

超高強度コンクリート部材の初期応力・  
初期ひび割れ抑制に関する研究

**Studies on Reduction of Early Age Deformation Induced Stress and  
Resultant Crack in Reinforced Ultra High-strength Concrete Members**

2009年3月

鈴木 雅博

**Masahiro, Suzuki**

# 目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究の目的	2
1.3 本論文の構成	3
第1章 参考文献	6
第2章 既往の研究	7
2.1 はじめに	7
2.2 高強度コンクリートの自己収縮ひずみ	7
2.2.1 自己収縮ひずみの発生機構	7
2.2.2 セメント種類が自己収縮ひずみに及ぼす影響	9
2.2.3 シリカフェームが自己収縮ひずみに及ぼす影響	10
2.3 自己収縮ひずみの低減方法	11
2.3.1 低熱ポルトランドセメント	11
2.3.2 膨張材	12
2.3.3 収縮低減剤	15
2.3.4 内部養生方法による自己収縮ひずみの低減	16
2.3.5 各種材料の組み合わせによる自己収縮ひずみ低減効果	17
2.3.6 自己収縮ひずみ低減に用いた材料が圧縮強度に及ぼす影響	17
2.4 自己収縮ひずみの温度依存性に関する研究の現状	19
2.5 若材齢時線膨張係数に関する研究の現状	20
2.6 応力速度が引張強度に与える影響	22
2.7 自己収縮応力に関する研究の現況	23
2.7.1 内部応力の予測方法	24
2.7.2 クリープ	26
2.7.3 模擬実物供試体を用いた試験による研究	28
2.8 現状の問題点	29
第2章 参考文献	30
第3章 超高強度コンクリートの自己収縮ひずみ低減化の検討	37
3.1 はじめに	37
3.2 膨張材種別による予備試験	37
3.2.1 実験概要	37
3.2.2 実験結果	39
3.3 単位膨張量の検討	39
3.3.1 実験概要	39
3.4 膨張材と収縮低減剤による収縮ひずみ低減効果	45
3.4.1 実験概要	45

3. 4. 2	膨張材による自己収縮ひずみ低減効果	46
3. 5	廃瓦粗骨材を用いた内部養生法による収縮ひずみ低減効果	48
3. 5. 1	実験概要	48
3. 5. 2	廃瓦粗骨材による自己収縮ひずみ低減効果	49
3. 6	各自己収縮ひずみの低減効果の相対比較	52
3. 7	各種低減方法を組み合わせた効果	53
3. 7. 1	実験概要	53
3. 7. 2	廃瓦粗骨材と膨張材および収縮低減剤を混入したことによる 自己収縮ひずみの低減効果	54
3. 8	水結合材比が内部養生効果に及ぼす影響	57
3. 8. 1	実験概要	57
3. 8. 2	水結合材比が内部養生効果に与える影響	57
3. 9	強度特性	59
3. 9. 1	実験概要	59
3. 9. 2	各種自己収縮低減方法が強度特性に与える影響	59
3. 10	第3章のまとめ	63
第3章	参考文献	65
第4章	自己収縮ひずみの温度依存性検討	66
4. 1	はじめに	66
4. 2	膨張材と収縮低減剤を用いた自己収縮ひずみの温度依存性	66
4. 2. 1	実験概要	66
4. 2. 2	線膨張係数の差が自己収縮ひずみ算出に与える影響	71
4. 2. 3	温度履歴を考慮した膨張材と収縮低減剤による 自己収縮ひずみの低減	72
4. 2. 4	膨張材と収縮低減剤を混入・無混入の超高強度コンクリートの 温度履歴を考慮した自己収縮ひずみの実験式	77
4. 3	廃瓦粗骨材を用いた自己収縮ひずみの温度依存性	81
4. 3. 1	実験概要	81
4. 3. 2	温度履歴を考慮した廃瓦粗骨材による自己収縮ひずみの低減	82
4. 4	圧縮強度の温度依存性	83
4. 5	第4章のまとめ	84
第4章	参考文献	85
第5章	低収縮超高強度コンクリートの拘束応力の検討	86
5. 1	はじめに	86
5. 2	超高強度コンクリートのクリープ特性	86
5. 2. 1	実験概要	86
5. 2. 2	超高強度コンクリートの若材齢におけるクリープ特性	88
5. 3	低収縮超高強度コンクリートの拘束応力	90

5. 3. 1	実験概要	90
5. 3. 2	コンクリート温度一定条件における拘束応力低減効果	91
5. 3. 3	コンクリートの温度履歴が拘束応力に与える影響	102
5. 4	第5章のまとめ	103
	第5章 参考文献	105
第6章	低収縮超高強度コンクリートによる柱模擬部材の収縮応力の低減効果	106
6. 1	はじめに	106
6. 2	実験概要	106
6. 2. 1	使用材料と配合	106
6. 2. 2	試験体および試験方法	108
6. 3	実験結果および考察	110
6. 3. 1	フレッシュ性状およびコンクリート最高温度	110
6. 3. 2	コンクリート温度履歴	110
6. 3. 3	圧縮強度, ヤング係数および割裂引張強度	112
6. 3. 4	自己収縮ひずみ	114
6. 3. 5	ひび割れ発生状況	115
6. 3. 6	全ひずみ	118
6. 4	柱模擬部材の応力検討	119
6. 4. 1	応力の算定方法	119
6. 4. 2	若材齢時のコンクリートのクリープ特性	120
6. 4. 3	弾性ひずみ+クリープひずみの算出方法	121
6. 4. 4	内部応力予測結果と評価	123
6. 5	第6章のまとめ	125
	第6章 参考文献	126
第7章	結論	127
	本論文に関連のある研究報告	133

# 第1章 序 論

## 1. 1 研究の背景

少子高齢化社会の社会情勢から建設コストが縮小する傾向にあり、コンクリート構造物は、ライフサイクルコストを抑制した高耐久化による長寿命化技術が求められている。また、都市部のインフラ整備においては、限られた空間を有効に活用するため、橋梁においては低桁高とすることや建築においては高層化とすることが求められている。超高強度コンクリートは、高い圧縮強度を有するばかりでなく、硬化体の組織が緻密化することから塩分遮断性を高めるなどの高耐久化にもつながることから、超高強度コンクリートの技術開発は、こうした社会的要請に対する1つの方策になると考えられる。

コンクリートの高強度化の技術は、シリカフュームなどの混和材の利用やセメントの分散性を高めた高性能減水剤の開発などが進み、良質な骨材を選定する必要があるが、設計基準強度 150MPa の建築部材の施工<sup>1)</sup>や設計基準強度 120N/mm<sup>2</sup> の歩道橋<sup>2)</sup>などの施工も可能となってきた。また、70℃を越える高温養生によるシリカフュームの水和を高めることによる高強度化を図る<sup>3,4)</sup>試みも行われている。

コンクリート標準書設計編<sup>5)</sup>では、圧縮強度の特性値の適用範囲を 80 N/mm<sup>2</sup> 以下とした。また、建築工事標準仕様書・同解説(JASS5)<sup>6)</sup>では、高強度コンクリートの定義を設計基準強度 36~60 N/mm<sup>2</sup> 以下とし、その後、設計基準強度 120 N/mm<sup>2</sup> 以下の高強度コンクリートの施工指針<sup>7)</sup>を刊行した。土木・建築ともに設計に必要な材料設定値の提示や実験データに基づく塩化物イオン拡散係数を解説に示すなど整備が進められており、超高強度コンクリートの優位性が明確になってきている。このことから、さらに、超高強度コンクリートは普及していくことが考えられる。

一方、超高強度コンクリートは、自己収縮ひずみが大きくなることが知られている<sup>8)</sup>。自己収縮ひずみは、毛細管張力説によれば、結合材の水和に基づく内部乾燥により、毛細管内にある液体に負圧が生じることによって発生する。このことから、封緘養生のように水の逸散がない場合にも自己収縮ひずみが発生する。超高強度コンクリートは、単位セメント量が多いため、反応に必要な水の消費が多くなるため、液体に発生する負圧が大きくなるため、大きな自己収縮ひずみが生じる。また、自己収縮ひずみは、結合材の水和進行に伴う空隙形成と反応水の消費に連動するために、凝結直後から大きな自己収縮ひずみが発生する。この自己収縮ひずみが鉄筋等の拘束により引張応力が比較的初期の材齢で発生する。また、超高強度コンクリートは単位結合材量が 1000kg 以上となるため水和発熱による温度上昇量が高くなることから温度応力が大きくなる。このことから、ひび割れに対するリスクが大きくなり、超高強度コンクリートを用いた RC 部材のひび割れが報告<sup>9,10)</sup>されている。

また、自己収縮ひずみは曲げひび割れ幅に影響を及ぼすこと<sup>11)</sup>や、せん断耐力を低下させることなどが報告<sup>12)</sup>されている。このことから、超高強度コンクリートの高耐久・高強度の利点を十分に発揮できなくなる可能性がある。

こうしたことから、耐久性能や構造性能の観点から、超高強度コンクリートに発生する引張応力を低減するための抑制技術の確立と自己収縮ひずみに起因して発生する内部応力を適正に評価することは重要な課題である。

温度応力による引張応力の抑制方法は、低熱ポルトランドセメントを使用する方法が知られている<sup>13)</sup>。自己収縮ひずみの抑制方法は、膨張材による物理的な膨張ひずみの付与<sup>14)</sup>や収縮低減剤による表面張力の低下による方法<sup>8,14)</sup>、高含水率骨材を用い、骨材からの水分補給により自己乾燥を抑制する方法(以下、内部養生方法と示す)<sup>15)</sup>が提案されている。また、セメント種別では、高ビーライトセメント系である低熱ポルトランドセメントは、自己収縮ひずみを抑制する効果があること<sup>14)</sup>が知られている。

膨張材と収縮低減剤を使用した収縮ひずみの抑制に関する検討は、水結合材比 23%以上であり、本研究で対象とする水結合材比 20%以下の超高強度コンクリートの適用例がほとんどない。これまでの研究においては、内部養生方法で使用する骨材は軽量骨材を使用しており、骨材自体の破砕強度が小さいために所定の圧縮強度を得るために混入する量が制限されている。また、実構造物を想定した水和熱に起因したコンクリートの温度履歴が収縮ひずみに与える影響を検討する必要があるが、自己収縮ひずみの低減に関する研究の多くは 20℃一定の条件で行われているのが現状である。

構造性能を適正に評価するためには、自己収縮ひずみが外部・内部で拘束を受けて発生する内部応力の把握が必要となる。内部応力の発生量は、コンクリートのヤング係数、クリープ係数、自己収縮ひずみ、鉄筋とコンクリートの線膨張係数差などが影響する。このため、自己収縮ひずみの低減が拘束応力の低減につながらない場合もあるため、拘束応力の低減に関する検討も必要となる。この内、拘束応力が初期材齢で生じるために、若材齢時のクリープ特性が必要となるが、これらの検討は水結合材比 23%以上においてはあるが<sup>16)</sup>、水結合材比 20%以下の超高強度コンクリートにおいてはほとんどなされていない。超高強度コンクリートを用いた部材の内部応力を予測することが、設計体系を構築する上で重要な課題であり、超高強度コンクリートのクリープ予測方法を確立する必要がある。このことは同様に自己応力低減の効果を適正に評価するためにも必要となる。

## 1. 2 本研究の目的

超高強度コンクリートは、圧縮強度の特長ばかりでなく、耐久面にも優れていることからインフラ整備をしていく上で有効な建設材料の 1 つとして期待される。一方、超高強度コンクリート課題の 1 つに大きな自己収縮ひずみが発生し、鉄筋などに拘束された場合に引張応力が発生し、構造面や耐久面の性能低下につながる可能性がある。このことから、高性能コンクリートとして期待できる超高強度コンクリートの優位性を十分に発揮するために自己収縮ひずみに起因して発生する引張応力を低減する技術を確立する必要がある。また、部材内部に発生するこの引張応力の影響を考慮した構造設計が必要となるため、内部応力を予測するために必要となる材料定数を把握し、引張応力の低減に対する適正な評価を行う必要がある。さらに、結合材の水和に起因して構造物は高温履歴を伴うため、内部に発生する引張応力の予測には温度履歴の影響を取り入れる必要がある。

この課題に対して、本研究では、実験的・解析的な検討を行い、いくつかの知見を得た。

高強度コンクリートの自己収縮ひずみ・拘束応力の低減方法では、膨張材による物理的な膨張ひずみの付与、収縮低減剤による表面張力の低下による方法および新たに軽量骨材と天然骨材との中間の破砕値となる高含水率の多孔性を有する廃瓦粗骨材を用い、骨材からの水分補給により自己乾燥を抑制する内部養生方法に着眼した。この低減方法の単独で

使用する方法や複数の収縮低減方法を併用した場合の収縮ひずみや拘束応力の低減効果を実験的に把握する。また、これまでの検討がほとんどなかった実構造物の施工を想定した練上がり温度や水和熱に起因して生じるコンクリート温度履歴が収縮ひずみに与える影響や収縮ひずみの低減効果に与える影響を実験的に把握した。さらに、取得した実験データを用いてコンクリートの温度履歴を考慮した収縮ひずみの予測方法を検討する。

部材内部に発生する応力を予測するのに必要となる超高強度コンクリートのクリープ特性が必要となる。自己収縮ひずみが材齢1~3日に発現し、そのひずみに起因して拘束応力が発生するため、材齢1日以前のクリープ特性の取得が必要となる。このため、若材齢時においても載荷可能となる横置きクリープ試験を用い、過去にほとんど試験例がない超高強度コンクリートクリープ特性を把握し、若材齢時の内部応力予測精度の向上を図る。また、この実験結果とW/Cを30%とした既往の研究<sup>17)</sup>との比較から圧縮強度によるクリープ特性の差異を比較した。さらに、膨張・収縮を伴う超高強度コンクリートを用いた小型の鉄筋拘束試験結果と実験で得られた超高強度コンクリートのクリープ特性を増分型step-by-stepクリープ解析結果を用いた解析結果とを比較し、超高強度コンクリートのクリープ特性の整合性を検証する。

次に収縮の大きい超高強度コンクリートと収縮ひずみを低減した超高強度コンクリートを用いた超高強度コンクリートを用いた柱模擬部材を作製し、柱模擬部材表面のひび割れ状況、柱模擬部材内部のひび割れ状および鉄筋周囲のひび割れを観察し、収縮ひずみを低減した効果を検証する。また、内部に設置したひずみ計の測定値から柱模擬部材内部に発生する応力を増分型step-by-stepクリープ解析法を用いて予測した結果を用いて、柱模擬部材に発生する応力の低減効果を解析的に検討するとともに、この結果と柱模擬部材内部ひび割れ観察結果との整合性を検証する。

以上のことより、本研究では、超高強度コンクリートの収縮応力の低減方法を確立し、それによる超高強度コンクリートの優位点である構造面や耐久面を確保し、より高性能なコンクリートとしての低収縮超高強度コンクリートを提案する。また、水和熱に起因したコンクリートの温度履歴や練上がり温度が収縮ひずみに与える影響を把握することにより、実構造物に発生する応力を正當に評価する基礎データを提示する。さらに、若材齢時のクリープ特性を把握し、内部応力を予測するための基礎データを提示する。温度依存性を考慮したひずみやクリープ特性から内部応力を予測し、収縮応力の低減効果を検討する。最後に、収縮ひずみを低減した配合を用いて柱模擬部材を作製し、収縮応力の低減効果を検証した。これにより、超高強度コンクリートの分野における技術的發展を図るものである。

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成を図1.3.1に示す。超高強度コンクリート特有の自己収縮ひずみを膨張材、収縮低減剤および廃瓦粗骨材を用いて低減した。また、収縮ひずみに関しては水和熱に起因した温度履歴の影響を検討した。これらの基礎試験結果から柱模擬部材に発生する内部応力の検討を行った。以下に各章の概要を示す。

第1章では、本研究の背景および目的について述べた。

第2章では、本研究に関連した既往の研究を調査し、現状の問題点を抽出し、本研究の位置づけを明確にした。

第3章では、超高強度コンクリートの合理的な収縮ひずみや収縮応力の低減方法を見いだすため、膨張材、収縮低減剤および廃瓦粗骨材による内部養生方法に着眼し、それらの単独使用あるいはいくつかの収縮低減方法の併用による超高強度コンクリートの収縮ひずみや収縮応力の低減効果を、収縮の低減を実施していない超高強度コンクリートと比較することにより実験的に検討した。この検討結果から、低収縮超高強度コンクリートを提案した。また、超高強度コンクリートの領域における膨張材の使用が極めて少なく、かつ、超高強度コンクリートであるために未反応となる膨張材の長期の挙動が懸念されるため、添加する単位膨張材量をパラメータとした超高強度コンクリートのひずみを長期間計測し、適量と考えられる単位膨張材量を実験的に検討した。

第4章では、実構造物を想定したコンクリートの温度履歴が収縮ひずみに与える影響を検討した。実構造物に打込まれる超高強度コンクリートは、各季節により練上がり温度に差が生じ、結合材の水和熱に起因してコンクリートの温度履歴が生じる。コンクリート温度履歴が収縮ひずみに与える影響は有効材齢を用いて評価する方法があるが、仮に有効材齢で表記できない場合には、収縮ひずみの発現量をコンクリートの温度依存性を考慮し、実構造物に発生する内部応力を予測する必要がある。しかし、超高強度コンクリートの収縮ひずみの温度依存性に関する研究はほとんどない。そこで、練上がり温度や温度履歴を変化させた試験を実施し、収縮ひずみのコンクリート温度履歴の影響を実験的に検討した。また、部材内部に発生する応力を予測することを目的とし、この実験結果に基づき、収縮ひずみのコンクリート温度依存性を考慮した実験式を検討した。

第5章では、収縮ひずみの低減効果を拘束応力の観点から検討した。拘束応力は、コンクリートの収縮ひずみ、クリープ、温度およびヤング係数などが多くの要因により発生する。このため、収縮ひずみの低減のみでは発生応力度の低減を評価できない。

超高強度コンクリートのひび割れリスクを検討する上で、拘束応力を予測することが重要であり、これまでのコンクリートの収縮ひずみやヤング係数およびクリープ特性を取り入れ、かつ、各時間ステップにおける応力変動に取る入れることが可能な増分型 step by step 法のクリープ解析が提案されている。しかし、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの発現は若材齢に生じることから、若材齢時のクリープ特性が必要となるが、超高強度コンクリート領域での検討はほとんどない。このことから、若材齢時のクリープ特性を把握することが可能な横型クリープ試験機を用いて、若材齢時のクリープ特性を把握した。このクリープ特性を用いて step by step 法によるクリープ解析を行い、拘束試験の試験結果と比較検討を行い、解析の適合性を検討した。

また、膨張材、収縮低減剤及び廃瓦粗骨材を用いることにより拘束応力の低減効果を実験的にも検討した。

第6章では、収縮ひずみの大きい超高強度コンクリートと収縮ひずみを低減した超高強度コンクリートを用いて柱模擬部材を作製し、コンクリート表面、コンクリート内部および鉄筋周囲のひび割れ状況を観察し、収縮ひずみを低減することによる効果を実験的に検討した。また、第4章の自己収縮ひずみの温度依存性と第5章のクリープ特性を取り入れ、柱模擬部材内部に埋設したひずみ測定値から内部に発生した応力を step by step の解析方法を用いて予測し、その予測した応力から収縮ひずみの低減した効果を検討した。

第7章では、各章で得られた知見をとりまとめ、本論文の結論とした。

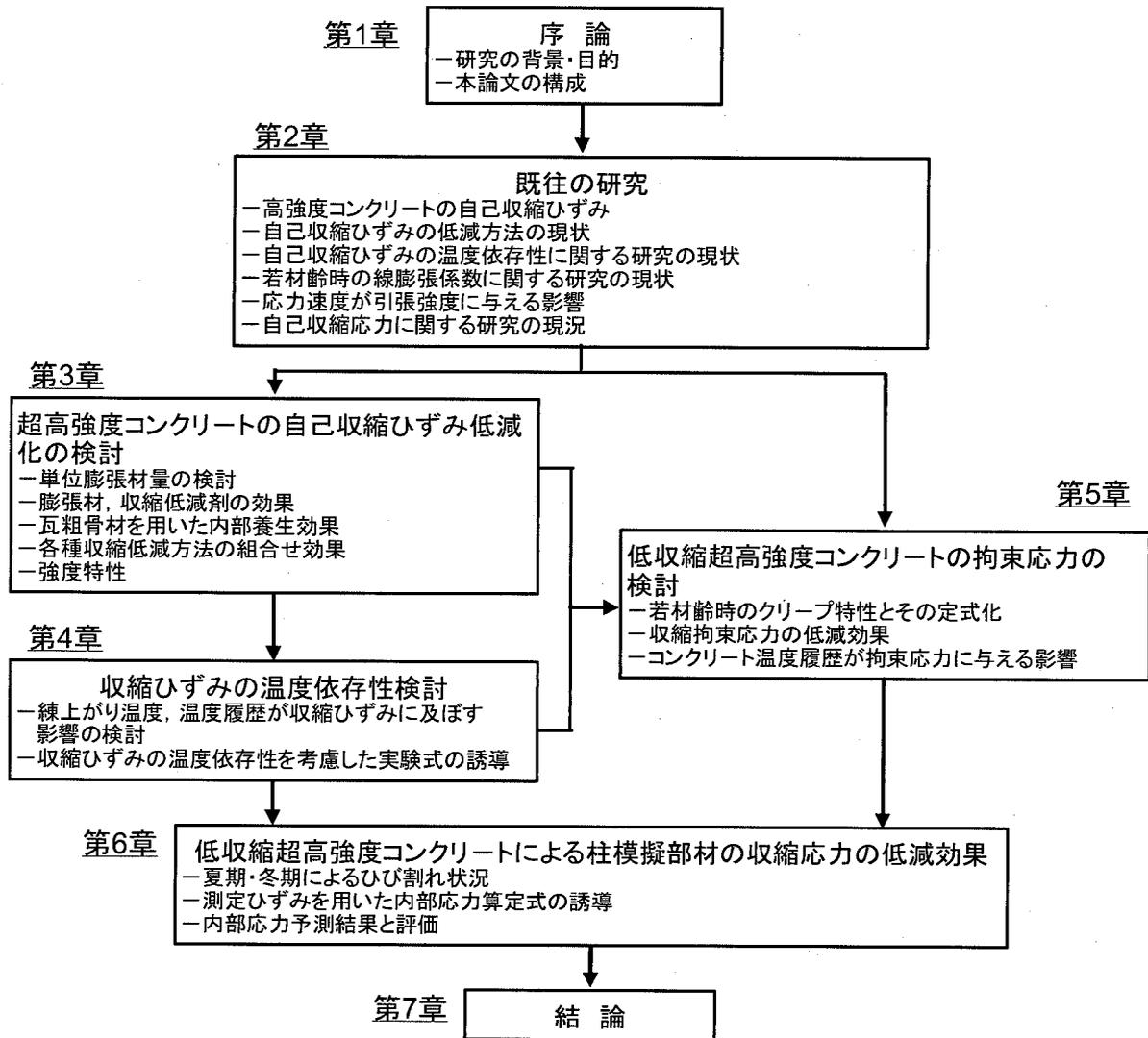


図 1.3.1 本論文の構成

## 第1章 参考文献

- 1)陣内浩, 黒岩秀介, 早川光敬, 並木哲, 飯島眞人, 原孝文, 小田切智明, 井上善尊: 設計基準強度 150N/mm<sup>2</sup>クラスの高強度コンクリートによる実大 RC 柱の施工性と構造体強度発現性状の検討, 日本建築学会技術報告集, No.704, pp.1-5, 2003.6
- 2)坂井吾郎, 一宮利通, 岡本裕昭, 小室敦: 低収縮型超高強度コンクリートを用いた橋梁上部工の施工, コンクリート工学, Vol.43, No.11, pp.44-49, 2005
- 3)菅俣匠, 杉山知己, 梅沢健一, 岡沢智: セメント-シリカフェューム系結合材の水和反応と強度発現性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1287-1292, 2004
- 4)中瀬博一, 鈴木雅博, 鳴瀬浩康, 藤井和俊: 超高強度 PCa コンクリート部材の初期高温養生に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.643-644, 2007
- 5)土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書設計編, pp.1-2
- 6)建築学会: 2003年制定建築工事標準仕様書・同解説(JASS5), pp67-74
- 7)建築学会: 高強度コンクリート施工指針(案)・同解説, pp.1, pp.45-48, 2005
- 8)田澤榮一, 宮澤伸吾, 重川幸司: 水和反応による硬化セメントペーストのマクロな体積減少, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.122-127, 1991
- 9)片寄哲務, 高森直樹, 西田浩和, 寺岡勝: 高強度コンクリートの若材齢における力学特性と自己収縮挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.497-502, 2006
- 10)丸山一平, 佐藤良一: 超高強度コンクリートを用いた RC 部材中の鉄筋近傍における微細ひび割れの発見, 日本建築学会論文報告集, 第 617 号, pp.1-7, 2007.7
- 11)谷村充, 佐藤良一, 平松洋一, 兵頭彦次: 若材齢時長さ変化を考慮した RC 曲げ部材のひび割れ・変形の一般化評価方法, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.181-195, 2004
- 12)R. Sato, H. Kawakane: "A New Concept for the Early Age Shrinkage Effect on Diagonal Cracking Strength of Reinforced HSC Beams", Journal of Advanced Concrete Technology Vol.6, No.1, pp.45-67, 2008.2
- 13)R. Sato, M. Xu, Y. Yang: "Stress of High-Strength Concrete Due to Autogenous Shrinkage Combined with Hydration Heat of Cement, Proceedings of ACI International Conference on High-Performance Concrete, ACI International SP-172, 1997, pp.837-852
- 14)田澤榮一, 宮澤伸吾: セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響, 土木学会論文集, No.502, /V-25, pp43-52, 1994
- 15)S. Weber and H.W. Reinhardt: "A Blend of Aggregates to Support Curing of Concrete", Proceedings of International Symposium on Structural Lightweight Concrete, Edited by I. Holand, T.A. Hammer and F. Fluge, Sandefjord, Norway, 1996, pp. 662-671
- 16)R. Sato, S. Tanaka, T. Hayakawa, M. Tanimura: "Experimental Studies on Reduction of Autogenous Shrinkage and its Induced Stress in Hgh-Strength Concrete, SELF-DESCICCATION AND ITS IMPORTANCE IN CONCRETE TECHNOLOGY, Proceedings of the Second International Research Seminar in Lund, pp163-171, 1999
- 17)Hidetoshi Ito, Ippei Maruyama, Makoto Tanimura, and Ryoichi Sato: Early Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology Vol.2, No.2, pp.155-174, 2004

## 第2章 既往の研究

### 2.1 はじめに

第2章では、超高強度コンクリートの収縮ひずみの発生機構、収縮ひずみの低減方法、若材齢とのクリープ特性、収縮ひずみの温度依存性に関して、これまでに得られている知見を整理し、現状の課題点を抽出し、本研究の位置づけを明確にした。

### 2.2 高強度コンクリートの自己収縮ひずみ

#### 2.2.1 自己収縮ひずみの発生機構

自己収縮ひずみは、乾燥を伴わない養生条件においても収縮する現象である。コンクリートの自己収縮ひずみは古くから知られていたが、通常のコンクリートでは乾燥収縮ひずみに対して1桁程度小さいため<sup>1)</sup>、ひび割れ制御する上で考慮されることがなかった<sup>2)</sup>。しかし、水結合材比が小さく、硬化体の組織が緻密になるほど、自己収縮ひずみが大きくなることが多く報告<sup>3),4)</sup>され、自己収縮ひずみは、鉄筋などで拘束されて部材に発生する引張応力によりひび割れ発生の要因となることも報告<sup>5),6)</sup>されており、ひび割れリスクを考える上で重要な位置づけになっている。図2.2.1<sup>7)</sup>は、全収縮ひずみと自己収縮ひずみを測定した例であり、自己収縮ひずみの寄与率は水結合材比が小さくなるにつれ大きくなり、水結合材比17%では自己収縮ひずみが収縮ひずみの多くを占めている。図2.2.2<sup>8)</sup>は、普通強度と高強度コンクリート収縮ひずみのモードを示したものである。高強度コンクリートは普通コンクリートと比較して、乾燥開始以前に既に大きな自己収縮ひずみが発現している。こうした知見から、土木学会コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>ではコンクリートの収縮ひずみは、設計基準強度55MPaを越えるコンクリートにおいて乾燥収縮ひずみと自己収縮ひずみの和と表示している。

なお、自己収縮に関する研究は、日本コンクリート協会の自己収縮研究会において調査・研究<sup>10),11)</sup>が行われている。同委員会では、自己収縮ひずみをセメント系材料において、セメントの水和により凝結過程および凝結以後に巨視的の生じる体積変化を自己収縮ひずみと定義している。自己収縮ひずみには物質の浸入や逸散、温度変化、外力や外部拘束により

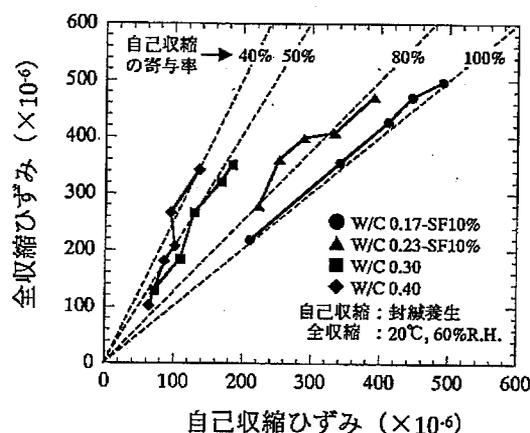


図 2.2.1 全収縮ひずみに占める自己収縮ひずみの寄与率

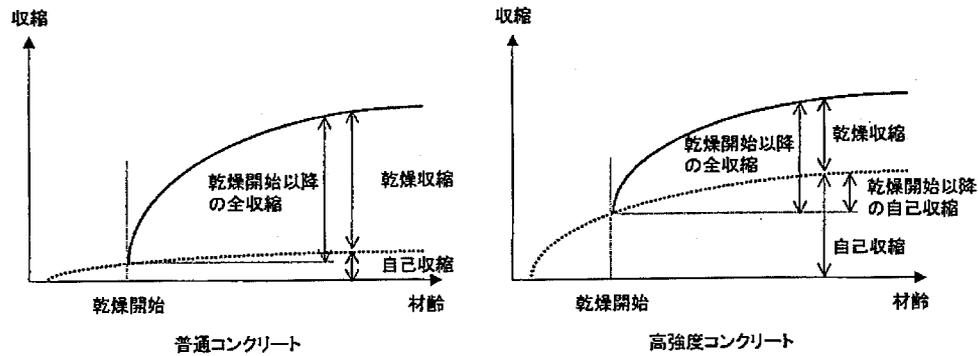


図 2.2.2 普通・高強度の収縮ひずみの模式

発生する応力に起因する変形は含まないとしている。本研究においても、この定義に従うこととする。

本節では、自己収縮ひずみの発生機構に関する知見を記述する。自己収縮ひずみの発生機構として有力とされている説に、毛細管張力説がある。セメントの水和反応により、未水和のセメントと水との反応により、生成する水和物の体積が、水和前の体積と比較して小さくなる水和収縮が生じる<sup>3)</sup>。水和反応が進行し、硬化体の骨格が生成され、この体積変化は水和前に水隙であった部分が空隙として形成されることになる。また、組織の緻密化により、空隙形成速度が水の移動速度を上回る場合には間隙水が不飽和となり、空隙の相対湿度が低下し、自己乾燥<sup>12)</sup>が生じる。この自己乾燥により、間隙水にメニスカスが形成され、毛細管現象張力による負圧が発生し、硬化体が収縮するとされている<sup>13)</sup>。このことを明らかにするため、水結合材比とコンクリート内部の相対湿度との関係を実験的に測定がいくつか実施されている<sup>14,15)</sup>。図 2.2.3<sup>14)</sup>は、コンクリート内部の相対湿度と W/C の関係を示したものであるが、水結合材比が小さくなるほど、硬化体の湿度が低下し、自己乾燥が大きくなることが推定される。また、硬化体の相対湿度と自己収縮ひずみとの測定結果から密接な関連があることも報告<sup>16)</sup>されており、自己乾燥が自己収縮ひずみの要因であると考えられる。図 2.2.4<sup>17)</sup>は、毛細管張力説を模式した図である。

界面物理化学の法則によれば、以下のようになる<sup>18)</sup>。

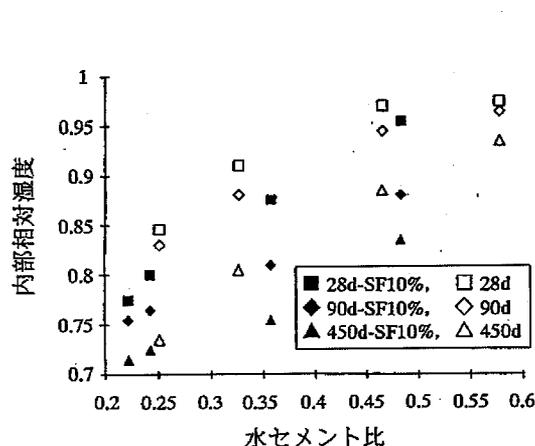


図 2.2.3 水セメント比と内部相対湿度の関係

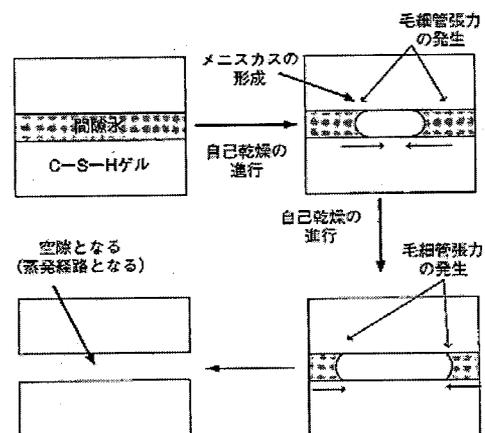


図 2.2.4 毛細管張力説による模式図

凹面状の表面を持つ水は表面張力の影響により、平面状の表面を持つ水より蒸気圧が小さく、水面の形状を半円形とすると、気液界面の曲率半径と蒸気圧との関係は式(2.2.1)(ケルビン式)となる。 $r_k$ はケルビン半径と呼ばれ、大気の相対湿度が  $p/p_0$  であるとき円管内の水の湿度が 100% となって、蒸発も凝縮もしない平衡状態となる円管の半径である。

$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{2\gamma M}{RT\rho} \frac{1}{r_k} \quad (2.2.1)$$

ここに、 $p$ は蒸気圧(N/m<sup>2</sup>)、 $p_0$ は飽和蒸気圧(N/m<sup>2</sup>)、 $\gamma$ は液の表面張力(N/m)、 $M$ は液の分子量(kg/mol)、 $R$ は気体定数(J/K・mol)、 $T$ は絶対温度(K)、 $\rho$ は液の密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $r_k$ は毛細管の半径(m)をそれぞれ示す。

このときの毛細管水中に発生する毛細管張力は式(2.2.2)(Young-Laplace 式)となる。

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{r_k} \quad (2.2.2)$$

ここで、 $\Delta p$ は毛細管張力(N/m<sup>2</sup>)を示す。

式(2.2.1)と(2.2.2)より、式(2.2.3)となる。

$$\Delta p = \frac{RT\rho}{M} \ln \frac{p}{p_0} \quad (2.2.3)$$

このことにより、毛細管張力は相対湿度の低下により増加する。このことから、自己乾燥が駆動力となり、自己収縮ひずみが発生する。

自己収縮ひずみと乾燥収縮とは発生要因が異なるが、収縮ひずみの発生機構は同じと考えられる。乾燥収縮ひずみの発生要因は、毛細管張力による説の他、表面張力の説や分離圧の説<sup>19)</sup>が提案されている。自己収縮ひずみに関しても同様と考えられるが、現在では、自己収縮ひずみの発生要因として、毛細管張力説が主流となっている。また、細孔構造の形成、水和反応、水分移動の現象からモデル化した自己収縮ひずみの解析的検討も行われている<sup>20)</sup>。

## 2. 2. 2 セメント種類が自己収縮ひずみに及ぼす影響

同一の水結合材比の場合には、低熱セメントを用いたペーストの自己収縮ひずみは早強セメントを用いたペーストと比較して小さくなることが知られている<sup>21,22,23)</sup>。図 2.2.5<sup>21)</sup>は、各種セメントを用いたペーストの自己収縮ひずみを測定した例である。この結果からも高ビーライト系セメントは自己収縮ひずみを抑制する結果となっている。セメント鉱物の観点から C<sub>3</sub>A の比率が大きいほど自己収縮ひずみは増加する報告<sup>24,25,26)</sup>がある。また、セメント鉱物から水結合材比 30%のセメントペーストの自己収縮ひずみの終局値として式(2.2.4)が提案されている。

$$\varepsilon_{ps} = 2.15C_3S\% - 5.49C_2S\% + 68.7C_3A\% + 48.5C_4AF\% \quad (2.2.4)$$

また、JIS R 5210 のポルトランドセメントにおいて低熱セメントの C<sub>3</sub>A は 6%以下の規定があり、また、ビーライト量が多いことから、鉱物組成の観点からも自己収縮ひずみの抑制にも優位な材料である考えられる。また、超高強度コンクリートの単位セメントが多

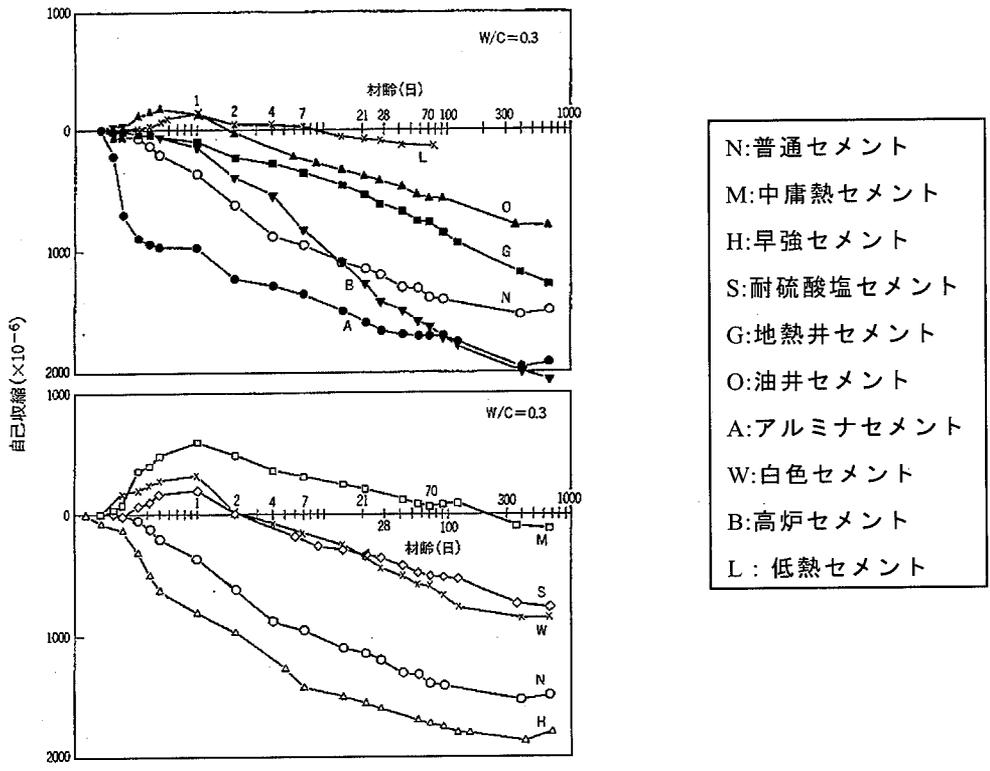


図 2.2.5 各種セメント種類による自己収縮ひずみ

いため、温度応力に起因したひび割れも危惧される。低熱セメントは、自己収縮ひずみの低減ばかりでなく、温度応力も低減させることから、超高強度コンクリートのひび割れリスクを低減する一つの材料であると考えられる。

2. 2. 3 シリカフュームが自己収縮ひずみに及ぼす影響

コンクリートの超高強度化を実現させるためにコンクリート材料として、シリカフュームを使用する場合が多い<sup>27)</sup>。この理由として、シリカフュームは、ポゾラン反応やマイクロフィラーにより組織を緻密することにより高強度化が図れるばかりでなく、ベアリング効果により低水セメント比における施工性の改善を図ることができるからである。本節で超高強度コンクリートの使用材料として使用されるシリカフュームが自己収縮ひずみに与える影響に関する知見を述べる。シリカフュームを使用したコンクリートの自己収縮ひずみが大きくなる<sup>21,28)</sup>ことが知られている。図 2.2.6<sup>28)</sup>は水結合材 25%のセメントペーストの測定例を示す。図中の PC はポルトランドセメントのセメントペースト、SF はポルトランドセメントの 10%をシリカフュームに置換したセメントペーストを示す。シ

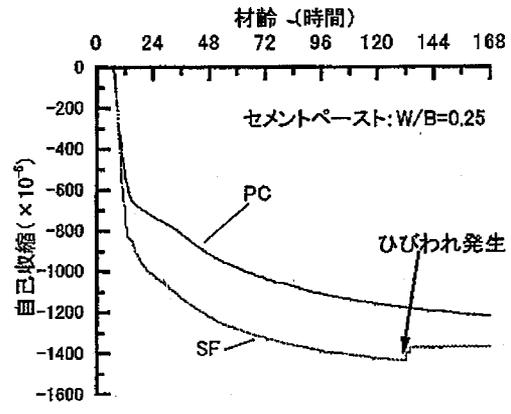


図 2.2.6 シリカフューム混入による自己収縮ひずみ測定例

リカフュームセメントを混入した場合に自己収縮ひずみは増加する。

材齢 1 日以前において収縮量が大きくなる理由として、メニスカス半径が減少し、毛細管張力が卓越したことが考えられる<sup>29)</sup>。また、材齢 12 時間および 24 時間において、シリカフュームを混入したコンクリートは、無混入のコンクリートと比較して  $0.2\mu\text{m}$  以上の粗大な径のポロシティーは少なくなり、シリカフュームの 24 時間以内におけるポゾラン反応や未反応のシリカフュームによる細孔の細分化の寄与により若材齢時に自己収縮ひずみを増大させる細孔構造が形成されることの報告<sup>28)</sup>がある。また、シリカフュームは  $70^\circ\text{C}$  程度の高温環境化になると何らかの理由によりシリカフュームの活性度が高まり、より緻密化することが明らかになってきている<sup>30)</sup>。シリカフュームは、細孔径を小さくすることにより、コンクリートの組織を緻密化することにより高強度化を図れる反面、若材齢時に毛細管張力の増加により自己収縮ひずみを大きくする。

### 2. 3 自己収縮ひずみの低減方法

高強度コンクリートの自己収縮ひずみの低減に関する知見は多く発表されている。しかし、水結合材比 20%以下を対象としたコンクリートの自己収縮ひずみ低減に関する知見はほとんどないのが現状である。本節では、一部水結合材比 20%以下のコンクリートを含むが、これまでに得られている自己収縮ひずみの低減方法の知見について述べる。

図 2.3.1 にこれまでに得た自己収縮ひずみの低減方法を示す。自己収縮ひずみの知見は、高ビーライトセメント材料、膨張材による機械的な膨張ひずみの付与、収縮低減剤による表面張力の低下を制御する方法、軽量骨材を用いた内部養生方法およびこれらを組み合わせることによる方法に大別される。以下、各々の材料について、詳述する。

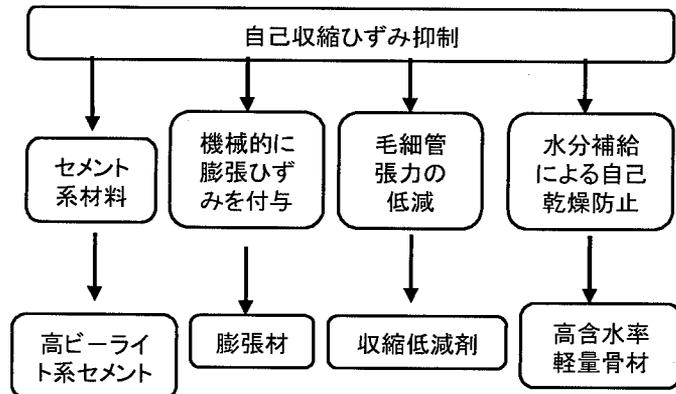


図 2.3.1 自己収縮ひずみの低減方法

#### 2. 3. 1 低熱ポルトランドセメント

低熱ポルトランドセメントは、2.2.2 節に述べたように鉱物組成からみて、本質的に自己収縮ひずみの小さいセメントである。低熱セメントは、水結合材比 20%を下回るコンクリートの単位セメント量は多くなることに起因したコンクリート温度上昇の抑制や比表面積が普通セメントや早強セメントと比較して小さくことによるコンクリートの粘性を抑制するこ

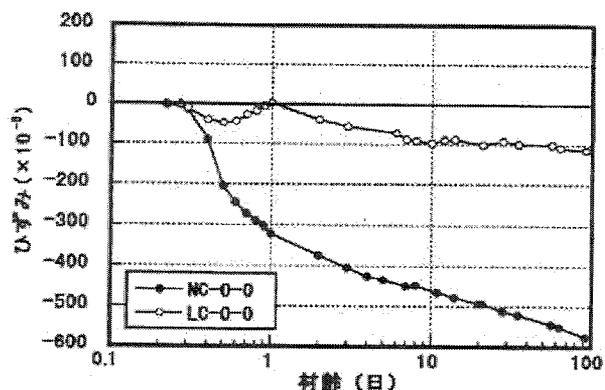


図 2.3.2 自己収縮ひずみの低減方法

とにより施工性を向上させる効果がある。

図 2.3.2<sup>22)</sup>は水セメント比 30%における低熱セメント(凡例 LC-0-0)と普通セメント(凡例 NC-0-0)の自己収縮ひずみの測定結果を示したものであり、低熱セメントを用いることにより、自己収縮ひずみを抑制する効果があることがわかる。このことから、低熱セメントは超高強度コンクリートの材料として最適であると考えられる。

## 2.3.2 膨張材

### (1)膨張材による膨張機構

膨張材はコンクリートの乾燥収縮の補償やケミカルプレストレスを与えることを目的に利用されている。膨張材の成分は、エトリンガイト系と石灰系の2種類に大別される。膨張材には JIS A 6202 の規格があり、「セメントおよび水とともに練混ぜた場合、水和反応によってエトリンガイトまたは水酸化カルシウムなどを生成し、コンクリートを膨張させる作用のある混和材料」と定義されている。この膨張材の反応式はエトリンガイト系において式(2.3.1)、石灰系において式(2.3.2)で表示される<sup>31,32)</sup>。

エトリンガイト系



石灰系



しかし、各化合物及び水和生成物の容積割合を計算すると、式(2.3.1)では 10.53vol.%, 式(2.3.2)では 5.71 vol.%の体積減少となる。図 2.3.3<sup>32)</sup>は膨張材を用いたセメント硬化体の空隙率を示す。体積減少を伴いながら膨張ひずみが発生する理由として空隙径の測定から膨張材の水和生成物が空隙を形成しながら生成する報告<sup>32)</sup>がある。また、エトリンガイト系ではエトリンガイト針状結晶が、石灰系では水酸化カルシウムの結晶がそれぞれ空隙を作りながら成長することの報告<sup>33)</sup>がある。

表 2.3.1<sup>34)</sup>に日本で一般的に使用されている膨張材の物理的性質および化学成分を示す。A, D はアウインと呼ばれるカルシウムサルホアルミネート・酸化カルシウム・無水石膏と水が反応して膨張成分であるエトリンガイトを生成するものである。B はアルミン酸三カルシウム・石膏と水が反応して同様にエトリンガイトを生成するものである。C, F は酸化カルシウムが水和して水酸化カルシウムを生成し、膨張を起こすものである。E については上記エトリンガイ

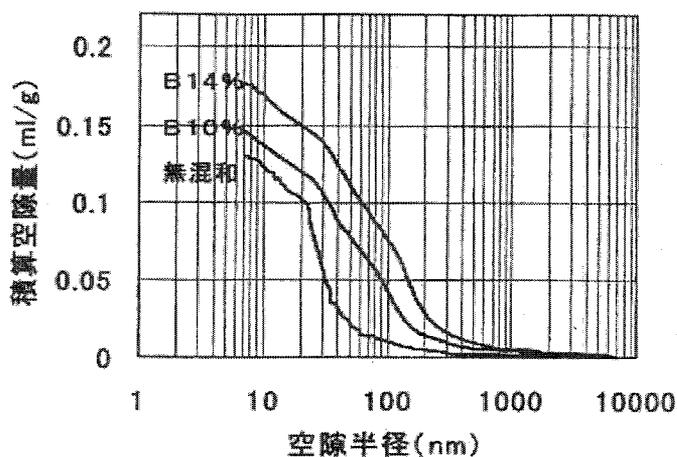


図 2.3.3 膨張材を混和したセメント硬化体の空隙率分布測定例

表 2.3.1 膨張材の物理的性質および化学成分

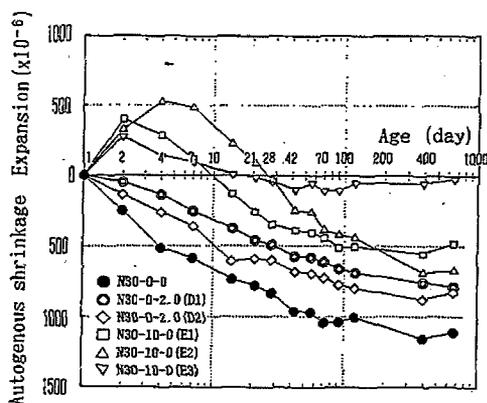
銘柄	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	化学成分 (%)							
			強熱減量	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	計
A	2.91	2500	0.8	4.0	10.0	1.0	51.2	0.6	31.9	99.5
B	3.00	3200	1.2	3.1	6.3	0.4	58.0	0.3	29.6	98.9
C	3.14	3500	0.4	9.6	2.5	1.3	67.3	0.4	18.0	99.5
D	3.01	2800	1.0	1.5	13.0	0.5	51.2	1.5	29.3	98.0
E	3.10	2800	1.1	1.7	5.5	2.6	70.3	0.5	18.2	99.9
F	3.18	3010	1.6	4.2	1.1	1.0	74.0	0.5	16.5	98.9

トと水酸化カルシウムをとともに生成するものである。これらの反応は主な反応であり、実際はセメントの水和反応との競争反応であることから複雑な反応となる。

E, F は低添加型膨張材であり、従来の乾燥収縮補償用(JIS A 6202 コンクリート用膨張材にある膨張コンクリートの一軸拘束膨張試験値が  $150\sim 250 \times 10^{-6}$ ) で用いられる単位膨張材量  $30\text{kg/m}^3$  を  $20\text{kg/m}^3$  に低減できるものである。この種の膨張材は経済的であることから種々の用途に使用されている。本研究では、低添加型膨張材を使用することとし、後述する予備試験において E と F を比較した結果、本研究で検討した配合では、膨張材 E においてより大きな収縮低減効果が認められたため、膨張材 E を用いて収縮ひずみの低減効果を検討することとした。

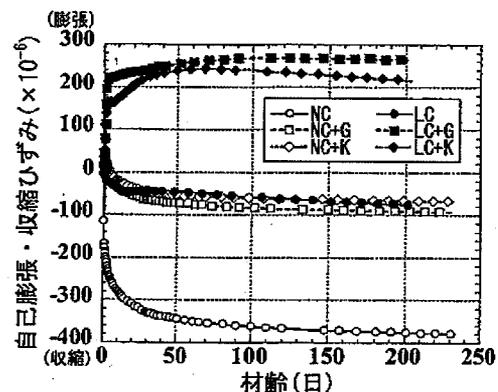
(2) 水結合材比 20%以上における膨張材による収縮ひずみ低減効果

図 2.3.4<sup>32)</sup> は水結合材比 30% のセメントペーストによる膨張材混入の有無を、図 2.3.5<sup>35)</sup> は水結合材比 30% のコンクリートによる膨張材混入の有無をそれぞれ示したものである。また、水結合比 23% においても、膨張材と収縮低減剤との併用ではあるが、収縮ひずみの低減効果を示す報告がある。このことから、水結合材比 20% 以上において膨張材の使用に



(N30-0-0: 無混入, E1, E2, E3: 膨張材混入, D1, D2: 収縮低減剤)

図 2.3.4 膨張材を混和したセメントペーストの収縮低減効果



(NC: 普通セメント, LC: 低熱セメント, NC+G, LC+G, NC+K, LC+K: 膨張材混入)

図 2.3.5 膨張材を混和したコンクリートの収縮低減効果

よる自己収縮ひずみの低減効果が示されている。

### (3) 水結合材比 20%以下における膨張材の使用

水結合材比を 30%, 25%および 20%とした膨張材を用いたモルタルを 20°C水中養生した長さ変化試験において、水セメント比が小さくなるほど継続的な膨張ひずみが確認されてきているが、この理由として、水結合材比が小さくなるほど完全に水和するのに必要となる結合水量が不足し未反応の膨張材が存在することとなり、この未反応の膨張材が外部から浸透した水が長期にわたって反応することに要因があると報告されている<sup>36)</sup>。図 2.3.6<sup>37)</sup>は、単位膨張材量を標準量の 1.5 倍の使用量とした水結合比 25%, 練上がり 20°C, コンクリート温度 60°Cの養生条件における自己収縮ひずみを示したものであり、後膨張することが報告されている。また、図 2.3.7<sup>38)</sup>は、単位膨張材量を標準量の 1.75 倍の使用量とした水結合材比 15%における練上がり温度を変化させ、簡易断熱した場合の自己収縮ひずみを示しており、簡易断熱養生した場合にも後膨張する報告<sup>38)</sup>がある。ただし、この後膨張に関しては、外から水分補給がなく、前述したように自己乾燥量が多いことから、膨張材の反応に必要な水分が存在しないと考えられる領域での現象であり、後膨張発生メカニズムに関しては明確にされていないのが現状である。

また、練上がり温度やコンクリートの温度履歴により、異なる膨張ひずみとなることも報告<sup>39)</sup>されている。図 2.3.8<sup>40)</sup>は、セメント硬化体の強度発現と膨張のタイミングを示したものである。コンクリートに有効な膨張を与え

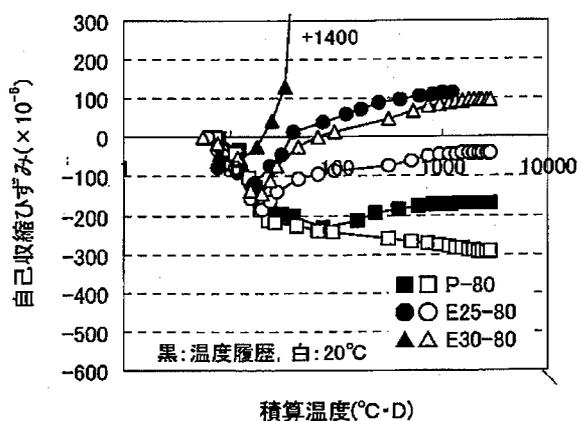


図 2.3.6 W/C=25%—膨張材混入の自己収縮  
 (P-80:W/B=25%-膨張材なし,  
 E25-80:単位膨張材量-標準量の 1.25 倍  
 E30-80:単位膨張材量-標準量の 1.50 倍)

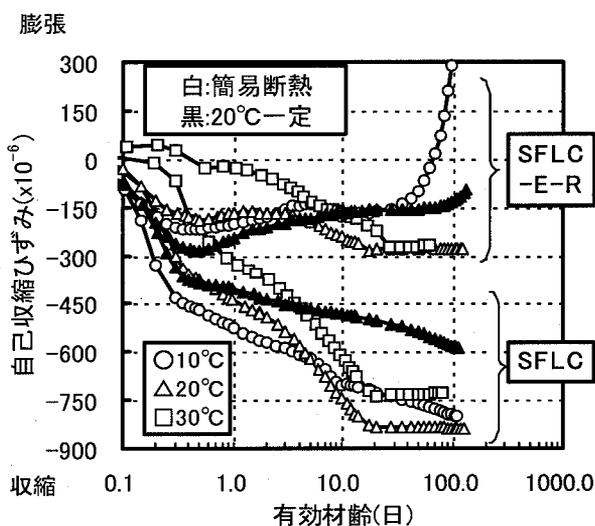


図 2.3.7 W/C=15%—膨張材混入の自己収縮  
 SFLC: W/B=15%, SFLC-E-R: 単位膨張材量-標準量の 1.75 倍

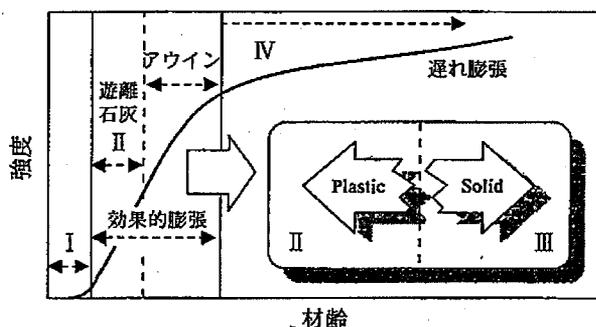


図 2.3.8 強度発現と膨張発現のタイミング

るタイミングが存在し、そのタイミングは水セメント比、セメントの種類および養生条件で異なり、この要因により、膨張速度や最終的な膨張量に差を与えることが考えられる。

これらのことから、水結合材比 20%以下における膨張材の使用は、未水和の膨張材が存在することが考えられることから、単位膨張材量、練上がり温度およびコンクリートの温度履歴などが膨張ひずみに与える影響の検討を事前に実施し、膨張材の添加が部材に悪影響を与えないことを確認する必要がある。

### 2. 3. 3 収縮低減剤

収縮低減剤は乾燥収縮ひずみを抑制する目的で使用される場合がある。収縮低減剤は膨張材による収縮ひずみの抑制の原理とは異なり、硬化体中の空隙水の表面張力を持続的に低くすることにより毛細管張力を低減することを目的とした混和剤である。自己収縮ひずみの駆動力が自己乾燥を伴う毛細管張力によるものと考えられるため、収縮低減剤は自己収縮ひずみの抑制にも期待できる。

収縮低減剤の主成分は、低級アルコールアルキレンオキシド付加物、ポリエーテル系、グリコールエーテル誘導体、プロピレングリコールエーテル類およびポリオキシアルキルエーテルなどが主成分市販されている<sup>41)</sup>。本研究では、低級アルコールアルキレンオキシド付加物を主成分とした収縮低減剤を使用した。

図 2.3.4 と図 2.3.9<sup>41)</sup>はセメントペーストを用いた自己収縮ひずみの低減効果を示したものである。図 2.3.9 から、乾燥収縮ひずみの抑制の観点からは、水セメント比 57%と 30%においてほぼ同一の乾燥収縮ひずみの比が認められることから、収縮低減剤は配合による収縮低減効果に差がほとんど生じないことが考えられる。図 2.3.10<sup>22)</sup>は水結合材 30%のコンクリートを用いた自己収縮ひずみの低減効果を示したものである。セメントペースト、コンクリートいずれも自己収縮ひずみの低減が認められる。このことから、水結合材比 20%以下の超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの低減効果にも期待できると考えられる。

ただし、収縮低減剤の成分により、消泡性や逆に空気連行性を伴う場合があるため、寒冷区域で使用する場合は、耐凍害性の検討を実施する必要性が述べられている<sup>42)</sup>。

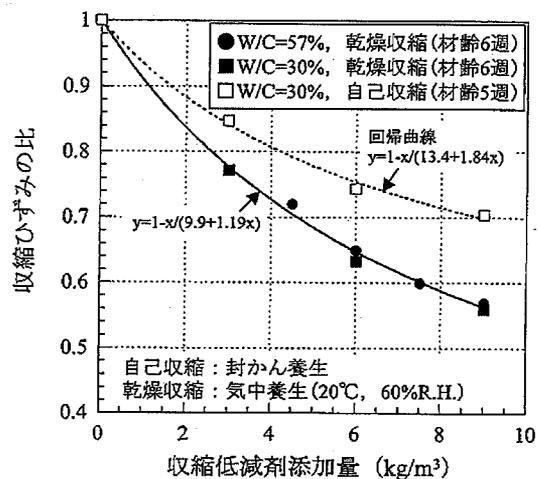
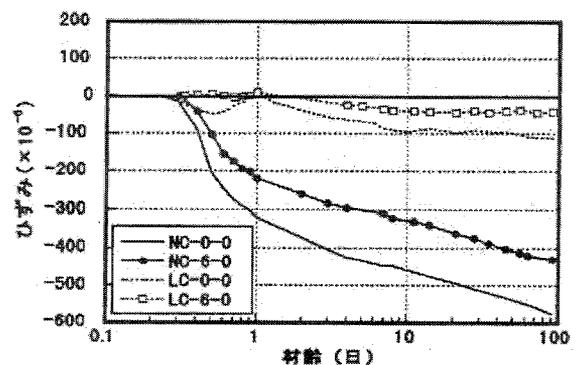


図 2.3.9 収縮低減剤添加量と自己収縮ひずみの比との関係(セメントペースト)



(NC-0-0: 普通セメント, LC-0-0: 低熱セメント, NC-6-0: 普通セメント+収縮低減剤, LC-6-0: 低熱セメント+収縮低減剤)

図 2.3.10 収縮低減剤添加による自己収縮低減効果(コンクリート)

### 2. 3. 4 内部養生方法による自己収縮ひずみの低減

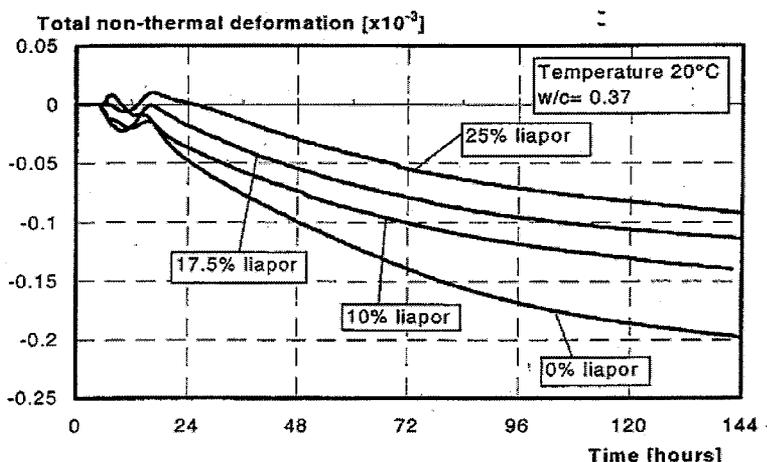
自己収縮ひずみの要因が水和反応に伴う自己乾燥に起因していることを前述した。このことから、自己乾燥によりモルタル部の湿度が低下することを利用し、含水率の高い軽量骨材からモルタル部への水分移動により自己乾燥による毛細管張力を抑制し、自己収縮ひずみの低減を示すデータが提示されている<sup>43,44,45,46</sup>。

図 2.3.11<sup>44)</sup>は水結合材 37%とした場合、図 2.3.12<sup>46)</sup>は水結合材 17%とした場合の内部養生方法を用いた自己収縮低減効果をそれぞれ示す。この内部養生方法は、超高強度コンクリート域においても効果が認められた。軽量骨材への完全吸水を行わない場合の内部養生効果は、乾燥した軽量骨材が周囲のモルタルからの水分を吸水することや微細なセメントの軽量骨材への移動することによる軽量骨材界面のセメント粒子の密度の増加の理由から低下することが報告されている<sup>47)</sup>。このことから、内部養生方法による収縮

低減効果を高めるためには、水の供給源となる材料の吸水を十分に行う必要がある。また、同報告では、シリカフェーム混入系の方が、無混入系と比較して内部養生方法による自己収縮ひずみの抑制効果が高いことが示されている。この理由として、軽量骨材表面の凸凹部にシリカフェームが充填し、練混ぜ時の軽量骨材への吸引効果が抑制させることや軽量骨材周囲のモルタル部が緻密となることによる毛細管張力の増加により軽量骨材からモルタルへの放出効果が高まったからと推定している。

自己収縮ひずみを完全に抑制するために必要となる軽量骨材に貯留させる水量を算出するモデルが提案<sup>48,49)</sup>されている。

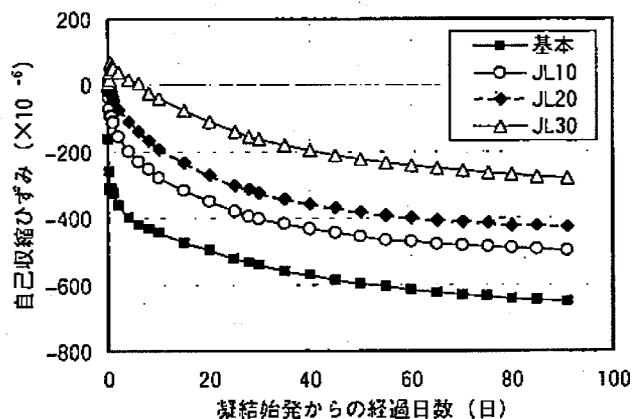
内部養生方法を用いる材料に軽量骨材を用いる方法を述べてきたが、この他に廃瓦細骨



0% liapor : 基準コンクリート

10, 17.5 25mass % liapor : 天然骨材との置換率 10, 17, 5. 25 mass %

図 2.3.11 軽量骨材を用いた場合の自己収縮ひずみ (W/C=37%)



JL10, 20, 30 : 天然骨材との置換率 10, 20, 30 Vol. %

図 2.3.12 軽量骨材を用いた場合の自己収縮ひずみ (W/C=17%)

材を用いる方法<sup>50)</sup>や高吸水性のポリマー(Super-absorbent polymers (SAP))を用いる方法<sup>51,52)</sup>が報告されている。廃瓦細骨材を用いた報告では水結合材 35, 40 および 45%に関する長さ変化試験について、瓦細骨材を用いた場合に長さ変化が若干小さくなることが示されている。

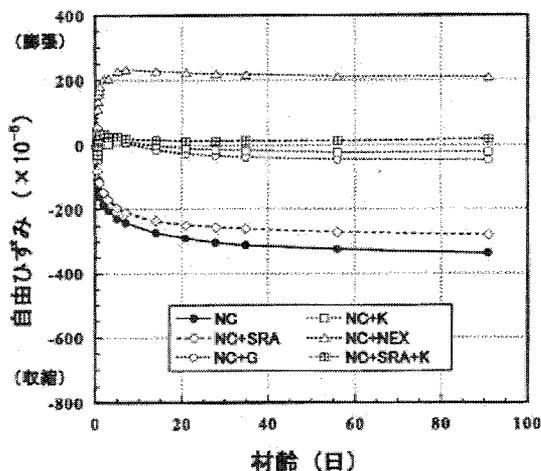
### 2. 3. 5 各種材料の組み合わせによる自己収縮ひずみ低減効果

膨張材による物理的な膨張ひずみの付与、収縮低減剤による表面張力の低下および内部養生による自己乾燥の抑制による収縮低減効果を組み合わせることにより、収縮低減効果を高めることが可能であることが知られている。これは、それぞれの収縮ひずみの低減機構が異なるため、干渉しないためと考えられる。図 2. 3. 13<sup>53)</sup>は水結合材比 30%とした場合の膨張材と収縮低減剤を併用した場合の自己収縮ひずみの測定例であり、膨張材による初期材齢での収縮補償効果、収縮低減剤による持続的な収縮低減効果が示されている。また、膨張材と収縮低減剤との併用は、それぞれの単独使用よりも収縮低減効果が高くなるとする報告<sup>25,54)</sup>もある。図 2. 3. 14<sup>46)</sup>は水結合材比 17%とした場合の膨張材と収縮低減剤および軽量骨材を用いた内部養生方法を併用した場合の自己収縮ひずみの測定例であり、自己収縮ひずみの低減効果が示されている。

水結合材比 17%とし、軽量骨材による内部養生方法と収縮低減剤との組合せた配合を用い、歩道橋に実施した例<sup>55)</sup>がある。

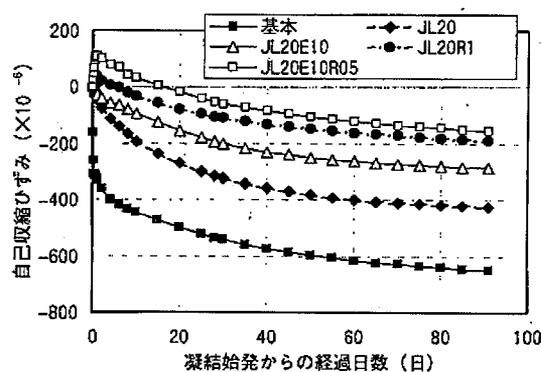
### 2. 3. 6 自己収縮ひずみ低減に用いた材料が圧縮強度に及ぼす影響

膨張材は前述したように、空隙を作りながら水和生成物を形成する。この理由から圧縮強度の低下が懸念される。図 2. 3. 15<sup>35)</sup>は水結合材比 30%、低添加型でない膨張材を単位膨張材量  $44\text{kg/m}^3$ (標準添加量の 1.47 倍)とした場合の 20℃室内養生とした圧縮強度の測定例であり、この配合条件および養生条件では圧縮強度の低下がないことが示されている。一方、図 2. 3. 16<sup>37)</sup>は水結合材比 16%、低添加型膨張材を単位膨張材量 15, 20, 25 および 30



(NC: 普通セメント, K, G, NEX: 膨張材, SRA: 収縮低減剤)

図 2. 3. 13 膨張材と収縮低減剤を組合せた自己収縮ひずみ低減効果



(JL20: 軽量骨材, JL20E10: 軽量骨材+膨張材, JL20R1: 軽量骨材+収縮低減剤, JL20E10R05: 軽量骨材+膨張材+収縮低減剤)

図 2. 3. 14 膨張材と収縮低減剤、軽量骨材を用いた内部養生方法を組合せた自己収縮ひずみ低減効果

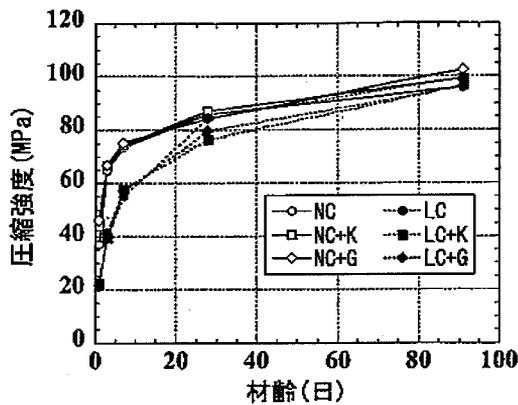


図 2.3.15 膨張材を混和したコンクリートの圧縮強度特性 (W/C=30%)

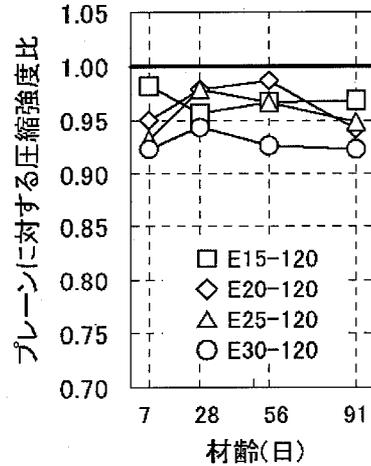


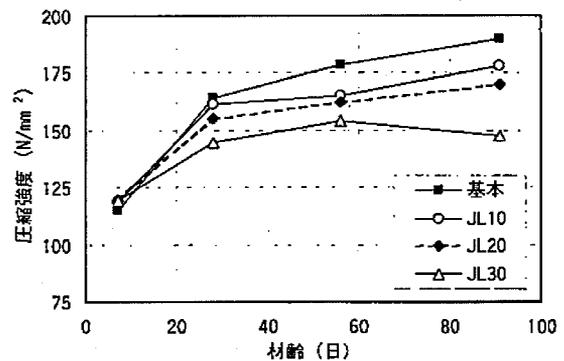
図 2.3.16 膨張材を混和したコンクリートの圧縮強度特性 (W/C=16%)

kg/m<sup>3</sup>とした場合の 60℃加熱養生とした場合のプレートに対する圧縮強度比の測定例であり、膨張材量の添加量の増加にともない圧縮強度の低下が認められる結果となっている。また、水結合材比 15%、低添加型膨張材を単位膨張材量 35 kg/m<sup>3</sup>とした 20℃水中養生した圧縮強度は、膨張材を混入しないコンクリートと比較して約 10%の低下を示す報告<sup>56)</sup>や水結合材比 17%、低添加型膨張材を単位膨張材量 20、25 および 30kg/m<sup>3</sup>とした 20℃水中養生した圧縮強度は、膨張材を混入しないコンクリートと比較して約 10%の低下を示す報告<sup>46)</sup>がある。

膨張材反応は配合条件やコンクリートの温度履歴などに影響をすることから、膨張材を自己収縮ひずみの低減に適用する場合には圧縮強度発現にも留意する必要がある。

水結合材比 17%の収縮低減剤を使用することによる圧縮強度の低減率は、5~8%であることが示されており<sup>46)</sup>、膨張材の使用よりも低減の度合いが小さいことが報告されている。

図 2.3.17<sup>46)</sup>は軽量骨材を内部養生材として使用したときの水結合材比 17%の軽量骨材の置換率別に圧縮強度発現を示したものであり、置換率 20%までは材齢 91 日に至るまで圧縮強度の増進が認められたが、置換率 30%では頭打ちの現象が認められる結果となった。超高強度コンクリートの領域においては、粗骨材の圧縮強度がコンクリートの圧縮強度に影響を及ぼすことが知られていること<sup>57)</sup>、報告書には軽量骨材の破砕値が示されていないため不明確ではあるが、軽量骨材の破砕値が高強度コンクリートで使用される粗骨材の破砕値の 3 倍である(約 30%)とする報告<sup>58)</sup>から推定すると軽量骨材の強度が十分でないために置換率 30%で圧縮強度の低下を招いたことが考えられる。一方、前述した瓦粗骨材の破砕値は 23.1%であること<sup>50)</sup>から、超高強度コンクリートへの適用が期待される材料である。



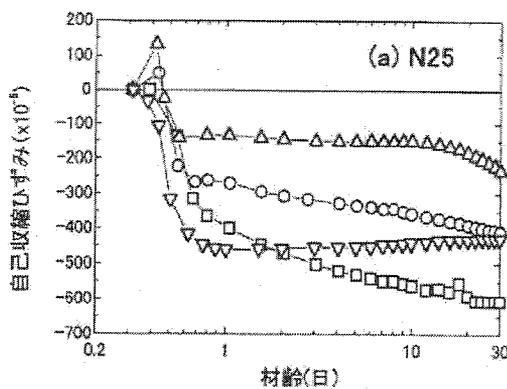
JL10, 20, 30: 天然骨材との置換率 10, 20, 30 Vol. %

図 2.3.17 軽量骨材を用いた場合の圧縮強度発現 (W/C=17%)

## 2. 4 自己収縮ひずみの温度依存性に関する研究の現状

超高強度コンクリートは単位結合材量が多くなるため、実構造物において水和反応に起因して高温履歴を伴う。自己収縮ひずみは若材齢時に大きく発現し、水和発熱に伴う温度履歴とも連動するため、自己収縮ひずみの温度依存性の把握は、コンクリートの健全性を評価する上で必要であると考えられる。自己収縮ひずみの温度依存性を評価するためには、コンクリート温度による体積変化との分離には線膨張係数を適正に評価する必要があるが、この点に関する既往の研究は次節で記述することとし、ここでは自己収縮ひずみの温度依存性に関する既往の研究について、はじめに自己収縮ひずみの終局値を示し、次に自己収縮ひずみの発現を記述する。

ポルトランド系とシリカフェームや混和材を添加した混合セメントとでは温度履歴が自己収縮ひずみに与える影響が異なる測定例が報告されている。図 2.4.1<sup>59)</sup>は普通セメントを使用した水セメント比 25%の 20℃、40℃、60℃一定養生した供試体および 400×400×400mm を厚さ 400mm の発泡スチロールで簡易断熱養生した場合の自己収縮ひずみの測定例を示し、図 2.4.2<sup>60)</sup>は低熱セメントの 10%をシリカフェームで置換した混合セメントを使用した水セメント比 22%の 20℃、40℃、60℃一定養生した供試体の自己収縮ひずみ発現の測定例を示す。ポルトランド系セメントでは、高温履歴を受けた供試体は、20℃一定で養生した供試体と比較して、自己収縮ひずみが小さくなる傾向があることが報告<sup>59,61,62)</sup>されており、一方、混和材を添加した供試体では自己収縮ひずみが大きくなることが報告<sup>60)</sup>されている。ポルトランド系に関しては、コンクリートが高温履歴を受けた場合に圧縮強度が停滞する理由として空隙構造の粗大化することに要因があるとする報告<sup>63)</sup>から、自己収縮ひずみの低減につながったと推察した報告<sup>61)</sup>がなされている。混和材を添加した結合材において、シリカフェームの反応が高温で活性化する報告<sup>64)</sup>やシリカフェームを添加した場合にセメントペーストを 15 から 40℃に変化させた場合にコンクリート温度が高いほど内部湿度の低下が認められた報告<sup>65)</sup>などから、水和活性や水和生成物の変化などが考えられるが明確にはされていない。このことから、自己収縮ひずみの終局値を予測するためには、



□: 20℃, ○: 40℃, △: 60℃,  
▽: ブロック

図 2.4.1 普通セメントを使用したコンクリートの自己収縮ひずみの温度依存性 (W/C=25%)

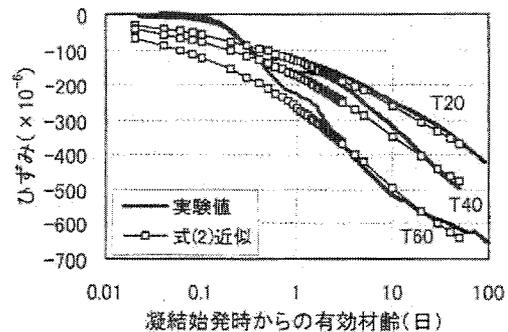


図 2.4.2 シリカフェームを混入したコンクリートの自己収縮ひずみの温度依存性 (W/B=22%)

コンクリートの温度履歴の影響を考慮する必要があると考える。

次に自己収縮ひずみの発現に関して記述する。コンクリートの温度が自己収縮ひずみの発現に与える影響は進行速度を表す関数式  $\beta(t)$  (2.4.1) と CEB-FIP MC90<sup>66)</sup>(以下, MC90) に示す有効材齢式(2.4.2)を乗じることにより評価できるとする報告<sup>67)</sup>がある。ただし, 係数  $a$ ,  $b$  は W/C で標記されており, コンクリートの温度履歴の影響を加味していない。このため, 有効材齢の式では標記でないとする報告<sup>59)</sup>もある。これは式(2.4.2)が本来, 配合条件や養生条件により定まるアーレニウス式<sup>68)</sup>の活性化エネルギーを固定して評価していることやコンクリートの温度履歴などが複雑に影響したことが考えられる。

$$\beta(t) = 1 - \exp\{-a(t - t_0)^b\} \quad (2.4.1)$$

$$t_0 \text{ および } t = \sum_i^n \Delta t_i \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (2.4.2)$$

ここに,  $a$ ,  $b$  は係数,  $\Delta t_i$ : 温度が  $T(^{\circ}\text{C})$  である期間の日数,  $T_0 = 1^{\circ}\text{C}$

## 2. 5 若材齢時線膨張係数に関する研究の現状

前節で述べたようにコンクリートの温度履歴が自己収縮ひずみに与える影響を把握するためには, コンクリートの温度変化に伴う体積変化を差し引く必要がある。コンクリートの体積変化は線膨張係数を一定として差し引くことが多いが, 時間とともに変化するという報告<sup>69)</sup>がある。自己収縮ひずみは若材齢時に発現するため, 若材齢時での線膨張係数を把握する必要がある。しかし, 若材齢時には水和進行が伴っており, 自己収縮ひずみ発現も同時に進行するため, 線膨張係数の把握は非常に難しい。本節では, 若材齢時の線膨張係数を把握するために実施された研究の方法とその線膨張係数の経時変化について述べる。

自己収縮ひずみの影響を排除するため,  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  の供試体の供試体の温度を低下させてセメントの水和反応を停止させ,  $-1 \sim 5^{\circ}\text{C}$  の範囲で温度変化を与える方法が提案されている<sup>70)</sup>。図 2.5.1<sup>70)</sup>は水結合材比 25% と 35% のシリカフュームを混入した測定結果を示したものであり, 極若材齢時に計測された線膨張係数は時間経過とともに減少し, その後一定値に収束することを報告している。

供試体の温度変化速度を速くし, 線膨張係数測定に要する時間を短縮させる方法が提案されている<sup>71,72)</sup>。図 2.5.2<sup>72)</sup>は水結合材比 25% の測定結果を示したものであり, 線膨張係数の経時変化は極低温時の結果と傾向的に合致する。

供試体に  $20 \sim 25^{\circ}\text{C}$  の温度変化を繰り返し与えた全ひずみ(温度ひずみ+自己収縮ひずみ)と温度一定の自己収縮ひずみを測定し, 積算温度を用いて線膨張係数を算出する方法を提案している<sup>73)</sup>。その結果は, 凝結始発時間で最大となり, 終結時間まで低減し, それ以降は一定とすることが報告されている。

また, 小型供試体に水和熱による温度履歴を与えた試験と温度変化を繰り返し与える試験(図 2.5.1<sup>74)</sup>参照)を行い, コンクリート温度履歴下での線膨張係数の経時変化を評価する方法が提案されている<sup>74)</sup>。図 2.5.2<sup>74)</sup>は  $20^{\circ}\text{C}$  一定, 最高温度を  $50^{\circ}\text{C}$  および  $60^{\circ}\text{C}$  とした場

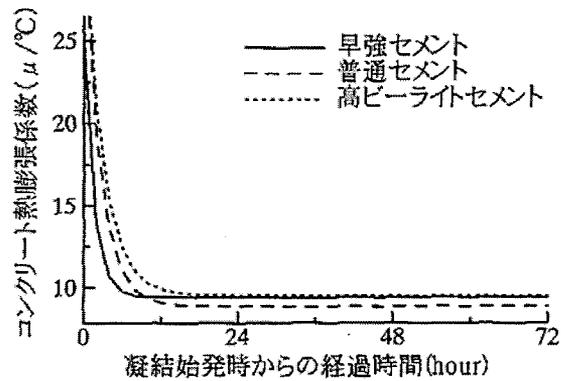
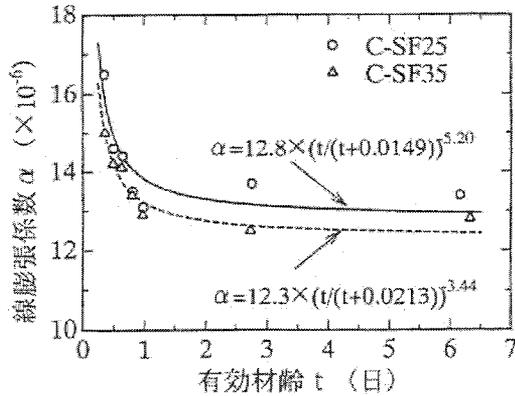


図 2.5.1 低温下での線膨張係数測定 図 2.5.2 供試体の温度変化速度を大きくした場合の線膨張係数測定結果

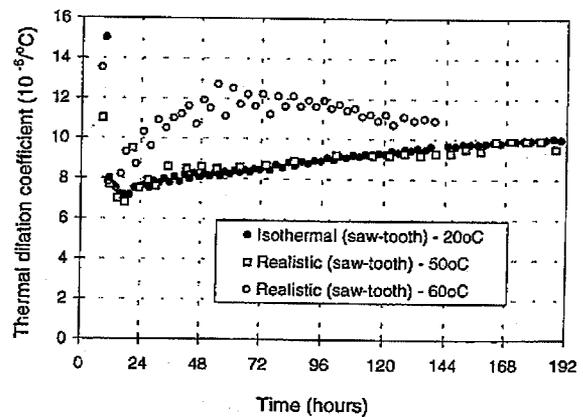
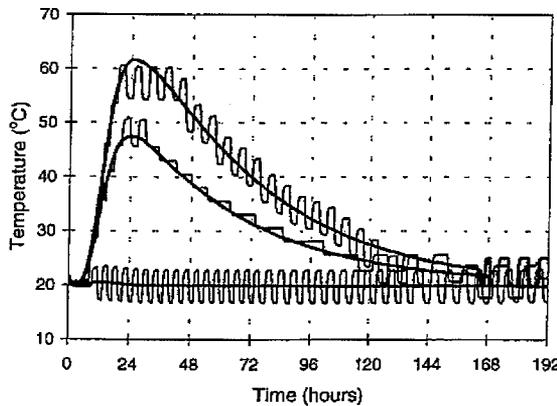


図 2.5.3 線膨張係数測定のコングリート 図 2.5.4 コングリート温度履歴下における線膨張係数測定結果

合の測定結果を示したものであり、20℃一定と最高温度 60℃に関しては同一の経時変化を示したが、最高温度 60℃では異なることが報告されている。

また、コングリートの温度履歴における線膨張係数に関して、柱部材を用いて水和熱による温度変化とした場合と外部から与えた熱による温度変化を与えた場合においても、活性化エネルギーを用いた材齢を用いることにより線膨張係数を適切に評価できることを報告している<sup>75)</sup>。同報告では、線膨張係数は凝結終結時間以降に漸増することを示している。

評価方法が異なるが、線膨張係数は終結時間まで大きく低下し、それ以降の変化は小さくなる傾向であり、コングリートの温度履歴が自己収縮ひずみに与える影響を評価するためには線膨張係数の経時変化も考慮する必要がある。

なお、線膨張係数は骨材の種類にも影響することが指摘されており<sup>69)</sup>、精度よい評価をするためにはこの点も考慮する必要がある。

最近の研究では、超高強度コングリートを想定し、シリカフェームの高温時での反応活性を伴う高温履歴下での線膨張係数に関する研究が報告されており<sup>76)</sup>、ペースト供試体においては、20℃養生と 65℃高温養生した場合にも MC90 の有効材齢による評価した場合に経時変化に差が生じないが、骨材を混入した模擬コングリートにおいては差が生じることを示している。

## 2. 6 応力速度が引張強度に与える影響

コンクリートに発生するひび割れリスクを評価する上でコンクリートの引張強度の評価も重要な要因となる。コンクリートの体積変化に起因して実構造物に発生する引張応力の応力速度は、JIS A 1113 に示される引張強度試験に規定される応力速度と比較して小さい。このため、コンクリートの引張強度が応力速度に依存して変化するのであれば、JIS に規定されて実施した引張強度試験結果に応力速度の影響を補正する必要がある。

引張強度に及ぼす応力速度の影響評価方法について、MC90 では、コンクリートの圧縮強度パラメータに含んだものとなっており、式(2.6.1)と式(2.6.2)で示される。

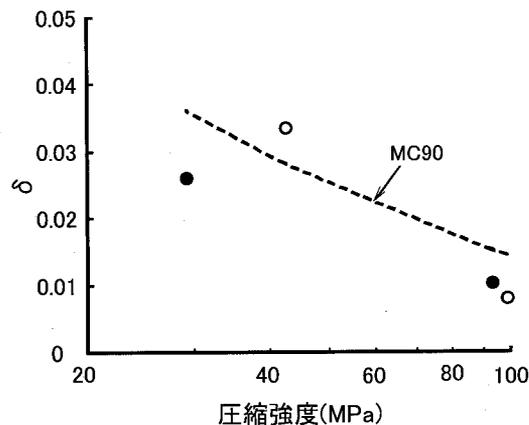
$$f_t = f_{t0} \left( \frac{\dot{\sigma}_t}{\dot{\sigma}_0} \right)^\delta \quad (2.6.1)$$

$$\delta = 1 / \left[ 10 + 6 \left\{ f'_c / f'_{co} (= 10 \text{ N/mm}^2) \right\} \right] \quad (2.6.2)$$

ここに、 $\dot{\sigma}_0$  は基準となる応力速度、 $f_{t0}$  は  $\dot{\sigma}_0$  で得られた引張強度、 $\dot{\sigma}_t$  は応力速度、 $f_t$  は  $\dot{\sigma}_t$  で得られた引張強度、 $f'_c$  は圧縮強度をそれぞれ示す。

図 2.6.1<sup>77)</sup> は水セメント比 25, 60, 75% において、JIS 速度、JIS 速度の 1/10 および 1/100 とした直接引張強度試験結果を圧縮強度と  $\delta$  で整理したものであり、コンクリートの圧縮強度が大きくなるほど応力速度の影響を受けないことが示されている。同報告では水和進行中の場合に、応力速度を遅くした場合に引張強度の増加もまた示されている。

本研究では、若材齢時に引張強度が低下することが推定されるが、水和進行による引張強度増加も考えられるため、今後の検討課題とすることとし、応力速度の影響を考慮せずに取り扱うこととした。



○ : 切欠き有り, ● : 切欠きなし

図 2.6.1 圧縮強度と  $\delta$  の関係

## 2.7 自己収縮応力に関する研究の現況

これまで、自己収縮ひずみの低減に関する既往の研究を述べてきた。しかし、ひび割れリスクの低減を検討するためには、前節の引張強度の他に部材に発生する応力に対して行う必要がある。部材に発生する応力は、自己収縮ひずみの大きさや経時変化ばかりなく、ひずみを拘束する程度やコンクリートのヤング係数発現およびクリープなどが影響する。図 2.7.1 にひび割れリスク算定のイメージ図を示す。しかしながら、自己応力は初期材齢におけるコンクリートの物性が時間的に急速に変化するため、評価することは難しい。

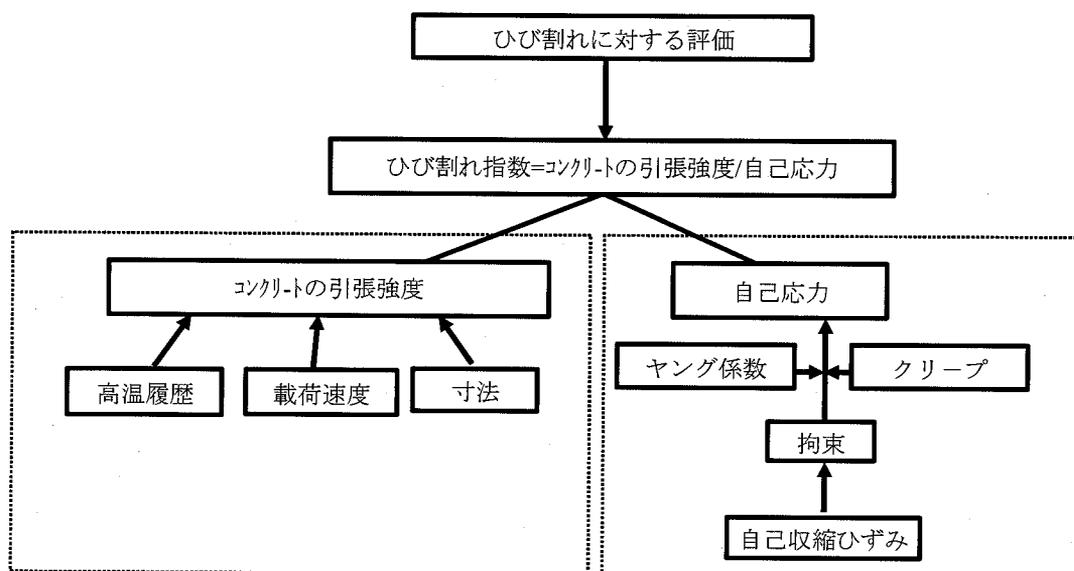


図 2.7.1 ひび割れリスク算定のイメージ図

こうした背景から、これまでに実施された研究を大別すると以下になる。

### ① 拘束試験による方法

JCI のコンクリートの自己収縮応力試験方法<sup>78)</sup>に準じて試験を行い、自己収縮ひずみに起因したひび割れリスクを評価する方法

### ② 単体の物性試験結果を用いて解析する方法

コンクリートのヤング係数、自己収縮ひずみおよびクリープひずみを個々に測定し、個々の物性値を用いて応力解析を行い、コンクリートの引張強度と対比してひび割れリスクの予測を行う方法

### ③ 模擬供試体を作製しひずみの測定から予測する方法

実構造物を模擬した供試体を作製し、ひび割れの有無を確認するとともに、鉄筋ひずみやコンクリートひずみおよびコンクリート温度を測定し、模擬供試体に発生する応力を考察する方法

本研究では、既存のデータがない単体の物性試験と拘束試験を行い、データの蓄積からひび割れリスクの低減に関する検討を行い、その結果に基づいて決定した配合を用いた柱模擬部材を作製してひび割れの有無やひずみ測定から内部応力の予測を行い、ひび割れリスクの低減効果を検討することとした。

以下では、内部応力の予測方法に関する既往の研究を述べ、その解析に必要なクリープ特性に関する研究の現況を述べる。

## 2. 7. 1 内部応力の予測方法

若材齢時の体積変化に起因した内部応力を精度よく予測する必要がある。超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの発現，ヤング係数発現，内部応力の変動に対応できるクリープ解析が必要となる。ここでは，一定持続応力下のクリープひずみから変動応力下のクリープひずみを求めるクリープ特性のモデルに関して，特に若材齢時のモデル化に関してこれまでの既往の研究を記述する。

クリープ解析法としては有効弾性係数法<sup>79)</sup>や step by step 法<sup>80,81,82,83,84)</sup>などが提案されているが，若材齢時から生じる変動応力の算定に対しては，有効弾性係数では過大に評価することが報告<sup>80,81)</sup>されていることから，載荷時材齢に対応したクリープ係数を用いた重ね合わせの原理に基づく step by step 法の方が精度良く検証されることが知られている<sup>85,86,87,88,89,90,91)</sup>。

このことから，本節では，step by step 法について述べる。以下では，基本式を誘導し<sup>92,93)</sup>，次節において，若材齢時のクリープ係数に関する既往の研究について記述する。なお，ヤング係数発現に関しては，実験結果に基づくこととし，ここでの記述は省略する。

図 2.7.2<sup>92)</sup>は増分型 step by step の概念図を示す。瞬時弾性ひずみとクリープひずみの和は，通常の使用状態の応力範囲において，作用応力に比例すると考えられる。また，応力に起因するひずみと体積変化によるひずみも重ね合わせることが可能である。

従って，時間とともにコンクリートに作用応力と物性値が変化するとき，1 軸下の作用応力とコンクリートの収縮により生じる全ひずみは式(2.7.1)で示される。

$$\varepsilon(t_{i+1/2}) = \sum_{j=1}^i [(\Delta\sigma_c)_j J(t_{i+1/2}, t_j)] + \varepsilon_{\Delta T, as, ds}(t_{i+1/2}, t_j) \quad (2.7.1)$$

ここで，

$\varepsilon(t_{i+1/2})$  : 区間  $i$  の終点時の実ひずみ

$(\Delta\sigma_c)_j$  : 区間  $j$  で生じる増分応力

$$J(t_{i+1/2}, t_j) = \frac{1}{E_c(t_j)} + \frac{\phi(t_{i+1/2}, t_j)}{E_{c,28}} : \text{クリープ関数}$$

$\phi(t_{i+1/2}, t_j)$  : 載荷時有効材齢  $t_j$ ，着目有効材齢  $t_{i+1/2}$

時のクリープ係数

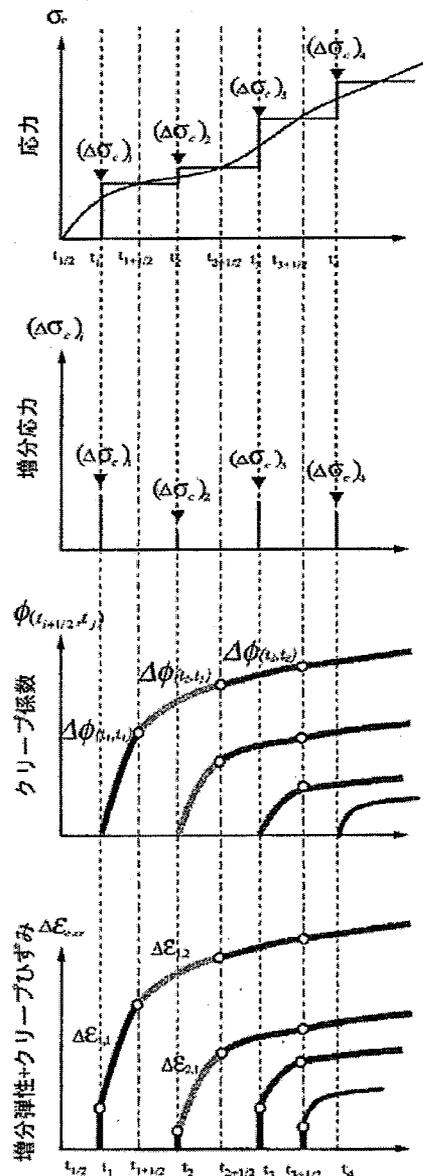


図 2.7.2 step by step の概念図

$E_c(t_j)$  : 有効材齢  $t_j$  時のヤング係数

$E_{c,28}$  : 標準養生材齢 28 日のヤング係数

$\varepsilon_{\Delta T,as,ds}(t_{i+1/2}, t_j)$  :  $t_i$  から  $t_{i+1/2}$  までの増分応力, 収縮ひずみ

式(2.7.1)を用いて区間  $i-1$  と区間  $i$  の終点におけるひずみ差を求めると式(2.7.2)が得られる。これは区間  $i$  の増分ひずみとなる。

$$\begin{aligned} (\Delta\varepsilon_c)_i &= \varepsilon(t_{i+1/2}) - \varepsilon(t_{(i-1)+1/2}) \\ &= (\Delta\sigma_c)_i J(t_{i+1/2}, t_i) + \sum_{j=1}^{i-1} \left[ (\Delta\sigma_c)_j \frac{\phi(t_{i+1/2}, t_j) - \phi(t_{(i-1)+1/2}, t_j)}{E_{c,28}} \right] + (\Delta\varepsilon_{\Delta T,as,ds})_i \end{aligned} \quad (2.7.2)$$

ここで,

$(\Delta\varepsilon_c)_i$  : 区間  $i$  で生じる増分実ひずみ

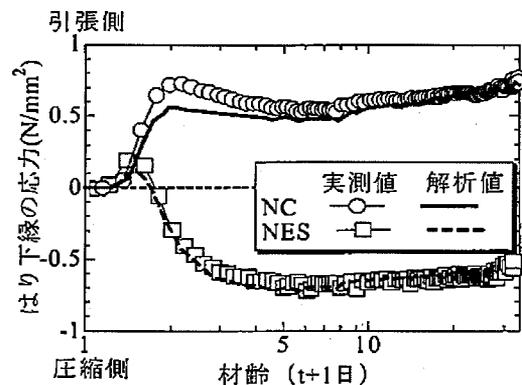
$(\Delta\sigma_c)_i$  : 区間  $i$  で生じるコンクリートの増分応力

$(\Delta\varepsilon_{\Delta T,as,ds})_i$  : 区間  $i$  で生じる増分収縮ひずみと温度ひずみの和

式(2.7.2)より, 区間  $i-1$  までの応力, ひずみ状態が既知であり, 区間  $i$  での増分全ひずみがわかれば, 区間  $i$  でのコンクリート増分応力  $(\Delta\sigma_c)_i$  は式(2.7.3)となる。

$$\sigma_c(t_{i+1/2}) = \sigma_c(t_{(i-1)+1/2}) + (\Delta\sigma_c)_i \quad (2.7.3)$$

式(2.7.2)と式(2.7.3)に示すように, 増分型 step by step は各時間ステップの応力変動を考慮したクリープ解析であることに特徴を有する。図 2.7.3<sup>92)</sup>は増分型 step by step の解析結果と測定した結果の例を示したものであり, 解析値と測定結果とがほぼ一致しており, 本解析手法において定量的に予測することが可能であると考えられる。このことから, 増分型 step by step の解析方法は, 超高強度コンクリートの若材齢時の応力変動が大きい場合には適正な評価方法といえる。水結合材比 23%において, 低熱セメントと膨張材および収縮低減剤を用いた拘束試験において低減効果が確認され, また, 本解析手法において予測可能であることが報告<sup>93)</sup>されている。



NC : 普通セメント-水セメント 30%

NES: 普通セメント+膨張材-水セメント 30%

図 2.7.3 収縮応力の実測値と解析値との比較

## 2. 7. 2 クリープ

### (1) 圧縮クリープ

式(2.7.2)より、クリープ係数の適正な評価が必要であり、特に高強度コンクリートでは若材齢時のクリープひずみの評価が必要となる。高強度コンクリートのクリープ係数の若材齢時に関する研究はほとんどないのが現状である。しかし、一般的にはクリープ係数は圧縮強度が高いほど小さくなる傾向があることから、水結合材、圧縮強度および相対湿度を用いたクリープ予測式が提案されている<sup>66,95)</sup>。80N/mm<sup>2</sup>以下の高強度コンクリートのクリープ予測式としては、MC90<sup>66)</sup>、ACI209<sup>96)</sup>、EUROCODE2<sup>97)</sup>、土木学会<sup>98)</sup>、Bazant<sup>99)</sup>などがある。これによるとMC90、ACI、EUROCODE2およびBazantはクリープ係数で、土木学会式は単位応力あたりのクリープひずみで予測している。予測値はクリープ係数の最終値と時間関数を乗じた式となっている。これらの予測方法は国内外の実測値から低強度からの80N/mm<sup>2</sup>範囲においてクリープをほぼ±40%で予測できることが確認されている<sup>100,101)</sup>。ここで、MC90においては、時間関数の中にクリープの進行速度を決める係数を取り入れている特徴を有しており、若材齢になるほどクリープが急速に収束する結果<sup>102,103)</sup>から、若材齢時のクリープ予測の精度を高めるために有効な方法である。

式(2.7.4)はMC90のクリープ式を示す。

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \left( \frac{(t - t_0)/t_0}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right)^{0.3} \quad (2.7.4)$$

ここで、 $\phi(t, t_0)$ はクリープ係数、 $\phi_0$ はクリープ係数の終局値、 $\beta_H$ はクリープ進行速度を表す係数、 $t$ は有効材齢(日)、 $t_1$ は1日、 $t_0$ は載荷時有効材齢(日)をそれぞれ示す。

ここで、MC90の $\beta_H$ は仮想部材厚と湿度の関数で標記されており、この式を高強度コンクリートの若材齢時にあてはめた場合に評価できないとする報告<sup>60)</sup>がある。図2.7.4<sup>104)</sup>はクリープ係数の実測値とMC90の予測値を示したものであり、MC90の予測値は実測値と比較して小さく予測している。このことから、 $\beta_H$ に関して、載荷時材齢を関数とする方法が提案されている<sup>6,102,105)</sup>。図2.7.5<sup>102)</sup>は、 $\beta_H$ を載荷時材齢の関数とし、クリープ係

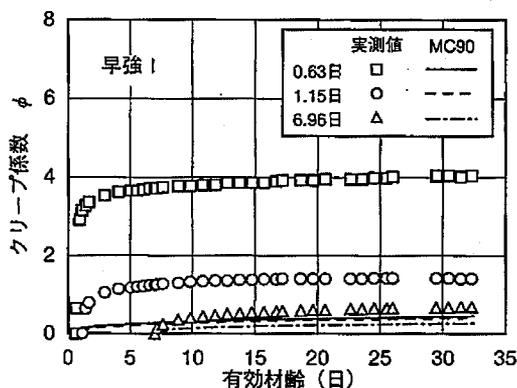


図 2. 7. 4 実測値と MC90 予測値との比較

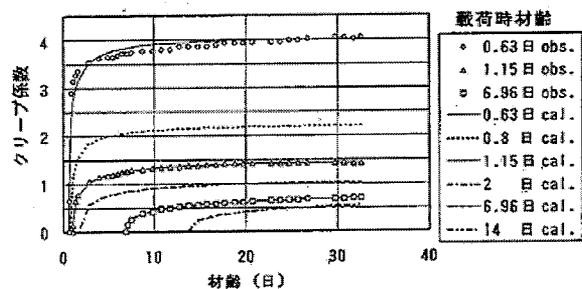


図 2. 7. 5 実測値と改良 MC90 予測値との比較

数を予測した結果を示したものであり、予測値と試験結果とがよく一致する結果を示している。

また、高強度コンクリートの若材齢時の発現が混和剤量やセメント種別により異なるため、凝結時間などが配合ごとに異なり、荷重時材齢はこの影響を加味する必要があるため、圧縮強度発現( $f_0/f_{28}$ )

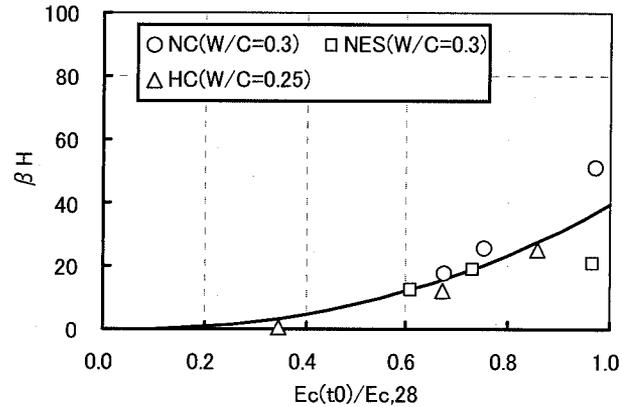
を関数とする方法<sup>106)</sup>およびヤング係数発現( $E_0/E_{28}$ )<sup>93,94,103)</sup>などが提案されている。

図 2.7.6<sup>93)</sup>は、ヤング係数発現  $\beta_H$  と  $\phi_0$  の回帰式と実測値を示したものであり、前述の解析結果はこの回帰式を用いた結果であり、実験値と予測値とがよく一致していることが認められる。

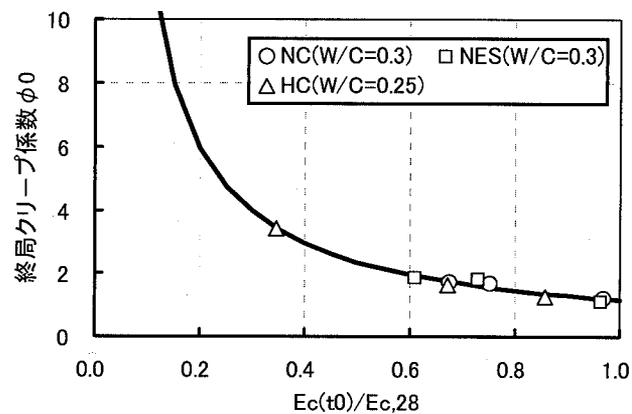
$\phi_0$  についてもヤング係数発現での評価が行われている。本研究における超高強度コンクリートのクリープに関する評価に関してもヤング係数発現に基づき検討することとした。

## (2) 引張クリープ

自己収縮ひずみに起因して発生する引張応力を予測するため、本来であれば引張クリープを用いて評価することが望ましい。しかし、供試体に均等な引張力を与えるなどの実験の困難さや引張ひずみが小さいために計測の難しさなどから引張クリープに関する検討はほとんどないのが現状であり、引張クリープに関しては圧縮クリープと比較して明確にされていない。若材齢時の圧縮クリープと引張クリープとの比較を既往の研究でみた場合にも、圧縮クリープ係数は引張クリープより大きく、かつ、その傾向は応力強度比が小さいほど大きくなるとする報告がある<sup>107,108)</sup>。一方において、それとは反対に引張クリープの大きいとする報告(単位引張応力クリープひずみが単位圧縮応力ひずみの 0.75 倍、引張ヤング係数が圧縮ヤング係数の 1.15 倍からクリープ係数を推定すると引張クリープ係数は圧縮引張クリープ係数の 0.86(=0.75×1.15)倍)報告<sup>109,110)</sup>がある。さらに、単位引張応力クリープひずみと単位圧縮応力ひずみに差がほとんどないとする報告<sup>111)</sup>がある。本研究では、



( $\beta_H$ )



( $\phi_0$ )

NC : 普通セメント-水セメント 30%

NES : 普通セメント+膨張材混入-水セメント 30%

HC : 早強セメント-水セメント 25%

図 2.7.6 ヤング係数発現と  $\beta_H$  および  $\phi_0$  の関係

本研究に近い既往の研究<sup>94)</sup>において実験値と予測値とがほぼ一致していることから、圧縮クリープと引張クリープとを同じとして取り扱うこととした。

### (3) 膨張材を混入したコンクリートのクリープ性状

膨張材がクリープ係数に及ぼす影響に関しては、(1)の圧縮クリープの図2.7.6に示すように膨張材の混入の有無(凡例 NE と NES)によりクリープ性状に差がほとんどないことが考えられる。ただし、膨張材を混入したコンクリートのクリープ係数は、載荷材齢2日以降は無混入のコンクリートとほぼ等しい結果となったが、若材齢時(材齢0.5日と1日)のクリープ係数は無混入と比較して大きくなる結果を示す報告<sup>112)</sup>がある。この報告における配合の水セメント比は45%であり、超高強度コンクリートの領域でないが、若材齢時のクリープ挙動に関しては留意する必要がある。

### 2.7.3 模擬実物供試体を用いた試験による研究

コンクリートの高強度化に伴い、温度応力ばかりでなく、自己収縮ひずみの引張応力も加味されるために部材のひび割れリスクが高まることが多く指摘されている。こうした背景から、模擬実部材を作製して鉄筋ひずみなどの計測結果から部材に発生している応力を検討している<sup>60,89,92)</sup>が、その検証例は少ないのが現状である。水結合材比22%における実部材の発生応力を予測するためには自己収縮ひずみの温度依存性を考慮する必要があるとする報告がある<sup>92)</sup>。また、水結合材21.5%とした冬期と水結合材23.0%とした夏期による柱模擬部材試験により夏期に方が自己収縮ひずみによるひび割れリスクが高くなることを報告している<sup>89)</sup>。図2.7.7<sup>113)</sup>は、最近の研究における水結合材比13%有筋柱模擬部材のひび割れ観察をした結果であり、有筋柱模擬部材内部にひび割れが発生したことを示す。また、最近の研究において、水結合材比16%とし、無筋柱模擬部材を用いた収縮低減剤を用いた自己収縮ひずみの低減効果に関する検証を行い、収縮ひずみの低減効果があることが報告されている<sup>114)</sup>。

水結合材比20%を下回る自己収縮ひずみを低減した超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの温度依存性や自己収縮ひずみに起因した拘束応力を把握する必要があるが、模擬実物供試体を用いた低収縮化の検討はほとんどないのが現状である。

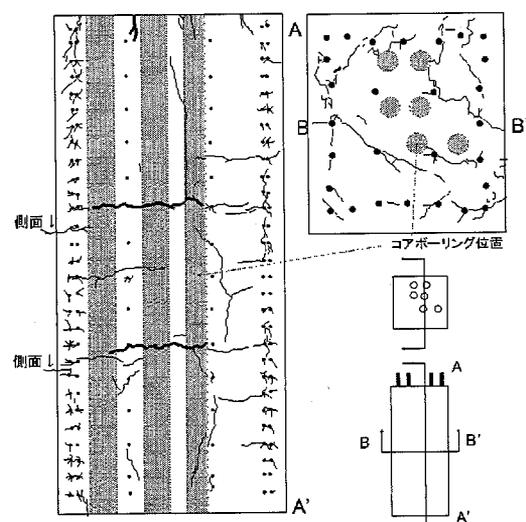


図2.7.7 超高強度コンクリート柱模擬部材のひび割れ状況

## 2. 8 現状の問題点

本章では、本研究に関連した既往の研究に関する現況についてまとめた。現況の問題点を以下にまとめる。

- (1) 高強度コンクリートの自己収縮ひずみに関する発生機構に関しては多くの知見を得ている。また、セメント種別やシリカフュームが自己収縮ひずみの発生量に与える影響に関する基礎的知見が得られている。しかしながら、これらの多くが水結合材比 20%以上の知見であり、水結合材比 20%を下回る超高強度コンクリートに知見はほとんどないのが現状である。
- (2) 自己収縮ひずみに関する基礎データの多くが練上がり温度と養生温度を 20℃とした知見であり、練上がり温度や水和熱に起因したコンクリート温度上昇量が自己収縮ひずみ発現や自己収縮ひずみ発生量に与える影響に関する検討はほとんどないのが現状である。
- (3) 自己収縮ひずみや収縮応力を低減する方法として、物理的な膨張ひずみの付与、表面張力の低減および内部養生方法などの知見が得られている。しかしながら、水結合材 20%を下回る超高強度コンクリートに関する自己収縮ひずみの低減効果に関する知見がほとんどないのが現状である。また、膨張材を使用したモルタルに関しては未反応膨張材の後膨張ひずみの発生に関する知見を得ているが、コンクリートとしての性状に関する知見がほとんどないのが現状である。
- (4) 内部養生方法として、高含水率の軽量骨材を使用する方法があるが、天然粗骨材との置換率を高めた場合に圧縮強度の低下が認められた。軽量骨材より破砕値が大きく、高含水率な廃瓦粗骨材を超高強度コンクリートの収縮ひずみや収縮応力の低減方法に有効な手段と考えられるが、基礎的性状が明らかになっていない。
- (5) 練上がり温度や水和熱に起因したコンクリート温度上昇量が各種自己収縮ひずみや自己応力の低減方法による低減効果に与える影響に関する検討はほとんど行われていないのが現況である。
- (6) ひび割れリスクを予測するためには、部材に発生する内部応力を予測する必要があるが、この予測に必要となる超高強度コンクリートの若材齢時のクリープ特性に関する検討はほとんどないのが現況である。

## 第2章 参考文献

- 1) Davis, H.E. : Autogenous Volume Change of Concrete, Proceedings of the Forty-Third Annual Meeting, American Society for Testing Materials (ASTM), Vol.40, pp.1103-1110, 1940
- 2) A. M. Neville (三浦尚訳) : Properties of concrete Fourth and Final Edition Standards updated to 2002, pp.525-526, 2004
- 3) 田澤榮一, 宮澤伸吾, 重川幸司 : 水和反応による硬化セメントペーストのマイロな体積減少, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.122-127, 1991
- 4) 田澤榮一, 宮澤伸吾 : セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響, 土木学会論文集, No.502/V-25, pp.43-52, 1994
- 5) 宮澤伸吾, 田澤榮一, 佐藤剛, 佐藤克敏 : 鉄筋拘束による超高強度コンクリートの自己収縮応力, コンクリート工学年次論文集, Vol.15, No.1, pp.57-62, 1993
- 6) 早川智浩, 許明, 佐藤良一, 今本啓一 : 高強度コンクリートラーメンの自己収縮応力 2次元 FEM 解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.1027-1032, 1998
- 7) 田澤榮一 : 水和反応によるセメントペーストの自己収縮, セメント・コンクリート, No.565, pp.35-44, 1994
- 8) 土木学会 : 2002年版 コンクリート標準示方書 改訂資料, コンクリートライブラリー 108, pp.13-16, 2002
- 9) 土木学会 : 2007年制定コンクリート標準示方書設計編, pp.45-49, 2007
- 10) 日本コンクリート工学協会 : 自己収縮研究委員会報告書, 1996
- 11) 日本コンクリート工学協会 : コンクリートの自己収縮研究委員会報告書, 2002
- 12) Powers, T.C. and Brownyard, T.L. : Studies of the physical Properties of Hardened Portland Cement Paste, Part9, Journal of the American Concrete Institute, Vol.18, No.8, pp.984-987, 1947
- 13) 田澤榮一, 宮澤伸吾 : 水和による自己収縮, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.25-30, 1994
- 14) Persson, B : Moisture in concrete Subjected to Different Kind of Curing, Materials and Structures, Vol.30, pp.533-544, 1997
- 15) 掘田智明, 名和豊治 : セメントペーストの自己収縮に及ぼす水セメント比の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第565号, pp1-7, 2003
- 16) 平尾宙, 内川浩, 羽原俊祐 : 硬化セメントペーストの湿度及び硬化体構造の変化と自己収縮, コンクリート工学, Vol.18, No.1, pp.705-710, 1996
- 17) セメント協会 : C3クリップボード [セメント化学編], pp79-80, 2008
- 18) 谷村充, 富田六郎 : 体積変化制御の物理と化学, コンクリート混和材料ハンドブック, エヌ・ティー・エス, pp.78-90, 2004
- 19) Powers, T.C.: Mechanisms of shrinkage and reversible creep of hardening cement paste, in Proc, int. Symp., Structure of concrete and its behaviors under load, pp.319-344, 1965
- 20) 石田哲也, R. P. CHAUBE, 岸利治, 前川宏一 : 微視的機構に基づくコンクリートの自己, 及び乾燥収縮に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.727-732, 1996

- 21)田澤榮一，宮澤伸吾，佐藤剛：自己収縮に及ぼすセメントの化学組成の影響，セメント・コンクリート論文集，No.47，pp.528-533，1993
- 22)谷村充，兵頭彦次，佐藤達三，佐藤良一：高強度コンクリートの収縮低減化に関する一検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.991-996，2000
- 23)谷村充：高強度コンクリートの収縮低減と RC 曲げ部材の使用性能評価に関する研究，広島大学博士論文，pp56-59
- 24)宮澤伸吾，田澤榮一：セメント系材料の自己収縮に及ぼすセメントの化学組成の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.699-704，1996
- 25)近松竜一，竹田宣典，三浦律彦，十河茂幸：高強度・高流動コンクリートの低収縮化に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.1，pp.169-174，1997
- 26)宮澤伸吾，黒井登起雄，北田悦子：自己収縮に及ぼすセメントの鉱物組成および粒径の影響，セメント・コンクリート論文集，No.53，pp.243-249，2000
- 27)例えば長滝重義：コンクリートの高性能化，技報堂出版，pp.30-31
- 28)五十嵐心一，川村満紀，森下隆志：若材齢における高強度コンクリートの内部組織の特徴と自己収縮拘束特性，土木学会論文集 No.704，V-55，pp.173-186，2002
- 29)Wittmann, F.H.:On the action of capillary pressure in fresh concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.6, pp.49-56, 1976
- 30)菅俣匠，杉山知己，梅沢健一，岡沢智：セメントーシリカフェーム系結合材の水和反応と強度発現性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1287-1292，2004
- 31)盛岡実，串橋和人，坂井悦郎，大門正機：遊離石灰ーアウインー無水セッコウ系膨張材の膨張特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.1，pp.271-276，1997
- 32)盛岡実，萩原宏俊，坂井悦郎，大門正機：膨張材を混和したセメント硬化体の微細構造，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp.169-174，1998
- 33)山本賢司，盛岡実，坂井悦郎，大門正機：膨張材を混和したセメントの膨張機構，コンクリート工学論文集，Vol.14，No.3，pp.23-31，2003
- 34)日本コンクリート協会：膨張コンクリートによる構造物の高機能化／高耐久化に関するシンポジウム，pp.1-3，2003
- 35)谷村充，兵頭彦次，佐藤良一：膨張材を用いた高強度コンクリートの自己膨張・収縮特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.951-956，2002
- 36)盛岡実，坂井悦郎：膨張材を混和した低水セメント比モルタルの膨張挙動，膨張コンクリートによる構造物の高機能化／高耐久化に関するシンポジウム，pp.103-108，2003
- 37)上原信郎，鈴木康則，河上浩司，西本好克：超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの自己収縮低減，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1099-1104，2005
- 38)鈴木雅博，中瀬博一，丸山一平，佐藤良一：超高強度膨張コンクリートの自己応力に及ぼす温度履歴の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.59，pp.375-382，2005
- 39)北澤真，羽淵貴士，村松道雄，守分敦郎：膨張材によるマスコンクリートの温度ひび割れ対策による検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.1117-1122，2001
- 40)盛岡実，萩原宏俊，坂井悦郎，大門正機：膨張材の水和反応と材料設計，セメント・コンクリート論文集，Vol.54，pp.111-116，2000

- 41)谷村充：ひび割れ低減対策－収縮低減剤の原理・効果と使用例，コンクリートテクノ，Vol.23，No.1，pp.38-47，2004
- 42)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説，pp.110-117，2006
- 43)S. Weber and H. W. Reinhardt：“A Blend of Aggregates to Support Curing of Concrete”，Proceedings of International Symposium on Structural Lightweight Concrete, Edited by I. Holand, T.A. Hammer and F. Fluge, Sandefjord, Norway, pp. 662-671,1996
- 44)K. Takada, K. VAN BREUGEL, E. A. B KOENDERS, N. KAPTIJN：EXPERIMENTAL EVALUATION OF AUTOGENOUS SHRINKAGE OF LIGHTWEIGHT AGGRIGATE CONCRETE, PROCEEDING OF INTERNATINAL WORKSHOP ON AUTOGENOUS SHRINKAGE OF CONCRETE, JCI, pp.221-230, 1998
- 45)高田和法，柳井修司，渡部貴裕，一宮利通：超高強度コンクリートの自己収縮低減に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1007-1022，2003
- 46)日紫喜剛啓，高田和法，大野俊夫，一宮利通，盛田行彦：自己収縮を低減した150N/mm<sup>2</sup>級超高強度コンクリートに関する実験的検討，土木学会論文集，No.781，V-66，pp.101-112，2005
- 47)五十嵐心一，川村満紀，神崎暁史：軽量骨材の使用による高強度コンクリートの自己収縮の低減，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.399-404，2002
- 48)Bentz, D. P., Snyder, K. A.：Protected paste volume in concrete, Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate, Cement and Concrete Research, Vol. 29, No.11, pp.1863-1867, 1999
- 49) Ole Mejlhede Jensen, Per Freiesleben Hansen: Water-entrained cement-based materials, I. Principals and theoretical background, Cement and Concrete Research, Vol. 31, No.4, pp.647-654, 2001
- 50)飛田浩孝，上原匠，梅原秀哲，友竹博一：廃瓦材のコンクリート用骨材への適用性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1577-1585，2002
- 51) Ole Mejlhede Jensen, Per Freiesleben Hansen: Water-entrained cement-based materials II. Experimental Observations, Cement and Concrete Research, Vol. 32, No.6, pp.973-978, 2002
- 52) Hao Lam, R. Douglas Hooton: EFFCTS OF INTERNAL CURING METHOD ON RESTRAINED SHRINKAGE AND PERMEABILITY, SELF-DESICCATION AND ITS IMPORTANCE IN CONCRETE TECHNOLOGY, Proceedings of the Fourth International Research Seminar, pp.210-228, 2005
- 53)谷村充，兵頭彦次，大森啓至，佐藤良一：高強度コンクリートの収縮応力の低減化に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.1075-1080，2001
- 54)竹田宣典，松永篤，近松竜一，十河茂幸：低熱ポルトランドセメントと膨張材を用いた低収縮コンクリートに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp.997-1002，1998
- 55)坂井吾郎，一宮利通，岡本裕昭，小室敦：低収縮型超高強度コンクリートを用いた橋梁上部工の施工－秋葉原公共デッキ建設工事－，コンクリート工学，Vol.43，No.11，pp.44-49，2005

- 56) M. Suzuki, I. Maruyama, R. Sato: Properties of Expansive-Ultra High-Strength Concrete, 7th International Symposium on the Utilization of High-Strength / High-Performance Concrete, pp.1159-1174, 2005
- 57) 渡邊悟士, 黒岩秀介, 陣内浩, 並木哲: 高強度コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす粗骨材物性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 588 号, pp.21-27, 2005
- 58) 鈴木雅博, 桐川潔, 諸橋克敏, 加賀谷誠: PVA 繊維補強軽量コンクリートの耐凍害性, 第 14 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.143-146, 2005
- 59) 丁海文, 河野広隆, 渡辺博志, 鈴木雅博: 水和熱による高温履歴がコンクリートの自己収縮に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.1117-1122, 1999
- 60) 河野政典, 梶田佳寛, 上西隆, 萩原伸政: 自己収縮の温度依存性を考慮した高強度コンクリート柱部材の初期材齢時発生応力の解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.979-984, 2000
- 61) 橋田浩, 山崎庸行: 自己収縮と水和熱膨張による高強度コンクリートの連成ひずみ特性に関する検討, コンクリート工学論文集, Vol.13, No.1, pp.25-32, 2002
- 62) 筒井英之, 佐藤良一, 許明: 高強度コンクリートの自己収縮応力に関する検討, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.478-483, 1996
- 63) 森本文太郎, 魚本健人: 初期高温養生したポルトランドセメントの水和に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, pp.651-654, 2000
- 64) 菅俣匠, 杉山知己, 梅沢健一, 岡沢智: セメント-シリカフェーム系結合材の水和反応と強度発現性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1287-1292, 2004
- 65) Ole Mejlhede Lensen, Per Freiesleben Hansen : Influence of temperature on autogenous deformation and relative humidity change in hardening cement paste, Cement and Concrete Research, pp.567-575, 1999
- 66) CEB-FIP : Model Code 90, Tomas Telford, 1993
- 67) 田澤榮一, 宮澤伸吾: コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究, 土木学会論文集, No.571, V-36, pp.211-219, 1997
- 68) Guo Chengiu : Maturity of Concrete : Method for Predicting Early-Stage Strength, ACI MATERIALS JOURNAL, Vol.86, No.4, pp.341-353, 1989
- 69) 川口徹: コンクリートの線膨張係数に関する研究成果について, 日本コンクリート工学協会, マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp.15-18, 1982
- 70) 楊楊, 佐藤良一, 田澤榮一: 硬化仮定にある高強度コンクリートの線膨張係数測定方法の一提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.961-966, 2000
- 71) 宮澤伸吾, 黒井登起雄: 若材齢時におけるセメントペーストの線膨張係数, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.215-220, 2000
- 72) 丁海文, 河野広隆, 渡辺博志, 佐藤重一: 高強度コンクリートの線膨張係数に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.955-960, 2000

- 73)小澤満津雄, 金鴻勝, 島崎磐, 森本博昭: 非接触型変位計による若材齢コンクリートの線膨張係数の計測, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.1099-1104, 2001
- 74) φ .Bj φ ntegaard, E. J. Sellevold : THERMAL DILATION – AUTOGENOUS SHRINKAGE : HOW TO SEPARATE ? , PROCEEDING OF INTERNATINAL WORKSHOP ON AUTOGENOUS SHRINKAGE OF CONCRETE, JCI, pp.233-244, 1998
- 75)萩原伸治, 榊田佳寛, 中村成春: 高強度コンクリートの若材齢における線膨張係数に関する実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 572 号, pp9-16, 2003
- 76)寺本篤史, 宮地友也, 丸山一平, 鈴木雅博: 超高強度コンクリートの若材齢線膨張係数に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.633-638, 2007
- 77)鈴木雅博, 河野広隆, 渡辺博志, 田中良樹: コンクリートの引張強度に及ぼす載荷速度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.649-654, 2007
- 78)日本コンクリート協会: コンクリートの自己収縮研究委員会報告書, pp.58-60, 2002
- 79)佐藤良一, 氏家勲, 手塚政男, 吉本徹: 持続荷重を受ける RC 曲げ部材の変形・ひびわれ, コンクリート工学年次論文集, Vol.9, No.2, pp.217-222, 1987
- 80)佐藤良一, 氏家勲, 鈴木雅博, 湊英一: 応力履歴を考慮した RC 曲げ部材の変形解析法, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.2, pp.239-244, 1990
- 81)佐藤良一, 氏家勲, 鈴木雅博, 湊英一: RC 部材の変形、応力の長期挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.2, pp.287-292, 1991
- 82)佐藤良一, 氏家勲, 湊英一, 北条泰秀: 長期の RC 曲げ部材における変形と付着に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.14, No.2, pp.63-68, 1992
- 83)Sato, R., Dilger, W.H. and Ujike, I : Deformations and Thermal Stresses of Concrete Beams Constructed in Two Stages, Proceedings of the International RILEM Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Munich, Germany, pp.313-320, 1994
- 84)佐藤良一, 氏家勲, 鈴木雅博, 北条泰秀: 鉄筋コンクリート曲げ部材の長期変形挙動およびその解析法に関する研究: 土木学会論文集, No.634, V-45, pp.27-41, 1999
- 85)日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会報告書, pp.81-190, pp.203-210, 1996
- 86) JCI : Autogenous Shrinkage of Concrete, Tazawa, E. (ed. ), E & FN Spon, pp.27-38, 1999
- 87) Sato, R., Xu, M. and Y, Yang : Stresses of High-Strength Concrete Due to Autogenous Shrinkage Combined with Hydration Heat of Cement, Third CANMET/ACI International Conference on High-Performance Concrete, Kuala Lumpur, Malaysia, SP-172-44, pp.837-852
- 88)今本啓一: 超高強度鉄筋コンクリート架構試験体に生じたひび割れに関する一検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 495 号, pp.1-8, 1997
- 89) 今本啓一: 高強度コンクリート実物大の自己収縮応力に及ぼす水和熱の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 503 号, pp.17-22, 1998
- 90)今本啓一: コンクリートの自己収縮応力予測法, 材料設計とコンクリート構造物の性能に関するシンポジウム・論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.309-314, 1999
- 91)橋田浩, 黒田泰弘, 山崎庸行, 友澤史紀: 高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート構造部材の初期ひび割れに関する実験ならびに応力解析, コンクリート工学論文集, Vol.10, No.1, pp.51-63, 1999

- 92)正木聡, 伊藤秀敏, 河金甲, 丸山一平, 谷村充: 高強度コンクリートにおける膨張応力の3次元有限要素クリープ解析, 膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化に関するシンポジウム・論文集, 日本コンクリート協会, pp.181-188, 2003
- 93)Sato, R., Tanaka, S., Hayakawa, T., Tanimura, M.: Experimental studies on reduction of autogenous shrinkage and its induced stress in high-strength concrete, "SELF-DESCICCATION AND ITS IMPORTANCE IN CONCRETE TECHNOLOGY, Proceedings of the Second International Research Seminar in Lund, 1999, pp.163-171
- 94)H. Ito, I. Maruyama, M. Tanimura, and R. Sato: Early Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.2, pp155-174, 2004
- 95)Roy, R. L., F. D. Larrard, G. Pons: The after code type model for creep and shrinkage of high-performance concrete, 4th International Symposium on the Utilization of High-Strength / High-Performance Concrete, pp.387-396, 1996
- 96)ACI Committee: Prediction of Concrete, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, 1982
- 97)PrEN 1992-1 (Final draft): Eurocode 2 Design of concrete structure – Part 1: General rules and rules for buildings, CRN, 2001
- 98)土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], pp50-53, 2007
- 99)Bazant, Z. P. and Baweija, S: Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures – Model B3, Materials and Structures, RIREM, Vol. 28, pp.357-365, 1995
- 100)阪田憲次, 椿龍哉, 井上正一, 綾野克紀: 高強度域を考慮できる乾燥収縮ひずみおよびクリープ予測式の提案, 土木学会論文集, No.690, V-53, pp.1-19, 2001
- 101)綾野克紀: クリープの予測手法とその精度の現状, コンクリート工学, Vol.43, No.5, pp51-55, 2005
- 102)宮澤伸吾, 大谷博, 今本啓一, 佐藤良一: 超高強度コンクリートの若材齢におけるクリープ係数, 土木学会第51回年次学術講演会, V-5, pp.578-579, 1996
- 103)橋田浩, 山崎庸行: 初期高温履歴を受ける高強度コンクリート構造体の自己収縮応力の算定法に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, 第537号, pp7-12, 2000
- 104)日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会報告書, pp.111, 1996
- 105)楊楊, 許明, 佐藤良一, 手塚正道: 高強度コンクリートの収縮及びクリープ, 第7回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.817-822, 1997
- 106) Larrard, F.: Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete Field Concrete, ACI SP-121, pp.577-598. 1990
- 107)平本昌生, 入矢桂史郎, グプタ スプラティック, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートのクリープの材齢および載荷応力依存性, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.775-780, 1997
- 108)入矢桂史郎, 服部達也, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの圧縮クリープと引張クリープの比較に関する研究, 土木学会論文集, No.599, V-40, pp.105-117, 1998

- 109)萩原伸治, 中村成春, 梶田佳寛, 河野政典: 高強度コンクリートの若材齢における力学特性と圧縮および引張クリープ挙動に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol.11, No.1, pp.39-50, 2000
- 110)萩原伸治, 梶田佳寛, 中村成春: 高強度コンクリートの若材齢クリープ挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 552 号, pp.31-36, 2002
- 111)小澤満津雄, 国森亮平, 車戸勝巳, 森本博昭: 若材齢高強度コンクリートのクリープ特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.631-636, 1997
- 112)百瀬晴基, 閑田徹志, 溝渕利明, 三橋博三: 膨張材を用いたコンクリートのクリープ性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 608 号, pp.1-7, 2006
- 113)片寄哲務, 高森直樹, 西田浩和, 寺岡勝: 高強度コンクリートの若材齢における力学特性と自己収縮挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.497-502, 2006
- 114)黒岩秀介, 渡邊悟士, 陣内浩, 並木哲: 収縮低減剤を用いた 150N/mm<sup>2</sup> 級コンクリートの諸特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.89-90, 2006

### 第3章 超高強度コンクリートの自己収縮ひずみ低減化の検討

#### 3.1 はじめに

本章では、シリカフュームと低熱セメントを用いた水結合材比 20%を下回る超高強度コンクリートの収縮低減方法を実験的に検討した結果を述べる。自己収縮ひずみの低減方法は、物理的な膨張ひずみを与えるための膨張材、表面張力を低減するための収縮低減剤および内部養生方法の骨材として廃瓦粗骨材をそれぞれ用い、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの低減効果を実験的に検討した。膨張材に関しては、未反応の膨張材の後膨張ひずみの懸念があるため、単位膨張材量を変化させた実験を行い、使用する単位膨張量の検討を行い、その後、各収縮低減方法および各収縮低減方法を組合せた検討を行った。

なお、本研究では、コンクリートの圧縮強度の目標を  $150\text{N/mm}^2$  に設定するために水結合材比を 15%として検討を行った。検討は、養生温度を  $20^\circ\text{C}$  一定とした場合の基本特性を把握することを目的とした。ただし、単位膨張量の検討に関しては、練上がり温度や温度上昇量の影響を勘案するため、コンクリートの温度履歴の影響についても検討した。

#### 3.2 膨張材種別による予備試験

本研究においては、膨張材は低添加型膨張材を使用することとした。低添加型膨張材はエトリンガイト-石灰系と石灰系の2種類ある。本研究で使用したシリカフュームと低熱セメントとのプレミック品を使用した水結合材比 19%における試験において収縮低減効果が高い結果を示した膨張材を本研究における水結合材比 15%にも用いることとした。ここでは、水結合材比 19%の試験について述べる。ただし、配合種別や養生条件などにより結果が異なることも考えられるため、水結合材比 15%に関して別途試験を行う必要があると考えるが、本研究では水結合材比 19%の結果による膨張材種別とした。なお、本試験は自己収縮ひずみを極力抑制するために実施した試験であり、後述する単位膨張量による後膨張の検討を実施せずに行った予備試験である。

##### 3.2.1 実験概要

###### (1) 使用材料と配合

表 3.2.1 と表 3.2.2 に使用材料と鉱物組成をそれぞれ示す。表 3.2.2 に配合表を示す。

表 3.2.1 使用材料

材料	種別	物理的性質	記号
セメント	低熱ポルトランドセメント	密度: $3.22\text{ g/cm}^3$ , 比表面積: $3540\text{ cm}^2/\text{g}$	L
細骨材	岩間産砕砂	表乾密度: $2.66\text{ g/cm}^3$ , 吸水率: $0.70\%$ , FM: 2.84	S
粗骨材	岩間産砂岩碎石	表乾密度: $2.75\text{ g/cm}^3$ , 吸水率: $1.30\%$ , FM: 6.62	G
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	消泡剤	-	D
混和材	膨張材	エトリンガイト石灰複合系—密度: $3.05\text{ g/cm}^3$	EX1
		石灰系—密度: $3.16\text{ g/cm}^3$	EX2
	シリカフューム	密度: $2.23\text{ g/cm}^3$ , 比表面積: $18.6\text{ m}^2/\text{g}$	SF

表 3.2.2 鋳物組成

	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
低熱ポルトランドセメント	30.2	49.2	4	9.2

表 3.2.3 配合表

配合名	膨張材 タイプ	W/ (SFLC+ EX)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SP/(SFLC +EX**)	D/(SFLC +EX**)
			W	SFLC*	EX**	S	G		
SFLC19	—	0.19	160	842	-	629	853	0.013	0.00010
SFLC19E1	EX1	0.19	160	807	35	629	853	0.013	0.00010
SFLC19E2	EX2	0.19	160	807	35	630	853	0.013	0.00010

\*:L+SF のプレミックス品, \*\*:膨張材

セメントには、低熱ポルトランドセメント(記号 L)を使用した。混和材には、シリカフェーム(記号 SF)を使用した。なお、セメント種類 L と混和材 SF を混合する配合では、L の重量の 10.6%を混和材 SF にあらかじめ置換したプレミックス材(記号 SFLC, 密度 3.08g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 6210cm<sup>2</sup>/g)を使用した。

練混ぜは 55 リットル 2 軸強制ミキサを使用し、1 バッチの練量は 45 リットルとした。練混ぜは SFLC と細骨材および膨張材の空練りを 15 秒行い、その後水と混和剤を添加してモルタル練りを 90 秒行い、最後に粗骨材を投入してコンクリート練りを 90 秒とし、排出した。

## (2) 試験方法

供試体寸法は 150×150×530mm とし、自己収縮ひずみを測定した。

養生は実部材を想定し、厚さ 300mm の発泡スチロール型枠を用いた簡易断熱養生とした。養生状況を図 3.2.1 に示す。練上がり温度は 20℃とし、練上がり後に発泡スチロール型枠に打設し、測定終了時まで実施した。

ひずみの測定は、供試体中央部に埋設した低弾性型(弾性係数：約 40N/mm<sup>2</sup>)の埋込みひずみ計を用いて行った。コンクリートの温度変化に伴う体積変化は、コンクリートの中心部に設置した熱電対にて測定した温度変化を JCI 案<sup>1)</sup>に準拠し、線膨張係数 10×10<sup>-6</sup>として補正した。

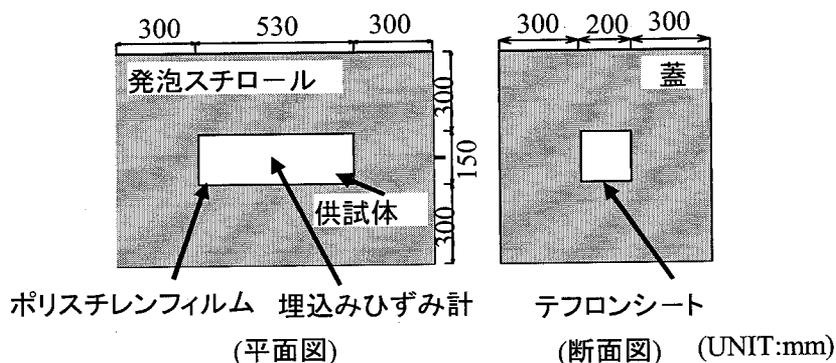


図 3.2.1 簡易断熱養生における自己収縮ひずみ測定状況

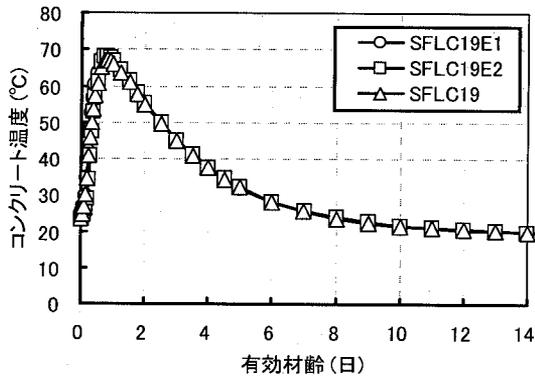


図 3.2.2 コンクリートの温度履歴

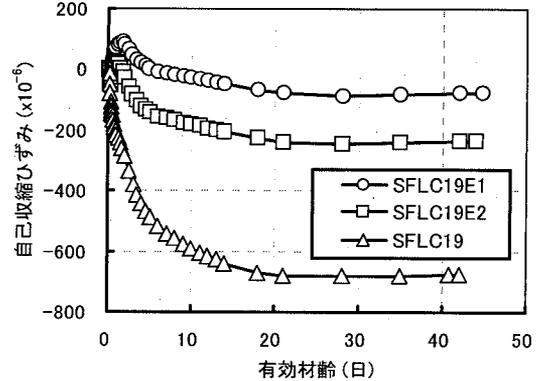


図 3.2.3 自己収縮ひずみの経時変化

### 3. 2. 2 実験結果

図 3.2.2 にコンクリートの温度履歴を、図 3.2.3 に自己収縮ひずみをそれぞれ示す。本試験の範囲内では、供試体名「SFLC19E1」の自己収縮ひずみの低減量は、供試体名「SFLC19E2」より大きくなる結果となり、本研究の範囲内ではエトリンガイト石灰複合系の膨張材に高い収縮低減効果が認められた。本研究での目的の1つである実構造物のひび割れリスクの低減から、コンクリートの温度履歴のある条件下ではエトリンガイト石灰系複合系膨張材において高い収縮低減効果が認められたことから、本研究ではエトリンガイト石灰複合系の膨張材を選択することとした。

## 3. 3 単位膨張量の検討

### 3. 3. 1 実験概要

#### (1) 実験フロー

ここでの実験は後膨張ひずみを生じない単位膨張材量を把握することを目的に実施した。

図 3.3.1 に実験フローを示す。後膨張ひずみの影響に関する検討は、最初に水和反応に起因したコンクリート温度履歴による影響に関する実験、20°C一定とした単位膨張材量をパラメータとした実験、最後に後膨張ひずみの発生が高いコンクリート温度条件での水中養生条件での実験を行うことにより実施した。なお、既往の研究<sup>2)</sup>において、膨張材と収縮低減剤と併用した場合に収縮ひずみの低減効果がより高まるとする報告から、収縮低減剤と併用した配合において検討した。

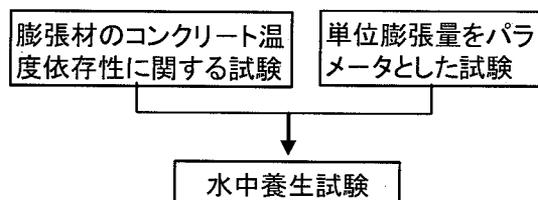


図 3.3.1 単位膨張材量の検討フロー

## (2) 使用材料および配合

表 3.3.1 と表 3.3.2 に使用材料と鉱物組成をそれぞれ示す。表 3.3.3 には配合表を示す。セメントには、低熱ポルトランドセメント(記号 L)を使用した。混和材には、シリカフェーム(記号 SF)を使用した。なお、セメント種類 L と混和材 SF を混合する配合では、L の重量の 10.5% を混和材 SF にあらかじめ置換したプレミックス材(記号 SFLC, 密度  $3.08\text{g/cm}^3$ , 比表面積  $6330\text{cm}^2/\text{g}$ )を使用した。粗骨材のかさ容積を  $0.53\text{m}^3/\text{m}^3$ (水結合材比 15% の場合はかさ容積を固定)(本検討では、単位体積重量  $530 \times 0.59 \times 2.96 = 940\text{kg/m}^3$ )と固定した。空気量は 2% とした。膨張材は結合材の一部とし、収縮低減剤は単位水量の一部とした。

練混ぜは 100 リットル 2 軸強制ミキサを使用し、1 バッチの練量は 80 リットルとした。練混ぜは SFLC と細骨材および膨張材の空練りを 15 秒行い、その後に水と混和剤を添加してモルタル練りを 240 秒行い、最後に粗骨材を投入してコンクリート練りを 60 秒とし、排出した。なお、練上がり温度  $10^\circ\text{C}$  の配合の練混ぜに関しては混和剤の効きが遅延するため、コンクリート練りの後に 5 分間ミキサ内に静置し、その後 30 秒練混ぜ後に排出した。

スランプフローの目標値は  $600 \pm 100\text{mm}$  となるように混和剤量を調整した。

表 3.3.1 使用材料

材料	種別	物理的性質	記号
セメント	低熱ポルトランドセメント	密度: $3.22\text{g/cm}^3$ , 比表面積: $3540\text{cm}^2/\text{g}$	L
細骨材	大月産安山岩砕砂	表乾密度: $2.62\text{g/cm}^3$ , 吸水率: 2.50%, FM: 2.53	S
粗骨材	盛岡産輝緑岩砕石	表乾密度: $2.96\text{g/cm}^3$ , 吸水率: 0.38%, FM: 6.19 実積率: 59.9%, BS 破砕値: 7.86%	G
混和剤	収縮低減剤	低級アルコール系	SRA
	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	消泡剤	-	D
混和剤	膨張材	エトリンガイト石灰複合系—密度: $3.05\text{g/cm}^3$	EX
	シリカフェーム	密度: $2.23\text{g/cm}^3$ , 比表面積: $18.6\text{m}^2/\text{g}$	SF

表 3.3.2 鉱物組成

	$\text{C}_3\text{S}$	$\text{C}_2\text{S}$	$\text{C}_3\text{A}$	$\text{C}_4\text{AF}$
低熱ポルトランドセメント	30.2	49.2	4	9.2

表 3.3.3 配合表

配合	(W+SRA)/ (SFLC+ EX)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )						練上がり 温度( $^\circ\text{C}$ )	SP/(SFLC+ EX)	D/(SFLC+ EX)
		W	SFLC	EX	S	G	SRA			
EX35-R	0.15	149	998	35	450	940	6	10	0.032	0.0010
								20,30	0.030	0.0002
EX25-R	0.15	149	1008	25	451	940	6	20	0.031	0.0002
EX20-R	0.15	149	1013	20	451	940	6	10	0.030	0.0002
								20	0.031	

表 3.3.4 試験シリーズと養生温度条件

試験シリーズ	供試体名 <sup>1)</sup>	配合種別	養生温度条件
膨張材のコンクリート温度依存性	EX35-R10℃→40℃	EX35-R	発泡スチロールを用いた簡易断熱養生
	EX35-R20℃→60℃	EX35-R	発泡スチロールを用いた簡易断熱養生
	EX35-R30℃→70℃	EX35-R	発泡スチロールを用いた簡易断熱養生
	EX35-R20℃一定	EX35-R	20℃室内試験 (封緘養生)
単位膨張材量	EX25-R20℃一定	EX25-R	20℃室内試験 (封緘養生)
	EX20-R20℃一定	EX20-R	20℃室内試験 (封緘養生)
冬期実部材のコンクリート温度を模擬した水中養生	EX20-R10℃→40℃ (水中)	EX20-R	材齢7日まで冬期実部材のコンクリートの温度履歴を模擬し、材齢7日以降は20℃水中養生
	EX20-R10℃→60℃ (水中)	EX20-R	加熱養生 <sup>2)</sup> した冬期実部材のコンクリートの温度履歴を模擬し、材齢7日以降は20℃水中養生
	EX20-R10℃(水中)	EX20-R	材齢7日まで10℃封緘し、それ以降は20℃水中養生

注1) 供試体名は、「一定」の記述が供試体名にある場合には、配合名と練混ぜから養生まで記述の室内温度で実施したことを意味し、その他の供試体名の場合には配合、フレッシュコンクリートの練上がり温度の目標値(以下、目標練温)、設定したコンクリートの目標最高温度を示す。また、供試体名に(水中)がある場合には供試体を水中養生したことを意味する。

注2) 加熱養生は製品を打設した後にシートで覆い、シートをはずし、脱枠するまでの期間にシート内を蒸気により所定の温度となるように加熱した養生をここでは意味する

### (3) 試験シリーズと試験方法

本試験は、膨張材のコンクリート温度依存性と単位膨張材量による長期材齢による後膨張の有無を検討するために実施した。表 3.3.4 に試験シリーズ、供試体名、養生温度条件および試験項目を示す。練混ぜから養生まで一定室内温度で実施した供試体は供試体名に「一定」の記述を加えた。その他の供試体名は配合、フレッシュコンクリートの練上がり温度の目標値(以下、目標練温と示す)および目標としたコンクリートの最高温度を示す。なお、供試体名「EX20-R10℃→40℃(水中)」と「EX20-R10℃→60℃(水中)」に関しては、温度湿度制御槽(以下、チャンバー)を用いてコンクリートの最高温度を制御した。また、供試体名に(水中)がある場合には供試体を水中養生したことを意味する。

試験は、最初に膨張材のコンクリートの温度履歴の差異による後膨張ひずみの有無を確認し、次に単位膨張材量の検討を行い、最後に、水中養生条件で試験を実施し、後膨張ひずみの有無を確認した。水中養生を実施した理由は、未反応の膨張材が外部の水の硬化体内部への浸透により後膨張ひずみが最も生じやすいと考えたからである。

また、冬期においては、凍害を防止する目的から蒸気による加熱養生(以下、加熱養生と示す)を実施する場合があるため、柱部材模擬温度履歴養生とは別に最高温度の設定を60℃とした加熱養生した試験も併せて実施した。図 3.3.2 に最高温度60℃としたチャンバー内の設定温度を示す。チャンバー内の設定温度は、後述する供試体名「EX35-R10℃→40℃」の練上がり温度10℃の簡易断熱養生した供試体のコンクリート温度の結果を参考に設定した。

#### (4) 供試体の作製方法と測定方法

供試体寸法は発泡スチロールを用いた供試体においては 125×125×1200mm とし、それ以外の供試体において 100×100×400mm とし、それぞれ自己収縮ひずみを測定した。なお、このコンクリート温度履歴は部材寸法 900×900×1100mm 部材の中心温度経時変化は、最高温度まではほぼ一致し、最高温度から外気温度までに関しては簡易断熱温度上昇した供試体の方が若干高いコンクリート温度になることが事前の試験で確認している(図 3.3.3 参照)。

ひずみの測定は、供試体中央部に埋設した低弾性型(弾性係数：約 40N/mm<sup>2</sup>)の埋込みひずみ計を用いて行った。コンクリートの温度変化に伴う体積変化は、コンクリートの中心部に設置した熱電対にて測定した温度変化を JCI 案<sup>り</sup>に準拠し、線膨張係数 10×10<sup>-6</sup>として補正した。

#### 3.3.2 実験結果および考察

##### (1) コンクリートのフレッシュ性状とコンクリート最高温度

表 3.3.5 にコンクリートのフレッシュ性状と最高温度を示す。

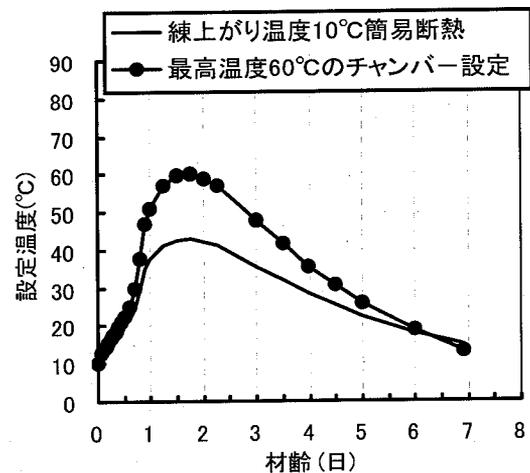


図 3.3.2 練上がり温度 10°C の最高温度 60°C の設定温度

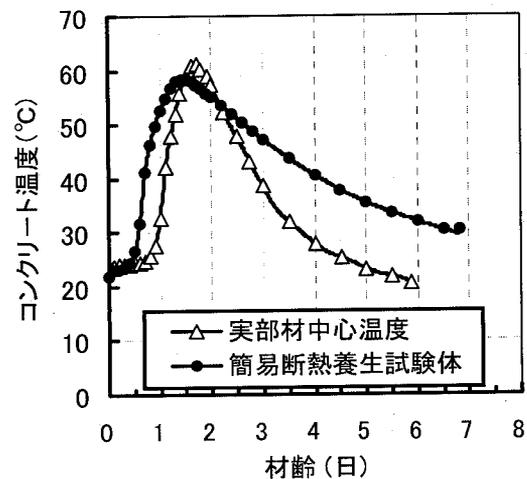


図 3.3.3 実部材コンクリートと簡易断熱養生供試体との温度履歴比較

表 3.3.5 フレッシュ性状およびコンクリートの最高温度

供試体名	スランブ フロー(cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)	
			練上がり温度	最高温度
EX35-R10°C→40°C	66.5×63.0	2.7	13.0	43.0
EX35-R20°C→60°C	66.0×63.5	2.3	22.5	56.0
EX35-R30°C→70°C	68.0×67.0	2.1	33.0	65.5
EX35-R20°C一定	62.0×59.5	2.3	22.5	24.8
EX25-R20°C一定	56.5×58.5	1.3	19.4	22.7
EX20-R20°C一定	65.0×65.0	1.8	23.9	23.9
EX20-R10°C→40°C(水中)	62.0×65.0	1.8	14.4	40.5
EX20-R10°C→60°C(水中)	63.0×63.5	2.0	13.9	60.0
EX20-R10°C(水中)	62.0×65.0	1.8	15.6	15.6

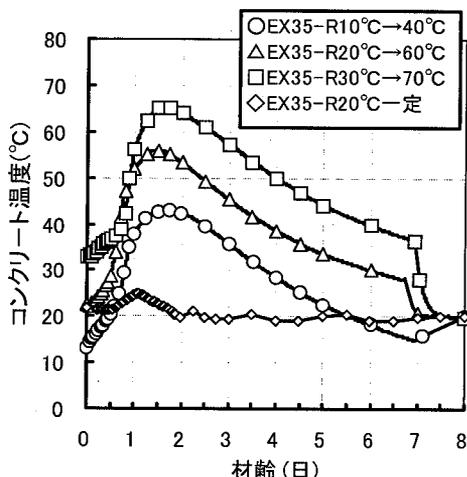


図 3.3.4 膨張材のコンクリート温度依存性試験の供試体温度

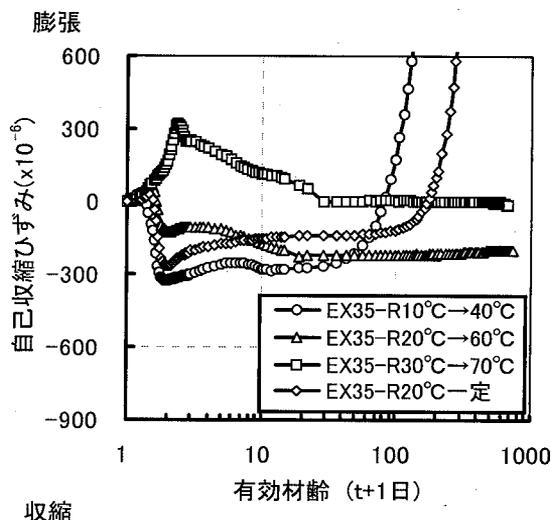


図 3.3.5 各コンクリート温度履歴による後膨張ひずみの有無

## (2) 膨張材のコンクリート温度依存性

図 3.3.4 に試験シリーズ「膨張材のコンクリート温度依存性」の各供試体のコンクリート温度履歴を示す。

図 3.3.5 に自己収縮ひずみの経時変化を示す。同図の材齢は式(3.3.1)に示す MC90 の有効材齢として標記し、温度依存性を検討することとした。

$$t_0 \text{ および } t = \sum_i^n \Delta t_i \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (3.3.1)$$

ここに、 $a$ 、 $b$  は係数、 $\Delta t_i$  : 温度が  $T(^{\circ}\text{C})$  である期間の日数、 $T_0 = 1^{\circ}\text{C}$

本研究においては、コンクリートの応力に関わる収縮量を考察する目的から時間軸原点を拘束応力の発生する時点としている。

供試体名「EX35-R10°C→40°C」と「EX35-R20°C一定」において材齢 100 日以降に急激な後膨張ひずみが発生した。膨張材による膨張量は練上がり温度と温度上昇量による影響を受け、両者の温度が高いほど膨張材の反応が早く、かつ、大きくなるとする報告<sup>3)</sup>や膨張材の作用機構は膨張材による水和反応生成物による毛細管空隙生成であるとする報告がある<sup>4)</sup>。このことから、練上がり温度が高く、温度上昇量が高い場合には、膨張材の水和反応が速く、コンクリートの剛性が比較的小さい若材齢時に膨張材による毛細管空隙を生成したのに対して、練上がり温度が低く、温度上昇量が低い場合には、コンクリート水和がほぼ終了した時点においても、膨張材の水和が進行したため、膨張圧が増加し、膨張材周辺にマイクロクラックが発生したことが推定される。このため、剛性が低下し、膨張ひずみが増加したことが考えられる。ただし、水結合材 15% であり、自己乾燥が大きく、かつ、外部の水分補給がない封緘養生であり、後膨張ひずみの発生メカニズムについては今後さらに検討していく必要があると考える。

膨張材による膨張ひずみ量には温度依存性があり、練上がり温度が低い場合に後膨張ひずみの発生が懸念されるため、単位膨張材量の検討を行うこととした。

### (3) 単位膨張材量

供試体名「EX35-R10℃→40℃」と「EX35-R20℃一定」において材齢100日以降に急激な後膨張ひずみが発生した。本節では、室温20℃において後膨張ひずみを発生しない単位膨張材量を把握することを目的に単位膨張材量をパラメータとした試験を実施した。

図3.3.6に自己収縮ひずみの経時変化を示す。供試体「EX25-R20℃」において有効材齢100日において後膨張ひずみが発生したが、供試体「EX20-R20℃」においては有効材齢660日においても後膨張ひずみが発生しない結果を得た。

### (4) 冬期実部材のコンクリート温度を模擬した水中養生

ここでは、練上がり温度10℃における単位膨張材量20kg/m<sup>3</sup>とした自己収縮ひずみの経時変化に関する検討を述べる。練上がり温度10℃の水中養生供試体の結果を述べる。水中養生による自己収縮ひずみを実施した理由は未反応の膨張材が外部の水の硬化体内部への浸透により後膨張ひずみが最も生じやすいと考えたからである。

水中養生した各供試体のコンクリート温度の経時変化と収縮ひずみの練り混ぜ直後からの経時変化をそれぞれ図3.3.7と図3.3.8に示す。水中養生開始後に供試体は経時変化に伴い膨張ひずみが漸増する傾向を示したが、極端な後膨張ひずみは材齢520日まで生じない結果を示した。今回検討した水結

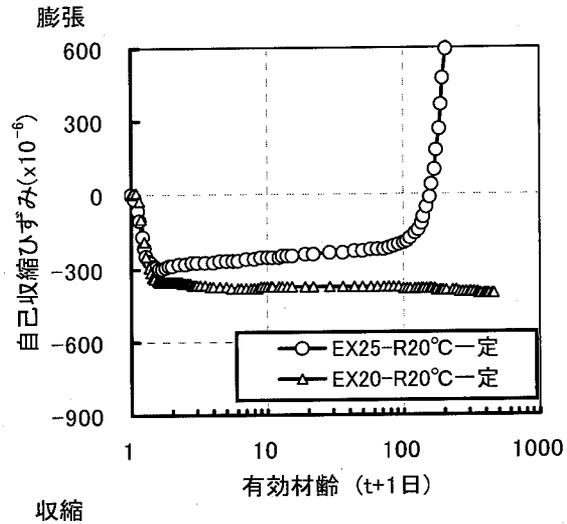


図 3.3.6 20℃一定室内による単位膨張材量をパラメータとした自己収縮ひずみの経時変化

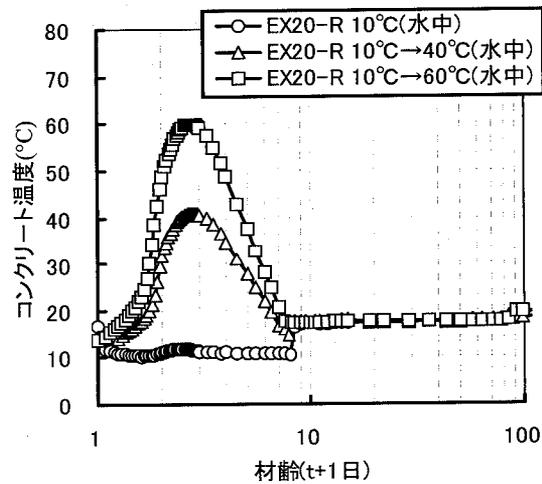


図 3.3.7 練上がり温度10℃における水中養生供試体のコンクリート温度履歴

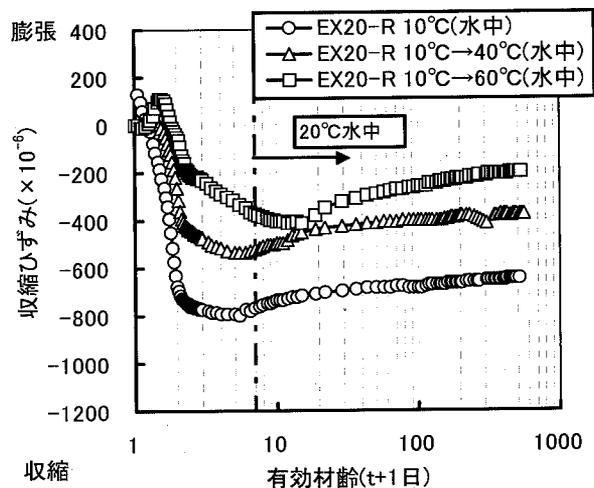


図 3.3.8 練上がり温度10℃における水中養生供試体の収縮ひずみ

合材比，結合材種別の条件下においては，標準使用量である単位膨張量  $20\text{kg/m}^3$  とすれば，大きな後膨張ひずみの発生はないと考えられたため，以降の検討は単位膨張材量を  $20\text{kg/m}^3$  以下とした。

### 3. 4 膨張材と収縮低減剤による収縮ひずみ低減効果

#### 3. 4. 1 実験概要

##### (1) 使用材料および配合

配合 EX20-R の使用材料は前節の表 3.3.1 に示す材料を用いた。配合 SFLC は次節に示す表 3.5.1 の使用材料を使用した。表 3.4.1 に配合表を示す。練混ぜは 55 リットル 2 軸強制ミキサを使用し，1 バッチの練量は 45 リットルとした。練混ぜは SFLC と細骨材および膨張材の空練りを 15 秒行い，水と混和剤を添加してモルタル練りを 240 秒行い，最後に粗骨材を投入してコンクリート練りを 60 秒とし，排出した。

表 3.4.1 配合表

配合	(W+SRA)/ (SFLC+ EX)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )						練上がり 温度( $^{\circ}\text{C}$ )	SP/(SFLC+ EX)	D/(SFLC+ EX)
		W	SFLC	EX	S	G	SRA			
SFLC	0.15	155	1033	—	435	944	—	20	0.028	0.0002
EX20-R	0.15	149	1013	20	451	940	6	20	0.031	0.0002

##### (2) 試験方法

供試体寸法は  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  とし，自己収縮ひずみを測定した。図 3.4.1 に養生方法を示す。打設後に打設面をラップで覆い，その上に濡れウエスで覆い供試体の乾燥を極力防止した。脱枠は材齢 1 日とし，脱枠後の養生は①封緘養生，②材齢 28 日まで封緘養生とし，28 日以降に気乾養生，③材齢 7 日まで濡れウエスで覆いラップ養生した湿布養生とし，7 日以降に封緘養生，および④材齢 7 日まで濡れウエスで覆いラップ養生した湿布養生とし，7 日以降に気乾養生とした 4 種類とした。4 種類の養生とした理由は，自己収縮ひずみの低減効果と乾燥収縮ひずみの低減効果を検討するためである。ここでは，コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>の考え方に準拠し，自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみとの重ね合わせができることを仮定する。なお，乾燥開始材齢が 3~7 日以降であれば，重ね合わせによっても誤差は 25% 以下であり，実用的に用いることが可能であるとする報告<sup>6)</sup>がある。このことから，材齢 28 日以降に気乾養生した供試体の測定ひずみ(自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの和，以下収縮ひずみと示す)から封緘養生した供試体の測定ひずみ(自己収縮ひずみ)との差を乾燥収縮ひずみとして区分し，検討することとした。ひずみの測定方法は前節と同様とした。

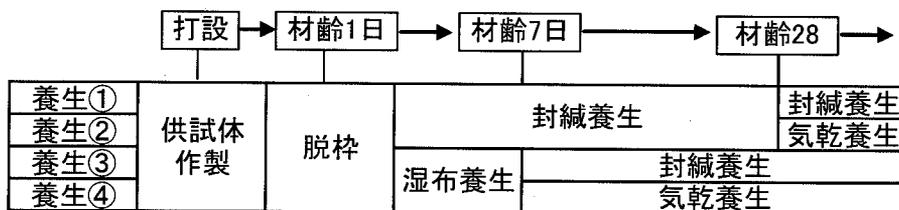


図 3.4.1 養生方法

### 3. 4. 2 膨張材による自己収縮ひずみ低減効果

#### (1) コンクリートのフレッシュ性状とコンクリート最高温度

表 3.4.2 にコンクリートのフレッシュ性状と最高温度を示す。

表 3.4.2 フレッシュ性状およびコンクリートの最高温度

供試体名	スランプ フロー(cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)	
			練上がり温度	最高温度
SFLC20°C一定	64.0×64.0	1.5	21.3	25.2
EX20-R20°C一定	65.0×65.0	1.8	23.9	23.9

#### (2) 自己収縮ひずみ

図 3.4.2 に各配合の自己収縮ひずみの経時変化を示す。水結合材 15%においても膨張材と収縮低減剤を混入することにより収縮ひずみの低減効果が認められた。また、供試体「SFLC20°C一定」では自己収縮ひずみが漸増しているのに対して、供試体「EX20-R20°C一定」では収縮ひずみの増加量が小さい結果を示した。

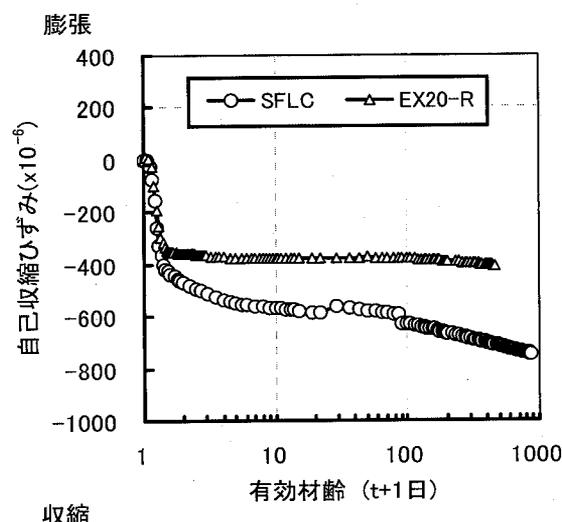


図 3.4.2 膨張材と収縮低減剤による自己収縮ひずみ

#### (3) 乾燥収縮ひずみ

図 3.4.3 に各配合の有効材齢 28 日で養生方法を変更した収縮ひずみの経時変化を示す。図 3.4.4 に各配合の有効材齢 7 日で養生方法を変更した収縮ひずみの経時変化を示す。材齢 7 日まで湿布養生した供試体「SFLC」と「EX20-R」はいずれも湿布養生期間中において膨張する傾向が認められた。この理由として、低熱セメントベースであり十分に水和反応が進行しておらず、組織が緻密となっていないために湿布養生による外部からの水の浸入により膨張したことが考えられる。

図 3.4.5 に材齢 28 日からの乾燥収縮ひずみの経時変化を、図 3.4.6 に材齢 7 日からの乾燥収縮ひずみの経時変化をそれぞれ示す。前述したように、乾燥収縮ひずみは材齢 28 日ないし材齢 7 日から気乾養生した供試体のひずみから封緘養生した供試体のひずみを差し低くことにより算出した。乾燥開始材齢によらず、膨張材と収縮低減剤を混入することにより乾燥収縮ひずみの低減効果が認められた。有効材齢 7 日まで湿布養生を実施した「SFLC」と「EX20-R」の供試体の乾燥収縮ひずみは、有効材齢 28 日まで封緘養生したそれぞれの供試体の乾燥収縮ひずみと比較して小さくなる傾向が認められた。この理由として、初期材齢の水和反応に必要な反応水が外部からも供給されたため、水和反応がより活発となり、コンクリート内部で消費される水が多くなったことが考えられる。

供試体「SFLC」は、材齢 28 日時点において自己収縮ひずみの経時変化が小さくなっていくが、材齢 28 日からの乾燥下において、乾燥収縮ひずみが発生している。このことは、

この時点では乾燥収縮ひずみを発生させる水分がモルタル中に内在していることが考えられる。このことから、自己乾燥により膨張材に反応に必要な水量が完全には消費されることなく内在したことが考えられ、前述した後膨張ひずみは未反応の水と膨張材の反応により発生したことが考えられる。この点についてはモルタル中の水分量や未反応膨張材量などの観点からさらに検討する必要がある。

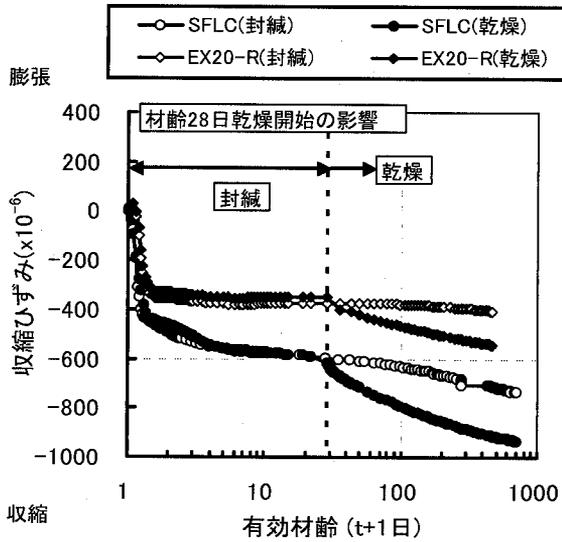


図 3.4.3 膨張材と収縮低減剤による収縮ひずみ (材齢 28 日乾燥)

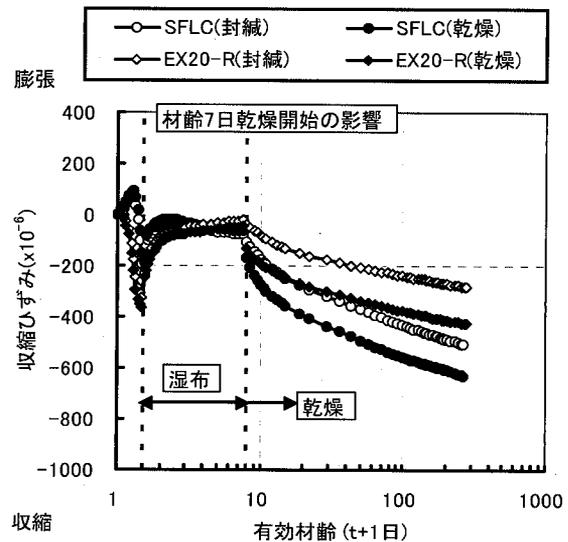


図 3.4.4 膨張材と収縮低減剤による収縮ひずみ (材齢 7 日乾燥)

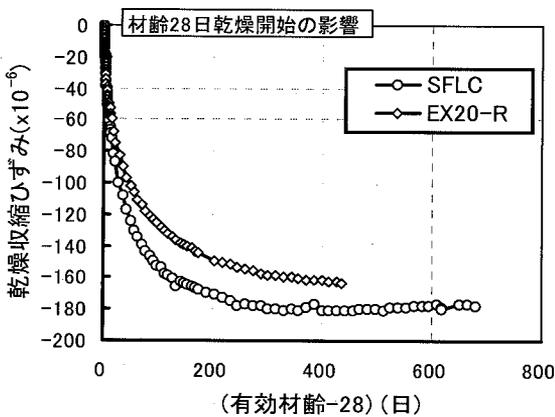


図 3.4.5 膨張材と収縮低減剤による乾燥収縮ひずみ (材齢 28 日乾燥)

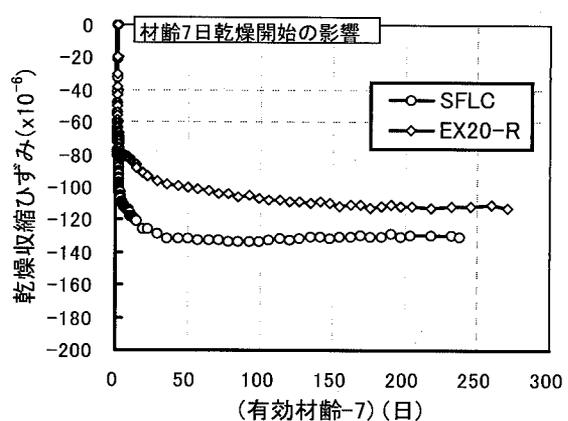


図 3.4.6 膨張材と収縮低減剤による乾燥収縮ひずみ (材齢 7 日乾燥)

### 3.5 廃瓦粗骨材を用いた内部養生方法による収縮ひずみ低減効果

#### 3.5.1 実験概要

##### (1) 使用材料および配合

表 3.5.1 と表 3.5.2 に使用材料と鉱物組成をそれぞれ示す。廃瓦粗骨材を除く各使用材料はロットが異なるため、あらためて標記する。廃瓦粗骨材(記号 GK)は島根県江津産を使用した。廃瓦粗骨材はカオリン粘土( $\text{SiO}_2$ :65.7%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :27.1%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ :2.9%,  $\text{K}_2\text{O}$ :1.8%)を焼成して作製した瓦の不適合品を破砕したものである。廃瓦粗骨材の BS 破砕値は 21.38% であり、市販の軽量骨材より小さい材料である。写真-3.5.1 に廃瓦粗骨材を示す。

図 3.5.1<sup>8)</sup>に廃瓦粗骨材の細孔径分布を示す。廃瓦粗骨材は軽量骨材と比較して強度が高いばかりでなく、多孔性の材料であり、かつ、吸水率も高いため、モルタル部の自己乾燥にともなう湿度低下により、廃瓦粗骨材からの水分移動により自己乾燥を緩和することによる自己収縮ひずみを低減する内部養生方法に用いる材料として適用可能と考えられる。

表 3.5.1 使用材料

材料	種別	物理的性質	記号
セメント	低熱ポルトランドセメント	密度: 3.22 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3590 cm <sup>2</sup> /g	L
細骨材	大月産安山岩砕砂	表乾密度: 2.62 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 2.41 %, FM: 3.21	S
粗骨材	盛岡産輝緑岩碎石	表乾密度: 2.92 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.88 %, FM: 6.51 実積率:61.0%, BS 破砕値:7.86%	G
	廃瓦粗骨材	表乾密度: 2.27 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 9.31 %, FM: 6.66 実積率:61.3%, BS 破砕値:21.38%	GT
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	消泡剤	-	D
混和剤	シリカフェーム	密度: 2.23 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 18.6 m <sup>2</sup> /g	SF

表 3.5.2 鉱物組成

	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
低熱ポルトランドセメント	29.0	50.2	4.6	9.6



写真 3.5.1 瓦粗骨材

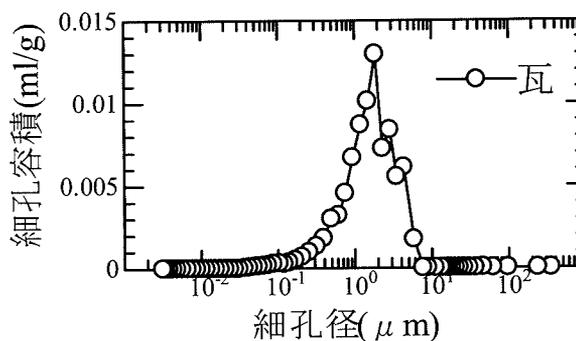


図 3.5.1 瓦粗骨材の細孔径分布

表 3.5.3 配合表

配合	W/ SFLC	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					練上がり 温度(°C)	SP/SFLC	D/SFLC
		W	SFLC	S	G	GT			
SFLC	0.15	155	1033	435	944	-	20	0.023	0.0002
G40	0.15	155	1033	435	566	294	20	0.023	0.0002
G20	0.15	155	1033	435	755	147	20	0.023	0.0002

軽量骨材の場合には、吸水状態が十分でない場合に収縮低減効果が小さくなることが報告<sup>7)</sup>されていることから、使用した廃瓦粗骨材は、3日間吸水させ、105°Cの炉で24時間乾燥して求めた含水率が吸水率以上となる状態とした。単位水量は、打設1日前に前述の試験方法により求めた含水率と吸水率から表面水率を算出し、表面水率の水量を補正した。セメントには、低熱ポルトランドセメント(記号 L)を使用した。混和材には、シリカフェーム(記号 SF)を使用した。なお、セメント種類 L と混和材 SF を混合する配合では、L の重量の 9.7% を混和材 SF にあらかじめ置換したプレミックス材(記号 SFLC, 密度 3.08g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 6210cm<sup>2</sup>/g)を使用した。

表 3.5.3 には配合表を示す。検討する配合は3種類とし、水結合材比は全て15%とし、単位水量は同一量の 155kg/m<sup>3</sup>とした。配合 SFLC の粗骨材のかさ容積を 0.53m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>(水結合材比 15%の場合はかさ容積を固定)(本検討では、単位体積重量 530×0.61×2.92=944kg/m<sup>3</sup>)と固定した。配合 G40 と G20 では、それぞれ配合 SFLC の粗骨材全容積を同じとし、廃瓦粗骨材でそれぞれ 40% と 20%容積置換した。試験時の含水率は、G40 において 9.4%、G20 において 11.2%であった。スランプフローの目標値は 700+50mm, -100mm となるように混和剤量を調整した。

練混ぜは 100 リットル 2 軸強制ミキサを使用し、1 バッチの練量は 80 リットルとした。練混ぜは SFLC と細骨材の空練りを 15 秒行い、その後に水と混和剤を添加してモルタル練りを 240 秒行い、最後に粗骨材を投入してコンクリート練りを 90 秒とし、排出した。

## (2) 試験方法

供試体寸法は 100×100×400mm とし、自己収縮ひずみを測定した。養生は前節に示した図 3.4.1 と同じとし、全 4 種類とした。ひずみの測定方法は前節と同様とした。

## 3. 5. 2 廃瓦粗骨材による自己収縮ひずみ低減効果

### (1) コンクリートのフレッシュ性状とコンクリート最高温度

表 3.5.4 にコンクリートのフレッシュ性状と最高温度を示す。

表 3.5.4 フレッシュ性状およびコンクリートの最高温度

供試体名	スランプ フロー(cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)	
			練上がり温度	最高温度
SFLC	64.0×64.0	1.5	21.3	25.2
G40	74.0×75.0	2.2	24.0	23.8
G20	69.5×68.5	2.3	22.2	24.7

## (2) 自己収縮ひずみ

図 3.5.2 に各配合の自己収縮ひずみの経時変化を示す。廃瓦粗骨材を用いた供試体の収縮ひずみは、配合 SFLC の収縮ひずみと比較して小さく、廃瓦粗骨材における内部養生方法による収縮低減効果が認められた。ここで、膨張材を用いたコンクリートとは異なり、廃瓦粗骨材を用いた場合の自己収縮ひずみの経時変化で特徴的なことは、膨張材を混入しないものにも拘わらず、材齢約 1 日において、配合 G40 では約  $200 \times 10^{-6}$ 、配合 G20 では約  $120 \times 10^{-6}$  の膨張ひずみが発生した

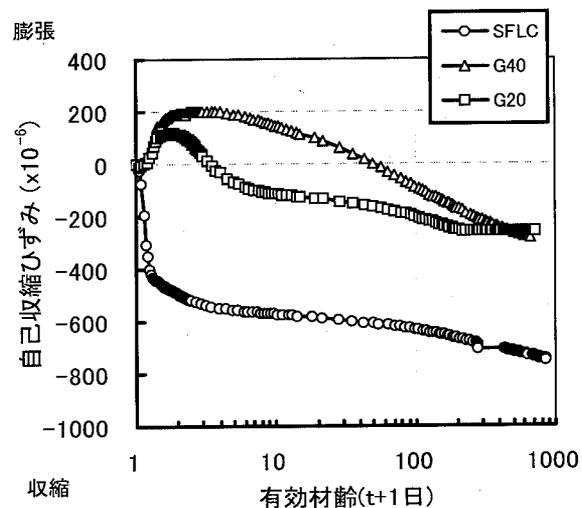


図 3.5.2 廃瓦粗骨材による自己収縮ひずみ

に伴うマトリックスの相対湿度が低下し、ケルビン式から毛細空隙内の水がより小さい細孔径に移動し、メニスカス半径が小さくなることによる毛細管張力の増加により大きくなることが報告されている<sup>9)</sup>。廃瓦粗骨材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみの低減は、マトリックス内の相対湿度低下に伴い廃瓦粗骨材中の水分がマトリックスに移動したため、メニスカス半径が大きくなり、毛細管張力が低減したためと考えられる。材齢初期に膨張ひずみが発生したことについては、吸水率の高い軽量骨材を用いた場合と傾向的に合致する結果<sup>10)</sup>となった。なお、膨張ひずみが発生する理由は、廃瓦粗骨材による水分移動による毛細管張力のバランスとモルタル部の強度などの影響が考えられるが、コンクリートの湿度などの測定によりさらに検討をしていく必要があると考える。封緘養生供試体の配合 SFLC-G40 の材齢 10 日以降のひずみ変化量は配合 SFLC-G20 と比較して大きくなる傾向を示した。この場合にヤング係数も大きくなっていることから、自己収縮ひずみが拘束されることにより発生する引張応力も大きくなることが予測される。このことから、自己収縮ひずみに起因して発生する応力の低減という観点からは、粗骨材容積の 20%置換の方が 40%置換と比較して小さくなると考えられるが、容積置換率を変化させた実験などデータの蓄積がさらに必要と考える。

## (3) 乾燥収縮ひずみ

図 3.5.3 に各配合の有効材齢 28 日で養生方法を変更した収縮ひずみの経時変化を示す。図 3.5.4 に各配合の有効材齢 7 日で養生方法を変更した収縮ひずみの経時変化を示す。図 3.5.5 に材齢 28 日からの乾燥収縮ひずみの経時変化を、図 3.5.6 に有効材齢 7 日からの乾燥収縮ひずみの経時変化をそれぞれ示す。材齢 28 日まで封緘養生を行い、気乾養生とした供試体においては、廃瓦粗骨材を混入量が多いほど乾燥収縮ひずみの低減効果が認められ、含水率の大きい廃瓦粗骨材を投入することによる乾燥収縮ひずみの増加は認められなかった。また、図 3.4.5 と図 3.5.5 の比較から、材齢 28 日から気乾養生とした廃瓦粗骨材を用いた供試体の乾燥収縮ひずみは、膨張材と収縮低減剤を混入した供試体と比較して小さくなる傾向を示し、廃瓦粗骨材は自己収縮ひずみの低減ばかりでなく、乾燥収縮ひずみの抑

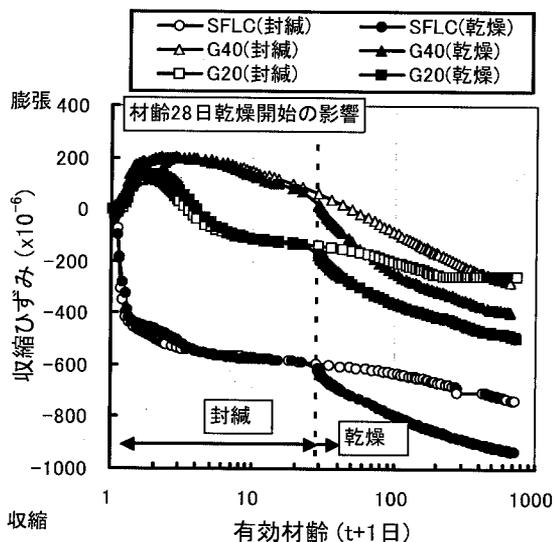


図 3.5.3 廃瓦粗骨材による  
収縮ひずみ (材齢 28 日乾燥)

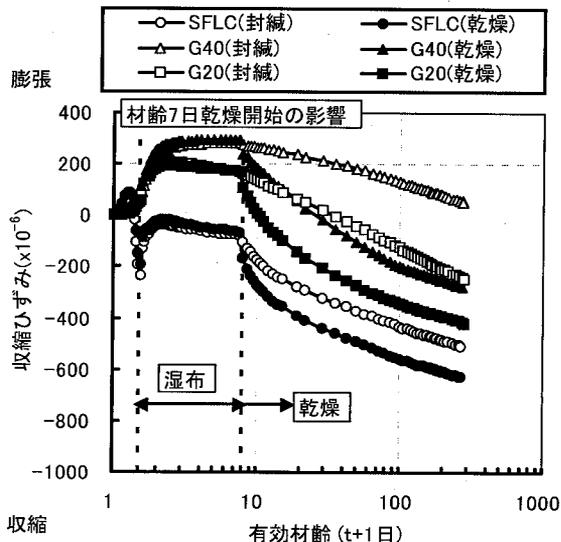


図 3.5.4 廃瓦粗骨材による収縮  
ひずみ (材齢 7 日乾燥)

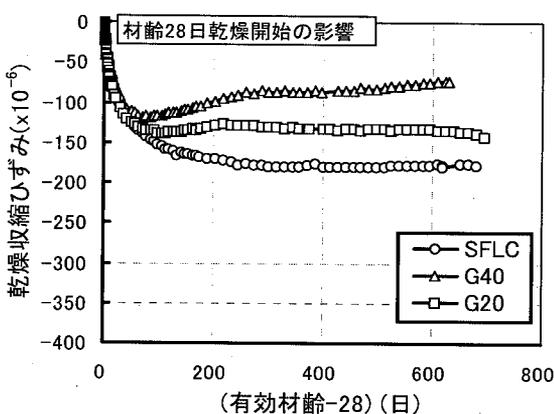


図 3.5.5 廃瓦粗骨材による乾燥  
収縮ひずみ (材齢 28 日乾燥)

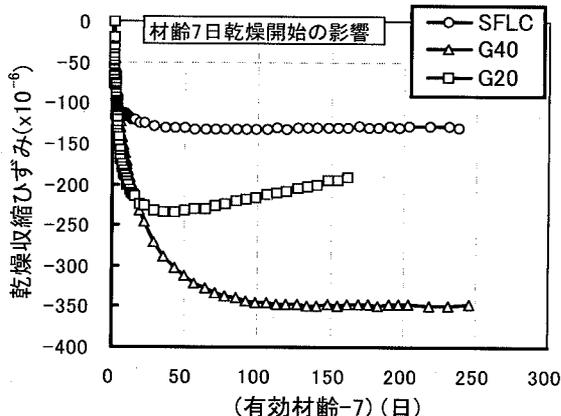


図 3.5.6 膨張材と収縮低減剤による乾燥  
収縮ひずみ (材齢 7 日乾燥)

制効果があることが認められた。

一方、材齢 7 日まで湿布養生を行い、気乾養生とした場合には、廃瓦粗骨材を混入量が多いほど乾燥収縮ひずみが大きくなることが認められた。この理由として、初期材齢の水和反応に必要な反応水が外部からも供給されたため、水和反応によるコンクリートモルタル部の自己乾燥による湿度低減が小さくなり、廃瓦粗骨材からの水分移動がおこらず廃瓦粗骨材に内在する水が残ったと考えられる。このため、材齢 7 日からの気乾養生によりモルタル部の水の逸散によりモルタル部の乾燥が開始し、廃瓦粗骨材に内在する水がモルタル部に移動し、さらに外部に逸散したため乾燥収縮ひずみが大きくなったことが考えられる。内部養生方法に関しては、モルタル部との湿度低下と連動しており、超高強度コンクリートの場合には初期材齢となる。コンクリートを密実にするためには初期材齢における水中養生が効果的ではあるが、内部養生方法を用いた場合には骨材からの水分移動を

抑制する可能性もある。この点に関しては、コンクリートの緻密性や収縮ひずみの低減効果を高める初期養生方法をさらに検討を重ねる必要があると考える。

### 3.6 各自己収縮ひずみの低減効果の相対比較

図 3.6.1 にこれまで検討してきた収縮低減方法の材齢 450 日における自己収縮ひずみを示す。図中の()内の数値は、1 から各配合の自己収縮ひずみを供試体「SFLC」の自己収縮ひずみで除した値を差し引いた値(以下、自己収縮ひずみ低減率)を示したものであり、廃瓦粗骨材で 64%、膨張材と収縮低減剤との組み合わせで 43%、自己収縮ひずみを低減した。本試験の範囲内では廃瓦粗骨材の方が自己収縮ひずみの低減効果が認められた。

図 3.6.2 に各自己収縮ひずみの収縮低減材量の自己収縮ひずみ低減量の経時変化を示す。ここでは、各材料の低減効果の重ね合わせができると仮定し、各材料の低減効果は下式として算出した。

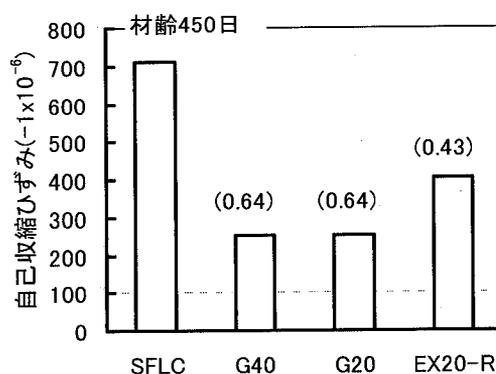
$$G40 \text{ 低減効果} = G40 \text{ ひずみ} - SFLC \text{ ひずみ}$$

$$G20 \text{ 低減効果} = G20 \text{ ひずみ} - SFLC \text{ ひずみ}$$

$$EX20-R \text{ 低減効果} = G20 - EX20-R \text{ ひずみ} - SFLC \text{ ひずみ}$$

供試体「G40」は初期の自己収縮ひずみの低減量が大きくなったが、有効材齢 9 日以降に小さくなっており、供試体「SFLC」の自己収縮ひずみの発現量以上に収縮することが認められた。一方、供試体「G20」は初期の自己収縮ひずみの低減量が大きくなり、有効材齢 9 日まで自己収縮ひずみの低減量が小さくなったが、それ以降の低減量は漸減した。自己収縮ひずみの低減量の経時変化は、低減量の変動量がない場合には、供試体「SFLC」の自己収縮ひずみの経時変化と平行していると考えられる。このことから、供試体「G20」の有効材齢 9 日以降の自己収縮ひずみの発現量は、概ね供試体「SFLC」の自己収縮ひずみの発現量とほぼ同等と考えられる。このことから、廃瓦粗骨材を用いた内部養生方法は有効材齢 1 日までの自己収縮ひずみ発現量が大きくなる時点で効果を発揮し、長期的に内部養生材としての自己収縮ひずみの効果が小さくなることが考えられるが、廃瓦粗骨材量をパラメータとした試験や長期的自己収縮ひずみの計測を継続し、さらに検討する必要がある。

自己収縮ひずみが拘束されて発生する応力は、経過日数がたちヤング係数がほぼ終了し



注: () の数値は自己収縮ひずみ低減率

自己収縮ひずみ低減率 =

$(1 - \text{各自己収縮ひずみ} / \text{供試体 SFLC の収縮ひずみ})$

図 3.6.1 各収縮ひずみ低減材料による収縮ひずみ低減率(材齢 450 日)

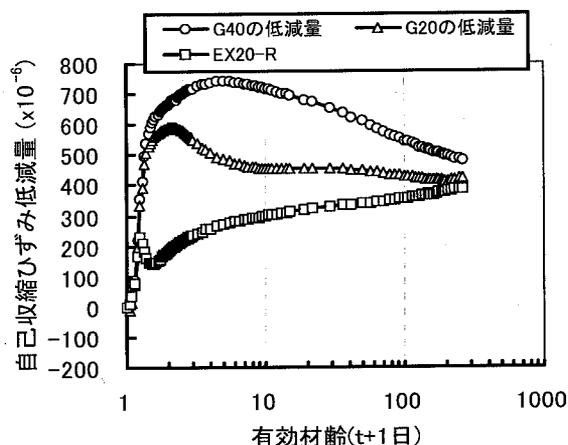


図 3.6.2 各自己収縮ひずみ低減材料による自己収縮ひずみ低減量の経時変化

た時点で自己収縮ひずみが発現した場合に大きくなる。内部養生材に廃瓦粗骨材を使用する場合には、その量を多くした場合には初期ひずみの抑制効果があるが、長期的には自己収縮ひずみの発現量は供試体「SFLC」より大きくなる場合もあるため、廃瓦粗骨材を内部養生材に使用する場合には短期・長期の自己収縮ひずみを検討し、適量を決める必要があると考える。

膨張材と収縮低減剤による自己収縮ひずみ低減量は経時変化とともに増加する傾向が認められた。

### 3. 7 各種収縮低減方法の組み合わせ効果

膨張材と収縮低減剤による自己収縮ひずみの低減効果は、膨張材の後膨張ひずみを防止する観点から単位膨張材の制限を受けることから発生する自己収縮ひずみの低減量としては小さくなるが、自己収縮ひずみの経時変化に伴う収縮量を減ずる効果が認められた。一方、廃瓦粗骨材による自己収縮ひずみ低減効果は、発生する自己収縮ひずみ量を大きく抑制するが、経時変化に伴う自己収縮ひずみの収縮量が大きくなることが認められた。

ここでは、廃瓦粗骨材、膨張材および収縮低減剤を組み合わせることにより、より高い自己収縮ひずみの低減効果を検討することを目的とした。ここでの実験においては、前節で述べた廃瓦粗骨材の自己収縮ひずみの低減量が長期的にも小さくならない供試体「G20」を用いて検討することとした。

#### 3. 7. 1 実験概要

##### (1) 使用材料および配合

膨張材と収縮低減剤を除く材料は前節の表 3. 5. 1 に示す材料を用い、膨張材と収縮低減剤は表 3. 3. 1 に示す材料を用いた。

表 3. 7. 1 に配合表を示す。配合は 3 種類とし、水結合材比は全て 15%とした。配合「SFLC」の粗骨材のかさ容積を  $0.53\text{m}^3/\text{m}^3$  と固定した。配合「G20-R」では、配合「SFLC」の粗骨材全容積を同じとし、廃瓦粗骨材で 20%容積置換し、収縮低減剤( $6\text{kg}/\text{m}^3$ )を混入した。配合「G20-E10-R」では、さらに膨張材( $10\text{kg}/\text{m}^3$ )を混入した。試験時の含水率は、配合「G20-R」において 9.8%、配合「G20-EX10-R」において 10.2%であった。

スランプフローの目標値は  $700+50\text{mm}$ 、 $-100\text{mm}$  となるように混和剤量を調整した。

練混ぜは 55 リットル 2 軸強制ミキサを使用し、1 バッチの練量は 45 リットルとした。練混ぜは SFLC と細骨材および膨張材の空練りを 15 秒行い、水と混和剤を添加してモルタル練りを 240 秒行い、最後に粗骨材を投入してコンクリート練りを 90 秒とし、排出した。

表 3. 7. 1 配合表

配合	(W+SRA)/ B <sup>1)</sup>	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )							練上がり 温度( $^{\circ}\text{C}$ )	SP/B <sup>1)</sup>	D/B <sup>1)</sup>
		W	SFLC	EX	S	G	GK	SRA			
SFLC	0.15	155	1033	—	435	944		—	20	0.023	0.00002
G20-R	0.15	149	1033	—	435	755	147	6	20	0.023	0.00002
G20-EX10-R	0.15	149	1023	10	435	755	147	6	20	0.023	0.00002

1) B:SFLC+EX

表 3.7.2 フレッシュ性状およびコンクリートの最高温度

供試体名	スランブ フロー(cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)	
			練上がり温度	最高温度
SFLC	64.0×64.0	1.5	21.3	25.2
G20-R	72.0×71.5	2.2	22.0	22.0
G20-EX10-R	67.5×66.5	1.4	20.2	22.8

(2) 試験方法

供試体寸法は 100×100×400mm とし、自己収縮ひずみを測定した。養生方法は供試体「G20-R」を除き、前節の 3.4.1 に示した図 3.4.1 と同じとし、全 4 種類とした。供試体「G20-R」は封緘養生のみ実施した。ひずみの測定方法は前節と同様とした。ひずみの測定方法は前節と同様とした。

3.7.2 廃瓦粗骨材と膨張材および収縮低減剤を混入したことによる自己収縮ひずみの低減効果

(1) コンクリートのフレッシュ性状とコンクリート最高温度

表 3.7.2 にコンクリートのフレッシュ性状と最高温度を示す。

(2) 自己収縮ひずみ

図 3.7.1 に各配合の自己収縮ひずみの経時変化を示す。同図にはあわせて前節の供試体「G20」もあわせて示す。図 3.7.2 に材齢 360 日の各供試体の自己収縮ひずみを示す。供試体「G20-EX10-R」は材齢 365 日において約  $100 \times 10^{-6}$  となり、もっとも収縮低減効果が認められ、その低減率は 86% となった。

図 3.7.3 に廃瓦粗骨材を用いたコンクリートの膨張材および収縮低減剤を用いた場合の各材料の低減効果を示す。ここでは、各材料の低減効果の重ね合わせができると仮定し、各材料の低減効果は下式として算出した。

G20 低減効果 = G20 ひずみ - SFLC ひずみ,  
R 低減効果 = G20-R ひずみ - G20 ひずみ

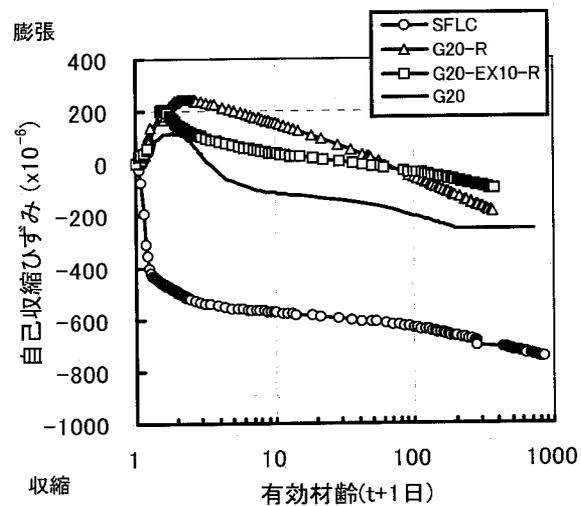
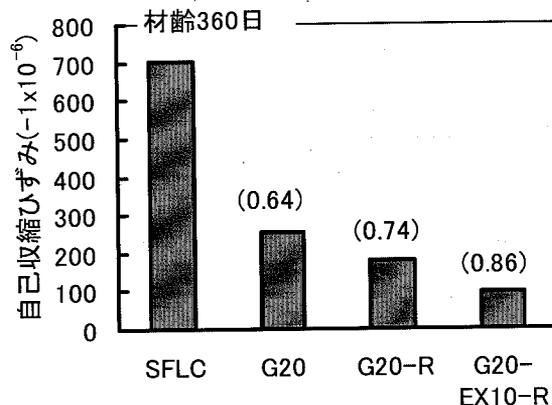


図 3.7.1 各種低減方法を組合せた自己収縮ひずみ



注: () の数値は自己収縮ひずみ低減率

図 3.7.2 廃瓦粗骨材を用いたコンクリートの膨張材および収縮低減剤による自己収縮ひずみの比較

EX10 低減効果=G20-EX10-R ひずみ - G20-R

EX10-R 低減効果= G20-EX10-R ひずみ - G20 ひずみ

G20-EX10-R 低減効果= G20-EX10-R ひずみ - SFLC ひずみ

供試体「G20-EX-R-10」は、有効材齢 1 日まで自己収縮ひずみの低減量が増加し、その後の経時変化にともなう低減量の変動もほとんどない結果を示した。供試体「G20」で認められた有効材齢 1 日から有効材齢 9 日までの自己収縮ひずみの低減量を膨張材と収縮低減剤を併用することにより改善効果が認められた。この結果として、供試体「G20-EX10-R」の自己収縮ひずみの低減量は有効材齢 365 日においてもほとんど減少することなく約  $600 \times 10^{-6}$  を維持する結果が認められた。

収縮低減剤による自己収縮ひずみの低減量の増加は、廃瓦粗骨材が有効材齢約 1 日において圧縮側となり低減量の減少時に大きくなる傾向が認められた。これは廃瓦粗骨材による内部養生により自己乾燥が緩和したが、有効材齢 1 日ふたたび自己乾燥が開始し、このときに収縮低減剤が毛細管張力の低減効果を発揮し、自己収縮ひずみの低減効果に寄与したことが考えられる。収縮低減剤による自己収縮ひずみの低減量は、廃瓦粗骨材により低減量の変動量が小さくなる有効材齢約 9 日から小さくなる傾向を示したが、膨張材による自己収縮ひずみの低減量は逆に大きくなる傾向を示した。膨張材による自己収縮ひずみの低減量は有効材齢約 0.5 日までは増加傾向を示したが、その後有効材齢約 1 日まで低減量が小さくなり、その後増加する傾向が認められた。この結果、膨張材と収縮低減剤との併用では有効材齢約 9 日以降の自己収縮ひずみの低減量の変動は小さくなる傾向を示した。本研究の試験条件の範囲内においては、廃瓦粗骨材と膨張材および収縮低減剤による自己収縮ひずみの低減は、材齢初期では廃瓦粗骨材において、長期的には膨張材と収縮低減剤においてそれぞれ効果が認められた。

### (3) 乾燥収縮ひずみ

図 3.7.4 に各配合の有効材齢 28 日で養生方法を変更した収縮ひずみの経時変化を示す。図 3.7.5 に各配合の有効材齢 7 日で養生方法を変更した収縮ひずみの経時変化を示す。図 3.7.6 に材齢 28 日からの乾燥収縮ひずみの経時変化を、図 3.7.7 に材齢 28 日からの乾燥収縮ひずみの経時変化をそれぞれ示す。膨張材と収縮低減剤を混入することにより乾燥収縮ひずみを低減する効果が認められた。

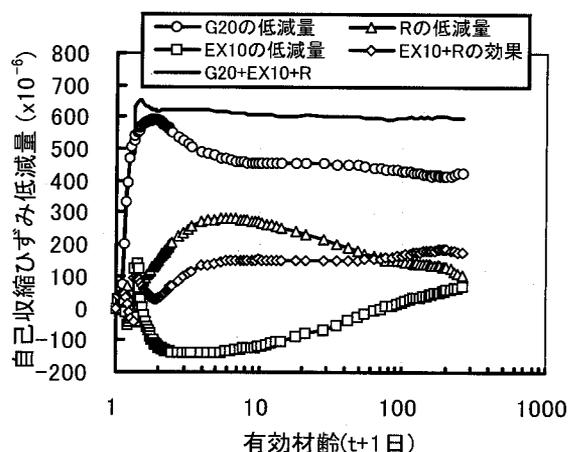


図 3.7.3 廃瓦粗骨材を用いたコンクリートの膨張材および収縮低減剤による自己収縮ひずみの低減量

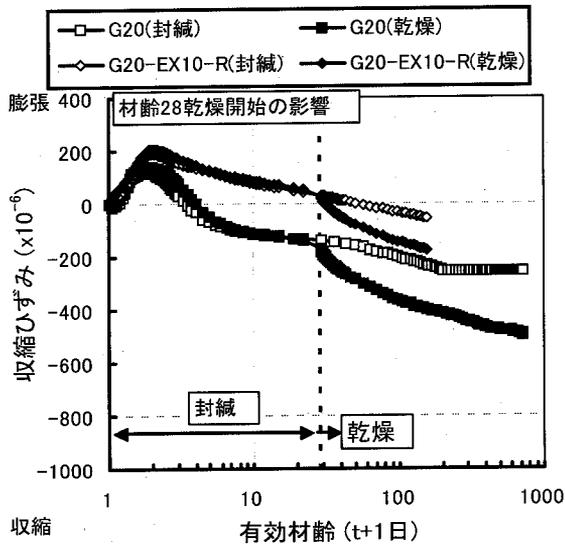


図 3.7.4 廃瓦粗骨材と膨張材および収縮低減材を組み合わせた収縮ひずみ(材齢 28 日乾燥)

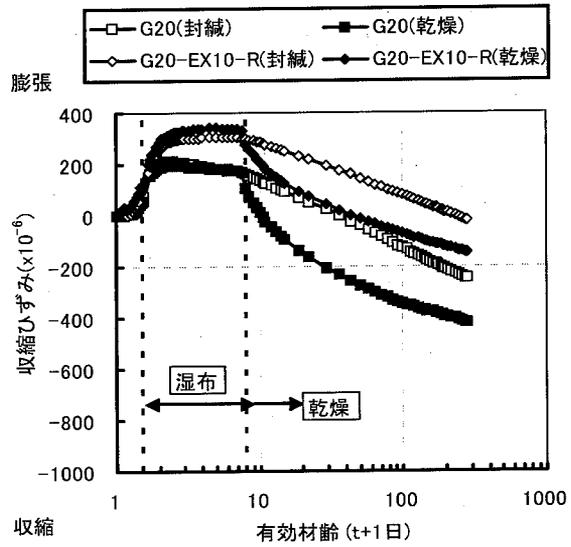


図 3.7.5 廃瓦粗骨材と膨張材および収縮低減材を組み合わせた収縮ひずみ(材齢 7 日乾燥)

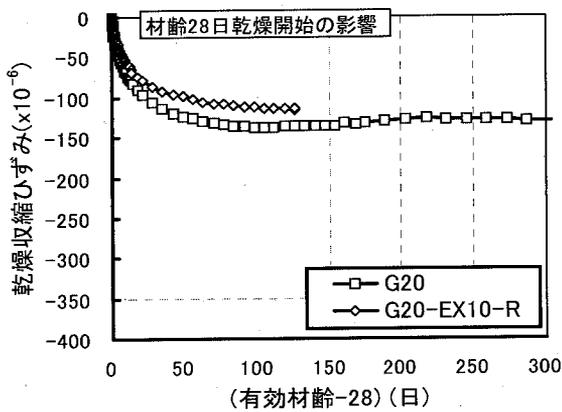


図 3.7.6 廃瓦粗骨材と膨張材および収縮低減材を組み合わせた乾燥収縮ひずみ(材齢 28 日乾燥)

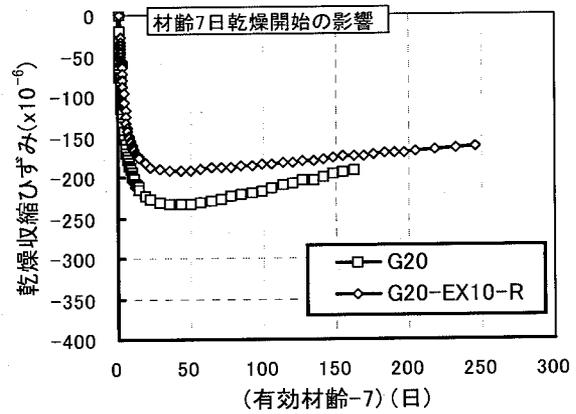


図 3.7.7 廃瓦粗骨材と膨張材および収縮低減材を組み合わせた乾燥収縮ひずみ(材齢 7 日乾燥)

### 3. 8 水結合材比が内部養生効果に及ぼす影響

廃瓦粗骨材を用いた内部養生効果はモルタル部の自己乾燥による湿度低下に起因し、廃瓦粗骨材内部の水分移動により発揮される。相対湿度は水セメント比により異なり、水セメント比が小さいほど小さくなることが知られている<sup>11)</sup>。本節では、水結合材をパラメータとした試験を行い、水セメント比が内部養生効果に及ぼす影響に関して検討する。

#### 3. 8. 1 実験概要

##### (1) 使用材料および配合

膨張材と収縮低減剤を除く材料は前節の表 3. 5. 1 に示す材料を用い、膨張材と収縮低減剤は表 3. 3. 1 に示す材料を用いた。

表 3. 8. 1 に配合表を示す。検討した配合は 6 種類とし、水結合材比は 15, 23 および 30% とした。本節に関しては、水結合材比を区分するため、配合名の後ろに水結合材比を示した。全ての配合において粗骨材のかさ容積を  $0.53\text{m}^3/\text{m}^3$  と固定した。なお、水結合材比 15% に関しては、前節の試験結果を用いることとした。

表 3. 8. 1 配合表

配合	(W+SRA)/ B <sup>1)</sup>	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							練上がり 温度(°C)	SP/B <sup>1)</sup>	D/B <sup>1)</sup>
		W	SFLC	EX	S	G	GK	SRA			
SFLC-23	0.23	155	674	—	741	944	—	—	20	0.013	0.0006
G20-EX10-R-23	0.23	149	664	10	741	755	147	6	20	0.013	0.0006
SFLC-30	0.30	155	517	—	875	875	147	—	20	0.009	0.0006
G20-EX10-R-30	0.30	149	507	10	875	875	147	6	20	0.009	0.0006

1) B:SFLC+EX

##### (2) 試験方法

供試体寸法は  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  とし、自己収縮ひずみを測定した。

### 3. 8. 2 水結合材比が内部養生効果に与える影響

#### (1) コンクリートのフレッシュ性状とコンクリート最高温度

表 3. 8. 2 にコンクリートのフレッシュ性状と最高温度を示す。

表 3. 8. 2 フレッシュ性状およびコンクリートの最高温度

供試体名	スランブ フロー(cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)	
			練上がり温度	最高温度
SFLC-23	57.0×57.5	1.5	21.6	22.4
G20-EX10-R-23	55.0×54.0	1.1	22.3	22.2
SFLC-30	スランブ 19.0	1.7	21.9	22.3
G20-EX10-R-30	スランブ 19.5	1.8	22.5	22.5

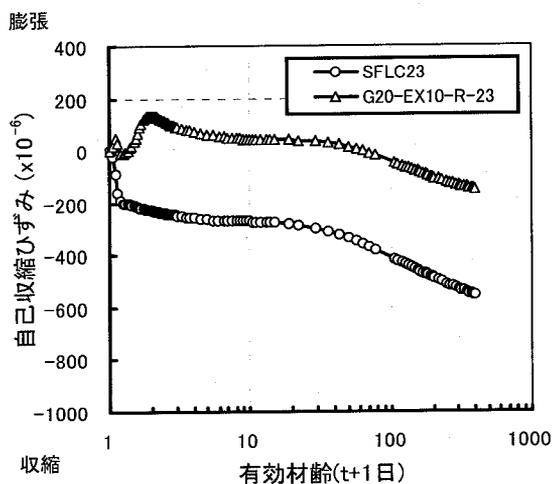


図 3.8.1 水結合材 23%の自己収縮ひずみ

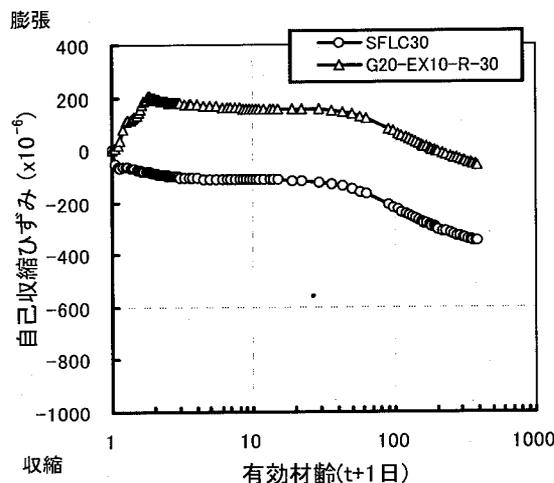


図 3.8.2 水結合材 30%の自己収縮ひずみ

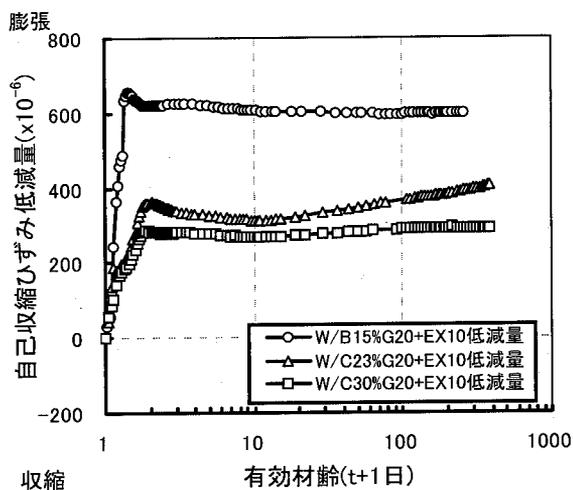


図 3.8.3 各水結合材比の自己収縮ひずみ低減量

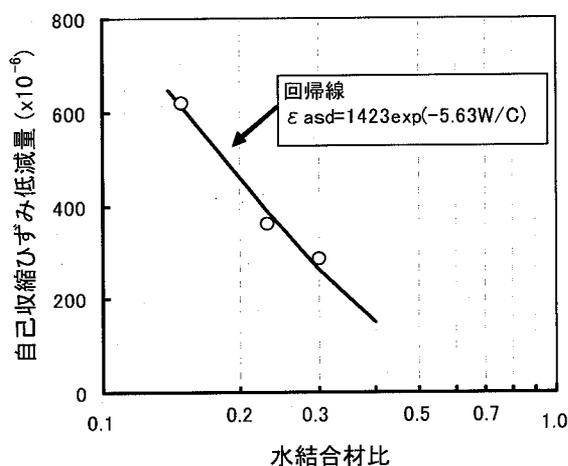


図 3.8.4 各水結合材比の有効材齢 1 日の自己収縮ひずみ低減量

## (2) 自己収縮ひずみ

図 3.8.1 と図 3.8.2 にそれぞれ水結合材比の 23% と 30% の自己収縮ひずみをそれぞれ示す。水結合材比 30% の供試体の自己収縮ひずみは水結合材比 23% と比較して小さくなる結果を示した。供試体「G20-EX10-R」の有効材齢 1 日に発生膨張ひずみは、前述した水結合材比 15% と水結合材比 30% において約  $200 \times 10^{-6}$  となり、水結合材比 23% において  $135 \times 10^{-6}$  となり、水結合材 15~30% の範囲においては水結合材比による明確な差が認められなかった。図 3.8.3 に 23% および 30% の自己収縮ひずみの低減量を示す。同図にはあわせて図 3.7.2 の水結合材比 15% の G20+EX10+R の低減量も併せて示す。水結合比が小さくなるほど自己収縮ひずみの低減量が大きくなる結果を示し、廃瓦粗骨材を用いた内部養生による自己収縮ひずみの低減は水結合材が小さいほど効果があることが認められた。この理由として水結合比が小さいほど自己乾燥が大きくなったことが考えられる。

図 3.8.4 に水結合材比と有効材齢 1 日の自己収縮ひずみ低減量の関係を示す。図中には

式(3.8.1)に基づく近似式を示す。自己収縮ひずみの終局値の水結合材比との関係は、 $\exp$ の関数で示されていることから<sup>1)</sup>、本検討においても同様の関数を使用することとした。

$$\varepsilon_{\text{auto}} = a \exp\{b(W/C)\} \quad (3.8.1)$$

ここで、 $\varepsilon_{\text{auto}}$ は自己収縮ひずみ低減量の最大値、 $a, b$ は係数(本試験の回帰結果は $a=1432$ 、 $b=-5.63$ )

実験値と近似式は概ね合致する結果となり、廃瓦粗骨材と膨張材および収縮低減剤による低減量は水結合材比をパラメータとした関数で示すことができる。このことから、自己収縮ひずみの実測値から廃瓦粗骨材と膨張材および収縮低減剤を混入した自己収縮ひずみを概ね予測できると考える。

### 3. 9 強度特性

前節では膨張材、収縮低減剤および廃瓦粗骨材を用いた自己収縮ひずみの低減効果に着目して検討してきた。実構造物に適用するためには圧縮強度特性、ヤング係数および割裂引張強度特性も把握する必要がある。本節では、各種自己収縮低減材料が強度特性におよぼす影響を検討する。

#### 3. 9. 1 実験概要

圧縮強度、割裂引張強度およびヤング係数の供試体は前節の自己収縮ひずみの試験と併せて採取した。

ここでの圧縮強度の検討は表 3. 9. 1 に示す供試体に関して実施することとする。なお、圧縮強度試験は JIS A1108 に準拠し、割裂引張強度試験は A1113 に準拠し、ヤング係数試験は JIS A 1149 に準拠して行った。圧縮強度供試体の養生は封緘養生と気乾養生とした(図 3. 4. 1 参照)とし、割裂引張強度供試体の養生は封緘養生とした。

#### 3. 9. 2 各種自己収縮低減方法が強度特性に与える影響

##### (1) 圧縮強度特性(封緘養生)

図 3. 9. 1 に供試体「SFLC」と「EX20-R」および「EX25-R」の圧縮強度の経時変化を示す。供試体「SFLC」は圧縮強度  $160\text{N/mm}^2$  を越える結果となったが、供試体「EX20-R」は圧縮強度  $150\text{N/mm}^2$  と

表 3. 9. 1 圧縮強度供試体一覧

供試体	W/B	備考(配合)
SFLC	0.15	表 3.4.1
G40		表 3.5.3
G20		表 3.5.3
G20-R		表 3.7.1
G20-EX10-R		表 3.7.1
EX20-R		表 3.4.1
EX25-R		表 3.4.1

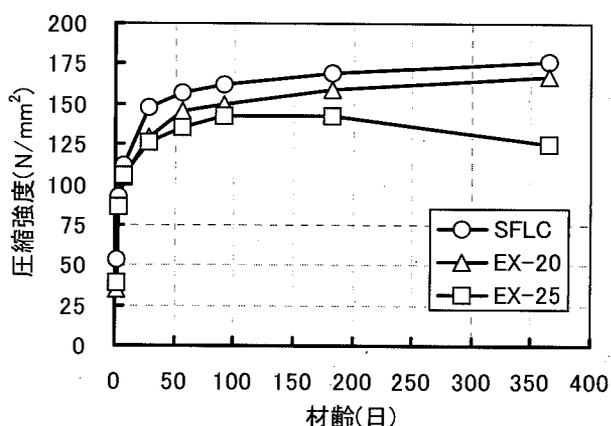


図 3. 9. 1 膨張材混入による圧縮強度発現特性

なり、膨張材を混入することにより圧縮強度が低下し、その低減の度合いは膨張材が多いほど低下する傾向が認められた。EX25に関しては材齢 364 日において圧縮強度の低減が認められた。このことから、後膨張ひずみの発生によりモルタル部がポーラスになったことが考えられる。

図 3.9.2 に供試体「SFLC」と「G40」および「G20」の圧縮強度の経時変化を示す。廃瓦粗骨材を混入することによる圧縮強度の低下が認められず、材齢 364 日では圧縮強度  $180\text{N/mm}^2$  を越える結果を示し、かつ、長期的にも圧縮強度の発現が認められた。廃瓦粗骨材を粗骨材全容積の 40% 置換した場合にも圧縮強度の低減は認められなかった。また、廃瓦粗骨材を混入した超高強度コンクリートの圧縮強度は、基準となる供試体「SFLC」の圧縮強度より大きくなる傾向が認められた。この理由として、軽量骨材を用いた場合に自己乾燥による相対湿度低下により、骨材に吸水している水分移動がともなうことが報告<sup>12)</sup>されている。廃瓦粗骨材でも同様の現象がおき、結果として未反応の結合材が反応し、より強固なマトリックスを形成したため、圧縮強度が増加したと考えられる。

図 3.9.3 に廃瓦粗骨材の超高強度コンクリートにさらに膨張材、収縮低減剤を混入した供試体「G20-R」および供試体「G20-EX10-R」と供試体「G20」の圧縮強度発現を示す。膨張材と収縮低減剤を混入することにより圧縮強度の低下が認められたが、目標とする圧縮強度  $150\text{N/mm}^2$  に対しては満足する結果となった。

図 3.9.4 に材齢 91 日における各配合の供試体「SFLC」に対する圧縮強度比を示す。廃瓦粗骨材単身で使用した場合には、供試体「SFLC」の圧縮強度に対して約 5% の増加が認められたが、膨張材と収縮低減剤を混入した場合には約 10% の減少が認められ

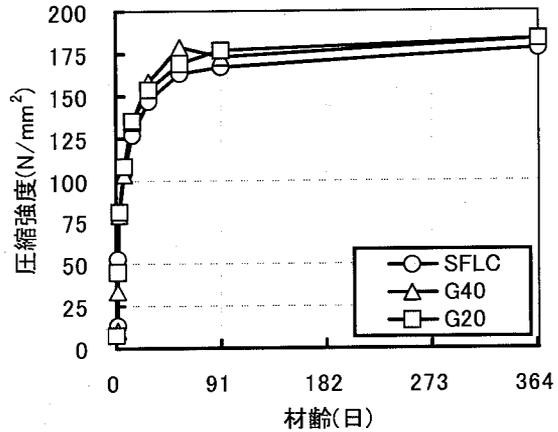


図 3.9.2 廃瓦粗骨材による圧縮強度発現特性

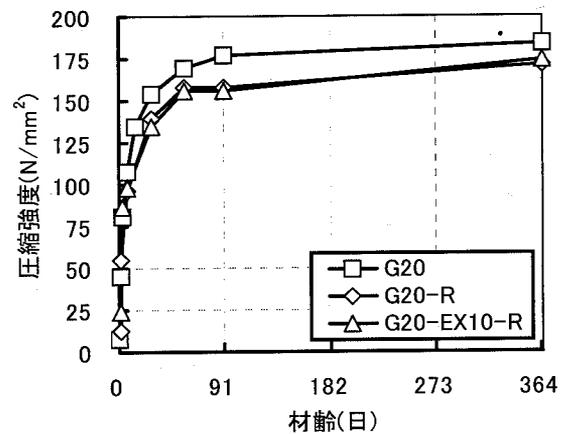


図 3.9.3 廃瓦粗骨材に膨張材と収縮低減剤を混入による圧縮強度発現特性

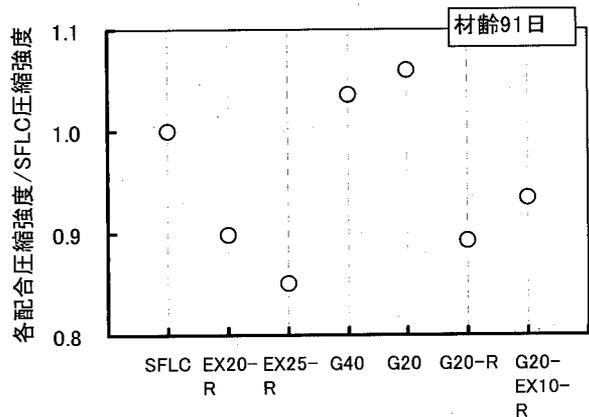


図 3.9.4 材齢 91 日における供試体 SFLC に対する圧縮強度比

表 3.9.2 気乾養生による影響(材齢 91 日)

供試体	材齢 7 日乾燥試験時			材齢 28 日乾燥試験時		
	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )			圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		
	封緘	乾燥	封緘-気乾	封緘	乾燥	封緘-気乾
SFLC	155	150	5	167	168	-1
EX20-R	143	146	-3	158	161	-3
G40	170	166	4	173	181	-8
G20	165	158	7	177	177	0
G20-EX-R	157	151	6	156	155	1

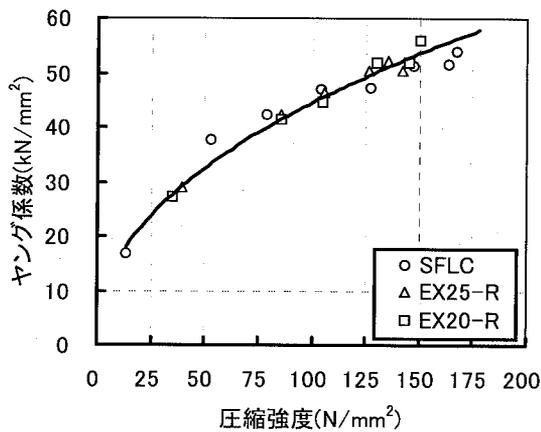


図 3.9.5 膨張材と収縮低減剤がヤング係数に及ぼす影響

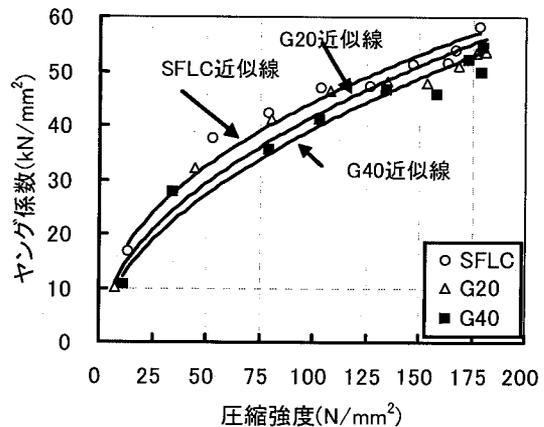


図 3.9.6 廃瓦粗骨材がヤング係数に及ぼす影響

た。ただし、供試体「G20-R」と「G20-EX10-R」の圧縮強度比は 96%であり、長期的には圧縮強度の低減率は小さくなる傾向を示した。供試体「EX20-R」と「EX25-R」から膨張材量が多いほど圧縮強度の低下が認められた。これらの検討から、廃瓦粗骨材を用いることによる圧縮強度の頭打ち現象が認められず、廃瓦粗骨材を超高強度コンクリートの骨材として用いることが十分に可能である。

### (2) 圧縮強度特性(気乾養生)

表 3.9.2 に材齢 7 日から気乾養生した供試体と封緘養生した供試体との差及び材齢 7 日から気乾養生した供試体と封緘養生した供試体との差を示す。材齢 7 日から乾燥を開始した場合の差が材齢 28 日から乾燥を開始した場合の差より大きくなる傾向を示した。

### (3) ヤング係数特性

図 3.9.5 に供試体「SFLC」と「EX20-R」および「EX25-R」の圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図 3.9.6 に供試体「SFLC」と「G40」および「G20」の圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図 3.9.7 に供試体「G20-R」および供試体「G20-EX10-R」と供試体「G20」の圧縮強度とヤング係数の関係を示す。それぞれの図には累乗回帰した結果もあわせて示

す。本研究において、単位粗骨材容積を固定したため、天然骨材を 100%とした配合(図 3.9.5)と廃瓦粗骨材容積の 20%とした配合(図 3.9.6)に関しては、膨張材と収縮低減剤を混入することによるヤング係数に及ぼす影響はほとんど認められなかった。廃瓦粗骨材を用いたコンクリートのヤング係数は、廃瓦粗骨材の量が多くなるほどヤングの係数の低下が認められ、供試体「G40」のヤング係数は、供試体「SFLC」のヤング係数に対して約 7%の低減を示した。なお、この数値は軽量骨材を用いたコンクリートのヤング係数の低減を一般的には約 30%としているのに対して極めて小さい数値である。廃瓦粗骨材を用いたコンクリートにおけるヤング係数が低下した理由は、粗骨材破砕値が小さいほどコンクリートのヤング係数が大きくなる傾向が報告<sup>13)</sup>されており、このため砕石より破砕値の大きな廃瓦粗骨材を混入によりヤング係数が低下したためと考えられる。

#### (4) 割裂引張強度

廃瓦粗骨材が割裂引張強度に及ぼす影響を把握することを目的とする。図 3.9.8 に供試体「SFLC」と「G40」および「G20」の圧縮強度と割裂引張強度の関係を示す。

同図には併せて供試体「SFLC」の累乗回帰した結果も示す。供試体「G40」と「G20」圧縮強度と割裂引張強度の関係は、供試体「SFLC」の累乗近似線と合致する結果となり、廃瓦粗骨材を混入することにより割裂引張強度の低下は認められなかった。

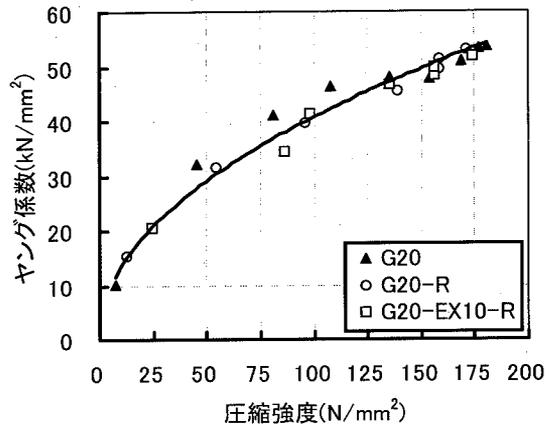


図 3.9.7 各種低減方法を併用した場合のヤング係数特性

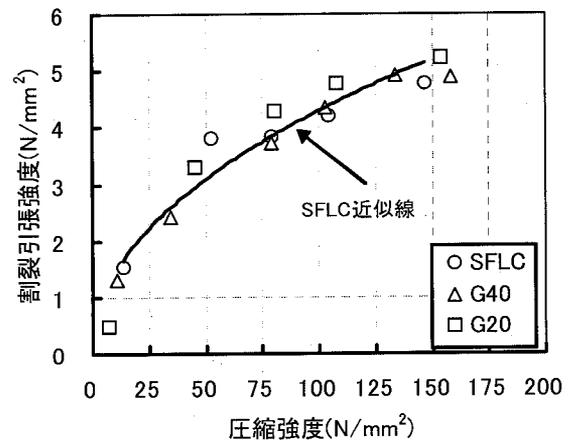


図 3.9.8 廃瓦粗骨材が割裂引張強度に及ぼす影響

### 3. 10 第3章のまとめ

本章では、シリカフェームと低熱セメントを用いた水結合材比 15%の超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの低減方法を実験的に検討した。自己収縮ひずみの低減方法として、膨張材、収縮低減剤および内部養生をするための廃瓦粗骨材をそれぞれ用い、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの低減効果を実験的に検討した。また、これら材料を使用した強度特性に及ぼす影響を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

#### －膨張材と収縮低減剤による自己収縮ひずみ低減－

- (1) 膨張材と収縮低減剤を混入することにより、超高強度コンクリートの領域においても自己収縮ひずみの低減効果が認められた。
- (2) 水結合材 15%の条件における膨張材と収縮ひずみを用いた超高強度コンクリートは、単位膨張材量を練上がり温度や水和熱に起因した温度上昇、さらに水中養生条件下における検討から単位膨張材量  $20\text{kg/m}^3$  とすれば、有効材齢 660 日においても後膨張ひずみを生じないことが明らかになった。ただし、本試験条件においては、単位膨張材量  $25\text{kg/m}^3$  とした場合に後膨張ひずみが発生した。
- (3) 後膨張ひずみの有無には膨張材の温度依存性があり、練上がりコンクリートの温度上昇量が高い場合には後膨張ひずみは発生しない場合があることが明らかになった。しかし、さまざまなコンクリート温度条件においても後膨張ひずみの発生を抑制することが望ましく、超高強度コンクリートに膨張材を使用する場合には膨張材の温度依存性の検討を十分に実施し、単位膨張材量を決定することが必要である。

#### －廃瓦粗骨材による自己収縮ひずみ低減－

- (4) 廃瓦粗骨材を使用したコンクリートは、内部養生効果により、有効材齢 1 日において膨張ひずみが生じ、自己収縮ひずみを低減することが認められた。その効果は、膨張材と収縮低減剤との併用した場合よりも大きくなることが明らかになった。
- (5) 廃瓦粗骨材の使用量を多くした場合には有効材齢 1 日までに発生する膨張材ひずみが大きくなるが、一方において、有効材齢 9 日移行の自己収縮ひずみが大きくなることが明らかになった。このことから、廃瓦粗骨材の使用量を決定するためには、短期・長期の自己収縮ひずみを総合的に判断する必要がある。本研究の範囲では、粗骨材全容積の 20%とすることにより長期の自己収縮ひずみの増分量は基準コンクリートと同等となった。なお、容積置換率に関する検討はさらにデータに蓄積が必要である。
- (6) 粗骨材全容積の 20%を廃瓦粗骨材とした供試体と基準となる自己収縮ひずみを低減しない供試体の自己収縮ひずみとの差は有効材齢 9 日移行においてほとんど変動しない結果が認められた。このことから、廃瓦粗骨材の内部養生効果は材齢初期に特に効果を発揮することが認められた。
- (7) 乾燥収縮ひずみに関しては、有効材齢 28 日まで封緘養生を行い、それ以後に乾燥を開始した場合には廃瓦粗骨材の量が多いほど乾燥収縮ひずみの低減効果が認められた。しかし、有効材齢 1 日から 7 日まで湿布養生を行い、乾燥させた場合には廃瓦粗骨材が多いほど乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向が認められた。
- (8) 廃瓦粗骨材を用いた内部養生効果は水結合材比が小さいほど効果があることが認められた。

－ 廃瓦粗骨材と膨張材および収縮低減剤併用による自己収縮ひずみ低減－

- (9) 廃瓦粗骨材と膨張材および収縮低減剤を併用した供試体は自己収縮ひずみの低減効果が認められた。廃瓦粗骨材単身において有効材齢1日から自己収縮ひずみが増加する傾向があったが、膨張材と収縮低減剤を混入することにより、それを抑制する効果が認められた。

－ 強度特性－

- (10) 廃瓦粗骨材単身で使用した供試体の圧縮強度は、収縮ひずみを低減しない供試体と比較して大きくなった。また、廃瓦粗骨材の混入による圧縮強度の低下は認められなかった。
- (11) 膨張材と収縮低減剤を混入した場合には、圧縮強度低下が認められたが、その程度は、廃瓦粗骨材の超高強度コンクリートにさらに膨張材と収縮低減剤を混入した供試体では長期材齢において緩和されることが認められた。
- (12) ヤング係数は、廃瓦粗骨材の量が多くなるほど小さくなることが明らかになったが、その程度は約7%であった。膨張材と収縮低減剤のみを自己収縮ひずみの低減に用いた供試体の圧縮強度は基準コンクリートと同等であった。
- (13) 廃瓦粗骨材を用いたコンクリートの割裂引張強度は基準コンクリートとほとんど同じであり、割裂引張強度低下は認められなかった。

### 第3章 参考文献

- 1)日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，1996，2002
- 2)例えば谷村充，兵頭彦次，佐藤達三，佐藤良一：高強度コンクリートの収縮低減化に関する一検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.991-996，2000
- 3)北沢真ほか：膨張材によるマスコンクリートの温度ひび割れ対策に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.1117-1122，2002
- 4)盛岡実ほか：膨張材を混和したセメント硬化体の微細構造，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp.169-174，1998
- 5)土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，pp45-49，2007
- 6)楊楊，佐藤良一，河合研至：結合水量に基づく自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの定量評価，土木学会論文集，No.690，V-53，pp.109-120，2001
- 7)五十嵐心一ほか：軽量骨材の使用による高強度コンクリートの自己収縮の低減効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，2002，pp.399-404
- 8)特願 2008-081739
- 9)日本コンクリート協会：自己収縮研究委員会報告書，1996 および 2002
- 10)日紫喜剛啓ほか：自己収縮を低減した 150N/mm<sup>2</sup> 級超高強度コンクリートに関する実験的検討，土木学会論文集，No.781，V-66，2005，pp.101-112
- 11)Persson, B : Moisture in concrete Subjected to Different Kind of Curing, Materials and Structures, Vol.30, pp.533-544, 1997
- 12)五十嵐心一，川村満紀，神崎暁史：軽量骨材の使用による高強度コンクリートの自己収縮の低減効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，2002，pp.399-404
- 13)鶴田浩章：高強度コンクリートの力学的性質に及ぼす粗骨材品質の影響に関する基礎的研究，九州大学学位論文，2000，pp55-67

## 第4章 自己収縮ひずみの温度依存性検討

### 4.1 はじめに

水結合材比 15%とする超高強度コンクリート部材は単位セメント  $1000\text{kg}/\text{m}^3$  を越えることから、水和熱に起因して温度上昇量が高くなる。実構造物の初期応力を予測するためには、コンクリートの温度履歴を考慮した自己収縮ひずみ量の検討をする必要がある。

本章では、水結合材比 15%において、練上がり温度や温度上昇量が発生する自己収縮ひずみ量におよぼす影響を実験的に検討するとともに、前章で述べた自己収縮ひずみの低減の効果に関して、温度依存性の観点から検討を加える。

また、取得した実験データから、膨張材と収縮低減剤を混入したコンクリートと混入しないコンクリート(以下基準コンクリート)の自己収縮ひずみの低減化の予測式を検討する。

### 4.2 膨張材と収縮低減剤を用いた自己収縮ひずみの温度依存性

ここでは、基準コンクリートと膨張材と収縮低減剤により自己収縮ひずみの低減をしたコンクリートの温度依存性を把握することを目的に実施する。なお、本研究では前章の結果から、単位膨張材量を  $20\text{kg}/\text{m}^3$ 、単位収縮低減量  $6\text{kg}/\text{m}^3$  として検討を行う。

#### 4.2.1 実験概要

##### (1) 使用材料と配合

表 4.2.1 と表 4.2.2 に使用材料と鉱物組成をそれぞれ示す。表 4.2.3 には配合表を示す。セメントには、低熱ポルトランドセメント(記号 L)を使用した。混和材には、シリカフェーム(記号 SF)を使用した。なお、セメント種類 L と混和材 SF を混合する配合では、L の重量の 9.9%を混和材 SF にあらかじめ置換したプレミックス材(記号 SFLC, 密度  $3.08\text{g}/\text{cm}^3$ , 比表面積  $6330\text{cm}^2/\text{g}$ )を使用した。粗骨材のかさ容積を  $0.53\text{m}^3/\text{m}^3$  と固定した。空気量は 2%とした。膨張材は結合材の一部とし、収縮低減剤は単位水量の一部とした。

練混ぜは 50 リットル 2 軸強制ミキサを使用し、1 バッチの練量は 35 リットルとした。練混ぜは SFLC と細骨材および膨張材の空練りを 15 秒行い、その後水と混和剤を添加し

表 4.2.1 使用材料

材料	種別	物理的性質	記号
セメント	低熱ポルトランドセメント	密度: $3.22\text{ g}/\text{cm}^3$ , 比表面積: $3520\text{ cm}^2/\text{g}$	L
細骨材	大月産安山岩砕砂	表乾密度: $2.62\text{ g}/\text{cm}^3$ , 吸水率: 2.41%, FM: 2.41	S
粗骨材	盛岡産輝緑岩碎石	表乾密度: $2.92\text{ g}/\text{cm}^3$ , 吸水率: 0.88%, FM: 6.51 実積率: 61.0%, BS 破砕値: 7.86%	G
混和剤	収縮低減剤	低級アルコール系	SRA
	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	消泡剤	-	D
混和剤	膨張材	エトリンサイト石灰複合系—密度: $3.05\text{ g}/\text{cm}^3$	EX
	シリカフェーム	密度: $2.24\text{ g}/\text{cm}^3$ , 比表面積: $18.0\text{ m}^2/\text{g}$	SF

表 4.2.2 鉱物組成

	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
低熱ポルトランドセメント	29.7	49.9	4.1	9.6

表 4.2.3 配合表

配合	(W+SRA)/ (SFLC+ EX)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						練上がり 温度(°C)	SP/(SFLC+ EX)	D/(SFLC+ EX)
		W	SFLC	EX	S	G	SRA			
SFLC	0.15	155	1033	—	435	944	—	10	0.029	0.0010
								20	0.028	0.0020
								30	0.028	0.0010
EX20-R	0.15	149	1013	20	435	944	6	10	0.030	0.0010
								20	0.031	0.0020
								30	0.032	0.0010

てモルタル練りを 240 秒行い、最後に粗骨材を投入してコンクリート練りを 60 秒とし、排出した。スランプフローの目標値は 650±100mm となるように混和剤量を調整した。

## (2) 試験シリーズと試験方法

表 4.2.4 に試験シリーズ、供試体名、養生温度条件および試験項目を示す。練混ぜから養生まで一定室内温度で実施した供試体は供試体名に「一定」の記述を加えた。その他の供試体名は配合、フレッシュコンクリートの練上がり温度の目標値（以下、目標練温と示す）および目標としたコンクリートの最高温度を示す。

コンクリート温度一定シリーズの自己収縮ひずみ供試体の寸法は 100×100×400mm とし、実部材温度履歴シリーズの自己収縮ひずみ供試体寸法は 125×125×1200mm とした。コンクリートの応力にかかわる収縮量を考察する目的から時間軸原点を拘束応力が発生する時点として収縮ひずみの低減効果を検討することとしたため、拘束応力試験を併せて実施した。拘束応力試験の部材寸法は 125×125×1200mm とし、SD295 の D16 を部材中央に埋設した。コンクリートの温度履歴は厚さ 400mm の発泡スチロール型枠を用いて簡易断熱養生を行った(図 4.2.1 参照)。ここでのコンクリート温度履歴の設定は、900×900×1100mm の模擬柱部材に発生するコンクリート温度履歴とした。なお、前章で述べたように柱部材模擬部材のコンクリートの温度履歴と簡易断熱養生した温度履歴はおおむね合致していることは確認している(図 4.2.1 参照)。

また、冬期においては、凍害を防止する目的から蒸気による加熱養生(以下、加熱養生と示す)を実施する場合があるため、柱部材模擬温度履歴養生とは別に最高温度の設定を 60°C とした加熱養生した試験も併せて実施した(供試体名「SFLC10→60°C」,「EX20-R10→60°C」)。チャンバーの設定方法は前章と同様とした(前章図 3.3.2 参照)。

収縮ひずみ試験体の作製方法は、前章と同様とした。供試体は、打込みから材齢 1 日の脱枠までは乾燥を極力防止するために型枠面にポリエステルフィルムを敷き、その上にさらに濡れウエスで覆った。脱枠後に全面を厚さ 0.05mm のアルミ箔テープで覆い乾燥を防止した。収縮ひずみは低弾性の埋込みひずみ計(剛性約 40N/mm<sup>2</sup>)を用いて測定した。

表 4.2.4 試験シリーズと養生温度条件

試験シリーズ	供試体名 <sup>1)</sup>	配合種別	養生温度条件
コンクリート 温度一定	SFLC10℃一定	SFLC	10℃室内
	EX20-R10℃一定	EX20-R	
	SFLC20℃一定	SFLC	20℃室内
	EX20-R20℃一定	EX20-R	
	SFLC20℃一定	SFLC	30℃室内
	EX20-R20℃一定	EX20-R	
実部材模擬コン クリート温度履歴 養生	SFLC10→40℃	SFLC	材齢 7 日まで冬期実部材のコンクリートの温度履歴を模擬し，材齢 7 日以降は 20℃室内
	EX20-R10→40℃	EX20-R	
	SFLC10→60℃	SFLC	加熱養生 <sup>2)</sup> した冬期実部材のコンクリートの温度履歴を模擬し，材齢 7 日以降は 20℃室内
	EX20-R10→60℃	EX20-R	
	SFLC20→60℃	SFLC	材齢 7 日まで標準期実部材のコンクリートの温度履歴を模擬し，材齢 7 日以降は 20℃室内
	EX20-R20→60℃	EX20-R	
	SFLC30→70℃	SFLC	材齢 7 日まで夏期実部材のコンクリートの温度履歴を模擬し，材齢 7 日以降は 20℃室内
	EX20-R30→70℃	EX20-R	

注1) 供試体名は、「一定」の記述が供試体名にある場合には，配合名と練混ぜから養生まで記述の室内温度で実施したことを意味し，その他の供試体名の場合には配合，フレッシュコンクリートの練上がり温度の目標値(以下，目標練温)，設定したコンクリートの目標最高温度を示す。また，供試体名に(水中)がある場合には供試体を水中養生したことを意味する。

注2) 加熱養生は製品を打設した後にシートで覆い，シートをはずし，脱枠するまでの期間にシート内を蒸気により所定の温度となるように加熱した養生をここでは意味する

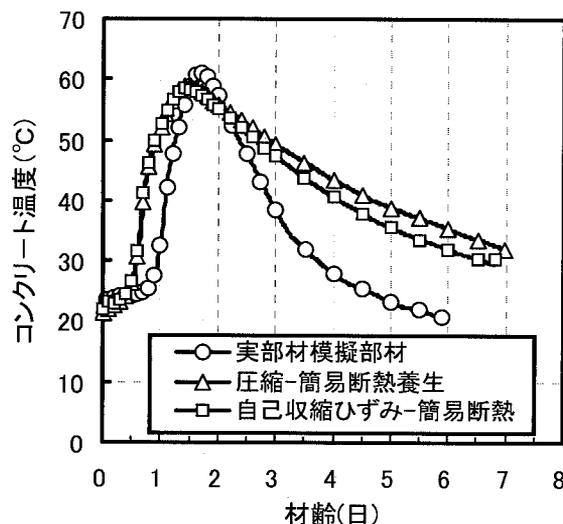


図 4.2.1 実部材模擬部材，圧縮強度用簡易断熱，自己収縮ひずみ用簡易断熱によるコンクリート温度履歴の比較

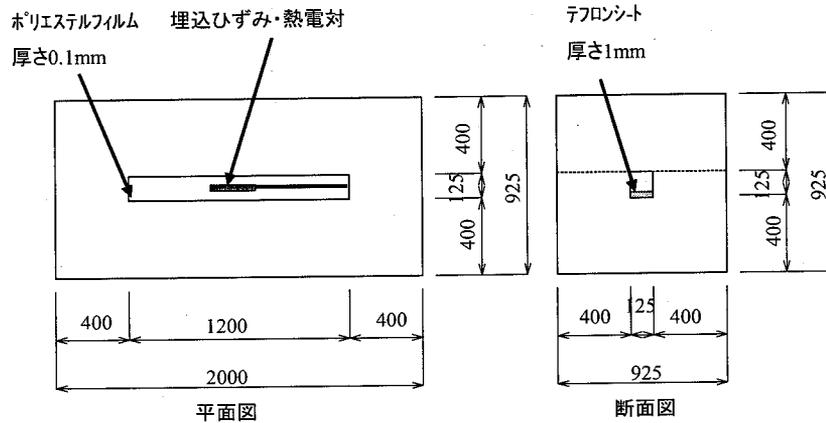


図 4.2.2 自己収縮ひずみ簡易断熱養生型枠

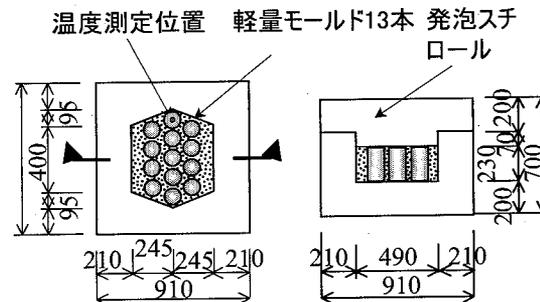


図 4.2.3 コンクリート圧縮強度用簡易断熱養生型枠

実部材温度履歴シリーズのコンクリート圧縮強度供試体の養生は、チャンバーを用いた自己収縮試験に関してはチャンバーにて養生を行い、簡易断熱養生した自己収縮ひずみ試験に関しては図に示す発泡スチロール型枠<sup>1)</sup>を用いた簡易断熱養生とした(図 4.2.2 参照)。なお、圧縮強度用簡易断熱用型枠と自己収縮ひずみ用簡易断熱養生型枠とは異なるが、事前の試験によりコンクリート温度の履歴は両者で概ね合致することを確認している。(図 4.2.1 参照)

### (3) コンクリート温度による体積変化の補正方法

超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの発現は若材齢時に生じ、かつ、この間において水和熱に起因した温度上昇量も大きくなる。このため、自己収縮ひずみとコンクリートの温度ひずみを精度よく分離するためには、材齢初期の線膨張係数が必要となる。また、シリカフェームの高温履歴下における水和の活性化が報告<sup>2)</sup>されており、このことが線膨張係数に影響を与える可能性がある。しかし、高温履歴下における線膨張係数の測定においては、自己収縮ひずみも進行しており、測定時間を極力短くする必要がある。また、急激な温度変化は供試体内部に温度分布を生じさせるため、適切な測定ができない可能性がある。このことから、粗骨材の最大径を 5mm とし、10×100×400mm の部材を用いて、コンクリートの最高温度を 65℃ としたコンクリート温度履歴下において、線膨張係数の試験を実施した。図 4.2.4 に試験装置を示す。型枠には熱伝導性に優れた銅板を用い、凹部には供試体との摩擦を減らすためテフロンシートを貼り付けた。その上にポリエステルフィルムで封緘した供試体を設置し、銅板型枠内に温度制御を行った水を流すことで供試体の

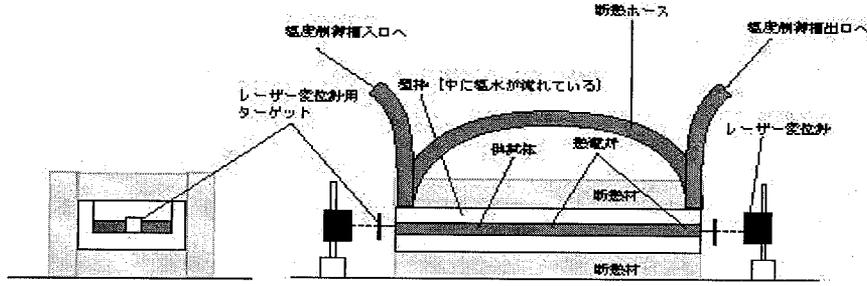


図 4.2.4 線膨張係数試験装置

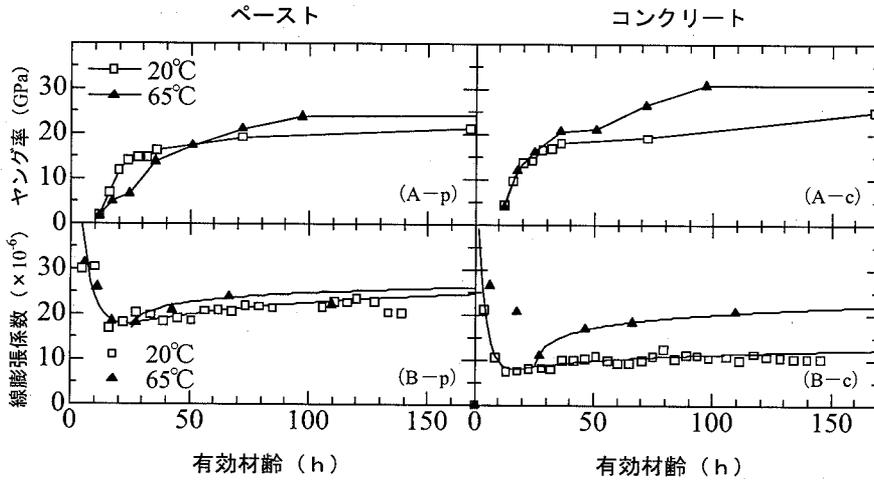


図 4.2.5 高温領域における線膨張係数測定結果

温度制御を行なった。銅板型枠は厚さ 50mm の断熱材で覆い、外部との熱交換を極力少なくした。

図 4.2.5 に測定結果を示す。ペースト供試体においては、20°C養生と 65°C高温養生した場合にも MC90 の有効材齢による評価した場合に経時変化に差が生じないが、骨材を混入した模擬コンクリートにおいては差が生じることを示した。ここでは、コンクリートの線膨張係数の試験結果に基づく線膨張係数は式(4.2.1) となり、表 4.2.4 に示す全供試体について補正した。ただし、式(4.2.1)の線膨張係数の測定は、膨張材と収縮低減剤が混入されていない配合であるが、ここでは式(4.2.1)が適用できると仮定した。

$$\left. \begin{aligned} \alpha(t) &= 60 \exp(-0.3t) + 2 \ln(t) + 2 & t < 84 \\ \alpha(t) &= 11.0 & t \geq 84 \end{aligned} \right\} \quad (4.2.1)$$

ここに、 $\alpha(t)$ :線膨張係数( $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )、 $t$ :打込み終了からの有効材齢(h)である。

#### 4. 2. 2 線膨張係数の差が自己収縮ひずみ算出に与える影響

ここでは、前節で述べた線膨張係数による差が自己収縮ひずみにおよぼす影響を検討する。図 4.2.6 に供試体「SFLC20→60℃」の線膨張係数とコンクリート温度履歴を、図 4.2.7 に線膨張係数を  $10 \times 10^{-6}$  一定とした場合および式(4.2.1)とした場合の自己収縮ひずみを示す。図 4.2.8 に供試体「SFLC30→60℃」の線膨張係数とコンクリート温度履歴を、図 4.2.9 に線膨張係数を  $10 \times 10^{-6}$  一定とした場合および式(4.2.1)とした場合の自己収縮ひずみを示す。ここでは注水した時間を時間軸の原点として示す。いずれの配合においても線膨張係数が大きく変動する材齢においてコンクリートの温度上昇が少なく、かつ、応力開始時点以前となっている。このため、本研究の範囲内では、線膨張係数が収縮ひずみにおよぼす影響は小さくなる結果となったが、以降の検討では自己収縮ひずみの精度を向上させるために式(4.2.1)を用いて補正することとする。

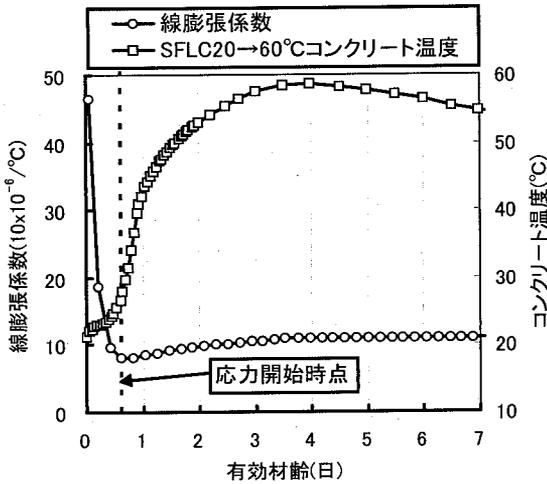


図 4.2.6 配合「SFLC20→60℃」の線膨張係数とコンクリート温度履歴

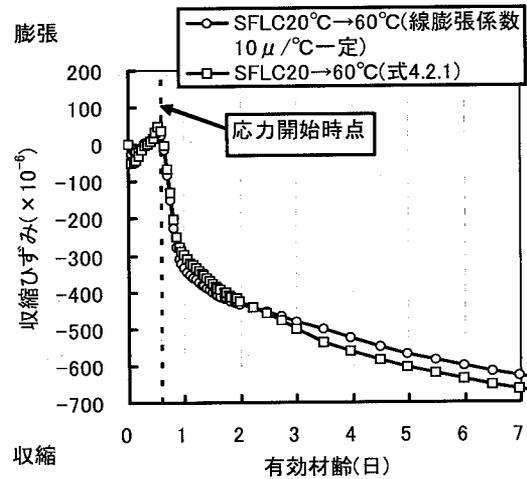
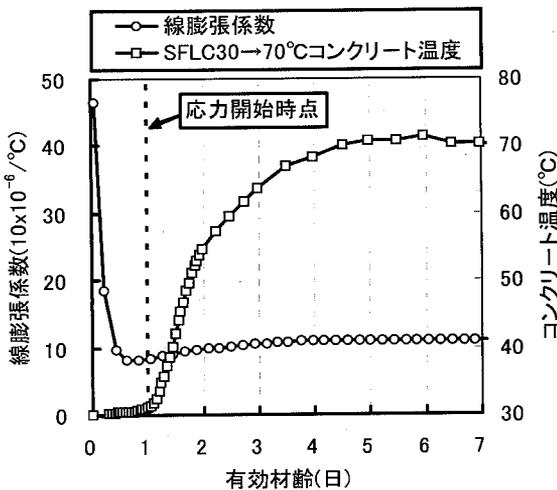
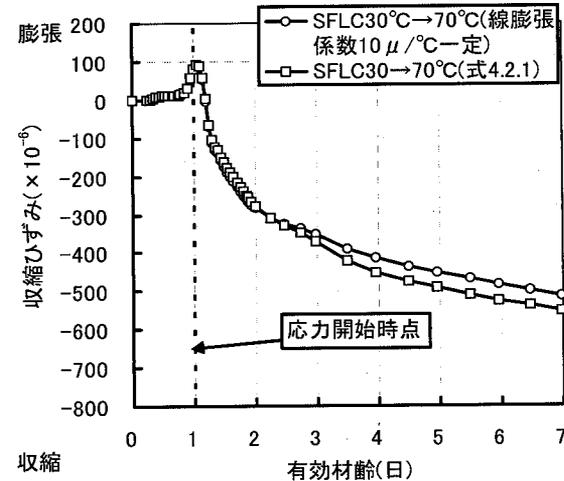


図 4.2.7 配合「SFLC20→60℃」の各線膨張係数による収縮ひずみ



(配合「SFLC」)

図 4.2.8 配合「SFLC30→70℃」の線膨張係数とコンクリート温度履歴



(配合「EX-20」)

図 4.2.9 配合「SFLC30→70℃」の各線膨張係数による収縮ひずみ

4. 2. 3 温度履歴を考慮した膨張材と収縮低減剤による自己収縮ひずみの低減  
 (1) コンクリートのフレッシュ性状とコンクリート最高温度

表 4.2.5 にコンクリートのフレッシュ性状とコンクリートの最高温度を示す。

表 4.2.5 フレッシュ性状およびコンクリートの最高温度

供試体名	スランブ フロー(cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)	
			練上がり温度	最高温度
SFLC10°C一定	69.0×73.0	1.5	11.0	11.5
SFLC20°C一定	64.0×64.0	1.5	21.3	25.2
SFLC30°C一定	71.0×72.0	2.0	29.9	33.3
EX20-R10°C一定	62.0×65.0	1.8	15.5	15.6
EX20-R20°C一定	65.0×65.0	1.3	23.9	23.9
EX20-R 30°C一定	69.0×66.0	1.9	30.2	33.2
SFLC 10→40°C	69.0×73.0	1.5	11.0	42.0
SFLC 10→60°C	71.0×71.5	2.3	14.4	62.5
EX20-R10→40°C	62.0×64.5	1.8	11.5	40.5
EX20-R10→60°C	63.0×63.5	2.0	13.9	60.0
SFLC 20→60°C	64.0×64.0	1.5	21.2	58.6
EX20-R 20→60°C	64.0×64.0	1.5	22.1	55.1
SFLC 30→70°C	71.0×72.0	2.0	31.0	66.8
EX20-R30→70°C	69.0×66.0	1.9	30.4	71.5

(2) コンクリート温度一定条件における自己収縮ひずみの温度依存性

練上がり温度が膨張材と収縮低減剤による収縮ひずみの低減効果に与える影響を検討する。なお、計測は、収縮ひずみ量やその後の挙動が予測可能となる材齢まで実施することとした。コンクリートの応力にかかわる収縮量を考察する目的から時間軸原点を拘束応力が発生する時点として収縮ひずみの低減効果を検討した。異なるフレッシュコンクリートの練上がり温度の目標値(以下、目標練温)と温度履歴における配合「SFLC」の拘束応力の打込み直後からの経時変化と一定温度で養生した配合「SFLC」と「EX20-R」の拘束応力の経時変化を図4.2.10と図4.2.11に示す。同じ目標練温の拘束応力が生じ始める有効材齢は、コンクリートの温度履歴と配合によらずほぼ同じとなった。このことから、目標練温10℃の配合「EX20-R」を使用した拘束試験を実施していないが、ここでは配合「SFLC」を使用した拘束応力が発現する時間と同じと仮定し、収縮ひずみの低減量の検討を行うこととした。加えて、供試体「SFLC10℃一定」についても拘束試験を実施していないが、供試体「SFLC10→40℃」と同じ有効材齢において拘束応力が発現すると仮定した。これは、拘束応力発現までの温度履歴の影響はほとんど実験上生じていないことを根拠としている。また、拘束応力開始時間は図4.2.11より、目標練温30℃、20℃および10℃において、それぞれ有効材齢1.0日、0.6日および0.4日となった。

図4.2.12と図4.2.13にコンクリート温度を一定温度で養生した各目標練温の膨張材と収縮低減剤を混入しない供試体と混入した供試体の収縮ひずみの経時変化を示す。凡例の供試体名は配合の目標練温を示す。膨張材と収縮低減剤を混入したことによる自己収縮ひずみの低減効果は、いずれの目

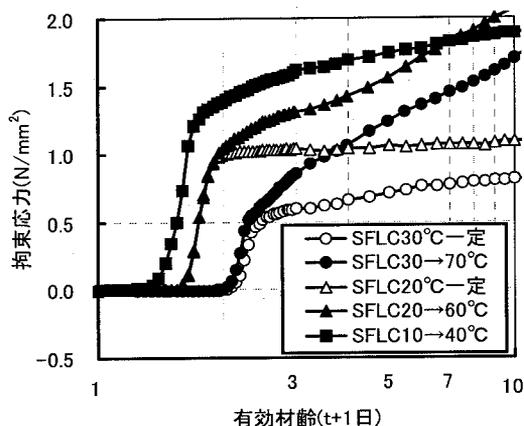


図 4.2.10 SFLC の拘束応力 (打込み直後時間軸原点)

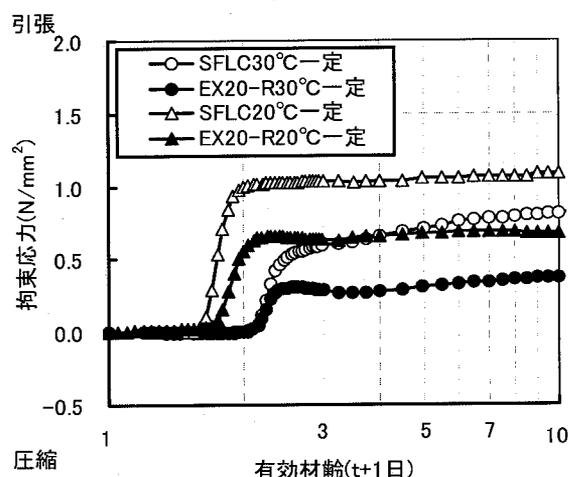


図 4.2.11 SFLC と EX20-R の拘束応力 (打込み直後時間軸原点)

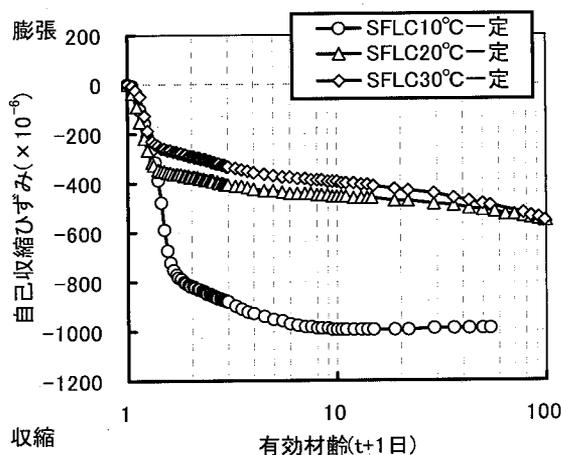


図 4.2.12 配合「SFLC」の温度一定条件における収縮ひずみ

標練温においても認められた。膨張材と収縮低減剤を混入していない供試体「SFLC10℃」、「SFLC20℃」、「SFLC30℃」の有効材齢 10 日の自己収縮ひずみは、それぞれ  $-997 \times 10^{-6}$ 、 $-445 \times 10^{-6}$ 、 $-400 \times 10^{-6}$  となり、目標練温が小さくなるほど発生する収縮ひずみ量が大きくなる結果を示し、特に目標練温 10℃では、目標練温 20℃および 30℃と比較して倍以上の収縮ひずみが発生した。各目標練温による自己収縮ひずみの有効材齢 10 日以降の経時変化は、供試体「SFLC10℃」ではほとんど変化していないのに対して、供試体「SFLC20℃」と「SFLC30℃」においては、収縮ひずみが増加しており、練上がり温度および養生温度に依存して、収縮ひずみの発現に差があることが認められた。供試体「EX20-R10℃一定」の収縮ひずみは、有効材齢 10 日以降に膨張側に推移しているが、極端な後膨張ひずみの発生は認められなかった。

図 4.2.14 にコンクリート温度一定養生とした各目標練温の収縮ひずみの低減量の経時変化を示す。ここでは、収縮ひずみの低減量は、図 4.2.12 と図 4.2.13 の同じ目標練温の配合「EX20-R」と「SFLC」のひずみを差し引くことにより算出した。目標練温 30℃の収縮ひずみの低減量は、有効材齢 3 日まで増加し、それ以降の経時変化に伴う変動は小さく、目標練温 10℃の収縮ひずみの低減量は、有効材齢 20 日まで増加し、それ以降の経時変化に伴う変動は小さくなった。目標練温 20℃においては有効材齢 100 日においても増加傾向が認められた。収縮ひずみの低減量は、目標練温により明確な傾向が認められなかった。

### (3) コンクリート温度履歴の影響が自己収縮ひずみに及ぼす影響

コンクリートの水和による初期高温履歴が収縮ひずみの低減効果に与える影響を検討する。配合「SFLC」シリーズと「EX20-R」シリーズの各供試体の温度履歴を図 4.2.15 と図 4.2.16 にそれぞれ示す。凡例の供試体名は配合，目標練温，目標コンクリート最高温度である。

図 4.2.17～図 4.2.18 に配合「SFLC」と配合「EX20-R」の目標練温 10，20 および 30℃の実部材模擬温度履歴養生した供試体とコンクリート温度一定養生した供試体のひずみ経

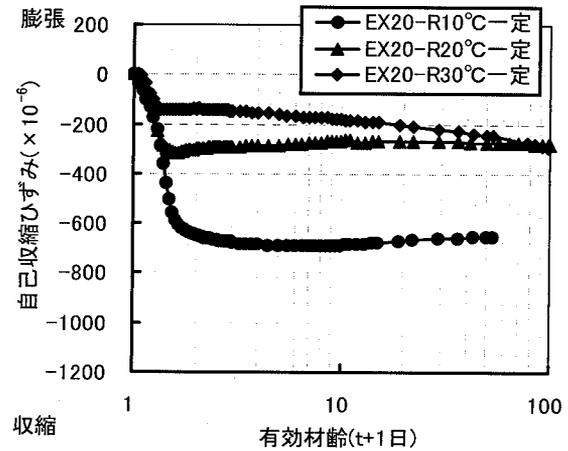


図 4.2.13 配合「EX20-R」の温度一定条件における収縮ひずみ

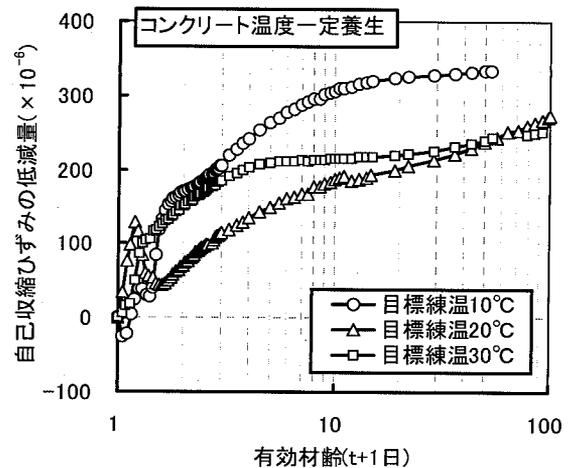


図 4.2.14 配合「EX20-R」の温度一定条件における収縮ひずみ

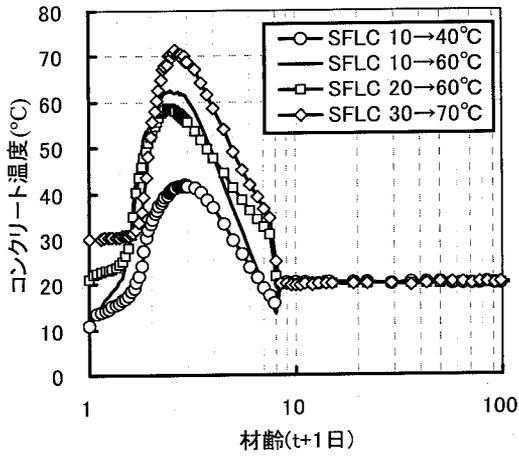


図 4.2.15 配合「SFLC」のコンクリート温度履歴

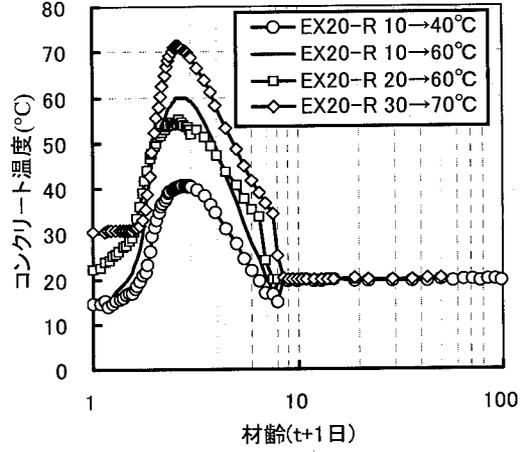
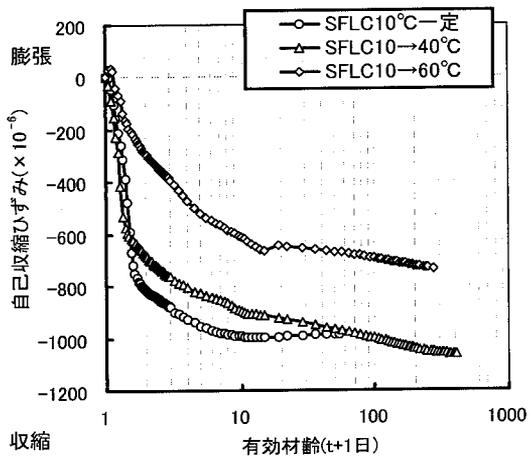
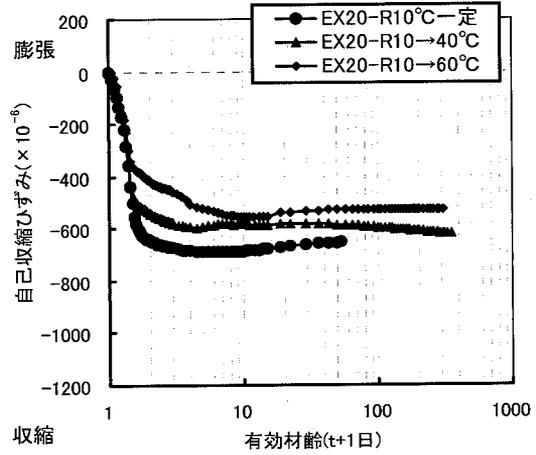


図 4.2.16 配合「EX-20」のコンクリート温度履歴

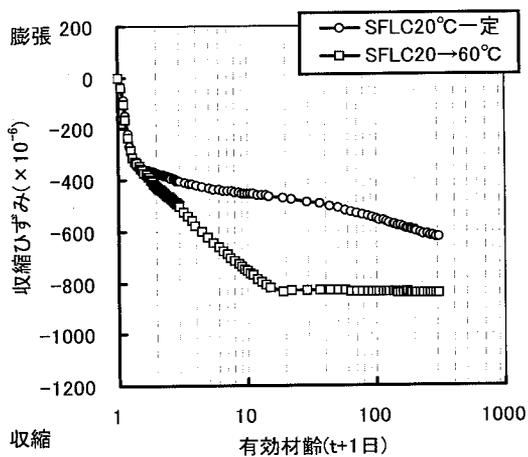


(配合「SFLC」)

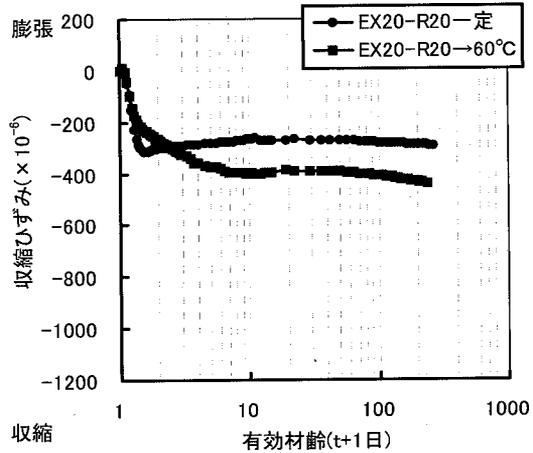


(配合「EX-20」)

図 4.2.17 目標練温 10°Cの温度履歴供試体の自己収縮ひずみの経時変化

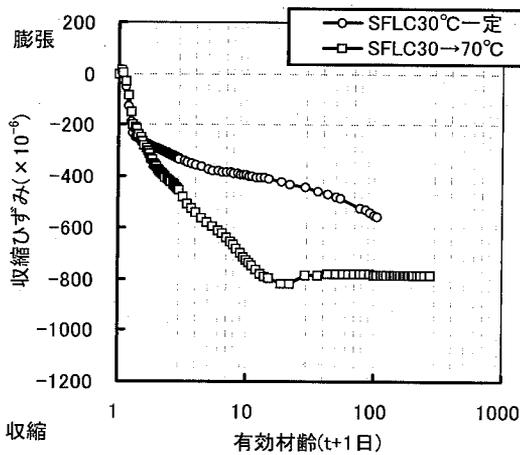


(配合「SFLC」)

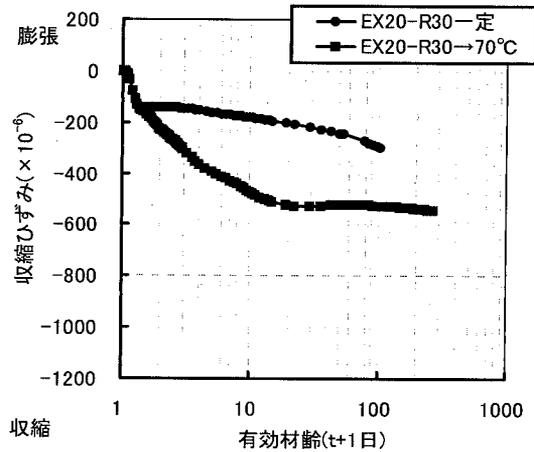


(配合「EX-20」)

図 4.2.18 目標練温 20°Cの温度履歴供試体の自己収縮ひずみの経時変化



(配合「SFLC」)



(配合「EX-20」)

図 4.2.19 目標練温 30℃の温度履歴供試体の自己収縮ひずみの経時変化

時変化を示す。同じ目標練温とし、実部材模擬温度履歴養生とした配合「SFLC」と「EX20-R」の収縮ひずみの比較から、いずれの目標練温においても、膨張材と収縮低減剤を混入することにより、収縮ひずみの低減が認められた。各目標練温の配合「SFLC」の柱部材模擬温度履歴養生した供試体とコンクリート温度一定養生した供試体のひずみの比較から、ひずみは、目標練温 20℃と 30℃においてコンクリートに温度履歴を与えた方が大きくなったが、目標練温 10℃においては供試体「SFLC10→40℃」において「SFLC10℃一定」とほぼ同等となり、「SFLC10→60℃」において「SFLC10 一定」より小さくなった。

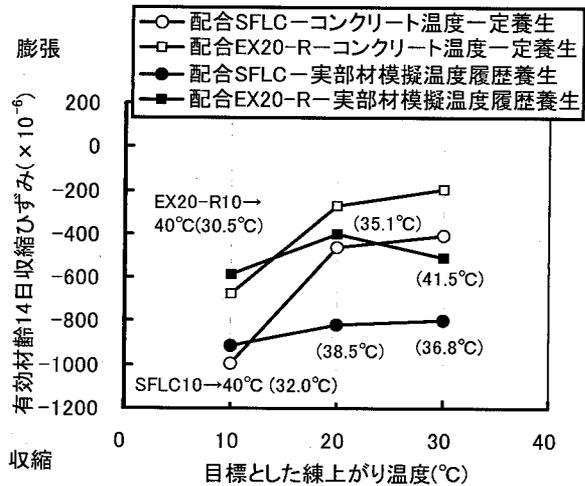


図 4.2.20 コンクリートの温度履歴による有効材齢 14 日の自己収縮ひずみ

次に、自己収縮ひずみが材齢初期に生じること、図 4.2.17～図 4.2.19 においてコンクリート温度履歴を与えた供試体において有効材齢 14 日以降の収縮ひずみの変動が小さくなることから、有効材齢 14 日の自己収縮ひずみ量を用いて、柱部材模擬温度履歴が収縮ひずみに与える影響を検討する。表 4.2.5 に示すように目標練温と練上がり温度の測定値とずれが生じているが、コンクリートの打込み終了から 0.15 日までに設定温度となったため、ここでは、この間のコンクリート温度履歴が収縮ひずみに与える影響はわずかであると考え、目標練温を用いて検討することとした。

図 4.2.20 に配合「SFLC」と「EX20-R」のコンクリート温度一定養生した供試体と柱部材模擬温度履歴養生した供試体の目標とした練上がり温度と有効材齢 14 日の収縮ひずみ

の関係を示す。配合「SFLC」のコンクリート温度を一定温度で養生とした目標とした練上がり温度 10℃、20℃および 30℃の収縮ひずみはそれぞれ  $-996 \times 10^{-6}$ 、 $-463 \times 10^{-6}$  および  $-411 \times 10^{-6}$  となり、特に目標練温 10℃の収縮ひずみが大きくなる傾向を示した。このことは配合「EX20-R」においても同様の傾向を示した。

各目標練温において、実部材模擬温度履歴養生したコンクリートの温度履歴が材齢 14 日の収縮ひずみ量に及ぼす影響を検討するため、図 4.2.21 に配合「SFLC」と「EX20-R」の柱部材模擬温度履歴養生した供試体とコンクリート温度一定養生した供試体の収縮ひずみの差(以下、収縮ひずみの

変動量)を示す。いずれの配合とも目標練温が高くなるほど収縮ひずみの変動量が大きくなる傾向を示したが、目標とした練上がり温度と収縮ひずみの変動量の関係は各配合で異なる。収縮ひずみの変動量は、配合「SFLC」において目標練温 20℃と 30℃において差が小さくなるのに対して、配合「EX20-R」では目標とした練上がり温度と収縮ひずみの変動量は概ね直線関係になり、目標練温が高いほどコンクリート温度履歴の影響を受け、膨張材と収縮低減剤による収縮ひずみの低減が小さくなる結果となった。膨張材の作用機構が膨張材の水和生成物がセメント硬化体に空隙を形成しながら生成しているとする報告<sup>3)</sup>があるが、この結果は、膨張材と SFLC の水和反応速度が目標練温やコンクリート温度の上昇量により異なるため、膨張材の水和生成物による空隙形成量に差異が生じたため、収縮ひずみの低減量が異なったことが推察される。

以上のことから、収縮ひずみ量は練上がり温度とコンクリート最高温度に影響することから、これらを考慮したひび割れリスクの評価が必要と考える。

#### 4. 2. 4 膨張材と収縮低減剤を混入・無混入の超高強度コンクリートの温度履歴を考慮した自己収縮ひずみの実験式

ここでの予測式は、最初にコンクリート温度一定条件としたときの自己収縮ひずみを予測し、次にコンクリート温度上昇量が自己収縮ひずみに与える影響を予測することとした。

図 4.2.12 と図 4.2.13 に示す配合「SFLC」と「EX20-R」の自己収縮ひずみの経時変化に結果によれば、有効材齢 1 日以前に変曲点があり、目標練温 20℃と 30℃の自己収縮ひずみの変曲点までの発現は目標練温 10℃の発現速度がほぼ等しいことがわかる。また、前節に述べたように有効材齢 14 日までで自己収縮ひずみの発現が終了している。この点に着眼し、目標練上がり温度 10℃の実験式を求め、自己収縮ひずみの発現における変局点と有効材齢 14 日のそれぞれの自己収縮ひずみの目標練温との関係から、各配合の目標練温ごとの実験式を求めることとした。表 4.2.6 に各配合と各目標練温の変局点となる有効材齢と自己収縮ひずみを示す。

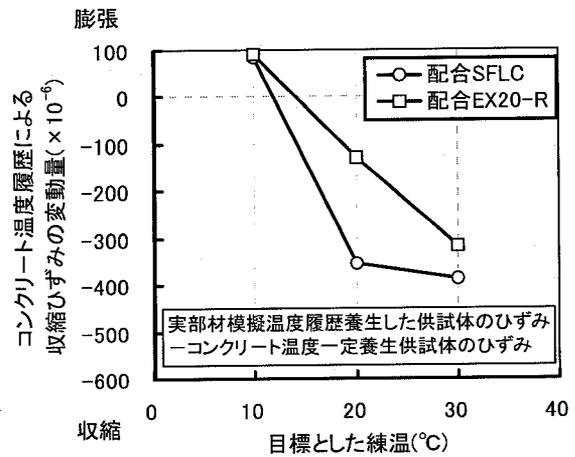


図 4.2.21 コンクリートの温度履歴に伴う自己収縮ひずみの変動量

表 4.2.6 自己収縮ひずみ発現の変曲点の時刻と自己収縮ひずみ

目標練温	SFLC		EX20-R	
	有効材齢 (日)	自己収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	有効材齢 (日)	自己収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )
10°C	0.747	-781	0.648	-604
20°C	0.444	-350	0.389	-287
30°C	0.346	-244	0.299	-131

目標練温 10°C の配合「SFLC」と「EX20-R」の実験式を式(4.2.2)と式(4.2.3)に示す。なお、自己収縮ひずみの発現は、一般的には自己収縮ひずみ発現の変曲点となる時刻までの関数で表示されるが、本研究の範囲では変曲点となる時刻で式を分けた方が実験式と実験値との整合性が向上した。

— SFLC —

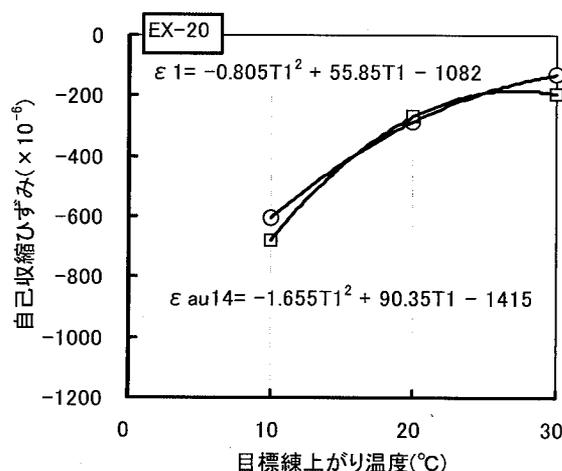
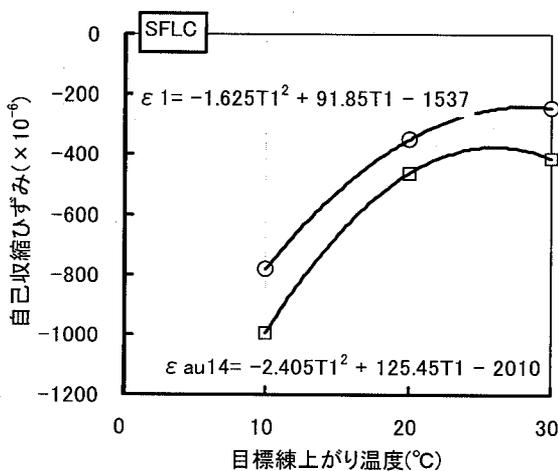
$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{au10}(t) &= -837 \{1 - \exp(-5.32t^{2.17})\} & t \leq 0.747 \\ \varepsilon_{au10}(t) &= 278 \log(t+1)^2 - 620 \log(t+1) - 652 & 0.747 \leq t \leq 14 \end{aligned} \right\} \quad (4.2.2)$$

— EX20-R —

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{au10}(t) &= -822 \{1 - \exp(-3.14t^{1.81})\} & t \leq 0.648 \\ \varepsilon_{au10}(t) &= 188 \log(t+1)^2 - 306 \log(t+1) - 570 & 0.648 \leq t \leq 14 \end{aligned} \right\} \quad (4.2.3)$$

ここで、 $\varepsilon_{au10}(t)$  は目標練温 10°C の自己収縮ひずみを示す。

図 4.2.22 と図 4.2.23 に配合「SFLC」と「EX-20」の目標練温と変曲点となる時刻および



注)  $\varepsilon_1$  と  $\varepsilon_{au14}$  はそれぞれ変曲点時刻と有効材齢 14 日の自己収縮ひずみ、 $T_1$  は目標練温

図 4.2.22 目標練温と自己収縮ひずみの関係 (配合 SFLC)

図 4.2.23 目標練温と自己収縮ひずみの関係 (配合 EX20-R)

び有効材齢 14 日のそれぞれの自己収縮ひずみの関係を示す。実験式は 2 次式で表示した。配合「SFLC」および「EX20-R」の変曲点時刻および有効材齢 14 日の目標練温の目標練温と自己収縮ひずみの実験式を式(4.2.4)から式(4.2.7)に示す。

—SFLC—

$$\varepsilon_1(T_1) = -1.625T_1^2 + 91.85T_1 - 1537 \quad (4.2.4)$$

$$\varepsilon_{au14}(T_1) = -2.405T_1^2 + 125.45T_1 - 2010 \quad (4.2.5)$$

—EX20-R—

$$\varepsilon_1(T_1) = -0.805T_1^2 + 55.85T_1 - 1082 \quad (4.2.6)$$

$$\varepsilon_{au14}(T_1) = -1.655T_1^2 + 90.35T_1 - 1415 \quad (4.2.7)$$

ここで、 $T_1$  は目標練温、 $\varepsilon_1(T_1)$  は目標練温  $T_1$  の変曲点時刻における自己収縮ひずみ、

$\varepsilon_{au14}(T_1)$  は目標練温  $T_1$  の有効材齢 14 日における自己収縮ひずみをそれぞれ示す。

これらの関係を用いて、配合「SFLC」および「EX20-R」の任意の目標練温の経時変化の実験を式(4.2.8)と(4.2.9)に示す。ここで、変曲点時刻で 2 式に差が生じる場合には式(4.2.2)と(4.2.3)が真値とし、その差を平行移動することにより調整することとした。

—SFLC—

$$\varepsilon_{auT1const}(t) = \varepsilon_{au14}(T_1) / \varepsilon_{au14}(10) \left\{ 278 \log(t+1)^2 - 620 \log(t+1) - 652 \right\} \left. \begin{array}{l} \varepsilon_{auT1const}(t) = -837 \{ 1 - \exp(-5.32t^{2.17}) \} \\ \varepsilon_{aut1}(t) \leq \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{aut1}(t) \end{array} \right\} \quad (4.2.8)$$

—EX20-R—

$$\varepsilon_{auT1const}(t) = \varepsilon_{au14}(T_1) / \varepsilon_{au14}(10) \left\{ 188 \log(t+1)^2 - 306 \log(t+1) - 570 \right\} \left. \begin{array}{l} \varepsilon_{auT1const}(t) = -822 \{ 1 - \exp(-3.14t^{1.81}) \} \\ \varepsilon_{aut1}(t) \leq \varepsilon_1 \\ \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{aut1}(t) \end{array} \right\} \quad (4.2.9)$$

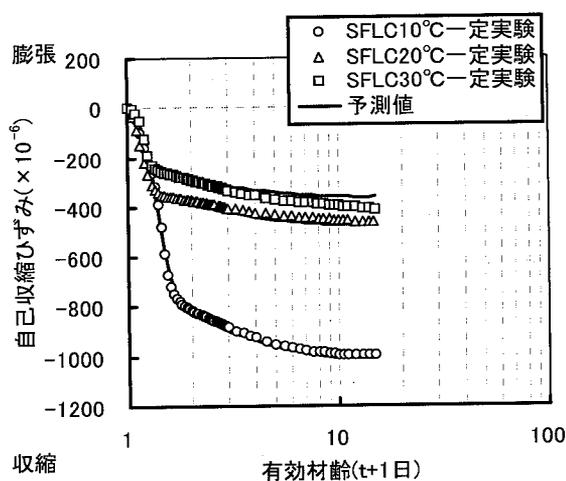


図 4.2.24 実験値と予測値との比較  
(配合 SFLC)

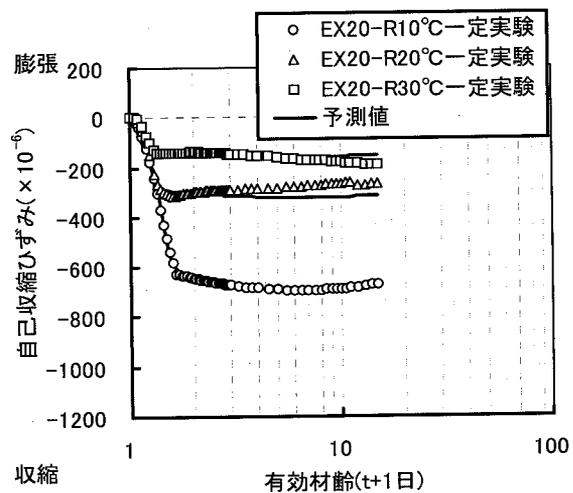


図 4.2.25 実験値と予測値との比較  
(配合 EX20-R)

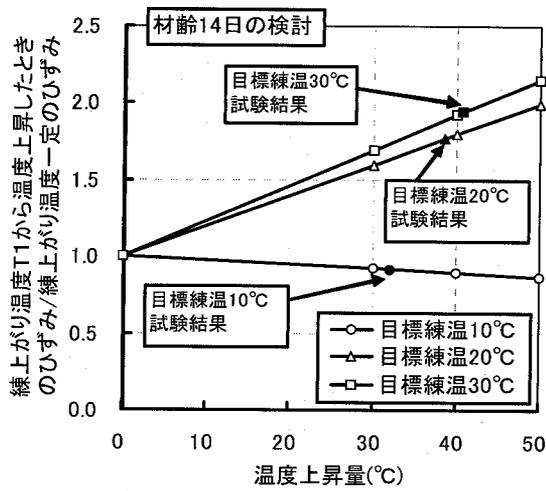


図 4.2.26 配合「SFLC」の温度上昇量とコンクリート温度上昇によるひずみ変化の割合との関係

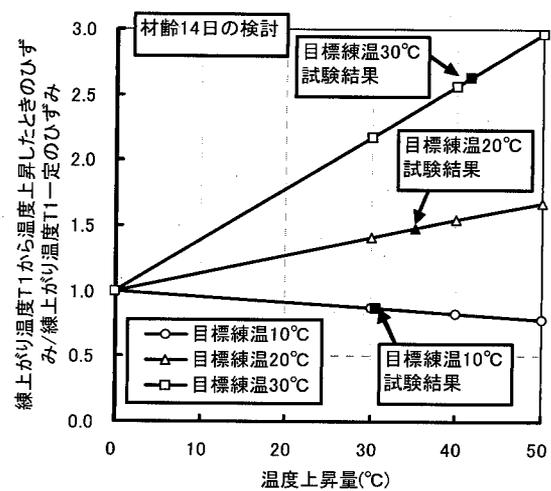


図 4.2.27 配合「EX20-R」の温度上昇量とコンクリート温度上昇によるひずみ変化の割合との関係

ここで、 $\varepsilon_{auT_1}(t)$  は目標練温  $T_1$  における有効材齢  $t$  日の自己収縮ひずみを示す。

図 4.2.24 と図 4.2.25 に配合「SFLC」と「EX-20」の実験値と実験式を用いた結果をそれぞれ示す。実験値と実験式の計算結果とは精度よく合致することが認められた。

次にコンクリートの温度上昇量が自己収縮ひずみに及ぼす影響を取り入れた実験式を求める。図 4.2.26 と図 4.2.27 に配合「SFLC」と「EX-20」の各目標練温のコンクリート温度上昇量と有効材齢 14 日の自己収縮ひずみを目標練温一定で養生した有効材齢 14 日で除した値(以下補正比  $\alpha$ )との関係を示す。データの蓄積を多くし、実験式の精度を向上させる必要があるが、ここでは実験データに基づき各目標練温と温度上昇量との関係を 1 次の関数として示した。しかし、温度上昇量に対する自己収縮ひずみの変動の傾向は概ね把握することはできると考える。この結果から、配合「SFLC」と「EX20-R」のコンクリートの温度履歴を考慮した実験式は式(4.2.10)となる。

$$\varepsilon_{auT_1}(t, T_2) = \varepsilon_{auT_1const}(t)(1 + \alpha T_2) \quad (4.2.10)$$

ここで、 $\varepsilon_{auT_1}(t, T_2)$  は有効材齢  $t$  における目標練温  $T_1$  の温度上昇量  $T_2$  のときの自己収縮ひずみ、 $\alpha$  は実験で定める係数で表 4.2.7 となる。

このことから、膨張材と収縮低減剤の混入・無混入のコンクリートの温度依存性を考慮した実験式が得られた。なお、これら検討結果から、自己収縮ひずみは目標練温が高いほど自己収縮ひずみ量が小さくなる。また、初期の水和に起因する温度上昇による自己収縮ひずみの増加は、線上がり温度が高くなるほど大きくなり、その傾向は配合「EX20-R」に顕著に認められた。

表 4.2.7 目標練温一定に対するコンクリート温度上昇量補正係数

目標練温	SFLC	EX20-R
10°C	-0.0026	-0.0044
20°C	0.0199	0.0135
30°C	0.0231	0.0392

#### 4. 3 廃瓦粗骨材を用いた自己収縮ひずみの温度依存性

ここでは、基準コンクリートと廃瓦粗骨材により自己収縮ひずみの低減をしたコンクリートの温度上昇による影響を把握することを目的に実施する。検討した配合は「G20-R」とし、目標練温 20℃とし、簡易断熱養生によりコンクリートに温度履歴を与えることによりコンクリートの温度履歴の影響を検討した。

##### 4. 3. 1 実験概要

###### (1) 使用材料と配合

配合「G20-R」における使用材料および配合は、それぞれ3章に示す表 3.5.1 と表 3.7.1 と同じである。

###### (2) 実験概要

コンクリート温度一定の自己収縮ひずみ供試体の寸法は 100×100×400mm とし、実部材温度履歴シリーズの自己収縮ひずみ供試体寸法は 100×100×1200mm とした。簡易断熱養生の方法と自己収縮ひずみの測定方法は前節と同様である。

#### 4. 3. 2 温度履歴を考慮した廃瓦粗骨材による自己収縮ひずみの低減

##### (1) コンクリートのフレッシュ性状とコンクリート最高温度

表 4.3.1 にコンクリートのフレッシュ性状と最高温度を示す。

表 4.3.1 フレッシュ性状およびコンクリートの最高温度

供試体名	スランプ フロー(cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(℃)	
			練上がり温度	最高温度
SFLC20℃一定	64.0×64.0	1.5	21.3	25.2
G20-R20℃一定	62.0×65.0	1.8	22.0	22.0
SFLC20→60℃	69.0×66.0	1.9	21.2	58.6
G20-R20→60℃	69.0×66.0	1.9	22.0	54.9

##### (2) コンクリートの温度履歴が廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートの自己収縮ひずみに及ぼす影響

配合「SFLC20→60℃」と「G20-R20→60℃」の各供試体の温度履歴を図 4.3.1 に示す。凡例の供試体名は配合、目標練温、目標コンクリート最高温度である。廃瓦粗骨材は多孔性材料であるため、水和熱に起因したコンクリートの温度上昇量が大きくなることが考えられたが、本試験の範囲内では両者に差異はほとんど認められなかった。

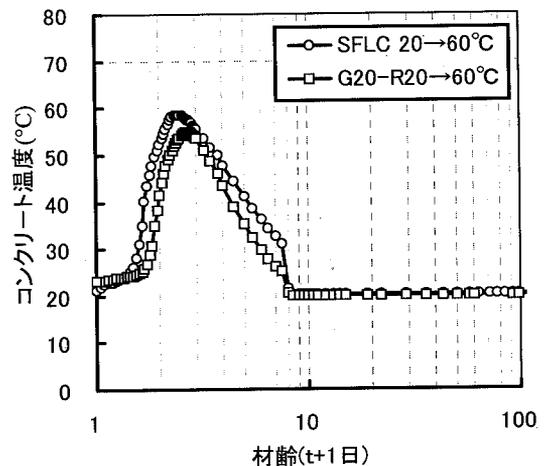


図 4.3.1 コンクリートの温度履歴

図 4.3.2 に自己収縮ひずみの経時変化を示す。廃瓦粗骨材を用いたコンクリートの温度変化に伴う線膨張係数は骨材の種別により異なるとする報告<sup>4)</sup>から別途試験を行う必要があるが、ここでは、前節で用いた線膨張係数を用いて算出した。

供試体「G20R20℃一定」と「G20R20→60℃」の自己収縮ひずみは、供試体「SFLC20℃」より小さくなり、廃瓦粗骨材を混入することによりコンクリートの温度履歴によらず自己収縮ひずみの低減効果が認められた。また、有効材齢 20 日までに、コンクリートの温度履歴が自己収縮ひずみ量に与える影響を配合「SFLC」と配合「G20-R」で比較する

と、配合「G20-R」のコンクリートの温度履歴による自己収縮ひずみの発生量の差は、配合「SFLC」と比較して小さくなる傾向が認められ、廃瓦粗骨材を用いたコンクリートは自己収縮ひずみの温度依存性にとまなう自己収縮ひずみの変動量を緩和させる効果もあることが考えられる。このことは、コンクリートに高温履歴を受けた場合にコンクリートの相対湿度が低下することが報告<sup>5,6)</sup>されており、このことにより、廃瓦粗骨材を用いたコンクリートは内部養生効果を高めたことが考えられるが、この点に関してはデータをさらに蓄積が検討を加える必要があると考える。

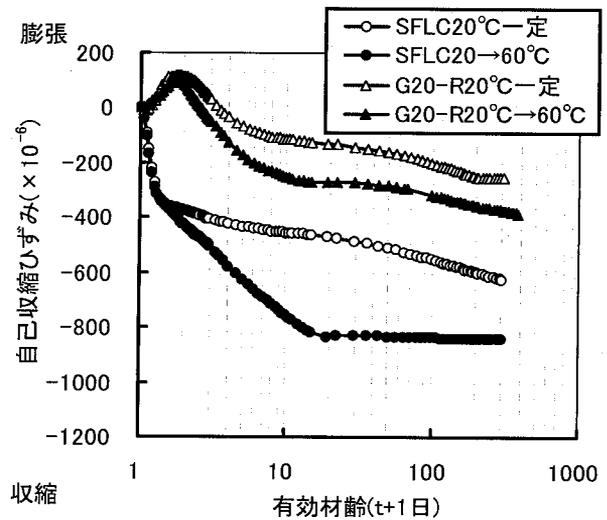
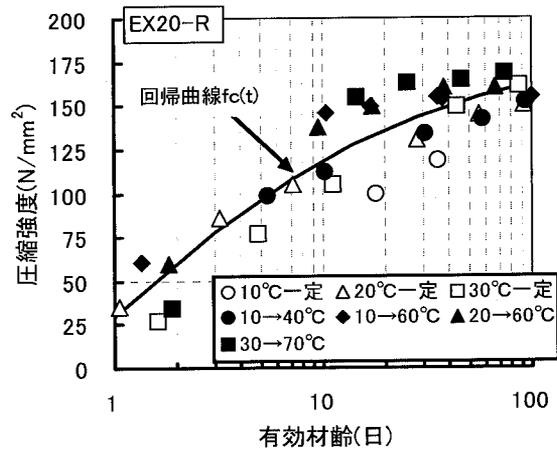
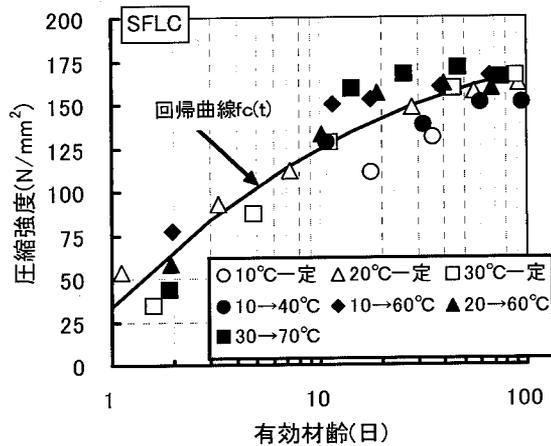


図 4.3.2 廃瓦粗骨材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみ



$$f_c(t) = 149 \exp(0.26(1 - (28/(t - 0.4))^{0.5})) \quad f_c(t) = 143 \exp(0.27(1 - (28/(t - 0.4))^{0.5}))$$

図 4.4.1 配合「SFLC」の圧縮強度発現

図 4.4.2 配合「EX20-R」の圧縮強度発現

#### 4.4 圧縮強度の温度依存性

本節では、4章で実施した各種コンクリートの温度履歴を与えた圧縮強度供試体の圧縮強度から、コンクリートの温度履歴が圧縮強度に及ぼす影響を検討する。配合「SFLC」、配合「EX-20R」および「G20-R」の圧縮強度発現を図 4.4.1～図 4.4.3 にそれぞれ示す。配合「SFLC」と配合「EX-20R」には全データの回帰曲線を示す。また、凡例は供試体名を除く温度履歴の標記のみで示す。圧縮強度は、10°C一定を除き、有効材齢約 100 日において 150N/mm<sup>2</sup> を越える結果を得た。配合

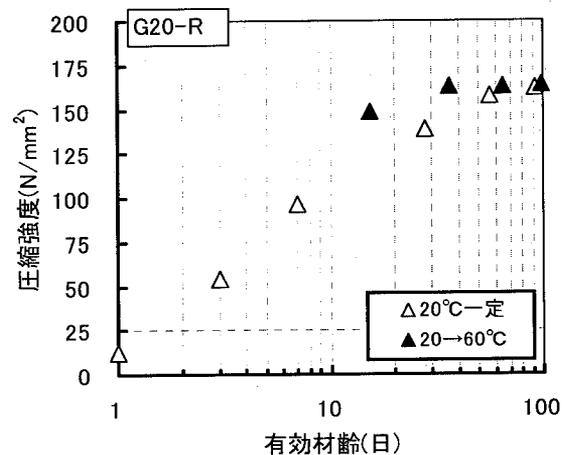


図 4.4.3 配合「G20-R」の圧縮強度発現

「SFLC」と配合「EX-20R」のコンクリート温度条件「10°C一定」と「10→40°C」において回帰曲線を下回っており、一方、温度条件「10→60°C」、「20→60°C」および「20→60°C」においては回帰曲線を上回る結果を示した。この理由としてコンクリート温度 70°C 近くにおいて水和活性度の高まりが生じるとする報告<sup>2)</sup>があり、シリカフェームの反応の差異が生じたことが考えられる。本研究においては、コンクリートの最高温度を 60°C としたが、実測値では 55.1°C から 62.5°C であったことから、50°C～60°C にシリカフェームの反応を活性化させる閾値があると推察される。このことから、シリカフェームを混入した超高強度コンクリートの圧縮強度発現を有効材齢で示す場合にはシリカフェームの活性化を考慮する必要がある。なお、配合「G20-R」においても同様の傾向が認められた。

#### 4. 5 第4章のまとめ

本章では、水結合材比 15%において、練上がり温度や温度上昇量が発生する自己収縮ひずみ量に及ぼす影響を実験的に検討するとともに、前章で述べた自己収縮ひずみの低減の効果に関して、温度依存性の観点から実験的に検討した。また、実験で得られた結果をもちいて実験式を求めた。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 超高強度コンクリートの温度履歴が与えられた場合においても膨張材、収縮低減剤および廃瓦粗骨材を混入することにより、超高強度コンクリートの領域においても自己収縮ひずみの低減効果が認められた。
- (2) 自己収縮ひずみの発生量は、練上がり温度やコンクリートの温度上昇量による異なり、コンクリートの温度依存性があることが認められた。
- (3) コンクリートを一定の温度で養生した配合「SFLC」と「EX-20-R」供試体の自己収縮ひずみは、練上がり温度が高くなるほど小さくなる傾向を示すことが認められた。本研究においては、練上がり温度 10℃における配合「SFLC」の自己収縮ひずみは、練上がり温度 20℃の自己収縮ひずみの 2 倍以上であった。
- (4) 配合「SFLC」と「EX-20-R」供試体に関しては、初期の水和に起因する温度上昇による自己収縮ひずみの増加は、練上がり温度が高くなるほど大きくなり、その傾向は配合「EX20-R」に顕著に認められた。
- (5) 配合「G20-R」の自己収縮ひずみの温度依存性は、配合「SFLC」と比較して小さくなる傾向が認められた。この理由として、コンクリートの温度上昇によるコンクリートの湿度低下から廃瓦粗骨材の内部養生効果が高まったことが考えられるが、さらにデータの蓄積が必要と考える。
- (6) コンクリートの養生を 20℃および 30℃一定とした供試体の自己収縮ひずみの発現は若材齢時の 10℃一定の自己収縮ひずみの発現と同じであるが、コンクリートの養生温度が高いほど、早い段階で自己収縮ひずみにおいて経時変化に伴う変動量が小さくなる領域に移行する傾向が認められた。
- (7) 配合「SFLC」と「EX-20-R」供試体のコンクリート温度依存性を考慮した実験式は、最初にコンクリートを一定の温度で養生した場合を求め、次にコンクリートの温度上昇量による影響を考慮することにより求めた。前述の理由から、コンクリートを一定の温度で養生した供試体の自己収縮ひずみの発現は有効材齢 1 日以前の自己収縮ひずみ発現の変曲点となる有効材齢の以前と以後で実験式を変えることにより精度を向上させることができた。
- (8) 圧縮強度の温度依存性に関しては、コンクリートの高温領域において圧縮強度が大きくなる傾向が認められた。

自己収縮ひずみ量は、練上がり温度とコンクリートの最高温度に影響することから、これらを考慮したひび割れリスクの評価が必要である。特に冬期施工に関して自己収縮ひずみ量が大きいことや強度発現が遅いことから留意する必要があると考える。

#### 第4章 参考文献

- 1) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針（案）・同解説，pp.228-229，2005
- 2) 菅俣匠，杉山知己，梅沢健一，岡沢智：セメント-シリカフェーム系結合材の水和反応と強度発現性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1287-1292，2004
- 3) 盛岡実，萩原宏俊，坂井悦郎，大門正機：膨張材を混和したセメント硬化体の微細構造，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp.169-174，1998
- 4) 川口徹：コンクリートの線膨張係数に関する既往の研究成果について，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集，pp15-18，1982
- 5) Ole Mejlhede Jensen, Per Freiesleben Hansen : Influence of temperature on autogenous deformation and relative humidity change in hardening cement paste, Cement and Concrete Research 29, pp567-575, 1999
- 6) 寺本篤史，山崎康太，丸山一平，鈴木雅博：超高強度コンクリートの自己収縮の温度依存性，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.489-494，2008

## 第5章 低収縮超高強度コンクリートの拘束応力の検討

### 5.1 はじめに

部材に発生する応力度は自己収縮ひずみの大きさだけでは判断できず、ヤング係数やクリープ特性などにより影響される。これまでは、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの低減化について述べてきた。

本章では、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの発現が若材齢時に生じるため、若材齢時のクリープ特性を実験的に把握し、クリープ実験式を求め、次に基準コンクリートと膨張材と収縮低減剤および瓦粗骨材を用いて自己収縮ひずみを低減したコンクリート(以下、低収縮超高強度コンクリート)の拘束応力試験結果による拘束応力の低減効果の検討を行い、実験で求めたクリープ特性を取り入れた step by step 法<sup>1)</sup>による解析結果を比較検討する。なお、解析結果の比較検討はコンクリート温度が一定の条件で実施した。

### 5.2 超高強度コンクリートのクリープ特性

ここでは、超高強度コンクリートの若材齢時のクリープ特性を把握することを目的にクリープ試験を実施する。なお、水結合材比 0.3 の膨張材と収縮低減剤を混入したコンクリートと無混入のコンクリートではほぼ等しいクリープ性状を示すとする報告<sup>1)</sup>から、本実験では基準コンクリートのみ実施することとし、水結合材比 0.15 における低収縮超高強度コンクリートについては解析結果と実験結果を比較し、基準コンクリートのクリープ特性の適用性を検討した。

#### 5.2.1 実験概要

##### (1) 使用材料と配合

表 5.2.1 と表 5.2.2 に使用材料と鉱物組成をそれぞれ示す。表 5.2.3 には配合表を示す。セメントには、低熱ポルトランドセメント(記号 L)を使用した。混和材には、シリカフェーム(記号 SF)を使用した。なお、セメント種類 L と混和材 SF を混合する配合では、L の重量の 10.6% を混和材 SF にあらかじめ置換したプレミックス材(記号 SF<sub>LC</sub>, 密度 3.08g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 6330cm<sup>2</sup>/g)を使用した。粗骨材のかさ容積を 0.53m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> と固定した。空気量は 2% とした。

表 5.2.1 使用材料

材料	種別	物理的性質	記号
セメント	低熱ポルトランドセメント	密度: 3.22 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3540 cm <sup>2</sup> /g	L
細骨材	大月産安山岩砕砂	表乾密度: 2.62 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 2.53 %, FM: 2.53	S
粗骨材	盛岡産輝緑岩碎石	表乾密度: 2.94 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.38 %, FM: 6.19 実積率: 59.9%, BS 破砕値: 7.86%	G
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	消泡剤	-	D
混和材	シリカフェーム	密度: 2.23 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 18.6 m <sup>2</sup> /g	SF

表 5.2.2 鉱物組成

	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
低熱ポルトランドセメント	30.2	49.2	4.0	9.2

表 5.2.3 配合表

配合	W/SFLC	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				練上がり 温度(°C)	SP/SFLC	D/SFLC
		W	SFLC	S	G			
SFLC	0.15	155	1033	451	940	20	0.027	0.00002

練混ぜは 400 リットル 2 軸強制ミキサを使用し、1 バッチの練量は 200 リットルとした。練混ぜは SFLC および細骨材の空練りを 15 秒行い、その後に水と混和剤を添加してモルタル練りを 210 秒行い、最後に粗骨材を投入してコンクリート練りを 90 秒とし、排出した。スランプフローの目標値は 650±100mm となるように混和剤量を調整した。

(2) 養生条件

クリープ試験体の養生条件は、全面を厚さ 0.05mm で覆い、温度 20°C、湿度 60%R.H.の室内にて静置した。

(3) クリープ試験方法

供試体は、同一断面のクリープ供試体と無載荷供試体を同時に作製した。超高強度コンクリートの自己収縮ひずみは若材齢時に発生し、そのひずみに起因して拘束応力が発生する。このため、材齢 1 日以下での若材齢時のクリープ特性の把握も必要となる。本試験では若材齢時においても載荷可能となる横置きのクリープ試験機を用いることとした。図 5.2.1 と写真 5.2.1 にクリープ試験状況を示す。本試験で用いたクリープ試験装置は、横置きでジャッキと接続されており、迅速に載荷できるため、若材齢時のクリープ係数を測定するのに適している。フレームを反力架台として 500kN ジャッキにて供試体に載荷し、荷重変動を±5% となるように静的コントローラに

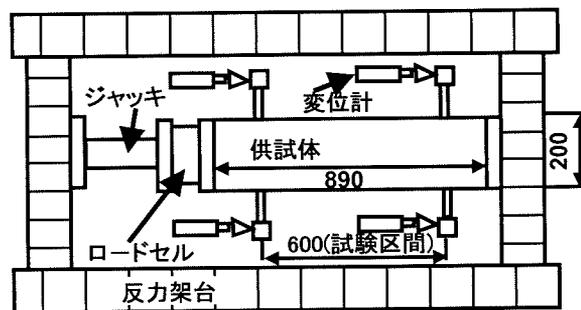


図 5.2.1 クリープ試験状況

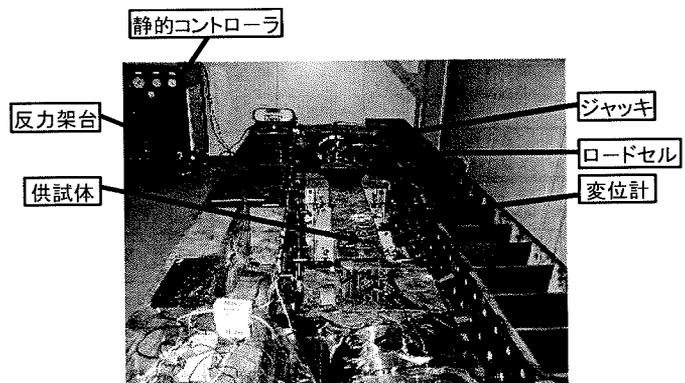


写真 5.2.1 クリープ試験状況

て調整した。供試体の寸法は 200×200×890mm とし、測定区間長を 600mm とした。載荷時有効材齢は 0.756, 0.917 日, 1.107 日および 9.865 日とした。

#### (4) 測定方法

クリープ供試体と無載荷供試体の自己収縮ひずみ量は等しいことから、「クリープひずみ+弾性ひずみ」の算出は、クリープ供試体のひずみから無載荷供試体のひずみを差し引くことにより行った。この試験の計測は試験区間 600mm の変位を精度 1/500mm の変位計を用いて行った。

### 5. 2. 2 超高強度コンクリートの若材齢におけるクリープ特性

#### (1) フレッシュ性状

表 5.2.4 にコンクリートのフレッシュ性状を示す。

表 5.2.4 各載荷時有効材齢試験供試体のフレッシュ性状

載荷時有効材齢(日)	スランブフロー(cm)	空気量(%)	練上がり温度(°C)
0.756	68.0×74.5	2.0	22.0
0.917	67.0×65.0	—	12.2
1.107	59.0×57.0	1.7	7.2
9.865	61.0×60.0	2.1	11.0

#### (2) クリープ関数

本研究におけるクリープ特性は、 $E_c(t_j)/E_{c,28}$  (コンクリートの載荷有効材齢/コンクリートの有効材齢 28 日) により算出する修正 MC90 法<sup>1)</sup>を用いて評価することとした。クリープ関数を式 (5.2.1) に示す。

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \left( \frac{(t - t_0)/t_0}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right)^{0.3}$$

(5.2.1)

ここで、 $\phi(t, t_0)$  はクリープ係数、 $\phi_0$  はクリープ係数の終局値、 $\beta_H$  はクリープ進行速度を表す係数、 $t$  は有効材齢(日)、 $t_1$  は 1 日、 $t_0$  は載荷時有効材齢(日)をそれぞれ示す。

このことから、以下ではヤング係数特性を示し、次にクリープ特性を示すこととする。

#### (3) 圧縮強度およびヤング係数特性

配合「SFLC」のヤング係数の経時変化を図 5.2.2 に示す。表 5.2.4 に載荷時有効材齢を示す。また、同表には、載荷時のヤング係数と有効材齢 28 日のヤング係数比、載荷時圧縮強度試験および載荷応力と載荷時圧縮強度の比をあわせて示す。

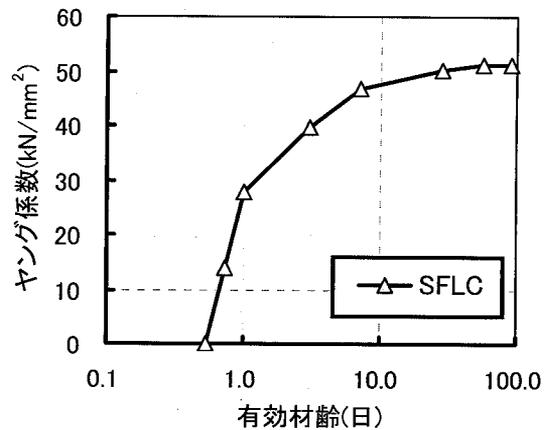


図 5.2.2 ヤング係数発現

表 5.2.4 荷重時圧縮強度とヤング係数比

荷重時有効材齢 (日)	荷重時圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	$E_c(t_0)/E_{c,28}$	荷重時圧縮強度との比
0.756	12.7	0.263	0.333
0.917	26.2	0.419	0.333
1.107	49.8	0.576	0.226
9.865	114	0.900	0.099

\*  $E_c(t_0)$ : 荷重時有効材齢のヤング係数,  
 $E_{c,28}$ : 有効材齢 28 日のヤング係数を示す

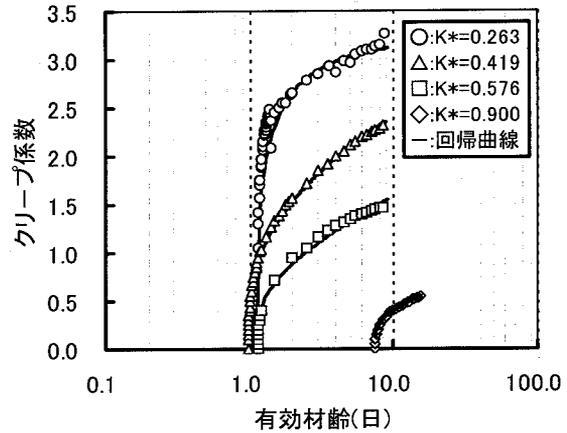
(4) クリープ試験結果

図 5.2.3 に各  $E_c(t_j)/E_{c,28}$  のクリープ係数の経時変化を示す。同図には式(5.2.1)を用いて最小 2 乗法により回帰した結果を実線であわせて示す。この回帰結果により、各  $E_c(t_j)/E_{c,28}$  の  $\phi_0$  と  $\beta_H$  を求めた。

図 5.2.4 に  $E_c(t_j)/E_{c,28}$  と  $\phi_0$  および  $\beta_H$  の関係を示す。この結果から、式(5.2.2)と(5.2.3)に示すクリープ関数を最小 2 乗法により求めた。同図には、あわせて回帰した結果と水結合材比 0.3 のクリープ関数<sup>1)</sup>を示す。

$$\phi_0 = 0.15 + 5.2 \exp(-2.0(E_c(t_0)/E_{c,28})) \quad (5.2.2)$$

$$\begin{cases} 0 < E_c(t_0)/E_{c,28} < 0.270 \\ \beta_H = 0.000001 \\ 0.270 < E_c(t_0)/E_{c,28} \\ \beta_H = 49.4(E_c(t_0)/E_{c,28}) - 13.2 \end{cases} \quad (5.2.3)$$



\*  $K = E_c(t_0)/E_{c,28}$   
 図 5.2.3 クリープ係数の経時変化

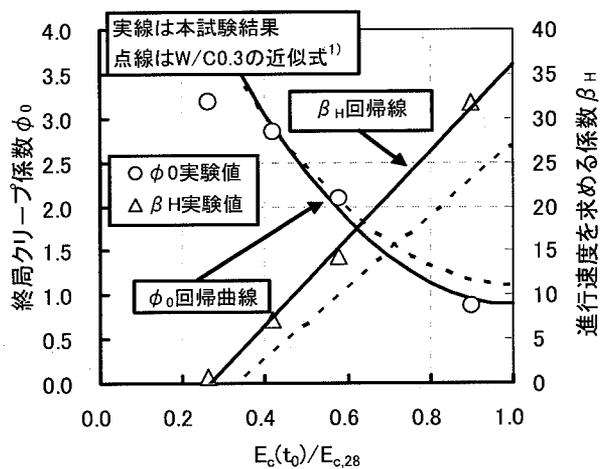


図 5.2.4 ヤング係数と  $\phi_0$  および  $\beta_H$  の関係

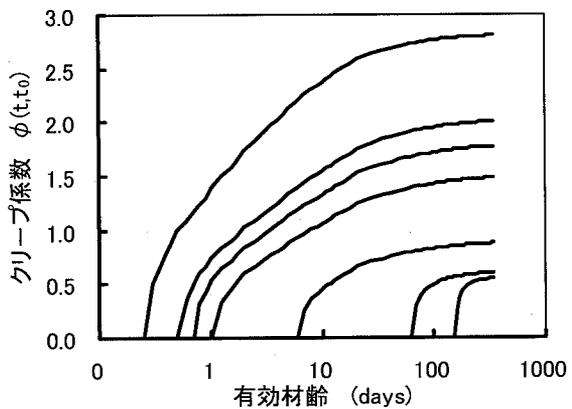


図 5.2.5 クリープ係数経時変化

以上から、超高強度コンクリートの若材齢時のクリープ関数を得た。文献<sup>1)</sup>との比較において、超高強度コンクリートの $\phi_0$ ではほぼ等しくなったが、 $\beta_H$ においては同じ

$E_c(t_j)/E_{c,28}$ に対して大きくなる結果となった。この結果は、若材齢時のシリカフェーム混入コンクリートでは、未水和セメント粒子周囲に形成される空隙のために変形拘束が低下し、クリープ変形が大きくなるとする報告<sup>2)</sup>と合致しない結果となった。この点については、さらに検討が必要と考える。

図 5.2.2 のヤング係数を用いて式(5.2.1)~(5.2.3)を用いて算出したクリープ係数の算出した結果を図 5.2.5 に示す。なお、拘束試験におけるクリープ係数は、供試体作製時に採取したテストピースのヤング係数を用いて求めた。

### 5.3 低収縮超高強度コンクリートの拘束応力

本節では、膨張材、収縮低減剤および廃瓦粗骨材を用いたコンクリートの拘束応力の低減効果を検討する。また、あわせてコンクリートの温度履歴や乾燥収縮ひずみの影響についてもあわせて検討する。

#### 5.3.1 実験概要

拘束応力の供試体は3章および4章の自己収縮ひずみの試験と併せて採取した。検討した配合の水結合材比は0.15である。表 5.3.1 に拘束応力供試体の一覧を示す。コンクリー

表 5.3.1 拘束応力供試体一覧

試験 シリーズ	供試体名	供試体寸法 (mm)- 鉄筋比(%)	鉄筋比(%)			備考 (配合)
			封緘	7日乾 燥開始	28日乾 燥開始	
コンクリ ート温度 一定	SFLC20°C一定	100x100x1200	1.63	1.67	1.62	表 3.4.1
	SFLC20°C一定-D13 SFLC20°C一定-D16 SFLC20°C一定-D22	125x125x1200	0.637 1.04 2.08	—	—	表 3.4.1
	EX20-R20°C一定	100x100x1200	1.67	1.62	1.67	表 3.4.1
	G40-20°C一定	100x100x1200	1.64	1.60	1.64	表 3.5.3
	G20-20°C一定	100x100x1200	1.65	1.69	1.66	表 3.5.3
	G20-R20°C一定	100x100x1200	1.69	—	—	表 3.7.1
	G20-EX10-R20°C一定	100x100x1200	1.68	1.69	1.65	表 3.7.1
	SFLC30°C一定	100x100x1200	1.64	—	—	表 4.2.3
	EX20-R30°C一定	100x100x1200-	1.64	—	—	表 4.2.3
コンクリ ート温度 履歴	SFLC10→40°C	125x125x1200	2.05	—	—	表 4.2.3
	SFLC20→60°C	125x125x1200	2.10	—	—	表 4.2.3
	SFLC30→70°C	125x125x1200	2.10	—	—	表 4.2.3
	G20-R20→60°C	100x100x1200	1.69	—	—	表 3.7.1

ト温度一定シリーズの供試体「SFLC20℃一定-D13」, 「SFLC20℃一定-D16」および「SFLC20℃一定-D22」コンクリートは寸法を 125 × 125 × 1200mm とし, SD295A-D10(鉄筋比 0.6%), SD295A-D16(鉄筋比 1%)および SD345-D22(鉄筋比 2%)を供試体中央に埋設した。温度履歴シリーズの供試体「SFLC10→40℃」, 「SFLC20→60℃-1」および「SFLC30→70℃」は寸法を 125

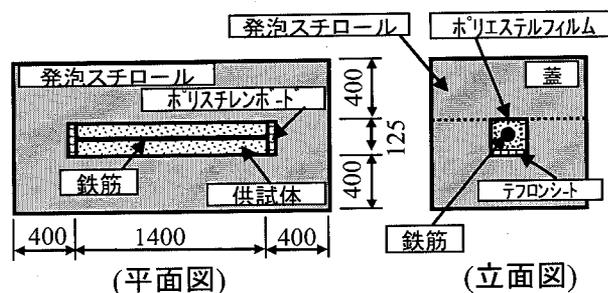


図 5.3.1 簡易断熱した拘束応力供試体

×125×1200mm とし, SD345-D22(鉄筋比約 2%)を供試体中央に埋設した。その他の供試体は寸法を 100×100×1200mm とし, SD295A-D16(鉄筋比約 1.7%)を供試体中央に埋設した。図 5.3.1 に簡易断熱養生した拘束応力供試体の実験状況を示す。

拘束応力で使用した鉄筋は, あらかじめ「荷重-ひずみ」の関係を試験により求め, 拘束応力の算出に反映した。また, 鉄筋の温度ひずみは, コンクリートとの付着を切った鉄筋に添付したダミーゲージを用いて差し引いた。

### 5.3.2 コンクリート温度一定条件における拘束応力低減効果

#### (1) 解析

解析は増分型 step by step 法を用いた。解析に用いた自己収縮ひずみは, 第 3 章および第 4 章で示した実験値とした。コンクリートの線膨張係数は第 4 章で示した有効材齢と線膨張係数の関係を用いた。また, クリープ関数は前節の結果を用いた。コンクリートの圧縮強度発現およびヤング係数は, 第 3 章および第 4 章で示した実験結果を式(5.3.1)および(5.3.2)で回帰した。表 5.3.2 に最小 2 乗法を用いて回帰して得た各係数を示す。

表 5.3.2 圧縮強度発現・ヤング係数の回帰結果

供試体名	圧縮強度発現			ヤング係数		備考 (圧縮強度, ヤング係数の結果)
	a	b	c	d	e	
SFLC20℃一定	148.9	0.193	0.6	5.4933	0.4544	図 3.9.1, 図 3.9.5
EX20R20℃一定	137.3	0.216	0.6	5.4933	0.4544	図 3.9.1, 図 3.9.5
G40-20℃一定	153.9	0.259	0.6	3.4515	0.5305	図 3.9.2, 図 3.9.6
G20-20℃一定	153.6	0.233	0.6	4.4169	0.4827	図 3.9.3, 図 3.9.7
G20-R20℃一定	139.6	0.298	0.6	4.4169	0.4827	図 3.9.3, 図 3.9.7
G20-EX10-R20℃一定	141.4	0.247	0.6	4.4169	0.4827	図 3.9.3, 図 3.9.7
SFLC30℃一定	150.8	0.280	1.0	5.4933	0.4544	図 4.4.1, 図 3.9.5
EX20R30℃一定	140.4	0.351	1.0	5.4933	0.4544	図 4.4.2, 図 3.9.5

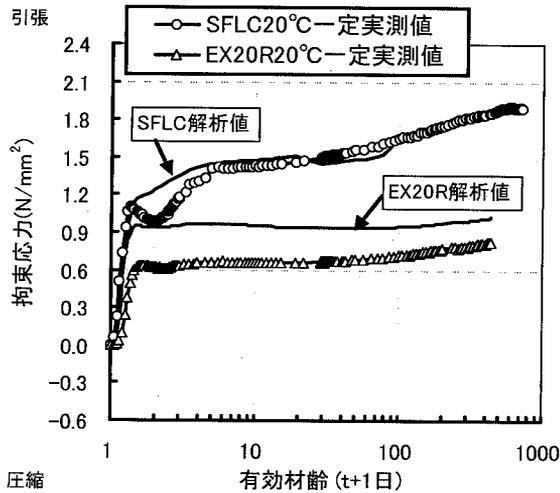


図 5.3.2 膨張材と収縮低減剤による拘束応力低減効果

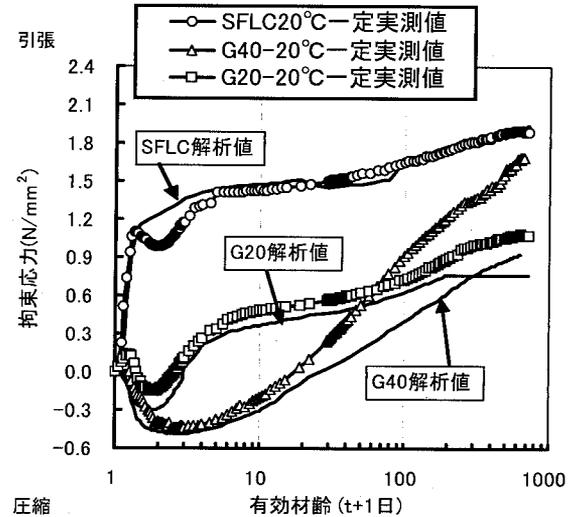


図 5.3.3 廃瓦粗骨材による拘束応力低減効果

$$f_c(t) = a \cdot \exp\left[b\left|1 - \left\{28/(t - c)\right\}^{0.5}\right|\right] \quad (5.3.1)$$

$$E_c(t) = d \cdot f_c(t)^e \quad (5.3.2)$$

ここで、 $f_c(t)$ は有効材齢 $t$ 日における圧縮強度、 $c$ は各練上がり温度による拘束応力が開始する有効材齢(練上がり温度 $10^{\circ}\text{C}$ のとき $0.4$ 日、練上がり温度 $20^{\circ}\text{C}$ のとき $0.6$ 日、練上がり温度 $30^{\circ}\text{C}$ のとき $1.0$ 日)(第4章図4.2.5、図4.2.6参照)、 $E_c(t)$ は圧縮強度 $f_c(t)$ におけるヤング係数、 $a, b, d, e$ は回帰により定まる係数

## (2) 封緘養生条件における拘束応力結果および解析結果

図 5.3.2 と図 5.3.3 に供試体「SFLC $20^{\circ}\text{C}$ 一定」、「EX20R $20^{\circ}\text{C}$ 一定」、「G40- $20^{\circ}\text{C}$ 一定」および「G20- $20^{\circ}\text{C}$ 一定」の拘束応力実験値と解析結果を示す。拘束応力の実験値は、膨張材と収縮低減剤を入れた配合および廃瓦粗骨材を混入した配合において拘束応力の低減効果が認められた。供試体「EX20R $20^{\circ}\text{C}$ 一定」は有効材齢初期に約  $0.6\text{N/mm}^2$  の拘束応力が発生し、経時的に拘束力の増加がほとんど認められなかったが、供試体「G20- $20^{\circ}\text{C}$ 一定」と供試体「G40- $20^{\circ}\text{C}$ 一定」は有効材齢1日まで圧縮応力が発生するが、材齢1日以降において拘束応力が引張側に転じ、かつ、経時変化にも変動した。特に供試体「G40-20」の引張応力への変動が大きくなった。第3章で記述したように供試体「G20- $20^{\circ}\text{C}$ 一定」の自己収縮ひずみの有効材齢450日の発生量は、供試体「SFLC $20^{\circ}\text{C}$ 一定」と比較して小さいが、供試体「G20一定」の有効材齢約300日の拘束応力は供試体「EX20-R $20^{\circ}\text{C}$ 一定」とほぼ等しくなる結果を示した。この理由として、供試体「EX20-R $20^{\circ}\text{C}$ 一定」自己収縮ひずみは、供試体「G20- $20^{\circ}\text{C}$ 一定」と比較して収縮側に転じる材齢が早いいため、ヤング係数が小さく、かつ、クリープ変形による応力緩和により拘束応力が小さくなったことが考えられる。これ

らのことから、廃瓦粗骨材を用いたコンクリートの拘束応力を低減するためには、経時変化にともなう自己収縮ひずみの発生量を低減させる必要があると考える。

供試体「SFLC20°C一定」の解析値は、ほぼ実験値と一致し、クリープ特性を解析により表示することができた。供試体「EX20-R20°C一定」の解析値は実験値と比較して大きくなり、膨張材と収縮低減剤を混入した供試体の解析を無混入とした供試体におけるクリープ関数を用いて解析した結果は実測値とほぼ一致した報告<sup>1)</sup>とは異なる結果となった。この理由として、膨張材を混入したことから組織に空隙が生じ、結果として無混入のコンクリートより剛性が低下したため、クリープによる応力緩和が大きくなったこと

が考えられる。膨張材と収縮低減剤を混入したクリープ特性に関してはクリープ試験を実施し、拘束試験結果と比較する必要がある、これについては今後の課題とする。

クリープ係数の大きさは、コンクリートに使用する骨材により異なることが知られており、例えば土木学会示方書では軽量骨材を用いたコンクリートのクリープ係数は、天然骨材をコンクリートと比較して約25%小さい値が示されている<sup>3)</sup>。廃瓦粗骨材を用いたコンクリートの解析を精度よく実施するためには廃瓦粗骨材を用いたコンクリートのクリープ試験を実施する必要がある。ここでは、廃瓦粗骨材を用いたコンクリートと天然骨材を用いたコンクリートとのクリープ特性の差を把握する目的で解析を実施した。供試体「G40-20°C一定」の供試体は、材齢初期において実測値と解析値とがほぼ一致する結果となったが有効材齢20日以降においては差が生じる結果となった。供試体「G20-20°C一定」の供試体に関しては、解析値は実験値より若干小さくなる結果となった。このことから、精度よく解析するためには今後クリープ試験によらなければならないが、本研究範囲内では粗骨材容積の20%であればクリープ特性は配合「SFLC」に近いことが考えられる。

図5.3.4に配合「SFLC」の異なる鉄筋比による拘束応力の実測値と解析値との比較を示す。供試体「SFLC20°C一定-D13」は実測値と解析値とが一致しており、クリープ関数が適正であったことが考えられる。しかし、供試体「SFLC20°C一定-D16」および供試体「SFLC20°C一定-D22」においては、解析結果は実測値と比較して大きく評価する結果となった。この理由として、鉄筋比が大きい場合に鉄筋周囲に微細なひび割れが発生することが報告<sup>4,5)</sup>されており、このため、クリープ線形則の適用の範囲を超えたことなどが考えられる。

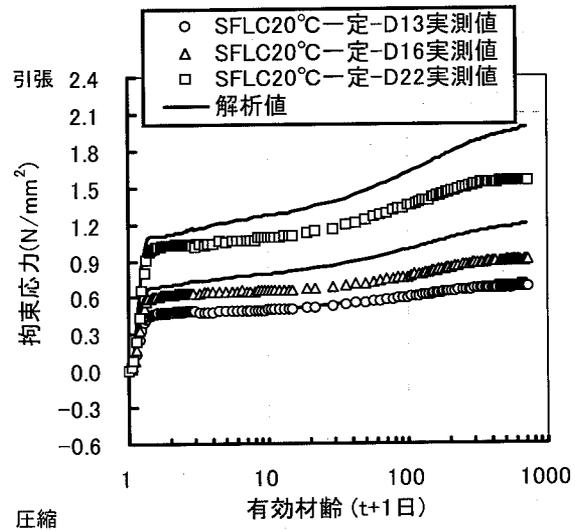


図 5.3.4 配合「SFLC」の異なる鉄筋比による拘束応力の実測値と解析値との比較

(3) 廃瓦粗骨材を超高強度コンクリートの膨張材ないし収縮低減剤を混入することによる拘束応力低減効果

図 5.3.5 に供試体「SFLC20°C一定」, 「G20R20°C一定」, 「G20EX10R20°C一定」および「EX20R20°C一定」の拘束応力の経時変化を示す。供試体「EX20R20°C一定」の拘束応力は、有効材齢約 150 日において  $0.11\text{N/mm}^2$  の引張応力となり、拘束応力を大幅に低減する結果を示した。配合「G20」に収縮低減剤のみを混入した供試体「G20R20°C一定」の拘束応力は、「G20」と比較して小さくなったが、経時変化にともなう拘束応力の増加量の抑制効果は小さくなった。また、供試体「G20R20°C一定」の有効材齢 10 日からの拘束応力の増分量は「G20」とほぼ等しいことから、収縮低減剤の拘束応力の低減効果は材齢初期であると考えられ、供試体に圧縮応力が発生したあとに引張応力側に転じる際にその発生する引張応力度を小さくする役割をしていることが考えられる。また、長期的な拘束応力の抑制は膨張材によるものと考えられる。これらのことから、膨張材と収縮低減剤を混入することにより、両者による複合効果によりさらに拘束応力を低減したことが認められた。この傾向は、自己収縮ひずみの抑制効果と同様となった。

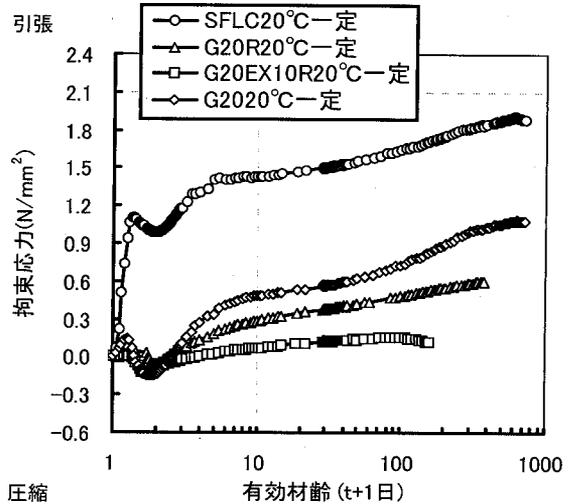
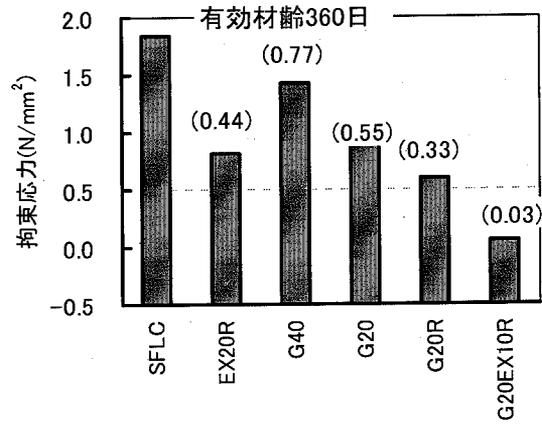
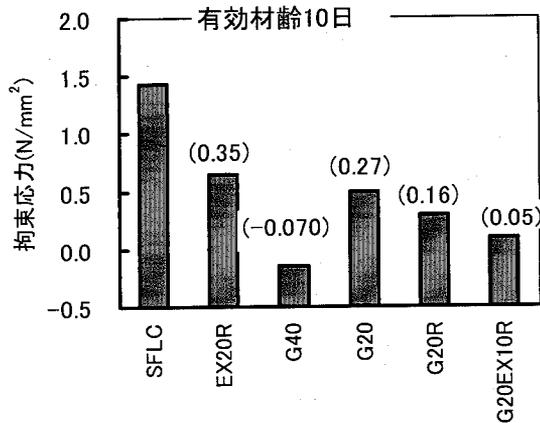


図 5.3.5 配合「G20」に収縮低減剤ないし膨張材および収縮低減剤を混入することによる拘束応力低減効果

#### (4) 各種自己応力低減方法の相対比較

図 5.3.6 および図 5.3.7 に練上がり温度 20°C, コンクリート温度 20°C とした鉄筋比約 1.7% の有効材齢 10 日および 360 日の拘束応力をそれぞれ示す。供試体「G40-20°C一定」及び「G20-20°C一定」の拘束応力は、有効材齢 10 日においては供試体「EX20R20°C一定」より小さくなり、有効材齢 360 日においては大きくなり、廃瓦粗骨材のみの拘束応力低減においては、初期材齢においては効果があるものの長期的には拘束応力の低減効果が小さくなる傾向を示した。一方、供試体「G20-20°C一定」にさらに収縮低減剤ないし、膨張材と収縮低減剤を混入することにより、供試体「EX20R20°C」小さくなる結果を得た。これらから膨張材と収縮低減剤を用いた自己応力の低減効果は、後膨張の課題があることから、拘束応力の低減はとして限界があると考えられるが、廃瓦粗骨材と膨張材および収縮低減剤を併用することにより、さらに拘束応力の低減効果が発揮できることが明らかとなった。

図 5.3.8 および図 5.3.9 に供試体「SFLC」の拘束応力から各供試体の拘束応力を差し引いた値を拘束応力の低減効果の経時変化を示す。供試体「G40-20°C一定」の自己応力の低減効果は初期材齢において有効であると考えられるが、長期的には低減効果が小さくなる傾向にあること、膨張材と収縮低減剤を混入することにより、廃瓦粗骨材の内部養生による初期の拘束応力低減効果を長期的に維持する効果があるが認められた。また、廃瓦粗骨材の拘束応力の低減効果は、有効材齢 9 日に着眼した場合に、収縮低減剤をのみを混入し

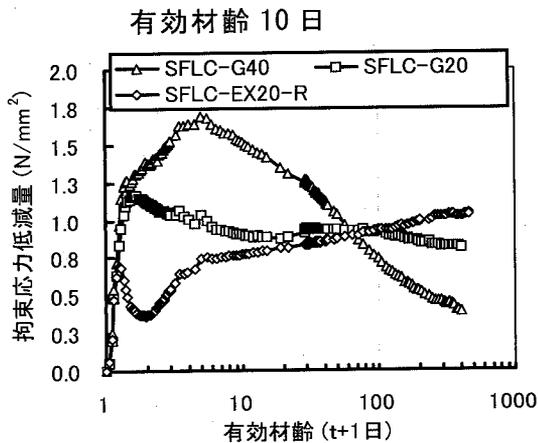


注 1: ( ) の数値は各配合の拘束応力/SFLC の拘束応力を示す

注 2: 供試体名の表記は 20°C一定を省略

図 5.3.6 コンクリート温度 20°C一定  
とした拘束応力比較

図 5.3.7 コンクリート温度 20°C一定  
とした拘束応力比較



注: 凡例は例えば SFLC-G40 は SFLC の拘束から G40 を差し引いたこと示す

図 5.3.8 拘束応力の低減効果-1  
(供試体 G40, G20, EX20R)

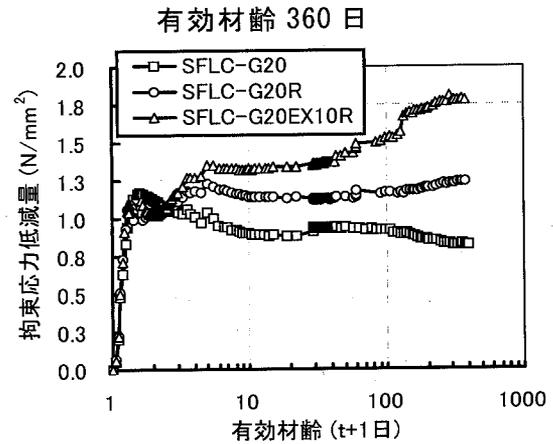


図 5.3.9 拘束応力の低減効果-2  
(供試体 G20, G20R, G20EX10R)

た場合にはその低減効果を概ね維持している。これは第 3 章の収縮ひずみで述べたことと同様に収縮低減剤のみでは廃瓦粗骨材の内部養生方法による効果は短期で発揮し、有効材齢 9 日以降においては供試体「SFLC20°C一定」の拘束応力の変動量が生していることも意味する。一方、さらに膨張材を混入した場合には拘束応力の低減効果が漸増しており、有効材齢 9 日以降においても自己応力を抑制していることを意味する。これらのことから、短期・長期に自己応力を低減させるためには、内部養生方法の効果と膨張材および収縮低減剤を混入することが最も効果があると考えられる。

(5) コンクリートの温度を 30℃一定と 20℃一定とした場合の拘束応力低減効果の比較

図 5.3.10 に配合「SFLC」および「EX20-R」のコンクリート温度 20℃一定とした場合と 30℃一定とした場合の拘束応力実測値を示す。また、同図には供試体「SFLC20℃一定」と供試体「SFLC30℃一定」の解析値を示す。いずれのコンクリート温度においても膨張材と収縮低減剤を混入することにより拘束応力の低減効果が認められた。供試体「SFLC20℃一定」の拘束応力は有効材齢 100 日において  $1.7\text{N/mm}^2$  に対して、供試体「SFLC30℃一定」では  $1.2\text{N/mm}^2$  となり、発生する拘束応力にコンクリート温度の依存性が認められた。供試体

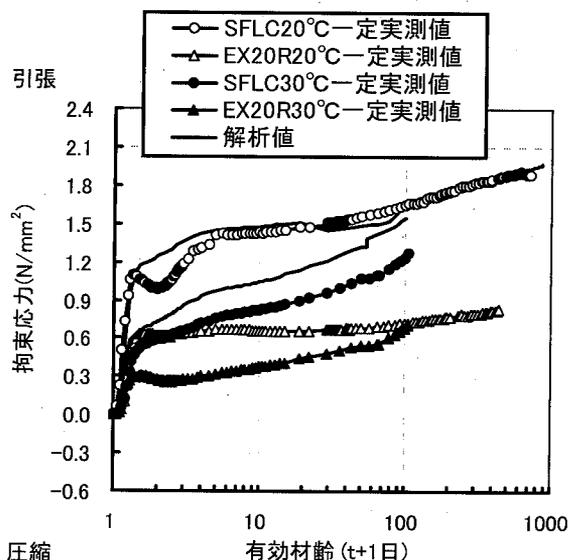


図 5.3.10 配合「SFLC」と「EX20-R」のコンクリート温度 20℃一定と 30℃一定とした場合の拘束応力比較

「EX20R20℃一定」の拘束応力は経時変化に伴う増分量がほとんど認められなかったが、「EX20R30℃一定」の拘束応力は経時変化に伴う増分量が認められた。また、配合「EX20R」と「SFLC」のコンクリート温度 20℃と 30℃の拘束応力の差(各コンクリート温度における低減効果)は、コンクリート温度 20℃とした供試体の方が大きくなる傾向が認められ、膨張材と収縮低減剤による拘束応力の低減効果は、コンクリート温度による差が生じることが確認された。膨張材の作用機構が膨張材の水和生成物がセメント硬化体に空隙を形成しながら生成するとする報告<sup>6)</sup>があるが、この結果は、膨張材と SFLC の水和反応速度がコンクリート温度により異なるため、膨張材の水和生成物による空隙生成量に差が生じたため、コンクリート温度により拘束応力の低減効果が異なると推察される。以上のことから、膨張材と収縮低減剤による低減効果はコンクリート温度依存性を考慮する必要がある。

供試体「SFLC30℃一定」と「SFLC20℃一定」の実測値と解析値の比較において、供試体「SFLC30℃一定」に関しては解析値と実測値精度良く解析できない結果となった。コンクリートのクリープ特性に関して温度依存性が存在することが報告<sup>7)</sup>されており、本研究においても同様と考えられ、今後さらに検討を進める必要がある。

(6) 自己収縮ひずみと拘束応力供試体の鉄筋ひずみとの関係

図 5.3.11 に供試体「SFLC20℃一定」及び「EX20-R20℃一定」の自己収縮ひずみと鉄筋ひずみの関係を示す。図は材齢 365 日までとして示す。供試体「SFLC20℃一定」の有効材齢 1 日までの自己収縮ひずみ発現量  $-400 \times 10^{-6}$  に対する鉄筋ひずみの変動量は、 $-200 \times 10^{-6}$  であり、有効材齢 1 日から 365 日までの自己収縮ひずみ発現量  $-250 \times 10^{-6}$  に対する鉄筋ひずみの変動量は、 $-250 \times 10^{-6}$  となり、若材齢時における自己収縮ひずみに対する鉄筋ひずみの変動量が小さくなる結果を示した。この傾向は供試体「EX20-R」でも同様であった。これは、図 5.3.2 に示すように若材齢時のクリープによる応力緩和が大きいことやコンクリートのヤング係数が小さいことより自己収縮ひずみの拘束に対するコンクリートの応力増分が小さいためと考えられる。また、有効材齢 1 日以前の自己収縮ひずみと鉄筋ひずみに関して、供試体「SFLC20℃一定」と「EX20-R20℃一定」の自己収縮ひずみの変動量に対する鉄筋ひずみの増分量を比較した場合に供試体「EX20-R20℃一定」の方が小さくなる傾向を示した。このことから、若材齢時の供試体「EX20-R20℃一定」のクリープ係数は、「SFLC20℃一定」より小さいことが考えられる。また、配合「SFLC20℃一定」のクリープ係数を用いて実施した「EX20-R」の解析値が実験値と比較して大きくなったことは、自己収縮ひずみと鉄筋ひずみから得られたクリープ特性と傾向的に整合している。

図 5.3.12 に供試体「SFLC20℃一定」、「G40-20℃一定」および「G20-20℃一定」の自己収縮ひずみと鉄筋ひずみの関係を示す。

廃瓦粗骨材を混入した供試体「G40-20℃一定」および「G20-20℃一定」は有効材齢 1 日に

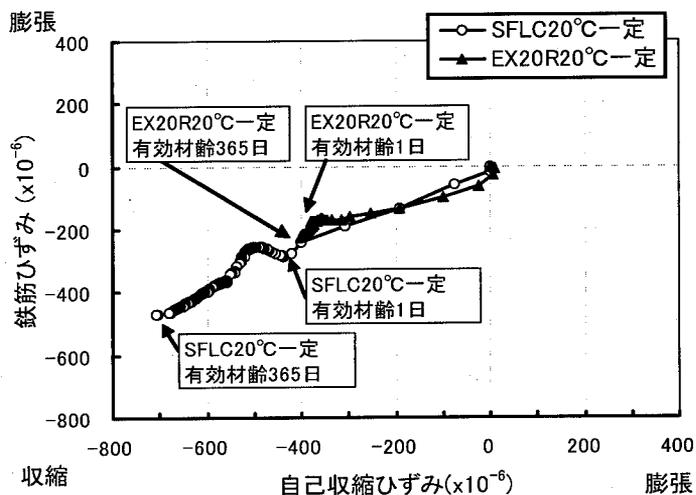


図 5.3.11 「SFLC20℃一定」と「EX20R20℃一定」の自己収縮ひずみと拘束応力供試体の鉄筋ひずみとの関係

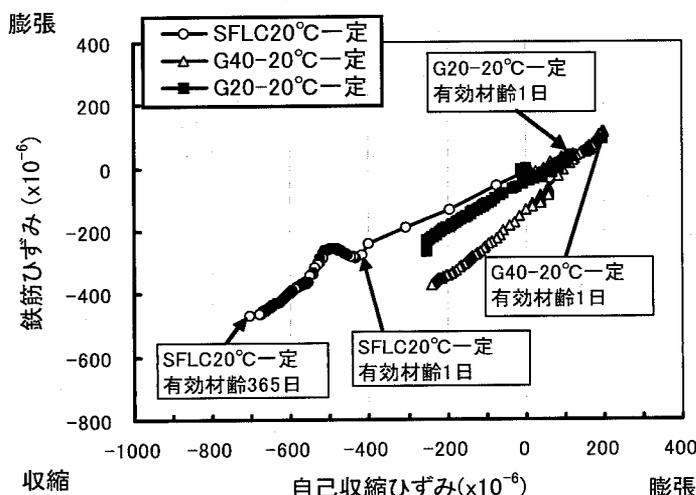


図 5.3.12 「SFLC20℃一定」、「G40-20℃一定」および「G20-20℃一定」の自己収縮ひずみと拘束応力供試体の鉄筋ひずみとの関係

において自己収縮ひずみと鉄筋ひずみは膨張側となり、その後収縮側に転じた。若材齢時であるため、クリープによる応力緩和により鉄筋に発生する膨張材ひずみは  $100 \times 10^{-6}$  であったが、供試体「SFLC20°C一定」に比べて大幅に初期に発生する引張ひずみを抑制する傾向が認められた。しかし、有効材齢1日以降に関してはクリープ係数が小さくなるため、鉄筋ひずみの収縮側への変動が大きくなり、その傾向は供試体「G40-20一定」で顕著に認められた。この理由として、第3章で示したように供試体「G40-20一定」の自己収縮ひずみは経時変化に伴う変動量が大いなのに対して、供試体「G40-20一定」の自己収縮ひずみは有効材齢10日までに変動が収まり、その材齢以降の変動が小さいため、ヤング係数が大きな領域で自己収縮ひずみを変動する供試体「G40-20一定」は、結果的に鉄筋ひずみが大きくなったと考えられる。

図 5.3.13 に供試体「SFLC20°C一定」、「G20-R20°C一定」および「G20-EX10R20°C一定」の自己収縮ひずみと鉄筋ひずみの関係を示す。瓦粗骨材を粗骨材全容積の20%とした配合は、有効材齢1日において鉄筋ひずみが概ね0となった。供試体「G20-R20°C一定」は膨張ひずみが発生し、収縮側に転じたときに鉄筋に収縮ひずみが発生したのに対して、さらに膨張材を添加した供試体「G20-EX10R20°C一定」においては、収縮側に転じた場合においても鉄筋ひずみは概ね0をとり、廃瓦粗骨材の配合に膨張材と収縮低減剤を混入することによりさらに鉄筋に発生する収縮ひずみを抑制する効果が認められた。

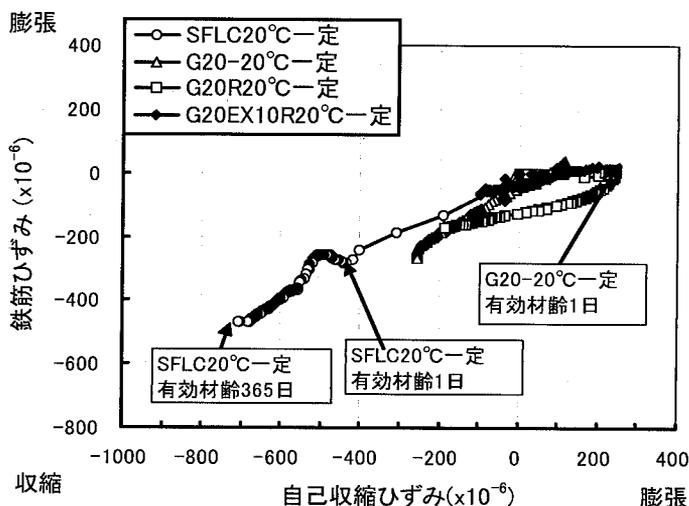


図 5.3.13 「G20-20°C一定」、「G20R20°C一定」および「G20EX10R20°C一定」の自己収縮ひずみと拘束応力供試体の鉄筋ひずみとの関係

(6) 乾燥条件が拘束応力に与える影響

図 3.5.14 から 16 に各配合の有効材齢 28 日で養生方法を封緘養生と気乾養生に変更した拘束応力の経時変化を示す。図 3.4.17 に材齢 28 日からの乾燥収縮ひずみによる拘束応力の経時変化を示す。ここでは、乾燥収縮ひずみによる拘束応力は、乾燥状態とした供試体の拘束応力から封緘養生した供試体の拘束応力を差し引いた値と仮定した。自己収縮ひずみにおいては、材齢 28 日まで封緘養生を行い、気乾養生とした供試体においては、廃瓦粗骨材を混入することにより乾燥収縮ひずみの低減効果が認められたが、拘束応力の差は

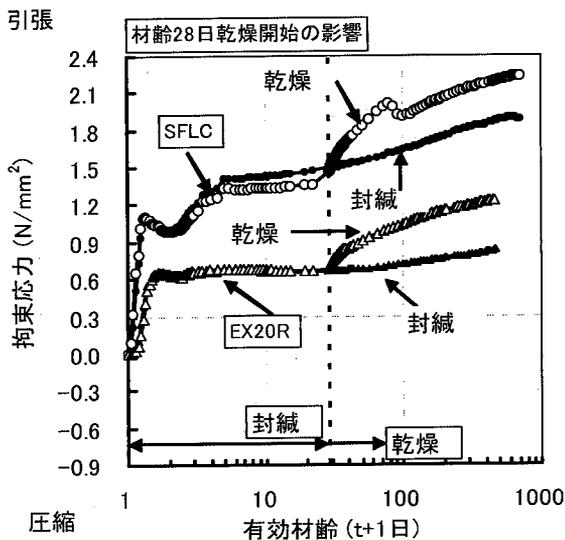


図 5.3.14 膨張材と収縮低減剤を混入した供試体の乾燥条件が拘束応力に与える影響(有効材齢 28 日乾燥)

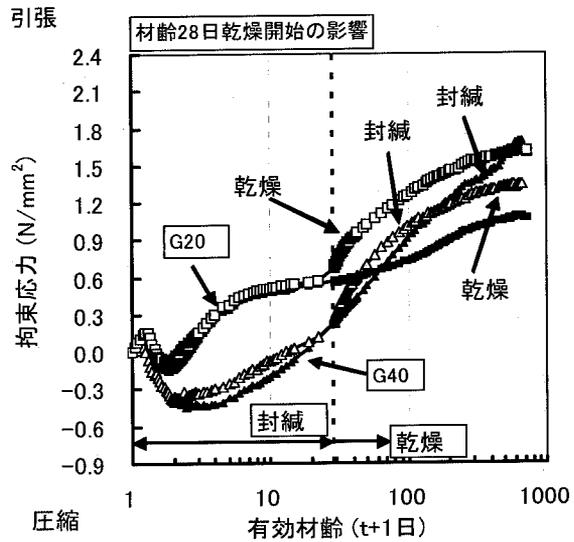


図 5.3.15 廃瓦粗骨材を混入した供試体の乾燥条件が拘束応力に与える影響(有効材齢 28 日乾燥)

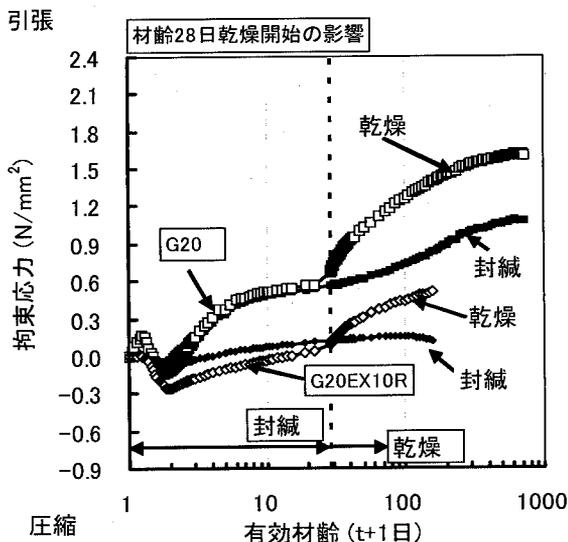


図 5.3.16 廃瓦粗骨材、膨張材、および収縮低減剤を混入した供試体の乾燥条件が拘束応力に与える影響(有効材齢 28 日乾燥)

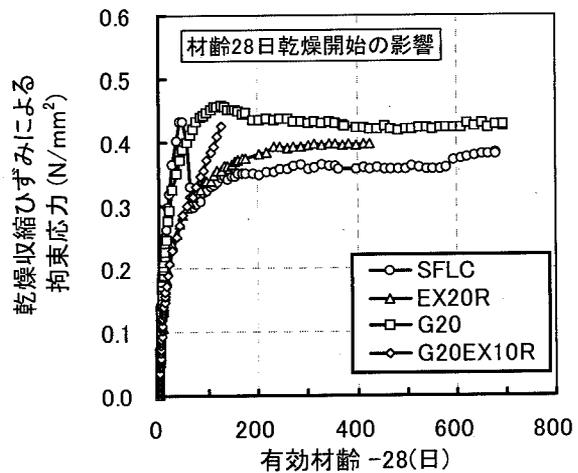


図 5.3.17 各供試体の乾燥収縮ひずみによる拘束応力(有効材齢 28 日乾燥)

ほとんど認められなかった。これは、図 5.3.14 に示す供試体「SFLC20℃一定」の有効材齢 28 日において乾燥した供試体の拘束応力が有効材齢 100 日においてなんらかの原因で低下したためである。また、供試体「EX20R20℃一定」の乾燥収縮ひずみによる拘束応力は、供試体「G20EX10R」とほぼ等しくなる結果となった。供試体「G40-20℃一定」の封緘養生した供試体の拘束応力は、供試体「G40-20℃一定」の気乾養生した拘束応力を上回る結果となった。このことに関しては、供試体「G40-20℃一定」乾燥収縮ひずみにおいてはこうした現象が生じていないこと、乾燥収縮ひずみによる拘束応力が増加することが一般的であると考えられる。このことから、再度試験を行い、再検証する必要があると考える。

図 3.5.18 から 20 に各配合の材齢 7 日まで湿布養生を行い、養生方法を封緘養生と気乾養生に変更した拘束応力の経時変化を示す。図 3.4.21 に材齢 7 日からの乾燥収縮ひずみによる拘束応力の経時変化を示す。供試体「G40-20℃一定」と「G20-20℃一定」気乾養生とした場合の比較から、廃瓦粗骨材を混入量が多いほど乾燥収縮ひずみによる拘束応力が大きくなることが認められた。この理由として、収縮ひずみと同様に初期材齢の水和反応に必要な反応水が外部からも供給されたため、水和反応によるコンクリートモルタル部の自己乾燥による湿度低減が小さくなり、廃瓦粗骨材からの水分移動がおこらず廃瓦粗骨材に内在する水が残ったと考えられる。

供試体「SFLC20℃一定」、「EX20R20℃一定」および「G20EX10R20℃一定」の乾燥収縮ひずみによる拘束応力に差がない結果を示した。この理由として初期材齢において膨張材の反応がほぼ終了し、有効材齢 7 日以降の膨張材の反応による抑制効果が小さくなったためと考えられる。

コンクリートを密実にするためには初期材齢における水中養生が効果的ではあるが、内部養生方法を用いた場合には骨材からの水分移動を抑制する可能性もある。この点に関しては、コンクリートの緻密性や収縮ひずみの低減効果を高める初期養生方法をさらに検討を重ねる必要があると考える。

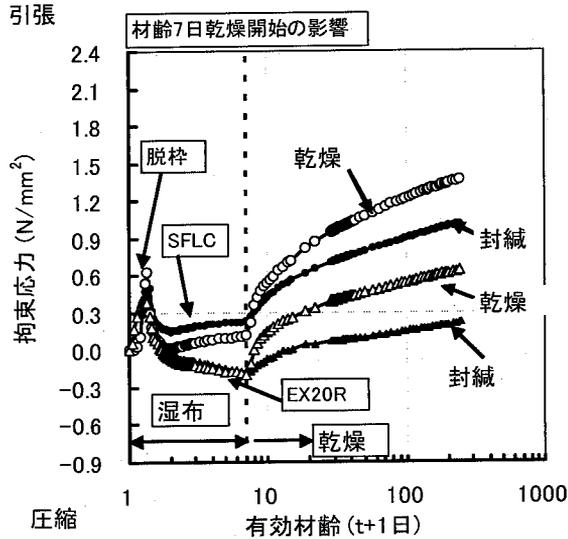


図 5.3.18 膨張材と収縮低減剤を混入した供試体の乾燥条件が拘束応力に与える影響(有効材齢 7 日乾燥)

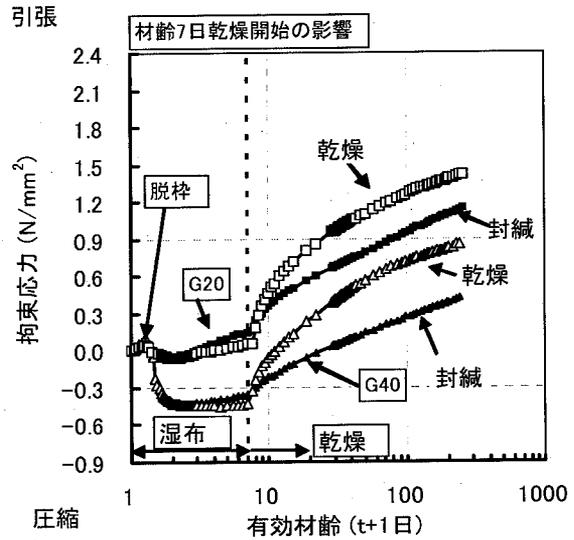


図 5.3.19 廃瓦粗骨材を混入した供試体の乾燥条件が拘束応力に与える影響(有効材齢 7 日乾燥)

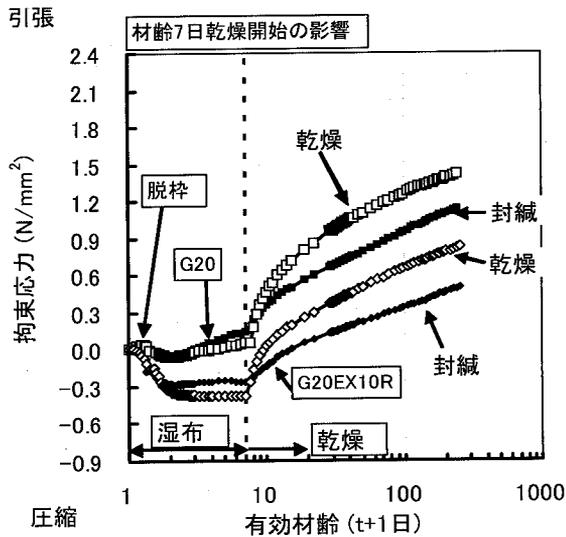


図 5.3.20 廃瓦粗骨材, 膨張材, および収縮低減剤を混入した供試体の乾燥条件が拘束応力に与える影響(有効材齢 7 日乾燥)

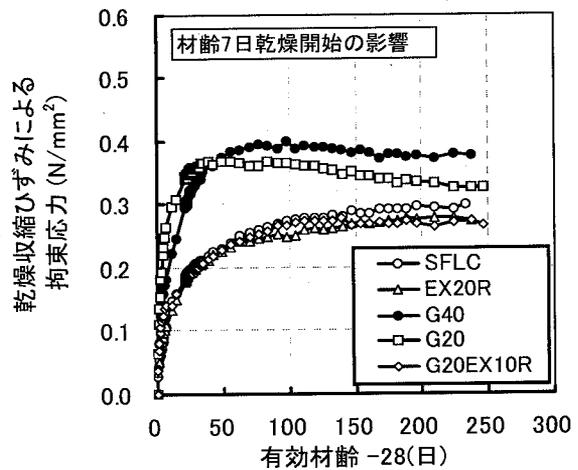


図 5.3.21 各供試体の乾燥収縮ひずみによる拘束応力(有効材齢 7 日乾燥)

### 5. 3. 3 コンクリートの温度履歴が拘束応力に与える影響

本節では、拘束応力の低減効果を実施しない場合に関して、練上がり温度 10℃、20℃および 30℃として 900×900×1100mm 部材のコンクリート温度履歴を与えた場合の自己応力発現を把握することを目的とした。また、あわせて、供試体「G20R→60℃」の拘束応力発現を示し、瓦粗骨材を混入した場合のコンクリートの温度履歴が拘束応力におよぼす影響を示す。

図 5. 3. 22 に供試体「SFLC10→40℃」、 「SFLC20→60℃」、 「SFLC30→70℃」および「SFLC20℃一定 D22」の拘束応力の経時変化を示す。なお、各供試体の温度履歴は第 4 章で示したコンクリートの温度履歴を与えた自己収縮供試体とほぼ合致している。有効材齢 10 日以前の拘束応力に着眼した場合に練上がり温度が高いほど拘束応力が小さくなり、このことは自己収縮ひずみとも合致している。また、練上がり温度 20℃において、コンクリートに温度履歴を与えることにより拘束応力が大きくなる傾向が認められた。コンクリートの割裂引張強度の発現が練上がり温度が低いほど遅くなることから、練上がり温度が低くなるほどひび割れリスクが高まることが考えられる。このことから、ひび割れリスクは季節ごとに評価する必要がある。

図 5. 3. 23 に供試体「G20R→60℃」および「G20R20℃一定」の拘束応力の経時変化を示す。コンクリートに温度履歴を与えることにより拘束応力は増加した。図 5. 3. 22 に示した拘束供試体の鉄筋比 2.1%に対して図 5. 3. 23 に示した拘束供試体の鉄筋比 1.7%と異なるため明確にはいえないが、供試体「SFLC」と比較して、「G20R10」の方がコンクリートの温度履歴による影響が小さくなる結果を示した。これは、廃瓦粗骨材の内部養生効果により温度履歴の拘束応力の増加を抑制したためと考えられる。廃瓦粗骨材を用いたコンクリートの温度履歴の影響は今後さらにデータを蓄積し、その特性を把握する必要がある。

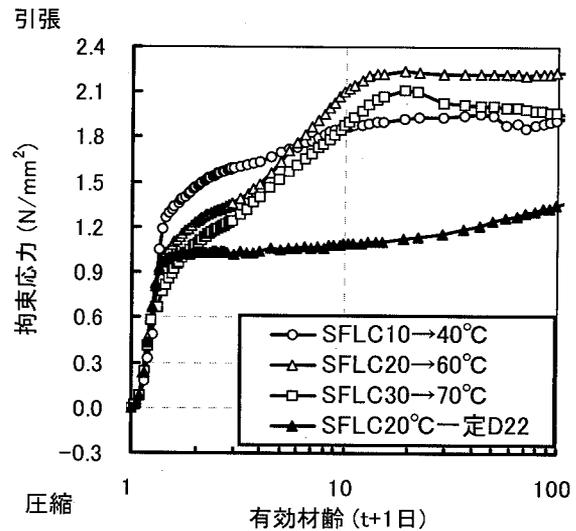


図 5. 3. 22 配合「SFLC」の実構造物を想定したコンクリート温度履歴が拘束応力に与える影響

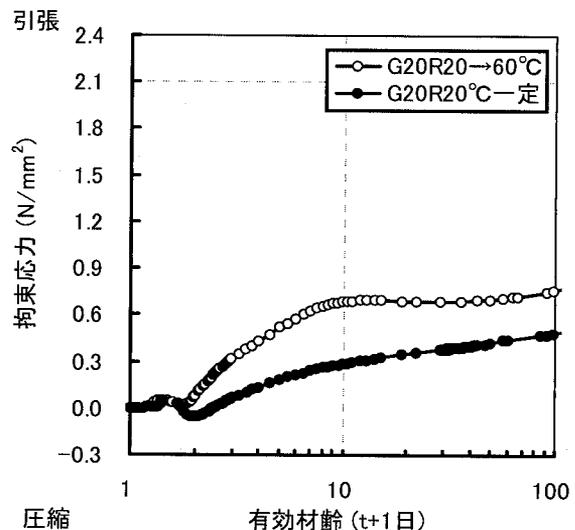


図 5. 3. 23 配合「G20R20」の実構造物を想定したコンクリート温度履歴が拘束応力に与える影響

#### 5. 4 第5章のまとめ

部材に発生する応力度は自己収縮ひずみの大きさだけでは判断できず、ヤング係数やクリープ特性などにより影響される。

本章では、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの発現が若材齢時に生じるため、若材齢時のクリープ特性を実験的に把握し、クリープ実験式を求め、次に基準コンクリートと膨張材と収縮低減剤および瓦粗骨材を用いて自己収縮ひずみを低減したコンクリート(以下、低収縮超高強度コンクリート)の拘束応力試験結果による拘束応力の低減効果の検討をした。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 横置きクリープ試験機を用いて、拘束応力を低減しない水結合材比 0.15 の超高強度コンクリートの若材齢時のクリープ特性を把握し、超高強度コンクリートのクリープ関数を新たに提案した。
- (2) このクリープ関数を用いた解析値と拘束応力を低減しない供試体の拘束応力はよく合致した。ただし、鉄筋比が大きくなるにつれて解析値は、実験値より大きくなる傾向を示した。これは鉄筋周囲の微細なひび割れなどによるクリープ以外の応力緩和などが推測される。
- (3) 膨張材と収縮低減剤を混入した場合の解析値は実験値より大きくなる結果を得た。膨張材と収縮低減剤を混入した超高強度コンクリートとは異なり、クリープ係数が大きくなる可能性がある。
- (4) 廃瓦粗骨材を混入した場合の解析値は、廃瓦粗骨材の混入量が多いほど実験値と乖離した。
- (5) 廃瓦粗骨材を全骨材容積の 20%および 40%とした内部養生法のみでの拘束応力の低減効果は有効材齢 9 日までは大きいですが、9 日以降の低減効果は小さくなる傾向を示した。これは、内部養生方法のみの場合には 9 日以降の自己収縮ひずみの発現量が多くなること、ヤング係数が大きくなること、およびクリープ係数が小さくなることによるものと考えられる。このことは、自己収縮ひずみと鉄筋ひずみとの関係から、有効材齢 9 日までの自己収縮ひずみに対する鉄筋ひずみの変動割合が有効材齢 9 日から有効材齢 360 日の自己収縮ひずみに対する鉄筋ひずみの変動割合より小さくなる結果からも推定される。
- (6) 廃瓦粗骨材を全粗骨材容積の 20%置換したコンクリートに膨張材と収縮低減剤を混入した供試体の拘束応力は、有効材齢約 150 日において  $0.1\text{N/mm}^2$  の引張応力となった。また、この配合は初期・長期材齢において拘束応力の低減効果を認められ、本研究の範囲においては、最もひび割れリスクが低くなると考えられる。
- (7) 有効材齢 28 日まで封緘養生を行い、乾燥を開始した拘束応力と引き続き封緘養生を実施した拘束応力の差を乾燥収縮ひずみによる拘束応力と仮定した場合に内部養生方法と膨張材と収縮低減剤を併用した方法において、明確な差異が認められなかった。
- (8) 有効材齢 7 日まで湿布養生を行い、乾燥を開始した拘束応力と封緘養生を実施した拘束応力の差は、内部養生方法のみとした場合に大きくなる傾向を示した。
- (9) 拘束応力の低減を行わないコンクリートと膨張材と収縮低減剤を混入したコンクリートの  $20^\circ\text{C}$  一定と  $30^\circ\text{C}$  一定として養生を行った供試体の拘束応力は  $30^\circ\text{C}$  一定の

方が小さくなった。また、30℃一定として養生した供試体の拘束応力の解析値と実験値が異なり、クリープ特性の温度依存性があることの可能性を示した。

- (10) 季節ごとの実構造物を想定したコンクリート温度履歴を拘束応力の低減を行わない供試体に与えた拘束応力試験結果から、拘束応力に関しても自己収縮ひずみ同様に温度依存性が認められ、本研究の範囲では冬期によりひび割れリスクが高くなる結果となった。

なお、本研究において、参考として拘束応力の低減を実施していない配合のクリープ関数を用いて廃瓦粗骨材を用いた供試体や膨張材および収縮低減剤を混入した供試体のクリープ解析を実施した。今後はこれら配合に関してもクリープ特性を把握し、より精度の高めることが望まれる。また、廃瓦粗骨材を用いた内部養生方法に関しては、実構造物を想定したコンクリートの温度履歴が拘束応力やクリープ特性に与える影響を把握し、より合理的な解析手法を確立していく必要があると考える。

## 第5章 参考文献

- 1)Hidetoshi Ito, Ippei Maruyama, Makoto Tanimura, and Ryoichi Sato : Early Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology Vol.2, No.2, pp.155-174,2004
- 2)森下隆志ほか：若材齢における高強度コンクリートの微視的構造が自己収縮拘束挙動におよぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，2001，pp.709-714
- 3)土木学会：コンクリート標準示方書設計編，pp50-53
- 4)丸山一平，佐藤良一，鈴木雅博：高強度コンクリートの健全度に関する検証，日本建築学会学術講演梗概集，日本建築学会，pp.625-626，2005
- 5)丸山一平，佐藤良一：超高強度コンクリートを用いた RC 部材中の鉄筋近傍における微細ひび割れの発見，日本建築学会構造系論文集，No.607，pp.1-7，2007
- 6)盛岡実，萩原宏俊，坂井悦郎，大門正機：膨張材を混和したセメント硬化体の微細構造，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp.169-174，1998
- 7)伊藤真佑，糸山豊，上原匠，梅原秀哲：温度依存性に着目した若材齢コンクリートのクリーブに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.443-448，2003

## 第6章 低収縮超高強度コンクリートによる柱模擬部材の収縮応力の低減効果

### 6.1 はじめに

本章では、拘束応力の大きい超高強度コンクリートと拘束応力を低減した超高強度コンクリートを用いて柱模擬部材を作製し、コンクリート表面、コンクリート内部および鉄筋周囲のひび割れ状況を観察し、収縮ひずみを低減することによる効果を実験的に検討する。また、柱模擬部材内部に埋設したひずみ測定値から内部に発生した応力を予測し、その予測した応力から収縮ひずみの低減した効果を検討する。さらに、本試験は夏期と冬期に実施し、ひび割れリスクに関してこれまで得た知見との整合性を検討する。なお、本章での低収縮超高強度コンクリートは、膨張材と収縮低減剤を混入することにより自己収縮ひずみと拘束応力を低減したコンクリートとした。

### 6.2 実験概要

#### 6.2.1 使用材料と配合

表 6.2.1 と表 6.2.2 に使用材料と鉱物組成をそれぞれ示す。セメントには、低熱ポルトランドセメント(記号 L1, L2, L3)を使用した。混和材には、シリカフェーム(記号 SF1, SF2, SF3)を使用した。なお、セメント種類低熱セメントと混和材シリカフェームを混合する配合では、あらかじめ置換したプレミックス材(記号 SFLC1, SFLC2, SFLC3, 密度 3.08g/cm<sup>3</sup>)を使用した。各プレミックス材の構成を表 6.2.3 に示す。表 6.2.4 に配合表を、表 6.2.5 にコンクリート使用材料の組み合わせをそれぞれ示す。配合表にはプレミックス材、細骨

表 6.2.1 使用材料

材料	種別	物理的性質	記号
セメント	低熱ポルトランドセメント 1	密度: 3.22 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3600 cm <sup>2</sup> /g	L1
	低熱ポルトランドセメント 2	密度: 3.22 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3600 cm <sup>2</sup> /g	L2
	低熱ポルトランドセメント 3	密度: 3.22 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3520 cm <sup>2</sup> /g	L3
細骨材	大月産安山岩砕砂 1	表乾密度: 2.63 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 2.50 %, FM: 2.53	S1
	大月産安山岩砕砂 2	表乾密度: 2.62 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 2.41 %, FM: 2.95	S2
粗骨材	盛岡産輝緑岩砕石 1	表乾密度: 2.93 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.39%, FM: 6.66 実積率:60.0%	G1
	盛岡産輝緑岩砕石 2	表乾密度: 2.92 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.88%, FM: 6.51 実積率:61.0%	G2
混和剤	収縮低減剤	低級アルコール系	SRA
	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	消泡剤	-	D
混和材	膨張材	エトリンガイト石灰複合系—密度: 3.05 g/cm <sup>3</sup>	EX
	シリカフェーム 1	密度: 2.24 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 17.1 m <sup>2</sup> /g	SF1
	シリカフェーム 2	密度: 2.24 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 17.9 m <sup>2</sup> /g	SF2
	シリカフェーム 3	密度: 2.24 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 18.0 m <sup>2</sup> /g	SF3

表 6.2.2 鉱物組成

	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
低熱ポルトランドセメント 1	29.1	50.1	4.3	9.6
低熱ポルトランドセメント 2	28.4	50.7	4.8	9.4
低熱ポルトランドセメント 3	29.7	49.9	4.1	9.6

表 6.2.3 プレミックス材の構成

プレミックス材	構成
SFLC1	90% L1+ 10% SF1
SFLC2	90% L2+ 10% SF2
SFLC3	90.1% L3+ 9.9% SF3

表 6.2.4 配合表

配合	(W+SRA)/ (SFLC+ EX)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )						SP/(SFLC <sup>1)</sup> + EX)	D/(SFLC <sup>1)</sup> + EX)
		W	SFLC <sup>1)</sup>	EX	S <sup>2)</sup>	G <sup>3)</sup>	SRA	EX)	EX)
SFLC1	0.15	155	1033	—	451	932	—	0.026	0.0060
SFLC2	0.15	155	1033	—	451	932	—	0.026	0.0060
R	0.15	149	1033	—	447	941	6	0.019	0.0002
EX20-R	0.15	149	1013	20	446	941	6	0.020	0.0002

1) SFLC は SFLC1, SFLC2, SFLC3, 2) S は S1, S2, 3) S は G1, G2

表 6.2.5 材料構成と部材製作時期

配合名	材料構成	製作時期
SFLC1	SFLC1,G1,S1	夏期
SFLC2	SFLC2,G1,S1	冬期
R	SFLC3,G2,S2R	冬期
EX20-R	SFLC3,G2,S2,EX,R	冬期

材および粗骨材の表記を SFLC, S, G とし, 表 6.2.5 にその詳細を示した。使用したプレミックス材, 粗骨材および細骨材は, 第 3 章から第 5 章で使用した同一のメーカーの市販のプレミックス品, 同一産地の骨材である。粗骨材のかさ容積を 0.53m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> と固定した。空気量は 2% とした。膨張材は結合材の一部とし, 収縮低減剤は単位水量の一部とした。

練混ぜは 2.25m<sup>3</sup> の 2 軸強制ミキサを使用し, 1 バッチの練量は 1.0m<sup>3</sup> とした。練混ぜは SFLC と細骨材および膨張材の空練りを 15 秒行い, その後に水と混和剤を添加してモルタル練りを 240 秒行い, 最後に粗骨材を投入してコンクリート練りを 90 秒とし, 排出した。スランプフローの目標値は 650±100mm となるように混和剤量を調整した。

## 6. 2. 2 試験体および試験方法

### (1) 柱模擬部材

本研究では、柱模擬部材を6つ作製した。表6.2.6に試験体一覧を示す。柱模擬部材のパラメータは、配合、コンクリートの温度履歴と鉄筋比であり、温度履歴に関しては夏期および冬期を想定して、8月および11月に製作した。主筋にD41を用いた柱模擬部材の概要を図6.2.1に示す。供試体寸法は、900×900×1100mmとした。主筋にSD390-D41(鉄筋比3.3%)、せん断補強筋にSD295-D13(せん断鉄筋比0.56%)を用いた柱模擬部材と主筋

にSD295-D6(鉄筋比0.08%)、せん断補強筋にSD295-D6(せん断鉄筋比0.14%)を用いた。柱の上下面には厚さ100mmの発泡スチロールを設置することにより上下方向の熱の伝達を遮断し、柱部材の中央部を模擬した。主筋下部には応力集中による発泡スチロールの破損を避ける目的でモルタル製のスペーサーを設置した。型枠は鋼製とし、打設直後から材齢3日まではシート養生、同材齢で脱型を行った。これらの温度におよぼす影響に関しては、シート内の温度履歴(シート養生後は柱模擬部材を静置した養生温度、以下ではシート内の養生温度も含めて柱模擬部材の養生温度を環境温度と示す)を測定することで評価を行った。脱枠から材齢28日までの養生は、配合SFLCでは場内(屋根有り)とし、配合EX20-Rでは材齢7日まで場内(屋根有り)とし、材齢7日からはシートで覆い屋外に静置した。

埋込型ひずみ計(剛性約40N/mm<sup>2</sup>)によりひずみを、熱電対によりコンクリート温度をそ

表 6.2.6 柱模擬部材一覧

供試体名	配合	製作時期
SFLC-D6S	SFLC1	夏期
SFLC-D41S	SFLC1	夏期
SFLC-D6W	SFLC2	冬期
SFLC-D41W	SFLC2	冬期
R-D41W	R	冬期
EX20-R-D41W	EX20-R	冬期

供試体名：配合-主筋径-製作時期

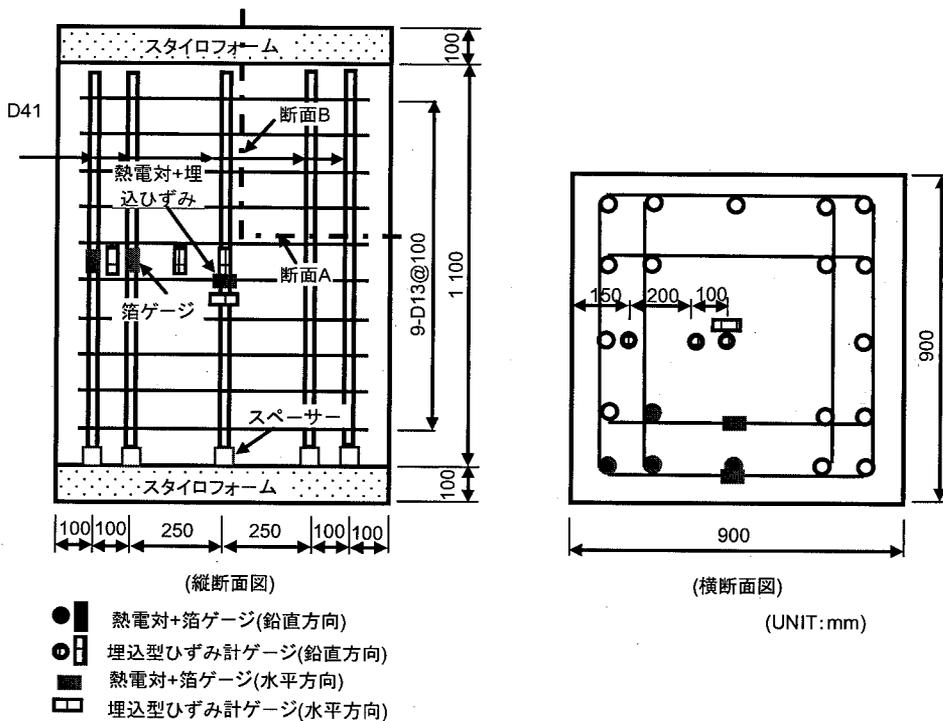


図 6.2.1 柱模擬部材の概要

れぞれ測定した。写真 6.2.1 と 6.2.2 に鉄筋配筋状況を示す。

柱模擬供試体は、柱内部のひび割れの有無を確認する目的で、材齢 28 日において図 6.2.1 に示す断面 A および断面 B をダイヤモンドカッターで切断し、アセトンの揮発状態によりひび割れを確認した。切断状況を写真 6.2.3 に示す。

## (2) 硬化コンクリートの諸物性確認用供試体

コンクリートの諸物性を確認する目的で、養生条件の異なる圧縮強度供試体と割裂引張強度供試体を作製した。圧縮強度供試体の供試体寸法は  $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  とし、シート内で柱模擬部材と同一の環境温度で封緘養生した封緘供試体、打込み直後より封緘し、外気との遮熱性の高い発泡スチロール内に設置した簡易断熱供試体(写真 6.2.4 参照)、標準水中供試体、柱供試体の中心部から 100mm の位置を材齢 28 日にコアドリルにより作製したコア供試体の 4 種類の供試体を圧縮試験に供した。割裂引張強度の供試体寸法は  $\phi 150 \times 200 \text{mm}$  であり、圧縮強度用封緘供試体と同様の養生条件とした。

供試体「R-D41W」および「EX20-R-D41W」に関しては、柱模擬部材の中心温度を再現できるチャンバーを用いて自己収縮ひずみの測定を実施した。

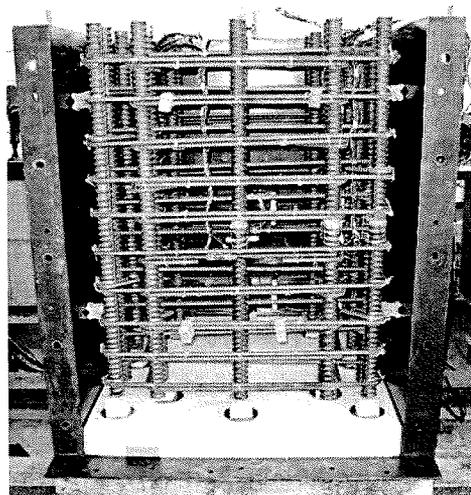


写真 6.2.1 柱模擬部材鉄筋配置状況 1

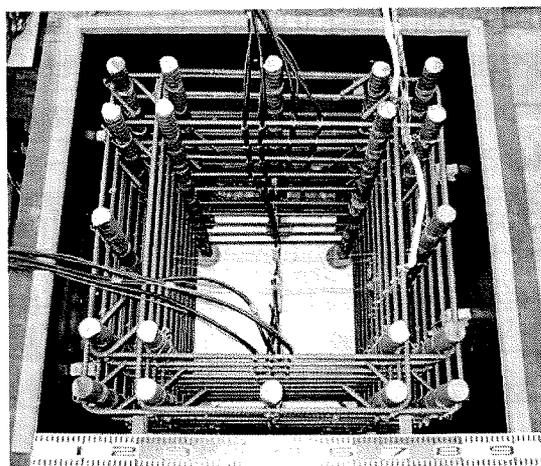


写真 6.2.2 柱模擬部材鉄筋配置状況 1

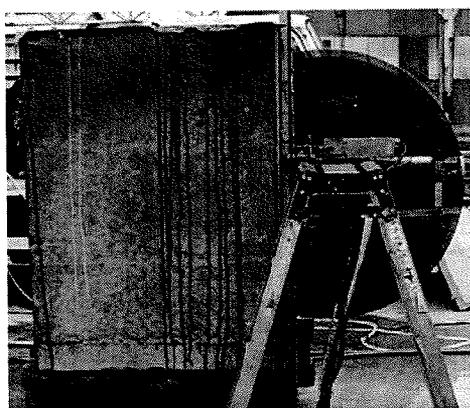


写真 6.2.3 柱模擬部材切断状況

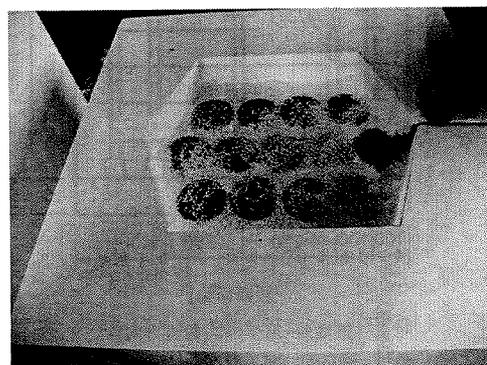


写真 6.2.4 圧縮強度テストピース簡易断熱養生状況

### 6. 3 実験結果および考察

#### 6. 3. 1 フレッシュ性状およびコンクリート最高温度

表 6. 3. 1 にコンクリートのフレッシュ性状とコンクリートの最高温度を示す。

表 6. 3. 1 フレッシュ性状およびコンクリートの最高温度

供試体名	スランブ フロー(cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)		環境温度 (°C)
			練上がり温度	最高温度 <sup>1)</sup>	
SFLC-D6S	71.5×71.5	1.4	29.0	78.0	29.0
SFLC-D41S	74.5×72.0	1.5	29.5	74.3	31.0
SFLC-D6W	73.0×71.0	2.4	14.5	52.0	8.0
SFLC-D41W	71.0×70.5	2.2	15.9	49.2	10.5
R-D41W	71.0×70.0	1.6	17.0	55.0	14.0
EX20-R-D41W	71.0×72.0	2.0	19.5	53.2	15.5

注 1) コンクリートの最高温度は柱模擬部材コア採取位置(部材中心位置から 100mm)におけるコンクリートの最高温度を示す

#### 6. 3. 2 コンクリート温度履歴

図 6. 3. 1～図 6. 3. 6 に各柱模擬部材の柱中央部, 柱中央部から 100mm および柱中央部から 300mm 位置の打ち込み直後からのコンクリート温度履歴を示す。

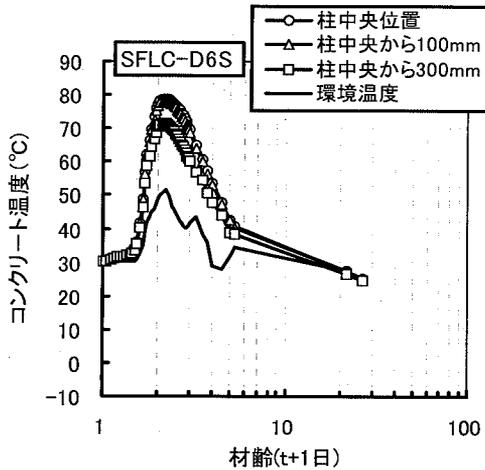


図 6. 3. 1 柱模擬部材 SFLC-D6S の  
コンクリート温度履歴

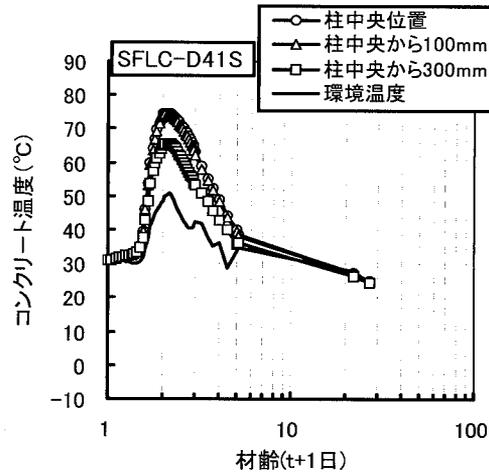


図 6. 3. 2 柱模擬部材 SFLC-D41S の  
コンクリート温度履歴

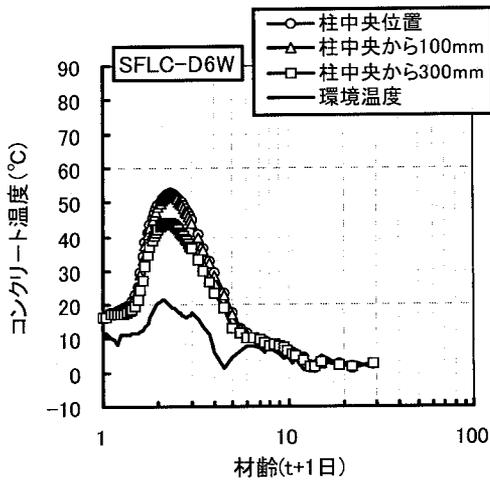


図 6.3.3 柱模擬部材 SFLC-D6W の  
コンクリート温度履歴

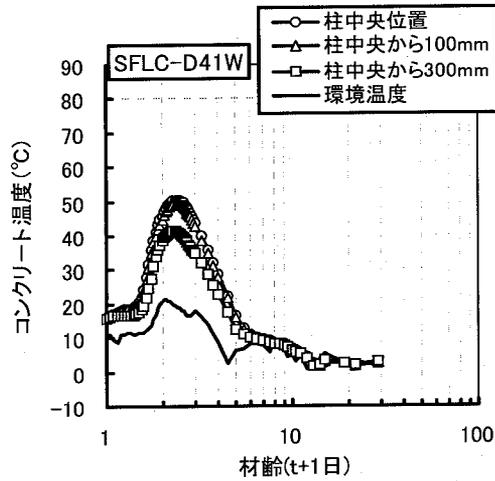


図 6.3.4 柱模擬部材 SFLC-D41W の  
コンクリート温度履歴

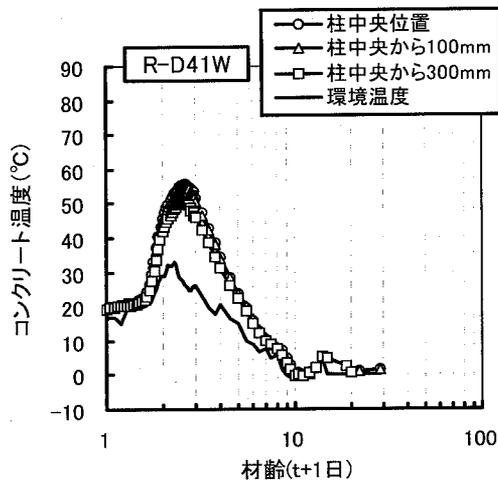


図 6.3.5 柱模擬部材 R-D41W の  
コンクリート温度履歴

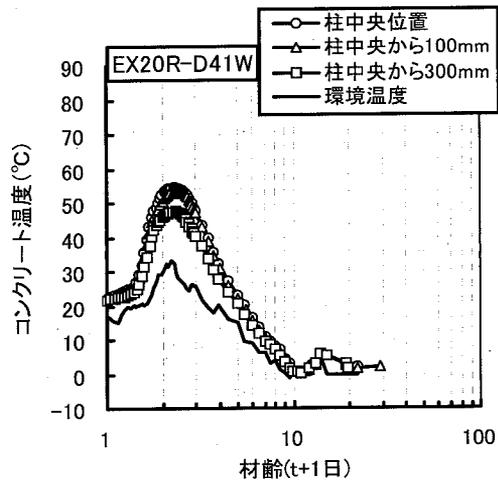


図 6.3.6 柱模擬部材 EX20R-D41W の  
コンクリート温度履歴

シート内で養生した圧縮強度供試体、簡易断熱養生箱で養生した供試体および柱模擬部材のコア採取位置(柱模擬部材中心から 100mm)の温度履歴を図 6.3.7～図 6.3.10 に示す。図中の封緘は封緘養生供試体、断熱は簡易断熱養生供試体、コアはコア供試体をそれぞれ示す。冬期打設においては、初期凍害を防止するため、打込み後に部材をシートで覆い、設定を 20°Cとした加熱養生を材齢 1 日まで実施した。なお、環境温度(ここではシート内の温度)は、シートを覆った後 3 時間かけて 20°Cとした。ただし、環境温度は、本試験で実施した加熱養生のシステムは、環境温度を下げるできないため、柱模擬部材の水和熱により環境温度が設定より上昇した。この結果、表 6.3.1 に示すように、配合「SFLC」と「EX20-R」のコア採取位置のコンクリートの最高温度に関してもそれぞれ 49.2°Cから 53.2°Cとなり、第 4 章の配合「SFLC」、「EX20-R」の練上がり温度 10°Cの温度履歴供試体より高くなった。加熱養生をしない夏期においては、簡易断熱養生した圧縮強度用試験体のコンクリート温度履歴は概ね柱模擬部材のコンクリート温度履歴と概ね一致したことから、加熱養生を実施しない場合には、簡易断熱養生することにより柱模擬部材のコンクリート強度を推定することが可能であると考えられる。

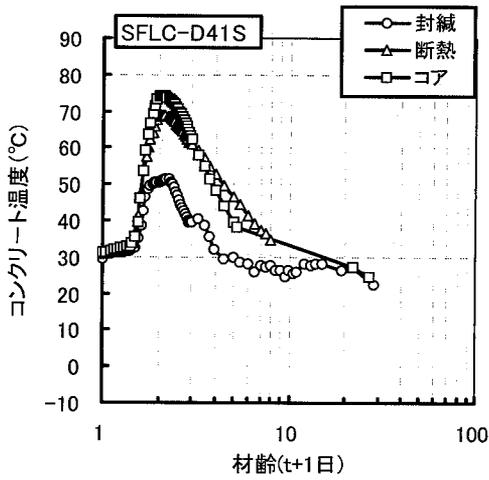


図 6.3.7 夏期 SFLC の各供試体の  
コンクリート温度履歴

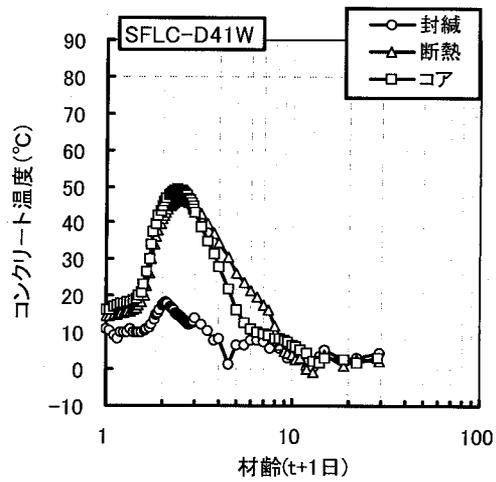


図 6.3.8 冬期 SFLC の各供試体の  
コンクリート温度履歴

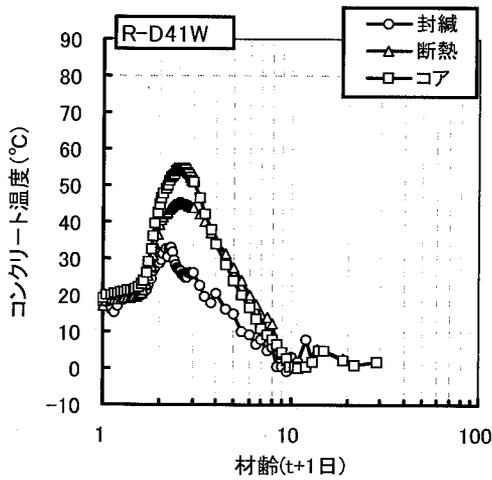


図 6.3.9 冬期 R の各供試体の  
コンクリート温度履歴

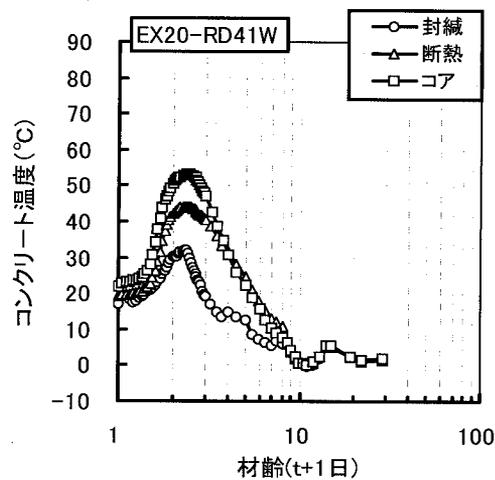


図 6.3.10 冬期 EX20-R の各供試体の  
コンクリート温度履歴

### 6.3.3 圧縮強度、ヤング係数および割裂引張強度

各試験体の圧縮強度を、温度履歴を元に有効材齢<sup>1)</sup>に対して示したものが図 6.3.11～図 6.3.14 である。図中の記号は試験体の養生方法を示す。図中には、式(6.2.1)に基づく近似式をあわせて示す。いずれの配合においても、簡易断熱養生した供試体と標準養生した供試体の圧縮強度は有効材齢 91 日において  $150\text{N/mm}^2$  を越える結果となった。封緘養生した供試体を除けば、同一の曲線により評価が可能と考えられる。ここで、第 4 章で示した部材中の鉄筋応力が発生している材齢(SFLCD6S, SFLCD41S: 有効材齢 1.0 日, SFLCD6W, SFLCD41W, EX20RD41: 有効材齢 0.4 日)を圧縮強度発生の原点と仮定した。

$$f_c = a \cdot \exp\left\{b\left(1 - \left(\frac{28}{t-c}\right)^{0.5}\right)\right\} \quad (6.2.1)$$

ここに  $a \cdot \exp(b)$ : 最終強度に関わる係数 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $b$ : 強度の発現, に関わる係数である。  
 $c$  は鉄筋応力が発生する材齢である。

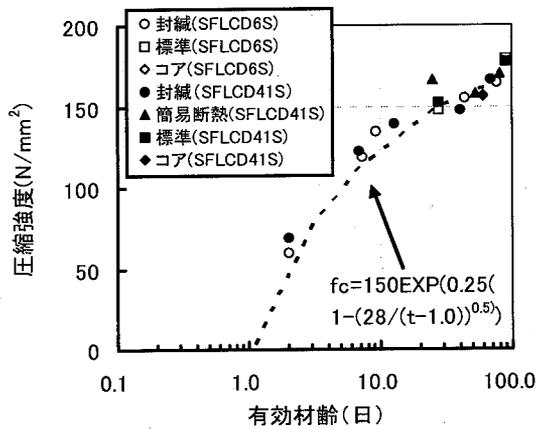


図 6.3.11 夏期 SFLC の圧縮強度発現

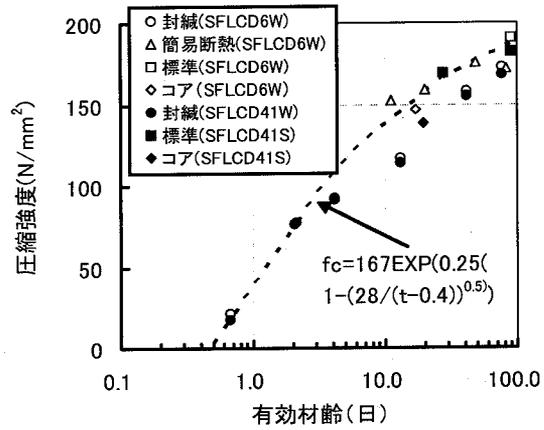


図 6.3.12 冬期 SFLC の圧縮強度発現

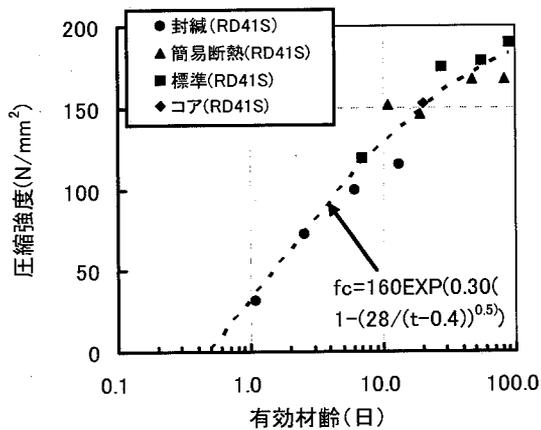


図 6.3.13 冬期 R の圧縮強度発現

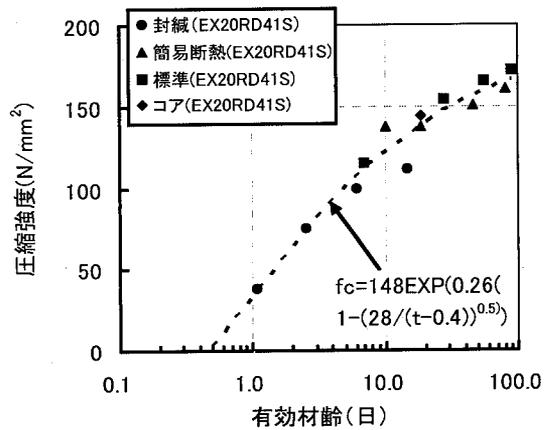


図 6.3.14 冬期 EX20-R の圧縮強度発現

コンクリートの温度履歴と圧縮強度発現からコンクリート温度の最高温度が  $50^{\circ}\text{C}$  を上回る供試体は有効材齢 91 日において、標準養生した供試体と同程度の圧縮強度発現が見られる一方で、最高温度が  $50^{\circ}\text{C}$  を下回る供試体は標準養生した供試体より小さい値となった。本研究の範囲内では、 $70^{\circ}\text{C}$  程度でのシリカフェームの水和反応の活性化を指摘する報告<sup>2)</sup>とは異なり、圧縮強度の観点から  $50^{\circ}\text{C}$  以上で確認された。

最終強度に関わる係数  $a \cdot \exp(b)$  を比較した場合には、配合 EX20-R は配合 SFLC と比較して 10% 低減する結果となった。この理由は、膨張材の水和によりセメント硬化体の空隙の増大<sup>3)</sup>が圧縮強度を低下させたことが考えられる。

図 6.3.15 から図 6.3.17 に圧縮強度に対するヤング係数 ( $E_c$ ) の値を示す。図中には配合「EX20-R」、 「SFLC」 および 「R」 の全データを最小 2 乗法で回帰した結果を示す。圧縮強度とヤング係数の関係は、1 つの近似式で表わせる結果となり、配合と温度履歴の影響はほとんどない結果となった。

図 6.3.18 に各配合の圧縮強度と割裂引張強度との関係を示す。圧縮強度と割裂引張強度の関係も、配合によらず 1 つの曲線で示せる結果となった。

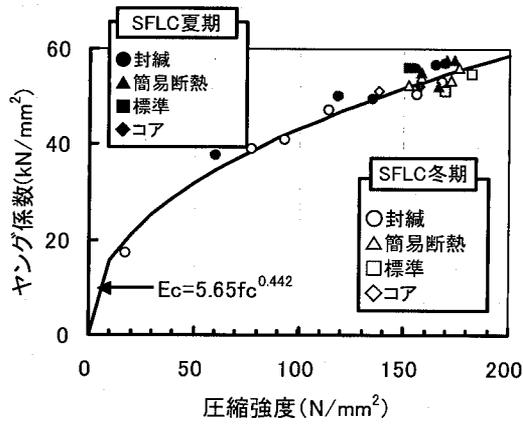


図 6.3.15 SFLCの圧縮強度とヤング係数との関係

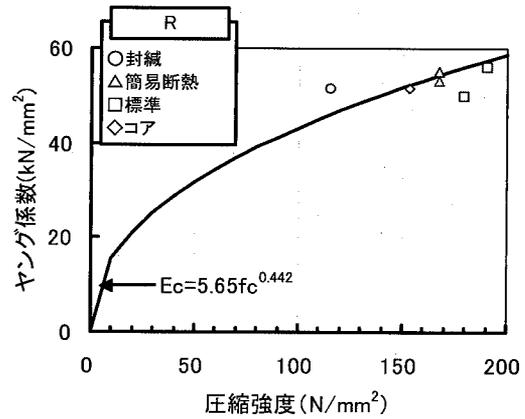


図 6.3.16 Rの圧縮強度とヤング係数との関係

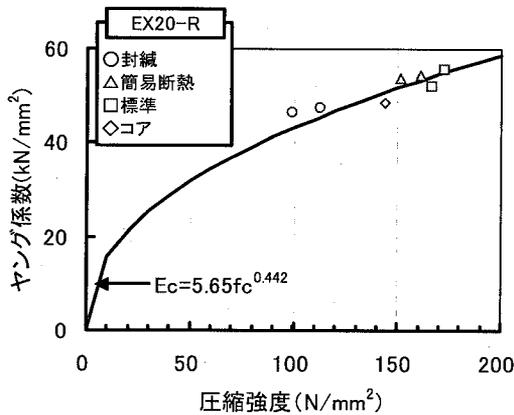


図 6.3.17 EX20-Rの圧縮強度発現

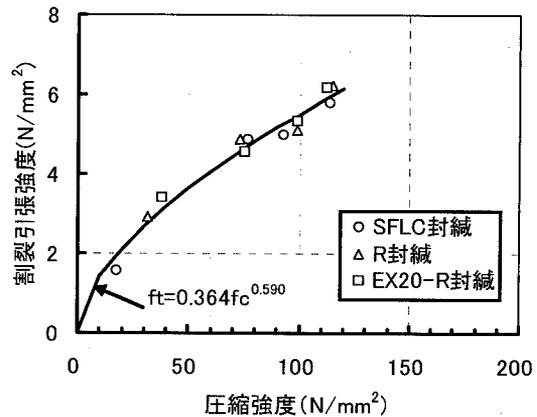


図 6.3.18 圧縮強度とヤング係数との関係

#### 6.3.4 自己収縮ひずみ

配合「R」および「EX20-R」のコア位置におけるコンクリート温度をチャンバーで再現した環境化での供試体の自己収縮ひずみを図 6.3.19 に示す。図中には第4章で示した供試体「SFLC10→40℃」の自己収縮ひずみもあわせて示す。

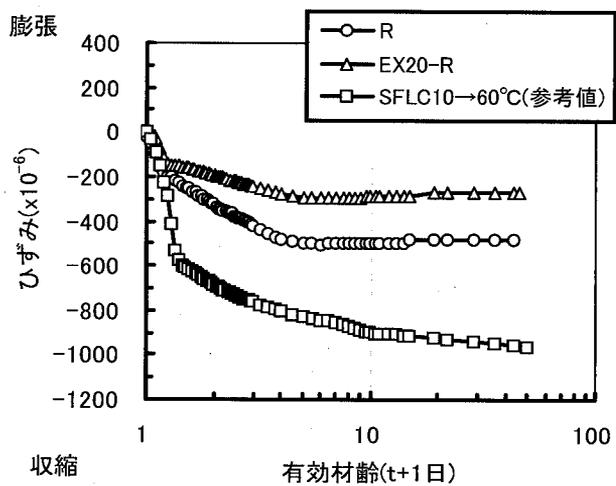


図 6.3.19 自己収縮ひずみ

### 6. 3. 5 ひび割れ発生状況

表 6.3.2 に各柱模擬部材の表面のひび割れ状況を示す。拘束応力を低減しない供試体「SFLC-D41S」と「SFLC-D41W」との比較から冬期の方がよりひび割れが顕著に発生した。供試体「SFLC-D41W」に発生したひび割れ幅は 0.1mm 程度であった。供試体「SFLC-D6W」においては柱模擬部材表面にわずかにひび割れが生じたが、その損傷の程度は小さいことが認められた。このことから、供試体「SFLC-D41W」の表面に発生したひび割れの要因として、温度応力の他に自己収縮ひずみが鉄筋に拘束されることにより発生拘束応力がさらに加わり、ひび割れが顕在化したことが考えられる。また、この結果は、第4章に示した自己収縮ひずみの温度依存性から冬期において特に大きくなることから、柱模擬部材におけるひび割れ発生状況とも傾向的に整合している。

冬期においてひび割れリスクが高くなることが判明したため、冬期において拘束応力を低減した供試体「R-D41W」と「EX20-R-D41W」については行った。その結果は、表面にはひび割れが生じず、拘束応力の低減効果が認められた。

表-6.3.2 柱模擬部材の表面ひび割れ状況

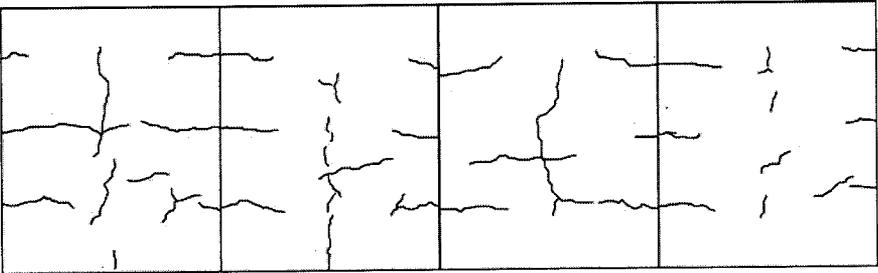
	SFLC-D6S, SFLC-D41S (夏期)	SFLC-D6W (冬期)
外 観 調 査	ひび割れが発生しなかった	ひび割れ発生 ひび割れ幅は 0.08~0.1mm  南 
	R-D41W, EX20-R-D41W (冬期)	SFLC-D41W (冬期)
	表面にわずかにひび割れ	ひび割れ発生 ひび割れ幅は 0.10~0.15mm    展開図

表 6.3.3 に供試体「SFLC-D6S」, 「SFLC-D41S」, 「SFLC-D6W」 および 「SFLC-D41W」の柱模擬部材の内部のひび割れ状況を示す。供試体「SFLC-D41W」では柱模擬部材を切断

表-6.3.3 内部ひび割れ状況-配合 SFLC

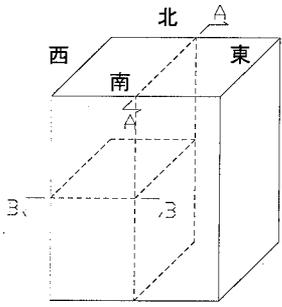
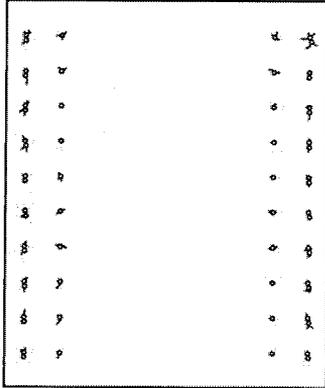
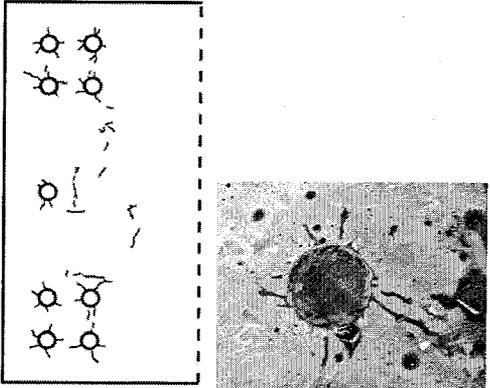
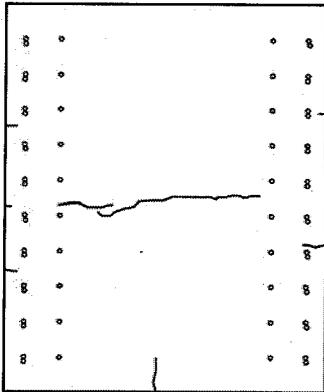
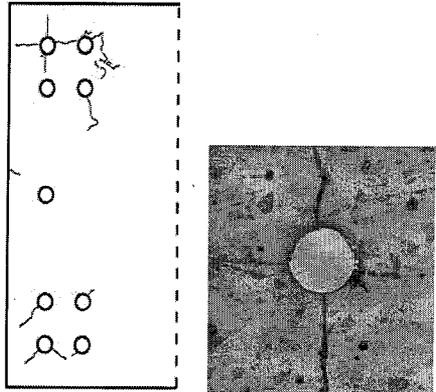
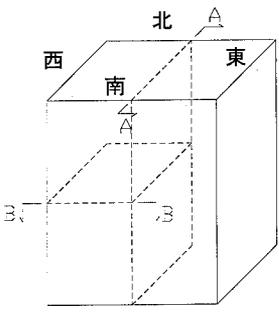
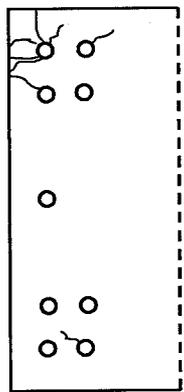
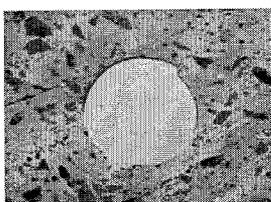
			
内部ひび割れ状況	SFLC-D6S(夏期)	SFLC-D41S(夏期)	
	ひび割れは発生しなかった	主筋-鉄筋周囲にアセトンで確認できる程度のひび割れが発生	
		<p>A-A 断面</p> 	<p>B-B 断面 鉄筋周囲のひび割れ</p> 
		SFLC-D6W(冬期)	SFLC-D41S(冬期)
表面にはわずかにひび割れが認められたが、内部への進展はないことを確認	主筋-内部と鉄筋周囲にひび割れ 内部のひび割れ幅は 0.08~0.1mm-ひび割れ深さ 5mm 鉄筋周囲のひび割れアセトンで確認できる程度		
	<p>A-A 断面</p> 	<p>B-B 断面 鉄筋周囲のひび割れ</p> 	

表-6.3.4 内部ひび割れ状況-配合 R および EX20-R

 <p>A-A 面は上縁から 420mm まで切断</p>		
内部ひび割れ状況	R-D41W(冬期)	EX20-R-41W(冬期)
	<p>鉄筋周囲にひび割れ-鉄筋周囲のひび割れアセトンで確認できる程度</p> <p>A-A 面にはひび割れが見つからなかったが、後述するコンクリートひずみ測定からひび割れ発生を確認</p> <p style="text-align: center;">B-B 断面</p> 	<p>内部のひび割れは発生しなかった</p> <p>鉄筋周囲のひび割れはひび割れは発生しなかった</p> <p style="text-align: center;">鉄筋周囲の状況</p> 

した時に材軸直交方向に横断する幅 0.1~0.15mm 程度のひび割れが確認された。このひび割れは部材の外部にひび割れの兆候が認められないため、施工前に内部ひび割れの有無を模擬部材などにより事前に確認しておく必要があるとともに施工時における検査方法を検討する必要があると考える。供試体「SFLC-D41S」においては内部にひび割れが発生しなかったが、鉄筋周囲に微細なひび割れが認められた。このひび割れは供試体「SFLC-D41W」において鉄筋間で連結し、より顕在化した。このことは、主筋付着力の低下を示唆している。このことは、自己応力が曲げひび割れ幅に影響をおよぼすこと<sup>4)</sup>やせん断耐力を低下させること<sup>5)</sup>の報告があり、鉄筋周囲の付着の低下が関連している可能性も考えられる。構造面への影響を検討する必要があると考える。

表 6.3.4 に供試体「R-D41W」および「EX20-R-D41W」の柱模擬部材の内部のひび割れ状況を示す。供試体「EX20-R-D41W」では柱内部と鉄筋周囲にはひび割れの発生はなかったが、供試体「R-D41W」では鉄筋周囲と柱内部にひび割れが発生した。なお、柱内部に関しては、本実験の切断範囲においてはひび割れが確認できなかったが、後掲する柱模擬部材に埋設した埋込みひずみ計の測定結果からひび割れの発生が認められた。図 6.3.19 に示すように、有効材齢 10 日における自己収縮ひずみは、配合「R」において  $500 \times 10^{-6}$ 、

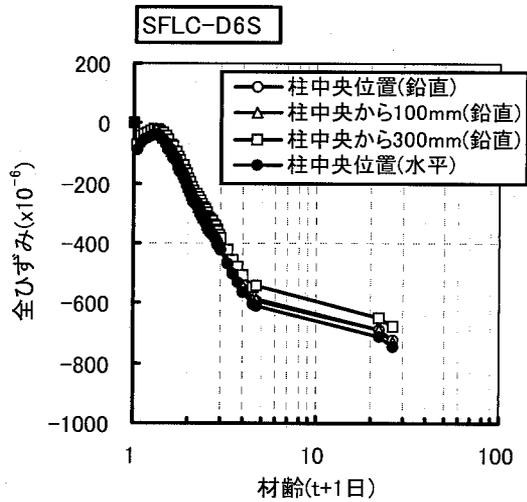


図 6.3.20 SFLCD6-S の全ひずみ

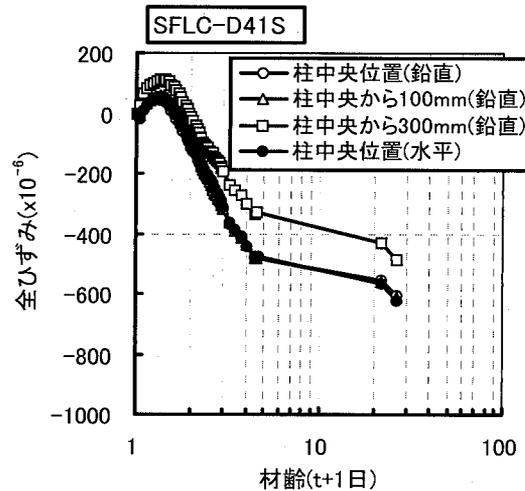


図 6.3.21 SFLCD41-S の全ひずみ

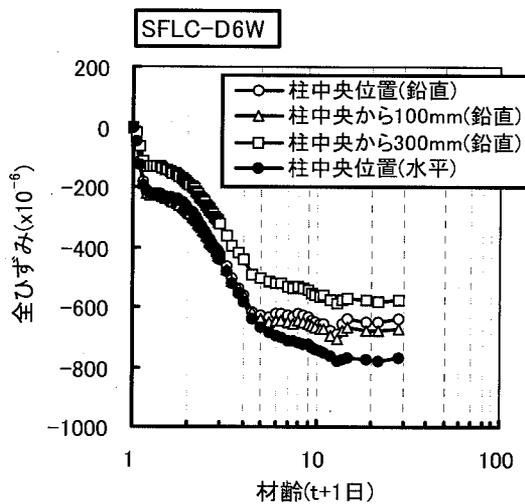


図 6.3.22 SFLCD6-W の全ひずみ

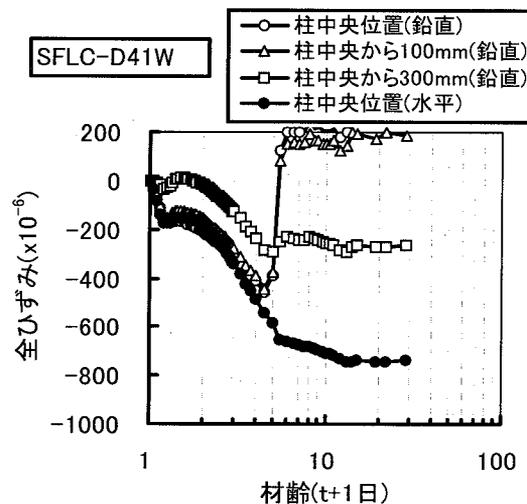


図 6.3.23 SFLCD41-W の全ひずみ

配合「EX20-R」において  $300 \times 10^{-6}$  であり、膨張材を添加することによりさらに  $200 \times 10^{-6}$  抑制しており、この差が内部のひび割れに現れたと考えられる。

本研究における配合条件，環境条件においては，収縮低減剤のみの拘束応力低減では不十分であり，膨張材と収縮低減剤を併用した拘束応力の低減によりひび割れを抑制することができた。

### 6.3.6 全ひずみ

図 6.3.20 から 25 に各柱模擬部材の拘束応力発生から全ひずみ(測定ひずみ)の経時変化を示す。ひずみの経時変化から供試体「SFLC-D41W」においては材齢 3 日において、「R-D41W」においては材齢 10 日において、ひずみの急激な変化が生じ、ひび割れが発生したことが推定される。

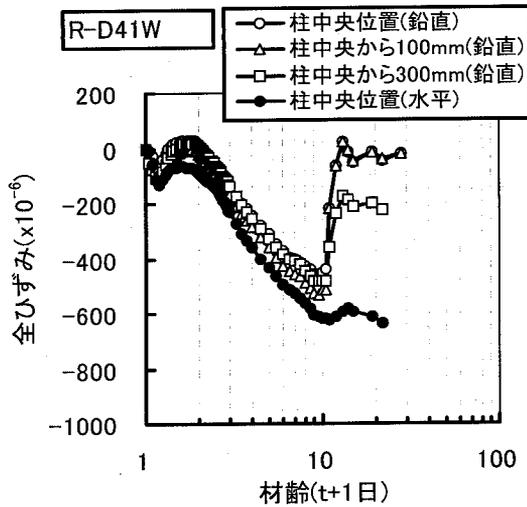


図 6.3.24 R-D41S の全ひずみ

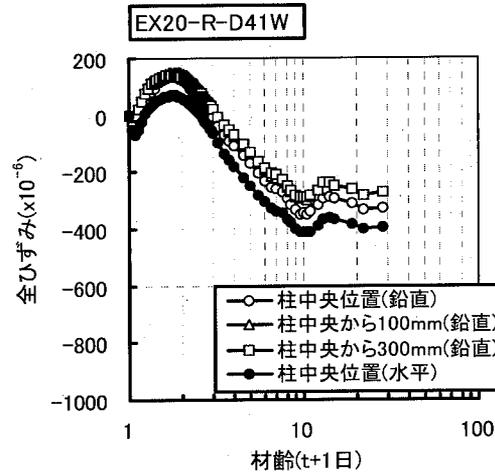


図 6.3.25 EX20-R-D41S の全ひずみ

#### 6. 4 柱模擬部材の応力検討

柱内部の応力解析は鉛直方向と水平方向で拘束条件が異なるため、本来であれば3次元的な解析が必要となるが、ここでは、ひび割れが生じた供試体「SFLC-D41W」とひび割れを抑制した「EX20-R-D41W」の鉛直ひずみから算出した応力算出値を比較することにより、膨張材および収縮低減剤を混入することによる応力低減効果を検討した。

##### 6. 4. 1 応力の算定方法

全ひずみ(測定値)は、鉛直方向の全ひずみとほぼ同等であり、収縮ひずみの等方性を仮定すると、水平方向には鉛直応力と同等の応力が生じていると考えられる。このことは、水平方向の応力に対応するポアソン効果によるひずみが鉛直方向に含まれていること、また、鉛直方向ひずみのみから算出される応力は、ポアソン比程度の過小評価であることを示唆する。ポアソンクリープの問題、超高強度コンクリートのポアソン比の問題があるが、その程度については、約15~20%程度と推察される<sup>6)</sup>。

柱模擬部材内部の応力を予測するために、増分型 Step by step 法<sup>6,7,8)</sup>を参考にして各部位の応力算出を行った。文献<sup>6)</sup>は、コンクリートの測定ひずみから断面内の自己収縮ひずみの分布を考慮したコンクリートの応力を予測しており、本検討でもこの方法を用いることとした。文献<sup>7)</sup>では線膨張係数を固定し、収縮ひずみの温度依存性を考慮していないが、ここでは、第4章に示した線膨張係数の経時変化と収縮ひずみの温度依存性を考慮して算定した。

クリープ関数は、CEB-FIP MC90<sup>1)</sup>の式(6.4.1)を用いた。

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \left( \frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right)^{0.3} \quad (6.4.1)$$

ここで、 $\phi(t, t_0)$  : クリープ係数、 $\phi_0$  : クリープ係数の終局値、 $\beta_H$  : クリープ進行速度

を表す係数， $t$ ：有効材齢(日)， $t_1$ ：1日， $t_0$ ：荷重時有効材齢(日)をそれぞれ示す。第2章の既往の研究で詳述した増分型 Step by step 法を用いて弾性ひずみとクリープひずみの和は式(6.4.2)で示される。

$$\varepsilon_c(t_{i+1/2}) = \sum_{j=1}^i [(\Delta\sigma_c(t_j) j(t_{i+1/2}, t_j))] \quad (6.4.2)$$

ここで， $j(t_{i+1/2}, t_j) = 1/E_c(t_i) + \phi(t_{i+1/2}, t_j)/E_{c,28}$ ， $\varepsilon_c(t_{i+1/2})$ は時間ステップ  $i$  の弾性ひずみとクリープひずみの和， $\Delta\sigma_c(t_j)$ は時間ステップ  $j$  のコンクリート増分応力， $E_c(t_j)$ は時間ステップ  $j$  のコンクリートのヤング係数， $E_{c,28}$ は材齢 28 日のヤング係数， $\phi(t_{i+1/2}, t_j)$ は荷重時有効材齢  $t_j$ ，着目有効材齢  $t_j$  のクリープ係数である。 $\Delta\sigma_c(t_j)$ は式(6.4.2)を用いた  $\varepsilon_c(t_{i-1/2})$  から  $\varepsilon_c(t_{i+1/2})$  の変化量 ( $\Delta\varepsilon_c(t_{i+1/2})$ ) を求める式から式(6.4.3)となる。

$$\Delta\sigma_c(t_i) = \left\{ \Delta\varepsilon_c(t_{i+1/2}) - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta\phi_{cr}(t_{i+1/2}, t_j) \Delta\sigma(t_j) / E_{c,28} \right\} / j(t_{i+1/2}, t_i) \quad (6.4.3)$$

ここで， $\Delta\phi_{cr}(t_{i+1/2}, t_j)$ は荷重時有効材齢  $t_j$ ，有効材齢  $t_{(i-1)+1/2}$  から  $t_{(i+1)+1/2}$  のクリープ係数の変化量である。式(6.4.3)により各時間ステップにおける増分応力が算出されるので，任意の時間ステップ  $i$  の応力は式(6.4.4)より算出することができる。

$$\sigma_c(t_i) = \Delta\sigma_c(t_i) + \sigma_c(t_{i-1}) \quad (6.4.4)$$

#### 6. 4. 2 若材齢時のコンクリートのクリープ特性

解析に用いたコンクリートの圧縮強度およびヤング係数は試験結果を用いた(図 6.3.12 図 6.3.14, 図 6.3.15 および図 6.3.17)。なお，圧縮強度発現を示す近似式は封緘養生した供試体の圧縮強度を評価できていないが，ここでは柱模擬部材の応力を算定するため，図に示す近似式を用いることとした。クリープ関数は第5章で実施したクリープ試験結果を用いた。 $\phi_0$  と  $\beta_H$  の近似式を(6.4.5)と(6.4.6)に再掲する。

$$\phi_0 = 0.15 + 5.2 \exp(-2.0(E_c(t_0)/E_{c,28})) \quad (6.4.5)$$

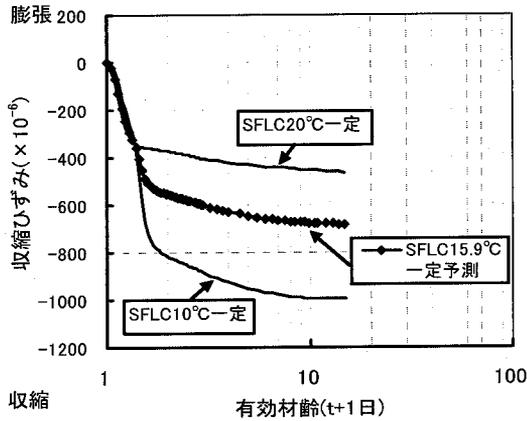


図 6.4.1 SFLC-D41W の 15.9°C 一定の自己収縮ひずみ予測結果

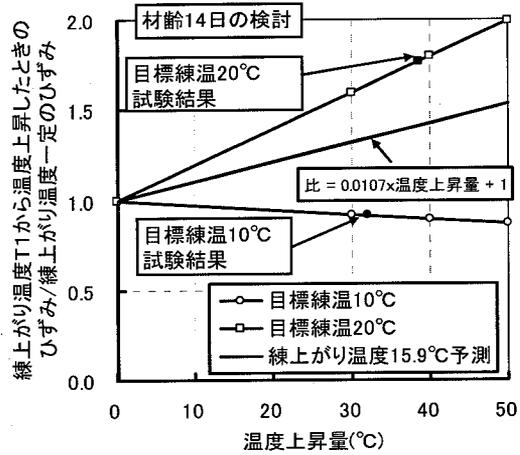


図 6.4.2 温度上昇量とコンクリート温度上昇によるひずみの変化の割合との関係

$$\begin{cases} 0 < E_c(t_0) / E_{c,28} < 0.270 \\ \beta_H = 0.000001 \\ 0.270 < E_c(t_0) / E_{c,28} \\ \beta_H = 49.4(E_c(t_0) / E_{c,28}) - 13.2 \end{cases} \quad (6.4.6)$$

### 6.4.3 弾性ひずみ+クリープひずみの算出方法

全ひずみは、弾性ひずみとクリープひずみとコンクリートの温度ひずみおよび収縮ひずみの和であると仮定した。弾性ひずみとクリープひずみの和は、全ひずみからコンクリートの温度ひずみと収縮ひずみを引くことにより算出した。

コンクリートの温度ひずみは、コンクリートの温度履歴と第4章で示した線膨張係数の式(4.2.1)を用いて算出した。

収縮ひずみは目標練温と温度上昇量により異なることから、第4章の自己収縮ひずみ測定結果と目標練温およびコンクリート温度上昇量との関係から得た実験式を用いて予測した。自己収縮ひずみの予測は、表 6.3.1 に示す練上がり温度(供試体「SFLC-D41W」:15.9°C, 供試体「EX20R-D41W」:19.5°C)を用いて算出した。コンクリート温度上昇量は測定結果を用いた。以下に供試体「SFLC-D41W」に発生した自己収縮ひずみの予測結果を示す。

#### (1) 柱部材練上がり温度(15.9°C)の一定養生温度における収縮ひずみの予測

ここでは、第4章に示した「SFLC10°C一定」と「SFLC20°C一定」のひずみの経時変化を線形補間し、練上がり温度 15.9°C の場合を予測した。図 6.4.1 に予測結果を示す。

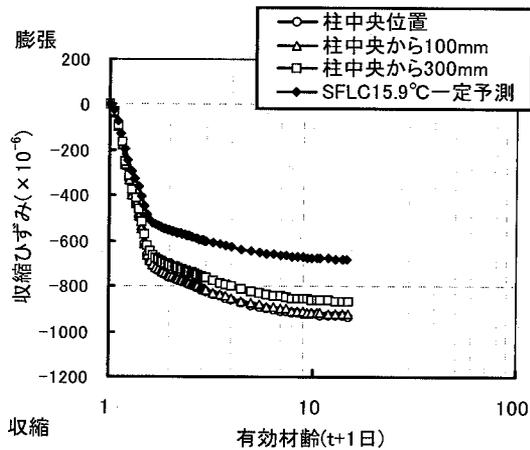


図 6.4.3 SFLC-D41W の各測定位置の自己収縮ひずみ予測結果

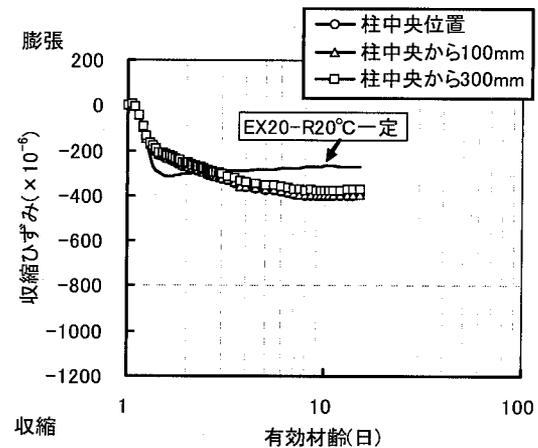


図 6.4.4 EX20R-D41W の各測定位置の自己収縮ひずみ予測結果

(2) 柱部材練上がり温度(15.9°C)の若材齢温度履歴による収縮ひずみ予測

第4章の予測方法から、コンクリート温度上昇したときのひずみはコンクリート温度一定養生したひずみと補正係数との積で示すと式(6.4.7)となる。

$$\varepsilon_{auT}(T_1) = \varepsilon_{auTconst}(1 + \alpha T_1) \quad (6.4.7)$$

ここで、 $\varepsilon_{auT}(T_1)$  は目標練温  $T$  の温度上昇量  $T_1$  のときの収縮ひずみ、 $\varepsilon_{auTconst}$  は目標練温  $T$  としコンクリート温度一定養生した供試体のひずみ、 $\alpha$  は実験により定める係数である(目標練温 10°C : -0.003, 20°C : 0.02)。

図 6.4.2 に温度上昇量と  $\varepsilon_{auT} / \varepsilon_{auTconst}$  の関係を示す。目標練温 10°C と 20°C の結果から線形補間することに柱部材練上がり温度 15.9°C の式(6.4.7)の各係数を算出する(15.9°C :  $\alpha=0.0107$ )。

「EX20-R」の収縮ひずみは練上がり温度 19.5°C であるために第4章の供試体「EX20-R20°C温度一定」と「EX20-R20→60°C」の結果から同様に各位置のコンクリート温度上昇量に対する補正を行った。配合「SFLC」の柱と配合「EX20-R」柱の中央部、柱中央部から 100mm および 300mm 位置の収縮ひずみの予測結果を図 6.4.3 と図 6.4.4 にそれぞれ示す。

#### 6. 4. 4 内部応力予測結果と評価

温度ひずみと収縮ひずみ予測結果から、「弾性ひずみ+クリープひずみ」が算出され、供試体「SFLC-D41W」と「EX20-R-D41W」の柱中央部、柱中央部から 100mm および 300mm 位置の応力を式(6.4.3)、式(6.4.5)より算出した。各配合のコンクリート温度、全ひずみ、引張応力および応力強度比の経時変化を図 6. 4. 5 と図 6. 4. 6 に示す。図中の「柱中央位置」、「柱中央から 100mm」および「柱中央から 300mm」は柱模擬部材の中央位置、中央位置から 100mm、300mm 位置の各結果を示す(図 6. 2. 1 参照)。時間軸原点は応力の発現が始まる材齢 0.4 日とした。供試体「EX20-R-D41W」の柱中央位置、中央位置から 100mm、300mm 位置の全ひずみは、供試体「SFLC-D41W」より小さく、膨張材および収縮低減剤を混入することによる全ひずみの低減効果が認められた。供試体「SFLC-D41W」では、部材中央部のひずみ計(中央、中央から 100mm)は材齢 4 日において急激な変化が見られ、部材中央にひび割れが生じたものと考えられるが、供試体「EX20-R-D41W」では急激なひずみ変化が認められなかった。

供試体「SFLC-D41W」の応力強度比は、材齢 0.5 日で 1.0 を超え、材齢 1 日まで低下し、材齢 3 日に急激な上昇を示した。材齢 0.5 日の「柱中央から 300mm 位置」の応力強度比は「柱中央位置」より大きいことから、表面にひび割れが発生し、柱中央部に進展したことが推察される。膨張材および収縮低減剤による拘束応力の低減効果を検討するため、材齢 0.5 日において両配合の引張応力を比較した。材齢 0.5 日の引張応力は供試体「EX20-R-D41W」において約  $2\text{N/mm}^2$  となる一方、供試体「SFLC-D41W」において約  $4.5\text{N/mm}^2$  となった。このことは、膨張材と収縮低減剤の混入が自己応力の抑制に効果的であったことを意味する。コンクリート温度が最高温度となる材齢 1 日において両配合において発生する引張応力を比較すると、供試体「SFLC-D41W」では柱中央位置と柱中央から 300mm 位置において差が生じたが、供試体「EX20-R-D41W」ではほとんど差が生じない結果となっており、配合間で異なる応力分布結果となった。供試体「SFLC-D41W」の柱内部の引張応力は材齢 0.5 日から材齢 1 日まで引張応力が減少する結果を示し、その後は増加する傾向を示した。これは、供試体「SFLC-D41W」において柱模擬部材表面に微細なひび割れが生じたことから、ひずみの見掛け上の変形に対しても応力増加として評価したためと考えられる。

供試体「EX20-R-D41W」の柱模擬部材の引張応力は材齢 0.25 日まで引張応力が増加し、コンクリートの最高温度となる材齢 1 日まで横ばいとなり、その後に漸増傾向を示した。供試体「EX20-R-D41W」の応力/割裂引張強度は常に 1.0 以下であり、柱内部にひび割れが生じない実験結果とも整合する結果となった。

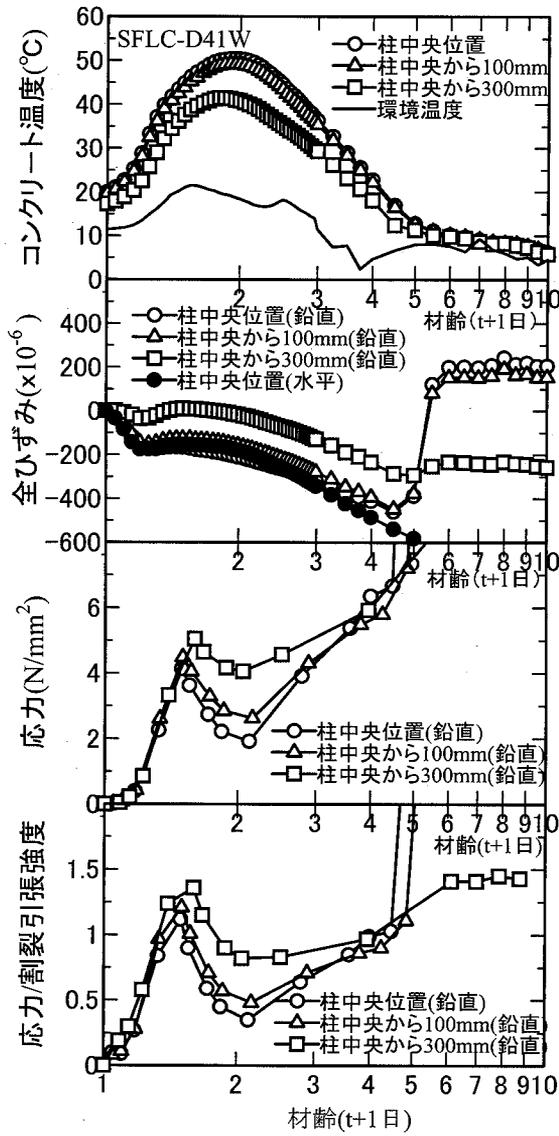


図 6.4.5 SFLC-D41W のコンクリート温度，全ひずみ，発生応力，応力強度比の経時変化

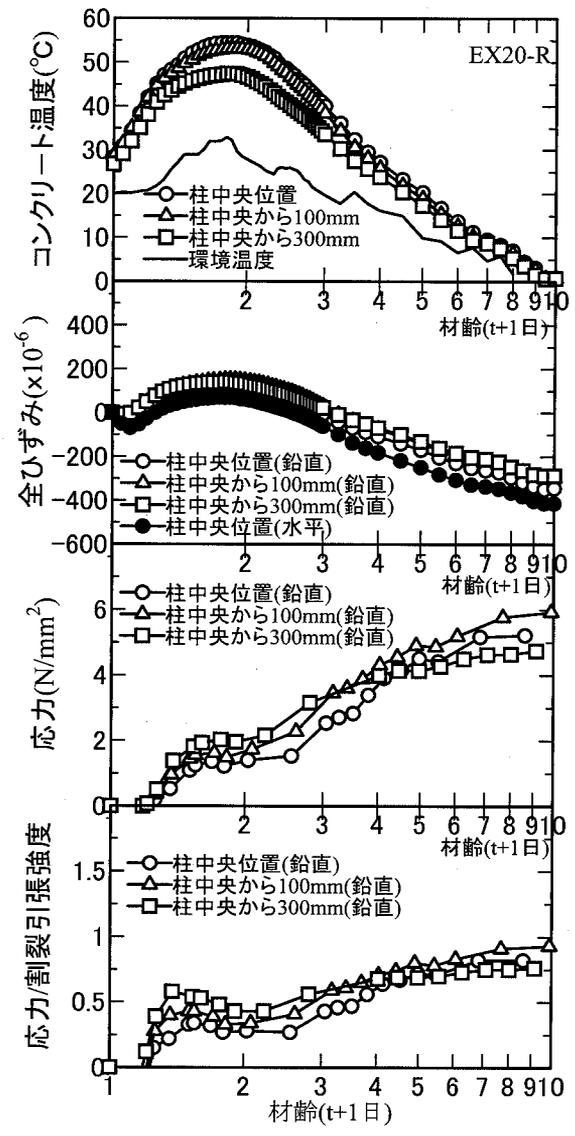


図 6.4.6 EX20R-D41W のコンクリート温度，全ひずみ，発生応力，応力強度比の経時変化

## 6. 5 第6章のまとめ

本章では、拘束応力の大きい超高強度コンクリートと拘束応力を低減した超高強度コンクリートを用いて柱模擬部材を作製し、コンクリート表面、コンクリート内部および鉄筋周囲のひび割れ状況を観察し、収縮ひずみを低減することによる効果を実験的に検討した。また、柱模擬部材内部に埋設したひずみ測定値から内部に発生した応力を予測し、その予測した応力から収縮ひずみの低減した効果を検討した。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 自己収縮ひずみは練上がり温度と初期の水和による温度上昇量の影響を受けるため、各季節におけるひび割れリスクの予測・評価が必要である。本検討では、特に冬期施工においてひび割れリスクが高いことを実験と応力の数値解析により確認した。
- (2) 拘束応力を低減しない D6 および D41 を主筋とした柱模擬部材のひび割れ観察から柱模擬部材に発生するひび割れは、温度応力によるものだけでなく、自己収縮ひずみが鉄筋により拘束されて発生する拘束応力が加算されることにより生じることが明らかになった。超高強度コンクリートのひび割れリスクの評価は温度応力と拘束応力の両者を勘案する必要がある。
- (3) 冬期施工においては、収縮低減剤のみの拘束応力低減では柱模擬部材内部にひび割れが発生した。膨張材と収縮低減剤を混入した拘束応力の低減方法においては、柱模擬部材内部のひび割れ抑制だけでなく、鉄筋周囲のひび割れも抑制することができた。
- (4) 拘束応力を低減しない D41 を主筋とした柱模擬部材では、夏期・冬期において鉄筋周囲に微細なひび割れが発生し、その損傷の程度は主鉄筋間を連結した冬期に施工した部材に顕著であった。このことはコンクリートと鉄筋との付着性状の劣化につながることを予測され、曲げひび割れやせん断耐力にも影響される可能性があり、構造性能の評価が必要である。
- (5) 柱模擬部材の表面および内部のひび割れ発生状況の観察から、表面にひび割れが発生しない場合においても、柱模擬部材内部にひび割れが発生し、外側までひび割れが貫通しない場合があることが確認できた。このことから、超高強度コンクリートを用いた場合には施工前に柱模擬部材などで確認する必要があることを示唆した。

本検討においては柱部材に発生するコンクリートの測定ひずみから応力を予測した。今後は、コンクリートの温度依存性を考慮した収縮ひずみ、クリープ特性およびヤング係数などの基礎物性から構造物の応力を予測する解析手法を構築するとともに、実構造物への整合性を検討する必要がある。また、本研究においては、水結合材比 15% の超高強度コンクリートの検討を対象としてきたが、より一般化するためには様々の条件化における拘束応力の低減効果を確認する必要がある。

## 第6章 参考文献

- 1) CEB-FIP : Model Code 1990, Thomas Telford, 1993
- 2)菅俣匠, 杉山知巳, 梅沢健一, 岡沢智 : セメントーシリカフェーム系結合材の水和反応と強度発現性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1287-1292, 2004
- 3)盛岡実, 萩原宏俊, 坂井悦郎, 大門正機 : 膨張材を混和したセメント硬化体の微細構造, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.169-174, 1998
- 4)谷村充, 佐藤良一, 平松洋一, 兵頭彦次 : 若材齢時長さ変化を考慮した RC 曲げ部材のひび割れ・変形の一般化評価方法, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.181-195,2004
- 5) R. Sato, H. Kawakane : “A New Concept for the Early Age Shrinkage Effect on Diagonal Cracking Strength of Reinforced HSC Beams”, Journal of Advanced Concrete Technology Vol.6, No.1, pp.45-67, 2008
- 6) H. Ito, I. Maruyama, M. Tanimura, and R. Sato : Early Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology Vol.2, No.2, pp.155-174,2004
- 7)今本啓一, 大谷博 : 超高強度鉄筋コンクリート架構試験体に生じたひび割れに関する一検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 495 号, pp.1-8, 1997
- 8)河野政典, 榊田佳寛, 上西隆, 萩原伸治 : 自己収縮の温度依存性を考慮した高強度コンクリート柱部材の初期材齢時発生応力の解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 2, pp. 979-984, 2000

## 第7章 結 論

超高強度コンクリートは、圧縮強度の特長ばかりでなく、耐久面にも優れていることから、長寿命、低桁高および超高層建築などのインフラ整備をして上で有効な建設材料の1つとして期待される。一方、超高強度コンクリート課題の1つに大きな自己収縮ひずみが発生し、鉄筋などに拘束された場合に引張応力が発生し、構造面や耐久面の性能低下につながる可能性がある。この課題に対して、本研究では、超高強度コンクリートの優位性を十分に発揮するために自己収縮ひずみに起因して発生するこの拘束応力を低減する技術を確立し、より高性能となる超高強度コンクリートを確立することを目的とした。この拘束応力を低減するために、高強度、高含水率な多孔性材料である廃瓦粗骨材を用いた内部養生方法を新たに提案し、その拘束応力の低減効果を実験に検討した。また、実構造物に発生する内部応力を適正に予測するために若材齢時のクリープ特性を把握することを目的とした。さらに、水和熱に起因したコンクリートの温度履歴や練上がり温度が収縮ひずみに与える影響を把握することにより、実構造物に発生する応力を正当に評価する基礎データを提示することを目的とした。

以下、各章で得られた主要な知見を以下に示し、本論文の結論とする。

第1章は序論であり、超高強度コンクリートの構造面や耐久面の優位性を確保するためには自己収縮ひずみに起因した拘束応力を低減することが必要であることを指摘し、本研究の目的および論文の構成について述べた。

第2章では、本研究に関連した既往の研究に関する現況についてまとめた。現況の問題点をまとめ、本研究の位置づけを明確にした。

- (1) 高強度コンクリートの自己収縮ひずみに関する発生機構に関しては多くの知見を得ている。また、セメント種別やシリカフェームが自己収縮ひずみの発生量に与える影響に関しても基礎的知見が得られている。しかしながら、これらの多くが水結合材比20%以上の知見であり、水結合材比20%を下回る超高強度コンクリートに知見はほとんどないのが現状である。
- (2) 自己収縮ひずみに関する基礎データの多くが練上がり温度と養生温度を20℃とした知見であり、練上がり温度や水和熱に起因したコンクリート温度上昇量が自己収縮ひずみ発現や自己収縮ひずみ発生量に与える影響に関する検討はほとんどないのが現状である。
- (3) 自己収縮ひずみや収縮応力を低減する方法として、物理的な膨張ひずみの付与、表面張力の低減および内部養生方法などの知見が得られている。しかしながら、水結合材20%を下回る超高強度コンクリートに関する自己収縮ひずみの低減効果に関する知見がほとんどないのが現状である。また、膨張材を使用したモルタルに関しては未反応膨張材の後膨張ひずみの発生に関する知見を得ているが、コンクリートとしての性状に関する知見がほとんどないのが現状である。
- (4) 内部養生方法として、高含水率の軽量骨材を使用する方法があるが、天然粗骨材との置換率を高めた場合に圧縮強度の低下が認められた。軽量骨材より破碎値が

- 大きく、高含水率な廃瓦粗骨材を超高強度コンクリートの収縮ひずみや収縮応力の低減方法に有効な手段と考えられるが、基礎的性状が明らかになっていない。
- (5) 練上がり温度や水和熱に起因したコンクリート温度上昇量が各種自己収縮ひずみや自己応力の低減方法による低減効果に与える影響に関する検討はほとんど行われていないのが現況である。
  - (6) ひび割れリスクを予測するためには、部材に発生する内部応力を予測する必要があるが、この予測に必要となる超高強度コンクリートの若材齢時のクリープ特性に関する検討はほとんどないのが現況である。

第3章では、シリカフェームと低熱セメントを用いた水結合材比15%の超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの低減方法を実験的に検討した。自己収縮ひずみの低減方法として、膨張材、収縮低減剤および内部養生をするための廃瓦粗骨材をそれぞれ用い、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの低減効果を実験的に検討した。また、これら材料を使用した強度特性に及ぼす影響を検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

#### －膨張材と収縮低減剤による自己収縮ひずみ低減－

- (1) 膨張材と収縮低減剤を混入することにより、超高強度コンクリートの領域においても自己収縮ひずみの低減効果が認められた。
- (2) 水結合材15%の条件における膨張材と収縮ひずみを用いた超高強度コンクリートは、単位膨張材量を練上がり温度や水和熱に起因した温度上昇、さらに水中養生条件下における検討から単位膨張材量 $20\text{kg/m}^3$ とすれば、有効材齢660日においても後膨張ひずみを生じないことが明らかになった。ただし、本試験条件においては、単位膨張材量 $25\text{kg/m}^3$ とした場合に後膨張ひずみが発生した。
- (3) 後膨張ひずみの有無には膨張材の温度依存性があり、練上がりコンクリートの温度上昇量が高い場合には後膨張ひずみは発生しない場合があることが明らかになった。しかし、さまざまなコンクリート温度条件においても後膨張ひずみの発生を抑制することが望ましく、超高強度コンクリートに膨張材を使用する場合には膨張材の温度依存性の検討を十分に実施し、単位膨張材量を決定することが必要である。

#### －廃瓦粗骨材による自己収縮ひずみ低減－

- (4) 廃瓦粗骨材を使用したコンクリートは、内部養生効果により、有効材齢1日において膨張ひずみが生じ、自己収縮ひずみを低減することが認められた。その効果は、膨張材と収縮低減剤との併用した場合よりも大きくなることが明らかになった。
- (5) 廃瓦粗骨材の使用量を多くした場合には有効材齢1日までに発生する膨張材ひずみが大きくなるが、一方において、有効材齢9日移行の自己収縮ひずみが大きくなることが明らかになった。このことから、廃瓦粗骨材の使用量を決定するためには、短期・長期の自己収縮ひずみを総合的に判断する必要がある。本研究の範囲では、粗骨材全容積の20%とすることにより長期の自己収縮ひずみの増分量を小さくできた。なお、容積置換率に関する検討はさらにデータに蓄積が必要である。
- (6) 粗骨材全容積の20%を瓦粗骨材とした供試体と基準となる自己収縮ひずみを低減しない供試体の自己収縮ひずみとの差は有効材齢9日移行においてほとんど変動しない結果が認められた。このことから、廃瓦粗骨材の内部養生効果は材齢初期に特

に効果を発揮することが認められた。

- (7) 乾燥収縮ひずみに関しては、有効材齢 28 日まで封緘養生を行い、それ以後に乾燥を開始した場合には廃瓦粗骨材の量が多いほど乾燥収縮ひずみの低減効果が認められた。しかし、有効材齢 1 日から 7 日まで湿布養生を行い、乾燥させた場合には瓦粗骨材が多いほど乾燥収縮ひずみが大きくなる傾向が認められた。
- (8) 廃瓦粗骨材を用いた内部養生効果は水結合材比が小さいほど効果があることが認められた。

#### －廃瓦粗骨材と膨張材および収縮低減剤併用による自己収縮ひずみ低減－

- (9) 廃瓦粗骨材と膨張材および収縮低減剤を併用した供試体は自己収縮ひずみの低減効果が認められた。廃瓦粗骨材単身において有効材齢 1 日から自己収縮ひずみが増加する傾向があったが、膨張材と収縮低減剤を混入することにより、それを抑制する効果が認められた。

#### －強度特性－

- (10) 廃瓦粗骨材単身で使用した供試体の圧縮強度は、収縮ひずみを低減しない供試体と比較して大きくなった。また、瓦粗骨材の混入による圧縮強度の低下は認められなかった。このことから、廃瓦粗骨材の超高強度コンクリートへの使用は可能であることが明らかになった。
- (11) 膨張材と収縮低減剤を混入した場合には、圧縮強度低下が認められたが、その程度は、廃瓦粗骨材の超高強度コンクリートにさらに膨張材と収縮低減剤を混入した供試体では長期材齢において緩和されることが認められた。
- (12) ヤング係数は、廃瓦粗骨材の量が多くなるほど小さくなることが明らかになったが、その程度は約 7%であった。膨張材と収縮低減剤のみを自己収縮ひずみの低減に用いた供試体の圧縮強度は基準コンクリートと同等であった。
- (13) 廃瓦粗骨材を用いたコンクリートの割裂引張強度は基準コンクリートとほとんど同じであり、割裂引張強度低下は認められなかった。

第 4 章では、水結合材比 15%において、練上がり温度や温度上昇量が発生する自己収縮ひずみ量に及ぼす影響を実験的に検討するとともに、前章で述べた自己収縮ひずみの低減の効果に関して、温度依存性の観点から実験的に検討した。また、実験で得られた結果をもちいて実験式を求めた。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 超高強度コンクリートの温度履歴が与えられた場合においても膨張材、収縮低減剤および廃瓦粗骨材を混入することにより、超高強度コンクリートの領域においても自己収縮ひずみの低減効果が認められた。
- (2) 自己収縮ひずみの発生量は、練上がり温度やコンクリートの温度上昇量による異なり、コンクリートの温度依存性があることが認められた。
- (3) コンクリートを一定の温度で養生した配合「SFLC」と「EX-20-R」供試体の自己収縮ひずみは、練上がり温度が高くなるほど小さくなる傾向を示すことが認められた。本研究においては、練上がり温度 10℃における配合「SFLC」の自己収縮ひずみは、練上がり温度 20℃の自己収縮ひずみの 2 倍以上であった。
- (4) 配合「SFLC」と「EX-20-R」供試体に関しては、初期の水和に起因する温度上昇に

よる自己収縮ひずみの増加は、練上がり温度が高くなるほど大きくなり、その傾向は配合「EX20-R」に顕著に認められた。

- (5) 配合「G20-R」の自己収縮ひずみの温度依存性は、配合「SFLC」と比較して小さくなる傾向が認められた。この理由として、コンクリートの温度上昇によるコンクリートの湿度低下から廃瓦粗骨材の内部養生効果が高まったことが考えられるが、さらにデータの蓄積が必要と考える。
- (6) コンクリートの養生を 20℃および 30℃一定とした供試体の自己収縮ひずみの発現は若材齢時の 10℃一定の自己収縮ひずみの発現と同じであるが、コンクリートの養生温度が高いほど、早い段階で自己収縮ひずみにおいて経時変化に伴う変動量が小さくなる領域に移行する傾向が認められた。
- (7) 配合「SFLC」と「EX-20-R」供試体のコンクリート温度依存性を考慮した実験式は、最初にコンクリートを一定の温度で養生した場合を求め、次にコンクリートの温度上昇量による影響を考慮することにより求めた。前述の理由から、コンクリートを一定の温度で養生した供試体の自己収縮ひずみの発現は有効材齢 1 日以前の自己収縮ひずみ発現の変曲点となる有効材齢の以前と以後で実験式を変えることにより精度を向上させることができた。
- (8) 圧縮強度の温度依存性に関しては、コンクリートの高温領域において圧縮強度が大きくなる傾向が認められた。

自己収縮ひずみ量は、練上がり温度とコンクリートの最高温度に影響することから、これらを考慮したひび割れリスクの評価が必要である。特に冬期施工に関して自己収縮ひずみ量が多いことや強度発現が遅いことから留意する必要があると考える。

第 5 章では、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの発現が若材齢時に生じるため、若材齢時のクリープ特性を実験的に把握し、クリープ実験式を求め、次に基準コンクリートと膨張材と収縮低減剤および瓦粗骨材を用いて自己収縮ひずみを低減したコンクリート(以下、低収縮超高強度コンクリート)の拘束応力試験結果による拘束応力の低減効果の検討をした。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 横置き of クリープ試験機を用いて、拘束応力を低減しない水結合材比 0.15 の超高強度コンクリートの若材齢時のクリープ特性を把握し、超高強度コンクリートのクリープ関数を新たに提案した。
- (2) このクリープ関数を用いた解析値と拘束応力を低減しない供試体の拘束応力はよく合致した。ただし、鉄筋比が大きくなるにつれて解析値は、実験値より大きくなる傾向を示した。これは鉄筋周囲の微細なひび割れなどによるクリープ以外の応力緩和などが推測される。
- (3) 膨張材と収縮低減剤を混入した場合の解析値は実験値より大きくなる結果を得た。膨張材と収縮低減剤を混入した超高強度コンクリートとは異なり、クリープ係数が大きくなる可能性がある。
- (4) 廃瓦粗骨材を混入した場合の解析値は、廃瓦粗骨材の混入量が多いほど実験値と乖離した。

- (5) 廃瓦粗骨材を全骨材容積の 20%および 40%とした内部養生法のみでの拘束応力の低減効果は有効材齢 9 日までは大きいですが、9 日以降の低減効果は小さくなる傾向を示した。これは、内部養生方法のみの場合には 9 日以降の自己収縮ひずみの発現量が多くなること、ヤング係数が大きくなること、およびクリープ係数が小さくなることによるものと考えられる。このことは、自己収縮ひずみと鉄筋ひずみとの関係から、有効材齢 9 日までの自己収縮ひずみに対する鉄筋ひずみの変動割合が有効材齢 9 日から有効材齢 360 日の自己収縮ひずみに対する鉄筋ひずみの変動割合より小さくなる結果からも推定される。
- (6) 廃瓦粗骨材を全粗骨材容積の 20%置換したコンクリートに膨張材と収縮低減剤を混入した供試体の拘束応力は、有効材齢約 150 日において  $0.1\text{N/mm}^2$  の引張応力となった。また、この配合は初期・長期材齢において拘束応力の低減効果を認められ、本研究の範囲においては、最もひび割れリスクが低くなると考えられる。
- (7) 有効材齢 28 日まで封緘養生を行い、乾燥を開始した拘束応力と引き続き封緘養生を実施した拘束応力の差を乾燥収縮ひずみによる拘束応力と仮定した場合に内部養生方法と膨張材と収縮低減剤を併用した方法において、明確な差異が認められなかった。
- (8) 有効材齢 7 日まで湿布養生を行い、乾燥を開始した拘束応力と封緘養生を実施した拘束応力の差は、内部養生方法のみとした場合に大きくなる傾向を示した。
- (9) 拘束応力の低減を行わないコンクリートと膨張材と収縮低減剤を混入したコンクリートの  $20^\circ\text{C}$ 一定と  $30^\circ\text{C}$ 一定として養生を行った供試体の拘束応力は  $30^\circ\text{C}$ 一定の方が小さくなった。また、 $30^\circ\text{C}$ 一定として養生した供試体の拘束応力の解析値と実験値が異なり、クリープ特性の温度依存性があることの可能性を示した。
- (10) 季節ごとの実構造物を想定したコンクリート温度履歴を拘束応力の低減を行わない供試体に与えた拘束応力試験結果から、拘束応力に関しても自己収縮ひずみ同様に温度依存性が認められ、本研究の範囲では冬期によりひび割れリスクが高くなる結果となった。

なお、本研究において、参考として拘束応力の低減を実施していない配合のクリープ関数を用いて廃瓦粗骨材を用いた供試体や膨張材および収縮低減剤を混入した供試体のクリープ解析を実施した。今後はこれら配合に関してもクリープ特性を把握し、より精度の高めることが望まれる。また、廃瓦粗骨材を用いた内部養生方法に関しては、実構造物を想定したコンクリートの温度履歴が拘束応力やクリープ特性に与える影響を把握し、より合理的な解析手法を確立していく必要があると考える。

第 6 章では、拘束応力の大きい超高強度コンクリートと拘束応力を低減した超高強度コンクリートを用いて柱模擬部材を作製し、コンクリート表面、コンクリート内部および鉄筋周囲のひび割れ状況を観察し、収縮ひずみを低減することによる効果を実験的に検討する。また、柱模擬部材内部に埋設したひずみ測定値から内部に発生した応力を予測し、その予測した応力から収縮ひずみの低減した効果を検討した。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 自己収縮ひずみは練上がり温度と初期の水和による温度上昇量の影響を受けるため、各季節におけるひび割れリスクの予測・評価が必要である。本検討では、特に冬期施工においてひび割れリスクが高いことを実験と応力の数値解析により確認した。
- (2) 拘束応力を低減しない D6 および D41 を主筋とした柱模擬部材のひび割れ観察から柱模擬部材に発生するひび割れは、温度応力によるものだけでなく、自己収縮ひずみが鉄筋により拘束されて発生する拘束応力が加算されることにより生じることが明らかになった。超高強度コンクリートのひび割れリスクの評価は温度応力と拘束応力の両者を勘案する必要がある。
- (3) 冬期施工においては、収縮低減剤のみの拘束応力低減では柱模擬部材内部にひび割れが発生した。膨張材と収縮低減剤を混入した拘束応力の低減方法においては、柱模擬部材内部のひび割れ抑制だけでなく、鉄筋周囲のひび割れも抑制することができた。
- (4) 拘束応力を低減しない D41 を主筋とした柱模擬部材では、夏期・冬期において鉄筋周囲に微細なひび割れが発生し、その損傷の程度は主鉄筋間を連結した冬期に施工した部材に顕著であった。このことはコンクリートと鉄筋との付着性状の劣化につながることを予測され、曲げひび割れやせん断耐力にも影響される可能性があり、構造性能の評価が必要である。
- (5) 柱模擬部材の表面および内部のひび割れ発生状況の観察から、表面にひび割れが発生しない場合においても、柱模擬部材内部にひび割れが発生し、外側までひび割れが貫通しない場合があることが確認できた。このことから、超高強度コンクリートを用いた場合には施工前に柱模擬部材などで確認する必要があることを示唆した。

本検討においては柱部材に発生するコンクリートの測定ひずみから応力を予測した。今後は、コンクリートの温度依存性を考慮した収縮ひずみ、クリープ特性およびヤング係数などの基礎物性から構造物の応力を予測する解析手法を構築するとともに、実構造物への整合性を検討する必要がある。また、本研究においては、水結合材比 0.15 の超高強度コンクリートの検討を対象としてきたが、より一般化するためには様々な条件化における拘束応力の低減効果を確認する必要がある。

以上のことより、本研究では、超高強度コンクリートの収縮応力の低減方法を確立し、それによる超高強度コンクリートの優位点である構造面や耐久面を確保し、より高性能なコンクリートとしての低収縮超高強度コンクリートを提案することができた。また、水和熱に起因したコンクリートの温度履歴や練上がり温度が収縮ひずみに与える影響を受けるため、実構造物に発生する応力を正當に評価するためには各季節での検討が必要であることを示した。また、若材齢時のクリープ特性や自己収縮ひずみの実験式を提示し、材料特性から内部応力を予測することを可能とした。これにより、超高強度コンクリートの分野における技術的發展を図れたものと考えている。

## 本論文に関連のある研究報告

### 1. 査読付き論文

- 1) 鈴木雅博, 中瀬博一, 丸山一平, 佐藤良一: 超高強度膨張コンクリートの自己応力に及ぼす温度履歴の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.59, pp.375-382, 2005  
【関連する章: 第3章, 第4章, 第5章】
- 2) M. Suzuki, I. Maruyama and R. Sato: Properties of Expansive-Ultra High-Strength Concrete, 7<sup>th</sup> Symposium on the Utilization of High-Strength / High-Performance concrete, ACI Special Publication-228, pp.1159-1174, 2005  
【関連する章: 第3章, 第4章】
- 3) 鈴木雅博, 丸山一平, 尼丁将太, 佐藤良一: 超高強度膨張コンクリートの自由変形と拘束応力に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No.1, pp.563-568, 2006  
【関連する章: 第5章】
- 4) 丸山一平, 亀田昭一, 鈴木雅博, 佐藤良一: RCプリズムにおける自己収縮ひずみによる微細ひび割れ発生と収縮応力挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No.1, pp.587-592, 2006  
【関連する章: 第5章】
- 5) 鈴木雅博, 丸山一平, 川畑智亮, 佐藤良一: 廃瓦粗骨材を用いた超高強度膨張コンクリートの変形と拘束応力に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No.1, pp.651-656, 2007  
【関連する章: 第3章, 第5章】
- 6) 桐山宏和, 丸山一平, 鈴木雅博, 佐藤良一: 超高強度 RC 部材中の初期応力発生メカニズムに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No.1, pp.669-674, 2007  
【関連する章: 第6章】
- 7) 寺本篤史, 宮地友也, 丸山一平, 鈴木雅博: 超高強度コンクリートの若材齢線膨張係数に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No.1, pp.633-638, 2007  
【関連する章: 第4章】
- 8) 鈴木雅博, 丸山一平, 川畑智亮, 佐藤良一: 超高強度 RC プリズムの自己応力低減に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No.1, pp.459-464, 2008  
【関連する章: 第3章, 第5章】
- 9) 寺本篤史, 山崎康太, 丸山一平, 鈴木雅博: 超高強度コンクリートの自己収縮の温度依存性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No.1, pp.489-494, 2008  
【関連する章: 第4章】
- 10) 丸山一平, 鈴木雅博, 中瀬博一, 佐藤良一: 温度履歴がRC柱の初期応力・初期欠陥に及ぼす影響に関する実験的検討—超高強度コンクリートを用いたRC柱の初期応力・初期欠陥に関する研究 その1—, 日本建築学会構造系論文集, 第629号, pp.1035-1042, 2008  
【関連する章: 第6章】

- 11) 鈴木雅博, 丸山一平, 中瀬博一, 佐藤良一: 超高強度コンクリートを用いたRC柱の膨張材と収縮低減剤による初期応力・初期欠陥低減に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第635号, pp.1-10, 2009

【関連する章: 第4章, 第6章】

- 12) 丸山一平, 鈴木雅博, 勅使河原正臣, 佐藤良一: 鉄筋コンクリート柱の断面内応力に関する解析的検討—超高強度コンクリートを用いたRC柱の初期応力・初期欠陥に関する研究 その2—, 日本建築学会構造系論文集, 第637号, pp.425-431, 2009

【関連する章: 第6章】

## 2. 口頭発表論文

- 1) M. Suzuki, I. Maruyama, K. Kawai and R. Sato : Temperature Effect on Shrinkage Stress in Expansive Stress in Expansive-Ultra High Strength Concrete, Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures, Concreep-7, Edited by Gilles Pijaudier-Cabot, pp.627-632, 2005

【関連する章: 第3章, 第4章, 第5章】

- 2) M. Suzuki, H. Nakase, I. Maruyama and R. Sato : The effect of hydration heat on the reduction of shrinkage in expansive-ultra high strength concrete, Proceedings of International Conference on Civil and Environmental Engineering, ICCEE-2005, Higashi-Hiroshima, Japan, pp.119-126, 2005

【関連する章: 第3章, 第4章, 第5章】

- 3) 丸山一平, 佐藤良一, 鈴木雅博: 高強度コンクリートの健全性に関する検証, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.625-626, 2005

【関連する章: 第5章】

- 4) I. Maruyama, S. Kameta, M. Suzuki, R. Sato, Cracking of high strength concrete around deformed reinforcing bar due to shrinkage, Int. RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning, edited by K. Kovler, RILEM Publications S. A. R. L., Ein-Bokek, Israel, pp.104-111, 2006

【関連する章: 第5章】

- 5) 鈴木雅博, 丸山一平, 尼丁将太, 佐藤良一: 超高強度膨張コンクリートの自己応力に関する検討, 第60回セメント技術大会講演要旨, pp.186-187, 2006

【関連する章: 第5章】

- 6) M. Suzuki, I. Maruyama, S. Amachou and R. Sato : A STUDY ON DEFORMATION AND RESULTANT STRESSES IN EXPANSIVE ULTRA-HIGH-STRENGTH CONCRETE, Proceedings of International Conference on Civil and Environmental Engineering, ICCEE-2006, Higashi-Hiroshima, Japan, pp.227-232, 2006

【関連する章: 第5章】

- 7) 丸山一平, 鈴木雅博, 佐藤良一: 超高強度コンクリートを用いたRC柱部材の初期応力に関する検討, コンクリート構造物の耐久性力学, 耐久性力学に関するシンポジウム論文集, JCI-C73, pp.303-312, 2007

【関連する章: 第6章】

- 8) 丸山一平, 鈴木雅博, 佐藤良一: 超高強度コンクリートを用いたRC柱部材に性能における自己収縮の影響に関する基礎的研究, 混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333委員会)報告書ならびシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ 74, 土木学会, pp.Ⅱ-71-78, 2007

【関連する章: 第6章】

- 9) 川畑智亮, 鈴木雅博, M. S. MEDDAH: 内部養生型コンクリートにおける水結合材比が収縮応力低減に及ぼす影響, 土木学会第63回年次学術講演会, pp.865-866, 2008

【関連する章: 第3章】

- 10) M. Suzuki, I. Maruyama, H. Nakase and R. Sato: Reduction of restrained stress in ultra high strength concrete using porous ceramic for internal curing, Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures, Concreep-8, Edited by Tada-aki Tanabe, pp.839-846, 2008

【関連する章: 第3章, 第5章】

- 11) I. Maruyama, M. Suzuki and R. Sato: Self-induced stress in reinforced ultra high-strength concrete, Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures, Concreep-8, Edited by Tada-aki Tanabe, pp.365-372, 2008

【関連する章: 第6章】

- 12) A. Teramoto, I. Maruyama and M. Suzuki: Temperature dependency of autogenous shrinkage of ultra high-strength concrete, Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures, Concreep-8, Edited by Tada-aki Tanabe, pp.701-708, 2008

【関連する章: 第4章】

### 3. 報告

- 1) 鈴木雅博, 中瀬博一, 藤井和俊: 超高強度コンクリートの収縮応力低減化に関する研究, 株式会社ピーエス三菱 技報第4号, pp62-63(概要), (詳細はCD-ROM), 2006

【関連する章: 第4章, 第5章】

- 2) 川畑智亮, 鈴木雅博: 廃瓦粗骨材を用いた超高強度コンクリートの自己収縮応力低減, 株式会社ピーエス三菱 技報第6号, pp16-17(概要), (詳細はCD-ROM), 2008

【関連する章: 第3章, 第5章】

## 謝 辞

大変お忙しい中、論文の審査をして頂きました広島大学教授 佐藤良一博士、広島大学教授 土田孝博士、広島大学教授 大久保孝昭博士、広島大学准教授 河合研至博士、名古屋大学准教授 丸山一平博士に深甚の謝意を表します。

本論文をとりまとめるに際し、主査をお引き受け頂いた佐藤良一博士には、研究の方向性、実験のポイントおよび研究論文作成に至るまで、お忙しい中、懇切なご指導、ご教示を頂きました。佐藤良一博士には、筆者が宇都宮大学の学部生および修士課程の在籍から今日に至るまで、一般化するために必要となる発生している現象のメカニズムの徹底した追求の必要性を御教示頂きました。さらに、公私にわたり多くのお心遣いを頂きました。衷心より厚くお礼申し上げます。今後の研究においての礎に致します。

副査をお引き受け頂いた丸山一平博士(入学時 広島大学助手)には、今日に至るまで、佐藤良一博士と同様に原理の追求する姿勢を御教示頂きました。実験に際しては、お忙しい中、弊社におこし頂き、実験のポイントを御教示頂きました。論文作成においては多くのご指導、ご教示を賜るとともに、実験と解析との両者において比較検討することもまた重要であることを御教示頂きました。また、本研究において必要不可欠となるデータ収集に関しても多大なるご協力を頂きました。心より感謝の意を申し上げます。

筆者が学位論文完成に辿り着けましたのも、佐藤良一博士、丸山一平博士の優れた指導者に恵まれたおかげでございます。

副査をお引き受け頂いた土田孝博士、大久保孝昭博士、河合研至博士には、論文審査にあたり多くの貴重なご助言・ご意見を頂きました。心より感謝の意を申し上げます。

本論文は、著者が2004年から2009年にかけて広島大学大学院工学研究科社会人博士後期の在学期間中に行った超高強度コンクリート部材の初期応力・初期ひび割れ抑制に関する研究を中心にとりまとめたものであります。研究着手から論文完成まで約5年を要しましたが、この間に頂いた多くの方のご指導、ご鞭撻、ご支援において本研究を実施することができたものであります。ここに記して、深甚の謝意を表します。

中国高圧コンクリート工業(株)取締役中川信矢氏、中国電力(株)エネルギー総合研究所マネージャー岩田和典氏、同研究員清木祥平氏、尼丁将太氏をはじめとする広島大学・構造材料工学研究室の卒業生および在学生の皆様、寺本篤史氏、宮地友也氏をはじめとする名古屋大学・建築構造システム講座の卒業生および在学生の皆様には、供試体の作製、データ収集などの多大なるご協力を頂きました。広島大学・構造材料工学研究室の甲斐真理子さん、前任の瀬分智子さんには事務的な面でご配慮頂きました。

広島大学名誉教授田澤榮一博士、広島工業大学教授 米倉亜洲夫博士、宇都宮大学教授 中島章典博士、秋田大学教授加賀谷誠博士、オリエンタル白石(株) 手塚正道博士、三井住友建設(株) 藤田学博士には機会があるごとに激励を頂きました。

筆者を快く社会人学生として、広島大学大学院工学研究科社会人博士後期に入学を許可して頂きました田中義一氏(当時(株)ピーエス三菱代表取締役社長)、理崎好生氏(当時(株)ピーエス三菱専務取締役技術本部長)に深く感謝します。また、在学中においては、勝木恒男(株)ピーエス三菱代表取締役社長をはじめとする前(株)ピーエス三菱代表取締役社長延増喬史氏、元(株)ピーエス三菱代表取締役神田徹氏、(株)ピーエス三菱職員に感謝致します。

理崎好生氏には、研究の機会を与えて頂くとともに、入学するにあたり多大なご尽力を頂き、さらには研究に関して多くのご支援とご配慮を頂きました。研究の遂行にあたり技術研究所長大浦隆氏、前任の佐藤雅則氏(現(株)復建エンジニアリング)には激励やご配慮を頂きました。春山漢同氏(現(株)ピーエス三菱技術研究所 実験補助員、元(株)ピーエス小田原工場品質管理室)には、実験に際し、骨材管理、供試体作製、強度試験などの多くのご協力を頂きました。服部政昭氏(現(株)日本構造橋梁研究所、元(株)ピーエス三菱技術研究所管理グループリーダー)には在籍中に研究に関する激励とサポート要員などのご配慮を頂きました。技術研究所のOBである長井健雄博士、久野公德博士、(株)ピーエス三菱 建築技術部長 浜田公也博士、開発メンテナンス部グループリーダー 石井浩司博士には終始激励を頂きました。吉松慎哉グループリーダー、大柳修一氏、桐川潔氏をはじめとする研究所移籍前の開発技術部の皆様、元技術研究所副所長の藤井和俊博士、元技術研究所材料グループの穴沢雅明主任研究員(現(株)ニューテック興和)、現材料グループの桜田道博主任研究員、中瀬博一主任研究員、川畑智亮研究員には供試体作製、データの整理のご協力を頂くとともに論文作成にあたり多くのご協力、ご配慮を頂きました。また、研究所研究員各位には論文作成にあたり多くの激励を頂きました。

宇部三菱セメント(株)には SFC(低熱セメントとシリカフェームのプレミックス材)、BASF ポゾリス(株)には 8HU(超高強度用高性能減水剤)を提供して頂くとともにコンクリート製造にご協力を頂きました。

このように、本研究は多くの方々のご協力、ご支援により完成したものであります。あらためて、感謝の意を表します。ありがとうございました。

最後に私事ですが、5年間暖かく見守って頂きました父 啓充、母 登美子、弟 智久に心より感謝致します。