

学位論文

火災を受けた鉄筋コンクリート造集合住宅の
火害部コンクリートの強度低下とその調査手法
に関する研究

2021年3月

春畑 仁一

目 次

第1章 序論

1.1 はじめに	9
1.2 火災の種別	9
1.3 国内の火災件数、火災建物の種類および火災継続時間	9
1.4 火災を受けた鉄筋コンクリート造構造物	12
1.5 火災を受けたコンクリート構造部材	14
1.5.1 火災を受けたコンクリートの物理的性質の変化	14
1.5.2 火災を受けたコンクリートの化学的性質の変化	15
1.5.3 火災を受けたコンクリートの機械的性質の変化	15
1.5.4 鉄筋の引張強度	16
1.5.5 鉄筋とコンクリートの付着強度	17
1.6 本研究における火害の定義	18
1.7 火災を受けたコンクリート構造部材の劣化範囲の推定	19
1.8 火害調査の必要性	19
1.9 火害調査の問題点	19
1.10 本研究の目的	20
1.11 本論文の構成	20

第2章 火災建物の被害と鉄筋コンクリート部材が受ける火災加熱温度の検討

2.1 はじめに	27
2.2 集合住宅の火害調査事例の集計結果	27
2.2.1 調査件数の変遷	28
2.2.2 建物の構造種別	28
2.2.3 建物の用途種別	29
2.2.4 集合住宅火災の特徴	29
2.2.5 集合住宅の火災継続時間	30
2.2.6 被災した構造部材から採取したコンクリートコアの圧縮強度	31
2.3 耐火検証法による集合住宅の火災外力の検討	32
2.3.1 火災外力（荷重）	32
2.3.2 耐火設計の概要	33
2.3.3 耐火設計の手順	33
2.3.4 屋内火災の火災継続時間と火災温度上昇係数の算定	34
(1) 算定手順の概略	34
(2) 火災室の採り方	36
(3) 火災室内の可燃物の総発熱量（ Q_r ）	37

(4) 室内火災の火災継続時間 (tf) と 室内の可燃物の 1 秒当たりの発熱量 (qb)	38
(5) 火災温度上昇係数 (α)	39
2.4 火害調査結果から求めた集合住宅の火災外力	41
2.4.1 構造部材の最高受熱温度と火災継続時間	41
2.4.2 集合住宅の火災外力の類型化	42
2.5 類型化した加熱温度-時間モデルを用いた熱伝導解析	43
2.5.1 はじめに	43
2.5.2 各部材の高温特性値について	43
(1) コンクリート	44
(2) 鋼材	45
2.5.3 解析方法	47
(1) 解析モデル	47
(2) 解析条件	48
2.5.4 解析結果	51
(1) 火災事例：集合住宅①の解析結果	51
(2) 火災事例：集合住宅②の解析結果	51
(3) 火災事例：集合住宅③の解析結果	52
(4) 火害調査結果と熱伝導解析結果との比較	52
2.6 まとめ	54
第 3 章 火災を受けたコンクリート部材の強度低下に関する検討	
3.1 はじめに	59
3.2 火災を受けた集合住宅の火災継続時間を模擬した コンクリート試験体の加熱実験	60
3.2.1 加熱実験	60
(1) 試験体	60
(2) 加熱方法	61
(3) 加熱温度	61
(4) 加熱実験結果	63
3.2.2 加熱冷却後のコンクリート試験体から採取したコアの圧縮強度	65
(1) 圧縮強度試験体の採取方法および試験方法	65
(2) 加熱面から採取したコアの圧縮強度	65
3.2.3 集合住宅の火災継続時間とコンクリートの圧縮強度との関係	68
3.2.4 加熱冷却後のコンクリート試験体から採取した小径コアによる 圧縮強度試験	69

(1) コンクリートコアの採取方法および試験方法	69
(2) コンクリートコアの圧縮強度試験結果	69
3.2.5 まとめ	72
3.3 加熱冷却後のモルタル試験体から採取したコアを用いた	
加熱面から深さ方向の強度分布の検討	73
3.3.1 加熱実験	73
(1) 試験体	73
(2) 加熱方法	74
(3) 加熱実験結果	75
3.3.2 加熱冷却後のモルタル試験体から採取したコアによる各種強度試験方法	77
(1) モルタルコアの採取方法および圧縮試験・静弾性係数試験方法	77
(2) 採取したモルタルコアを用いたスライス試験片の成形方法 および各種試験方法	77
(3) モルタルコアの圧縮強度試験方法	79
(4) スライス試験片の圧縮強度試験方法	79
(5) スライス試験片の曲げ強度試験方法	79
(6) スライス試験片の引張強度試験方法	79
3.3.3 加熱冷却後のモルタル試験体から採取したコアによる 各種強度試験結果	80
(1) モルタルコアの圧縮強度試験結果	80
(2) スライス試験片の圧縮強度試験結果	81
(3) スライス試験片の曲げ強度試験結果	81
(4) スライス試験片の引張強度試験結果	82
3.3.4 各種スライス強度結果の相互比較	83
(1) モルタルコアとスライス圧縮強度残存比	83
(2) スライス圧縮強度と曲げおよび引張強度との比	83
(3) 各種試験結果における未加熱および加熱試験片の変動	84
(4) 各種スライス強度とコンクリート受熱温度との関係	85
3.4 加熱冷却後のコンクリート試験体から採取したコアを用いた	
加熱面から深さ方向のスライス曲げ強度の検討	86
3.4.1 加熱実験	86
(1) 試験体	86
(2) 加熱方法	87
(3) 加熱実験結果	87
3.4.2 スライス曲げ試験方法	88
3.4.3 スライス曲げ試験結果	88
3.4.4 スライス曲げ強度分布による加熱面から各深さの劣化範囲の推定	89
3.5 まとめ	90

第4章 火災を受けたコンクリート部材から採取したコアの圧縮応力-体積ひずみ 曲線による変形特異点を用いた火害劣化深さの推定に関する検討	
4.1 はじめに	95
4.2 火災加熱を受けたコンクリートから採取したコアの圧縮試験時における 多点縦ひずみ挙動に関する検討	96
4.2.1 はじめに	96
4.2.2 実験概要	96
(1) 試験体	96
(2) 加熱方法	97
(3) コンクリートコアの採取方法および圧縮試験方法	98
4.2.3 実験結果	
(1) 採取したコアの圧縮強度および静弾性係数	99
(2) 1/3 圧縮強度時における加熱面から各深さの多点縦ひずみ分布	99
(3) 圧縮応力と各深さの多点縦ひずみとの関係	100
(4) 圧縮応力比毎の各深さの多点縦ひずみの分布	103
4.2.4 まとめ	104
4.3 一軸圧縮を受けるコンクリートの力学的性質を考慮した火災加熱を受けた コンクリートから採取したコアの圧縮、変形特性に関する検討	105
4.3.1 はじめに	105
4.3.2 コンクリートの圧縮破壊過程	106
4.3.3 コンクリートの圧縮強度試験時における端面摩擦の影響	107
4.3.4 加熱火災を受けたコンクリート内のひび割れ	108
4.3.5 火災加熱を受けたコンクリートから採取したコアの圧縮破壊過程	108
4.3.6 圧縮強度試験時におけるコンクリートの変形特異点と臨界応力度	108
4.3.7 火災加熱を受けたコンクリートから採取したコアの臨界応力度	109
4.4 火災加熱を受けたモルタルから採取したコアの圧縮応力-体積ひずみ曲線 から求めた臨界応力度に関する検討	110
4.4.1 実験概要	110
(1) 試験体	110
(2) 加熱方法	110
(3) 加熱コアの採取方法および圧縮試験方法	110
4.4.2 実験結果	111
(1) 採取したコアの圧縮強度および静弾性係数	111
(2) 採取したコアの加熱面から内部の多点縦ひずみ分布	111
(3) 採取したコアの摩擦拘束の影響および体積ひずみ	113
(4) 臨界応力度の到達位置	113
4.4.3 まとめ	115

4.5	加熱冷却後のコンクリート円柱供試体による圧縮応力-体積ひずみ曲線から求めた臨界応力度に関する検討	
4.5.1	はじめに	116
4.5.2	実験概要	116
	(1) 試験体	116
	(2) 加熱方法歴	116
	(3) 試験方法および体積ひずみの測定方法	117
4.5.3	実験結果	117
	(1) 圧縮強度および静弾性係数	120
	(2) 各加熱温度と臨界応力度との関係	120
4.5.4	まとめ	122
4.6	火災加熱を受けたコンクリートから採取したコアの圧縮応力-体積ひずみ曲線から求めた臨界応力度に関する検討	
4.6.1	はじめに	123
4.6.2	実験概要	123
	(1) 試験体	123
	(2) 加熱方法	124
	(3) コアの採取方法および圧縮試験方法	125
	(4) コア軸方向における各深さの体積ひずみ測定	125
4.6.3	実験結果	126
	(1) 加熱実験結果	126
	(2) コアの圧縮強度試験結果	126
	(3) 1/3 圧縮強度時における加熱面から各深さの縦ひずみ分布	127
	(4) コアの圧縮応力と体積ひずみおよび臨界応力度	128
	(5) 臨界応力度から推定した火災劣化深さ	129
	(6) コアの臨界応力度と円柱供試体の臨界応力度との比較	133
	(7) 圧縮試験機の球座が円柱供試体端面に及ぼす影響	134
4.6.4	まとめ	136
4.7	火災を受けた建物の構造部材から採取したコンクリートコアを用いた火災劣化深さに関する検討	137
4.7.1	火災事例	137
	(1) 火災状況	137
	(2) コア採取部材の概要	137
4.7.2	構造部材から採取したコアの圧縮応力と体積ひずみおよび臨界応力度	137
	(1) コアの圧縮試験と体積ひずみ測定方法	137
	(2) コアの圧縮応力と体積ひずみおよび臨界応力度	137
4.7.3	まとめ	139
4.8	まとめ	140

第 5 章 結論	143
研究業績	151
謝辭	156

1 序論

1. 序章

1.1 はじめに

火事による災い(=火災)は古くから世の中で恐ろしい災害として認知されている。火災とは、人の意図に反して(または放火により)発生して、消火の必要がある燃焼現象である。被災物によって一般的に、建物火災、林野火災、車両火災、船舶火災、航空機火災、その他の火災に分類されている。

1.2 火災の種別

火災の種別は以下のように区分されている。

- ① 建物火災 建物又はその収容物が焼損した火災をいう。
- ② 林野火災 森林・原野又は牧野が焼損した火災をいう。
- ③ 車両火災 原動機によって運行することができる車両及び被けん引車又はこれらの積載物が焼損した火災をいう。
- ④ 船舶火災 船舶又はその積載物が焼損した火災をいう。
- ⑤ 航空機火災 航空機又はその積載物が焼損した火災をいう。
- ⑥ その他火災 ①～⑤に含まれない火災をいう。

1.3 国内の火災件数、火災建物の種類および火災継続時間

国内の建物火災の現状について、令和元年度版消防白書¹⁾に報告されている結果のうち、火災件数、火災建物の種類および火災継続時間は以下のようなになる。

表 1.1 に火災の状況を示す。平成 30 年の総出火件数は 3 万 7,981 件であり、このうち建物火災が 2 万 764 件、林野火災 1,284 件、車両火災が 5,358 件、船舶火災が 101 件、航空機火災が 3 件、その他の火災が 14,988 件と報告されている。

表 1.1 火災の状況¹⁾ (令和元年度版消防白書 第 1-1-1 表 抜粋)

区 分	平成20年	平成29年 (A)	平成30年 (B)	(各年中)	
				増 減 (B)-(A) (C)	増減率 (C)/(A) × 100 (%)
出火件数合計(件)	52,394	39,373	37,981	△ 1,392	△ 3.5
建物火災	30,053	21,365	20,764	△ 601	△ 2.8
林野火災	1,891	1,284	1,363	79	6.2
車両火災	5,358	3,863	3,660	△ 203	△ 5.3
船舶火災	101	72	69	△ 3	△ 4.2
航空機火災	3	6	1	△ 5	△ 83.3
その他の火災	14,988	12,783	12,124	△ 659	△ 5.2
焼損棟数合計(棟)	40,588	30,824	29,962	△ 862	△ 2.8
全 焼	8,628	6,967	7,138	171	2.5
半 焼	2,761	1,677	1,658	△ 19	△ 1.1
部 分 焼	11,548	8,063	7,833	△ 230	△ 2.9
ぼ や	17,651	14,117	13,333	△ 784	△ 5.6
建物焼損床面積(m ²)	1,317,231	1,069,932	1,063,583	△ 6,349	△ 0.6
建物焼損表面積(m ²)	148,018	111,304	117,981	6,677	6.0
林野焼損面積(a)	83,916	93,808	60,624	△ 33,184	△ 35.4
死者(人)	1,969	1,456	1,427	△ 29	△ 2.0
負傷者(人)	7,998	6,052	6,114	62	1.0
り災世帯数(世帯)	26,805	18,853	18,180	△ 673	△ 3.6
全 損	5,923	4,163	3,978	△ 185	△ 4.4
半 損	2,139	1,305	1,233	△ 72	△ 5.5
小 損	18,743	13,385	12,969	△ 416	△ 3.1
り災人員(人)	66,533	41,518	39,758	△ 1,760	△ 4.2
損害額合計(百万円)	108,417	89,323	84,627	△ 4,696	△ 5.3
建物火災	99,841	81,599	76,353	△ 5,246	△ 6.4
林野火災	606	900	202	△ 698	△ 77.6
車両火災	2,819	2,283	2,227	△ 56	△ 2.5
船舶火災	171	619	859	240	38.8
航空機火災	1,192	43	730	687	1,597.7
その他の火災	3,371	3,105	3,172	67	2.2
爆 発	417	772	1,084	312	40.4
出火率(件/万人)	4.1	3.1	3.0	△ 0.1	-

(備考) 1 「火災報告」により作成

- 2 各年の数値は、1月～12月に発生した火災を集計したもの。以下本節において、ことわりのない限り同じ。
- 3 「建物火災」とは、建物又はその収容物が焼損した火災をいう。以下本節において、ことわりのない限り同じ。
- 4 「林野火災」とは、森林、原野又は牧野が焼損した火災をいう。以下本節において、ことわりのない限り同じ。
- 5 「車両火災」とは、自動車車両、鉄道車両及び被けん引車又はこれらの積載物が焼損した火災をいう。以下本節において、ことわりのない限り同じ。
- 6 「船舶火災」とは、船舶又はその積載物が焼損した火災をいう。以下本節において、ことわりのない限り同じ。
- 7 「航空機火災」とは、航空機又はその積載物が焼損した火災をいう。以下本節において、ことわりのない限り同じ。
- 8 「その他の火災」とは、建物火災、林野火災、車両火災、船舶火災及び航空機火災以外の火災(空地、田畑、道路、河川敷、ごみ集積場、屋外物品集積場、軌道敷、電柱類等の火災)をいう。以下本節において、ことわりのない限り同じ。
- 9 死者には、火災により負傷した後、48時間以内に死亡した者を含む。以下本節において、ことわりのない限り同じ。
- 10 出火率とは、人口1万人当たりの出火件数をいう。以下本節において、ことわりのない限り同じ。
- 11 損害額等については、調査中のものがあり、変動することがある。以下本節において、ことわりのない限り同じ。
- 12 △は負数を表す。以下本節において、ことわりのない限り同じ。
- 13 増減率は、表示単位未満を四捨五入した。以下本節において、ことわりのない限り同じ。
- 14 人口は、平成20年については3月31日現在の住民基本台帳、平成29年、平成30年については1月1日現在の住民基本台帳による。
- 15 火災が2種以上にわたった場合、火災件数は損害額の大きい方で計上し、損害額は、火災による損害を受けたものの火災種別(建物、林野、車両、船舶、航空機、その他の別)ごとに計上している。以下本節においてことわりのない限り同じ。
- 16 「爆発」による損害額については、火災種別に関わらず、「損害額」中の「爆発」に計上している。
- 17 合計欄の値が四捨五入により各値の合計と一致しない場合がある。以下本節において、ことわりのない限り同じ。

図 1.1 に建物火災の火元建物用途別の状況を示す。火災は長期的にみて減少傾向にあるが、建物火災は2万764件に及んでいる。建物火災のうち、住宅火災については53%を占めている。住宅には、木造、鉄骨造、鉄筋コンクリート造（以下、RC造と記す）などの構造種別が含まれるが、このうちRC造の耐火構造は29%を占める。耐火構造については、共用期間中に火災が発生しても規定された時間内は崩壊させないことを想定し、建築基準法において多様な規定が定められている。

我が国における耐火構造は、建築基準法第2条七に、鉄筋コンクリート造、れんが造等の構造で、政令で定める耐火性能を有するものと定義されている。このうち政令とは、施行令第107条にRC造は耐火構造として規定されており、耐火性を有していることから法規上の制約を受けない。

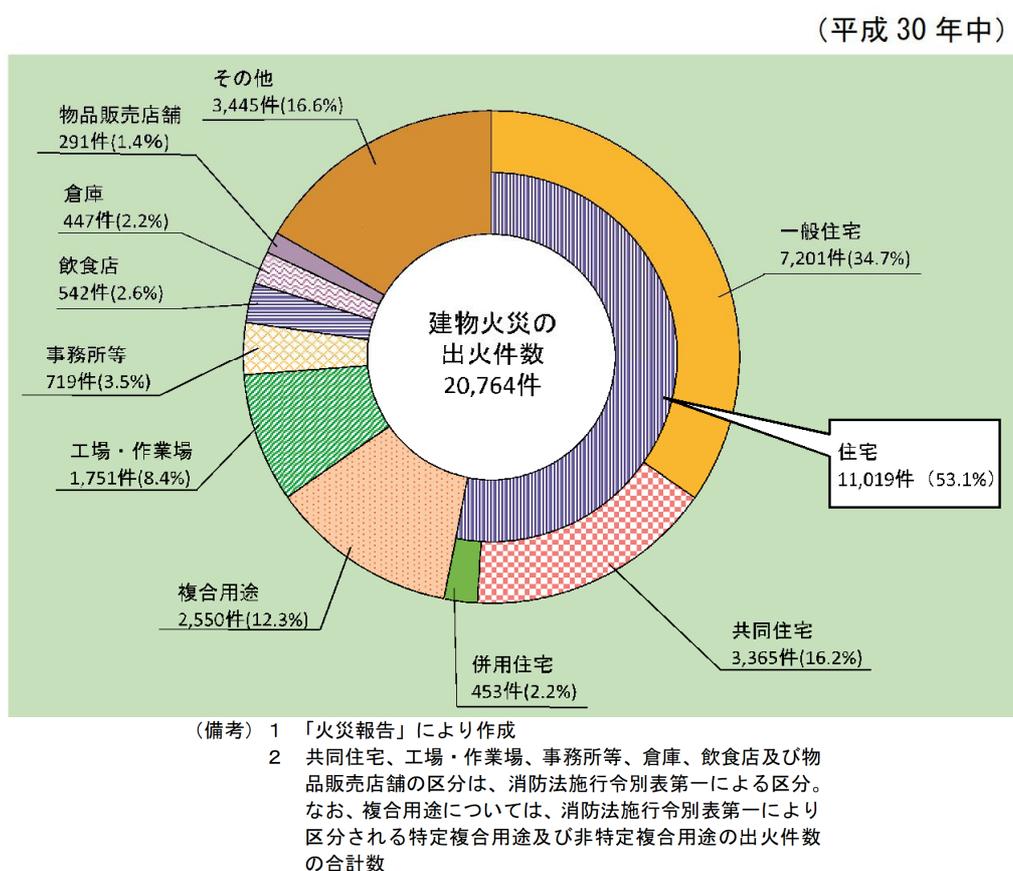


図 1.1 建物火災の火元建物用途別の状況¹⁾

(令和元年度版消防白書 第1-1-17図 抜粋)

図 1.2 に建物火災の鎮火所要時間別1件当たりの焼損状況を示す。消防隊が放水した建物火災のうち、放水開始後60分以内に鎮火に至った件数は5,244件となっており、このうち放水開始後21～30分までに鎮火に至ったものが1,013件と最多である。



- (備考) 1 「火災報告」により作成
 2 「鎮火所要時間」とは、放水開始から、現場の最高指揮者が再燃のおそれがないと決定するまでに要した時間をいう。
 3 「1件当たり焼損床面積」及び「1件当たり出動ポンプ台数」は鎮火所要時間ごとに集計している。
 4 「火災件数」については左軸を、「1件当たり焼損床面積」、「1件当たり出動ポンプ台数」については右軸を参照
 5 「鎮火所要時間」が不明のものは除く。

図 1.2 建物火災の鎮火所要時間別 1 件当たりの焼損状況¹⁾
 (令和元年度版消防白書 付属資料 1-1-39 抜粋)

1.4 火災を受けた鉄筋コンクリート造構造物

写真 1.1~写真 1.4 に、火災を受けた RC 造構造物の被害状況を示す²⁾。



写真 1.1 RC 造構造物部材の被害



写真 1.2 RC 造構造物部材の被害

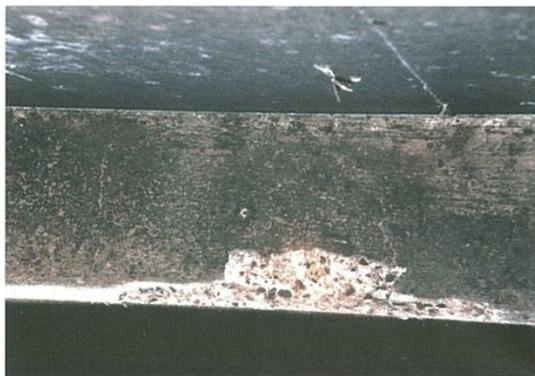


写真 1.3 RC 造構造物部材の被害



写真 1.4 RC 造構造物部材の被害

従来、RC造建物内で火災が発生した場合においては、所定の部材寸法、かぶり厚さを有すれば火災に対して安全であるとみなされてきたが、火災を受けた耐火構造であっても、火災の規模によっては、構造部材に写真1.1~1.4のような被害を受ける場合がみられる。

被災した建物を再利用する場合には、被災前の性能を確保するために当該建物の構造部材コンクリートが受けた火災による損傷や劣化（以下、火害と記す。本研究で扱う火害の定義は1.6節に示す）状況を調査し、必要に応じて的確な補修・補強を施すことが求められる。火災を受けたRC造建物の火害診断および補修については、これまでににおいても設計者、施工者、調査会社等によって数多く行われている。しかしながら、被災した建物の資産価値または守秘義務の観点から、調査結果については公開されないことが多くある。そのうち公開されている鉄筋コンクリート建物の火害調査に関する研究事例を以下に挙げる。

牟田の「火害と補修・補強」によれば、鉄筋コンクリート構造物の火害調査は、第二次世界大戦の東京空襲で焼け野原となった東京の復興に際して、いわゆる焼けビルの耐力診断として、その建物の被災に程度によっては耐力上再使用に耐えられず、取り壊さなければならない事態も生ずることから、使えるビルと使えないビルを可及的速やかに判断する目的で実施された記録がある。その判断基準は、被害等級を軽微な「1級相当」から、取り壊すかまたは完全に設計状態を満たすまで復元するのかの「4級相当」の4段階に分類されている。当該調査では、構造体の振動や載荷実験、コンクリートのテストハンマー試験等が実施されており、個々の火災によって被災したコンクリートの物理的・化学的特性の変化が異なることを示し、調査によってコンクリートや鉄筋の物理的・化学的特性の最終確認を行うことが補修、補強、取り壊しの判断に必要となる場合があるとしている³⁾。

原田らの「火熱を受けた鉄筋コンクリート構造の被害について」によれば、ブリジストン横浜工場の鉄筋コンクリート造5階建構造の火災について調査しており、主として大きな被害を受けた4階および5階を調査し、火災室床版や小梁コンクリートの爆裂、剥脱、鉄筋の露出または著しい曲げ変形の発生を報告している⁴⁾。また、火災に伴う火災荷重の大きさを推定して、主要ラーメンの熱応力を算定し、大きな火災室の端部の構造部材には大きな熱応力が発生していることを示し、火災荷重の大きいものは熱応力を算定して設計応力を検討することの重要性を示している。さらに、原田、古村らは「火災時における鉄筋コンクリート構造および鉄骨構造の熱応力に関する研究」と題して研究を継続し、火災時における熱応力については相当大きく、ラーメンの一部が火災による熱応力によって破壊される可能性が十分にあることを示している⁵⁾。

また、中村らは、「火害を受けた構造物の調査・診断」によれば、火災後の建物の再利用にあたっては、火害調査を行ったうえで検討することの重要性を示している⁶⁾。その調査方法は、コンクリートの圧縮強度残存率と色彩の関係、コンクリートのひび割れ・爆裂・浮き、鉄筋の露出・座屈、部材の変形・破壊などの火害の観察と、炭酸ガス量の変化によって生じるコンクリートの中性化や示唆熱天秤分析などを用いた火害温度の推定、さらにはシュミットハンマーや超音波測定などによる現場での非破壊試験ならびに被災したコンクリートから採取したコアを用いた室内試験による材料試験および部材の耐力を調べる載荷試験などを示し、火害度の総合判定を行った後、被災した部材の補修を行うことの重要性とその方法を示している。

補修方法の事例では、松井、阪口らによって「鉄筋コンクリート造建物の火害調査及び補強例」に関する報告⁷⁾が、また、火害診断後の鉄筋コンクリート造の補修事例として、阪口、吉田、安部、池田らの「鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の火害調査に基づく補修・補強事例」によって、

それぞれ断面修復などの工法で補修され、原設計に基づき品質（設計・耐久）基準強度以上のコンクリートやモルタルの充填材料により、被災前の状態まで補修していることが報告されている⁸⁾。

近年では、森田、近藤らによって「東日本大震災における鉄筋コンクリート造建物の火害 一門脇小学校の事例一」や「津波火災を受けた大槌小学校の火害調査」など、いわゆる津波後火災後の被災事例が報告されている^{9)、10)}。

1.5 火災を受けたコンクリート構造部材

前節で述べたように、火災を受けたRC造の構造部材は、耐火性を有していると認識されながらも、コンクリートについては火災の温度に応じて物理的性質および化学的性質に変化が生じ、その結果機械的性質が低下する。

1.5.1 火災を受けたコンクリートの物理的性質の変化

火災を受けたコンクリートの物理的性質の変化に関する研究は、これまで多くの研究者により行われている。

原田によれば、コンクリートおよび部材の火災特性については、火災が2～3時間継続すると鉄筋コンクリート構造体に発生する熱応力により、地震時の被害のように大きな亀裂が発生すること、高熱を受けたコンクリートは一般に温度の上昇とともに強度が低下するが、殊に弾性係数の低下が著しく、塑性化されたコンクリートになることが示されている。高温を受けたコンクリートは膨張挙動を示すが、その内部では、セメントモルタルは140°Cを超えると膨張から収縮に転じること、粗骨材においてはその岩種によって膨張率が異なることなどが示される。また、コンクリートは一般に高温になると熱伝導率が減少することなどを指摘している¹¹⁾。

U. Schneider はコンクリート内の水分移動については、低温度ではコンクリート表面近くの大きなポア（細孔）から多量の水の蒸発が始まる。120°Cではより小さなポア（細孔）に物理的にとらえた水、または化学吸着していた水の放出が始まり500°Cまで続く。その水分量は、120°Cまでに水分飽和したコンクリートでは1m³当たり130kg、120～600°Cの範囲ではコンクリート1m³当たり50～60kg程度となる。また、水分を蒸発させるために必要な熱量は120°Cまでにコンクリート1m³当たり290MJ、120～600°Cの範囲では135MJとなることがそれぞれ示されている。また、熱ひずみについては、温度に対して非線形であり非可逆的な性質を持つこと、熱ひずみにはコンクリート内の粗骨材が影響を及ぼす重要な要素であること、純粋な水和セメントペーストは140～400°Cにおいて収縮挙動を示すことなどが示されている¹²⁾。

高正遠らの「火災加熱環境下におけるコンクリート中の熱・水分移動および爆裂に関する研究」によると、高温履歴を受けた水セメント比55%のコンクリート内の細孔径分布は、急激な温度上昇によって径0.1μm以下の細孔が崩壊し、その分径1μm以上の細孔が著しく増加すること、コンクリート内の相対含水率は細孔構造がポーラスであるほど水分移動はし易くなり、逆に緻密であるとし難くなること、コンクリート内の水蒸気圧は水分移動の影響を大きく受け、水分移動が活発になると水蒸気圧が緩和され、逆に水分移動が抑制されると水蒸気圧が抑制されると水蒸気圧の急激な上昇により、爆裂が生じる可能性が高まることなどを確認している¹³⁾。

このように、火災を受けた場合のコンクリートの物理的性質の変化は、骨材、セメント、水、水セメント比はもちろんのこと、コンクリートの練り混ぜ、打ち込み方法、コンクリートの水和

状態、養生条件、コンクリートがさらされている周辺状態（温度、湿度）、コンクリート部材や構造要素の形状などに大きく依存する。また、コンクリート内部の水分が蒸発してセメントペーストにひび割れが発生することや、内部の熱応力によって骨材とセメントペースト間が、それぞれ異なった膨張収縮挙動を示すことで緩むことから物理的性質の変化が生じる。

1.5.2 火災を受けたコンクリートの化学的性質の変化

U. Schneider は「コンクリートの熱的性質」にコンクリートの熱分析では、約 100°Cで水の気散、180°Cでゲルの崩壊（脱水の第一段階）、500°Cでポルトランドイトの分解、570°Cで石英の変態、700°C以上で C-S-H 相の分解、800°C以上で石灰岩の脱炭酸塩反応、1150~200°Cで融解が開始することを明らかにしている¹²⁾。同様に指針では、火災を受けたコンクリートの受熱した温度と化学的変化について、コンクリートが 100°Cに達するとエトリンガイトが分解し始め、C-S-H は 100°Cを超えたあたりから温度の上昇に伴って分解し続ける。500°Cに達すると水酸化カルシウムが分解して炭酸カルシウムに変化し始め、950°Cに達すると炭酸カルシウムは酸化カルシウムとなると示している。

最近の研究では、吉田、新らの「火災の影響を受けたコンクリートの化学的変化に関する一考察」などによって、コンクリート内の受熱温度に応じた化学変化について、450~600°Cでは水酸化カルシウムの分解、600~700°Cでは炭酸カルシウムの分解や β -C₂Sの生成、また、約 100°Cで水分蒸発が顕著となり 100°C以上では含水率が大きく低下することを改めて確認している。

コンクリートの外観の変化について、Green, J.K は火災を受けたコンクリートの色彩は、300~600°Cで桃色、600~900°C程度で白灰色、900~1100°Cで淡黄色に呈することを明らかにしている¹⁴⁾。また、Emmanuel V. R. Annerelらは、火災を受けたコンクリートの色彩変化を L*a*b*表色系を用いて評価し、コンクリート表面の反発度との関係について示している¹⁵⁾。最近の研究では、筆者らは加熱冷却後のコンクリートの加熱温度が 300°Cおよび 500°Cでピンク色、750°Cで灰白色、950°Cで淡黄色に呈すること、その色彩の変化はコンクリートの水セメント比で異なること、その色彩変化を L*a*b*表色系¹⁶⁾を用いて定量的に評価できる可能性があることを実験により明らかにしている¹⁷⁾。

これらのことから、指針では図 1.3 のように、火災を受けたコンクリートが受熱した温度と外観の変化については、300~500°Cでピンク色、500~900°C程度で灰白色、900~1200°Cで淡黄色にそれぞれ呈し、1200°Cを超えると溶解することを示している。また、500°Cまではコンクリートにフェノールフタレイン溶液を噴霧することにより赤紫色に呈色することや 580°C以上からはコンクリートに亀甲状のひび割れが発生することが示されている。しかしながら、このフェノールフタレイン溶液を噴霧する方法やコンクリート表面のひびわれについては、それぞれの事象が発生する温度が異なる可能性があることが最近の研究において示唆されている^{18), 19)}。

1.5.3 火災を受けたコンクリートの機械的性質の変化

多くの研究者により高温履歴後のコンクリートについて、圧縮強度や静弾性係数といった機械的性質の変化について研究され、高温履歴を受けたコンクリートはその最高温度に応じて圧縮強度および静弾性係数が変化することを確認している^{20)~24)}など。これらの研究成果は、電気（マッフル）炉を用いて行われていることがほとんどで、目標温度まで加熱しコンクリート内部が均一な温度になるまで試験体（直径 10cm、高さが 20cm 程度のシリンダー）を加熱した後、

常温に冷却した時の圧縮強度および静弾性係数である。一方、Ayman Nassif の「Postfire full stress-strain response of fire-damaged concrete」では、一方向から火災を受けたコンクリートでは、コンクリート内部に非直線的な温度勾配が存在し、高温層の熱変形は低温層によって拘束され、互換性を維持するために引張応力が発生する可能性があること、また、急激な温度上昇とそれに伴う水分の蒸発および移動によって、セメントペースト内の収縮ひび割れ、さらにはセメントペーストと骨材間の相対する収縮膨張挙動による緩みが発生し、コンクリート内は破壊されることを示し、加熱履歴後のコンクリートの加熱面からコアを採取し、圧縮強度試験時に圧縮応力-ひずみ曲線を計測しており、火災温度に応じて圧縮強度時のコアの縦ひずみが著しく変化し、静弾性係数に影響を及ぼすことを確認している²⁵⁾。

指針においては、高温履歴後のコンクリートにおける化学的・力学的性質の変化の概要を図1.3に示す²⁾。高温履歴後のコンクリートの圧縮強度は、コンクリート温度が300°Cに曝されることで1/4程度、500°Cで1/2程度まで低下し、静弾性係数は、コンクリート温度が300°Cで1/2程度、500°Cで1/4程度まで低下する²⁾。

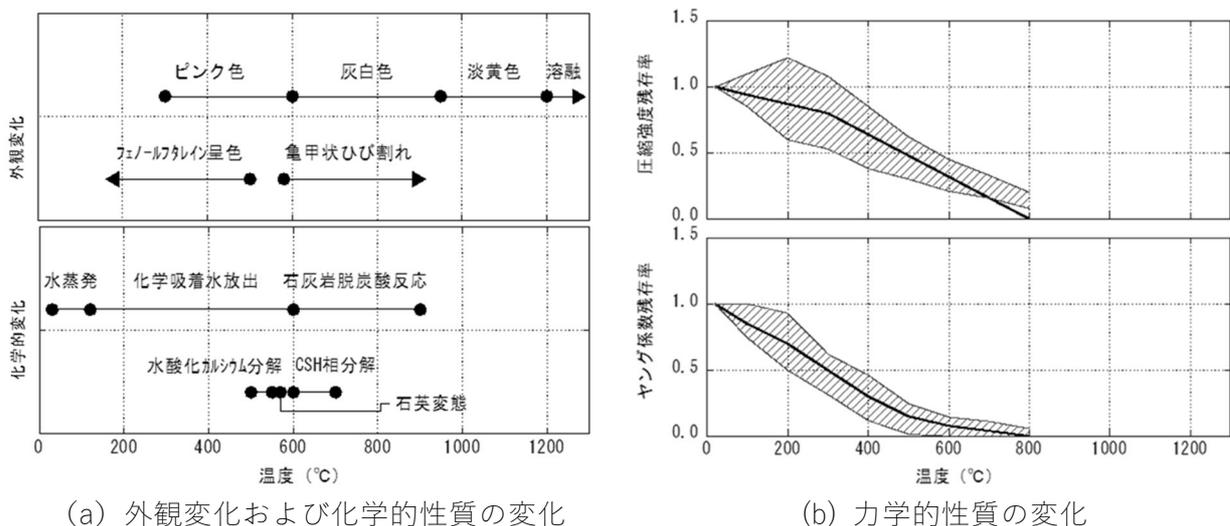


図 1.3 高温履歴後のコンクリートにおける化学的・力学的性質の変化の概要²⁾。

1.5.4 鉄筋の引張強度

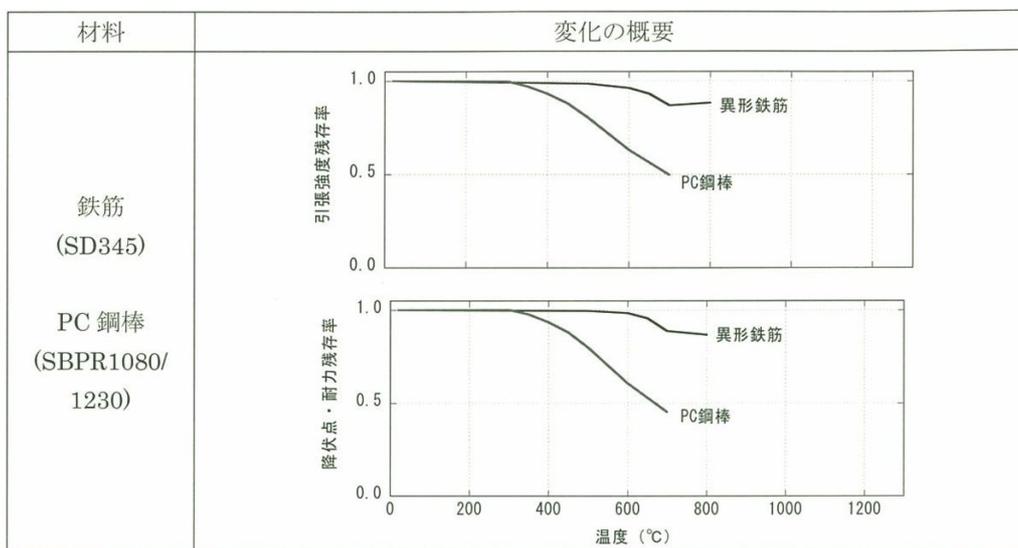
原田によれば、コンクリートおよび部材の火災特性について、鋼材の強度と弾性の低下は比較的小さいが400~500°Cで大きく低下することを指摘している¹¹⁾。

また、丹羽らは、高強度鉄筋（種類の記号SD490：呼び名D19および種類の記号USD685：呼び名D16）の加熱冷却後の力学的性質について加熱実験を行っており、加熱温度600°Cまでは、降伏点、引張強さは加熱前と変化がないこと、破断伸び・絞りについては、加熱温度400°Cまでは変化が見られないことを確認している²⁶⁾。一方、近藤らは、異形棒鋼と性質に近い非調質鋼の鋼材（種類の記号SN400A、板厚6mm）の加熱冷却温度及び冷却方法を考慮した鋼材の機械的性質について、加熱温度が800°Cであっても、降伏点、引張強さおよび破断伸びは、JISの規格値を満足していることを実験によって確認している²⁷⁾。

火災を受けた鉄筋の降伏点および引張強さのそれぞれの残存率を表1.2に示す²⁾。指針によれば、火災を受けたコンクリート内の鉄筋は、受熱温度が600°C以下であれば、加熱冷却後の降伏

点および引張強さの残存率は、受熱前と比較して変化はない。しかしながら PC 棒鋼などの調質鋼は、受熱温度が 400°Cを超えたあたりから降伏点および引張強さが低下し始める。

表 1.2 高温履歴後の鉄筋および PC 棒鋼における力学的性質の変化の概要²⁾。



1.5.5 鉄筋とコンクリートの付着強度

高温履歴後の異形棒鋼とコンクリートとの付着強度と受熱温度との関係を図 1.4 に示す¹²⁾。火災を受けたコンクリート内の鉄筋とコンクリートとの付着強度は、受熱温度が 300°Cで 1/3 程度、500°Cで 2/3 程度まで低下することが知られている。

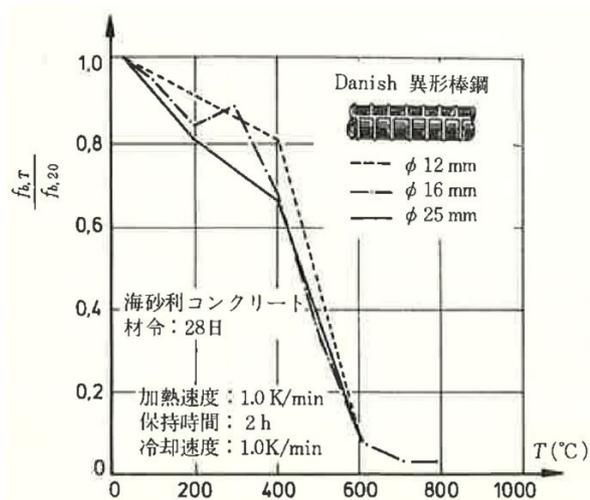


図 1.4 高温履歴後の異形棒鋼とコンクリートとの付着強度と受熱温度との関係¹²⁾

1.6 本研究における火災の定義

火災を受けたコンクリートは 1.5.1～1.5.3 項に示したように、化学的変化および物理的変化が同時に生じることにより機械的性質が変化する。これらの変化の要因の一つには、加熱面が高温に曝されることにより発生するひび割れにある。このひび割れは、セメントペーストの収縮と骨材の膨張挙動から高温になるほど成長し、コンクリート内部に進展する。図 1.5 は、後述する実験で使用した火災加熱後のコンクリートから採取したコンクリートコア内の劣化状態を撮影した写真と加熱面からの位置を示す。

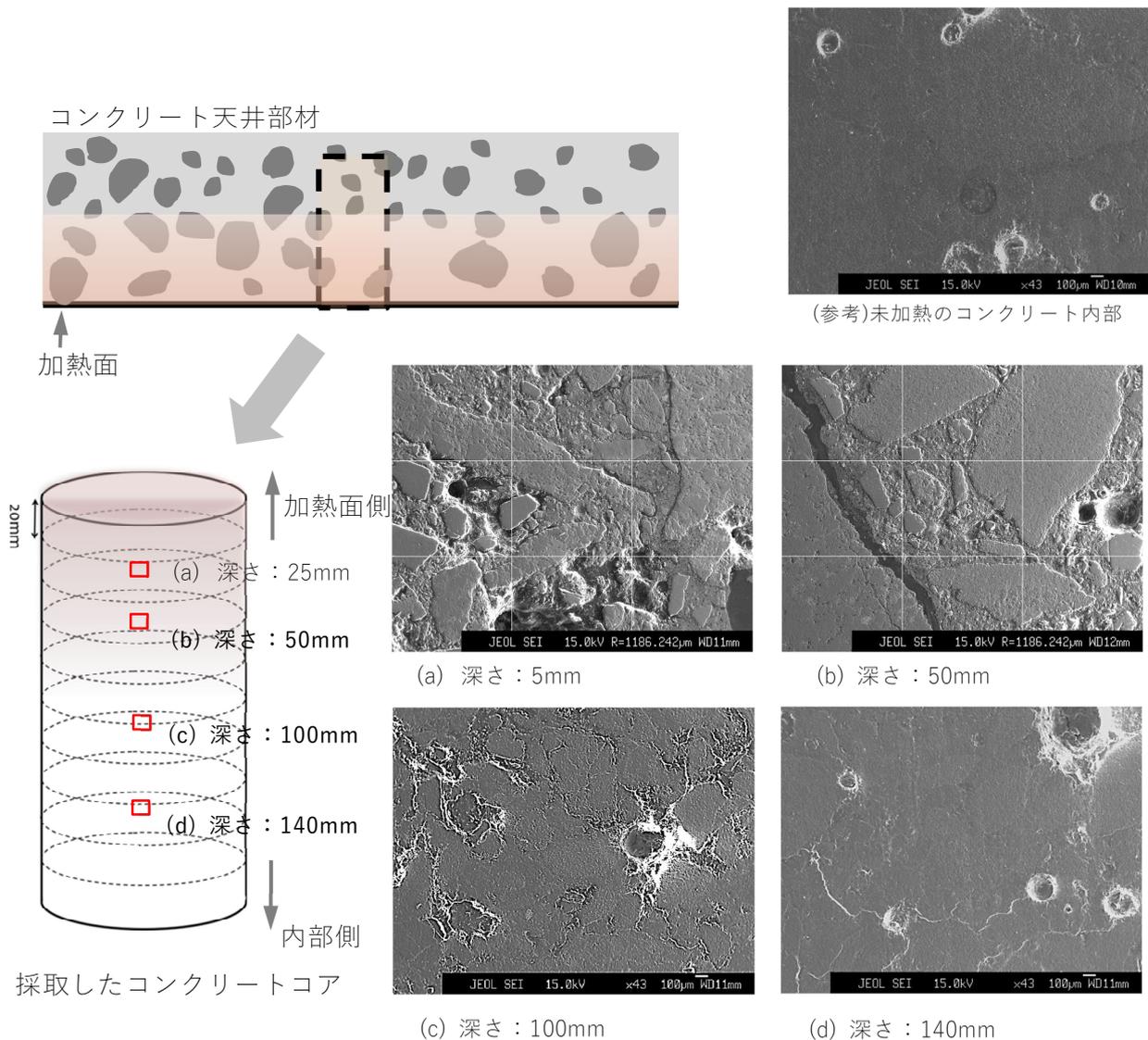


図 1.5 加熱冷却後のコンクリートコア内の状態

火災加熱を受けたコンクリート内に生じるひび割れは、①加熱面近傍のような各材料の収縮や膨張挙動によるひび割れ、②セメントの化学的変化によって脆弱化した剥離（ひび割れ）、さらには③熱容量の違いによって生じる部材間に生じるひび割れなどがある²⁷⁾。これらは、火災を受けたコンクリートの表面から内部に向かうほど減少すると考えられるが、③は加熱面から内部に至るまで卓越して発生する考えられるものをあり不明確な点も少なくない。また、それら

が発生には、コンクリート表面が受ける火災温度や火災継続時間に依存する。

本研究では、化学的変化および物理的変化が同時に生じることにより発生する①～③のひび割れや各材料間の剥離などを対象として火害と定義する。一方で、火災を受けたコンクリートは爆裂現象が生じる²⁸⁾。この現象は高強度コンクリートに比較的好く見られる現象である。ここでは、既存の集合住宅におけるコンクリート構造部材を対象とすることから取り扱わないこととする。

1.7 火災を受けたコンクリート構造部材の火害劣化範囲の推定

火災を受けた構造部材は、火災の温度や継続時間によって機械的性質、化学的性質および物理的性質にそれぞれ変化が生じ、劣化を受けた範囲や深さが異なる。火災を受けた構造物の調査においては、劣化を受けた範囲や深さ（ここでは、劣化範囲と記す）を推定することが重要となる。この劣化範囲を推定することによって、構造物を火災前の状態に戻すための補修範囲を把握し、その範囲を適切に補修することで構造物の再利用を可能とする。

1.8 火害調査の必要性

構造部材の補修範囲を検討する上において、火災を受けた構造物の調査（以下、火害調査と記す）を行うことは、その後の補修計画を行う上で重要となる。

建築分野においては、国内で行われている建物の火害診断は、日本建築学会編「建物の火害診断・補修補強方法指針・同解説」（以下、指針と記す）²⁾によって行われることが少なくない。指針内における火害調査方法は、コンクリート部材表面の目視観察（煤の付着状況、表面の変状等）を行い、概略の被害を把握した後、必要に応じて火害を受けた部材から採取したコアを用いて、圧縮強度や静弾性係数または中性化深さなどの試験を行い、それらの結果から火害等級を決定している。

鉄筋コンクリート部材が火災を受けた場合、火災により劣化を受けたコンクリート表面および劣化を受けていないコンクリート表面からそれぞれ採取したコンクリートコア（以下、コアと記す）を用いて圧縮強度試験を実施し、その両者の圧縮強度を比較することによって、劣化部のコンクリートを評価する。ここで、圧縮強度試験に供されるコアは、劣化部のコンクリート表面から内部に向かって採取される。この時、火災により劣化を受けたコンクリートには、火災時の熱によってコンクリート表面から内部にかけて温度分布が生じていることから、採取するコアの軸方向においては、表面から内部にかけて強度差が生じている^{4)、25)}。この強度差を明らかにすることによって、火災により劣化を受けたコンクリートの補修範囲（深さ）を知ることができれば、適切な補修計画を検討することが可能となり、被災した建物の再利用するための復旧期間や復旧費用などについても明確になる。

なお、最近では、火災を受けた建物が的確に調査・補修された後に再利用するというプロセスが、火災後における建物の資産価値の観点において重要と考えられている。

1.9 火害調査の問題点

火災により劣化を受けたコンクリートは、火災時の熱によって、物理的性質、化学的性質の変化に伴って機械的性質（圧縮強度、静弾性係数）が低下する。しかしながら、コンクリート表面から深さに対する機械的性質の変化を明確にできていない。現状、火害調査によって採取したコアの圧縮強度を評価することは可能であるが、この指標値は構造部材の補修範囲（深さ）を特定

する情報にはなり難い。

1.10 本研究の目的

本研究では、火災を受けた RC 造の集合住宅の構造部材を対象として、被災したコンクリートが加熱面から内部に受けた火害による強度低下の範囲を明確にし、その強度低下から劣化深さを推定する方法を提案することを目的としている。

1.11 本論文の構成

本論文の構成を図 1.6 に示す。本論は全 5 章によって構成する。以下に各章の概要を示す。

第1章 序論

本研究の背景と課題をあげて、研究目的および本論文の構成について述べた。

第2章 火災建物の被害と鉄筋コンクリート部材が受ける火災加熱温度の検討

国内の火災件数と火害調査件数から鉄筋コンクリート部材が受ける火災加熱温度について検討を行った。まず、調査機関による建物の火害調査事例を集計し火害調査における目視観察により推定したコンクリートの受熱温度と圧縮強度の関係を求めた。次に、耐火性検証法を用いて火害調査統計のうち 3 つの集合住宅について火災外力を類型化した。検討した火災外力については、火災温度と火災継続時間との関係を算出し、有限要素法による非線形解析を用いてコンクリート内部の温度を熱伝導解析し、それぞれを比較検討した。

第3章 火災加熱を受けたコンクリート部材の強度低下に関する検討

本章では、RC 造部材を模擬したコンクリート試験体を作製し、第 2 章で検討した火災性状に基づき、天井部材を模擬したコンクリート試験体の下面に火災加熱を与えた後、加熱面から採取したコアを用いて、加熱面からコンクリート内に至るまでの各強度の分布について検討した。これまで、多くの研究者によりコンクリート円柱供試体の圧縮強度と加熱後の最高温度とは相関があることが明らかになっている。しかしながら、それらのほとんどは電気炉で一様に加熱した円柱供試体の圧縮強度である。火害調査で扱うコンクリート部材の受熱温度については、火災後の火災室内の可燃物を観察することで得られる変状から、ある程度の受熱温度は想定できるものの、火災継続時間や可燃物の位置などによってコンクリートが受ける劣化を把握することは困難である。このため、火災性状は不明でコンクリートの受熱温度が求められなくても、火害劣化範囲の特定が必要なため、採取するコアの強度分布を把握することにより、受熱温度を求めることなく、コンクリートの強度低下ならびに深さ方向の強度分布を把握することが重要となる。

第4章 火災を受けたコンクリート部材から採取したコアの圧縮応力-体積ひずみ曲線による変形特異点を用いた火害劣化深さの推定に関する検討

本章では、火害調査において、圧縮強度を確認する目的で採取される直径 100mm のコアを使用して、切断することなく加熱面から内部に至る劣化深さを推定する方法について検討し、その方法を示した。

火害劣化深さの推定については、火害調査時に必要であるがその方法については明確な方法は定められていない。本実験では、火災を受けたコンクリート試験体から採取したコアの圧縮強度試験を実施する際に、コアの軸方向に短いひずみゲージを連続して貼付して載荷し、圧縮強度に至るまでの軸方向およびその直交方向のひずみを得ることによって、加熱面から深さ方向に連続して臨界応力度を求めることにより火害劣化深さを推定する方法を示した。

第5章 結論

本研究によって得られた成果について総括した。

第1章 序章

- ・火研究背景と目的
- ・コンクリート構造部材の火災後の特性
- ・研究範囲と本論文の構成

集合住宅の火災外力とコンクリート部材の強度低下

第2章 火災建物の被害と鉄筋コンクリート部材が受ける火災加熱温度の検討
(集合住宅の火災外力)

- ・建物の火害調査に関する統計と集合住宅火災の特徴
- ・耐火性検証法による火災温度と火災継続時間の算定と熱伝導解析による検証
- ・火害調査結果から求めた集合住宅の火災外力の推定
- ・加熱温度-時間モデルを用いた熱伝導解析

第3章 火災を受けたコンクリート部材の強度低下に関する検討
(集合住宅の火災外力を受けたコンクリートの強度低下)

- ・ガス炉による片面加熱したコンクリートから採取したコアおよび小径コアの圧縮強度分布の検討
- ・コアのスライス試験片による加熱面から深さ方向の圧縮・曲げ・引張強度分布
- ・各種強度と火災継続時間との関係



コンクリートの火害診断劣化深さの推定方法

第4章 火災を受けたコンクリート部材から採取したコアの圧縮応力-体積ひずみ曲線による変形特異点を用いた火害劣化深さの推定に関する検討
(火災を受けたコンクリートの火害劣化深さの推定方法)

- ・コンクリートの圧縮強度試験時における破壊過程と変形特性
- ・コンクリートの圧縮強度試験時における端面摩擦の影響
- ・コンクリートの圧縮強度試験時における体積ひずみと臨界応力度に関する検討
- ・加熱冷却後のコンクリート円柱供試体の加熱温度と臨界応力度に関する検討
- ・コンクリートコアの臨界応力度から推定した火害劣化深さ

第5章 結論

図 1.6 本論文の構成

<第1章の参考文献>

- 1) 総務省消防庁：令和元年版消防白書
- 2) 日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法 指針・同解説、2015年2月
- 3) 牟田紀一郎：火害と補修・補強、特集 補修・補強、コンクリート工学、Vol.31, No.7, pp.83-86, 1993
- 4) 原田 有, 仕入豊和, 古村福次郎, 寺本隆幸：加熱を受けた鉄筋コンクリート構造の被害について、日本建築学会論文報告集, 第103号, pp.383-284, 1964年10月
- 5) 原田 有, 古村福次郎：火災時における鉄筋コンクリート構造および鉄骨構造の熱応力に関する研究、日本建築学会論文報告集, 第183巻, pp.15-23, 92, 1971年5月
- 6) 中村賢一：火害をうけた構造物の検査・診断, セメント・コンクリート No.367, pp.145-153, 1977年9月
- 7) 松井亮夫, 阪口明弘：鉄筋コンクリート造建物の火害調査及び補強例, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 防火, 火害診断および補修・補強, pp.97-100, 2010年7月
- 8) 阪口明弘, 吉田正友, 安部武雄, 池田憲一：鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の火害調査に基づく補修・補強事例, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 防火, pp.167-168, 2004年7月
- 9) 森田 武, 近藤史朗, 野竹宏彰：東日本大震災における鉄筋コンクリート造建物の火害－門脇小学校の事例－, 日本火災学会 火災誌 318号, Vol.62, No.3, pp.1-4, 2012年6月
- 10) 近藤史朗, 森田 武, 野竹宏彰：津波火災を受けた大槌小学校の火害調査, 日本火災学会 火災誌 318号, Vol.62, No.3, pp.5-8, 2012年6月
- 11) 原田 有：コンクリートおよび部材の火災特性について, コンクリートジャーナル, Vol.11, No.8, pp37-65, 1973年8月
- 12) U, Schneider 著, 森永繁監修, 山崎庸行, 林章二訳：コンクリートの熱的性質, 技報堂出版, 1983年12月
- 13) 高正遠：火災加熱環境下におけるコンクリート中の熱・水分移動および爆裂に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第607号, pp.23-30, 2006年9月
- 14) Green, J.K., : Reinstatement of Concrete Structures after Fire, The Architects' Journal Information Library, p.93, 1971.7
- 15) Emmanuel V. R. Annerel and Luc R. Taerwe : Assessment Techniques for the Evaluation of Concrete Structures After Fire, Journal of Structural Fire Engineering, Vol.4, No.2, pp.123-129, 2013
- 16) JIS Z 8781-4 : 2013 「CIE 1976 L*a*b*色空間」, 日本工業規格
- 17) 春畑仁一, 新井真：粗骨材の種類が火害を受けたコンクリート表面の劣化評価に与える影響, GBRC, Vol.43, No.1, 2018.1
- 18) 吉田夏樹, 新大軌, 木野瀬透, 奥村勇馬：火災による熱を受けたコンクリートの化学的変化に関する検討, GBRC, Vol.44, No.1, 2019.1
- 19) 大野健太郎, 前田祐輔, 内田慎哉, 春畑仁一：弾性波の速度構造による火害を受けたコ

- ンクリートの劣化評価手法に関する基礎的検討, 日本コンクリート工学会, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1909-1914, 2017.7
- 20) Y.F.Fu, Y.L.Wong, C.S.Poon and C.A.Tang, Stress-Strain behaviour of high-strength concrete at elevated temperature, Magazine of concrete Research, 57, No.9, pp.535-544, 2005.11
 - 21) 奥山治也, 奥野亨, 佐藤忠博, 崇英雄: コンクリートの耐熱性におよぼす骨材の影響に関する研究 (その 1 高温加熱を受けた骨材およびコンクリートの性状の変化, その 2 20~300°Cの高温に長時間さらされたコンクリートの諸性能), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp.217-220, 1973 年 10 月
 - 22) Yngve Anderberg, Sven Thelandrsson, : Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures, Lund Institute of Technology Lund Sweden 1976, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, 1976.11
 - 23) 一瀬賢一, 川口徹, 長尾覚博: 高温加熱後における高強度軽量コンクリートの各種強度特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.135-136, 2001 年 9 月
 - 24) Eurocode4, Design of Concrete Steel and Concrete Structures-Part 1-2 : General Rules -Structural Fire Design, CEN EN 1994-1-2:2005
 - 24) Ayman Nassif, Postfire full stress-strain response of fire-damaged concrete, Materials Science, pp.135-136, 2001.9
 - 25) 丹羽博則, 長沼一洋: 高強度鉄筋の加熱冷却後の力学的性質, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.51-52, 2005 年 9 月
 - 26) 近藤史郎, 杉本薫昭, 村上行夫, 春畑仁一, 西村光太, 鈴木淳一: 加熱冷却温度及び冷却方法を考慮した鋼材の機械的性質について その 1 JSIZ2241 の方法による引張試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.145-146, 2016 年 8 月
 - 27) 日本コンクリート工学会: コンクリートの診断技術'19[基礎編], P57, 2019 年 2 月
 - 28) 一瀬賢一, 長尾覚博: 高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 541 号, pp.23-30, 2001 年 3 月

第2章

火災建物の被害と鉄筋コンクリート部材が受ける火災加熱温度の検討

2. 火災建物の被害と鉄筋コンクリート部材が受ける火災加熱温度の検討

2.1 はじめに

第1章では、総務省消防庁の令和元年防災白書¹⁾に報告されている国内の火災件数について、年間の火災件数分布、火災件数の建物の種類、出火場所および火災計測時間等について述べた。

すなわち、平成30年の総出火件数は3万7,981件であり、このうち建物火災は2万764件、と報告されていた。建物火災の出火件数を火元建物用途別にみると、住宅火災が1万1,019件と最も多く、全体の53.1%を占め、このうち、共同住宅は3,365件で16.2%を占めた。また、火元建物の構造別でみると、耐火構造は5,695件で27.4%であった。また、建物火災の鎮火所要時間別1件当たりの焼損状況をみると、消防隊が消火した建物火災のうち、放水開始後60分以内に鎮火に至った件数は5,244件となっており、このうち放水開始後21～30分までに鎮火に至ったものが1,013件と最多であった。

本章では、(一財)日本建築総合試験所がこれまでに実施した火害調査²⁾について、建物の種類、構造種別、火災発生から鎮圧までの経過時間、また損傷を受けた構造部材のコンクリートの圧縮強度の結果について整理した。また、その結果から、耐火性能検証により求めた被災室の最高受熱温度および火災継続時間などを類推し、被災した建物の火災外力を推定した。

なお、これら本章で検討したRC造の集合住宅における火災の特徴を整理した結果については、第3章の加熱実験計画における加熱温度条件を考慮する情報のひとつとした。

2.2 集合住宅の火害調査事例の集計結果

建物が火災を受けると建物の内外装に被害が生じる。火災によって構造部材が受ける火害の程度は、火災が発生した場所の総可燃物量、供給される酸素量、消火開始時間、鎮火時間、構造部材の耐火被覆の有無などにより異なる。

表2.1は、1981年～2016年までに日本建築総合試験所が実施した火害調査における統計調査結果に使用した統計項目である³⁾。このうち、RC造の共同住宅で設計図書が現存し、出火位置や火災継続時間などの火災時の情報が明確であった事例に対して、火災の概要、被害を受けた建物の種類、用途および火災継続時間に着目した統計調査結果を整理した。

表 2.1 統計調査の項目

統計項目	対象範囲
調査年数	1981年～2016年
調査件数	191件
構造物	建築物：96%，土木構造物：4%
構造	鉄筋コンクリート造，鉄骨造，その他
用途	共同住宅，事務所，病院，店舗，ごみ処理施設，工場，庁舎，その他
火災継続時間	出火時刻～鎮圧時刻までの時間
構造部材から採取したコンクリートコアの圧縮強度	火害を受けた構造部材および火害を受けていない構造部材から，それぞれ採取したコンクリートコアによる圧縮強度の比較

2.2.1 調査件数の変遷

図 2.1 に、対象とした 1981 年～2016 年の調査件数の変遷を示す。

調査件数は、1981 年～1994 年頃までは年間 0～3 件の依頼であったが、兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）が発生した 1995 年以降から徐々に増加傾向にあることがわかる。図中の折れ線グラフは建物火災件数¹⁾を示している。2005 年以降は建物火災件数が減少している。これに対して火害調査・診断が増加傾向にあるが、この要因には、各学協会により、火害診断の重要性が言及され始めたことや、建設業界において発生した構造計算書偽装問題や基礎ぐい工事問題などにより、建築物の安全に対する信頼が揺らいでいることに起因していると考えられる。

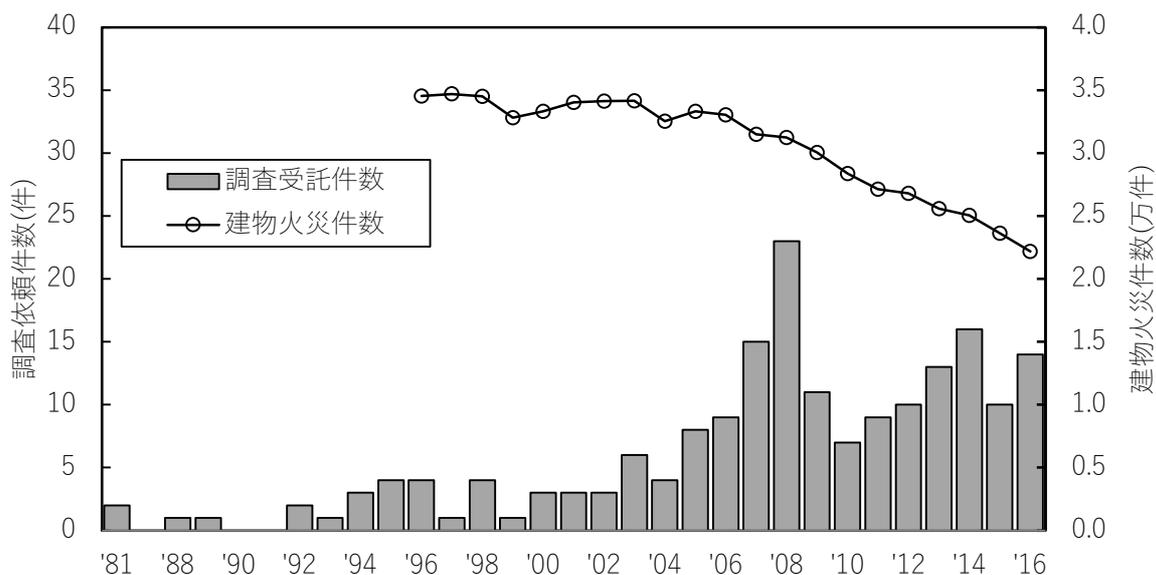
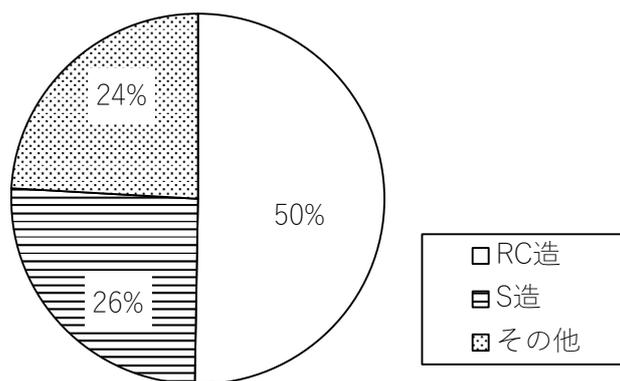


図 2.1 調査件数の変遷³⁾

2.2.2 建物の構造種別

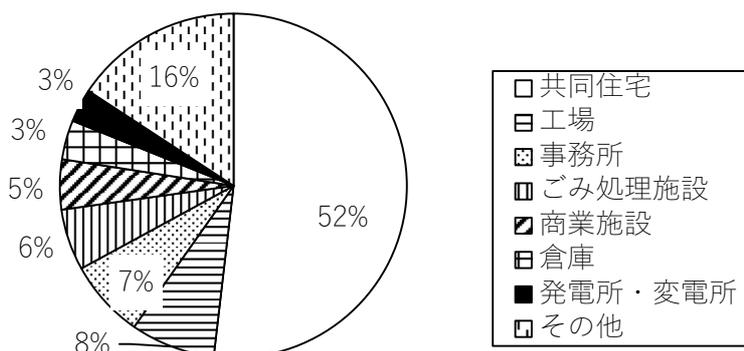
対象件数のうち、構造物の種別は建築物が 96%、土木構造物が 4%であった。このうち、建築物について構造種類で分類すると図 2.2 のように、鉄筋コンクリート造（本報では鉄骨鉄筋コンクリート造も鉄筋コンクリート造に含め、以下、RC 造と記す）：50%、鉄骨造（以下、S 造と記す）：26%、その他（PC、木造）の構造で 24%であった。

図 2.2 構造の種別³⁾

2.2.3 建物の用途種別

建物の用途は図 2.3 のように、共同住宅が 52%と最も多く、工場：8%、事務所：7%、ごみ処理施設：6%と続く。共同住宅は居住空間であることから、調理機器や暖房機器の使用頻度が高くなることから火災件数が多くなると考えられる。

これらのことから、火害調査の最多依頼は、RC 造の共同住宅であることが確認できた。

図 2.3 建物の用途³⁾

統計結果から、対象件数のうち建築物が 96%を占め、このうち、構造種類で分類すると、鉄筋コンクリート造：50%、鉄骨造：26%、その他（PC、木造）の構造で 24%となっている。建物の用途は、集合住宅が 52%と最も多く、火害調査の最多依頼は、RC 造の集合住宅である。

2.2.4 集合住宅火災の特徴

集合住宅は、一つの建物の中に、複数の世帯が入居している住宅の形態であり、建築基準法上は共同住宅と長屋に大別される。

前述のように建物火災の大半は住宅火災である。そのうち、戸建て木造住宅の火災が多い。集合住宅のそれぞれ専用部分である住戸内は、様々な人々が生活する空間であり、就寝施設を有するのが特

徴である。また、調理や暖房などの火気を使用することから、潜在的な火災危険性が高い出火の危険性は高い。

集合住宅は、一般的に南側に居間や主寝室などの居室を、北側に水回りなどを配置し、出入口は玄関1箇所であることが多い。居室は比較的可燃物が多く、また、調理や暖房などで火気を使用するため、火災が発生する可能性が高い。

火災が発生すると、居室内に配置されている家具、ソファ、カーテンなどの可燃物に燃え移り、火災室内に広がる。その後、火災が成長すると、室内の温度が上昇し、開口部の破損などによって室内に空気が供給されることで盛期火災に発展して火災温度が急激に上昇することもある。集合住宅の居室などでは開口部の大きさに比べて可燃物が多い。火災便覧には、可燃物が多い区画火災時は、火災のごく初期に燃料支配型を示し、火災の成長あるいはフラッシュオーバーとともに換気支配型を示すのが一般的であると示されている⁴⁾。

これらのことを勘案すると、集合住宅では、各住戸部分を防火区画し、火災が発生した場合でも火災を住居内に閉じ込めることが重要となる。

2.2.5 集合住宅の火災継続時間

図 2.4 に、火災継続時間を調査した結果を示す。火害調査件数が最多であった RC 造の共同住宅において、出火時間と鎮圧時間が明確となっている 63 件を対象として、出火開始時間から 15 分間隔で集計した件数である。図より、出火開始から 30 分を超え 45 分で鎮圧されている件数が最多であった。また、出火開始から 1 時間 30 分以内で鎮圧された件数は全体の 89.8%であった。なお、2 時間 45 分まで、火災が継続した案件については、低層団地の 3 階部分の 1 住戸が全焼した火災であった。

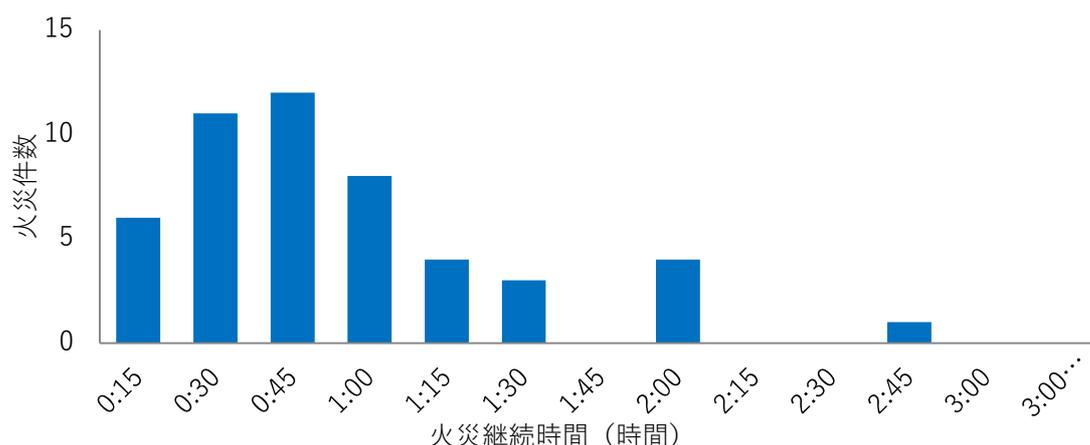


図 2.4 共同住宅の火災継続時間³⁾

2.2.6 被災した構造部材から採取したコンクリートコアの圧縮強度

図 2.5 のうち、火災継続時間が 3 時間以内、かつ火害調査時に構造部材からコンクリートコア（以下、コアと記す）を採取して圧縮強度試験を行った 89 本について調査結果を表 2.2 に示す。表より、火害部から採取したコアの圧縮強度に低下が認められた割合は、全体の 76.4%であった。

表 2.2 コア本数と火害部が非損傷部を下回った割合³⁾

火害部	非損傷部	合計	火害部／非損傷部<1.0
55(本)	34(本)	89(本)	76.4(%)

採取部材表面の推定受熱温度ならびに火災継続時間別に整理した火害部の圧縮強度残存比を図 6 に示す。図より、火災継続時間が 30 分以上で、推定受熱温度が 500°C 以上の場合では、圧縮強度残存比が 0.7~0.9 であった。

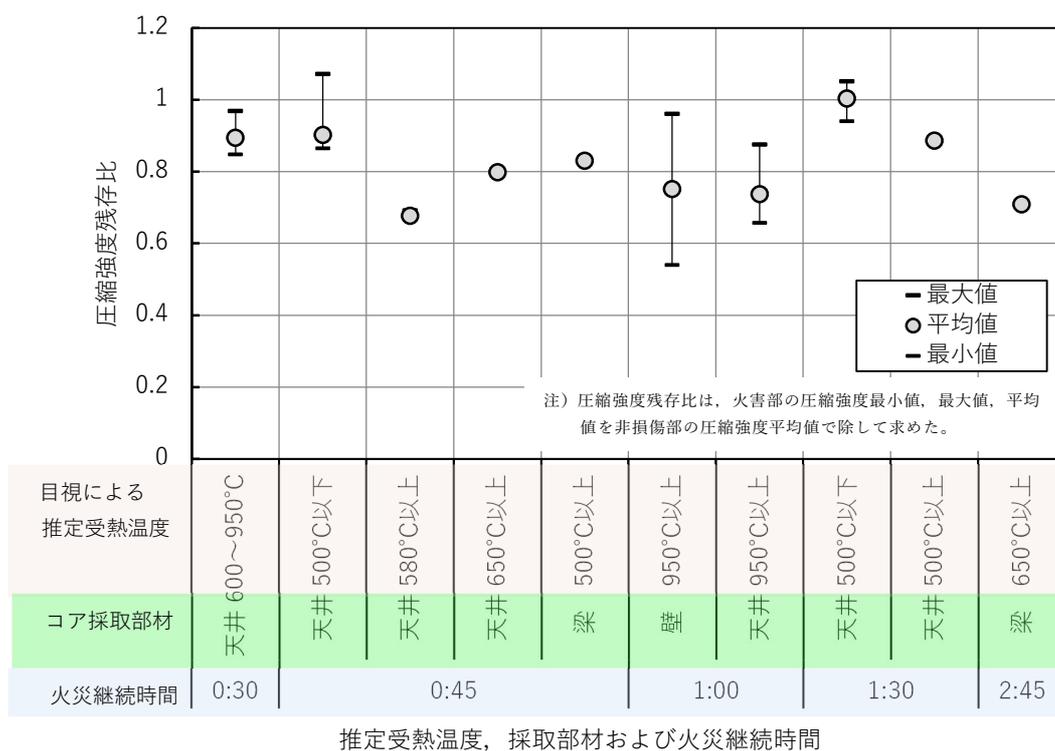


図 2.5 推定受熱温度、採取部材および火災継続時間別のコンクリートコアの圧縮強度残存比³⁾

2.3 耐火性能検証法による集合住宅の火災外力の検討

前節までの集合住宅の統計結果により集合住宅の火災の実態について整理した。

一般的な集合住宅で火災が発生すると、居室内に配置されている家具、ソファ、カーテンなどの可燃物に燃え移り、火災室内に広がる。火災が成長すると、室内の温度が上昇し、開口部の破損などによって室内に新鮮な空気が供給されることで、可燃物は一斉に燃焼しフラッシュオーバー現象が発生する。フラッシュオーバーが発生すると区画内の温度は急上昇し窓などの開口部から激しく火災が噴出する。これを盛期火災と呼ぶ。盛期火災に発展すると火災温度が急激に上昇することもある。盛期火災の温度は、燃焼による発熱量と、開口および周壁（床、壁、天井）を通じて外部へ放出される熱量とのバランスにより決まる。したがって、盛期火災の激しさは、空間内の可燃物の量と空間の開放度が決まれば大凡決定される。通常の居住空間では、火災温度はかなり高くなり、800～1200℃に達することもある。

このように、盛期火災に成長した火災により建物内に火災が広がることを防ぐために、建物の内部には耐火性のある床、壁、防火戸などの区画部材により区画され、耐火建築物における火災は区画火災と呼ばれている。図 2.6 に典型的な区画火災の推移を示す⁵⁾。

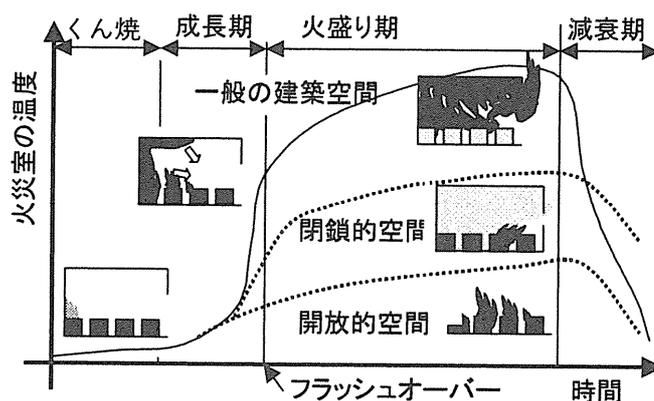


図 2.6 典型的な区画火災の推移 (図 1.1.1 抜粋)⁵⁾

本節では、前節で示した集合住宅の火災調査事例調査結果から、設計図書が明確な3件の火災に対して、室内の可燃物量から火災外力（火災継続時間と火災温度上昇係数）を算定し、実際に火災を受けた天井部材の被害状況を比較した。算定方法は耐火性能検証法⁶⁾を用いた。

2.3.1 火災外力（荷重）

建物の火災において、火災の温度とその継続時間を支配する最大の要因は、対象となる建物に含まれる可燃物の量と開口部の大きさであるとされており、可燃物の量を火災室の床面積で除して火災荷重と呼んでいる。建物の耐火設計を行うにあたっては、設計する建物内の可燃物の量を正確に予測することが必要である。

建物内の可燃物は、大きく分けると、固定可燃物と積載可燃物の2つに分けられる。固定可燃物とは、床、壁、天井の下地と内装材料および建具や造り付けの家具などの建築時に持ち込む可燃物。一方、積載可燃物とは、家具、書籍、衣類、寝具などの建築後に持ち込まれる可燃物である。この2つの可燃物には、多種類の材料があり、燃焼時の発熱量も材質によってそれぞれ異なる。この発熱量を同発熱量の木材重量に換算した値を等価可燃物量といい、耐火設計を行う場合はこの等価発熱量がよく用いられる。火災温度を予測する場合、火災区画の形状寸法、区画部材の熱特性、開口部の形状寸法がそれぞれ必要となるが、これらは建物の設計に基づいて設定される。

2.3.2 耐火設計の概要

耐火設計を行う RC 造建物の構造部材としては、柱、梁、壁、床などがある。これらは、常時、積載荷重、自重により生じる曲げモーメント、せん断力、軸力などの長期荷重を支え、地震時、台風時などの短期荷重に対して抵抗する。

構造部材が火災時に加熱を受けると、部材温度が上昇し部材の熱膨張による熱応力や構造部材の劣化による耐力低下が生じる。発生した火災の激しさや構造部材に作用する荷重、架構条件によっては構造部材が倒壊に至ることがある。火災時に建物が倒壊しないためには、これら構造部材は常時に支えている荷重を火災時においても支えていなくてはならない。さらに、壁、床などの面材は、柱、梁などと異なり建物の内部空間を区画し、発生した火災をその中に封じ込め、①延焼を防ぐ、②居住者の避難路を確保する、③消火活動を容易にする、ことなどが求められることから、区画部材としても機能を併せ持つ必要がある。

2.3.3 耐火設計の手順

図 2.7 に、耐火設計の手順を示す⁶⁾。耐火設計を行うには、まず、建物の構造部材が火災時に保持すべき耐火性能の安全係数を設定する。安全係数は、建物の用途や建物が建設される地域、または建物に施される防火対策などに基づいて設計される。この安全係数を火災荷重に乗じることで設計火災時間が決定される。次に、建物内に存在する火災荷重と防火区画の形状寸法、仕様等に基づいて火災性状が予測される。一般に耐火設計で対象とする火災はフラッシュオーバー以降の盛期火災であるが、可燃物の量や配置、空間条件によっては、フラッシュオーバーに至らず局所的な火災に留まることもある。また、外壁の外側に構造部材を露出させた建物では、外壁の開口部から噴出する火災や近隣火災などなどにより構造部材が加熱を受けるため、これらについても予測する必要がある。

部材温度予測については、上記の火災性状予測で求めた火災温度-時間曲線を条件として構造部材の断面寸法と構成材料の熱定数等に基づいて、部材温度-時間曲線や部材の最高到達温度を算定する。架構条件や部材の断面寸法、構成材料の高温時の力学的性質や作用荷重等に応じて、上記部材温度の下で架構または部材の熱応力変形状を予測する。

これらの予測値を別に定められた耐火性能評価基準に基づき、架構や構造部材に破壊や倒壊が生じないかを判定する。

この耐火設計の手続を参考に、本節では部材温度-時間曲線や部材の最高到達温度を算定した(図 2.9 赤枠参照)。

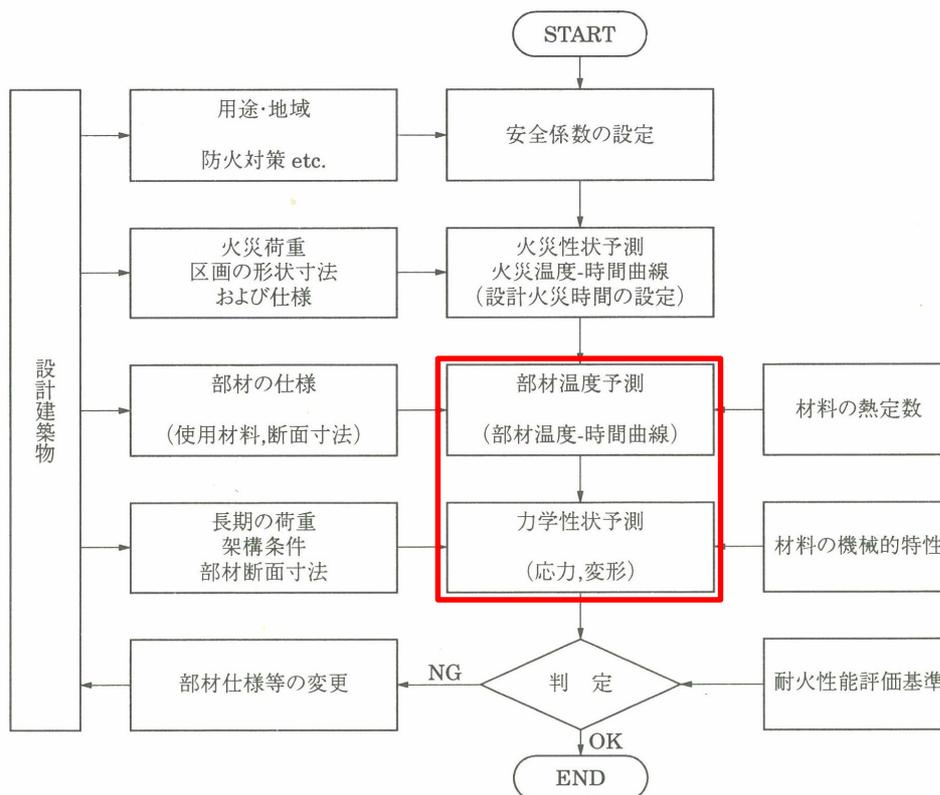


図 2.7 耐火設計の手順 (図 11.1 抜粋) ⁵⁾

2.3.4 屋内火災の火災継続時間と火災温度上昇係数の算定

(1) 算定手順の概略

耐火性能検証法において、主要構造部に加わる火災温度は、図 2.10 に示すように、火災継続時間 t_f (min) と火災温度上昇係数 α ($^{\circ}\text{C}/\text{min}^{1/6}$) を用いて式 2.1 のように表される。

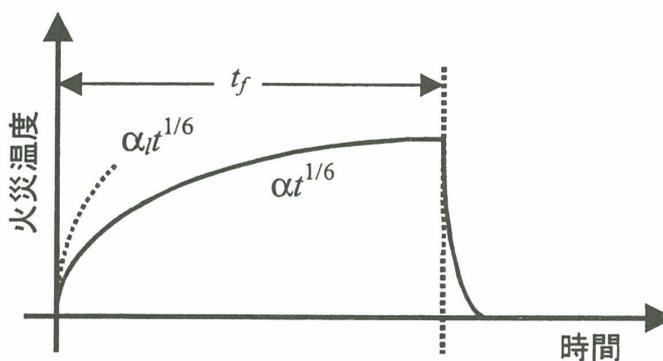


図 2.10 火災温度の推移 (図 3.1.1 抜粋) ⁵⁾

$$T_f = \alpha t^{1/6} + 20, (0 \leq t \leq T_f) \quad (2.1)$$

ここに、

t : 時間 (min)

また、屋内火災においては、可燃物の局所的な燃焼や噴出火災等の室の一部に短時間生ずる高温部材が通常想定される。その温度は部材近傍火災温度上昇係数 α_t ($^{\circ}\text{C}/\text{min}^{1/6}$) を用いて、式 2.2 のように示される。

$$T_f = \alpha_t t^{1/6} + 20, \quad (0 \leq t \leq T_f) \quad (2.2)$$

ここに、

t : 時間 (min)

火災継続時間は、室内の可燃物が燃え尽きるまでの時間であり、室に含まれる可燃物の総発熱量を単時間当たりの発熱量で割った値である。火災温度上昇係数は燃焼による発熱に応じて室の温度が上昇する程度を表す係数である。両者は、発熱速度に応じて決まることから、検証法においては発熱速度を算定することが基本となっている

図 2.8 に火災継続時間および火災温度上昇係数の算定手順を示す。算定手順は、

- ① 検証法に先立って防火区画を設定し検証対象となる部位を抽出する。
- ② 火災性状を算定する単位となる室を下記(2)に従って選定する。
- ③ 室ごとの総発熱量、燃焼による可燃物の 1 秒間あたりの発熱量と火災継続時間、火災温度上昇係数、部材近傍火災温度上昇係数の順に算定を行う。

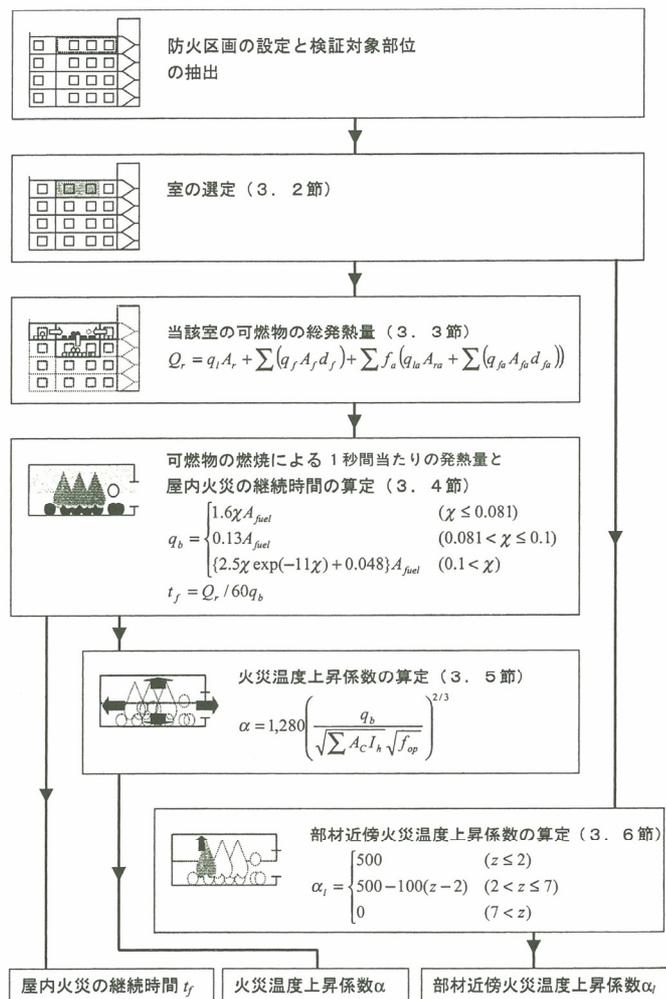


図 2.8 火災継続時間および火災温度上昇係数の算定手順⁵⁾

(2) 火災室の採り方

耐火性能検証法においては、室を単位として火災性状を考え、室ごとに火災継続時間と火災温度上昇係数を算定することから、火災性状を算定する単位となる室（以下、火災室と記す）を選定することが必要となる。ここでは、火災室の設定方法と室に関連する入力パラメータの算定方法の原則を示す。

火災室の選定方法

耐火性能検証法で想定される火災は、出火直後の火災ではなく十分に成長した盛期火災を対象とすることから、室の可燃物量と室の形状から予測される最大規模の火災を考える。したがって、同時に燃焼が起こり、かつ温度が一様に上昇する部分を検証単位の室として抽出することが重要となる。通常、周壁（間仕切り壁、床、天井）とそれに設ける開口部によって区切られた一つの空間を火災室とする。また、火災室として選定すべき室は、居室だけでなく、機械室などの室、廊下や階段、昇降機、ダクトスペースなどの堅穴に相当する部分も火災室とし、建物の全てがいずれかの室に含まれるように火災室を設定する。

耐火性能検証法では、用途が同一で、間仕切り壁が火災初期に崩壊して一体として燃焼する部分は複数の室を一つの火災室として扱ってよいとしている。

本章では当該研究による火災室の判断基準は、「200 平米以下の集合住宅の住戸」を一つの火災室として検証を行った。

室の床面積と高さ

検証法における負荷面積と高さは、主要構造部材で囲まれた距離をもとに算出することを原則とする。室の床面積 A_r は壁芯距離から室の高さ H_r は床スラブ上端から上階のスラブ下端までの高さとする。

算定項目に応じた面積および高さの採り方

検証法の中で扱う天井と床については、図 2.9 に示すように計算する項目により指す部分が微妙に異なることに注意が必要である。

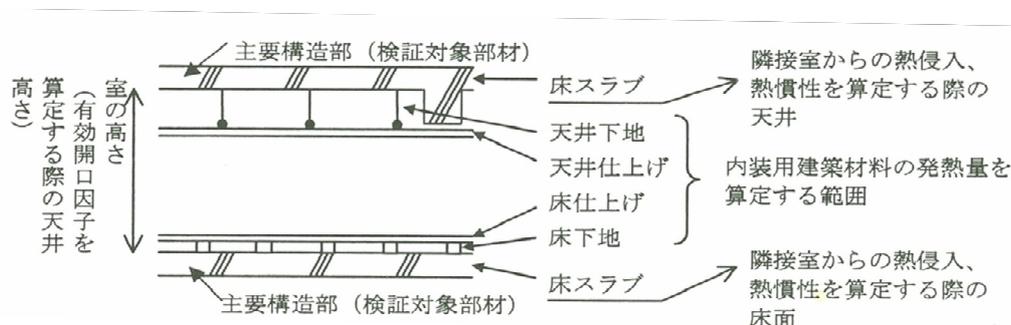


図 2.9 室の部位と呼び方⁵⁾

(3) 火災室内の可燃物の総発熱量 (Q_f)

火災室内の可燃物の総発熱量は、当該室の収納可燃物と内装用建築材料の発熱量の合計二輪室からの熱侵入量を加えたもので、式 2.3 で表される。

$$Q_f = q_t A_r + \sum(q_f A_f d_f) + \sum f_a \{q_{ta} A_{ra} + \sum(q_{fa} A_{fa} d_{fa})\} \quad (2.3)$$

ここに、

q_t : 当該室の収納可燃物の床面積 1m^2 あたりの発熱量 (MJ/m^2)、

A_r : 当該室の床面積 (m^2)

q_f : 当該室の壁、床、天井の室内に面する部分の内装用建築材料の表面積 1m^2 、厚さ 1mm 当たりの発熱量 ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{mm}$)

A_f : 当該室の内装用建築材料の種類ごとの各部分の表面積 (m^2)

d_f : 当該室の内装用建築材料の厚さ (mm)

f_a : 熱侵入係数 (-)

q_{ta} : 当該室の隣接室の収納可燃物の床面積 1m^3 あたりの発熱量 (MJ/m^3)

A_{ra} : 当該室の隣接室の床面積 (m^2)

q_{fa} : 当該室の隣接室の壁、床、天井の室内に面する部分の内装用建築材料の 1m^2 、表面積厚さ 1mm 当たりの発熱量 ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{mm}$)

A_{fa} : 当該室の隣接室の内装用建築材料の種類ごとの各部材の表面積 (m^2)

d_{fa} : 当該室の隣接室の内装用建築材料の厚さ (mm)

収納可燃物の発熱量 ($q_t A_r$)

収納可燃物とは、建物の使用者によって室内に持ち込まれる可燃物である。家具、什器などの大型のものや、書類や身の回りの物品を含めた値とする。床面積 1m^2 当たりの収納可燃物の発熱量は、室の用途に応じて平 12 建告第 1433 号にてその特性値が定められている。

本研究では集合住宅の居室に限定されるので、平 12 建告第 1433 号より以下の発熱量を使用した。

(一) 住宅の住居 発熱量 : $720 (\text{MJ}/\text{m}^2)$

室内用建築材料の発熱量 ($\sum(q_f A_f d_f)$)

内装用建築材料の発熱量とは、内装材料などの建築物に固定された材料の発熱量のうち、火災の燃焼に寄与するものを指す。その算定は、内装用建築材料の種類ごとに単位発熱量 (q_f)、表面積 (A_f)、厚さ (d_f) を採りその積和とする。

内装用建築材料の範囲

発熱量の積和は、室内に面する仕上げ材料とその下地となる部分の全てについて対象とする。したがって、壁、床などの区画部材の表面に付加する内装（化粧および内装下地材を含む）、防火上の効果が期待できない簡易な間仕切り壁（下地を含む）や天井材（吊具等を含む）などが含まれる。構造部材については、それ自体が検証対象の部材となるので、可燃性材料の一部（または全部）に使用していても発熱量の算定の対象としない。

単位発熱量 (q_f)

単位発熱量（見付け面積 1m^2 当たり、厚さ 1mm 当たりの発熱量）は、材料の区分に従って表 2.3 に示す値を用いる。

表 2.3 内装用建築材料の単位発熱量と酸素消費量⁵⁾

内装用建築材料の種類	単位発熱量 q_f (MJ/m ² .mm)	酸素消費係数 ϕ (-) *
不燃材料	0.8	0.1
準不燃材料（不燃材料を除く）	1.6	0.2
難燃材料（準不燃材料を除く）	3.2	0.4
木材その他これに類するもの （難燃材料を除く）	8.0	1.0

注) *: 酸素消費係数は内装用建築材料の表面積の算定において必要となる

(4) 室内火災の火災継続時間 (t_f) と室内の可燃物の 1 秒当たりの発熱量 (q_b)

当該室の火災継続時間 (分) は、可燃物の 1 秒間当たりの発熱量 q_b (MW) を用いて、式 2.4 により計算される。

$$t_f = \frac{Q_r}{60q_b} \quad (2.4)$$

ここに、

Q_r : 前節の方法で求めた当該室内の可燃物の総発熱量 (MJ)

可燃物の発熱量は、当該室の燃焼型支配因子 x ($\text{m}^{1/2}$) の値の区分に応じて式 2.5 により計算する。

$$q_b = \begin{cases} 1.6 \times x \times A_{\text{fuel}} & (x \leq 0.081) \\ 0.13 \times A_{\text{fuel}} & (0.081 \leq x \leq 0.1) \\ (2.5 \times x \times \exp(-11 \times x) + 0.048) \times A_{\text{fuel}} & (0.1 \leq x) \end{cases}$$

$$x = \max \left[\frac{\sum A_{op} \sqrt{H_{op}}}{A_{\text{fuel}}}, \frac{A_r \sqrt{H_r}}{70 A_{\text{fuel}}} \right] \quad (2.5)$$

ただし、 $\sum A_{op} \sqrt{H_{op}}$: 当該室の開口因子 ($\text{m}^{5/2}$)
 A_r : 室の床面積 (m^2)
 H_r : 室の高さ (m)
 A_{fuel} : 当該室内の可燃物表面積 (m^2)

(5) 火災温度上昇係数 (α)

火災温度上昇係数 α は、室内火災の激しさを示す因子であり、式 2.1 により表されている。

火災温度上昇係数を求めるためには、上記 (4) に従って、可燃物の 1 秒間当たりの発熱量 (q_b) を求めたあとに式 2.6 によって算定する。

$$\alpha = 1,280 \left(\frac{q_b}{\sqrt{\sum A_c I_h \sqrt{f_{op}}}} \right) \quad (2.6)$$

式 2.6 の分母においては、 $\sum A_c I_h$ は火災室周辺への熱吸収を表す因子、 f_{op} は有効開口因子を示し、燃焼型支配因子の分母と同一であるが、ここでは、開口からの熱放出の程度を表す因子として用いられている。

火災室周壁への熱吸収を表す因子 ($\sum A_c I_h$)

室内で発生した熱の一部は、室の周壁（壁、床、天井または屋根を含む）に吸収されるが、その程度は室に面する部分の表面積と周壁の構成材料の熱特性に依存する。火災室周壁への熱吸収を表す因子は、周壁の構成部材ごとに室に面する部分の表面積 A_c (m^2) と熱慣性 I_h ($kW \cdot s^{1/2}/m^2 \cdot K$) の積和として求める。総和記号は、室の周壁の構成部材が異なる部分すべてについての和を表す。

1) 室に面する部分の表面積 (A_c)

室に面する部分の表面積は、熱吸収に対して有効な部分の表面積を、構成材料が異なる部分ごとに採る。一般の建築壁体は仕上げを含めると多層で構成されるので、熱吸収に有効な部分を選定するにあたっては、どの材料が熱の吸収に寄与するかを決めなければならない。これは、表 2.4 に示すように、火災期間中を通じて燃焼、溶融、脱落がなく躯体と一体となっているものを選ぶ。すなわち、内装等の仕上げが脱落もしくは焼失した後に露出する表面を採れば良い（図 2.9 参照）。

表 2.4 熱吸収を表す因子の算定対象とする材料の選定方法⁵⁾

部位	熱慣性の算定を行う材料
壁	壁構造を構成する材料（可燃性の内装用建築材料などは参入しない）
床	床構造を構成する材料（カーペット、P タイルなどの仕上げは算入しない）
天井（屋根）	屋根面を構成する材料（釣り天井などは算入しない）

2) 熱慣性 (I_h)

・定義

火災により加熱される材料内部の典型的な温度分布を図 2.11 に示す。表面に近い部分の温度は高いが、材料内部では徐々に温度が低下する。図中に示す温度分布で囲まれた部分の面積は、

材料が吸収した熱量に相当する。この多寡は、温度分布が同じになれば材料の熱容量（比熱と密度の積）に比例する。また、熱伝導率が高い部材ほど内部まで高温となるので吸収できる熱量は多くなる。熱慣性は、材料が熱を吸収できる程度を表す指標であり、構成材料の熱伝導率 κ (kM/m、K)、密度 ρ (kg/m³)、比熱 c (kJ/kg、K) の積の平方根である。

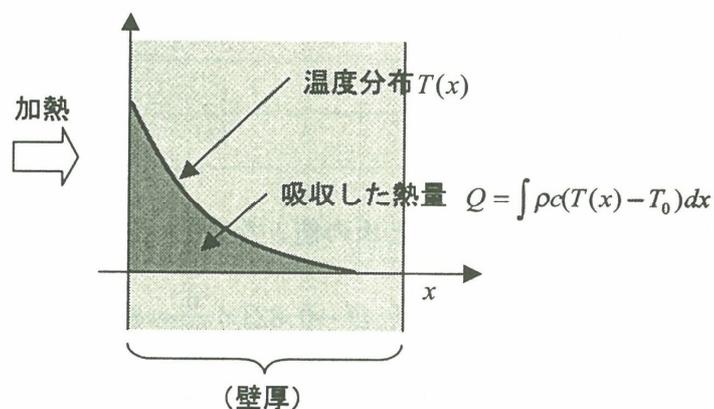


図 2.11 壁体材料中の典型的な温度分布と吸収熱量⁵⁾

・熱慣性の例示

耐火検証法（平 12 建告第 1433 号）で例示される値を表 2.5 に示す。告示においては、コンクリートその他の重量材料で比較的重くて熱を吸収しやすいもの、軽量材料で熱をあまり吸収しないもの、金属板や膜のように極薄材料で熱が容易に通過するものの 3 つに分類される。重量材料は普通コンクリート、軽量材料では各種の不燃ボード類に対応する値として、1.75 と 0.3 を採用している。また、極薄材料では熱通過のしやすさを考慮して値が選定されている。

表 2.5 熱慣性の一覧⁵⁾

構造	熱慣性
鉄筋コンクリート，コンクリートブロックその他これらに類する材料で造られたもの	1.75
軽微な間仕切り壁その他これに類するもの	0.3
金属板屋根，膜構造その他これらに類するもの	2.8
その他のもの	$I_h = \sqrt{k\rho c}$

2.4 火害調査結果から求めた集合住宅の火災外力

2.4.1 構造部材の最高受熱温度と火災継続時間

表 2.6 に、調査対象とした 3 件の間取り、床面積、火災継続時間および室内の状況を示す。また、表 2.7 に、火災室内における火災性状の算定結果を示す。なお、ここでは、火災室内の火災性状のみ算定することを目的としたので、隣接室からの侵入熱量 Q_{r3} (MJ)は除外した。

表 2.6 対象建物の間取り、床面積、火災継続時間および被災状況

番号	間取り	床面積 (m^2)	火災継続時間 (時)	室内の状況
集合住宅①	3LDK	76.6	2:38	全焼
集合住宅②	2LDK	60.7	0:45	全焼
集合住宅③*	3LDK	104	0:41	半焼

注) *: 集合住宅③は施行中に火災が発生しており、火災発生時は内装材の施行中であった。

表 2.7 火災室内の火災性状の算定結果

番号	火災温度 上昇係数 α	火災継続時間 t_f	火災温度 T_{ROOM}	等価火災時間 t_{eq}
集合住宅①	521	68.1	1,053	82.1
集合住宅②	622	45.1	1,175	71.4
集合住宅③	612	10.3	902	15.8

注) 表中の記号の内訳を示す。

- t_f : 火災の継続時間(分)
- α : 火災温度上昇係数
- T_{ROOM} : 火災温度($^{\circ}C$)
- t_{eq} : 等価火災時間 (分)

2.4.2 集合住宅の火災外力の類型化

表 2.7 の算定結果より、集合住宅①～③が火災を受け盛期火災に成長した場合の火災外力は、火災時間 10 分～68 分、火災温度 902～1,175℃であった。

図 2.12 に、表 2.6 の火災温度と火災継続時間との関係を示す。いずれの集合住宅においても、火災温度と火災継続時間の関係は ISO 標準加熱曲線を超えていることがわかる。

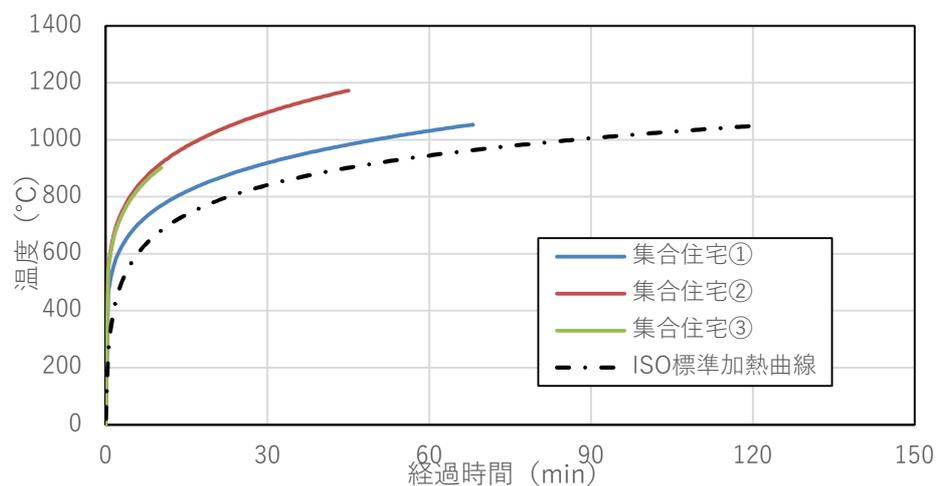


図 2.12 集合住宅①～③の火災温度－時間曲線

2.5 類型化した加熱温度－時間モデルを用いた熱伝導解析

2.5.1 はじめに

構造部材の温度予測は、2.3節で述べた火災外力によって求めた火災温度や火源上の気流温度、火災からの放射熱を加熱条件とし、部材の断面寸法や構成材料の熱特性に基づいて、熱伝導方程式を解くことにより実施される。境界条件の具体的な形としては、既知の熱流束、対流熱伝達、放射熱伝達がある。上記の方程式により、空間的、時間的に離散化し数値計算するのが一般的である。差分法を用いた三次元非定常熱伝導解析方法¹²⁾、¹³⁾や熱伝導とともに水分の移動を考慮した詳細な解析手法¹⁴⁾がすでに提案されている。これらの解析手法は、鉄筋コンクリート構造や合成構造などの様々な材料や断面形状の構造部材に対して有効である。

本節では、耐火性能検証法で算出された火災継続時間および火災温度上昇係数を基にして数値解析の一つである有限要素法を用いた熱伝導解析を実施し、前項に示した集合住宅で被災した天井スラブについて、コンクリートの受熱温度について推定する。

加熱を受けた物体の熱的挙動（伝導、対流および放射）は、理論的には熱伝導方程式等の方程式を解くことで求められる。これらの方程式は複雑な偏微分方程式で構成されており、厳密解を求めることは難しい。そのため、厳密解が求められなくても、コンピューターを利用して近似的な解を求める手法が現在まで利用され続けているが、方程式をコンピューターで解くことができるようにするためには、連続した方程式を不連続な値に分割する離散化を行う必要がある。この離散化の種類により、有限差分法、有限体積法、有限要素法等の計算手法がある。この中でも特に有限要素法は、解析モデルを任意の点（節点）を用いて表現することが可能であり、複雑な解析モデルにも対応することができる。一方で、その節点により生成されたメッシュ自体が複雑な形状をしてしまうと、計算結果に支障をきたし、最悪の場合、計算が収束しない等のデメリットも存在する方法である。

熱伝導解析を行う意義は、主に、

- ・実験を行わずに、コンピューター上で熱的挙動を把握することができる。
- ・実験で得られた結果以外の箇所における分析もできる。

実験を行うことは確実な結果を得る術であるが、あらゆるデータを実験により得ることは時間やコスト等がかかり現実的ではない。解析を用いることでこれらの負担を軽減することができる。解析結果は近似解であることに留意する必要があるが、定量的な評価ができることは非常に大きなメリットである。

2.5.2 各部材の高温特性値について

熱伝導解析で使用する熱伝導率や比熱などの高温特性値については、様々な論文や参考書等にまとめられている。本研究では、それらの中から以下の3点を判断基準とし、文献を選定することとした。

- ① 解析で使用できるよう数値化されている。
- ② 最大温度が1200°C程度の高温域まで値が指定されている。
- ③ 体系的にまとめられている。

①では、文献内に熱伝導解析として入力可能な値が示されているかどうかを判断した。②では、本研究の加熱実験でISO834の標準加熱曲線を使用しているため、高温特性値が1200°C程度まで対応したデータであるかどうかを判断した。最後に③では、同一の機関、著者等から示された高温特性値であるかどうかを判断した。

これらを踏まえ本研究では、コンクリートおよび鋼材の高温特性値については Eurocode¹⁵⁾⁻¹⁷⁾などを参考に使用することとした。Eurocode については、コンクリートおよび鋼材において上記①から③の基準を満たした。それぞれコンクリートは Eurocode2 および 4 に、鋼材は Eurocode3 および 4 に高温特性値が記載されている。なお、Eurocode は欧州の規格で信頼性も高く、これまで多くの研究に用いられている。

(1) コンクリート

熱伝導率

図 2.13 にコンクリートの熱伝導率を示す。Eurocode2 および 4 におけるコンクリートの熱伝導率は、以下の式にある上限値と下限値の間で変動するとしている。

上限値

$$\lambda_c = 2 - 0.2451(\theta_c/100) + 0.0107(\theta_c/100)^2 \quad [\text{W/m}^\circ\text{C}] \quad \text{ただし、} 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$$

下限値

$$\lambda_c = 1.36 - 0.136(\theta_c/100) + 0.0057(\theta_c/100)^2 \quad [\text{W/m}^\circ\text{C}] \quad \text{ただし、} 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$$

※ θ_c はコンクリート温度

鉄筋コンクリートの場合、Eurocode では上限値の熱伝導率が実験から導き出された値であるとして推奨されているため、本研究でも上限値の熱伝導率を使用することとした。

比熱

図 2.14 にコンクリートの比熱を示す。Eurocode2 および 4 においてコンクリートの含水率が 0% の場合、以下の式にて与えられている。

$$c_c = 900 \quad [\text{J/kg}^\circ\text{C}] \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 100^\circ\text{C}$$

$$c_c = 900 + (\theta_c - 100) \quad [\text{J/kg}^\circ\text{C}] \quad 100^\circ\text{C} < \theta_c \leq 200^\circ\text{C}$$

$$c_c = 1000 + (\theta_c - 200)/2 \quad [\text{J/kg}^\circ\text{C}] \quad 200^\circ\text{C} < \theta_c \leq 400^\circ\text{C}$$

$$c_c = 1100 \quad [\text{J/kg}^\circ\text{C}] \quad 400^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$$

※ θ_c はコンクリート温度

また、解析計算を行う際に別途含水率について考慮することができる手法が無い場合には、100°C から 115°C の範囲内で含水率に応じた比熱のピーク値 (c_{peak}) が以下のとおり与えられ、115°C から 200°C の間は線形補間できるとしている。

$$c_{peak} = 900 \quad [\text{J/kg}^\circ\text{C}] \quad (\text{含水率 } 0\%)$$

$$c_{peak} = 1470 \quad [\text{J/kg}^\circ\text{C}] \quad (\text{含水率 } 1.5\%)$$

$$c_{peak} = 2020 \quad [\text{J/kg}^\circ\text{C}] \quad (\text{含水率 } 3.0\%)$$

$$c_{peak} = 5600 \quad [\text{J/kg}^\circ\text{C}] \quad (\text{含水率 } 10\%)$$

本研究におけるコンクリートの含水率は RC 造試験体の 4.9 [%]を用いて、 c_{peak} を 2992 [J/kg°C]として解析に使用した。

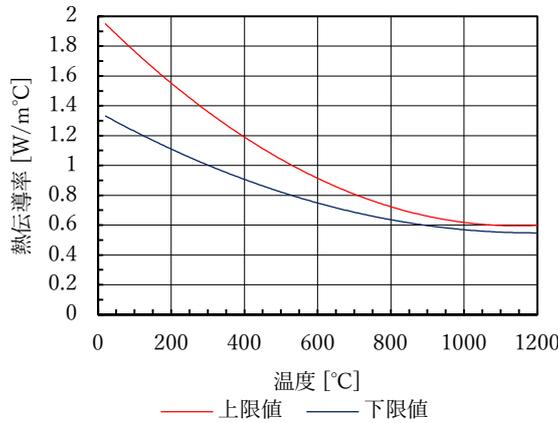


図 2.13 コンクリートの熱伝導率

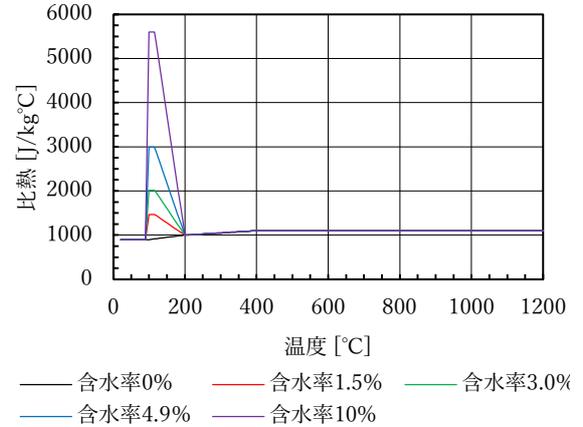


図 2.14 コンクリートの比熱

熱容量

熱容量は、比熱と密度の積で求められる。コンクリートの密度は、実験結果より 2300 [kg/m³]とした。図 2.15 にコンクリートの熱容量を示す。本研究では、解析における安定性や収束性を考慮し、比熱のピーク値 (c_{peak}) を 100 から 200°C の中間である 150°C に修正した。図 2.16 に修正後のコンクリートの熱容量を示す。

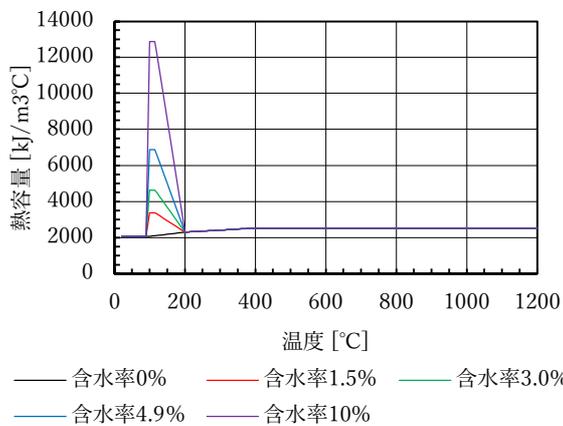


図 2.15 コンクリートの熱容量

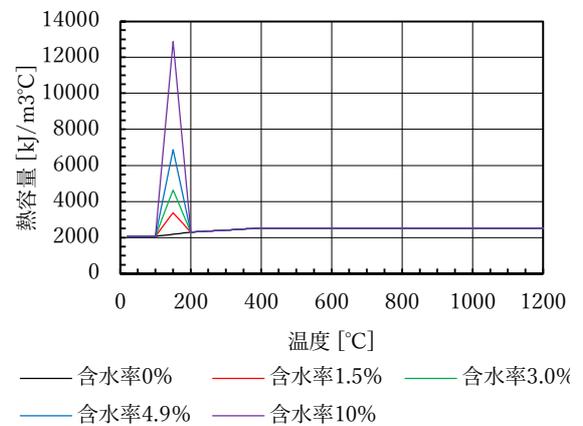


図 2.16 修正後のコンクリートの熱容量

(2) 鋼材

熱伝導率

図 2.17 に鋼材の熱伝導率を示す。Euocode3 および 4 における鋼材の熱伝導率は、以下の式にて与えられている。本研究でもこの式を使用した。

$$\lambda_s = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_s \text{ [W/m°C]} \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta_s < 800^\circ\text{C}$$

$$\lambda_s = 27.3 \text{ [W/m°C]} \quad 800^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 1200^\circ\text{C}$$

※ θ_s は鋼材温度

比熱

図 2.18 に鋼材の比熱を示す。Eurocode3 および 4 における鋼材の比熱は、以下の式にて与えられている。本研究でもこの式を使用した。

$$c_s = 425 + 7.73 \times 10^{-1} \theta_s - 1.69 \times 10^{-3} \theta_s^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta_s^3 \quad [\text{J/kg}^\circ\text{C}] \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta_s < 600^\circ\text{C}$$

$$c_s = 666 + 13002 / (738 - \theta_s) \quad [\text{J/kg}^\circ\text{C}] \quad 600^\circ\text{C} \leq \theta_s < 735^\circ\text{C}$$

$$c_s = 545 + 17820 / (\theta_s - 731) \quad [\text{J/kg}^\circ\text{C}] \quad 735^\circ\text{C} \leq \theta_s < 900^\circ\text{C}$$

$$c_s = 650 \quad [\text{J/kg}^\circ\text{C}] \quad 900^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 1200^\circ\text{C}$$

※ θ_s は鋼材温度

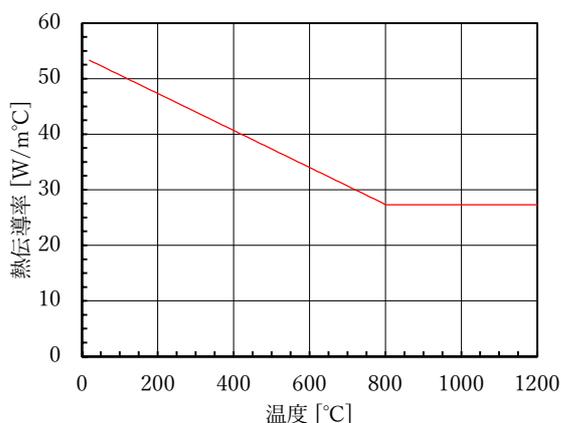


図 2.17 鋼材の熱伝導率

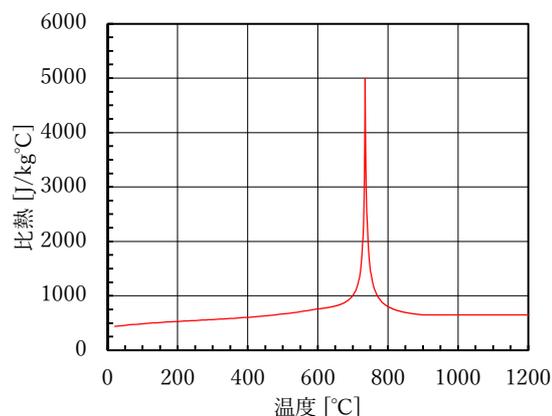


図 2.18 鋼材の比熱

熱容量

鋼材の密度は、Eurocode3 を準拠し 7850 [kg/m³]とした。図 2.19 に鋼材の熱容量を示す。本研究では、解析における安定性や収束性を考慮し、熱容量の最大値をとる 735°Cの前後 25°C (710°Cから 760°C) の範囲における総エネルギーを変化させずに勾配を修正し使用した (図 2.19)。

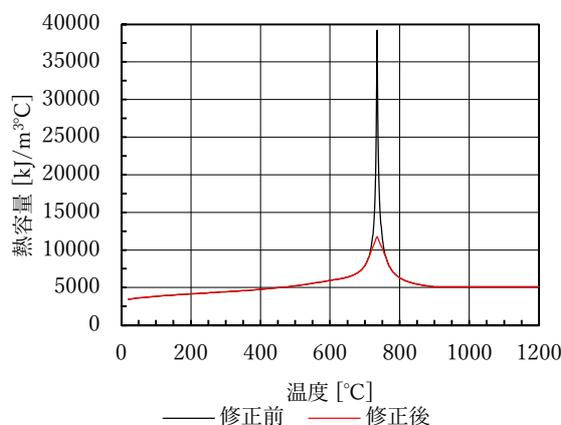


図 2.19 鋼材の熱容量

2.5.3 解析方法

(1) 解析モデル

図 2.20 に解析モデルを示す。解析モデルは加熱実験で使用するコンクリート試験体について作成した。また、解析モデルは断面を断熱境界とする 1/4 モデルとして作製した。

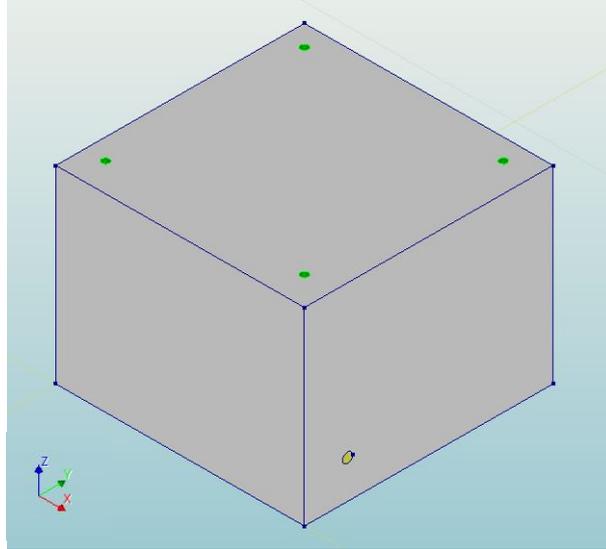


図 2.20 解析モデル

メッシュ要素

図 2.21～図 2.24 に解析モデルで使用したメッシュ要素を示す（名称は DIANA Manual より）。全てのモデルは計 4 種類の要素で構成されている。モデル要素については、 $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$ の正六面体を基本要素とし、接合部周辺などの緻密な部分にはそれより小さな要素や三角柱要素を使用した。また、いずれの要素も中間節点を設定した。解析モデルのメッシュ要素数は 1,735 とした。

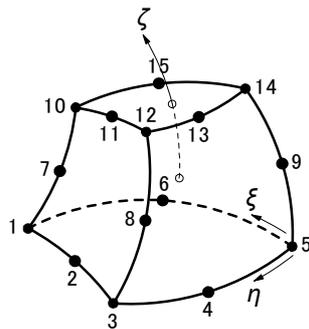


図 2.21 CTP15H (モデル要素)

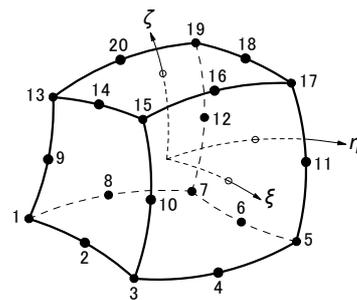


図 2.22 CHX20H (モデル要素)

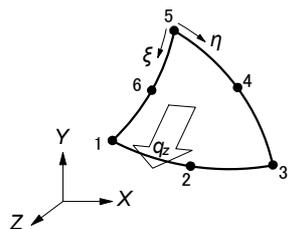


図 2.23 BCT6HT (境界要素)

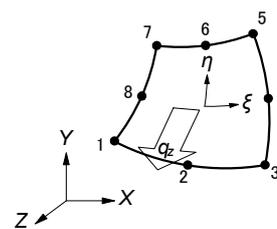


図 2.24 BCQ8HT (境界要素)

メッシュ図

図 2.25 および図 2.26 に各種メッシュ詳細図を示す。

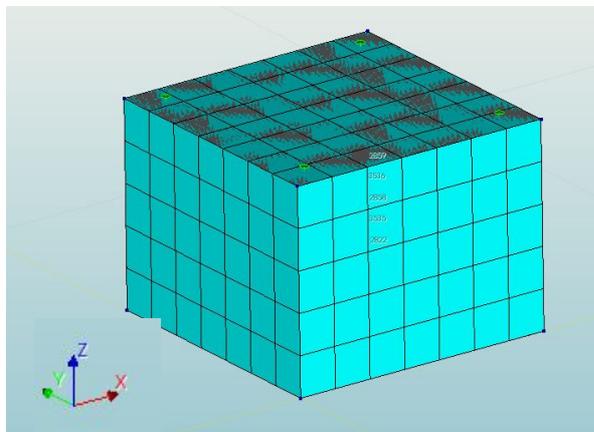


図 2.25 コンクリート試験体

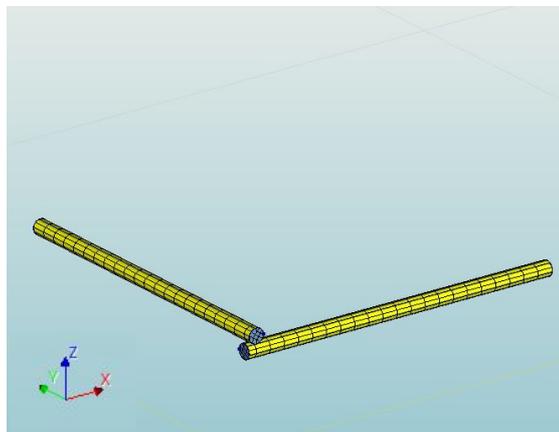


図 2.26 異形棒鋼（呼び名：D13）

(2) 解析条件

初期温度（初期条件）

モデル全体に対して室温の 20°C を設定した。

加熱面（境界条件）

図 2.27 に集合住宅①～③の火災検証法から求めた火災温度－火災継続時間曲線を、図 2.28 に節点間詳細図を示す。

加熱は 2.4.2 項で求めた集合住宅①～③を火災温度－火災継続時間曲線を入力した。また、モデル加熱面上の節点と火災温度－火災継続時間曲線との間には、対流 q_c'' （対流熱伝達率 23 [W/m²C]）及び放射 q_r'' （放射率 0.8）¹⁸⁾ を介しており、以下の式にて与えた。

$$q_c'' = h(T_2 - T_1)$$

h ：対流熱伝達 [W/m²C]

T_1 ：モデル加熱面上節点温度 [°C]

T_2 ：集合住宅①～③における火災検証法から求めた火災温度[°C]

$$q_r'' = \varepsilon\sigma(T_2^4 - T_1^4)$$

ε ：放射率 [-]

σ ：ステファン・ボルツマン係数 (5.67×10⁻¹¹) [kW/m²K⁴]

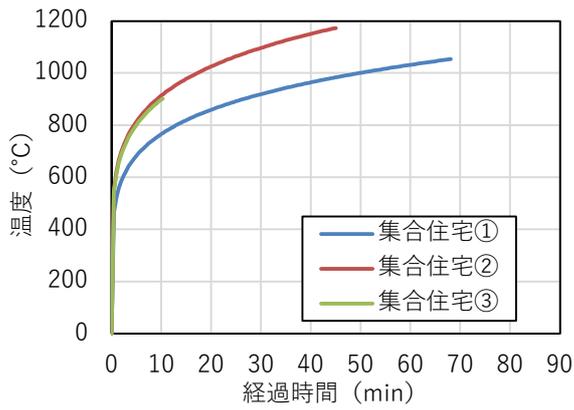


図 2.27 耐火性能検証法で求めた各住戸の火災温度と火災継続時間曲線

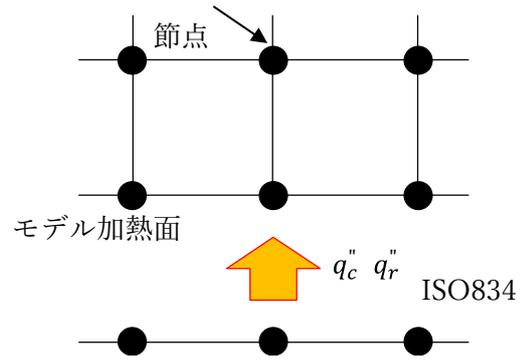


図 2.28 節点間詳細図

図 2.29 に解析モデルの加熱面を示す。

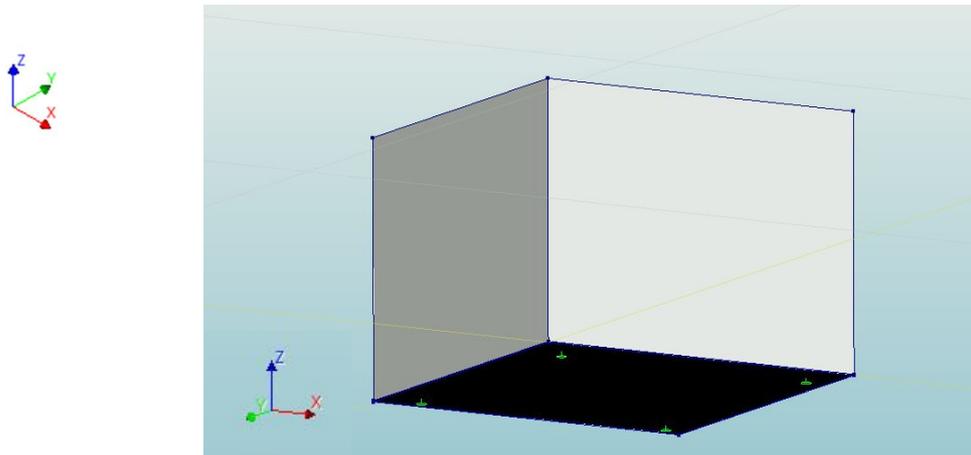


図 2.29 解析モデルの加熱面

外気面（境界条件）

図 2.30 に解析時間と外気温度の関係を、図 2.31 に節点間詳細図を示す。モデル外気面上の節点と外気との間には、対流（対流熱伝達率 10 [W/m²°C]）を介して外気（20°C）を設定した。

$$q_c'' = h(T_2 - T_1)$$

h：対流熱伝達 [W/m²°C]

T₁：外気温度 [°C]

T₂：モデル外気面上節点温度 [°C]

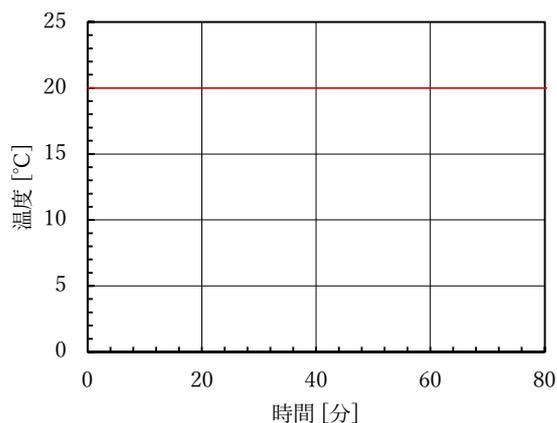


図 2.30 解析時間と外気温度の関係

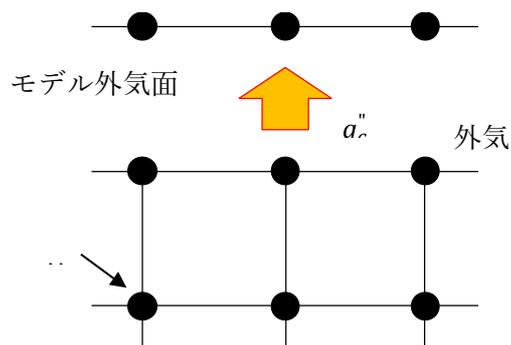


図 2.31 節点間詳細図

図 2.32 に解析モデルの外気面を示す。

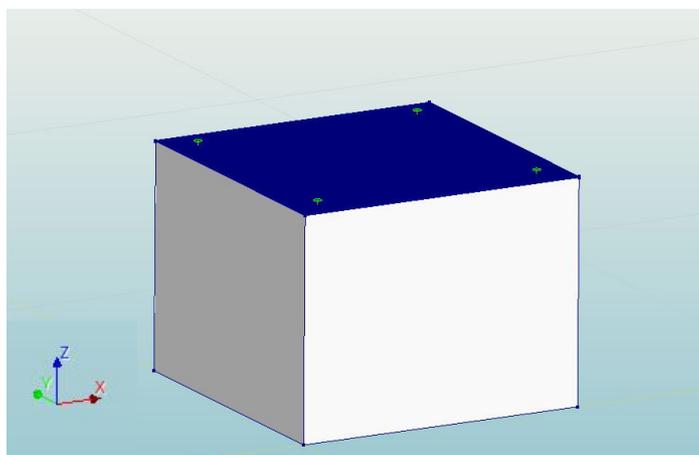


図 2.32 解析モデルの外気面

断熱境界（境界条件）

加熱実験において断熱材を施した箇所および解析モデルの対称面に断熱境界を当てた。解析モデル上では、加熱面および外気面以外の部分に割り当てた。

解析手法等

表 3.3.2 に解析手法等の概要を示す。

表 3.3.2 解析手法等の概要

解析手法	3次元有限要素法（FEM）、非線形解析
解析ステップ	30s×480回（計240分）
反復法	ニュートン法
反復上限回数	50回

解析ソフト

汎用線形&非線形構造解析システムの DIANA を使用した。

温度上昇に伴うコンクリート内のひび割れ

本解析では、温度上昇に伴って発生するコンクリート内のひび割れについては考慮しない。

2.5.4 解析結果

(1) 火災事例：集合住宅①の解析結果

図 2.33 に、耐火検証法により求めた重合住宅①の火災温度－火災継続時間曲線を火災モデルとした解析結果を示す。図より、加熱面の温度は 1001°C となった。加熱面から内部方向のコンクリート温度は、コンクリートの中央部の深さ 25mm、50mm、75mm および 100mm の解析結果はそれぞれ 781°C、561°C、411°C および 284°C であった。

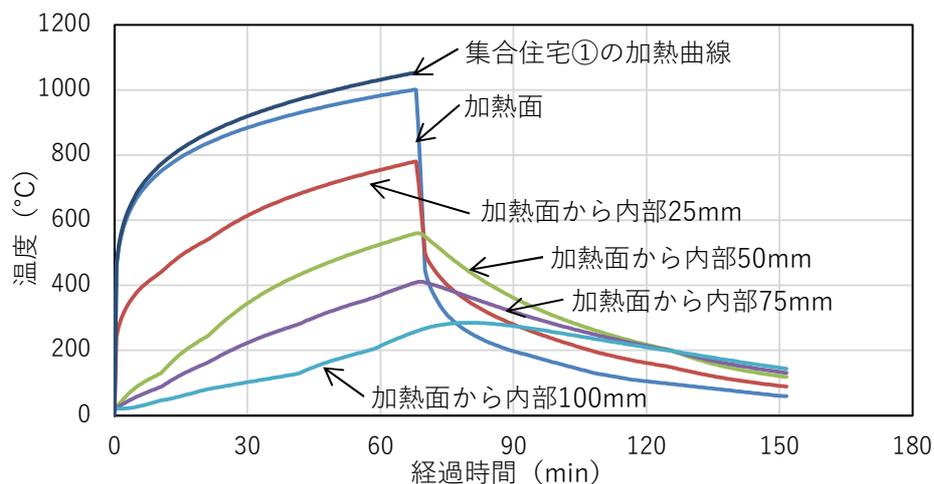


図 2.33 集合住宅①の火災温度－時間曲線

(2) 火災事例：集合住宅②の解析結果

図 2.34 に、耐火検証法により求めた重合住宅②の火災温度－火災継続時間曲線を火災モデルとした解析結果を示す。図より、加熱面の温度は 1102°C となった。加熱面から内部方向のコンクリート温度は、コンクリートの中央部の深さ 25mm、50mm、75mm および 100mm の解析結果はそれぞれ 818°C、558°C、404°C および 290°C であった。

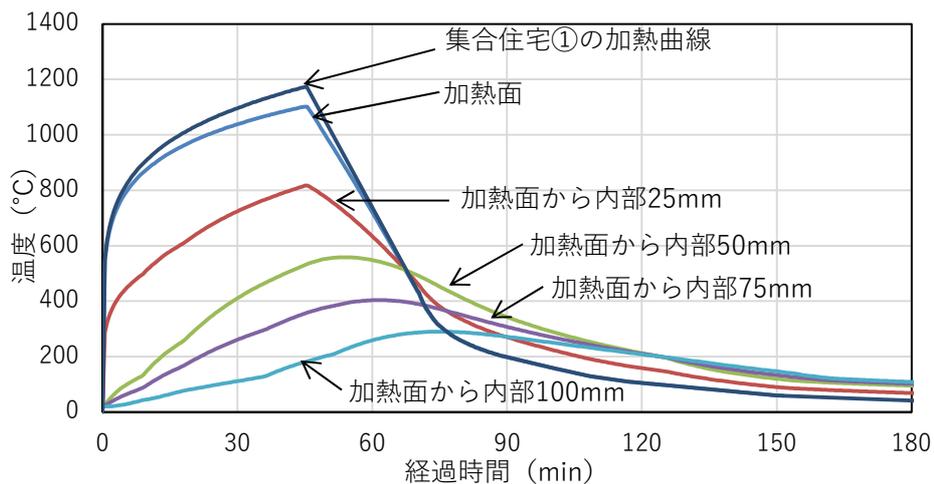


図 2.34 集合住宅②の火災温度－時間曲線

(3) 火災事例：集合住宅③の解析結果

図 2.35 に、耐火検証法により求めた集合住宅③の火災温度－火災継続時間曲線を火災モデルとした解析結果を示す。図より、加熱面の温度は 865°C となった。加熱面から内部方向のコンクリート温度は、コンクリートの中央部の深さ 25mm、50mm、75mm および 100mm の解析結果はそれぞれ 507°C、171°C、118°C および 92°C であった。

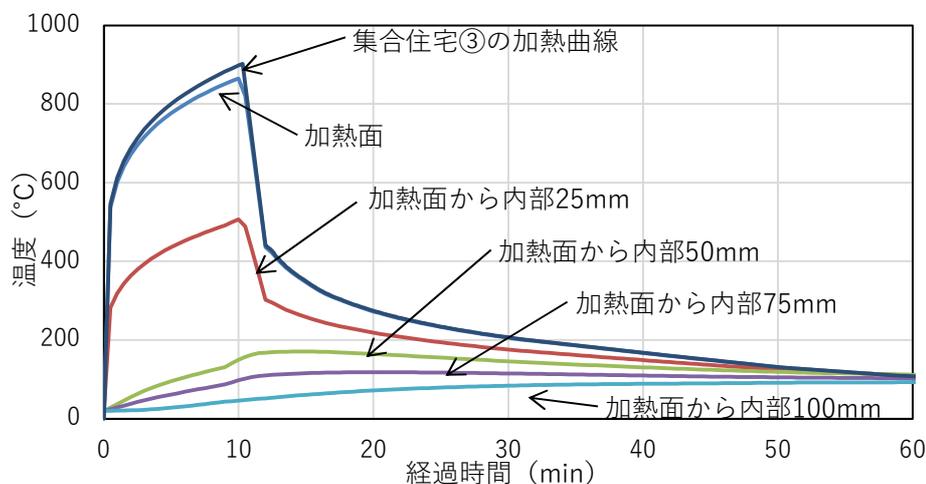


図 2.35 集合住宅③の火災温度－時間曲線（集合住宅③）

(4) 火害調査結果と熱伝導解析結果との比較

表 2.7 に、火害調査結果と熱伝導解析結果との比較を示す。火害調査における集合住宅①～③の推定受熱温度と熱伝導解析結果を比較すると、熱伝導解析が示す最高到達温度の方が高い。これは解析で設定した加熱面が受ける温度が、火害調査で被災した温度よりも高いことが考えられる。実火災では、可燃物と天井との間に比較的空間がある場合や、火災室であっても局所火災であることなどが考えられコンクリート面の受熱が均一でないことが考えられる。一方、熱伝導解析においては、加熱面

に一定の条件下で耐火設計上算出された最高温度を与え続けることから、火災加熱が境界条件から、各住戸火災室のスラブ下面における最高温度は、集合住宅①で 1001°C、集合住宅②で 892°C および集合住宅③で 695°C であった。これらの解析結果とそれぞれの住宅の火害調査結果を表 2.7 に示す。

表 2.7 火害調査結果と熱伝導解析結果との比較

番号	火害調査結果			解析結果	
	火災室スラブコンクリートした面(天井)の目視観察	推定受熱温度	圧縮強度の残存率	圧縮強度/設計基準強度	コンクリート表面の最高到達温度
集合住宅①	コンクリート表面に亀甲状のひび割れ、灰色の変色が確認されている	600°C以上	0.72~0.79	0.84~0.90	1001°C
集合住宅②	コンクリート表面に亀甲状のひび割れ、煤の焼失が確認されている	580°C以上	0.71~0.91	0.86~1.11	1102°C
集合住宅③	コンクリート表面の一部に煤の焼失が確認されている。またその他は煤が付着していることが確認されている	500°C以上 (煤焼失) 500°C未満 (煤付着)	0.98~1.0	1.37~1.73	865°C

表より、集合住宅①～③の火害調査結果の目視観察による変状と推定受熱温度によると、集合住宅①では、火災室の天井は 600°C 以上の受熱温度であったことが推定され、解析結果はそれを上回る受熱温度が得られた。集合住宅②および③も同様に、火害調査結果の目視観察による推定受熱温度より解析結果による受熱温度が上回った。

2.6 まとめ

本章では、（一財）日本建築総合試験所がこれまでに実施した火害調査²⁾について、建物の種類、構造種別、火災発生から鎮圧までの経過時間、また劣化を受けた構造部材のコンクリートの圧縮強度の結果について統計調査を実施した。次に、火害調査統計から設計図書が比較的詳細であった集合住宅①～③を用いて耐火性能検証を行い被災室の最高受熱温度および火災継続時間を求めて、被災した建物の火災外力を決定し、熱伝導解析によって被災したコンクリート構造部材の受熱温度を解析的に求めた。最後に、熱伝導解析結果と集合住宅①～③の火害調査結果を比較し、解析結果の妥当性を検証した。

本章で得られた知見を以下に示す。

（1）火害調査結果における統計調査

- ・国内の建物火災件数は年々減少しているが、火害調査・診断の件数は増加傾向にある。
- ・火害調査・診断件数の実績では、RC造の共同住宅の件数が最多である。
- ・RC造の集合住宅における火災は、全体の89.8%が出火発生から1時間30分以内に、また遅くとも3時間以内にはほとんどが鎮圧されている。
- ・RC造の集合住宅において、火害部から採取されたコアの圧縮強度は、全体の76.4%が低下している。

（2）集合住宅①～③における火災温度および火災継続時間

統計調査を用いて設計図書が残存した3件の集合住宅について、耐火性能検証法により火災温度と火災継続時間の算出した。その結果、集合住宅①～③が火災を受け盛期火災に成長した場合の火災外力は、火災時間10分～68分、火災温度902～1,175℃となり、いずれ集合住宅においても、火災温度と火災継続時間の関係はISO標準加熱曲線を超えていることがわかる。

（3）火害調査結果を用いた熱伝導解析結果の妥当性検証

耐火性能検証法により求めた3件の集合住宅の火災温度と火災継続時間の関係を用いて熱伝導解析を行った。その結果、モデル化した3つの火災温度は、火害調査の目視観察により推定した最高受熱温度よりも大きくなった。これは、耐火性能検証法では盛期火災を想定し、かつ消火活動などが実施できない放任火災を考慮されたものであることに対し、本章で扱った火害調査事例では、火災室内の火元の位置により構造部材が受ける火災温度が異なることや、消火活動などによって火災温度の上昇が抑えられたことなどがその要因のひとつであると考えられる。

以上により、本章ではRC造集合住宅の火害調査実績に基づいたRC造集合住宅の火災被害について分類した。なお、これら本章で検討したRC造の集合住宅における火災の特徴を整理した結果については、第3章の加熱実験計画における加熱温度条件を考慮する情報のひとつとした。

<第 2 章の参考文献>

- 1) 総務省消防庁：令和元年版消防白書
- 2) 日本建築総合試験所：テーマ解説 構造物の火害診断業務について，GBRC Vol.41, No.164, PP.163-164, 2016 年 9 月
- 3) 春畑仁一，新井真：火害を受けた建物の調査・診断に関する統計調査：日本火災学会 研究発表会 梗概集，pp.232-233, 2018 年 5 月
- 4) 日本火災学会：火災便覧 第 4 版，2018 年 11 月，
- 5) 国土交通省住宅局建築指導課他：2001 年度版 耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説，平成 13 年 3 月
- 6) 日本火災学会：火災と建築 第 3 版，P223, 2002 年
- 7) Kawagoe, K., Sekine, T.: Estimation of Fire Temperature-Time curve in rooms., B.R.I Occasional Report, No.11, 1963
- 8) Harmathy, T. Z. : Post-flashover compartment fires., FIRE AND MATERIALS, Vol.7, No.2, 1983
- 9) Babrauskas, V., Williamason, R. B.: Post flashover compartment fires., Fire Research Group Report, No.UCB FRG 75-1, University of California, Berkeley, 1975
- 10) Tanaka, T. : A mathematical model of a compartment fire., B. R. I. Research Paper No.70, 1977
- 11) Mitler, H. E., Emmons, H. W. : Documentation for CFCV, The Fifth Harvard Computer Fire Code., Home Fire Project Technical Report, No.45, Harvard University, 1981
- 12) 若松孝旺：火災時における建物部材の内部温度算定に関する研究（第一報），一算定式の誘導，算定条件及び算定要素一，日本建築学会論文報告集，第 109 号，1965 年
- 13) 若松孝旺：火災時における建物部材の内部温度算定に関する研究（第二報），一算定式の解法一，日本建築学会論文報告集，第 111 号，1965 年
- 14) Teral, Harada: Heat and Mass transfer in an intensely Heated Wall, Proc. 3rd, Int. Symp. on Fire Safety Science, 1991
- 15) Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules –Structural fire design. European committee for standardization, EN 1992-1-2; 2004. pp26-29
- 16) Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. European committee for standardization, EN 1993-1-2; 2005. pp25-26
- 17) Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. European committee for standardization, EN 1994-1-2; 2005. pp36-41
- 18) 齋藤秀人，森田武，上杉英樹：中心圧縮を受ける充填鋼管コンクリート柱の内部温度と耐火時間に関する研究，日本建築学会環境系報告集，第 582 号，pp.6-16, 2004 年 8 月

第 3 章

火災加熱を受けたコンクリート部材の強度低下に関する検討

3. 火災加熱を受けたコンクリート部材の強度低下に関する検討

3.1 はじめに

火災が発生すると建物は熱による被害を受ける。国内で行われている建物の火害診断は、日本建築学会編「建物の火害診断・補修補強方法指針・同解説」¹⁾以下、指針と記す)に基づいて行われることが多い。

指針では、鉄筋コンクリート部材が火害を受けた場合、火災により劣化を受けた箇所(以下、劣化部と記す)および劣化を受けていない箇所(以下、非部と記す)からそれぞれ採取したコンクリートコア(以下、コアと記す)を用いて、圧縮強度試験を実施する方法が示されている。その両者の圧縮強度を相対比較にすることにより、火災を受けたコンクリートの劣化の程度を診断することが推奨されている。また、相対比較した結果、劣化部の圧縮強度に低下がみられた場合においても、コアを採取したコンクリート部材が要求されている設計基準強度を満足していれば、当該部材が補修の対象にならない可能性もあると考えられる。しかしながら、圧縮強度試験に供されるコアは、劣化部のコンクリート表面から内部に向かって採取される。劣化部のコンクリートには、火災時の熱によって加熱面から内部にかけて温度分布が生じていることが報告されており²⁾、採取されたコアの軸方向においても、これと同様に加熱面から内部にかけて強度差が生じていると考えられる。

そこで本章は、RC造集合住宅の一般的な火災を受けた構造部材のコンクリート表面から内部における強度の低下を明らかにすることを目的として、実験により検討した。

実験は、コンクリートまたはモルタル試験体を対象として、第2章で求めた火害調査実績ならびに耐火性検証法により求めた火災外力を、ISO標準加熱曲線に等価して与えた後、試験体加熱面から採取した直径100mmのコアおよび直径30mmのコア(以下、小径コアと記す)の圧縮強度を求めた。さらに、加熱面から内部の深さ方向の強度分布を明らかにするため、直径100mmのコアを軸方向に切断し成形したスライス試験片を用いて、各深さの圧縮、曲げ、引張強度をそれぞれ求めた。

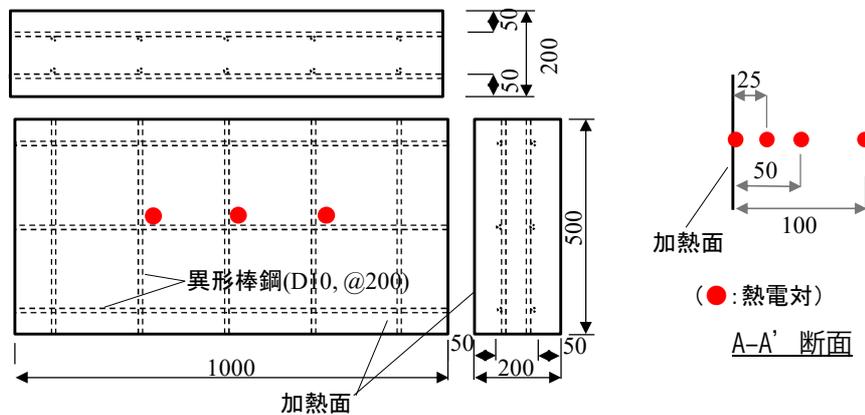
3.2 火災を受けた集合住宅の火災継続時間を模擬したコンクリート試験体の加熱実験

本実験は、コンクリート試験体加熱面が受けた熱による劣化の有無またはその程度を把握することを目的として、加熱冷却後の加熱面からコア採取し、各種試験を実施した。

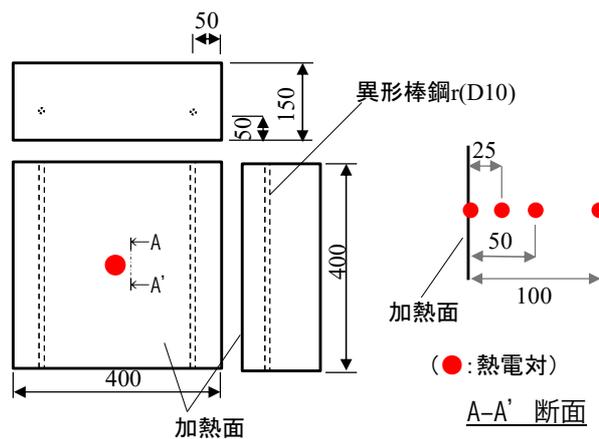
3.2.1 加熱実験

(1) 試験体

図 3.1 に試験体の形状と寸法、表 3.1 にコンクリートの調合、使用材料およびコンクリートの性状（スランプ、空気量）および封緘養生した材齢 28 日の圧縮強度試験を示す。試験体は、形状、水セメント比、骨材の種類等が異なる A~F の 6 種類で、各種類 5 体ずつの計 30 体を作製した。作製した試験体は、材齢 7~10 日で脱型し、加熱試験に供するまで屋内にて静置した。また同図に、加熱実験中の試験体の温度を計測するため、加熱面（深さ 0mm）および内部（25, 50, 100mm）の深さに、コンクリート打込み前に予め設置した K 型熱電対の位置を示す。



(a) 試験体記号：A, B, C



(b) 試験体記号：D, E, F

図 3.1 試験体の形状と寸法

表 3.1 コンクリートの調合と使用材料および性状

種類	水セメント比 W/C	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)						実測値		
			W	C	S1	S2	G	Ad	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 ^{注2)} (N/mm ²)
A	0.63	45.4	184	292	556	239	991	2,920	15.0	3.9	29.7
B	0.50	48.3	180	360	823	---	913	2,916	19.0	4.8	35.5
C	0.38	44.2	180	474	712	---	932	3,792	18.5	4.2	54.2
D	0.86	47.8	180	210	866	---	974	2,400	13.0	3.9	20.1
E	0.57	49.9	180	316	881	---	909	2,970	18.5	5.2	30.6
F	0.63	45.4	184	292	404	403	1002	2,920	20.0	6.0	26.7

注1) 使用材料を以下に示す。

W : 上水道水、上澄水

C : 普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³)

S₁ : 佐賀県小川島産 海砂(表乾密度: 2.56g/cm³)

S₂ : 京都府亀岡市東別院町 砕砂(表乾密度: 2.64g/cm³)

G : 京都府亀岡市東別院町 砕石(表乾密度: 2.67g/cm³)

Ad : AE 減水剤 標準型 I 種

注2) 28日間室内気中養生した供試体の圧縮強度を示す。

(2) 加熱方法

図 3.2 に、試験体を設置したガス加熱炉を示す。試験体は下からの一方向加熱を模擬して、下面を加熱するように加熱炉に設置した。加熱方法は、都市ガス(46,090kJ/m³)を熱源とし、ISO834 に規定する標準加熱曲線に沿って炉内温度を上昇させ、各試験体加熱面が本項(3)に示す4水準の目標温度となるまで加熱した。加熱終了後は加熱炉側面の炉蓋を開放し、室温になるまでそれぞれの試験体を静置した。炉内温度の測定は、試験体加熱面から100mm離して設置した3本の熱電対を用いた。また、加熱炉内のバーナーの前には、加熱炉内温度が均等なるように遮炎板を設置した。コンクリートの加熱面の測定には、試験体の加熱面に予め設置した熱電対を用いた。なお、各水準の試験体のうちそれぞれ1体は、加熱後の試験体と比較するため加熱を行わなかった(以下、未加熱試験体と記す)。

(3) 加熱温度

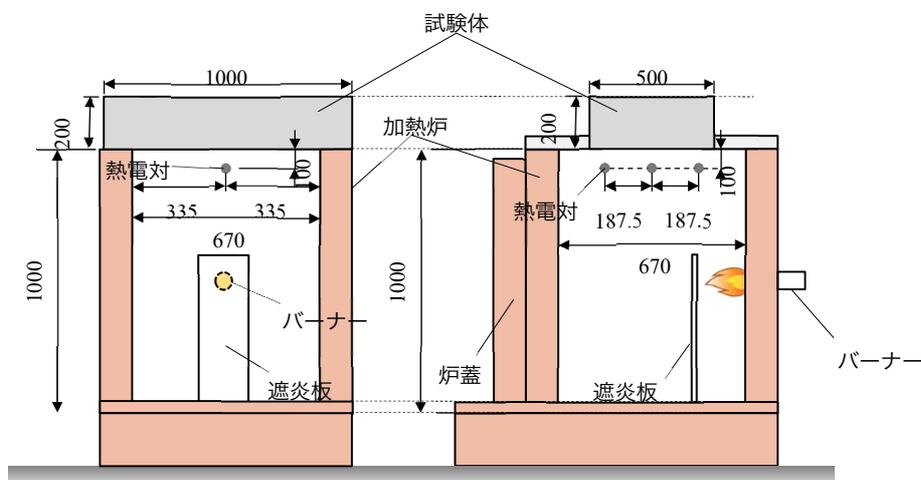
加熱温度は、2.3.5 項の RC 造集合住宅火災調査³⁾の実績における火災継続時間および2.5.5 項の RC 造集合住宅の耐火性検証による火災外力を勘案し決定した。

表 3.2 に試験体の加熱面の温度を、図 3.3 に加熱温度と加熱時間との関係の一例を示す。

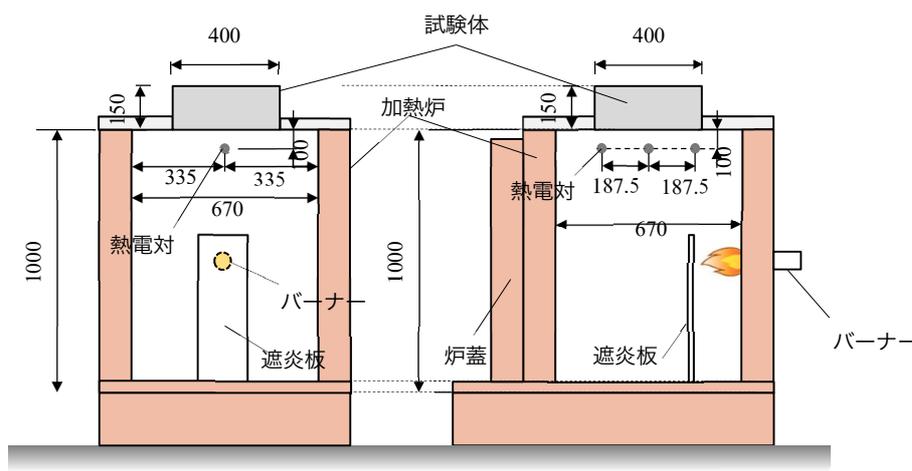
表 3.2 試験体の加熱温度とその根拠

火災外力	コンクリート表面の加熱温度(°C)	火災調査実績により求めた火災継続時間(分)	耐火性検証により求めた火災継続時間(分) 【ISO 標準加熱曲線等価火災時間(分)】
①	300	15	10 【15】
②	500	30	
③	750	60	45 【71】、68 【82】
④	950	130 (61~165の平均値)	-----

目標とした加熱温度は、火災が鎮圧するまで約15分程度を想定した300°C、約30分程度の500°C、約1時間程度の750°C、約1時間を超えて2時間45分前までの大凡の平均である2時間10分程度の950°Cの4水準を設定した



(a) 試験体種類：A, B, C (単位：mm)



(b) 試験体種類：D, E, F (単位：mm)

図3.2 加熱実験装置

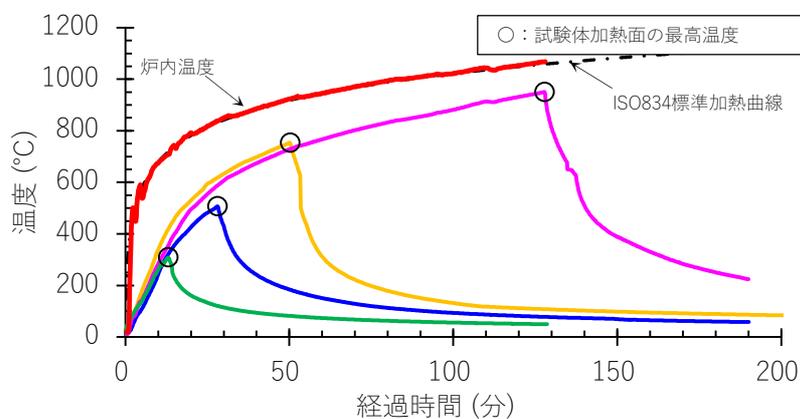


図3.3 加熱温度と加熱時間との関係

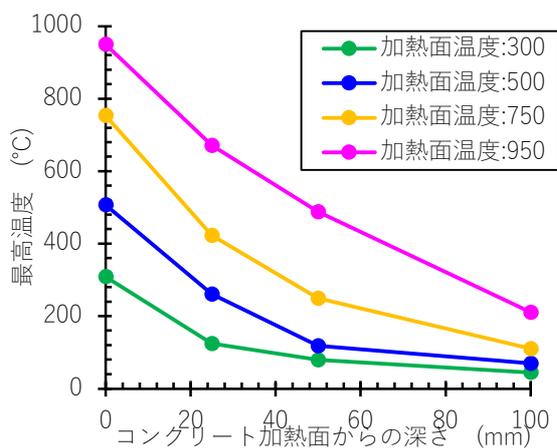
(4) 加熱実験結果

表 3.3 および図 3.4 に、各試験体の加熱面から内部にかけて設置した熱電対の最高温度（以下、加熱面に設置した熱電対の最高温度を加熱面温度、それより内部に設置した熱電対の最高到達温度をコンクリート温度、とそれぞれ記す）を示す。同図 (a)~(f)の縦軸は加熱面温度とコンクリート温度を示し、横軸はコンクリートの加熱面からの深さを示す。

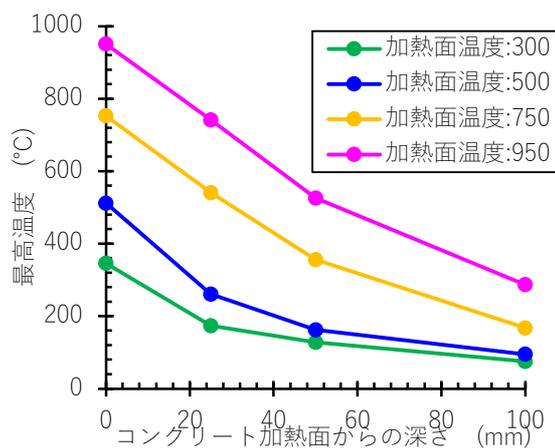
図より、加熱実験を行った各試験体内部のコンクリート温度は、加熱面温度：300°Cでは、深さ 50mm 付近で 100°Cに到達した。加熱面温度：500°Cでは深さ 100mm 付近で 93~113°Cとなった。加熱面温度：750°Cおよび 950°Cでは、深さ 100mm であっても 211~378°Cを超えていた。コンクリートが熱を受けると、70~100°C付近でエトリンガイトが分解し始め、100°Cを超えると水分が蒸発し始めることから、それらの位置より加熱面側のコンクリートについては、熱による化学変化や物理的変化が生じ始め、火害劣化が進行していると推測する。加熱実験に供した各試験体の加熱面は、設定した目標温度に対して加熱され、加熱面から内部に向かって、温度勾配が生じていることを確認した。

表 3.3 各試験体の加熱面から内部にかけて設置した熱電対の最高温度

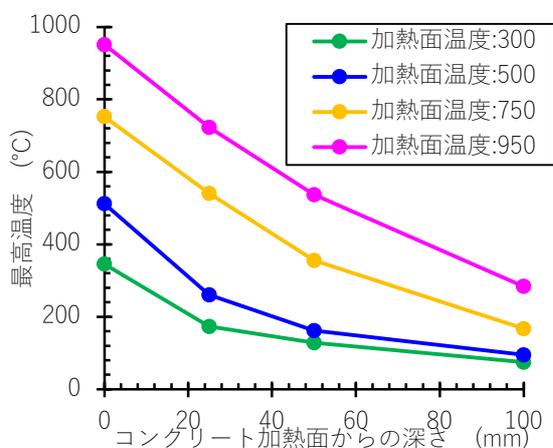
試験体種類	加熱面温度	コンクリート加熱面からの深さ			
		加熱面	25mm	50mm	100mm
A	300	309	124	79	45
	500	507	261	118	70
	750	754	422	249	110
	950	950	671	488	211
B	300	346	174	128	75
	500	512	261	162	95
	750	753	541	355	168
	950	951	742	526	287
C	300	346	174	128	75
	500	512	261	162	95
	750	753	541	355	168
	950	951	723	537	284
D	300	321	127	92	67
	500	509	233	155	113
	750	753	504	302	214
	950	951	689	524	319
E	300	313	129	86	60
	500	516	269	155	93
	750	753	472	295	146
	950	951	722	579	324
F	300	303	115	76	55
	500	502	261	139	100
	750	751	418	272	177
	950	951	691	524	378



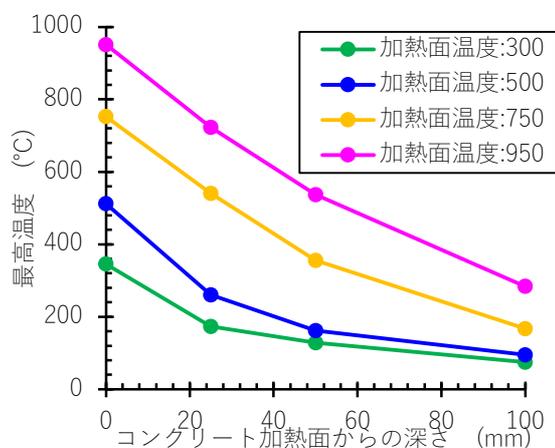
(a) 試験体種類：A



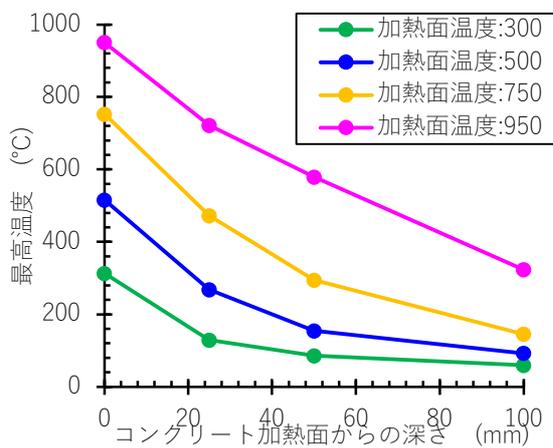
(b) 試験体種類：B



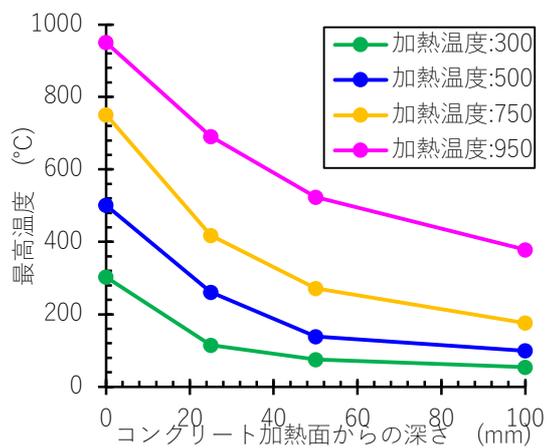
(c) 試験体種類：C



(d) 試験体種類：D



(e) 試験体種類：E



(f) 試験体種類：F

図 3.4 各試験体の加熱面から内部にかけて設置した熱電対の最高温度

3.2.2 加熱冷却後のコンクリート試験体から採取したコアの圧縮強度

(1) 圧縮強度試験体の採取方法および試験方法

JIS A 1107:2012⁴⁾に基づき、加熱冷却後の各試験体の加熱面および未加熱の試験体からそれぞれ3本ずつコアを採取した。採取したコアは、JIS A 1107:2012に規定される直径を満足し、かつ、高さは直径の2倍として整形した後、採取日の翌日に圧縮強度および静弾性係数の測定を行った。なお、コアの直径と高さは、試験体種類：A,B,Cについては直径100mm、高さ200mmとし、試験体種類：D,E,Fでは直径75mm、高さ150mmとした。圧縮試験はJIS A 1107:2012に、静弾性係数はJIS A 1149:2010⁵⁾にそれぞれ基づいて実施した。静弾性係数を求めるためのコアの縦ひずみは、コアの軸方向の中央部に検長60mmのひずみゲージを2枚貼付して計測した。

(2) 加熱面から採取したコアの圧縮強度

図3.5に加熱面温度とコアの圧縮強度との関係、図3.6に加熱面温度とコアの静弾性係数との関係を示す。コア試験体の圧縮強度および静弾性係数は加熱面温度が高いほど低下した。

図3.8に加熱面温度とコアの圧縮強度残存比との関係を、図3.9に加熱面温度とコアの静弾性係数残存比との関係を、図3.10に加熱面温度とコアの縦ひずみ残存比との関係をそれぞれ示す。なお、図3.8～3.9の各残存比は、加熱冷却後のコアの各結果を未加熱試験体のコアの各結果で除して求めた。

図より、加熱面温度と圧縮強度残存比（試験体種類：A～Fの平均値）との関係は加熱面温度：300℃では0.89、500℃では0.76、750℃では0.59、950℃では0.43となり、加熱面温度が高くなるほど低下した。指針¹⁾またはN,Yuzerらの研究⁸⁾では、加熱冷却後のコンクリートの圧縮強度は、受熱温度が200℃を超えると低下し始め、500℃に達すると常温時の1/2程度となることが示されているが、本実験における加熱面温度：500℃の圧縮強度残存比は0.76であった。また、図3.7に加熱面温度とコアの縦ひずみとの関係を示す。コアの縦ひずみは加熱面温度に関わらず、概ね 1800×10^{-6} ～ 2800×10^{-6} であった。図3.9より、コアの縦ひずみ残存比は加熱温度によらず未加熱と相違なかった。圧縮強度試験後のコアの破壊性状を目視観察すると、最も脆弱であると想定される加熱面で破壊しておらず、コアの中央部付近で破壊していた。なお、コンクリートの加熱面温度が高くなるほど、破壊位置は中央部付近から加熱面側によっているようにみられた。この要因については、ひとつはコアの加熱面側の端部をキャッピング処理していること、もうひとつは圧縮試験機加圧版がコアの上下端部を拘束していることにより、最も脆弱な加熱面の崩壊を妨げたと推測する。

本実験では、集合住宅における温度履歴に限定してガス炉を用いた片面加熱実験を行っている。加熱面から採取したコアは、加熱面から内部に向かって温度勾配を持ち、加熱面が最も劣化が大きく、内側ほどその劣化は小さくなる。そのコアを圧縮強度試験に供した場合、加熱面側で破壊し、コア内側までは破壊に到らないと推測できる。一方で、破壊が生じる加熱面側においても、圧縮試験機加圧板の端部拘束⁹⁾により、加熱面側が拘束されていることが推測され、最も弱い加熱面の破壊荷重を測定できているか不明な点もある。この点については4章で検討する。

なお、指針に示されるコンクリートの圧縮強度残存比を求めた際の加熱条件は、電気炉での一様加熱である。

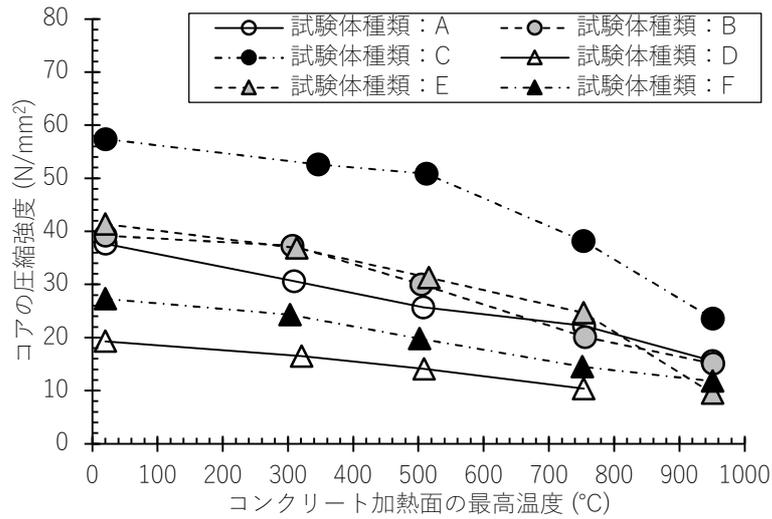


図 3.5 コンクリート加熱面の最高温度とコアの圧縮強度との関係

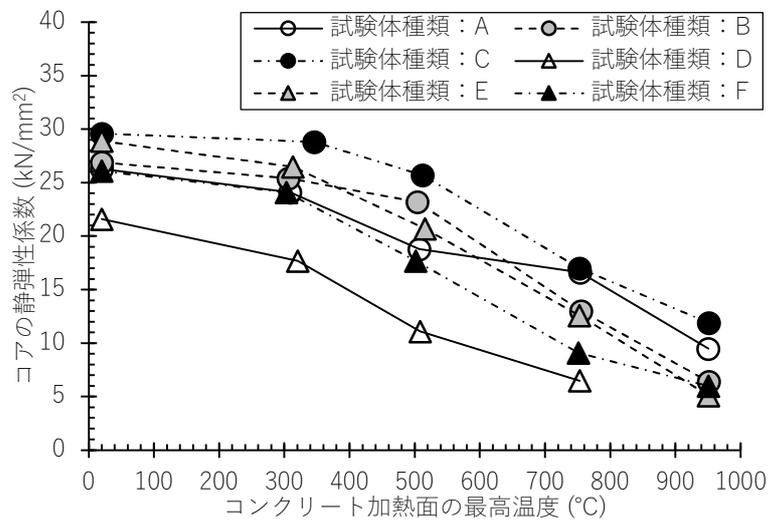


図 3.6 コンクリート加熱面の最高温度とコアの静弾性係数との関係

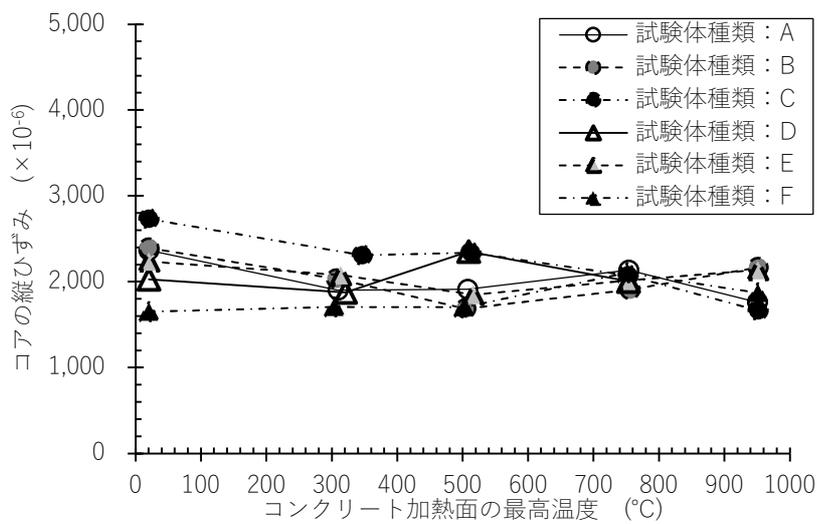


図 3.7 コンクリート加熱面の最高温度とコアの縦ひずみとの関係

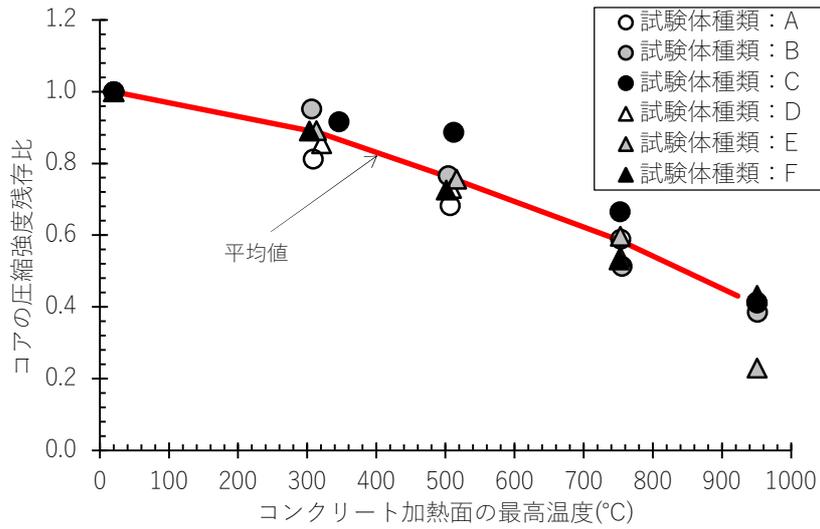


図 3.8 コンクリート加熱面の最高温度とコアの圧縮強度残存比との関係

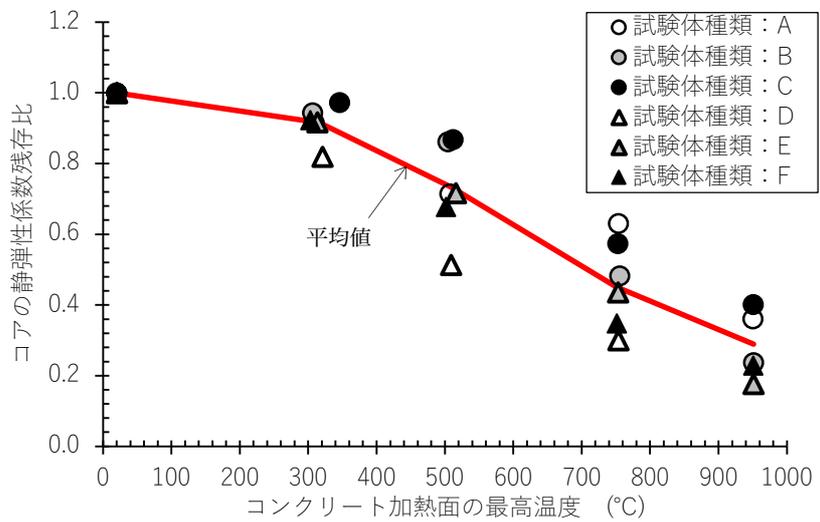


図 3.9 コンクリート加熱面の最高温度とコアの静弾性係数との関係

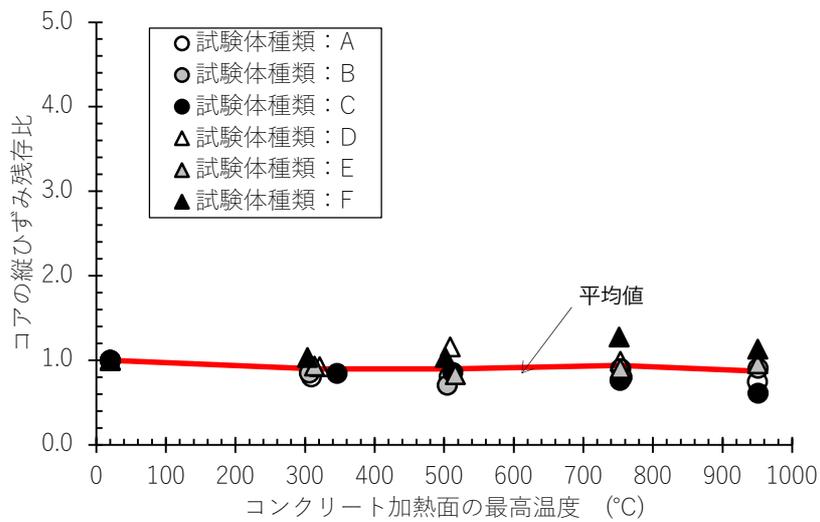


図 3.10 コンクリート加熱面の最高温度とコアの縦ひずみ残存比との関係

3.2.3 集合住宅の火災継続時間とコンクリートの圧縮強度との関係

図 3.11 に、前章の集合住宅のコンクリート天井部材から採取したコンクリートコアの圧縮強度残存比と火災継続時間との関係を示す。

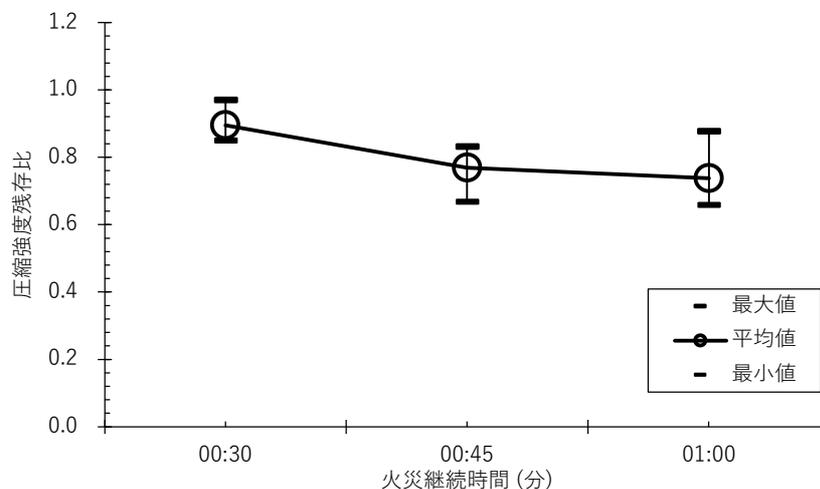


図 3.11 集合住宅の天井部材から採取したコアの圧縮強度残存比と火災継続時間との関係

3.2.2 項(2)より、加熱面温度と圧縮強度残存比（試験体種類：A～F の平均値）との関係は、加熱面温度：500°Cでは0.76、750°Cでは0.59であった。ここで、加熱面温度500°Cは30分間加熱した火災モデル、加熱面温度750°Cは60分間加熱した火災モデルである。これらを図3.9の結果と比較すると、加熱面温度：500°Cでは0.90、加熱面温度：750°Cでは0.74となり、火災調査実績から得られた圧縮強度残存比の方が火災加熱を与えたコンクリート試験体よりも1.2～1.3倍高くなる傾向を示した。これは、火災調査時の目視観察により推定する受熱温度から、コアの圧縮強度を類推することは難しいことを示していると考えられる。

3.2.4 加熱冷却後のコンクリート試験体から採取した小径コアの圧縮強度試験

(1) コンクリートコアの採取方法および試験方法

CTM-14「コンクリートからの小径コアの採取方法および小径コア供試体を用いた圧縮強度試験方法⁹⁾に基づいて、加熱冷却後の試験体種類：Cの加熱面および未加熱の試験体から、直径30mmのコア（以下、小径コアと記す）を3本ずつ採取し、加熱面側および内側の圧縮強度を確認して、その平均値を示した。図3.12に小径コアから切断した加熱面側および内側の位置を示す。

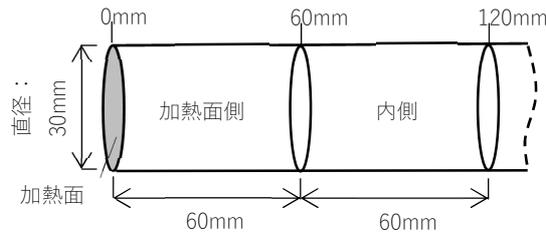


図 3.12 小径コアの試験体採取位置

(2) コンクリートコアの圧縮強度試験結果

図3.14に、加熱冷却後の加熱面からの深さと小径コアの圧縮強度との関係を示す。図より、小径コアの圧縮強度は、加熱面側と内側で差が生じており、加熱面温度が高いコアほど、内側の圧縮強度も低下していた。なお、未加熱の小径コアの圧縮強度は、コンクリート表面側と内側で差は認められない。図3.13に、加熱面からの深さと小径コアの密度との関係を示す。加熱冷却後の小径コアの見かけ密度は、図3.14の圧縮強度と同じ傾向を示している。この結果より、加熱による水分の蒸発、それに伴うセメントペースト間の収縮ひび割れおよび骨材の熱膨張によるひび割れなどが圧縮強度の低下する一つの要因であると推測する。図3.15に、加熱面からの深さと小径コアの圧縮強度残存比との関係を示す。なお、小径コアの圧縮強度残存比は、コンクリート加熱面側および内側それぞれにおいて、加熱後の小径コアの圧縮強度を未加熱試験体の小径コアの圧縮強度で除して求めた。圧縮強度残存比は、加熱面側では加熱面温度：300℃では0.73、加熱面温度：500℃では0.63、加熱面温度：750℃では0.40、加熱面温度：950℃では0.30、一方、内側では加熱面温度：300℃で0.92、加熱面温度：500℃で0.86、加熱面温度：750℃で0.84、加熱面温度：950℃で0.68であった。この結果から、加熱面側の圧縮強度残存比は、指針に示される圧縮強度残存比に近いことがわかる。これは、加熱面温度が高くなるほど、内側の最高到達温度も高温となることから、通常のコアと比較して、小径コアを成形する軸方向（深さ方向）に、高温度域、つまり火害部を多く含んだことによると考えられる。

図3.16に、小径コアの軸方向中央部の最高温度と圧縮強度残存比との関係を示す。なお、小径コアの軸方向中央部の最高温度は、図3.1に示すコンクリート内部に設置した熱電対で測定した最高到達温度を線形補間して求めた。図より、小径コアの圧縮強度残存比は、小径コアの軸方向中央部の温度と高い相関が認められた。この結果から、加熱冷却後のコンクリートから採取した小径コアを用いて、加熱面～60mmの加熱面側、深さ60mm～120mmの内側それぞれの圧縮強度を比較することにより、劣化部コンクリートの加熱面から深さ方向の劣化傾向を把握することができた。

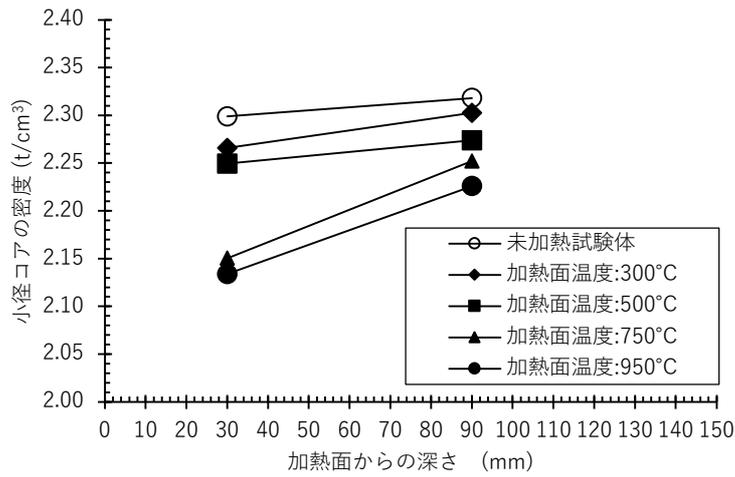


図 3.13 コンクリート加熱面からの深さと小径コアの密度との関係

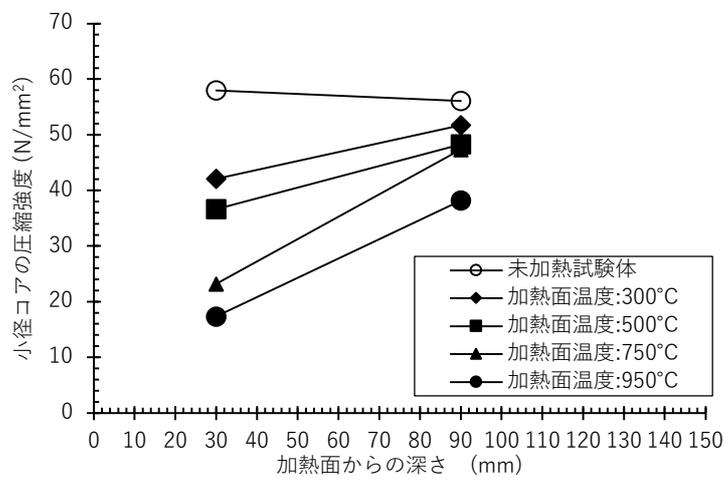


図 3.14 コンクリート加熱面からの深さと小径コアの圧縮強度との関係

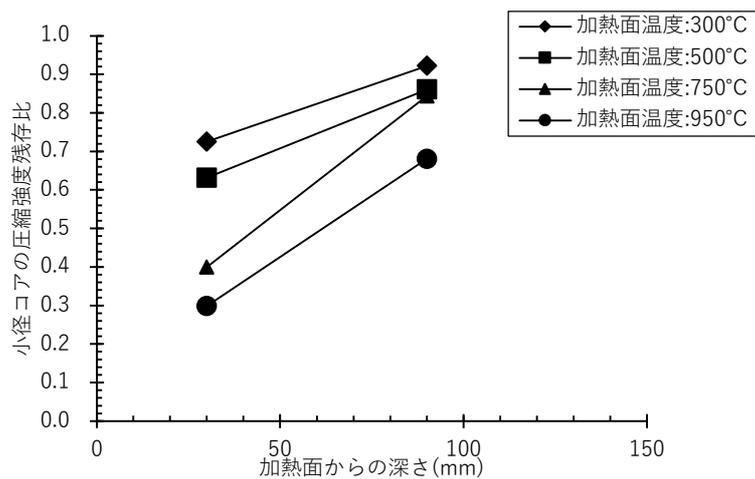


図 3.15 コンクリート加熱面からの深さと小径コアの圧縮強度残存比との関係

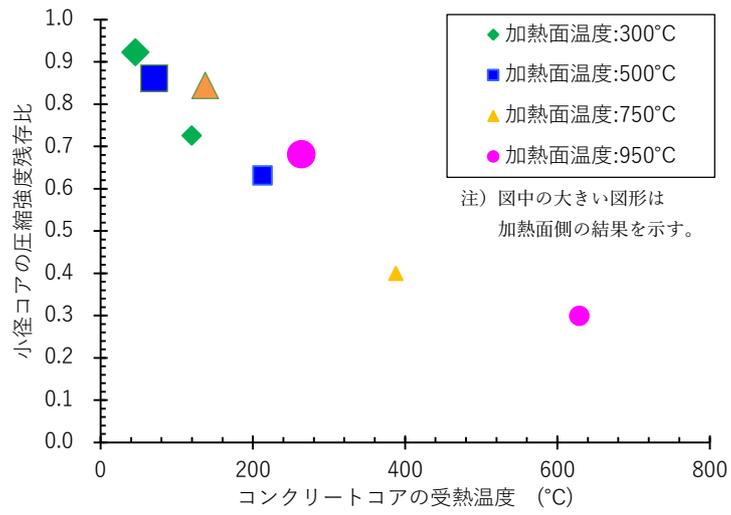


図 3.16 コンクリートコアの受熱温度と小径コアの圧縮強度残存比との関係

3.2.5 まとめ

本実験では、コンクリート試験体を対象として、第2章で求めた火害調査実績ならびに耐火性検証法により求めた火災外力をISO標準加熱曲線に等価して与えた後、試験体加熱面から採取したコアおよび小径コアの圧縮強度について検討した。表3.4に火災外力との関係を示すとともに得られた知見を以下に示す。

表 3.4 火災温度および火災継続時間と圧縮強度残存比との関係

火災外力	コンクリート加熱面の加熱温度(°C)	火害調査実績により求めた火災継続時間(分)	コアの圧縮強度残存比(加熱面~200mm)	小径コアの圧縮強度残存比	
				加熱面側(加熱面~60mm)	内部側(60mm~120mm)
①	300	15	0.89	0.73	0.92
②	500	30	0.76	0.63	0.86
③	750	60	0.59	0.40	0.84
④	950	130 (61~165の平均値)	0.43	0.30	0.68

- (1) JIS A 1107 により採取したコアの圧縮強度残存比の結果から、火災加熱を受けた圧縮強度は、火災継続時間が15分で約11%、30分で約24%、60分で約40%となり、130分では60%程度低下する。
- (2) 小径コアの圧縮強度残存比の結果から、加熱面側では火災継続時間が30分で約37%、60分で60%低下し、JIS規格に基づくコアの同火災継続時間より、圧縮強度は0.7~0.85倍と低い。一方、内部側の圧縮強度は、火災継続時間が30分で14%程度、60分で16%程度、130分で32%程度低下している。
- (3) 上記の結果より、火災継続時間が15分であれば、JIS規格に基づくコアの圧縮強度は約89%残存していることが明らかとなった。しかしながら、火災継続時間が15分を超えると圧縮強度残存率は低下し、火災継続時間が60分で半分以下となる。また、小径コアを用いて加熱面側(加熱面~60mmまで)と内部側(60~120mmまで)それぞれの圧縮試験を求めることにより、強度分布が把握できる。

3.3 加熱冷却後のモルタル試験体から採取したコアを用いた加熱面から深さ方向の強度の検討

本節では、3.2節で求めた火災後の集合住宅におけるコンクリート部材の強度低下について、加熱面から内部への強度低下の傾向を把握する目的で、加熱冷却後のモルタル試験体の加熱面からコア採取し、さらにコアを深さ方向に切断したスライス試験片を用いて各種試験を実施した。

3.3.1 加熱実験

(1) 試験体

図 3.17 に試験体の形状と寸法、表 3.5 にモルタルの調合、使用材料およびモルタルの性状（スランプ、空気量）および封緘養生した材齢 28 日の圧縮強度試験を示す。モルタルの使用材料は、普通ポルトランドセメント（密度： $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ ）、地下水、海砂（表乾密度： $2.66\text{g}/\text{cm}^3$ ）および砕砂（表乾密度： $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ ）、AE減水剤とした。試験体作製時のモルタルのフレッシュ性状は、スランプフローは18.5cm、空気量は1.0%、また、封緘養生した材齢28日の円柱供試体の圧縮強度平均値は $33.3\text{N}/\text{mm}^2$ であった。試験体は加熱実験用を4体、未加熱用を1体の計5体作製した。作製した試験体は、材齢7～10日で脱型し、加熱試験に供するまで屋内にて静置した。また同図に、加熱実験中の試験体の温度を計測するため、加熱面（深さ0mm）および内部（25、50、100mm）の深さに、モルタル打込み前に予め設置したK型熱電対の位置を示す。

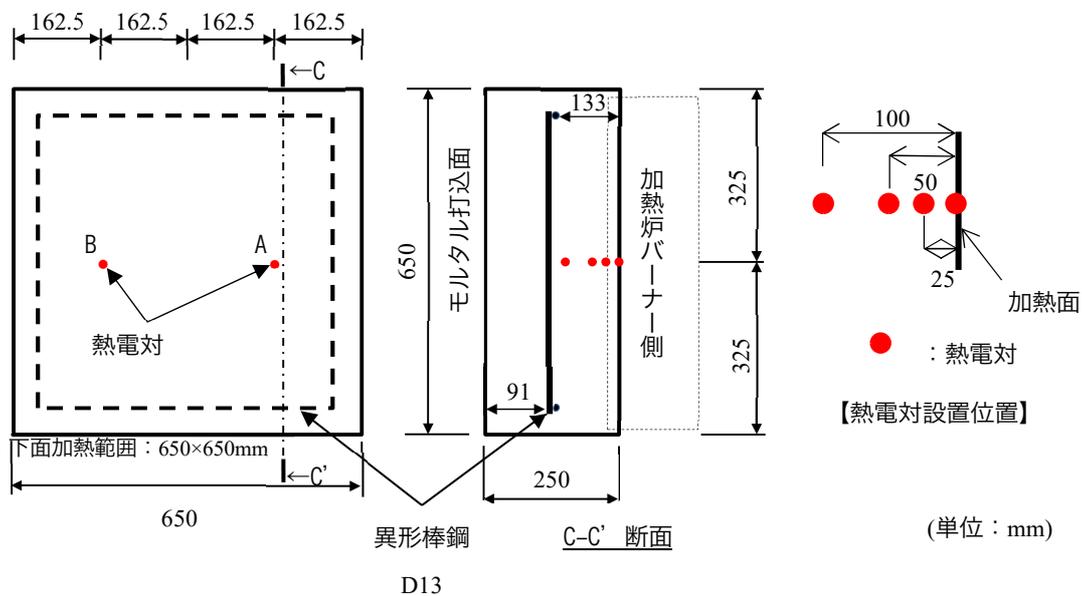


図 3.17 モルタル試験体の形状と寸法

表 3.5 モルタルの調合と使用材料

水セメント比 W/C	単位量(kg/m ³)			
	W	C	S1	S2
0.57	290	509	1020	440

注) 使用材料を以下に示す。

- W : 地下水
- C : 株式会社トクヤマ製 普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³)
- S₁ : 京都府亀岡市産 砕砂(表乾密度: 2.60g/cm³)
- S₂ : 大分県津久見市 海砂(表乾密度: 2.66g/cm³)

(2) 加熱方法

図 3.18、写真 3.1 および写真 3.2 に、試験体を設置したガス加熱炉を示す。試験体は下からの一方向加熱を模擬して、下面を加熱するように加熱炉に設置した。試験体の加熱は 3.2.1 項で定めた目標温度を勘案し、加熱面の目標温度を 500°C、800°C の 2 水準と未加熱試験体の 1 水準の合計 3 水準とした。

炉内温度の測定は、試験体加熱面から 100mm 離して設置した 3 本の熱電対を用いた。また、加熱炉内のバーナーの前には、加熱炉内温度が均等なるように遮炎板を設置した。モルタルの加熱面の測定には、試験体の加熱面に予め設置した熱電対を用いた。なお、各種類の試験体のうちそれぞれ 1 体は、加熱後の試験体と比較するため加熱を行わなかった (以下、未加熱試験体と記す)。

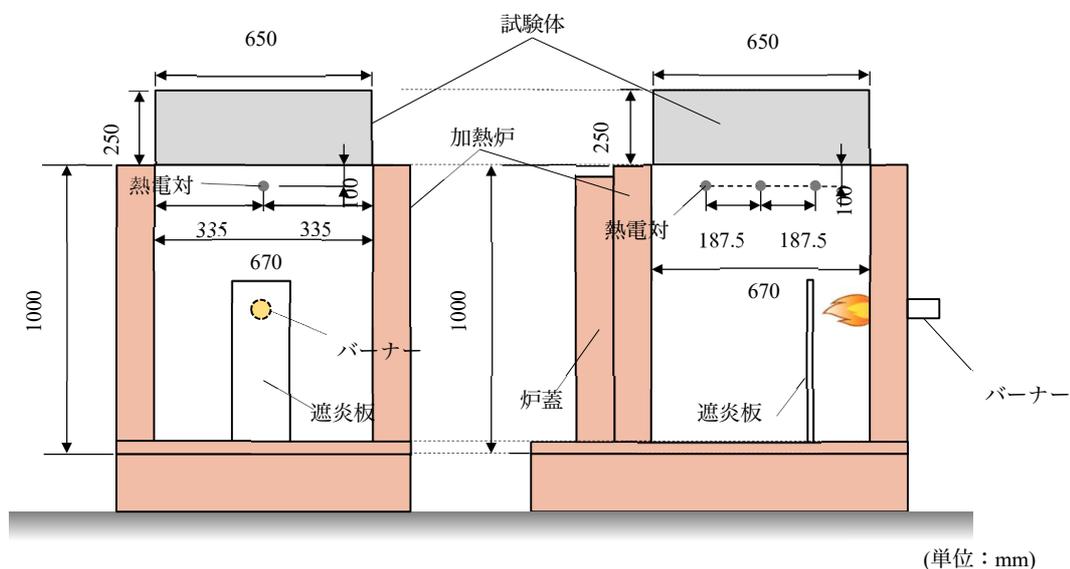


図 3.18 加熱実験装置



写真 3.1 加熱炉の状況



写真 3.2 炉内の状況

(3) 加熱実験結果

図 3.19 に、加熱試験時の温度と経過時間の関係を示す。同図の縦軸は加熱面温度とモルタル温度を示し、横軸は試験体加熱面からの深さを示す。

図より、加熱実験を行った各試験体内部の温度は、加熱面温度：500°Cでは、加熱面で 510°C、深さ 50mm 付近で 92°Cに到達した。加熱面温度：800°Cでは、加熱面で 802 で、深さ 100mm 付近で 111°Cとなった。

コンクリートが熱を受けると、70~100°C付近でエトリングが分解し始め、100°Cを超えると水分が蒸発し始めることから、それらの位置より加熱面側のモルタルについては、熱による化学変化や劣化が生じ始めていると推測する。

表 3.6 および図 3.20 に各試験体の加熱面から内部にかけて設置した熱電対の最高温度（以下、加熱面に設置した熱電対の最高温度を加熱面温度、それより内部に設置した熱電対の最高到達温度を試験体温度、とそれぞれ記す）は、設定した目標温度に対して加熱され、加熱面から内部に向かって、温度勾配が生じていることを確認した。

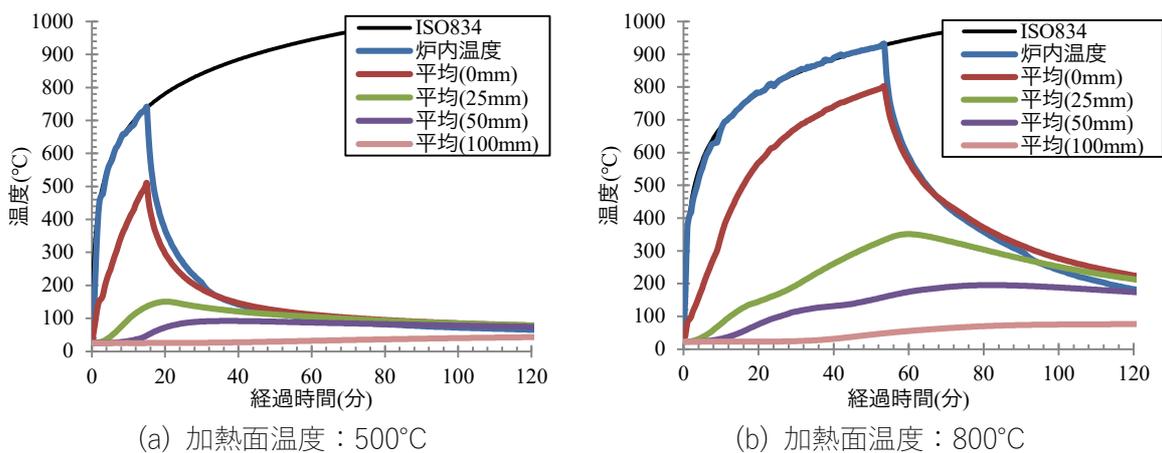


図 3.19 加熱試験時の温度と経過時間の関係

表 3.6 各試験体の加熱面から内部にかけて設置した熱電対の最高温度

加熱面温度	コンクリート加熱面からの深さ			
	加熱面	25mm	50mm	100mm
500	510	151	92	60
800	802	351	195	111

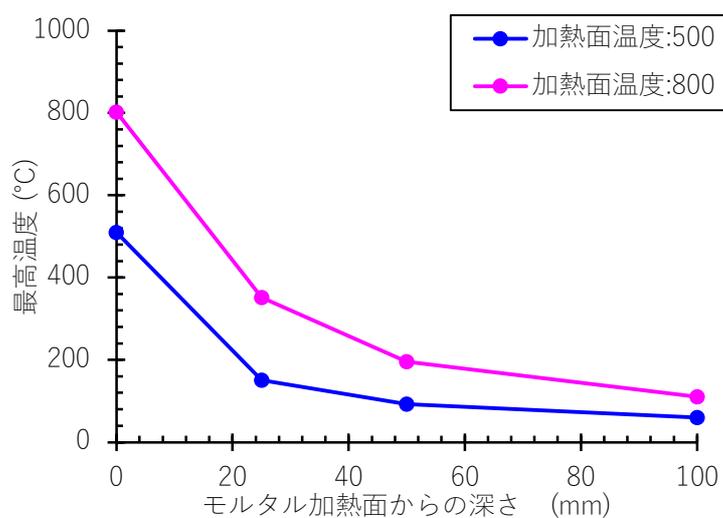


図 3.20 各試験体の加熱面から内部にかけて設置した熱電対の最高温度

3.3.2 加熱冷却後のモルタル試験体から採取したコアによる各種試験方法

前節において加熱実験を行ったモルタル試験体の加熱面からコアを採取し、表 3.7 の試験を実施した。以下にコアの採取方法、コアを切断して成形したスライス試験片* (以下、スライス試験片と記す) の作製方法および各種試験方法とその結果を示す。

注) * : コアを切断して成形したスライス試験片は、JIS 規格等で定められた形状の試験体ではなく、本論中でのみ取り扱う用語である。

表 3.7 各種試験方法

調査方法	参照
モルタルコアの圧縮強度・静弾性係数試験	3.3.2 項(3)
スライス試験片の圧縮試験方法および試験	3.3.2 項(4)
スライス試験片の圧縮試験方法および試験	3.3.2 項(5)

(1) モルタルコアの採取方法および圧縮試験・静弾性係数試験方法

本実験では、JIS A 1107⁴⁾に基づき、加熱冷却後の各試験体の加熱面および未加熱の試験体からそれぞれ3本ずつコアを採取した。写真 3.3 に採取状況を示す。採取したコアは JIS A 1107:2012⁴⁾に規定される直径を満足し、かつ、高さは直径の2倍として整形した後、採取日の翌日に圧縮強度および静弾性係数の測定を行った。

圧縮試験は JIS A 1107:2012⁴⁾に、静弾性係数は JIS A 1149:2010⁵⁾にそれぞれ基づいて実施した。静弾性係数を求めるためのコアの縦ひずみは、コアの軸方向の中央部に検長 60mm のひずみゲージを2枚貼付して計測した。

(2) 採取したモルタルコアを用いたスライス試験片の成形方法および各種試験方法

加熱冷却した試験体から、JIS A 1107:2012⁴⁾に従って採取したコアをスライスし、各種試験片に整形した。圧縮クーポン試験、曲げ試験および引張試験に供するスライス試験片を図 3.21 に示す。なお、コアの採取および切断には乾式のコアドリルおよび切断機を用いた。なお、各種強度試験には、コア2本からそれぞれ切断した同深部の2試験片の平均値を示す。



写真 3.3 コアの採取状況

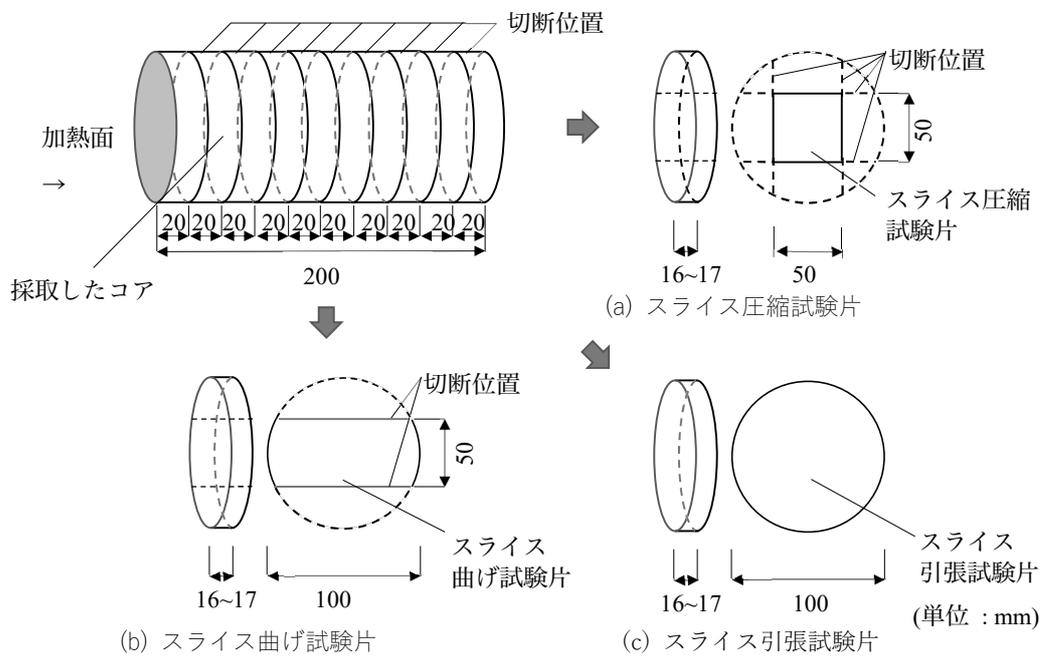


図 3.21 採取したコアの切断位置および圧縮試験、曲げ試験、引張試験に供するスライス試験片



写真 3.4 コアの切断状況



写真 3.5 スライス圧縮試験片の状況



写真 3.6 スライス曲げ試験片の状況



写真 3.7 スライス引張試験片の状況

(3) モルタルコアの圧縮強度試験方法

圧縮試験は JIS A 1107:2012⁴⁾に、静弾性係数は JIS A 1149:2010⁶⁾ にそれぞれ基づいて実施した。静弾性係数を求めるためのコアの縦ひずみは、コアの軸方向の中央部に検長 60mm のひずみゲージを2枚貼付して計測した。

(4) スライス試験片の圧縮試験方法

圧縮試験は、JIS A 1108:2006¹⁰⁾により実施し、スライス試験片の上下端部を石膏でキャッピングした後、毎秒 $0.6 \pm 0.4 \text{N/mm}^2$ で載荷した。写真 3.8 にスライス圧縮試験状況を示す。

(5) スライス試験片の曲げ試験方法

曲げ試験は、JIS A 1106:2006¹¹⁾ を参考に実施した。写真 3.9 に曲げ試験状況を示す。スライス試験片は、加熱面側を下向きとして、直径 6mm の棒鋼 2 本を用いて支点間距離 64mm で支持し、その上面の中央に直径 6mm の棒鋼を介して、鉛直下向きに毎秒 $0.06 \pm 0.04 \text{N/mm}^2$ で載荷した。

(6) スライス試験片の引張試験方法および試験結果

引張試験は、JIS A 1113:2018¹²⁾により実施し、毎秒 $0.06 \pm 0.04 \text{N/mm}^2$ で載荷した。写真 3.10 にスライス引張試験状況を示す。



写真 3.8 スライス圧縮試験状況



写真 3.9 スライス曲げ試験状況



写真 3.10 スライス引張試験状況

写真 3.10 スライス引張試験状況

3.3.3 加熱冷却後のモルタル試験体から採取したコアによる各種試験結果

(1) モルタルコアの圧縮強度試験結果

表 3.8 にモルタルコアの圧縮強度結果を示す。未加熱のモルタルコアの平均値は 35.4N/mm^2 であった。一方、加熱面温度： 500°C のモルタルコアの平均値は 31.5N/mm^2 、加熱面温度： 800°C のモルタルコアの平均値は 22.6N/mm^2 あった。加熱冷却後のモルタルコアの圧縮強度残存比はそれぞれ 0.89 および 0.64 であった。静弾性係数は圧縮強度と同様に加熱面温度が大きくなるほど低下した。

表 3.8 モルタルコアの圧縮強度および静弾性係数

番号	圧縮強度		静弾性係数		
		平均値		平均値	
未加熱	No.1	34.7	35.4	17.6	19.0
	No.2	37.2		20.0	
	No.3	34.3		19.4	
加熱面温度： 500°C	No.1	33.3	31.5	17.1	18.2
	No.2	28.8		20.0	
	No.3	32.5		17.6	
加熱面温度： 800°C	No.1	22.1	22.6	9.3	10.3
	No.2	20.4		12.7	
	No.3	25.2		8.9	

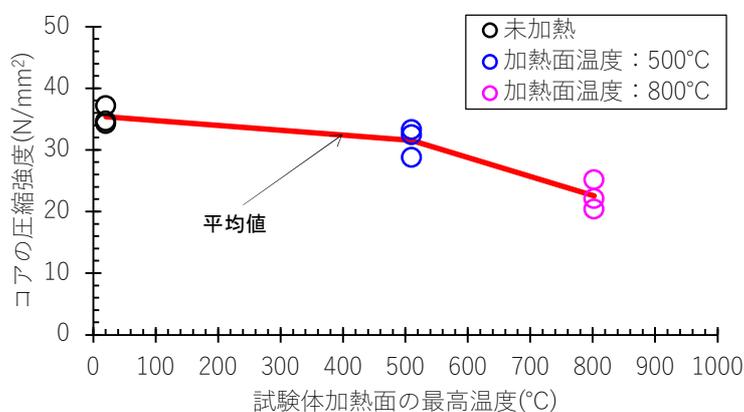


図 3.22 コンクリート加熱面の最高温度とコアの圧縮強度との関係

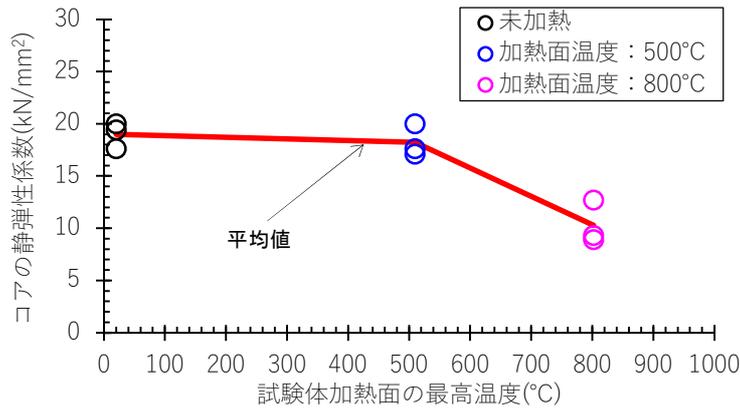


図 3.23 コンクリート加熱面の最高温度とコアの静弾性係数との関係

(2) スライス試験片の圧縮強度試験結果

図 3.24 に、スライス圧縮強度と加熱面からの深さとの関係を示す。なお、図中の縦軸にはモルタルコアの受熱温度を示した(図 3.25、図 3.26 も同様)。スライス圧縮強度は、加熱面温度:500°Cで 50mm、加熱面温度:800°Cで 80mm より内部で未加熱の下限值以上の強度が確認され、その深さの受熱温度は前者で 92°C、後者で 144°Cであった。なお、スライス圧縮試験片は、加熱面温度:500°Cで 20mm、加熱面温度:800°Cで 60mm まで加工時に破壊したことから圧縮強度は測定していない。

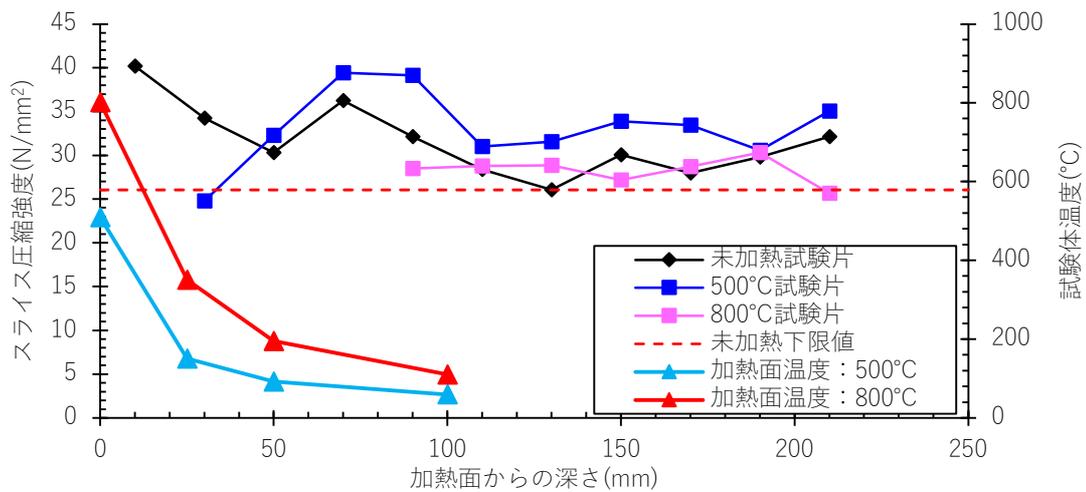


図 3.24 加熱面からの深さとスライス圧縮強度との関係

(3) スライス試験片の曲げ強度試験結果

図 3.25 に、スライス曲げ強度と加熱面からの深さとの関係を示す。スライス圧縮強度は、加熱面温度:500°Cで 40mm より内部、加熱面温度:800°Cで 60mm より内部で未加熱と同程度の強度が確認され、その深さの受熱温度は前者で 116°C、後者で 178°Cであった。なお、スライス圧縮試験片は、加熱面温度:500°Cで 20mm、加熱面温度:800°Cで 40mm まで、スライス加工時に破壊したことから圧縮強度は測定できていない。

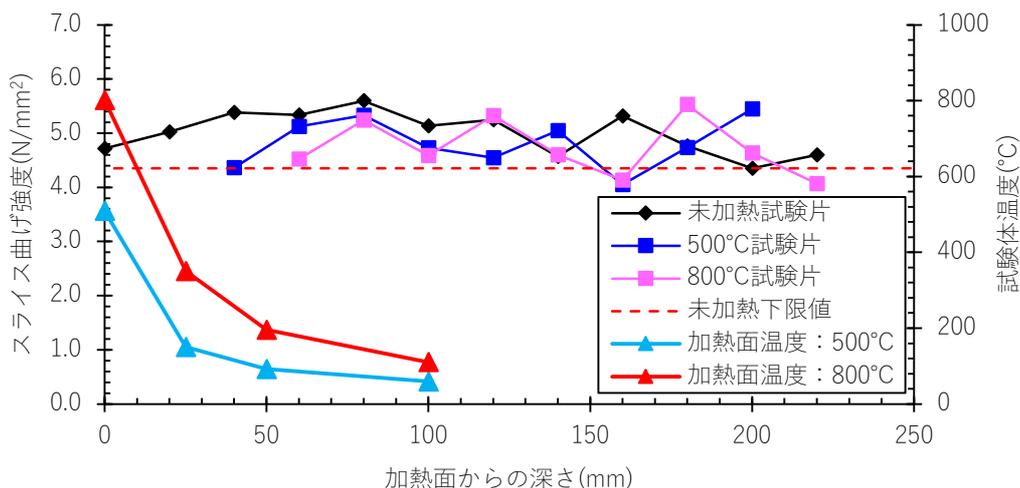


図 3.25 加熱面からの深さとスライス曲げ強度との関係

(4) スライス試験片の引張強度試験結果

図 3.26 に、スライス引張強度と加熱面からの深さとの関係を示す。スライス引張強度は、加熱面温度：500°Cで110mm、加熱面温度：800°Cで150mmより内部で未加熱の下限値と同傾向の強度が確認され、前述のスライス圧縮強度および曲げ強度の強度分布と異なる傾向を示した。また、その深さの受熱温度は前者で60°C以下、後者で111°C以下と推定された。なお、スライス圧縮試験片は、加熱面温度：500°Cで30mm、加熱面温度：800°Cで70mmまでスライス加工時に破壊したことから圧縮強度は測定できていない。

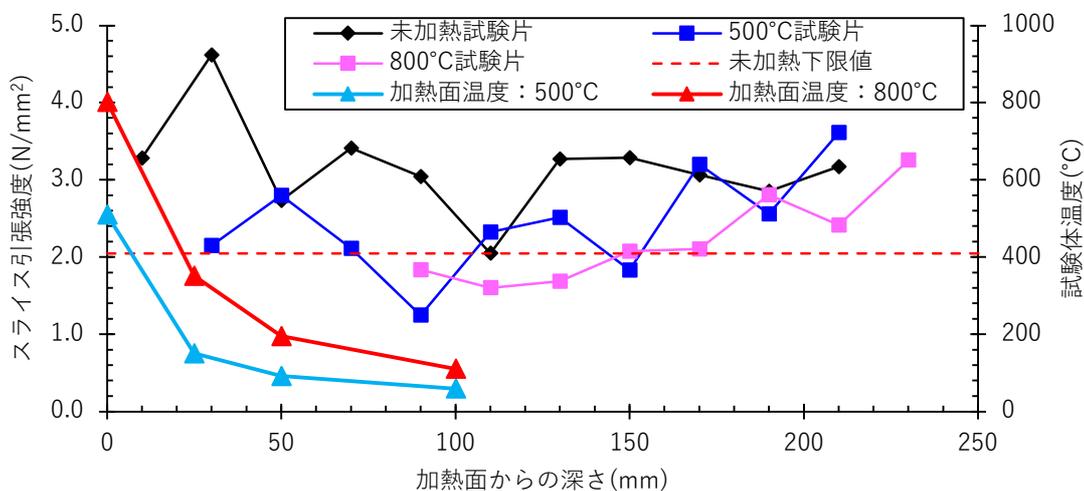


図 3.26 加熱面からの深さとスライス引張強度との関係

3.3.4 各種スライス強度の相互比較

(1) モルタルコアとスライス圧縮強度残存比

図 3.27 に、モルタルコアとスライス圧縮強度残存比を示す。なお、スライス圧縮強度残存比は深さ方向の結果の平均値（ただし、試験片が作製できなかった深さは「0」とした）を用いて算出した。モルタルコアおよびスライス圧縮強度の残存比が、加熱面温度：500°Cと 800°Cで同じ傾向を示していることから、モルタルコアの圧縮強度は、コンクリート内の深さごとの強度を平均化したものであることがわかる。

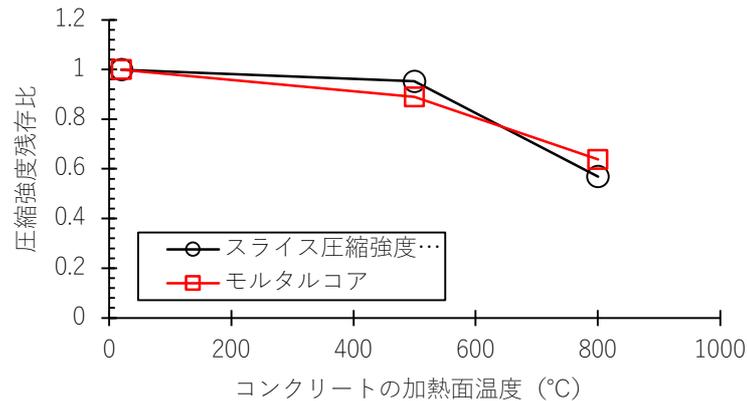


図 3.27 スライス圧縮強度およびモルタルコアの圧縮強度残存比と加熱面温度との関係

(2) スライス圧縮強度と曲げおよび引張強度との比

図 3.28 に、スライス圧縮強度を基準とした曲げおよび引張強度との比を示す。図中に示す各スライス強度の残存比は、深さ方向の結果の平均値を用いて算出した。

図より、未加熱の場合、曲げ強度は 0.158、引張強度は 0.100 となり、加熱面温度：500°Cの場合、曲げ強度は 0.131、引張強度は 0.081 となり、加熱面温度：800°Cの場合、曲げ強度は 0.197、引張強度は 0.073 となった。試験体の材料が粗骨材を排除したモルタルを使用していることから、多少条件は異なるが、未加熱および加熱面温度が 500°Cまたは 800°Cであっても、概ね、曲げ強度は圧縮強度の 1/5～1/8、引張強度は圧縮強度の 1/10～1/14 となる。コンクリートは圧縮強度を基準とした場合、曲げ強度はその 1/6～1/8 (0.13～0.17)、引張強度は 1/10～1/12 (0.8～0.1) となることが知られている。本結果についても、同傾向を示すことを確認した。

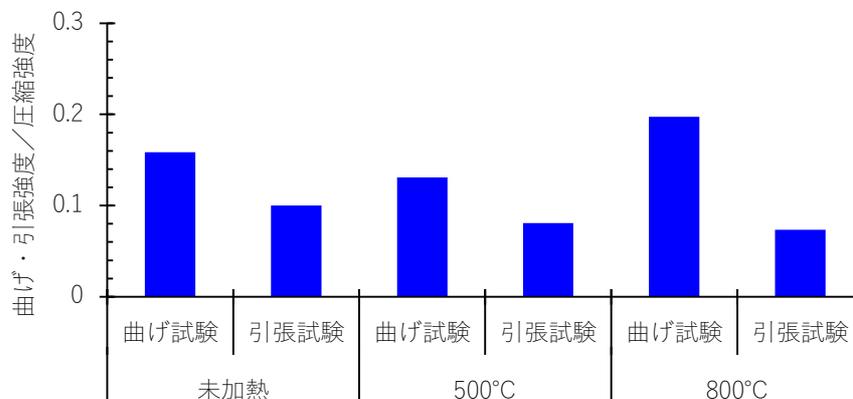
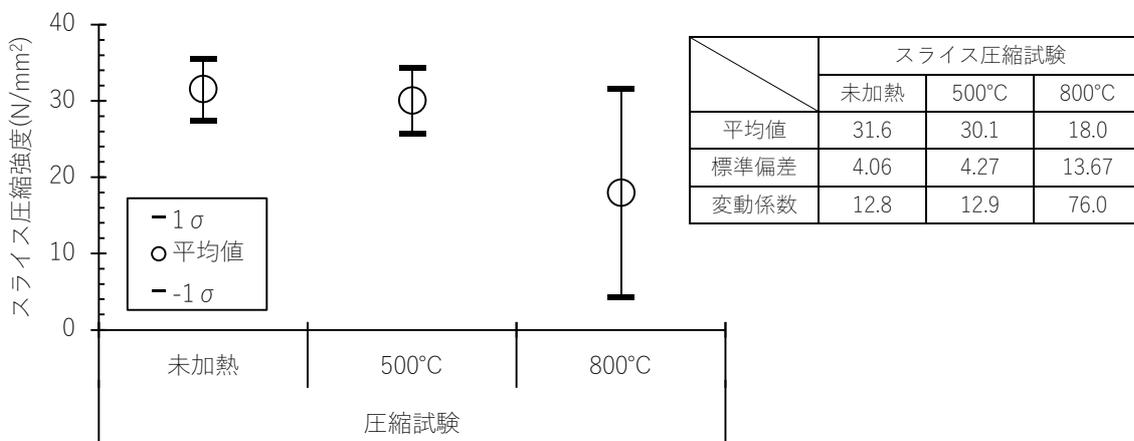


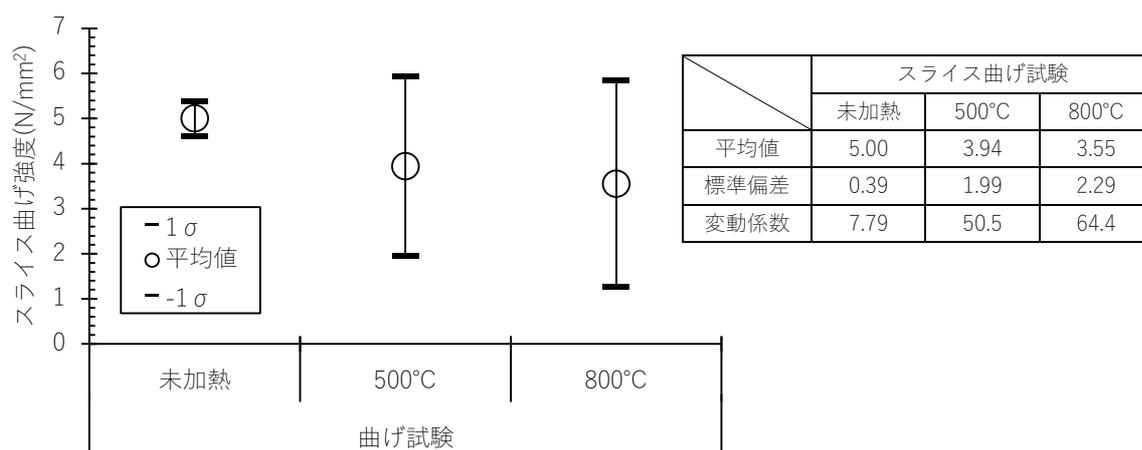
図 3.28 スライス圧縮強度と曲げおよび引張強度との比

(3) 各種試験結果における未加熱および加熱後の試験片の変動

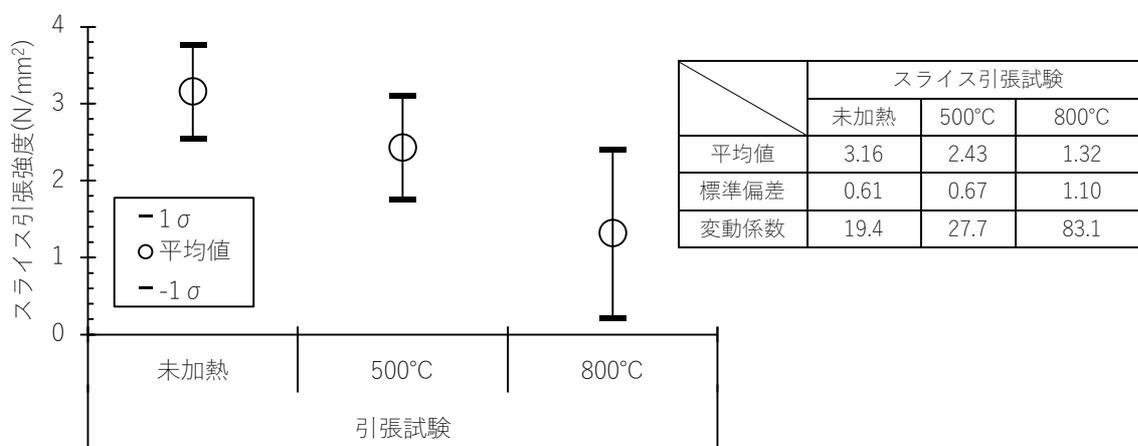
図 3.29 に各種試験における各強度の平均値、標準偏差および変動係数を示す。ただし、試験片が作製できなかった深さは「0」とした。



(a) スライス圧縮試験



(b) スライス曲げ試験



(c) スライス引張試験

図 3.29 各種試験における未加熱試験体結果の変動

各種試験結果については、いずれも加熱温度が高くなるほど得られる強度が低下することから、その平均値は低くなり、標準偏差は大きくなった。また、加熱後の各種スライス強度は、コンクリート加熱面からの各深さを示していることから、平均値にはそれほど重要ではなく、変動係数が大きくなることも当然である。ここでは、未加熱の標準偏差に着目する。図より、各種スライス試験の未加熱の強度の標準偏差については、スライス曲げ強度<スライス引張強度<スライス圧縮強度の順で小さい結果であった。

(4) 各種スライス強度とコンクリート受熱温度との関係

図 3.30 に、前項で得られた各種スライス強度残存比とコンクリート内部温度との関係を示す。なお、各種のスライス強度残存比は図 3.7 に示す位置に設置した熱電対の位置（加熱面から 25mm、50mm および 100mm）における各強度を各強度の未加熱の強度との比を示す。

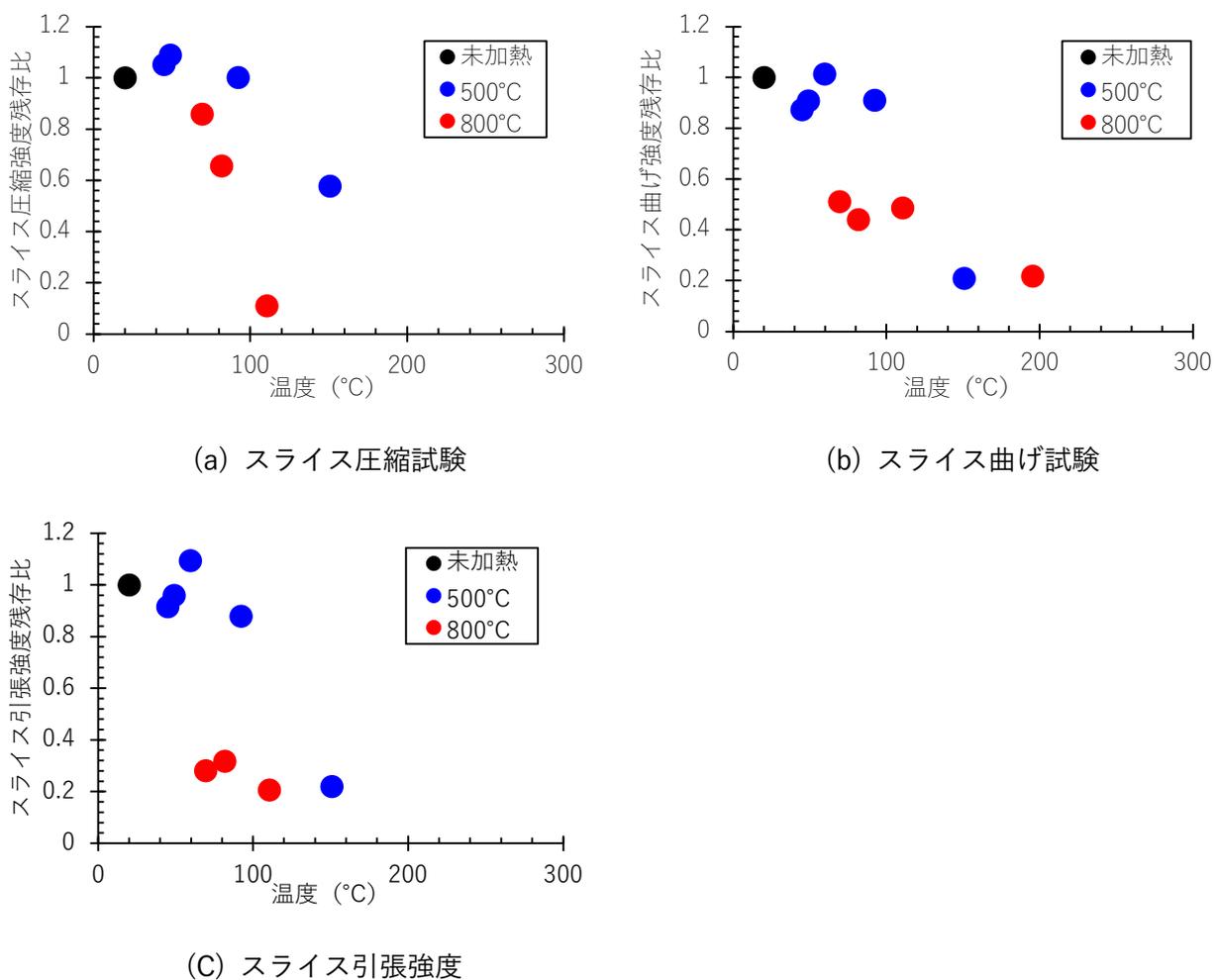


図 3.30 各種試験におけるスライス強度残存比とコンクリート温度との関係

図より、各種スライス強度の残存比は、いずれの試験結果も強度を求めた位置のコンクリート温度と相関が認められた。このうち、スライス圧縮強度および引張強度は、コンクリート温度が 150°C を超えるとスライスしたコアを成形中に試験片が破損し易くことがわかった。これは、加熱によって生じた火害劣化によるひび割れが要因と考えられる。スライス曲げ強度についても同様であるが、圧縮試験片および引張試験片と比較して 200°C 近くまで試験片の整形が可能であった。これらのことか

ら、スライスしたコアによって強度分布を得ようとする場合は、曲げ強度試験片に加工すると良いと考えられる。しかしながら、いずれのスライス試験片を作成する際には、片面加熱を受けた試験体に生じている火害劣化によるひび割れに注意が必要である。

3.4 加熱冷却後のコンクリート試験体から採取したコアを用いた加熱面から深さ方向のスライス曲げ強度の検討

本節では、3.3節で検討した各種スライス強度試験方法のうち、曲げ強度試験方法を用いて、加熱面から内部への強度低下の傾向を把握する目的で、加熱冷却後のコンクリート加熱面からコア採取し、コアを深さ方向に切断したスライス試験片を用いて曲げ強度試験を実施した。

3.4.1 加熱実験

(1) 試験体

図 3.31 に試験体の形状と寸法、表 3.9 にコンクリートの調合を示す。コンクリートの使用材料は、普通ポルトランドセメント（密度： 3.15g/cm^3 ）、地下水、海砂（表乾密度： 2.55g/cm^3 ）および砕砂（表乾密度： 2.64g/cm^3 ）、碎石（表乾密度： 2.68g/cm^3 ）、AE 減水剤とした。試験体作製時のフレッシュコンクリートの性状は、スランプは 18.5cm 、空気量は 4.2% 、また、封緘養生した材齢 28 日の円柱供試体の圧縮強度平均値は 35.7N/mm^2 であった。試験体は加熱試験用と、未加熱用をそれぞれ 1 体ずつ作製した。作製した試験体は材齢 7 日で脱型し、加熱実験に供するまで屋内にて静置した。また同図に、加熱実験中の試験体の温度を計測するため、加熱面（深さ 0mm ）および内部（ 25 、 50 、 100mm ）の深さに、コンクリート打込み前に予め設置した K 型熱電対の位置を示す。

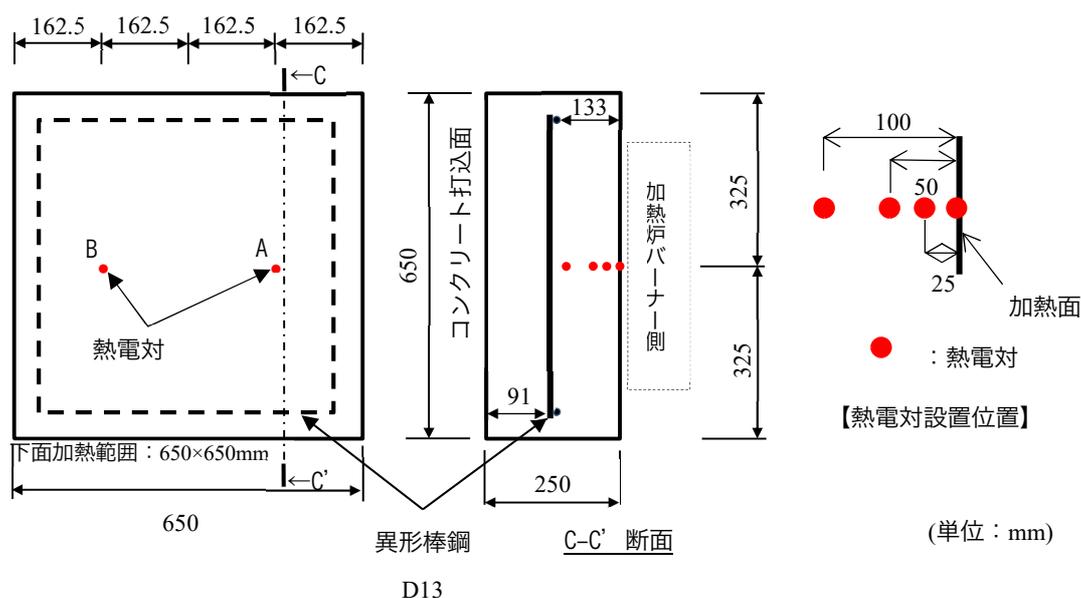


図 3.31 コンクリート試験体の形状と寸法

表 3.9 コンクリートの調合と使用材料

水セメント比 W/C	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		水 W	セメント C	細骨材		素骨材 G	混和材 Ad
				S ₁	S ₂		
57.6	44.7	180	295	560	240	1023	2.950

注) 使用材料を以下に示す。

- W : 地下水
- C : 株式会社トクヤマ製 普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³)
- S₁ : 京都府亀岡市産 砕砂(表乾密度: 2.60g/cm³)
- S₂ : 大分県津久見市 石灰砕砂(表乾密度: 2.66g/cm³)
- G : 京都府亀岡市東別院町 砕石(表乾密度: 2.67g/cm³)
- Ad : AE 減水剤 標準型I種

(2) 加熱方法

試験体の加熱実験は 3.2.1 項 (2) に、コアの採取は 3.2.2 項 (1) に示す方法と同様とした。ただし、試験体の加熱温度と時間については、コンクリートの内部に温度分布を設けることを目的として、加熱面の目標温度 500°C に達してから 1 時間保持する方法とした。

(3) 加熱実験結果

図 3.32 に、加熱試験時の温度と経過時間の関係を示す。同図の縦軸は加熱面温度とコンクリート温度を示し、横軸はコンクリートの加熱面からの深さを示す。

図より、各試験体の加熱面から内部にかけて設置した熱電対の最高温度（以下、加熱面に設置した熱電対の最高温度を加熱面温度、それより内部に設置した熱電対の最高到達温度をコンクリート温度、とそれぞれ記す）は、設定した目標温度に対して加熱され、加熱面から内部に向かって、温度勾配が生じていることを確認した。

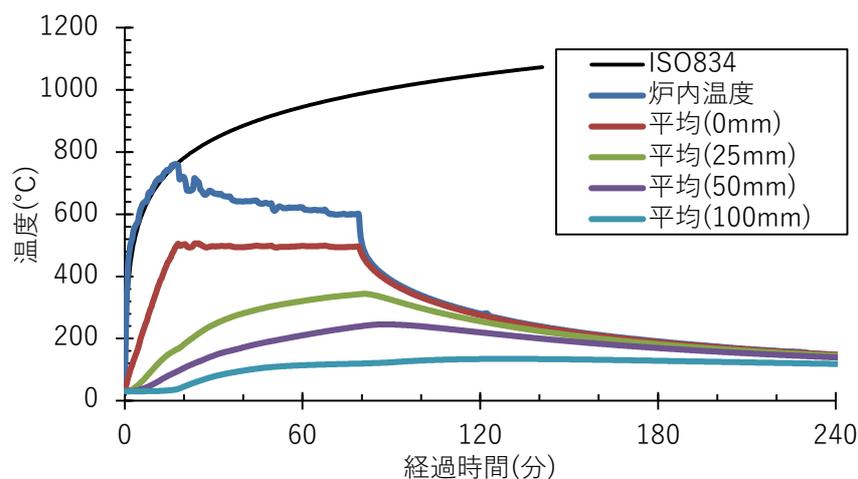


図 3.32 加熱試験時の温度と経過時間の関係

3.4.2 スライス曲げ試験方法

前項において加熱実験に供した試験体の加熱面からコアを採取し、3.2.2 項（2）に示すスライス曲げ試験を実施した。

3.4.3 スライス曲げ試験結果

図 3.33 に、加熱面からの各深さと加熱冷却後の試験体および未加熱試験体のスライス試験片の曲げ強度との関係を示す。なお、曲げ強度は、コア 3 本からそれぞれ切断した同深部の 3 スライス試験片の平均値を示す。なお、図 3.22(b)にはコンクリートの加熱面温度およびコンクリート温度分布を示す。図より、未加熱のスライス試験片による曲げ強度はコンクリート表面から深さ 60mm 程度にかけて緩やかに増加し、それ以深ではほぼ横ばいとなるような勾配を示した。一方、加熱冷却後のスライス試験片の曲げ強度は、加熱面～深さ 80mm 程度までは内側に向かうほど高くなり、深さ 80～140mm では停滞状態、深さ 140mm より内側では再び緩やかに増加する傾向を示した。加熱冷却後の曲げ強度の深さ 100mm の温度は 135°C を示しており、深さ 140mm の位置ではそれ以下の温度となり停滞状態の位置と重なる。吉田らの実験¹³⁾において、加熱実験後に採取したコンクリートコア内の相対含水率は、加熱面から 70mm までは 10%未満であるが、それより深くなるほど増加することが報告されている。曲げ強度の停滞については、加熱によってコンクリート中の水分が 100°C で吸熱し、一度蒸発した後、同位置で再び水分に戻り停滞したものと考えられる。また、加熱中に生じた部材間の温度勾配が生じることにより発生する温度ひび割れの影響により、140mm の深部においても強度が未加熱と比較して低下している可能性が示唆できる。

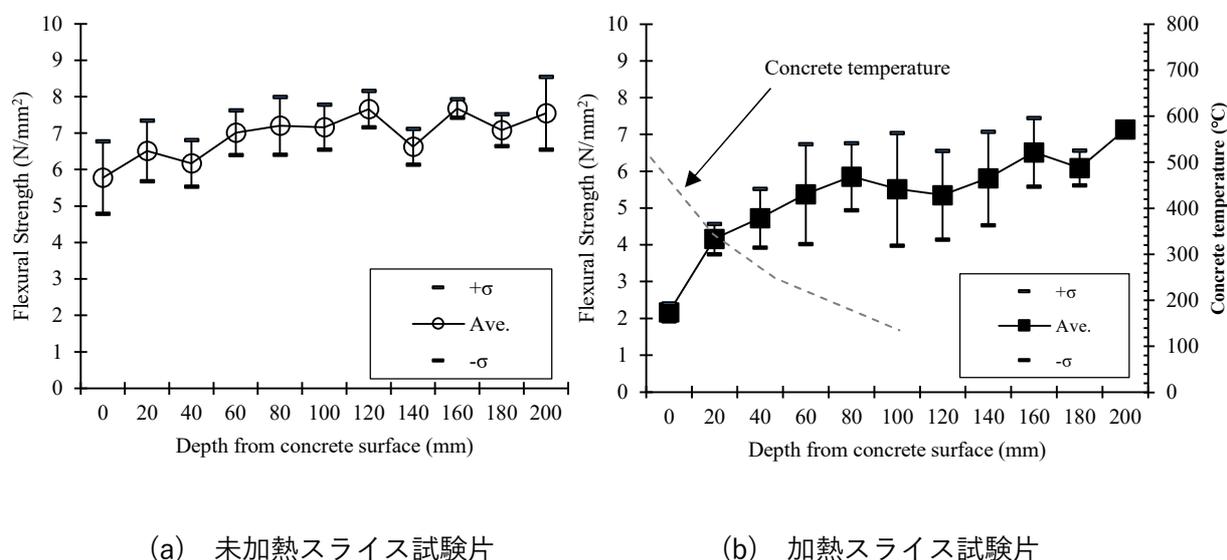


図 3.33 加熱面からの各深さとスライス曲げ強度の関係

3.4.4 スライス曲げ強度分布による加熱面から各深さの劣化範囲の推定

図 3.34 に、未加熱のおよび加熱冷却後のスライス試験片の曲げ強度結果を示す。なお、未加熱によるスライス試験片の曲げ強度の最小値を点線で示す。図より、加熱冷却後のスライス試験片の曲げ強度は、未加熱の同深部と比較して加熱面側ほど明確な低下が生じていることが確認できた。

この結果より、加熱冷却後および未加熱のコアをそれぞれ 20mm 間隔で切断し、曲げ強度を確認することによって、加熱面から深さ 80mm までは強度が低下している部分、加熱面から深さ 80~140mm は強度が停滞している部分、加熱面から深さ 140~200mm では強度低下が極めて小さい部分として判断することが可能である。

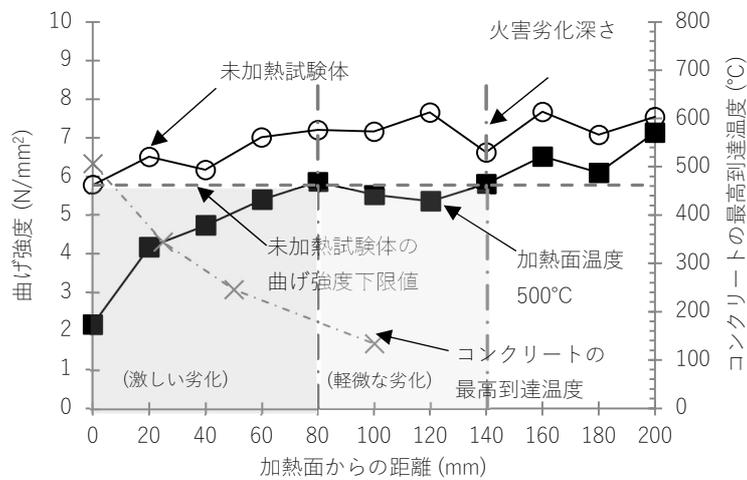


図 3.34 未加熱のおよび加熱冷却後のスライス曲げ強度の比較

以上のことから、加熱冷却後のコンクリート試験体では、火災加熱による化学的性質の変化および物理的性質の変化によるひび割れ、また、部材の熱応力によるひび割れにより、加熱面から 140mm 程度まで強度低下があることが把握できた。

3.5 まとめ

本章では、RC 造集合住宅の天井スラブにおける被災部コンクリートの強度低下および劣化深さを把握することを目的として、片側加熱を与えたコンクリートの加熱面からコアを採取して各種実験を行った。本研究において得られた知見を以下にまとめる。

(1) コアによる圧縮強度

コンクリート加熱面から採取したコアの圧縮強度残存比は、加熱面の最高到達温度が高くなる（コンクリート火災継続時間が長くなる）ほど低下し、火災加熱を受けた圧縮強度は火災継続時間が15分で約11%、30分で約25%、60分で約40%、130分で60%程度低下する。

火害調査実績から得られた圧縮強度残存比の方が火災加熱を与えたコンクリート試験体よりも1.2~1.3倍高くなる傾向を示した。これは、指針に示す圧縮強度残存比よりも高い傾向である。

(2) 小型コアによる圧縮強度

小径コアを用いて、劣化部コンクリートの深さ方向の圧縮強度を比較すると、加熱面側と内側で生じた差が明らかとなり、その差を定量的に把握することができた。加熱面側では火災継続時間が30分で約40%、60分で60%低下し、(1)の圧縮強度残存比の0.7~0.85倍である。一方、内部側の圧縮強度は、火災継続時間が60分で16%程度、130分で32%程度低下している。また、採取した小径コアの最高到達温度と圧縮強度残存比には高い相関関係が認められた。これらの結果より、火災継続時間が30分までであれば、加熱面から深さ60mm内部のコンクリートの圧縮強度は約14%程度の低下であることから、火害の程度は軽微と考えられる。一方、加熱面側から60mmまでのコンクリートの圧縮強度は、火災継続時間が15分であっても27%程度の低下が認められることから、火害の影響を受けていることがわかる。これらのことから、小径コアを用いて加熱面側（加熱面~60mmまで）と内部側（60~120mmまで）それぞれの圧縮試験を求めることにより、強度分布が把握できる。

(3) 各種スライス試験片による強度

加熱後のモルタル試験体から採取したコアを用いて、加熱面から内側に向かって連続して圧縮・曲げ・引張強度を求めることにより、加熱面から内部200mmまでの強度分布を把握した。この結果より、未加熱および加熱面温度が500°Cまたは800°Cであっても、概ね、曲げ強度は圧縮強度の1/5~1/8、引張強度は圧縮強度の1/10~1/14となる。各強度試験の難易度、データのバラツキなどをまとめると表3.10のようになる。

表 3.10 スライス試験体を用いた各強度試験の特徴

試験の種類	圧縮強度を基準とした各強度比			試験結果のバラツキ	難易度	
	未加熱	加熱面温度 500°C	加熱面温度 800°C		試験体の成形	試験方法
圧縮強度	—	—	—	○	×	×
曲げ強度	0.158 (1/6)	0.131 (1/8)	0.197 (1/5)	△	△	△
引張強度	0.100 (1/10)	0.081 (1/12)	0.073 (1/14)	×	○	○

加熱冷却後のコンクリート試験体から採取したコアにより、加熱面から内側に向かって連続して曲げ強度を測定することにより、加熱面から深さ方向に強度低下を定量的に把握した。

火災加熱を受けたコンクリート試験体では、化学的性質の変化および物理的性質の変化によるひび割れ、また、部材の熱応力によるひび割れにより、加熱面から 140mm 程度まで強度低下があることが把握できた。

本章によって、火災を受けた RC 造集合住宅のコンクリート部材が受ける受熱による各種強度の低下傾向を明らかとした。

<第3章の参考文献>

- 1) 日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法 指針・同解説，2015年2月
- 2) W.Lin, et at. Microstructures of fire-damaged concrete, ACI Mater.J., Vol.93 No.3, pp.199-205, 1996
- 3) 春畑仁一，新井真：火害を受けた建物の調査・診断に関する統計調査：日本火災学会 研究発表梗概集，pp.232-233，2018年5月
- 4) 日本工業規格：コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法，JIS A 1107，2012年
- 5) 日本工業規格：コンクリートの静弾性係数試験方法，JIS A 1149，2010年
- 6) 日本建築学会：耐火性ガイドブック，2015年3月
- 7) N, Yuzer, et at. Compressive strength-color change relation in mortars at high temperature Cem.Concr.Res., Vol.34, Ppp.1803-1807, 2004
- 8) 大内千彦，寺西浩司，立松和彦，谷川恭雄：載荷面の摩擦を軽減させたコンクリートの圧縮強度試験で得られる変形特異点に関する一考察，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.1221-1222，2010年9月
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の品質管理および維持管理のための試験方法，CTM-14 コンクリートからの小径コアの採取方法及び小径コア供試体を用いた圧縮強度試験方法(案)，2007年3月
- 10) 日本工業規格：コンクリートの圧縮強度試験方法，JIS A 1108，2018年
- 11) 日本工業規格：コンクリートの曲げ強度試験方法，JIS A 1106，2006年
- 12) 日本工業規格：コンクリートの割裂引張強度試験方法，JIS A 1113，2018年
- 13) 吉田夏樹，新大軌，木野瀬透，奥村勇馬：火災による熱を受けたコンクリートの化学的变化に関する検討，GBRC Vol.44 No.1, pp.22-28, 2019年1月

第4章

火災加熱を受けたコンクリート部材から採取したコアの圧縮応力－体積ひずみ曲線による臨界応力度を用いた火害劣化深さの推定に関する検討

4. 火災加熱を受けたコンクリート部材から採取したコアの圧縮応力－体積ひずみ曲線による臨界応力度を用いた火害劣化深さの推定に関する検討

4.1 はじめに

被災した建物の火害調査では、コンクリートの残存強度の確認するために、構造部材から採取したコンクリートコア(以下、コアと記す)の圧縮強度試験が実施される。被災した構造部材と非劣化部の構造部材から得られたそれぞれの圧縮強度を相対比較することにより、構造部材の被災状況を判断するひとつの指標としている。一方、火害調査時に確認したい指標の一つに劣化深さがある。劣化部コンクリートの適切な補修を行う場合、その劣化深さを推定することが必要となる。これは、火害調査・診断時に被災した構造部材の劣化深さを示すことにより、その構造部材の補修を行う際の補修深さを決定するひとつの指標となる。しかしながら、火害を受けたコンクリートは、その火災状況によって表面から深さ方向に強度低下の状態が変化する。すなわち、採取されたコア長手方向の劣化状態が異なり、現状において、圧縮強度試験でそれを特定することは難しい。現在、多くの研究者により火害劣化を推定するための研究が行われている。

耐火性ガイドブック¹⁾では、加熱冷却後のコンクリート供試体の圧縮強度の低下率を示している。非破壊試験を用いた火害を受けたコンクリートの劣化範囲の推定については、筆者らは、加熱面のコンクリートの色彩に注目し、その色彩を測定することにより受熱温度の範囲を推定している²⁾。内田、大野、岩野、寺澤らは火災加熱を受けたコンクリート試験体の加熱面において衝撃弾性波法を、藤原らは超音波走査法を、迫井らは表層透気法を、筆者らは色彩測定法をそれぞれ用いて、それら指標値により劣化範囲の推定を試みている^{3)~7)}。また、澤口らは、同加熱面のコア採取孔を用いて、加熱面から内部の貫入抵抗値を測定し、その指標値により火害劣化深さの推定を試みている⁸⁾。このように、近年は火害劣化範囲または深さを推定する研究が行われており、これらは、火害診断技術の精度を向上させる上で極めて重要な指標値となる。これらのことから、火災後のコンクリート構造部材の火害劣化深さを明確にすることは、火害調査の今後の展望に極めて重要な課題の一つである。

集合住宅における通常の火災においては、天井部材で一方向の加熱を受けることが多いことが、第2章の統計データにおいても既知である。また、第3章で一方向から火災加熱を受けたコンクリート部材は、コンクリート加熱面ほど強度の低下が著しく、内部になるほど強度の低下はみられなくなることを実験によって定量的に確認した。同章においては、加熱条件の大小複数のコンクリートから採取したコアを用いて作製したスライス試験片の各強度結果から、コアの長手方向の強度が、加熱面から内部に向かうほどそのコンクリートが持つ元の強度に近づくことが把握できている。しかしながら、コンクリートが受ける火害劣化によるひび割れは、部材内部にまで卓越するものも混在すること、また、スライス試験片の加工ができずに強度試験が困難な場合もある。したがって、火害劣化部から採取したコンクリートコアをスライスすることなく、より簡便に各深さの強度を把握することができれば、火害調査の評価手法に寄与すると考える。

本章では、火害劣化深さを推定することを目的として、ガス加熱炉により火災による劣化を模擬したコンクリート試験体を作製し、この試験体から採取したコアに対して圧縮強度試験を行い、試験時にコアに生じるひずみ分布から、劣化深さを推定する方法について検討した。

4.2 火災加熱を受けたコンクリートから採取したコアの圧縮試験時における多点縦ひずみ挙動に関する検討

4.2.1 はじめに

本研究では、ガス加熱炉により火災による劣化を模擬したコンクリート試験体を作製し、この試験体から採取したコアに対して圧縮強度試験を行い、コア長手方向のひずみ分布から、劣化深さを推定する方法について検討した。以下に、実験概要とコアの圧縮強度、静弾性係数および各深さの縦ひずみの結果について述べる。

4.2.2 実験概要

(1) 試験体

試験体は、図 4.1 に示すとおり、長さ 900mm、幅 900mm、厚さ 250mm の直方体を 1 体作製した。コンクリートは生コン工場で作成した呼び強度：24 を使用し作製した。なお、コンクリートを打込む前に、加熱実験中に試験体の温度を計測するため、加熱面（深さ 0mm）および内部（25、50、100mm）の深さに K 型熱電対を設置した。作製後は、室内気中養生した後、材齢 7 日で脱型し、加熱試験に供するまで屋内にて静置した。表 4.1 にコンクリートの調査、使用材料およびコンクリートの性状を示す。

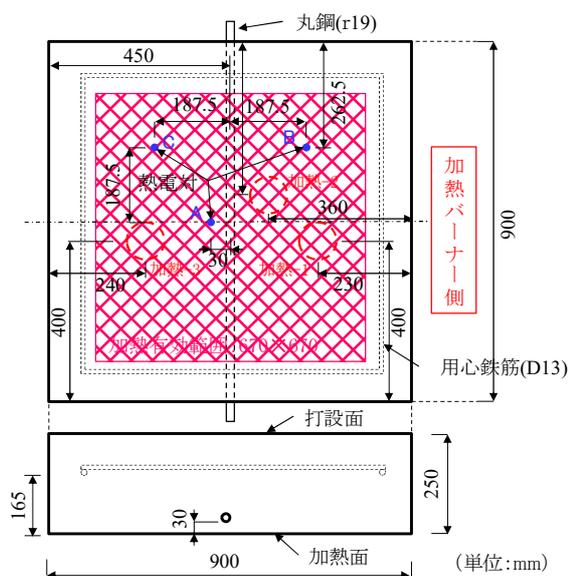


図 4.1 試験体の形状、熱電対の設置位置、コア採取位置

表 4.1 コンクリートの調合と使用材料および性状

水セメント比 W/C	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)						実測値		
		W	C	S1	S2	G	Ad	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 ^{注2)} (N/mm ²)
0.57	44.7	168	295	560	240	1023	2.95	9.0	4.1	32.4

注 1) 使用材料を以下に示す。

- W : 地下水
- C : 普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³)
- S₁ : 大分県津久見市産 砕砂(表乾密度: 2.68g/cm³、粗粒率: 2.85)
- S₂ : 京都府亀岡市産 砕砂(表乾密度: 2.60g/cm³、粗粒率: 2.85)
- G : 京都府亀岡市産 碎石(表乾密度: 2.68g/cm³、実積率: 58.0%)
- A_d : AE 減水剤 標準型 I 種

注 2) 28 日間室内気中養生した供試体の圧縮強度を示す。

(2) 加熱方法

図 4.2 に、加熱実験に使用したガス加熱炉を示す。試験体は下からの一方向加熱を模擬して、下面を加熱するように加熱炉に設置した。

加熱方法は、都市ガス(46,090kJ/m³)を熱源とし、ISO834 に規定する標準加熱曲線に沿って炉内温度を上昇させ、500°Cとなるまで加熱し、その後、コンクリートの劣化を明確にする目的で、加熱表面温度が 500°Cを 60 分間保持するようにバーナーを調節し加熱を継続した。加熱終了後は加熱炉側面の炉蓋を開放し、40°C以下になるまで試験体を静置した。炉内の温度測定は、試験体加熱面から 100mm 離して設置した 3 本の熱電対を用いた。また、加熱炉内のバーナーの前には、加熱炉内温度が均等なるように遮炎板を設置した。コンクリートの加熱面の測定には、試験体の加熱面に予め設置した熱電対を用いた。温度履歴を図 4.3 に示す。なお、もう 1 体の試験体は、加熱後の試験体と比較するため加熱を行わなかった(以下、未加熱試験体と記す)。なお、加熱時の材齢は 184 日である。

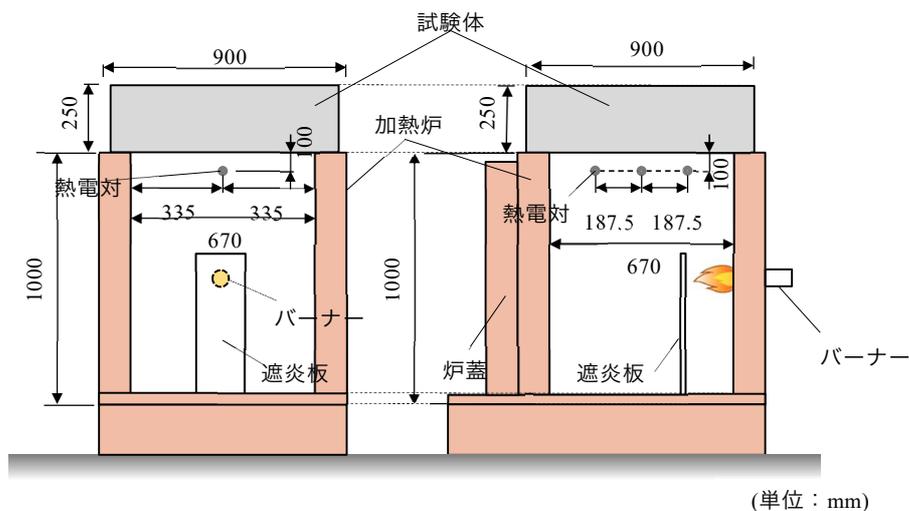


図 4.2 加熱実験装置

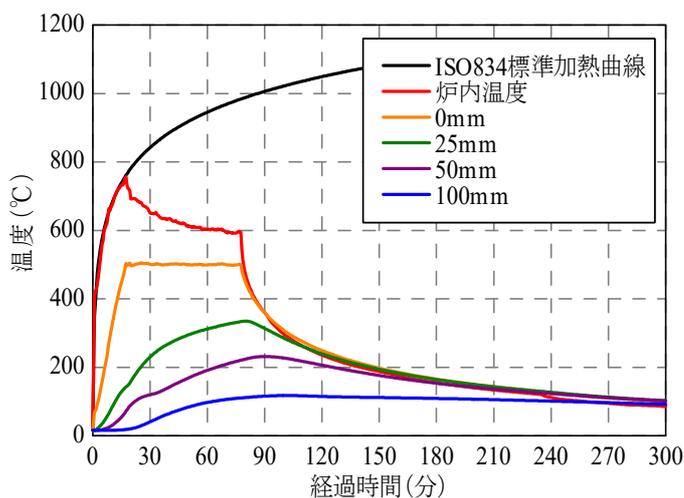


図 4.3 加熱温度と加熱時間との関係

(3) コンクリートコアの採取方法および圧縮試験方法

加熱後の試験体から直径 93mm のコアを 3 本採取した。コアの採取位置は、図 4.1 に示す 3 箇所とした。

圧縮強度試験は JIS A 1107:2012⁹⁾、静弾性係数は JIS A 1149:2017¹⁰⁾により実施した。また、検長 20mm のひずみゲージをコアの軸に平行かつ対称な二つの線上で、図 4.4 に示す 9 箇所の位置に計 18 枚貼付して、コアの加熱面から深さ方向の縦ひずみをそれぞれ測定した。なお、圧縮試験時の材齢は 255 日である。加えて、比較のため試験体作製時に併せて作製した円柱供試体（未加熱）についても試験体から採取したコアと同日に同様の試験を行った。

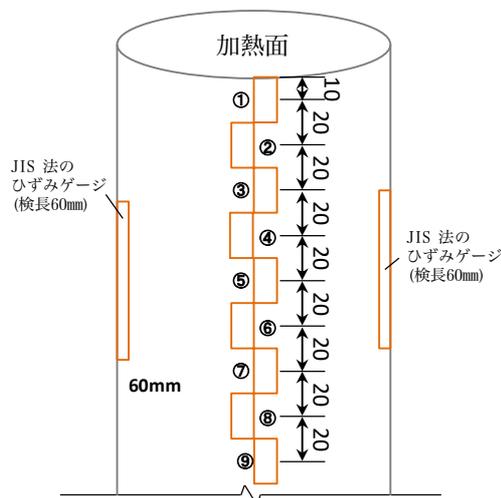


図 4.4 ひずみゲージ貼付位置



写真 4.1 コアの採取状況

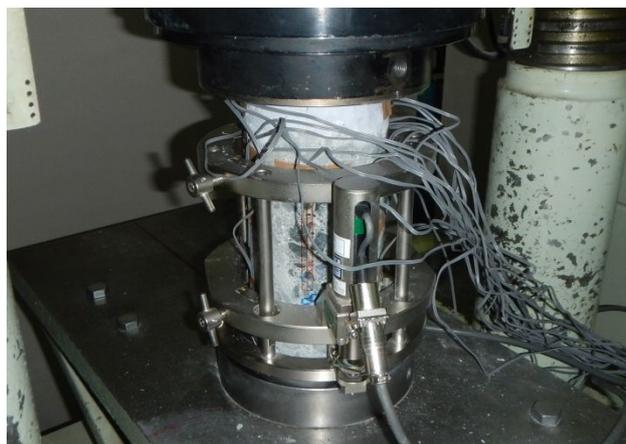


写真 4.2 圧縮試験状況

4.2.3 実験結果

(1) 採取したコアの圧縮強度および静弾性係数

表 4.2 に圧縮強度試験および静弾性係数試験の結果を示す。採取したコアは、未加熱の供試体と比べて圧縮強度および静弾性係数がともに約 3 割低下した。これは、これまでの実験結果¹¹⁾と同様の傾向を示した。

表 4.2 コアの各試験結果

試験体記号	圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)	
		平均値		平均値
加熱-1	22.9	23.7	17.7	20.1
加熱-2	24.9		22.1	
加熱-3	23.4		20.5	
未加熱-1	34.8	34.8	28.9	29.1
未加熱-2	35.2		28.0	
未加熱-3	34.4		30.5	

(2) 1/3 圧縮強度時における加熱面から各深さの縦ひずみ分布

図 4.5 に、最大荷重の 1/3 時の縦ひずみと加熱面表面からの距離の関係を示す。なお、ひずみの極性は、圧縮域を「+」、引張域を「-」とした。表 4.2 の静弾性係数を算出した縦ひずみは、図 4.5 の加熱-1(JIS)～加熱-3(JIS)に示す位置である。同図をみると、採取したコアの縦ひずみは、全体的に表面に近づくほど大きくなり、表面から 10mm の測定位置で最大となっていることから、加熱面ほど、静弾性係数は小さく、従来の火害調査で求める静弾性係数は、採取した構造部材の物性値を正しく求められていないことが推測される。一方、未加熱の供試体の縦ひずみは、表面に近づくほど小さくなっている。

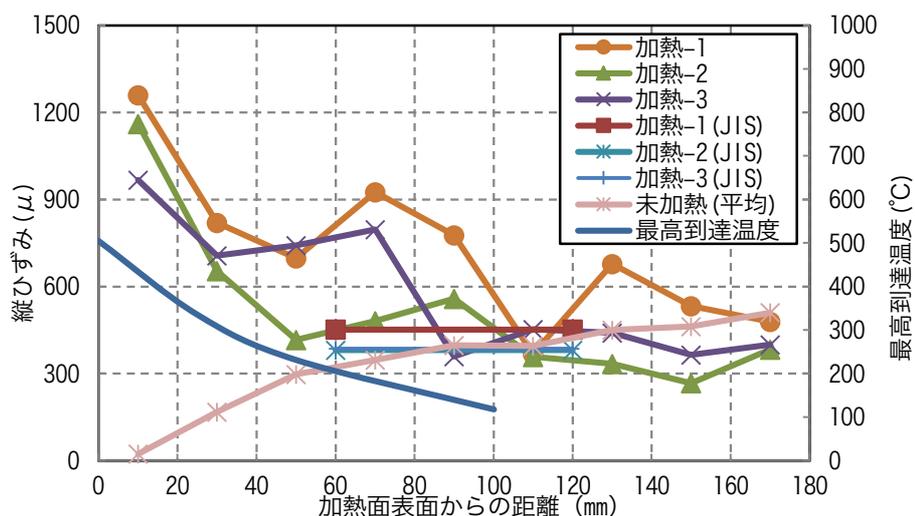


図 4.5 最大荷重の 1/3 時の縦ひずみと加熱面表面からの距離の関係

(3) 圧縮応力と各深さの多点縦ひずみとの関係

図 4.6 は、加熱コア（試験体記号：加熱-1～加熱-3）と未加熱供試体（試験体記号：未加熱-1～未加熱-3）の圧縮応力と各深さの縦ひずみとの関係について、ひずみゲージの貼付位置毎に比較した結果である。図内(a)～(j)の凡例は代表して(a)に示す。加熱コアおよび未加熱供試体の型枠面（加熱コア：加熱面、未加熱供試体：底面）は、上向きにして圧縮試験を実施した。なお、ひずみの極性は、圧縮域を「+」、引張域を「-」とした。

同図(a)より、JIS A 1149：2017（以下、JIS 法と記す）によって測定した最大応力時の縦ひずみは、加熱コアおよび未加熱供試体ともに 1800×10^{-6} 程度であった。同図 (b)～(h)に示す貼付位置①～⑦（加熱面から 10～130mm）までの最大荷重時の縦ひずみは、加熱面に近いほど大きくなり未加熱供試体とのグラフの傾きに相違が大きい。

図 4.7 は、図 4.6 を圧縮応力 $\sigma_c = 0 \sim 12 \text{ N/mm}^2$ の範囲で拡大したものである。図内(a)～(j)の凡例は代表して(a)に示す。

図 4.7 (b)～(f)では、加熱コアは未加熱供試体と比較して、圧縮試験の開始直後から縦ひずみの増大が顕著で、圧縮応力-縦ひずみ曲線は下に凸の曲線となった。この結果は、構造部材の耐火性ガイドブック¹⁾に示される加熱冷却後の応力-ひずみ曲線と同様の傾向を示した。また、この現象を図 4.6(a)と比較すると、JIS 法の加熱コアにおける圧縮応力-縦ひずみ曲線よりも勾配の変化が大きい。これは、加熱面から深さ方向に生じたセメントペースト内のひび割れ、またはセメントペーストと骨材の間の緩みにより生じた微細な空隙が、試験開始直後の圧縮力により潰されたために発生したと考えられる。

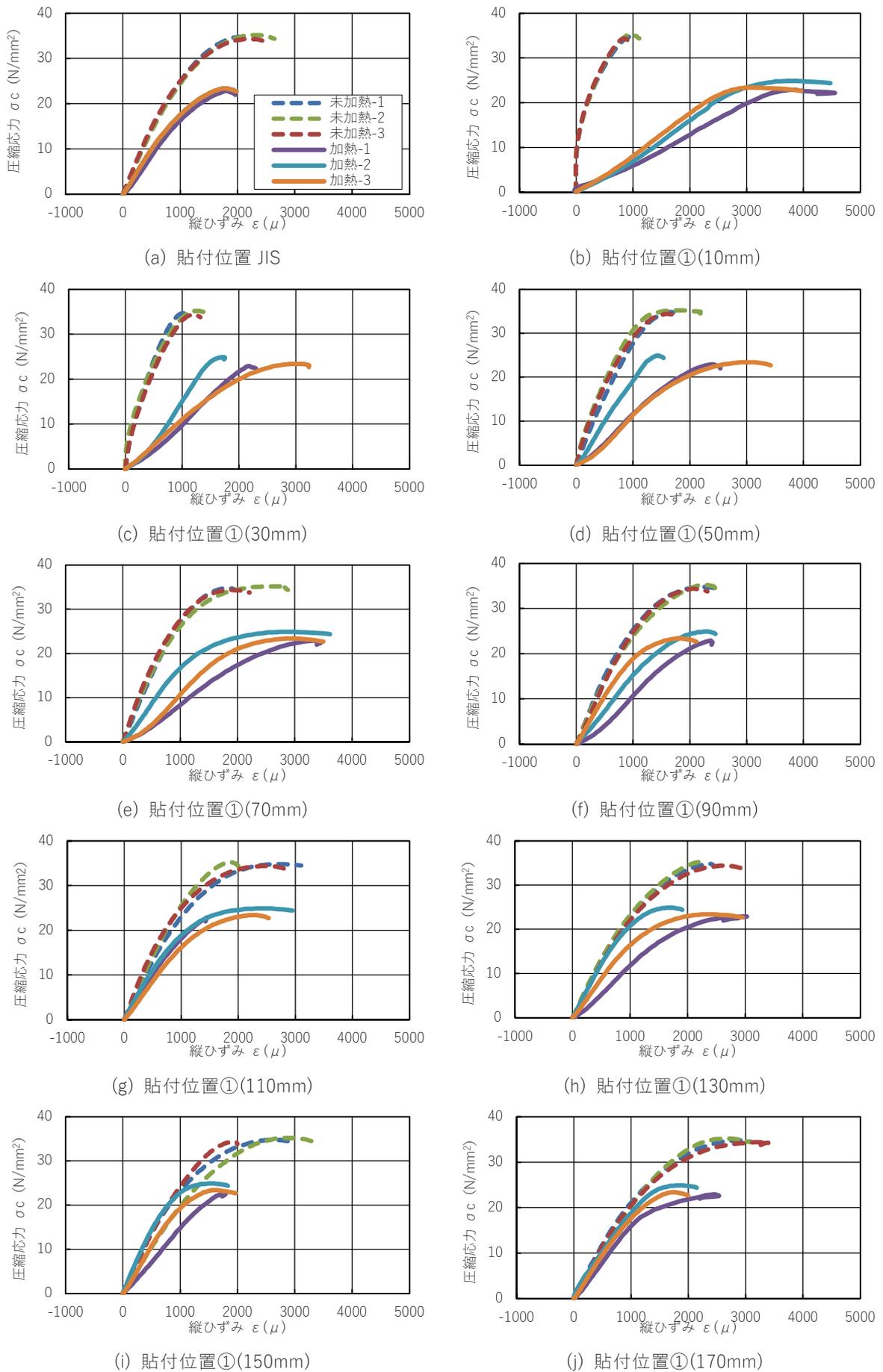
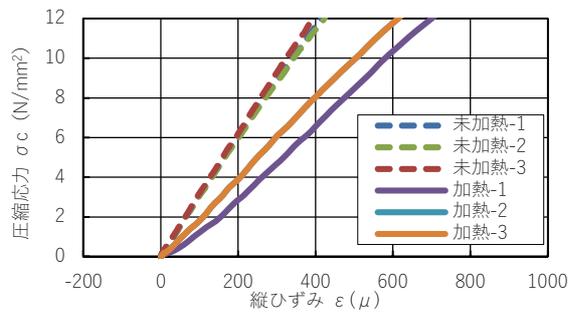
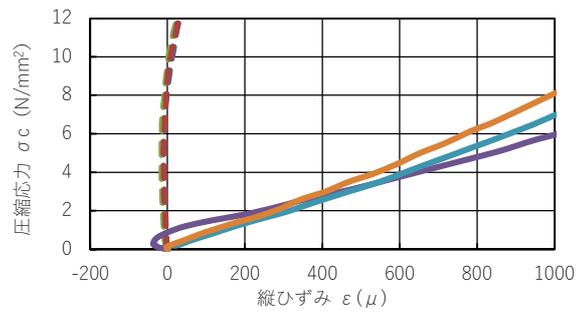


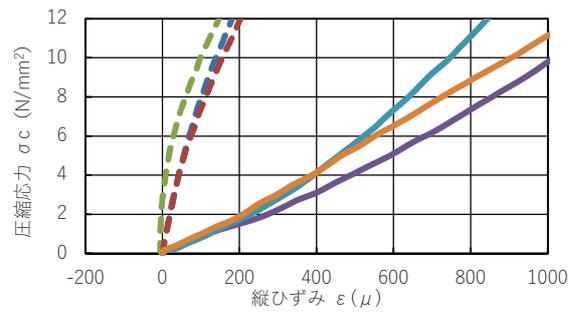
図 4.6 圧縮応力と各測定位置の縦ひずみの関係【圧縮試験終了時まで】



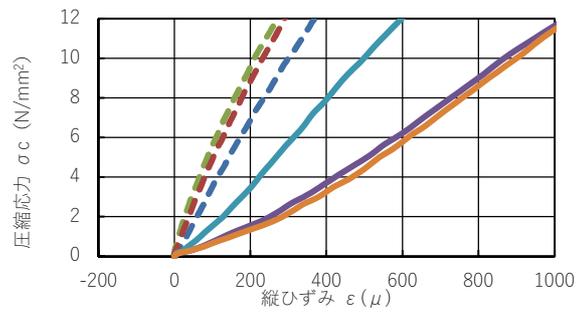
(a) 貼付位置 JIS



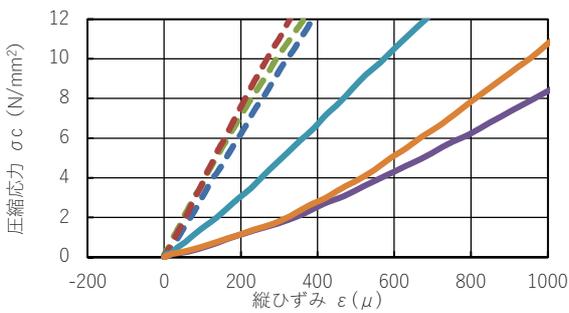
(b) 貼付位置①(10mm)



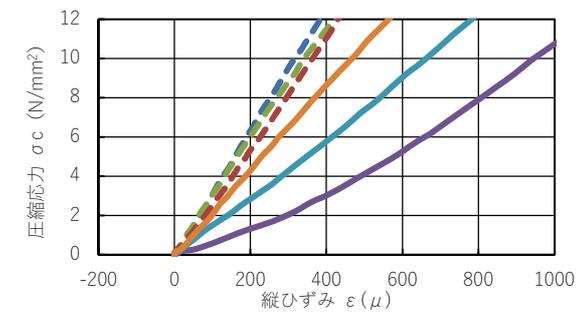
(c) 貼付位置②(30mm)



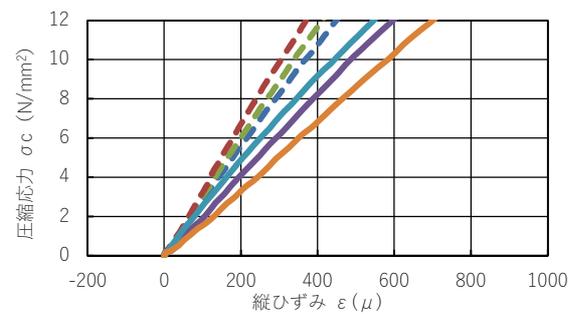
(d) 貼付位置③(50mm)



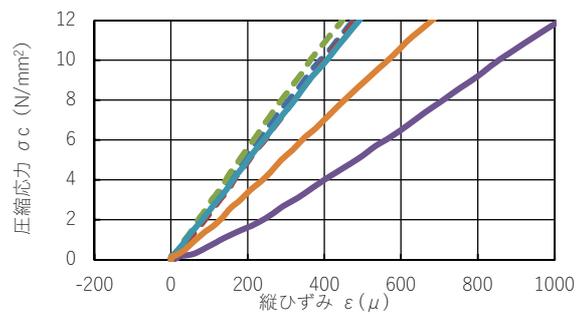
(e) 貼付位置④(70mm)



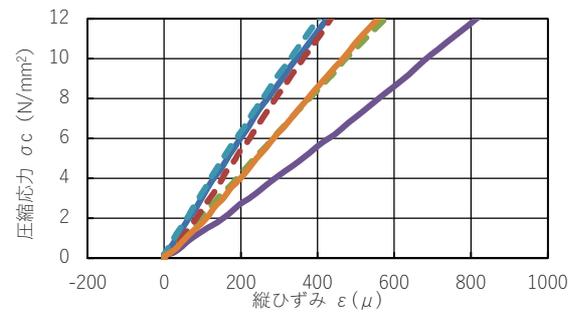
(f) 貼付位置⑤(90mm)



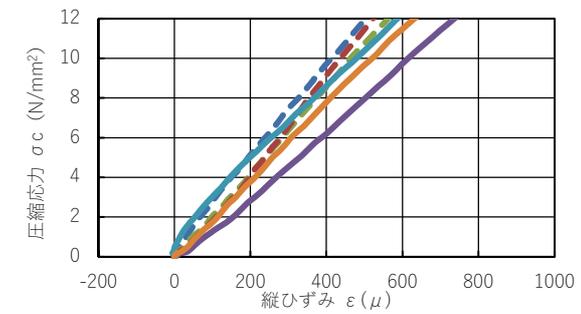
(g) 貼付位置⑥(110mm)



(h) 貼付位置⑦(130mm)



(i) 貼付位置⑧(150mm)



(j) 貼付位置⑨(170mm)

図 4.7 圧縮応力と各測定位置の縦ひずみの関係【圧縮応力 $\sigma_c=12\text{N/mm}^2$ まで】

(4) 圧縮応力比毎の各深さの多点縦ひずみの分布

図 4.8 に、圧縮応力比毎の各深さの縦ひずみの分布を示す。図内(a)～(f)の凡例は最大応力を基準としたときの圧縮応力比であり、代表して(a)に示す。なお、ひずみの極性は、圧縮域を「+」、引張域を「-」とした。

図 4.8 より、加熱コアが圧縮強度に到達した際の縦ひずみは、上部載荷面から 10mm の深さで最大となった。一方、未加熱供試体における最大応力時の縦ひずみは 150mm または 170mm の深さで最大となった。火害コアでは加熱面側を上部載荷面側に設置し試験を実施したことにより上部載荷面側のひずみが最大を示した。これに対して未加熱供試体では、火害コアと圧縮試験条件を合わせるため打込み面を下部載荷面側に向けて載荷したことにより、円柱供試体の打込み面と型枠面で若干の密度差が生じ、縦ひずみの増加として示されたものである。

圧縮試験時には、試験機と試験体の弾性係数の違いによって、両者の載荷面の間に摩擦拘束が生じることが知られている¹²⁾。例えば、本実験結果では図 4.7(b)の加熱-1 および未加熱-1～未加熱-3 に示されるように、初期の圧縮応力時においては縦ひずみが引張方向に発生していたことや、図 4.8(d)～(f)に示されるように下部載荷面より上部載荷面側の縦ひずみが小さかったことについては、コアや円柱供試体内の密度の違いとともに、摩擦拘束の影響が生じていたと推測される。しかしながら、本結果については、載荷面と加熱コアの加熱面において摩擦拘束が生じる位置であっても、それ以上に、加熱面近傍の火害による縦ひずみの増加が大きかった。なお、友澤、野口らの研究¹³⁾では、圧縮試験機の加圧面と試験体端面との間の摩擦拘束をテフロンシートなどによって低減した場合、強度レベルに関わらず試験体の直径と高さの比の影響を受けないことが示されている。

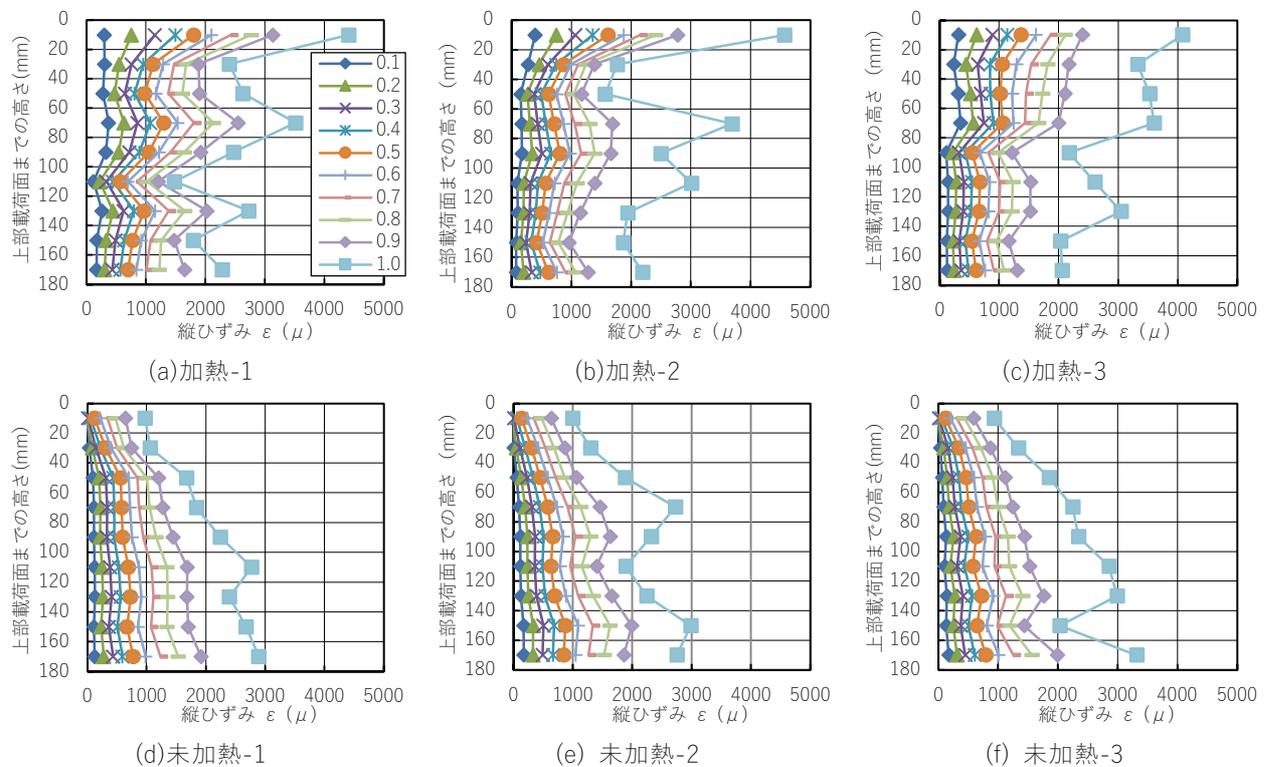


図 4.8 圧縮応力比毎の各深さの縦ひずみ

4.2.4 まとめ

本実験では、加熱コアと未加熱供試体のそれぞれの圧縮応力と縦ひずみの関係について比較した。得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリートの表面温度が、500°Cの温度を受けると、圧縮強度および静弾性係数は低下することを改めて確認した。
- (2) 火害を受けたコンクリートから採取したコアの圧縮試験における最大荷重時の各深さの縦ひずみは、加熱面に近づくほど大きくなる。
- (3) に示す縦ひずみの増大は、圧縮試験の開始直後に顕著にみられた。
- (4) 圧縮強度試験の際、加圧面の端部拘束が生じる箇所であっても、火害を受けた位置（加圧面近傍）における縦ひずみの増加が大きい。
- (5) 圧縮試験時に縦ひずみを表面から深さ方向に連続して測定することにより、火災を受けたことによる劣化深さを推定できる可能性が示唆された。

以上のことから、採取したコアの加熱面から長手方向の各深さに貼付したひずみゲージによって、圧縮応力-縦ひずみ曲線の測定することにより、火害劣化深さを推定できることを示唆した。

しかしながら、本実験から圧縮試験時に試験機上下載荷面とコアまたは円柱供試体の端面と間で生じる摩擦拘束の影響ならびに縦ひずみのばらつきに作用していると考えられる粗骨材の影響について、コアの軸方向における多点縦ひずみの測定結果に与える影響に対して検討する必要がある。これらについては次節の実験で明らかとする。

4.3 一軸圧縮を受けるコンクリートの力学的性質に基づいた火災加熱を受けたコンクリートから採取したコアの圧縮、変形特性に関する検討

4.3.1 はじめに

4.2 節では、圧縮強度試験時にコア軸方向の多点縦ひずみの分布を測定することで、火災加熱を受けたコンクリートの劣化深さを推定する方法について検討した。そこで得られた縦ひずみの分布は、概ね加熱面に近づくほど大きくなり火害による劣化深さとの相関関係が認められたが、いまだ劣化深さを特定するまでには至っていない。また、圧縮試験時に試験機上下載荷面とコア（または円柱供試体）の端面と間で生じる摩擦拘束の影響や、縦ひずみのばらつきに作用していると考えられる粗骨材の影響など、新たな課題に直面した。

そこで本節では、圧縮強度試験時のコンクリートの圧縮崩壊過程に基づき、火災加熱を受けたコンクリートから採取したコアの圧縮、変形過程を検討して、圧縮破壊メカニズムを示すことを目的として、同コアの圧縮試験時に生じる各深さの縦ひずみと横ひずみから体積ひずみを測定する方法により、圧縮応力と多点体積ひずみの変形特異点から得られる臨界応力度を一つの指標値とすることを検討した。また、前節で課題となった以下の2点についても同時に検討した。

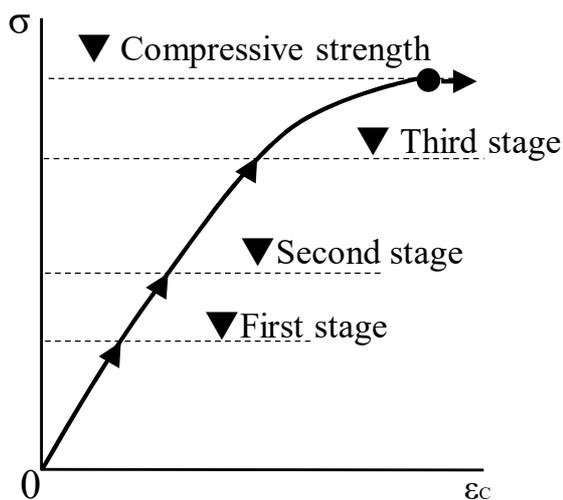
- ① 多点縦ひずみのばらつきに作用したと考えられる粗骨材の影響
- ② 圧縮強度試験時に試験機加圧板とコアの上下端部に生じる摩擦拘束の影響

粗骨材の影響については、3.3 節の試験体から採取したコアを用いて、縦ひずみを測定し、4.2.3 とうと比較した。

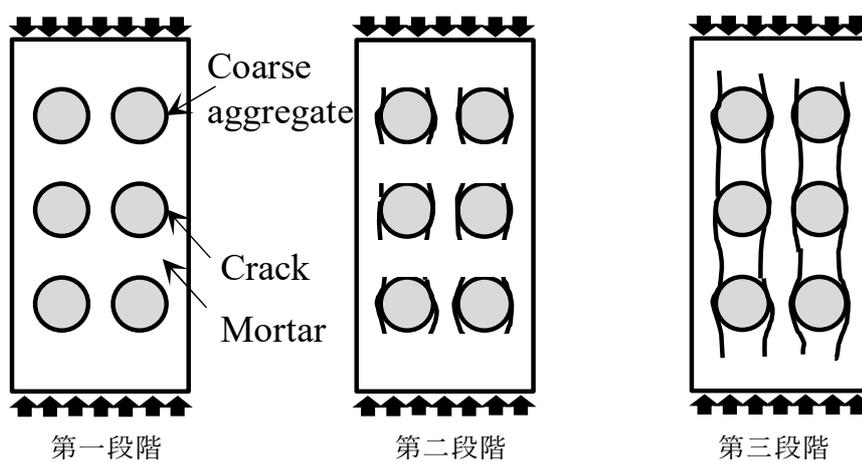
試験機加圧板とコアの上下端部に生じる摩擦拘束（以下、端面摩擦と記す）の影響については、上下加圧面の摩擦に対して減摩材を用いて低減した場合としていない場合の圧縮強度試験を実施し検討した。

4.3.2 コンクリートの圧縮破壊過程

図 4.9 にコンクリートの圧縮破壊過程を示す¹⁴⁾。一般に、圧縮強度試験時における載荷荷重の増大に伴うコンクリートの破壊過程は次のようになる。最大応力の 1/3 程度の応力になる第 1 段階では、粗骨材とモルタル間の付着が損なわれて微細なひび割れが生じ、静弾性係数がわずかに低下する。最大応力のおよそ 1/2 の応力になる第 2 段階では、粗骨材の周辺で生じた局部的なひび割れがモルタル中に進展する。最大荷重のおよそ 80% の応力を超える第 3 段階では、ひび割れが互いに連結して大きなひび割れが形成し始める。



(a) 荷重段階



(b) 破壊の進展

図 4.9 コンクリートの圧縮崩壊過程¹³⁾

4.3.3 コンクリートの圧縮強度試験時における端面摩擦の影響

図 4.10 に、圧縮試験機の端面摩擦の違いによる円柱供試体の破壊域を示す¹⁴⁾。通常の圧縮強度試験では、圧縮試験機の加圧板と円柱供試体間に端面摩擦が生じて図 4.10 a) のように加圧板付近のコンクリートは三軸圧縮状態となり、端面摩擦が小さい場合と比較して破壊域は円柱供試体端部から離れる方向へ移動する。この現象により破壊パターンは、多くのひび割れが縦方向に生じる圧壊割裂型ではなく、せん断破壊型になりやすい。一方、図 4.10 b) のように圧縮試験機加圧板と円柱供試体端部間にテフロンシートなどの減摩材を挿入することによって端面摩擦を減じることにより、1 軸圧縮载荷した時の円柱供試体の破壊域は最も脆弱な部分で破壊する。

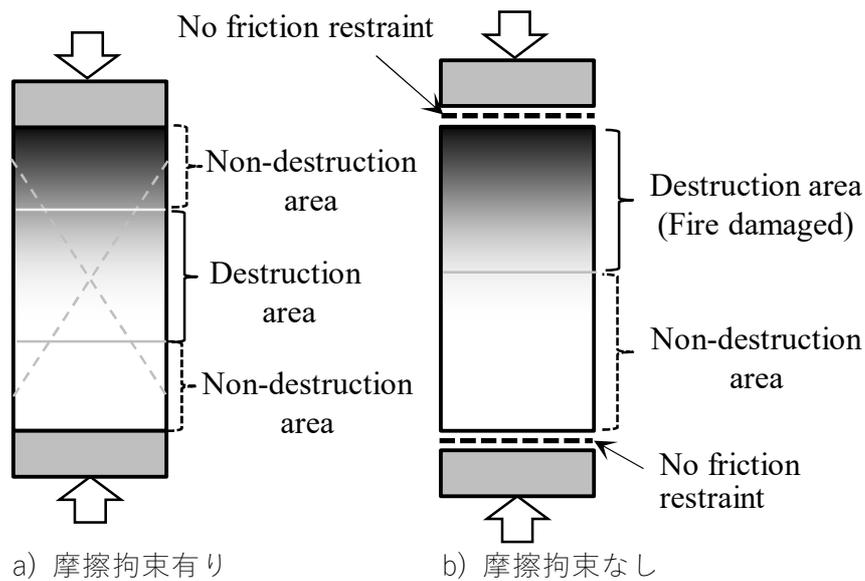
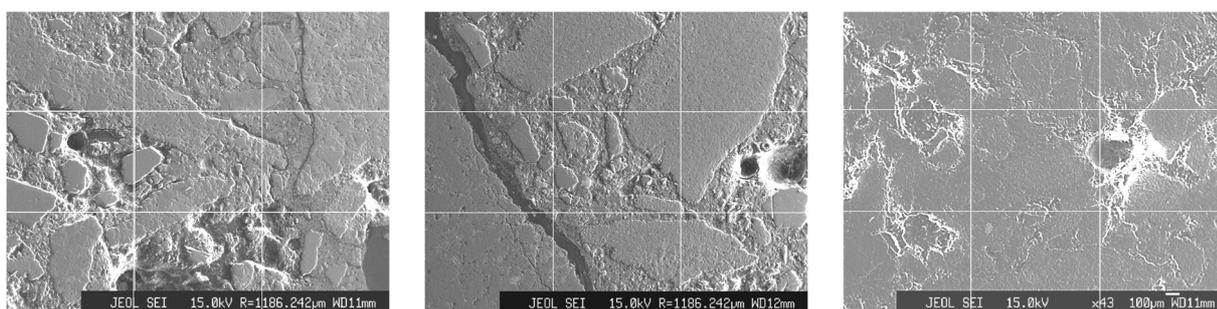


図 4.10 圧縮試験の上下加圧板による摩擦拘束の有無におけるコアの崩壊領域¹⁴⁾

4.3.4 加熱火災を受けたコンクリート内のひび割れ

火災を受けたコンクリートの強度が低下する理由の一つには、加熱面が高温に曝されることにより発生するひび割れにある。そのひび割れは、セメントペーストの収縮と骨材の膨張挙動から高温になるほど成長し、コンクリート内部に進展する。写真 4.3 は、後述する本実験において、使用した加熱冷却後のコンクリート内の劣化状態を深さ方向に顕微鏡撮影した写真である。

火災加熱を受けたコンクリート内に生じるひび割れは、加熱面が最多で、加熱面から離れるほど少ない。その劣化が発生する深さは、火災時のコンクリート表面が受ける温度や火災継続時間に依存する。また、これのひび割れ以外にも、加熱中のコンクリートの加熱面と内部の温度差により温度ひび割れが生じる。



a) 加熱面からの深さ：5mm b) 加熱面からの深さ：25mm c) 加熱面からの深さ：100mm

写真 4.3 加熱冷却後のコンクリート内の状態

4.3.5 火災加熱を受けたコンクリートから採取したコアの圧縮破壊過程

火災加熱を受けたコンクリート加熱面から採取したコアを圧縮強度試験に供した場合、高温に曝された加熱面から破壊が生じると考えられる。

しかしながら、圧縮試験機の機構上、加圧中のコアには、図 4.10 a) のように圧縮試験機加圧板の端面摩擦によりコア両端が拘束された状態となり、劣化部を含んだコア全域にわたるせん断破壊を示すことから、採取されたコアに有する劣化部からの破壊過程を辿るか不明である。この現象を換言すれば、コア両端の端面摩擦を低減した状態で圧縮強度試験を行うことにより、コアの破壊パターンを多くのひび割れがコアの深さ（軸）方向に生じる圧壊割裂型として、コアの端部の劣化部に内在するひび割れが先行し破壊する過程を辿ると推測される。

4.3.6 圧縮強度試験時におけるコンクリートの変形特異点と臨界応力度

図 4.11 に、コンクリートの圧縮強度試験における圧縮応力と縦ひずみ、横ひずみ、体積ひずみおよび臨界応力度の関係を示す。なお、体積ひずみは縦ひずみと横ひずみを用いて式(1)により算出した。図 4.11 に示す臨界応力度は、コンクリートの体積が膨張に転じた時点の変形特異点であり、図 4.9 a) 中の第 3 段階の応力レベルを示し、クリープ限界応力や端面摩擦を減じた圧縮強度試験で得られる最大荷重にほぼ相当することが知られている¹⁴⁾。

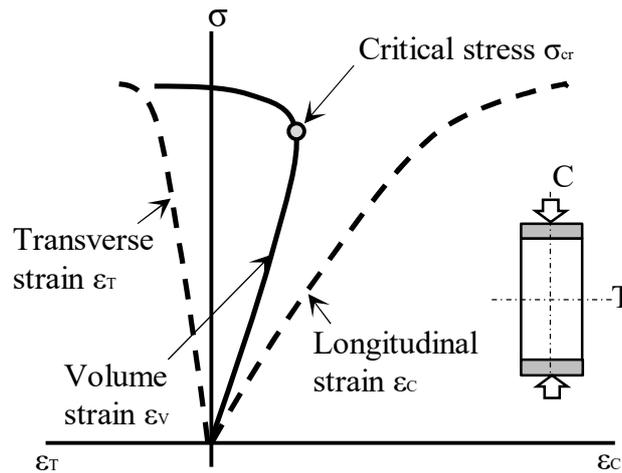


図 4.11 体積ひずみ曲線と臨界応力度

$$\varepsilon_V = \varepsilon_C - 2\varepsilon_T \quad (1)$$

ここに、

ε_V : 体積ひずみ、 ε_C : 縦ひずみ、 ε_T : 横ひずみ

4.3.7 火災加熱を受けたコンクリートから採取したコアの臨界応力度

4.2 節の実験に用いた火災加熱を受けたコンクリートから採取したコアの圧縮強度試験について、前項までの物理現象を勘案して考える。

火災加熱を受けたコンクリートは、火災時の熱により細骨材および粗骨材とセメントとの界面または骨材自体、さらにはセメントペースト間に生じたひび割れが内在し加熱面側の劣化が激しく内部に向かうほどその程度は小さく、そこから採取されたコアも同様である。

ここで、図 4.11 に示す体積ひずみは、圧縮試験時に発生したひび割れが成長することでコアが収縮から膨張に転じる挙動を示すものである。火災加熱を受けたコンクリートから採取したコアは、加熱面から内部に火害劣化により発生したひび割れを有していることから、加熱面近傍では、圧縮試験時に生じる体積ひずみは载荷初期の段階からひび割れが成長することで膨張挙動を示し、さらに内部（コアの軸方向）に向う過程で徐々にそれらのひび割れが成長し収縮から膨張に転じていくことが予測される。したがって、コアに内在する火害劣化は、加熱面から深さ方向に多点の体積ひずみを計測することでその深さを推定することが可能になると推測する。また、体積ひずみを計測することにより収縮から膨張に転じる点（変形特異点）の応力度（臨界応力度）を求めることによって、火害劣化部の圧縮応力も同時に推測することが可能になる。

この推測した現象を次項の実験で確認する。また併せて、4.2 節の実験で得られた課題である、①多点縦ひずみのばらつきに作用したと考えられる粗骨材の影響、②圧縮強度試験時に試験機加压板とコアの上下端部に生じる摩擦拘束の影響についても併せて確認する。

4.4 火災加熱を受けたモルタルから採取したコアの圧縮応力－体積ひずみ曲線による臨界応力度に関する検討

4.4.1 実験概要

(1) 試験体

試験体は、図1に示すとおり、長さ650mm、幅650mm、厚さ250mmの直方体を3体作製した。モルタルの使用材料を表1に、調合を表2にそれぞれ示す。試験体は室内気中養生した後、材齢7日で脱型し、加熱試験に供するまで屋内にて静置した。また、加熱実験時にコンクリート加熱面および内部の温度を測定するために、図1に示すAとBの2箇所に、加熱する表面から0, 25, 50, 75, 100, 125mmの位置にK熱電対をそれぞれ設置した。なお、この試験体は3.3.1項(1)と同一である。

(2) 加熱方法

試験体の加熱はガス加熱炉を使用した。試験体は、天井スラブの加熱を想定し、試験体の長さ650mm、幅650mmの型枠面が炉内に接するように設置した。加熱試験に供する試験体は計2体である。加熱方法は、ガスバーナー（都市ガスを熱源）によりISO834に規定する標準加熱曲線に沿って炉内温度を上昇させ、図3.3.1に示すAおよびBの加熱表面にある2本の熱電対でそれぞれ測定した温度の平均値が500°Cおよび800°Cとなるまで各試験体を加熱した（以下、加熱温度と記す）。加熱終了後、加熱炉側面の炉蓋を開放し、加熱面の温度が室温になるまで加熱炉上に静置した。なお、加熱時の試験体材齢は、500°Cの試験体で99日、800°Cの試験体で104日である。

(3) 加熱コアの採取方法および圧縮試験方法

圧縮試験に供するコアは、加熱面温度500°Cおよび800°C、また加熱を行わなかった未加熱（以下、未加熱と記す）それぞれの試験体から直径100mmとして6本採取した。

圧縮強度試験は、写真4.4に示すように、JIS A 1107:2012⁹⁾、静弾性係数の測定はJIS A 1149:2017¹⁰⁾により行った。その際、各深さの縦ひずみおよび横ひずみを測定した。ひずみゲージは、図4.4と同様の貼付位置に加えて、横ひずみ測定用の検長30mmのひずみゲージを、コアの上下両端部および中央部において縦ひずみ計測位置から円周方向に90度回転させた軸方向で対象となる二つの線上に直交する位置に貼付した。なお、採取した各種類のコア6本のうち3本は、コア上下端部と試験機加圧板との間に減摩材（厚さ0.5mmのテフロンシート2枚とグリス）を介して摩擦拘束を低減した状態で圧縮強度試験を実施した。



写真 4.4 ひずみゲージ貼付位置と圧縮強度試験

4.4.2 実験結果

(1) 採取したコアの圧縮強度および静弾性係数

各試験結果を表 4.3 に示す。表より、各加熱温度と未加熱とを比較すると、減摩材の有無に関わらず圧縮強度および静弾性係数はそれぞれ低下した。減摩材の有無を比較すると、減摩材がある方の圧縮強度は無い場合と比較して約 20%低下した。一方、静弾性係数は、未加熱または加熱面温度 500°Cでは減摩材の有無で著しい低下はみられなかったが、加熱面温度 800°Cの場合では減摩材が無い方が低下した。これは、通常の圧縮強度試験ではコアの軸方向中央付近で圧縮破壊に至るところ、摩擦拘束を減じたことにより、最も劣化している加熱面側の破壊が進行し、静弾性係数を測定するために貼付していたコア軸方向の中央のひずみゲージの位置に破壊が生じていないことが一つの要因であると考えられる。

表 4.3 モルタルコアの圧縮強度および静弾性係数試験結果

加熱温度	圧縮強度* (N/mm ²)		静弾性係数* (kN/mm ²)	
	減摩材 無し	減摩材 有り	減摩材 無し	減摩材 有り
未加熱	35.4	29.7**	19.0	18.3**
500°C	31.5	24.6	18.2	17.3
800°C	22.6	17.8	10.3	13.7

注) *: 3本の平均値を示す。

** : 3本中2本が载荷中にすべりだし最大荷重まで载荷することができなかったため、1本のデータを示す。

(2) 採取したコアの加熱面から内部の多点縦ひずみ分布

図 4.12 に、未加熱および各加熱温度の最大荷重 1/3 時の縦ひずみと加熱面表面からの距離の関係を示す。図に示した試験体記号は、加熱温度-減摩材の有無(N:無、T:有)-コア番号を付した。なお、ひずみの極性は、圧縮域を「+」、引張域を「-」とした。

未加熱の縦ひずみは、表面に近づくほど小さくなり、各深さの差が小さかった。一方、加熱

温度 500°Cにおいても、加熱面ほど縦ひずみが大きくなる傾向は認められず、加熱温度 800°C では、個体差のバラツキは若干見られるが概ね表面に近づくほど大きくなった。また、各深さの縦ひずみの差は、未加熱と比較すると両加熱温度ともに大きくなり、図 4.5 のコンクリートと同様に、加熱面表面から 70mm と 90mm においてひずみが増加した現象がみられた。なお、友澤、野口らの研究¹³⁾によれば、摩擦拘束を低減した状態では供試体の細長比の影響を受けないことが明らかにされている。本結果においても摩擦拘束の有無による縦ひずみ挙動の変化はみられなかった。この現象から、セメントペースト間で生じる微細なひび割れが一つの要因であることが推測される。

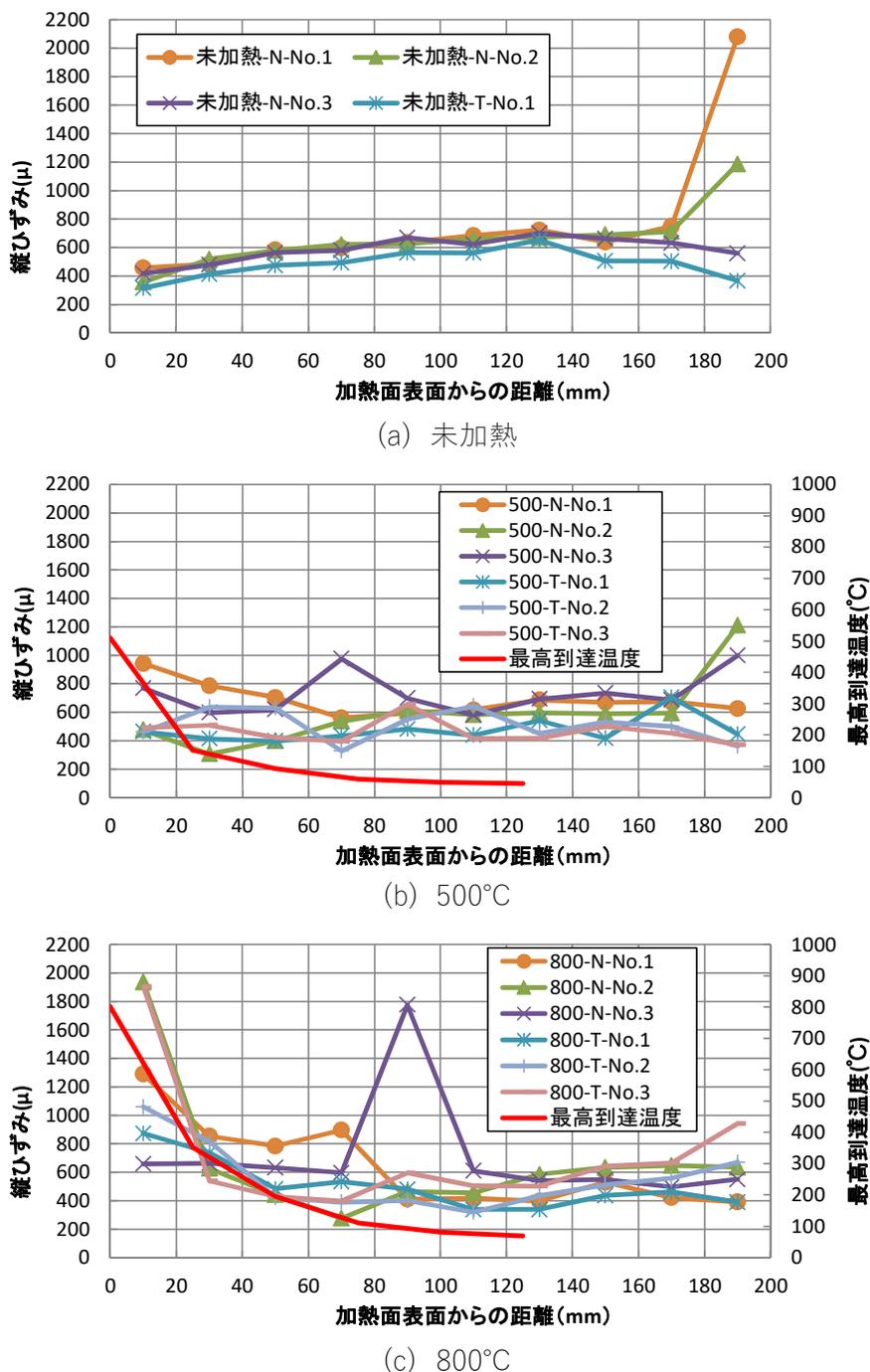


図 4.12 最大荷重の 1/3 時の縦ひずみと加熱面表面からの距離の関係

(3) 採取したコアの摩擦拘束の影響および体積ひずみ

端面摩擦を低減しない状態（以下、減摩材なしと記す。また、端面摩擦を低減した状態を減摩材ありと記す）における一軸圧縮を受けるコンクリート供試体の破壊過程は、供試体上下端部と試験機加圧板との間に摩擦が生じ、横方向への膨らみが拘束される。このような摩擦力（せん断力）の横拘束効果は、供試体上下端面から離れるにしたがって減少する。高さ直径の比が2倍の円柱供試体では、両端に破壊されない円錐状の部分が存在し、中央部のごくわずかな部分だけが一軸圧縮状態下で破壊することになる。

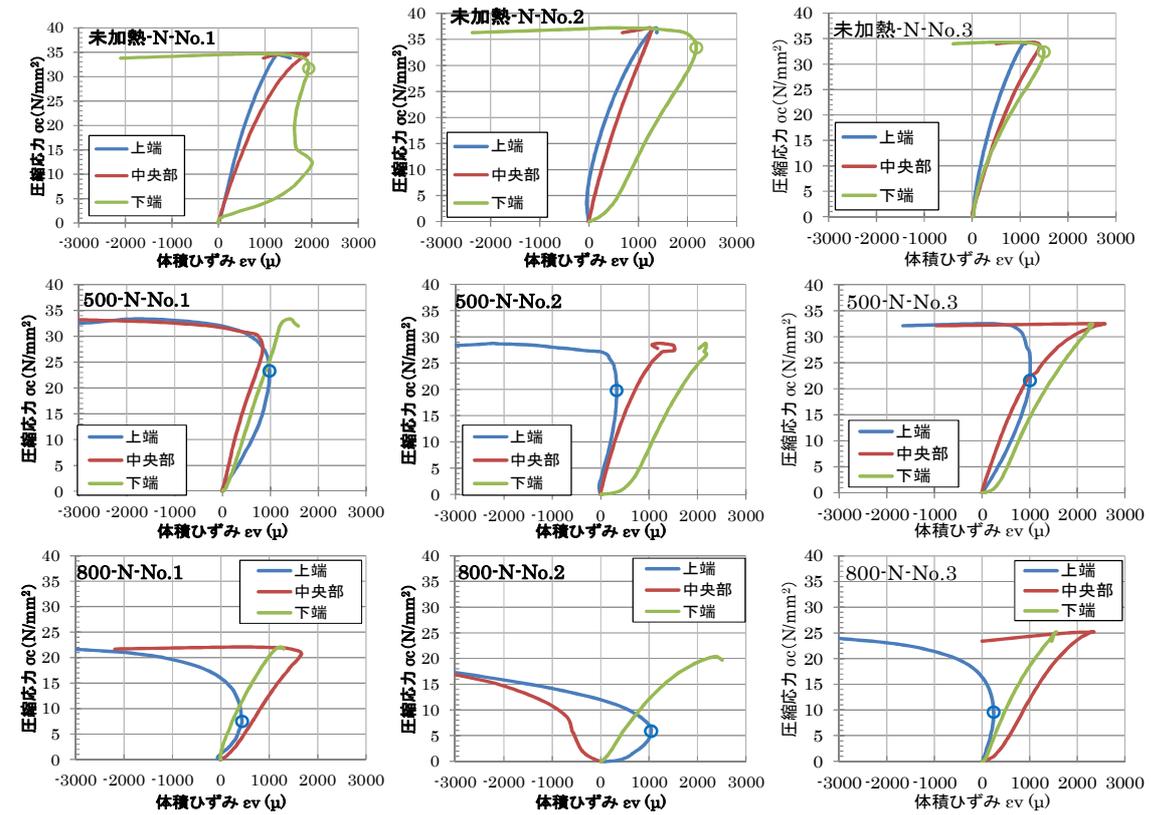
図4.13に、未加熱および各加熱温度の圧縮応力と体積ひずみの関係を示す。なお、体積ひずみの極性は収縮域を「+」、膨張域を「-」とした。未加熱のコアにおいて、減摩材なしは、圧縮強度の直前に臨界応力度（図4.13の○印で、圧縮試験時の最初の到達点を示す）に達した。一方、減摩材ありの臨界応力度は、減摩材なしと比較して約16%低下した。なお、減摩材ありのコアの3体中2体は、圧縮試験を開始してから、コアが試験機加圧板から滑り始め、載荷を継続することが難しくなったため、圧縮強度に達する前に試験を終了した。加熱温度500°Cのコアでは、減摩材ありの臨界応力度は15~20N/mm²となり、減摩材なしより約20%低下した。加熱温度800°Cのコアでは、臨界応力度は500°Cと比較して、減摩材なしで5~10N/mm²、減摩材ありでは、減摩材なしの半分程度であった。

(4) 臨界応力度の到達位置

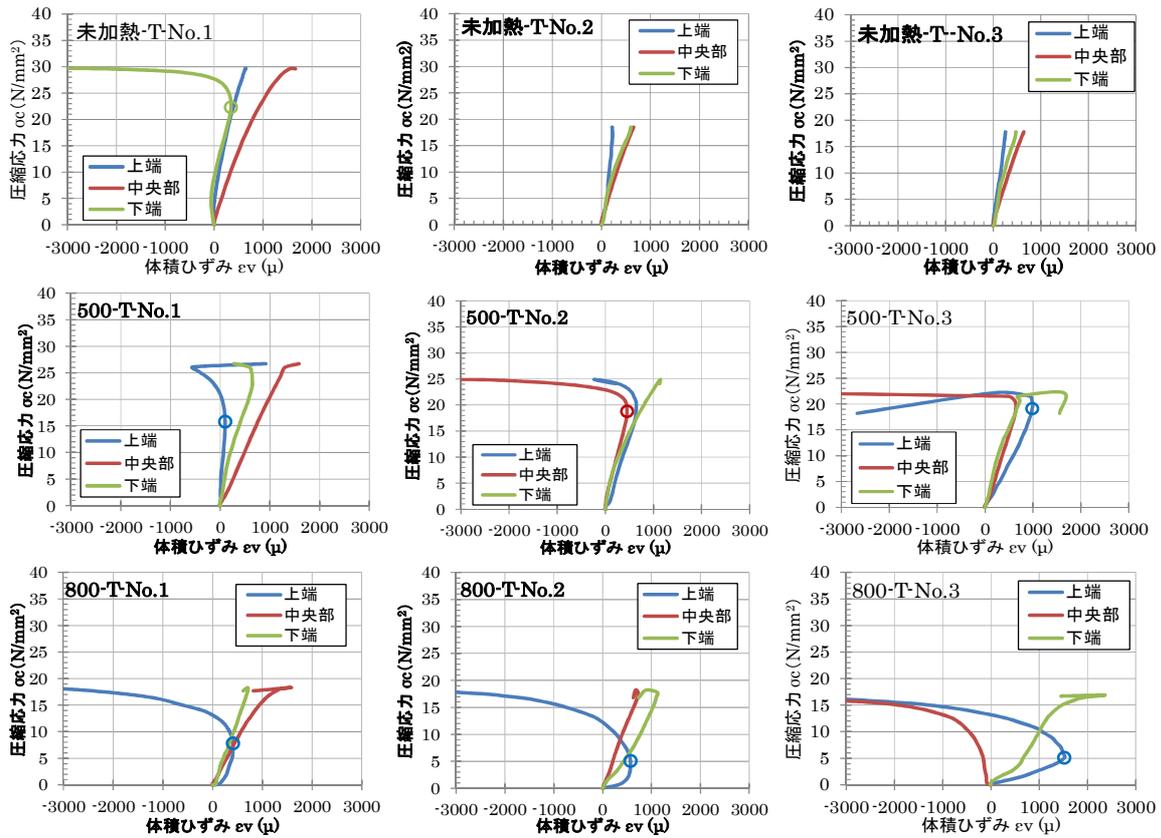
図4.13に示すように、未加熱のコアでは、減摩材の有無に係わらず、臨界応力度に達した時の到達位置は下端となった。コアの下端部は、試験体作製時の打込み面側となり、打込み後のブリーディング水などによって、採取したコアの軸方向に密度変化が生じたものと推測する。

加熱面温度500°Cのコアが臨界応力度に達した位置は、減摩材無しで上端部、減摩材有りでは上端または中央部であった。

加熱面温度800°Cのコアでは、減摩材の有無に係わらず、コア上端で臨界応力度に達したが、加熱面温度500°Cの上端とは体積ひずみの挙動が異なっていた。なお、減摩材無しのNo.2および減摩材有りのNo.3の中央部においては、圧縮試験初期から膨張方向に進展した。



(a)減摩材なし



(b)減摩材あり

注) 図中の○印は臨界応力度を示し、各コアの圧縮試験時における最初に到達点を示す

図 4.13 圧縮応力とコア両端部および中央部の体積ひずみとの関係

4.4.3 まとめ

本実験では、4.2 節の実験で得られた課題である、①多点縦ひずみのばらつきに作用したと考えられる粗骨材の影響、②圧縮強度試験時に試験機加圧板とコアの上下端部に生じる摩擦拘束の影響について確認した。得られた知見を以下に示す。

- (1) モルタルが火災加熱を受けると、コンクリートと同様に圧縮強度および静弾性係数は低下する。
- (2) 圧縮強度試験時に端面摩擦を低減することで圧縮強度は低下したが、静弾性係数は必ずしも低下しなかった。
- (3) 火災を受けたモルタルの縦ひずみ分布はコンクリートと同様の傾向を示したことから、セメントペースト間で生じる微細なひび割れを示していると考えられる。
- (4) 火災加熱を受けたコアの臨界応力度は、加熱面温度の上昇により低下した。
- (5) 火災加熱を受けたコアの臨界応力度は、圧縮強度試験時にコアが膨張し始めた位置を示した。
- (6) コア中央部および上下端部それぞれの臨界応力度の到達位置は、加熱面温度が高くなるほど、上部から中央部へと進展したことから、圧縮強度試験時に試験機加圧板とコア上下端部に生じる摩擦拘束を低減することにより、コアは最も劣化している位置で破壊する。
- (7) 火災加熱を受けたコンクリートから採取したコアは、加熱面温度が高いほど臨界応力度は低くなり、その到達順序は、最初に加熱面、続いて中央部となる。
- (8) 本実験で得られた加熱面温度 500°Cと 800°Cの臨界応力度とその到達位置（加熱面からの深さ）から、火災加熱を受けたコンクリートから採取したコアは、圧縮強度試験時に減摩材を介して体積ひずみを測定して臨界応力度を求めることで、加熱面側に多く内在する火災劣化の深さを把握できる可能性が示唆された。

また、本実験より次の課題が得られた。

- ① コンクリート中の粗骨材が臨界応力度に与える影響
- ② コアの圧縮試験時における多点体積ひずみによる臨界応力度を連続測定することによって劣化部の推定が可能か

これらの課題については、4.5 節および 4.6 節で検討した。

4.5 加熱冷却後のコンクリート円柱供試体による圧縮応力-体積ひずみ曲線から求めた臨界応力度に関する検討

4.5.1 はじめに

本節では、加熱冷却後におけるコンクリートの臨界応力度の物性値を把握することを目的として、電気炉により一様に加熱したコンクリート供試体(以下、供試体と記す)を用いて臨界応力度を求め、加熱温度と臨界応力度との関係を明らかにした。

4.5.2 実験概要

(1) 試験体

表 4.4 に、使用した供試体のコンクリートの調合および使用材料を示す。供試体は軽量型枠を用いて作製した円柱供試体で、その形状は、直径 100mm、高さ 200mm である。供試体数は、加熱温度ごとに 3 体と比較用に準備した未加熱の 3 体の合計 30 体である。供試体は室内で封緘養生し、加熱試験の前日に脱型、打込み面を研磨処理した。なお、供試体の圧縮強度試験時の材齢を表 2 に示す。

表 4.4 コンクリートの調合および使用材料

W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	A _d
49.0	43.1	184	376	719	998	3.760

注) 以下に使用材料を示す。

水(W) : 上水道水

セメント(C) : 宇部三菱セメント株式会社製普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)

細骨材(S) : 佐賀県唐津市小川島沖産 除塩砂(表乾密度:2.56 g/cm³)

粗骨材(G) : 京都府亀岡市東別院町産碎石(表乾密度:2.69 g/cm³)

混和剤(Ad) : 株式会社フローリック製 AE 減水剤(フローリック SV10)

(2) 加熱方法

加熱は電気炉を用いて実施した。円柱供試体の加熱温度は、100°C~900°Cを 100°C間隔で分けた 9 水準と、比較用の未加熱 1 水準の合計 10 水準である。加熱方法は、炉内温度を 60 分あたり 100°Cピッチで昇温させ各加熱温度に到達させ、その温度を 24 時間保持した後終了した。加熱終了後は炉内温度が 50°C以下になるまで供試体を炉内で自然冷却した。図 4.14 に各加熱温度の炉内温度と経過時間の関係を示す。

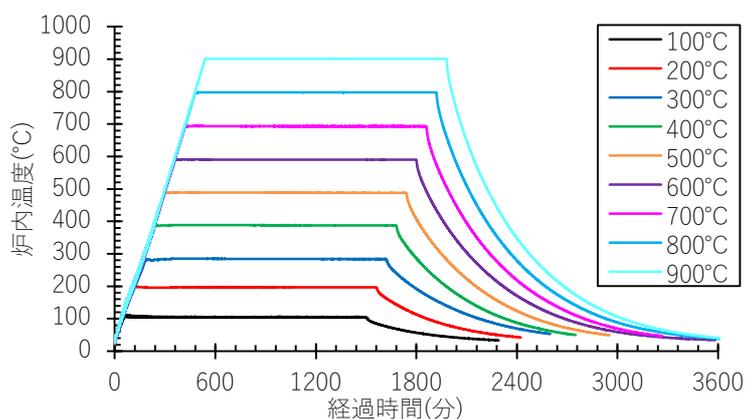


図 4.14 円柱供試体の炉内温度と経過時間との関係

(3) 圧縮試験方法および体積ひずみ測定方法

圧縮強度試験は JIS A 1107:2012⁹⁾および JIS A 1149:2017¹⁰⁾なお、縦、横ひずみの極性は圧縮域を「+」、引張域を「-」、体積ひずみの極性は。収縮域を「+」、膨張域を「-」とした。に基づき、供試体を電気炉から出した後、直ちに行った。また、圧縮強度試験時には横ひずみの測定も行った。なお、縦および横ひずみの測定には、検長 90mm のひずみゲージを使用した。横ひずみの測定位置は、縦ひずみの貼付位置から円周方向に 90 度回転させた位置とした。臨界応力度は、4.3.6 項の式 1 により、圧縮応力と体積ひずみの関係から求めた。

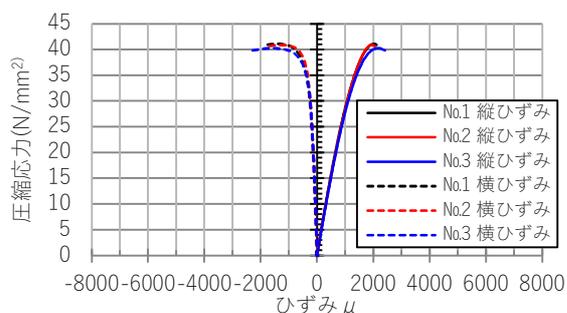
4.5.3 実験結果

表 4.5 に圧縮強度試験結果から得られた加熱温度毎の物性値の一覧を、図 4.15 に加熱温度毎にみた圧縮応力と縦ひずみおよび横ひずみとの関係を、図 4.16 に加熱温度毎の圧縮応力と体積ひずみとの関係をそれぞれ示す。なお、縦、横ひずみの極性は圧縮域を「+」、引張域を「-」、体積ひずみの極性は収縮域を「+」、膨張域を「-」とした。図 4.11 に圧縮応力と体積ひずみとの関係および臨海応力度を示す。

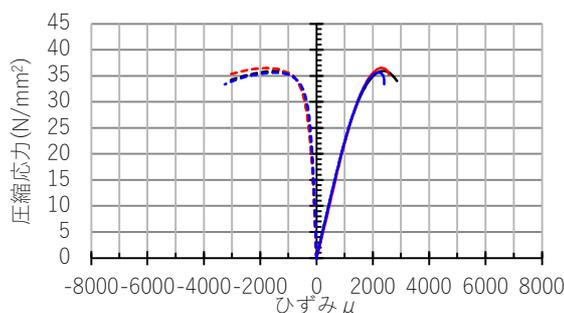
表 4.5 圧縮強度試験結果の一覧

加熱温度 (°C)	未加熱	100	200	300	400	500	600	700	800	900
圧縮強度 (N/mm ²)	40.8	36.0	38.2	35.6	27.9	22.6	16.6	12.1	5.72	2.69
静弾性係数 (kN/mm ²)	30.6	22.7	18.6	15.2	9.29	5.79	2.85	1.86	1.04	0.65
臨界応力度 (N/mm ²)	34.3	29.1	25.9	21.7	13.6	11.5	7.17	5.17	2.20	1.04
圧縮強度に対する臨 界応力度の比	0.841	0.808	0.678	0.610	0.487	0.509	0.432	0.427	0.385	0.387
材齢(日)	606	614	608	602	606	612	629	635	626	633

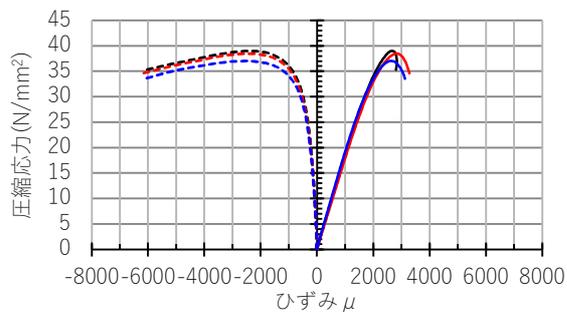
注) 各測定値は 3 体の平均を示す。



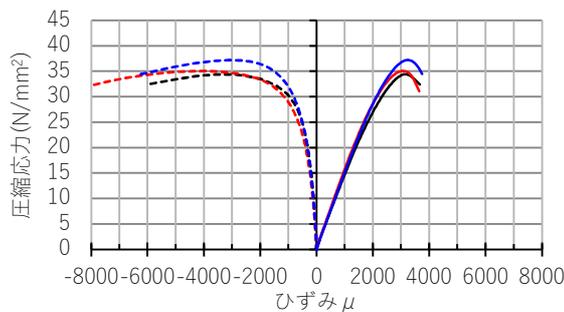
(a) 未加熱



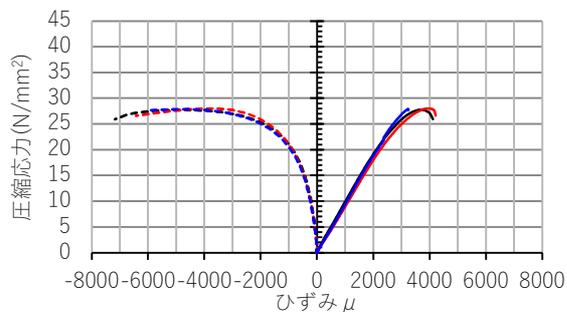
(b) 加熱温度 100°C



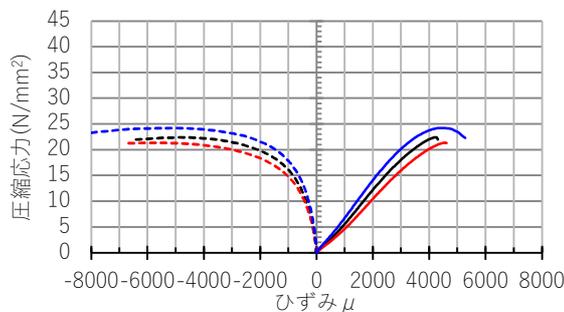
(c) 加熱温度 200°C



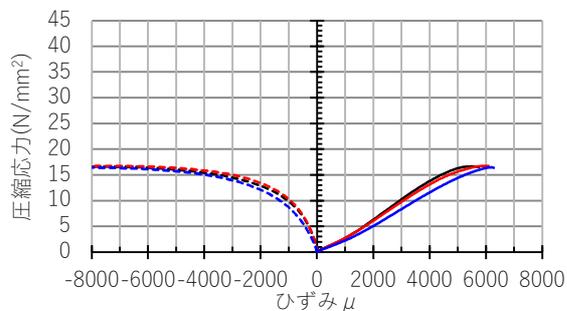
(d) 加熱温度 300°C



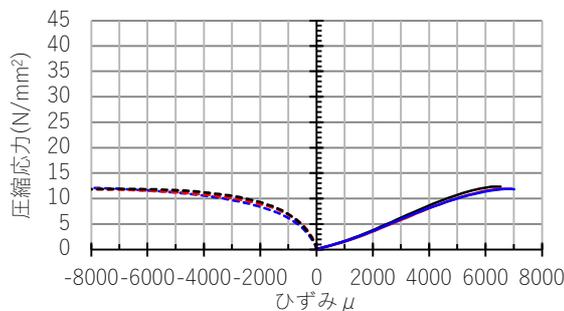
(e) 加熱温度 400°C



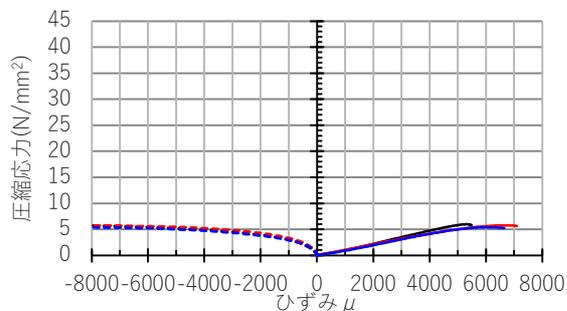
(f) 加熱温度 500°C



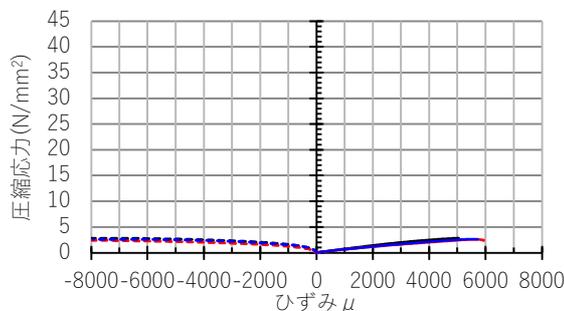
(g) 加熱温度 600°C



(h) 加熱温度 700°C

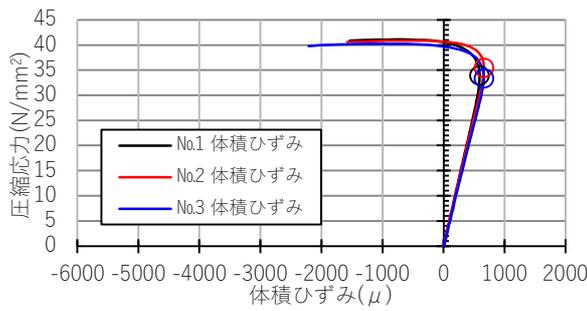


(i) 加熱温度 800°C

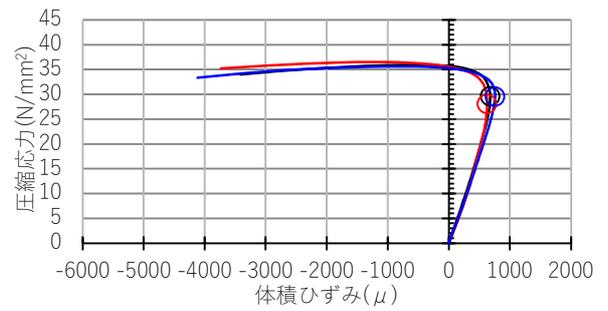


(j) 加熱温度 900°C

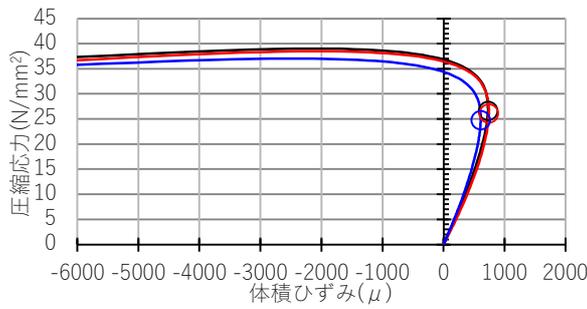
図 4.15 圧縮応力と縦ひずみおよび横ひずみの関係



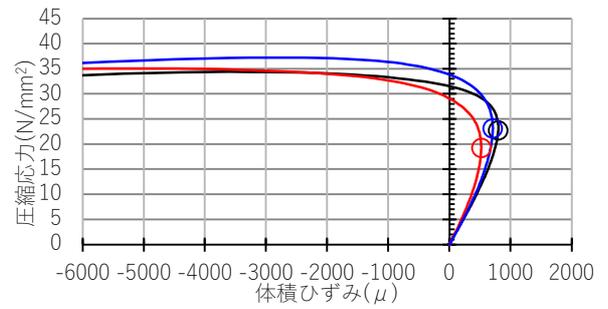
(a) 未加熱



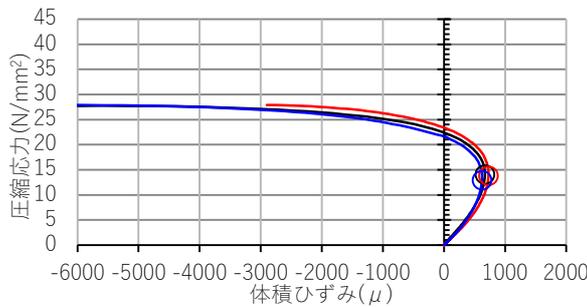
(b) 加熱温度 100°C



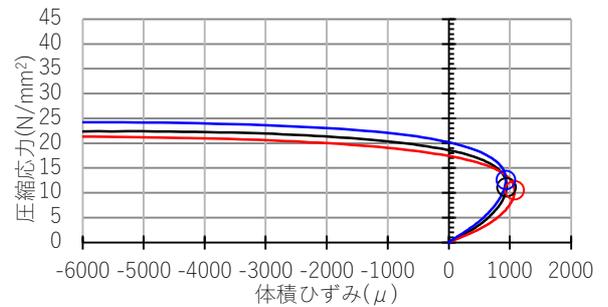
(c) 加熱温度 200°C



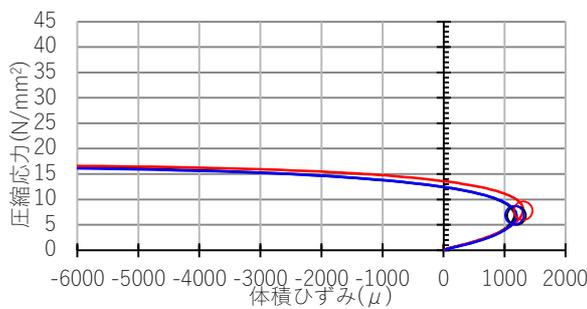
(d) 加熱温度 300°C



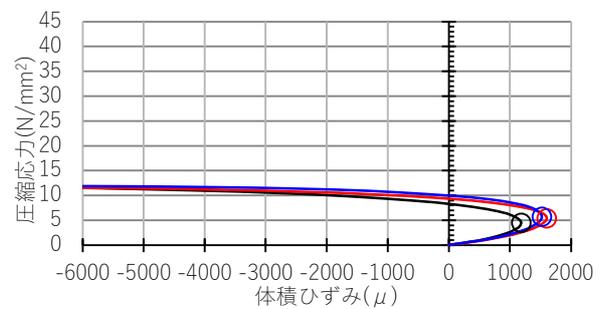
(e) 加熱温度 400°C



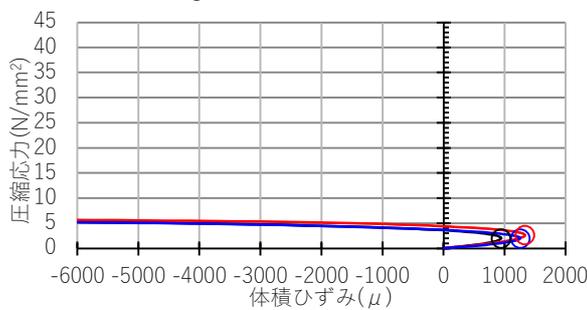
(f) 加熱温度 500°C



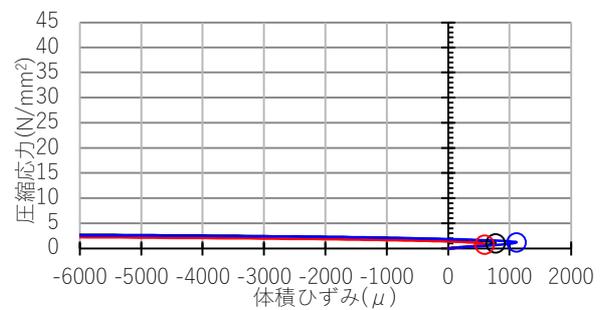
(g) 加熱温度 600°C



(h) 加熱温度 700°C



(i) 加熱温度 800°C



(j) 加熱温度 900°C

図 4.16 圧縮応力と体積ひずみの関係

(1) 圧縮試験結果および静弾性係数

図 4.17 に加熱温度と圧縮強度との関係を示す。圧縮強度は加熱温度 100°C で低下し 200°C で若干回復する傾向を示した後、300°C 以上では直線的に低下した。図 4.18 に加熱温度と圧縮強度残存比との関係を示す。圧縮強度残存比と加熱温度との関係は、耐火性ガイドブック¹⁾と同傾向を示した。図 4.19 に加熱温度と静弾性係数との関係を示す。静弾性係数は、加熱温度が高くなるほど低下する傾向であった。図 4.20 に加熱温度と静弾性係数残存比との関係を示す。静弾性係数残存比と加熱温度との関係は、耐火性ガイドブック¹⁾と同傾向を示した。

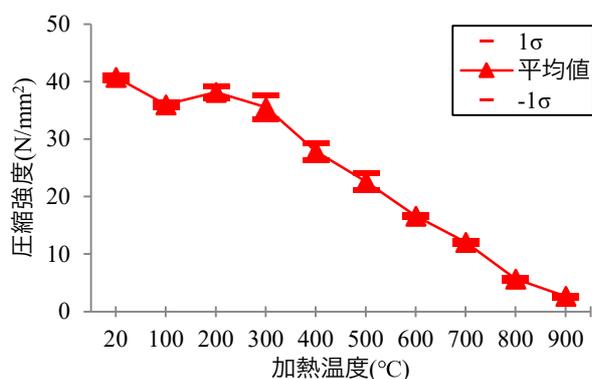


図 4.17 加熱温度と圧縮応力との関係

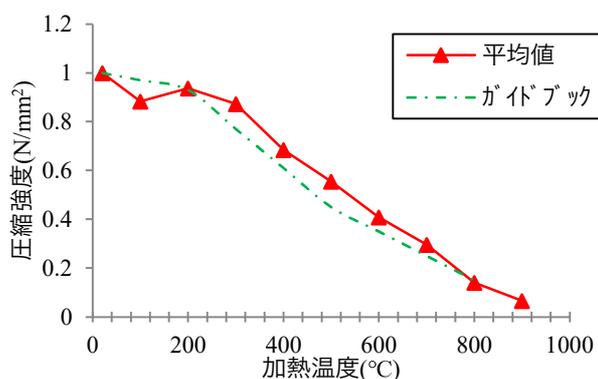


図 4.18 加熱温度と圧縮強度残存比との関係

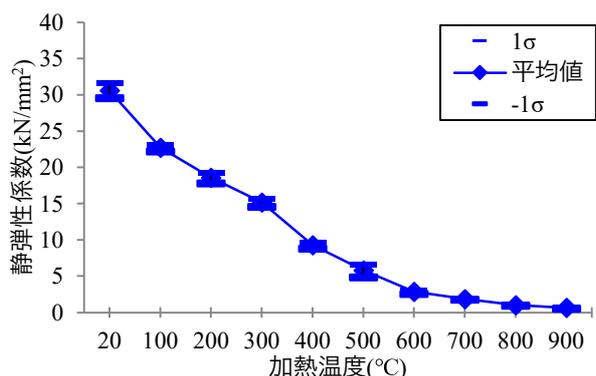


図 4.19 加熱温度と静弾性係数との関係

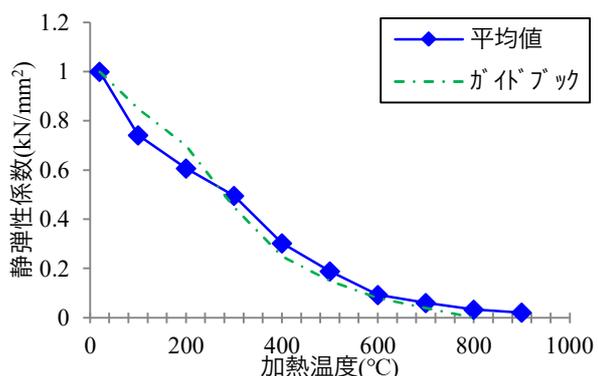


図 4.20 加熱温度と静弾性係数残存比との関係

(2) 各加熱温度と臨界応力度との関係

図 4.21 に、加熱温度と臨界応力度との関係を示す。臨界応力度は加熱温度が高くなるほど低下する。これは、コンクリートが高温履歴を受けると、コンクリート内のセメントペーストおよび骨材において、それぞれ異なった収縮膨張挙動を示すことからセメントペースト間または骨材とセメントペーストとの界面にひび割れが生じる。それが、圧縮応力下において連続化し、臨界応力度として定量化されたものと推測できる。

図 4.22 に、未加熱の臨界応力度を基準とした時の臨界応力度残存比と加熱温度との関係を示す。臨界応力度残存比は、圧縮強度残存比と同様に加熱温度が高くなるほど低下し、両者は反比例の関係を示し、強い相関関係（決定係数 $R^2=0.969$ ）を示すことが認められる。

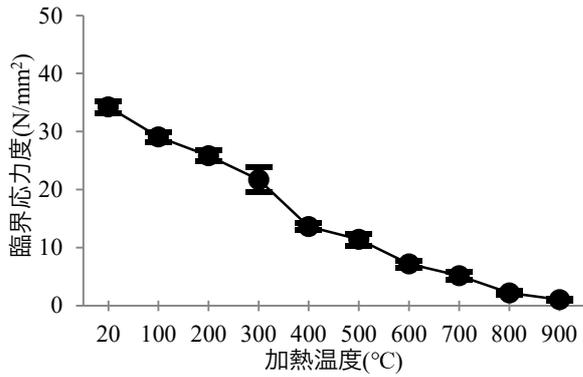


図 4.21 加熱温度と臨界応力度との関係

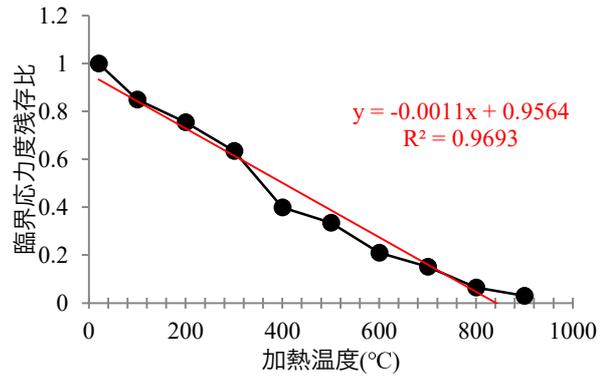


図 4.22 加熱温度と臨界応力度残存比との関係

図 4.23 に、各加熱温度の圧縮強度を基準とした臨界応力度の比（臨界応力度／圧縮強度）と加熱温度との関係を示す。未加熱の臨界応力度／圧縮強度は 0.84 を示し、臨界応力度に到達後直ちに圧縮強度に達した。臨界応力度は円柱供試体の圧縮強度の 0.8～0.9 倍であることが示されており¹⁴⁾、本結果もこの結果とほぼ一致した。これに対して、加熱を受けた場合の臨界応力度／圧縮強度は、加熱温度 400°C までは 0.49～0.84 で、加熱温度が 100°C 上昇する毎に 0.09 低下した。また、加熱温度 400°C を超えると 0.39～0.51 の範囲を示し、加熱温度が 100°C 上昇する毎に 0.03 となり、その低下傾向は緩慢となった。

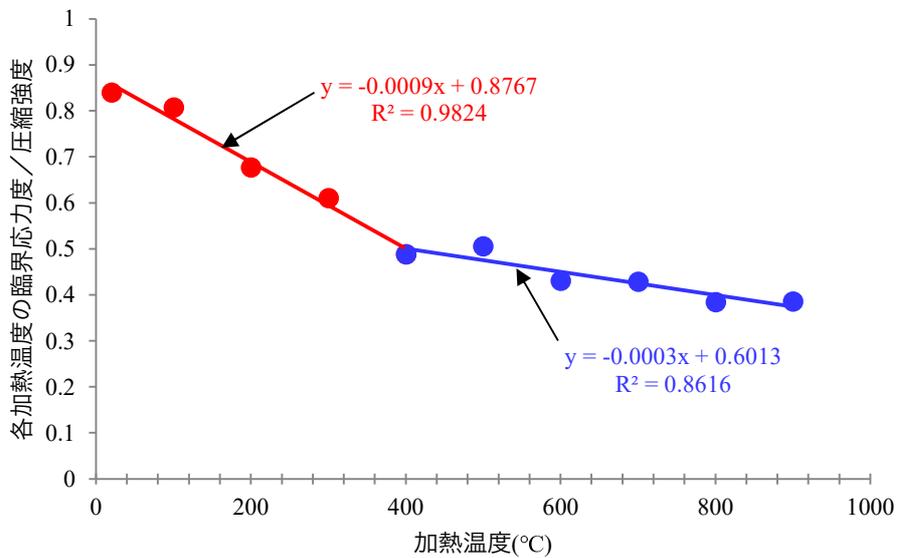


図 4.23 加熱温度と加熱温度毎の臨界応力度／圧縮強度との関係

4.5.4 まとめ

加熱冷却後におけるコンクリートの臨界応力度の物性値を把握することを目的として、電気炉により一様に加熱した供試体を用いて臨界応力度を求め、加熱温度と臨界応力度との関係を明らかにした。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 加熱温度 100°C から 900°C では、加熱を受けた供試体の圧縮強度および静弾性係数は低下し、耐火性ガイドブックの各指標値と同様な傾向を示した。
- (2) 加熱温度 100°C から 900°C では、臨界応力度は加熱温度の上層に伴いに概ね線形に低下し、未加熱の臨界応力度と比較すると、加熱温度 300°C で 4 割、鑑加熱温度 500°C で 7 割低下した。その低下率は圧縮強度よりも大きい。
- (3) 未加熱の圧縮強度を基準とした臨界応力度との比は 0.84 を示した。これに対して、各加熱温度における圧縮強度を基準とした臨界応力度との比は、加熱温度 400°C までは加熱温度が 100°C 上昇する毎に 0.09、加熱温度 400°C を超えると加熱温度が 100°C 上昇する毎に 0.03 となる。

4.6 火災加熱を受けたコンクリートから採取したコアの圧縮応力-体積ひずみ曲線から求めた臨界応力度に関する検討

4.6.1 はじめに

本節では、火災診断において採取されるコアの圧縮強度試験に着目し、試験機加圧板とコア両端部の端面摩擦を低減した状態で圧縮強度試験を実施し、試験時に生じるコア軸方向および直交方向の膨張収縮挙動から臨界応力度を任意の深さ毎に連続測定して、そのひずみ挙動から火災劣化深さが推定可能か検討を行った。

4.6.2 実験概要

(1) 試験体

図 4.24 に試験体の形状と寸法を、表 4.6 にコンクリートの調合を示す。コンクリートの使用材料は、普通ポルトランドセメント（密度： 3.15g/cm^3 ）、地下水、海砂（表乾密度： 2.55g/cm^3 ）および砕砂（表乾密度： 2.64g/cm^3 ）、碎石（表乾密度： 2.68g/cm^3 ）、AE 減水剤とした。試験体作製時のフレッシュコンクリートの性状は、スランプは 18.5cm 、空気量は 4.2% 、また、封緘養生した材齢 28 日の円柱供試体の圧縮強度平均値は 35.7N/mm^2 であった。試験体は加熱実験用と、未加熱用を 1 体ずつ作製した。作製した試験体は材齢 7 日で脱型し、加熱実験に供するまで屋内にて静置した。また同図に、加熱実験中の試験体の温度を計測するため、加熱面（深さ 0mm ）および内部（加熱面から深さ $25, 50, 100\text{mm}$ ）に設置した K 型熱電対を示す。なお、この試験体は 3.3.1 項(1)と同一である。

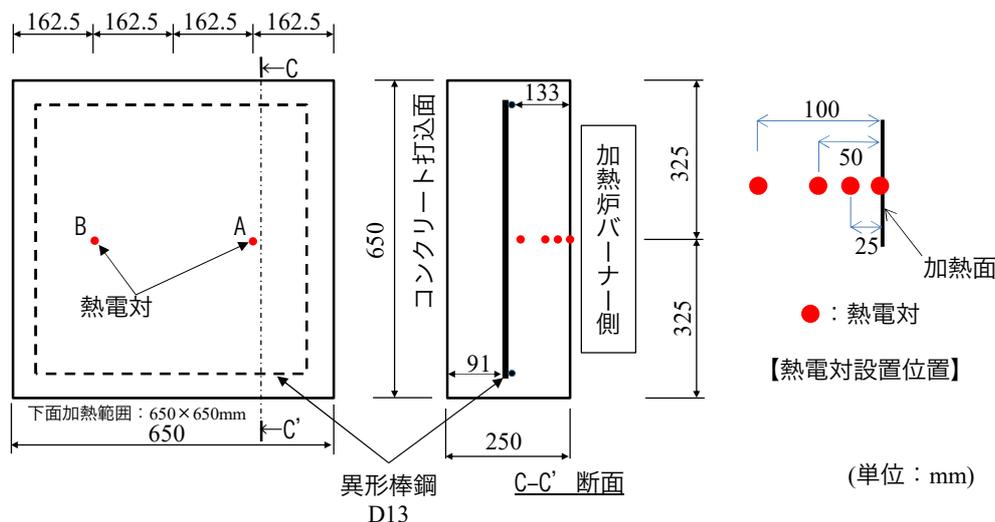


図 4.24 試験体の形状、熱電対の設置位置

表 4.6 コンクリートの調合と使用材料および性状

水セメント比 W/C	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)						実測値		
		W	C	S1	S2	G	Ad	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 ^{注2)} (N/mm ²)
0.58	44.7	170	295	560	240	1023	2.95	18.5	4.2	35.7

注 1) 以下に使用材料を示す。

水(W) : 上水道水、上澄水

セメント(C) : 普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)

細骨材(S₁) : 佐賀県小川島産 海砂 (表乾密度:2.56g/cm³)

細骨材(S₂) : 京都府亀岡市東別院町 砕砂 (表乾密度:2.64g/cm³)

粗骨材(G) : 京都府亀岡市東別院町 砕石 (表乾密度:2.67g/cm³)

混和剤(Ad) : AE 減水剤 標準型 I 種

注 2) 28 日間室内気中養生した供試体の圧縮強度を示す。

(2) 加熱方法

図 4.25 に、試験体を設置したガス加熱炉を示す。試験体の加熱にはガス加熱炉を使用した。試験体は天井スラブの加熱を想定し、試験体の長さ 650mm、幅 650mm の型枠面が炉内に接するように設置した。加熱は、ISO834 に規定する標準加熱曲線に沿って、図 4.24 に示す A および B の加熱面にある 2 本の熱電対で測定した温度の平均値が 500°C となるまで炉内温度を上昇させ、その状態を 60 分保持した後終了した。加熱終了後は加熱炉側面の炉蓋を開放し、加熱面の温度が室温になるまで加熱炉上に静置した。なお、加熱時の試験体材齢は 230 日で、作製した試験体 2 体のうちの 1 体は、加熱後の試験体と比較するため加熱を行わなかった (以下、未加熱試験体と記す)。

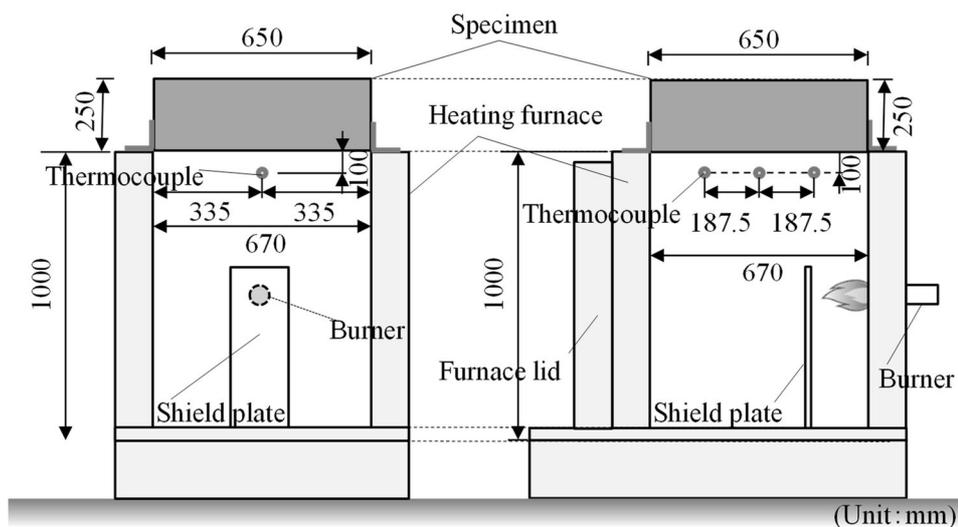


図 4.25 加熱実験装置

(3) コアの採取方法および圧縮試験方法

圧縮強度試験に供するコアは、JIS A 1107:2012⁹⁾ に基づき、湿式のコアドリルを用いて、加熱冷却後の試験体および未加熱試験体からそれぞれ3本ずつ採取した。加熱冷却後の試験体から採取したコア記号を500-1~500-3、未加熱の試験体から採取したコア記号をN-1~N-3と記す。採取したコアは、JIS A 1107:2012⁹⁾に規定される直径を満足し、かつ、高さの2倍として整形した後、圧縮強度試験に供した。

圧縮強度試験は JIS A 1107:2012⁹⁾に基づいて実施し、その際、圧縮試験機加圧板とコア上下端面との間には、端面摩擦を低減するために減摩材(テフロンシート2枚の間にグリース塗布)を挿入した。

(4) コア軸方向における各深さの体積ひずみ測定

圧縮強度試験において、コアの深さごとの体積ひずみを測定した。測定方法は、JIS A 1149 : 2017¹⁰⁾を参考に、図 4.26 に示す①~⑦の位置に縦ひずみゲージを、その縦ひずみ計測位置から円周方向に 90 度回転させた軸方向と平行かつ対象な二つの線上に横ひずみゲージを、合計 28 枚貼付した。このゲージを用いて圧縮強度試験開始からコアが破壊に至るまでに生じる縦ひずみおよび横ひずみを測定し、4.3.6 項 式(1)により体積ひずみを算出して臨界応力度を求めた。なお、体積ひずみは、コアの軸方向に貼付した①~⑦の各縦ひずみおよび横ひずみから各深さの体積ひずみを算出した。

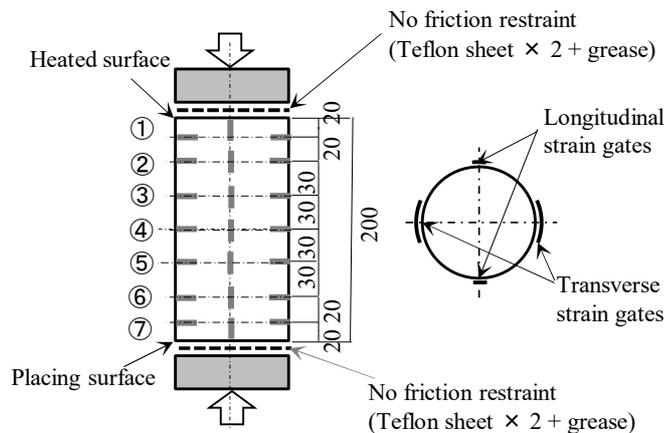


図 4.26 コンクリートコアのゲージ貼付位置

4.6.3 実験結果と考察

(1) 加熱実験結果

図 4.27 に、炉内温度、試験体加熱面および内部に設置した熱電対の温度履歴を示す。加熱実験に供した試験体の加熱面は 500°C に加熱されその温度を 1 時間保持している。また、試験体内部に設置した各深さの熱電対 2 箇所のアverage 温度の最高値は、②357°C、③240°C および④125°C であった。これらの結果から、加熱後の試験体は、加熱面から内部に向かって温度勾配が生じていることを確認した。

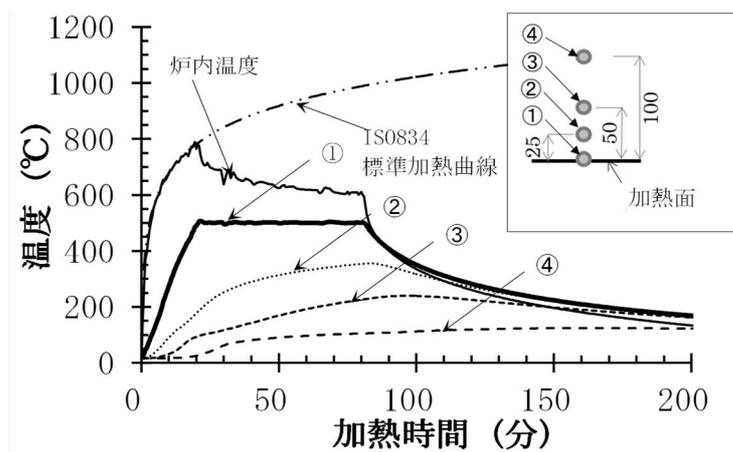


図 4.27 試験体の加熱温度履歴

(2) コアの圧縮強度試験結果

図 4.28 にコアの圧縮強度結果を示す。未加熱試験体の ND-1~ND-3 の平均値は 27.2 N/mm²、一方、加熱冷却後のコア 500-1~500-3 の平均値は 15.9 N/mm² であった。加熱冷却後の試験体の圧縮強度残存比は 0.58 であった。

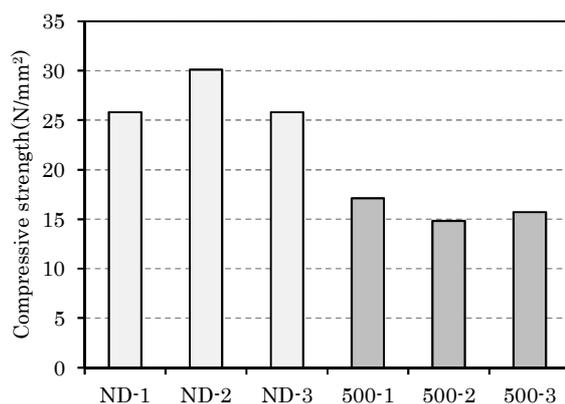


図 4.28 コアの圧縮強度試験結果

(3) 1/3 圧縮強度時における加熱面から各深さの縦ひずみ分布

図 4.29 に、最大荷重の 1/3 時の縦ひずみと加熱面表面からの距離の関係を示す。なお、ひずみの極性は、圧縮域を「+」、引張域を「-」とした。

同図をみると、加熱後の試験体から採取したコアの縦ひずみは、500-1 では加熱面に近づくほど大きくなり、加熱面から 40mm の位置で最大となっているおり、これは図 4.5 に示した加熱した試験体から採取したコアの縦ひずみの挙動と概ね一致している。500-2 および 500-3 では加熱面と加熱面から 100mm の位置には顕著な挙動はみられず、加熱面から 100mm よりも深い位置の縦ひずみが増大した。500-3 にみられた加熱面から 130mm の位置の縦ひずみの挙動は、図 4.5 の加熱-1 の加熱面から 130mm の挙動と類似しており、図 4.12 の結果から粗骨材の影響が小さいことを考慮すると温度ひび割れに起因するものと推測することができる。

一方、未加熱の試験体から採取したコアの縦ひずみは、コンクリート表面から内部までほぼ同様の挙動を示した。

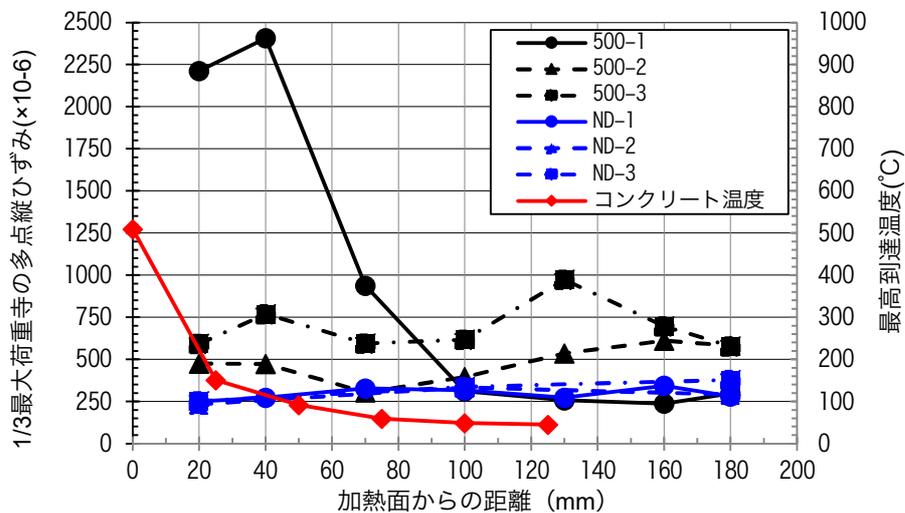


図 4.29 最大荷重の 1/3 時の縦ひずみと加熱面表面からの距離の関係

(4) コアの圧縮応力と体積ひずみおよび臨界応力度

図 4.30 にコアの圧縮応力と体積ひずみの関係を示す。同図の a)~c)は未加熱試験体：ND-1~ND-3、d)~f)は加熱冷却後の試験体：500-1~500-3 におけるコア軸方向①~⑦のそれぞれの体積ひずみを示す。ただし、ND-2 および ND-3 については、コア軸方向中央部の④、および上下端部の①、⑦のみ計測を行った。また、表 4.7 に、コアの臨界応力度とその発生順序を示す。

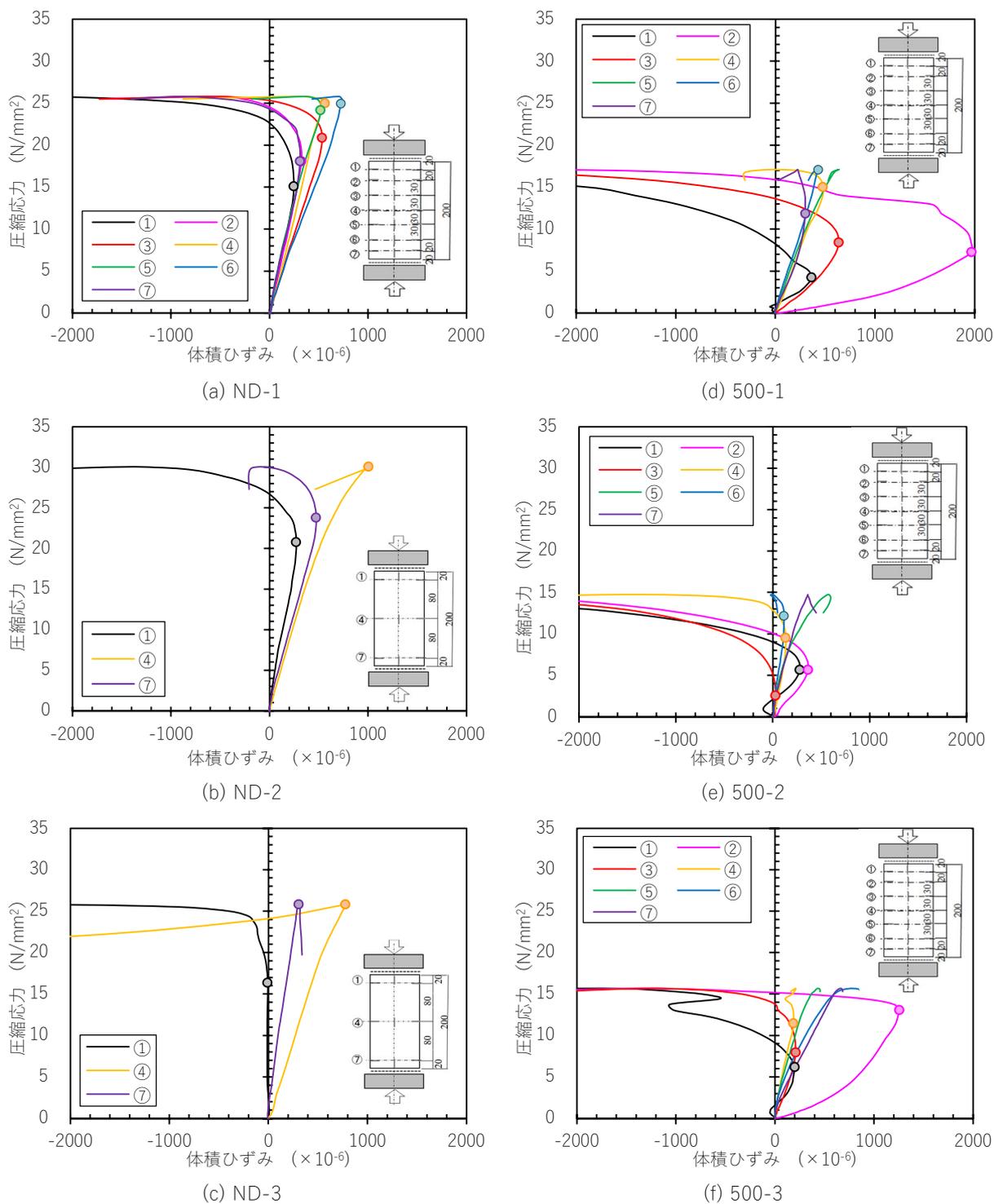


図 4.30 圧縮応力と体積ひずみの関係

表 4.7 コアの臨界応力度とその発生順序

コア記号	圧縮強度		臨界応力度 *1						
	平均値		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
ND-1	25.8	27.2	15.1 (1)	18.1 (2)	20.9 (4)	25.0 (6)	24.2 (5)	25.0 (6)	18.1 (2)
ND-2	30.1		20.8 (1)			30.1 (3)			23.8 (2)
ND-3	25.8		16.3 (1)			25.8 (2)			25.8 (2)
500-1	17.1	15.9	4.2 (1)	7.3 (2)	8.4 (3)	15.0 (5)	—*3	17.1 (6)	11.9 (4)
500-2	14.8		5.6 (2)	5.6 (2)	2.5 (1)	9.5 (4)	—*3	12.2 (5)	—*2
500-3	15.7		6.2 (1)	13.1 (3)	7.9 (2)	15.7 (4)	—*3	—*3	—*2

注) *1: 表中の単位は N/mm²。

*2: 表中の()内の数値は臨界応力度が発生した順番を示す。

*3: 臨界応力度に達していない。

図 4.30 および表 4.7 より、ND-1 の体積ひずみは、载荷初期より収縮挙動を示したが、圧縮応力の増加に伴いコア両端部から中央部に向かって徐々に臨界応力度に到達した。また、体積ひずみ④および⑥が最も臨界応力度が高かった。このことから、端面摩擦を低減した状態で一軸圧縮载荷することにより、圧壊割裂型の破壊パターンを示したことが確認できる。次に、ND-2 および ND-3 では、コアの上下端部および中央部の 3箇所 の体積ひずみの挙動を測定し、その結果、体積ひずみ⑦以外では中央部よりも上下端部が先行して臨界応力度に達していることを確認した。一方、500-1～500-3 では、载荷初期に体積ひずみ①だけは膨張挙動を示したが、その後、圧縮応力の増大に伴いすべての体積ひずみ①～⑦は収縮挙動を示し、500-1 では明確にコアの上端（加熱面側）近傍から順に膨張に転じて臨界応力度に達しており、500-2 および 500-3 でも似たような傾向が見られた。

この結果から 500-1～500-3 は、試験機加圧板とコア上下端面間に減摩材を介して、体積ひずみの臨界応力度を求めることで、火害による破壊部分と非破壊部分の境界を捉えることができると考えられる。なお、500-2 および 500-3 のコア下端では、体積ひずみに変形特異点に達していないことから臨界応力度は求められていない。これは、コアの上下端部から順番に破壊に至った未加熱の ND-1～ND-3 とは異なり、500-1～500-3 では、加熱面付近に破壊域があることから、载荷初期よりコア上端（加熱面側）の破壊域から先行して破壊に至り、その体積変化により、非破壊域であるコア下端が変形特異点に達しなかったと推測する。

(5) 臨界応力度から推定した火害劣化深さ

図 4.31 に、加熱面からの深さと臨界応力度との関係を示す。臨界応力度は火害部の加熱面側に近づくほど低くなる結果を示した。一方で、加熱面から 130mm の深さでは、臨界応力度が

認められないことから、横ひずみの顕著な伸展はなくその深さにおいては破壊に至っていないと推測される。なお、500-1はコア下端が臨界応力度に達していた。これについては、コンクリート打込み時に発生するブリーディングなどによる脆弱部がコア下端に存在し、破壊に至った可能性が考えられる。

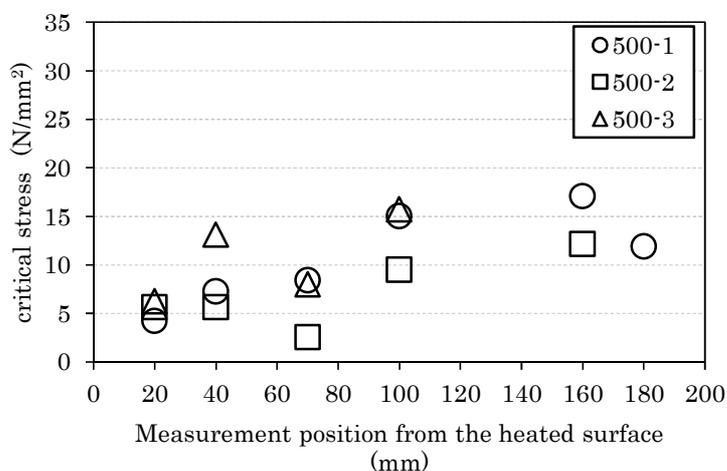


図 4.31 加熱面からの深さと臨界応力度との関係

臨界応力度は、圧縮強度試験時における荷重の増加に伴い発生したモルタルクラックが進展して、母材モルタルと粗骨材の界面に発生したクラックや骨材内部に発生した骨材クラックと連結して、載荷方向に進展する巨視的ひび割れが形成され始めるときの応力に相当するといわれており¹⁵⁾、Desayi・Viswanatha¹⁶⁾ら、加藤¹⁷⁾らは、この応力がコンクリートの真の圧縮強度と呼ぶにふさわしいとしている。温度ひび割れは、火害を受けたコンクリートから採取したコアの軸方向に発生しており、圧縮試験時のそのひび割れの挙動は、縦ひずみのみでは捉えにくく、横ひずみも同時に測定しそれらから体積ひずみを測定して臨界応力度を求めることにより明確になる。

臨界応力度と圧縮強度の比については、コンクリートの調合の違いにより表 4.8 のように報告されており、加藤らは 0.75~0.89、小阪・谷川¹⁸⁾らは 0.86~0.92 であることを実験によって明らかとしている。表 4.8 および図 4.32 の臨界応力度と圧縮強度の比とコンクリートの水セメント比との関係を示す。なお、図中の赤い破線は本実験で使用したコンクリートの水セメント比は 0.58 である。この結果より、各実験データから線形補間して求めた水セメント比 0.58 の臨界応力度の範囲は 0.76~0.91 である。

図 4.33 に、本結果で得られたコンクリート加熱面からの深さと臨界応力度と圧縮強度の比との関係を示す。

図中の青色の破線は、図 4.32 で求めた臨界応力度の範囲の下限値 0.76 と上限値 0.91 を示す。

図より、ND-1~ND-3 ではコア加熱面から 40mm までは、若干臨界応力度と圧縮強度の比が 0.76 を下回るが、コアの内部に至っては通常の臨界応力度を迎えて破壊していることが明らかで、500-1~500-3 と比較するとその傾向がよく分かる。一方、500-1~500-3 では、コンクリートの深さが 100mm (図中の A) もしくは 130mm (図中の B) までは臨界応力度と圧縮強度との比が下限値を下回っており、加熱によって内部まで発生しているひび割れによって低下

しているものと推測できる。したがって、加熱冷却後の試験体 500-1～500-3 においては、加熱面から深さ 100mm～130mm の間に、破壊域と非破壊域の境界があると考えられる。

表 4.8 各研究者によるコンクリートの調合比と臨界応力度¹⁵⁾

研究者名	調 合				計 算 値			実 測 値			実測値/計算値		
	W/C	V _c /V _{cp}	V _{sa} /V _m	V _{ca} /V _{cc}	σ _p /F _c	σ _{in} /F _c	σ _{cr} /F _c	σ _p /F _c	σ _{in} /F _c	σ _{cr} /F _c	σ _p /F _c	σ _{in} /F _c	σ _{cr} /F _c
加藤 ⁶⁵⁾	0.41	0.44	0.35	0.41	0.56	0.75	0.93	0.64	0.81	0.87	0.88	1.08	0.94
	0.49	0.39	0.42	0.45	0.53	0.75	0.89	0.52	0.80	0.89	0.98	1.07	1.00
	0.59	0.35	0.46	0.48	0.50	0.70	0.86	0.53	0.73	0.75	1.06	1.04	0.87
	0.87	0.27	0.50	0.50	0.48	0.68	0.80	0.52	0.73	0.80	1.08	0.91	1.00
小阪・谷川 ⁷¹⁾	0.45	0.41	0.46	0.39	0.54	0.72	0.91	0.52	0.68	0.91	0.96	0.94	1.00
	0.50	0.39	0.50	0.39	0.53	0.71	0.90	0.49	0.65	0.92	0.92	0.92	1.02
	0.55	0.37	0.52	0.39	0.52	0.70	0.89	0.51	0.68	0.87	0.98	0.97	1.09
	0.60	0.35	0.54	0.39	0.51	0.69	0.88	0.47	0.70	0.89	0.92	1.01	1.05
	0.65	0.33	0.56	0.39	0.51	0.69	0.87	0.47	0.65	0.87	0.92	0.94	1.00
0.70	0.31	0.57	0.36	0.51	0.69	0.86	0.43	0.64	0.86	0.84	0.95	1.00	
奥島 ⁷⁰⁾	0.45	0.41	0.55	0.40	0.50	0.69	0.90	—	0.67	0.88	—	0.97	0.98
	0.65	0.33	0.55	0.40	0.51	0.69	0.87	—	0.73	0.93	—	1.06	1.07
	0.75	0.30	0.55	0.40	0.52	0.69	0.95	—	0.78	0.91	—	1.13	1.07
小阪・谷川 ⁷¹⁾	0.45	0.41	0.51	0.30	0.55	0.73	0.92	0.57	0.72	0.89	1.04	0.99	0.97
	0.55	0.37	0.48	0.30	0.56	0.74	0.91	0.58	0.75	0.84	1.04	1.01	0.92
	0.70	0.31	0.44	0.30	0.58	0.76	0.89	0.60	0.76	0.81	1.03	1.00	0.91

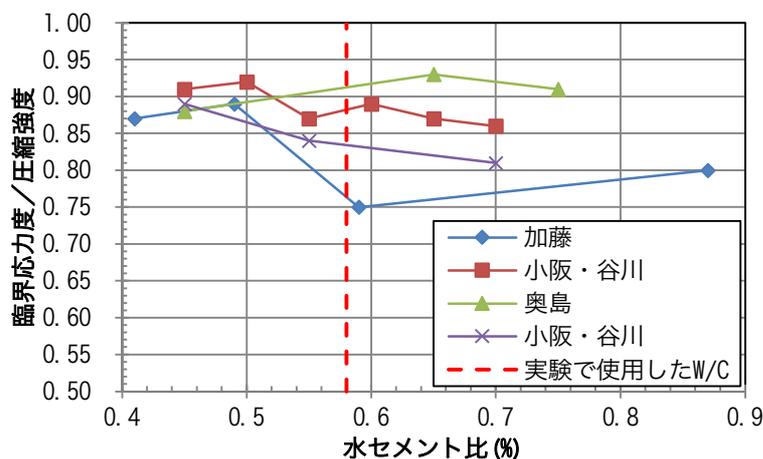


図 4.32 臨界応力度と圧縮強度の比とコンクリートの水セメント比との関係

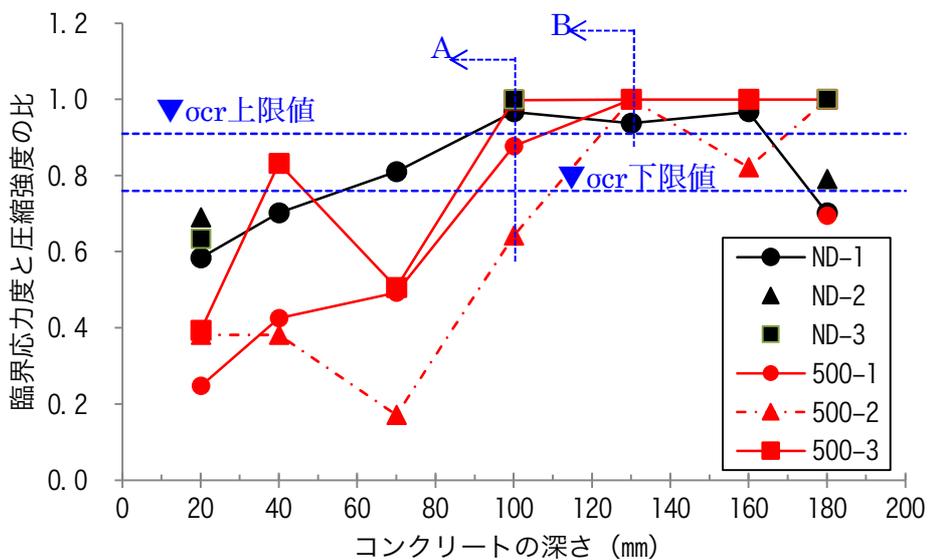


図 4.33 コンクリート加熱面からの深さと臨界応力度と圧縮強度の比との関係

(6) コアの臨界応力度と円柱供試体の臨界応力度との比較

図 4.34 に、4.5.3 項で得られた臨界応力度残存比と加熱温度の関係を用いて、4.6.3 項の熱電対（加熱面と加熱面から深さ 25, 50, 100mm）で計測した最高到達温度から推定した臨界応力度残存比を示す。なお、計測していない温度の残存比は各測定点間を直線補間して求めた。

臨界応力度の推定残存比は、加熱面で 0.33 となり、加熱面から 100mm の位置で 0.83 となった。コンクリート試験体の最高到達温度は加熱面に近づくほど高くなることから臨界応力度の推定残存比は加熱面に近づくほど小さくなる。

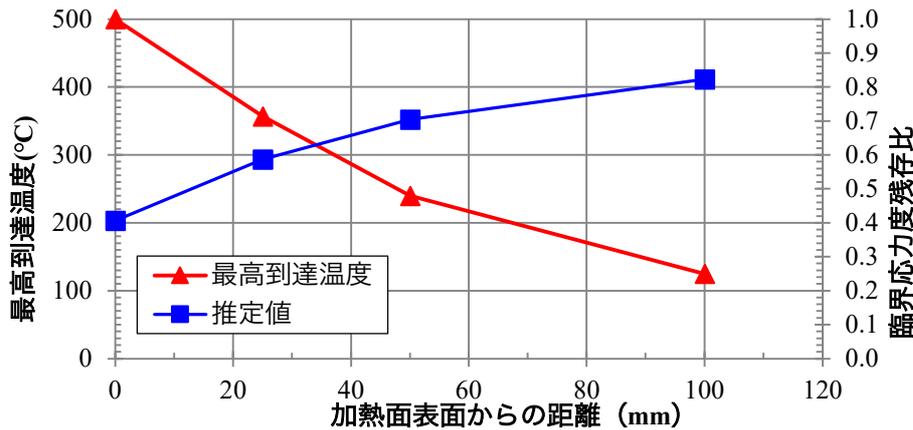


図 4.34 コアの最高到達温度と供試体による臨界応力度残存比との関係

図 4.35 に、図 4.34 で求めた供試体による臨界応力度残存比の推定値およびコアの臨界応力度と加熱面からの深さとの関係を示す。内部（加熱面から 70mm）の臨界応力度残存比はコアと供試体で傾向が異なっている。コンクリートが火災を受けると、加熱面と内部で温度差が発生し、その温度差により加熱面の膨張を温度が低い内部が拘束することによってひび割れが発生する。このひび割れは温度差が大きい程発生しやすくなる。コアは、供試体と比べて急加熱しており、加熱面と内部の温度差が大きいことから、内部のひび割れが比較的多くなったと想定され、供試体の基礎データから求めた推定値より、コアの臨界応力度が小さくなったと推測する。

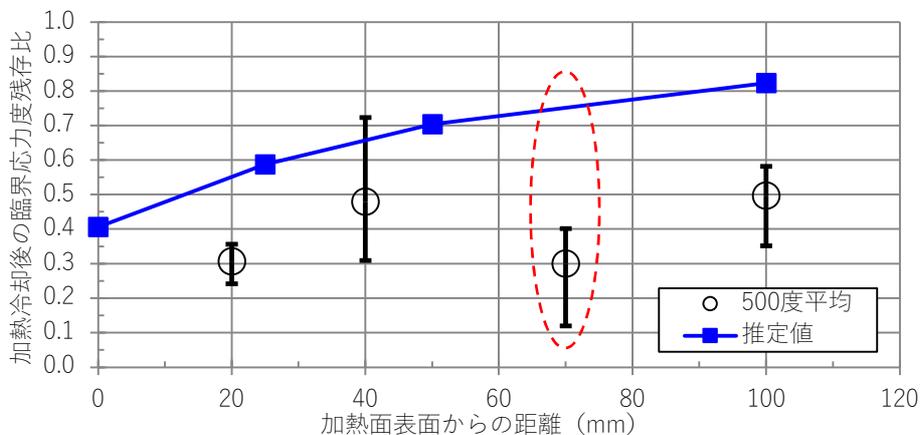


図 4.35 コアの加熱冷却後の臨界応力度残存比と加熱温度の関係

図 4.36 の赤い破線の枠内に示す臨界応力度の差については、以下の要因が考えられる。図 4.37 に一面から加熱されたコンクリート断面のイメージを示す。

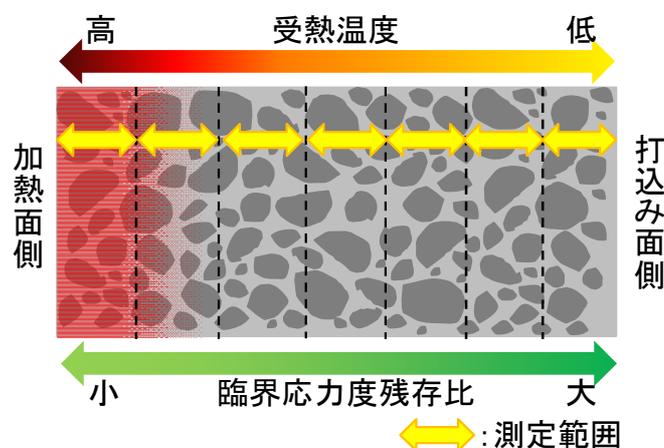


図 4.36 一面から加熱されたコンクリート断面のイメージ

図より、加熱面より内部の測定範囲は受熱温度が低く、臨界応力度の残存比が大きくなる。最も劣化している測定範囲で臨界応力度に達した後は、隣接する臨界応力度に達していない測定範囲が体積ひずみの減少を拘束することが予測され、この拘束が圧縮強度と臨界応力度の比を小さくした要因のひとつであると考えている。なお、目視によるコアの破壊位置は、体積ひずみから求めた臨界応力度が最初に達した測定位置付近であった。これについては、加熱面近傍の測定位置における臨界応力度の残存比と概ね一致している。しかしながら、加熱面近傍より内部において、最初に臨界応力度に達しているコアも散見されることから、必ずしも加熱面近傍で破壊に至っているとは断言できない。この現象については、加熱を受けたコンクリートに生じる温度ひび割れの影響を受けていることが一つの要因であると考えられる。

以上より、火災を受けたコンクリートの劣化深さは、必ずしも受熱温度のみで決定するものではなく、火災加熱によりコア内部まで生じた温度ひび割れが影響していると推測される。

(7) 圧縮試験機の球座が円柱供試体端面に及ぼす影響

コンクリートの圧縮試験機には上部加圧版に球座が設けられている。この球座が設置されていることにより、本実験のように試験機加圧面と円柱供試体端面間に減摩材を挿入したコンクリートの圧縮強度試験では、球座側が先行して臨界応力度に達する可能性がある。

そこで、未加熱のコンクリート円柱供試体を用いた圧縮強度試験において球座が円柱供試体端部に及ぼす影響を確認した。確認方法は、円柱供試体の打込み面を球座側にした条件（供試体記号：打込み面(上)）とその逆の円柱供試体の型枠底面を球座側にした条件（供試体記号：打込み面(下)）でそれぞれ圧縮試験を行い、円柱供試体の軸方向の各所における臨界応力度を測定した。なお、測定位置は打込み面から 20～180mm まで 20mm 間隔の 5 箇所とした。

図 4.37 に、未加熱の円柱供試体の臨界応力度と圧縮強度の比と測定位置との関係を示す。なお、打込み面（上）および打込み面（下）の各測定位置の臨界応力度は、それぞれ 3 本の円柱供試体の平均値を示す。

図より、円柱供試体の打込み面と型枠底面が異なることによる臨界応力度と圧縮強度の比に差異は認められなかった。また、球座側から最も近距離（測定位置：20mm）における円柱供試体の打込み面と型枠底面との差についても認められなかった。

なお、圧縮試験機底板側の臨界応力度と圧縮強度の比は、打込み面（下）が打込み面（上）よりも若干低下していたが、これは、打込み方向が異なることによる密度の差が結果に現れたものと考えられる。

この結果により、未加熱のコンクリート円柱供試体の軸方向各所における臨界応力度と圧縮強度の比は、圧縮強度試験の球座に左右されないことが確認した。

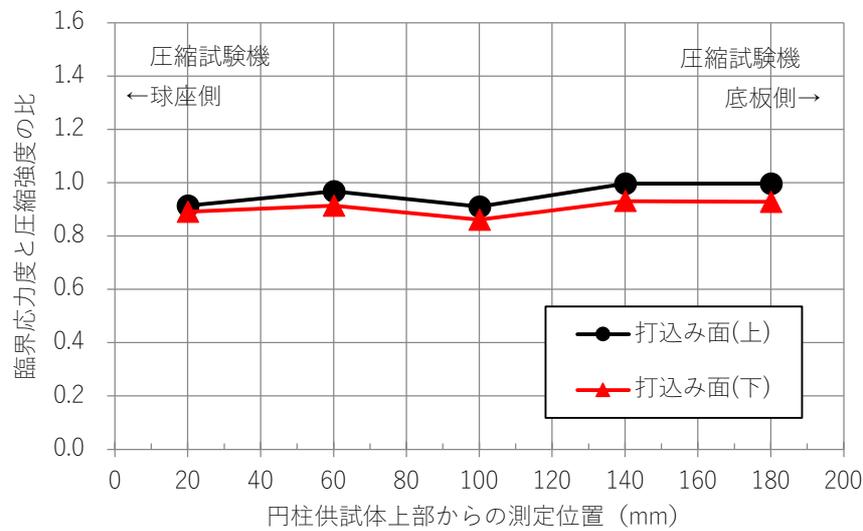


図 4.37 円柱供試体の臨界応力度と圧縮強度の比と円柱供試体の測定位置との関係

4.6.4 まとめ

本節では、火害調査時において採取されるコアの圧縮強度試験に着目し、試験機加圧板とコア両端部の端面摩擦を低減した状態で圧縮強度試験を実施し、試験時に生じるコア軸方向および直交方向の膨張収縮挙動をひずみゲージを用いて任意の深さ毎に同時に測定して、そのひずみ挙動から火害劣化深さが推定可能かを検討した。

本研究において得られた知見を以下にまとめる。

- ・コアの圧縮強度試験時に試験機加圧板とコア上下端部の摩擦を低減することにより、圧壊割裂型の破壊パターンとなり、コア上端（加熱面側）から先行して徐々に内部に向かって臨界応力度に達する傾向があることがわかった。
- ・試験機加圧板とコア上下端部の摩擦を低減したコアの圧縮強度試験において、コア軸方向の各深さの臨界応力度から、火害劣化深さが推定できる可能性を見出した。

4.7 火災を受けた建物の構造部材から採取したコンクリートコアを用いた火害劣化深さに関する検討

本節では、前節で示した火害劣化推定方法を実火災後の建物に適用可能かを確認するため、以下の火災を受けた建物の構造部材から採取したコンクリートコアを用いて、コアの圧縮試験時に被災面から深さ方向に体積ひずみを測定して臨界応力度を算出し、その結果の妥当性について確認した。

4.7.1 火災事例

(1) 火災状況

出火推定時刻 : 2019年7月18日 時刻不明
 消火開始時刻 : 2019年7月18日 午後2時22分
 鎮圧時刻 : 不明
 鎮火時刻 : 2019年7月18日 午後5時頃

(2) コア採取部材の概要

部材：鉄筋コンクリート造 壁

壁厚 250mm

鉄筋 呼び名：D13, @200m

コンクリート 設計基準強度：24N/mm²

コア：

採取本数 1本

直径 75mm

長さ 150mm

体積ひずみ測定位置：火災面から20mm, 40mm, 60mm, 80mm, 100mm, 120mm
 の計6箇所

4.7.2 構造部材から採取したコアの圧縮応力と体積ひずみおよび臨界応力度

(1) コアの圧縮試験と体積ひずみ測定方法

圧縮試験は、JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」により行った。圧縮試験の際、図4.26と同様にコアに火災面から20mm間隔の6箇所（写真4.5 ①～⑥参照）に円周方向とそれと直行する方向に貼付したひずみゲージによって、コアの縦ひずみと横ひずみを計測した。その結果から、火災面から深さ方向に臨界応力度を求め、火害劣化（影響）深さを推定した。

(2) コアの圧縮応力と体積ひずみおよび臨界応力度

図4.38にコアの圧縮応力と縦ひずみおよび横ひずみとの関係を、図4.39にコアの圧縮応力と体積ひずみとの関係を、図4.40にコンクリート火災面からの深さと臨界応力度と圧縮強度の比との関係を示す。また、写真4.5に圧縮試験時のコアの状況を示す。

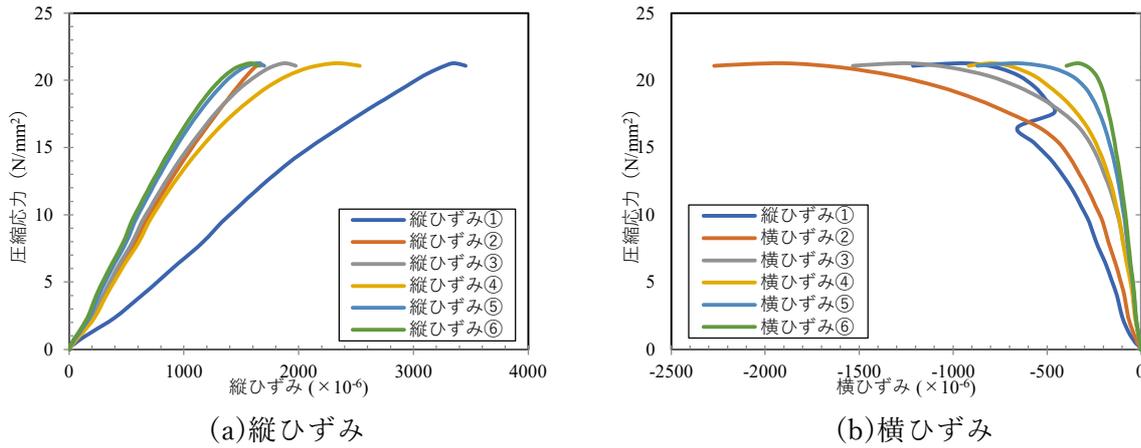


図 4.38 圧縮応力と縦ひずみおよび横ひずみとの関係

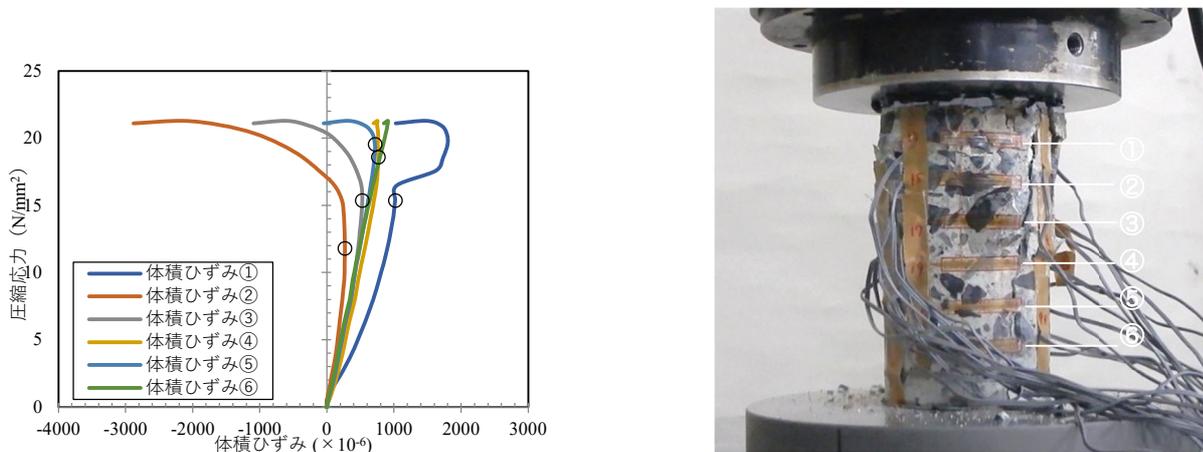


図 4.39 圧縮応力と体積ひずみおよび臨界応力度

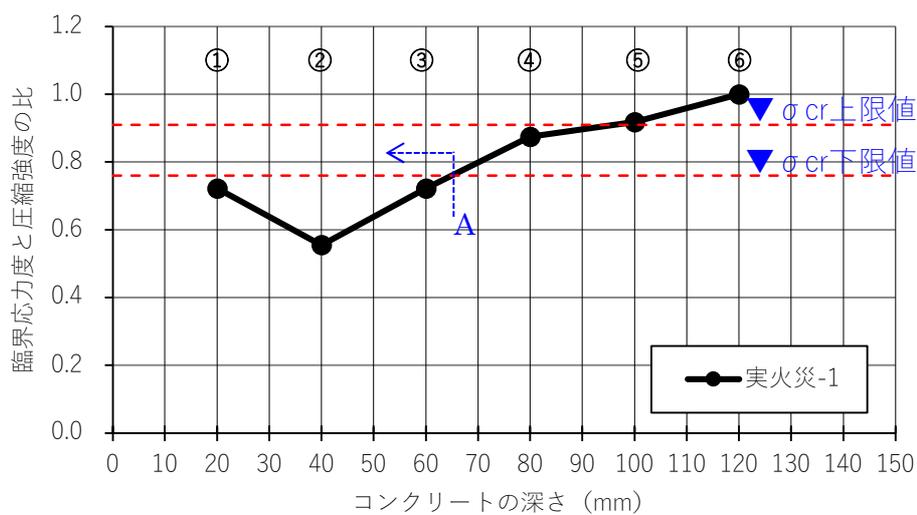


図 4.40 コンクリート火災面からの深さと臨界応力度と圧縮強度の比との関係

図 4.40 に示すように、臨界応力度と圧縮強度の比は火災面から 40mm の深さで最低値を示し、それより以深では増大している。その結果と、図 4.32 から採取したコンクリートと同様の水セメント比の臨界応力度／圧縮強度:0.76~0.91 の下限値0.76との交点は、火災面から 65mm (図中 A) であることから、コアを採取した構造部材の火害劣化深さは、火災面から 65mm と推定できる。なお、火災面から 20mm の臨界応力度と圧縮強度の比は、火災面から 40mm より高い結果を示しているが、図 4.37(a)に示される測定位置①の圧縮応力と縦ひずみとの関係は、圧縮試験時の载荷初期に縦ひずみが増大する傾向を示しており、これは、火害を受けたコンクリートの特徴を表していることから、臨界応力度と圧縮強度の比は最低値を示してはいないが火害劣化(影響)部であることがわかる。加えて、図 4.38(b)に示す測定位置①の圧縮応力 16.5N/mm²時にみられた横ひずみの増大は、その位置のひび割れの挙動を表していると考えられる。

4.7.3 まとめ

本節では、前節で示した火害劣化推定方法を実火災後の建物に適用可能かを確認するため、火災を受けた建物の構造部材から採取したコンクリートコアを用いて、コアの圧縮試験時に被災面から深さ方向に体積ひずみを測定して臨界応力度を算出し、その結果の妥当性について確認した。

その結果、火災事例建物の構造部材から採取したコンクリートコアの圧縮試験時に、4.6 節で検討した方法に基づき、被災面から深さ方向に体積ひずみを測定することにより、火災面から各深さの臨界応力度を測定することができ、その臨界応力度と圧縮強度との比を、本研究データに基づき比較することによって、その構造部材の被災面がうけた火害劣化(影響)の深さを推定することが可能であることを確認した。

4.8 まとめ

本章では、火害調査時において採取されるコアの圧縮強度試験に着目し、試験機加圧板とコア両端部の端面摩擦を低減した状態で圧縮強度試験を実施し、試験時に生じるコア軸方向および直交方向の膨張収縮挙動をひずみゲージを用いて任意の深さ毎に同時に測定して、そのひずみ挙動から火害劣化深さが推定可能かを検討した。

本研究において得られた知見を以下にまとめる。

- ・コアの圧縮強度試験時に試験機加圧板とコア上下端部の摩擦を低減することにより、圧壊割裂型の破壊パターンとなり、コア上端（加熱面側）から先行して徐々に内部に向かって臨界応力度に達する傾向があることがわかった。
- ・試験機加圧板とコア上下端部の摩擦を低減したコアの圧縮強度試験において、コア軸方向の各深さの臨界応力度から、火害劣化深さが推定できる可能性を見出した。
- ・火災事例建物の構造部材から採取したコンクリートコアを用いて、本研究で提案した方法を適用し、その構造部材の被災面がうけた火害劣化（影響）の深さを推定することが可能であることを確認した。

以上より、コンクリートの劣化深さの推定には、採取したコアの深さごとに臨界応力度を求める方法が有効であることを明らかにした。本研究において、限定的ではあるが、火害部から採取したコアの破壊域の体積ひずみから臨界応力度を求めることによって、火災を受けたコンクリート部材の劣化深さを把握することが可能である。

<第4章の参考文献>

- 1) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，2017年
- 2) 春畑仁一，新井真：粗骨材の種類が火害を受けたコンクリート表面の劣化評価に与える影響，GBRC, Vol.43, No.1, 2018年1月
- 3) 春畑仁一，迫井祐樹，内田慎哉，池田憲一：表層透気試験および色彩測定による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.39 No.1, pp.1075-1080, 2017年7月
- 4) 内田慎哉，春畑仁一，小松由弥，池田憲一：反発度および機械インピーダンスによる火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.39 No.1, pp.1903-1908, 2017年7月
- 5) 岩野聡史，内田慎哉，春畑仁一，渡部正：弾性波法で得られた接触時間・伝搬時間による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.39 No.1, pp.1915-1920, 2017年7月
- 6) 寺澤広基，鎌田敏郎，春畑仁一，内田慎哉：表面波の伝播特性に着目したコンクリート火害劣化の評価に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.39 No.1, pp.1933-1938, 2017年7月
- 7) 藤原規雄，西谷慶彦，春畑仁一，内田慎哉：超音波表面走による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.39 No.1, pp.1993-1998, 2017年7月
- 8) 澤口啓希，春畑仁一，内田慎哉，池田憲一：火害を受けたコンクリートの孔内局部載荷法による劣化評価に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.39 No.1, pp.1063-1068, 2017年7月
- 9) 日本工業規格：コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法 JIS A 1107, 2012年
- 10) 日本工業規格：コンクリートの静弾性係数試験方法 JIS A 1149, 2010年
- 11) 新井真，春畑仁一，内田慎哉，池田憲一，岩野聡史，大野健太郎：各種非破壊試験による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的検討 その1 コアの圧縮強度，静弾性係数および中性化深さ，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，pp.337-338, 2017年7月
- 12) 大内千彦，寺西浩司，立松和彦，谷川恭雄：載荷面の摩擦を軽減させたコンクリートの圧縮強度試験で得られる変形特異点に関する一考察，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)，pp.1221-1222, 2010年9月
- 13) 友澤史紀，梶田佳寛，野口貴文ほか：高強度コンクリートの圧縮試験方法の標準化に関する研究(その1～その3)，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，pp.505-510, 1989年10月
- 14) 谷川恭雄 監修：硬化コンクリートの性質，セメントジャーナル社，2004年10月
- 15) 日本コンクリート工学会編：コンクリート便覧[第2版]，1976年
- 16) Desayi, P., Viswantha, C,S. : True ultimate strength of plain concrete, Bulletin RILAM No.36, 1967.9
- 17) 加藤清志：プレーンコンクリートの微小ひびわれと物性評価，土木学会論文報告集，第208号，pp.121-136, 1972年12月
- 18) 小阪義夫，谷川恭雄：コンクリート圧縮供試体の内部応力分布におよぼす載荷面の拘束の影響，コンクリートジャーナル，Vol.8, No.6, pp.12-18, 1970年6月

第 5 章 結論

5. 結論

本研究は、火災を受けた鉄筋コンクリート造（以下、RC造と記す）集合住宅の構造部材を対象として、被災したRC造部材が受ける火災外力を推定し、コンクリート表面から内部に受けた火害による強度低下の範囲を明確にした。また、被災したコンクリート部材を補修するために検討される火害劣化深さを推定する方法を提案した。

以下に各章に述べた検討の結果をまとめて、本研究の結論とする。

第1章では、本研究の背景と課題を述べ、研究の目的、本論文の構成について述べた。

第2章では、火災時にRC造の集合住宅が被災する火災外力を明確にするため、火災建物の被害と鉄筋コンクリート部材が受ける火災加熱温度および火災継続時間の検討を行なった。国内の火災件数と火害調査件数からRC造部材が受ける火災加熱温度を求めるため、調査機関による建物の火害調査事例を集計した。また、出火件数が多かった火災継続時間における集合住宅に対して耐火性能検証法によって火災外力を類型化し、火災温度と火災継続時間を推定した。加えて、類型化した火災外力に対して、有限要素法による非線形解析を用いて部材内部の温度を推定し、調査結果を比較して妥当性を検証した。

その結果、火害調査結果における統計調査では、国内の建物火災件数は年々減少しているが、火害調査・診断の件数は増加傾向にあること、火害調査件数はRC造の共同住宅が最多であること、RC造の集合住宅における火災は全体の89.8%が出火発生から1時間30分以内に、また遅くとも3時間以内にはほとんどが鎮圧されていること、集合住宅の火害調査における火害部から採取されたコンクリートコアの圧縮強度は、全体の76.4%が低下していることなどを明らかとした。

集合住宅の耐火性能検証による最高火災温度および火災継続時間の推定においては、統計調査を用いて設計図書が残存した3件の耐火性能の検証を行った。集合住宅が火災を受け盛期火災に成長した場合、いずれ集合住宅においても火災温度と火災継続時間の関係は、ISO834に示される標準加熱曲線を上回ることを確認した。

耐火性能検証法により求めた集合住宅の火災温度と火災継続時間の関係を用いたコンクリートの熱伝導解析結果では、上記3件のいずれにおいても、火害調査の目視観察により推定した最高受熱温度よりも高い温度であることを明らかとした。

第3章では、片面から火災加熱を受けたコンクリート部材の強度低下に関する検討を行った。本章では、まず、RC造天井部材を模擬したコンクリート試験体を作製し、第2章により類型化した火災外力のうち、火害調査実績およびモデル化した火災温度と火災継続時間から、加熱実験のパラメータを設定して火災加熱したコンクリート試験体を作製した。次に、この試験体加熱面からJIS規格に基づくコンクリートコアおよび直径30mmの小径のコンクリートコアをそれぞれ採取して強度分布を求めた。

その結果、JIS規格に基づくコンクリートコアの圧縮強度は、加熱面の最高到達温度が高くなる（コンクリート火災継続時間が長くなる）ほど低下し、火災前と比較して火災継続時間が15

分で約 89%、30 分で約 76%、60 分で 59%程度となり、130 分では 43%程度となることを明らかにした。これは、火害調査実績から得られた圧縮強度残存比の方が火災加熱を与えたコンクリート試験体よりも 1.2~1.3 倍高くなる傾向を示した。

小径コアの圧縮強度結果からは加熱面側と内側で生じた差が明らかとなり、その差を定量的に把握することができた。加熱面側の小径コアの圧縮強度は、火災継続時間が 60 分で 60%低下し半分以下となっている。一方、内部側の圧縮強度は火災継続時間が 60 分で 84%程度、130 分で 68%程度残存している。なお、小径コアの最高到達温度と圧縮強度残存比との関係には高い相関が認められた。

これらの結果より、火災継続時間が 30 分までであれば、加熱面から深さ 60mm 内部のコンクリートの圧縮強度は約 14%程度の低下であることから、火害の程度は軽微と考えられる。一方、加熱面側から 60mm までのコンクリートの圧縮強度は、火災継続時間が 15 分であっても 27%程度の低下が求められることから、火害の影響を少なからず受けていると考えることができ、補修範囲の対象として検討するための判断材料になることが示唆される。

各種スライス試験片による強度結果から、加熱面温度を限定したモルタル試験体から採取したコアを用いて、加熱面から内側に向かって連続して圧縮・曲げ・引張強度を求めることにより、加熱面から内部 200mm までの強度分布を把握した。また、各種試験方法の特性を定量的に把握し、コアをスライスして各深さの強度分を求める場合には、曲げ試験が最適であることを明らかとした。この曲げ試験により、加熱冷却後のコンクリート試験体から採取したコアを加熱面から内側に向かって連続して曲げ強度を測定し、加熱面から深さ方向に強度低下を定量的に把握した結果、火災加熱を受けたコンクリート試験体では、化学的性質の変化および物理的性質の変化によるひび割れ、また、部材の熱応力によるひび割れにより、加熱面から 140mm 程度まで強度低下があることが把握できた。

火害調査で扱うコンクリート部材の受熱温度については、火災後の火災室内の可燃物を観察することで得られる変状からある程度の受熱温度は想定できるものの、火災継続時間や可燃物の位置などによってコンクリートが受ける火害劣化を把握することは困難である。このため、火災性状は不明であっても、採取するコアの強度分布を把握することにより、加熱温度を求めることなく、コンクリートの強度低下把握することが可能となった。

第 4 章では、火災加熱を受けたコンクリート部材から採取したコアの深さ方向の臨界応力度を求め火害劣化深さの推定に関する検討を行った。

本章では、火害調査時に被災部の構造部材の圧縮強度を確認する目的で採取されるコアに着目し、従来行われているコアの圧縮強度を行う際に、コアを切断することなく加熱面から内部に至る損傷範囲を把握する方法について検討し、その方法を示した。火害劣化深さの推定については、現在、火害調査時に必要であるがその方法については明確な方法は定められていない。

本実験では、火災を受けたコンクリート試験体から採取したコアの圧縮強度試験を実施する際に、コアの軸方向にひずみゲージを連続して貼付し、圧縮強度に至るまでの軸方向およびその直交方向のひずみから得られる体積ひずみを測定した。その体積ひずみは、コアの深さ方向における最弱部から順番に変形特異点に達することを明らかにし、その変形特異点に達した時の圧縮応力（臨界応力度）を求めることによって、火害劣化深さを定量化する方法を示した。

これらの結果、限定的ではあるが採取したコアの破壊域の体積ひずみから臨界応力度を求めることによって、火災を受けたコンクリート部材の劣化深さを把握することが可能である。

以上に、本研究によって得られた結論について述べた。

火災後の建物の再利用を目的とした火害調査は、被災した RC 造構造部材の補修範囲（広さと深さ）を求めることが重要である。本研究では、RC 造の集合住宅の火災に焦点を絞り、実火災事例による火災温度と火災継続時間から熱伝導解析によって、被災部コンクリートの表面から内部における温度勾配を把握し、その強度低下を実験的に明らかにした。そして、従来、火害調査で実施しているコアの圧縮試験を応用して、コアの表面から深さ方向に連続して臨界応力度を求めることにより、劣化深さを推定できる方法を示した。

しかしながら、近年では、建物の長期火災が発生していることから、長時間火災を受ける RC 造構造部材の火害劣化について、データを蓄積することが重要であると考えられる。

また、火害劣化深さ推定方法については、まだまだ蓄積データが乏しいと言わざるを得ないのが現状である。様々な火災事例に対して、実験的ならびに解析的に検討していくことが必要であると考えている。さらには、第4章で示した火害劣化深さの推定方法は、ひずみゲージによる限られた測定範囲のデータであることが懸念される。将来的にはハイスピードカメラを用いた画像処理解析などにより、広範囲の測定が可能で、より簡便に、高精度の測定方法が望まれる。

研究業績

主論文を構成する論文

1. 鉄筋コンクリート造集合住宅における火災によるコンクリートの強度低下に関する研究
春畑仁一, 新井真, 池田憲一
日本建築学会構造系論文集 第 85 巻 第 769 号, pp.439-447, 2020 年 3 月
2. 火災を受けたコンクリート部材から採取したコアの圧縮応力-体積ひずみ曲線による変形特異点を用いた火害損傷深さの推定に関する基礎的研究
春畑仁一, 新井真, 池田憲一
日本建築学会構造系論文集 第 84 巻 第 765 号, pp.1497-1502, 2019 年 11 月

参考論文

1. 火災を受けたコンクリート部材から採取したコアを用いた火害劣化深さの推定に関する基礎的研究
その 1 実験概要および一面加熱を受けたコンクリートから採取したコアの深さ毎の臨界応力度
春畑仁一, 新井真, 岸仁志, 池田憲一
日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.169-170, 2020 年 9 月
2. 火災を受けたコンクリート部材から採取したコアを用いた火害劣化深さの推定に関する基礎的研究
その 2 電気炉で加熱したコンクリート円柱供試体の臨界応力度
岸仁志, 新井真, 春畑仁一, 池田憲一
日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.171-172, 2020 年 9 月
3. 火災を受けたコンクリート部材から採取したコアを用いた火害劣化深さの推定に関する基礎的研究
その 3 コアの臨界応力度と受熱温度との関係
新井真, 春畑仁一, 岸仁志, 池田憲一
日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.173-174, 2020 年 9 月
4. 火災を受けたモルタルの圧縮強度試験による劣化深さ推定に関する基礎的研究 その 1 実験概要, コアの圧縮強度, 縦ひずみ分布および摩擦拘束の影響
新井真, 春畑仁一, 池田憲一
日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.71-72, 2019 年 9 月
5. 火災を受けたモルタルの圧縮強度試験による劣化深さ推定に関する基礎的研究 その 2 火害劣化を受けたモルタルコアの体積ひずみと臨界応力度
春畑仁一, 新井真, 池田憲一
日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.73-74, 2019 年 9 月
6. 粗骨材の種類が火害を受けたコンクリート表面の劣化評価に与える影響

春畑仁一，新井真
GBRC, Vol.43, No.1, pp.20-27, 2018年1月

7. 粗骨材の種類が火害を受けたコンクリート表面の色彩測定に与える影響
新井真，春畑仁一
日本火災学会 研究発表会概要集, pp.230-231, 2018年5月
8. 火害を受けた建築物の調査・診断に関する統計調査
春畑仁一，新井真
日本火災学会 研究発表会概要集, pp.232-233, 2018年5月
9. 火災を受けたコンクリートの劣化深さの推定に関する基礎的研究
その1 実験概要，コアの圧縮強度，静弾性係数および縦ひずみ分布
新井真，春畑仁一，内田慎哉，池田憲一，岩野聡史，大野健太郎
日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.227-228, 2018年9月
10. 火災を受けたコンクリートの劣化深さの推定に関する基礎的研究
その2 加熱後のコンクリートコアと未加熱供試体との比較
春畑仁一，新井真，内田慎哉，池田憲一，岩野聡史，大野健太郎
日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.229-230, 2018年9月
11. 火害を受けたコンクリートの反発度・反発速度・機械インピーダンス・接触時間による劣化状態の評価方法の検討
春畑仁一，内田慎哉，岩野聡史，池田憲一
コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.1, pp.1635-1640, 2018年7月
12. Basic Study on Evaluation Method of Fire Damaged Concrete by Color Measurement
Masakazu Haruhata, Makoto Arai, Shinya Uchida, Kenichi Ikeda
The 6th Japan-US NDT Symposium, Vol.6, pp.290-296, 2018.7
13. 火害を受けたコンクリートの色彩による劣化評価手法
春畑仁一，内田慎哉，大野健太郎，岩野聡史，澤口啓希，池田憲一
コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集，Vol.6, pp.361-366, 2018年8月
14. 火害を受けたコンクリートの機械インピーダンスによる劣化状態の評価方法の検討
春畑仁一，内田慎哉，大野健太郎，岩野聡史，池田憲一
土木学会第73回年次学術講演会，pp.327-328, 2018年8月
15. 表層透気試験および色彩測定による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究
春畑仁一，迫井裕樹，内田慎哉，池田憲一
コンクリート工学年次論文集，Vol.39 No.1, pp.1075-1080, 2017年7月
16. 反発度および機械インピーダンスによる火害を受けたコンクリートの劣化評

- 価手法に関する基礎的研究
内田慎哉，春畑仁一，小松由弥，池田憲一
コンクリート工学年次論文集，Vol.39 No.1，pp.1903-1908，2017年7月
17. 弾性波法で得られた接触時間・伝搬時間による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究
岩野聡史，内田慎哉，春畑仁一，渡部正
コンクリート工学年次論文集，Vol.39 No.1，pp.1915-1920，2017年7月
18. 表面波の伝播特性に着目したコンクリート火害劣化の評価に関する基礎的研究
寺澤広基，鎌田敏郎，春畑仁一，内田慎哉
コンクリート工学年次論文集，Vol.39 No.1，pp.1933-1938，2017年7月
19. 超音波表面走査法による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究
藤原規雄，西谷慶彦，春畑仁一，内田慎哉
コンクリート工学年次論文集，Vol.39 No.1，pp.1993-1998，2017年7月
20. 火害を受けたコンクリートの孔内局部載荷法による劣化評価に関する基礎的研究
澤口啓希，春畑仁一，内田慎哉，池田憲一
コンクリート工学年次論文集，Vol.39 No.1，pp.1063-1068，2017年7月

謝 辭

謝 辞

本研究は、筆者が一般財団法人日本建築総合試験所において 2013 年から今日にわたり実施してきた自主（共同）研究の成果をまとめたものです。この度、研究の機会を与えてくださった当法人の役職員の皆様に心から感謝申し上げます。

そして、東京理科大学研究推進機構総合研究院教授池田憲一博士には、筆者が火害診断の分野に携わった当初から、火害を受けたコンクリートの火害劣化深さの推定手法という非常に奥深いテーマを与えて頂き、大変お忙しい中に長期間にわたり懇切丁寧なご指導を頂きました。また、研究は元より研究者としての姿勢や考え方において、時には温かく時には厳しく一貫してご指導を賜りました。ここに篤く御礼申し上げます。

東京理科大学工学部第二部建築学科教授河野守博士には、本論文の構成から実験や解析など多岐にわたってご助言ならびにご指導を頂きました。また、東京理科大学研究推進機構総合研究院教授松原美之博士には、解析方法や論文執筆にあたりご助言を頂戴致しました。東京理科大学理工学部教養教授市村志朗博士には、本論文に関する実験方法について貴重なご示唆を賜りました。東京理科大学理工学研究科国際火災科学専攻准教授水野雅之博士には、本論文の構成や建築火災安全工学に関してご助言を頂戴しました。ここに心より感謝致します。

東京理科大学工学部建築学科教授今本啓一博士には、私が社会人として現職につき研究者を目指した頃より大変お世話になり、この度は本研究におけるコンクリートの各種試験方法や火害を受けたコンクリートのひび割れに関して、細やかにご指導を頂戴しました。また、東京理科大学理工学部建築学科教授兼松学博士には、本研究における実験について、体積ひずみの計測方法や圧縮試験機の特性など、大変お忙しい中にも多岐にわたってご助言、ご指導を賜りました。ここに心より感謝致します。

本研究のテーマである鉄筋コンクリート造集合住宅の火害診断については、日本建築学会火害診断補修小委員会とその傘下のコンクリート調査方法 WG の委員の方々より、コンクリートの火害診断に関する調査方法について最新の知見を学びました。とくに株式会社浅沼組技術研究所山崎順二博士には、研究当初より実験や論文執筆に関して多くのご指導を頂戴致しました。また、コンクリート調査方法 WG では、富山県立大学環境・社会基盤工学科准教授内田慎哉博士をはじめ、東京都立大学都市環境学部都市基盤環境学科助教大野健太郎博士、リック株式会社岩野聡史博士、株式会社構造総研山根政夫氏（当時）、日東建設株式会社久保元樹氏、川崎地質株式会社澤口啓希氏等多くの方々のご指導とご協力を賜り、実験を重ねることで多くの貴重な知見を得ることができました。ここに深く感謝申し上げます。

また、東京理科大学の研究活動においては、池田研究室の大和征良氏、江口純子氏、ドゥ・バン・ニー氏の諸先輩方ならびに吉野茂氏、藤宮克氏、梅澤正人氏らに多くのご助言、ご協力を得ました。ここに心より感謝致します。加えて、本研究における多くの実験では、日本建築総合試験所耐火防火試験室職員の協力を得て実施することができました。とくに同試験室の新井真氏には、実験実施や結果の整理に至るまで多くの協力を得ました。これらの実験は私の貴重な財産であるとともに、本論文を構成する重要な要素となっています。ここに心より感謝申し上げます。

最後に、これまで筆者に学ぶ機会を与えてくれた春畑健二、京子の両親に感謝し、本論文の謝辞と致します。

2021 年 3 月
春畑 仁一