

学位論文

木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の
地盤工学的特性とその耐久性に関する研究

2022年3月

吉川 友孝

目次

第 1 章 序論

1.1 研究の背景.....	1
1.2 研究の目的.....	2
1.3 本論文の構成.....	3
参考文献.....	5

第 2 章 既往の研究と本研究の位置付け

2.1 概説.....	7
2.2 篩下残渣について.....	8
2.2.1 災害廃棄物の概説と再生利用率.....	8
2.2.2 篩下残渣の発生と処理方法.....	9
2.2.3 篩下残渣の木屑含有量と木屑混入が篩下残渣の地盤工学的特性に及ぼす影響.....	11
2.2.4 地盤材料としての木材の腐朽.....	13
2.2.5 篩下残渣の有効再利用の一例と課題.....	15
2.3 鉄鋼スラグ(製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末)について.....	17
2.3.1 鉄鋼スラグの発生と分類.....	17
2.3.2 製鋼スラグの物理化学的性質と現状の利用法.....	18
2.3.3 高炉スラグ微粉末の物理化学的性質と現状の利用法.....	20
2.4 廃棄物の複合地盤材料としての有効利用に関する研究.....	22
2.5 転炉系製鋼スラグの水硬性に関する問題点と解決策.....	25
2.5.1 製鋼スラグのエイジング処理の有無が硬化特性に及ぼす影響.....	25
2.5.2 締固め度の違いが製鋼スラグの硬化特性に及ぼす影響とそのばらつき.....	29
2.5.3 固化系補助材(高炉スラグ微粉末, 普通ポルトランドセメント, 半水石膏)の選定.....	30
2.6 本研究の位置付け.....	31
参考文献.....	33

第 3 章 使用試料と各種室内土質試験概要

3.1 使用試料.....	41
3.1.1 繊維状のココヤシ繊維の特徴と物性.....	43
3.1.2 粒状のヒノキの特徴および物性.....	49
3.1.3 棒状のカラマツの特徴および物性.....	49
3.1.4 ココヤシ繊維・ヒノキ・カラマツの粒子密度.....	49
3.1.5 製鋼スラグの特徴と物性.....	49
3.1.6 高炉スラグ微粉末の特徴と物性.....	55
3.1.7 いわき珪砂の特徴と物性.....	55
3.1.8 化学繊維の特徴と物性.....	56
3.1.9 その他の試料・材料の特徴と物性.....	57
3.2 締固め曲線.....	58
3.3 供試体作製方法.....	61
3.4 一軸圧縮試験概要.....	63
3.4.1 ひずみ制御式一軸圧縮試験装置.....	64
3.4.2 一軸圧縮試験手順.....	65
3.5 三軸圧縮試験概要.....	66
3.5.1 ひずみ制御式三軸圧縮試験装置.....	66
3.5.2 三軸圧縮試験手順.....	68
参考文献.....	77

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案	
4.1 木屑形状と木屑混合割合の違いが力学特性に及ぼす影響	80
4.2 養生期間の違いが力学特性に及ぼす影響	92
4.3 せん断強度・せん断剛性推定手法の提案	120
4.4 母材強度(-小・中・大-)の違いが混合材料のせん断特性に及ぼす影響	135
4.4.1 いわき硅砂と木屑を混合した材料の一軸圧縮特性	135
4.4.2 いわき硅砂と木屑を混合した材料の一軸圧縮特性に及ぼす飽和度の影響	141
4.4.3 飽和条件下における三軸せん断特性に及ぼす母材強度の影響	147
4.5 飽和圧密排水せん断特性の拘束圧依存性	165
4.6 排水条件依存性	172
4.6.1 木屑混合割合の違いによる圧密排水・非排水せん断特性	172
4.6.2 非排水せん断特性に及ぼす Cavitation(背圧)の影響	185
4.6.3 UC試験, CU試験, UU試験から見る粘着成分 c の評価	188
4.7 第4章まとめ	193
参考文献	195
第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討	
5.1 繊維状木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の繊維補強効果に関する実験的検討①	199
5.1.1 実験概要と予備試験	199
5.1.2 石膏複合固化材と化学繊維を用いた繊維補強効果の発現機構	209
5.2 繊維状木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の繊維補強効果に関する実験的検討②	220
5.3 一軸圧縮強さの地盤工学的解釈	230
5.4 第5章まとめ	234
参考文献	235
第6章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の耐久性	
6.1 概説	237
6.2 乾湿繰り返し(DW)実験	238
6.2.1 DW 実験概要	238
6.2.2 DW による木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の体積膨張と木屑繊維の復元力	240
6.2.3 DW による木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のUC特性の変化	245
6.2.4 高湿度環境下における耐久性	250
6.2.5 一次元 DW 実験から見る水平拘束による体積膨張効果の抑制	252
6.3 高アルカリ・嫌気性環境下における木屑の腐朽実験	255
6.3.1 木屑腐朽実験概要	255
6.3.2 画像(光学カメラ/SEM-EDX)判別による木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の腐朽菌浸食	260
6.3.3 腐朽した木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断特性の変化	278
6.4 第6章まとめ	281
参考文献	283
第7章 結論	
7.1 結論	285
7.2 今後の研究課題	292

第1章 序論

1.1 研究の背景

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震によって、約2000万トンの災害廃棄物と約1100万トンの津波堆積物が発生した。これらの災害廃棄物は、国と地方自治体と民間が協力し、極力被災地の復興支援への再利用が図られた。国は「東日本大震災からの復旧復興のための公共工事における災害廃棄物由来の再生資材の発揚について(平成24年5月25日)」を通知し、災害廃棄物等に由来する再生資材の一部を復旧復興のための公共工事に活用する場合に限定し、津波堆積物や瓦くず等、通常であれば最終処分場に埋立処分され得るものについても、可能な限り再生利用を進めるよう対象の県・市に促した。また、民間では建設業界を中心に技術を総動員し、さらに企業間での情報共有・情報伝達の一元化を図ることで意思疎通が円滑化された。これら多くの他組織間の協力があり、災害廃棄物で81%、津波堆積物で98%の再利用が行われた¹⁾。しかし、これら災害廃棄物の中で、除去の難しい木屑等の有機物を含む分別土砂や篩下残渣に関しては、その性状が不明であることや木屑の腐朽による影響が不明であることから、多くが土木材料として有効利用されないだけでなく、焼却施設の処理機能圧迫²⁾につながった。また、仮置きによる周辺環境への悪影響(粉塵・腐食による悪臭)が問題^{3),4)}となった。そしてこれらの問題は、今後発生すると言われている南海トラフ巨大地震や首都直下地震でも発生しうる問題^{5),6)}であり、大量の分別土砂・篩下残渣の有効利用法の提案は喫緊の課題である。

また、我が国では粗鋼の生産量が1960年代より増加し、それに伴い産業副産物として生成される鉄鋼スラグの産出量も増加した。粗鋼の生産量⁷⁾は年間8200万トン(2020年度)以上となっており、今後も大量の鉄鋼スラグが発生し続けると考えられている。様々な特性(耐摩耗性、高い内部摩擦角、水硬性など)を有している鉄鋼スラグは、昭和40年代後半より資源化に向けた取り組みが積極的に行われ始め、これまでに様々な利用用途^{8),9)}の開発・拡大がなされてきた。鉄鋼スラグの一種である製鋼スラグは、製鋼スラグは硬質かつ耐摩耗性に優れているということや、単位容積質量が大きいといった性質を利用し、道路用路盤材^{10),11)}や土木工事事用材料^{12),13)}としてその多くが再利用されている。また、高炉スラグの一種である高炉スラグ微粉末はその潜在水硬性を活かし、セメント原料として再利用されている。いずれも再利用率¹⁴⁾は100%近くに達し、そのほとんどが建設資材として有効に利用されている。しかし、長期的な視点で捉えると公共事業費¹⁵⁾の削減に伴い、いまなお鉄鋼スラグの販路拡大は課題となっている。

1.2 研究の目的

本研究の目的は、篩下残渣を製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末(以下、製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を混合したものをスラグと称す)の水硬性によって固めることで、篩下残渣の地盤材料としての性状を改善し、高品質な地盤材料として有効利用することである。これらの混合材料が地盤材料として利用可能となることで、災害後の迅速な復旧・復興が可能となるだけでなく、現在、地盤材料採取の為に行われている地山掘削等の自然破壊を低減することが可能となる。高度循環型社会の構築に向け、従来の循環利用だけでなく、将来的により高度で効率的な廃棄物の循環利用や最終処分場の維持管理が重要となっている現在において、本研究は非常に重要な研究であるといえる。

先述の通り、篩下残渣には多量の木屑が含まれていることから木屑とスラグを混合した材料の力学特性には木屑の影響が強く現れる。しかし、木屑の混入割合や形状は発生する場所や選別・処理方法によっても大きく異なる。一般的な砂礫材料は、粒子単体が剛体に近い変形特性を持つ粒状体材料に対し、木屑混じりの地盤材料はその骨格の一部が剛性の小さな、圧縮弾性体である木屑に置き換わった材料である。また、スラグは固化する材料として用いることとしている。結局ここで考えているのは、木屑のような変形性の高い圧縮弾性体とスラグのような固化する粗粒を主体とした材料を混合した地盤材料の力学特性を検討しようとするものである。このような混合材料における木屑のような材料の影響を定量的に評価・検討した研究はほとんどない。

本研究では実務的な課題として篩下残渣の有効利用の促進を考えているため、地盤材料としてやや特殊と考えられる篩下残渣中の木屑に着目し、木屑と固化する材料としてスラグを混合した材料(以降、木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料と称す)を用いて、室内土質力学試験を実施することで、その力学特性を把握し、木屑が力学特性に与える影響を木屑混合割合・木屑形状・拘束圧・排水条件・圧密条件を変えて定量的に評価する。また、木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の耐久性について、耐候性(乾湿繰り返し実験)と耐朽性(木材腐朽実験)の観点から評価し、実用化に向けて、木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の劣化抑制の方法と対策について提案する。このため、本研究では木屑とスラグを用いたことによるこれら材料であるがゆえの特性について議論しているが、この結果の一部は固化する粒状材料に弾性変形する材料を混合した材料の特性に広く応用できると考えられる。

1.3 本論文の構成

本研究は、災害廃棄物の一種である篩下残渣を産業副産物である鉄鋼スラグ(転炉系製鋼スラグ・高炉スラグ微粉末)の水硬性によって固めた材料を地盤材料として利用するために、篩下残渣中の木屑が混合材料の力学特性に与える影響を検討するものである。本論文の全体構成を図 1.3-1 に示す。

第1章では、序論として本研究の目的と概要を示すとともに、学位論文全体の構成について説明する。

第2章では、災害廃棄物の分別・処理方法について示し、篩下残渣が排出されるまでの工程を説明するとともに、篩下残渣の利用に向けての問題点と現状の利用方法について既往の研究を例に説明する。また、産業副産物である鉄鋼スラグ(製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末)の分類と物理化学的性質、現状の利用方法について、既往の研究を示して説明する。また、廃棄物の複合地盤材料としての有効利用に関する研究についてまとめる。さらに、本研究の実験条件の選定に向けてこれまでに本研究室で行われた研究成果を総括する。以上を取りまとめることで本研究の位置付けを明確にする。

第3章では本研究で使用する各種試料の特徴や物性値を示し、本研究での主な供試体作製手順を示すとともに、本研究で行った各種室内力学試験の概要(装置、試験機の取扱、試験手順)について説明する。その上で、本研究で使用する試料と一般的な地盤材料との類似点と相違点について述べる。

第4章では本研究で対象とする木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性を把握することを目的に、木屑形状、木屑混合割合、養生期間、固化強度、拘束圧条件、排水条件の違いが力学特性に与える影響について検討する。また、得られた結果を基に木屑混合割合と養生期間をパラメータに取ったせん断強度・せん断剛性推定手法を提案する。

第5章では第4章で繊維状の木屑を混合した場合に見られたせん断抵抗発現機構について実験的に検討する。また第4章で得られた結果を基に一軸圧縮強さの地盤工学的な解釈を示す。

第6章では木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の耐久性について、耐候性と耐朽性の観点から、乾湿繰り返し実験および木材腐朽実験を行い評価・検討する。また、実験結果から実利用時における劣化抑制方法と対策について提案する。

第7章では総括として各章の結論を述べ、この種の混合材料に関する力学特性を総覧し、地盤材料としての利用方針を示す。

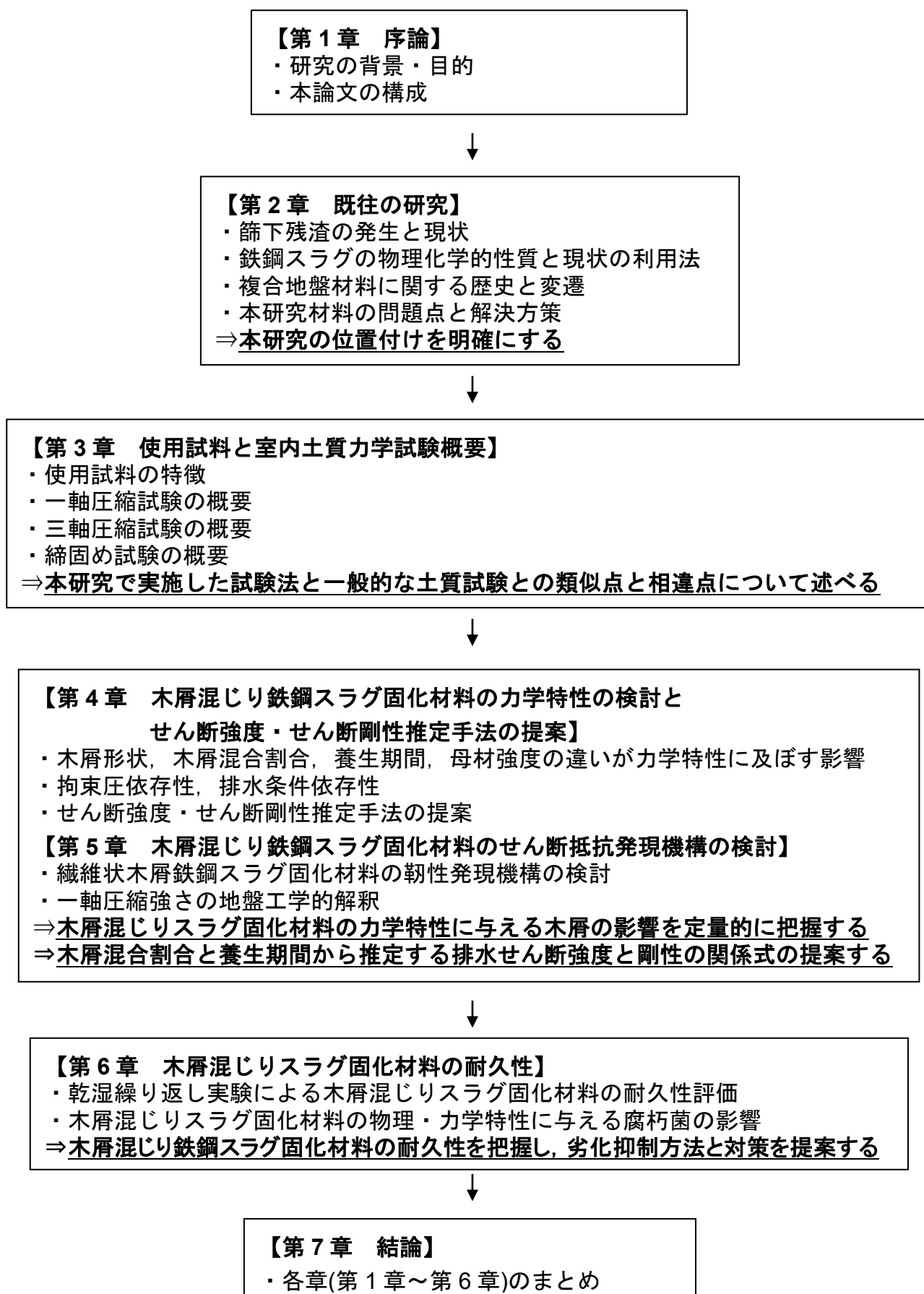


図 1.1-1 本論文の全体構成

【引用・参考文献】

- 1) 環境省 HP 災害廃棄物対策情報サイト: 平成 23 年 3 月東日本大震災における災害廃棄物の処理について>災害廃棄物処理の実施>災害廃棄物処理の進捗管理.
http://kouikishori.env.go.jp/archive/h23_shinsai/implementation/progress_management/ (参照日 2021.08.23)
- 2) 大成建設株式会社: 仮置場・二次処理施設等の設置管理について, 環境省中部地方環境事務所中部ブロック災害廃棄物対策セミナー, 2014.
http://chubu.env.go.jp/recycle/mat/data/r_8/r8-H26semi-s4.pdf (参照日 2021.08.23)
- 3) 環境省東北地方環境事務局・一般財団法人日本環境衛生センター: 東日本大震災により発生した被災 3 県(岩手県・宮城県・福島県)における災害廃棄物等の処理の記録第 4 章, 2014.
https://dwasteinfo.nies.go.jp/archive/past_doc/201103tohoku_2/201409kiroku_6.pdf (参照日 2021.08.23)
- 4) 大迫政浩: 震災による災害廃棄物処理の現状と課題, 日本分析化学会第 60 年会, 名古屋, 2011 年 9 月. <https://www.jsac.or.jp/eq/eqsympo2-3.pdf> (参照日 2021.08.23)
- 5) 環境省 HP 災害廃棄物対策情報サイト: 災害廃棄物対策推進検討会>平成 25 年>災害廃棄物の発生量の推計.
http://kouikishori.env.go.jp/action/investigative_commission/h25_fiscal_year/estimate/ (参照日 2021.08.23)
- 6) 内閣府 防災情報のページ HP: 南海トラフ巨大地震の被害想定(第二次報告)のポイント(資料 1-4), 2015. http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20130318_kisha.pdf (参照日 2021.08.31)
- 7) 一般社団法人日本鉄鋼連盟: worldsteel 銑鉄・粗鋼年間生産量・時系列表 2011~2020 年.
https://www.jisf.or.jp/data/iisi/documents/summary_2020CY_.pdf (参照日 2021.08.31)
- 8) 堀井和弘・堤直人・北野吉幸・加藤敏朗: 製鋼スラグ処理と資源化技術, 新日鉄技報, No.394, pp.125-131, 2012.
- 9) 月橋文孝: 鉄鋼スラグリサイクルの現状と課題, 資源と素材, Vol.113, pp.989-994, 1997.
- 10) 西勝・河端薫: 路盤材としての鉄鋼スラグの基本的性質と力学特性, 土木学会論文集, No.414, Vol.12, pp.89-96, 1990.
- 11) 安藤和彦・寺田剛・坂修平: 鉄鋼スラグ路盤設計施工指針の発刊~鉄鋼スラグの水浸膨張比の規格値検討~, 土木技術資料, No.57, pp. 52-55, 2015. <http://www.pwrc.or.jp/s-pdf/1511-P052-055.pdf> (参照日 2021.08.31)
- 12) 本間裕介・玉井智子・富永晃司・永井及: 杭周辺地盤改良材として適用するための鉄鋼スラグの力学的特性に関する基礎的実験, 地盤工学ジャーナル, Vol.1, No.4, pp.123-130, 2006.
- 13) 吉田信之・宮原哲平・木村裕行: 水硬性粒度調整鉄鋼スラグ路盤材の品質と力学特性の管理に関する考察, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, No.12, 2008.

- 14) 鉄鋼スラグ協会 HP: 鉄鋼スラグ需給概要>2020 年度鉄鋼スラグ需給の概要.
<https://www.slg.jp/pdf/FS-177-01.pdf> (参照日 2021.08.23)
- 15) 国土交通省: 令和3 年度予算概要令和3 年1 月.
<https://www.mlit.go.jp/page/content/001383017.pdf> (参照日 2021.08.23)

第2章 既往の研究

2.1 概説

本章の目的は篩下残渣と鉄鋼スラグの実態についてまとめるとともに、それらに関する既往の研究について整理・総括し、本研究の位置付けを明確にすることである。本章の概説を以下に示す。

- (1) 2.2節では、まず災害廃棄物の処理と現状について説明し、篩下残渣の発生から処理方法についてまとめる。次に篩下残渣の地盤材料としての物理的性質と有効利用に向けた取り組みについて既往の研究を紹介する。最後に、篩下残渣の有効利用に関する課題について述べる。
- (2) 2.3節では、まず鉄鋼スラグの発生と分類について述べる。次に本研究で固化系材料として用いた製鋼スラグの物理化学的性質と現状の利用法について既往の研究を整理する。最後に本研究材料で固化系補助材として用いた高炉スラグ微粉末の物理化学的性質と現状の利用法について既往の研究を整理する。
- (3) 2.4節では、廃棄物の複合地盤材料としての有効利用に関する研究・開発について一例を示すとともに、本研究で対象とする木屑混じりスラグ固化材料と他の複合地盤材料との類似性と相違性を明確にする。
- (4) 2.5節では、本研究室で2018年度までに実施した製鋼スラグの水硬性に関する研究成果についてまとめる。

2.2 篩下残渣について

2.2.1 災害廃棄物の概説と再生利用率

災害廃棄物とは、地震や風水害等の自然災害によって一時的かつ大量に発生する廃棄物であり、被災者や避難者の生活に伴い発生する廃棄物も対象となる。また、災害廃棄物は一般廃棄物に該当するため、処理の主体は市区町村が基本となる。東日本大震災などの近年の災害における教訓・知見により、災害時には廃棄物の適正な処理と再生利用を確保するために廃棄物処理法(通常時の対応)と災害対策基本法(大規模災害時)を相互補完する形で、連続的な対策の必要性が謳われている。先にも述べたように災害廃棄物の処理主体は市区町村であり、各市区町村でその処理計画を事前に策定し、平時から備えておくことが円滑かつ迅速な廃棄物処理に繋がる。令和3年3月末時点での災害廃棄物処理計画策定状況¹⁾は環境省のアンケートによると全国の市区町村の約64%となっている。

我が国で災害廃棄物処理の重要性が大きく注目されたきっかけは、1995年の阪神淡路大震災と2011年の東日本大震災である。勝見ら²⁾は阪神淡路大震災での災害廃棄物の分別不徹底による低いリサイクル率や仮置き場での野焼きなどの様々な環境問題が顕在化したことを報告している。また、「阪神・淡路大震災における災害廃棄物処理について³⁾」や「災害廃棄物の処理の記録【阪神・淡路大震災の発生に伴う災害廃棄物処理事業報告書】⁴⁾」によると、阪神淡路大震災における災害廃棄物処理の教訓として分別仮置の徹底(特に初期段階が重要)を挙げている。阪神・淡路大震災では解体を急いだ結果、災害廃棄物の分別が不十分でリサイクルされずにその多くが処分された。表2.2-1⁵⁾に阪神・淡路大震災における兵庫県の災害廃棄物処理の内訳を示す。表2.2-1から分かるように発生した災害廃棄物の再生利用率は約38%と災害廃棄物全体の半分にも満たなかった。

次に東日本大震災の災害廃棄物処理の取組をみると、東日本大震災では阪神淡路大震災の教訓・経験を生かし、様々な面で改善が図られたことが分かる。表2.2-2⁶⁾に東日本大震災における災害廃棄物処理の内訳を示す。表2.2-2から分かるように東日本大震災では災害廃棄物(津波堆積物含む)の再生利用率は87%と、阪神淡路大震災での再生利用率38%よりも非常に高くなっていることが分かる。災害廃棄物処理に係る阪神・淡路大震災20年検証委員会⁷⁾の報告では再生利用率の増加の要因として、阪神淡路では大阪湾フェニックス処分場などの大規模な処分場があったのに対し、東日本では大規模な処分場が不足していたことを挙げている。これは廃棄物処分場が物理空間的に不足していたために、再生利用せざるを得なかったということである。また、建設リサイクル法の施行により木屑リサイクルの受け皿が増加していたこと、さらに焼却灰を造粒固化・不溶化処理し土木資材としてリサイクルしたことも災害廃棄物の再生利用の増加に繋がった要因であるとしている。そして、「災害廃棄物分別・処理戦略マニュアル～東日本大震災において～⁸⁾」によると、東日本大震災で発生した災害廃棄物が阪神淡路大震災で発生した災害廃棄物と大きく異なる点として津波堆積物の量と質を挙げている。この報告では、仮置き場だけでなく、一次集積所と二次集積所を設けたことで再生利用の増加に繋がったとしている。なお、仮置き場とは最低限の生活復旧のために家屋等から廃棄物を除去し、発生元において短期間置いておく場所を指し、分別については可能な限り住民の負担軽減を考慮することが望ましいとしている。また、一次・二次集積所はその後の処理(リユース、リサイクル含む)を念頭に分別や可能な限りの中間処理を行う場所を指す。

第2章 既往の研究と本研究の位置付け

Ide⁹⁾は震災後の災害廃棄物のリサイクル・リユースに向けた早期取り組みについてまとめている。その中で今回の東日本大震災が、1911年の関東大震災や1995年の阪神淡路大震災と異なる点として、大量の災害廃棄物を再利用する大きな手段として期待できる沿岸部の埋立計画がなかったこと、政府が震災直後に可能な限りのリサイクルに向けたガイドライン¹⁰⁾を発表したことを挙げている。また、国による援助がある一方で大量の津波堆積物の発生や放射線による土壌汚染の懸念など様々な課題解決に向けて建設業界が全スキル、経験、能力を発揮して取り組んだことを報告している。

このように、東日本大震災ではこれまでの様々な経験・知見や新たな技術の導入、さらに人・企業によって災害廃棄物の再生利用率(87%)を上げることができたと言われている。一方で、災害廃棄物の13%は焼却・埋立処分され、焼却施設および最終処分場の機能圧迫した。特に再生利用されなかった13%のうちの約半分が篩下残渣(または分別土C種)と呼ばれる本研究で対象とする木屑混じり土砂である。焼却施設の機能圧迫は災害復興・復旧の進行を遅らせ、また年々最終処分場の残余容量は減少している¹¹⁾中で、南海トラフ巨大地震や首都直下地震などの大規模災害では東日本大震災以上の災害廃棄物が発生すると想定されており¹²⁾、篩下残渣の有効利用法の提案は喫緊の課題であると言える。

表 2.2-1 阪神・淡路大震災における兵庫県の災害廃棄物処理の内訳⁵⁾(文献5)より作成)

可燃物			不燃物		合計
287 (20%)			1165 (80%)		1452 (100%)
焼却	埋立	再生	埋立	再生	
209 (14%)	67 (5%)	11 (1%)	622 (43%)	543 (37%)	

表 2.2-2 東日本大震災における災害廃棄物(津波堆積物含む)処理の内訳⁶⁾(文献6)より作成)

	焼却	埋立	再生	合計
災害廃棄物	243 (12%)	133 (7%)	1629 (81%)	2005 (100%)
津波堆積物	-	17 (2%)	1043 (98%)	1060 (100%)

2.2.2 篩下残渣の発生と処理方法

まず災害廃棄物から篩下残渣が排出されるまでの一連の流れを説明する。災害廃棄物の基本的な分別フロー^{13)~16)}を図 2.2-1 に示す。図 2.2-1 のように、被災地域で発生した廃棄物は仮置き場に運搬される。仮置き場は個人の生活環境や空間確保のために、家屋から排出された廃棄物を仮に集積しておく場所である。東日本大震災ではその規模が大きく、大量の災害廃棄物が発生したことから、仮置き場に運搬する際にも分別が推奨・実施された。一次集積所では仮置き場から運搬された廃棄物を手選別や重機選別などの粗選別が行い、可能な限りの分別をして保管される。二次集積所の運用は基本的には一次集積所と同様であり、一次集積所での分別が不十分な場合に設けることとしている。一次集積所で分別さ

第2章 既往の研究と本研究の位置付け

れた貴重品や危険物，さらにそのままリサイクルが可能と判断されるものについては，図のとおり処置(返却，処分，リサイクル)がとられる．また，それ以外のがれきについては，二次選別・二次破碎によってより細かく分別される．二次選別の方法は施設の設備によって様々であるが，東日本大震災では比重差選別や磁力選別を取り入れたことで，従来よりも確かな分別を可能し，より多くの再生利用を可能とした．図の右最下部に黄色で示したものが本研究で対象とする篩下残渣で，選別処理過程によって発生した除去が困難な多量の木屑を含む土砂分である．岩手県復興資材活用マニュアル¹⁴⁾では，津波堆積物を処理したものを分別土A種，不燃系・可燃系混合物を処理し，マニュアルの品質基準を満たすものを分別土B種，それ以外の品質基準を満たさないものをふるい下くずと土砂混合くずと称し，ふるい下くずは木材等の可燃物が多いものを指す．篩下残渣は自治体や時期によってその呼び方は異なり，“ふるい下くず(分別土C種)¹⁴⁾”や“ふるい下残渣¹⁷⁾”，さらにはただ単に“ふるい下^{16), 18)}”と呼称される災害廃棄物であるが，実質的な違いはない．本研究では篩下残渣と呼称する．

上記のようにして分別された篩下残渣は多量の木屑を含む残渣土砂分であり，発生する地域また二次選別での処理の仕方によっても木屑含有量が大きく異なる．「東日本大震災等の経験に基づく災害廃棄物処理の技術的事項に関する報告書¹⁷⁾」によると，東日本大震災で発生した篩下残渣は概ね20~40mm程度のふるいを通じた土砂分である．産業廃棄物である建設発生土のふるい下残渣¹⁹⁾は概ね10mmふるいを通じた木屑含有土砂であることから，産業廃棄物として発生する篩下残渣とはふるい目の大きさが異なるのも災害廃棄物の篩下残渣における特徴である．これは選別施設の設備の都合もあるが，ふるいによる選別工程を少しでも簡素化し，災害後の迅速な処理を優先したためである．

篩下残渣に分類された災害廃棄物は一般廃棄物として管理型処分場に埋め立てられる．阪神淡路大震災では兵庫県で発生した約14%もの災害廃棄物が県外で焼却・埋立処分され，東日本大震災の岩手県では1年間で発生する一般廃棄物の約8倍，宮城県では1年間で発生する一般廃棄物の約13倍の災害廃棄物が発生し，県外で処理された²⁰⁾．このように大規模災害では発生地域内での処理能力を超える災害廃棄物が発生し，早期の復旧・復興のために広域処理が重要となってくる．

例えば，加用ら²¹⁾は宮城県で発生した災害廃棄物を対象に一般廃棄物と産業廃棄物の両処理施設を活用した広域処理による処理期間の低減効果について，宮城県内だけで処理する場合は8年，宮城・福島県で処理する場合は4年，北日本・東日本で広域処理する場合は1年以内に処理を完了できるという推計結果を示している．また，広域処理をすることで処理費用単価が低下するものの，それを上回る運搬費の増加が見られることを示している．

また，川畑ら²²⁾は東日本大震災によって発生した災害廃棄物の処理について，岩手県を対象として広域処理に関する処理費用と期間について比較分析し，広域処理(焼却・埋立処分および運搬)による処理費用の高額化を示すとともに，自地域内処理を推進した場合の新規処分場の建設や仮設焼却炉の増設などによる処理費用の増大と焼却・処分場新設のために処理期間が増加するなどの問題点を指摘している．その為，焼却・埋立処分されている木屑混入堆積物(篩下残渣)の利用拡大を促すことで，より現実的に処理費用を削減できると報告している．

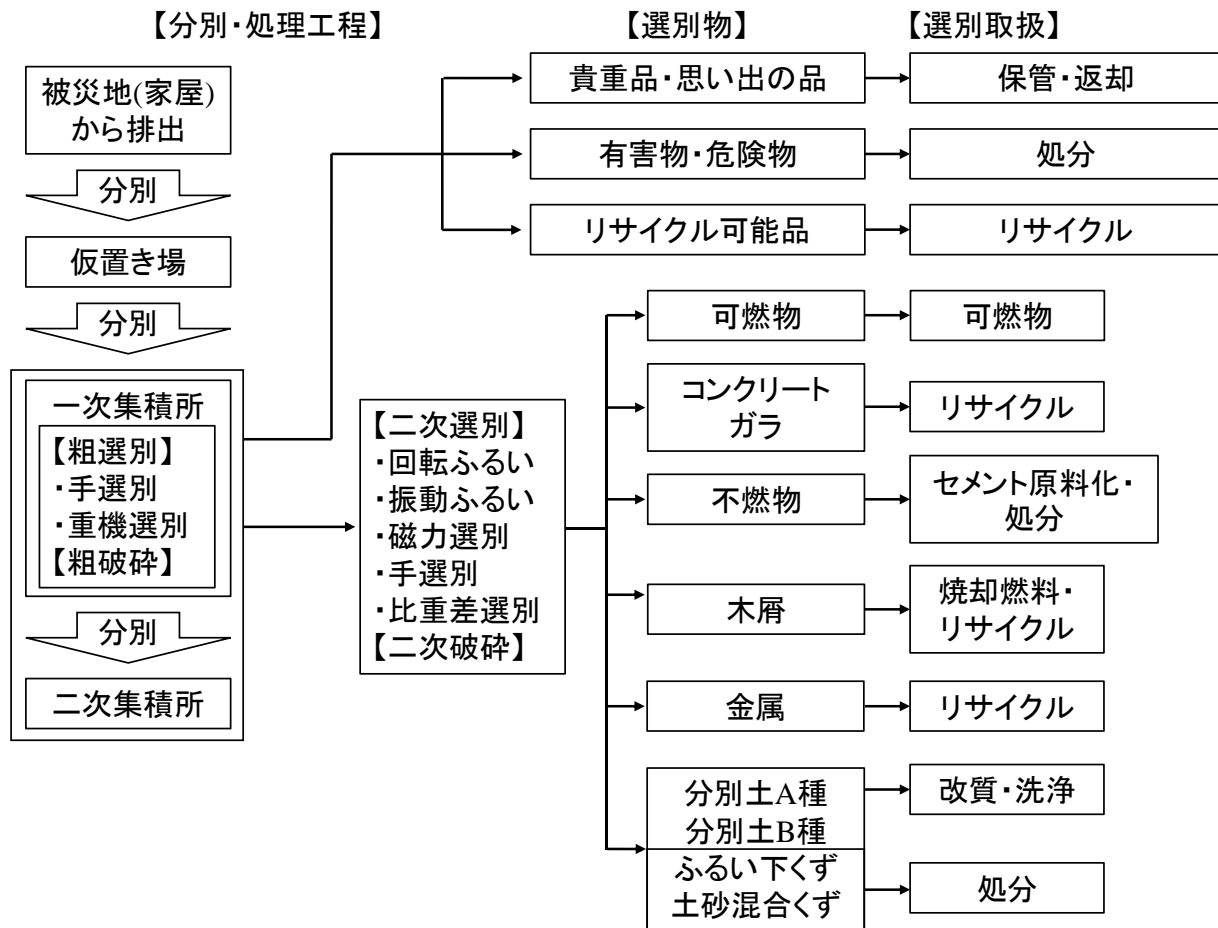


図 2.2-1 災害廃棄物の分別・処理フロー^{13)~16)}(文献 13)~16)より作成)

2.2.3 篩下残渣の木屑含有量と木屑混入が篩下残渣の地盤工学的特性に及ぼす影響

篩下残渣の外観を図 2.2-2^{23)~26)}に示す。図 2.2-2 からただちに判断できるように篩下残渣と言ってもその外観は大きく異なる。これは先に述べたように発生する地域、施設等に起因するものである。しかし、いずれの篩下残渣にも共通することとして、多量の木屑を含むということである。本研究では篩下残渣に含まれる木屑に着目し、木屑がスラグ固化材料の力学特性に与える影響を検討したものである。本項では東日本大震災で発生した篩下残渣(および分別土)に関して、発生した篩下残渣中の木屑混入割合に関しての調査や篩下残渣中の木屑混入割合の違いが地盤工学的特性及ぼす影響について様々な研究が行われてきた。本項ではそれらの研究成果を整理し、その上で本研究の目的と意義を明確にする。

まず、篩下残渣に含まれる木屑混入割合とその測定方法についての問題点と解決策について既往研究から説明する。

高井ら²⁷⁾は東日本大震災で発生した岩手県の様々な地域を対象に分別土砂の品質と経年変化を調べた。その結果、発生地域の違いによる品質のばらつきだけでなく、同地区であっても発生する時期によってその品質が異なることを指摘している。また、現行の強熱減量試験法(JIS A 1226:2009)は分別土に残存する木屑量の同定手法として適当ではないことを指摘している。

第2章 既往の研究と本研究の位置付け

鴫田ら²⁸⁾は、東日本大震災で発生した災害廃棄物の処理によって得られた分別土砂中の木屑混入割合を把握するために文献調査を行った。その結果、組成分析で求めた木屑混入割合は0.2~20.7 wt.%であり、強熱減量から求めた木屑混入割合は4.2~24 wt.%であった。組成分析は規格が統一されていないために、同一試料に対して異なった混入率が算定されることがあることや、組成分析と強熱減量の関係は模擬分別土では強い相関があるものの、実際の分別土では諸条件が異なることのためにばらつきが大きいということを報告している。

遠藤ら²⁹⁾は災害廃棄物分別土の木屑混入割合を測定する際に、地盤工学の分野で実施されている強熱減量試験法(JIS A 1226:2009)で判定することの問題点として、強熱温度を600°Cとすると、土壌や石膏、カルシウム系化合物の結合水や結晶水も同時に揮発するために、木屑混入割合を過大評価することを挙げている。その上で、400°C±25°Cで2時間の強熱減量値によって木屑混入割合を評価できると報告している。

このように篩下残渣に含まれる木屑混入割合は様々であり、その性状も多様であることから、再利用が進まなかった。また、篩下残渣中の木屑混入割合を評価する方法が確立(統一)されていなかったことで木屑混入割合が過大評価されたことも再利用が進まなかった要因の一つである。紹介したように東日本大震災以降、木屑混入割合の測定方法についての問題点が指摘され、多くの機関・人々が積極的に研究を行ったことで以前よりも正確な木屑混入割合の測定が可能になっている。

次に、篩下残渣(および分別土)の地盤工学的特性について、木屑混入割合に着目して行われた研究について紹介する。

高井ら³⁰⁾は、分別土中の木屑混入割合および木片寸法が材料特性に及ぼす影響を検討するために、一軸圧縮試験を行った。その結果、木屑混合割合が高いほど、最大乾燥密度は小さくなり、最適含水比が高くなるとともに、締固め曲線が緩やかとなることを確認した。また、木片寸法の違いによる締固め特性の差異は確認できなかったことから、施工性を評価する上で木屑量が重要であることを明らかにした。また、木屑混合割合が高くなるほどピーク強度は低くなるものの、靱性が高くなることを確認した。しかし、木屑混入率が10%以上では顕著な強度低下は確認されないことから、木屑が増加しても、木屑同士の接触に伴う強度によりある程度の強度が担保されることを明らかにした。さらに、木屑混合割合が高くなるほど圧縮指数は高くなり、圧縮性が大きくなることを確認した。また、供試体を浸水させることにより木屑が吸水し、軟化するため、浸水させなかった場合と比較して大きな圧縮性を示すことを明らかにした。

小竹ら³¹⁾は、東北地方太平洋沖地震の津波で発生した津波堆積分別土について、土工材料としての適用性評価を目的とし、木屑の混入が津波堆積物分別土のせん断強度特性に及ぼす影響を評価した。その結果、締固め試験をすると木屑混合割合の増加によって最大乾燥密度が低下し、最適含水比が増加することを確認した。この要因として、木屑の内部には空隙が存在し、土粒子と比較して軟質で密度が小さいことから、その混合によって締固めが困難になることを挙げている。また、締固めた試料に対して圧密低圧一面せん断試験を実施した。その結果、圧密過程においては、木屑混合割合が増加するほど沈下量が増加し、せん断過程においては、木屑混合割合が3 wt.%程度以下であれば、著しいせん断強度の低下がないことを明らかにした。さらに、細長い形状の木屑を混合した場合、木屑混合

割合が増加するほど内部摩擦角や粘着力が増加することを明らかにした。

辻ら³²⁾は、分別土(東日本大震災で宮城県と岩手県から発生した実際の分別土)と模擬分別土(5号硅砂とクレイサンドを任意に混合)を用いて、人工木片の混合率を変えることで木片の混入が分別土の締固め度に与える影響について検討した。Walker-Holtzの理論式から求まる木片混入率と最大乾燥密度の関係と締固め試験の実測値を比較したところ、木屑混合割合が10 wt.%程度であれば理論式と実測値は一致するが、木屑混合割合が10 wt.%以上となると、土の骨格形成に支障が出て理論値と実測値に差が生じることを明らかにした。

これらの研究に共通する成果・知見として、木屑混合割合の増加に伴い締固めによる最大乾燥密度の低下と含水比の増加である。用いられた木屑は大きさも形状も全く異なるものであることから、木屑の大きさと形状によらず、木屑の存在によって締固めエネルギーが周囲の土粒子に伝達しにくくなるためだと考えられる。また、そもそも木屑の密度は土粒子と比べても低く、木屑混合によって単位体積に占める木屑体積が増加することで最大乾燥密度が減少すると考えられる。さらに、”木屑混合によって乾燥密度が低下するにもかかわらず、3~10 wt.%程度木屑を混合しても強度は低下しないもしくは増加すること”，”木屑の形状によって分別土の力学特性が大きく変化すること”が示されている。

2.2.4 地盤材料としての木材の腐朽

篩下残渣を地盤材料として利用する上で木屑の腐朽問題は避けられない重要検討事項の1つである。本項では木材の腐朽現象について説明するとともに、地盤工学分野で行われてきた木屑の腐朽に関する研究についてまとめる。その上で、本研究で対象とする木屑混じりスラグ固化材料の特徴を示すことで本実験の意義を明確にする。

まず、木材の腐朽現象について、森本³³⁾は木材の腐朽が起こる4要因として、①栄養分(木質成分)、②水分(含水率20%以上)、③温度(20~40℃)、④空気(木材中に20 vol.%以上)を挙げている。そして、腐朽菌の活動はこれらのすべてを満足する必要がある、一つでも欠けると繁殖を休止または死滅すると説明している。

地盤工学の分野において、木材を構造物の基礎とする、すなわち杭基礎として用いることは古くから国内外で行われてきた。約420年前にイタリアのリアルト橋に使用された木杭は現在も大きな変状はなく、海水・泥水中での木材の耐久性を実証している³⁴⁾。また、日本でも1950年代までは木杭の利用が多く、木杭の耐久性を示した有名な実例として東京駅丸の内駅舎に使用された木杭が挙げられる。この駅舎では今から約120年前に1万本近くの木杭(5~7 m)が駅舎の基礎として使用された。2007年の駅舎保存・復元工事に伴ってすべての木杭が撤去されたが、杭頭部から0.5 m以下の部位に著しい腐朽が確認されなかったことが報告されている³⁵⁾。このように地下水以下での使用に関しては木材の腐朽による耐久性への影響はほとんどないことが実証されている一方で、不飽和環境における木屑の腐朽現象、腐朽過程についての研究は多くない。

石田ら³⁶⁾は木材チップとセメント等の固化材、土砂を混合した複合土を地盤材料として用いた場合、木材チップの長期的な耐久性(耐腐朽性)が問題となることから、木材腐朽

第2章 既往の研究と本研究の位置付け

菌のアルカリ条件下での生育性を評価し、木材チップを用いた複合土の長期耐久性について調べた。その結果、木材腐朽菌の種類により生育できる pH 領域が異なることがわかった。基本的に、木材の耐久性は難分解性のリグニンがセルロースやヘミセルロースの周りを取り囲み、細胞同士を強固に接着することにより高められる。したがって、試験結果から、複合土を pH=9 以上とすれば、リグニンを分解する白色腐朽菌の生育が抑えられるため、木材チップの耐腐朽性が保たれる。また、pH = 11 以上とすれば、主にセルロースやヘミセルロースを分解する褐色腐朽菌、主にヘミセルロースを分解する軟腐朽菌の生育も抑えられ、さらに長期的な耐久性が得られる可能性があることを報告している。

また、中野³⁷⁾は木片が含まれる災害津波堆積物を地盤材料として有効利用することを目的に、木片が混合した土の短・長期的な性質を調べた。その結果、木片の腐朽菌を除去した木片混じり締固め供試体は、供試体周辺（本試験では供試体上面）に木片腐朽菌を接触させ、さらに腐朽菌の進行を促進する環境下であっても、腐朽期間によらず、含水比が等しければ、その一軸圧縮強さも変化しないことを明らかにした。また、その一軸圧縮強さの変化が生じなかった要因として、木片混じり土を滅菌し、適切に締固めたことで外部からの菌糸が供試体内部へ侵入することができなかつたことも考えられる。加えて、腐朽した木片を混合した試料で密詰め、緩詰め供試体を作製し、その後腐葉土内に供試体を埋め、所定の期間経過後掘り出して一軸圧縮試験を実施した。その結果、試験を実施した4ヶ月間では、密詰め・緩詰め供試体ともに、腐朽による一軸圧縮強さの大きな変化は見られなかつたと報告している。

さらに、古賀ら³⁸⁾は腐朽劣化挙動が竹チップ混合固化処理土の長期的な強度変形特性に与える影響を把握するために、一定期間強制的に腐朽させた処理土の物理・力学特性を質量減少量・断面含水比分布・pH 変化と一軸圧縮試験の結果から検討した。その結果、目視、質量変化の結果から腐朽の傾向は見られないことを確認した。しかし、供試体の含水比変化、pH は腐朽菌と接触している供試体底部において腐朽の傾向が見られた。また、一軸圧縮強度は腐朽菌と接触である底面部において、含水比の増加に伴い、強度の低下傾向が見られることを報告している。

本研究で対象とする木屑混じりスラグ固化材料は、(1)製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末が pH = 11.5 以上であることから混合材料内の環境が高アルカリ性^{39), 40)}であり、(2)締固めて固化した材料であることから、供試体内部が嫌気性環境である可能性が高い。つまり、アルカリ環境かつ酸素供給量がほとんどない環境が木屑の腐朽抑制に対し有利に働き、本研究材料は腐朽に対して高い耐久性を有していると考えられる。



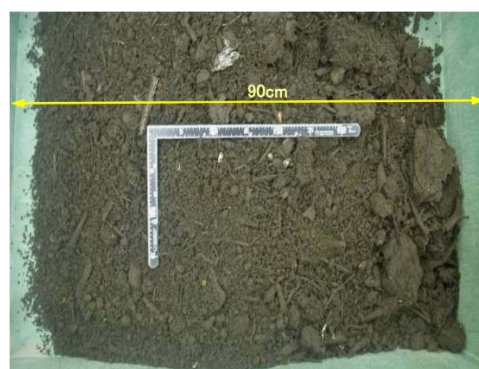
(a) 篩下残渣の例 1(文献 23)より引用



(b) 篩下残渣の例 2(文献 24)より引用



(c) 篩下残渣の例 3(文献 25)より引用



(d) 篩下残渣の例 4(文献 26)より引用

図 2.2-1 様々な篩下残渣の一例^{23)~26)}

2.2.5 篩下残渣の有効再利用の一例と課題

近年の巨大災害が発生するたびに篩下残渣に関する研究が各所で積極的に行われているが、いまなお篩下残渣に関しての知見は十分でなく、災害時に発生する再生利用率は他の災害廃棄物と比較しても非常に少ない。一方で、わずかではあるが東日本大震災において篩下残渣も再生利用された。ここでは、久田ら⁴¹⁾の文献を基に東日本大震災での篩下残渣の再生利用の一例を挙げる。

久田の報告によると、宮城県岩沼市では「千年希望の丘⁴²⁾」の造成に篩下残渣が用いられた。これは「緑の防潮堤」とも呼ばれ、高さ約 10m の盛土に広葉樹が植えられており、植林基板材料として篩下残渣、コンクリートがれき、焼却灰造粒固化物および津波堆積物が混合され利用された。また、宮城県亘理町では、アップサイクルブロックの材料に篩下残渣が用いられた。これは篩下残渣をセメントペーストなどによってブロック状に固めたもので、避難高台、公園、緑地などの盛土の中詰め材として使用された。

このように、篩下残渣の再利用については数えられるほどしかなく、上記の利用法についても建物等による地盤内応力が発生しない場所で使用やセメントなどで十分固めての活用である。これは現行の篩下残渣の取り扱い基準やマニュアルによる規制、さらに篩下残渣に関する研究が進んでいなかったことで力学特性が不明であったことが大きな要因として挙げられる。篩下残渣に関する様々な懸念や不安が取り除かれない限りは今後も再利用

第2章 既往の研究と本研究の位置付け

は進まない。第2章2節2項で紹介したように、近年では篩下残渣に関する研究も積極的に行われ、篩下残渣の物性や地盤工学的な力学特性について多くのことが明らかになりつつあるものの、その有効利用法に関しての研究は十分でない。本研究は篩下残渣と鉄鋼スラグを固めた材料の地盤工学的特性を評価・把握することで、篩下残渣の有効再利用法の提案を行うものである。

2.3 鉄鋼スラグについて

2.3.1 鉄鋼スラグの発生と分類

鉄鋼スラグは、鉄鋼製造プロセスの製鉄工程および製鋼工程で発生する産業副産物である。転炉における製鉄工程と発生するスラグを図 2.3-1⁴³⁾に示す。鉄鋼スラグは、高炉で鉄鉱石を熔融・還元する際に発生する高炉スラグと、鉄を精錬する製鋼段階で発生する製鋼スラグに大別できる。この際、高炉スラグは、溶鉄 1000kg を製造する際に約 300kg 発生する。製鋼スラグは、溶鋼 1000kg 製造する際に約 130kg 発生する。粗鋼生産量の推移を図 2.3-2^{44), 45)}に示す。このように粗鋼生産量は約年間 1 億トンであることから高炉スラグは 3000 万トン、製鋼スラグは約 1300 万トンも年間で発生する。

高炉スラグは冷却方法の違いによって高炉徐冷スラグと高炉水砕スラグに分けられる。また、高炉水砕スラグは破碎し、高炉スラグ微粉末になる。本研究で使用した製鋼スラグと高炉スラグ微粉末の詳細はそれぞれ 2.3.2 と 2.3.3 で説明するが、いずれのスラグも粗鋼生産量に対して相当に高い割合で発生する。

なお、製鋼スラグはその製鋼方法(炉の種類)によって転炉系製鋼スラグと電気炉系製鋼スラグに大別され、さらに電気炉スラグは酸化スラグと還元スラグに大別される。本研究で対象とする製鋼スラグは転炉系製鋼スラグであり、以降の製鋼スラグはこれを指すものとする。

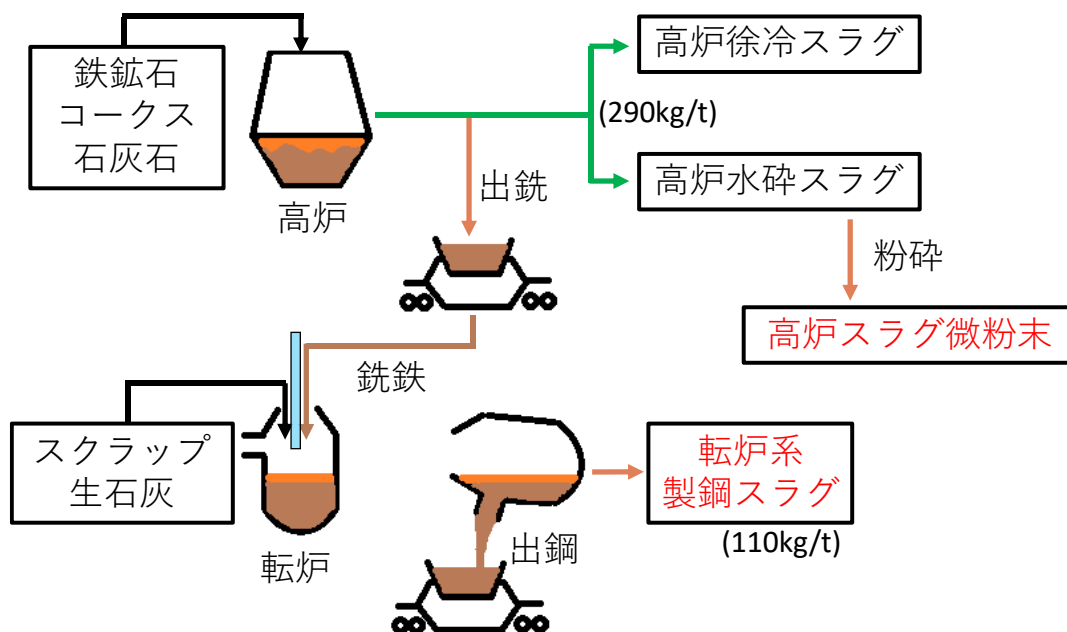


図 2.3-1 製鉄工程と発生する鉄鋼スラグ⁴³⁾(文献 43)を参考に作成)

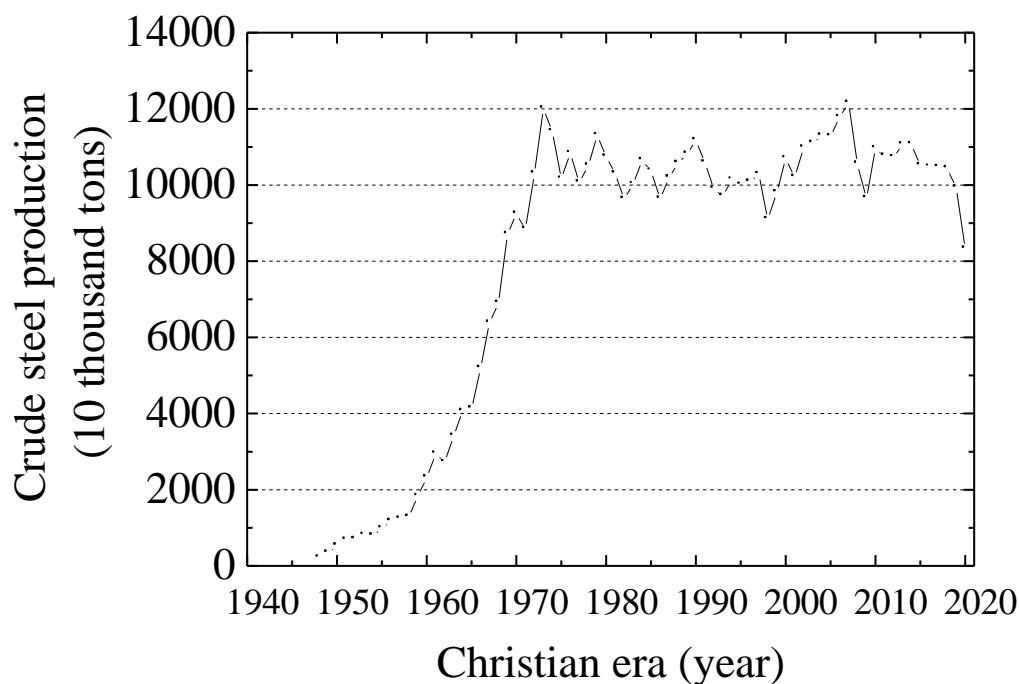


図 2.3-2 粗鋼生産量の推移^{44), 45)} (文献 44), 45)のデータより作成)

2.3.2 製鋼スラグの物理化学的特性質と現状の利用法

製鋼スラグは高炉で生まれた銑鉄を靱性・加工性の高い「鋼」にする製鋼工程で生成される。石灰などの副原料を加えて酸素を吹き込み、銑鉄に含まれる炭素やリン、硫黄などを取り除き、粘り強い鋼に精錬するときに生まれた酸化物が製鋼スラグとなる。

製鋼スラグの化学成分の例を表 2.3-2⁴⁶⁾に示す。脱リン剤、脱硫剤として添加された CaO が主で、脱炭、脱リン、脱珪のため溶鉄に吹き付ける酸素や酸化剤として投入する鉄鉱石、ダストに由来する酸化鉄、酸素や酸化剤の投入により溶銑中の Si が酸化し発生する SiO₂ からなる。また高炉スラグと比べて、Fe を多く含むため粒子密度が大きく、概ね 3.2 ~ 3.7 g/cm³ の範囲である。

表 2.3-2 に示すように、製鋼スラグには多くの生石灰が含まれる。この生石灰は、精錬に十分な熱と時間をかけて精錬すれば溶解されるが、精錬に要する時間は短時間であるためにその一部はそのままの状態製鋼スラグ中に残存する。この生石灰は遊離石灰(Free-CaO)と呼ばれ、水と接すると水和反応⁴⁷⁾し、約 2 倍の体積膨張が生じる。その際、スラグ粒子も亀裂を生じながら⁴⁸⁾膨張し、同時に細粒化する(“ふけ”と呼ばれる)。一方、製鋼スラグの内部に遊離石灰が存在する場合には、水と反応することがないため膨張することはできない。一般に遊離石灰量が多い製鋼スラグの膨張性は大きいですが、遊離石灰の粒子の大きさ、存在状況、他の化学成分の量によっても膨張量は異なるため、遊離石灰量だけで製鋼スラグの膨張量を予測することは困難である。製鋼スラグの膨張安定化機構の模式図を図 2.3-3⁴⁹⁾に示す。従来、道路用路盤材^{50)~54)}として利用されることの多かった製鋼スラグは、図 2.3-3 のような水和反応による膨張および細粒化が供用期間で生じると、材料の

強度低下やクラックの原因になる為、事前に膨張抑制処理としてエージングと呼ばれる処理が行われ出荷されている。

エージング処理はヤードに積み上げられたスラグを散水や雨水によって水和反応を起こさせる「大気エージング」⁵⁵⁾で行われてきたが、処理完了までに6ヶ月以上要するといった時間的な大きな課題があった。そこでエージング処理時間の短縮に向けて様々な研究・検討が行われた。温水中にスラグを浸漬しエージングを促進する「温水エージング」では処理完了までに約1週間、ヤードに積み上げられたスラグの下方から水蒸気を噴霧することでエージングを促進する「蒸気エージング」⁵⁶⁾では約2日、さらに蒸気エージングを圧力缶内で行う「加圧蒸気エージング」⁵⁷⁾では約3時間に短縮されている。

このように製鋼スラグは施工後の膨張性が問題となるため、古くから膨張抑制を目的とするエージング処理に関する研究が行われてきた。しかし、近年では製鋼スラグの利用用途拡大を目的に、製鋼スラグの水硬性に期待・着目した研究が積極的に行われている。特に、製鋼スラグと浚渫土を混合したカルシア改質土に関しては実用化も進んでいる。

木曾ら⁵⁸⁾は転炉系スラグと浚渫土の混合材料について、室内試験と実海域実験からその特性について評価を行った。その結果、軟弱な浚渫土は、転炉系スラグの混合により、水和固化による強度改良がなされること、転炉系スラグによる海水のpHの上昇や白濁の発生が抑制されること、および浚渫土の間隙水内のリン濃度が低減し、利用時に海域のリン濃度の上昇を抑制できる可能性を確認した。また、強度改良については、配合設計の確立に向け、f-CaO/W および可溶性 Si/W が強度に影響する配合パラメータであることを確認した。さらに、強度改良効果および pH・白濁抑制効果については、実施工においてもその効果を確認したことを報告している。

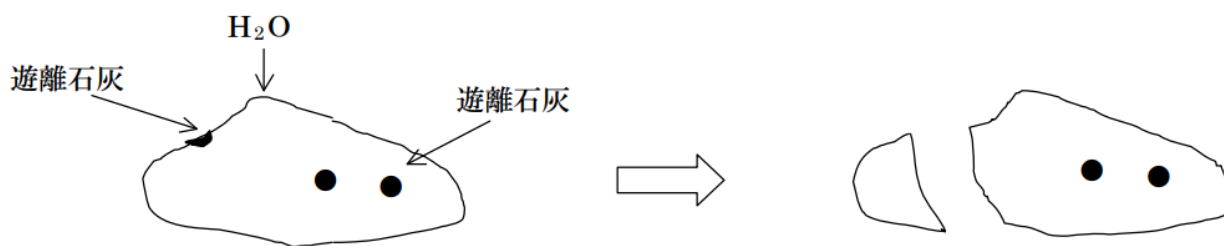
平井ら⁵⁹⁾は、製鋼スラグと浚渫土を混合した材料中でどのように固化反応が進み、固化範囲が広がっていくのかを明らかにするために、製鋼スラグと浚渫土の2層模型地盤を作製し、コーン貫入試験、SEM観察、EPMA分析を行った。その結果、製鋼スラグと浚渫土の境から経時的に固化領域が広がり、固化部分では土組織の緻密化が起こっていること、さらに、固化部ではカルシウムやケイ素、アルミニウム、カリウムなどが高い濃度であることを報告している。

柳橋ら⁶⁰⁾は、短繊維製鋼スラグ混合土の材料特性を明らかにするため、浚渫、製鋼スラグ、短繊維を混合した材料で一軸圧縮試験を行った。その結果、短繊維を混合することにより、破壊ひずみと残留強度が大きくなることを確認した。また、破壊モードを、「脆性破壊型」、「安定破壊型」、「延性破壊型」、「ひずみ硬化型」の4種類にできることを明らかにした。

このように、近年では製鋼スラグの水硬性に期待した利用法について、多くの研究・開発がなされている。

表 2.3-1 製鋼スラグの組成一例(mass%)⁴⁶⁾ (文献 46)より引用)

CaO	SiO ₂	T-Fe	MgO	Al ₂ O ₃	S	P ₂ O ₅	MnO
45.8	11.0	17.4	6.5	1.9	0.06	1.7	5.3

図 2.3-3 粒子断面と膨張による安定化機構⁴³⁾(文献 43)より引用)

2.3.3 高炉スラグ微粉末の物理化学的特性と現状の利用法

高炉スラグ微粉末がどのように発生するかについては第2章3節1項で簡単に述べたが、本項では高炉スラグ微粉末の物理化学的特性と現状の利用方法について詳細に説明する。

まず高炉スラグ微粉末は高炉水砕スラグを粉砕し、粒度調整したもので、その品質は高炉水砕スラグの品質である塩基度(=CaO+MgO+Al₂O₃)/SiO₂)やガラス化率に加え、粉末度によって定まる⁶¹⁾。つまり、粉砕する前の高炉水砕スラグの品質と高炉スラグ微粉末の品質は概ね対応するものであり、高炉水砕スラグの化学成分が高炉スラグ微粉末の品質に大きく影響する。その為、まずは高炉水砕スラグの特徴を示す。

高炉水砕スラグは、鉄鉱石に含まれるシリカなどの鉄以外の成分や還元材として使われるコークスの灰分が、副原料の石灰石と結合したものである。比重が銑鉄よりも小さく、熔融状態では銑鉄の上になるため容易に分離・回収が可能である。高炉水砕スラグには単純に水と混ぜても反応しないが、急冷されたガラス質であるため潜在水硬性を有し、pH12程度のアルカリ刺激を受けるとCaやSiなどが溶出し水和反応が進行するといった特徴がある。

表 2.3-2 に高炉水砕スラグの化学組成の一例を示す⁶²⁾。表 2.3-2 の製鋼スラグの化学組成と比べると、SiO₂とAl₂O₃が多いのも高炉水砕スラグの特徴である。

高炉スラグ微粉末は高炉セメント用混合材⁶³⁾がほとんどであり、一部はコンクリート用混和材や地盤改良材、グラウト混和材として利用されている。

表 2.3-2 高炉水砕スラグの組成一例(mass%)⁶²⁾(文献 62)表 2.2-1 より引用)

CaO	SiO ₂	T-Fe	MgO	Al ₂ O ₃	S	P ₂ O ₅	MnO
41.7	33.8	0.4	7.4	13.4	0.8	0.1	0.3

また、近年では製鋼スラグと混合した材料に関する研究も増え、実用化に至っている例もある。以下にその一例を示す。

本間ら⁶⁴⁾は鉄鋼スラグを杭基礎構造物に適用するため、製鋼スラグ(エージング処理ありとなし)と水砕スラグを混合した材料を用いて、力学特性、透水係数、膨張圧の経時的な変化について定量的に評価した。その結果、エージング処理ありとなしでは、エージン

第2章 既往の研究と本研究の位置付け

グ処理なしのほうが養生による粘着力の増加率が高く、また、エージング処理なしの製鋼スラグを用いた場合、“内部摩擦角 ϕ は増加しないが、粘着力 c が増加すること”、“透水係数が大きく低下すること”、“水砕スラグと混合することで膨張圧を抑制すること”を明らかにした。

柏原ら⁶⁵⁾は製鋼スラグと高炉水砕スラグを混合した鉄鋼スラグ水和固化体の舗装材としての有効利用を目的として、強度特性、防草特性、固化機構、環境影響を室内レベルおよび現場レベルで検討した結果や簡易な散水転圧施工で安定的に強度を発現する配合条件を見つけ出し、強度品質の基準化および製造指標を作成したことについてまとめている。さらに現状の実際の施工事例について紹介している。

高野ら⁶⁶⁾は製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を混合した鉄鋼スラグ水和固化体(必要に応じてセメントおよび消石灰等を添加)のコンクリート代替材料としての有効利用を目的にこれまでに行ってきた実験結果や適用事例について取り纏めている。この材料を用いた人工石材や河川護岸・防波堤被覆石など様々なものへの適用事例や、実際の施工事例を挙げている。

以上のように、高炉水砕スラグやそれを破砕した高炉スラグ微粉末は製鋼スラグの高アルカリ性による潜在水硬性の発揮によって安定的に強度を発現する材料であり、その有用性についてはこれまでに様々な知見が得られている。

2.4 廃棄物の複合地盤材料としての有効利用に関する研究

土質力学は、18世紀の Rankine や Coulomb の土圧論にはじまり、その後 1925 年に Terzaghi が”Erdbau Mechanik”を発行して以来、学問として体系化されたと言われている⁶⁷⁾。さらに世界大戦以降、戦後復興や経済成長を目的とするインフラ整備に伴い、土質力学は飛躍的に発展し、世界中で地盤工学という新しい工学分野が確立した。日本では高度経済成長期に社会資本の充実が図られ、ダム・港湾・道路などの公共投資が積極的に行われた。経済社会の発展に伴い人々の生活水準が向上した一方で、自然破壊や環境汚染を生み出した。社会基盤整備による負の影響から、1980年代後半より地球環境・生活環境の保全を意識した地盤環境工学⁶⁸⁾という新しい学問分野の構築が図られるようになってきた。また、2000年代には資源循環型社会の実現に向けて様々な法整備が行われ、多様な分野で環境負荷の低減に向けた取り組みがなされてきた。地盤工学の分野においても廃棄物の再利用に向け、積極的に研究開発が行われてきたが、本節では地盤工学的観点から見た廃棄物(産業廃棄物および災害廃棄物を含む)の有効利用に関する研究について一例を示すとともに、本研究との類似性と相違性を述べる。なお、ここでは土質材料または固化処理土をマトリックスとして、土質材料以外の材料を介在物とした複合材料について簡単に取り纏める。

まず初めに港湾や河川などの浚渫工事や建設工事に伴い発生する建設発生土および建設汚泥などの廃棄物をマトリックスに用いた複合材料の有効利用に関する研究についてまとめる。

青山ら^{69), 70)}は浚渫土砂の有効利用を目的として、海成粘土にセメントや気泡を混合した気泡混合補強土の軽量性、流動性および強度発現性の評価を行った。その結果、気泡量・粘土の含水比・セメント量を任意に調整することで、軽量性・流動性・強度発現性などの施工条件に最適な気泡混合補強土を作製することが可能であることを示した。気泡混合補強土については、これまでに阪神淡路大震災後の神戸港復旧工事^{71), 72)}や東京国際空港 D 滑走路建設事業⁷³⁾を含む多くの施工実績がある。また、1999年には「港湾・空港における軽量土混合処理土工法技術マニュアル」⁷⁾として取り纏められている。

土田ら⁷⁴⁾は浚渫土砂や建設発生土の資源化および有効利用を目的として、浚渫土にセメントと気泡および ESP ビーズを混合した材料の力学特性について検討した。その結果、現場打設における材料の均質性や地盤作製後のコアボーリングによる材料の強度評価の妥当性を示した。また、強度評価手法として一面せん断試験の有効性を示した。ESP ビーズを混合した軽量土については、これまでに東京国際空港沖合展開第Ⅲ期事業⁷⁵⁾や北海道の帯広浦幌線橋梁補修工事⁷⁶⁾などの施工実績がある。また、1997年に「混合補強土の技術開発に関する共同研究報告書:発砲ビーズ混合軽量土利用技術マニュアル」として取り纏められている。

次に介在物に廃棄物を用いた複合材料の有効利用に関する研究についてまとめる。

築地ら⁷⁷⁾や落合ら⁷⁸⁾はプラスチック廃材(PET ボトル)を軟弱地盤の表層改良材として有効利用することを目的として、裁断したプラスチックシートとセメント安定処理土(浚渫粘土およびセメント)を混合した材料を用いて、力学試験と模型載荷実験、さらに変形解析を行った。その結果、プラスチック片の配向の違いによって強度異方性が生じること、プラスチック片の混合によってセメント固化処理土の脆性挙動が改善されること、そして

表層地盤材料として、支持力および沈下特性を大きく改善し、新たな地盤材料としての有用性を示した。

木全ら⁷⁹⁾は惣菜用トレーやカップ麺の容器として使われる発泡プラスチックの有効利用を目的として、破碎した発泡プラスチックと砂質土(現場発生土)を混合した材料を用いて、一軸圧縮試験や非排水非圧密三軸圧縮試験を行い、その力学特性について評価した。また、円弧すべり解析を行うことで混合材料の軽量化効果を検討した。その結果、砂質土に破碎発泡プラスチックを混合することによって、固化剤を混合しなくても軽量の地盤材料として十分なせん断強さを発揮し、混合材料に靱性が備わることを見いだした。また、解析の結果、軟弱地盤上にこの混合材料を用いて盛土を構築した場合に軽量化効果が顕著に現れ、非常に有用な材料となることを明らかにした。

最後にマトリックスおよび介在物のいずれにも廃棄物を用いた複合材料の有効利用に関する研究についてまとめる。

浅田ら⁸⁰⁾は製紙業界から排出されるPS灰と採石業界から発生する廃棄物である採石粘土を混合し、さらに固化材として石灰を混合した材料を用いて、力学特性や流動性、環境影響を評価した。その結果、環境基準を満足する施工性の高い低コスト地盤材料となることを示し、実現場で利用できることを実証した。PS灰を用いた泥土改質技術についての詳細は望月⁸¹⁾が取り纏めているため、そちらを参照いただきたい。

森ら⁸²⁾や高橋ら⁸³⁾は浚渫土砂や建設汚泥の資源化および有効利用を目的として、高含水比泥土に破碎した故紙(新聞紙や雑誌)と高分子系改良剤、さらにセメント系固化材を混合した材料(繊維質固化処理土)を用いて、その力学特性の検討や含水比および密度を理論的に推定するモデル式の検討を行った。その結果、この工法によって再資源化される繊維質固化処理土は変形追随性を有した粘り強い材料であることや通常の土よりも軽い「軽量土」としての有用性を示した。また、混合する故紙によって泥水の見かけの含水比を低減させ、高価な高分子系改良剤の添加量を削減できるために、建設汚泥のリサイクルコストの大幅な削減も可能にすることを示した。さらに、含水比および密度を推定するモデル式を提案し、実現場で要求される性能を有する軽量盛土材を生成することができる可能性を示した。繊維質固化処理土は、「ボンテラン工法」⁸⁴⁾としてこれまでに芳賀池地区造成工事や大江地区地域用水機能増進事業(補完ハード事業) 薬師ヶ池漏水防止工事⁸⁵⁾など多くの施工実績がある。

御手洗ら⁸⁶⁾や菊池ら⁸⁷⁾は浚渫土砂と廃棄タイヤチップの有効利用を目的として、浚渫土をセメント固化した固化処理土にゴムチップ(古タイヤを粉碎した廃棄物)を混合した材料を用いて、ゴムチップ特有の弾性的性質が固化処理土の変形性能の改善に及ぼす影響を評価し、強度発現メカニズムについて検討した。その結果、タイヤチップを混合したケースは強度の伸びとピーク後の強度低下が緩やかで、タイヤチップの混合量が多いほどピーク強度を示すひずみ量や残留強度が大きくなることを確認した。すなわち、タイヤチップを固化処理土に混合することで脆性的な変形性状が延性的な性状に変化することを明らかにした。さらにゴムチップの混合によって内部でのせん断時の亀裂の生じ方が変化することを明らかにした。

このように既に実用化が進んでいるものと研究段階であるものとの違いはあるが、いずれの研究においても共通することは、そのままでは再利用が困難な土を固めて強度を確保

第2章 既往の研究と本研究の位置付け

するというだけではなく、これまでの地盤材料にない軽量性・流動性・変形追随性という人工地盤材料としての付加価値を有しているという点である。このように廃棄物の再利用・再資源化にあっては、廃棄物としての短所をなくすだけではなく、現状の地盤材料よりも優れている面がないと実利用に至らないことが多い。新しい材料を初めて使用する“リスク”と“有益性・実利性”を天秤にかけた時に後者が優位であることが必須である。本研究では、マトリックスに鉄鋼スラグ(現在ではその多くが有効利用され、廃棄物でなくなりつつある)、介在物に木屑(篩下残渣)という点で最後に紹介した複合材料のすべてが廃棄物に近い材料であるが、それぞれの長所である“水硬性による強度剛性の改善”と“圧縮変形性による靱性向上と変形追随性”を兼ね備えた材料となることに期待したものである。また、製鋼スラグのような粒状固化材料に、木屑のような変形性の高い、圧縮弾性体を混合した材料に関して、木屑の影響を定量的に評価・検討した研究はこれまでほとんどなく、その力学特性を把握することは、篩下残渣の有効利用化に向けて必要不可欠である。

2.5 スラグ固化材の水硬性に関する問題点と解決策

製鋼スラグの水硬性に関して、古くは坪井ら⁸⁸⁾や浅賀ら⁸⁹⁾によって研究が行われたが、いずれも製鋼スラグ単体には強度発現するほどの水硬性はない、または非常に弱いため、強度発現に期待する場合は石膏を添加するなどの対策が必要であると報告している。一方で、鳥居ら⁹⁰⁾は粒径 5 mm 以下の転炉系製鋼スラグを最適含水比および最大乾燥密度で突き固めて作製した供試体を用いて、転炉系製鋼スラグのエージング期間(1, 2, 3, 6ヶ月)の違いが CBR 値に与える影響について検討した。その結果、締固めた転炉スラグは β -C₂S 相の水和反応によってスラグ粒子表面に生成した微細な水和生成物がスラグ粒子同士を固結させることで材令による強度増加をもたらすこと、また、エージングが長期間になると材令に伴う強度増加が小さくなることを報告している。これらの結果は一見すると矛盾した結果であり、製鋼スラグの粒子の大きさや供試体作製方法が異なるため、一概に製鋼スラグの水硬性の大小について判断することは難しい。

また、第2章3節で製鋼スラグの水硬性を利用した研究および現状の実用法について紹介したが、いずれも製鋼スラグ単体の水硬性に期待して研究・実用されたものでない。例えば、路盤材への適用に関する研究では製鋼スラグの水硬性による強度発現に期待したのではなく、水砕スラグの潜在水硬性による強度発現に期待したものである。また、浚渫土と製鋼スラグを混合した材料に関しては、浚渫土から供給された Si と製鋼スラグ中の Ca が反応することによる強度発現に期待したものである。

著者らは研究開始当初、製鋼スラグ単体で篩下残渣を固めようと考えていた。本研究で対象とする製鋼スラグの粒径が 4.75 mm であるといった点や締固めを行うといった点で、先述した鳥居らの研究は本研究との関連性が高い。しかし、製鋼スラグは生産される地域・ロットによって製鋼スラグ自体の成分がやや異なるため、水硬性発現の再現性について確認するために行った実験について本項では説明する。また、その結果を踏まえ行った追加試験について説明するとともに、本研究で使用する事となった試料について、その決定方法を示す。

2.5.1 製鋼スラグのエージング処理の有無が硬化特性に及ぼす影響

大林ら⁹¹⁾は粉碎し細粒化した製鋼スラグ(粉碎スラグ)には未反応の f-CaO が多く含まれ、それを製鋼スラグと混合することで養生による強度増加に期待できると考えた。またそれは製鋼スラグのエージング処理の有無も影響すると考え、エージング処理した製鋼スラグ(最大粒径 4.75 mm)とエージング処理をしていない製鋼スラグを用いて一軸圧縮試験を行った。表 2.5-1 に示すような 4 パターンで試験を行い、エージング処理の有無と粉碎した細粒分の有無が製鋼スラグの硬化特性に及ぼす影響を検討した。図 2.5-1 に一軸圧縮試験より得られた一軸圧縮強さと養生期間の関係を示す。図 2.5-1 より、エージング処理の有無にかかわらず粉碎スラグを混合した場合のほうが混合しない場合よりも養生による強度増加が顕著であることを明らかにした。また、“エージング処理なしの製鋼スラグにエージング処理なしの粉碎スラグを混合した材料”のほうが“エージング処理ありの製鋼スラグにエージング処理ありの粉碎スラグを混合した材料”で養生による強度増加が顕著であ

第2章 既往の研究と本研究の位置付け

ったことから、粉砕し細粒化したエージング処理なしの製鋼スラグを混合することで養生による強度増加に期待できると報告している。しかし、大林らの用いた製鋼スラグはエージング処理の有無だけではなく、エージング処理ありとなしの製鋼スラグで発生したロットが異なるため、製鋼スラグ自体の組成が大きく異なっていた可能性がある。つまり、元々の製鋼スラグの水硬性に違いがあった可能性がある。

そこで著者ら⁹²⁾は①エージング処理ありの製鋼スラグと②エージング処理なしの製鋼スラグのそれぞれに、②のエージング処理なしの製鋼スラグを粉砕細粒化した製鋼スラグ(以下、細粒スラグ)を混合した材料を締固めた作製した供試体に対し、圧密排水三軸圧縮試験を行った。図 2.5-2 に三軸圧縮試験より得られた最大せん断強さと養生期間の関係を示す。図 2.5-2 より、エージング処理なしの細粒スラグを添加したエージング処理ありの製鋼スラグのほうが、エージング処理なしの細粒スラグを添加したエージング処理なしのスラグよりも、養生による強度増加が顕著であった。つまり、これらの結果からエージング処理の有無からだけでは製鋼スラグの水硬性の有無を判断できないこと、さらに細粒スラグだけでなく、粗粒製鋼スラグ(0.075 ~ 4.75 mm)の水硬性も強度増加に関係していると考えられる。

先述の大林らや著者らが行った実験では、最大粒径 4.75 mm の製鋼スラグを粉砕し細粒化した製鋼スラグ(0.075 mm)を混合することによる硬化特性の影響を検討した。しかし、粉砕に要する労力に見合う結果は得られなかった。

そこで著者ら⁹³⁾は製鋼スラグを目合い 0.075 mm のふるいを用いて粒度調整した細粒スラグ(0.075 mm)を製鋼スラグに混合することでも強度増加に期待できると考え、細粒スラグの混合割合を外割 0, 10, 30 mass.%と変化させて圧密排水三軸圧縮試験を行った。これにより粉砕の必要性和細粒分量の違いが強度増加に与える影響を検討した。図 2.5-3 に三軸圧縮試験より得られた最大せん断強さと細粒スラグ混合割合の関係を示す。図 2.5-3 より、細粒スラグ混合割合が 10%以下では、養生によるせん断強度の増加はあまり見込めないが、細粒スラグ混合割合が 30%では、大幅な強度増加が見込めることが明らかとなった。ただし、細粒スラグ混合割合が 30%の場合、せん断強度及び乾燥密度にばらつきが大きくなり、再現性が低くなる可能性があることも明らかとなった。また、大林らの行った実験では 10%程度の混合で大幅な強度増加が見られたことから、製鋼スラグ自体の性質もしくは粉砕の有無によっても増加の程度は異なり、粉砕の必要性についてまでは分からなかった。

以上より、製鋼スラグの水硬性発現はエージング処理の有無からだけでは判断できないが、0.075 mm 以下の細粒スラグが一定量以上ないと養生による強度増加には期待できないことが分かった。また、細粒分量が増えると試験の再現性が確保できない可能性が高い。ただし、粉砕した細粒分スラグとふるいで粒度調整した細粒分スラグが力学特性に与える影響までは分かっていない。

表 2.5-1 実験条件⁹¹⁾(文献 91)の実験条件を整理)

実験ケース	Experimental material
①	Steelmaking slag (With aging)
②	Steelmaking slag (Without aging)
③	① + Crushed ① under 0.075mm (10 wt.% by externally)
④	② + Crushed ② under 0.075mm (10 wt.% by externally)

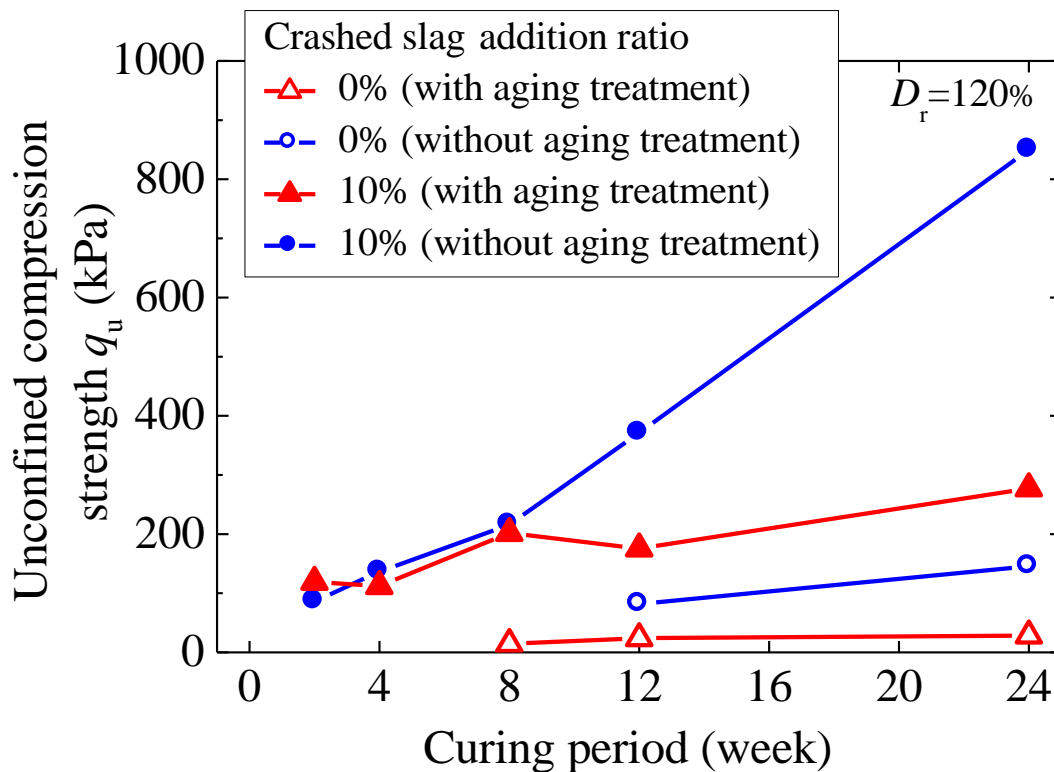


図 2.5-1 一軸圧縮強さと養生期間の関係(エージング処理のあり・なし, 粉砕スラグのあり・なし)⁹¹⁾(文献 91)に加筆修正)

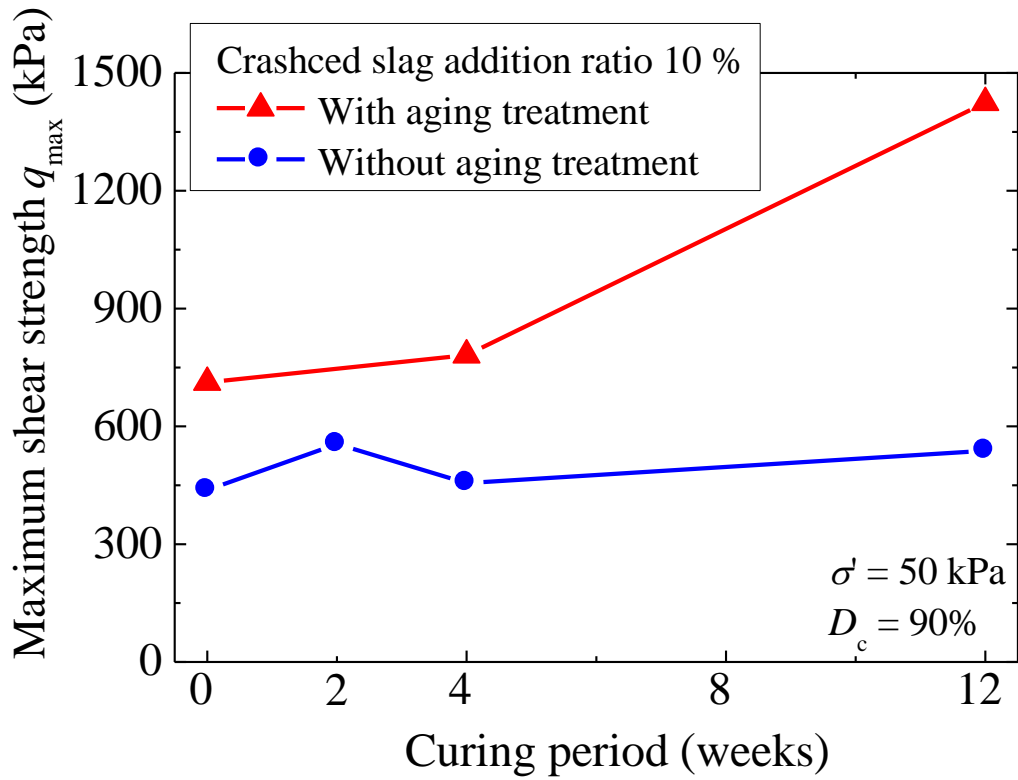


図 2.5-2 最大せん断強さと養生期間の関係(エージング処理のあり・なし)⁹²⁾(文献 92)に加筆修正)

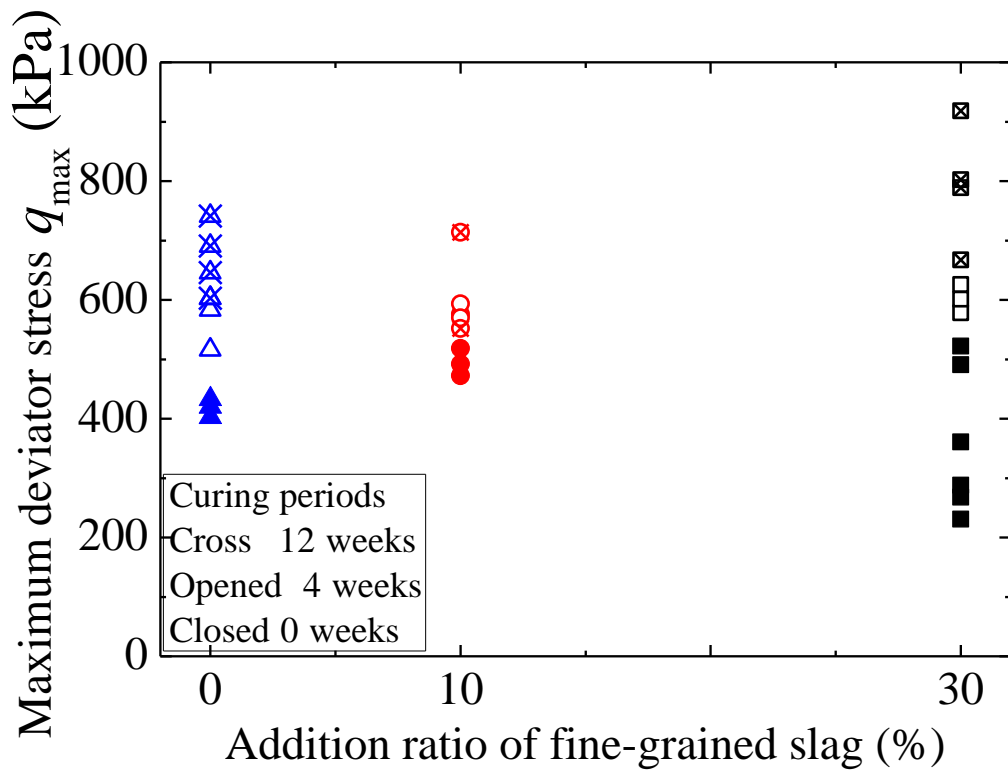


図 2.5-3 最大せん断強さと細粒スラグ混合割合の関係(養生期間 0, 4, 12 週)⁹³⁾(文献 93)に加筆修正)

2.5.2 締固め度の違いが製鋼スラグの硬化特性に及ぼす影響とそのばらつき

第2章5節1項で示した著者らが行った実験で製鋼スラグの細粒分含有率を30%とした場合に試験結果のばらつきが大きくなった要因として締固め度の影響が考えられる。そこで著者ら⁹⁴⁾は締固め度の違いが試験結果のばらつきに及ぼす影響と締固め度の違いが硬化特性に及ぼす影響を把握することを目的として、締固め度($D_c=75,90,100\%$)及び養生期間(0,4,12週間)を変えて、圧密排水三軸圧縮試験を行った。図2.5-4に三軸圧縮試験より得られた最大せん断強さと乾燥密度の関係を示す。図2.5-4より、養生なしの場合、締固め度(乾燥密度)が高くなるにつれて、せん断強度は高くなるものの、締固め度が高くなるにつれて、試験結果のばらつきが大きくなるが分かった。また締固め度が高いほど、養生による強度増加が顕著であることが分かった。

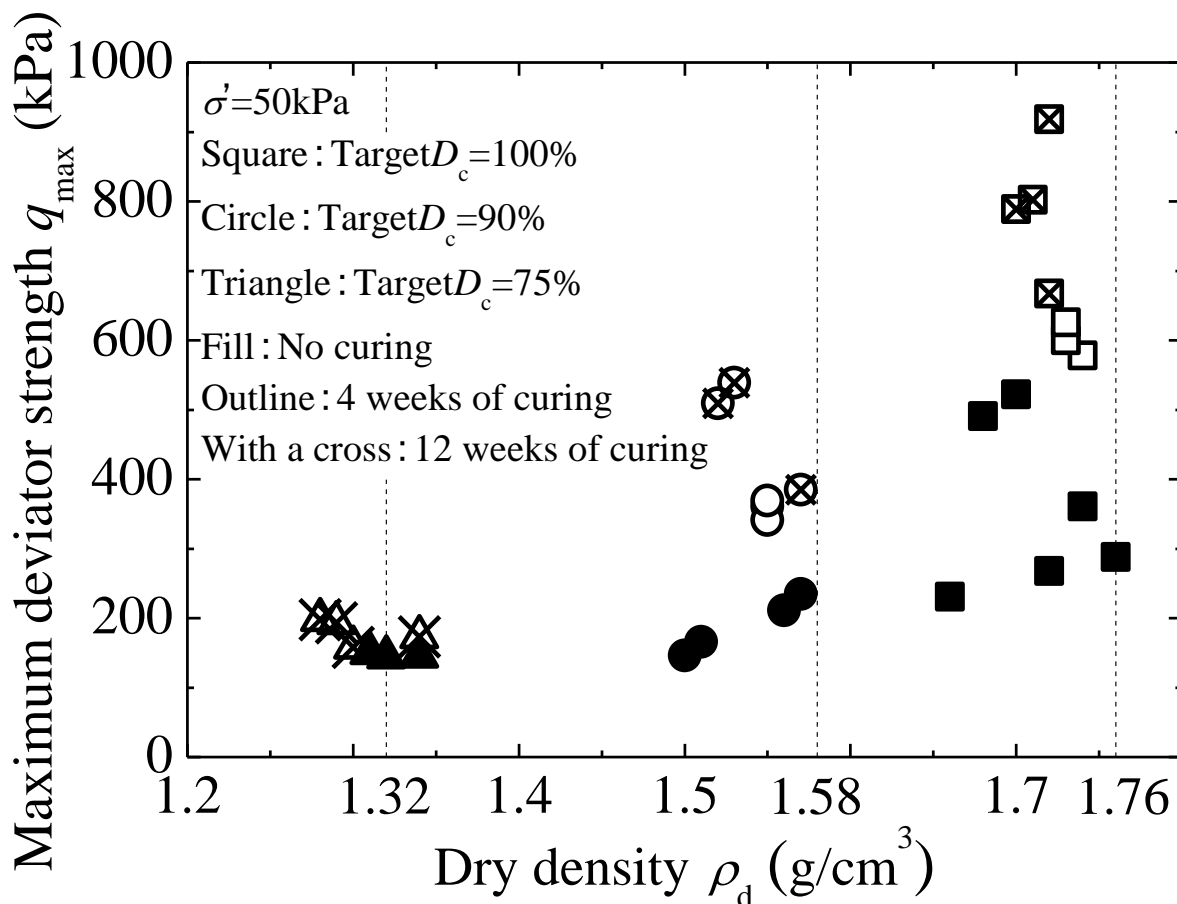


図2.5-4 最大せん断強さと乾燥密度の関係(養生期間0,4,12週)⁹⁴⁾(文献94)に加筆修正)

以上、第2章5節1項と第2章5節2項の結果から、製鋼スラグの水硬性発現は製鋼スラグ自体の性質によるところが大きく、また水硬性を発現する製鋼スラグであっても、細粒分が一定量以上であり、かつ締固めないと養生による強度草加には期待できないということが分かった。さらに細粒分が多いほど、また締固め度が高いほど試験結果はばらつき、試験の再現性を確保することが難しいということが明らかとなった。

2.5.3 固化系補助材(高炉スラグ微粉末, 普通ポルトランドセメント, 半水石膏)の選定

第2章5節1項と第2章5節2項の結果から、製鋼スラグ単体の水硬性にはばらつきがあること、さらに供試体作製方法によっても試験結果にばらつきが生じるなど、製鋼スラグ単体では様々な面で試験の再現性を確保することが困難であることが分かった。

著者ら⁹⁵⁾は安定した固化反応を確保するために製鋼スラグに固化系補助材を添加することを決め、固化系補助材の選定を行った。一般的に地盤の固化材として用いられている普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、石膏を用いて、7日養生の一軸圧縮強さ750~1000 kPaを目標に、添加材料および添加割合の選定を行った。なお、目標強度に明確な基準はないが、木屑を混合した場合にも地盤材料として十分な強度を確保するために、この値とした。図2.5-6に固化系補助材の混合割合と一軸圧縮強さの関係を示す。図2.5-6より、いずれの固化系補助材を混合した場合でも、固化系補助材の混合割合の増加に伴い、一軸圧縮強さが線形的に増加することが分かった。また、同一混合割合であれば、高炉スラグ微粉末>普通ポルトランドセメント B種>半水石膏の順で一軸圧縮強さは大きくなり、高炉スラグ微粉末であれば内割質量で約4 wt.%混合することで目標強度を満足することが分かった。ただし、半水石膏は作製開始からすぐに固化が始まるために作業性が著しく悪く、木屑を混合した際に攪拌時間を考える(木屑が偏在しないように十分攪拌する)と本実験で用いる固化系補助材としては不向きである。

つまり、この3つの固化系補助材の中では、高炉スラグ微粉末が最も安定した水和反応に期待できるということである。この結果を基に本研究では製鋼スラグに高炉スラグ微粉末を混合した材料を固化材として用いることとした。

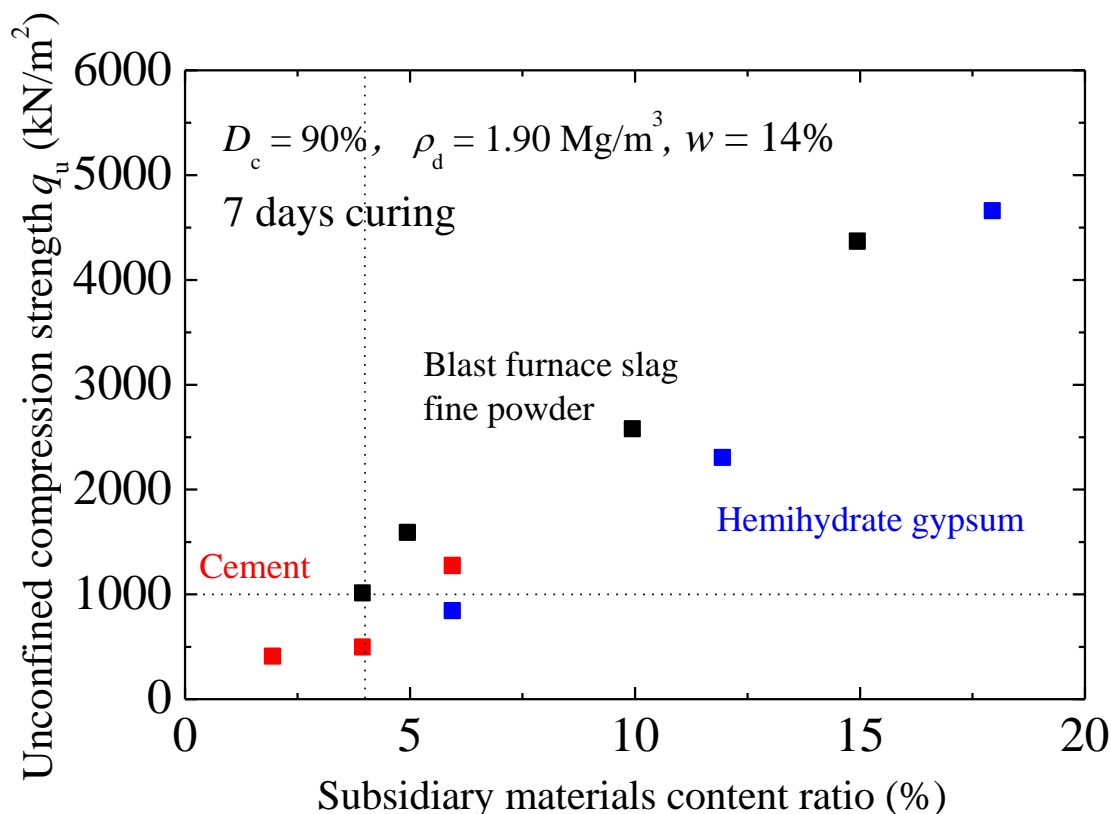


図 2.5-6 一軸圧縮強さと固化系補助材混合割合(内割質量%)の関係⁹⁵⁾(文献 95)に加筆修正)

2.6 本研究の位置付け

第2章では本研究で対象とする篩下残渣および鉄鋼スラグの発生方法や性質についてまとめるとともに、現状の利用方法についていくつかの例を挙げて整理した。また、廃棄物(災害廃棄物および産業廃棄物)の地盤材料としての有効利用に関してこれまでの研究例・実施工例を取り上げて示し、本研究材料との類似点および相違点を確認した。さらに、本研究室でこれまでに行ってきた製鋼スラグの水硬性に関する研究(研究著者らの研究含む)から見えた課題とその解決策を示し、本研究で使用する材料の選定条件を示した。

本章で得られた知見と本研究の位置付けを以下に示す。

得られた知見

- ▶ 災害廃棄物である篩下残渣は多種多様な木屑を大量に含む土砂である。災害が発生するたびに様々な技術開発・研究が進み、東日本大震災で発生した災害廃棄物の約 81 wt.%が有効利用された。篩下残渣は災害廃棄物全体の約 9 wt.%を占めたが、その強度特性や木屑の腐朽過程および影響が不明であることから、そのほとんどが有効利用されず埋立処分された。(⇒本研究の位置付け①に対応)
- ▶ 篩下残渣の地盤工学的特性は残渣中に含まれる木屑混合量の影響が大きい。数 wt.%程度の木屑混入量であれば土砂分(通常地盤材料)のみと比較してもその力学特性には大きな影響を及ぼさない。また、篩下残渣は発生する地域や処理施設によって混入している木屑混合割合や木屑形状が大きく異なる。(⇒本研究の位置付け②に対応)
- ▶ 製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末は粗鋼生産の際に大量に発生する産業副産物であり、現在は道路用路盤材や高炉セメント混合材など様々な用途で使用されている。しかし、近年の公共事業費削減に伴い販路拡大が課題となっている。従来、製鋼スラグの耐摩耗性や高い内部摩擦角を利用した研究開発が行われてきたが、近年は水硬性に着目した研究開発が積極的に行われている。(⇒本研究の位置付け②に対応)
- ▶ 循環型社会構築に向けて地盤工学分野でも様々な取組がなされている。その一つとして、廃棄物(一般廃棄物・産業廃棄物)を地盤材料として有効利用することが挙げられる。これまでも様々な研究開発が実施されてきたが、いずれも人工地盤材料としてこれまでの地盤材料にない有益な特徴を備えたものである。つまり、廃棄物としての短所を相殺するだけでなく、長所を生かした材料とすることで積極的な利活用を促すことができると考えられる。(⇒本研究の位置付け③に対応)
- ▶ 製鋼スラグの水硬性発現は製鋼スラグ自体の性質によるところが大きく、一方で、水硬性を発現する製鋼スラグであっても、細粒分が一定量以上であり、かつ締固めないと養生による強度増加には期待できない。ただし、細粒分が多く締固め度が高いほど試験結果はばらつき、試験の再現性を確保することが難しい。この結果を受け、製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を質量比 96 対 4 で混合することで地盤材料として十分な強度を短期間で安定的に確保できる。(⇒本研究の位置付け②に対応)

本研究の位置付け

- ① 篩下残渣の有効利用が可能となることで廃棄物の最終処分量を削減するだけでなく、災害復興・復旧の迅速化に繋がる。
- ② 製鋼スラグと高炉スラグ微粉末(併せて鉄鋼スラグと呼称)を混合した材料は安定的な水硬性を発現し、固結による強度増加材料として有用である可能性がある。本研究では鉄鋼スラグによって篩下残渣を固めることを想定し、製鋼スラグのような粒状固化材料と圧縮弾性体である木屑を混合した材料の木屑形状や木屑混合割合の違いが力学特性に及ぼす影響を定量的に評価する。
- ③ 産業副産物である鉄鋼スラグと災害廃棄物である篩下残渣を掛け合わせた材料において、鉄鋼スラグの固化による篩下残渣の強度改善と篩下残渣中の木屑の圧縮性および繊維補強効果に期待し、粘り強い靱性を備えた材料となることに期待している。また、鉄鋼スラグの高 pH によって篩下残渣中の木屑の腐朽を大幅に抑制できることにも期待している。

【引用・参考文献】

- 1) 環境省: 災害廃棄物対策情報サイト トップ>自治体の災害廃棄物対策の推進に向けて>災害廃棄物処理計画>災害廃棄物処理計画策定状況(令和3年3月末時点).
http://kouikishori.env.go.jp/strengthening_measures/formulation_status/pdf/formulation_status_r0303.pdf (参照日 2021.08.09)
- 2) 勝見武, 林春男, 楡井久, 嘉門雅史: 阪神・淡路大震災における災害廃棄物の発生と処理の実態について, 京都大学防災研究所年報, No. 39 B-2, pp. 37-50, 1996.
<http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/nenpo/no39/39b2/a39b2p04.pdf> (参照日 2021.08.09)
- 3) 兵庫県生活文化部環境局環境整備課: 阪神・淡路大震災における災害廃棄物処理について, 1997. <https://web.pref.hyogo.lg.jp/kk41/documents/000044725.pdf> (参照日 2021.08.09)
- 4) (旧財団法人)兵庫県環境クリエイトセンター: 災害廃棄物の処理の記録【阪神・淡路大震災の発生に伴う災害廃棄物処理事業報告書】, 1997.
<https://www.kankyo.pref.hyogo.lg.jp/application/files/8315/6110/7181/2.pdf> (参照日 2021.11.04)
- 5) 金子和裕: 東日本大震災における災害廃棄物の概況と課題～未曾有の災害廃棄物への取組～, 立法と調査, 参議院事務局企画調整室, No. 316, pp65-76, 2011.
- 6) 環境省: 災害廃棄物対策情報サイト>災害廃棄物処理アーカイブ>平成23年3月東日本大震災における災害廃棄物の処理について>災害廃棄物処理の実施>災害廃棄物処理の進捗管理.
http://kouikishori.env.go.jp/archive/h23_shinsai/implementation/progress_management/ (参照日 2021.08.09)
- 7) 災害廃棄物処理に係る阪神・淡路大震災20年検証委員会: 災害廃棄物処理に係る阪神・淡路大震災20年検証, 2015.
https://dwasteinfo.nies.go.jp/archive/past_doc/201503_hyogo_kankyo_souzou.pdf (参照日 2021.08.30)
- 8) (廃棄物資源循環学会)災害廃棄物対策・復興タスクチーム: 災害廃棄物分別・処理戦略マニュアル～東日本大震災において～, 東日本大震災 Ver2-Re3, 2011. <http://eprc.kyoto-u.ac.jp/saigai/> (参照日 2021.08.30)
- 9) Ide kazuo: Treatment of disaster waste generated by the great east Japan earthquake -Treatment of disaster waste by member corporations of the Japan federation of construction contractors-, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol. 2, No. 2, pp. 135-142, 2015.
- 10) Ministry of the Environment: Guidelines for Disaster Waste Management, 2011.
- 11) 環境省: 平成30年度版 環境白書・循環型社会白書/生物多様性白書-第3章1節.
<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/h30/html/hj18020301.html> (参照日 2021.08.09)
- 12) 環境省: 災害廃棄物対策情報サイト>災害廃棄物対策推進検討会>巨大災害発生時における災害廃棄物対策のグランドデザインについて-中間とりまとめ(平成26年3月).
http://kouikishori.env.go.jp/action/investigative_commission/grand_design/pdf/h2603report.pdf (参照日 2021.08.09)
- 13) 浅利美鈴, 吉岡敏明, 酒井伸一: 災害廃棄物分別・処理戦略マニュアルの概要と今後の課

題, 廃棄物資源循環学会誌, Vol. 23, No. 1, pp. 10-21, 2012.

- 14) 岩手県: 岩手県復興資材活用マニュアル(改訂版)第2章, pp. 5-11, 2013. <http://iwate-archive.pref.iwate.jp/wp/wp-content/uploads/2017/02/e49f7b1f8170a70006989def8b7fbb59.pdf> (参照日 2021.08.30)
- 15) 環境省環境再生・資源循環局災害廃棄物対策室: 災害廃棄物対策指針(改訂版)第3編技術資料, 技 1-16-3, 2014. https://www.env.go.jp/recycle/waste/disaster/dwasteguideline/pdf/gl_h25_main.pdf (参照日 2021.08.30)
- 16) 東北地方環境事務局・一般財団法人日本環境衛生センター: 東日本大震災により発生した被災3件における災害廃棄物等の処理記録第3章4節, 2014. https://dwasteinfo.nies.go.jp/archive/past_doc/201103tohoku_2/201409kiroku_4.pdf (参照日 2021.08.30)
- 17) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部: 東日本大震災等の経験に基づく災害廃棄物処理の技術的事項に関する報告書, 2017. http://kouikishori.env.go.jp/document_video/pdf/wg_report_02.pdf (参照日 2021.08.11)
- 18) 茨城県: 茨城県災害廃棄物処理計画, 2017. <https://www.pref.ibaraki.jp/seikatsukankyo/haitai/kikaku/disaster-waste/documents/keikaku.pdf> (参照日 2021.08.11)
- 19) 建設廃棄物協同組合: 建設混合廃棄物処理におけるふるい下残さ適正処理ガイドライン, 2014. https://www.kenpaikyo.or.jp/works/file/furui_guideline.pdf (参照日 2021.08.11)
- 20) 笹尾俊明: 東日本大震災における災害廃棄物処理の現状と今後の課題-広域処理を中心に-, 都市とガバナンス, Vol. 21, pp. 26-32, 2014. http://www.toshi.or.jp/app-def/wp/wp-content/uploads/2014/03/reportg21_2_2.pdf
- 21) 加用千裕, 石垣智基, 山田正人, 大迫政浩, 立尾浩一: 東日本大震災で発生した災害廃棄物の広域処理に関する一考察(第一報)-費用と処理期間の低減効果-, 一般財団法人日本環境衛生センターHP>資料集>手記・記録, 2015. <https://www.jesc.or.jp/Portals/0/center/library/H27saigai1.pdf> (参照日 2021.09.12)
- 22) 川畑雄大, 島岡隆行, 中山裕文: 東日本大震災により発生した災害廃棄物処理に関する一考察, 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会, Vol. 23, A13-8_Poster2, 2012. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmcwm/23/0/23_191/_pdf/-char/ja
- 23) 国立研究開発法人国立環境研究所災害廃棄物情報プラットフォーム: 将来に伝えておきたい災害廃棄物処理のはなし>~寄稿~東日本大震災災害廃棄物処理の課題と巨大災害への備え(その3)一般財団法人日本環境センター宗清生, 図6ふるい下くずの例. https://dwasteinfo.nies.go.jp/archive/interview/sou_03.html (参照日 2021.08.11)
- 24) 環境省: 災害廃棄物対策情報サイト>用語集>ふるい下残渣. <http://kouikishori.env.go.jp/glossary/> (参照日 2021.08.11)
- 25) がれき処理コンソーシアムプレキャストコンクリート製品検討部会: 【情報提供】宮城県災害廃棄物処理サイトの震災がれきについて. <http://www.gareki-shori.com/pdf/28/27-1.pdf> (参照日 2021.08.28)
- 26) 三反畑勇, 塩崎功, 坂本守, 弘末文紀, 砂山浩紀: 木くず等の夾雑物を含む土砂を利用した

地盤材料の締固め特性, ハザマ研究年報, Vol. 44, pp. 1-7, 2012. https://www.ad-hzm.co.jp/trr/hazama/2012/pdf_file/06.pdf (参照日 2021.08.28)

- 27) 高井敦史, 川島光博, 勝見武, 乾徹, 岩下信一, 大河原正文: 東日本大震災で発生した岩手県の災害廃棄物分別土砂の品質とその変化, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol. 72, No. 3, pp. 252-264, 2016.
- 28) 鴫田稔・野口真一・中村吉男・中野正樹・加藤雅彦: 東日本大震災で発生した津波堆積物の分別土砂中の夾雑物混入率に関する文献調査, 第12回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 229-236, 2017. 高井敦史, 森田康平, 勝見武, Mohammed Nasir Uddin, 山根華織, 乾徹: 災害廃棄物分別土の材料特性に及ぼす木片混入量・木片寸法の影響, 第11回地盤改良シンポジウム論文集, pp. 63-66, 2014.
- 29) 遠藤和人: 災害廃棄物由来の分別土有効利用における木くず等有機炭素含有量の評価, 環境研究総合推進費補助金循環型社会形成推進研究事業総合研究報告書, 平成27年度～平成28年度. https://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/pdf/seika_1_h29/3K152005_2.pdf (参照日 2021.11.04)
- 30) 高井敦史, 森田康平, 勝見武, Mohammed Nasir Uddin, 山根華織, 乾徹: 災害廃棄物分別土の材料特性に及ぼす木片混入量・木片寸法の影響, 地盤改良シンポジウム論文集(第11回), pp. 67-70, 2014.
- 31) 小竹望, 山中稔, 多田有汰, 竹谷貢太: 締め固めた津波堆積物分別土のせん断強度特性, 地盤工学ジャーナル, Vol.14, No.4, pp. 295-305, 2019.
- 32) 辻直紀, 中村吉男: 災害廃棄物分別土砂に夾雑する木片類の腐朽を考慮した地盤特性評価に関する研究, 愛知工業大学研究報告, No. 54, pp. 100-109, 2019. <http://hdl.handle.net/11133/3487> (参照日 2021.08.28)
- 33) 森本博: 木材の腐朽について, 紙パ技協誌, Vol.14, No.10, pp. 644-648, p. 482a, 1960.
- 34) 公益社団法人土木学会木材工学特別委員会・土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会: 国内の構造物基礎における木材利用実例と設計方法の変遷, JSCE 木材利用ライブラリー, 2012. <https://committees.jsce.or.jp/mokuzai/system/files/005.pdf> (参照日 2021.11.04)
- 35) 野澤伸一郎, 藤原寅士良: 東京駅丸の内駅舎に使用された木杭の耐久性, 土木工学会論文集 C(地圏工学), Vol. 72, No. 4, pp 300-309, 2016.
- 36) 石田正利, 梶尾孝之, 赤井智幸, 増井昭彦, 三木博史: 木材チップを用いた複合土の耐久性評価, 土木学会第65回年次学術講演会, pp. 37-38, 2010.
- 37) 中野正樹: 木片の混入率・腐朽性を考慮した災害津波堆積物の地盤材料としての有効利用の提案, 科学研究費助成事業 研究成果報告書, 2015. <https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-25630199/25630199seika.pdf> (参照日 2021.08.28)
- 38) 古賀千佳嗣, 佐藤研一, 藤川拓朗, 米丸佳克, 村尾勇成: 強制腐朽をさせた竹チップ混合固化処理土の物理・力学特性, 第12回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp. 237-240, 2017.
- 39) 一般財団法人沿岸技術研究センター: 港湾・空港・海岸等における製鋼スラグ利用技術マニュアル, pp. 15-17, 2015.

- 40) 一般財団法人沿岸技術研究センター: 港湾・空港における水砕スラグ利用技術マニュアル, pp. 67-68, 2014.
- 41) 久田真: 災害廃棄物の有効利用, コンクリート工学, Vol. 53, No. 1, pp.71-78, 2014.
- 42) 千年希望の丘 HP: 千年希望の丘とは. <https://sennen-kibouno-oka.com/> (参照日 2021.08.30)
- 43) 鐵鋼スラグ協会: 鐵鋼スラグができるまで>鐵鋼スラグ製品の製造フロー.
<https://www.slg.jp/slag/process.html> (参照日 2021.08.11)
- 44) 日本製鐵株式会社: 粗鋼生産量の推移-全国および日本製鐵.
https://www.nipponsteel.com/ir/pdf/nscguide2012_j_51.pdf (参照日 2021.08.11)
- 45) 日本製鐵株式会社 HP: 日本製鐵ファクトブック>製鐵事業>生産>粗鋼生産量の推移-全国および日本製鐵. <https://www.nipponsteel.com/factbook/11-01.html> (参照日 2021.08.11)
- 46) 鐵鋼スラグ協会: 鐵鋼スラグの化学特性>鐵鋼スラグの組成例.
<https://www.slg.jp/slag/character.html> (参照日 2021.08.11)
- 47) 松井俊介: 製鋼スラグ中のカルシウム化合物の安定化技術, 日本製鐵技報, Vol. 415, pp. 94-99, 2020. <https://www.nipponsteel.com/tech/report/pdf/415-17.pdf> (参照日 2021.11.04)
- 48) 水渡英昭, 横幕豊一, 林田由美子, 高橋愛和: 転炉滓中の遊離石灰の影響による風化崩壊, 鉄と鋼, Vol. 63, No. 14, pp. 50-59, 1977.
- 49) 港湾・空港等リサイクル推進協議会: 港湾空港等整備におけるリサイクル技術指針第2章 6節図 2.6.12 粒子断面と膨張による安定化機構, 2004.
<https://www.mlit.go.jp/kowan/recycle/0/01.pdf> (参照日 2021.08.30)
- 50) カルマチャリヤ M.R., 内田一郎, 出光隆, 高山俊一: 転炉スラグの路盤材への利用について, 土木学会論文報告集, Vol. 282, pp. 101-103, 1979.
- 51) 飯島尚, 小島逸平, 原富男, 石神公一: 転炉スラグのアスファルト混合物への利用に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 366, pp. 83-91, 1986.
- 52) 西勝, 河端薫: 路盤材としての鐵鋼スラグの基礎的性質と力学特性, 土木学会論文集, No. 414, pp. 89-98, 1990.
- 53) 高山俊一, 出光隆, 会田憲義, 杉正法, 徳原英利: 蒸気エージングした転炉スラグの上層路盤材としての利用に関する研究, 土木学会論文集, No. 544, pp. 177-186, 1996.
- 54) 森下智貴, 和田信一郎, 金子敏行, 柏原司, 原良: 製鋼スラグを用いた舗装材の強度特性と化学特性の関係, 農業農村工学会論文集, Vol. 83, No. 2, pp. 33-39, 2015.
- 55) 佐野博昭, 麻生更紗, 山田幹雄, 柏原司, 古川幹人, 澄川圭治, 佐藤庫一, 中村貴敏: 膨張性安定化を目的として製鐵所構内に積み付けた大気エージング処理用製鋼スラグ山の性状調査, 地盤工学ジャーナル, Vol. 12, No. 3, pp351-362, 2017.
- 56) 佐々木剛, 浜島拓司: 製鋼スラグの蒸気エージング処理の開発, 新日鉄住金技報, No. 399, pp. 21-25, 2014. <https://www.nipponsteel.com/tech/report/nssmc/pdf/399-06.pdf> (参照日 2021.08.30)
- 57) 市原恵: 製鋼スラグの加圧式蒸気エージング設備, 山陽特殊鋼技報, Vol. 17, No. 1, 2010.
http://www.sanyo-steel.co.jp/technology/images/pdf/17/17_06.pdf (参照日 2021.08.30)
- 58) 木曾英磁・辻井正人・伊藤公夫・中川雅夫・五明美智男・永留健: 転炉系製鋼スラグの混合による浚渫土の固化改良技術, 海洋開発論文集, Vol.24, pp.327-332, 2008.
- 59) 平井壮, 水谷崇亮, 菊池喜昭, 川端雄一郎: 製鋼スラグ混合土の配合・混合条件がその力

学特性に与える影響について, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 51, No. 3, pp. 77-106, 2012.

<https://www.pari.go.jp/search-pdf/vol051-no03-02.pdf> (参照日 2021.08.30)

- 60) 柳橋 寛一・田中 裕一・堤 彩人・松村 聡・水谷 崇亮・森川 嘉之: 短繊維・製鋼スラグ混合土の配合条件が一軸圧縮による変形挙動に及ぼす影響, 海洋開発論文集, Vol.73, No.2, pp.336-341, 2017.
- 61) 壇康弘: 高炉スラグ微粉末, コンクリート工学, Vol. 52, No. 5, pp. 387-392, 2014.
- 62) 一般財団法人沿岸技術研究センター: 港湾・空港における水砕スラグ利用技術マニュアル, pp. 3-4, 2014.
- 63) 高炉スラグ微粉末によるコンクリートの CO₂削減効果について, コンクリート工学, Vol. 48, No. 9, pp. 62-65, 2010.
- 64) 本間裕介・玉井智子・富永晃司・永井及: 杭周辺地盤改良材として適用するための鉄鋼スラグの力学的特性に関する基礎的実験, 地盤工学ジャーナル, Vol.1, No.4, pp.123-130, 2006.
- 65) 柏原司, 澄川圭治, 原良治, 金子敏行, 和田信一郎, 森下智貴, 佐野博昭, 新井清人, 菅原敬介, 高野良広: 環境調和型”簡易舗装材”カタマ®SP(スペシャル)”の開発, 新日鉄住金技報, No. 399, pp. 26-35, 2014.
- 66) 高野良広, 中川雅夫, 堤直人, 篠崎晴彦, 木曾英滋, 平嶋裕: 鐵鋼スラグ水和固化体の開発経緯と特徴および適用事例, 新日鉄住金技報, No. 399, pp. 42-50, 2014.
<https://www.nipponsteel.com/tech/report/nssmc/pdf/399-09.pdf> (参照日 2021.08.30)
- 67) 石原研而: 地盤工学の発展-過去・現在・未来, 土と基礎, Vol. 52, No. 1, 2004.
- 68) 日本学術会議地盤環境工学研究連絡委員会: 地盤環境工学の現状と将来, pp. 437-471, 1997. <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/14/16-34.pdf> (参照日 2021.09.11)
- 69) 青山憲明, 黒山英伸, 千田昌平, 安在六男, 草刈太一, 新坂孝志, 入島文雄, 吉原正博: 気泡混合補強土の特性についてその 1, 第 27 回土質工学研究発表会, pp. 2483-2484, 1992a.
- 70) 青山憲明, 新舎博, 高橋勇, 久保博, 笠井寿太郎, 佐藤常雄, 古谷俊明: 気泡混合補強土の特性についてその 2, 第 27 回土質工学研究発表会, pp. 2485-2486, 1992b.
- 71) 輪湖建雄, 土田孝, 松永康男, 濱本晃一, 岸田隆夫, 深沢健: 軽量混合処理土工法の港湾施設への適用, 土木学会論文集, Vol. 1998, No. 602, pp. 35-52, 1998.
- 72) 土田孝: 港湾空港事業における軽量混合処理土工法の開発と適用事例, 港湾技術研究所報告, Vol. 38, No. 2, 1999. <https://www.pari.go.jp/search-pdf/vol038-no02-05.pdf> (参照日 2021.09.11)
- 73) 野口孝俊, 渡部要一, 鈴木弘之, 堺谷常廣, 梯浩一郎, 小倉勝利, 水野健太: 羽田空港 D 滑走路の設計, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol. 68, No. 1, pp. 150-162, 2012.
- 74) 土田孝, 横山裕司, 清水和也, 笠井寿太郎: 浚渫粘土を用いた軽量盛土・埋立地盤の強度評価, 第 28 回土質工学研究発表会, pp. 2665-2668, 1993.
- 75) 土田孝, 藤崎治男, 卷渕正治, 新舎博, 長坂勇二, 彦坂周男: 建設発生土を原料土とする軽量混合処理土の護岸工事への適用, 土木学会論文集, Vol. 2000, No. 644, pp. 13-23, 2000.
- 76) 酒井啓之: 発泡ビーズ混合軽量盛土, 第 13 回土木施工管理技術論文集, pp. 211-215, 2008. <https://www.ejcm.or.jp/jcm/ronbun/13/pdf/13-54.pdf> (参照日 2021.09.11)
- 77) 築地健太郎, 落合英俊, 安福規之, 大嶺聖, 宮崎良彦: プラスチック廃材を利用したセメン

- ト安定処理土の強度異方性について, 土木学会第53回年次学術講演会概要集, 第Ⅲ部-B, pp. 592-593, 1998. <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/1998/53-3B/53-3B-0592.pdf> (参照日 2021.09.11)
- 78) 落合英俊, 大嶺聖, 安福規之, 山本雅之: プラスチック廃材を用いた複合地盤材料, 土と基礎, Vol. 48, No. 6, pp. 16-18, 2000.
- 79) 木全卓, 大野高弘, 桑原孝雄: 廃棄発砲プラスチック破砕片混合土の力学特性, 農業土木学会論文集, Vol. 2001, No. 213, 2001.
- 80) 浅田素之, 小川恵道, 堤博恭, 浦野真次, 沢田英一, 堀内澄夫: PS灰と採石粘土を用いたリサイクル地盤材料の活用, 清水建設研究報告, No. 80, pp. 7-16, 2004.
https://www.shimztechnonews.com/tw/sit/report/vol80/pdf/80_002.pdf (参照日 2021.09.11)
- 81) 望月美登志: ペーパーラッジ灰泥土改質材の開発と実用化, 横浜国立大学博士論文, 2020. https://ynu.repo.nii.ac.jp/?action=repository_uri&item_id=10672&file_id=20&file_no=2 (参照日 2021.09.11)
- 82) 森雅人, 高橋弘, 逢坂昭治, 堀井清之, 片岡勲, 石井知征, 小谷謙二: 故紙破砕物と高分子系改良剤を用いた新しい高含水比泥土リサイクル工法の提案と繊維質固化処理土の強度特性, 資源と素材, Vol. 119, No. 4-5, pp. 155-160, 2003.
- 83) 高橋弘, 森雅人, 熊倉宏治, 大谷雅之, 石井知征: 高含水泥土の再資源化を目指した軽量繊維質固化処理土の生成に関する研究, 素材物性学雑誌, Vol. 16, No. 1, pp. 21-26, 2003.
- 84) 高橋弘: 泥土リサイクル技術ボンテラン工法.
http://www.suishinkaigi.jp/diffuse/pdf/2015g_1.pdf (参照日 2021.09.10)
- 85) 株式会社森環境研究所: ボンテラン工法>資料ダウンロード. https://mori-kankyo.co.jp/application/files/7716/0895/3123/BTcases_A3.pdf (参照日 2021.09.10)
- 86) 御手洗義夫・中村裕・大谷順: 古タイヤを粉砕したゴムチップを用いた新しい地盤材料の開発に関する研究, 応用力学論文集, Vol.9, pp.591-601, 2006.
- 87) 菊池喜昭, 永留健, 御手洗義夫: ゴムチップ混合固化処理土のせん断時の破壊メカニズム, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 45, No. 2, 2006. <https://www.pari.go.jp/search-pdf/vol045-no02-04.pdf> (参照日 2021.09.11)
- 88) 坪井龍明, 君島健之, 小出儀治: 転炉滓の水硬性, セメント技術年報, Vol. 28, pp. 98-103.
- 89) 浅賀喜与志, 柴田純夫, 平野隆, 後藤誠史, 大門正機: 転炉スラグの水和反応, セメント技術年報, Vol. 35, pp. 57-60, 1981.
- 90) 鳥居和之, 川村満紀, 柳場重正, 五十嵐心一: 粉化転炉スラグの路盤材としての利用に関する基礎的研究, 材料, Vol. 34, No. 379, pp. 17-22, 1985.
- 91) 大林沙紀, 菊池喜昭, 兵動太一, 武藤昌己, 齋藤俊介: 細粒化した製鋼スラグを混合した地盤材料の海水環境下での強度特性, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 71, No. 2, pp. 1167-1172, 2015.
- 92) Yoshikawa, T., Kikuchi, Y., Hyodo, T., Obayashi, S., Kakihara, Y., Iwai, D. and Kaneda, T.: The effect of aging treatment on the mechanical properties of steelmaking slag mixed with crushed slag, Proceedings of the 7th China-Japan Geotechnical Symposium, pp.410-415, 2018.
- 93) Yoshikawa, T., Kikuchi, Y., Hyodo, T., Kakihara, Y., Iwai, D. and Kaneda, T.: Influence of differences in fine-grained slag content on hydraulic solidification of converter steelmaking

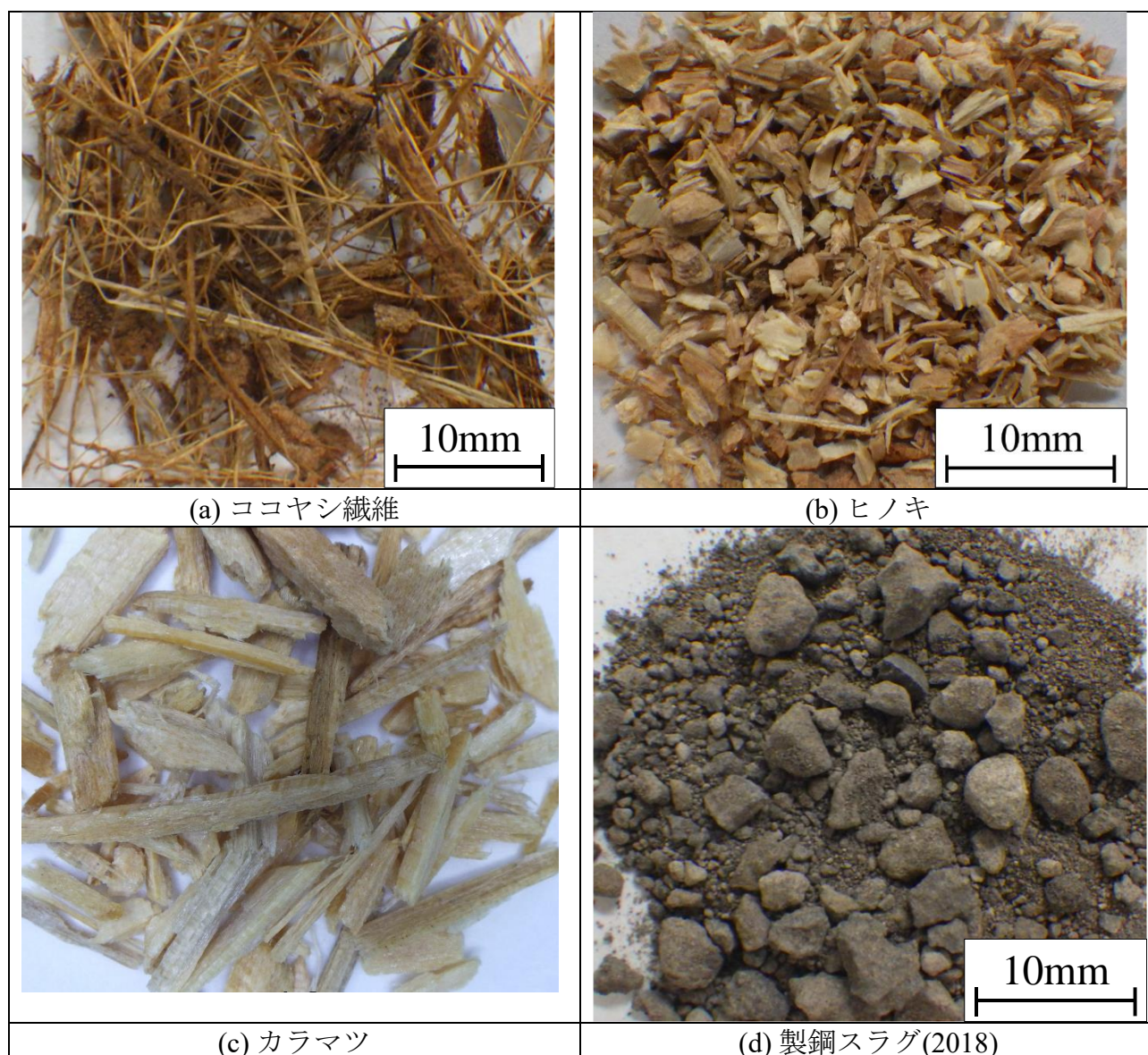
slag, 17th Global Joint Seminar on Geo-Environmental Engineering, pp.169-174, 2018.

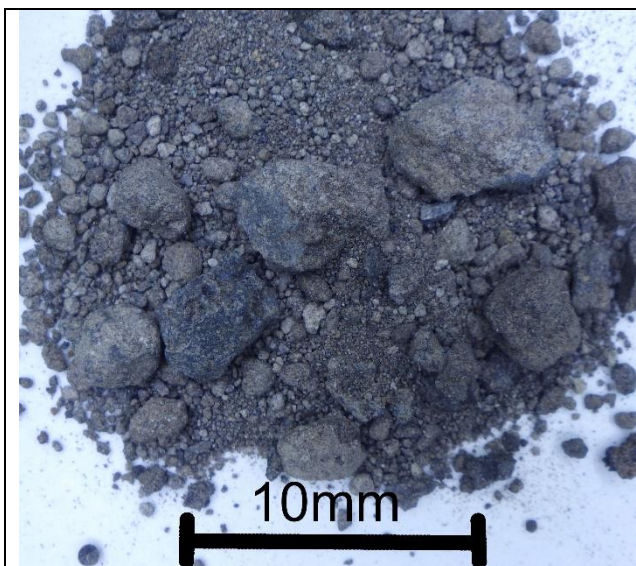
- 94) 吉川友孝, 菊池喜昭, 兵動太一, 柿原結香, 押川玲香, 押野滉大: 締固めによるスラグ微粉末を添加した転炉系製鋼スラグの水硬性への影響, 第53回地盤工学研究発表会, pp.527-528, 2018.
- 95) 吉川友孝, 菊池喜昭, 野田翔兵, 柿原結香, 押川玲香, 押野滉大: 固化系材料を混合した転炉系製鋼スラグの一軸圧縮特性, 第15回地盤工学会関東支部研究発表会, pp.298-301, 2018.

第3章 使用試料と室内土質試験概要

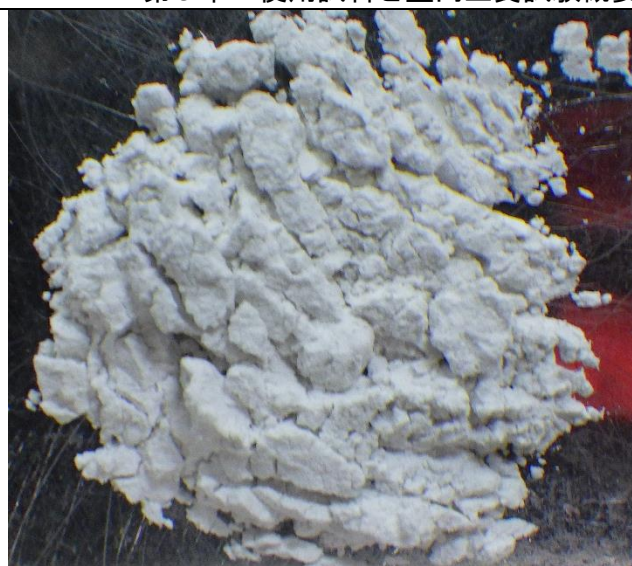
3.1 使用試料

第2章2節3項で述べたように、一般的に篩下残渣は発生する災害の種類(豪雨・地震)・発生する地域・災害廃棄物の処理方法によって、その性状は大きく異なる。植物および木の根などの繊維状の木屑や破砕粉碎された角状・粒状の木屑が含まれる篩下残渣において、本研究では極端な3つの形状の木屑(繊維状・粒状・棒状)を用いた。また、固化材には製鋼スラグ、固化系補助材には高炉スラグ微粉末を用いた。また、比較実験のために用いた化学繊維についても示す。なお、各試料の外観は図3.1-1にまとめて示す。なお、各種木屑の平均的な寸法については後述する通りであるが、図3.1-1(a)~(c)のように全体的な外観で区別しているため、細かく見ると粒状の中に棒状の木屑が存在していることや、棒状の中に粒状の木屑が存在していることが確認できる。つまり、縦横比などで定量的に区別したものではない。





(e) 製鋼スラグ(2019)



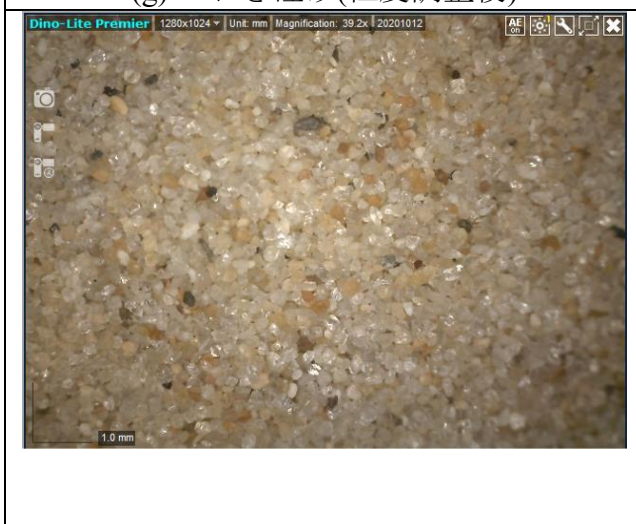
(f) 高炉スラグ微粉末



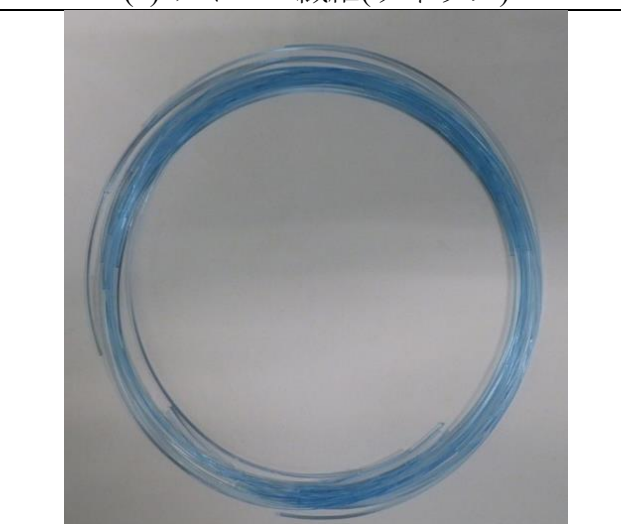
(g) いわき砂(粒度調整後)



(h) ナイロン繊維(ウィッグ)



(i) 豊浦砂



(j) ナイロン繊維(釣り糸)



図 3.1-1 各試料の外観

3.1.1 繊維状のココヤシ繊維の特徴と物性

繊維状の木屑として用いたココヤシ繊維(商品名:ココチップ 4S/たまごや商店から取り寄せ)の外観を図 3.1-1(a)に示す。任意に採取したココヤシ繊維の平均直径および平均長さ(サンプル数 105)は、直径 0.27mm、長さ 18.9mm であった。図 3.1-2 にココヤシ繊維の長さとの関係を示す。図 3.1-4 に直径の頻度分布を、図 3.1-5 に長さの頻度分布を示す。図 3.1-3 より、ココヤシ繊維の長さとの関係性は見られない。また、図 3.1-4、図 3.1-5 から、直径 0.1~0.4 mm、長さ 10~20mm のものが多い。

ココヤシ繊維はココナッツの殻を構成する食物繊維¹⁾で、主成分はリグニン、L-ガラクトース、D-キシロースなどである²⁾。インドやブラジルでは大量に産出されることから安価な天然地盤改良材として積極的に研究が行われている^{3),4)}。

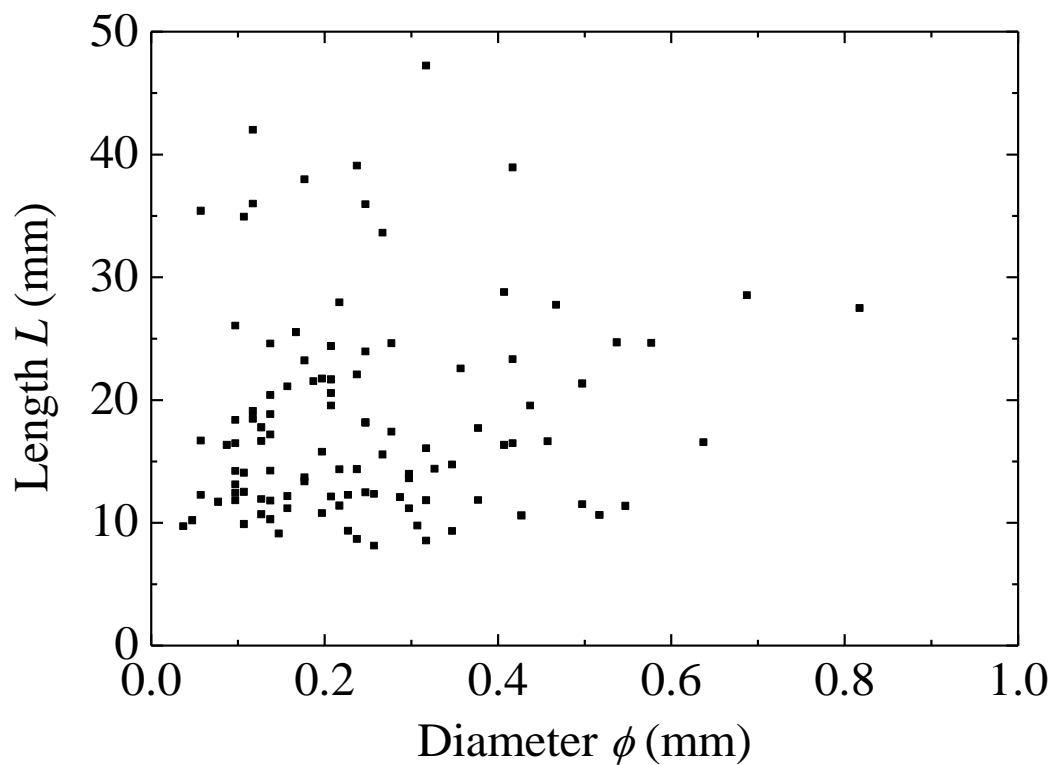


図 3.1-3 ココヤシ繊維の直径と長さの関係

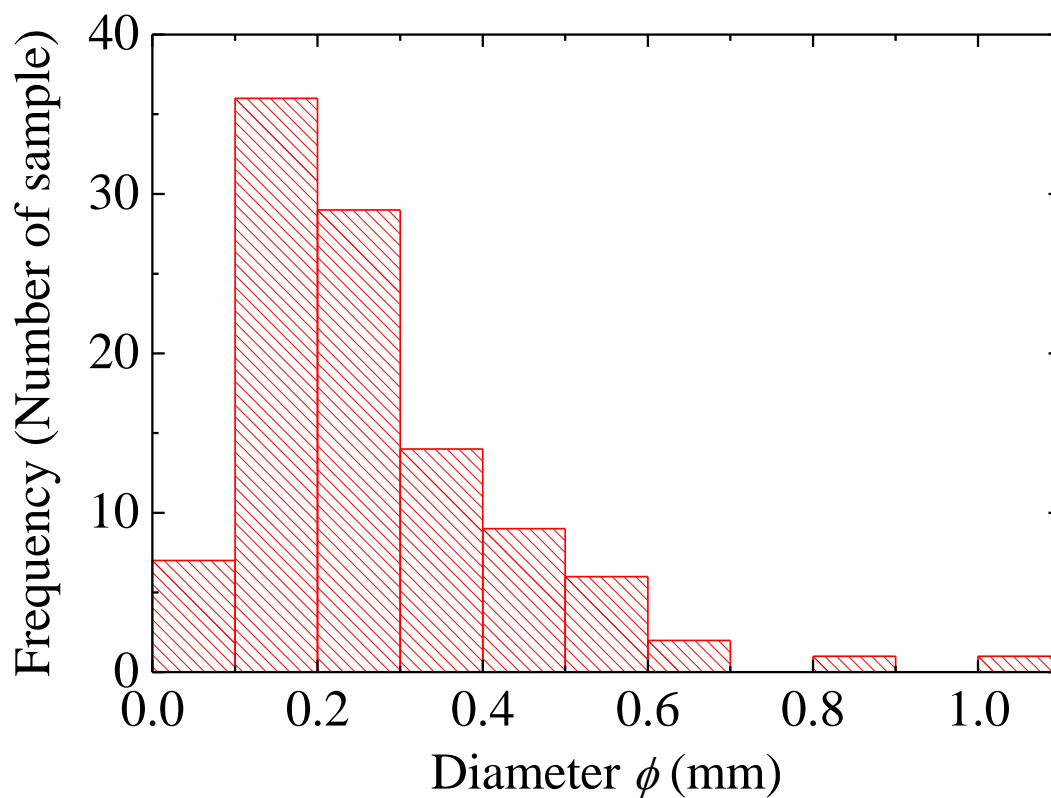


図 3.1-4 ココヤシ繊維の直径の頻度分布

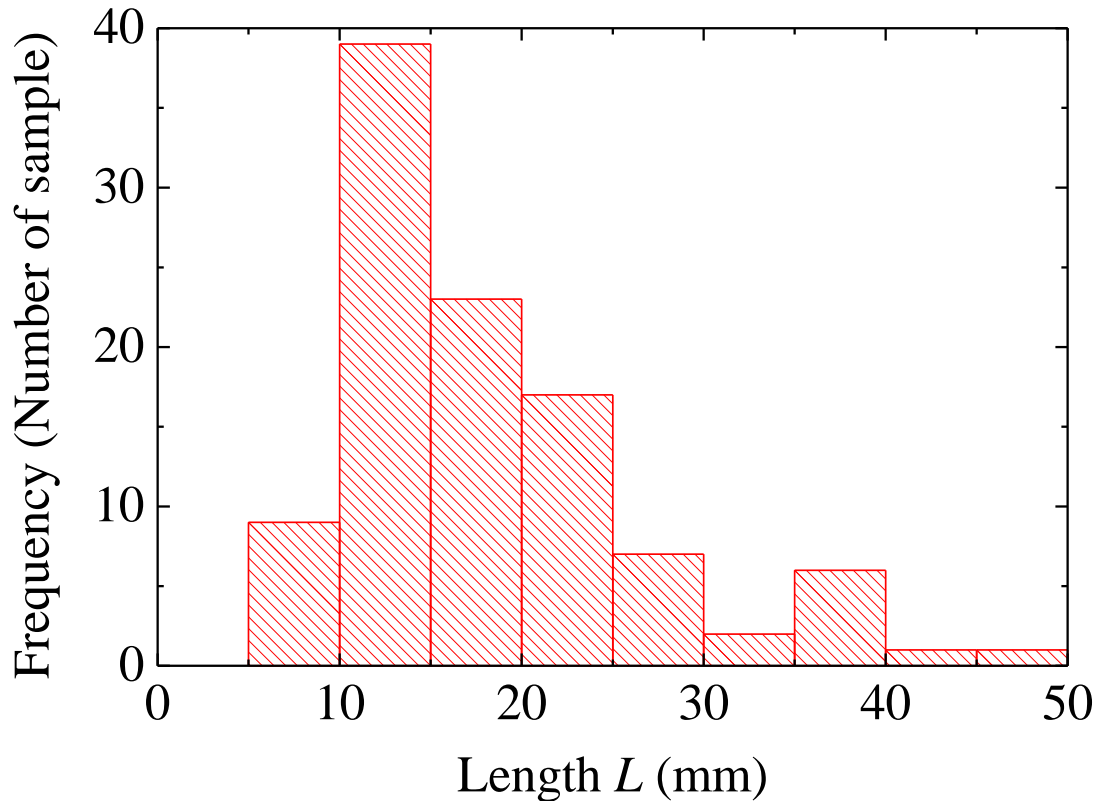


図 3.1-5 ココヤシ繊維の長さの頻度分布

次にココヤシ繊維の引張強さについて示す。引張試験(JIS Z 2241)は株式会社 IHI 検査計測計測事業部に依頼し、11本の試験片を用いて実施した。図 3.1-6 に試験装置の外観を、図 3.1-7 にココヤシ繊維固定部を示す。

試験手順および引張強さ算出までの手順を以下に示す。

- 1) 図 3.1-7 のように一本のココヤシ繊維を上下の治具で固定する。
- 2) 試験機外部に取り付けたカメラによる撮影で繊維の直径を計測する。
- 3) 5 mm/min で鉛直上方向に繊維を引張る。
- 4) 破断時の最大荷重を開始時の断面積で除すことで引張強さを算出する。

試験結果を表 3.1-1 に示す。また、直径と引張強さの関係を図 3.1-8 に、直径と引張強さの関係を図 3.1-9 に示す。図 3.1-8 からココヤシ繊維の引張力は直径と一定の正の相関があり、図 3.1-9 からココヤシ繊維の引張強さにはばらつきはあるものの、小さい場合でも 60 MPa 以上の材料である。



図 3.1-6 引張試験装置



図 3.1-7 繊維固定部

表 3.1-1 引張試験結果

引張試験(JIS Z 2241)		試験材料:ココヤシ繊維		
No.	直径 (mm)	試験温度 (°C)	最大荷重 (N)	引張強さ (MPa)
1	0.171	R.T.	5.680	248
2	0.163	R.T.	4.311	206
3	0.138	R.T.	2.595	173
4	0.162	R.T.	2.037	99
5	0.127	R.T.	2.849	225
6	0.254	R.T.	6.656	132
7	0.277	R.T.	4.051	67
8	0.192	R.T.	5.532	191
9	0.192	R.T.	5.176	179
10	0.303	R.T.	9.300	129
11	0.104	R.T.	1.092	128
試験仕様	1)試験機: 島津製作所オートグラフ(AG-X/R) 荷重容量100kN, ClassNK管理番号: T-05 TK152 2)室温: R.T.(24°C) 3)試験速度: 5mm/min			

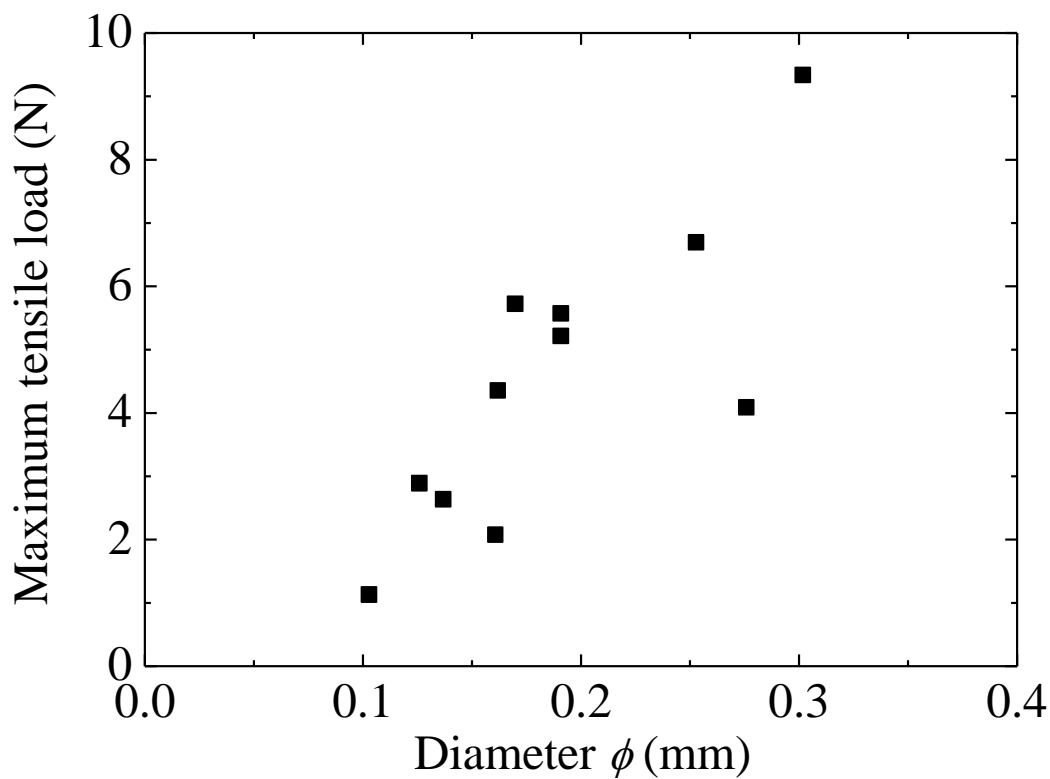


図 3.1-8 繊維直径と最大引張荷重の関係

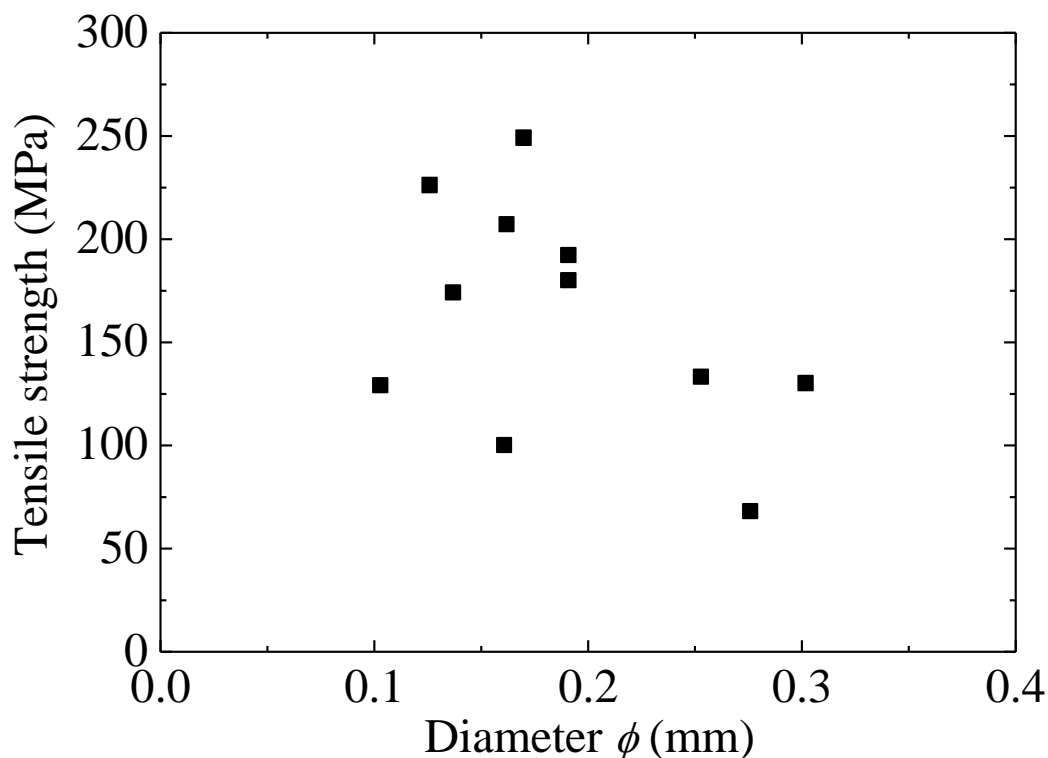


図 3.1-9 繊維直径と引張強さの関係

3.1.2 粒状のヒノキの特徴および物性

粒状の木屑として用いたヒノキ(佐久間木材株式会社から取り寄せ)の外観は図 3.1-1(b)に示した通りである。任意に採取したヒノキの平均径(サンプル数 105)は、ヒノキを直方体と仮定した場合で 1.4 mm×3.3 mm×0.7 mm であった。今回使用したヒノキは辺材を細かく粉砕したもので、心材と比べると軟らかく保水性の高い材料⁵⁾である。

3.1.3 棒状のカラマツの特徴および物性

棒状の木屑として用いたカラマツの外観は図 3.1-1(c)に示した通りである。任意に採取したカラマツの平均径(サンプル数 100)は、ヒノキを直方体と仮定した場合で 1.3 mm×11.6 mm×2.1 mm であった。カラマツは日本の針葉樹で唯一の落葉性高木で、本研究では合板や単板積層体として用いられるカラマツを粉砕して棒状にしたものを使用した。

3.1.4 ココヤシ繊維・ヒノキ・カラマツの粒子密度

表 3.1-2 にココヤシ繊維とヒノキとカラマツの気乾密度と真密度を示す。土粒子密度試験(JIS A 1202:2020)に基づき、密度試験を実施した。この試験により求まる値は木材そのものの密度、すなわち細胞壁の密度(以下、真密度)である。この真密度は、樹種によらず一定であるため、表 3.1-2 に示すようにココヤシ繊維、ヒノキ、カラマツでほとんど変わらない値を示す。しかし、この真密度は、木材中の細胞壁の割合や水質量等を考慮してい

ない。また、実験では木屑中の細胞空隙内にスラグ粒子が入り込むことは想定しにくく、見かけの密度による管理をすることの方が体積管理をする上での正当性が高いと判断できる。その為、木材の自然乾燥状態での密度である気乾状態の密度を用いた。気乾密度の値は、「(一般財団法人)日本木材総合情報センターの木材の種類と特性^{6),7)}」より引用した。

表 3.1-2 ココヤシ繊維とヒノキの密度^{6),7)} (気乾密度は文献^{6), 7)}より引用)

		ココヤシ繊維	ヒノキ	カラマツ
本研究で使用した密度	気乾密度 ρ_s (Mg/m ³)	0.53	0.41	0.53
密度試験によって算出した密度	真密度 ρ_s (Mg/m ³)	1.53	1.50	1.50

3.1.5 製鋼スラグの特徴と物性値

本研究では、JFE スチール株式会社より提供いただいたエージング処理を行っていない粒径 4.75mm 以下に調整された転炉系製鋼スラグ(以下、製鋼スラグ)を2種類用いた。この2種類の製鋼スラグは 2018 年度(以下、製鋼スラグ(2018))と 2019 年度(以下、製鋼スラグ(2019))に取り寄せたものであり、異なる製造ラインである。

製鋼スラグ(2018)の外観と製鋼スラグ(2019)の外観は図 3.1-1(d),(e)に示した通りである。図 3.1-10 に製鋼スラグ(2018)と製鋼スラグ(2019)の粒度試験結果を示す。図 3.1-10 より、2種のスラグで 0.045~0.425 mm の範囲に大きな違いが見られる。表 3.1-3 に物性値を示す。表 3.1-3 より、本研究で使用した製鋼スラグも一般的な地盤材料と比べ粒子密度が高く、2種類の製鋼スラグで細粒分含有率も大きく異なる。また、均等係数 U_c が 10 以上、曲率係数 U_c' が 1 以下であり、粒度分布の良否を数量的に判断する基準の「 $U_c \geq 10$ かつ $U_c' < 1$ 」は満足していないものの、最大粒径が 4.75mm と比較的小さいことを踏まえると粒度分布として悪くはないと判断できる。

ここで製鋼スラグの粒度試験を実施するにあたり、注意すべき点を挙げる。土の粒度試験(JIS A 1204:2020)では分散剤にヘキサメタリン酸ナトリウムを用いることとしており、代用としてピロリン酸ナトリウム、トリポリリン酸ナトリウムなどを用いても良いとしている。本研究において、ヘキサメタリン酸ナトリウムとピロリン酸ナトリウムを分散剤として用いて粒度試験を実施したところ、いずれの分散剤を用いた場合でも試験中に水溶液に白色の浮遊物が生じた。これは製鋼スラグ中のカルシウムとりん酸が反応し、リン酸カルシウムを生成したためであると考えられるが、試験開始から 1 時間程度で発生していることから試験結果に影響を与える可能性がある。そこで分散剤質量パーセント濃度の違いと製鋼スラグのエージング処理の有無が白色物質の発生に与える影響を検討した。検討方法はヘキサメタリン酸ナトリウムとピロリン酸ナトリウムの濃度(0, 0.01, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.50, 1.00%)を変えて、適当な時間(0, 2.0, 3.5, 5.0, 24.0 時間)で白色物質の有無を

確認した。なお、JIS A 1204:2020 では沈降分析中の分散剤質量パーセント濃度は 1%である。

図 3.1-11 と図 3.1-12 に各濃度のヘキサメタリン酸ナトリウム溶液にエージング処理ありの製鋼スラグとエージング処理なしの製鋼スラグのそれぞれを投入した 5 時間後の様子を、図 3.1-13 と図 3.1-14 に各濃度のピロりん酸ナトリウム溶液にエージング処理ありの製鋼スラグ(細粒分含有率とエージング処理なしの製鋼スラグのそれぞれを投入した 5 時間後の様子を示す。なお、この検討で用いた製鋼スラグは 2017 年度に手に入れた製鋼スラグであるため、本研究で用いた製鋼スラグ(2018)や製鋼スラグ(2019)とは異なるものである。図 3.1-11～図 3.1-14 より、分散剤の種類・濃度および製鋼スラグのエージング処理の有無によって白色物質の発生量は異なり、相当に薄い濃度(0.01%)でも白色物質が生じる可能性があることが分かる。また、分散剤の種類が異なると白色物質が生じ始める時間も異なる。なお、いずれの分散剤を用いた場合にもエージング処理ありでは全体的に溶液が濁って見えるがこれは細粒分含有率が異なるためである。

以上、本検討から白色物質の生じない分散剤濃度を評価し、その分散剤濃度で粒度試験を改めてすることを想定していたが、本検討の結果から分散剤の種類および濃度と白色物質の生成に関係性が見出せなかったため、本研究では分散剤を使用せずに製鋼スラグの粒度試験を行うこととした。ただし、分散剤を用いる場合の誤差と分散剤を用いない場合の誤差については検討していない為、どちらが真の粒度を評価できるかはさらなる検討が必要である。なお、これ以外は JIS A 1204:2020 に準拠して粒径加積曲線を求めた。

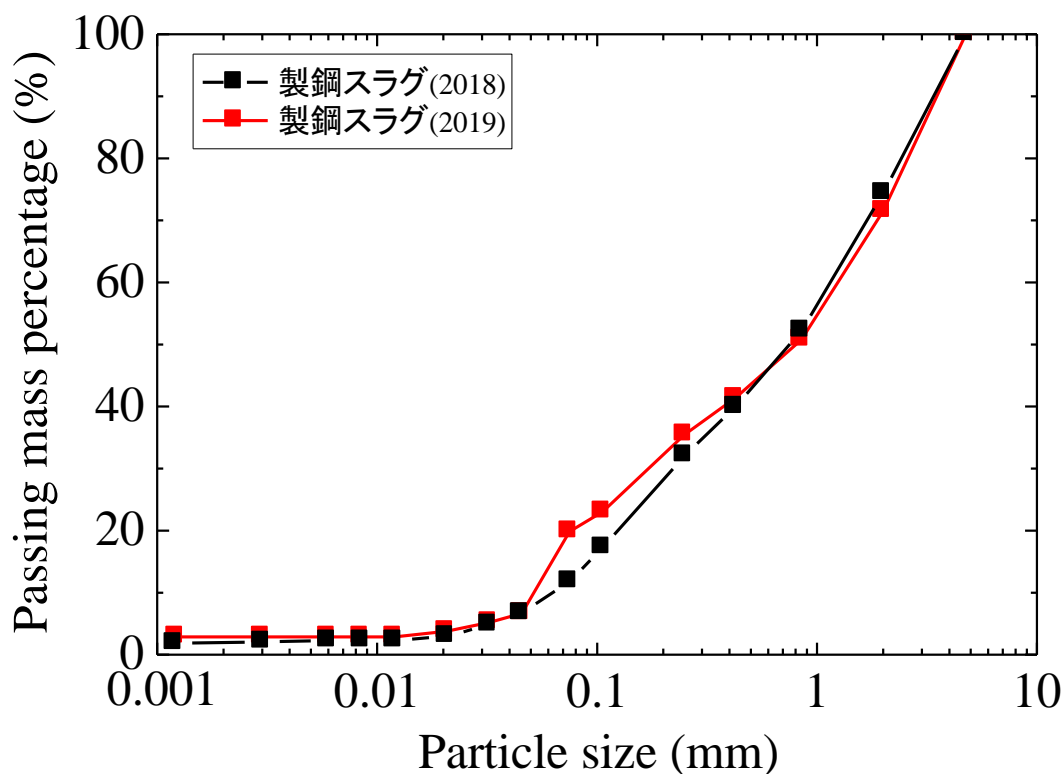


図 3.1-10 製鋼スラグ(2018, 2019)の粒径加積曲線



0%



0.01%



0.05%



0.10%



0.15%



0.20%



0.25%



0.50%



1.00%

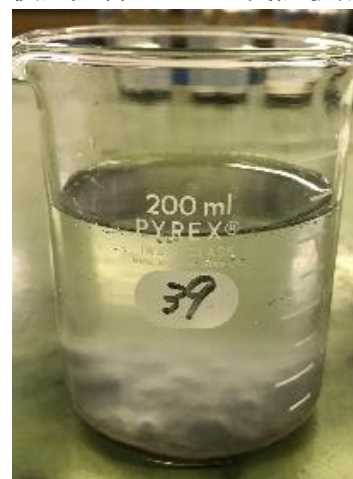
図 3.1-11 ヘキサメタリン酸ナトリウム溶液にエージング処理ありの製鋼スラグを投入してから5時間後の様子



0%



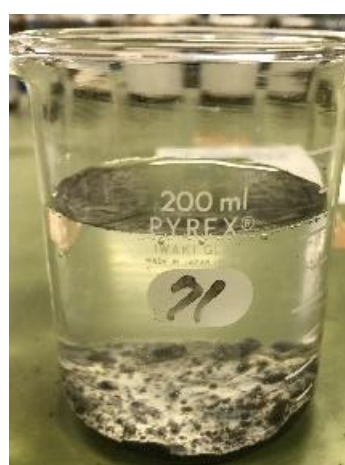
0.01%



0.05%



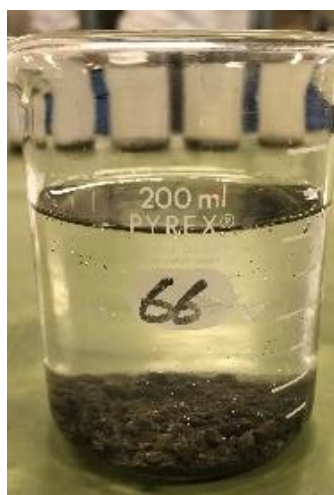
0.10%



0.15%



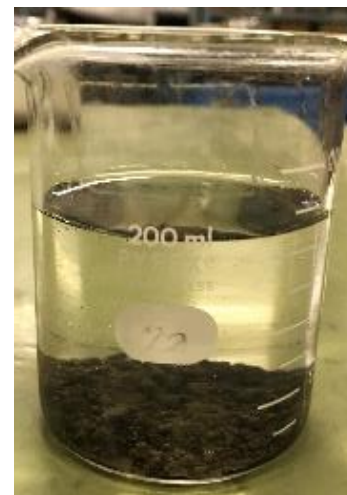
0.20%



0.25%



0.50%

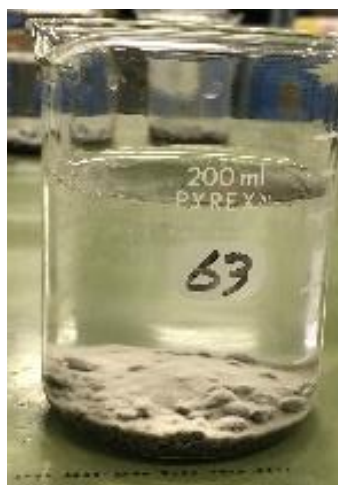


1.00%

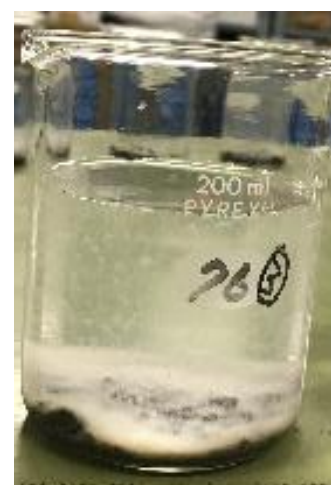
図 3.1-12 ヘキサメタリン酸ナトリウム溶液にエージング処理なしの製鋼スラグを投入してから5時間後の様子



0%



0.01%



0.05%



0.10%



0.15%



0.20%



0.25%



0.50%



1.00%

図 3.1-13 ピロリン酸ナトリウム溶液にエージング処理ありの製鋼スラグを投入してから5時間後の様子



0%



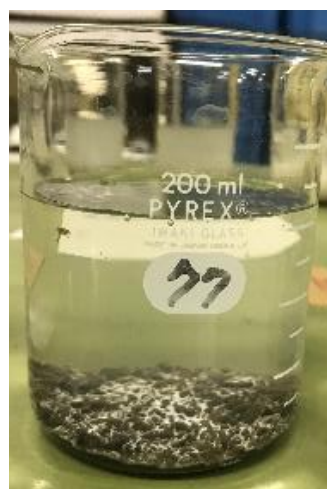
0.01%



0.05%



0.10%



0.15%



0.20%



0.25%



0.50%



1.00%

図 3.1-14 ピロリン酸ナトリウム溶液にエージング処理なしの製鋼スラグを投入してから5時間後の様子

表 3.1-3 製鋼スラグ(2018, 2019)の物性値

	土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³)	最大粒径 D_{max} (mm)	平均粒径 D_{50} (mm)	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'	細粒分含有率 F_c (%)
製鋼スラグ (2018)	3.42	4.75	0.75	18.5	0.68	11.8
製鋼スラグ (2019)	3.35	4.75	0.80	24.1	0.46	19.8

3.1.6 高炉スラグ微粉末の特徴と物性

第2章5節で述べたように本研究では製鋼スラグの固化反応を促進し、安定した固化発現を確保することを目的に固化系補助材として高炉スラグ微粉末を用いた。高炉スラグ微粉末(エスメント 4000 石膏添加品/エスメント関東株式会社より提供)の外観は図 3.1-1(f)に示した通りである。高炉スラグ微粉末は比表面積 4370 cm²/g, 粒子密度 2.89 Mg/m³ の粉体である。

3.1.7 いわき硅砂の特徴と物性

第4章3節や第5節1節において、母材強度の違いが木屑混じり混合材料の力学特性に与える影響を検討するため、いわき硅砂を用いた(詳細は後述)。0号から7号のいわき硅砂(瑞穂礦業株式会社)を用いて、ふるい目 4.75mm, 3mm, 2mm, 0.85mm, 0.425mm, 0.250mm, 0.106mm, 0.075mm でふるい分けを行い、製鋼スラグ(2018)と同等の粒度となるように調整した。0.075mm 以下は、7号を振るうことで得た。製鋼スラグ(2018)と同等の粒度としたのは、製鋼スラグ(2018)を用いた試験結果との比較を行うためである。いわき硅砂の外観は図 3.1-1(g)に示した通りである。外観から分かるようにいわき硅砂は製鋼スラグと同様に、稜角を帯びた材料である。製鋼スラグ(2018)と同等の粒度に調整したいわき硅砂を用いて、確認のために行った粒度試験(JIS A 1204:2020)の結果を図 3.1-14 に示す。図中には比較のために製鋼スラグ(2018)の結果も示す。図 3.1-14 より、2つの粒径加積曲線は一見してほとんど一致している。また、表 3.1-4 にいわき硅砂の物性値を示す。物性値についても比較のため製鋼スラグ(2018)の結果も示す。表 3.1-4 より、粒度分布は定量的にもほとんど一致しており、いわき硅砂を粒度調整した試料の粒度分布は製鋼スラグ(2018)の粒度分布を高く再現できている。

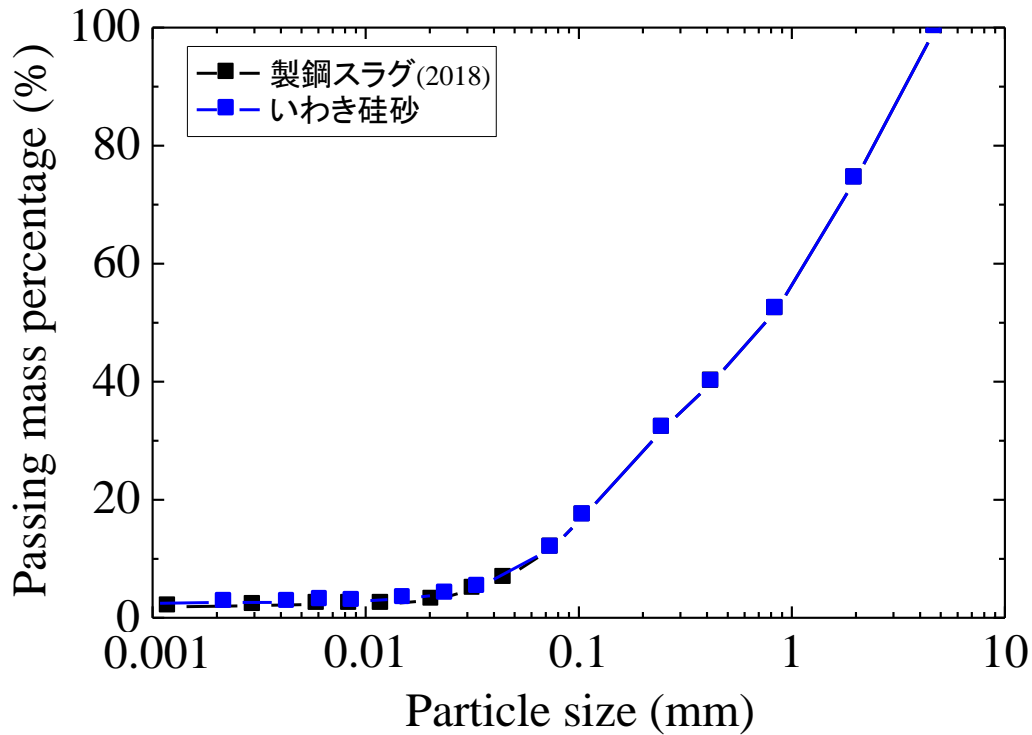


図 3.1-14 いわき硅砂と製鋼スラグ(2018)の粒径加積曲線

表 3.1-4 いわき硅砂の物性値(製鋼スラグ(2018)比較)

	土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³)	最大粒径 D_{max} (mm)	平均粒径 D_{50} (mm)	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'	細粒分含有率 F_c (%)
いわき硅砂	2.67	4.75	0.75	18.9	0.69	11.8
製鋼スラグ (2018)	3.42	4.75	0.75	18.5	0.68	11.8

3.1.8 化学繊維の特徴と物性

第5章1節において、ココヤシ繊維混じりスラグ固化材料の力学特性(特に延性・靱性発現)に与える繊維長の影響を検討するために、ナイロン繊維(ウィッグ/市販, $\rho = 1.14 \text{ Mg/m}^3$, 直径 $70 \mu\text{m}$)を用いた。ナイロン繊維の外観は図 3.1-1(h)に示す通りである。ナイロン繊維は摩擦や静電気によって混合材料中で分散しにくい性質を有する材料である。本研究ではこのナイロン繊維を 5, 10, 20, 30 mm に裁断して使用した。

3.1.9 その他の試料・材料の特徴および物性値

第4章6節の検討においては、他の検討と用いる材料が大きく異なる。詳細については第4章6節で述べるが、この検討では繊維状の木屑が混合材料の強度増加および靱性発現に及ぼす影響を検討するために、本項に示す豊浦砂とナイロン繊維(クインスター20号/SUNLINE 株式会社)と半水石膏(歯科用硬質半水石膏/吉野石膏販売株式会社)を代替材料として用いた。それぞれの外観を図3.1-1(i), (j), (k)に示す。豊浦砂($\rho_s = 2.65 \text{ Mg/m}^3$)の粒径加積曲線を図3.1-15に示す。ナイロン繊維は直径0.74 mmの釣り糸用として市販されているものを用いた。

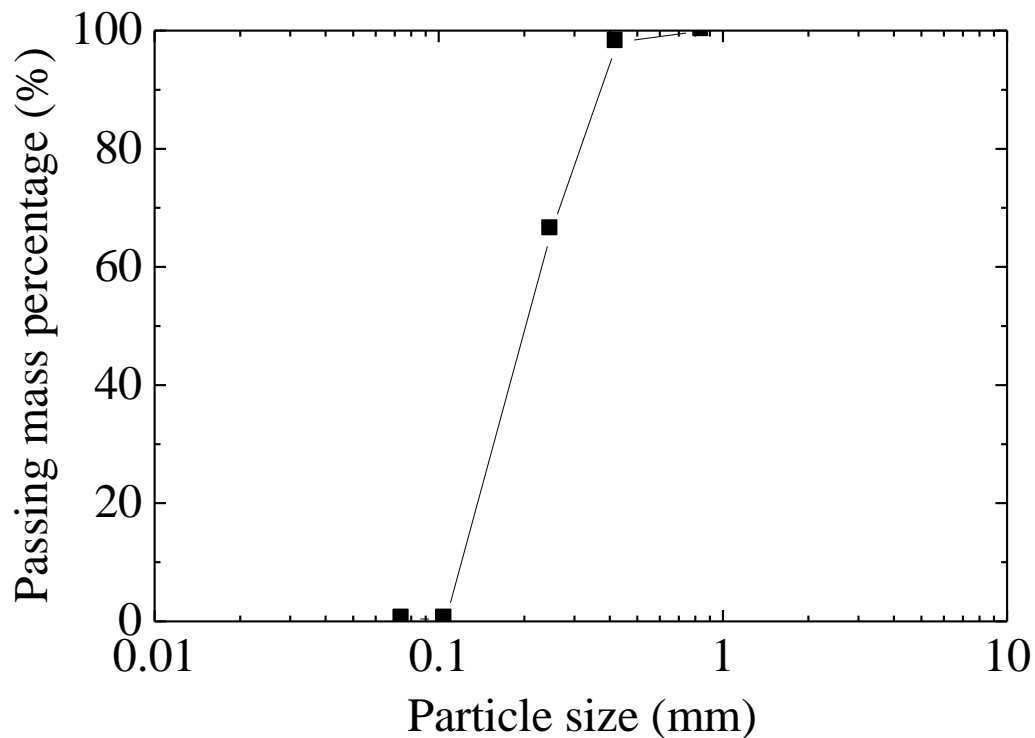


図 3.1-15 豊浦砂の粒径加積曲線

3.2 締固め曲線

第3章1節で示した各試料を用いて実施した締固め試験の結果を示す。締固め試験はJIS粒度調整したいわき硅砂は試料が限られていたために試料をA-a法で行った。また、A-a法で実施した試料は上下3点の部分試料採取による含水比計測を行い、A-b法で行った試料の含水比は全量計測で求めた。この締固め試験の結果を基に、供試体の目標乾燥密度と目標含水比を決定した。

また、JIS A 1210:2020では最適含水比を挟んで6~8種類の含水比で試験を実施することとしている。しかし、本研究で用いた製鋼スラグの粒度分布とほとんど同等の粒度分布の製鋼スラグを用いて締固め試験を実施した既往の研究^{8), 9), 10)}により、含水比を変えても乾燥密度がほとんど変化しないことが分かっており、製鋼スラグの量も限られていたことから、1, 2点しか試験を実施していない。

ここで第2章5節3項に示した通り、本研究では製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を質量比96対4で混合した場合に、7日養生の一軸圧縮強さが1000 kPa程度を満足した。その為、製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を質量比96対4で混合した材料(以下、スラグ4)を基本的な固化材料として実験を行った。また、一部比較のために、製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を質量比96対15で混合した材料(以下、スラグ15)も用いた。さらに製鋼スラグは製鋼スラグ(2018)と製鋼スラグ(2019)の2種類用いていることから、例えば、製鋼スラグ(2018)と高炉スラグ微粉末を質量比96対4で混合した場合にはスラグ4(2018)と称する。

図3.2-1にスラグ4(2018)と木屑を混合した材料の締固め試験結果(A-b法)を、図3.2-2にスラグ4(2019)と木屑を混合した材料の締固め試験結果(A-b法)を、図3.2-3にいわき硅砂と木屑を混合した材料の締固め試験結果(A-a法)を示す。製鋼スラグを用いた場合は、製鋼スラグ:高炉スラグ微粉末=96:4の質量比は一定とし、ココヤシ繊維やヒノキ、カラマツを混合して締固め試験を実施した。また、いわき硅砂を用いた場合は、高炉スラグ微粉末は混合せず、ココヤシ繊維とヒノキを混合して締固め試験を実施した。図3.2-1と図3.2-2にはスラグ4と木屑の体積比を、図3.2-1にはいわき硅砂と木屑の体積比を凡例に示している。これらの結果を利用して、目標乾燥密度及び目標含水比を設定し、供試体を作製した。詳細は第3章3節に記す。

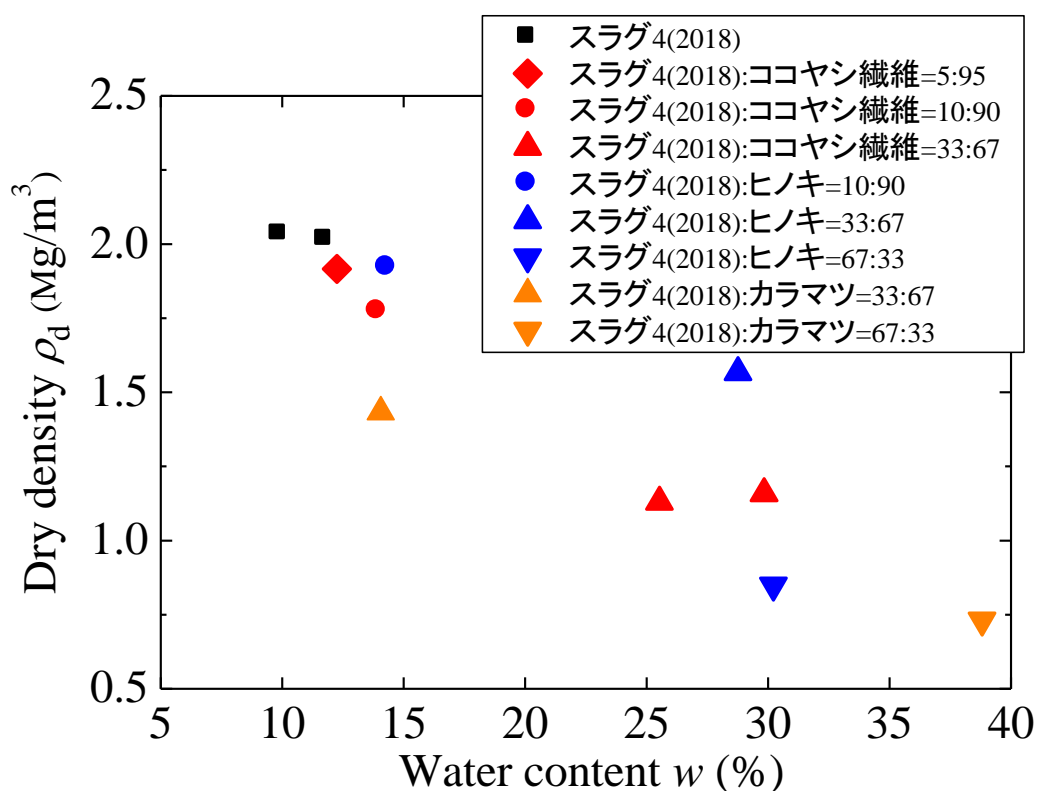


図 3.2-1 スラグ 4(2018)と木屑を混合した材料の締固め曲線(A-b 法)

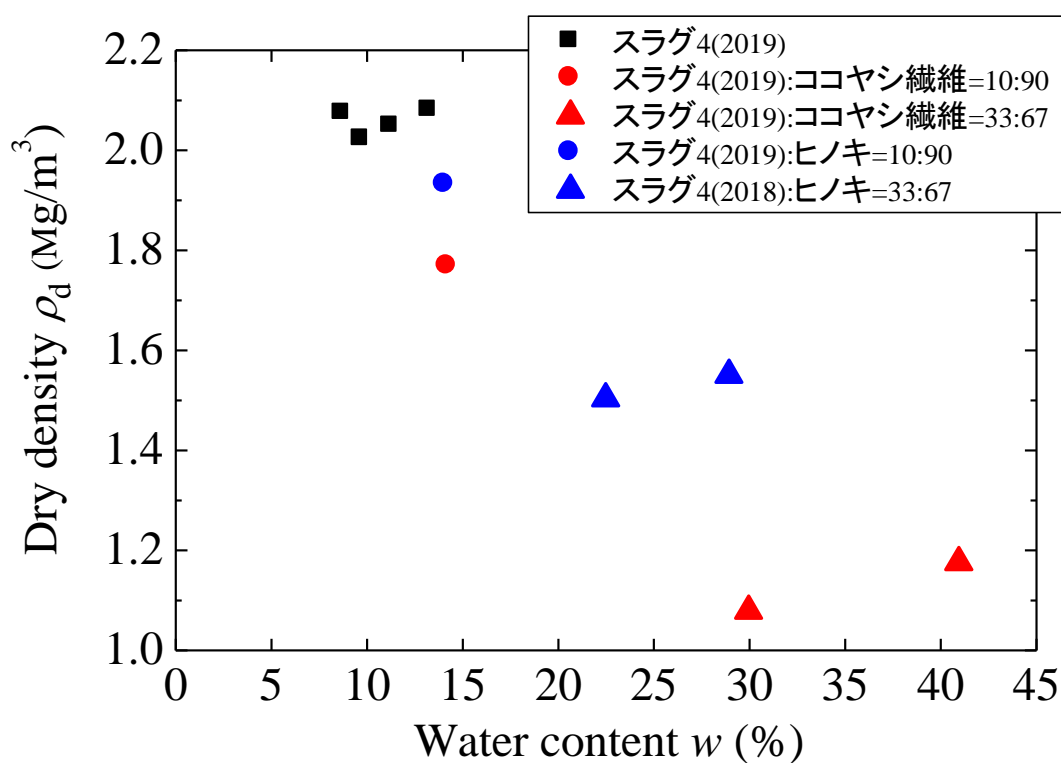


図 3.2-2 スラグ 4(2019)と木屑を混合した材料の締固め曲線(A-b 法)

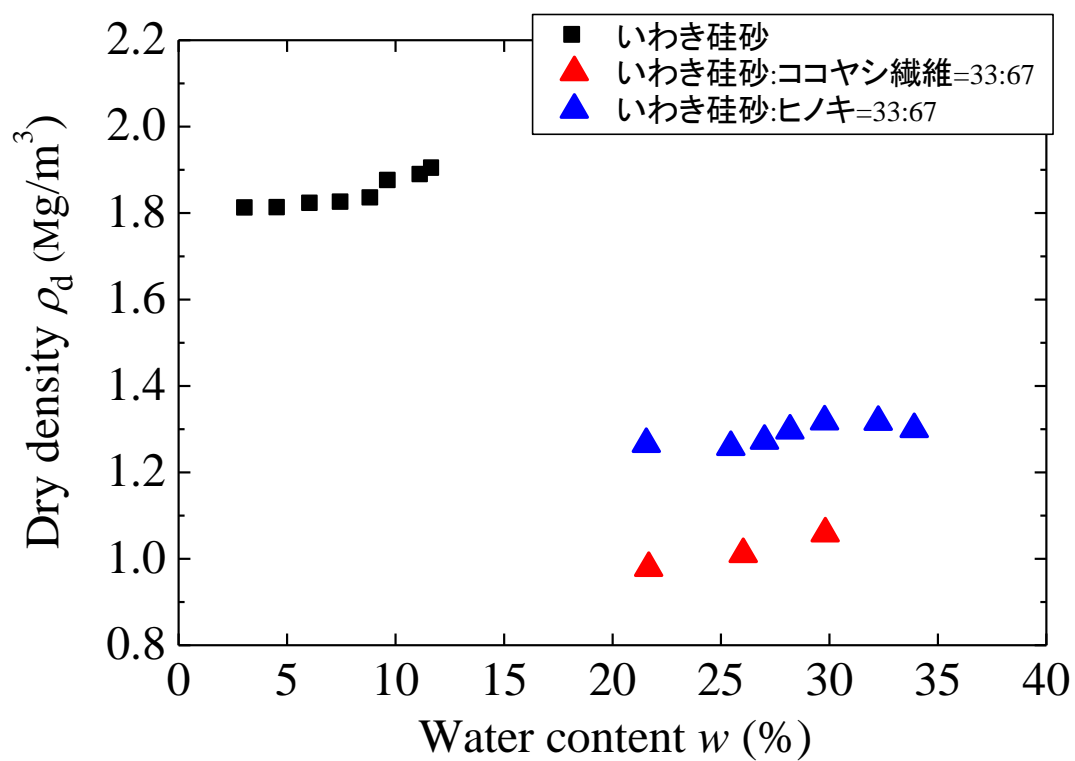


図 3.2-3 いわき硅砂と木屑を混合した材料の締固め曲線(A-a 法)

3.3 供試体作製方法

供試体は基本的に湿潤状態で5層突固め法によって作製した。また、第4章7節2項では別の方法で供試体を作製したが、それについては第4章7節2項で述べる。

以下に突固め法による供試体作製の手順を示す。(1)~(4)まで試料の準備、(5)以降で試料投入。なおいずれの場合も間隙水にはイオン交換水を用いている。これは、スラグの水和反応に期待して供試体を作製するため、水道水や蒸留水に含まれる余計なイオンを取り除きたかったためである。

- (1) 所定の乾燥密度と含水比なるように、一層分の試料およびイオン交換水を図り取る。
なお、目標乾燥密度や目標含水比は混合する試料によって異なるため、各章、各節で別途説明する。
- (2) 高炉スラグ微粉末を添加する場合はそれ以外の試料をボウルに入れ十分攪拌する。
- (3) 所定の量のイオン交換水を加え、さらに十分攪拌する。
- (4) 高炉スラグ微粉末を添加する場合は、この段階で高炉スラグ微粉末を混合し、十分攪拌する。
- (5) 直径 50 mm、高さ 100 mm のプラスチックモールド(HitOne/テスコ株式会社)に試料を投入し、鉄製の T 型ランマーで突き固める。2層目以降は高さ 20 mm の塩ビ管をガイドとして装着することで、供試体の高さ管理が容易に行える仕組みとなっている。突固め器具とモールドの外観を図 3.3-1 に、突固め時の供試体内部のイメージを図 3.3-2 に示す。これを突き固め、モールドとランマー隙間を完全になくすことで、容易かつ安定的に一層当たりの高さを 20 mm に調整することができ、所定の密度を確保できる。
- (6) 以上のようにして作製した供試体は、上面をラップで7重に覆い、恒温(20℃)・恒湿(55~60%)の部屋で所定の期間、大気養生した。



(a)モールド



(b)ランマー



(c)ガイド

図 3.3-1 供試体作製に使用した(a)モールド、(b)ランマー、(c)ガイドの外観

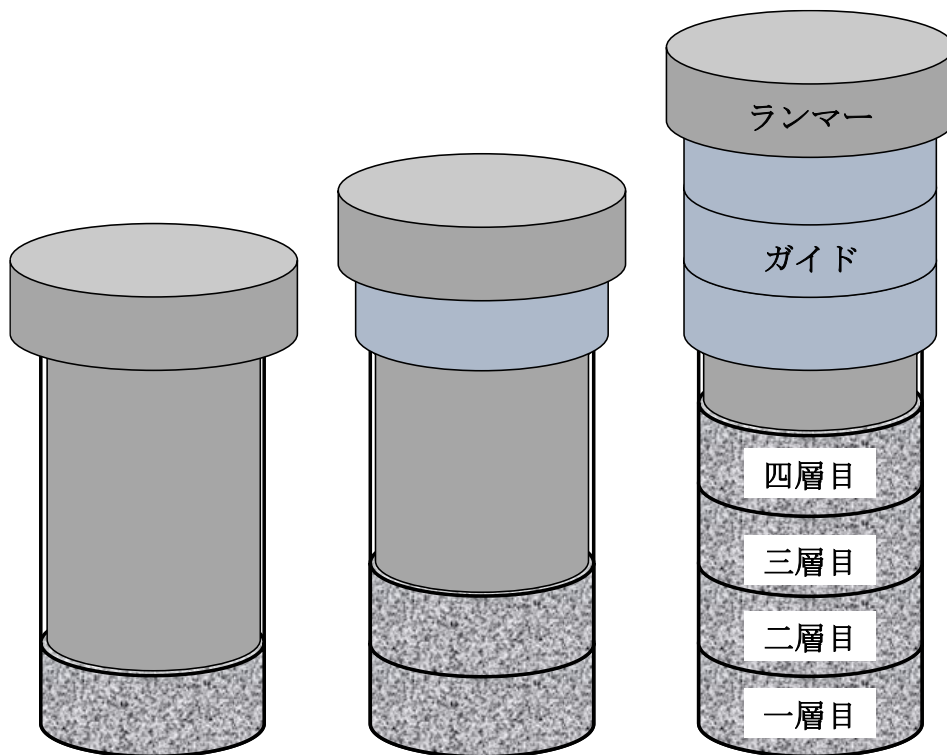


図 3.3-2 供試体作製時の突き固めイメージ

3.4 一軸圧縮試験概要

改良土の圧縮・せん断強度を計測する手段として、一軸圧縮試験は多く用いられる試験法である。改良土の一軸圧縮試験では、セメント系固化材等を添加して固化させた土の一軸圧縮強さを求めるもので、地盤改良工事の品質管理における検査指標として用いられる。道路・港湾・建築などの各分野における基準・指針ではセメント系改良土の配合試験方法として、一軸圧縮試験や CBR 試験，コーン指数試験，三軸圧縮試験等を挙げている(表 3.4-1)¹¹⁾。分野ごとに細かく見ると、用途(路床・路盤・液状化対策・盛土材)によって試験法は異なるものの、一軸圧縮試験はいずれの分野でも実施されている試験方法である。

これは一軸圧縮試験が三軸圧縮試験より手間も時間も要さないという点だけでなく、古くからの知見・データが豊富である多いためであると考えられる。一軸圧縮強さから CBR 値，コーン指数，非排水せん断強さを算出できるよう研究^(例えば 12)~16)も進められ，多くの換算式が存在していることも利点である。

このように改良土に関しては、地盤材料としての力学特性の把握に一軸圧縮試験を用いることは一般的である。本研究で対象とする木屑混じりスラグ材料の力学特性について、様々なパラメータを変化させる必要があり，試験数を多くする必要があった。そのため本研究では三軸圧縮試験と並行して一軸圧縮試験を行った。

表 3.4-1 各分野における配合試験の規定¹¹⁾(文献 11)より一部抜粋)

	基準	使用箇所	試験方法
道路	舗装試験法便覧 (日本道路協会)	路床	CBR試験
		路盤	一軸圧縮試験
	日本道路公団試験方法 (日本道路公団)	下層路体	コーン指数試験
		路床および上部路体	CBR試験
		下層路盤	CBR試験
上層路盤	一軸圧縮試験		
港湾	港湾施設の技術上の 基準・同解説 (日本港湾協会)	土圧低減，液状化防止の ための事前混合処理	土圧軽減：三軸CD試験 液状化：一軸圧縮試験
	埋立地の液状化対策 ハンドブック (沿岸開発技術研究センター)	液状化防止のための事前 混合処理工法	一軸圧縮試験 三軸CD試験
建築	建築物のための改良地盤設計 及び品質管理指針 (日本建築センター)	深層混合処理 浅層混合処理	一軸圧縮試験
鉄道	鉄道構造物等設計標準・ 同解説土構造物 (鉄道各社)	路床	一軸圧縮試験
発生土	発生土利用促進のための 改良工法マニュアル (財)土木研究センター)	埋め立て	締固めを行う場合：コーン指数試験 締固めを行わない場合：コーン指数試験 または一軸圧縮試験
		公園緑地造成	
		宅地造成	
		一般堤防	
		高規格堤防	
		道路路体用盛土	
		土木構造物の裏込め	
		道路(路床)盛土	
構造物の埋め戻し			

3.4.1 ひずみ制御式一軸圧縮試験装置

本研究の一軸圧縮試験は全てひずみ制御式一軸圧縮試験装置を用いて行った一軸圧縮試験装置の外観を図 3.4-1 に示す。装置は LC, LVDT, LOAD CONTROL SYSTEM, 手動の昇降機, データロガー, 器具及びデータの読み取りや蓄積などの記録装置の PC で構成されている。データロガーがあることにより, 一度キャリブレーションを行うと次回の使用からデータロガーに記録した校正係数を読み込んで試験を行うことができるため, 毎度のキャリブレーションの手間がなくなる。

鉛直荷重装置は, 電磁クラッチ及び AC サーボモーターからなる。ひずみ速度は AC サーボモーターの回転数の調整により軸方向の制御を簡単に行う事ができ, ひずみ速度を一定に保つ事ができる。

鉛直荷重はロードセルおよび動ひずみアンプによって計測する。本試験で使用したロードセルの容量は 2tf である。計測原理は, 荷重の変化に伴うロードセルのひずみゲージの抵抗値の変化を計測し, アンプから A/D ボードを介して PC に出力される荷重へと変化する。ロードセルはホイートストンブリッジ回路が組みられ, 高い精度での計測が可能であるが, 供試体に直接かかる荷重だけでなく, 載荷軸と軸受けとの摩擦による余分な荷重を計測してしまう。それを避けるために, 軸受け下部に設置し, 供試体にかかる荷重のみを計測する事で, 正確な軸荷重を計測する事が可能になる。

軸方向変位は, 外部変位計 LVDT (Linear Variable Differential Transformer) を用いて計測した。試験機に電磁石を用いて設置し, 載荷軸から垂直に取りつけたアルミ板との距離を計測することで軸方向変位を測った。

データロガーには, KYOWA 製ネットワークターミナルボックス NTB-500A を用いた。本データロガーはコンピュータに接続して記録したデータを転送することができる

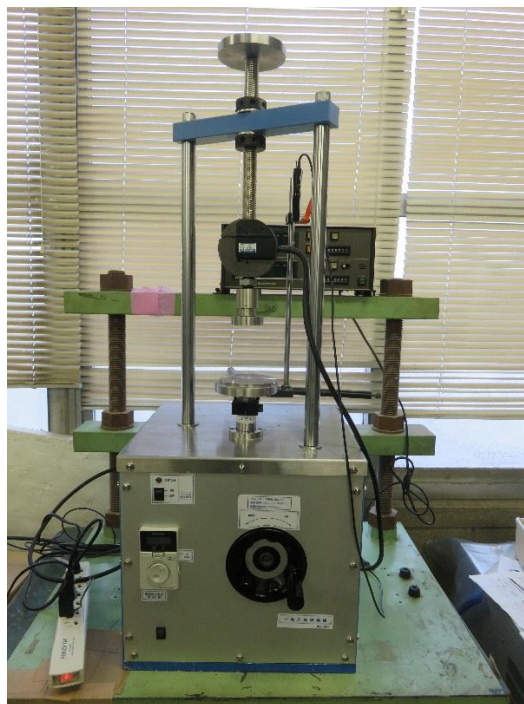


図 3.4-1 一軸圧縮試験装置の全体

3.4.2 一軸圧縮試験手順

- (1) 供試体を所定の期間養生後，恒温室(20°C)より取り出し，重量を測定する。
- (2) モールドから供試体を取り出す際，モールド付属の取り外し機をハンマーで叩くと，図 3.4-2 のように端面がかけることがある．静的に供試体を取り出すために図 3.4-3 のような供試体押し抜き機を使用する。
- (3) 脱型した供試体の重量および供試体の体積を計測(直径，高さを3点ずつ計測)する。
- (4) 一軸圧縮試験機に供試体の中心と試験機の載荷軸が一致するように設置し，LVDT を設置する。
- (5) 軸ひずみ速度 1%/min で載荷を開始する。
- (6) 試験の終了は圧縮力が最大時の 2/3 より小さくなった場合，または軸ひずみが 15%に達した場合を基本とする．繊維状の木屑を多量に用いた条件の一部では，可能な限り長く試験を実施する．これは基準には示されていないが，材料特性を把握するために実施した。
- (7) 試験終了後に炉乾燥質量を計測し，含水比を計測する。



図 3.4-2 動的な取り出しによる端面の欠損



図 3.4-3 静的な押し抜き

3.5 三軸圧縮試験概要

3.5.1 ひずみ制御式三軸圧縮試験装置

本研究では、電磁クラッチ式軸荷重載荷装置と AC サーボモーターから構成される三軸試験機を用いた。電磁クラッチ式軸荷重載荷装置を用いることで滑らかな(遊びによる時間的遅れのない)載荷方向の反転が可能となり、AC サーボモーターを用いることで3000倍までの軸ひずみ速度の変化が任意の変化率で可能である。また、この軸荷重載荷装置は最大 5 tonf まで載荷することができる。載荷装置のコントロールボックスは D/A 変換機を介してパーソナルコンピュータに接続されているため、載荷装置の自動制御が可能である。図 3.5-1 に電磁クラッチ式軸荷重載荷装置の詳細図¹⁷⁾を示す。試験中、AC サーボモーターは常に一定方向に回転し、反転することはない。モーターの回転は複数のギヤによって減速され、平歯車を経て、かさ歯車 A・B に伝達される。かさ歯車 A・B は回転速度が等しく、軸対象に逆方向に回転する。かさ歯車 A と電磁クラッチ A が接続されていると、軸が載荷方向に回転し、かさ歯車 B と電磁クラッチ B が接続されていると、軸が除荷方向に回転する。つまり、AC サーボモーターの回転方向を反転させることなく、電磁クラッチの切り替えのみで載荷方向を反転させることができる。これにより、時間遅れのない滑らかな微小繰返し載荷を行うことができる。

以下に AC サーボモーターと電磁クラッチ式軸載荷装置の特徴を示す。

- ▶ 軸ひずみ速度の一定性が高い。
- ▶ 載荷方向反転時のバッククラッシュ(遊び)がない。
- ▶ ギヤボックスを重ねることにより、超低速軸ひずみ速度の設定が可能である。
- ▶ AC サーボモーターの導入により、試験中に 3000 倍までの範囲で任意に軸ひずみ速度を変化させることができる。
- ▶ 電磁ブレーキにより静止状態を安定して保持することができる。
- ▶ 比較的安価である。
- ▶ AC サーボモーターの回転数と載荷軸の変位速度との間には高い線形性があり、サーボモーターの回転数を変化させることで任意の軸載荷変位速度を達成することができる。

また、本研究で用いた載荷装置には電磁クラッチ式載荷装置のほかに高速軸載荷装置が取り付けられている。これは載荷軸最上部に取り付けられたギヤをスピードコントロールモーターによって回転させることで載荷軸を上下させることができる。高速軸載荷装置は高速ロード制御ボックスを操作することによって、手動で制御することができ、載荷ロードと載荷軸の結合及びセルの解体時に用いる。

三軸試験装置の外観を図 3.5-2 に示す。軸載荷装置とセル圧制御用の電圧-空圧変換機 (EP トランスデューサー) は、12bit D/A 変換ボードを介してパーソナルコンピュータに接続されている。そのため、パーソナルコンピュータからの電気信号によって、任意の軸ひずみ速度、セル圧で応力経路を自動制御することができる。三軸圧縮試験中の供試体の

軸方向の変形は載荷軸に直接取り付けられたハネに設置された外部変位計 LVDT (Linear Variable Differential Transformer) と局所変位計 LDT(Local Deformation Transducer)を用いて測定した。また、供試体の体積変化の測定については、ビュレットと低用量差圧計を用いた。また、セル圧及び間隙水圧(背圧)はひずみゲージ式圧力計によって測定した。本研究では、圧密までのデータは10秒間隔、載荷中のデータは0.1秒もしくは1秒間隔でハードディスクに自動的に記録される。

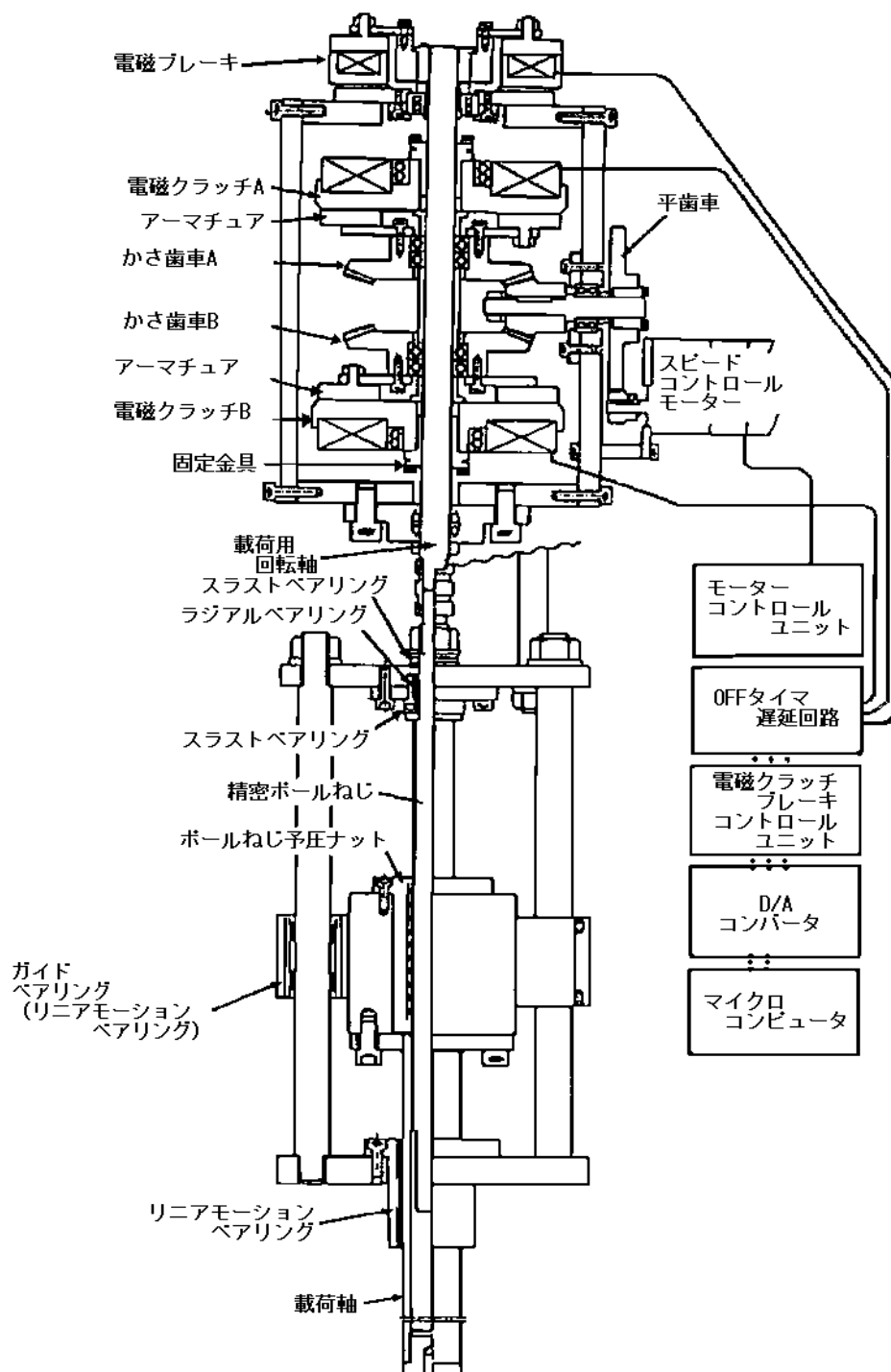


図 3.5-1 電磁クラッチ式軸荷重載荷装置

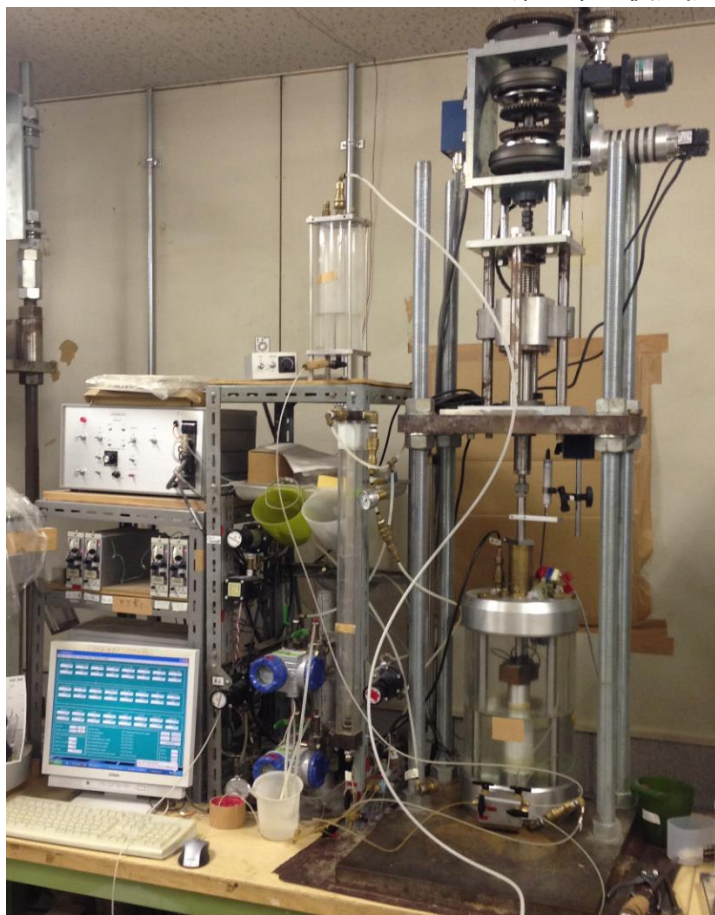


図 3.5-2 三軸試験装置

3.5.2 三軸圧縮試験手順

① 準備

メンブレン(内径 50 mm, 高さ 150 mm, 厚さ 0.3 mm), メンブレンから切り出した摩擦軽減層(直径 5 cm の円形), メンブレンから切り出したシールテープ(幅約 10 mm, 長さ約 150 mm), ろ紙(20 mm×20 mm), ポーラスストーン(直径 8 mm の円形)を用意する。

- (1) ペDESTALの周にスコッチテープを貼る。
- (2) ペDESTALの表面に高真空グリスを塗り, 直ナイフを用いてグリスをスコッチテープの厚さに均等に伸ばす。
- (3) スコッチテープをはがし, 準備しておいた直径 50 mm となるように切った摩擦軽減層を貼る。このときペDESTAL及びキャップと摩擦軽減層の間にできる限り空気が入らないように注意する。摩擦軽減層がはみ出している場合ははさみで切り落とす。
- (4) ペDESTAL及びキャップを試験装置に取り付け, ポーラスストーンを設置する。側面のグリスは多く塗りすぎるとメンブレンが滑りシールが上手く付けられないため, ごく少量が良い。
- (5) ペDESTALの上に正方形のろ紙を 1 枚置く。

② 供試体の作製(養生用)

供試体作製方法については、第3章3節で述べた通りである。

③ 供試体の設置

所定の期間養生後、モールドから供試体を取り出す。この時、第3章4節の一軸圧縮試験同様、供試体端面の破損を防ぐために、押し抜き機を使用して、供試体をモールドから丁寧に取り出す。

- (1) 取り出した供試体の質量を測定し、ペDESTALの上に設置する。
- (2) メンブレン(直径 50 mm, 高さ 150 mm, 厚さ 0.3 mm)を塩化ビニール管の内側に装着し、負圧をかけてメンブレンを塩化ビニール管内面に密着させる。
- (3) 塩化ビニール管を供試体に通し、メンブレンを外して供試体に密着させる。LDTを使用する場合、供試体左右側面の上・中・下に瞬間接着剤を塗布し、供試体とメンブレンを接着させる。
- (4) メンブレンを被せたのちペDESTALに巻き付けるようにシールテープをする。
- (5) 供試体の上部に正方形のろ紙を1枚置く。

④ キャリブレーション

キャリブレーションを行う。なお、本研究におけるキャリブレーションとは、ロードセル LC や外部変位計 LVDT 等のセンサーから出力される電圧とその物理的数値（荷重や変位）の関係を PC に記憶させることを言う。

- (1) 三軸セルの支柱を3本立てる。
- (2) 三軸セル上部（ロードセル、キャップ等を含む）を供試体に接触しないよう注意しながら支柱に載せ、ネジで止める。
- (3) ロードセルを動ひずみアンプに接続する。
- (4) 荷重計 LC, 外部変位計 LVDT, セル圧計, 間隙水圧計, 体積変化用差圧計, 局所変位計 LDT(左右)のキャリブレーションをそれぞれ行う。セル圧計, 間隙水圧計のキャリブレーションは、それぞれの計測器の空気ネジを開けて大気圧下で行う。

⑤ 供試体の自立

真空ポンプを用いて供試体内に-25 kPa の間隙水圧を作用させることによって供試体を自立させる。

- (1) 載荷軸を支えながら軸クランプを緩めて、キャップを供試体上面に静かに接触させる。荷重計の測定値を 5N 以内であることを確認し、接触した後でクランプを締め、軸を固定する。
- (2) キャップにメンブレンを被せてシールテープをする。LDTを使用する場合、③-(3)で瞬間接着剤を塗布した同じ箇所に LDT のヒンジを瞬間接着剤で設置する(15分程度放置)。
- (3) キャップに底盤から出ている長いほうのシンフレックスチューブを接続する。
- (5) ペDESTALに底盤から出ている短いほうのシンフレックスチューブを接続する。
- (6) 真空ポンプと排水タンクを接続する。この時、排水タンク上部の空気ネジが閉まっていることを確認する。また、真空レギュレータが反時計回りに回りきっていることを確認する。

- (7) コック A と B をそれぞれ内側に向ける。
- (8) コック D を左に向け、排水タンクと接続させる。
- (9) コック C を右に向け、間隙水圧を測定できる状態にする。
- (10) 間隙水圧計の空気ネジを閉めて、真空ポンプの電源を入れる。ビュレットの下のコックが非排水状態になっていることを確認する。
- (11) 排水タンク下部のコックを開ける。
- (12) 真空レギュレータのロックを外して時計回りにゆっくり回し、供試体に有効拘束圧 25 kPa 程度を作用させて自立させる。
- (13) 養生なしの場合はこの段階で供試体の直径と高さを測定する。供試体の直径 ϕ (mm) を π メーターで、高さ h (mm) をノギスで、それぞれ 3 箇所ずつ測定して記録し、平均化する。
- (14) Digit Show Basic の「Specimen」をクリックする。そして、供試体の初期データ initial の Diameter と Height に供試体の直径と高さを手入力後、下部の「present」をクリックする。供試体のデータ入力後は「Save to file」をクリックし、供試体のデータを保存する。

⑥ 三軸セルの設置

- (1) キャリブレーション時に接続した、LC コネクター(及び LDT コネクター)の接続を解除する。
- (2) セル台とセル上部の O リングに高真空グリースを塗る。
- (3) グリースが付着しないようにセルカバーを被せ、セル上部のネジ 3 箇所締め、セルカバーを固定する。
- (4) 三軸セルのロッドと載荷装置の載荷軸の中心が一致する位置にセルを移動させる。
- (5) 高速ロード制御ボックスを操作し、載荷軸とセルのロッドの隙間が紙 1 枚程度となるようにする。その後ネジで固定する。
- (6) 高速ロード制御ボックスの電源を切る。取り外したコネクター類を再び取り付ける。
- (7) LVDT を載荷軸に対して、平行になるように取り付ける。
- (8) セル上部の空気ネジを開け、セル水タンク下部についているチューブをセル右下部のオスカプラに接続する。
- (9) セル水タンク上部に Cell Pressure を接続し、セル水タンク上部のコックを閉じる。
- (10) セル水タンク下部のコックを開け、Cell Pressure を作用させセル水を投入する。
- (11) 供試体上端面から 5 mm 程度上まで水が入ったら、セル水タンク下部のコックを閉じる。
- (12) Cell Pressure を解きセル水タンクの接続を解除する。
- (13) セル上部の空気ネジを締める。
- (14) 高速ロード制御ボックスの電源が OFF になっていることを確認する。
- (15) LVDT の値を記録し、LVDT, Sp.Vol, LDT をゼロセットする。
- (16) Control→sensitivity をクリックし error stress by motor を 0.5 に変える。さらにその画面上の Stroke limiter minimum stroke を -2, maximum stroke を 28 に変更する。

- (17) 負圧チューブを三軸セル上部に、セル圧を測定するチューブをセル右下部のオスカブラに接続する。
- (18) PC 下部の control ID[1], Sampling time[10.0s]にしそれぞれ set をクリックする。
- (19) PC 上部の Control→Pre-Consolidation をクリックし Max Motor Speed を 130 rpm に変更し Update する。
- (20) Start Saving をクリックし、日付 preconsol で保存する。
- (21) 軸クランプを緩めた直後の変位を記録するために Start Saving 後に軸クランプを緩める。
- (22) Start control をクリックする。この際ギヤがカチッと音が鳴り、 $q=0$ kPa プログラムが起動したことを確認する。ギヤが鳴らない場合は、高速載荷制御装置の電源が OFF になってない可能性が高いため、一度 Stop Control を押し、電源を OFF にする。その後改めて、Start Control をクリックする。

⑦ 供試体及び給水タンクの脱気

二重負圧法により脱気を行う。軸差応力 q が 10 kPa 以下になってから操作する。

- (1) 排水タンク上部のレギュレータを時計回りに回して、Pore Pressure を -95 kPa にする。同時に負圧レギュレータを時計回りに回して、セル内に Cell Pressure を -70kPa 作用させる。この時、有効拘束圧が 25kPa、軸差応力 q が 0kPa を保つようにする。
- (2) 続いて給水タンクの脱気を行う。
- (3) あらかじめ真空ポンプで脱気しておいた給水タンクの上部と排水タンクの上部をメスマスチューブでつなぐ。
- (4) 給水タンクをできる限り高い位置に設置し、給水タンク下部のシンフレックスチューブを B コックに接続する。
- (5) 給水タンク下部のコックを開ける。
- (6) 脱気が完了するまで待つ。本研究では概ね一晩放置した。

⑨ 通水

給水タンク内の脱気水を供試体に通水することで供試体を飽和させる。

- (1) B コックを右に向ける。
- (2) 脱気水が供試体内に十分入るまで待つ。給水タンクの水が 5 cm 入ったら、次の工程へ進む。通水速度が速すぎると、供試体にミズミチができてしまうので注意する。

⑩ 圧力の切り替え

二重負圧状態を解除し、セル内に正圧を作用させ、有効拘束圧 25 kPa にする。

- (1) 負圧レギュレータ及び排水タンク上部のレギュレータを反時計回りにゆっくり回転させ、有効拘束圧 25 kPa を保ちながら、Pore Pressure を -25 kPa にする。
- (2) 負圧チューブを取り外し、セル圧チューブを接続する。セル圧チューブを接続すると有効拘束圧が上昇するので、排水タンク上部のレギュレータを反時計回りに回し有効拘束圧を 25 kPa に保つ。
- (3) 有効拘束圧を 25 kPa に保ちながら、排水タンク上部のレギュレータを反時計回りに、

セル圧レギュレータを時計回りに同時に回し、Pore Pressure 0 kPa, Cell Pressure 25 kPaにする。

- (4) A,B コックを下に向ける(手前に向ける)。D コックを上に向ける。
- (5) 排水タンク下部のコックを閉じ、D コックとの接続を解除する。
- (6) 給水タンク下部のコックを閉じ、セル前に降ろす。
- (7) 給水タンク上部及び排水タンク上部のメスメスチューブを取り外す。

⑪ 差圧計の飽和

脱気されたイオン交換水を体積変化測定用差圧計に投入する。

- (1) B コックに接続してある給水タンクチューブを取り外し、D コックに接続する。
- (2) ビュレット上部についている、Back Pressure チューブを、給水タンク上部に接続する。
- (3) ビュレットの上部についているカプラを取り外し、カプラを取り付ける(空気の逃げ道を作るため)。
- (4) D コックを左に向ける。給水タンク下部のコックを開ける。Back Pressure を回し 20kPa 程度作用させる。
- (5) ビュレット下部の排水コックを開け、ビュレット内に脱気水を投入する。
- (6) ビュレット上部まで脱気水が満たされたら、排水コックを閉じる。
- (7) 差圧計右のコックを上にあげ、ビュレット内の脱気水を差圧計の中に入れていく。
- (8) 水位がビュレット下部まで到達したら、差圧計の右のコックを下げて閉じる。
- (9) (5)~(8)を3回程度繰り返す、差圧計内部を脱気水で満たす。
- (10) ビュレットの水位を調節する。密な供試体の場合は高めに、緩い供試体の場合は低めにする。
- (11) Back Pressure を解除して、給水タンク下部のコックを閉じる。D コックを上に向ける。
- (12) 給水タンク上部の Back Pressure チューブを取り外し、ビュレット上部に戻す。
- (13) ビュレット上部のカプラを取り外し、もともとついていたカプラを取り付ける。
- (14) D コックに接続された給水タンクを取り外す。
- (15) A, B コックをゆっくり内側に向ける。
- (16) 排水コックを開ける。この時、有効拘束圧が 25kPa でなければ Cell Pressure を時計回りに回す。
- (17) ビュレットの水位変化がわかるようテープを貼る。
- (18) Back Pressure, Cell Pressure を同時に時計回りに回し、Pore pressure 200 kPa, Cell Pressure 250 kPa にする。この際、軸差応力 q は 0 kPa を保つ。

⑫ 供試体飽和化の確認(B 値チェック)

B 値を調べることによって、供試体が飽和しているかどうかを確認する。B 値は等方応力状態で測定する。すなわち、軸差応力 q を 0 kPa の状態で行う。

- (1) 排水コックを閉める。
- (2) Pore Pressure が上がったたり、下がったりしないか確認する。値が安定していたら B 値チェックを続行する。下がる場合は、下がらなくなるまで待つ。上がる場合は、ビュレ

ットの水位を確認する。水位が上がっている場合、メンブレンに穴が開いている可能性や、シールテープがうまく巻けていない可能性があるため、最初からやり直す必要がある。

- (3) Pore pressure, Cell Pressure が入るよう PC 画面を撮る。
- (4) Cell Pressure を 30kPa 程度上昇させ、写真を撮る。
- (5) Cell Pressure を 30kPa 程度下げ、写真を撮る。
- (6) 次式により B 値算出する。

$$B = \frac{\text{間隙水圧の変化量}}{\text{セル圧の変化量}} = \frac{\text{間隙水圧の増加量} + \text{間隙水圧の減少量}}{\text{セル圧の増加量} + \text{セル圧の減少量}}$$

- (7) B 値が 0.95 以上で飽和したと判断する。
- (8) B 値チェック終了後、排水コックを開ける。

※以下に、Skempton の間隙水圧係数 B 値¹⁸⁾の理論的な解釈と固化処理土への適用事例について簡単に示す。

B 値は以下の式 3-1 から得られる。

$$\begin{aligned} \Delta u &= \frac{1}{n(K_w / K_s) + 1} \left\{ \Delta \sigma_3 + \frac{1}{3} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \right\} \\ &= B \{ \Delta \sigma_3 + A(\sigma_1 - \sigma_3) \} \quad \dots (3-1) \end{aligned}$$

ここで、 K_s は土の骨格構造の体積圧縮係数、 K_w は間隙流体の体積圧縮係数、 n は間隙率、 A 、 B は Skempton の間隙水圧係数である。等方圧力下においては $\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3 = 0$ であるため、 $\Delta \sigma_3$ を作用させたときの Δu の変化を計測することで B 値が求められる。なお、固化処理土においても B 値が適用できることが寺島ら¹⁹⁾によって報告されており、本研究材料においても B 値による飽和の判定(B 値0.95以上)を行っても問題ないと判断した。

⑬ 载荷プログラムの準備, 圧密

供試体の飽和を確認後に圧密を行う。

- (1) Stop Control をクリックし Stop Saving をクリックする。
- (2) Control→control from file→load from file→control file→etc→load.ctl を開く
- (3) Load をクリックする。
- (4) 画面 cfpara[1]に 320rpm を入力する。Cfpara[2]への入力値は変位の測定域を表す。試験終了の軸ひずみを 25%にした場合、高さ 100mm の供試体では変位約 28mm に相当することから、ここに 28 と入力する。入力後 update をクリックする。
- (5) Step No.1 にして LOAD をクリックする。全て 0 になっているか確認する。
- (6) Specimen をクリックし、画面下部の Before consolidation をクリックし、Before consolidation 欄下部の present をクリックし、save to file をクリックし上書き保存する。
- (7) LVDT, sp.vol, LDT をゼロセットする。
- (8) 圧密開始手順である。Control ID [1], Sampling Time [1.0s]にして、それぞれ set をクリ

ックする。

- (9) Control→sensitivity をクリックする。Error stress by motor に 0.3 を入力する。
- (10) Control→pre-consolidation をクリックする。Max Motor Speed を軸ひずみが 0.005 %/min 程度となるスピードにする。320 / 2 = 160 rpm を入力する。
- (11) Start Saving をクリックする。日付 consol.dat で保存する。
- (12) Start Control をクリックし圧密を開始する。
- (13) Cell Pressure を増加させて有効拘束圧 50 kPa にし、1 時間以上放置する。
- (14) ある程度時間が経過したら \sqrt{t} 法により圧密完了をチェックする。
- (15) 圧密終了後、Stop Control, Stop Saving をクリックする。
- (16) ビュレットの水位を調節する。
- (17) Specimen をクリックし、After consolidation をクリックする。After consolidation 欄下部の present をクリックする。Save to file をクリックする。

⑭ 載荷

⑬-(2)~(6)を忘れていた場合ここです。

LDT 使用時

- (1) Contorl ID[15] sampling time [0.1s]にして、それぞれ[set]をクリックする。
- (2) Start saving をクリック(日付.shear で保存)、start control をクリックし、載荷プログラムを開始する。
- (3) 約 20 分後に stop control, stop saving をクリックし、載荷を中断する。
- (4) Sampling time[1.0s]にして set をクリックする。Contorol ID はクリックしない。
- (5) Start saving(shear で保存)、start control をクリックし載荷を再開する。
- (6) (3)~(5)は時間をかけずにやる。
- (7) 最初の載荷 7 時間後程度に、テグスを引っ張り、LDT を供試体側面より取り除く。

LDT 使用しない場合

- (1) Contorl ID[15] sampling time [1.0s]にして、それぞれ[set]をクリックする。
- (2) Start saving をクリック(日付.shear で保存)、start control をクリックし、載荷プログラムを開始する。

※なお、試験終了は軸ひずみ $\epsilon_a = 25\%$ (残留強度に達したものの一部は $\epsilon_a = 15\%$)とした。ここで、JGS 0524-2020²⁰⁾では試験終了条件として①最大荷重を示した後に軸ひずみが 3% 以上生じたとき、②最大荷重を示した後に荷重が 2/3 程度となったとき、③軸ひずみが 15%に達したときとしているが、これは通常の土質材料であれば、これら 3 つのいずれかを満たすときには残留状態に達しているためである。しかし、本研究材料ではこれらの試験終了時に残留に達していないことが懸念されるため、残留強度を發揮するまで、もしくは試験機の限界である $\epsilon_a = 25\%$ まで試験を実施した。

⑮ 片付け

- (1) Stop control, Stop saving をクリックする.
- (2) 軸クランプを締めて固定する. 載荷軸接続部のキャップを緩める.
- (3) LVDT を取り除く
- (4) 高速ロード制御ボックスの電源を ON にして, 軸をあげる.
- (5) Cell Pressure と Back Pressure を反時計回りに回して, それぞれの圧力を 0 にする.
- (6) A, B コックを下, C コックを上方向にし, 全コックを閉じる.
- (7) 排水コックを閉じる.
- (8) セル室右下に接続したセル圧測定用チューブを取り外す.
- (9) セル水タンク下部のチューブを接続し, セル水を戻す.
- (10) セル内の圧力を抜き, セル上部のコネクター類を取り外す.
- (11) セルを手前に移動させ, セル室上部の留め具 3 つ外す.
- (12) セルカバーを取り除き, 底盤やセルについてのグリースを拭く.
- (13) LDT 使用時は LDT を取り除く.
- (14) キャップやペDESTAL, C コックについているシンフレックスチューブを取り外す.
- (15) キャップについているシールテープを取り外す.
- (16) 軸クランプを緩めて, 軸を持ち上げてキャップを供試体から離す.
- (17) あらかじめ測定しておいたバットにペDESTAL と供試体を慎重に移す.
- (18) 水差しを用いて, キャップやペDESTAL, メンブレンに付着した試料をバットに入れ, 炉乾燥する. 木くずを配合した供試体は 80°C 炉に入れる.
- (19) エアガンを用いて底盤やシンフレックスチューブ内の水を抜く.
- (20) 試験数日後に炉乾燥質量を測定する.
- (21) 次の実験の準備のために給水タンクにイオン交換水を入れ, 真空タンクに接続し脱気する.
- (22) 排水タンク内に水位変化がわかる程度の水を入れる.

本試験での各種計測機器について

本研究では, 試験中に供試体に作用する荷重や変形は各測定装置により電圧に変換され, D/A 変換器を介してパソコンに取り込まれ記録される.

本研究で測定し, 記録した項目は鉛直軸荷重, 軸変位(外部変位, 局所変位), 間隙水圧(背圧), セル圧, 体積変化, 時間経過の 6 項目である.

(1) 荷重測定装置

三軸圧縮試験中に供試体に作用する鉛直荷重はロードセル(LC)と同ひずみ計で測定した. LC 上部にはひずみゲージが貼り付けてあり, LC に荷重が加わるとひずみゲージが変形し, その変形量に応じて電気抵抗値が変化する. パソコンにはひずみゲージの抵抗値の変化に比例する電圧に変換されて出力される.

(2) 軸方向変位測定装置

外部変位計 LVDT の外観を図 3.5-3 に示す. 本研究では供試体の軸変位(鉛直変位)を

測定する装置として、外部変位計 LVDT (Linear Variable Differential Transformer) と局所変位計 LDT(Local Deformation Transducer)を用いた。外部変位計は三軸セル上部の载荷軸に取り付けられたハネ部に設置する。そのためその測定値には供試体の変形量以外に载荷軸、ロードセル、キャップ等の変形及びベッディングエラー、メンブレンペネトレーションが含まれる。



図 3.5-3 外部変位計 LVDT

(3) 間隙水圧・セル圧測定装置

間隙水圧およびセル圧をひずみゲージ式圧力計（間隙水圧：共和電業，PMG-5KH，セル圧：共和電業，PMG-10KH）と動ひずみ計で測定した。供試体内部に出入りする空気・水をシンフレックスチューブで繋ぐことにより間隙水圧を測定した。背圧系統の配管には肉厚細径のシンフレックスチューブを用いて体積誤差を極力小さくしている。

(4) 体積変化測定装置

飽和化供試体の排水三軸圧縮試験では、供試体の上下端面と側面にベッディングエラーがなければ、供試体内部に出入りする水の体積をビュレットで測定することで供試体の体積変化を計測することができる。本研究では体積変化測定用ビュレットの上部の空気圧(+背圧)と最下部の水圧(+背圧)の差圧を低容量差圧発信機で測定することによりビュレットの水頭を電圧に変換し、体積変化を測定する。ビュレットの容量は約 50 ml である。

【引用・参考文献】

- 1) Irwin M. Hutten: Handbook of nonwoven filter media, 2nd edn. In: Advancing Chemical Engineering Worldwide, pp. 158-275, 2016.
- 2) Roger M. Rowell, James S. Han and Jeffrey S. Rowell: Characterization and factors effecting fiber properties, Natural Polymers and Agrofibers Composites, pp. 115-134, 2000.
- 3) G. L. Sivakumar Babu and A. K. Vasudevan: Evaluation of strength and stiffness response of coir-fibre-reinforced soil, Ground Improvement, Vol. 11, No. 3, pp. 111-116, 2007.
- 4) Viday Tilak B., Rakesh Kumar Dutta and Bijayananda Mohanty: Effect of coir fibres on the compaction and unconfined compressive strength of bentonite-lime-gypsum mixture, Slovak Journal of Civil Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 1-8, 2015.
- 5) 山崎享史: 木材と水の関係, 地方独立行政法人北海道立総合研究所森林研究本部 林産試だより 2012年12月号, 2012. <https://www.hro.or.jp/list/forest/research/fpri/dayori/1212/1212-2.pdf>
- 6) 一般財団法人日本木材総合情報センター: 木材の種類>木材の種類と特性>ココヤシ. <https://www.jawic.or.jp/woods/sch.php?nam0=kokoyasi> (参照日 2021.8.13)
- 7) 一般財団法人日本木材総合情報センター: 木材の種類>木材の種類と特性>ヒノキ. <https://www.jawic.or.jp/woods/sch.php?nam0=hinoki> (参照日 2021.8.13)
- 8) 菊池喜昭, 大林沙紀, 兵動太一, 武藤昌己, 齋藤駿介: 製鋼スラグ微粉末を添加した地盤材料の締固め時の強度特性, 第50回地盤工学会研究発表, pp. 531-532, 2015.
- 9) 吉川友孝, 菊池喜昭, 兵動太一, 黒岩祐介, 田中志和: 製鋼スラグを混合した木くずの地盤材料としての特性, 第12回環境地盤シンポジウム発表論文集, pp.199-204, 2017.
- 10) T. Yoshikawa, Y. Kikuchi, T. Hyodo, S.Obayashi, Y. Kakihara, D. Iwai and T. Kaneda: The effect of aging treatment on the mechanical properties of steelmaking slag mixed with crushed slag, Proceedings of the 7th China-Japan Geotechnical Symposium, pp.410-415, 2018.
- 11) 深谷渉, 榊原隆: 下水道管路施設埋め戻し部へのセメント改良土の適用に関する検討報告書第4章, 国総研資料第531号, 2009. <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0531pdf/ks0531.pdf> (参照日 2021.8.13)
- 12) 佐藤勝久, 八谷好高, 深海正彦: 空港舗装用安定処理土の基本的性質, 港湾空港技術研究所資料, 1987. <https://www.pari.go.jp/search-pdf/no0598.pdf> (参照日 2021.8.13)
- 13) 佐藤厚子, 西本聡: 安定処理土の強度と凍上試験の関係について, 北海道開発土木研究所月報第619号, pp. 27-32, 2004. <https://thesis.ceri.go.jp/db/files/0005612060.pdf> (参照日 2021.8.13)
- 14) 松村真人, 武本敏男: 東京都土木技術センター年報, pp57-60, 2007. <https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/content/000009897.pdf> (参照日 2021.8.13)
- 15) 齋藤二郎, 西村清茂, 細谷芳己: 有機質土の性状と施工性に関する研究(その4)-有機質土のセメント系安定処理による強度特性-, 大林組技術研究所報, No. 24, 1982. https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_10215462_po_1982_024_14.pdf?contentNo=1&alternativeNo= (参照日 2021.8.13)
- 16) 岡林茂生, 藤野秀利, 山本哲朗, 鈴木素之, 川島洋史: セメント系固化材により改良した

種々の土の静的強度特性, 地盤と建設, Vol. 19, No. 1, 2001.

- 17) 川邊翔平: 多様な地盤材料の応力-ひずみ挙動における粘性の研究, 東京理科大学大学院理工学研究科博士論文, 2011.
- 18) A. W. Skempton, D. Sc. and A. M. I. C. E.: The pore-pressure coefficients A and B, *Geotechnique*, Vol. 4, No. 4, pp. 143-147, 1954.
- 19) 寺島昌明, 田中洋行, 光本司, 本間定吉, 大橋照美: 石灰・セメント系安定処理土の基本的特性に関する研究(第3報), 港湾空港技術研究所報告, Vol. 22, No. 1, pp. 69-96, 1983. (参照日 2021.09.20) <https://www.pari.go.jp/search-pdf/vol022-no01-03.pdf>
- 20) 公益社団法人地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説[第一回改訂版]土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験 JGS 0524-2020, pp. 619-622, 2020.

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討

とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

地盤工学の分野における固化する材料として最も一般的な材料はセメント改良土である。セメント改良土の力学特性を知る上で、実務で最も多く行われている試験は一軸圧縮試験である。この理由としては①簡便さ¹⁾、②設計基準強度に一軸圧縮強さが用いられていること²⁾(一軸圧縮強さでない場合もあるが)、③既往データの豊富さ³⁾などが挙げられる。一方で、近年ではセメント改良土においても拘束圧依存性や排水条件依存性が指摘されている。つまり、地盤材料の多くの場合は拘束圧の影響を無視することは出来ない。そして、一軸圧縮試験ではピーク強度後の残留強度については計測が困難である故、実際の地盤材料としての力学特性の把握は難しい(三軸圧縮試験でも実際を再現しているとは言い難いが一軸圧縮試験よりは原位置の応力状態を再現できる)。

本研究材料である木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料は、“スラグのような粒状体材料が固化していること”や“木屑を混合することによる拘束圧依存性および排水性の変化が不明であること”から、一般的な土材料と同様に拘束圧を考慮した三軸圧縮試験で力学特性を把握することが望ましいと考える一方で、三軸圧縮試験は一軸圧縮試験より時間を要することから様々な条件で試験を行うことは困難である。本研究においては様々なパラメータ(木屑形状・木屑混合割合・養生期間 etc.)を変化させることで、それらが木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性に与える影響を定量的に評価・検討したいと考えていることから、一軸圧縮試験と三軸圧縮試験を併用して行うことで多くのデータを収集するとともに、地盤材料としての力学特性を検討した。

以下に検討項目とその試験方法を整理して示す。なお[]内が行った試験名である。

- (1) 木屑形状[UC, CD]
- (2) 木屑混合割合[UC, CD]
- (3) 養生期間[UC, CD]
- (4) スラグ固化強度[UC, CD]
- (5) 排水・非排水条件[UC, CD, \overline{CU} , UU]
- (6) 圧密・非圧密[\overline{CU} , UU]
- (7) 拘束圧依存性[CD, CU]

また、(1)~(3)の結果を基に、木屑混合割合と養生期間をパラメータに取った強度剛性推定手法の提案を行った。

4.1 木屑形状と木屑混合割合の違いが力学特性に及ぼす影響

本節では木屑混合割合と木屑形状の違いが7日養生後のUC特性およびCD特性に及ぼす影響を検討した。用いた試料はスラグ4(2018)、繊維状のココヤシ繊維、粒状のヒノキ、棒状のカラマツである。間隙水にはイオン交換水を用いた。本節の供試体作製条件(木屑混合割合、目標乾燥密度、目標含水比)を表4.1-1に示す。表4.1-1に示す通り、木屑の種類によって、混合割合条件が異なる。この理由を以下に挙げる。

- (1) まず初めに、スラグ4(2018)に混合する木屑の混合割合が力学特性に及ぼす影響の大略を把握するために、木屑混合割合 0, 33, 67 vol.%でUC試験を行った。ただし、ココヤシ繊維を67 vol.%混合した供試体はココヤシ繊維の反発力が大きく、突き固めることができず供試体作製が困難であった。
- (2) (1)の結果を基に、より詳細な検討(より細かく混合割合を変化させて検討)を行うこととし、①製鋼スラグの量が限られていたこと、②棒状のカラマツを混合した場合にはココヤシ繊維とヒノキの中間的挙動を示したことから、詳細検討はココヤシ繊維とヒノキを用いることとした。
- (3) (2)を受けて、ココヤシ繊維とヒノキを用いて10, 20 vol.%混合条件でUC試験を行った後、ココヤシ繊維ではさらに細かく刻んだ条件で試験をする必要があると判断し、追加で5, 15, 27 vol.%を行った。

表4.1-1を基に算出した各試料の質量とイオン交換水の質量を表4.1-2に示す。なお、表4.1-2はいずれの試料も自然含水比 $w_n = 0\%$ として示しているが、実際には各試料の自然含水比も考慮して算出している。供試体の作製方法については3.3を参照されたい。

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

表 4.1-1 供試体作製条件(木屑混合割合, 目標乾燥密度, 目標含水比)

木屑の種類 (形状)	木屑の内割 混合体積 (vol.%)	目標乾燥密度 ρ_d (Ma/m ³)	目標含水比 w (%)
- (スラグ4(2018)のみ)	0	1.92	12.0
ココヤシ繊維 (繊維状)	5	1.82	13.0
	10	1.69	14.7
	15	1.56	16.5
	20	1.42	20.2
	27	1.24	22.4
	33	1.07	25.0
ヒノキ (粒状)	10	1.82	14.3
	20	1.63	21.1
	33	1.45	25.0
	67	0.81	30.0
カラマツ (棒状)	33	1.36	14.0
	67	0.69	40.0

表 4.1-2 各試料の重量とイオン交換水の重量(5層分)

木屑の種類 (形状)	木屑の内割 混合体積 (vol.%)	製鋼スラグ 質量 $m_{製}$ (g)	高炉スラグ 微粉末質量 $m_{高}$ (g)	木屑質量 $m_{木}$ (g)	イオン 交換水質量 m_w
- (スラグ4(2018)のみ)	0	369.39	15.19	0.00	40.80
ココヤシ繊維 (繊維状)	5	343.65	14.32	3.00	46.93
	10	315.09	13.13	5.81	49.10
	15	286.20	11.93	8.38	50.57
	20	259.24	10.80	10.75	56.72
	27	221.92	9.25	13.62	54.83
	33	189.30	7.89	15.70	53.22
ヒノキ (粒状)	10	341.81	14.24	4.87	51.61
	20	301.05	12.54	9.66	68.21
	33	260.03	10.84	16.69	71.89
	67	123.35	5.14	32.14	96.38
カラマツ (棒状)	33	240.09	10.00	19.62	37.76
	67	99.27	4.14	33.43	54.73

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

図 4.1-1 から図 4.1-3 に 7 日養生の UC 試験より得られた木屑形状(種類)ごとの応力ひずみ関係を示す。

図 4.1-1 にココヤシ繊維混合割合別の応力ひずみ関係を示す。図中のプロットは各試験でのピーク強度，すなわち一軸圧縮強さ q_u を示している。なお，試験は複数本($n=3$ or 4)で実施したが大きなばらつきはなく，それぞれの混合割合で代表的な 1 本を示している。図 4.1-1 よりココヤシ繊維を 5～20 vol.% 混合した場合とスラグのみ(図中の 0 vol.%)とを比較すると， E_{50} は小さくなるものの， q_u と破壊ひずみ ϵ_f は大きくなる。また，ココヤシ繊維を 10 vol.% 以上混合した場合，ピーク強度後の応力低下が緩やかになることが分かる。さらに，混合割合が 27 vol.% 以上となると強度も剛性も著しく低下することが分かる。

図 4.1-2 にヒノキ混合割合別の応力ひずみ関係を示す。図中のプロットは各試験でのピーク強度，すなわち一軸圧縮強さ q_u を示している。図 4.1-2 よりヒノキを 10 vol.% 混合した場合，スラグ 4(2018)のみと比較して， q_u が大きくなることが分かる。しかし，ヒノキの混合割合が 20 vol.% を超えると q_u が減少することが分かる。また，図 4.1-1 のココヤシ繊維 10 vol.% とヒノキ 10 vol.% を比較すると，ピーク強度後の応力低下が顕著であることが分かり，33 vol.% 同士を比較すると，ヒノキのほうが強度も剛性も高いことが分かる。つまり同一混合割合であっても木屑の形状が異なると，力学特性が大きく異なることが分かる。

図 4.1-3 にカラマツ混合割合別の応力ひずみ関係を示す。図中のプロットは各試験でのピーク強度，すなわち一軸圧縮強さ q_u を示している。なお，カラマツに関しては，簡単な比較のために 33 vol.% と 67 vol.% の 2 パターンでのみ実施した。図 4.1-3 より，カラマツにおいてもココヤシ繊維やヒノキと同様，混合割合が 33 と 67 vol.% ではスラグ 4(2018)のみよりも大幅に強度と剛性が低下することが分かる。

図 4.1-4 に図 4.1-1 から図 4.1-3 に示した異なる木屑形状の混合割合 33 vol.% の応力ひずみ関係をまとめて示す。なお，比較のためにスラグ 4(2018)のみの応力ひずみ曲線も示す。図 4.1-4 より，カラマツを混合した場合にはココヤシ繊維とヒノキを混合した場合の中間的な応力ひずみ関係を示すことが分かる。これはカラマツの形状がココヤシ繊維とヒノキの中間的な形状であるためであり，粒状，棒状，繊維状の順で剛性が低下している。つまり，同一混合割合であっても細長比が大きいほど剛性が低下することが分かる。ただし，厳密には本検討で用いた木屑は種類が異なり，材質の違いが影響を及ぼしている可能性もある。

図 4.1-5 に図 4.1-4 に示したスラグ 4(2018)のみ，ヒノキ 33 vol.% 混合，カラマツ 33 vol.% 混合，ココヤシ繊維 33 vol.% 混合条件の試験後の供試体外観を示す。図 4.1-4 よりスラグ 4(2018)のみとヒノキ 33 vol.% ではせん断破壊しているのに対し，カラマツ 33 vol.% とココヤシ繊維 33 vol.% ではたる型の圧縮破壊をしている。

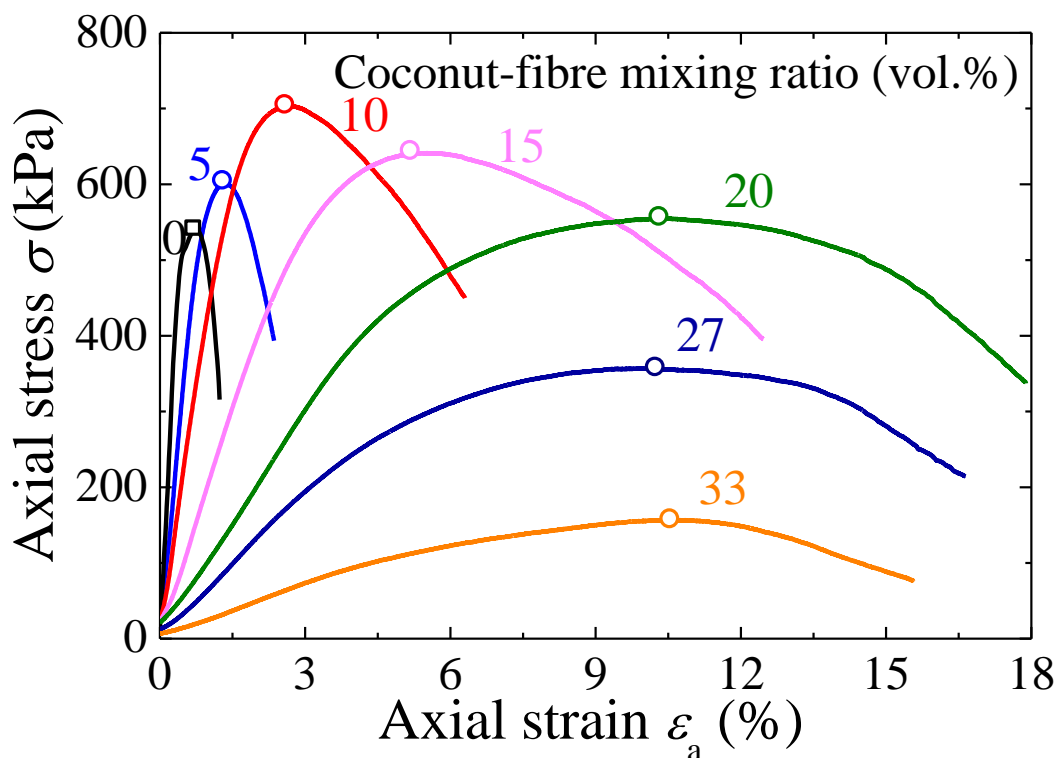


図 4.1-1 ココヤシ繊維混合割合別の応力ひずみ関係(UC, 7日養生)

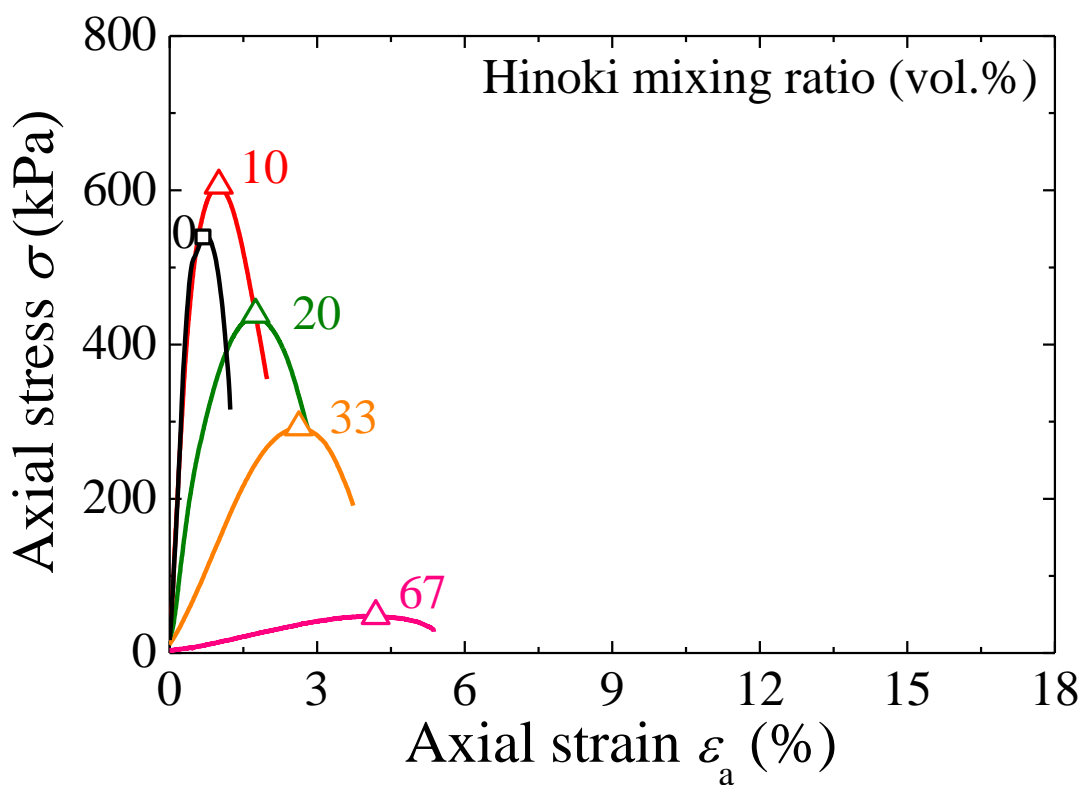


図 4.1-2 ヒノキ混合割合別の応力ひずみ関係(UC, 7日養生)

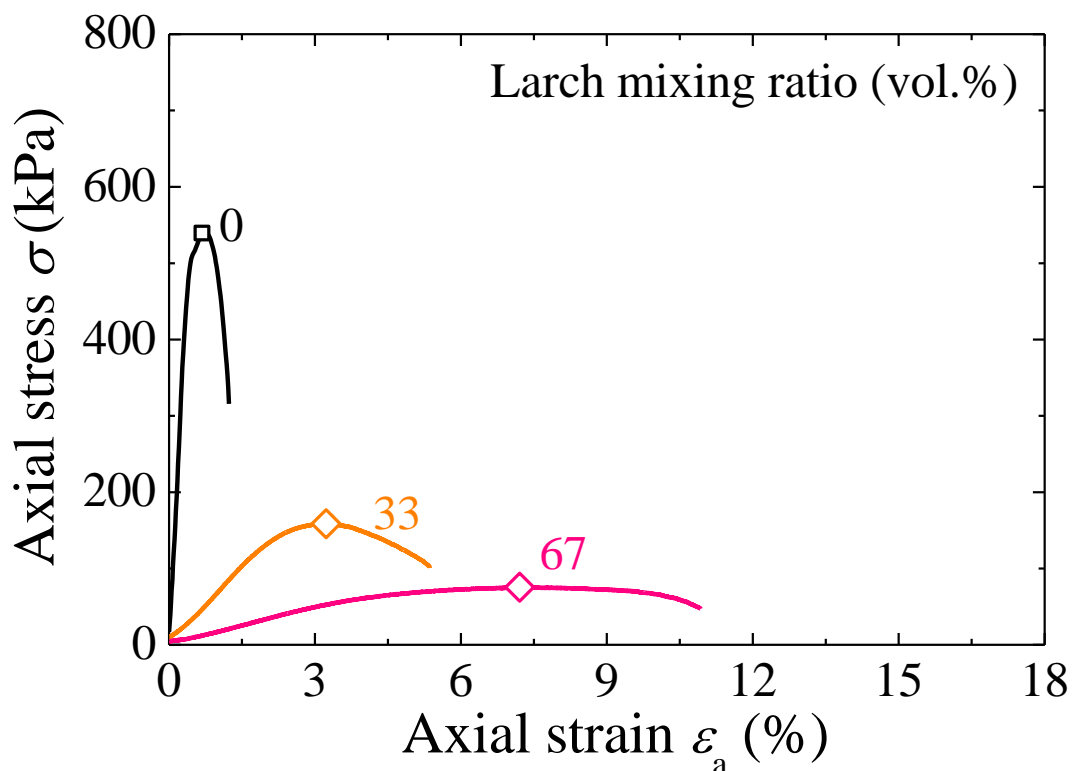


図 4.1-3 カラマツ混合割合別の応力ひずみ関係(UC, 7日養生)

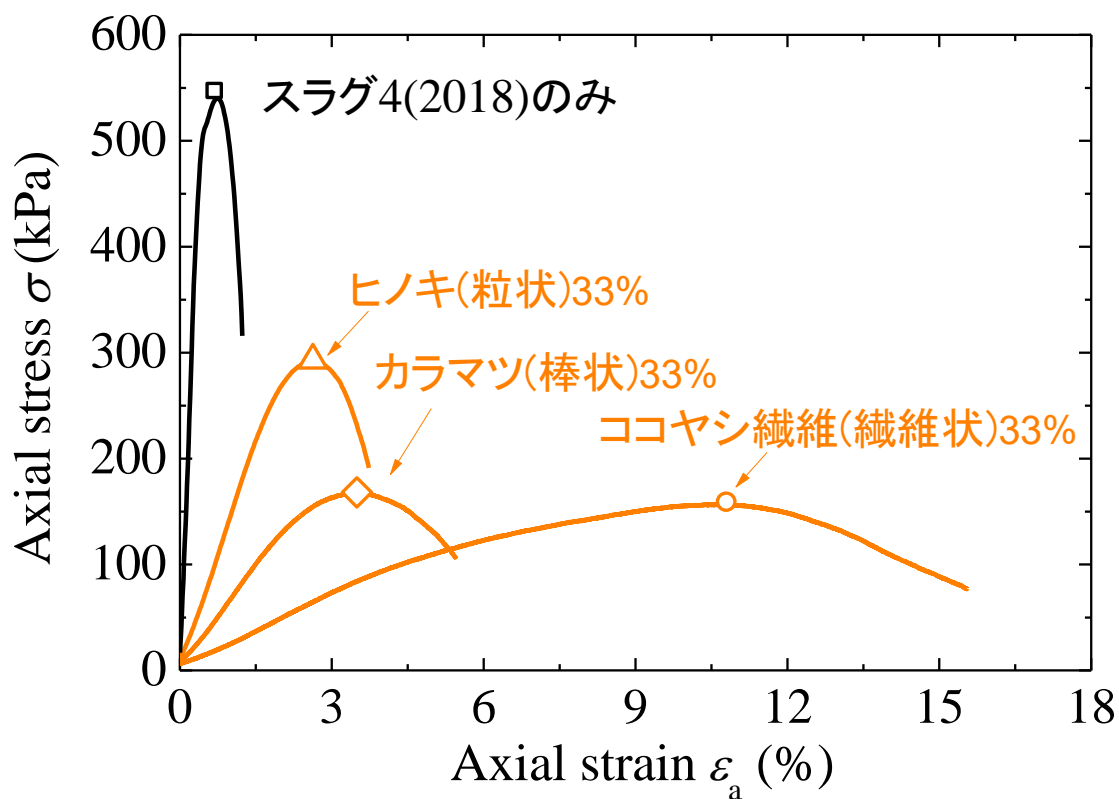


図 4.1-4 スラグ 4(2018)のみと木屑混合割合 33 vol.%の応力ひずみ関係(UC, 7日養生)



(a)スラグ 4(2018)のみ (b)ヒノキ 33vol.% (c) カラマツ 33vol.% (d)ココヤシ繊維 33vol.%
($\varepsilon_a = 1.2\%$) ($\varepsilon_a = 3.7\%$) ($\varepsilon_a = 5.4\%$) ($\varepsilon_a = 15.6\%$)

図 4.1-5 試験終了時の供試体外観

図 4.1-1, 図 4.1-2, 図 4.1-3 の試験結果を基に, 図 4.1-6 に木屑混合割合と一軸圧縮強さ q_u の関係を示す. 図 4.1-6 より, 木屑形状が粒状のヒノキであっても繊維状のココヤシ繊維であっても, 混合割合が 10 vol.%程度でスラグ 4(2018)のみよりも大きな q_u を発揮する. そして, 混合割合が 27 vol.%まではココヤシ繊維を混合した場合のほうがヒノキを混合した場合よりも q_u が大きいことが分かる. 一方で 33 vol.%混合するとその関係は逆転し, ヒノキを混合した場合のほうが大きい q_u を示す. これはココヤシ繊維 33 vol.%を混合した場合, 破壊ひずみ($\varepsilon_f=10.6\%$)が非常に大きく, 圧縮に伴い供試体が傾くことで軸方向の圧縮力が適切に作用しなかったためであると考えている. そして, それは図 4.1-5(d)の試験後に上面に接した圧力板が傾いていることから分かる. つまり, ココヤシ繊維 33 vol.%の圧縮強さは適切に評価できていない可能性が高い. さらに, 棒状のカラマツを 33 vol.%混合した場合は粒状のヒノキを 33 vol.%混合した場合よりも q_u が小さく, 67 vol.%ではやや大きいことが分かる. これについて, 図 4.1-5 の供試体外観から分かるように, 33 vol.%ではスラグ粒子の大きさに対してヒノキはやや大きいか同じくらいであるのに対し, カラマツは相当に大きく, カラマツを 33 vol.%混合した場合には骨格の主体がカラマツであり, スラグの摩擦力および固化の影響が相当に小さくなったのに対し, ヒノキを 33 vol.%混合した場合にはカラマツを混合した場合よりもスラグの摩擦力および固化の影響があったものと考えられる. 一方で, 67 vol.%ではいずれの形状でも木屑が骨格の主体となる為に, ほとんど木屑の摩擦力のみで強度を発揮し, q_u に違いが見られなくなるものと推察される.

図 4.1-1, 図 4.1-2, 図 4.1-3 の試験結果を基に, 図 4.1-7 に木屑混合割合と変形係数 E_{50} の関係を示す. 図 4.1-7 より, 木屑混合割合によらず, 同一混合割合における E_{50} は粒状のヒノキのほうが繊維状のココヤシ繊維を混合する場合よりも大きいことが分かる. また, 粒状のヒノキを 10 vol.%混合した場合にはスラグ 4(2018)のみと比較してわずかに減

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

少しているものの、繊維状のココヤシ繊維を 10 vol.%混合した場合には大幅に低下し、スラグ 4(2018)のみの約 20%程度となる。また、ヒノキを 20 vol.%混合した場合には急激に E_{50} が低下し、スラグ 4(2018)の E_{50} の約 30%となり、ココヤシ繊維を 20 vol.%混合した場合にはスラグ 4(2018)の E_{50} の約 8%となる。そして木屑を 33 vol.%混合した場合には粒状のヒノキであっても相当に小さく、ココヤシ繊維を 20 vol.%混合した場合と同程度となることが分かる。さらに、カラマツの E_{50} はヒノキとココヤシ繊維の中間的な値を取ることが分かる。つまり、 E_{50} は木屑形状によって大きく異なるが、木屑形状によらず混合割合が 33vol.%ではスラグ 4(2018)のみよりも相当に小さくなる。

図 4.1-1、図 4.1-2、図 4.1-3 の試験結果を基に、図 4.1-8 に木屑混合割合と破壊ひずみ ϵ_f の関係を示す。図 4.1-8 より、木屑の混合割合が等しい場合、ココヤシ繊維を混合した場合のほうが、ヒノキを混合した場合より大きな ϵ_f を示す。また、混合割合の増加に伴う ϵ_f の増加率はココヤシ繊維のほうが大きく、20 vol.%混合では、ヒノキを混合した場合の $\epsilon_f = 2\%$ 程度であるのに対し、ココヤシ繊維を混合した場合には $\epsilon_f = 10.6\%$ 程度となる。ココヤシ繊維が 20 vol.%以上の ϵ_f は一定となっているが、先にも述べたように木屑 33 vol.%では大変形であることから適切な試験が出来ておらず(圧縮力が鉛直方向に適切に作用していない)、繊維状の木屑を多量に含んだ場合の破壊ひずみについても評価できないものと考えられる。さらに、木屑混合割合 33 vol.%の条件で比較すると、棒状のカラマツは粒状のヒノキよりも ϵ_f よりも大きいですが、繊維状のココヤシと比べると小さく、明らかに繊維状の木屑では破壊ひずみに及ぼす影響が他の 2 種類(粒状・棒状)と異なることが分かる。

以上、7日養生の UC 試験結果から、スラグ 4(2018)に混合する木屑の形状が異なると、混合する体積が同程度であっても応力ひずみ関係は大きく異なり、細長比が大きいほど、破壊ひずみは大きく、剛性が低下することが分かった。また、木屑形状によらず木屑を 10 vol.%混合することで q_u はスラグ 4(2018)のみよりも大きくなることが明らかとなった。そして、特に繊維状のココヤシ繊維を混合した場合には、ピーク強度後の応力低下が非常に緩やかになることが分かった。

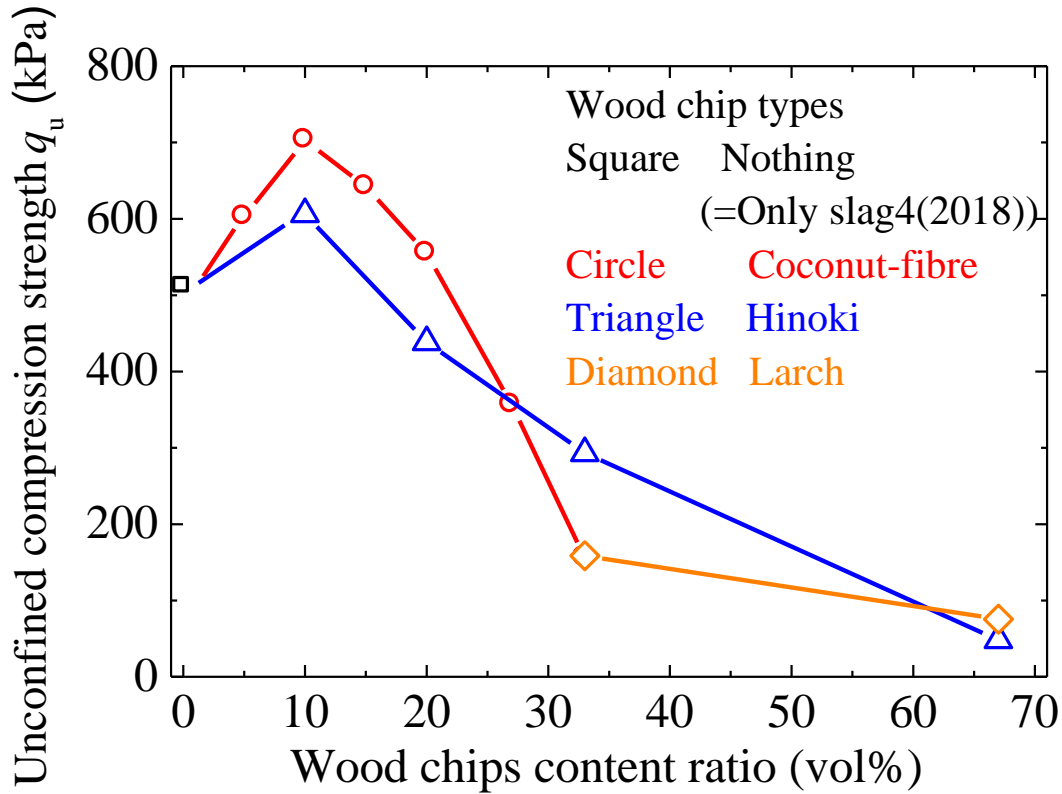


図 4.1-5 木屑混合割合と一軸圧縮強さの関係(7日養生)

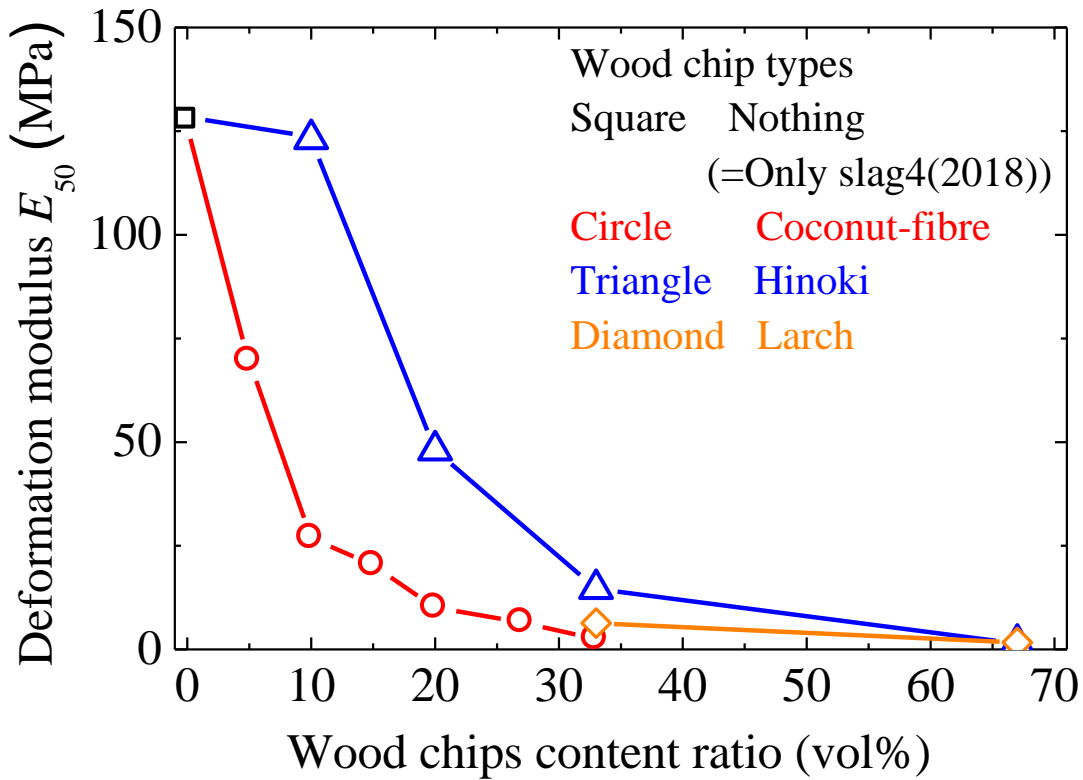


図 4.1-6 木屑混合割合と変形係数の関係(7日養生)

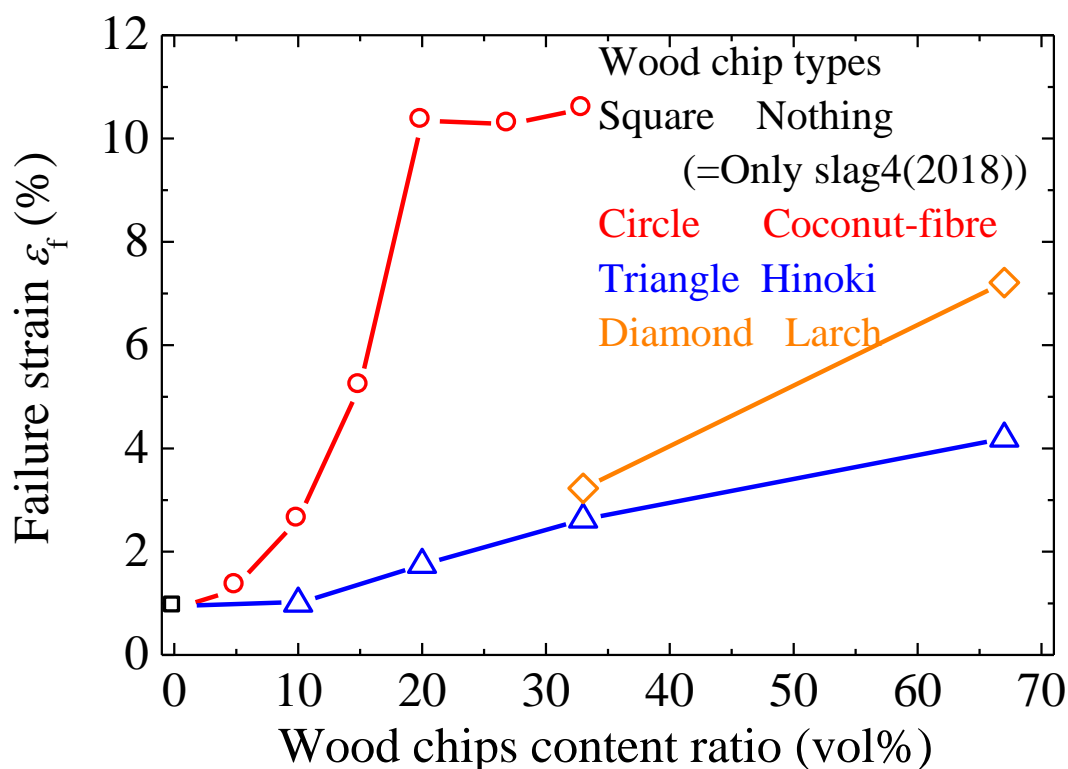


図 4.1-7 木屑混合割合と破壊ひずみの関係(7日養生)

次に図 4.1-8 と図 4.1-9 に 7 日養生の CD 試験(拘束圧 50 kPa)より得られたココヤシ繊維混合条件とヒノキ混合条件の応力ひずみ関係を示す。なお、混合割合は UC 試験の結果を踏まえ、繊維状のココヤシ繊維では 5, 10, 33 vol.%, 粒状のヒノキでは 10, 33, 67 vol.%とした。供試体作製時の乾燥密度と含水比は表 4.1-1 と同様である。

図 4.1-8 にココヤシ繊維混合割合別の応力ひずみ関係を示す。図中のプロットは各試験でのピーク強度、すなわち最大せん断強さ q_{max} と残留強度 q_{res} を示している。なお、ココヤシ繊維 33 vol.%混合では試験終了時までピーク強度を示さなかったため、試験終了時の軸差応力にプロットしている。図 4.1-8 より、ココヤシ繊維混合割合の増加に伴い、応力ひずみ関係は大きく変化し、ココヤシ繊維混合割合が 10 vol.%まではひずみ軟化が見られるのに対し、33 vol.%では試験終了時まで軸差応力が増加するひずみ硬化型の挙動を示す。また、ココヤシ繊維を 5 vol.%または 10 vol.%混合した場合にはスラグ 4(2018)のみよりも大きな最大せん断強さを示す。さらにココヤシ繊維混合割合の増加に伴い破壊ひずみが大きくなり、残留強度はココヤシ繊維の混合割合によらずスラグ 4(2018)のみとほとんど変わらない。

図 4.1-9 にヒノキ混合割合別の応力ひずみ関係を示す。図 4.1-8 と同様、図中のプロットは最大せん断強さと残留強度を示した点である。なお、ヒノキ 67 vol.%混合では試験終了時までピーク強度を示さなかったため、試験終了時の軸差応力にプロットしている。図 4.1-9 より、ヒノキ混合割合の増加に伴い、応力ひずみ関係は大きく変化し、ヒノキ混合割合が 33 vol.%まではひずみ軟化が見られるのに対し、67 vol.%では試験終了時まで軸差

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

応力が増加するひずみ硬化型の挙動を示す。また、ヒノキを 10 vol.%混合した場合にはスラグ 4(2018)のみよりも大きな最大せん断強さを示す。また、ヒノキ混合割合の増加に伴い破壊ひずみが大きくなり、残留強度はヒノキを混合することによってやや低下する。さらにヒノキ混合割合が増加するほど残留強度を発現した軸ひずみは大きくなる。

図 4.1-8 と図 4.1-9 より、木屑の形状が異なると、同一混合割合でも力学特性が大きく異なることが分かる。例えば、ココヤシ繊維 10 vol.%の応力ひずみ曲線はヒノキ 33 vol.%と、ココヤシ繊維 33 vol.%の応力ひずみ曲線はヒノキ 67 vol.%と同様の傾向を示す。また、第 4 章 2 節の一軸圧縮試験の結果と併せて考えると、木屑の形状によらず、スラグ 4(2018)に木屑を 5 ~ 10 vol.%混合した場合にせん断強度の増加が見られたことから、低拘束圧条件下($\sigma' = 50 \text{ kPa}$ 以下)ではスラグ 4(2018)のような微細な固結をする材料に木屑のような圧縮性および変形性の高い材料が含まれていても、混入割合によって強度低下は生じず、むしろスラグ固化体単体よりも大きな強度を発揮することが明らかとなった。さらに、ココヤシ繊維混合割合が 5 vol.%および 10 vol.%の場合の残留強度はスラグ 4(2018)のみのそれと同程度であるのに対し、ヒノキを混合した場合にはスラグ 4(2018)のみよりも残留強度が小さくなる。これは、繊維状の木屑を混合した場合には繊維補強効果によって内部摩擦抵抗が増加し、スラグ粒子が減っても供試体全体としての内部摩擦角は減少しないのに対し、粒状の木屑はスラグ粒子に比べて摩擦力が小さく、また繊維補強効果にも期待できないために残留強度が減少するものと考えられる。

図 4.1-10 に図 4.1-8 と図 4.1-9 の試験後の各供試体外観を示す。図 4.1-10 から試験終了時までピーク強度を発現しなかったココヤシ繊維 33 vol.%とヒノキ 67 vol.%では、他の条件で見られるせん断層(面)は見られず、ピーク強度の見られたそれ以外の条件ではせん断層が確認できる。

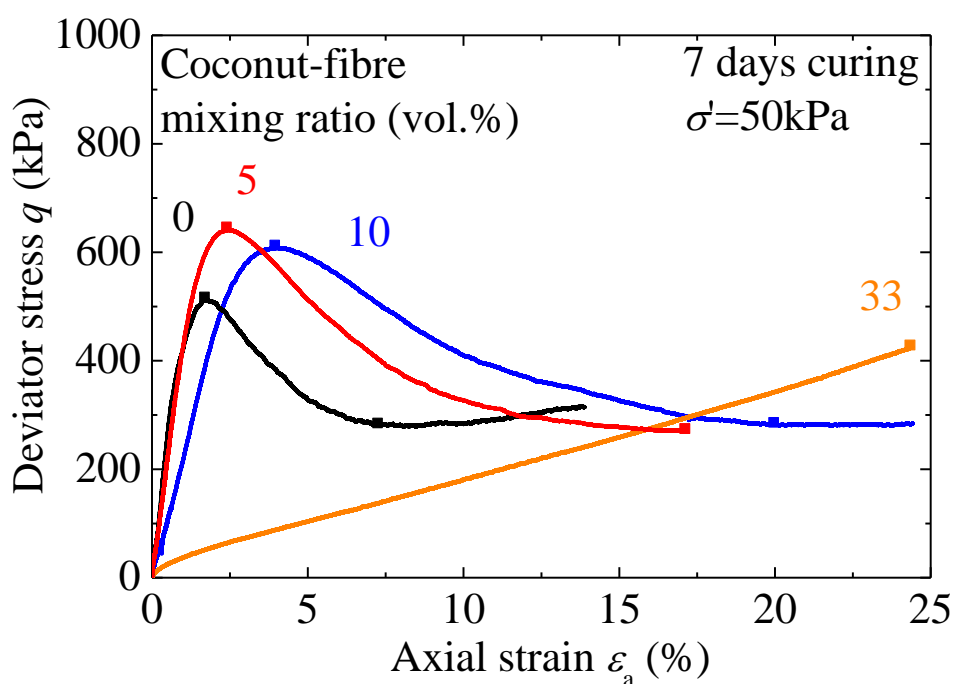


図 4.1-8 ココヤシ繊維混合スラグ固化材料の応力ひずみ関係(7日養生, $\sigma' = 50 \text{ kPa}$)

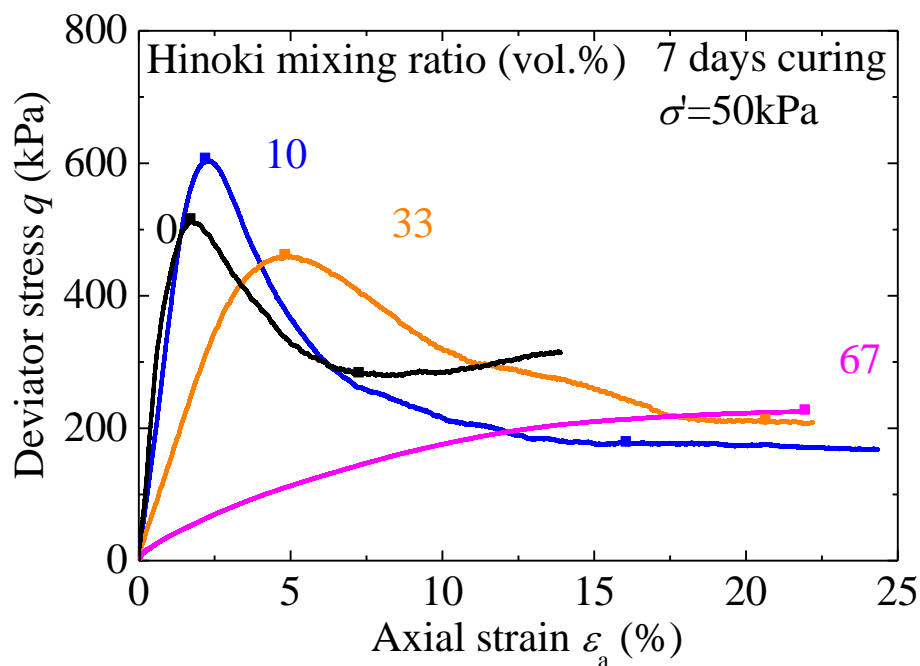


図 4.1-9 ヒノキ混合スラグ固化材料の応力ひずみ関係(7日養生, $\sigma' = 50 \text{ kPa}$)

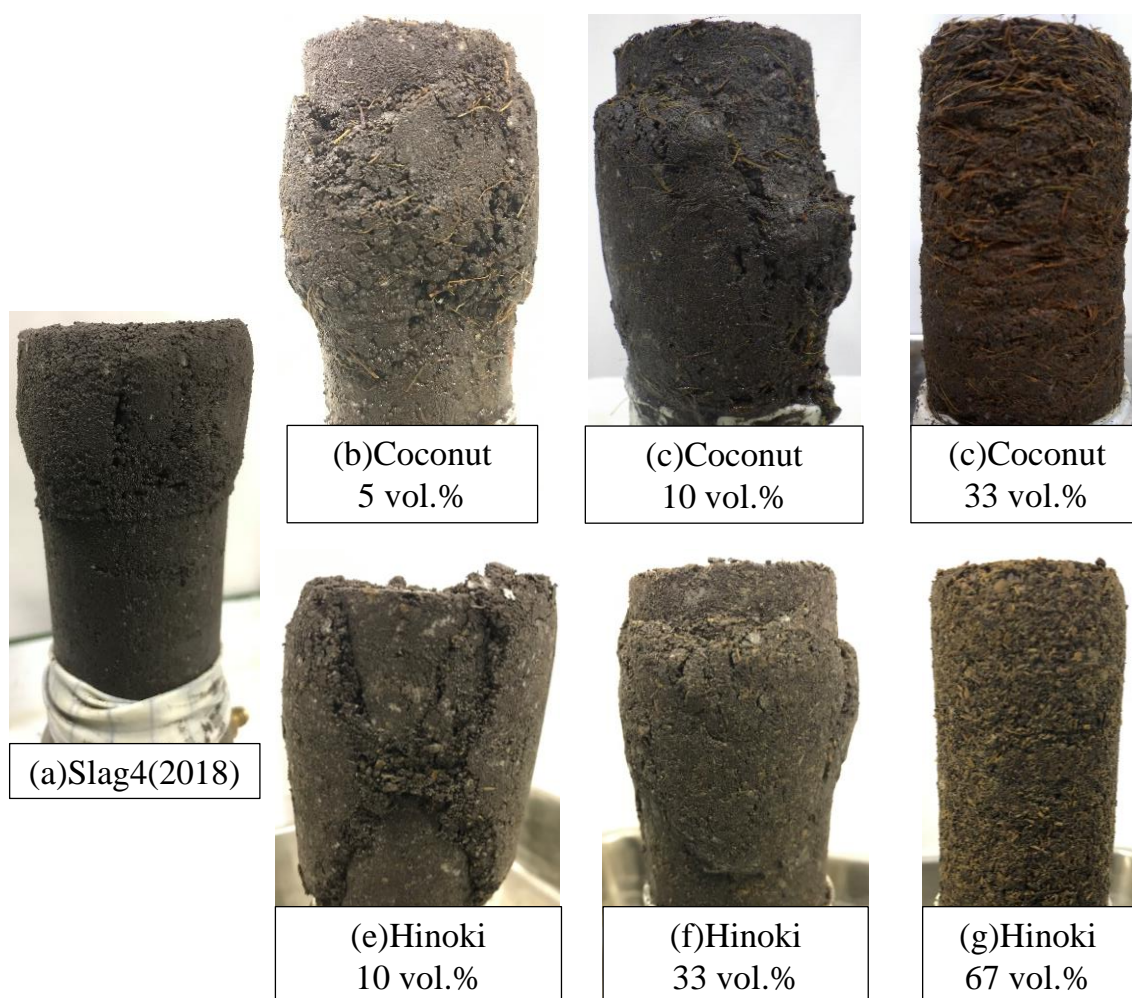


図 4.1-10 各配合条件での試験終了後の供試体外観(7日養生, $\sigma' = 50 \text{ kPa}$)

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

以下に、木屑形状と木屑混合割合の違いが力学特性に及ぼす影響について、本節で得られた知見を示す。

- ▶ 木屑形状によらず、スラグ 4(2018)に木屑を混合することで変形係数は低下する。そして、細長比が大きいほど、変形係数の低下率も大きい。
- ▶ 形状(繊維状・粒状)によらず、スラグ 4(2018)への木屑混合割合が 10 vol.%までは木屑混合割合の増加とともに、一軸圧縮強さ q_u および最大せん断強さ q_{max} は増加し、それ以上混合すると木屑混合割合の増加に伴って q_u および q_{max} は低下する。つまり、せん断強さが最大となる最適混合割合(10 vol.%)が存在する。
- ▶ 木屑形状によらず、木屑を混合することで破壊ひずみは増加する。また、木屑混合による残留強度の増加は見られないが、ピーク強度後の応力低下が緩やかになる。特に繊維状の木屑を混合した場合に破壊ひずみの増加およびピーク強度後の応力低下が緩やかとなり靱性が卓越した材料となる。

4.2 養生期間の違いが力学特性に及ぼす影響

本節では養生期間の違いが木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性に及ぼす影響をUC試験とCD試験(拘束圧 50 kPa)により検討する。用いた試料は4.1 で用いたものと同様、スラグ 4(2018)、繊維状のココヤシ繊維、粒状のヒノキである。供試体作製条件も表 4.1-1 と同様である。本検討ではUC試験とCD試験で木屑混合割合や養生期間がやや異なるため、表 4.2-1 に各条件での養生期間を示す。UC試験では養生による一軸圧縮特性について大略の変化を捉え、詳細についてはCD試験で検討する。

表 4.2-1 各種試験(UC・CD)における各配合条件での養生期間

木屑の種類 (形状)	木屑の内割 混合体積 (vol.%)	UC試験実施の 養生期間(日)	CD試験実施の 養生期間(日)
- (スラグ4(2018)のみ)	0	0, 7, 28, 84	0, 7, 28, 84, 334, 672, 1008
ココヤシ繊維 (繊維状)	5	7, 28, 84	0, 7, 28, 84, 335, 673, 1008
	10	7	0, 7, 28, 84, 336, 675, 1008
	15		-
	20		-
	27		-
	33	7, 28, 84	0, 7, 28, 84, 337, 672, 1008
ヒノキ (粒状)	10	7, 28	0, 7, 28, 84, 672
	20		-
	33		0, 7, 28, 84, 335, 672, 1008
	67		0, 7, 28, 84, 335, 672, 1008

まず、UC試験の結果を示す。

図 4.2-1 にスラグ 4(2018)のみの 0, 7, 28, 84 日養生の応力ひずみ関係を示す。図中のプロットは各試験でのピーク強度、すなわち一軸圧縮強さ q_u を示している。図 4.2-1 よりばらつきはあるものの、養生期間の増加に伴って、 q_u が増加することが分かる。また、養生期間によらず、破壊ひずみ $\epsilon_f = 0.5 \sim 1.0\%$ 程度であり、養生に伴う ϵ_f の変化は確認できない。

図 4.2-1 の試験結果を基に、図 4.2-2 に一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} の関係を示す。変形係数 E_{50} は、 $E_{50} = (q_u / 2) / \epsilon_{50}$ (MPa) より算出した。ここで、 ϵ_{50} は $q_u / 2$ 時の軸ひずみ ϵ_a (%) である。図 6 より本試験条件では、 q_u と E_{50} の間にやや非線形関係がある。この関係式から q_u の増加に伴い、 E_{50} が増加することが分かる。つまり、養生期間の増加とともに、 ϵ_{50} が減少することが分かる。

図 4.2-1 の試験結果を基に、図 4.2-3 に一軸圧縮強さ q_u と破壊ひずみ ϵ_f の関係を示す。図 4.2-3 より ϵ_f にばらつきはあるものの、養生期間の増加に伴う ϵ_f の変化は大きくない。図 4.2-2 と図 4.2-3 を併せて考えると、養生期間の増加とともに ϵ_{50} は減少する傾向が見られた

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

が、 ε_f の減少は見られなかった。つまり、養生期間の増加に伴い、 E_{50} は大きくなるが、 ε_f はあまり変化しない靱性を備えた材料となる可能性がある。

図 4.2-4 にスラグのみの養生期間と乾燥密度 ρ_d の関係を示す。図 4.2-4 よりばらつきはあるものの、養生なしよりも 7 日養生の ρ_d が高く、さらに 28 日養生よりも 84 日養生の ρ_d がやや低いことが分かる。

図 4.2-5 にスラグのみの養生期間と含水比 w の関係を示す。図 4.2-5 より 28 日養生までは養生期間の増加とともに w が減少する傾向見られた。一方で 84 日養生では 28 日養生よりも w が高くなった。本研究材料は、製鋼スラグと高炉スラグ微粉末の水和反応による強度増加に期待している。そこで養生期間の増加に伴い水和反応が進むことで、含水比の低下および乾燥密度の増加が確認できると著者らは考えた。しかし、図 4.2-1 より 28 日養生から 84 日養生にかけて q_u が増加しているのに対し、図 4.2-4 や図 4.2-5 では ρ_d の増加や w の減少を確認できなかつた。この要因については不明であるが、第 1 に、28 日養生以降の強度増加は水和物の結晶構造の変化によるものであり、そもそも含水比は変化しない可能性がある。第 2 に、本研究では 80 °C の炉乾燥試料を使用して含水比の計測していることから、自由水だけでなく結合水の蒸発や、加熱による水和反応が乾燥中に起こる可能性があり精度の良い計測が出来ていなかった可能性がある。

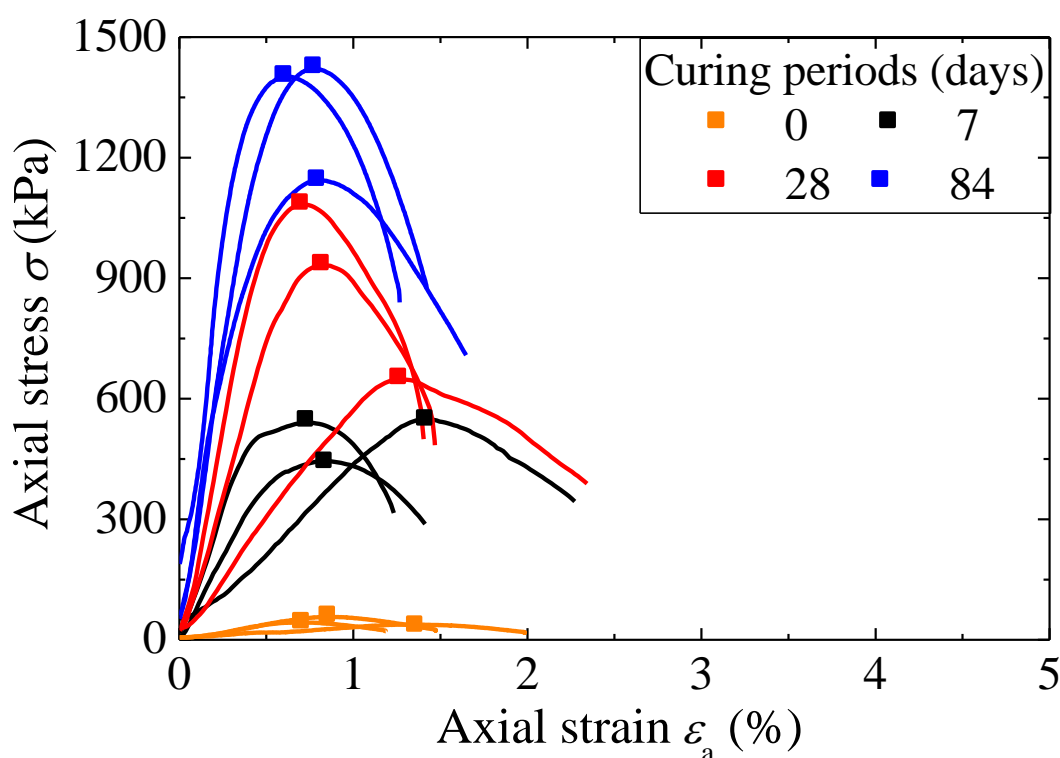


図 4.2-1 スラグ 4(2018)のみの応力ひずみ関係(0, 7, 28, 84 日養生)

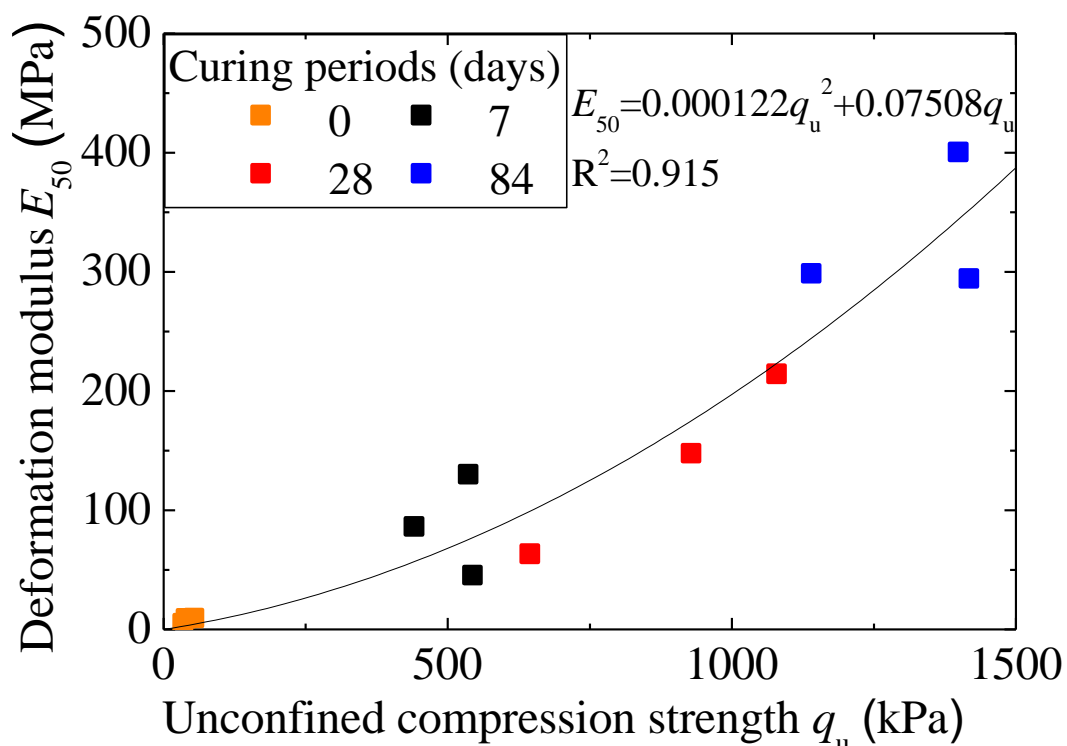


図 4.2-2 スラグ 4(2018)のみの一軸圧縮強さと変形係数の関係 (0, 7, 28, 84 日養生)

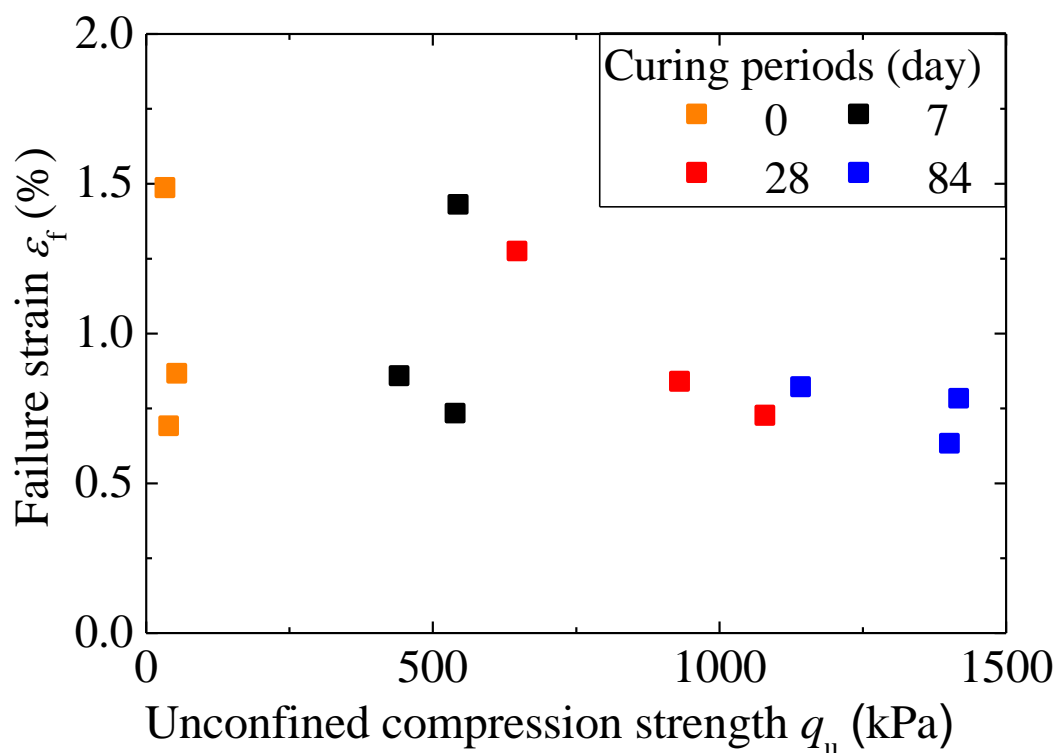


図 4.2-3 スラグ 4(2018)のみの一軸圧縮強さと破壊ひずみの関係 (0, 7, 28, 84 日養生)

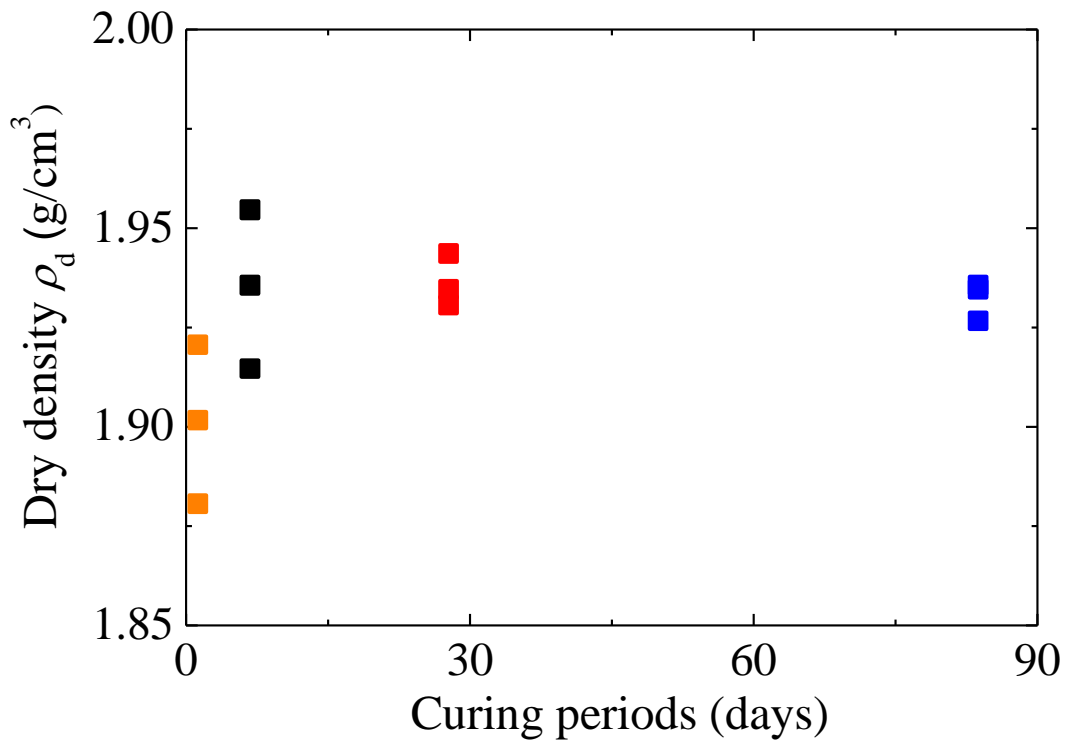


図 4.2-4 スラグ 4(2018)のみの養生期間と乾燥密度の関係 (0, 7, 28, 84 日養生)

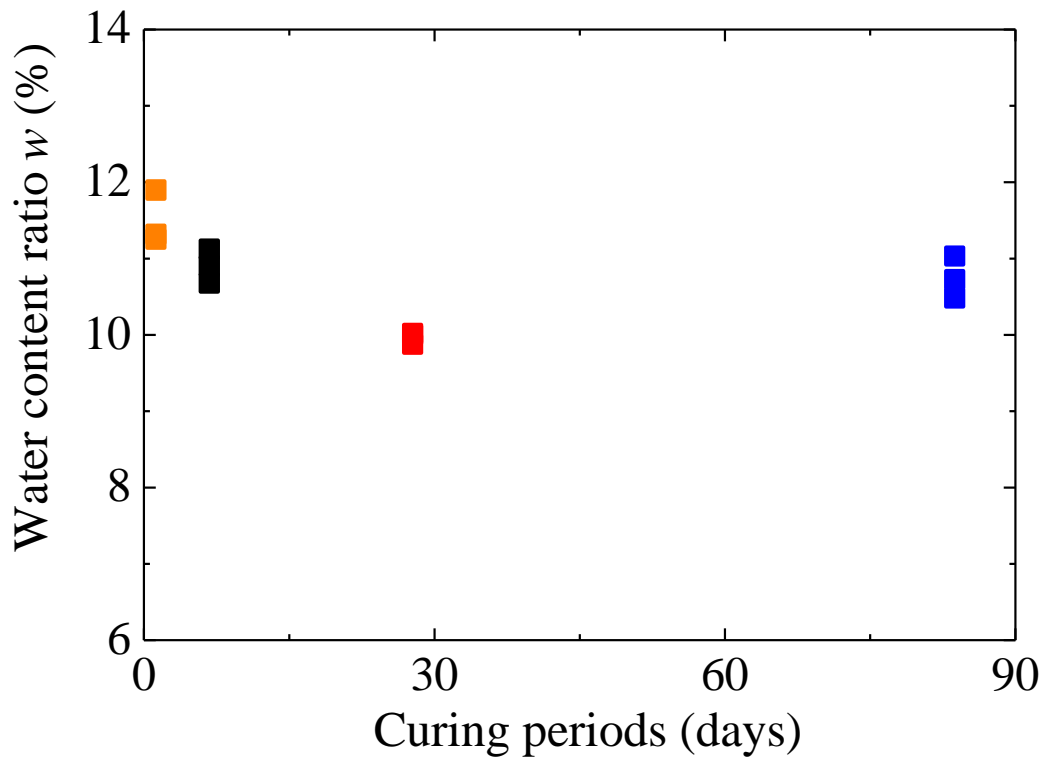


図 4.2-5 スラグ 4(2018)のみの養生期間と含水比の関係 (0, 7, 28, 84 日養生)

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

次に図 4.2-6 にココヤシ繊維とスラグ 4(2018)を混合した材料の養生期間別の一軸圧縮強さとココヤシ繊維混合割合の関係を示す。図中の実線は試験結果を結んだ線であり、破線は試験結果から推定した線である。なお、ココヤシ繊維混合割合が 0, 5, 27, 33 vol.% のプロットは 3 本の供試体の平均値を示している。図 4.2-6 より、木屑の混合割合の増加とともに養生による強度増加率が低くなると考えられるが、ココヤシ繊維を 20 vol.% 混合しても 7 日養生のスラグ 4(2018)のみよりも大きな一軸圧縮強さを発揮する可能性がある。ただし、いずれにしてもココヤシ繊維混合割合 10 ~ 27 vol.% では 7 日養生の結果しかないために、長期養生を行い検討する必要がある。第 5 章ではココヤシ繊維混合割合が 0, 5, 10, 33 vol.% の条件で長期養生した結果について示すため、そちらを参照されたい。

図 4.2-7 にココヤシ繊維とスラグ 4(2018)を混合した材料の養生期間別の変形係数 E_{50} とココヤシ繊維の混合割合の関係を示す。なお、図 4.2-6 同様、ココヤシ繊維混合割合が 0, 5, 27, 33 vol.% のプロットは 3 本の供試体の平均値を示している。図 4.2-7 よりココヤシ繊維の混合割合と変形係数には非線形性がある。次に 7 日養生に着目する。ここでココヤシ繊維 100 vol.% の場合の変形係数を $E_{50} = 0$ MPa とし、線形関係であると仮定すると、ココヤシ繊維 5 vol.% 混合した場合の変形係数は $E_{50} = 76$ MPa となるはずである。しかし、本試験では $E_{50} = 61$ MPa であった。さらに、84 日養生に着目する。ココヤシ繊維 100 vol.% の場合の変形係数を $E_{50} = 0$ MPa とし、線形関係であると仮定すると、ココヤシ繊維 5 vol.% 混合した場合の変形係数は $E_{50} = 315$ MPa となるはずである。しかし、 $E_{50} = 114$ MPa となり、養生期間が延びるほど、その低下度合いが大きいことが分かる。図 4.2-6 と図 4.2-7 より、ココヤシ繊維を 5 ~ 20 vol.% 混合することで、混合材料の強度を高めることが可能となり、5 vol.% の混合でも靱性を高めることに期待できる。

図 4.2-6 と図 4.2-7 を基に、図 4.2-8 にココヤシ繊維混合割合 0 ~ 33 vol.% の一軸圧縮強さ q_u を、スラグ 4(2018)のみ(=ココヤシ繊維混合割合 0 vol.%)の一軸圧縮強さ $q_{u, \text{only slag}}$ で除すことで正規化した値 $q_u / q_{u, \text{only slag}}$ と混合割合の関係と、それぞれの変形係数 E_{50} を、スラグのみの変形係数 $E_{50} = E_{50, \text{only slag}}$ で除すことで正規化した値 $E_{50} / E_{50, \text{only slag}}$ と混合割合の関係を示す。なお図中の実線と破線は、それぞれのプロットの近似線を示している。図 4.2-8 よりココヤシ繊維の混合割合と変形係数の関係と、ココヤシ繊維の混合割合と一軸圧縮強さの関係は大きく異なることが分かる。

図 4.2-9 にヒノキとスラグ 4(2018)を混合した材料の養生期間別の一軸圧縮強さ q_u とヒノキ混合割合の関係を示す。なお、プロットは 3 本の供試体の平均値を示している。図 4.2-9 より、ヒノキ混合割合が 20 vol.% 以下では 7 日養生から 28 日養生で q_u の増加が見られるが、33 vol.% 以上になるとほとんど増加は見られない。また、いずれの養生期間でもヒノキを 10 vol.% 混合した場合にはスラグ 4(2018)のみよりも q_u の増加が見られ、20 vol.% 以上ではスラグ 4(2018)のみよりも q_u が低下する。

図 4.2-10 にヒノキとスラグ 4(2018)を混合した材料の養生期間別の変形係数 E_{50} とヒノキ混合割合の関係を示す。図 4.2-10 より、図 4.2-9 の q_u の傾向と同様、ヒノキ混合割合が 20 vol.% 以下では 7 日養生から 28 日養生で E_{50} の増加が見られるが、33 vol.% 以上になるとほとんど増加は見られない。さらに、いずれの養生期間でもヒノキを 10 vol.% 混合した場合

にはスラグ 4(2018)のみよりも E_{50} の増加が見られ、20 vol.%以上ではスラグ 4(2018)のみよりも E_{50} が低下する。

図 4.2-9 と図 4.2-10 を基に、図 4.2-11 にヒノキ混合割合 0 ~ 67 vol.%の一軸圧縮強さ q_u を、スラグ 4(2018)のみ(=ヒノキ混合割合 0 vol.%)の一軸圧縮強さ $q_{u,only\ slag}$ で除すことで正規化した値 $q_u / q_{u,only\ slag}$ と混合割合の関係と、それぞれの変形係数 E_{50} を、スラグのみの変形係数 $E_{50,only\ slag}$ で除すことで正規化した値 $E_{50} / E_{50,only\ slag}$ と混合割合の関係を示す。図 4.2-11 よりややばらつきはあるものの、養生期間の違いによらず $q_u / q_{u,only\ slag}$ と $E_{50} / E_{50,only\ slag}$ はヒノキ混合割合が 10 vol.%までは増加し、それ以上混合すると低下するという同様の傾向を示す。

以上より、ココヤシ繊維をスラグ 4(2018)と混合した材料とヒノキとスラグ 4(2018)を混合した材料を比較する検討する。なお、ココヤシ繊維の 10 ~ 27 vol.%では 7 日養生のみの結果からの推察も含まれる。まず、一軸圧縮強さに着目すると、ココヤシ繊維を 10 vol.%程度混合するとスラグ 4(2018)よりも増加し、それ以上混合するとココヤシ繊維の混合割合の増加とともに一軸圧縮強さが低下するといった点ではヒノキを混合する場合と同様の傾向を示した。一方で、変形係数に着目すると、ココヤシ繊維では 5 vol.%混合しただけでスラグ 4(2018)のみよりも低下し、そしてその低下率は養生期間が増加するほど大きくなるのに対し、ヒノキは 10 vol.%混合してもスラグ 4(2018)のみの E_{50} と比べて低下するどころか増加する。そしてそれは 28 日養生までであれば養生期間によらず同様の傾向が見られる。つまり、木屑形状の違いは強度に与える影響よりも剛性に与える影響が大きいと推察される。

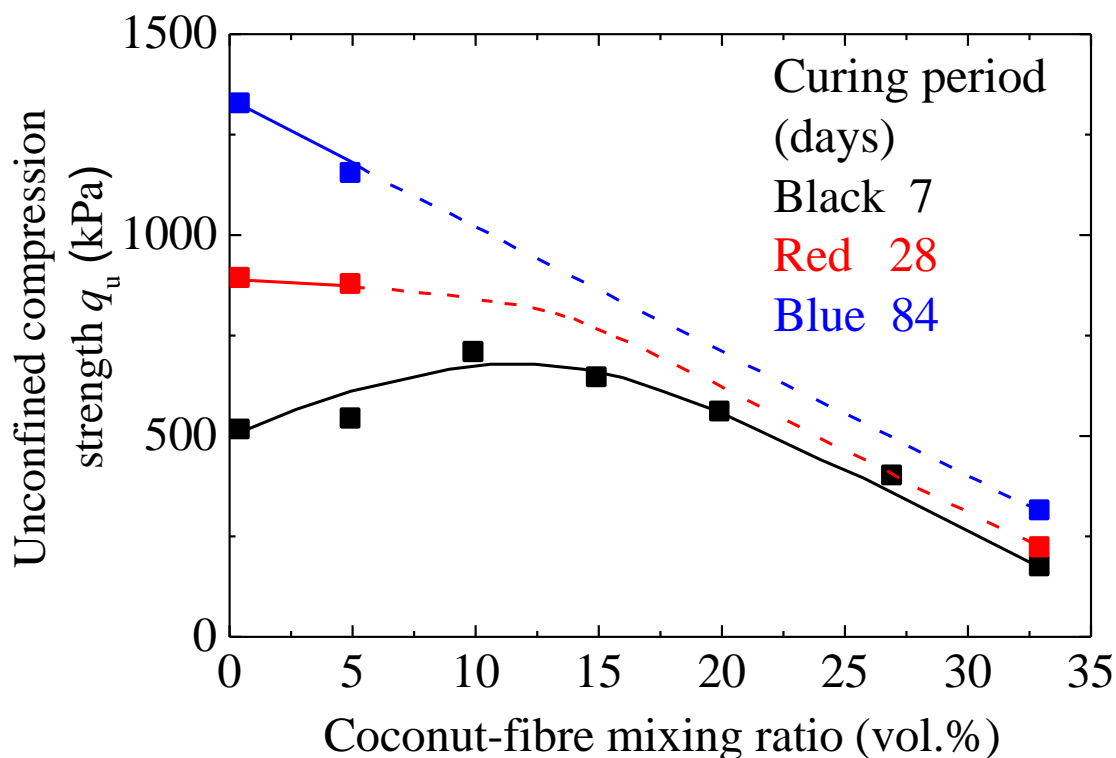


図 4.2-6 ココヤシ繊維混合割合と一軸圧縮強さの関係(養生期間 7, 28, 84 日)

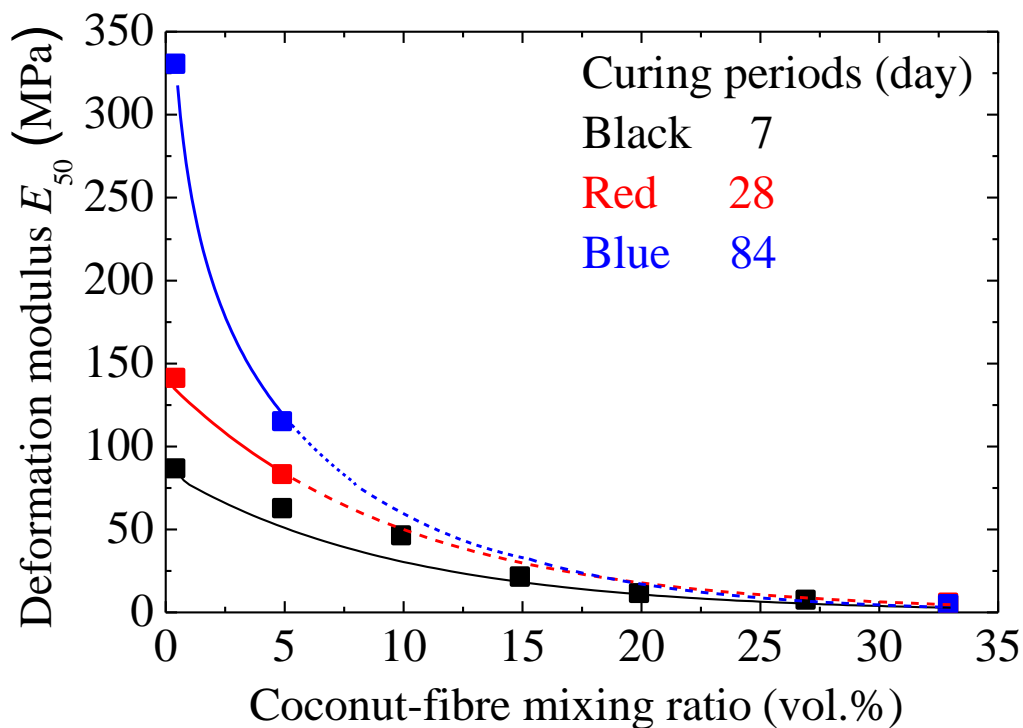


図 4.2-7 ココヤシ繊維混合割合と変形係数の関係(養生期間 7, 28, 84 日)

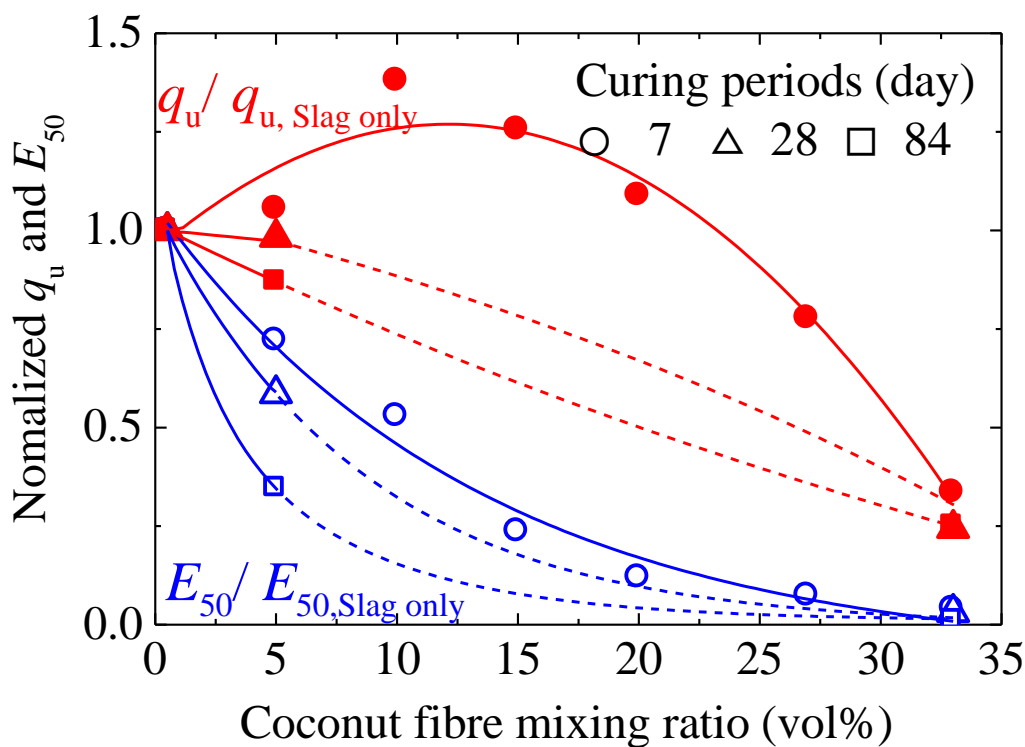


図 4.2-8 ココヤシ繊維混合割合と正規化した q_u および E_{50} の関係(養生期間 7, 28, 84 日)

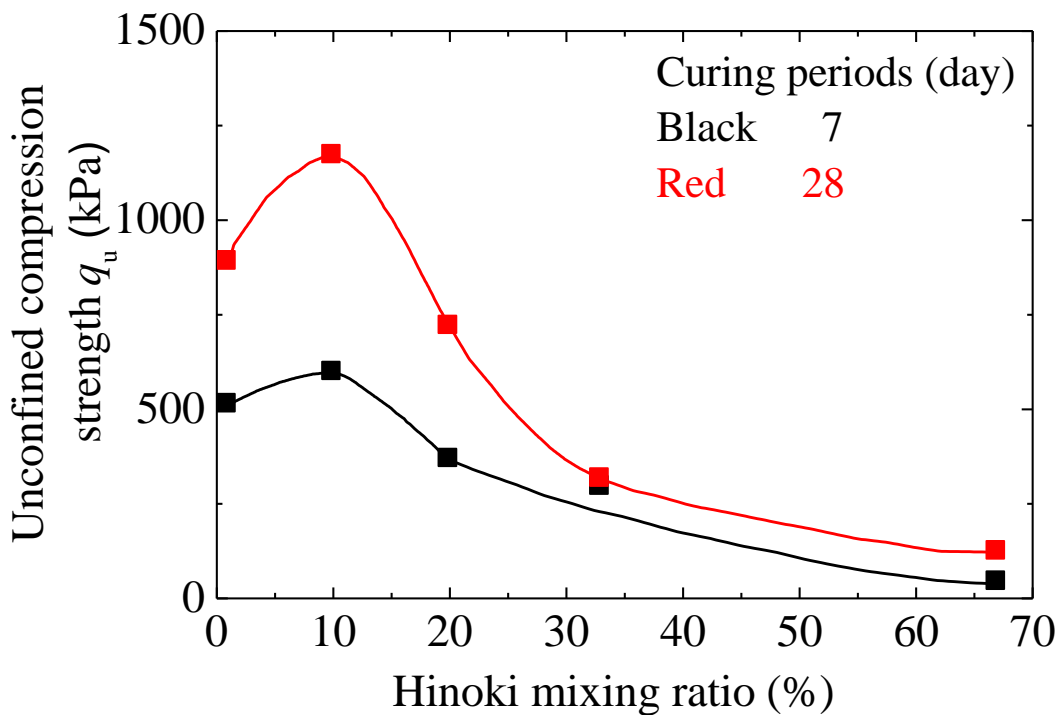


図 4.2-9 ヒノキ混合割合と一軸圧縮強さの関係(養生期間 7, 28 日)

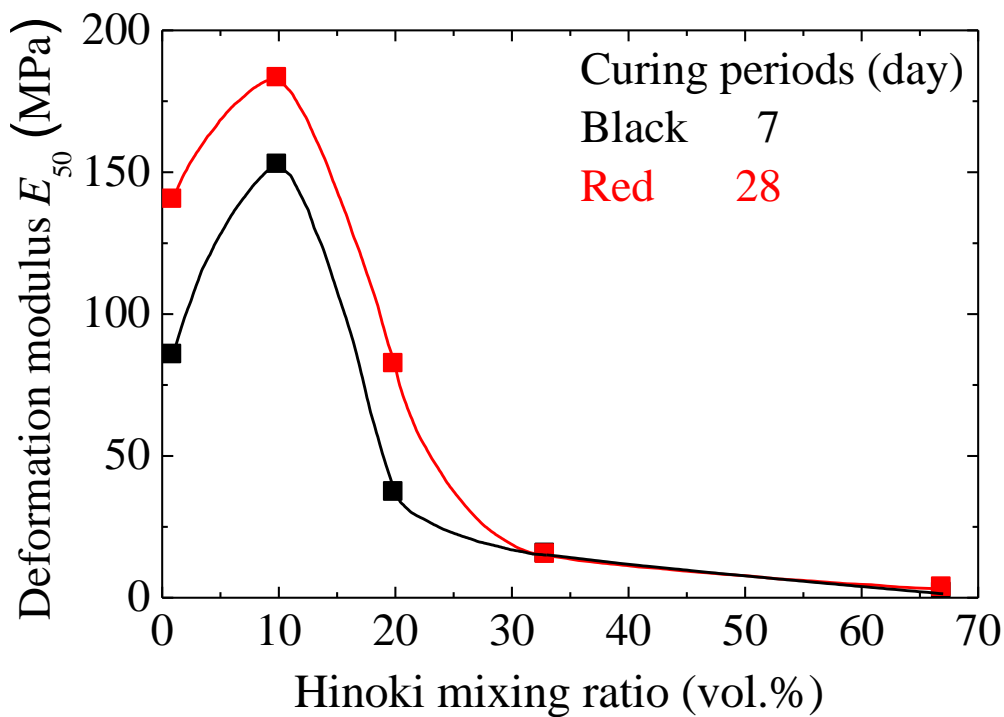


図 4.2-10 ヒノキ繊維混合割合と変形係数の関係(養生期間 7, 28 日)

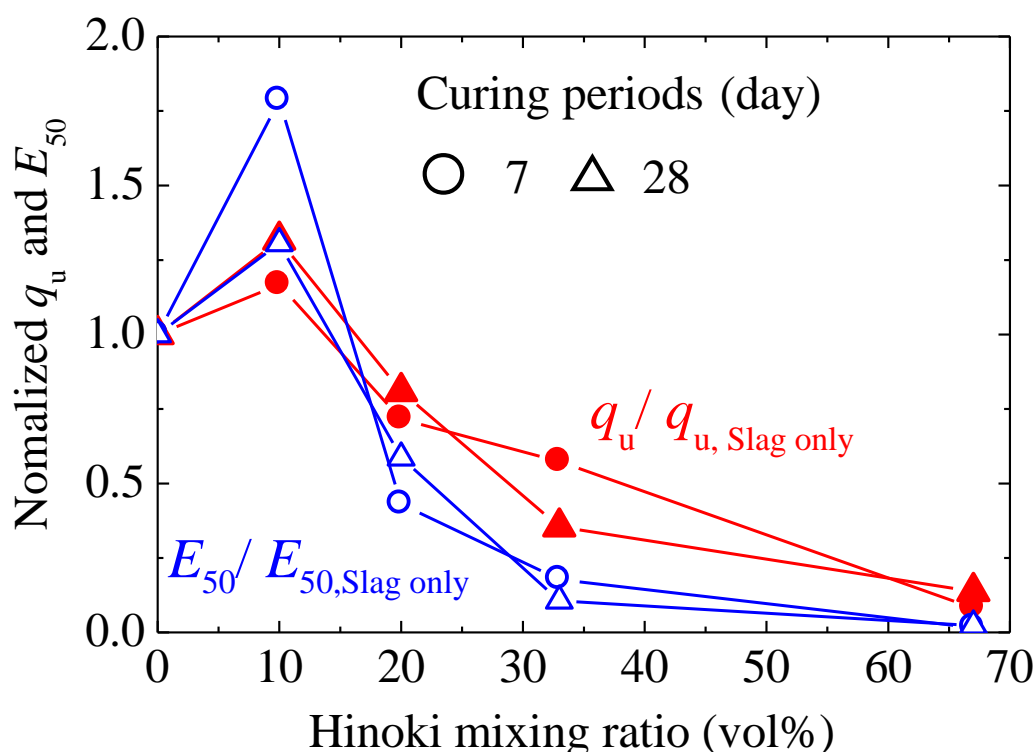


図 4.2-11 ヒノキ混合割合と正規化した q_u および E_{50} の関係(養生期間 7, 28 日)

次に、 CD 試験の結果を示す。表 4.2-1 では UC 試験の結果を基に、木屑混合割合を限定し、より長期的な養生期間の影響について検討した。表 4.2-1 に示すように、養生 0, 7, 28, 84, 約 336, 約 672, 約 1008 日の供試体に対し CD 試験を行い、以降に長期養生によるせん断特性(最大せん断強さ、初期剛性、残留強度)の変化を評価・検討した結果について示す。なお、約 336, 約 672, 約 1008 日養生とはそれぞれ養生 334~337 日, 672~675 日, 999~1008 日と正確には多少異なる養生日数となっているためである。以降、木屑混合割合ごとで整理する際は図中の凡例に正確な養生期間を示しているが、全条件をまとめて図中に示す際などは簡略化して 336, 672, 1008 日として示しているため留意されたい。

図 4.2-12 にココヤシ繊維とスラグ 4(2018)を用いて実施した CD 試験の応力ひずみ関係を養生日数別にまとめて示す。図中のプロットは最大せん断強さを示している。なお、比較のため図 4.1-8 の 7 日養生の結果も示している。図 4.2-12 より、ココヤシ繊維混合割合が 10 vol.%以下の場合にはいずれの養生期間においても最大せん断強さを示した後に軟化挙動を示し、ココヤシ繊維を 33 vol.%混合した場合には試験が終了するまで明確なピーク強度を示していないことが分かる。また、ばらつきはあるものの、ココヤシ繊維混合割合が 10 vol.%以下の場合の残留強度はいずれの養生期間においても同程度($q_{res} = 400$ kPa)であることが分かる。

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

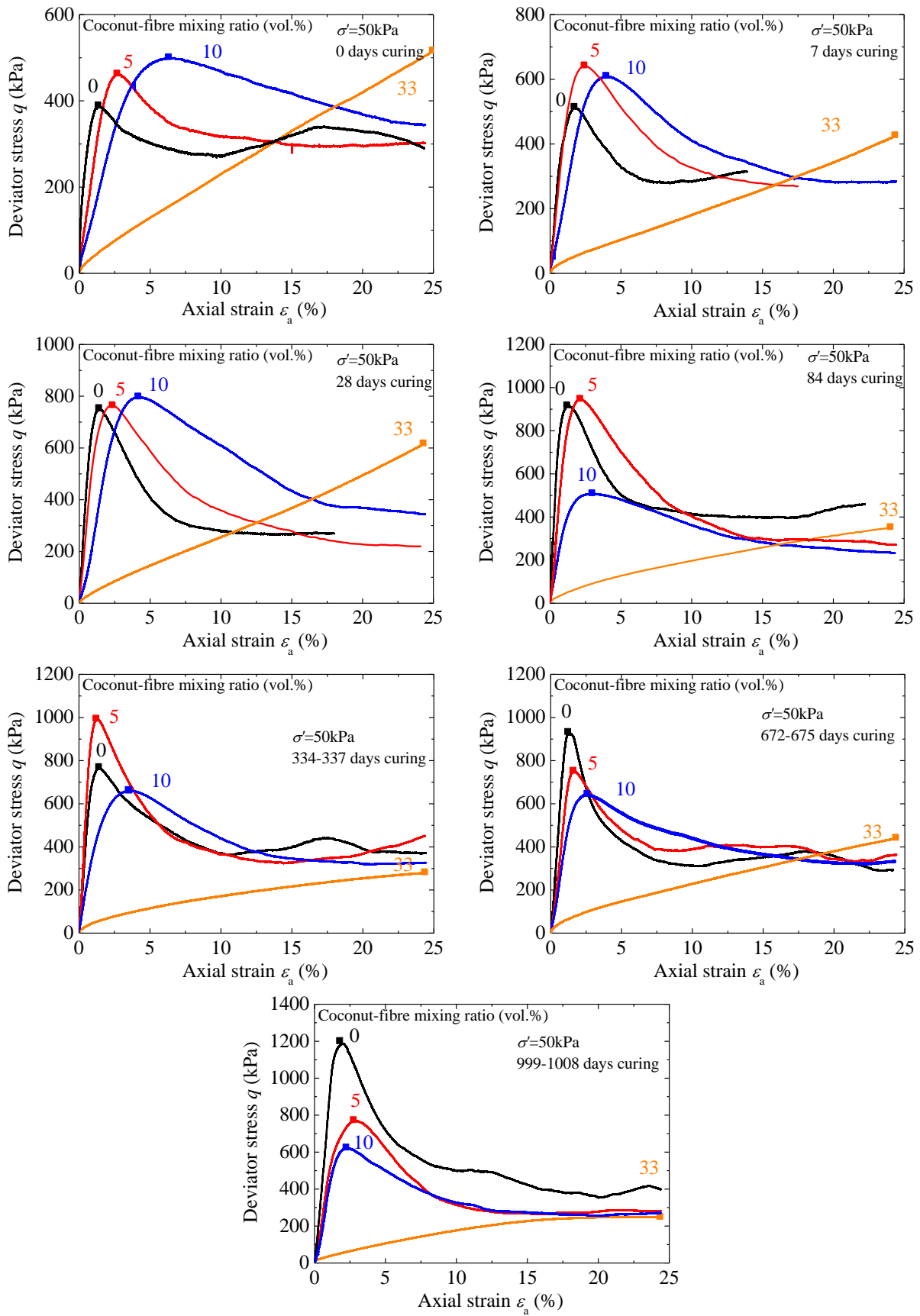


図 4.2-12 養生期間別の応力ひずみ関係(ココヤシ繊維混合)

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

図 4.2-13 にココヤシ繊維混合スラグ 4(2018)材料の養生期間と乾燥密度の関係を示す。図中の 4 本の点線はそれぞれの供試体作製時の目標乾燥密度である。なお、ココヤシ繊維混合割合 5 vol.%と 33 vol.%の 1008 日養生では供試体を脱型する際に一部が欠落してしまった為、乾燥密度の算出が困難であった。図 4.2-13 より、スラグ 4(2018)のみでは養生 84 日までに乾燥密度がわずかに増加することが確認できるが、木屑を混合した場合にはほとんど増加しないことが分かる。

図 4.2-14 にココヤシ繊維混合スラグ 4(2018)材料の養生期間と最大せん断強さの関係を示す。図 4.2-14(b)は、図 4.2-14(a)を横軸(養生期間)の縮尺を大きくし、0~84 日養生を示したものである。なお、ココヤシ繊維混合割合が 33 vol.%では試験終了時まで軸差応力が増加し続けたため、ピーク強度は不明であるが、ここでは比較のために試験終了時の軸差応力を最大せん断強さとして示している。図 4.2-14(a),(b)より、全体的にばらつきがあるものの、ココヤシ繊維 10 vol.%以下の q_{max} は 84 日養生までは増加し、それ以降はわずかに増加するか、ほとんど変わらない。また、ココヤシ繊維を 33 vol.%混合した場合の q_{max} は 28 日養生で増加し、84 日養生では大きく減少し、それ以降は養生期間の増加に伴う q_{max} の増加は確認できない。84 日養生で q_{max} が減少した要因を以降に示す養生期間と変形係数の関係(図 4.2-15)や第 6 章に示す木材腐朽実験の結果と併せて考えると、混合した木屑が養生によって劣化した可能性よりも個体差によるばらつきであると考えられる。また、図 4.2-6 に示す一軸圧縮試験の結果から、養生なしから養生 28 日にかけての q_{max} の増加についても個体差である可能性がある。つまり、ココヤシ繊維 33 vol.%では養生による q_{max} の増加はほとんど起こらない可能性が高い。

図 4.2-15 にココヤシ繊維混合スラグ 4(2018)材料の養生期間と変形係数の関係を示す。なお、図 4.2-14 で述べたようにココヤシ繊維 33 vol.%ではピーク強度が不明なため E_{50} も算出できないが、比較のために試験終了時を最大せん断強さとして E_{50} を算出した。図 4.2-15 より、ばらつきはあるもののスラグ 4(2019)のみとスラグ 5 vol.%は養生期間によらず同程度である。また、ばらつきはあるものの、ココヤシ繊維 10 vol.%以下では 84 日養生までは増加し、その後は大きく変化しないことが分かる。そしてココヤシ繊維 33 vol.%では養生なしと 84 日養生以降の E_{50} が同程度であることから養生によって E_{50} は変化しないと推察される。

以上、図 4.2-14 と図 4.2-15 より、ココヤシ繊維 10 vol.%以下では 84 日養生まで q_{max} および E_{50} は増加するものの、84 日養生以降はほとんど変化しないことが分かった。また、ココヤシ繊維 33 vol.%では q_{max} も E_{50} も養生による変化はほとんど見られないことが分かった。

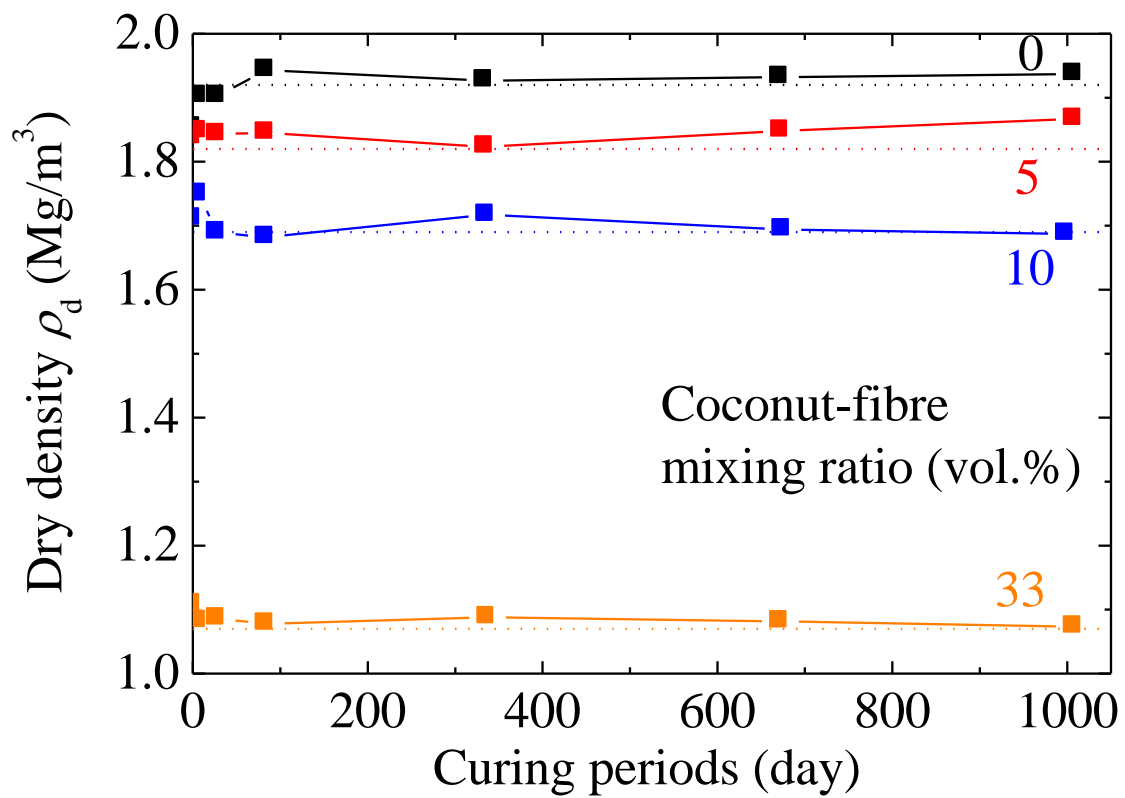
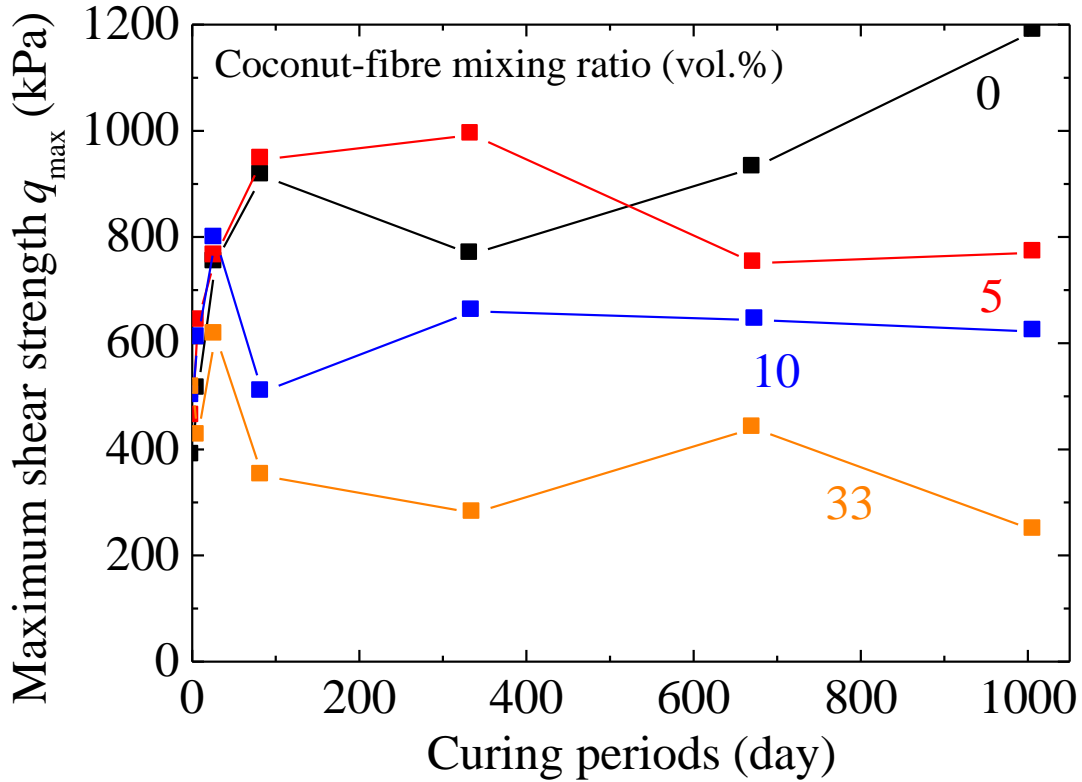
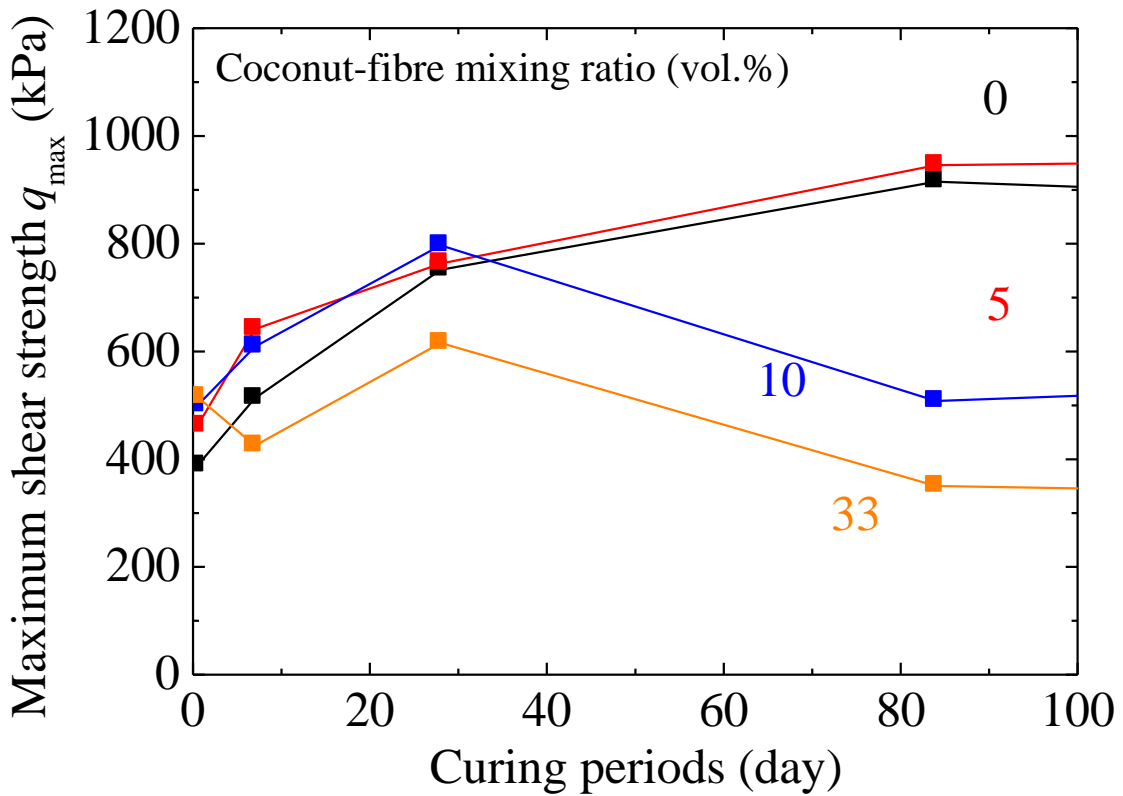


図 4.2-13 養生期間と乾燥密度の関係(ココヤシ繊維混合)



(a) 0 ~ 1008 日養生



(b) 0 ~ 84 日養生

図 4.2-14 養生期間と最大せん断強さの関係(ココヤシ繊維混合)

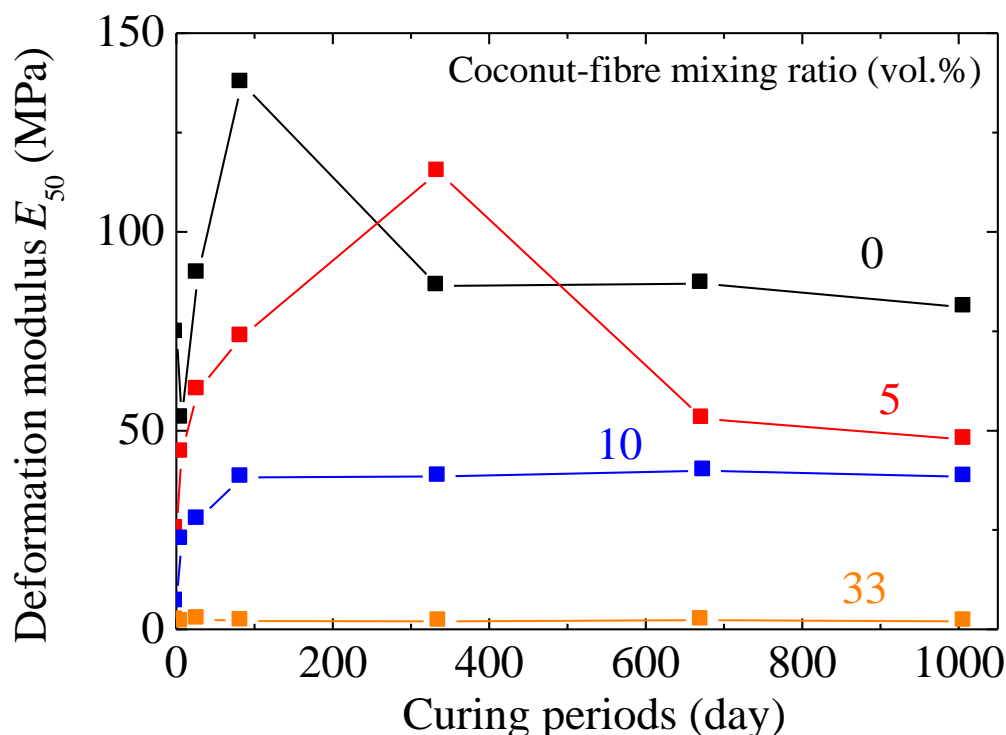


図 4.2-15 養生期間と変形係数の関係(ココヤシ繊維混合)

図 4.2-13 から図 4.2-15 の乾燥密度，最大せん断強さ，変形係数の結果を基に，それぞれの養生なしの値($q_{\max_0\text{ days curing}}$, $E_{50_0\text{ days curing}}$, $\rho_{d_0\text{ days curing}}$)で正規化したものを配合割合別に図 4.2-16 から図 4.2-19 に示す．図 4.2-16 より，スラグ 4(2018)のみの場合，乾燥密度と最大せん断強さおよび変形係数の間には一定の関係があり，せん断強さが増加すると変形係数も増加し，せん断強さが変化しない場合には変形係数も変化しないことが分かる．また，養生 84 日まではスラグが固結することで乾燥密度が増加し，それに伴い最大せん断強さおよび変形係数が増加する傾向が見られる．一方で，図 4.2-17 から図 4.2-19 のココヤシ繊維を混合した場合には，これらの 3 つの値に関係性は全く見られない．この理由として容易に考えられる要因は乾燥密度の計測誤差である．乾燥密度を算出する際の体積計測が誤差を含みやすいと考えられる．体積の計測は直径と高さを 3 か所で 0.1 mm オーダーで行っているが，供試体は微小な凹凸があることや木屑を含む場合には脱型による応力開放によって体積膨張することがあり，計測箇所によって直径 0.1 mm 程度，高さ 1.0 ~ 1.5mm 程度の誤差が生じてしまう．特に木屑混合割合が増加するほど，その誤差が大きくなることは経験的に分かっており，例えば仮に，直径 0.1 mm，高さ 1.0 mm の誤差があっただけでも乾燥密度は $0.02 \sim 0.03 \text{ Mg/m}^3$ の誤差を生じる．この計測誤差がどの程度影響しているかを判断することは難しいが，

以上，図 4.2-16 から図 4.2-19 より，スラグ 4(2018)のみに関しては養生によるせん断強さおよび変形係数の増加と乾燥密度の増加に正の相関が見て取れることから，固結の影響が乾燥密度に現れるが，木屑を 5 vol.%混合しただけでせん断強さおよび変形係数の増加と乾燥密度の変化に相関が見られなくなることから，固結の影響を乾燥密度の変化から捉えることは困難となる．

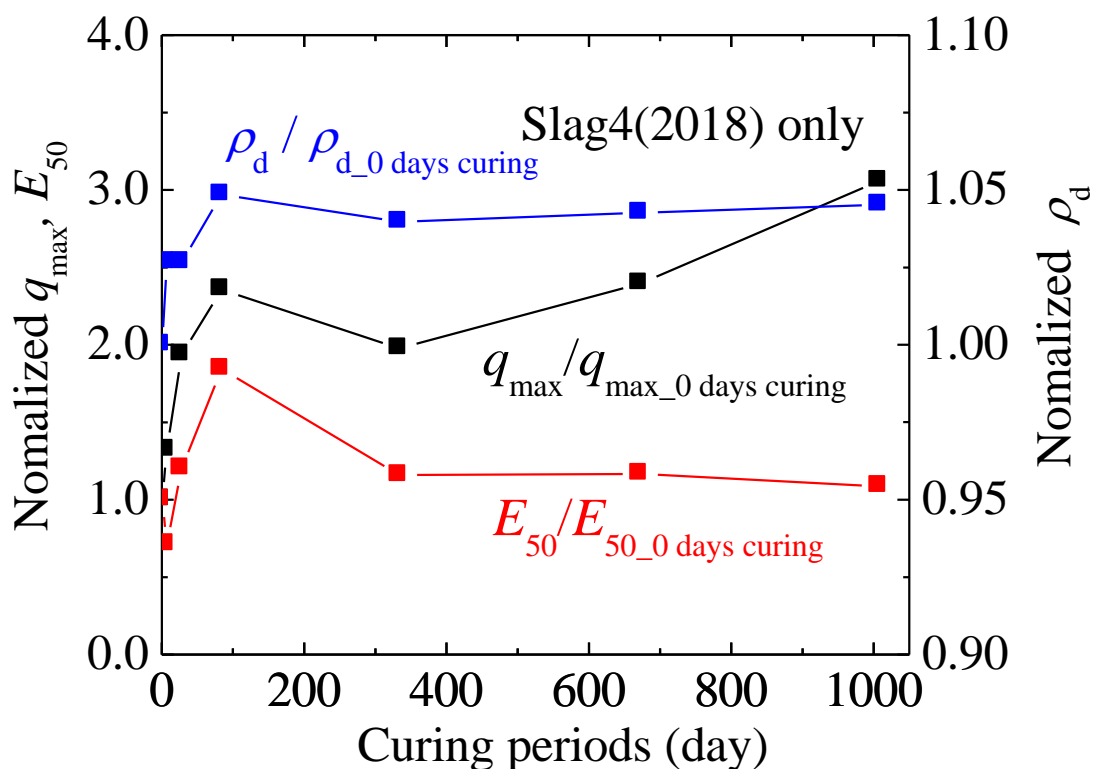


図 4.2-16 養生期間と正規化した q_{max} , E_{50} , ρ_d の関係(スラグ 4(2019)のみ)

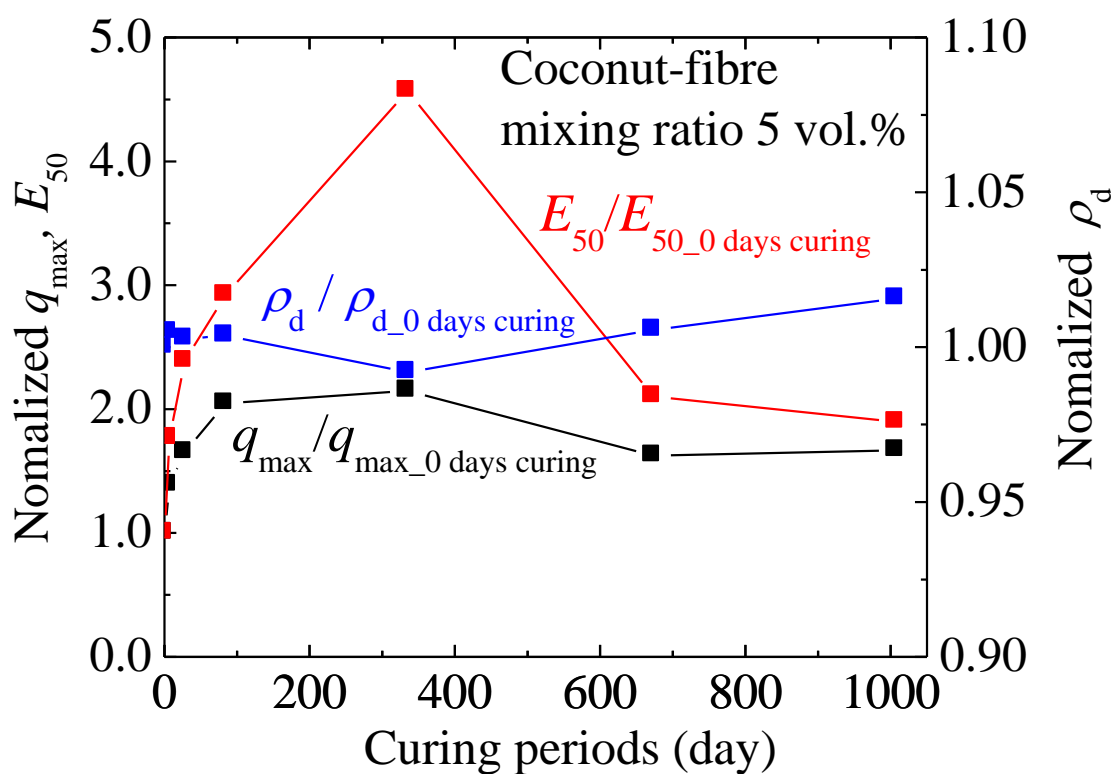


図 4.2-17 養生期間と正規化した q_{max} , E_{50} , ρ_d の関係(ココヤシ繊維混合割合 5 vol.%)

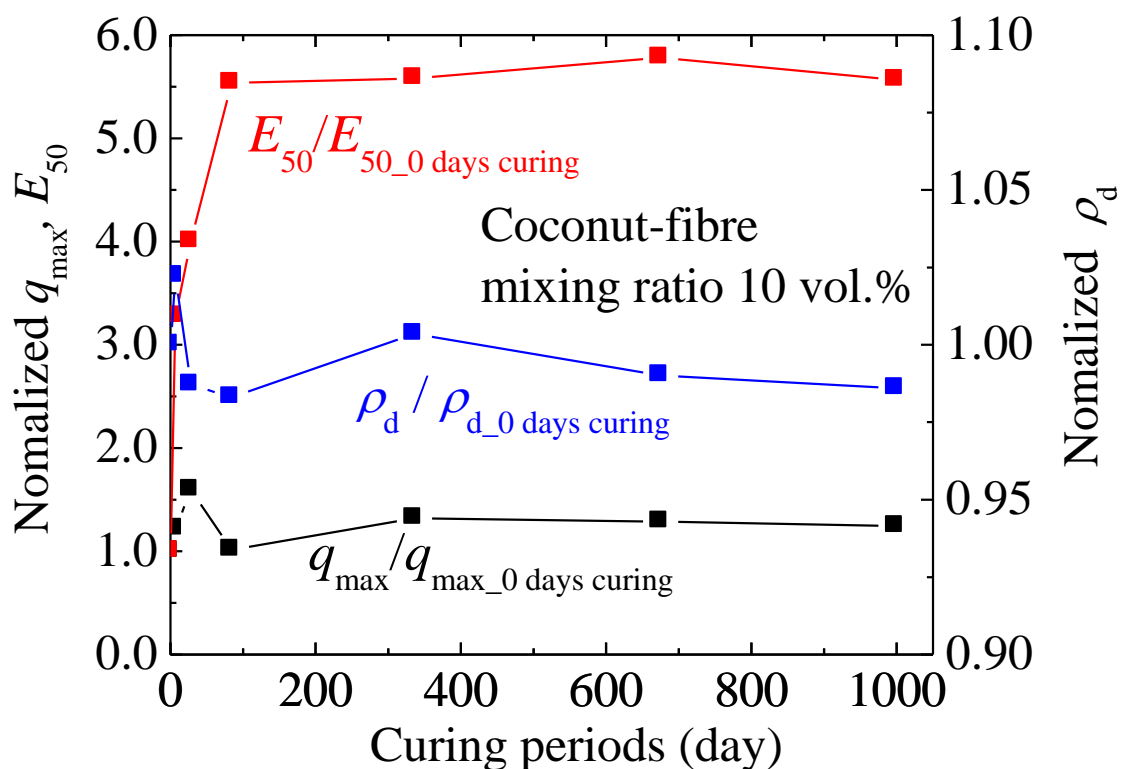


図 4.2-18 養生期間と正規化した q_{max} , E_{50} , ρ_d の関係(ココヤシ繊維混合割合 10 vol.%)

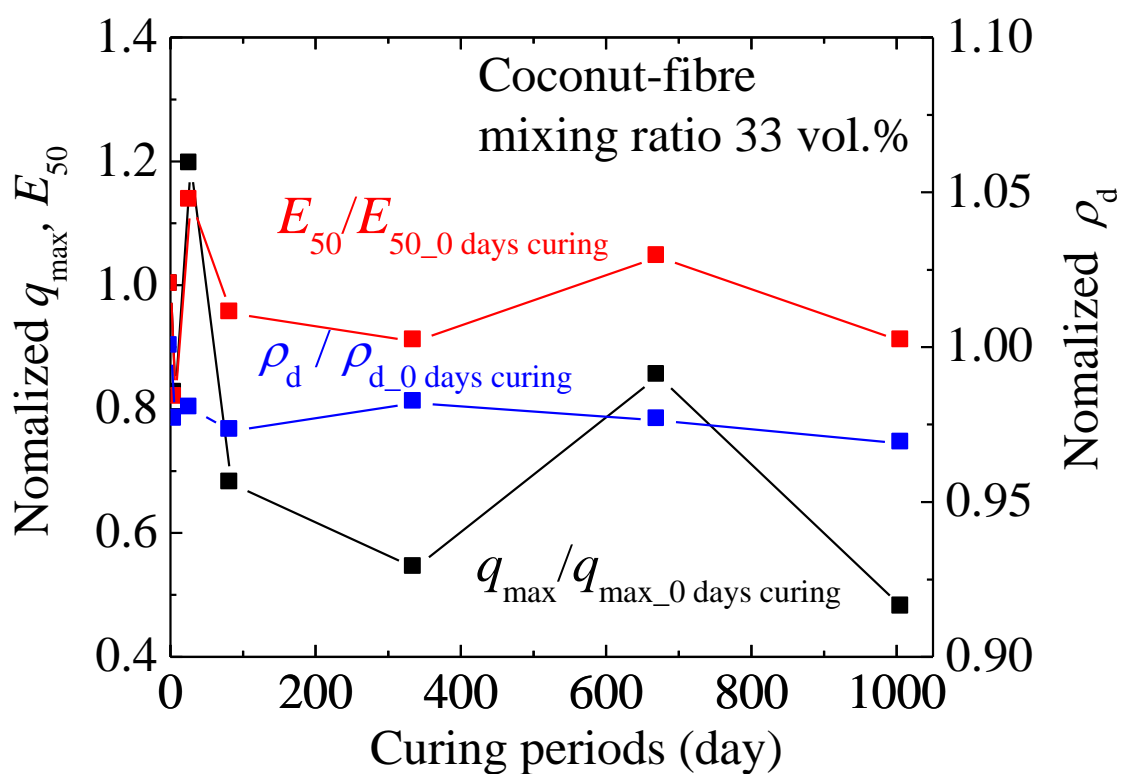


図 4.2-19 養生期間と正規化した q_{max} , E_{50} , ρ_d の関係(ココヤシ繊維混合割合 33 vol.%)

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

図4.2-20にココヤシ繊維混合スラグ4(2018)材料の養生期間と破壊ひずみの関係を示す。なお、ココヤシ繊維混合割合が33 vol.%の場合には試験終了までピーク強度を発現しなかったことから示していない。図4.2-20より、ばらつきはあるものの、ココヤシ繊維混合割合が高いほど養生による破壊ひずみの低下が顕著である。また、養生期間によらず、ココヤシ繊維混合割合が高いほど、破壊ひずみも大きいことが分かる。

図4.2-21にココヤシ繊維混合割合と最大せん断強さの関係を示す。なお、凡例の336日養生や672日養生は、配合条件によって養生期間が1~3日程度異なるが、ここでは目標養生期間である336日養生や672日養生として示している。図4.2-21より、ココヤシ繊維混合割合が増加すると、養生による最大せん断強さの増加が小さくなることが分かる。これはココヤシ繊維混合割合の増加に伴い、供試体の単位体積当たりには占めるスラグ固化材が減るためである。そして、ココヤシ繊維混合割合が33 vol.%の場合、28日養生以外の養生期間における q_{max} は養生なしの q_{max} よりも小さいことからスラグの固化には期待できず、さらに q_{max} のばらつきも大きいことが分かる。

図4.2-22にココヤシ繊維混合割合と変形係数の関係を示す。凡例については図4.2-21と同様である。図4.2-22より、ココヤシ繊維混合割合が5 vol.%の336日養生が他とは異なる傾向を示したが、これをばらつきと考えると、ココヤシ繊維を5 vol.%程度混合しただけで変形係数はスラグ4(2018)のみよりも大幅に低下することが分かる。

図4.2-21と図4.2-22の結果を図4.2-6のココヤシ繊維混合割合-一軸圧縮強さの関係と図4.2-7のココヤシ繊維混合割合-変形係数の関係とそれぞれ比較すると、ココヤシ繊維の混合による強度および剛性への影響はほとんど同じである(グラフの変化傾向が似ている)ことが分かる。つまり、飽和条件(不飽和・飽和)や有効拘束圧(0 kPa・50 kPa)が変化しても、ココヤシ繊維を混合することによる強度および剛性の変化傾向はほとんど変わらない。ただし、UC試験では33 vol.%混合時のピーク強度が10 vol.%混合時よりも低いのに対し、CD試験では33 vol.%混合時と10 vol.%混合時でほとんど変わらないのは、33 vol.%混合時の破壊が圧縮破壊であることが大きく影響している。UC試験では拘束圧がないことから大変形に伴い供試体が折れ曲がるようにして破壊するのに対し、CD試験では試験終了時まで圧縮し続け、軸差応力も増加し続ける。このことから、ココヤシ繊維を33 vol.%混合した場合のように大きな圧縮を伴う材料に関しては、UC試験では最大強度を過小評価する可能性がある。また、 E_{50} の絶対値はUC試験で得られる E_{50} のほうがCD試験で得られる E_{50} よりも明らかに大きいことから、ココヤシ繊維混じり鉄鋼スラグ固化材料の剛性は、拘束圧による正の影響よりも飽和化による負の影響によって大幅に低下すると考えられる。

以上の結果から、ココヤシ繊維混合割合が10 vol.%以下では84日まではスラグ4(2018)の固化反応によって q_{max} および E_{50} は増加するものの、そこから3年養生しても、 q_{max} および E_{50} はわずかに増加するか、ほとんど変わらないことが分かった。また、ココヤシ繊維混合割合が33 vol.%ではばらつきが大きく判断が難しいが、養生しても力学特性はほとんど変化しないと推察される結果が得られた。

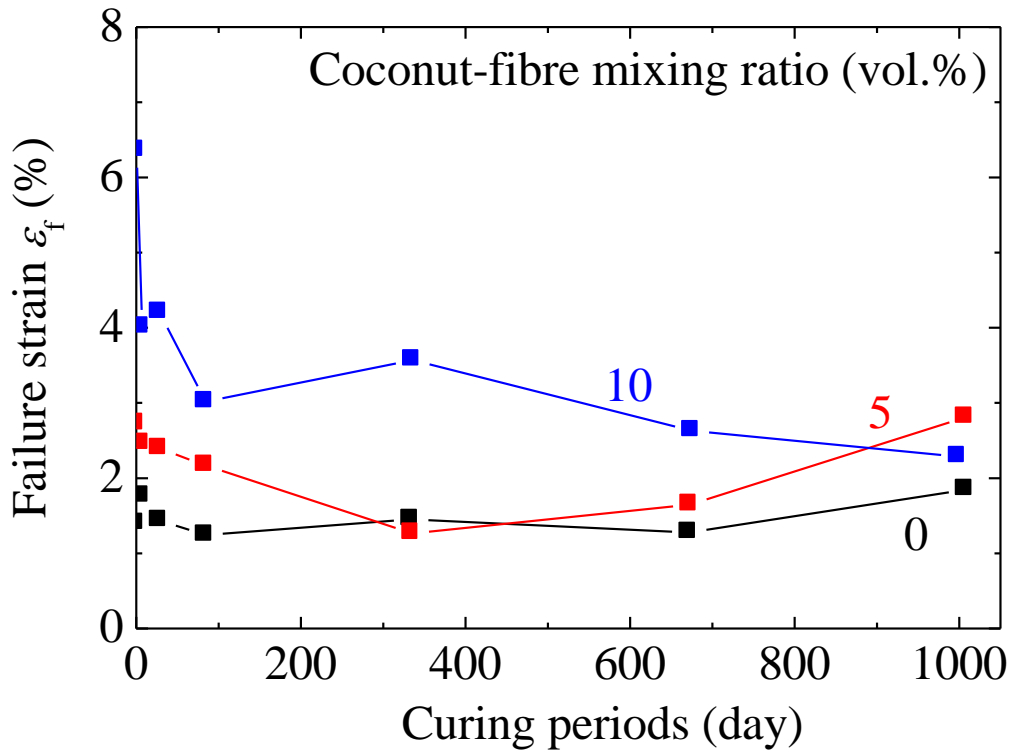


図 4.2-20 養生期間と破壊ひずみの関係(ココヤシ繊維混合)

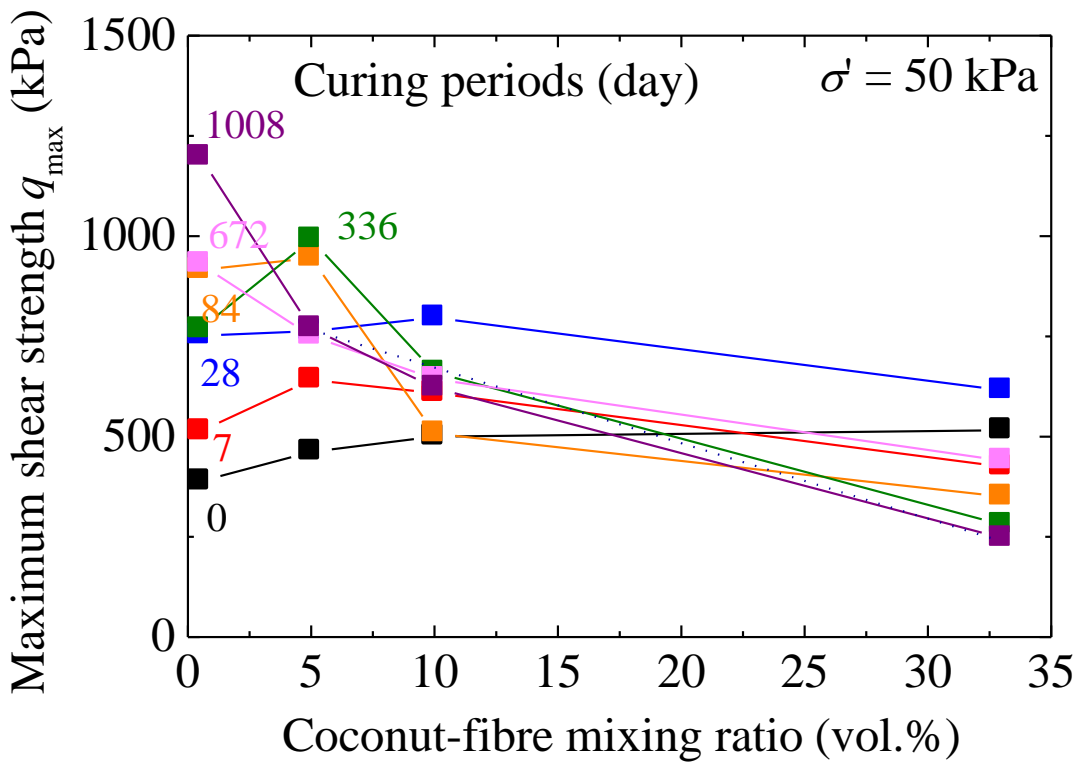


図 4.2-21 ココヤシ繊維混合割合と最大せん断強さの関係

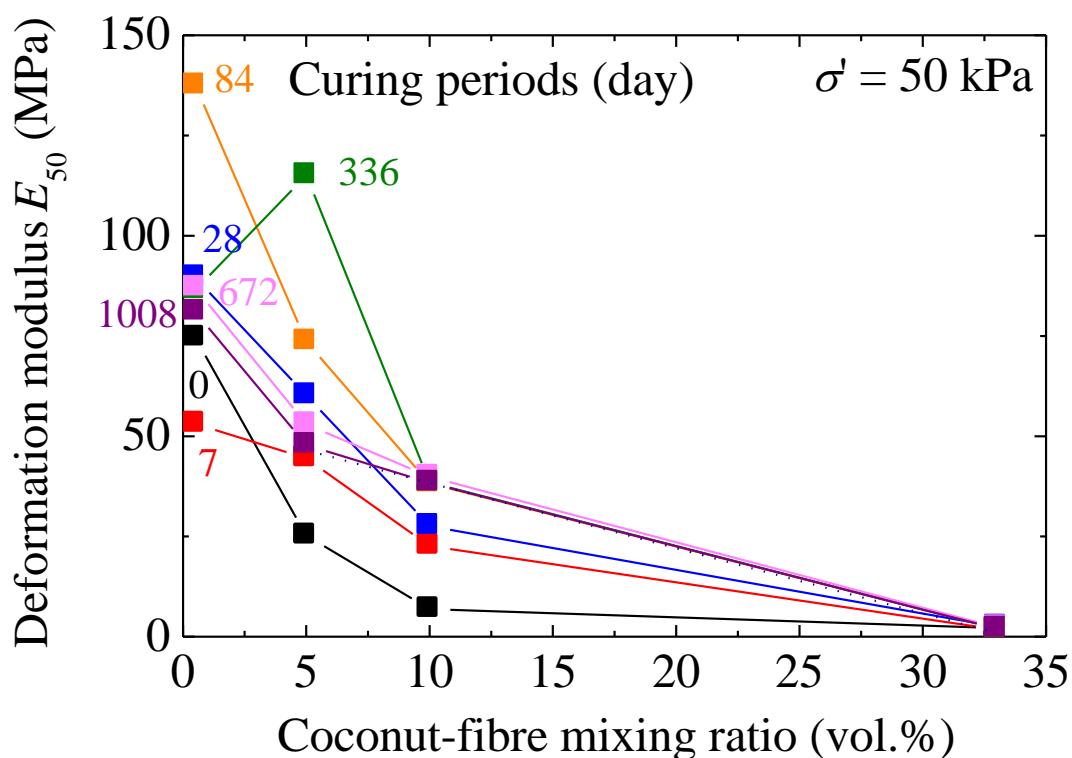


図 4.2-22 ココヤシ繊維混合割合と変形係数の関係

次に、図 4.2-23 にヒノキとスラグ 4(2018)を用いて実施したCD試験の応力ひずみ関係を養生日数別にまとめて示す。図中のプロットは最大せん断強さを示している。なお、図 4.1-9 の 7 日養生の結果も示している。図 4.2-23 より、ヒノキ混合割合が 33 vol.%以下の場合にはいずれの養生期間においても最大せん断強さを示した後に軟化挙動を示し、ヒノキを 67 vol.%混合した場合には試験が終了するまで明確なピーク強度を示していないことが分かる。また、図 4.2-12 のココヤシ繊維混合の養生期間別の応力ひずみ関係と比較すると、ヒノキ混合割合 33 vol.%の応力ひずみ関係はココヤシ繊維混合割合 10 vol.%の応力ひずみ関係と似た傾向を、またヒノキ混合割合 67 vol.%の応力ひずみ関係はココヤシ繊維混合割合 33 vol.%の応力ひずみ関係と似た傾向を示すことから、混合する木屑の形状が異なると、同一の混合体積であっても応力ひずみ曲線は大きく異なることが分かる。そして、この傾向は図 4.1-9 の不飽和かつ拘束圧 0 kPa の一軸圧縮試験の結果と一致する。

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

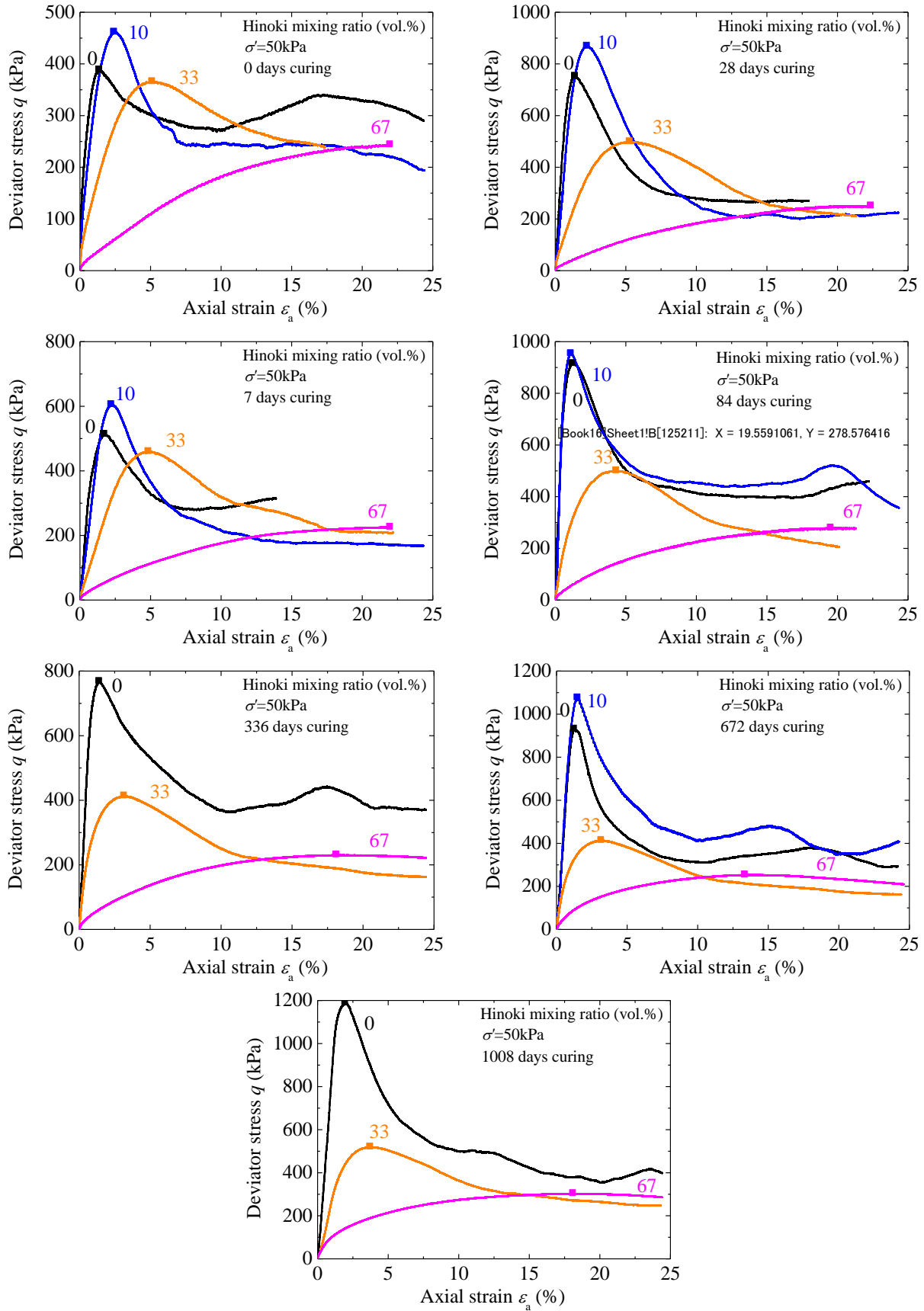


図 4.2-23 養生期間別の応力ひずみ関係(ヒノキ混合)

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

図 4.2-24 にヒノキ混合スラグ 4(2018)材料の養生期間と乾燥密度の関係を示す。図中の 4本の点線はそれぞれの供試体作製時の目標乾燥密度である。図 4.2-24 より、ヒノキ混合割合 67 vol.%の 672 日を除き、各混合割合で養生期間の増加に伴う乾燥密度の変化は見られない。

図 4.2-25 にヒノキ混合スラグ 4(2018)材料の養生期間と最大せん断強さ q_{max} の関係を示す。なお、ヒノキ混合割合 10 vol.%では 336 日養生と 1008 日養生の結果がないため、84 日養生と 672 日養生を破線で結んでいる。また、ヒノキ混合割合が 67 vol.%の一部では試験終了時まで軸差応力が増加し続けたため、ピーク強度は不明であるが、ここでは比較のために試験終了時の軸差応力を q_{max} として示している。図 4.2-25 より、全体的にばらつきがあるものの、スラグ 4(2018)のみとヒノキを 10 vol.%混合した場合、84 日養生までは養生期間の増加に伴い、 q_{max} は増加し、それ以降はわずかに増加するかほとんど変化しない。また、33 vol.%混合した場合の q_{max} は養生なしから養生 28 日にかけて q_{max} が増加するものの、それ以降は養生しても q_{max} はほとんど変化せず、336 日養生や 672 日養生の q_{max} は 7 日養生よりも小さくなる。つまり、7 日養生から 28 日養生に変えて q_{max} の増加は供試体のばらつきであると考えられる。そして、図 4.2-10 に示した UC 試験のヒノキ 33 vol.%の結果でも 7 日養生から 28 日養生にかけて q_u の増加が見られなかったことを加味すると、よりばらつきである可能性が高いと考えられる。さらに 67 vol.%混合した場合は養生による q_{max} の増加は確認できない。

図 4.2-26 にヒノキ混合スラグ 4(2018)材料の養生期間と変形係数の関係を示す。なお、ヒノキ混合割合 10 vol.%では 336 日養生と 1008 日養生の結果がないため、84 日養生と 672 日養生を破線で結んでいる。また、ヒノキ混合割合が 67 vol.%ではピーク強度が不明なため E_{50} も算出できないが、比較のために試験終了時を最大せん断強さとして E_{50} を算出した。図 4.2-26 より、ヒノキ混合割合 10 vol.%以下ではばらつきはあるものの、84 日養生までは養生期間の増加に伴い E_{50} の増加がそれ以降はやや減少かほとんど変化しないことが分かる。また、ヒノキ 33 vol.%も 84 日養生までは養生期間の増加に伴い、 E_{50} も増加し、その後はほとんど変化していない。こうしてみると 84 日までは E_{50} が増加するように思えるが、672 日養生の E_{50} は 28 日養生の E_{50} と 84 日養生の E_{50} の間の値を取るから、ばらつきも相当に含まれる可能性がある。また、図 4.2-25 でも述べたように、ヒノキ 33 vol.%では供試体のばらつきを含む可能性が十分にあることから、 E_{50} についても q_{max} と同様に 7 日養生以降は変化しないと捉えることができる。そして、ヒノキ 67 vol.%は、図 4.2-25 の養生による q_{max} の変化と同様、ばらつきはあるものの、養生によって E_{50} はほとんど変化しないと考えられる。

以上、図 4.2-25 と図 4.2-26 より、ヒノキ混合割合が 10 vol.%以下では 84 養生まで、養生期間の増加とともに q_{max} および E_{50} は増加し、その後はほとんど変化しないことが分かった。また、ヒノキ混合割合が 33 vol.%以上となると試験結果にばらつきが多くなり、33 vol.%では 7 日養生までは q_{max} および E_{50} は増加し、その後は変化せず、また 67 vol.%では養生によって q_{max} および E_{50} が変化しないことが分かった。

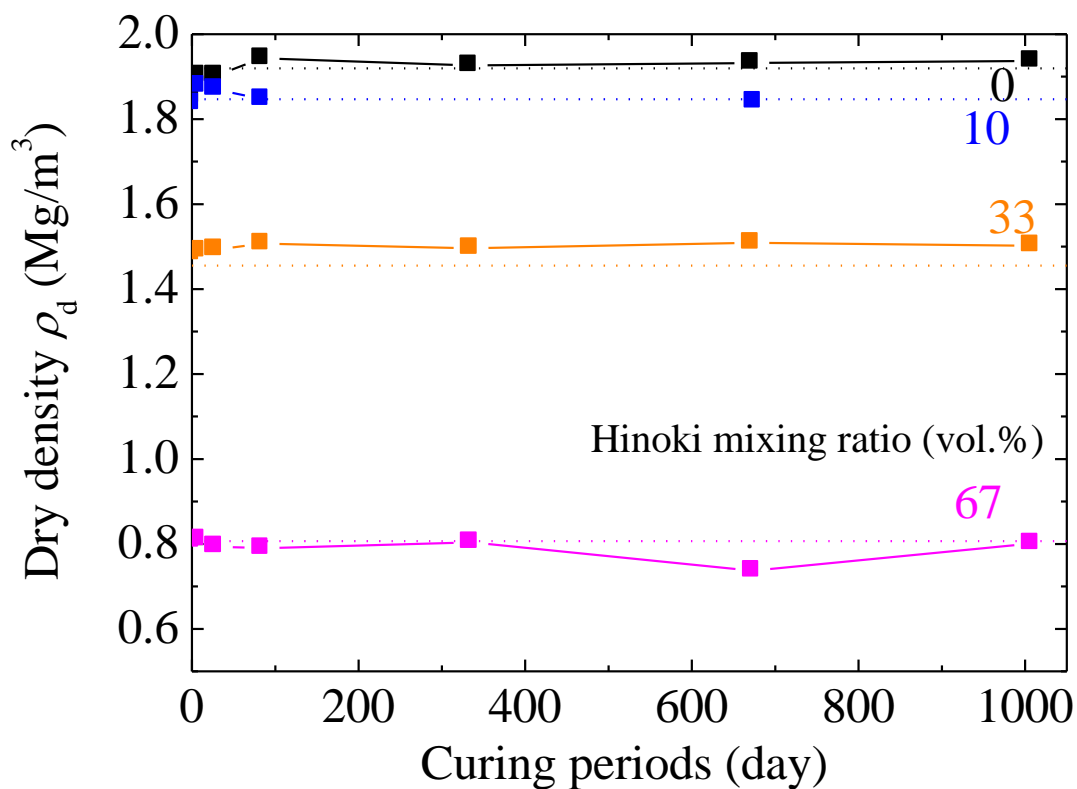


図 4.2-24 養生期間と乾燥密度の関係(ヒノキ混合)

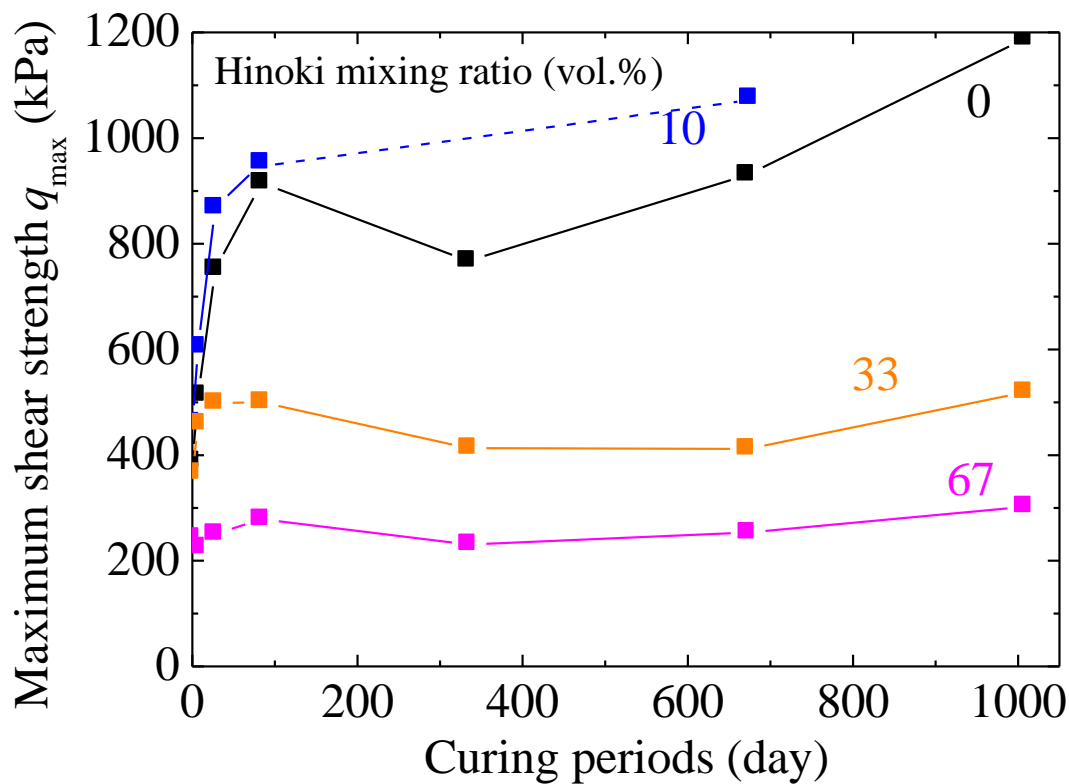


図 4.2-25 養生期間と最大せん断強さの関係(ヒノキ混合)

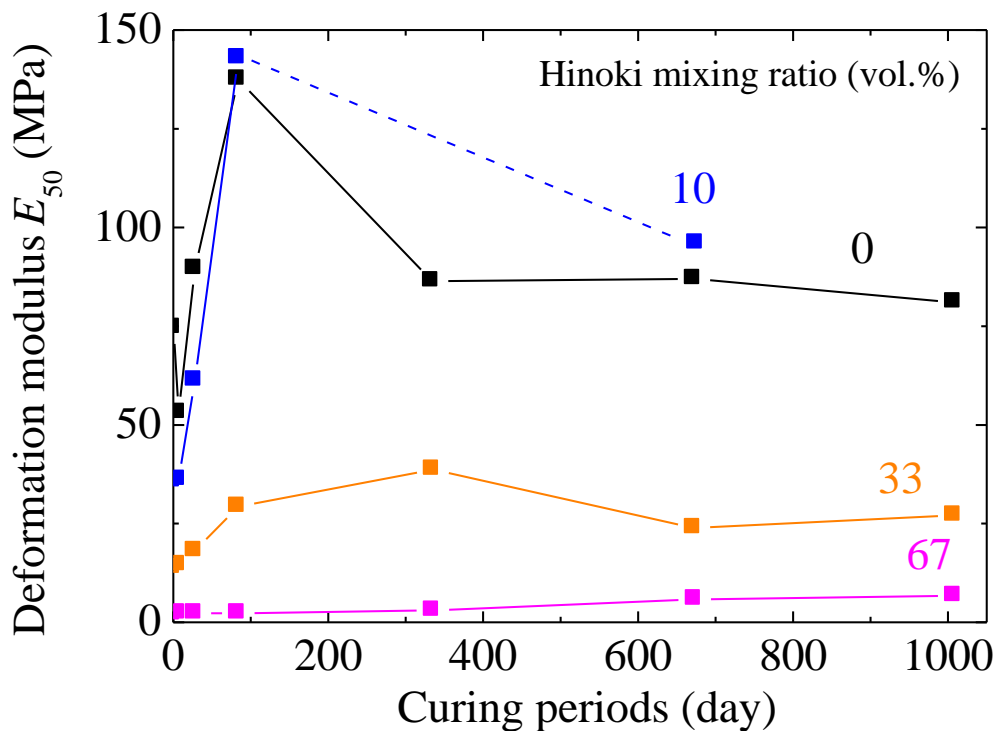


図 4.2-26 養生期間と変形係数の関係(ヒノキ混合)

図 4.2-24 から図 4.2-26 の乾燥密度，最大せん断強さ，変形係数の結果を基に，それぞれの養生なしの値($q_{\max_0 \text{ days curing}}$, $E_{50_0 \text{ days curing}}$, $\rho_{d_0 \text{ days curing}}$)で正規化したものを配合割合別に図 4.2-27 から図 4.2-30 に示す．図 4.2-27 から図 4.2-30 より，いずれのヒノキ混合割合によらず乾燥密度の変化とせん断強度および変形係数の変化とに相関は見られない．

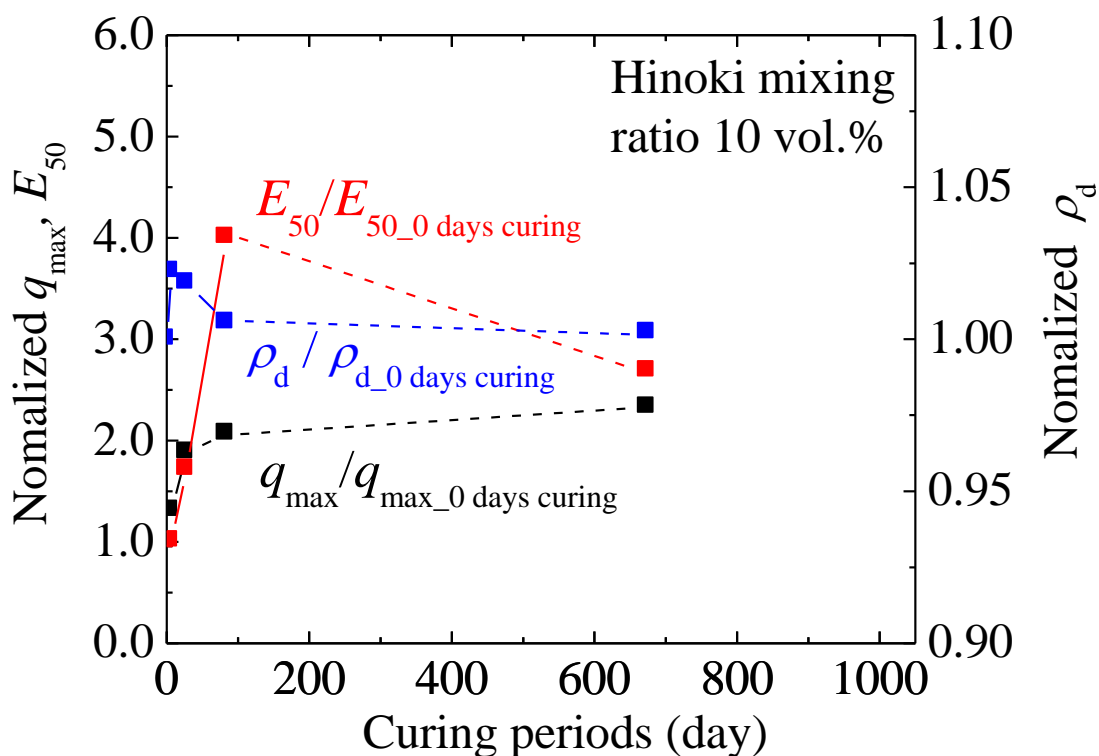


図 4.2-27 養生期間と正規化した q_{max} , E_{50} , ρ_d の関係(ヒノキ混合割合 10 vol.%)

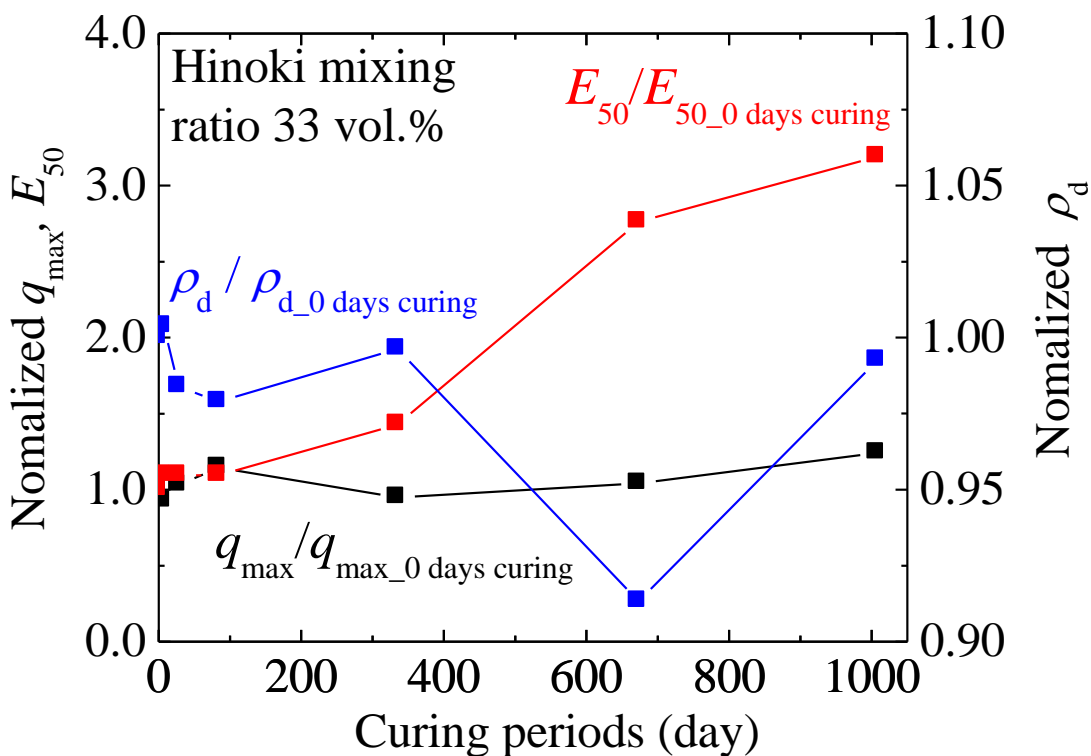


図 4.2-28 養生期間と正規化した q_{max} , E_{50} , ρ_d の関係(ヒノキ混合割合 33 vol.%)

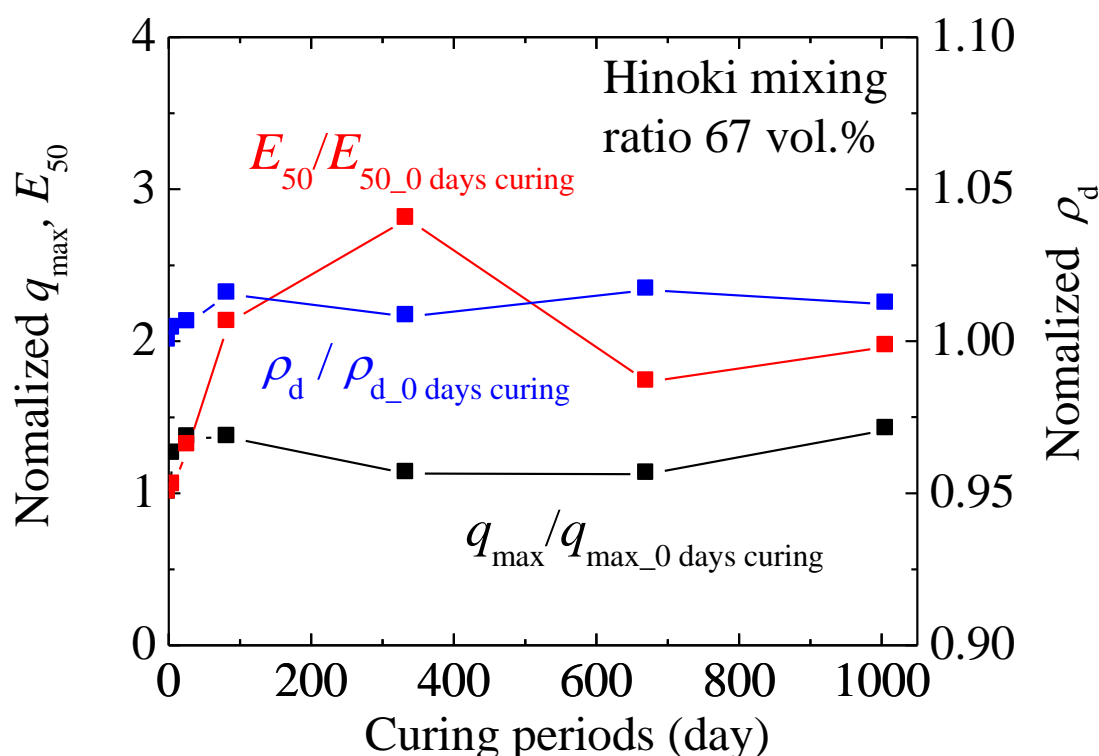


図 4.2-29 養生期間と正規化した q_{max} , E_{50} , ρ_d の関係(ヒノキ混合割合 67 vol.%)

図 4.2-30 にヒノキ混合スラグ 4(2018)材料の養生期間と破壊ひずみの関係を示す。なお、ヒノキ混合割合が 67 vol.% の場合には試験終了までピーク強度を発現しなかったことから示していない。図 4.2-30 より、ばらつきはあるものの、ヒノキ混合割合によらず、破壊ひずみは 84 日養生まで増加し、その後は一定となることが分かる。また、養生期間によらずスラグ 4(2018)のみとヒノキ混合割合 10 vol.% の破壊ひずみに大きな違いは見られない。さらに、養生期間によらずヒノキ混合割合が高いほど、破壊ひずみも大きいことが分かる。

図 4.2-31 にヒノキ混合割合と最大せん断強さの関係を示す。図 4.2-31 より、ヒノキ混合割合混合割合 10 vol.% の 1008 日養生の結果がないため、やや限定的にはなるが、養生期間によらずヒノキ 10 vol.% のほうがスラグ 4(2018)のみよりも大きな q_{max} を発揮することが分かる。また、これはヒノキ混合割合が 10 vol.% 程度であれば、養生による強度増加率がスラグ 4(2018)のみと大きく変わらないことを意味している。一方でヒノキ混合割合が 33 vol.% 以上では養生による強度増加にはほとんど期待できないことが分かる。

図 4.2-32 にヒノキ混合割合と変形係数の関係を示す。図 4.2-32 より、ヒノキ混合割合 10 vol.% の 84 日養生や 672 日養生でスラグ 4(2018)のみよりも大きな E_{50} を示す場合はあるものの、全体として捉えるとこれらはばらつきであり、養生期間によらず、ヒノキ混合割合の増加に伴って E_{50} は低下することが分かる。また、木屑混合割合の増加に伴い養生による E_{50} の増加にも期待できなくなることが分かる。

図 4.2-31 のヒノキ混合割合-最大せん断強さの関係と図 4.2-9 のヒノキ混合割合-一軸圧縮強さの関係を比較すると、ヒノキを混合することによる強度への影響はほとんど同じであ

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討と
せん断強度・せん断剛性推定手法の提案

ることが分かる。つまり、養生期間によらずヒノキ混合割合が 10 vol.%の時にスラグ 4(2018)よりも大きな強度を発現している。この結果から、飽和条件(不飽和・飽和)や有効拘束圧(0 kPa・50 kPa)が変化しても、ヒノキを混合することによる強度および剛性の変化傾向はほとんど変わらないということである。

また、図 4.2-32 のヒノキ混合割合-*CD*試験より求まる変形係数の関係と図 4.2-10 のヒノキ混合割合-*UC*試験より求まる変形係数の関係を比較してみると、*UC*試験ではヒノキ 10 vol.%のほうがスラグ 4(2018)のみよりも大きな E_{50} を発揮しているが、*CD*試験では養生期間によって大きいものと小さいものがある。ここで、スラグ 4(2018)のみの E_{50} よりもヒノキ 10 vol.%の E_{50} のほうが大きい場合のヒノキ 10 vol.%の E_{50} の値に着目すると、図 4.2-32 では 90 ~ 150 MPa、図 4.2-10 では 90 ~ 200 MPa と比較的高い E_{50} であることが分かる。これは E_{50} を算出する際に用いる ϵ_{50} が相当に小さく、誤差を含みやすいためであると推察できる。つまり、ヒノキ 10 vol.%の E_{50} に関しては過大評価をする可能性も過小評価をする可能性もあることから、調べる際はサンプル数を十分確保する必要がある。

以上の結果から、ヒノキ混合割合が 10 vol.%以下では 84 日まではスラグ 4(2018)の固化反応によって q_{max} および E_{50} は増加するものの、そこから 3 年養生しても、 q_{max} および E_{50} はわずかに増加するか、ほとんど変わらないことが分かった。これはココヤシ繊維を混合した場合と同じ傾向であることから、木屑形状によらず、木屑混合割合が 10 vol.%以下では 84 日まで強度および剛性が増加するものと考えられる。また、ヒノキ 33 vol.%の q_{max} および E_{50} は 7 日養生でわずかに増加し、67 vol.%の q_{max} および E_{50} は養生による増加は期待できないことが分かった。

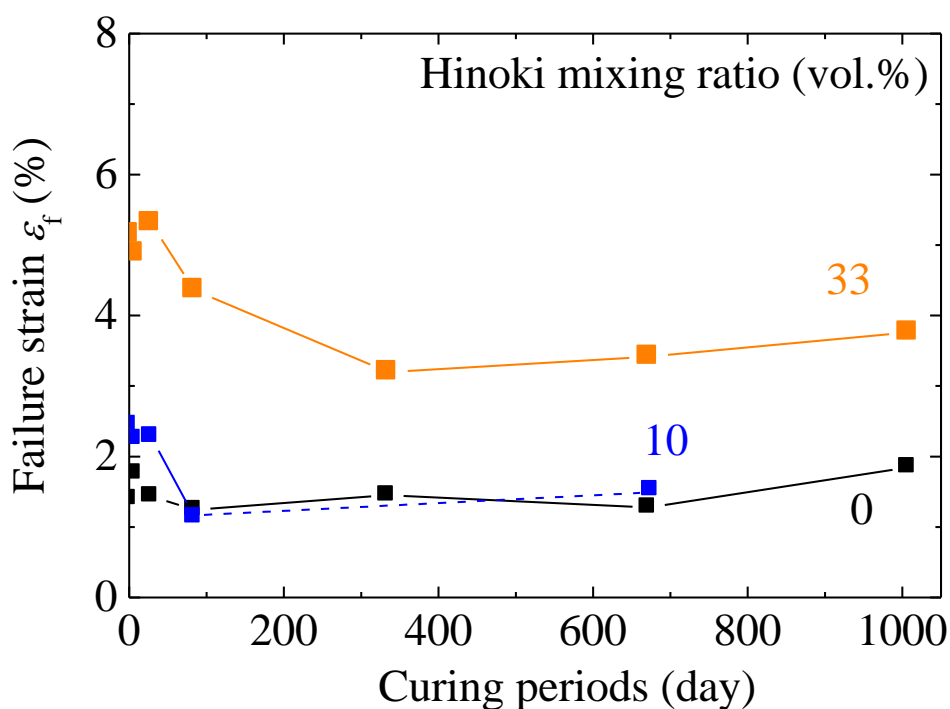


図 4.2-30 養生期間と破壊ひずみの関係(ヒノキ混合)

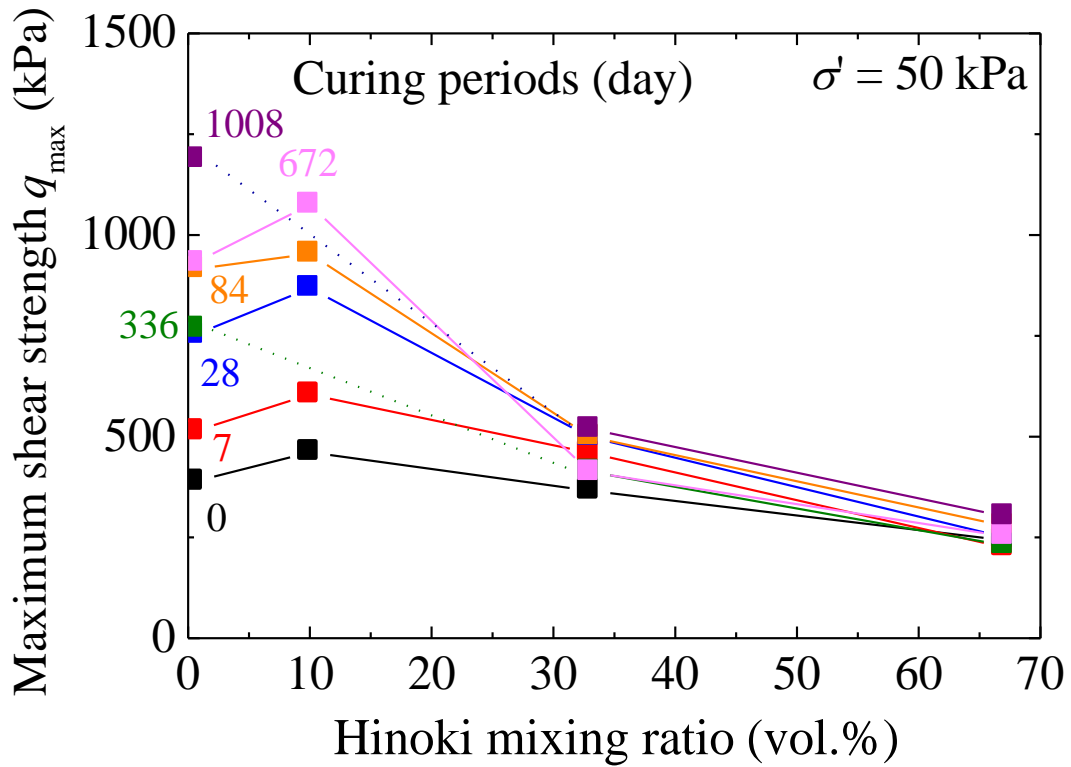


図 4.2-31 ヒノキ混合割合と最大せん断強さの関係

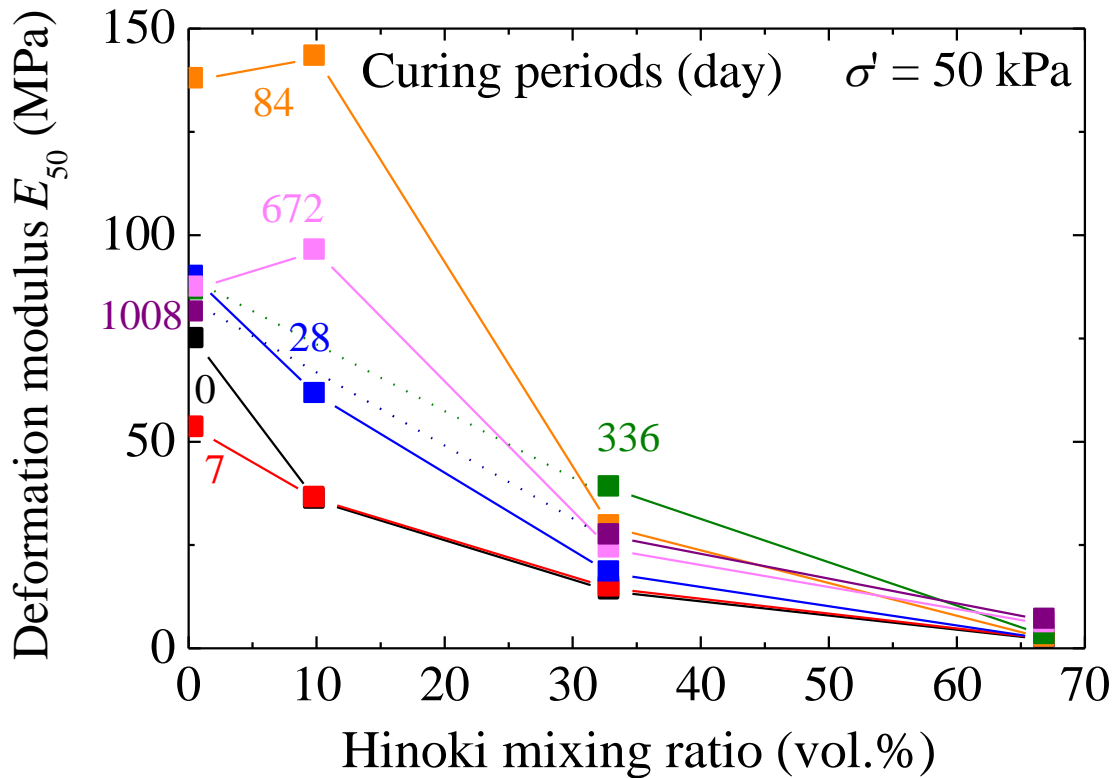


図 4.2-32 ヒノキ混合割合と変形係数の関係

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

以下に，養生期間の違いが力学特性に及ぼす影響について，本節で得られた知見を示す．

- ▶ 試験方法(一軸圧縮試験および拘束圧 50 kPa の飽和圧密排水三軸圧縮試験)によらず，養生による強度および剛性に与える影響は変わらない．
- ▶ 木屑形状によらず，木屑混合割合が 10 vol.%以下では，84 日養生までせん断強度およびせん断剛性は増加する．ただし，増加の程度は木屑の形状および混合割合，さらにせん断剛性とせん断剛性でそれぞれ異なる．
- ▶ 木屑形状(繊維状・粒状)によらず，木屑混合割合が 33 vol.%以上では，養生によるせん断強度およびせん断剛性の増加はほとんど見られない．

4.3 せん断強度・せん断剛性推定手法の提案

本項では第5章1節2項の結果を用いて木屑混合割合と養生期間をパラメータに取った強度剛性関係式を導出するとともにその方法を提案する。なお、ここでの強度とは有効拘束圧 50 kPa の飽和圧密排水条件でのせん断強さ q_{\max} (kPa) を指す。また、剛性は変形係数 E_{50} (MPa) を指す。

図 5.2-1 に図 5.1-11 より得られるココヤシ繊維混合割合別の最大せん断強さ q_{\max} と剛性 E_{50} の関係および関係式を、図 5.2-2 に図 5.1-22 より得られるヒノキ混合割合別の q_{\max} と E_{50} の関係を示す。なお、前述の通りココヤシ繊維混合割合が 33 vol.% やヒノキ混合割合 67 vol.% の一部では試験終了時までピーク強度を発現していないが、ここでは試験終了時のせん断強度を最大せん断強さと仮定して強度剛性式を提案する。また、図 5.2-1 と図 5.2-2 に示した近似直線は原点を通るものとして算出している。

図 5.2-3 に図 5.2-1 の各グラフ中に示した近似直線の傾き A とココヤシ繊維混合割合 B の関係を、図 5.2-4 に図 5.2-2 の各グラフ中に示した近似直線の傾き A とヒノキ混合割合 B の関係を示す。図 5.2-3 や図 5.2-4 に示すように、近似曲線は式 5-4 の形で表される。表 5.2-1 にココヤシ繊維およびヒノキの混合割合別の式 5-4 の係数 X, Y, Z を示す。表 5.2-1 に示すように、混合する木屑の種類によらず、係数 X と Z は共通する値で表されるのに対し、係数 Y は異なる。つまり、係数 Y が木屑の種類(形状)の影響を表していると考えられる。因子分析を行うためにはより多くのデータを蓄積することが必要不可欠であるが、この木屑影響因子 Y を定量的に評価し、係数 Y に木屑寸法やポアソン比などを導入することが可能となれば、より汎用性の高い関係式を導くことができると推察される。

$$A = 2Xe^{(-B/Y)} + Z \quad \dots (5-4)$$

次に図 5.2-5 に養生期間 t (day) と強度 q_{\max} の関係およびココヤシ繊維混合割合別の近似曲線を、図 5.2-6 に養生期間 t (day) と強度 q_{\max} の関係およびヒノキ混合割合別の近似曲線を示す。図 5.2-5 と図 5.2-6 に示した近似曲線は式 5-4 と同様の形で表すことができる。ただし、図 5.1-12 や図 5.1-24 に示したように、本研究材料は木屑の混合割合によらず木屑を混合した場合に 84 日以上養生を行っても強度は増加しないことから、 $t = 84$ (day) を境界値として式 5-5 で表せる。ただし、ココヤシ繊維混合割合 33 vol.% やヒノキ混合割合 67 vol.% ではいずれの養生期間でも強度および剛性の変化はほとんど見られない。

$$\begin{aligned} q_{\max} &= (2ae^{(-t/b)} + c) \times 10^3 \quad (t \leq 84) \\ q_{\max} &= (2ae^{(-84/b)} + c) \times 10^3 \quad (84 < t) \quad \dots (5-5) \end{aligned}$$

表 5.2-2 と表 5.2-3 にココヤシ繊維およびヒノキの混合割合別の式 5-5 の係数 a, b, c の値を示す。ここで先述の通り、表 5.2-2 のココヤシ繊維混合割合 33 vol.% では、養生によって強度が増加しないことを前提に、意図的に $a=0, b \doteq 1.0 \times 10^{-10}, c=520.4$ としている。なお、 c はココヤシ繊維混合割合 33 vol.% の 0 ~ 84 日養生の平均 q_{\max} である。また、表 5.2-3 のヒノキ混合割合 67 vol.% でも養生によって強度が増加しないことを前提に、意図的に $a=0, b$

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

$\cong 1.0 \times 10^{-10}$, $c=275.4$ としている. なお, c はヒノキ混合割合 67 vol.% の 0 ~ 84 日養生の平均 q_{\max} である.

図 5.2-7 に表 5.2-2 の係数 a, b, c とココヤシ繊維混合割合 B の関係およびそれらの近似曲線を, 図 5.2-8 に表 5.2-3 の係数 a, b, c とヒノキ混合割合 B の関係およびそれらの近似曲線を示す. また, それぞれの近似曲線は式 5-6 で表すことができる.

$$a, b, c = \beta + (\alpha - \beta) / (1 + (B/\gamma)^\omega) \quad \dots (5-6)$$

表 5.2-4 と表 5.2-5 にココヤシ繊維とヒノキの混合割合別の式 5-6 の係数 $\alpha, \beta, \gamma, \omega$ を示す. 表 5.2-4 と表 5.2-5 を比較すると, 表中の黄色で示した値が異なる. つまり, これらの係数の違いが木屑形状の違いに起因すると考えられる. 先述の通り, 本検討では 2 種類の木屑しか用いていない為, これらの係数に関する定量的な検討は困難である. より多くのデータを得ることで, これらの係数と木屑の性状(寸法およびポアソン比)の関係について検討することで本提案式の汎用性が高まると考えられる. なお, 係数 α はスラグのみの CD 試験から得られる値であるため, 事前(篩下残渣発生前)に試験をしておくことで決定できる.

以上の関係式を用いて, 表 5.2-6 と表 5.2-7 に木屑混合割合と養生期間から求めた強度および剛性を示す. なお, 表中のカッコ内の値は実測値を 100% とした時の推定値の百分率(%)を示している. 表 5.2-6 と表 5.2-7 より, ココヤシ繊維を 5 vol.% 混合した場合やヒノキを 10 vol.% を混合した場合にはスラグのみよりも q_{\max} は増加し, E_{50} は減少していることが分かる. また, ココヤシ繊維混合割合 10 vol.% やヒノキ混合割合 33 vol.% では E_{50} の推定値が実測値よりも大幅に高い値となっているが, それ以外については全体的に q_{\max} も E_{50} も比較的精度よく内挿できていると判断できる.

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

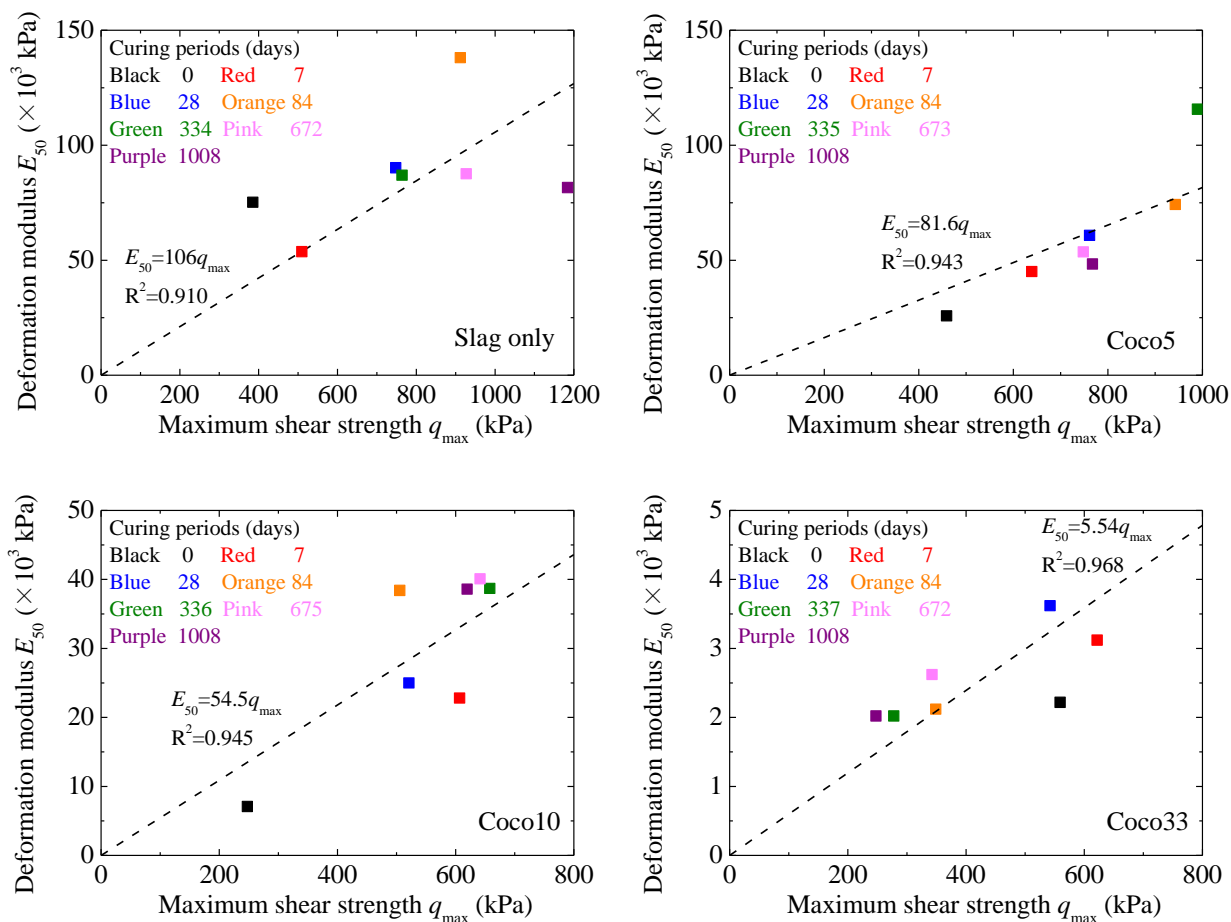


図 5.2-1 ココヤシ繊維混合割合別の強度と剛性の関係とその近似直線(全データ)

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

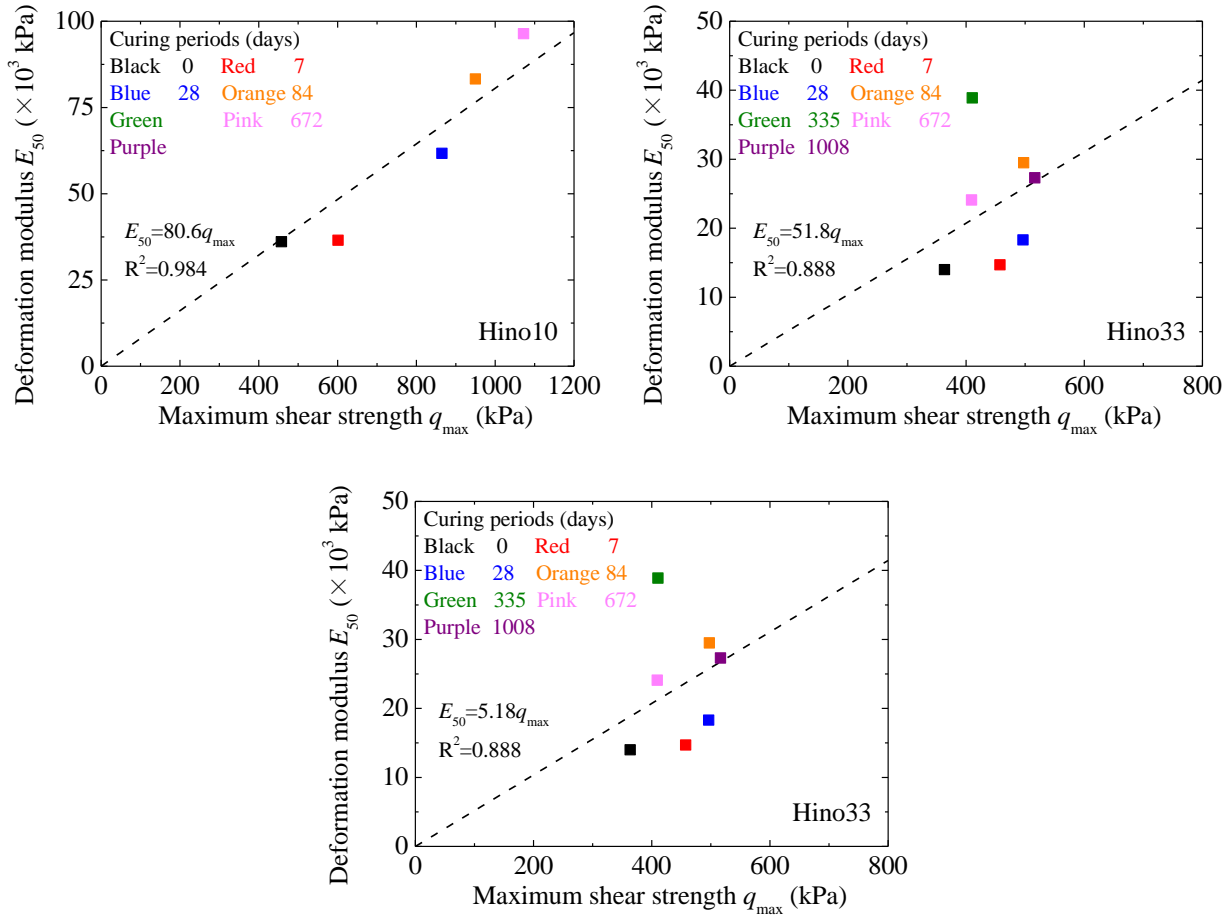


図 5.2-2 ヒノキ混合割合別の強度剛性関係とその近似直線(全データ)

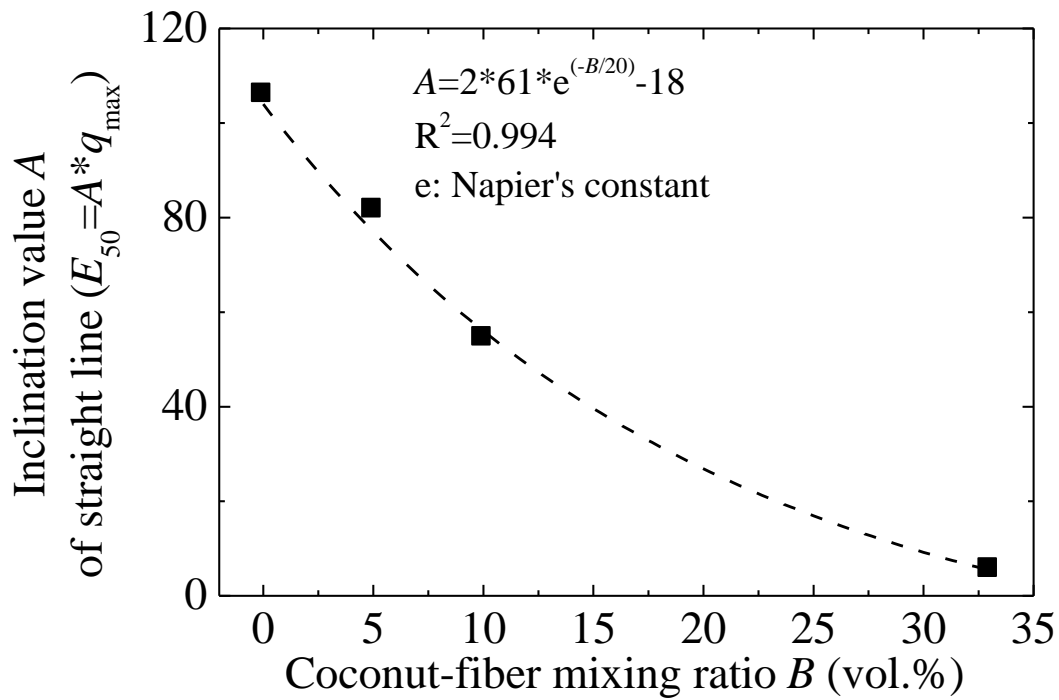


図 5.2-3 ココヤシ繊維混合割合と強度剛性関係式の傾きの関係

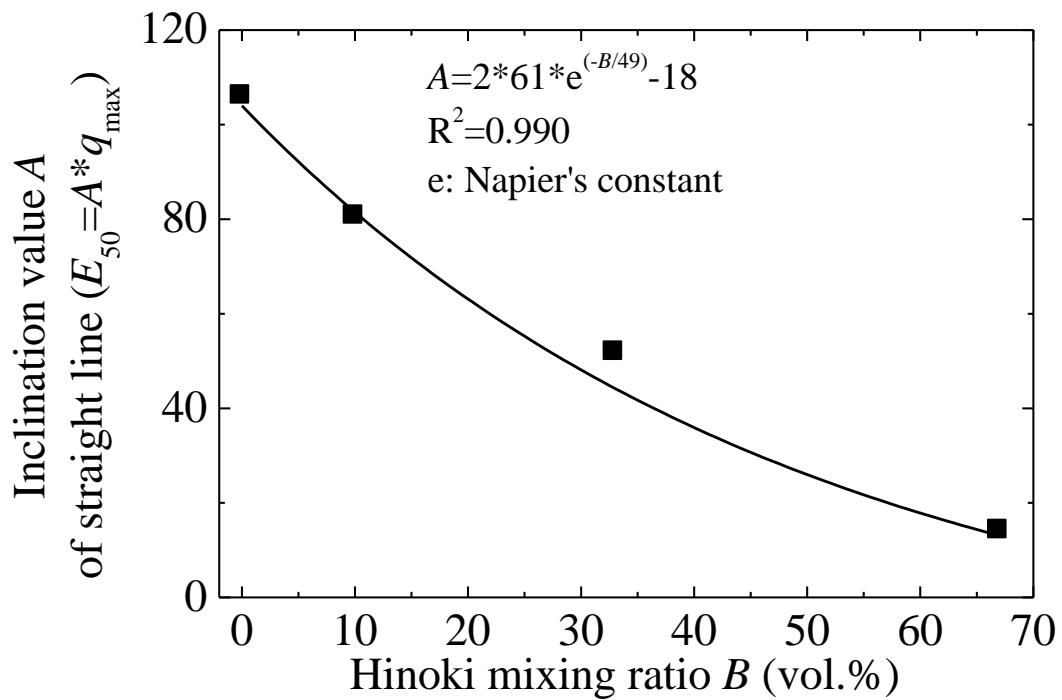


図 5.2-4 ヒノキ混合割合と強度剛性関係式の傾きの関係

表 5.2-1 混合する木屑の違いによる式 5-4 の係数 X, Y, Z の相違

$A = 2Xe^{(-t/Y)} + Z$, e: ネイピア数			
木屑種類	式5-4の係数		
	X	Y	Z
ココヤシ繊維	61	20	-18
ヒノキ		49	

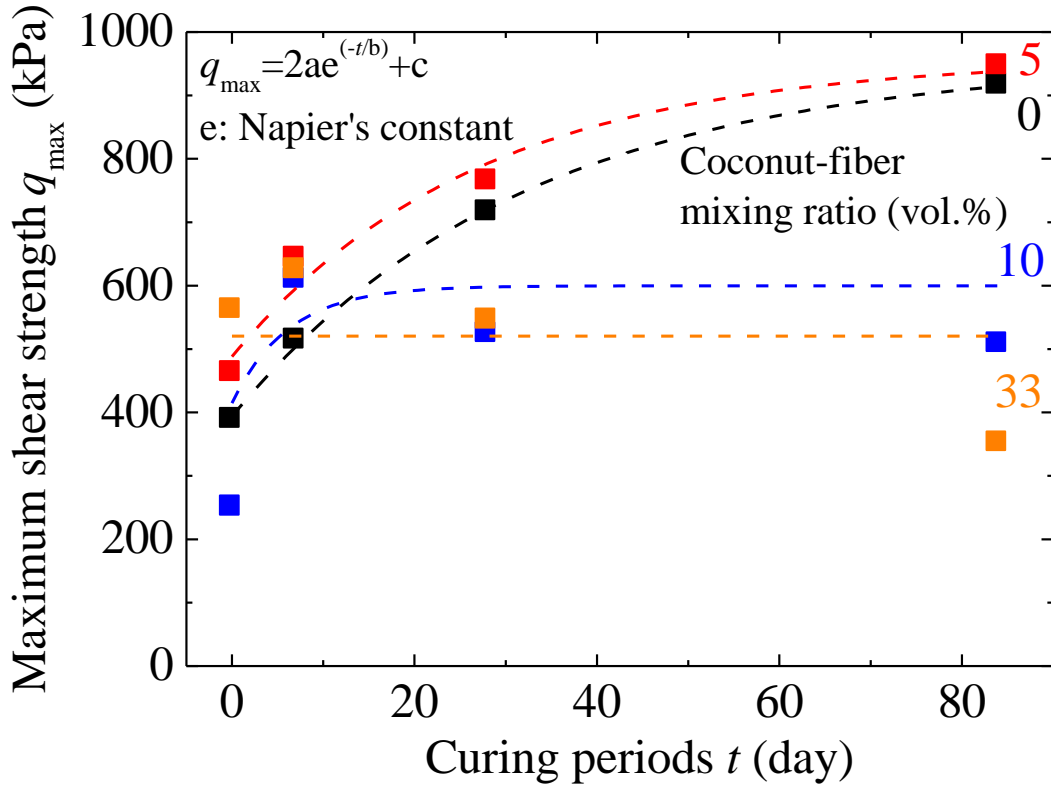


図 5.2-5 養生期間と強度の関係およびココヤシ繊維混合割合別の近似曲線(84日養生迄)

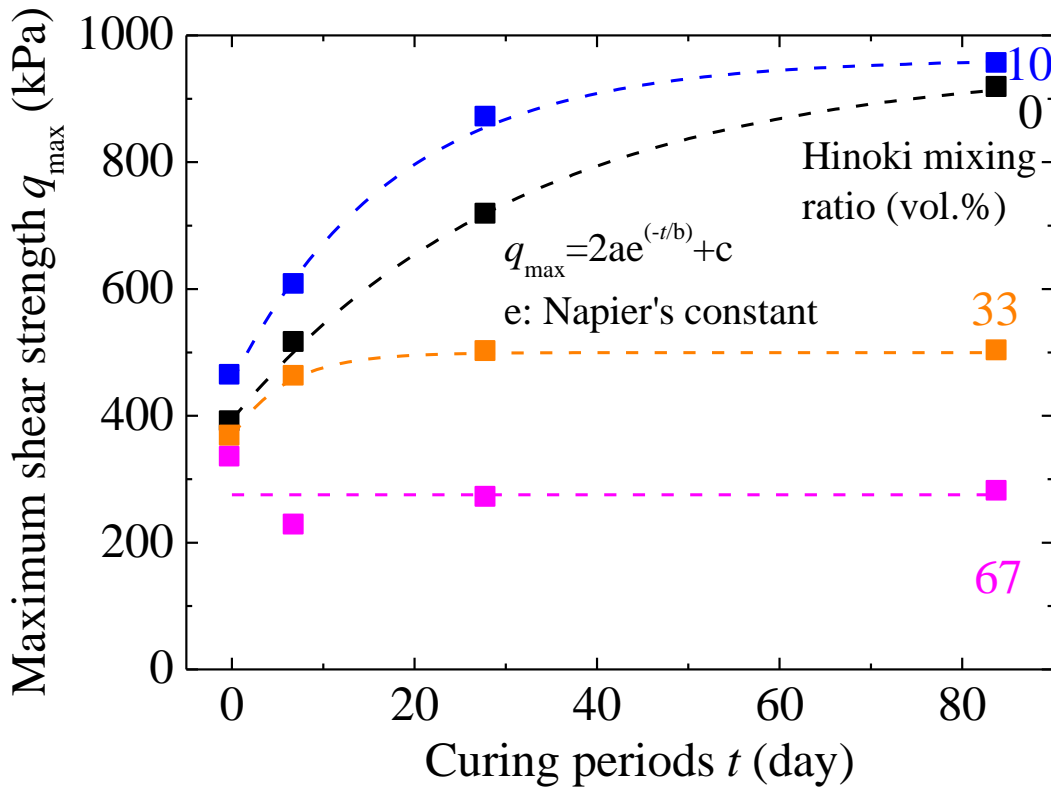


図 5.2-6 養生期間と強度の関係およびヒノキ混合割合別の近似曲線(84日養生迄)

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

表 5.2-2 式 5-3 におけるココヤシ繊維混合割合別の各係数 a, b, c

$q_{\max}=2ae^{(-t/b)}+c$, e: ネイピア数			
ココヤシ繊維 混合割合 B (vol.%)	式5-5の係数		
	a	b	c
0	-280.5	32.0	954.7
5	-235.1	26.8	958.2
10	-92.4	6.2	599.8
33	0	1.0×10^{-10}	520.4

表 5.2-3 式 5-3 におけるヒノキ混合割合別の各係数 a, b, c

$q_{\max}=2ae^{(-t/b)}+c$, e: ネイピア数			
ヒノキ 混合割合 B (vol.%)	式5-5の係数		
	a	b	c
0	-280.5	32.0	954.7
10	-254.3	17.9	962.9
33	-67.1	5.8	499.8
67	0	1.0×10^{-10}	254.0

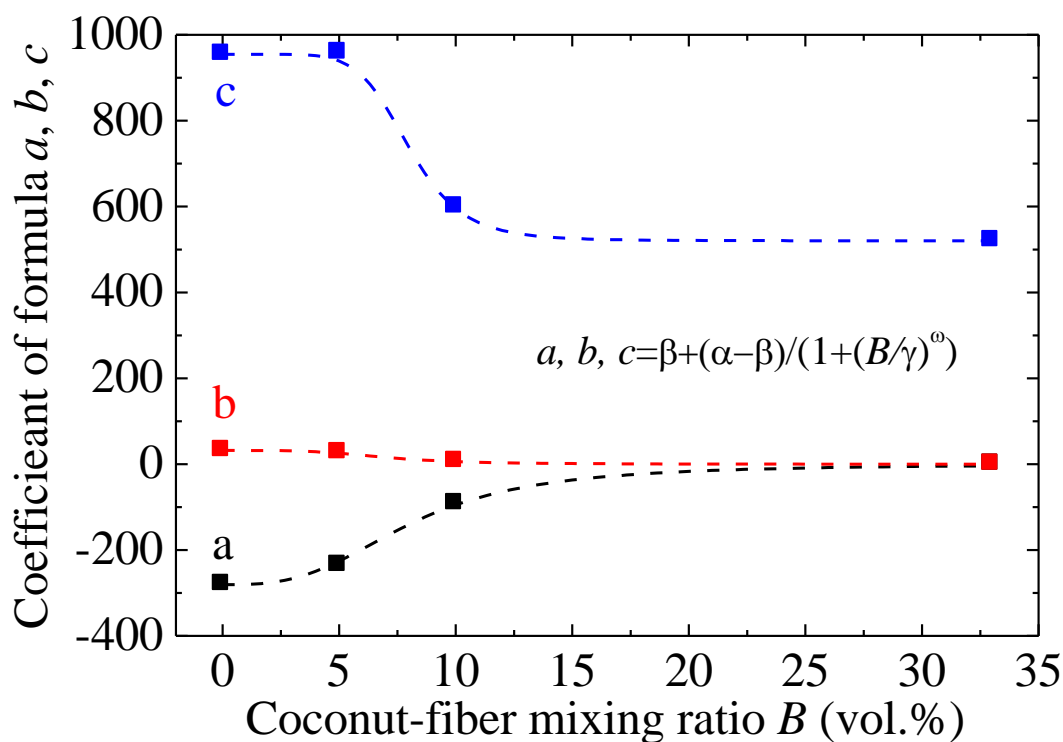


図 5.2-7 ココヤシ繊維混合割合と式 5-6 の各係数 a, b, c の関係

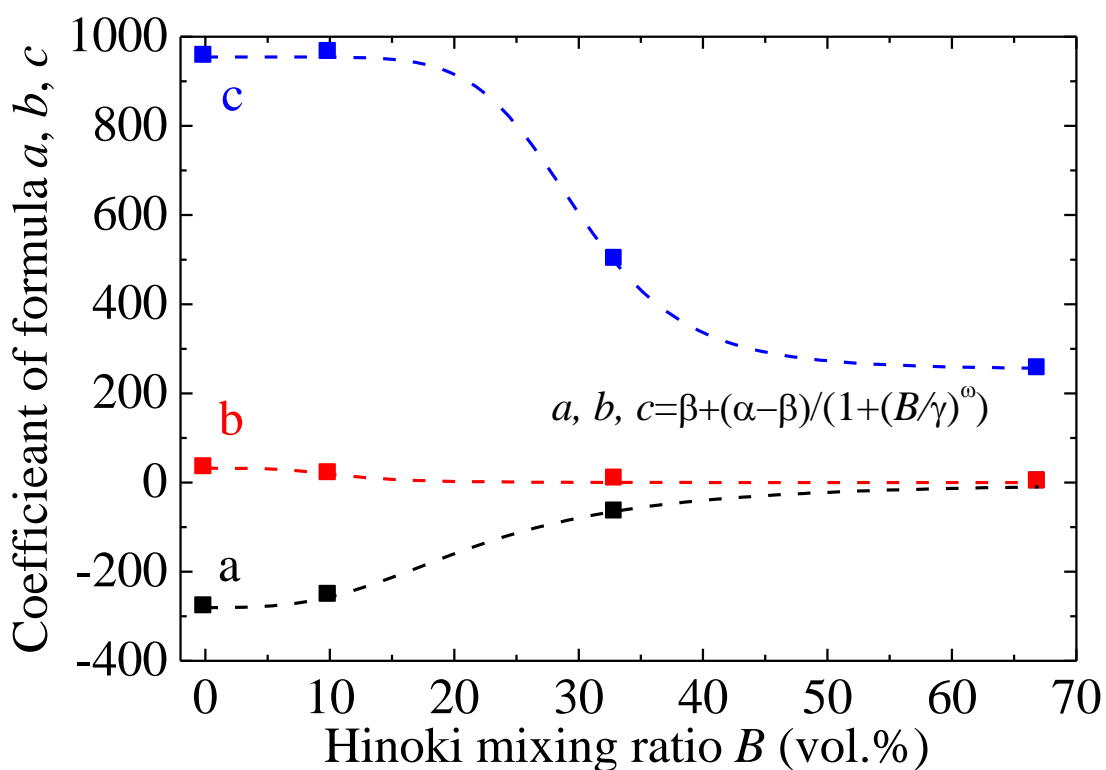


図 5.2-8 ヒノキ混合割合と式 5-6 の各係数 a, b, c の関係

表 5.2-4 式 5-3 の各係数 a, b, c とココヤシ繊維混合割合 B の関係式における各係数 α , β , γ

$a, b, c = \beta + (\alpha - \beta) / (1 + (B/\gamma)^\omega)$				
	式5-6の係数			
式5-5の係数	α	β	γ	ω
a	-280.5	0	8.0	3.0
b	32.0	1.0×10^{-10}	7.0	4.0
c	954.7	520.4	8.0	7.0

表 5.2-5 式 5-3 の各係数 a, b, c とヒノキ混合割合 B の関係式における各係数 α , β , γ

$a, b, c = \beta + (\alpha - \beta) / (1 + (B/\gamma)^\omega)$				
	式5-6の係数			
式5-5の係数	α	β	γ	ω
a	-280.5	0	22.0	3.0
b	32.0	1.0×10^{-10}	11.0	4.0
c	954.7	254.0	30.0	7.0

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討と
せん断強度・せん断剛性推定手法の提案

表 5.2-6 推定式から求めた強度および剛性と実測値との差異(ココヤシ繊維混合)

q_{max} (kPa)	ココヤシ繊維混合割合 (vol.%)			
養生期間	0	5	10	33
0	393.7(101.4)	488.2(105.7)	405.7(162.3)	512.5(91.3)
7	503.9(98.2)	596.8(92.9)	534.3(87.7)	520.4(83.4)
28	720.8(95.9)	789.4(103.2)	593.6(113.4)	520.4(95.6)
84	914.1(99.9)	922.6(97.6)	595.7(117.3)	520.4(148.1)

E_{50} (MPa)	ココヤシ繊維混合割合 (vol.%)			
養生期間	0	5	10	33
0	40.2(53.8)	37.0(146.6)	22.4(324.2)	2.8(126.4)
7	51.4(96.8)	45.2(101.5)	29.5(130.4)	2.8(91.0)
28	73.5(82.1)	59.8(99.3)	32.7(132.0)	2.8(78.3)
84	93.2(67.8)	69.8(94.9)	32.9(86.0)	2.8(134.3)

※カッコ内の数値は実測値を 100%とした時の推定値の百分率(%)

表 5.2-7 推定式から求めた強度および剛性と実測値との差異(ヒノキ混合)

q_{max} (kPa)	ヒノキ混合割合 (vol.%)			
養生期間	0	10	33	67
0	393.7(101.4)	441.5(95.7)	363.4(99.4)	258.7(97.5)
7	503.9(98.2)	599.5(99.1)	491.6(107.0)	277.8(114.0)
28	720.8(95.9)	836.8(96.4)	491.6(98.6)	277.8(95.3)
84	914.1(99.9)	948.2(99.5)	491.6(98.3)	277.8(92.1)

E_{50} (MPa)	ヒノキ混合割合 (vol.%)			
養生期間	0	10	33	67
0	40.2(53.8)	35.3(98.8)	15.7(113.8)	3.0(141.9)
7	51.4(132.6)	47.9(132.6)	21.2(146.4)	3.2(140.4)
28	73.5(82.1)	66.8(109.0)	21.2(109.0)	3.2(115.4)
84	93.2(67.8)	75.7(91.3)	21.2(72.5)	3.2(97.9)

※カッコ内の数値は実測値を 100%とした時の推定値の百分率(%)

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

次に、剛性 E_{50} と養生期間 t の関係式を導出し、強度剛性関係式から q_{\max} を推定する方法を検討する。そしてこれらの内挿方法の違いが推定値に与える影響を比較検討する。

図 5.2-5 や図 5.2-6 と同様に、図 5.2-9 と図 5.2-10 に木屑の種類ごとに 84 日養生までの養生期間 t (day) と剛性 E_{50} の関係および木屑混合割合ごとの近似曲線を示す。なお、図中の近似曲線は式 5-7 の q_{\max} を E_{50} に置き換えた形(式 5-9)で表せる。

$$\begin{aligned} E_{50} &= (2ae^{(-t/b)} + c) \times 10^3 & (t < 84) \\ E_{50} &= (2ae^{(-84/b)} + c) \times 10^3 & (84 \leq t) \end{aligned} \quad \cdot \cdot \cdot (5-7)$$

表 5.2-7 と表 5.2-8 にココヤシ繊維およびヒノキの混合割合別の式 5-7 の係数 a , b , c の値を示す。ここで先述(図 5.1-21)の通り、表 5.2-1 のココヤシ繊維混合割合 33 vol.% では、養生によって剛性が増加しないことを前提に、 $a=0$, $b \doteq 1.0 \times 10^{-10}$, $c=2.8$ を恣意的に設定した。なお、 c はココヤシ繊維混合割合 33 vol.% の 0 ~ 84 日養生の平均 E_{50} である。また、表 5.2-2 のヒノキ混合割合 67 vol.% でも養生によって強度が増加しないことを前提に、 $a=0$, $b \doteq 1.0 \times 10^{-10}$, $c=2.8$ を恣意的に設定した。なお、 c はヒノキ混合割合 67 vol.% の 0 ~ 84 日養生の平均 E_{50} である。

図 5.2-11 に表 5.2-7 の係数 a , b , c とココヤシ繊維混合割合 B の関係およびそれらの近似曲線を、図 5.2-12 に表 5.2-12 の係数 a , b , c とヒノキ混合割合 B の関係およびそれらの近似曲線を示す。それぞれの近似曲線は式 5-4 の A を a, b, c に、 a を α , b を β , c を γ に変換した式 5-10 で表すことができる。ここで式 5-10 ではなく、式 5-8 で表すことも試みたが、フィッティングが困難であったため本検討ではこの式を用いた。

$$a, b, c = 2\alpha e^{(-B/\beta)} + \gamma \quad \cdot \cdot \cdot (5-8)$$

表 5.2-9 と表 5.2-10 にココヤシ繊維とヒノキの混合割合別の式 5-8 の係数 α , β , γ を示す。表 5.2-9 と表 5.2-10 を比較すると、表中の黄色で示した値が異なる。つまり、表 5.2-3 や表 5.2-4 と同様に木屑形状の違いに起因する係数の違いが見られる。ただし、後述するようにこれらの関係式から求めた強度には根本的な問題があるため、ここではこの係数の違いについてこれ以上言及はしない。

以上の関係式(5-5, 5-6, 5-9, 5-10)を用いて、表 5.2-11 と表 5.2-12 に木屑混合割合と養生期間から求めた強度および剛性を示す。なお、表中のカッコ内の値は実測値を 100% とした時の推定値の百分率(%)を示している。表 5.2-11 と表 5.2-12 より、ココヤシ繊維を 5 vol.% またはヒノキを 10 vol.% 混合した場合にスラグのみよりも q_{\max} が減少している。これまで述べてきたように、一軸圧縮試験においても圧密排水三軸圧縮試験においても木屑混合割合が 10 vol.% 以下であればスラグのみよりも強度が増加しているのに対し、推定された強度は増加していない。つまり本研究材料である木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の特徴的な強度特性を上手く表現できていない。これはスラグのみの推定強度が実測値よりも相当に高く、ココヤシ繊維混合割合 5 vol.% の推定強度が実測値よりもやや低く算出されてしまうためである。ここで図 5.2-9 の 7 日養生に着目すると、スラグのみでは近似曲線が

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討と
せん断強度・せん断剛性推定手法の提案

実測値よりも大きい値を取るのに対し、ココヤシ繊維混合割合 5 vol.%を混合した場合には近似曲線のほうが実測値よりも小さくなる。図 5.2-1 より、強度と剛性は線形関係にあることから、図 5.2-9 と併せて考えると、スラグのみでは推定強度が実測値よりも高くなり、ココヤシ混合割合 5 vol.%では推定強度が実測値よりも低くなる。その為、スラグのみの強度がココヤシ繊維混合割合 5 vol.%の強度よりも高くなり、実際の試験結果を上手く表現できなかつたと考えられる。また、養生なしに着目すると、スラグのみでは近似曲線が実測値よりも小さい値を取るのに対し、ココヤシ繊維を混合した場合の近似曲線はほとんど実測値を通る。先述のように考えると、スラグのみの推定強度は低く見積もられ、ココヤシ繊維混合割合 5 vol.%では変化しないことから、7日養生においてはスラグのみの推定強度がココヤシ繊維混合割合 5 vol.%の推定強度よりも高くなるはずである。つまり、スラグのみの推定強度がココヤシ繊維混合割合 5 vol.%よりも高くなる理由について、図 5.2-9 だけでは説明できない。

つまり本検討のように強度と剛性が線形関係にあると仮定して推定式を導く場合には、養生期間から強度を求め、その強度から剛性を求める方法は望ましいが、養生期間から剛性を求め、その剛性から強度を求める方法は望ましくないと言える。これは厳密には強度と剛性が線形関係にないということの意味している。

以上のように、木屑の混合割合のみを与えることで特定の養生期間における強度と剛性を算出することが可能な式または方法を提案した。しかし、本提案式は本条件でのみ成り立つ関係式であり、木屑の形状が異なるだけで成り立たなくなるなどの課題は多く、汎用性については別途検討する必要があると考えている。特に式 5-8 の係数 γ や c の係数 β に木屑の性状を取り入れることができれば、より汎用性の高い式となると考えられる。

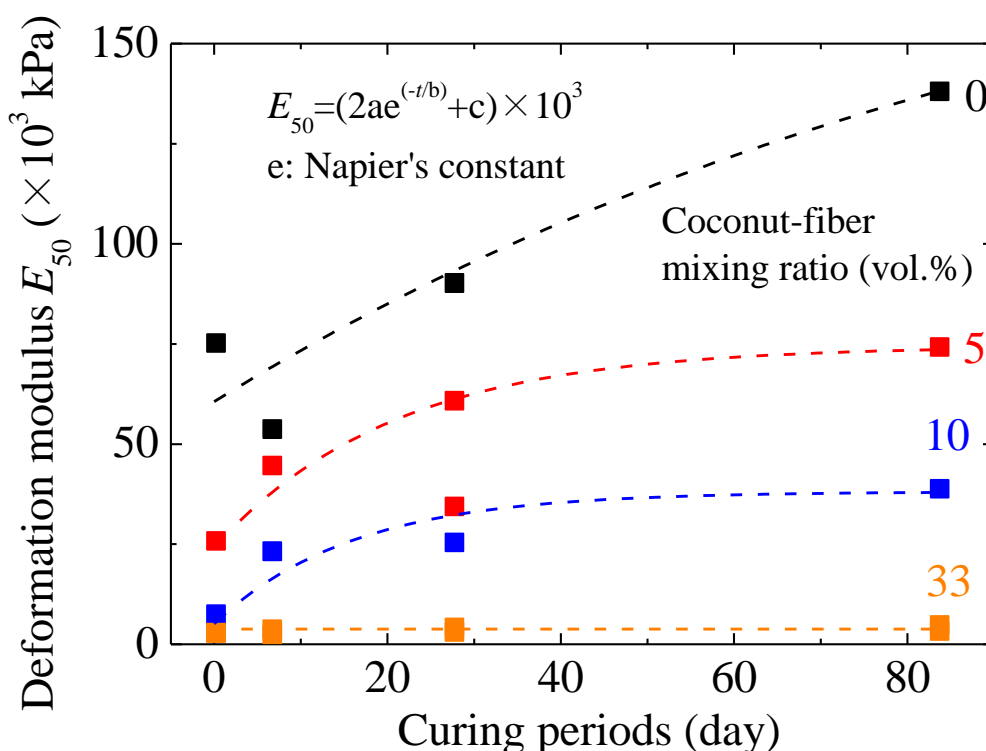


図 5.2-9 養生期間と剛性の関係およびココヤシ繊維混合割合別の近似曲線(84日養生迄)

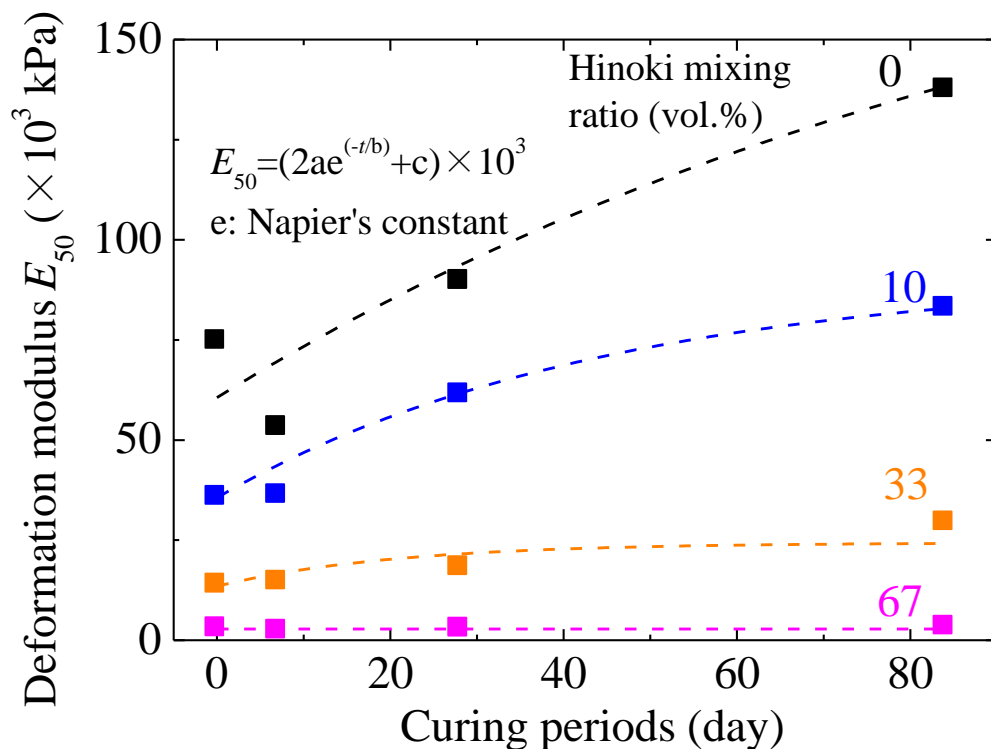


図 5.2-10 養生期間と剛性の関係およびヒノキ混合割合別の近似曲線(84日養生迄)

生期間と剛性の関係およびヒノキ混合割合別の近似曲線(84日養生迄)

表 5.2-8 式 5-9 におけるココヤシ繊維混合割合別の各係数 a, b, c

$E_{50}=2ae^{(-t/b)}+c$, e: ネイピア数			
ココヤシ繊維 混合割合 B (vol.%)	式5-7の係数		
	a	b	c
0	-71.1	106.1	202.8
5	-25.2	20.8	74.5
10	-16.5	16.0	38.1
33	0	1.0×10^{-10}	2.8

表 5.2-9 式 5-9 におけるヒノキ混合割合別の各係数 a, b, c

$E_{50}=2ae^{(-t/b)}+c$, e: ネイピア数			
ヒノキ 混合割合 B (vol.%)	式5-7の係数		
	a	b	c
0	-71.1	106.1	202.8
10	-27.8	44.3	91.2
33	-5.4	20.6	24.3
67	0	1.0×10^{-10}	2.8

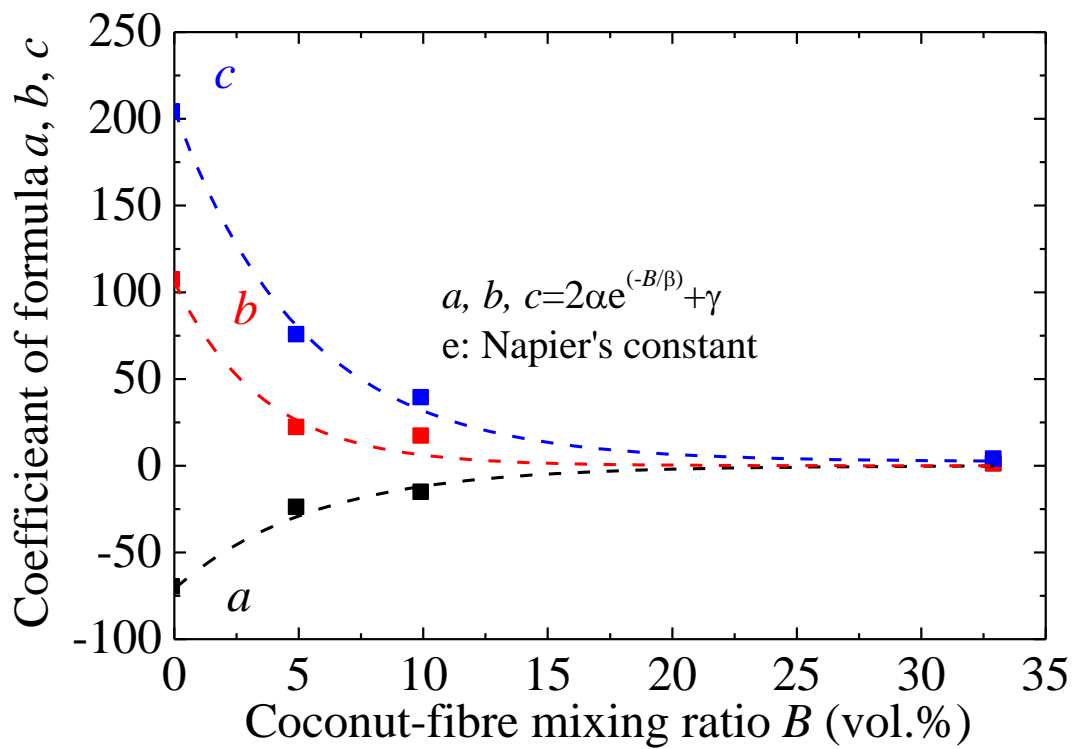


図 5.2-11 ココヤシ繊維混合割合と式 5-10 の各係数 a , b , c の関係

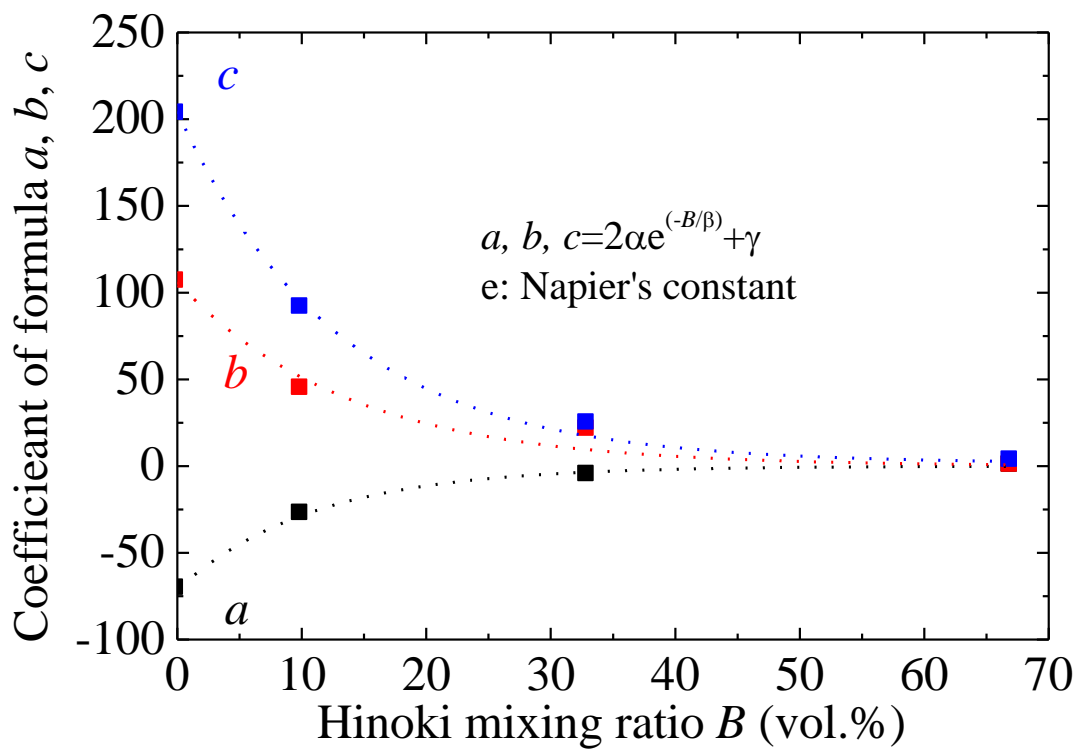


図 5.2-12 ヒノキ混合割合と式 5-10 の各係数 a , b , c の関係

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討と
せん断強度・せん断剛性推定手法の提案

表 5.2-10 式 5-9 の各係数 a , b , c とココヤシ繊維混合割合 B の関係式(5-10)における各係数 α , β , γ

	式5-8の係数		
式5-7の係数	α	β	γ
a	-35.6	5.6	0.0
b	53.1	3.5	1.0×10^{-10}
c	101.4	5.2	2.4

表 5.2-11 式 5-9 の各係数 a , b , c とヒノキ混合割合 B の関係式(5-10)における各係数 α , β , γ

$a, b, c = 2\alpha e^{(-B/\beta)} + \gamma$, e: ネイピア数			
	式5-8の係数		
式5-7の係数	α	β	γ
a	-35.6	10.9	0.0
b	53.1	16.6	1.0×10^{-10}
c	101.4	12.9	1.6

表 5.2-12 推定式から求めた強度および剛性と実測値との差異(ココヤシ繊維混合)

E_{50} (MPa)	ココヤシ繊維混合割合 (vol.%)			
養生期間	0	5	10	33
0	63.0(84.5)	21.4(85.0)	8.0(115.7)	2.4(107.2)
7	72.1(135.7)	35.3(79.3)	24.1(106.4)	2.7(88.4)
28	96.0(107.1)	60.0(99.7)	31.4(126.6)	2.7(76.1)
84	140.8(102.4)	77.2(105.0)	31.6(82.8)	2.7(130.5)

q_{\max} (kPa)	ココヤシ繊維混合割合 (vol.%)			
養生期間	0	5	10	33
0	617.7(159.0)	282.9(61.2)	144.8(57.9)	434.6(77.4)
7	706.7(137.7)	466.4(72.6)	436.2(71.6)	505.1(80.9)
28	941.0(125.2)	792.9(103.7)	569.3(108.8)	505.1(92.7)
84	1380.1(150.8)	1020.6(107.9)	573.9(113.0)	505.1(143.8)

※カッコ内の数値は実測値を 100%とした時の推定値の百分率(%)

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討と
せん断強度・せん断剛性推定手法の提案

表 5.2-13 推定式から求めた強度および剛性と実測値との差異(ヒノキ混合)

E_{50} (MPa)	ヒノキ混合割合 (vol.%)			
養生期間	0	10	33	67
0	62.2(83.4)	38.2(107.0)	10.4(75.5)	2.4(115.3)
7	71.3(134.2)	44.6(123.7)	13.0(90.0)	2.7(118.2)
28	95.2(106.2)	59.9(97.7)	16.3(90.1)	2.7(97.3)
84	139.9(101.8)	81.6(98.4)	17.3(59.0)	2.7(82.6)

q_{max} (kPa)	ヒノキ混合割合 (vol.%)			
養生期間	0	10	33	67
0	609.8(157.0)	478.4(103.7)	241.2(66.0)	192.6(79.1)
7	698.7(136.2)	559.1(92.5)	302.1(65.7)	216.2(96.1)
28	932.9(124.1)	750.3(86.4)	377.4(75.7)	216.8(80.5)
84	1371.8(149.9)	1022.1(107.2)	400.2(80.1)	216.8(77.8)

※カッコ内の数値は実測値を 100%とした時の推定値の百分率(%)

以下に本節で得られた知見を示す.

- 木屑混合割合と養生期間をパラメータに取ったせん断強度・せん断剛性の推定手法について提案した.
- 推定工程にせん断強度-養生期間関係を用いた場合の推定剛性は, 実測剛性の傾向と一致し, 推定方法として適切であるが, 剛性-養生期間関係式を用いた場合の推定強度は, 実測強度の傾向と一致せず, 推定方法として不適切である可能性があることを示した.
- 導出した関係式において, 木屑の影響因子と推察される係数を特定した.

4.4 母材強度(小・中・大)の違いがせん断特性に及ぼす影響

4.1 で示したように、製鋼スラグ(2018)と高炉スラグ微粉末を質量比 96 : 4 で混合したスラグ 4(2018)と篩下残渣を想定した繊維状や粒状の木屑を混合した材料において、木屑の形状によらず、木屑を 5 ~ 20 vol.%混合することで、スラグ 4(2018)よりも大きなせん断強さを発揮することが明らかとなった。この結果から、単純に木屑を混合するとせん断強さが増加すると結論づけるのは早急である。というのも、母材(今回でいうところのスラグ 4(2018))の強度が異なっても木屑を混合することで母材よりも大きなせん断強度を発揮するかどうかについては不明である。そこで、本節では粒度調整し製鋼スラグ(2018)と同等の粒度にした全く固まらないいわき硅砂やスラグ 4(2018)よりも大きなせん断強さを発揮するスラグ 15(2018)を母材として用い、それらに木屑を混合することで母材強度の影響を一軸圧縮(*UC*)試験と飽和圧密排水三軸圧縮(*CD*)試験(拘束圧 50 kPa)を行い検討した。

4.4.1 いわき硅砂と木屑を混合した材料の一軸圧縮特性

上記の目的(母材強度の影響)に対し、まず初めに一軸圧縮試験によって大略の把握を試みた。表 4.4-1 に本項で実施した*UC*試験の供試体作製条件(木屑混合割合、目標乾燥密度、目標含水比、目標飽和度)を示す。表 4.4-1 の目標乾燥密度と目標含水比は 3.2 の図 3.2-3 に示したように締固め試験の結果から決定した。なお、締固め試験はいわき硅砂のみ、ココヤシ繊維 33 vol.%混合、ヒノキ 33 vol.%混合の 3 種でしか実施していない。これは粒度調整したいわき硅砂の量が限られていたためである。その為、ココヤシ繊維混合割合 5, 10, 20 vol.%場合の目標乾燥密度と目標含水比はいわき硅砂のみとココヤシ繊維 33 vol.%の締固め試験の目標乾燥密度と目標乾燥密度を線形補完して算出した。ヒノキ混合割合 10, 20 vol.%においても、いわき硅砂とヒノキ混合割合 33 vol.%の結果から線形補完して算出した。また、締固め試験結果から分かるようにいずれの条件でも含水比の変化による明確な乾燥密度の増加が見られず、最適含水比の決定が困難であった。その為、著者らの経験に基づいて適当と思われる含水比で試験を行った。

また、表 4.4-1 に示すように基本的に養生は行っていない。これは他の実験との兼ね合いから養生期間が定まっていると融通が利かなくなるためである。しかし、前述の通り、木屑を混合した場合にせん断強さの増加が確認されたスラグ 4 を用いた場合は 7 日間の養生をしていることから、いわき硅砂を用いた場合にも養生することが望ましいとも考えられる。いわき硅砂は短時間で固化することはないものの養生による拘束の影響を排除することが最も望ましいと考え、本検討では事前にいわき硅砂のみを用いて養生なしと 7 日養生の結果を比較した。その結果を図 4.4-1 に示す。図 4.4-1 より養生なしと 7 日養生で有意な差は認められないことが分かる。つまり、いわき硅砂を用いる場合には 7 日間の養生によるモールドの拘束影響はないものと考えられることから、いわき硅砂を用いる場合には養生なしで試験を行った。

これらの結果には飽和度(サクション)の違いが影響していた可能性もあり、第 4 章 4 節ではいわき硅砂と木屑を混合し、飽和度を変化させて一軸圧縮試験を行った。その結果、

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討と せん断強度・せん断剛性推定手法の提案

供試体作製時の飽和度(サクション)の違いが混合材料の一軸圧縮特性に対して一定程度の影響を及ぼしていることが分かった。つまり、この試験結果は見方を変えたと、サクションの影響を受けてしまい純粋な母材強度の影響を評価できなかつたということである。

そこで本項ではサクションの影響を排除するために飽和圧密排水三軸圧縮(CD)試験を行った結果について示す。第4章3節でいわき硅砂にココヤシ繊維を20 vol.%混合した場合にとりわけ強度増加が大きかったことから、本項ではいわき硅砂にココヤシ繊維を混合した材料を用いた。また、スラグ4(2018)よりも強度の大きな固化材料(スラグ15(2018))に木屑を混合した場合のせん断特性を把握するために、スラグ15(2018)に木屑(ココヤシ繊維、ヒノキ)を混合した材料を用いて、せん断特性の評価・検討を行った。

表5.3-1に供試体作製条件を示す。なお、表5.3-1中の母材にいわき硅砂を用いた場合の目標含水比は表4.4-1の注釈*をつけた含水比を用いた。この含水比の決定方法については第4章4節冒頭で述べているためここでは省略する。また、表5.3-1中のスラグ15とは製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を質量比85:15で混合したものである。さらに、いわき硅砂混合材料は養生なしで試験を行った。この理由については第4章3節冒頭で述べているためここでは省略する。また、スラグ4(2018)にココヤシ繊維を混合する条件は第5章1節1項で示しているため、その結果を用いて考察する。

CD試験の手順については第5章1節1項と基本的に同じであるが、圧密圧力はすべての条件で $\sigma = 50 \text{ kPa}$ という点は異なる。

表 4.4-1 UC試験の供試体作製条件

木屑の種類 (形状)	木屑の内割 混合体積 (vol.%)	目標乾燥密度 $\rho_d (\text{Ma/m}^3)$	目標含水比 $w (\%)$	目標飽和度 $S_r (\%)$	養生日数 (日)
- (いわき硅砂のみ)	0	1.78	9.7	52.0	0, 7
ココヤシ繊維 (繊維状)	5	1.66	12.2	58.0	0
	10	1.53	14.7	60.0	
	20	1.28	19.6	58.5	
	33	0.96	26.0	47.5	
ヒノキ (粒状)	10	1.60	9.7	67.0	
	20	1.43	14.5	78.0	
	33	1.20	25.5	81.5	

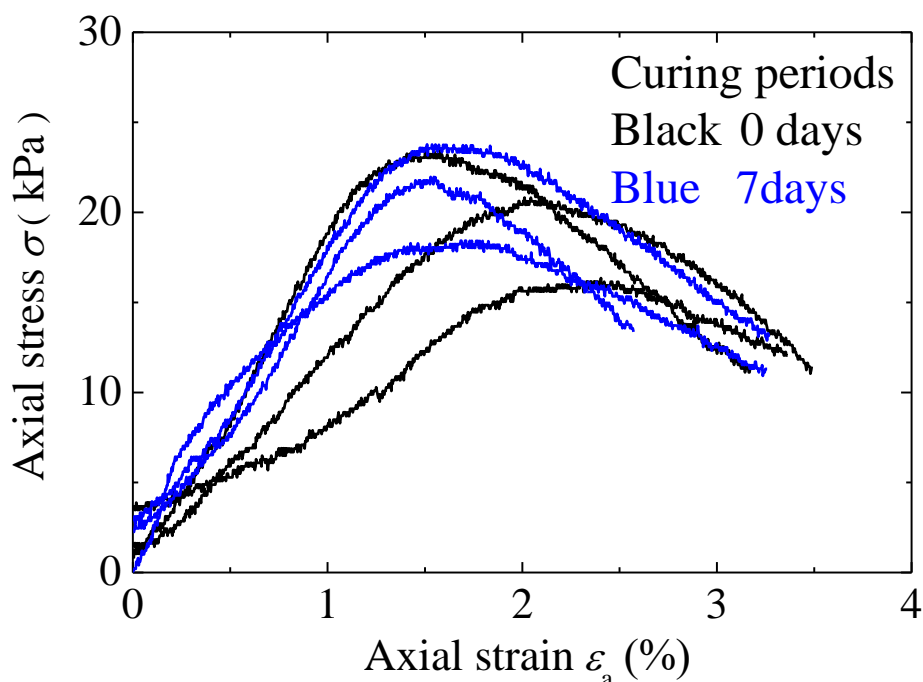


図 4.4-1 いわき硅砂のみの応力ひずみ関係(養生なし, 7日養生)

図 4.4-2 にココヤシ繊維混合割合別の応力ひずみ曲線を示す. 図中の丸プロットは各試験での一軸圧縮強さ q_u を発現したときの点を示している. また, 図中の数値はココヤシ繊維の混合割合を示している. なお, 試験は各条件で 3 本実施したが, 大きなばらつきはないと判断し, 代表的な 1 本の試験結果を示している. 図 4.4-2 より, いわき硅砂のみと比較すると, ココヤシ繊維を混合した場合, ココヤシ繊維の混合割合によらず q_u が大きく増加することが分かる. 特にココヤシ繊維を 20 vol.% 混合した場合にはその増加は顕著であり, いわき硅砂のみの約 20 倍もの強度を発揮する. また, 10, 20 vol.% 混合した場合には, 破壊ひずみ ϵ_f の増加が顕著である. ココヤシ繊維混合による一軸圧縮強さの増加は, この混合材料が固化しないことを考慮すると, 粒子の接触によってココヤシ繊維の引き抜き抵抗が増大することが, 要因の 1 つとして考えられる. また, 表 4.3-1 のように, ココヤシ繊維混合割合 10 vol.% までは, 木屑の混合割合の増加とともに, 飽和度も増加する傾向にある. 一般的に, 同条件で作製した供試体は, 飽和度の増加とともにサクシオンは減少する. しかし, 本試験では飽和度だけでなく, ココヤシ繊維の混合割合も異なることから, サクシオンの影響について評価することは難しい.

図 4.4-3 に粒状のヒノキといわき硅砂を混合した材料の応力ひずみ曲線を示す. ここでも 3 本試験を実施したが, ばらつきは小さく, 代表的な一本の結果を示している. 凡例や図中のプロットについては, 図 4.4-2 と同様である. 図 4.3-3 よりヒノキを混合した場合, いずれの混合割合でも, q_u の増加は確認できない. これはヒノキが粒状体であり, 粒子間に引き抜き抵抗が発揮されなかったことが要因であると考えられる.

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

図 4.4-4 にいわき珪砂のみ供試体，ココヤシ繊維 20 vol.%混合供試体，ヒノキ 20 vol.%混合供試体の一軸圧縮試験終了時の外観を示す．図 4.4-4(b)より，ココヤシ繊維を 20 vol.%混合した場合には，せん断層が水平方向に見られる．これは载荷軸が偏心したことにより供試体に曲げが作用し，偏心荷重が供試体に作用した為であると考えられる．図 4.4-4(a),(c) のいわき珪砂のみおよびヒノキを 20 vol.%混合した場合には，縦および斜め方向にせん断層が確認できる．このことから，いわき珪のみとヒノキを 20 vol.%混合した場合の破壊機構は似たものであったと推察されるのに対し，ココヤシ繊維を 20 vol.%混合した場合には，他とは破壊機構が異なっていたと推察される．

図 4.4-5 に，図 4.4-3 と図 4.4-4 の結果を基に整理した木屑混合割合と一軸圧縮強さ q_u の関係を示す．なお，図 4.4-5 には全試験結果 ($n=3$) を示している．図 4.4-5 より，前述の通り，同一条件であれば試験結果にばらつきは小さいことが分かる．また，木屑の混合割合によらず，ココヤシ繊維を混合した場合，粒状のヒノキを混合した場合よりも大きな q_u を示した．

図 4.4-6 に木屑混合割合と変形係数 E_{50} の関係を示す．図 4.4-6 より，ココヤシ繊維 5 vol.%混合の場合で，やや E_{50} にばらつきはあるものの，他の条件では試験結果にばらつきはほとんど見られないことが分かる．また，図 4.4-5 と同様に，木屑の混合割合によらず，ココヤシ繊維を混合した場合，粒状のヒノキを混合した場合よりも大きな E_{50} を発揮することが分かる．4.1 の図 4.1-4 のスラグ 4(2018)に木屑を混合した材料では，ココヤシ繊維を混合した場合のほうが，ヒノキを混合した場合よりも変形係数が低かったことから，木屑の形状だけでなく，木屑と混合する材料によっても混合材料の力学特性は異なることが明らかとなった．

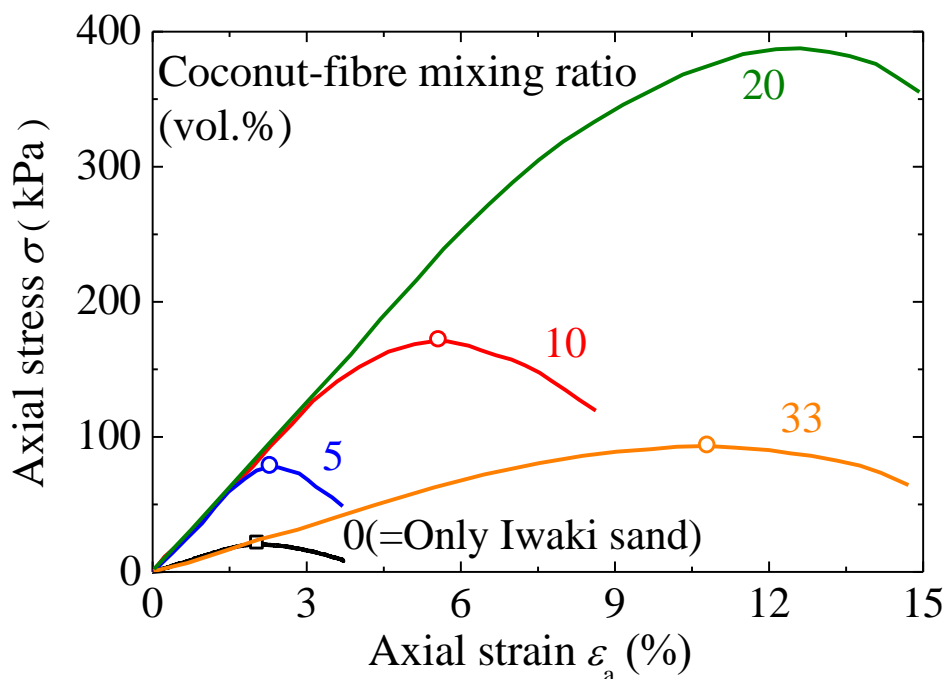


図 4.4-2 ココヤシ繊維混合割合別の応力ひずみ関係

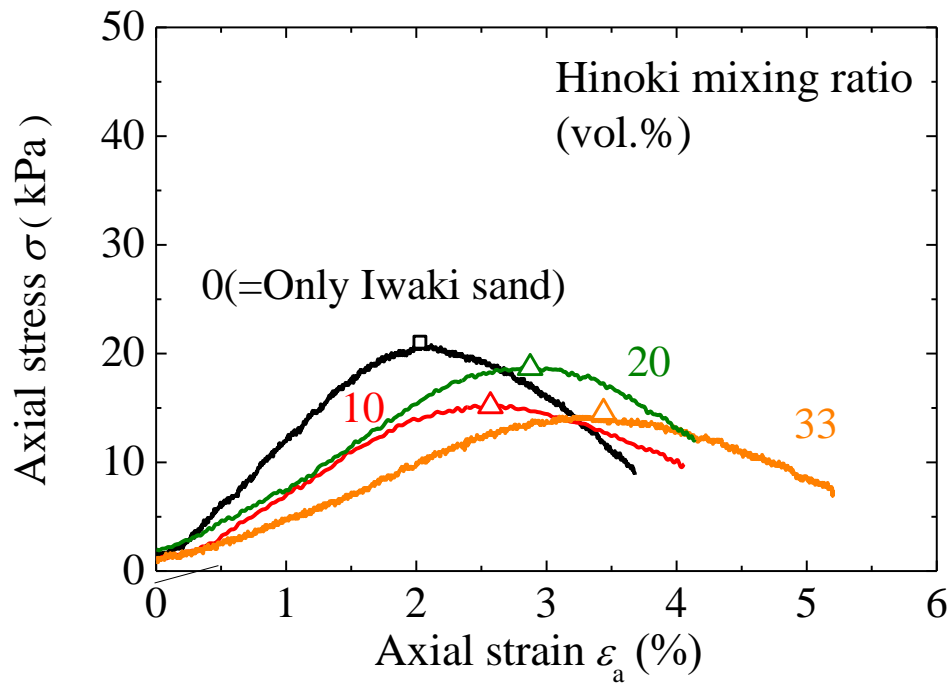


図 4.4-3 ヒノキ混合割合別の応力ひずみ関係(養生なし)

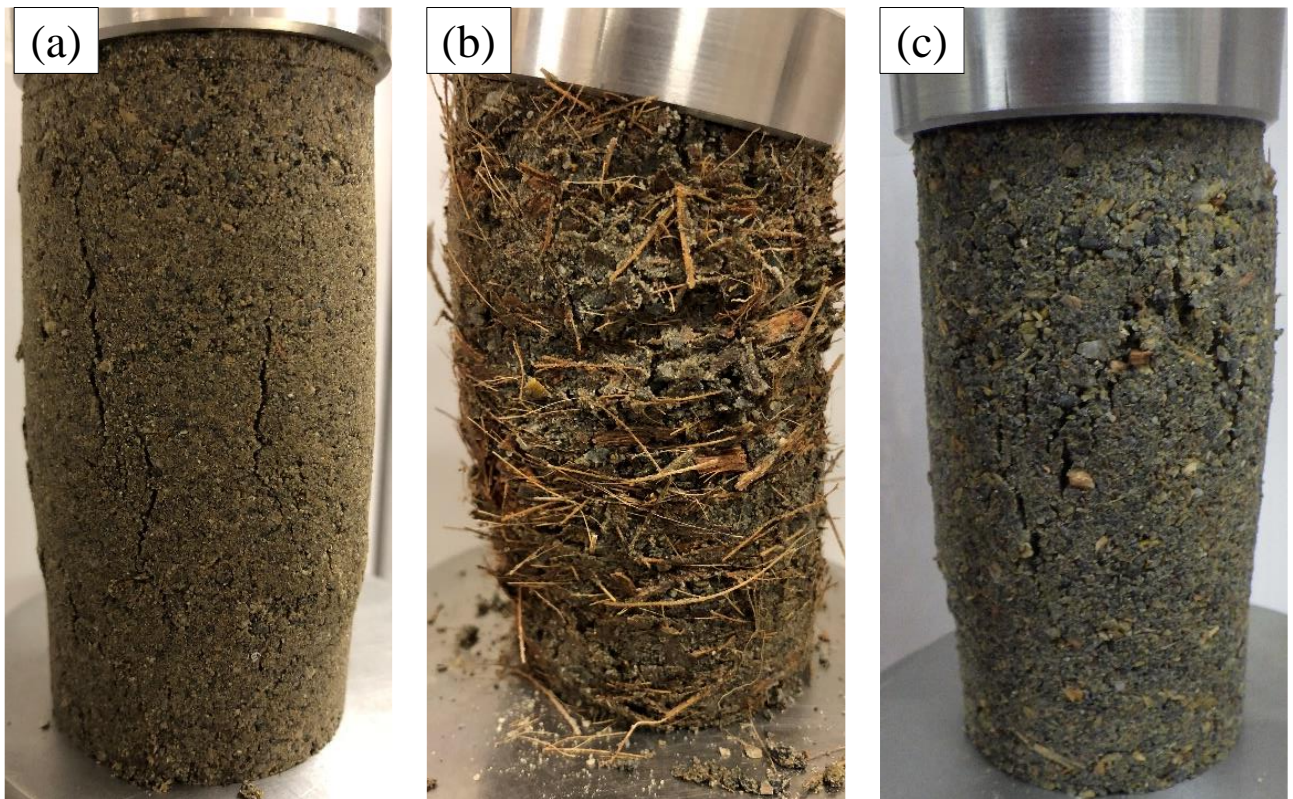


図 4.4-4 一軸圧縮試験終了時の外観(a)いわき珪砂のみ, (b)ココヤシ繊維 20 vol.%, (c)ヒノキ 20 vol.%

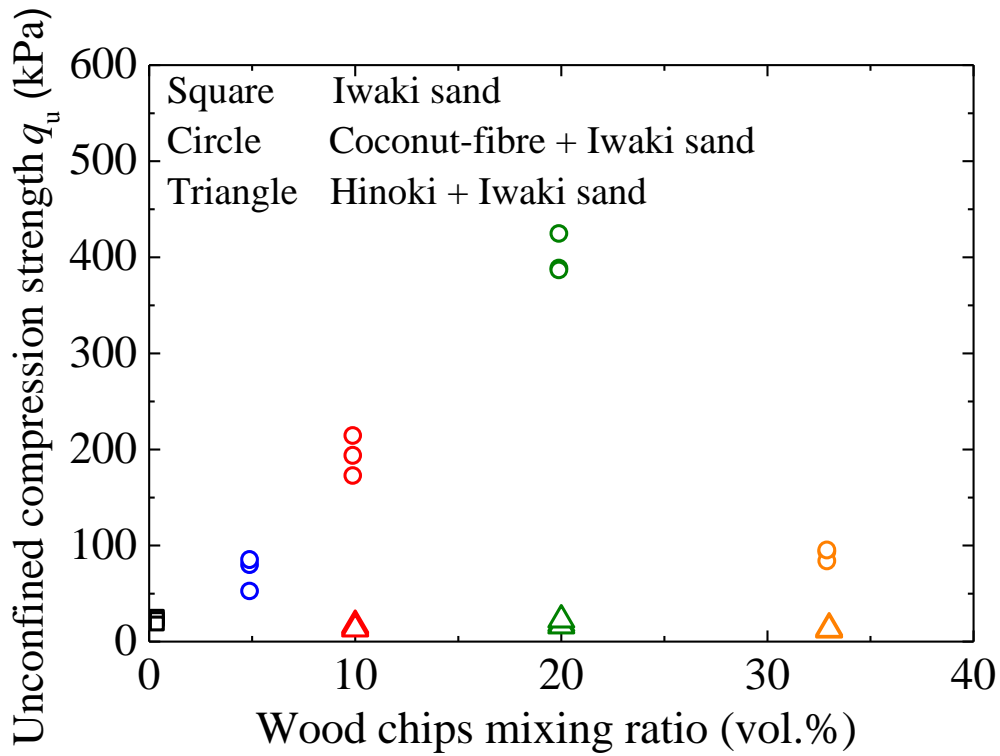


図 4.4-5 木屑混合割合と一軸圧縮強さ q_u の関係

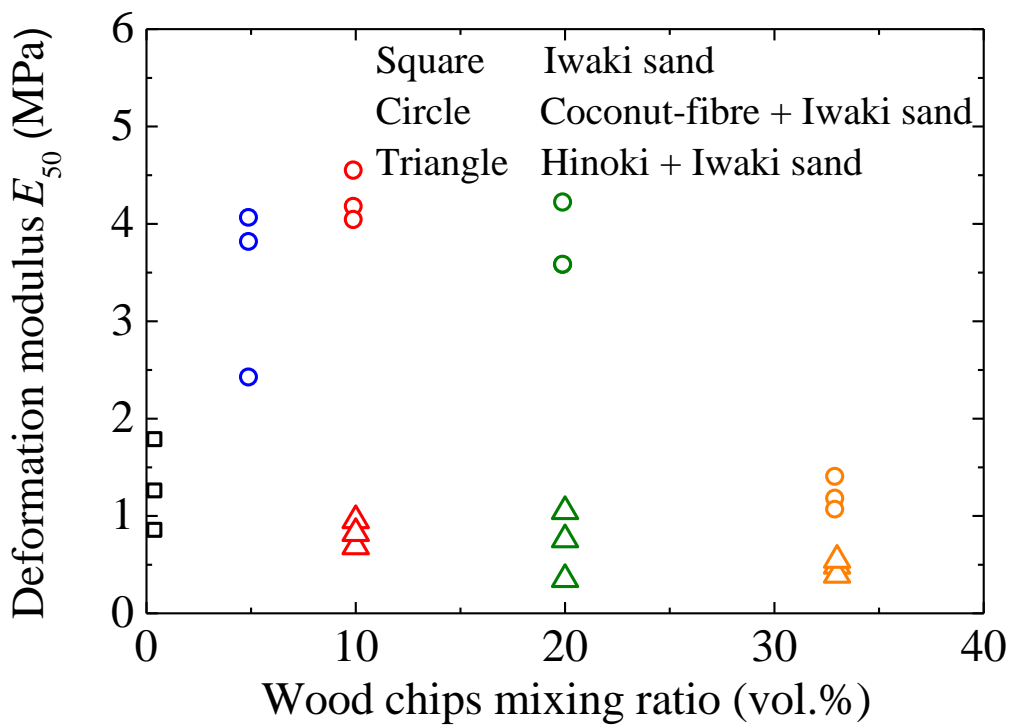


図 4.4-6 木屑混合割合と変形係数 E_{50} の関係

以下に本項で得られた知見をまとめる。

- 1) いわき硅砂のような固化をしない材料にココヤシ繊維を混合した場合、一軸圧縮強さも増加し、破壊ひずみも大きくなる。さらに、ピーク強度後の応力低下も緩やかになる。一方で、ヒノキを混合した場合には一軸圧縮強さの増加も見られず、またピーク強度後の応力低下傾向もいわき硅砂と変わらない。つまり、一軸圧縮強さの増加およびピーク強度後のひずみ軟化傾向にはココヤシ繊維の引抜き抵抗が寄与しているものと推察され、スラグと混合した材料においてもココヤシ繊維の引抜き抵抗が発揮されていたものと考えられる。
- 2) 木屑混合材料の力学特性は、混合する木屑の形状だけではなく、木屑と混合する母材の強度によっても大きく異なる。

4.4.2 いわき硅砂と木屑を混合した材料の一軸圧縮特性に及ぼす飽和度の影響

4.1.1 より、いわき硅砂のような固化をしない材料にココヤシ繊維を混合した場合、一軸圧縮強さも増加し、破壊ひずみも大きくなることが分かった。また、ピーク強度後の応力低下も緩やかになる。一方で、ヒノキを混合した場合には一軸圧縮強さの増加も見られず、またピーク強度後の応力低下傾向もいわき硅砂と変わらないことが分かった。つまり、一軸圧縮強さの増加およびピーク強度後のひずみ軟化傾向にはココヤシ繊維の引抜き抵抗が寄与しているものと推察され、スラグと混合した材料においてもココヤシ繊維の引抜き抵抗が発揮されていたものと考えられる。これについて、ココヤシ繊維の引抜き抵抗を要因として考えているが、一軸圧縮試験は不飽和で実施されており、サクシヨンの影響を評価できていない。サクシヨンの影響を評価する場合、木屑の混合割合を等しくし、飽和度を変える必要がある。そこで本項では木屑の混合割合を統一し、飽和度を変化させた条件でサクシヨンの影響について検討する。

表 4.4-2 に本項で実施した UC 試験の供試体作製条件(木屑混合割合, 目標乾燥密度, 目標含水比, 目標飽和度)を示す。表 4.4-2 中には 4.4.1 で実施した供試体の含水比も注釈*をつけて示している。なお、目標飽和度は 4.4.1 の結果から一軸圧縮強さが最大となったココヤシ繊維 20 vol.%混合の供試体といわき硅砂のみの供試体の両条件で作製可能な最小及び最大の飽和度とした。しかし、表 4.4-2 から分かるように、いわき硅砂にココヤシ繊維を 33 vol.%混合した条件では飽和度 21.0%と 89.5%で自立しなかったため、UC 試験は実施していない。その為、以降で示す一軸圧縮強さ, 破壊ひずみ, 変形係数を 0 として破線でつないでいる。

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

表 4.4-2 供試体作製条件(木屑混合割合, 目標乾燥密度, 目標含水比, 目標飽和度)

木屑の種類 (形状)	木屑の内割 混合体積 (vol.%)	目標乾燥密度 ρ_d (Ma/m ³)	目標含水比 w (%)	目標飽和度 S_r (%)
- (いわき珪砂のみ)	0	1.78	3.9	21.0
			9.74*	52.0
			16.8	89.5
ココヤシ繊維 (繊維状)	5	1.66	4.5	21.0
			12.2*	58.0
			19.0	89.5
	10	1.53	5.2	21.0
			14.7*	60.0
			22.1	89.5
	20	1.28	19.6	21.0
			19.6*	58.5
			30.0	89.5
33	0.96	26.0*	47.5	

図 4.4-7, 図 4.4-8, 図 4.4-9 に各飽和度の応力ひずみ関係を示す. 各条件で 3 本の試験を行っているがばらつきはないと判断し, 3 本のうち中間挙動を示した 1 本の結果を図中に示す. 図 4.4-7, 図 4.4-8, 図 4.4-9 より, 飽和度によらず, ココヤシ繊維をいわき珪砂に混合すると, 一軸圧縮強さがいわき珪砂よりも増加する傾向が確認できる. また, いずれの飽和度でもココヤシ繊維を混合することによる剛性の低下は見られず, 変わらないもしくはいわき珪砂のみよりも高い剛性となる. 一方でいずれの飽和度においてもココヤシ繊維を混合することによるピーク強度後の応力低下が緩やかになるような傾向は見られない.

図 4.4-10 にココヤシ繊維混合割合と一軸圧縮強さの関係を示す. 4.4.1 で作製した供試体の含水比は締固め試験と著者らの経験から決定された含水比であるため, ココヤシ繊維の混合割合によって飽和度は多少異なるが, 47.5~60.0%の範囲にあった. それぞれの図中の折線は飽和度がほぼ等しい条件のものをつないだものとなっている. 図 4.4-10 より, 飽和度 21.0%では, ココヤシ繊維 10 vol.%で一軸圧縮強さが最大となり 20 vol.%で低下する. 一方, 飽和度が 47.5~60.0%と 89.5%では, ココヤシ繊維 20 vol.%で一軸圧縮強さが最大となり 33 vol.%で低下する. つまり, 供試体作製時の飽和度により, 一軸圧縮強さが最大となるココヤシ繊維混合割合が異なる. また, 湿潤側($S_r = 89.5\%$)の一軸圧縮強さは, いずれのココヤシ繊維混合割合でも同じココヤシ繊維混合割合で, 飽和度が 47.5~60.0%の時の一軸圧縮強さよりも小さい結果となった.

ココヤシ繊維混合割合の違いによる一軸圧縮強さの違いに着目すると, ココヤシ繊維 5 vol.%では飽和度の変化による一軸圧縮強さの変化が少ないが, ココヤシ繊維 10 vol.%以上

では飽和度を変化させると一軸圧縮強さに差が生じる傾向が確認された。つまりココヤシ繊維混合割合が増えると、飽和度の変化による一軸圧縮強さの変化も大きくなる。本研究では、ココヤシ繊維を混合したことで非常に大きな一軸圧縮強さが観察された。特にココヤシ繊維混合割合が、10 vol.%と 20 vol.%の時に一軸圧縮強さが非常に大きくなる含水比があることがわかった。ただし、ココヤシ繊維混合割合によって、最大の一軸圧縮強さが見られる含水比は異なるようである。

図 4.4-11 にココヤシ繊維混合割合と破壊ひずみの関係を示す。図 4.4-11 より、飽和度に関係なくココヤシ繊維混合割合が増加すると、破壊ひずみが増加する傾向を確認することができる。またココヤシ繊維混合割合が同一条件の場合は、飽和度 89.5%で破壊ひずみが最大となる傾向が確認された。

図 4.4-12 にココヤシ繊維混合割合と変形係数 E_{50} の関係を示す。 E_{50} は、 $E_{50} = (q_u / 2) / \varepsilon_{50}$ より算出した。ここで、 ε_{50} は $q_u / 2$ 時の軸ひずみ ε_a (%) である。図 4.4-12 より、飽和度 21.0% のココヤシ繊維 10 vol.% を除いて、最適含水比の飽和度から変化させると、変形係数は低下する傾向が確認された。

図 4.4-7 から図 4.4-12 のココヤシ繊維といわき砂を混合した材料の一軸圧縮試験の結果より、ココヤシ繊維を混合した場合、飽和度によらず一軸圧縮強さおよび破壊ひずみが増加し、粘り強い靱性を備えた材料となることを確認した。また、ココヤシ繊維を混合することによる正の影響は一軸圧縮強さに対して最も大きい。飽和度の違いによる一軸圧縮強さとココヤシ混合割合の間に相関を見出すことは出来なかった。

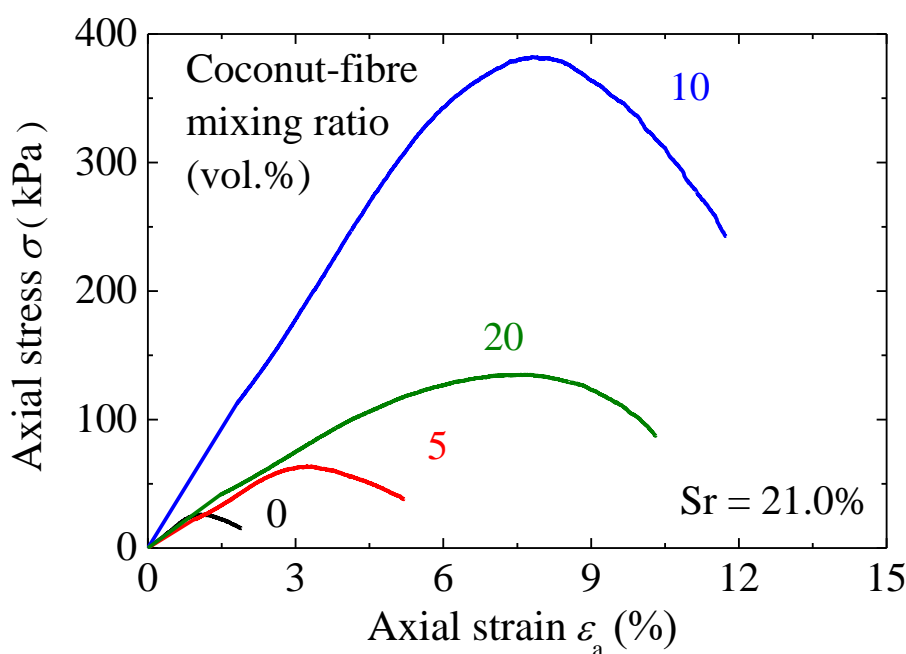


図 4.4-7 飽和度 21.0% のココヤシ繊維混合割合別応力ひずみ関係

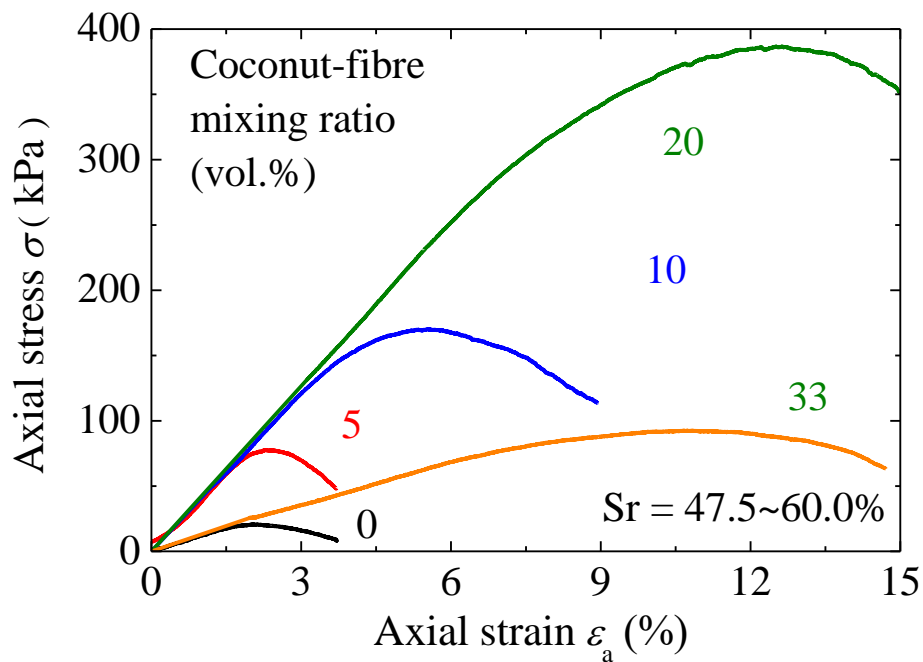


図 4.4-8 飽和度 47.5~60.0%のココヤシ繊維混合割合別応力ひずみ関係

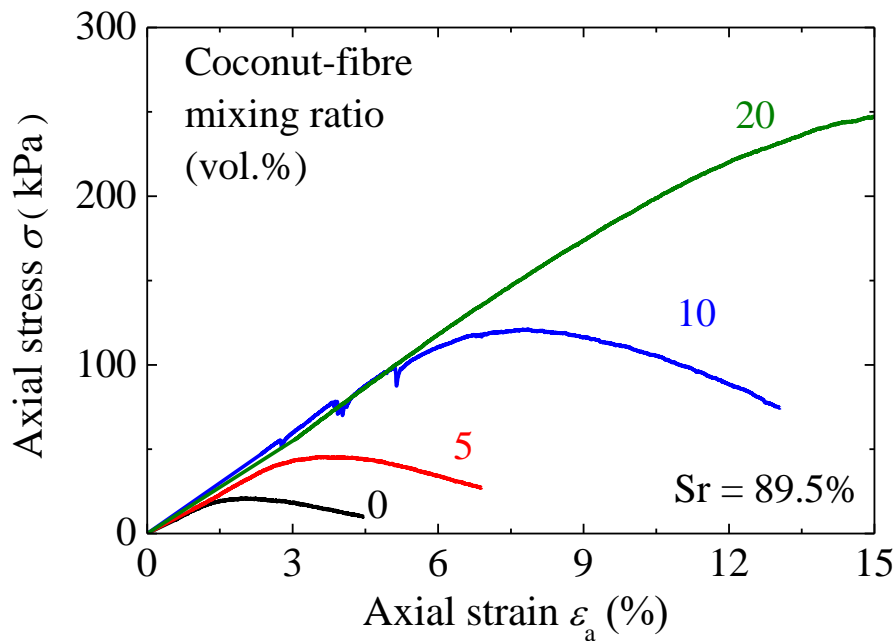


図 4.4-9 飽和度 89.5%のココヤシ繊維混合割合別応力ひずみ関係

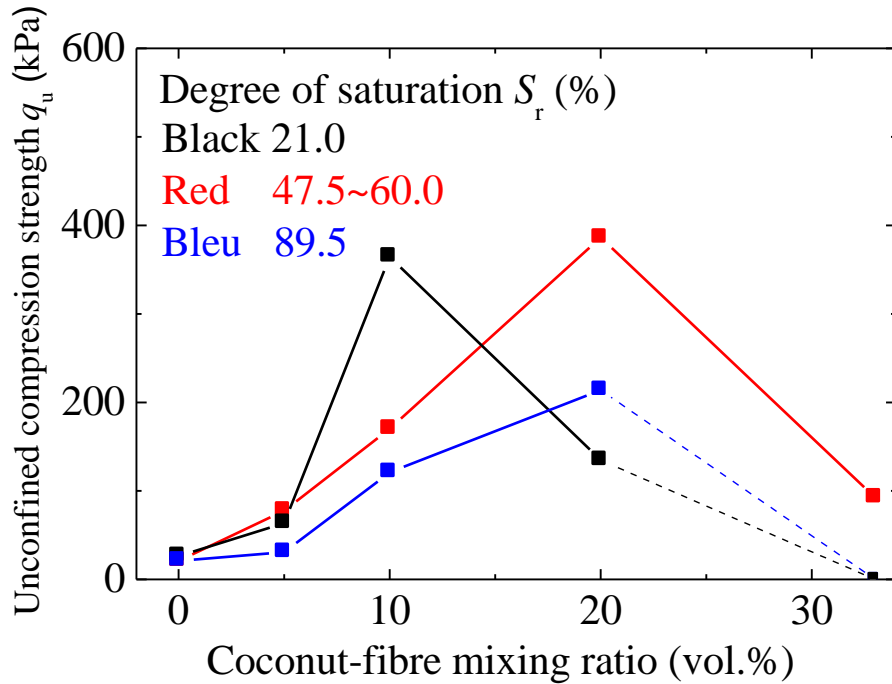


図 4.4-10 飽和度別のココヤシ繊維混合割合と一軸圧縮強さの関係

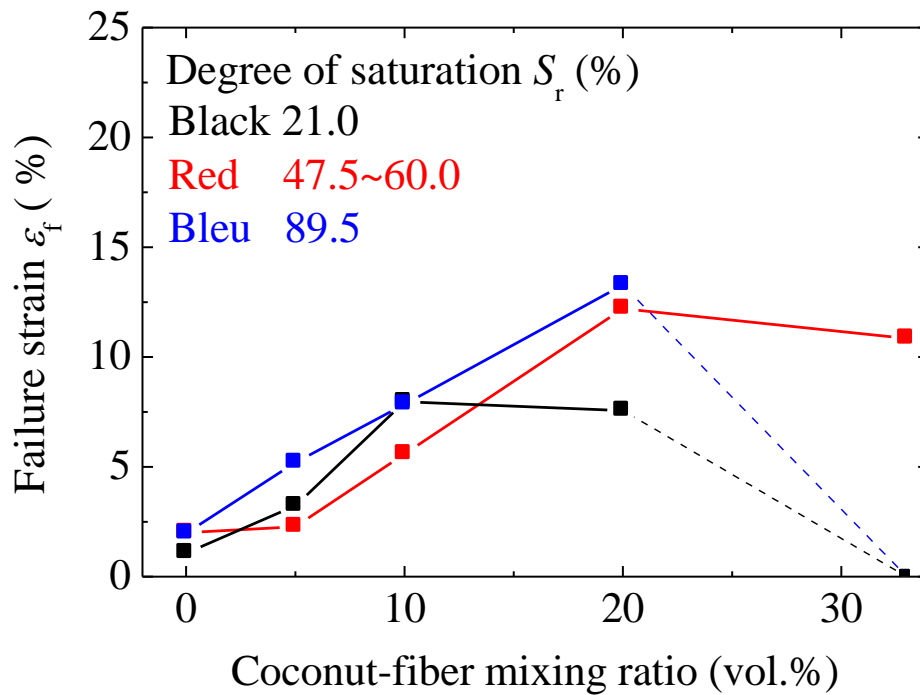


図 4.4-11 飽和度別のココヤシ繊維混合割合と破壊ひずみの関係

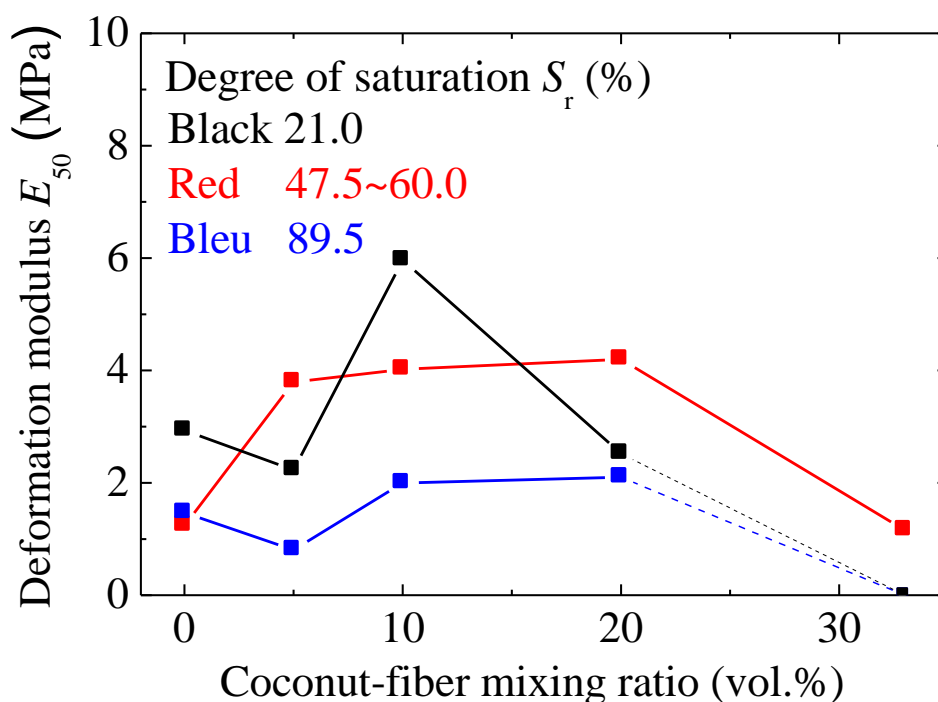


図 4.4-12 飽和度別のココヤシ繊維混合割合と変形係数の関係

以下に本項で得られた知見を示す。

- (1) 全く固化しないいわき砂にココヤシ繊維を混合した材料ではココヤシ繊維を混合することによって飽和度の違いによらず、一軸圧縮強さおよび破壊ひずみは増加する。
- (2) いわき砂のような低強度材料に対してはココヤシ繊維の繊維補強による正の影響は変形係数よりも一軸圧縮強さに対して大きくなる。
- (3) 飽和度 $S_r = 21\%$ や 89.5% のような極端にサクシジョンの働かない条件においても、ココヤシ繊維混合による靱性向上効果が見られたことから、ココヤシ繊維自体の繊維補強効果によって混合材料は靱性を発現する。ただし、サクシジョンの影響を完全に排除することは出来ていない。
- (4) いわき砂にココヤシ繊維を混合した材料では、飽和度によらずピーク強度後のひずみ軟化を抑制するような効果は確認できない。ただし、一軸圧縮試験のような拘束圧の作用しない条件下での圧縮(せん断)試験では、ピーク強度後(すなわち供試体の一部が破壊される)に急激な供試体崩壊が起こるため、ピーク強度後の応力については詳細な検討は出来ない。

4.4.3 飽和条件下における三軸せん断特性に及ぼす母材強度の影響

4.4-2 ではいわき硅砂と木屑を混合し、飽和度を変化させて一軸圧縮試験を行った。その結果、供試体作製時の飽和度(サクション)の違いが混合材料の一軸圧縮特性に対して一定程度の影響を及ぼしていることが分かった。つまり、この試験結果は見方を変えると、サクションの影響を受けてしまい純粋な母材強度の影響を評価できなかったということである。そこで本項ではサクションの影響を排除するために飽和圧密排水三軸圧縮(CD)試験(拘束圧 50 kPa)を行った結果について示す。また、スラグ 4(2018)よりも強度の大きな固化材料であるスラグ 15(2018)に木屑を混合した場合のせん断特性を把握するために、スラグ 15(2018)に木屑(ココヤシ繊維, ヒノキ)を混合した材料を用いて、せん断特性の評価・検討を行った。なお、スラグ 15とは製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を質量比 85:15 で混合したものである。

表 4.4-3 に供試体作製条件を示す。表 4.4-3 中の母材にいわき硅砂を用いた場合の供試体作製時の目標含水比は表 4.4-1 と同じである。また、スラグ 15 を用いた場合の目標乾燥密度はスラグ 4 と同じにし、目標含水比はスラグ 4 の目標含水比に 3%加算した。含水比を高くした理由として、スラグ 15 は高炉スラグ微粉末を 15%も含んでいることから、スラグ 4 と等しくすると相当に乾燥状態となってしまうためである。なお、加算量 3%自体に厳密な理由はなく、実際に供試体を作製して適度に湿潤だと工学的に判断した。

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討と
せん断強度・せん断剛性推定手法の提案

表 4.4-3 CD試験(拘束圧 50 kPa)の供試体作製条件

母材	木屑の種類 (形状)	木屑の内割 混合体積 (vol.%)	目標乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	目標含水比 w (%)	養生日数 (日)
いわき珪砂	ココヤシ繊維	0	1.78	9.7	0
		5	1.66	12.2	
		10	1.53	14.7	
		20	1.28	19.6	
		33	0.96	26.0	
スラグ4 (2018)		0	1.92	12.0	7
		5	1.82	13.0	
		10	1.69	14.7	
		33	1.07	25.0	
スラグ15 (2018)		0	1.92	15.0	
	5	1.82	16.0		
	10	1.69	17.7		
	33	1.07	28.0		
スラグ4 (2018)	ヒノキ	0	1.92	12.0	
		10	1.68	14.7	
		33	1.07	25.0	
スラグ15 (2018)		0	1.92	15.0	
		10	1.68	17.3	
		33	1.07	28.0	

図 4.4-13 にいわき珪砂とココヤシ繊維を混合した材料の応力ひずみ関係を示す。図中のプロットは最大せん断強さと残留強度を示している。なお、ココヤシ繊維混合割合が 33 vol.%では試験終了時までピーク強度を示さなかったため、試験終了時の軸差応力にプロットしている。図 4.4-13 より、ココヤシ繊維混合割合が 20 vol.%までは軸差応力にピークが現れ、ココヤシ繊維混合割合が 33 vol.%では軸差応力が軸ひずみとともに増加し続けるひずみ硬化型の挙動を示した。つまり、ココヤシ繊維混合割合により、応力ひずみ曲線が大きく異なることが分かる。また、いずれの混合条件でも、ココヤシ繊維混合割合が増加するほど、いわき珪砂のみよりも大きな最大せん断強さや残留強度を発揮することが分かる。また、ココヤシ繊維を混合すると変形係数が小さくなる傾向にあり、混合割合が増加すると応力ひずみ曲線の初期の傾きが小さくなる。

図 4.4-14 には図 4.4-13 より求められた最大せん断強さと変形係数の関係を示す。図 4.4-14 より、ココヤシ繊維混合割合が増加すると、最大せん断強さは増加するが、変形係数は低下する。これは、ココヤシ繊維を混合することにより、最大せん断強さを示す破壊ひずみが大きくなるためである。また、ココヤシ繊維を混合することで E_{50} は 10 MPa 以下と、いわき珪砂のみの時の半分以下となる。

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

図 4.4-15 には図 4.4-13 から求めたココヤシ繊維混合割合と残留強度の関係を示す。ここでの残留強度は、軸差応力減少量が軸ひずみ 1%あたり 10 kPa 以内となった時とした。なお、ココヤシ繊維混合割合が 33 vol.%では、試験終了時までピーク強度を示さなかったために残留強度は計測できていないが、せん断の最終段階の最大せん断強さを便宜的に残留強度であるとして図示した。図 4.4-15 より、ココヤシ繊維混合割合が増加すると残留強度が大きくなることが分かる。なお、33 vol.%混合した時には、残留強度ではないものの大変形時の最大せん断強さが非常に大きくなることが分かる。

図 4.4-16 に軸ひずみと体積ひずみの関係を示す。図 4.4-16 より、いわき硅砂のみとココヤシ繊維混合割合が 10 vol.%では、せん断初期に体積収縮した後に体積膨張する正のダイレイタンシーを示す。初期の収縮性はココヤシ繊維混合割合の影響を強く受け、混合割合が増えるほど初期の体積圧縮量が大きくなる傾向がある。一方、ココヤシ繊維混合割合が 20 vol.%と 33 vol.%の体積圧縮特性は、他とは大きく異なっており、体積収縮し続ける負のダイレイタンシーを示す。これらのことから、ココヤシ繊維といわき硅砂混合材料の体積圧縮特性は、ココヤシ繊維混合割合が 10 vol.%と 20 vol.%の間で変化すると考えられる。

図 4.4-17 に軸ひずみと内部摩擦角 ϕ の関係を示す。図 4.4-17 より、いわき硅砂のみの内部摩擦角は 38° なのに対し、ココヤシ繊維を混合するとそれよりも高く、ピーク後の挙動も緩やかであることが分かる。また、ココヤシ繊維混合割合が 10 vol.%と 20 vol.%の内部摩擦角は約 46° と同程度だが、それを発揮する軸ひずみはココヤシ繊維混合割合が 20 vol.%の方が高くなった。いわき硅砂のみの内部摩擦角は残留状態においては、 30° であるが、ココヤシ繊維を混合すると 40° 近くまで達し、ココヤシ繊維には残留状態の内部摩擦角を上昇させる効果が確認できる。

これらの結果から分かるように、飽和状態で考えると、ココヤシ繊維混合割合が 20 vol.%程度までは、砂の特性を保持したままココヤシ繊維の影響が少しずつ現れ、ココヤシ繊維混合割合の増加に伴い最大せん断強さと残留強度がわずかに増加する。また、ココヤシ繊維混合割合の増加に伴い変形係数は小さくなり、体積収縮も起こりやすくなる。一方、ココヤシ繊維混合割合が 33 vol.%になると、最大せん断強さと残留強度が大きく増加し、変形係数は非常に小さく、体積収縮も非常に大きくなるなど、それまでとは全く異なったせん断挙動を示すことが分かる。

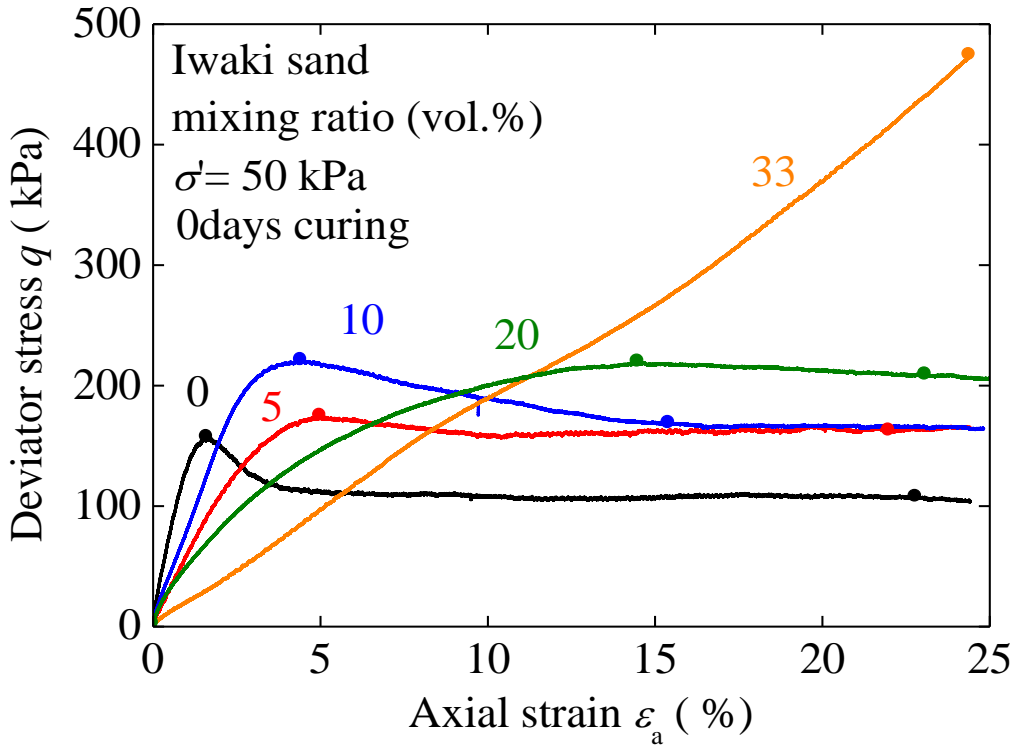


図 4.4-13 いわき珪砂-ココヤシ繊維混合材料の応力ひずみ関係

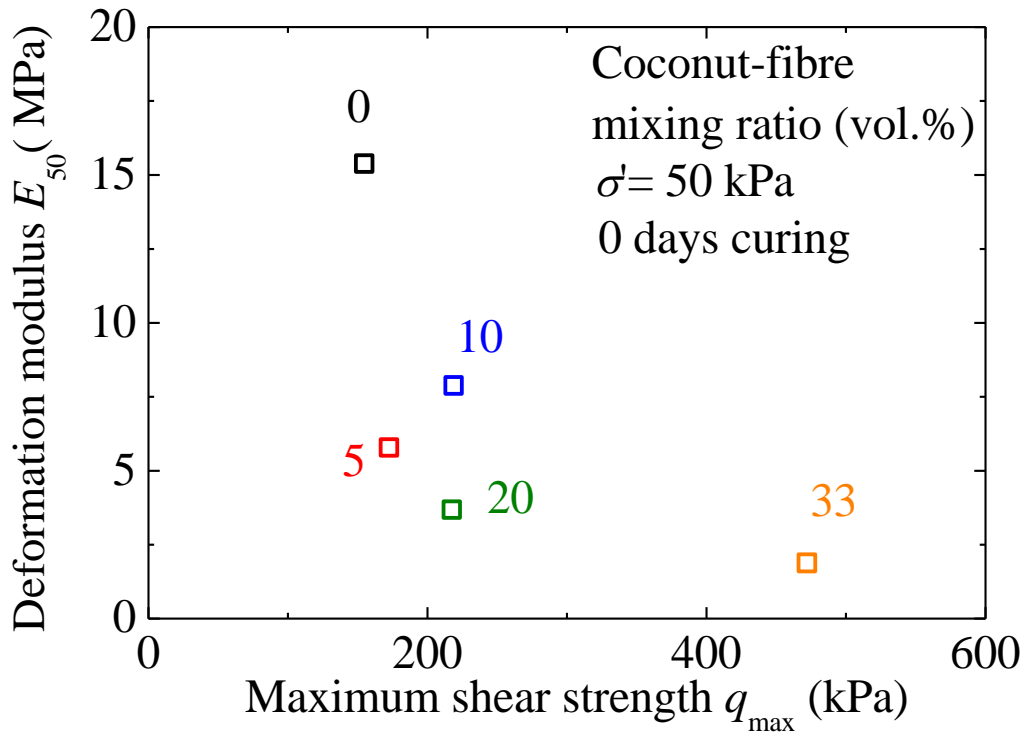


図 4.4-14 いわき珪砂-ココヤシ繊維混合材料の最大せん断強さと変形係数の関係

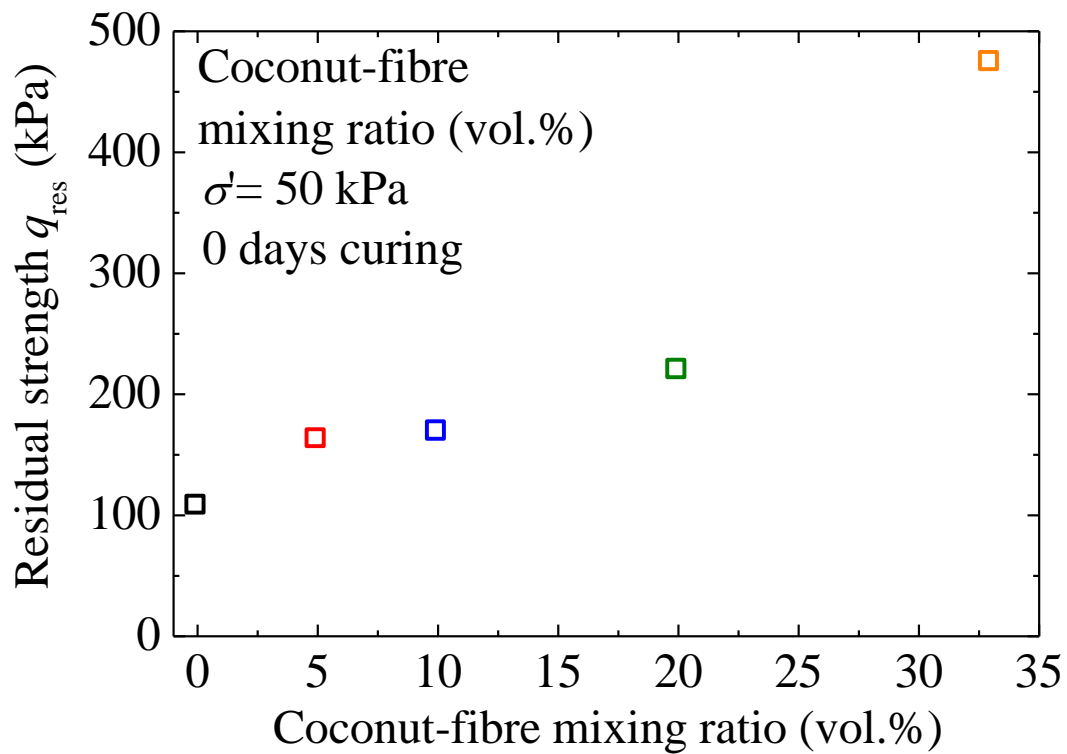


図 4.4-15 ココヤシ繊維混合割合と残留強度の関係

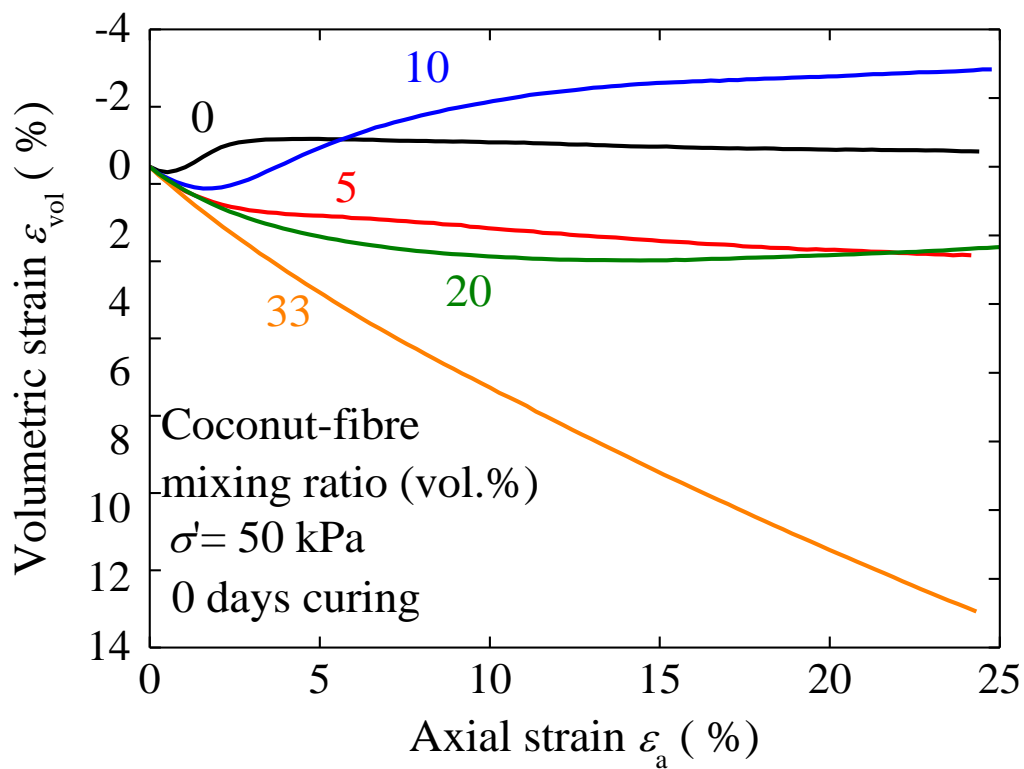


図 4.4-16 いわき硅砂-ココヤシ繊維混合材料の軸ひずみと体積ひずみの関係

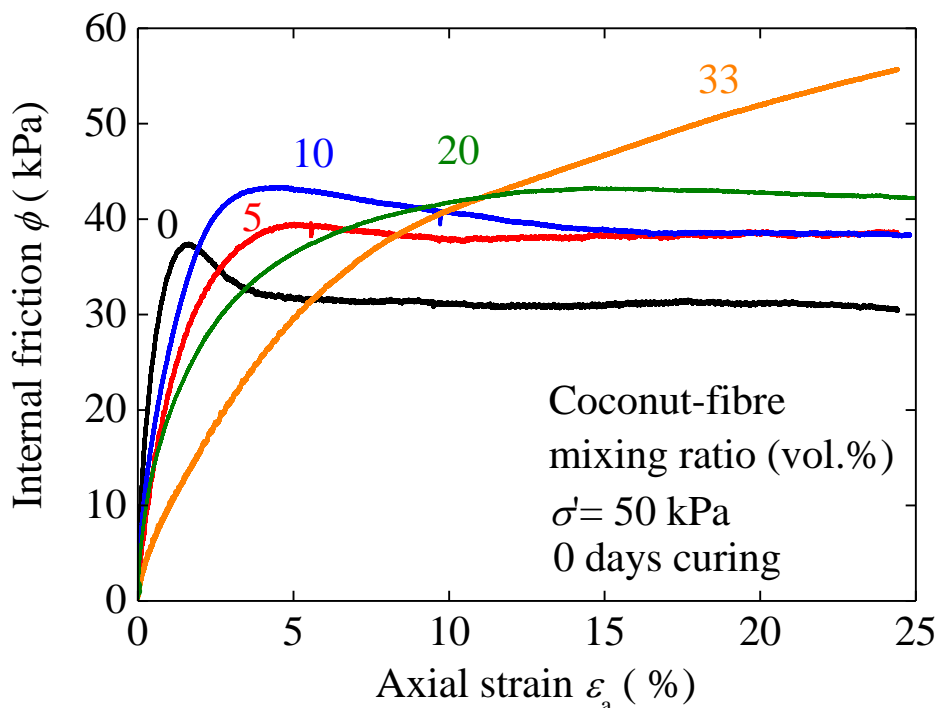


図 4.4-17 いわき珪砂-ココヤシ繊維混合材料の軸ひずみと内部摩擦角の関係

次にスラグ 15(2018)にココヤシ繊維とヒノキをそれぞれ混合した材料について結果を示す。

図 4.4-18 にスラグ 15(2018)とココヤシ繊維を混合した材料の応力ひずみ曲線を、図 4.4-19 にスラグ 15(2018)とヒノキを混合した材料の応力ひずみ曲線を示す。いずれも図中のプロットは最大せん断強さと残留強度を示している。なお、ココヤシ繊維 33 vol.%混合では試験終了時までピーク強度を示さなかったため、試験終了時の軸差応力にプロットしている。図 4.4-18 と図 4.4-19 より、木屑の形状や混合割合に関係なくスラグ 15(2018)と木屑を混合すると、スラグ 15(2018)よりも最大せん断強さが低下することが分かる。また、木屑を 33 vol.%混合した場合には、7 日養生と 28 日養生で応力ひずみ関係の形状がほぼ変化しないことが分かる。

図 4.4-20 にスラグ 15(2018)とココヤシ繊維を混合した材料の軸ひずみと体積ひずみの関係を、図 4.4-21 にスラグ 15(2018)とヒノキを混合した材料の軸ひずみと体積ひずみの関係を示す。なお、ここでの図中のプロットは養生期間の違いを区別するものであり、プロット自体に他意はない。図 4.4-20 より、ココヤシ繊維混合材料の体積ひずみは、ココヤシ繊維混合割合が 10 vol.%までは養生期間に関係なく正のダイレイタンスーを示すが、33 vol.%では負のダイレイタンスーを示す。また、ココヤシ繊維混合割合 33 vol.%の軸ひずみと体積ひずみの関係は養生期間で変化はほとんど見られない。図 4.4-21 より、ヒノキ混合材料は、全ての混合割合において正のダイレイタンスーを示す。また、ヒノキ混合割合 33 vol.%ではスラグ 15(2018)のみやヒノキ混合割合が 10 vol.%よりも大きな軸ひずみまで収縮

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

傾向を示す。これは、混合材料中のヒノキが多いためだと考えられる。

図 4.4-22 に木屑(ココヤシ繊維およびヒノキ)混合割合と最大せん断強さ q_{max} で整理した結果を示す。図 4.4-22 より、木屑の形状によらず、いずれの混合割合においても 28 日養生の方が 7 日養生よりも q_{max} が大きくなり、いずれの養生期間においても混合割合の増加に伴って q_{max} が減少することが分かる。また、いずれの混合割合においてもヒノキ混合材料の方がココヤシ繊維混合材料よりも q_{max} が大きくなる。つまり、スラグ 15(2018)においては、粒状の木屑であるヒノキを混合した方が繊維状の木屑であるココヤシ繊維を混合するより q_{max} の減少を抑えることができると考えられる。ただし、木屑の混合割合が 33 vol.%となると、木屑の形状と養生期間に関係なく最大せん断強さが 1000 kPa 程度となる。

図 4.4-23 に木屑(ココヤシ繊維およびヒノキ)混合割合と変形係数 E_{50} で整理した結果を示す。図 4.4-23 より木屑の形状に関係なく、いずれの養生期間においても混合割合の増加に伴い変形係数は減少する。また、いずれの混合割合においてもヒノキ混合材料の方がココヤシ繊維混合材料よりも E_{50} が大きい。このことから、スラグ 15(2018)において、粒状の木屑を混合した方が繊維状の木屑を混合するより E_{50} の減少を抑えることができると考えられる。

図 4.4-24 に木屑(ココヤシ繊維およびヒノキ)混合割合と残留強度 q_{res} で整理した結果を示す。なお、ココヤシ繊維混合割合 33 vol.%の応力ひずみ曲線がピークに達していないことから、図中にはココヤシ繊維混合割合 33 vol.%の q_{res} を示していない。図 4.4-24 より、同じ混合割合においてヒノキ混合材料の方がココヤシ繊維混合材料よりも q_{res} が大きくなる。

これらの試験結果より、スラグ 15(2018)のような母材の強度が大きい材料には粒状のヒノキの方がココヤシ繊維を混合するよりも、同じ混合割合において q_{max} や E_{50} の減少が抑制されることが分かる。また、木屑に混合する母材がスラグ 15(2018)のようになると、木屑が負の影響を発揮し、補強効果は期待できなくなることが明らかとなった。

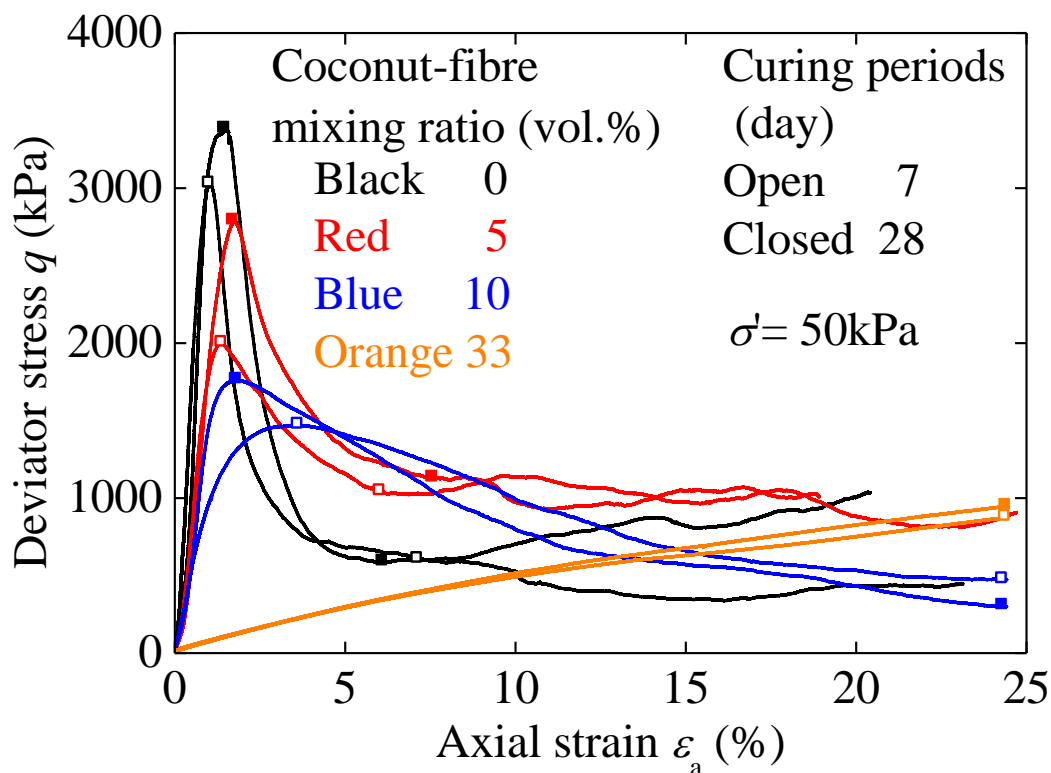


図 4.4-18 スラグ 15(2018)-ココヤシ繊維混合材料の応力ひずみ関係

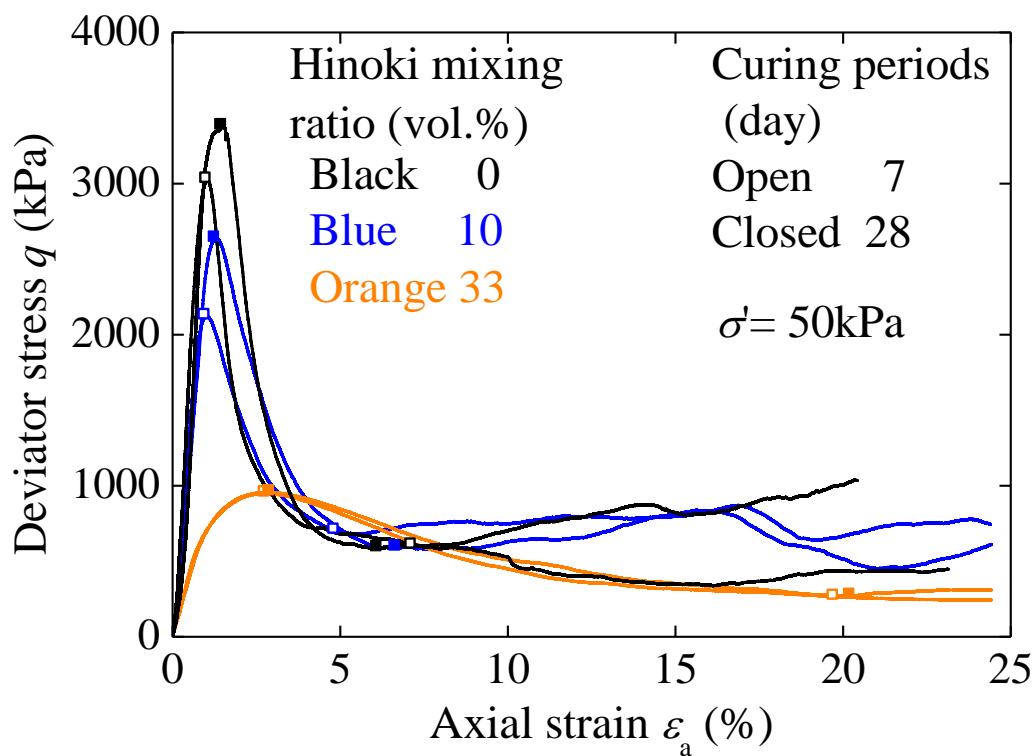


図 4.4-19 スラグ 15(2018)-ヒノキ混合材料の応力ひずみ関係

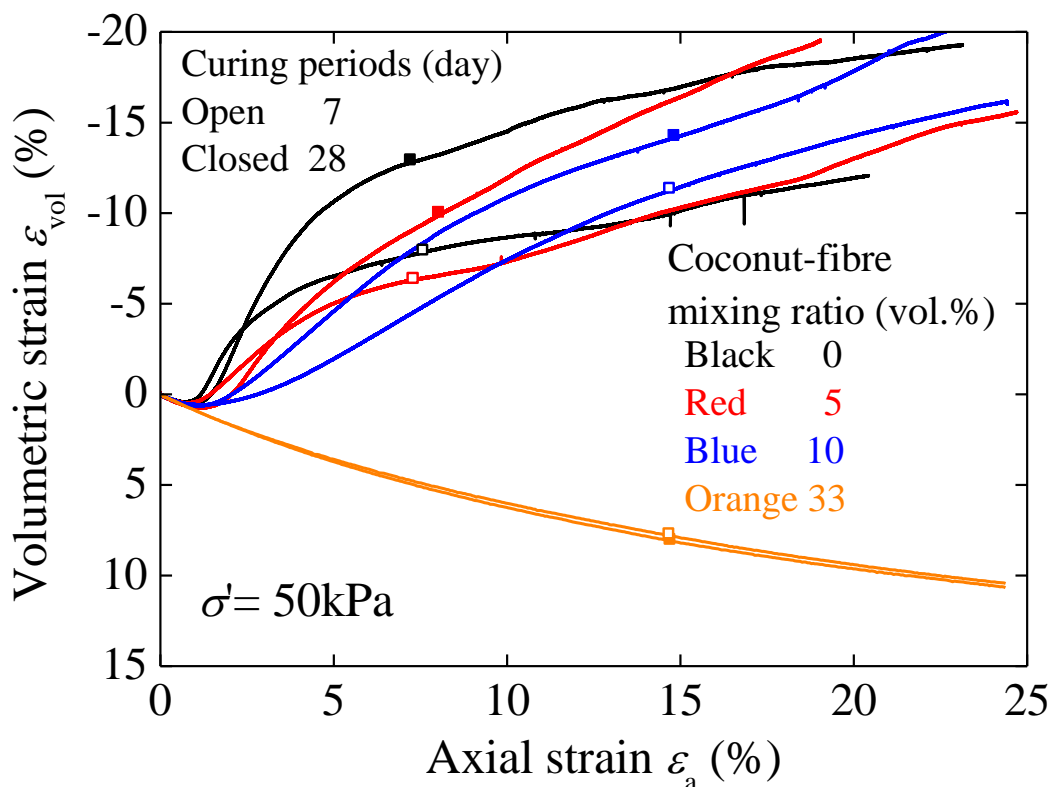


図 4.4-20 スラグ 15(2018)-ココヤシ繊維混合材料の軸ひずみと体積ひずみの関係

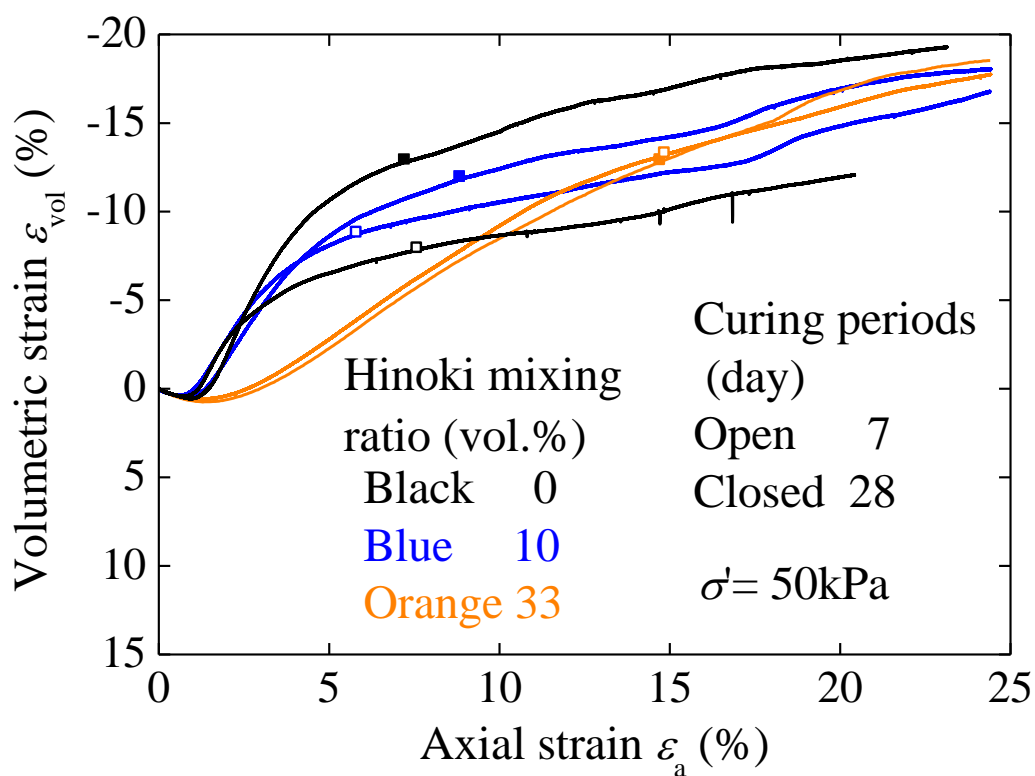


図 4.4-21 スラグ 15(2018)-ヒノキ混合材料の軸ひずみと体積ひずみの関係

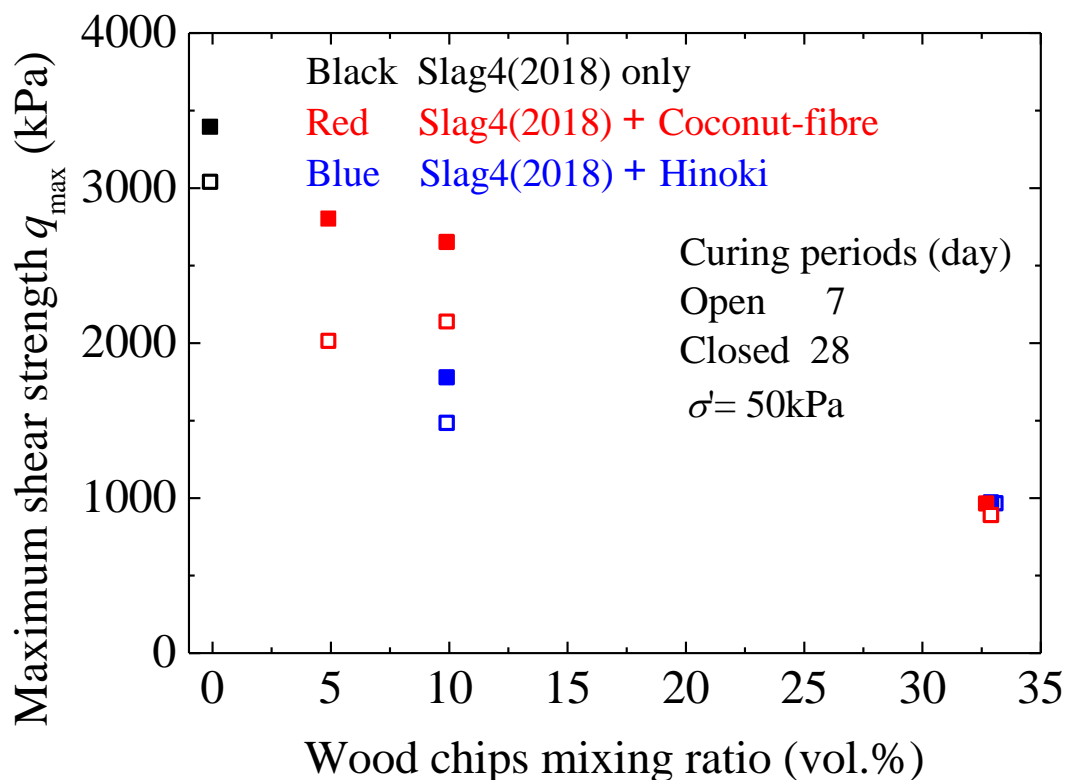


図 4.4-22 木屑混合割合と最大せん断強さ q_{max} の関係(ココヤシ繊維およびヒノキ)

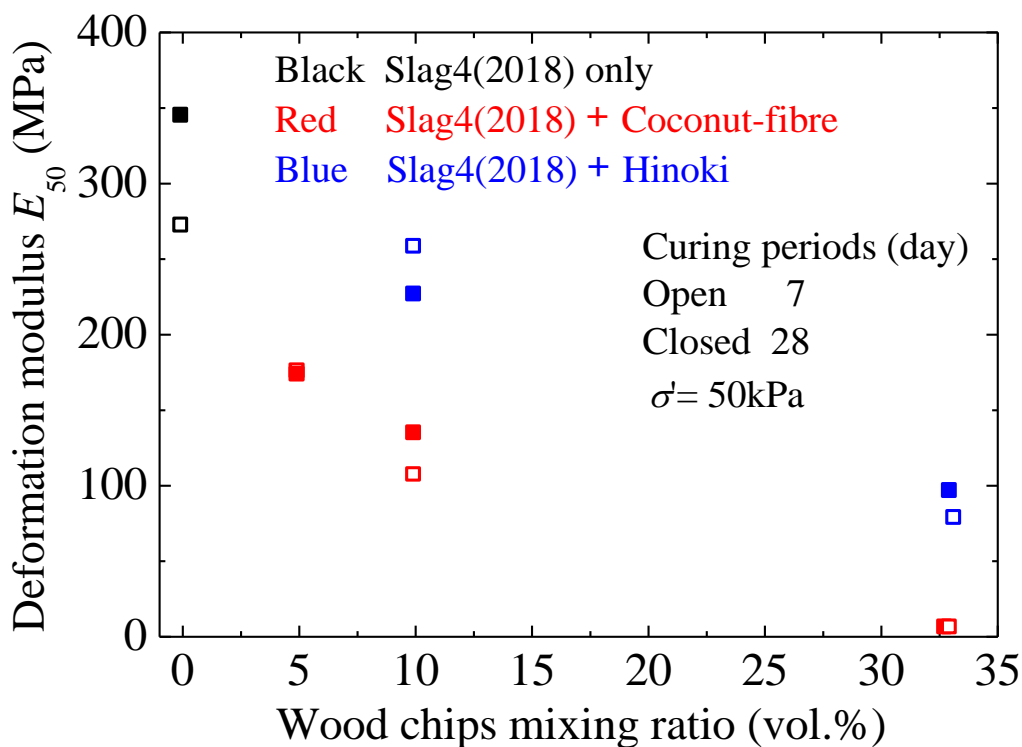


図 4.4-23 木屑(ココヤシ繊維およびヒノキ)混合割合と変形係数 E_{50} の関係(ココヤシ繊維およびヒノキ)

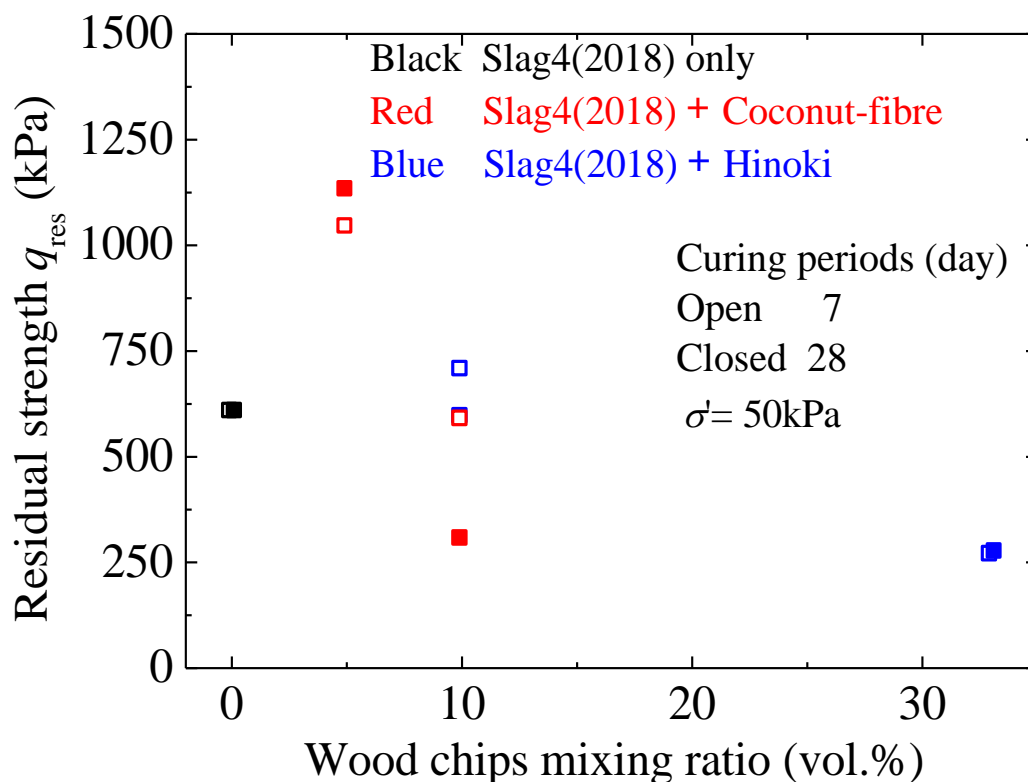


図 4.4-24 木屑(ココヤシ繊維およびヒノキ)混合割合と残留強度 q_{res} の関係(ココヤシ繊維およびヒノキ)

ここまでの結果を用いて、①「いわき珪砂とスラグ 4(2018)とスラグ 15(2018)のそれぞれにココヤシ繊維を混合した材料」と②「スラグ 4(2018)とスラグ 15(2018)にヒノキを混合した材料」で母材の強度が異なる材料の全条件を比較し検討した。なお、いわき珪砂にヒノキを混合した材料ではCD試験を実施していない為、ここでは検討から除外する。

まず、①の「いわき珪砂とスラグ 4(2018)とスラグ 15(2018)のそれぞれにココヤシ繊維を混合した材料」を用いて行ったCD試験の結果を基に、母材強度がせん断特性に及ぼす影響について検討した結果を示す。

図 4.4-25 にココヤシ繊維をスラグ 4(2018)とスラグ 15(2018)のそれぞれに混合した材料の 7日養生の応力ひずみ関係を示す。つまり、4.1 の図 4.1-8 と 4.4.1 の図 4.4-18 の一部を併せた結果である。図中のプロットは最大せん断強さと残留強度を発現した点を示す。ここでの残留強度は、軸差応力減少量が軸ひずみ 1%あたり 10 kPa 以内となったときの軸差応力である。なお、ココヤシ繊維 33 vol.%混合では試験終了時までピーク強度を示さなかったため、試験終了時の軸差応力にプロットしている。図 4.4-25 より、スラグ 4(2018)-ココヤシ繊維混合材料とスラグ 15(2018)-ココヤシ繊維混合材料ともにココヤシ繊維混合割合が 10 vol.%まではピーク強度を示した後に軟化するのに対し、ココヤシ繊維混合割合が 33 vol.%では試験終了時まで軸差応力が増加し続ける挙動であり、応力ひずみ曲線が大きく異なることが分かる。この応力ひずみ曲線の傾向は、いわき珪砂混合材料の時と同様である。つまり、ココヤシ繊維を 33 vol.%混合した時に軸差応力の発現が三軸試験機でできる

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

軸ひずみレベルでは生じなくなるという応力ひずみ曲線の傾向は、母材の最大せん断強さに依存しないことが分かる。その一方で、ココヤシ繊維混合割合が低い場合には、最大せん断強さを発現した後の軸差応力の減少に仕方には違いがあり、最大せん断強さが大きくなる混合条件の方が脆性的な挙動を示すことがわかる。

図 4.4-26 にスラグ 4(2018)-ココヤシ繊維混合材料とスラグ 15(2018)-ココヤシ繊維混合材料の最大せん断強さ q_{max} をそのときの母材の最大せん断強さ q_{max_mo} で除した正規化した最大せん断強さ q_{max}/q_{max_mo} とココヤシ繊維混合割合の関係を示す。それぞれの折線は各条件の結果をつないだものである。母材の q_{max} は、いわき硅砂、スラグ 4(2018)、スラグ 15(2018)で 193kPa, 630kPa, 3715kPa である。図 4.4-26 より、いわき硅砂混合材料の正規化した最大せん断強さは、ココヤシ繊維混合割合が増加するほど大きくなる。スラグ 4 混合材料の正規化した最大せん断強さは、スラグ 4 よりも高くなったが、ココヤシ繊維混合割合による変化は僅かであった。一方、スラグ 15 混合材料の正規化した最大せん断強さは、ココヤシ繊維混合割合が増加するほど低下する。つまり、母材の最大せん断強さ q_{max_mo} が大きくなるにつれ、ココヤシ繊維混合による最大せん断強さへの補強効果から、母材よりも弱くなる負の効果となっていく。ただし、ココヤシ繊維を 33 vol.%混合した場合であっても、母材の固化による強度の増加を期待でき、ココヤシ繊維 33 vol.%混合した時のスラグ 15 のケースの最大せん断強さといわき硅砂のケースの最大せん断強さとではスラグ 15 と混合したケースの方が大きい。

図 4.4-27 にココヤシ繊維混合割合と破壊ひずみの関係を示す。なお、ココヤシ繊維混合割合が 33 vol.%の場合、母材強度によらず試験終了時までピーク強度を取らなかったため、ここでは除いている。図 4.4-27 より、ココヤシ繊維を混合しないときの最大せん断強さに関係なく、ココヤシ繊維混合割合が増加するにつれ、破壊ひずみが増加する。また、ココヤシ繊維混合割合が等しい時の破壊ひずみは、ココヤシ繊維 10 vol.%まではいわき硅砂混合材料の方がスラグ 4 混合材料やスラグ 15 混合材料よりも高い。しかし、ココヤシ繊維 33 vol.%では、いわき硅砂混合材料とスラグ 15 混合材料で同程度である。このことから、ココヤシ繊維 10 vol.%までは、いわき硅砂やスラグの特性を維持するが、33 vol.%になるとココヤシ繊維の特性が強く発揮されることが分かる。

図 4.4-28 にココヤシ繊維を混ぜた場合の変形係数 E_{50} を、そのときの母材の変形係数 E_{50_mo} で除した正規化した変形係数 E_{50} / E_{50_mo} とココヤシ繊維混合割合の関係を示す。母材の E_{50_mo} は、いわき硅砂、スラグ 4、スラグ 15 で 19MPa, 65MPa, 423MPa である。なお、図 4.4-28 より、母材の最大せん断強さに関係なく、ココヤシ繊維混合割合が増加するにつれて、正規化した変形係数は低下する傾向となり、ココヤシ繊維混合割合が等しい時の示す値に母材の違いによる差はあまりない。

図 4.4-29 にココヤシ繊維を混合した場合の残留強度 q_{res} をそのときの母材の残留強度 q_{res_mo} で除した正規化した残留強度 q_{res} / q_{res_mo} とココヤシ繊維混合割合の関係を示す。なお、ココヤシ繊維 33 vol.%混合では試験終了時までピーク強度を示さなかったため残留強度は計測できていないが、ここではせん断の最終段階の軸差応力を便宜的に残留強度であるとした。それぞれの折線は各条件をつないだものである。母材の q_{res_mo} は、いわき硅砂、

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

スラグ 4, スラグ 15 で 131kPa, 345kPa, 742kPa である. なお, ココヤシ繊維 33 vol.% はいわき硅砂混合材料とスラグ混合材料ともに, 軸ひずみが増加するのに伴い, 軸差応力も増加していく傾向であったため残留強度は計測できていないが, せん断の最終段階の軸差応力を便宜的に残留強度であるとして図示した. 図 4.4-29 より, いわき硅砂混合材料の正規化した残留強度は, ココヤシ繊維を混合することで大きくなるのが分かる. しかし, スラグ 4 混合材料とスラグ 15 混合材料のように固化する材料では, ココヤシ繊維混合割合によって正規化した残留強度が変わることが分かる. これは, ココヤシ繊維を多く含む場合には, 測定された残留強度のところの軸ひずみの大きさに大きく差があり, 残留強度に至る過程での挙動が大きく異なることも差が出た要因であると思われる.

これらの結果から, 母材の最大せん断強さの違いによって, 圧密排水三軸圧縮試験時のココヤシ繊維を混合した時の力学挙動の変化の割合が異なることが明らかとなった. 特に, 正規化した最大せん断強さと正規化した残留強度については, 母材の最大せん断強さの違いによって異なる傾向を示す. しかし, 破壊ひずみ, 正規化した変形係数は母材の最大せん断強さの影響をあまり受けないことが分かった.

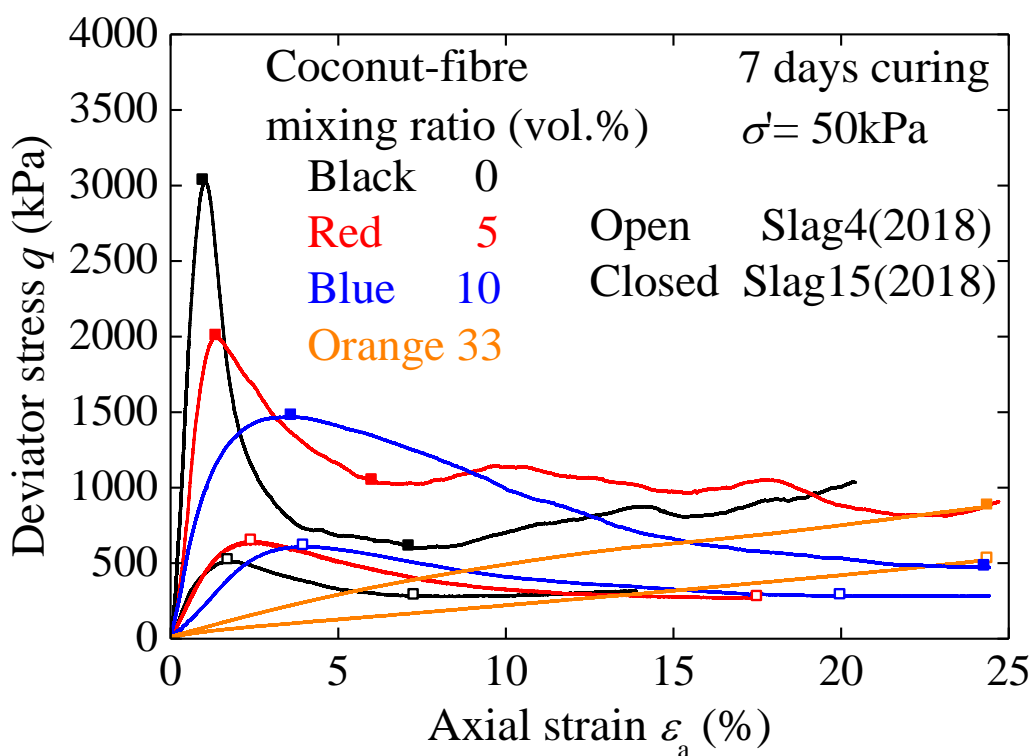


図 4.4-25 スラグ 4(2018)-ココヤシ繊維混合材料とスラグ 15(2018)-ココヤシ繊維混合材料の 7 日養生の応力ひずみ関係

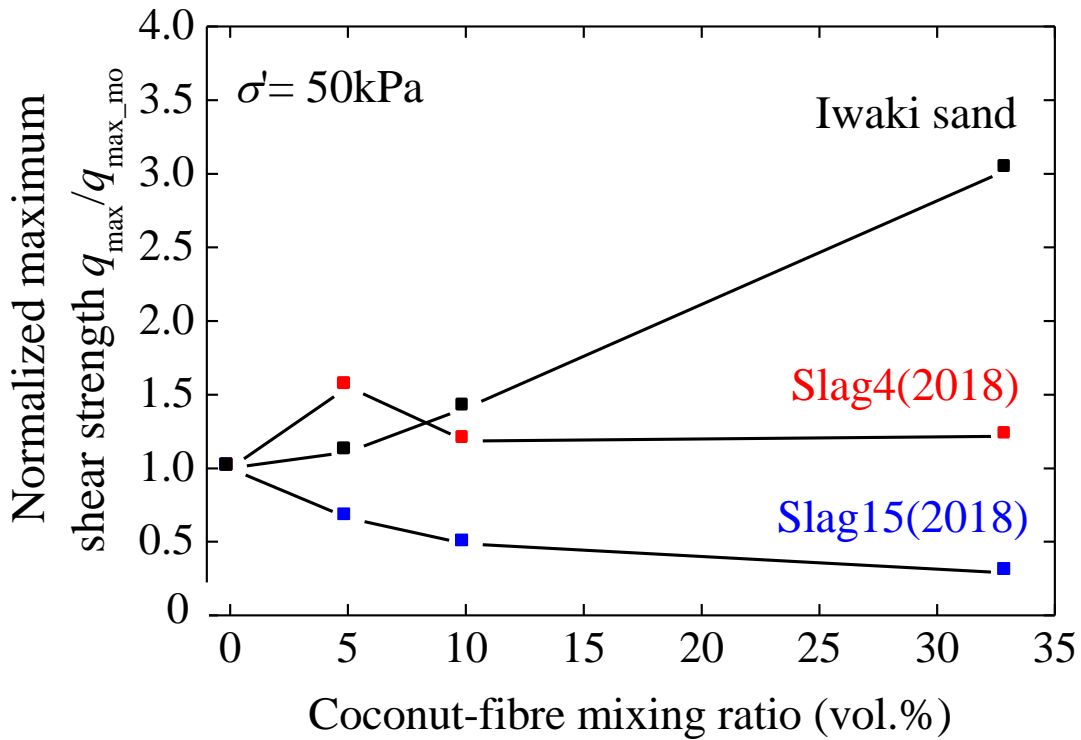


図 4.4-26 各母材におけるココヤシ繊維混合割合と正規化した最大せん断強さの関係

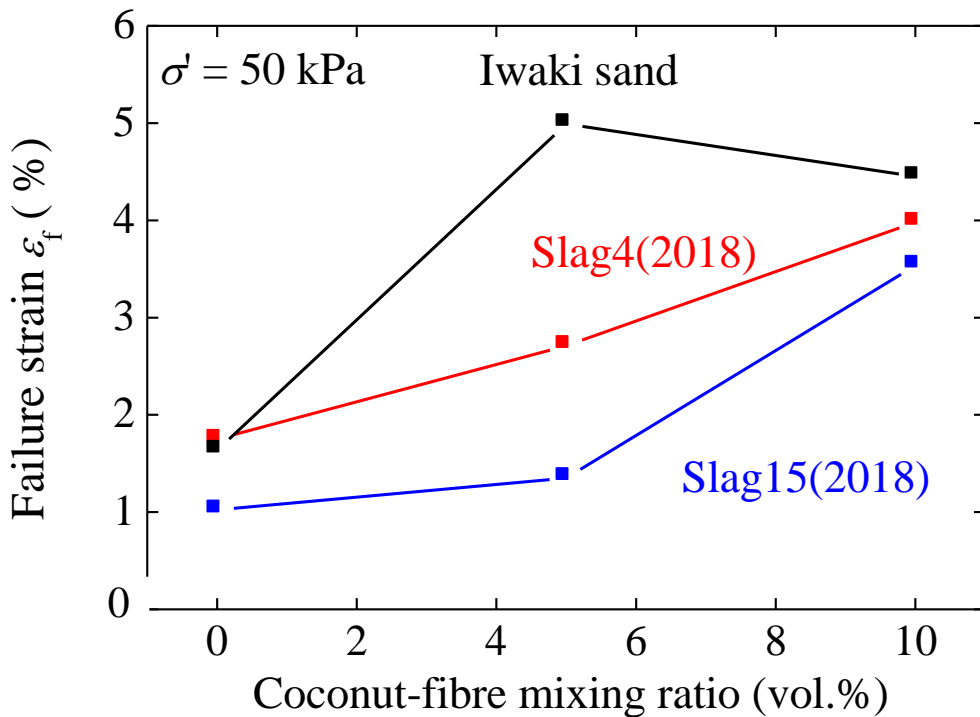


図 4.4-27 各母材におけるココヤシ繊維混合割合と正規化した破壊ひずみの関係

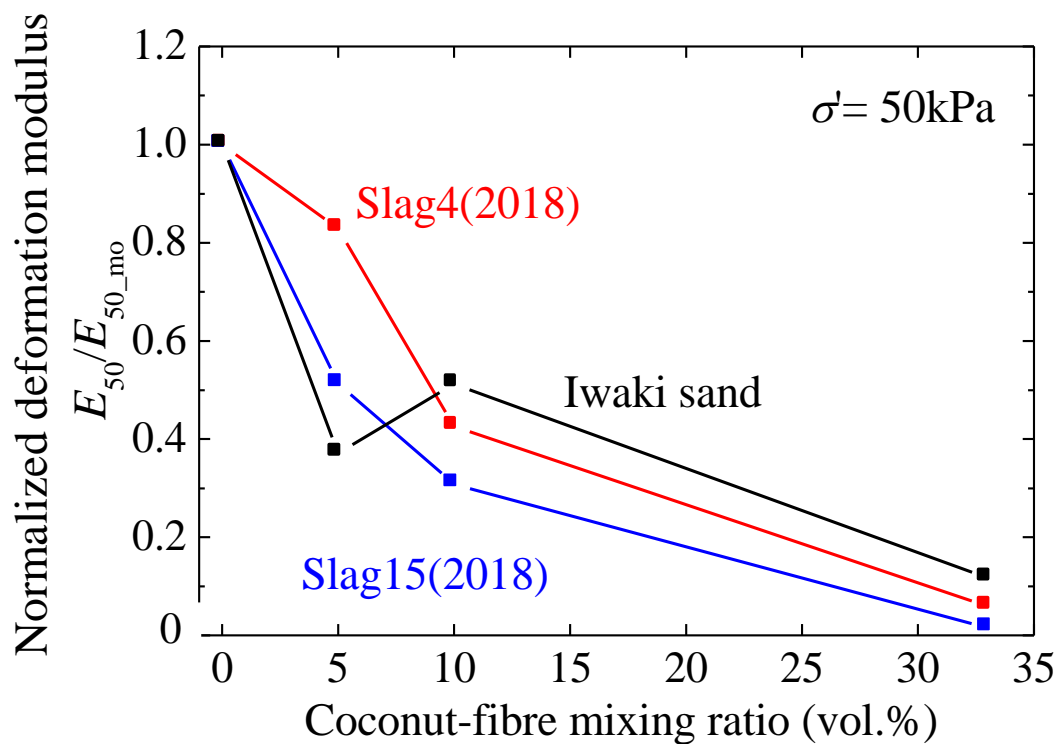


図 4.4-28 各母材におけるココヤシ繊維混合割合と正規化した変形係数の関係の関係

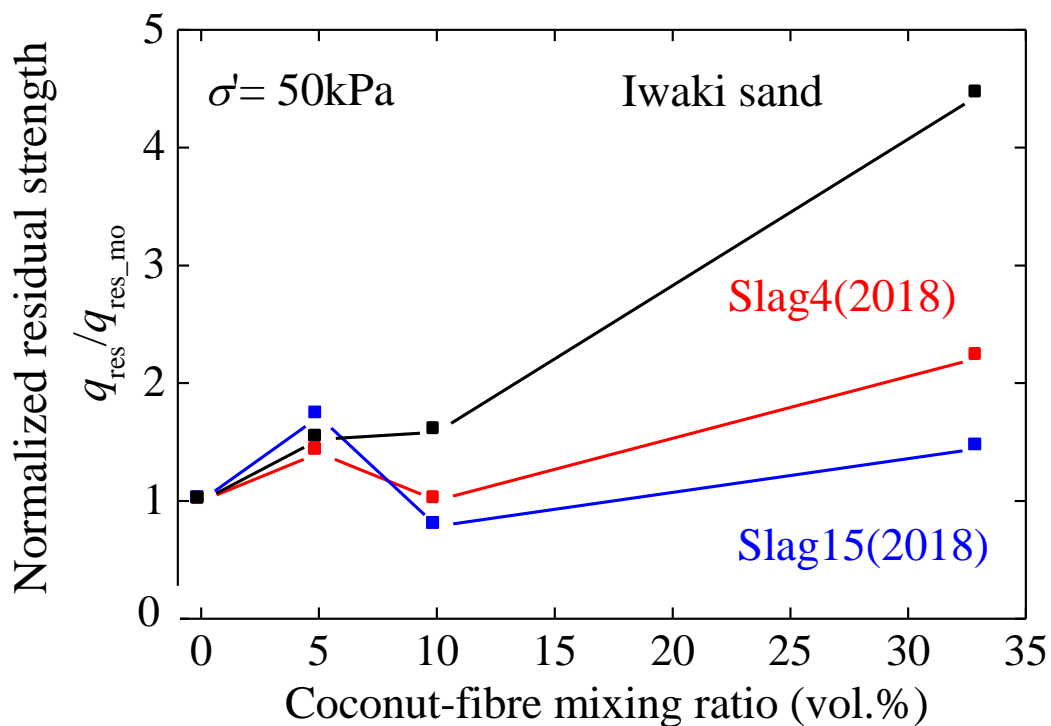


図 4.4-29 各母材におけるココヤシ繊維混合割合と正規化した変形係数の関係の関係

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

次に、②の「スラグ 4(2018)とスラグ 15(2018)のそれぞれにヒノキを混合した材料」を用いて行ったCD試験の結果を基に、母材強度がせん断特性に及ぼす影響について検討した結果を示す。

図 4.4-30 にスラグ 4(2018)-ヒノキ混合材料とスラグ 15(2018)-ヒノキ混合材料の養生 7 日の応力ひずみ関係を示す。つまり、4.1 の図 4.1-9 と 4.4.1 の図 4.4-19 の一部を併せた結果である。図中のプロットは最大せん断強さを発現した点を示す。図 4.4-30 より、同じ混合割合ではスラグ 15(2018)の方がスラグ 4(2018)よりも破壊ひずみが小さいことが分かる。また、ヒノキ混合割合が 10 vol.%以下ではスラグ 4(2018)とスラグ 15(2018)の応力ひずみ曲線は大きく変化しているが、ヒノキ混合割合が 33 vol.%ではあまり変化せず似たような形状となった。この結果から、母材の強度によらず、ヒノキ混合割合が 33 vol.%では木屑の影響が大きくなっていると考えられる。

図 4.4-31 にスラグ 4(2018)-ヒノキ混合材料とスラグ 15(2018)-ヒノキ混合材料の 28 日養生の応力ひずみ関係を示す。図 4.4-31 より、図 4.4-30 の 7 日養生と同様に、同じ混合割合ではスラグ 15(2018)の方がスラグ 4(2018)よりも破壊ひずみが小さいことが分かる。また、ヒノキ混合割合が 10 vol.%以下ではスラグ 4(2018)とスラグ 15(2018)の応力ひずみ曲線は大きく変化しているが、ヒノキ混合割合が 33 vol.%ではあまり変化せず似たような形状であった。この結果から、ヒノキ混合材料においてはヒノキ混合割合が 33 vol.%では木屑の影響が大きくなっていると考えられる。

図 4.4-32 にヒノキを混合した場合の最大せん断強さ q_{\max} をそのときの母材の最大せん断強さ q_{\max_mo} で除した正規化した最大せん断強さ q_{\max}/q_{\max_mo} とヒノキ混合割合の関係を示す。母材の q_{\max} は、スラグ 4(2018)_7日養生, スラグ 4(2018)_28日養生, スラグ 15(2018)_7日養生, スラグ 15(2018)_28日養生のそれぞれで、513 kPa, 751 kPa, 3024 kPa, 3380 kPa である。図 4.4-32 より、スラグ 4(2018)では 7 日養生, 28 日養生のいずれにおいてもヒノキを 10 vol.%混合すると q_{\max}/q_{\max_mo} は増加し、33 vol.%混合すると母材のみよりも強度が低下する。一方でスラグ 15(2018)では養生期間によらずヒノキの混合割合が増加するほど q_{\max}/q_{\max_mo} は低下する。つまり、母材の最大せん断強さ q_{\max_mo} が大きくなるにつれ、粒状のヒノキによる最大せん断強さへの補強効果から、母材よりも弱くなる負の効果となっていく。ただし、ヒノキを 33 vol.%混合した場合であっても、母材の固化による強度の増加を期待でき、ヒノキを 33 vol.%混合した時のスラグ 15(2018)のケースの最大せん断強さとスラグ 4(2018)のケースの最大せん断強さとではスラグ 15(2018)と混合したケースの方が大きくなった。この傾向は、ココヤシ繊維においても確認できたため、木屑の形状に依存しないと考えられる。

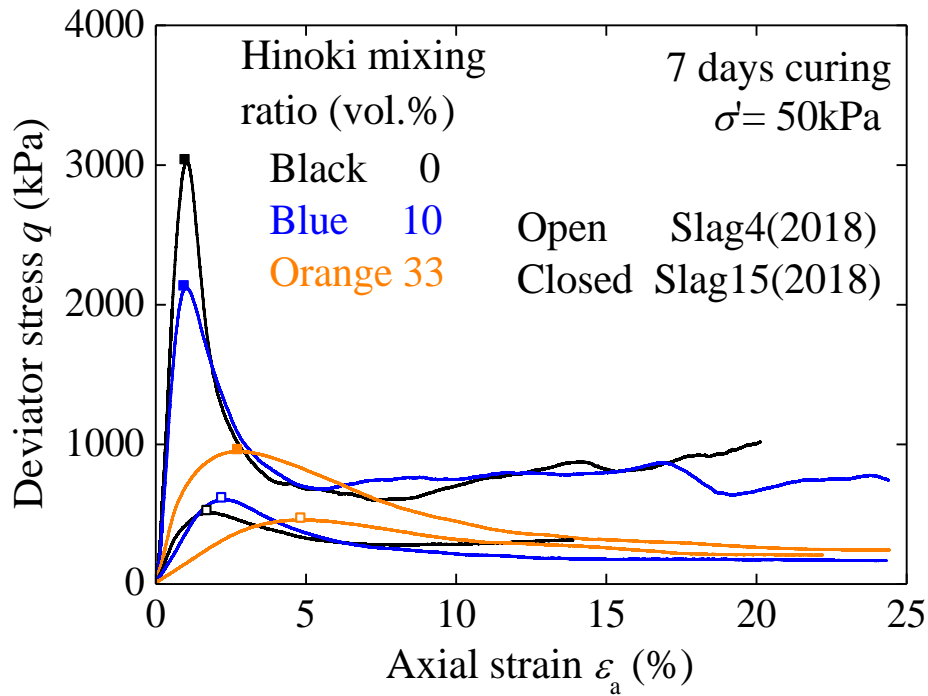


図 4.4-30 ヒノキ混合スラグ 4(2018)とココヤシ繊維混合スラグ 15(2018)の養生 7 日の応力ひずみ関係

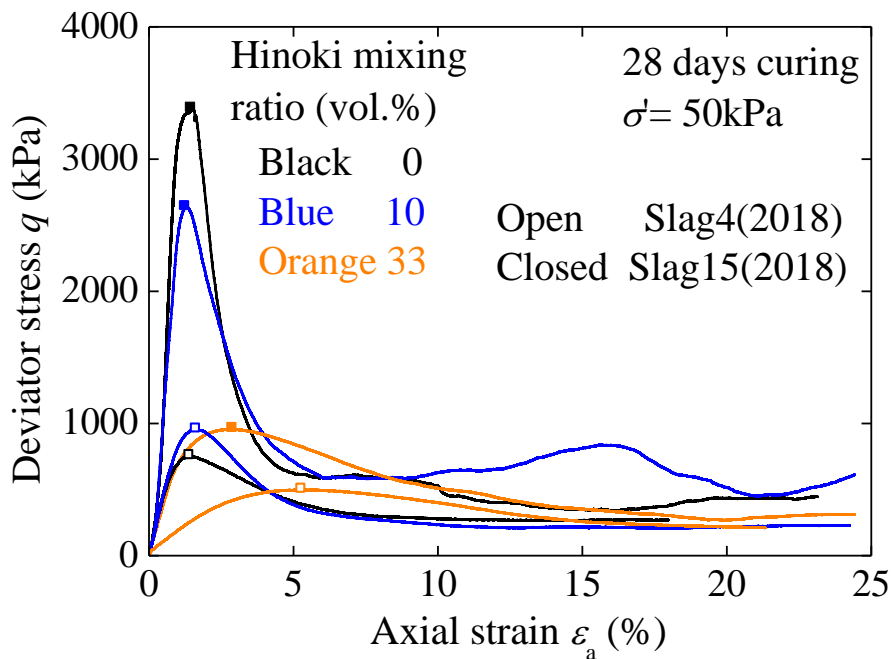


図 4.4-31 ヒノキ混合スラグ 4(2018)とヒノキ混合スラグ 15(2018)の養生 28 日の応力ひずみ関係

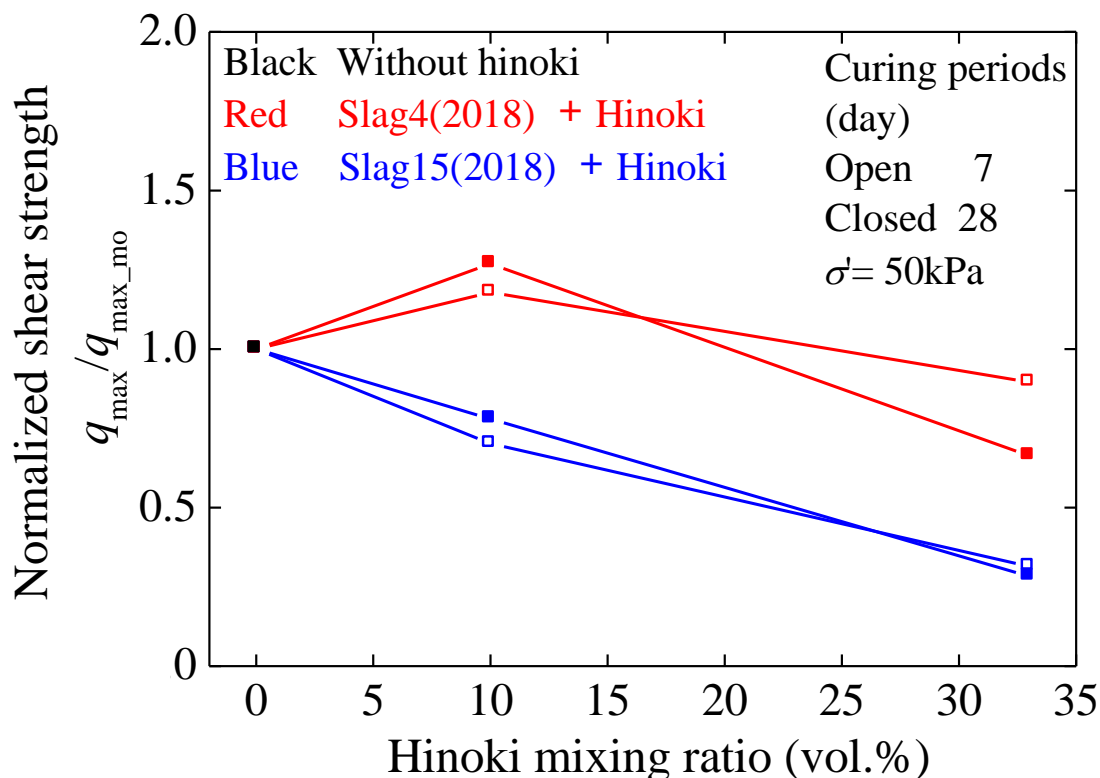


図 4.4-32 ヒノキ混合スラグ 4(2018)とヒノキ混合スラグ 15(2018)の養生 28 日の応力ひずみ関係

以下に本項で得られた知見を示す。

- ココヤシ繊維をスラグ 4(2018)やスラグ 15(2018)のような固化する材料に混合すると、固化する母材の最大せん断強さの違いによって、ココヤシ繊維を混合した場合の正規化した最大せん断強さが変化する。そして、母材の最大せん断強さが小さい場合には、ココヤシ繊維混合による強度増加がみられることもあるが、母材の最大せん断強さが大きいとココヤシ繊維混合によって強度低下する。ただし、その場合でも、母材の最大せん断強さの大きな材料と混合したほうが最大せん断強さは大きくなる。また、固化する材料と固化しない材料とで木屑混合割合の増加に伴う正規化した残留強度の変化傾向は異なるが、母材の最大せん断強さの影響はあまり明確ではない。
- ココヤシ繊維混合割合が増加すると破壊ひずみは増加し、剛性は低下するが、この変化傾向には母材の最大せん断強さの影響はない。

4.5 飽和圧密排水せん断特性の拘束圧依存性

本研究材料の固化材であるスラグは、製鋼スラグに少量の高炉スラグ微粉末(本研究では基本的に内割質量比で 4%)を混合した材料であり、スラグの主体は粒状の製鋼スラグであり、木屑を混合した木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料においても基本的には粒状材料の性質(拘束圧依存性)を持ち合わせていると考えられる。そこで本項では木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断特性に及ぼす拘束圧の影響を評価・検討するために、7日養生した供試体を用いて、拘束圧を 50, 100, 300 kPa の条件下で飽和圧密排水三軸圧縮試験を行った。表 4.5-1 に供試体作製条件を示す。表 4.5-1 から分かるように本検討では木屑に繊維状のココヤシ繊維を用いている。4.4.1 では7日養生・拘束圧 50kPa のCD試験は粒状の木屑であるヒノキも用いたが、本検討では用いていない。これは、試験機の数の都合上、条件を限定する必要があったためであり、粒状の木屑よりも繊維状の木屑を用いた場合のほうが同一混合割合での破壊ひずみも大きく、ピーク強度後の応力低下が緩やかであり、木屑の特徴が応力ひずみによく現れていたためである。また、4.1 に示した拘束圧 50 kPa のCD試験の結果を比較のために本項でも用いている。

表 4.5-1 供試体作製条件とCD試験時の拘束圧

木屑の種類 (形状)	木屑の内割 混合体積 (vol.%)	目標乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	目標含水比 w (%)	拘束圧 σ' (kPa)
- (スラグ4(2018)のみ)	0	1.92	12.0	50 100 150
ココヤシ繊維 (繊維状)	5	1.82	13.0	
	10	1.69	14.7	
	33	1.07	25.0	

図 4.5-1 に配合条件別で応力ひずみ関係を示す。また、図 4.5-2 に図 4.5-1 を基にして、ココヤシ繊維混合材料の最大せん断強さ q_{max} をスラグ 4(2018)のみの最大せん断強さ $q_{max_slag4(1018)only}$ で除した正規化した最大せん断強さ $q_{max}/q_{max_slag4(1018)only}$ とココヤシ繊維混合割合で整理した結果を示す。それぞれの折線は各条件の結果をつないだものである。図中の黒のプロットは 4.1 の図 4.1-8 の拘束圧 50kPa の結果を、またオレンジのプロットは 4.1 の図 4.1-1 の一軸圧縮強さをそれぞれ正規化した($q_{max}/q_{max_slag4(1018)only}$, $q_u/q_{u_slag4(1018)only}$)もので、試験時の供試体飽和度が異なる点で厳密には拘束圧だけに着目して検討は出来ないが、比較のために有効拘束圧 0 kPa の結果として示した。図 4.5-1 より、ココヤシ繊維をスラグ 4(2018)に混合した材料において、ココヤシ繊維を混合することによる力学特性の変化には拘束圧依存性があり、低拘束下では木屑を 5 ~ 10 vol.%混合するとスラグ 4(2018)よりも大きな最大せん断強さを示すが、拘束圧が高くなるとココヤシ繊維を 5 vol.%混合しただけでせん断強度が低下することが分かる。また、ココヤシ繊維を 33 vol.%混合した場合、

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

CD試験の有効拘束圧 50, 100, 300 kPa では試験終了時までピーク強度に達していないにも関わらず、スラグ 4(2018)の q_{max} の 8 割程度の q_{max} を発揮しているのに対し、オレンジの一軸圧縮試験の結果を見るとココヤシ繊維 33 vol.%混合した材料の q_u はスラグ 4(2018)のみの q_u の 3 割程度である。つまり、本材料は拘束圧の大小で木屑を混合することによる最大せん断強さの変化傾向が異なるということである。そして、繊維状の木屑を多量に含む場合、一軸圧縮試験では圧縮強さを正確に把握できない可能性がある。

次に排水の三軸圧縮強度定数である内部摩擦角 ϕ_{d0} と粘着力 c_d について検討する。ここで、残留時は粘着力 c_d が働かず、 ϕ 材として内部摩擦角 ϕ_{d0res} のみが働くと考える。また、最大せん断強さ発揮時には残留時の内部摩擦角 ϕ_{d0res} を発揮し、それを上回る強度については粘着力 c_d が働くものとする。図 4.5-2 に上述の考え方を Mohr の応力円を使って示す。表 4.5-2 に CD 試験より得られた最大せん断強さ q_{max} 、残留強度 q_{res} 、残留内部摩擦角 ϕ_{d0res} 、粘着力 c_d を示す。なお、 ϕ_{d0res} および c_d はそれぞれ式 5-1 と式 5-2 で算出した。

$$\phi_{d0res} = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma_{1res} - \sigma_3}{\sigma_{1res} + \sigma_3} \right) \quad \dots (5-1)$$

$$c_d = \left(\frac{q_{max} - q_{res}}{2} \right) \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_{d0res}}{2} \right) \quad \dots (5-2)$$

図 4.5-3 に残留内部摩擦角 ϕ_{d0res} とココヤシ繊維混合割合の関係を示す。なお、ココヤシ繊維混合割合 33 vol.%では試験終了時まで明確なピーク強度および残留強度を示さなかったため、ここでは除外している。図 4.5-3 より、有効拘束圧 $\sigma' = 50$ kPa ではココヤシ繊維の混合割合の増加に伴って ϕ_{d0res} はやや減少するものの、 $\sigma' = 100$ または 300 kPa では混合割合の増加に伴って ϕ_{d0res} も増加する。また、スラグ 4(2018)のみの $\sigma' = 300$ kPa は $\sigma' = 50$ kPa より ϕ_{d0res} が 9° 近く減少するが、ココヤシ繊維を混合することで 3° 程度の低下に抑えられる。この要因については粒子破碎が容易に考えられる。しかし、図 4.5-4 に示す圧密前後の供試体高さの変化率 H_{after} / H_{before} をみると、後述のように粒子破碎だけでは説明できないことが分かる。なお、 H_{before} が圧密前の供試体高さ、 H_{after} が圧密後の供試体高さである。また、ここでは圧密前後の体積変化率で検討することが望ましいが、試験の一部で体積計測できていない条件があるために、供試体の高さ変化率で簡易的な検討を行った。図 4.5-4 より、スラグ 4(2018)のみでは有効拘束圧の増加に伴い H_{after} / H_{before} が減少しているものの、その減少率はココヤシ繊維の混合割合が増加するほど大きい。つまり、拘束圧の増加による供試体の骨格構造への影響はココヤシ繊維混合割合が高いほど大きいと考えられる。しかし、有効拘束圧の増加に伴う残留内部摩擦角の減少はココヤシ繊維を混合した場合のほうがスラグ 4(2018)のみよりも小さいことから、スラグの粒子破碎だけでは説明がつかない。つまり、ココヤシ繊維を混合することで供試体のせん断特性が変化することが大きな要因と考えられる。また、図 4.5-6 に示すココヤシ繊維混合割合と最大内部摩擦角 ϕ_{d0max} は図 4.5-5 とは異なる挙動を示したため、ここで触れておく。なお、 ϕ_{d0max} は式 5-2 の σ_{1res} を σ_{1max} に置き変えて算出したものである。図 4.5-6 より、ばらつきはあるものの

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

有効拘束圧の増加に伴って φ_{d0max} は大きく低下することが分かる。そして、 φ_{d0res} と異なりココヤシ繊維を混合することによる内部摩擦角の低減効果がほとんど見られない。つまり、 φ_{d0res} はココヤシ繊維の混合によって拘束圧依存性が小さくなるものの、 φ_{d0max} はココヤシ繊維を混合しても拘束圧依存性はほとんど変化しないことが明らかになった。

図 4.5-7 にココヤシ繊維混合割合と式 5-3 を用いて算出した粘着力 c_d の関係を示す。図 4.5-7 より、最大せん断強さ発揮時の内部摩擦角を φ_{d0res} と仮定して求めた粘着力 c_d は有効拘束圧 $\sigma = 50$ kPa ではスラグ 4(2018)のみが最も低く $c_d = 36.8$ kPa 程度であった。そして、このようにして求めた粘着力 c_d は $\sigma = 50$ kPa の時、ココヤシ繊維の混合割合の増加に伴い増加する傾向が見られる。これはココヤシ繊維がスラグ粒子を拘束する効果が c_d に現れるためであると思われる。一方で、 $\sigma = 100$ kPa 以上ではココヤシ繊維の混合割合の増加とともに c_d は減少する。つまり、ココヤシ繊維を混合した場合には c_d の拘束圧依存性が小さくなる。

また、4.1 の図 4.1-1 より、スラグ 4(2018)のみの q_u は 539 kPa であることから、粘着力 c ($= q_u/2$) は 269.5 程度となり、本結果($c_d = 36.8$ kPa)とは大きく異なる。一軸圧縮試験(4.1)は不飽和条件であるため、本結果との厳密な比較は難しく、この差が生じた要因については不明であるが、不飽和三軸圧縮試験をすることで c_d と c ($= q_u/2$) の関係について検討できると考えている。

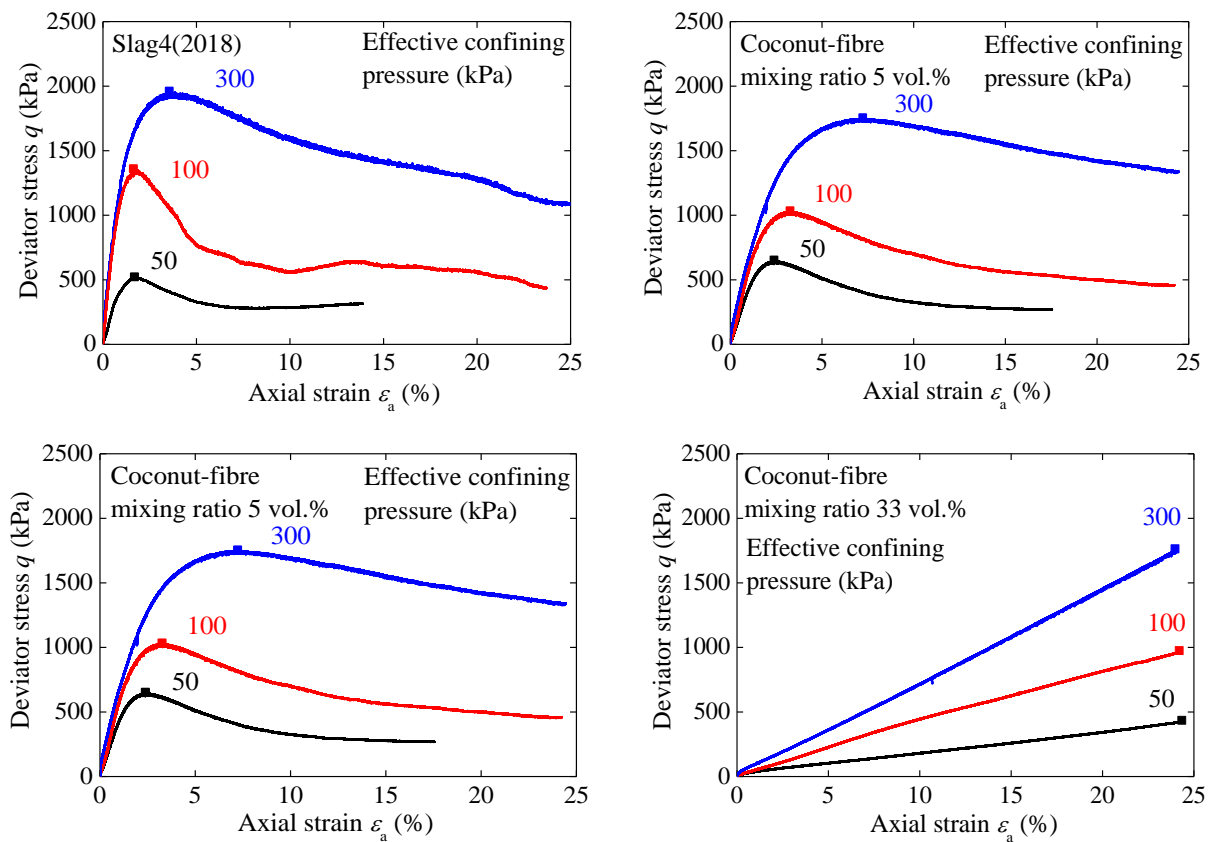


図 4.5-1 各配合条件別の応力ひずみ関係(7日養生)

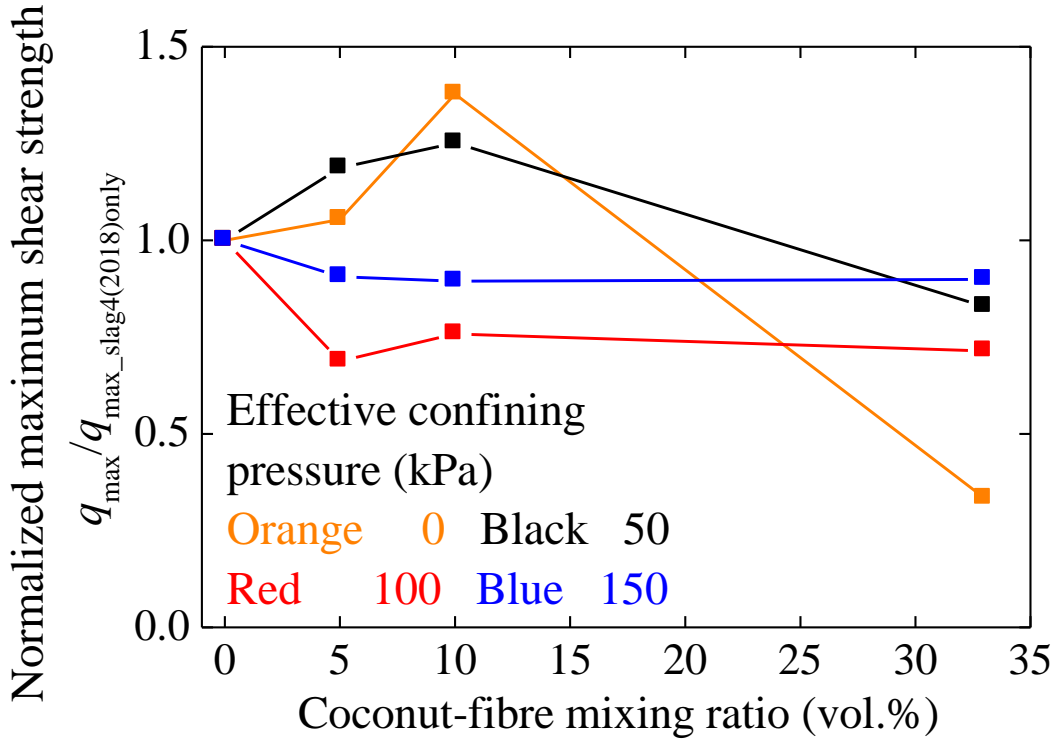


図 4.5-2 正規化最大せん断強さ $q_{\max} / q_{\max_slag4(2018)only}$ とココヤシ繊維混合割合の関係

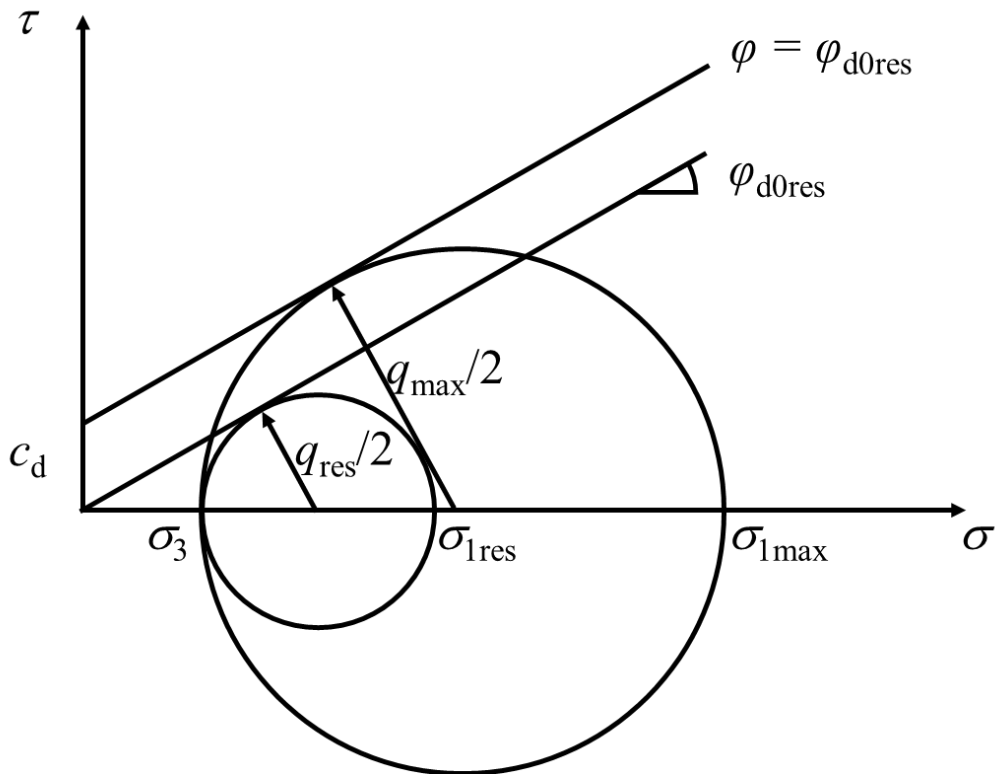


図 4.5-3 強度定数の設定イメージ(文献 7)の図-51 に加筆修正)

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

表 4.5-2 CD 試験より得られた q_{max} , q_{res} , ϕ_{d0res} , c_d

	σ' (kPa)	50	100	300
スラグ4(2018)	q_{max} (kPa)	513.1	1350.5	1950.6
	q_{res} (kPa)	314.5	440.0	1091.1
	ϕ_{d0res}	49.4	43.4	40.2
	c_d (kPa)	36.8	195.9	199.6
ココヤシ繊維 5 vol.%	q_{max} (kPa)	608.9	928.7	1766.7
	q_{res} (kPa)	269.4	457.8	1339.4
	ϕ_{d0res}	46.8	44.1	43.7
	c_d (kPa)	67.2	99.7	91.4
ココヤシ繊維 10 vol.%	q_{max} (kPa)	642.2	1023.6	1745.0
	q_{res} (kPa)	284.0	641.0	1431.2
	ϕ_{d0res}	47.7	49.7	44.8
	c_d (kPa)	69.3	70.3	65.3

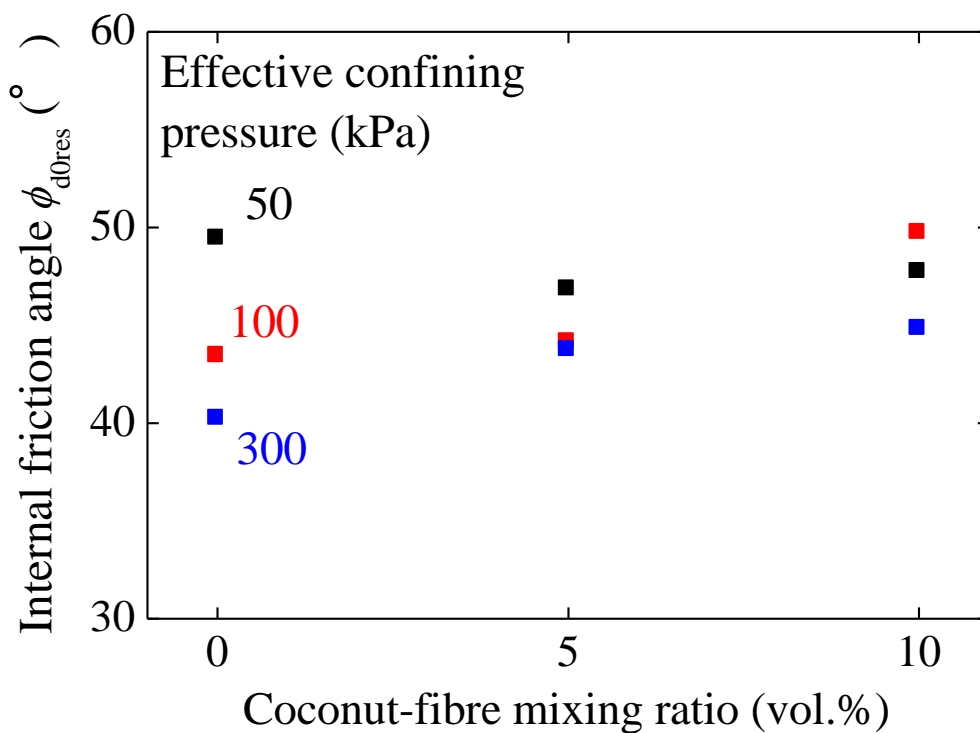


図 4.5-4 ココヤシ繊維混合割合と残留時の内部摩擦角の関係

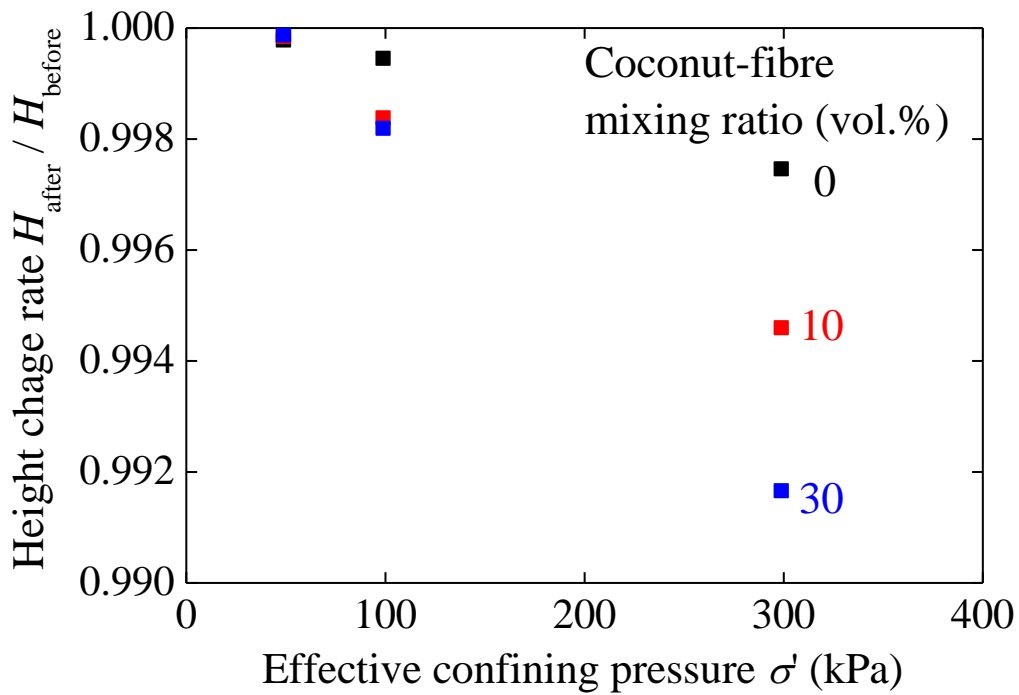


図 4.5-5 有効拘束圧と圧密前後の供試体高さの変化率の関係

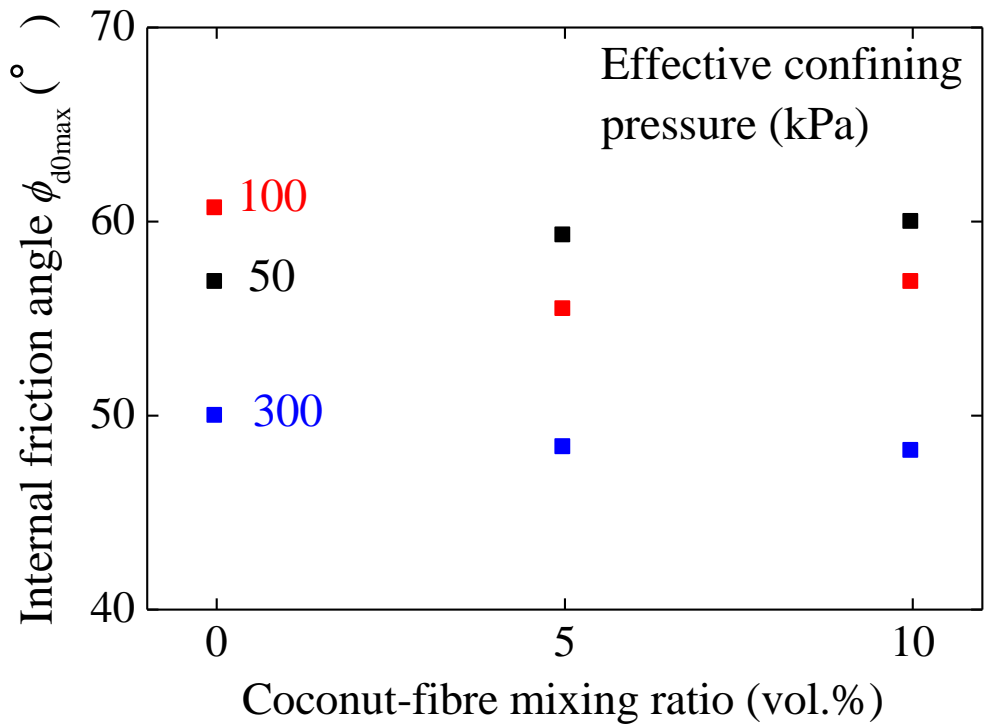


図 4.5-6 ココヤシ繊維混合割合と最大内部摩擦角の関係

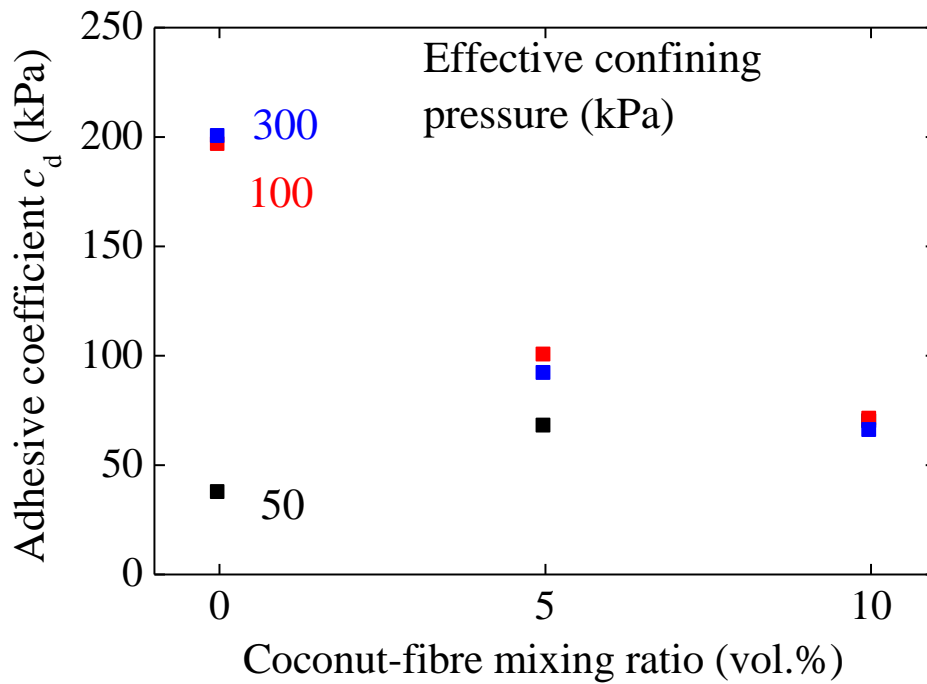


図 4.5-7 ココヤシ繊維混合割合と推定粘着力の関係

以下に、本節で得られた知見を示す。

- ココヤシ繊維の混合割合によらず、 φ_{d0max} には拘束圧依存性があることを確認した。
- ココヤシ繊維の混合によって φ_{d0res} の拘束圧依存性が小さくなるものの、 φ_{d0max} はココヤシ繊維を混合しても拘束圧依存性はほとんど変化しないことが明らかになった。
- ココヤシ繊維を混合した場合には c_d の拘束圧依存性が小さくなることが明らかになった。

4.6 排水条件依存性

4.1 において繊維状の木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料を用いて飽和排水三軸圧縮試験を行ったところ、木屑混合割合が 10 vol.%以下では、せん断初期に体積収縮し、その後の軸ひずみの増加に伴い体積膨張するといった密詰めの粒状材料のようなダイレイタンシー特性を示した。また、木屑混合割合が 33 vol.%では試験終了時まで収縮し続ける緩詰め砂のようなダイレイタンシー特性を確認した。これらの結果から木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料は粒状材料としてのダイレイタンシー特性を示すことが明らかとなった。つまり排水・非排水条件によってせん断強さが大きく変化するものと想定される。そこで本節では木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の非排水せん断特性を把握することを目的に \overline{CU} 試験を行った。また、 \overline{CU} 試験より得られた有効応力経路から木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の粘着成分について検討した。さらに、粘着成分についてより詳細な検討を行うために UU 試験と UC 試験を行った。

表 4.6-1 に供試体作製条件を示す。ここで、本節で使用した製鋼スラグは 2019 年度に入手したもので、4.1~4.5 で用いた 2018 年度に入手した製鋼スラグと発生場所および発生年度が異なり、粒度分布や物性等がやや異なる。その為、4.1~4.5 と同一のココヤシ繊維混合割合であっても、目標乾燥密度や目標含水比がやや異なる。粒度分布や物性等については 3.1 と 3.2 を参照されたい。そして、本検討では製鋼スラグ(2019)と高炉スラグ微粉末を質量比 96 対 4 で混合したスラグ 4(2019)を用いて実施しているが、これは製鋼スラグ(2018)の量が限られていたためであり他意はない。また、表 4.6-1 に示すように、本検討では混合する木屑に繊維状のココヤシ繊維のみを用いているが、これについては 4.5 と同様、試験機の数の都合上、条件を限定する必要があったためである。

表 4.6-1 CD 試験と \overline{CU} 試験の供試体作製条件

木屑の種類 (形状)	木屑の内割 混合体積 (vol.%)	目標乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	目標含水比 w (%)	有効拘束圧 σ' (kPa)
- (スラグ4(2019)のみ)	0	1.98	13.3	50 100 150
ココヤシ繊維 (繊維状)	5	1.83	14.6	
	10	1.68	17.0	
	33	1.07	40.9	

4.6.1 木屑混合割合の違いによる圧密排水・非排水せん断特性

前述の通り、本節で用いた製鋼スラグは 4.1~4.5 で用いた製鋼スラグとは異なることから、本節では表 4.6-1 の条件で作製した 7 日養生の供試体を用いて、改めて CD 試験(拘束圧 50 kPa)を行った。

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

図 4.6-1 に 7 日養生・拘束圧 50 kPa の CD 試験の応力ひずみ関係を示す。図中のプロットは最大せん断強さ q_{max} を示している。図 4.6-1 より、木屑混合割合の増加とともに破壊ひずみは大きくなるものの、 q_{max} と変形係数は低下することが分かる。また、繊維状木屑混合割合が 10 vol.%以下ではせん断に伴い体積収縮後に体積膨張し、33 vol.%では試験終了時まで収縮し続けた。本結果と 4.1 のスラグ 4(2018)を用いた場合を比較すると、木屑を混合することによる q_{max} への影響が異なる。つまり、スラグ 4(2018)を用いた場合には、ココヤシ繊維混合割合が 10 vol.%以下の q_{max} (7 日養生・拘束圧 50 kPa)は、スラグ 4(2018)のみの q_{max} よりも大きな値を示したが、スラグ 4(2019)では 5vol.%程度混合しただけで q_{max} が低下する結果となった。これは、4.2 の長期養生の結果や 4.4 の固化強度の影響を検討した結果と一致する。つまり、本検討で用いたスラグ 4(2019)は q_{max} (7 日養生・拘束圧 50 kPa) が 1250 kPa と母材強度が高く、木屑を混合することによる補強効果が発揮されなかったものと考えられる。いずれにしても、スラグ 4(2019)のみの q_{max} (7 日養生・拘束圧 50 kPa)は 1250 kPa、スラグ 4(2019)にココヤシ繊維を 5 または 10 vol.%混合した場合の q_{max} (7 日養生・拘束圧 50 kPa)は 700 ~ 750 kPa 程度であることを確認した。このような排水せん断特性を持つ材料であることを前提に、以降に非排水せん断特性の検討結果を示す。

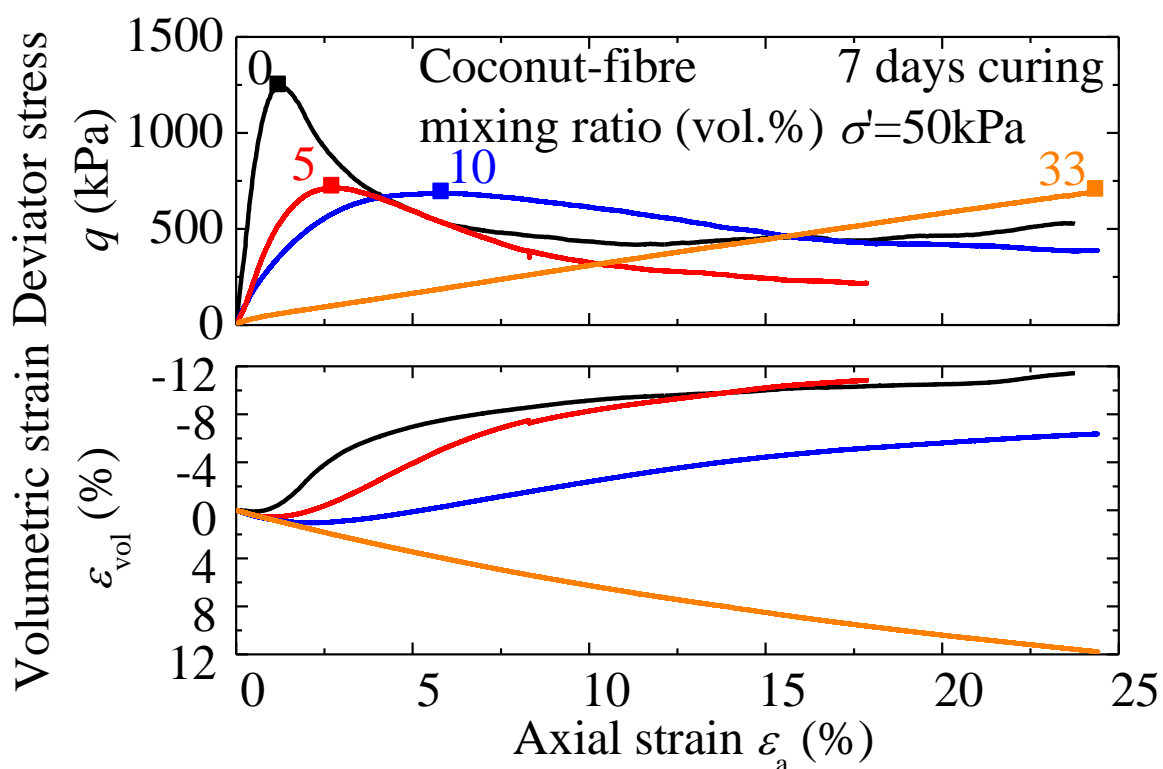


図 4.6-1 CD 試験より得られた応力-軸ひずみ関係と体積ひずみ-軸ひずみ関係(拘束圧 50 kPa)

次に \overline{CU} 試験の結果を示す。なお、 \overline{CU} 試験は背圧 200~500 kPa、圧密圧力(50, 100, 150 kPa)の非排水条件下で単調載荷(載荷速度 0.01 %/min)した。背圧に幅があるのは実験初期

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討と せん断強度・せん断剛性推定手法の提案

にはCD試験と同じ背圧 200 kPa(または 300 kPa)で試験をしていたためであり、Cavitationの影響を考慮していなかったためである。そして、実験後期では Cavitation の影響を考慮して、試験機の限界である背圧 500 kPa で試験を実施したためである。また、本試験では圧密圧力と載荷開始時の有効拘束圧は等しい。なお、 \overline{CU} 試験もCD試験と同様に軸ひずみ $\varepsilon_a = 25\%$ に達したところで終了とした。

図 4.6-2 に背圧 200 kPa・圧密圧力 50 kPa で実施した応力-軸ひずみ関係および過剰間隙水圧-ひずみ関係を示す。図 4.6-2 より、ココヤシ繊維混合割合の増加に伴い、ピーク強度が低下すること、さらに破壊ひずみが増加することが確認できる。また、ココヤシ繊維混合割合 33 vol.%では試験終了まで軸差応力 q が増加し続けた。また、過剰間隙水圧の発生の仕方に着目すると、ココヤシ繊維混合割合 10 vol.%以下では負のダイレイタンシーを示した後に正のダイレイタンシーを示すのに対し、ココヤシ繊維混合割合 33 vol.%では試験終了まで負のダイレイタンシーを示す。

図 4.6-3 に図 4.6-2 の結果を基に有効応力経路で整理した結果を示す。図 4.6-3(b)は図 4.6-3(a)の一部を拡大した有効応力経路で、それぞれの図中のプロットは、応力比 $R(= \sigma'_1 / \sigma'_3)$ が最大($= R_{max}$)を示した時の q および p' である。以降では R_{max} 時の q を q_{Rmax} と称す。なお、Coco33 では R が明確な最大値を示さなかったため、図中にはプロットしていない。また、図中の破線は $q = 3p'$ の直線で、いわゆる tention cut-off の境界線である。これは有効最小主応力 σ'_3 が 0 kPa となる直線である。図 4.6-3 (b)より、ココヤシ繊維混合割合 10 vol.%以下ではせん断に伴い p' はほとんど変化せずに $q = 3p'$ の直線に近づき、 q_{Rmax} に達するまでは直線 $q = 3p'$ に沿って q および p' が増加する。その後、 q_{Rmax} に達すると、直線 $q = 3p'$ から離れる。なお、直線 $q = 3p'$ に沿って q および p' が増加している傾向を有効応力経路で確認することができるが、これを図 4.6-2 と対応させて考えると、スラグ 4(2019)のみでは軸ひずみ $\varepsilon_a = 0.34\% \sim 0.43\%$ 、Coco5 では $\varepsilon_a = 0.43\% \sim 0.79\%$ 、Coco10 では $\varepsilon_a = 0.57\% \sim 0.77\%$ の範囲で起こっている現象であり、非常に小さなひずみレベルを捉えているということが分かる。ここで tention cut-off の境界線に沿って q が増加する、すなわち有効側方応力 $\sigma'_3 = 0$ kPa を保ちながら q が増加することから、本材料は粘着成分が備わっていると考えられる。ココヤシ繊維混合割合 10 vol.%以下では厳密には直線 $q = 3p'$ 上ではなく、 $\sigma'_3 \cong 5$ kPa を保ちながら直線 $q = 3p'$ に沿って q および p' が増加している。しかし、直線 $q = 3p'$ に沿って q および p' が増加している間、上記に示したそれぞれのひずみ領域において図 4.6-2 の過剰間隙水圧 Δu が変化していないことから、ココヤシ繊維混合割合 10 vol.%以下ではダイレイタンシーの変化は起こっていない。つまり、スラグの固結やココヤシ繊維が供試体を拘束によって粘着力 c が発現していると考えられる。さらに、 q_{Rmax} に達したところでダイレイタンシー特性が変化し始めていることから、スラグの固結による粘着力が低下し始めたと考えられる。また、 q_{Rmax} に達しても q は増加し続けているが、これはスラグ粒子およびココヤシ繊維が ϕ 材として機能するためであると考えられる。すなわち、 q_{Rmax} を境界に c の効果が低下し、 ϕ の効果が強く現れ始めたものと考えられる。さらに、図 4.6-3(b)のココヤシ繊維混合割合 33 vol.%に着目すると、せん断初期では q の増加に伴い p' が減少し、その後は試験終了まで直線 $q = 3p'$ に沿って q および p' が増加する。ココヤシ繊維混合割合

33 vol.%は他の条件と比べるとスラグの固化は期待出来ないことからココヤシ繊維の影響が大きいと考えられる。

図 4.6-4 にスラグ 4(2019)のみの養生なし(未固化)の有効応力経路を示す。なお、スラグ 4(2019)のみの養生なし(未固化)は背圧 300 kPa で試験を行った結果である。また、図中には比較のためにスラグ 4(2019)のみの 7日養生の試験結果も示すが、これも背圧 300 kPa で試験した結果であり、図 4.6-2 および図 4.6-3 に示した結果とは異なる。図 4.6-4(b)は図 4.6-4(a)の一部を拡大した有効応力経路である。また、図中のプロットは q_{Rmax} である。図 4.6-4(b)より、スラグ 4(2019)のみの養生なし(未固化)では $q = 3p'$ に達しないことが分かる。また、図 4.6-5 に示す過剰間隙水圧と軸ひずみの関係からも分かるように、7日養生の固化した場合には $u_e = 47$ kPa 程度まで発達するのに対し、養生なしの未固化の場合には、 $u_e = 30$ kPa までしか発達しない。つまり、これらの結果からもスラグが固結したことで粘着力が働き、 q および p' は直線 $q = 3p'$ に沿って増加することが分かる。

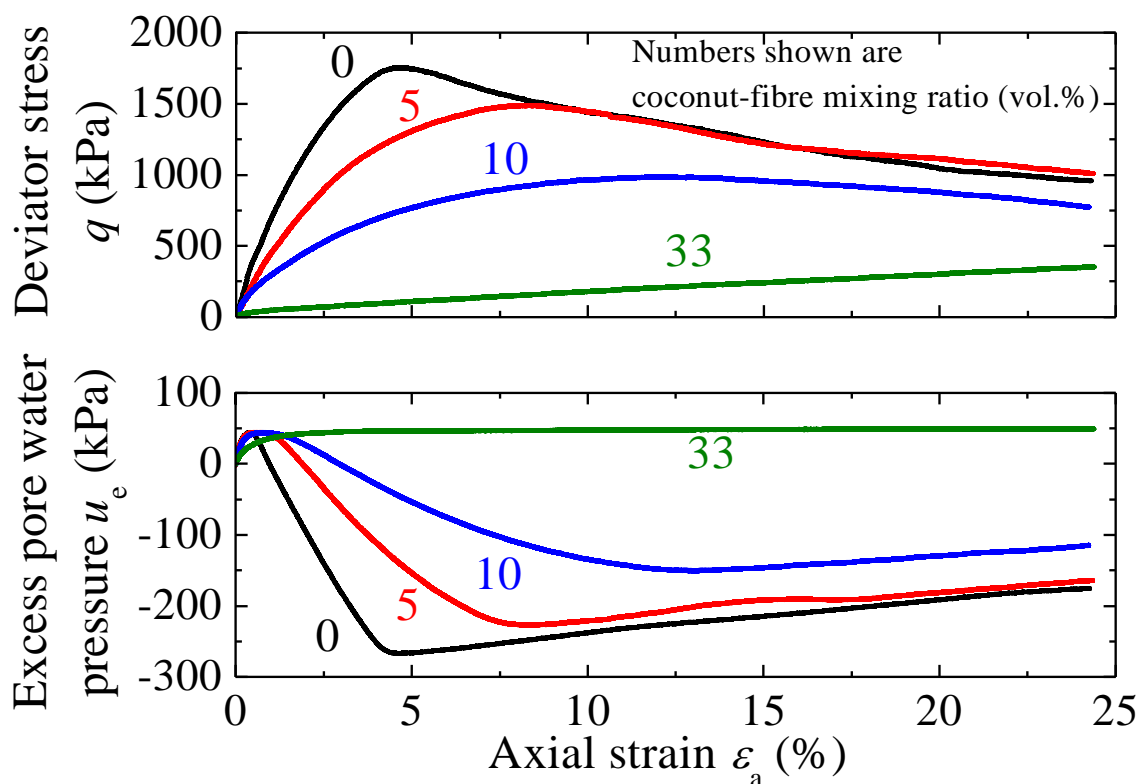


図 4.6-2 応力-軸ひずみ関係と過剰間隙水圧-ひずみ関係(圧密圧力 50 kPa)

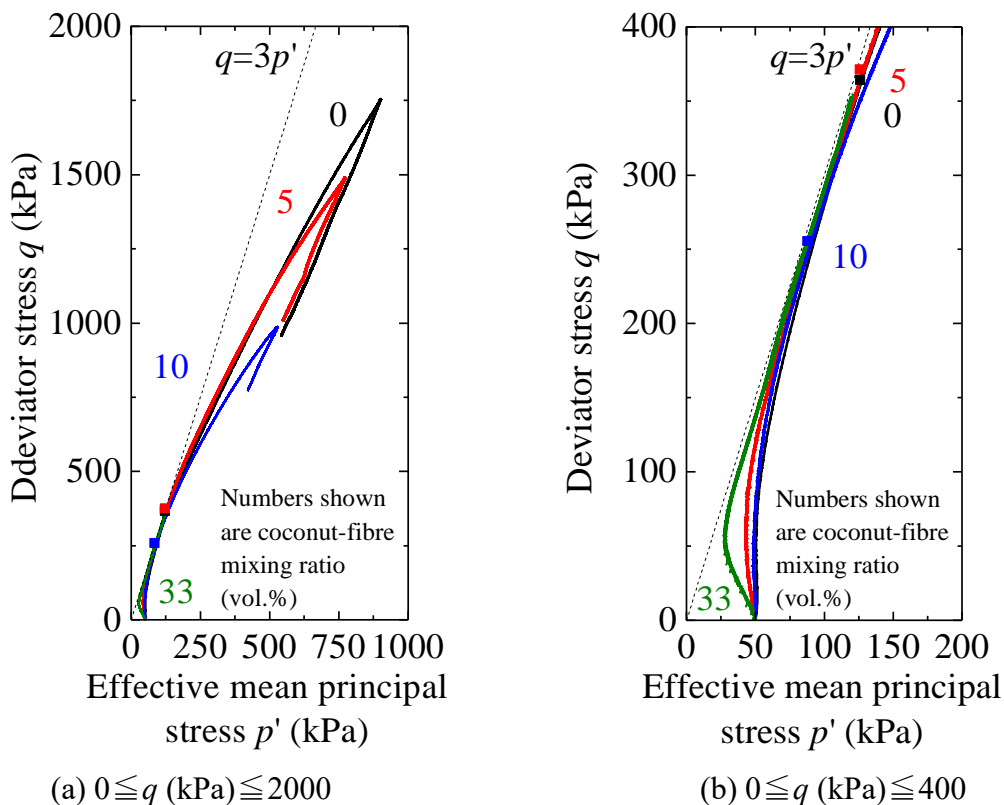


図 4.6-3 有効応力経路(圧密圧力 50kPa)

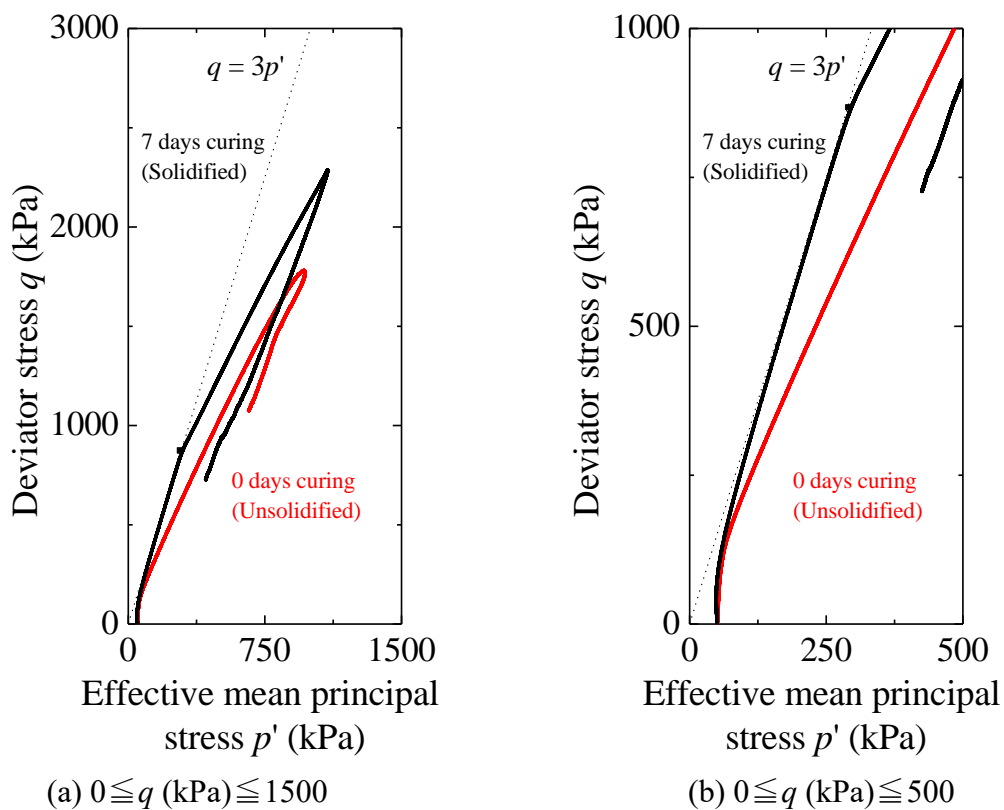


図 4.6-4 スラグ 4(2019)のみの未固化・固化供試体の有効応力経路(圧密圧力 50kPa)

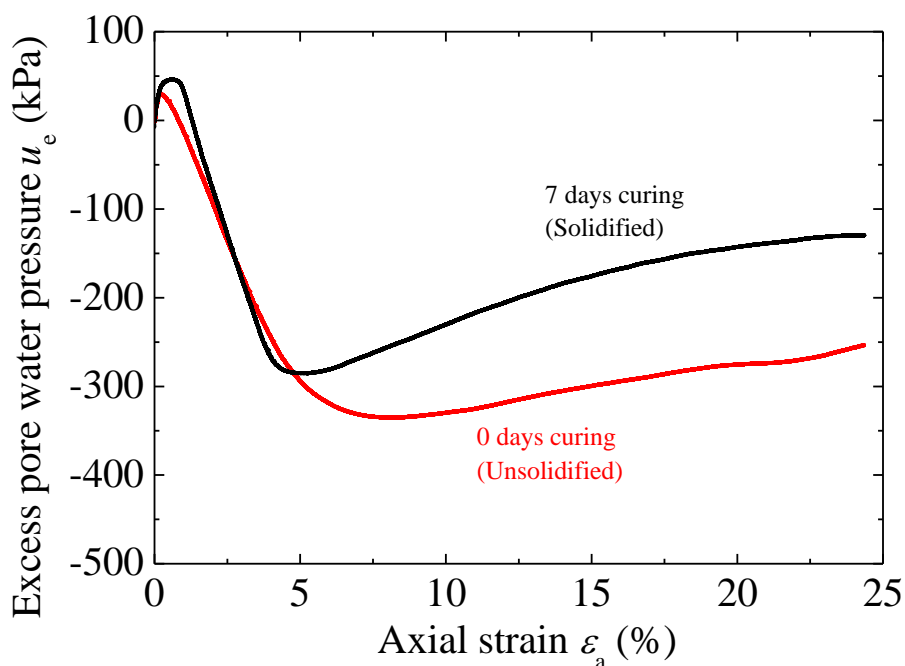


図 4.6-5 スラグ 4(2019)のみの過剰間隙水圧と軸ひずみ関係

次に、図 4.6-3(b)より、ココヤシ繊維混合割合 33 vol.%では直線 $q = 3p'$ に沿って q および p' が増加していくことが確認されたことから、この要因について検討するため、ココヤシ繊維混合割合 33 vol.%の養生なし(以降、Coco33_0dc と称す)と、ココヤシ繊維のみの養生なし(以降、Coco100_0dc と称す)を用いて \overline{CU} 試験(背圧 200 kPa・圧密圧力 50 kPa)を実施した結果について示す。Coco33_0dc の供試体はココヤシ繊維混合割合 33 vol.%の 7 日養生(以降、Coco33_7dc と称す)と同様の作製条件 ($\rho_d = 1.07 \text{ Mg/m}^3$, $w = 40.9\%$)で作製した。Coco100_0dc の供試体は、締固め試験から求まる乾燥密度($D_c = 95\%$ 相当)での供試体作製が困難であった。これは供試体作製で用いるモールドの直径が締固め試験で用いるモールドよりも小さく、突固めによって曲げられたココヤシ繊維が元の形に戻ろうとする復元力(6.2の図 6.2-4 で詳細を記載)が大きくなったためであると考えられる。そこでCoco100_0dc の供試体作製には、他の条件のように締固め試験結果を用いず、適当な量のココヤシ繊維を締固めることで供試体を作製した。結果的に、 $\rho = 0.79 \text{ Mg/m}^3$ 、一層当たりココヤシ繊維 6.362 g、水 25 g で供試体を作製した。また、Coco33_0dc および Coco100_0dc はモールドから脱型した際に供試体が膨張してしまい試験機に供試体を設置することが困難であったために凍結を行った。3.3 の手順で作製した供試体をプラスチックモールドのまま冷凍庫で 24 時間凍結後、試験機に設置した。供試体の完全解凍は事前に予備実験を行い、室温 (20 °C)、セル圧 20 kPa、間隙水圧 0 kPa 条件下で 5 時間静置することで完了することが分かっていたため、本試験ではこの処理を行った後に、二重負圧法による脱気を行った。

図 4.6-6 に Coco33_0dc と Coco100_0dc の背圧 200 kPa・圧密圧力 50kPa で実施した \overline{CU} 試験より得られた有効応力経路を示す。図 4.6-6 中には比較のために、図 4.6-3 のココヤシ繊

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

維混合割合 33 vol.%の 7 日養生(以降, Coco100_7dc)の結果も示している. 図 4.6-6 より Coco33_0dc と Coco100_0dc も Coco33_7dc と同様に, 載荷後, q の増加に伴い p' は減少し, 直線 $q = 3p'$ に接するとその後は直線 $q = 3p'$ に沿って q および p' が増加する. スラグの水和反応が起こっていないと考えられる Coco33_0dc やスラグを混合していない Coco100_0dc でも同様の有効応力経路を示したことから, 試験終了まで直線 $q = 3p'$ に沿って q および p' が増加するのはココヤシ繊維が大きく影響していると考えられる. また, Coco33_0dc と Coco33_7dc でやや有効応力経路が異なるが, これについては後述する CD 試験の結果を踏まえると, 試験結果のばらつきによるものと考えられる.

次に, Coco33_0dc, Coco33_7dc, Coco100_0dc の最終的な内部摩擦角 ϕ' を以下の式 4.6-(1) から求めた.

$$\sin \phi' = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \quad \dots 4.6-(1)$$

式 4.6-(1) より, Coco33_0dc では $\phi' \cong 90^\circ$, Coco33_7dc では $\phi' = 83.3^\circ$, Coco100_0dc では ϕ' が算出できなかった. Coco100_0dc における ϕ' が算出できないというこの不可解な現象は, σ'_3 が負の値を示し, $\sin \phi' > 1$ となったことで起こっており, この不自然さを考慮しても実質的に Coco100_0dc の ϕ' は 90° 近く, ココヤシ繊維を 33 vol.% 以上混合したスラグ 4(2019)材料の ϕ' は非常に大きくなることが分かる. こういった非常に大きい ϕ' は高有機質土でも見られる⁵⁾ことから, 木屑特有の性質(圧縮性や摩擦角が大きい性質)が関係していると推察される.

図 4.6-7 に Coco33_0dc, 図 4.6-8 に Coco100_0dc の \overline{CU} 試験中の供試体外観を示す. 図 4.6-6 中の \blacksquare , \circ , \triangle が図 4.6-7 と図 4.6-8 のそれぞれの(a)~(c)に対応している. (a)には載荷直前, (b)には直線 $q = 3p'$ に達する直前, (c)には直線 $q = 3p'$ に達した直後の供試体外観を示している. 図 4.6-7(b)および図 4.6-8(b)より, Coco33_0dc と Coco100_0dc で多少の違いはあるものの, 直線 $q = 3p'$ に達する直前にメンブレンにしわが発生している. また, Coco33_0dc では図 4.6-7(b), (c) に示す通り, 圧縮に伴いメンブレンのしわが増え, メンブレンと供試体の間に間隙水が溜まっている様子が確認できる. さらに, Coco100_0dc では図 4.6-8(b), (c) に示す通り, 圧縮に伴い明らかにメンブレンがふくらみ, メンブレンと供試体の間に間隙水が溜まっている様子が確認できる. このようにココヤシ繊維の割合によって多少の差異はあるものの, いずれにおいてもメンブレンと供試体との間に間隙水が排水されていることが確認できる. このような脱水現象は泥炭などの高有機質土を用いた \overline{CU} 試験において確認・指摘されており⁶⁾, 圧縮性の高い材料での \overline{CU} 特性が現れているものと考えられる.

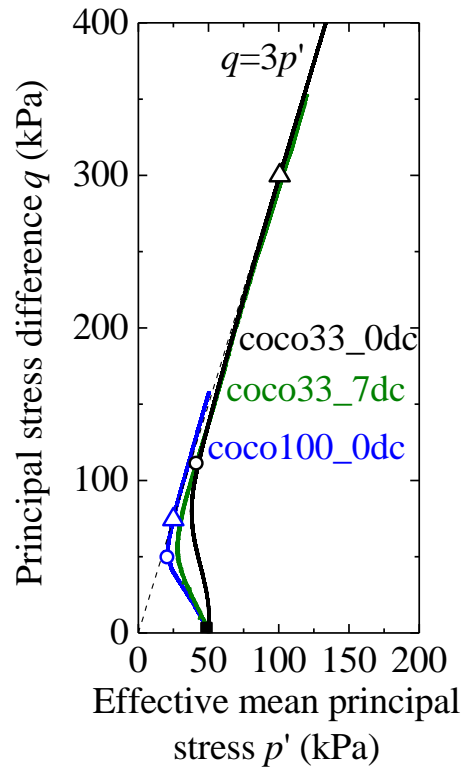


図 4.6-6 有効応力経路(圧密圧力 50kPa)

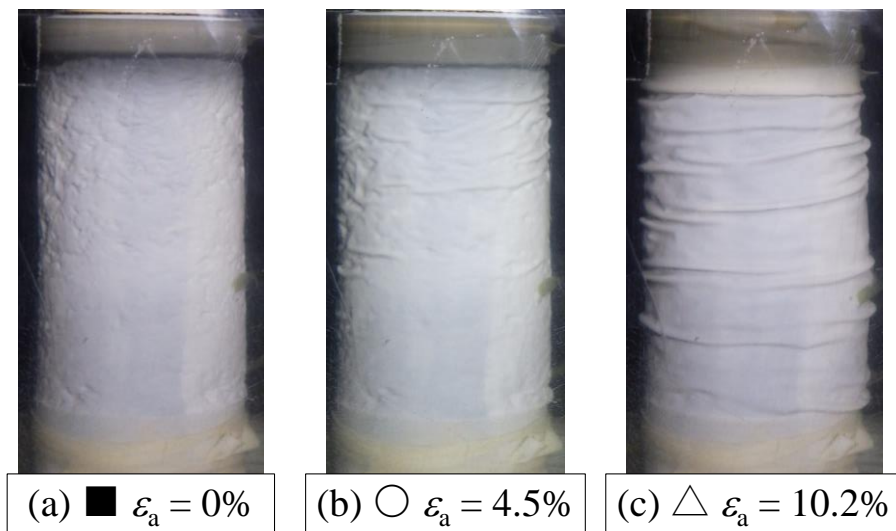


図 4.6-7 \overline{CU} 試験中の coco33_0dc の様子(圧密圧力 50kPa)

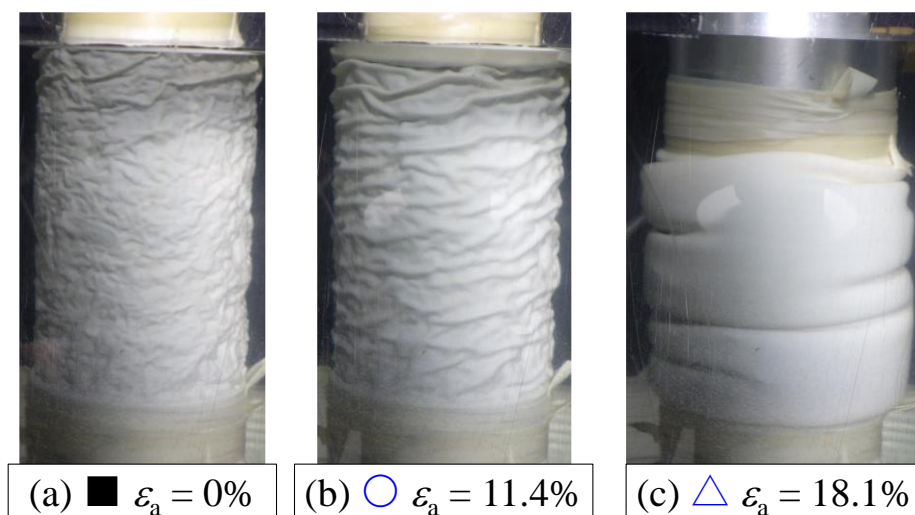


図 4.6-8 \overline{CU} 試験中の coco100_0dc の様子(圧密圧力 50kPa)

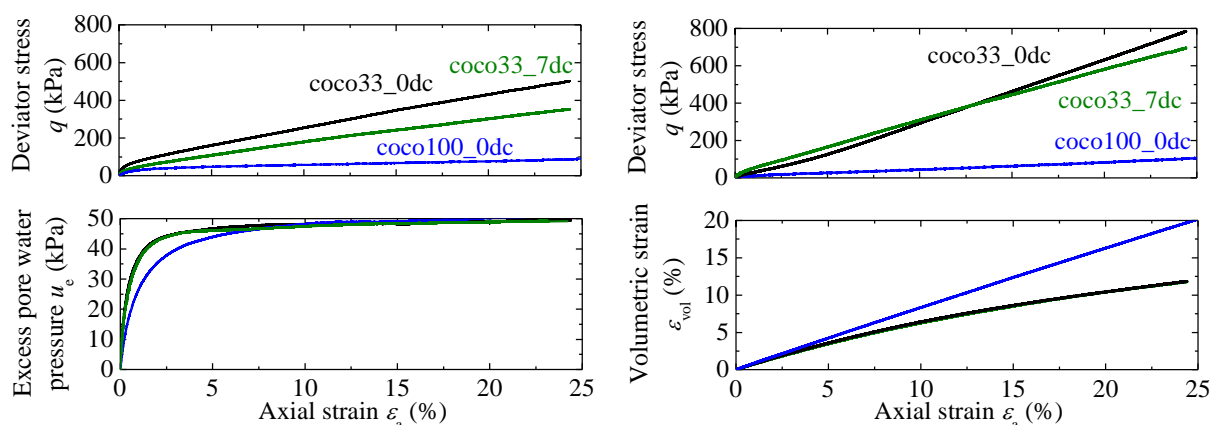
ここで、4.1 で実施したココヤシ繊維混合割合 33 vol.%を用いた CD 試験(7日養生・拘束圧 50 kPa)では、試験終了まで体積収縮することが確認されており、今回の \overline{CU} 試験から得られたダイレイタンシー特性とは明らかに異なる傾向であった。そこで、改めてココヤシ繊維混合割合 33 vol.%の養生なし(Coco33_0dc)と 7日養生(Coco33_7dc)の CD 試験結果と比較し、 \overline{CU} 試験から得られたダイレイタンシー特性について検討した。なお、ココヤシ繊維混合割合が 100 vol.%の養生なし(Coco100_0dc)の CD 試験は本検討のために追加で実施した。

図 4.6-9 に Coco33_0dc, Coco33_7dc, Coco100_0dc の \overline{CU} 試験(背圧 200 kPa・圧密圧力 50kPa)の応力-軸ひずみ、過剰間隙水圧-軸ひずみ関係を、図 4.6-10 に Coco33_0dc, Coco33_7dc, Coco100_0dc の CD 試験(背圧 200 kPa・拘束圧 50kPa)の応力-軸ひずみ、体積ひずみ-軸ひずみ関係を示す。なお、視覚的に比較しやすいように、図 4.6-9 と図 4.6-10 を横に並べて示している。まず、図 4.6-9 と図 4.6-10 の応力ひずみ関係に着目すると、排水・非排水に関わらず、いずれの配合条件でも試験終了までピーク強度は示さなかった。そして、ばらつきはあるものの、排水・非排水に関わらず Coco33_0dc および Coco33_7dc よりも Coco100_0dc のほうが同ひずみにおける q が小さいことが分かる。また図 4.6-9 より、養生なしの Coco33_0dc と 7日養生の Coco33_7dc で、 Δu の発達の仕方に違いは見られないにもかかわらず、Coco33_0dc のほうが同ひずみに対する q が高くなった。この結果について、7日養生の Coco33_7dc で養生中のモールドによる拘束が強度低下の要因になったとは考えにくく、また、養生なしの Coco33_0dc において凍結から融解の工程で強度増加をもたらしたとも考えにくい。さらに、図 4.6-10 の CD 試験の応力ひずみ関係より、Coco33_0dc と Coco33_7dc で応力ひずみ関係にほとんど違いが見られないことから試験結果のばらつきであり、実際には Coco33_0dc と Coco33_7dc で \overline{CU} 特性に違いはないと考えられる。

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

次に、図 4.6-9 の過剰間隙水圧-軸ひずみ関係と図 4.6-10 の体積ひずみ-軸ひずみ関係から、ダイレイタンシー特性に着目すると、ばらつきはあるものの非排水・排水のいずれにおいても Coco33_0dc と Coco33_7dc でほとんど違いは見られない。一方で Coco100_0dc のダイレイタンシー特性は Coco33_0dc および Coco33_7dc とはやや異なる傾向を示している。これはスラグの有無が影響しており、ココヤシ繊維のみである Coco100_0dc は圧縮性が高いためである。また、図 4.6-9 より、いずれの条件でも Δu は $\varepsilon_a = 1\sim 2\%$ までに急激に増加し、それ以降は緩やかに増加し、 $\Delta u = 50$ kPa に達する。このように、圧縮の進行に伴って間隙水圧が側圧に等しくなる現象^{5), 7)}は有機質土の \overline{CU} 特性として古くから多く報告されている。また、図 4.6-10 の Coco100_0dc の有効応力経路を詳細に見てみると、 $q = 75$ kPa (図 4.6-9 の $\varepsilon_a = 19.0\%$ に対応)を超えたあたりからわずかではあるが、直線 $q = 3p'$ よりも上方を q が増加していくのが分かる。すなわち、 $\Delta u > 50$ kPa ($\sigma_3 < 0$ kPa) の状態で q が増加していくことが分かる。これは $q = 75$ kPa までは Δu の発達とともにメンブレンが伸びることで、供試体全体の Δu の上昇が抑えられていたが、図 8(c)のようにメンブレンが伸びきり、メンブレンの張力が働くようになると過剰間隙水圧が側圧を超えることがあり得ると考えられる。さらに、図 4.6-9 と図 4.6-10 の $\varepsilon_a = 7\%$ 以下に着目すると、まず図 4.6-10 において、Coco100_0dc が Coco33_0dc および Coco33_7dc よりも体積収縮が大きい。しかし、図 4.6-9 では、Coco100_0dc が Coco33_0dc および Coco33_7dc よりも過剰間隙水圧の発生が小さい。つまり、 CD 試験と \overline{CU} 試験でダイレイタンシー特性の関係が逆転している。この要因については不明であるが、Coco100_0dc はココヤシ繊維のみであるため透水性が高く、供試体とメンブレンの間に間隙水が排水しやすい条件であったことが影響していると考えられている。

以上より、Coco33_7dc で \overline{CU} 試験終了時まで $q = 3p'$ に沿って軸差応力が増加していく要因は、スラグの固結による影響よりもココヤシ繊維特有の大きな内部摩擦角や大きな圧縮性、さらに繊維の絡み合いによる供試体の拘束の影響が大きいと考えられる。



左: 図 4.6-9 \overline{CU} 試験から得られた応力-軸ひずみ関係と過剰間隙水圧-軸ひずみ関係(圧密圧力 50 kPa)

右: 図 4.6-10 CD 試験から得られた応力-軸ひずみ関係と体積ひずみ-軸ひずみ関係(圧密圧力 50 kPa)

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

次に圧密圧力(50, 100, 150 kPa)の違いが非排水せん断特性に及ぼす影響について検討した。

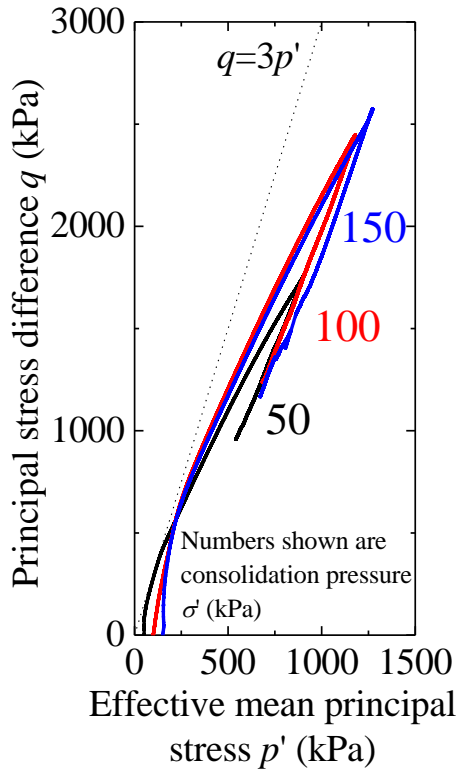
図 4.6-11 に各種配合条件で7日養生した供試体の圧密圧力を変えて実施した \overline{CU} 試験の有効応力経路を示す。図中の線色の違いは圧密圧力 50, 100, 150 kPa の違いを表している。図 4.6-11 (a)~(d)より、スラグ 4(2019)のみでは圧密圧力の増加に伴い非排水せん断強さが増加する傾向が確認できる一方で、ココヤシ繊維を混合した場合には圧密圧力の違いによる非排水せん断強さの違いは確認できない。

図 4.6-12 に各種配合条件の軸ひずみ-過剰間隙水圧関係を示す。図 4.6-12(a)~(c)より、ココヤシ繊維混合割合 10 vol.%以下ではいずれの圧密圧力でも負のダイレイタンシーを示した後に、正のダイレイタンシーを示す。さらに、図 4.6-12(a)~(c)より、ココヤシ繊維混合割合 10 vol.%以下では、ココヤシ繊維混合割合が増加するほど、ダイレイタンシーの変化する軸ひずみが大きくなる。そしてこの傾向は各配合条件において、圧密圧力の影響を受けないことが分かる。

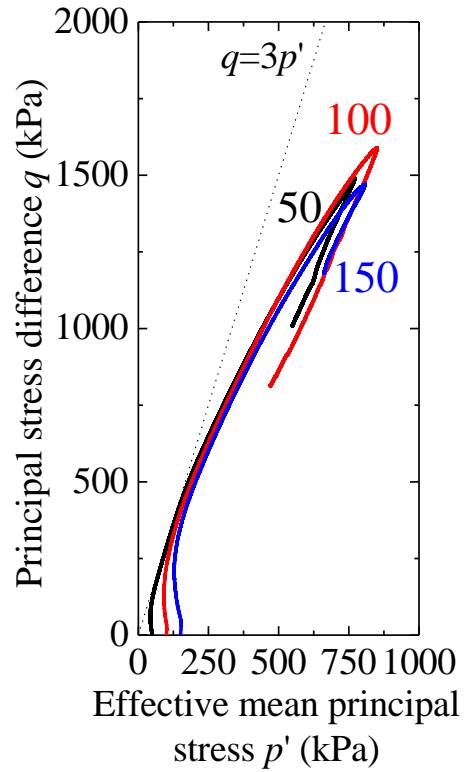
ここで、図 4.6-12(a)のスラグ 4(2019)のみの過剰間隙水圧 Δu に着目すると、すべての圧密圧力で $\Delta u \approx -270$ kPa でデータが重なることが分かる。この結果は Cavitation が発生していることを示唆している。山崎ら⁸⁾は活性シリカ改良土を用いて、背圧 200 kPa, 圧密圧力 50 ~ 600 kPa で \overline{CU} 試験を行った結果、いずれの試験でも過剰間隙水圧が-250 kPa までしか発達せず、その要因を Cavitation の発生による影響としている。また、吉川ら⁹⁾が実施した密詰め砂の数値シミュレーションでは、飽和($S_r = 99.90\%$)供試体が Cavitation の発生によって間隙空気が急激に膨張し、供試体が不飽和土として挙動することを示している。本研究においても図 4.6-12 (a)のスラグ 4(2019)のみのいずれの圧密圧力でも-250 kPa が過剰間隙水圧の最低値になっていることから Cavitation が発生していた可能性が高い。そして、スラグ 4(2019)のみにおいて Cavitation が発生していたと仮定すると、本試験結果のスラグ 4(2019)のみの非排水せん断強さは本来の非排水せん断強さよりも過小評価している可能性が高い。

以上より、非排水せん断強さはココヤシ繊維を混合することによって圧密圧力の影響を受けにくくなる可能性があるが、スラグ 4(2019)のみでは圧密圧力によらず Cavitation が発生していた可能性があり、Cavitation が発生しない条件で実験を行い、非排水せん断強さについて改めて検討する必要がある。再検討した結果については次項に示す。

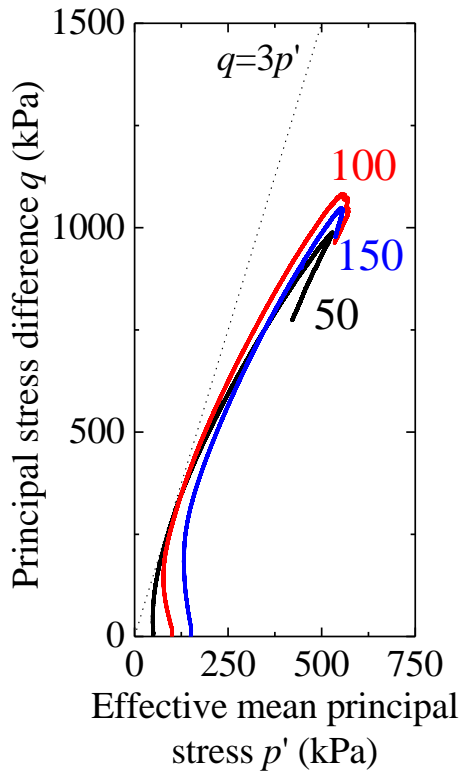
図 4.6-13 に図 4.6-11 の結果を基に、ココヤシ繊維混合割合 10 vol.%以下条件における圧密圧力と有効最小主応力の最小値 σ_{3_min} の関係を示す。ここで σ_{3_min} が大きいほど有効応力経路が直線 $q = 3p'$ に接近しなくなることを意味している。図 4.6-13 より、ココヤシ繊維混合割合によらず、圧密圧力が高いほど、 σ_{3_min} は大きくなることが分かる。また、圧密圧力の増加に伴う σ_{3_min} の増加率にはココヤシ繊維の混合割合の違いによる影響は確認できない。圧密圧力が高いほど、 σ_{3_min} が大きくなる要因として、圧密圧力が高いほど、圧密段階もしくは載荷初期にスラグの固結が壊れるためだと考えられる。



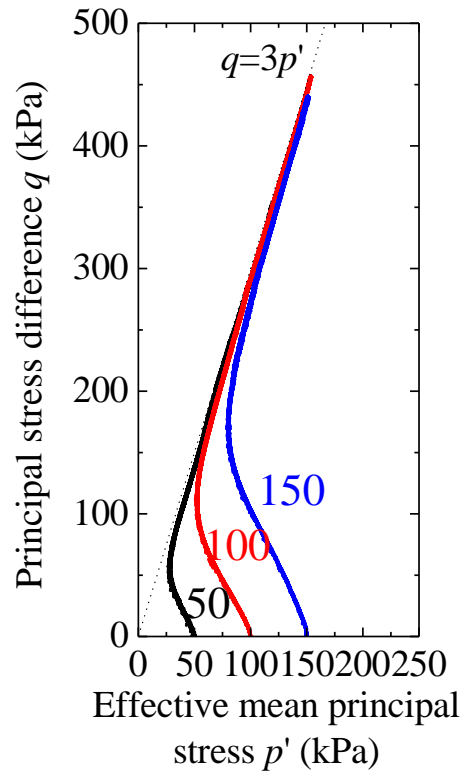
(a) スラグ 4(2018)のみ



(b) ココヤシ繊維 5 vol.%混合

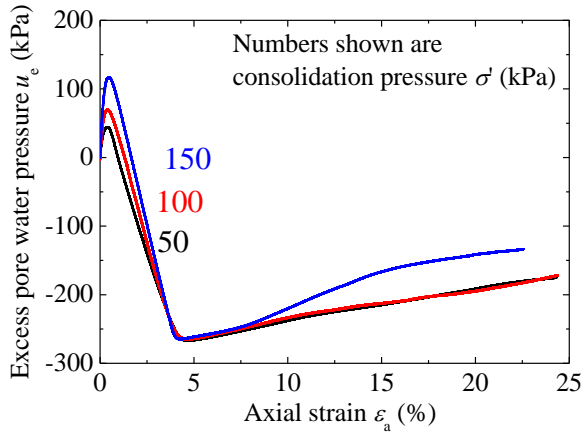


(c) ココヤシ繊維 10 vol.%混合

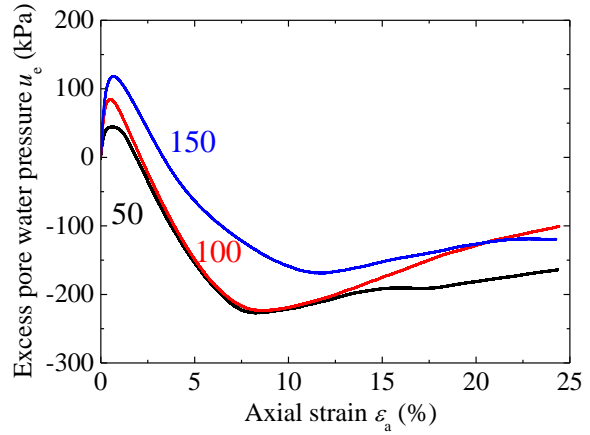


(d) ココヤシ繊維 33 vol.%混合

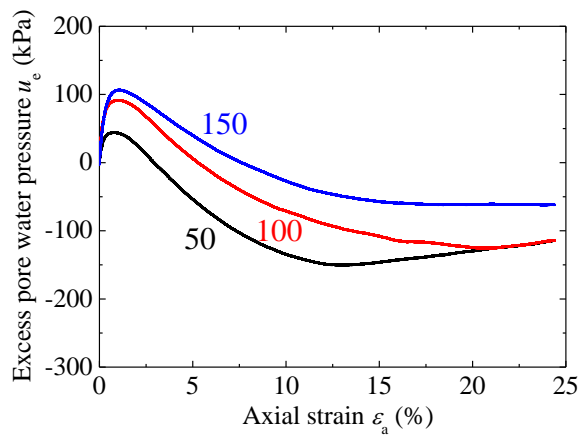
図 4.6-11 各種配合条件の有効応力経路(圧密圧力 50, 100, 150 kPa)



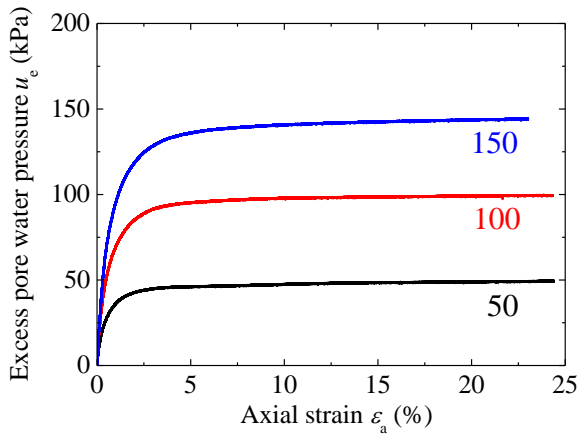
(a) スラグ 4(2018)のみ



(b) ココヤシ繊維 5 vol.%混合



(c) ココヤシ繊維 10 vol.%混合



(d) ココヤシ繊維 33 vol.%混合

図 4.6-12 各種配合条件の過剰間隙水圧-軸ひずみ関係(圧密圧力 50, 100, 150 kPa)

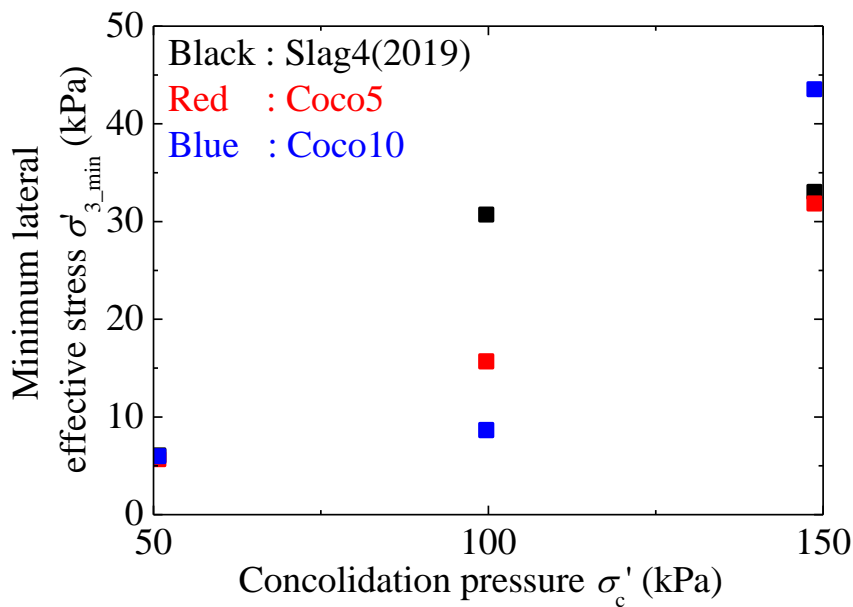


図 4.6-13 圧密圧力と有効最小主応力の最小値の関係

4.6.2 非排水せん断特性に及ぼす Cavitation(背圧)の影響

4.6.1 で行った検討によってスラグ 4(2019)のみの条件において Cavitation が発生していた可能性が高いことが判明した。実験データを正確に得るためにも Cavitation の発生する実験条件を知ることは必要不可欠である。そこで本稿では7日養生のスラグ 4(2019)のみを用いて、圧密圧力 50 kPa, 背圧 100, 200, 300, 400, 500 kPa で Cavitation の発生条件について検討した結果を示す。この時のセル圧は 550 kPa であり、これは本研究室で保有するエアークンプレッサーで安定的に供給できる圧力の上限値である。

図 4.6-14 にスラグ 4(2019)のみの \overline{CU} 試験より得られた軸ひずみ ε_a -主応力差 q 関係と、軸ひずみ ε_a -過剰間隙水圧 u_e 関係を示す。図中の u_b は圧密時すなわち載荷開始時の背圧を示している。なお、図中の背圧 400 kPa では $\varepsilon_a=10.8\%$ でメンブレンが破れてしまったため、それ以降のデータは計測できていない。図 4.6-14 より、背圧の違いによらず $\varepsilon_a = 3 \sim 5\%$ までは弾性挙動を示し、最大主応力差 q_{cu} を示した後に緩やかに q が減少する。 u_e に着目すると、背圧の違いによらず、 $\varepsilon_a = 0.6\%$ までは負のダイレイタンスを示し、主応力差が最大となるまで正のダイレイタンスを示す。その後はダイレイタンスがほとんど変化しなくなることを確認できる。さらに、 u_b は 100, 200, 300, 400, 500 kPa の条件で u_e の最小値はそれぞれ -163, -249, -285, -407, -469 kPa であった。つまり、 $u_b = 100, 200$ kPa の条件では絶対圧で -63 または -49 であったことから Cavitation が発生していたと考えられる。また、 $u_b = 500$ kPa の時に $u_e = -469$ kPa まで発達したことから、 $u_b = 300$ kPa の時に $u_e = -350$ kPa 発生しても不思議はない条件の中で u_e が -280 kPa までしか発達しなかったのは、他の条件と破壊形態が異なり、せん断破壊したためと考えられる。破壊形態の違いについては図 4.6-15 に示す試験後の供試体の様子からも明らかである。また、 $u_b = 300$ kPa の条件で q_{cu} を示した後の応力低下が他の条件と比べて急であることから分かる。そして、 $u_b = 400$ kPa の条件においては $u_e = -407$ kPa であり、発生した過剰間隙水圧からだけで Cavitation を判断することは難しい。その為、後述する図 4.6-16 を基に Cavitation の有無を判断した。

図 4.6-16 に、図 4.6-14 の結果を基に主応力差 q と有効主応力 p' で整理した有効応力経路を示す。図中のプロットは先述の考察から Cavitation が発生したと考えられる点を示している。図 4.6-16 より、 $u_b = 100$ kPa の条件ではそれ以外の条件よりも非排水せん断強さ q_{cu} が低く、 $u_b = 200, 300, 400$ kPa の条件では同程度 ($q_{cu} = 2300$ kPa)、 $u_b = 500$ kPa の $q_{cu} = 2800$ kPa であった。 $u_b = 200, 300$ kPa で Cavitation が発生し、 $u_b = 400$ kPa で Cavitation が発生していないと仮定すると、 $u_b = 400$ kPa の条件では $u_b = 200, 300$ kPa の条件よりも q_{cu} が高くなるはずであるが、本試験ではその傾向が見られなかった。そして、 $u_b = 500$ kPa の $q_{cu}(=2800$ kPa) が $u_b = 400$ kPa の $q_{cu}(=2300$ kPa) より高かったことから $u_b = 400$ kPa では Cavitation が発生していたと考えられる。ここで、 $u_b = 400$ kPa において、Cavitation が発生していたとすると、 $u_b = -450$ kPa 程度まで達すると考えられるが本試験ではそれに達していない。このことから推察される理由として、今回計測した間隙水圧は供試体全体の平均値であり、せん断面ではそれ以上の間隙水圧が発生していたことが挙げられる。

以上より、スラグ 4(2019)においては背圧 500 kPa が Cavitation の発生しない境界値であると考えられる。

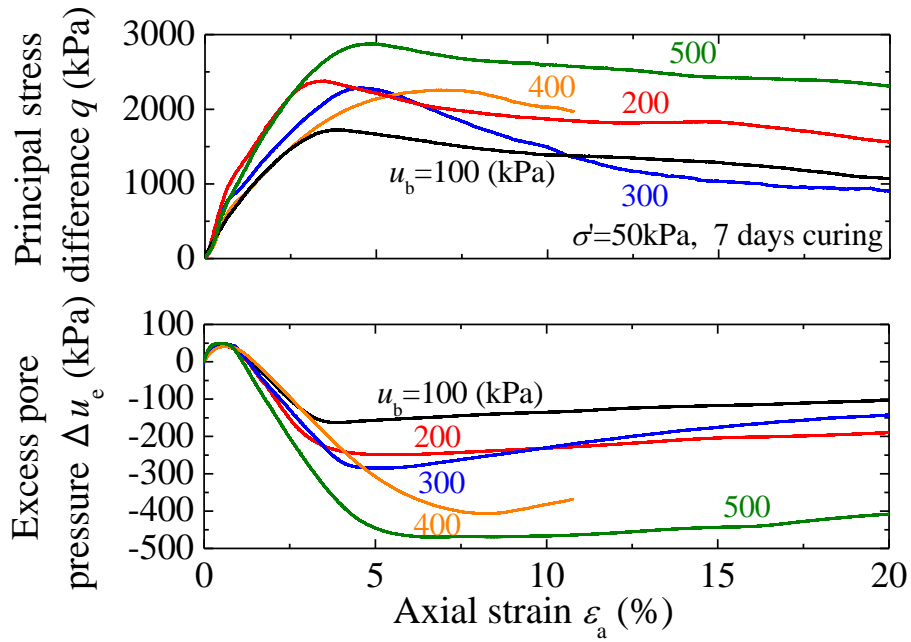


図 4.6-14 スラグ 4(2019)のみの軸ひずみ-主応力差の関係と軸ひずみ-過剰間隙水圧関係

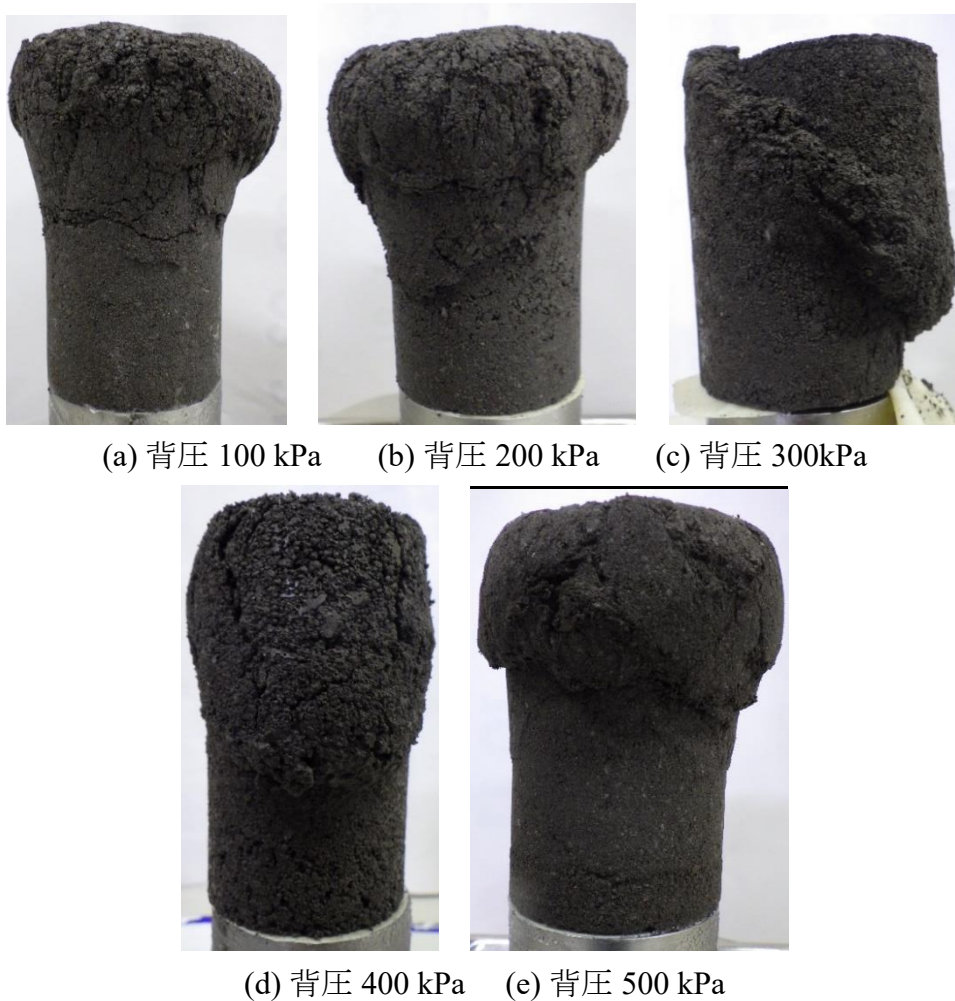


図 4.6-16 スラグ 4(2019)のみの背圧の違いによる試験終了時の供試体外観の違い

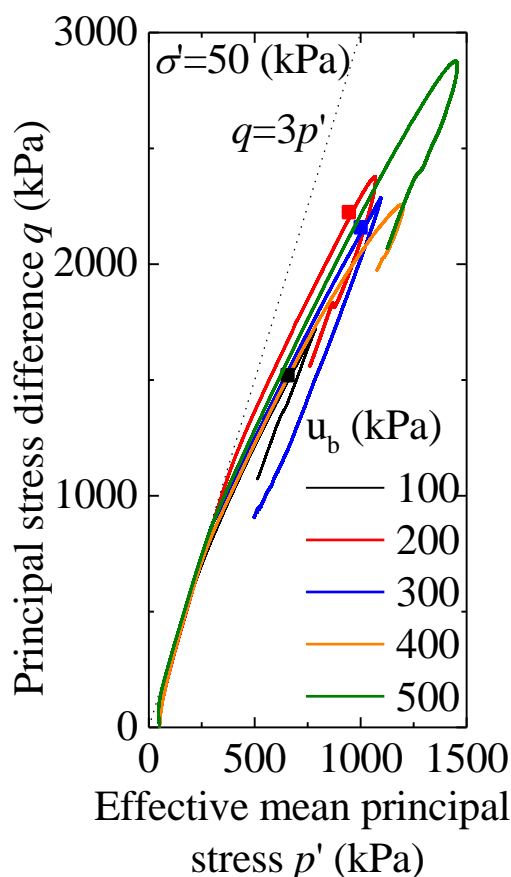


図 4.6-16 スラグ 4(2019)のみの载荷開始時の背圧の違いによる有効応力経路の違い

以下、本項で得られた知見をまとめる。

- ▶ 7日養生したココヤシ繊維混合割合が 10 vol.%以下のスラグ 4(2019)は、圧密圧力が 50 kPa の時、有効応力経路は tension cut off の境界線である $q = 3p'$ に沿って軸差応力が増加することから非常に大きな粘着力 c を持った材料であることが分かる。そして、その粘着成分はスラグの固結に由来するものであり、固結が破壊され始めても粒状材として ϕ が発揮されることで軸差応力 q は伸び続ける。ただし、スラグ 4(2019)のみのような非常に硬い材料では Cavitation が発生する可能性があり、非排水せん断強さについて議論するためには背圧を上げて再試験を実施する必要がある。
- ▶ 硬化による非排水せん断特性への影響は、Cavitation の影響を受けない $\varepsilon_a < 1\%$ の小さなひずみ領域での非排水せん断挙動から把握することが可能である。
- ▶ ココヤシ繊維混合割合が 10 vol.%以下では圧密圧力が大きくなるほど、有効最小主応力の最小値 σ'_{3_min} が大きくなる。つまり、有効応力経路は直線 $q = 3p'$ から離れた経路を辿るため、硬化による粘着力の評価が困難である。この要因として、圧密圧力が 100 および 150 kPa では圧密過程で粘着力が失われていた可能性や载荷中に固結が破壊したために正の過剰間隙水圧が発生しきらなかった可能性が挙げられる。ただし、いずれの要因か限定することは本結果からは困難である。

- ▶ ココヤシ繊維混合割合が 33 vol.% (Coco33)の場合、圧密圧力によらず、tension cut offの境界線(直線 $q = 3p'$)に沿って q および p' が、ココヤシ繊維のみ(Coco100)の養生なしのような全く固化しない供試体でも同様の有効応力経路であったことから、これはココヤシ繊維特有の傾向であると考えられる。そして、このような圧縮性の高い供試体では間隙水圧の上昇範囲が側圧に依って制限されることでダイレイタンシー特性が制限される可能性が高く、その結果、 \overline{CU} 特性を適切に評価できない可能性がある。
- ▶ スラグ 4(2019)のみの非排水三軸圧縮試験は背圧 500 kPa 以上確保しなければ Cavitation が発生するため、非排水せん断強さを過小評価する可能性が高い。ただし、常圧コンプレッサーを用いた場合には安定的に供給できる圧力が 550 kPa 程度であることから背圧を 500 kPa とした場合、圧密圧力は 50 kPa 程度が限界である。

4.6.3 UC試験, \overline{CU} 試験, UU試験から視る粘着成分 c の評価

4.6.1 の \overline{CU} 試験から、本研究材料である木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の圧密圧力 50 kPa の非排水せん断における有効応力経路は $q=3p'$ の直線に沿って q および p' が増加し、応力比が最大となる R_{max} 時の主応力差 q_{Rmax} で $q=3p'$ から有効応力経路が下方に離れ始めることが分かった。 q_{Rmax} の時の有効最小主応力 σ_3 は 0 kPa であることから、これは一軸圧縮試験中の応力状態と等しい条件下でせん断が進行したものと考えられる。このような状況から q_{Rmax} は材料の粘着成分 c を表現しているものと考えられる。そこで本項では q_{Rmax} と q_u を比較評価することで本研究材料の粘着成分に与える圧密と飽和の影響について検討した。なお、圧密の影響は \overline{CU} 試験により得られる q_{Rmax} と UU試験から得られる q_{Rmax} を比較することで、また、飽和の影響を UC試験により得られる q_u と UU試験から得られる q_{Rmax} を比較することで検討した。

表 4.6-2 に本検討で用いた供試体作製条件を示す。4.6.2 の結果から、各条件において Cavitation の発生しない背圧にし、 \overline{CU} 試験では圧密圧力 50 kPa で等方圧密後にせん断を行い、UU試験では非圧密(圧密圧力 0 kPa)でせん断を行った。なお、スラグ 4(2019)のみとココヤシ繊維混合割合 10 vol.%の条件では \overline{CU} 試験と UU試験を 2 または 3 本、ココヤシ繊維混合割合 5 vol.%の条件では UU試験を 1 本、UC試験はすべての混合条件で 3 本の試験を行った。

図 4.6-17 に UU試験より得られた応力ひずみ関係と過剰間隙水圧ひずみ関係を示す。図中のプロットはピーク強度(ココヤシ繊維混合割合 0, 5 vol.%)もしくは試験終了時の軸差応力(ココヤシ繊維混合割合 10 vol.%)である。なお、スラグ 4(2019)とココヤシ繊維混合割合 10 vol.%の条件では複数本の試験を行っているが、同一条件であれば、供試体ごとに有意な差はないと判断してここでは代表的な 1 本を示す。図 4.6-17 より、スラグ 4(2019)のみでは試験終了時まで明確なピーク強度を示し、その後ひずみ軟化挙動を示すのに対し、ココヤシ繊維を 5 vol.%混合すると明確なピークが現れなくなる。さらに、10 vol.%となると試験終了時まで軸差応力が増加し続けるひずみ硬化型のせん断挙動を示した。

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討と せん断強度・せん断剛性推定手法の提案

また、過剰間隙水圧の変化に着目すると、スラグ4(2019)のみでは $\varepsilon_a = 0.8\%$ 、ココヤシ繊維混合割合 5 vol.%では $\varepsilon_a = 1.6\%$ 、ココヤシ繊維混合割合 10 vol.%では $\varepsilon_a = 2.5\%$ で負の過剰間隙水圧が発生し始めていることが確認できる。つまり、木屑混合割合によってダイレイタンシー特性が異なることが分かる。これはこれまでに示した図 4.6-1 の CU 試験や図 4.6-2 の \overline{CU} 試験から得られたダイレイタンシー特性とも一致する。

図 4.6-18 に有効応力経路を示す。図 4.6-18 中には図 4.6-3 と同様に応力比 R が最大(R_{max})を示した時の軸差応力 q_{Rmax} の点をプロットした。図 4.6-18 より、いずれの配合条件でも載荷開始直後から tension cut-off の境界線である $q = 3p'$ に沿って q および p' が増加することが分かる。そして、軸差応力が q_{Rmax} に達すると、有効応力経路が直線 $q = 3p'$ から徐々に離れることが分かる。これは、 q_{Rmax} に達する前と後で過剰間隙水圧の発生の仕方が異なるためであり、この点は図 5.6-1 の過剰間隙水圧が負の値を示し始める点とほとんど一致する。つまり、 q_{Rmax} は正のダイレイタンシー特性が現れ始める直前の軸差応力であり、木屑混合割合が高いほど小さくなることが分かる。4.6.1 でも述べたようにこの点で固結が破壊され、粘着成分 c が大きく失われると同時に ϕ 材として機能し始める点であると推察される。

表 5.6-1 供試体作製条件

木屑の種類 (形状)	ココヤシ繊維 内割混合体積 (vol.%)	目標乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	目標含水比 w (%)	背圧 (kPa)
- (スラグ4(2019)のみ)	0	1.98	13.3	450
ココヤシ繊維	5	1.83	14.6	450
	10	1.68	17.0	500

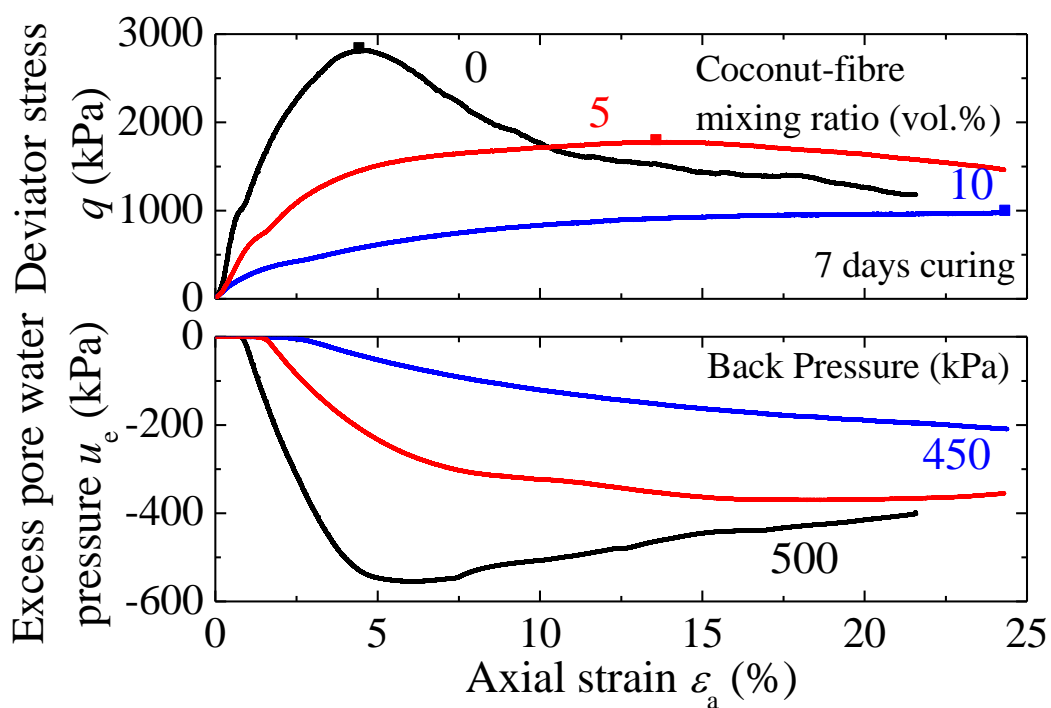


図 4.6-17 応力-軸ひずみ関係と過剰間隙水圧-軸ひずみ関係

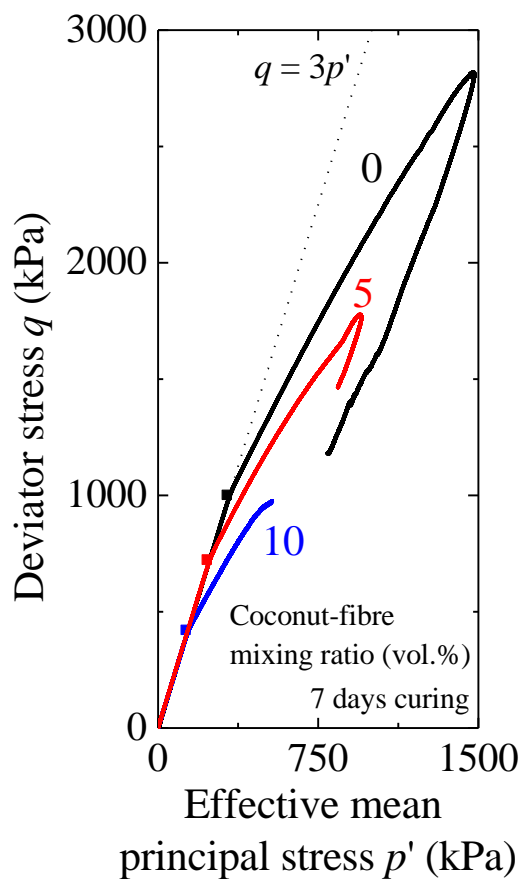


図 4.6-18 有効応力経路

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討とせん断強度・せん断剛性推定手法の提案

図 4.6-19 に \overline{CU} 試験から得られた q_{Rmax} と UU 試験から得られた q_{Rmax} を圧密圧力で整理した結果を示す. なおここでは \overline{CU} 試験を行っていないココヤシ繊維混合割合 5 vol.%の条件は除き, スラグ 4(2019)のみとココヤシ繊維混合割合 10 vol.%の全ての試験データを示す. また, UC 試験から得られた q_u は圧密圧力 0 kPa として図中に示す. 図 4.6-19 より, スラグ 4(2019)のみの場合には 50 kPa で圧密したことで q_{Rmax} が平均約 22%減少し(UU 試験の q_{Rmax} を 100%とする), ココヤシ繊維を 10 vol.%混合した場合には約 12%減少する. この結果から, 有効応力経路が $q=3p'$ に沿って q および p' が増加していても 50 kPa で圧密をしたことで微小な固結は壊れていると考えられる. つまり, 固結の破壊は q_{Rmax} の減少に現れると考えられる. また, \overline{CU} 試験での圧密による体積減少に着目すると, スラグ 4(2019)のみでは $1.0 \times 10^{-5}\%$ 程度, ココヤシ繊維混合割合 10 vol.%では 0.2%程度であった. スラグ 4(2019)のみのほうが q_{Rmax} の減少率が大きいにも関わらず圧密時に計測される体積変化は小さいことから, 圧密時の体積変化だけではこの現象は説明できない. 現時点で考えられることの 1 つとして, 圧密時の体積変化は供試体全体の体積変化を捉えたものであり, スラグ 4(2019)のみについては供試体全体の体積変化が起こらないほど小さな固結が壊れていた可能性が考えられる. つまり, この結果が真であるとすると, 圧密による供試体の体積変化傾向には現れないほどの小さな固結破壊を q_{Rmax} で評価できることとなる.

次に, UC 試験で得られた q_u と UU 試験で得られた q_{Rmax} を比較すると, スラグ 4(2019)のみの場合には q_{Rmax} が q_u よりも約 20%小さく, ココヤシ繊維 10 vol.%混合した場合には約 25%小さい. つまり, 圧密以外の試験方法および供試体状況の違いがこの低下の要因であると考えられる. すなわち, ひずみ速度や飽和化の影響が挙げられる. 飽和化の影響については, 不飽和での UU 試験行う他に検討のしようがないが, q_u (固結強度)が 1250 kPa もある材料の固結が飽和化によって壊れ, 20%近くも固結強度が低下することは相当に考えにくい. また, ひずみ速度の違いについては, UC 試験では軸ひずみ速度 1.0 %/min であったのに対し, UU 試験では 0.01 %/min と 100 倍も異なることから, 軸ひずみ速度の速い条件で計測した q_u の方が大きく値となった可能性は十分にあり得る. ひずみ速度依存性については様々な研究が存在しており, 材料や試験方法によってその傾向は異なるが, 100 倍もひずみ速度が大きいと 1.1~1.3 倍の軸差応力を発揮することは珍しくなく, 仮に木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料がひずみ速度依存性を有する材料であるならば, q_u と UU 試験から求まる q_{Rmax} が一致する可能性は十分にあり得ると考えている.

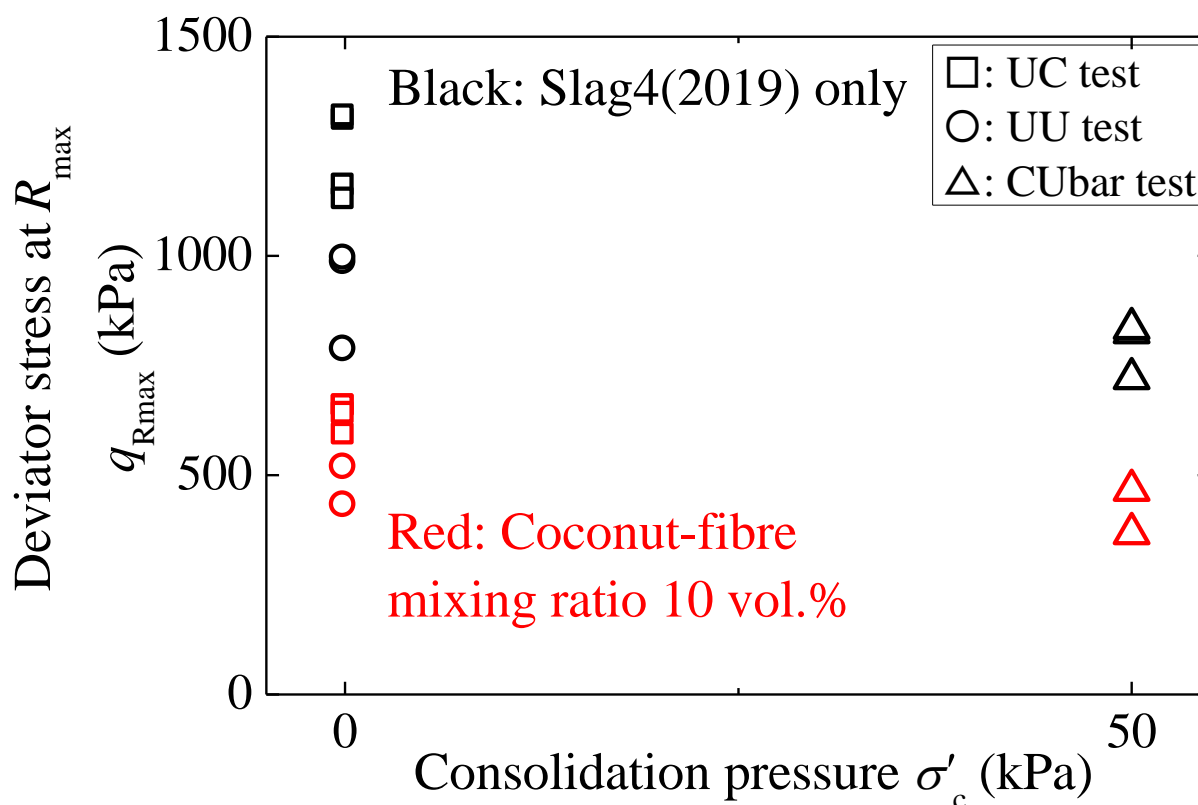


図 4.6-19 圧密圧力とUC試験から得られる q_u およびUU試験・ \overline{CU} 試験から得られる q_{Rmax} の関係

以下に本節で得られた知見を示す。

- スラグ4(2019)のみ，またはココヤシ繊維を10 vol.%混合した材料のUU試験において， \overline{CU} 試験と同様，いずれの有効応力経路も $q = 3p'$ に沿って q および p' が増加し，応力比 R が最大となる軸差応力 q_{Rmax} を境に有効応力経路は $q = 3p'$ の直線から下方に離れ始めることを確認した。
- \overline{CU} 試験(圧密圧力 50 kPa)から得られる q_{Rmax} とUU試験から得られる q_{Rmax} を比較すると，50 kPa の圧密によって，スラグ4のみでは q_{Rmax} が22%程度減少し，またココヤシ繊維混合割合 10 vol.%では 12%程度減少した。圧密による体積変化に着目するとスラグ4のみでは $1.0 \times 10^{-5}\%$ ，ココヤシ繊維混合割合 10 vol.%では 0.2%程度の体積変化であったことから，圧密による影響はほとんどないものと考えていたが， q_{Rmax} の低下を捉えることで圧密による粘着成分の低下を評価できる可能性があることが明らかになった。
- UU試験から得られる q_{Rmax} はUC試験から得られる q_u よりも20%程度低い値を示した。この要因としてはUC試験ではUU試験よりも軸ひずみ速度が100倍も速い条件であったことから q_u が高くなった可能性があり，木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のひずみ速度依存性について検討することで q_u と q_{Rmax} の関係を明確にできると考えられる。

4.7 第4章まとめ

本章では木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性に及ぼす木屑形状・木屑混合割合・養生期間・固化強度・拘束圧依存性・排水条件依存性の影響について評価・検討した。以下に、得られた知見を示す。

木屑形状と木屑混合割合の影響

- 木屑形状によらず，スラグ 4(2018)に木屑を混合することで変形係数は低下する。そして，細長比が大きいほど，変形係数の低下率も大きい。
- 形状(繊維状・粒状)によらず，スラグ 4(2018)への木屑混合割合が 10 vol.%までは木屑混合割合の増加とともに，一軸圧縮強さ q_u および最大せん断強さ q_{max} は増加し，それ以上混合すると木屑混合割合の増加に伴って q_u および q_{max} は低下する。つまり，せん断強さが最大となる最適混合割合(10 vol.%)が存在する。
- 木屑形状によらず，木屑を混合することで破壊ひずみは増加する。また，木屑混合による残留強度の増加は見られないが，ピーク強度後の応力低下が緩やかになる。特に繊維状の木屑を混合した場合に破壊ひずみの増加およびピーク強度後の応力低下が緩やかとなり靱性が卓越した材料となることを明らかにした。

養生期間の影響(0~1008日)

- 試験方法(一軸圧縮試験および拘束圧 50 kPa の飽和圧密排水三軸圧縮試験)によらず，養生による強度および剛性に与える影響は変わらない。
- 木屑形状によらず，木屑混合割合が 10 vol.%以下では，84日養生までせん断強度およびせん断剛性は増加し，その後は1008日養生までほとんど変化しないかわずかに増加する。
- 木屑形状(繊維状・粒状)によらず，木屑混合割合が 33 vol.%以上では，養生によるせん断強度およびせん断剛性の増加はほとんど見られない。
- 養生期間ごとで木屑混合割合が異なると強度および剛性の発現傾向が異なる。例えば，スラグ 4のみと繊維状木屑混合割合 5 vol.%の7日養生後の最大せん断強さは木屑混合割合 5 vol.%のほうが高いのに対し，84日養生ではほとんど変わらない最大せん断強さを示す。また，これらの条件の剛性は7日養生でも84日養生でもスラグのみのほうが顕著に大きい。そしてこの傾向は一軸圧縮試験から得られる傾向と同じである。

母材強度の影響

- いわき砂のような母材の一軸圧縮強さが著しく低い材料に繊維状の木屑を混合した場合，木屑の混合割合(33 vol.%以下)によらず，一軸圧縮強さおよび破壊ひずみは大きくなり，さらに，ピーク強度後の応力低下も緩やかになる。一方で，ヒノキを混合した場合には一軸圧縮強さの増加も見られず，またピーク強度後の応力低下傾向もいわき砂と変わらない。つまり，一軸圧縮強さの増加およびピーク強度後のひずみ軟化

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討と せん断強度・せん断剛性推定手法の提案

傾向にはココヤシ繊維の繊維補強効果が寄与しているものと推察され、スラグと混合した材料においてもココヤシ繊維の繊維補強効果が発揮されていたものと考えられる。

- ▶ 木屑混合材料の力学特性は、混合する木屑の割合および形状だけでなく、木屑と混合する母材の強度によっても大きく異なり、 $q_u=500\text{kPa}$ までは木屑を混合することで母材よりも大きなせん断強度を発揮するが、 $q_u=750\text{kPa}$ 以上となると木屑を 5 vol.%程度混合しただけで母材よりもせん断強度が小さくなる。ただし、その場合でも、母材の最大せん断強さの大きな材料と混合したほうが最大せん断強さは大きくなる。また、固化する材料と固化しない材料とで木屑混合割合の増加に伴う正規化した残留強度の変化傾向は異なるが、母材の最大せん断強さの影響はあまり明確ではない。
- ▶ 繊維状の木屑の混合割合が増加すると破壊ひずみは増加し、剛性は低下するが、この変化傾向には母材の最大せん断強さの影響はない。

拘束圧依存性

- ▶ ココヤシ繊維の混合割合によらず、 $\phi_{d0\max}$ には拘束圧依存性があることを確認した。
- ▶ ココヤシ繊維の混合によって $\phi_{d0\text{res}}$ の拘束圧依存性が小さくなるものの、 $\phi_{d0\max}$ はココヤシ繊維を混合しても拘束圧依存性はほとんど変化しないことが明らかになった。
- ▶ ココヤシ繊維を混合した場合には c_d の拘束圧依存性が小さくなることが明らかになった。

排水条件依存性

- ▶ 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料は密に締固めた粒状材料としても振舞うため、非排水条件のせん断強度は排水条件のせん断強度よりも大きく算出され、本材料においては $q_u = c_u = 2\tau_{\max}$ の関係が成り立つことが明らかとなった。

せん断強度・せん断剛性推定手法の提案

- ▶ 木屑混合割合と養生期間をパラメータに取ったせん断強度・せん断剛性の推定手法について提案した。
- ▶ 推定工程にせん断強度-養生期間関係を用いた場合の推定剛性は、実測剛性の傾向と一致し、推定方法として適切であるが、剛性-養生期間関係式を用いた場合の推定強度は、実測強度の傾向と一致せず、推定方法として不適切である可能性があることを示した。
- ▶ 導出した関係式において、木屑の影響因子と推察される係数を特定した。

【引用・参考文献】

- 1) 公益社団法人地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説[第一回改訂版]土の一軸圧縮試験 JIS A 1216:2020, pp. 581-593, 2020.
- 2) 深谷渉, 榊原隆: 下水道管路施設埋め戻し部へのセメント改良土の適用に関する検討報告書 第4章, 国総研資料 第531号, 2009. <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0531pdf/ks0531.pdf> (参照日 2021.11.05)
- 3) 一般社団法人セメント協会: セメント系固化材の拡がる用途と役割, 2018. https://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jj3c_51.pdf (参照日 2021.11.05)
- 4) 菊池喜昭, 中島研司, 木村淳治, 水谷崇亮: 港湾工事に用いる高炉水砕スラグの硬化特性, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 45, No. 2, pp. 105-134, 2006. <https://www.pari.go.jp/search-pdf/vol045-no02-05.pdf> (参照日 2021.11.24)
- 5) Anwar, S. Khattak・Braja, M. Das: Effect of high excess pore pressure on strength parameters of organic soil, Soil and Foundations, Vol. 25, No. 1, pp. 99-104, 1985.
- 6) 荻野俊寛・及川洋・対馬雅己・三田地利之: せん断応力載荷型試験による高有機質土の強度特性, 土木学会論文集, No. 715, III-60, pp. 277-285, 2002.
- 7) Hanrahan, E. T.: An investigation of some physical properties of peat, Geotechnique, Vol. 1, No. 3, pp. 108-123, 1954.
- 8) 山崎浩之・善功企・河村健輔: 溶液型薬液注入工法の液状化対策への適用, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 41, No. 2, pp. 119-151, 2002.
- 9) 吉川高広: 空気～水～土骨格連成有限変形解析手法の開発と粘性土地盤上の不飽和盛土の地震時安定問題への適用, 名古屋大学博士論文 第3章, pp. 39-47, 2015. ndljp/pid/9479433

第4章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の検討と
せん断強度・せん断剛性推定手法の提案

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の

せん断抵抗発現機構の検討

第4章では木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性について、木屑形状や木屑混合割合、養生期間等々の様々なパラメータを変化させて評価・検討した。その結果、排水せん断強さが500 kPa程度の粒状鉄鋼スラグに木屑を10 vol.%程度混合すると、木屑の形状によらず最も大きなせん断強度を発現し、破壊ひずみが大きくなることが分かった。特に繊維状の木屑を5~20 vol.%混合した場合にスラグのみよりも大きなせん断強さ・破壊ひずみを発揮するだけでなく、ピーク強度後の応力低下が緩やかになり、靱性の卓越した材料になることが分かった。また、4.4では全く固化しないいわき珪砂に繊維状の木屑を混合した場合にもいわき珪砂のみよりも大きな一軸圧縮強さを発揮し、靱性を備えた材料となることが明らかとなった。これは繊維状木屑の“引抜き抵抗”と“粒子拘束による団粒化”による補強効果(図5-1)が繊維状木屑混合材料(繊維状木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料および繊維状木屑といわき珪砂を混合した材料)の強度増加および靱性発現に大きな影響を及ぼした結果であると考えられる。

地盤材料における繊維補強効果に関してはこれまでも多くの知見が得られている。例えば、山中ら¹⁾は粘性土にポリプロピレン製の繊維ネットを混入した材料において、繊維混入割合(質量比0.5, 0.8, 1.1%)の増加とともに残留強度(一面せん断試験結果)が増加することや一軸圧縮強さが増加することを報告している。また、盛ら²⁾は川砂にナイロン製釣り糸を混入した材料において、繊維混入率(質量比0.0, 0.1, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.9%)に対するせん断強さのピーク(混入率0.6%)が存在することを明らかにしている。野添ら³⁾は珪砂にポリプロピレン製の繊維を混入した材料において、繊維混入率(質量比0.0~1.2%)に対するせん断強さのピークが存在すること、混入率の増加に伴い変形係数が低下することを報告している。いずれの研究においても混入率と繊維の補強効果について示されているものの、母材が固化する材料ではなく母材自体の強度が小さいといった点で本研究材料(スラグ単体の $q_u=500$ kPa, 木屑混合割合5 vol.%以上)と異なる。

次に、固化処理土に繊維を混合した地盤材料に関する既往の研究として、例えば、小竹ら⁴⁾は粘性土とセメントを混合した固化材料にビニロン製の繊維を混合した材料において、繊維混入率(体積比0.5, 1.0, 1.5%)の増加に伴い、せん断強さは大きく変わらないものの、残留強度が大きくなることを報告している。また、堤ら⁵⁾は製鋼スラグと浚渫土を混合したカルシア改質土にポリエステル繊維(直径14.8 μm)を混合した固化材料において、繊維混入率(体積比0.0~1.0%)が0.2%まではせん断強さが増加し、それ以上の混入率では変化しないことを明らかにしている。さらに残留強度は、混入率が高いほど高くなることを報告している。これらはいずれも固化する材料であるが、セメントや粘土を混合していることから供試体全体が一体構造であるため、粒状の製鋼スラグが固化した本研究材料とは骨格構造が大きく異なるものと考えられる。

そこで本章では繊維補強効果について、繊維配列を恣意的に調整した材料を用いて、繊

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討

繊維の引抜き抵抗がせん断抵抗(靱性挙動)に及ぼす影響と、繊維長さの違いがせん断抵抗に及ぼす影響を実験的に検討した。

また、本章の最後には第4章で得られた様々な要素力学試験(一軸圧縮(UC)試験・三軸圧縮(UC・CD・UU)試験)の結果を用いて、一軸圧縮強さの地盤工学的な解釈を行った。

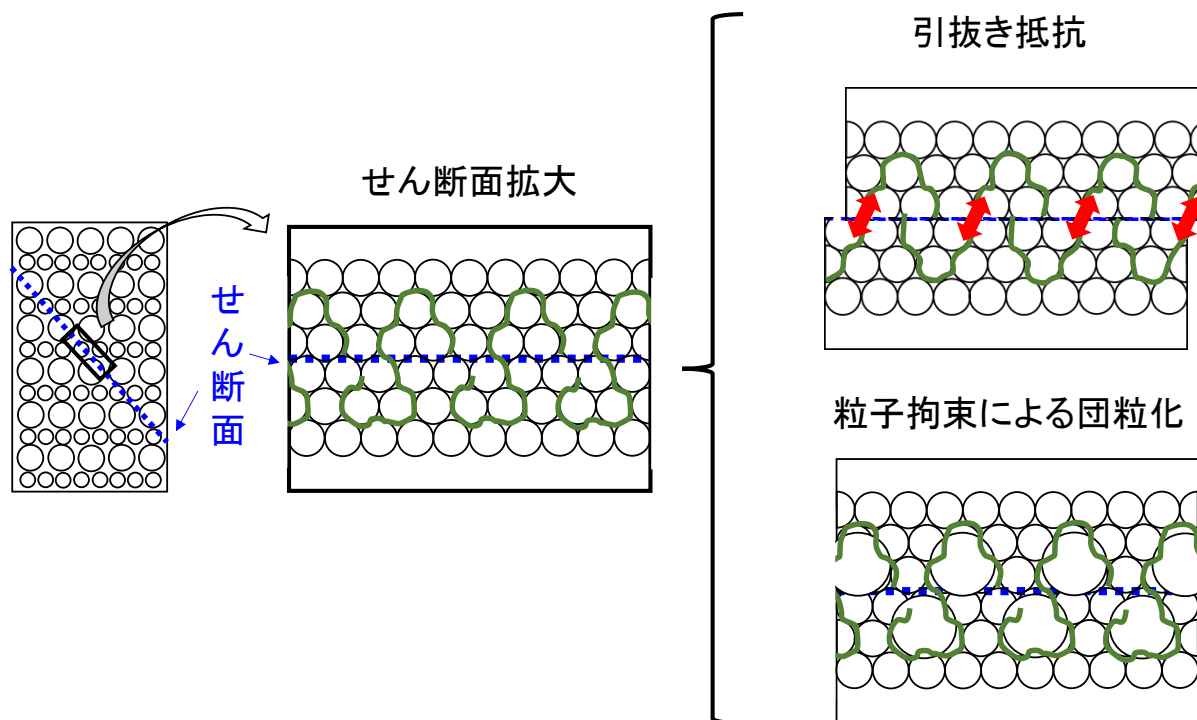


図 5-1 繊維状木屑の引抜き抵抗と粒子拘束による団粒化のイメージ図

5.1 繊維状木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の繊維補強効果に関する実験的検討①

繊維状木屑の引抜き抵抗が混合材料の力学特性に及ぼす影響について検討する場合、供試体内での繊維状木屑を任意の方向に配列する必要がある。しかし、木屑繊維自体が真直ぐな形状でないために任意の方向に配置することが困難である。そこで、本検討では木屑繊維の代替材として化学繊維であるナイロン繊維を用いることとした。しかし、事前実験の結果、化学繊維を用いてもスラグ固化材を突き固めて作製する供試体内では化学繊維がたわんでしまい、引抜き抵抗を評価することが困難であることが分かった(図 5.1-1)。その為、固化材(母材)にスラグではなく、3.1 に示した豊浦砂と半水石膏と高炉スラグ微粉末を混合した材料(以下、石膏複合固化材と称す)を用いることとし、流動性のある固化材を使用することで化学繊維がたわまないような恣意的な条件で検討を行った。つまり、元の繊維状木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料とは全く異なる試料を用いて検討を行った。



図 5.1-1 締めによる供試体中の化学繊維のたわみ

5.1.1 実験概要と予備試験

表 5.1-1 に石膏複合固化材の各試料の配合割合(質量)を示す。4.1, 4.2, 4.4 の試験結果から母材単体(スラグ 4(2018)のみやいわき砂のみ)の7日養生の一軸圧縮強さ q_u が 500 kPa 以下の時、繊維状木屑を 5 ~ 20 vol.%混合した場合に強度増加が見られたため、石膏複合固化材の7日養生の一軸圧縮強さ q_u も 500 kPa 以下となるように調節した。表 5.1-1 に示すように 80°C 炉乾燥で1時間養生した供試体の q_u が 500 kPa もしくは 200 kPa となるように配合割合を調整して一軸圧縮(UC)試験を行った。表 5.1-1 の No.1 は目標 q_u が 500 kPa となるような配合条件で、質量比で豊浦砂 : (高炉スラグ微粉末+半水石膏) = 1 : 1, 半水石膏 : 高炉スラグ微粉末 = 30 : 70, 含水比 22.8%となるようにした。また、表 5.1-1 の No.2 は目標 q_u が 200 kPa となるような配合条件で、質量比で豊浦砂 : (高炉スラグ微粉末+半水石膏) =

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討

1 : 1, 半水石膏 : 高炉スラグ微粉末 = 5 : 95, 含水比 21.5%となるようにした. なお, 半水石膏と高炉スラグ微粉末の自然含水比は 0%, 豊浦砂の自然含水比は 4.7%であるため, 表 4.5-1 中の豊浦砂 200 g には水 9 g が含まれている. また, 養生を 1 時間とした理由は UC 試験に要する時間が供試体 1 本当たり 1 時間程度であったためである. ここで, 一軸圧縮強さのみを考慮した場合には石膏と高炉スラグ微粉末, および水を混合することでも満足するが, 本検討では高炉スラグ微粉末の量が限られていたため豊浦砂を混合し, 供試体体積 (約 200 cm³) に占める高炉スラグ微粉末量を削減した. 例えば, 石膏と高炉スラグ微粉末を質量比 10 対 90 で混合し, 含水比 34% とした供試体を 80°C 炉乾燥で 1 時間養生した場合でも $q_u \approx 500$ kPa となる.

供試体作製から UC 試験までの手順で行っており, 第 3 章 3 節で述べた供試体作製方法と異なることに留意されたい.

1. 各試料およびイオン交換水をボール内に投入後, 十分に攪拌する.
2. 直径 50 mm, 高さ 150 mm の円筒プラスチックモールド(HEIKO PET 円筒ケース/株式会社シモジマ)にスプーンで試料を投入後, 充填する. 充填方法は, 試験条件によって木槌によるタッピングとコンクリートバイブレータを使用する 2 種類を使い分けている. 木槌によるタッピングはモールド側面の下から上に向かって 50 回叩く. これをモールド側面の四方向で行う.

また, コンクリートバイブレータによる充填では, モールド側面をコンクリートバイブレータに押し当てて, モールド側面の下から上に向かって 1 分かけて空気を追い出す. これをモールド側面の四方向で行う. なお, 後述する結果のようにこれらの充填方法の違いが一軸圧縮特性に与える影響はほとんどないと思われる.

3. モールド+試料の質量を計測する.
4. 80°C 炉乾燥機に入れて, 一時間養生する.
5. 一時間養生後, 取り出したモールドの質量を計測する.
6. はんだごてを用いてプラスチックモールド側面を焼き切り, 脱型する.
7. 供試体の直径と高さを計測し, UC 試験(軸ひずみ速度 1.0 %/min)を行う.

表 5.1-1 石膏複合固化材の実験ケースと配合割合

Case (目標 q_u (kPa))	半水石膏	高炉スラグ 微粉末	豊浦砂	イオン 交換水
No.1 (500)	30	170	200	80
No.2 (200)	10	190	200	75

図 5.1-2 に石膏複合固化材 No.1 の UC 試験より得られる応力ひずみ関係を, 図 5.1-3 に石膏複合固化材 No.2 の UC 試験より得られる応力ひずみ関係を示す. なお, 図 5.1-2 には比較のためにスラグ 4(2018)のみの 7 日養生の応力ひずみ関係も赤線で示す. 図 5.1-2 より, 石膏複合固化材 No.1 の応力ひずみ関係はスラグ 4(2018)のみの応力ひずみ関係と同様の傾向

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討

を示すことが分かる。そして図 5.1-4 に示すUC試験後の供試体外観の様子から分かるように、スラグ 4(2018)のみではUC試験によって、せん断破壊しているのに対し、石膏複合固化材 No.1 では割裂破壊していることが分かる。これは石膏複合固化材 No.1 では石膏が多く、供試体全体が一体化していたためであると考えられる。ここで、本検討の目的は繊維による補強効果を確認することであるため、破壊モードが異なるのは望ましくない。ここで石膏複合固化材 No.2 の条件では、図 5.1-3 に示すように一軸圧縮強さおよび変形係数のいずれもスラグ 4(2018)のみよりも小さい。しかし、図 5.1-4 に次召すように石膏複合固化材 No.2 の破壊モードはせん断破壊となっており、スラグ 4(2018)のみと同様の破壊モードであることが分かる。本検討では繊維を混合することによるUC特性への影響を評価することが目的であり、スラグ 4(2018)と破壊モードの異なる材料では適切な評価・検討が困難であると考えられる。そこで本検討では石膏複合固化材 No.2 を基本材料として検討することとした。なお、母材の強度が低いことは第4章3節のいわき硅砂を用いた試験結果からとりわけ問題ないと判断した。

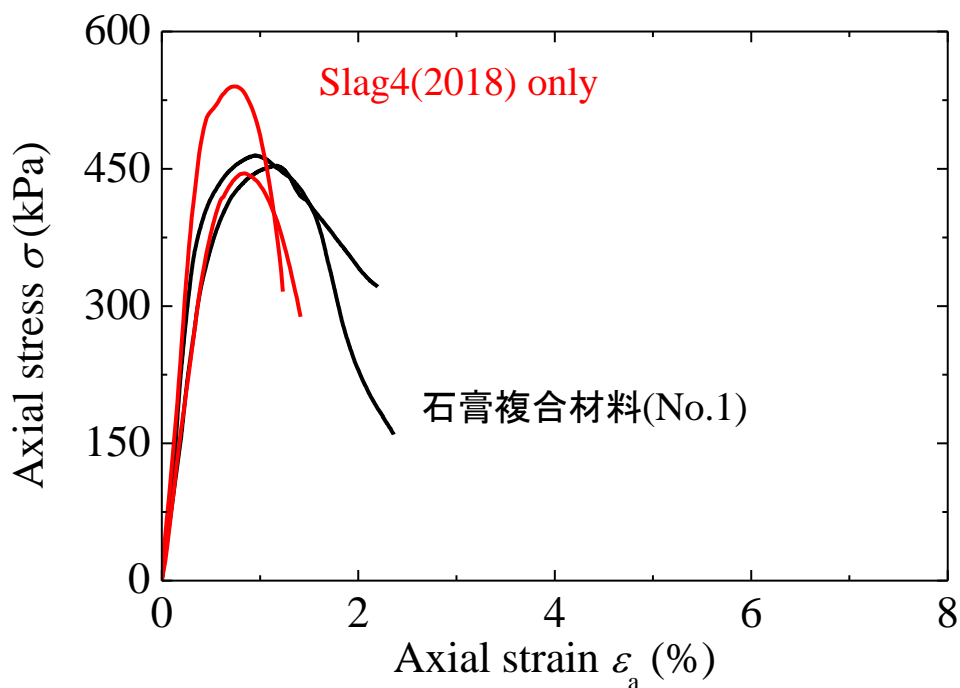


図 5.1-2 石膏複合固化材 No.1 とスラグ 4(2018)の応力ひずみ関係

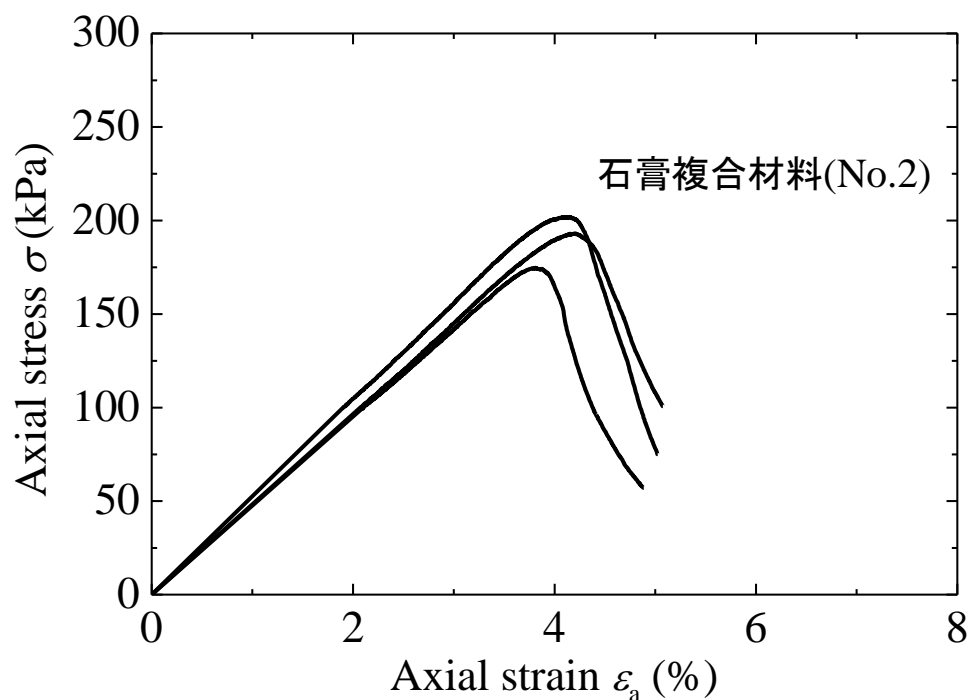
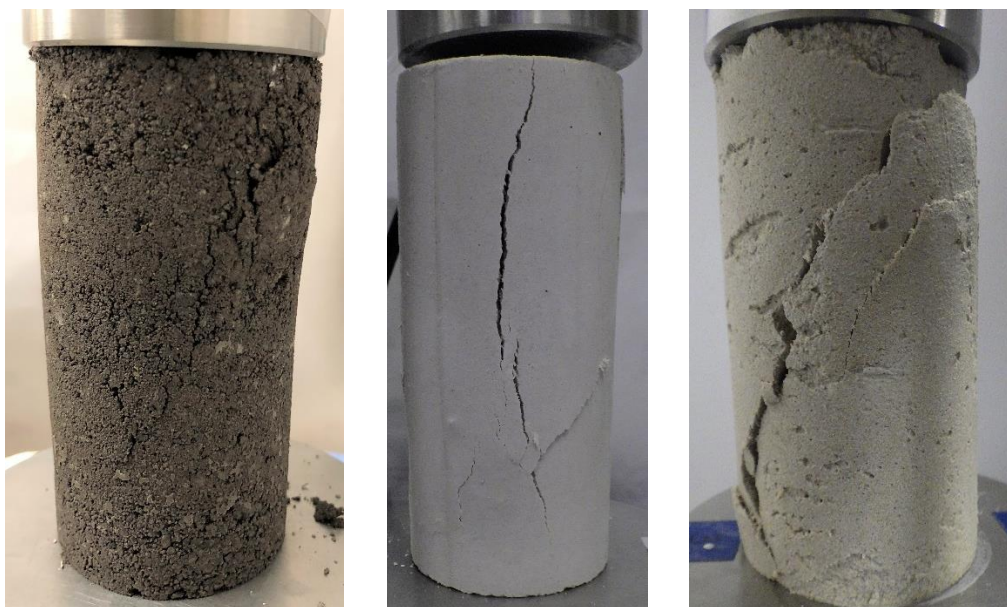


図 5.1-3 石膏複合固化材 No.2 の応力ひずみ関係



(a) スラグ 4(2018)_7日養生 (b) 石膏複合固化材 No.1 (c) 石膏複合固化材 No.2

図 5.1-4 各種配合条件の一軸圧縮試験後の供試体破壊モードの違い

次に、石膏複合固化材 No.2 の供試体試料充填方法の検討を行った。先にも述べたように本検討では2種類の充填方法がUC特性に及ぼす影響について検討した。石膏複合固化材は砂を含む流動性に富んだ非常に軟らかい半粒状材料であり、一般的な粒状地盤材料(粘

性土)としての材質とセメントコンクリートのような材質を併せ持った材料である。つまり、一般的な地盤材料の供試体作製方法としてのタッピング充填法では空気の押し出しが不十分となる可能性がある。そこで、これら2種類の充填方法の違いがUC特性に与える影響について、石膏複合固化材 No.2 を用いて検討した。

図 5.1-5 に木槌によるタッピングによって充填した供試体とコンクリートバイブレータによって充填した供試体の応力ひずみ関係を示す。図 5.1-5 より、木槌によるタッピング充填法とコンクリートバイブレータによる充填法ではピーク強度までのUC特性にほとんど差異は見られない。本検討では比重の軽い木屑や化学繊維を用いるため、バイブレータによる充填では木屑や化学繊維が浮いてきてしまうという問題も発生したため、試験条件によって充填方法を使い分けて試験を行った。

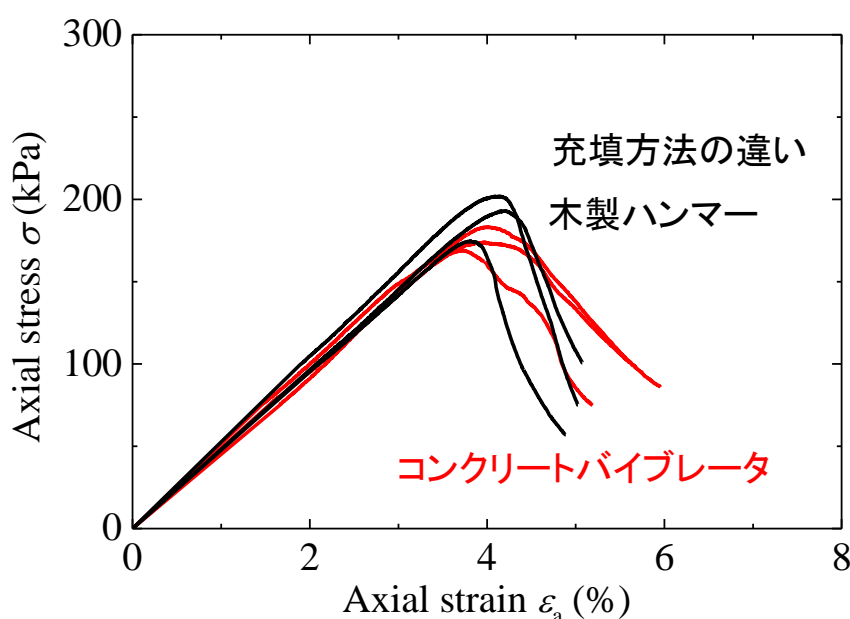


図 5.1-5 試料充填方法の違いが応力ひずみ関係に与える影響検討結果

次に石膏複合固化材を本検討に用いることの是非について検討した。ここでの是非とは石膏複合固化材にココヤシ繊維を混合した場合にもスラグ 4(2018)やいわき硅砂にココヤシ繊維を混合した場合と同様に、強度増加および破壊ひずみの増加が見られるのかどうかということである。この検討を行う上での注意点として、石膏複合固化材を用いてUC試験を実施すると、UC試験時の含水比の違いによって応力ひずみ関係が敏感に変化する。

図 5.1-6 に石膏複合固化材 No.2 の含水比を変化させて行ったUC試験の結果を示す。図 5.1-6 より、石膏複合固化材の供試体作製時の含水比 $w = 18.9 \sim 21.5\%$ を変化させると、含水比が小さいほど、 q_u および変形係数は大きくなることから分かる。この結果から、石膏複合固化材とココヤシ繊維を混合した場合、ココヤシ繊維が石膏複合固化材から水を吸うことで石膏複合固化材の含水比が変わってしまう可能性があることが分かる。これによって生じる問題として、木屑繊維の補強による強度増加と母材(石膏複合固化材)の含水比低下による強度増加を併せて評価してしまう可能性があるということである。つまり、ココヤ

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討
 シ繊維の吸水量を把握し，吸水量を考慮して配合する必要がある．そこで以降では簡易的にココヤシ繊維の吸水実験を行った結果を示す．

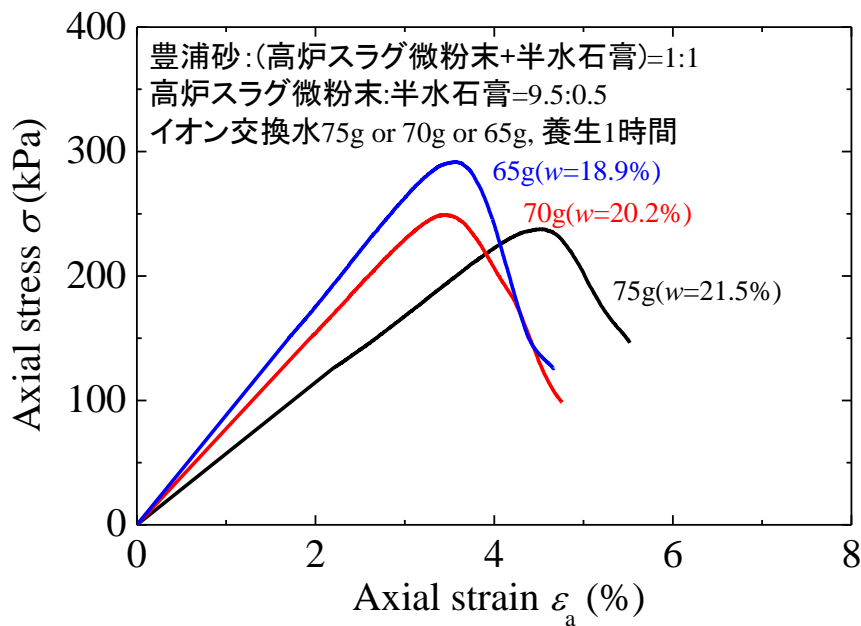


図 5.1-6 石膏複合固化材 No.2 の含水比の違いによる応力ひずみ関係の違い

表 5.1-2 にココヤシ繊維の吸水実験の結果を示す．吸水実験は，小皿に入れた表乾状態のココヤシ繊維(50°C風乾を1週間程度行い含水比0%としている)が十分に浸るようにイオン交換水を加え，成形真空デシケーターで1時間吸水させることで行った．その後，成形真空デシケーターから取り出した小皿からココヤシ繊維を一本ずつ取り出し，繊維表面に付着している水分をペーパータオルで拭き取り表乾状態にした．さらに小皿の水をふき取り，ココヤシ繊維を小皿に戻して質量を計測した．このようにして，表乾状態(含水比0%)のココヤシ繊維の単位質量あたりの吸水量を算出した．表 5.1-2 に示すようにココヤシ繊維の吸水量は1.765 g/gであり，この吸水量を供試体作製時に加えるイオン交換水量に加算した．

表 5.1-3 に石膏複合固化材に内割体積比でココヤシ繊維を10 vol.%を混合した条件の各試料の配合割合を示す．以下に表 5.1-3 の各試料質量の算出方法を示す．

1. 石膏複合固化材 No.2 の平均乾燥密度 ρ_d を図 5.1-3 に示した石膏複合固化材 No.2 のUC試験後の供試体の炉乾燥質量 m をUC試験前の体積 V で除すことで算出する．なお， m ， V ともに3供試体の平均値を使用する．

$$\begin{aligned}\rho_d &= m / V \\ &= 392.73 / 214.63 = 1.83 \text{ (Mg/m}^3\text{)}\end{aligned}$$

2. ココヤシ繊維が供試体全体の体積 V のうちの10 vol.%となるように，質量 $m_{\text{ココヤシ繊維}}$ をココヤシ繊維の粒子密度 $\rho_{d_ココヤシ繊維} = 0.53 \text{ Mg/m}^3$ と石膏複合固化材の $\rho_d = 1.83 \text{ Mg/m}^3$

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討から算出する。なお、本来は石膏複合固化材においても粒子密度を以下の計算で用いるべきであるが、石膏複合固化材の粒子密度は推定が困難であったため、ここでは乾燥密度 ρ_d を用いている。

$$\begin{aligned} m_{\text{ココヤシ繊維}} &= m \times \{(\rho_d_{\text{ココヤシ繊維}} \times 0.1) / (\rho_d \times 0.9 + \rho_d_{\text{ココヤシ繊維}} \times 0.1)\} \\ &= 390.73 \times \{(0.53 \times 0.1) / (1.83 \times 0.9 + 0.53 \times 0.1)\} \\ &= \underline{12.24} \text{ (g)} \end{aligned}$$

3. 石膏複合固化材が供試体全体の体積 V のうちの 90 vol.%となるような石膏複合固化材の質量 $m_{\text{石膏複合固化材}}$ は $m - m_{\text{ココヤシ繊維}}$ より算出される。

$$\begin{aligned} m_{\text{石膏複合固化材}} &= m - m_{\text{ココヤシ繊維}} \\ &= 392.73 - 12.24 = \underline{380.49} \text{ (g)} \end{aligned}$$

4. 石膏複合固化材の質量 $m_{\text{石膏複合固化材}}$ から半水石膏、高炉スラグ微粉末、豊浦砂の各試料質量 $m_{\text{半水石膏}}$ 、 $m_{\text{高炉スラグ微粉末}}$ 、 $m_{\text{豊浦砂}}$ を算出する。

$$\begin{aligned} m_{\text{半水石膏}} &= m_{\text{石膏複合固化材}} \times (10 / m) \\ &= 380.49 \times (10 / 380.49) = \underline{9.69} \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{高炉スラグ微粉末}} &= m_{\text{石膏複合固化材}} \times (190 / m) \\ &= 380.49 \times (190 / 380.49) = \underline{184.08} \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{豊浦砂}} &= m_{\text{石膏複合固化材}} \times (191 / m) \\ &= 380.49 \times (191 / 380.49) = 185.05 \text{ g} \end{aligned}$$

※豊浦砂の自然含水比(4.7%)を考慮した $m_{\text{豊浦砂}} = 185.05 \times 104.7 = \underline{193.75} \text{ g}$

5. イオン交換水の質量 $m_{\text{イオン交換水}}$ を算出する。ココヤシ繊維を 10 vol.%混合した材料では石膏複合固化材の質量は 380.49 g であるため、石膏複合固化材 No.2 で加えたイオン交換水量に 380.49 / 391 を乗ずることで算出される。

$$\begin{aligned} m_{\text{イオン交換水}} &= 380.49 \times (380.49 / 391) \\ &= 81.74 \text{ g} \end{aligned}$$

また、ココヤシ繊維の自然含水比(12.0%)と豊浦砂の自然含水比(4.7%)を考慮して加えるイオン交換水の質量を算出する。

$$\begin{aligned} m_{\text{イオン交換水}} &= 81.74 - 8.50 \\ &= 73.24 \text{ g} \end{aligned}$$

さらに、今回加えるココヤシ繊維の乾燥質量は 12.24 g であるから、表 4.5-2 に示したココヤシ繊維の吸水量 1.765 g/g を考慮すると、21.60 g(=12.24 × 1.765)を加算して、加えるイオン交換水の質量を算出する。

$$\begin{aligned} m_{\text{イオン交換水}} &= 73.24 + 21.60 \\ &= \underline{94.84} \text{ g} \end{aligned}$$

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討
表 5.1-2 ココヤシ繊維の吸水実験結果

No.	自然状態 ココヤシ繊維 質量 (g)	容器質量 (g)	容器とココヤシ繊維 の質量 (g)	容器と吸水したココヤシ 繊維の質量 (g)	ココヤシ繊維の 単位質量あたりの 吸水量 (g/g)	ココヤシ繊維の 単位質量あたりの 平均吸水量 (g/g)	分散	標準偏差
1	0.300	13.889	14.189	14.709	1.733	1.765	0.001	0.163
2		14.116	14.416	14.879	1.543		0.049	
3		17.020	17.320	17.825	1.683		0.007	
4		14.226	14.526	15.123	1.990		0.051	
5		13.822	14.122	14.744	2.073		0.095	
6		17.021	17.321	17.820	1.663		0.010	
7		13.888	14.188	14.758	1.900		0.018	
8		14.115	14.415	14.899	1.613		0.023	
9		14.226	14.526	15.063	1.790		0.001	
10		13.822	14.122	14.620	1.660		0.011	

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討

表 5.1-3 ココヤシ繊維混合割合 10 vol.%配合の各試料の質量(単位: g)

Case	石膏複合固化材 ： ココヤシ繊維 (体積比)	半水石膏 (g)	高炉スラグ 微粉末 (g)	豊浦砂 (g)	ココヤシ繊維 (g)	イオン交換水 (g)
ココヤシ繊維10 vol.%	90 : 10	9.69	184.08	193.75	12.24	94.84

予備実験の最後に、石膏複合固化材とココヤシ繊維を混合した材料の一軸圧縮特性と鉄鋼スラグにココヤシ繊維を混合した材料の一軸圧縮特性を比較することで石膏複合固化材での繊維補強効果を把握し、本検討材料としての妥当性を確認した。

図 5.1-7 に石膏複合固化材 No.2-ココヤシ繊維 10 vol.%混合材料のUC試験より得られる応力ひずみ関係を示す。先にも述べたようにココヤシ繊維の粒子密度は 0.53 Mg/m^3 と石膏複合固化材よりも小さいことからコンクリートバイブレータによる充填法ではココヤシ繊維が材料上部に浮き上がってきってしまう。その為、木槌によるタッピングで充填した。なお、図中には比較のために石膏複合固化材 No.2 のみの応力ひずみ曲線も示している。また図中の数字は試験時の含水比を示している。図 5.1-7 より、石膏複合固化材 No.2 にココヤシ繊維を 10 vol.%混合した場合、一軸圧縮強さ q_u および破壊ひずみ ϵ_f は増加し、剛性はほとんど変化しない。また、ピーク強度後のひずみ軟化もココヤシ繊維を混合することで緩やかとなる。4.1 の図 4.1-1 に示したようにスラグ 4(2018)にココヤシ繊維を 10 vol.%混合した場合には、変形係数の低下が見られたが、石膏複合固化材 No.2 にココヤシ繊維を 10 vol.%混合した場合には変形係数の低下は確認できなかった。ここで化学繊維を混合した人工地盤材料に関する既往の研究(例えば、奥山ら⁶⁾や平野ら⁷⁾)では、いずれも相当に細い化学繊維を粘性土やセメント固化材と混合した材料を用いてUC試験を実施している。これらの実験においても化学繊維を混入することによる変形係数の低下は見られない。これらの実験と本研究の共通点として、繊維が母材に包まれて一体化しているということが挙げられる。つまり、本検討においても母材の石膏複合固化材 No.2 がココヤシ繊維を包むようにして供試体が一体化していたことで変形係数が低下しなかったものと考えられる。一方で、スラグ 4(2018)にココヤシ繊維を 10 vol.%混合した材料では、スラグ粒子は粒状体であるためココヤシ繊維を包むような構造とはなっていない。その構造の違いが変形係数の変化傾向の違いに現れたものと考えられる。また、図 5.1-8 に示すように、石膏複合固化材-ココヤシ繊維 10 vol.%混合供試体とスラグ 4(2018)-ココヤシ繊維 10 vol.%混合供試体のUC試験後の供試体外観をみると、いずれも似たような破壊モードとなっており、大きな違いは見られない。つまり本検討結果から、剛性については石膏固化材を用いた場合とスラグ固化材を用いた場合とで比較評価できないが、繊維の補強による強度増加および破壊ひずみについては評価できると考えられる。

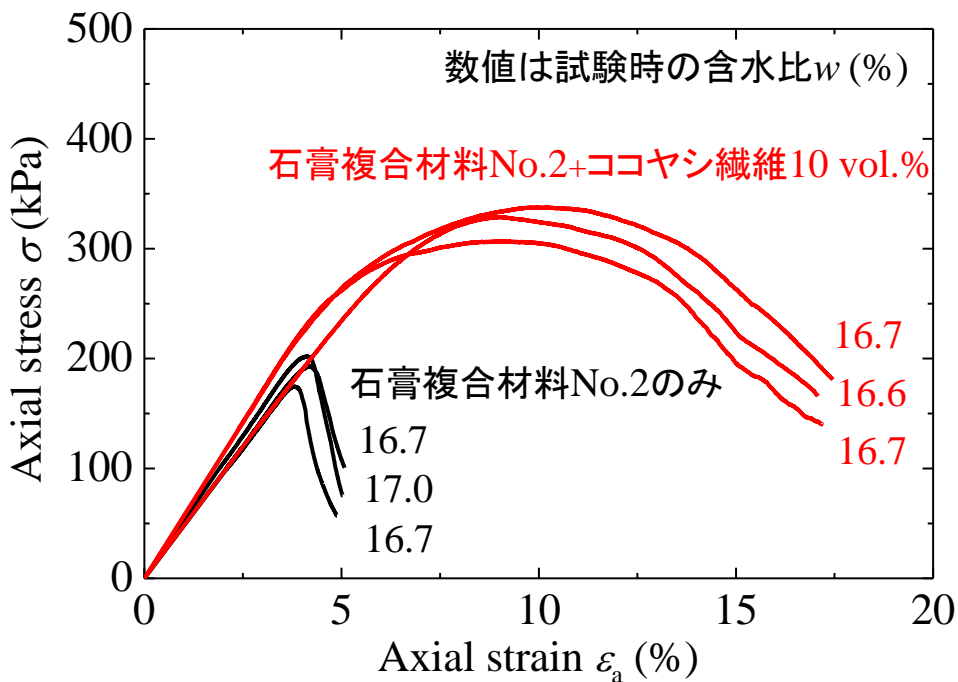


図 5.1-7 石膏複合固化材 No.2+ココヤシ繊維 10 vol.%混合材料の応力ひずみ関係(石膏複合固化材 No.2 のみの応力ひずみ曲線との比較)



(a)石膏複合固化材 No.2



(b)スラグ 4(2019)

+
ココヤシ繊維 10vol.%

+
ココヤシ繊維 10vol.%

図 5.1-8 一軸圧縮試験後の供試体外観(a)石膏複合固化材 No.2+ココヤシ繊維 10 vol.%混合供試体, (b)スラグ 4(2019)+ココヤシ繊維 10 vol.%混合供試体

5.1.2 石膏複合固化材と化学繊維を用いた繊維補強効果の発現機構

5.1.1で石膏複合固化材と繊維状の木屑であるココヤシ繊維を用いた場合にも繊維補強による強度増加と破壊ひずみの増加を確認することができた。そこで本項では石膏複合固化材 No.2 化学繊維を混合することで繊維補強効果についてUC試験から検討した。なお、以降では石膏複合固化材 No.2 を石膏複合固化材と称す。

3.1.9に示したように化学繊維には釣り糸用のナイロン繊維($\phi=0.7$ mm)を用いた。図 5.1-9 にナイロン繊維の配置イメージ(ランダム配置と鉛直配置)を、図 5.1-10 にナイロン繊維をランダム配置した一軸圧縮試験前の供試体外観と、ナイロン繊維を鉛直配置したプラスチックモールドおよび鉛直配置した供試体外観を示す。図 5.1-9(b)のように鉛直配置のナイロン繊維は下端をはんだで溶かし、逆 T 型になっているため、上部を持って引張っても問題ない構造となっている。また、図 5.1-10 (b)のように鉛直配置のナイロン繊維は石膏複合固化材を流すまでは比較的余裕のある長さを確保し、石膏複合固化材を流し込んでいる間にたわまないように上部を引張りながら供試体を作製する。そして養生・脱型後に供試体上部からはみ出したナイロン繊維をはんだで焼き切り、UC試験を行った。本検討でナイロン繊維を用いた理由は、(1)ナイロン繊維ははんだごてで先端を溶かすことができ、加工がしやすかったこと、(2)ポリエステル紐(図 5.1-1)は太いため、図 5.1-9(b)の実験を行うにあたって、繊維を多数配置することが物理的に困難であったこと、(3)麻紐を用いた場合、麻紐の吸水性が高く、麻紐周辺部の石膏複合固化材の含水比が著しく低下し、供試体内で含水比のばらつきが生じたことなどが挙げられる。

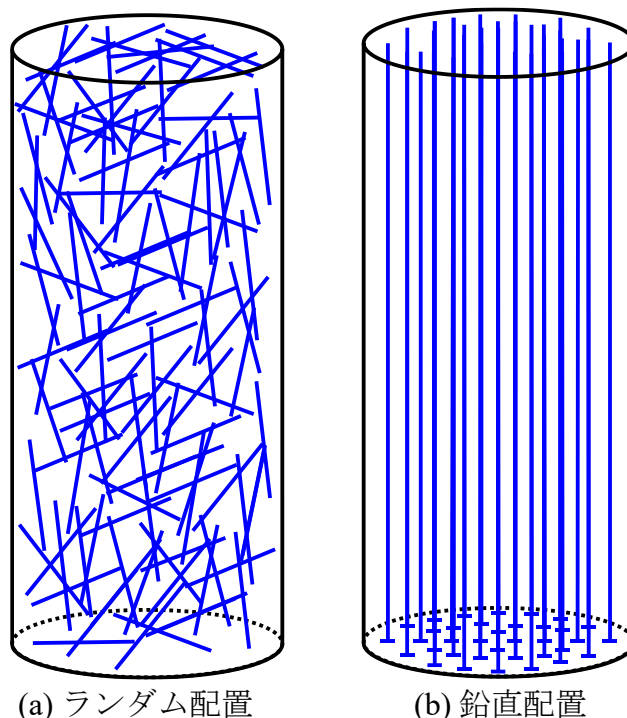


図 5.1-9 石膏複合固化材のナイロン繊維の配置イメージ



図 5.1-10 ナイロン繊維を配置した石膏複合固化材供試体とプラスチックモールド

表 5.1-4 にナイロン繊維を配置した石膏複合固化材の供試体作製条件を示す．表 5.1-4 に示すようにランダム配置と鉛直配置ではナイロン繊維の長さおよび本数が異なる．ここでランダム配置するナイロン繊維の長さは，ナイロン繊維を 60 本鉛直配置した供試体の平均高さを 5 等分した長さとした．つまり，ナイロン繊維を鉛直配置した供試体高さ=鉛直配置したナイロン繊維の 1 本長さであり，本実験では 60 本鉛直配置したナイロン繊維の長さ l が 116.5 mm であったことから，ランダム配置のナイロン繊維長さ l を 23.3 mm とした．また，鉛直配置するナイロン繊維の本数は任意に決定し，ランダム配置するナイロン繊維の本数は鉛直配置するナイロン繊維の本数から逆算的に求めた．例えば，鉛直配置するナイロン繊維の本数が 30 本であるとき，それに対応するランダム配置のナイロン繊維の本数は 30 本に 5 を乗じた 150 本となる．なお，205 本が鉛直配置の限界であった．

ここでナイロン繊維はココヤシ繊維と比較して表面の摩擦が相当に小さい．その為，ナイロン繊維の表面を紙やすり 1000 番で傷を付け摩擦力を上げたものと傷つけていない(そのまま)のものを用いて 6 本鉛直配置した供試体で *UC* 試験を行い，表面摩擦の影響が *UC* 特性に与える影響について比較検討した．図 5.1-11 に石膏複合固化材にナイロン繊維(傷あり・傷なし)を 6 本鉛直配置した供試体の *UC* 試験より得られる応力ひずみ関係を示す．図 5.1-11 より，多少のばらつきはあるものの傷つけて摩擦力を上げたものとそうでないもの

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討

とで有意な差は見られない。本検討ではやすりで傷をつける時間を省き、多様な条件で実験することを優先した。つまり、ナイロン繊維は傷つけずにそのまま用いた。

図 5.1-12 に石膏複合固化材にナイロン繊維をランダム配置した条件の応力ひずみ関係をまとめて示す。なお、図中には比較のために石膏複合固化材のみ(図 5.1-3)の結果をナイロン繊維 0 本として示す。図 5.1-12 より、ナイロン繊維を混合することで初期剛性はやや増加するもののピーク強度後の応力低下に大きな違いは見られず、応力ひずみ曲線全体の傾向としては大きな違いは見られない。初期剛性が大きくなった要因として、繊維混合割合が増加するほど乾燥による水の蒸発が促進され、供試体の含水比が低下したことによるものと考えられる。

図 5.1-13 に図 5.1-12 より得られた一軸圧縮強さ q_u とナイロン繊維の本数の関係を示す。図 5.1-13 より、ナイロン繊維の本数によらず、ナイロン繊維を混合することで石膏複合固化材のみより q_u はわずかに増加するが、150 本と 300 本では大きな違いは見られない。

図 5.1-14 に図 5.1-12 より得られた破壊ひずみ ϵ_f とナイロン繊維の本数の関係を示す。図 5.1-14 より、ナイロン繊維を 30 本または 150 本混合した石膏複合固化体の ϵ_f は増加するものの 300 本混合した場合には繊維を混合したい場合とほとんど変わらない。ナイロン繊維を 150 本混合した場合には試験を 1 本しか実施しておらず、また 30 本混合した場合には 2 本の供試体で実施しているが 1 本は石膏複合固化材のみの ϵ_f とほとんど変わらない。つまり、ばらつきの可能性もあり、ナイロン繊維をランダムに配置した場合、配置するナイロン繊維の本数が増加しても破壊ひずみはほとんど変化しない可能性がある。

以上、図 5.1-12~図 5.1-14 より、石膏複合固化材にナイロン繊維($l = 23.3 \text{ mm}$)をランダム配置した場合、わずかに強度増加したが、繊維本数が増えても大きな強度増加や破壊ひずみの増加は見られないことが分かる。また、石膏複合固化材にココヤシ繊維を混合した場合に見られたような強度増加および破壊ひずみの増加(図 4.5-8)は確認できなかった。

表 5.1-4 ナイロン繊維を配置した石膏複合固化材の供試体作製条件

ナイロン繊維の配置	石膏複合固化材			イオン交換水 (g)	ナイロン繊維長さ (mm)	ナイロン繊維本数 (本)
	半水石膏 (g)	高炉スラグ微粉末 (g)	豊浦砂 (g)			
ランダム	10	190	200	75	23.3	30, 150, 300
鉛直					116.5	6, 30, 60

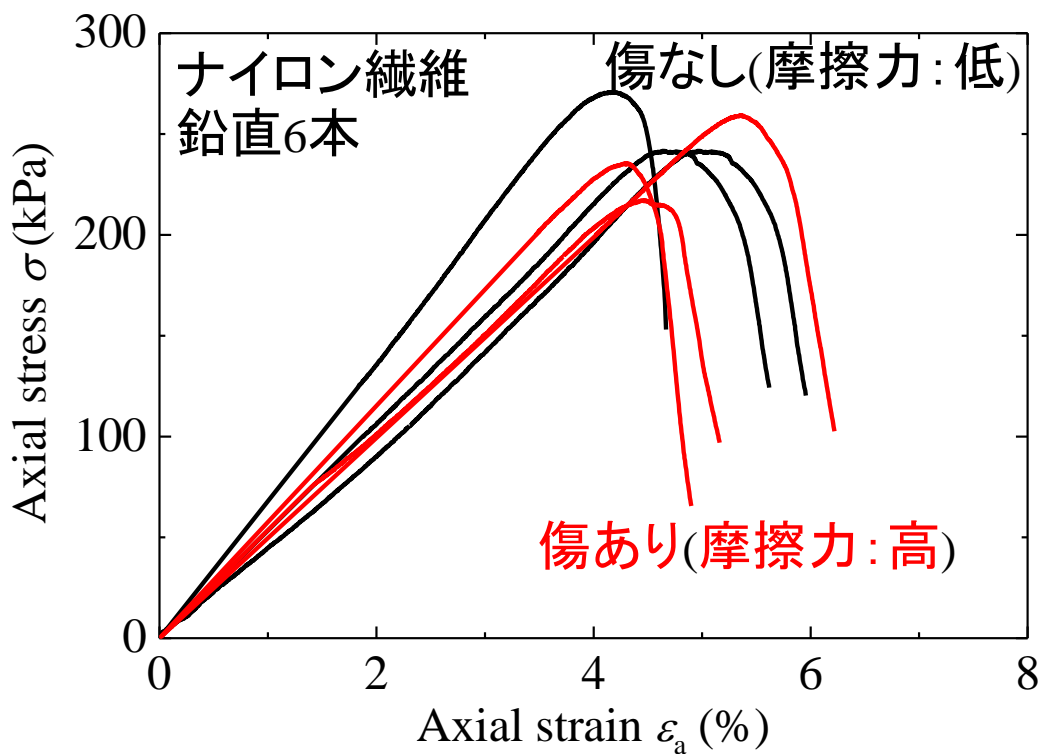


図 5.1-11 ナイロン繊維の摩擦力の違いによる一軸圧縮特性の違い(鉛直配置 6 本)

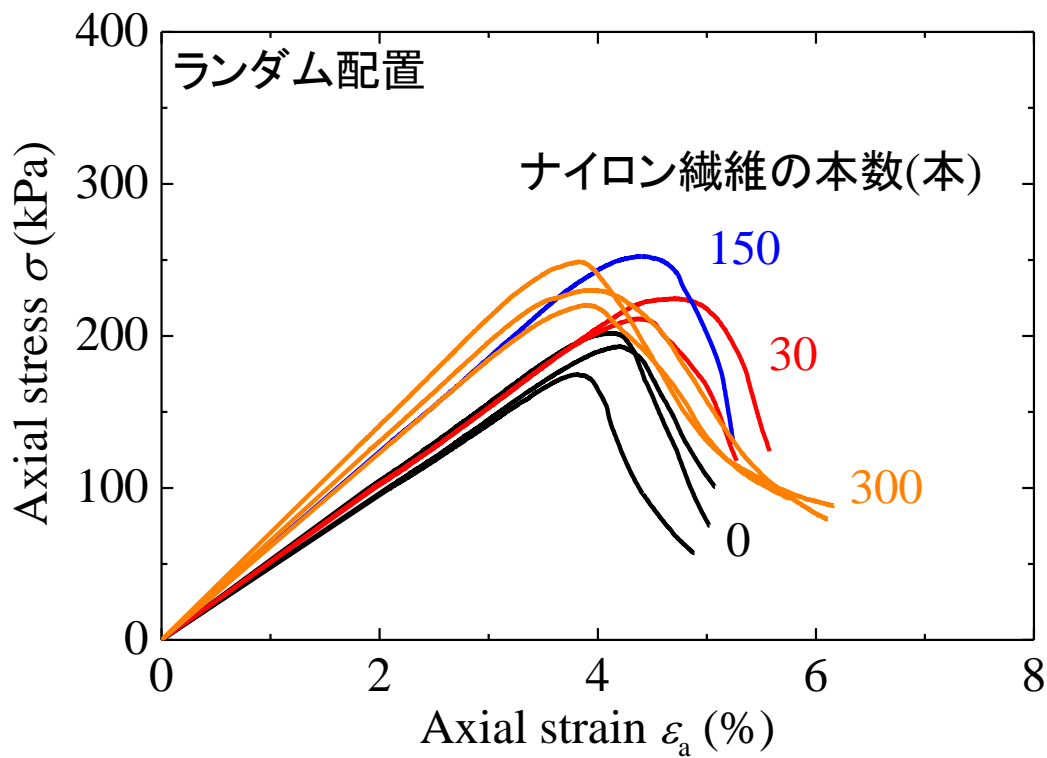


図 5.1-12 石膏複合固化材にナイロン繊維をランダム配置した条件の応力ひずみ関係

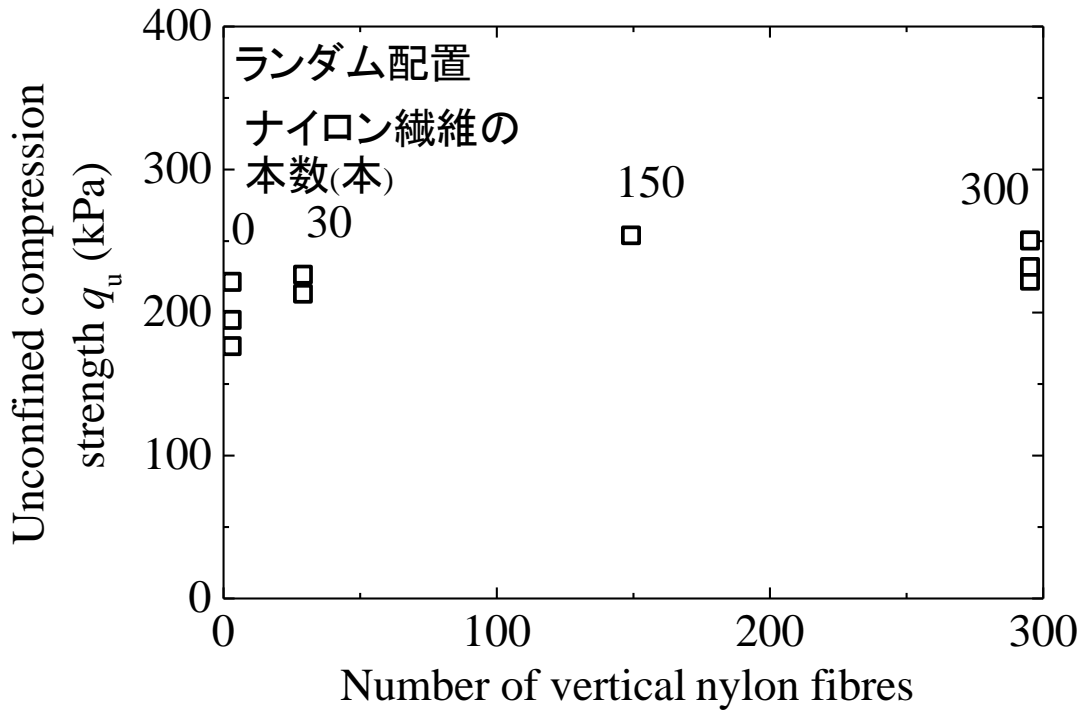


図 5.1-13 石膏複合固化材にナイロン繊維をランダム配置した条件の一軸圧縮強さと繊維本数の関係

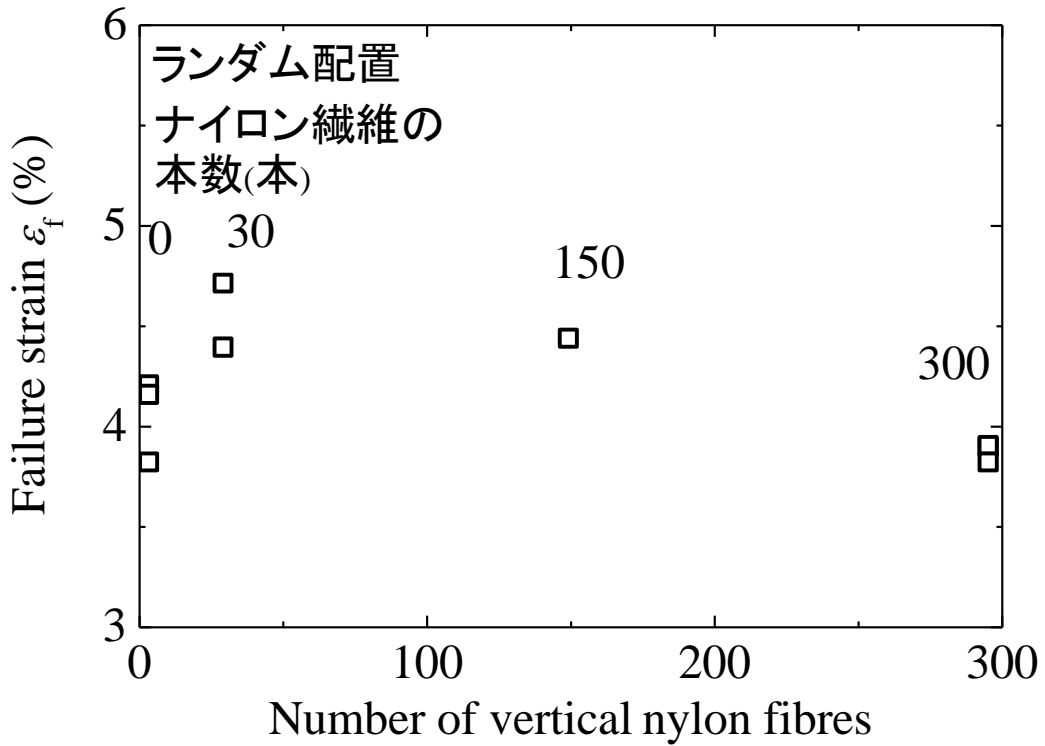


図 5.1-14 石膏複合固化材にナイロン繊維をランダム配置した条件の破壊ひずみと繊維本数の関係

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討

図 5.1-15 に石膏複合固化材にナイロン繊維を鉛直配置した条件の応力ひずみ関係をまとめて示す。なお、図中には比較のために石膏複合固化材のみ(図 5.1-3)の結果をナイロン繊維 0 本として示す。図 5.1-15 より、同一条件であってもややばらつきがあるがナイロン繊維を 30 本または 60 本混合した場合に初期剛性が顕著に増加する。ランダム配置同様に含水比の低下が要因であると考えられ、ナイロン繊維が多いほど、同一温度・同一時間の乾燥でも供試体の水分蒸発が早まるものと考えられる。また、ナイロン繊維を鉛直配置した場合にはピーク強度後の応力低下が急激になることが分かる。このピーク強度後の応力低下がナイロン繊維を鉛直配置した場合に顕著であった要因として、供試体の破壊モードの違いが挙げられる。図 5.1-4(c)に示した石膏複合固化材のみのUC試験後の供試体外観や図 5.1-16 に示すナイロン繊維を 300 本ランダム配置した供試体のUC試験後の外観と 60 本鉛直配置した供試体のUC試験後の外観から明らかなように、石膏複合固化材のみ(図 5.1-4(c))やナイロン繊維をランダム配置した石膏複合固化材(図 5.1-16(a))ではせん断破壊しているのに対し、ナイロン繊維を鉛直配置した石膏複合固化材(図 5.1-16(b))は割裂破壊している。これは、図 5.1-16(b)の鉛直配置した石膏複合固化材ではせん断層で繊維の引抜き抵抗が発揮されたためと考えられる。

図 5.1-17 に石膏複合固化材にナイロン繊維を鉛直配置した条件の一軸圧縮強さと繊維本数の関係を示す。図 5.1-17 より、ナイロン繊維の増加に伴って q_u も非線形的に増加することが分かる。

図 5.1-18 に石膏複合固化材にナイロン繊維を鉛直配置した条件の破壊ひずみと繊維本数の関係を示す。図 5.1-18 より、ナイロン繊維 30 本ではばらつきが大きい、 ϵ_f もナイロン繊維の増加に伴い非線形的に増加することが分かる。

図 5.1-19 に図 5.1-13 と図 5.1-17 の結果を基に、ナイロン繊維の本数別の平均一軸圧縮強さ $q_{u_Ave.}$ を石膏複合固化材のみの平均一軸圧縮強さ $q_{u_Ave.0}$ で除して正規化した一軸圧縮強さ $q_{u_Ave.}/q_{u_Ave.0}$ と繊維本数の関係を示す。なお、横軸のナイロン繊維の本数は鉛直配置の本数であり、図中にはランダム配置と鉛直配置のそれぞれの本数を示している。図 5.1-19 より、ナイロン繊維を鉛直配置した場合のほうがランダム配置した場合よりも、ナイロン繊維を配置することによる q_u の増加が顕著に大きいことが分かる。つまり、供試体中に占める体積が等しくても繊維の配置の仕方によって、繊維本数の増加に伴う q_u の変化傾向は異なることが分かる。

図 5.1-20 に図 5.1-14 と図 5.1-18 の結果を基に、ナイロン繊維の本数別の平均破壊ひずみ $\epsilon_{f_Ave.}$ を石膏複合固化材のみの平均破壊ひずみ $\epsilon_{f_Ave.0}$ で除して正規化した破壊ひずみ $\epsilon_{f_Ave.}/\epsilon_{f_Ave.0}$ と繊維本数の関係を示す。なお、図 5.1-19 と同様に、横軸のナイロン繊維の本数は鉛直配置の本数であり、図中にはランダム配置と鉛直配置のそれぞれの本数を示している。また、鉛直 30 本の条件では先述の通り破壊ひずみのばらつきが大きく、平均化したことで過小評価している可能性があることに注意して図 5.1-20 の結果を考える。図 5.1-20 より、ナイロン繊維を鉛直に 30 本(または 6 本)すなわちランダムに 150 本(または 30 本)配置した条件では破壊ひずみの増加の仕方に大きな違いは見られないものの、鉛直 60 本では鉛直 30 本よりも破壊ひずみが増加するのに対し、ランダム 300 本ではランダム 150 本よりも破壊ひずみが低下する。ばらつきはあるものの、一軸圧縮強さと同様に鉛直

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討

配置した場合のほうがランダム配置した場合よりも繊維本数の増加に伴う破壊ひずみの増加率が大きいことが分かる。

以上の結果を基に、ココヤシ繊維とスラグ4を混合した場合で強度増加し、靱性を備えた要因について考える。石膏複合固化材にナイロン繊維を鉛直配置した場合に強度増加および破壊ひずみの増加が見られたことから、ココヤシ繊維をスラグ4に混合した場合もせん断層に交わったココヤシ繊維が引抜き抵抗を発揮し、強度および破壊ひずみが増加すると考えられる。そして、ピーク強度後のひずみ軟化が緩やかになる現象については本検討からは明らかにすることができなかったが、ココヤシ繊維がスラグ粒子に絡みつき、スラグ粒子が団粒化することが大きく影響するものと考えられ、これについては第5章1節5項で検討する。

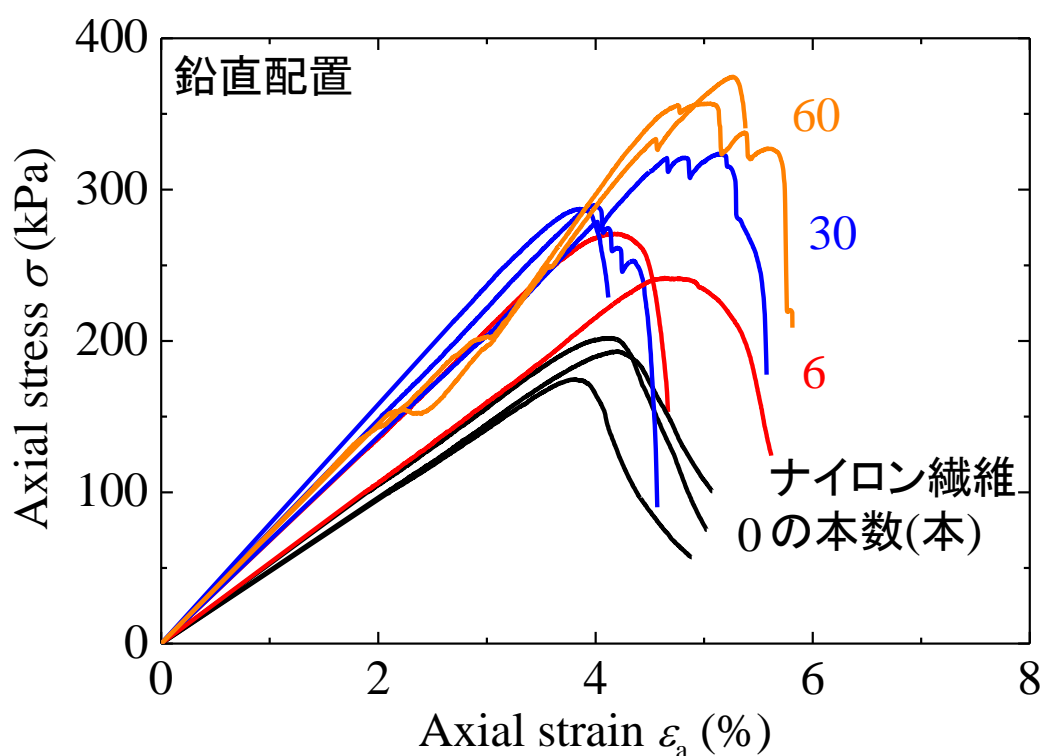
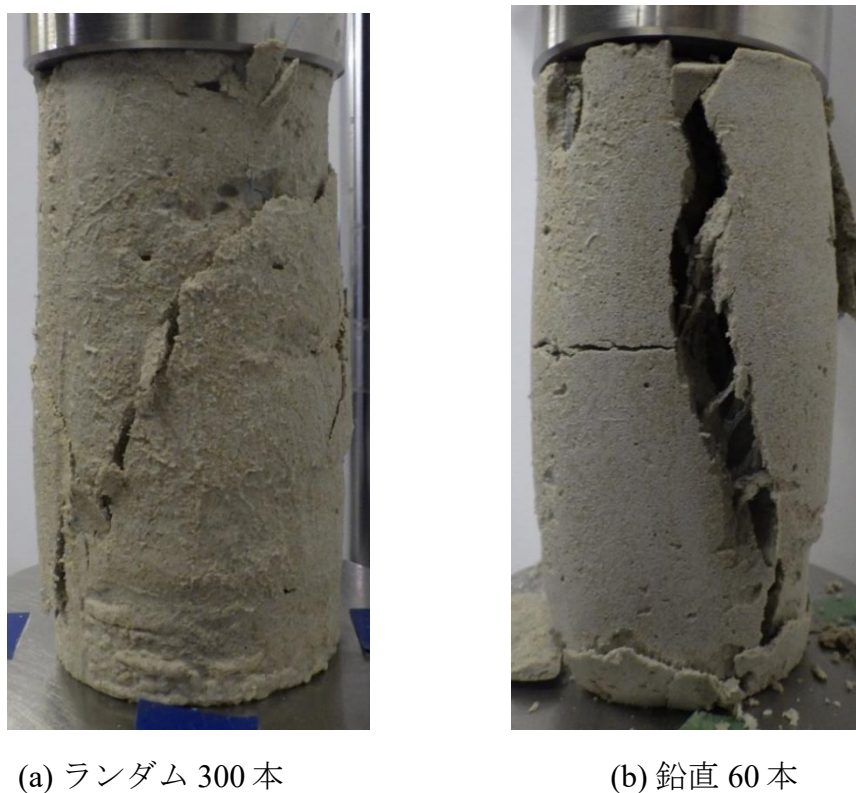


図 5.1-15 石膏複合固化材にナイロン繊維を鉛直配置した条件の応力ひずみ関係



(a) ランダム 300 本

(b) 鉛直 60 本

図 5.1-16 ナイロン繊維を 300 本ランダム配置した供試体と 60 本鉛直配置した供試体の一軸圧縮試験後の供試体外観

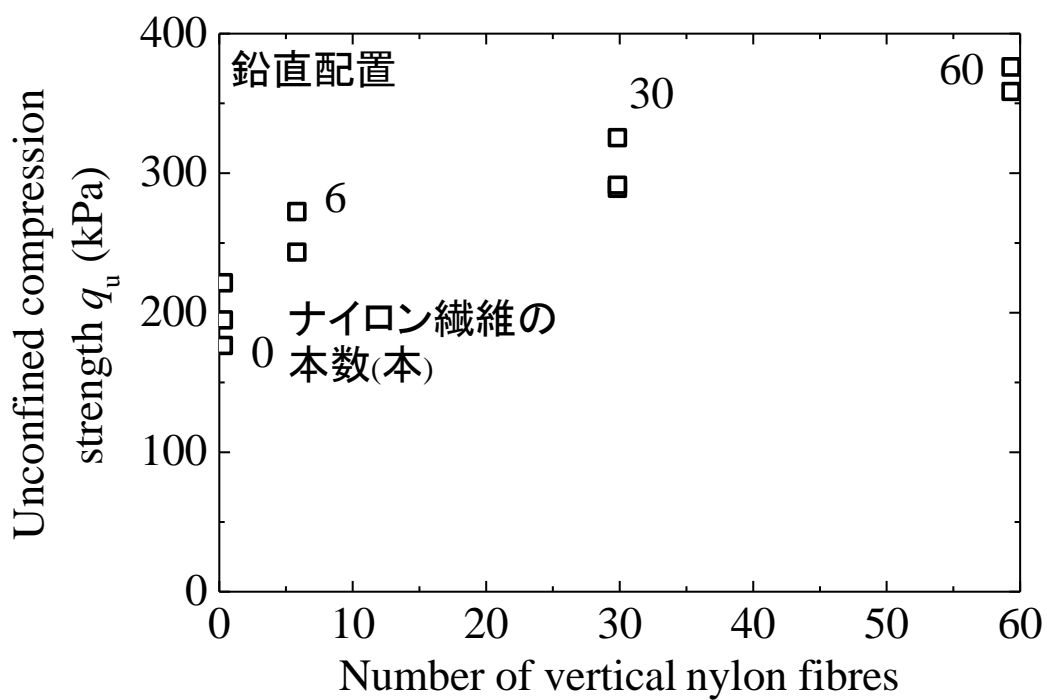


図 5.1-17 石膏複合固化材にナイロン繊維を鉛直配置した条件の一軸圧縮強さと繊維本数の関係

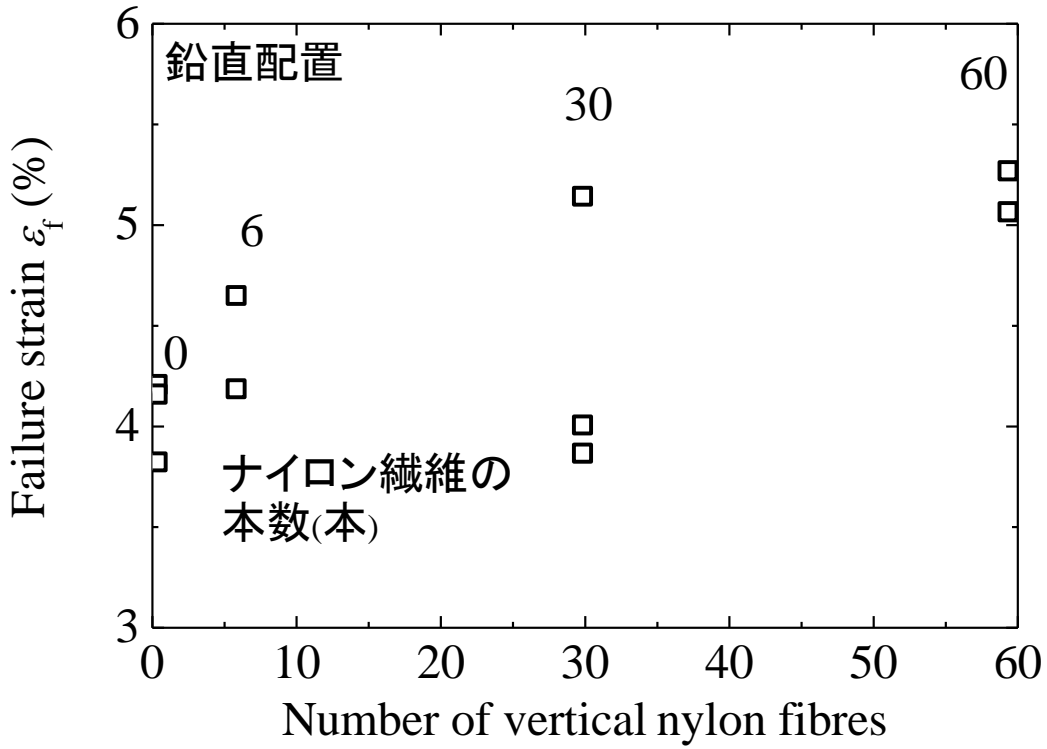


図 5.1-18 石膏複合固化材にナイロン繊維を鉛直配置した条件の破壊ひずみと繊維本数の関係

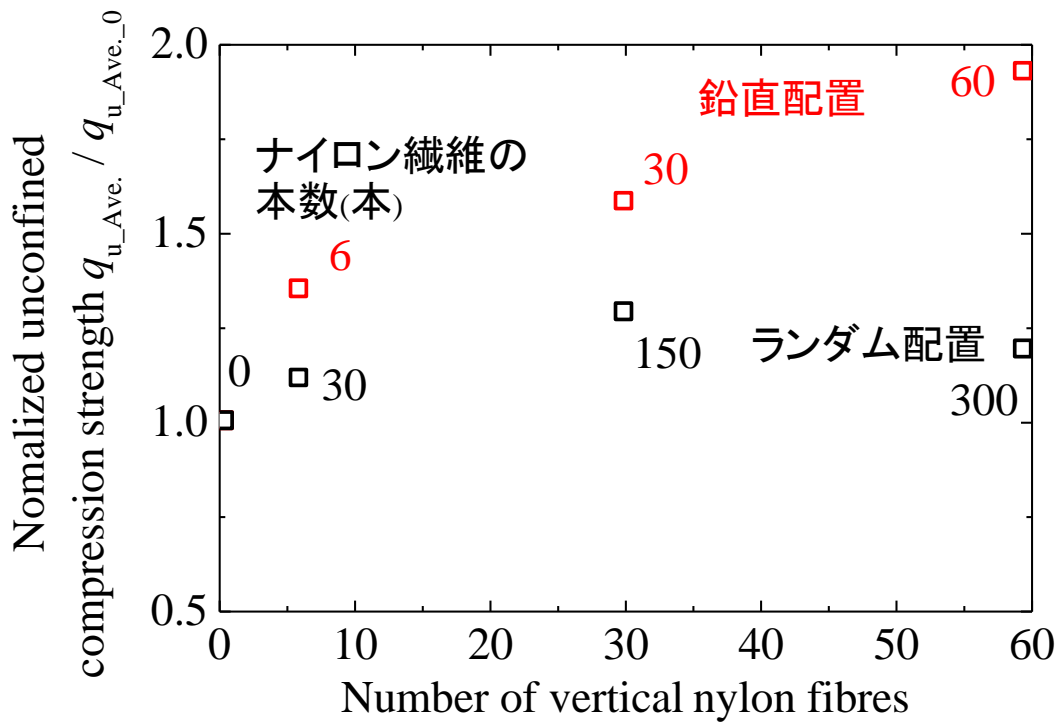


図 5.1-19 石膏複合固化材にナイロン繊維をランダム配置および鉛直配置した条件の正規化一軸圧縮強さと繊維本数の関係

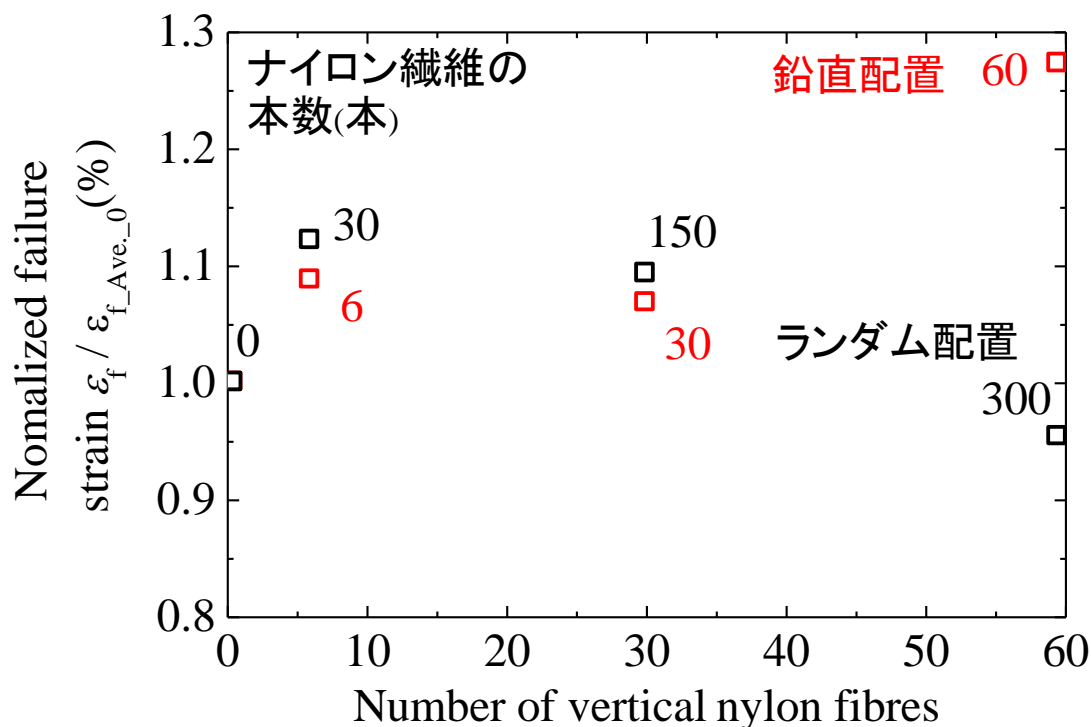


図 5.1-20 石膏複合固化材にナイロン繊維をランダム配置および鉛直配置した条件の正規化破壊ひずみと繊維本数の関係

以上、本章では石膏複合固化剤とナイロン繊維を用いて、繊維の引抜き抵抗と団粒化による補強効果が混合材料の強度増加および靱性発現に及ぼす影響を検討した。以下に得られた知見を示す。

- 製鋼スラグ代替固化材として用いた石膏複合固化材にココヤシ繊維を内割体積で 10 vol.%混合した材料においても強度増加および破壊ひずみの増加を確認し、さらにピーク強度後のひずみ軟化も緩やかになることが分かった。また、石膏複合固化材にココヤシ繊維を混合した場合にはスラグ 4 にココヤシ繊維を混合した場合に見られたような変形係数の低下は見られなかったことから、変形係数は母材の固結の仕方によって変化するものと考えられる。これは石膏スラグ固化材のように供試体全体硬化が進む材料とスラグ 4 のような粒状体の材料がココヤシ繊維の周囲で木屑を囲むようにして微細な固結をする材料の違いであると考えられる。
- ナイロン繊維を石膏複合固化材にランダム配置した場合と鉛直配置した場合とでピーク強度後のひずみ軟化挙動は異なり、ランダム配置した石膏複合固化材は石膏複合固化材のみと比べてほとんど変わらないひずみ軟化挙動を示すのに対し、鉛直配置した石膏複合固化材ではピーク強度後に急激なひずみ軟化を示す挙動が視られた。これは、ナイロン繊維を配置した場合、せん断面に交差するようにナイロン繊維が引抜き抵抗を發揮し、補強効果が発現するためと考えられる。

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討

- ココヤシ繊維をスラグ 4(2018)と混合した場合の強度および破壊ひずみの増加は木屑繊維の引抜き抵抗による補強効果に起因すると考えられる。ただし、本検討ではピーク強度後の緩やかなひずみ軟化を実験的に検討することは出来なかったため、以降の5.2で改めて検討する。

5.2 繊維状木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の繊維補強効果に関する実験的検討②

本節では、製鋼スラグと化学繊維を混合した材料の力学特性に対し、①化学繊維の長さが混合材料の力学特性に与える影響、②繊維状のココヤシと化学繊維の材質の違いが力学特性に与える影響について検討することを目的とし、繊維状のココヤシ繊維および化学繊維にスラグ 4(2019)を混合した材料に対して、化学繊維の長さ(5, 10, 20, 30 mm)と養生期間(0, 7, 28 日)を変えて、飽和圧密排水三軸圧縮(CD)を実施した。ここで化学繊維を用いた理由としてココヤシ繊維は長さの調整が困難であったためである。

供試体作製条件を表 5.2-1 に示す。表中の化学繊維の混合体積割合が 2 vol.%なのは、ココヤシ繊維と同じ 5 vol.%にすると、化学繊維とスラグを偏在なく混合させて供試体を作製するのが困難であったためである。また、ココヤシ繊維の長さは任意に取り出した 100 サンプルの平均値である。ココヤシ繊維 5 vol.%と化学繊維 2 vol.%混合材料については、締固め試験を実施せず、スラグ 4(2019)とココヤシ繊維 33 vol.%混合時の最大乾燥密度(締固め度 95%相当)と最適含水比(オーバーコンパクションする直前の含水比)を基に、ココヤシ繊維混合体積割合に基づいて線形補間して、目標乾燥密度及び目標含水比を設定した。そのため、実際の締固め度は 95%でない可能性がある。供試体作製は 3.3 に示した方法と同様である。

表 5.2-1 供試体作製条件(繊維混合材料)

ケース名	繊維の種類	内割混合体積 (vol.%)	繊維長さ (mm)	目標乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	目標含水比 w (%)	養生期間 (日)
Slag4	-(スラグ4(2019)のみ)	0	0	1.98	13.3	0 7 28
FWC	ココヤシ繊維	5	18.9	1.83	14.6	
CF	化学繊維	2	5, 10, 20, 30	1.91	15.0	

図 5.2-1 に 28 日養生の繊維長さの違いによる軸差応力と軸ひずみの関係を示す。図中のプロットは最大せん断強さ q_{max} と残留強度 q_{res} を示している。なお、図中のプロット形状の違いは混合する繊維の種類の違いを、また色の違いは化学繊維の長さの違いを表している。さらに、基準となるスラグ 4(2019)の結果は太線で結び結果を強調している。図 5.2-1 より、混合する化学繊維の長さが 20 mm までは繊維が長くなるほど最大せん断強さと破壊ひずみが増加する。一方で、繊維長さが 30 mm のときは繊維長さが 20 mm の応力ひずみ曲線と違いは見られない。また、ピーク強度後の応力低下に着目すると、繊維の長さが 10 mm 以下(繊維なしも含む)と 20, 30 mm とで低下の仕方に違いが見られる。つまり、20 mm を境に応力低下が極端に緩やかとなることが確認できる。

図 5.2-2 に 28 日養生の繊維長さの違いによる体積ひずみと軸ひずみの関係を示す。図 5.2-2 より、いずれの条件も養生期間に関係なく、せん断初期に体積収縮した後に体積膨張する正のダイレイタンスーを示した。また、スラグ 4(2019)のみでは一定の膨張量に達

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討

するとその後はひずみが増加しても膨張量があまり変化しないのに対し、化学繊維とココヤシ繊維を混合した場合には収縮後に一度急激な膨張をした後に、緩やかに膨張し続けることが分かる。そしてその緩やかな膨張傾向は繊維長さの違いによって変化しないことが分かる。

図 5.2-3 に繊維長さの違いによる体積ひずみの最大値と養生期間の関係を示す。図 5.2-3 より、養生期間に関係なく繊維を混合すると、スラグ 4(2019)のみよりも体積収縮が大きくなった。化学繊維を混合すると、長いほど収縮しやすい傾向が見られた。

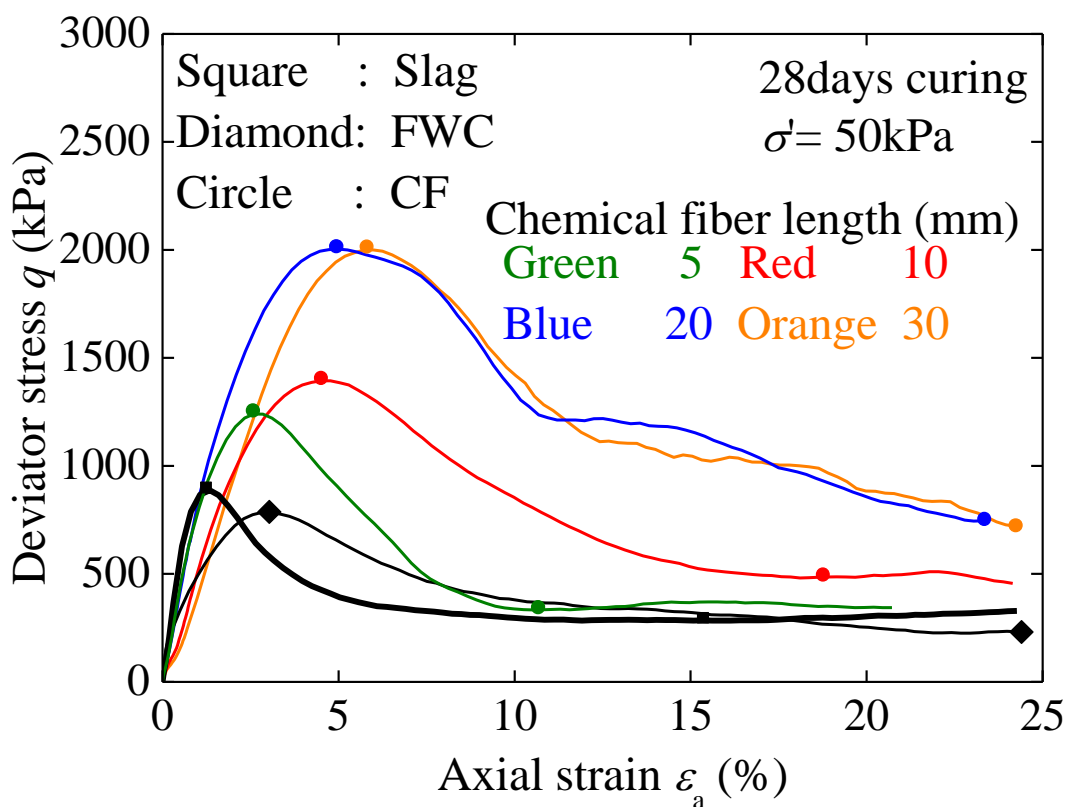


図 5.2-1 スラグ 4(2019)-化学繊維混合材料の繊維長さ別の応力ひずみ関係(比較のためにスラグ 4(2019)のみとスラグ 4(2019)ココヤシ混合材料の結果も含む)

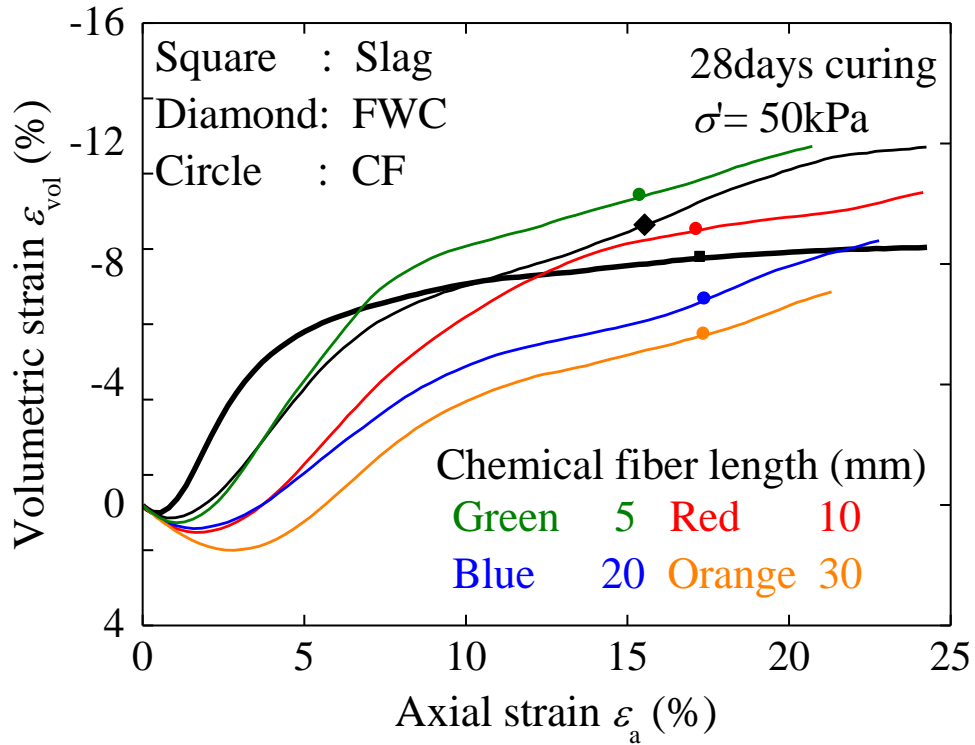


図 5.2-2 スラグ 4(2019)-化学繊維混合材料の繊維長さ別の軸ひずみと体積ひずみの関係(比較のためにスラグ 4(2019)のみとスラグ 4(2019)ココヤシ混合材料の結果も含む)

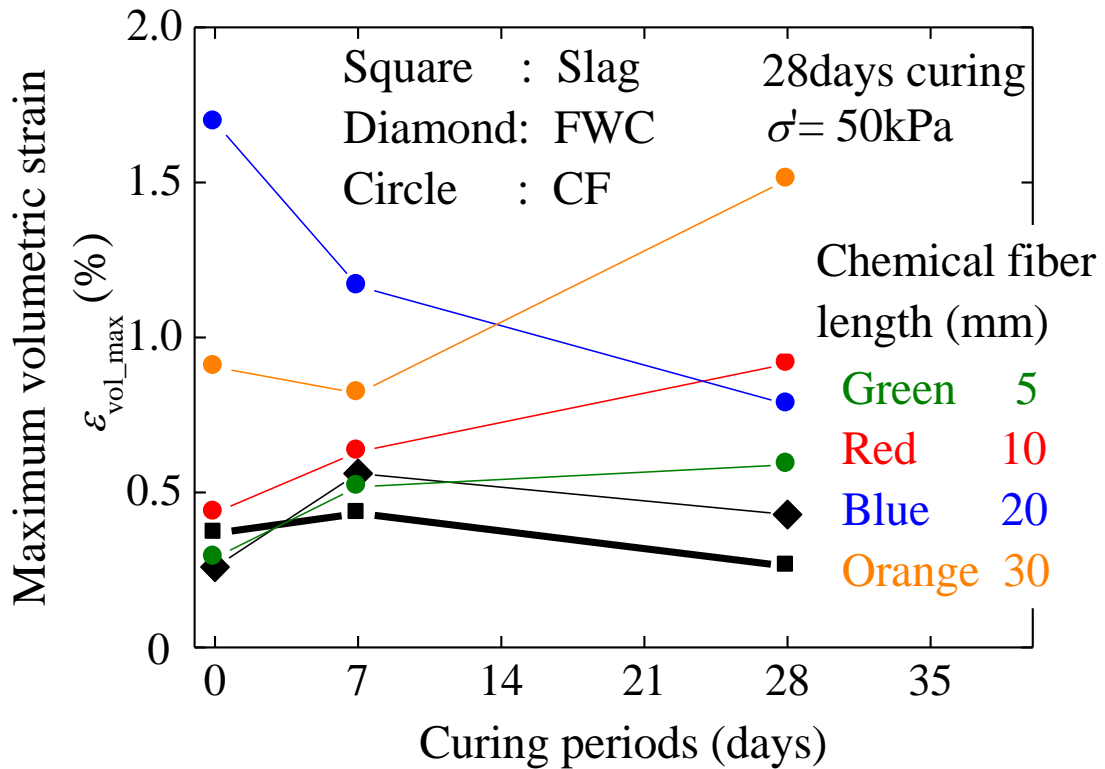


図 5.2-3 繊維長さの違いによる体積ひずみの最大値と養生期間の関係

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討

図 5.2-4 に各供試体作製条件の最大せん断強さ q_{max} を、養生なしのスラグ 4(2019)のみの最大せん断強さ $q_{max_slag_0days}(=520 \text{ kPa})$ で除すことで正規化した最大せん断強さ $q_{max} / q_{max_slag_0days}$ と繊維長さの関係を養生期間別に示す。記号の形状の違いが供試体作製条件を示す。図 5.2-4 より、化学繊維を 2 vol.%混合した場合の最大せん断強さは、スラグ 4(2019)のみよりも高く、繊維長さ 20 mm までは線形的に増加し、30 mm では 20 mm と同程度の値を示した。また、ココヤシ繊維を 5 vol.%混合した場合の最大せん断強さは、繊維長さが 18.9 mm あるがスラグの約 0.9 倍であった。このことから、繊維の長さよりも材質に最大せん断強さを増加する補強効果があることが分かる。更に、同じ繊維であっても、繊維が長くなればなるほど、最大せん断強さが増加するのではなく、ある長さ以上となると一定値を示すことが分かる。ココヤシ繊維のような繊維状木屑であっても、繊維長さにより同様の傾向を示すか検討する必要がある。

図 5.2-5 に正規化した最大せん断強さ $q_{max} / q_{max_slag_0days}$ と養生期間の関係を繊維長さ別に示す。記号の形状の違いが供試体作製条件を示す。図 5.2-5 より、ばらつきはあるが本研究の供試体作製条件において、最大せん断強さは、養生なしから 7 日養生で約 1.6 倍増加し、28 日養生では 7 日養生と同程度の値を示す傾向となった。このことから養生による最大せん断強さの増加は、繊維ではなく、スラグ 4(2019)の固化に由来すると考えられる。本研究の供試体作製条件では、繊維を混合してもスラグ 4(2019)のみと同様に最大せん断強さが増加することから、繊維を混合することによるスラグの水和反応阻害は起こらないと考えられる。また、7 日養生から 28 日養生での最大せん断強さの変化が僅かなことより、スラグの水和反応は、7 日養生の時点でほとんど終了していたと考えられる。化学繊維を 2 vol.%混合の繊維長さ 5 mm の養生なしから 7 日養生や繊維長さ 10 mm の 7 日養生から 28 日養生での最大せん断強さの低下の要因は不明である。

図 5.2-6 に各供試体作製条件の残留強度 q_{res} を、養生なしのスラグ 4(2019)のみの残留強度 $q_{res_slag_0days}(=217 \text{ kPa})$ で除すことで正規化した残留強度 $q_{res} / q_{res_slag_0days}$ と繊維長さの関係を養生期間別に示す。記号の形状の違いが供試体作製条件を示す。図 5.2-6 より、化学繊維を 2 vol.%混合した場合の残留強度は、スラグ 4(2019)のみよりも高く、繊維長さ 20 mm までは線形的に増加し、30 mm では 20 mm と同程度の値を示すことが分かる。また、ココヤシ繊維の繊維長さは 18.9 mm であるが、ココヤシ繊維を 5 vol.%混合した場合とスラグ 4(2019)のみの残留強度は同程度である。これらのことから、繊維の長さよりも材質に残留強度を増加する補強効果があることが分かる。更に、同じ繊維であっても、繊維が長くなればなるほど、残留強度が増加し続けるわけではなく、ある長さ以上となると一定値を示すことが分かる。ただし、本検討は直径 50 mm の供試体で実施していることから、寸法効果の影響を受けている可能性もあるため、繊維長さ 20 mm と 30 mm についての詳細な検討はより大きな供試体を用いて試験を実施する必要がある。

図 5.2-7 に正規化した残留強度 $q_{res} / q_{res_slag_0days}$ と養生期間の関係を繊維長さ別に示す。図 5.2-7 より繊維を混合しても、養生による残留強度の増加は確認できなかった。

図 5.2-8 に正規化した残留強度と正規化した最大せん断強さの関係を示す。図 5.2-8 より、養生期間の増加に伴って正規化した最大せん断強さは増加するが、正規化した残留強度は増加しないことが分かる。つまり、最大せん断強さが同じであっても、残留強度は変化す

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討

るため、最大せん断強さから残留強度を予測することは困難である。

図 5.2-9 に養生期間と破壊ひずみの関係を繊維長さ別に示す。図 5.2-9 より、繊維を混合すると破壊ひずみは、スラグ 4(2019)のみよりも大きい。しかし、ココヤシ繊維の長さは 18.9 mm あるが、破壊ひずみは化学繊維長さ 10 mm 以上より低くなった。そして、いずれの配合条件でも、養生により破壊ひずみは低下する傾向があった。

図 5.2-10 に繊維長さと変形係数 E_{50} の関係を養生期間別に示す。変形係数 E_{50} は、 $E_{50}=(q_{\max}/2)/\epsilon_{50}$ (MPa)より算出した。ここで、 ϵ_{50} は $q_{\max}/2$ 時の軸ひずみ ϵ_a (%)である。図 5.2-10 より、繊維長さと養生による変形係数の変化傾向に特定の関係性は見られないことが分かる。

図 5.2-11 に養生期間と変形係数 E_{50} の関係を繊維長さ別に示す。図 5.2-11 より、化学繊維長さ 5 mm を混合した場合に養生なしから 7 日養生で変形係数が減少するものの、全条件で変形係数は養生なしから 28 日養生で増加する傾向を示し、全体としては養生期間の増加に伴い変形係数も増加することが確認できる。これは繊維の種類に依らない傾向であると思われる。

図 5.2-4, 図 5.2-6, 図 5.2-9 より、ココヤシ繊維は長さが約 18.9 mm あるにも関わらず、化学繊維のような最大せん断強さ、破壊ひずみ、残留強度を増加させる補強効果を確認することはできなかった。このことから最大せん断強さや残留強度、さらには破壊ひずみに対して補強効果を期待するには、繊維の長さも重要であるが材質がより重要な因子と考えられる。ただし、上記に示したように化学繊維の長さを変えた場合にもその補強効果への影響に違いが見られたことから、繊維状の木屑でもより短い場合には補強効果がより小さくなると推察される。

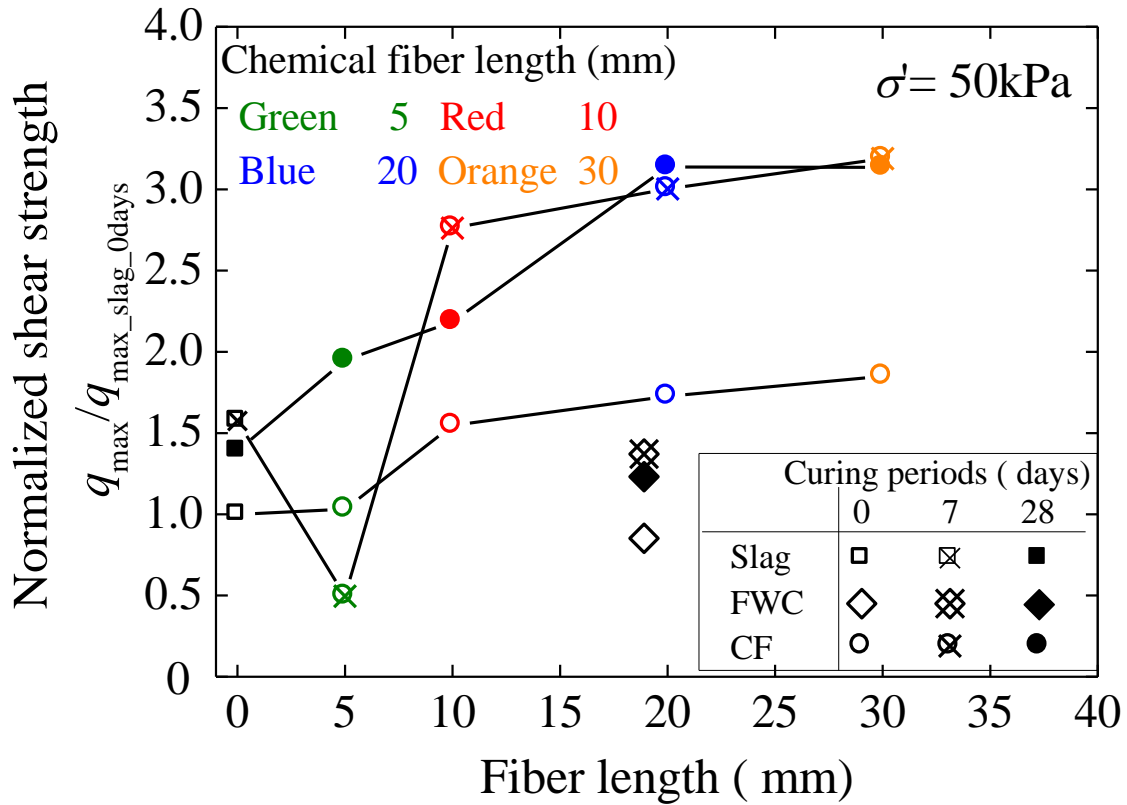


図 5.2-4 正規化最大せん断強さ $q_{\max}/q_{\max_slag_0days}$ と繊維長さの関係

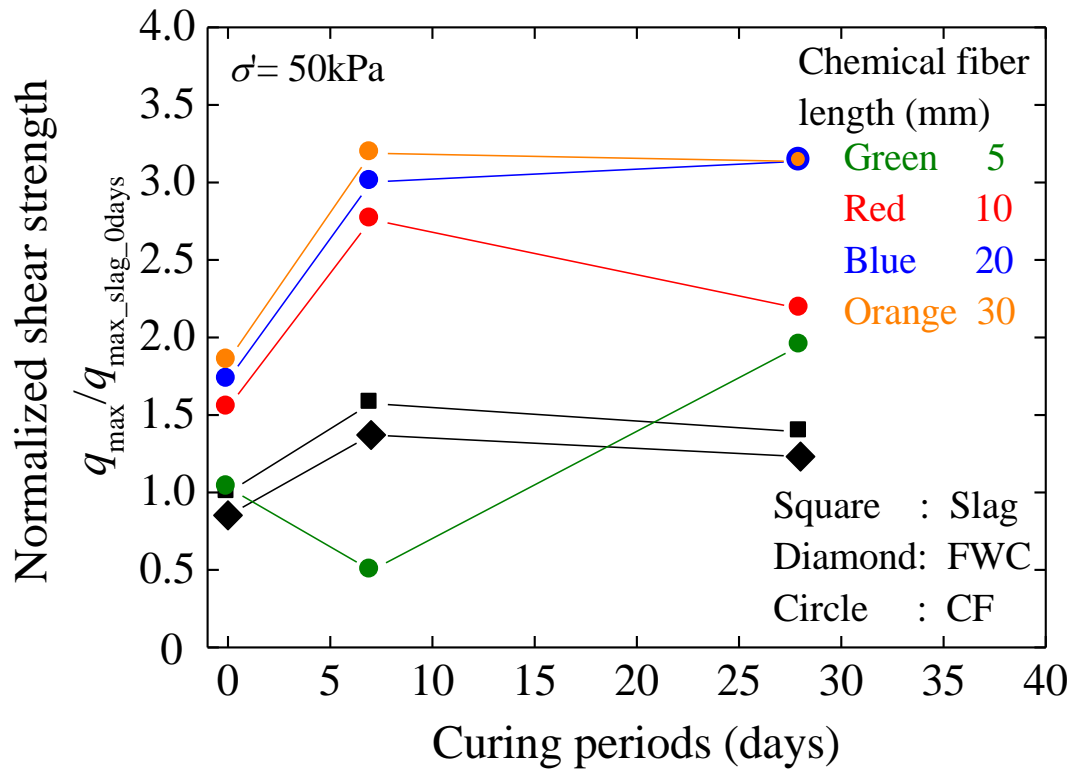


図 5.2-5 正規化最大せん断強さ $q_{\max}/q_{\max_slag_0days}$ と養生期間の関係

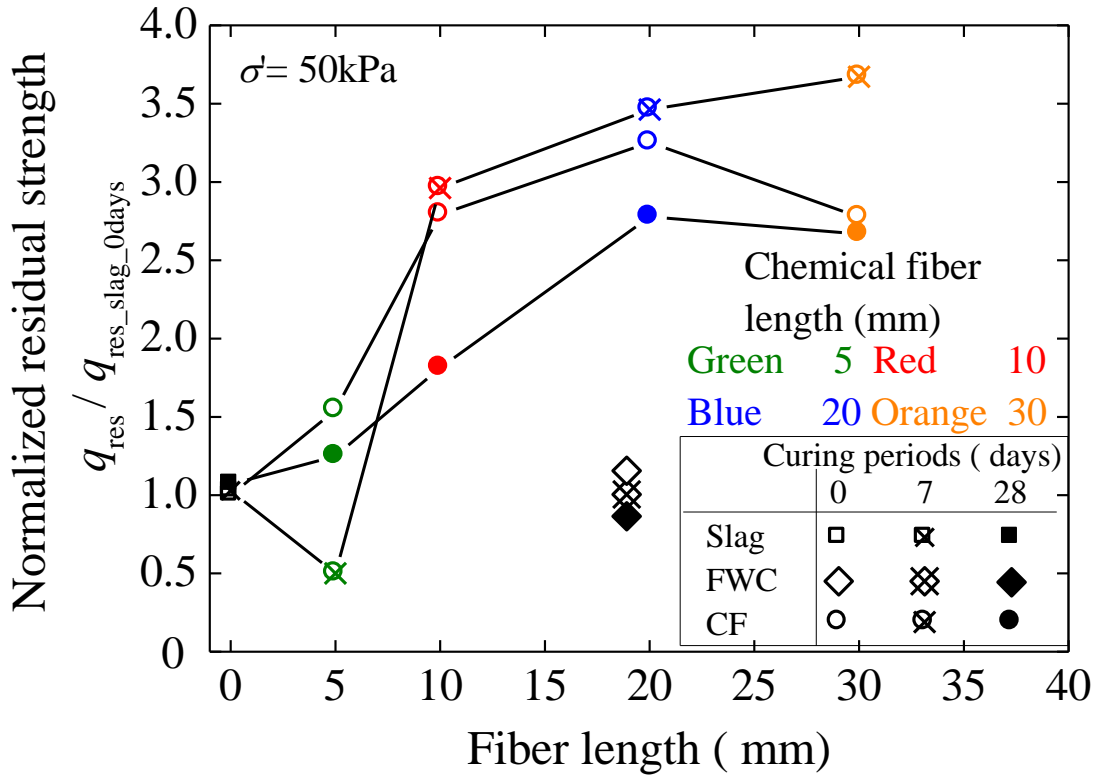


図 5.2-6 正規化残留強度 $q_{res} / q_{res_slag_0days}$ と繊維長さの関係

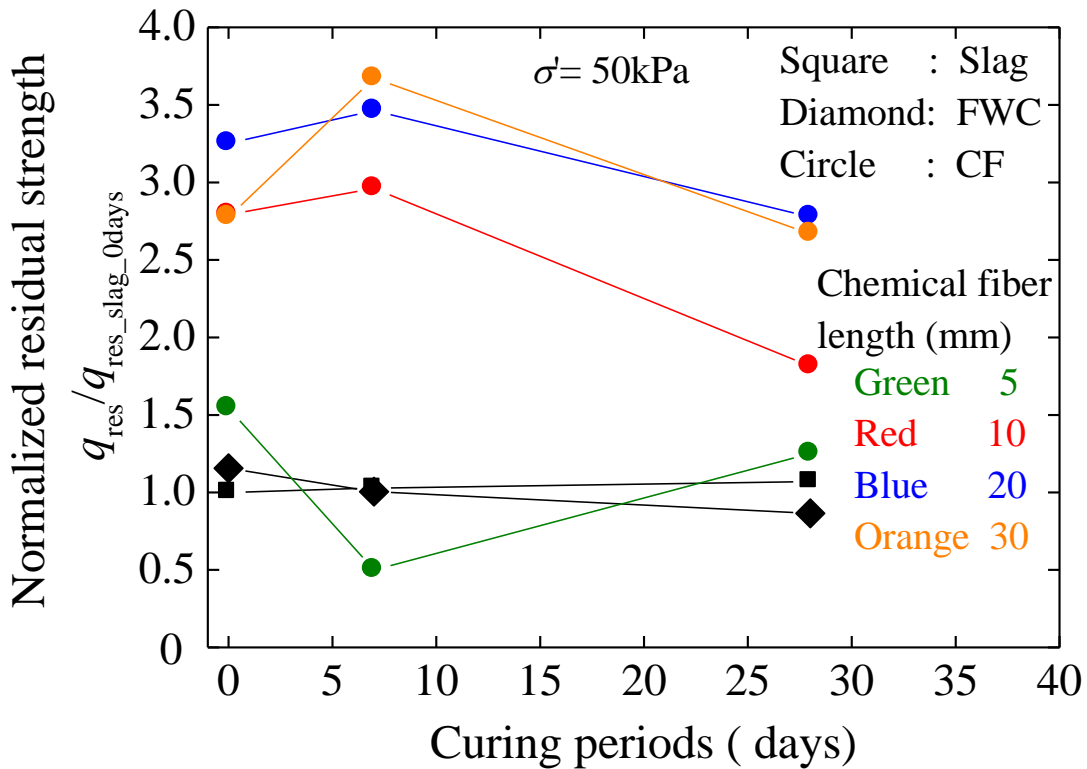


図 5.2-7 正規化残留強度 $q_{res} / q_{res_slag_0days}$ と養生期間の関係

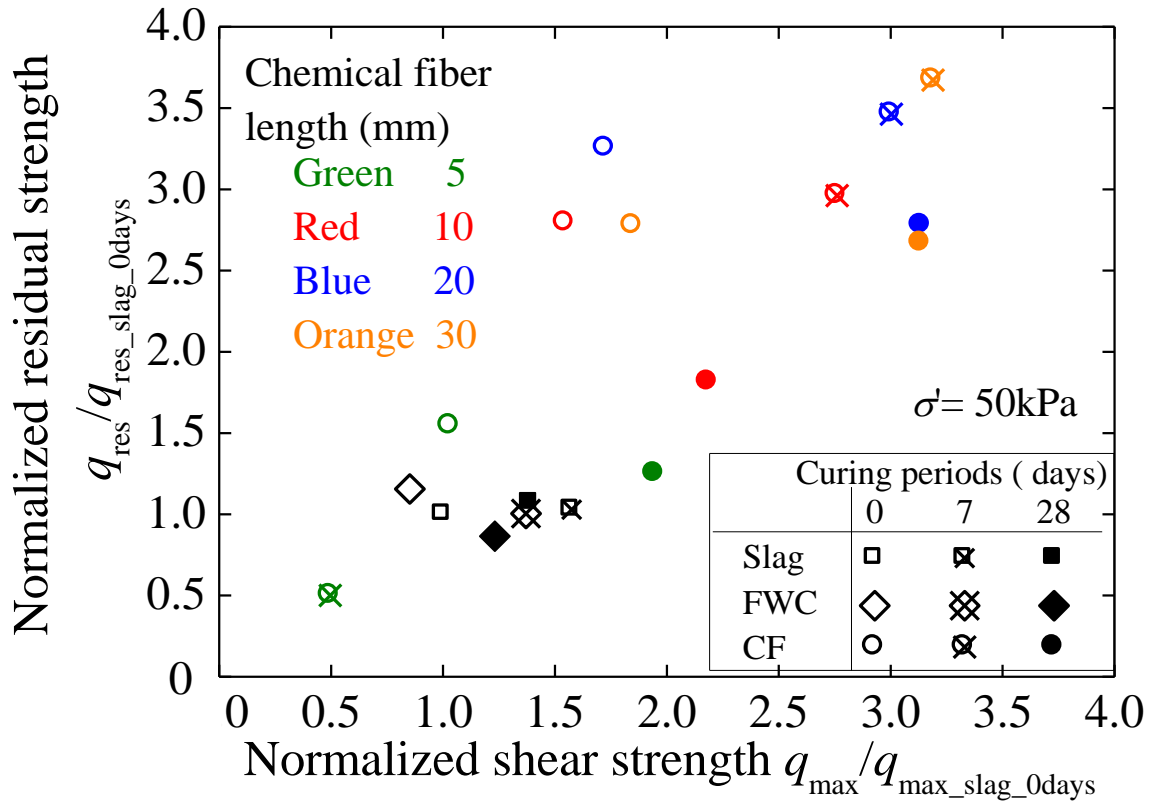


図 5.2-8 正規化残留強度 $q_{res} / q_{res_slag_0days}$ と正規化した最大せん断強さ $q_{max} / q_{max_slag_0days}$ の関係

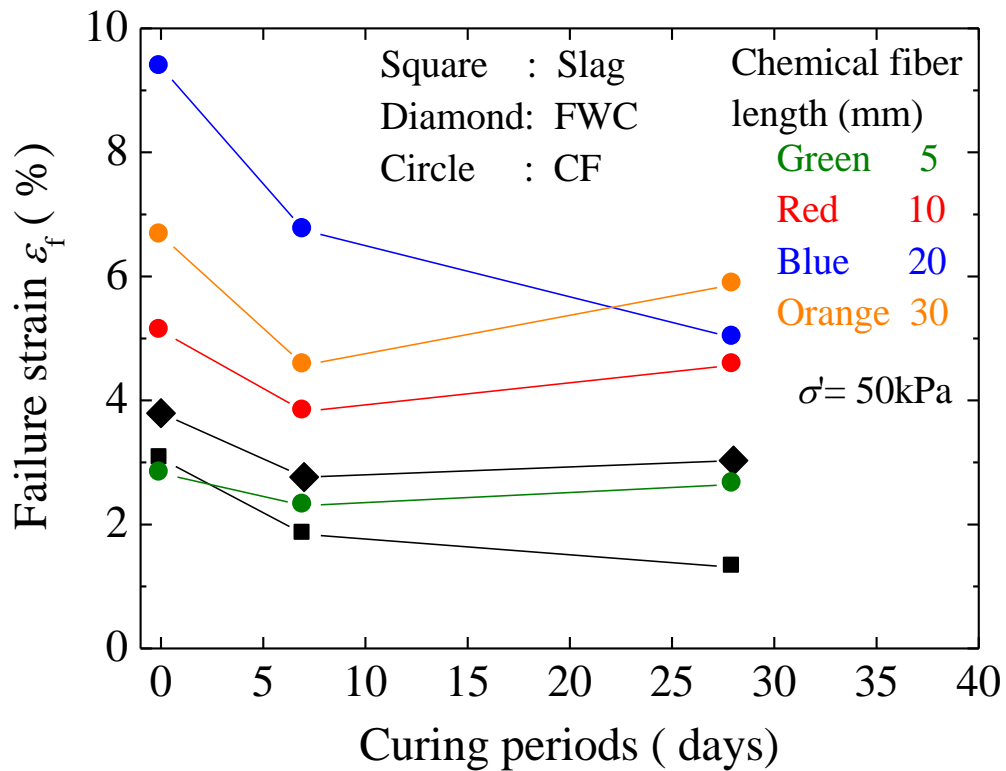


図 5.2-9 養生期間と破壊ひずみの関係

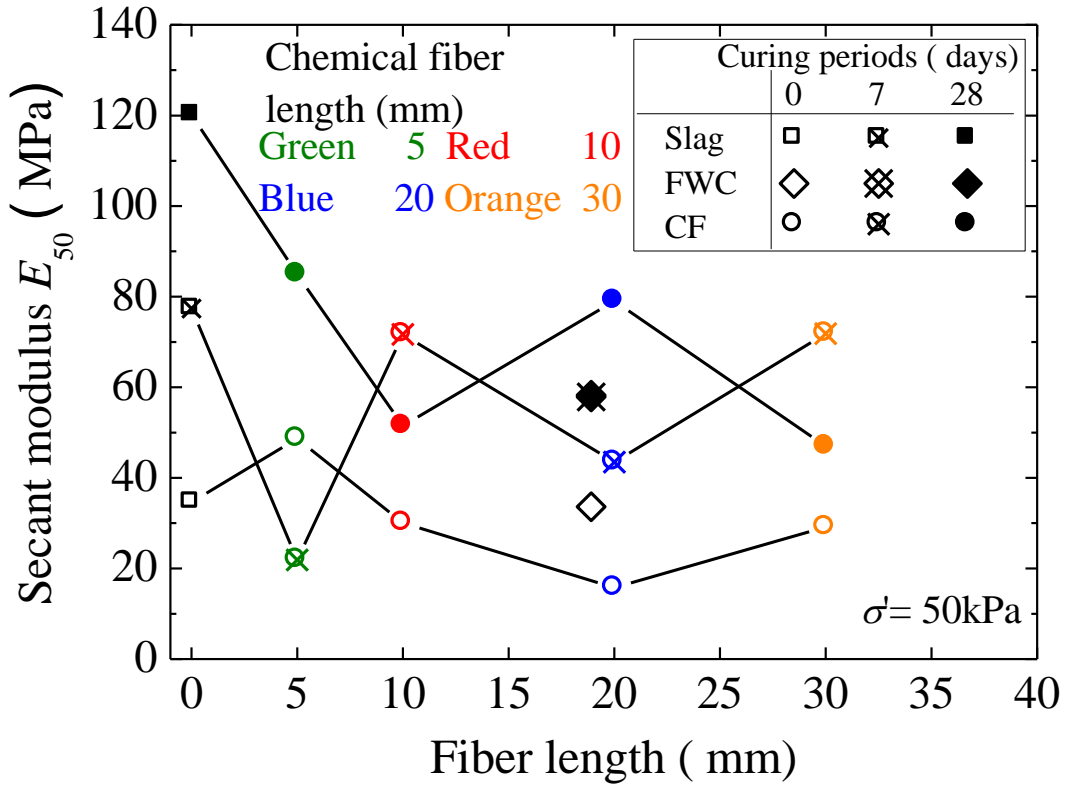


図 5.2-10 繊維長さと変形係数 E_{50} の関係

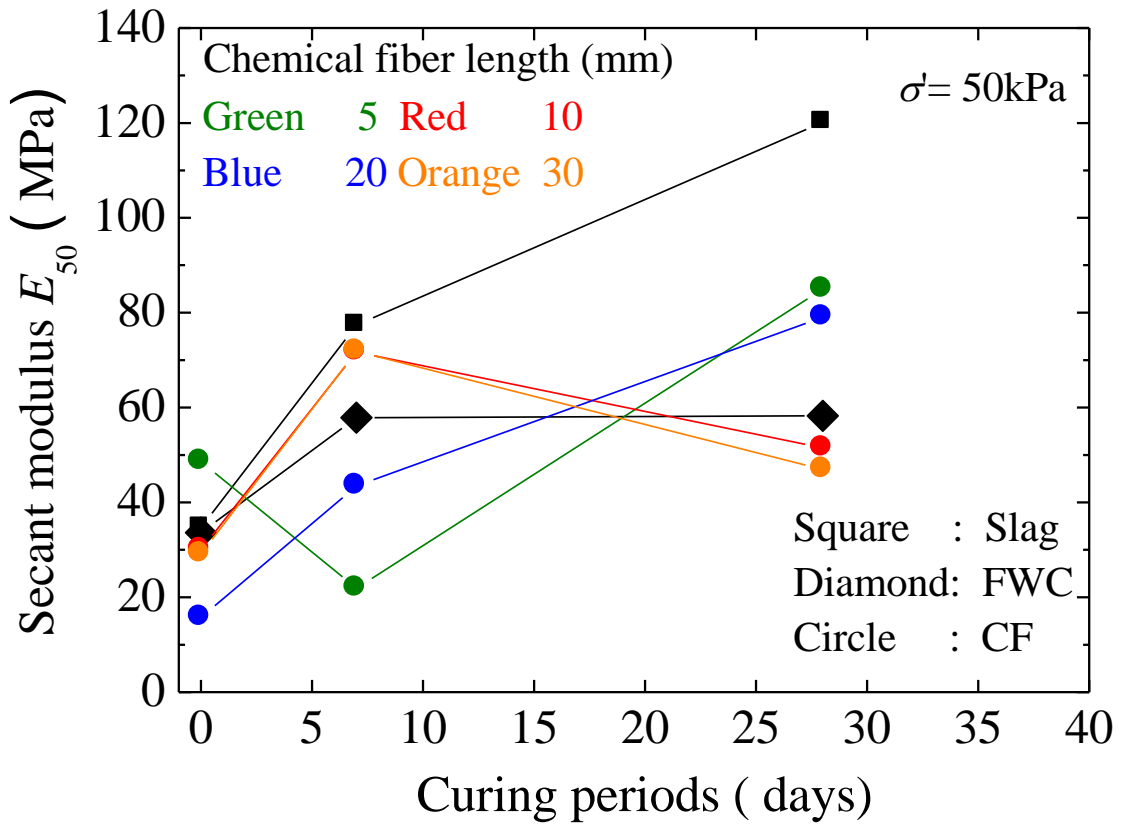


図 5.2-11 養生期間と変形係数 E_{50} の関係

以下に本節で得られた知見を示す.

- 化学繊維を 2 vol.%混合した場合, 繊維長さによらずスラグ 4(2019)のみよりも最大せん断強さや破壊ひずみ, 残留強度を増加させる補強効果が確認できた. そして, 繊維が長いほど最大せん断強さ, 破壊ひずみ, 残留強度は大きくなるが, 一定長さ以上(本実験では 20 mm 以上)になると変化しなくなることが分かった.
- ピーク強度後の応力低下の仕方は繊維長さが 10 mm から 20 mm の間で変わり, その間を境に応力低下が顕著に緩やかになることが明らかになった. これはスラグ粒子が繊維によって拘束されたことによるものと考えられる.
- 化学繊維やココヤシ繊維に関係なく, 養生により, 破壊ひずみは低下し, 残留強度の増加はしない. つまり, スラグの固化によって残留強度は増加しないことが明らかになった.

5.3 一軸圧縮強さの地盤工学的解釈

第4章では木屑混じり鉄鋼スラグ材料を用いて様々な応力条件、排水・非排水条件で力学特性の評価・検討を行った。第4章冒頭でも述べたように、固化系地盤材料の代表であるセメント改良土の圧縮強さは一軸圧縮(UC)試験から求められることが多い。これは UC 試験の簡便さやデータの豊富さからである。また、 UC 試験から求まる一軸圧縮強さ q_u は様々な土質力学指標(N 値, CBR 値, 非排水せん断強さ c_u など)との関連性が示されていることも多用される要因となっている。一方で、拘束圧依存性や排水条件依存性も指摘されている。そこで本節では本研究材料の UC 試験から求まる7日養生の圧縮強度 q_u の地盤工学的な解釈について、飽和圧密排水三軸圧縮(CD)試験(拘束圧 50, 100, 300kPa)と飽和非排水非圧密三軸圧縮(UU)試験の結果を基に整理して示す。

図5.3-1に2018年度に入手した製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を質量比96対4で混合したスラグ4(2018)とココヤシ繊維を用いて7日養生した供試体を用いた場合の UC 試験より得られた応力ひずみ関係と飽和圧密排水三軸圧縮(CD)試験(拘束圧 50 kPa)より得られた応力ひずみ関係を併せて示す。ここでの木屑混合割合は2つの試験で共通に実施した0, 5, 10, 33 vol.%の結果である。なお、図中のプロットはそれぞれのピーク強度である q_u と q_{max} を示した値で、ココヤシ繊維混合割合 33 vol.%の q_{max} については試験終了時まで軸差応力が増加し続けたため、試験終了時の q を示している。図5.3-1より、ココヤシ繊維混合割合が10 vol.%以下において、ばらつきはあるものの、 q_u と q_{max} は同程度であることが分かる。また、33 vol.%では $\epsilon_a = 8\%$ 程度まではひずみの増加に伴い同程度の軸応力を発揮していることが分かる。そして、 $\epsilon_a = 8\%$ を超えると応力ひずみ関係に差異が生まれ始め、その後、 CD 試験では ϵ_a の増加とともに軸応力が増加し続けるのに対し、 UC 試験では $\epsilon_a = 10\%$ まで緩やかに応力が増加し、ピーク強度を発現後、 ϵ_a の増加とともに軸応力は減少することが分かる。これは UC 試験では側方拘束圧がなく、大変形時に供試体が無作為に曲げ変形をするために軸方向に適切な圧縮ができなくなるためである。さらに、ココヤシ繊維混合割合が10 vol.%以下において、 CD 試験のほうが UC 試験よりも破壊ひずみが大きく、初期剛性が小さくなることが分かる。この初期剛性の違いは軸ひずみ速度の違いが影響した可能性が考えられる。 UC 試験の軸ひずみ速度は1.0%/minであったのに対し、 CD 試験の軸ひずみ速度は0.01%/minであったことから、载荷初期で同ひずみにおける軸差応力が一軸圧縮試験のほうが高くなった可能性がある。

図5.3-2に2019年度に入手した製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を質量比96対4で混合したスラグ4(2019)とココヤシ繊維を用いて7日養生した供試体を用いた場合の UC 試験より得られた応力ひずみ関係と CD 試験(拘束圧 50 kPa)より得られた応力ひずみ関係を併せて示す。図の説明については図5.3-1と同様であるため省略する。図5.3-2より、図5.3-1と同様にココヤシ繊維混合割合10 vol.%以下では、ばらつきはあるものの $q_u \doteq q_{max}$ が成り立ち、33 vol.%では $\epsilon_a = 7\%$ を境に UC 試験の応力ひずみ曲線と CD 試験の応力ひずみ曲線の傾向に違いが現れる。また、ココヤシ繊維混合割合が10 vol.%以下において、 CD 試験のほうが UC 試験よりも破壊ひずみが大きく、初期剛性が小さくなる。

第5章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断抵抗発現機構の検討

以上、図 5.3-1 と図 5.3-2 から、スラグ 4 のみの一軸圧縮強さが 2 倍以上異なる材料であっても、製鋼スラグの違いによらず、また木屑混合割合によらず、 $q_u \doteq q_{max}$ が成り立つ(33 vol.%ではひずみ $\varepsilon_a = 7\%$ 程度に限定)ことが明らかになった。

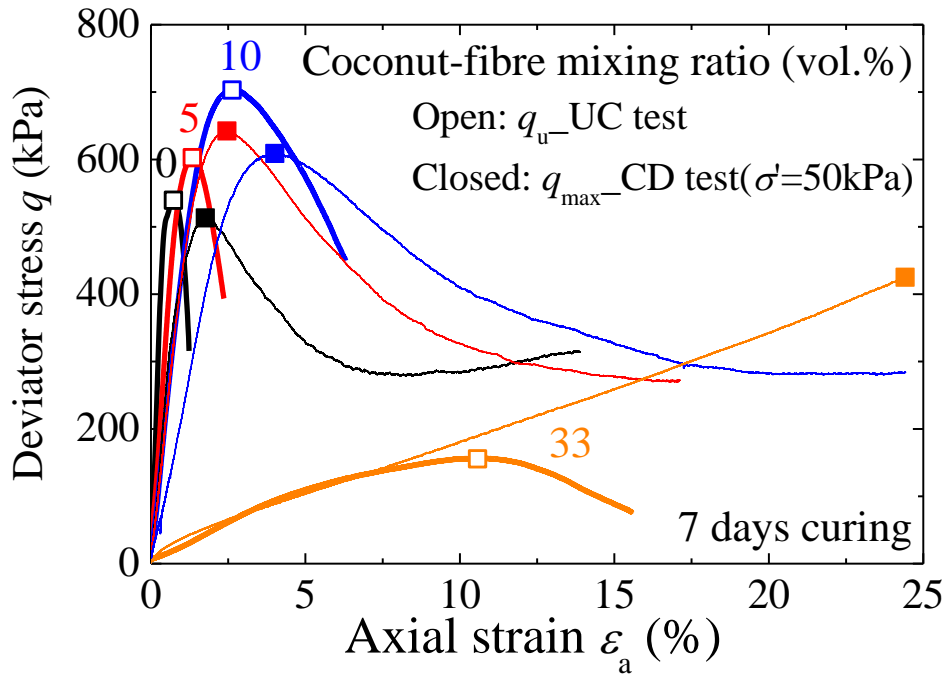


図 5.3-1 スラグ 4(2018)-ココヤシ繊維混合材料のUC試験より得られた応力ひずみ関係とCD試験(拘束圧 50 kPa)より得られた応力ひずみ関係(7日養生)

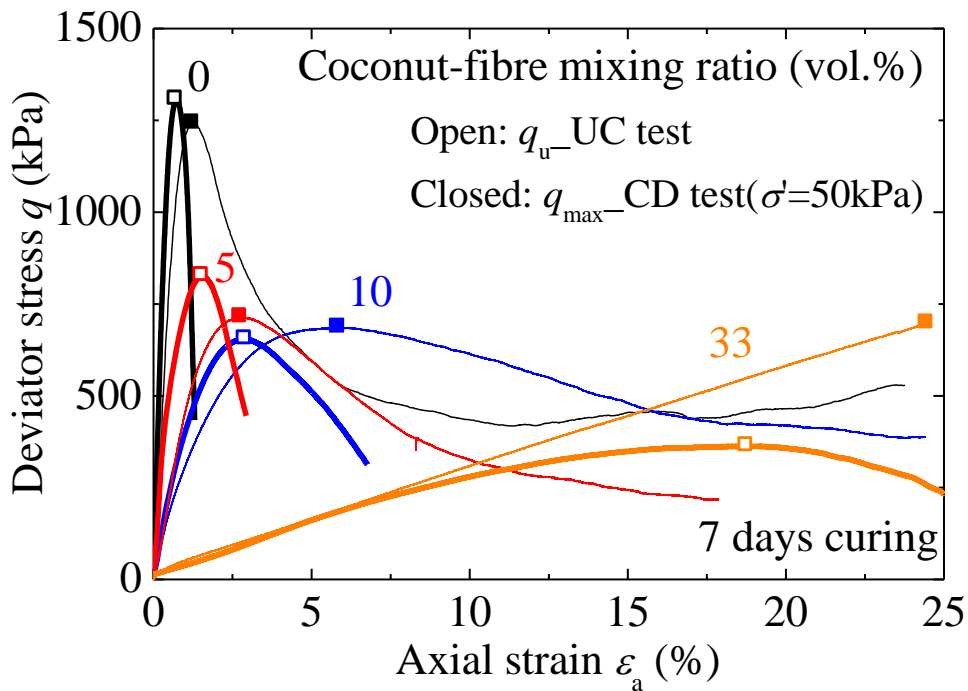


図 5.3-2 スラグ 4(2019)-ココヤシ繊維混合材料のUC試験より得られた応力ひずみ関係とCD試験(拘束圧 50 kPa)より得られた応力ひずみ関係(7日養生)

図 5.3-3 にスラグ 4(2019)のココヤシ繊維混合割合 10 vol.%以下で7日養生の条件のUC試験およびCD試験のピーク強度(図 5.3-2), さらにはUU試験のピーク強度(4.6 の図 4.6-17)とココヤシ繊維混合割合の関係を示す. なお, ここではピーク強度をそれぞれ q_u , c_u , τ_{max} として示す. 図 5.3-3 より, ココヤシ繊維混合割合 10 vol.%において q_u と c_u にやや違いはあるものの基本的には $q_u = c_u$, $\tau_{max} = 1/2q_u$ が成り立つ. つまり, 木屑混合割合 10 vol.%以下の場合, UC試験で求まる圧縮強度は排水・低拘束圧条件でのせん断強度 τ_{max} の2倍の値となる. なお, ここで低拘束圧と限定したのは 4.5 で述べたように, 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の排水せん断強さは拘束圧依存性があり, 拘束圧 100 kPa では拘束圧 50 kPa の 1.8~2.6 倍程度のせん断強さとなるためである.

以上より, 実務的には木屑混合割合によらず, 比較的浅い(3m 以浅)場所での使用を想定する場合の排水せん断強さ t_{max} は一軸圧縮強さ q_u の 1/2 とすることで推定できる. また, 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料は密に締固めた粒状材料としても振舞うため, 非排水条件のせん断強度は排水条件のせん断強度よりも大きく算出され, 本材料においては $q_u = c_u = 2\tau_{max}$ の関係が成り立つことが分かった.

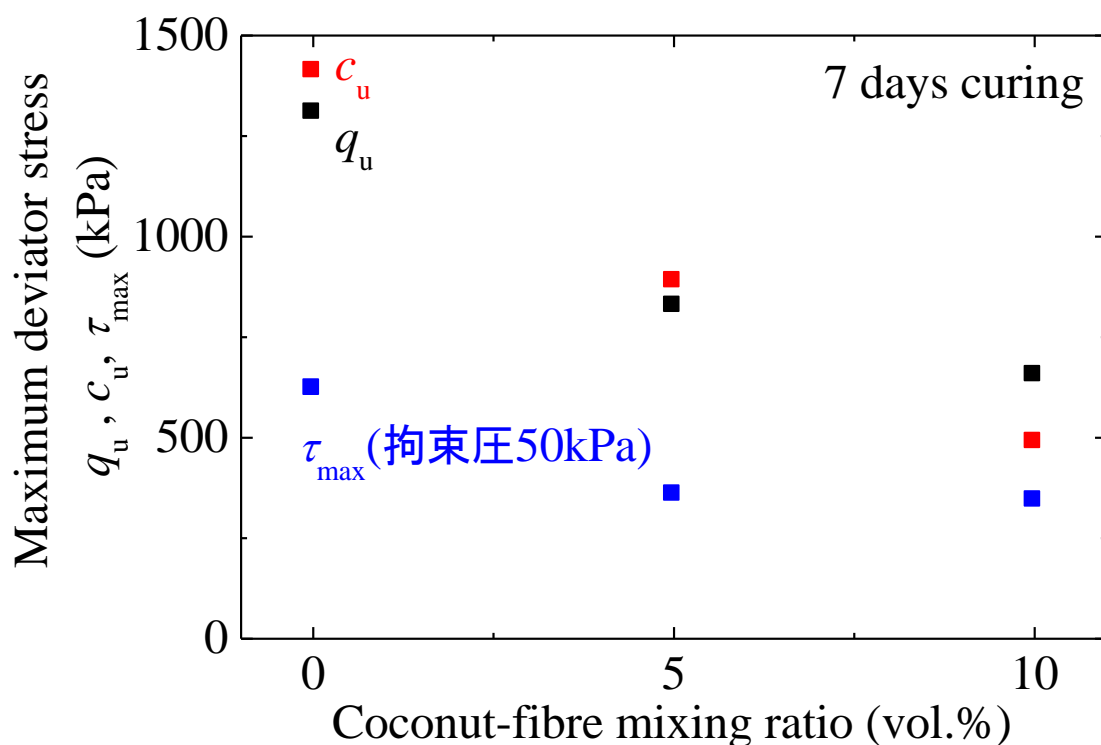


図 5.3-3 スラグ 4(2019)-ココヤシ繊維混合材料の各試験(UC試験, CD試験, UU試験)におけるピーク強度

以上，本節で得られた知見を示す．

- UC試験で求まる圧縮強度は排水・低拘束圧条件でのせん断強度 τ_{\max} の2倍の値となることが明らかになった．
- UC試験から得られる q_u はUU試験から得られる c_u と等しく， $q_u = c_u$ が成り立つことが明らかになった．

5.4 第5章まとめ

本章では第4章において繊維状の木屑をスラグ 4(2018)やいわき硅砂に混合した場合、ピーク強度や破壊ひずみの増加することや、ピーク強度後の応力低下が緩やかになるなど靱性の卓越した材料となることが確認されたことから、繊維の補強効果について、鉛直配置した繊維の引抜き抵抗がせん断抵抗に及ぼす影響や繊維の長さの違いがせん断抵抗に及ぼす影響について実験的な検討を試みた。また、第4章で得られた本研究材料の一軸圧縮強さについて地盤工学的な解釈を示した。その結果を以下にまとめる。

繊維の引抜き抵抗による補強効果がせん断抵抗に及ぼす影響

- 繊維の引抜き抵抗による補強効果によってせん断強さは増加することが明らかになった。一方で、ピーク強度発現後に応力低下が緩やかになるせん断抵抗挙動については引抜き抵抗だけでは説明ができない。

繊維長さの違いがせん断抵抗に及ぼす影響

- せん断強度の増加は繊維長の影響を強く受け、繊維長さが 20 mm までは繊維が長いほどせん断強度も大きくなるが、繊維長さが 20 mm と 30 mm とでせん断抵抗に違いが見られないことから、せん断抵抗に及ぼす繊維長さにはピーク長さが存在する可能性がある。ただし、これについては繊維の長さのみで決定されるものではなく、スラグ粒子の寸法や供試体寸法によっても異なると考えられる。
- 繊維が長いほど残留強度は増加するが、5 mm の繊維では残留強度は繊維なしと変わらない。これは製鋼スラグ粒子の最大径 4.75mm が関係していると考えられ、粒子径と繊維長さについて検討する必要がある。
- 繊維長さが 10 mm から 20 mm の間でピーク強度発現後の応力低下傾向が異なり、本試験では 20 mm 以上であると応力低下が相当に緩やかになることが確認された。この結果から、一定程度の長さがあれば繊維がスラグ粒子に絡み拘束力が発生する(団粒化する)のに対し、繊維長さが短いと拘束力が発生しないためであると考えられる。

一軸圧縮強さの地盤工学的解釈

- UC試験で求まる圧縮強度は低拘束圧条件下での排水せん断強度である。つまり、実務的には、比較的浅い(3m 以浅)場所での使用を想定する場合の最大せん断強度 t_{\max} は一軸圧縮強さの 1/2 とすることで推定できる。ただし、木屑混合割合が 33 vol.% では、 $\varepsilon_a = 7\%$ までの範囲で $q_u = 1/2 t_{\max}$ が成り立つことから、相当に大変形時のせん断強さは q_u で推定することは難しい。
- 木屑混合割合が 10 vol.% 以下であれば、UC試験より得られる q_u と UU試験より得られる c_u は等しく、 $q_u = c_u$ の関係が成り立つ。

【引用・参考文献】

- 1) たとえば, 山中光一, 峯岸邦夫: 粘性土に短繊維を混入させた地盤材料の基本的力学特性, ジオシンセティックス論文集, Vol. 29, pp. 11-18, 2014.
- 2) たとえば, 盛健太郎, 橋詰豊, 金子賢治: 供試体作製条件に着目した短繊維混合砂の強度変形特性に与える短繊維混合率の影響について, ジオシンセティックス論文集, Vol. 32, pp. 197-202, 2017.
- 3) たとえば, 野添重晃, 葛西祥男, 金子賢治, 松井和己, 熊谷浩二: 短繊維混合補強砂における混合率と強度変形特性の関係, ジオシンセティックス論文集, Vol. 27, pp. 127-132, 2012.
- 4) たとえば, 小竹望, 平田昌史, 赤井智幸, 馬淵伸明, 西村正樹, 山本正人, 石川雅英, 嘉門雅史: 線状高分子混合による土質系遮水材料の強度変形特性と透水性, ジオシンセティックス論文集, Vol. 20, pp. 193-198, 2005.
- 5) たとえば, 堤彩人, 田中裕一, 山田耕一: 短繊維・製鋼スラグ混合土の土質遮水材としての適用性の検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 72, No. 2, pp. 431-436, 2016.
- 6) たとえば, 奥山広樹, 峯岸邦夫, 卷内勝彦: 短繊維混合補強土における補強材混合量の影響, ジオシンセティックス論文集, Vol.26, pp. 89-94, 2011.
- 7) たとえば, 平野孝行, 吉田直人, 土橋聖賢, 藤井二三夫, 金澤伸一: 短繊維混合補強土の基本特性, ジオシンセティックス論文集, Vol.28, pp. 135-142, 2013.

第6章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の耐久性

6.1 概説

2001年に循環型社会形成推進法が施行されて以降、持続可能な社会の構築に向けて、建設業においても3R(リデュース・リユース・リサイクル)の実現に向けて積極的に行われてきた。さらに近年では他産業から発生する廃棄物や副産物も最終処分場の残余容量が逼迫している影響を受け、地盤材料としてリサイクル活用するための技術開発が行われている。廃棄物や副産物をリサイクルした人工地盤材料の研究は多く積極的に行われているものの、実用化されている例はそれほど多くない。その背景にはコストや周辺環境への安全性、長期耐久性など様々の要因が考えられる。特に長期耐久性については適切な評価方法や維持管理手法が定められていないものの重要な検討事項である。

木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料においては、“固化処理土としての耐候性”と“木屑による耐朽性”の側面から耐久性について検討する必要がある。まず、固化処理材料の実地盤への適用にあたっては、降雨や地下水の変動に伴って乾燥と湿潤が繰り返されることによる材料の劣化が問題となる。また、木屑を含むことから木屑が腐朽することによる混合材料への影響や混合材料内での木屑の腐朽過程を評価・検討する必要がある。木屑の腐朽については使用される環境に左右されることが多く、検討が困難であるが、実験的に定量的な評価をすることは実用上意義のあるものであると考えられる。そこで本章では木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料を用いて、乾湿繰り返し実験と木屑腐朽実験を行うことで、混合材料の耐久性について評価・検討し、実利用に向けて適切な使用場所の提案と使用上の注意点を示す。

6.2 乾湿繰返し(DW)実験

固化処理土の乾湿繰返しによる劣化現象については既往の多くの研究で明らかになっている^{1), 2), 3)}。その一方で、固化処理土に繊維材を混合することによって、乾湿繰返しによる耐久性が向上することも報告されている。森ら(2005)⁴⁾はペーパースラッジ、模擬汚泥、セメント系固化材を混合した材料において、ペーパースラッジが乾湿繰返しに対する高い耐久性を発揮することを明らかにしている。また、小竹ら(2013)⁵⁾は化学繊維、粘性土、砂質土、普通ポルトランドセメントを混合した材料を用いて、化学繊維が乾湿繰返しによる劣化を抑制することを明らかにしている。本研究では固化材として粒状のスラグを使用している点で既往研究のセメント系固化材などの見かけ上一体化している材料とは異なる。また、木屑のような吸水性を有する材料とスラグを混合した場合に乾湿繰返しを与える影響について検討した事例はほとんど見られない。本節では乾湿繰返しによる耐久性についてまとめる。

6.2.1 DW 実験概要

第4章と第5章で明らかになったように、製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を質量比 96 対 4 で混合したスラグ 4 に木屑を 5 ~ 15 vol.% 混合した場合、木屑の形状によらずスラグ 4 のみよりも大きなせん断強度および大きな破壊ひずみとなる。すなわち靱性を備えた変形追随性を有する希少な地盤材料となる可能性がある。本検討はスラグ 4 に木屑を 10 vol.% 混合した材料を用いた。本検討では乾湿繰返しによる吸水・乾燥現象はもちろんであるが、使用する木屑の物性も重要となってくるため、第3章1節の「使用試料」でも示したが改めて使用する木屑の物性について説明する。

本検討で使用した木屑は、粒状の木屑であるヒノキ($\rho_s = 0.41 \text{ Mg/m}^3$, 100 サンプル:平均長さ 0.7 mm × 1.4 mm × 3.3 mm)と繊維状の木屑であるココヤシ繊維($\rho_s = 0.53 \text{ Mg/m}^3$, 100 サンプル:平均直径 0.27 mm, 平均長さ 24.4 mm)である。ヒノキは辺材をチップ状に細かく粉砕したもので保湿性が高いといった特徴がある。また、ココヤシ繊維はリグニンによってセルロースおよびヘミセルロースが被覆された硬い細胞壁で構成された植物繊維である。この為、木屑の材質の違いとして、ヒノキのほうがココヤシ繊維よりも乾燥による収縮性が高く、吸水による膨張性が高いと想定される。

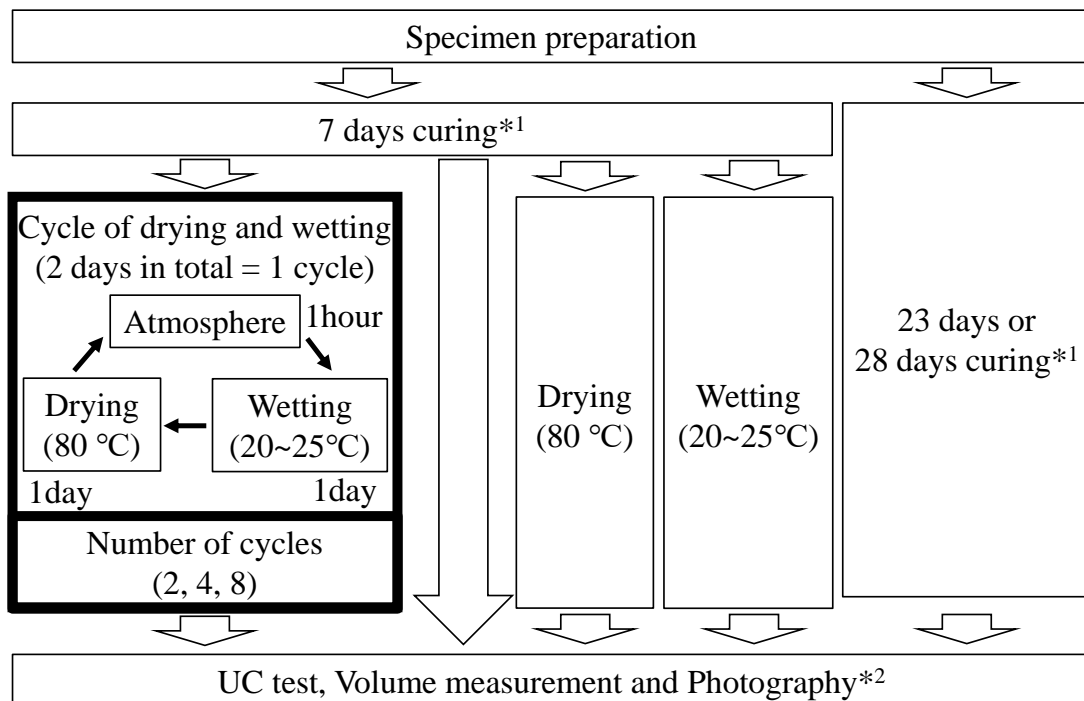
表 6.2-1 に供試体作製条件を示す。供試体作製方法については第3章3節を参照されたい。こうして作製された供試体に対して、以降の実験フローに基づき乾湿繰返し(以下、DW)実験を行った。

図 6.2-1 に実験フローを示す。図 6.2-1 中の太枠で示した工程が DW の工程である。恒温恒湿(20°C・55~60%)環境下で7日間密閉気中養生後に脱型した供試体に対し、80°C炉乾燥1日、大気冷却1時間、20°C浸水1日の合計約2日間を1サイクルとして乾湿繰返しを行った。Wetting and Drying test (ASTM D-4843)⁶⁾では炉乾燥温度を60°Cと定めているが、本供試体を50~60°C(;手造りの風乾装置であるため温度が一定でない)で乾燥した場合、絶乾状態(;単位時間あたりの質量減少量が0.02g以下)に至るのに3日程度要することから、本実験では80°C炉乾燥を1日行うとした。これは短時間で実験を行うためであり、乾燥温度の

違いが耐久性に与える影響については別途検討する必要がある。また、木屑のようなセルロースを主体とする高分子材料は熱による物理的・化学的性質の変化が懸念される。하라(2014)⁷⁾ は 3 種類の植物繊維を用いて熱負荷(25 ~ 250°C)による引張強度の変化を調べた結果、いずれの植物繊維も熱負荷が 180°C以下であれば引張強度はほとんど低下しないことを報告している。つまり本実験で用いた植物と하라が用いた植物が異なることを留意しても、80°Cの炉乾燥による材料特性の変化は相当に小さいと推察される。さらに、植物に含まれるたんぱく質大気冷却は炉乾燥後の高温の供試体を 20°Cの水に浸けると、熱毛管現象により供試体内部へ水が急激に浸透することが懸念されるために放熱することを目的としている。浸水時間は工学的な判断で 1 日としているが、墨汁を用いた事前実験から約 3 時間で供試体内部まで十分な水が浸透することを視認している。

それぞれのサイクルでの乾燥後および浸水後ごとに供試体寸法の測定および写真撮影を行い、所定の乾湿繰返しサイクル数に達した供試体に対し、UC testを実施した。比較実験として、7日養生、7日養生後に 16 日間乾燥、7日養生後に 16 日間浸水、23 日養生した供試体に対して一軸圧縮試験(以下、UC test)を行った。なお、UC test 時の飽和度は UC test 直前の処理方法によって異なる。

表 6.2-2 に実験条件を示す。表 2 の通り、C7D16 と C7W16 はココヤシ繊維を用いた場合のみで実施し、ココヤシ繊維を用いた乾湿繰返し 8 サイクル(=16 日間)の条件 C7DW8 と比較を行った。また、乾湿繰返しをしない 23 日養生 C23 はココヤシ繊維を混合した条件のみ行っており、ヒノキを混合した条件 C28 は既往の研究結果(28 日養生の結果)を用いた。



*1 Curing conditions (Atmosphere, 20°C, Closed)

*2 Volume measurement and photography were performed after drying and wetting in each cycle

図 6.2-1 乾湿繰返し実験フロー

表 6.2-1 供試体作製条件

実験ケース	木屑の種類	目標乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)	含水比 w (%)
Hino10	ヒノキ	1.83	14.1
Coco10	ココヤシ繊維	1.68	17.0

表 6.2-2 実験条件

No.	実験方法	表6.2-1の実験 ケースと対応
C7	7日養生	Hino10 Coco10
C7DW2	7日養生 + DW 2 cycles	
C7DW4	7日養生 + DW 4 cycles	
C7DW8	7日養生 + DW 8 cycles	
C7D16	7日養生 + 16間乾燥	Coco10
C7W16	7日養生 + 16間浸水	
C23	23日養生	

6.2.2 DW による木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の体積膨張と木屑繊維の復元力

図 6.2-2 に Hino10 の C7DW8 の供試体が乾湿繰返しによってどのように外観が変化したかを示した。図 6.2-2 (a) は 7 日養生後の供試体全体の外観を示し、図 6.2-2 (b) ~ (e) には図 6.2-2 (a) の点線で囲った箇所(クラック発生部)の 7 日養生後および乾湿繰返し 2, 4, 8 サイクル目浸水後の拡大した外観を示す。図 6.2-2 (d) より、Hino10 では 4 サイクルで供試体下端から上方向に 37 mm のところに水平方向に最大 0.2 mm 幅のクラックを確認した。これは 2 サイクルでは見られなかったものであり、さらに 8 サイクルではクラック幅が最大 0.5 mm 程度と大きくなっていった。また、紙面の都合上、写真は示していないが、4 サイクルで供試体下端から 67 mm でも 0.1 mm 幅のクラックを確認した。同時に実施した 4 本の中 2 本の供試体で同じ箇所に微細なクラックが観察された。なお、これらのクラックの発生位置は 5 層突固めで作製した供試体の層境であったことから、供試体の作製方法の影響を受けた可能性がある。

図 6.2-3 に Coco10 の C7DW8 における 7 日養生後および乾湿繰返し 2, 4, 8 サイクル目浸水後の供試体外観を示す。供試体の外観変化から、Coco10 では 2 サイクルでクラックの発生、4 サイクルでクラックの拡大および一部試料の崩落、さらに 8 サイクルでは崩落部が多くなることが確認された。そしてこのクラックや崩落は、ココヤシ繊維が存在する部分で起こっている。先にも述べたように今回使用したココヤシ繊維は外皮がリグニンによって覆われた硬い繊維からなる為、ココヤシ繊維自体の吸水による膨張はわずかであると

考えられる。しかし、供試体作製時の締固めによって折れ曲がったココヤシ繊維においては、そのわずかな膨張を契機にココヤシ繊維の元の形に戻ろうとする力(以降、復元力と称す)が増加し、クラックの発生や試料の崩落に繋がったと考えられる。

図 6.2-4 にココヤシ繊維の復元力の 2 次元イメージを示す。図 6.2-4(a)は供試体作製直後の復元力と拘束圧のつり合いイメージで、図 6.2-4(b)は乾湿工程によるクラックの発生と浸水工程による木屑の復元力の増大(拘束圧よりも大きい)イメージである。乾燥工程では乾燥収縮(スラグおよびココヤシ繊維)によって供試体に微小な間隙が生じ、浸水工程によってココヤシ繊維が吸水することで復元力が増加すると、相対的かつ絶対的に拘束力より復元力が上回る。その結果、折れ曲がったココヤシ繊維は元の形(まっすぐ)に戻ると考えられる。これは乾湿を繰り返すと供試体側面のココヤシ繊維が四方に広がる様子からも明らかである。これが供試体内部でも起こっていると考えると、浸水工程でココヤシ繊維の復元力が増加し、乾燥によって生じたクラックが押し広げられることでクラック幅の拡大や試料の崩落が起こるものと考えられる。

図 6.2-5 に Hino10 および Coco10 の C7DW8 における各乾湿繰返しサイクルでの乾燥および浸水後に計測した体積膨張比を示す。体積膨張比とは、各サイクルでの乾燥および浸水後の平均供試体体積を 7 日養生直後の平均供試体体積で除したものである。図中のプロット点は各条件における 4 本の供試体の平均値である。図 6.2-5 より、Hino10 ではサイクル数の増加に伴う体積変化がほとんど生じなかった。一方、Coco10 では、サイクル数の増加に伴い体積が増加し、8 サイクル終了時には約 14%の体積膨張が生じた。この体積膨張は、乾燥時にわずかに体積収縮し、浸水時に体積膨張する傾向が繰り返されたためである。なお、Coco10 の 8 サイクル終了時の供試体 4 本の平均直径は乾湿繰返しを行う前(7 日養生直後)と比較して+4.6%、平均高さは+3.9%となっており、ほぼ等方的に膨張していた。木屑の材質を見ると、吸水による膨張性はココヤシ繊維よりもヒノキのほうが高いが、木屑の吸水しやすさと供試体の体積膨張しやすさには全く相関性がないことが分かる。つまり、木屑の吸水性の違いが乾湿繰返しによる供試体の体積膨張に与える影響は小さいと考えられる。

次に体積膨張の要因であると推定される復元力が繊維長さに起因するものであると考え、短く裁断したココヤシ繊維(100 サンプル: 平均長さ 8.0mm)を混合した供試体(n=4)を用い、平均繊維長 24.4mm のココヤシ繊維を使用した C7DW8 と同じ条件で DW 実験を行い、繊維長の違いが体積膨張に与える影響を比較検討した。図 6.2-5 中には、その結果 (ShortCoco10_C7DW8)も示している。その結果、ココヤシ繊維の長さの違いによる体積膨張比には有意な差は見られなかった。このことから裁断していないココヤシ繊維と裁断したココヤシ繊維で、繊維の長さの違いによって復元力に違いはなかったと考えられる。本実験の範囲では体積膨張比と繊維長に関係は見られなかったものの、繊維状の木屑が入ることで供試体の膨張性に影響を及ぼすことが懸念される。

なお、これ以降の Coco10 のデータはすべて裁断していないココヤシ繊維(繊維長 22.4mm のココヤシ繊維)を使用したものである。

次に Coco10 の C7DW8 において乾燥による体積収縮比よりも浸水による体積膨張比がより大きかった。この要因について検討するため、7 日養生後に 16 日間 80°C 炉乾燥した C7D16 および 7 日養生後に 16 日間浸水した C7W16 において、経時的な体積計測と UC test

を行い、C7DW8 との比較検討を行った。つまり、いずれの条件も供試体作製から 23 日後に UC test を実施した点で一致しているが、UC test 時の飽和度は大きく異なる。

図 14 に Coco10 の C7D16, C7W16, C7DW8 における経時的な体積膨張比の変化を示す。図中のプロットはそれぞれ同一条件における 4 本の供試体の平均値である。図 14 より、C7D16 および C7W16 のいずれにおいても、C7DW8 のような体積変化は見られなかった。この結果から、C7DW8 のような体積膨張は、乾燥による収縮と浸水による膨張を繰り返すことによって生じたと考えられる。

浸水のみあるいは乾燥のみでは体積膨張が起こらなかったことを踏まえると、乾燥によってわずかながらも収縮することで材料の劣化が生じることで、固化した部分の固化強度の低下をきたすことによって、木くずの復元力が固化による拘束力を上回り、吸水時に体積膨張が生じたものと考えられる。

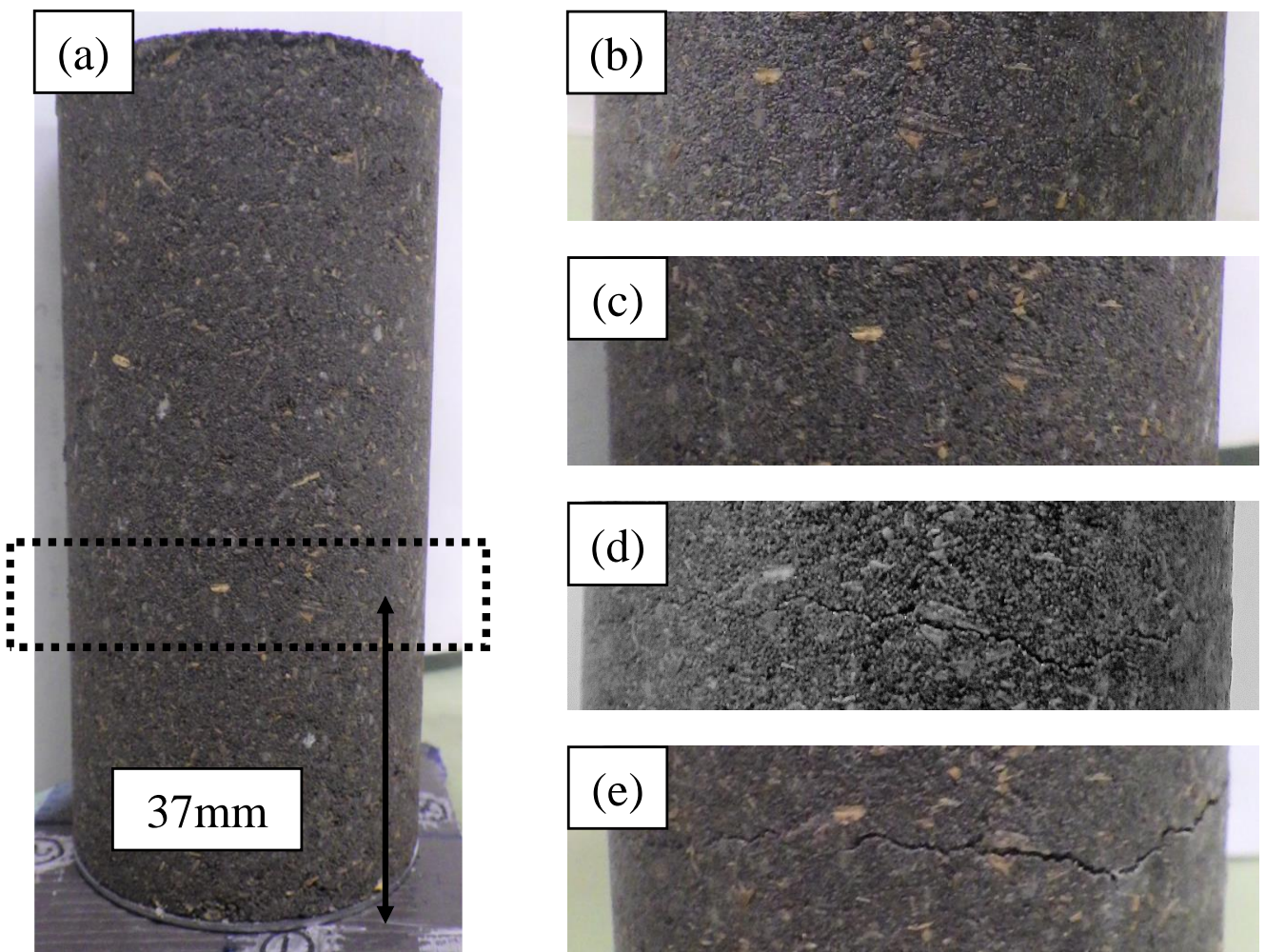


図 6.2-2 Hino10_C7DW8 の乾湿繰返しによる供試体外観の変化(a)7 日養生後(供試体全体), (b)7 日養生後(一部拡大), (c)DW 2 cycles 浸水後(一部拡大), (d)DW 4 cycles 浸水後(一部拡大), (e)DW 8 cycles 浸水後(一部拡大)

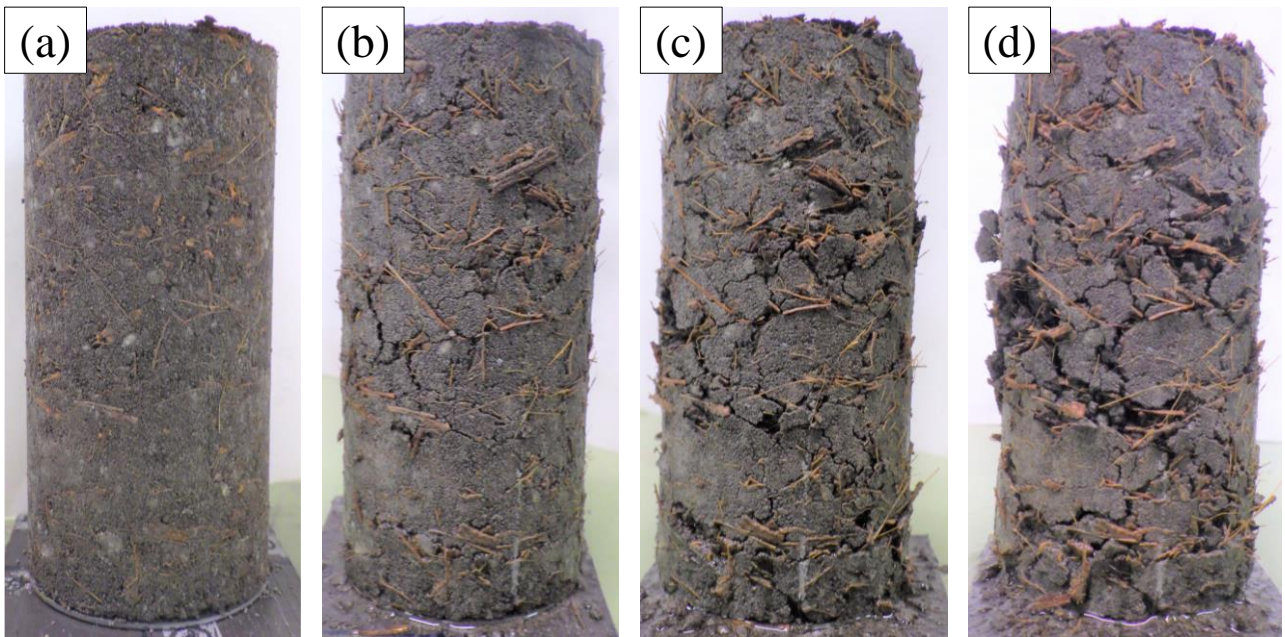


図 6.2-3 Coco10_C7DW8 の乾湿繰返しによる供試体外観の変化(a)7日養生, (b)DW 2 cycles 浸水後, (c) DW 4 cycles 浸水後, (d)DW 8 cycles 浸水後.

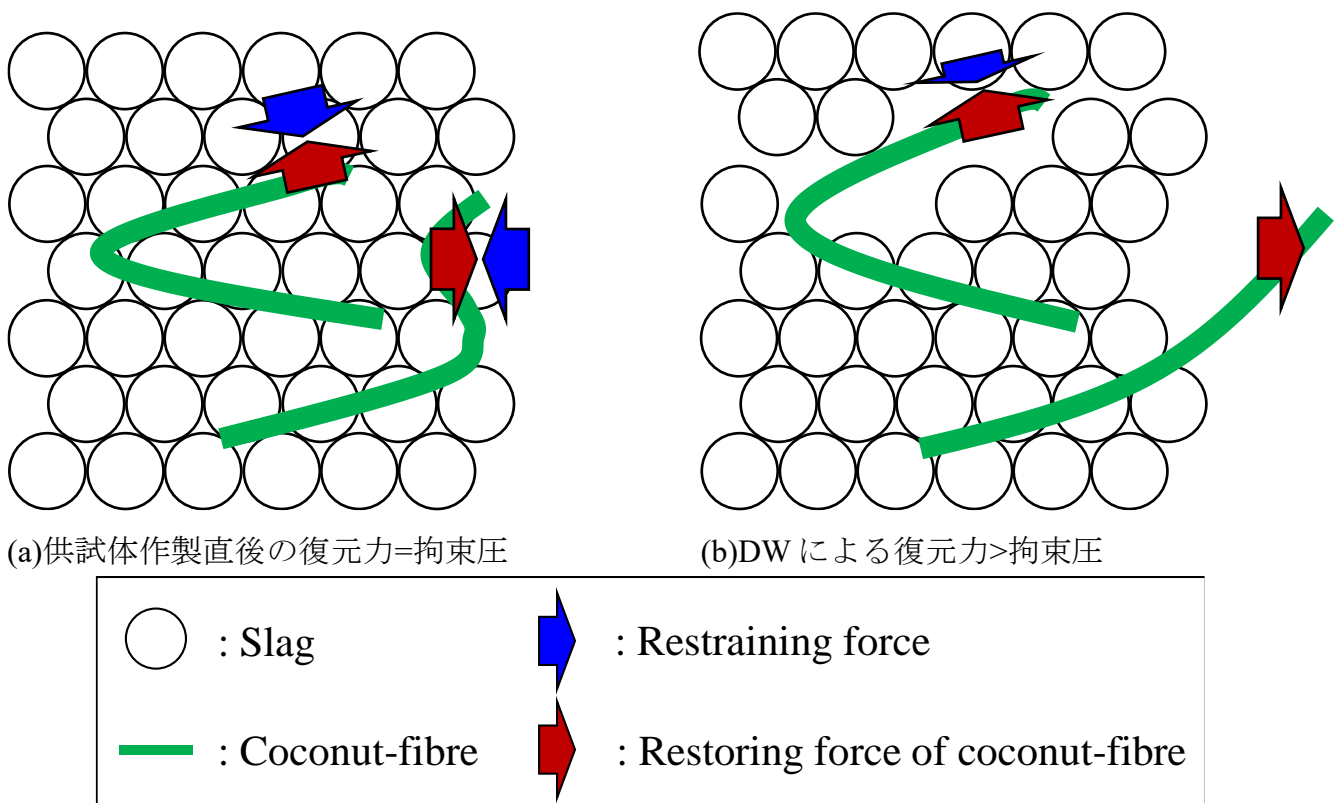


図 6.2-4 木屑繊維による復元力のイメージ

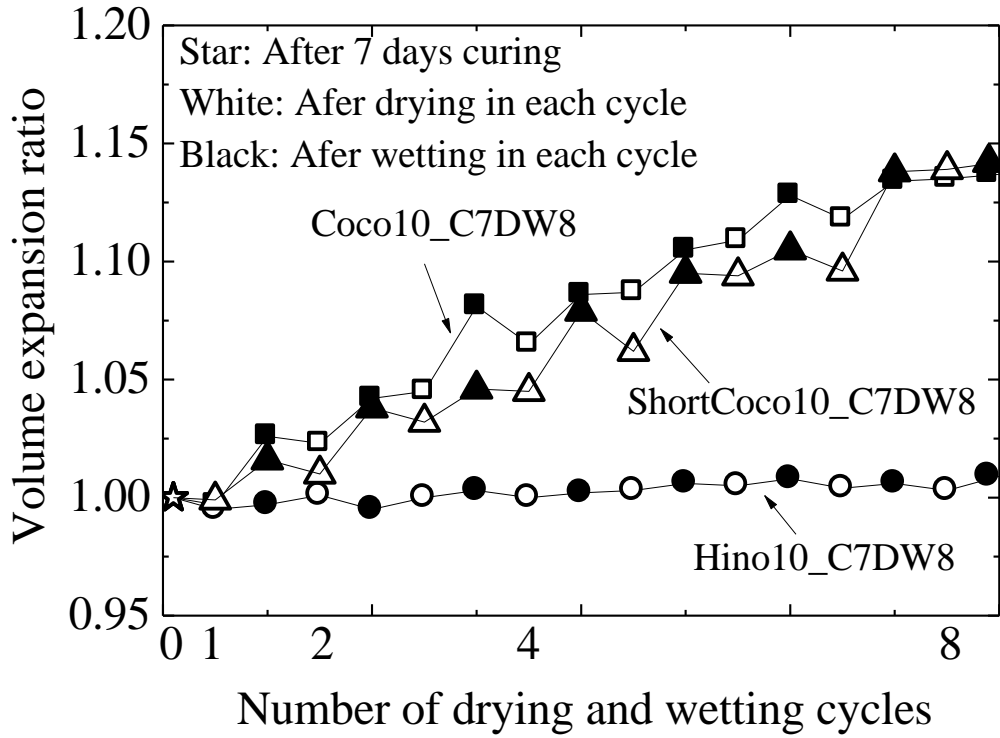


図 6.2-5 Hino10 および Coco10 の C7DW8 における各乾湿繰返しサイクルでの乾燥および浸水後に計測した体積膨張比

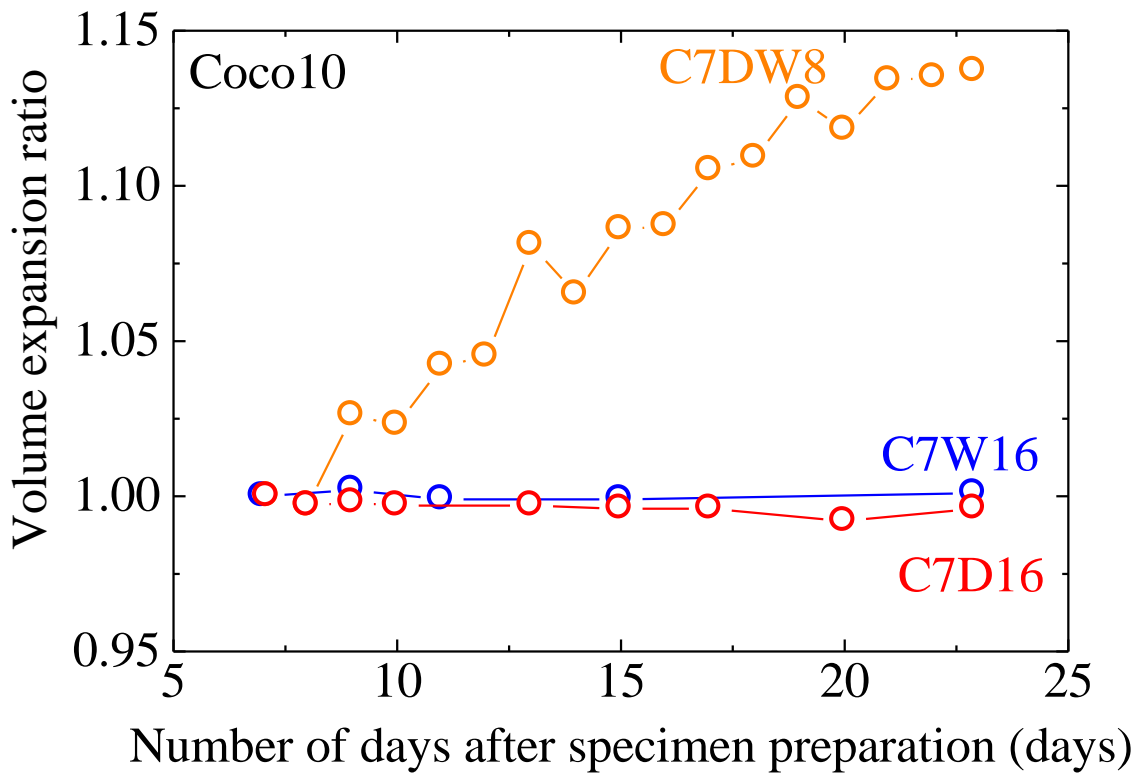


図 6.2-6 Coco10 の C7D16, C7W16, C7DW8 における経時的な体積膨張比の変化

6.2.3 DWによる木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のUC特性の変化

図 6.2-7 に Hino10 の C7, C7DW2, C7DW4, C7DW8 で実施した UC tests から得られた一軸圧縮強さ q_u と供試体作製日(=0 日)からの経過日数の関係を示す。図 6.2-7 の破線は C7 の平均値と C28 の平均値を結んだ線で、乾湿繰返しをしない条件での恒温密閉養生による q_u の推定線であり、乾湿繰返しをしない場合にはこの養生期間では、 q_u は時間とともに増加する。なお C7DW2 において、 q_u が他と比較して著しく小さい点(図中の赤丸で囲った点)が存在する。この点に関して、破壊モードも他の 3 つとは明らかに異なり、供試体の一部分の弱化によって破壊されたものであった。これらを踏まえ、安定処理土の一軸圧縮試験に関する注意点⁸⁾に基づき、ここでは C7DW2 のこの点は考察から除外して考えることにする。図 6.2-7 より、Hino10 では 0 から 4 サイクルにかけて、サイクル数の増加に伴い q_u が増加したが、4 サイクルから 8 サイクルにかけては q_u が減少した。0 から 4 サイクルにかけての q_u は推定 q_u 線と比較しても差異が見られず、4 から 8 サイクルにかけての q_u は推定 q_u 線よりも明らかに小さく、C7 と C7DW8 の q_u が同程度であった。これは、スラグの固化反応による強度増加効果と乾湿繰返しによる材料劣化による強度減少効果が互いに打ち消し合い q_u が同程度になったためと考えられる。供試体 4 本のうちの 2 本は 8 サイクル後にもクラックを確認できていないにも関わらず、8 サイクル目に q_u の低下が見られたことから、供試体の劣化は供試体外観には現れない可能性がある。

図 6.2-8 に Hino10 の変形係数 E_{50} と供試体作製日からの経過日数の関係を示す。なお、変形係数は $E_{50} = (q_u / 2) / \varepsilon_{50}$ より算出した。ここで、 ε_{50} は $q_u / 2$ 時の軸ひずみ ε_a である。図 6.2-8 より、乾湿繰返しをしないときの推定 E_{50} 線と比較すると、乾湿繰返しによって E_{50} が低下することが分かる。特に 8 サイクルの E_{50} は推定 E_{50} 線よりも小さくなることが顕著である。

図 6.2-9 に Hino10 の ε_{50} と供試体作製日からの経過日数の関係を示す。図 6.2-9 より、C7 の ε_{50} は 0.34% 程度であるのに対し、2 サイクル目の ε_{50} は 0.52% と大きい値を示した。このようになった要因として、乾湿繰返しをすることによって、初期剛性を小さくさせるような劣化が内部に生じていたと考えられる。

図 6.2-10 に Coco10 の C7, C7DW2, C7DW4, C7DW8, C23 で実施した UC test から得られた一軸圧縮強さ q_u と供試体作製日からの経過日数の関係を示す。図 6.2-10 に示す破線は C7 と C23 の平均値を結んだ線であり、乾湿繰返しをしない条件での恒温養生による q_u の推定線である。図 6.2-10 より、Coco10 ではサイクル数の増加に伴い q_u が減少した。乾湿繰返しをしない場合の推定 q_u 線と比較して明らかに強度の低下が見られることから、乾湿繰返しの初期から乾湿繰返しによる劣化の影響が大きく、乾湿繰返しサイクル数が増えるにつれて劣化の影響がより顕著になったと考えられる。そして、図 6.2-3 や図 6.2-5 と併せて考えると、体積膨張が q_u の減少の主要因のひとつであると考えられる。

図 6.2-11 に Coco10 の変形係数 E_{50} と供試体作製日からの経過日数の関係を示す。また、図 6.2-12 に Coco10 の ε_{50} と供試体作製日からの経過日数の関係を示す。図 6.2-11 より、Coco10 ではサイクル数の増加に伴い E_{50} が減少した。これはサイクル数の増加に伴って、 q_u が減少し、さらに ε_{50} が増加したことが要因である。

図 6.2-7 と図 6.2-10 の乾湿繰返しサイクル数と q_u の関係、および図 6.2-8 と図 6.2-11 の乾湿繰返しサイクル数と E_{50} の関係について、図 6.2-5 の乾湿繰返しサイクル数の体積膨張比

の関係と併せてみると、Coco10_C7DW8ではサイクル数の増加に伴いクラックが発生し、 q_u と E_{50} が減少したと考えられる。一方で、Hino10_C7DW8では乾湿繰返しサイクル数の増加に伴う体積変化はほとんど生じず、 q_u と E_{50} で変化傾向が異なる。C7DW2で q_u は増加しているのに対し、 E_{50} は減少していることから、 q_u の変化や体積の変化には影響が現れないような軽微な劣化が起きているものと考えられる。つまり、Coco10 おび Hino10のいずれの場合も乾湿繰返しによって、スラグの固結破壊や供試体構造の不安定化を引き起こしたと考えられる。

図 6.2-13 に Coco10 の C7DW8, C7D16, C7W16, C23 で実施した UC test から得られた応力ひずみ関係を示す。ここでは各条件で実施した 4 本の試験結果のばらつきは小さく、有意な差はないと判断し、代表的な結果を示した。図 6.2-13 より、C7DW8 とそれ以外の条件では応力ひずみ曲線の違いが大きく異なる。これは C7DW8 において体積膨張による供試体の劣化が顕著であったためである。また C7W16 と C23 で応力ひずみ曲線に大きな違いは見られなかった。一方、C7D16 の q_u と E_{50} は、C7W16 や C23 のそれよりも低くなるのが分かる。C7D16 は 7 日養生後に 80°C の炉乾燥機に入れられ、その 24 時間後には含水比 $w = 0.44\%$ となった。そして、その後の 15 日間はその状態が継続していたことから、炉乾燥中は水和による固化反応が進行しなかった可能性が高く、強度および剛性が低下した可能性が考えられる。しかし、C7D16 は C7DW8 より q_u が大きく、劣化の度合いが小さかったと思われる。このことから、乾湿繰返しは一度乾燥させた後の体積膨張が劣化の促進に強い影響を与えると考えられる。第 6 章 2 節の図 6.2-6 と図 6.3 の結果を併せて考えると、浸水条件であればココヤシ繊維を混合した場合でも乾湿繰返し時にみられたような材料の急激な劣化を引き起こすことはなく、乾燥状態($S_r = 1\%$ 程度)に置くと密閉状態($S_r = 60\%$ 程度の不飽和状態)や水深状態($S_r = 85\%$ 程度の不飽和状態)よりは劣化するものの、乾湿繰返しを受けるよりは強度低下が小さかった。このように供試体の置かれた水分環境によって強度発現の様子に違いが出ることが分かった。

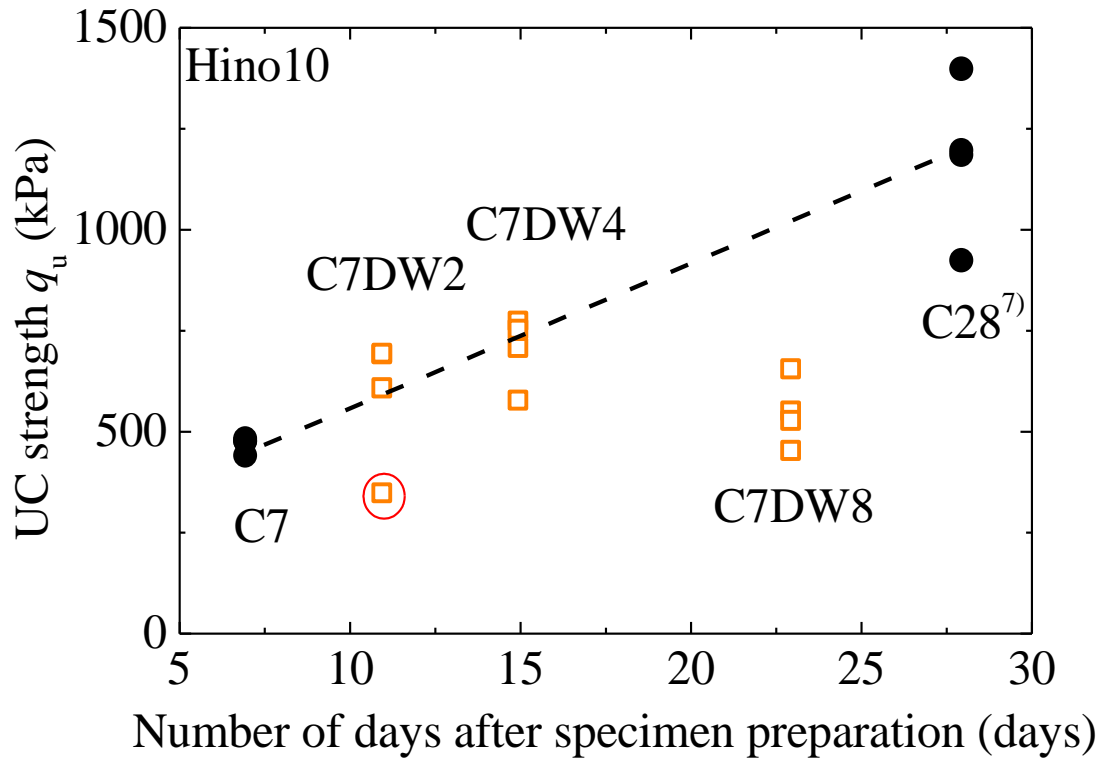


図 6.2-7 Hino10_C7, C7DW2, C7DW4, C7DW8 の一軸圧縮強さと供試体作製日からの経過日数

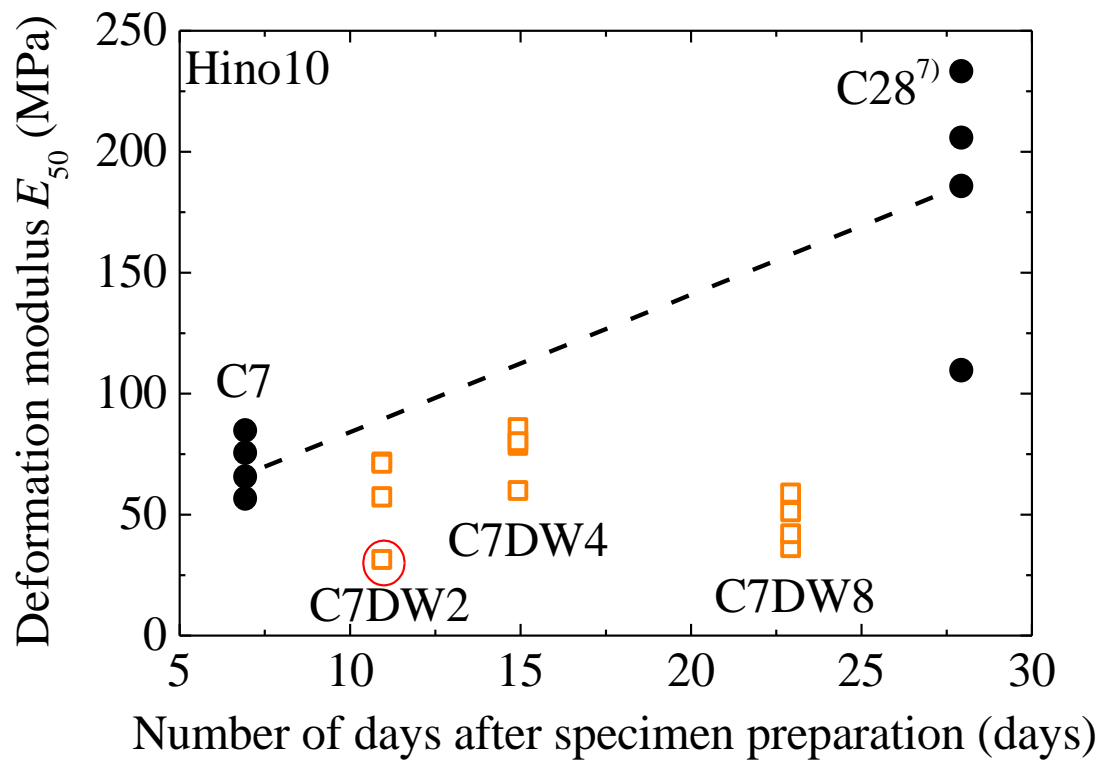


図 6.2-8 Hino10_C7, C7DW2, C7DW4, C7DW8 の変形係数と供試体作製日からの経過日数

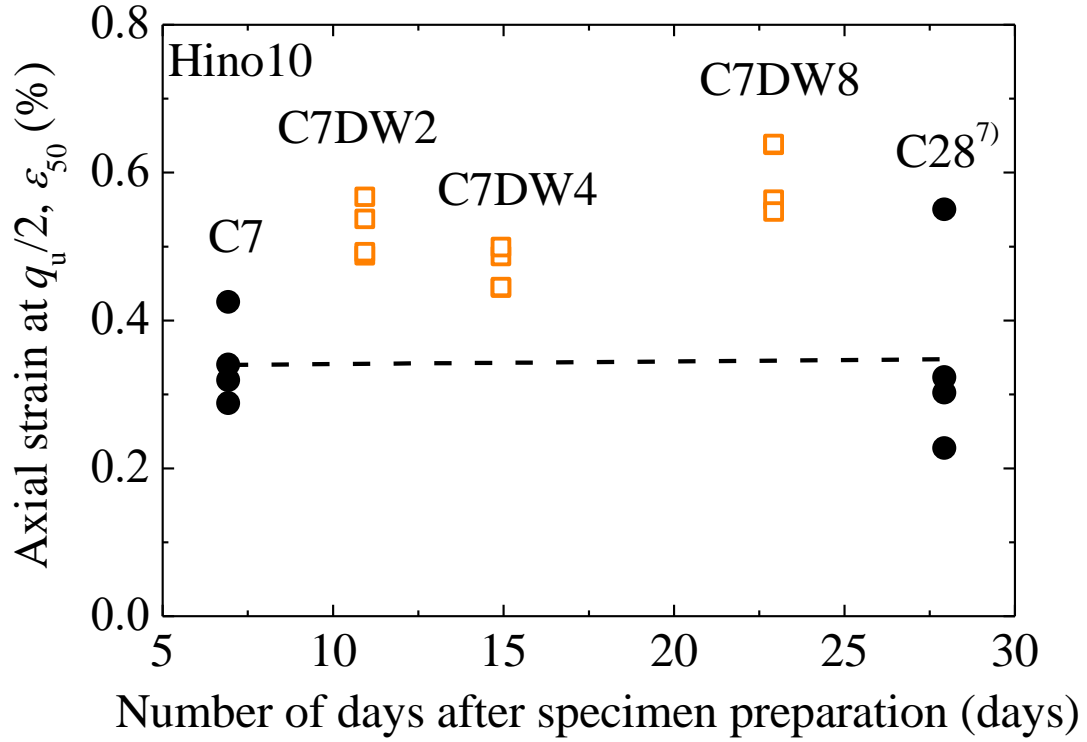


図 6.2-9 Hino10_C7, C7DW2, C7DW4, C7DW8 の ϵ_{50} と供試体作製日からの経過日数

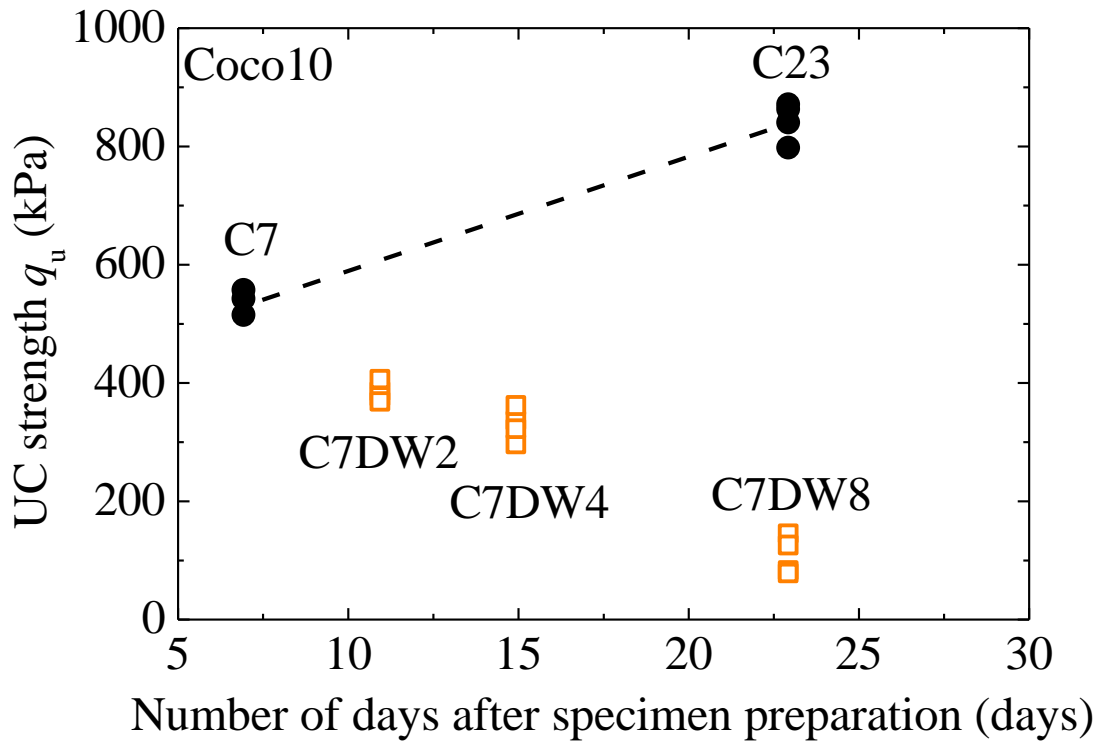


図 6.2-10 Coco10_C7, C7DW2, C7DW4, C7DW8 の一軸圧縮強さと供試体作製日からの経過日数

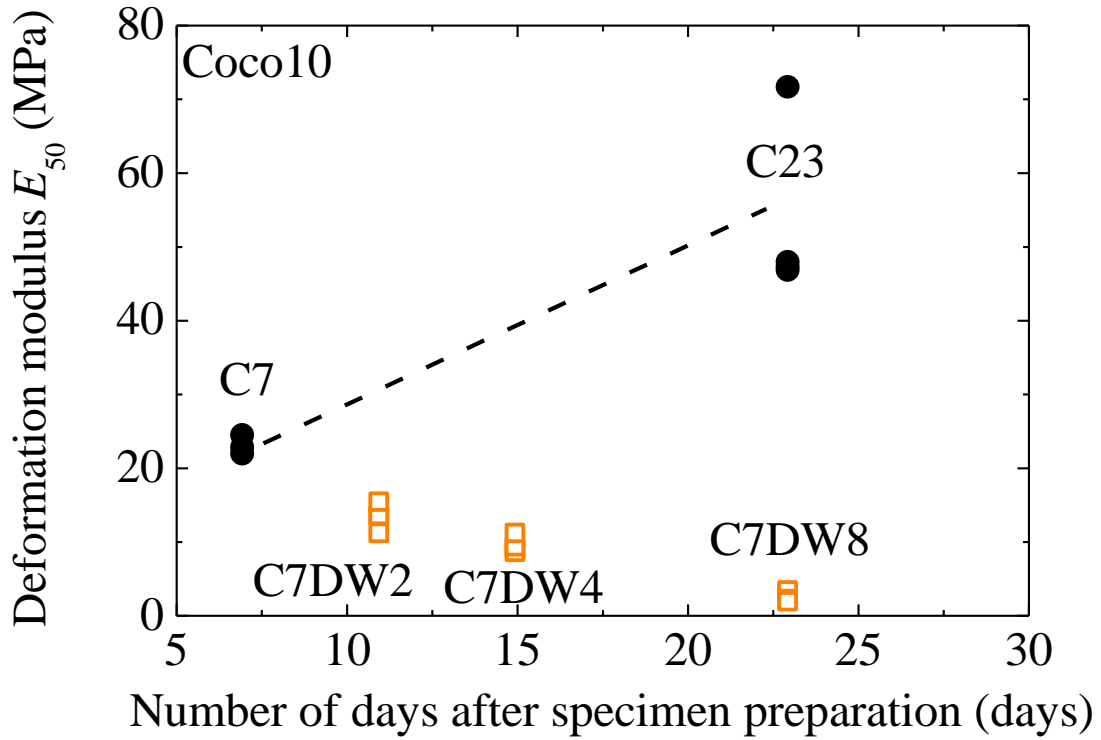


図 6.2-11 Coco10_C7, C7DW2, C7DW4, C7DW8 の変形係数と供試体作製日からの経過日数

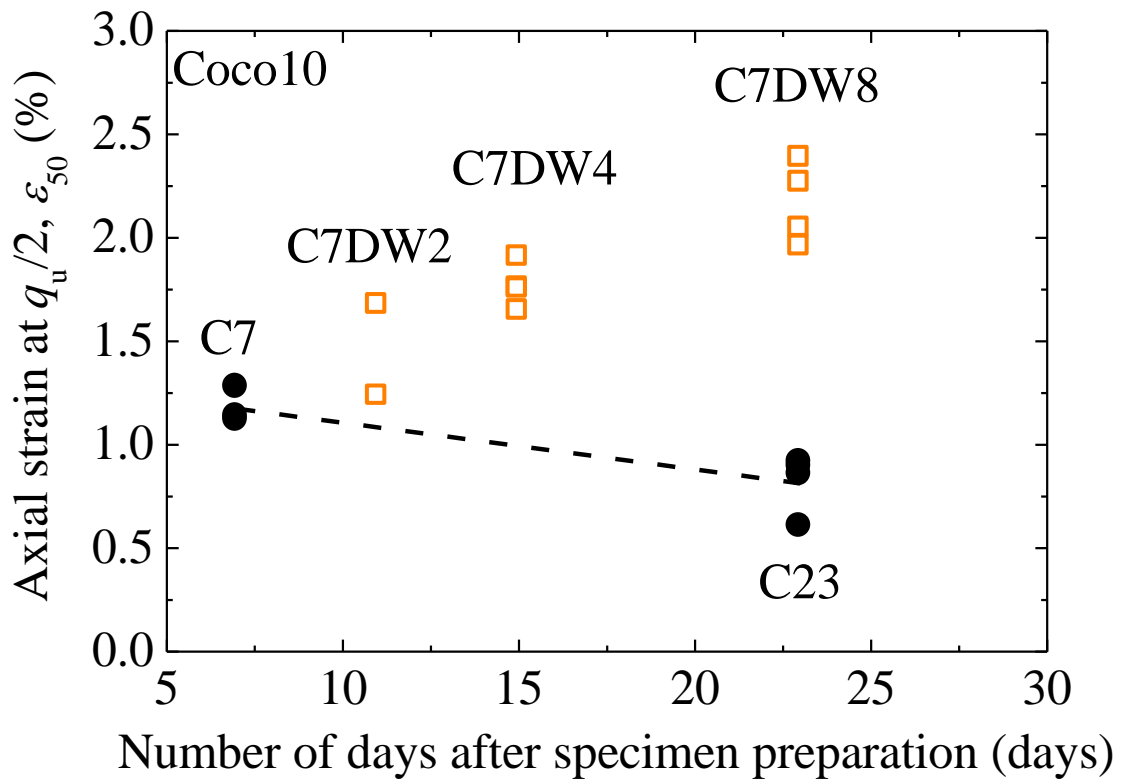


図 6.2-12 Coco10_C7, C7DW2, C7DW4, C7DW8 の ϵ_{50} と供試体作製日からの経過日数

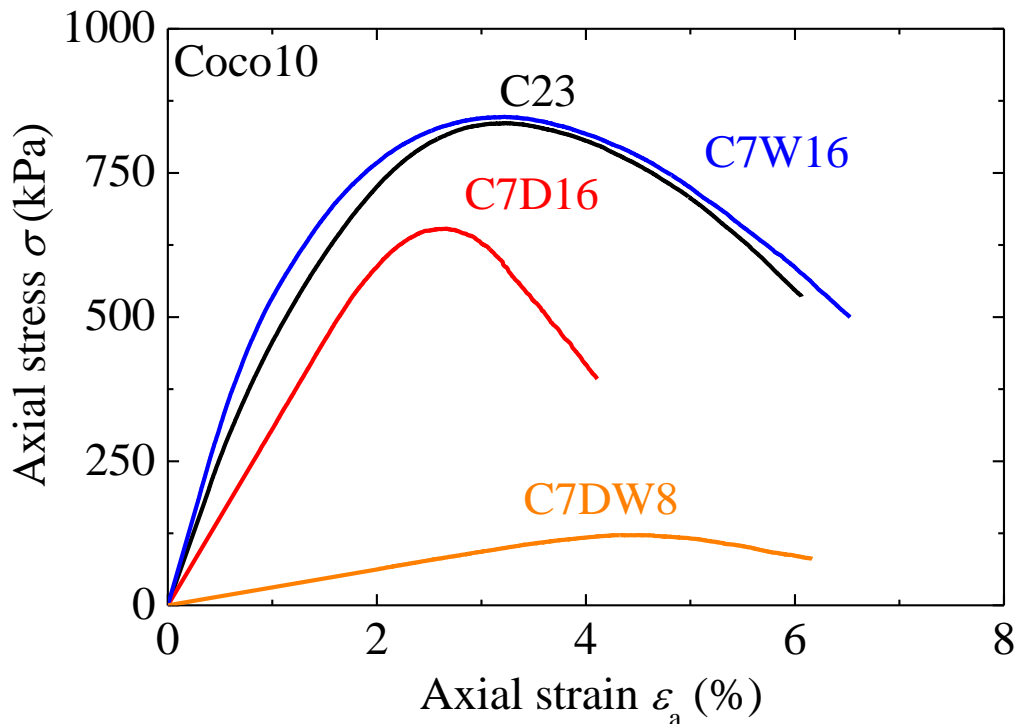


図 6.2-13 Coco10 の C7D16, C7W16, C7DW8 における応力ひずみ関係

6.2.4 高湿度環境下における耐久性

第6節2章1項~3項ではDW繰り返しや乾燥のみ、浸水のみなどの極端な条件で耐久性の評価を行った。次に、本研究材料を盛土材料として利用することを想定した場合、不飽和の高湿度環境となることが想定される。本項では表 6.2-1 に示した Coco10 の条件で作製した供試体4本を7日養生後に脱型し、温度 19°C の恒温室内に設置したデシケータ内に16日間(=DW16日相当)静置した(以降、条件名を C7US16 とする)。また、デシケータの内部相対湿度は 95% となるように硝酸カリウム飽和塩で調整し、高湿度環境を保持し実験を行った。デシケータ内に静置した供試体は2日経過ごとに体積および質量を計測し、16日静置後に一軸圧縮試験を行った。

図 6.2-14 に C7US16 の供試体4本の各経過日数で計測した平均体積を7日養生後の平均体積($V = 191.838 \text{ cm}^3$)で除すことで正規化した体積と経過日数の関係を示す。また、図 6.2-14 中には図 6.2-6 に示した C7D16 と C7W16 の結果も比較のために示す。供試体直径の計測誤差が $\pm 0.1 \text{ mm}$ 、高さの計測誤差が $\pm 0.2 \text{ mm}$ であり、体積の計測誤差は $\pm 0.6\%$ 程度となることを踏まえても、図 6.2-14 の C7US16 はほとんど体積変化していないと判断できる。また、比較のために示した7日養生後に 80°C 炉乾燥を16日間行った C7D16 や7日養生後に16日間浸水した C7W16 よりも C7US16 でばらつきが小さいが、これは供試体を各容器(デシケータ、炉乾燥機、水槽)から取り出す際の負荷がデシケータの場合は小さく、供試体の乱れが小さいためであると考えられる。このように様々な誤差を考慮しても、C7US16 の経時的な体積変化はほとんど見られない。

図 6.2-15 に C7US16 の一軸圧縮試験より得られる応力ひずみ関係を示す。また、図 6.2-

15 中には図 6.2-13 に示した C23, C7D16 および C7W16 の結果を比較のために示す. 図 6.2-15 より, C7US16 は 4 本の供試体でばらつきがほとんどないことが分かる. また, C23 や C7W16 と同等の応力ひずみ関係であり, 高い湿度の影響はないものと考えられる. ただし, 本実験は 16 日間と短期間の実験であることから, より長期的な耐久性については別途検討する必要がある.

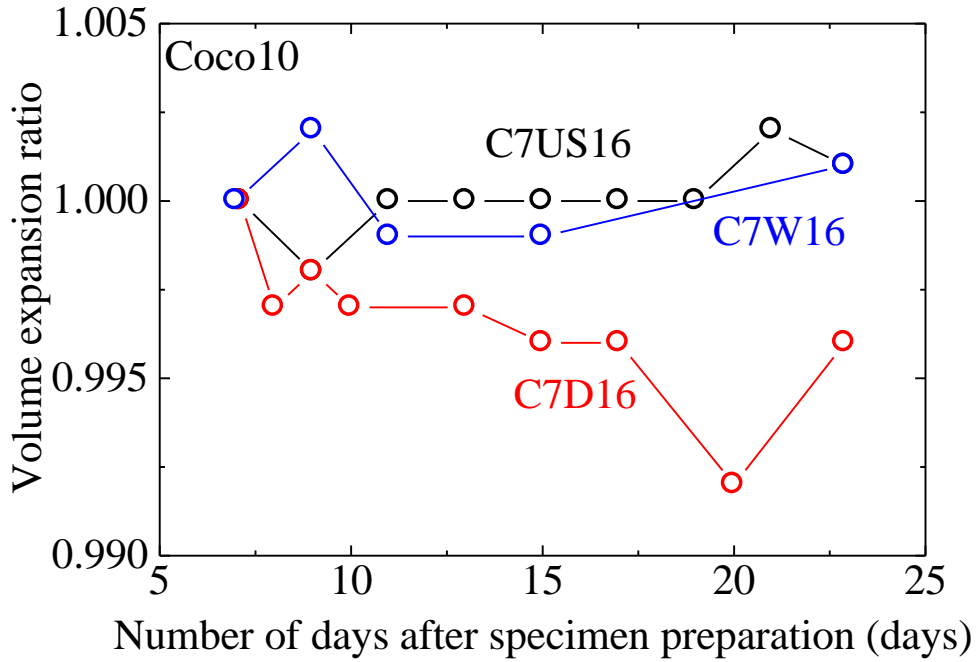


図 6.2-14 Coco10 の C7US16, C7D16, C7W16 における経時的な体積膨張比の変化

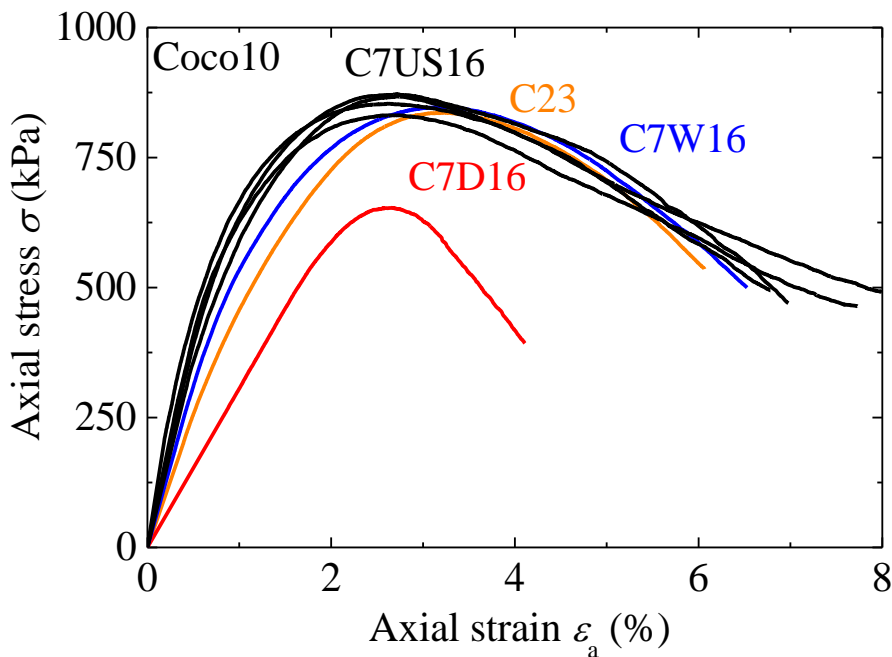


図 6.2-15 Coco10 の C7US16, C23, C7D16, C7W16 における応力ひずみ関係

6.2.5 一次元 DW 実験から見る水平拘束による体積膨張抑制効果

第6節2章1項~3項では ASTM D-4843 に従い, "脱型した"供試体に対して乾湿を繰り返すことでその耐久性を検討した. これは, 最悪のケースを想定した極端な条件での実験であり, 実地盤での利用にあたっては水平拘束が作用している. そこで本項では図 6.2-14 に示すアクリル円筒容器(内径 70mm, 高さ 160mm)内に試料を突き固めて作製した供試体に対して乾湿繰り返しを行うことで, 水平拘束状態を再現し, 乾湿繰り返しに対する耐久性を検討した. なお, 本検討では供試体の体積膨張の大きかったココヤシ繊維混合割合 10 vol.%(Coco10)の条件で実験を行った. ココヤシ繊維($\rho_s = 0.53 \text{ Mg/m}^3$, 100 サンプル:平均直径 0.27 mm, 平均長さ 24.4 mm)を用いて, 表 6.2-1 の乾燥密度および含水比となるように供試体を作製した.

図 6.2-15 に Coco10 の C7DW8 における各乾湿繰り返しサイクルでの乾燥および浸水後に計測した体積膨張比を示す. 先にも述べたように体積膨張比とは, 各サイクルでの乾燥および浸水後の平均供試体体積を 7 日養生直後の平均供試体体積で除したものである. また, 本検討ではアクリル容器の都合上, 1 つの供試体でのみ実験を行った. なお, 図中には比較のために図 6.2-5 の Coco10_C7DW8 の結果も示している. 図 6.2-15 より, 水平拘束がある Coco10 では乾湿繰り返しによる供試体の膨張は全く見られないことが分かる. アクリルによる拘束圧については定量的に分からないが, 本実験結果から繊維状のココヤシ繊維を混合した場合でも水平拘束の有無によって乾湿繰り返しが与える影響は顕著に異なり, 実際の地盤においても水平拘束が想定されることから, クラックが生じるなどの水平拘束が除荷されない限りにおいては乾湿繰り返しによる耐久性は相当に高いものと考えられる.



図 6.2-14 一次元乾湿繰り返し実験に用いたアクリル円筒容器と突固めた供試体

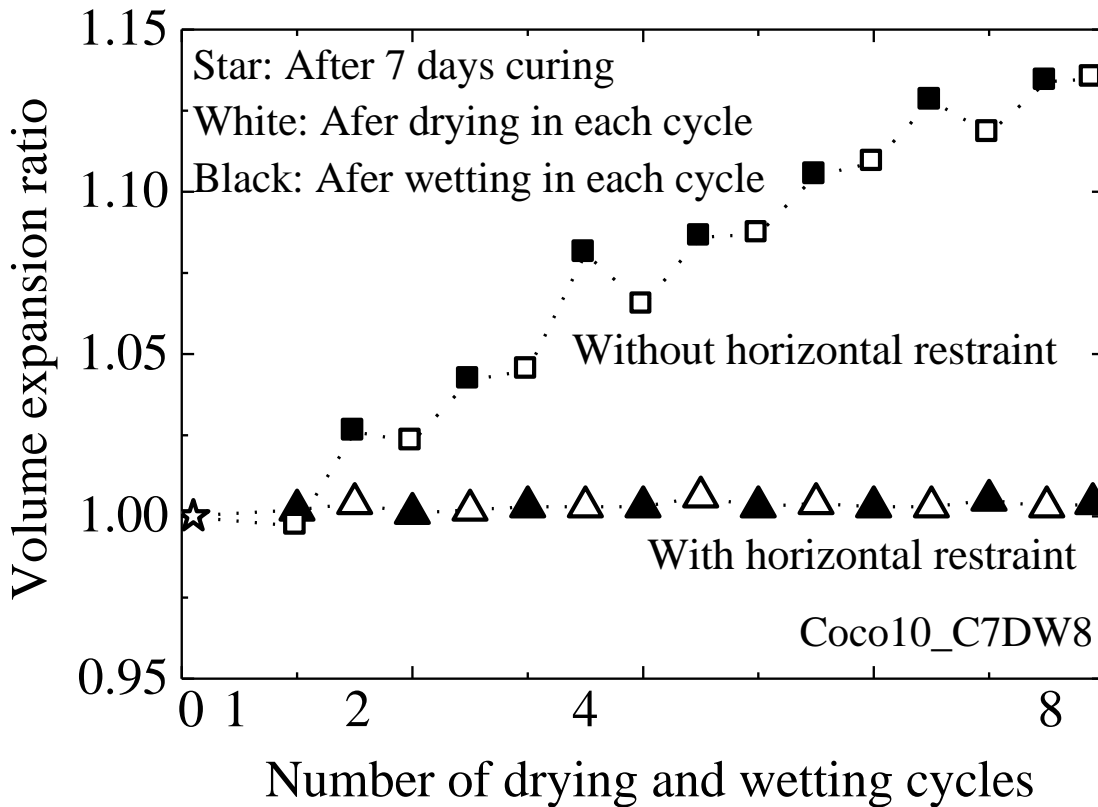


図 6.2-15 水平拘束の有無による Coco10 の C7DW8 を用いた各乾湿繰返しサイクルでの乾燥および浸水後に計測した体積膨張比の違い

以下に本節で得られた知見を示す。

- 粒状のヒノキを 10 vol.%混合したスラグ供試体(Hino10)では、0 から 4 サイクルの乾湿繰返しでは、サイクル数が増加しても、 q_u は増加するが、8 サイクルでは、それまでよりも q_u が減少した。また、Hino10 の e_{50} は乾湿繰返しをすることによってしない場合よりも顕著に増加する。一方、繊維状のココヤシ繊維を 10 vol.%混合したスラグ供試体(Coco10)では、サイクル数の増加に伴い、 q_u は減少し、 e_{50} は増加する。
- Hino10 ではサイクル数の増加に伴う体積変化はほとんど起こらない。一方で、Coco10 では体積収縮と体積膨張を繰返しながら体積が顕著に増加する。
- Hino10 では、乾湿繰返しによる供試体の損傷がUC特性に表われるが、体積変化には表れず外観から供試体の劣化損傷を判断することは難しい。また、Coco10 では、乾湿繰返しによる供試体の損傷は、UC特性と体積変化に表われる。
- Coco10 での乾湿繰返しによる体積膨張はココヤシ繊維の復元力に起因するものと考えられるが、短く裁断(平均長さ 8.0 mm)したココヤシ繊維を混合した場合の体積膨張比と元の長さ(平均長さ 24.4 mm)のココヤシ繊維を混合した場合の体積膨張比にほとんど違いは見られなかった。ココヤシ繊維の長さをより短くした場合の復元力発現について、さらなる検討が必要である。
- Coco10 は、乾燥と浸水を繰り返すことによって体積膨張傾向を示すものの、乾燥およ

第6章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の耐久性

び浸水のいずれか片方でも起こらなければ体積膨張は起こらない。つまり Coco10 は、常に飽和した環境下で使用することで体積変化も起こさず、力学特性も変化しない可能性がある。

- 水平拘束の有無によって乾湿繰り返しによる体積膨張傾向は大きく異なり、水平拘束されている場合には繊維状の木屑を混合した場合にも全く体積変化しない。

6.3 高アルカリ・嫌気性環境下における木屑の腐朽実験

篩下残渣と鉄鋼スラグ(製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末)を混合した材料を土構造物に適用する場合、長期的な視点で捉えると材料内の木屑が腐朽することによって、混合材料の強度(せん断強さ、剛性、靱性など)が低下する可能性ある。本研究で対象とする木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料は、(1)製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末が pH = 11.5 以上であることから混合材料内の環境が高アルカリ性であり、(2)締固めて固化した材料であることから、供試体内部が嫌気性環境である可能性が高い。つまり、アルカリ環境かつ酸素供給量がほとんどない環境が木屑の腐朽抑制に対し有利に働き、本研究材料は腐朽に対して高い耐久性を有していると考えられる。本節では木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料内の木屑の腐朽が力学特性に与える影響および腐朽菌の繁殖過程を把握することを目的としている。

6.3.1 木屑腐朽実験概要

木材の腐朽による耐久性を評価する方法として、「木材保存剤-性能基準及びその試験方法(JIS K 1571:2010)」での評価が多く行われている。この試験で2種の腐朽菌(白色腐朽菌と褐色腐朽菌)のうち白色腐朽菌(カワラタケ)を用いて腐朽について検討することを検討しているが、本検討では褐色腐朽菌であるオオウズラタケを用意することが困難であったため白色腐朽菌のみで検討を行った。ただし、今回使用するココヤシ繊維はその多くがリグニンであること⁹⁾、さらに褐色腐朽菌(オオウズラタケ)はセルロースおよびヘミセルロースを選択的に分解し、リグニンを分解しないのに対し、白色腐朽菌はリグニンも分解する¹⁰⁾といった点で、ココヤシ繊維がより腐朽しやすい菌を用いて実験を行っている。

図 6.3-4 に本研究で用いた白色腐朽菌(カワラタケ)を繁殖させた PDA 寒天培地(以下、寒天)の外観と、走査型顕微鏡(以下、SEM)で撮影した白色腐朽菌の外観を示す。白色腐朽菌は本大学理工学部応用生物科学科鎌倉研究室にて培養したものをを用いた。また、SEMの画像撮影は本大学理工学部土木工学科コンクリート工学研究室および ART-HIKARI 株式会社所有の機器を拝借して行った。

篩下残渣とスラグを混合した材料で想定される木屑の腐朽状況として具体的には、(1)土構造物を造成する段階では、材料内の木屑が腐朽していないが、供用期間中に外部から菌が侵入する、(2)土構造物を造成する段階では、材料内の木屑が腐朽していないが、元々材料内に木屑を腐朽させる菌が存在する、(3)土構造物を作製する段階で、材料内の木屑が既に腐朽している、以上の計3パターンの状況が主に想定される。そのため、上述した(1)~(3)各々の状況を再現した供試体、すなわち(1)木屑とスラグを混合した供試体を作製した後、外部に白色腐朽菌を接種させる(外部腐朽菌接種供試体、図 6.3-1 参照)、(2)木屑とスラグを混合した供試体を作製する際に、供試体の層間に白色腐朽菌を接種させる(内部腐朽菌接種供試体、図 6.3-2 参照)、(3)白色腐朽菌により腐朽させた木屑をスラグと混合し供試体を作製する(腐朽木屑混合供試体、図 6.3-3 参照)。

供試体作製方法は第3章3節に示す手順と同様であるが、作製中(または作製後)に白色腐朽菌の付いた(または無菌)寒天を供試体に設置する。寒天はコルクボーラー(内径 7 mm)

第6章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の耐久性

で切り抜き使用した。図 6.3-4 に白色腐朽菌の SEM 画像を示す。図 6.3-4 より寒天培地上での白色腐朽菌は多数分枝した網目状の菌であることが分かる。作製した供試体は25°Cに設定したインキュベータ内で養生を行った。それぞれの供試体に対し、養生中または所定の期間養生後に一軸圧縮試験、供試体の質量計測、画像撮影(光学カメラ、走査型電子顕微鏡)、スケッチを実施し、供試体の物理的変化を把握することで耐久性の検討を行った。

表 6.3-1 に実験ケース名、供試体作製条件、養生期間(一軸圧縮試験を実施するまでの期間)を示す。表 6.3-1 の実験条件名を図 6.3-3、図 6.3-3、図 6.3-3 のキャプションのカッコ内と対応している。実験は基本的にココヤシ繊維 10 vol.%混合スラグ 4(2019)で行った。木屑混合割合を 10 vol.%とした理由は、前節までで明らかになったように、スラグにココヤシ繊維を 10 vol.%混合した場合にスラグのみよりも大きなせん断強度を発揮し、高い靱性を備えた材料となる可能性があるためである。同時に木屑粒子とスラグ粒子の境界が明確なため菌の繁殖が視認しやすいと考えたためである。なお、試験は同一条件で $n = 3$ 以上で実施するのが望ましいが、本検討では白色腐朽菌や腐朽ココヤシ繊維の量が限られていたため、条件によって 1 本しか実施できていないものもある。ただし、複数本実験を行っている場合でも、外観の変化に関する検討では同一条件ないでのばらつきに有意差はないと判断し、代表的な 1 本を示している。

菌付き寒天

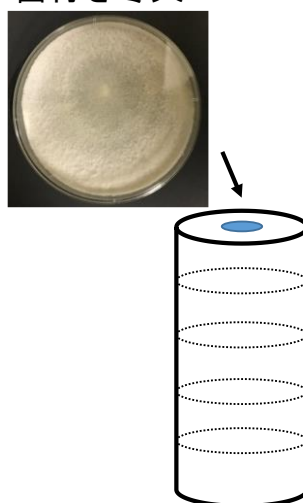


図 6.3-1 外部腐朽菌接種供試体のイメージ(5層目菌)

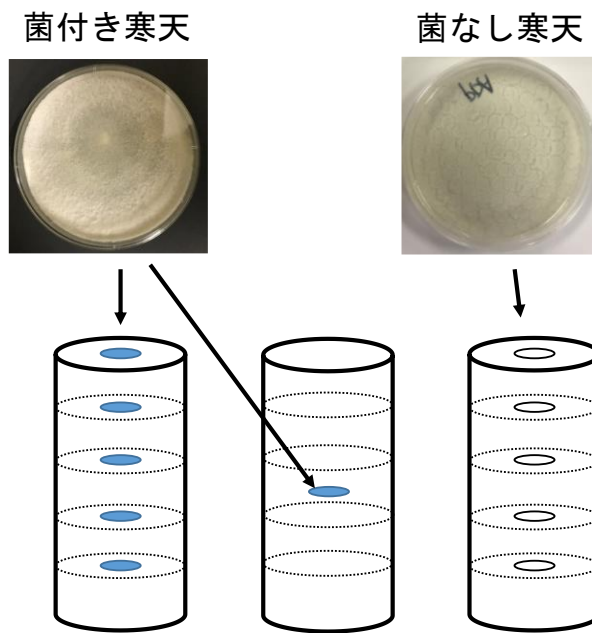


図 6.3-2 内部腐朽菌接種供試体のイメージ(左:5層間菌, 中:重心菌, 右:5層間無菌寒天)

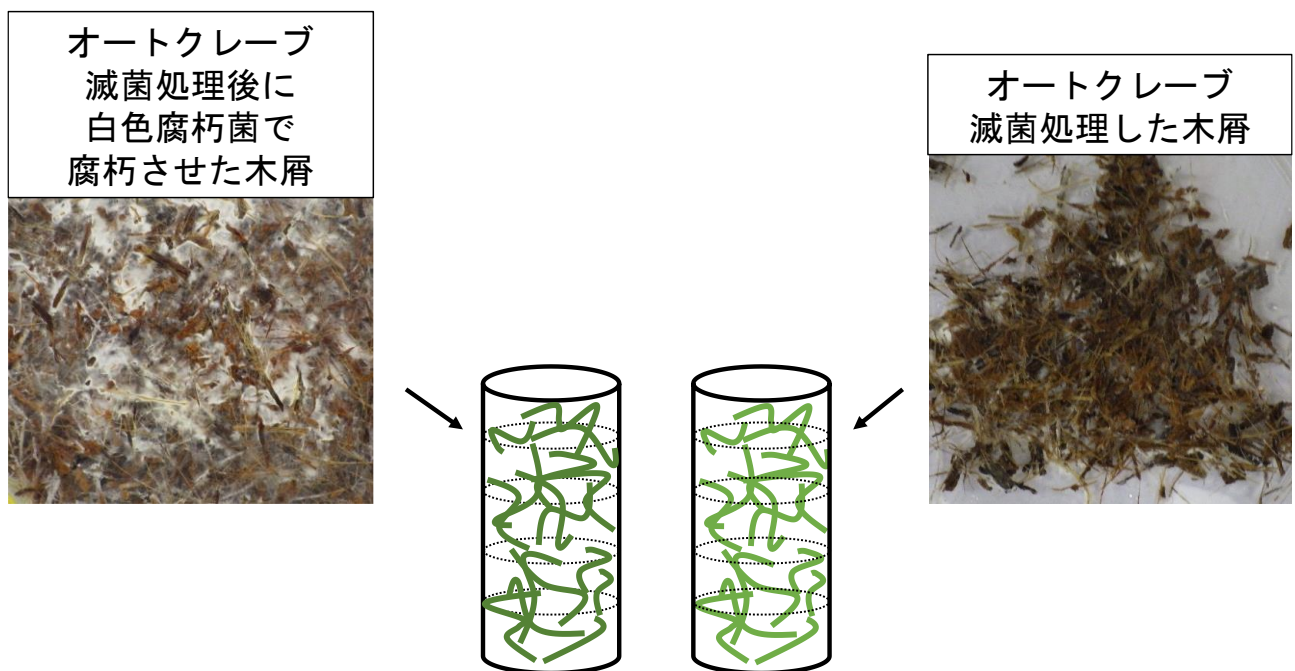


図 6.3-3 腐朽木屑混合供試体のイメージ(左:腐朽木屑混合, 右:滅菌木屑混合)

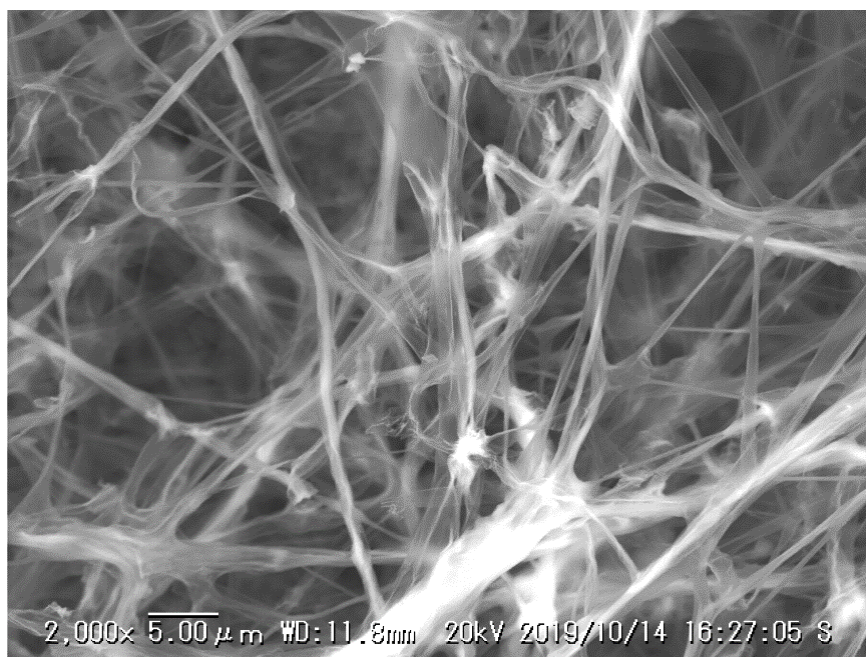
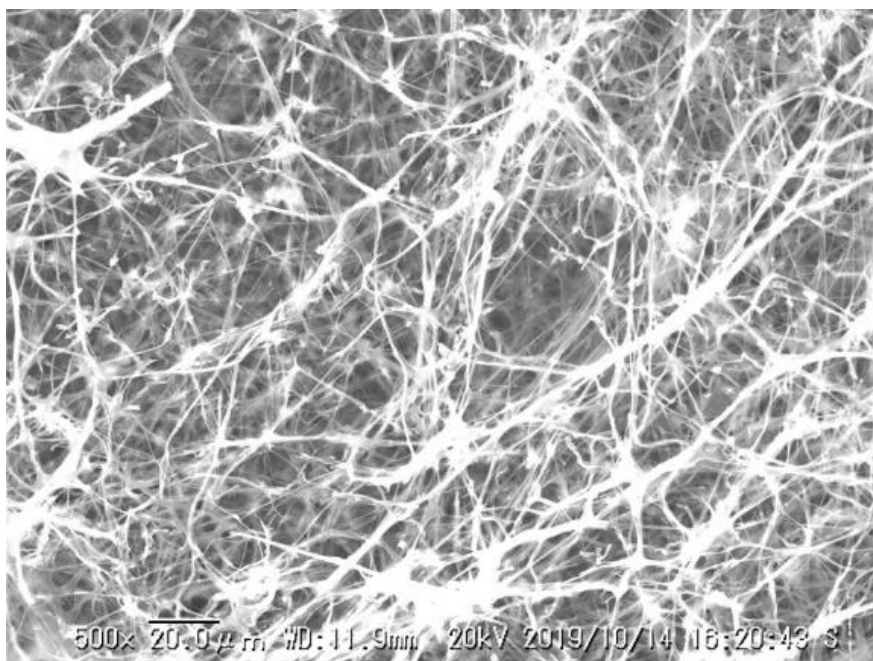


図 6.3-4 腐朽菌の SEM 画像 (上:500 倍, 下:2000 倍)

第6章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の耐久性

表 6.3-1 実験条件と供試体作製条件と養生期間

実験 No.	実験条件	実験条件名	供試体作製条件				最大養生日数(日)	写真撮影(日) (供試体作製からの日数)	作製本数 (一軸圧縮試験数)
			スラグ4(2019)と混合する木屑の種類と様子	木屑の内割混合体積(vol.%)	目標乾燥密度 ρ_d (Ma/m ³)	目標含水比 w (%)			
①	外部腐朽菌接種供試体	5層目菌	なし(スラグ4(2019)のみ)	0	1.98	13.3	328	0, 7, 14, 21, 28, 49, 70, 91, 328	1 (0)
②				33	1.12	40.9	376	0, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 63, 70, 91, 112, 133, 376	3 (2)
③				10			364*	0, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 70, 112, 133, 364	1 (0)
④	内部腐朽菌接種供試体	5層間菌	自然状態のココヤシ繊維	10	1.68	14.2	372	0, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 63, 70, 91, 98, 112, 133, 328	5 (4)
⑤				10			371	0, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 70, 91, 112, 133, 371	5 (4)
⑥				10			369	0, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 63, 70, 91, 112, 133, 369	4 (3)
⑦	腐朽・滅菌木屑混合供試体	5層間無菌寒天	オートクレーブ滅菌処理後に白色腐朽菌で腐朽させたココヤシ繊維	10			84	0, 7, 42, 84	2 (2)
⑧				10			84	0, 7, 42, 84	2 (2)

6.3.2 画像(光学カメラ・SEM-EDX)判別による木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の腐朽菌浸食

図 6.3-5 に No.①のスラグ 4(2019)のみ 5 層目菌の供試体上面の経時的な変化を示す。図 6.3-5 より、5 層目に白色腐朽菌を接種したスラグ 4(2019)のみの供試体では約 1 年経過後も供試体の上面に菌の広がり確認できない。これは栄養源である木屑が供試体中に存在しなかったため、もしくはスラグのアルカリ性が菌の繁殖を抑制したためだと思われる。

図 6.3-6 に No.②ココヤシ繊維 10 vol.%混合 5 層目菌の供試体上面の経時的な変化を示す。なお、7 日以降の写真では接種した寒天培地がなくなっているが、これは供試体を被覆しているキャップに寒天が付着してしまったためである。しかし、白色腐朽菌は一度対象物に接種すると、繁殖条件が整い次第、接種箇所から繁殖可能であるため、腐朽状況の観察には影響を与えないと考えられる。図 6.3-6 より、7 日後に白色腐朽菌を接種した箇所とは異なる箇所(写真の中央下方やや左)に 1.5 mm 程度の白い球状の菌が繁殖していることが分かる。そして、その球状の菌が時間経過とともに広がり、56 日後には相当に大きな繁殖領域になっていることが確認できる。さらに 91 日後からは写真の上方にも菌が広がり、最終的に腐朽している部分の供試体上面を占める割合は 50~60%程度となっている。実験前の想定では、腐朽が起こるとすれば上面中央に接種した白色腐朽菌を中心に同心円状に繁殖が進むと考えていた。しかし、接種した上面中央部には菌の繁殖を確認できなかった。この要因については以下の結果と併せて考察する。

図 6.3-7 から図 6.3-10 に No.③~No.⑥の供試体上面の経時的な変化を示す。図 5.3-7 から図 3-9 より、すべての条件で 7 日後には上面の一部が白く腐朽しており、養生期間の増加に伴い、腐朽している部分の供試体上面を占める割合が増える。また、この白い部分はすべてココヤシ繊維上に存在し、スラグ上にはほとんど存在しないことが分かる。さらに図 5.3-7 から図 3-9 では供試体上面周辺部のほうが供試体上面中央部よりも腐朽の進行が早く、菌が活発に活動しているように思える。しかし、偶然ココヤシ繊維が上面中央部に少なかったとも考えられる。そこで図 6.3-6 を改めてもう一度見てみると、上面中央部にも多くのココヤシ繊維が存在している。このことから、供試体の養生方法について考えてみると、供試体上面はプラスチックのキャップで被覆していたが、キャップとモールドには微小な隙間がありそこを通じて空気は供給される環境にあったと思われる。すなわち、上面中央部は上面周辺部よりも空気の供給が少なく、それが菌の繁殖の違いに影響したと推察できる。

次に、図 6.3-10 の無菌寒天(No.⑥)を 5 層間に接種した場合にもココヤシ繊維上および寒天上に菌が繁殖していたことについて、(1)元々ココヤシ繊維に存在していた休止菌が活動し、成長した、(2)供試体作製時に外部から侵入した菌が成長したことが要因として挙げられる。この実験を始めるまでにココヤシ繊維を 33 vol.%混合した供試体の 84 日養生で 1 度だけ 5 mm×9 mm 程度の菌を確認したことがあったが、それ以外では配合条件(ココヤシ繊維 5, 10 vol.%混合)によらず菌の繁殖を確認することがなかった為、今回の実験では滅菌処理をしていないココヤシ繊維を用いた。しかし、力学試験に用いた供試体と本検討の供試体とでは養生温度(20°C or 25°C)と供試体の被覆の仕方(ラップ or プラスチックキャップ)が異なる。そこで温度と被覆方法が腐朽に与える検討を行った。

図 6.3-11 にココヤシ繊維 10 vol.%混合スラグ 4(2019)の養生温度と被覆方法の異なる 4 パターンの供試体上面の様子を示す。なお、図中に示したように、(a)は無菌寒天を接種して

第6章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の耐久性

いるが、(b)～(d)は無処理であるため、やや供試体作製方法が異なる。また、(d)の 20°C かつラップ養生の結果は力学試験に用いた供試体であるため、(a)、(b)、(c)とは養生期間が異なる。図 6.3-11 より、モールド上面の被覆がキャップの場合((a)と(c))には、養生温度に関わらず、養生開始から 35 日が経過すると、供試体上面に菌が確認できるが、被覆がラップの場合((b)と(d))には、養生温度に関わらず、菌を確認できない。つまり、No.⑥の無菌寒天を 5 層間に接種した供試体上面に菌が繁殖した理由は、モールド上面の被覆をキャップで行ったため供試体内に空気が供給され、元々ココヤシ繊維に存在していた菌、もしくは供試体作製過程で侵入した菌が成長したものと考えられる。そこで No.⑥のココヤシ繊維に付着していた菌(作製日から 17 日後)および No.⑥の無菌寒天に付着していた菌(作製日から 67 日後)の SEM 画像撮影を行った。図 6.3-12 にそれらの SEM 画像を示す。図 6.3-12 より、No.⑥内での菌の違いは明確でないが、図 6.3-4 に示した白色腐朽菌との違いは明確である。しかし、図 6.3-4 に示した白色腐朽菌は寒天培地で培養した菌であり、図 6.3-12 とは生育環境が異なる。そこでココヤシ繊維に付着していた菌を寒天培地に移し、繁殖後に SEM 画像撮影を行った。図 6.3-13 にそれらの画像を示す。なお、ここでは No.⑤重心菌(供試体作製から 28 日後)の供試体上面の任意の 3 ヶ所のココヤシ繊維に付着した菌を殺菌したピンセットで寒天培地に移植して約 1 ヶ月経った寒天培地から採取した菌である。図 6.3-13 より、いずれも白色腐朽菌と異なる菌であることは明確であり、同時に同一供試体でも繁殖している菌が異なることが分かる。

以上、ここまで約 1 年経過後の供試体上面の様子を観察することで、菌の繁殖過程を評価・検討した。以下にここまでを簡単にまとめる。

- (1) スラグのみでは腐朽菌が必要な栄養分が不足している、またはスラグの高アルカリ性によって、約 1 年経過しても白色腐朽菌は繁殖せず、見かけ上の変化は見られない。
- (2) ココヤシ繊維を 10 vol.% 混合した場合、養生 7 日後にはすべてのケースでココヤシ繊維上に菌が繁殖し始め、91 日後には供試体上面の相当な割合が菌で覆われる。
- (3) 本検討では白色腐朽菌の繁殖は確認できず、ココヤシ繊維上に繁殖していた菌は元々ココヤシ繊維に存在していた菌(もしくは空気中の菌)である。
- (4) 様々な状況を想定して白色腐朽菌を接種したが、元々ココヤシ繊維に菌がいたと考え、すべての条件で同一の試験条件になっている可能性が高い。

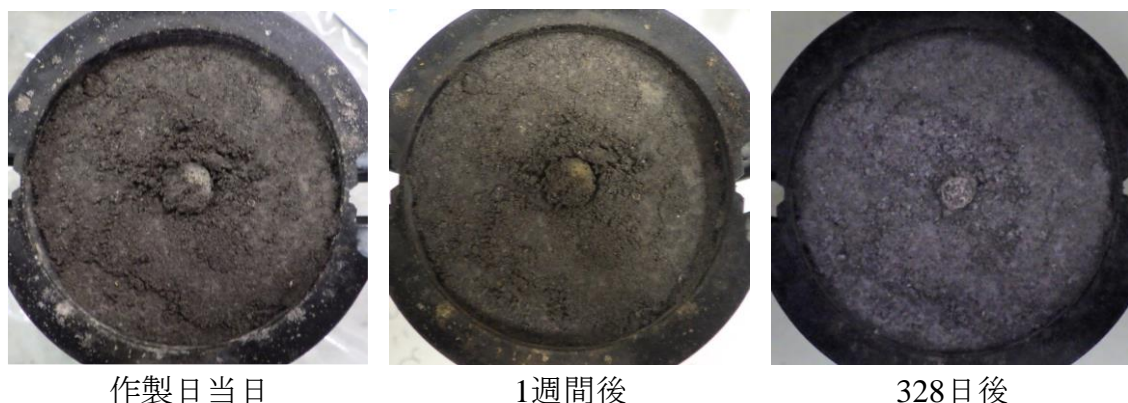


図 6.3-5 No.①スラグのみ 5 層目菌の供試体作製日とその 328 日後の供試体上面の様子

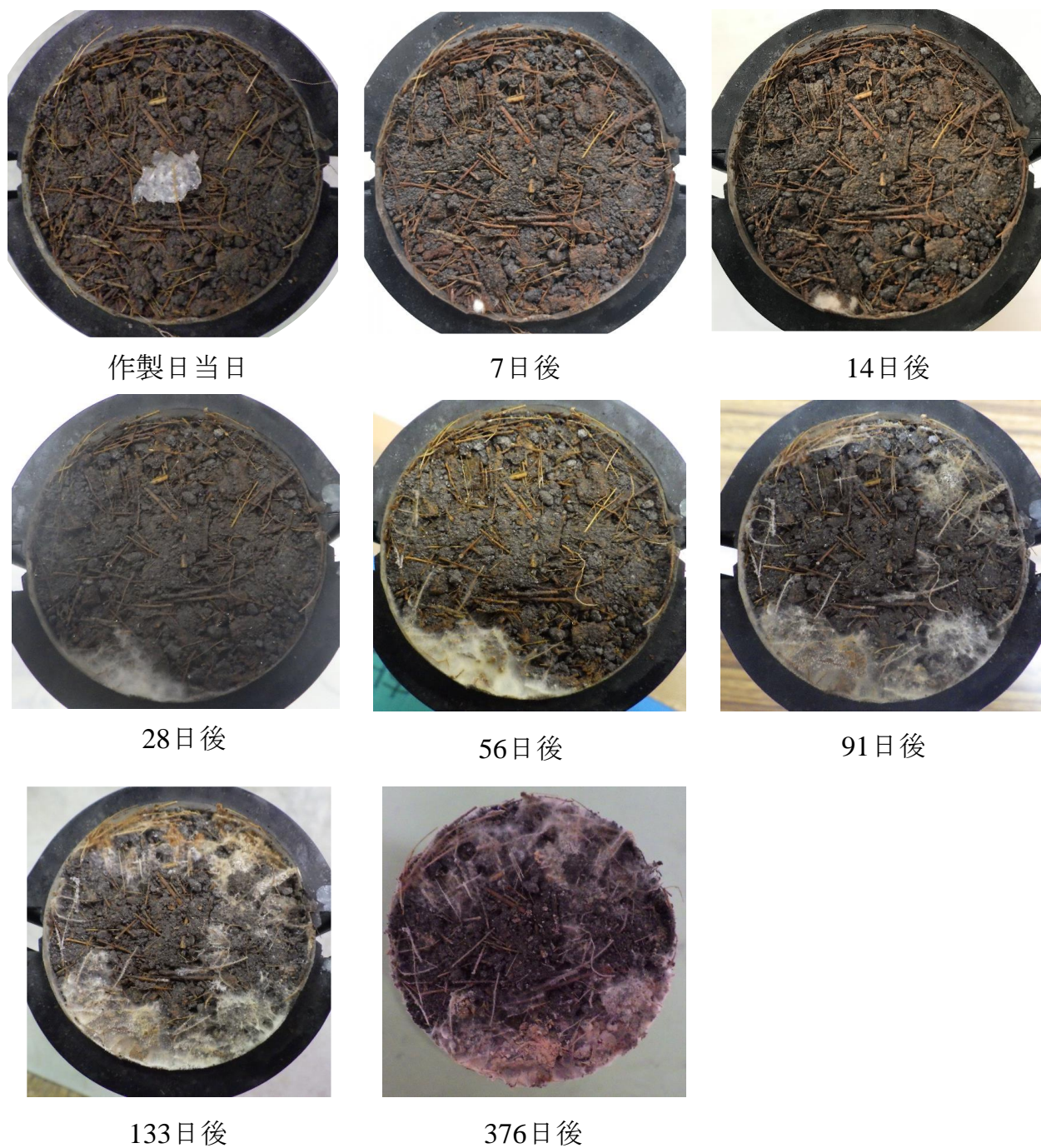


図 6.3-6 No.②ココヤシ繊維 33 vol.%混合 5層目菌の時間経過に伴う供試体上面の変化



作製日当日



7日後



14日後



28日後



49日後



91日後



133日後



372日後

図 6.3-7 No.③ココヤシ繊維 10 vol.%混合 5層目菌の時間経過に伴う供試体上面の変化

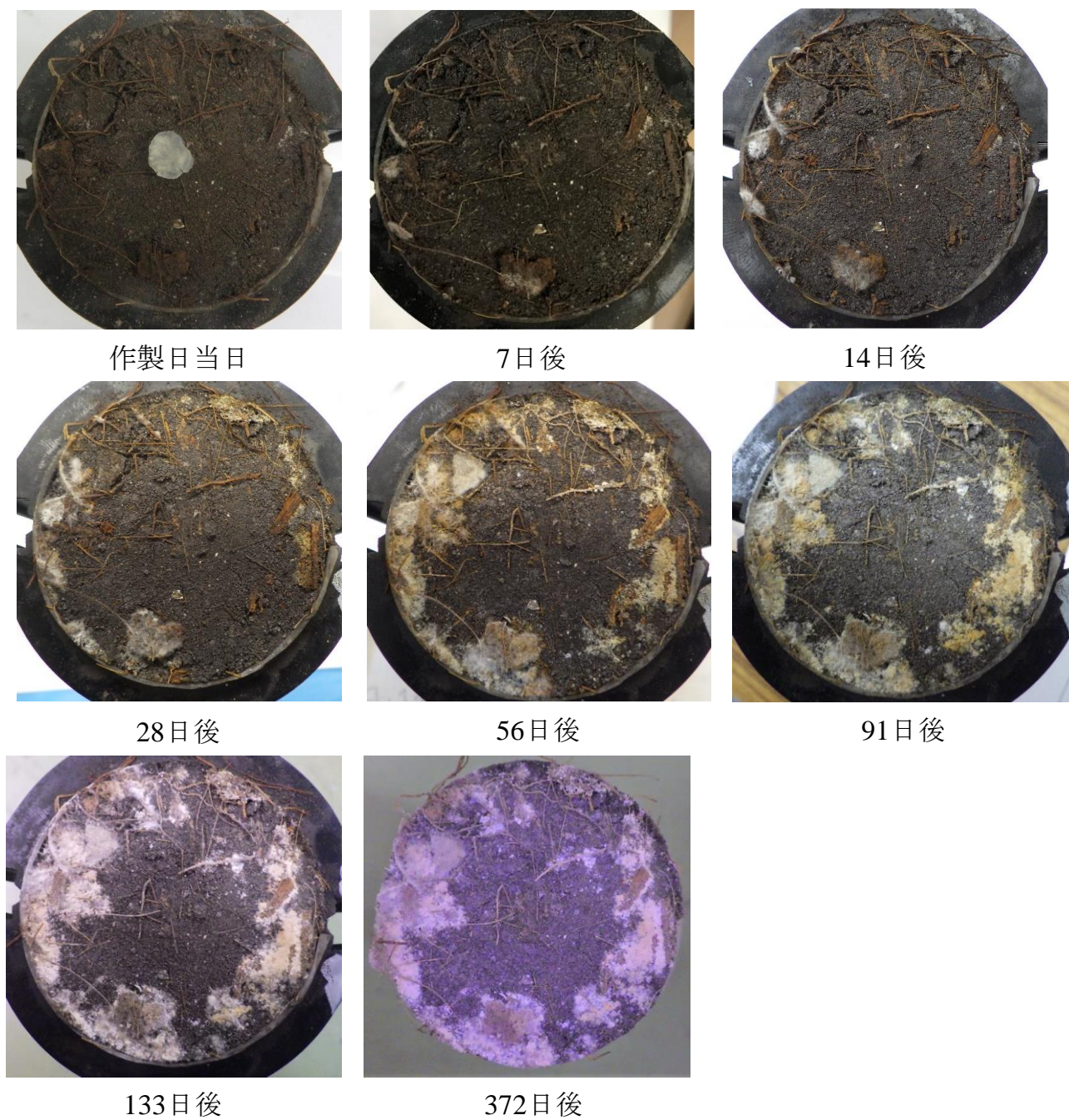


図 6.3-8 No.④ココヤシ繊維 10 vol.%混合 5層間菌の時間経過に伴う供試体上面の変化

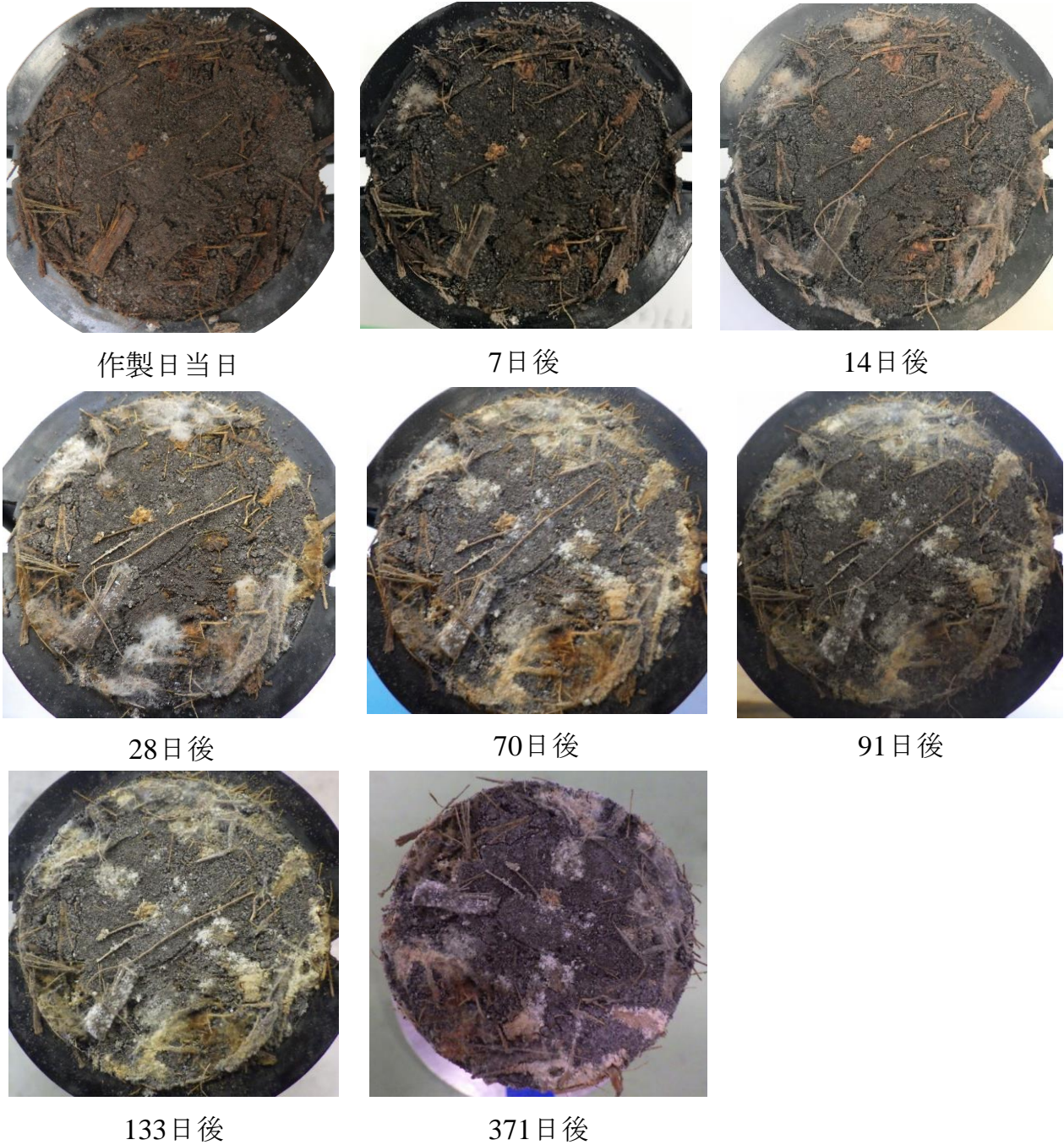


図 6.3-9 No.⑤ココヤシ繊維 10 vol.%混合重心菌の時間経過に伴う供試体上面の変化



作製日当日



7日後



14日後



28日後



56日後



91日後



133日後



369日後

図 6.3-10 No.⑥ココヤシ繊維 10 vol.%混合無菌寒天の時間経過に伴う供試体上面の変化

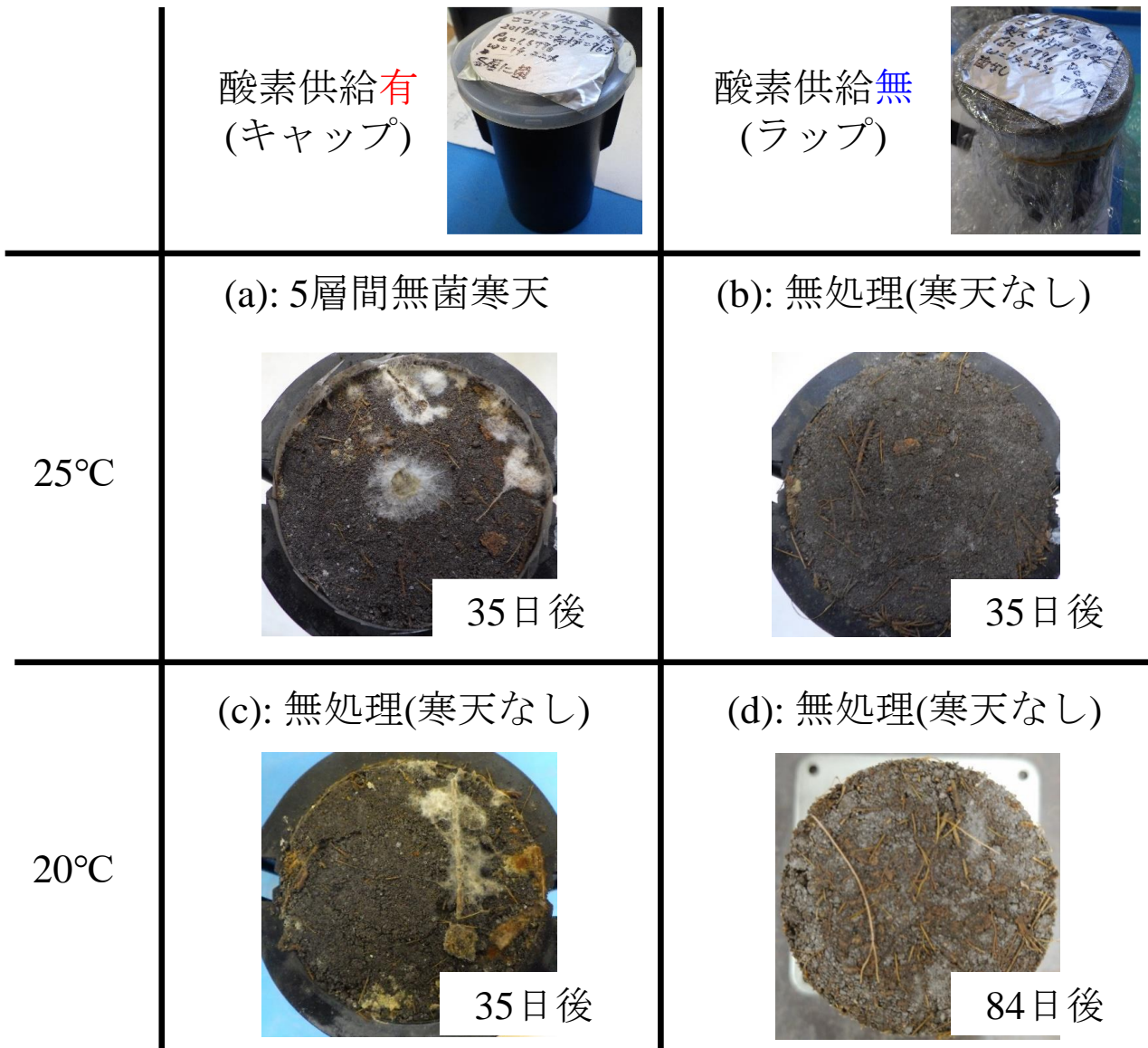


図 6.3-11 養生温度と被覆方法の異なる供試体上面の様子(ココヤシ繊維 10 vol.%混合)

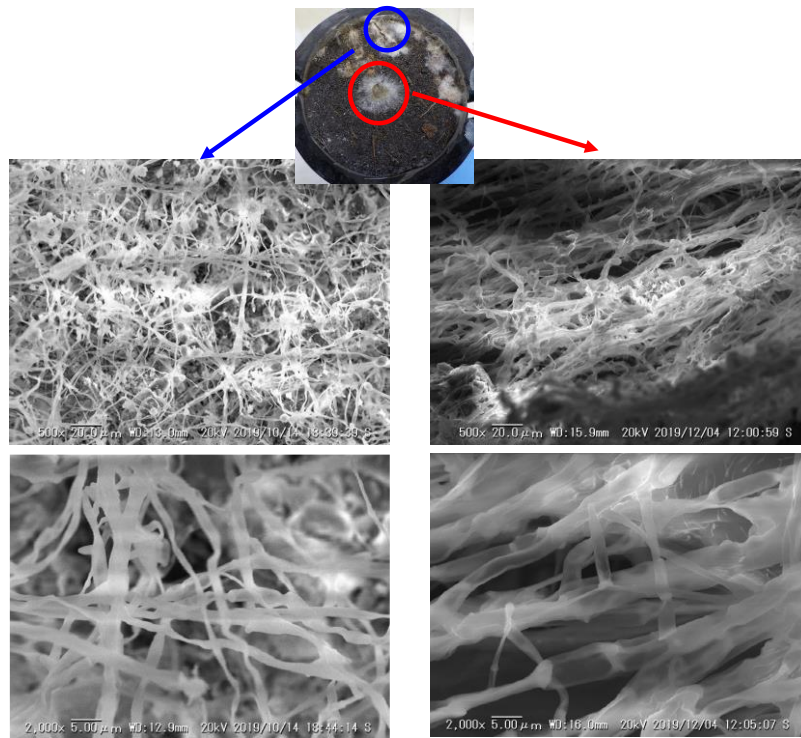


図 6.3-12 No.⑥ココヤシ繊維 10 vol.%混合無菌寒天のココヤシ繊維付着菌と寒天付着菌

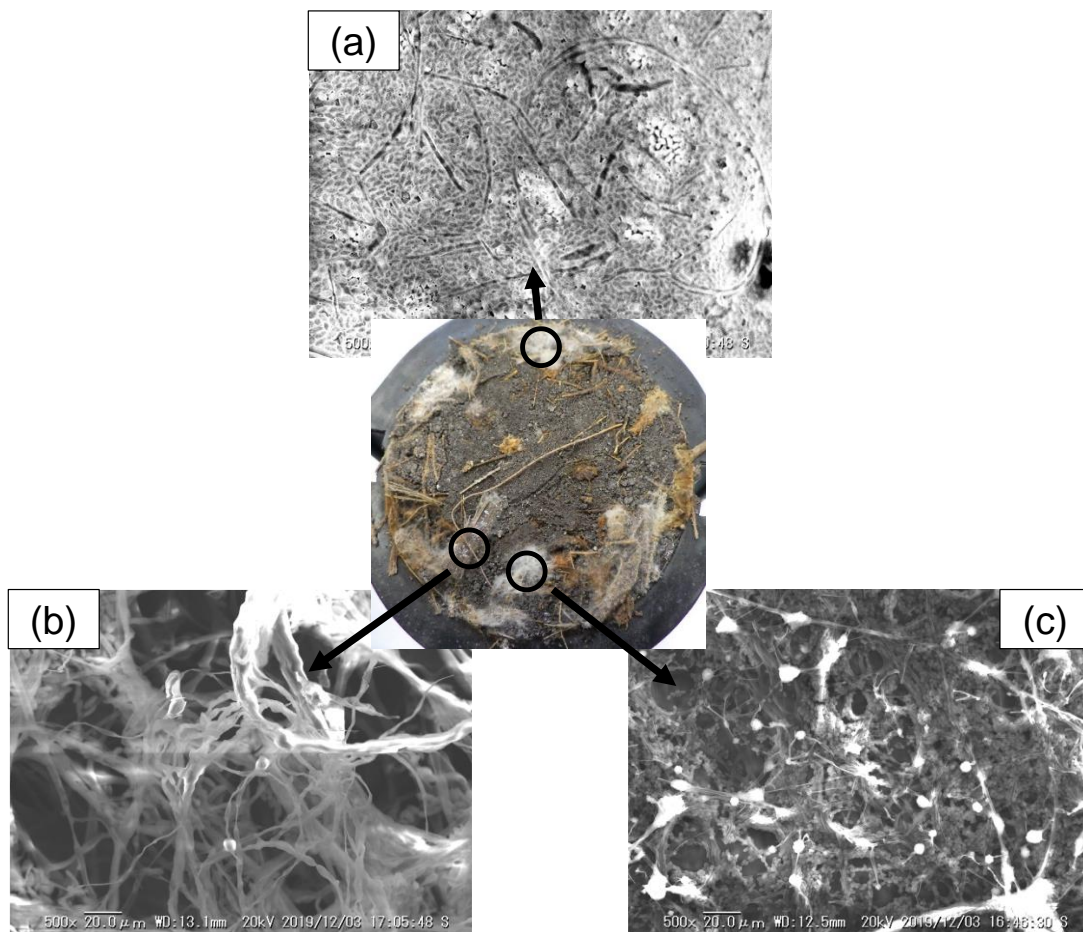


図 6.3-13 No.⑤ココヤシ繊維 10 vol.%混合無菌寒天のココヤシ繊維付着菌と寒天付着菌

第6章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の耐久性

次に、供試体側面および内部の腐朽状況について観察結果から述べる。図 6.3-14 に一軸圧縮試験前(養生 369~376 日後)に撮影したココヤシ繊維 10 vol.%混合の No.④, No.⑤, No.⑥とココヤシ繊維 33 vol.%混合の No.②の供試体側面の外観を示す。図 6.3-14 より、ココヤシ繊維 10 vol.%混合の No.④, No.⑤, No.⑥ではいずれの条件でも供試体上面(0 mm)から下方に+7.5 mm 程度までに位置する木屑は白くなり、腐朽していると思われる。この白色部は菌である可能性が高く、先述の通りココヤシ繊維に元々いた菌だとするとこの結果は自然である。また、ココヤシ繊維 33 vol.%混合の No.②では+30 mm 程度まで白色部が確認できる。ココヤシ繊維 33 vol.%混合材料では突き固めて供試体を作製しても締まりにくく、ココヤシ繊維 10 vol.%混合材料と比べると空隙の多い供試体となる。また、モールドとの境界部である供試体側面は供試体内部よりも空気の供給が多いことが予想される。つまり、この白色部は菌である可能性が高く、ココヤシ繊維 10 vol.%混合材料とココヤシ繊維 33 vol.%混合材料では菌の繁殖の仕方が大きく異なることが分かる。

図 6.3-15 に SEM 画像撮影用のココヤシ繊維の採取位置を示す。図 6.3-14 に示した供試体(ココヤシ繊維 10 vol.%混合: No.④, No.⑤, No.⑥, ココヤシ繊維 33 vol.%混合: No.②)の上面と側面から一軸圧縮試験前にココヤシ繊維を採取、また一軸圧縮試験後に重心と思われる箇所からココヤシ繊維を採取し、SEM 画像を撮影した。図 6.3-16~図 6.3-19 に各条件での SEM 画像を示す。なお、図には SEM 画像撮影を行ったすべての画像は示していないが、この理由については結果とともに説明する。

図 6.3-16~図 6.3-18 より、ココヤシ繊維 10 vol.%混合材料(No.④, No.⑤, No.⑥)では上面および側面の 5 mm 地点では菌を確認できるものの、重心や 15 mm 地点では菌を確認できない。また、ここでは示していないが、側面においては 15 mm 以上の地点では菌は確認できなかった。図 6.3-19 より、ココヤシ繊維 33 vol.%混合材料(No.②)では上面および側面の 15 mm 地点では菌を確認できるものの、重心や 40 mm 地点では菌を確認できない。また、ここでは示していないが、5 mm と 15 mm 地点では菌が確認でき、40 mm 以上の地点では菌を確認できなかった。先述の通り、ココヤシ繊維 10 vol.%混合材料では上面から 10 mm まで、またココヤシ繊維 33 vol.%混合材料では上面から 30 mm まで白色部を確認しており、SEM によって目視で確認できない菌が存在している可能性もあったため、SEM 画像撮影を行ったが、菌は確認できなかった。これまでの SEM 画像結果とも併せて考えると、目視では菌の違いまでは分からないが、菌の有無の判断は可能である。

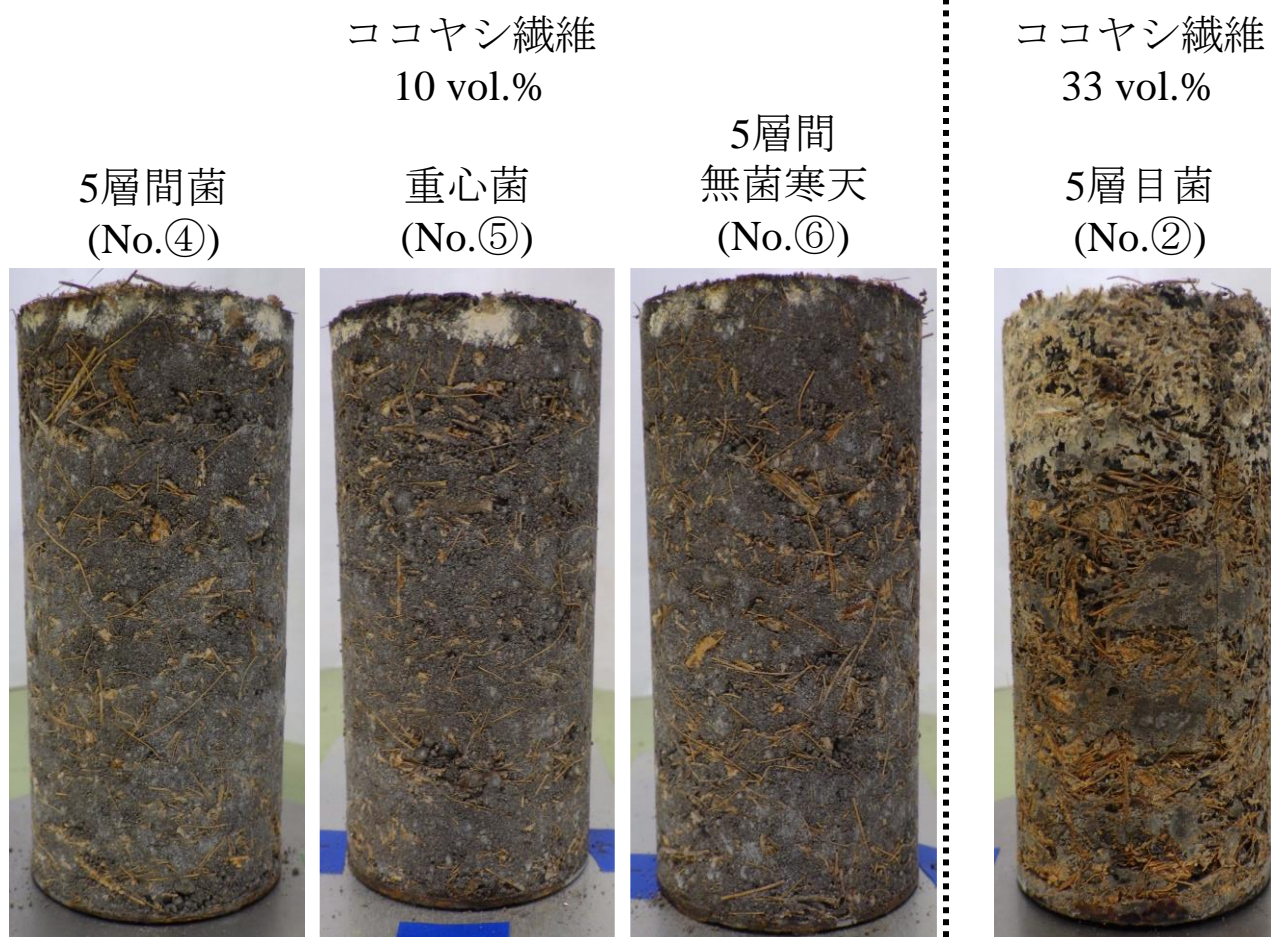


図 6.3-14 No.④, No.⑤, No.⑥および No.②の養生 369 ~ 376 日後の供試体側面

SEM撮影用
ココヤシ繊維
採取位置

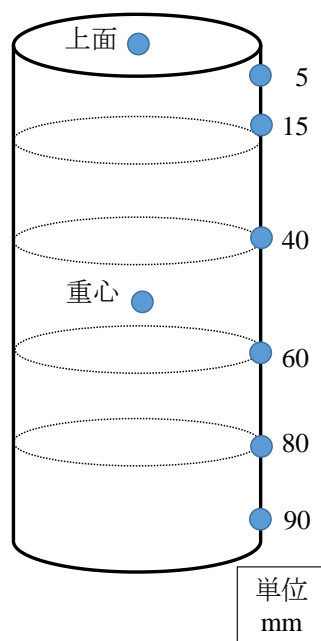
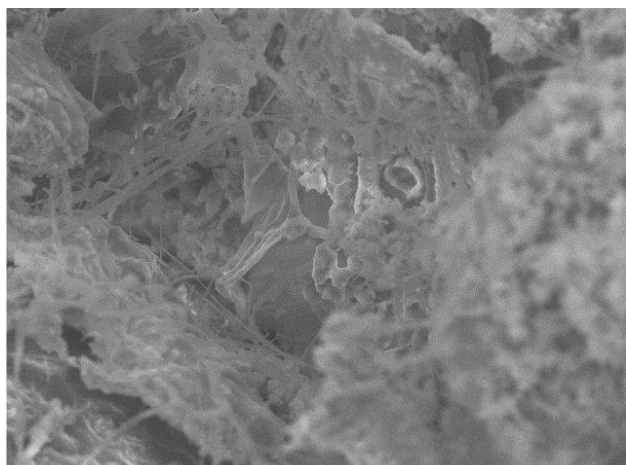


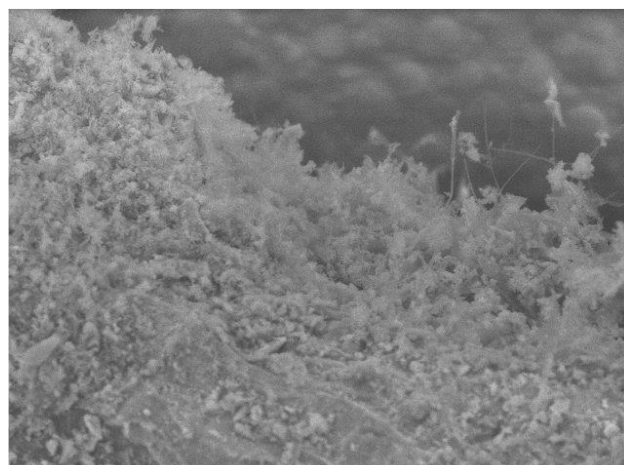
図 6.3-15 SEM 画像撮影用のココヤシ繊維の採取位置

上面



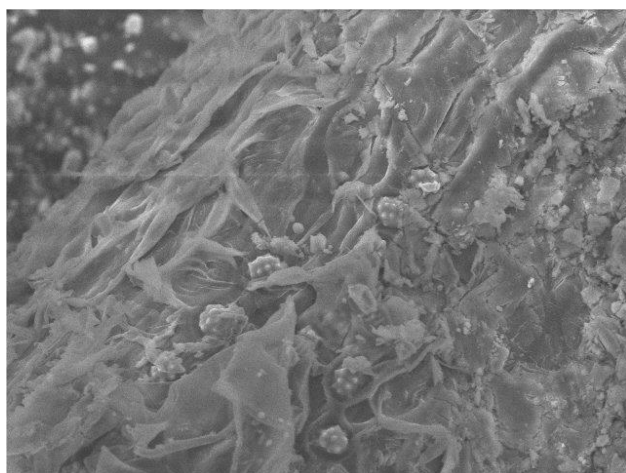
Miniscope0111 2020/10/07 17:34 HMMD8.3 x1.0k 100 μm

5 mm



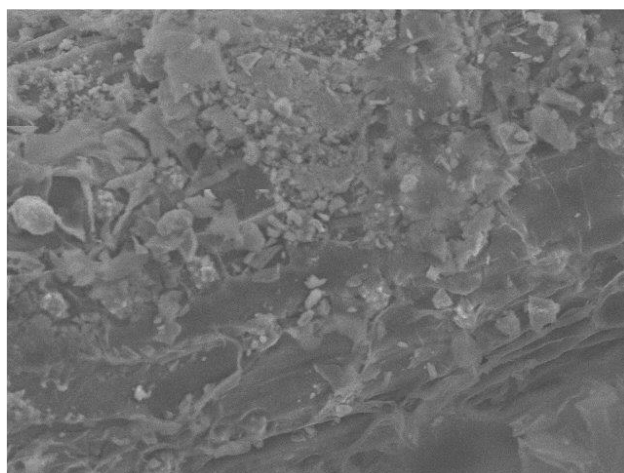
Miniscope0119 2020/10/07 17:54 HMMD8.4 x1.0k 100 μm

15 mm



Miniscope0128 2020/10/07 18:11 HMMD8.6 x1.0k 100 μm

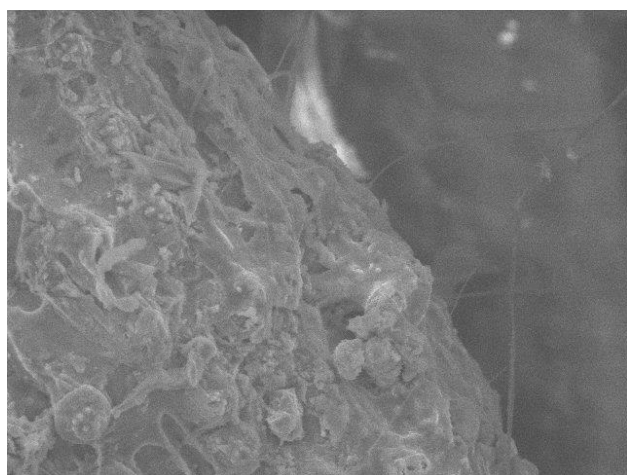
重心



Miniscope0164 2020/10/08 13:25 HMMD9.3 x1.0k 100 μm

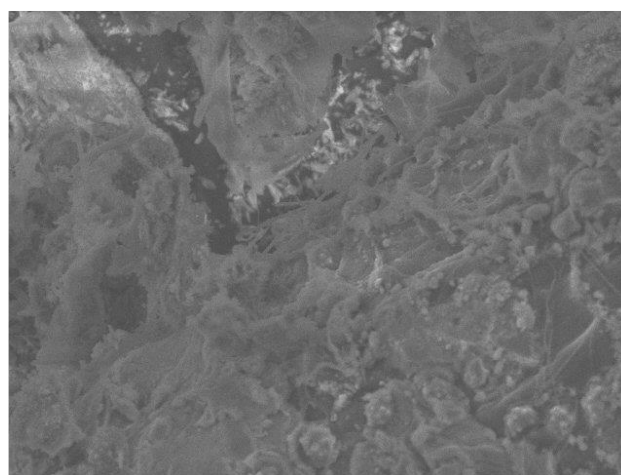
図 6.3-16 No.④ココヤシ繊維 10 vol.%混合 5 層間菌(養生 372 日)の各採取位置でのココヤシ繊維の SEM 画像(1000 倍)

上面



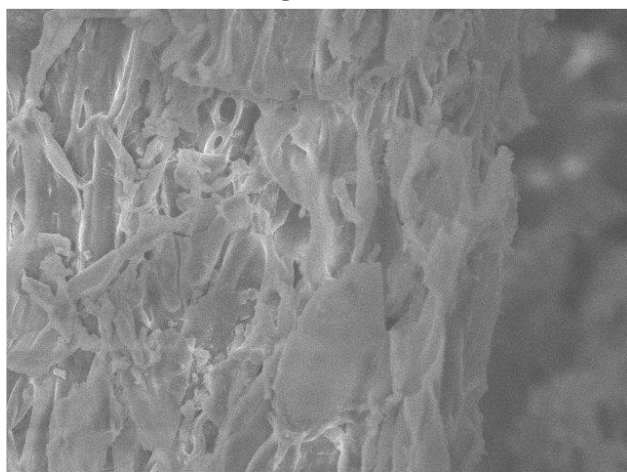
Miniscope0173 2020/10/08 14:19 HMMD10.4 x1.0k 100 μm

5 mm



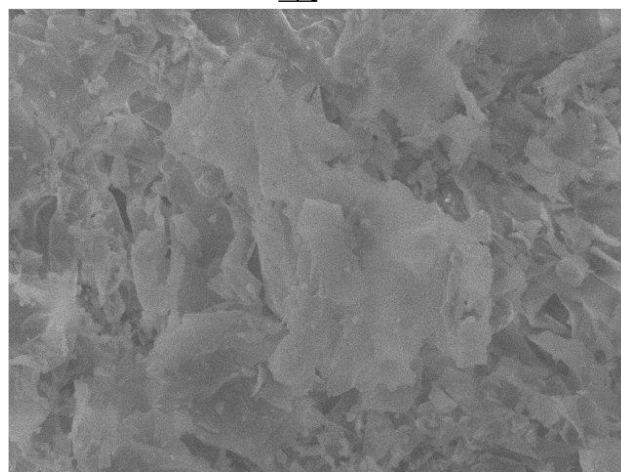
Miniscope0180 2020/10/08 14:32 HMMD10.9 x1.0k 100 μm

15 mm



Miniscope0188 2020/10/08 14:48 HMMD10.3 x1.0k 100 μm

重心



Miniscope0213 2020/10/08 15:45 HMMD15.3 x1.0k 100 μm

図 6.3-17 No.⑤ココヤシ繊維 10 vol.%混合重心菌(養生 371 日)の各採取位置でのココヤシ繊維の SEM 画像(1000 倍)

上面

5 mm



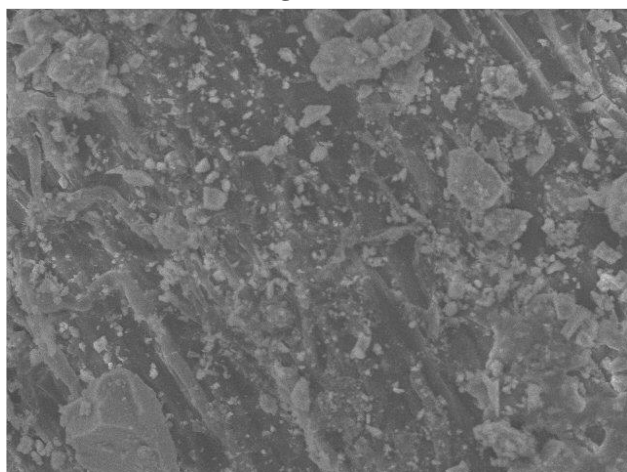
Miniscope0217 2020/10/08 16:53 HMMD6.4 x1.0k 100 μm



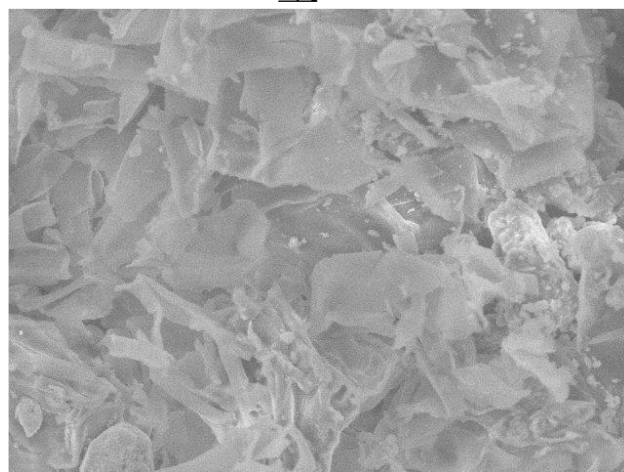
Miniscope0227 2020/10/08 17:16 HMMD6.5 x1.0k 100 μm

15 mm

重心



Miniscope0231 2020/10/08 17:26 HMMD6.4 x1.0k 100 μm

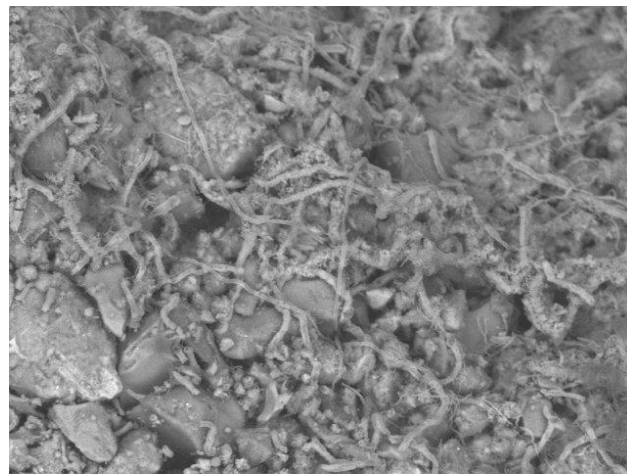
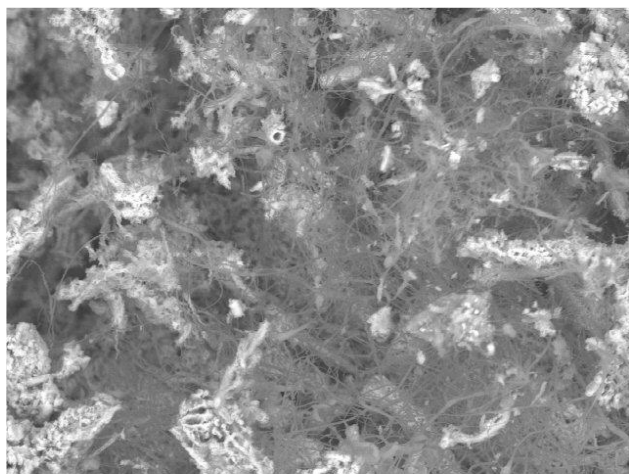


Miniscope0256 2020/10/08 18:24 HMMD10.1 x1.0k 100 μm

図 6.3-18 No.⑥ココヤシ繊維 10 vol.%混合 5 層間無菌寒天(養生 369 日)の各採取位置でのココヤシ繊維の SEM 画像(1000 倍)

上面

15 mm



40 mm

重心

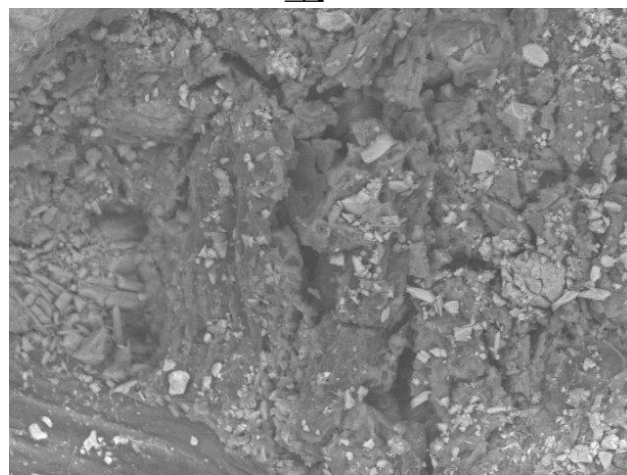
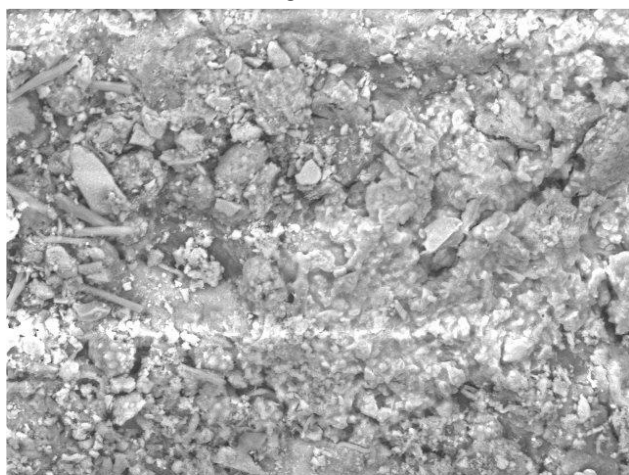


図 6.3-19 No.②ココヤシ繊維 33 vol.%混合 5 層間菌(養生 376 日)の各採取位置でのココヤシ繊維の SEM 画像(1000 倍)

本項の最後に、No.⑦の白色腐朽菌で腐朽したココヤシ繊維を 10 vol.%混合した供試体と No.⑧のオートクレーブ滅菌処理をしたココヤシ繊維を 10 vol.%混合した供試体の経時的な外観の変化について評価する。

先述の結果からココヤシ繊維に元から菌がいる可能性があることが分かり、白色腐朽菌で腐朽させる前に滅菌処理をする必要があるかどうかについて検討した。滅菌処理の工程が省ければ実験効率が良くなると考えたためである。

図 6.3-20(a)に白色腐朽菌を繁殖した PDA 寒天培地にココヤシ繊維を設置した当日の外観を、図 6.3-21(b)に設置から 1 ヶ月後の外観を示す。図 6.3-21(b)より、設置から 1 ヶ月が経過しても、ココヤシ繊維に白色腐朽菌が付着し腐朽していることを確認することができない。この結果から、滅菌処理をしていないココヤシ繊維は、白色腐朽菌を接種しても腐朽しにくいことが考えられ、その要因として、ココヤシ繊維に元々存在した菌が白色腐朽

菌より優位な状況であった(物理的に白色腐朽菌が浸食できないほど菌が存在していた)と考えられる。

次に、ココヤシ繊維に元々存在した菌の存在が、ココヤシ繊維の白色腐朽菌による腐朽を阻害している可能性が考えられたため、オートクレーブで滅菌処理をしたココヤシ繊維を、白色腐朽菌および図 6.3-14 で No.⑤から採取した3つのココヤシ付着菌が各々繁殖した寒天培地上に設置して、ココヤシ繊維の腐朽状況を観察した。なお、No.⑤から採取した3つのココヤシ付着菌が繁殖した寒天培地でココヤシ繊維を腐朽させようと試みた理由は先述したようにこれらは元々ココヤシ繊維に存在した菌の可能性が高く、仮に白色腐朽菌よりココヤシ繊維を腐朽させる能力が高い場合には、その菌を用いることで今後の試験の実施効率を上げられると考えたためである。

図 6.3-21 に設置から2ヶ月後の各菌上のココヤシ繊維を示す。設置から2ヶ月後の腐朽状況を比較すると、3つのココヤシ繊維付着菌を繁殖させた培地に比べ、白色腐朽菌を繁殖させた培地に設置したココヤシ繊維のほうが腐朽している。この結果から、無菌状態のココヤシ繊維に対しては白色腐朽菌のほうがココヤシ繊維を侵食する能力は高いと思われる。

図 6.3-22 に No.⑦と No.⑧の養生84日までの経時的な供試体上面の変化を示す。図 6.3-22 の No.⑦より、腐朽ココヤシ繊維を混合した材料では84日後の供試体上面には1 mm程度の白い斑点が鮮明に確認できる。一方で、図 6.3-6~図 6.3-10に見られたような明らかな菌の繁殖は見られない。この結果は白色腐朽菌がココヤシ繊維に元々いた菌よりもスラグ上では繁殖しにくいことを示唆している。また、図 6.3-22 の No.⑧より、滅菌ココヤシ繊維10 vol.%混合材料では84日後でも供試体上面にほとんど変化は見られない。No.⑧では滅菌処理の影響で菌の繁殖が起こらなかったためと考えられる。

図 6.3-23 に No.⑦と No.⑧の養生84日後の供試体側面の外観を示す。図 6.3-23 より、No.⑦では図 6.3-14のように供試体の上端面から鉛直下方向に4 mm程度の白色層が確認できる。一方で No.⑧ではそれが確認できない。先にも述べたように、No.⑦の供試体上面は No.④, No.⑤, No.⑥の供試体上面のように大部分が菌で覆われることはなかったが、供試体側面は No.④, No.⑤, No.⑥と同様に白色部を確認した。側面の様子については No.⑦と No.④, No.⑤, No.⑥とでは養生期間が異なるため、単純な比較はできないが、No.⑦の白色腐朽菌で腐朽させたココヤシ繊維を混合した場合もモールドと供試体の境界部では数 mmの繁殖が起っていることが確認できる。逆説的に考えると、相当に白色腐朽菌で腐朽させた場合にも数 mmの浸食しか起こらないということである。

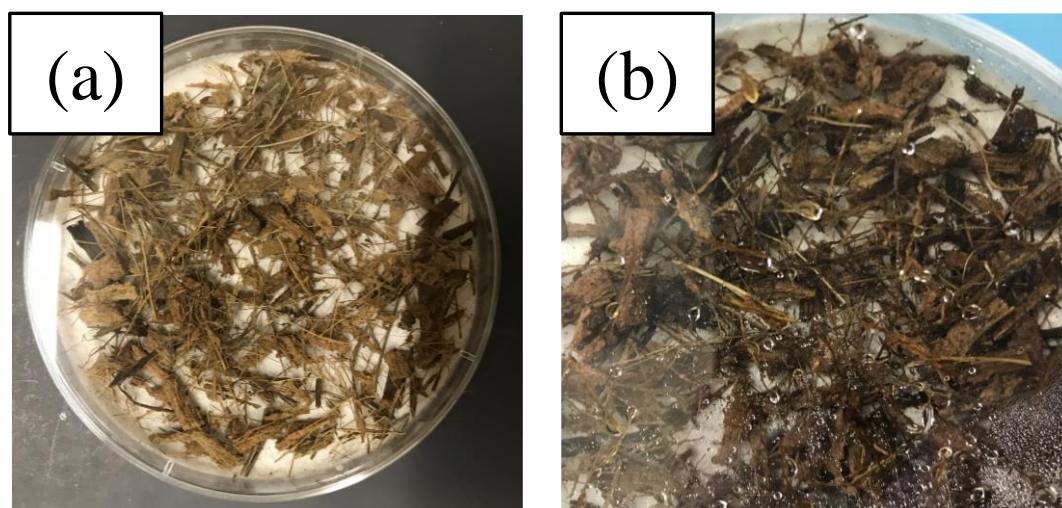


図 6.3-20 白色腐朽菌が繁殖した寒天培地上にココヤシ繊維を設置(a)設置当日, (b)設置から1ヶ月後

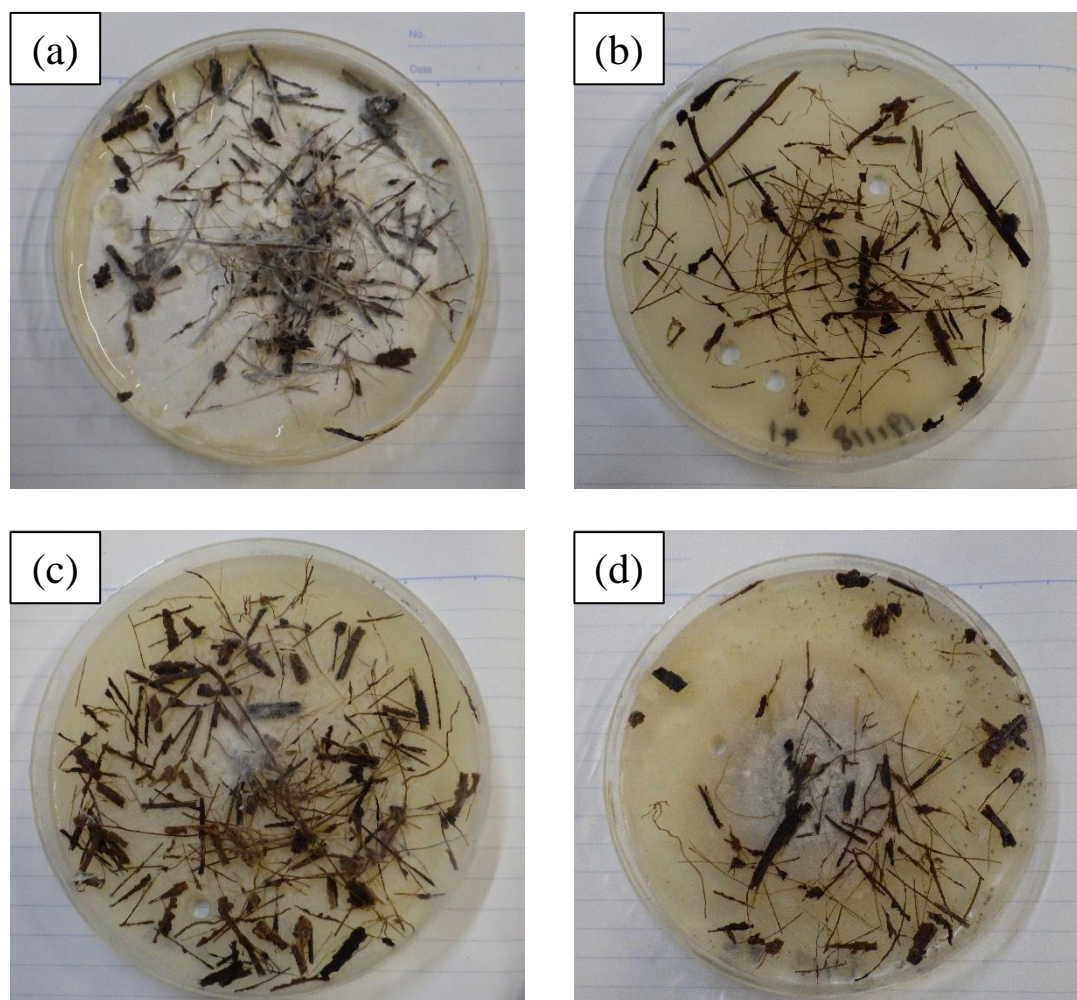


図 6.3-21 設置から2ヶ月後の各菌上のココヤシ繊維(a)白色腐朽菌, (b)~(d)ココヤシ繊維付着菌

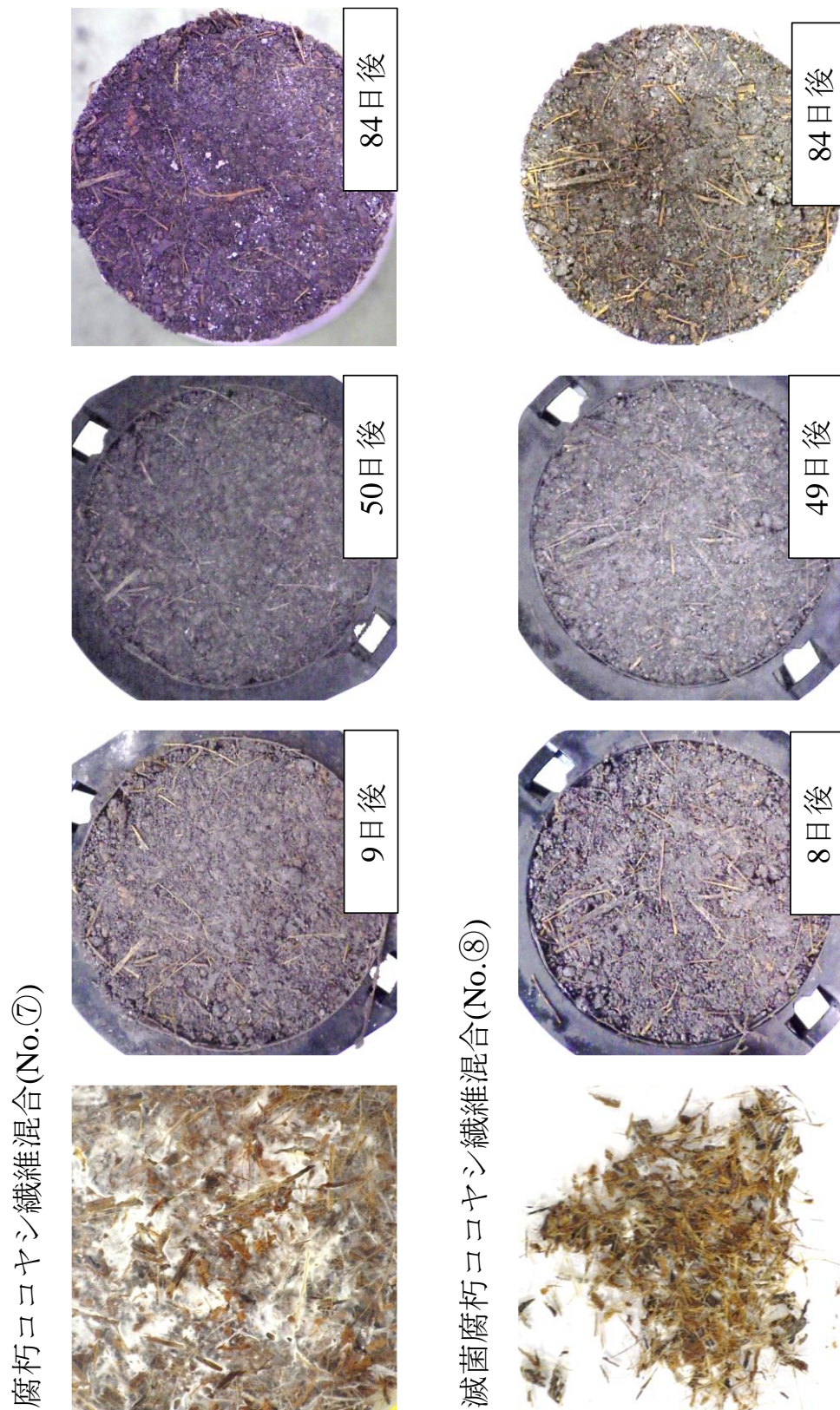


図 6.3-22 No.⑦腐朽ココヤシ繊維 10 vol.%混合材料と No.⑧滅菌ココヤシ繊維 10 vol.%混合材料の養生 84 日までの経時的な供試体上面の変化

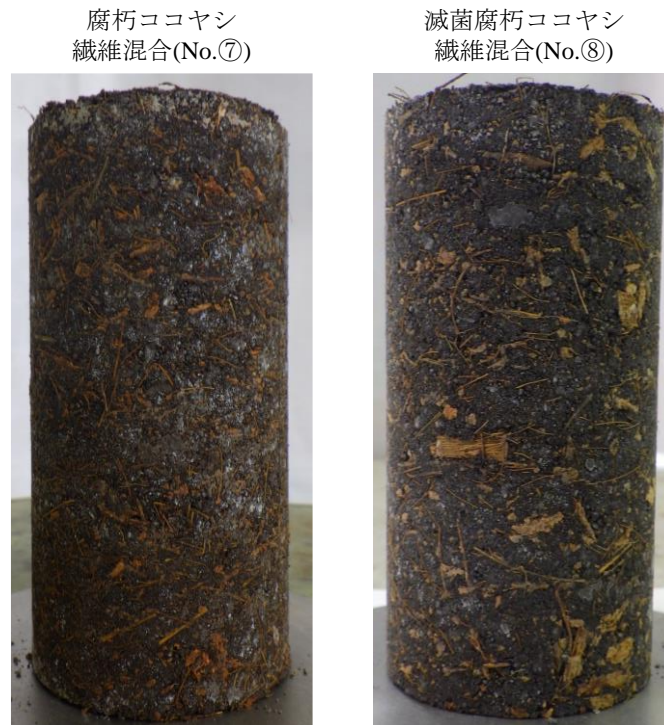


図 6.3-23 No.⑦腐朽ココヤシ繊維 10 vol.%混合材料と No.⑧滅菌ココヤシ繊維 10 vol.%混合材料の養生 84 日の供試体側面

6.3.3 腐朽した木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料のせん断特性の変化

図 6.3-24 に No.④, No.⑤, No.⑥の一軸圧縮試験より得られた応力ひずみ関係を示す。図 6.3-24 より、白色腐朽菌の接種方法の違いによる応力ひずみ関係の違いは見られない。前述の通り、これらのいずれの条件でも白色腐朽菌による腐朽の進行がなく、ココヤシ繊維に元々存在していた菌が活動していたと仮定すると、いずれの条件でも同じような養生過程を辿るため、このようにすべての条件で応力ひずみ関係に違いが見られなかったのは当然であると考えられる。一方で、供試体上面では好気性環境下でありココヤシ繊維にもともと存在していた菌が繁殖していたが、初期剛性が著しく低下するなどの影響は見られない。また、同条件(養生期間および試験時含水比)で腐朽が見られなかった条件での試験を実施していない為、腐朽による材料の劣化を評価することは難しいが、表層部が相当に腐朽しても地盤材料としては十分な強度を発揮することが分かる。

図 6.3-25 に No.⑦と No.⑧の一軸圧縮試験より得られた応力ひずみ関係を示す。図中のプロットは一軸圧縮強さを示した点である。図 6.3-25 より、初期剛性にはややばらつきがあるものの、腐朽木屑を混合した No. ⑦と無菌木屑を混合した No. ⑧とで大きな違いは見られない。また、一軸圧縮強さに着目すると、腐朽木屑を混合した No. ⑦のほうが無菌木屑を混合した No. ⑧よりも大きな値を示すことが分かる。腐朽した木屑を混合することによって硬化が促進されたとは考えにくく、これはばらつきの範囲であると考えられる。つまり、ココヤシ繊維とスラグ 4(2019)を混合した材料において、本検討期間ではココヤシ繊維の腐朽の有無が力学特性に与える影響は見られなかった。

図 6.3-24 の 1 年養生と図 6.3-25 の 84 日養生を併せて考えると、より腐朽が進んでいる 1 年養生の一軸圧縮強さが高いことから、腐朽による強度低下よりも養生による強度増加が大きく、短期的には腐朽の影響はほとんどないと考えられる。ただし、より長期的な力学特性の変化については再検討する必要がある。

ここまで記したように今回参考にした木材の耐久性を評価する試験方法は建築分野で多く用いられる評価方法であり、木材単体の耐久性を評価するものである。本実験結果は、本研究材料のような木屑周辺がアルカリ固化材料という特殊な環境下において、規格化された腐朽菌(カワラタケ・オオウズラタケ)を用いても腐朽促進効果が得られるとは限らないということを示している。つまり、腐朽促進を目的とした場合に限っては、実験供試体を腐朽環境下に静置し、そこに繁殖した菌を用いることが最も望ましいと考えられる。この方法の場合、使用試料が変わると菌が変わり、繁殖能力に違いが出ることから比較検討が困難であるといった問題を含んでいるが、本実験によって、木屑の腐朽による影響を評価することを目的とした場合には現行の規格に従うことが必ずしも腐朽促進を高めるとは限らないということを示した。

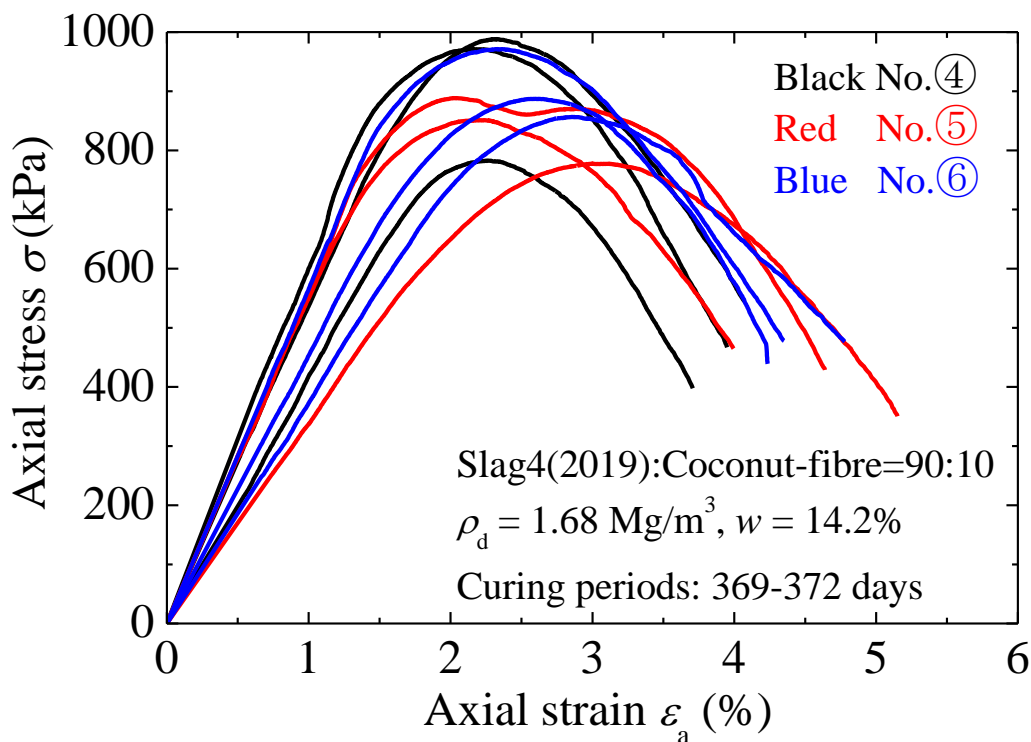


図 6.3-24 No.④(5層間菌), No.⑤(重心菌), No.⑥(5層間無菌寒天)の一軸圧縮試験より得られた応力ひずみ関係

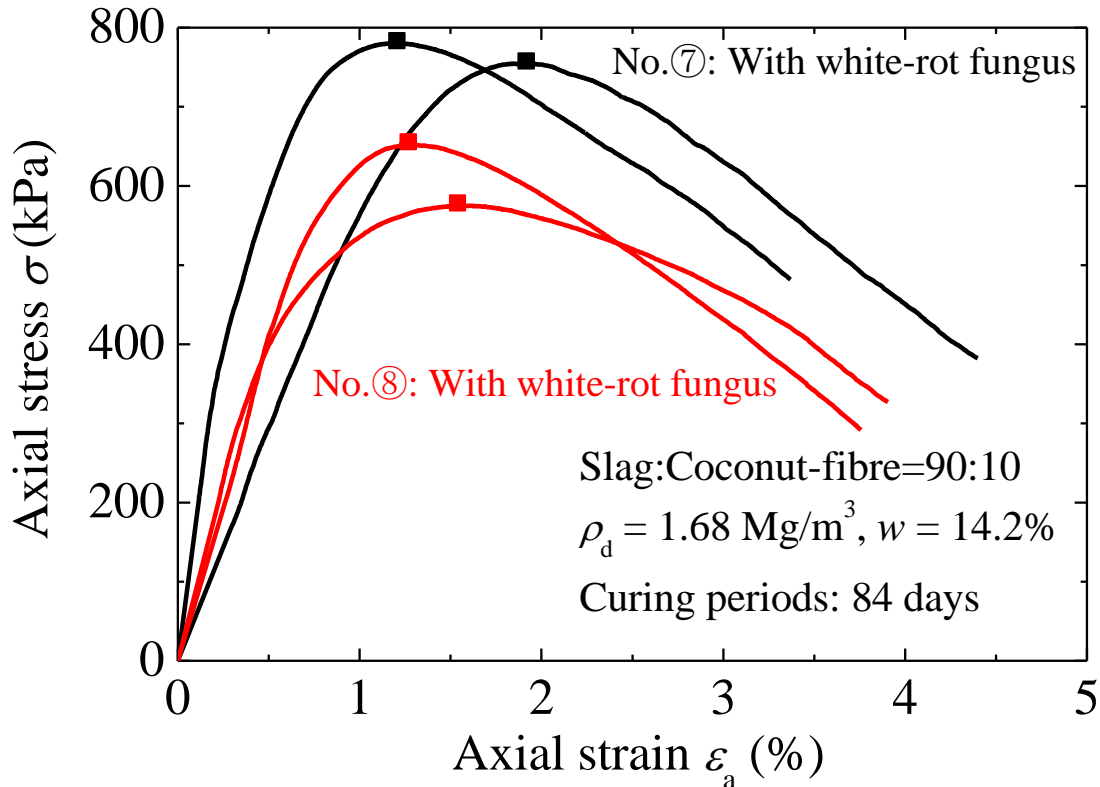


図 6.3-25 No.⑦(滅菌処理後に白色腐朽菌で腐朽させたココヤシ繊維混合), No.⑧(滅菌処理したココヤシ繊維混合)の一軸圧縮試験より得られた応力ひずみ関係

以下に本節で得られた知見をまとめる。

- (1) 白色腐朽菌の有無に関わらず，供試体の上端面ではココヤシ繊維上に菌が繁殖し，スラグ上にはほとんど菌が繁殖しない．また，モールドと供試体の境界部では酸素が供給されるため，上端面から鉛直下方向に 10 mm 程度のココヤシ繊維は菌の繁殖によって腐朽が進む．一方で，供試体内部では締固めによって嫌気性環境となっているため，供試体上面から重心方向に 2 mm 程度の箇所ですら木屑の腐朽は確認できない．さらに供試体側面であっても 10 mm 以上の深度となると，嫌気性環境となるために菌は観察できなくなる．
- (2) 経時変化に伴う菌の繁殖の仕方，寒天の設置条件の違い，SEM 画像を総合的に判断するとココヤシ繊維に繁殖した菌は白色腐朽菌でなく，元々ココヤシ繊維にいた菌である可能性が高い．
- (3) 白色腐朽菌を繁殖した寒天培地上に滅菌したココヤシ繊維を設置した場合とココヤシ繊維から採取した菌を繁殖した寒天培地に滅菌したココヤシ繊維を設置した場合とでは前者のココヤシ繊維で圧倒的に腐朽速度が速い．しかし，スラグ固化材料中ではこの関係性が逆となり，ココヤシ繊維に元々いた菌のほうが白色腐朽菌よりも繁殖能力が高い．

6.4 第6章まとめ

本節では木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の実利用に向けて、“耐候性”を乾湿繰り返し実験によって、また、“耐朽性”を木屑の腐朽実験によって検討した。以下に各節ごとのまとめを示す。

乾湿繰り返し実験による耐候性

- 固化処理土の乾湿繰り返し耐久性について、セメント改良土における乾湿繰り返しの既往研究を示とともに、本研究材料と既往研究の類似性と相違性を説明した。本研究で使用するスラグ固化材料は粒状固化材料であり、セメント固化材のように全体が完全に一体化した材料とは異なる、また、木屑のような吸水性を有する材料が固化処理された材料の乾湿繰り返し耐久性を評価した事例はほとんどない。
- 脱型した供試体(水平拘束力なし)の乾湿繰り返し耐久性はスラグと混合する木屑の形状によって異なる。繊維状の木屑を混合した場合には、乾燥による微小な収縮と浸水による大きな膨張を繰り返しながら顕著に体積膨張し、一軸圧縮強さも大幅に減少する。一方で、粒状の木屑を混合した場合には、わずかに体積膨張し、一軸圧縮強さは乾湿を8サイクル繰り返した後も7日養生と同程であった。これらの違いは繊維状木屑の復元力が影響したためと考えられるが、繊維状の木屑を短く裁断しても裁断する前と同程度の体積膨張を示した。つまり、ある一定以上の長さを持った繊維状の木屑(実際には木の根)が混入した場合には体積膨張および一軸圧縮強さの低下をもたらす可能性がある。
- 繊維状の木屑を混合した脱型供試体(水平拘束力なし)であっても、乾燥のみおよび浸水のみ、さらに不飽和(相対湿度 95%)環境下ではほとんど体積変化が起こらないことから、体積膨張は乾燥と浸水のいずれか片方でも欠けると起こらず、強度の大幅な低下も防げると考えられる。
- 水平拘束力が作用した条件下(アクリル製の円筒カラム)においては繊維状の木屑を混合した場合であっても乾湿繰り返しによる体積膨張が全く見られなかったことから、実利用にあたって体積変化はほとんど起こらないものと考えられる。

以上から、実務においては、地表面付近を除き、水平拘束力が作用しない条件は考えられず、また本研究で実施したほどに極端に乾燥するような状況は起こりにくくなることから繊維状の木屑が多く混入した場合でも体積膨張は相当に抑えられると考えられる。仮に乾燥が懸念される場合には、その上に十分な覆土を施すことで極端な乾燥が避けられるため、材料の劣化は大幅に抑制されることが考えられる。

木屑腐朽実験による耐朽性

- 本研究材料である木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料は、製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末を固化材として使用することから木屑周辺的环境は高アルカリ性(pH = 11.5 以上)であり、また、締固めた木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の内部は嫌気性であることから木屑の腐朽は相当に起こりにくい環境であると考えられる。

第6章 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の耐久性

- 滅菌処理していないココヤシ繊維をスラグと混合した場合，白色腐朽菌の接触する位置(内部 or 外部)によらず，白色腐朽菌の接触から7日後には供試体上面のココヤシ繊維上に菌が繁殖しはじめ，約50日後には供試体上面に存在するココヤシ繊維のほとんどが菌で覆われた，また，供試体内部のココヤシ繊維は約1年後にも菌の繁殖を確認できなかった．これは，供試体上面は酸素が十分に供給されている好気性環境であったのに対し，締固めた供試体内部は嫌気性環境であったためである．さらに，供試体上面であってもスラグ上に菌はほとんど繁殖しないことを確認した．これはスラグが高アルカリ性であったためであると考えられる．
- 滅菌処理していないココヤシ繊維を用いた場合，供試体上面のココヤシ繊維上に繁殖した菌はココヤシ繊維に元からいた菌(以降，常在菌)であり，白色腐朽菌ではないことをSEM画像によって確認した．つまり，滅菌処理をしていないココヤシ繊維は元から存在していた微生物叢によって，白色腐朽菌が浸食できない環境となっていた可能性が高い．
- 供試体上部のココヤシ繊維が常在菌によって相当に腐朽した1年後の木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料において，一軸圧縮特性の大きな変化は見られず，地盤材料として十分なせん断強さを発揮することが分かった．ただし，より長期間の耐朽性については更なる検討が必要である．
- 滅菌処理後に白色腐朽菌で腐朽させたココヤシ繊維をスラグと混合した場合，84日後でも供試体上面および内部に菌の繁殖は確認できなかった．これは白色腐朽菌がアルカリ性に対して相当に耐性が低く，十分な酸素供給がある供試体上面のココヤシ繊維であっても，白色腐朽菌の活動が抑制されたためであると考えられる．また，84日後の一軸圧縮特性にも変化は見られず，地盤材料として十分な強度・剛性を備えたままであり，木屑の腐朽およびそれによる木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の変化は確認されなかった．

以上から，実務においては，表層部が露出した使用を避け，覆土を施すことで菌の繁殖を大幅に抑制できると考えられる．

【引用・参考文献】

- 1) Caroline S. Rangel, Mayara Amario, Marco Pepe, Enzo Martinelli and Romildo D. Toledo Filho: Influence of wetting and drying cycles on physical and mechanical behavior of recycled aggregate concrete, Vol. 13, Iss. 24, pp. 1-20, 2020.
- 2) Xilin Li, Xiaowan Yu, Ling Liu and Jianlin Yang: Cyclic drying and wetting tests on combined remediation of chromium-contaminated soil by calcium polysulfide, synthetic zeolite and cement, Scientific reports, Vol.11, pp. 1-13, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91282-4> (参照日 2021.11.05)
- 3) Norshakila Abdul Wahab, Mohammad Jawed Roshan, Ahmad Safuan A. Rashid, Muhammad Azril Hezmi, Siti Norafida Jusoh, Nik Daud Nik Norsyahariati and Sakina Tamassoki: Strength and Durability of Cement-Treated Lateritic Soil, sustainability, Vol. 23, Iss. 11, pp. 1-23, 2021.
- 4) 森雅人, 高橋弘, 熊倉宏治: 繊維質固化処理土の乾湿繰り返し試験による耐久性に関する実験的研究, Vol. 121, pp. 37, 43, 2005.
- 5) 小竹望, 宮脇史恭, 松岡賢樹: 繊維補強による固化処理土の乾湿繰り返し抵抗性の向上効果, ジオシンセティックス論文集, No. 28, pp. 161-166, 2013.
- 6) Standard Test Method for Wetting and Drying Test of Solid Wastes, Designation, “D4843-88”, ASTM International (2009).
- 7) 哈斯, 井野晴洋, 木村照夫: 植物繊維の熱劣化による変色と強度変化, 繊維学会誌, Vol. 70, No.5, 2014.
- 8) 公益社団法人地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説[第一回改訂版]土の一軸圧縮試験方法, pp581-593, 2020.
- 9) L. Asoka Panamgama and P.R.U.S.K. Peramune: Coconut coir pith lignin: A physicochemical and thermal characterization, International Journal of Biological Macromolecules, Vol. 113, pp1149-1157, 2018.
- 10) 高橋旨象: 褐色腐朽菌の生物学, 木材保存, Vol. 19, No. 4, pp. 143-153, 1993.

第7章 結論

7.1 結論

本研究は災害廃棄物である篩下残渣を産業副産物である鉄鋼スラグの水硬性によって固めた地盤材料の有効再利用を目指すものである。特に篩下残渣中の木屑に着目し、木屑とスラグを混合した材料(以降、木屑混じりスラグ固化材料と称す)を用いて、木屑形状の違いや木屑混合割合の違いが木屑混じりスラグ固化材料のせん断特性に与える影響について明らかにした。また、木屑混じりスラグ材料の耐久性について明らかにすることで、実用化に向けて適切な使用方法と対策について提案した。

第1章では、本研究の背景・目的として、災害廃棄物の一種である篩下残渣の有効利用法を提案することの重要性について示した。また、学位論文全体の構成について説明した。

第2章では、災害廃棄物の分別・処理方法について示し、篩下残渣が排出されるまでの工程を説明するとともに、篩下残渣の利用に向けての問題点と現状の利用方法について既往文献を用いて示した。また、産業副産物である鉄鋼スラグの分類と物理化学的性質を現状の利用方法について、既往の研究を示して説明した。さらに、本研究の実験条件の選定に向けてこれまでに行われた研究結果を総括し、本研究の位置付けを示した。第2章をまとめると以下の通りである。

得られた知見

- ▶ 災害廃棄物である篩下残渣は多種多様な木屑を大量に含む土砂である。災害が発生するたびに様々な技術開発・研究が進み、東日本大震災で発生した災害廃棄物の約81 wt.%が有効利用された。篩下残渣は災害廃棄物全体の約9 wt.%を占めたが、その強度特性や木屑の腐朽過程および影響が不明であることから、そのほとんどが有効利用されず埋立処分された。
- ▶ 篩下残渣の地盤工学的特性は残渣中に含まれる木屑混合量の影響が大きく、数 wt.%程度の木屑混入量であれば土砂分(通常地盤材料)のみと比較してもその力学特性には大きな影響を及ぼさない。ただし、篩下残渣中の木屑混入割合やその性状が発生地域や処理施設によって大きく異なることが指摘されている。
- ▶ 製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末は粗鋼生産の際に大量に発生する産業副産物であり、現在は道路用路盤材や高炉セメント混合材など様々な用途で使用されている。しかし、近年の公共事業費削減に伴い販路拡大が課題となっている。従来、製鋼スラグの耐摩耗性や高い内部摩擦角を利用した研究開発が行われてきたが、近年は水硬性に着目した研究開発が積極的に行われている。
- ▶ 循環型社会構築に向けて地盤工学分野でも様々な取組がなされている。その一つとして、廃棄物(一般廃棄物・産業廃棄物)を地盤材料として有効利用することが挙げられる。

これまでも様々な研究開発が実施されてきたが、いずれも人工地盤材料としてこれまでの地盤材料にない有益な特徴を備えたものである。つまり、廃棄物としての短所を相殺するだけでなく、長所を生かした材料とすることで積極的な利活用を促すことができると考えられる。

- 製鋼スラグの水硬性発現は製鋼スラグ自体の性質によるところが大きく、一方で、水硬性を発現する製鋼スラグであっても、細粒分が一定量以上であり、かつ締固めないで養生による強度増加には期待できない。ただし、細粒分が多く締固め度が高いほど試験結果はばらつき、試験の再現性を確保することが難しい。この結果を受け、製鋼スラグと高炉スラグ微粉末を質量比 96 対 4 で混合することで地盤材料として十分な強度を短期間で安定的に確保できることを確認した。

➤

本研究の位置付け

- ① 篩下残渣の有効利用が可能となることで廃棄物の最終処分量を削減するだけでなく、災害復興・復旧の迅速化に繋がる。
- ② 製鋼スラグと高炉スラグ微粉末(併せて鉄鋼スラグと呼称)を混合した材料は安定的な水硬性を発現し、固結による強度増加材料として有用である可能性がある。本研究では鉄鋼スラグによって篩下残渣を固めることを想定し、製鋼スラグのような粒状固化材料と圧縮弾性体である木屑を混合した材料の木屑形状や木屑混合割合の違いが力学特性に及ぼす影響を定量的に評価する。
- ③ 産業副産物である鉄鋼スラグと災害廃棄物である篩下残渣を掛け合わせた材料において、鉄鋼スラグの固化による篩下残渣の強度改善と篩下残渣中の木屑の圧縮性および繊維補強効果に期待し、粘り強い靱性を備えた材料となることに期待している。また、鉄鋼スラグの高 pH によって篩下残渣中の木屑の腐朽を大幅に抑制できることにも期待している。

第3章では本研究で使用する各種試料の特徴や物性値を示し、本研究で使用する各種力学試験装置の概要について示した。その上で、本研究で使用する試料と一般的な地盤材料との類似点と相違点について述べた。

- 本研究材料は砂や粘土などの自然の地盤材料と異なり、人工的な固化地盤材料である。また、これまでに多くの研究がされているセメント改良土などの人工地盤材料とは異なり、材料全体が一体化して固化体を形成しているわけではなく、製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末が粒状固化体として木屑の周りで微細な固結体を形成している材料である。
- 木屑を大量に混合した場合には大変形が予測されることから、三軸圧縮試験では試験終了時の軸ひずみを基準の $\epsilon_a=15\%$ ではなく、本試験機の上限である $\epsilon_a=25\%$ まで試験を行うこととした。

第4章では本研究で対象とする木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性について、木屑形状・木屑混合割合・養生期間・固化強度・拘束圧依存性・排水条件依存性の影響を明らかにした。また、得られた結果を基に木屑混合割合と養生期間をパラメータに取ったせん断強度・せん断剛性の推定手法を提案した。以下に得られた知見を示す。

木屑形状と木屑混合割合の影響

- 木屑形状によらず、スラグ 4(2018)に木屑を混合することで変形係数は低下する。そして、細長比が大きいほど、変形係数の低下率も大きい。
- 形状(繊維状・粒状)によらず、スラグ 4(2018)への木屑混合割合が 10 vol.%までは木屑混合割合の増加とともに、一軸圧縮強さ q_u および最大せん断強さ q_{max} は増加し、それ以上混合すると木屑混合割合の増加に伴って q_u および q_{max} は低下する。つまり、せん断強さが最大となる最適混合割合(10 vol.%)が存在する。
- 木屑形状によらず、木屑を混合することで破壊ひずみは増加する。また、木屑混合による残留強度の増加は見られないが、ピーク強度後の応力低下が緩やかになる。特に繊維状の木屑を混合した場合に破壊ひずみの増加およびピーク強度後の応力低下が緩やかとなり靱性が卓越した材料となることを明らかにした。

養生期間の影響(0~1008日)

- 試験方法(一軸圧縮試験および拘束圧 50 kPa の飽和圧密排水三軸圧縮試験)によらず、養生による強度および剛性に与える影響は変わらない。
- 木屑形状によらず、木屑混合割合が 10 vol.%以下では、84日養生までせん断強度およびせん断剛性は増加し、その後は1008日養生までほとんど変化しないかわずかに増加する。
- 木屑形状(繊維状・粒状)によらず、木屑混合割合が 33 vol.%以上では、養生によるせん断強度およびせん断剛性の増加はほとんど見られない。
- 養生期間ごとで木屑混合割合が異なると強度および剛性の発現傾向が異なる。例えば、スラグ 4 のみと繊維状木屑混合割合 5 vol.%の7日養生後の最大せん断強さは木屑混合割合 5 vol.%のほうが高いのに対し、84日養生ではほとんど変わらない最大せん断強さを示す。また、これらの条件の剛性は7日養生でも84日養生でもスラグのみのほうが顕著に大きい。そしてこの傾向は一軸圧縮試験から得られる傾向と同じである。

母材強度の影響

- いわき砂砂のような母材の一軸圧縮強さが著しく低い材料に繊維状の木屑を混合した場合、木屑の混合割合(33 vol.%以下)によらず、一軸圧縮強さおよび破壊ひずみは大きくなり、さらに、ピーク強度後の応力低下も緩やかになる。一方で、ヒノキを混合した場合には一軸圧縮強さの増加も見られず、またピーク強度後の応力低下傾向もいわき砂砂と変わらない。つまり、一軸圧縮強さの増加およびピーク強度後のひずみ軟化傾向にはココヤシ繊維の繊維補強効果が寄与しているものと推察され、スラグと混合した材料においてもココヤシ繊維の繊維補強効果が発揮されていたものと考えられる。

- 木屑混合材料の力学特性は、混合する木屑の割合および形状だけでなく、木屑と混合する母材の強度によっても大きく異なり、 $q_u=500\text{kPa}$ までは木屑を混合することで母材よりも大きなせん断強度を発揮するが、 $q_u=750\text{kPa}$ 以上となると木屑を 5 vol.%程度混合しただけで母材よりもせん断強度が小さくなる。ただし、その場合でも、母材の最大せん断強さの大きな材料と混合したほうが最大せん断強さは大きくなる。また、固化する材料と固化しない材料とで木屑混合割合の増加に伴う正規化した残留強度の変化傾向は異なるが、母材の最大せん断強さの影響はあまり明確ではない。
- 繊維状の木屑の混合割合が増加すると破壊ひずみは増加し、剛性は低下するが、この変化傾向には母材の最大せん断強さの影響はない。

拘束圧依存性

- ココヤシ繊維の混合割合によらず、 $\phi_{d0\max}$ には拘束圧依存性があることを確認した。
- ココヤシ繊維の混合によって $\phi_{d0\text{res}}$ の拘束圧依存性が小さくなるものの、 $\phi_{d0\max}$ はココヤシ繊維を混合しても拘束圧依存性はほとんど変化しないことが明らかになった。
- ココヤシ繊維を混合した場合には c_d の拘束圧依存性が小さくなることが明らかになった。

排水条件依存性

- 木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料は密に締固めた粒状材料としても振舞うため、非排水条件のせん断強度は排水条件のせん断強度よりも大きく算出され、本材料においては $q_u = c_u = 2\tau_{\max}$ の関係が成り立つことが明らかとなった。

せん断強度・せん断剛性推定手法の提案

- 木屑混合割合と養生期間をパラメータに取ったせん断強度・せん断剛性の推定手法について提案した。
- 推定工程にせん断強度-養生期間関係を用いた場合の推定剛性は、実測剛性の傾向と一致し、推定方法として適切であるが、剛性-養生期間関係式を用いた場合の推定強度は、実測強度の傾向と一致せず、推定方法として不適切である可能性があることを示した。
- 導出した関係式において、木屑の影響因子と推察される係数を特定した。

第5章では第4章で繊維状の木屑をスラグに混合した際にスラグのみよりも大きなせん断強度・破壊ひずみを発揮するだけでなく、ピーク強度後の応力低下が緩やかになることが明らかになったことから、このせん断抵抗発現機構について実験的な検討を行った。また、第4章で得られた一軸圧縮強さの地盤工学的な解釈を示した。

せん断抵抗発現機構の検討に関する実験的検討①

石膏複合固化剤とナイロン繊維を用いて一軸圧縮試験を行うことで、繊維の引抜き抵抗による補強効果が混合材料のせん断抵抗に及ぼす影響について検討した。以下に得られた知

見を示す.

- 製鋼スラグ代替固化材として用いた石膏複合固化材にココヤシ繊維を内割体積で 10 vol.%混合した材料においても強度増加および破壊ひずみの増加を確認し、さらにピーク強度後のひずみ軟化も緩やかになることが分かった。また、石膏複合固化材にココヤシ繊維を混合した場合にはスラグ 4 にココヤシ繊維を混合した場合に見られたような変形係数の低下は見られなかったことから、変形係数は母材の固結の仕方によって変化するものと考えられる。これは石膏スラグ固化材のように供試体全体硬化が進む材料とスラグ 4 のような粒状体の材料がココヤシ繊維の周囲で木屑を囲むようにして微細な固結をする材料の違いであると考えられる。
- ナイロン繊維を石膏複合固化材にランダム配置した場合と鉛直配置した場合とでピーク強度後のひずみ軟化挙動は異なり、ランダム配置した石膏複合固化材は石膏複合固化材のみと比べてほとんど変わらないひずみ軟化挙動を示すのに対し、鉛直配置した石膏複合固化材ではピーク強度後に急激なひずみ軟化を示す挙動が視られた。これは、ナイロン繊維を配置した場合、せん断面に交差するようにナイロン繊維が引抜き抵抗を発揮し、補強効果が発現するためと考えられる。
- ココヤシ繊維をスラグ 4(2018)と混合した場合の強度および破壊ひずみの増加は木屑繊維の引抜き抵抗による補強効果に起因すると考えられる。

せん断抵抗発現機構の検討に関する実験的検討②

製鋼スラグに長さの異なる化学繊維を混合した材料を用いて飽和排水圧密三軸圧縮試験を行うことで、繊維長さがせん断抵抗に及ぼす影響について検討した。以下に得られた知見を示す。

- 化学繊維を 2 vol.%混合した場合、繊維長さによらずスラグ 4(2019)のみよりも最大せん断強さや破壊ひずみ、残留強度を増加させる補強効果が確認できた。そして、繊維が長いほど最大せん断強さ、破壊ひずみ、残留強度は大きくなるが、一定長さ以上(本実験では 20 mm 以上)になると変化しなくなることが分かった。
- ピーク強度後の応力低下の仕方は繊維長さが 10 mm から 20 mm の間で変わり、その間を境に応力低下が顕著に緩やかになることが明らかになった。これはスラグ粒子が繊維によって拘束されたことによるものと考えられる。
- 化学繊維やココヤシ繊維に関係なく、養生により、破壊ひずみは低下し、残留強度の増加はしない。つまり、スラグの固化によって残留強度は増加しないことが明らかになった。

一軸圧縮強さの地盤工学的解釈

- UC試験で求まる圧縮強度は低拘束圧条件下での排水せん断強度である。つまり、実務的には、比較的浅い(3m 以浅)場所での使用を想定する場合の最大せん断強度 t_{max} は一軸圧縮強さの 1/2 とすることで推定できることを示した。ただし、木屑混合割合が 33 vol.%では、 $\varepsilon_a = 7\%$ までの範囲で $q_u = 1/2 t_{max}$ が成り立つことから、相当に大変形時のせん断強さは q_u で推定することは難しい。

- 木屑混合割合が 10 vol.%以下であれば、*UC*試験より得られる q_u と *UU*試験より得られる c_u は等しく、 $q_u = c_u$ の関係が成り立つことを示した。

第6章では、耐候性と耐朽性の観点から、乾湿繰り返し実験および木材腐朽実験を行い、木屑混じりスラグ固化材料の耐久性について評価した。また、実験結果から実利用時における劣化抑制方法と対策について提案した。第6章をまとめると以下の通りである。

乾湿繰り返し実験による耐候性

- 固化処理土の乾湿繰り返しの耐久性について、セメント改良土における乾湿繰り返しの既往研究を示とともに、本研究材料と既往研究の類似性と相違性を説明した。本研究で使用するスラグ固化材料は粒状固化材料であり、セメント固化材のように全体が完全に一体化した材料とは異なる、また、木屑のような吸水性を有する材料が固化処理された材料の乾湿繰り返し耐久性を評価した事例はほとんどない。
- 脱型した供試体(水平拘束力なし)の乾湿繰り返し耐久性はスラグと混合する木屑の形状によって異なる。繊維状の木屑を混合した場合には、乾燥による微小な収縮と浸水による大きな膨張を繰り返しながら顕著に体積膨張し、一軸圧縮強さも大幅に減少する。一方で、粒状の木屑を混合した場合には、わずかに体積膨張し、一軸圧縮強さは乾湿を8サイクル繰り返した後も7日養生と同程であった。これらの違いは繊維状木屑の復元力が影響したためと考えられるが、繊維状の木屑を短く裁断しても裁断する前と同程度の体積膨張を示した。つまり、ある一定以上の長さを持った繊維状の木屑(実際には木の根)が混入した場合には体積膨張および一軸圧縮強さの低下をもたらす可能性がある。
- 繊維状の木屑を混合した脱型供試体(水平拘束力なし)であっても、乾燥のみおよび浸水のみ、さらに不飽和(相対湿度 95%)環境下ではほとんど体積変化が起こらないことから、体積膨張は乾燥と浸水のいずれか片方でも欠けると起こらず、強度の大幅な低下も防げると考えられる。
- 水平拘束力が作用した条件下(アクリル製の円筒カラム)においては繊維状の木屑を混合した場合であっても乾湿繰り返しによる体積膨張が全く見られなかったことから、実利用にあたって体積変化はほとんど起こらないものと考えられる。

以上から、実務においては、地表面付近を除き、水平拘束力が作用しない条件は考えられず、また本研究で実施したほどに極端に乾燥するような状況は起こりにくくなることから繊維状の木屑が多く混入した場合でも体積膨張は相当に抑えられると考えられる。仮に乾燥が懸念される場合には、その上に十分な覆土を施すことで極端な乾燥が避けられるため、材料の劣化は大幅に抑制されることが考えられる。

木屑腐朽実験による耐朽性

- 本研究材料である木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料は、製鋼スラグおよび高炉スラグ微粉末を固化材として使用することから木屑周辺環境は高アルカリ性(pH = 11.5 以上)

であり、また、締固めた木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の内部は嫌気性であることから木屑の腐朽は相当に起こりにくい環境であると考えられる。

- ▶ 滅菌処理していないココヤシ繊維をスラグと混合した場合、白色腐朽菌の接触する位置(内部 or 外部)によらず、白色腐朽菌の接触から7日後には供試体上面のココヤシ繊維上に菌が繁殖しはじめ、約50日後には供試体上面に存在するココヤシ繊維のほとんどが菌で覆われた、また、供試体内部のココヤシ繊維は約1年後にも菌の繁殖を確認できなかった。これは、供試体上面は酸素が十分に供給されている好気性環境であったのに対し、締固めた供試体内部は嫌気性環境であったためである。さらに、供試体上面であってもスラグ上に菌はほとんど繁殖しないことを確認した。これはスラグが高アルカリ性であったためであると考えられる。
- ▶ 滅菌処理していないココヤシ繊維を用いた場合、供試体上面のココヤシ繊維上に繁殖した菌はココヤシ繊維に元からいた菌(以降、常在菌)であり、白色腐朽菌ではないことをSEM画像によって確認した。つまり、滅菌処理をしていないココヤシ繊維は元から存在していた微生物叢によって、白色腐朽菌が浸食できない環境となっていた可能性が高い。
- ▶ 供試体上部のココヤシ繊維が常在菌によって相当に腐朽した1年後の木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料において、一軸圧縮特性の大きな変化は見られず、地盤材料として十分なせん断強さを発揮することが分かった。ただし、より長期間の耐朽性については更なる検討が必要である。
- ▶ 滅菌処理後に白色腐朽菌で腐朽させたココヤシ繊維をスラグと混合した場合、84日後でも供試体上面および内部に菌の繁殖は確認できなかった。これは白色腐朽菌がアルカリ性に対して相当に耐性が低く、十分な酸素供給がある供試体上面のココヤシ繊維であっても、白色腐朽菌の活動が抑制されたためであると考えられる。また、84日後の一軸圧縮特性にも変化は見られず、地盤材料として十分な強度・剛性を備えたままであり、木屑の腐朽およびそれによる木屑混じり鉄鋼スラグ固化材料の力学特性の変化は確認されなかった。

以上から、実務においては、表層部が露出した使用を避け、覆土を施すことで菌の繁殖を大幅に抑制できると考えられる。

第7章では、本論文の結論と課題についてまとめた。

以上のように、木屑混じりスラグ固化材料の地盤工学的特性について多くの重要な事実を明らかにした。これらの知見は、篩下残渣の有効利用に向けて、非常に有益な情報を含んでいる。特に繊維状の木屑混じりスラグ固化材料は靱性を備えた材料であり、様々な場所への利活用が想定できる。

7.2 今後の研究課題

第4章における課題

- 実際の篩下残渣には土やその他の様々な物質が含まれるが本研究では木屑のみに着目して実験を行っていることから、本研究成果を基により複雑な混合材料を用いた実験を行い、データを蓄積する必要がある。
- 本研究では単一形状の木屑を混合した材料で実験を実施したが、実際の篩下残渣中の木屑形状は様々である。本研究データを組み合わせることでデータを整理することが可能であるかの検討が必要である。
- せん断強度・せん断剛性の推定において、導出した関係式の係数に対し、木屑の因子分析をする必要がある。因子分析を行うことで、今回特定した木屑因子係数をより具体的な係数(木屑寸法ポアソン比)に置換することが可能となり、汎用性のある推定式として取り扱うことが可能になると考えている。

第5章における課題

本検討では繊維状の木屑を混合した場合のせん断強度の増加や破壊ひずみの増加、さらにはピーク強度後の応力低下に着目し、そのせん断抵抗発現機構について実験的な検討を行ったが、粒状の木屑を混合した場合にもせん断強度の増加は確認されている。粒状の木屑を混合した場合のせん断強度増加機構についても明らかにする必要があると考えている。

第6章における課題

- 木屑の腐朽に関して、実地盤には様々な生物(菌, 細菌 etc)が存在するが、本検討では白色腐朽菌のみでの室内実験であることから、実地盤での検討が必要不可欠である。
- 本研究で行った木材腐朽実験は1年程度の腐朽実験であることから、より長期的な腐朽影響については未解明な部分が多い。

このように実利用に向けてはまだ課題があるものの、本研究の成果が篩下残渣の有価資源に向けた取り組みの一助となることを願っている。