

学位論文

現場施工における締固め土の 力学特性の評価手法に関する研究

2021年3月

永井裕之

要旨

本研究は、盛土の締固め管理を高度化することにより施工の合理化や盛土構造物の高品質化を実現する手法に着目したものである。本論文では、まず、品質規定方式や工法規定方式といった現状の締固め管理手法に加え、施工全体の生産性向上を目指す i-Construction の取り組みについて説明した上で、施工の合理化、盛土構造物の高品質化を実現する新しい締固め管理技術の重要性を示した。

一方、新しい締固め管理手法を実現するために解決すべき現状の締固め管理の課題として、品質測定手法の即時性の確保、Walker-Holtz による礫率補正式(以下、WH 式)の修正による品質評価手法の高度化の必要性について示した。これより、加速度応答法による締固め特性の評価手法および礫率補正式の高度化を目的とした現場および室内実験を実施し、盛土構造物の品質情報をリアルタイムかつ面的に測定し、その結果に礫率補正式を適用することで高精度な品質評価を行うことのできる新しい締固め管理手法を提案した。本手法を実工事に適用し、その有効性を明らかにした。

以下に本論文の各章の要旨を述べる。

第 1 章では、盛土の締固め管理の特徴を概観した上で、近年激甚化する自然災害による盛土構造物の被害状況、さらに施工の生産性向上を目的とした i-Construction の推定について説明し、施工の合理化、盛土構造物の高品質化を実現する新しい締固め管理手法の重要性を示した。上記の内容を踏まえ、本研究の目的を示し、本論文の全体構成を概説した。

第 2 章では、盛土の締固め管理に関して、これまでに得られている知見を示し、現状の締固め管理手法（品質規定方式、工法規定方式）の詳細や、ICT 技術の現場導入実績などについて示した。しかし、本研究の目的を達成するには、現状の締固め管理における品質測定手法の即時性の確保、礫率補正式の高度化による品質評価手法の向上に関する課題などが存在することを明らかにした。

以上の内容を踏まえ、上記の課題を解決するために行った実験結果を**第 3 章**、**第 4 章**にとりまとめた。

第 3 章は、地盤剛性指標による効率的な締固め管理手法の検討を目的とし、大型土槽内にて最大粒径の小さい室内粒度試料を用いた実大締固め機械による転圧試験を実施した。転圧中には加速度応答法 (CCV システム) による地盤剛性指標を計測し、所定の転圧回数施工後には砂置換法、RI 試験による密度および含水比測定とともに、小型 FWD 試験、キャスポル試験、現場 CBR 試験による地盤剛性指標の計測を行った。転圧試験の測定データと、小型 FWD 試験、キャスポル試験、現場 CBR 試験、CCV システムにより取得したそれぞれの地盤剛性指標 ($(K_{30})_{FWD}$ 、 $(K_{30})_{キャスポル}$ 、CBR 値、CCV 値) の相関を調べたところ、いずれの地盤剛性指標とも飽和度 S_r と

乾燥密度 ρ_d をパラメータとする関係式が成立することを示した。これより、地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r との関係式に基づく締固め管理を行うことが可能であることが明らかとなった。地盤剛性指標のうち、 $(K_{30})_{FWD}$ 、 $(K_{30})_{\text{キャスボル}}$ 、 CBR 値は、砂置換法と同様に施工完了後の点情報として得られる指標であるのに対して、 CCV 値は、施工中にリアルタイムかつ面的な測定が可能であるため、本研究の目的の一つである施工の合理化に最も適した工法である。

第4章は、第3章に示した CCV 値による締固め管理手法の実工事への適用性を検証するため、実工事において大粒径の土粒子を含む現場全粒度試料を対象とした転圧試験を実施した。転圧施工中は CCV 値を計測し、転圧施工後は RI 試験による密度と含水比の測定を行った。

この転圧試験の測定データを解析し、 CCV 値が飽和度 S_r と乾燥密度 ρ_d をパラメータとした関係式で表現できることを示した。これより、 CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r との関係式が実大規模の大粒径土粒子を含む場合にも適用できることを意味しており、この関係式による締固め管理は実工事に適用可能であることを示した。

ところで、一般に、現場施工における目標締固め度 $(D_c)_{IEc} =$ 「現場施工時に取得した乾燥密度 ρ_d 」 / 「現場全粒度試料での $1.0E_c$ のエネルギーの時の最大乾燥密度 ρ_{dmax} 」は室内実験により求めた $1.0E_c$ のエネルギーの時の最大乾燥密度 ρ_{dmax} をもとに設定される。しかし、室内試験と現場試験とでは用いる地盤材料の最大粒径 D_{max} が異なるため同じエネルギーで締め固めた時の最大乾燥密度 ρ_{dmax} の最大粒径の違いによる補正が必要である。これには一般的には、 WH 式が用いられるが、 WH 式には課題があり、その推定精度や適用範囲には制限がある。そこで、現場全粒度試料での $1.0E_c$ での最大乾燥密度 ρ_d を精度良く推定するためには新たな補正方法が必要である。そこで、最大粒径 D_{max} を変化させて小型・大型装置による室内締固め試験を実施した。その結果、 WH 式によって求めた最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH}$ を最大乾燥密度の比 $X =$ 「 WH 式による推定値」 / 「実測値」で補正することで礫率混入後の試料の礫率 P から、現場全粒度試料の $1.0E_c$ での最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH,X-P}$ を推定できることを明らかにした。本章で提案した現場最大乾燥密度 ρ_{dmax} を求めるための礫率補正手法を用いることにより、室内実験の結果から目標締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を設定できるようになることを示した。

第5章は、第3章、第4章の結論を受け、加速度応答法による品質測定手法、 $X-P$ 関係による締固め度 $(D_c)_{IEc}$ の推定手法を組合せた新しい締固め管理手法の実工事への適用方法を示した。事前準備として室内試験と試験施工を行い、それらの結果を踏まえて本施工を行う。

室内試験では、土粒子密度、粒度試験などの基本的な物性試験に加えて、二種類の最大粒径（例えば、最大粒径 $D_{max}=2.00, 37.5\text{mm}$ ）を持つ試料で突固め試験を実施し、最適飽和度 S_{ropt} 、突固め時の各締固め点から $D_c \sim$ 飽和度差 $S_r - S_{ropt}$ 曲線、 $X-P$ 関係、現場全粒度試料に相当する所定締固めエネルギーでの最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH,X-P}$ を算出する。

試験施工では、要求性能を満足する施工仕様（重機、撒き出し厚、施工含水比 w 、転圧回数 N など）を決定と、 CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を構築する。

本施工では、試験施工で構築した CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を用いて、施工中に取得する CCV 値と施工前に測定した含水比 w から乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r をリアルタイム

に推定し、事前準備で求めた最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH,X-P}$ を用いて締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を満たしていることを確認していく。

なお、本手法の実工事への適用性を検討するため、実工事で取得した CCV 値をもとに乾燥密度 ρ_d を求めた結果、推定値と実測値は概ね一致することが確認された。これより、加速度応答法と礫率による最大乾燥密度補正式を組み合わせた新しい締固め管理手法の実工事への適用に対する有効性が明らかとなった。

第6章では、本研究で得られた結論と今後の展開や課題についてまとめた。本研究によって、盛土の品質情報をリアルタイムかつ面的に加えて高精度に評価することが可能であるため、本研究の目的である施工の合理化、盛土構造物の高品質化を実現することを示した。一方で、残された課題として、含水比のリアルタイムかつ面的な評価手法の開発の必要性和、その値を用いた CCV 値による乾燥密度 ρ_d の推定精度向上を指摘した。

目次案

頁

第1章 序論.....	1
1-1 研究の背景.....	1
1-1-1 盛土構造物について.....	1
1-1-2 激甚化する自然災害による盛土構造物の被害状況.....	2
1-1-3 i-Construction の推進による生産性向上.....	3
1-2 本研究の目的.....	4
1-3 本論文の構成.....	4
第1章の参考文献.....	7
第2章 既往の研究と本研究の位置づけ.....	9
2-1 盛土構造物の締固め管理の考え方.....	9
2-1-1 室内締固め試験.....	9
2-1-2 現場での締固め施工法.....	11
2-1-3 品質規定方式による施工管理.....	12
2-1-4 工法規定方式による施工管理.....	14
2-1-5 飽和度管理の考え方.....	16
2-2 ICT 技術の利用状況と事例.....	19
2-2-1 ICT 技術の利用状況.....	19
2-2-2 ローラ加速度応答法を用いた盛土の品質管理.....	20
2-3 盛土締固め管理の課題.....	23
2-3-1 盛土の品質情報の即時推定手法の考案.....	23
2-3-2 礫率補正式の高度化.....	23
2-4 CBR 値と乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の関係.....	25
第2章の参考文献.....	28
第3章 地盤剛性指標を用いた盛土品質の即時推定手法による施工の合理化.....	29
3-1 概要.....	29
3-2 小粒形の盛土材料を対象とした屋外土槽ピット試験による検討.....	31
3-2-1 実験条件.....	31
3-2-2 試験ヤード, 重機, 品質試験の設定.....	33
3-2-3 地盤剛性指標.....	37
3-3 実験結果および考察.....	38

3-3-1	試験値と転圧回数 N の関係	38
3-3-2	地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d , 飽和度 S_r の関係	42
3-3-3	地盤剛性指標の相関性	43
3-3-4	締固め試験での締固め状態	46
3-4	盛土品質の即時推定手法の検討	48
3-4-1	現場 CBR 試験による品質指標の推定式	48
3-4-2	小型 FWD 試験による品質指標の推定式	50
3-4-3	キャスポル試験による品質指標の推定式	52
3-4-4	CCV システムによる品質指標の推定式	54
3-4-5	CBR 値, $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ による CCV 値の推定精度	56
3-5	地盤剛性指標を活用した締固め管理	61
	第3章のまとめ	65
	第3章の参考文献	67
第4章	粒度特性が盛土の品質に与える影響を考慮した盛土の高品質化	69
4-1	概要	69
4-2	大粒径の盛土材料を対象とした現場転圧試験による推定式の検証	71
4-2-1	実験手順	71
4-2-2	実験結果および考察	73
4-2-3	CCV 値による品質指標の推定式の検討	78
4-2-4	推定式を用いた締固め管理手法	81
4-3	粒度特性が締固め特性に与える影響	85
4-3-1	室内試験条件	85
4-3-2	室内試験結果	86
4-3-3	粒子破砕の影響の評価	89
4-3-4	Walker-Holtz による礫率補正式の妥当性検証	91
4-3-5	最大乾燥密度比 X と礫率 P の関係による礫率補正	100
	第4章のまとめ	104
	第4章の参考文献	106
第5章	加速度応答法を用いた新しい締固め管理手法の実工事への適用性	107
5-1	これまでの検討結果	107
5-1-1	地盤剛性指標による乾燥密度 ρ_d , 飽和度 S_r の推定	107
5-1-2	最大粒径 D_{\max} の違いによる特性が品質評価に与える影響	108
5-2	加速度応答法を用いた新しい締固め管理手法の実工事への適用方法	110
5-2-1	施工前の実施事項	112
5-2-2	試験施工の実施事項	114
5-2-3	本施工の実施事項	116

5-3	CCV 値による現場締固め度(D_c) _{IEc} の推定方法	117
5-3-1	実施工により得られた CCV 値の測定データ	117
5-3-2	締固め曲線の礫率補正による締固め度(D_c) _{IEc} の推定	120
	第 5 章のまとめ	124
	第 5 章の参考文献	125
第6章	結論	127
6-1	各章における結論	127
	第 2 章の結論	127
	第 3 章の結論	128
	第 4 章の結論	129
	第 5 章の結論	131
6-2	まとめ	132
6-3	今後の課題	132
	謝辞	133

第1章 序論

1-1 研究の背景

1-1-1 盛土構造物について

盛土構造物は、我々の生活に欠かすことのできない重要なインフラの一部である。図 1-1 に盛土の種類と機能を示す¹⁾。図に示すように、盛土構造物は、道路、鉄道、造成地、河川堤防、海岸堤防、貯水池、フィルダムなどそれぞれの目的に応じて様々な役割がある。道路、鉄道盛土などの交通荷重を支持するもの、造成地盛土などの建物、施設の荷重を支持するもの、河川堤防や海岸堤防などの止水や防水を目的としたもの、調整池やフィルダムなどの貯水を目的としたものなどがある。

盛土構造物の設計を行う場合は、上記に示したそれぞれの目的に応じて、施設の機能や荷重条件、盛土構造物の規模や形状などを考慮する必要がある。さらに、万が一、盛土構造物が崩壊した場合の周辺環境へ与える影響の大きさや重要性、復旧の難易なども考慮した設計が求められる。

全国には 51,306 箇所²⁾、総面積 99,684ha²⁾の大規模盛土造成地が存在することが国土交通省により報告されている²⁾。この他にも、規模を問わずあらゆる用途で構築されたものも含めると、膨大な数の盛土構造物が日本に存在していることがわかる。このことから、日本における盛土構造物の重要性が確認される。

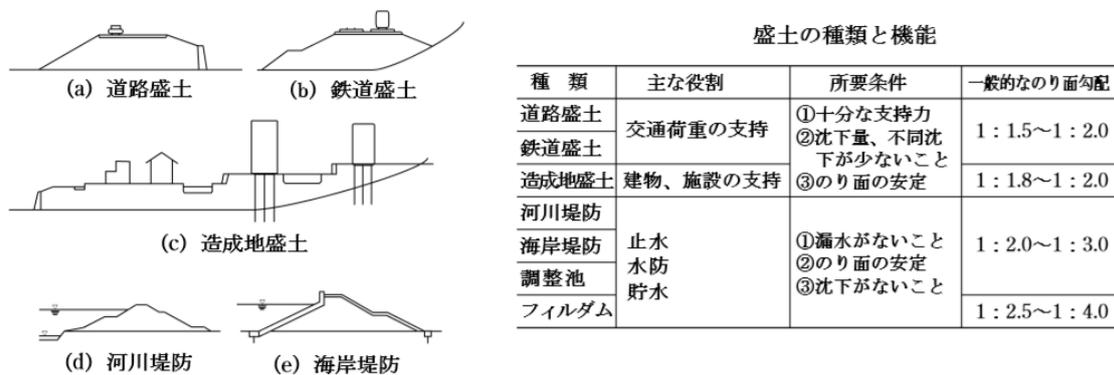


図 1-1 盛土構造物の種類と機能¹⁾

1-1-2 激甚化する自然災害による盛土構造物の被害状況

盛土構造物は、自然材料である土が母材であり、現地発生土をそのまま用いることが多いため、コンクリート材料のように品質の均一性が保たれていないことがほとんどである。そのため、粒度や含水比などの材料管理や施工管理を入念に行った場合でも、盛土の品質は不可避免的にばらつきが生じる。これより、豪雨や地震時には盛土構造物には円弧すべりや滑動などが作用し、崩壊などの事例が多く確認されている。特に、地震、津波、暴風、豪雨、洪水等、多種の自然災害が発生しやすいという特性を有する日本においては、これらの被害は顕著である。

図1-2には、東日本大震災により被災した藤沼ダム（本体）の写真を示す。平成23年3月11日の東北地方太平洋沖地震（発生時刻14時46分、M9.0）により藤沼ダムは決壊し、流出した多量の水が下流域の集落に達して、死者7名、行方不明者1名の惨事を引き起こした。藤沼ダムの決壊について、その原因究明を目的とした調査・検討²⁾が行われ、特に重要な要因の一つとして、締固め不足が挙げられた。藤沼ダムは昭和24年10月に竣工しており、盛土の性能を表す指標である締固め度 D_c が現在の施工方法と比較すると小さく、地震時に非排水条件になると堤体盛土の強度は小さくなる。特に、砂分に富む材料からなる堤体上部の盛土部では、水で飽和されている部分があり、今回のような地震動をうけるとさらに強度低下を示すことが判明した³⁾。なお、同地震により福島県内では約750箇所フィル型式の農業用ダム・ため池が被災している。

これより、今後も発生が予想される地震や豪雨などの大規模な自然災害に対して、締固め管理の重要性が明らかとなった。



図 1-2 決壊した藤沼ダム（2011年4月撮影）

1-1-3 i-Constructionの推進による生産性向上

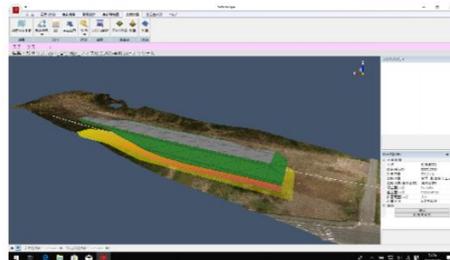
我が国は、今後、少子高齢化が進展し、働き手の減少が避けられない状況であるとともに、近年激甚化している自然災害に対する対応、今後本格的に老朽化を迎えるインフラの維持管理への対応など様々な課題を抱えている。このような中、少ない人手でも従来と同じ量の仕事ができるよう生産性を向上することが不可欠であることから、国土交通省では、生産性向上に向けたプロジェクトの一つとして、「ICT技術の全面的な活用」、「規格の標準化」、「施工時期の平準化」等の施策を建設現場に導入することによって、建設生産システム全体の生産性向上を図り、魅力ある建設現場を目指す「i-Construction(アイ・コンストラクション)」を推進している。平成28年度より、「i-Construction」のトップランナー施策として、土工事へICTを全面的に導入する「ICT土工」の施行が進められている。これは、「調査・測量」、「設計・施工」、「検査」、「維持管理・更新」の建設生産プロセスにICT技術(情報通信技術)を取り入れることで生産性を向上させるというものである⁴⁾。

盛土の施工においても、ICT技術による生産性の向上が進められている。具体的には、①3次元起工測量、②3次元設計データ作成、③ICT建機による施工、④3次元出来形管理等の施工管理、⑤3次元データの納品、⑥3次元モデルによる検査についての6項目が対象となる。図1-3には、実工事に適用されたICT適用事例⁶⁾を示す。土工事に用いる施工重機と位置情報技術を組合せることによる施工履歴管理が進められていることがわかる。振動ローラによる施工においては、施工履歴を活用した転圧回数管理が行われており、従来の品質規定による締固め管理よりも大幅な省力化が可能である⁷⁾。

このように、盛土構造物の施工方法の合理化が求められている。



UAVによる施工前の
空中写真測量



施工前測量データと3D設計データを合成し土量算出
3D設計データを重機データに変換し重機に出力



MCブルドーザによる
敷均し



RTK/GNSSによる転圧管理
システム搭載ローラによる転圧



3DMGバックホウによる
法面整形

図1-3 ICT土工の概要図⁶⁾

1-2 本研究の目的

以上のような、盛土構造物の施工に関する諸問題に対して、本研究においては、リアルタイムかつ面的に地盤剛性を評価することのできる加速度応答法に着目し、それを利用して品質測定手法の即時性を確保することによる施工の合理化を目指した。さらに、盛土の品質評価手法において課題とされてきた現場試験と室内試験との粒径特性の違いが品質評価に与える影響に着目し、礫率補正式の高度化による盛土の高品質化を目指した。

これらの考え方を組合せることで、合理的な施工法による高品質な盛土構造物を構築することが可能となる。

1-3 本論文の構成

本研究は、合理的な施工法による盛土構造物の高品質化の実現に向け、加速度応答値（以下、CCV 値）によるリアルタイムかつ面的で高精度な締固め管理手法に着目し、現場試験や室内試験により CCV 値を用いた盛土の乾燥密度、飽和度の即時推定式の構築と礫率補正式の高度化を検討し、これらを組み合わせた新しい締固め管理手法を提案したものである。本論文の全体構成を図 1-4 に示す。

まず、近年の激甚化する自然災害による盛土構造物の崩壊や近年の建設生産システム全体の生産性向上を目的とした i-Construction の推進により、施工手法の合理化と盛土の高品質化を実現する新しい締固め管理手法を開発することの重要性を示す。次に、現状の盛土の締固め管理手法について示すとともに、施工の合理化や盛土の高品質化を実現する上で課題となる①品質管理の即時性の確保、②現場試験、室内試験における盛土材の粒形特性の違いを考慮した品質評価手法について明らかとした。そして、それぞれの課題を解決することを目的とし、以下に示す研究を実施した。

① 品質管理の即時性の確保

大型土槽内にて砂質土（最大粒径 $D_{\max}=9.50\text{mm}$ ）を用いた実大締固め機械による転圧試験を実施し、地盤剛性指標による盛土の乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の即時推定手法を検討した。

転圧試験で得られた砂置換による密度試験結果と、多数測定可能な重錘落下試験、リアルタイムで面的に測定可能な CCV システムによって得られた地盤剛性指標の測定データを解析した結果、地盤剛性指標は飽和度 S_r をパラメータとして乾燥密度 ρ_d との関係式が成立することが確認された。地盤剛性指標のうち、CCV 値は、リアルタイムかつ面的に計測することが可能な手法であるため、本研究の目的である締固め管理の合理化に適していることがわかった。

次に、施工現場において大粒形を含む盛土材（最大粒径 $D_{\max}=75.0\text{mm}$ ）を対象とした転圧試験を実施し、CCV 値による上記の推定式の適用性を検証した。その結果、大粒形を含む盛土材が対象であっても CCV 値は飽和度 S_r と乾燥密度 ρ_d の関係式で表現できることが確認された。

最後に、CCV 値の関係式を用いた具体的な締固め管理手法について提案する。まず、締固

め過程における盛土材の含水比 w は一定であると仮定した場合、推定式により転圧回数 N が増加（すなわち、乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r も増加）した場合の CCV 値の変化を表現することができる。 CCV 値は、転圧の初期段階（転圧回数 $N=0\sim 6$ 回程度）では乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r に比例して増加傾向を示すが、転圧の後期（転圧回数 $N=8\sim 16$ 回程度）に飽和度 S_r が最適飽和度 S_{ropt} 以上になると、 CCV 値は乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r が増加しても低下傾向を示す。この特性を考慮し、 CCV 値の関係式により乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r を正確に推定するためには、 CCV 値単体ではなく転圧回数 N と併用した締固め管理が必要であることがわかった。これにより、 CCV 値によるリアルタイムかつ面的な盛土の締固め管理を実現することができる。

② 現場試験，室内試験における盛土材の粒形特性の違いを考慮した品質評価手法

最大粒径 D_{max} を変化させた室内締固め試験を実施し、Walker-Holtz の礫率補正式（以下、WH 式）の推定精度の検証および礫率補正式の高度化を検討した。

道路造成工事に使用した最大粒径 $D_{max}=75.0\text{mm}$ の盛土材を母材とし、せん頭粒度法により最大粒径 $D_{max}=2.0\text{mm}$ 、 4.75mm 、 9.5mm 、 19.0mm 、 37.5mm 、 53.0mm になるように粒度調整して作製した試料を対象に締固めエネルギー CEL を $1.0E_c$ 、 $4.5 E_c$ に設定して大型・小型締固め試験を実施した。任意の最大粒径 D_{max} の最大乾燥密度 ρ_{dmax} を基準とし、WH 式により目標とする最大粒径 D_{max} の最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH}$ を推定する。目標とする最大粒径 D_{max} で実際に締固め試験を行って得られた最大乾燥密度 ρ_{dmax} の実測値と前述の推定値との比較を行った結果、礫率 P に依らずに推定値は、実測値を過大評価することが明らかとなった。ここで、同一の CEL に対する最大乾燥密度の比 $X=$ 「WH 式による推定値」/「実測値」と礫率混入後の試料の礫率 P の関係（以下、 $X-P$ 関係）を求めた結果、礫混入側、礫除去側のそれぞれで、粒径の依らず高い相関関係を示した。これより、 $X-P$ 関係を構築しておくことにより、現場試験と室内試験との粒形特性の違いを考慮した品質評価が可能となる。

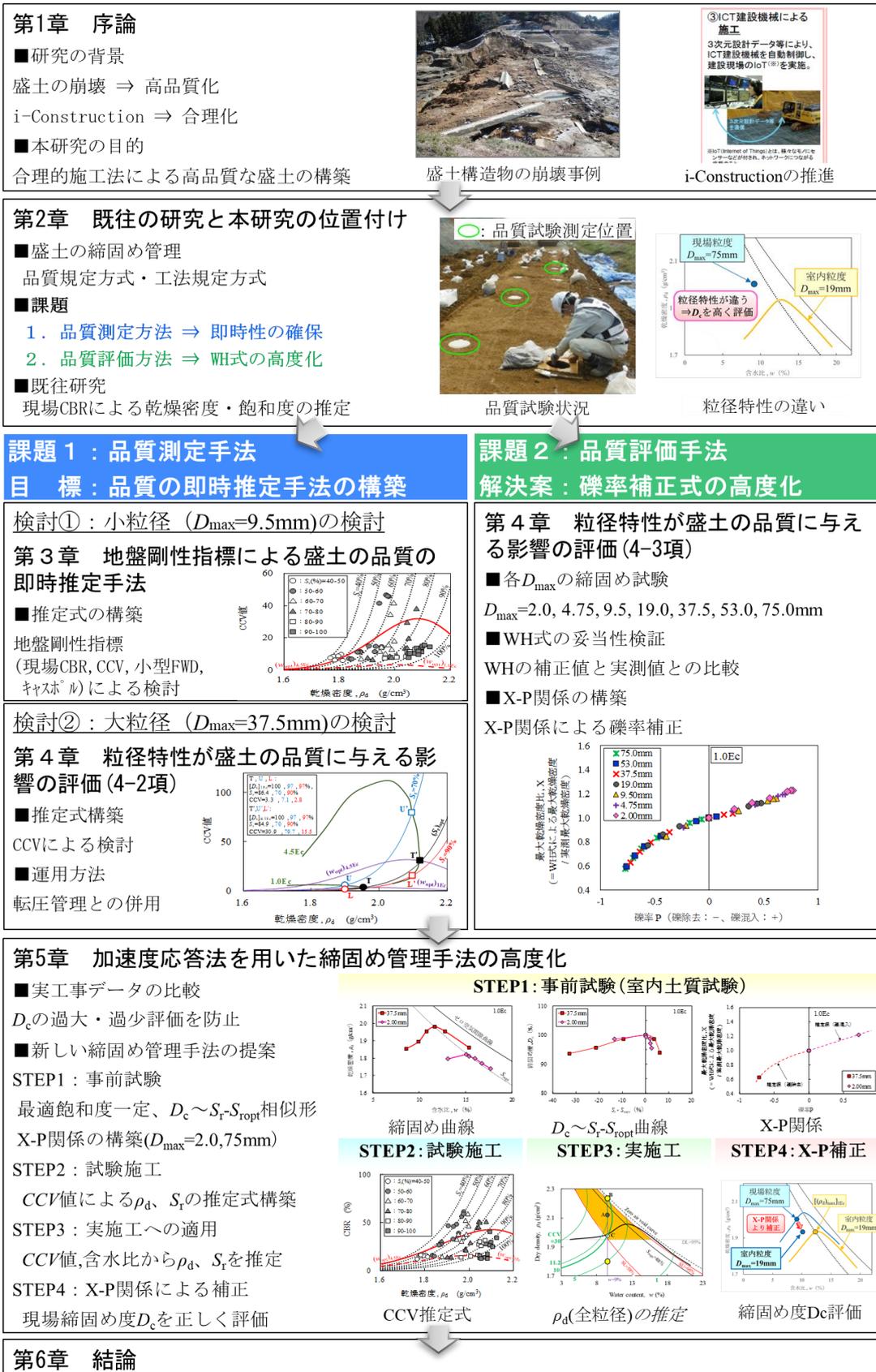
上記の①、②の課題に対する検討内容を踏まえ、加速度応答法を用いた新しい締固め管理手法を以下のように提案する。

まず、室内試験において、最大粒径 D_{max} を変化させた 2 種類の締固め試験を実施し、 $X-P$ 関係を求める。この時の最大粒径 D_{max} は、室内締固め試験を実施可能な範囲で最大・最小の粒径（最大粒径 $D_{max}=2.00\text{mm}$ 、 37.5mm ）とする。現場粒度の最大粒径 D_{max} を確認し、 $X-P$ 関係から現場粒度の最大粒径 D_{max} に対応する最大乾燥密度比 X を求める。

次に、試験施工において、 CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を構築する。

最後に、本施工において、盛土の施工含水比 w は既知で一定値と仮定した場合、施工中に得られる CCV 値と転圧回数 N の情報と上記の関係式により、乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r を推定する。ただし、この時に得られる乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r は、いずれも現場全粒度試料に対応した測定結果であるため、室内粒度で実施した室内締固め曲線上にそのままプロットすることはできない。そこで、室内試験で求めた最大乾燥密度比 X を用いて現場全粒度試料に相当する最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH,X-P}$ を推定し、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を評価することができる。

以上より、 CCV 値によるリアルタイムかつ面的で高精度な品質測定が可能となるため、施工方法の合理化と、盛土の高品質化を実現できることを示した。



第1章の参考文献

- 1) (社)地盤工学会編：「盛土の調査・設計から施工まで第一回改訂版」, pp. 6-7, 1990.
- 2) 国土交通省都市局都市安全課：都道府県別の大規模盛土造成地数および面積 (別紙資料), 国土交通省ホームページ.
- 3) 福島県農業用ダム・ため池耐震性検証委員会：藤沼湖の決壊原因調査報告書 (要旨), pp. 1-7, 2012.
- 4) 国土交通省：i-Construction の取組状況 (ICT 土工事例集) ver. 2, 2016.
- 5) 亀山崇, 山口賢一, 野崎了：I C T土工における実際の効果と課題について, 2017.
- 6) 国土交通省東北地方整備局：東北復興 i-Construction ICT 活用取組み事例集, 2018.
- 7) 吉田輝, 北本幸義, 早崎勉：施工規定方式における規定転圧回数の実用的な更新手法, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp. 55-56, 2004.

第2章 既往の研究と本研究の位置づけ

2-1 盛土構造物の締固め管理の考え方

2-1-1 室内締固め試験

土の締固めの考え方は、R.R.Proctorが発表した「転圧式アースダムの設計および施工について」と題する論文の中に示されている土の締固め特性、締固め試験方法、現場における施工管理手法に基づいており、現在における締固め管理のルーツとなっている。

ここで、図2-1に土の構造図を示す。図2-1に示すように、土は土粒子、空気、水の混合体である。土を締固めるといふことは、この混合体に外力を与えることで、土を密実にする行為である。図2-2に室内締固め試験により得られた締固め曲線の一例を示すが、土の締固め特性を表現する最も一般的な図表である。図中の曲線は、同一の土の含水比 w を変化させ、それぞれを同一の締固めエネルギー CEL で締固めた時の乾燥密度 ρ_d の変化を表したグラフであり、含水比 w と乾燥密度 ρ_d の関係は上に凸の曲線形である。これは、ある土に対して最も効率的に締固まる含水比 w が存在することを意味しており、この時の含水比 w を最適含水比 w_{opt} 、乾燥密度 ρ_d を最大乾燥密度 ρ_{dmax} 、飽和度 S_r を最適飽和度 S_{ropt} という。締固め曲線は、扱う土質が変化する毎に室内締固め試験を実施して求める必要がある。

締固め曲線は、室内締固め試験により得られる値であり、表2-1に示すように土質の最大粒径 D_{max} や土に与えるエネルギー（以下、締固めエネルギー CEL ）などを変化させた合計5種類の試験方法²⁾が存在する。

土に与える締固めエネルギー（仕事量） E_c (kJ/m^3) は、次の式(2-1)²⁾で定義されている。ここに、 W_R ：ランマーの重量 (kN)、 H ：ランマーの落下高さ (m)、 N_B ：1層あたりの突固め回数 (回)、 N_L ：突固め層数、 V ：モールドの容積 (m^3) である。

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{V} \quad (2-1)$$

表2-1に示した各呼び名の諸条件を式(2-1)に代入すると、呼び名A、Bの締固めエネルギーは $E_c \doteq 550 \text{kJ/m}^3$ となり、呼び名C、D、Eは $E_c \doteq 2500 \text{kJ/m}^3$ となる。ここで、呼び名A、Bを $1.0 E_c$ とした場合、呼び名C、D、Eは $4.5 E_c$ に相当することになる。現場における土の固め管理では、構造物の種類や重要度によって異なるが、道路盛土においては、路体・路床では $1.0 E_c$ 、路盤では $4.5 E_c$ を用いると定義されている³⁾。

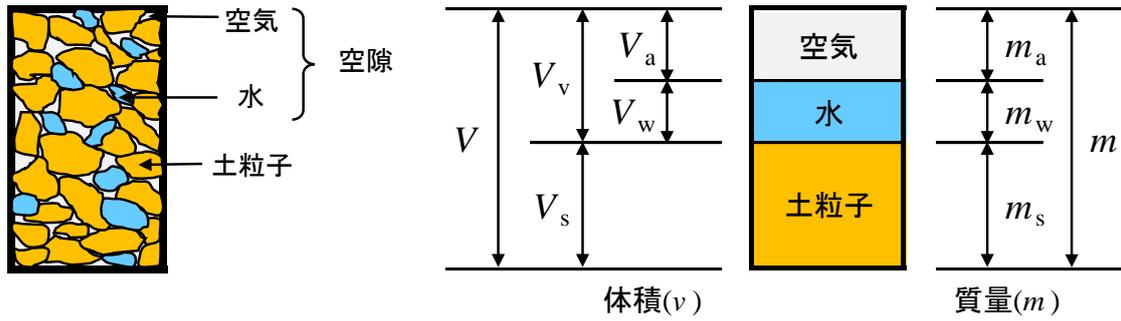


図 2-1 土の構造

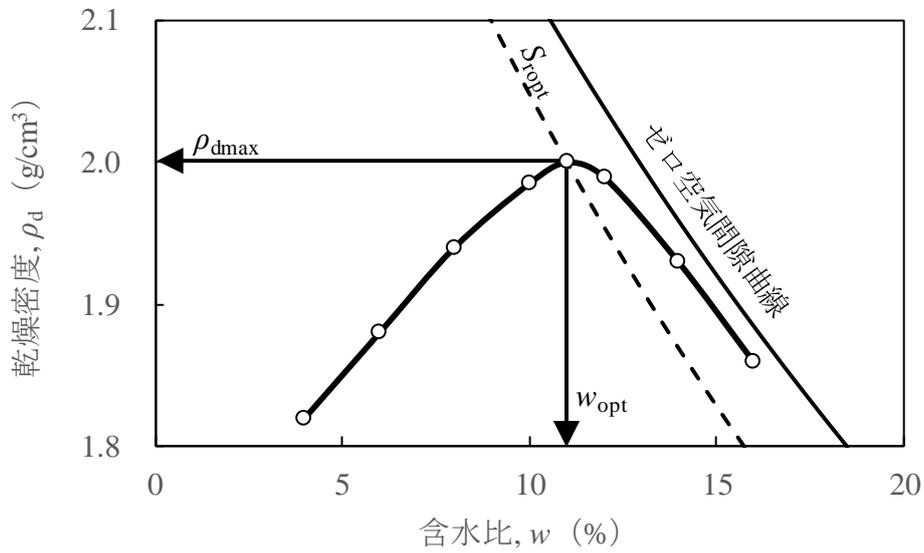


図 2-2 締固め曲線

表 2-1 試験方法一覧表²⁾

呼び名	ランマー質量 W_R (kg)	ランマー落下高 H (cm)	モールド内径 (cm)	モールド容積 V (cm^3)	突固め層数 N_L (層)	各層の 突固め回数 N_B (回)	許容最大粒径 D_{\max} (mm)
A	2.5	30	10	1000	3	25	19
B	2.5	30	15	2209	3	55	37.5
C	4.5	45	10	1000	5	25	19
D	4.5	45	15	2209	5	55	19
E	4.5	45	15	2209	5	92	37.5

2-1-2 現場での締固め施工法

道路、空港、フィルダムなどの土構造物の造成手順について説明する。図 2-3 には、実工事における盛土の締固め施工法のフロー図を示す。

まず、バックホウにより土砂を掘削し、それをダンプに積込み、盛土の施工ヤードに運搬、荷下ろしする。次に、ブルドーザにより所定の高さに敷き均し、その上を振動ローラなどの締固め機械が走行する。一層当りの土の仕上がり厚さは、一般的に 25~30cm に設定されることが多く、締固め機械が 6~10 回程度の転圧を繰り返し、所定の品質の盛土構造物を構築する。

土工事に用いられる締固め機械として最も一般的な機種は振動ローラである。図 2-4 には、振動ローラの全体図⁴⁾を示す。振動ローラは、ドラムと呼ばれる鉄製タイヤの前輪と、ゴム製タイヤの後輪によって構成されており、前輪が振動しながら走行することができる。大規模造成工事では、一般的に 7~10t 級の重量に該当する機種が選定されることが多い。

上記に示した締固め施工法により所定の品質を満足する盛土を構築するには、締固め機械、撒き出し厚、転圧回数 N 、施工含水比 w などの施工条件を適切に設定および管理するとともに、造成された盛土構造物が所定の品質を満足していることを確認する必要がある。盛土構造物の施工管理は、品質規定方式と工法規定方式の 2 通りが存在する。次項では、それらについて説明する。

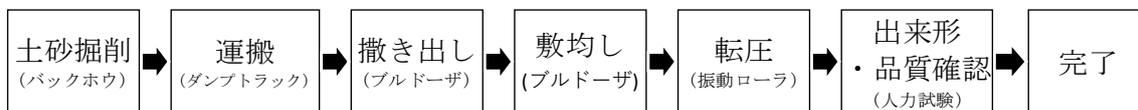


図 2-3 盛土の締固め施工法のフロー図

図 2-4 振動ローラの概要⁴⁾

2-1-3 品質規定方式による施工管理

品質規定方式⁵⁾とは、転圧施工後の盛土の密度や強度などの品質を直接的に確認し、良否を判定する手法である。施工手順は、まず盛土の対象となる土質を用いた室内試験を実施し、物性情報を取得する。次に、盛土の管理基準値を設定し、それを満足するように締固め施工管理を行う。本施工では、施工完了後に施工ヤードの代表的な地点で人力による品質試験を実施する。

品質管理基準値はいくつか存在する。以下にそれぞれの基準値について説明する。なお、本研究においては、 D 値管理（締固め度 D_c ）に基づく品質評価を基準とした。

(1) D 値管理⁵⁾

D 値管理は、締固めにおける品質管理手法として最も現場適用事例の多い手法である。なお、道路土工では D 値ではなく締固め度 D_c と表現されており、本研究においても、締固め度 D_c に基づく品質評価を基準とする。本管理手法は、現場から採取した土を対象に室内締固め試験を行い、図2-2に示すような締固め曲線を求め、最大乾燥密度 ρ_{dmax} を算出する。次に、現場において転圧施工後の締固め土の乾燥密度 ρ_d を砂置換法やRI試験などの人力手法により測定する。これらの値を式(2-2)に代入し、締固め度 D_c (%)を算出する。

$$\text{締固め度 } D_c = \frac{\text{現場で測定された締固め土の乾燥密度 } \rho_d}{\text{室内締固め試験で得られた最大乾燥密度 } \rho_{dmax}} \times 100 \quad (2-2)$$

締固め度 D_c の管理基準値は、造成する構造物毎に設定されるが、通常は締固め度 $D_c=90\%$ 、 95% を下限值として設定することが多い。転圧施工後に実施する品質試験により得られた締固め度 D_c が所定の下限值を超えているかの確認を行い、施工の良否を判定する。

ここで、現場施工と室内試験で取り扱う土質の最大粒径の違いが締固め度 D_c の評価に与える影響についても留意する必要がある。式(2-2)の最大乾燥密度 ρ_{dmax} は室内締固め試験により得られる指標であるのに対し、現場で測定された締固め土の乾燥密度 ρ_d は室内締固め試験の許容最大粒径 D_{max} を超える大粒径粒子を有する現場全粒度試料が対象となる場合が多く、同じ締固めエネルギー CEL で締固めても、乾燥密度 ρ_d の値が室内試験とは異なることがある。このため、締固め度 D_c として適切なものを規定できなくなるという欠点がある。この場合は、室内締固め試験結果に礫率補正を施し、現場全粒度試料に相当する締固め曲線から基準となる最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH}$ を算出することが行われている。

礫率を補正する手法は、Walker-Holtzの手法の他、Humphresの手法、福本の手法など多くの手法が研究されているが、ここでは、最も適用事例の多いWalker-Holtzの手法を説明する。許容最大粒径 D_{max} より大きな礫を混入した土の乾燥密度 ρ_d の補正式を図2-

5に示す。

Walker-Holtz の礫率補正式^{6,7)}は、大きい礫同士の空隙中には、細かな土で充填されていると仮定し、礫部分の含水比 w はないものと仮定しており、土（礫以外）と礫の乾燥密度をそれぞれ ρ_{d1} 、 ρ_{d2} と定義とした場合に、図2-5に示す補正式により礫を混入した後の乾燥密度 ρ_d を算出することができる。図2-6は、礫混入率と混合したあとの土の最大乾燥密度の実測値と Walker-Holtz 式による計算した理論値との関係を示す⁸⁾。理論上の乾燥密度 ρ_{d0} と実際の乾燥密度 ρ_{d0} との曲線を比較すると、礫率 $P=30\sim40\%$ までは Walker-Holtz の理論上の乾燥密度 ρ_{d0} と実際の乾燥密度 ρ_{d0} は完全に一致し、礫率 P が40%を超えると一致しなくなることを示している。これより、Walker-Holtz の適用範囲は礫率 $P=30\sim40\%$ までとされている。

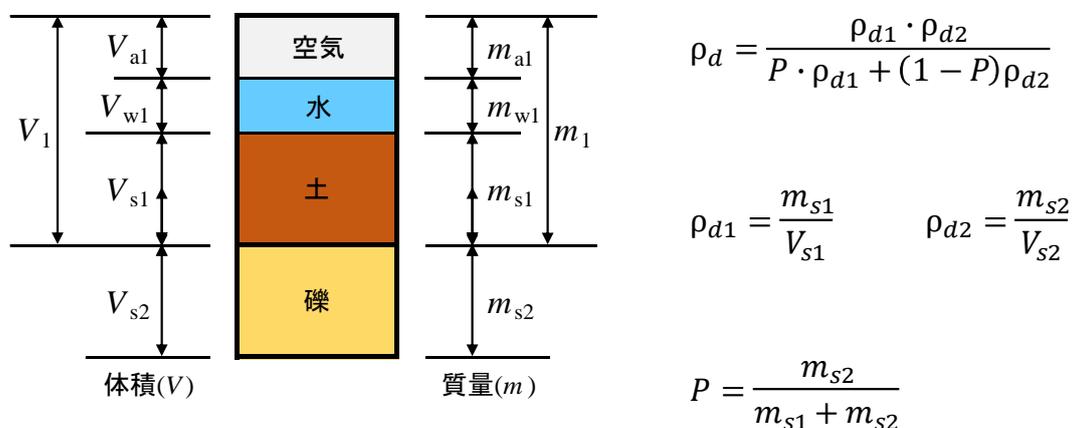


図2-5 Walker Holtz 法の概念図

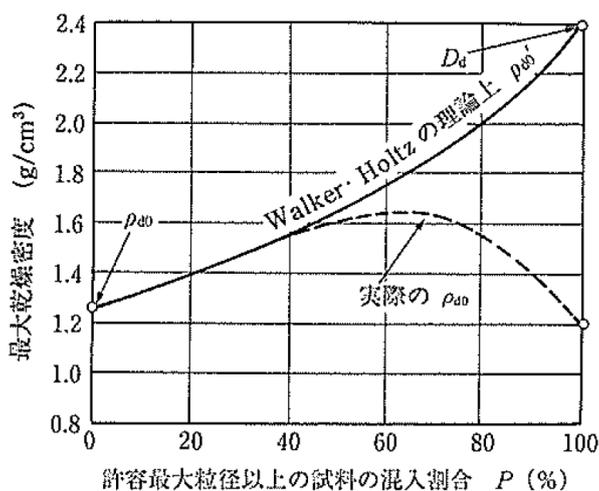


図2-6 Walker-Holtz の理論値と実測値との比較⁸⁾

(2) D_s 値管理⁵⁾

既に述べたように大粒径の礫分を多く含む盛土材を対象とする場合は、室内締固め試

験により最大乾燥密度を求めること困難である。また、大規模盛土において大型の締固め機械を用いる場合は、室内締固め試験との締固めエネルギーの乖離が大きくなりすぎている懸念がある。このように、現場の施工状況により、 D 値管理に用いる締固め度 D_c を算出するための最大乾燥密度 ρ_{dmax} を室内試験により求めることが困難な場合に D_s 値管理が適用される。

本手法では、現場転圧試験において実大締固め機械による転圧施工を繰り返し、乾燥密度 ρ_d が収束した値を最大乾燥密度 ρ_{dmax} として採用し、式(2-3)に代入することで締固め度 D_s を算出する手法である。

$$\text{締固め度 } D_s = \frac{\text{現場で測定された締固め土の乾燥密度 } \rho_d}{\text{転圧試験から得られた最大乾燥密度 } \rho_{dmax}} \times 100 \quad (2-3)$$

(3) V_a 値, S_r 値管理⁴⁾

自然含水比 w_n が最適含水比 w_{opt} よりも著しく高い細粒土を対象とする場合は、現場の転圧施工において所定の締固め度 D_c を満足することが困難である。このような場合は、空気間隙率 V_a の上限値管理や飽和度 S_r による下限値管理が行われる場合がある。なお、空気感度率 V_a や飽和度 S_r は RI 試験や砂置換法により算出される指標である。空気間隙率 V_a 、飽和度 S_r の公式をそれぞれ式(2-4)、式(2-5)に示す。ただし、ここに示す飽和度 S_r による管理手法は、2-1-5 節で説明する「飽和度管理」の考え方とは異なる。

$$v_a = \frac{V_a}{V} \times 100 \quad (2-4)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (2-5)$$

2-1-4 工法規定方式による施工管理

工法規定方式⁵⁾は、盛土の締固めに関する工法そのものを規定する方法であり、施工着手前の試験施工で目標品質を満足する施工方法（締固め機械、撒き出し厚、含水比 w 、転圧回数 N ）を設定し、その方法に基づいて本施工を実施するものである。

近年の締固め機械の大型化、高性能化により転圧回数を管理することで CEL の管理を厳密に行えるようになった。さらに、品質規定方式のように、施工管理のために多大な労力を有する現場密度測定なども行わなくても良くなるため、施工管理の省力化が大幅に期待されている。

近年は、上記の工法規定方式に基づく情報化施工手法の一つとして「TS・GNSSを用いた締固め管理技術」⁹⁾の現場適用が主流となりつつある。図 2-7 には、TS・GNSS による締固め管理の概要図¹⁰⁾を示す。本手法は、振動ローラによる転圧施工に適用されるものであり、TS や GNSS などの位置計測装置を用いて振動ローラの走行軌跡を計測し、転圧回数 N をリアル

タイムにオペレータ画面に表示することで規定の転圧回数 N に対する過不足を確実に防止するシステムである。

試験施工で設定した施工方法を実施および管理することで、施工後の現場での密度試験が不要とされている。本手法は、従来管理に比べて施工の省力化、高速化、確実性の向上に寄与する技術である。

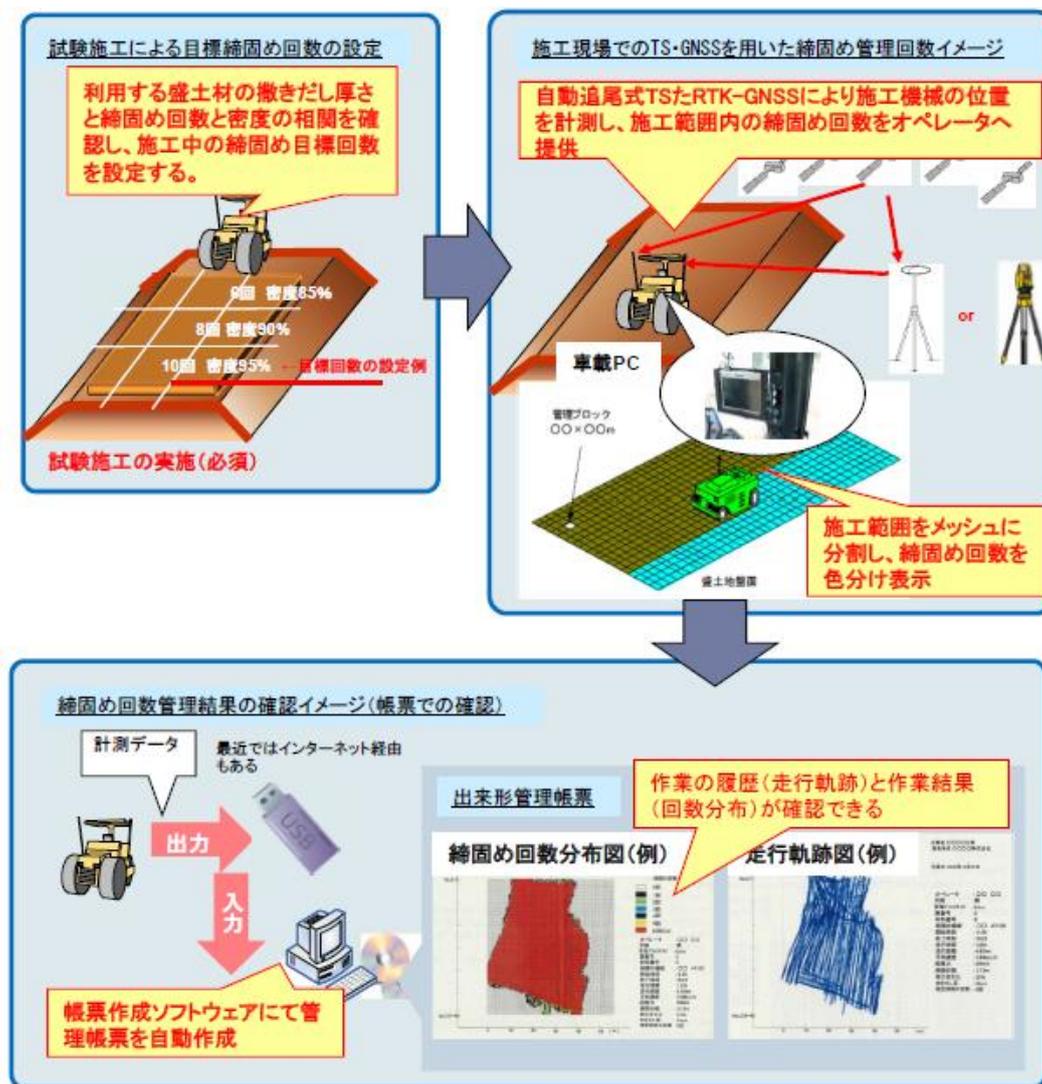


図 2-7 TS・GNSS を用いた締固め管理技術の概要図¹⁰⁾

2-1-5 飽和度管理の考え方

現代の締固め管理は、Proctorの研究以来、室内締固め試験によって得られた最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} を基準にした方法が行われてきて、膨大な研究と現場でのデータの蓄積がなされてきている。しかし、日本のように雨の多い地帯では、自然含水比 w_n が最適含水比 w_{opt} よりかなり高い場合が多く、その状態で単に乾燥密度 ρ_d を高める施工を進めようとするとうーバーコンパクションが生じやすくなり、どんなに締固めエネルギー CEL を加えても乾燥密度 ρ_d は大きくならないため、目標とする締固め度 D_c を達成できなくなる。加えて、内部摩擦角 ϕ も小さくなるため、盛土構造物の安定性の確保が難しくなるなどの問題が生じることが多い。このような背景より、従来の締固め度 D_c に基づく品質管理に加えて、飽和度 S_r を管理するという新しい品質管理手法^{11), 12), 13), 14)}が注目されている。

近年、龍岡ら^{11), 12), 13), 14)}の研究より、粘性土・砂・礫質土といった幅広い土質材料を対象に、最適飽和度 S_{ropt} は締固めエネルギー CEL に依存せず一定であり、土質の変化に鈍感であることが明らかにされている。図2-8、図2-9は、異なる締固めエネルギー CEL と土質の締固め曲線結果を乾燥密度 ρ_d と含水比 w 、締固め度 D_c と飽和度 S_r-S_{ropt} の関係でそれぞれ示したものである¹⁵⁾。図2-8をみると、最大乾燥密度 ρ_{dmax} 、最適含水比 w_{opt} は、締固めエネルギー CEL や土質の変化に応じて変動する指標であるのに対して、最適飽和度 S_{ropt} は一定値を示していることがわかる。ここで、最適飽和度 S_{ropt} とは、最大乾燥密度 ρ_{dmax} 、最適含水比 w_{opt} の締固め状態の時の飽和度 S_r である。また、図2-9をみると、締固め曲線の横軸を飽和度 S_r-S_{ropt} 、縦軸を締固め度 D_c で表記することで、締固めエネルギー CEL や土質の変化に依らずに締固め曲線の形は相似形であることがわかる。

図2-10(a)、(b)には、それぞれ従来の締固め管理図と、上記に示した最適飽和度 S_{ropt} に関連する特性を考慮して設定した飽和度管理図を示す。図2-10(a)に示すように、従来の締固め管理では、締固め度 D_c の下限値と含水比 w の上下限值により規定された管理範囲による品質管理が行われている。しかし、現場の施工条件に相当する締固め曲線は通常は不明であるため、既に述べたように締固め度 D_c を過大に評価してしまうという欠点がある。

これに対し、図2-10(b)に示すように、飽和度管理では、図2-8に示したように締固めエネルギー CEL と土質に依らず一定値を示す最適飽和度 S_{ropt} を目指した管理を行うため、土質材料と重機等の施工条件の変化と共に締固めエネルギー CEL や土質が変動しても、現場の施工条件に相当する締固め曲線の最大乾燥密度 ρ_{dmax} を用いて評価した締固め度 D_c が100%になることを目指した施工を行うことが可能となる。これより、実工事に飽和度管理を適用することで、従来の締固め管理に比べて高品質な盛土を構築することが可能となる。

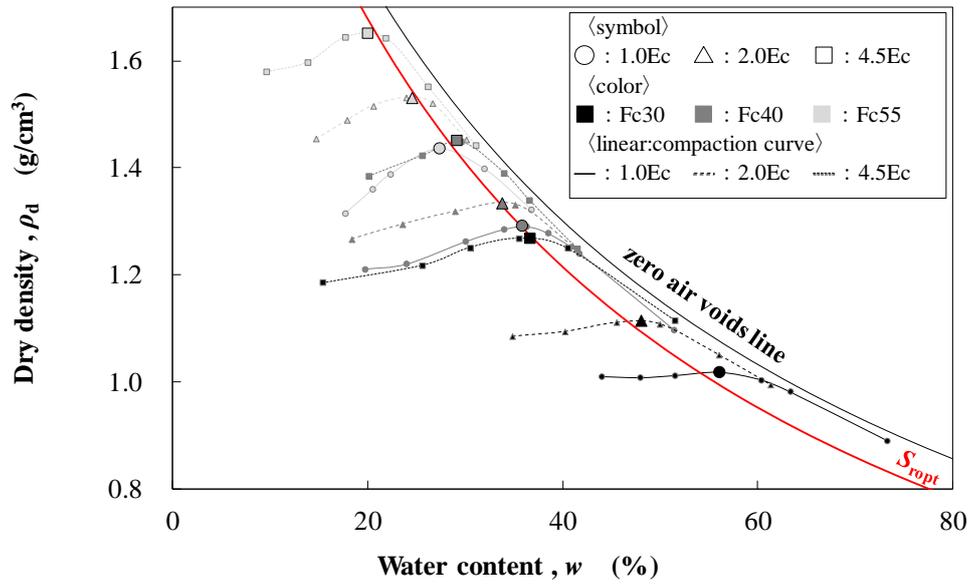


図 2-8 異なる締固めエネルギーCELと土質の締固め曲線¹⁵⁾

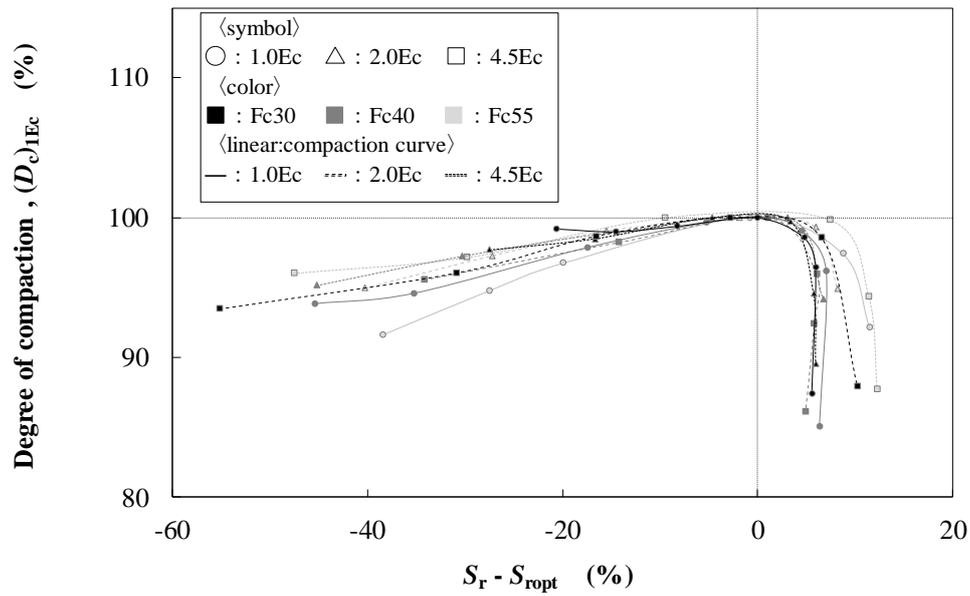
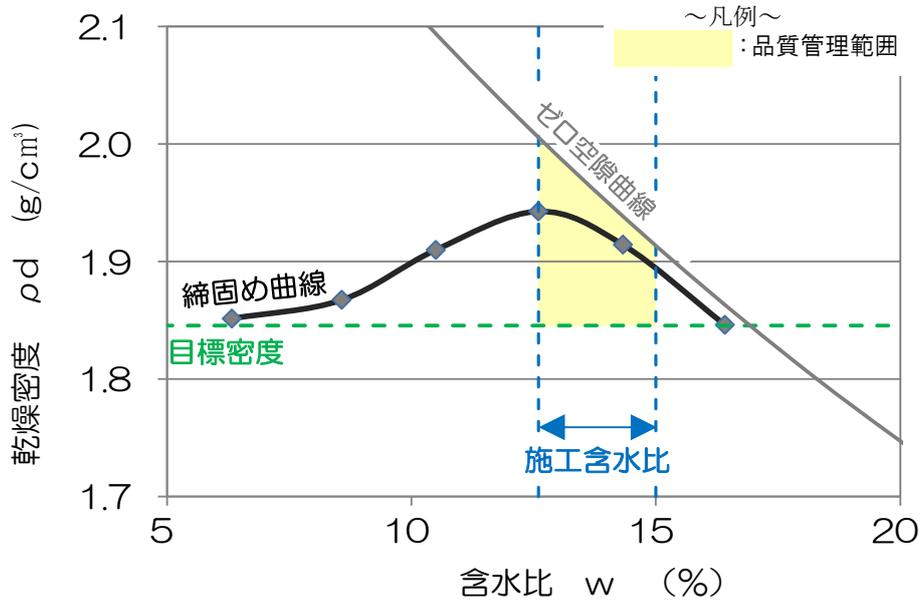
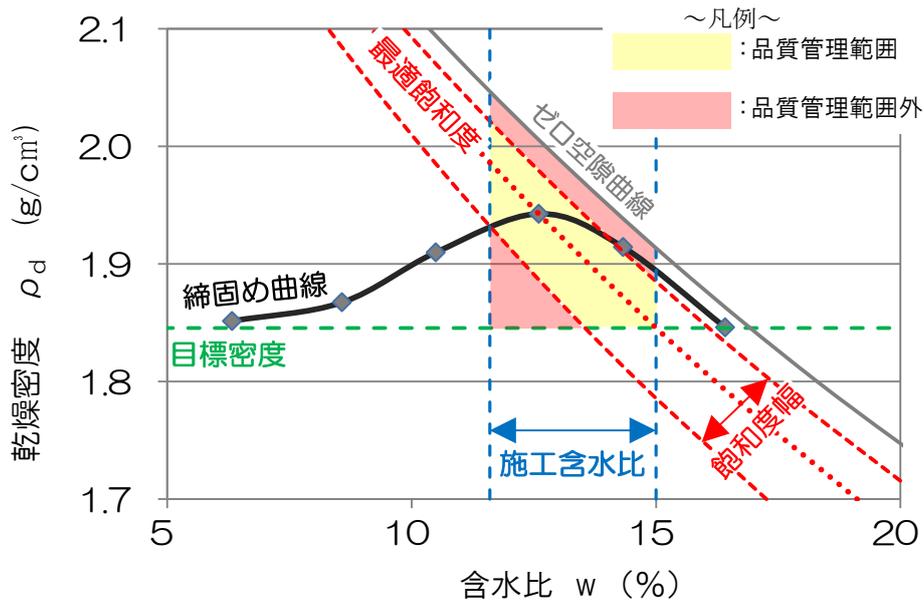


図 2-9 異なる締固めエネルギーCELと土質の締固め度 $(D_c)_{1Ec}$ と飽和度 S_r の関係



(a) 従来の締固め管理図



(b) 飽和度管理図

図 2-10 従来の締固め度管理図と飽和度管理図の比較

2-2 ICT技術の利用状況と事例

我が国におけるICT技術は、国交省および各都市、自治体が主導となり、平成25年度から現場適用が進められてきた。本項では、ICT技術の利用状況と、主に盛土の締固め管理に関するICT技術の適用事例について以下に示す。

2-2-1 ICT技術の利用状況

建設施工の生産性向上、品質確保、安全性向上、熟練労働者不足への対応など、建設施工が直面している諸課題に対応するICT施工技術（情報化施工）の利用状況を説明する。表2-2には、ICT活用工事の実施状況¹⁶⁾を示す。表2-2より、平成28年度からICT土工の適用が開始され、以降は舗装工、浚渫工、地盤改良まで工種が拡大している。さらに、令和元年度は、公告件数2397件のうち79%に該当する1890件がICT活用工事である¹⁶⁾。

具体的なICT技術として、コントロール（MC）技術、マシンガイダンス（MG）技術、TS・GNSSによる締固め管理技術など施工の効率化を目的とした技術は多く基準化されており、いずれも、施工の生産性を向上することが可能である。

一方、本研究の目的の一つである盛土の高品質化に着目したICT技術はほとんど報告されておらず、「ローラ加速度応答法を用いた盛土の品質管理（案）」¹⁷⁾は盛土の品質向上に関連する技術として唯一基準化されている。しかし、前述した施工の効率化に関するICT技術と比較すると、現場への導入実績は圧倒的に少ないのが現状である。本手法については、次項で説明する。

表2-2 ICT活用工事の実施状況¹⁶⁾

工種	平成28年度		平成29年度		平成30年度		令和元年度	
	公告件数	うちICT実施	公告件数	うちICT実施	公告件数	うちICT実施	公告件数	うちICT実施
土工	1,625	584	1,952	815	1,675	960	2,246	1,799
舗装工	—	—	201	79	203	80	340	233
浚渫工	—	—	28	24	62	57	63	57
浚渫工(河川)	—	—	—	—	8	8	39	34
地盤改良工	—	—	—	—	—	—	22	9
合計	1,625	584	2,175	912	1,947	1,104	2,397	1,890
実施率	36%		42%		57%		79%	

2-2-2 ローラ加速度応答法を用いた盛土の品質管理

盛土の品質評価に焦点を当てた ICT 技術の一つとして、「ローラ加速度応答法を用いた盛土の品質管理(案)」¹⁷⁾について説明する。

ローラ加速度応答法とは、振動ローラの振動挙動を利用して地盤の剛性を評価し、そこに GPS による重機の位置特定技術を融合させることで、施工中に施工ヤード全面の品質を評価する技術のことである。この技術は、1975 年に設立された Geodynamik の Thurner 博士により本格化し、Geodynamik, Dynapac 社が共同して CMV という加速度応答システムを開発したことが起源とされている¹⁸⁾。我が国においても、1980 年代からローラ加速度応答法の検討が進められ、1990 年代後半に GPS 技術の発展とともに実用技術として現場への導入が検討されてきた。¹⁸⁾

表 2-3 には、機械メーカーにより採用されているいずれも地盤剛性を評価するための各種システムの解析手法および全体概要図¹⁸⁾を示す。

表 2-3 重機メーカーのシステム一覧¹⁸⁾

重機メーカー	システムの特徴	
	締固め時の計測と解析手法	フィードバック
Ammann	$k_s = 4\pi^2 f^2 \left[m_d + \frac{m_r \gamma_t \cos(\varphi)}{A_1} \right]$	振幅と周波数制御
Bomag	$Z_a = \frac{(1-v^2)}{E_{V1B}} \cdot \frac{F_t}{L} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left(1.884 + \ln \frac{L}{B} \right)$ where, $B = \sqrt{\frac{16}{\pi} \cdot \frac{R(1-v^2)}{E_{V1B}} \cdot \frac{F_s}{L}}$	振幅と振動方向の制御
Caterpillar	$GoedynamikCMV = C \left(\frac{A_2}{A_1} \right)$ $MDP = P_g - WV \left(\sin \alpha + \frac{\alpha}{g} \right) - (mV + b)$	振幅制御
Dynapac	$GoedynamikCMV = C \left(\frac{A_2}{A_1} \right)$ $BouncingValue = \frac{A_{0.5}}{A_1}$	振幅制御
Sakai	$CCV = \left(\frac{A_{0.5} + A_{1.5} + A_2 + A_{2.5} + A_3}{A_{0.5} + A_1} \right) \times 100$	—

表 2-3 のうち、日本において最も適用実績が多い酒井重工業製の CCV システム¹⁹⁾の仕組みについて説明する。振動ローラは、鉄製車輪の内部に回転する偏心錘を持ち、その遠心力による周期的な振動力を発生させる機械である。鉄製車輪の主軸付近に CCV という加速度

センサを取り付け、転圧施工中の振動挙動を波形データとして計測することが可能である。

図 2-11 には、転圧回数 N が 2 回と 8 回の地盤上を振動ローラで転圧した際の振動輪の振動挙動の例を示したものである。この振動挙動は、土の締固めの進行とともに変化する。転圧回数 N が多くなるほど地盤剛性は大きくなると仮定すると、地盤剛性が一番低い転圧回数 N が 2 回 (図 2-11 (a)) では、加速度と時間の関係は規則性を有する形状になっていることがわかる。振動ローラの基本周波数にのみスペクトルがあらわれている。これから転圧が進み、転圧回数 N が 8 回 (図 2-11 (b)) では、種々の振動数成分を含んだ複雑な振動挙動を示す。

この結果に対してフーリエ解析を施すことで、図 2-12 に示すような各周波数のスペクトルを算出することができる。図 2-12 に示すように、地盤が軟らかい場合には、基本周波数 F_0 の振幅スペクトル A_2 のみが卓越しているが、転圧回数 N が増加するにつれて基本周波数以外のスペクトルが卓越し始めていることがわかる。このようなスペクトルの変化を地盤剛性とを関連付けることを目的とし、表 2-3 に示す数式が考案された。この時、地盤剛性指標を CCV 値と定義した。

CCV システムは、従来の同類指標である CMV システムを改良することにより考案されたシステムであり、 CMV 値は式(2-6)に示す関数により算出される。

$$CMV = \frac{A_4}{A_2} \quad (2-6)$$

CMV 値は CCV 値と同様に振動ローラの加速度信号を処理して得られる締固め指標であり、主既に欧州を中心に普及している。しかし、横田ら¹⁹⁾の研究によると、ある種の土質条件によっては、乾燥密度 ρ_d は転圧回数 N の増加に伴い単調増加するのに対して CMV 値は一貫して減少する傾向を示すことがわかった。この原因は、式(2-6)に示すように、 CMV 値は転圧回数 N が増加して地盤が硬化することにより卓越する加速度振幅スペクトル (S_1 , S_5 , S_6) を反映していないためとしている。これに対し、表 2-3 に示す CCV 値の数式は上記の加速度振幅スペクトルを反映しているため、転圧回数 N の増加に伴う乾燥密度 ρ_d の増加傾向と類似の傾向を示すことのできる指標である。

図 2-13 には、 CCV システムの概要を示す。図 2-13 より、振動ローラの振動輪の振動軸に加速度センサを設置し、振動ローラの天端部には GNSS 受信機を設置する。加速度センサより得られる波形データを瞬時に解析し、 CCV 値としてデータを取得する。データのサンプリングピッチは 5 回/秒であるため、施工中の CCV 値はリアルタイムに計測することが可能である。これに、GNSS 受信機による位置情報を組み合わせることで、面的な CCV 値を取得することが可能になる。従来の転圧回数管理に加え、地盤剛性を面的にモニタリングすることで、高品質な盛土の構築が可能となる。

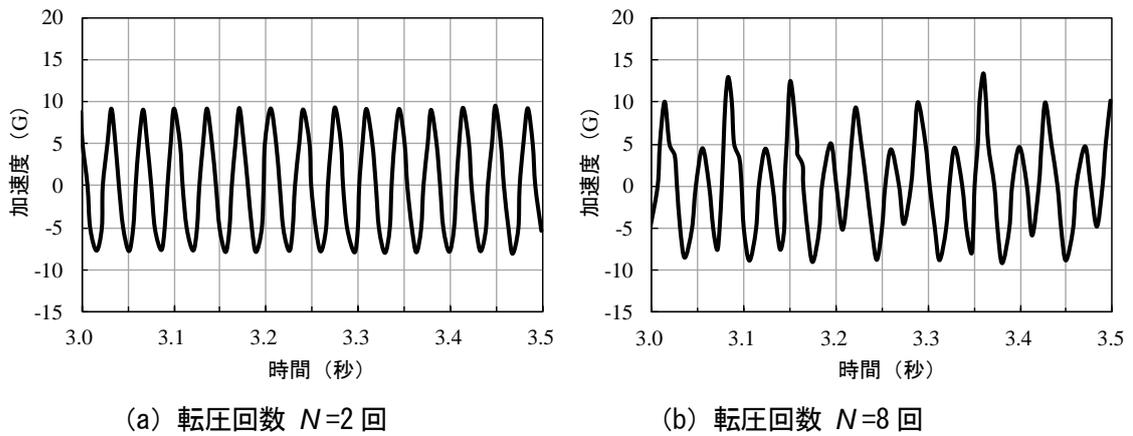


図 2-11 転圧回数 N 毎の加速度応答値の時刻歴

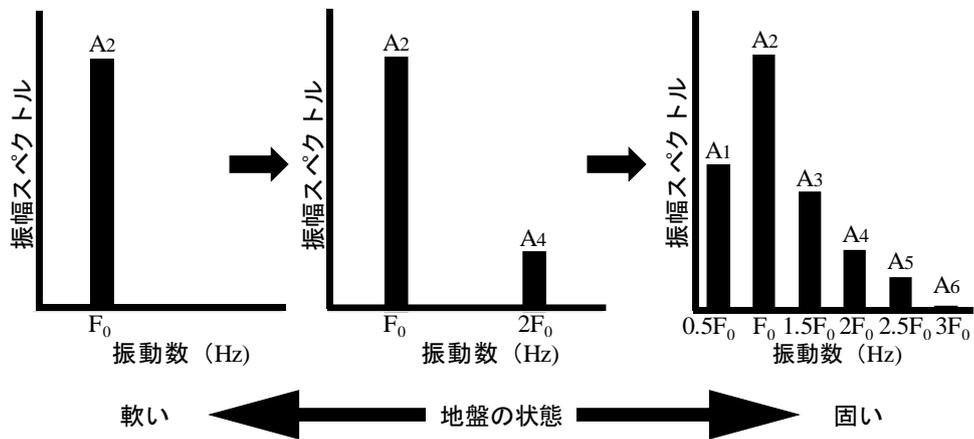


図 2-12 周波数と振幅スペクトル



図 2-13 CCV システムの概要

2-3 盛土締固め管理の課題

本研究の目的である合理的な施工法と盛土の高品質化を実現するためには、従来の締固め管理手法に関する二つの課題について検討する必要がある。一つ目の課題は、品質測定手法について、盛土の品質指標の即時推定法を考案するというものである。二つ目の課題は、品質評価手法について、礫率補正式を高度化するというものである。それぞれの課題について、以下に説明する。

2-3-1 盛土の品質情報の即時推定手法の考案

品質測定手法の課題は、盛土の品質情報の即時推定手法を考案することである。品質規定方式における品質測定手法は、砂置換やRI試験による密度管理が主流である。すなわち、盛土の品質を直接的に管理する手法である。しかし、これらの品質試験は転圧施工が完了してから行うため、仮に目標品質を満足しない場合には、転圧施工の追加や、時には土砂を撤去してやり直しを行わなければいけなくなる可能性も含まれている。さらに、品質試験は人力により実施されるものであるため、広い施工ヤードの代表点でしか実施することができない。これより、測定範囲以外に品質不良個所が存在した場合には、それらを見逃す可能性がある。

一方、工法規定方式においても課題がある。工法規定方式で大規模造成工事を行う場合には、盛土材の採取場所が広範囲に及ぶため、施工に伴って締固め特性が変化し、施工着手前に設定した施工方法が実状と合わなくなる場合がある。このため、同一の施工方法（特に転圧回数）で施工すると、場所によっては転圧不足や過転圧が発生する可能性がある。そのため、材料の変化に応じて頻繁に試験施工を行い、適切な施工方法を設定する必要があり、施工において大きな労力を要するという懸念がある。このような課題は、特定の施工仕様（転圧回数や撒き出し厚）を設定する工法規定方式に、土の乾燥密度 ρ_d や飽和度 S_r などの品質情報も含めた施工管理を行うことで解決することができると考えられる。

2-3-2 礫率補正式の高度化

品質評価手法の課題は、現場試験と室内試験で取り扱う土質の粒度特性の違いが品質評価に与える影響を考慮した礫率法正式の高度化を行うことである。

締固め度 D_c による管理を実施する場合、最大乾燥密度は室内締固め試験により求めることが一般的である。しかし、現場試験は、室内試験の許容最大粒径以上の礫を含む場合が多いため、粒径の違いを解消することを目的としてWalker-Holtzの礫率補正(WH式)を適用させる必要がある。

図2-14にWalker-Holtzによる礫率補正をした計算締固め曲線と実測締固め曲線とを比較した結果を示す、図2-14に示すように、最大粒径 $D_{max}=2.00\text{mm}$ の実測締固め曲線を基準とし、 $D_{max}=75.0\text{mm}$ になるようにWH式による算出した計算締固め曲線は、最大粒径 $D_{max}=75.0\text{mm}$ の実測の締固め曲線と比較して乾燥密度を大幅に高く評価する傾向がみられる。現

場試験結果より任意の乾燥密度 ρ_d を取得した時、計算締固め曲線の最大乾燥密度 ρ_{dmax} で算出した締固め度 D_c は実測締固め曲線の最大乾燥密度 ρ_{dmax} により評価した締固め度 D_c よりも大幅に小さい値ということになる。すなわち、過小品質として評価されてしまうという課題がある。仮に礫を除去した場合には、過大評価ということになる。このため、Walker-Holtz による礫率補正式の高度化が課題の一つである。

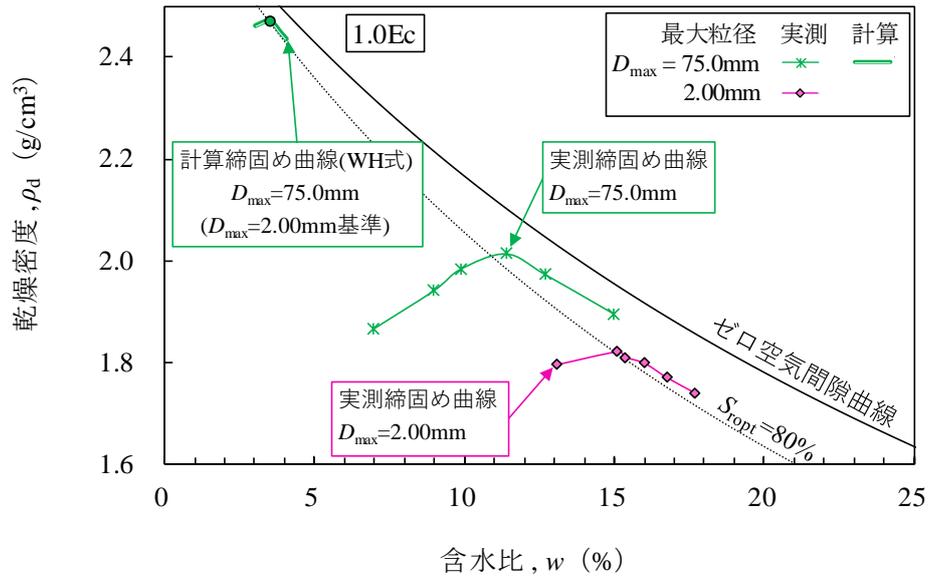


図2-14 Walker-Holtz による礫率補正をした計算締固め曲線と実測締固め曲線との比較

以上、従来の締固め管理手法である品質規定方式、工法規定方式における課題を解決し、合理的な施工法による高品質な盛土を構築する新しい締固め管理手法が求められていることがわかる。

本研究では、地盤の剛性を評価する指標の一つであり、リアルタイムかつ面的な情報取得が可能な加速度応答値（以下、CCV 値）に着目し、CCV 値による乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の推定について検討した。また、CCV 値以外の地盤剛性指標に関しても、同様の検討を実施した。一方、現場試験と室内試験との粒径特性の違いが品質評価に与える影響の解消については、同一の土質に対して多種の最大粒径 D_{max} での室内締固め試験を実施し、Walker-Holtz による礫率補正式の妥当性を検証するとともに、さらなる推定精度の高度化に関する検討を実施した。上記の二つの技術を組み合わせた新たな締固め管理手法を提案し、施工の合理的と盛土構造物の高品質化を目指した。

2-4 CBR 値と乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の関係

盛土の締固め管理における品質試験の効率化について、現場 CBR 試験により得られる地盤剛性指標である CBR 値は、同一の盛土材において、締固め機種と転圧回数 N に依らず、乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r を変数とした関係式で表せることが龍岡らの研究により報告されている。

龍岡ら^{11), 12), 13), 14)}は、旧建設機械化研究所で砂質ロームを用いて多様な締固め機械と異なる含水比 w で行われた実大締固め試験（1965～1990年）で得られたデータを解析し、図 2-15 (a) と図 2-15 (b) に示すように締固め時の飽和度 S_r と含水比 w をパラメータとした CBR 値と乾燥密度 ρ_d の関係を得ている。図 2-15 (a) を見ると、飽和度 S_r が一定であれば、乾燥密度 ρ_d の増加に伴い CBR 値は一貫して増加し、乾燥密度 ρ_d が一定であれば、CBR 値は飽和度 S_r が減少すると増加している。一方、図 2-15 (b) を見ると、含水比 w が一定の時の乾燥密度 ρ_d と CBR 値の関係は、大きくばらつくほか、それぞれの含水比 w において、乾燥密度 ρ_d が増加に伴い CBR 値も増加するが、乾燥密度 ρ_d が所定の限界値を超えると乾燥密度 ρ_d が増加しても CBR 値は低下する。なお、乾燥密度 ρ_d の限界値は含水比 w が大きくなるほど低下する。龍岡ら⁹⁾は、一定の含水比 w で乾燥密度 ρ_d が増加すると飽和度 S_r が増加するため、CBR 値に対する乾燥密度 ρ_d の正の影響よりも飽和度 S_r の負の影響（飽和度 S_r が高くなりすぎる）が卓越するようになると CBR 値が低下するためであるとしている。以上の結果は転圧回数 $N=8$ 回のデータであるが、他の転圧回数 N でも同様な結果を得ている。

これらの結果から、締固め土の乾燥密度 ρ_d と CBR 値の関係は含水比 w ではなく飽和度 S_r が主要なパラメータであることがわかる。龍岡ら⁹⁾は、さらに、図 2-15 (a) に示す転圧回数 $N=8$ 回における CBR 値～乾燥密度 ρ_d 関係と他の転圧回数 N での同様な関係を解析して、CBR 値を乾燥密度 ρ_d と締固め時の飽和度 S_r を独立変数とした変数分離式(2-6)を得ている。

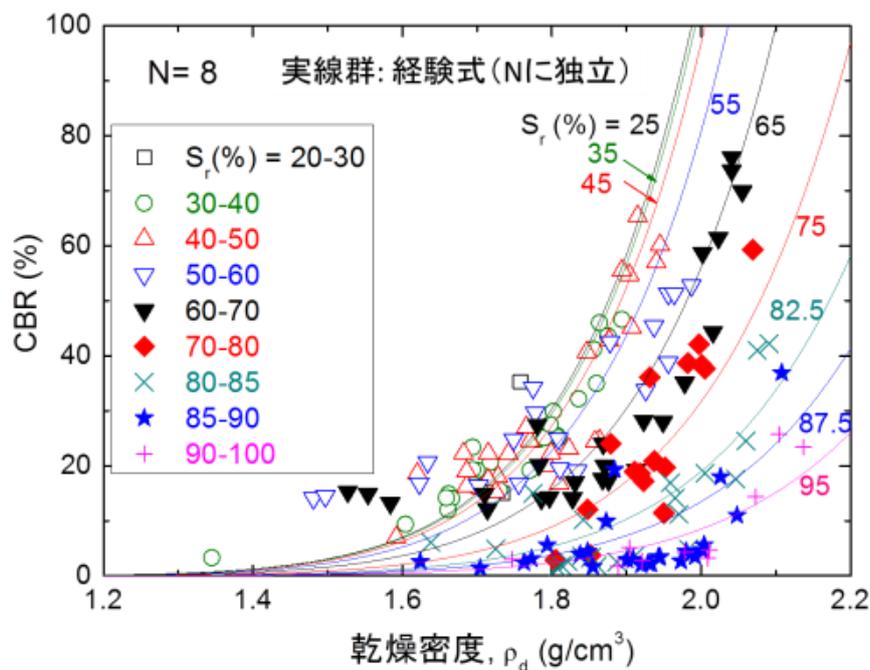
$$CBR = f_{CBR}(S_r) \cdot (\rho_d / \rho_w - b)^c \quad (2-7)$$

式(2-7)中の ρ_w は水の密度である。図 2-15 (a), (b) 中に示す実線の曲線群は、それぞれ式(2-7)を用いて図化した等飽和度線と等含水比線である。また、式(2-7)の定数 b , c は、それぞれ $b=0.4$, $c=9.5$ としているが、これらの係数は土の種類によって異なる可能性がある。また、図 2-15 (c) に示すように、関数 $f_{CBR}(S_r)$ は飽和度 S_r の減少関数となる。これより、式(2-7)を用いることで、乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r から CBR 値を推定できることが確認された。

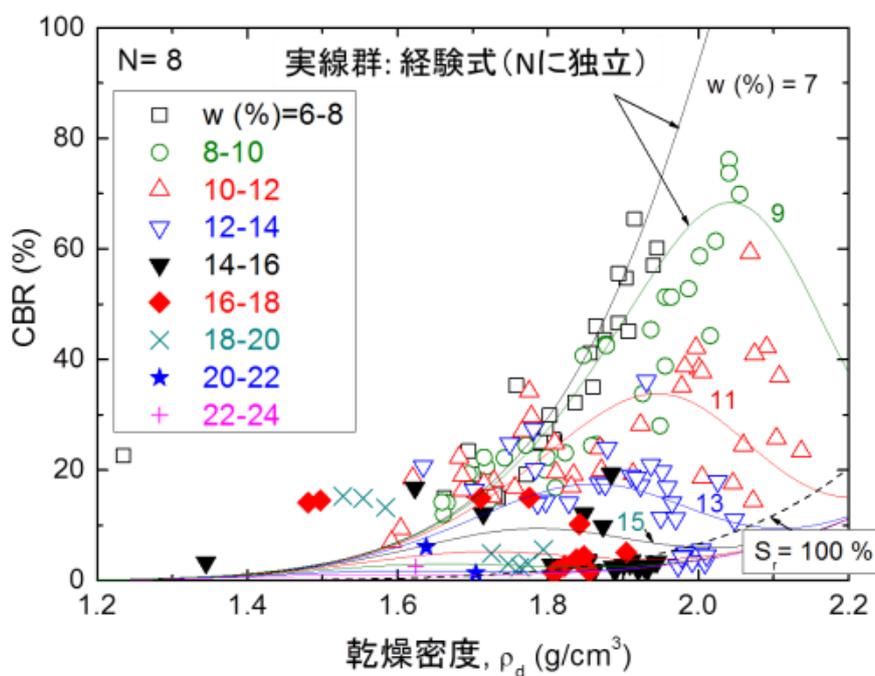
地盤の剛性と乾燥密度 ρ_d および含水比 w との関係については、地盤の剛性は乾燥密度 ρ_d が増加すると増加すること、また、乾燥密度 ρ_d が一定の条件下において、最適含水比 w_{opt} よりも乾燥側にある時には締固め時の地盤の剛性が高く、湿潤側になると締固め時の地盤の剛性が低くなるという一般的傾向があることが知られている。式(2-7)は、地盤剛性指標のひとつである CBR 値の場合について、上記の傾向を飽和度 S_r を介して具体的に示したものである。これに類した関係が CCV 値を含めた各種の地盤剛性指標でも示すことができるかを同一条件で検討した例は見当たらない。

そこで、第3章では、実大締固め試験を広い範囲の含水比 w で実施し、CCV 値を含めた各種

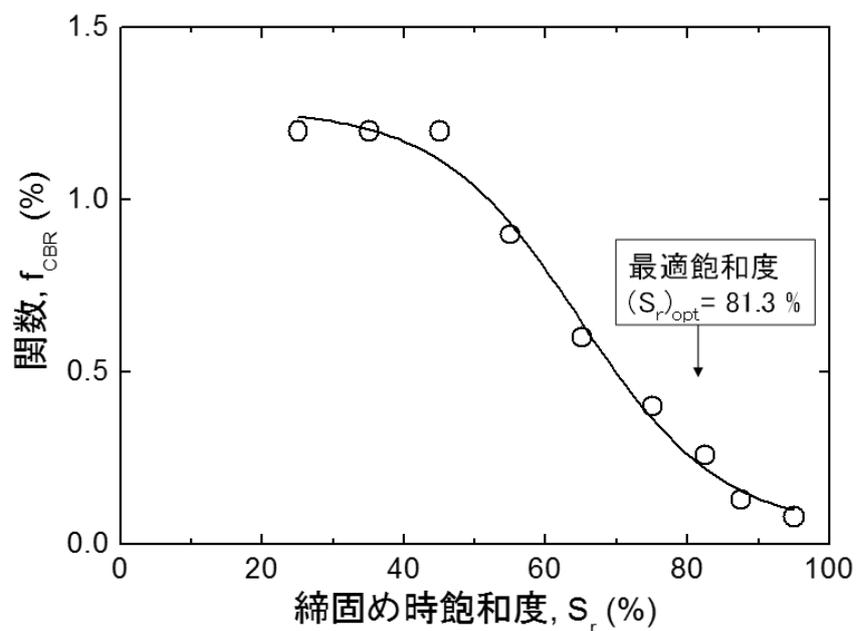
の地盤剛性指標を測定の上で比較を行い、これらの指標の類似性を検討した。さらに、*CBR* 値と同様に、各地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r との関係式が成り立つかを検討し、このような関係式に基づく締固め管理法を検討した。



(a) 締固め終了時の飽和度 S_r をパラメータとした関係



(b) 含水比 w をパラメータとした関係



(c) 飽和度 S_r の関数 $f_{CBR}(S_r)$

図2-15 旧建設機械化研究所での実大締固め試験で得られた CBR 値と乾燥密度 ρ_d , 含水比 w , 飽和度 S_r の関係^{11), 12), 13), 14)}

第2章の参考文献

- 1) Proctor, R.R. : Four Articles on the Design and Construction of Rolled Earth Dams, Engineering news Records, Vol.111, 1933.
- 2) 公益社団法人地盤工学会 : 突固めによる土の締固め試験方法, 地盤材料試験の方法と解説-二分冊の1-, pp.373~383, 2009.
- 3) 道路土工指針
- 4) 酒井重工業 : SV513D 製品紹介, 土用振動ローラ製品カタログ.
- 5) 公益社団法人地盤工学会 : 土の締固め, 地盤工学・実務シリーズ 30, pp.22~27, 2012.
- 6) Walker, F. C. and Holtz, W.C. : Control of Embankment Material by Laboratory Testing. Proc. ASCE, 77-108, pp.1-25, 1951.
- 7) Holtz, W. G. and Lowitz. : Compaction characteristics of gravelly soils. Bureau of Reclamation, Earth laboratory report, No. EM-509, 1957.
- 8) 公益社団法人地盤工学会 : 突き砂法による土の密度試験, 地盤調査の方法と解説-二分冊の2-, pp.787, 2013.
- 9) 国土交通省 : TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領, 国土交通省ホームページ, 2020.
- 10) 国土交通省 : TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領【施工者用】, 近畿地方整備局ホームページ, 2014.
- 11) Tatsuoka, F. : Compaction characteristics and physical properties of controlled the degree of saturation, Keynote Lecture, Proc. of 15th Pan-American Conf. on SMGE and 6th Int. Conf. on Deformation Characteristics of Geomaterials, Buenos Aires, pp.40-76, 2015.
- 12) 龍岡文夫ら : 地盤工学・技術ノート, 盛土の締固め1~20回, 雑誌「基礎工」, 2013年7月号~2015年2月号.
- 13) 龍岡文夫 : 土の締固めにおける飽和度管理の重要性, 雑誌ダム技術, No.354, 3, 3-16頁, 2016.
- 14) 龍岡文夫 : 飽和度と剛性に管理に基づく盛土締固めの合理化について, 地盤工学会誌, 11, 12月号, 67-11/112 (742/743), pp.30-33, 2019
- 15) Nagai, H., Sandambata, I., Hyodo, T., Kikuchi, Y. and Tatsuoka, F. : Soil compaction control for different soil types and energy levels based on the saturation degree, KGS & JGS Joint Workshop, 2018.
- 16) 国土交通省 : ICT 施工の実施状況, 国土交通省ホームページ, 2020.
- 17) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社 : ローラ加速度応答法を用いた盛土の品質管理(案), 土工施工管理要領, pp.参-127, 2017.
- 18) 公益社団法人地盤工学会 : 土の締固め, 地盤工学・実務シリーズ 30, pp.103~104, 2012.
- 19) 横田聖哉, 吉田武男, 藤井弘章, 内山恵一 : 振動ローラ加速度を利用した締固め管理の検討-大規模土工における情報化施工に関する研究(3)-, 第37回地盤工学研究発表会, pp.664-665, 2002

第3章 地盤剛性指標を用いた盛土品質の即時推定 手法による施工の合理化

第2章では、従来の盛土の締固め管理における品質管理に関する二つの課題を示した。本章においては、盛土の品質測定手法の即時性の課題に着目し、実大土槽ピットでの転圧試験を実施し、地盤剛性指標による乾燥密度 ρ_d や飽和度 S_r の関係式を構築するとともに、関係式を用いた具体的な締固め管理手法の実施工における適用性について検討した。

3-1 概要

盛土の締固め管理における品質評価手法の即時性を確保することを目的とし、大型土槽ピット内で含水比 w を変化させた砂質土層を用いた実大締固め機械による転圧試験を実施した。

本研究に使用した盛土材料は、造成工事で最も用いられることの多い砂質土とした。ただし、最大粒径 D_{max} は9.5mmであり、実工事に用いられる土質に比べて小粒径が主体の材料である。実大締固め機械は、現場施工において最も適用事例の多い12t級の土工用振動ローラとした。大型土槽ピットは、長さ20m、幅3m、深さ95cmのコンクリート製ピットであり、基盤層10cm×5層(CBR値の目標値：60%以上)の上に、複数の含水比条件に調整した試験層30cm(1層)を設けて転圧試験を実施した。試験後には、レベル測量による沈下量の測定、砂置換による上層10cmでの密度測定、現場CBR試験¹⁾、小型FWD試験²⁾とキャスポル試験(簡易支持力計)³⁾による地盤剛性指標の測定、CCVシステムによる地盤剛性指標の一つであるCCV値の測定⁴⁾を実施し、これらの結果を解析した。

まず、各試験結果と転圧回数 N との関係を確認した上で、地盤剛性指標同士(現場CBR試験、小型FWD試験、キャスポル試験、CCVシステム)の相関性について検証した。その結果、各地盤剛性指標はいずれも一定のばらつきはあるものの相関性の高い結果を得ることができた。これより、地盤剛性指標のいずれか一つの値を取得できれば、その他の指標を推定できる可能性が示唆された。

次に、地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d や飽和度 S_r の関係式について検討した。地盤剛性指標は、乾燥密度 ρ_d が増加するほど増加傾向を示し、飽和度 S_r が低くなるほどその傾向は顕著となる。この関係性に着目し、飽和度 S_r をパラメータとした地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d の関係式を構築した。従来の締固め管理では、砂置換により乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r を取得してきたが、小型FWD試験、キャスポル試験は砂置換と比較して測定手法が簡易であり、短時間で結果を取得することができる。さらに、CCVシステムは、リアルタイムかつ面的な測定が可能であるため、本章の目的である品質測定手法の即時性を確保するのに適した手法であるといえる。すなわち本章に示すいずれの地盤剛性指標の測定手法は、従来の砂置換よりも効率的に乾燥密度 ρ_d 、飽

和度 S_r を推定できる。

ここで、地盤剛性指標同士の相関性が高いことに着目し、仮に現場 CBR 試験、小型 FWD 試験、キャスポル試験の結果を介して推定した CCV システムの地盤剛性指標とその実測値との関係についても検証した。その結果、いずれも推定値と実測値との間にやや乖離があることがわかった。これより、地盤剛性指標から乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r を精度良く推定するためには、各地盤剛性指標から直接的に関係式を構築した方が良いことがわかった。

最後に、関係式を用いた地盤剛性指標による具体的な締固め管理手法について検証した。従来の締固め管理において、飽和度 S_r の上下限值を設定することの重要性については第2章に示した通りであるが、関係式を用いて構築した地盤剛性指標、乾燥密度 ρ_d の空間上において乾燥密度 ρ_d 、締固め度 D_c と飽和度 S_r の管理値を設定することで、地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d の取りうる範囲を示すことができる。これにより、目標とする地盤剛性指標を目指した施工を行うことにより、乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r により規定された品質管理を行うことができることを示した。

3-2 小粒形の盛土材料を対象とした屋外土槽ピット試験による検討

盛土の締固め管理における品質評価手法の即時性を確保することを目的とし、大型土槽ピット内で含水比 w を変化させた砂質土層を用いた実大締固め機械による転圧試験を実施した。実験条件および試験結果を以下に示す。

3-2-1 実験条件

本試験で使用した砂質土の物性値、粒度分布、締固め曲線 (JISA1210)⁵⁾をそれぞれ表 3-1、図 3-1、図 3-2 に示す。

図 3-3 は、本研究と同様に、大型土層ピット、砂質土、起振力 Low (起振力：172kN, 振動数：33.3Hz) 条件の 13t 級振動ローラを用いた既往の実大試験 (撒き出し厚 30cm) で得られた転圧回数 N が 12 回での締固め曲線と、本研究の含水比条件を併記したものである。図 3-3 に示す乾燥密度 ρ_d と含水比 w は、表層 10cm での測定値であり、振動ローラ転圧回数 N が 12 回による締固め曲線での最適含水比 w_{opt} (以下 $(w_{opt})_{N=12}=11.2\%$) を挟んで変化させた 4 種類の含水比 ($w_1=8.9\%$, $w_2=9.8\%$, $w_3=10.8\%$, $w_4=11.8\%$) を設定した。なお、図 3-2 に示す室内締固め試験による $1.0E_c$ と修正プロクター ($4.5E_c$) の締固め曲線を基準にすると、図 3-3 に示す締固め曲線の最大乾燥密度 ρ_{dmax} 状態での締固め度はそれぞれ $(D_c)_{1E_c}=106\%$ と $(D_c)_{4.5E_c}=94\%$ になる。

表 3-1 物性値一覧

試験項目	実測値
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.779
最大粒径 D_{max} (mm)	9.5
細粒分含有率 F_c (%)	42.6
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	2.120
最適含水比 w_{opt} (%)	9.50
地盤材料の工学的分類	細粒分質砂 (SF)

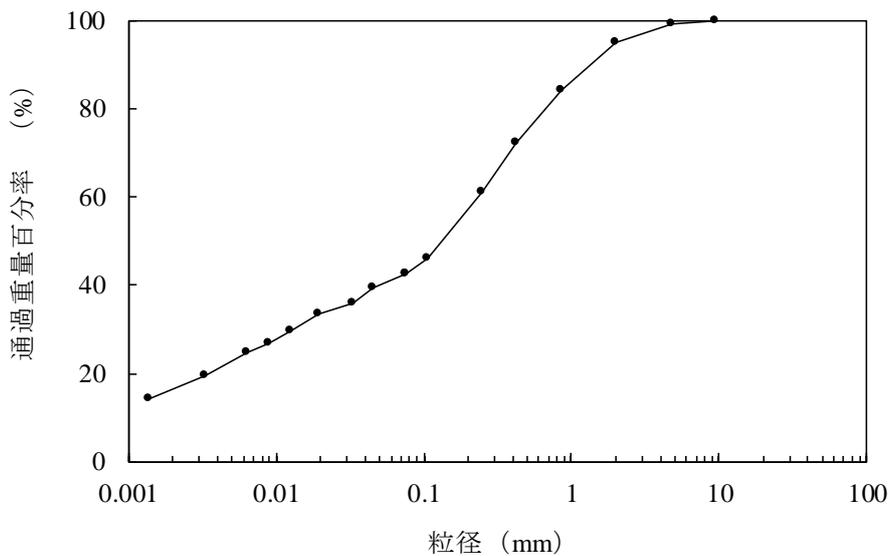
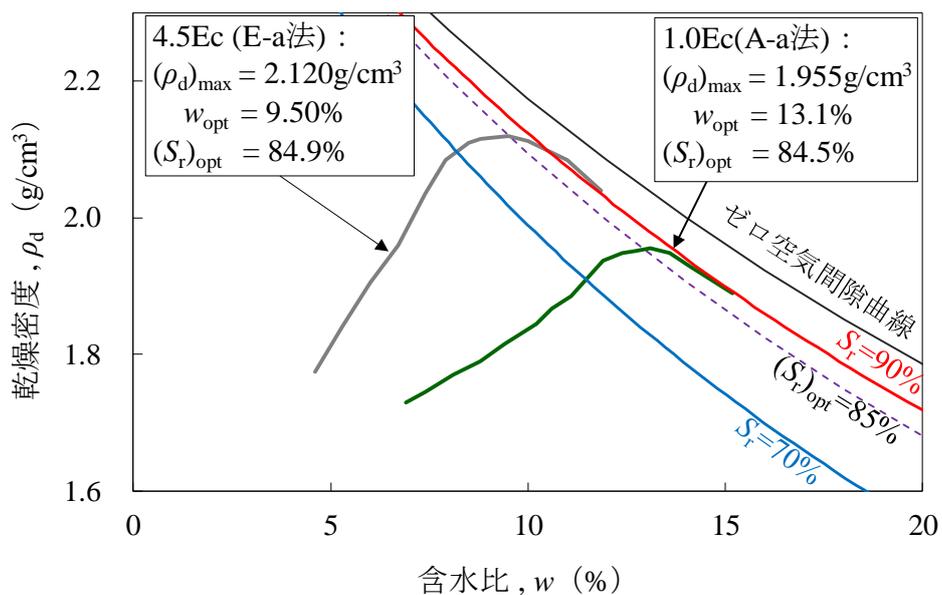
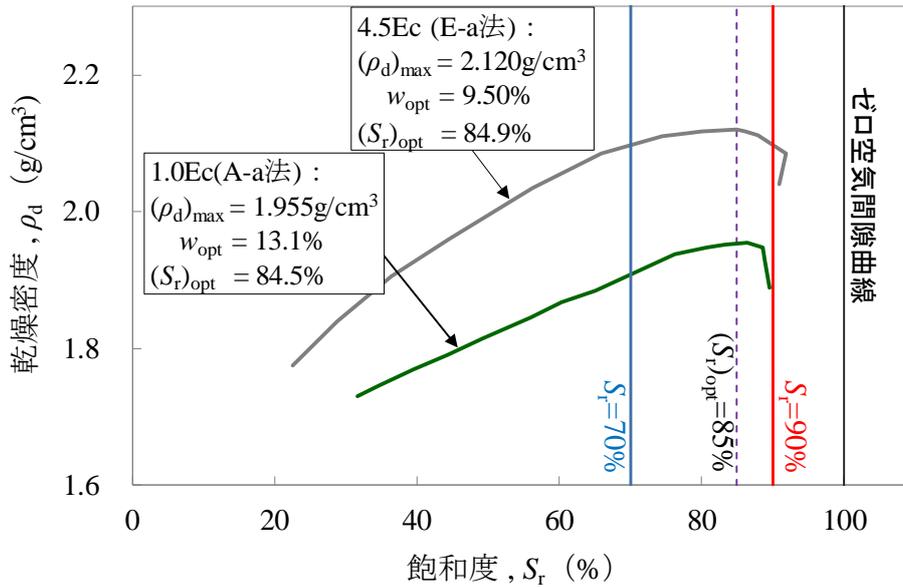


図3-1 粒度分布



(a) 乾燥密度 ρ_d -含水比 w



(b) 乾燥密度 ρ_d -飽和度 S_r

図 3-2 室内締固め曲線

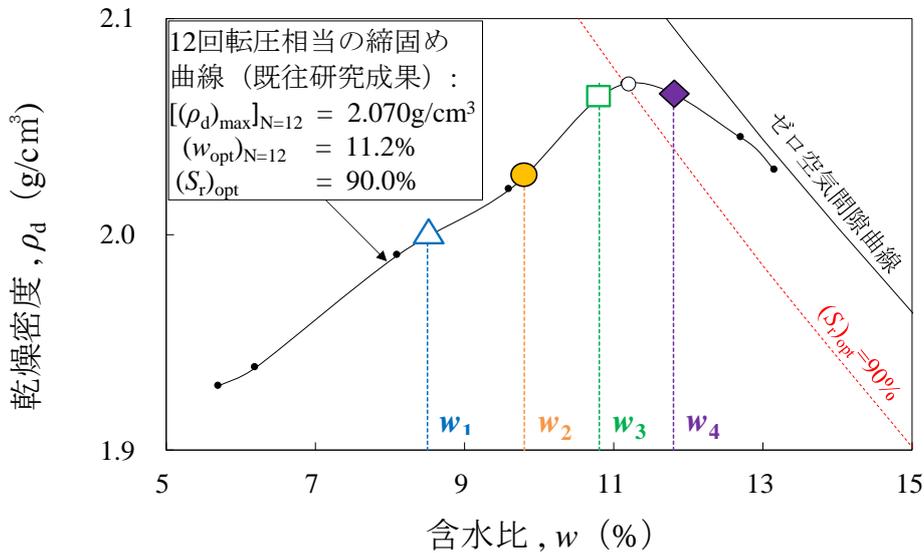


図 3-3 振動ローラによる締固め曲線（既往の実大実験）と含水比条件

3-2-2 試験ヤード，重機，品質試験の設定

転圧試験に使用したコンクリート製ピットを図 3-4 に示す。コンクリート製ピットの寸法は、長さ 20m、幅 3m、深さ 95cm である。転圧試験は、10cm×5 層（CBR 値の目標値：60% 以上）で締固めた層を基盤層として、その上に、図 3-3 に示した各含水比 w に調整した砂質

土を 30cm 撤き出しで 1 層作製して行った。転圧試験は合計で 4 回実施した。各回の試験では、試験層は同じ試料を再攪拌により含水比調整して作製し、基盤層は掘り返すことなく同じものを 4 回とも用いた。品質試験を実施する試験区間は、図 3-4 に示すようにピット底面長と同じ 15m 区間内で実施した。土の敷均しには、土槽に備え付けの敷均し機（ピットスタビライザ）を用いた。

転圧試験に使用した重機は、盛土工事に比較的広く利用されている 13t 級振動ローラ（酒井重工業製 SV620D）とした。この振動ローラは、図 3-3 に示した既往の実大実験でも用いられている。表 3-2 には、振動ローラの仕様を示す。転圧実験では、振動ローラの起振力は Low の設定で行った。これは、実工事で適用されている実績が最も多いためである。

品質試験項目を表 3-3 に示す。表 3-3 より、品質試験項目は、施工中は CCV システムによる地盤剛性指標の一つである CCV 値の測定、施工後はレベル測量による沈下量の測定、砂置換法による上層 10cm での密度測定、現場 CBR 試験、小型 FWD 試験とキャスポル試験（簡易支持力計）による地盤剛性指標の測定を行った。その結果に基づいて、各試験結果と転圧回数 N との関係、地盤剛性指標同士の相関性を検討した。なお、表 3-3 に示す品質試験の品質試験測定位置、品質試験頻度を図 3-5、表 3-4 に示す。

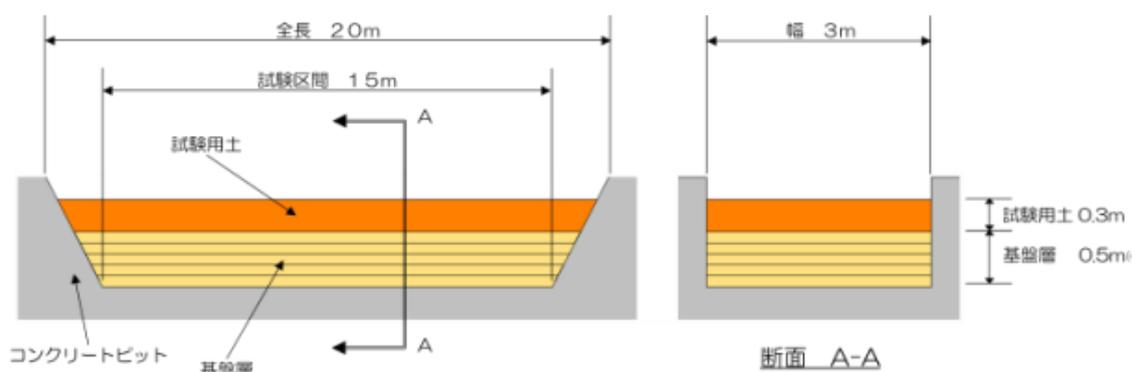


図 3-4 試験土槽の概要

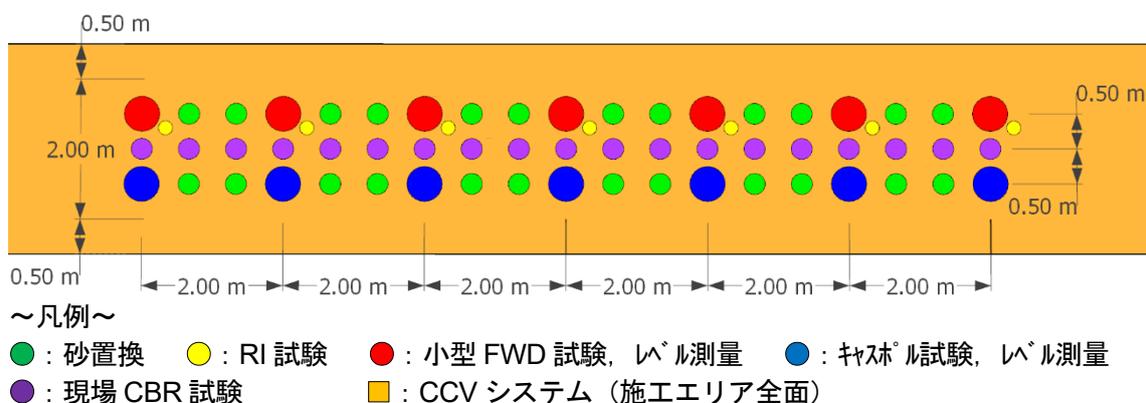


図 3-5 品質試験の測定位置

表 3-2 振動ローラの仕様

名称		SV620D	
重量	t	12.610	
電源容量	V	24	
起振力 (Low/High)	kN	172/255	
振動数 (Low/High)	Hz	33.3/28.3	
走行速度 (Low/High)	km/h	0-6/0-10	
土槽試験中の走行速度	km/h	2.0	
寸法	全長	m	5.840
	全幅	m	2.295
	全高	m	2.835
	ロール幅	m	2.130
写真			

表 3-3 品質試験方法

分類	種別	測定状況	概要
沈下量	レベル測量		締固めによる地盤表面沈下量を測定
密度・含水比	砂置換		直径 100mm×高さ 100mm の締固め土を密度が既知の珪砂に置き換え、その比重により締固め土の密度等を測定（主に表層 10cm で測定）
地盤反力係数	小型 FWD 試験		締固め後の地盤を対象とし、東京測器研究所製 FWD-100A を用いて地盤反力係数を測定
	キャスポル試験		締固め後の地盤で、(株)マルイ製簡易支持力測定器キャスポルを使用し、地盤反力係数を測定
	現場 CBR 試験		締固め後の地盤で、ロードセルを貫入させるのに必要な荷重を測定し、支持力特性を測定
	CCV システム (加速度応答法)		振動ローラに取り付けた GPS と加速度計によって、振動ローラの位置情報と振動加速度波形を測定し、地盤の剛性を測定

表 3-4 品質試験頻度（○は測定実施を意味する）

測定名称	測定項目	敷均	予備	測定転圧回数						
				0	2	4	6	8	12	16
速度メータ	車速	—	—	—	○	○	○	○	○	○
レベル測量	沈下量	○	○	○	○	○	○	○	○	○
砂置換法	乾燥密度 ρ_d 含水比 w 飽和度 S_r	—	○	○	○	○	○	○	○	○
現場 CBR 試験	CBR 値	—	—	○	○	○	○	○	○	○
小型 FWD 試験	$(K_{30})_{FWD}$	—	—	○	○	○	○	○	○	○
キャスポル試験	$(K_{30})_{キャスポル}$	—	—	○	○	○	○	○	○	○
CCV システム	CCV 値	—	—	—	○	○	○	○	○	○

3-2-3 地盤剛性指標

地盤剛性指標のうち、現場 CBR 試験は従来から実際の盛土の締固め管理で用いられていて、データが豊富である。また、第2章で示したように、現場 CBR 試験と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r との間には関係式が成立することが龍岡ら⁹⁾の研究により明らかとなった。そこで、本研究では、小型 FWD 試験、キャスポル試験および CCV システムの測定結果と現場 CBR 試験との相関を確認することで、関係式の適用性を検討した。ここで、各試験方法の概要を以下に示す。CCV システムの概要に関しては、第2章に示したため、ここでは省略する。

現場 CBR 試験 (California Bearing Ratio) では、貫入ピストンを 0.1mm/min の速さで地盤の中に貫入させ、最大 12.5mm の貫入量に到達するまでの荷重を計測し、標準荷重と比較して相対的な強さを CBR 値として算出する試験である。CBR 値は、貫入量 2.5mm における載荷を標準荷重で除した値を百分率で標記した指標¹⁾である。CBR 値の算出式を式(3-1)に示す。

ここに、 q : 所定の貫入量における載荷圧力 (MN/m²)、 q_0 : 所定の貫入量における標準載荷圧力 (MN/m²) とする。

$$CBR = \frac{q}{q_0} \times 100 \quad (3-1)$$

小型 FWD 試験 (FWD-Light) では、直径 10cm の載荷板上に重錘を自由落下させて衝撃荷重を加え、これにより生じた荷重中心位置での変位量を測定して、地盤反力係数 ($KP.FWD$, kN/m³) を得た²⁾。この係数から変形係数 E (kN/m²) を得て、経験式によって CBR 値や一軸圧縮強度 q_u (kN/m²) などに換算することができる。また、 $KP.FWD$ は、載荷板の直径が 30cm の平板載荷試験より得られる K_{30} と相関性が高く、地盤材料が砂質土の場合は、 $KP.FWD$ から式(3-2)によって K_{30} を推定することが行われている²⁾。本研究では、測定した $KP.FWD$ を式(3-2)に代入し、算出した K_{30} を $(K_{30})_{FWD}$ と定義する。

$$(K_{30})_{FWD} = \frac{1.0}{1.5} \times (KP.FWD) \quad (3-2)$$

キャスポル試験は、4.5kg のランマーを盛土面に落下させ、衝撃加速度法によるインパクト値 (以下、 I_a 値、無次元量) を得て、この値から締固め状態を調べる測定器である³⁾。 I_a 値は、平板載荷試験による K_{30} と相関性が高く、式(3-3)によって I_a 値から K_{30} の値に推定する³⁾。本研究では、測定された I_a 値を式(3-3)によって換算した K_{30} を $(K_{30})_{キャスポル}$ と定義した。

$$(K_{30})_{キャスポル} = -37.58 + 8.554I_a \quad (3-3)$$

小型 FWD 試験とキャスポル試験による測定は、現場 CBR 試験に比べて測定方法が簡易で結果出力までの時間は迅速であるが、施工完了後の転圧面で限定された箇所ではしか実施できないという点では同様である。

3-3 実験結果および考察

転圧試験で得られた全ての計測データを整理し、各試験結果と転圧回数 N の関係、地盤剛性指標同士の相関性および測定結果と締固め曲線との関係について検証する。

3-3-1 試験値と転圧回数 N の関係

各試験結果（沈下量、含水比 w 、乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r 、 CBR 値、 $(K_{30})_{FWD}$ 、 $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ 、 CCV 値）と転圧回数 N との関係および標準誤差をそれぞれ図 3-6 (a)～(h) に示す。

図 3-6 (a) は沈下量と転圧回数 N の関係を示したものである。沈下量はいずれの施工含水比条件においても転圧回数 N の増加とともに増加し、含水比 w が最適含水比 $(w_{opt})_{N=12}$ に近いほど大きくなった。

図 3-6 (b) は含水比 w と転圧回数 N の関係を示したものである。各試験での転圧によって含水比 w の測定結果にはある程度ばらつきはあるものの、ほぼ一定であった。

図 3-6 (c) は乾燥密度 ρ_d と転圧回数 N の関係を示したものである。この乾燥密度 ρ_d はすでに述べたように表層 10cm の部分のものである。初期含水比 w が低いほど転圧回数 N の増加に伴う乾燥密度 ρ_d の増加率が小さく、最終的な乾燥密度 ρ_d が小さいことが特徴的である。

図 3-6 (d) は測定された含水比 w と乾燥密度 ρ_d から求めた飽和度 S_r と転圧回数 N の関係を示した。含水比 w は締固め中に一定であったため、乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r は同じ傾向の変化を示し、転圧回数 N の増加とともに一貫して増加し、転圧回数 N が 6 回以降は増加率が小さくなった。なお、含水比 w_3 、 w_4 は、転圧回数 N が 4～6 回で最適飽和度 S_{ropt} を上回ることがわかった。

図 3-6 (e) は小型 FWD 試験による地盤剛性指標である地盤反力係数 $(K_{30})_{FWD}$ と転圧回数 N の関係を示したものである。 $(K_{30})_{FWD}$ は、低い含水比 w_1 、 w_2 では、転圧回数 N の増加による増加率が大きく一貫して大きな値を示している。一方、高い含水比 w_3 では転圧回数 N が 12 回以降、含水比 w_4 では転圧回数 N が 4 回以降は $(K_{30})_{FWD}$ が一定、もしくは減少する傾向を示し、含水比 w が低い時よりも低い値となっている。

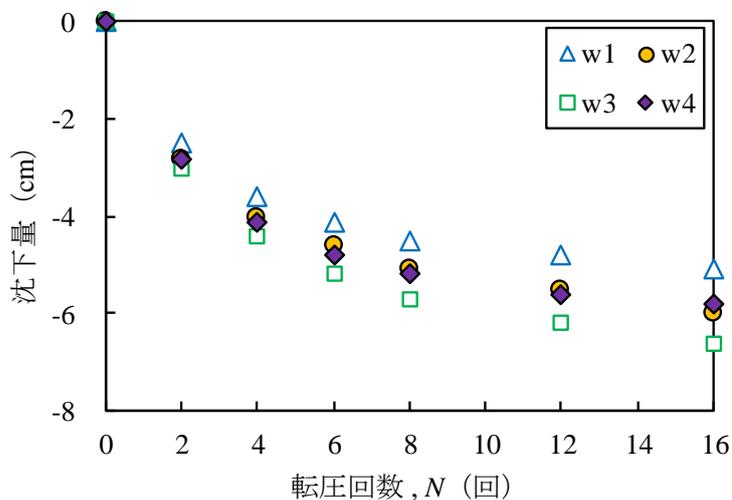
図 3-6 (f) はキャスポル試験による地盤剛性指標である地盤反力係数 $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ と転圧回数 N の関係を示したものである。 $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ も、低い含水比 w_1 、 w_2 では転圧回数 N の増加による増加率が最も大きく一貫して大きな値を示している。一方、高い含水比 w_4 では転圧回数 N が 4 回以降は $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ が一定もしくは減少する傾向を示し、全般的に低い値となっている。

図 3-6 (g) は現場 CBR 試験による CBR 値と転圧回数 N の関係を示したものである。 CBR 値も、低い含水比 w_1 、 w_2 では、転圧回数 N の増加による増加率が高く一貫して大きな値を示している。一方、高い含水比 w_3 では転圧回数 N が 12 回以降、含水比 w_4 では転圧回数 N が 2 回以降は CBR 値が一定、もしくは減少する傾向を示し、全般的に低い値となっている。

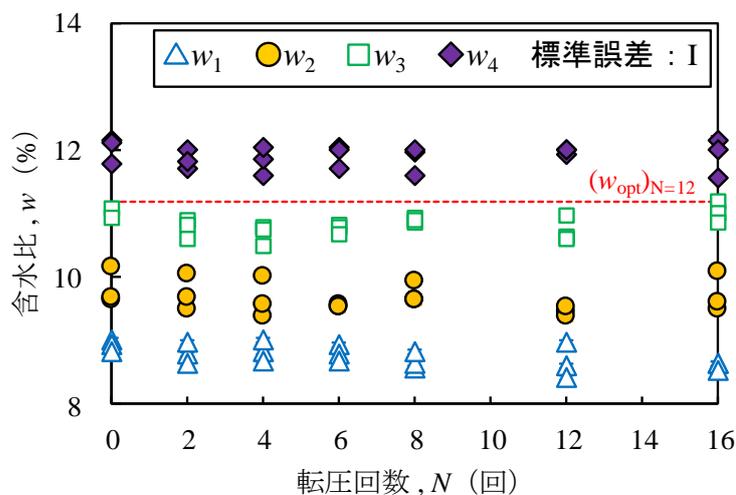
図 3-6 (h) は CCV システムによる CCV 値と転圧回数 N の関係を示したものである。 CCV

値も、含水比 w が低いほど転圧回数 N の増加とともに大きく増加し、全般的に高い値となっている。含水比 w_1 では転圧回数 N が6回以降、含水比 w_2 では転圧回数 N が12回以降に CCV 値は急激に増加する。一方、含水比 w が高くなるほど転圧回数 N の増加に伴う CCV 値の増加が明確ではなくなり、含水比 w_3, w_4 では、転圧回数 N が6~8回以前（締固め初期）では CCV 値の増加量がある程度認められるが、転圧回数 N が6~8回以降（締固め後期）では微増であり、全般的に低い値となっている。

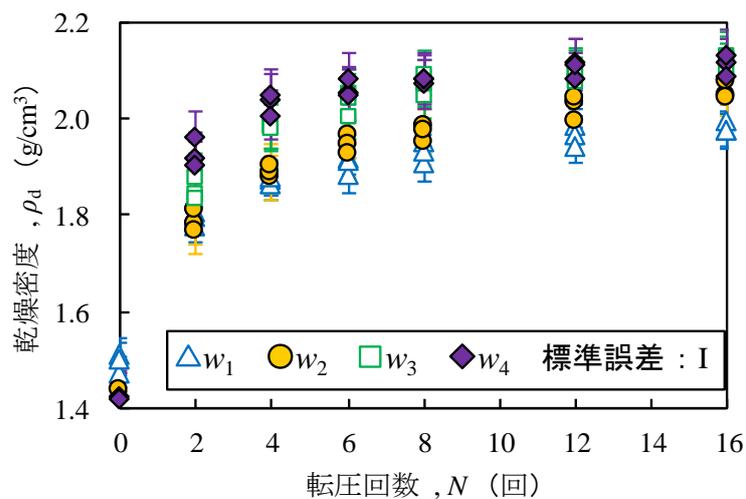
なお、各試験結果の標準誤差をみると、湿潤密度 ρ_t 、含水比 w 、乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r はいずれも試験条件に依らずばらつきの小さい結果となった。一方、地盤剛性指標は、いずれも乾燥側（すなわち飽和度が低い時）になるほどばらつきが大きく、湿潤側（すなわち飽和度が高い時）になるほどばらつきは小さいことが確認された。



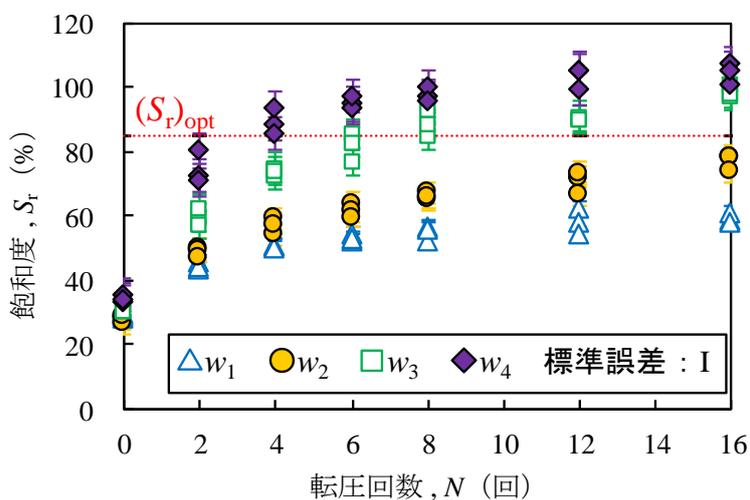
(a) 沈下量



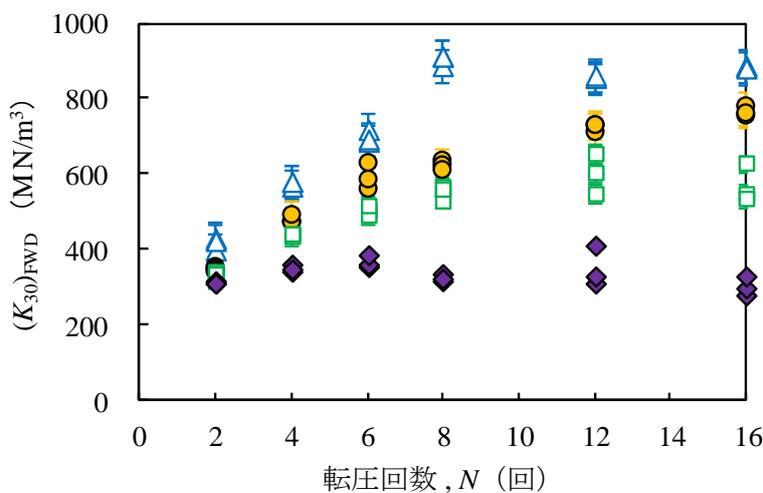
(b) 含水比 w



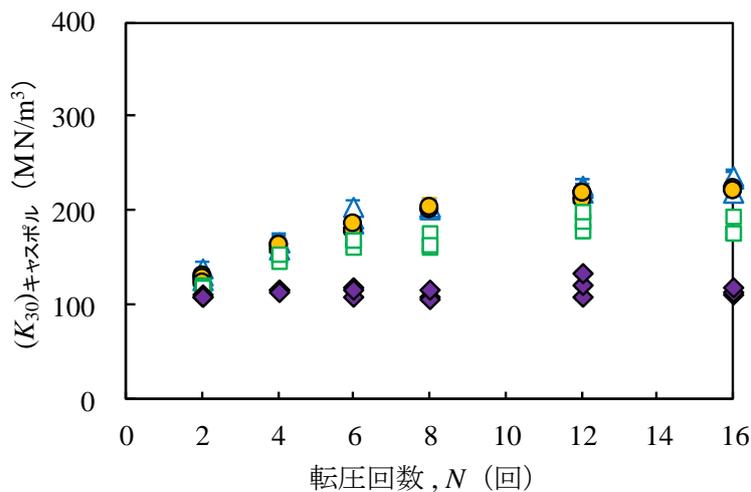
(c) 乾燥密度 ρ_d



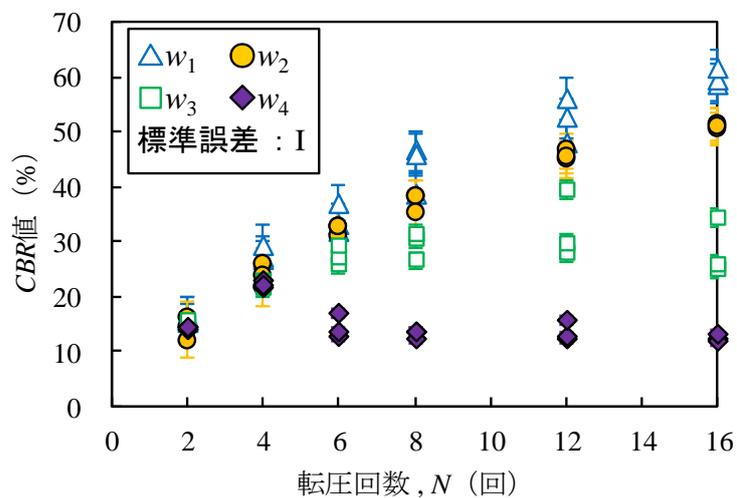
(d) 飽和度 S_r



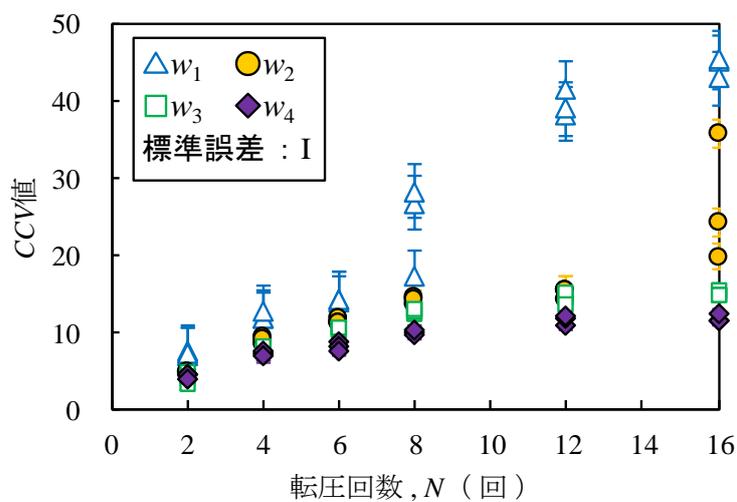
(e) $(K_{30})_{FWD}$



(f) (K_{30}) キャスボル



(g) CBR 値



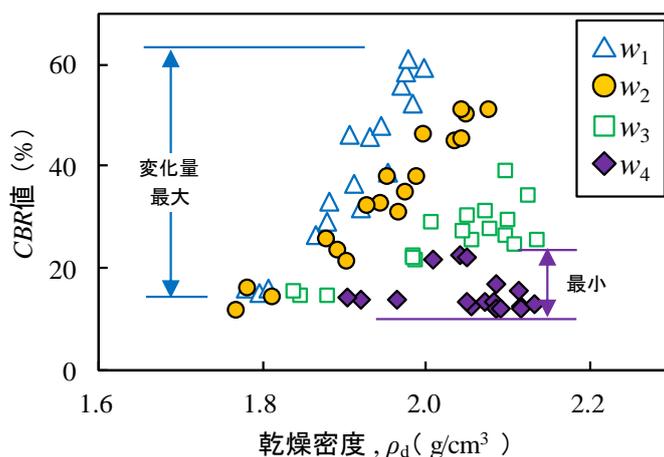
(h) CCV 値

図 3-6 各試験結果と転圧回数 N の関係

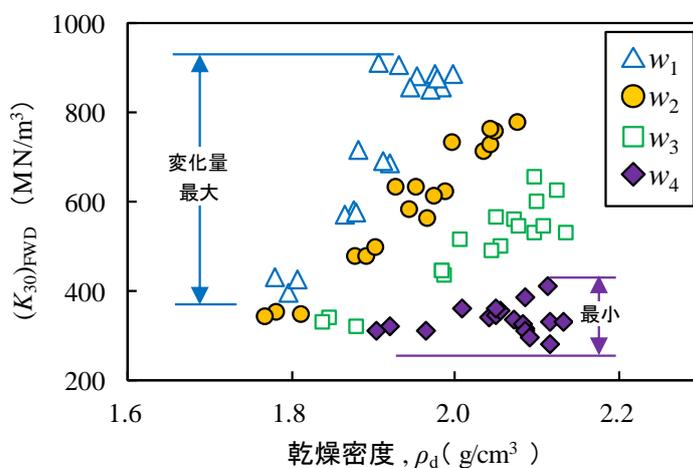
3-3-2 地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d , 飽和度 S_r の関係

図3-7(a)～(d)は、含水比条件 ($w_1 \sim w_4$) 毎に分類したそれぞれ CBR 値, $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{キャスポル}$, CCV 値と乾燥密度 ρ_d との関係を示す。

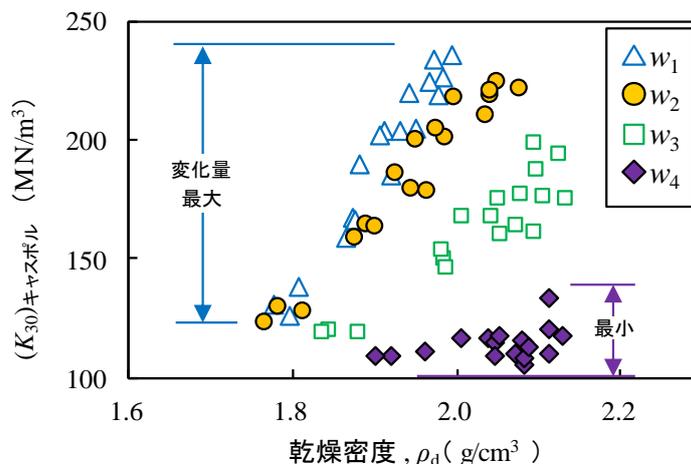
図3-7より、地盤剛性指標は、乾燥密度 ρ_d の増加に伴い全体的に増加する傾向を示すが、その傾向は含水比条件により異なる。例えば、最も乾燥側の含水比 w_1 では、乾燥密度 ρ_d の増加に伴い各地盤剛性指標は一貫して増加し、増加量は全含水比条件の中で最大を示す。含水比 w が増加するにつれて増加量は徐々に低下し、最も湿潤側の含水比 w_4 では増加量が最小を示し、乾燥密度 ρ_d が増加すると各地盤剛性指標の増加が停止する傾向となる。このように、地盤剛性指標はいずれも乾燥密度 ρ_d だけに支配されるのではなく、含水比 w (すなわち飽和度 S_r) に複雑に影響される。このことはすなわち、各地盤剛性指標だけから乾燥密度 ρ_d の値を推定することはできないことを意味している。以上のことから、地盤剛性指による締固め管理を実施する場合には、地盤剛性指標単体による管理ではなく、含水比 w あるいは飽和度 S_r と組み合わせた管理が必要である。



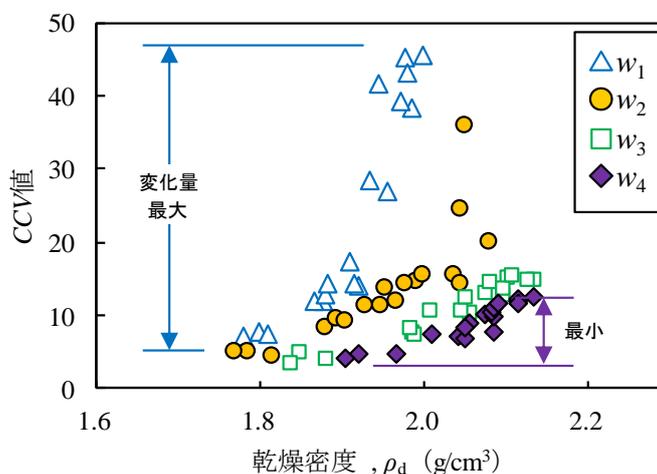
(a) CBR 値



(b) $(K_{30})_{FWD}$



(c) $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$



(d) CCV 値

図3-7 地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d , 含水比 w の関係

3-3-3 地盤剛性指標の相関性

地盤剛性指標同士の相関性について検証する。まず、図3-8に示すように CBR 値, $(K_{30})_{\text{FWD}}$, $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ の相関性について確認した。図3-8をみると、 CBR 値と $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ と $(K_{30})_{\text{FWD}}$, CBR 値と $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ は相互に高い相関を示した。これは、 $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ と $(K_{30})_{\text{FWD}}$ も高い相関を示すことを意味している。図3-8には、近似線も示すが、いずれの関係も線形で近似できることがわかる。これより、 CBR 値, $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$, $(K_{30})_{\text{FWD}}$ の指標のうちのいずれか一つを把握すれば、近似線を用いて他の二つの指標を推定することができる。

次に、 CCV 値と CBR 値, $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$, $(K_{30})_{\text{FWD}}$ との相関性について検証する。図3-9には、 CBR 値, $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$, $(K_{30})_{\text{FWD}}$ を基準とした CCV 値との相関を示す。図3-9より、いずれも非線形ではあるものの概ね正の相関を示した。ここで、 CCV 値と CBR 値, $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$, $(K_{30})_{\text{FWD}}$ の平均的な関係をそれぞれ式(3-4)~(3-6), 式(3-7)~(3-9), 式(3-10)~(3-11)で近似

した. CBR 値, $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$, $(K_{30})_{\text{FWD}}$ のいずれかを取得し, それぞれ式(3-4)~式(3-11)の近似式を適用することで, CCV 値を概ね推定することができる.

・ CBR 値を介して CCV 値を推定する近似式

$$CBR \text{ 値} \leq 45\% \text{ の場合 : } CCV = 0.400 \times CBR + 0.700 \quad (3-4)$$

$$45\% < CBR \text{ 値} \leq 50\% \text{ の場合 : } CCV = 3.460 \times CBR - 137.0 \quad (3-5)$$

$$50\% < CBR \text{ 値 の場合 : } CCV = 0.667 \times CBR + 2.667 \quad (3-6)$$

・ $(K_{30})_{\text{FWD}}$ を介して CCV 値を推定する近似式

$$(K_{30})_{\text{FWD}} \leq 780 \text{ MN/m}^3 \text{ の場合 : } CCV = 0.025 \times (K_{30})_{\text{FWD}} - 1.566 \quad (3-7)$$

$$780 \text{ MN/m}^3 < (K_{30})_{\text{FWD}} \leq 830 \text{ MN/m}^3 \text{ の場合 : } CCV = 0.344 \times (K_{30})_{\text{FWD}} - 250.52 \quad (3-8)$$

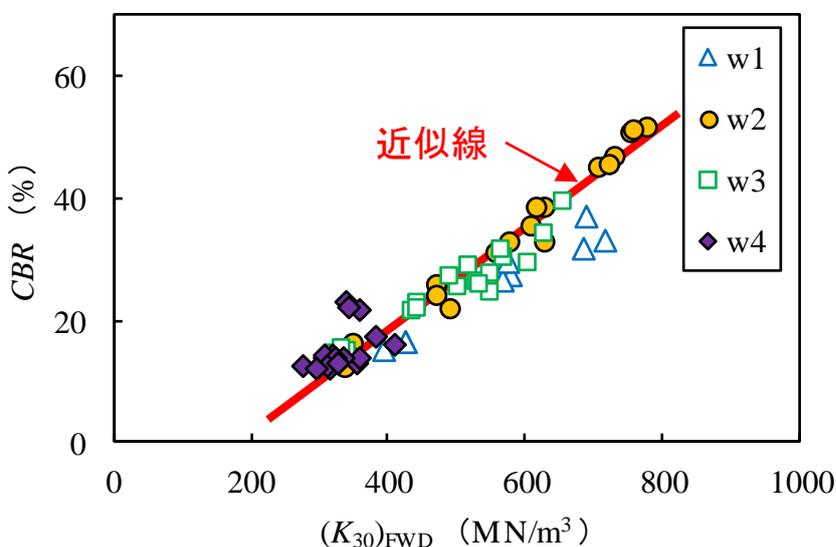
$$830 \text{ MN/m}^3 < (K_{30})_{\text{FWD}} \text{ の場合 : } CCV = 0.173 \times (K_{30})_{\text{FWD}} - 108.87 \quad (3-9)$$

・ $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ を介して CCV 値を推定する近似式

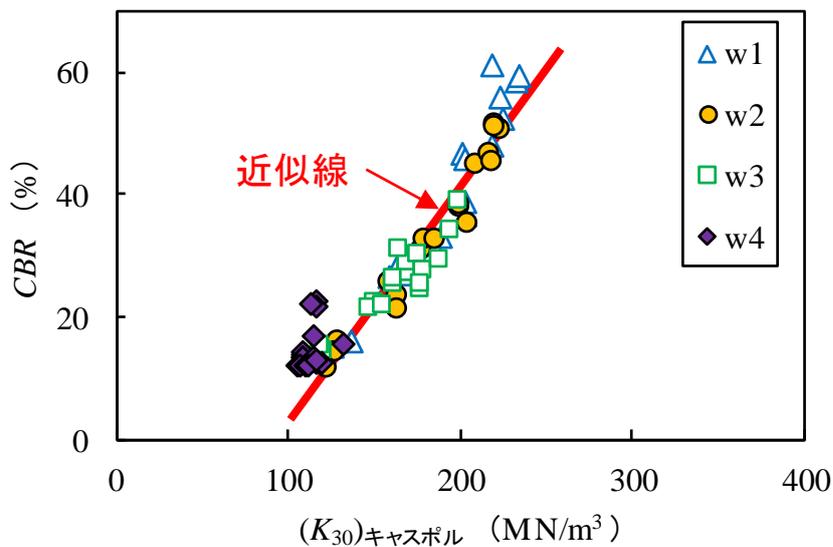
$$(K_{30})_{\text{キャスポル}} \leq 210 \text{ MN/m}^3 \text{ の場合 : } CCV = 0.105 \times (K_{30})_{\text{キャスポル}} - 6.131 \quad (3-10)$$

$$210 \text{ MN/m}^3 < (K_{30})_{\text{キャスポル}} \leq 215 \text{ MN/m}^3 \text{ の場合 : } CCV = 4.200 \times (K_{30})_{\text{キャスポル}} - 866.0 \quad (3-11)$$

$$215 \text{ MN/m}^3 < (K_{30})_{\text{キャスポル}} \text{ の場合 : } CCV = 0.367 \times (K_{30})_{\text{キャスポル}} - 41.83 \quad (3-12)$$

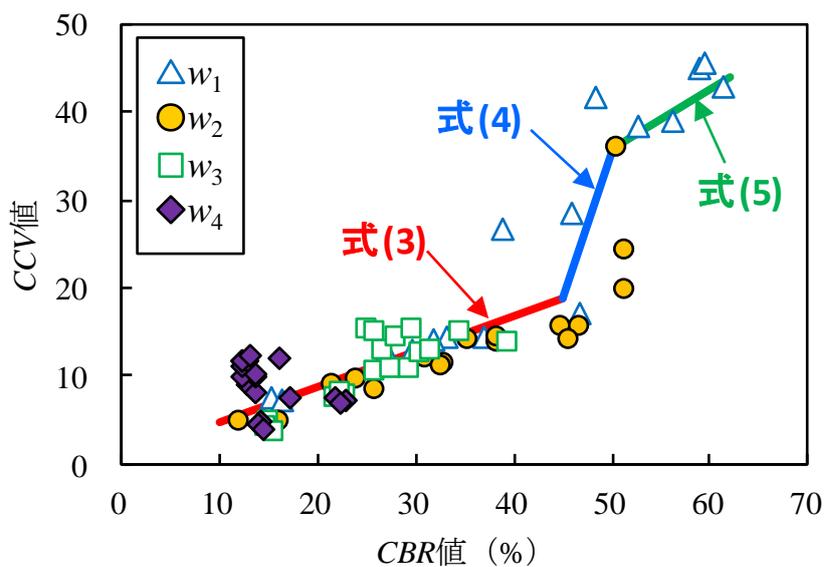


(a) CBR 値と $(K_{30})_{\text{FWD}}$

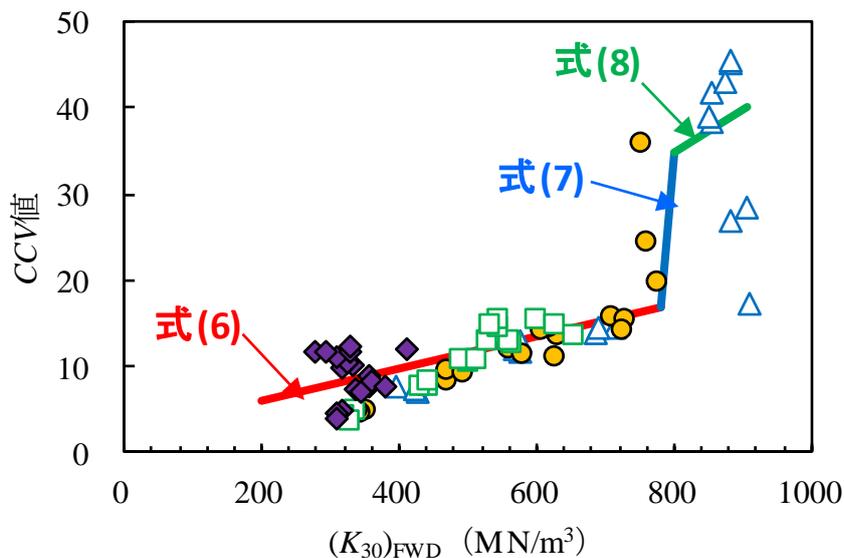


(b) CBR 値と $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$

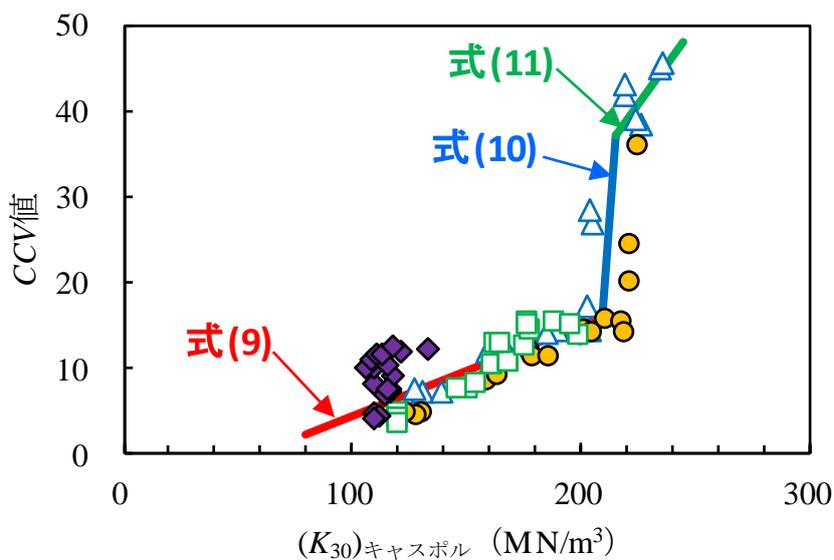
図3-8 CBR 値と $(K_{30})_{\text{FWD}}$, $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ の相関



(a) CCV 値と CBR 値



(b) CCV 値と $(K_{30})_{FWD}$



(c) CCV 値と $(K_{30})_{キャスポル}$

図 3-9 地盤剛性指標同士の相関

3-3-4 締固め試験での締固め状態

図 3-10 に、室内締固め試験による $1.0Ec$ と $4.5Ec$ での締固め曲線と実大締固め試験結果を示す。図 3-10 には、含水比条件毎の転圧回数 N が 2~16 回までの締固め状態をプロットしており、いずれも転圧回数 N の増加に伴い乾燥密度 ρ_d が増加する傾向を示している。なお、実大締固め試験の乾燥密度 ρ_d 、含水比 w は、いずれも表層 10cm を対象に実施した砂置換の試験結果である。締固め時の乾燥密度 ρ_d は深さ方向に変化することが知られているが、表層に近いところの試料について調べて室内締固め試験と対比したものである。

図3-10に、同一の転圧回数 N での測定値の平均値を点線でつないで示している。図3-10をみると、転圧回数 N が2回の時は、 $1.0Ec$ の締固め曲線とほぼ一致しているが、転圧回数 N が増えるにつれて湿潤側の乾燥密度 ρ_d が急激に増加するのに対し、乾燥側の乾燥密度 ρ_d の増加が少ないため、同一締固めエネルギー CEL で締固めをしている室内締固め曲線の形状とは少し異なる形となっている。その原因として、試料のばらつき、室内締固め試験と転圧試験での締固めメカニズムの相違等が考えられるが、詳細は不明である。

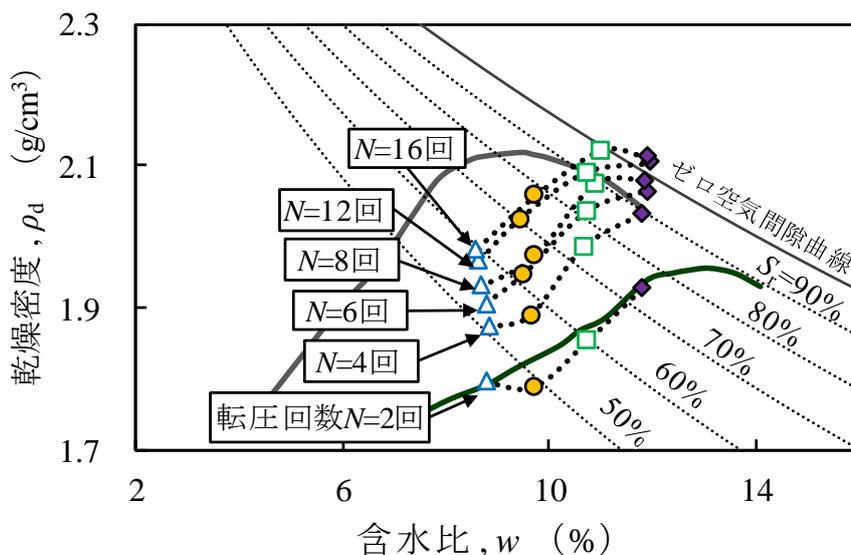


図3-10 同一転圧回数 N (締固めエネルギー CEL) の締固め曲線

3-4 盛土品質の即時推定手法の検討

地盤剛性指標（ CBR 値, $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$, CCV 値）と乾燥密度 ρ_d , 飽和度 S_r , 含水比 w との関係式について検討した。また, 前項に示した CBR 値, $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ と CCV 値との近似式 (式(3-4)~式(3-12)) と各地盤剛性指標の関係式を組み合わせることによる CCV 値の推定精度についても検討した。

3-4-1 現場 CBR 試験による品質指標の推定式

締固め時の締固め状態を表すパラメータとして一般的には, 乾燥密度 ρ_d と含水比 w が用いられている。乾燥密度 ρ_d は, 土粒子比重 G_s , 間隙比 e , 水の密度 ρ_w によって式(3-13)のように表せる。また, 含水比 w は, 土粒子比重 G_s , 間隙比 e , 飽和度 S_r によって式(3-14)のように表せる。

$$\rho_d = \frac{G_s}{1+e} \rho_w \quad (3-13)$$

$$w = \frac{eS_r}{G_s} \quad (3-14)$$

このように, 土の締固め状態は, 間隙比 e と飽和度 S_r によっても表現できる。

第2章にも示した龍岡ら⁹⁾の研究成果からもわかるように CBR 値と乾燥密度 ρ_d の関係は含水比 w をパラメータにするよりも飽和度 S_r をパラメータにするほうがばらつきの少なく法則性が明確な関係式を構築できる。このようなことから, 飽和度 S_r と乾燥密度 ρ_d を二つのパラメータとし, それぞれが変数分離の形で表せられるものとして, 式(3-15)に示す関係式を構築することにした。この考え方は, 後で議論する $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$, CCV 値に関しても共通である。

$$CBR = f_{CBR}(S_r) \times (\rho_d / \rho_w - b)^c \quad (3-15)$$

図3-11に, 転圧試験で得られた CBR 値~乾燥密度 ρ_d との関係の全データを示す。全データを飽和度 S_r で10%ごとに分類し, それぞれを別の記号でプロットした。図3-11をみると, それぞれの分類した飽和度 S_r において CBR 値は乾燥密度 ρ_d の増加に伴って一貫して増加している。この傾向を表現する関係式として, 式(3-15)の形式を設定する。この式のうち, 関数 $f_{CBR}(S_r)$, 定数 b , c は実験的に求められるパラメータである。これらのパラメータは以下のような手続きで決定した。

まず, 飽和度 S_r の範囲として10%毎にデータを分類し, 関数 $f_{CBR}(S_r)$ の変化が少ないと思われるそれぞれの範囲の飽和度 S_r のデータごとに最適な定数 b , c の組み合わせを求めた。それらの定数 b , c に対してそれぞれのパラメータごとに各飽和度範囲での値の算術平均を

もって仮の定数 b , c を決め、それらを用いて個々のデータの関数 $f_{CBR}(S_r)$ と飽和度 S_r の関係を求めた。その結果を図 3-12 に示すが、データを見ると、飽和度 S_r の値によるプロットの平均的関係からの偏りは見られないことから、この関係を定式化したのが、式(3-16)である。さらに、式(3-15)に式(3-16)を代入し、式(3-17)を得た。

式(3-17)において、従属変数 CBR 値の独立変数は乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r であり、この関係は転圧回数 N や締固めエネルギー CEL には寄らない関係である。式(3-17)は乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r から CBR 値を決定する式の形となっているが、三つの変数のうち二つの変数の値がわかれば他の変数の値を決定できるので、例えば、 CBR 値と飽和度 S_r から乾燥密度 ρ_d を推定することも可能である。また、飽和度 S_r は式(3-18)のように表せるため、 CBR 値と含水比 w から飽和度 S_r と乾燥密度 ρ_d を推定することも可能な式であるといえる。

このように、式(3-17)を用いることで、施工後に測定した CBR 値と含水比 w から乾燥密度 ρ_d や飽和度 S_r を推定可能である。

$$f_{CBR}(S_r) = \frac{5.70}{\{1 + \exp(0.037S_r)\}} \quad (3-16)$$

$$CBR = \left[\frac{5.70}{\{1 + \exp(0.037S_r)\}} \right] (\rho_d / \rho_w - 0.4)^{9.5} \quad (3-17)$$

$$S_r = \frac{G_s}{\frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1} w \quad (3-18)$$

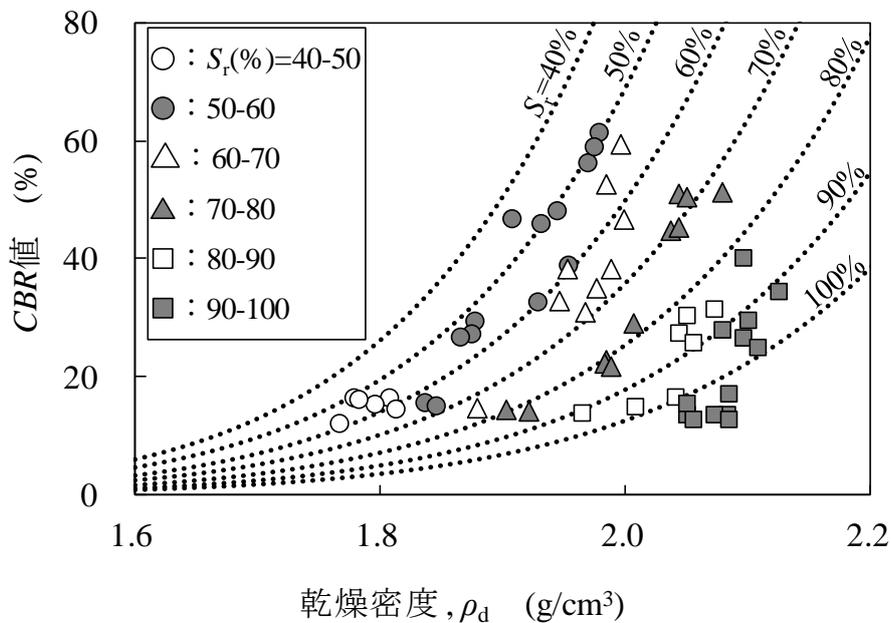


図 3-11 本研究で得られた飽和度 S_r をパラメータとした CBR 値と乾燥密度 ρ_d の関係

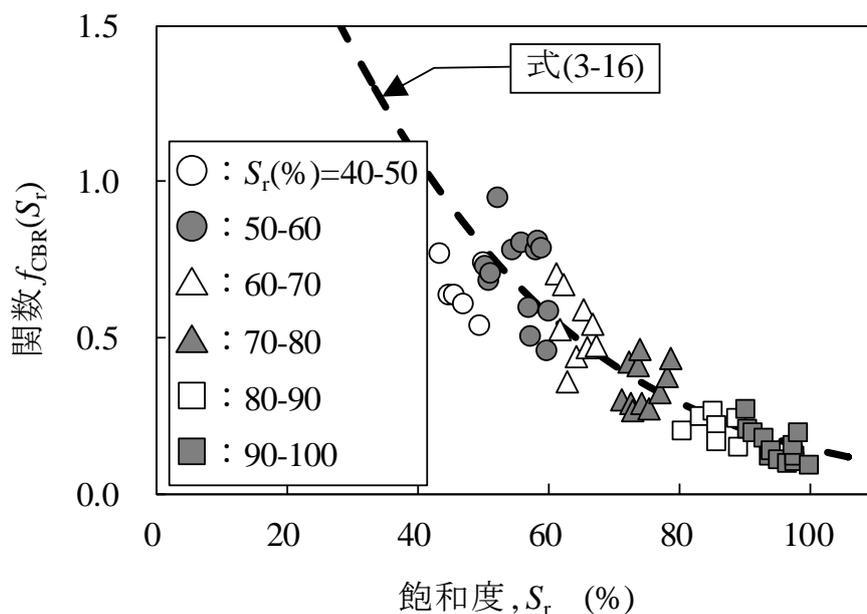


図 3-12 関数 $f_{CBR}(S_r) \sim$ 飽和度 S_r 関係

3-4-2 小型 FWD 試験による品質指標の推定式

飽和度 S_r と乾燥密度 ρ_d を二つのパラメータとし、それぞれが変数分離の形で表せられるものとして、式(3-19)に示す関係式を構築することにした。

$$(K_{30})_{FWD} = f_{FWD}(S_r) \times (\rho_d / \rho_w - b)^c \quad (3-19)$$

図 3-13 に、転圧試験で得られた $(K_{30})_{FWD} \sim$ 乾燥密度 ρ_d 関係の全データを示す。全データを飽和度 S_r で 10%ごとに分類し、それぞれを別の記号でプロットした。図 3-13 をみると、それぞれの分類した飽和度 S_r において $(K_{30})_{FWD}$ は乾燥密度 ρ_d の増加に伴って一貫して増加している。この傾向を表現する関係式として、式(3-19)の形式を設定する。この式のうち、関数 $f_{FWD}(S_r)$ 、定数 b 、 c は実験的に求められるパラメータである。これらのパラメータは以下のような手続きで決定した。

まず、飽和度 S_r の範囲として 10%毎にデータを分類し、関数 $f_{FWD}(S_r)$ の変化が少ないと思われるそれぞれの範囲の飽和度 S_r のデータごとに最適な定数 b 、 c の組み合わせを求めた。それらの定数 b 、 c に対してそれぞれのパラメータごとに各飽和度範囲での値の算術平均をもって仮の定数 b 、 c を決め、それらを用いて個々のデータの関数 $f_{FWD}(S_r)$ と飽和度 S_r の関係を求めた。その結果を図 3-14 に示すが、データを見ると、飽和度 S_r の値によるプロットの平均的関係からの偏りは見られないことから、この関係を定式化したのが、式(3-20)である。さらに、式(3-19)に式(3-20)を代入し、式(3-21)を得た。

式(3-17)において、従属変数 $(K_{30})_{FWD}$ の独立変数は乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r であり、この関係

は転圧回数 N や締固めエネルギー CEL には寄らない関係である。式(3-21)は乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r から $(K_{30})_{FWD}$ を決定する式の形となっているが、三つの変数のうち二つの値がわかれば他の変数の値を決定できるので、例えば、 $(K_{30})_{FWD}$ と飽和度 S_r から乾燥密度 ρ_d を推定することも可能である。また、飽和度 S_r は式(3-18)のように表せるため、 $(K_{30})_{FWD}$ と含水比 w から飽和度 S_r と乾燥密度 ρ_d を推定することも可能な式であるといえる。

このように、式(3-21)を用いることで、施工後に測定した $(K_{30})_{FWD}$ と含水比 w から乾燥密度 ρ_d や飽和度 S_r を推定可能である。小型 FWD 試験は、従来の砂置換と比較すると、転圧施工が完了したタイミングで実施するという点は共通しているものの、試験方法が簡易で短時間で試験結果を取得できるという部分で品質試験の効率化が期待される手法である。

$$f_{FWD}(S_r) = \frac{115.3}{\{1 + \exp(0.038S_r)\}} \quad (3-20)$$

$$(K_{30})_{FWD} = \left[\frac{115.3}{\{1 + \exp(0.038S_r)\}} \right] (\rho_d / \rho_w - 0.4)^{9.5} \quad (3-21)$$

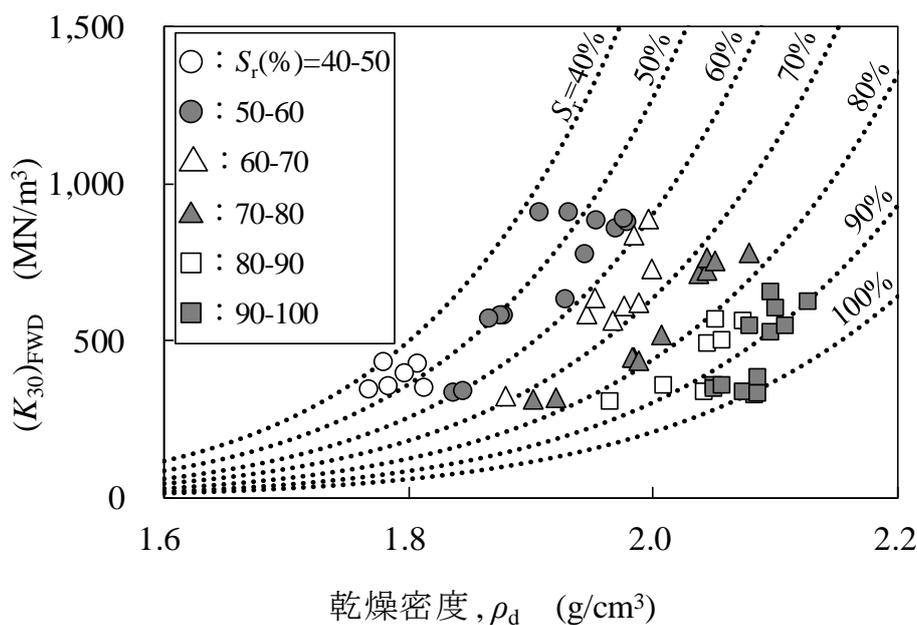


図 3-13 $(K_{30})_{FWD}$ と乾燥密度の関係

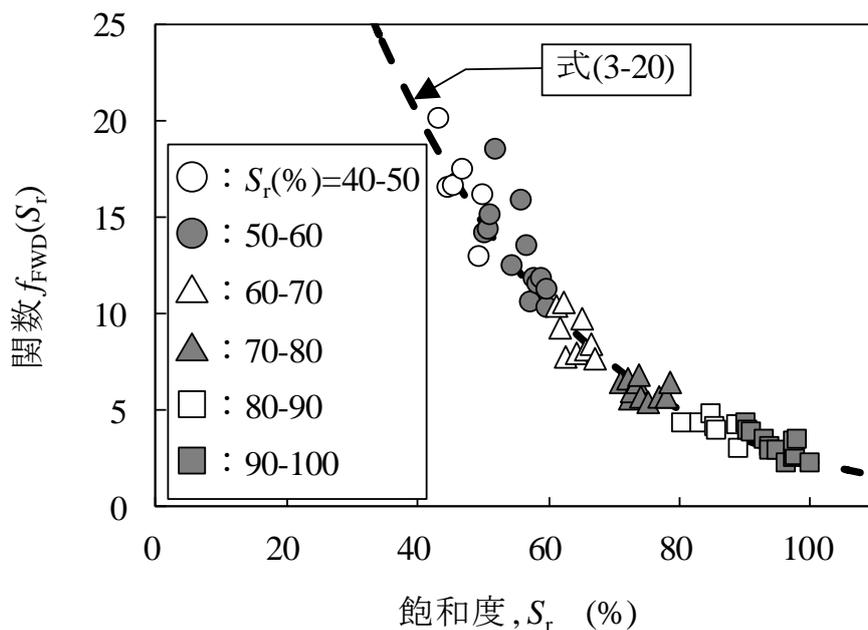


図 3-14 関数 $f_{FWD}(S_r) \sim$ 飽和度 S_r 関係

3-4-3 キャスポル試験による品質指標の推定式

飽和度 S_r と乾燥密度 ρ_d を二つのパラメータとし、それぞれが変数分離の形で表せられるものとして、式(3-22)に示す関係式を構築することにした。

$$(K_{30})_{\text{キャスポル}} = f_{\text{キャスポル}}(S_r) \times (\rho_d / \rho_w - b)^c \quad (3-22)$$

図 3-15 に、転圧試験で得られた $(K_{30})_{\text{キャスポル}} \sim$ 乾燥密度 ρ_d 関係の全データを示す。全データを飽和度 S_r で 10% ごとに分類し、それぞれを別の記号でプロットした。図 3-15 をみると、それぞれの分類した飽和度 S_r において $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ は乾燥密度 ρ_d の増加に伴って一貫して増加している。この傾向を表現する関係式として、式(3-22)の形式を設定する。この式のうち、関数 $f_{\text{キャスポル}}(S_r)$ 、定数 b 、 c は実験的に求められるパラメータである。これらのパラメータは以下のような手続きで決定した。

まず、飽和度 S_r の範囲として 10% 毎にデータを分類し、関数 $f_{\text{キャスポル}}(S_r)$ の変化が少ないと思われるそれぞれの範囲の飽和度 S_r のデータごとに最適な定数 b 、 c の組み合わせを求めた。それらの定数 b 、 c に対してそれぞれのパラメータごとに各飽和度範囲での値の算術平均をもって仮の定数 b 、 c を決め、それらを用いて個々のデータの関数 $f_{\text{キャスポル}}(S_r)$ と飽和度 S_r の関係を求めた。その結果を図 3-16 に示すが、データを見ると、飽和度 S_r の値によるプロットの平均的關係からの偏りは見られないことから、この関係を定式化したのが、式(3-23)である。さらに、式(3-22)に式(3-23)を代入し、式(3-24)を得た。

式(3-24)において、従属変数 $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ の独立変数は乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r であり、この

関係は転圧回数 N や締固めエネルギーレベル CEL には寄らない関係である。式(3-24)は乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r から $(K_{30})_{\text{キャスボル}}$ を決定する式の形となっているが、三つの変数のうち二つの変数の値がわかれば他の変数の値を決定できるので、例えば、 $(K_{30})_{\text{キャスボル}}$ と飽和度 S_r から乾燥密度 ρ_d を推定することも可能である。また、飽和度 S_r は式(3-18)のように表せるため、 $(K_{30})_{\text{キャスボル}}$ と含水比 w から飽和度 S_r と乾燥密度 ρ_d を推定することも可能な式であるといえる。

このように、式(3-24)を用いることで、施工後に測定した $(K_{30})_{\text{キャスボル}}$ と含水比 w から乾燥密度 ρ_d や飽和度 S_r を推定可能である。キャスボル試験は、小型 FWD 試験と同様に、従来の砂置換と比較すると、転圧施工が完了したタイミングで実施するという点は共通しているものの、試験方法が簡易で短時間で試験結果を取得できるという部分で品質試験の効率化が期待される手法である。

$$f_{\text{キャスボル}}(S_r) = \frac{38.6}{\{1 + \exp(0.039S_r)\}} \quad (3-23)$$

$$(K_{30})_{\text{キャスボル}} = \left[\frac{38.6}{\{1 + \exp(0.039S_r)\}} \right] (\rho_d / \rho_w - 0.4)^{9.5} \quad (3-24)$$

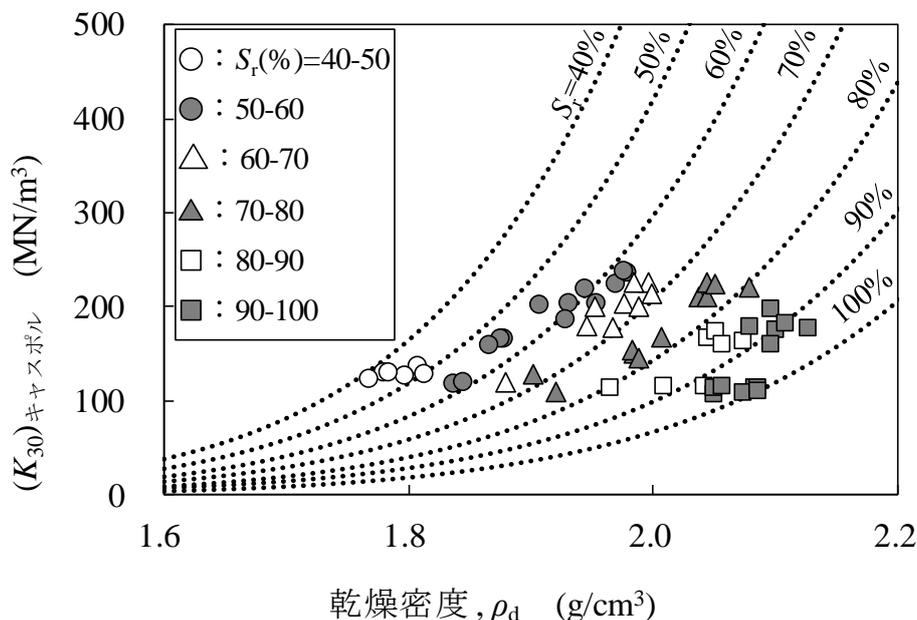


図 3-15 $(K_{30})_{\text{キャスボル}}$ と乾燥密度 ρ_d の関係

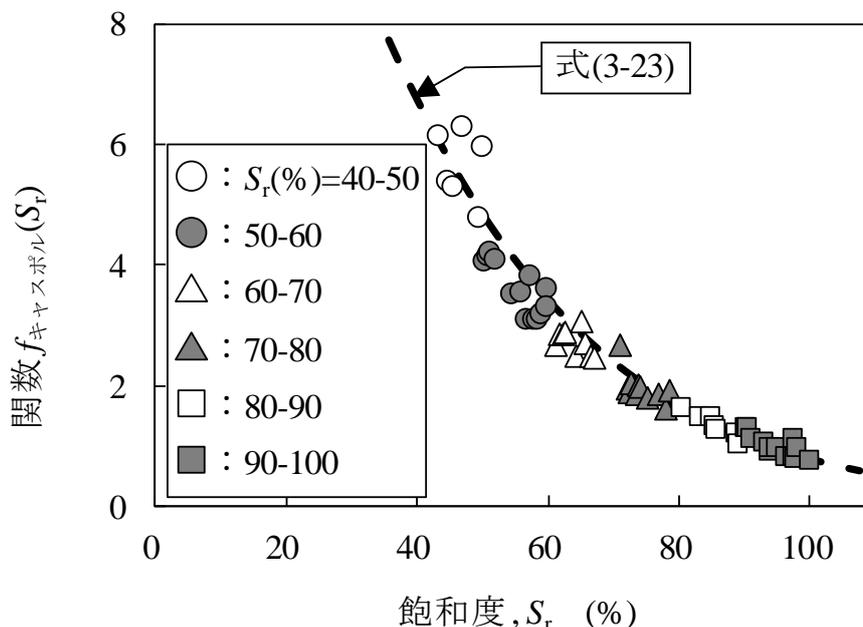


図 3-16 関数 $f_{\text{キャスポル}}(S_r) \sim$ 飽和度 S_r 関係

3-4-4 CCV システムによる品質指標の推定式

飽和度 S_r と乾燥密度 ρ_d を二つのパラメータとし、それぞれが変数分離の形で表せられるものとして、式(3-25)に示す関係式を構築することにした。

$$CCV = f_{ccv}(S_r) \times (\rho_d / \rho_w - b)^c \quad (3-25)$$

図 3-17 に、転圧試験で得られた CCV 値～乾燥密度 ρ_d 関係の全データを示す。全データを飽和度 S_r で 10%ごとに分類し、それぞれを別の記号でプロットした。図 3-17 をみると、それぞれの分類した飽和度 S_r において CCV 値は乾燥密度 ρ_d の増加に伴って一貫して増加している。この傾向を表現する関係式として、式(3-25)の形式を設定する。この式のうち、関数 $f_{ccv}(S_r)$ 、定数 b 、 c は実験的に求められるパラメータである。これらのパラメータは以下のような手続きで決定した。

まず、飽和度 S_r の範囲として 10%毎にデータを分類し、関数 $f_{ccv}(S_r)$ の変化が少ないと思われるそれぞれの範囲の飽和度 S_r のデータごとに最適な定数 b 、 c の組み合わせを求めた。これらの定数 b 、 c に対してそれぞれのパラメータごとに各飽和度範囲での値の算術平均をもって仮の定数 b 、 c を決め、それらを用いて個々のデータの関数 $f_{ccv}(S_r)$ 飽和度 S_r の関係を求めた。その結果を図 3-18 に示すが、データを見ると、飽和度 S_r の値によるプロットの平均的関係からの偏りは見られないことから、この関係を定式化したのが、式(3-26)である。さらに、式(3-25)に式(3-26)を代入し、式(3-27)を得た。

式(3-27)において、従属変数 CCV 値の独立変数は乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r であり、この関係は転圧回数 N や締固めエネルギー CEL には寄らない関係である。式(3-27)は乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r から CCV 値を決定する式の形となっているが、三つの変数のうち二つの変数の値がわかれば他の変数の値を決定できるので、例えば、 CCV 値と飽和度 S_r から乾燥密度 ρ_d を推定することも可能である。また、飽和度 S_r は式(3-18)のように表せるため、 CCV 値と含水比 w から飽和度 S_r と乾燥密度 ρ_d を推定することも可能な式であるといえる。

このように、式(3-27)を用いることで、施工後に測定した CCV 値と含水比 w から乾燥密度 ρ_d や飽和度 S_r を推定可能である。 CCV システムは、施工中にリアルタイムかつ面的な測定が可能であるため、砂置換や現場 CBR 試験、小型 FWD 試験、キャスポル試験と比較すると施工の効率を大幅に向上することができる。

$$f_{CCV}(S_r) = \frac{560}{\{1 + \exp(0.075S_r)\}} \quad (3-26)$$

$$CCV = \left[\frac{560}{\{1 + \exp(0.075S_r)\}} \right] (\rho_d / \rho_w - 0.87)^{15.0} \quad (3-27)$$

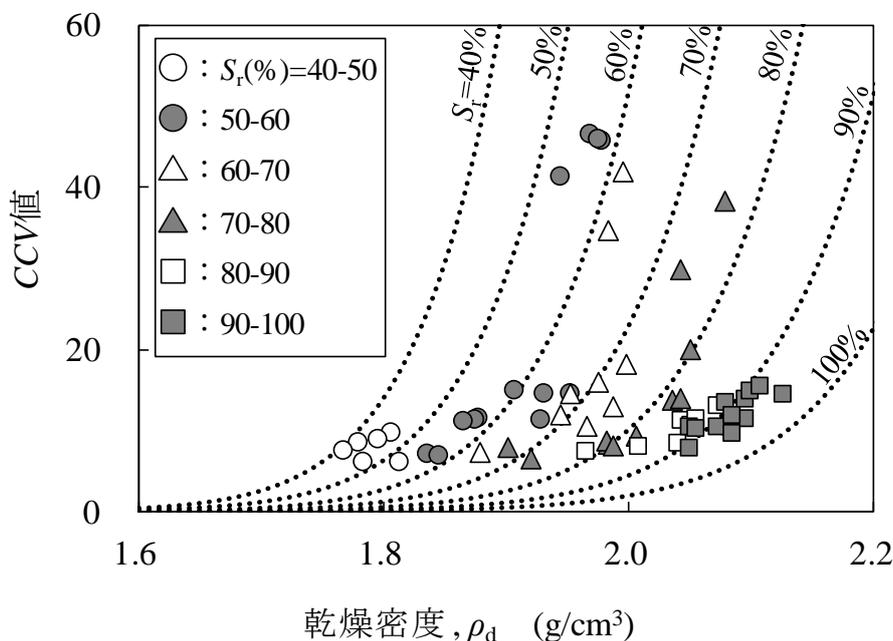


図 3-17 CCV 値と乾燥密度の関係

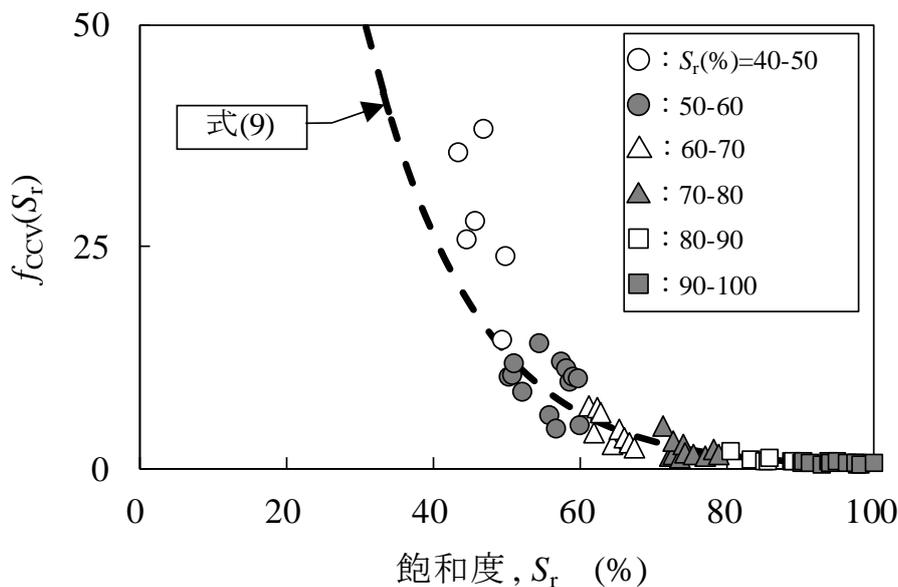


図 3-18 関数 $f_{ccv}(S_r) \sim$ 飽和度 S_r 関係

3-4-5 CBR 値, $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{キャスボル}$ による CCV 値の推定精度

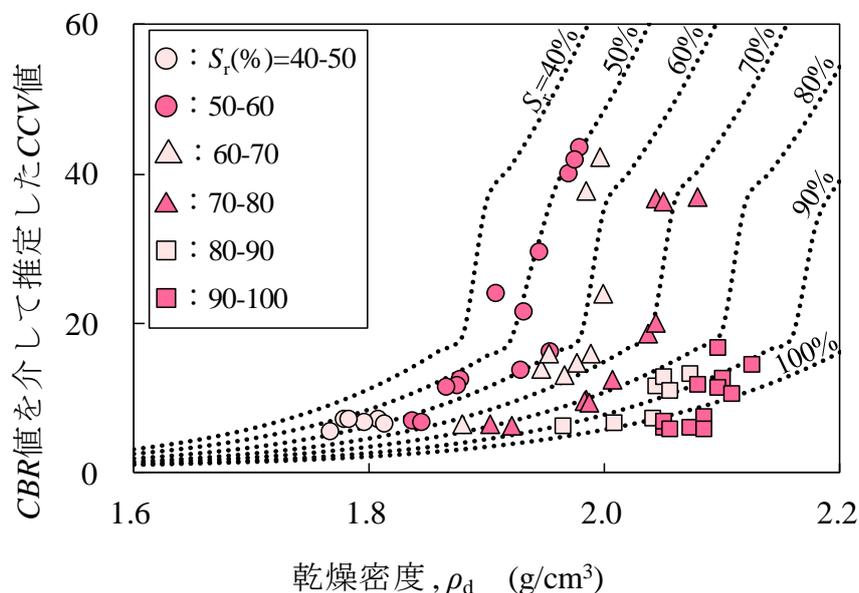
図 3-9 に示したように, CCV 値と CBR 値, $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{キャスボル}$ は, 多少のばらつきはあるものの, 非線形ではあるが正の相関関係を示しており, 式(3-4)~式(3-12)のような近似式が成立する. これより, これらの近似式を用いて, CBR 値, $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{キャスボル}$ を介して CCV 値と乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の関係式を構築することを試みた.

ここで, 実測の CBR 値, $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{キャスボル}$ をそれぞれ図 3-9 に示した式(3-4)~式(3-6), 式(3-7)~式(3-9), 式(3-10)~式(3-12)に代入して CCV 値を求め, 実測の乾燥密度 ρ_d に対して実測の飽和度 S_r をパラメータとしてプロットしたのが図 3-19 である. また, それぞれの飽和度 S_r の値における点線の関係は, 所定の乾燥密度 ρ_d の値とその飽和度 S_r の値をそれぞれ式(3-17), 式(3-21), 式(3-24)に代入して CBR 値, $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{キャスボル}$ を求め, それらを式(3-4)~式(3-6), 式(3-7)~式(3-9), 式(3-10)~式(3-12)にそれぞれ代入して CCV 値を求めて乾燥密度 ρ_d との関係を得たものである. この結果を見ると, いずれも近似線(点線)は, ややいびつな形をしているほか, プロット点で示した CCV 値の推定値との間にやや乖離があることがわかる.

図 3-20 に, 乾燥密度 ρ_d , 飽和度 S_r の実測値を式(3-17), 式(3-21), 式(3-24), 式(3-27)に代入して CBR 値, $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{キャスボル}$, CCV 値の推定値を算出し, CBR 値, $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{キャスボル}$ に関しては前述の式(3-4)~式(3-12)に代入して CCV 値を間接的に推定し, それらと CCV 値の実測値を比較した結果を示す. それぞれのグラフには, 相関係数 R^2 を示すが, 図 3-20 (d) からわかるように, 式(3-27)を用いて乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の実測値から直接的に CCV 値を推定した時に最も推定精度が高いことが確認された. ただし, CCV 値の実測値が 30 以上

の範囲における推定精度が低いことがわかる。これは、図3-17、図3-18に示すように、 CCV 値が高い範囲(すなわち飽和度 S_r が低い範囲)における関係式の測定精度が低いためである。次に、 CCV 値以外の地盤剛性指標を介して推定した CCV 値の結果をみると、 CCV 値の実測値が 20~40 の範囲における推定精度が低いことがわかる。これは、図3-9からわかるように、 CCV 値が 20 から 40 になる範囲では、 CBR 値、 $(K_{30})_{FWD}$ 、 $(K_{30})_{キャスボル}$ の変化に対して CCV 値の変化が大きいためである。

以上より、 CCV 値を乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r から精度良く推定するためには、乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r を変数とした CBR 値、 $(K_{30})_{FWD}$ 、 $(K_{30})_{キャスボル}$ の関係式(3-17)、式(3-21)、式(3-24)と近似式(3-4)~式(3-12)を介して推定するのではなく、 CCV 値を乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r を変数とした関係式(3-27)を用いて直接的に推定したほうが良いことがわかる。



(a) CBR 値を介して推定した CCV 値

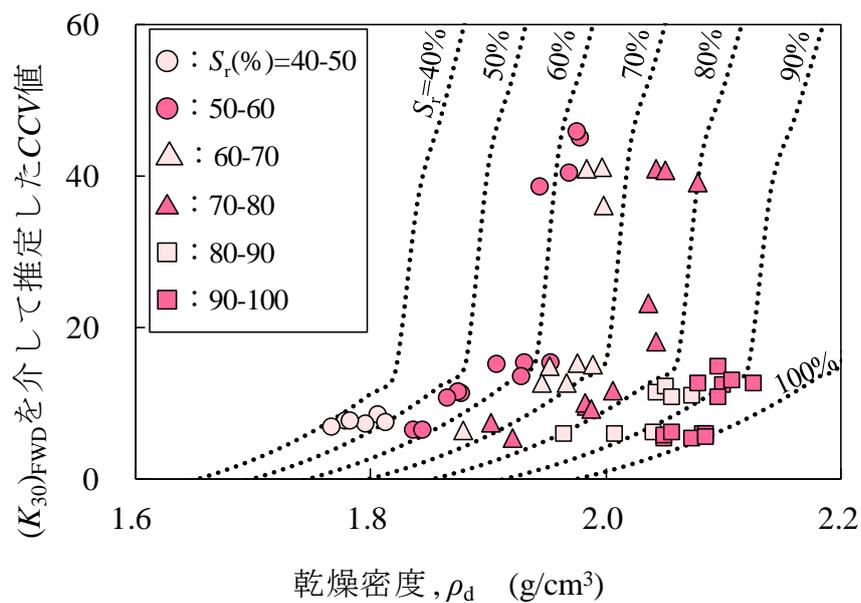
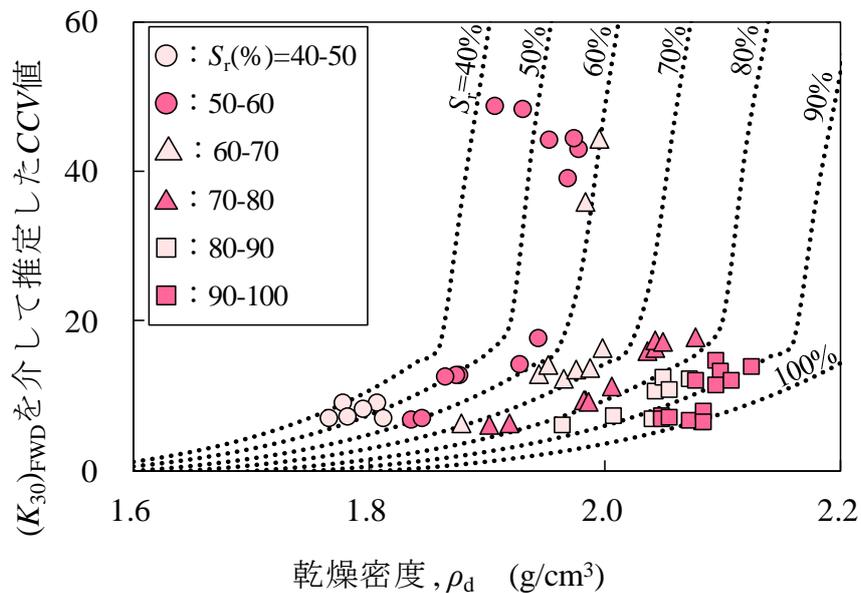
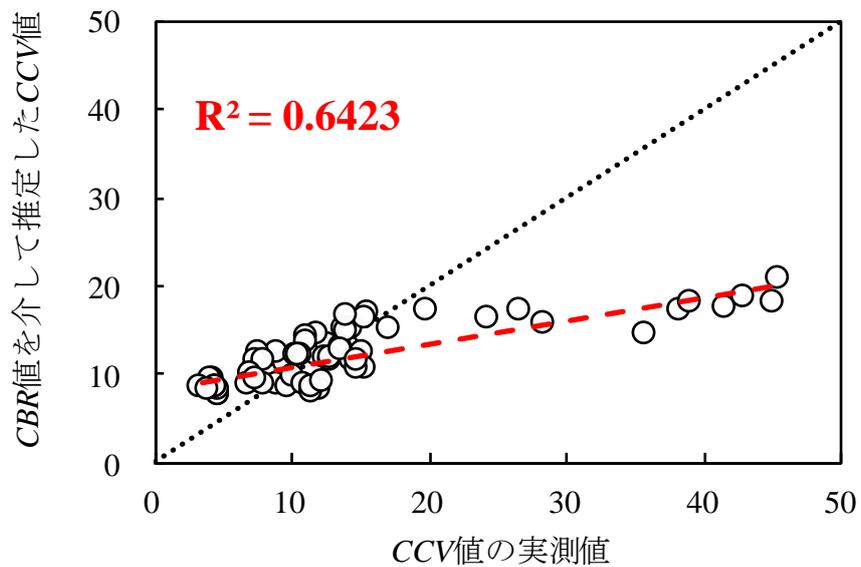
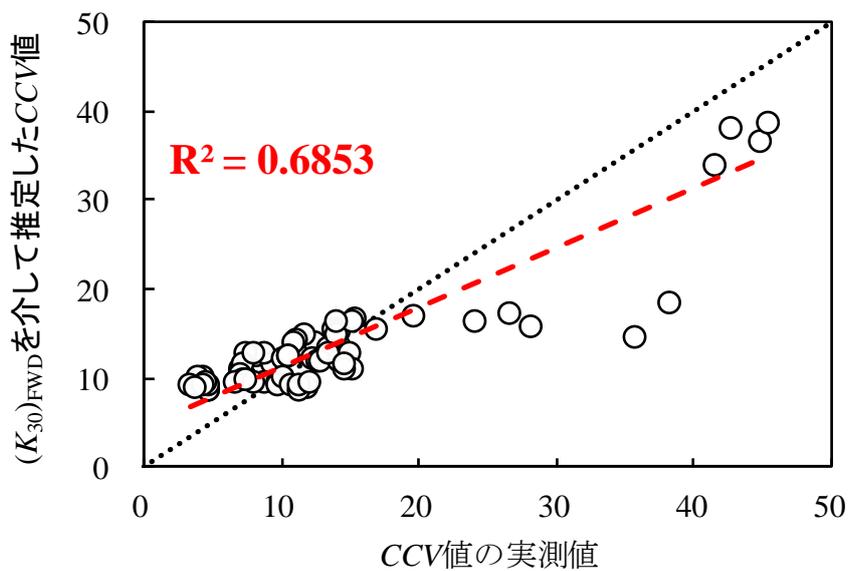


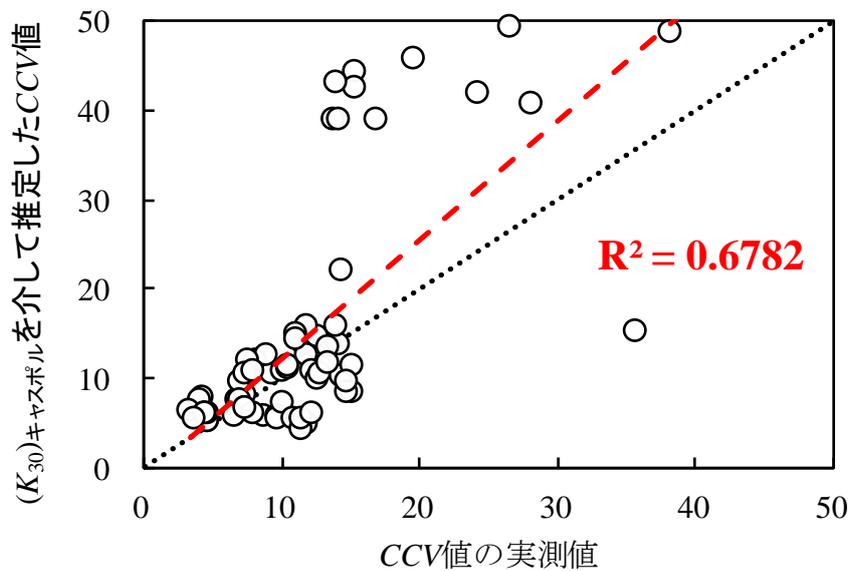
図 3-19 CBR 値, $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{キャスボル}$ を介して推定した CCV 値と乾燥密度 ρ_d の関係



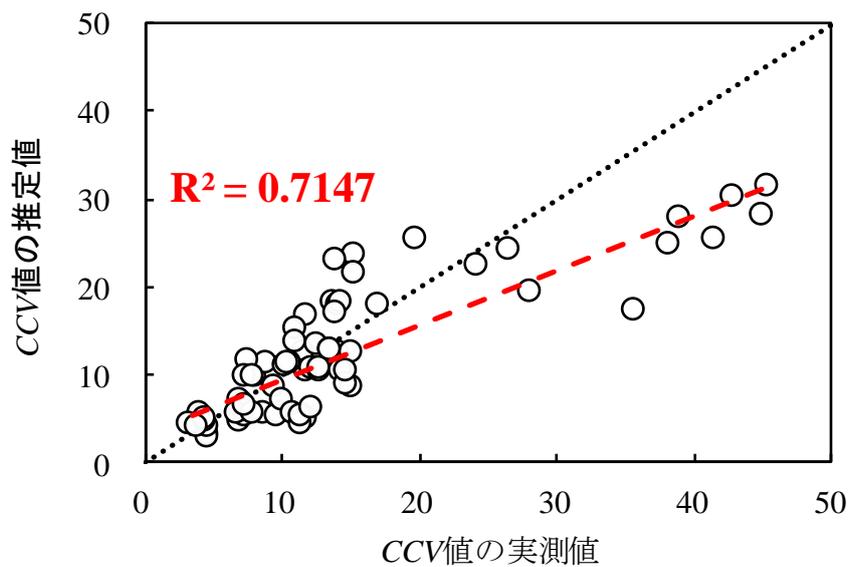
(a) CBR 値を介して推定した CCV 値



(b) $(K_{30})_{FWD}$ を介して推定した CCV 値



(c) $(K_{30})_{\text{キャスボル}}$ を介して推定した CCV 値



(d) CCV 値の実測値と推定値

図 3-20 地盤剛性指標を介して推定した CCV 値と実測値との関係

3-5 地盤剛性指標を活用した締固め管理

図3-21に示すように、従来の締固め度 D_c の許容下限値と盛土材の含水比 w の上下限值による管理に加え、締固め盛土の「最適飽和度 S_{ropt} を挟んだ一定の範囲での飽和度 S_r を実現する飽和度管理」が提案されている^{(6), (7), (8), (9), (10)}。締固め管理に飽和度 S_r を重視する理由は、土構造物の設計で参照する変形・強度特性と透水係数、浸水沈下量などの基本的な物性は、土質と乾燥密度 ρ_d （あるいは締固め度 $(D_c)_{IEc}$ ）に加えて締固め時の飽和度 S_r の関数であることがわかったからである。また、これらの物性は浸水・湿潤によって変化する。特に、締固め時の飽和度 S_r が最適飽和度 S_{ropt} よりも低いほど、同一の締固めエネルギー CEL に対して乾燥密度 ρ_d は低下するが、締固め土の地盤剛性は高くなる傾向を示し、湿潤化・飽和化によって大きく低下する。このため、締固め時の飽和度 S_r の下限値制限が必要となる。また、飽和度 S_r が大きくなり過ぎるときには、オーバークompactionを起こしやすくなることと、飽和度 S_r が最適飽和度 S_{ropt} となる締固め状態の実現を目指すために、飽和度 S_r の上制限も必要となる。

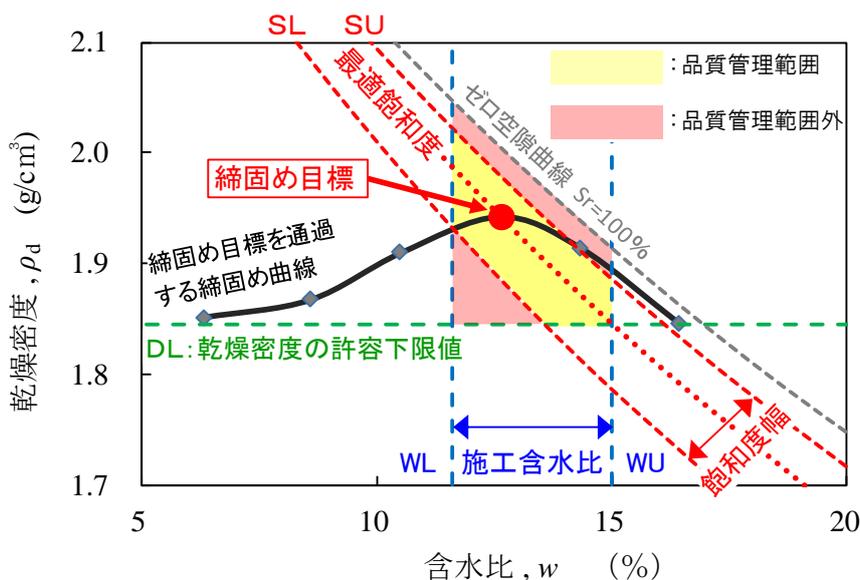
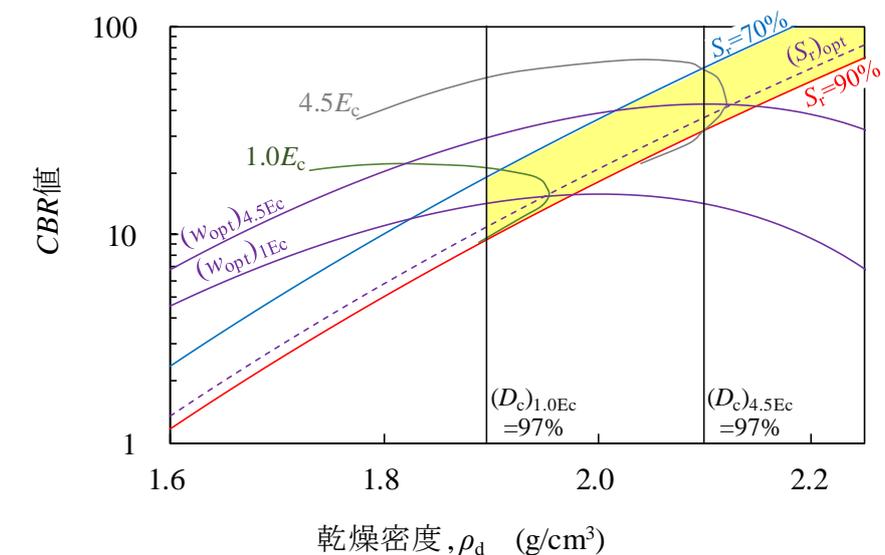


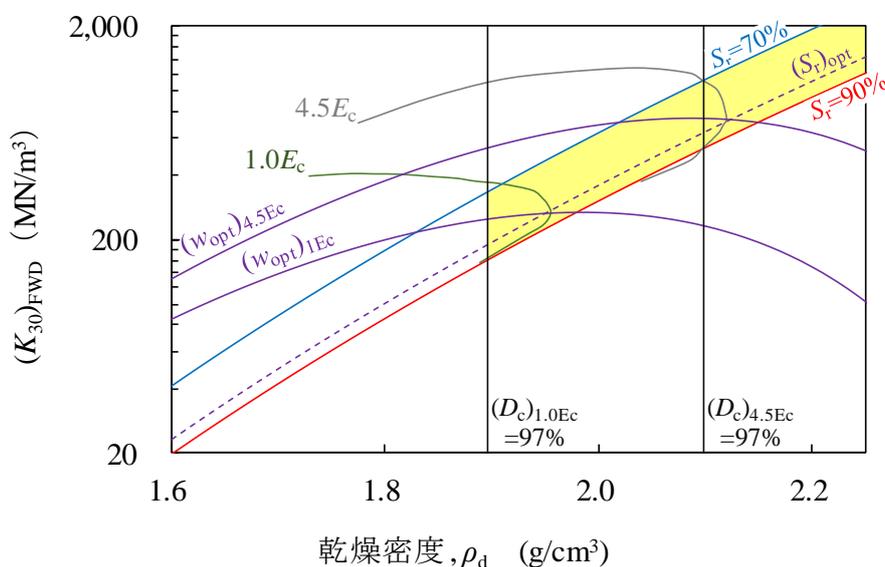
図 3-21 飽和度 S_r を重視した盛土の締固め管理図^{(6), (7), (8), (9), (10)}

これまでに求めた地盤剛性指標（ CBR 値、 $(K_{30})_{FWD}$ 、 $(K_{30})_{キャスボル}$ 、 CCV 値）と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係から、図3-22に示すように、乾燥密度 ρ_d と対数で表記した地盤剛性指標を軸にとると、上記の飽和度管理に基づいて、地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d の取りうる範囲をそれぞれ図示することができる。式(3-18)、式(3-22)、式(3-25)、式(3-28)からもわかるように、関数 $f_{CBR}(S_r)$ 、 $f_{FWD}(S_r)$ 、 $f_{キャスボル}(S_r)$ 、 $f_{CCV}(S_r)$ は飽和度 S_r が増加するとともに低下するため、図3-22では飽和度 S_r が大きいほど相対的に地盤剛性指標が小さくなっている。図3-22に、含水比 w の一定線を書き込むと、上に凸な曲線として示すことができる。また、含水比 w が小さい方が、同一の乾燥密度 ρ_d で比較すると大きな地盤剛性指標を示すことになる。図3-22に示すように、飽和度 S_r の一定線は正の傾きを持った線であるので、締固めをある一定の飽和度 S_r の範囲に収め

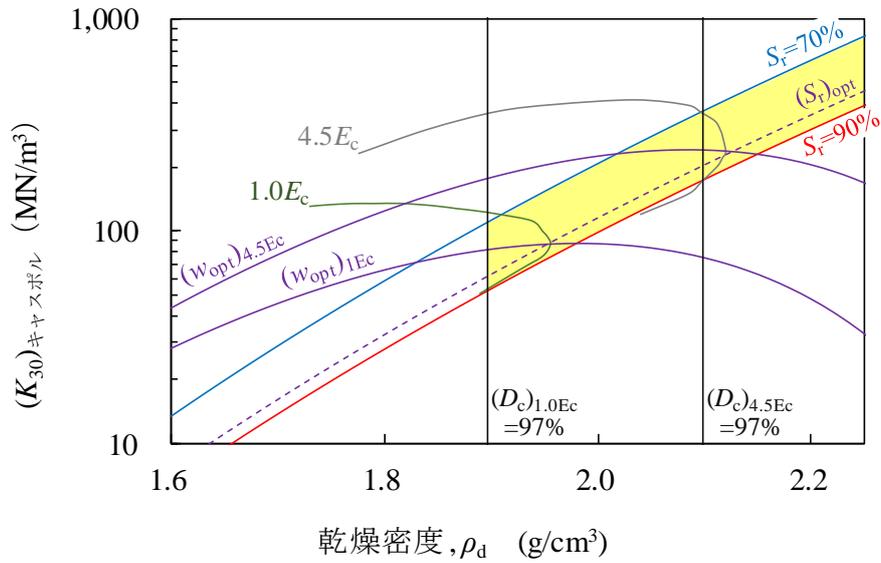
ようとする、自動的に含水比 w が小さいほうが大きな乾燥密度 ρ_d を得ることになる。図 3-22 にも示してあるように、最適含水比 w_{opt} は締固めエネルギー CEL が大きいほうが小さくなるため、低い含水比 w で目標とする飽和度 S_r の範囲に収めるためには、より高い締固めエネルギー CEL で締固めることが必要となる。



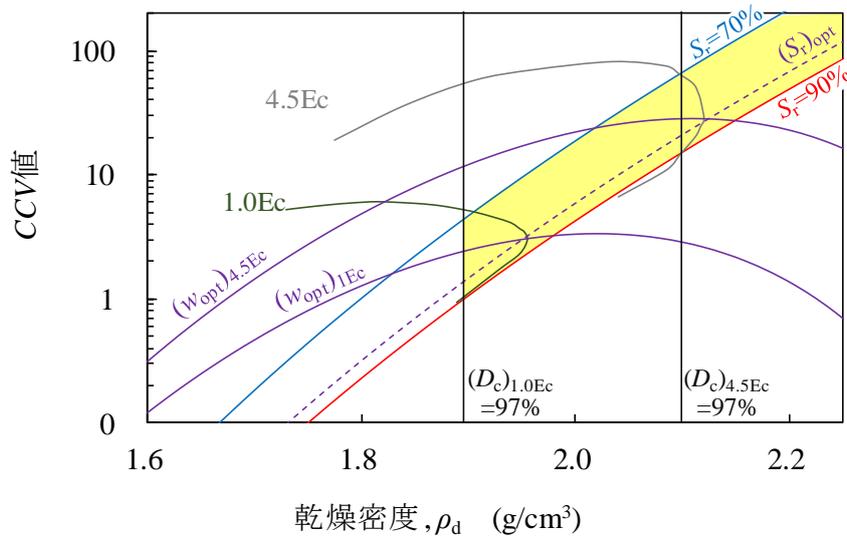
(a) CBR 値



(b) $(K_{30})_{FWD}$



(c) $(K_{30})_{\text{キャスボル}}$



(d) CCV値

図3-22 乾燥密度 ρ_d と地盤剛性指標による締固め管理図

次に、乾燥密度 ρ_d の算定方法について、ここでは CCV 値を参考に説明する。 CBR 値、 $(K_{30})_{\text{FWD}}$ 、 $(K_{30})_{\text{キャスボル}}$ も同様の手順により乾燥密度 ρ_d を算定する。

式(3-27)に基づいて含水比 w と乾燥密度 ρ_d の空間に CCV 値の等値線を書くと図 3-23 のようになる。すでに述べてきているように、 CCV 値だけからでは乾燥密度 ρ_d を推定できないこと、また乾燥側では乾燥密度 ρ_d が小さくても大きな地盤剛性指標が得られることがわかる。そのため、すでに述べてきているように含水比 w をあらかじめ調べたうえで施工することが要求される。

実務においては、予め含水比 w を調整した上で転圧がなされることが一般的である。図 3-23 に示す、含水比 $w=11\%$ の場合を例とすると、含水比一定の下で締固めていく過程においては、転圧回数 N を増やしていくということは図中の B 点から A 点を通って C 点に向かっていくということになる。その際、単に、含水比 $w=11\%$ で CCV 値=10.0 という測定データを取得しただけとすると、二点、B 点と C 点の二つの乾燥密度 ρ_d の点が候補となることになる。しかし、この時、転圧回数 N ごとの地盤剛性指標の変化の様子を把握していれば、B 点に至るときには、転圧回数 N ごとに地盤剛性指標が増加する傾向にある段階であることがわかる。一方で、C 点に至る場合には、A 点で極大値を示した後に転圧回数 N ごとに CCV 値が減少傾向にあることになる。このように、地盤剛性指標の変化の時系列も考慮に入れることで、同じ地盤剛性指標を持つ二つの乾燥密度 ρ_d のどちらの条件にあるかがわかるようになる。また、含水比 w が 11% の時の CCV 値の極大値は A 点（すなわち CCV 値=12）であることがわかる。

このように、 CCV 値と含水比 w から乾燥密度 ρ_d を推定するような施工管理を行う場合には、予め転圧試験を実施して、 CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を求めておき、実際に施工する際には、含水比 w を把握した上で転圧し、 CCV 値と CCV 値の転圧回数 N ごとの変化を考慮に入れることで、リアルタイムかつ面的に飽和度 S_r と乾燥密度 ρ_d を管理した施工が実施できるようになる。

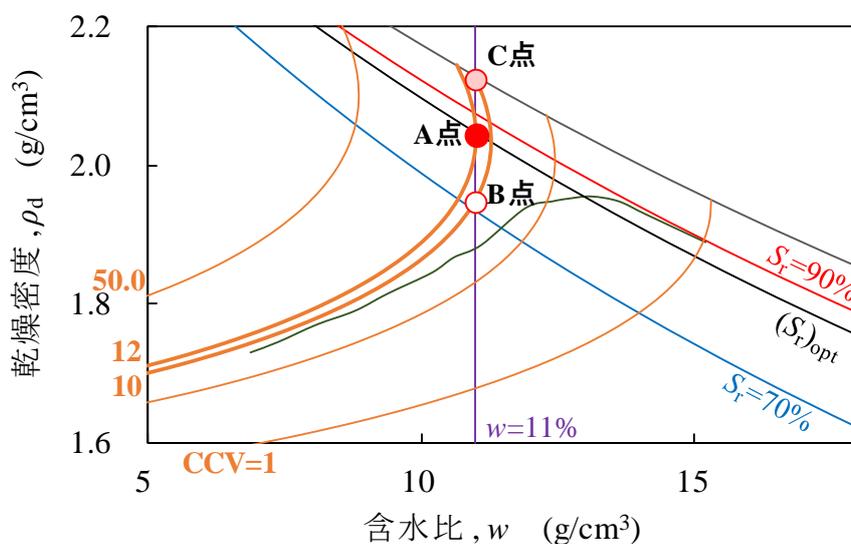


図 3-23 CCV 値と転圧回数管理による乾燥密度 ρ_d の推定

第3章のまとめ

本章においては、盛土締固め管理における品質評価の即時性の確保に着目し、地盤剛性指標による乾燥密度、飽和度の推定式の検討を行うとともに、推定式を用いた具体的な締固め管理手法について考察した。本章での検討結果を以下に示す。

① 地盤剛性指標による乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の推定式

模型盛土における実大締固め試験の結果から、いずれの地盤剛性指標も、転圧回数 N を変数として含まない乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r を独立変数とする関係式で表現できた。これらの経験式に基づくと、転圧回数 N に関わらず、含水比 w と測定された地盤剛性指標から、乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r を求めることができる。

② 地盤剛性指標同士の相関性

CCV システムと現場 CBR 試験、小型 FWD 試験、キャスポル試験の各試験から求められる地盤剛性指標の変化挙動は、含水比 w や転圧回数 N に対して異なる面があるが、締固め条件によらずほぼ一対一の関係があることがわかった。このことは、CCV 値によってその他の地盤剛性指標を面的にリアルタイムで収集が可能であること意味している。

③ CBR 値、 $(K_{30})_{\text{FWD}}$ 、 $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ による CCV 値の推定

CBR 値、 $(K_{30})_{\text{FWD}}$ 、 $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ と乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の関係式が導かれており、いずれも CCV 値と正の相関を示すことから、CBR 値、 $(K_{30})_{\text{FWD}}$ 、 $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ を介して CCV 値と乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の関係式が導くことができるが、いずれも CCV 値、乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の測定値を直接用いて相関式を求める方がよいという結果が得られた。また、所定の含水比 w と CCV 値から関係式によって推定される乾燥密度 ρ_d と実測の乾燥密度 ρ_d の間の推定誤差は十分に小さくすることが可能である。

④ 推定式を用いた地盤剛性指標の上下限值による締固め管理手法

地盤剛性指標（CBR 値、 $(K_{30})_{\text{FWD}}$ 、 $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ 、CCV 値）と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係から、乾燥密度 ρ_d と対数で表示した地盤剛性指標を軸にとると、飽和度管理に基づいて、地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d の取りうる範囲をそれぞれ図示することができる。これにより、目標とする地盤剛性指標を目指した施工を行うことで、締固め度 D_c 、飽和度 S_r 、含水比 w により規定された品質管理を行うことができる。

また、地盤剛性指標を用いた締固め管理において、一つの地盤剛性指標と含水比 w より二つの乾燥密度 ρ_d が推定されることがあるため、転圧回数 N ごとの地盤剛性指標の変化方向も考慮することで乾燥密度 ρ_d を正しく評価することができる。

以上のことから、地盤剛性指標（CBR 値、 $(K_{30})_{\text{FWD}}$ 、 $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ 、CCV 値）は、いずれも乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r を推定することが可能であるため、地盤剛性指標による締固め管理の

有効性を確認した。さらに、現場 CBR 試験、小型 FWD 試験、キャスポル試験は、いずれも施工後の点情報としてデータを取得するのに対して、CCV システムは施工中にリアルタイムかつ面的にデータを取得できるため、本研究の目的の一つである施工の合理化に最も適しているといえる。

第3章の参考文献

- 1) 公益社団法人地盤工学会：現場 CBR 試験，辞意版調査の方法と解説—二分冊の 2—，pp.723～731，2013.
- 2) 近畿地方整備局近畿技術事務所：簡易支持力測定器（キャスポル）利用手引き，pp.5-6，2005.
- 3) 東京測器株式会社：FWD-Light による小型 FWD 試験方法（地盤編），pp.21-22.
- 4) 横田聖哉，吉田武男，藤井弘章，内山恵一：振動ローラ加速度を利用した締固め管理の検討—大規模土工における情報化施工に関する研究(3)—，第37回地盤工学研究発表会，pp.664-665，2002.
- 5) 公益社団法人地盤工学会：突固めによる土の締固め試験方法，地盤材料試験の方法と解説—二分冊の 1—，pp.373～383，2009.
- 6) 龍岡文夫ら：地盤工学・技術ノート，盛土の締固め 1～20 回，雑誌「基礎工」，2013 年 7 月号～2015 年 2 月号.
- 7) Tatsuoka, F. : Compaction characteristics and physical properties of controlled the degree of saturation, Keynote Lecture, Proc. of 15th Pan-American Conf. on SMGE and 6th Int. Conf. on Deformation Characteristics of Geomaterials, Buenos Aires, pp.40-76, 2015.
- 8) 龍岡文夫: 土の締固めにおける飽和度管理の重要性，雑誌ダム技術，No. 354, pp. 3-16, 2012.
- 9) 龍岡文夫: 飽和度と剛性に管理に基づく盛土締固めの合理化について，地盤工学会誌，11, 12 月号, 67-11/112 (742/743), pp.30-33, 2019.
- 10) Nagai, H., Nishio, T., Sandambata, I., Makabe, J., Kogusuri, H., Tatsuoka, F., Kikuchi, Y., and Hyodo, T. : Effects of the degree of saturation on the stiffness and dry density relation of compacted soil, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019.

第4章 粒度特性が盛土の品質に与える影響を考慮した盛土の高品質化

第3章では、最大粒径 $D_{\max}=9.5\text{mm}$ の砂質土を対象に実施した転圧試験の結果より、地盤剛性指標と盛土の品質指標である乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r との間には関係式が成立することが明らかにした。本章では、実工事に用いられる最大粒径 $D_{\max}=75.0\text{mm}$ の大粒径を含む砂礫土を対象とした転圧試験を実施し、リアルタイムかつ面的に地盤剛性指標を計測可能な CCV システムによる乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の推定式を構築するとともに、実工事の締固め管理への適用性について検証した。

一方、上記の関係式により CCV 値から推定された乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r は、いずれも大粒径粒子を含む現場全粒度試料の品質情報であるため、小粒径粒子を対象とした室内粒度試料を用いた室内締固め試験により得られる最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ を基準として締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を評価した場合、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を過大評価する可能性がある。そこで、現場全粒度試料と室内粒度試料による最大粒径の違いによる特性が品質評価に与える影響を明らかにし、Walker-Holtz による礫率補正式と最大乾燥密度比 X を組合せることによる礫率補正の高度化について検討した。

4-1 概要

土の乾燥密度 ρ_d や飽和度 S_r は、盛土の品質管理において最も主要な指標であり、いずれも転圧施工後に代表箇所で行う砂置換法や RI 試験により計測されてきた。そのため、品質不良や過転圧による再施工の実施や測定箇所以外の品質不良の見逃しなど様々なリスクの発生が予想されてきた。

これに対し、第3章で示した地盤剛性指標を用いた締固めた土の乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の推定手法は、従来の品質試験法に比べて即時性を有しており、特に CCV 値は施工中にリアルタイムに品質評価が可能であるため、前述したリスクの発生を防止することが期待される。

しかし、第3章での検討内容は、最大粒径 $D_{\max}=9.5\text{mm}$ の小粒径材料を含む盛土材料（以下、室内粒度試料）を対象としたものであり、実際の現場施工では、室内試験では取り扱うことが困難な大粒径粒子を含む現地発生土を使用することがほとんどである。そのため、第3章で示した地盤剛性指標による締固め管理手法の実工事への適用性を検討するためには、大粒径粒子を含む現場全粒度に相当する盛土材を対象とした転圧試験を行う必要がある。

本章では、最大粒径 $D_{\max}=75\text{mm}$ の大粒径粒子を含む盛土材料（以下、現場全粒度試料）を用いて実大締固め機械による転圧試験を実施し、地盤剛性指標による締固め管理手法の実工事へ

の適用性について検討した。

一方、現場全粒度試料を用いた実工事では、施工後に密度試験を実施し、室内粒度試料を対象とした室内締固め試験で得られた最大乾燥密度 ρ_{dmax} を用いて締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を評価する。しかし、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を正しく評価するためには、現場全粒度試料を用いた締固め曲線の最大乾燥密度 ρ_{dmax} を用いることが適切である。しかし、現場全粒度試料の締固め特性を求めるためには、多大な費用や労力を必要とする大型締固め試験が必要となる。そのため、第2章で示したように、Walker-Holtz の礫率補正式（以下、WH 式）により、室内粒度試料を対象とした室内試験の結果から現場全粒度試料に相当する乾燥密度 ρ_d や含水比 w を推定する必要がある。ただし、礫率補正式は、その特性上、礫率 P が大きくなるほど乾燥密度 ρ_d を過大評価し、その逆もまた然りである。

そこで、本研究では、最大粒径 D_{max} を変化させた多種の室内締固め試験を実施し、任意の最大粒径 D_{max} に対して WH 式を用いて推定した最大乾燥密度 $[(\rho_d)_{max}]_{WH}$ と実測の最大乾燥密度 $(\rho_d)_{max}$ の比である最大乾燥密度比 X と礫率 P との関係を調べ、その一般性を検証した。

4-2 大粒径の盛土材料を対象とした現場転圧試験による推定式の検証

最大粒径 $D_{\max}=75.0\text{mm}$ の大粒径粒子を含む砂礫材を現場全粒度試料とした転圧試験を実施し、多種の品質試験データを取得および解析を行い、 CCV 値による乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を構築するとともに、関係式を用いた締固め管理手法について検討した。

4-2-1 実験条件

転圧試験に用いた現場全粒度試料は、最大粒径 $D_{\max}=75.0\text{mm}$ の細粒分混じり礫質砂である。現場全粒度試料の写真を図 4-1 に、物性値を表 4-1 に示す。図 4-2 には、現場全粒度試料と、現場全粒度試料を粒度調整し、剪頭粒度法により最大粒径 $D_{\max}=37.5\text{mm}$ 、 9.50mm に作製したそれぞれの試料の粒度分布を示す。

盛土の締固め管理基準値を設定することを目的とし、室内締固め試験 (JIS A 1210) ¹⁾、圧密排水三軸圧縮試験 (JGS 0524-2009) を実施した。室内締固め試験は、図 4-1 に示す最大粒径 $D_{\max}=37.5\text{mm}$ の剪頭粒度の試料を用いて、B-c 法 (標準プロクター: $1.0E_c$) にて実施した。

圧密排水三軸圧縮試験 (以下、CD 試験) ²⁾ は、供試体寸法 $\Phi 5\text{cm}\times\text{H}10\text{cm}$ とし、図 4-1 に示す最大粒径 $D_{\max}=9.5\text{mm}$ の試料を用いて実施した。CD 試験は土の内部摩擦角 ϕ_d を求めるために実施した。

転圧試験ヤードおよび品質試験位置図を図 4-3 に示す。転圧試験ヤードの寸法は、長さ 20m 、幅 6m 、高さ 60cm とした。1 層当りの撒き出し厚は 30cm とし、計 2 層で造成した。1 層目は、予備層として平均含水比 $w_n=11\%$ の盛土材を 11t 級の振動ローラを用いて 8 回転圧により構築した。2 層目は、試験層として平均含水比 w_n を 11% にして 16 回転圧により構築した。なお、平均含水比 w_n は、ダンプトラックから運搬されてきた土砂が施工ヤードに荷下ろしされた際に、土塊のうち代表的な個所の土を採取し、電子レンジ法 ³⁾ により計測した含水比 w の平均値である。2 層目の転圧中は転圧ヤードの全面を対象に振動ローラの加速度応答値による CCV 値の測定を実施し、転圧回数 $N=2, 4, 6, 8, 16$ 回の施工後に図 4-3 に示す測点 1 ~ 測点 6 でレベル測量による沈下量測定、RI 試験 ⁴⁾ による上層 20cm の密度測定を行った。

ここで、 CCV 値 ⁵⁾ の測定頻度について説明する。図 4-3 のうち、転圧試験ヤード表面を 50cm メッシュで分割している。 CCV 値のサンプリングピッチは 5 回/秒であり、 50cm のメッシュ範囲の移動平均値により CCV 値が算出される。図 4-3 に示す各測点の RI 試験の計測位置に対応する 50cm メッシュの CCV 値を抽出することが理想であるが、 CCV 値は地盤中に礫などの硬質な材料が混在している場合に特異値を発生させる傾向がみられるため、RI 試験の測定位置に対応する 50cm メッシュの CCV 値を直接抽出するのではなく、青枠で囲った 2m メッシュ ($50\text{cm}\times 16$ 個) の平均値として抽出することにした。



図 4-1 現場全粒度試料写真

表 4-1 盛土材の物性値

土粒子密度 (g/cm^3)		2.778
最大粒径 (mm)		75.0
細粒分含有率 (%)		10.1
均等係数		334
曲率係数		16.2
分類名		細粒分混じり礫質砂
分類記号		G-FS
液性限界	w_L (%)	29.6
塑性限界	w_P (%)	19.7
塑性指数	I_P	9.9
最大粒径 $D_{\max}=37.5$ mm での試験結果		
標準プロクター試験の最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ (g/cm^3)		1.897
標準プロクター試験の最適含水比 w_{opt} (%)		14.8
最適飽和度 S_{ropt} (%)		88.5

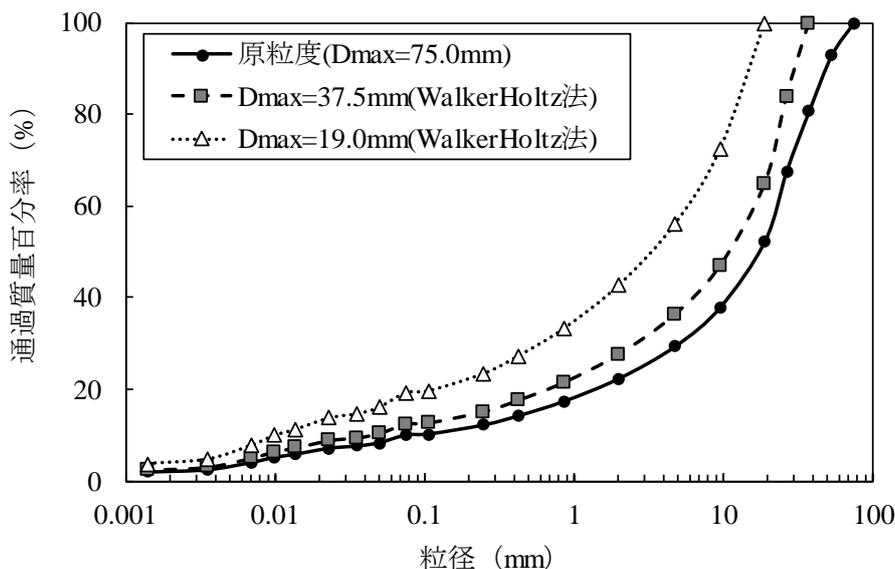


図 4-2 粒度試験

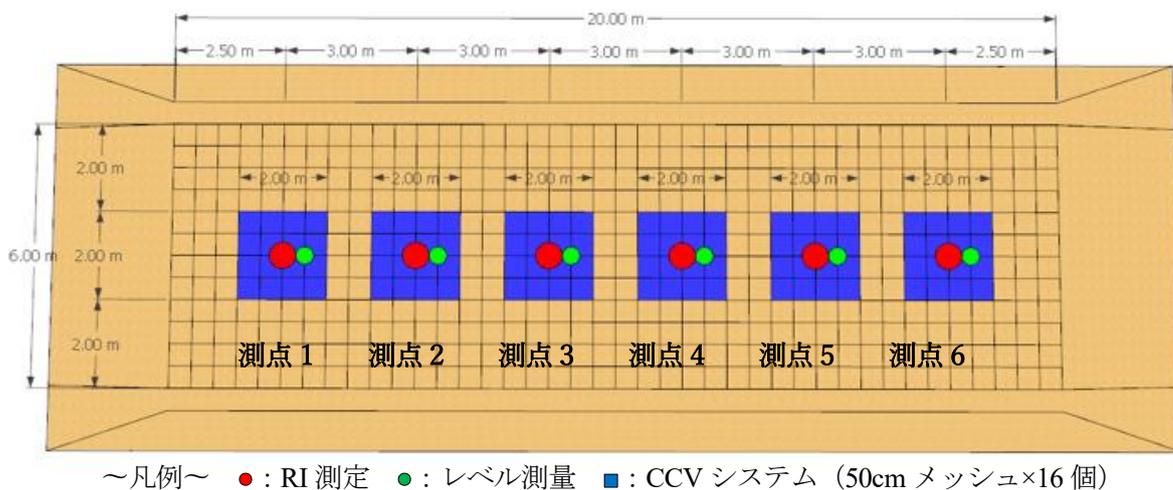


図 4-3 転圧試験ヤードと品質試験エリア

4-2-2 実験結果および考察

(1) 室内試験

図 4-2 に示す最大粒径 $D_{max}=37.5\text{mm}$ の剪頭粒度の試料を用いた室内締固め試験結果を図 4-4 に示す。図 4-4 に示す締固め曲線を WalkerHoltz 法⁶⁾により最大粒径 $D_{max}=9.5\text{mm}$ に碾率補正して求めたものを図 4-5 に示す。図 4-5 には、CD 試験の供試体条件も示している。CD 試験の供試体条件として、乾燥密度 ρ_d は図中の締固め曲線の最大乾燥密度 ρ_{dmax} に対して締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を 95% とし、含水比 w は図中の No.1~3 の位置とした。なお、CD 試験は内部摩擦角 ϕ_d を求めるために行ったものであり、盛土の要求性能である内部摩擦角 $\phi \geq 30^\circ$ を達成することを締固め管理の目標とした。

飽和度 S_r が一定の条件下において締固め度 $(D_c)_{IEc}$ (すなわち乾燥密度 ρ_d) が増加した場合、内部摩擦角 ϕ は一貫して増加する傾向を示す⁸⁾ ことから、No.1~3 の全試験条件で内部摩擦角 $\phi \geq 30^\circ$ を達成することができれば、締固め度 $(D_c)_{IEc} \geq 95\%$ かつ No.1~No.3 と同じ飽和度 S_r で包括された範囲はいずれも要求品質を満足することになる。

CD 試験は、No.1~3 の条件で作成した供試体を飽和化して実施した。表 4-2 に CD 試験の供試体条件と内部摩擦角 ϕ の実測値を示す。表 4-2 より、締固め度 $(D_c)_{IEc} \geq 95\%$ では、いずれの飽和度 S_r でも内部摩擦角 $\phi \geq 30^\circ$ であることを確認した。この結果に基づき、現場全粒度試料 (最大粒径 $D_{max}=75\text{mm}$) でも締固め度 $(D_c)_{IEc} \geq 95\%$ であればいずれの飽和度 S_r でも内部摩擦角 $\phi \geq 30^\circ$ であると判断した⁹⁾。

この結果を参考にして、図 4-6 に示すように要求品質を満足する乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r 、含水比 w の管理範囲 (図中の黄色のハッチング部) を設定した。

なお、目標とする最低乾燥密度 ρ_d は、現場全粒度試料 (最大粒径 $D_{max}=75\text{mm}$) の時の乾燥密度 ρ_d であり、この曲線は、図 4-4 に示す最大粒径 $D_{max}=37.5\text{mm}$ の締固め曲線を Walker-Holtz 法によって最大粒径 $D_{max}=75.0\text{mm}$ に礫率補正して求めたものである。

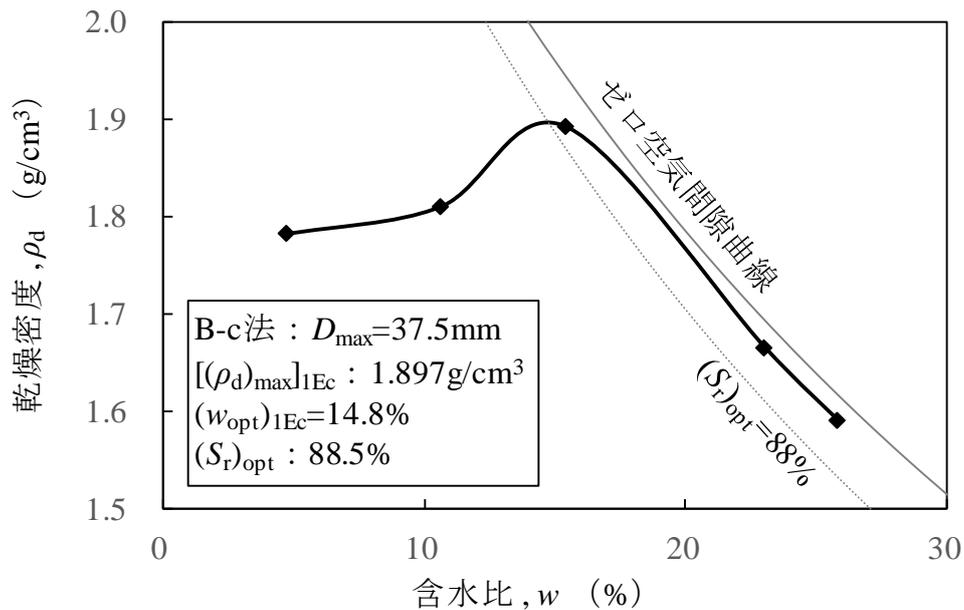


図 4-4 締固め試験

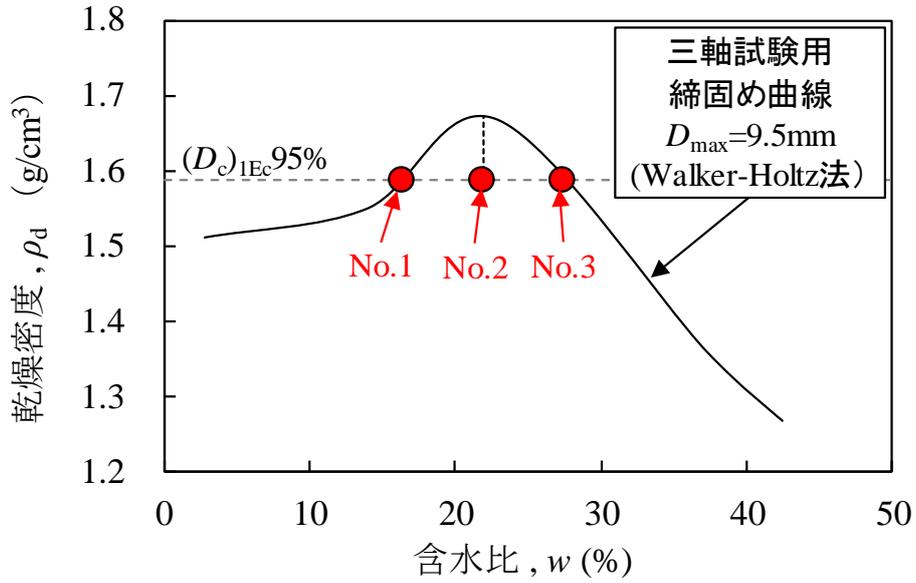


図 4-5 三軸試験実施時の密度と含水比の条件

表 4-2 排水三軸圧縮試験 (CD) の結果

供試体 番号	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)	内部摩擦角 ϕ (°)
No.1	1.573	15.7	58	32.3
No.2	1.568	21.0	72	36.6
No.3	1.554	27.6	95	34.6

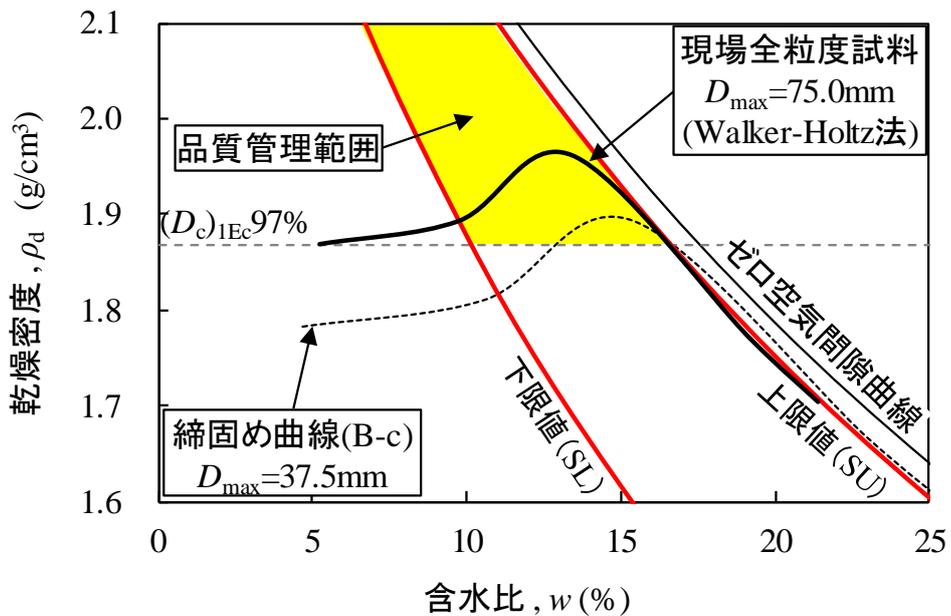


図 4-6 品質管理範囲

(2) 現場試験

図4-7~4-11に、いずれも図4-3に示した計6つの測点で計測した全データを示した。図4-7、図4-8、図4-9、図4-10に転圧試験により得られた湿潤密度 ρ_t 、含水比 w 、乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r と転圧回数 N の関係を示す。湿潤密度 ρ_t 、含水比 w はRI試験により直接的に得られる実測値であり、乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r はこれらの実測値より算出された値である。

図4-7、図4-8に、湿潤密度 ρ_t 、含水比 w と転圧回数 N との関係を示したものである。図に示すように、湿潤密度 ρ_t 、含水比 w は、測点によって値が異なっていることがわかる。特に、含水比 w は、最も低い測点1と最も高い測点2とで3~4%程度の差が生じている。また、同じ測点の結果をみても、転圧回数 N の増加に伴い値は若干変動していることがわかる。転圧試験における盛土材は、ストックヤードに塊として存在している盛土材を対象に数点の含水比 w を代表的に測定し、その平均値をその土の自然含水比 w_n とし、自然含水比 w_n が目標とする施工含水比 w の範囲内であることが確認できれば、転圧ヤードに盛土材が運搬される。このため、転圧ヤードに撒き出された盛土材は、場所によって若干のばらつきが生じていることが予想される。

図4-9、図4-10に、乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r と転圧回数 N との関係を示したものである。図に示すように、乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r は測点により値が大きく異なる。各測点の転圧回数 N と測定値との関係を見ると、概ね転圧回数 N が2回の時に大きく増加し、それ以降は漸増傾向が続き、転圧回数 N が6~16回の時にほぼ収束する傾向が確認された。

図4-11には、CCV値と転圧回数 N の関係図を示す。CCV値は、湿潤密度 ρ_t 、含水比 w 、乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r と同様に測点によって異なる傾向を示すが、いずれも転圧回数 N が2~8回まで一貫して増加し、転圧回数 N が8回の時に極大値を示し、転圧回数 N が16回の時に減少する傾向を示した。すなわち、転圧回数 N が8回の時を境にして、締め固め過程におけるCCV値の増減傾向が異なる。

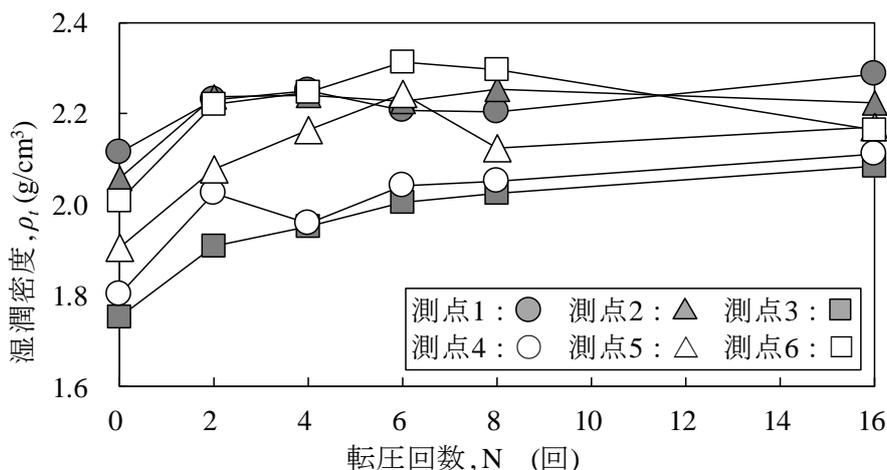


図4-7 湿潤密度 ρ_t と転圧回数 N の関係

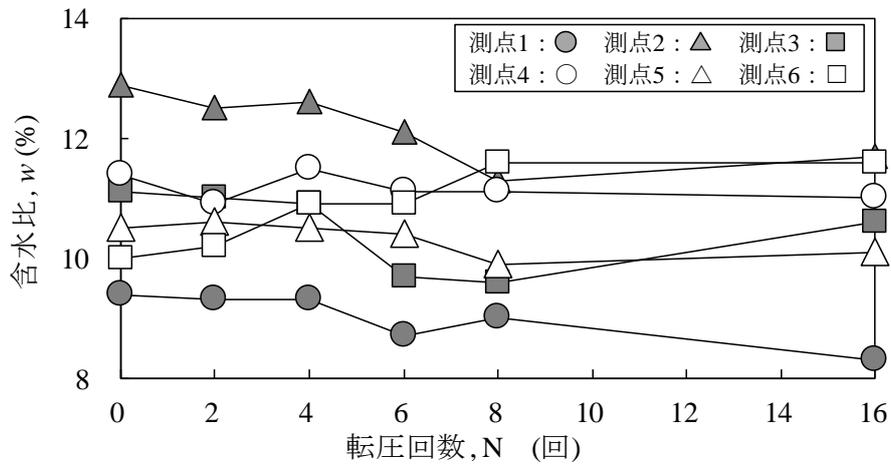


図 4-8 含水比 w と転圧回数 N の関係

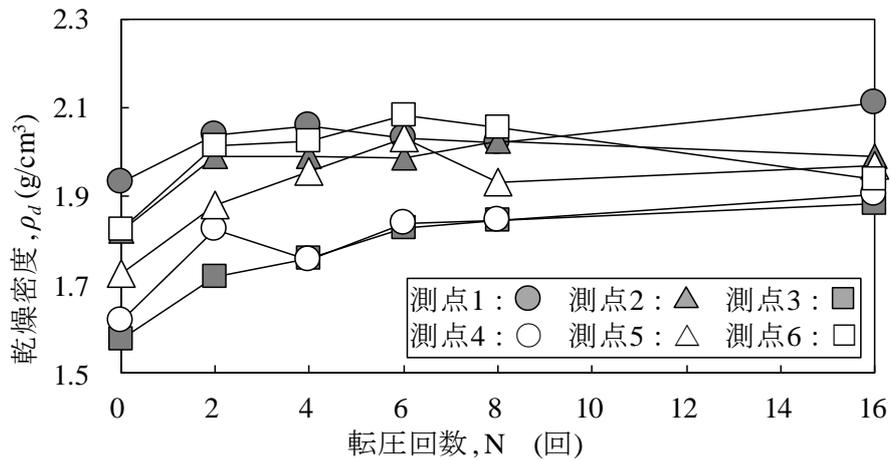


図 4-9 乾燥密度 ρ_d と転圧回数 N の関係

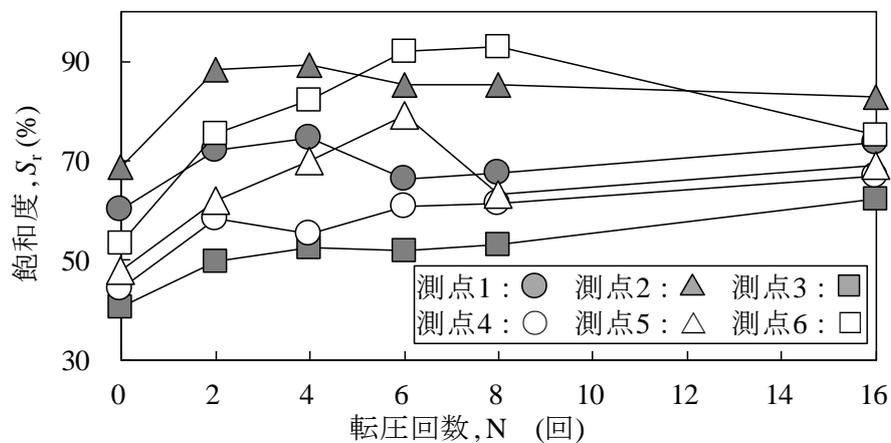


図 4-10 飽和度 S_r と転圧回数 N の関係

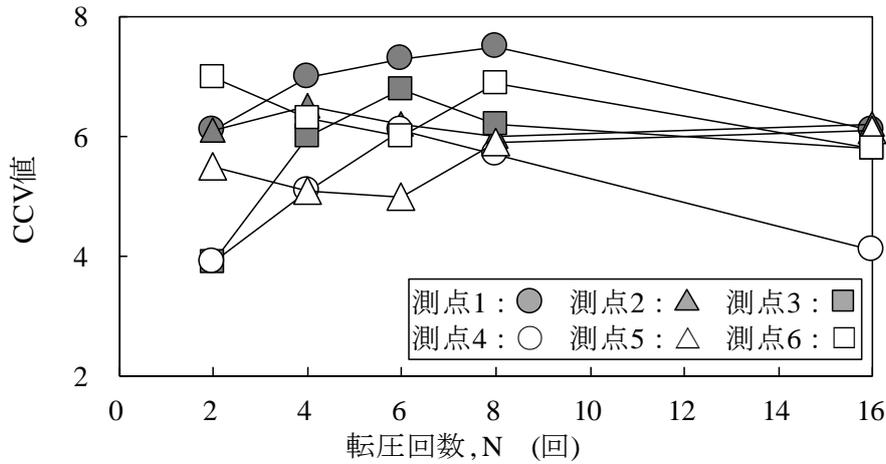


図 4-11 CCV 値と転圧回数 N の関係

4-2-3 CCV 値による品質指標の推定式の検討

盛土の品質指標である乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r を CCV 値と含水比 w から推定する手法を検討する。第 3 章で示した地盤剛性指標による乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を参考とし、転圧試験で得られたデータを解析し、 CCV 値による乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の関係式を式(4-1)のように構築することにした。

$$CCV = f_{ccv}(S_r)(\rho_d/\rho_w - b)^c \quad (4-1)$$

図 4-12 に、転圧試験で得られた CCV 値～乾燥密度 ρ_d 関係の全データを示す。全データを飽和度 S_r で 5% 毎 ($50\% \leq S_r < 55\%$, $55\% \leq S_r < 60\%$, $60\% \leq S_r < 65\%$, $70\% \leq S_r < 75\%$, $75\% \leq S_r < 85\%$, $85\% \leq S_r < 90\%$, $90\% \leq S_r < 95\%$) に分類し、それぞれを別の記号でプロットした。図 4-12 に示すデータは、転圧回数 N 毎に取得した図 4-2 に示す 6 測点の全データである。図 4-12 をみると、 CCV 値は乾燥密度 ρ_d の増加に伴って一貫して増加している。この傾向を表現する関係式として、式(4-1)の形式を設定する。式中の関数 $f_{ccv}(S_r)$ 、定数 b 、 c は、実験的に求められるパラメータであり、これらのパラメータは以下のように設定した。

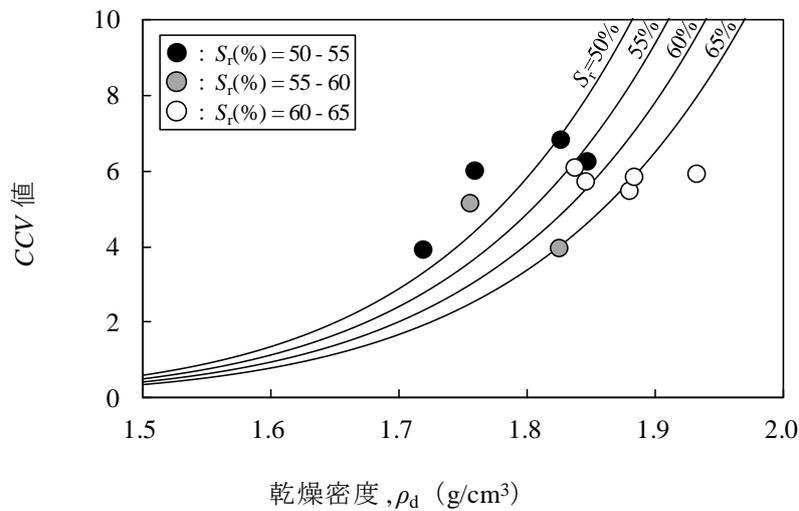
まず、飽和度 S_r を 5% 毎に分類し、関数 $f_{ccv}(S_r)$ の変化の小さいと思われるそれぞれの範囲の飽和度 S_r のデータ毎に最適な定数 b 、 c の組合せを求める。それらの定数 b 、 c に対してそれぞれのパラメータ毎に各飽和度範囲での値の算術平均をもって仮の定数 b 、 c を設定し、それらを用いて関数 $f_{ccv}(S_r)$ と飽和度 S_r の関係を求めた。その結果を図 4-13 に示すが、飽和度 S_r の値によるプロットの平均的關係からの偏りは見られないことから、式(4-2)のようにこの関係を定式化した。さらに、式(4-1)に式(4-2)を代入し、式(4-3)が得られる。

図 4-12 にプロットされているデータはいずれも実測値であり、曲線は式(4-3)により算出した飽和度 S_r の等値線である。これらの実測値の飽和度 S_r は、飽和度 S_r の等値線の間それぞれ収まっていることが望ましいが、必ずしもそうはなっていない。特に、図 4-12 (b)に

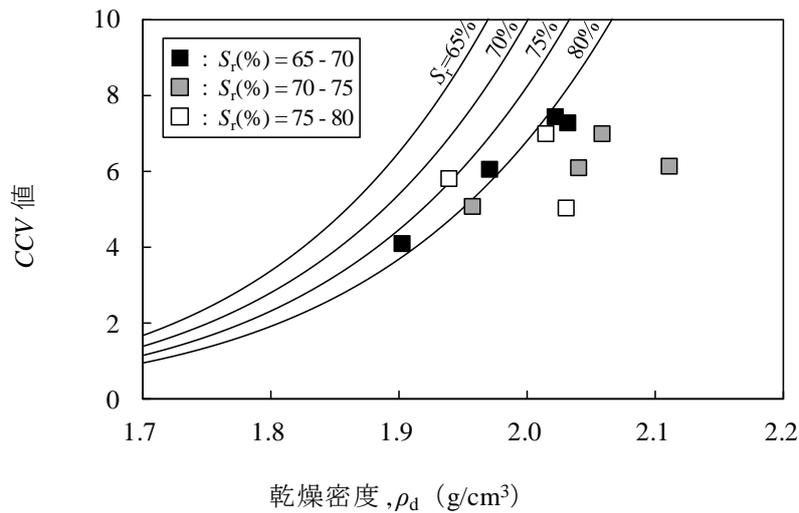
示すように、飽和度 $S_r=65-70\%$ (図中の■), $70-75\%$ (図中の■) では整合性が低い。しかしそれ以外の図では比較的好く、実験結果を表すことができている。本研究では、最適飽和度 $S_{r,opt}=88.5\%$ 付近を精度良く評価するため、飽和度 S_r が $75-95\%$ の範囲を精度良くフィッティングすることにした。

$$f_{CCV}(S_r) = 2.0/[1 + \exp(0.04S_r)] \quad (4-2)$$

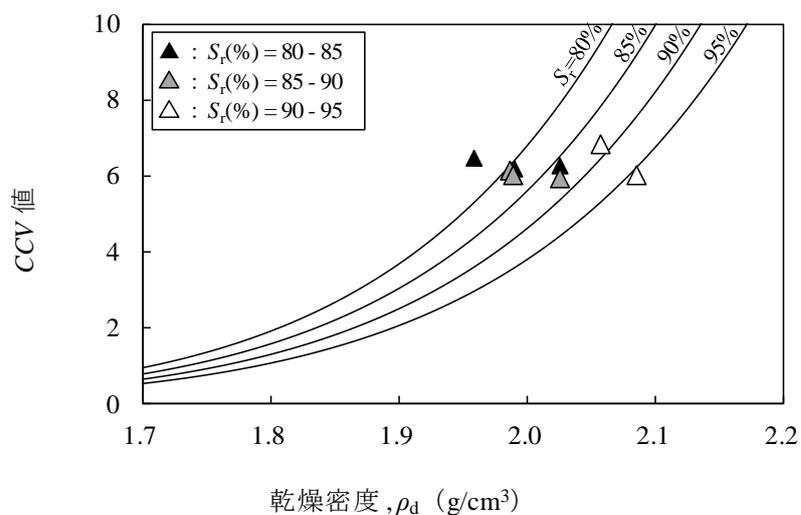
$$CCV = \left\{ \frac{2.0}{[1 + \exp(0.04S_r)]} \right\} (\rho_d/\rho_w - 0.4)^{9.5} \quad (4-3)$$



(a) $50\% < S_r \leq 65\%$



(b) $65\% < S_r \leq 80\%$



(c) $80\% < S_r \leq 95\%$

図 4-12 CCV 値～乾燥密度 ρ_d の関係

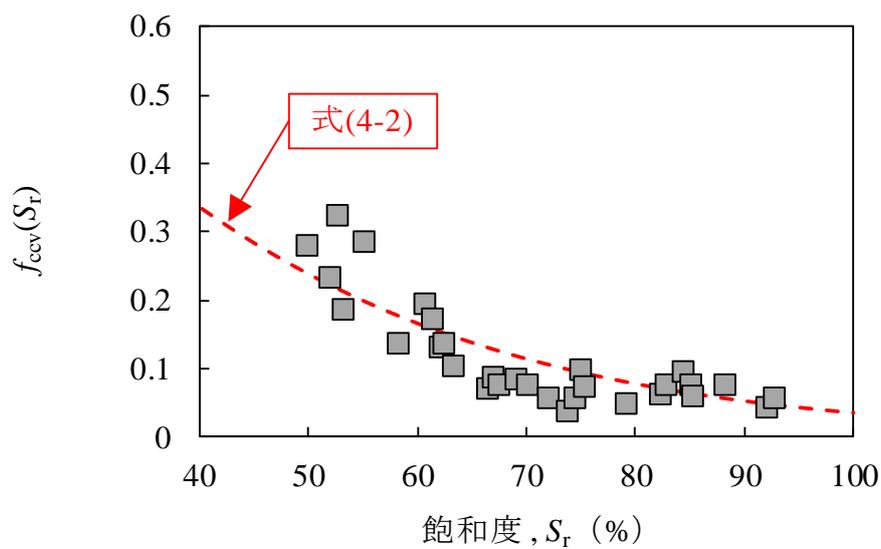


図 4-13 関数 $f_{ccv}(S_r)$ ～飽和度 S_r の関係

4-2-4 推定式を用いた締固め管理手法

第3章に示した小粒径粒子(最大粒径 $D_{\max}=9.5\text{mm}$)の砂質材を対象とした試験結果と同様に、最大粒径 $D_{\max}=75.0\text{mm}$ の大粒径粒子を含む現場全粒度試料に対しても CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r との関係式が成立することがわかった。そこで、 CCV 値の関係式を用いた締固め管理手法の実工事への適用性について検討する。

ここで、式(4-4)は式(4-3)の飽和度 S_r を土粒子密度 ρ_s 、含水比 w 、乾燥密度 ρ_d で表した関数である。

$$CCV = \left\{ \frac{2.0}{\left[1 + \exp\left(\frac{0.04 \rho_d \rho_s w}{\rho_s - \rho_d} \right) \right]} \right\} (\rho_d / \rho_w - 0.4)^{9.5} \quad (4-4)$$

目標とする乾燥密度 ρ_d が決まっており、含水比 w と土粒子密度 ρ_s が既知であれば、式(4-4)から目標の CCV 値を決めることができる。一方で、土粒子密度 ρ_s 、含水比 w が既知で、 CCV 値を施工時に測定した場合には乾燥密度 ρ_d を算出できる。したがって、式(4-4)を用いることで、本研究の目的とするリアルタイムかつ面的な締固め管理手法を実現することが可能となる。

次に、式(4-4)を用いた乾燥密度 ρ_d の推定手法の検討を行う。図4-14には、現場全粒度試料の締固め曲線上に転圧試験で得られた乾燥密度 ρ_d と含水比 w の実測値、乾燥密度 ρ_d の推定値と含水比 w の実測値との関係をプロットした。乾燥密度 ρ_d の推定値は、 CCV 値、含水比 w の実測値を式(4-4)に代入して算出した。図4-14より、乾燥密度 ρ_d の実測値と推定値は、概ね一致していることがわかった。ただし、飽和度 $S_r=65\sim 75\%$ のデータは推定精度が低く、推定値は実測値に比べて低い値を示した。

図4-15には、乾燥密度 ρ_d の実測値と推定値との関係を示す。図4-15には、 $Y=X$ 、 $Y=X-0.1$ 、 $Y=X+0.1$ の線分に加えて、最小二乗法により求めた乾燥密度 ρ_d の実測値と推定値との近似曲線と相関係数 R^2 をそれぞれ示した。実測値と推定値が一致している場合には、 $Y=X$ の線分上にデータがプロットされることになる。図4-15をみると、一部のデータを除き概ね全てのデータが $Y=X$ の線分上の付近にプロットされており、いずれも $Y=X+0.1$ 、 $Y=X-0.1$ の線分に挟まれた範囲の中に存在することがわかった。さらに、相関係数は $R^2=0.7023$ となり、推定精度は高いことが確認された。なお、 CCV 値により推定した乾燥密度 ρ_d のほとんどは実測値よりも低く評価されていることがわかる。これより、式(4-4)を用いた乾燥密度 ρ_d の推定精度は概ね良好であり、推定値は現場施工において安全側に評価していることがわかった。

次に、実工事における CCV 値と関係式を用いた具体的な締固め管理手法について検討する。

図4-16には、乾燥密度 ρ_d と対数で表記した CCV 値を軸にとり、締固め度 D_c の下限値と飽和度 S_r の上下限值により規定された品質管理範囲に対応する CCV 値と乾燥密度 ρ_d の管理範囲を図化した。図4-16に示す CCV 値の管理範囲を目指した施工を行うことで、締固め度 D_c と飽和度 S_r 、含水比 w により規定された品質管理を行うことができる。この結果は、第3

章に示した小粒径粒子を含む盛土材料を対象とした地盤剛性指標による締固め管理手法と同様であるため、取り扱う土質の最大粒径 D_{max} に依らず、地盤剛性指標による締固め管理の実工事への有効性を確認した。

最後に、 CCV 値による乾燥密度 ρ_d の推定手法について検討する。図 4-17 には、 CCV 値と転圧回数管理による乾燥密度 ρ_d の推定手法を示す。図 4-17 より、乾燥密度 ρ_d と含水比 w の空間で現場全粒度試料の締固め曲線上に含水比 $w=9\%$ の等値線と式(4-4)より求めた CCV 値 = 1, 5, 10, 11.2, 30 の等値線をそれぞれ図化した。現場全粒度試料の含水比 w は、ダンプアップした土塊毎に RI 試験を行うことで求めるものとし、いずれも土塊を敷均したエリアの代表値として設定する。なお、含水比 w は面的にばらつかないものと仮定し、面的な含水比情報として取り扱う。ここでは、現場全粒度試料の含水比 w は 9% として検討を行った。

図 4-17 より、 CCV 値の等値線は、いずれも $S_r < S_{ropt}$ の範囲では乾燥密度 ρ_d が増加すると含水比 w は増加し、最適飽和度 S_{ropt} になる少し前で含水比 w は極大値を示し、 $S_r > S_{ropt}$ の範囲では乾燥密度 ρ_d が増加すると含水比 w は減少することがわかる。この特性を活用し、乾燥密度 ρ_d の推定を行う。今、盛土の含水比が仮に含水比 w は 9% で一定値であると仮定すると、締固め過程における乾燥密度 ρ_d は含水比 w が 9% の等値線上を変化することになる。ここで、 CCV 値 = 11.2 と含水比 $w = 9\%$ の等値線をみると、二つの線分は A 点で接していることがわかる。これは、含水比 $w = 9\%$ における CCV 値の極大値は 11.2 であることを意味している。

続いて、極大値以下の CCV 値が得られた状態について検討する。図 4-17 のように CCV 値 = 10 のデータが得られた場合、 CCV 値と含水比 w の等値線は B 点、C 点の二点で交わることがわかる。これは、乾燥密度 ρ_d の解の候補が二つ存在すること意味しており、乾燥密度 ρ_d は $S_r \leq S_{ropt}$ の範囲（締固め初期段階）、もしくは $S_r > S_{ropt}$ （締固め後期）のどちらかであるかを検討する必要がある。ここで、図 4-11 に示した締固め過程における CCV 値の変化を確認すると、 CCV 値は締固めの初期は増加傾向を示し、締固め後期で減少傾向を示すことがわかる。これより、現在とそれ以前の転圧回数の時の CCV 値を比較し、現在の締固め段階を把握することができれば、乾燥密度 ρ_d を正しく評価することができる。

このように、関係式を用いて CCV 値と含水比 w から乾燥密度 ρ_d を推定する際には、 CCV 値は単体ではなく、必ず転圧回数 N と組合せて管理することが重要である。これにより、リアルタイムかつ面的な締固め管理が可能となるため、高品質な盛土構造物を合理的な施工法により実現できる。

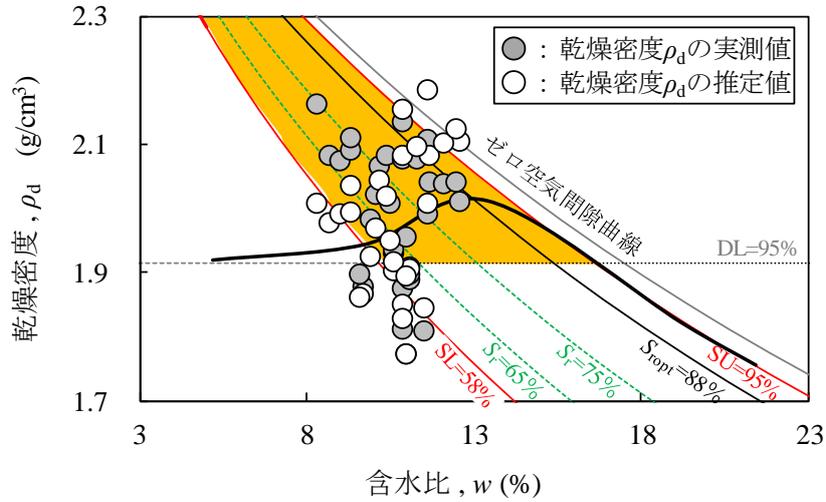


図4-14 乾燥密度 ρ_d ~ 含水比 w 空間上の転圧試験結果

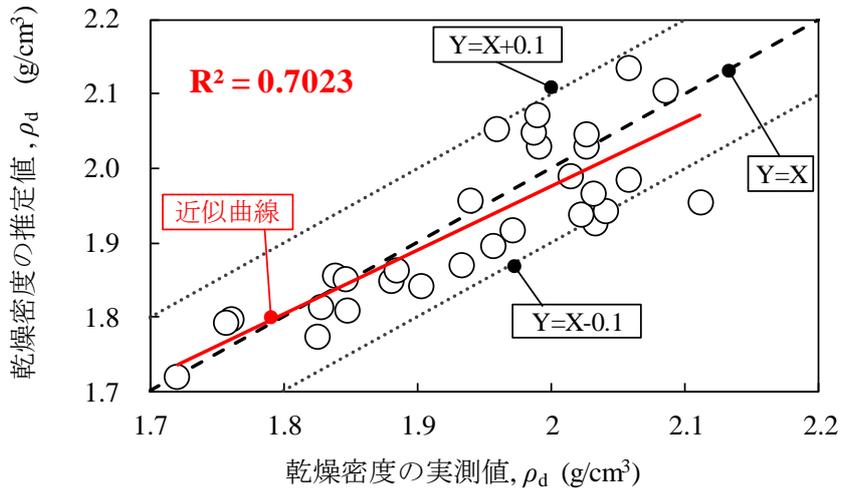


図4-15 乾燥密度 ρ_d の実測値と推定値の比較

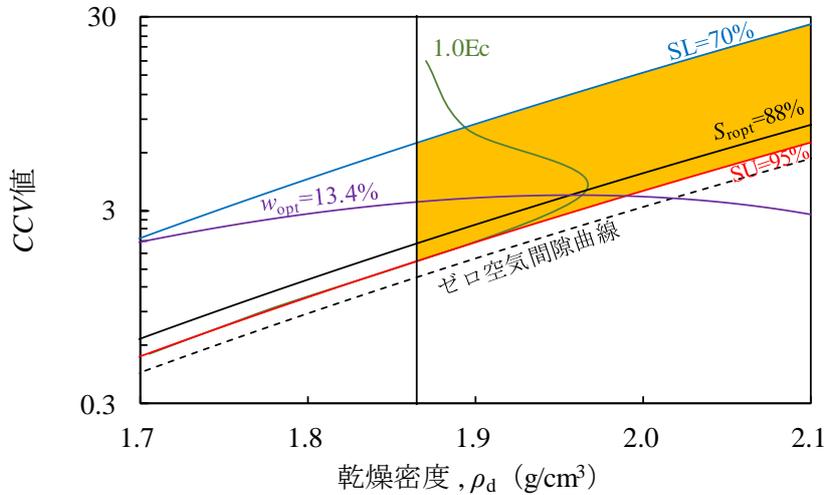


図4-16 乾燥密度 ρ_d と CCV 値空間による締固め管理図

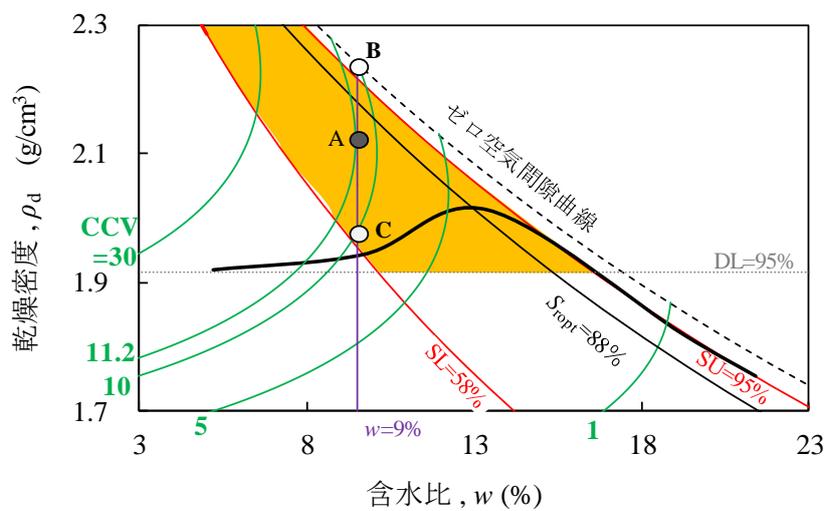


図4-17 CCV値と転圧回数管理による乾燥密度 ρ_d の推定

4-3 粒度特性が締固め特性に与える影響

盛土の締固め管理では、現場で測定された乾燥密度 ρ_d と含水比 w を、現場代表試料を用いて所定の締固めエネルギー CEL で行われた室内締固め試験で得られる最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} と比較する。前節で述べた CCV 値より推定した乾燥密度 ρ_d についても、乾燥密度 ρ_d は現場全粒度相当であるのに対して、締固め度 $(Dc)_{IEc}$ を算定する際には、室内粒度試料を用いて行われる室内締固め試験により得られる最大乾燥密度 ρ_{dmax} が用いられる。施工現場で使用する現場全粒度試料は、岩砕や礫など室内試験適用外の大粒径の土を含む。その場合、室内試験モールドの許容最大粒径内に収まるように粒度調整した試料を用いて室内締固め試験を行い、得られた結果を Walker-Holtz の礫率補正式^{6),7)}(以下、WH式)により補正し、現場全粒度試料の所定の締固めエネルギー CEL における最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH}$ を推定する。WH式の適用範囲は、礫率 $P < 0.3 \sim 0.4$ とされているが、現場全粒度試料の礫率 P はその適用範囲外となることも多く、さらに、礫率 $P < 0.3 \sim 0.4$ でも一定の誤差があることが知られている^{6),7)}。なお、ここでの礫率とは、土の工学的分類による礫ではなく、ある最大粒径 D_{max} 以上の土粒子の質量と、全粒子の重量の比を指す。

上記のような課題を解決するためには、大型締固め試験を実施して、大粒径粒子を含む現場全粒度試料の締固め特性の把握する必要がある。しかし、室内試験においても現場全粒度試料では多大な労力と費用を要することに加え、大型締固め試験機の希少さを鑑みて、全ての施工現場でそれを実施することは現実的ではないといえる。これより、せん頭粒度により現場全粒度試料の最大粒径 D_{max} を小さくして室内締固め試験を実施し、WH式に何らかの補正を施すことで現場全粒度試料の締固め特性を推定することを要求される。

そこで本研究では、最大粒径 D_{max} の異なる粒度調整試料を複数用意して室内締固め試験を実施し、各最大粒径 D_{max} の最大乾燥密度 ρ_{dmax} の実測値と WH式により推定した最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH}$ を比較することで WH式の礫率補正式の精度を確認した上で、最大乾燥密度 ρ_{dmax} の推定値と実測値との比で表される最大乾燥密度比 X と礫率 P の関係による礫率補正式の高度化について検討した。

4-3-1 室内試験条件

本実験に使用した盛土材は、前項の転圧試験に使用した最大粒径 $D_{max} = 75.0\text{mm}$ の細粒分混じり礫質土（以下、現場全粒度試料。土粒子密度 $\rho_s = 2.77\text{ g/cm}^3$ ）を母材とし、目標とする最大粒径 D_{max} なるようにせん頭粒度法により粒度調整して作製した試料である。図 4-18 には、現場全粒度試料と、現場全粒度試料をせん頭粒度法により最大粒径 $D_{max} = 2.00\text{mm}, 4.75\text{mm}, 9.50\text{mm}, 19.0\text{mm}, 37.5\text{mm}, 53.0\text{mm}$ に粒度調整して作製したそれぞれの試料の粒度分布を示す。なお、最大粒径 $D_{max} = 75.0, 53.0\text{mm}$ を現場全粒度試料、最大粒径 $D_{max} = 2.00\text{mm}, 4.75\text{mm}, 9.50\text{mm}, 19.0\text{mm}, 37.5\text{mm}$ を室内粒度試料と定義する。

これらの試料を対象に室内締固め試験¹⁾を実施した。室内締固め試験に使用した大型・小型装置の写真と試験条件をそれぞれ図 4-19、表 4-3 に示す。

室内粒度試料を用いた小型装置による室内締固め試験では、半径 15cm、体積 2209cm³ のモールドを使用した。2.5kg のランマーを高さ 30cm から自由落下させ、締固め回数は 1 層 55 回で 3 層にて締固めを行い、この場合の締固めエネルギー CEL を $1.0E_c$ と呼ぶ。さらに、4.5kg のランマーを高さ 45cm から自由落下させ、1 層 55 回として計 5 層で締固めた。この場合の締固めエネルギー CEL を $4.5 E_c$ と呼ぶ。

現場全粒度試料を用いた大型装置による室内締固め試験では、内径 30cm、体積 25000cm³ のモールドを使用した。単位体積あたりのエネルギーは、式(4-5)で計算した¹⁾。 $1.0E_c$ では、10kg のランマーを高さ 45cm から自由落下させた。締固め回数は 1 層 104 回として計 3 層で締固めた。 $4.5E_c$ では、10kg のランマーを高さ 45cm から自由落下させた。締固め回数は 1 層 468 回として計 3 層で締固めた。なお、含水比は実験試料の全量を乾燥して測定した。

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_L \cdot N_B}{V} \quad (4-5)$$

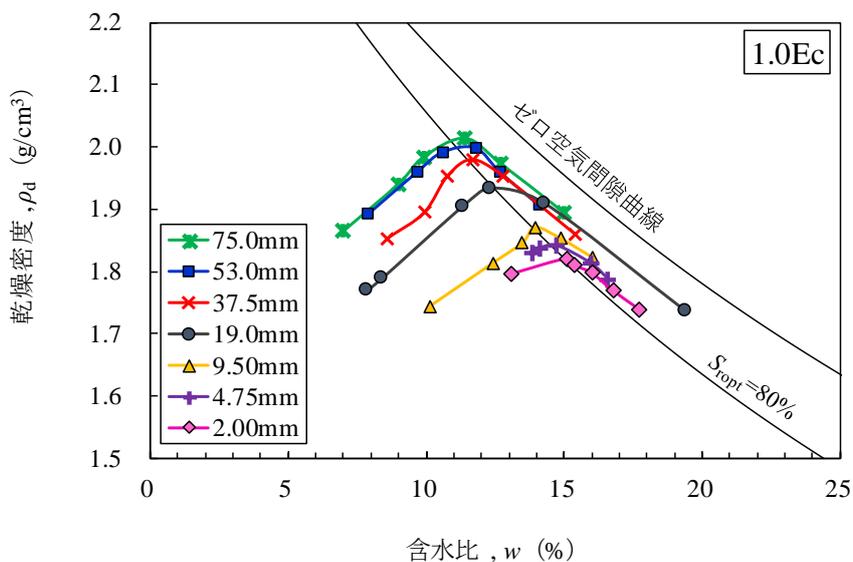
ここに、 W_R ：ランマー重量(kN)、 H ：ランマー落下高さ(m)、 N_L ：層数、 N_B ：1層あたりの突固め回数、 V ：モールド容積(m³)である。式(4-5)に表 4-3 に示すモールドの仕様などを代入した上で、目標とする $1.0E_c$ 、 $4.5E_c$ の締固めエネルギーになるように締固め層厚、締固め回数を調整した。小型締固め試験に関しては、試験基準 (JIS) に倣い、締固め層厚、締固め回数を設定した。

4-3-2 室内試験結果

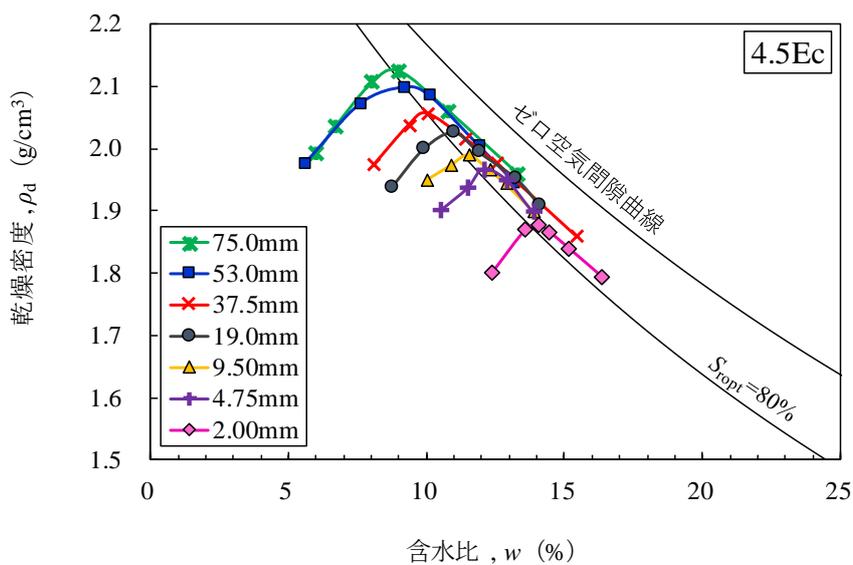
締固めエネルギー CEL が $1.0E_c$ 、 $4.5 E_c$ の時の室内締固め試験結果をそれぞれ図 4-20 (a)、(b) に示す。図 4-20 より、締固めエネルギー CEL に依らず、最大粒径 D_{max} の増加に伴って最大乾燥密度 ρ_{dmax} は増加し、最適含水比 w_{opt} は減少していることがわかる。また、最適飽和度 S_{ropt} は、締固めエネルギー CEL と最大粒径 D_{max} に依らず概ね 80% で一致していることも確認された。

次に、図 4-20 に示す締固めエネルギー CEL が $1.0E_c$ 、 $4.5 E_c$ の時の締固め曲線を、締固め度 $(D_c)_{1Ec}$ ～飽和度差 $S_r - S_{ropt}$ の関係で表記したグラフをそれぞれ図 4-21 (a)、(b) に示す。図 4-21 より、締固めエネルギー CEL 、最大粒径 D_{max} に依らず、曲線形は相関関係にあることがわかる。

以上の内容から、同一試料に対しては、締固めエネルギー CEL 、最大粒径 D_{max} に依らず、最適飽和度 S_{ropt} と締固め曲線形は一致することがわかった。これらは、龍岡ら¹⁰⁾の既往の研究成果と同様である。

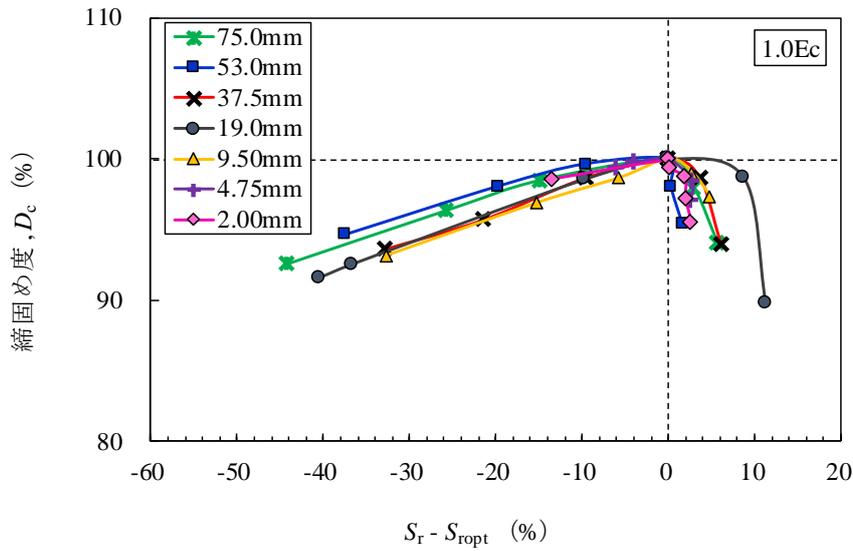


(a) 締固めエネルギー $CEL=1.0E_c$

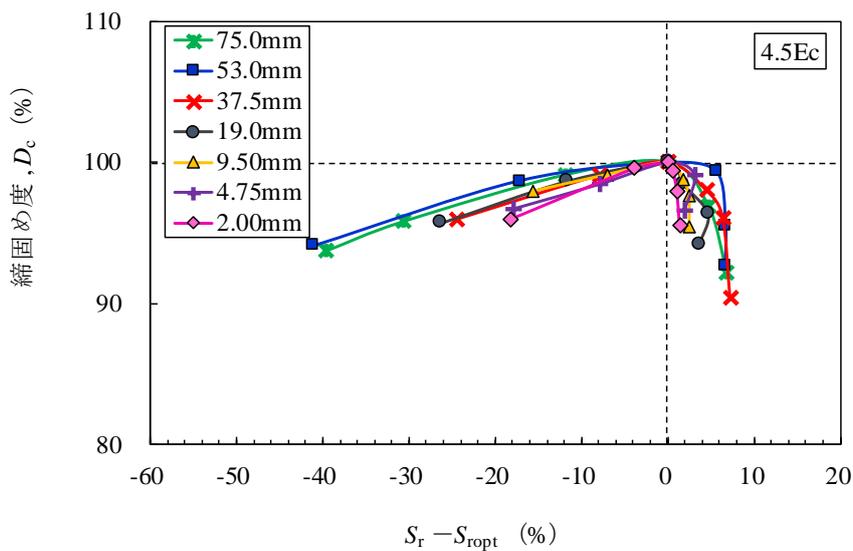


(b) 締固めエネルギー $CEL=4.5E_c$

図4-20 室内締固め試験結果



(a) 締固めエネルギー $CEL=1.0E_c$



(b) 締固めエネルギー $CEL=4.5E_c$

図4-21 室内締固め試験結果

4-3-3 粒子破碎の影響の評価

粒子の繰り返し利用による粒子破碎の影響を検討するため、最大粒径 $D_{max} = 19.0\text{mm}$ において締固め試験前後の粒度試験を実施した¹¹⁾。粒度試験でのばらつきの影響を小さくするために、締固め試験前の試料で3回の粒度試験を行うとともに締固め試験後の試料を全量用いて粒度試験を行い、それぞれで得た粒径加積曲線を比較した。また、締固め試験後の粒度試験では、含水比 w を測定した後に 2.0mm ふるいを行い、 2.0mm 残留試料を水洗いして炉乾

燥した後に沈降分析、粒度試験を実施した。

締固めによる粒子破碎を調べた結果を図 4-22 に示す。締固め前の試料を用いて粒度試験を 3 回行った結果は、ややばらつきが大きい。最適含水比 w_{opt} で締固めエネルギー CEL が $1.0E_c$ で締固めた後の粒度分布は、締固め前の 3 回の測定で得られた粒度分布と比較すると、ほとんどがばらつきの範囲内に含まれており、有意な粒子破碎は無かったと判断できる。

図 4-23 に、締固め試験において試料を繰返し使用した場合に測定結果に及ぼす影響を検討した結果を示す。最大粒径 $D_{max}=19.0\text{mm}$ 試料について締固めエネルギー CEL が $1.0E_c$ の締固め試験で得られた非繰返しによる締固め曲線（処女試料）および 1 回（繰返し試料①）と 2 回（繰返し試料②）繰返し使用した後の締固め曲線を示している。乾燥側の含水比 w における乾燥密度 ρ_d は、繰返し試料①、②よりも処女試料の方がやや低い値を示すが、最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} は繰返し使用による影響は見られない。従って、試料を 2 回程度繰返し使用しても最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} の有意な変化は無いと判断し、繰返し法による締固め試験により以下に示す検討を行った。

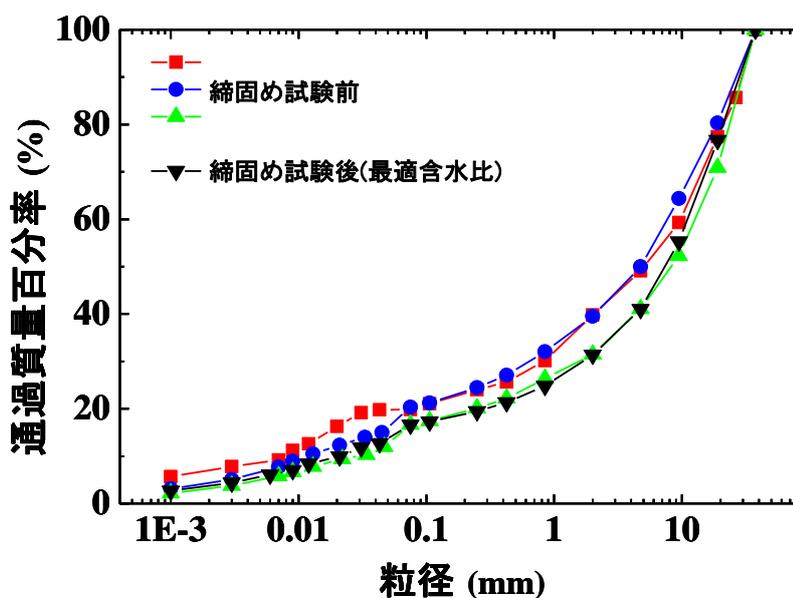


図 4-22 締固め試験前後の粒径加積曲線¹¹⁾

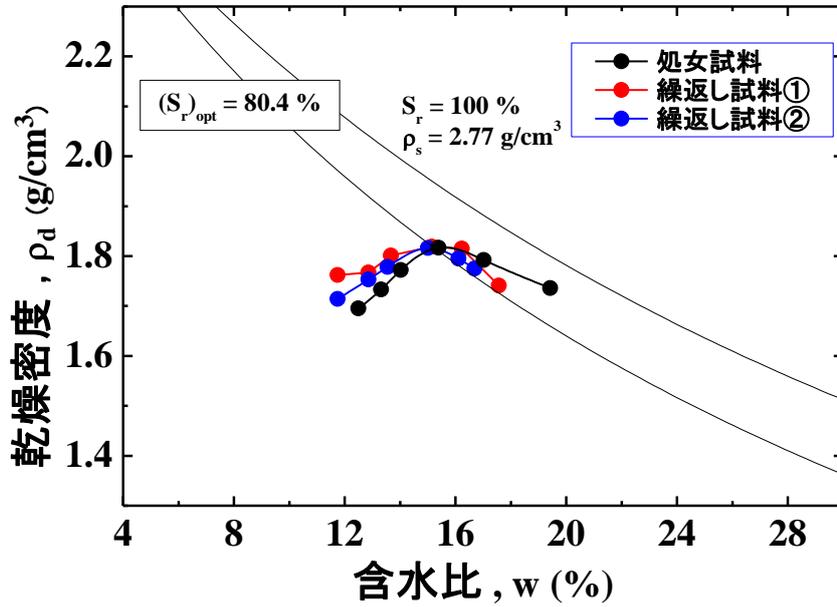


図 4-23 最大粒径 $D_{\max}=19.0\text{mm}$ における繰返し締固め試験結果¹¹⁾

4-3-4 Walker-Holtz による礫率補正式の妥当性検証

WH 式による礫率補正の精度を検証することを目的とし、図 4-20 に示した異なる最大粒径 D_{\max} の実測締固め曲線と、任意の最大粒径 D_{\max} を基準に WH 式により推定した計算締固め曲線との比較を行う。WH 式の概要については、第 2 章で説明しているため、ここでの説明は省略するが、WH 式をそれぞれ式(4-6)、式(4-7)に示す。

$$[\rho_d]'_{WH} = \frac{\rho_d \cdot \rho_s}{(1-P) \cdot \rho_s + P \cdot \rho_d} \quad (4-6)$$

$$[\rho_d]''_{WH} = \frac{(1-P) \rho_d \cdot \rho_s}{\rho_s - P \cdot \rho_d} \quad (4-7)$$

式中の ρ_d は礫粒子を混入する前の試料の乾燥密度である。 ρ_s は土粒子密度である。 P は礫率であり、所定の最大粒径 D_{\max} よりも大きい粒子の土の重量と、全粒子の土の重量の比である。本研究では、所定の最大粒径 D_{\max} よりも大きい粒子の土と、それ以外の土の土粒子密度 ρ_s は同一であると仮定しており、この時の飽和度 S_r は変化していないとしている。所定の最大粒径より大きい粒子の土を混入した場合の全粒子の乾燥密度 $[\rho_d]'_{WH}$ は式(4-6)から求め、所定の最大粒径 D_{\max} より小さい土の乾燥密度 $[\rho_d]''_{WH}$ は式(4-7)から求める。

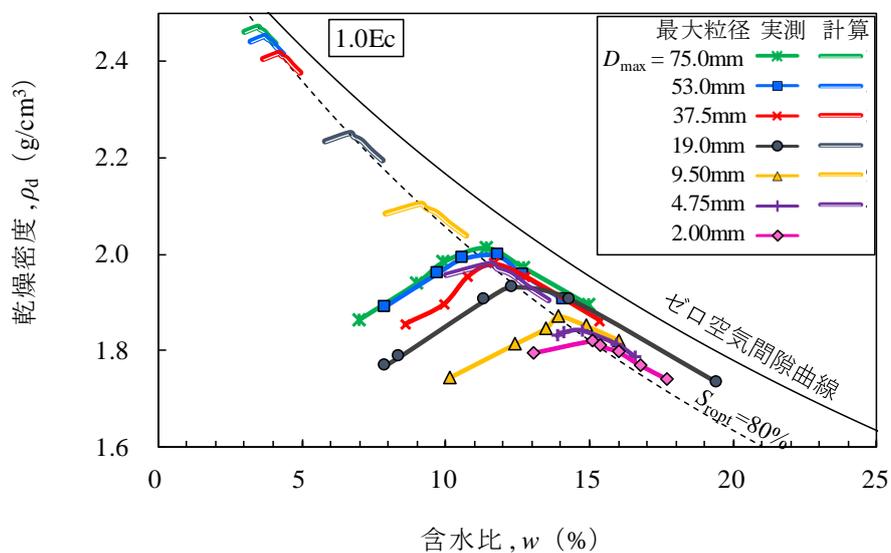
まず、締固めエネルギー CEL が $1.0E_c$ 、 $4.5 E_c$ で締固められた最大粒径 $D_{\max}=2.00\text{mm}$ の締固め曲線を基準として、礫粒度を混入した場合の WH 式の精度について確認する。図 4-24 には、図 4-20 に示した $1.0E_c$ 、 $4.5 E_c$ における最大粒径 $D_{\max} = 75.0\text{mm}$ 、 53.0mm 、 37.5mm 、

19.0mm, 9.5mm, 4.75mm, 2.00mm の締固め曲線の実測値と、最大粒径 $D_{\max}=2.0\text{mm}$ の締固め曲線を基準として式(4-6)によって推定した最大粒径 $D_{\max}=75.0\text{mm}$, 53.0mm, 37.5mm, 19.0mm, 9.5mm, 4.75mm の計算締固め曲線を示す。図 4-24 より、式(4-6)により推定した異なる最大粒径 D_{\max} の最大乾燥密度 $[\rho_{d\max}]_{\text{WH}}$ は、 $1.0E_c$ での締固めにより得られた実測値よりも大きくなり、大きな粒子を混入した後の試料の乾燥密度 ρ_d を著しく過大評価する結果となった。この傾向は礫混入率が高い（すなわち、最大粒径 D_{\max} 大きくなる）ほど顕著となる。なお、これらの結果は、締固めエネルギー CEL に依らず同様であることがわかった。

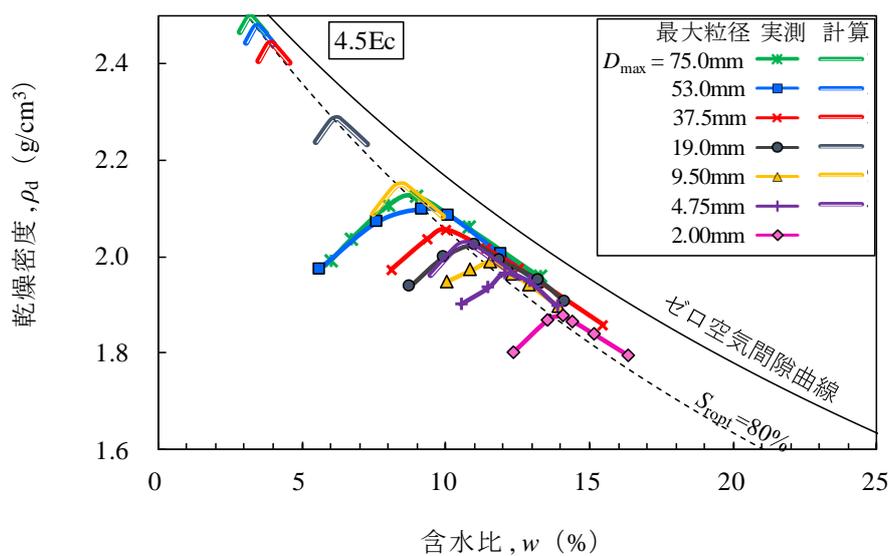
次に、締固めエネルギー CEL が $1.0E_c$, $4.5E_c$ で締固められた最大粒径 $D_{\max}=75.0\text{mm}$ の締固め曲線を基準として、礫粒子を除去した場合の WH 式の精度を確認する。図 4-25 には、図 4-20 にも示した $1.0E_c$, $4.5E_c$ における最大粒径 $D_{\max}=75.0\text{mm}$, 53.0mm, 37.5mm, 19.0mm, 9.5mm, 4.75mm, 2.00mm の締固め曲線の実測値と、最大粒径 $D_{\max}=75.0\text{mm}$ の締固め曲線を基準として式(4-7)によって推定した最大粒径 $D_{\max}=53.0\text{mm}$, 37.5mm, 19.0mm, 9.5mm, 4.75mm, 2.00mm の計算締固め曲線を示す。図 4-25 をみると、式(4-7)により算出した最大乾燥密度 $[\rho_{d\max}]_{\text{WH}}$ は、 $1.0E_c$ での締固めにより得られた実測値よりも小さくなり、大きな粒子を除去した後の試料の乾燥密度 ρ_d を著しく過小評価する結果となった。この傾向は礫除去率が高い（すなわち、最大粒径 D_{\max} が小さくなる）ほど顕著となる。なお、これらの結果は、締固めエネルギー CEL に依らず同様であることがわかった。

図 4-26～図 4-30 は、図 4-24, 図 4-25 に示した最大粒径 $D_{\max}=2.00$, 75.0mm を基準とした検討方法と同様に、最大粒径 $D_{\max}=4.75$, 9.50, 19.0, 37.5, 53.0mm を基準として礫粒子を混入・除去した場合の WH 式の精度を検証した結果を示すが、いずれも前述した結果と同様であることがわかった。

これらの WH 法による補正結果の実測結果との相違は、実際には試料全体に加える締固めエネルギー CEL が一定であっても、礫粒子以外の細粒成分に加わる締固めエネルギー CEL は小さくなることが考慮されていないためである。

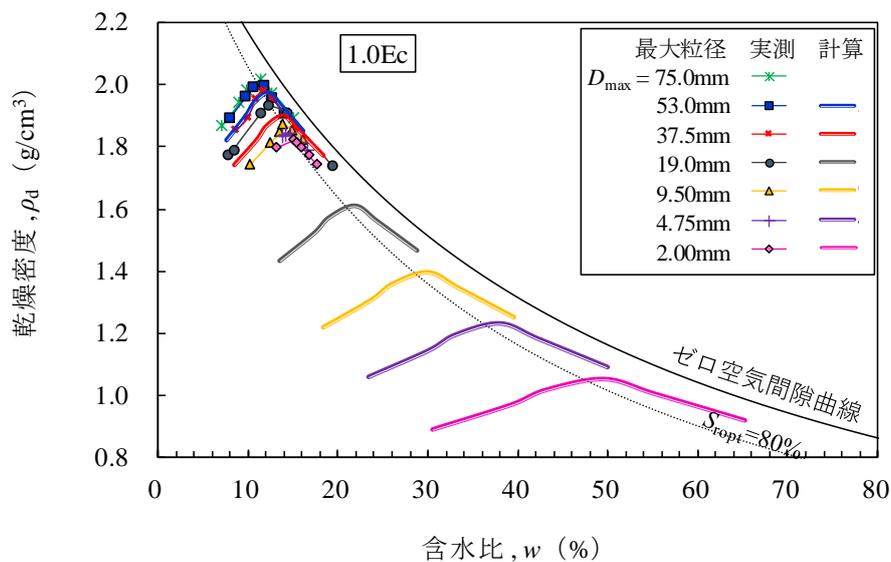


(a) 締固めエネルギー-CEL $1.0E_c$

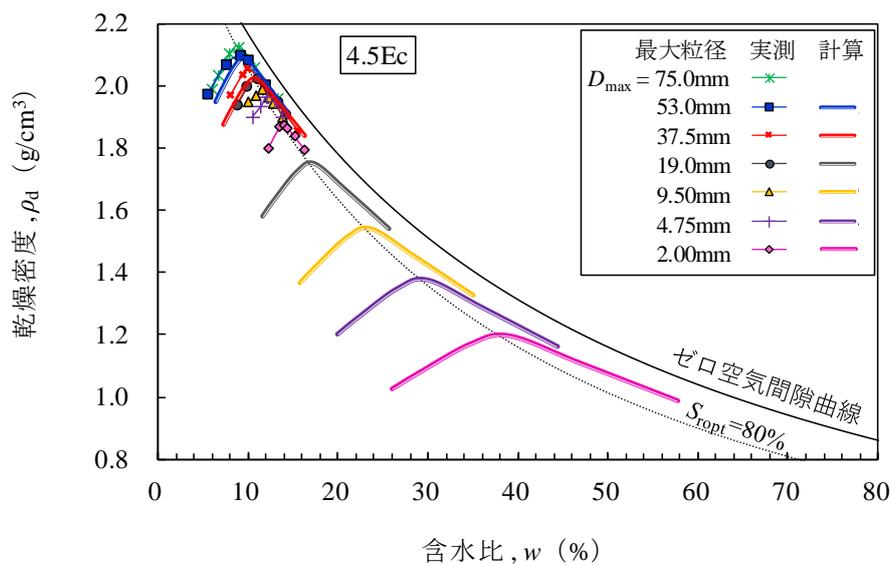


(b) 締固めエネルギー-CEL $4.5E_c$

図 4-24 最大粒径 $D_{max}=2.00\text{mm}$ を基準として WH 式より推定した各最大粒径 D_{max} の計算締固め曲線と実測値との比較

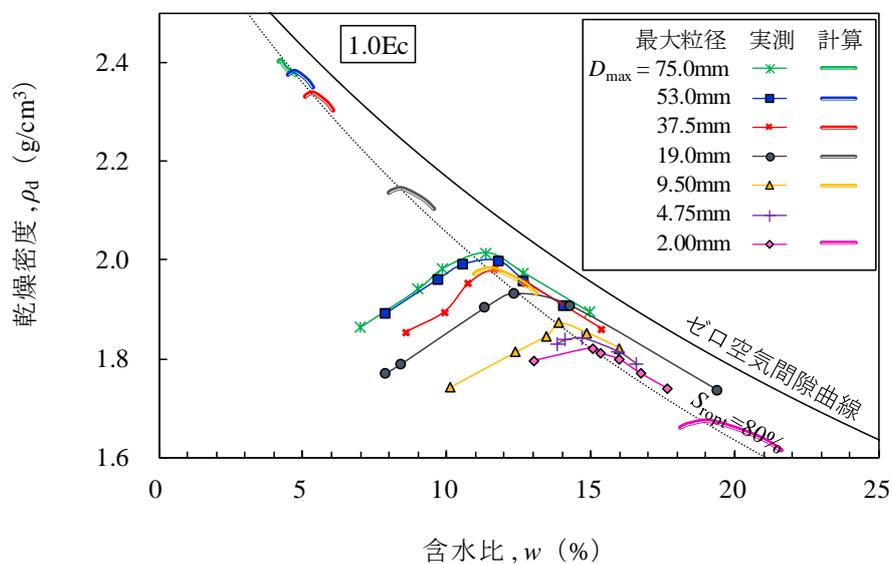


(a) 締固めエネルギー-CEL 1.0 E_c

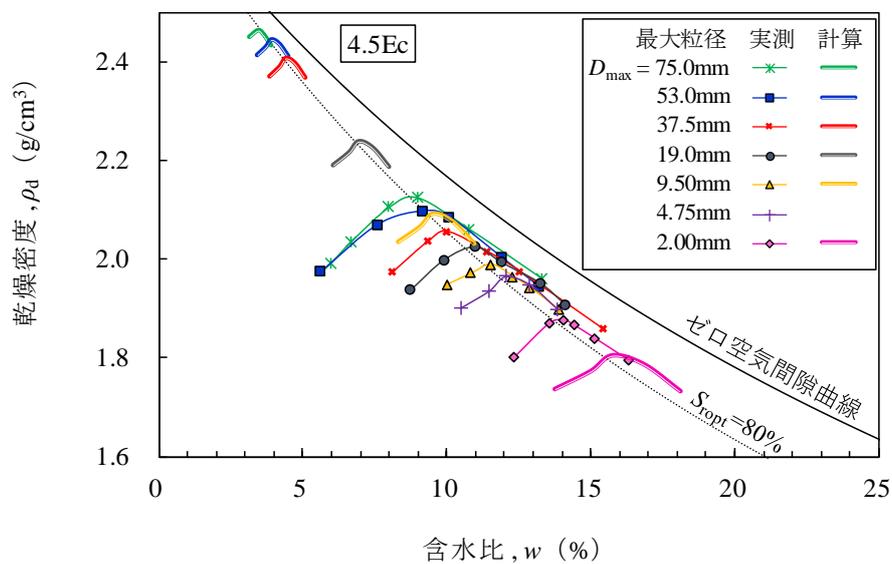


(b) 締固めエネルギー-CEL 4.5 E_c

図4-25 最大粒径 $D_{max}75.0\text{mm}$ を基準としてWH式より推定した各最大粒径 D_{max} の計算締固め曲線と実測値との比較

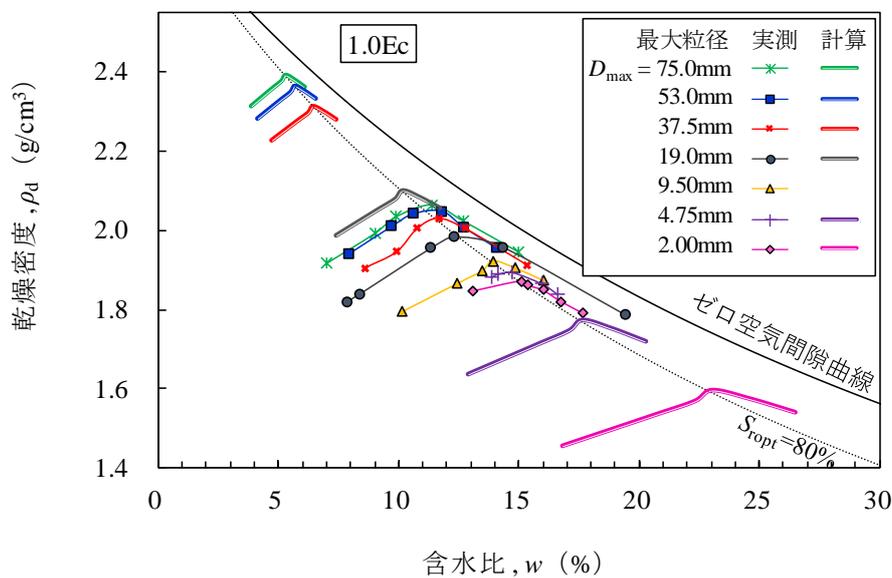


(a) 締固めエネルギー-CEL $1.0 E_c$

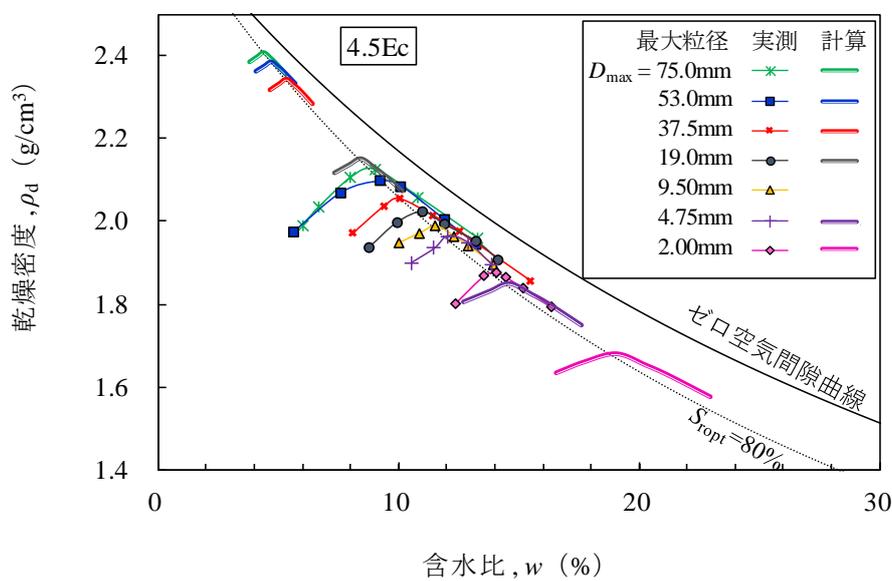


(b) 締固めエネルギー-CEL $4.5 E_c$

図 4-26 最大粒径 $D_{max}=4.75\text{mm}$ を基準として WH 式より推定した各最大粒径 D_{max} の計算締固め曲線と実測値との比較

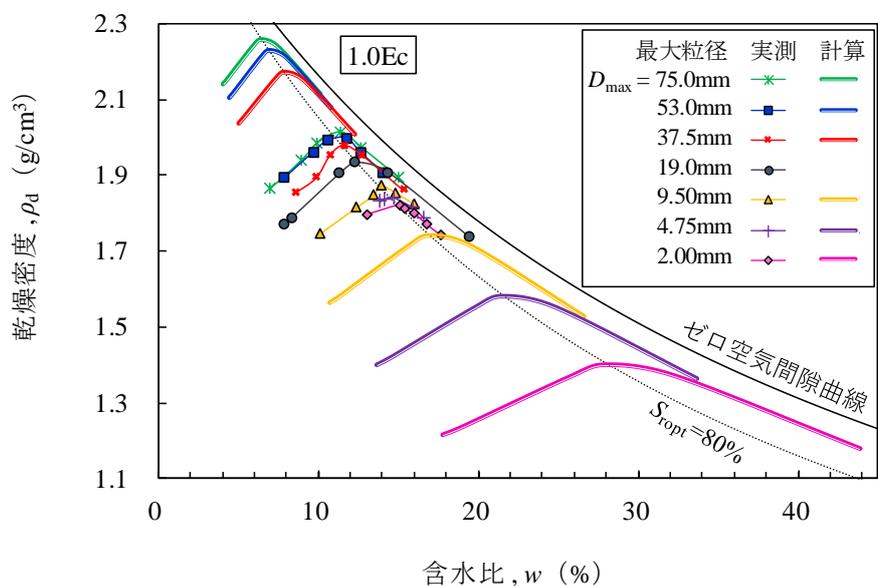


(a) 締固めエネルギー—CEL 1.0 E_c

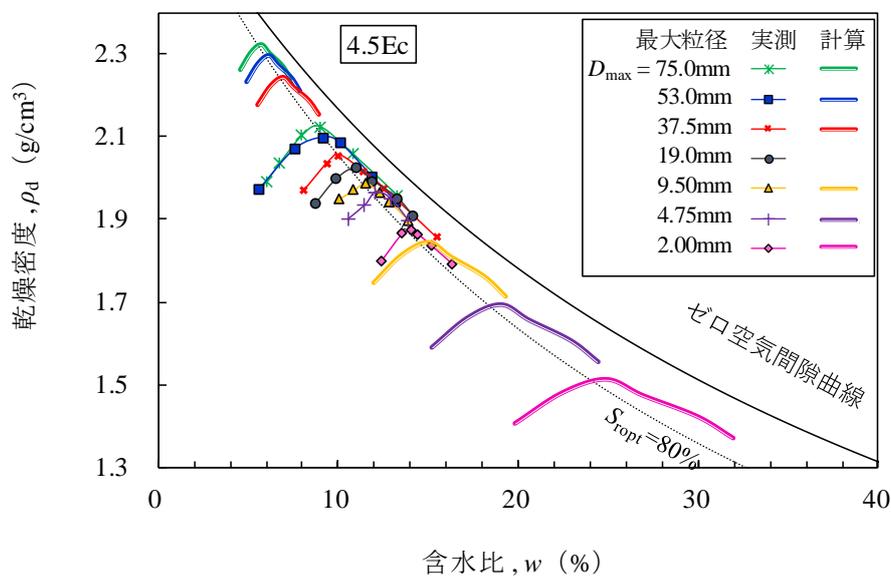


(b) 締固めエネルギー—CEL 4.5 E_c

図 4-27 最大粒径 $D_{max}=9.50\text{mm}$ を基準として WH 式より推定した各最大粒径 D_{max} の計算締固め曲線と実測値との比較

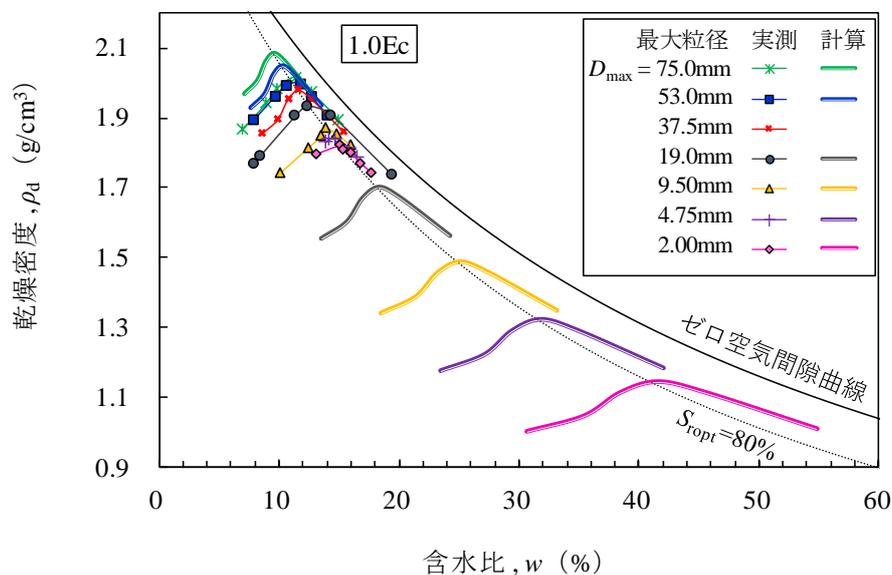


(a) 締固めエネルギー—CEL 1.0 E_c

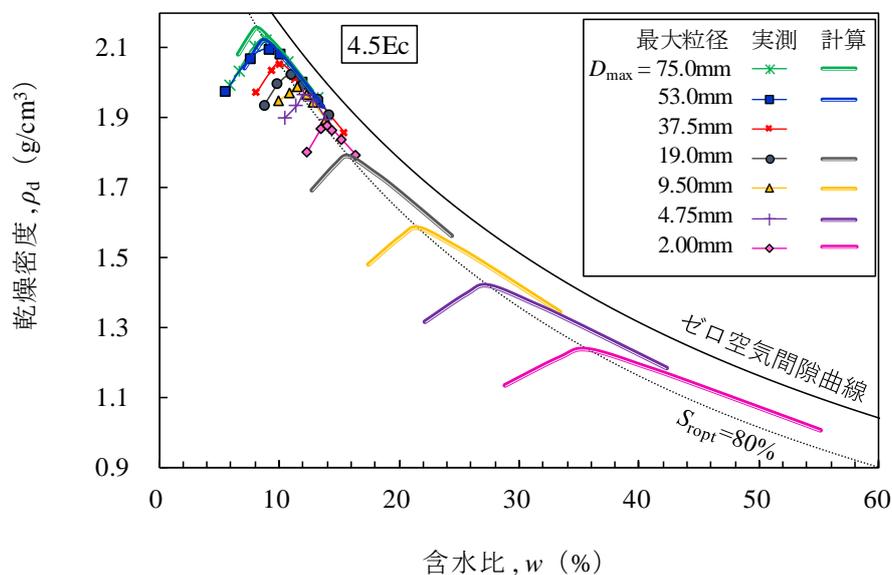


(b) 締固めエネルギー—CEL 4.5 E_c

図 4-28 最大粒径 $D_{max}=19.0\text{mm}$ を基準として WH 式より推定した各最大粒径 D_{max} の計算締固め曲線と実測値との比較

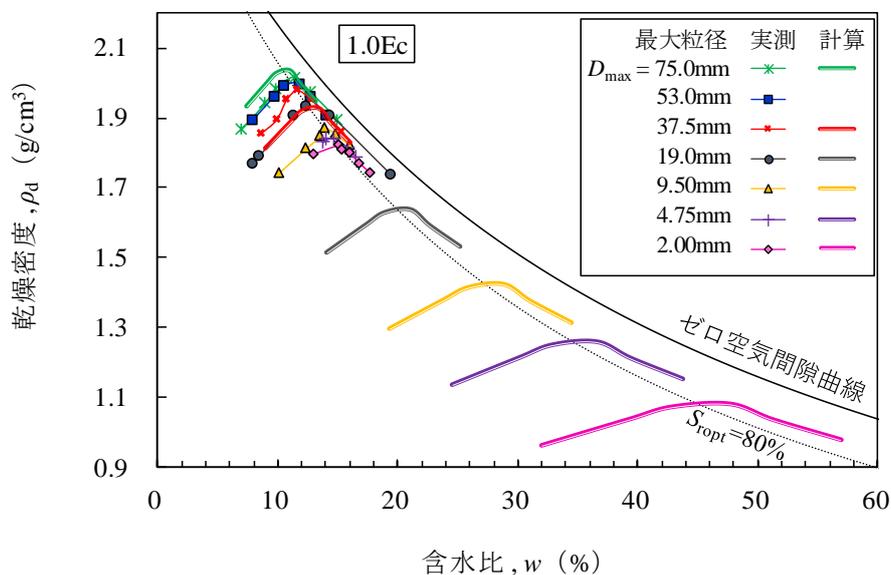


(a) 締固めエネルギー—CEL 1.0 E_c

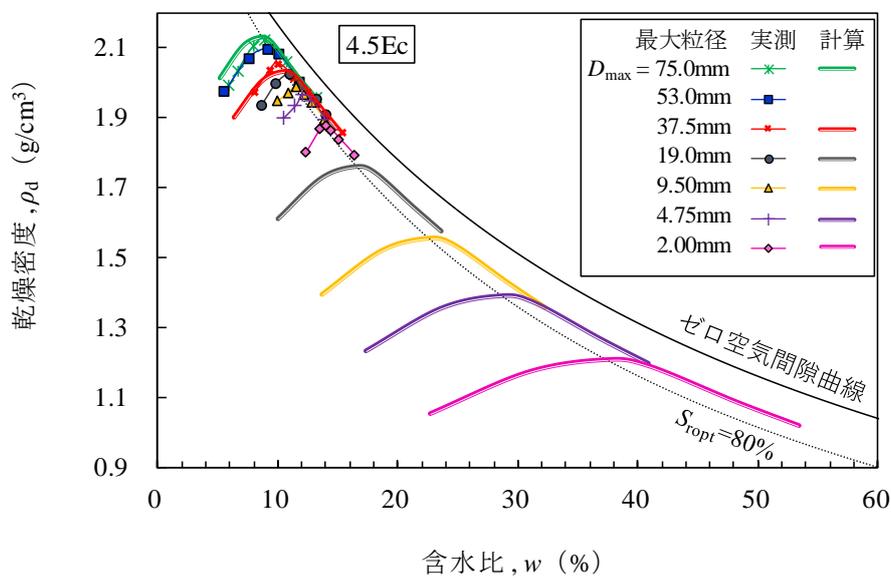


(b) 締固めエネルギー—CEL 4.5 E_c

図 4-29 最大粒径 $D_{max}=37.5\text{mm}$ を基準として WH 式より推定した各最大粒径 D_{max} の計算締固め曲線と実測値との比較



(a) 締固めエネルギー—CEL 1.0 E_c



(b) 締固めエネルギー—CEL 4.5 E_c

図 4-30 最大粒径 $D_{max}=53.0\text{mm}$ を基準として WH 式より推定した各最大粒径 D_{max} の計算締固め曲線と実測値との比較

4-3-5 最大乾燥密度比 X と礫率 P の関係による礫率補正

図 4-24～図 4-30 より、ある締固めエネルギー CEL で締固められた基準となる最大粒径 D_{max} 試料の乾燥密度 ρ_d から、それより大きな粒子の土を混入した後に同一の締固めエネルギー CEL で締固めた場合の乾燥密度 $[\rho_d]_{WH}$ を式(4-6)により正確に推定することは難しく、これを実現するためには、式(4-6)に示す WH 式をさらに補正する必要があることを示した。また、式(4-7)における所定の最大粒径 D_{max} よりも小さい粒子の土を除去した場合の WH 式による乾燥密度 $[\rho_d]_{WH}$ についても、その推定精度は礫率 P に依らず高いものではなく、式(4-7)の更なる補正が必要である。

ここで、式(4-6)、(4-7)により推定した最大乾燥密度を $[(\rho_d)_{max}]_{WH}$ 、同一の最大粒径 D_{max} 試料を $1.0E_c$ で締固めた時の最大乾燥密度の実測値を $[(\rho_d)_{max}]_{1E_c}$ と定義すると、 $[(\rho_d)_{max}]_{WH}$ を $[(\rho_d)_{max}]_{1E_c}$ で除したものを最大乾燥密度比 X と定義し、これと礫率 P との関係（以下、 X - P 関係）による式(4-6)、式(4-7)の更なる補正を検討した。

まず、最大乾燥密度比 X の算出方法について、最大粒径 $D_{max}=2.00\text{mm}$ の締固め曲線を例に用いて説明する。図 4-31 は、締固めエネルギー CEL が $1.0E_c$ で締固めた最大粒径 $D_{max}=2.00\text{mm}$ 、 75.0mm の実測締固め曲線と、最大粒径 $D_{max}=2.00\text{mm}$ の実測締固め曲線を基準とし、式(4-6)により最大粒径 $D_{max}=75.0\text{mm}$ に礫率補正した計算締固め曲線を示した。図 4-31 より、最大乾燥密度比 X は、”式(4-6)より推定した最大粒径 $D_{max}=75.0\text{mm}$ の最大乾燥密度 $[(\rho_d)_{max}]_{WH}=2.472\text{g/cm}^3$ (推定値)”/”実測の最大乾燥密度 $[(\rho_d)_{max}]_{1E_c}=2.014\text{g/cm}^3$ (実測値)” $\div 1.227$ ということになる。この時、図 4-18 に示す粒度分布より、最大粒径 $D_{max}=2.00\text{mm}$ に対する最大粒径 $D_{max}=75.0\text{mm}$ の礫率 P を算出することで、 X - P 関係が得られる。同様に、図 4-32 に最大粒径 $D_{max}=75.0\text{mm}$ を基準として最大粒径 $D_{max}=2.00\text{mm}$ に礫率補正した結果も示すが、このときの最大乾燥密度比 X は 0.579 となる。

この整理方法に倣い、その他の最大粒径 D_{max} に対しても最大乾燥密度比 X と礫率 P の組合せを算出し、それら全ての結果を図 4-33 のように取り纏めた。図 4-33 より、所定の最大粒径 D_{max} よりも大きい粒子の土を混入した時では、推定値は実測値よりも大きく、最大乾燥密度比 X は 1.0 以上となっている。つまり、実際の締固めにより得られた最大乾燥密度 $[(\rho_d)_{max}]_{1E_c}$ が WH 式により推定した最大乾燥密度 $[(\rho_d)_{max}]_{WH}$ に達するために必要な締固めエネルギー CEL は $1.0E_c$ よりも大きいことを示している。一方、所定の最大粒径 D_{max} よりも大きい粒子の土を除去した時では、推定値は実測値よりも小さく、最大乾燥密度比 X は 1.0 以下となっている。つまり、礫粒子を含む試料を締固めた場合に、礫除去部分に加わった締固めエネルギー CEL は試料全量に与えた締固めエネルギー CEL よりも小さいことを示している。

従来、WH 式の適用範囲とされてきた礫率 $P < 0.3 \sim 0.4$ においても推定値と実測値との差は有意であり、計算値は過大評価されており、その程度は礫率 P が大きくなるほど顕著となることが分かる。また、所定の最大粒径 D_{max} よりも小さい土を除去する場合も同様であり、礫率 $P < 0.3 \sim 0.4$ の範囲でも計算値と実測値の差は大きく、計算値は過小評価されており、その程度は礫率 P が大きくなるほど明白となる。これらの傾向は最大粒径 D_{max} に依らず同様であり、図 4-33 に示す X - P 関係の形状が相関関係にあることから明らかである。

図4-34には、最適含水比率 W と礫率 P の関係（以下、 W - P 関係）を示した。ここで、最適含水比率 W は、最大乾燥密度比 X の算出方法と同様に、WH 式により算出した最適含水比 $[w_{opt}]_{WH}$ を、同一の最大粒径 D_{max} 試料を同一の締固めエネルギー CEL で締固めた時の最適含水比 $(w_{opt})_{IEc}$ で除した値と定義した。図4-34は、図4-33に示す X - P 関係と同様に、 W - P 関係も最大粒径 D_{max} に依らず高い相関関係が確認された。これは、WH 式による礫率補正式では、飽和度 S_r が一定と仮定しており、乾燥密度 ρ_d と含水比 w は飽和度 S_r の従属関数であるためである。

以上のことから、 X - P 関係は最大粒径 D_{max} を変化させても一意の関係にあることが示され、それは室内試験用のモールドの許容最大粒径を超えるような大粒径を含む試料に対しても適用できることがわかった。これより、WH 式と X - P 関係を用いることで、室内締固め試験結果から大粒径を含む現場全粒径相当の乾燥密度 ρ_d や含水比 w を推定できることを示した。

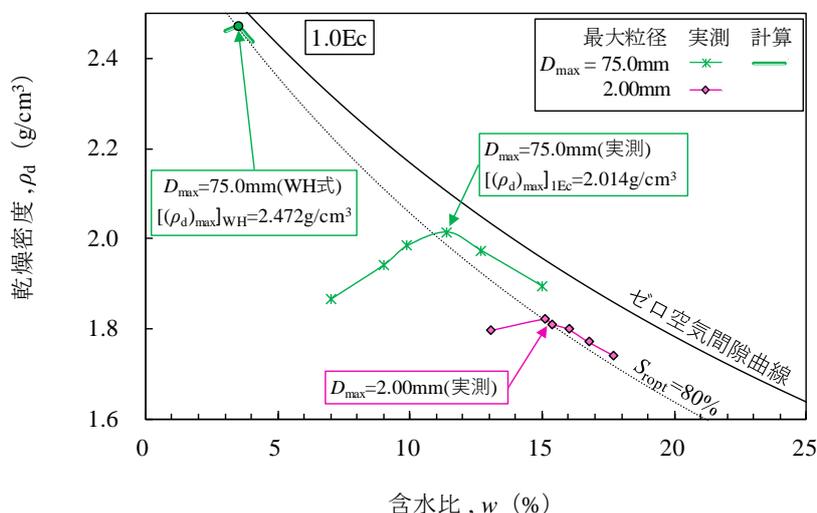


図4-31 最大乾燥密度比 X と礫率 P の算出（礫混入）

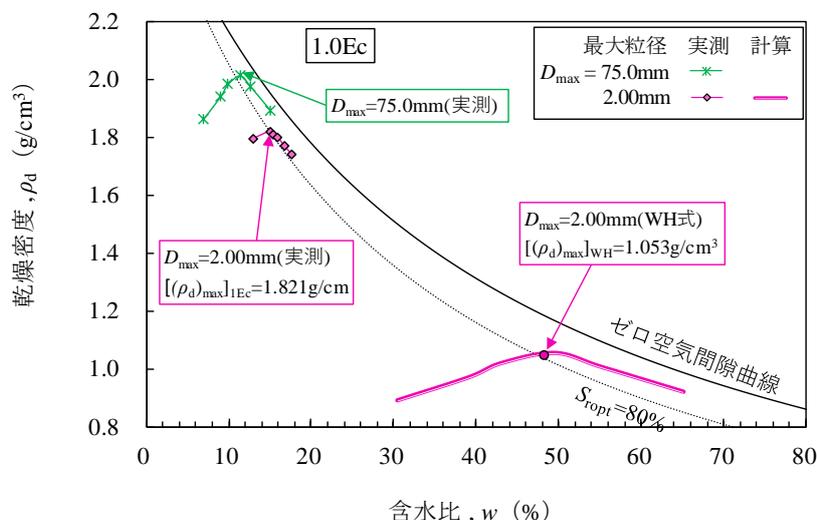
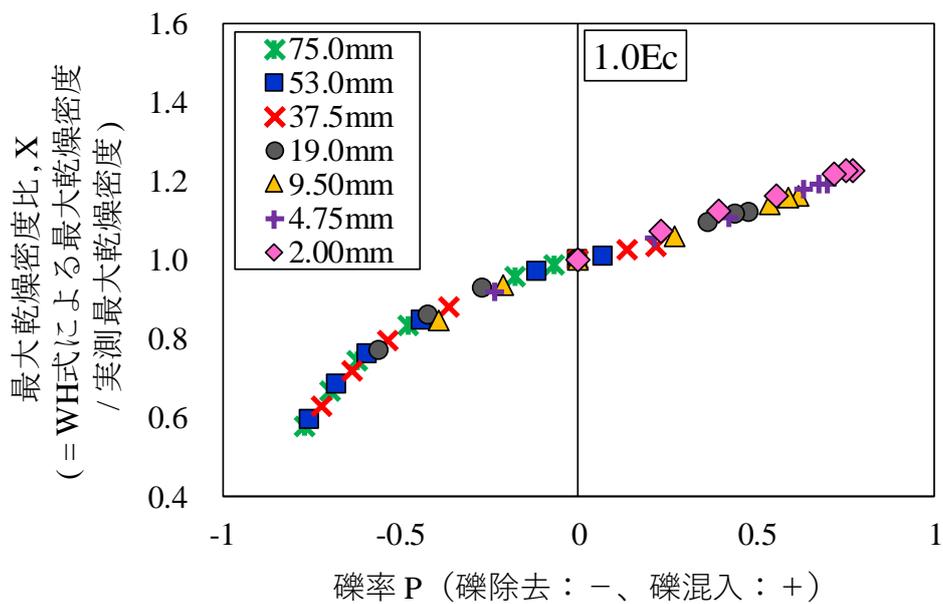
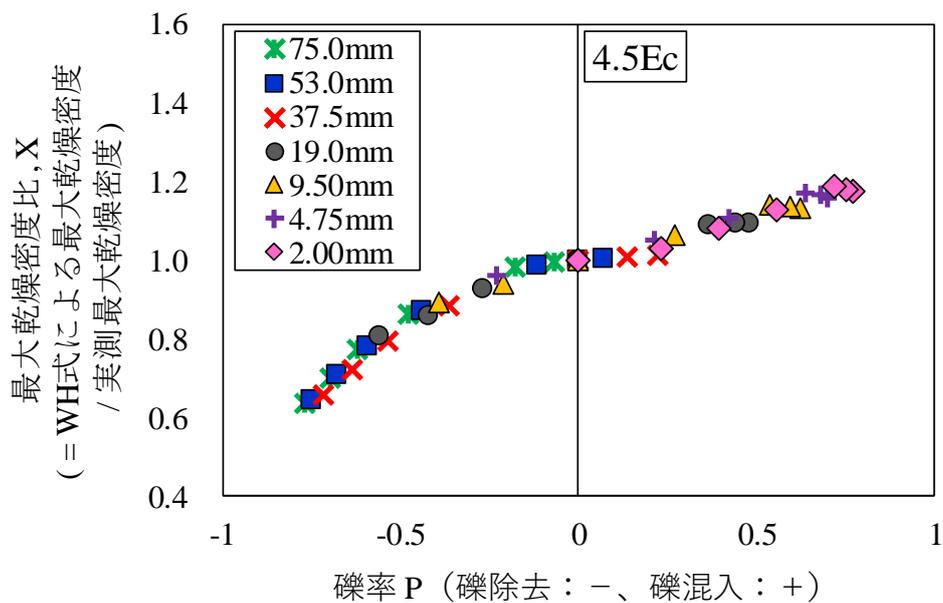


図4-32 最大乾燥密度比 X と礫率 P の算出（礫除去）

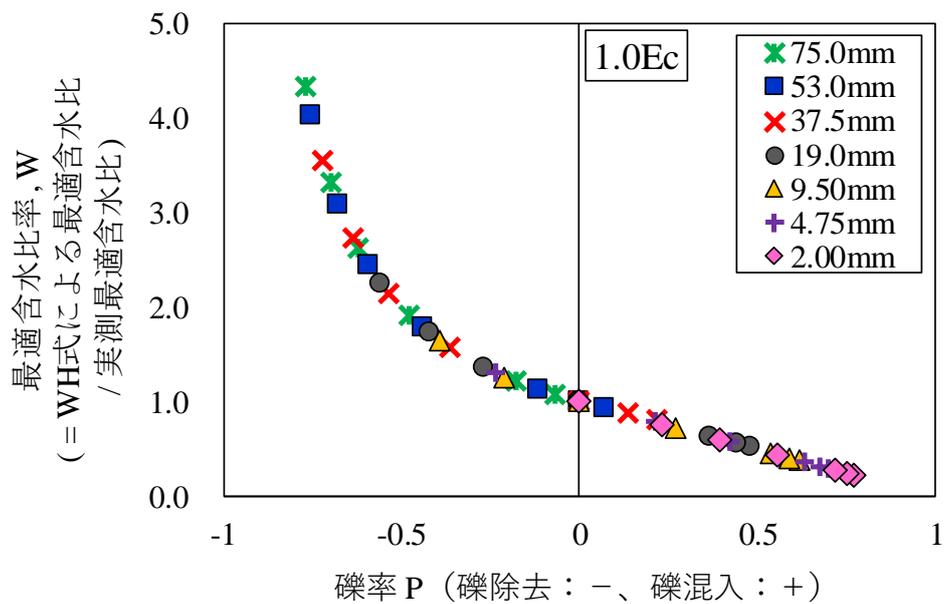


(a) 締固めエネルギー-CEL 1.0Ec。

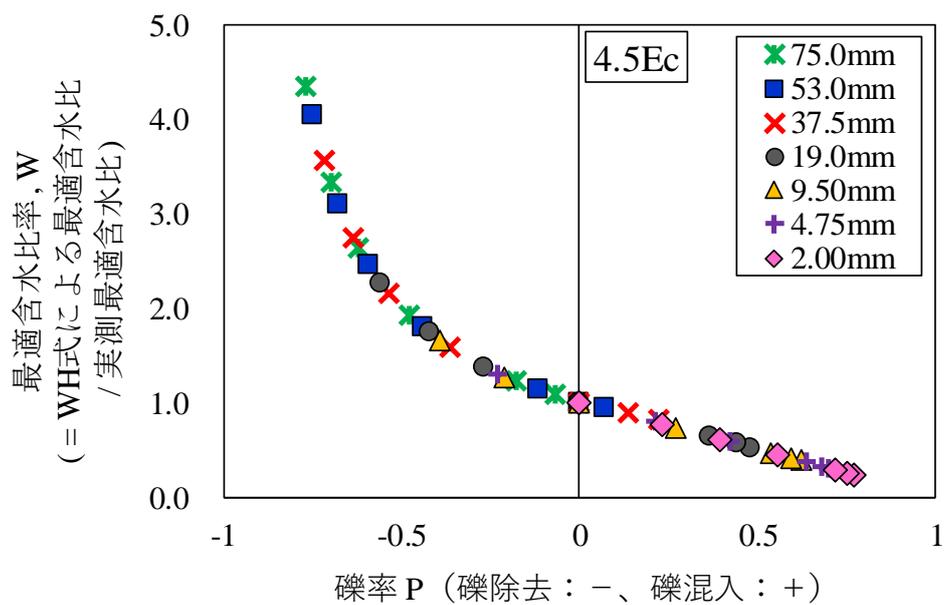


(b) 締固めエネルギー-CEL 4.5Ec。

図 4-33 最大乾燥密度比 X と礫率 P の関係



(a) 締固めエネルギー CEL $1.0E_c$



(b) 締固めエネルギー CEL $4.5E_c$

図4-34 最適含水比率 W と礫率 P の関係

第4章 まとめ

本章では、大粒径を含む盛土材を対象に現場転圧試験を実施し、 CCV 値を用いた乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を構築するとともに、関係式を用いた CCV 値による締固め管理手法の実工事への適用性を検討し、以下の知見を得た。

- ① 最大粒径 $D_{max}=75.0\text{mm}$ の大粒径粒子を含む盛土材に対しても、 CCV 値は、転圧回数 N と締固めエネルギー CEL に依らずに乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の独立変数とする関係式で表現できる。土粒子密度 ρ_s 、含水比 w が既知で、 CCV 値を施工時に測定した場合には乾燥密度 ρ_d を算出できる。したがって、関係式を用いればリアルタイムかつ面的な締固め管理手法を実現することが可能となる。
- ② 関係式に基づく締固め管理において、乾燥密度 ρ_d と CCV 値の空間上に締固め度 D_c と飽和度 S_r の管理値を図化することで、 CCV 値と乾燥密度 ρ_d の取りうる範囲を設定できる。 CCV 値の目標値を目指した施工を行うことで、締固め度 D_c 、飽和度 S_r 、含水比 w により規定された品質管理を行うことができる。また、盛土材の含水比 w を一定と仮定した場合、飽和度 S_r が最適飽和度 S_{ropt} になる少し前で CCV 値は極大値を示す。施工時には、所定の転圧回数 N を達成した上で CCV 値がこの極大値に達成したことを確認すれば、高い締固め状態を実現できる。また、 CCV 値が極大値以下の場合、 CCV 値単体ではなく転圧回数 N と組合せて管理することで、乾燥密度 ρ_d を正しく評価することができる。

次に、現場全粒度試料に対して、せん頭粒度法により最大粒径 D_{max} を変化させて得られた、異なる最大粒径 D_{max} の試料に対する室内締固め試験を実施し、 X - P 関係による WH 式のさらなる補正手法について検討し、以下の知見を得た。

- ③ 最大粒径 D_{max} を変化させた室内締固め試験結果より、最大乾燥密度 $(\rho_d)_{max}$ が得られる飽和度 S_r である最適飽和度 $(S_r)_{opt}$ は、最大粒径 D_{max} や締固めエネルギー CEL に依らず概ね一定値を示すことがわかった。
- ④ ある締固めエネルギー CEL で締固められた最大粒径 D_{max} の小さい土の乾燥密度 ρ_d を用いて、Walker-Holtz式(以下、 WH 式)^{6),7)}により、より大きな粒径の土を含む土の乾燥密度 $[\rho_d]_{WH}$ を推定する場合、 WH 式はより大きな粒径の土を混入した場合でも元の土にも一定の締固めエネルギーが加えられていると仮定しているため、乾燥密度 ρ_d を過大に評価する傾向がみられた。

一方、ある締固めエネルギー CEL で締固められた最大粒径 D_{max} の大きい土の乾燥密度 ρ_d を用いて、 WH 式により、所定の最大粒径 D_{max} がより小さな土の乾燥密度 $[\rho_d]_{WH}$ を推定する場合、乾燥密度 ρ_d を過小に評価する傾向がみられた。

また、本来、 WH 式の適用範囲はある既定の最大粒径 D_{max} よりも大きい礫率 $P=0.3\sim 0.4$ までとされているが、この傾向は礫率 P に依らず確認されているため、乾燥密度 ρ_d を精度良く推定するためには、 WH 式による礫率補正式のさらなる補正が必要である。なお、礫率 P は、

ある所定の最大粒径 D_{max} よりも大きい粒径の土の重量と、全粒径の土の重量の比である。

- ⑤ 所定の最大粒径 D_{max} の土を用いて、最大粒径 D_{max} がより大きい土、もしくはより小さい土の最大乾燥密度 ρ_{dmax} を精度良く推定するためには、WH式と最大乾燥密度比 X と礫率 P の関係を組み合わせることによる修正が好ましい。この方法は、WH式の適用範囲である礫率 P が0.3~0.4よりも低い範囲から高い範囲の広範囲の礫率 P に適用できる。

以上より、大粒径粒子を含む現場全粒度試料に対しても、CCV値による締固め管理の有効性を確認するとともに、WH式と X - P 関係を組合せによる礫率補正の高度化により、現場試験と室内試験における最大粒径 D_{max} の違いが品質評価に与える影響を解消した。これより、従来よりも適切な品質評価に基づく盛土構造物の高品質化を実現することができる。

第4章の参考文献

- 1) 公益社団法人地盤工学会：突固めによる土の締固め試験方法，地盤材料試験の方法と解説-二分冊の1-，pp373～383，2009.
- 2) 公益社団法人地盤工学会：土の圧密排水（CD）三軸圧縮試験方法，地盤材料試験の方法と解析-二分冊の2-，pp.579～604，2009.
- 3) 公益社団法人地盤工学会：電子レンジを用いた土の含水比試験，地盤材料試験の方法と解析-二分冊の1-，pp106～113，2009.
- 4) 東日本高速道路株式会社，東日本高速道路株式会社，東日本高速道路株式会社：RI計器による管理，土工施工管理要領，pp.2-12～2-25，2017.
- 5) 横田聖哉，吉田武男，藤井弘章，内山恵一：振動ローラ加速度を利用した締固め管理の検討-大規模土工における情報化施工に関する研究(3)-，第37回地盤工学研究発表会，pp.664-665，2002.
- 6) Walker, F. C. and Holtz, W.C.: Control of Embankment Material by Laboratory Testing. Proc. ASCE, 77-108, pp.1-25 (1951)
- 7) Holtz, W. G. and Lowitz.: Compaction characteristics of gravelly soils. Bureau of Reclamation, Earth laboratory report, No. EM-509 (1957).
- 8) 井原壯，岡田舜啓，真柄海里，野田翔兵，菊池喜昭，龍岡文夫，永井裕之，三反畑勇：砂礫の締固め特性と強度特性に及ぼす礫含有の影響の実験的検討，第16回地盤工学関東支部発表会 GEO 関東,2019
- 9) 上本雄也，澁谷啓，橋元洋典，川尻峻三：砂礫盛土材の締固め特性および変形・強度特性に及ぼす粒度特性の影響，地盤工学ジャーナル，Vol.6, No.2, pp181-190, 2011.
- 10) 龍岡文夫ら(2013～2015): 地盤工学・技術ノート，盛土の締固め1～20回，雑誌「基礎工」，2013年7月号～2015年2月号.
- 11) 井原壯，飯名亮介，永井裕之，三反畑勇，西尾竜文，野田翔兵，菊池喜昭，龍岡文夫：Walker-Holtzの礫率補正法の実験的検討，第15回関東支部発表会，2018.

第 5 章 加速度応答法を用いた新しい締固め管理手法の実工事への適用性

本章においては、第 3 章と第 4 章で行った実験的検討の結果を踏まえ、CCV 値と乾燥密度 ρ_s 、飽和度 S_r の関係式と X - P 関係による礫率補正式に基づく新しい締固め管理手法を提案する。さらに、上記の締固め管理手法の実工事への適用性を検証することを目的とし、実工事で得られた CCV 値と含水比 w の測定データを対象に締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を評価した。

5-1 これまでの検討結果

本項においては、第 3 章の検討によって得られた地盤剛性指標と盛土の乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r との関係式と、第 4 章の検討から得られた最大乾燥密度比 X と礫率 P との関係に基づく礫率補正の高度化に関する検討結果から、それぞれが盛土締固め管理における施工の効率化と盛土構造物の高品質化に与える影響について整理した。

5-1-1 地盤剛性指標による乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の推定

盛土締固め管理における施工方法の効率化に与える影響として、第 3 章における検討結果から、以下のような主要な結論が得られた。

① 各地盤剛性指標による乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の推定式

CCV システム¹⁾と現場 CBR 試験²⁾、小型 FWD 試験³⁾、キャスポル試験⁴⁾の各試験から求められるいずれの地盤剛性指標(CCV 値、CBR 値、 $(K_{30})_{FWD}$ 、 $(K_{30})_{キャスポル}$)において、地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r を独立変数とする関係式で表現できることがわかった。これらの経験式を用いれば、転圧回数 N に関わらず、含水比 w と測定された地盤剛性指標から、乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r を求めることができる。

② 地盤剛性指標同士の相関性

それぞれの地盤剛性指標(CCV 値、CBR 値、 $(K_{30})_{FWD}$ 、 $(K_{30})_{キャスポル}$)の間の相関を見ると、ある程度のばらつきはあるもののそれぞれほぼ一対一の関係があることがわかった。このことは、従来よく用いられてきた地盤剛性指標(CBR 値、 $(K_{30})_{FWD}$ 、 $(K_{30})_{キャスポル}$)に替わって、CCV 値によって従来の地盤剛性指標と同等の地盤剛性指標を求めることができるということを意味しており、すなわち、CCV 値によって地盤剛性指標を面的にリアルタイムで収集が可能であること意味している。

③ 関係式を用いた地盤剛性指標の上下限值による締固め管理手法

地盤剛性指標(CCV 値, CBR 値, $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$)と乾燥密度 ρ_d , 飽和度 S_r の関係により, 地盤剛性指標の目標値を目指した施工を行うことで, 締固め度 D_c , 飽和度 S_r , 含水比 w により規定された品質管理を行うことができる. また, 地盤剛性指標単体ではなく, 転圧回数 N ごとの地盤剛性指標の変化方向も考慮することで乾燥密度 ρ_d を正しく評価することができる.

以上より, 地盤剛性指標(CCV 値, CBR 値, $(K_{30})_{FWD}$, $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$)は, いずれも乾燥密度 ρ_d , 飽和度 S_r を推定することが可能であるため, 地盤剛性指標による締固め管理の有効性を確認した. なお, 現場 CBR 試験, 小型 FWD 試験, キャスポル試験は, いずれも施工後の点情報としてデータを取得するのに対して, CCV システムは施工中にリアルタイムかつ面的にデータを取得できるため, 本研究の目的の一つである施工の合理化に最も適しているといえる.

5-1-2 最大粒径 D_{\max} の違いによる特性が品質評価に与える影響

第3章の検討では, 比較的最大粒径の小さい, また比較的良好に管理された条件での実験であったので, 第4章では, 大粒径の土を含む現場の施工試験相当の条件で, CCV 値について, CCV 値と乾燥密度 ρ_d , 飽和度 S_r の関係を求め, その結果を用いて, 実施工での施工管理の検討を行った. 以下がその主たる結論である.

- ① 最大粒径 $D_{\max}=75.0\text{mm}$ の大粒径粒子を含む盛土材に対しても, CCV 値は, 転圧回数 N や締固めエネルギー CEL に依らずに乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の独立変数とする関係式で表現できる. この関係式を用いることで, 土粒子密度 ρ_s , 含水比 w が既知で, CCV 値を施工時に測定した場合には乾燥密度 ρ_d を算出できる.
- ② 関係式に基づく締固め管理において, 乾燥密度 ρ_d と CCV 値の空間上に締固め度 D_c と飽和度 S_r の管理値を図化することで, CCV 値による品質管理を行うことができる. また, 盛土材の含水比 w を一定と仮定した場合, 飽和度 S_r が最適飽和度 $S_{r\text{opt}}$ になる少し前で CCV 値は極大値を示すため, 施工時には, 所定の転圧回数 N を達成した上で CCV 値がこの極大値に達成したことを確認すれば, 必要な高い締固め状態を実現できる. また, CCV 値が極大値以下の場合, CCV 値単体ではなく転圧回数 N と組合せた管理を行うことで, 乾燥密度 ρ_d を正しく評価することができる.

実務での施工管理においても, 既定の締固めエネルギーレベルでの最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ をもとに密度管理が行われることが多い. このような管理をするためには, 室内締固め試験が必要となる. 室内締固め試験では, 用いることのできる最大粒径に限りがあるため, 実際に用いる代表的な地盤材料から最大粒径 D_{\max} を変更させて行われる. 第4章では, 小さい最大粒径 D_{\max} の締固め試験結果から, 大粒径を含む地盤材料の締固め挙動を推定する方法について検討した. 如何その主たる結論である.

- ③ せん頭粒度法により最大粒径 D_{max} を変化させたいくつかの地盤材料に対する室内締固め試験結果より、最大乾燥密度 ρ_{dmax} が得られる飽和度 S_r である最適飽和度 S_{ropt} は最大粒径 D_{max} や締固めエネルギー CEL に依らず概ね一定値を示すことがわかった。
- ④ ある締固めエネルギー CEL で締固められた最大粒径 D_{max} の小さい土の乾燥密度 ρ_d を用いて、Walker-Holtz式(以下、WH式)^{6),7)}により、より大きな粒径の土を含む土の乾燥密度 $(\rho_d)_{WH}$ を推定する場合、WH式はより大きな粒径の土を混入した場合でも元の土にも一定の締固めエネルギーが加えられていると仮定しているため、乾燥密度 ρ_d を過大に評価する傾向がみられた。
- 一方、ある締固めエネルギー CEL で締固められた最大粒径 D_{max} の大きい土の乾燥密度 ρ_d を用いて、WH式により、所定の最大粒径 D_{max} がより小さな土の乾燥密度 $(\rho_d)_{WH}$ を推定する場合、乾燥密度 ρ_d を過小に評価する傾向がみられた。
- また、本来、WH式の適用範囲はある既定の最大粒径 D_{max} よりも大きい礫率 $P=0.3\sim 0.4$ とされているが、この傾向は礫率 P に依らず確認されているため、乾燥密度 ρ_d を精度良く推定するためには、WH式による礫率補正式のさらなる補正が必要である。なお、礫率 P は加えた礫粒子の重量と礫混入後の全粒子の質量の比である。
- ⑤ 所定の最大粒径 D_{max} の土を用いて、最大粒径 D_{max} がより大きい土、もしくはより小さい土の最大乾燥密度 ρ_{dmax} を精度良く推定するためには、WH式と最大乾燥密度比 X と礫率 P の関係を組み合わせることによる修正が好ましい。この方法は、WH式の適用範囲である礫率 P が $0.3\sim 0.4$ よりも低い範囲から高い範囲の広範囲の礫率 P に適用できる。

以上より、大粒径粒子を含む盛土材に対しても、 CCV 値による締固め管理の有効性を確認するとともに、WH式と $X-P$ 関係を組合せによる礫率補正の高度化により、粒径特性の違いが品質評価に与える影響を解消した締固め管理を実現できる。

5-2 加速度応答法を用いた新しい締固め管理手法の実工事への適用方法

前項に示した検討結果を踏まえ、加速度応答法(CCV 値)を用いた新しい締固め管理手法の実工事への適用方法について説明する。図 5-1 には、本手法を実工事に適用する場合の手順フローを示す。

まず、施工前の事前準備として、室内試験と試験施工を行う。

室内試験では、締固め施工に用いる試料をふるって、少なくとも二種類の最大粒径(例えば、最大粒径 $D_{\max}=2.00, 37.5\text{mm}$)を持つ試料を準備し、突固め試験(JIS A 1210 : 2009)⁸⁾を実施する。この際、付随して、土粒子密度試験(JIS A 1202 : 2009)⁹⁾、粒度試験(JIS A 1204 : 2009)¹⁰⁾も実施する。締固め試験の結果を整理し、最適飽和度 S_{ropt} 、突固め時の各締固め点から D_c ～飽和度差 S_r-S_{ropt} 曲線、最大乾燥密度比(最大粒径 D_{\max} が小さいほうの実測最大乾燥密度 ρ_{dmax} を礫混入率 P に基づいて WH 式で補正した最大乾燥密度 $[\rho_{\text{dmax}}]_{\text{WH}}$ をより大きな最大粒径 D_{\max} を持つ試料の実測最大乾燥密度 ρ_{dmax} で除したもの) X -礫混入率 P 関係を求める。

次に、試験施工を行う。試験施工は、要求性能を満足する施工仕様(重機、撒き出し厚、施工含水比 w 、転圧回数 N など)を決定することと、CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を構築することを目的として行う。そのため、試験施工では、CCV 値を取得するとともに、施工後に RI 試験(密度と含水比の計測)を実施する。なお、要求性能を満足する施工仕様となっているかの判断は、上記の室内試験の結果を利用する。すなわち、現場試料の $1.0E_c$ での最大乾燥密度 ρ_{dmax} を求め、その密度をもとに、目標とする締固め度 D_c の時の密度を決定するとともに、室内試験の時の最適飽和度 S_{ropt} も不変のものとして取り扱う。

最後に、本施工において CCV 値による締固め管理を行う。試験施工で構築した CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を用いて、施工中に取得する CCV 値と施工前に測定した含水比 w から乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r をリアルタイムに推定する。このうち、乾燥密度 ρ_d と事前準備で算出した最大乾燥密度 $[\rho_{\text{dmax}}]_{\text{WH},X-P}$ を用いて締固め度 $(D_c)_{\text{IEc}}$ を評価する。

これらの情報を重機のオペレータが施工中にリアルタイムかつ面的に確認できるようなモニタリングシステムを構築することで、締固め度 $(D_c)_{\text{IEc}}$ や飽和度 S_r の良否を判断しながら最適な施工を行うことが可能となる。これより、合理的な施工法による高品質な盛土構造物の構築が可能になる。以下に、各項目の実施内容の詳細を説明する。

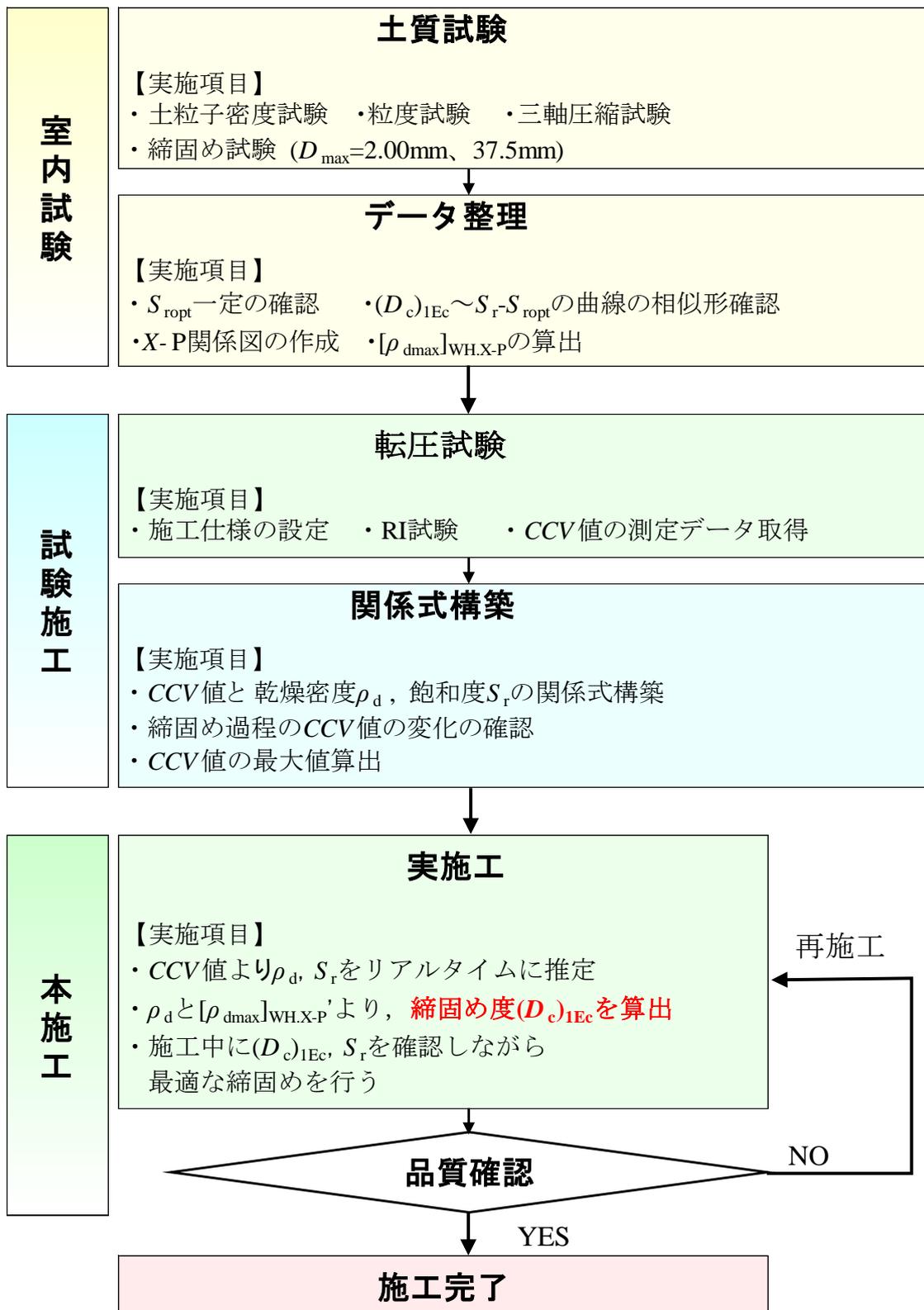


図 5-1 加速度応答法 (CCV 値) を用いた新しい締固め管理手法の手順フロー

5-2-1 施工前の実施事項

施工前は、室内土質試験とデータ整理を行う必要がある。それぞれにおける実施内容を以下に示す。

(1) 室内試験

室内試験では、以下に示す三つの試験を行う。これらは必要最低限の試験項目を示したものであり、これ以外にも必要な試験があれば、適宜実施する。

- ・突固めによる土の締固め試験 (JIS A 1210 : 2009) ⁸⁾
- ・土粒子の密度試験 (JIS A 1202 : 2009) ⁹⁾
- ・土の粒度試験 (JIS A 1204 : 2009) ¹⁰⁾

土粒子密度試験は、土質の性状を把握するために必要な情報であり、飽和度 S_r の算出に欠かすことのできない指標の一つである。

粒度試験は、土質の性状 (細粒分含有率 F_c や礫率 P , 均等係数 U_c や曲率係数 U_c' など) を把握するために必要な試験であり、基本情報として把握する必要がある。可能な限り沈降分析も実施する。粒度試験の結果より、現場全粒径試料の最大粒径 D_{max} を確認する。

土の締固め試験は、土質の締固め特性を把握するために必要な試験である。通常の盛土の締固め管理では、1種類の土試料を対象に締固め試験を実施するが、本研究で提案する新しい締固め管理では、室内試験において実現可能な範囲で最大粒径 D_{max} を変化させた2種類の土質を対象に試験を行う。この目的は、第4章に示したように、 $X-P$ 関係は粒径に依らず高い相関関係にあるため、必要最低限の試験数で合理的に $X-P$ 関係を構築することである。図5-2は、最大粒径 $D_{max}=2.00\text{mm}$, 37.5mm の2種類の材料を対象に実施した締固め試験の例を示す。図5-2より、粒径に依らず最適飽和度 S_{ropt} は一致していることがわかる。

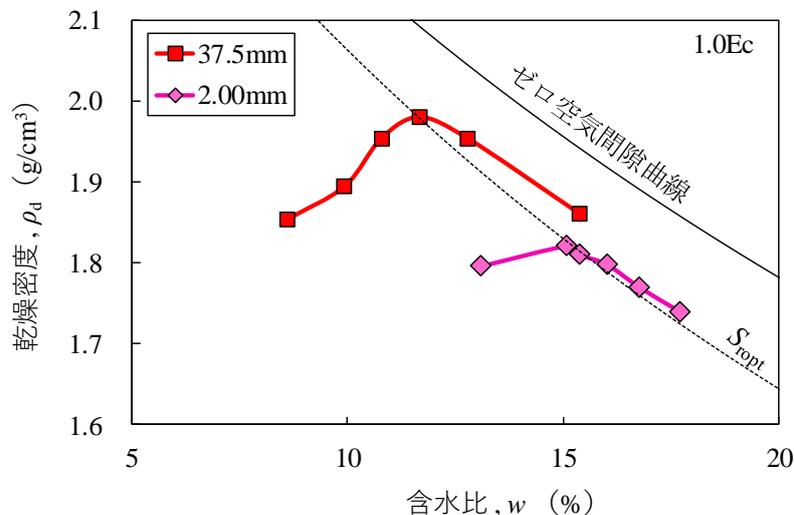


図5-2 最大粒径 $D_{max}=2.00\text{mm}$, 37.5mm の締固め曲線の例

(2) データ整理

室内試験データを整理し、図5-3に示す締固め度 D_c ～飽和度差 $S_r - S_{ropt}$ 曲線を作成する。図5-3より、締固め曲線形は湿潤側では相関性が低下する結果がみられるものの、粒径に依らず概ね相似関係にあることがわかる。図5-4は、2種類の締固め曲線から得られた $X-P$ 関係図を示す。 $X-P$ 関係は、粒径や締固めエネルギー CEL に依らず一致することが確認されているため、図中に示すような推定線を記述することができる。これより、最大粒径 $D_{max}=37.5mm$ を基準とした場合の現場全粒径試料に相当する礫率 P と最大乾燥密度比 X を求めることができるため、最大粒径 $D_{max}=37.5mm$ の締固め曲線を礫率補正により現場全粒度試料相当の締固め曲線に変換し、その時の最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH,X-P}$ を求める。

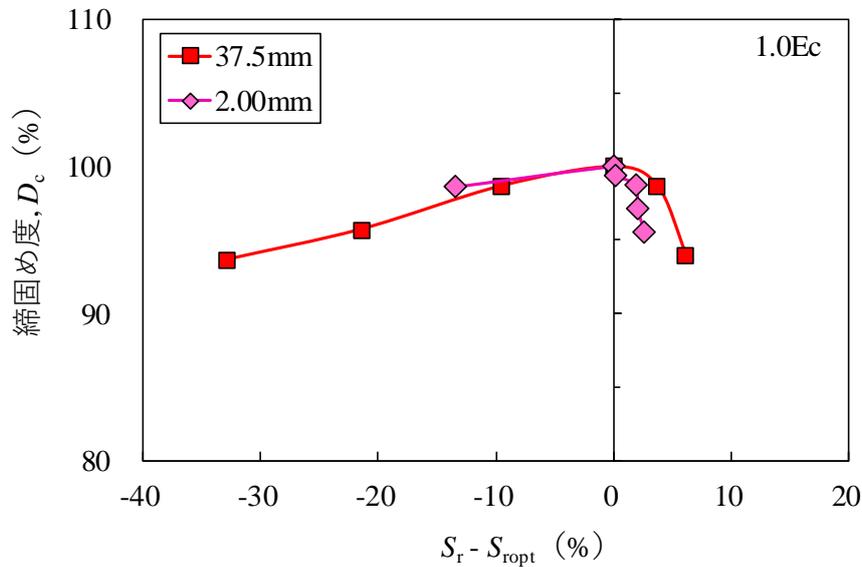


図5-3 締固め度 D_c と飽和度差 $S_r - S_{ropt}$ の関係の例

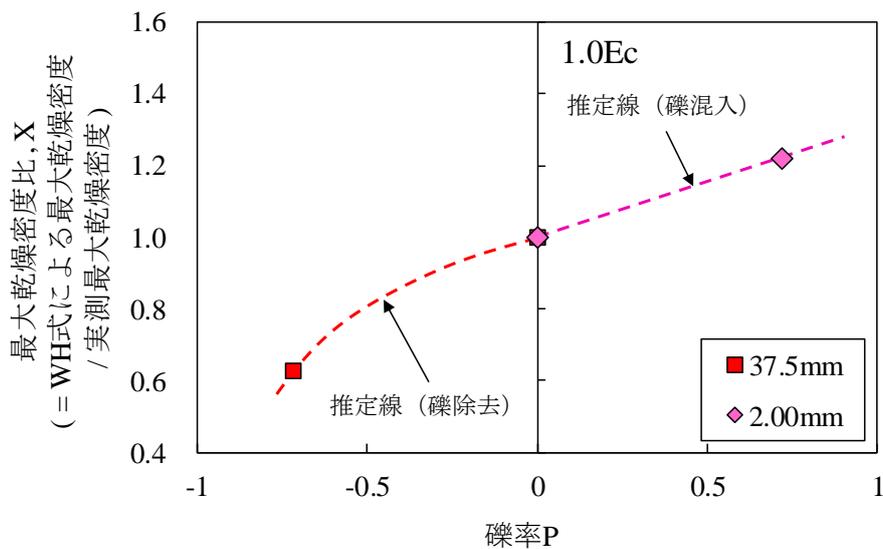


図5-4 最大粒径 $D_{max}=2.00mm$, $75.0mm$ の $X-P$ 関係の例

5-2-2 試験施工の実施事項

試験施工では、試験施工と CCV 値による乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式の構築を行う。それぞれについて、以下にその詳細を示す。

(1) 試験施工

通常の工法規定方式と同様に、施工仕様（施工重機、敷き均し厚、含水比 w 、転圧回数 N など）を決定するための試験施工を実施する。これに加え、新しい締固め管理では、 CCV 値の取得と、それに対応する密度試験(RI 試験など)を実施する。表 5-1 には、品質試験項目と品質試験測定頻度を示す。品質試験項目は、施工中には CCV 値を計測し、施工後には、レベルによる沈下量の計測、砂置換もしくは RI 試験による密度試験を実施する。なお、 CCV システムは、衛星通信状態が芳しくない山間部では、稀に測定データを取得できない事象が発生する。そのため、 CCV 値と正の相関を示すキャスポル試験や小型 FWD 試験を補足的に実施することを推奨する。図 5-5、図 5-6 には、試験施工試験ヤードと品質試験測定位置の例を示す。これらの品質測定データを解析し、 CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を構築する。また、締固め過程における CCV 値の変化も確認する。これは、第 4 章に示したように、一つの CCV 値から推定される二つの乾燥密度 ρ_d を正しく評価するためである。

表 5-1 品質管理項目と測定頻度の例

測定項目	撒出し	敷均し	初期 (無振動)	転圧回数 N (有振動)				
				2	4	6	8	12
CCV 測定	-	-	-	○	○	○	○	○
レベル測定	-	-	○	○	○	○	○	○
密度試験	-	-	○	○	○	○	○	○
RI 試験	-	-	○	○	○	○	○	○
キャスポル試験	-	-	○	○	○	○	○	○
小型 FWD 試験	-	-	○	○	○	○	○	○

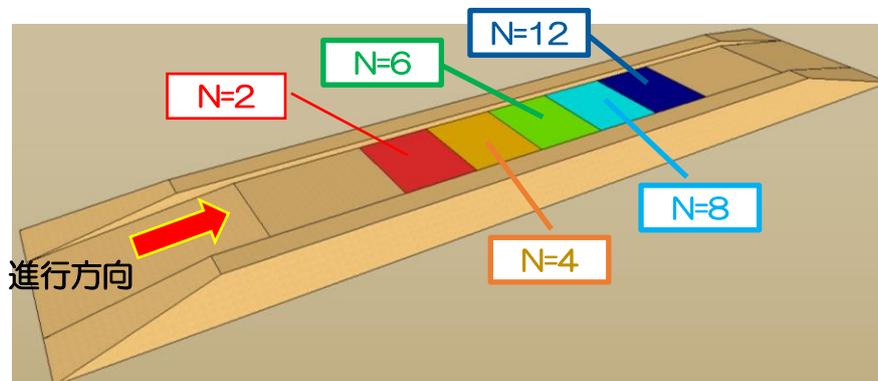
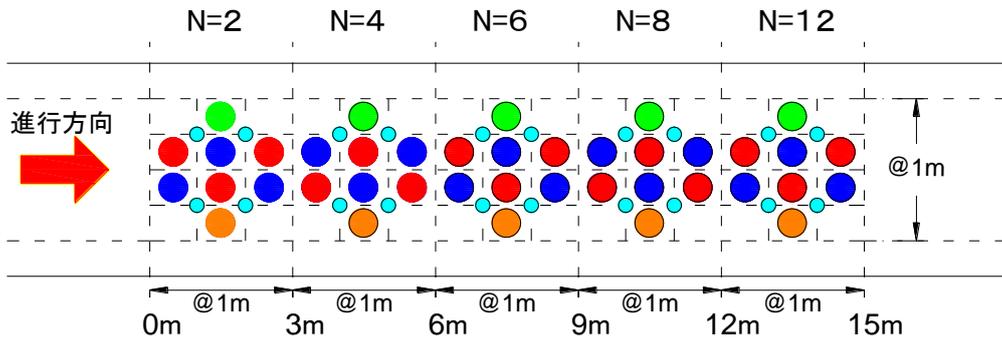


図 5-5 試験盛立ヤードの例



～凡例～ ● レベル測量 ● 砂置換 ● RI 試験 ● キャスポル試験 ● 小型 FWD 試験

図 5-6 品質試験位置図の例

(2) データ整理

試験施工で取得した測定データを解析し、飽和度 S_r をパラメータとした CCV 値と乾燥密度 ρ_d の推定式を作成する。図 5-7 に示すように、転圧試験で得られた乾燥密度 ρ_d と CCV 値の測定データを、飽和度 S_r 毎に分類する。この関係を表現する関数式として式(5-1)に示す飽和度 S_r をパラメータとした CCV 値と乾燥密度 ρ_d との関係式を構築する。これより、施工中に得られる CCV 値から乾燥密度 ρ_d や飽和度 S_r を即時に推定することができる。

$$CCV = f_{ccv}(S_r) \times (\rho_d - b)^c \quad (5-1)$$

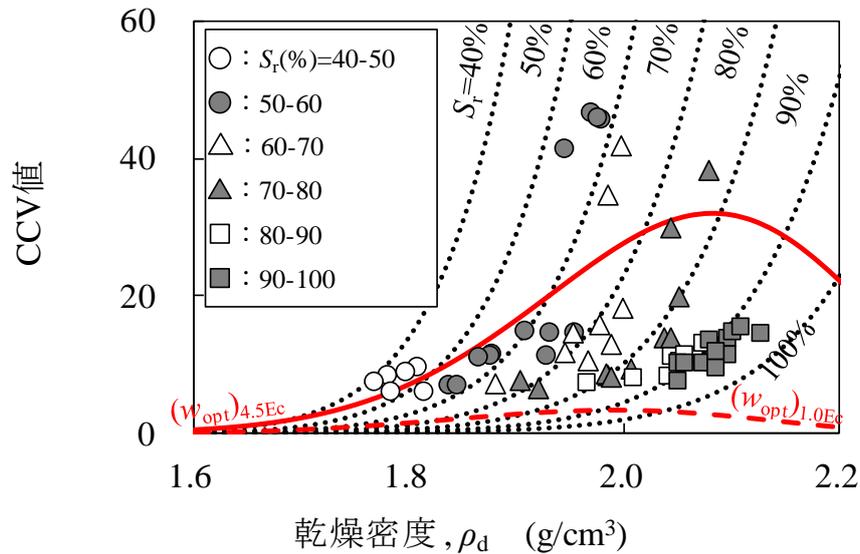


図 5-7 飽和度 S_r 毎に分類した CCV 値と乾燥密度 ρ_d の関係

5-2-3 本施工の実施事項

実施工では、施工中に取得する CCV 値と試験施工で構築した CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係性を組み合わせることで、リアルタイムかつ面的な品質管理を行う。 CCV 値から推定する乾燥密度 ρ_d は現場全粒径試料に相当する値であるため、事前準備で求めた最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WHLX-P}$ を用いて締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を評価する。

図5-8には、飽和度のモニタリング画面¹⁾を示す。これは、振動ローラの操縦席に搭載するモニタ上に投影される画面であり、振動ローラのGNSS情報と連動して画面上のローラアイコンが動くようになっていいる。振動ローラの走った軌跡には、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ や飽和度 S_r などの品質情報をコンタ表示することができる。画面には、締固め曲線も示すが、乾燥密度 ρ_d 、含水比 w 、飽和度 S_r で規定された品質管理範囲に概要する場合は黄色、それ以外は青や赤色で標記するようにプログラム上で認識されておくことで、オペレータはそのコンタを確認しながら施工することができる。これより、施工の手戻りや品質不良個所の見落としなどのリスクを排除した施工管理が可能となる。

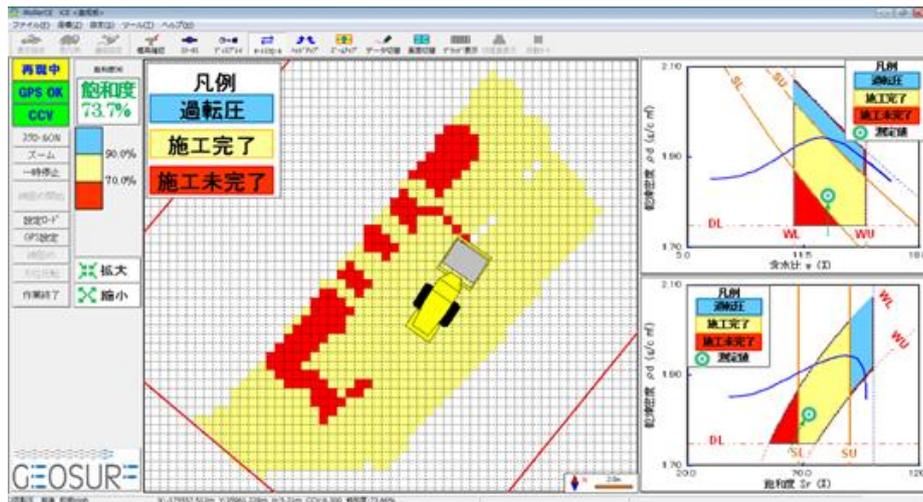


図5-8 飽和度のモニタリング画面

5-3 CCV値による締固め度(D_c)_{IEc}の推定方法

前節に示した締固め管理手法に倣い、第4章に示した転圧試験やX-P関係の検討に使用した最大粒径 $D_{max}=75.0\text{mm}$ の細粒分混じり礫質土を現場全粒度試料とする実施工において取得したCCV値と含水比 w の測定データの一部を用いて、締固め度(D_c)_{IEc}の算出を行う。具体的には、小粒径粒子を主体とする室内粒度試料を用いた室内締固め試験の結果をWH式とX-P関係により現場全粒度試料相当に礫率補正し、その時の最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH,X-P}$ を用いて締固め度(D_c)_{IEc}を評価した。なお、盛土材料や使用重機などの諸条件は、第4章に示した内容と同様であるため、ここでは説明を省略する。

5-3-1 実施工により得られたCCV値の測定データ

最大粒径 $D_{max}=75.0\text{mm}$ の細粒分混じり礫質土（以下、現場全粒度試料）を用いて実大締固め機械による実施工時において得られた含水比毎 ($w=10.4\%$, 10.7% , 11.0% , 11.3% , 12.3% , 12.7% , 13.0%) のCCV値データを図5-9～図5-15に示す。これらのデータは、施工日、施工層がそれぞれ異なる条件での施工時に得られたデータである。CCV値は、第4章に示した転圧試験と同様に施工エリアを2m各に分割し、その範囲内に存在する50cmメッシュのCCV値の平均値として評価した。施工含水比 w は、盛土場にダンプ運搬した土砂の代表的な場所で複数回のRI試験を実施し、それらの平均値を設定した。また、施工含水比 w は場所、時間によるばらつきはないものと仮定し、一定値として取り扱うことにした。図5-9～図5-15をみると、含水比毎にデータ数にばらつきはあるものの、CCV値は10以下のデータが大半を占めており、そのうちCCV値は4～6のデータ量が最も多い傾向が確認されている。

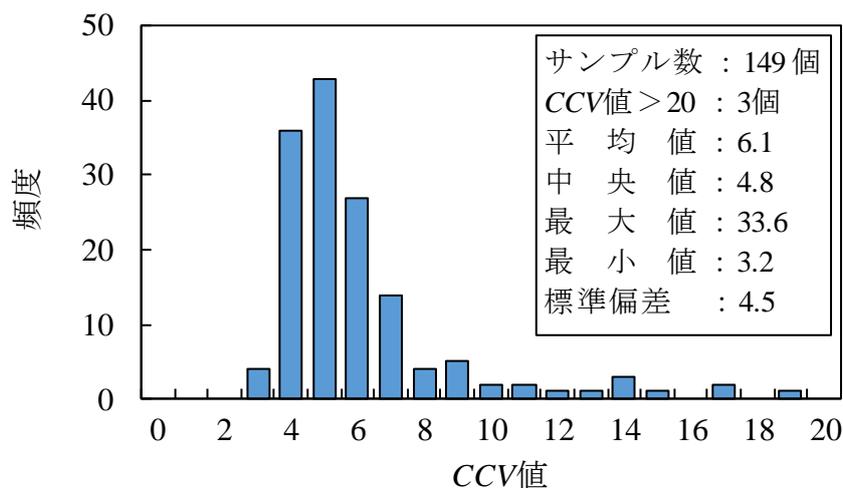


図5-9 含水比 $w=10.3\%$ の時の CCV 値のヒストグラム

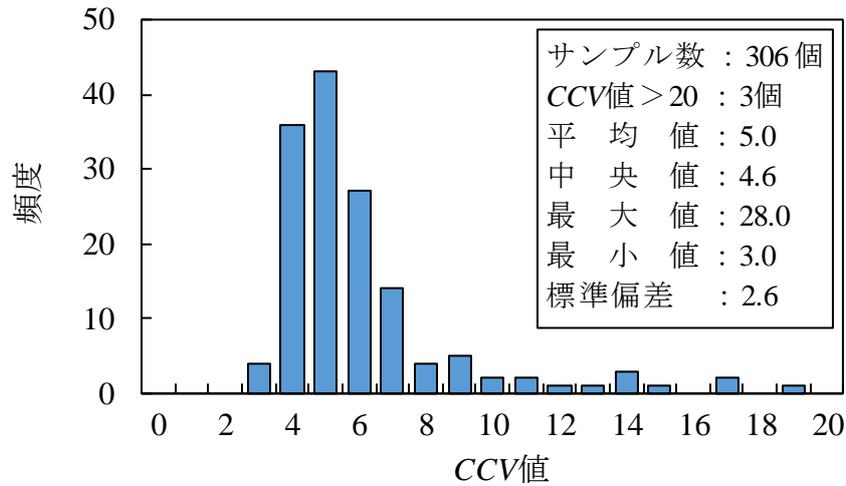


図 5-10 含水比 $w=10.7\%$ の時の CCV 値のヒストグラム

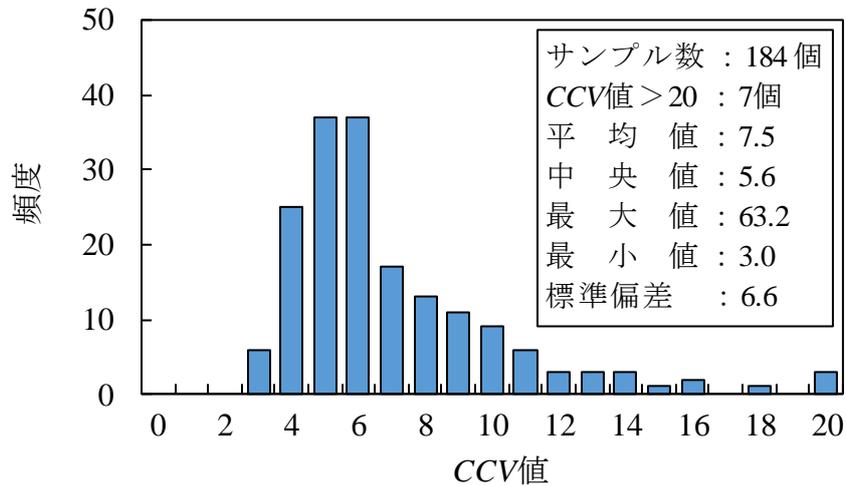


図 5-11 含水比 $w=11.0\%$ の時の CCV 値のヒストグラム

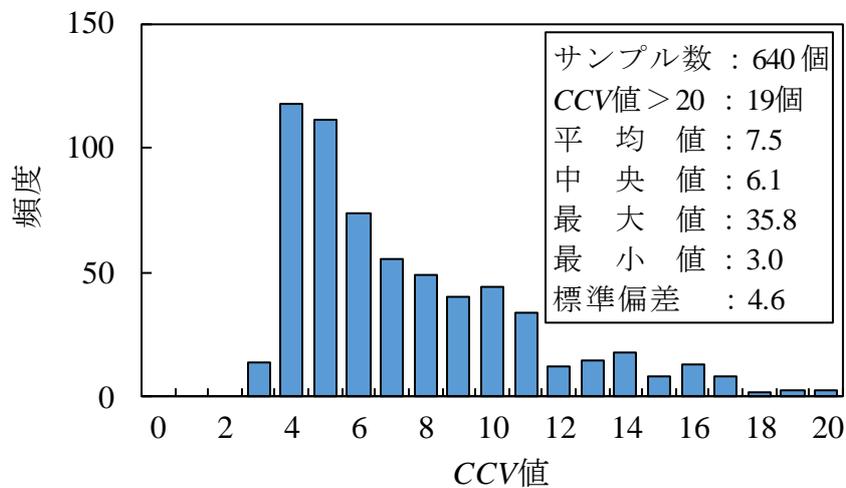


図 5-12 含水比 $w=11.7\%$ の時の CCV 値のヒストグラム

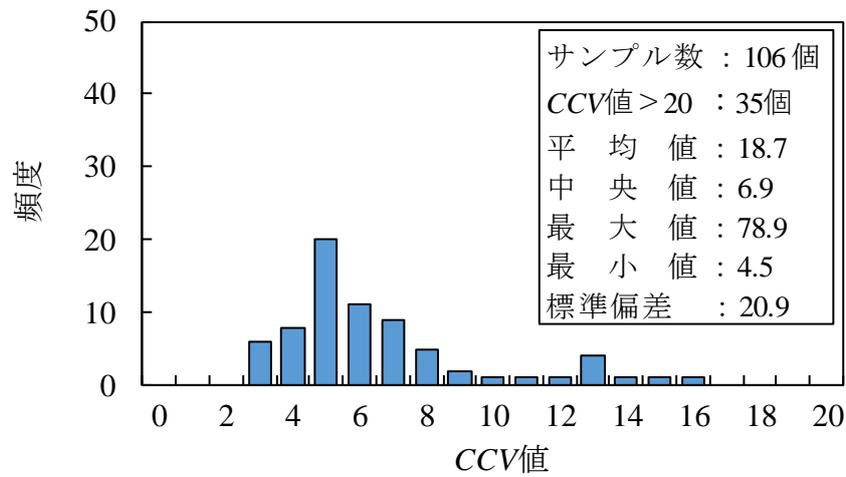


図 5-13 含水比 $w=12.3\%$ の時の CCV 値のヒストグラム

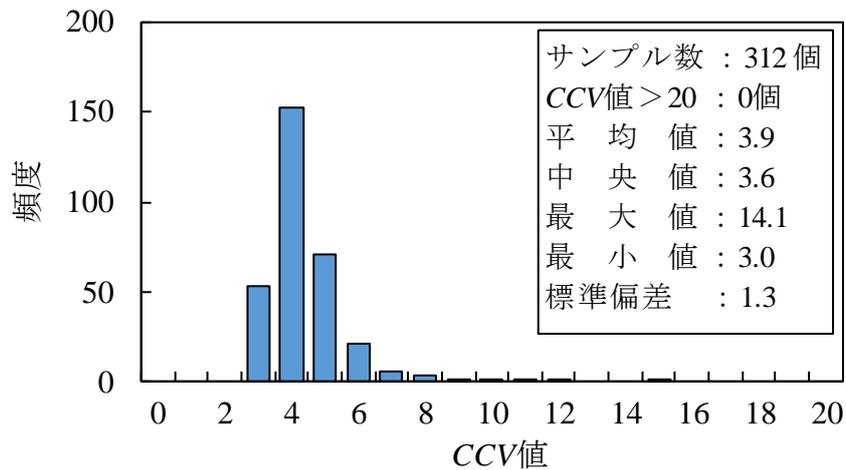


図 5-14 含水比 $w=12.7\%$ の時の CCV 値のヒストグラム

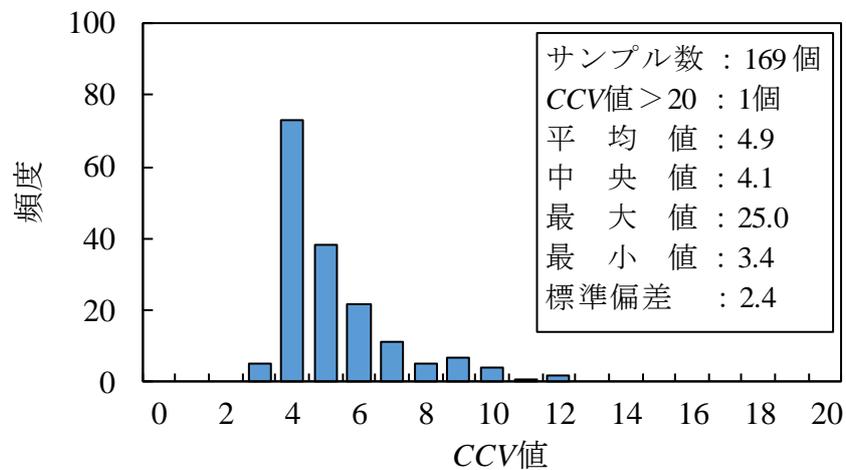


図 5-15 含水比 $w=13.0\%$ の時の CCV 値のヒストグラム

5-3-2 締固め曲線の礫率補正による締固め度 $(D_c)_{IEc}$ の推定

ここでは、小粒形粒子を主体とした室内粒度試料を用いた室内締固め試験により得られた締固め曲線に WH 式と X-P 関係による礫率補正を施すことで現場粒度試料に相当する締固め曲線に取得し、その時の最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH,X-P}$ と CCV 値データより推定した乾燥密度 ρ_d より締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を推定する手法について説明する。

図 5-9～図 5-15 に示した含水比 w 毎の CCV 値の測定データと土粒子密度 ρ_s を用いて、第 4 章に示した CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式より乾燥密度 ρ_d の推定を行う。図 5-16 には、締固め曲線上に乾燥密度 ρ_d の推定値と含水比 w の実測値をプロットした。図 5-16 には、最大粒径 $D_{max}=75.0\text{mm}$ の現場全粒度試料と、現場全粒度試料をせん頭粒度法により最大粒径 $D_{max}=37.5\text{mm}$ に粒度調整した室内粒度試料の締固め曲線を示した。室内粒度試料の締固め曲線は、室内締固め試験 (B-b 法) により得られた結果であり、現場全粒度試料の締固め曲線は、室内粒度試料の締固め曲線を WH 法により礫率補正して得られた結果である。

まず、WH 式により算出した現場全粒度試料の締固め曲線を用いた場合の締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を評価する。締固め度 $(D_c)_{IEc}$ は、CCV 値より推定した乾燥密度 ρ_d と、室内粒度試料による室内締固め曲線を WH 法により現場全粒度試料相当に礫率補正し、その時の最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH}$ を用いて算出した。図 5-16 より、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ は、一部を除いて概ね 95%以下に分布していることがわかる。特に、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ は 90%以下のデータが大半を占めており、最大・最小の締固め度 $(D_c)_{IEc}$ はそれぞれ 96.5%、77.6%であった。

図 5-17 には、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ のヒストグラムを示すが、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ は 70～100%の区間に分布しており、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ の平均値は 86.5%であった。道路の盛土の締固め管理では締固め度 $(D_c)_{IEc} \geq 90\%$ を管理基準値とする場合が多く、本試験で得られた全データのうち約 15%がこの管理基準値以上という結果となった。この要因の一つとして CCV 値のばらつきも考えられるが、主たる要因として WH 式による礫率補正の精度が低いことが考えられる。第 4 章に示したように、礫粒子を混入した場合は、WH 式により推定した乾燥密度 ρ_d は実測値よりも過大に評価され、礫粒子を除去した場合は、実測値よりも過小に評価される。すなわち、図 5-17 に示す WH 式により求めた現場全粒度試料の締固め曲線は、実際の現場全粒度試料の締固め曲線よりも過大に評価されている可能性が高い。そこで、第 4 章に示した X-P 関係を用いて現場全粒度試料に相当する締固め曲線を正しく補正した上で、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を評価することにした。

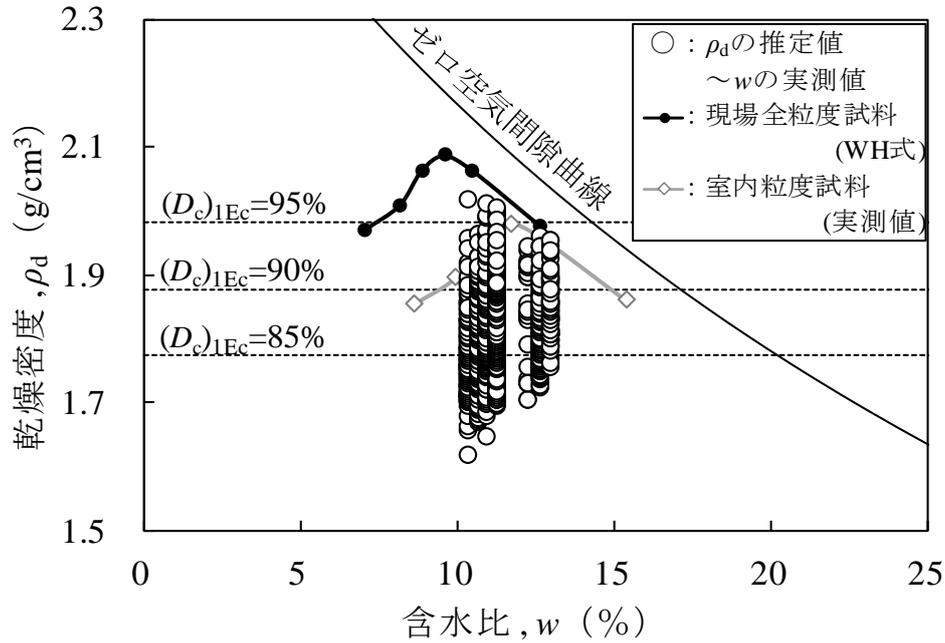


図 5-16 締固め曲線と実測値の関係

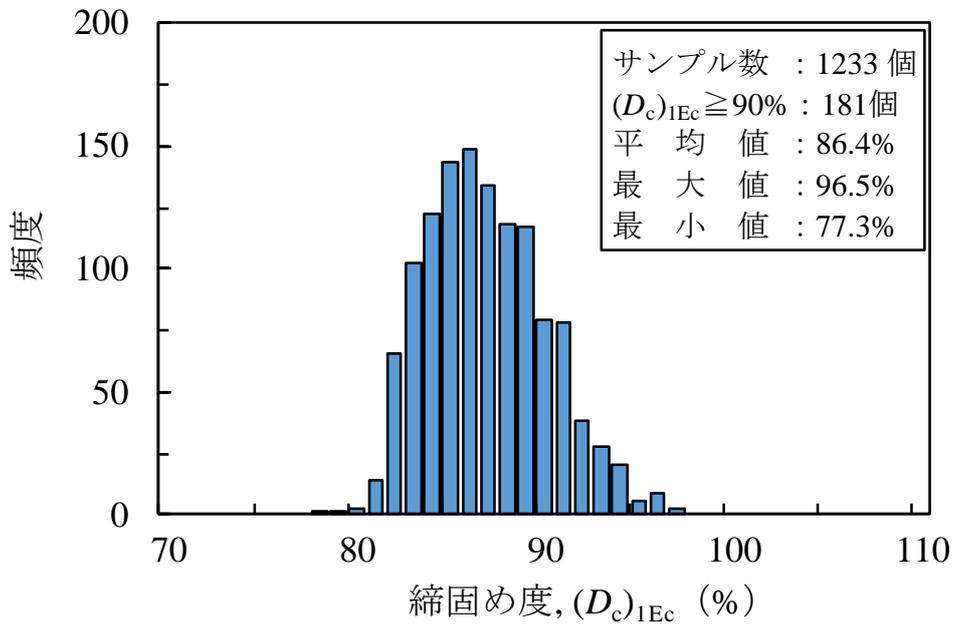


図 5-17 締固め度 $(D_c)_{1Ec}$ のヒストグラム

図 5-18 には、第 4 章に示した $X-P$ 関係のうち、最大粒径 $D_{max}=37.5\text{mm}$ を基準とした $X-P$ 関係のみをプロットした。図 5-18 より、最大粒径 $D_{max}=37.5\text{mm}$ を基準とした場合、最大粒径 $D_{max}=75.0\text{mm}$ を目標とした場合の $X-P$ 関係を確認すると、それぞれ礫率 $P=0.219$ 、最大乾燥密度比 $X=1.034$ であることがわかった。すなわち、図 5-16 に示した WH 式により算出し

た最大粒径 $D_{max}=75.0\text{mm}$ の現場全粒度試料の締固め曲線の最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH}$ を最大乾燥密度比 X で除した値を算出し、その値を最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH,X-P}$ とする新しい締固め曲線をプロットすることで、 $X-P$ 関係により補正した現場全粒度試料に相当する締固め曲線を得ることができる。

図5-19には、WH式と $X-P$ 関係により取得した現場全粒度試料の締固め曲線と、CCV値より推定した乾燥密度 ρ_d の推定値と含水比 w の実測値を示した。図5-19をみると、図5-16に比べて締固め度 $(D_c)_{IEc}$ は全体的に増加しており、中には、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ は100%を超える結果も確認された。最大・最小の締固め度 $(D_c)_{IEc}$ は、それぞれ100%、80.1%という結果が得られた。

図5-20には、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ のヒストグラムを示すが、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ は85~100%の範囲に分布しており、平均値は89.5%であった。図5-17の結果と比較すると、WH式と $X-P$ 関係を用いることで、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ は高めに評価されることがわかった。実工事においては、工法規定方式で規定された施工仕様を確実に履行しているため、目標品質である締固め度 $(D_c)_{IEc} \geq 90\%$ を満足しているものと仮定すると、図5-19に示すWH式と $X-P$ 関係の組合せにより算出した品質試験結果はその実態と概ね一致しており、図5-17に示すWH式のみにより算出した品質試験結果は実態を過小評価していることがわかる。

このように、CCV値より推定した乾燥密度 ρ_d を用いて締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を評価する場合、室内試験で得られた締固め曲線に対してWH式と $X-P$ 関係による礫率補正を施すことで、粒径特性の違いが品質評価に与える影響を排除した高精度な締固め度 $(D_c)_{IEc}$ の評価が可能である。

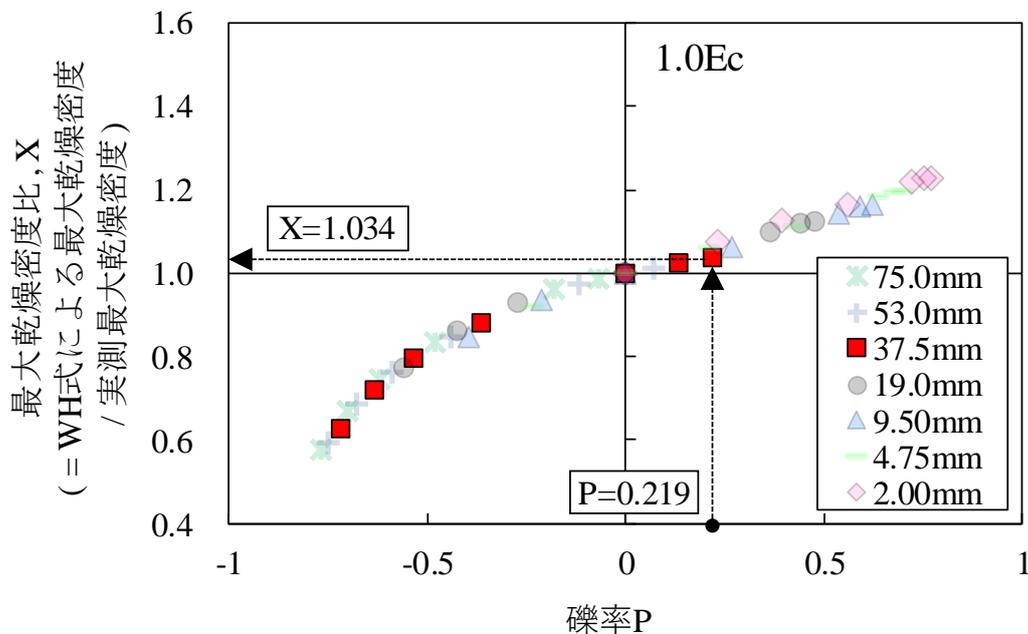


図5-18 $D_{max}=37.5\text{mm}$ を基準とした $X-P$ 関係

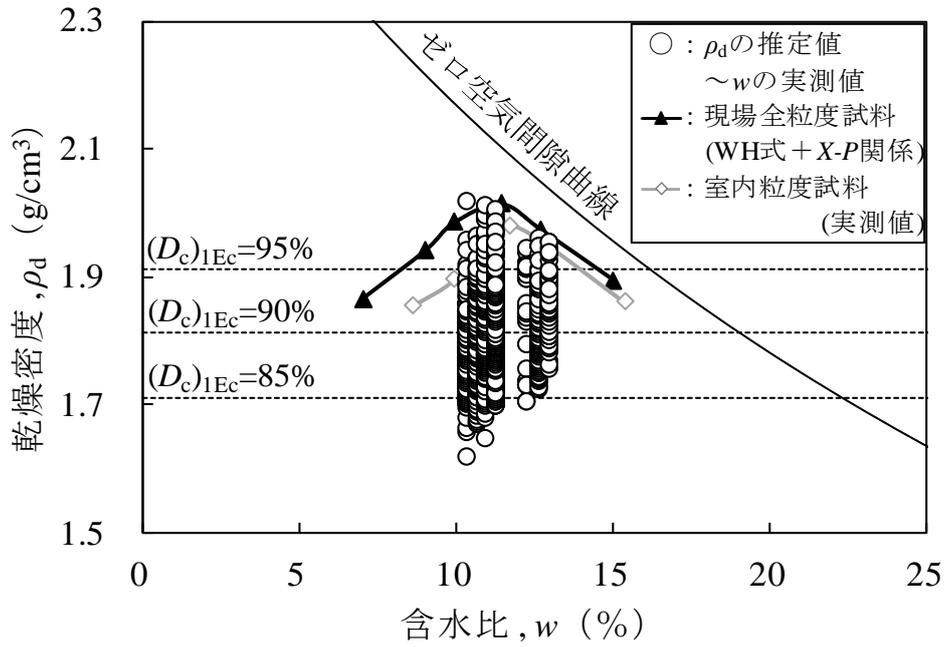


図 5-19 締固め曲線と実施工データの関係

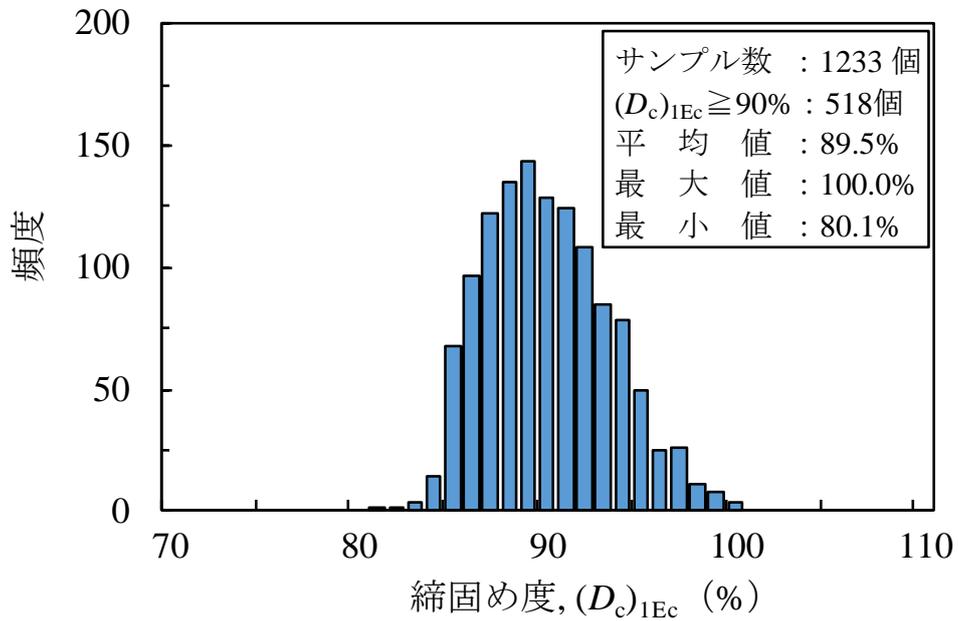


図 5-20 締固め度 $(D_c)_{IEc}$ のヒストグラム

第5章のまとめ

本章においては、第3章と第4章で行った実験による検討結果を踏まえ、盛土の施工方法の合理化するとともに、盛土構造物を高品質化することが可能な加速度応答法を用いた新しい締固め管理方法について検討した。本章での検討結果を以下に示す。

① CCV 値を用いた新しい締固め管理手法の実工事への適用方法

施工前の事前準備、試験施工、実施工において実施すべき項目を整理し、施工の合理化と盛土の高品質化を実現する新しい締固め管理手法を提案した。

施工前の事前準備では、土粒子密度試験、粒度試験、締固め試験を実施する。土の締固め試験は、室内試験において実現可能な範囲で最大粒径 D_{max} を変化させた2種類の土質を対象に試験を実施し、最大粒径 D_{max} 、締固めエネルギー CEL に依らず最適飽和度 S_{ropt} は一定値を示すこと、締固め度 D_c ~ 飽和度差 $S_r - S_{ropt}$ 曲線は相似関係にあることを確認する。また、 $X-P$ 関係を図化し、粒度試験で得られた現場全粒度試料の最大粒径 D_{max} に対応する最大乾燥密度比 X の値を算出し、室内締固め試験結果を現場全粒度試料に相当する締固め曲線に変換し、その時の最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH,X-P}$ を求めておく。

試験施工では、通常の工法規定方式と同様に、施工仕様を決定するための試験施工を実施し、 CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を構築する。

本施工では、施工前に取得した含水比 w と施工中に取得する CCV 値の測定データを関係式に代入し、乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r をリアルタイムに推定しながら施工する。なお、 CCV 値から推定される乾燥密度 ρ_d と事前準備で求めた最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH,X-P}$ より締固め度 $[D_c]_{IEc}$ を正確に評価する。これらの品質情報を振動ローラの操縦席のモニタ上にコンタ表示することで、再施工の発生や品質不良個所の見落としなどのリスクを回避した施工が可能となる。

② CCV 値による締固め度 $(D_c)_{IEc}$ の推定方法

実工事において取得した CCV 値と含水比 w の測定データの一部を用いて、従来の WH 式を用いた場合と、本研究で提案する WH 式と $X-P$ 関係を用いた場合とで求めた締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を比較した。その結果、 WH 式と $X-P$ 関係により算出した締固め度 $(D_c)_{IEc}$ は、 WH 式により算出した締固め度 $(D_c)_{IEc}$ よりも高く評価され、 WH 式により算出した締固め度 $(D_c)_{IEc}$ は実際の値を過小評価していることがわかった。これより、実施工により得られた CCV 値と含水比 w の測定データに対して CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式と $X-P$ 関係を適用することで、締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を正しく評価できることが示唆された。

以上のように、本研究で提案する新しい締固め管理は、加速度応答法 (CCV 値) による品質手法の即時推定式と、 $X-P$ 関係を用いて高度化した礫率補正式を組合せた管理手法により、施工の合理化と盛土構造物の高品質化を実現可能であることを示した。

第5章の参考文献

- 1) 横田聖哉, 吉田武男, 藤井弘章, 内山恵一: 振動ローラ加速度を利用した締固め管理の検討—大規模土工における情報化施工に関する研究(3)—, 第37回地盤工学研究発表会, pp.664-665, 2002.
- 2) 東京測器株式会社: FWD-Light による小型 FWD 試験方法 (地盤編), pp.21-22.
- 3) 近畿地方整備局近畿技術事務所: 簡易支持力測定器 (キャスポル) 利用手引き, pp.5-6, 2005.
- 4) 公益社団法人地盤工学会: 現場 CBR 試験, 辞意版調査の方法と解説—二分冊の 2—, pp.723~731, 2013.
- 5) 龍岡文夫ら(2013~2015): 地盤工学・技術ノート, 盛土の締固め 1~20 回, 雑誌「基礎工」, 2013 年 7 月号~2015 年 2 月号.
- 6) Walker, F. C. and Holtz, W.C.: Control of Embankment Material by Laboratory Testing. Proc. ASCE, 77-108, pp.1-25 (1951)
- 7) Holtz, W. G. and Lowitz.: Compaction characteristics of gravelly soils. Bureau of Reclamation, Earth laboratory report, No. EM-509 (1957).
- 8) 公益社団法人地盤工学会: 突固めによる土の締固め試験方法, 地盤材料試験の方法と解説-二分冊の 1-, pp373~383, 2009.
- 9) 公益社団法人地盤工学会: 土粒子の密度試験方法, 地盤材料試験の方法と解析—二分冊の 1—, pp.97~103, 2009.
- 10) 公益社団法人地盤工学会: 土の粒度試験方法, 地盤材料試験の方法と解析—二分冊の 1—, pp.115~136, 2009.
- 11) 永井裕之: ICT を活用した盛土施工の品質管理, 公益財団都市計画協会, 新都市, 第 71 巻第 10 号, pp.10~14, 2017.

第6章 結論

本研究においては、リアルタイムかつ面的に地盤剛性を評価することのできる加速度応答法に着目し、品質測定手法の即時性を確保することによる施工の合理化に関する検討を行った。さらに、盛土の品質評価手法において課題とされてきた現場試験と室内試験で取り扱う土質の最大粒径 D_{\max} の違いが品質評価に与える影響に着目し、礫率補正式の高度化による盛土の高品質化に関する検討を行った。これらの検討結果を組合せることで、高品質な盛土構造物を構築するための新しい締固め管理手法を提案し、その手法を実施工で用いることによってその妥当性を明らかとした。

6-1 各章における結論

以下に本論文の主要な要旨を述べる。

第2章の結論

第2章においては、盛土の締固め管理に関して、これまでに得られている知見を示し、往年中に行われてきた盛土締固め管理手法である品質規定方式、工法規定方式に加え、i-Constructionの推進による生産性向上を目的としたICT技術について示した。しかし、現状で現場施工に用いられているICT技術は、いずれも施工の効率化を目指した技術であり、盛土構造物の品質向上に寄与するような技術の開発はなされていない。

このような背景を踏まえ、施工方法の合理化と盛土構造物の高品質化を実現する技術の重要性を明らかにした上で、盛土の締固め管理における品質測定手法と品質評価手法に関連するそれぞれの課題を示した。

品質測定手法の課題は、盛土の品質情報の即時推定手法を考案することである。品質規定方式における品質測定手法は、砂置換やRI試験による盛土の品質を直接的に管理する手法が主流である。しかし、これらの品質試験は転圧施工が完了してから行うため、仮に目標品質を満足しない場合には、転圧施工の追加や、時には土砂を撤去してやり直しを行わなければいけなくなる可能性も含まれている。さらに、品質試験は人力により実施されるものであるため、広い施工ヤードの代表点でしか実施することができない。これより、測定範囲以外に品質不良個所が存在した場合には、それらを見逃す可能性がある。

一方、品質評価手法の課題は、現場試験と室内試験で取り扱う土質の最大粒径 D_{\max} の違いが品質評価に与える影響を排除することの可能な礫率法正式を構築することである。締固め度 D_c による管理を実施する場合、最大乾燥密度 $\rho_{d\max}$ は室内締固め試験により求めることが一般的である。これに対して、現場試験は、室内試験の許容最大粒径以上の大きい粒子の土

を含む場合が多いため、最大粒径 D_{\max} の違いを解消することを目的として Walker-Holtz の礫率補正（以下、WH 式）を適用させる必要がある。しかし、室内粒度の乾燥密度 ρ_d を用いて WH 式により推定した現場全粒度試料の乾燥密度 $[\rho_d]_{\text{WH}}$ は、現場全粒度試料の乾燥密度 ρ_d の実測値よりも過大に評価される。一方、現場全粒度試料の乾燥密度 ρ_d を用いて WH 式により推定した室内粒度試料の乾燥密度 $[\rho_d]_{\text{WH}}$ は、室内粒度試料の乾燥密度 ρ_d の実測値より過小に評価することがわかった。

このため、現場試験と室内試験において取り扱う土質の最大粒径 D_{\max} の違いを排除するためには、Walker-Holtz による礫率補正式の高度化が課題の一つである。

以上の内容を踏まえ、盛土の締固め管理において、施工方法の合理化と盛土構造物の高品質化を実現することを目的とし、第3章、第4章に示す実験的検討を行った。

第3章の結論

第3章においては、多数測定可能な重錘落下試験やリアルタイムで面的に測定可能な CCV システムにより測定された地盤剛性指標による効率的な締固め管理手法の検討を目的とし、大型土槽内にて砂質土層を用いた実大締固め機械による転圧試験を実施した。

転圧試験は、長さ 20m、幅 3m、深さ 95cm のコンクリート製ピットに砂質土を敷設し、転圧回数 $N=0, 2, 4, 6, 8, 12, 16$ 回の転圧施工を実施した。施工中には CCV システムにより得られる地盤剛性指標の一つである CCV 値をリアルタイムに計測し、施工後には RI 試験、砂置換による密度試験、レベル測量による沈下量計測、小型 FWD 試験、キャスポル試験や現場 CBR 試験により得られる地盤剛性指標 ($(K_{30})_{\text{FWD}}$, $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$, CBR 値) を計測した。なお、本試験に用いた砂質土の最大粒径 D_{\max} は 9.5mm であり、室内試験に用いられる材料に相当する。

転圧試験により得られた全ての計測データを解析した。転圧回数 N と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r 、さらに地盤剛性指標との関係は、締固めの初期段階で増加傾向を示し、転圧回数 N が 8 回以降は収束する傾向を示した。なお、転圧回数 N の増加に伴う地盤剛性指標の増加量は、飽和度 S_r が低いほど大きく、飽和度 S_r が高くなると剛性の増加量は低下した。ここで、龍岡らによる既往の研究成果に基づき、 $(K_{30})_{\text{FWD}}$ 、 $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ 、CBR 値、CCV 値による乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の推定式の構築を行った。その結果、いずれも飽和度 S_r をパラメータとして乾燥密度 ρ_d との関係式が成立することを確認した。

次に、地盤剛性指標同士の相関性について検討した。それぞれの地盤剛性指標 (CCV 値、CBR 値、 $(K_{30})_{\text{FWD}}$ 、 $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$) の間の相関を見ると、ある程度のばらつきはあるもののそれぞれほぼ一対一の関係があることがわかった。このことは、従来よく用いられてきた地盤剛性指標 (CBR 値、 $(K_{30})_{\text{FWD}}$ 、 $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$) に替わって、CCV 値によって従来の地盤剛性指標と同等の地盤剛性指標を求めることができるということを意味している。さらに、CBR 値、 $(K_{30})_{\text{FWD}}$ 、 $(K_{30})_{\text{キャスポル}}$ は施工完了後の点情報として取得する指標であるのに対して、CCV 値はリアルタイムかつ面的に取得することのできる指標であるため、CCV 値によってその他の地盤剛性指標を面的にリアルタイムで収集が可能であること意味している。

次に、各地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を用いた締固め管理手法について

提案した。地盤剛性指標の関係式に基づく乾燥密度 ρ_d と各地盤剛性指標との関係をみると、同じ乾燥密度 ρ_d でも飽和度 S_r が低下（増加）すると地盤剛性指標値は大きく増加（減少）することから、地盤剛性指標だけで締固めの良否を判定することはできないことがわかる。また、同じ締固めエネルギー CEL で飽和度 S_r が最適飽和度 S_{ropt} よりも低下すると、乾燥密度 ρ_d は低下するが地盤剛性指標は増加する。この特性を活用し、地盤剛性指標を用いた飽和度 S_r と締固め度 D_c による締固め管理手法について検討する。

地盤剛性指標と乾燥密度 ρ_d の空間上に、上記に示した関係式を用いて締固め度 D_c の下限値、飽和度 S_r の上下限値を凶化することができるため、地盤剛性指標の目標値を設定することができる。実施工においては、地盤剛性指標の目標値を目指した施工を行うことで、締固め度 D_c 、飽和度 S_r により規定された品質管理を行うことができる。また、地盤剛性指標から関係式を用いて乾燥密度 ρ_d を推定する場合、一つの地盤剛性指標から二つの乾燥密度 ρ_d を推定することになる。この時、締固め過程における地盤剛性指標の変化（すなわち転圧回数情報）を併せて管理することで、正しい乾燥密度 ρ_d を推定することができる。

この手法は、盛土の高品質化と締固め管理の効率化に有効と考えられる。なお、 $(K_{30})_{FWD}$ 、 $(K_{30})_{キャスボル}$ 、 CBR 値はいずれも施工後の点情報としてデータを取得するのに対して、 CCV 値は施工中にリアルタイムかつ面的にデータを取得できるため、締固め管理の効率化に最も適した手法であるといえる。

第4章の結論

第4章においては、粒径特性が盛土の品質に与える影響の評価に関する研究とし、まずは大粒径の土を含んだ現場全粒度試料を対象とした実工事における転圧試験を実施し、 CCV 値による合理的な締固め管理手法を検討した。

本研究に使用する現場全粒度試料は、最大粒径 $D_{max}=75\text{mm}$ の細粒分混じり砂質礫であり、長さ 20m、幅 6m、高さ 60cm の施工ヤードにて転圧試験を行った。転圧施工中には CCV 値を計測し、施工後には施工エリアの計 6 測点で RI 試験による密度試験を行った。

転圧試験の結果より、含水比 w 、乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r 、 CCV 値はいずれも測点によって値が異なることがわかった。このことは、含水比 w に基づく締固め管理法では、含水比 w の分布の把握が重要なことを示している。測点毎の結果をみると、含水比 w は転圧回数 N の増加に伴い値が若干変動した。乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r は、転圧回数 N が 2 回で大幅に増加し、6 回まで漸増し、8~16 回で収束傾向を示した。 CCV 値は、転圧回数 N が 2~6 回まで一貫して増加し、8 回で極大値を示し、16 回で減少した。 CCV 値は、転圧回数 N と締固めエネルギー CEL を変数とせず乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r を独立変数とする関係式により表現できる。

関係式を用いて推定した乾燥密度 ρ_d の推定精度は、飽和度 S_r と関数 $f_{ccv}(S_r)$ の精度が高いほど向上することがわかった。目標とする乾燥密度 ρ_d が決まっており、含水比 w と土粒子密度 ρ_s が既知であれば、関係式により目標の CCV 値を決めることができる。一方で、土粒子密度 ρ_s 、含水比 w が既知で、 CCV 値を施工時に測定した場合には乾燥密度 ρ_d を算出できる。したがって、関係式を用いればリアルタイムかつ面的な締固め管理手法を実現できる。

上記の関係式を用いて乾燥密度 ρ_d と含水比 w の空間上に CCV 値の等値線を凶化すると、

現場全粒度試料の含水比 w を一定と仮定した場合、飽和度 S_r が最適飽和度 S_{ropt} になる少し前で CCV 値は極大値を示すことがわかる。施工時には、所定の転圧回数 N を達成した上で CCV 値がこの極大値に達成したことを確認すれば、必要な高い締固め状態を実現できる。 CCV 値が極大値以下の場合、第3章の検討結果と同様に、 CCV 値単体ではなく転圧回数 N と組合せて管理することで、乾燥密度 ρ_d を正しく評価することができる。これより、大粒径を含む現場全粒度試料を対象とした実施工においても CCV 値によるリアルタイムかつ面的な乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の管理が可能となるため、従来よりも効率的な施工法による高品質な盛土の実現が可能となる。

次に、現場試験と室内試験で取り扱う土質の最大粒径 D_{max} の違いが品質評価に与える影響を排除することを目的とし、Walker-Holtz による礫率補正式の高度化について検討した。

転圧試験に使用した現場全粒度試料を母材とし、最大粒径 D_{max} を変化させた小型・大型室内締固め試験を実施した。最大粒径 D_{max} を 2.00, 4.75, 9.50, 19.0, 37.5, 53.0, 75.0mm と変化させ、それぞれ $1.0E_c$ 、 $4.5E_c$ による締固め試験を実施した。次に、WH 式により所定の最大粒径 D_{max} よりも大きい粒子の土を混入した試料を同一の締固めエネルギー CEL で締固めた時の最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH}$ を推定した。その結果、最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH}$ は、所定の最大粒径 D_{max} よりも大きい粒子の土を混入した試料の実際の最大乾燥密度 ρ_{dmax} よりも過大に評価されることがわかった。この傾向は、礫率 P の値に依らず確認されているが、礫率 P が 0.3 よりも大きくなると、より明白に過大評価することが分かった。これは、WH 式の仮定では、所定の最大粒径 D_{max} よりも大きい粒子の土を混合した場合、全粒子の土に均等に締固めエネルギー CEL が加えられるものとしているが、実際には、混入した土以外の元の土には均一な締固めエネルギー CEL が加えられていないことを意味している。

そこで、同一の締固めエネルギー CEL に対する最大乾燥密度比 $X = \text{「WH 式による推定値」} / \text{「実測値」}$ と礫率 P の関係を求め、WH 式の補正を試みた。ある締固めエネルギー CEL で締固められた最大粒径 D_{max} の小さい土の最大乾燥密度 ρ_{dmax} を用いて、Walker-Holtz 式(以下、WH 式)により、より大きな粒径の土を含む土の最大乾燥密度 $(\rho_{dmax})_{WH}$ を推定し、その値を X - P 関係から求めた最大乾燥密度比 X の値を用いて修正することで最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH.X-P}$ が得られる。これと同様に、所定の最大粒径 D_{max} よりも小さい粒子の土を除去した場合、WH 式と X - P 関係を用いることで最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH.X-P}$ を得ることができる。最大乾燥密度 $[\rho_{dmax}]_{WH.X-P}$ 、 $[\rho_{dmax}]_{WH.X-P}$ は、それぞれの土質の最大乾燥密度 ρ_{dmax} の実測値と一致する。

これより、WH 式に X - P 関係を組合せることで、現場試験と室内試験で取り扱う土質の最大粒径 D_{max} の違いが品質評価に与える影響を排除した、高精度な品質管理を行うことができる。

第5章の結論

第5章においては、第3章と第4章で行った実験的検討の結果を踏まえ、 CCV 値と乾燥密度 ρ_s 、飽和度 S_r の関係式と X - P 関係による礫率補正式に基づく新しい締固め管理手法を提案する。さらに、本手法の有効性を確認するため、実工事で得られた CCV 値と含水比 w の測定データを対象に本手法を用いて締固め度 $(D_c)_{IEc}$ を評価した。

まず、本手法の施工手順について、事前準備、試験施工、本施工に分けて説明する。

事前準備では、土粒子密度や粒度試験など基本的な物性試験に加えて、最大粒径 D_{\max} を変化させた締固め試験を実施し、最大粒径 D_{\max} 、締固めエネルギー CEL に依らず最適飽和度 S_{ropt} は一定値を示すこと、締固め度 $(D_c)_{\text{IEc}}$ ~ 飽和度差 $S_r - S_{\text{ropt}}$ 曲線は相似形を示すことを確認する。さらに、 $X-P$ 関係図を求めて、現場全粒度試料の最大乾燥密度 $[\rho_{\text{dmax}}]_{\text{WH.X-P}}$ を予め算出する。

試験施工では、現場全粒度試料を用いた転圧施工を行い、施工中に得られる CCV 値と施工後に実施する密度試験結果を解析し、 CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r の関係式を構築する。

本施工では、試験施工で構築した関係式を用いたりリアルタイムかつ面的な品質管理を実施する。施工前に盛土材の含水比 w を測定し、施工中に CCV 値を測定し、これらを上記の関係式に代入することで乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r を推定する。なお、含水比 w は施工中に一定であると仮定する。 CCV 値より推定した乾燥密度 ρ_d は現場全粒度試料の値であるため、事前準備で算出した最大乾燥密度 $[\rho_{\text{dmax}}]_{\text{WH.X-P}}$ を用いて締固め度 $(D_c)_{\text{IEc}}$ を算出する。

上記の手順に倣い施工を行うことで、 CCV 値から締固め度 $(D_c)_{\text{IEc}}$ を正しく評価できる。

次に、本手法の有効性を確認するため、実工事で得られた CCV 値と含水比 w の測定データを対象に締固め度 $(D_c)_{\text{IEc}}$ の評価を行った。なお、本手法の有効性を明確にするため、従来の品質管理と同様に WH 式のみを用いた場合の締固め度 $(D_c)_{\text{IEc}}$ の評価結果との比較を行う。

まず、実施工で取得した CCV 値と含水比 w の測定データを対象とし、 CCV 値と乾燥密度 ρ_d 、飽和度 S_r との関係式を用いて乾燥密度 ρ_d を算出した。これに対し、最大粒径 $D_{\max}=37.5\text{mm}$ の室内粒度試料を用いて算出した締固め曲線を対象とし、 WH 式、 WH 式と $X-P$ 関係を用いてそれぞれの締固め曲線を算出し、それぞれの最大乾燥密度 $[\rho_{\text{dmax}}]_{\text{WH}}$ 、 $[\rho_{\text{dmax}}]_{\text{WH.X-P}}$ を求めて締固め度 $(D_c)_{\text{IEc}}$ を得た。なお、実工事においては、工法規定方式で規定された施工仕様を確実に履行しているため、目標品質である締固め度 $(D_c)_{\text{IEc}} \geq 90\%$ を満足していると仮定する。

WH 式、 WH 式と $X-P$ 関係を用いて評価したそれぞれの締固め度 $(D_c)_{\text{IEc}}$ を比較すると、 WH 式のみの場合、 WH 式と $X-P$ 関係を用いた場合よりも締固め度 $(D_c)_{\text{IEc}}$ が低く評価された。これは、 WH 式のみを用いて推定した最大乾燥密度 $[\rho_{\text{dmax}}]_{\text{WH}}$ が実測値よりも過大に評価されたためである。 WH 式と $X-P$ 関係を用いて評価した締固め度 $(D_c)_{\text{IEc}}$ の平均値は 89.5% となり、目標品質である締固め度 $(D_c)_{\text{IEc}} \geq 90\%$ と比較すると若干低め（安全側）に評価されているものの、概ね良好な試験結果が得られた。これより、 WH 式と $X-P$ 関係を用いることで正しい品質管理が可能であることが明らかとなった。

以上より、 CCV 値と乾燥密度 ρ_s 、飽和度 S_r の関係式と $X-P$ 関係による礫率補正式に基づく新しい締固め管理手法は実工事に有効な管理手法であり、本研究の目的とする施工の効率化、盛土構造物の高品質化を実現する手法であることを示した。

6-2 まとめ

本研究においては、リアルタイムかつ面的に地盤剛性を評価する加速度応答法に着目し、品質測定手法の即時性を確保することによる施工の合理化に関する検討を行った。さらに、盛土の品質評価手法において課題とされてきた現場試験と室内試験との粒径特性の違いが品質評価に与える影響に着目し、礫率補正式の高度化による盛土の高品質化に関する検討を行った。これらの検討結果を組合せることで、施工の合理化と盛土構造物の高品質化を実現する新しい締固め管理手法の提案を目指した。各章の検討内容と効果について下記に示した。

第3章では、室内粒度試料（粒径が小さい）を対象とし、地盤剛指標（現場 CBR 試験，小型 FWD 試験，キャスポル試験，CCV システム）を用いた乾燥密度 ρ_d ，飽和度 S_r の即時推定手法を示した。砂置換や RI 測定により得られる乾燥密度 ρ_d や飽和度 S_r は、いずれも施工完了後の点情報として得られる指標であるのに対して，CCV システムは，施工中にリアルタイムかつ面的にそれらの品質情報を取得することができるため，本研究の一つ目の目的である施工の合理化を実現する上で有効な手法であることを明らかにした。

第4章では，第3章に示した CCV 値による乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の推定手法が現場全粒度試料（粒径が大きい）にも適用可能であることを示した。これより，CCV 値によるリアルタイムかつ面的な品質管理手法の実工事における適用性を示すことができた。

さらに，walker-Holtz による礫率補正式に最大乾燥密度比 X -礫率 P の関係を組合せることで，従来の締固め管理において課題であった現場試験と室内試験の最大粒径 D_{max} の違いが品質評価に与える影響を解消し，高精度な品質評価を行えることを示した。これにより，本研究の二つ目の課題である盛土構造物の高品質化を実現する上で有効な手法であることを明らかにした。

第5章では，第3章と第4章の検討結果より，CCV 値と乾燥密度 ρ_d と飽和度 S_r の関係式，Walker-Holtz による礫率補正式と X - P 関係に基づく礫率補正式を組合せた新しい締固め管理手法を示した。本手法を実工事に適用することにより，本研究の主目的である施工の合理化と盛土構造物の高品質化を実現することを明らかにした。

第2章に示したように，現在，現場に適用されている ICT 技術のほとんどが施工の省力化を目的としたものであり，その中において，施工の合理化に加えて盛土の高品質化を実現する本研究の優位性は明確であり，今後に発生が予想される自然災害や少子高齢化に伴う生産性の向上などの課題に対応することのできる技術である。

6-3 今後の課題

本研究により提案した加速度応答法を用いた新しい締固め管理手法により，現状の締固め管理における課題を解決し，社会のニーズ（盛土の高品質化，施工の合理化）に対応することができることがわかった。しかし，本手法により品質評価精度をさらに向上させるためには，施工中各場所での含水比 w をリアルタイムに測定あるいは推定することが必要である。今後，含水比 w のリアルタイムかつ面的な技術の発展は必要な事項であり，将来の研究成果を待ちたい。

謝辞

本論文は、東京理科大学理工学研究科土木工学専攻博士後期課程において、東京理科大学大学院教授 菊池喜昭先生のご指導の下で、研究成果を取り纏めたものであります。

東京理科大学より本論文に対して博士の学位を授与して頂くに際し、本論文の研究活動に対して、休日も厭わず熱心で丁寧にご指導、ご鞭撻を賜りました東京理科大学理工学部土木工学科教授 菊池喜昭先生に、心より感謝申し上げます。2015年に共同研究を開始して以来、菊池先生のご指導の下、研究活動の面白さに気付かせていただき、こうして学位の取得にチャレンジすることができました。日々ご多忙の中にも関わらず、隔週ごとに打合せの機会を設けていただき、研究計画や進行、論文執筆に対して叱咤激励をしていただきました。また、世の中の複雑さや面白さなどについても日常会話を通じて教えていただきました。更には、人との接し方、物事の考え方、文章の書き方など力量不足な私に対して多大なる時間と労力を費やしていただき、大変感謝しております。

菊池先生からご指導頂いた様々な名言の中で特に印象的なものは、「社会に出て実務を通じて研究の重要性に気付き、そこから学び始めることは非常に大切である」というお言葉です。2009年度学部卒の私にとって、博士取得とは縁遠いものでありました。そんな私が博士課程に進学させて頂くにあたり「私のような未熟者にしっかりと研究ができるのか？」と自問自答を繰り返しました。その時に、菊池先生より前述した温かいお言葉をかけていただきました。この言葉に共感を覚え、それ以降、常に前向きな気持ちで研究に取り組んできました。菊池先生からは、このお言葉以外にも本当に様々な温かい言葉の与えて頂いたことで、忘れることの出来ない充実した研究生活を過ごすことができました。共同研究を開始してから今までの約6年間を価値あるものとして下さった菊池先生には、重ねて御礼申し上げます。

本論文の副査として、ご多忙にも関わらず本論文の審査をしていただき、貴重なご意見、ご指導を賜りました東京理科大学理工学部土木工学科教授 塚本良道先生、東京理科大学理工学部土木工学科教授 佐伯昌之先生、東京理科大学理工学部機械工学科教授 野口昭治先生、東京理科大学建築学科教授 永野正行先生に謹んで感謝申し上げます。

東京大学名誉教授・東京理科大学名誉教授 龍岡文夫先生には、地盤工学全体の視点から研究の方針や実務適用に向けた課題など多くご指導、ご助言をいただきました。私の初歩的な質問や相談にも丁寧に答えていただきありがとうございます。龍岡先生のお陰で研究生活を順調に進めることができました。今後共、ご指導ご鞭撻の程よろしくお願い致します。

富山県立大学工学部環境・社会基盤工学科講師 兵動太一先生には、研究に対するアドバイスに限らず研究者としての心構えや社会人としての処世術などたくさんのお話を聞かせていただきました。いつも温かく見守っていただいたことに御礼申し上げます。今後ともよろしくお願ひ致します。

東京理科大学理工学部土木工学科助教 野田翔兵先生には、実験方法や結果の解釈、更には単位取得などについて様々な助言をいただきました。また、趣味の話もたくさん聞かせていただき、とても楽しい研究生活を送ることができました。今後ともよろしくお願ひ致します。

本研究を取りまとめることができたのは、加速度応答法（CCV システム）による締固め管理技術の基礎を築き上げた株式会社安藤・間建設本部技術研究所 黒台昌弘氏、国際事業本部 中島聡氏の功績のおかげです。黒台氏には、CCV システムを発展させた研究で学位論文に取り組むことに背中を押して頂いただけではなく、同校で学位を取得した先輩として様々なアドバイスをいただきました。また、株式会社安藤・間建設本部技術研究所 三反畑勇氏、足立有史氏、室山拓生氏、西尾竜文氏、土木技術統括部 松本江基氏、木付拓磨氏には、実験の進行やデータ解析法に加えて、実務者としての観点からの見方や現場適用に関するアドバイスをいただきました。また、同社の齋藤淳氏には、ZOOM による公聴会の際に発生した通信障害により困惑していた私にご自身の貴重な PC を提供していただきました。さらには、東京理科大学博士 1 年 井原壮氏をはじめとする菊池研究室の方々にもご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、第 3 章の実大ピット試験では、土槽ピットの貸出し、実験計画の立案、実験の進行および品質試験結果の取りまとめまで酒井重工業株式会社 内山恵一氏、眞壁淳氏、小葉はるな氏にご協力をいただきました。謹んで感謝申し上げます。

本研究を学位論文としてまとめる機会を与えて下さった株式会社安藤・間代表取締役社長 福富正人氏、執行役員技術研究所長 弘末文紀氏、技術研究所副所長 笠 博義氏、技術研究所副所長 鈴木英之氏、技術研究所副所長 谷口裕史氏、技術企画部長 坂本 守氏、土木研究部長 浦野和彦氏、土木技術統括部長 名倉 浩氏、土木技術統括部副部長 西嶋岳郎氏、技術第二部長 木村 聡氏をはじめとして、建設企画部、社長室人事部の関係者の皆様に深く謝意を表します。また、快く研究に必要な環境を与えていただくとともに応援していただいた技術研究所、土木技術統括部の皆様に深く感謝申し上げます。

最後に、これまで私をいつも応援してくれた母（弥生）、コロナ禍では仕事場所を提供して下さった義親（父：雅直、母：恭子）と家族の皆様にご心より感謝の意を捧げます。また、出産・育児と大変な状況の中、常に仕事と研究を最優先とした環境を提供してくれた愛すべき妻 幸子、天使のような笑顔で私の心を癒してくれた娘 佑菜にご心から感謝します。

2021 年 3 月 永井裕之