

セメント系材料の水和反応に依存する体積変化に関する研究
(Study on volume change of cementitious materials under hydration process)

寺本 篤史
(TERAMOTO, Atsushi)

名古屋大学大学院環境学研究科 博士（工学）

2012 年

第1章 序論	
1.1 背景	2
1.2 本論文の目的	5
1.3 本論文の特色	8
1.4 本論文の概要	9
第2章 水和依存性体積変化の成分分離	
2.1 概論	14
2.2 既往の研究	16
2.2.1 線膨張係数の経時変化	18
2.2.2 線膨張係数の相対湿度依存性	20
2.2.3 線膨張係数に及ぼす温度履歴の影響	23
2.3 線膨張係数測定装置の開発	25
2.3.1 概要	25
2.3.2 線膨張係数の測定方法に関する検討	27
2.3.3 線膨張係数測定用温度パルスが自己収縮ひずみに及ぼす影響	32
2.3.4 ひずみの測定方法に関する検討	33
2.4 線膨張係数に及ぼす調合の影響	36
2.4.1 実験概要	36
2.4.2 水セメント比の影響	39
2.4.3 セメント種類の影響	44
2.4.4 質量含水率と線膨張係数の関係	47
2.4.5 骨材量の影響	50
2.5 温度ひずみ	52
2.6 人工軽量骨材による線膨張係数の制御手法	56
2.6.1 実験概要	56
2.6.2 測定結果及び考察	58
2.7 収縮低減剤による線膨張係数の制御手法	62
2.7.1 収縮低減剤の作用に関する理論的背景	62
2.7.2 実験概要	63
2.7.3 測定結果及び考察	64
2.7.4 線膨張係数低減メカニズムに関する考察	68
2.8 結論	70

第3章 自己収縮ひずみ	
3.1 概論	75
3.2 既往の研究	76
3.2.1 収縮理論	76
3.2.2 自己収縮ひずみに関する既往の知見	80
3.2.3 超高強度コンクリートの自己収縮	84
3.2.4 自己収縮に関する既往の知見のまとめ	86
3.2.5 水和収縮	88
3.3 実験概要	91
3.3.1 実験概要 シリーズ1 ー普通強度セメントペースト, モルタルー	91
3.3.2 実験概要 シリーズ2 ー超高強度セメントペースト, モルタルー	94
3.3.3 実験概要 シリーズ3 ー超高強度セメントペースト, コンクリートー	97
3.4 セメントペーストの自己収縮に及ぼす調合の影響	100
3.4.1 水セメント比の影響	100
3.4.2 セメント種類の影響	105
3.4.3 混和材・剤の影響	107
3.5 セメントペーストの自己収縮に及ぼす温度履歴の影響	111
3.5.1 アレニウス則による有効材齢	111
3.5.2 シリーズ1 水セメント比 25%~55%	111
3.5.3 シリーズ2 (SFC W/C=15%)	115
3.5.4 シリーズ3 (SFPC W/C=13%~20%)	122
3.6 自己収縮ひずみに及ぼす骨材の影響	124
3.6.1 骨材寸法の影響	124
3.6.2 骨材量の影響	125
3.7 超高強度コンクリートの自己収縮ひずみ予測式の提案	128
3.7.1 予測式の方針	128
3.7.2 検証用コンクリート試験体の自己収縮ひずみ	128
3.7.3 コンクリートの線膨張係数に関する取扱い	129
3.7.4 コンクリートの自己収縮試験結果	130
3.7.5 変曲点以前の自己収縮に及ぼす調合要因	130
3.7.6 終局自己収縮ひずみ	132
3.7.7 セメントペーストの自己収縮予測式	132
3.7.8 骨材の影響	134
3.7.9 コンクリート試験体による検証	135
3.8 結論	139

第4章	超高強度コンクリートの自己収縮メカニズム	
4.1	概論	146
4.2	水和圧理論に関する既往の研究	147
4.2.1	セメントペーストの体積変化と分離圧の関係	147
4.2.2	増分分離圧と統計的吸着厚さの関係	149
4.2.3	実験によって得られた分離圧曲線の評価	150
4.2.4	水和圧を駆動力とする収縮メカニズム	150
4.3	変曲点以降の自己収縮メカニズム	151
4.3.1	実験概要	151
4.3.2	実験結果	155
4.3.3	水和圧曲線	158
4.4	変曲点以前の自己収縮ひずみメカニズム	160
4.4.1	実験概要	160
4.4.2	実験結果	163
4.4.2	水和圧曲線	167
4.5	変曲点の決定メカニズム	169
4.6	超高強度コンクリートの自己収縮温度依存性の検証	172
4.6.1	仮説	172
4.6.2	数値計算	173
4.7	結論	176
第5章	水和依存性体積変化に起因するRC部材中のひび割れ	
5.2	既往の研究	179
5.3	実験概要	183
5.3.1	使用材料及び調合	183
5.3.2	強度試験	184
5.3.3	線膨張係数	184
5.3.4	自己収縮ひずみ	184
5.3.5	実大柱試験体の概要	187
5.4	基本物性	188
5.4.1	強度試験結果	188
5.4.2	ヤング係数	190
5.4.3	割裂引張強度	191
5.4.4	線膨張係数	192
5.4.5	自己収縮ひずみ	194

5.5	超高強度RC模擬柱部材試験結果	197
5.5.1	温度履歴	197
5.5.2	ひずみ履歴	201
5.5.3	内部ひび割れ観察	204
5.6	結論	211
第6章 自己収縮ひずみが付着性状に及ぼす影響		
6.1	概論	214
6.2	既往の研究	215
6.2.1	自己収縮ひずみがRC曲げ部材の構造性能に及ぼす影響	215
6.2.2	自己収縮ひずみがRCはり部材のせん断耐力に及ぼす影響	217
6.2.3	自己収縮ひずみがRCはりの付着性状に及ぼす影響	218
6.2.4	若材齢両引き付着試験に関する研究	219
6.3	実験概要	221
6.3.1	使用材料及び調合	221
6.3.2	強度試験	222
6.3.3	自己収縮ひずみ試験	222
6.3.4	両引試験	222
6.4	実験結果	225
6.4.1	強度, ヤング係数	225
6.4.2	自己収縮ひずみ	227
6.4.3	両引き付着試験以前の付着性状	228
6.4.4	両引き付着試験	230
第7章 結論		
7.1	本論文のまとめ	236
7.2	今後の展望	241

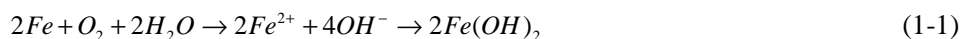
第 1 章 序論

- 1.1 背景
- 1.2 本論文の目的
- 1.3 本論文の特色
- 1.4 本論文の概要

1.1 背景

低炭素社会実現にむけて環境負荷の低減，インフラ整備における住宅の資産価値の増大を目的として，平成19年に「200年住宅ビジョン」が提唱されるなど¹，超長期的に利用可能な社会資本の構築が国策として提案されている。主要な構造躯体の一つである鉄筋コンクリート（RC）構造物においても，ライフサイクルコストを抑制可能な高耐久化，長寿命化技術が求められている。

RC構造物の構造的劣化の原因としてはコンクリート内部の鉄筋腐食が挙げられる。鉄筋は健全なコンクリート中のようにアルカリ環境下では不動態被膜を形成され，腐食が防止されているが，塩化物イオンの侵入により鉄筋表面の不動態被膜が分解されると，以下の反応式によって鉄筋腐食が進行する。



つまり，鉄筋腐食の進行を防止するためには，塩化物イオンの侵入を抑制する，中性化の進行を抑制する，水，酸素が供給されない環境を維持するといった対策が必要となる。以上の観点から，RC構造物の高耐久性を実現する有力な手法として，二酸化炭素や塩化物イオン等の劣化因子を部材内部への進入を抑制するコンクリートを使用することが挙げられる。

高強度コンクリートは水セメント比を低減することによって密実な内部構造を形成し，高い耐久性を有する^{2, 3, 4, 5}ことが種々の検討によって明らかになっている。また，低水セメント比のコンクリートは高い圧縮強度を発揮するため，高層建築物など土地の有効利用の観点からも大きな利点を有している。近年，高性能AE減水剤の開発とその性能向上⁶や，シリカフュームなどの反応性微粉末を混和するDSP技術⁷の発展にともなって高強度コンクリートの実用化が進み（図1-1），既に実強度150MPa級のコンクリートが実構造物に適用されている⁸。建築物の長寿命化への社会的な要請は今後も継続することが考えられ，それを実現する一つの手法として高強度コンクリートのさらなる利用拡大が見込まれる。

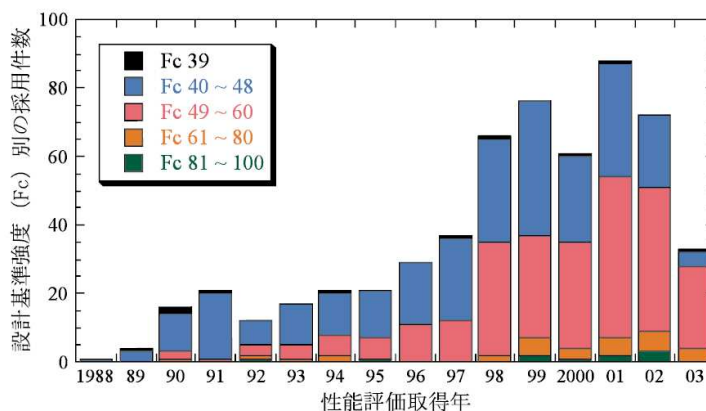


図1-1 高強度コンクリートの採用実績⁹

高強度コンクリートの利用拡大に際し不利な点としては、単位セメント量が多く高粘性であることから十分な施工性、品質を管理するために手間やコストが増大すること、火災時に爆裂¹⁰による部材耐力低下の危険性が高いことといった点のほかに、若材齢において水和発熱による温度上昇量、自己乾燥による自己収縮ひずみ量が普通コンクリートより卓越すること¹¹が挙げられる。

水和発熱による温度膨張ひずみや自己収縮ひずみといった、水和反応に伴って自発的に生じる体積変化は、コンクリートの硬化過程において不可避なものであるが、このような体積変化が他の部材や鉄筋によって拘束された場合、コンクリート内部に応力を発生させる。

コンクリートはその構造上、圧縮応力には十分な強さを発揮するが、引張応力には弱く、またこのような水和依存性体積変化は十分にコンクリート強度が発現していない若材齢に生じるため、ひび割れリスクを著しく増大させる^{12, 13}。

コンクリートに生じるひび割れは、それ自体が構造物の美観の低下に繋がるだけでなく、先述の二酸化炭素、塩化物イオンといった劣化因子の侵入を容易にし^{14,15}、鉄筋の腐食¹⁶、錆汁の流出、更なるひび割れの拡大など躯体全体の劣化を促進する（図 1-2）。

以上のようなコンクリート及び鉄筋の劣化は RC 構造物の構造性能を低下させ、建設物の資産価値を下げ、長期的な利用の妨げになるものである。特に、高耐久性を期待されて使用される高強度コンクリートにおいては、材齢初期に生じるひび割れは深刻な問題となる。

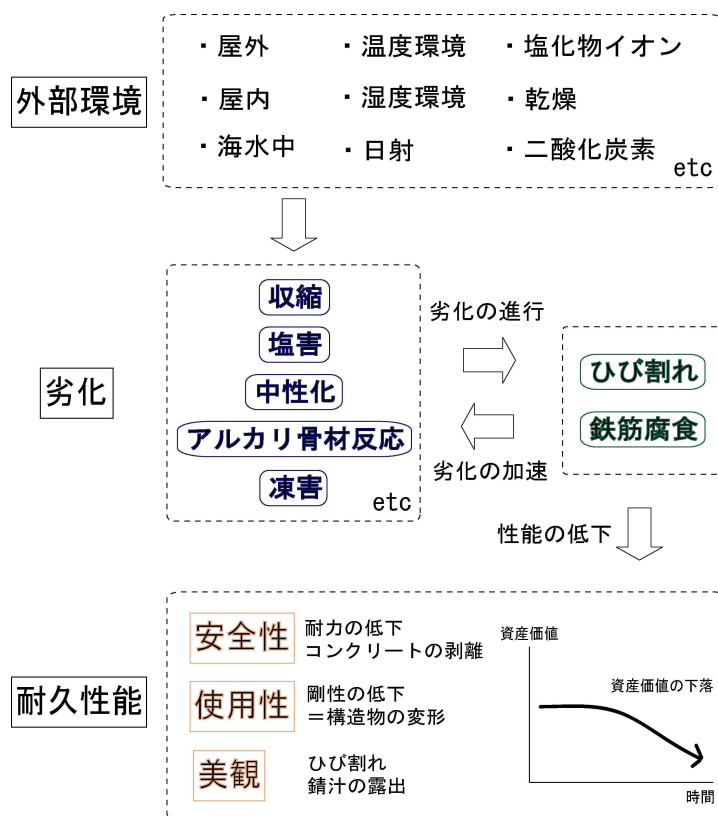


図 1-2 RC 構造物における耐久性低下のフローチャート

高強度コンクリートの適切な利用に際し、「高強度コンクリート施工指針（案）・同解説」（日本建築学会）等の示方書が提示されているが、高強度コンクリートもこれまでの普通コンクリートと同様に経験主義的に利用されている現状がある。

経験主義的利用とはすなわち、コンクリートの物性に関しては強度試験、鉄筋コンクリート部材の性能に関しては縮小試験体による試験を行うことで性能評価を行うことであり、実際の設計もこのデータを基に行われている。そのため、高強度コンクリート、とりわけ設計基準強度 150MPa 程度の超高強度コンクリートの材料物性に関する検討は、強度についての議論は多いが^{17, 18, 19}、その他の物性に関する評価は多くはなく、先述の水和依存性体積変化に関する議論も十分ではない。

以上の理由から、高強度コンクリートの合理的な利用に際し、ひび割れ抑制、ひび割れ制御手法の一つとして、温度ひずみや自己収縮ひずみ等の体積変化によって生じる部材内部の応力状態を適切に評価することが求められている。

1.2 本論文の目的

本論文では、コンクリートの水和によって発生する体積変化として、水和発熱による温度上昇、放熱による温度下降といったコンクリートの温度変化に起因する温度ひずみ、セメントの水和反応によって水分が消費されることによって生じる自己収縮ひずみの2つを想定している。

このうち、温度ひずみは、コンクリートの温度変化量と線膨張係数が既知であれば算出可能であり、温度変化量については、水和反応モデル^{20, 21}による水和発熱量予測²²と熱伝導解析によって一定の研究成果が挙げられている。

一方で、線膨張係数はこれまで $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 一定値として扱われることが多く、線膨張係数の材齢変化についてはほとんど議論がなされていない。

また、自己収縮ひずみに関しては、普通コンクリートでは乾燥収縮と比較して影響が小さく²³、現象としては知られていた²⁴ものの、実用上無視されることがほとんどであった。近年のコンクリートの高強度化の流れの中、高強度コンクリートの収縮の大部分を自己収縮が占めていることが本邦で発見され、その後の数多くの研究を踏まえて、現在では、ひび割れ制御技術における自己収縮の重要性は世界各国で認められるものとなっている。

しかしながら、自己収縮の研究の多くは一定温度養生下で測定及び議論が行われてきており、実際の環境のように異なるコンクリート温度が経時的に変化していくような温度環境下における自己収縮の研究は、近年まで多くはないのが現状である。これは、前述の線膨張係数の経時変化に関する研究が少ないことと関連しており、コンクリートに温度変化が生じている最中に進行するひずみ変化は、自己収縮ひずみに加えて温度ひずみが加算されたものであるため、それぞれの成分のみを議論することが極めて難しいことによるものと推察される。

以上を踏まえて、本論文の目的の一つとして、

目的 1. 水和依存性体積変化（温度ひずみ、自己収縮ひずみ）の成分分離

を設定した。具体的には水和発熱によって生じるような温度履歴環境下において、コンクリートに生じる線膨張係数の経時変化を得ることで、全体の水和依存性体積変化（全ひずみ）のうち温度ひずみの成分を算出し、全ひずみから温度ひずみを差し引くことで自己収縮ひずみを得る。

上述の手法で温度履歴中の自己収縮性状を得た研究はほとんどなく、本研究によって初めて実部材の環境に近い条件での自己収縮ひずみが得られることになる。よって、次なる目標として、

目的 2. 温度履歴下におけるコンクリートの自己収縮挙動の把握

を設定した。自己収縮ひずみが問題となるのは水セメント比が30%程度以下の低水セメント比のコンクリートの場合が多いが、本論文では、水セメント比が55%～13%の比較的広範なセメントペー

スト、コンクリートの自己収縮ひずみを得ることとする。

現状、水セメント比が 20%から 50%程度の領域については、日本コンクリート工学会によって下式のような自己収縮ひずみ予測式が提案されている。

$$\varepsilon_c(t_e) = \gamma \times \varepsilon_{c0} \times \beta(t_e) \quad (1-2)$$

$$\varepsilon_{c0} = 3070 \exp\{-7.2(W/B)\} + 50 \left\{ 1 - \exp\left(-1.2 \times 10^{-6} \times (T_{\max} - 20)^4\right) \right\} \quad (1-3)$$

$$\beta(t) = 1 - \exp\{-a(t_e - t_{e0})^b\} \quad (1-4)$$

$$t_e = \sum \exp\left\{ \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_k} \right) \right\} \times \Delta t \quad (1-5)$$

ここで、 t_e : 有効材齢

t_{e0} : 自己収縮進行開始有効材齢

$\varepsilon_c(t_e)$: 有効材齢 t_e における自己収縮ひずみ量

ε_{c0} : 終局自己収縮ひずみ量

$\beta(t_e)$: 有効材齢 t_e における自己収縮ひずみの進行量を表す関数

γ : セメント種類に関する係数

W/B : 水セメント比 (水結合材比)

T_{\max} : 最高到達温度

a, b : 自己収縮進行速度に関する実験定数

E_a : みかけの活性化エネルギー

R : ガス定数

T_0 : 基準温度 (=293K =20°C)

T_k : Δt 区間におけるコンクリート温度

である。ここで示されるように、自己収縮ひずみに及ぼす温度の影響については、進行速度としてアレニウス則による有効材齢を、終局自己収縮ひずみ ε_{c0} の補正として最高到達温度を考慮している。先に述べたように、本式の検定に使用された実験の多くは一定温度養生下のものである。本研究によって温度履歴下におけるコンクリートの自己収縮挙動が得られた場合、実部材のように高温履歴を受ける場合について、上式の適用性を検討することが可能となる。

また、コンクリートの高強度化技術の進展に伴い、現在では設計基準強度 150MPa の超高強度コンクリートも実用化例が増加している一方で、現行の自己収縮予測式は水セメント比 20%以上の領域においてのみその精度を保証しており、水セメント比 20%以下の場合の自己収縮に関しては、現

在までに予測式が提案されていない。また、超高強度コンクリートを作製する場合、セメントには、シリカフェームに代表される微粉末が混合されることが多いが、このように単種のセメントと異なる組成の結合材を使用する場合にも、同様の自己収縮予測式を適用できる保証はない。

そこで、本論文の3つめの目的を、

目的 3. 超高強度コンクリートの自己収縮予測式の提案

と設定した。

以上の手順によって、コンクリート単体の水和依存性体積変化を把握した後は、このような体積変化が RC 部材中においてどのような影響をもたらすかを把握する必要がある。

既往の研究によって、水セメント比が 15%程度の超高強度 RC 部材を無対策で作成した場合、自己収縮に代表される若材齢体積変化によって、硬化過程で部材内部や鉄筋近傍にひび割れが発生すること²⁵が明らかになっている。1.1 節で述べたように、ひび割れは部材の耐久性を低下させるのみならず、RC 部材の構造性能をも低下させる可能性がある。このような状況下において、収縮ひび割れを抑制する手法として、水和発熱量、自己収縮量を抑制する低発熱系セメントを使用する、または膨張材や収縮低減剤といったコンクリートに生じる収縮を低減させる混和材・剤を使用するといった対策が取られているが、膨張材や収縮低減剤の効果については縮小試験体による実験が多く、実大上の RC 部材についてこれらの対策の影響を確認した研究はほとんどない。そこで、本研究では、

目的 4. 超高強度 RC 部材に生じる体積変化に起因するひび割れの抑制手法の提案

として、実大の超高強度 RC 部材に生じる体積変化起源のひび割れを抑制する手法を提案する。

またひび割れが生じないまでも、体積変化によってコンクリートに応力が蓄積されることは避けられない。近年の研究で、コンクリートに生じた収縮ひずみが鉄筋等に拘束されることにより、RC 部材の曲げひび割れ幅を増幅すること²⁶や、せん断耐力を低下させること²⁷が実験的に明らかになっている。以上を踏まえて、本研究に置いては、RC 部材の構造性能の一つとして、コンクリートと鉄筋界面における応力伝達に着目し

目的 5. 超高強度 RC 部材に生じた収縮応力、ひび割れが付着性能に及ぼす影響の解明

を目的として設定した。

1.3 本論文の特色

本研究の特色は、RC 部材において、コンクリートやコンクリート-鉄筋界面に生じる様々な物理的現象の一つ一つに焦点を当て、それらの性質、メカニズム等を“実験的”に明らかにしていく点にある。従来の研究では影響が小さいと無視されてきた諸現象に着目することは、既存の実験的手法が通用しない場合もあり、そのため本論文には、著者らは測定装置を開発する段階から始める必要があった研究も含まれている。

設計上、あるいは解析上において、著者らが着目した諸現象は必ずしも有意ではないものも含まれるかもしれないが、「有意ではない」ことを明らかにするという基本姿勢も本論文の特色の一つである。

1.4 本論文の概要

本論文は、RC 構造物におけるひび割れ要因の一つである、コンクリートの“自己収縮”という現象をキーワードとし、自己収縮が RC 部材の性能に及ぼす影響を明らかにすることを最終的な目的としている。具体的には、

- ・ 自己収縮の導出
 - ↓
- ・ 自己収縮の性状把握
 - ↓
- ・ 自己収縮によって RC 部材に生じる応力、ひび割れ
 - ↓
- ・ 自己収縮によって RC 部材に生じた応力、ひび割れが部材性能に及ぼす影響の把握

というのが主たる流れである。この中で、自己収縮の導出には線膨張係数という物性値が必要であることから、線膨張係数の性質を把握すること、また、自己収縮の性状を把握する上で、自己収縮がどのようなメカニズムで引き起こされているかといった検討も本論文に含めた。

以上に説明した本論文の全体像を図 1-3 に示す。

一方、自己収縮が特に問題となるコンクリートとして、水セメント比が 20%以下程度の超高強度コンクリートに重点をおいている点や、セメントペーストやモルタルといった理想的な試験体による実験が多くを占めていることから、“コンクリートの自己収縮”の研究としては不十分な点もあると承知している。

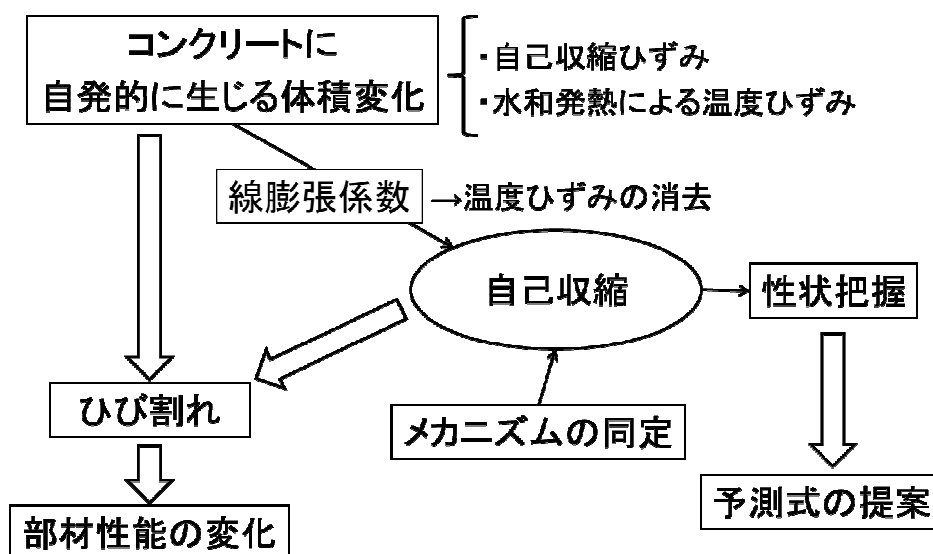


図 1-3 本論文の全体像

本論文は、本章も含めて7章で構成されている。以下に各章の概要を記す。

[第1章 序論]では、本論文の背景、目的、概要について述べ、本研究がRC構造物のなかで果たす役割、コンクリート材料研究において占める位置について説明を行った。

[第2章 水和依存性体積変化の成分分離]では、線膨張係数の経時変化を実験的に取得する手法の提案、得られた線膨張係数の諸性質について言及し、得られた線膨張係数を使用することでコンクリートに水和によって生じる体積変化を温度ひずみ成分と自己収縮ひずみ成分に分離を行う。また、算定によって得られる温度ひずみは、温度ひび割れのリスクになり得るものであったため、線膨張係数の経時変化を制御することで、温度ひび割れリスクを低減する手法についても提案を行う。

[第3章 自己収縮ひずみ]では、第2章で得られた自己収縮ひずみの諸性状を種々の観点から整理し、自己収縮ひずみの性質の把握を行う。特に、従来の研究ではあまり考慮されてこなかった温度履歴の影響について詳細に検討を行い、普通強度領域のコンクリートと超高強度コンクリートのような低水セメント比のコンクリートでの、自己収縮ひずみの温度依存性の相違点について言及する。また、超高強度コンクリートの実用に際し、超高強度コンクリート特有の自己収縮傾向を再現できる自己収縮ひずみ予測式の提案を行う。

[第4章 超高強度コンクリートの自己収縮メカニズム]では、第3章で得られた超高強度コンクリートに特有の自己収縮性状の原因を究明するため、従来の自己収縮メカニズムとは異なる新たな収縮理論によって検討を試みる。

[第5章 水和依存性体積変化に起因するひび割れ]では、実大寸法の超高強度RC部材を使用して、超高強度コンクリートの自己収縮によってコンクリートの硬化過程に生じる部材内部のひび割れ性状を把握し、膨張材や収縮低減剤といった自己収縮を低減可能な諸対策が、実大寸法の超高強度RC部材内部のひび割れを抑制する効果について確認する。

[第6章 鉄筋近傍のひび割れが付着性状に及ぼす影響]では、自己収縮がRC部材の構造性能に及ぼす影響の一つとして、コンクリートと鉄筋の付着性状に着目し、同じ強度レベルで自己収縮量が異なる2種類の超高強度コンクリートを使用して、収縮の大小がコンクリート-鉄筋界面の付着性状に及ぼす影響について検討を行う。

[第7章 結論]では、本論文で得られた知見、成果を取りまとめ、今後の展望について言及する。

第1章の参考文献

- 1 <http://www.jimin.jp/jimin/seisaku/2007/pdf/seisaku-007b.pdf>
- 2 澤田由美子ほか：高強度コンクリートのアルカリ骨材反応性と高炉スラグ微粉末による抑制効果に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.479,pp1-6, 1996
- 3 陣内浩ほか：高強度コンクリートの長期的な長さ変化と中性化に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.594, pp.9-15, 2005.6
- 4 日紫喜剛啓ほか：自己収縮を低減した 150N/mm² 級超高強度コンクリートの耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.1,pp.1105-1110, 2005
- 5 渡邊芳春ほか：200N/mm² 級超高強度繊維補強コンクリートの耐久性と微細組織，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1,pp.1271-1276, 2006
- 6 服部健一：特殊減水剤の物性と高強度発現機構，コンクリート工学，Vol. 14, No. 3, pp. 31-38, 1976
- 7 Bach. H. H. : 水硬性複合材料，特公昭 60-59182 (登録 No.419493)
- 8 陣内浩ほか：設計基準強度 150N/mm² 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
- 9 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針（案）・同解説，2005.1
- 10 長尾覚博ほか：高強度コンクリートの爆裂に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18, No.1, pp. 657-662, 1996
- 11 田澤栄一ほか：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
- 12 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.617,pp1-7, 2007.7
- 13 早野博幸ほか，擬似完全拘束下における高強度コンクリートの自己収縮によるひび割れポテンシャル評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.622, pp. 9-16, 2007.12
- 14 氏家勲ほか：ひび割れ表面粗さとひび割れ部の透気・透水性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.21, No.2,pp.841-846, 1999.7
- 15 伊代田岳史ほか：コンクリートのひび割れが中性化速度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.20, No.2,pp.979-984, 1998.7
- 16 柳濟峻ほか：鉄筋腐食に及ぼすコンクリートのひび割れと中性化の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22, No.1,pp.187-192, 2000
- 17 小室努ほか：100~180N/mm² 級の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の圧縮特性，日本建築学会構造系論文集，No.577,pp77-84, 2004
- 18 依田彰彦，横室隆：超高強度コンクリートの性質に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.11, No.1,pp.539-544, 1989
- 19 Kakizaki, M., Edahiro, H. : Effects of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of ultra high-strength concrete, 日本建築学会構造系論文集，No.451,pp.19-32, 1993
- 20 R. Kondo, S. Ueda, : Kinetics and Mechanism of the Hydration of Cements, Proc. of 5th Int. Symp. on the Chem. of Cem., Tokyo, II-4, pp.203-248, 1968
- 21 F. Tomosawa : Development of a kinetic model for hydration of Cement, Proc. of the 10th Int. Cong. on the Chem. of Cem., Gothenburg, Sweden, 2ii051, 1997
- 22 岸利治，前川宏一：ポルトランドセメントの複合水和発熱モデル，土木学会論文集，No.526, V-29, pp. 97-109, 1995

-
- 23 Tazawa, E., Miyazawa, S : Experimental Study on Mechanism of Autogenous Shrinkage of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.8, pp.1633-1638, 1995
- 24 Davis, R: Autogenous Volume Change of Concrete, Proceedings of the 43rd Annual ASTM Meeting, pp.1103-1113, 1940
- 25 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, 第 617 号, pp. 1-7, 2007.7
- 26 谷村充ほか: 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
- 27 Ryoichi sato and Hazime 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

第2章 水和依存性体積変化の成分分離

- 2.1 概論
- 2.2 既往の研究
- 2.3 線膨張係数測定装置の開発
- 2.4 セメントペーストの線膨張係数に及ぼす調合の影響
- 2.5 温度ひずみ
- 2.6 人工軽量骨材による線膨張係数の制御手法
- 2.7 収縮低減剤による線膨張係数の制御手法
- 2.8 結論

2.1 概論

外部への熱の移動が行われにくいマスコンクリートや単位セメント量が多い超高強度コンクリートは、水和発熱によって部材が高温履歴を受ける。水和発熱量を減少させる目的で中庸熱ポルトランドセメントや低熱ポルトランドセメントといった低発熱系のセメントが使用された場合においても水和発熱による温度上昇を完全に抑えることはできず、たとえば、低熱ポルトランドセメントを使用した超高強度コンクリートの模擬柱において最高到達温度が70°Cを超える例が複数報告されている^{1, 2, 3}。

この水和発熱による温度上昇によって、コンクリート部材には熱膨張（温度ひずみ）が生じるが、一方で、水和が進行中のコンクリートは自己乾燥に起因する自己収縮によって収縮しようとする。このように、自らの水和発熱によって温度履歴を受けるコンクリートでは、熱膨張と自己収縮が同時に生じるため、この区間において、温度ひずみ、自己収縮ひずみのいずれか一方の挙動を観測することは困難であり、これまでの自己収縮に関する研究の多くは、養生温度を一定にすることで温度ひずみの影響を取り除き、自己収縮ひずみの評価を行ってきた⁴。しかし実際の部材が受ける温度履歴は一定ではなく、より正確に自己収縮の評価を試みる場合には、実情に近い環境条件で自己収縮ひずみの測定を行う必要があるといえる。近年になり、自己収縮が温度依存性を持つことが指摘され⁵、高温履歴を受ける最中の自己収縮ひずみに関する研究も増加傾向にあるが、未だに十分なデータが整備されているとは言い難い。

温度変化が生じている最中のコンクリートのひずみ変化には、自己収縮ひずみの他に温度ひずみが含まれるため、高温履歴中の自己収縮ひずみを把握するためには、全体のひずみ変化から温度ひずみの影響を取り除かなければならない。自己収縮算定に関する概念図を図2-1に示す。

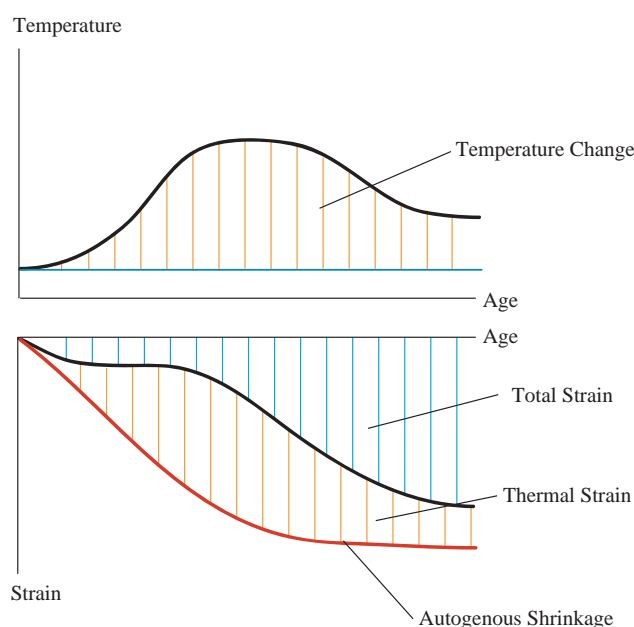


図 2-1 温度履歴中の自己収縮算定に関する概念図

図に示されるように、温度ひずみは線膨張係数と温度変化量の積で表される。そのため、自己収縮ひずみを精度良く算定するためには、全ひずみを適切に測定した上で、線膨張係数と温度変化量の正確な値を知る必要がある。

しかしながら、線膨張係数の時間変化を測定することは手間がかかること、普通コンクリート領域において十分に硬化したコンクリートの線膨張係数は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度の値を取ることから、自己収縮ひずみの算定には線膨張係数 $\alpha = 10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定した値が用いられることが一般的である⁶。

本章では、セメントペースト及びモルタルの、高温履歴中における線膨張係数の材齢変化を経時的に取得することによって、実際に温度ひずみを算定し、線膨張係数の経時変化によって生じる温度ひずみの影響について論じる。以下に本章の内容を記す。

2.2 節では、線膨張係数に関する既往の研究をとりまとめ、線膨張係数を実験的に取得する際の注意点について議論を行う。また、セメントペーストの線膨張係数変化について、過去に提案されているメカニズムに関しても言及する。

2.3 節では、線膨張係数の経時変化を取得するために開発した、線膨張係数・自己収縮ひずみ測定装置について、測定方法、測定誤差、既往の手法との比較について検討を行う。

2.4 節では、種々のセメントペーストの線膨張係数の経時変化を測定し、水セメント比、セメント種類、骨材量が線膨張係数に及ぼす影響について検討を行う。

2.5 節では、セメントペースト及びモルタルが山形の温度履歴を受ける際に、線膨張係数の経時変化を考慮することによって生じるひずみ（温度ひずみ）を算定し、線膨張係数の経時変化によって生じる温度ひび割れリスクについて議論を行う。

2.6 節では、水を含浸させた人工軽量骨材を使用して、線膨張係数の上昇を抑制することで温度ひずみを低減することを試みる。

2.7 節では、線膨張係数の制御手法として、収縮低減剤を使用して線膨張係数の経時変化を抑制し、温度ひずみを低減する効果について検討を行う。

2.2 既往の研究

マスコンクリートでは高水セメント比のコンクリートでも、材齢初期の水和発熱によりコンクリート温度が上昇しコンクリート内部と表層部で大きな温度差が生じることがある。この温度差に起因する温度応力を解析する上で線膨張係数の時間依存性の重要性が報告され、1980年代以降いくつかの研究^{7, 8, 9, 10, 11, 12, 13}がなされてきた。また、単位セメント量が多い高強度コンクリートでは、水和発熱量、自己収縮量が増大するため、材齢初期に温度ひずみ、自己収縮ひずみが複合した複雑な体積変化を示す。これらの複雑な体積変化を適切に評価するために線膨張係数の経時変化に関する議論^{14, 15, 16, 17, 18}が行われてきた。

本節では、線膨張係数の水和依存性に関する既往の研究の一部を示し、既往の線膨張係数測定手法の問題点を指摘する。既往の研究の一部について表 2-1 に測定手法を、図 2-2 から図 2-4 に測定結果を示す。

表 2-1 既往の文献における線膨張係数の測定手法

	年	セメント種類	W/C (%)	混和材種類	計測器	試験体寸法 (mm)	温度変化 (°C)	粗骨材最大寸法 (mm)
井上	1986	—	55.5	なし	埋め込み型	ボックスカルパート	15→40	25
山川	1986	中庸熱	71	フライアッシュ	埋め込み型	φ200-400	20→75	40
小山	1992	普通	25, 40, 50	シリカフェューム	ルシャテリエ法	種々	+1~2	10
小澤	2001	普通	30	なし	非接触変位計	φ100-200	20→25	25
国森	2000	普通, 早強	50	なし	非接触変位計 埋め込み型	φ100-200	20→30	25
宮澤	2000	普通	20, 30, 50	なし	ダイヤルゲージ	20×20×160	20→60, 20→0	なし
丁	2000	普通, 早強, 低熱	25	なし	埋め込み型	50×50×200	20→60	13
楊	2000	普通	25, 35	シリカフェューム 高炉スラグ	高感度変位計	100×100×400	-1→5	40
竹内	2000	普通	25	シリカフェューム 高炉スラグ	高感度変位計	P-40×40×160 C-100×100×400	-1→5	なし
石田	1997	普通	30, 40, 50, 65	なし	非接触変位計	25×25×180	20→80	なし

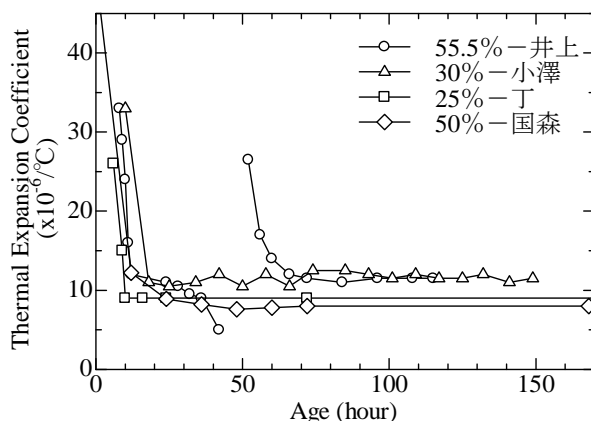


図 2-2 既往の文献における線膨張係数と水セメント比の関係

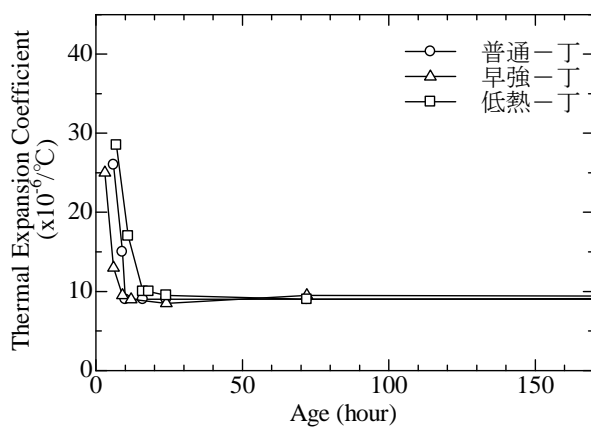


図 2-3 既往の文献における線膨張係数とセメント種類の関係

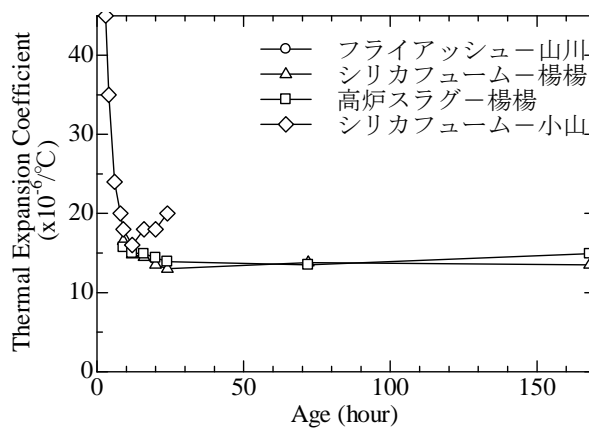


図 2-4 既往の文献における線膨張係数に及ぼす混和材の影響

2.2.1 線膨張係数の経時変化

線膨張係数は、コンクリートの温度制御及びそれに伴うひずみ変化を測定することにより可能である。その際、主として問題となるのは以下の点である。

1. 温度制御中に自己収縮が進行するため、温度ひずみのみを測定することが出来ない。
2. 温度制御中の試験体に温度分布が生じ、内部拘束により適切な温度ひずみが測定されない。
3. 十分にヤング率が発現していないコンクリートにおいて、埋込型ひずみ計、ダイヤルゲージといった接触型の変位計で、変位を測定することが困難である。

1. に関して、宮澤ら⁹は、自己収縮の影響を極力少なくするため測定時間の短縮を目指し昇温速度を 40°C/h と大きくした。しかし、昇温速度を大きくすることは試験体内の温度分布を助長することになる。そこで、セメントペースト試験体を用いて試験体寸法を 20×20×160mm と小さくすることで温度分布に配慮している。試験体としてコンクリートを用いた場合、試験体寸法によっては粗骨材の線膨張係数が支配的になる可能性があるため、辺が 20mm 程度以下の試験体寸法ではコンクリートを用いた測定を行うことが困難であり、試験体寸法を小さくする手法ではモルタルもしくはセメントペーストを用いることが一般的である。

丁ら¹⁰も、宮澤らと同様に測定時間を短縮することを目的として、昇温速度を 80°C/h として自己収縮の影響が小さくなるよう配慮した。また、コンクリートの線膨張係数を得るため、粗骨材最大寸法 $G_{max}=13\text{ mm}$ とし、試験体寸法を 50×50×200mm とすることで温度分布に配慮している。その結果、線膨張係数の経時変化は定性的にとらえることができているものの、試験体温度が高温になるほど線膨張係数が減少を示しており、自己収縮ひずみの影響を除去しきれていない点、試験体内部と表層部で多少の温度差が確認された点で定量値には疑問が残る。

楊ら¹¹は、低温領域では水和の進行が遅延することを利用して、自己収縮の影響が無視できる -1 ~ 5°C の範囲で線膨張係数の測定を行った。材齢の評価には有効材齢を用いている。この手法は、自己収縮の影響を抑えるという点で効果的であり、測定結果も良好であった。ただし、この手法では試験中の温度範囲が制限されるため、異なる温度履歴中の測定は困難である。

2. の温度分布の影響に関しては、<1. 自己収縮の影響>と関連が大きい。すなわち、試験体内の温度分布を小さくするためには昇温速度を小さくして、試験体の温度が一様となるように温度変化を与えてやればよいが、この手法では測定に時間を要するため自己収縮の影響が大きくなる。この点、楊ら¹¹の手法は、低温領域での水和の遅延を利用することで自己収縮の影響を考慮しているため、昇温速度を抑えることができ、温度分布を小さくできる点で有効である。

3. に関して、小澤ら⁸は、埋込型ひずみ計と非接触変位計を用いてひずみを測定し、それぞれの測定方法の適用性を示した。ここでは、埋込型ひずみ計では極若材齢の硬化過程における線膨張係

数の把握は困難であると結論づけている。

小山ら³は、ゴム袋にコンクリート試験体を詰め、温度変化に伴う体積変化から自己収縮ひずみによる影響を考慮した上で線膨張係数の算定を行った。この手法は、コンクリートの硬化程度の影響を全く無視できるという点で効果的であるが、コンクリート内に混入した空気の影響等で測定誤差が大きくなる可能性がある。

現状では、すべての問題点を同時に解決する手法は提案されておらず、線膨張係数の測定は、各研究者の裁量に任されている。

本研究における線膨張係数の測定手法は、1. から3. の問題点に対してそれぞれ、1) 昇温、降温の温度変化を短時間で与えることで自己収縮ひずみの影響をキャンセルすること、2) セメントペーストもしくはモルタルを使用し試験体寸法を $10 \times 60 \times 370\text{mm}$ の薄肉試験体として温度分布に配慮すること、3) レーザー変位計による非接触の測定手法を採用することで対応している。

本研究で用いた線膨張係数測定手法の詳細に関しては2.3節で詳述する。

2.2.2 線膨張係数の相対湿度依存性

S.L.Meyers¹⁹は線膨張係数の相対湿度依存性に注目し、数種類の硬化コンクリート、硬化セメントペーストを用いて、材齢、水セメント比、骨材等をパラメータとした実験を行い、相対湿度によって線膨張係数が変化し相対湿度 70%前後で最大値を取ることを明らかにした。図 2- 5 に Meyers の実験結果を示す。なお、図は論文中の複数の図から値を読み取り再構成したものである。

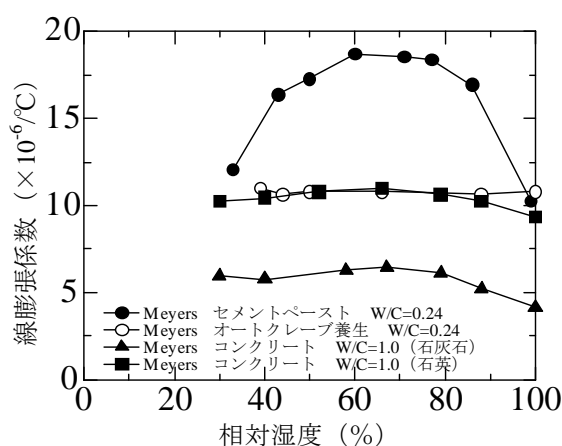


図 2- 5 線膨張係数の相対湿度依存性

線膨張係数が相対湿度依存性を持つメカニズムに関して、「ネビルのコンクリート²⁰」では以下の仮説が紹介されている。

セメントペーストはそれ自身が固有の線膨張係数を持つが、温度変化によりセメントペースト中で水分移動が生じ、水分移動による毛細管張力等の収縮駆動力の変化がセメントペーストの収縮・膨張を引き起こす。この水分移動に起因する体積変化によって、セメントペースト固有の値以上の線膨張係数値が観測される。

つまり、飽水状態、またはそれに近い高含水率の場合、セメントペースト中の空隙はすべて水で満たされており、ゲル空隙から毛細管空隙への水分拡散はほとんど起こらず、毛細管張力変化も生じない。これが高相対湿度で線膨張係数が比較的小さな値（セメントペースト固有の線膨張係数に近い値）をとる理由となる。しかし、相対湿度が 60~80%程度に低下すると、毛細管空隙中の凝縮水や吸着水は減少する。このときセメントペーストが温度上昇すると、水分の熱膨張によりゲル空隙から毛細管空隙へと水分が拡散する。ゲル空隙から毛細管空隙への水分移動は毛細管張力を緩和し、セメントペーストの収縮駆動力が緩和される。このため、セメントペーストには収縮力の緩和による膨張が生じ、この膨張効果がセメントペースト固有の線膨張係数に加算され、線膨張係数はみかけ上大きくなる。この膨張効果の影響が最も大きくなるのが相対湿度 70%前後のピークを示す状態である。

相対湿度がさらに低下すると、ゲル空隙中の水分が少なくなり、前述の水分拡散が生じにくくなる。よって収縮力の緩和は生じず、セメントペースト固有の線膨張係数に近づく。

Z.C.Grasley²¹は、線膨張係数の相対湿度依存性のメカニズムについて、水が熱膨張することによってメニスカス曲率が減少しそれに伴って収縮駆動力が減少することで、みかけ上線膨張係数が大きくしていると仮定し kelvin 式を用いて式(2-1)、(2-2)のようにモデル化した。

$$\Delta p = p_f - p_i = \frac{-RT_f}{v'} \ln h_f - \frac{-RT_i}{v'} \ln h_i \quad (2-1)$$

$$\varepsilon = \Delta p S \left[\frac{1}{3K} - \frac{1}{K_s} \right] \quad (2-2)$$

ここで、 Δp : 温度変化により生じる圧力の変化,

v' : 空隙水のモル体積,

R : 気体定数,

T : 温度,

h : 空隙中の相対湿度,

ε : 温度変化により生じるひずみ,

S : 浸透の程度を表す定数,

K : 体積弾性率,

K_s : 固体固有の体積弾性率,

であり f と i はそれぞれ final と initial の状態を表す。式(2-2)の ε と温度変化量 ΔT を用いて、線膨張係数の相対湿度依存性は以下のように表すことができる。

$$CTD = CTD_{solid} + \frac{\varepsilon}{\Delta T} \quad (2-3)$$

ここで、 CTD : ある相対湿度におけるセメントペーストの線膨張係数,

CTD_{solid} : 固体固有の線膨張係数,

である。

線膨張係数の相対湿度依存性の実験結果と上述のモデルを用いた計算値を図 2-6 に示す。以上のモデルは、現状提案されているコンクリートの収縮メカニズムで、コンクリートの体積変化は相対湿度の変化に起因することに着目し、温度変化により生じる相対湿度の変化を温度ひずみに組み込んだものである。

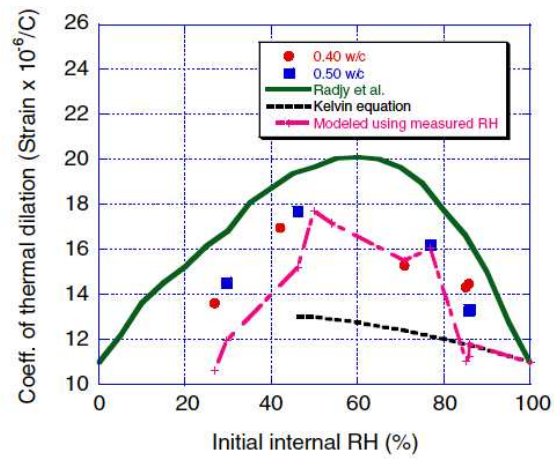


図 2-6 線膨張係数の相対湿度依存性に関する実験値と算定値

2.2.3 線膨張係数に及ぼす温度履歴の影響

線膨張係数が相対湿度依存性を持つことを(2)で述べた。封緘養生条件下において、コンクリートは自らの水和反応による自己乾燥で内部相対湿度が減少することを考慮すると、コンクリートの線膨張係数は材齢によって経時的に変化していくことが予想される。一方で、(1)で紹介した既往の研究では、コンクリートの線膨張係数に相対湿度依存性の影響は確認されなかった。これは、(1)の実験の多くは比較的高い水セメント比のコンクリートが使用されており、かつ20°C程度の温度一定環境で養生を行っているため水和の進行が比較的緩やかであったためセメントペースト中の相対湿度変化が測定期間においてほとんど生じなかったこと、骨材の影響により線膨張係数変化が抑制されていること、測定材齢が少ないため経時変化を適切に得られていない可能性があることなどが要因として考えられる。

ここでは水和発熱による温度上昇という実際に部材が曝される環境に比較的近い温度条件下における線膨張係数の経時変化の測定例として Sellevold²²らが行った実験について報告する。

Sellevold は、水セメント比が40%のコンクリート試験体を用いて、図2-7に示すように20°C一定条件と水和発熱による温度上昇を模擬した最高到達温度60°Cの温度履歴条件において、のこぎり型の温度パルスを短時間中に繰り返し与えることによって、温度履歴中における線膨張係数の測定を行った。その測定結果を図2-8(左図)に示す。

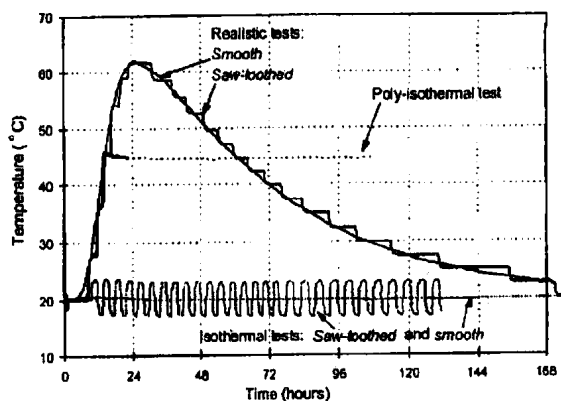


図 2-7 温度履歴パターン

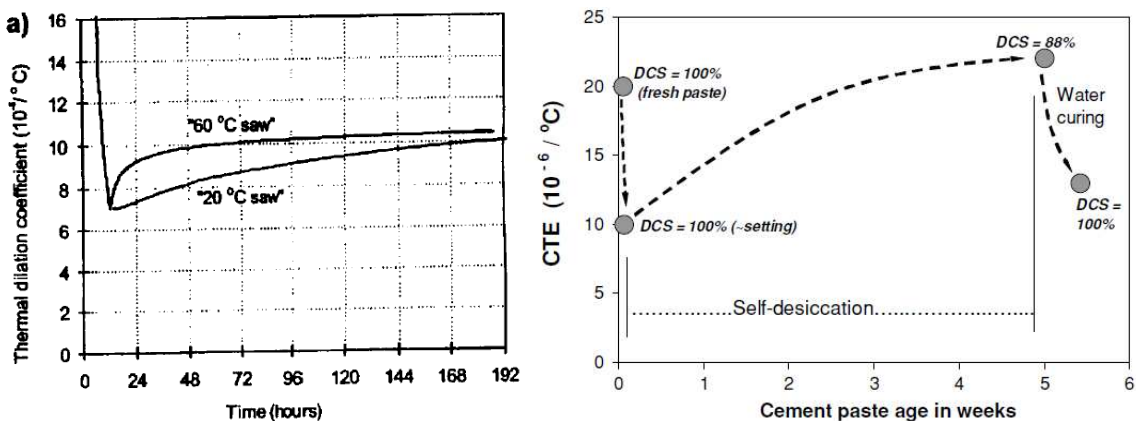


図 2-8 線膨張係数の測定結果

図 2- 8 に着目すると、材齢 12 時間以前の材齢において、20℃条件、60℃履歴条件の双方で、線膨張係数の急激な減少が確認できる。この現象は、コンクリートが十分に硬化する以前の材齢では、コンクリートと比較して大きな線膨張係数値を持つ水（線膨張係数が約 $70 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）の影響が、反映されるために生ずるものであり、(1)で紹介した、国内の線膨張係数実験においてもたびたび確認されている。

しかし、材齢 12 時間前後で線膨張係数は最下点を迎えた以降は、既往の研究と異なり、線膨張係数が増加に転じる結果となっている。線膨張係数の増加速度は 20℃条件と 60℃履歴条件とでは大きく異なり、最高到達温度 60℃の温度履歴を受けたコンクリートのほうが線膨張係数の増加速度が大きい。この現象は、高温履歴を受けることにより水和反応が促進され相対湿度の減少速度が大きくなると考えることで説明が可能である。すなわち、この実験は、線膨張係数が極若材齢の減少傾向以外にも、水和に依存する経時変化をもつことを示すものである。

また、これを裏付けるように Bjøntegaard は、材齢 5 週間で、相対含水率が 88%に低下しているセメントペースト及びコンクリート試験体を再度飽水状態にしたときに、線膨張係数が低下することを報告している（図 2- 8 右図）²³。

2.3 線膨張係数測定装置の開発

本章では、水和発熱によってコンクリートに生じる高温履歴を受ける条件下において、温度ひずみと自己収縮ひずみを分離することを目的としており、線膨張係数についても高温履歴条件下の経時変化を適切に測定する必要がある。

本節では、著者らが開発を行った、線膨張係数・自己収縮ひずみ測定装置について詳細を述べる。

2.3.1 概要

セメントペーストやモルタルといった、比較的薄い試験体を作製することが可能な調合において、線膨張係数の材齢変化を測定可能な測定装置の開発を行った。測定装置の概要を図2-9に示す。

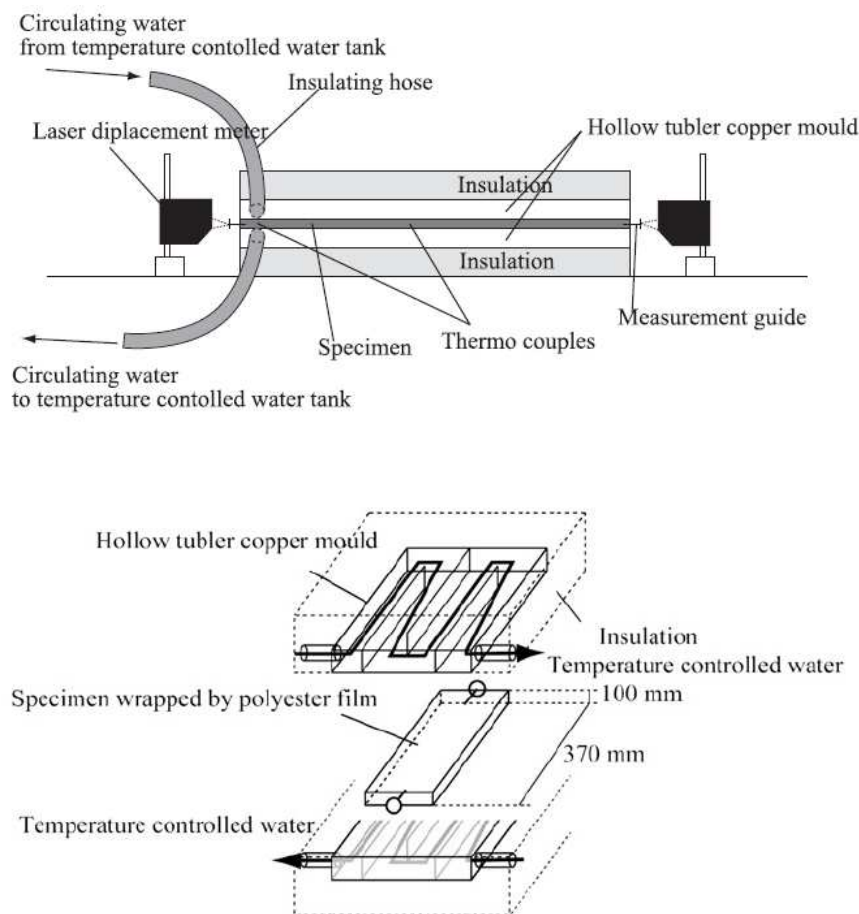


図 2-9 線膨張係数測定装置

本装置は、銅製型枠中にポリエステルフィルムで封緘を施した試験体を設置し、銅製型枠内に温度制御を行った水を流すことによって、銅製型枠の間にある試験体の温度を調節するものである。試験体の長さ変化は、試験体の両端をレーザー変位計によって測定する仕様となっており、レーザー変位計のターゲットである、ねじに応力を伝達できる程度の比較的剛性が小さい状態から変位の

測定が可能である。

型枠の材質には、熱伝導性に優れた銅板を選択し、試験体と銅板の摩擦の低減、試験体内の水分の逸散を防ぐことを目的として、試験体はポリエステルフィルム（厚さ0.05mm）で覆っている。また、外部との熱交換を極力少なくするため、銅板型枠全体を厚さ30mmの断熱材で覆った。

線膨張係数測定用試験体は、試験体内の温度分布を考慮して厚さ10mmの薄肉試験体とした。試験体の長手方向の標点間距離は概ね300mmであり、レーザー変位計（精度1/2000）によって測定を行うことで、 2×10^{-6} の精度で測定が可能である。

温度変化については、試験体中央部と端部に熱電対を設置して温度履歴の測定を行った。試験中、この2点の温度差は $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ の範囲内であり、試験体内の温度分布はほとんどないものと考えられる。以下の検討における線膨張係数の算定に際し、試験体温度には2点の平均値を用いた。

2.3.2 線膨張係数の測定方法に関する検討

本節では、温度制御手法及び自己収縮ひずみが線膨張係数の測定値に及ぼす影響に関して検討を行う。

試験体にはシリカフェームプレミックスセメントを用いた水セメント比16.5%、寸法10×60×370mm（評点間距離290mm）のセメントペースト（記号SFPC16.5）を使用し、十分に硬化したと考えられる材齢68日（封緘養生）に測定を行った。

本実験で与えた温度制御パターンを図2-10に、試験条件及び測定値を表2-2にそれぞれ示す。ここで、山部（Convex）、谷部（Concave）とは、基準温度より高い領域（例えばパターン2のStep1,Step2）、低い領域（例えばパターン2のStep3,Step4）を表している。

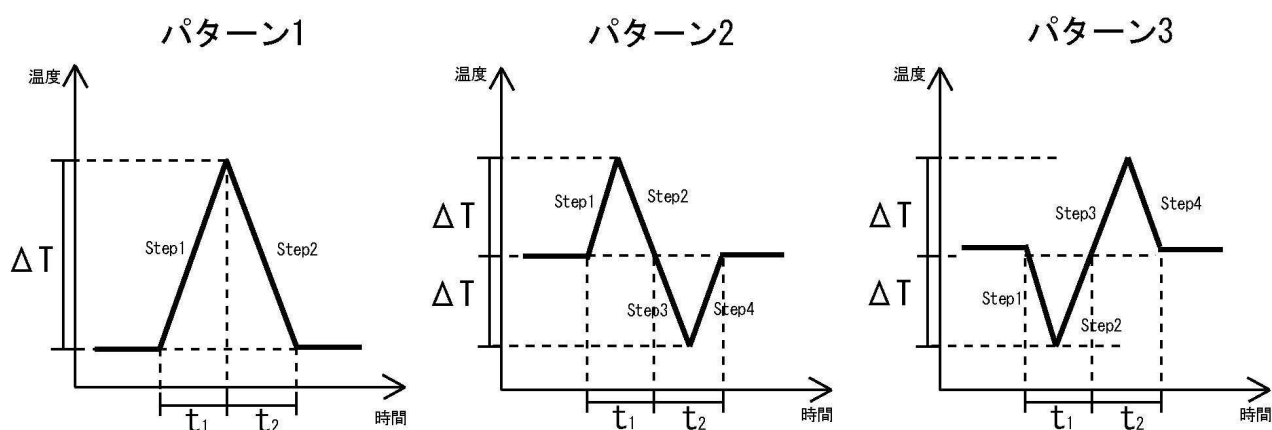


図 2-10 線膨張係数測定用温度パターン

表 2-2 線膨張係数の測定結果

	No.	$\Delta T(^{\circ}C)$	t_1 (min)	t_2 (min)	Step 1 ($\mu/^{\circ}C$)	Step 2 ($\mu/^{\circ}C$)	Step 3 ($\mu/^{\circ}C$)	Step 4 ($\mu/^{\circ}C$)	Avg. ($\mu/^{\circ}C$)	Convex ($\mu/^{\circ}C$)	Concave ($\mu/^{\circ}C$)	Up ($\mu/^{\circ}C$)	Down ($\mu/^{\circ}C$)
A	1	50	120	240	24.0	20.3	—	—	22.2	22.2	—	24.0	20.3
B	2	5	50	50	20.8	20.9	20.2	19.3	20.3	20.9	19.8	20.1	20.6
C	3	5	50	50	19.6	19.7	20.9	21.0	20.3	21.0	19.7	20.3	20.3
D	2	5	100	100	20.4	21.5	20.8	19.3	20.5	21.0	20.1	19.9	21.2
E	2	5	30	30	20.1	20.5	20.6	18.7	20.0	20.3	19.7	19.4	20.6
F	2	2	50	50	20.7	21.8	19.9	19.5	20.5	21.3	19.7	20.1	20.9

表2-2に示すとおり、+50℃の温度パルスを与えた試験Aでは温度上昇域と下降域で線膨張係数の測定値が異なり、上昇域で下降域より $4 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ 程度大きな値が確認された。一方、試験B～Fのように比較的溫度変化が小さい条件では、線膨張係数の測定値に差異はほとんど見られない。以上の結果は、同一試験体であっても温度上昇量、もしくは温度変化速度が異なる場合、異なる線膨張係数値を示す可能性があることを示している。本現象の原因としては、大幅な温度変化を受けた場合、セメントペースト内で水分移動が生じ見かけ上異なる線膨張係数値となった可能性が考えられ、線膨張係数の測定を目的とした場合、必要以上に大きい温度変化は避けるべきであるといえる。

温度変化量を5°C以下とした試験B～Fでは、試験Aのような温度制御後の残留温度ひずみは確認されなかったが、この結果は、十分に水和が進行した硬化セメントペーストを使用したものであり、細孔構造の異なる若材齢時や異なる調合条件下でも同様の結果が得られるとは限らない。さらに、若材齢では顕著な自己収縮が生じる場合があるため、線膨張係数の算定に際し自己収縮の影響を考慮しなければならない。

図2-11、図2-12は、上記の実験と同じ材料、調合のセメントペーストにおいて、注水直後からひずみ履歴を測定した結果である。

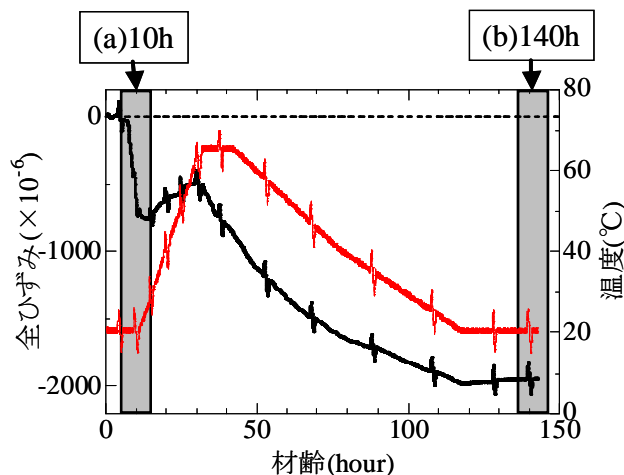


図 2-11 超高強度セメントペースト試験体の全ひずみ

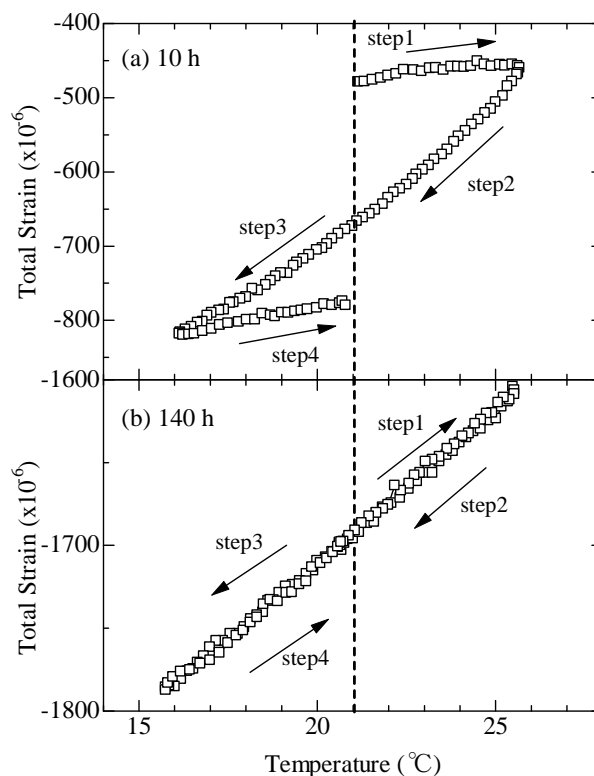


図 2-12 自己収縮の大小が温度とひずみの関係に及ぼす影響

図に示されるように、若材齢で顕著な自己収縮がみられる低水セメント比のセメントペーストにおいて、自己収縮の進行速度が著しい材齢 10h では、温度と全ひずみの関係は各 step で異なる傾きをもつ線形性が得られている。さらに、step1 から step4 の間に $\pm 5^{\circ}\text{C}$ の温度変化を受け基準温度に戻ってきた状態において全ひずみは 300×10^{-6} 程度減少している。一方で、自己収縮の進行が概ね終了している材齢 140h では、図 2- 12 下図に示されているように、自己収縮の影響はほとんど見られず、温度と全ひずみの関係は全 step でほぼ同一の線形関係を示している。

以上のように、若材齢から線膨張係数の測定を行う場合、自己収縮の影響を考慮する必要があることは明らかである。

本研究では、線膨張係数を導出に際し、以下の手法で自己収縮の影響を考慮することとした。

まず、温度制御パターン 2 中の Step1,2 において自己収縮が、単位時間あたり自己収縮ひずみ増加量 a ($\times 10^{-6}/\text{min}$) で線形に進行すると仮定した。この場合、Step1, Step2 での全ひずみ量はそれぞれ、

$$\varepsilon_{1all} = \alpha \Delta T_{S1} + at_{S1} \quad (2-4)$$

$$\varepsilon_{2all} = \alpha \Delta T_{S2} + at_{S2} \quad (2-5)$$

と表される。

ここで α : 該当区間における線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),

ΔT_{Si} : Step i における温度変化量 ($^{\circ}\text{C}$),

t_{Si} : Step i の測定時間 (min),

である。たとえば、試験 B では、 $\Delta T_{S1} = 5$ ($^{\circ}\text{C}$)、 $\Delta T_{S2} = -5$ ($^{\circ}\text{C}$)、 $t_{S1} = t_{S2} = 25$ (min)、さらに昇温・降温速度が一定であることを考慮すると、式(2-4)から式(2-5)を差し引くことで自己収縮ひずみ増加量 a を消去でき、結果として線膨張係数 α は a の値によらず式(2-6)で表すことができる。

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{1all} - \varepsilon_{2all}}{\Delta T_1 - \Delta T_2} \quad (2-6)$$

以上の線膨張係数算定手法の妥当性を検証するため、研究用普通ポルトランドセメント(記号-N)を用いて水セメント比が 25%,40%,55% (記号- 25, 40, 55) 及びシリカフェームプレミックスセメント(記号-SFPC)を用いた水セメント比 16.5% (記号- 16.5) のセメントペーストについて、上述の手法で線膨張係数の経時変化を測定した。測定結果を自己収縮の時間変化と併せて図 2- 13 に示す。

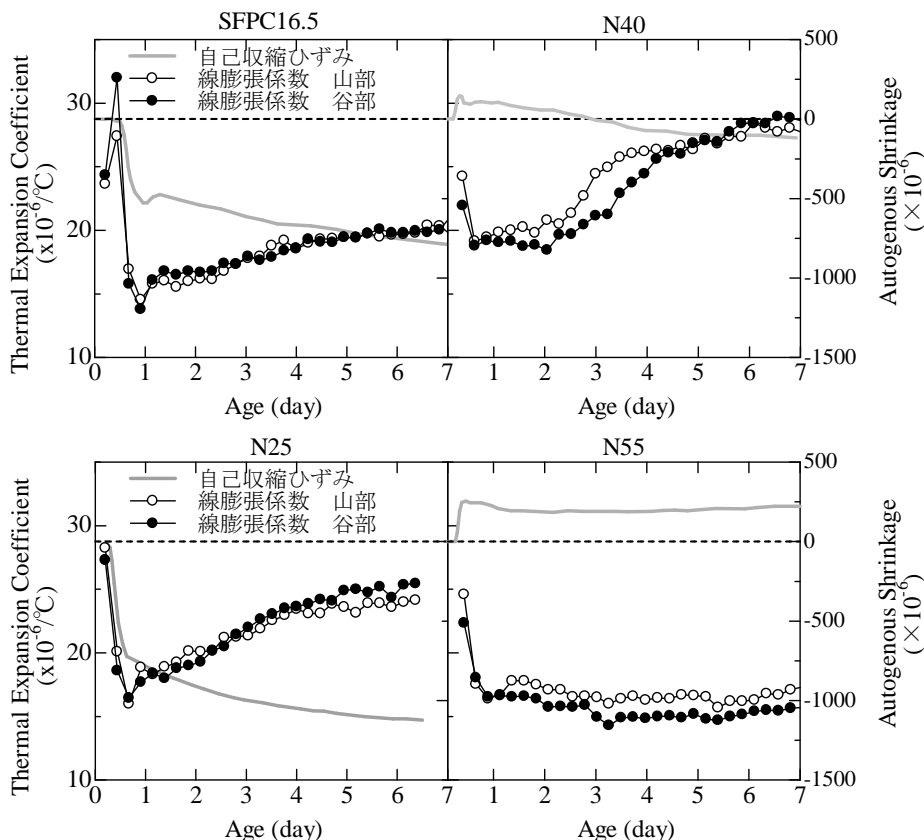


図 2-13 線膨張係数の経時変化

図より N40 の材齢 2 日以降，線膨張係数が上昇する区間において，若干のばらつきがみられるものの，自己収縮の大小に関わらず，比較的小さいばらつきで線膨張係数の時間変化を算出可能であることが確認できる。特に，材齢 1 日以前の線膨張係数が減少している段階では，各水セメント比によって相当の自己収縮差があるにも関わらず，線膨張係数の減少・停滞挙動を表現可能であった。

図 2-14 に，N25，N40，N55 及び SFPC16.5 について，温度パルスを経ることで生じたひずみ変化（ずれ）を示す。

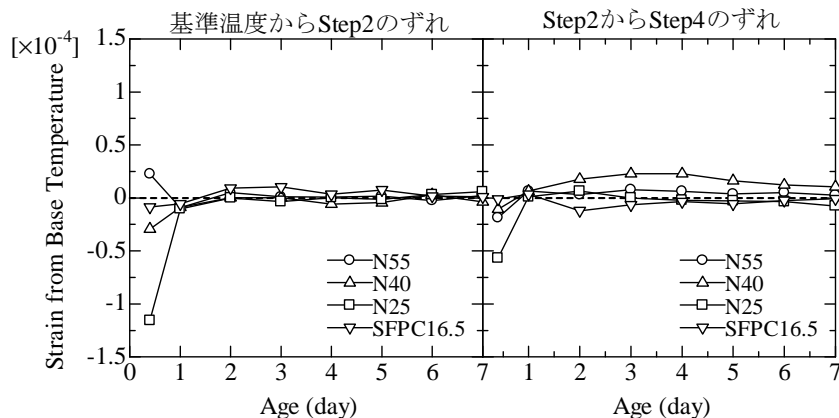


図 2-14 温度パルスの前後におけるひずみのずれ

ここで、基準温度時からのずれとは、試験体の基準温度時のひずみと、温度パルスを経て再び基準温度に戻ってきたときのひずみとの差異であり、温度パルスを経ることによる水分移動の影響と自己収縮ひずみの影響が含まれていると考えられる。

図 2-14 温度パルスの前後におけるひずみのずれをみると、材齢 1 日以前では自己収縮の影響により、いずれの試験体でもずれ量が大きくなる傾向が見られるが、材齢が経過するに従ってずれ量が小さくなることが確認できる。これは図 2-13 に示した自己収縮ひずみの傾向と一致している。また、材齢 1 日以降では水セメント比がずれ量に及ぼす影響については、明確な傾向は見られない。

材齢 1 日以降における最大ずれ量は、N40 の材齢 3 日時点の 20×10^{-6} 程度であり、本実験で与えた温度パルスは $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ であることを踏まえると、本測定手法における線膨張係数の測定誤差は最大で $2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 程度であると判断される。

2.3.3 線膨張係数測定用温度パルスが自己収縮ひずみに及ぼす影響

(1)で述べた線膨張係数の誤差は、すなわち線膨張係数測定用の温度パルスが自己収縮ひずみに影響を及ぼす可能性を示唆するものであるため、温度パルスが自己収縮ひずみに及ぼす影響について検討を行った。

試験体として、シリカフェームプレミックスセメントを使用した、水セメント比 0.15 のセメントペースト（記号-P）を作製し、ベース温度を 20°C一定条件（記号-20-20）のものについて、温度パルスを有するものと温度パルスがないものについて測定を行った。測定結果を図 2- 15 に示す。

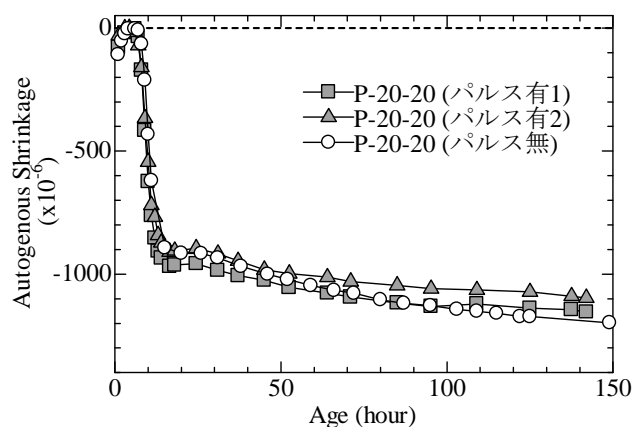


図 2- 15 自己収縮ひずみに及ぼす温度パルスの影響

図に示されるように、温度パルスの有無によるひずみの差異は、±5%程度であり、ほとんど確認されなかったため、今後の検討では、温度パルスが自己収縮ひずみに与える影響については無視できるものとした。

2.3.4 ひずみの測定方法に関する検討

開発した測定装置は、変位の測定にレーザー変位計を使用しているが、コンクリートの分野において同様の測定手法は実績が少ないため、変位の測定手法が測定値に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、レーザー変位計及び埋込型ひずみ計を用いて、セメントペースト（記号- P）、モルタル（記号- M）、コンクリート（記号- C）のひずみの測定を行った。

試験体の結合材はシリカフェームプレミックスセメント（記号- SFC）とし、水セメント比 0.15 のセメントペースト、モルタル及びコンクリートを作製した。温度条件は 20°C 一定条件、最高到達温度 65°C の温度履歴条件の 2 条件とした。試験に使用した調合を表 2- 3 に、与えた温度履歴を図 2- 16 に示す。

表 2- 3 調合

	W/B	Va	W	B	S	G	SP/B	D/B
			(kg/m ³)				(%) ^{**}	(%) ^{**}
SFC-P	0.15	0	316	2108	0	0	1.0	0.2
SFC-M26	0.15	0.26	235	1565	665	0	1.4	0.2
SFC-M49	0.15	0.49	161	1074	456	926 [*]	1.5	0.2
SFC-C49	0.15	0.49	161	1074	456	926	1.4	0.2

※ 粗骨材最大寸法を 5mm とした。

※ 高性能減水剤，消泡剤は水に含めた

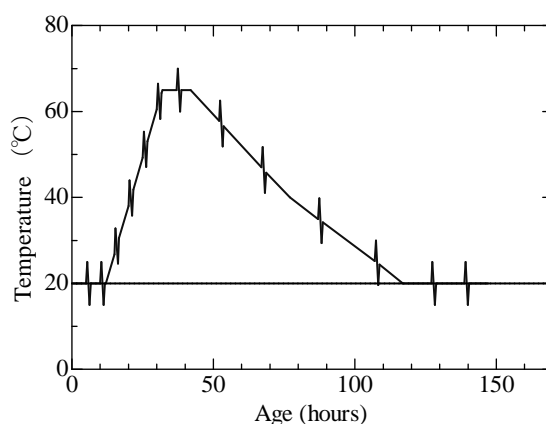


図 2- 16 温度履歴

レーザー変位計との比較に使用した埋込型ひずみ計は、KM-100BT@東京測器であり、コンクリートの自己収縮ひずみの測定に、十分な実績が認められている。

同一調合のセメントペースト及びモルタルを、試験体寸法 10×60×370mm とし、レーザー変位計（記号- L）で測定した結果と、試験体寸法 100×100×400mm とし、埋込型ひずみ計（記号-B）で測

定した結果について、20°C一定条件のものを図2-17に、最高到達温度65°Cの温度履歴条件のものを図2-18にそれぞれ示す。凡例中のM26, M49は、試験体中の骨材体積比Vaがそれぞれ26%のモルタル、49%のモルタルを表している。

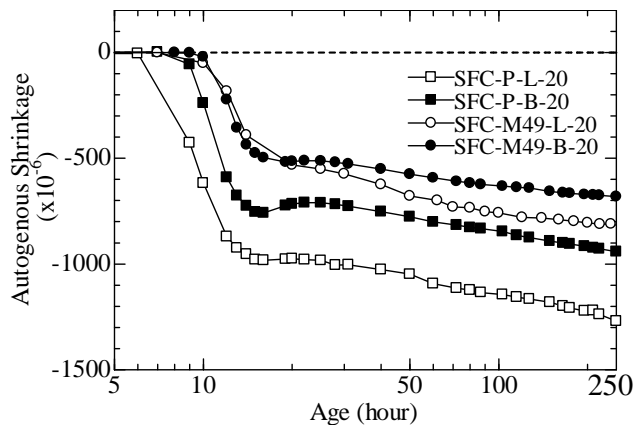


図2-17 測定手法が自己収縮ひずみの測定値に及ぼす影響 (20°C一定条件)

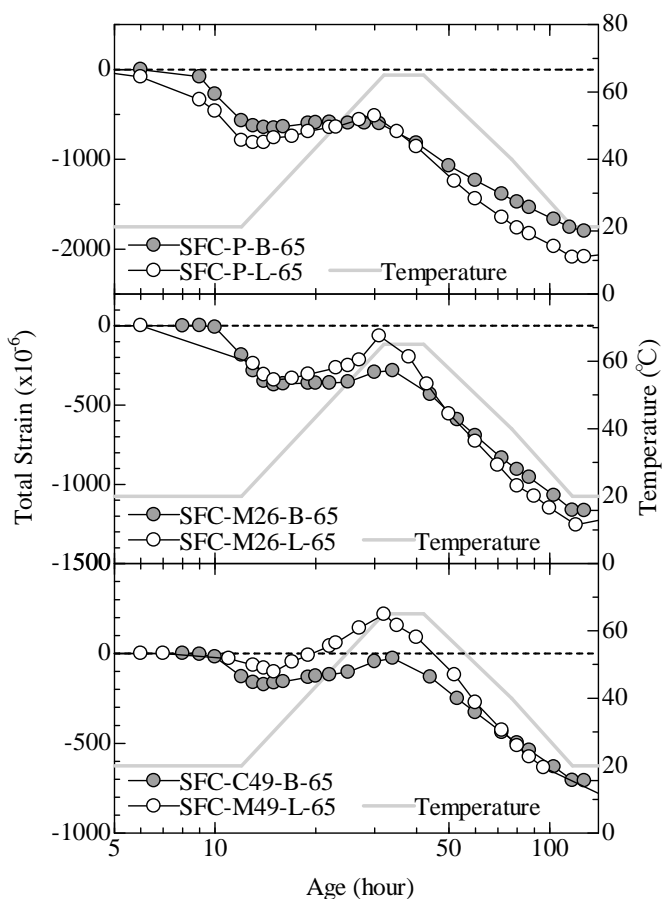


図2-18 測定手法が自己収縮ひずみの測定値に及ぼす影響 (65°C履歴条件)

図2-17に示されるように、材齢20時間以降のある程度試験体が硬化した材齢では、セメントペースト、モルタルいずれの試験体についても、測定手法によらずほぼ同様のひずみ挙動が測定され

ている。一方で、セメントペースト試験体では、材齢 20 時間以前に非接触型であるレーザー変位計が埋込型ひずみ計に比べて初期の自己収縮を大きく評価している。これは、埋込型ひずみ計、もしくはひずみゲージといった接触型の測定手法では、セメントペーストにある程度の剛性が発現するまでの極若材齢時の変位を適切に測定できないためと考えられる。

以上を踏まえると、若材齢の変形により鋭敏であるレーザー変位計による非接触型の測定装置のほうが、より早い材齢から収縮ひずみを探知可能であり、セメントペーストの硬化過程におけるひずみ変化は本測定装置を用いることでより精度のよい測定が可能であるといえる。

また、モルタル試験体では、セメントペーストで確認された若材齢における測定の差異が小さい。これは骨材の影響によって初期のヤング係数の発現速度が速くなり、結果として測定手法の剛性差が反映されにくかったためと考えられる。

次に図 2-18 に着目すると、セメントペーストでは、65°C 履歴条件においても 20°C 一定条件と同様に若材齢においてレーザー変位計が埋込型ひずみ計に比べて初期の自己収縮を大きく評価している。モルタル及びコンクリートでは、その差異が小さくなることも 20°C 一定条件と同様である。

その後、最大到達温度 65°C の温度履歴を経て、再び試験体温度が 20°C の戻ってきた材齢 7 日時点のひずみを比較すると、セメントペーストでは、若材齢に生じたひずみ差がそのまま残留している。このことは、温度履歴条件でも 20°C 一定条件と同様に、硬化後のひずみは測定手法によらず評価ができることを意味している。

しかしながら、温度昇降中のひずみ履歴は、測定手法によって異なっており、レーザー変位計のほうが、より温度に対して鋭敏な反応を示している。これは、試験体寸法の影響や型枠の拘束程度の差が反映されたものと考えられ、100×100×400mm 試験体を埋込型ひずみ計で測定した場合、線膨張係数を小さく見積もる可能性があることを意味している。

2.4 線膨張係数に及ぼす調合の影響

本節では、2.3 節で検証を行った線膨張係数・自己収縮ひずみ測定装置を使用して、水セメント比、結合材種類、骨材量といった要因が線膨張係数の経時変化に及ぼす影響について検討を行う。

2.4.1 実験概要

(1)使用材料・調合及び養生条件

使用したセメントは普通ポルトランドセメント(記号-N), 中庸熱ポルトランドセメント(記号-M), 低熱ポルトランドセメント(記号-L), 高炉スラグ混入セメント(記号-BB), シリカフェームプレミックセメント(記号-SFC, SFPC)の5種であり, それぞれのセメントに対して, パラメータとして2~4種類の水セメント比のセメントペースを作製した。

モルタル試験体の作成には, セメントとして高炉スラグ混入セメント, 細骨材には山梨県大月産砕砂を使用して, 骨材体積比を0%, 38%, 60%とした。試験体はポリエステルフィルムによって封緘を施し, 20°C一定条件と, 山形の温度履歴条件という2種類の温度履歴を与えることで自己乾燥の速度が異なる条件下で線膨張係数の経時変化を得た。表2-4に, 各セメント種類における水セメント比と, 温度履歴試験の最高到達温度を示す。

表 2-4 使用材料

Materials	Type	Character
Cement	Normal Portland cement	Density: 3.16 g/cm ³ , Specific surface area: 3110 cm ² /g
	Moderate Portland cement	Density: 3.20 g/cm ³ , Specific surface area: 3110 cm ² /g
	Low Heat Portland cement	Density: 3.20 g/cm ³ , Specific surface area: 3110 cm ² /g
<u>Additive</u>	Blast furnace slag	Density: 2.90 g/cm ³ , Specific surface area: 4050 cm ² /g
	Silica Fume 1	Density: 2.24 g/cm ³ , Specific surface area: 17.1 m ² /g, SiO ₂ Content: 95%
	Silica Fume 2	Density: 2.34 g/cm ³ , Specific surface area: 10.13 m ² /g, SiO ₂ Content: 85.77%
Fine aggregate	Crushed sand	Surface dry density: 2.57 g/cm ³ , Water absorption: 2.62 %
Superplasticizer	Polycarboxylic acid	SP8HU @ BASF

表 2-5 セメントの化学成分

	ig.loss (%)	Chemical Composition (mass%)							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
N	0.64	21.8	4.49	2.9	63.9	1.84	2.26	0.2	0.38
M	0.8	23.3	3.8	3.9	63.3	0.9	2.4	0.3	0.35
L	0.7	26.3	2.8	3.2	62.9	0.7	2.4	0.15	0.41
BFS	0.05	33.88	15.34	0.34	42.65	5.81	0.65	0.28	0.31

表 2-6 線膨張係数試験条件

	Water to Cement Ratio (%)	Temperature History		Aggregate Volume Content
		Constant	Max. Temperature	
N	25	20°C	40°C, 60°C	0%
	30		40°C, 60°C	0%
	40		40°C, 60°C	0%
	55		60°C	0%
M	30		40°C, 60°C	0%
	40		40°C, 60°C	0%
	55		40°C, 60°C	0%
L	30		40°C, 60°C	0%
	40		40°C, 60°C	0%
	55		40°C, 60°C	0%
BB30	40		40°C, 60°C	0%, 38%, 60%
	55		40°C, 60°C	0%
BB45	40		40°C, 60°C	0%
	55		40°C, 60°C	0%
SFC10	15		45°C, 65°C	0%
SFPC125	13		45°C, 80°C	0%
	16.5	45°C, 70°C	0%	
	20	45°C, 70°C	0%	
SFPC175	13	45°C, 80°C	0%	
	16.5	45°C, 70°C	0%	
	20	45°C, 70°C	0%	

(2) 線膨張係数試験

所定の材齢において、 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ の温度パルスを与えることで線膨張係数の経時変化を得た。セメントペーストの長さ変化の測定には、線膨張係数・自己収縮ひずみ測定装置（図 2- 9）を使用し、線膨張係数の算定方法は、自己収縮の影響を考慮した 2.3.1 の手法を用いた。

(3) 質量含水率試験

普通、中庸熱、低熱ポルトランドセメントにおいて、線膨張係数の経時変化に及ぼす質量含水率の影響を確認するため、水セメント比が 40%、55%のものについては、 20°C 一定条件および 60°C 履歴条件について材齢 12, 18, 24, 72, 168 時間に、水セメント比が 30%のものについては 20°C 条件のみ材齢 3, 6, 9, 12, 18, 24, 72, 168 時間に質量含水率の測定を行った。

質量含水率は、封緘中のセメントペーストをハンマーで約 1g 程度に砕き、その時点の質量を測定し、真空ポンプにより脱水させた後、定温乾燥機により 105°C で 24 時間以上乾燥させ、恒量となった時点の質量を測定することによって得た。秤量には 0.1mg まで測定可能な電子天秤を用いて、質量含水率を 3 体の平均値としてそれぞれ有効数字 3 桁にて算出した。

2.4.2 水セメント比の影響

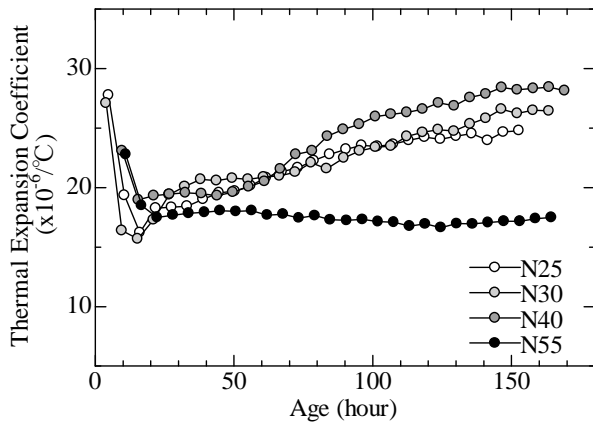
既往の研究では、図 2-2 に示したとおり、コンクリートの線膨張係数に及ぼす水セメント比の影響はほとんどないとされており、硬化後のセメントペーストにおいても、飽水状態では水セメント比の影響をほとんど受けないとされている。

しかしながら、十分に硬化したセメントペーストでは、線膨張係数はセメントペーストの内部相対湿度に依存し、飽水状態から内部相対湿度の低下に伴い上昇を示し 70%RH 程度でピークをとることが Meyers の研究で明らかになっており、封緘条件におけるセメントペーストは自らの水分を消費しながら水和が進行していくことを考えると、自己乾燥による内部相対湿度の低下によって線膨張係数が増加していく可能性が考えられる。

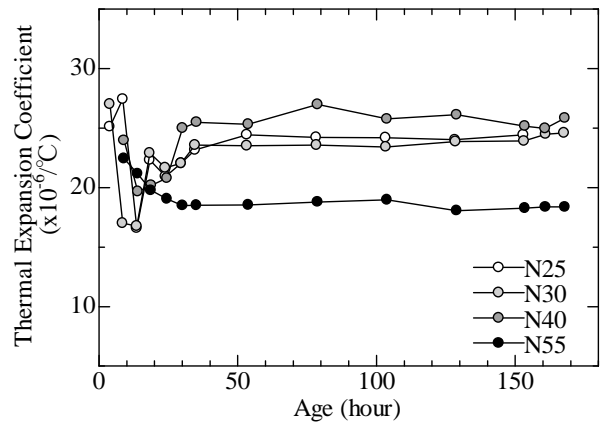
自己乾燥の速度及び終局値は、初期含水率すなわち水セメント比の影響を受けるため、線膨張係数の経時変化は水セメント比の影響を受けることが予想される。

本節では、様々なセメント種類を使用して、異なる水セメント比のセメントペーストを作成し、打設直後からの各試験体の線膨張係数の経時変化を得た。得られた測定値を、各セメント種類の中で水セメント比、温度履歴ごと整理し以下で比較検討を行う。

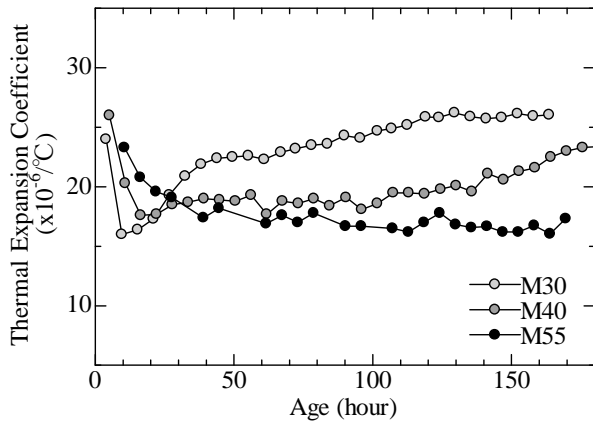
ポルトランド系セメントの線膨張係数の経時変化を図 2-21 に、高炉スラグ混入セメントについてを図 2-21 に、シリカフェームプレミックセメントについてを図 2-21 に、20°C一定条件の場合と 60°C履歴条件の場合をそれぞれ示した。



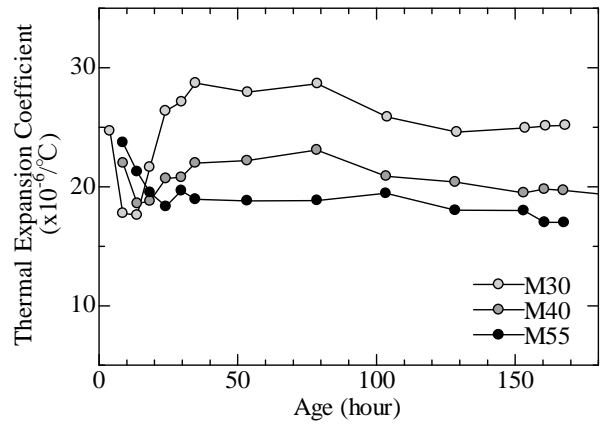
普通ポルトランドセメント 20°C一定



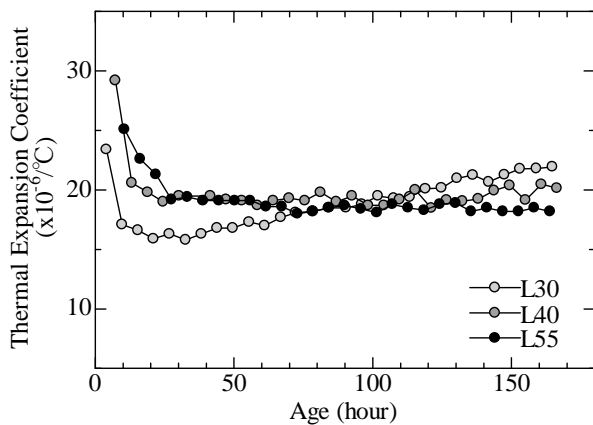
普通ポルトランドセメント 60°C履歴



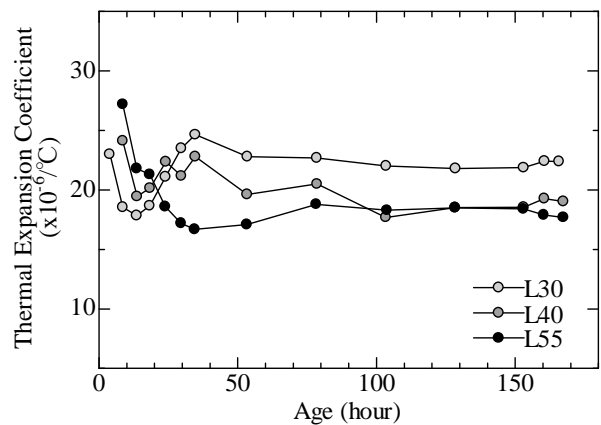
中庸熱ポルトランドセメント 20°C一定



中庸熱ポルトランドセメント 60°C履歴

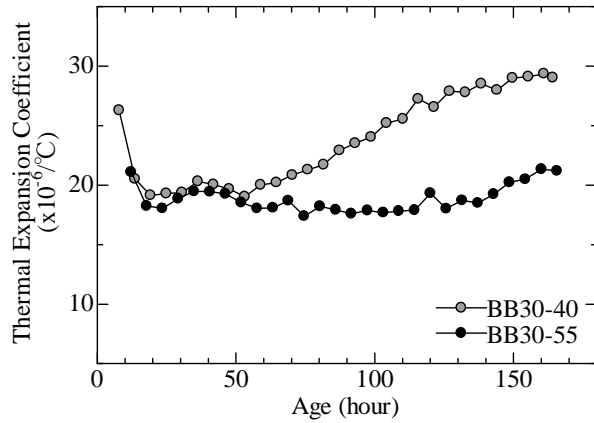


低熱ポルトランドセメント 20°C一定

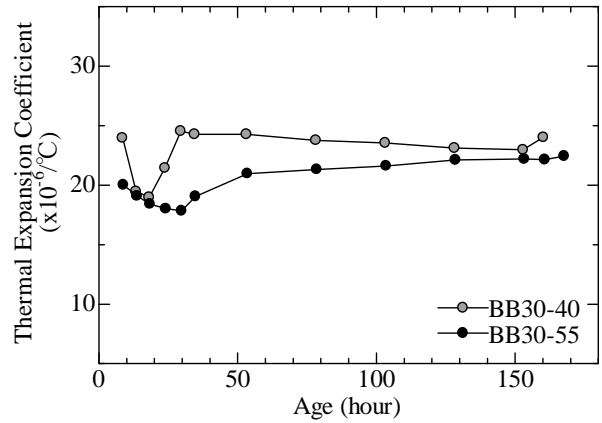


低熱ポルトランドセメント 60°C履歴

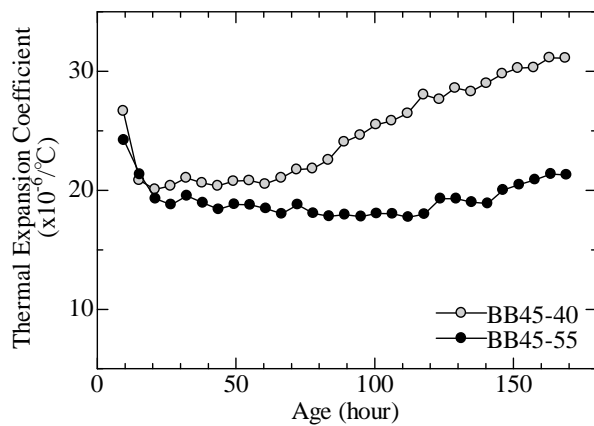
図 2-19 ポルトランド系セメントの線膨張係数の経時変化



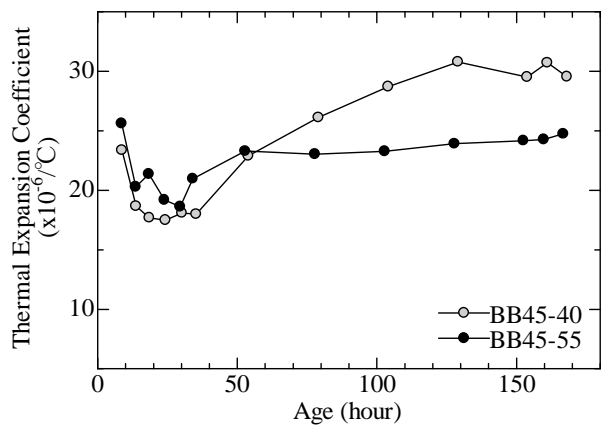
高炉スラグ 30%置換セメント 20°C一定



高炉スラグ 30%置換セメント 60°C履歴



高炉スラグ 45%置換セメント 20°C一定



高炉スラグ 45%置換セメント 60°C履歴

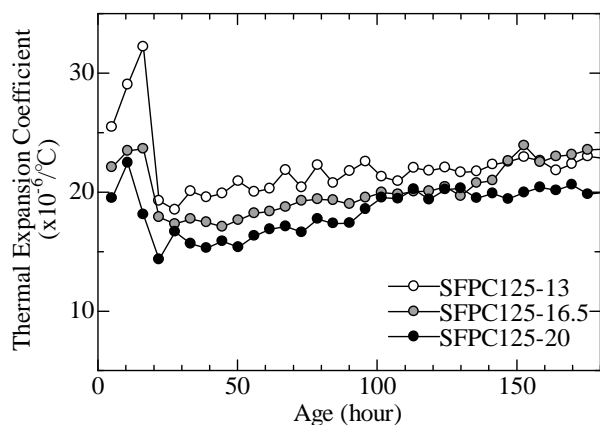
図 2-20 高炉スラグ混入セメントの線膨張係数の経時変化

図 2-19 から図 2-21 のいずれの試験体でも確認されるように、線膨張係数は、材齢初期に急激に減少し、材齢 10 時間から 25 時間程度で極小値を取った。これは、線膨張係数が約 $70 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である水の影響が支配的な領域から、セメントペーストが硬化するに従って減少するために生じるものであり、同様の傾向は 2.2 節の既往の研究でも報告した。この極若材齢における線膨張係数の減少挙動に水セメント比が及ぼす影響に関しては、高水セメント比のものほど線膨張係数の減少速度が小さくなる結果であった。これは、水セメント比の大きいセメントペーストほど長時間にわたって、高含水率の状態を保てることによるものと考えられる。

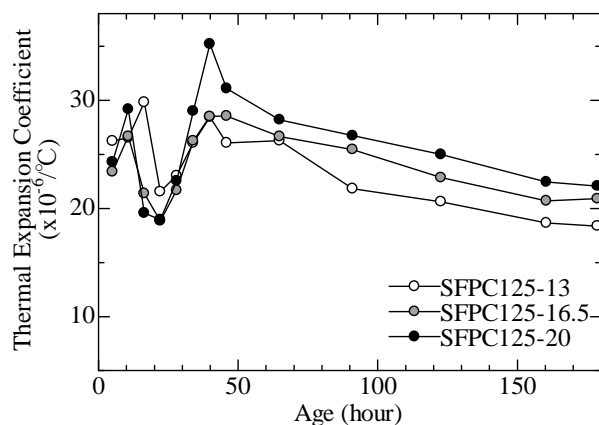
一方、極小値を取った後の挙動は、水セメント比、温度履歴によって異なった。特に、図 2-21 左段の 20°C 一定条件においては、各セメント種類で水セメント比の影響が顕著に見られた。

普通ポルトランドセメントに着目すると、水セメント比 25%、30% のものは、極小値をとった直後から、水セメント比 40% では材齢 50 時間程度から、線膨張係数の緩やかな上昇が確認された。

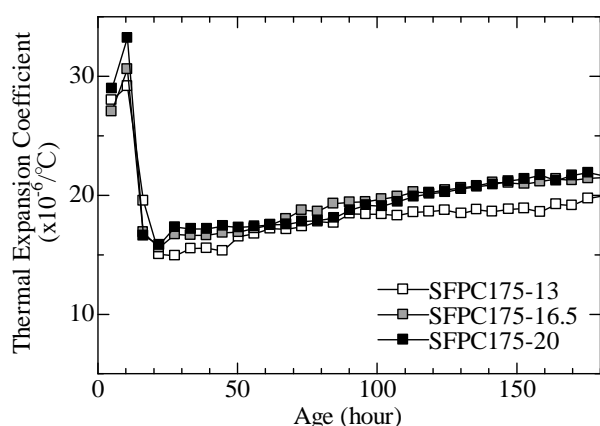
以上の水セメント比が 40% 以下の 3 調合の材齢 7 日時点における線膨張係数は概ね $25 \sim 27 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、材齢 7 日時点では線膨張係数の上昇量における水セメント比の影響はほとんど見



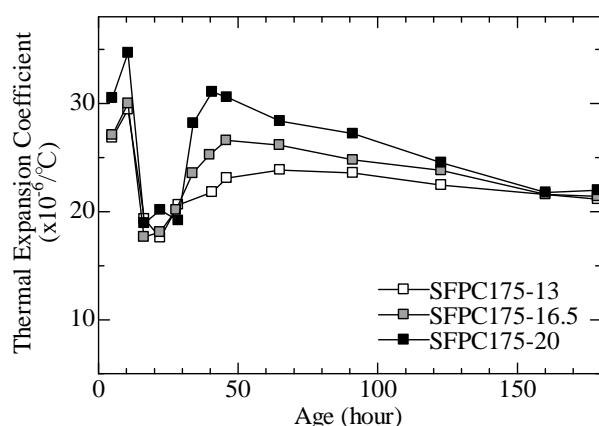
シリカフェーム 12.5%置換セメント 20°C一定



シリカフェーム 12.5%置換セメント 60°C履歴



シリカフェーム 17.5%置換セメント 20°C一定



シリカフェーム 17.5%置換セメント 60°C履歴

図 2-21 シリカフェームプレミックセメントの線膨張係数の経時変化

られなかった。

一方、水セメント比 55%のセメントペーストでは、材齢 7 日以前において、水セメント比 40%以下のセメントペーストと異なり、線膨張係数の増加はみられなかった。このような傾向は中庸熱ポルトランドセメントについても同様であった。

図 2-19 左下の低熱ポルトランドセメントに着目すると、水セメント比 55%だけでなく、水セメント比 40%でも材齢 7 日以前に目立った上昇は確認されず、水セメント比 30%においても材齢 40 時間程度から緩やかな上昇を示すにとどまっており、材齢 7 日時点の線膨張係数値も $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度と普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントの水セメント比 30%の値 $26 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と比較してやや低い結果であった。

図 2-19 右段に示される最高到達温度 60°Cの温度履歴を受ける試験体においては、いずれの調査についても、極小値以降の線膨張係数の上昇速度が 20°C一定条件と比較して大きくなっている。

多くの調査で線膨張係数が増大する材齢において、試験体温度が高温域に到達していることを踏まえると、これらの線膨張係数の増大については、線膨張係数の温度依存性の可能性も考えられる

が、本実験の温度範囲内において、コンクリートの線膨張係数は温度依存性をほとんどもたない²⁴ことを考慮すると、本実験の結果も Sellevold らの実験と同様に、高温履歴を受けることで水和反応が促進され、それに伴う自己乾燥が進行によって線膨張係数が上昇したものと考えられる。

線膨張係数の上昇量は 20℃一定条件のものと同様に、普通ポルトランドセメントでは、水セメント比 55%を除き、概ね $25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度、中庸熟ポルトランドセメント、低熟ポルトランドセメントでも、20℃条件と同様に、水セメント比が小さいもののほうが大きい線膨張係数をとっている。

図 2- 21 の高炉スラグ混入セメントでも、水セメント比が線膨張係数の経時変化に与える影響はポルトランド系セメントの傾向と大きくは変わらないが、水セメント比 55%のセメントペーストにおいても材齢 140 時間程度から緩やかな上昇が確認されている点でポルトランド系の結果と異なっている。

図 2- 21 に示されるシリカフェームプレミックスセメントでは、水セメント比の範囲が 13%から 20%という低い領域において比較を行っている。この水セメント比の低さを考えると、普通強度領域のセメントペーストにもまして自己乾燥の影響を大きく受けることが予想されたが、左段に示される 20℃一定条件の試験結果をみると、若材齢から線膨張係数の増大は見られるものの、その上昇量は比較的小さい。

一方、右段に示す温度履歴を受ける試験体については、特徴的な挙動を示している。すなわち、いずれの水セメント比のセメントペーストにおいても、試験体温度がピークを迎える材齢 36 時間程度で線膨張係数が最大値をとり、その後は試験体温度の低下に伴って減少を示している。先に述べたように、線膨張係数の温度依存性がないものとする、この挙動は以下のように説明できる。

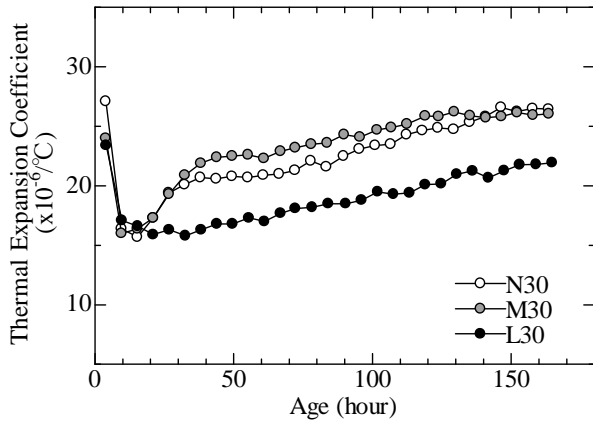
つまり、図 2- 5 で Meyers が示しているように線膨張係数の相対湿度依存性において、線膨張係数は、70%RH においてピークをとり、その後は相対湿度の低下に伴って減少する。水セメント比が 20%以下のセメントペーストが高温履歴を受けた場合、相対湿度が 70%RH 以下に到達することは可能性として十分にあり、この材齢 40 時間以降にみられる線膨張係数の減少は、相対湿度の減少に起因するものであると推察できる。

2.4.3 セメント種類の影響

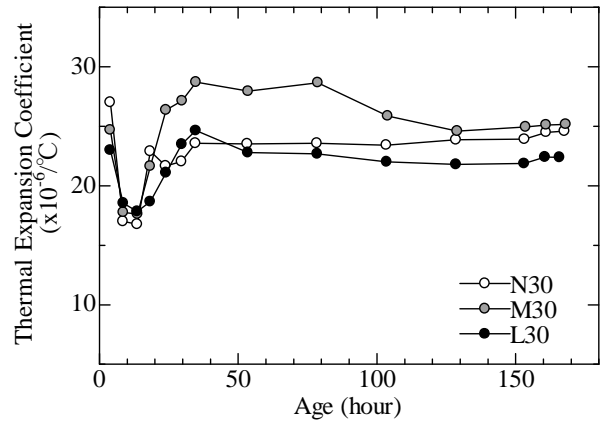
セメント中には、主たる鉱物として、エーライト、ビーライト、アルミネート、フェライトの4種が含まれている。これら各鉱物は水和反応速度がそれぞれ異なり^{25, 26}、以上の4種の鉱物の相組成が異なっている各種セメントでは当然水和反応速度が異なる。また、混和材として使用されている高炉スラグ微粉末や、シリカフェームが置換されている結合材については、これら混和材の水和反応の影響も受ける。

2.4.2 では、セメントペーストの水和に伴う自己乾燥によって線膨張係数の経時変化が生じうることを示したが、ここでは、セメント種類の相違による水和反応速度すなわち自己乾燥の速度に着目し、2.4.2 で示した実験値を使用して同一水セメント比ごとに再整理を行い、セメント種類の影響について検討を行った。

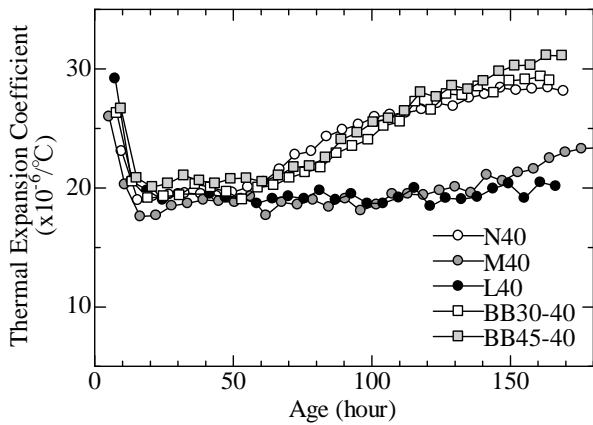
図 2- 22 に同一水セメント比における各種セメント種類のセメントペーストの線膨張係数の経時変化を 20°C一定条件と 60°C履歴条件についてそれぞれ示した。



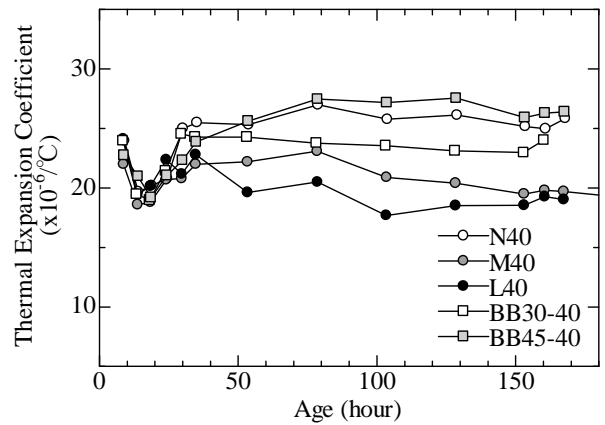
W/C=0.3 20°C一定



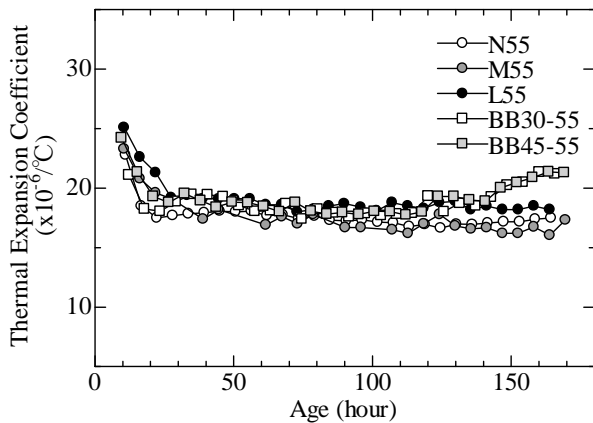
W/C=0.3 60°C履歴



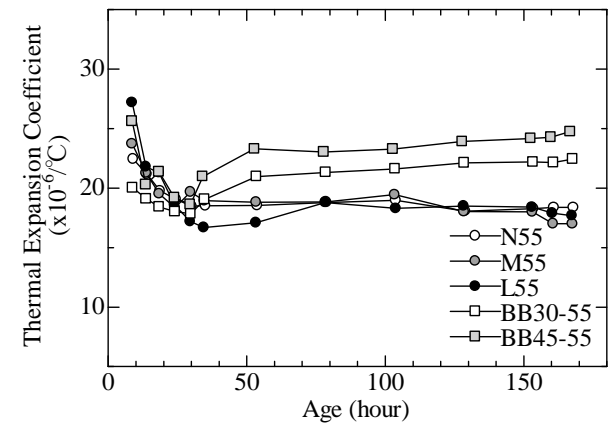
W/C=0.4 20°C一定



W/C=0.4 60°C履歴



W/C=0.55 20°C一定



W/C=0.55 60°C履歴

図2-22 各水セメント比における線膨張係数の経時変化に及ぼす結合材の影響

図から、20°C一定条件、高温履歴条件のいずれの温度条件においても、同一の水セメント比の中で、線膨張係数の経時変化はセメント種類によって異なることが見て取れる。

上段に示した水セメント比30%に着目すると、材齢10時間以前に極初期の急激な減少が終了し、極小値を取った直後から、普通ポルトランドセメントと中庸熱ポルトランドセメントでは材齢30時間前後にかけて比較的急激な上昇が確認される。一方、この区間において低熱ポルトランドセメントでは上昇はみられず、材齢40時間前後から比較的緩やかな上昇を示している。普通ポルトランドセメントと中庸熱ポルトランドセメントでは、材齢40時間以降の材齢においても緩やかな上昇を継続し、材齢140時間において停滞に移行する。材齢7日において、線膨張係数値は $N = M > L$ となっているが、低熱ポルトランドセメントでは、材齢7日以降も上昇を継続する可能性があり、20°C一定条件の試験結果のみからは最終値については議論ができない。ここで、右上段に示す高温履歴条件をみると、低熱ポルトランドセメントも他のセメントと同様に材齢15時間程度から急激な線膨張係数の上昇が確認される。しかしその後は材齢30時間でピークをとり、材齢7日時点の線膨張係数値は、20°C一定条件と同様に、 $N = M > L$ となっている。

左中段に示される、水セメント比40%の20°C一定条件においては、明確な2つの傾向がみられる。すなわち、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ混入セメントにおいては、材齢50時間以降に線膨張係数の増大がみられ、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントでは材齢150時間まで線膨張係数に変化がない。先に述べた水セメント比30%の場合では中庸熱ポルトランドセメントは普通ポルトランドセメントと似通った経時変化を示していたが、水セメント比40%ではむしろ低熱ポルトランドセメントと同様の傾向を示し、材齢150時間以降に緩やかな上昇を示すにとどまっている。低熱ポルトランドセメントでは、材齢7日以前に明確な上昇は見られなかった。また、高炉スラグ混入セメントは、高炉スラグ置換率が異なる2つの結合材を用意しているが、両者に差異はほとんどなく、また水セメント比40%の20°C一定条件では普通ポルトランドセメントとも差異は見られなかった。

一方、水セメント比40%において温度履歴を受ける試験体では、材齢7日時点における線膨張係数は $BB30 = BB45 = N > M > L$ の順であり、20°C一定条件と同様であるが、その途中の経路はセメント種類によって大きく異なる。この経時変化の差異は、材齢15時間程度に極小値をとった後、材齢30時間程度まではほとんど見られないが、温度履歴がピークを迎えた後の降温域に生じたものである。

図2-22下段に示される水セメント比55%では、ポルトランド系セメントにおいては、材齢7日まで一定値、もしくは緩やかな減少を示しているのに対して、高炉スラグが混入したセメントでは、材齢150時間以降に上昇が確認された。温度履歴を受ける場合にはこの傾向がより顕著であり、高炉スラグ混入セメントでは材齢30時間以降上昇し材齢7日時点で概ね $25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度に達した。

2.4.4 質量含水率と線膨張係数の関係

繰り返し述べているように、十分に硬化したセメントペーストにおいて線膨張係数はセメントペーストの内部相対湿度に依存する。この現象は、ゲル空隙量に影響を受けるとされている²⁷ため、本研究のように、若材齢時における線膨張係数が、必ずしも同様の相対湿度依存性を示すとは限らないが、少なからず内部相対湿度の影響は受けることが予測される。その意味で、2.4.2 及び 2.4.3 で、水セメント比が小さい順に、また材齢初期に水和反応が進行するエアライトの含有量が多いセメント種類順に線膨張係数の上昇が確認されたことに関しては、内部相対湿度の観点から定性的に説明が可能である。

本節では、ポルトランド系セメントペーストの封緘養生条件下における質量含水率の経時変化を取得し、線膨張係数との関係を確認した。図 2-23 から図 2-25 に各水セメント比における質量含水率の経時変化を示す。

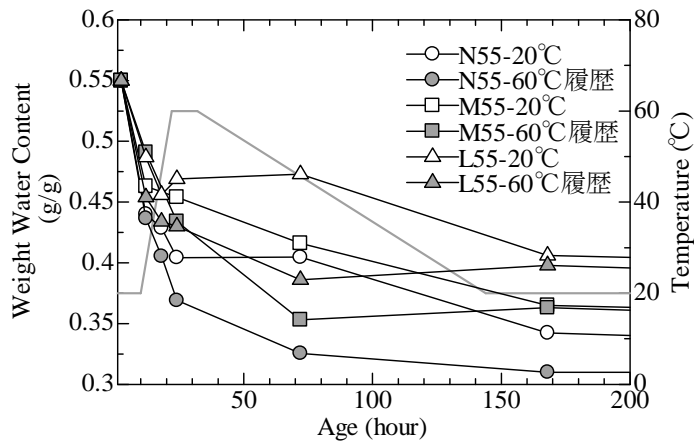


図 2-23 水セメント比 55%の質量含水率の経時変化

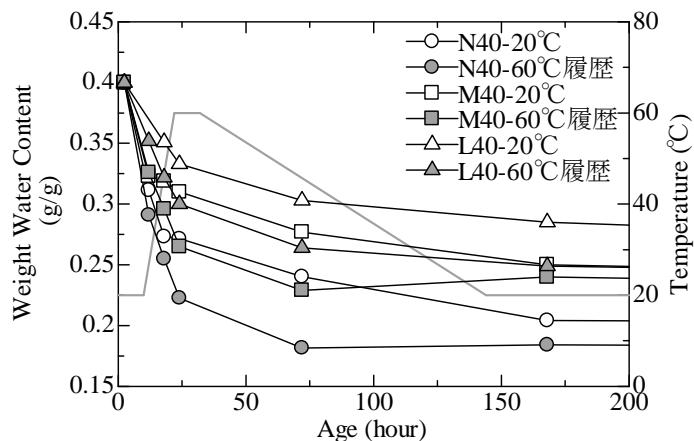


図 2-24 水セメント比 40%の質量含水率の経時変化

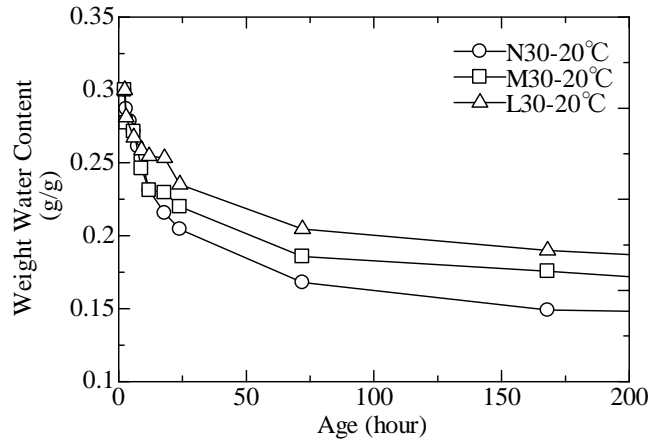


図 2-25 水セメント比 30%の質量含水率の経時変化

図 2-23 から図 2-25 のいずれの質量含水率の経時変化においても、20°C一定条件では、材齢 7 日以前において N, M, L の順に質量含水率の低下量が大きく、若材齢ではエーライト量、アルミネート量が質量含水率の低下に影響を及ぼすことが確認できる。この事実は、2.4.3 で述べた線膨張係数の経時変化と定性的に一致している。

また、図 2-23, 図 2-24 に示すように 60°C履歴条件の試験体は、材齢 12 時間の測定以降、20°C一定条件のものより質量含水率が低下しており、高温時の水和促進が確認できる。20°C一定条件と 60°C履歴条件の質量含水率の差異は、材齢 72 時間の測定時にもっとも大きく、材齢 168 時間の測定ではその差異が小さくなる傾向が見られた。

以上で述べた質量含水率と、同一材齢における線膨張係数の関係を示したものが図 2-26 である。ここで、線膨張係数と質量含水率の取得材齢が異なる場合は、後述する線膨張係数の近似式から求めた。

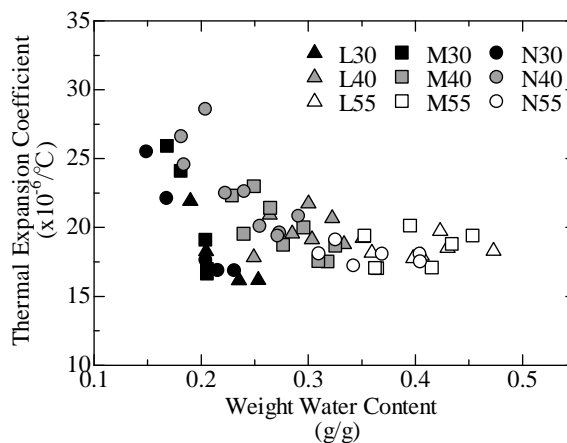


図 2-26 質量含水率と線膨張係数の関係

図から明らかなように、ポルトランド系セメントペーストの水セメント比 30%及び 40%で確認された線膨張係数の経時的な増加は質量含水率の低下を伴っており、線膨張係数の増大は自己乾燥による含水率変化によって生じることが確認された。

一方で、線膨張係数が増加を開始する含水率は水セメント比によって異なっている。このことは、自己乾燥による線膨張係数上昇のメカニズムは、質量含水率のみでは説明がつかないことを意味している。

線膨張係数の相対湿度依存性のメカニズムとしては、セメントペースト内部の相対湿度が温度とともに変化²⁸し、この相対湿度変化を駆動力とした毛管張力機構を用いて数値計算を行った Z.C.Grasley らの研究²⁹あり、一定の傾向が評価できている。

本論文では、セメントペースト内部の相対湿度の測定を行っていないため、これらの研究の検証を行うことはできないが、丸山らの指摘³⁰によって、毛管張力機構では乾湿繰り返し時に生じるヒステリシス挙動を説明することができないことがわかっている。自己乾燥による内部相対湿度の減少は、等温吸着線において、処女脱着線上を移動するものと推察されるため、封緘状態では乾湿繰り返しを受けることはないものの、実際の RC 部材を想定した場合、コンクリート内外の水分移動を無視することはできず、線膨張係数の増減メカニズムについては、より一般的な環境における議論が必要であると思われる。

以上を踏まえ、丸山らが提唱している水和圧理論に着目すると、同理論では同一温度条件下で、ヒステリシスが生じた際にも水と体積変化の関係を統計的吸着厚さで一様に整理することが可能となっており、温度変化に起因する体積変化についても水和圧理論で考察を行う余地がある。

本節では、質量含水率の経時変化による評価を行ったが、水和圧理論に供するためには、質量含水率に加えて、各調合の体積含水率、体積弾性係数、比表面積の経時変化を取得する必要がある、この点については今後の検討課題としたい。

2.4.5 骨材量の影響

弾性変形、乾燥収縮等のセメントペーストの体積変化は、一般に骨材のそれよりも大きく、複合材料であるコンクリートの中では、骨材はセメントペーストの体積変化を拘束する方向に働く。この関係は温度変形についても例外ではなく、通常、セメントペーストと比較して、骨材の線膨張係数は小さいため、骨材はセメントペーストの温度変形を拘束する。この拘束の程度は骨材の線膨張係数のほか骨材粒径や骨材量の影響を受けることが予想される。本節では、モルタルの線膨張係数に及ぼす骨材量の影響について検討を行った。なお、骨材種類がコンクリートの線膨張係数に及ぼす影響に関しては、文献³¹に詳しい。

異なる骨材量におけるセメントペーストおよびモルタルの線膨張係数の経時変化について、高炉スラグ混入セメント（スラグ置換率 30%）、水セメント比 40%の試験結果を図 2-27 に示す。

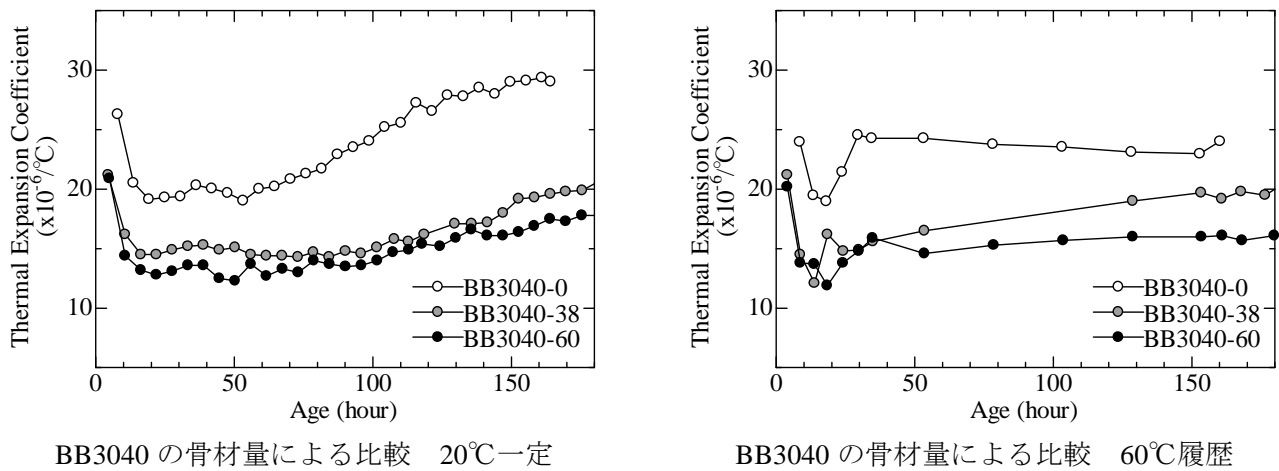


図 2-27 線膨張係数の経時変化に及ぼす骨材量の影響 (BB3040)

図 2-27 から、線膨張係数の経時変化に関しては、モルタル試験体でもセメントペースト試験体と同様に、極若材齢で急激に減少し、その後自己乾燥に伴い上昇に転じるという傾向が確認された。

しかしモルタル試験体の線膨張係数の挙動は、セメントペースト試験体と比較して全体的に値が小さく、経時変化の量も小さい。これは、一般的な骨材の線膨張係数がセメントペーストより小さいため、セメントペーストの温度膨張を骨材が抑制することが一因である。

線膨張係数に与える骨材量の影響については、式(2-7)に示す複合則によって評価を試みた。

$$\alpha(x) = \frac{1}{\frac{1-x}{\alpha_p} + \frac{x}{\alpha_a}} \tag{2-7}$$

ここで、 x : 骨材量体積比、

$\alpha(x)$: 骨材量体積比 x における線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),

α_p : セメントペーストの線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),

α_a : 骨材の線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

である。しかしながら、図 2- 27 に示されるように、セメントペーストもモルタルも、線膨張係数は水和に伴い時間的に変化していくため、骨材の影響のみを取り出すためには、2.4.4 で述べたような質量含水率の減少による影響を取り除く必要がある。そこで本節では、乾燥の影響がほとんどないと考えられる、線膨張係数の極小値近辺の材齢 21 時間の値を使用した。

図 2- 28 に材齢 21 時間における線膨張係数と骨材体積比の関係を示す。

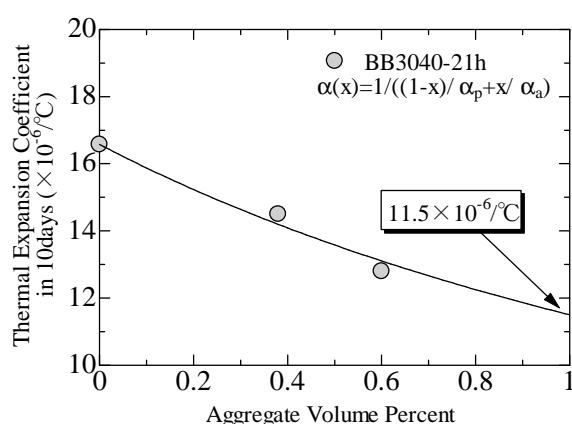


図 2- 28 線膨張係数に及ぼす骨材量の影響

図 2- 28 から、セメントペースト試験体の測定値から式(2-7)を用いてモルタル試験体の線膨張係数を予測した場合、骨材の線膨張係数を $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定したときによい一致を示すことが確認された。この線膨張係数値は、骨材平均よりもやや大きいものの、概ね妥当な値である。

本検討では、骨材量の影響の検討に際して細骨材のみを使用しているが、コンクリートの線膨張係数に及ぼす骨材の影響に関しては、骨材種類、粒径についても考慮する必要があるため、本節の検討は十分ではないが、次章以降の検討では、さしあたり式(2-7)によって、骨材量の影響を考慮することとした。

2.5 温度ひずみ

2.4節で示したように、コンクリートの温度が変化している最中に、線膨張係数もまた変化しているため、温度変化によって生じるひずみの変化を算定するためには、式(2-8)に示す増分による温度ひずみの算定式が適当である。

$$\Delta\varepsilon_{thermal,i} = \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} \cdot (T_i - T_{i-1}) \quad (2-8)$$

ここで、 $\Delta\varepsilon_{thermal,i}$: i ステップにおける増分温度ひずみ ($\times 10^{-6}$),

α_i : i ステップにおける線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),

T_i : i ステップにおける試験体温度 ($^{\circ}\text{C}$)

であり、本論文では1ステップを1時間として計算を行う。

式(2-8)を使用して得られた温度ひずみの経時変化の一例として、図 2- 29 にポルトランド系セメントの水セメント比 30%, 40%, 55%のセメントペーストにおける 60°C履歴条件の温度ひずみの推移を示す。

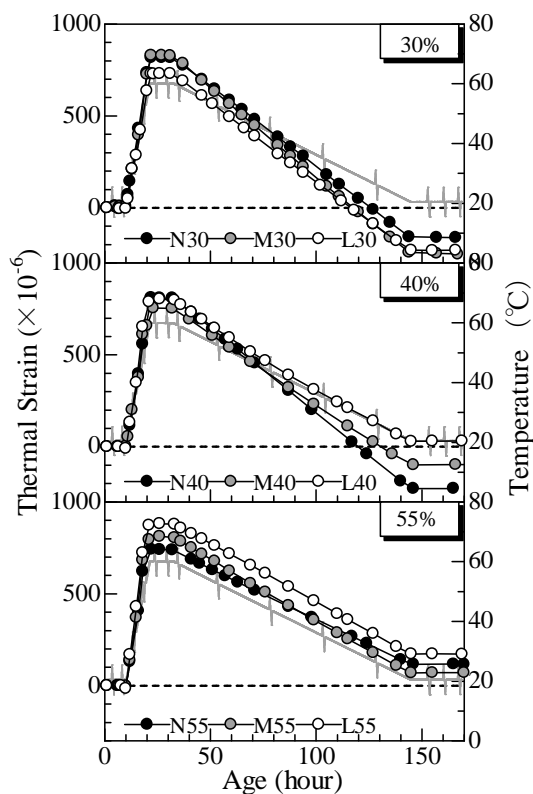


図 2- 29 60°C履歴条件の各調合の温度ひずみ

図2-29に示されるいずれの試験体も初期温度の20°Cから温度上昇→下降に伴って膨張→収縮挙動を示しているが、線膨張係数の経時変化を考慮しているため、材齢144時間に再び20°Cに戻ってきたときに、温度ひずみは必ずしもゼロを示さない。特に、水セメント比30%、40%の試験体では、温度ひずみが最終的に収縮を示している。これは水和による自己乾燥に伴い線膨張係数が増加し、温度上昇時より温度下降時に大きな線膨張係数を取ったためである。本現象に関する模式図を図2-30に示す。

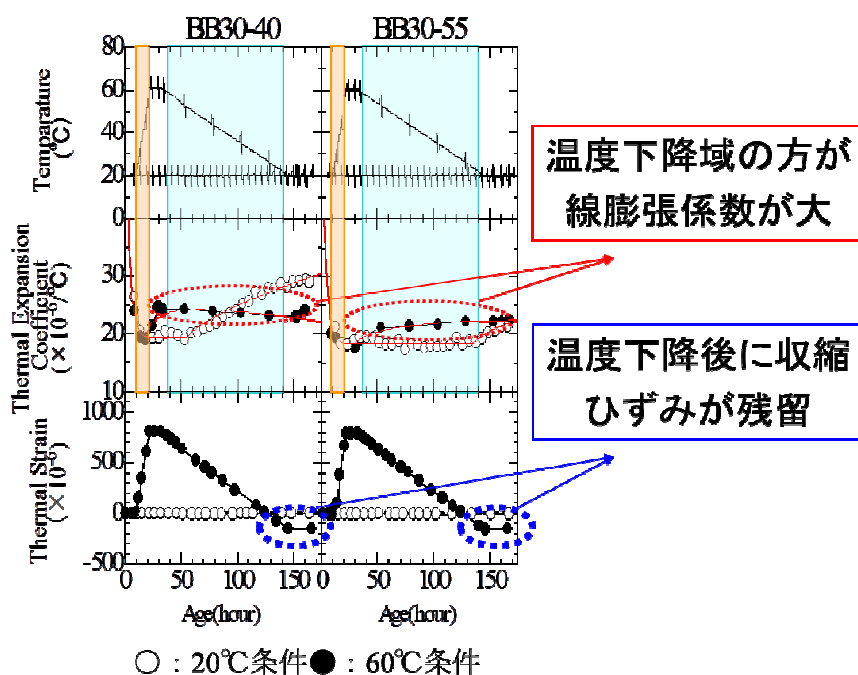


図 2-30 温度ひずみに関する模式図

マスコンクリート等で水和発熱による高温履歴を経る場合のひび割れメカニズムは、温度ひずみが拘束される時のヤング率の経時変化によって生まれる引張拘束応力、外部拘束条件下の自己収縮によって生ずる引張拘束応力が挙げられるが、本検討のように、線膨張係数が経時変化することによって、収縮ひずみが生じていることを考えると、以上の2つのひび割れリスク要因の他に、3番目の要因として“線膨張係数の経時変化によって生じる温度ひずみ”の拘束によって生まれる引張拘束応力が存在するといえる。この新たなひび割れリスクの存在は、従来可能性として考えられてきたものであるが、実験的に立証したのは本研究が初めてである。

実際に、マスコンクリートのひび割れ制御指針において、これら温度ひずみによる収縮ひずみは明示されていない。

近年、高炉セメントコンクリートにおける温度ひび割れが問題となり、マスコンクリートのひび割れ制御指針2008において、宮澤らは高炉セメントコンクリートの自己収縮の終局値として、最高到達温度の影響を加味した次式を提案した。

$$\varepsilon_{c0} = 3070 \exp\{-7.2(W/B)\} + 50 \left\{ 1 - \exp\left(-1.2 \times 10^{-6} \times (T_{\max} - 20)^4\right) \right\} \quad (2-9)$$

ここで、 ε_{c0} : 終局自己収縮ひずみ量
 W/B : 水セメント比 (水結合材比)
 T_{\max} : 最高到達温度

であり、自己収縮ひずみの終局値の第2項に最高到達温度の影響が加味されている。これは高炉セメントコンクリートを使用した実験において、線膨張係数を一定として算定された自己収縮ひずみから得られた実験式である。

このような実験式は、取扱いが簡便であることから工学的価値は高いが、自己収縮がセメントの水和反応によって生じるものであるとするならば、自己収縮ひずみの終局値に最高到達温度の影響を加味することには疑問が残る。なぜなら、自己収縮ひずみの終局値が温度によって異なるという式(2-9)は、物理化学的には最高到達温度が異なった場合に、異なる水和生成物が生成されているということを意味しているからである。

もしこのような水和反応を仮定しているのであれば、自己収縮の進行速度に及ぼす温度の影響としてアレニウス則の有効材齢を使用していることと決定的に矛盾する。

そこで本論に戻り、この式(2-9)における第2項が、温度ひずみによる収縮ひずみを意味していると考え、第2項の変数として最高到達温度が使われていることに合理的な説明が可能である。また、この式が線膨張係数の経時変化が顕著である高炉セメントコンクリートの実験値から得られたことも理解ができる。

以上から、自己収縮ひずみの算定に際し、線膨張係数の経時変化を考慮しなかった場合、“温度ひずみ”という誤差が含まれた自己収縮ひずみが算定されることを認識する必要がある。

2.4節の検討において、線膨張係数の経時変化は水セメント比、セメント種類の影響を受けることが確認されている。線膨張係数の経時変化は、残留温度ひずみを発生させることを述べたが、この温度ひずみの経時変化も、線膨張係数と同様に調合の影響を受けると考えられる。

そこで、各調合の試験体で最高到達温度60℃の温度履歴を経たものについて、材齢7日時点における残留温度ひずみの算定を行った。

温度ひずみの算定結果を全ひずみの測定結果と併せて、ポルトランド系セメントペーストの結果を図2-31に、高炉スラグ混入セメントの結果を図2-32にそれぞれ示す。

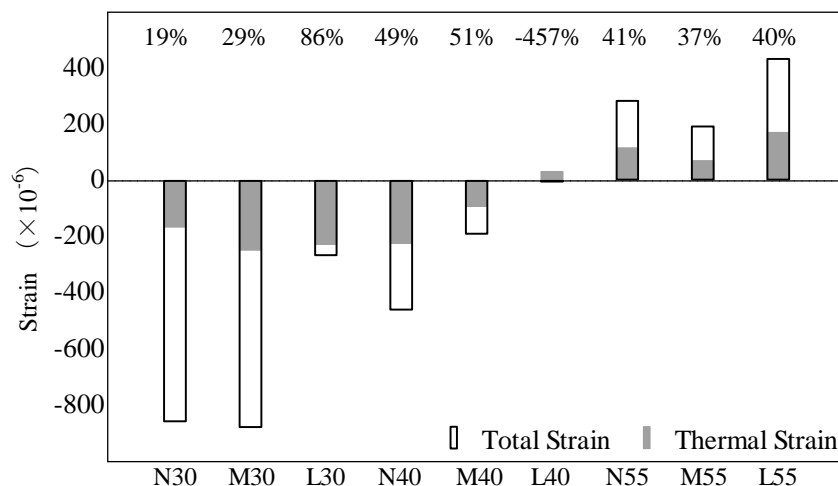


図 2-31 材齢 7 日時点における全ひずみと温度ひずみ（ポルトランド系セメント）

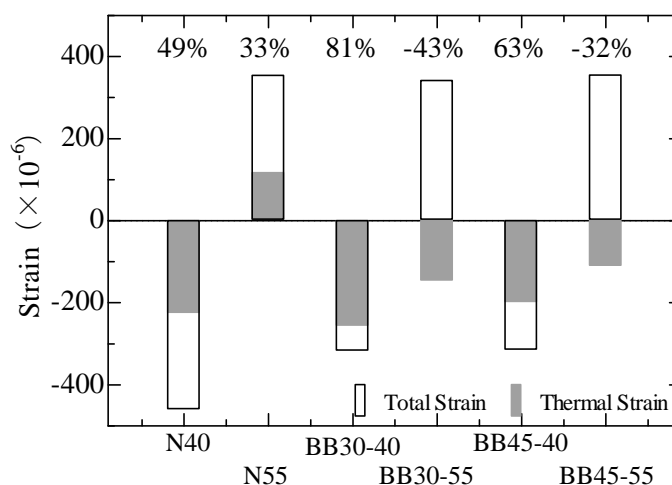


図 2-32 材齢 7 日時点における全ひずみと温度ひずみ（高炉スラグ混入セメント）

図 2-31, 図 2-32 をみると, 材齢 7 日時点における全ひずみの中には相当量の残留温度ひずみが含まれており, 収縮量, 膨張量が小さいものほど, 相対的に温度ひずみの影響が大きいことがわかる。

図 2-31 によると, 比較的大きい自己収縮ひずみが生じる水セメント比 30%のものでも, 7 日時全ひずみ中の N:19%, M:29%, L:86%程度の差異が確認される。このように, 従来のマチュリティ則や有効材齢の概念で使用されている終局自己収縮ひずみには, 線膨張の温度依存性に由来する温度ひずみが含まれており, 正確な自己収縮ひずみの終局ひずみを示していないことが示された。

2.6 人工軽量骨材による線膨張係数の制御手法

近年、高炉セメントを利用した構造物でひび割れが発生した事例が報告されており、その原因の一つとして若材齢に生じるコンクリートの体積変化が挙げられている。高炉セメントを用いたコンクリートは普通コンクリートと比較して線膨張係数及び自己収縮ひずみが大きくなることが指摘されており、マスコンクリートのように水和発熱による高温履歴を受ける高炉セメントコンクリートでは、若材齢に生じる体積変化が普通コンクリートと比べて大きくなる可能性が考えられる。

本節では含水させた人工軽量骨材（LWA）を用いることでモルタル中の含水状態を制御することにより、線膨張係数の時間変化を制御する手法について検討を行った。

2.6.1 実験概要

(1) 使用材料及び調合

本実験でセメントペースト試験体及びモルタル試験体の作製に使用した材料を表2-7に、結合材として使用した普通ポルトランドセメント（記号-N）及び高炉スラグ（記号-BFS）の化学成分を表2-8に示す。

表 2-7 使用材料

Materials	Type	Character
Cement	Normal Portland cement	Density: 3.16 g/cm ³ , Specific surface area: 3110 cm ² /g
<u>Additive</u>	Blast furnace slag	Density: 2.90 g/cm ³ , Specific surface area: 4050 cm ² /g
Fine aggregate 1	Crushed sand	Surface dry density: 2.57 g/cm ³ , Water absorption: 2.62 %
Fine aggregate 2	Lightweight aggregate (LWA)	Surface dry density: 1.86 g/cm ³ , Water absorption: 18.8 %

表2-8 セメント，高炉スラグの化学組成

	ig.loss (%)	Chemical Composition (mass%)							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
N	0.64	21.8	4.49	2.9	63.9	1.84	2.26	0.2	0.38
BFS	0.05	33.88	15.34	0.34	42.65	5.81	0.65	0.28	0.31

本実験で使用した結合材は、無水石膏を高炉スラグ微粉末に3.4%内割りで置換したものを、普通ポルトランドセメントに対して内割りで30%（記号-BB30）置換したものであり、水セメント比はすべての試験体で40%（記号-40）とした。以上の記号を用いセメントペースト試験体はBB3040と表記する。

モルタル試験体については、山梨県大月産砕砂及びLWA（太平洋アサノライト）2種類の細骨材を使用した。細骨材全体の容積は、モルタル全容積の38%（記号-38）及び60%（記号-60）の2水準とし、使用した2種類の細骨材を同一容積ずつ使用するものを標準状態とし、LWAを全量使用したものを記号-allで表記した。

本研究では、モルタル試験体中の含水状態に差異を生じさせるため、LWAの含水状態について表乾状態（記号-S）、半飽水状態（記号-P）及び絶乾状態（記号-D）の3水準について検討を行った。モルタル試験体は、それぞれの調合条件をBB3040- [LWAの含水状態] [細骨材の容積]（例えばBB3040-S60）の形で表記する。

練混ぜにはオムニミキサを使用し、注水後3分間練混ぜ、掻き落としの後さらに3分間練混ぜた。モルタルの練混ぜに際し、空練り時間は1分であった。またBB3040については、ブリージングの影響が見られなくなるまで練り返しを行った。

(2) 線膨張係数及び全ひずみ測定

本研究で用いた線膨張係数及び全ひずみの測定方法は2.3に拠り、材齢原点は注水時とし、ひずみ原点はセメントペースト試験体において練り返しが終了し、測定装置に試験体を設置した後、試験体温度が安定した材齢6.6時間とした。

(3) 温度履歴

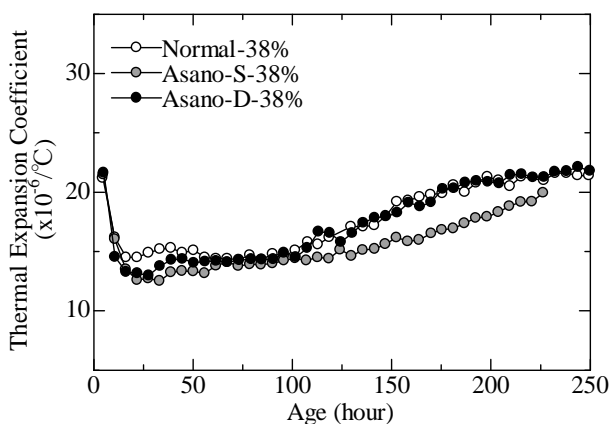
本研究では、それぞれの試験体に3種類の温度履歴を与えた。すなわち、20°C一定条件と水和発熱による温度上昇を模擬した最高到達温度40°C（40°C履歴条件）及び60°C（60°C履歴条件）の温度履歴条件である。セメントペーストとモルタルでは、同一水セメント比でも単位セメント量が異なるため、実際には異なる温度上昇曲線を持つと考えられるが、本実験では温度依存性の相互比較を行うことを目的としており、すべての調合条件に同一の温度履歴を与えた。温度上昇開始材齢は10時間とし、温度上昇開始後は一定温度勾配で昇温を行い、材齢22時間で最高到達温度に達し材齢32時間まで一定温度、その後、材齢144時間に20°Cとなるよう降温した。なお、以上の温度履歴は、所定材齢において線膨張係数測定用の $\pm 5^\circ\text{C}$ の温度パルスを有する。

(4) 温度ひずみの算定手法

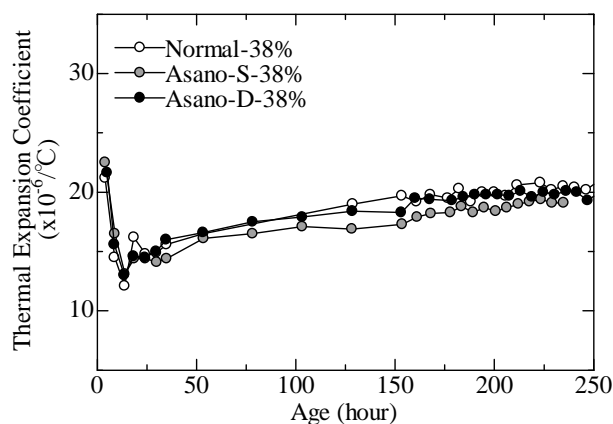
温度ひずみの算定は2.5に拠った。

2.6.2 測定結果及び考察

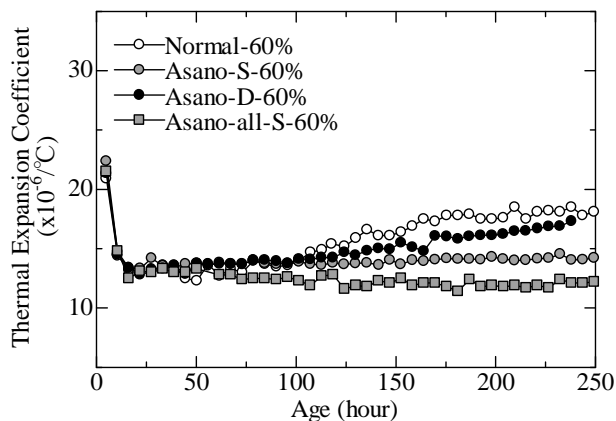
図2- 33に各調合条件における線膨張係数の測定値を示す。



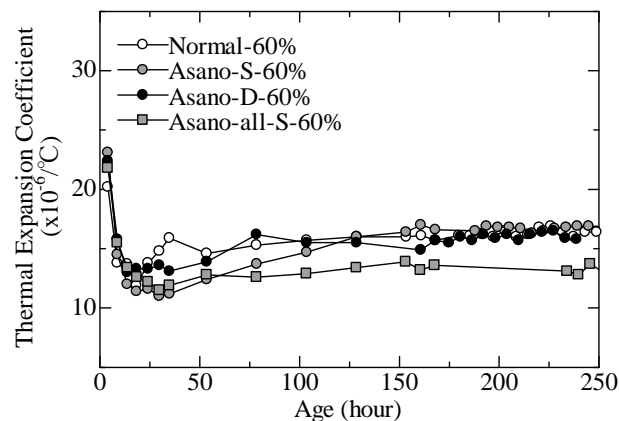
LWA が線膨張係数の経時変化に及ぼす影響
20°C一定 (Va=38%)



LWA が線膨張係数の経時変化に及ぼす影響
60°C履歴 (Va=38%)



LWA が線膨張係数の経時変化に及ぼす影響
60°C履歴 (Va=60%)



LWA が線膨張係数の経時変化に及ぼす影響
60°C履歴 (Va=60%)

図 2- 33 人工軽量骨材混入モルタルの線膨張係数の経時変化

図2- 33の上段, 下段のグラフを比較した場合, 全体的な傾向として, 細骨材容積を60%とした場合のほうが38%の場合より線膨張係数の値が小さい。これは, 2.4.5で述べたように骨材の線膨張係数がセメントペーストの線膨張係数と比較して値が小さく, セメントペーストの温度ひずみを骨材が拘束するためである。

それぞれの図において, 線膨張係数が極小値を取った後の挙動に着目すると, 骨材量が38%のものでは, 普通骨材を使用した場合と, 絶乾のLWAを使用した場合の挙動はほとんど等しく, 飽水のLWAを用いた場合のみ, 線膨張係数が上昇する材齢を遅延させていることが確認できる。しかしながら, 高温履歴条件ではすべての調合でほぼ同様の線膨張係数の経時変化を示しており, LWAをモルタル全体の体積比19%では十分な内部養生効果が得られていない。

骨材量を60%に増やした系では、20°C条件の測定結果は38%のものと同様傾向はほとんど変わらないが、絶乾のLWAを使用した場合においても、若干ながら線膨張係数の増大を抑制する効果が見られた。この現象に関しては、人工軽量骨材とセメントペースト間での水分移動を中性子ラジオグラフィによって可視化した研究³²で、絶乾状態のLWAが材齢初期にセメントペーストから水が供給され、長期的には再度セメントペーストへ水を放出することが確認されており、LWAの全体量が増えた場合には、この水分の再放出が線膨張係数の増大を抑制する可能性が考えられる。

一方、飽水状態でLWAを使用した場合には、38%のときより長期間にわたって線膨張係数の増大を抑制できていることが確認された。また、骨材の全量を飽水状態のLWAで置換した場合には、さらに持続効果が長いことも確認された。このような傾向は、高温履歴を受ける条件でも再現されており、骨材の全量を飽水LWAとした場合には、線膨張係数の上昇量を材齢7日時点で $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度低減可能であった。

次に、全量をLWAで置換した調合において、LWAの相対含水率を100%とした場合と、50%とした場合の比較検討を行った。

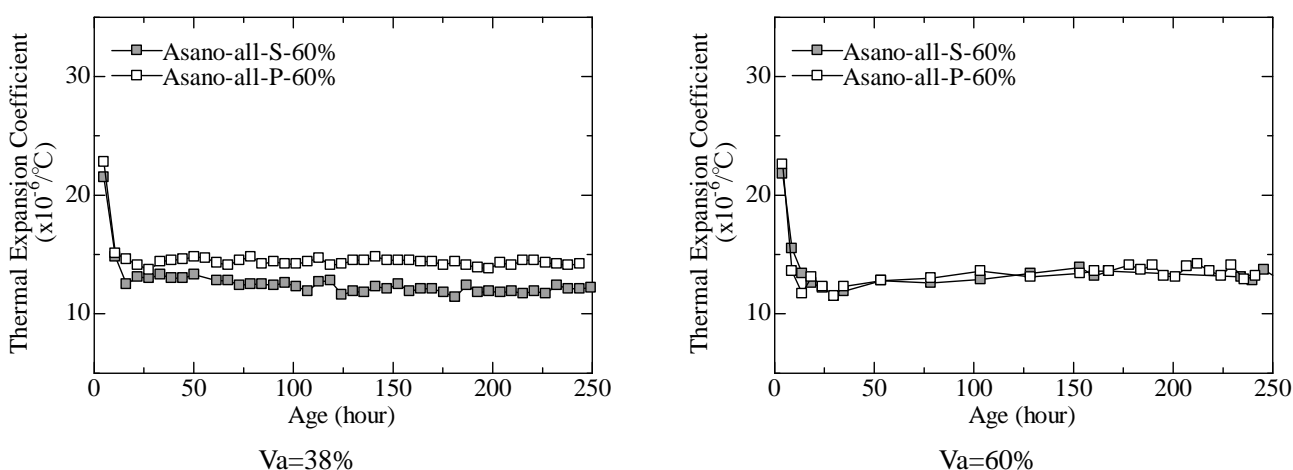


図 2-34 LWA の相対含水率が線膨張係数の経時変化に及ぼす影響

図より、LWAの相対含水率が50%時においても、飽水LWAとほぼ同様の線膨張係数の増大を抑制する効果があることがわかる。以上のように、LWAの含有量や、LWAに含浸させる水の量をコントロールすることによって、線膨張係数の経時変化をある程度制御することが可能であると考えられる。

図2-33、図2-34で示したの線膨張係数の経時変化から、2.5と同様に増分による手法で温度ひずみを求めた。図2-35に各調合の温度ひずみの経時変化を示す。

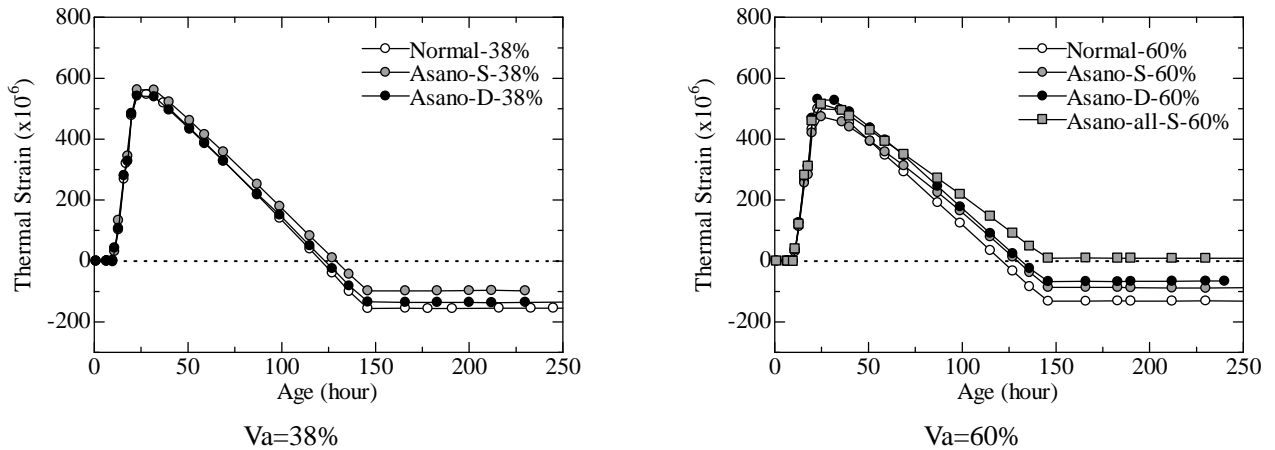


図 2-35 人工軽量骨材が温度ひずみの経時変化に及ぼす影響

図に示されるように、いずれの調査においても山形の高温履歴を経た後の温度ひずみは収縮側で推移しており、水セメント比40%で高炉スラグ混入セメントを使用することで、線膨張係数の経時変化による温度ひずみによって温度ひび割れリスクが高まる可能性を示唆している。

その中で、LWAの収縮温度ひずみの抑制効果を見てみると、38%の飽水では収縮温度ひずみが若干の低減、絶乾ではほとんど効果が見られないのに対し、60%では、飽水、絶乾いずれの含水状態でもLWAを使用することで残留する収縮温度ひずみが低減されていることが確認できる。さらに、LWAを60%全量置換した場合には、収縮温度ひずみをほぼゼロにすることが可能であった。このことは、セメントペーストに十分な量の水分を供給することによって、自己収縮ひずみのみならず、温度ひずみも低減可能であることを示している。

図2-36に材齢7日時点の全ひずみと温度ひずみの割合を示す。

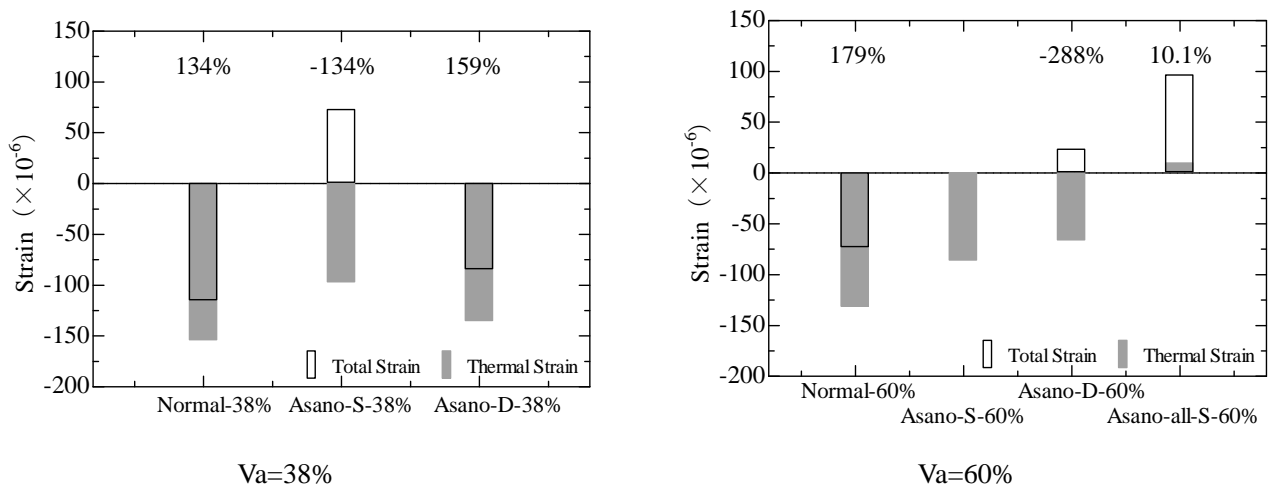


図 2-36 材齢 7 日時点における全ひずみと温度ひずみ

材齢7日時点における全ひずみ及び温度ひずみについて、普通骨材を使用した場合をみると、収縮側に推移した全ひずみはすべて線膨張係数の経時変化によって生じた温度ひずみによるものであることがわかる。これと比較すると、LWAを用いることで、いずれの含水状態で使用した場合でも温度ひずみ、全ひずみ量が膨張側に改善されていることがわかる。特に飽水状態で60%使用した場合の効果は劇的であった。

LWAによる内部養生効果が自己収縮の低減に有効であることはよく知られており、実際に、図2-37に示されるように、LWAを置換することによって自己収縮ひずみも膨張側に推移している。

この結果は、LWAが温度ひずみ及び自己収縮ひずみの両者に対して有効であり、温度ひび割れのリスク低減に効果的であることが再確認された。

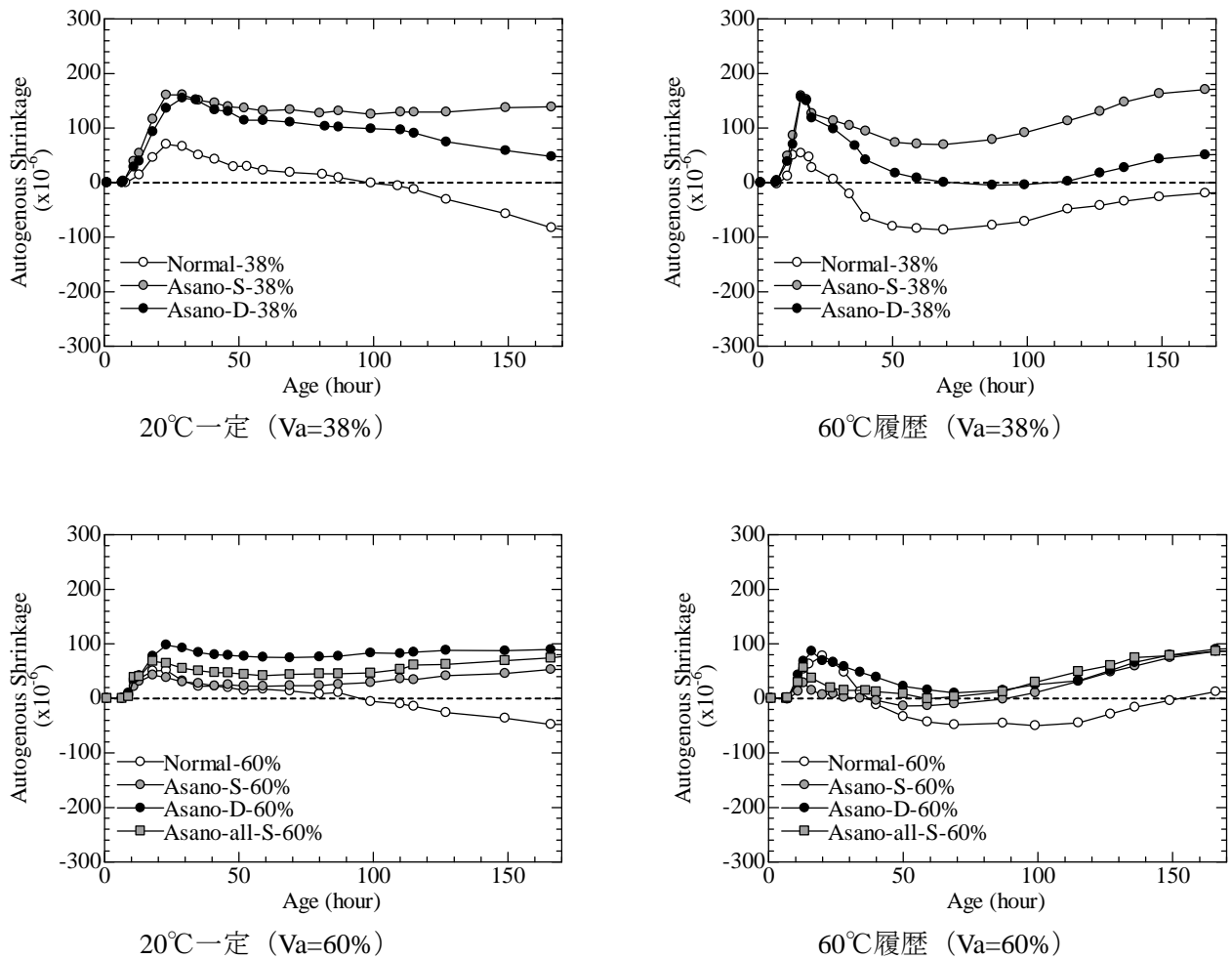


図 2-37 LWA が自己収縮ひずみに及ぼす影響

2.7 収縮低減剤による線膨張係数制御

2.7.1 収縮低減剤の作用に関する理論的背景

丸山らによれば、セメントペーストに乾燥によって生じる体積変化は、表面間に生じる水和圧で一様に表現することができる。水和圧曲線を求めるのに必要な諸量は、セメントペーストの体積弾性率、比表面積、質量含水率、体積含水率であり、水和圧曲線の減衰はセメントペースト表面の親水性を意味している。

2.6 節では人工軽量骨材を投入することによってセメントペーストの含水率を保持させることで線膨張係数の経時変化を制御可能であることを示した。本節では、水和圧理論上におけるセメントペースト表面の親水性を収縮低減剤によって低下させることによって線膨張係数を低減することを試みる。

水和圧曲線から温度変化によって生じる体積変化のメカニズムは以下のように説明することができる。すなわち、セメントペーストの表面に吸着している水分子は、コンクリートの温度上昇に伴って体積重心が表層から離れるため、見かけ上吸着厚さが増大する。その結果、セメントペースト表面から受ける水和圧が減少する。この水和圧の変化量は、セメントペーストに生じる温度ひずみの駆動力の一部となる、というものである。

収縮低減剤がセメントペースト表面の親水性を低下させることの証左として、丸山らは、高炉スラグ混入セメントペースト及び収縮低減剤混入セメントの水和圧曲線を実験的に得ることで、水和圧曲線の減衰は、高炉セメントペーストの場合に大きく（親水的）なり、収縮低減剤を混和した系では、小さく（疎水的）なることを示した。

このような水和圧曲線の傾きが、上述の温度変化による水和圧の変化に及ぼす影響について、自己乾燥によって到達する程度の含水状態の場合を考えると、同一量の平均吸着厚さの変化に対する水和圧の変化は普通ポルトランドセメントと比較して、高炉セメントペーストで大きく、収縮低減剤を使用した系では小さくなる。つまり、温度変化時に働く体積変化の駆動力が収縮低減剤を使用した系では小さくなることを意味している。以上の議論に基づくと、高炉スラグを使用したセメントペーストに対し、収縮低減剤を用いることで、線膨張係数の経時変化に由来するセメントペーストの温度ひずみを小さくできる可能性がある。

本節ではこの仮説に則り、複数の収縮低減剤を使用し、これらが線膨張係数の経時変化に及ぼす影響について実験的に検証をおこなった。

2.7.2 実験概要

(1) 使用材料および調合

本実験には市販の高炉セメント B 種及び4種類の収縮低減剤を使用した。セメント及び収縮低減剤の性質を表に示す。セメントの化学組成を表に示す。

表 2-9 使用材料

Materials	Type	Character
Cement	Blast Furnace Slag Cement	Density: 3.05 g/cm ³ , Specific surface area: 3090 cm ² /g
Shrinkage Reducer (SR2)	Tetra propylene glycol monomethyl ether, Diethylene glycol monobutyl ether	
Shrinkage Reducer (SR5)	Decane, Diethylene glycol monobutyl ether	
Shrinkage Reducer (SR7)	Dipropylene Glycol, Diethylene glycol monobutyl ether	
Shrinkage Reducer (SR10)	-	

表 2-10 セメント、高炉スラグの化学組成

	ig.loss (%)	Chemical Composition (mass%)							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
BB	2.14	24.63	8.94	1.88	55.23	3.38	2.06	0.20	0.35

基本調合は水セメント比 0.40 のセメントペーストとし、収縮低減剤無混和のもの（記号 BB40）、4種類の収縮低減剤を混和したもの（それぞれ記号 SR2, SR5, SR7, SR10）の5種類を用いた。収縮低減剤はセメント質量の3%を水に置換して使用した。

練混ぜはホバートミキサを用いて、注水後3分、掻き落としを行った後にさらに3分練り混ぜた。練混ぜ後、ブリージングの影響が見られなくなるまでの間、15分毎に練返しを行った。本実験において、全てのデータは注水時を材齢原点とし、試験体温度が落ち着いた材齢6.3時間をひずみの原点とした。

(2) 線膨張係数及び全ひずみ測定

本研究で用いた線膨張係数及び全ひずみの測定方法は2.3に拠り、試験体の長さ変化試験には2.3で述べた線膨張係数・自己収縮ひずみ測定装置を使用した。

(3) 温度履歴

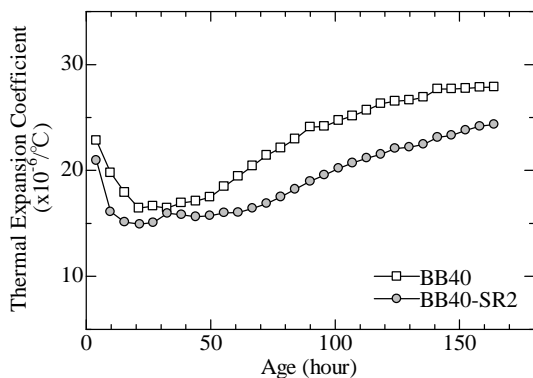
本実験では、それぞれの試験体に20℃一定条件と水和発熱による温度上昇を模擬した最高到達温度40℃（40℃履歴条件）及び60℃（60℃履歴条件）の3種類の温度履歴を与えた。

(4) 温度ひずみの算定手法

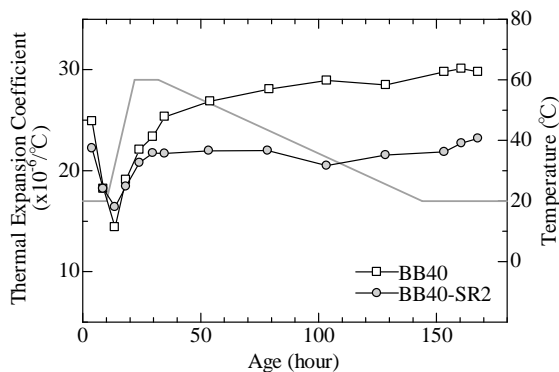
温度ひずみの算定は2.5に拠った。

2.7.3 測定結果及び考察

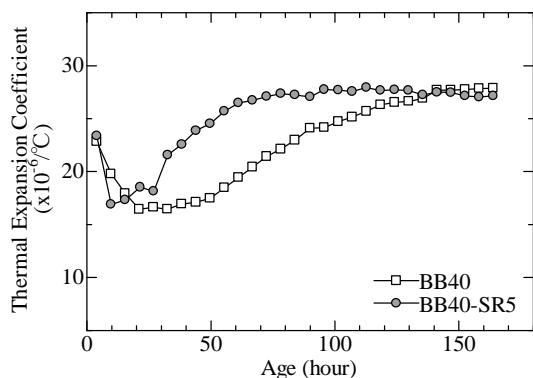
各収縮低減剤を使用した場合における線膨張係数の経時変化を、収縮低減剤無混和の BB40 と併せて図 2- 38, 図 2- 39 にそれぞれ示す。



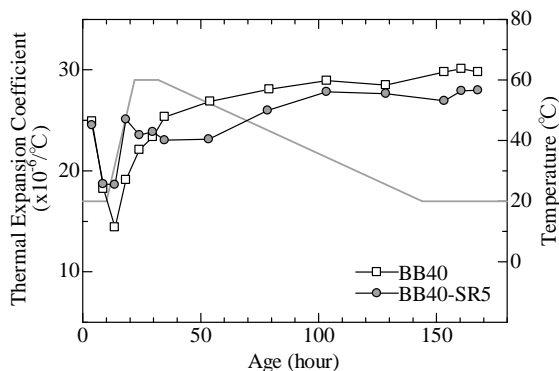
SR2 20°C一定



SR2 60°C履歴

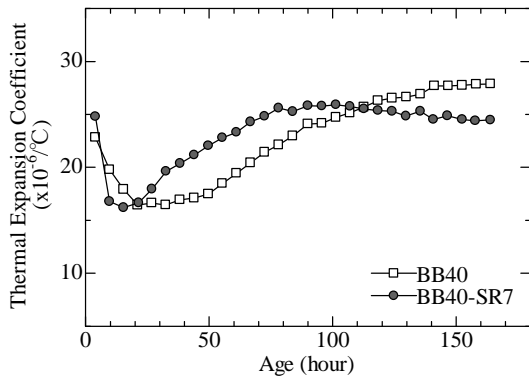


SR5 20°C一定

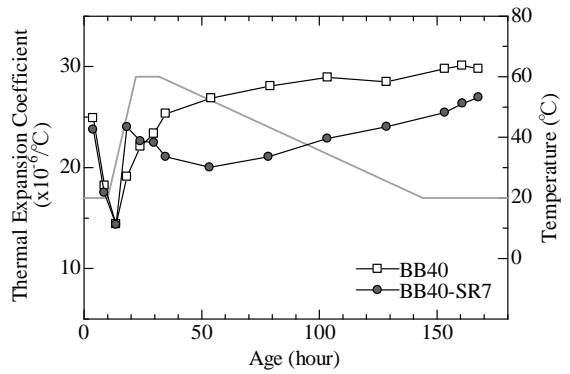


SR5 60°C履歴

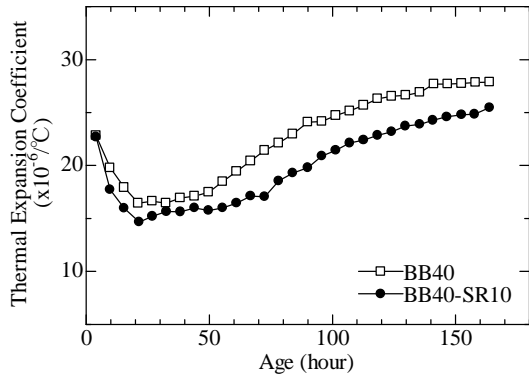
図 2- 38 収縮低減剤が線膨張係数の経時変化に及ぼす影響 (SR-2, SR-5)



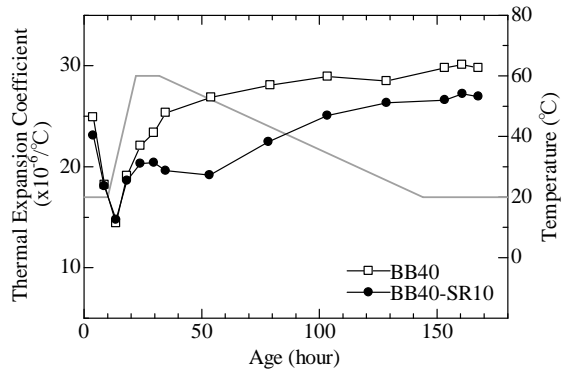
SR7 20°C一定



SR7 60°C履歴



SR10 20°C一定



SR10 60°C履歴

図 2-39 収縮低減剤が線膨張係数の経時変化に及ぼす影響 (SR-7, SR-10)

以上の図の左段に示される20°C一定条件の各試験結果をみると、極小値の値は収縮低減剤の混和の有無に関わらず、ほぼ同程度の値をとっていることがわかる。しかし、極小値を取る材齢は収縮低減剤の影響を受け、SR2, SR5, SR7では無混和のものより早くSR10ではほぼ同材齢であった。

極小値を取った材齢以降の線膨張係数の増加傾向は大きく二つの傾向に分かれ、SR2とSR10では、無混和のものと比較して増加傾向が抑制されている一方、SR5, SR7では、材齢30時間程度から急激な増大を示し、材齢60時間程度には最大値に到達しその後はほぼ一定値を示した。

材齢7日時点での線膨張係数値を比較すると、SR5では、無混和とほぼ同程度であるが、SR2, SR7, SR10では、無混和と比較して、 $3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度小さい値を取っている。

右段に示される60°C履歴条件において、線膨張係数が増大し始める材齢を、各収縮低減剤で比較するとSR5とSR7では20°C条件と同様に無混和より早期に線膨張係数が上昇し、SR2及びSR10では無混和のものと同時期であった。また、材齢7日時点の線膨張係数値は、いずれの試験体でも20°C一定

条件とほぼ同程度であり、SR5のみは無混和と同程度の値を取った。

以上の線膨張係数の経時変化を使用して、温度ひずみの経時変化を得た。温度ひずみの経時変化を図2-40に、材齢7日時点の全ひずみと温度ひずみの算定値を示す。図2-41にそれぞれ示す。

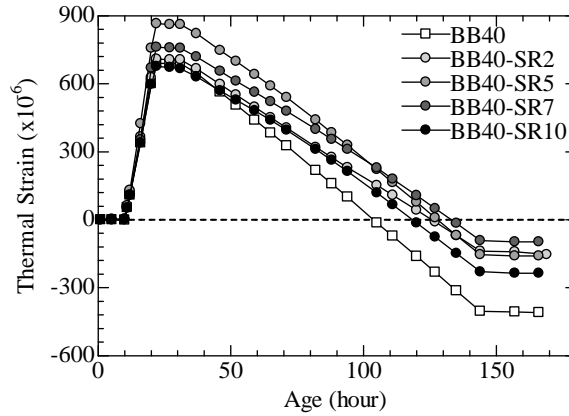


図 2-40 温度ひずみの経時変化

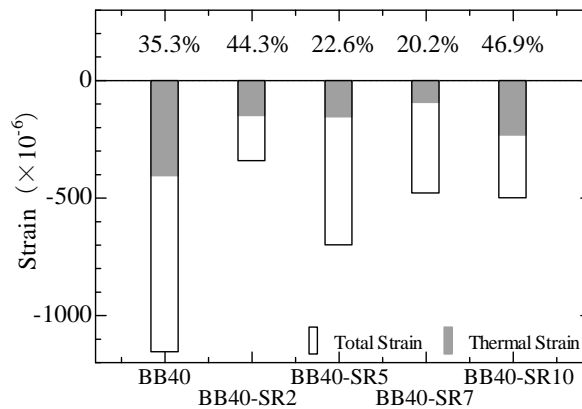


図 2-41 材齢 7 日時点の全ひずみと温度ひずみの割合

図 2-41 を見ると、いずれの収縮低減剤を使用した場合でも、無混和のものと比較すると、全ひずみが大きく低減されており、残留温度ひずみの低減量も大きい。しかしながら、図中に示す材齢 7 日時点の全ひずみと温度ひずみの割合をみると、SR2 と SR7 では全ひずみ中の割合が無混和のものより大きくなっている。これは、収縮低減剤の混和によって、温度ひずみとともに、自己収縮ひずみも低減され、全体のひずみの低減効果のうち、温度ひずみの低減効果より自己収縮ひずみの低減効果が大きいことを意味している。

また、図 2-40 に着目すると、SR5 の温度ひずみの経時変化において、材齢 10 時間以降の温度膨張が著しく大きい。これは、線膨張係数が増大を開始する材齢が早かったことに起因するものである。この影響を受け SR5 の 7 日時点の温度ひずみ量は、小さくなっているが、ヤング係数の発現過程を考えると、温度ひび割れリスクには、温度ピークを迎えた後の収缩量についても議論をする必要があると考えられる。表 2-11 右端に最高到達温度時からの収缩量を各調合別に示した。

表 2-11 最高到達温度時及び材齢 7 日時 (20°C) のひずみとその差分

	At 60°C	At 7day	Shrinkage from the peak
BB40	690	-409	1099
BB40-SR2	709	-153	862
BB40-SR5	865	-159	1024
BB40-SR7	761	-97	858
BB40-SR10	676	-236	912

表から分かるように、材齢 7 日時点の温度ひずみをみると、 $SR7 > SR2 > SR5 > SR10$ となっており、 $SR5$ において残留温度ひずみの低減効果は $SR10$ より大きくなっているが、温度ピーク時からの収縮量を比較すると、 $SR10 > SR5$ となり、先述の順とは逆転している。

以上のように、単純に残留温度ひずみの大小のみで温度ひび割れリスクの大きさを議論することは危険であり、実際には、各調合のヤング係数やクリープ性状についても把握する必要がある。

2.7.4 線膨張係数低減メカニズムに関する考察

毛細管張力説では、収縮低減剤の収縮低減効果は凝縮水の表面張力が低下することによって引き起こされると考えられている。

一方、2.7.1 で述べたように、セメントペーストの体積変化を水和圧説で説明を試みる場合、線膨張係数を低減できるメカニズムは複数存在し、主として含水率、親水性、比表面積等がその要因となり得る。このうち、質量含水率については材齢7日時点の値を実験的に得た。図2-42がその試験結果である。

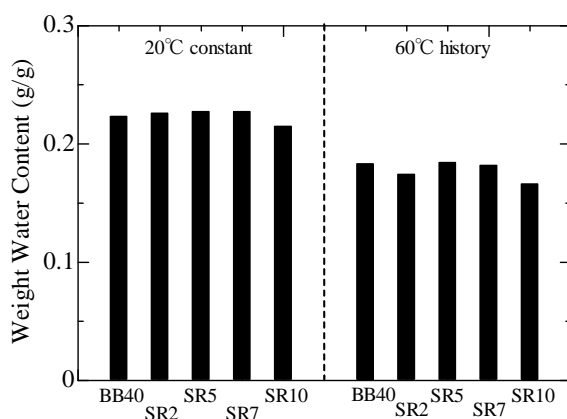


図2-42 材齢7日時点における質量含水率

図から、SR10が他の調合と比較してやや小さくなっているほかは大きな差異がなく、SR10の材齢7日時点の線膨張係数は、線膨張係数を低減できているSR2、SR7と変わっていないことから、収縮低減剤を使用することで線膨張係数が低減された主たる要因は質量含水率ではないと考えられる。

次に、凝縮水中の表面張力を測定した結果を表2-12に示す。

表2-12 各収縮低減剤の詳細

Materials	Molecule	Moller Weight	mol%	Surface Tension (4%/dyn/cm)
Shrinkage Reducer (SR2)	Tetra propylene glycol monomethyl ether	264	3.0	47.4
	Diethylene glycol monobutyl ether	162	1.0	
Shrinkage Reducer (SR5)	Decane	142	0.8	44.8
	Diethylene glycol monobutyl ether	162	1.0	
Shrinkage Reducer (SR7)	Dipropylene Glycol	146	10	35.8
	Diethylene glycol monobutyl ether	162	1.0	
Shrinkage Reducer (SR10)	-	321	0.8	32.9
	-	292	1.0	

表によると、表面張力の大きさは、 $SR2 > SR5 > SR7 > SR10$ となっており、こちらも線膨張係数の経時変化の傾向とは特に一致していない。

一方、収縮低減剤に含まれている高分子材料の分子量に着目する $SR2$ と $SR10$ で比較的大きく、 $SR5$ と $SR7$ では小さい分子量の材料が使用されていることがわかる。

$SR2$ と $SR10$ 及び $SR5$ と $SR7$ の線膨張係数の経時変化は似通っており、 $SR2$ と $SR10$ では無混和のものより経時的に小さい線膨張係数を示している。分子量の大きさが線膨張係数にどのように影響をしているかは現状では明確ではないが、この結果はこれまでに考慮されていない収縮低減メカニズムの存在を示唆するものであり、この点については今後の検討課題としたい。

2.8 結論

第2章では、水和発熱による温度上昇を模擬した温度履歴中におけるひずみ成分を温度ひずみと自己収縮ひずみに成分分離することを目的として、種々の調合において線膨張係数の経時変化を得た。以下に本章で得られた知見を示す。

2.2節では、線膨張係数の測定方法、メカニズムの検討に関する既往の研究をとりまとめた。

2.3節では、2.2節で得られた既往の知見を参考に以下のように線膨張係数の測定方法を決定した。

1. 試験体内の温度分布を考慮するため試験体厚さを1cmとした。
2. フレッシュな状態から線膨張係数を測定するために、ひずみの測定にはレーザー変位計を使用した。
3. 自己収縮ひずみを考慮するため、温度変化をプラス側に5°C、マイナス側に5°Cの温度パルスを与えた。これは、この間の自己収縮ひずみを線形と仮定することで、温度膨張、温度降下時における自己収縮ひずみを差し引くことが可能になるためである。
4. 開発した測定装置の適用性を実験的に確認した。

2.4節では、種々のセメントペーストの線膨張係数の経時変化を測定し、水セメント比、セメント種類、骨材量が線膨張係数に及ぼす影響について検討を行った。その結果、セメントペーストの線膨張係数は、ある極小値を取った後、水セメント比（初期含水率）は小さいものほど、また、早期に水和反応が進行するセメント種類ほど線膨張係数の上昇材齢が早くなることが明らかになった。

以上の測定結果は、線膨張係数は同一含水状態では、水セメント比、セメント種類の影響をほとんど受けないが、自らの水和反応による水分消費によって、セメントペースト中の含水率が低下し、結果として線膨張係数の経時変化は調合の影響を大きく受けるということを実験的に示したものである。

また、骨材量の影響については、乾燥収縮と同様に、体積変化を抑制する方向に働き、複合則を使用することによって概ね骨材量の影響を評価できること示した。

2.5節では、2.4節で得られた線膨張係数の経時変化を使用して、セメントペースト及びモルタルが山形の温度履歴を受ける際に生じるひずみ（温度ひずみ）を算定し、線膨張係数の経時変化によって生じる温度ひび割れリスクについて議論を行った。その結果、高温履歴を受ける最中の線膨張係数の上昇を低減することで温度ひずみも低減可能であることを示した。

2.6節では、自己乾燥によって増大するセメントペーストの線膨張係数を制御することを目的と

して、水を含浸させた人工軽量骨材を使用したモルタル試験体を作製した。その結果、十分な量の人工軽量骨材を飽水状態で使用することで、高温履歴を受ける間の線膨張係数の増大を抑制することが可能であることを示した。結果として、線膨張係数が低減できている試験体では、温度ひずみも低減されており、温度ひび割れリスクを低減する手法の一つとして有効であることを示した。

2.7 節では、線膨張係数の制御手法として、複数の収縮低減剤を使用して線膨張係数の経時変化を抑制し、温度ひずみを低減する効果について検討を行った。その結果、収縮低減剤は種類によって効果的な材齢が異なり、温度降下時における温度ひずみの低減効果にも差異がみられた。

また、収縮低減剤が線膨張係数を低減するメカニズムに関して検討を行ったところ、質量含水率や表面張力ではすべての種類の収縮低減剤の線膨張係数低減効果を説明することが困難であること、収縮低減剤に使用している高分子材料の分子量が関与している可能性を示した。

第2章の参考文献

- 1 一瀬賢一, 川口徹: 超高強度コンクリートの構造体コンクリート強度発現性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1293-1298, 2004.7
- 2 神代泰道ほか: ジルコニア起源シリカ質微粉末混合セメントを用いた超高強度コンクリートの性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1057-1062, 2005.7
- 3 鈴木雅博ほか: 超高強度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, 2005.7
- 4 筋野晃司ほか: マスコンクリートの自己収縮性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, pp.225-230, 1996.7
- 5 今本啓一, 大谷博: 超高強度コンクリートの自己収縮性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.225-230, 1996.7
- 6 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
- 7 井上元ほか: ボックスカルバートのコンクリート硬化時における温度応力の物性値についてコンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.187-192, 1988
- 8 山川秀次ほか: コンクリートの線膨張係数に関する一考察, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.313-316, 1986
- 9 小山智幸ほか: セメントモルタルの硬化初期における線膨張係数の経時変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.16, No.1, pp.687-692, 1994
- 10 国森亮平ほか: 若材齢のコンクリートの熱膨張係数に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.1033-1038, 1994.6
- 11 石田征男ほか: モルタル試験体の線膨張係数の測定(その4. 材齢, 含水率および調合依存性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.788-789, 1997.9
- 12 梶尾聡ほか: 若材齢におけるコンクリートの温度ひずみに関する研究, 土木学会第49回年次学術講演会, pp.1106-1107, 2000.9
- 13 金鴻勝ほか: 若材齢コンクリートの熱膨張係数に関する研究, 土木学会中部支部研究発表会, V-7, 2000
- 14 小澤満津雄ほか: 非接触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, 2001.7
- 15 宮澤伸吾ほか: 若材齢におけるセメントペースト熱膨張係数, Cement Science and Concrete Technology, No.54, pp.215-220, 2000
- 16 丁海文ほか: 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, 2000.6
- 17 楊楊ほか: 硬化過程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, 2000.6
- 18 竹内崇剛ほか: 若材齢における高強度コンクリートの線膨張係数の経時変化について, 土木学会第55回年次学術講演会, pp.518-519, 2000.9
- 19 Meyers, S. L. et al.: Thermal Expansion Characteristics of Hardened Cement Paste and of Concrete, 1 21 Research Board Proceedings, Vol.30, pp. 193-203, 1950
- 20 A.M.ネビル: ネビルのコンクリート特性, 技報堂出版株式会社, pp.370-373, 1979.11
- 21 Grasley, Z.C.: Thermal dilation and internal relative humidity of hardened cement paste, Materials and Structure, Vol.40, pp.311-317, 2007

-
- 22 Sellevold, E. J. : Interaction between thermal dilation and autogenous deformation in high performance concrete, *Materials and Structure*, Vol.34, pp.266-272, 2001.6
- 23 Sellevold, E. J., Bjoutegaad, O.: Coefficient of Thermal Expansion of Cement Paste and Concrete: Mechanisms of moisture interaction, *Materials and Structures*, Vol.39, pp809-815, 2006
- 24 Zoldners N. G. : Thermal Properties of Concrete under Sustained Elevated Temperatures, *ACI Special Publications* 25, pp.1-32, 1971
- 25 丸山一平, 松下哲郎, 野口貴文, 細川佳史, 山田一夫 : エーライトおよびビーライトの水和反応速度に関する研究—ポルトランドセメントの水和反応機構に関する研究 その1—, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.75, No.650, pp.681-688, 2010.4
- 26 丸山一平, 松下哲郎, 五十嵐 豪, 野口貴文, 細川佳史, 山田一夫 : アルミネート相およびフェライト相の水和反応に関する研究—ポルトランドセメントの水和機構に関する研究 その2—, *日本建築学会構造系論文集*, No. 659, pp.1-8, 2011.1
- 27 A.M.ネビル著, 三浦尚訳 : ネビルのコンクリートバイブル, 技報堂出版株式会社, pp.370-373, 2004.6
- 28 Radjy F. et. al.: Isosteric vapor pressure-temperature data for water sorption in hardened cement paste: enthalpy, entropy and sorption isotherms at different temperatures, *Tech. Univ. of Denmark*
- 29 Grasley, Z. C. , Lange, D. A. : Thermal Dilation and Internal Relative Humidity of Hardened Cement Paste: *Materials and Structures*, Vol. 40, pp.311-317, 2007
- 30 丸山一平, 岸直哉 : セメント硬化体の収縮理論, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.74, No.642, pp.1395-1403, 2009.8
- 31 川口 徹 : コンクリートの熱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, pp.15-18, 1982.8
- 32 丸山一平, 兼松 学, 寺本篤史, 早野博幸, 飯倉 寛, 野口貴文 : 中性子ラジオグラフィによる骨材とセメントペースト間における水分挙動評価, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.645, pp.1905-1912, 2009.11

第3章 自己収縮ひずみ

- 3.1 概論
- 3.2 既往の研究
- 3.3 実験概要
- 3.4 セメントペーストの自己収縮に及ぼす調合の影響
- 3.5 セメントペーストの自己収縮に及ぼす温度履歴の影響
- 3.6 自己収縮ひずみに及ぼす骨材の影響
- 3.7 コンクリートの自己収縮ひずみ予測式の提案
- 3.8 結論

3.1 概論

セメントの水和に起因するコンクリートの収縮は古くから知られており, Davisにより **Autogenous Shrinkage** (自己収縮) として定義されている¹。このセメント系材料に生じる巨視的な体積減少は, 普通強度領域のコンクリートではほとんど生じないとされており, 乾燥収縮ひずみのように大きな問題とされてこなかった。

近年の高性能減水剤や, DSP 技術の発展によって従来と比較して水セメント比の小さいコンクリートの流動性を確保できるようになり, コンクリートの高強度化が進展する中, コンクリートの水セメント比を小さくするほど自己収縮ひずみが大きくなるという事実が田澤博士²の研究によって発見された。

本邦では, 土地の有効利用の観点からコンクリートの高強度化の必要性が高く, 高強度コンクリートや自己収縮に関する研究が進んでおり, 自己収縮に関する多くの基礎的研究が行われている。

一方で, つい最近になって実施工が可能になった水セメント比が 20%程度以下の超高強度コンクリートでは, 未だにデータの蓄積が不十分であり, コンクリート工学会が提案している自己収縮ひずみの予測式³も水セメント比が 20%以下の領域には対応していない。また, マスコンクリートや超高強度コンクリートのように, 水和過程において高温履歴を経るコンクリート中の自己収縮についても, これまでに十分な検討が行われていない。

以上の背景を踏まえて, 本章では水セメント比, セメント種類に代表される, コンクリートの調合がセメントペーストの自己収縮に及ぼす影響について体系的実験を行い, 水セメント比 20%以上の領域の自己収縮について, すでに得られている知見の確認を行うとともに, 温度履歴の影響, 超高強度領域における自己収縮性状の把握, さらに, 現状で提案されていない水セメント比 20%以下の領域における自己収縮ひずみの予測式の提案を行うことを目的とした。以下に本章の内容を記す。

3.2 節では, 自己収縮に関する既往の研究をとりまとめ, 自己収縮のメカニズム, 基本性状について言及する。

3.3 節では, 本研究で行った自己収縮ひずみの測定実験について, 実験概要を述べる。

3.4 節では, 測定したセメントペーストの自己収縮の結果を各種調合要因 (水セメント比, セメント種類, 混和材・剤) 毎にとりまとめ, それぞれの要因が自己収縮ひずみに及ぼす影響について検討を行う。

3.5 節では, セメントペーストの自己収縮に及ぼす温度履歴の影響に関して, アレニウス則による有効材齢の概念で評価可能な範囲を明示し, それ以外の範囲については見かけの活性化エネルギーを修正することで評価を試みる。

3.6 節では, 3.5, 3.6 節で得られたセメントペーストの自己収縮に関する知見を, コンクリートに延用するにあたり, 骨材の影響について検討を行う。

3.7 節では, 以上の知見をもとに, 従来提案されていない水セメント比が 20%以下の領域における自己収縮ひずみの予測式の提案を行う。

3.2 既往の研究

3.2.1 収縮理論

本節では、これまでに提案されている収縮メカニズムについて、代表的なものを紹介する。

セメントペーストの収縮メカニズムに関する議論は古くから行われており、1965年に T.C.Powers は膨大なセメント硬化体の体積変化、異なる平衡状態における自由水分量、比表面積等の測定結果に基づき、セメント硬化体の体積変化のメカニズムとして、表面張力説、分離圧説、毛管張力説を提案した。

(1) 毛細管張力説

未水和のセメントと水が反応する場合、生成する水和物の体積は未水和セメントと水の体積の和より小さくなる（水和収縮）ため、セメントペースト中では、水和反応により次々と空隙が形成されている。このような状況の中で、セメントペースト中の水分の浸透速度が水和収縮による空隙生成速度を下回る、もしくは乾燥により水分が外部に逸散するなどの理由で、空隙を水が充填できなくなった場合、空隙にはメニスカスが形成される。

メニスカス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なる。水面の形状を半円球と仮定すると、気液界面の曲率半径と蒸気圧との関係は式(3-1)で表すことができる⁴。

$$r_k = \frac{\gamma \cdot V}{RT \ln h} \quad (3-1)$$

ここで、 r_k : Kelvin半径、

γ : 空隙水の表面張力、

V : 空隙水のモル体積、

R : 気体定数、

T : 温度、

h : 空隙中の相対湿度

であり、Kelvin半径は物理的にはメニスカスの曲率を表す。このとき、毛細管凝縮水中には圧力が生じ、この圧力はLaplace圧とよばれ、式(3-2)で表現できる⁵。

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r_k} \quad (3-2)$$

ここで、 ΔP : 圧力差

である。式(3-1) , 式(3-2) をまとめると、毛細管凝縮水中の圧力は式(3-3)で表現できる。

$$\Delta P = \frac{2RT}{V} \ln h \quad (3-3)$$

毛細管張力説は、このメニスカスの形成による毛細管凝縮水中の負圧が硬化体に弾性的な体積減少を生じさせるとするものである。セメント硬化体内部で水が凝縮水として存在する毛細管空隙の最小径は約2~3nmと指摘されている^{6,7}。相対湿度60%及び70%でのケルビン半径がそれぞれ、約2.2nm, 3.1nmとなることから、収縮のメカニズムにおいて毛細管張力説が支配的な領域は相対湿度60%~70%以上であると考えられる。

(2) 分離圧説⁸

水分子は固相の表面に吸着すると、化学ポテンシャルが低減し安定して存在できるようになる。したがって、気相の化学ポテンシャルが高い場合、気相の水分子は固相に吸着する。この際、固相から水分子に作用する力は固相表面に近いほど大きく、吸着水の中には固相からの距離に応じて化学ポテンシャルの低下に分布が生じる。水分子はより安定な状態を求めて移動しようとし、最終的には気相の化学ポテンシャルと平衡する吸着層厚さを得る。

この現象を、図3-1に示すような固相同士のファンデルワールス力が作用するような細孔部分に適用した場合、固相間の距離が上述の平衡吸着層厚さより小さいとき、水分子が固相間に吸着しようとし、固相同士のファンデルワールス力を妨げる方向に力（分離圧）が働く。固相間に吸着する水分子は、固相同士の引力により化学ポテンシャルが増大するが、この化学ポテンシャルの増大と固相に吸着することによる化学ポテンシャルの低減が周りの気相の化学ポテンシャルとつり合った場合に平衡状態が決定する。

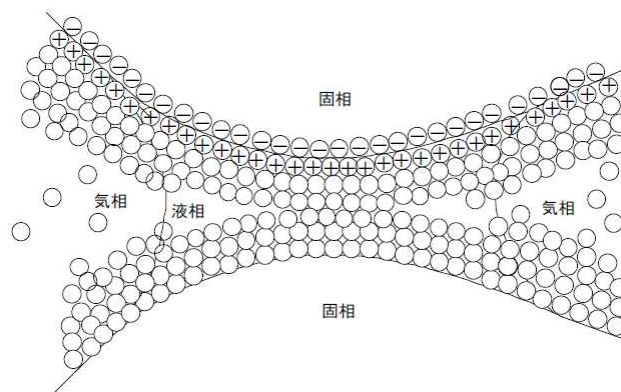


図 3-1 分離圧の概念図

セメントペースト中の水分が外部逸散や水和反応によって消費された場合、平衡状態の化学ポテンシャルが低下することとなり、吸着層厚さは減少する。すなわち、固相間に働く分離圧が減少し固相間の距離が小さくなる。分離圧説は、この周囲の化学ポテンシャルの低下が固相間の距離の減少、つまり収縮を生じさせるというものである。Powers⁹はこの分離圧 Π を以下の式(3-4)で表現できるとした。

$$\Pi = \frac{RT}{Mv_w} \ln h \quad (3-4)$$

ここで、 M : 吸着層のモルあたりの質量、

v_w : 吸着層の単位質量体積

である。

(3) 表面張力説¹⁰

(2)分離圧説で述べたように、気相中の水分子は固相に吸着しようとする。このとき、固相に吸着された水を固相の表面の一部と見なすと、みかけの固相の表面張力は緩和される。表面張力説はこの水分子の吸着・脱離による表面張力の変化が体積変化を引き起こすとするものである。

Gibbsの吸着式によると、相対湿度と吸着層厚さに基づく表面張力の変化は式(3-5)のように表現できる。

$$\Delta\gamma = RT \int_{h_1}^{h_2} \Gamma d(\ln h) \quad (3-5)$$

ここで、 $\Delta\gamma$: 表面張力の変化量、

Γ : 吸着層厚さ

である。

Powersは、この表面張力の変化とセメント硬化体の変形は、線形の関係にあると仮定して、表面張力と体積変化の関係を式(3-6)の形で提案した。

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{2}{3} K \Delta\gamma \quad (3-6)$$

ここで、 K : 固相の圧縮に関する性能

である。

例えば空隙が水で満たされている場合など高湿度領域では、毛細管水の量に変化しても表面張力にはほとんど影響せず、表面張力説は相対湿度が40%以下において有効であるといわれている¹¹。

以上(1)~(3)に列挙した3つの収縮メカニズムは、式(3-3), (3-4), (3-5)から明らかのように、すべてセメントペースト内部の相対湿度の減少によって収縮が生じるというものである。

これらの諸説の適用性について、Feldman¹² は表面張力説や毛管張力説によってセメントペーストの体積変化が評価可能であると結論付ける一方、1982年にはWittmann¹¹は相対湿度50%以上では分離圧説、相対湿度50%以下では表面張力説が支配的であるというミュンヘンモデルを提案しておりセメント硬化体の収縮メカニズムに関しては未だ決定的な理論は存在していない。

3.2.2 自己収縮ひずみに関する既往の知見

(1) 水セメント比の影響

自己収縮に及ぼす調合の影響のうち、もっとも支配的な要因として、水セメント比が挙げられる。そのため、自己収縮ひずみに及ぼす水セメント比の影響は広範にわたって検討されており、自己収縮ひずみは水セメント比が小さくなるほど大きくなるということが明らかになっている。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に関する実験のうち、一例として Tazawa et. al.¹³の研究と堀田ら¹⁴の研究を図 3-2 にそれぞれ示す。

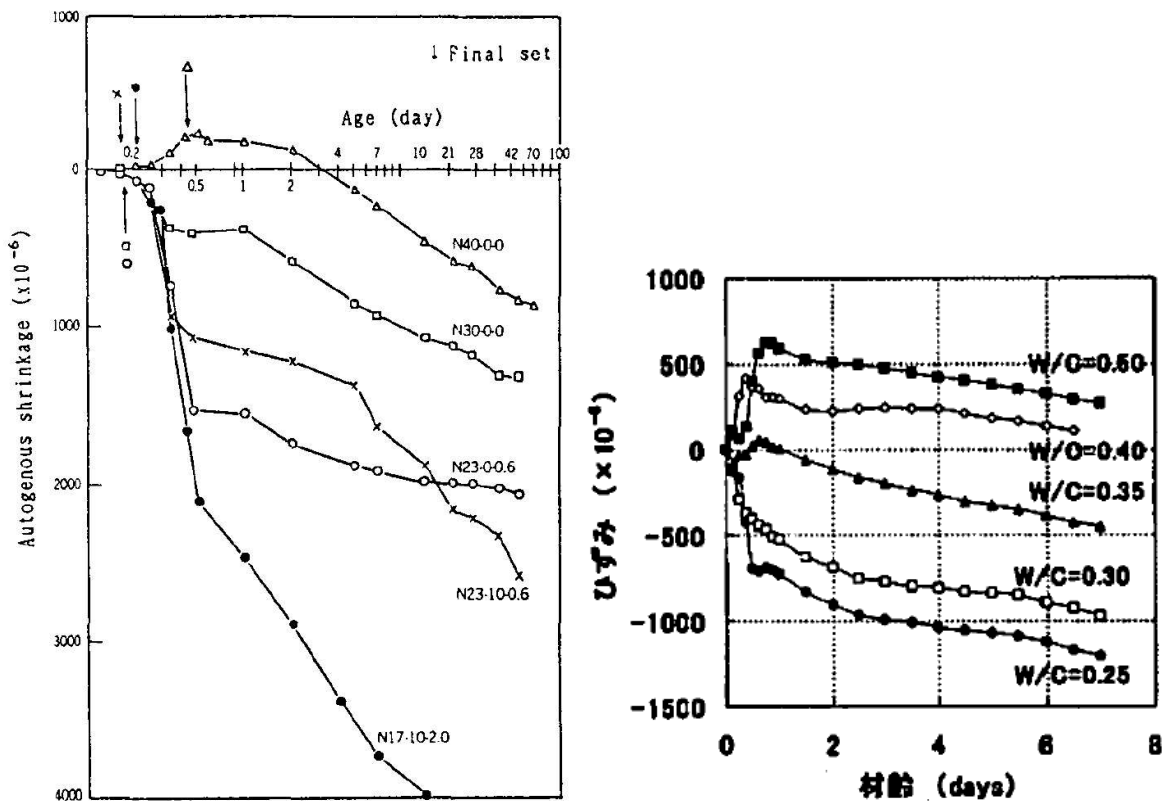


図 3-2 自己収縮ひずみに及ぼす水セメント比の影響 (Tazawa, 堀田)

両者の研究では、使用しているセメントの種類が異なるため、ひずみの絶対量に差異があるが、同一のセメントを使用した場合、水セメント比が小さいものほど自己収縮ひずみが大きくなる点については共通であり、Tazawa et. al.の研究では材齢 0.5 日以前、堀田らの研究では材齢 0.5~1 日以前の自己収縮量が全体の大部分を占めている点も一致している。これらの自己収縮速度が大きく変化する材齢において、水セメント比が 40%以上のセメントペーストでは、自己膨張から自己収縮に転じている。

(2) セメント種類の影響

セメントペーストの自己収縮に及ぼすセメント種類の影響について、Tazawa et. al.の研究を図 3-3 に示す。

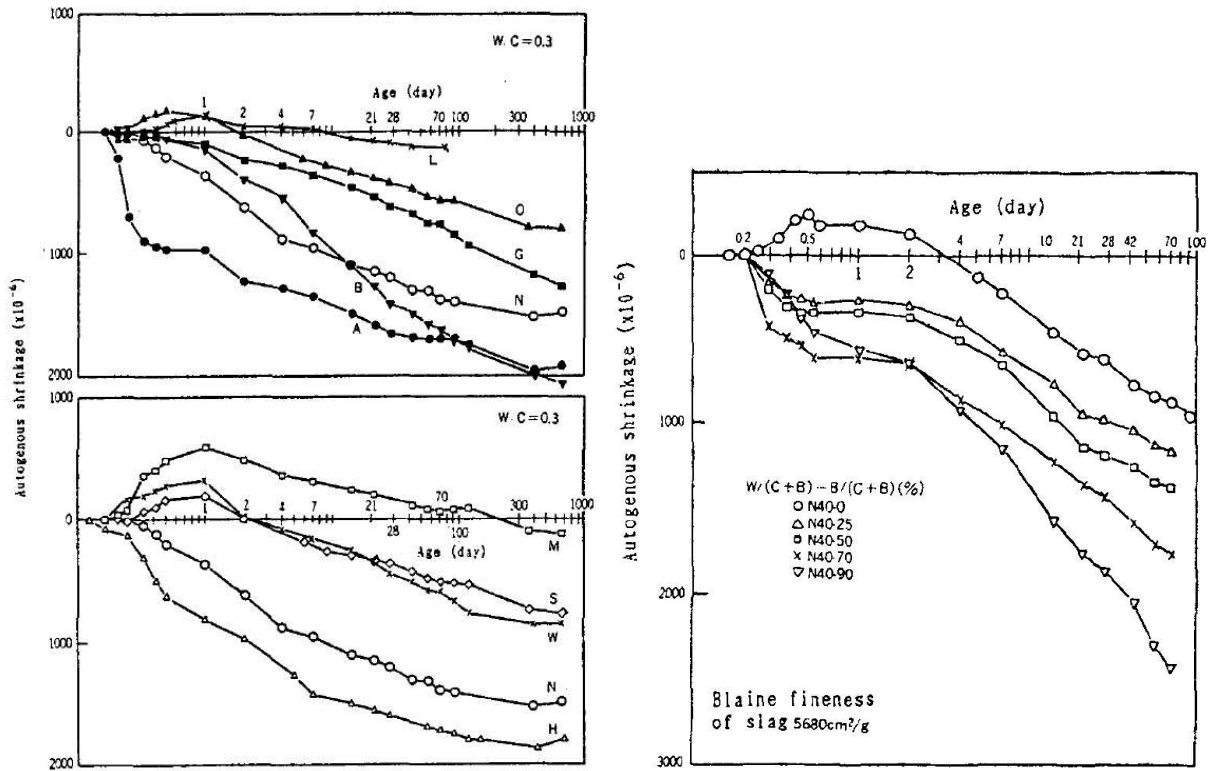


図 3-3 自己収縮に及ぼすセメント種類の影響 (Tazawa)

セメント種類が自己収縮に及ぼす影響に関しては、アルミナセメント、早強セメント、普通ポルトランドセメントといったエアライト、アルミネートの含有量が高いセメントでは、早期に大きな収縮を生じ、長期的にも大きくなる。一方、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントといったビーライト含有量の大きいセメントでは長期的にも自己収縮を抑制できると考えられている。また、高炉セメントを使用した場合は、長期的に収縮が増大し、田澤らの研究では、最終的にどのセメントよりも大きい自己収縮ひずみ量を示している。

以上のような傾向は、セメントに含まれる各鉱物によって、水和反応で水分を消費するタイミングが異なり、これが自己収縮ひずみの大小に大きな影響を及ぼすことを示唆するものである。ポルトランドセメントに含まれる主要な鉱物の反応率と自己収縮ひずみの重回帰式として、下式が提案されている¹⁵。

$$\epsilon_{as} = -0.012\alpha_{C3S} - 0.070\alpha_{C2S} + 2.256\alpha_{C3A} + 0.859\alpha_{C4AF} \quad (3-7)$$

- ここで、 ϵ_{as} : 自己収縮ひずみ,
- α_{C3S} : エアライトの反応率,
- α_{C2S} : ビーライトの反応率,
- α_{C3A} : アルミネートの反応率,
- α_{C4AF} : フェライトの反応率,

である。この重回帰式からは、アルミネートとフェライトの反応が自己収縮ひずみ大きな影響を及ぼすことを示している。

(3) 骨材量の影響

骨材には水和反応は起こりえないため、当然ながら自己収縮は存在しない。そのため、骨材はセメントペーストの自己収縮を拘束する方向に働く。すなわち、骨材量の増加によってコンクリートの自己収縮は減少する。このような骨材の拘束効果について、田澤らは乾燥収縮について提案されている Hobbs の複合則¹⁶によって、セメントペーストの自己収縮ひずみからコンクリートの自己収縮ひずみを予測可能であることを明らかにしている¹⁷。

しかしながら、セメントペーストの自己収縮が、水和反応による自己乾燥によって生じることをふまえると、セメントペーストで水分が消費された際に、骨材から水分の供給が行われる場合もあり、単純に力学的な拘束効果のみを考慮するだけでは不十分な場合がある。この骨材からの水分供給を積極的に利用したもの、高含水骨材を使用した内部養生法^{18, 19, 20}がある。これは、人工軽量骨材や廃瓦²¹など、普通骨材より極めて大きい含水率を有する骨材をコンクリートに混入することによって、骨材からセメントペーストへの水分供給を促し、自己収縮ひずみの進行を抑制する手法である。近年では、この原理を利用して、骨材だけでなく、高吸水性ポリマーを混入する手法²²なども提案されている。

(4) 混和材・剤の影響

自己収縮に及ぼす混和材の影響のうち、高炉スラグの影響に関しては、(2)で述べた。

フライアッシュの影響については、図 3-4 に示すようにフライアッシュを混入することで自己収縮が低減するとの報告があるが、現状では十分なデータ数が得られておらず不明な点が多い。

超高強度コンクリートで使用されることが多いシリカフェームについては、シリカフェーム置換率が大きいほど自己収縮ひずみが大きくなるとの報告がある。これについては 3.2.3 で後述する。

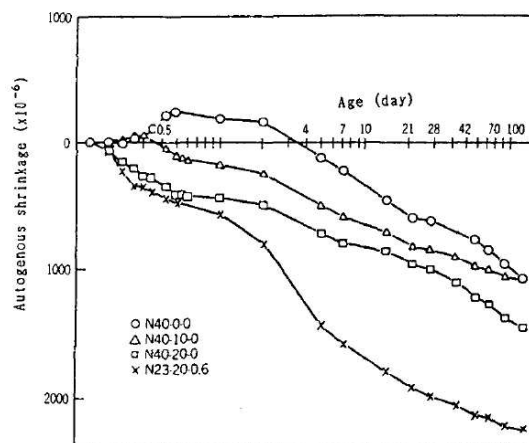


図 3-4 自己収縮ひずみに及ぼすフライアッシュの影響 (Tazawa)

低水セメント比のコンクリートでは一般に高性能減水剤が使用されるが、高性能減水剤の種類及び量の影響については、図3-5に示されるように材齢1日を原点に取った自己収縮ではそれほど大きくないとされている。しかしながら、水和反応が高性能減水剤から受ける影響は、主として材齢1日以前であり、この区間の自己収縮については更なる検討を要する。

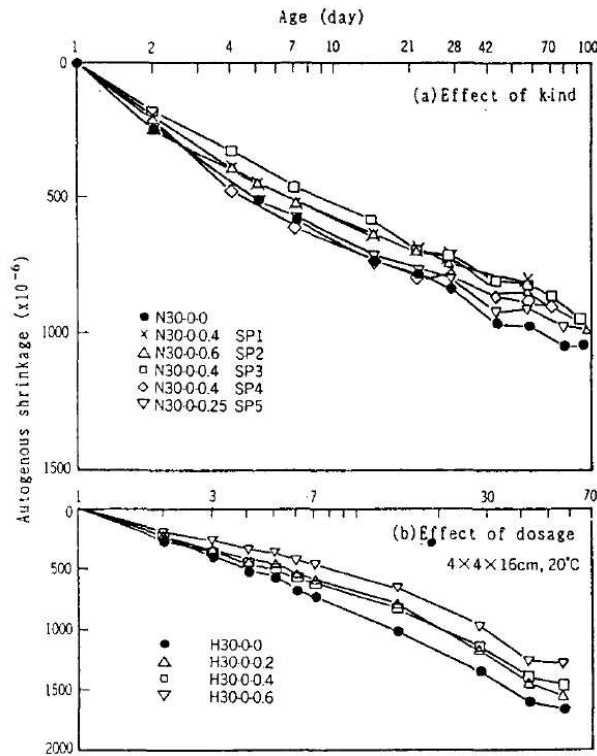


図3-5 自己収縮ひずみに及ぼす高性能減水剤の影響 (Tazawa)

乾燥収縮を低減することを目的として開発された収縮低減剤は、自己収縮の低減にも有効であるとされており^{16, 23}、収縮低減剤が間隙水の表面張力を低下させることにより毛細管張力を低減するためとされることが多い。

3.2.3 超高強度コンクリートの自己収縮

超高強度コンクリートの自己収縮に関する既往の研究の一部を紹介する。一般に圧縮強度が60MPa以上のコンクリートは超高強度コンクリートと称されるため、その範囲は広い。ここでは、著者らが対象としている、28日圧縮強度が150MPa～200MPa程度、水セメント比が13%～20%の領域に近いものを選定した。

超高強度コンクリートの特徴的な点として、水セメント比が極めて小さいこと、単位セメント量の多さから部材が水和発熱による温度履歴を受けること、結合材としてシリカフュームなどの微粒子が使用されることが多いことなどが挙げられる。そこで以下では、超高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす水セメント比の影響、養生温度の影響、シリカフューム置換率の影響に関する知見について整理した。

(1) 水セメント比の影響

3.2.2で述べたように、水セメント比はコンクリートの自己収縮の要因として最も支配的なものであるが、水セメント比が20%以下の領域でもこの関係は例外ではなく、図3-6に示されるように水セメント比が小さいものほど自己収縮ひずみは大きくなると報告されている²⁴。また、3.2.2で述べた水セメント比領域と同様に、自己収縮量の相違は材齢1日以内の影響が支配的である。

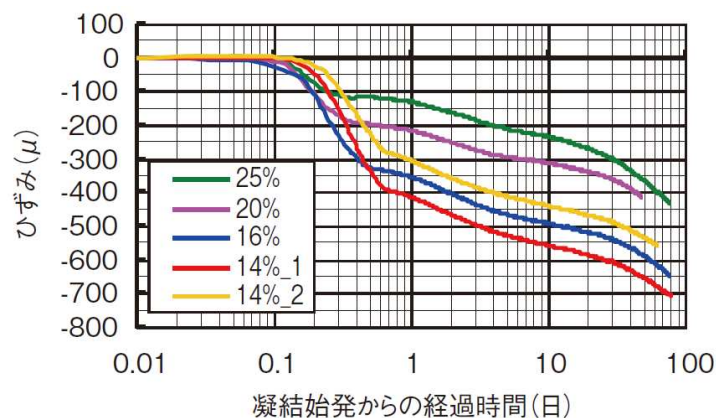


図 3-6 超高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす水セメント比の影響 (梅本)

(2) 養生温度の影響

コンクリートの水和は化学反応であるため、その反応速度は温度の影響を受ける。水セメント比の小さい超高強度コンクリートは、水和発熱により自発的に高温環境に曝されるため、高温履歴を受ける状況下での自己収縮挙動を把握することが重要になる。

今本ら²⁵は、水セメント比23%、シリカフューム置換率10%、25%のコンクリート試験体を用いて、20℃及び50℃一定温度条件下で自己収縮ひずみの測定を行っている。この実験において、シリカフュームを使用した場合に自己収縮ひずみが増大すること、図3-7に示すように、温度条件の違いはマチュリティを用いることで概ね評価可能であることを示した。

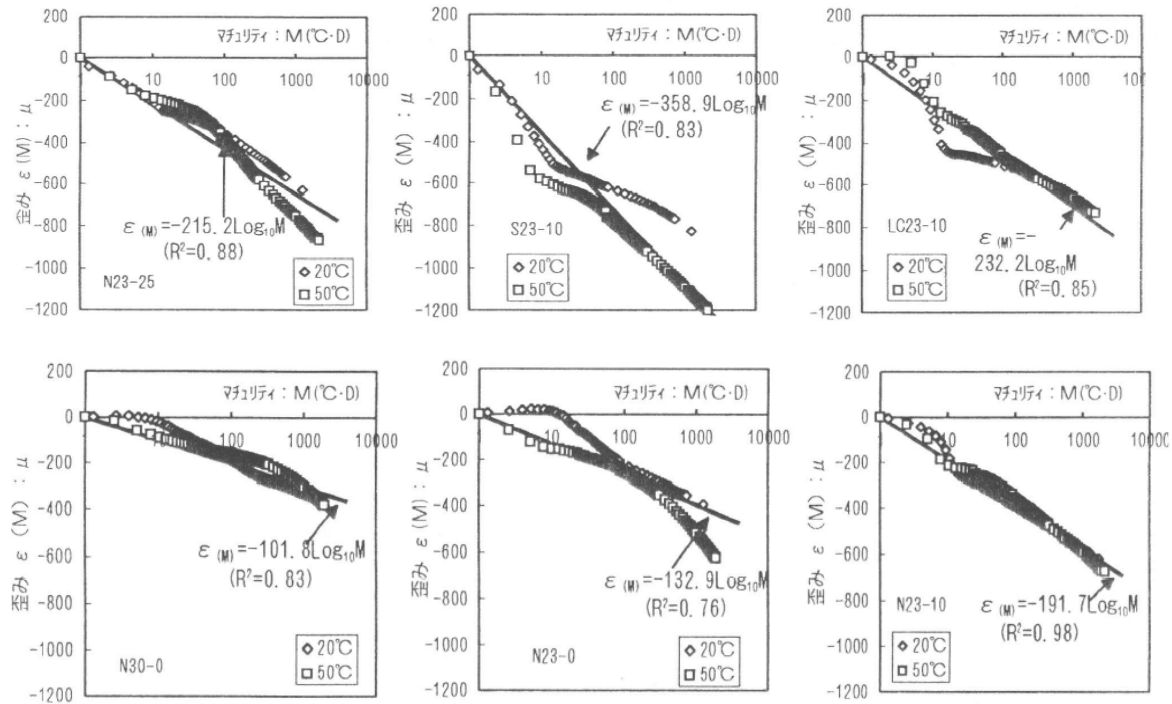


図 3-7 自己収縮に及ぼす温度の影響 (今本)

橋田, 山崎²⁶は, 普通ポルトランドセメント及び高ビーライト系セメントを用い, 水セメント比が 20% から 40%, シリカフェーム置換率が 0%, 5% のコンクリート試験体を作製し, 20°C 条件及び断熱温度上昇条件で自己収縮ひずみの測定を行った。断熱温度上昇による最高到達温度は割合により異なるが, 60°C から 90°C の範囲内であった。温度ひずみの算定に際し, 材齢 3 ヶ月で線膨張係数の測定を行い, 得られた測定値を用いて自己収縮ひずみを算定している。この材齢の線膨張係数は $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \sim 13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であった。図 3-8 にある自己収縮の算定値からわかるように, 同一水セメント比では高ビーライト系セメントは普通ポルトランドセメントより自己収縮ひずみが小さくなり, 高ビーライト系セメントにシリカフェームを混和することで普通ポルトランドセメントと同程度の自己収縮量となっている。また, 断熱温度上昇を経た試験体の自己収縮ひずみは, 材齢 1 日までに急増し, その後は停滞することが示されている。

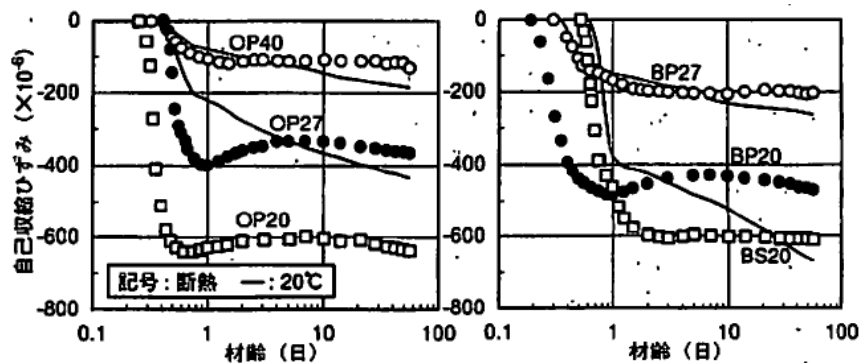


図 3-8 温度履歴が自己収縮に及ぼす影響 (橋田)

出雲ら²⁷は、水セメント比 23%から 65%のモルタル試験体を用いて、雰囲気温度が 10℃及び 20℃の環境下で自己収縮ひずみの測定を行った。その結果、図 3-9 に示されるように、水セメント比 25%では、雰囲気温度が 10℃のものが 20℃のものに比べてわずかながら自己収縮が大きくなった。この研究は、報告数が格段に少ない 20℃以下の養生温度における自己収縮試験の結果の一つである。

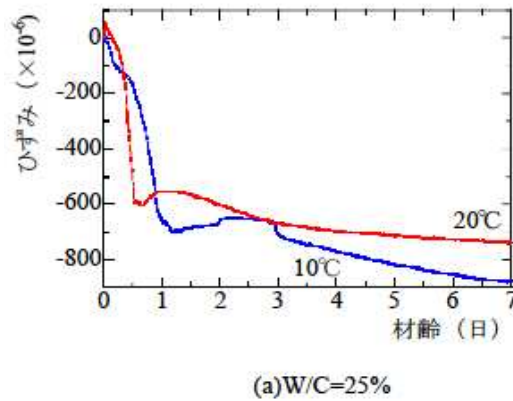


図 3-9 低温養生が自己収縮に及ぼす影響 (出雲)

松田ら²⁸は、水セメント比が 14%と 16%、シリカフェーム置換率が 10%のコンクリート試験体を用いて、20℃一定条件下及び図 3-10 に示す水和発熱による温度上昇を模擬した最高温度 60℃及び 90℃の温度履歴条件下で自己収縮ひずみの測定を行った。その際、温度ひずみは線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して全ひずみから差し引いている。

自己収縮ひずみの算定結果を図 3-11 に示したが、超高強度コンクリートの自己収縮は、高温履歴下で急激に進行し、材齢 14 日時点の自己収縮ひずみ量は最高到達温度によって評価できること、温度履歴の影響は最高到達温度によって決まる仮の終局自己収縮ひずみ量と積算温度で概ね評価できることを示した。

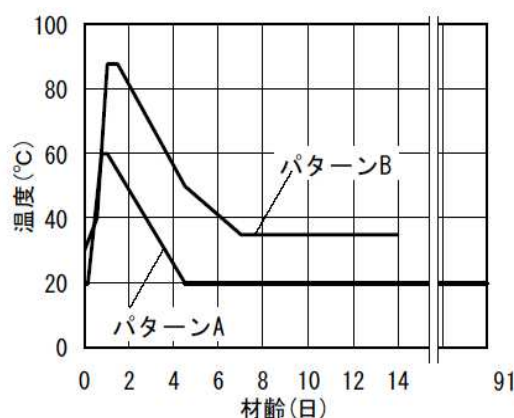


図 3-10 温度履歴 (松田)

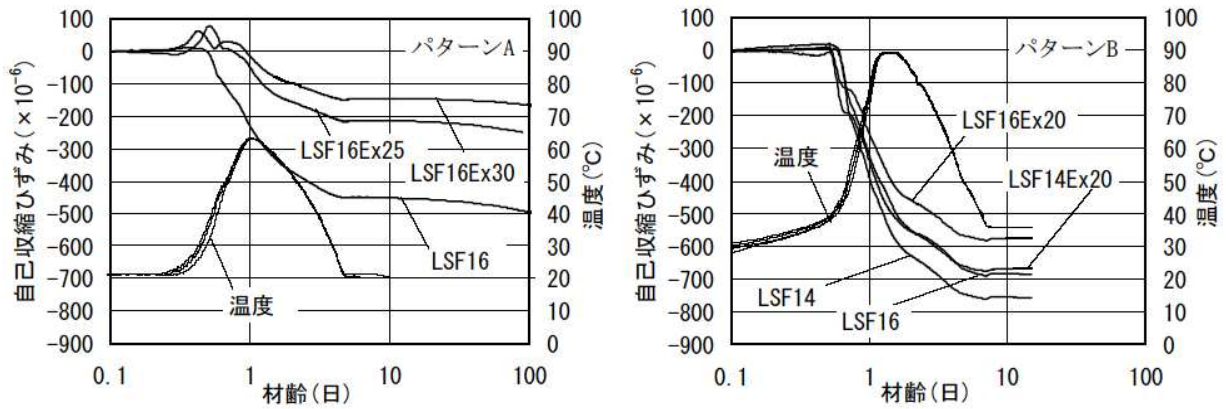


図 3-11 高温履歴が自己収縮に及ぼす影響 (松田)

(3) シリカフェーム置換率の影響

超高強度コンクリートは、流動性の向上、長期強度の向上を目的にシリカフェームを混入することが一般的であり、著者らが行った実験でもシリカフェームをプレミックスした結合材を用いている。ここでは、シリカフェーム置換率に着目した既往の研究を紹介する。

M.H.Zhang et al²⁹は、水セメント比が 26%から 35%、シリカフェーム置換率が 0%から 10%の範囲内のコンクリート試験体を用いて、30°C一定条件で自己収縮ひずみの測定を行った。この測定結果から、図 3- 12 左図にあるようにシリカフェームはシリカフェーム置換率が 0%から 10%の範囲内では置換率が大きいほど自己収縮ひずみが増大することを明らかにした。

また、寺澤³⁰は、水セメント比が 20%から 30%、シリカフェーム置換率が 0%から 25%の範囲内のコンクリート試験体を用いて、20°C一定条件下で自己収縮ひずみの測定を行っており、シリカフェームはシリカフェーム置換率が 0%から 25%の範囲内では使用量が多いほど自己収縮ひずみが増大すること、シリカフェームにより生じる自己収縮ひずみの増大は、主に材齢 3 日以内であり、それ以降の自己収縮挙動には大きな影響を及ぼさないことを明らかにした。測定結果を図 3- 12 右図に示す。

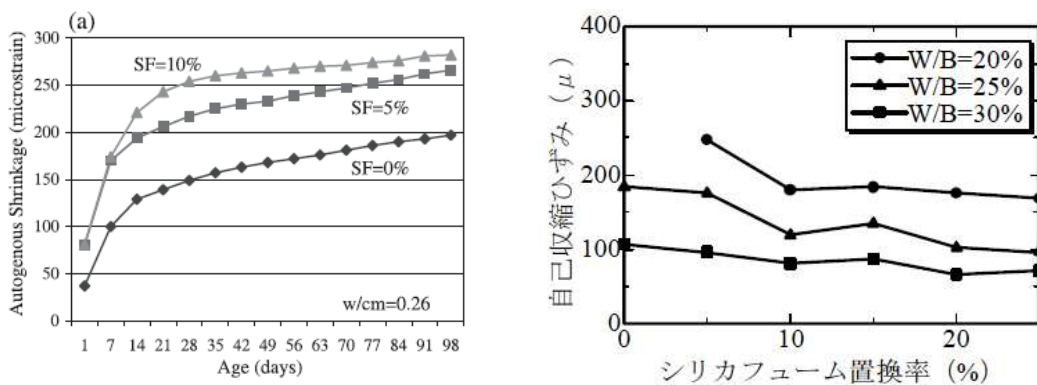


図 3-12 自己収縮に及ぼすシリカフェーム置換率の影響 (Zhang, 寺澤)

次に、シリカフュームの種類に着目した研究として、神代ら³¹の研究を紹介する。

この研究は、水セメント比が17%の超高強度コンクリートで、比表面積の異なる2種類のシリカフューム微粉末を用いてシリカフューム置換率が10%の試験体を作製し、20°C一定条件下で自己収縮ひずみの測定を行ったもので、同一水セメント比、同一シリカフューム置換率であっても、比表面積の大きいシリカフュームを用いることで自己収縮ひずみが増大することを明らかにした。

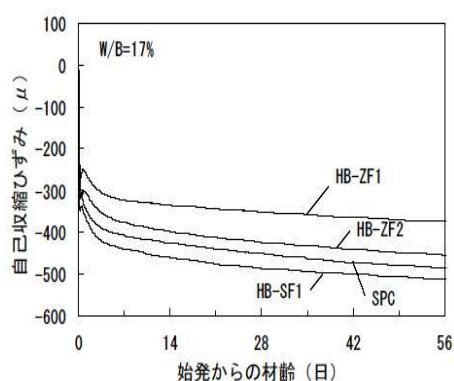


図 3-13 自己収縮に及ぼすシリカフュームの比表面積の影響（神代）

3.2.4 自己収縮に関する既往の知見のまとめ

3.2 節では、自己収縮ひずみに関する既往の測定例を、水セメント比、セメント種類、骨材量、養生温度、シリカフューム置換率の観点から整理した。以上の既往の研究から得られた知見は、以下のようにまとめることができる。

1. 自己収縮ひずみは、水セメント比が小さいコンクリートほど増大する。
2. 高ビーライト系セメントを使用することで自己収縮ひずみの低減が可能である。
3. 骨材は自己収縮ひずみを拘束するが、拘束効果は複合則を用いることで概ね評価可能である。
4. 高温履歴を経た試験体は、常温での試験体より早期に自己収縮ひずみが大きくなる。
5. 自己収縮進行速度に及ぼす温度の影響は、マチュリティ、積算温度の概念で概ね評価可能である。
6. シリカフューム置換率は大きいものほど自己収縮ひずみが増大する。
7. 置換するシリカフュームの比表面積が大きい場合、自己収縮ひずみが増大する。

3.2.5 水和収縮

未水和セメントと水が反応によって生成する水和物の体積は、反応前の未水和セメントと水の体積の和より小さくなり³²、この現象は水和収縮と呼ばれている。このような真の体積収縮が、見かけの体積収縮である自己収縮に影響及ぼす可能性が考えられるため、本節では水和収縮に関する既往の研究を取りまとめた。

C ₃ Sの水和				
水和反応	C ₃ S	+	5.3H ₂ O	→ C _{1.7} S·H _{4.0} + 1.3CH
質量(g)	228.33		95.51	227.51 96.33
密度(g/cm ³)	3.12		1.00	1.90 2.24
体積(cm ³)	73.2		95.5	119.7 43.0
	168.7		162.7	
体積変化	6.0(-3.6%)			

C ₂ Sの水和				
水和反応	C ₂ S	+	4.3H ₂ O	→ C _{1.7} S·H _{4.0} + 0.3CH
質量(g)	172.17		77.49	227.51 22.23
密度(g/cm ³)	3.28		1.00	1.90 2.24
体積(cm ³)	52.5		77.5	119.7 9.9
	130.0		129.6	
体積変化	0.4(-0.3%)			

C ₃ Aの水和				
水和反応	C ₃ A	+	CS*2H	+ 10H ₂ O → AFm
重量(g)	270.20		172.19	180.20 622.59
密度(g/cm ³)	3.03		2.32	1.00 1.95
体積(cm ³)	89.2		74.2	180.2 319.3
	343.6		319.3	
体積変化	24.3(-7.1%)			

図 3-14 水和反応によって生じる固相の体積変化

図 3-14 に示したように、セメントに含まれる主要な鉱物のうち、エーライト、ビーライト、アルミネートといった鉱物は、水和反応に伴って総体積が減少することが分かっている。

しかしながら、セメントの水和反応は、空隙構造を形成しながら進行するため、水和の進行に伴い、みかけの体積が膨張側に推移することがある。これは、水和収縮と自己収縮には直接関係がないことを示す一例である。

実際に、高水セメント比のセメントペーストでは水和収縮が進行しながらみかけの体積が膨張すること³³や、膨張材を用いた場合、水和収縮は膨張材の添加により増加するにもかかわらず、みかけの体積は膨張材を添加しないものと比べて増大すること^{34, 35}といった実験的事実があり、水和収縮と自己収縮の関係が一様でないことがわかる。

一方で、Mounanga et al³⁶は、水和収縮と体積自己収縮の関係を調べ、注水から数時間以内の段階では、図 3-15 左図に示すように、水和収縮と体積自己収縮が等しくなることを実験的に示した。右図は、この現象についての Jensen³⁷による概念図である。

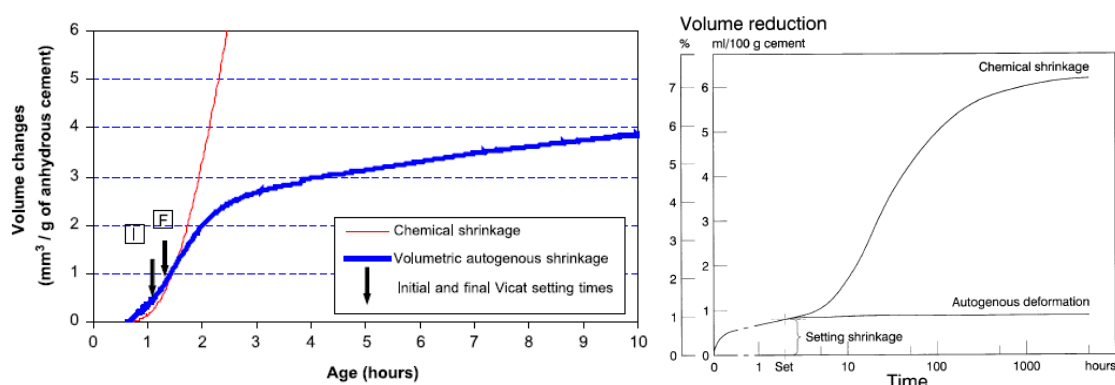


図 3-15 水和収縮と体積自己収縮の関係 (Mounanga, Jensen)

また、水和収縮が自己収縮の駆動力となりうることは以前から指摘されている³⁸。特に、低水セメント比の領域では緻密な内部構造が形成されるため、水分浸透速度が小さくなることから、水和収縮による空隙構造の形成速度に対して水分浸透速度が追いつかない現象（自己乾燥）が生じる。そのため、空隙構造にメニスカスが形成され、収縮駆動力となる負圧が発生する。

3.2 節で述べたように、液状の水が固相に取り込まれる際に空隙が生成され液状の水が減少するという点では、外部に水が逸散して生じる乾燥収縮と同等であり、この自己乾燥が収縮の駆動力となりうる。

本章でも、一部の試験体については、自己収縮試験と同時に水和収縮試験を実施し、自己収縮と水和収縮の関係について検討を行った。

3.3 実験概要

本章では、以下のように3つのシリーズに分けて自己収縮ひずみの測定を行った。

1. 水セメント比 30%~55%の領域における自己収縮ひずみに関する実験
2. シリカフェームプレミックスセメントを使用した水セメント比 15%の超高強度セメントペースト、モルタルの自己収縮の温度依存性に関する実験
3. 2とは異なるシリカフェームプレミックスセメントで作製した水セメント比 13%~20%の超高強度セメントペースト、コンクリートの調合及び温度依存性に関する実験

以下では、それぞれのシリーズに関する実験概要について説明を行う。

3.3.1 実験概要 シリーズ1 —普通強度セメントペースト、モルタル—

(1) 使用材料・調合及び養生条件

使用したセメントは普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント、高炉スラグ混入セメントであり、それぞれのセメントに対して、パラメータとして2~4種類の水セメント比のセメントペーストを作製した。モルタル試験体の作成には、セメントとして高炉スラグ混入セメント、細骨材には山梨県大月産砕砂を使用し、パラメータとして骨材体積比を0%、38%、60%とした。

すべての試験体はポリエステルフィルムによって封緘を施し、それぞれの試験体に対して2~3種類の温度履歴を与えた。表3-1に使用材料を、表3-2に使用したセメントの化学組成を、表3-3に各セメント種類における水セメント比と、温度履歴試験の最高到達温度を示す。

表 3-1 使用材料

Materials	Type	Character
Cement	Normal Portland cement	Density: 3.16 g/cm ³ , Specific surface area: 3110 cm ² /g
	Moderate Portland cement	Density: 3.20 g/cm ³ , Specific surface area: 3110 cm ² /g
	Low Heat Portland cement	Density: 3.20 g/cm ³ , Specific surface area: 3110 cm ² /g
	Blast Furnace Slag Cement	Density: 3.05 g/cm ³ , Specific surface area: 3090 cm ² /g
<u>Additive</u>	Blast furnace slag	Density: 2.90 g/cm ³ , Specific surface area: 4050 cm ² /g
Fine aggregate	Crushed sand	Surface dry density: 2.57 g/cm ³ , Water absorption: 2.62 %
Superplasticizer	Polycarboxylic acid	SP8HU @ BASF

表 3-2 セメントの化学組成

	ig.loss (%)	Chemical Composition (mass%)							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
N	0.64	21.8	4.49	2.9	63.9	1.84	2.26	0.2	0.38
M	0.8	23.3	3.8	3.9	63.3	0.9	2.4	0.3	0.35
L	0.7	26.3	2.8	3.2	62.9	0.7	2.4	0.15	0.41
BFS	0.05	33.88	15.34	0.34	42.65	5.81	0.65	0.28	0.31

表 3-3 試験概要

	Water to Cement Ratio (%)	Temperature History		Aggregate Volume Content
		Constant	Max. Temperature	
N	25	20°C	40°C, 60°C	0%
	30		40°C, 60°C	0%
	40		40°C, 60°C	0%
	55		60°C	0%
M	30		40°C, 60°C	0%
	40		40°C, 60°C	0%
	55		40°C, 60°C	0%
L	30		40°C, 60°C	0%
	40		40°C, 60°C	0%
	55		40°C, 60°C	0%
BB30	40		40°C, 60°C	0%, 38%, 60%
	55		40°C, 60°C	0%
BB45	40	40°C, 60°C	0%	
	55	40°C, 60°C	0%	

(2) 温度履歴

表 3-3 に示したように、それぞれの試験体には、20°C一定条件のほか、水和発熱を模擬した最大到達温度 40°C、60°Cの温度履歴（以下、40°C履歴条件、60°C履歴条件、）を与えた。与えた温度履歴は温度上昇開始材齢が 10 時間、温度上昇開始後は一定温度勾配で昇温を行い、材齢 22 時間で最高到達温度に達し材齢 32 時間まで一定温度、その後、材齢 144 時間に 20°Cとなるよう降温した。

これはコンクリート部材の中央部や端部において水和発熱による温度履歴を想定して設定したものである。実部材における水和発熱性状はセメント種類、単位セメント量、練上り温度、各種混和剤の使用量などにより異なると考えられるが、本実験ではセメント種類及び水セメント比における自己収縮ひずみについて相互比較を行うことを目的としているため、すべての調合に対して、同様の温度履歴を与えた。

また、以上のベースとなる温度履歴の最中に、線膨張係数測定用の $\pm 5^\circ\text{C}$ の温度パルスを与えた。温度パルスを与えた材齢は、20°C条件では 5.7 時間おき、40°C履歴条件、60°C履歴条件では材齢約 4, 9, 14, 18, 24, 30, 35, 53, 79, 104, 129, 153, 161, 166 時間である。実際に試験体を与えた温度履歴を図 3-16 に示す。

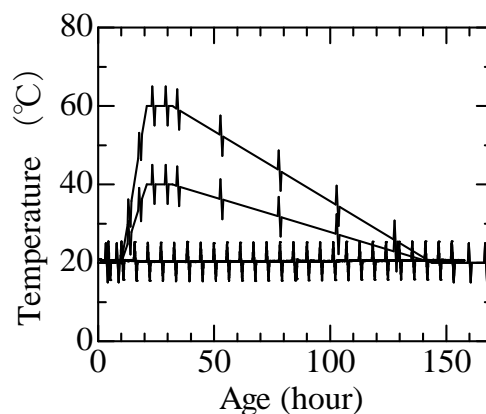


図 3-16 温度履歴

(3) 長さ変化試験

試験体の変位測定には、2.3 節で述べた線膨張係数・自己収縮ひずみ測定装置（図 2-9）を使用した。また、上述の $\pm 5^\circ\text{C}$ の温度パルス区間の長さ変化を得ることで、各試験体の線膨張係数の経時変化を得た。線膨張係数の算定方法は、自己収縮の影響を考慮した 2.3.1 の手法を用いた。

(4) 自己収縮ひずみの算定

2.5 節で述べたように、線膨張係数の経時変化を考慮して、温度ひずみを算出し、全ひずみから差し引くことで自己収縮ひずみの算定を行った。

3.3.2 実験概要 シリーズ2 —超高強度セメントペースト, モルタル—

(1) 使用材料・調合及び養生条件

セメントペースト試験体及びコンクリートを模擬したモルタル試験体の作成にあたり、過去の実験^{39, 40, 41}を参考に、使用材料及び調合を決定した。使用材料及び調合を表 3-4、表 3-5 に示す。粗骨材には、超高強度コンクリートに使用実績⁴²のある盛岡産閃緑岩を使用した。なお粗骨材は、試験体寸法の都合上最大寸法 5mm に粗粉碎し、コンクリートを模擬したモルタル試験体とした。

表 3-4 使用材料

Materials	Type	Character
Cement	Silica Fume Premix Cement	Density: 3.05 g/cm ³ , Specific surface area: 3090 cm ² /g Base Cement: Low Heat Portland Cement
Coarse Aggregate	Crushed Stone (Morioka)	Density: 2.95 g/cm ³ , Water absorption: 0.48%
Fine Aggregate	Crushed Sand (Ohtsuki)	Density: 2.57 g/cm ³ , Water absorption: 2.62%
Admixture	Superplasticizer (SP)	Polycarbonate-type
	Air-Entraining Admixture (D)	
Superplasticizer	Polycarboxylic acid	SP8HU @ BASF

表 3-5 調合

	Water to Cement Ratio W/C	Unit Weight (kg/m ³)				SP/C (%)	D/C (%)
		W	C	S	G		
SFC10-15P	0.15	316	2108	0	0	1.0	0.2
SFC10-15C25	0.15	161	1074	456	926	1.5	0.2
SFC10-15C49	0.15	161	1074	456	926	1.5	0.2

セメントペースト及びモルタルの水セメント比は 15% とし、モルタルは骨材体積比が 49% となるように設定した。この割合は、実際の超高強度コンクリートで一般的な値であり、既往の実験を参考に決定した値である。高性能減水剤 (SP) 混和量は、セメント質量に対して、セメントペースト試験体では 1%、モルタル試験体では 1.5% とした。この値は、打込みに必要な流動性を確保するために決定した値である。なお、SP 及び消泡剤 (D) は固形分補正を行わずすべて単位水量に含めた調合とした。練混ぜにはオムニミキサを使用し、注水後に 3 分、掻き落としを行った後更に 4 分練り混ぜた。モルタルの練混ぜにおいて、空練り時間は 1 分であった。

本実験シリーズの概要を表 3-6 に示す。

表 3-6 試験概要

	Water to Cement Ratio (%)	Temperature History		Aggregate Volume Content
		Constant	Max. Temperature	
SFC10	15	20°C	45°C, 65°C	0%, 25%, 49%

(2) 温度履歴

打込み時期として冬期，中間期，夏期を想定し，目標練上り温度をそれぞれ 10°C, 20°C, 30°C と設定した。ここでの練上り温度とは，練混ぜ直後から 10 時間程度の温度を表している。練り混ぜ直後の温度と想定練上り温度には最大で 9°C の差が見られたが，その後の温度管理によって全ての試験体が注水から 40 分以内に想定温度に到達したことを確認している。

それぞれの練上り温度に対して，水和発熱による温度上昇を模擬した +25°C, +45°C の温度履歴を与えた。この温度上昇量は，実大柱部材を用いた実験において，部材の端部と中央部で測定された実際の温度履歴を参考に設定したものである。また，参考値として +0°C すなわち，練上り温度一定条件についても測定を行った。実部材における水和発熱性状は単位セメント量や練上り温度，SP 混和量⁴³などにより異なると考えられるが，本実験では温度依存性の相互比較を行うことを目的としており，すべての条件で温度上昇開始材齢を 12 時間とした。温度上昇開始後は一定温度勾配で昇温を行い，材齢 32 時間で最高到達温度に達し材齢 42 時間まで一定温度，その後，材齢 117 時間に練上り温度となるよう降温した。与えた温度履歴パターンを図 3-17 に示す。

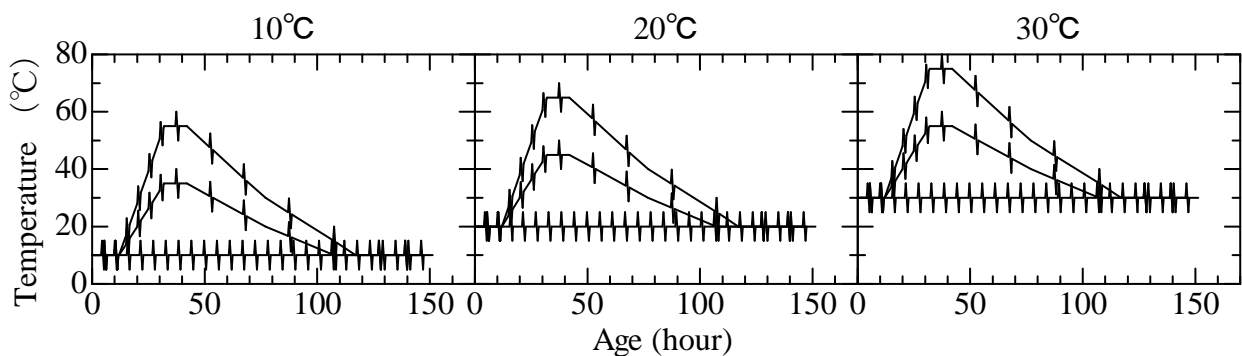


図 3-17 温度履歴 1

また，自己収縮に及ぼす温度の影響を評価するため，別途試験体を作成し，10°C から 60°C の一定温度養生を施した。この一定温度シリーズは，自己収縮ひずみの算定に際し，線膨張係数の測定を必要としないことや，養生温度を一定としているため既往の研究と比較しやすい利点がある。

10°C から 60°C という温度範囲は，中間期の +45°C の温度履歴と比較することを目的として設定し

たものであり，温度履歴の比較を図 3-18 に示す。

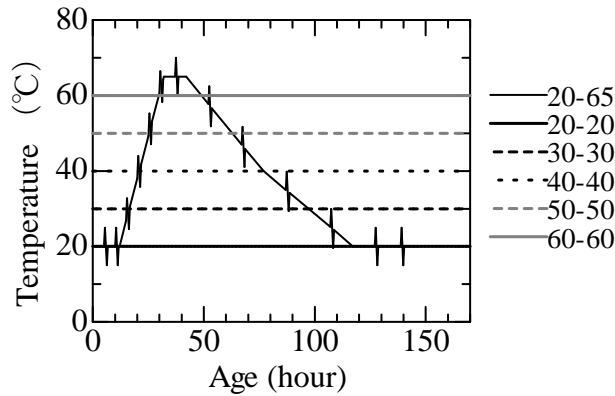


図 3-18 温度履歴 2

本実験シリーズでは，それぞれの温度履歴条件を SFC10-[セメントペースト試験体-P もしくはモルタル試験体-C]-[目標練上り温度]-[最高到達温度]の形で表記することとした。例えば，練上り温度が 20°C で +45°C の温度上昇をうけるセメントペースト試験体は SFC10-P-20-65 と表記する。表記例を図 3-19 に示す。

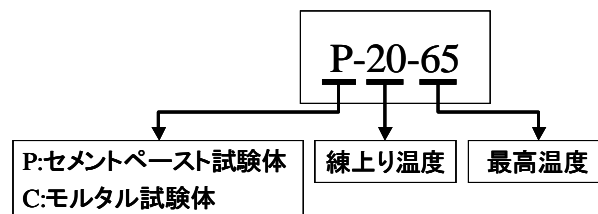


図 3-19 表記例

(3) 長さ変化試験

セメントペースト及びモルタルの長さ変化の測定には，線膨張係数・自己収縮ひずみ測定装置（図 2-9）を使用し，線膨張係数の算定方法は，自己収縮の影響を考慮した 2.3.1 の手法を用いた。

(3) 自己収縮ひずみの算定

2.5 節で述べたように，線膨張係数の経時変化を考慮して，温度ひずみを算出し，全ひずみから差し引くことで自己収縮ひずみの算定を行った。

(4) 水和収縮試験

自己収縮研究委員会で推奨されている水和収縮量の測定方法に準拠して，材齢 2 時間から水和収縮の測定を行った。

水和収縮の測定に関して、笠井ら⁴⁴は低水セメント比の試験体は水分の浸透速度が小さく試験体の寸法依存性が生じることを指摘している。本研究で用いたセメントペーストは水セメント比が15%と極めて小さいことから、上述の寸法依存性が懸念される。そこで図3-20に示すようにろ紙を渦巻状に成型し、セメントペーストの厚さが3mm 毎となる試験体を作成し、水和収縮量の測定をおこなった。本研究では、各条件につき2本の試験体を作成し、測定値にはその平均値を採用した。

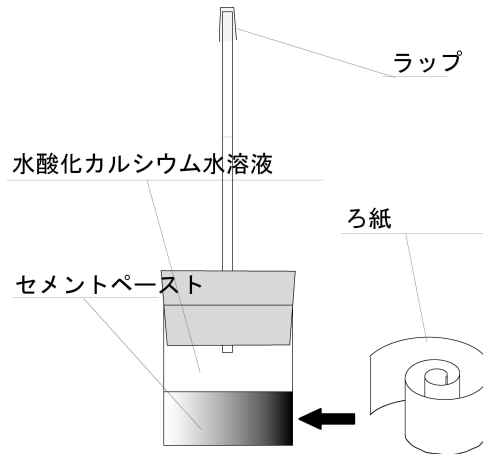


図3-20 水和収縮測定方法

3.3.3 実験概要 シリーズ3 —超高強度セメントペースト，コンクリート—

(1) 使用材料・調合及び養生条件

本実験シリーズでは、セメントペースト試験体として、SF置換率12.5%条件と17.5%条件で水セメント比について13%、16.5%、20%の3水準、SF置換率7.5%条件で水結合材比W/C=16.5の1水準、計7種類の調合をパラメータとして与えた。また、コンクリート試験体として、SF置換率12.5%条件で水セメント比について13%、16.5%、20%の3水準、SF置換率7.5%条件、17.5%条件で水セメント比16.5%の1水準について自己収縮ひずみの測定を行った。使用材料及び調合を表3-7、表3-8、表3-9にそれぞれ示す。

表3-7 使用材料

Materials	Type	Character
Cement	Moderate Cement	Density: 3.23 g/cm ³ , Specific surface area: 3320 cm ² /g
Silica Fume		Density: 2.34 g/cm ³ , Specific surface area: 10.13 m ² /g, SiO ₂ Content:85.77%
Coarse Aggregate	Crushed Stone (Sakuragawa)	Density: 2.64 g/cm ³ , Young's Modulus: 71.8GPa
Fine Aggregate	Mountain Sand (Kakegawa)	Density: 2.56 g/cm ³
Admixture	Superplasticizer	Polycarbonate-type

表 3-8 セメントペースト調合

	Water to Cement Ratio W/C	Unit Weight (kg/m ³)			SP/C (%)
		W	C	SF	
13-12.5	0.13	148	1065	86	0.7
13-17.5	0.13	148	1068	87	0.7
16.5-7.5	0.165	190	996	142	1.0
16.5-12.5	0.165	189	1004	143	1.0
16.5-17.5	0.165	189	1007	144	1.0
20-12.5	0.20	230	944	200	1.4
20-17.5	0.20	230	947	201	1.4

表 3-9 コンクリートの調合

	Water to Cement Ratio W/C	Aggregate Volume Va (-)	Unit Weight (kg/m ³)					SP/C (%)
			W	C	SF	S	G	
13-12.5-C	0.13	0.465	150	1010	144	353	840	1.4
16.5-7.5-C	0.165	0.537	155	869	70	532	840	1.0
16.5-12.5-C	0.165	0.531	155	822	117	518	840	1.0
16.5-17.5-C	0.165	0.526	155	775	164	504	840	1.0
20-12.5-C	0.20	0.585	155	678	97	654	840	0.7

混和剤には SP を使用し、SP 混和量は結合材質量に対してそれぞれ W/C=13%では 1.4%、W/C=16.5%では 1.0%、W/C=20%では 0.7%添加した。調合に際し、SP 質量の 30%を固形分、70%を水分として扱った。

セメントペーストの練混ぜはオムニミキサを使用し、注水後に 3 分、掻き落としを行った後更に 4 分練り混ぜた。

(2) 温度履歴

目標練上り温度を 20℃とし、練上り温度に対して水和発熱による温度上昇を模擬した温度履歴を与えた。最高到達温度は、W/C=13%条件についてはそれぞれ 80℃と 45℃、W/C=16.5%、20%条件については、70℃と 45℃である。温度上昇開始材齢は材齢 12 時間で、その後 18 時間をかけて最高到達温度に達し、一定温度を 12 時間保持した後、材齢 168 時間に 20℃となるよう降温した。また、それぞれの調合について 20℃一定条件についても測定を行い、温度履歴条件は各調合に対して 3 種

類とした。与えた養生温度パターンを図3-25に示す。なお、コンクリート試験体については、45°C履歴条件は実施しておらず、温度履歴に線膨張係数測定用の温度パルスも含まれていない。

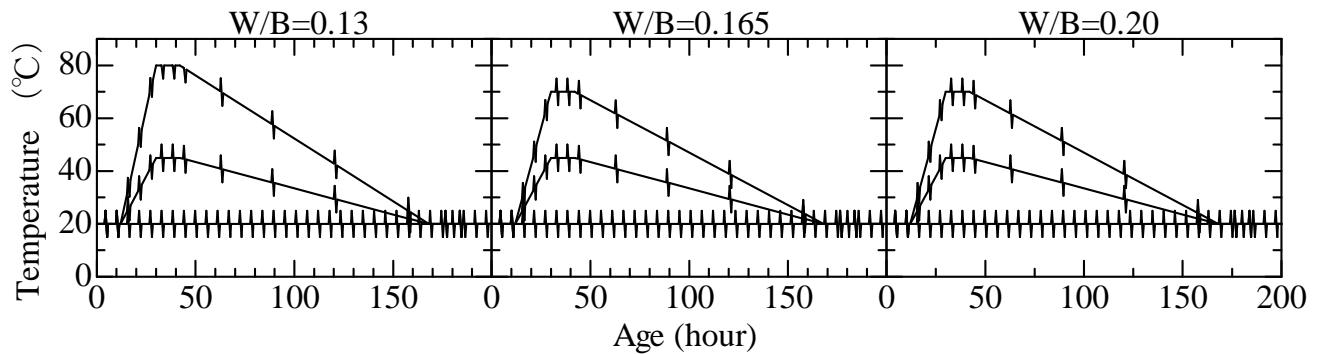


図3-21 温度履歴

(3) 長さ変化試験

セメントペーストの長さ変化測定については、線膨張係数・自己収縮ひずみ測定装置を使用した3.2.3と同様である。また、自己収縮ひずみの算定についても、3.2.7と同様である。セメントペーストの長期自己収縮ひずみの測定は、材齢7日時点で線膨張係数・自己収縮ひずみ測定装置から試験体を取り出し、上下面にメタルベースゲージを貼り付けることで行った。測定値には、上下面のメタルベースゲージの平均値を使用した。

コンクリートの自己収縮ひずみの測定については、「コンクリートの自己収縮研究委員会報告書」を参考に、試験体寸法を100×100×400mmとし、埋め込み型ひずみ計(KM)によって測定を行った。

(4) 自己収縮ひずみの算定

全ひずみから、温度ひずみを差し引くことで自己収縮ひずみの算定を行った。温度ひずみの導出については、2.5節に従った。

コンクリート試験体では、試験体寸法の関係上、適切な温度ひずみを取り出すことができないため、セメントペーストの線膨張係数の測定値から、コンクリートの線膨張係数を推定する手法を使用した。この線膨張係数の推定手法については後述する。

3.4 セメントペーストの自己収縮に及ぼす調合の影響

3.4.1 水セメント比の影響

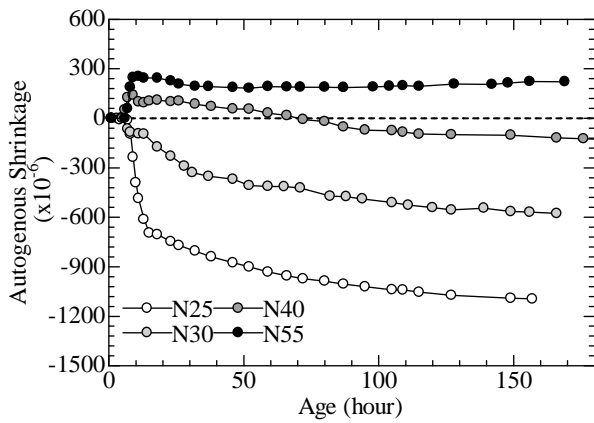
水セメント比は、コンクリートの細孔構造を決める支配的な要因であり、自己収縮も水セメント比の影響を大きく受ける。そもそも、自己収縮の問題が顕在化してきた背景には、水セメント比の小さい高強度、高耐久性コンクリートの使用量が増加したことにある。

田澤らは、セメントペースト、モルタル及びコンクリートを用いて、水セメント比が 50% から 20% の範囲内で自己収縮ひずみの測定を行い、水セメント比が小さいものほど自己収縮ひずみが大きくなることを明らかにした。堀田らは、セメントペーストを用いて水セメント比が 50% から 25% の範囲内で自己収縮ひずみの測定を行い、水セメント比が小さいものほど自己収縮ひずみが大きくなること、水セメント比による自己収縮量の相違は、材齢 1 日以内の影響が支配的であることを示した。

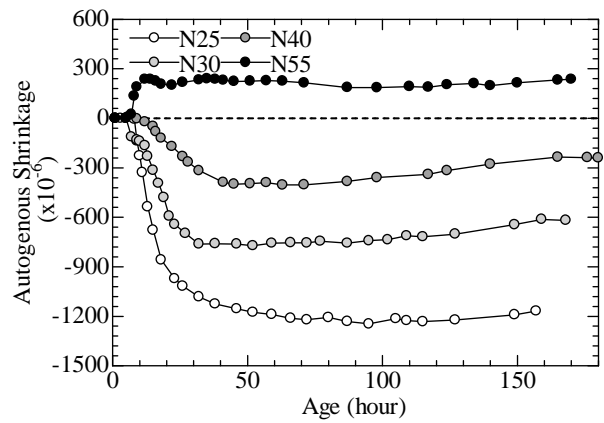
本節では、複数のセメント種類において、水セメント比がセメントペーストの自己収縮ひずみに与える影響について取りまとめる。本論文と、先に紹介したような既往の論文との相違点は、比較対象であるセメント種類が多い点と、温度履歴中の自己収縮ひずみを議論している点である。

各セメント種類の自己収縮ひずみにおける、水セメント比、温度履歴の影響を比較した測定結果について、ポルトランド系セメントの結果を図 3-22 に、高炉スラグ混入セメントについてを図 3-23 に、シリカフェームプレミックスセメントについてを図 3-25 にそれぞれ示す。

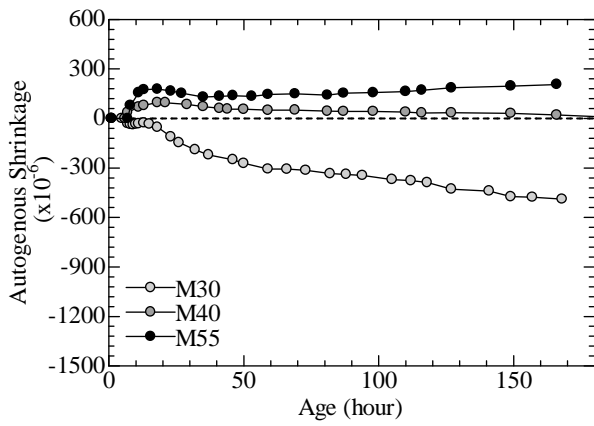
以上の図では、左段に 20°C 一定条件、右段に 60°C 履歴条件の測定結果を示している。



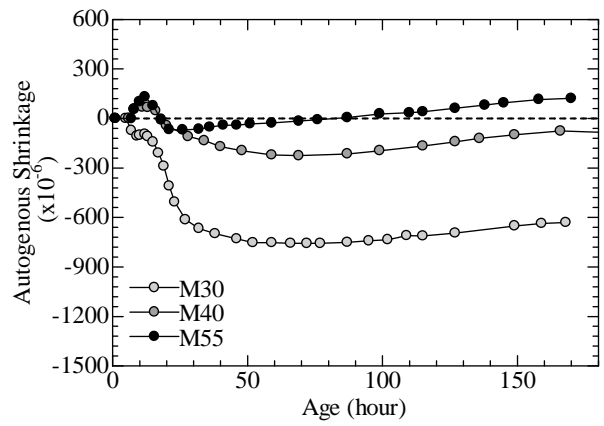
普通ポルトランドセメント 20°C一定



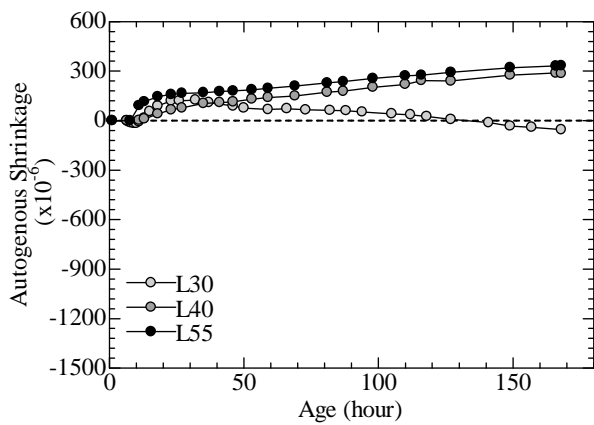
普通ポルトランドセメント 60°C履歴



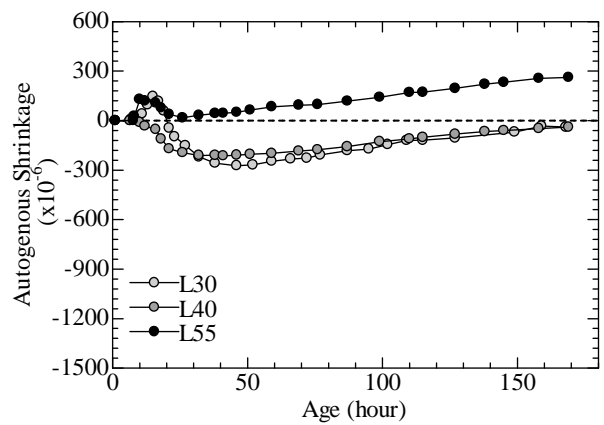
中庸熱ポルトランドセメント 20°C一定



中庸熱ポルトランドセメント 60°C履歴

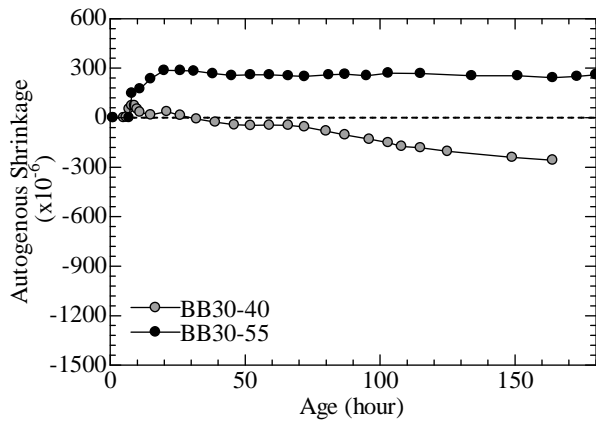


低熱ポルトランドセメント 20°C一定

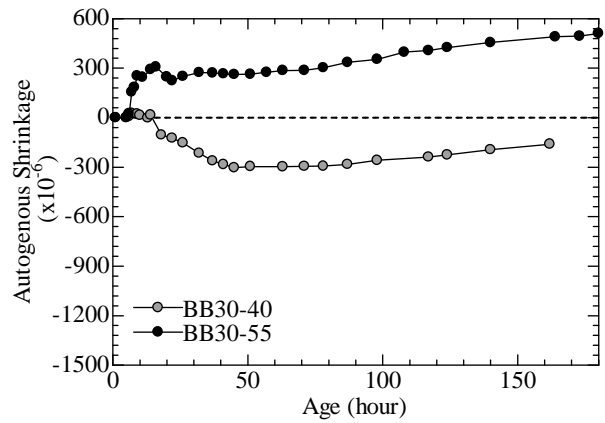


低熱ポルトランドセメント 60°C履歴

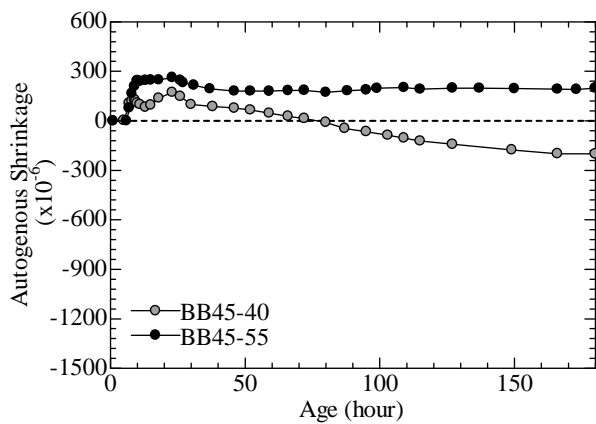
図3-22 ポルトランド系セメントペーストの自己収縮ひずみ



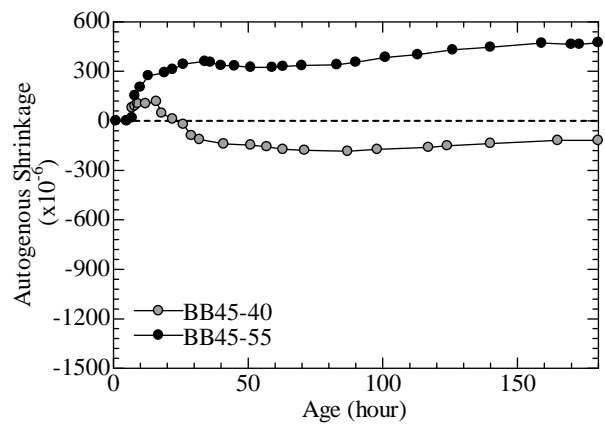
高炉スラグ 30%置換セメント 20°C一定



高炉スラグ 30%置換セメント 60°C履歴



高炉スラグ 45%置換セメント 20°C一定



高炉スラグ 45%置換セメント 60°C履歴

図 3-23 高炉セメントペーストの自己収縮ひずみ

全体的な傾向として、水セメント比が 20%以上の領域では、図 3-22、図 3-23 の測定結果にあるように、いずれのセメント種類についても同一のセメント種類を使用した場合は、温度履歴によらず水セメント比が小さいものほど自己収縮が大きくなっている。これは先に紹介した自己収縮の基本性状であり、これまでの研究と同様の結果である。

水セメント比と自己収縮ひずみの関係は線形ではなく、水セメント比が小さくなるほど自己収縮ひずみに対して鋭敏である。この傾向が確認できるのは、図 3-22 左上図に示す普通ポルトランドセメント（記号-N）の結果である。特に、水セメント比が 25%と 30%とを比較した場合、材齢 20 時間以前ですでに 500×10^{-6} 近い自己収縮量の差異が生じている。この自己収縮量差は、この後、材齢 7 日までほとんど変わらないため、水セメント比の影響は若材齢において大きいものと推察される。なお、日本コンクリート工学会が提案している自己収縮ひずみ予測式では、自己収縮ひずみ量と水セメント比の関係は、下式第 1 項に示されるように指数関数で表現されている。

$$\varepsilon_{c0} = 3070 \exp\{-7.2(W/B)\} + 50 \left\{ 1 - \exp\left(-1.2 \times 10^{-6} \times (T_{\max} - 20)^4\right) \right\} \quad (3-8)$$

また、Nについて、温度履歴を受ける試験体に着目すると、水セメント比40%以下の試験体では、いずれも、高温時に急激に収縮が進行し、その後は停滞もしくは緩やかな膨張を示している。この結果は、図3-8に示した橋田らの結果を再現するものである。仮に、温度履歴を受ける試験体の材齢7日時点の自己収縮量を式(3-8)の終局自己収縮ひずみ量と考えると、Nの各水セメント比における自己収縮量と水セメント比の関係は、図3-24のようになっており、水セメント比40%以下の領域では、式(3-8)と同様、指数関数形になっている。なお、図3-24では、他の図と異なり、収縮ひずみを正で表記した。

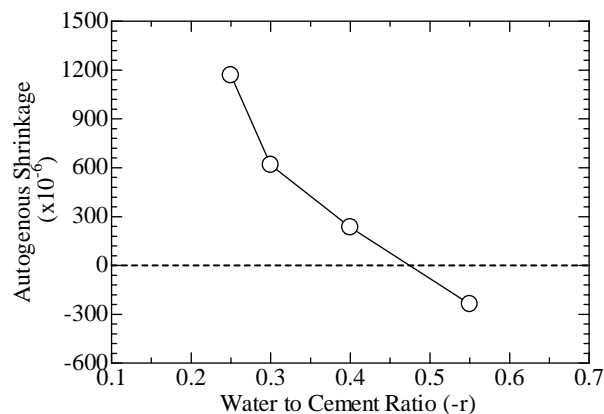
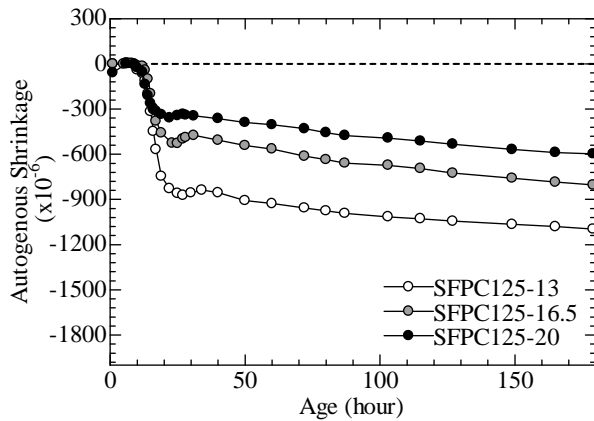


図3-24 水セメント比と7日時自己収縮量の関係 (N)

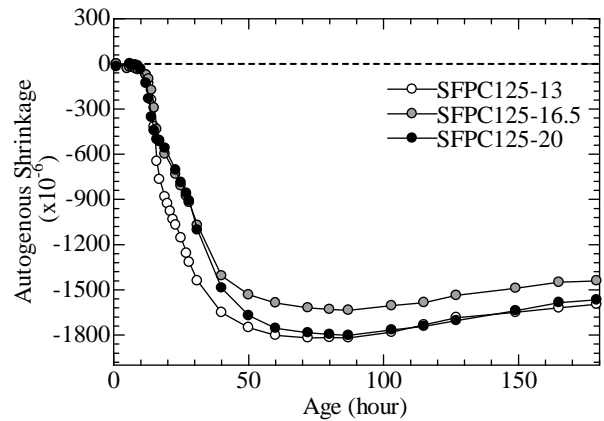
図3-24において、N55では7日時点の自己収縮量が膨張側に推移している。この自己膨張は、他のセメント種類における水セメント比55%の試験体でも確認される。これらの膨張傾向は、ほとんどが材齢1日以前に生じたものであり、このような膨張傾向は、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントでは、水セメント比40%の試験体でも確認できる。

この膨張量に関して定量的議論を行う場合には、自己収縮の駆動力と自己膨張の駆動力を別途検証することが必要となるが、この若材齢時の膨張メカニズムについては未だ解明されておらず、また、この区間の自己膨張は、収縮・膨張応力にほとんど寄与しないことから、式(3-8)のように、高水セメント比の自己収縮ひずみは無視できるという取扱いが一般的である。

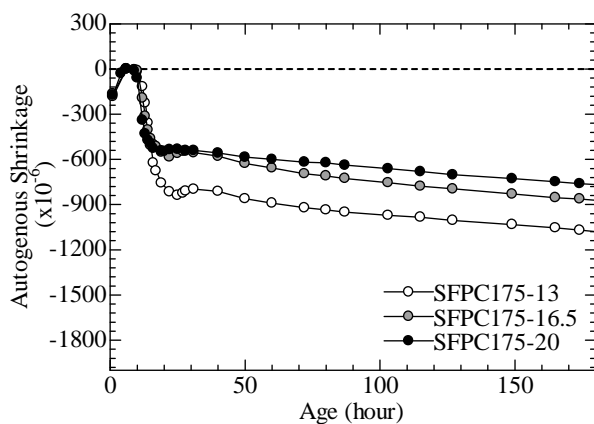
材齢1日以前の極若材齢時の膨張とは別に、高温履歴を受けた試験体のほぼすべてで、材齢30時間程度以降に膨張が生じている。これらの比較的長期間にわたる膨張については、コンクリートによる自己収縮試験でも過去に確認されているが、セメントペーストを使用した本実験において、より明確に確認されたものである。L40とL55といった比較的水和反応の緩やかな調合においては、20℃一定条件の場合でも同様に長期的な膨張傾向が確認できる。



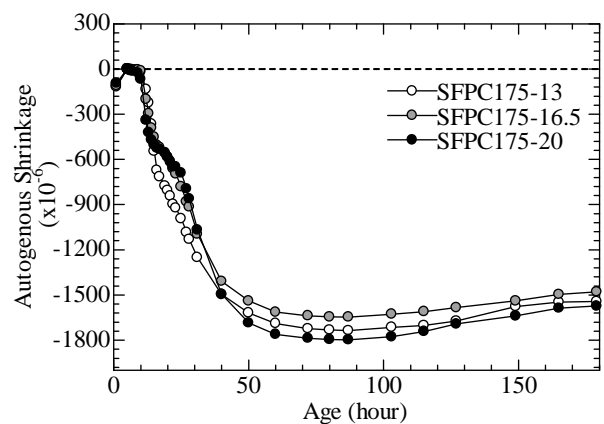
シリカフェーム 12.5%置換 20°C一定



シリカフェーム 12.5%置換 60°C履歴



シリカフェーム 17.5%置換 20°C一定



シリカフェーム 17.5%置換 60°C履歴

図 3-25 シリカフェームプレミックセメントペーストの自己収縮ひずみ

高炉セメントについても、ポルトランド系セメントと同様に、水セメント比が 55%のものでは材齢初期に顕著な膨張ひずみがみられ、その後はほとんど自己収縮が進行しないが、水セメント比 40%の自己収縮ひずみ量はポルトランド系セメントより大きく、結果として、水セメント比の影響が大きいと捉えることができる。

図 3-25 に示されるシリカフェームプレミックセメントでは、いずれのシリカフェーム置換率の場合においても材齢 1 日以前の極若材齢時に顕著な自己収縮ひずみの進展が確認される。材齢 1 日程度で自己収縮進行速度が大きく変曲する点があり、その後の材齢では材齢 7 日まで比較的緩やかに自己収縮が進行している。この自己収縮速度の変曲点以前の材齢における水セメント比の影響は顕著であり、この区間では水セメント比が小さいものほど自己収縮が大きくなる結果であった。その後の緩やかに自己収縮が進行する材齢では、材齢 7 日まで水セメント比による大きな差異は確認されなかった。一方、高温履歴条件では、材齢初期に水セメント比 13%の試験体でやや大きい自己収縮量を示しているが、他の水セメント比でも高温履歴を受ける際に急激に自己収縮が進行して、最終的には、自己収縮ひずみの差異はほとんど見られなかった。

3.4.2 セメント種類の影響

水和反応速度はセメント中の各鉱物によって異なる⁴⁵ため、セメントペーストの自己乾燥速度もセメント種類の影響を受ける。ここでは、2.4.2 で示した実験値を使用して、水セメント比 30%から 55%の間で同一水セメント比ごとに再整理を行い、セメント種類の影響について検討を行った。

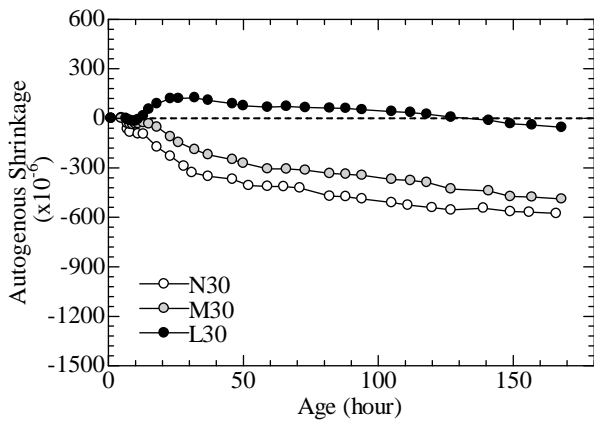
試験結果を図 3-26 に示す。ここでも 3.4.1 と同様に左段に 20°C一定条件を、右段に 60°C履歴条件の測定結果を示している。

図 3-26 から、既往の知見の通り、同一の水セメント比であっても、自己収縮ひずみの経時変化はセメント種類によって異なることが見て取れる。

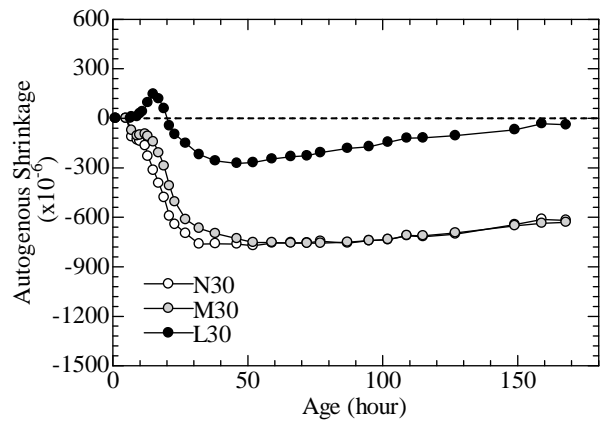
水セメント比 30%では、普通ポルトランドセメントと中庸熱ポルトランドセメントは材齢初期から収縮傾向を示しているのに対し、低熱ポルトランドセメントでは、材齢 20 時間程度まで膨張傾向を示し、その後緩やかに自己収縮の進行を示した。材齢 7 日時点では、N30 : -577×10^{-6} 、M30 : -489×10^{-6} 、L30 : -55×10^{-6} となっており、低熱ポルトランドセメントを使用することで著しく自己収縮を低減可能であることが確認された。この傾向は 60°C履歴条件でも同様であり、低熱ポルトランドセメントのみ、材齢初期に膨張傾向を示し、材齢 7 日までその後の収縮も他のセメントと比較すると緩やかである。一方、普通ポルトランドセメントと中庸熱ポルトランドセメントでは、高温時に顕著な自己収縮を示しているが、最高到達温度に到達した後は、自己収縮の進行が停滞し、温度降下時には、温度履歴を受ける試験体に特有の膨張挙動を示し、材齢 7 日時点では、20°C一定条件とほぼ同様の自己収縮ひずみ量であった。

水セメント比 40%では、すべてのセメント種類で材齢 1 日前に膨張傾向を示したがその後の自己収縮進行速度は、高炉セメントで大きく、次に $N > M > L$ の順であった。これらの傾向は、既往の研究と同様であった。水セメント比 40%の測定結果で特異な点は L40 の結果であり、材齢 7 日まで継続して膨張している。しかしながら、温度履歴を受ける試験体では L40 においても収縮ひずみが確認されていることから、長期的には 20°C一定条件でも収縮側に推移することが予測される。また、他のセメント種類では、普通ポルトランドセメントで温度による自己収縮の進行が急激であり、20°C一定条件では $BB > N$ であったが、60°C履歴条件では材齢 7 日時点で高炉セメントを上回った。

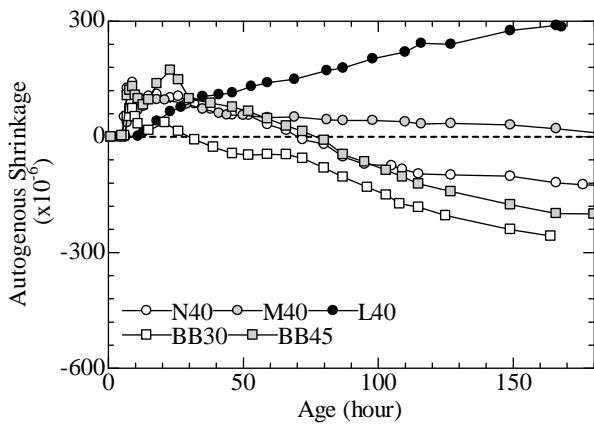
水セメント比 55%では、水セメント比 40%と同様に、すべてのセメント種類で材齢 1 日以前に 300×10^{-6} 程度の膨張が見られ、それ以降はほとんど増減がなかった。ただし、低熱ポルトランドセメントにおいては、L40 と同様に材齢 7 日まで一定して膨張を継続した。温度履歴を受ける場合には、初期の膨張量はまちまちであったが、最高到達温度に到達した後の温度降下時には、いずれの試験体も大きな膨張傾向を示した。



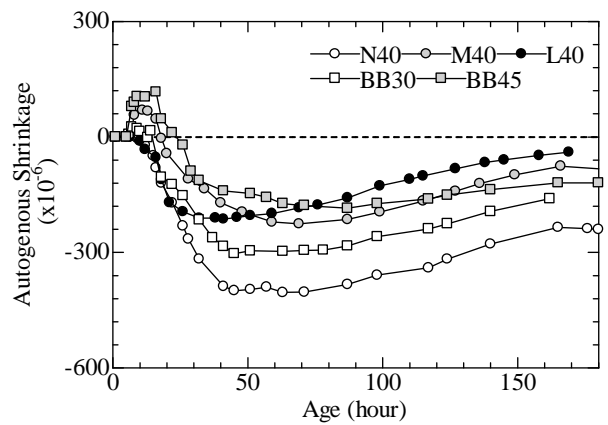
W/C=0.3 20°C一定



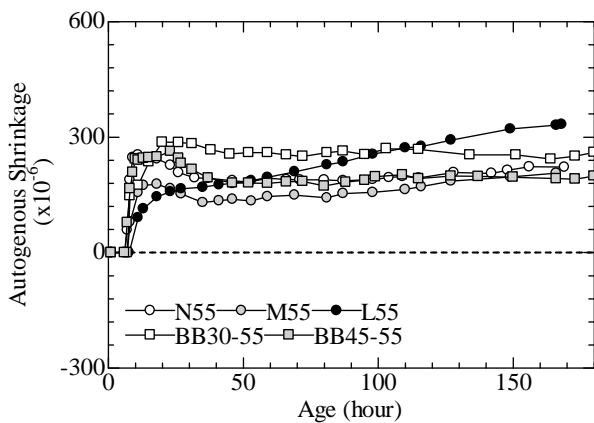
W/C=0.3 60°C履歴



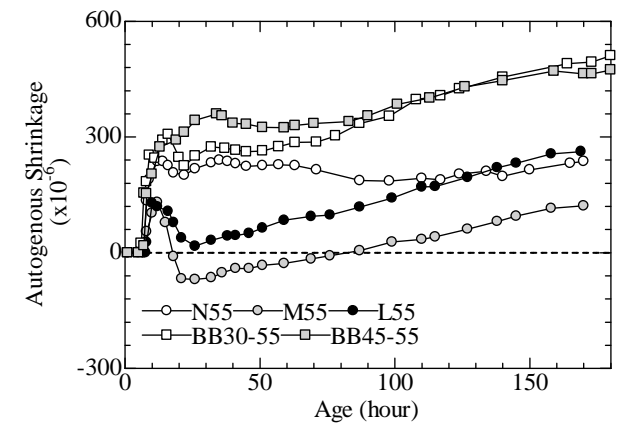
W/C=0.4 20°C一定



W/C=0.4 60°C履歴



W/C=0.55 20°C一定



W/C=0.55 60°C履歴

図3-26 セメント種類による自己収縮ひずみの比較

3.4.3 混和材・剤の影響

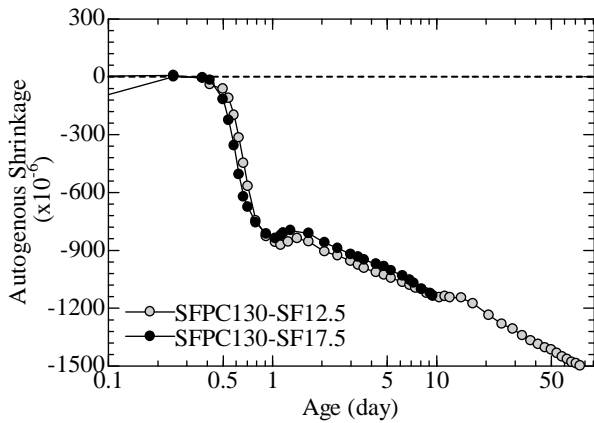
(1) シリカフェーム置換率の影響

3種類のシリカフェーム置換率が異なるシリカフェームプレミックスセメントを使用して、水セメント比が13%、16.5%、20%のセメントペーストの自己収縮に及ぼすシリカフェーム置換率の影響を確認した。測定結果を図3-27に示す。

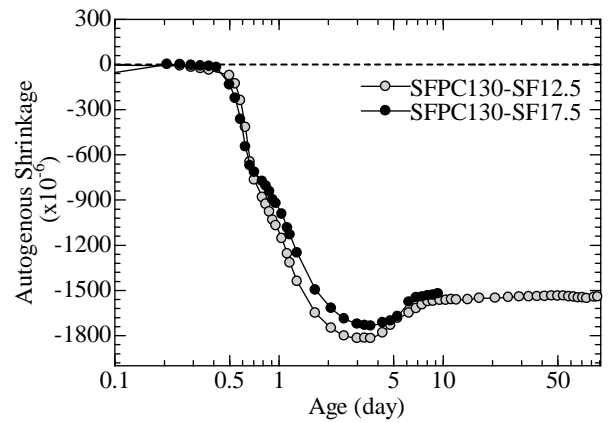
既往の研究では、シリカフェーム置換率が大きくなるほど自己収縮ひずみが増大するという実験結果が多かったが、本実験のように水セメント比が13~20%でシリカフェーム置換率が7.5~17.5%の範囲では、いずれの調合においても大きな差異は見られなかった。

また、高温履歴を受ける試験体についてもこれらの傾向は変わらず、シリカフェーム置換率による大きな差異がみられなかった。

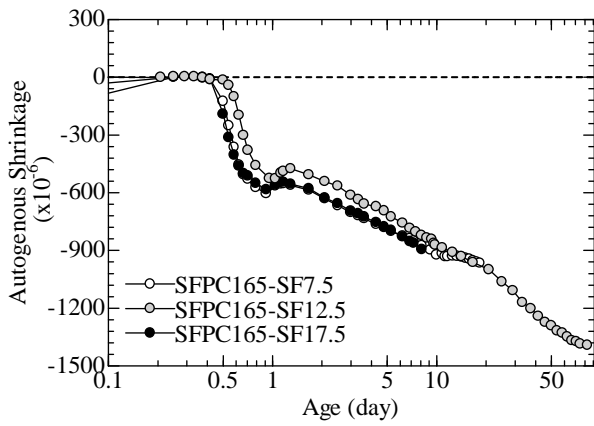
この件に関しては、シリカフェームの比表面積等の特性による影響も考えられるが、総じて、水セメント比の影響に比べると無視できる範囲であると考えられる。



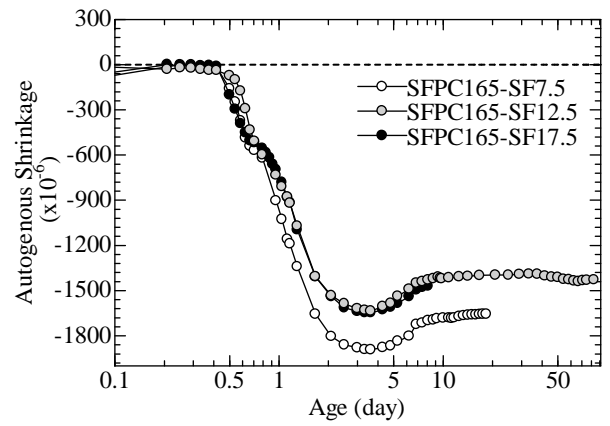
W/C=0.3 20°C一定



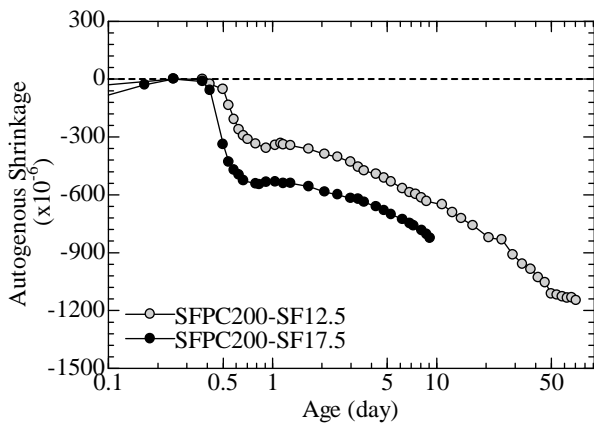
W/C=0.3 60°C履歴



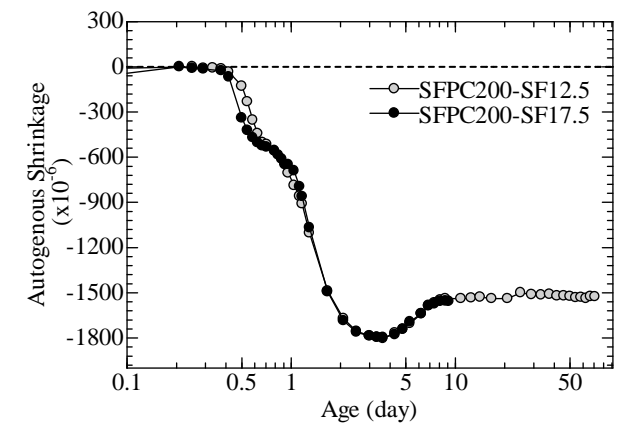
W/C=0.4 20°C一定



W/C=0.4 60°C履歴



W/C=0.55 20°C一定



W/C=0.55 60°C履歴

図3-27 シリカフェーム置換率による自己収縮ひずみの比較

(2) 高性能減水剤の影響

高性能減水剤 (SP) の開発・改良によって、低水セメント比コンクリートであっても所要の流動性、粘性を確保することを可能にした。SP を使用せずに水セメント比 20% 程度以下のコンクリートを適切に打ち込むことは困難であり、すべての超高強度コンクリートに SP が使用されているといってもよい。

現状、SP の作用機構は解明されつつある^{46, 47}ものの、自己収縮に及ぼす SP の影響に関する研究はほとんどない⁴⁸。本節では、SP 混和量が自己収縮に及ぼす影響に関して検討を行う。

2 種類のシリカフェームプレミックスセメントを使用して、高性能減水剤量が自己収縮に及ぼす影響について検討を行った。測定結果を図 3-28 に示す。

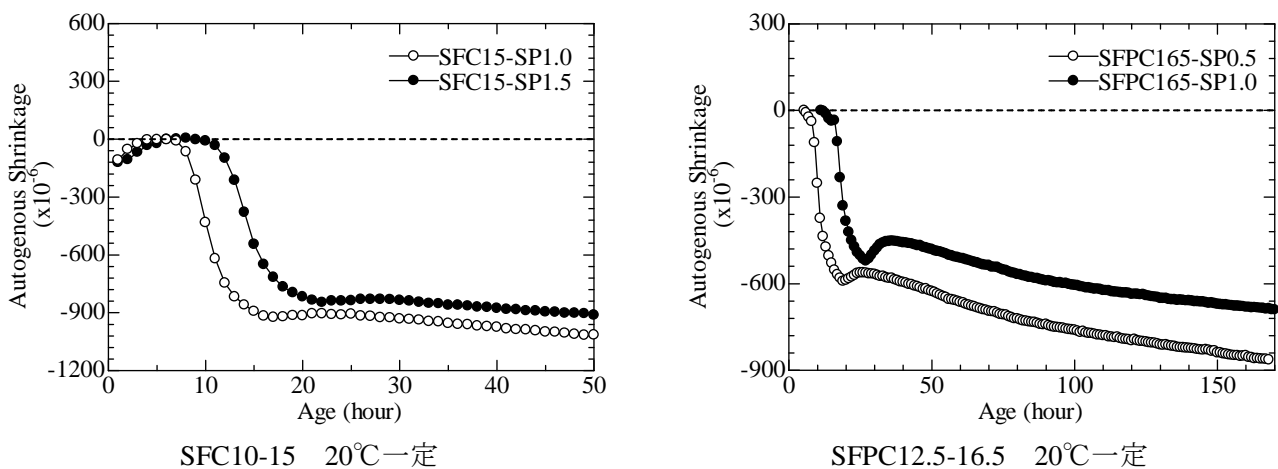


図 3-28 自己収縮ひずみに及ぼす高性能減水剤の影響

図から、いずれの温度条件でも、SP 混和量が多いものほど自己収縮の進行開始材齢が遅く、SP による水和の遅延効果が確認された。また、右図から、この自己収縮進行開始材齢の相違は一定温度養生下では、自己収縮進行速度が変曲する点以前の自己収縮量には大きな影響を及ぼさないが、変曲点以降に時折みられる膨張時の膨張量には大きな差異を生じさせる可能性があることがわかる。この点に関しては、第 4 章で後述する。

SP 量が長期的な自己収縮に与える影響に関しては、いずれの調合においても大きくはなく、硬化後の収縮挙動には大きな影響を及ぼさないことがわかる。

(3) 収縮低減剤の影響

収縮低減剤は、乾燥収縮の低減を目的に開発されたが、これまで多くの実験で自己収縮の収縮低減効果をも有することが確認されている。本研究では、4 種類の収縮低減剤について自己収縮ひずみの低減効果について検討を行った。基本調合は、高炉スラグプレミックスセメントで水セメント比は 40% とし、4 種類の収縮低減剤を混和した。実験に使用した材料を表 3-10 に示す。

表 3-10 使用材料

Materials	Type	Character
Cement	Blast Furnace Slag Cement	Density: 3.05 g/cm ³ , Specific surface area: 3090 cm ² /g
Shrinkage Reducer (SR2)	Tetra propylene glycol monomethyl ether, Diethylene glycol monobutyl ether	
Shrinkage Reducer (SR5)	Decane, Diethylene glycol monobutyl ether	
Shrinkage Reducer (SR7)	Dipropylene Glycol, Diethylene glycol monobutyl ether	
Shrinkage Reducer (SR10)	-	

本実験で得られたセメントペーストの自己収縮試験結果を図 3-29 に示す。

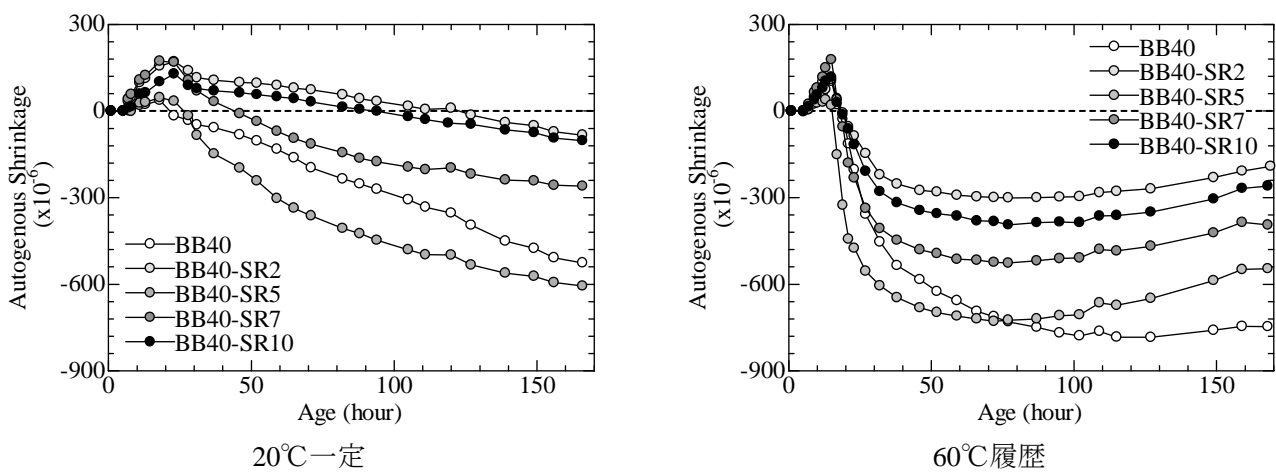


図 3-29 自己収縮ひずみに及ぼす収縮低減剤の影響

20°C一定条件下では、基本調合である BB40 と比較すると、SR7 以外は若材齢から自己収縮ひずみが低減されており、材齢 7 日時点の収縮低減量は、SR2=SR10 > SR5 であった。SR7 では、材齢 30 時間以降、BB40 より自己収縮量が大きくなっているが、次第に自己収縮進行速度が緩やかになっているのがわかる。

60°C履歴条件をみると、材齢 30 時間以前における高温時の自己収縮の進展も 20°C一定条件と同様に SR7 > BB40 > SR5 > SR2=SR10 という結果であったが、温度降下時の膨張傾向は、収縮低減剤を使用した場合に大きくなっており、初期には BB40 より大きな自己収縮量を示していた SR7 でも、材齢 80 時間で BB40 を逆転し、材齢 7 日時点では、 350×10^{-6} 程度の収縮低減効果がみられた。以上の結果は、収縮低減剤の中には経時的に収縮を抑制するものと、長期材齢に収縮低減効果があるものがあるようであり、自己収縮を低減することを目的として収縮低減剤を使用する場合は、事前に収縮低減剤の性質を把握することが重要である。

3.5 セメントペーストの自己収縮に及ぼす温度履歴の影響

本節では、3.4節で示した自己収縮試験結果のうち、温度履歴の影響に着目し、アレニウス則⁴⁹による有効材齢によって評価を試みる。

3.5.1 アレニウス則による有効材齢

セメントの水和反応は化学反応の一つであり、環境温度が高いほど反応速度が大きくなる。そのため、水和反応に起因するコンクリートの強度発現、自己収縮の進行等も高温域の方がその速度が大きくなる。このようなコンクリートにおける諸物性の温度依存性を評価する際に有効材齢という、みかけの活性化エネルギーを設定しアレニウス則を用いた概念が用いられる。

現在、よく使われている有効材齢の一つに CEB FIP Model Code 90⁵⁰ に採用された式(3-9)がある。

$$t_e = \sum \exp \left\{ \frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_k} \right) \right\} \cdot \Delta t \quad (3-9)$$

ここで、 t_e : 有効材齢(時間),

E_a : みかけの活性化エネルギー (kJ/mol),

R : ガス定数(8.31J/(K・mol)),

T_0 : 基準温度 (293K) ,

T_k : 試験体温度 (K)

である。活性化エネルギーは素反応過程に必要な最小のエネルギーで定まる値を表し、すべての化学反応には活性化エネルギーが存在する。ここでの最小のエネルギーとは、素反応で活性物質を生成し得る系の最小のエネルギーである。しかしながら、セメントの水和反応は複数の化学反応が同時に生じている状態であり、各鉱物がそれぞれの活性化エネルギーを有している^{46, 51, 52, 53}。そのため、すべての素反応をそれぞれの活性化エネルギーを用いて、正確に記すことが困難である。そこで、水和反応という複雑な化学反応全体の活性化エネルギーを表す指標として「みかけの活性化エネルギー」が用いられている。このみかけの活性化エネルギーを用いることで反応速度定数の温度依存性を表すことが出来る。

CEB-FIP MODEL CODE では、普通コンクリートのみかけの活性化エネルギーの値として $E_a/R = 4000 \text{ K}$ となる E_a が与えられている。この値は、普通コンクリートの強度発現性状の温度依存性から得られた値であり、自己収縮の温度依存性についても、水セメント比が30%以上の領域では概ね適用可能であるとされている。日本コンクリート工学会の自己収縮研究委員会の報告書⁵¹でも自己収縮ひずみの予測式の時間項として、式(3-9)に $E_a/R = 4000 \text{ K}$, $T_0 = 293 \text{ K}$ (20°C) を代入した式が採用されている。

3.5.2 シリーズ1 水セメント比 25%~55%

本節では、材齢軸の指標に有効材齢を用いることで、水セメント比25%から55%のセメントペーストにおける温度履歴の影響について検討を行った。ここでの有効材齢は、式(3-9)に示す有効材齢式において $E_a/R = 4000 \text{ K}$ を代入したものである。

図3-30に、普通ポルトランドセメントの結果を、図3-31に中庸熱ポルトランドセメント及び低熱ポルトランドセメントの結果を、図3-32に高炉スラグ混入セメントの結果をそれぞれ示す。

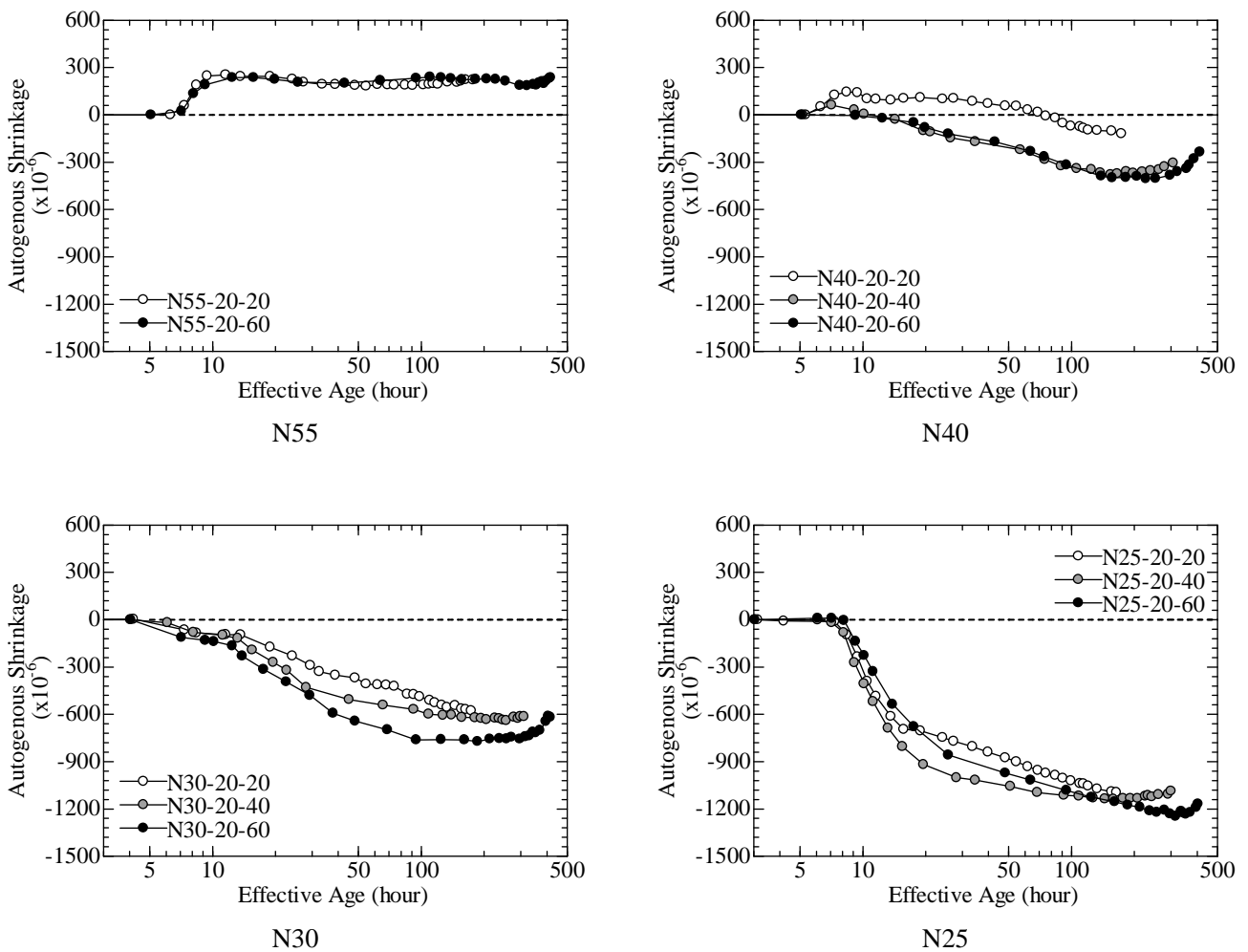


図3-30 自己収縮ひずみの有効材齢による評価 (N)

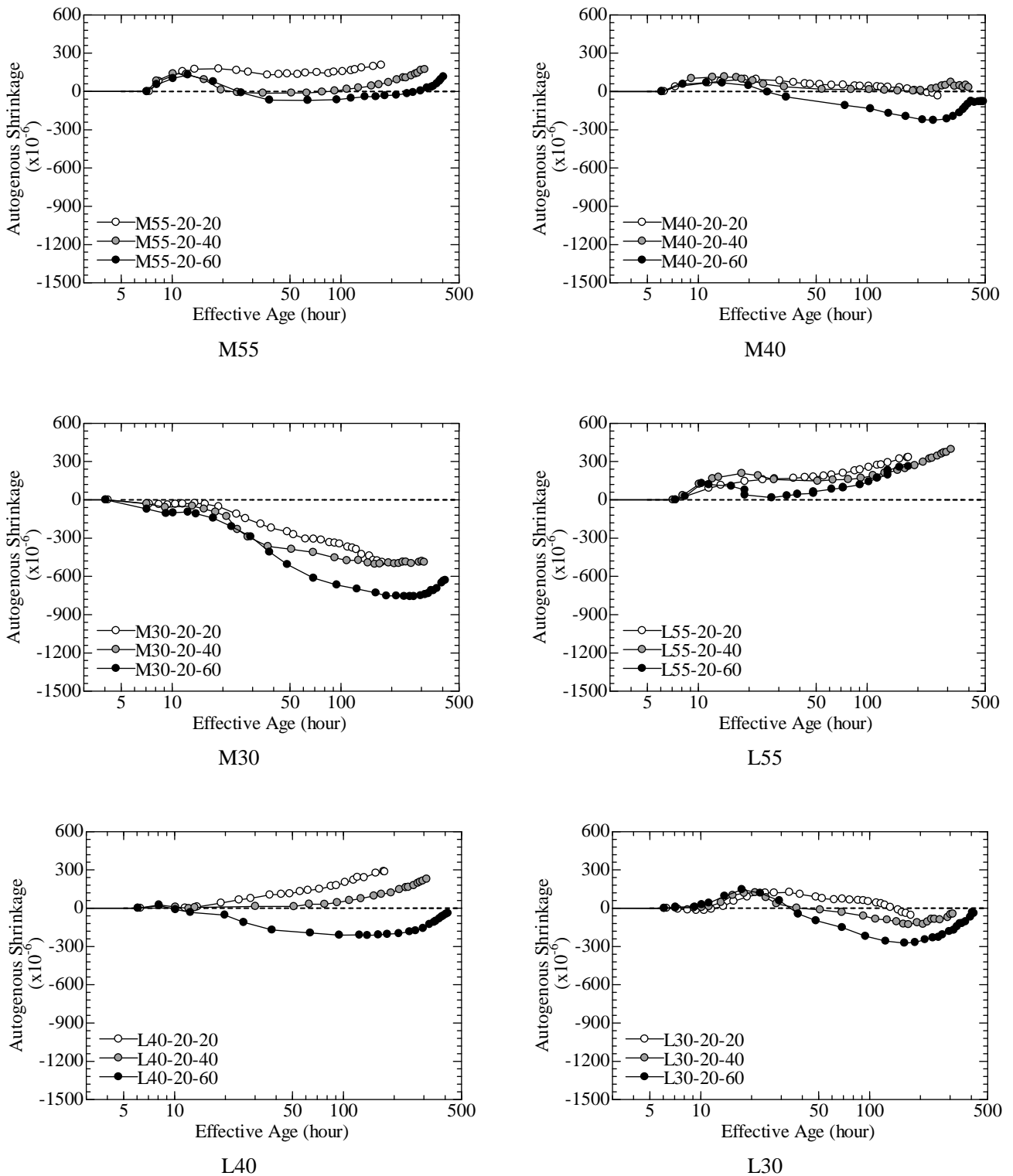


図 3-31 自己収縮ひずみの有効材齢による評価 (M, L)

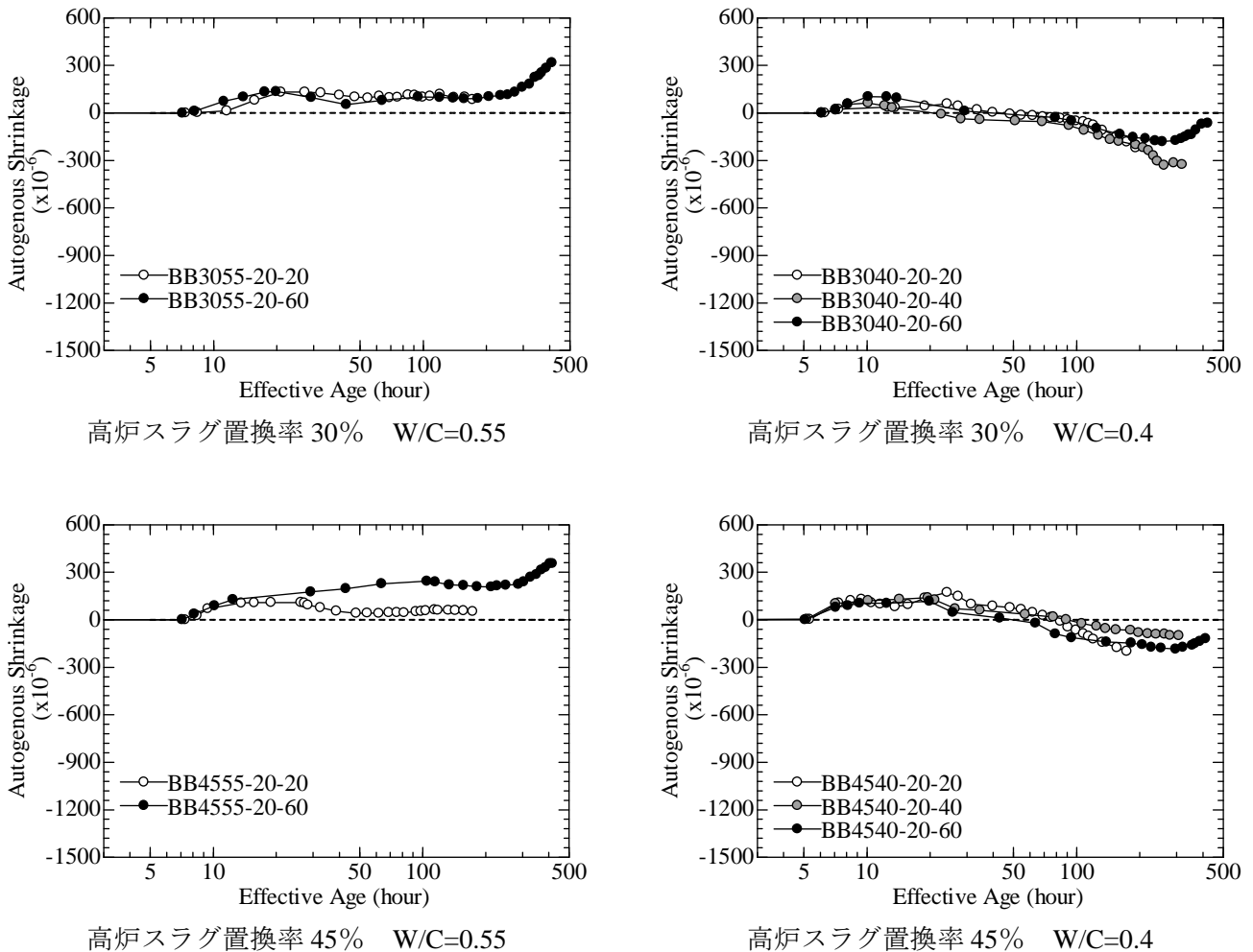


図 3-32 有効材齢による高炉スラグ混入セメントの自己収縮ひずみ評価

図 3-30 に示した普通ポルトランドセメントの系では、N40 の 20°C 一定条件を除き、温度履歴の影響は概ね有効材齢式で評価可能であった。また、N40 についても、材齢 1 日以前の膨張傾向を除けば、収縮挙動は概ね表現できている。

一方、図 3-31 に示した低発熱系セメントを使用した場合には、各温度履歴間の差が大きくなっており、特に数日間にわたる膨張の進行速度については再現されていない。この件に関しては、式 (3-7) から既に明らかになっているように、各鉱物の水和反応率が自己収縮に寄与する影響度合いが異なることに加えて、そもそも各鉱物の活性化エネルギーが異なること、が原因であると考えられるため、低発熱系セメントの自己収縮・膨張挙動の温度依存性を再現するためには更なる検討が必要である。

また、図 3-32 に示す高炉スラグ混入セメントの自己収縮温度依存性状については、普通ポルトランドセメントの系と同程度に、有効材齢が機能している。これは、本実験では高炉スラグ混入セメントのベースセメントとして普通ポルトランドセメントを使用していることに起因するものと考えられる。

3.5.3 シリーズ2 (SFC W/C=15%)

シリカフェームプレミックスセメントの水セメント比 15%のセメントペースト及びモルタルの自己収縮ひずみの試験結果を図 3-33 に示す。

図は、左から練り上がり温度がそれぞれ 10°C, 20°C, 30°C を表しており、各練り上がり温度の中で、+0°C (一定温度) を白抜き、+25°C を灰色、+45°C を黒塗り で表現している。また、セメントペースト試験体の凡例は○、骨材体積比が 49% のモルタル試験体については□で表した。

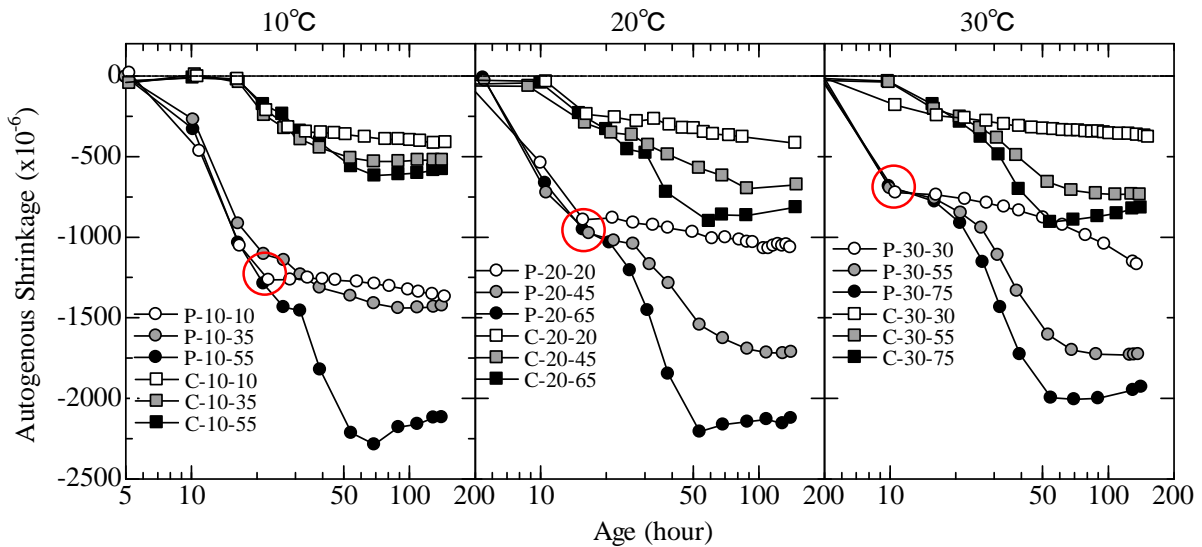


図 3-33 超高強度セメントペーストの各温度履歴化における自己収縮ひずみ (実材齢)

図から確認されるように、超高強度セメントペーストの自己収縮性状は、以下に示す 2 つの点において普通強度領域のセメントペーストの自己収縮性状とは異なる。

1. 図中に赤丸で示した自己収縮進行速度の変曲点までの収縮量を、各練り上がり温度で比較すると、 $10^{\circ}\text{C} > 20^{\circ}\text{C} > 30^{\circ}\text{C}$ となっており、低温のものほど自己収縮量が大きい。これは、高温時に水和反応が促進されるというこれまでの知見とは反対のものである。
2. 変曲点以降の自己収縮量は、高温履歴を経た場合に著しく大きくなり、特に試験体が 45°C 以上の環境温度に晒された場合に顕著である。

また、セメントペーストとモルタルを比較した場合、セメントペーストの収縮性状をモルタル中の骨材が拘束するため、モルタルのほうが自己収縮ひずみ量が小さくなっているが、セメントペーストでみられた 1. や 2. の傾向は、セメントペーストでもモルタルでも変わらないことが分かる。つまり、これらの傾向は、骨材共存下のコンクリートにおいても十分に起こり得る現象と考えられる。

温度履歴の影響を評価するために、3.5.2のように $E_a/R = 4000 \text{ K}$ とした有効材齢式で評価した結果が、図 3-34 である。

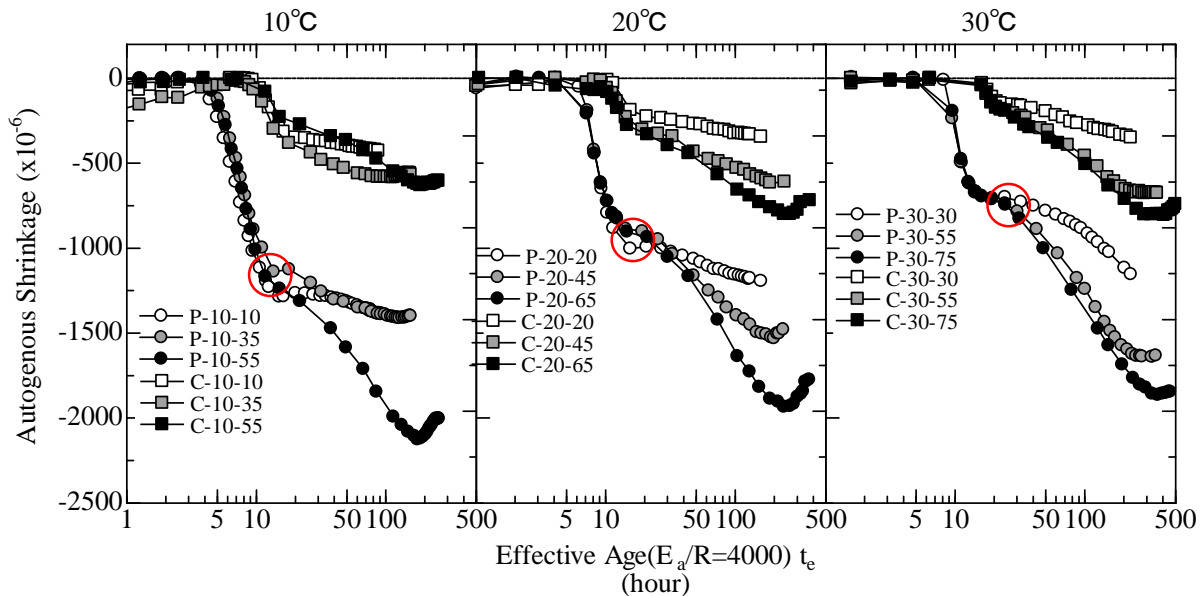


図 3-34 超高強度セメントペーストの各温度履歴化における自己収縮ひずみ (有効材齢)

図中赤丸で示した変曲点を迎えるまでは、いずれの練り上がり温度についても、それぞれの温度履歴を有効材齢で適切に評価できていることがわかるが、その後の材齢では温度履歴の影響を様に表現できておらず、特に、先に述べた試験体温度が 45°C を超える領域では、それ以下の養生温度の試験体と比較して、自己収縮進行速度が大きい。

超高強度コンクリートのようにシリカフュームが混入する系の強度特性は、普通コンクリートとは異なり、若材齢に高温養生を受けた試験体が高い強度を示すことが指摘されている^{54, 55, 56, 57}。これは、シリカフュームが高温域で反応が活性化すること、微粒子であるシリカフュームが密な細孔構造を形成することが原因とされている。この現象を鑑みると、シリカフュームが高温域に反応が活性し、それによってセメントペースト中の水分が消費され、自己収縮量が急激に大きくなることが予測される。

つまり、シリカフュームを含む結合材を使用することが多い超高強度コンクリートでは、これまでのコンクリートと同じく $E_a/R = 4000 \text{ K}$ とした有効材齢式を使用することは適切ではない可能性がある。

アレニウス則に立ち返ると、シリカフュームのような高温域において反応速度が大きくなる化学反応では活性化エネルギーを大きく、超高強度コンクリートにおいても、このような反応活性を再現するためには、みかけの活性化エネルギーを大きくする必要があると考えられる。

そこで、変曲点以降の自己収縮挙動を適切に表現するために必要なみかけの活性化エネルギーを求めるため、 E_a/R を 4000K から 10000K の範囲で変化させた。算定結果を図 3-35 に示す。

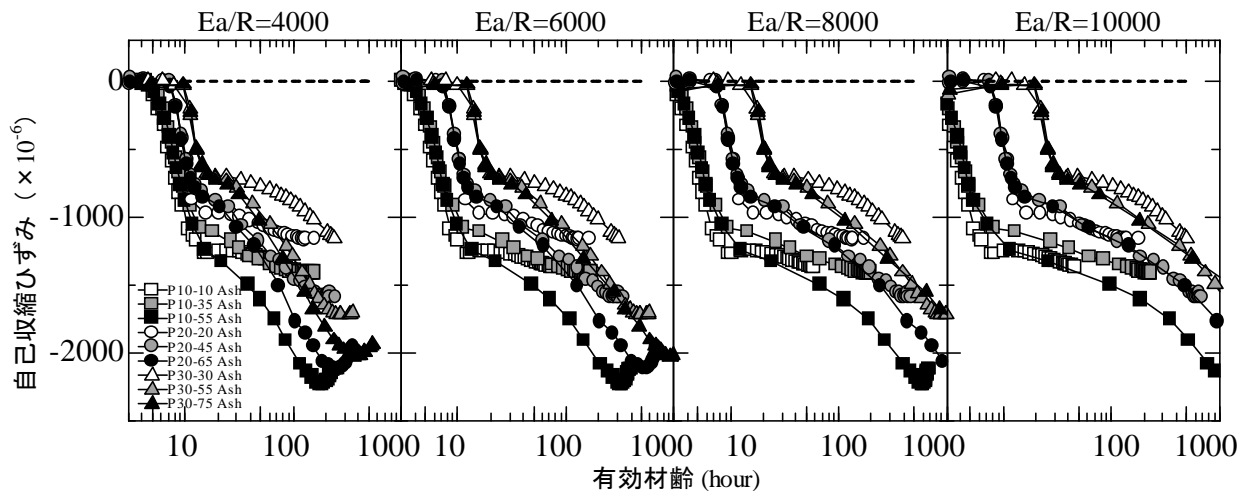


図 3-35 みかけの活性化エネルギーの影響

図 3-35 に示されるように、変曲点以降の自己収縮ひずみを表現するには、 $E_a/R = 10000 \text{ K}$ 程度まで大きくする必要であることがわかる。一方で、みかけの活性化エネルギーを大きくとることは、高温環境の温度活性をより大きく評価することを意味しており、変曲点以前の材齢において、低温のものほど自己収縮量が進行した現象とは逆行している。そのため、 $E_a/R = 10000 \text{ K}$ の図において、各練り上がり温度の自己収縮挙動を比較した場合、 E_a/R が大きくなるほど、若材齢時の収縮挙動が大きく乖離していく様子が見て取れる。

このように、超高強度コンクリートでは、材齢によって自己収縮が温度履歴から受ける影響が異なっており、変曲点以前と以降に分けて議論を行う必要があると考えられる。本節では、以下でそれぞれの材齢域における自己収縮温度依存性について検討を行う。

(1) 変曲点の定義

以降の議論に供するため、セメントペーストにおける自己収縮進行速度の変曲点を以下のように定義した。

変曲点：自己収縮進行速度がピークを迎えた後 $-30 \times 10^{-6}/\text{h}$ を下回る点

この定義に従い、各練り上がり温度における変曲点を導出するため、各温度履歴条件における自己収縮進行速度の算定を行った結果が図 3-36 である。図中には、 10°C から 60°C の各温度一定養生条件下の自己収縮ひずみの進行速度を示してある。

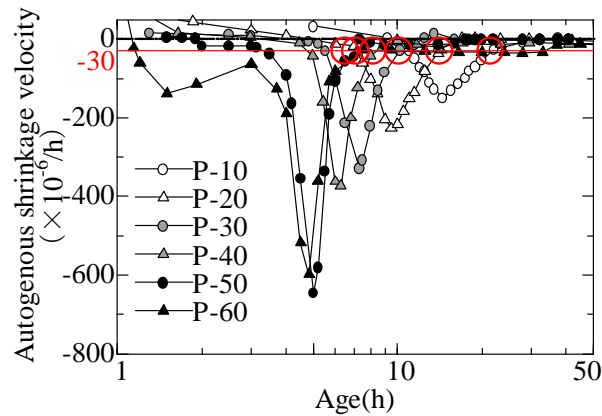


図 3-36 各養生温度における自己収縮進行速度

なお、自己収縮進行速度の算出に際し、図 3-17 に示したような線膨張係数測定用の温度パルスを与える温度履歴を使用した場合、温度パルス区間の温度ひずみの影響によって自己収縮進行速度が経時的に把握できない場合がある。

よって本検討では、同一調合試験体に図 3-18 に示すように、温度パルスを持たない温度一定条件下を与え、この自己収縮ひずみの測定結果において得られた変曲点と同有効材齢を示す材齢を変曲点として採用した。表 3-11 に採用した変曲点の材齢及び自己収縮ひずみ量を示す。

表 3-11 変曲点の材齢及び自己収縮ひずみ量

	10-10	10-35	10-55	20-20	20-45	20-65	30-30	30-55	30-75
$t_e(\text{h})$	16.3	13.7	11.7	15.7	14.3	14.7	14.5	16.0	16.0
$\epsilon_{aut} (\times 10^{-6})$	-1285	-1139	-1167	-1005	-895	-904	-670	-697	-693

(2) 変曲点以降の自己収縮温度依存性

先に述べたように、変曲点以降の自己収縮挙動については、 $E_a/R = 10000 \text{ K}$ とした有効材齢式によって評価が可能である。

図 3-37 に、表 3-11 に示す変曲点を原点としてとった、その後の自己収縮挙動を示す。

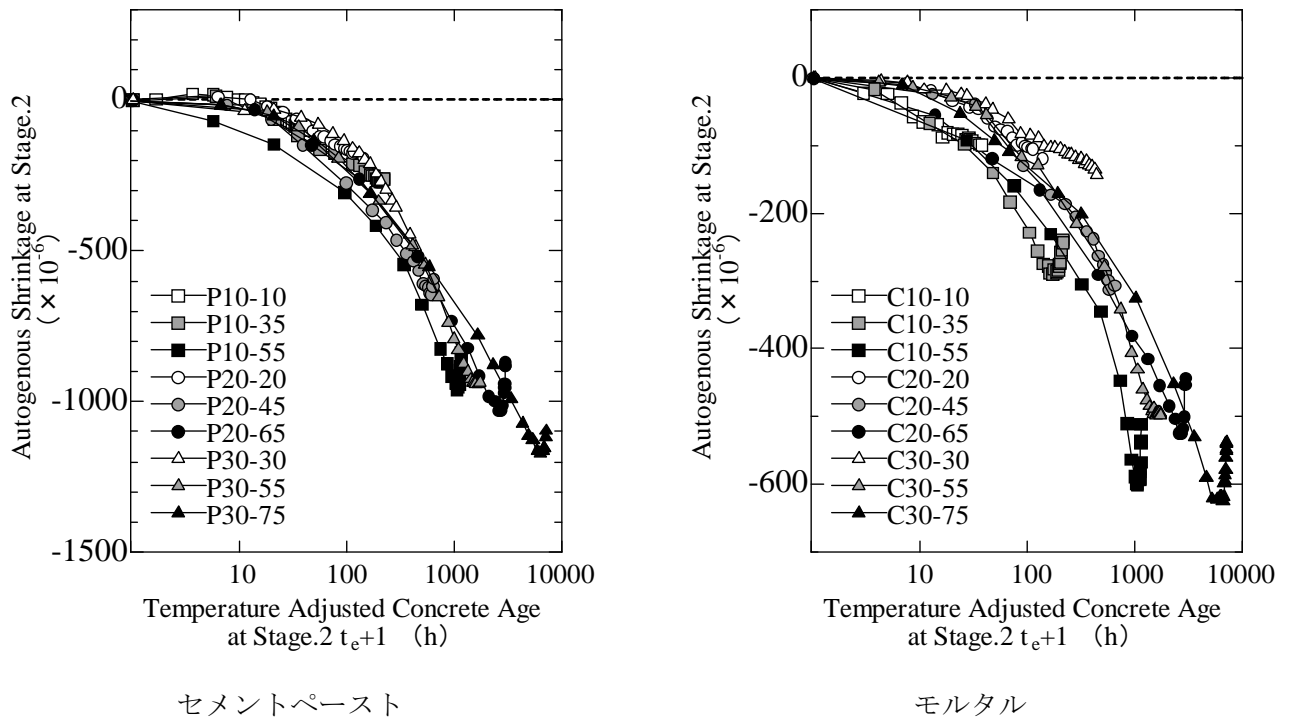


図 3-37 変曲点以降の自己収縮ひずみ

図 3-37 からわかるように、変曲点以降の自己収縮は、練上り温度や、骨材の有無によらず $E_u/R = 10000 \text{ K}$ とした同一の有効材齢式で評価可能であると考えられた。

(3) 変曲点以前の自己収縮温度依存性

図 3-33 において、超高強度セメントペースト及びモルタルでは、変曲点以前に低温のものほど自己収縮が進行する傾向がみられたが、この傾向の温度範囲を見るために、 10°C から 60°C 一定温度養生した同一調合のセメントペーストの自己収縮試験を行った。試験結果を図 3-38 に示す。

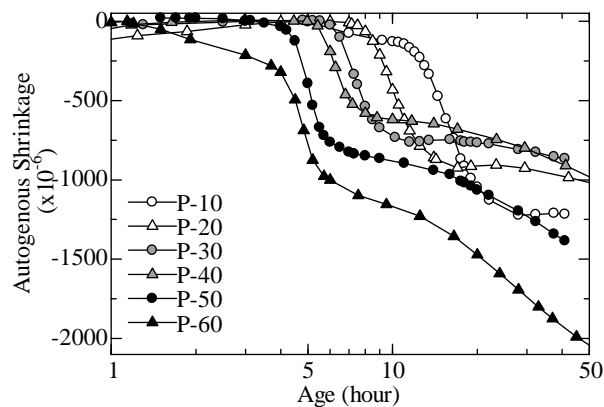


図 3-38 各一定温度養生下における自己収縮ひずみ

また、図 3- 39 には、変曲点以前における自己収縮ひずみ量と、変曲点から材齢 6 日における自己収縮ひずみ量を示した。ここで、図中の凡例 Stage1 は変曲点以前の材齢、Stage2 は変曲点以降の材齢を意味している。

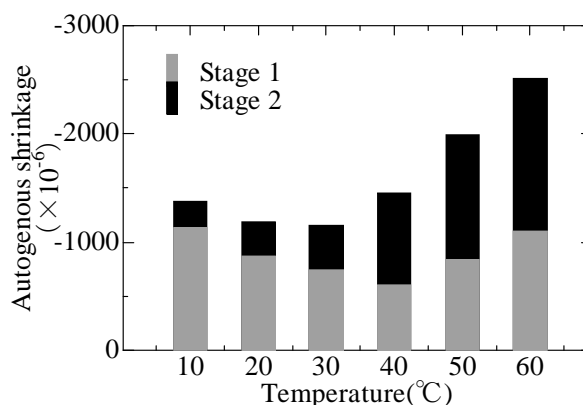


図 3- 39 各一定温度養生下における変曲点以前と以後の自己収縮ひずみ量

図 3- 39 から明らかなように、変曲点以前の自己収縮ひずみ量を各温度で比較した場合、養生温度が 40°C 以下の領域では、養生温度が低いものほど大きくなる結果が得られている。これは、図 3- 33 での試験結果を再現するものであった。

一方、50°C、60°C 一定養生条件では自己収縮ひずみ量が 40°C のものより大きくなる結果が得られた。この結果は、変曲点の決定づけるメカニズムは、温度の影響を受けることが示唆する。

50°C 付近で反応が変容する水和生成物として、エトリンガイトが挙げられる^{58, 59}。エトリンガイトは 50°C 以上の領域ではモノサルフェートに転移するとされており、また、高橋ら⁶⁰の実験で、自己収縮ひずみに若材齢に生じる変曲点の材齢とエトリンガイト生成量のピークが一致することを踏まえると、変曲点以前の自己収縮にエトリンガイトの生成が寄与している可能性が高い。これらの変曲点の決定メカニズムについては、詳細な水和反応解析を行った第 4 章で詳述する。

(4) 水和収縮による確認

Mounanga et al は、極若材齢では水和収縮によるメニスカスの形成が自己収縮というマクロな体積変化として現れることを指摘しており、変曲点以前に進行する自己収縮の因子の一つとしても水和収縮が想定される。

笠井⁶¹は W/C=50% の各種セメントペーストにおいて、養生温度が高くなるほど水和収縮進行速度のピークを取る材齢が早くなり、値が大きくなること実験的に示している。この傾向は図 3- 36 に示す、本実験で得られた変曲点以前の自己収縮進行速度の傾向と一致している。そこで、本研究においても、10°C から 60°C 一定温度養生下で、水和収縮の測定を行った。

得られた結果を有効材齢 ($E_a/R = 4000 \text{ K}$) で整理したものが図 3- 40 である。

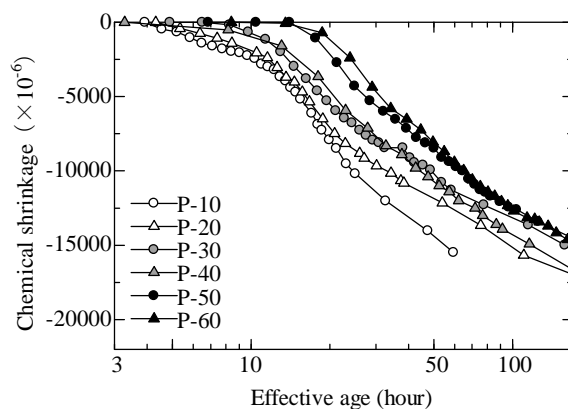


図 3-40 水和収縮の試験結果

図 3-40 に示されるように、有効材齢 ($E_a/R = 4000 \text{ K}$) で評価した場合、水和収縮は同一有効材齢では低温養生のものほど水和収縮量が大きくなる結果であった。この傾向は、図 3-34 に示す自己収縮挙動と同様であり、変曲点以前の材齢においては、水和収縮が自己収縮に影響を及ぼす可能性が示唆された。

一方で、変曲点以降の自己収縮挙動と水和収縮については関連はなく、水和収縮が自己収縮に及ぼす影響度合いについては不明な点が多い。

本論文では、変曲点以前の自己収縮メカニズムに関して、従来のアプローチとは異なる観点から説明を試みる。これらの考察は第 4 章で詳述する。

3.5.4 シリーズ3 (SFPC W/C=13%~20%)

3.5.3 では、水セメント比 15%の超高強度セメントペーストの自己収縮温度依存性について詳細を述べた。本節では、3.5.3 の変曲点以降の自己収縮温度依存性について、異なる調合条件下においても再現されるものであるかを確認する。

試験体として、結合材としてシリーズ2とは異なる種類のシリカフュームプレミックスセメントを使用し、水セメント比が 13%、16.5%、20%のセメントペーストを作製した。また、水セメント比が 16.5%のものについては、シリカフューム置換率が 7.5%から 17.5%の3水準のセメントペーストを作製し、水セメント比とシリカフューム置換率の影響について検討を行った。

なお、本節で使用しているシリカフュームプレミックスセメントは、シリーズ2のセメントとはベースセメント及び使用したシリカフュームの種類が異なる点で注意を要する。特に、シリカフュームの比表面積は自己収縮ひずみに大きな影響を与えるため、3.5.3 の試験結果と定量値を比較することはできないことを付記する。

本シリーズの自己収縮試験結果を、実材齢で整理したものを図 3-41 に、式(3-1)において $E_a/R = 4000 \text{ K}$ として整理したものを図 3-42 に、同じく $E_a/R = 10000 \text{ K}$ として整理したものを 図 3-43 にそれぞれ示した。それぞれの図中において、左段は水セメント比 13%、中央は水セメント比 16.5%、右段は水セメント比 20%の試験結果である。

それぞれの図から確認できるように、変曲点以降の自己収縮挙動は、3.4.3 の試験結果と同様に、高温域で自己収縮が急激に進行しており、 $E_a/R = 4000 \text{ K}$ とした有効材齢では適切な評価ができていない。一方、図 3-43 に示したとおり、 $E_a/R = 10000 \text{ K}$ とした有効材齢を用いた場合には、いずれの水セメント比の場合においても、若材齢から温度履歴の影響を適切に評価できていることが分かる。このことは、異なる比表面積を有するシリカフュームを使用した場合であっても、高温時の反応活性度合いは概ね同様であることを意味している。

以上から、超高強度セメントペーストの自己収縮温度依存性の評価にあたり、異なるシリカフュームを使用した場合においても、有効材齢式中におけるみかけの活性化エネルギーを大きくとることで対応することが可能であるが確認された。

また、変曲点以前の自己収縮挙動に着目すると、3.4.1 で述べたように、図 3-42 中の赤丸で示した変曲点における自己収縮ひずみ量は、水セメント比が小さいものほど大きくなっている。また、シリカフューム置換率の影響については、3.4.3 で述べたように、本実験の範囲内ではほとんど他の調合と差異がみられず、温度履歴の影響も確認されなかった。

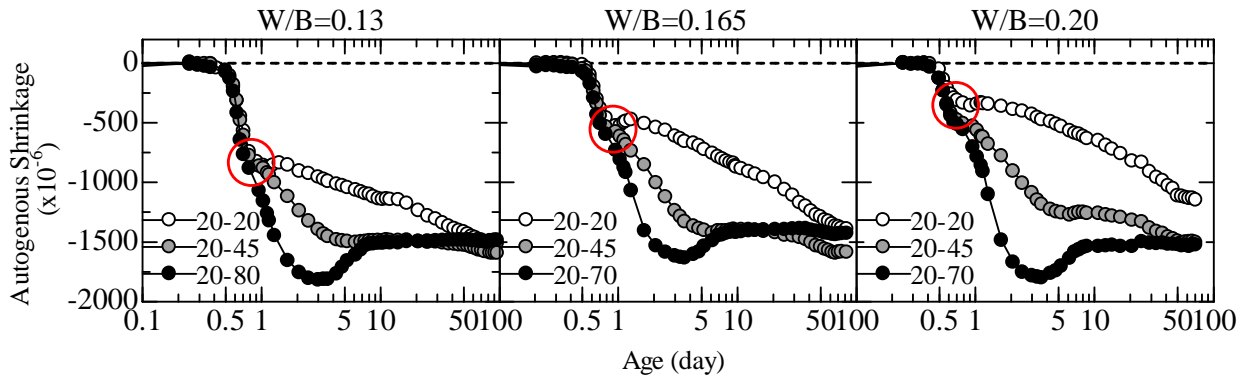


図 3-41 超高強度セメントペーストの各温度履歴化における自己収縮ひずみ（実材齢）

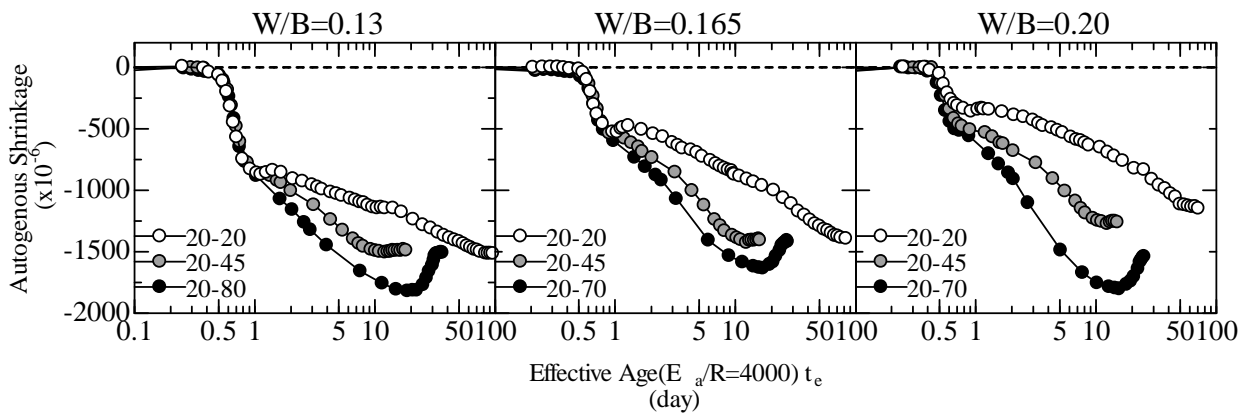


図 3-42 超高強度セメントペーストの各温度履歴化における自己収縮ひずみ（有効材齢 4000）

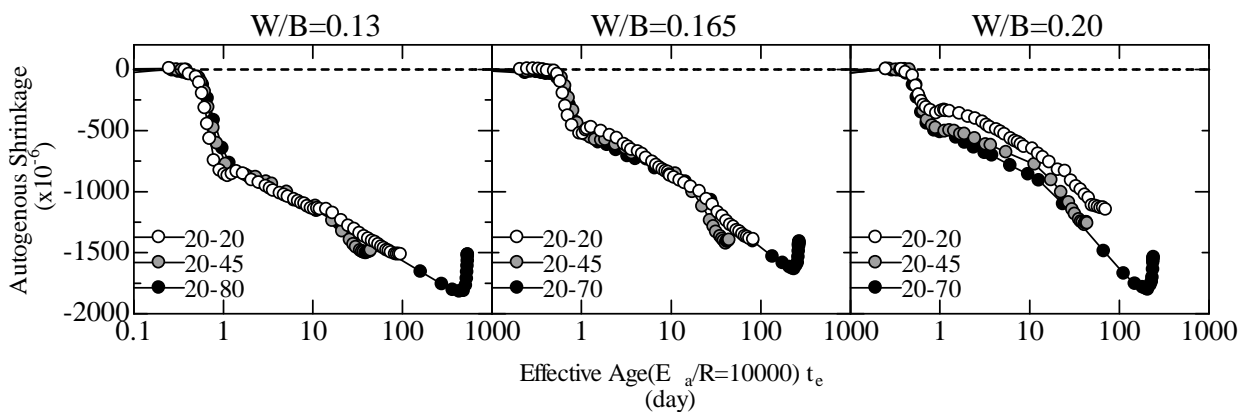


図 3-43 超高強度セメントペーストの各温度履歴化における自己収縮ひずみ（有効材齢 10000）

3.6 自己収縮ひずみに及ぼす骨材の影響

自己収縮ひずみに及ぼす骨材の影響については、田澤らの研究が詳しいが、超高強度領域では、実験数が未だ少ないため、本節では、超高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす骨材の影響として、骨材寸法及び骨材量の影響について実験的検討を行った。

3.6.1 骨材寸法の影響

ここでは、骨材寸法の影響を確認するため、同一種類の粗骨材を最大寸法 20mm のコンクリートとして打設した場合と、粗骨材を粉砕し最大寸法 5mm のモルタルとした場合について、比較検討を行った。両者の骨材体積比 V_a は 49% で統一し、それぞれの記号を SFC15-M49 と SFC15-C49 と表記した。20°C 一定条件並びに 65°C 履歴条件における自己収縮ひずみの算定値を図 3-44 に示す。

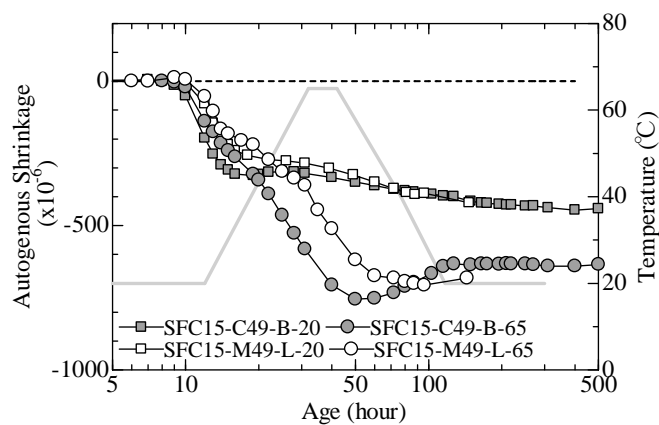


図 3-44 自己収縮ひずみに及ぼす骨材寸法の影響

図から材齢 150 時間における自己収縮ひずみ量は、いずれの温度履歴条件下でも、異なる最大粗骨材寸法を有する試験体で同程度となっていることが確認できる。しかし、65°C 履歴条件において、高温履歴中のひずみ履歴は、両者で異なっている。これは、骨材寸法の影響というよりむしろ、2.3 で示したように測定手法の影響によるものと考えられる。

骨材寸法が体積変化に与える影響に関しては、石灰石骨材を細骨材で利用した場合、粗骨材として利用した場合と比べ収縮低減への寄与が小さくなること⁶²や、コンクリートのヤング係数の推定においても骨材粒径の影響があることが指摘されている⁶³。また、仕入⁶⁴は、骨材寸法が乾燥収縮に及ぼす影響に関して、細粒骨材のものほど空隙量が大となり、骨材の拘束効果が小さくなるため収縮量が大きくなる、との考察を行っている。これは、細粒骨材になるほど骨材の比表面積が増大し、遷移帯のような骨材周辺の空隙が増大することを意味していると思われるが、本研究における水セメント比が 15% の超高強度領域では、骨材寸法の影響は見られなかった。この件に関しては、シリカフェームの影響、消泡剤の影響等の観点からメカニズムを検討する必要があると考えられる。

3.6.2 骨材量の影響

セメントペーストがもつ収縮駆動力を骨材が拘束するというモデルは古くから提案されており、 V_a をパラメータとした多くの乾燥収縮予測式が提案されている^{65, 66}。これらの複合則モデルは自己収縮ひずみにおいても適用可能であるとの報告があるが、セメントペーストの物性は材齢によって変化するため、自己収縮ひずみに複合則を応用する場合は増分による手法を用いるべきである。

本論文では複合則として増分型の Hobbs モデル⁶⁷ (式(3-9)) を用いて自己収縮に及ぼす V_a の影響に関して評価を試みた。また、本論文ではセメントペーストからモルタル・コンクリートの自己収縮を推定する手法と、モルタルからコンクリートの自己収縮を推定する手法について比較検討を行った。

$$\Delta \varepsilon_{m,c} = \Delta \varepsilon_{p,m} \frac{(1-V_a)(K_a/K_{p,m}+1)}{\{1+K_a/K_{p,m}+V_a(K_a/K_{p,m}-1)\}} \quad (3-10)$$

$$K_a = \frac{E_a}{3(1-2\nu_a)} \quad (3-11)$$

$$K_{p,m} = \frac{E_{p,m}}{3(1-2\nu_{p,m})} \quad (3-12)$$

ここで $\varepsilon_{m,c}$: コンクリートもしくはモルタルの自己収縮ひずみ($\times 10^{-6}$),

$\varepsilon_{p,m}$: セメントペーストもしくはモルタルの自己収縮ひずみ($\times 10^{-6}$),

K_a : 骨材の体積弾性係数,

V_a : 骨材が占める体積割合,

E_a : 骨材のヤング係数 (49GPa と仮定),

$K_{p,m}$: セメントペーストもしくはモルタルの体積弾性係数,

$V_{p,m}$: セメントペーストもしくはモルタルが占める体積割合,

$E_{p,m}$: セメントペーストもしくはモルタルのヤング係数,

ν_a : 骨材のポアソン比 (0.16 と仮定),

$\nu_{p,m}$: セメントペーストもしくはモルタルのポアソン比 (0.16 と仮定)

である。Hobbs モデルを採用するにあたり、セメントペーストのヤング係数並びにポアソン比が必要とされる。

本節では、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱セメントペースト試験体を作製し、所定の材齢において圧縮試験並びにヤング係数試験を実施した。得られた測定結果を有効材齢 ($E_a/R = 4000 \text{ K}$) で整理した結果を図 3-45 に、圧縮強度とヤング係数を図 3-46 に示した。

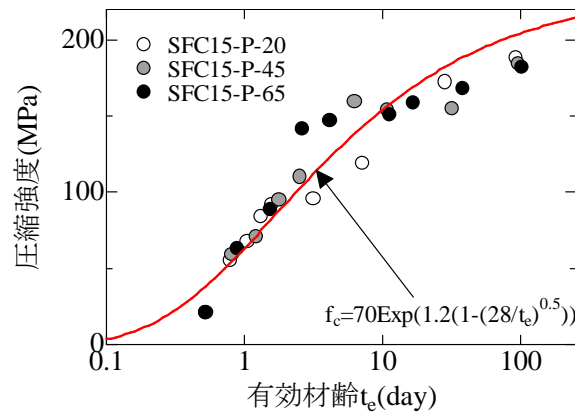


図 3-45 圧縮試験結果

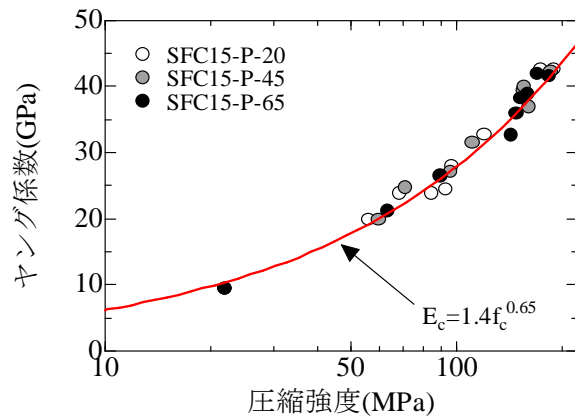


図 3-46 圧縮強度とヤング係数の関係

自己収縮ひずみの算定に際し、以上の実験値は図中に示す式で表現した値を使用した。モルタルのヤング係数の経時変化はセメントペーストの経時変化を用いて複合則⁶⁸から推定した値を使用した。

3.5節で述べたように、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみは、有効材齢 ($E_a/R = 4000 \text{ K}$) では表現できないため、みかけの活性化エネルギーを大きくした有効材齢 ($E_a/R = 10000 \text{ K}$) を用いて図 3-47 のように表現した。

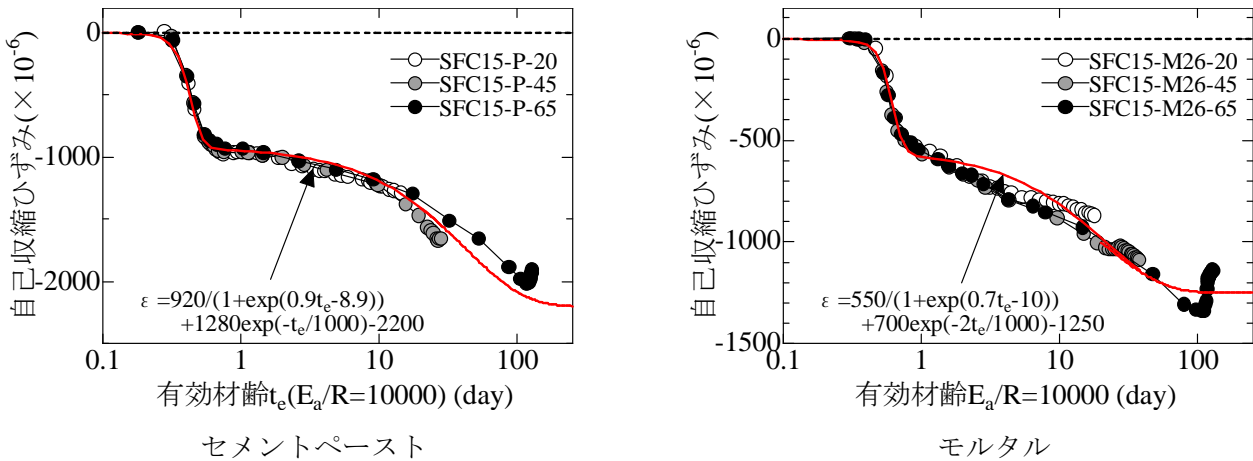


図 3-47 自己収縮ひずみ試験結果と表現式

材齢6日時点の各温度条件における自己収縮ひずみの実験値と増分型 Hobbs モデルによる推定値を図 3-48 に示す。図中において、セメントペーストからモルタル、コンクリートの自己収縮ひずみを推定した結果は実線、モルタルからコンクリートを予測した結果は点線で示されている。

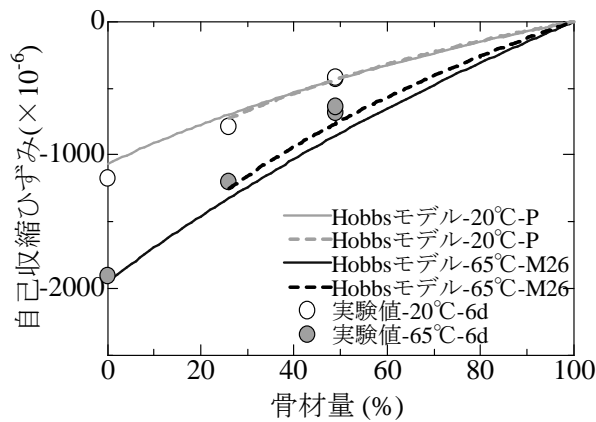


図 3-48 Hobbs モデルと実験値の比較

図から確認されるように、セメントペーストからモルタル、コンクリートの自己収縮ひずみを予測する手法とモルタルからコンクリートの自己収縮ひずみを予測する手法には大きな差異は見られず、いずれの手法によってもよい推定結果が得られている。

このことから、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみは、セメントペーストの自己収縮ひずみ及びヤング係数を用いて、Hobbs モデルによって高精度で予測可能であることが確認された。

3.7 超高強度コンクリートの自己収縮ひずみ予測式の提案

日本コンクリート工学会によって提案されている自己収縮ひずみ予測式

$$\varepsilon_c(t_e) = \gamma \times \varepsilon_{c0} \times \beta(t_e) \quad (3-13)$$

$$\varepsilon_{c0} = 3070 \exp\{-7.2(W/B)\} + 50 \left\{ 1 - \exp\left(-1.2 \times 10^{-6} \times (T_{\max} - 20)^4\right) \right\} \quad (3-7)$$

$$\beta(t) = 1 - \exp\{-a(t_e - t_{e0})^b\} \quad (3-14)$$

は、水セメント比が20%以上の領域を対象としており、またシリカフュームが混入する系において十分な精度を保証していない。

本節では、3.4 から 3.6 節で得られた実験値や知見をもとに、超高強度コンクリートに適用可能な自己収縮予測式の提案を行う。

3.7.1 予測式の方針

水セメント比が小さいコンクリートの自己収縮において、変曲点を境に自己収縮ひずみの進行速度が大きく変化する現象に関しては、3.5 節で述べた。この自己収縮進行速度の急激な変化は、極低水セメント比の超高強度コンクリートに特有の現象であり、既往の自己収縮予測式では考慮されていない点である。その一方で、超高強度コンクリートの実大模擬柱には、若材齢時に無視できないひび割れが発生する実験事実も示されており、この現象を適切に評価するためには、極若材齢における体積変化の予測精度を向上させる必要性が高い。

そのため、本予測式では、変曲点以前とそれ以後の材齢でそれぞれの自己収縮挙動を表現できるように、下式の構成からなる予測式の構築を目指す。

$$\varepsilon_{shmax} = \varepsilon_{sh1} + \varepsilon_{sh2} \quad (3-15)$$

ここで、 ε_{shmax} : 終局自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$),
 ε_{sh1} : 変曲点以前の自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$),
 ε_{sh2} : 変曲点以後の自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

であり、3.6 節で示した骨材量の影響を明示するため、以下に示す手順で提案する。

1. セメントペーストの自己収縮予測式を作成する。
2. Hobbs モデルを使用して、コンクリートの自己収縮ひずみに換算する。

3.7.2 検証用コンクリート試験体の自己収縮ひずみ

本予測式は、これまでに得られたセメントペーストの自己収縮性状をまずモデル化し、次に複合則モデルと組み合わせてコンクリートの自己収縮ひずみを求める。得られたコンクリートの予測値の精度を検証する必要があるため、3.3 で述べたような材料、調合のコンクリートを作製し、自己収縮試験を実施した。温度履歴として、20°C一定条件と、最高到達温度が80°C、もしくは70°Cの高温履歴条件の2種類を与えた。

3.7.3 コンクリートの線膨張係数に関する取扱い

検証用試験体において、温度が変化する系で自己収縮ひずみを算定する場合、線膨張係数が必要となる。しかしながら、コンクリート試験体では、粗骨材が混入するため試験体断面が大きくならざるをえず、若材齢時の線膨張係数を実験的に得ることは容易ではない。そのため、一般的にコンクリートの線膨張係数は一定値 ($10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) が用いられることが多いが、実際のコンクリートでは水和に伴い線膨張係数は変化するため、線膨張係数の時間依存性を考慮しない場合、自己収縮ひずみを適切に評価できない場合がある。ここでは、コンクリートの線膨張係数の推定を以下の手順で行った。

2.4 節において、線膨張係数自己収縮ひずみ測定装置を用いて、シリカフェームプレミックスセメントペーストの線膨張係数を取得した。得られた実験値をアレニウス則による有効材齢 ($E_a/R = 10000 \text{ K}$) で整理した結果が図3-49である。

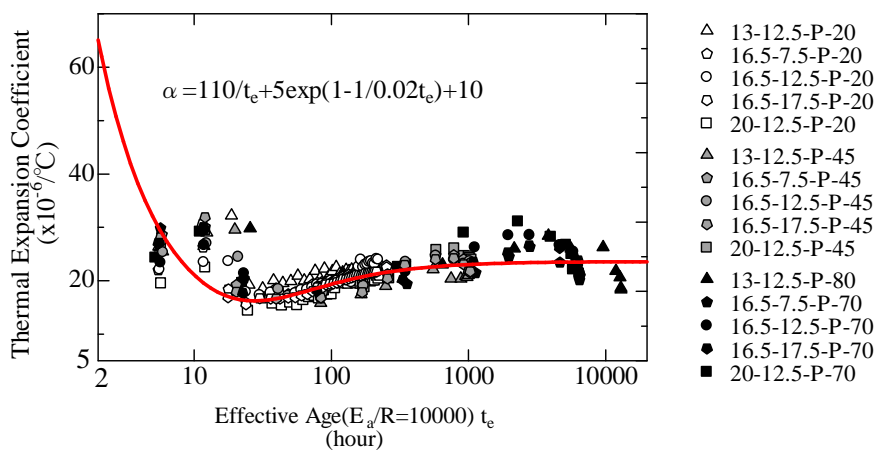


図3-49 超高強度セメントペーストの線膨張係数の経時変化

また、線膨張係数における骨材とセメントペーストの複合則に関しては、2.4 節で述べた実験式(3-16)を用いた。

$$\alpha(x) = \frac{1}{\frac{1-x}{\alpha_p} + \frac{x}{\alpha_a}} \quad (3-16)$$

ここで、 x ：骨材量体積比、

$\alpha(x)$ ：骨材量体積比 x における線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、

α_p ：セメントペーストの線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、

α_a ：骨材の線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

である。

式(3-16)の利用に際し、コンクリート中の細骨材および粗骨材の線膨張係数が必要となるが、実際に骨材の線膨張係数の測定を行うことが困難であるため、骨材の線膨張係数は以下の方法で決定した。

すなわち、高温履歴を受ける試験体で、温度下降域の 30°C から 20°C の範囲において、自己収縮および自己膨張が生じないと仮定して当該範囲の線膨張係数を算出し、式(3-16)によるコンクリートの線膨張係数の推定値が上記の算出値と概ね一致するように骨材の線膨張係数 ($\alpha_a = 7.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) を定めた。

3.7.4 コンクリートの自己収縮試験結果

以上の手順で得られた線膨張係数と温度変化量から得られる温度ひずみを全ひずみから差し引くことで自己収縮ひずみの算定を行った。 20°C 条件および高温履歴条件におけるコンクリートの自己収縮ひずみの算定結果を図 3-50 に示す。

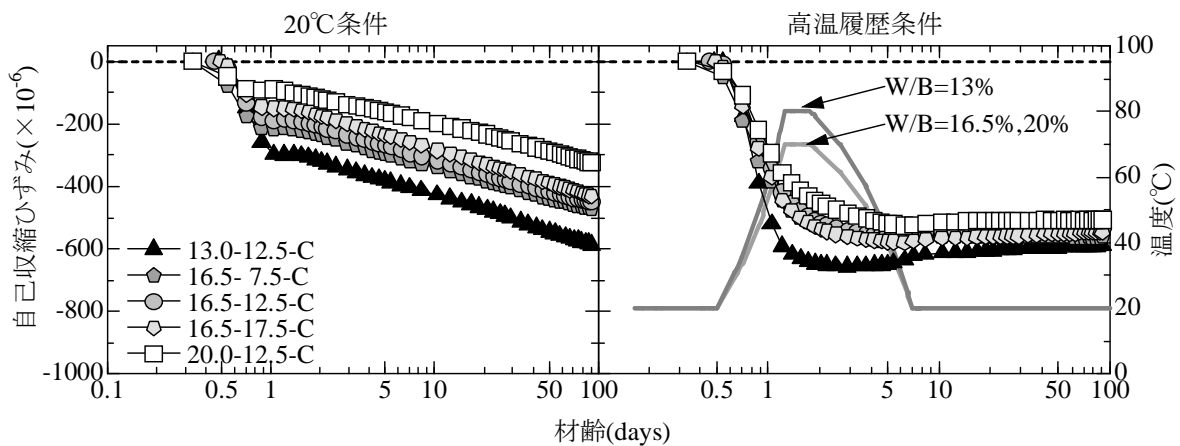


図 3-50 コンクリートの自己収縮ひずみ

3.7.5 変曲点以前の材齢に進展する自己収縮に及ぼす調合要因

変曲点以前の自己収縮ひずみに影響を及ぼす因子として、著者らはすでに練上り温度の影響、水セメント比の影響があることを示したが、ここでは得られた試験結果を要因ごとに再整理を行った。

図 3- 51 に 20℃条件下における各セメント比，シリカフューム置換率と ϵ_{sh1} の関係を示す。

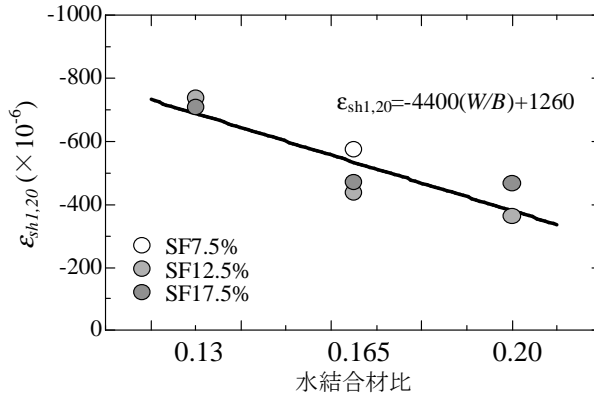


図 3- 51 各水結合材比，シリカフューム置換率における $\epsilon_{sh1,20}$

図より，変曲点以前の自己収縮ひずみと水セメント比の関係式は以下のように記せる。

$$\epsilon_{sh1,20} = -4400(W/C) + 1260 \quad (3-17)$$

ここで， $\epsilon_{sh1,20}$ ：練上り温度が 20℃条件時の変曲点以前の自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)，

w/c ：水セメント比 (-)

である。また，練り上がり温度の影響については，図 3- 52 を参考に 20℃一定養生を基準として規格化した図 3- 52 によって係数 τ として下式のように示す。

$$\epsilon_{sh1} = \tau \cdot \epsilon_{sh1,20} \quad (3-18)$$

ここで， ϵ_{sh1} ：ステージ 1 の自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)，

τ ：練上り温度の影響を表す係数

である。

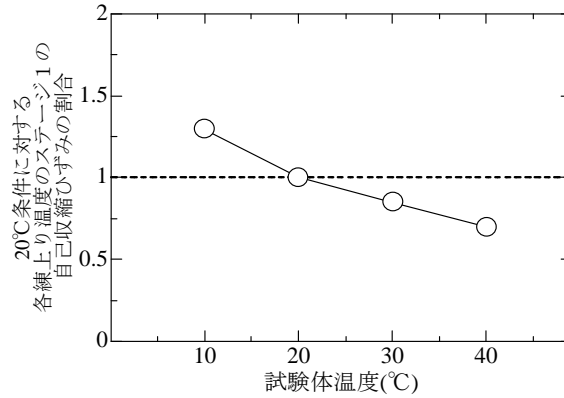


図 3-52 様々な練上り温度での ϵ_{sh1}

3.7.6 終局自己収縮ひずみ

図 3-53 に各調合条件について本検討の範囲内で得られたセメントペーストの最大の自己収縮ひずみ（以下，最大ひずみ）を水セメント比ごとに示す。

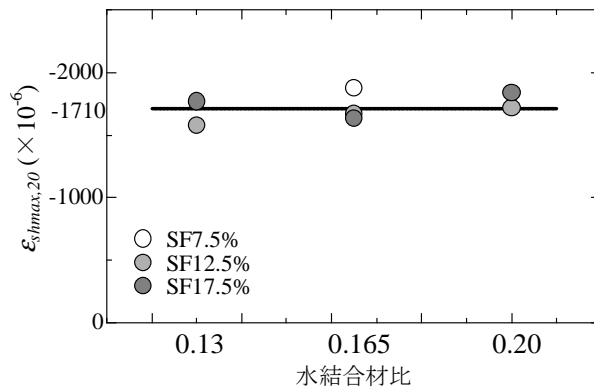


図 3-53 各水結合材比，シリカフューム置換率における $\epsilon_{sh1,20}$

図から，超高強度セメントペーストの最大ひずみは水セメント比およびシリカフューム置換率で大きな差異はなく，概ね一定値であった。また，いずれの調合条件でも，高温履歴条件で最大ひずみが得られた。よって，練り上がり温度が 20°C の場合の終局自己収縮ひずみは，以下のように一定値とした。

$$\epsilon_{shmax,20} = -1710 \quad (3-19)$$

ここで， $\epsilon_{shmax,20}$ ：練り上がり温度が 20°C 条件時の最大ひずみ ($\times 10^{-6}$)

である。以上から，変曲点以前の自己収縮ひずみ量及び，終局の自己収縮ひずみ量を決定した。よって練り上がり温度が 20°C 条件における変曲点以降の自己収縮ひずみは式(3-20)のように表現できる。

$$\varepsilon_{sh2} = \varepsilon_{shmax,20} - \varepsilon_{sh1,20} \quad (3-20)$$

3.5.2 で述べたように、変曲点以降の自己収縮ひずみは練り上がり温度の影響を受けないため、いずれの練り上がり温度でも同一の値を取る。したがって、任意の練り上がり温度における最大ひずみは式(3-21)で表現することができる。

$$\varepsilon_{shmax} = \varepsilon_{sh1} + \varepsilon_{sh2} \quad (3-21)$$

3.7.7 セメントペーストの自己収縮表現式

超高強度コンクリートの自己収縮挙動において特徴的な点である、極若材齢では低温のものほど自己収縮が進行する傾向は、練り上がり温度の影響を表す係数 τ で、その後の材齢では高温履歴を受けるものほど自己収縮が急激に進行する傾向は有効材齢式の見かけの活性化エネルギーを $E_a/R = 10000 \text{ K}$ とすることで表現した。

本節では、セメントペーストの各材齢における自己収縮ひずみの進行速度を表現するために、式(3-22)に示す自己収縮予測式を提案する。

$$\varepsilon_p(t_e) = \frac{-\varepsilon_{sh1}}{1 + \exp(t_e - a)} - \varepsilon_{sh2} \cdot \exp\left(-\frac{t_e}{1000}\right) + \varepsilon_{shmax} \quad (3-22)$$

ここで、 $\varepsilon_p(t_e)$: 有効材齢 t_e におけるセメントペーストの自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$),

a : 凝結に関する係数 (時間)

である。

先に述べたように、超高強度コンクリートの自己収縮挙動においては変曲点の前後で自己収縮進行速度が大きく異なる。そこで、式中の第1項、第2項でそれぞれ、変曲点の前後の自己収縮ひずみの進行程度を表現することとし、それぞれの進行速度に応じた関数を適用した。

また、第1項に関しては、練り上がり温度や SP 量によって決まる係数 a を用いることで、自己収縮進行開始材齢を表現できる関数とした。第2項に関しては、いずれの調合条件、温度条件も、有効材齢に対して同一の進行速度を持つこととした。

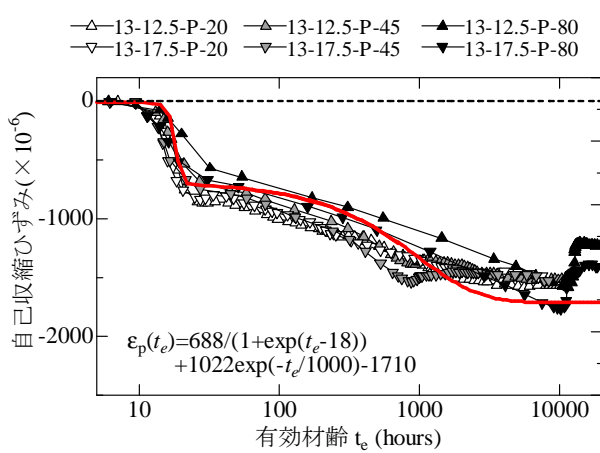
普通コンクリート領域の自己収縮ひずみは、変曲点以前の自己収縮ひずみが極めて小さい、あるいは膨張側に推移する。そこで、式(3-22)において、仮に第1項の値をゼロとした場合、式(3-22)は式(3-23)で表される。

$$\varepsilon_p(t_e) = \varepsilon_{shmax} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t_e}{1000}\right) \right\} \quad (3-23)$$

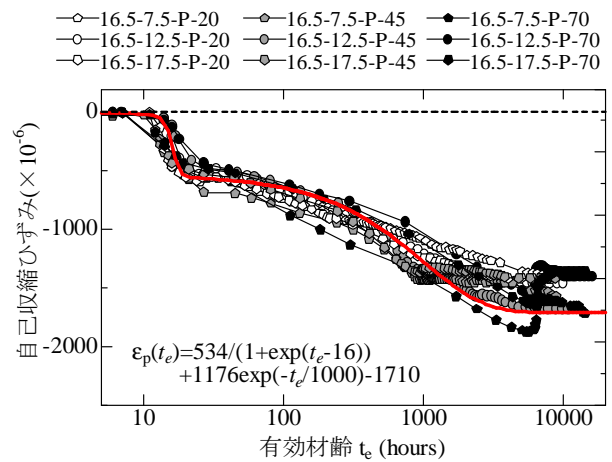
この式形は、式(3-3)、(3-7)、(3-14)で示した予測式に類似している。このことから、本式は、式の中に新たな係数を付与することで、超高強度コンクリート領域に限らず、普通コンクリート領域にも拡張可能であるといえる。

なお、本予測式では、簡素化のため水セメント比と $\varepsilon_{sh,1,20}$ の関係を直線で表現したため、水セメント比が 28.6%以上の領域で、 $\varepsilon_{sh,1,20}$ が膨張側に推移することになる。この値は、既往の研究と比較してやや小さいが、更なるデータの蓄積により任意の水セメント比についても適用可能な式の提案が期待される。

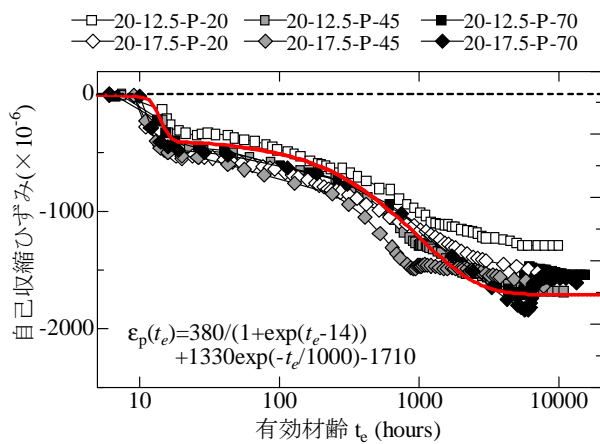
図 3- 54 にそれぞれの調合条件について、セメントペーストの自己収縮予測式と測定値の比較を示す。



W/C=13% セメントペースト



W/C=16.5% セメントペースト



W/C=20% セメントペースト

図 3- 54 セメントペーストの自己収縮ひずみの測定値と予測式の比較

3.7.8 骨材の影響

超高強度コンクリートの自己収縮ひずみに及ぼす骨材量の影響に関しては、3.6.2 において、Hobbs モデルで概ね評価可能であることを確認した。本予測式でも骨材量の影響は Hobbs モデルによって表現することとする。

Hobbs モデルに使用する、セメントペーストのヤング係数やポアソン比等の物性は材齢によって変化するため、自己収縮ひずみに複合則を応用する場合、3.6.2 で行ったようにこれらの物性値の経時変化も考慮することが望ましい。

しかしながら、コンクリートと比較して、セメントペーストの物性に関するデータは著しく少なく、また実際のコンクリートの利用に際しても、同時にセメントペーストの物性を経時的に得ることは困難である。

そのため、本予測式ではセメントペーストのポアソン比とヤング係数については、材齢 28 日時典の値（一定値）を使用することとした。なお、セメントペーストのヤング係数を一定値とした場合と、ヤング係数が増えるモデルを用いた場合の予測精度の誤差は 10% 以内であることを確認している。

3.7.9 コンクリート試験体による検証

以上の検討から、本予測式では、式(3-22)に示すセメントペーストの自己収縮ひずみ、および式(3-10)に示す骨材量の影響を用いることで、調合表からコンクリートの自己収縮ひずみを経時的に表現することができる。

本予測式において式(3-22)で表現されるセメントペーストの自己収縮ひずみは、同一練上り温度であれば、一定の最大ひずみを示すため、コンクリートの最大ひずみは練上り温度と骨材体積比で決定されることになる。

3.7.4 で得られた 20°C 一定条件と高温履歴条件における超高強度コンクリートの自己収縮試験結果と本予測式の比較を行った。測定値と予測式の比較を図 3-55 に示す。

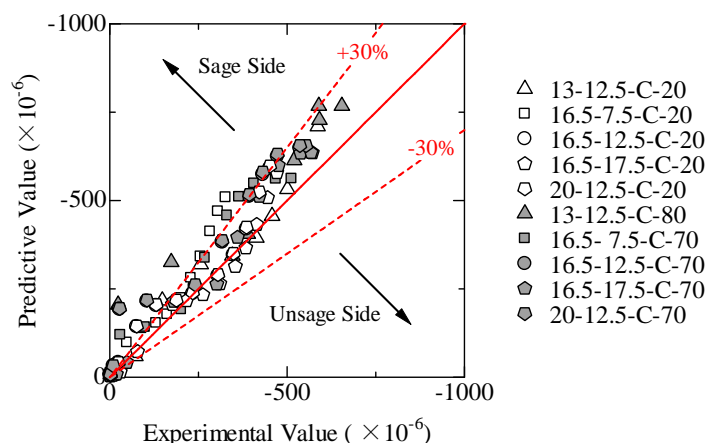


図 3-55 測定値と予測値の比較

図 3-55 に示されるように、コンクリートの自己収縮量が大きくなるにつれて予測値は安全側にシフトしていく傾向が確認された。これは、自己収縮の終局値を最大ひずみで表現しているため、実

際の測定で確認される最大ひずみを示した後に生じる膨張が考慮されていないことによるものである。しかしながら、全体的な傾向として、本予測式を用いることで、若材齢から自己収縮の経時変化を概ね30%以内の範囲内で表現可能であった。

3.7.10 既往の文献による検証

本論文では、以下の条件に合致する既往の研究^{3),7),19)~22)}について、それぞれの論文中で確認することができる最大ひずみの値に関して、本予測式の推定精度の検証を行った。

- ・低発熱系のベースセメントを用いている。
- ・シリカフェーム混入の結合材を用いている。
- ・水結合材比が20%以下である。
- ・骨材体積比を算出することができる。
- ・収縮を低減させる混和材料および骨材を使用していない。

検証に用いた既往の研究の概要を表3-12に示す。

表3-12 検証に使用した既往の研究での調合条件

	W/C (-)	SF Content (%)	Aggregate Volume Content Va (-)	W	C	SF	G	S	SP (%)	28day Compressive Strength (MPa)	Toung's Modulus for Eq.(3-19) _p (GPa)
橋田 ¹⁹⁾	0.20	5	0.565	165	784	41	606	856	5	123	32.2
高田 ²⁰⁾	0.17	13	0.544	155	798	114	613	798	2	165	34.6
神代 ZF1 ²¹⁾	0.17	10	0.541	155	821	91	554	845	1	158	34.6
神代 ZF2	0.17	10	0.541	155	821	91	554	845	1	152	34.6
神代 SF1	0.17	10	0.538	155	821	91	545	845	2	164	34.6
神代 SPC	0.17	10	0.540	155	821	91	549	845	2	165	34.6
寺西 ²²⁾	0.14	10	0.495	150	964	107	411	871	2	152	37.9
鈴木 ³⁾ SFLC_10-42	0.15	10	0.501	155	930	103	451	940	2.9	-	36.8
鈴木 SFLC_20-20	0.15	10	0.501	155	930	103	451	940	2.8	-	36.8
鈴木 SFLC_20-60	0.15	10	0.501	155	930	103	451	940	2.8	--	36.8
鈴木 SFLC_30-67	0.15	10	0.501	155	930	103	451	940	2.8	-	36.8
松田 ⁷⁾ LSF16_20-20	0.16	10	0.562	145	816	91	595	840	2.5	-	35.7
松田 LSF16_20-60	0.16	10	0.562	145	816	91	595	840	2.5	-	35.7
松田 LSF16_30-90	0.16	10	0.562	145	816	91	595	840	2.0	-	35.7
松田 LSF14_20-20	0.14	10	0.501	150	964	107	386	888	2.6	-	37.9
松田 LSF14_20-90	0.14	10	0.501	150	964	107	386	888	2.3	-	37.9

有効材齢の算定に際し、文献中に温度履歴の記述がないものに関しては、20℃一定とした。

また、Hobbs モデルの算定に際し、各試験体のセメントペーストのヤング係数が不明であるため、超高強度セメントペーストのヤング係数を推定することを目的として、本実験で作成した各調合のセメントペーストの28日ヤング係数を得た。

得られた実験値から水セメント比とヤング係数の関係を図3-56に示す。

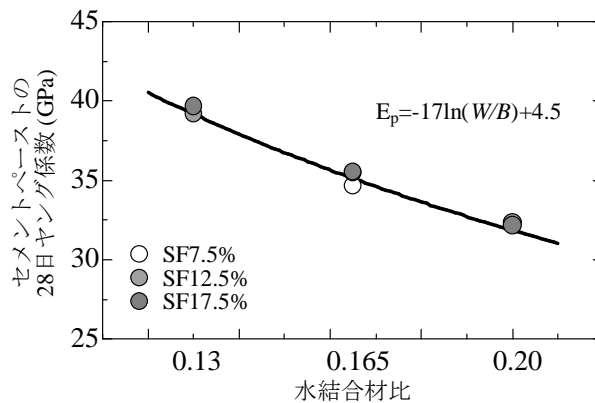


図3-56 超高強度セメントペーストのヤング係数と水セメント比の関係

本検討では水セメント比とヤング係数の関係を式(3-20)で表現し、セメントペーストのヤング係数として、既往の文献における各試験体の水セメント比から得た推定値を使用した。

$$E_{p,28} = -17 \cdot \ln(W/B) + 4.5 \quad (3-24)$$

ここで $E_{p,28}$: セメントペーストの材齢28日ヤング係数 (GPa)

である。予測式に使用したセメントペーストのヤング係数値を

表3-12に示す。また、骨材のヤング係数、ポアソン比およびセメントペーストのポアソン比は3.6.2と同一の値を使用した。

各文献における測定結果と本予測式を用いることで得られた推定値の比較を図3-57に示す。

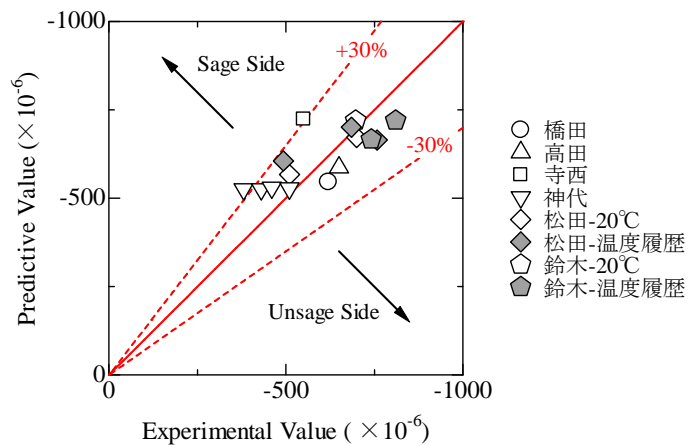


図 3-57 既往の文献値と予測値の比較

鈴木らや松田らの実験では、20°C条件だけでなく水和発熱による温度上昇を模擬した温度履歴条件下においても自己収縮ひずみの測定が行われているが、図 3-57 に示されるように、本予測式を用いることで、温度履歴によらず概ね 30%以内の範囲内で予測可能であった。

3.8 結論

第3章では、線膨張係数の経時変化を考慮した手法によって得られた自己収縮ひずみの性状について取りまとめ、超高強度コンクリートの自己収縮予測式の提案を行った。以下に本章で得られた知見を示す。

3.2節では、自己収縮ひずみのメカニズム、基本的な性質について述べ、さらに水セメント比やセメント種類といった調合から受ける影響について既往の研究をとりまとめた。

3.3節では、本研究で行った自己収縮ひずみの測定実験について実験概要を述べた。著者らが開発した線膨張係数-自己収縮ひずみ測定装置を用いることで、任意の温度履歴中の自己収縮ひずみを得ることが可能であるため、試験体の調合や、試験目的に対応した温度履歴を設定した。

3.4節では、測定したセメントペーストの自己収縮の結果を各種調合要因（水セメント比、セメント種類、骨材量）について検討を行い、これまでに明らかにされている自己収縮ひずみの基本性状を確認するとともに、温度履歴を受ける最中の自己収縮ひずみ挙動について新たな知見を示した。すなわち、水和発熱によるような山形の温度履歴を受けるセメントペーストの自己収縮は、高温域に急激に進行し、温度降下時には停滞もしくは緩やかな膨張が生じることを示した。

3.5節では、自己収縮に及ぼす温度履歴の影響に関して測定結果を取りまとめた。日本コンクリート工学会の自己収縮ひずみ予測式にあるように、自己収縮進行速度の温度依存性は、アレニウス則による有効材齢によって表現されることが多いが、本論文で温度ひずみの影響を取り除いた自己収縮ひずみを有効材齢で整理した結果、普通ポルトランドセメントペーストについては有効材齢で説明が可能であったが、ビーライト含有量が多い低発熱系のセメントではよい一致を示さないことが明らかになった。

また、混和材としてシリカフェームを含んでいる超高強度セメントペーストについては、材齢によって異なる温度依存性を示すことが実験的に確認された。すなわち、有効材齢1日以前に生じる急激な自己収縮において低温のものほど自己収縮ひずみが大きくなること、また、それ以降の材齢では、普通コンクリートと同様、高温履歴を受けるものほど自己収縮速度が大きくなることである。しかし、後者についても通常の有効材齢式では、高温時の自己収縮の促進を評価することはできず、見かけの活性化エネルギーを大きくとる必要性が確かめられた。前者の極若材齢時における低温ほど自己収縮が進行する現象については、その温度範囲が10℃から40℃以内の領域によって再現されることが確認された。この現象については、第4章でメカニズムの説明を試みる。

3.6節では、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみに及ぼす骨材の影響について、粗骨材寸法、

骨材体積量の観点から検討を行い、複合則の一つである Hobbs モデルを使用することで、セメントペーストからモルタル、コンクリートの、またはモルタルからコンクリートの自己収縮を推定可能であることを示した。

3.7 節では、従来提案されていない水セメント比が 20%以下の領域における自己収縮ひずみの予測式の提案を行った。本提案式は、セメントペーストの予測式及び 3.6 節に示した複合則からなっており、骨材量の影響を明示できる点に特徴がある。

また、これ 3.4 節、3.5 節で得られた超高強度セメントペーストの特徴である変曲点以前と以後の温度依存性状の相違を表現することが可能であり、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみを 30% 以内の精度で再現できることが確かめられた。

第3章の参考文献

- 1 Davis, R: Autogenous Volume Change of Concrete, Proceedings of the 43rd Annual ASTM Meeting, pp.1103-1113, 1940
- 2 田澤栄一ほか：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，pp.122-127, 1991
- 3 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，2002
- 4 Israelachivili, J. N. : 分子間力と表面張力，朝倉書店，1996
- 5 Schmidt-Dohl, F. et al : Crystallization and Hydration Pressure or Formation Pressure of Solid Phase, cement and concrete research, Vol.25, No.2, pp.255-256, 1995
- 6 Powers, T. C : Structure and Physical Properties of hardened Portland Cement Paste, J. Am. Soc., Vol41, No1, pp1-5, 1958
- 7 Daimon, M., et al., Pore : Structure of Calcium Silicate Hydrate in Hydrated Tricalcium Silicate, J. Am. Ceram Soc., Vol60, No3-4, pp.110-114, 1977
- 8 宮治友也：力学的平衡に基づくセメントペーストの自己収縮のモデル化，名古屋大学卒業論文，2007
- 9 Powers, T. C. : Mechanisms of shrinkage and reversible creep of hardening cement paste, in Proc. Int. Symposium "Structure of concrete and its behavior under load", London, pp.319-344, 1965
- 10 Wittmann, F. H. : Creep and Shrinkage in Concrete Structures, JOHN WILEY & SONS, pp.129-161, 1982
- 11 川村満紀，S. チャタジー：コンクリートの材料化学，森北出版，2002.9
- 12 Fledman, R. F.: Sorption and Length-Change Scanning Isotherms of Methanol and Water on Hydrated Portland Cement, ICCS, Tokyo, III-23, pp.53-66, 1967
- 13 Tazawa, E. et al. : Influence of Cement and Admixture on Autogenous Shrinkage of Cement Paste, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.2 pp.281-287, 1995
- 14 堀田智明ほか：セメント系材料の自己収縮に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol22, No.2, pp.595-600, 2000
- 15 田澤栄一，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, pp.43-52, 1994.11
- 16 Hobbs, D.W. : Influence of Aggregate restraint on the shrinkage of concrete, Journal of ACI, Vol.71, No.9, pp.405-450, 1974
- 17 田澤栄一，宮澤伸吾，佐藤剛，小西謙二郎：コンクリートの自己収縮，コンクリート工学年次論文報告集，No.14, pp.561-566, 1992.7
- 18 RILEM TC196-ICC State-of-the-art-report of ICC, (Draft) 2006
- 19 A.Bemtur et al., Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates, Cement and Concrete Research, Vol.31, pp.1587-1591, 2001
- 20 日紫喜剛啓ほか，自己収縮を低減した 150N/mm² 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，Vol.781, V-66, pp.101-112, 2005
- 21 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
- 22 Jensen, O. M. and Hansen, P. F. : Water-Entrained Cement-Based Materials: I. Principle and Theoretical Background, Cement and Concrete Research, No. 31, pp. 647-654, 2001
- 23 田中敏嗣ほか：混和材量を組み合わせて使用した高流動コンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.1, No.1, pp.157-162, 1995

-
- 24 梅本宗弘：超高強度コンクリートの自己収縮に関する実験的研究，戸田建設技術研究報告，第34号
- 25 今本啓一，大谷博：超高強度コンクリートの自己収縮性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.18, No.1, pp.225-230, 1996.7
- 26 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，No.537, pp.7-12, 2000.11
- 27 出雲健司ほか：異なる温度下でのモルタルの自己収縮，土木学会第56回年次学術講演会，V, Vol.56, pp.668-669, 2001
- 28 松田拓ほか：初期高温履歴を受けた超高強度コンクリートの自己収縮特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, pp.1247-1252, 2006.7
- 29 Zhang, M. H. et al. : Effect of Water to Cementitious Materials Ratio and Silica Fume on the Autogenous Shrinkage of Concrete, cement and concrete research, Vol.33, pp.1687-1694, 2003
- 30 寺澤貴裕，菅田紀之：シリカフュームを用いた高強度コンクリートの自己収縮特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.431-436, 2003.7
- 31 神代泰道ほか：特殊シリカ質微粉末を用いた超高強度コンクリートのフレッシュ及び硬化性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.213-218, 2004.7
- 32 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，2002
- 33 丁海文ほか：水和熱による高温履歴が高強度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
- 34 盛岡実ほか：膨張材を混和したセメントペーストの化学収縮と自己体積変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.21, No.2, pp.157-162, 1999
- 35 保利彰宏ほか：膨張材を混和した各種高流動モルタルの自己収縮，コンクリート工学年次論文集，Vol.20, No.2, pp.163-168, 1998.7
- 36 Mounanga, P. et al. : Autogenous Deformations of Cement Pastes: Part I. Temperature effects at Early Age and Micro-macro Correlations, cement and concrete research, Vol.36, pp.110-122, 2006
- 37 Jensen, O. M. et al. : Autogenous Deformations and RH-Change in Perspective, cement and concrete research, Vol.31, pp.1859-1865, 2001
- 38 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
- 39 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，第617号，pp. 1-7, 2007.7
- 40 丸山一平ほか：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, 2008.7
- 41 丸山一平，勅使川原正臣：超高強度コンクリートの自己収縮がRC柱の曲げ性能に及ぼす影響に関する考察，日本建築学会構造系論文集，第630号，pp. 1331-1338, 2008.8
- 42 鈴木雅博ほか：超高強度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, 2005.7
- 43 浅井あかねほか：温度依存性を考慮したセメントの水和発熱特性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 18, No. 1, pp. 231-236, 1996
- 44 笠井哲郎ほか：セメントペーストの水和収縮量の測定方法に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.49, pp.156-161, 1995
- 45 L.E.Copeland, D.L.Kantro: Hydration of Portland cement, Proc. 5th Int. Cong. on Chem. Cem., Tokyo, pp.387-420, 1968

- 46 松尾茂美ほか：超高強度コンクリート用高性能 AE 減水剤の作用効果，セメント・コンクリート論文集，No.49, pp.258-263, 1995
- 47 菅俣 匠，太田 晃：100～150N/mm 級超高強度コンクリート用高性能 AE 減水剤の動向，Journal of the Society of Material Science, Japan, Vol.54, No.8, pp.794-803, 2005.8
- 48 中西博ほか：次世代型多機能，多目的高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの諸物性，コンクリート工学年次論文集， Vol.25, No.1, pp. 479-484, 2003
- 49 S.Arrhenius: Ueber die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Saeuren, Zeitschrift für physikalische Chemie Vol.4, pp.226-248, 1889
- 50 CEB-FIP , "MODEL CODE 1990 - Material properties", Thomas Telford,1990
- 51 F.Ridi, E.Frantini, F.Manelli, P.Baglioni: Hydration process of cement in the presence of a cellulosic additive. A calorimetric investigation, J. Phys. Chem., B 109 pp.14727-14734, 2005
- 52 T.Kishi, K.Maekawa: Multi-component model for hydration heating of Portland cement, Conc. Lib. JSCI 28 97-115, 1996
- 53 I.Maruyama, T.Matsushita, T.Noguchi: Numerical Modeling of Portland Cement Hydration Based on Particle Kinetic Model and Multi-Component Concept, Proc. of Int. Cong. on Chem. of Cem., TH1-08.3, 2007.7
- 54 菅俣 匠ほか：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の関係に関する一考察，コンクリート工学年次論文集， Vol.26, No.1, pp.1287-1292, 2004.7
- 55 河上浩司ほか：低熱ポルトランドセメントとシリカフェームを併用した結合材モルタルの圧縮強度と内部組織に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.599, pp. 1-7, 2006.1
- 56 河上浩司ほか：低熱ポルトランドセメントとシリカフェームを併用した高強度コンクリートの強度発現に与える初期温度履歴の影響，日本建築学会構造系論文集，No.601, pp. 15-21, 2006.3
- 57 菅俣 匠ほか：150N/mm² 級コンクリートの強度発現性に及ぼすセメントーシリカフェーム系結合材の水和反応，コンクリート工学年次論文集， Vol.28, No.1, pp.1193-1198, 2006.7
- 58 Michand-Poupardin, V. et al. : Influence of Temperature and Alkali Concentration on Thermodynamical Stability of Sulphoaluminate Phases, Proceeding of 11th International Congress on the Chemistry of Cement, pp.2033-2043, 2003
- 59 Lothenbach, B. : Thermodynamic Modeling of the Effect of Temperature on the Hydration of Portland Cement, International RILEM Symposium on Concrete Modeling- CONMOD'08, pp.393-400, 2008
- 60 高橋俊之ほか：セメントペーストの自己収縮に及ぼす水和反応の影響，コンクリート工学論文集， Vol.7, No.2, pp.137-142, 1996
- 61 笠井哲朗：各種ポルトランドセメントの水和収縮に及ぼす温度の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.19, No.1, pp.577-582, 1997
- 62 秋田唯男，他：三多摩地区におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみに関する試験結果，コンクリートテクノ， pp.62-69, Vol.28, No.1, 2009.1
- 63 川上英男：コンクリートの弾性係数に及ぼす粗骨材の粒径と量の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東） pp.99-100, 2001.9
- 64 仕入豊和：セメントペースト量とコンクリートの乾燥収縮量に関する実験研究，日本建築学会関東支部研究報告集， No.58, pp.13-16, 1961
- 65 大野和男：モルタル及びコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究，北海道大学工学部研究報告， No.9, pp.49-110, 1953
- 66 江口清，寺西浩司：複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式，日本建築学会構造系論文集，No.557, pp.15-22, 2002.7
- 67 Hobbs, D.W. : Influence of Aggregate restraint on the shrinkage of concrete, Journal of ACI, Vol.71, No.9, pp.405-450, 1974
- 68 川上英男：複合理論による骨材の弾性係数評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29, No. 1, pp.

111-116, 2007

第4章 超高強度コンクリートの自己収縮メカニズム

- 4.1 概論
- 4.2 水和圧理論に関する既往の研究
- 4.3 変曲点以降の自己収縮メカニズム
- 4.4 変曲点以前の自己収縮メカニズム
- 4.5 変曲点の決定メカニズム
- 4.6 超高強度コンクリートの自己収縮温度依存性の検証
- 4.7 結論

4.1 概論

第3章の中で、超高強度コンクリートの自己収縮性状において、材齢1日以前に自己収縮進行速度が変曲する点（変曲点）が存在すること、超高強度コンクリートでは自己収縮の温度依存性の変曲点の前後の材齢によって異なることが明らかになった。温度依存性が異なるということは、これらの材齢では異なる収縮メカニズムによって自己収縮が進行している可能性を示唆するものである。

それぞれの材齢に着目すると、変曲点以降の材齢では、シリカフェームの高温域における反応活性を考慮して、有効材齢式中のみかけの活性化エネルギーを大きくとることで温度履歴の影響が評価可能であった。このことは、超高強度コンクリートではシリカフェームの存在によって高温域における収縮が鋭敏ではあったが、毛細管張力説や分離圧説といった既に提案されている収縮メカニズムに類する機構によって説明が可能であることを示唆する。

一方で、変曲点以前の極若材齢にみられた低温ほど収縮が進行する現象に関しては、既往の知見とは異なる傾向であり、水和反応の観点からは説明がつかない。第3章の検討で、この区間における自己収縮進行速度と水和収縮の進行速度が同一の傾向であることを示したが、検討が十分ではなく未だ収縮メカニズムは明らかになっていない。

このような自己収縮の温度依存性状が実部材に及ぼす影響としては、既往の研究の中で、冬期打設の超高強度 RC 部材が夏季打設の同部材と比較して部材内部、表面のひび割れが多くなることが報告されているなど、実部材にも害を及ぼしかねない。

以上の背景の中、低水セメント比のコンクリートにおいて、極若材齢域あるいはその後の材齢にも適用可能な収縮メカニズムの解明が望まれる。

本章では、極若材齢から自己収縮、体積弾性率等の収縮に関する物性値を得るとともに、水分量、比表面積、水和反応解析を行うことで、極若材齢の体積変化メカニズムについて検討を行う。以下に本章の内容を記す。

4.2 節では、本章の検討に採用する体積変化メカニズムとして、丸山らが提案している水和圧理論について詳細を報告する。

4.3 節では、水セメント比 16.5%のシリカフェームプレミックスセメントペーストを作製し、長期的な自己収縮の経過を得ることで、水和圧理論を使用して、変曲点以降の収縮について説明を試みる。

4.4 節では、4.3 節と同様のセメントペーストを作製し、変曲点以前の極若材齢に特化して各実験値を得ることで、自己収縮性状について水和圧理論によって説明を試みる。

4.5 節では、低水セメント比のセメントペーストで変曲点が生じる原因について、セメントペースト中の水分量の取得及び水和反応解析によって説明を試みる。

4.6 節では、水和圧理論が成り立つという仮定のもと低温のものほど収縮が進行した現象について解析を行う。

4.2 水和圧理論に関する既往の研究

4.2.1 セメントペーストの体積変化と分離圧の関係

Derjaguin が提案した分離圧^{1, 2}とは、面積一定の液体薄膜を考えた場合に、吸着物質と被吸着表面の距離が e の時に働く相互作用エネルギーを $P(e)$ としたときに、次式(4-1)が成り立つというものである。

$$\mu = \mu_0 + v_0 \frac{dP(e)}{de} \quad (4-1)$$

ここで、 e : 吸着物質と被吸着表面の距離 (m)

μ : 薄膜の化学ポテンシャル (J/1 分子) ,

μ_0 : バルクの吸着物質の化学ポテンシャル (J/1 分子) ,

v_0 : 吸着物質 1 分子が占める体積 ($\text{m}^3/1$ 分子) ,

$P(e)$: 吸着物質と被吸着表面の距離が e の時に働く相互作用エネルギー (J/m^2)

である。このとき、Derjaguin の記法に従い、分離圧 $\Pi(e)$ を式(4-2)で定義する。

$$\Pi(e) = -\frac{dP(e)}{de} \quad (4-2)$$

ここで、 $\Pi(e)$: 分離圧

である。この分離圧 $\Pi(e)$ は、 $P(e)$ が減少関数であるときに厚さ e を保つためにその薄膜に加えておかななくてはならない圧力であると解釈できる。

従来の研究では、Powers の研究を含め、セメントペースト中の分離圧の変化は、平衡する雰囲気相の相対湿度から求められる化学ポテンシャル変化から説明可能であるとの仮説から、収縮駆動力の支配方程式として下式が用いられてきた。

$$\mu = \mu_0 + v_0 \frac{dP(e)}{de} \quad (4-3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP(e)}{de} &= \frac{\mu - \mu_0}{v_0} \\ &= \frac{RT \ln(h)}{v_0} \end{aligned} \quad (4-4)$$

これは、たとえばセメントペースト中の水は、周囲環境にある水分の化学ポテンシャルと、表面から生じる親水力（ファン・デル・ワールス力や静電相互作用力）とがバランスした結果、新しい平衡状態を目指すことで表面への水の吸着や脱着が決定するとの仮定による。しかし、この仮定はセメントペースト表層への水の吸着と脱着がまったくの可逆反応であるときに成り立つのであって、セメントペースト中の水分のように吸着等温線・脱着線においてヒステリシス挙動を示すような場合には必ずしも成立しないことが明らかになっている。

丸山らは以上の議論を踏まえて、セメントペーストに働く分離圧がセメントペースト表層への水の吸着厚さに依存するという立場でセメントペーストの体積変化の評価を行った。

セメントペースト中の水分状態と体積変化を力の釣り合いにより関連づけることを考える。今、セメントペースト中の吸着厚さが e の状態であったとき、その時点の体積ひずみを $\Delta V/V$ 、体積含水率を w_v 、多孔体のみかけの体積弾性率を K としたとき次式が成り立つ。

$$w_v \cdot \Pi(e) + K \cdot \Delta V/V = 0 \quad (4-5)$$

これは、吸着厚さ e の時の分離圧 $\Pi(e)$ の反力をセメントペーストの骨格が負担すると考えたものであり、分離圧を有する物質の単位体積あたりの存在量を表す指標として体積含水率を用いた力の釣り合い式である。この式は、任意の平衡する2点の状態に対して適用でき、分離圧の原点および収縮の原点について座標変換を行っても一般性は失われない。

セメントペーストの実際の利用を想定し、飽水状態（状態 1）における体積ひずみおよび分離圧をゼロとした場合、飽水状態から任意の平衡状態（状態 2）に移行したときに生じる分離圧の差分 $\Delta \Pi_{21}$ は、次式によって得ることができる。

$$\Delta \Pi_{21} = - \left(\frac{K}{w_{v2}} \cdot \frac{\Delta V_{21}}{V} \right) \quad (4-6)$$

ここで e_2 : 状態 2 における統計的吸着厚さ、

w_{v2} : 状態 2 における体積含水率

$\Delta V_{21}/V$: 飽水状態からの体積ひずみの変化量

である。

この式(4-6)によって算出される分離圧の増分は、飽水状態を基準とした、吸着水に生じる引張力の増分である。

式(4-6)において、体積弾性率、体積ひずみは、実験上得ることが比較的難しいため、次式を用いて、容易に得ることができるヤング係数、ポアソン比、1軸ひずみに変換を行う。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (4-7)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = 3 \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (4-8)$$

また、質量含水率 w_g とセメントペーストの比表面積 S から、統計的吸着厚さ e を得た。

$$e = \frac{w_g}{\rho \cdot S} \quad (4-9)$$

ここで、 ρ : 水の密度 (g/cm^3)

である。

4.2.2 増分分離圧と統計的吸着厚さの関係

実験によって得られた質量含水率，体積含水率，体積弾性率，一軸ひずみを式(4-6)に供することによって，飽水状態を基準とした液状水に働く分離圧の差分を算出した。ここで，飽水状態基準とは，一軸ひずみの測定に際し飽水状態をゼロひずみとすることを意味している。

飽水状態の絶対分離圧が異なる試験体の分離圧曲線を比較するためには，基準点の分離圧を得る必要があるが，これについては 105°C 乾燥状態の分離圧をゼロと仮定して，式(4-6)を用いて飽水状態と絶乾状態のひずみ差，飽和含水量および体積弾性率から算出した。

以上の手順で得られた分離圧を，統計的吸着厚さ毎にプロットして得られた結果が，図 4-1 である。ここで，図中のデータは，普通ポルトランドセメント，中庸熱ポルトランドセメント，低熱ポルトランドセメントのそれぞれ水セメント比 30%，40%，55%の実験値から得られたものであり，●は吸着線上，○は脱着線上のプロットである。

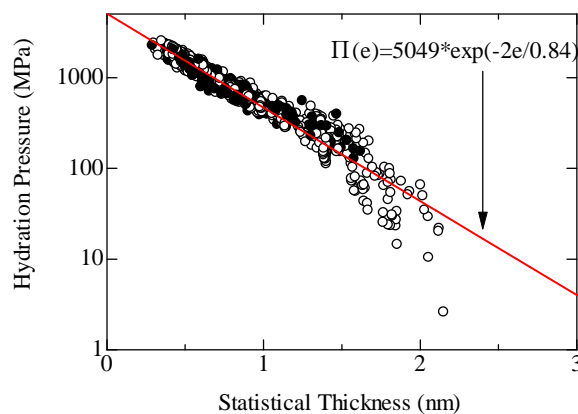


図 4-1 水和圧曲線

図に示されるように、統計的吸着厚さと分離圧曲線の関係は、ポルトランド系セメントの中で、セメント種類や水セメント比、あるいは吸着線上、脱着線上といったヒステリシスの状態もふくめて、ただ一つの曲線で評価できることがわかる。この曲線は、物理的にはセメントペーストの固相表面と水との相互作用力から定められるポテンシャル曲線の微分に相当するものと考えられる。

4.2.3 実験によって得られた分離圧曲線の評価

表面や粒子を数 nm 以下のスケールに近接させると、それらの間の相互作用をファン・デル・ワールスカや電気二重層斥力とは異なる短距離溶媒和力が生じる。これらは固体の表面、構成する材料などに起因して斥力にも引力にもなることが指摘されている³が、このような力のうち、特に溶質が水の場合を水和力 (hydration force) と呼ぶ。この水和力のうち、斥力のものについては現在までに、粘土⁴、界面活性剤の石けん膜⁵、帯電していない脂質二重相⁶などで確認されており、これらの斥力は次式に従うことが知られている。

$$P(e) = P_0 \exp(-2e/\lambda_0) \quad (4-10)$$

ここで、 P_0 : 各物質の表面エネルギー (J/m²),

λ_0 : 減衰定数(m),

$2e$: 表面間の距離 (m)で水分の吸着厚さの2倍

である。式中の減衰定数 λ_0 は、固相表面の親水性を意味しており、粘土については 1.1 , 電解質の場合では 0.6~1.1nm 程度の値をとることや、 P_0 の値は表面の水和状態に依存するが通常 3~30m J/m² 以下であることが報告されている⁶。図 4- 1 で示したセメントペースト表面に働く分離圧は、式(4-10)と同形であり、セメントペースト表面にも水を媒質とした水和力と似通った圧力が働いている可能性が考えられる。以上から丸山らは、セメントペースト表面に働く分離圧を「水和圧」と名付けた。なお、丸山らの検討では統計的吸着厚さの算定に供する比表面積測定の前処理として 105°C という強い乾燥条件下で試験体の前準備を行っているため、乾燥以前の水和生成物の比表面積とは異なる表面性状を有する可能性があり、その前提の上で議論を進める必要がある。

4.2.4 水和圧を駆動力とする収縮メカニズム

ここまで得られた水和圧曲線は各セメントペーストが十分に硬化した状態のものであるため、十分に硬化したセメントペーストにおいて水和圧曲線が一定とすると、統計的吸着厚さから水和圧を求めることが可能であり、式(4-5)を変形した式(4-11)からひずみを導出することが可能になる。

$$\Delta V/V = -\frac{w_v \cdot \Pi(e)}{K} \quad (4-11)$$

4.3 変曲点以降の自己収縮メカニズム

4.2 節で述べた水和圧理論は、十分に硬化したセメントペーストの乾燥収縮試験結果から得られたものであるが、本節では、材齢1日以降の自己収縮ひずみから、水和圧理論を用いて超高強度セメントペーストの水和圧曲線を導出することを試みる。

4.3.1 実験概要

本実験では、水和圧曲線の導出に必要な物性として、自己収縮ひずみ、含水率、ヤング係数、比表面積の測定を行った。また、得られた水和圧曲線の評価に必要な、C-S-H中のカルシウムシリケート比を得ることを目的として、各材齢で水和停止した試料を用いて、水和反応解析を行った。

(1) 使用材料及び調合

本実験では、シリカフュームを内割りで12.5%置換したシリカフュームプレミックスセメントを使用して、水セメント比16.5%のセメントペーストを作製した。使用材料を表4-1に示す。

表4-1 使用材料

Materials	Type	Character
Cement	Normal Portland Cement	Density: 3.16 g/cm ³ , Specific surface area: 3110 cm ² /g
	Moderate Portland Cement	Density: 3.23 g/cm ³ , Specific surface area: 3320 cm ² /g
Silica Fume		Density: 2.34 g/cm ³ , Specific surface area: 10.13 m ² /g, SiO ₂ Content:85.77%
Admixture	Superplasticizer	Polycarbonate-type

(2) 温度履歴

図4-2に本実験で与えた温度履歴を示す。なお、後述する水和停止用試料に与えた温度履歴には線膨張係数測定用の温度パルスを有しない。

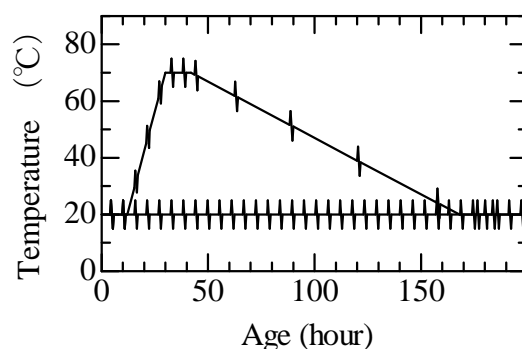


図4-2 温度履歴

(3) 長さ変化試験

2.1 節で述べた線膨張係数・自己収縮ひずみ測定装置を使用した。線膨張係数，自己収縮ひずみの算定手法は2.3 節に拠った。

(4) 水和停止

所定の材齢において，ハンマーで20mm以下の小片に粉碎した後，高速振動試料粉碎機を用いて微粉碎した。微粉碎した試料粉末を直ちにアセトンに30分程度浸漬させ，吸引濾過により，粉末試料とアセトンを分離した。その後，再度アセトンに6時間浸漬後，アセトンの分離作業を行い，水和停止した後，11% RH，20℃環境下で，2週間乾燥を行った後，150 μ mふるいで分級を行い，各分析に供するまで密閉容器に詰め，11% RHに保たれたデシケータ中に保存した。

なお，各分析測定にはふるい150 μ m以下の試料を用いた。これは，熱分析については，粒径の差異による減量速度のばらつきを抑制するため，粉末X線回折については，粗大結晶の混入による反射強度のばらつきを増大を抑制するためである。

(5) XRD／リートベルト解析

粉末X線回折の測定は，D8 ADVANCE (BrukerAXS社製)により，水和停止を行った11%RH乾燥状態の粉末試料を用いて，X線源Cu-K α ，管電圧40kV，管電流40mA，走査範囲 $2\theta=5\sim 65^\circ$ ，ステップ幅:0.02 $^\circ$ ，スキャンスピード:0.5 $^\circ$ /min.の条件で行った。解析には，ソフトウェアTOPAS ver.4.2 (BrukerAXS社製)により多重ピーク分離(WPPF法)を行い，分離された各鉱物ピークにおける回折線の積分強度(波形面積)を算出した。試料には，内部標準試料として α -Al $_2$ O $_3$ を内割で10wt%混合した。

定量に際しては既往の文献を参考に，測定した全走査範囲から各鉱物に応じて解析範囲を限定して，隣接または重なったピークを分離し，ピーク位置，積分強度および結晶子サイズを算出した。3CaO \cdot SiO $_2$ (C $_3$ S)については，51.4-52.2 $^\circ$ の範囲で，51.6 $^\circ$ と51.9 $^\circ$ の回折線を分離し，両ピークの積分強度の和を用いた。2CaO \cdot SiO $_2$ (C $_2$ S)については，40.8-42.0 $^\circ$ の範囲で，41.0 $^\circ$ ，41.3 $^\circ$ および41.6 $^\circ$ の回折線を分離し，41.0 $^\circ$ と41.6 $^\circ$ のピークの積分強度の和を用いた。3CaO \cdot Al $_2$ O $_3$ (C $_3$ A)については，33.1-33.5 $^\circ$ の範囲で，33.2 $^\circ$ の回折線および積分強度を用いた。4CaO \cdot Al $_2$ O $_3$ \cdot Fe $_2$ O $_3$ (C $_4$ AF)については，11.0-12.3 $^\circ$ の範囲で，10.1 $^\circ$ と12.2 $^\circ$ の回折線を分離し，12.2 $^\circ$ のピークの積分強度を用いた。 α -Al $_2$ O $_3$ について52.2-52.9 $^\circ$ の範囲で，52.5 $^\circ$ のピークおよび積分強度を用いた。得られた各鉱物の積分強度(波形面積)から水和率を式(4-12)により算出した。

$$\alpha_i(t) = 1 - \frac{\frac{S_i(t)}{S_N(t)} \times \frac{1}{1 - Ig.loss(t)}}{\frac{S_i(0)}{S_N(0)} \times \frac{1}{1 - Ig.loss(0)}} \quad (4-12)$$

ここで、
 $\alpha_i(t)$: 材齢 t における鉱物 i の反応率(-),
 $S_i(t)$: 材齢 t における鉱物 i の積分強度(-),
 $S_N(t)$ 材齢 t における標準物質の積分強度(-),
 $S_i(0)$: 未水和における鉱物 i の積分強度(-),
 $S_N(0)$ 未水和における標準物質の積分強度(-),
 $Ig.loss(t)$: 材齢 t における試料の Ig.loss 値(-),
 $Ig.loss(0)$: 未水和における試料の Ig.loss 値(-)

である。

前項で述べた測定チャート全体について、ソフトウェア TOPAS ver.4.2 (BrukerAXS 社製) によりリートベルト解析を行った。定量に際しては、 C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF , MgO (M), $Free-CaO$, $CaCO_3$ ($c\bar{c}$), $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ($c\bar{s}H_2$), $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$ ($c\bar{s}H_{0.5}$), $Ca(OH)_2$ (CH), $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ (AFt), $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ (AFm)の各セメント鉱物・水和生成物および内部標準試料として分析試料に混合した $\alpha-Al_2O_3$ (10wt%混合) を定量対象とした。定量に用いた各鉱物の結晶系 C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF の結晶構造に関するパラメータは NIST Technical Report と同様とし, M, $c\bar{c}$, $c\bar{s}H_2$, $c\bar{s}H_{0.5}$, CH, AFt, AFm, $\alpha-Al_2O_3$ に関しては ICSD Database と同様とした。非晶質物質量は内部標準 $\alpha-Al_2O_3$ の定量値から式(4-13)に従い算出した。

$$A = \{100 \times (S_R - S)\} / \{S_R \times (100 - S) / 100\} \quad (4-13)$$

ここで、 A : 非晶質量 (%),
 S : $\alpha-Al_2O_3$ の混合率 (%),
 S_R : $\alpha-Al_2O_3$ の定量値 (%)

である。XRD/リートベルト解析における最大誤差は、3回の測定誤差ら算出を行った。

(6) シリカフェーム反応率

シリカフェーム反応率測定用の試料は所定の材齢まで各温度履歴で養生した後、容器から取り出して鉄乳鉢で粗砕後、アセトンに浸漬し、アスピレータにより水分除去作業を2回実施し、R.H.11%乾燥することにより水和停止を行った。以上の試料を用い、シリカフェームの未反応量を文献⁷の手法を参考に、HCl-Na₂CO₃ 選択溶解法によって定量し、シリカフェーム反応率を得た。値は2回の実験値の平均を用いた。

(7) 比表面積

セメントペーストについては、水和停止を行った試料を、25 μm 以上 75 μm 以下に分級、105°C

下で30分真空脱気を行った後、20°C環境下において吸着等温線の測定を行った。吸着等温線は定容水蒸気吸着法(Quantachrome社製、Hydrosorb1000)により測定した。測定点は、許容圧力較差0.05mmHg、平衡時間120sec.で5%RHから40%RHまで測定を行った。比表面積については、30%RH以下の領域においてBET理論を用いて算出した。

(8) ヤング係数

φ5×10cm試験体により材齢1, 3, 7, 28, 91, 182, 364日においてヤング係数の測定を行った。ヤング係数の測定はコンプレッソメータに取り付けられた精度1/1000mmのCDPにより、標点間50mmで縦ひずみを測定し、それに対する圧縮応力の比により、ヤング係数を最小二乗法を用いて算出、3試験体の平均値として評価した。

(9) 相組成及び含水率の算定方法

水和反応に伴うCaO/SiO₂比(C/S比)の変化の導出、セメントペースト中の含水状態の推定を目的として、リートベルト解析による分析値から以下のような繰り返し計算によって相組成を同定した。

- 1) 各相から結合水を除いた無水物量に換算する。このとき、C-S-Hは暫定的なC/S比の仮定値を用いる。
- 2) 測定結果から各未水和物相の水和反応率を算出し、結晶相から確認できるAl₂O₃(A)およびFe₂O₃(F)の量から、セメント鉱物の反応量から反応に利用されたはずのAl₂O₃(A)およびFe₂O₃(F)の量を算出し、非晶質中に存在する各量を算出する。このときのAおよびFはそれぞれC₄AH₁₃, C₄FH₁₃の構造の水和物を形成していると仮定する。
- 3) 次に非晶質中のC₄AH₁₃およびC₄FH₁₃で利用されたCaO(C)量が計算されるので、セメント鉱物の反応量から算出された反応に利用されたはずのCを算出し、C-S-Hの中で利用されているCを物質収支から計算し、C/S比を算定する。

1)~3)の繰り返し計算によってC/S比を収束させて、計算を終える。なお、本検討の範囲ではC/S比の違いによる分子量の違いは考慮したが、データが不十分なので、H/S比および密度の変化はないものとした。

上記の繰り返し計算から相組成中の各相の物質量が同定される。さらに、封緘状態における各水和生成物の結合水量と密度を補完し、体積ベースで封緘状態における相組成を求めた。

4.3.2 実験結果

(1) 統計的吸着厚さに関する実験結果

統計的吸着厚さの算定に供する、質量含水率、比表面積の経時変化と統計的吸着厚さの算定結果を図4-3に示す。統計的吸着厚さは単位吸着サイトあたりの平均吸着分子の厚さとし、質量含水率を水分子の密度と比表面積で除すことで得た。

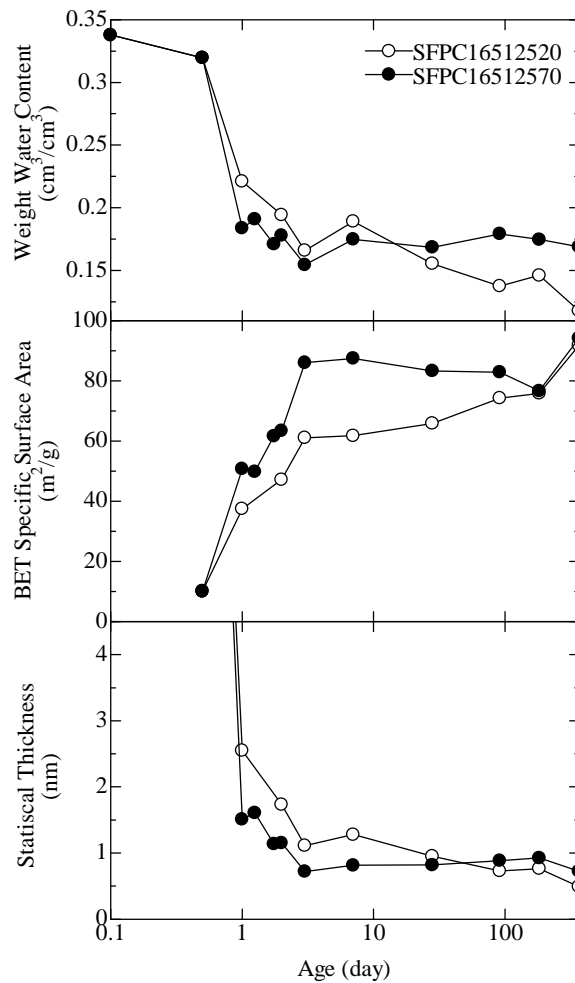


図4-3 統計的吸着厚さに関する実験結果

図4-3上図の質量含水率の経時変化に着目すると、高温履歴を受けている材齢1日から7日においては、SFPC16512570の方が質量含水率が小さい状態にあるが、その後の材齢では水和が停滞し、材齢28日以降は20°C一定条件の方が質量含水率が小さい状態にあることが確認できる。以上のようなSFPC16512570の降温後の水和の停滞は比表面積の経時変化からも確認でき、材齢182日で20°C一定条件が追いついている結果となった。しかしながら、その後の材齢でも20°C一定条件が高温履歴条件を上回ることではなく、結合水量の観点から考えると、高温履歴を受けた場合、同一結合水量で比表面積の大きい水和物が生成されている可能性が考えられる。

(2) 水和圧に関する諸量の実験結果

水和圧の算定に供する、体積含水率、自己収縮ひずみ、ヤング係数の経時変化を図4-4に示す。

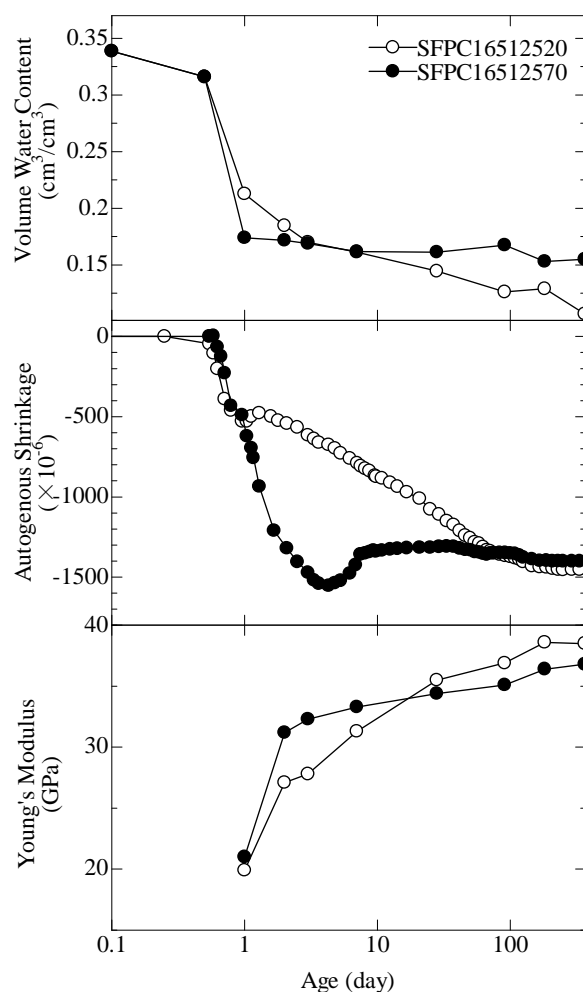


図4-4 水和圧に関する実験結果

図4-3の質量含水率の経時変化で見られたように、図4-4の体積含水率、ヤング係数でも、初期に高温履歴条件で水和が促進され、その後の材齢では停滞し、最終的に20℃一定条件の方が含水率が低く、ヤング係数が大きい状態に達している。

一方、中段に示す自己収縮の経時変化は、以上の諸量よりはむしろ図4-3中段に示した比表面積の経時変化に近い傾向がみられる。このことから、比表面積が自己収縮に及ぼす影響が大きいことが示唆される。

(3) 相組成及びカルシウムシリケート比

水和反応解析と物質収支の繰り返し計算から得られたセメントペーストの相組成の経時変化を図4-5に、リートベルト解析および相組成モデルによって得られたC-S-H中のCa/Siモル比の経時変化を図4-6にそれぞれ示す。

図4-6には、参考として普通ポルトランドセメントの水セメント比が40%のセメントペーストを用いて同種の実験、解析を行った結果を併せて示した。

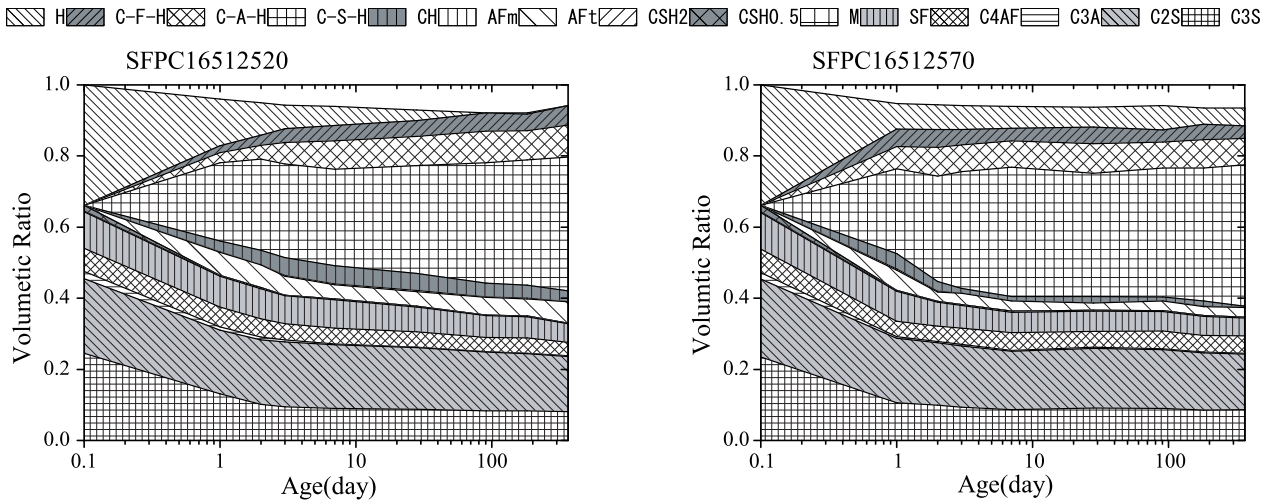


図4-5 セメントペーストの相組成の経時変化

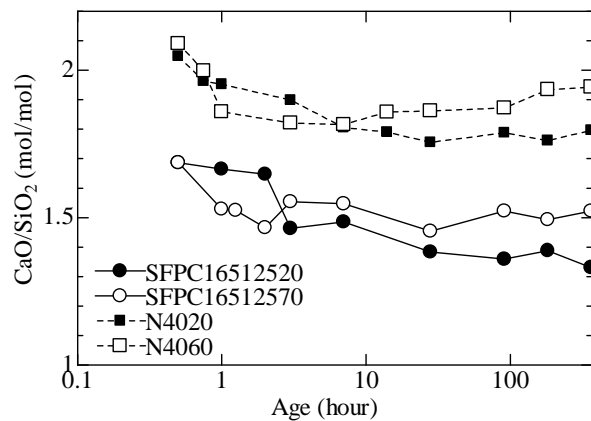


図4-6 SFPC と N40 の Ca/Si モル比経時変化

図4-6から、SFPCとN40では各調合間で温度履歴の影響は似通っているものの、Ca/Siル比の絶対値には大きな隔たりがみられる。これは、SFPCにシリカフュームが混和されていることによって、シリケート量が大きくなっているためと考えられる。

4.3.3 水和圧曲線

4.3.2 の (1) 及び (2) から得られた統計的吸着厚さと水和圧の関係を図 4-7 に示した。

図には、比較のために N40 で同様のプロセスによって得られた自己収縮ひずみから求めた分離圧曲線、また図 4-1 に示したポルトランドセメントセメントペーストの乾燥収縮から得られた水和圧曲線の近似曲線を併せて示した。

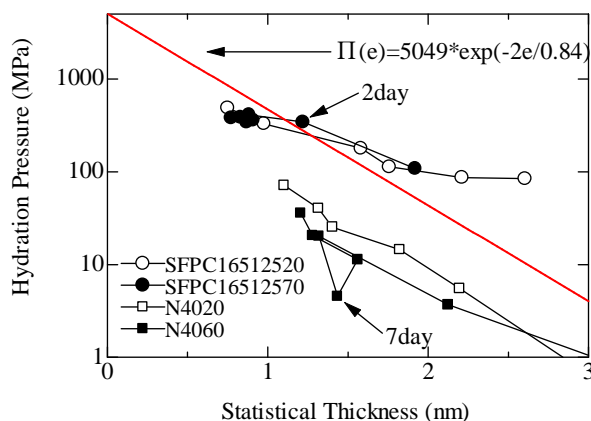


図 4-7 水和圧曲線

図から、同一調合間において温度履歴の影響をみると、SFPC16512570 では材齢 2 日、N40 では材齢 7 日において、一時的に曲線からのずれがみられるが、その後の材齢ではまた曲線上に復帰しており、高温時以外の材齢ではいずれのセメントペーストでも 20°C 一定条件と高温履歴条件は、概ね同一の水和圧曲線を持つことが確認できる。

温度履歴条件を受ける試験体において、上述のようなずれがみられた点については、高温環境下においてセメントペーストの固相表面の親水性が一時的に変化した可能性や、温度変化による水分移動の影響が考えられる。また本現象に関係する実験上の注意点として、本検討で取得したセメントペーストの比表面積は 20°C 一定条件であっても高温履歴条件であっても、4.3.1 の(7)に示す手法、すなわち 20°C 環境下において得られたということを認識しておく必要がある。

さらに、異なる温度環境下では同一の固相表面であっても高温時の比表面積を適切に得られていない可能性があり、高温時には同一質量含水量でも、水の温度膨張によって統計的吸着厚さも変化している可能性も考慮すると、高温時の挙動については更なる検討が必要である。

次に SFPC165125 と N40 の水和圧曲線を比較すると、SFPC では N40 に比べ曲線の傾きが小さくなっている。水和圧を式(4-10)の形で表記した場合、曲線の傾きは減水定数 λ_0 によって決定する。丸山らは、水和圧曲線における λ_0 の項の特性について、セメント表面の親水性の親水性を示す指標であると述べており、高炉スラグを混入することでより親水性になること、収縮低減剤を混和することで疎水的になることを実験的に明らかにしている。

本実験における SFPC と N40 の λ_0 は、それぞれ SFPC165125:1.95, N40:0.79 であって、SFPC165125 のほうが、セメントペースト表面が疎水的であることを示している。セメントペースト表面の親水

性に影響する指標の一つとして、水和生成物 C-S-H のカルシウムシリケート比 (Ca/Si) が挙げられ、一般的に C-S-H の Ca/Si モル比が小さくなると親水性が大きくなること^{8, 9}が知られている。

図 4-6 に、リートベルト解析および相組成モデルによって得られた Ca/Si モル比の経時変化を示しているが、温度履歴に関わらず、すべての材齢において、SFPC の Ca/Si モル比が低くなっている結果は、水和圧曲線の λ_0 から判断された SFPC165125 のほうが N40 より疎水的であるという傾向と一致する。また、図 4-7 に示したポルトランド系セメントペーストの乾燥収縮から得られた曲線の傾き ($\lambda_0=0.84$) と比較すると、N40 の自己収縮から得られた傾き ($\lambda_0=0.79$) と概ね一致している。このことはつまり、自己収縮ひずみから得た水和圧曲線と、乾燥収縮ひずみから得た水和圧曲線の増分水和圧には大きな差異がないことを意味している。

4.4 変曲点以前の自己収縮ひずみメカニズム

4.3 節では、主に長期的に進行する自己収縮に着目し、水和圧の観点から整理を行った。本節では、超高強度コンクリートに特有の変曲点以前の急激に自己収縮が進行する材齢について水和圧理論の適用性を検討する。

4.4.1 実験概要

(1) 使用材料及び調合

本実験では、シリカフェームプレミックスセメントを使用し、水セメント比 16.5%のセメントペーストを作製した。また、自己収縮が急激に進行する材齢について差異をみるため、高性能減水剤の使用量を SP/C=0.5%、1.0%の2水準のセメントペーストを作製した。使用材料を表 4-2 に示す。

表 4-2 使用材料

Materials	Type	Character
Cement	Moderate Portland Cement	Density: 3.23 g/cm ³ , Specific surface area: 3320 cm ² /g, Silica fume content: 13.0%
Silica Fume		Density: 2.34 g/cm ³ , Specific surface area: 10.13 m ² /g, SiO ₂ Content:85.77%
Admixture	Superplasticizer	Polycarbonate-type

(2) 長さ変化試験

2.1 で述べた線膨張係数・自己収縮ひずみ測定装置を使用した。

(3) 水和停止

4.3.1 と同様である。

(4) 含水率試験

材齢 0.5, 0.75, 1, 3, 7, 14, 28, 91, 182, 364 日にて、封緘中のセメントペーストをハンマーで約 1g 程度に砕き、その時点の質量を測定した。次に、水没させ、真空ポンプによる減圧で飽水させ、表面乾燥飽水状態質量、およびアルキメデス法による見かけの密度を測定した。その後、真空ポンプにより脱水させ、定温乾燥機により 105°C で 24 時間以上乾燥させ、絶対乾燥状態質量を測定した。秤量には 0.1mg まで測定可能な電子天秤を用いて、質量含水率、総空隙量、真密度を 3 体の平均値としてそれぞれ有効数字 3 桁にて算出した。以下に各計算式(4-14)~(4-16)を示す。

$$w_0 = \frac{W_0 - W_d}{W_d} \quad (4-14)$$

$$p_s = \frac{\rho_s (W_s - W_d)}{\rho_w \cdot W_s} \quad (4-15)$$

$$\rho_d = \frac{W_d}{W_s / \rho_s - (W_s - W_d) / \rho_w} \quad (4-16)$$

ここで、 w_0 : 質量含水率(g/g),
 W_0 : 封緘状態質量(g),
 W_d : 絶対乾燥状態質量(g),
 p_s : 総空隙量(cm^3/cm^3),
 ρ_s : 見かけの密度(g/cm^3),
 W_s : 表面乾燥飽水状態質量(g),
 ρ_w : 純水の密度(=0.998) (g/cm^3),
 ρ_d : 真密度(g/cm^3)

である。

(4) XRD／リートベルト解析

4.3.1 と同様である。

(5) 比表面積

4.3.1 と同様である。

(7) 超音波伝播試験

各セメントペーストで作製した $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ 角柱試験体が自立可能な材齢において脱型し、材齢 1 日前後まで 15 分から 30 分ピッチで、その後は材齢 36, 42, 48, 72, 168 時間に超音波到達時間を計測し、3 体の平均値としてポアソン比を算出した。試験体は脱型後、アルミ粘着テープにより測定箇所以外は常時封緘、測定箇所は、計測時以外については封緘を施し、水分の逸散を極力防いだ。

超音波到達時間の計測には、Panametrics-NDT™ 超音波探触子 (V103-RM, V153-RM), Panametrics-NDT™ パルサーレシーバ 5077PR (OLYMPUS 社製), およびデジタル・スコープ・オシロスコープ TDS2012B (Tektronix 社製) を使用した。測定条件として、パルス発振電圧: -400V , 探触子周波数: 1.0MHz , パルス繰返し周波数 (PRF): 100Hz として、透過法により試験体中央部において、縦波到達時間、横波到達時間をリファレンス波形と透過波形の差分からそれぞれ計測し、縦波伝播速度、横波伝播速度に換算し、ポアソン比を算出した。到達時間の判定には、最大ピーク波形において最大値を示した時間を用いた。ここで、計算に用いる試験体の厚さは、 40mm 一定とした。

ポアソン比は、縦波と横波の速度比から弾性理論により、式(4-17)のように表される。

$$\nu = \frac{1 - 2(V_s/V_p)^2}{2 - 2(V_s/V_p)^2} \quad (4-17)$$

ここで、 ν : ポアソン比 (-),

V_p : 縦波伝播速度(km/sec.),

V_s : 横波伝播速度 (km/sec.)

である。また、得られたポアソン比と見かけの密度から、ヤング係数 (縦弾性係数), せん断弾性係数 (横弾性率), および体積弾性係数が式(4-18)から(4-20)によりそれぞれ得られる。

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} V_p^2 \rho = 2(1+\nu) V_s^2 \rho \quad (4-18)$$

$$G = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} V_p^2 \rho = V_s^2 \rho \quad (4-19)$$

$$K = \frac{(1+\nu)}{3(1-\nu)} V_p^2 \rho = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} V_s^2 \rho \quad (4-20)$$

ここで、 ρ : 見かけの密度 (g/cm^3),

E : ヤング係数 (GPa),

G : せん断弾性係数 (GPa),

K : 体積弾性係数 (GPa)

である。セメントペーストの見かけの密度は、封緘条件では、質量変化は生じないはずであるので、注水直後から一定値と仮定して、表1に示されるセメント密度と水セメント比から算出した。

式(1)~(4)は、弾性理論に基づくものであり、微細なひび割れなどによる塑性変形が卓越しやすい若材齢でのセメントペーストへの適用妥当性を示すデータは限定的である。しかし、既往の研究でも予測・確認されている経時変化、すなわち、水のような体積変化のない値 ($\nu=0.5$) から、硬化に伴い、一般に知られるコンクリートのポアソン比の値付近に収束する傾向が実験的に確認されたため、セメントペーストの弾性ポアソン比を求められるものと判断している。なお、圧縮試験でのひずみゲージの測定ではまったく逆の、すなわち、材齢に応じてポアソン比が増加する傾向を確認しており、一般的な概念と逆の傾向が示されているので、本検討では、超音波法によるポアソン比を採用して考察を行っている。

4.4.2 実験結果

含水率に関する試験結果を、自己収縮ひずみの試験結果と併せて図4-8に示す

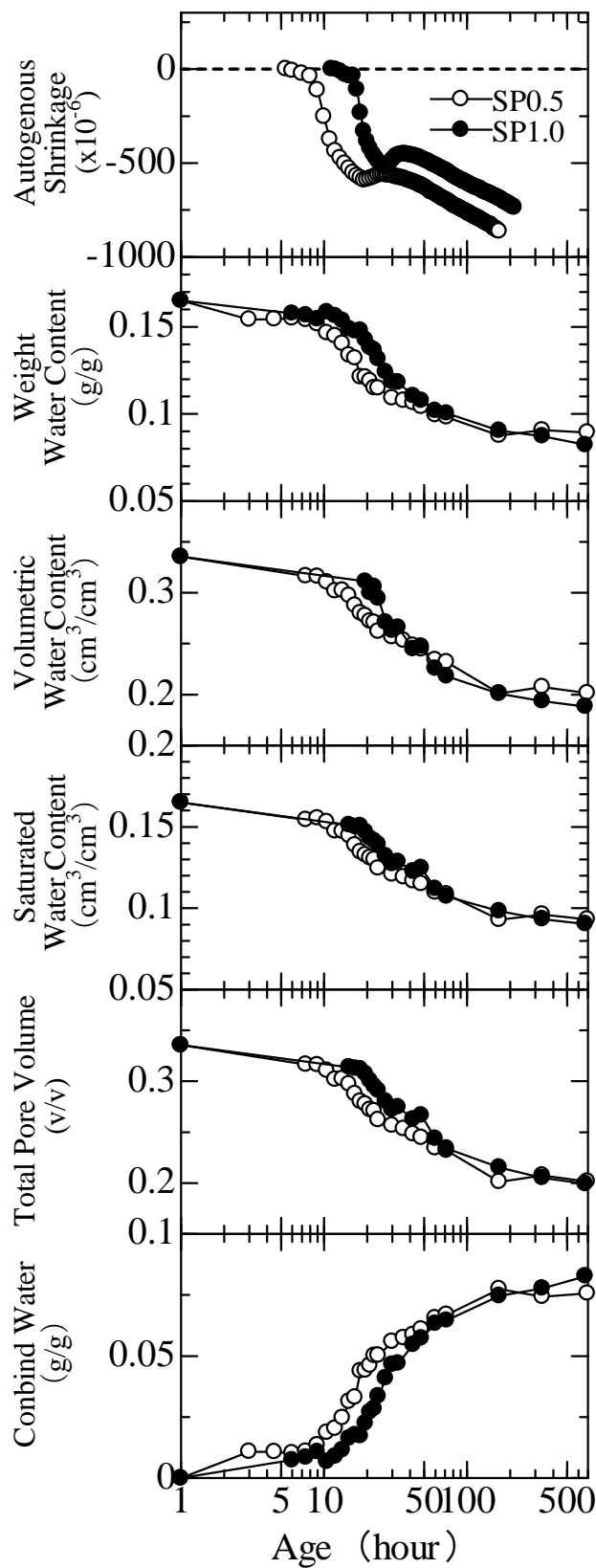


図4-8 含水率に関する試験結果

次に、自己収縮ひずみ、比表面積、線膨張係数、ポアソン比、ヤング係数といった物性値に関する実験結果を図4-9に示す。

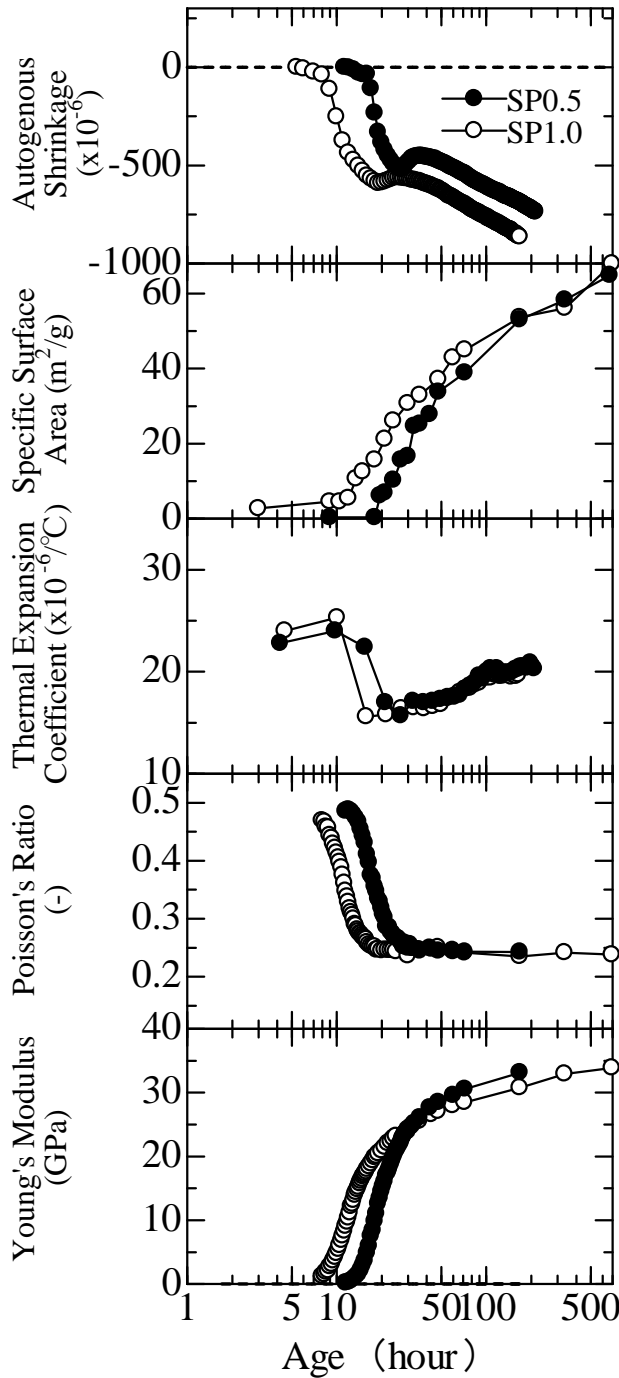


図4-9 物性に関する試験結果

また、リートベルト解析から得られた各鉱物の反応と、生成物の質量割合を、SP量が0.5%のものは、図4-10に、SP量が1.0%のものは図4-11にそれぞれ示す。ここでは、3回の分析結果の測定全点を示した。

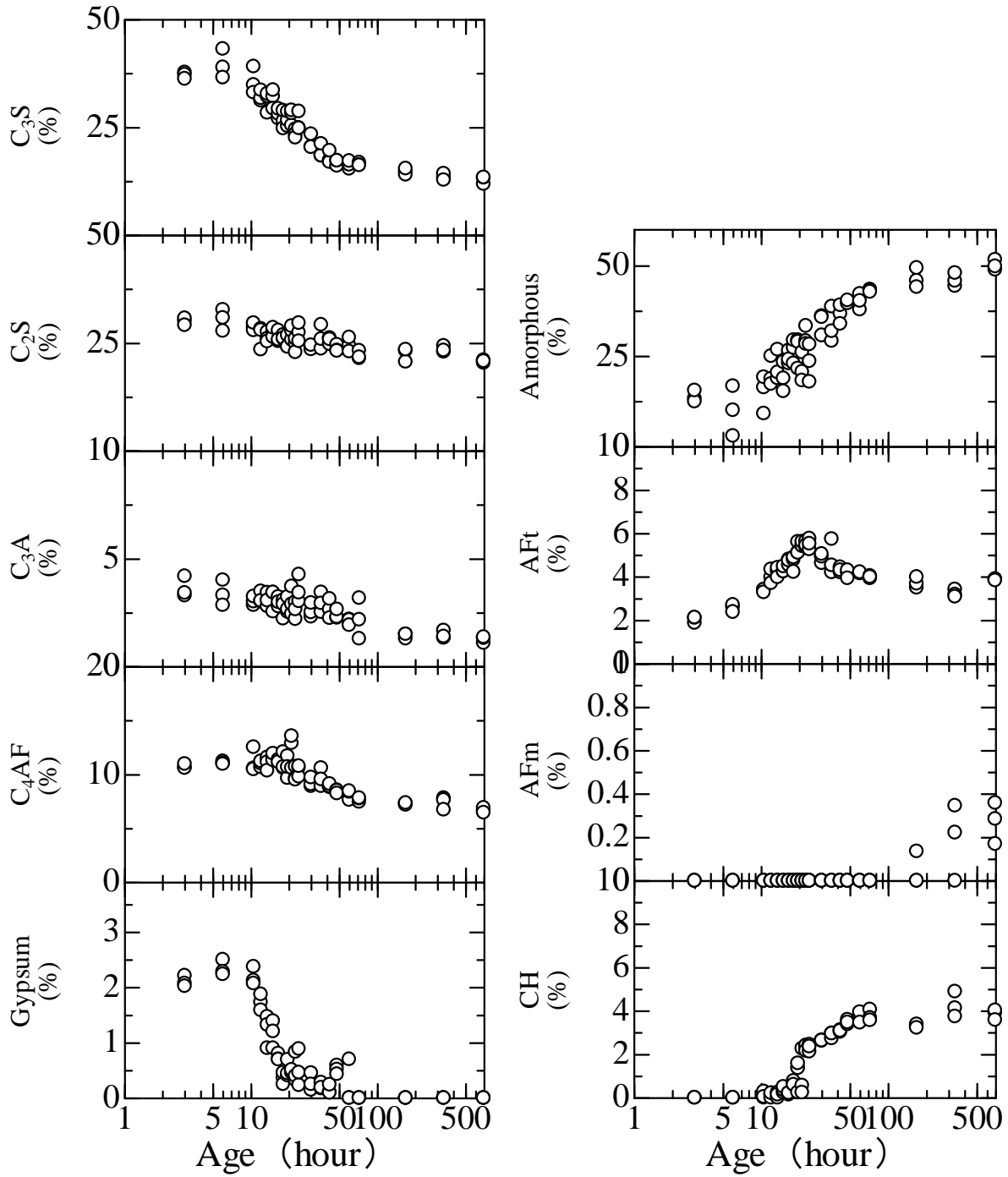


図 4-10 水和に関する試験結果 (SP/C=0.5%)

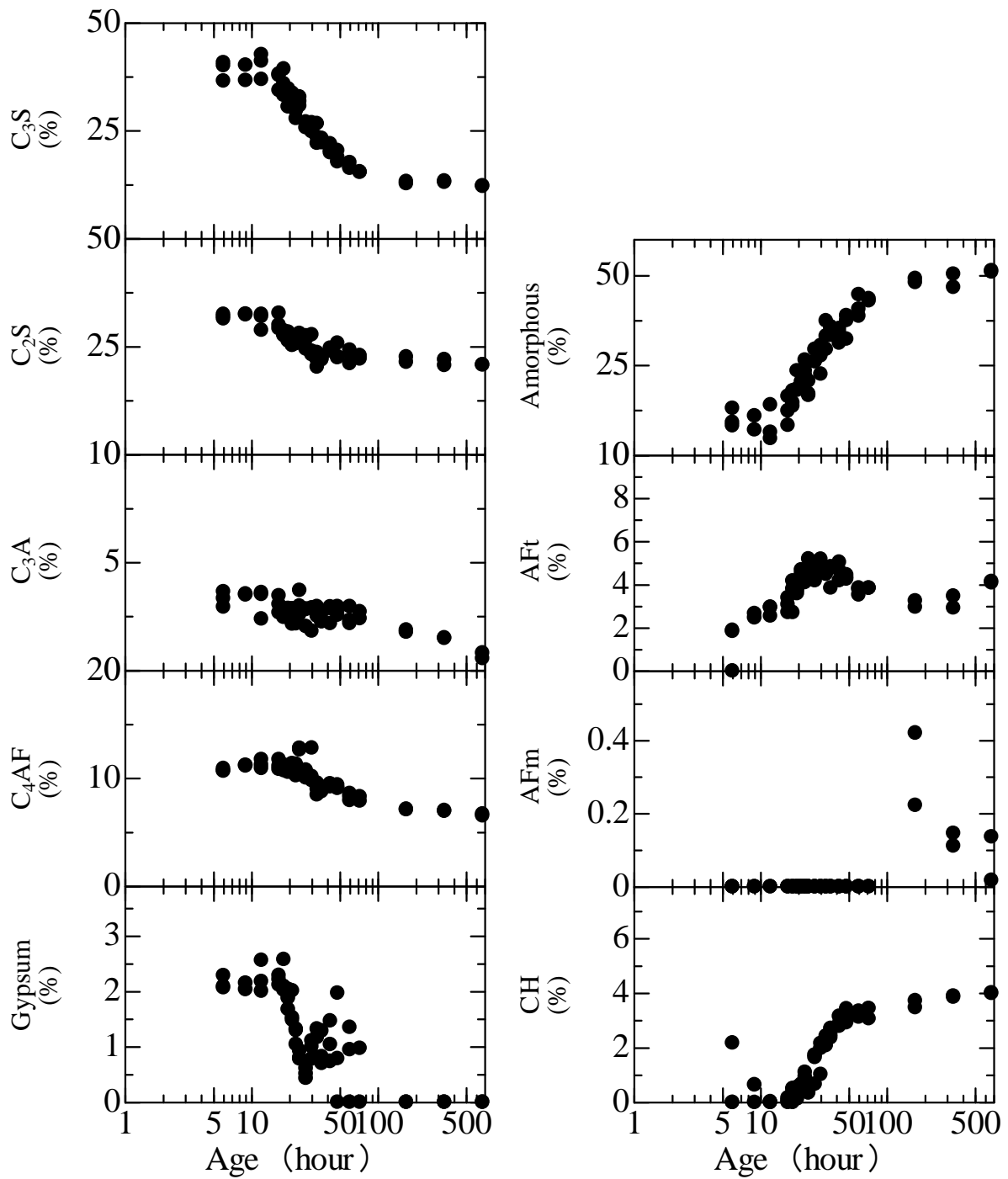


図 4-11 水和に関する試験結果 (SP/C=1.0%)

4.4.2 水和圧曲線

得られた測定値を基に、式(4-6)に従って、水和圧を求めた。また、別途統計的吸着厚さも算出し、同一試験体の同一材齢における両者の値をプロットしたものが図4-12である。比較のため、図4-1に示したポルトランドセメントセメントペーストの乾燥収縮から得られた水和圧曲線の近似曲線を併せて示した。また、図4-13に、4.3節で得られたシリカフェームプレミックスセメントペーストの水和圧曲線との比較を示した。

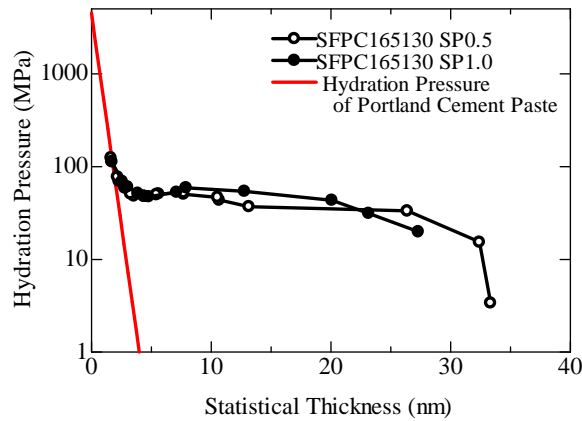


図4-12 水和直後からの水和圧曲線

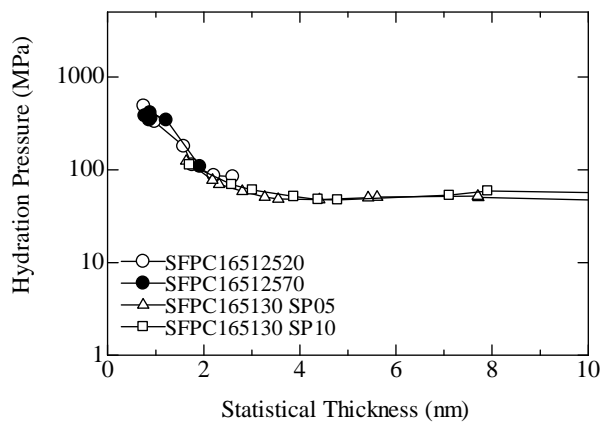


図4-13 SFPC セメントペーストによる水和圧曲線の比較

図4-12から、水和反応がほとんど進んでおらず比表面積が増大する以前の材齢では、統計的吸着厚さが著しく大きく、材齢3時間では、30nm以上の値が観測されている。図4-1に示したように、十分に硬化したセメントペーストでは、飽水状態でも統計的吸着厚さが2nm程度であることを考えると、その大きさが理解される。

その後、水和による水分の消費、水和による比表面積の発現に伴って、急速に統計的吸着厚さは減少し、SP05では材齢15時間程度、SP10では材齢24時間程度に10nmに達する。統計的吸着厚さ10nmの領域について拡大したものが図4-13であるが、いずれのSP量であっても、4.3で述べたシリカフェームプレミックスセメントペーストの水和圧曲線に合流していく様子がわかる。その後の

水和圧曲線の傾向については、4.3 で述べたように、ポルトランドセメントペーストの乾燥収縮から得られた水和圧曲線よりは小さい傾きをもったまま、統計的吸着厚さの減少にしたがって水和圧は増大していく。

図 4-14 は、統計的吸着厚さと自己収縮ひずみの関係であるが、超高強度コンクリートに特有の変曲点は、統計的吸着厚さが概ね 10nm から 7nm の領域においてみられる。

つまり、変曲点以前の自己収縮ひずみは、この統計的吸着厚さが急激に減少していく部分に生じていることになる。

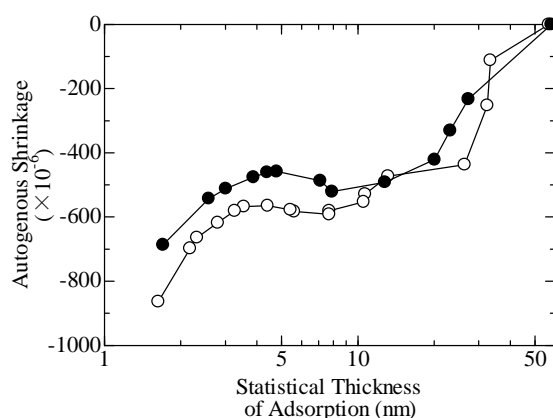


図 4-14 統計的吸着厚さと自己収縮ひずみの関係

この統計的吸着厚さが 7nm 以上の領域における、水和圧曲線の横滑りが超高強度コンクリートに特有の現象であるのか、またすべてのセメント系材料で見られる現象であるのかを判断するには現状ではデータが不足しており、この点については今後の検討課題としたい。

4.5 変曲点の決定メカニズム

超高強度コンクリートの自己収縮では材齢極初期に急激に進行し、その後自己収縮進行速度は緩やかになることを繰り返し述べた。本論文では、この自己収縮進行速度が変曲する点を「変曲点」と呼んでいる。

第3章で述べたように、変曲点の前後で自己収縮の温度依存性状が異なることから、この変曲点がどのように決定するかを解明することは、自己収縮制御技術を確立する上で非常に重要となる。

変曲点が表れる原因に関して、高橋ら¹⁰は、水セメント比 0.3 及び 0.4 の低熱ポルトランドセメントを含む各種セメントペーストについて、自己収縮は2つの屈曲点を持ち、第1屈曲点はエトリンガイトの成長圧により収縮が抑制されることで発現し、第2屈曲点はせっこうが消費されエトリンガイトの生成が終了する材齢と等しく、その後再び自己収縮が進行するとの報告している。

高橋らの指摘のように、自己収縮の変曲点がエトリンガイトの生成によって決定されると考えた場合、変曲点以前の自己収縮ひずみ量が図 3-1 (再掲) に示すように、10°Cから 40°Cの間では減少傾向、50°C以上の領域では増大傾向という実験的事実は、Michand-Poupardin¹¹, Lothenbach¹² が指摘しているように、50°C以上の領域ではエトリンガイトがモノサルフェートに転化するという現象と符合している。

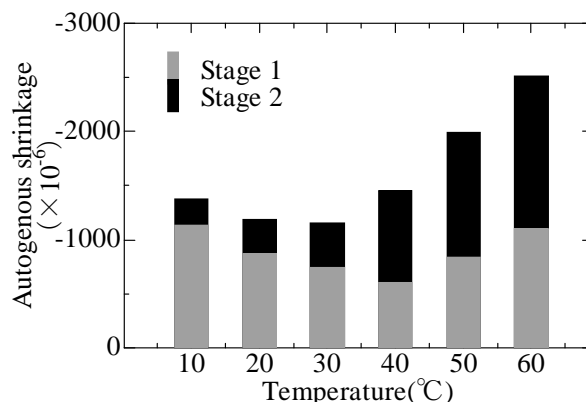


図 3-1 各一定温度養生下における変曲点以前と以後の自己収縮ひずみ量 (再掲)

一方で、普通強度領域のコンクリートや膨張材を混和したコンクリートにおいてもエトリンガイトが生成されているにもかかわらず、超高強度コンクリートのように明確な変曲点がみられるものは少ない。これは、変曲点が生じる原因として、エトリンガイト以外の原因があることを示唆するものである。

本章では自己収縮を統計的吸着厚さ-水和圧曲線により評価することを試みているが、図 4-15 統計的吸着厚さと自己収縮ひずみの経時変化に示す若材齢における統計的吸着厚さと自己収縮ひずみの経時変化をみると、自己収縮ひずみの変曲点を迎える材齢において、統計的吸着厚さの減少速度も大きく停滞している。

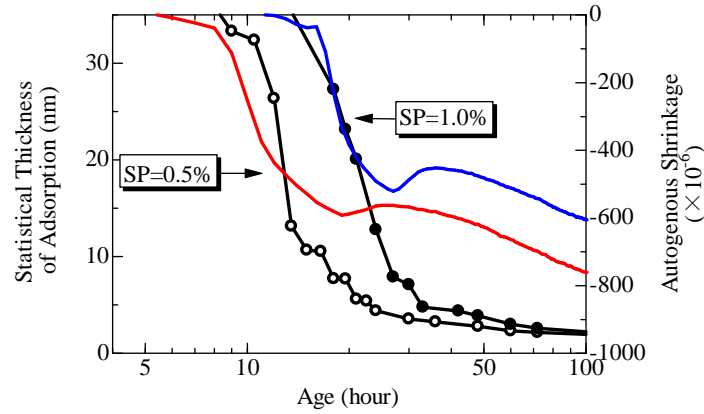


図 4-15 統計的吸着厚さと自己収縮ひずみの経時変化

統計的吸着厚さは、質量含水率と比表面積によって決定される。図 4-16 に示す両者の経時変化をみると、図 4-15 でみられた統計的吸着厚さの減少の停滞する材齢は、質量含水率の減少が緩やかになる材齢と、比表面積が直線的に増大する材齢にあっている。

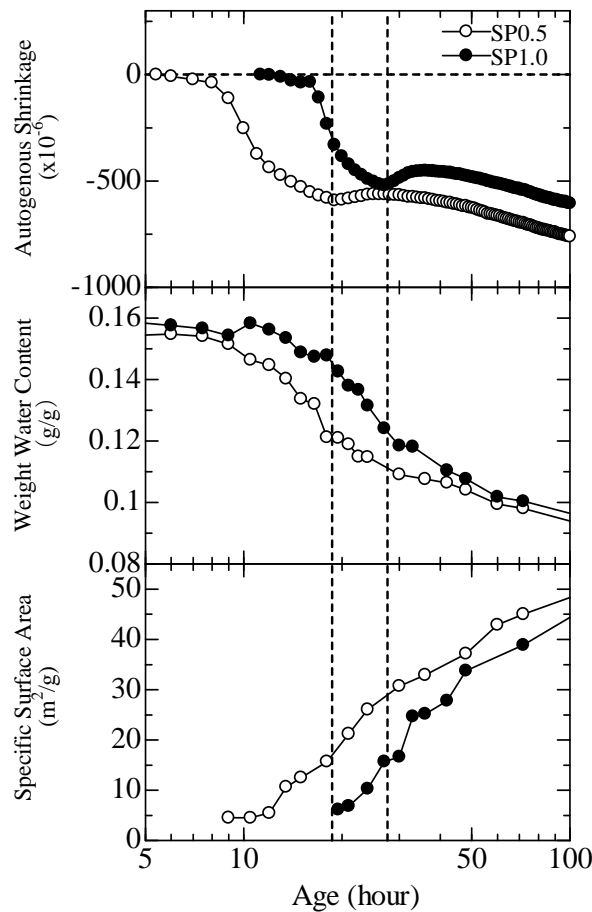


図 4-16 変曲点周辺における質量含水率と比表面積の経時変化

図 4- 17 は、結合水量と比表面積の関係であるが、破線で示される変曲点をとる材齢において、結合水量と比表面積の傾きが若干ではあるが増大している。つまり、図 4- 17 は変曲点において同一結合水量でやや大きな比表面積の水和物が生成されはじめていることを意味している。

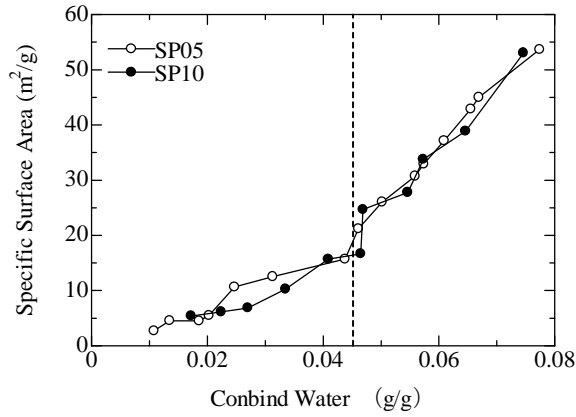


図 4- 17 結合水量と比表面積の関係

一方、超高強度コンクリートの自己収縮でしばしばみられる変曲点直後の膨張傾向については、統計的吸着厚さの観点からは説明がつかない。

図 4- 18 に示す変曲点周辺におけるエトリングイト生成量の経時変化をみると、エトリングイト生成量がピークを迎える材齢と、変曲点直後の膨張のピークの材齢とほとんど対応している。

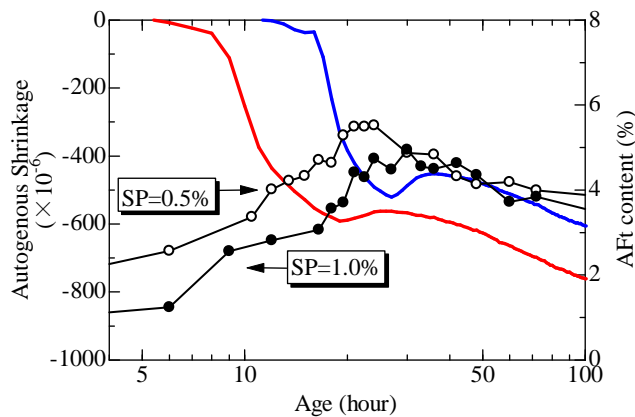


図 4- 18 エトリングイト生成量と自己収縮ひずみの経時変化

以上から、超高強度コンクリートの自己収縮における変曲点は、統計的吸着厚さの減少量の停滞と、エトリングイトの生成によって膨張圧が発生によって生じるものと推察された。

4.6 超高強度コンクリートの自己収縮温度依存性の検証

本節では、4.4 節で得られた水和圧曲線を利用して、超高強度コンクリートの自己収縮において変曲点以前の材齢で低温のものほど進行した現象について説明を試みる。

4.6.1 仮説

変曲点以前の材齢で低温のものほど自己収縮が大きくなった現象に関して、本論文では以下の仮説に則って説明を試みる。

五十嵐らは、普通ポルトランドセメントで水セメント比 40%、55%のセメントペーストを使用し、比表面積の温度依存性に関して検討を行っており、図 4-19 に示されるように、同一養生、同一材齢の試験体を使用した場合、低温のものほど水蒸気吸着による BET 比表面積が増大することを実験的に明らかにした。

さらに五十嵐らは、この現象のメカニズムについて、セメントペースト中の C-S-H 表面のヒドロキシ基が温度変化によって会合反応が生じ、吸着サイトに変化が生じるものと推察している。

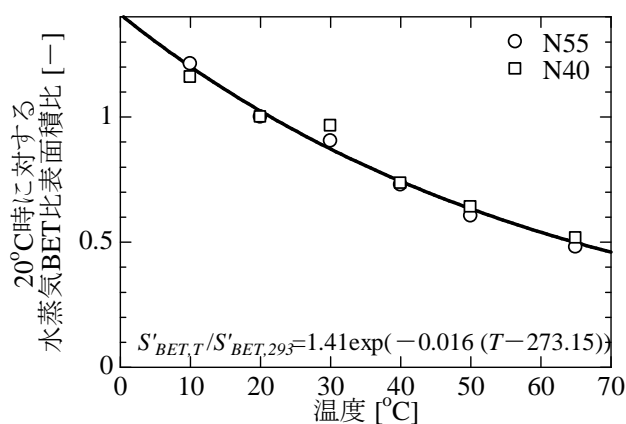


図 4-19 温度と比表面積の関係 (五十嵐)

このような、温度による比表面積の変化が超高強度セメントペーストの若材齢時においても生じていると仮定すると、同一の水和率時（質量含水率時）において統計的吸着厚さは低温のものほど小さくなることになる。このことは、水和圧曲線上で水和圧を増大させる要因となり得るため、結果として自己収縮ひずみを増大させる可能性がある。

以上の議論を踏まえて、超高強度セメントペーストの変曲点以前の自己収縮ひずみについて数値計算による検証を行う。

4.6.2 数値計算

数値計算にあたり、本論文での仮定は以下の3つである。

- ・質量含水率、体積弾性率等の水和に依存する諸量は、同一結合水量時であれば、異なる養生温度であっても同一の値をとる。
- ・異なる養生温度でも、同一の分離圧曲線を示す。
- ・温度による比表面積の変化は、普通ポルトランドセメントのそれと同様である。

超高強度セメントペーストの分離圧曲線に関して、得られた実験値から3次曲線による最小二乗近似を行い、次式で表現した。

$$7 \leq e \leq 34.44 \quad \Pi(e) = -0.0043e^3 + 0.2174e^2 - 4.5352e + 76.736 \quad (4-21)$$

$$e > 34.44 \quad \Pi(e) = \frac{5 \times 10^9}{e^6} \quad (4-22)$$

実験値と近似曲線の関係を図4-20に示す。なお、本節で再現しようとしている変曲点以前の材齢は概ね $e > 7$ (nm) であるため、近似曲線の設定においては $e > 7$ (nm) の範囲の実験値によって最少二乗近似によって求めた。

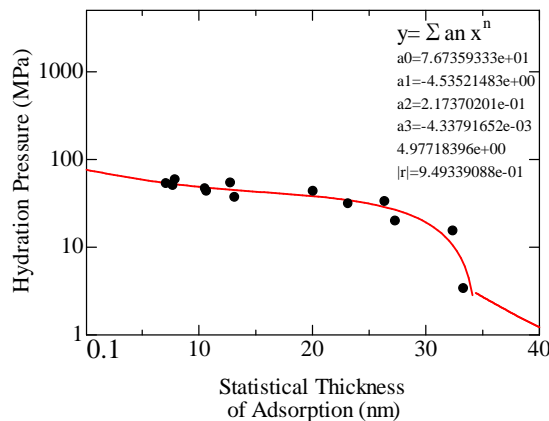


図4-20 水和圧曲線の近似

異なる養生温度時の比表面積は、五十嵐らの研究にならい以下の式で表現した。

$$S'_{BET,T} / S'_{BET,293} = 1.41 \cdot \exp(-0.016(T - 273.15)) \quad (4-23)$$

ここで、 $S'_{BET,293}$: 20°C のセメントペーストの BET 比表面積 (m²/g),

$S'_{BET,T}$: 温度 T のときのセメントペーストの比表面積 (m^2/g),

T : 絶対温度 (K)

である。

式(4-23)を適用した場合、各温度によって同一結合水量における比表面積が変化することになり、結果として、統計的吸着厚さは温度の影響を受けることになる。

統計的吸着厚さが異なる場合、収縮の駆動力として働く水和圧も異なるため、結果として収縮量が異なることになる。

以上の手順によって算定された自己収縮ひずみの結果を図 4- 21 に示す。ここで、横軸には、水和の進行度合いを示す指標として結合水量を使用した。また、実験において、収縮開始時点における結合水量が概ね 0.01 であったため、図中の収縮原点を 0.01 とした。

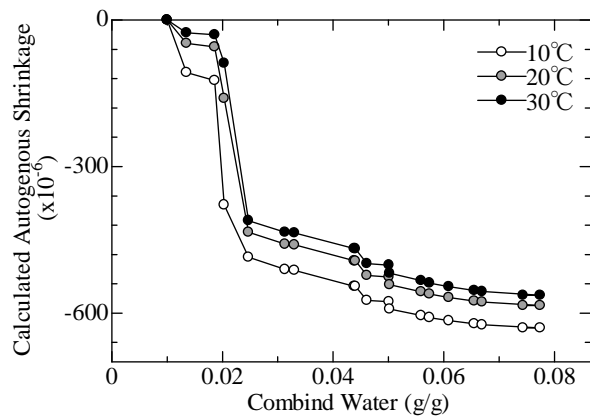


図 4- 21 結合水量と算定自己収縮ひずみの関係

図から確認されるように、以上の仮定及びプロセスによって算定された自己収縮ひずみは、材齢初期には低温のものほど自己収縮が進行する結果となっている。この結果は、第3章で得られた知見を定性的に再現するものである。

しかしながら、本実験で使用したセメントは第3章の実験とは異なるセメント種類であるため、自己収縮量の比較はできない。そこで、20°Cの変曲点における自己収縮量を基準とすることで、各温度の変曲点における自己収縮量の値の比較を行った。その結果が図 4- 22 である。

図から、練り上がり温度が変曲点のひずみ量に及ぼす影響は、定性的には再現できているものの、算定値は測定値より温度の影響を小さく見積もっていることが確認される。このような誤差は、同一のセメントによる実験を行うこと、水和圧曲線において統計的吸着厚さが大きい領域についての実験値を取得すること、また超高強度セメントペーストの比表面積の温度依存性を明らかにすることで改善が可能であると思われる。

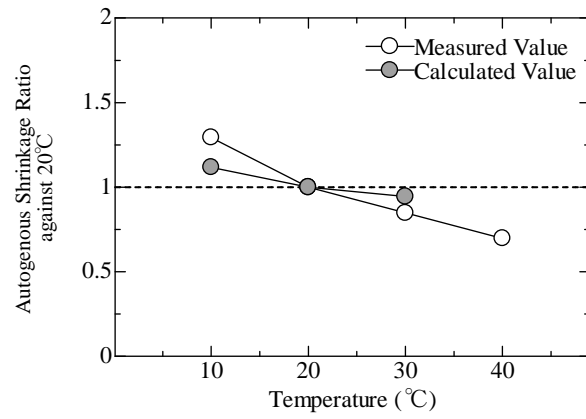


図 4-22 練り上がり温度が自己収縮ひずみに及ぼす影響に関する算定値と測定値の比較

4.7 結論

第4章では、丸山らが提案した水和圧理論を使用して、超高強度コンクリートの自己収縮メカニズムについて検討を行った。以下に本章で得られた知見を示す。

4.2 節では、丸山らが提案した水和圧曲線の理論的背景と、実験手法及び結果について取りまとめ、本章における検討の方向性を示した。

4.3 節では、変曲点以降の材齢における自己収縮挙動について、超高強度セメントペーストを製作し、20°C一定条件と高温履歴条件における自己収縮ひずみを得ると同時に、水和反応解析を実施し、自己収縮から得られた水和圧曲線を作成した。従来の研究では、この水和圧曲線は、十分に水和が進行したセメントペーストを使用して、ヤング係数等の物性が大きく変化することがないという環境で描かれていたが、本節の検討によって、ヤング係数、比表面積といった各種物性が時々刻々変化していくなかにおいても、自己収縮ひずみから水和圧曲線を描画できることが確認された。

また、得られた水和圧曲線について、シリカフェームプレミックスセメントペーストと、ポルトランド系セメントの各水和圧曲線の特徴についてC/Sの観点から検証を行い、C-S-H中のC/Sが低下することによって水和圧曲線の係数の一つである λ_0 が大きな値を取ることが確認された。これは、物理的には水和生成物表面が疎水的であるということの意味している。

4.4 節では、変曲点以前の材齢における水和圧曲線の作成を目的として、注水直後から各物性を取得するとともに、水和反応解析を実施した。得られた実験値から、4.3 節の実験値の範囲外である統計的吸着厚さが大きい領域における水和圧曲線を得た。

4.5 節では、超高強度コンクリートに特有の現象である、自己収縮ひずみの変曲点が観察される原因について推察を行い、変曲点が発生する材齢は、統計的吸着厚さの減少が停滞する材齢、またエトリングライト生成量がピークを迎える直前の材齢であることを明らかにした。

4.6 節では、4.4 節から得られた超高強度セメントペーストの水和圧曲線を使用して、変曲点以前の材齢において、低温のものほど自己収縮量が大きくなる現象について説明を試みた。その結果、この現象は比表面積の温度依存性を考慮することで上述の現象を定性的に再現できることがわかり、自己収縮のメカニズムにおいて、比表面積という物性が有する重要性を指摘するものであった。

第4章の参考文献

- 1 B. V. Derjagin : A theory of capillary condensation on the pores of sorbents and of other capillary phenomena taking into account the disjoining action of polymolecular liquid films, *Acta Physico-chimica URSS*, Vol. 12, No. 2, pp. 181-200, 1945
- 2 B.V. Derjagin and N.V. Churaev : The definition of disjoining pressure and its importance in the equilibrium and flow of thin films. *Colloid J., USSR* 38, pp. 438-448, 1976
- 3 van Olphen, H.: *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*, 2nd ed., Wiley, New York, chapter 10, 1977
- 4 Cluine, J. S., Goodman, J. F., and Symons, P.C: *Solvation Forces in Soap, Films*, *Nature*, 216, pp.1203-1204, 1967
- 5 McIntosh, T. J., and Simon, S. A.: Hydration force and bilayer deformation: a reevaluation, *Biophys. J.*, Vol. 25 No. 14, pp. 4058-4066, 1986
- 6 Israelachvili, J. N.: *Intermolecular & Surface Forces*, 2nd ed., Academic Press, p. 276, 1991
- 7 浅賀喜与志ほか：セメント-石英系水熱反応における未反応石英の定量，*窯業協会誌* 90, pp. 397-400, 1982
- 8 セメント・コンクリート研究会 水委員会，セメント・コンクリート中の水分移動，pp.23-25
- 9 五十嵐豪，丸山一平：C-S-Hの水蒸気吸着モデルに関する基礎的検討，*日本建築学会東海支部研究報告書*，第49号，2011.2
- 10 高橋俊之ほか：セメントペーストの自己収縮に及ぼす水和反応の影響，*コンクリート工学論文集*，Vol.7, No.2, pp.137-142, 1996
- 11 Michand-Poupardin, V. et al. : Influence of Temperature and Alkali Concentration on Thermodynamical Stability of Sulphoaluminate Phases, *Proceeding of 11th International Congress on the Chemistry of Cement*, pp.2033-2043, 2003
- 12 Lothenbach, B. : Thermodynamic Modeling of the Effect of Temperature on the Hydration of Portland Cement, *International RILEM Symposium on Concrete Modeling- CONMOD'08*, pp.393-400, 2008

第 5 章 水和依存性体積変化に起因する RC 部材中のひび割れ

- 5.1 概論
- 5.2 既往の研究
- 5.3 実験概要
- 5.4 基本物性
- 5.5 超高強度 RC 模擬柱部材試験結果
- 5.6 結論

5.1 概論

100N/mm²を越えるような高強度コンクリートにおいては、単位セメント量が多いことから、建築部材に用いられるような比較的断面の小さいコンクリートでも自らの水和発熱によって高温履歴を受ける。

第3章の検討において、超高強度コンクリートではコンクリート温度が40℃以上に達した場合自己収縮が急激に進展することを明らかにした。また、これら自己収縮ひずみや温度ひずみといった若材齢に生じる自己体積変化によって、鉄筋周辺や部材内部にひび割れが発生することが既往の研究において実験的に確認されている¹⁾。しかしながら、体積変化やひび割れがRC部材の耐久性や構造性能に及ぼす影響については、未だ十分に明らかになっていない部分も多く、高耐久性を期待される超高強度コンクリートを構造物に適切に利用するためには、事前にひび割れを防止する対応策を提案する必要があると考えられる。

そこで、本検討では超高強度コンクリートが実際に使用される際に想定される程度の寸法のRC部材を選定し、実大RC柱を模擬した試験体について、自らの水和発熱によって生じる温度履歴の検証、温度履歴化における自己収縮ひずみの進展の検証、コンクリートの体積変化がRC部材中で鉄筋に拘束されることによって生じるひび割れの確認、コンクリートの収縮を低減した場合におけるRC部材中のひび割れ低減効果の確認等について実験的検証を行った。

5.2 既往の研究

丸山ら^{2,3,4}は、水セメント比15%、シリカフューム置換率10%の超高強度コンクリートを用いて、900×900×1100mmの模擬柱部材の打設を行った。表5-1、表5-2に、使用した材料及び調合を示す。

表5-1 使用材料（丸山）

材料名	物性・特徴	記号
低熱ポルトランドセメント1	C ₃ S:29.1%, C ₂ S:50.1%, C ₃ A:4.3%, C ₄ AF:9.6%, プレーン: 3600 cm ² /g, 密度: 3.22 g/cm ³	L1
低熱ポルトランドセメント2	C ₃ S:28.4%, C ₂ S:50.7%, C ₃ A:4.8%, C ₄ AF:9.4%, プレーン: 3600 cm ² /g, 密度: 3.22 g/cm ³	L2
シリカヒューム1	密度:2.24 g/cm ³ , 比表面積:17.1 m ² /g, SiO ₂ :95%	SF1
シリカヒューム2	密度:2.24 g/cm ³ , 比表面積:17.9 m ² /g, SiO ₂ :95%	SF2
シリカヒュームセメント1	90% 低熱ポルトランドセメント1 + 10% シリカヒューム1	SFC1
シリカヒュームセメント2	90% 低熱ポルトランドセメント2 + 10% シリカヒューム2	SFC2
細骨材	表乾密度: 2.63 g/cm ³ , 吸水率:2.5%, F.M. 2.53, 実積率:54%	S
粗骨材	最大粒径:20mm, 表乾密度:2.93 g/cm ³ , 吸水率:0.39%, F.M. 6.66, 実積率: 60.0%	G
高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系減水剤	SP
消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体系消泡剤	D

表5-2 調合（丸山）

バッチ	試験体	記号	ベースセメント	シリカヒューム	W/B	W	C	S	G	SF	SP	D	Air	スランプフロー	練上り温度	環境温度
					(%)											
B1	C-D6S	SFLC1	LC1	SF1	15	155	930	451	932	103	2.6	0.6	1.4	715x715	29.0	29.0
B2	C-D41S	SFLC1	LC1	SF1	15	155	930	451	932	103	2.6	0.6	1.5	745x720	29.5	31.0
B3	C-D6W	SFLC2	LC2	SF2	15	155	930	451	932	103	2.6	0.6	2.4	730x710	14.5	8.0
B4	C-D41W	SFLC2	LC2	SF2	15	155	930	451	932	103	2.6	0.6	2.2	710x705	15.5	10.5

水結合材比はすべての調合で15%であり、実験で使用した粗骨材は、超高強度コンクリートに一般的に使用されるものであり、夏期施工（記号 S）と冬期施工（記号 W）を想定して8月及び11月に打込みを行った。

それぞれの時期に打込んだ試験体の中心部及び端部の温度履歴を図5-1に、試験体の全ひずみから温度ひずみを差し引いた自己収縮ひずみを図5-2にそれぞれ示す。なお、自己収縮ひずみの算定に際し、線膨張係数は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として20°Cのひずみに換算して評価を行っている。

図5-1からわかるように、試験体温度は打設時期によって大きく異なり、夏期と冬期では初期温度が10°C以上、最高到達温度が30°C以上異なる場合があることが明らかになった。また、このような温度履歴の相違によって自己収縮ひずみ量も影響を受け、練上り温度が低温のものほど自己収縮が大きく、また、断熱温度履歴（最高到達温度41.6°C~66.8°C）のものは温度一定のものよりも自己収縮が大きくなることが確認された。これらの傾向については第3章で述べた。

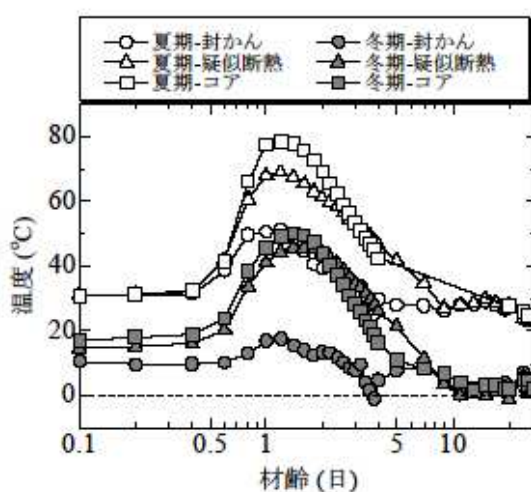


図 5-1 打設時期による温度履歴の相違 (丸山)

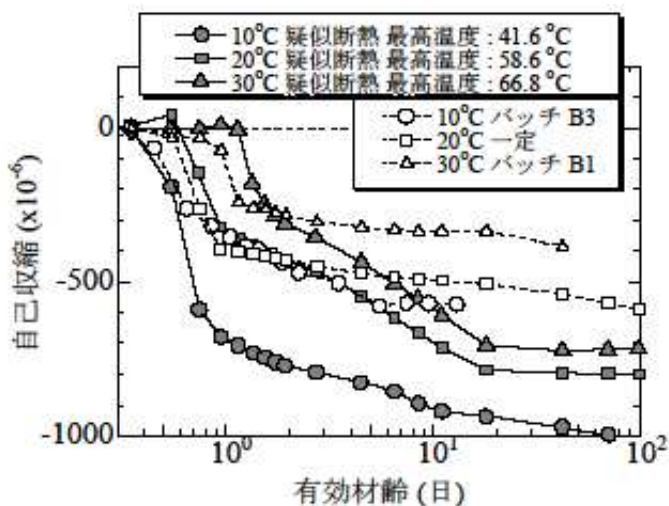


図 5-2 自己収縮ひずみの温度依存性 (丸山)

若材齢における自己収縮ひずみ及び温度ひずみが模擬柱部材に及ぼす影響を確認する目的で、表面部はアセトンを用いてひび割れの確認を行い、内部は模擬柱部材をダイヤモンドカッターで切断し同じくアセトンでひび割れの確認を行った。

図 5-3 に示す冬期打設試験体の断面内部ひび割れ性状を見ると、主筋近傍、せん断補強筋近傍あるいは部材中央を横断するひび割れがみられる。このひび割れは外部からは確認できないものであり、施工時に確認されないという意味で問題である。

これらのひび割れ性状を、図 5-4 に示す夏季打設の試験体と比較すると、主筋近傍では同様のひび割れがみられるものの、横断ひび割れは確認されなかった。さらに、冬期打設試験体の部材表面に着目すると、主筋に沿うように縦ひび割れがみられた。この表面ひび割れの一部は、かぶり厚さ以上の奥行をもち、一部はせん断補強筋に到達していた。

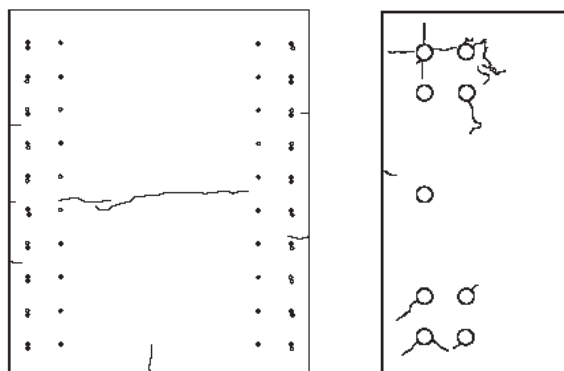


図 5-3 冬期打設の試験体断面のひび割れ（丸山）

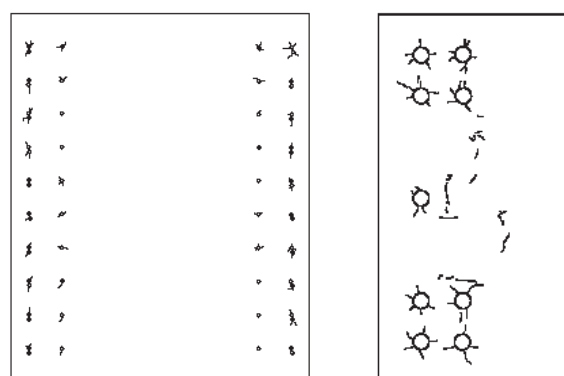


図 5-4 夏期打設の試験体断面のひび割れ（丸山）

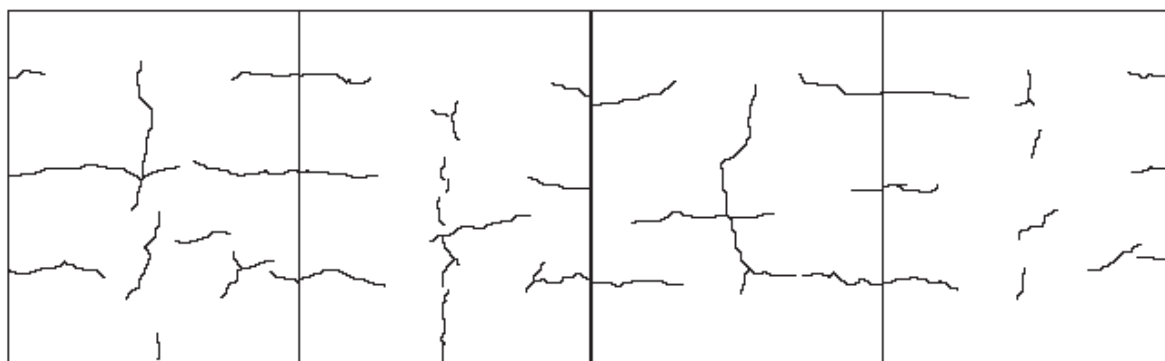


図 5-5 冬期打設の試験体表面のひび割れ（丸山）

5.3 実験概要

本実験では、実大寸法の超高強度 RC 柱に生じる自発的な体積変化に起因するひび割れを抑制する手法として、1) 保温養生の適用、2) 膨張材の混和、3) 収縮低減剤の混和、4) 膨張材と収縮低減剤の併用に関して検討を行った。4) については2体作製し脱型時期を1日とした試験体についても温度、ひずみ、ひび割れ状況の確認を行った。

5.3.1 使用材料及び調合

本実験で使用した材料を表 5-3 に示す。セメントにはシリカフェームプレミックスセメント、膨張材には一般的なものより比表面積が大きいものを、粗骨材、細骨材には超高強度コンクリートに使用実績のあるものを使用した。本実験に使用した調合を表 5-4 に示す。調合は実強度 150N/mm² を目標として水結合材比を 14% とした。また、スランプフローが 65cm±10cm、空気量が 2%±1.5% となるよう、適宜混和剤で調整を行った。収縮低減を目的として、膨張材、収縮低減剤を適当量を使用した。

表 5-3 使用材料

材料	記号	物理的特性など
セメント	C	シリカフェームプレミックスセメント (SFPC [®] /太平洋セメント社製) 密度: 3.05g/cm ³ , 比表面積: 6190cm ² /g
粗骨材	G	2005 碎石 (安山岩) 表乾密度: 2.56g/cm ³ , 吸水率: 2.45%, 粗粒率: 6.72
細骨材	S	砕砂 (安山岩) 表乾密度: 2.55g/cm ³ , 吸水率: 2.61%, 粗粒率: 2.79
膨張材	EX	早強性膨張材 (太平洋 N-EX/太平洋マテリアル社製) 密度: 3.19g/cm ³ , 比表面積: 4920cm ² /g
収縮低減剤	SR	高性能収縮低減剤 (テトラガード AS21/太平洋マテリアル社製) 成分: 低級アルコールのアルキレンオキシド付加物
繊維	F	ポリプロピレン繊維 (ダイワボウポリテック社製) 繊維度: 2.27dtex, 繊維長: 2.0mm
減水剤	SP	高性能減水剤 I 種 (レオビルド SP8HU/BASF ポゾリス社製)

表 5-4 調合

	W/B	Unit Weight (kg/m ³)							
		W	C	EX	SR	S	G	F	AD
PL-1	14	155	1108	0	0	366	850	3	0.95
EX-1	14	155	1088	20	0	366	850	3	0.96
PL-2	14	155	1108	0	0	366	850	3	0.95
EX-2	14	155	1078	30	0	366	850	3	0.96
SR	14	155	1108	0	6	366	850	3	0.94
EX・SR	14	155	1078	30	6	366	850	3	0.93

5.3.2 強度試験

所定の材齢に圧縮強度試験及び割裂引張強度試験を、それぞれ JIS A 1108, JIS A 1113 に準拠して行った。圧縮試験時には同時に静弾性係数を測定した。試験に供する試験体の養生条件は標準水中養生、封緘養生、簡易断熱養生の3種類とした。各養生条件における試験材齢を表 5-5 に示す。

表 5-5 強度試験材齢

養生方法	圧縮試験材齢 (日)	引張試験材齢 (日)
標準	7, 28, 56, 91	—
封緘	7, 28, 56, 91, 182, 365	7, 28, 56, 91, 182, 365
簡易断熱	28, 56, 91, 182	—

5.3.3 線膨張係数

20°C一定条件で材齢 186 日まで封緘養生を行った小型試験体 (100mm×100mm×400mm) を使用して、超高強度コンクリートの線膨張係数の測定を行った。

ひずみの測定は、埋込型ひずみ計 (評点間距離 100mm) によって行い、試験体の温度を一定速度で 20°C→70°C→常温としたときのひずみの変化を線形回帰することで線膨張係数を得た。

5.3.4 自己収縮ひずみ

20°C一定条件及び水和発熱によって生じる温度履歴環境下において、自己収縮ひずみ試験を行った。測定には埋め込み型ひずみ計を使用した。20°C一定条件については、「コンクリートの自己収縮研究委員会報告書」を参考に、小型試験体 (100×100×400mm) を使用した。また、温度履歴環境下の自由ひずみを得るため、PL-1 と EX-1 では、後述する実大 RC 模擬柱の中に無応力計を設置した。また、PL-2, EX2, SR, EXSR では 1000×1000×500mm のコンクリート塊を作製し、同じく無応力計によってひずみの測定を行った。また、早期脱型が自己収縮ひずみに及ぼす影響をみるために、EXSR と EXSR_1 日脱型試験体には、2 本の無応力形の他に、コンクリートの表層から 10mm～20mm の部分に埋込型ひずみ計を設置した。無応力計とひずみ計の測定位置を図 5-6 に示す。

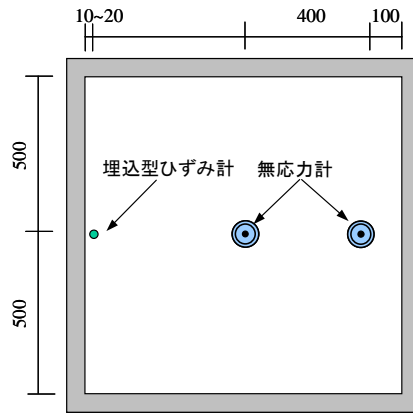


図 5-6 自己収縮ひずみの測定位置

温度履歴下における自己収縮ひずみの算定は以下のプロセスに従って評価を行った。

(1) セメントペーストの線膨張係数の時間依存性

第2章で得られた測定結果によると、水セメント比が13~20%の範囲内のセメントペーストの線膨張係数は、有効材齢で評価すると図5-7のように同一曲線(式(2-1))で概ね表現できる。ただし、ここでの有効材齢では式中の $E_a/R=10000$ とした。

$$\alpha_p(t_e) = \frac{110}{t_e} + 5 \cdot \exp\left(1 - \frac{1}{0.02 \cdot t_e}\right) + 10 \quad (5-1)$$

ここで、 t_e : 有効材齢

$\alpha_p(t_e)$: 有効材齢 t_e におけるセメントペーストの線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

である。本検討では、膨張材や収縮低減剤の混和によらず上式を使用できるものとした。

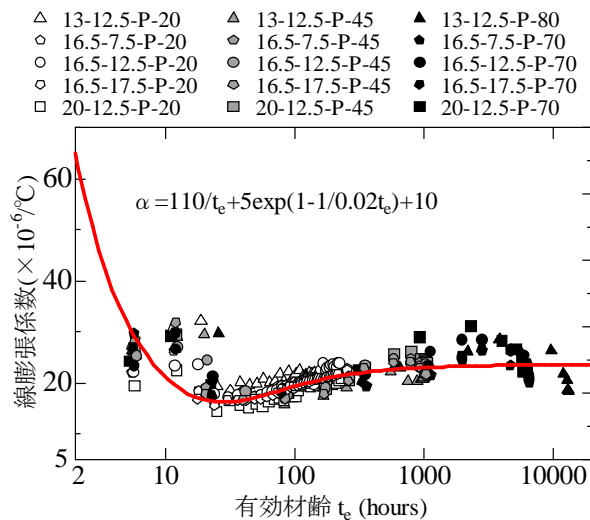


図 5-7 超高強度セメントペーストの線膨張係数の経時変化

(2) 骨材の線膨張係数の推定

線膨張係数に与える骨材量の影響は、2.4.5 に示す複合則（式(5-2)）で概ね評価可能である。

$$\alpha(x) = \frac{1}{\frac{1-x}{\alpha_p} + \frac{x}{\alpha_a}} \quad (5-2)$$

ここで、 x ：骨材量体積比、

$\alpha(x)$ ：骨材量体積比 x における線膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、

α_p ：セメントペーストの線膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、

α_a ：骨材の線膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)

である。式(5-2)より、材齢 185 日(20°C一定養生)のとき、セメントペーストの線膨張係数 $\alpha_p = 23.5$ であり、調号より骨材体積比 x が 0.461 である。後述する線膨張係数の試験結果を利用すると $\alpha(0.461) = 12.2$ となり、 $\alpha_a = 7.79$ が得られる。

(3) 複合則によるコンクリートの線膨張係数の導出

(5-2)で得られた骨材の線膨張係数の推定値を使用すると、コンクリートの線膨張係数の時間変化は以下の式で表される。

$$\alpha(t) = \frac{1}{\frac{1-0.461}{\alpha_p(t)} + \frac{0.461}{7.79}} \quad (5-3)$$

式(5-1)、(5-3)で表される線膨張係数と、試験中に測定される温度変化量から得られる温度ひずみを全ひずみから差し引くことで自己収縮ひずみの算定を行った。算定には、式(5-4)に示す増分による手法を用いた。

$$\Delta \varepsilon_{aut,i} = \Delta \varepsilon_{total,i-1} + \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} \cdot (T_i - T_{i-1}) \quad (5-4)$$

ここで、 $\varepsilon_{aut,n}$ ： n ステップにおける自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、

$\varepsilon_{total,n}$ ： n ステップにおける全ひずみ ($\times 10^{-6}$)、

α_n ： n ステップにおける線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)、

T_n ： n ステップにおける試験体温度 ($^{\circ}\text{C}$)

である。

5.3.5 実大柱試験体の概要

試験体寸法は、高層住宅の柱を模擬した丸山らの実験を参考に、縦横 900mm、高さ 1100mm とし、配筋は主筋 D41 20 本、せん断補強筋は、D13 100mm ピッチとした。型枠は鋼製型枠とし、上下は厚さ 100mm の発泡スチロールで断熱した。試験体の概要を図 5-8 に示す。

実大試験体中のひずみ測定は、各試験体の中間高さ断面でコンクリートひずみ 2 カ所で水平方向、鉛直方向の計 4 点、鉄筋ひずみは主筋とせん断補強筋に合わせて 4 箇所 8 点（裏表）とし、同時に各点において熱電対によってコンクリート温度の計測を行った。試験体鉛直方向に温度の分布が懸念されたため、上下端から 100mm の断面でも、中央部、周辺から 350mm、隅角部の 3 点でコンクリート温度の計測を行った。

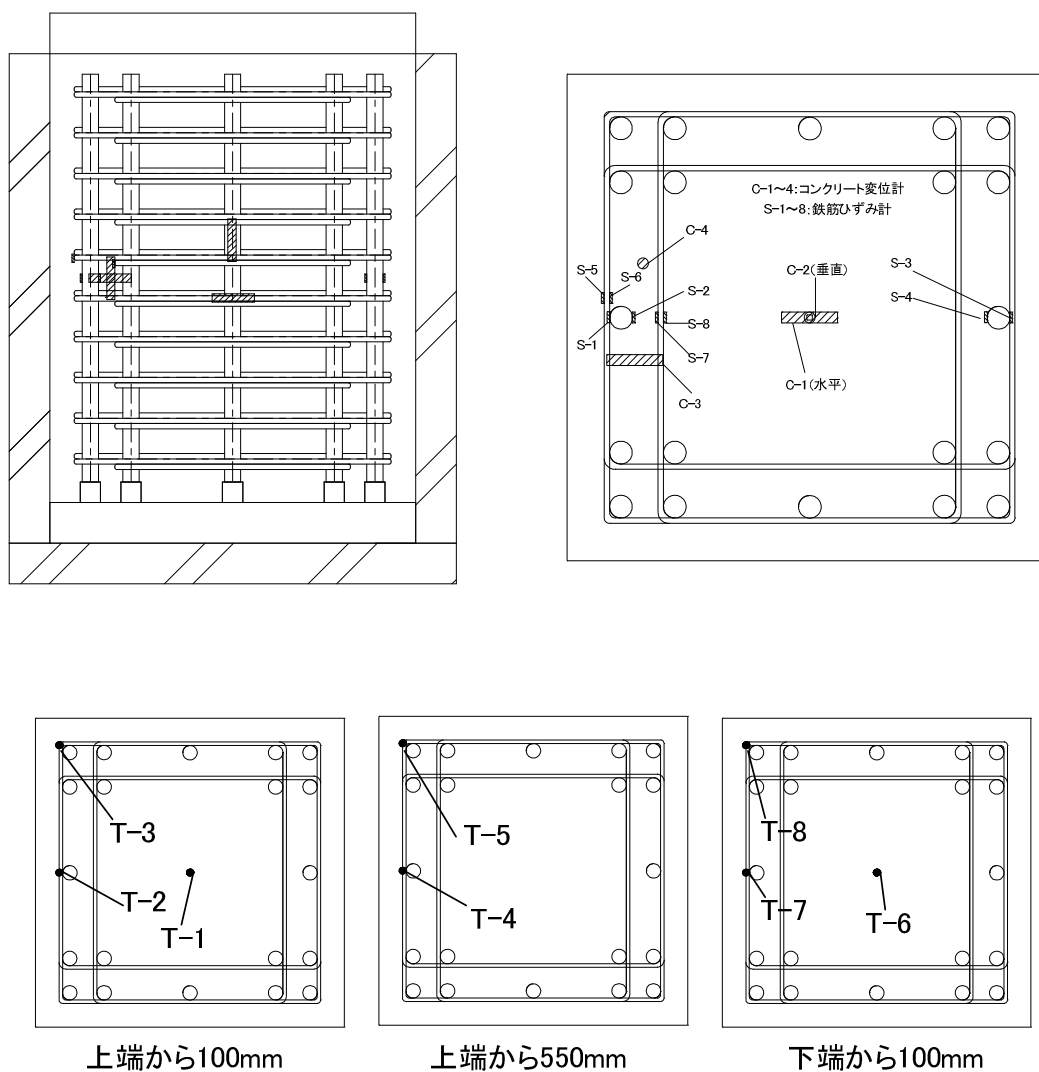


図 5-8 実大柱試験体概要

5.4 基本物性

5.4.1 強度試験結果

図5-9に、各養生条件における圧縮強度試験の結果を示す。

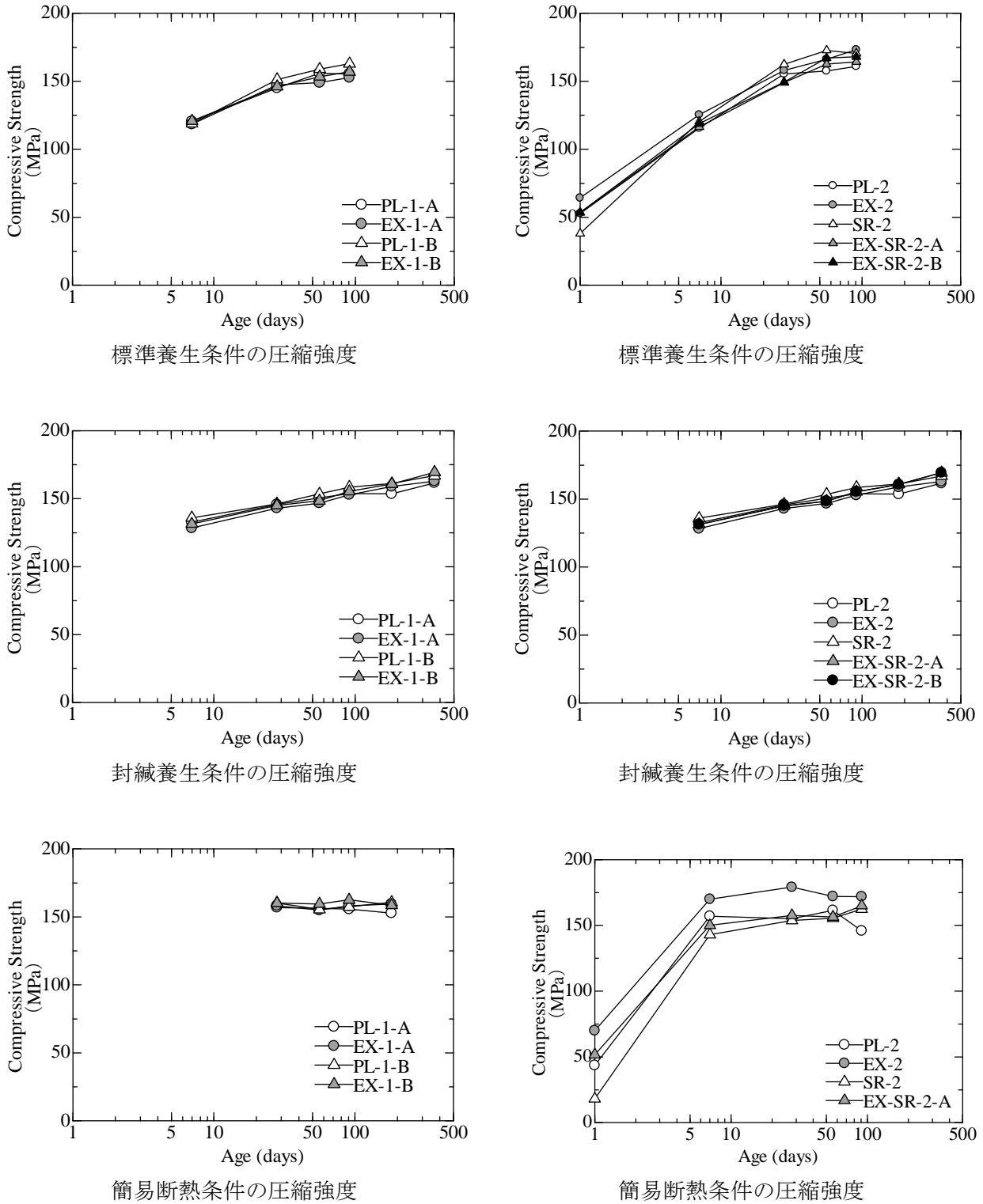


図5-9 圧縮強度試験結果

標準養生、封緘養生といった20°C一定養生条件下では、圧縮強度に及ぼす膨張材、収縮低減剤の影響は若材齢から大きくはない。

しかし、図5-9右下の図に示されているように、膨張材を30kg/m³混和しているEX-2の簡易断熱養生において、高温履歴を受けたときの強度増進は材齢55日まで他の調合より大きい。このような傾向は膨張材を20kg/m³混和のEX-1では見られないため、高温履歴下の強度発現において、膨張材量が影響を及ぼす可能性が考えられる。同様の傾向は既往の研究⁵でも確認されている。

簡易断熱養生を受けた試験体はEX-2以外でも調合によらず、他の養生と比較して早期に強度が増進するものの、長期的には停滞もしくは低下を示した。

圧縮強度に及ぼす温度履歴の影響を評価するため、図5-9に示される各調合、養生条件における圧縮試験のうち、PL-2、EX-2、SR-2、EXSR-2の試験結果をCEB-FIPモデルコード90に採用された有効材齢式によって評価した。

$$t_e = \sum \exp\left\{\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_k}\right)\right\} \cdot \Delta t \quad (5-5)$$

- ここで、 t_e : 有効材齢 (時間),
 E_a : みかけの活性化エネルギー (kJ/mol),
 R : ガス定数 (8.31J/(K・mol)),
 T_0 : 基準温度 (293K) ,
 T_k : 試験体温度 (K)

である。結果を図5-10 有効材齢による評価に示す。

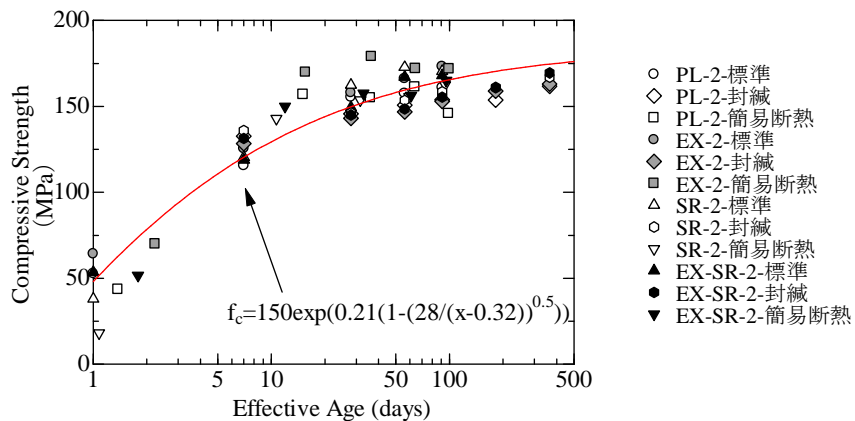


図5-10 有効材齢による評価

5.4.2 ヤング係数

図5-11に、各養生条件におけるヤング係数試験の結果を示す。

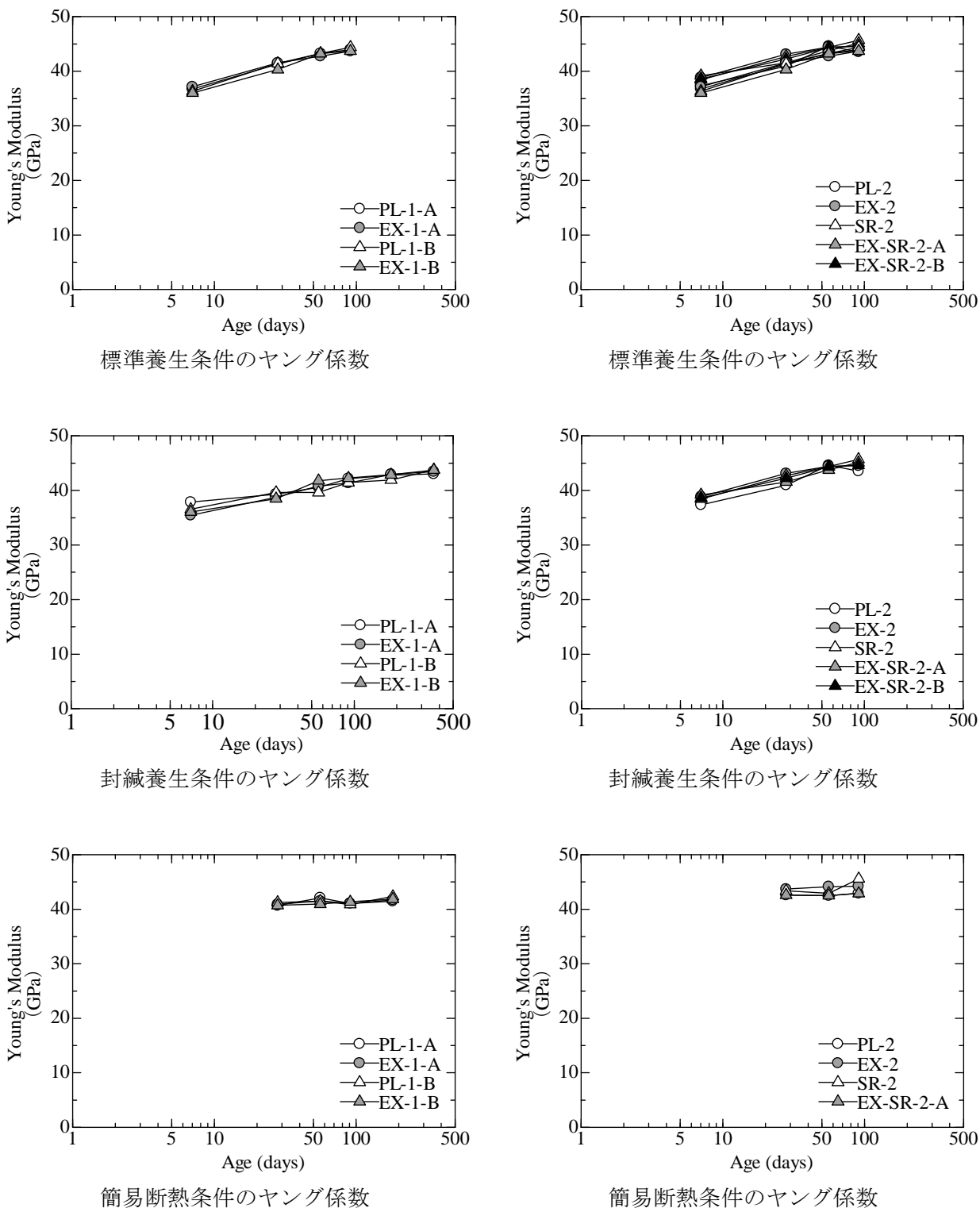


図5-11 ヤング係数試験結果

ヤング係数試験においても、圧縮強度と同様に、20℃一定養生条件では膨張材、収縮低減剤の影響はほとんど見られない。また、圧縮強度試験では見られた簡易断熱養生のEX-2でも、他の調査とほぼ同程度のヤング係数の推移を示した。

図5-12に、同一調査、同一材齢における圧縮強度とヤング係数の関係を示す。

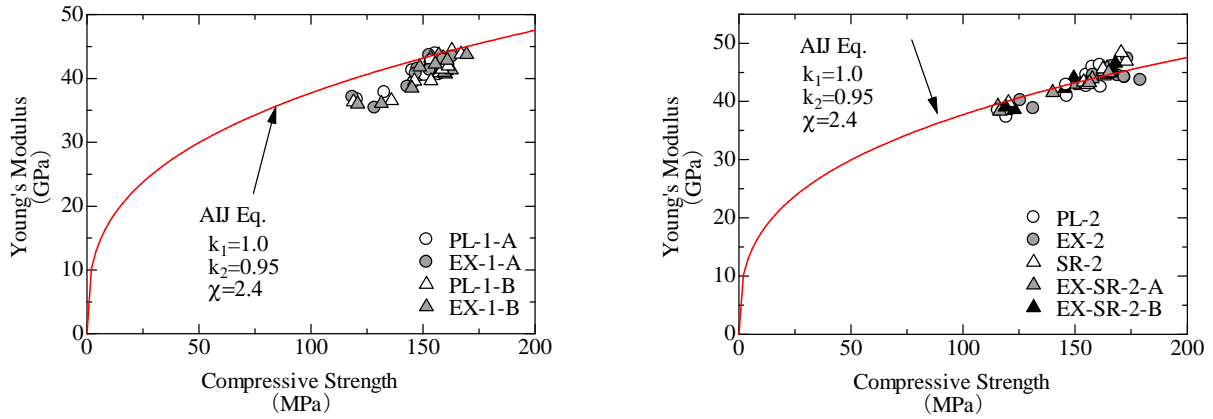


図5-12 圧縮強度とヤング係数の関係

いずれの調査においても、膨張材、収縮低減剤の有無や養生条件にかかわらず、図中に記す日本建築学会の関係式と良い符合を示した。

5.4.3 割裂引張強度

図5-13に、封緘養生条件における割裂引張強度試験の結果を示す。

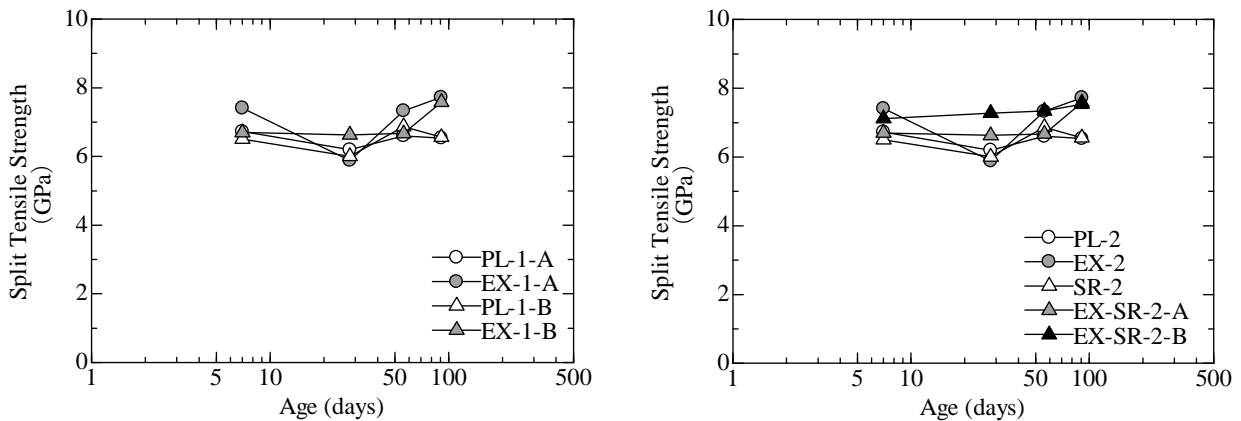


図5-13 割裂引張強度試験結果

封緘養生条件の割裂引張強度は、材齢7日時点で概ね6~7MPaに到達しており、その後の材齢での伸びはほとんど見られなかった。また、EX-1, EX-2では、材齢28日時に一時的に強度が低下す

る現象が見られた。

圧縮強度と割裂引張強度の関係を、野口らが提案した関係式と併せて図5-14に示した。

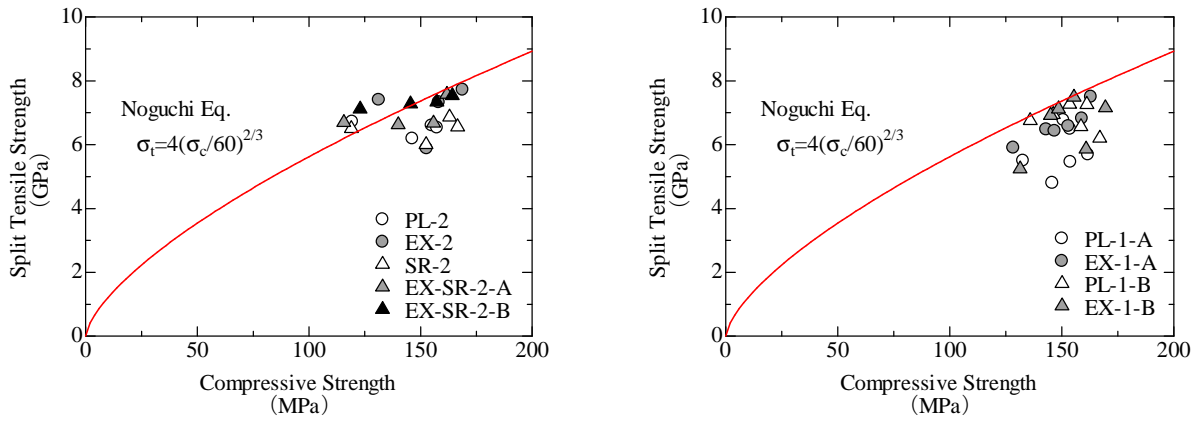


図5-14 割裂引張強度と圧縮強度の関係

調合の相違による明確な傾向は見られないが、野口らの関係式と比較した場合、実験値が関係式をやや下回るという結果であった。

5.4.3 線膨張係数

100×100×400mmを使用した線膨張係数試験時の温度-ひずみ関係の一例を図5-15に示す。

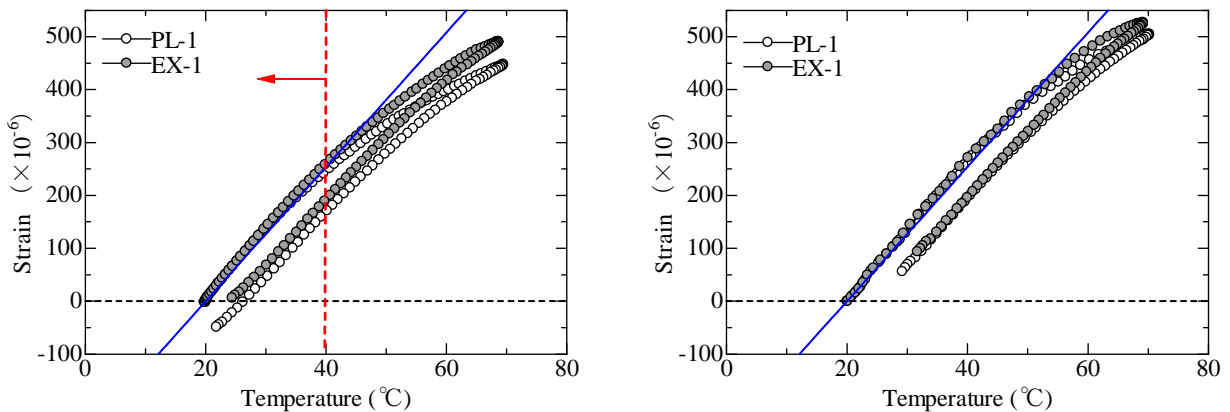


図5-15 線膨張係数試験における温度-ひずみ関係（左：1回目加熱，右：回目加熱）

左図に示されるように、PL-1、EX-1ともに、コンクリート温度が40°C以下の領域では線形の温度-ひずみ関係が得られている。しかし、40°C以上の領域では右下がりの緩やかなカーブを描く。

この現象の原因については、1) 線膨張係数の温度依存性、2) 自己収縮の影響、が考えられるが、硬化コンクリートにおいて150°C以下の範囲では線膨張係数の温度依存性は確認されていない⁶⁾た

め、本現象は高温域における自己収縮の進展に起因するものと考えられる。

第3章で述べたように、結合材としてシリカフュームを含む超高強度コンクリートは高温域における反応が普通コンクリートと比較して顕著であり、特に本試験のように、事前に高温履歴を受けていない試験体を使用した場合、シリカフュームの反応活性に起因すると思われる自己収縮の急激な進展が起り得る。以上を踏まえると、本検討でも温度上昇域で自己収縮が生じ、見かけ上線膨張係数が低下したものと推察される。

この推察の妥当性を確認するため、図 5-15 右図のように、同一の試験体を再び加熱した。その結果、1回目と比較して自己収縮の影響が低減され、コンクリート温度が 55°C 以下の領域では高い線形性を確保できた。

以上の試験結果から得られた線膨張係数を表 5-6 に取りまとめた。

表 5-6 線膨張係数試験結果

		Up 1st	Up 2nd	Down 1st	Down 2nd	Avg. 1st	Avg. 2nd	20°C→40°C
PL	①	9.1	10.3	10.5	10.9	10.0	11.1	12.2
	②	9.4	11.0	11.1	11.7			
EX	①	10.3	10.9	11.1	11.6	10.7	11.4	12.7
	②	10.3	11.3	11.2	11.7			
SR	①	9.1	9.7	10.4	10.7	9.3	10.6	11.5
	②	9.2	9.3	10.4	10.8			
EXSR	①	9.2	10.4	9.9	10.1	9.6	9.5	11.5
	②	8.3	10.7	9.0	9.1			

表 5-6 に示されるように、昇温域全体で線膨張係数の算出を行った場合、1回目と比較して2回目のほうで線膨張係数の増加が確認された。この増加分が加熱を繰り返したことによる自己収縮の影響の低減によるものである。

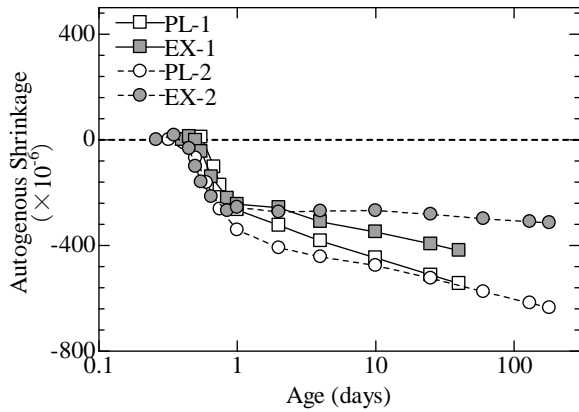
しかしながら、図 5-15 右図の 55°C 以上の領域では、右下がりのカーブが依然見られ、自己収縮の影響を完全に取り除くことができていない。今後さらに同様の加熱繰り返すことによって自己収縮の影響を低減できるものと推察されるが、加熱を繰り返すことによって試験体の条件が異なっていることや、有効材齢による一律な評価が難しくなることから、本検討では、1回目の温度昇降時において、自己収縮の影響が小さいと考えられる 20°C→40°C、40°C→20°C の部分を取り出し、それぞれを線形回帰することで得られた値を当該材齢の線膨張係数とした。

表 5-6 右端に各調合の材齢 164 日における線膨張係数値を示した。各調合についてこの線膨張係数値を比較したとき、SR と EXSR といった収縮低減剤を混和した試験体において、わずかながら線膨張係数の低減がみられた。この現象については、2.7 節で高炉セメントペーストを用いて収縮低減剤混和による線膨張係数の低減効果を示したが、超高強度コンクリートを用いた本検討におい

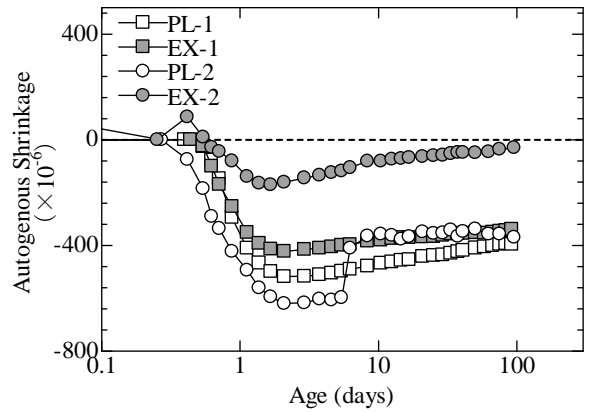
でも再現された結果であった。

5.4.4 自己収縮ひずみ

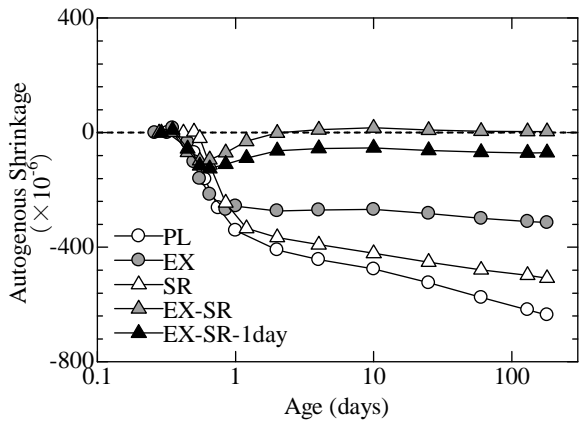
5.3.4 で示した手順によって得られた自己収縮ひずみの算定結果について、20°C一定条件、及び高温履歴条件における各調合の試験結果の比較を図5-16に、また、それぞれの調合における同一断面内の自己収縮ひずみ分布を図5-17にそれぞれ示した。図5-17には、各測定点のコンクリート温度の経時変化も併せて示した。



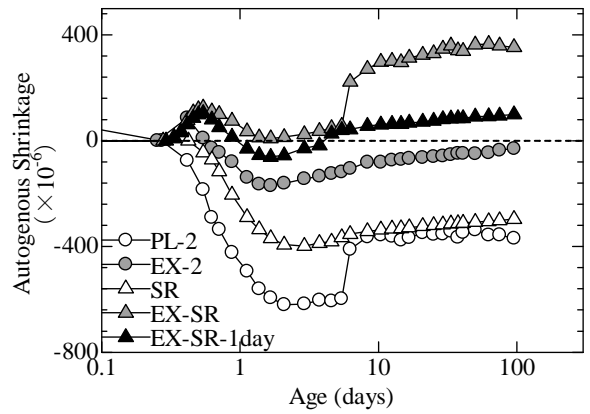
PL及びEXの20°C一定条件における自己収縮ひずみ試験結果の比較



PL及びEXの簡易断熱条件における自己収縮ひずみ試験結果の比較

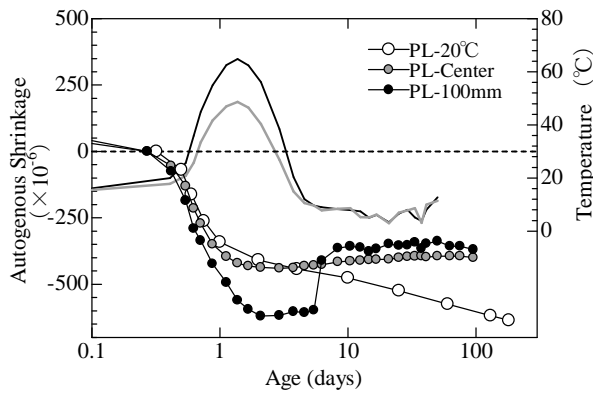


各調合条件の20°C一定条件における自己収縮ひずみ試験結果の比較

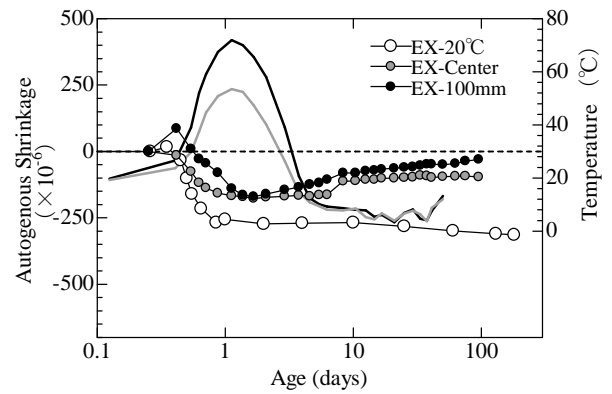


各調合条件の簡易断熱条件における自己収縮ひずみ試験結果の比較

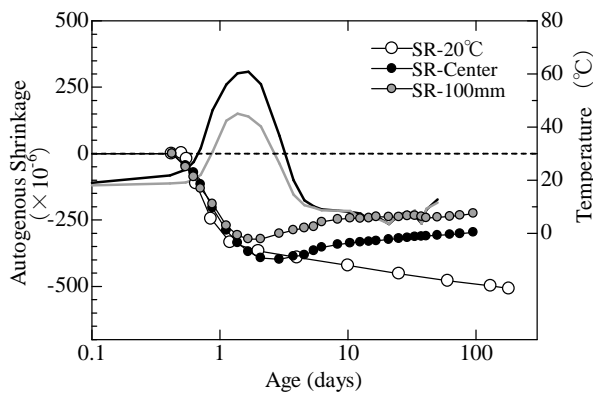
図5-16 各調合の自己収縮ひずみ試験結果



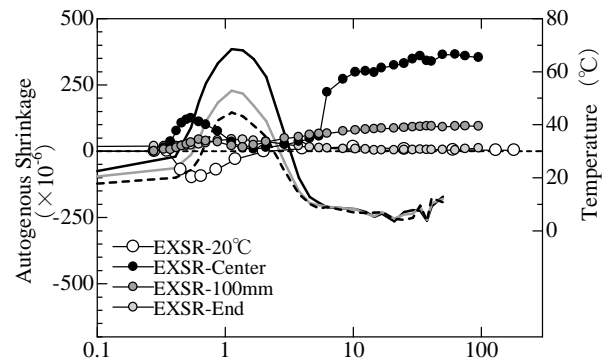
自己収縮ひずみの測定位置の影響 (PL)



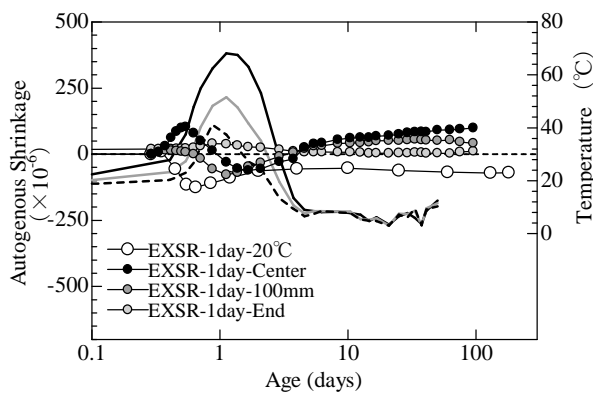
自己収縮ひずみの測定位置の影響 (EX)



自己収縮ひずみの測定位置の影響 (SR)



自己収縮ひずみの測定位置の影響 (EXSR)



自己収縮ひずみの測定位置の影響
(EXSR_1日脱型)

図5-17 各調合における自己収縮ひずみの断面分布

図 5- 16 上段において PL-1 と PL-2 は同一調合、EX-1 と EX-2 は膨張材の混入量が異なる調合である。実験条件上、PL-1 と PL-2 は別バッチであるため、同一調合であっても、凝結材齢は異なっている。先に述べたように、超高強度コンクリートの自己収縮は凝結の始発から数時間の間において自己収縮進行速度が極めて大きい区間があり、その間の養生温度が大きな意味を持っている。

本実験の 20°C一定条件では、図 5- 16 左上に示されるように、PL-1 及び PL-2 は材齢 1 日以前の収縮量がやや異なるものの、材齢 40 日までほぼ同程度の収縮量を示した。膨張材 20kg/m³ を混和した EX-1 は PL-1 と材齢 1 日時点の収縮量とほぼ同一であり、膨張材はその後の材齢に収縮低減効果がみられたが、膨張材 30kg/m³ を混和した EX-2 では、その後の材齢において EX-1 より収縮低減効果が大きかった。

図 5- 16 右上に示す簡易断熱条件に関して自己収縮量を比較すると PL-1 と PL-2 は同一調合であるにも関わらず材齢初期から異なる収縮量を示した。これは無応力形が埋め込まれているコンクリートの温度履歴が異なることに加えて、無応力形の周りに試験体の条件が有筋、無筋と異なることが一因であると考えられる。また、PL-2 では材齢 7 日に測定値がはねている部分がみられるが、これは、無応力形周辺にひび割れが生じた可能性が考えられる。

膨張材を混和した系では、無筋試験体である EX-2 が EX-1 より小さい自己収縮量を示した。これは、鉄筋の有無の影響より膨張材量の影響が卓越した結果であると考えられる。

図 5- 16 左下の図は各調合における 20°C一定条件の自己収縮ひずみ測定結果であるが、基本調合である PL と比較する、膨張材と収縮低減剤をそれぞれ個別に使用した場合でも収縮低減効果が見られた。収縮低減効果が有効な期間は膨張材と収縮低減剤で異なり、収縮低減剤では、屈曲点以降の材齢で、膨張材では、それ以前の材齢から収縮低減効果がみられる。

両者を併用した EXSR では、それぞれ個別に使用した場合と比較して収縮低減効果が著しく向上している。特に、材齢約 1 日以前の急激に自己収縮が進行する段階において収縮低減効果が大きいことが確認できる。

図 5- 17 に示す簡易断熱条件の各調合の自己収縮量の順は、20°C一定条件と変わらないが、PL と EXSR で材齢 7 日に急激な収縮の回復がみられた。これはひび割れが発生したことに起因するものと考えられる。

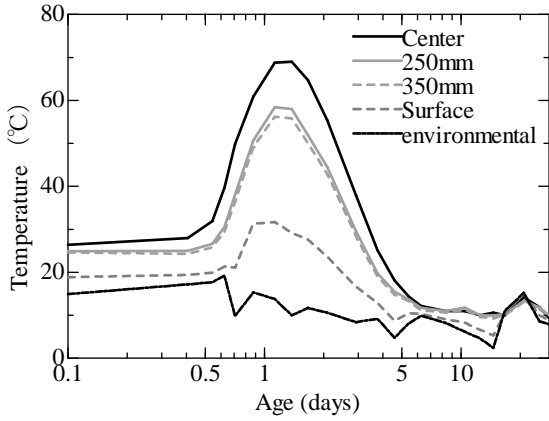
また、これらの傾向は、簡易断熱条件でも 20°C一定条件とほぼ同様であったが、収縮量を比較すると、PL-1,2 及び EX-1 では高温履歴の影響を受け、高温時に急激に自己収縮が進行することで、一時的に 20°C一定条件のものを上回るが、温度降下後の収縮の停滞、回復によって材齢 100 日時点では、20°C一定条件が簡易断熱条件の自己収縮量を上回る結果となった。また EX-2, SR では高温時においても、自己収縮の急激な進展はみられず、常に 20°C一定条件の方が大きい収縮量を示した。

20°C一定条件で十分な収縮低減効果が確認された EXSR 併用の試験体では、高温履歴を受けた場合も、20°C一定条件とほぼ同程度の収縮量であった。

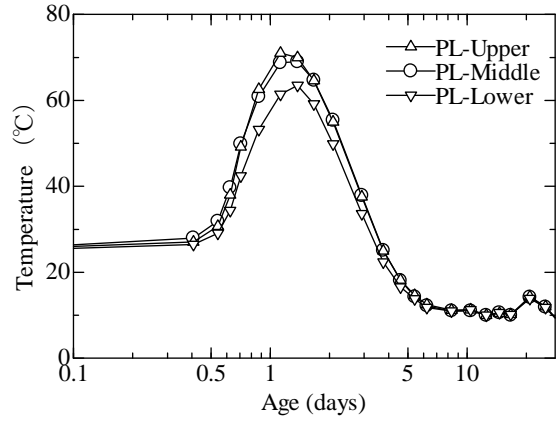
5.5 超高強度RC模擬柱部材試験結果

5.5.1 温度履歴

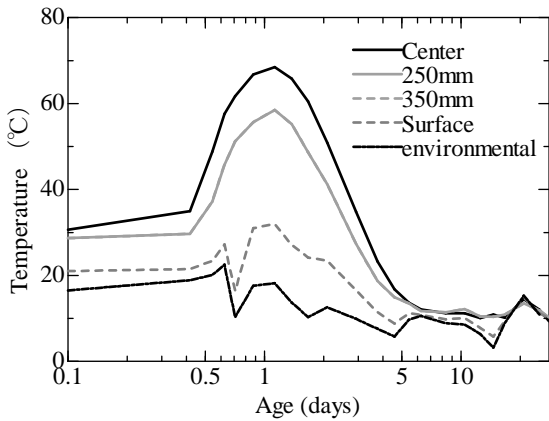
実大RC模擬柱の各点に設置した熱電対によって、各試験体内の温度履歴を得た。試験体中段中央部及び上段中央部の温度履歴の比較を示した。



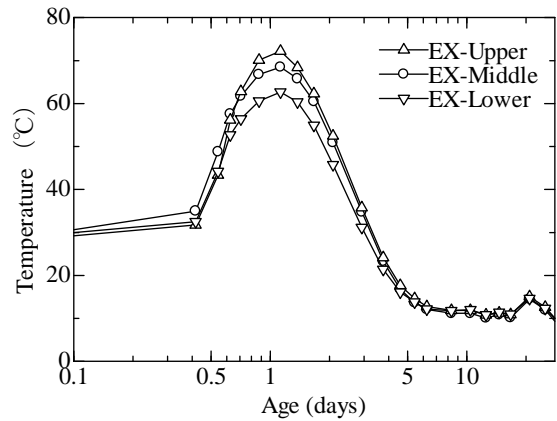
断面方向の温度分布 (PL1)



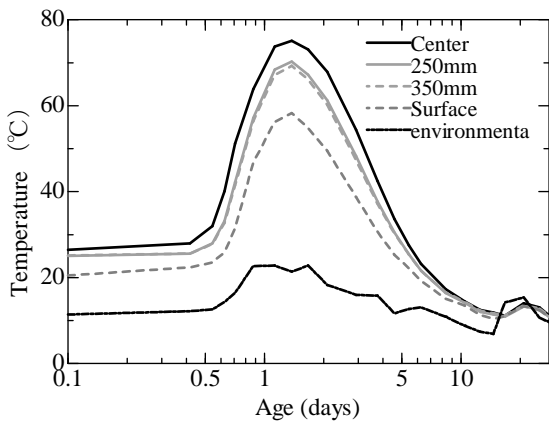
垂直方向の温度分布 (PL1)



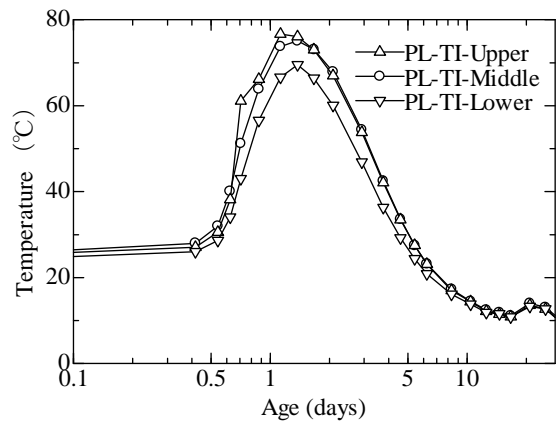
断面方向の温度分布 (EX1)



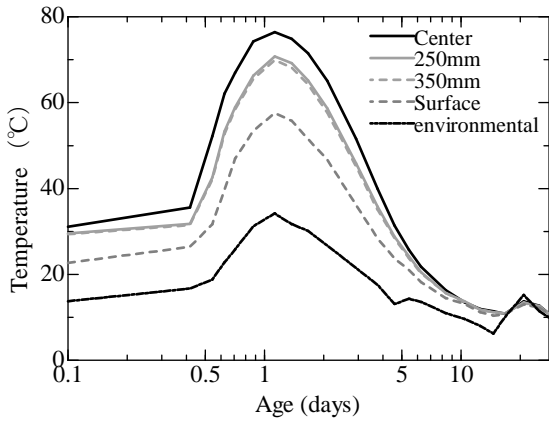
垂直方向の温度分布 (EX1)



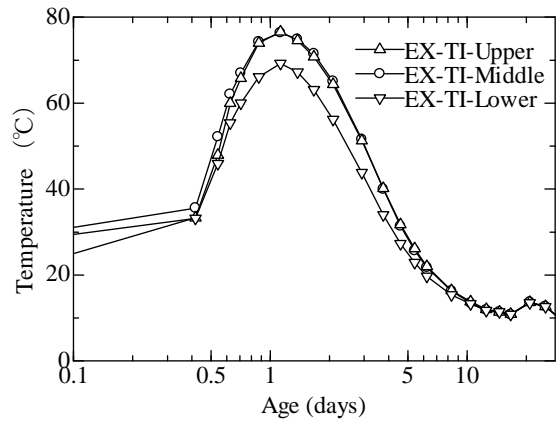
断面方向の温度分布 (PL1 断熱)



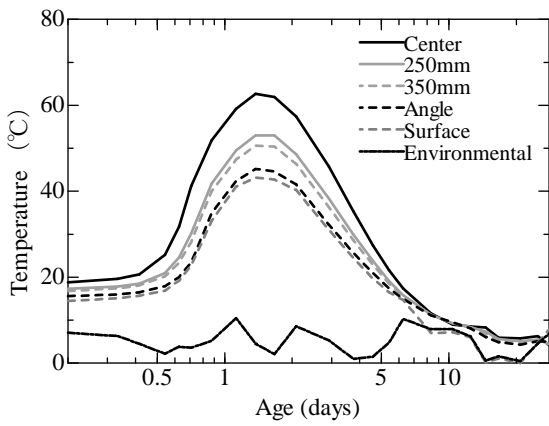
垂直方向の温度分布 (PL1 断熱)



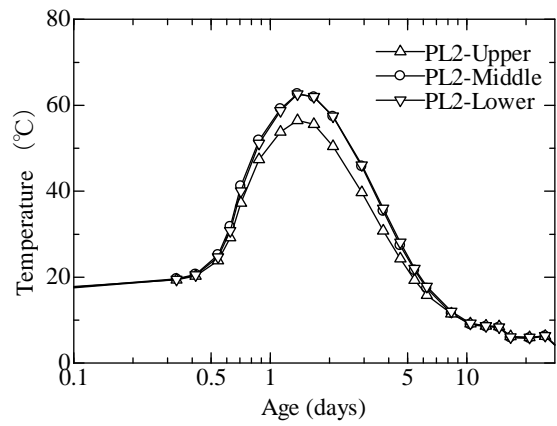
断面方向の温度分布 (EX1 断熱)



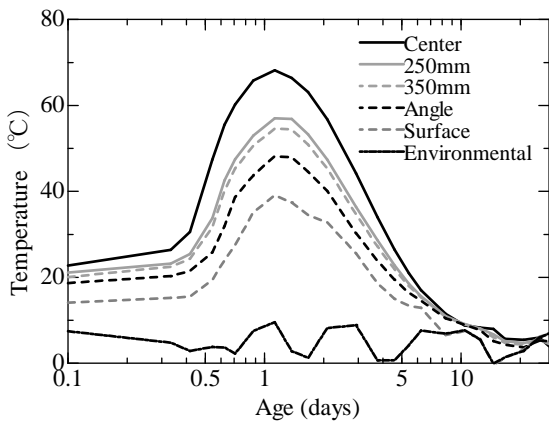
垂直方向の温度分布 (EX1 断熱)



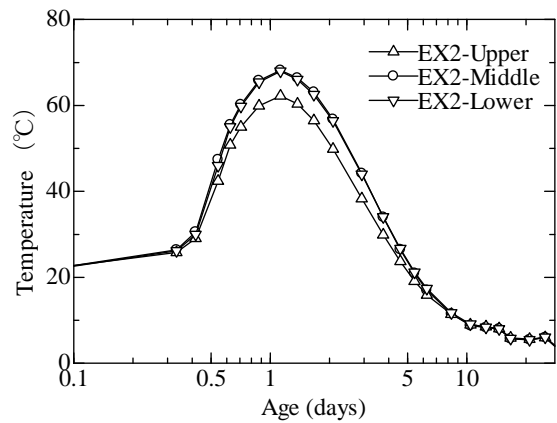
断面方向の温度分布 (PL2)



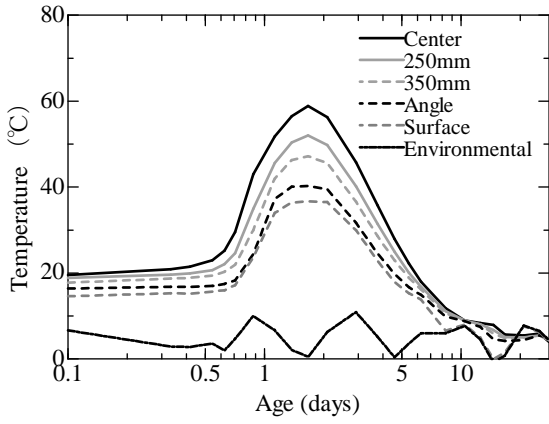
垂直方向の温度分布 (PL2)



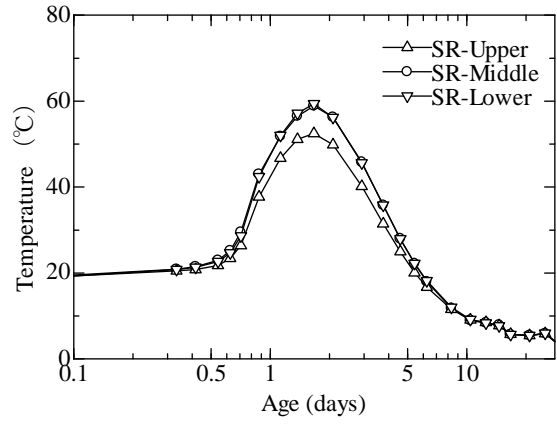
断面方向の温度分布 (EX2)



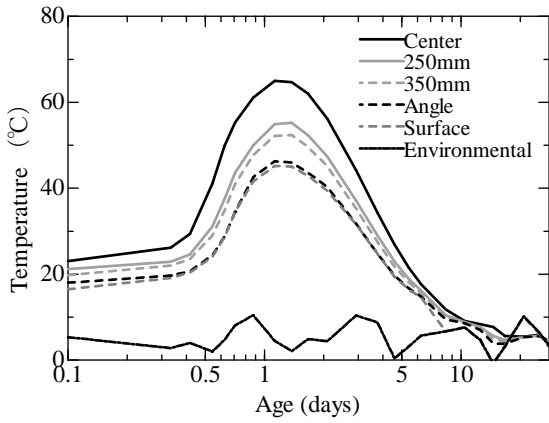
垂直方向の温度分布 (EX2)



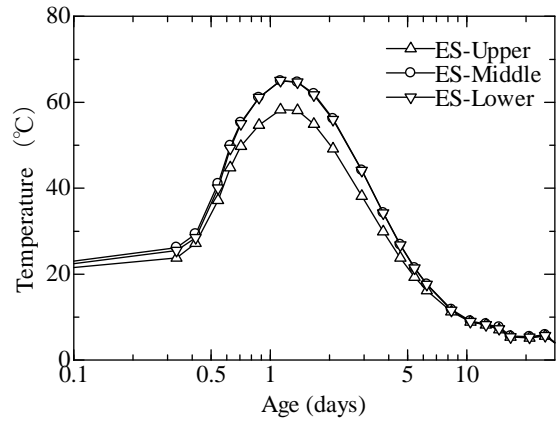
断面方向の温度分布 (SR2)



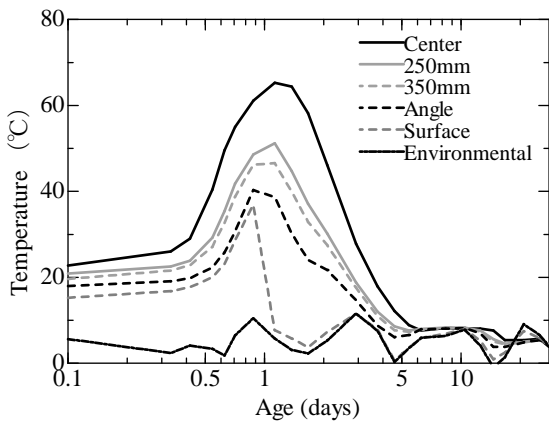
垂直方向の温度分布 (SR2)



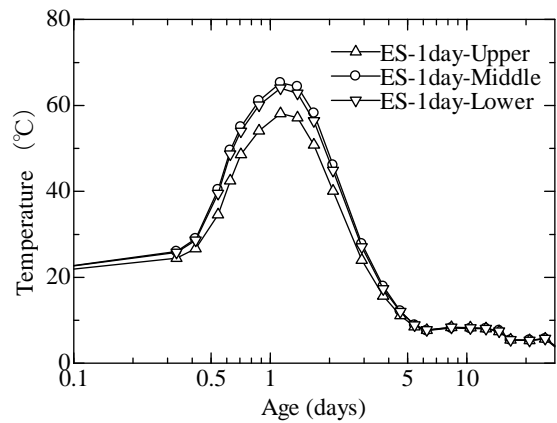
断面方向の温度分布 (EXSR)



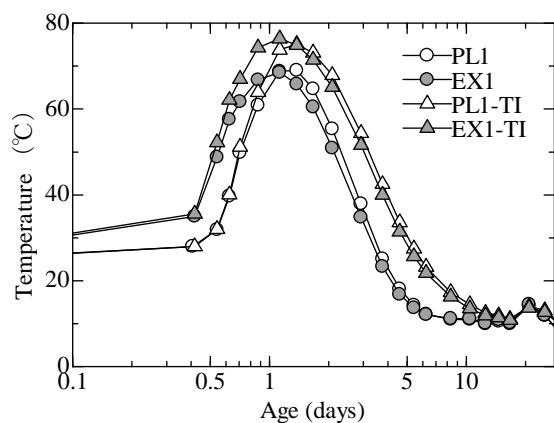
垂直方向の温度分布 (EXSR)



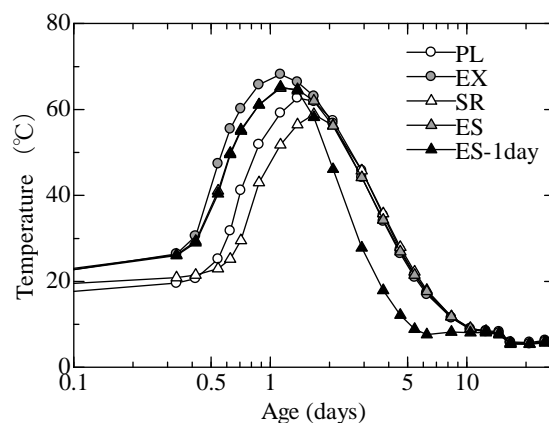
断面方向の温度分布 (EXSR_1日脱型)



垂直方向の温度分布 (EXSR_1日脱型)



断面方向の温度分布 (EXSR_1日脱型)



垂直方向の温度分布 (EXSR_1日脱型)

膨張材を付与することで、材齢初期から試験体温度が上昇していることがわかる。この影響によって各試験体の部材中央部の最高到達温度は、PL:62.9°C、EX: 68.2°C、SR: 58.9°C、EXSR:65.2°C、EXSR_1日脱型:65.5°Cで、と膨張材 30kg/m³の混和によって 5.3°Cの上昇がみられた。また、収縮低減剤を混和した試験体では水和発熱の上昇材齢が PL より後退しており、結果として最高到達温度は 3.0°Cの減少が確認された。

ピーク時の材齢は PL:34.5 時間、EX: 25.7 時間、SR: 40.0 時間であり、膨張材の混和によって 8.8 時間促進、収縮低減剤の混和によって 5.5 時間遅延された。EXSR の試験体の脱型材齢を 1 日とした場合、最高到達温度及びピーク時材齢にはほとんど変化が見られなかった。

以上の温度履歴に関しては、中段と下段ではほぼ同一の傾向を示したが、上段はこれらと比べてピーク時に 5°C程度低い結果であった。

5.5.2 ひずみ履歴

実大RC模擬柱の中央断面における、ひずみ分布を得た。試験体中段中央部及び上段中央部の温度履歴の比較を示した。

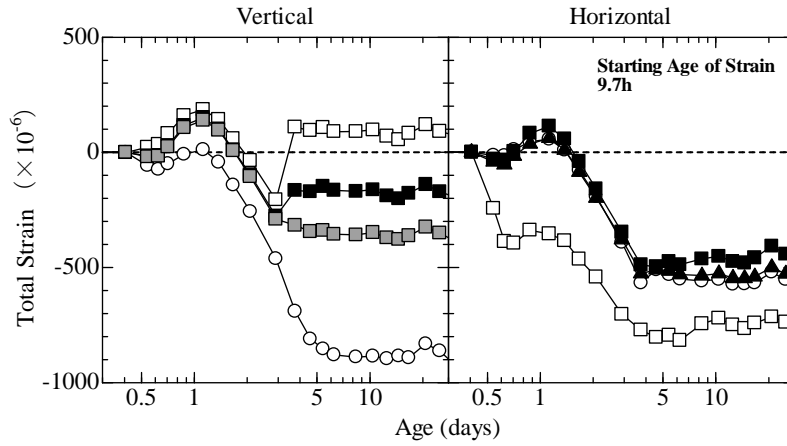


図 5-18 PL1 のひずみ履歴

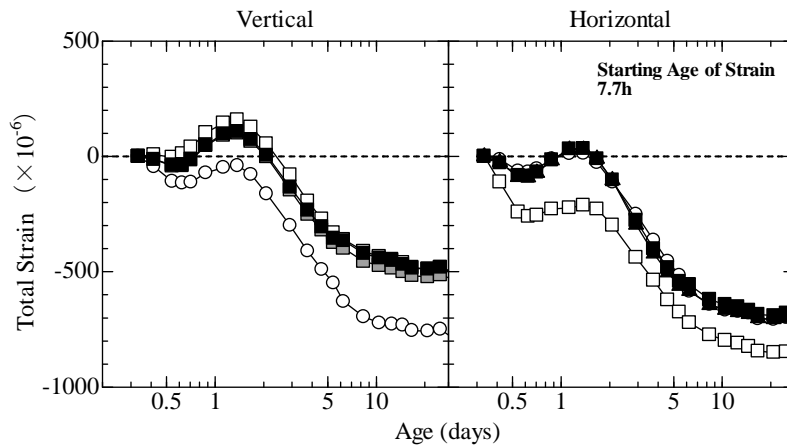


図 5-19 PL2 のひずみ履歴

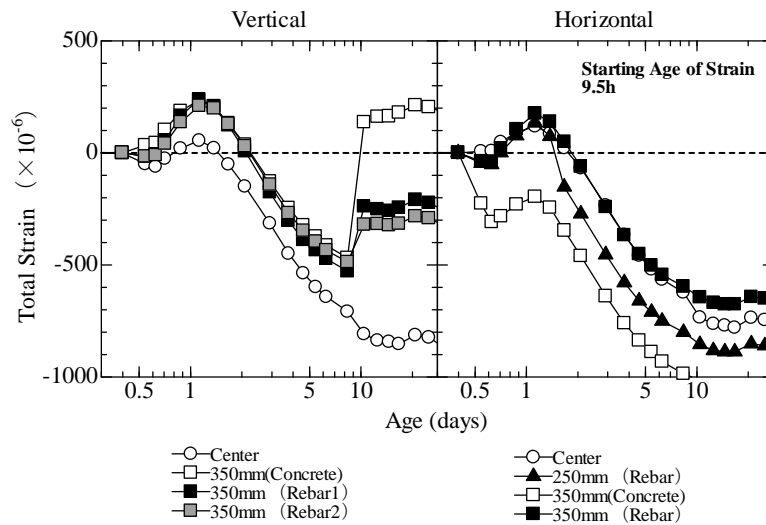


図 5-20 PL1 断熱のひずみ履歴

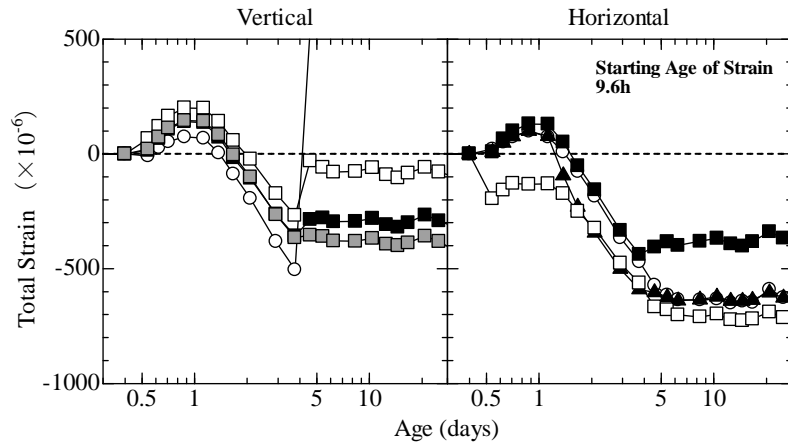


図 5-21 EX1 のひずみ履歴

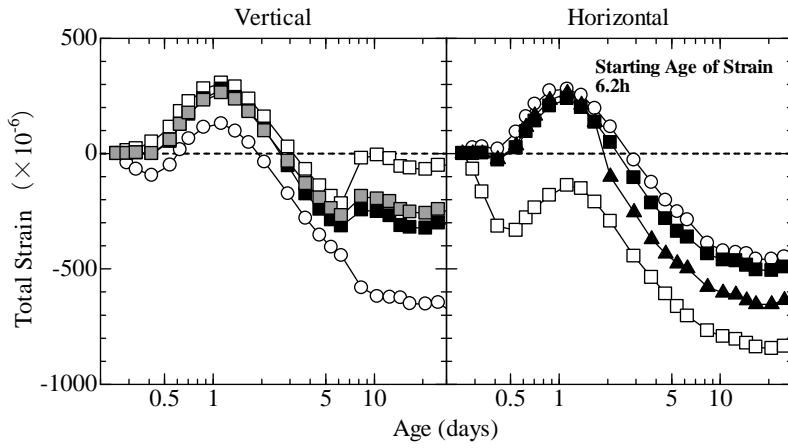


図 5-22 EX2 のひずみ履歴

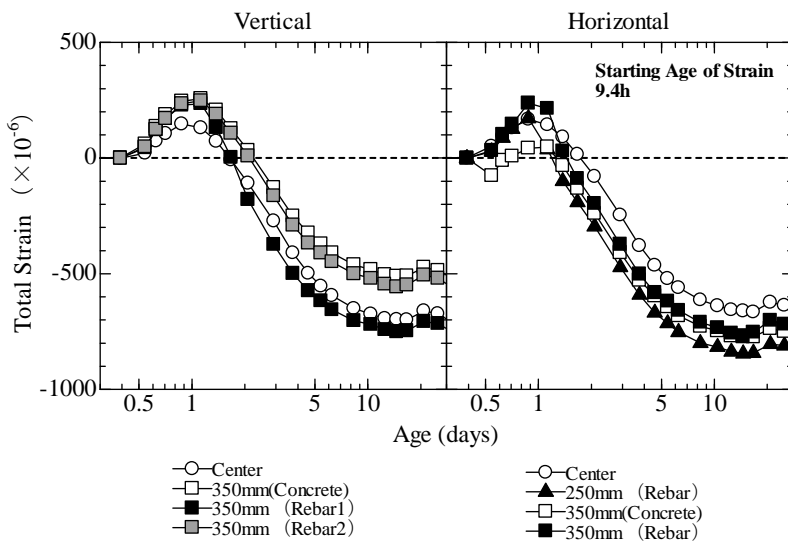


図 5-23 EX1 断熱のひずみ履歴

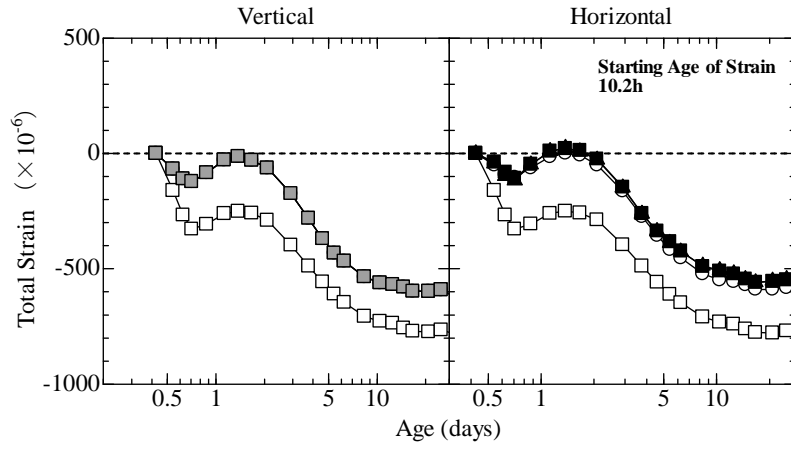


図 5-24 SR のひずみ履歴

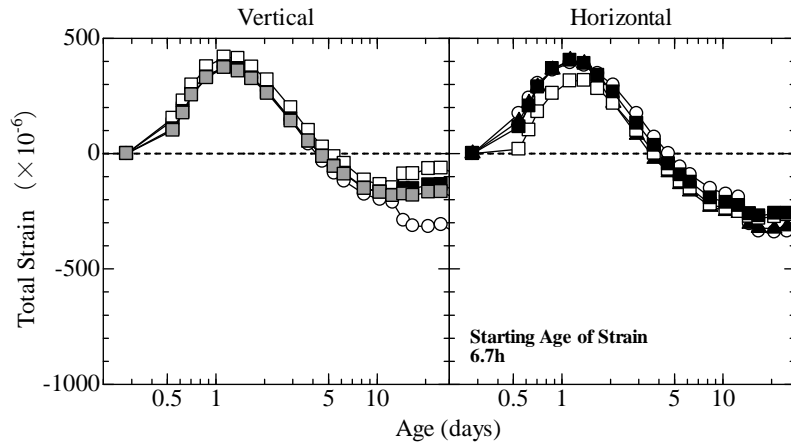


図 5-25 EXSR のひずみ履歴

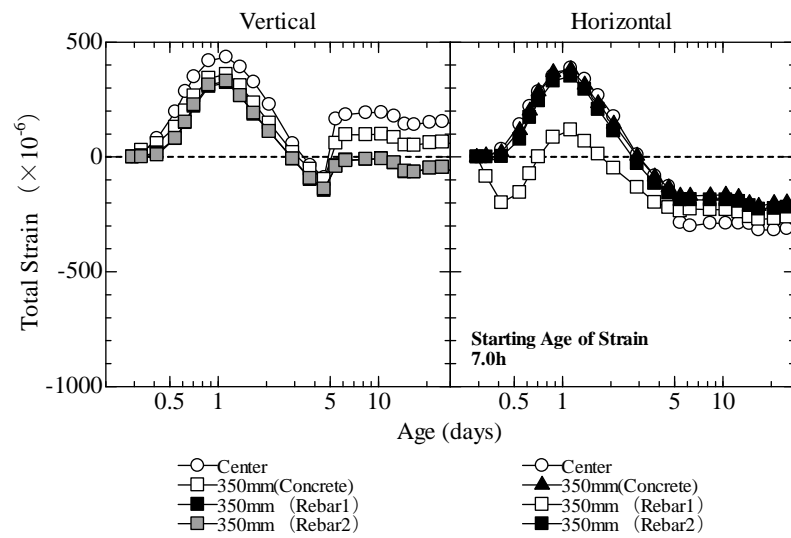


図 5-26 EXSR_1日脱型のひずみ履歴

PL の鉛直ひずみの経時変化に着目すると、いずれの試験体についても中心部のコンクリートひずみの収縮ひずみが大きく、周辺部では膨張を示している。この差異の大部分は材齢 16 時間以前の収縮時と温度膨張時に生じたものであり、温度ピークを迎えて以降はほぼ同様のひずみ履歴を示している。また、PL-1 では材齢 3 日に周辺のコンクリートひずみが大きく変動し、中段断面付近でのひび割れの発生を示唆している。PL-1 断熱では、このひずみの大きな変動が材齢 10 日時に生じており、打設日が異なる PL-2 ではこのようなひずみの変動は材齢 28 日まで見られなかった。

図 5-21 から図 5-23 に示される膨張材混和の RC 部材中のひずみ履歴では、PL と比較すると、鉛直ひずみにおける中心部コンクリートと周辺部コンクリートのひずみ差は低減されている。さらに、膨張材と収縮低減剤を併用した場合には、若材齢から断面内のひずみ分布がほとんどなく、鉄筋とコンクリートが一体に動いている。

収縮低減剤のみを使用した場合には若材齢に収縮を低減する効果が小さく、材齢 16 時間程度までに周辺コンクリートで大きな収縮が生じている。

水平方向に関しては、EXSR を除き、周辺部のコンクリートひずみが他のひずみ履歴と大きく乖離している。この大部分は、材齢 16 時間以前に生じたものであり、温度ピークを迎えた後のひずみ履歴は他の部分と同様であった。この原因としては、水平方向へのコンクリートのはらみが考えられるが、詳細は不明である。

図 5-20、図 5-23 から、ひずみ履歴に及ぼす断熱の影響を見ると、断熱の効果によって水和発熱による温度上昇時の膨張量が大きくなっている。これは、温度履歴の試験結果と対応している。また、PL-1 では材齢 3 日、EX-1 では材齢 4 日でみられた鉛直方向ひずみの大きな変動は、断熱を施すことにより、PL-1 では材齢 10 日まで遅延され、EX-1 では、材齢 28 日まで確認されなかった。

5.5.3 内部ひび割れ観察

内部のひび割れ状況を確認するために、材齢 91 日経過後に切断を行い、断面及び鉄筋近傍のひび割れの状況を確認した。図 5-27 から図 5-35 に各試験体のひび割れ図を示す。

また、一部の試験体では、主筋を鉛直方向に切断し、鉄筋周辺のひび割れの確認も行った。

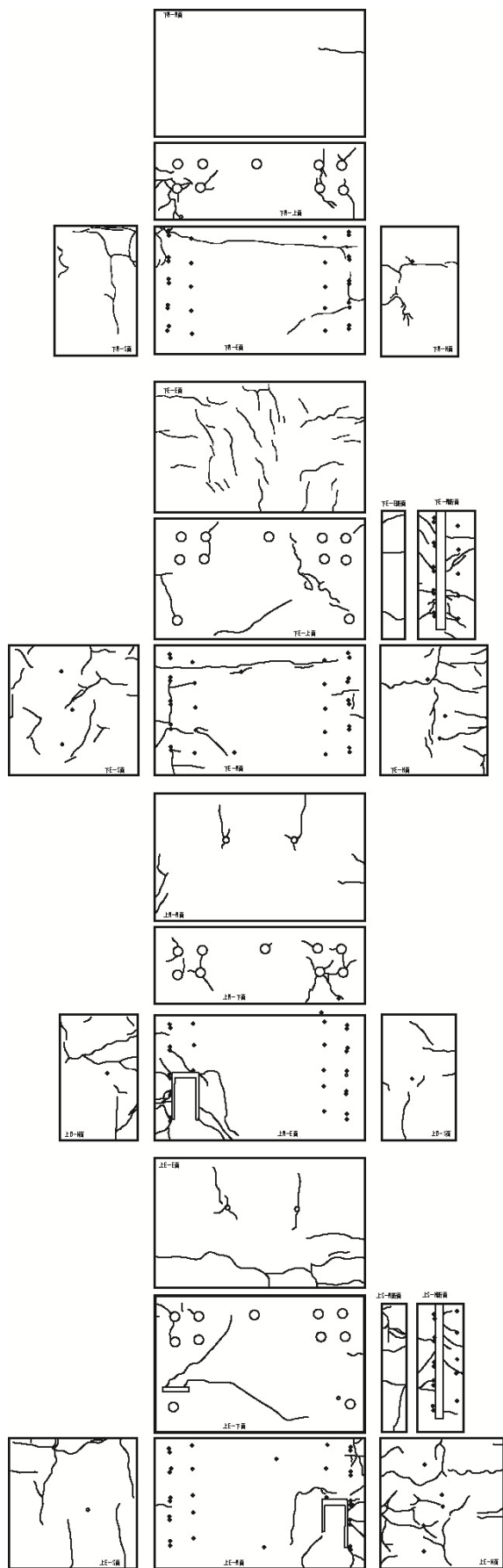


図 5-27 PL1 の内部ひび割れ

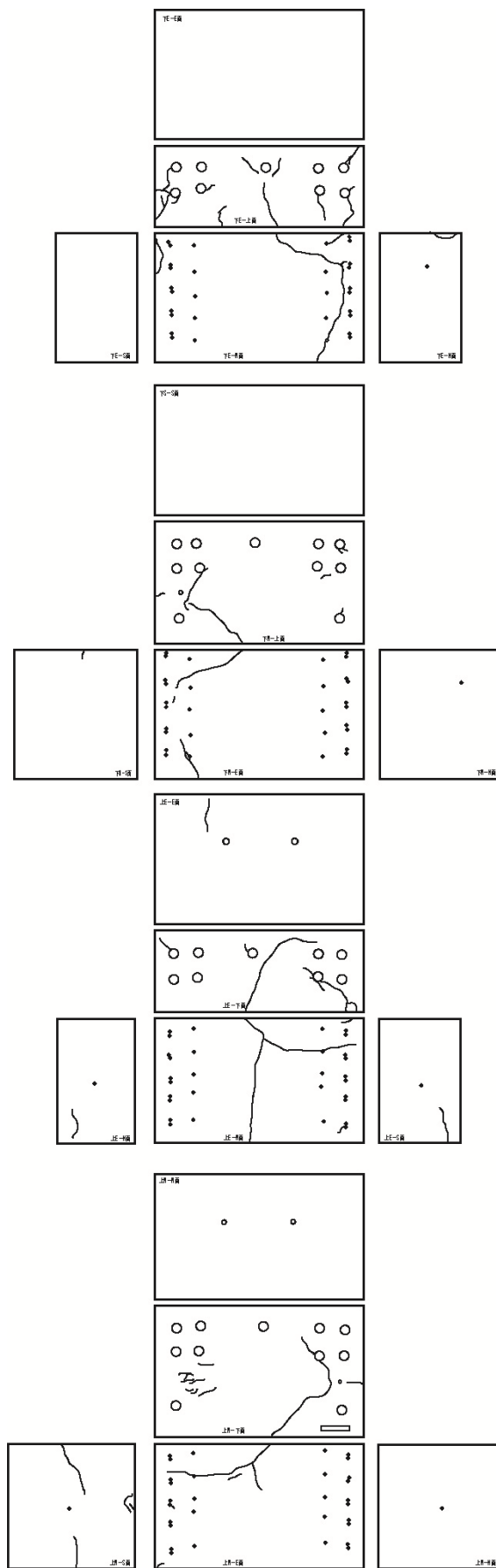


図 5-28 EX1 の内部ひび割れ

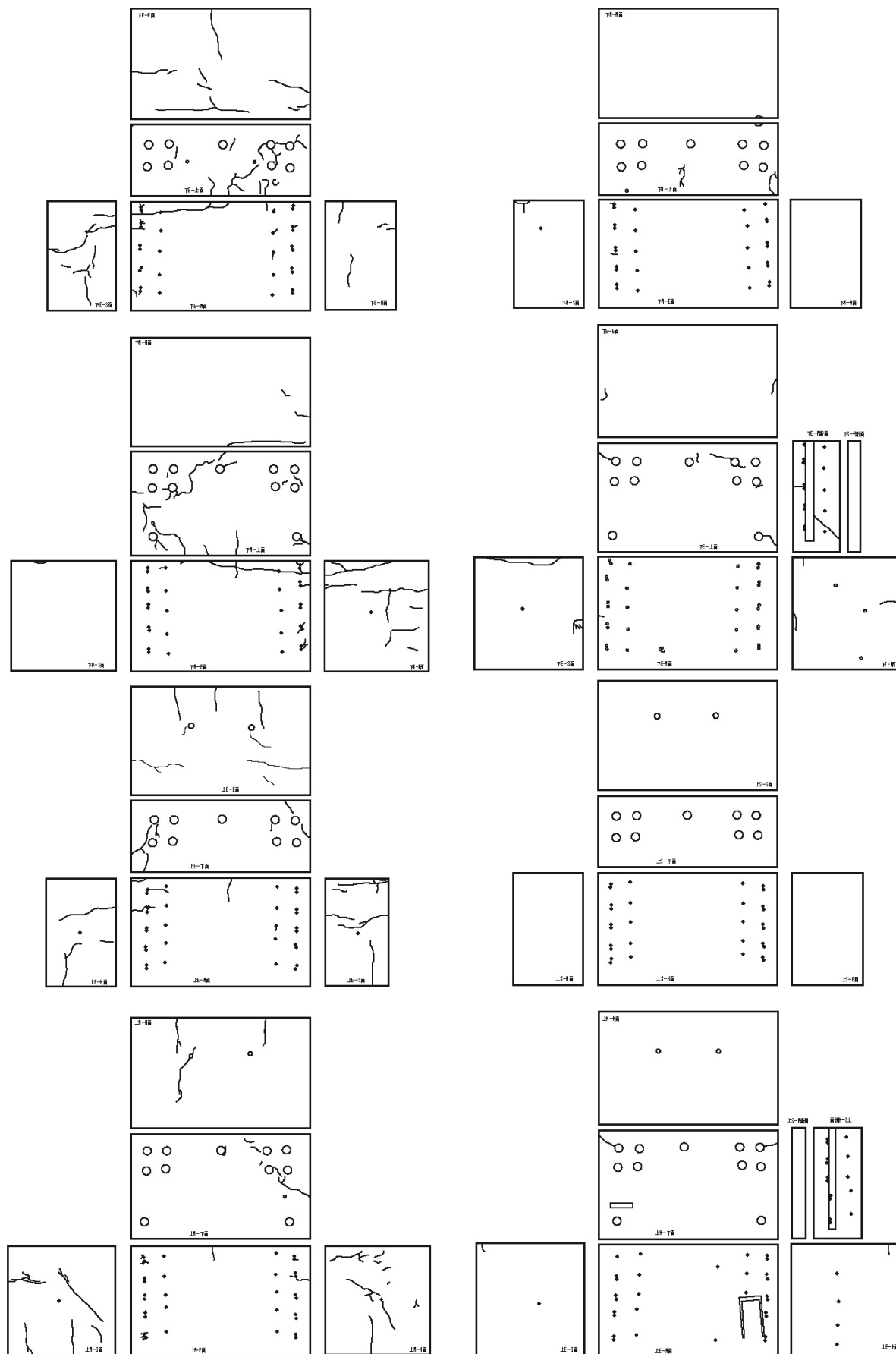


図 5-29 PL1 断熱の内部ひび割れ

図 5-30 EX1 断熱の内部ひび割れ

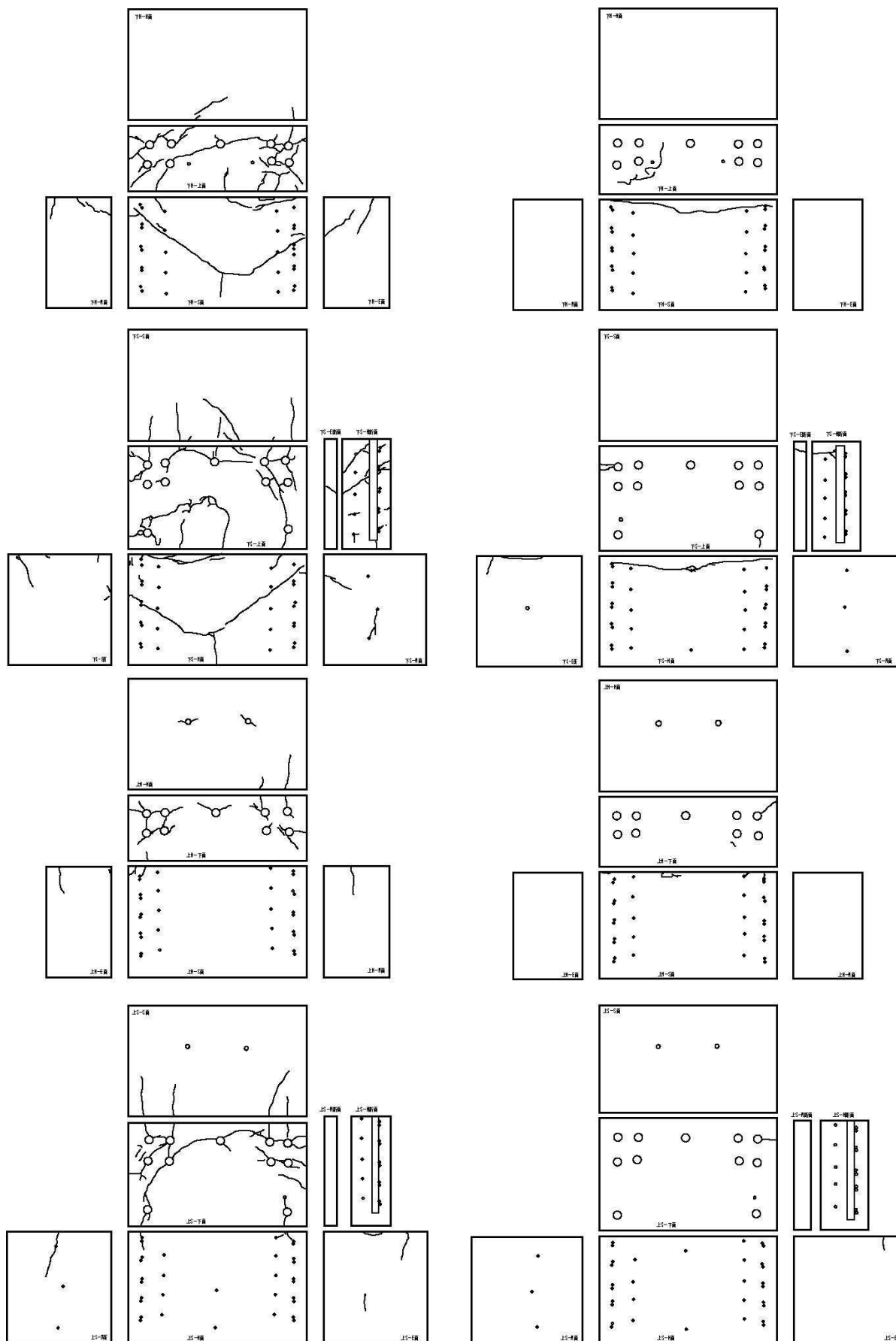


図 5-31 PL2 の内部ひび割れ

図 5-32 EX2 の内部ひび割れ

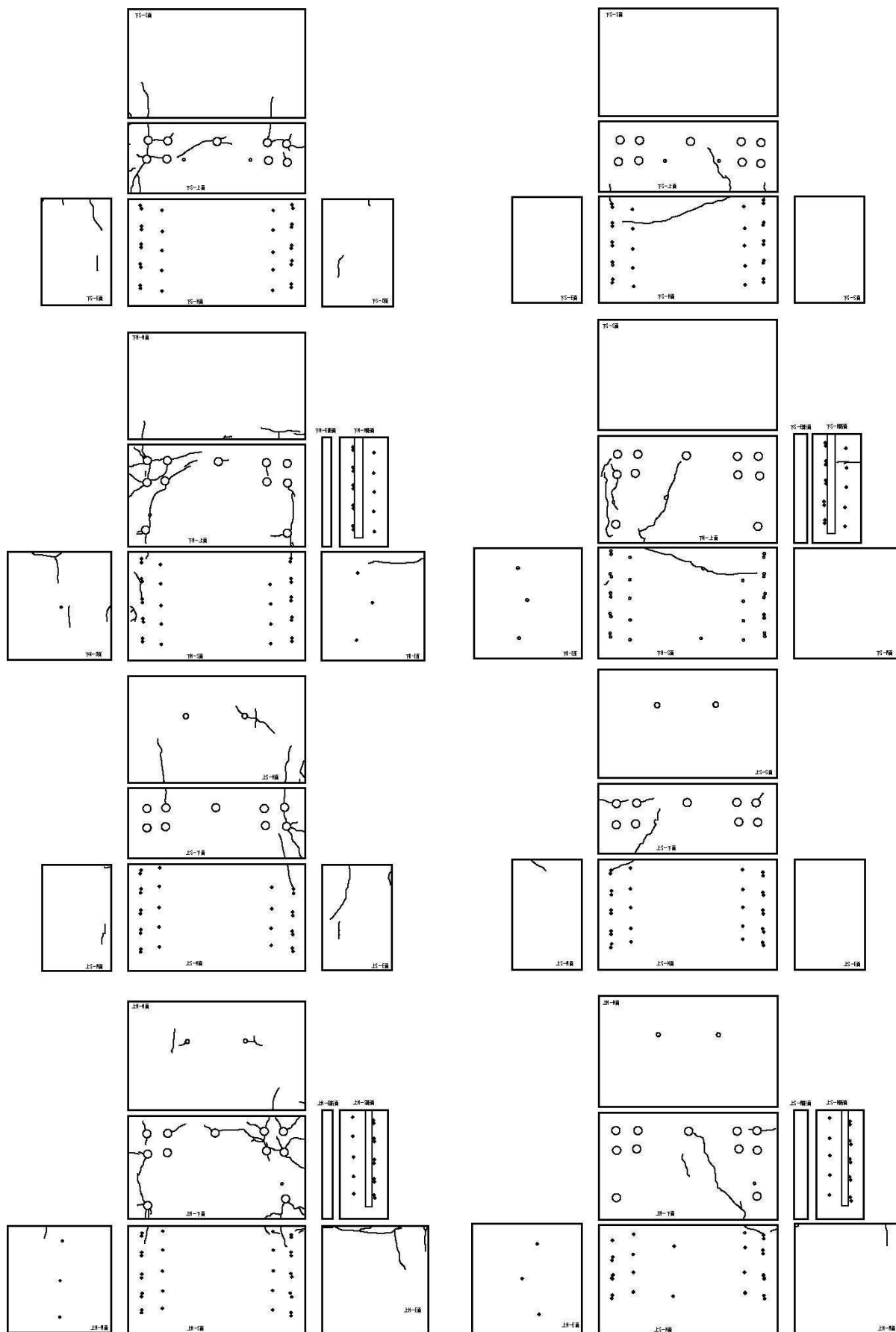


図 5-33 SR の内部ひび割れ

図 5-34 EXSR 断熱の内部ひび割れ

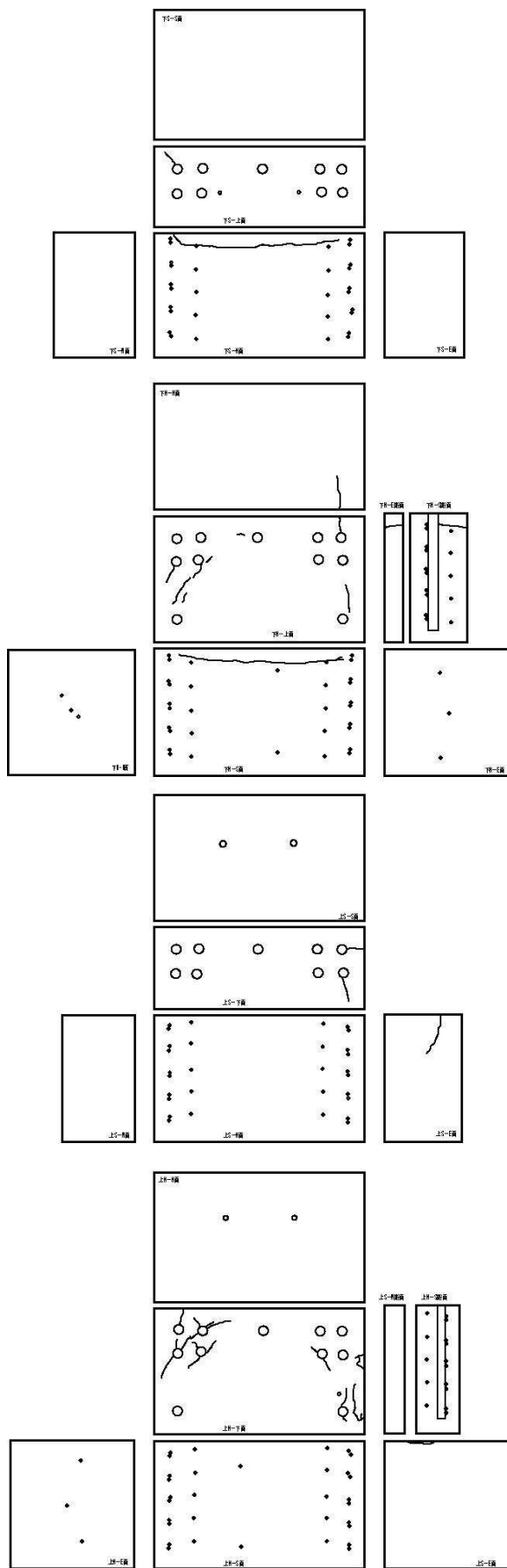


図 5-35 EXSR-1 日脱型のひび割れ図

PL1 では、主筋および帯筋の周辺にひび割れが多数発生しており、一部のひび割れは貫通していた。また、表層には主筋に沿った縦ひび割れが、切断面では図 5- 36 に示すように、主筋に沿ってコーン状のひび割れが確認された。



図 5- 36 主筋周辺のひび割れ例

PL-1 と同一調合である PL-2 では、主筋及びせん断補強筋の周辺にひび割れが多数発生しているものの、PL-1 と比較すると表層部分のひび割れは少なくなっている。これは打設日の環境温度が PL-2 のほうで小さく、コンクリート内部の最高到達温度も小さい。つまり、表層部分のひび割れは最高到達温度もしくは部材内の温度分布の影響を受けることを示唆している。

PL-1 断熱でも、PL1 と同様に鉄筋近傍に多くのひび割れが確認できるが、表層のひび割れは PL-1 と比較して少なかった。両者の温度履歴を比較すると、初期保温養生によって試験体の中央部と表層部の温度差が減少しており、これが表層ひび割れが減少した一因と考えられる。

膨張材を混和した EX-1 は、内部のひび割れは生じているものの、鉄筋近傍のひび割れが PL-1 より大幅に減少している。膨張材を混和し、さらに初期保温養生をした場合 (EX-1 断熱) には、内部および鉄筋近傍のひび割れがほとんどなく、もっともひび割れを抑制する効果が得られた。

収縮低減剤のみを混和した試験体では、内部ひび割れは PL2 と比較すると表層部、内部、鉄筋近傍ともに減少しているものの、鉄筋近傍に比較的多くのひび割れが確認された。

収縮低減剤と膨張材を併用した ES は水平方向に内部ひび割れが見られたものの、鉄筋周辺のひび割れは少なくなっており、表層部のひび割れもほとんど確認されなかった。

以上のひび割れ性状を鑑みると、膨張材、収縮低減剤、断熱といったひび割れを低減する各手法は、いずれもひび割れを大きく低減できることが確認されたが、ひび割れを低減することができる部位は手法によって異なった。

5.6 結論

本検討では、ひびわれの低減に効果があると考えられる各対策（膨張材、収縮低減剤の使用）について、実大部材についての実験を行い、その効果について検証を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- ・ 膨張材、収縮低減剤の混入によって圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度に大きな差異はみられなかった。
- ・ 収縮低減剤を混入することによって、線膨張係数の低減がみられた。
- ・ 膨張材、収縮低減剤を個別に使用した場合、自己収縮ひずみの低減効果は材齢 1 日以後に見られたが、両者を併用することによって材齢極初期からの自己収縮ひずみを低減することが可能であった。
- ・ 簡易断熱養生によって、高温履歴を経た試験体は、高温域に自己収縮が急激に進行するものの、温度降下後はひずみの進行が停滞もしくは回復を示し、最終的には 20℃一定条件の方が大きい自己収縮ひずみを示した。
- ・ 膨張材を 30kg/m³ 混入した場合、5.3℃の上昇がみられた。また収縮低減剤を混入した場合、PL と比較して、3.0℃減少した。
- ・ PL 実大柱内のひずみ分布は、鉛直方向には中央部の、水平方向には周辺部のコンクリートの収縮ひずみが、他の部位のひずみと比較して大きくなった。
- ・ 膨張材や収縮低減剤を使用することで、上述のコンクリートひずみの乖離が低減された。
- ・ PL 実大柱は、自己収縮及び水和発熱による高温履歴といった体積変化が鉄筋や内部コンクリートに拘束されることによって、鉄筋近傍やコンクリート内部、表層にひび割れが発生することが再確認された。
- ・ 実大柱に簡易断熱を施すことによって、表層部のひび割れを抑制することが可能であった。
- ・ 膨張材を混和することで、鉄筋近傍のひび割れを抑制することが可能であった。
- ・ 収縮低減剤を混入することによって、PL と比較してひび割れの抑制がみられたが、EX と比較するとその効果は小さかった。

膨張材と収縮低減剤を併用することで、ひび割れが少なく、部材内部のひずみ分布がほとんどないコンクリート部材を作製することが可能であった。

第5章の参考文献

¹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73巻, 第629号, pp.1035-1042, 2008.7

²丸山一平ほか: 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, 2008.7

³丸山一平, 勅使川原正臣: 超高強度コンクリートの自己収縮が RC 柱の曲げ性能に及ぼす影響に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第630号, pp. 1331-1338, 2008.8

⁴丸山一平ほか: 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, 耐久性力学に関するシンポジウム, pp.303-312, 2007.12

⁵三谷裕二ほか: 高温度履歴を受けた超高強度コンクリートの膨張材による自己収縮制御, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1241-1246, 2010.7

⁶ネビルのコンクリートバイブル, A.M.Neville 著, 三浦尚訳

第6章 自己収縮ひずみが付着性状に及ぼす影響

- 6.1 概論
- 6.2 既往の研究
- 6.3 実験概要
- 6.4 実験結果

6.1 概論

第5章以前の検討において、超高強度 RC 部材を無対策で作製した場合、卓越する自己収縮によってコンクリートに引張応力が発生し、部材内部及び表層、鉄筋近傍にひび割れが生じうることを示した。

これらのひび割れは、コンクリートの硬化過程において、水和反応に伴って自発的に生じうるひび割れであり、超高強度 RC 部材の構造性能、耐久性能を低下させる可能性がある。本章では、以上のような自己収縮応力やひび割れが構造性能に及ぼす影響について検討を行う。

自己収縮に起因する拘束応力が部材性能に及ぼす影響については、比較的最近になって詳細が検討されはじめ、自己収縮ひずみ量の異なる高強度 RC 梁を使用した実験では、自己収縮ひずみ量の増大に伴い、曲げひび割れ発生モーメントの低下、ひび割れ幅の増大、せん断ひび割れ発生強度の低下等の影響を及ぼすことが明らかになってきている。

本検討では、同一強度を保持し、異なる自己収縮量を持つ2種類の超高強度コンクリートを作製し、自己収縮ひずみが水和の進行に伴って変化していく過程で両引き付着試験を実施することで、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみが鉄筋-コンクリート界面の付着性状に及ぼす影響を明らかにすることを試みた。本章の内容を以下に示す。

6.2 節では、自己収縮が RC 部材の構造性能に及ぼす影響に関する既往の研究のうち、曲げ性能、せん断性能についての詳細を報告するとともに、本検討の実験手法について参考にした両引き付着試験の概要について報告する。

6.3 節では、本実験の概要を表すとともに、本検討の特色について説明を行う。

6.4 節では、両引き付着試験を実施する以前に、試験体に生じた鉄筋ひずみ性状から、自己収縮及び自己膨張によって生じる付着応力-すべり性状について議論を行い、そういった前条件のなかで自己収縮ひずみ量の大小が、両引き試験時における付着応力-すべり関係に及ぼす影響を示す。

6.2 既往の研究

高強度コンクリート、高流動コンクリート等の高性能コンクリートの開発により RC 部材の機能向上が期待されている。しかしながら、高強度コンクリートを用いた RC 部材の性能を評価したものは少なく、その中でも自己収縮等の時間依存性体積変化を考慮した検討はほとんどない。

ここでは、コンクリートの時間依存性体積変化が部材レベルでどのような影響を及ぼすかについて、既往の研究を紹介する。

6.2.1 自己収縮ひずみが RC 曲げ部材の構造性能に及ぼす影響

谷村、佐藤ら¹⁾は、普通ポルトランドセメント（記号 N）及び低熱セメント（記号 L）を用いて水セメント比 30%、試験体寸法 200×250×2700mm の RC はり（図 6-1）を作製し、静的載荷による曲げ試験を行った。

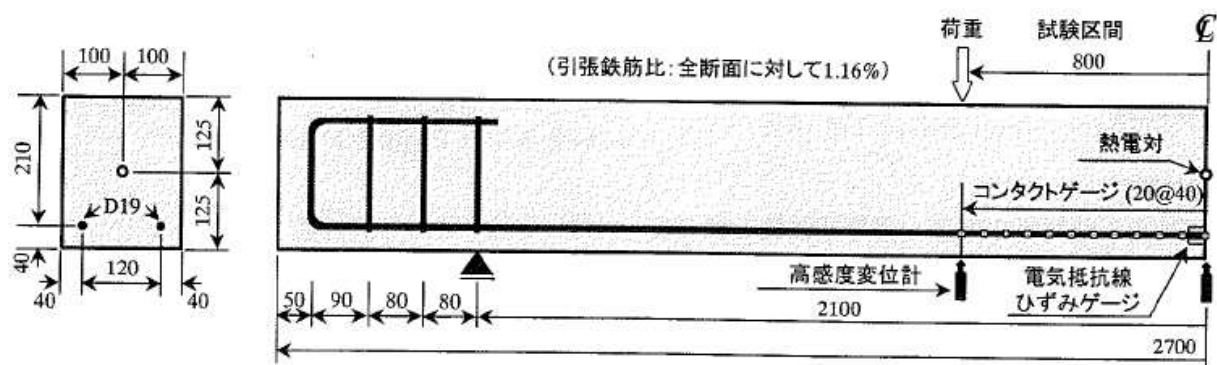


図 6-1 試験体概要（谷村）

RC はりの作製に際し、自己収縮ひずみの影響を検討するため、収縮低減剤（記号 S）及び膨張材（記号 E）を用いて自己収縮ひずみを低減した RC はりを併せて作製した。各調合条件における自己収縮ひずみを図 6-2 左図に示す。各調合の試験結果のうち、低熱ポルトランドセメントに膨張材を混和した調合（LE, LES）では、自己収縮ひずみが膨張側に転じている。これらの調合では、鉄筋拘束条件下においてコンクリートにケミカルプレストレスが生じていることを意味している。

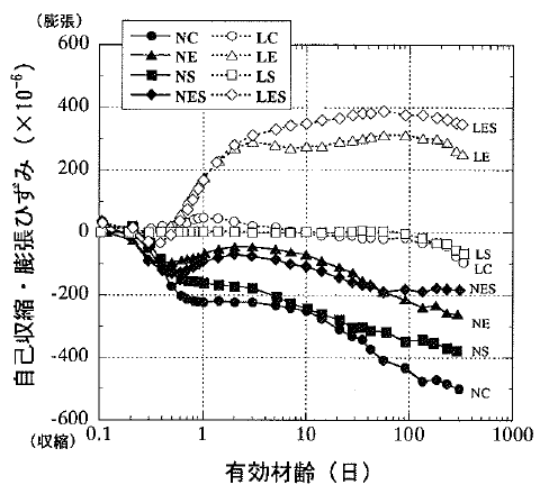
載荷試験は図 6-1 に示すように支間 2100mm、等曲げ区間 800mm の 2 点集中載荷で行った。

ひび割れ発生モーメントの実測値及び、拘束応力を無視して載荷直前の割裂引張強度を用いて求めたひび割れ発生モーメントの計算値を図 6-2 右図に示す。ここで、ひび割れモーメントは自己収縮を低減していない調合（NC）を基準としている。

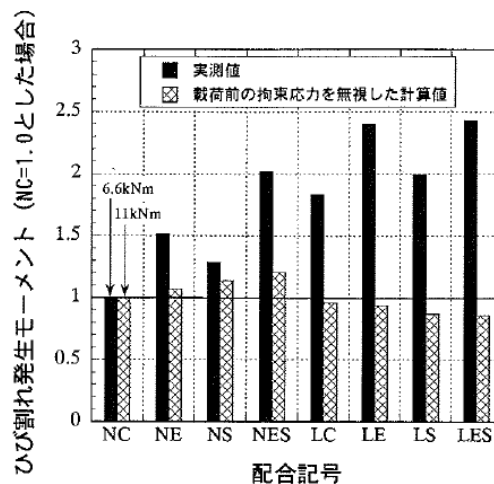
図から、自己収縮応力が最も卓越して生じた NC はりのひび割れ発生モーメントは拘束応力の影響を無視した計算値の 60%程度に低下しており、ひび割れ発生モーメントに及ぼす自己収縮の影響は無視することができないことを明らかにしている。

一方、自己収縮ひずみが膨張側であった、LE, LES のひび割れ発生モーメントの NC の概ね 2.5

倍であり、ケミカルプレストレスがひび割れ発生モーメントに及ぼす効果は明らかであった。



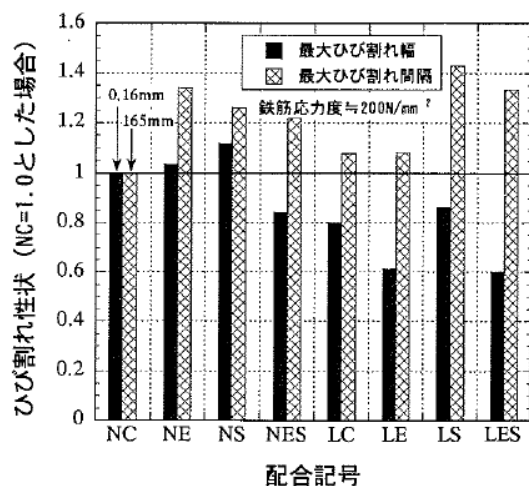
各調合の自己収縮ひずみの経時変化



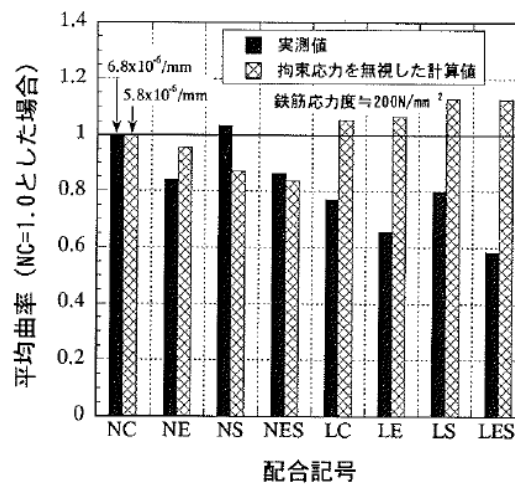
ひび割れモーメントに及ぼす
自己収縮ひずみの影響

図 6-2 試験結果 1 (谷村)

図 6-3 左図に、鉄筋応力度が約 200N/mm^2 のときの最大ひび割れ幅及び最大ひび割れ間隔を、NC を 1.0 とした場合の比で示す。



ひび割れ幅・ひび割れ間隔に及ぼす
自己収縮ひずみの影響



平均曲率に及ぼす
自己収縮ひずみの影響

図 6-3 試験結果 2 (谷村)

ケミカルプレストレスが卓越した LE, LES の場合、最大ひび割れ間隔が 10~40% 程度増大する一方、最大ひび割れ幅は 20% 低減されている。

また、図 6-3 右図に、鉄筋応力度が約 200N/mm^2 のときの、平均曲率の実測値、拘束応力の影響を無視した計算値を示す。図から、実測平均曲率は、拘束応力を無視した計算値よりも約 20% 大きく、自己収縮の変形能力に及ぼす影響は無視できないことがわかる。一方、ケミカルプレストレスが卓越した LE, LES の場合、実測平均曲率は約 40% 小さくなっており、ケミカルプレストレスの導入による曲率の低減効果は明らかであった。

6.2.2 自己収縮ひずみが RC はり部材のせん断耐力に及ぼす影響

Sato, Kawakane²は、普通ポルトランドセメント（記号 HAS）及び低熱セメント（記号 LAS）を用いて水セメント比 23%、シリカフューム置換率 10% で試験体寸法 $150 \times 500 \times 4500\text{mm}$ の RC はり（図 6-4）を作製し、静的載荷による曲げ試験を行った。

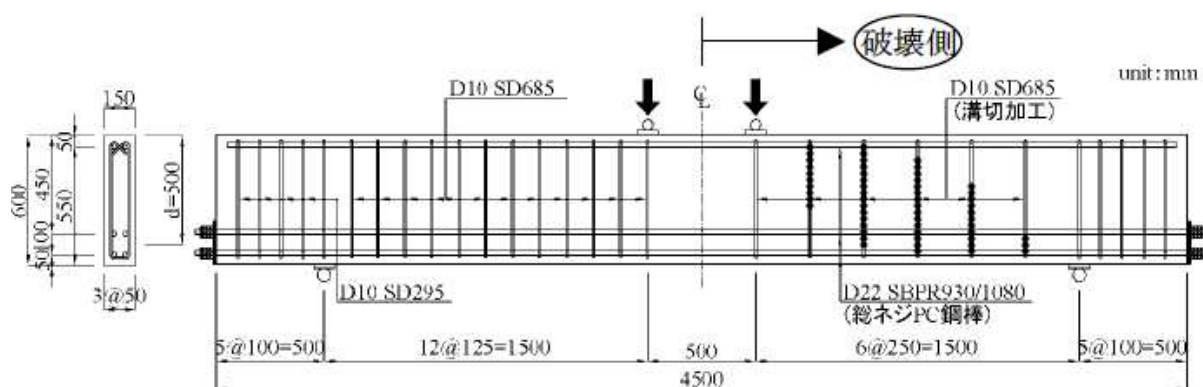


図 6-4 試験体概要（河金）

RC はりの作製に際し、自己収縮ひずみの影響を取り出すため、基準コンクリート（HAS）に加えて、収縮低減剤及び膨張材を用いて自己収縮ひずみを低減したコンクリート（LAS）の 2 水準を設けた。各調合条件における自己収縮ひずみを図 6-5 に示す。LAS は収縮低減剤及び膨張剤を用いることで自己収縮ひずみが低減され、膨張側で推移している。

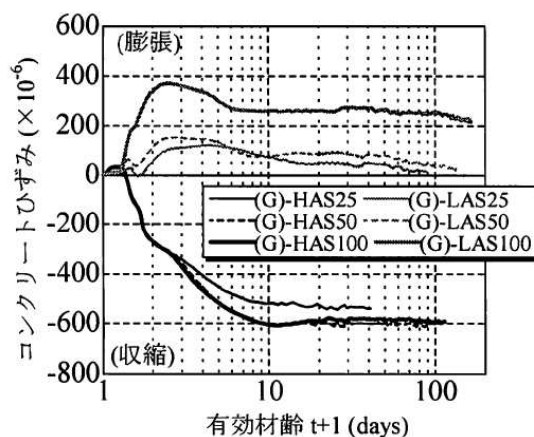
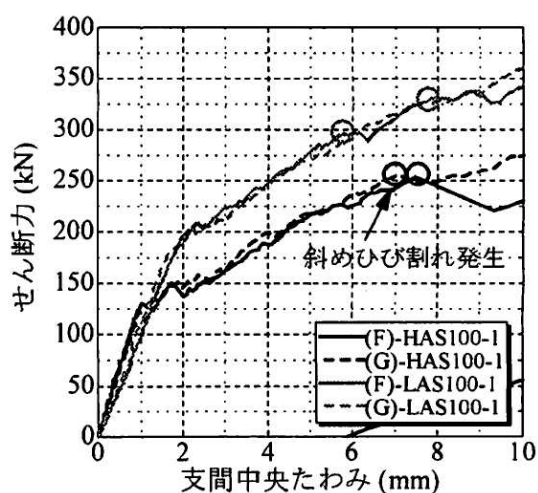


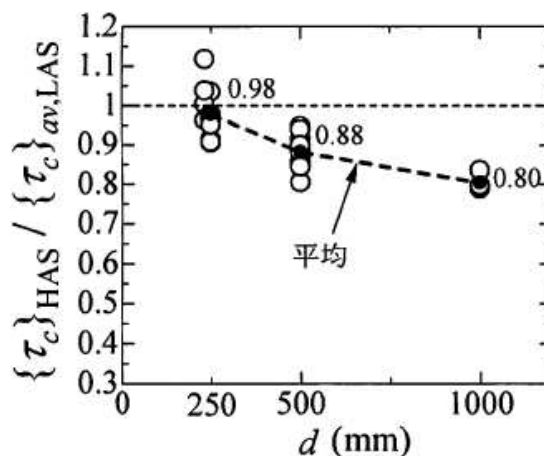
図 6-5 自己収縮ひずみ試験結果（河金）

図 6-4 に示すように、載荷試験は支間 1500mm、等曲げ区間 500mm の 2 点集中載荷で行った。試験の結果の一部を図 6-6 に示した。

図 6-6 左図に示されるように、同一せん断力における、たわみ量は HAS が LAS より大きくなっており、これは自己収縮によってコンクリート中に引張応力が蓄積しており、HAS 試験体の方がひび割れの進展が早かったためと推察している。これを裏付けるように、HAS と LAS でせん断ひび割れ発生荷重を比較すると、図 6-6 右図に示されるように、HAS でせん断ひび割れ荷重が低下していることがわかる。またこの傾向は梁せいが大きいものほど顕著である。



部材中央のたわみとせん断力の関係



ひび割れ発生荷重に及ぼす
自己収縮ひずみ及び梁せいの影響

図 6-6 試験結果 (河金)

6.2.3 自己収縮ひずみが RC はりの付着性状に及ぼす影響

丸山、佐藤³は、普通ポルトランドセメント (記号 SFNC) 及び低熱セメント (記号 SFLC) を用いて水結合材比 15%、100×100×1100mm の試験体を作製し、鉄筋拘束試験を行った。鉄筋には D-32 を使用した。なお、使用セメントの違いは、収縮量の差異を表現するためであり、SFNCの方が自己収縮が卓越する。鉄筋拘束試験の結果を図 6- に示す。

図から、SFNC のコンクリート応力が材齢 28 日以降低下していることが確認できる。丸山らは、このコンクリート応力の低下は、初期の自己収縮により鉄筋近傍にひび割れが導入し、付着が劣化したために生じた現象であると考察している。

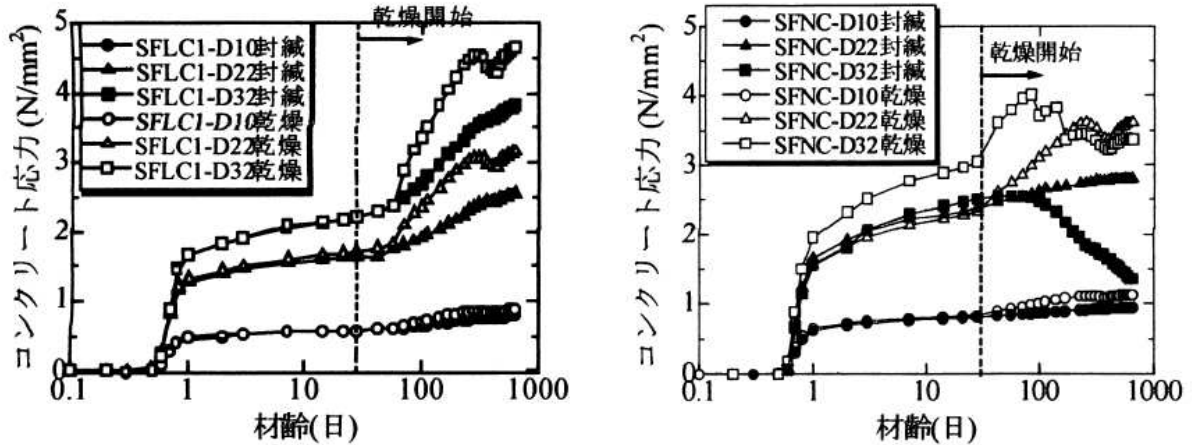


図 6-7 鉄筋拘束試験結果 (丸山)

6.2.4 若材齢両引き付着試験に関する研究

本章の検討において、実験手法の面で参考にした文献のうち、両引き付着性状の材齢依存性について三村らの研究を紹介する。水セメント比 32% の高強度モルタルを使用して、材齢 0.5 日以降の所定の材齢において、圧縮強度試験及び、両引き付着試験を実施した。

両引き付着試験に使用した载荷装置を図 6-7 に示す。本試験体における定着部長さは 650mm である。

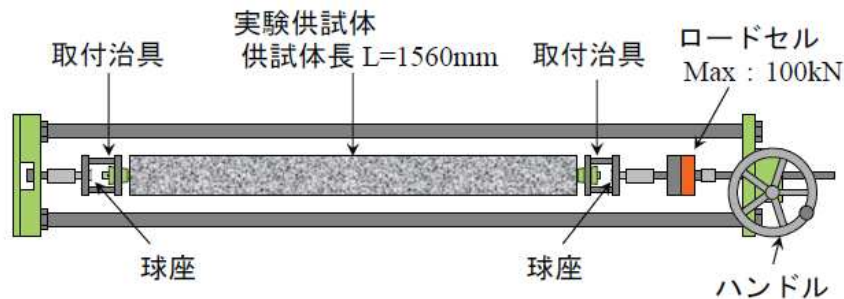


図 6-7 一軸引張载荷装置 (三村)

山尾ら⁴は、片引き付着試験において、十分な定着帳を有する試験体では、相対すべりと局所付着応力の関係は、局所付着応力を圧縮強度の (2/3) 乗で除した値を使用することでコンクリート強度によらず、付着性状を評価できると報告しており、三村らは両引き付着試験において、以上の知見について実験的に確認を行った。その試験結果が図 6-8 である。

図から分かるように、ある程度モルタルが硬化した材齢 2 日以降では、材齢 (圧縮強度) や鉄筋径によらず、すべり-付着関係は、ある一様の関係を示すことを確認している。

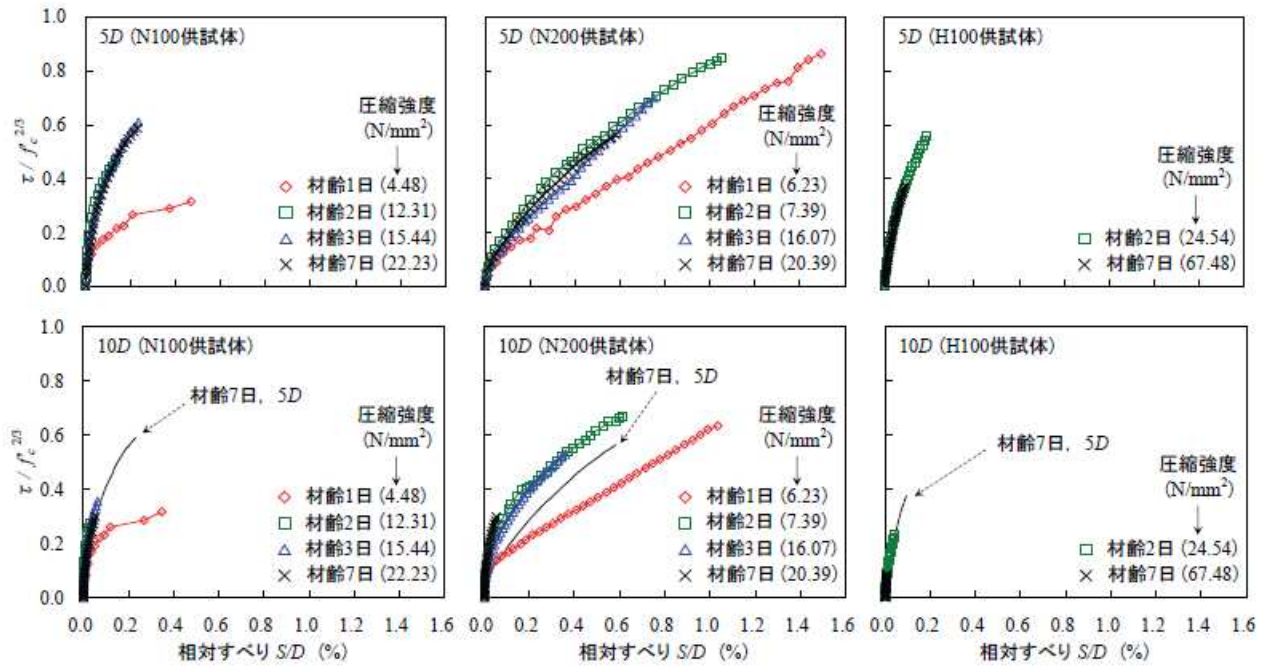


図 6-8 試験結果 (三村)

6.3 実験概要

水セメント比が小さいコンクリートは、若材齢期において温度・自己収縮などの体積変化が著しく、第5章において体積変化に起因したひび割れが発生することを確認した。

RC 部材において、ひび割れが発生した位置における引張力は鉄筋が負担し、コンクリートと鉄筋の付着を介して、ひび割れ周辺のコンクリートに応力を伝達する。このようなメカニズムによってコンクリートに生じるひび割れ幅の拡大が抑制されている。そのため、ひび割れ幅を抑制する際には、コンクリート - 鉄筋界面の付着性状を適切に評価する必要がある。

また、以上のメカニズムを逆から考えると、すでにひび割れを有しているコンクリート - 鉄筋界面が存在する場合、健全な状態と比較して、異なる付着性状を示す場合が考えられる。

コンクリート - 鉄筋界面の付着性状の指標の一つとして付着応力とすべりの関係がある。これまで、付着 - すべり関係に関する既往の研究は、コンクリートが十分に硬化した状態において試験を実施することが大半であり、また、収縮の大小に着目した研究はほとんどみられない。本節では、超高強度コンクリートの硬化過程において、強度性状、自己収縮性状が時々刻々変化する最中における、付着 - すべり関係の導出を目的とした。

6.3.1 使用材料及び調合

本実験シリーズでは、自己収縮がコンクリート - 鉄筋界面の付着性状に及ぼす影響を確認するため、異なる自己収縮量を持つ2種類の超高強度コンクリートを作製した。この調合の設定に際し、自己収縮量の明確な差を設定するために、例えば水セメント比が異なるコンクリートを使用した場合、両者の圧縮強度も異なるため、正しく付着性状を比較することが難しくなる。そこで本検討では、同一水セメント比のコンクリートを作製し、自己収縮量差は、膨張材及び収縮低減剤を用いることで調整した。

本実験に使用した材料を表 6-1 に、調合を表 6-2 にそれぞれ示す。

表 6-1 使用材料

材料	記号	Type		Density (g/cm ³)	Saturated Water Content (%)
Cement	C	Silica Fume Premix Cement	Taiheiyo Cement Co.LTD	3.07	—
Expansive Additive	EX	N-EX	Taiheiyo Material Cement Co.LTD	—	—
Fine Aggregate	S	Crushed Sand (Seto)		2.68	1.21
Coarse Aggregate	G	Crushed Stone (Seto)		2.71	0.55
Superplasticizer	SP	チューボール SSP-104	Takemoto Oil & Fat Co.LTD.	—	—
Antibubble and preparations	AD	AFK-2	Takemoto Oil & Fat Co.LTD.	—	—

表 6-2 調合

No.	Expansion Additive	W/B (%)	Unit Weight (kg/m ³)						
			W	C	EX	S	G	SR	SP C×%
1	×	16.0	155	969	—	525	848	-	1.30
2	○	16.0	155	939	30	525	848	6	1.30

6.3.2 強度試験

所定の材齢に圧縮強度試験及び割裂引張強度試験を、それぞれ JIS A 1108, JIS A 1113 に準拠して行った。圧縮試験時には同時に静弾性係数を測定した。試験に供する試験体の養生条件は封緘養生であり、材齢 28 日には標準水中養生試験体を使用して圧縮強度試験を行った。各養生条件における試験材齢を表 6-3 に示す。

表 6-3 強度試験材齢

Curing Condition	Test Age of	Test Age of
	Compressive Strength (hour)	Split Tensile Strength (hour)
Standard	672	—
Sealed	12, 18, 24, 36, 48, 72, 168, 672	12, 18, 24, 36, 48, 72, 168, 672

6.3.3 自己収縮ひずみ試験

20℃一定条件において「コンクリートの自己収縮研究委員会報告書」を参考に、小型試験体(100×100×400mm)を使用した。自己収縮ひずみの測定には、2種類の埋め込み型ひずみ計(PMFL, KM)を使用した。

6.3.4 両引試験

コンクリートに自己収縮が発生し、鉄筋がそれを拘束する場合、鉄筋には圧縮応力、コンクリートには引張応力が発生する。

本検討では、このコンクリートの体積変化によって生じる、コンクリートと鉄筋の相対変位と同一方向の付着 - すべり関係をえるために、両引き付着試験を実施した。両引き付着試験に使用した装置を図 6-9 に、また試験に供した両引き試験体の概要を図 6-10 にそれぞれ示す。

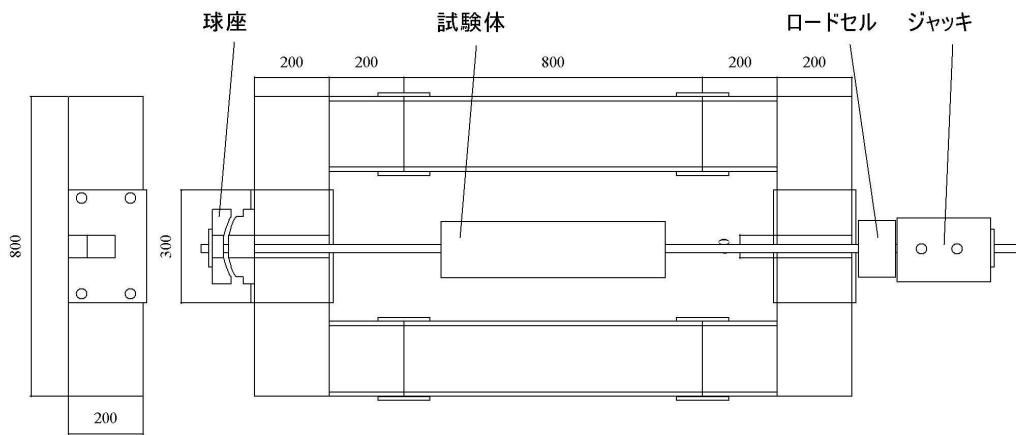


図 6-9 両引き試験装置

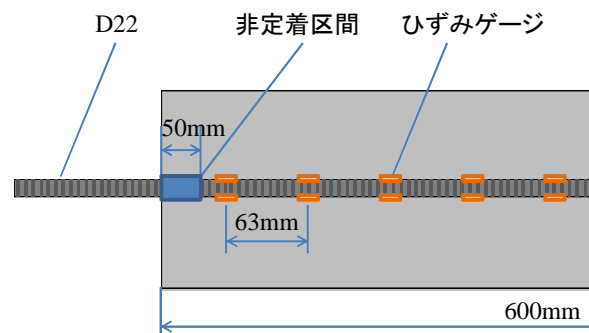


図 6-10 両引き試験体概要

本実験に使用した試験体の端部には、自由端から 50mm までをブチルゴム系テープによって被覆することで非定着部分を設け、試験体の定着部分は 500mm とした。また、定着部中央から両側に 63mm ピッチで 9 か所において、リブの裏表面を必要最小量研磨し、各距離に裏表 2 枚、計 18 枚のひずみゲージを貼付した。ひずみゲージを貼り付けた後、防水のため、リード線の下側およびひずみゲージの上側を 2 種類のブチルゴム系コーティングテープで 2 重に覆った。

両引き試験に際し、試験体の端部には球座を設け、荷重の偏心にともなう曲げ応力の作用をできるだけ小さくした。センターホールジャッキによって鉄筋に強制変位を与え、その間に生じる応力をセンターホールロードセル（最大荷重：500kN）によって荷重を計測した。

得られた荷重及び鉄筋ひずみから、以下の式によって局所付着応力及び局所すべりを得た。

$$\tau = \frac{D \cdot E_s}{4} \cdot \frac{d\epsilon_s}{dx} \quad (6-1)$$

$$S_i(x) = S_{i-1}(x) + \int_{x_{i-1}}^{x_i} \varepsilon(x) dx \quad (6-2)$$

ここで、 $S(x)$: x 位置におけるすべり、

x : 試験体中央からの距離、

τ : 局所付着応力、

D : 鉄筋径、

E_s : 鉄筋のヤング係数、

ε_s : 鉄筋ひずみ、

である。

ここで、鉄筋全域のひずみ分布曲線 $\varepsilon(x)$ を、隣接する 3 点を通る 2 次曲線を順次組み合わせることによって表現した。

6.4 実験結果

6.4.1 強度, ヤング係数

(1) 圧縮強度

図 6-11 に各養生条件における圧縮強度試験の結果を示す。

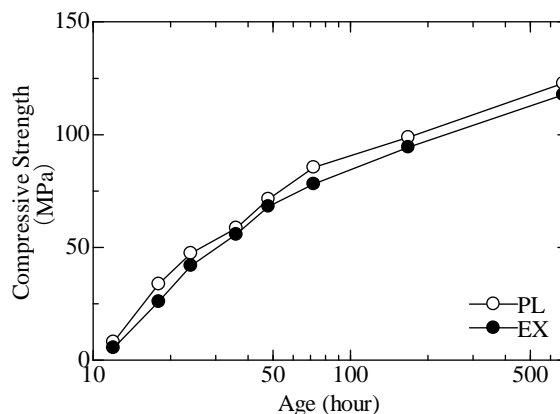


図 6-11 圧縮強度試験結果

当初設定した通り、20°C一定封緘養生条件下では、圧縮強度に及ぼす膨張材の影響は若材齢からほとんど見られず、材齢 28 日までほぼ同程度の圧縮強度の経時変化を示している。

しかしながら、膨張材混入のコンクリートのほうで凝結時間が約 1 時間程度遅かったため、材齢 12 時間の圧縮強度比はやや大きくなっている点に注意を要する。

また、強度管理用に材齢 28 日には封緘養生試験体と併せて標準養生試験体でも圧縮強度を実施した。比較結果を表 6-4 に示す。

表 6-4 封緘養生と標準養生の圧縮強度試験結果

Curing Condition	PL (MPa)	EX (MPa)
Standard	125.2	118.7
Sealed	122.7	117.7

表から確認できるように、いずれの調合においても標準養生でやや大きい強度を示しているが、有意な差は見られなかった。

(2) ヤング係数

図 6-12 左図に各養生条件におけるヤング係数試験の結果を示す。また、同一調合、同一材齢における圧縮強度とヤング係数の関係を図 6-12 右図に示す。

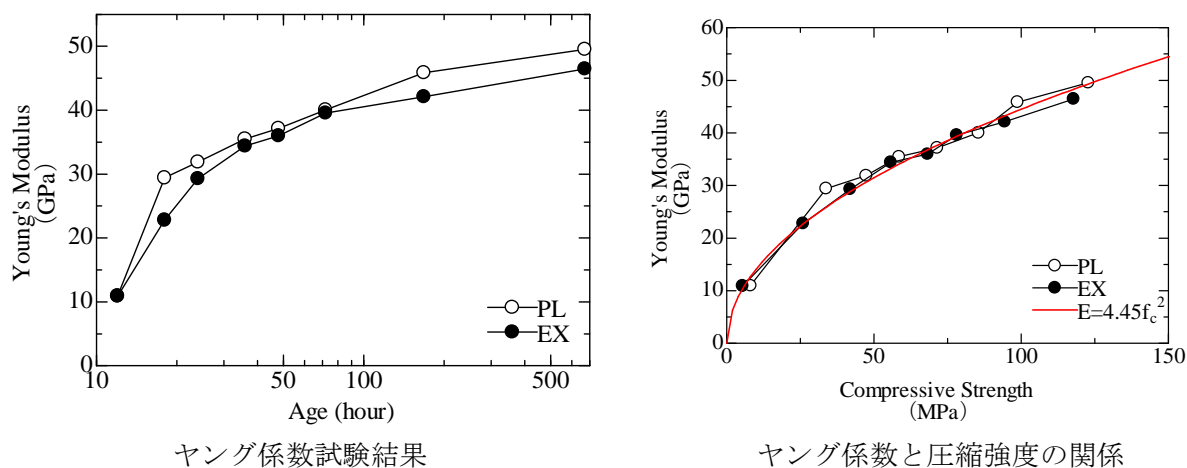


図 6-12 ヤング係数試験結果

ヤング係数試験においても、圧縮強度と同様に、20℃一定養生条件では膨張材の影響はほとんど見られない。また、いずれの調合においても、膨張材の有無にかかわらず若材齢から同一の曲線によって表現可能であった。

(3) 割裂引張強度

図 6-13 に封緘養生条件における割裂引張強度試験の結果を示す。

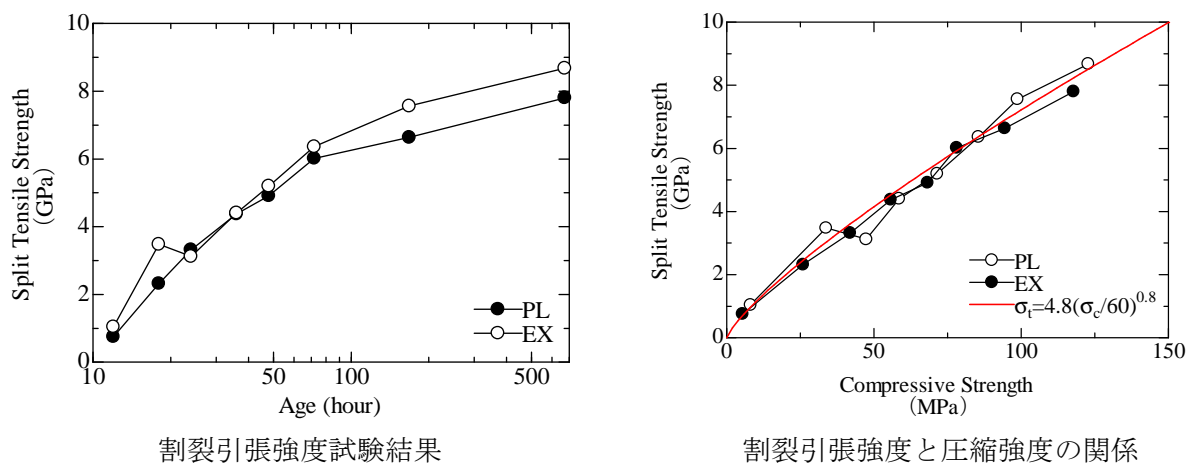


図 6-13 割裂引張強度試験結果

封緘養生条件の割裂引張強度は、いずれの調合においても材齢 28 日まで経時的に増加しており、圧縮強度と割裂引張強度の関係についても、両者にほとんど差異は見られなかった。

6.4.2 自己収縮ひずみ

2種類の埋め込み型ひずみ計から得られた自己収縮ひずみの算定結果について、20℃一定条件における各調合の試験結果を図6-14に示す。ここで100×100×400mmには、最大で6.3℃の温度上昇がみられたが、この温度ひずみについては線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として温度ひずみの補正を行った。

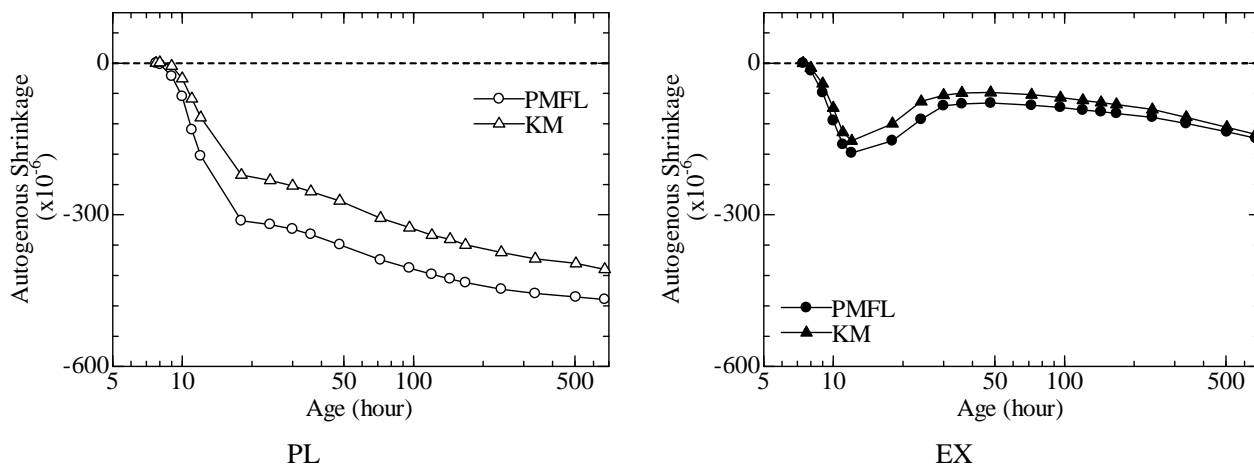


図 6-14 自己収縮ひずみ試験に及ぼす測定方法の影響

図に示されるように、2種類の埋め込み型ひずみ計による自己収縮ひずみを比較すると、いずれの調合においても、剛性の小さいPMFLを使用した場合のほうが若材齢の自己収縮ひずみが大きくなっている。これは、2.3節で述べたレーザー変位計とKMを比較した結果と対応している。

PMFLは長期的な測定については耐久性の観点から不安があるものの、若材齢における自己収縮ひずみをより鋭敏にとらえていると考えられ、本章の以降の検討では、PMFLの自己収縮ひずみを使用した。

図6-15にPMFLで得られた各調合の自己収縮ひずみの比較を示す。図6-15には、後述する両引き付着試験を実施した材齢を点線で示した。

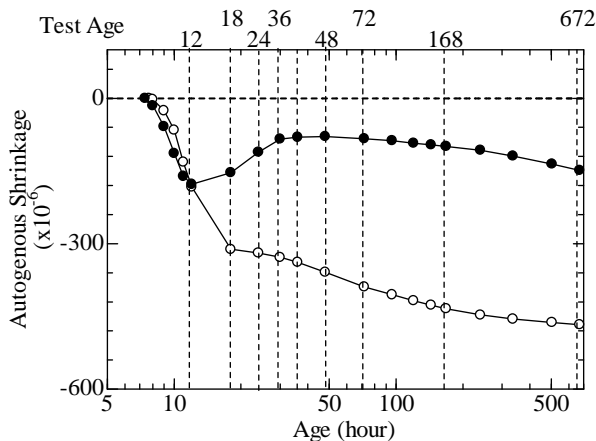


図 6-15 自己収縮ひずみ試験結果

図から、いずれの調合においても材齢 12 時間までは同様の自己収縮挙動を示しているが、EX では材齢 12 時間から膨張材が効果を発揮している。この機械的な膨張によって材齢 36 時間において -80×10^{-6} まで収縮が回復し、その後は再度収縮に転じた。しかしその後の自己収縮進行速度も PL よりは小さく、これは収縮低減剤の効果によるものと考えられる。以上の強度試験、自己収縮ひずみ試験から、本実験に使用した 2 種類の超高強度コンクリートは、当初想定した自己収縮量に差があり、強度がほぼ同じコンクリートであることを確認した。

6.4.3 両引き付着試験以前の付着性状

図 6-16 に、コンクリートに生じる体積変化がもたらす各位置の鉄筋ひずみの経時変化を示した。ここで左図の PL が収縮大のコンクリート、右図の EX が収縮小のコンクリートである。

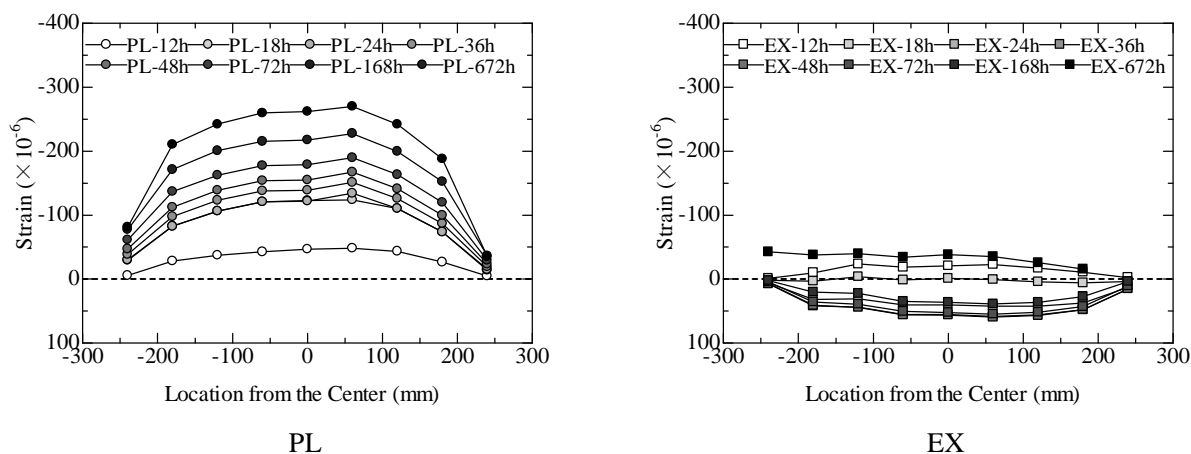


図 6-16 自己収縮によって生じる鉄筋ひずみの推移

材齢 672 時間まで自己収縮が継続して進展する PL では、いずれの材齢、いずれの鉄筋位置でも鉄筋ひずみは圧縮側に推移している。また、十分に定着がとれていない部材両端付近では鉄筋ひずみの伸びは部材中央部と比較して小さく、端部付近ですべりが生じていることを表している。一方、膨張材、収縮低減剤により自己収縮量を低減した EX では、材齢 12 時間に PL と同様圧縮ひずみを示した後、膨張材の効果によってその後は徐々に引張側へと推移し、材齢 48 時間の中央部で最大 59×10^{-6} の引張ひずみを示した。つまりこの間、周辺コンクリートには微量のプレストレスが付与されているものと考えられる。その後再び進展する自己収縮によって材齢 672 時間の鉄筋ひずみは再度圧縮ひずみを示したが、PL の材齢 672 時間の値と比較して 200×10^{-6} 以上小さいものであった。

このように自己収縮量を低減することで、中央部の鉄筋ひずみの変化量を低減することは可能であったが、圧縮側・引張側いずれの場合においても、材齢 18 時間、672 時間を除き、部材端部と中央部のひずみ差は解消し切れてはおらず、EX でも部材端部付近ですべりが生じていることが分かる。

以上の実験値を使用して式(6-2)から局所すべりを算出した。各鉄筋位置における局所すべりの材

齢変化を図 6-17 に、また、式(6-1)から算出した $x=240$ における局所付着応力と、局所すべりの関係を図 6-18 に示す。

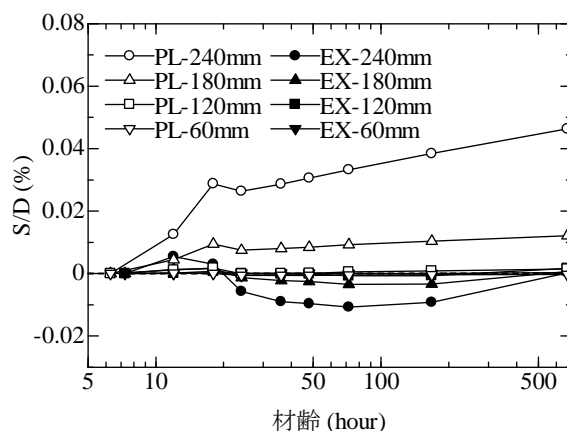


図 6-17 鉄筋各位置における局所すべりの材齢変化

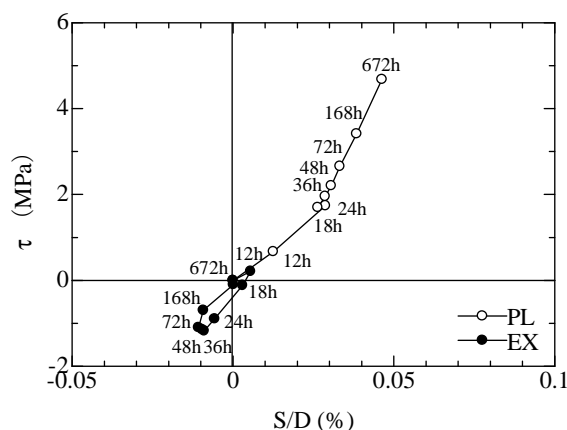


図 6-18 自己収縮ひずみによって生じた局所すべり - 局所付着応力関係

図 6-17 から明らかなように、PL のようにすべり方向が正側に一様であれば、すべり量の増大に伴って付着応力の増大を示し、付着応力-すべり曲線は下に凸の形状となる。これは、コンクリートの水和の進行に伴って付着剛性が増大していくためである。一方、材齢によってすべり方向が逆転する EX では複雑な挙動を示している。この複雑な挙動の中で注目すべき点は、材齢 168 時間から材齢 672 時間であり、この間 PL と EX ではほぼ同程度のすべり量を示しているにも関わらず、両者の付着剛性は $PL > EX$ となっている。つまり、EX では収縮、膨張を繰り返すことで、正負の最大すべり量の間では、付着性能が低下している可能性が考えられる。

本実験で実施した両引き付着試験は、以上のような、自己収縮によって自発的に生じた鉄筋ひずみ、局所すべり、局所付着応力の状態を起点として、ジャッキにより鉄筋に強制変位を与えること

で得られたものである。

6.4.4 両引き付着試験

各材齢において両引き付着試験から得られた鉄筋全長の平均ひずみ - 荷重関係のうち、試験体にひび割れが発生する以前の結果を図 6-19 に示す。また、参考として、使用した鉄筋のみのひずみ - 荷重関係を併せて示した。

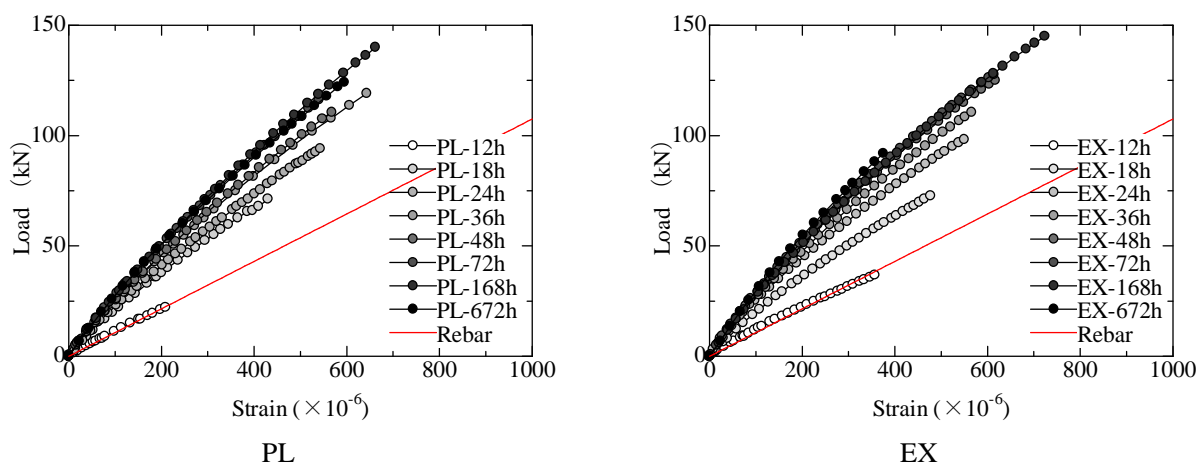


図 6-19 両引き試験時における平均鉄筋ひずみ - 荷重関係

いずれの調査についても材齢 12h では、鉄筋単体の剛性とほぼ一致しており、コンクリートのヤング係数が十分に発現していない状態では、付着拘束がほとんど働かないことを示している。材齢の経過に伴い、コンクリートに応力が伝達されるようになると、部材全体の剛性は向上していくことが確認できる。

平均ひずみ 200×10^{-6} 以下の領域でこの傾きを算出し、EX の PL に対する比率を取ったものが図 6-19 である。

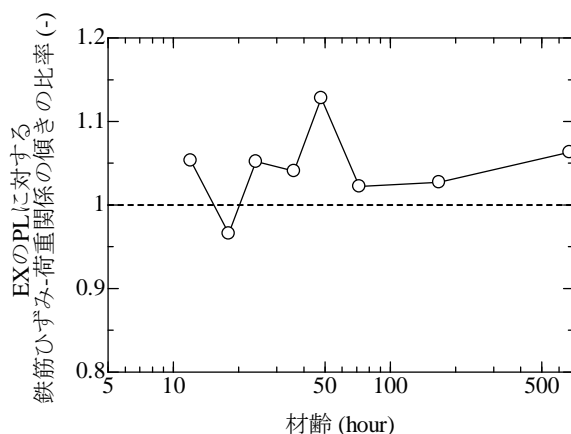


図 6-20 EX の PL に対する鉄筋ひずみ-荷重関係の傾きの比率

この値が1より大きい場合には、EXの方が部材の応力伝達性能が高いことを意味している。図をみると、材齢18時間を除き、EXの方がPLと比較して傾きがやや大きくなっていることが分この結果は、自己収縮を低減することで鉄筋-コンクリート界面の付着性状が改善されることで部材全体の剛性が上昇することを示唆するものであるが、その改善の程度はいずれの材齢でも概ね5%程度であり、本実験の範囲程度の鉄筋量、自己収縮量であれば、自己収縮がRC部材の付着剛性に及ぼす影響は大きくはない。

次に、各材齢における両引き付着試験から、鉄筋各位置における付着応力-すべり関係を得た。各鉄筋位置において付着応力-すべり関係を比較したところ、同一調合ではいずれの鉄筋位置についてもほぼ同様の付着応力-すべり曲線上にあることが確認されたため、に各材齢の代表値として鉄筋位置240mmの点における付着応力-すべり関係を示した。

ここで、局所すべり、局所付着応力の原点は厳密には図6-18に示した各点であるが、本論文では一般的な整理方法に倣って、載荷開始時点を原点とした。また、材齢や調合によるコンクリート強度の影響を取り除くため、山尾らの研究にならい、付着応力は圧縮強度の $(2/3)$ 乗で規格化した。参考として、図中には普通強度領域の付着応力-すべり関係の一例である島らの提案式⁵を併せて示した。

$$\tau = 0.9 f_c^{2/3} \{1 - \exp(-40(S/D)^{0.6})\} \quad (6-3)$$

ここで、 $f_c^{2/3}$ ：圧縮強度の $(2/3)$ 乗、

D ：公称鉄筋径、

である。

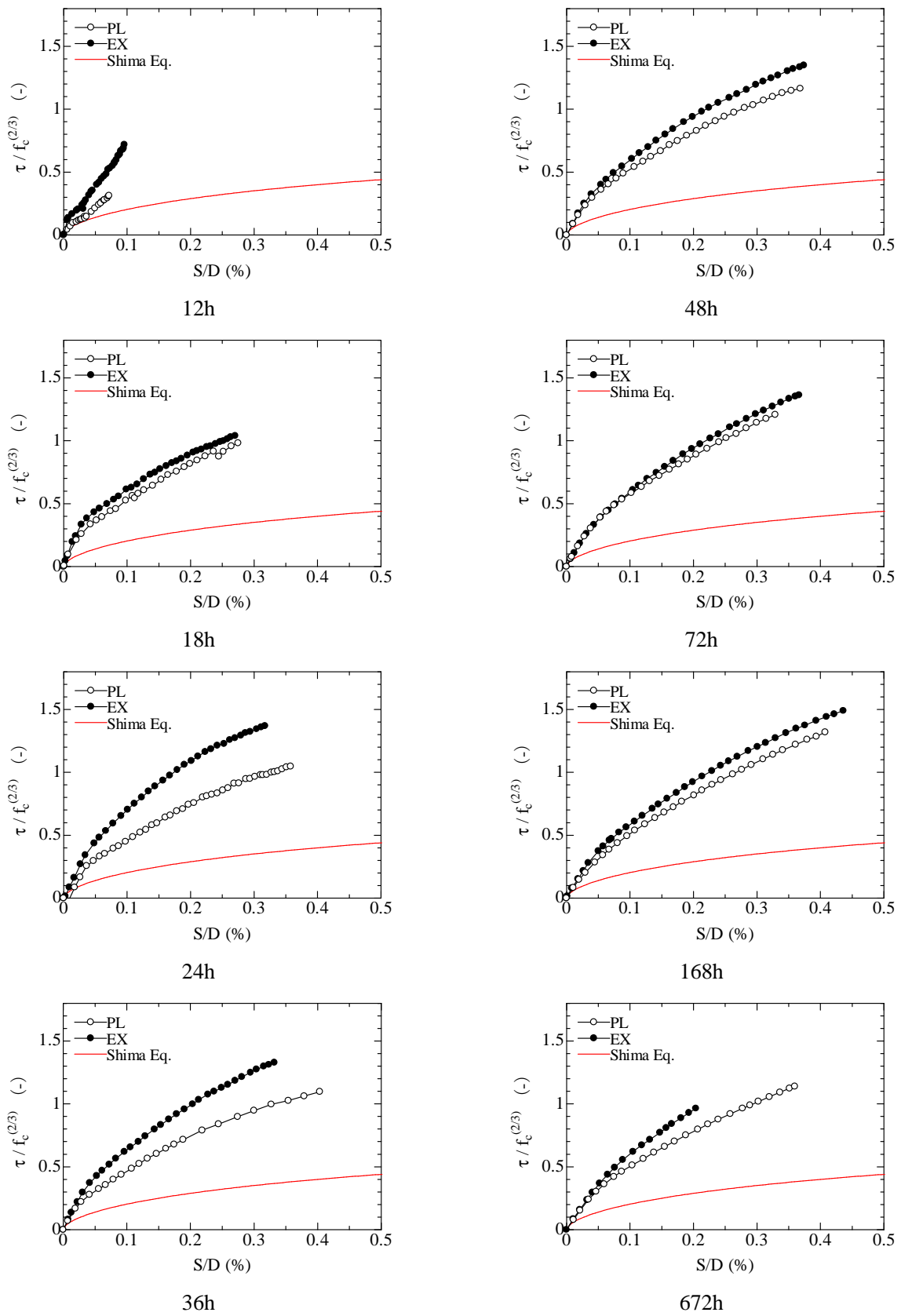


図 6-20 各材齢における付着応力-すべり関係

図 6-20 に示されるいずれの材齢においても、付着剛性の実験値は島らの提案式を上回っており、既往の研究⁶にみられるように超高強度コンクリートは普通コンクリートと比較して優れた付着性能を有していることが確認される。

また、PL、EX について比較すると、材齢 24 時間、36 時間という EX の自己収縮挙動において膨張を示していた材齢において、EX が PL を上回っており、その後の材齢についても、若干ながら EX のほうが上回る結果であった。この結果は、図-12 に示した傾向と符合している。その後、材齢の経過に伴ってその差異は小さくなっているが、この間のすべり-付着応力関係をみると、EX では材齢によってほとんど変化していないのに対し、PL で材齢 48 時間以降、付着剛性が改善されていることによるものである。

丸山らは、自己収縮量の異なる 2 種類の超高強度 RC 短柱を用いたせん断試験において、超高強度コンクリートの自己収縮量を低減した場合に RC 短柱の初期せん断剛性が改善することを実験的に明らかにしている⁷が、本検討において、この現象は付着性能の向上によるものであることが示唆された。

第6章の参考文献

- ¹谷村充ほか：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
- ²Sato, R. and Kawakane, H. : 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
- ³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, 第 617 号, pp. 1-7, 2007.7
- ⁴山尾芳秀ほか：付着応力-すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.343, pp.219-228, 1984
- ⁵島弘ほか：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.378, pp.165-174, 1987
- ⁶O. E. Gjorv, et. al. : Effect of Condensed Silica Fume on the Steel-Concrete Bond, ACI Materials Journal, Vol.87, Issue 6, pp.573-580, 1990.11
- ⁷丸山一平ほか：超高強度コンクリートの自己ひずみが RC 柱の構造挙動に及ぼす影響についての基礎検討, 高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会報告書, pp.385-392, 2011.9

第7章 結論

7.1 本論文のまとめ

7.2 今後の展望

7.1 本論文のまとめ

本論文では、セメントの水和反応によってコンクリート中に生じる体積変化のうち、温度ひずみ、自己収縮ひずみに着目し、両者の特性及び両体積変化が RC 部材に及ぼす影響を明示することを目的とした。

本章では、結論として各章毎の内容と本研究で得られた成果をとりまとめる。

第1章では、本研究の背景およびその特色を示し、コンクリート研究における本研究の位置付けを示した。

近年、コンクリート材料の高強度化、高耐久性化への要求が高まる中、水セメント比の小さいコンクリートの利用が増大傾向にあることを踏まえ、このような高強度コンクリートが本質的に持っている問題点として、1) 単位セメント量の多さから水和発熱量が大きくなり、結果として部材が高温履歴を受ける可能性が高くなること、2) 水セメント比が小さいため、十分に強度を発揮していない若材齢から自己収縮が卓越することを指摘した。

以上の水和に伴って進行する体積変化は、他の部材や鉄筋等に拘束された場合、コンクリート中に応力を発生させる。若材齢に生じた拘束応力はコンクリートに生じるひび割れリスクを著しく増大させるため、RC 部材の高耐久性を確保するためには、ひび割れ制御の一手法として、水和依存性体積変化の高精度予測、制御手法が要求されている。

このような背景のもと、本論文の概要として、コンクリートの“自己収縮”という現象をキーワードとし、材料レベルでは、自己収縮の導出手法の改善から自己収縮性状の把握、新たな自己収縮予測式の提案、また、RC 部材レベルでは、自己収縮によって RC 部材に生じる応力、ひび割れの把握、自己収縮が RC 部材性能に及ぼす影響の検証といった手順を踏むことを詳述した。

第2章では、コンクリートに生じる体積変化のうち、温度ひずみ成分と自己収縮ひずみ成分の成分分離を最終的な目的とした。

既往の研究を整理することで温度ひずみの算出に供するコンクリートの線膨張係数の基本的な特性について言及し、既存の手法では線膨張係数の測定に限界があることを指摘した。その上で、線膨張係数の経時変化を測定可能な装置の開発に着手し、開発した測定装置の妥当性の検証を行った。また、本装置を使用して種々のセメントペースト、モルタルについて線膨張係数の経時変化を得た。

得られた測定結果から、セメントペーストの線膨張係数はセメントの水和反応によってセメントペースト中の含水量が低下することで経時的に増大することを確認した。セメントペーストの調合が線膨張係数の経時変化に与える影響は、水セメント比が小さいものほど、また、材齢初期に反応が進行するセメント種類ほど若材齢における経時変化の速度が大きいことであり、水和発熱によって高温履歴環境下に晒されるセメントペーストでは、高温時に水和反応が促進され、上述の線膨張

係数の経時変化がより顕著になる。

以上の線膨張係数の経時変化を考慮して、増分法によって温度ひずみの算定を行った。線膨張係数を一定値と仮定した場合には、山形の高温履歴を経て基準温度に戻ってきたとき、温度ひずみは必ずゼロを示す。しかしながら、水和反応に伴い増大する線膨張係数を考慮した場合、温度上昇域より温度下降域において線膨張係数は大きな値を取ることがあり、結果として基準温度に戻ってきたときに、温度ひずみは収縮側に推移することが明らかになった。

マスコンクリート等で水和発熱による高温履歴を経る場合のひび割れメカニズムは、従来、温度ひずみが拘束される時のヤング率の経時変化によって生まれる引張拘束応力、外部拘束条件下の自己収縮によって生じる引張拘束応力が指摘されてきたが、本検討において、線膨張係数が経時変化することによって生じる収縮ひずみもまた引張拘束応力の要因となり得ること指摘した。この新たなひび割れリスクの存在は、可能性として考えられてきたものであるが、実験的に立証したのは本研究が初めてである。

また、以上の線膨張係数の経時変化によって増大しうる温度ひび割れリスクを低減することを目的として、線膨張係数の経時変化を制御する2つの手法について提案を行った。

1つは、線膨張係数の経時変化を引き起こす原因であるセメントペースト内部の質量含水量の低下を抑制することであり、高含水性の人工軽量骨材を使用して骨材からセメントペーストへの水分供給を促すことによってセメントペースト内部の高含水状態を保持させた。

2つ目は、丸山らが提案しているセメントペーストの体積変化メカニズムである“水和圧理論”に則り、セメントペースト表面を疎水性にすることで、温度変化時に生じる水和圧の変化量を抑制することを目的とした。この着眼は、これまでの研究で、収縮低減剤を使用した場合に、セメントペースト表面の親水性が低下する可能性が指摘されていたことによるものである。本検討では、4種類の収縮低減剤を使用し、線膨張係数の経時変化の制御を試みた。

以上、2つの提案手法は、いずれも線膨張係数を低減することに効果があり、結果として温度ひずみが収縮側に推移することを防止する効果をもたせることを可能にした。

第3章では、従来多くの研究が行われているコンクリートの自己収縮に着目し、これまでに得られている知見を整理した上で、本研究の特色である、高温履歴中の自己収縮ひずみの特性、水セメント比が20%以下の高強度コンクリートの自己収縮ひずみについて精査した。

水セメント比が、25%から55%の範囲において、ポルトランド系セメント及び高炉スラグ混入セメントのセメントペーストの自己収縮ひずみ特性は、既往の研究と同様に、水セメント比が小さくなるほど自己収縮量が大きくなる、低発熱系のセメントを使用することで自己収縮量が低減される、といった傾向が再現された。一方、本論文で得られた新たな知見としては、上記の調合において、高温履歴を受ける最中の自己収縮ひずみは、高温時に自己収縮が進行し、最高到達温度以降の温度降下材齢には、自己収縮がほとんど進展しないあるいは緩やかな膨張挙動を示す、といった傾向が認められた。以上の温度履歴中の自己収縮挙動を、アレニウス則による有効材齢によって評価した

場合、普通ポルトランドセメントペーストでは、いずれの水セメント比についても有効材齢で自己収縮ひずみの温度依存性が評価可能であったが、低発熱系のセメントで同様の有効材齢式を用いた場合、材齢極初期や温度降下時にみられる自己膨張の速度を評価できない可能性が示された。

次に、本論文の主目的である、水セメント比が20%以下の超高強度セメントペースト、モルタル、コンクリートの自己収縮ひずみについて得られた知見を以下に示す。

水セメント比が20%以下の超高強度セメントペーストの自己収縮温度依存性に関する実験において、超高強度セメントペーストの自己収縮は、材齢1日以前に自己収縮速度が変曲する材齢（変曲点）を有し、変曲点以前と以降の材齢で、自己収縮が温度から受ける影響が異なることが明らかになった。すなわち、変曲点以前の極若材齢では、低温のものほど自己収縮が進行し、変曲点以降では、高温履歴を受ける試験体ほど自己収縮進行速度が大きくなるというもので、特に、変曲点以前の低温ほど自己収縮が大きくなる測定結果はこれまでの知見とは正反対のものであった。しかしながら、既往の研究において超高強度RC模擬柱部材を冬期及び夏期に打設した実験では、部材内部のひび割れ性状は冬期のほうでむしろ厳しいものとなっており、本実験で得られた自己収縮温度依存性状は以上の実験を自己収縮の観点から定性的に説明可能とするものであった。

また、変曲点以降の自己収縮温度依存性について、普通強度領域と同様の有効材齢式を使用した場合、自己収縮進行速度を小さく見積もることが明らかになった。これは、超高強度コンクリートを作製する際に、一般に利用されるシリカフュームが、高温時に反応が活性化することによるものと推察され、以上の傾向は有効材齢式の中でみかけの活性化エネルギーを大きくとることで適切な評価が可能であった。

以上に述べた超高強度セメントペーストの自己収縮性状が、骨材が共存するモルタル、コンクリートにおいても再現されるものであるかを確認する必要性が考えられたため、本論文ではまず、第2章で得られた超高強度セメントペーストの線膨張係数の実験値を使用して、任意の温度履歴下における線膨張係数の経時変化を表現可能な実験式を提案し、セメントペーストと骨材の複合則からコンクリートの線膨張係数の経時変化を推定する手法の提案を行った。これにより、高温履歴を受ける最中のコンクリートの自己収縮ひずみの算定精度の向上を図った。これまでの研究では、高温履歴中の自己収縮ひずみは、線膨張係数を一定値として算出されたものがほとんどであり、本研究のように、線膨張係数の経時変化を考慮して自己収縮ひずみの議論を行ったものほとんどない。これらの手法によって得られた超高強度コンクリートの自己収縮挙動は、セメントペーストの挙動を再現しているものであった。

さらに第3章では、これまで提案されている自己収縮予測式の適用範囲が水セメント比20%以上の領域のものであることから、水セメント比20%以下でかつ、シリカフュームを使用しているコンクリートの自己収縮予測式の提案を行った。本提案式の特徴は、材齢による自己収縮進行速度の差異を表現できること、材齢による自己収縮温度依存性の相違を表現できること、骨材量の影響を明示できることであり、本提案式を使用することで、超高強度コンクリートの自己収縮を30%以内の精度で推定可能とした。

第4章では、第3章で指摘された超高強度コンクリートの自己収縮にみられる、自己収縮進行速度の変曲点に着目し、この変曲点が現れる原因、また変曲点前後における自己収縮メカニズムについて検討を行った。

想定する収縮メカニズムとして水和圧理論を紹介し、従来、乾燥収縮から得られてきた水和圧曲線を自己収縮から得ることを目的として、材齢1日以降の自己収縮ひずみ、含水量、比表面積、体積弾性係数等の諸量を得るとともに、水和反応解析を実施することで、水和圧曲線に影響を及ぼす因子として、C-S-H中のカルシウムシリケート比、また見かけの体積変化に影響を及ぼすエトリンサイト生成量を得た。以上の検討から、超高強度コンクリートに使用されるシリカフェームプレミックスセメントペーストは、通常のポルトランドセメントペーストと比較して、水和性生成物C-S-Hのカルシウムシリケート比が小さく、結果としてセメントペースト表面の親水性が小さくなりポルトランドセメントより傾きの小さい水和圧曲線を描くことを明らかにした。

また、変曲点以前の極若材齢に着目して、上述と同様の手法で材齢3時間から1日以前における水和圧曲線を得たところ、質量含水率と比表面積から得られる統計的吸着厚さは、水和圧曲線の変数として扱われる指標であるが、統計的吸着厚さが2nm以下の領域では、指数関数を描く水和圧曲線は注水直後の統計的吸着厚さが大の領域では、異なる形状を示すことを明らかにした。

ここで得られた水和圧曲線を利用して、超高強度コンクリートの自己収縮挙動の説明を試みた場合、超高強度コンクリートの自己収縮に現れる変曲点は、統計的吸着厚さの減少量が停滞し、エトリンサイトが生成される材齢と一致することが分かった。

また、変曲点以前の材齢で低温のものほど自己収縮量が大きくなる現象についても、セメントペーストの比表面積の温度依存性を考慮することで定性的には説明が可能であることを示した。

第5章では、実大の超高強度RC部材を作製し、超高強度コンクリートの硬化過程における、水和発熱及び自己収縮によって生じる部材内部の温度分布、ひずみ分布の観測を行った。さらに、コンクリートが十分に硬化した材齢において部材を切断し、部材断面内及び鉄筋周辺のひび割れ観察を実施した。

また、これらの温度分布、ひずみ分布、ひび割れ性状の改善を目的として、これまでに提案されている自己収縮低減手法として、膨張材の混和、収縮低減剤の混和、両者の併用、また温度分布及びひずみ分布を低減させる手法として断熱保温養生といったひび割れ防止策について検討を行った。

以上に挙げた収縮、ひび割れ対策はこれまで主として縮小部材実験で効果が確認されているものであるが、これらの対策が、実大部材において機能しうかを確認することが、本実験における新規性である。

以上の各試験体について、まず最高到達温度に着目すると、900mm角の柱部材において、水セメント比14%の超高強度コンクリートを使用した場合、部材中央では最高到達温度60℃から70℃程度の高温履歴を受けることが確認された。この最高到達温度は膨張材を混和することで上昇し、収縮低減剤を混和することで低減する。また、部材に断熱保温養生を施すことで、最高到達温度は10℃

近く上昇することが明らかになった。同時に断面内の温度分布についても、断熱保温養生を施すことで表層に近い部分で劇的に改善された。

部材断面内部のひずみ分布に着目すると、通常の超高強度コンクリートでは、部材断面内にひずみ分布が生じており、鉛直方向では中央部のコンクリート、水平方向では周辺部のコンクリートのひずみが収縮側に卓越することが分かった。また、これらのひずみ分布はコンクリートの自己収縮を抑制することで改善され、膨張材と収縮低減剤を併用した場合に、部材断面は一様のひずみ分布を有することが明らかになった。

上記のひずみ観測中に、一部の試験体ではひび割れ発生を示唆するひずみの大きな変動が確認されたが、このひずみの変動材齢は通常の超高強度コンクリートにおいて材齢3日に発生しており、改めて若材齢から体積変化挙動を把握する必要性が確認された。

部材が硬化した後に実施したひび割れ観察において、無対策に超高強度 RC 部材を作製した場合、部材表層、内部、鉄筋近傍に無数のひび割れが発生することが確認された。特に、鉄筋の長軸方向には、鉄筋に沿ってコーン状のひび割れが多数発見された。これらのひび割れ性状は、膨張材、収縮低減剤、断熱保温養生といった対策を施すことにより大きな改善が見られたが、ひび割れが抑制された部位は、対策手法によって異なり、膨張材を使用した場合は、表層及び鉄筋近傍、収縮低減剤や断熱保温養生では表層のひび割れ抑制効果が特に大きかった。

第6章では、自己収縮によって収縮応力が蓄積された状況の RC 部材における、コンクリート鉄筋界面の付着性状について、同一強度で自己収縮量の異なる2種類の超高強度コンクリートを作製し、両引き付着試験を実施した。

その結果、超高強度コンクリートに生じる自己収縮によって、超高強度 RC 部材の定着が十分でない区間にはすべりが生じることがわかり、両引き試験に供する以前の状態が、自己収縮量の大小によって決定される可能性が示された。また、自己収縮を低減することでわずかながら付着剛性が増大し、結果として RC 部材全体の剛性が上昇する可能性があることが示唆された。

第7章は本章であり、本論文の各章で得られた知見を取りまとめた。

7.2 今後の展望

本検討は、セメントの水和という微視的観点から、実大部材にいたる比較的広範な領域のセメント系材料を対象としているが、中でも特に、コンクリートの性質を決定づけるセメントペーストに重点を置いた検討を多く行った。

セメントペーストは、理想的な実験条件を構成する上で取扱いやすい材料ではあるが、実社会で利用されることはほとんどなく、モルタルやコンクリートのように骨材と組み合わせて使用することが一般的である。近年の研究で、骨材そのものの乾燥収縮量がコンクリートの乾燥収縮量に大きな影響を及ぼすことや、コンクリートが強い乾燥を受けた場合に、モルタルと粗骨材の界面に損傷が生じることが分かってきている。その意味で、本論文の範囲内ではセメントペーストと骨材のインタラクションに関する考察が十分ではない部分がある。すなわち、本検討のように超高強度セメントペーストと比較的粒径の小さい骨材を使用している範囲においては、骨材の影響は既存の複合則理論によって説明が可能であったが、先に述べたような複合材料に特有の諸現象を一般化し、定量的に評価するためには、それぞれ単相としてセメントペースト・骨材の性質を理解しておくとともに、遷移帯と呼ばれる骨材とセメントペーストの界面の性状把握が必要であると考えられる。

また、ことセメントペーストの体積変化に限っても、例えば第2章で述べた線膨張係数の相対湿度依存性のメカニズムや、収縮低減剤の作用機構、第3章の自己収縮ひずみにおける高水セメント比のセメントペーストで確認された自己膨張、高温履歴後の膨張挙動など不明な点が多い。

これら諸性質を理解するためには、セメントの水和反応や、水和反応によって生成される水和生成物の性質、温度依存性等を把握する必要があると思われる。その意味で、第4章で行った水和圧理論に基づく体積変化機構の説明は、今後の体積変化研究の一方向性を示すものであったと考えている。

以上のようなコンクリート材料の特性を、実際の構造物の設計に生かしていくためには、一般的には、RCを想定した鉄筋とのインタラクションや、部材断面或いは高さ方向のコンクリートの物性のばらつきなどを考慮する必要がある。また、コンクリートの安定供給を考えると、地域固有の骨材種類や温度・湿度環境など一般化できない議論も同時に進めていく必要がある。

その意味で、本論文の第5章、第6章は、検討が十分ではないものの、今後の材料研究に必要な視点であったと思われる。

