



Title	収縮低減剤および人工軽量骨材によるコンクリートの低収縮化に関する研究
Author(s)	黒岩, 秀介
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11465号
Issue Date	2014-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k11465
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55546
Type	doctoral thesis
File Information	Syusuke_Kuroiwa.pdf



収縮低減剤および人工軽量骨材による
コンクリートの低収縮化に関する研究

平成 26 年 2 月

黒 岩 秀 介

目 次

第 1 章	序論.....	1
1.1	研究の背景と目的.....	1
1.2	論文の構成	8
第 2 章	収縮低減剤による高強度コンクリートの自己収縮対策.....	13
2.1	はじめに.....	13
2.2	若材齢ヤング係数試験および収縮拘束応力計算方法の検討	15
2.2.1	実験概要.....	15
2.2.2	実験結果および考察	18
2.3	拘束度が異なる鉄筋拘束試験.....	28
2.3.1	実験概要.....	28
2.3.2	実験結果および考察	31
2.4	まとめ.....	50
第 3 章	収縮低減剤を用いた高強度コンクリート模擬柱部材の長期材齢における収縮およびコア強度	52
3.1	はじめに.....	52
3.2	調査計画.....	53
3.2.1	要因と水準	53
3.2.2	試験項目および方法	55
3.3	調査結果および考察	58
3.3.1	模擬柱部材の水和熱による温度履歴	58
3.3.2	模擬柱部材のコアによる強度発現および含水率	60
3.3.3	模擬柱部材のひずみ変化.....	62
3.3.4	熱分析および粉末 X 線回折分析	65
3.4	まとめ.....	68

第 4 章	人工軽量骨材による高強度コンクリートの自己収縮対策	70
4.1	はじめに)	70
4.2	実験概要	72
4.2.1	予備試験	72
4.2.2	実験の要因と水準	73
4.2.3	使用材料，調合および練混ぜ	73
4.2.4	試験項目および方法	75
4.2.5	実機試し練り	78
4.3	実験結果および考察	80
4.3.1	フレッシュコンクリートの性状	80
4.3.2	自己収縮ひずみ，内部温度，電気抵抗および内部湿度	80
4.3.3	圧縮強度および静弾性係数	85
4.3.4	熱分析および粉末 X 線回折分析による確認	87
4.3.5	実機試し練りによる検証	91
4.4	まとめ	99
第 5 章	新しい収縮低減剤によるコンクリートの乾燥収縮対策	102
5.1	はじめに)	102
5.2	新しい収縮低減剤を用いたコンクリートの特性	105
5.2.1	実験概要	105
5.2.2	実験結果および考察	106
5.3	新しい収縮低減剤を用いたコンクリートのひび割れ抵抗性	113
5.3.1	実験概要	113
5.3.2	実験結果および考察	114
5.4	新しい収縮低減剤を用いたコンクリートの製造性・施工性	117
5.4.1	実験概要	117
5.4.2	実験結果および考察	118
5.5	まとめ	124
第 6 章	結論	126

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

(1) コンクリートの高強度化と自己収縮問題の顕在化

近年、建築物の柱に使用されるコンクリートは著しい高強度化を示しており、コンクリートの設計基準強度は最高 300N/mm^2 までに達している¹⁾。コンクリートの高強度化は、集合住宅の高層化のニーズに応えながら発展してきた経緯がある²⁾。

1960 年代半ば以降の高度経済成長期、大都市部に人口が流入し、土地の高度利用の観点から住宅の高層化が社会的ニーズとなった。1963 年に建物高さ 31m の法的制限が撤廃され、事務所ビルでは鉄骨造および鉄骨鉄筋コンクリート造の超高層建築物が建設され始めていた。一方、住宅には事務所ビルより高い居住性が求められ、鉄筋コンクリート造は、剛性が高く鉄骨造より風揺れが少ないので居住性に優れ、鉄骨鉄筋コンクリート造より短工期かつ低コストのため住宅に適すると考えられた。このような背景のもと、1970 年代半ばに鉄筋コンクリート造による最初の超高層集合住宅「椎名町アパート」(18 階建, 53m) が出現した。このときのコンクリートの設計基準強度は 30N/mm^2 であり、現在の一般的な強度である。

その後、1988 年から 1993 年の建設省の総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量化・超高層化技術の開発」(newRC 総プロ) によって、高強度コンクリートの実用化の研究は大きく発展した。newRC 総プロでは、設計基準強度 120N/mm^2 級のコンクリートおよび降伏強度 1200N/mm^2 級の鉄筋という、当時通常の強度の 3~4 倍相当までを対象とした。newRC 総プロの成果は早々に超高層集合住宅に適用され、例えば 1997 年竣工の「大島一丁目計画」³⁾では、設計基準強度 60N/mm^2 の高強度コンクリートと SD490 の高強度鉄筋が使用され、2000 年竣工の「リバーシティ 21 北ブロック N 棟」⁴⁾では、設計基準強度 100N/mm^2 の高強度コンクリートと USD685 の高強度鉄筋が本格的に使用された。

2000 年代に入ると、都市機能の高度化と都市の居住環境向上を図るための都市再生や駅前再開発事業により、都心回帰の傾向が進み、都市部において超高層集合住宅の建設が増加した。2006 年竣工の「太平四丁目錦糸町開発計画」⁵⁾では設計基準強度 130N/mm^2 , 2008 年竣工の「MK プロジェクト」⁶⁾では設計基準強度 150N/mm^2 , 2013 年竣工の「大橋地区第二種市街地開発事業 1-1 棟新築工事」⁷⁾では設計基準強度 200N/mm^2 の高強度コンクリートが使用された。

建築物の高層化とともに、自由な空間構成の要求も高まる傾向にあり、スパン長の増大と柱一本あたりの支配面積の増加への要求は今後も強まるものと考えられている。2013 年竣工の「御茶ノ水ソラシティ」⁸⁾では設計基準強度 250N/mm^2 のコンクリートが超高層オフ

ィスビルに付随する立体広場の人工地盤を支える広場に使用され、2014 年竣工の低層建築¹⁾には、設計基準強度 300N/mm² のコンクリートが直径 220mm の鉄筋コンクリート造細柱に使用された。

一方で、高強度コンクリートは、一般のコンクリートよりも自己収縮ひずみが大きくなるという欠点がある。自己収縮ひずみとは、外部からの水の侵入や逸散が無い状態で、セメントの水和により凝結の始発以後に生じる巨視的な収縮ひずみである。高強度コンクリートを用いた模擬柱部材による実験では、自己収縮ひずみに起因すると考えられる微細なひび割れが鉄筋周囲に確認され^{9,10)}、高強度コンクリートの自己収縮問題が顕在化している。

最近の高強度コンクリートが用いられた建築物における収縮低減材料の使用状況について文献調査した結果を表 1.1 に示す。設計基準強度 100N/mm² のコンクリートでは、収縮低減材料が使用された実施工例の報告は少ないが、水結合材比 16%以下の設計基準強度 150N/mm² 級以上のコンクリートの場合は、多くの建築物において何らかの自己収縮対策が採用されている。収縮低減剤および収縮低減成分混入の高性能減水剤による対策が多く、膨張材や鋼繊維を採用したケースもみられる。

表 1.1 高強度コンクリートが用いられた建築物の収縮低減材料使用状況

建設地	設計基準強度 N/mm ²	構造	水結合材比 %	収縮低減 材料	階数
汐留 ¹¹⁾	100	RC	18	—	B2F, 56F
港南 ¹²⁾	100	RC	18.2, 19.8	—	B2F, 32F
錦糸町 ⁵⁾	130	RC	18	—	B2F, 45F
名古屋 ¹³⁾	100	CFT	17, 18	—	B6F, 47F
勝どき ¹⁴⁾	130	RC	17	—	B2F, 58F
豊洲 ¹⁵⁾	120	RC	15.4	膨張材	B1F, 52F
天王洲 ¹⁶⁾	100	RC	18.5	—	B2F, 42F
武蔵小杉 ¹⁷⁾	150	RC	15	SP(SR), 鋼繊維	B2F, 59F
武蔵小杉 ⁶⁾	150	RC	16	SRA	B2F, 49F
葉研坂 ¹⁸⁾	150	RC(PCa)	15	SP(SR)	B2F, 43F
東池袋 ¹⁹⁾	100	RC(構真柱)	19	SP(SR)	B2F, 52F
千葉 ²⁰⁾	200	RC	11.7	鋼繊維	低層
清瀬 ²¹⁾	160	CFT	14	膨張材	低層
東池袋 ²²⁾	160	RC(PCa)	14.5	SP(SR)	B2F, 52F
大橋 ⁷⁾	200	RC(PCa)	14	SP(SR)	B2F, 42F
御茶ノ水 ⁸⁾	250	RC(PCa)	12	SP(SR)	B2F, 23F, 広場
東雲 ²³⁾	160	RC (一部 PCa)	14	膨張材	B2F, 52F
阿倍野 ²⁴⁾	150	CFT	17		B5F, 60F
大手町 ²⁵⁾	150	CFT	15	SP(SR), 膨張材	B6F, 38F
新宿 ²⁶⁾	200	RC	12.5	SRA, 鋼繊維	B2F, 55F
横浜 ¹⁾	300	RC(PCa)	12	SP(SR), 鋼繊維	低層

SRA : 収縮低減剤, SP(SR) : 収縮低減成分混入の高性能減水剤

このような背景の下、自己収縮ひずみに関する研究は近年盛んに行われている。以下に主な研究の概要を示す。

宮澤ら²⁷⁾は、自己収縮ひずみの予測式として下式(1.1)を提案し、土木学会コンクリート標準示方書「構造性能照査編」に採用されている。式(1.1)を用い、水セメント比と自己収縮ひずみ終局値の関係を求めると、一般的な設計基準強度 30N/mm² 程度に相当する水セメント比 50%の自己収縮ひずみは高々 85×10^{-6} 程度だが、設計基準強度 100N/mm² 程度に相当する水結合材比 20% の高強度コンクリートでは 730×10^{-6} 程度と大きくなる。なお、式(1.1)の適用範囲は、水セメント(結合材)比 20～60%の一般的な単位骨材容積を有するコンクリートで、20～60℃の温度とされている。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{as}(t) &= \gamma \cdot \varepsilon_{as\infty} \cdot \beta_{as}(t) \\ \beta_{as}(t) &= 1 - \exp(-a \cdot (t - t_0)^b) \\ \varepsilon_{as\infty} &= 3070 \cdot \exp(-7.2 \cdot (W/B)) \end{aligned} \right\} (1.1)$$

ここに、 $\varepsilon_{as}(t)$:凝結始発から材齢 t までのコンクリートの自己収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)
 γ :セメントおよび混和材の種類の影響を表す係数(普通セメント:1.0, 早強セメント:1.2, 中庸熱セメント:0.85, 低熱セメント:0.4, 高炉セメントB種:0.85)
 $\varepsilon_{as\infty}$:自己収縮ひずみの終局値($\times 10^{-6}$)
 $\beta_{as}(t)$:自己収縮ひずみの進行を表す関数
 a, b :定数(水結合材比 $W/B=0.2$: [1.2, 0.4], $W/B=0.23$: [1.5, 0.4], $W/B=0.3$: [0.6, 0.5], $W/B=0.4$: [0.1, 0.7], $W/B=0.5$ 以上: [0.03, 0.8])
 t_0, t :凝結の始発(日), 材齢(日), コンクリートの温度によって次式で補正する。
 $t_0, t = \sum \Delta t_i \cdot \exp(13.65 - 4000/(273 + T(\Delta t_i)/T_0))$
ここに、 $T(\Delta t_i)$; Δt_i の間継続するコンクリート温度(℃), T_0 ; 1℃

河野ら²⁸⁾は、設計基準強度 100N/mm² 相当の水結合材比 22%のコンクリートを用いて自己収縮の温度依存性について検討し、その影響をモデル化した。また、実大鉄筋コンクリート柱について、若材齢のクリープなども考慮した step by step 解析を行い、実測結果との検証を行った。この結果、①自己収縮ひずみは養生温度が高いほど大きいこと、②自己収縮の温度依存性を考慮した解析により、自己収縮応力を精度よく求めることが出来ること、③初期材齢において柱部材側面に生じる引張応力は内外温度差が最大となる材齢 1.3 日で最も大きく 3.4N/mm² に達したことなどを明らかにした。

谷村ら²⁹⁾は、水セメント比 30%の高強度コンクリートを対象に、2種類の膨張材の自己収縮ひずみおよび自己収縮応力の低減効果と、この効果に及ぼすセメント種類の影響を実験的に検討した。この結果、①自己収縮の発現が大きい時期において膨張材が有効に作用すること、②低熱ポルトランドセメントの使用により自己収縮を抑制できることなどを明らかにした。さらに、谷村ら³⁰⁾は、高強度コンクリートの自己収縮応力の低減化に及ぼす膨張材の効果を、収縮低減剤と併用した場合

も含め、3 水準の養生温度下において実験的に検討し、以下の結論を得ている。①膨張材は、材齢初期の自己収縮を有効に補償することに加えて、長期にわたって徐々に進行する自己収縮を補償する作用も有する。②膨張材を混和したコンクリートの拘束応力は、いずれの養生温度の場合も材齢初期から長期にわたりほぼゼロ付近となった。③収縮低減剤が自己収縮応力の低減に及ぼす効果は、養生温度に関係なく 10～15%となった。④膨張材・収縮低減剤併用時の自己収縮応力の低減効果は、養生温度に拘わらず 5%程度以上の相乗効果が発揮された。

高田ら³¹⁾は、プレストレストコンクリート橋などの土木構造物への適用を目指して自己収縮の少ない高強度コンクリートの検討を行い、以下の結果を得ている。①低熱ポルトランドセメントベースのシリカフェュームブレミックスセメントと超高強度用高性能減水剤を使用した水結合材比 17%の条件における自己収縮は材齢 91 日で 650×10^{-6} である。②膨張材 $20 \sim 30 \text{ kg/m}^3$ では、収縮低減効率は大きい、流動性が低下する。収縮低減剤 2% (×結合材重量) では、収縮低減効率が大きく、流動性も低下しない。膨張材 25 kg/m^3 と収縮低減剤 2% を併用すると、自己収縮を解消することができる。③石炭灰系の人工軽量骨材は自己収縮の低減に有効であるが、使用量の増加に応じて強度低下も大きくなる。粗骨材置換率 20%程度であれば、強度低下率は膨張材を使用したケースとあまり変わらない。④置換率 20%の石炭灰系の人工軽量骨材、添加率 0.5%の収縮低減剤を併用することで、材齢 91 日圧縮強度が 150 N/mm^2 を満足し、材齢 180 日の自己収縮が基本配合の 3 分の 1 の 200×10^{-6} 程度に低減できる。

都築ら³²⁾は、 $100 \sim 150 \text{ N/mm}^2$ 級の高強度コンクリートを対象として実験的に検討を行い、以下の結論を得ている。①膨張材、収縮低減剤を混入していないコンクリートの自己収縮ひずみは水結合材比の低下にともない増大し、経時 56 日で $400 \sim 700 \times 10^{-6}$ 、材齢 91 日の圧縮強度は $150 \sim 190 \text{ N/mm}^2$ の範囲となった。②低熱系セメントに比べ普通セメントの方が自己収縮ひずみは大きくなり、両者の差は 100×10^{-6} 程度となった。③膨張材の混入率によって収縮ひずみは異なり、混入率を 2 倍にすると、その収縮低減効果は約 2 倍となった。膨張材と収縮低減剤との併用により、ひずみは膨張側を示した。④膨張材を結合材重量比にして 2.5%混入すると、強度はほぼ低下することなく、収縮ひずみが半減した。

上原ら³³⁾は、水結合材比 25%および 16%のコンクリートについて、低添加型膨張材、収縮低減剤などが強度発現性や自己収縮ひずみに及ぼす影響を検討し、以下の知見を得た。①膨張材添加による強度発現の低下は、 30 kg/m^3 までの範囲において 5%程度である。②膨張材と収縮低減剤は単独で用いるより併用することにより自己収縮ひずみ抑制効果は向上する。膨張材 25 kg/m^3 および収縮低減剤 B×1.0%の使用によって、水結合材比 25%では膨張域に、水結合材比 16%では、自己収縮ひずみが 55%低減された。③低水結合材比のコンクリートでは、コンクリート内部において継続的でゆっくりとした水分の移動があると推察される。このため、膨張材の置換量によっては遅れ膨張が生じる可能性がある。④線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 一定の仮定では、温度履歴下における自己収縮ひずみを積算温度によって整理できず、膨張材とセメントの温度活性の差が原因の一つと推察される。⑤膨張材を用いたコンクリートは温度履歴下において 20°C 一定条件下より膨張量が大きくなる傾向がある。

片寄ら³⁴⁾は、水結合材比 13%, 26%, 31%のコンクリートについて、無筋の $\phi 100 \times H200mm$, $100 \times 100 \times 1000mm$, $700 \times 700 \times 1040mm$ または $1000 \times 1000 \times 1000mm$ の試験体、有筋の $100 \times 100 \times 1000mm$, $700 \times 700 \times 1040mm$ または $1000 \times 1000 \times 2400mm$ の試験体を作製し、鉄筋ひずみなどを測定した。この結果、①無筋試験体では、圧縮強度が高く、部材寸法が大きいほど自己収縮ひずみは大きいこと、②有筋試験体では、圧縮強度が高く、部材寸法が大きいほど内部応力が大きく、 $Fc150N/mm^2$ 級ではひび割れが生じること、③ひび割れ発生の危険性は実大有筋部材で評価する必要があることが分かったなどとしている。また、 $Fc150N/mm^2$ 級では、始発が 0.54 時間と遅く、実大で材齢 10 日に 1000×10^{-6} に達する自己収縮や、鉛直方向のひずみが水平方向より大きいことなどを示している。

松田ら³⁵⁾は、低熱ポルトランドセメントにシリカフュームを混合した結合材による水結合材比 14% および 16%のコンクリートについて、最高温度 $60^{\circ}C$ および $90^{\circ}C$ の温度履歴を与え、自己収縮特性に及ぼす温度履歴の影響を検討した。これらの結果から、以下の知見が得られたとしている。①初期高温履歴条件下での自己収縮ひずみは $20^{\circ}C$ 一定条件下に比べ大きくなり、その進行速度は最高温度が高いほど速く、温度降下後は非常に緩やかになる。②圧縮強度は自己収縮ひずみの有効な評価指標である。③材齢 14 日時点の高温履歴を受けた自己収縮ひずみの $20^{\circ}C$ 条件下に対する比は、最高温度で評価できるなど、初期高温履歴下の自己収縮ひずみを最高温度と積算温度により予測する手法を提案した。また、膨張材による自己収縮低減効果が初期高温履歴条件下でも得られることを示した。

桐山ら³⁶⁾は、低熱ポルトランドセメントにシリカフュームを混合した結合材による水結合材比 15% のコンクリートにより、 $900 \times 900 \times 1100mm$ で主筋比 3.1% と 0.07% の模擬柱を夏季に製作し、ひずみ測定および解析を行った。この結果、① $20^{\circ}C$ での自己収縮ひずみと比べ、最高温度 $60^{\circ}C$ の簡易断熱では大きく、最高温度 $75^{\circ}C$ では小さい。②内外温度差による自己収縮の差異が内部に水平方向の応力を発生させることを実験および解析によって示した、などとしている。

丸山らは、近年、示唆に富む論文を日本建築学会構造系論文集などに数多く発表している。2007 年 7 月に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³⁷⁾と題し、収縮および拘束が大きいケースの鉄筋拘束試験において、観測される応力が比較的小さく、かつ、急激な応力低下がみられることから、クリープではなく自己収縮ひび割れによる付着劣化が生じていると予想し、鉄筋周囲の微細ひび割れの存在を確認した。2008 年 7 月には、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、その¹³⁸⁾として、練上がり温度が低い場合に自己収縮ひずみは大きくなる傾向を示すことと、模擬柱部材に生じる内部ひび割れ発生のメカニズムなどを示した。2008 年 8 月には、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³⁹⁾と題して、断面解析により自己収縮が柱の構造性能に及ぼす影響について検討を行い、終局時の耐力にはほとんど影響しないものの、高軸力で降伏強度が小さい鉄筋を用いている場合には圧縮側コンクリートの圧壊や圧縮側鉄筋の座屈の可能性があることを示唆した。2008 年 12 月には、超低水セメント比シリカフュームコンクリートの自己収縮温度依存性に関する研究⁴⁰⁾と題し、セメントペーストを用いた詳細な実験を行い、自己収縮の進展

は2段階に分けられ、段階によって温度依存性が異なることなどを示した。2009年1月には、超高強度コンクリートを用いたRC柱の膨張材と収縮低減剤による初期応力・初期欠陥低減に関する研究⁴¹⁾と題して実大試験の結果を紹介し、2009年3月には、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、その2⁴²⁾と題して、柱の構造性能に及ぼす影響について検討を進め、柱内部に縦ひび割れが生じる可能性について言及した。さらに、2010年8月には、超高強度コンクリートの自己収縮予測式の提案⁴³⁾と題して低発熱系のベースセメントにシリカフュームを混合した結合材について、水和発熱による温度履歴の影響、水結合材比、シリカフューム置換率の影響を整理し、超高強度コンクリートに適する見かけの活性化エネルギーの提案、線膨張係数および自己収縮ひずみの進展についてモデル化を行っている。

(2) 一般のコンクリートに使用する収縮低減剤の問題

水セメント比が大きい一般のコンクリートでは、自己収縮ひずみの問題は大きくないものの、水分の逸散に伴う乾燥収縮ひずみが大きく、乾燥収縮ひび割れの低減が鉄筋コンクリート構造物の大きな課題の一つであった。近年、コンクリート構造物の高耐久化に伴いひび割れに対する関心が高まっており、日本建築学会では、2008年に「収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)」を発刊し、2009年に「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」のなかで計画供用期間が長期の場合は使用するコンクリートの乾燥収縮ひずみに規定値を設けるなど、対応を行っている。これらの指針等では、ひび割れの抑制には膨張材または収縮低減剤を使用してコンクリートの乾燥収縮を低減させる方法が有効である、とされている。粉末である膨張材は、近年、使用量が従来の3分の2となった低添加型が実用化されて以来、ひび割れが特に懸念される工場や物流倉庫などの床を中心に一般的に使用されるようになってきた。一方、収縮低減剤は、ポリオキシアルキレングリコールのアルキルエーテルを基本構造とした非イオン界面活性剤で、JASS 5において「セメント硬化体の毛細管空隙中の水の表面張力を低下させ、水の逸散蒸発に伴う毛細管張力を小さくし、コンクリートの乾燥収縮および自己収縮を低減する効果を持つ混和剤」と解説されているものである。収縮低減剤は、1980年初頭に実用化されて久しく、研究例も多くあるものの、コンクリートの空気量の調整を難しくして耐凍害性を低下させる、レディーミクストコンクリート工場でのミキサやトラックアジテータ洗浄の際の泡立ちや回収水に悪影響を及ぼす等の指摘があり、実際の工事に採用されることは少ないのが現状である。

(3) 研究の目的

普通ポルトランドセメントをベースセメントとし、高炉スラグ微粉末、無水せっこう、シリカフュームを混和材としてあらかじめ混合した高強度コンクリート用セメントは、安定した強度発現性と流動性を有する高強度コンクリートが容易に製造できるため、1996年の設計基準強度60N/mm²級の鋼管充填用コンクリートに初適用⁴⁴⁾されて以来、継続的に使用されてきた。しかし、この高強度コンクリート用セメントは、既往の研究からもわかる

ように、自己収縮ひずみを増加させる傾向のある材料の組合せになっている。実際の設計基準強度 130N/mm^2 までの現場打設および 100N/mm^2 までのプレキャストの柱部材では、梁との分離打設工法やプレキャスト化工法により製造されるなど外部からの拘束が小さいこともあり、ひび割れが問題になることはなかった。また、実際の適用にあたっては、事前に実大のコンクリート試験を行ってひずみデータを取得し、傾向を把握しつつ実験の範囲で使用するなどの配慮がなされている。しかしながら、更なる高強度化、柱断面の合理化、大断面化などに対応するための自己収縮対策方法については、十分な定量化がなされているとは言えない。

そこで、本研究では、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、無水せっこう、シリカフュームからなる高強度コンクリート用セメントを用いたコンクリートに対して、収縮低減剤による低収縮化を定量的に把握する手法を提案するとともに、これらの組み合わせによる高強度コンクリートの長期安定性を示すことを第一の目的とした。

第一の目的として掲げた手法による検討結果の考察に基づき、実施適用例はまだないものの、さらなる低収縮化が期待できる人工軽量細骨材による自己収縮低減方法について、材料試験および実機ミキサの試験練りを行い、実用化の可能性を示すことを第二の目的とした。

一般のコンクリートの乾燥収縮対策用の収縮低減剤についても、普及を妨げている問題を解決し、ひび割れの少ない建築物を実現することが強く望まれている。そこで、耐凍害性を改善した新しいタイプの保水性の収縮低減剤について、材料試験、実機ミキサによる試験練りおよび試験施工を行い、実用化の可能性を示すことを第三の目的とした。

1.2 論文の構成

本論文は、以下に示す 6 章より構成されている。

「第 1 章 序論」では、研究の背景、目的および論文の構成を示している。背景として、近年、コンクリートは著しい高強度化を示す一方で自己収縮問題が顕在していること、一般のコンクリート用収縮低減剤には普及を妨げている要因があること、また、本研究の目的は、スラグせっこう系の高強度用セメントを用いたコンクリートの収縮低減剤による低収縮化を定量的に予測する手法を提案すること、これらの組み合わせによる高強度コンクリートの長期安定性を示すこと、人工軽量細骨材による自己収縮低減方法について実用化の可能性を示すこと、耐凍害性を改善した新しい収縮低減剤について一般の強度領域を対象として実用化の可能性を示すことであることを示した。

「第 2 章 収縮低減剤による高強度コンクリートの自己収縮対策」では、スラグせっこう系の高強度コンクリート用セメントを用いたコンクリートに対する収縮低減剤の効果を実験的に把握し、既往の研究で提案されている収縮応力予測法の適用性を検討している。ここでは、スラグせっこう系の高強度用セメントを用いたコンクリートに対して、収縮低減剤による低収縮化の有効性を定量的に把握することが可能であることを示した。

「第 3 章 収縮低減剤を用いた高強度コンクリート模擬柱部材の長期材齢における収縮およびコア強度」では、スラグせっこう系高強度用セメントを用いたコンクリートで作製した模擬柱部材の材齢 7 年における調査結果などを示している。ここでは、圧縮強度は材齢の対数軸上ではほぼ直線的な増進を示すこと、収縮ひずみの増加は見られず収縮低減剤の優位性は長期材齢でも保たれていること、などを示した。

「第 4 章 人工軽量骨材による高強度コンクリートの自己収縮対策」では、人工軽量細骨材の内部養生効果に着目した高強度コンクリートの低収縮化の検討を行っている。材齢 1 日程度以内に生じる急速な自己収縮ひずみを人工軽量細骨材によってほぼ防止できること、圧縮強度を確保しつつの低減が可能であること、長期材齢の水和生成物に顕著な差はないこと、水和熱により高温履歴する模擬柱部材においても収縮低減効果が認められること、などを示した。

「第 5 章 新しい収縮低減剤によるコンクリートの乾燥収縮対策」では、収縮低減効果と耐凍害性の改善を両立させた保水性を有する新収縮低減剤を用いたコンクリートについて検討している。一般的な強度のコンクリートの乾燥収縮に対して、新収縮低減剤の使用量に応じた低収縮化が可能であること、耐凍害性は既存の収縮低減剤に比べて大きく改善

されること、レディーミクストコンクリート工場の実機ミキサによる練混ぜも可能であること、などを示した。

「第 6 章 結論」では、本研究の結論を示している。本研究の手法によって、対象構造物に応じてコンクリートの低収縮化が可能であることなどを総括した。

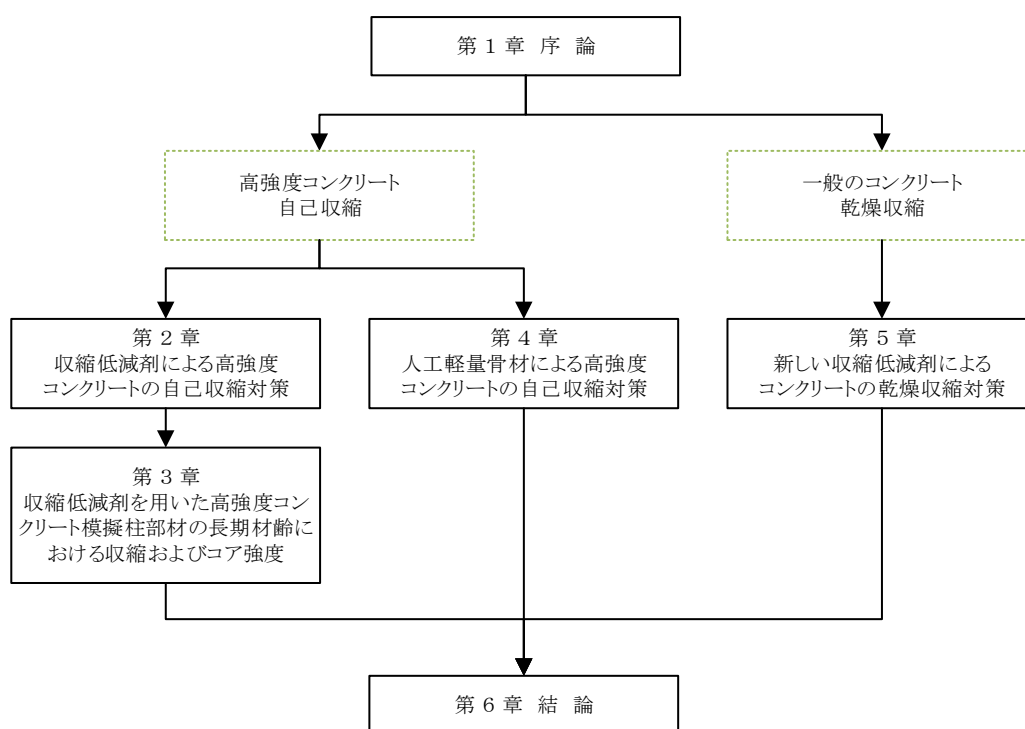


図 1.1 論文の構成

第1章 参考文献

- 1) 今井和正, 山本佳城, 加藤雅樹, 村松晃次: 設計基準強度 300N/mm^2 のコンクリートを用いた RC 細柱の開発と適用, コンクリート工学, Vol.51, No.12, pp.959-966, 2013.12
- 2) 黒岩秀介: 超高強度コンクリートを用いた超高層集合住宅, コンクリート工学, Vol.48, No.1, pp.124-127, 2010.1
- 3) 黒羽健嗣, 並木哲, 河西正一, 小林敏彦: $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ の高強度コンクリートを用いた超高層建築物の施工, コンクリート工学, Vol.33, No.9, pp.29-39, 1995.9
- 4) 陣内浩, 黒羽健嗣, 並木哲, 黒岩秀介, 川端一三, 原孝文, 稲津秀明, 後藤和正: 設計基準強度 100N/mm^2 の高強度コンクリートを用いた超高層建物の施工, 日本建築学会技術報告集, 第9号, pp.7-12, 1999.12
- 5) 黒岩秀介, 河合邦彦, 小田切智明, 嵐山正樹: $F_c130\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを用いた超高層集合住宅の施工, コンクリート工学, Vol.42, No.10, pp.44-49, 2004.10
- 6) 陣内浩, 黒岩秀介, 渡邊悟士, 寺内利恵子, 飯島真人, 阿部剛士, 小田切智明, 南輝弥: 設計基準強度 150N/mm^2 の高強度コンクリートの強度管理手法の検討と品質管理結果, 日本建築学会技術報告集, 第13巻, 第25号, pp.7-12, 2007.6
- 7) 山本佳城, 中島徹, 渡邊悟士, 清水良広: 設計基準強度 200N/mm^2 の超高強度プレキャストコンクリートの超高層鉄筋コンクリート造住宅への適用, コンクリート工学, Vol.49, No.8, pp.37-42, 2011.8
- 8) 辰濃達, 山本佳城, 河合邦彦, 河本慎一郎: 超高強度コンクリートにより構築された立体都市広場の設計および施工, コンクリート工学, Vol.50, No.7, pp.621-627, 2012.7
- 9) 片寄哲務, 高森直樹, 西田浩和, 寺岡勝: 高強度コンクリートの若材齢時における力学特性と自己収縮挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.497-502, 2006
- 10) 丸山一平, 佐藤良一: 超高強度コンクリートを用いた RC 部材中の鉄筋近傍における微細ひび割れの発見, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.629, pp.1035-1042, 2008.7
- 11) 三井健郎, 米澤敏男, 上田忠男, 佐藤敏之: $F_c100\text{N/mm}^2$ 超高強度高耐火コンクリートの超高層 RC 造建物への大量施工, 日本建築学会技術報告集, 第20号, pp.47-52, 2004.12
- 12) 加納嘉, 西本好克, 蓮尾孝一, 松田拓: $F_c100\text{N/mm}^2$ クラスの高強度コンクリートの品質管理, その3 実施工時の結果, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.519-520, 2004.7
- 13) 小島正朗, 三井健郎, 米山和秀, 向野聡彦: $F_c100\text{N/mm}^2$ 超高強度コンクリートの CFT 造オフィスビルへの適用—(仮称) 名駅四丁目7番地区再開発ビル新築工事—, コンクリート工学, Vol.44, No.8, pp.54-60, 2006.8
- 14) 柳田裕之, 萩原浩, 岸本均, 梶田秀幸: $F_c=130\text{N/mm}^2$ のコンクリート鋼板巻き柱を有する大規模超高層集合住宅の施工, コンクリート工学, Vol.44, No.11, pp.51-57, 2006.11
- 15) 加納嘉, 河上浩司, 菅谷泰之, 松田拓, 蓮尾孝一, 西本好克: $F_c120\text{N/mm}^2$ ならびに 100N/mm^2 級高強度コンクリートの品質管理結果, その1 概要, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.27-28, 2007.7
- 16) 太田達見, 前田信之, 西田典宏, 西田朗: 超高層 RC 集合住宅の建設工事における超高

-
- 強度コンクリートの品質管理—ワールドシティータワーズ新築工事—, コンクリート工学, Vol.44, No.12, pp.40-47, 2006.12
- 17) 上田忠男, 阿部洋, 山下真吾, 大津勝也: 最高階数 59 階の超高層集合住宅の設計と施工, コンクリート工学, Vol.45, No.3, pp.39-44, 2007.3
- 18) 岩室大, 松本俊輔, 寺内利恵子, 渡邊悟士, 陣内浩, 服部敦志: 設計基準強度 150N/mm^2 の超高強度コンクリートの実施適用および品質管理, その 1 工事概要および現場打ちコンクリートの品質管理, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.1067-1068, 2008.7
- 19) 山本佳城, 陣内浩, 渡邊悟士, 宮田哲治, 森康浩, 服部敦志, 飯島真人, 寺内利恵子: $\text{Fc}150,160\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを用いた超高層住宅の施工, その 1 $\text{Fc}160\text{N/mm}^2$ プレキャストコンクリート, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.929-930, 2009.7
- 20) 三井健郎, 小島正朗, 米澤敏男ほか: 設計基準強度 $150\sim200\text{N/mm}^2$ 超高強度繊維補強コンクリートの開発と実建物への適用, 日本建築学会技術報告集, 第 16 巻, 第 32 号, pp.21-26, 2010.2
- 21) 石川郁男, 湊田安浩, 遠藤文明, 平田隆祥: 大林組技術研究所新本館の設計と施工, コンクリート工学, Vol.48, No.10, pp.28-33, 2010.10
- 22) 服部敦志, 宮田哲治, 今井和正, 山本佳城: 最新技術を適用した超高層集合住宅の設計と施工, コンクリート工学, Vol.49, No.2, pp.26-31, 2011.2
- 23) 湊田安浩, 岡本悦男, 山田雄一郎, 阿部貴則: 世界初 オール 150N/mm^2 強度の材料・部材を使用した超高層 RC 造住宅の建設, セメント・コンクリート, Vo.786, pp.13-17, 2012.8
- 24) 青木義彦, 岩清水隆, 山田佳博, 永野浩一: $\text{Fc}=150\text{N/mm}^2$ の超高強度コンクリート CFT 柱の施工-高さ 300m 超高層複合ビル「あべのハルカス」-, コンクリート工学, Vol.50, No.8, pp.683-688, 2012.8
- 25) 松本修一, 後藤和正, 黒岩秀介, 高瀬洋一: $\text{Fc}150\text{N/mm}^2$ コンクリート・ 780N/mm^2 鋼材の CFT 柱を用いた超高層建物の設計および施工, コンクリート工学, Vol.50, No.12, pp.1102-1108, 2012.12
- 26) 日経アーキテクチャー: 現場打ち 200N/mm^2 コンクリートを初採用, 2013.8.10 号, p.20
- 27) 宮澤伸吾, 黒井登起雄, 河合雅弘: コンクリートの自己収縮に及ぼすセメントの種類の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.429-434, 2002
- 28) 河野政典, 榊田佳寛, 上西隆, 萩原伸治: 自己収縮の温度依存性を考慮した高強度コンクリート柱部材の初期材齢時発生応力の解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.979-984, 2000
- 29) 谷村充, 兵頭彦次, 佐藤良一: 膨張材を用いた高強度コンクリートの自己膨張・収縮特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No.1, pp.951-956, 2002
- 30) 谷村充, 三谷裕二, 鶴田昌宏, 佐藤良一: 高強度コンクリートの自己収縮応力の低減化における膨張材の効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1013-1018, 2003

-
- 31) 高田和法, 日紫喜剛啓, 大野俊夫, 一宮利通, 渡部貴裕, 盛田行彦: 自己収縮を低減した超高強度コンクリート (150N/mm² 級) の開発, 鹿島技術研究所年報, Vol.51, pp.79-86, 2003.9
- 32) 都築正則, 一瀬賢一, 神代泰道, 川口徹: 超高強度コンクリートの自己収縮に及ぼす結合材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No.1, pp.1299-1304, 2004
- 33) 上原伸郎, 鈴木康範, 河上浩司, 西本好克: 超高強度コンクリートの自己収縮低減, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1099-1104, 2005
- 34) 片寄哲務, 高森直樹, 西田浩和, 寺岡勝: 高強度コンクリートの若材齢時における力学特性と自己収縮挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.497-502, 2006
- 35) 松田拓, 嶋毅, 河上浩司, 西本好克: 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
- 36) 桐山宏和, 丸山一平, 鈴木雅博, 佐藤良一: 超高強度 RC 部材中の初期応力発生メカニズムに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp. 669-674, 2007
- 37) 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, pp.1-7, 2007.7
- 38) 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ー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ー, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.629, pp.1035-1042, 2008.7
- 39) 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, Vol.73, No.630, pp.1331-1338, 2008.8
- 40) 寺本篤史, 丸山一平: 超低水セメント比シリカフュームコンクリートの自己収縮温度依存性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.634, pp.2069-2076, 2008.12
- 41) 鈴木雅博, 丸山一平, 中瀬博一, 佐藤良一: 超高強度コンクリートを用いた RC 柱の膨張材と収縮低減剤による初期応力・初期欠陥低減に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.635, pp.1-10, 2009.1
- 42) 丸山一平, 鈴木雅博, 勅使川原正臣, 佐藤良一: 鉄筋コンクリート柱の断面内応力に関する解析的検討ー超高強度コンクリートを用いた RC 柱の初期応力・初期欠陥に関する研究, その 2ー, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.637, pp.425-431, 2009.3
- 43) 寺本篤史, 丸山一平, 谷村充, 三谷裕二: 超高強度コンクリートの自己収縮予測式の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.654, pp.1421-1430, 2010.8
- 44) 早川光敬, 黒岩秀介, 渡辺健治, 陣内浩: 設計基準強度 600kgf/cm² の高流動コンクリートを用いた高さ 90m の鋼管柱充てん工事:, コンクリート工学, Vol.35, No.9, pp.27-31, 1997.9

第2章 収縮低減剤による高強度コンクリートの自己収縮対策

2.1 はじめに

前章に示すように、低発熱系ポルトランドセメントにシリカフュームを混合した結合材を用いた高強度コンクリートについては、収縮低減剤によって自己収縮ひずみを低減させた例が多く報告されている。しかし、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、無水せっこう、シリカフュームをあらかじめ混合した高強度コンクリート用セメント（以下、スラグせっこう系高強度用セメント）を用いたコンクリートについては、収縮低減剤の効果を検討した例は少ない。そこで、スラグせっこう系高強度用セメントを用いた水結合材比 20% 以下の高強度コンクリートを取りあげ、収縮低減剤による自己収縮対策の有効性を検討した。

コンクリートの自己収縮は、変形を拘束するものがなく自由に収縮できる状態であれば、応力を発生させることはない。しかし、実際には内部または外部からの拘束が存在する。鉄筋コンクリート部材では、コンクリートが収縮しようとするとき鉄筋が抵抗し、コンクリートには引張応力、鉄筋には圧縮応力を生じる。自己収縮による引張応力は、荷重によるひび割れの発生を早め、過大な場合は自己収縮のみでひび割れを発生させて部材剛性の低下を招くおそれもある。したがって、自己収縮によって生じる応力を把握することは重要である。一方、構造物の終局耐力に対しては、ひび割れ後の塑性化による応力再配分が前提であるので、一般には自己収縮によるひび割れが顕著な影響を及ぼすことはないと考えられる。とは言え、せん断耐力や付着割裂耐力に及ぼす自己収縮の影響に関する研究は未だ十分ではないので、できるだけ自己収縮の小さいコンクリートを用いることが賢明であると考えられる。自己収縮による検討を行う場合、コンクリートのひずみは、全ひずみ、自己収縮ひずみ、温度ひずみ、弾性ひずみ、クリープひずみなどに分けて考える。

$$\begin{array}{c} \text{(全ひずみ)} = \text{(収縮ひずみ)} + \text{(温度ひずみ)} + \text{(弾性ひずみ)} + \text{(クリープひずみ)} \\ \underbrace{\hspace{10em}} \hspace{10em} \underbrace{\hspace{10em}} \\ \text{(自由ひずみ)} \hspace{10em} \text{(拘束ひずみ)} \end{array}$$

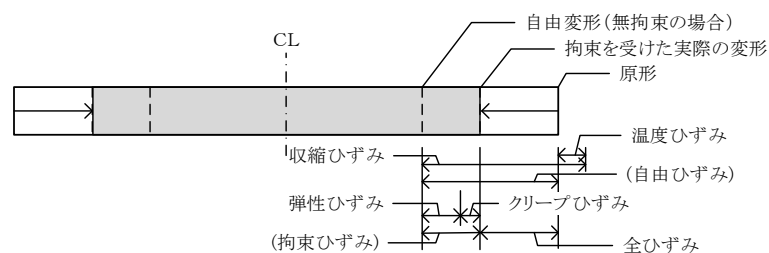


図 2.1 各ひずみ成分の関係

ここで、全ひずみは、釣り合い状態にある実際の変形に対応するひずみである。収縮ひずみは、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみがあり、拘束を受けない自由な状態のひずみとして扱う。本章で対象とする高強度コンクリートの自己収縮ひずみは、主にセメントの水和によって生じるものであるが、結合材の種類、水結合材比、温度履歴の影響を受けることが知られており、その進展を正確に予測することは難しい。温度ひずみは、温度変化量に線膨張係数を乗じたひずみである。水和熱等の作用により温度変化が生じる通常の条件では温度ひずみを考慮する必要があるが、硬化過程における線膨張係数の変化の取り扱いが応力の予測の課題となっている。弾性ひずみは、応力に直接寄与するひずみであり、応力の予測には、若材齢のヤング係数の変化やクリープひずみの把握が重要になる。このように、自己収縮ひずみのほか、線膨張係数、ヤング率、クリープひずみが材齢に伴って変化するため、自己収縮によって生じる応力の定量評価は難しい。

本章では、①若材齢ヤング係数試験と収縮拘束応力計算方法の検討、②拘束度が異なる鉄筋拘束試験、③鉄筋コンクリート部材による効果の検証の順に、節を分けて検討を行った。

若材齢ヤング係数試験および収縮拘束応力計算方法の検討の節では、スラグせっこう系高強度セメントを用いた水結合材比 20%、17%、15%および 15%に収縮低減剤を混和した高強度コンクリート 5 種類について、20℃環境の自己収縮ひずみを測定し、自己収縮ひずみと水セメント比の関係および収縮低減剤による収縮低減効果を確認した。同時に、コンクリートの自己収縮が鉄筋によって内部から拘束される場合に発生する応力の測定（鉄筋拘束試験）と、若材齢のヤング係数の測定を行った。さらに、測定結果と、既往のクリープ式¹⁾による拘束応力の計算結果を比較し、スラグせっこう系高強度セメントを用いた高強度コンクリートおよび収縮低減剤を用いた場合におけるクリープ式の適用性を確認した。

次節の拘束度が異なる鉄筋拘束試験では、スラグせっこう系高強度セメントを使用し、水結合材比 20%、17%、15%のそれぞれについて収縮低減剤の混和を有・無としたコンクリート 6 種類について、20℃養生の自己収縮ひずみの測定を行い、さらに径が異なる埋込鉄筋を用いた鉄筋拘束試験（鉄筋比 1.3, 3.9, 7.9%）によって収縮拘束応力の測定²⁾を行った。文献³⁾によれば、鉄筋拘束が大きくかつ自己収縮ひずみが大きい場合は、自己収縮ひずみに起因する微細ひび割れによりコンクリートと鉄筋の付着に劣化が生じ、拘束が緩和するために応力が小さくなり、逆に、自己収縮ひずみの小さいコンクリートのほうが大きな応力を生じた例が報告されている。スラグせっこう系高強度セメントを用いたコンクリートについても同様の現象が認められるかどうかを確認した。また、発泡スチロールを用いて供試体を簡易な断熱状態とし、水和熱により高温履歴したコンクリートの自己収縮ひずみと鉄筋拘束試験による収縮拘束応力の測定を行った。20℃養生と簡易な断熱状態で測定したひずみデータの比較から硬化過程における線膨張係数の変化について検討を行った。

2.2 若材齢ヤング係数試験および収縮拘束応力計算方法の検討

2.2.1 実験概要

2.2.1.1 実験の要因と水準

実験に用いたコンクリートの種類を表 2.1 に、使用材料を表 2.2 に、調合を表 2.3 に示す。実験要因は水結合材比と収縮低減剤の種類とした。水結合材比は 20%、17%、15%の 3 水準とし、もっとも自己収縮ひずみが大きくなると予想された水結合材比 15%について、収縮低減剤無混和（15y）、収縮低減剤使用（15Ty）、収縮低減成分混入高性能減水剤使用（15Py）の 3 種類のコンクリートを比較した。水結合材比 20%と 17%については収縮低減剤無混和のみ（20y、17y）とし、本節では合計 5 種類のコンクリートの試験を行った。収縮低減剤には低級アルコール系、高性能減水剤にはポリカルボン酸系を用いた。15Py の高性能減水剤（収縮低減タイプ）に混和される収縮低減成分はグリコールエーテル系化合物とされるが、15Ty に用いた製造会社が異なるアルキレンオキシド付加物を主成分とする収縮低減剤と同様の化合物⁴⁾と分類される。結合材は、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、無水せっこう、シリカフュームをあらかじめ混合した高強度コンクリート用セメント（スラグせっこう系高強度用セメント）、骨材は安山岩の碎石砕砂を使用し、単位水量は 150kg/m³、単位粗骨材量は 825kg/m³とした。

表 2.1 コンクリートの種類

調査記号	水結合材比	収縮低減剤
20y	20%	無混和
17y	17%	無混和
15y	15%	無混和
15Ty		収縮低減剤を使用
15Py		高性能減水剤（収縮低減タイプ）を使用

表 2.2 コンクリートの使用材料

材料	品質等
結合材 B	スラグせっこう系高強度用セメント（密度 2.99g/cm ³ 、普通ポルトランドセメント：スラグせっこう系混和材：シリカフューム＝7：2：1）
細骨材 S	大月産安山岩砕砂（表乾密度 2.63g/cm ³ 、吸水率 2.75%）
粗骨材 G	大月産安山岩碎石（最大寸法 20mm、表乾密度 2.62g/cm ³ 、吸水率 2.45%）
化学混和剤	SP；ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤 SPSR；ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤＋グリコールエーテル系収縮低減成分 MA；空気量調整剤（消泡剤）
収縮低減剤	SRA；低級アルコールアルキレンオキシド付加物（比重 0.984、粘度 18.4nPa.s）

表 2.3 コンクリートの調合

調合 記号	W/B %	単位量 kg/m ³							
		W	B	S	G	SP/B	SPSR/B	SRA	MA/B
20y	20	150	750	708	825	1.15%	—	—	0.16%
17y	17	150	882	591	825	1.3%	—	—	0.16%
15y	15	150	1000	488	825	1.6%	—	—	0.16%
15Ty	15	150	1000	488	825	1.5%	—	7	0.16%
15Py	15	150	1000	488	825	—	1.6%	—	0.16%

2.2.1.2 試験項目および試験方法

試験項目を表 2.4 に示す。試験項目は、フレッシュ性状、凝結時間、圧縮強度、ヤング係数、自己収縮の経時変化、鉄筋拘束試験体による自己収縮拘束応力の経時変化とした。特に、自己収縮ひずみが急速に増加する材齢 1 日前後の若材齢における圧縮強度およびヤング係数の発現について、多くのデータを取得することとした。

コンクリートの練混ぜは、容量 100L の 2 軸強制練りミキサを用い、練混ぜ量 100L としてモルタルを先行して 180~480 秒間練り混ぜ、その後、粗骨材を投入して 90 秒間練り混ぜた。水結合材比 17%と 15%のスランプリフローは目標を 75±5cm、20%は 70±5cm とし、フレッシュコンクリートの性状を確認後、直ちに供試体の作製を行った。凝結性状は、JIS A1147「コンクリートの凝結時間試験方法」に従い、ウェットスクリーニングしたモルタルについて測定した。試料数は、各調合について、同一バッチから採取した 2 つとした。

自己収縮ひずみは、図 2.2 左に示すように、100×100×400mm の角柱供試体の中央部に低弾性型埋込型ひずみ計（東京測器研究所製 KM-100BT：弾性係数 40N/mm²）を埋設して測定した。型枠との摩擦の低減方法は JCI「コンクリートの自己収縮応力試験方法(案)」を参考にして、鋼製型枠の底面の内側にナフロンシート（厚さ 1mm、幅 100mm）、両端部の内側に発泡ポリスチレン板（厚さ 3mm）、型枠内側の側面、端面、底面にナフロンテープ（厚さ 0.1mm、幅 300mm を折り曲げて使用）を入れ、コンクリートと型枠が直接接触しないようにした。コンクリート打込み後は直ちに仕上げ面をナフロンテープ（厚さ 0.1mm、幅 100mm）で覆い、温度 20℃、湿度 95%以上の室内にて養生した。材齢 24 時間で供試体を脱型し、供試体全面をアルミ箔粘着テープ（厚さ 0.1mm）でシールし、その後は 20℃の温湿度制御室で養生した。供試体の本数は、1 調合あたり 2 体とした。

自己収縮拘束応力用の供試体の形状は、図 2.2 右に示すように、100×100×1000mm の角柱とした。拘束用の鉄筋は、D22 (SD345)、長さ 1000mm とし、中心部の表裏にひずみゲージを貼付した。また、ひずみゲージ近傍の温度を熱電対にて測定した。ひずみゲージは UFLA-2-11-5LT（2 mm、線膨張係数 10 μ 、リード線 5m のビニール被覆、3 線）、接着剤は EB-2（長期測定用エポキシ）、コーティング剤は UE-2（エポキシ）+SB テープ（自己融着）、保護材は VM テープとした。ゲージ貼付位置の磨きは、別の実施する鉄筋のヤン

グ係数測定用試験片と同じとした。ゲージ貼付後、前処理として温度履歴を与え、安定したひずみを検出できることを確認した。型枠は、金属製型枠パネル 200×1200mm および 100×1200mm（2 枚）と、端部を木製コンパネ 200×150mm とし、ボルトナットで組み立てた。型枠の底面の内側にナフロンシート（厚さ 1mm，幅 100mm），両端部の内側にナフロンシート（厚さ 1mm，幅 100mm）と発泡ポリスチレン体（100×100×100mm）を入れて伸縮を拘束しないようにするとともに、型枠内側の側面，底面にナフロンテープ（厚さ 0.1mm，幅 300mm を折り曲げて使用）を入れ、コンクリートと型枠が直接接触しないようにした。コンクリート打込み後は直ちに仕上げ面をナフロンテープ（厚さ 0.1mm，幅 100mm）で覆い、温度 20℃，湿度 95%以上の室内にて養生した。材齢 24 時間で供試体を脱型し、供試体全面をアルミ箔粘着テープ（厚さ 0.1mm）でシールした。なお、ひずみおよび温度は打込み前より測定した。供試体の本数は、1 調合あたり 2 体とした。

圧縮強度およびヤング係数の供試体は、いずれも $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の 20℃封かん養生とした。測定は、6 時間、8 時間、10 時間、12 時間、14 時間、16 時間、18 時間、20 時間、24 時間、48 時間、7 日、28 日、91 日とし、いずれも縦ひずみと横ひずみの測定を行った。若材齢の材齢 6～20 時間の圧縮試験は、300kN 圧縮試験機を用い、載荷盤間の変位と横方向の膨らみを CDP 型変位計によって測定しながら行った。供試体の加圧面は、打込み面を硬質石膏キャッピングとし、供試体の本数は、1 調合あたり 1 体とした。材齢 24 時間の圧縮試験は、1000kN 圧縮試験機を用い、長さ 60mm のひずみゲージにて縦ひずみと横ひずみを測定しながら行った。供試体の加圧面は、両面研磨仕上げとし、供試体の本数は、1 調合あたり 1 体とした。材齢 48 時間、7 日、28 日、91 日の圧縮試験は、3000kN 圧縮試験機を用いて材齢 24 時間と同様の方法で行い、供試体の本数は、1 調合あたり 3 体とした。ヤング係数の算出は、材齢 24 時間以降については JIS A1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に基づいて行うが、材齢 20 時間以前のヤング係数は、載荷初期の応力ひずみ関係の直線部分を採用した。

表 2.4 試験項目

試験項目	詳細
フレッシュ性状	スランプフロー，空気量，温度，単位容積質量
凝結時間	JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」
自己収縮ひずみ	100×100×400mm 角柱供試体，20℃養生， 埋込型ひずみ計を使用（n=2）
自己収縮 拘束応力	100×100×1000mm 角柱供試体，20℃養生， 埋込鉄筋 D22 による鉄筋拘束試験（鉄筋比 3.9%，n=2）
圧縮強度・ ヤング係数	$\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体，20℃封かん養生 材齢 6 時間，8 時間，10 時間，12 時間，14 時間，16 時間，18 時間，20 時間，24 時間（n=1），48 時間，7 日，28 日，91 日（n=3）

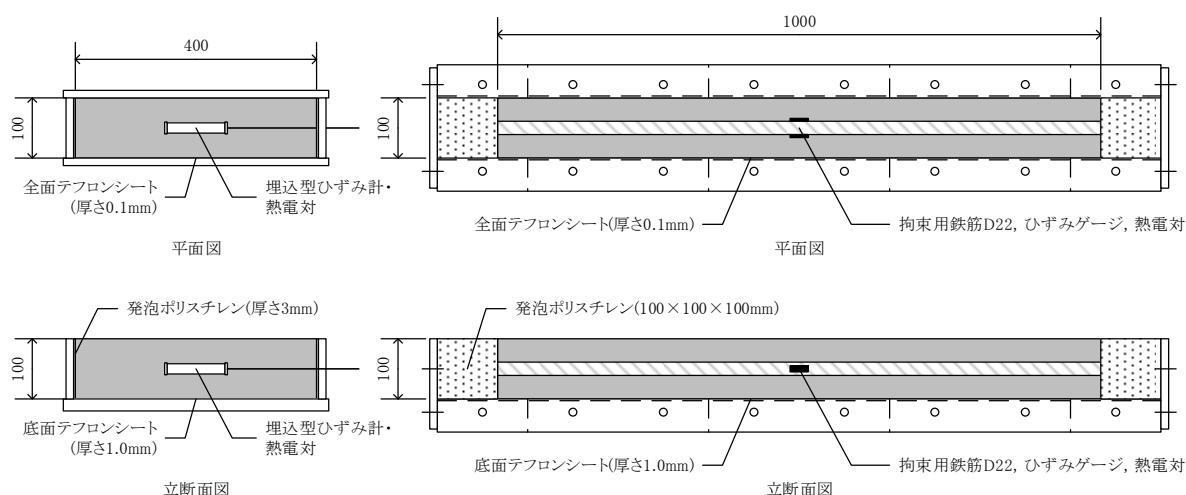


図 2.2 自己収縮ひずみ（左）および自己収縮拘束応力（右）測定用供試体の概要

2.2.2 実験結果および考察

2.2.2.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表 2.5 に示す。20y, 17y, 15y の比較から、水結合材比が小さくなると高性能減水剤の使用量は増加した。収縮低減剤は全て水に置換して用いたが、15y と 15Ty の比較から、収縮低減剤を用いると高性能減水剤の使用量はやや少なくなった。15Py の高性能減水剤（収縮低減タイプ）の使用量は、収縮低減成分が含まれるため、15y より多くなるよう設計されている。しかし、今回のように、スランプフローが過大で使用量が制限されると所定の収縮低減成分を混入できない。減水成分と収縮低減成分の一液化は、省力化の利点はあるが、混合比率を現場で変えられない課題がある。なお、収縮低減剤（15Ty）には凝結をやや遅らす傾向が見られたが、高性能減水剤（収縮低減タイプ）（15Py）には、使用量が少ないことも影響し、凝結の遅延はなかった。スランプフローはいずれも目標値より大きくなったが、顕著な分離はなかったので供試体を作製した。

表 2.5 フレッシュコンクリートの試験結果

調合 記号	W/B %	SP/B %	練り時間 秒	SLF cm	Ts50 秒	AIR %	CT ℃	UM t/m ³	凝結時間 h:m	
									始発	終結
20y	20	1.15	180+90	79.5	8.9	0.9	21.3	2.448	6:00	8:10
17y	17	1.30	270+90	82.0	9.6	0.9	22.0	2.460	6:00	9:15
15y	15	1.60	480+90	81.5	13.9	1.0	22.6	2.470	7:00	9:30
15Ty	15	1.50	480+90	80.5	16.6	1.3	23.0	2.468	7:00	10:20
15Py	15	1.60	480+90	84.0	12.8	1.2	23.7	2.468	6:15	9:05

SP/B: 高性能減水剤使用量, SLF: スランプフロー, Ts50: 50cm フロー到達時間, AIR: 空気量,
CT: コンクリート温度, UM: 単位容積質量

2.2.2.2 自己収縮ひずみおよび自己収縮拘束応力

自己収縮ひずみの経時変化を図 2.3 に示す。各調合とも、供試体 2 体の平均を示した。同図では、材齢の原点をコンクリートの練上がり時とし、材齢 0.2 日の自己収縮ひずみをゼロとした。材齢 0.2 日は、ひずみ計の値に変化が生じる凝結の始発時間（20y, 17y, 15Py は 0.25 日, 15y, 15Ty は約 0.3 日）よりやや早い時期にあたる。また、材齢 0.2 日の供試体温度は 20～21℃であるが、その後、水和によって一時的に 24℃程度まで上昇する温度変化があるため、計測された全ひずみからコンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として計算した温度ひずみを差し引いて自己収縮ひずみとした。

高強度コンクリートの自己収縮ひずみは、材齢 1 日までに急速に増加した。材齢 1 日の自己収縮ひずみは、20y では 490×10^{-6} 、17y では 550×10^{-6} 、15y では 680×10^{-6} に達し、水結合材比が小さいほど大きい。また、収縮低減剤を用いた 15Ty では 430×10^{-6} 、15Py では 580×10^{-6} となり、15y に比べて各々 65% 程度、85% 程度に低減した。

材齢 6 か月では、20y, 17y, 15y の自己収縮ひずみは 680×10^{-6} 、 720×10^{-6} 、 840×10^{-6} に達し、材齢 1 日から $160 \sim 190 \times 10^{-6}$ 程度増加した。一方、収縮低減剤を用いた 15Ty の材齢 6 か月の自己収縮ひずみは 450×10^{-6} 、15Py は 620×10^{-6} となり、15y に比べて各々 55% 程度、75% 程度に低減した。また、材齢 1 日からの増加量は $20 \sim 40 \times 10^{-6}$ と小さい。このように、収縮低減剤を用いると、材齢初期の急速な自己収縮の増加を抑えるとともに、その後の増加率も抑制しており、自己収縮ひずみの進展曲線は変化する。

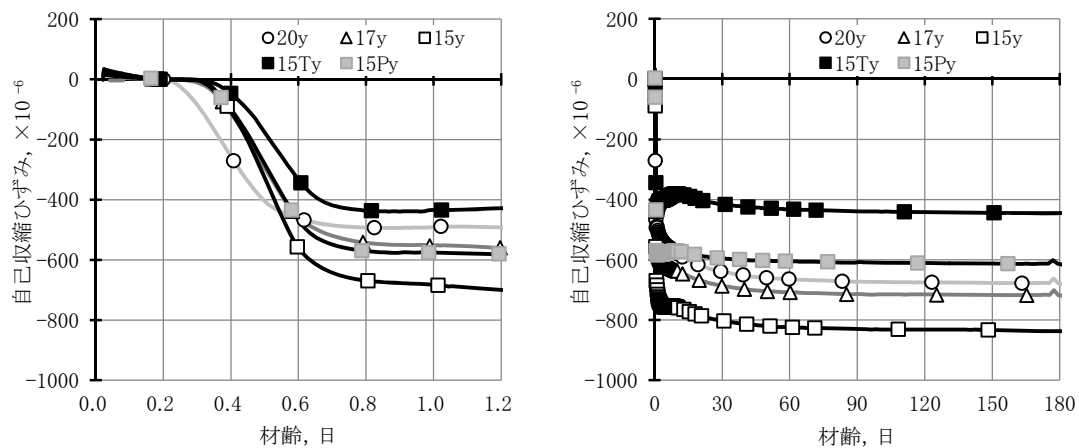


図 2.3 自己収縮ひずみの経時変化

自己収縮拘束応力の経時変化を図 2.4 に示す。コンクリートの応力は、鉄筋のひずみの平均値を用い、次の計算式(2.1)で算出した。

$$\sigma_c = (E_s \times \varepsilon_s \times A_s) / A_c \quad (2.1)$$

ここで、 σ_c ：コンクリートの応力、 E_s ：鉄筋のヤング係数（189kN/mm²）、 ε_s ：鉄筋のひずみ測定値、 A_s ：鉄筋の断面積（3.87cm²）、 A_c ：コンクリートの純断面積（100-3.87cm²）。

同図では、各調合とも供試体 2 体の平均を示し、材齢の原点はコンクリートの練上がり時とした。コンクリートの応力値に変化が生じるのは、ほぼ凝結の終結時間（20y は 0.35 日、その他は約 0.4 日）からであり、自己収縮ひずみに変化が生じる始発時間からやや遅れる。

自己収縮拘束応力も、自己収縮ひずみと同様に材齢 1 日までに急速に増加する。材齢 1 日の応力は、20y では 0.67N/mm²、17y では 0.94N/mm²、15y では 1.32N/mm²に達し、水結合材比が小さいほど大きい。また、収縮低減剤を用いた 15Ty では 0.64N/mm²、15Py では 0.90N/mm²となり、15y に比べて各々50%程度、70%程度に低減した。

材齢 6 か月では、20y、17y、15y の応力は 1.59N/mm²、1.54N/mm²、1.79N/mm²に達し、材齢 1 日から 0.5～0.9N/mm²程度増加した。一方、収縮低減剤を用いた 15Ty の材齢 6 か月の応力は 0.54N/mm²、15Py は 0.90N/mm²となり、15y に比べて各々30%程度、50%程度に低減した。収縮低減剤を用いたコンクリートの応力は、材齢 1 日から一旦低下し、その後再び上昇する傾向を示し、材齢 6 か月の応力は材齢 1 日より小さいか同等となった。自己収縮ひずみの経時変化にも小さな振幅が見られたが、自己収縮拘束応力にはこの傾向が顕著に表れた。

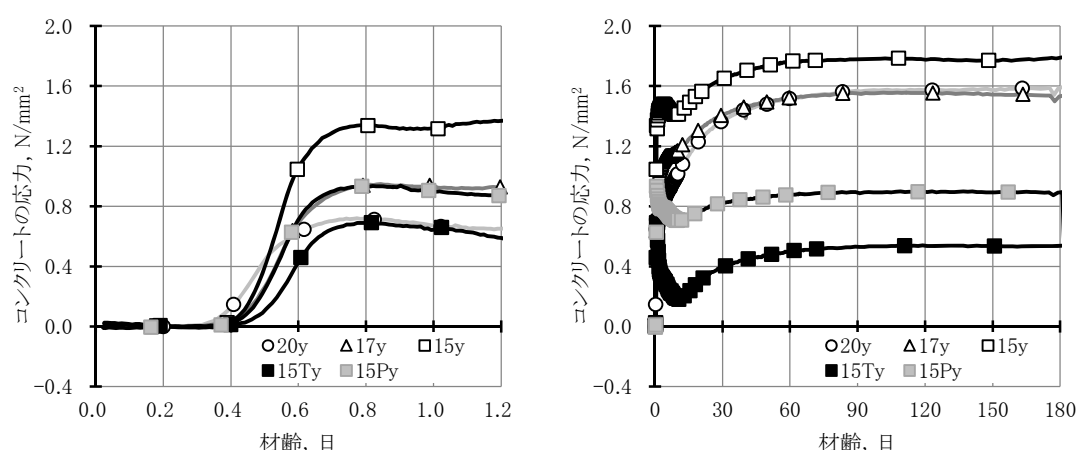


図 2.4 コンクリートの自己収縮拘束応力の経時変化

2.2.2.3 圧縮強度およびヤング係数

材齢 1 日までの圧縮強度およびヤング係数の経時変化と凝結時間との関係を図 2.5 に示す。圧縮強度は、凝結の始発にあたる材齢 0.25～0.3 日に 0.3～0.5N/mm²程度、終結にあたる材齢 0.35～0.4 日において 1.0N/mm²程度であるが、材齢 1 日には 20y が 35.4N/mm²、17y が 39.5N/mm²、15y が 46.1N/mm²に達する。また、収縮低減剤を用いた 15Ty および 15Py の材齢 1 日の強度は、15y よりやや遅延し、32.3N/mm²、41.9N/mm²となった。ヤング係数は、始発時には 0.05kN/mm²以下、終結時においても 0.1kN/mm²程度と小さいが、自己収縮ひずみが急速に増大している材齢 0.6 日には 3kN/mm²程度、材齢 1 日には 25kN/mm²程度に達する。このように、時間に伴い各物性が変化する場合の応力算定は、時間増分 ΔT の収縮ひずみ増分および温度ひずみ増分を与え、増分時間内の増分弾性ひずみにヤング係数を乗じて応力増分を計算し、その応力増分を増分開始時点の応力に加えることを繰り返して求める。高強度コンクリートの自己収縮ひずみやヤング係数は若材齢の短期間に大きく変化するため、精度のよい自己収縮応力の算定には、自己収縮ひずみ、ヤング係数、線膨張係数などの経時変化を正確に把握することが重要である。

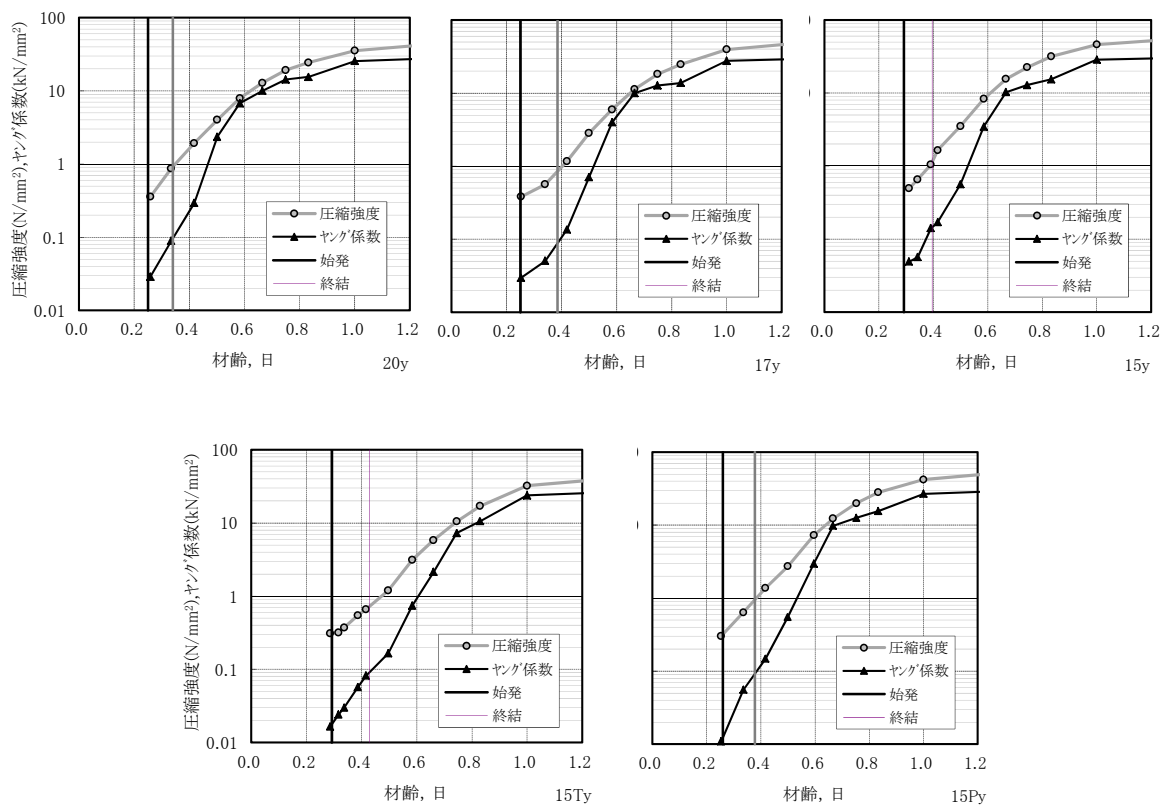


図 2.5 材齢 1 日までの圧縮強度およびヤング係数の経時変化

次に、CEB-FIP-1990 モデルコードを参考とする式(2.2)および式(2.3)に対し、圧縮強度試験結果およびヤング係数試験結果が近似するよう、最小二乗法により係数を定めることとした。

$$\text{圧縮強度；} \quad f_c(t) = f_c(28) \cdot \exp\left(A \cdot \left(1 - \left(\frac{28-t_0}{t-t_0}\right)^B\right)\right) \quad (2.2)$$

$$\text{ヤング係数；} \quad E_c(t) = E_c(28) \cdot \exp\left(C \cdot \left(1 - \left(\frac{28-t_0}{t-t_0}\right)^D\right)\right) \quad (2.3)$$

ここで、 $f_c(28)$ ：材齢 28 日の圧縮強度、 $E_c(28)$ ：材齢 28 日のヤング係数、 t ：有効材齢、 t_0 ：凝結時間の影響による係数、 A , B , C , D ：進行速度に関する係数である。CEB-FIP-1990 モデルコードでは、 A および C はセメントの種類によって与えられる係数とし、 B および D は 0.5 の一定値としている。今回は、これらも変数として近似式を求めた。また、 t_0 は、CEB-FIP-1990 モデルコードにはないパラメータであるが、日本コンクリート工学会の自己収縮委員会において、材齢 1 日以前の若材齢の強度発現の精度を高めるために採用されたもので、今回は図 2.5 を参考に、圧縮強度の t_0 を 0.2 日、ヤング係数の t_0 を 0.3 日とした。なお、一般の強度のコンクリートを対象とする日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説」などでは、ヤング係数を圧縮強度の関数として表現している。しかし、若材齢のヤング係数と圧縮強度の発現状況は大きく異なることと、高強度コンクリートの自己収縮応力の評価には特に若材齢の挙動を正確に把握する必要があるため、個々に近似曲線を作成することとした。

近似式の係数を、圧縮強度の試験結果と近似式を図 2.6、ヤング係数の試験結果と近似式を図 2.7 に示す。いずれの調合も、近似曲線と実験値は概ね良い対応を示している。

表 2.6 近似式の係数一覧

調合 記号	W/C	圧縮強度 式(2.2)				ヤング係数 式(2.3)			
		$f_c(28)$	A	B	t_0	$E_c(28)$	C	D	t_0
20y	0.20	143	0.063	0.892	0.2	42.5	0.0063	1.250	0.3
17y	0.17	152	0.040	1.011	0.2	42.7	0.0028	1.464	0.3
15y	0.15	159	0.059	0.894	0.2	44.3	0.0028	1.462	0.3
15Ty	0.15	153	0.084	0.868	0.2	44.4	0.0025	1.581	0.3
15Py	0.15	152	0.034	1.044	0.2	45.4	0.0027	1.492	0.3

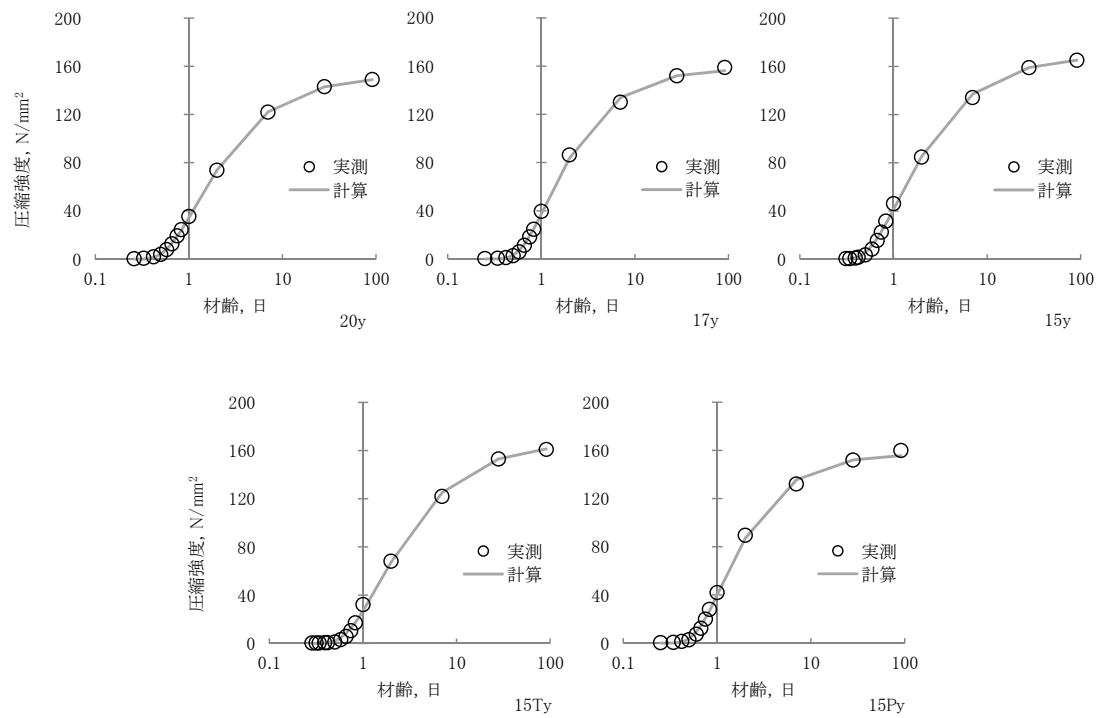


図 2.6 圧縮強度の試験結果と近似式

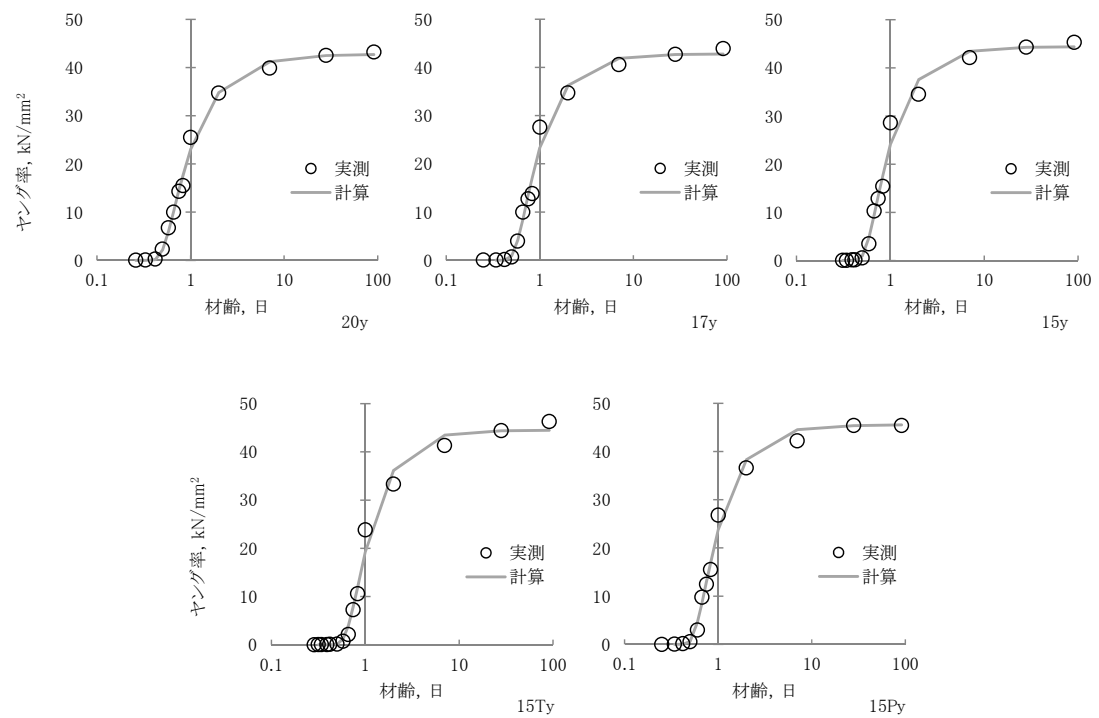


図 2.7 ヤング係数の試験結果と近似式

材齢 1 日以前の圧縮強度およびヤング係数を正確に把握するにはかなりの測定点数が必要となるため、材齢 1 日以降の硬化後の試験結果から材齢 1 日以前の経時変化を推定できるとよい。しかし、材齢 1 日以降の材齢 1 日、2 日、7 日、28 日、91 日の実測結果から近似曲線を求めると、材齢 1 日以前の近似曲線と実測値に大きな差が生じるようになった。そこで、今回の材齢 1 日以前の試験結果も含めて求めた係数 A～D の値について傾向の確認を行う。水結合材比と近似式の係数の関係を図 2.8 に示す。圧縮強度に関する係数 A, B には、水結合材比による影響は小さいが、収縮低減剤の使用による影響が大きい。よって、収縮低減剤を用いない場合の係数 A, B は表 2.6 の 15y の値、収縮低減剤を用いる場合は 15Ty (または 15Py) の値を用いればよいと考えられる。一方、ヤング係数に関する係数 C, D には、収縮低減剤による影響は小さいが、水結合材比による影響が認められる。よって、収縮低減剤の有無に依らず水結合材比 15～17% の場合の係数 C, D は 15y の値、水結合材比 20% は 20y の値を用いればよいと考えられる。

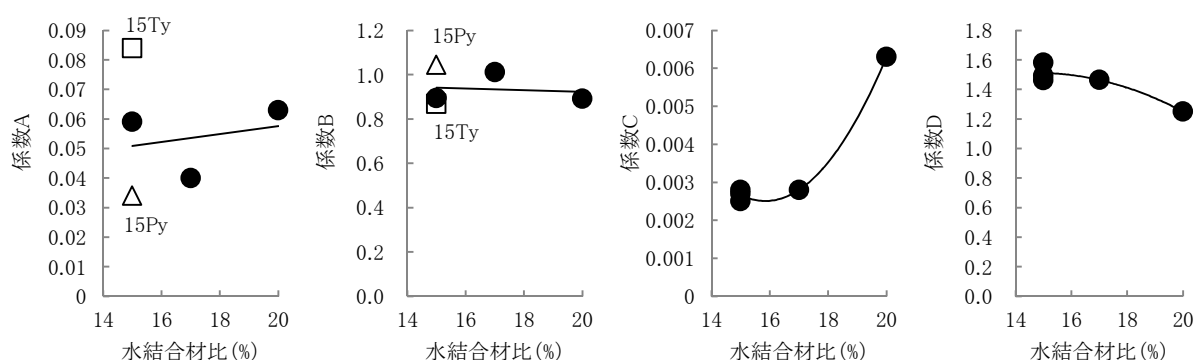


図 2.8 水結合材比と式(2.2)および式(2.3)の係数の関係

2.2.2.4 自己収縮拘束応力の計算方法の検討

時間に伴いヤング係数などの物性が変化する場合は、時間増分 ΔT の収縮ひずみ増分および温度ひずみ増分を与え、増分時間 ΔT 内においてひずみの適合条件と力の釣合から増分弾性ひずみを求め、増分弾性ひずみにヤング係数を乗じて応力増分を計算し、その応力増分を増分開始時点の応力に加えることを繰り返して行う。この応力算定の精度には、持続载荷によって経時的に増大するクリープひずみの取扱いが大きな影響を与える。

自己収縮応力の算定方法としては、各増分応力に対してクリープの進展による時間的な応力緩和を重ね合わせで考慮する **step-by-step** 法が用いられる。本節の収縮拘束応力は、式(2.4)に示す **step-by-step** 法により算出する。

$$\begin{aligned}
\sigma(t_{i+1/2}) &= \frac{\sigma(t_{i-1/2}) \cdot \left(\frac{1}{E_c(t_i)} + \frac{\phi(t_{i+1/2}, t_i)}{E_c(28)} \right) - \sum_{j=1}^{i-1} \left((\sigma(t_{j+1/2}) - \sigma(t_{j-1/2})) \cdot \left(\frac{1}{E_c(t_j)} + \frac{\phi(t_{i+1/2}, t_j)}{E_c(28)} \right) \right) - \varepsilon_f(t_{i+1/2})}{\frac{1}{E_c(t_i)} + \frac{\phi(t_{i+1/2}, t_i)}{E_c(28)} + \frac{A_c}{E_s \cdot A_s}} \\
\sigma(1) &= \frac{\sigma(0) \cdot \left(\frac{1}{E_c(0.5)} + \frac{\phi(1, 0.5)}{E_c(28)} \right) - 0 - \varepsilon_f(1)}{\frac{1}{E_c(0.5)} + \frac{\phi(1, 0.5)}{E_c(28)} + \frac{A_c}{E_s \cdot A_s}} \\
\sigma(2) &= \frac{\sigma(1) \cdot \left(\frac{1}{E_c(1.5)} + \frac{\phi(2, 1.5)}{E_c(28)} \right) - \left((\sigma(1) - \sigma(0)) \cdot \left(\frac{1}{E_c(0.5)} + \frac{\phi(2, 0.5)}{E_c(28)} \right) \right) - \varepsilon_f(2)}{\frac{1}{E_c(1.5)} + \frac{\phi(2, 1.5)}{E_c(28)} + \frac{A_c}{E_s \cdot A_s}} \\
\sigma(3) &= \frac{\sigma(2) \cdot \left(\frac{1}{E_c(2.5)} + \frac{\phi(3, 2.5)}{E_c(28)} \right) - \left((\sigma(1) - \sigma(0)) \cdot \left(\frac{1}{E_c(0.5)} + \frac{\phi(3, 0.5)}{E_c(28)} \right) + (\sigma(2) - \sigma(1)) \cdot \left(\frac{1}{E_c(1.5)} + \frac{\phi(3, 1.5)}{E_c(28)} \right) \right) - \varepsilon_f(3)}{\frac{1}{E_c(2.5)} + \frac{\phi(3, 2.5)}{E_c(28)} + \frac{A_c}{E_s \cdot A_s}}
\end{aligned} \tag{2.4}$$

ここで、 A_c はコンクリート断面積、 A_s と E_s は鉄筋の断面積とヤング係数である。

次に、クリープ特性について検討を行う。クリープ特性の既往式としては、JCI 自己収縮委員会
の式(2.5)がある。同式は、圧縮強度やヤング係数の発現式と同様に CEB-FIP-1990 モデル
コードをベースにしているが、終局クリープ係数 ϕ_0 およびクリープの進行を決める係数 β_H
を、高強度コンクリートの若材齢のクリープなどを想定して載荷時のヤング係数比で評価
するよう修正されている。

$$\begin{aligned}
\text{クリープ係数 ; } \quad \phi(t, t_0) &= \phi_0 \cdot \left(\frac{(t-t_0)/1}{\beta_H + (t-t_0)/1} \right)^{0.3} \\
\phi_0 &= 0.826 \cdot (E_c(t_0)/E_c(28))^A \\
\beta_H &= 0.0588 \cdot \exp(7.75 \cdot (E_c(t_0)/E_c(28)))
\end{aligned} \tag{2.5}$$

ここで、 t は有効材齢、 t_0 は載荷材齢（日）、 $E_c(t_0)$ は載荷時のヤング係数、 $E_c(28)$ は材
齢 28 日のヤング係数である。 A の値は JCI 自己収縮委員会では -1.67 であるが、これをパ
ラメータとして、図 2.9 に示す検討を行う。クリープ特性の検討手順は、まず、①自己収縮ひず
みの実測値、若材齢を含めた実測値の近似式によるヤング係数、既往のクリープ特性を用いて、
鉄筋拘束試験の自己収縮拘束応力を step-by-step 法によって求め、次に、②step-by-step 法に
よる応力の計算値を応力の実測値と比較し、③計算値が実測値とほぼ一致するまで、既往のクリ

ープ式(2.5)の係数 A をパラメータとして再計算を実施することとした。ここで、自己収縮ひずみの経時変化を数式化せずに実測値を入力値として採用した理由は、図 2.3 に示したように、一般的な自己収縮ひずみの進展式では表現できないひずみの停滞などが見られたので、クリープ特性の検討を目的とする場合には、この現象を正確に反映させる必要があると判断したためである。ヤング係数については、若材齢を含めた実測値の近似式 (2.3) および表 2.6 の係数を用いた。

鉄筋拘束試験体に生じるコンクリート応力の計算値と実測値の比較の結果、既往のクリープ式(2.5)の係数 $A=-1.67$ では応力を小さく見積もり、若材齢のクリープをやや過大に評価する傾向となったため、式(2.5)の係数 $A=-0.5$ を採用することとした。既往式の $A=-1.67$ の場合と採用した $A=-0.5$ の場合の終局クリープ係数 ϕ_0 および $A=-0.5$ として計算した 15y のクリープ係数 $\phi(t, t_0)$ の経時変化を図 2.10 に示す。同図には、一般のコンクリートを対象とした日本建築学会の「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」に示される終局クリープ係数も併せて示したが、採用したクリープ係数は若材齢において既往式より小さい。応力の計算値と実測値を図 2.11 に示す。計算値が実測値に比べてまだ小さい傾向がみられるが、収縮低減剤の有無にかかわらず概ね再現できていることが分かる。

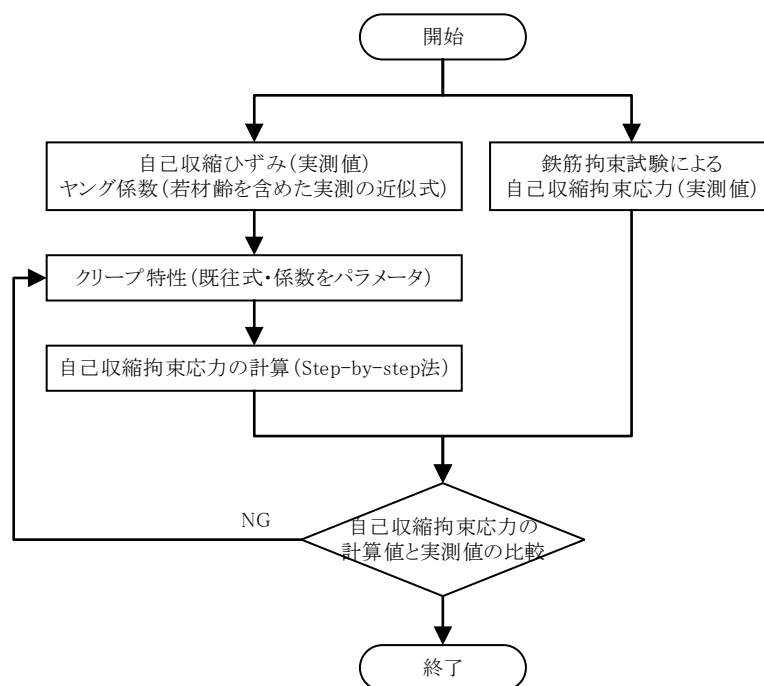


図 2.9 検討手順

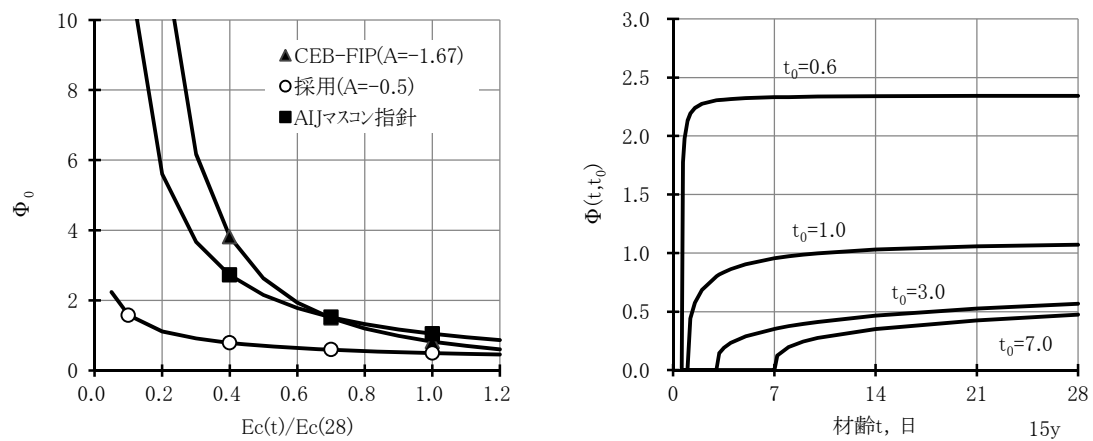


図 2.10 式(2.5)の終局クリープ係数 ϕ_0 と15yのクリープ係数 $\phi(t, t_0)$

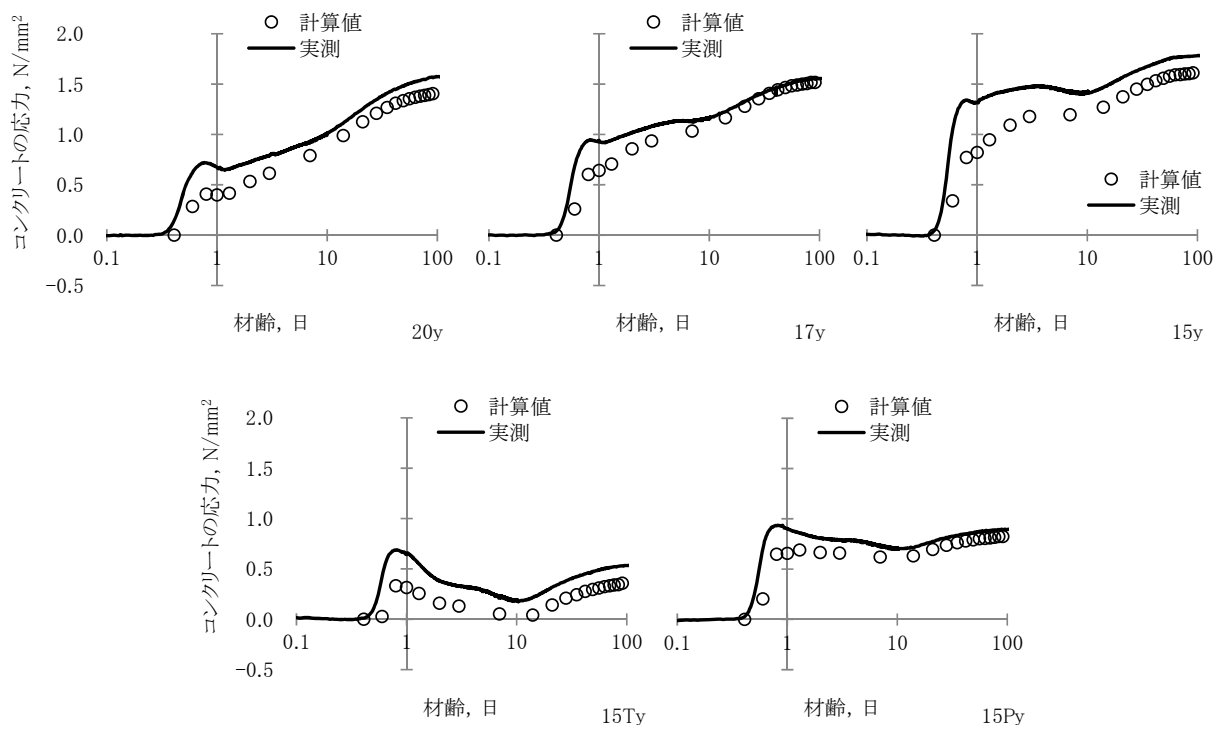


図 2.11 鉄筋拘束試験体に生じる応力の試験結果と計算結果の比較

2.3 拘束度が異なる鉄筋拘束試験

2.3.1 実験概要

2.3.1.1 実験の要因と水準

コンクリートの種類を表 2.7, 使用材料を表 2.8, 調合を表 2.9 に示す。前節と同じスラグせっこう系高強度用セメントを使用し、水結合材比 20%, 17%, 15%について収縮低減剤の有・無のコンクリート 6 種類について、拘束度 3 水準の鉄筋拘束試験を行った。記号の添字「T」に低級アルコール系収縮低減剤を使用した。収縮低減剤は全て水に置換した。いずれも骨材は安山岩碎石・砕砂、単位水量は 150kg/m³、粗骨材量は 825kg/m³とした。

表 2.7 コンクリートの種類

調合記号	水結合材比	収縮低減剤	鉄筋拘束試験の鉄筋比	養生条件
20	20%	無混和	1.3%, 3.9%, 7.9%	20℃と簡易断熱
20T		収縮低減剤を使用	1.3%, 3.9%, 7.9%	20℃と簡易断熱
17	17%	無混和	1.3%, 3.9%, 7.9%	20℃と簡易断熱
17T		収縮低減剤を使用	1.3%, 3.9%, 7.9%	20℃と簡易断熱
15	15%	無混和	1.3%, 3.9%, 7.9%	20℃と簡易断熱
15T		収縮低減剤を使用	1.3%, 3.9%, 7.9%	20℃と簡易断熱

表 2.8 コンクリートの使用材料

材料	品質等
結合材 B	スラグせっこう系高強度用セメント（密度 2.99g/cm ³ 、普通ポルトランドセメント：スラグせっこう系混和材：シリカフューム＝7：2：1）
細骨材 S	大月産安山岩砕砂（表乾密度 2.63g/cm ³ 、吸水率 2.75%）
粗骨材 G	大月産安山岩碎石（最大寸法 20mm、表乾密度 2.62g/cm ³ 、吸水率 2.45%）
化学混和剤	SP；ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤、MA；空気量調整剤（消泡剤）
収縮低減剤	SRA；低級アルコールアルキレンオキシド付加物

表 2.9 コンクリートの調合

調合 記号	W/B %	単位量 (kg/m ³)						
		W	B	S	G	SP/B	SRA	MA/B
20	20	150	750	708	825	1.15%	—	0.16%
20T	20	150	750	708	825	1.05%	7	0.16%
17	17	150	882	591	825	1.35%	—	0.16%
17T	17	150	882	591	825	1.25%	7	0.16%
15	15	150	1000	488	825	1.6%	—	0.16%
15T	15	150	1000	488	825	1.5%	7	0.16%

2.3.1.2 試験項目および試験方法

試験項目を表 2.10 に示す。試験項目は、フレッシュ性状、圧縮強度および引張強度、ヤング係数、自己収縮の経時変化、鉄筋拘束試験体による応力の経時変化とした。

コンクリートの練混ぜは、前節と同様に、2 軸強制練りミキサを用い、モルタルを先行して 150～330 秒間練り混ぜ、その後、粗骨材を投入して 90 秒間練り混ぜる方法とした。モルタルの練混ぜ時間は、練り混ぜの状態を確認しながら決定した。

自己収縮ひずみは、前節と同様に、100×100×400mm の角柱試験体に埋込み型ひずみ計を埋設して測定した。自己収縮ひずみ用供試体の養生は、図 2.12 に示す 20℃養生と発泡ポリスチレンを用いた簡易断熱養生の 2 条件とした。自己収縮拘束応力は、前節と同様に、100×100×1000mm の角柱供試体にひずみゲージを貼付した鉄筋を埋設して測定した。拘束鉄筋は、D13, D22, D32（鉄筋比は 1.3%, 3.9%, 7.9%）の 3 水準とした。自己収縮拘束応力用の供試体の養生は、図 2.13 に示すように、20℃養生を基本とし、D22 については発泡ポリスチレンを用いた簡易断熱養生も行った。

圧縮強度およびヤング係数は、いずれも ϕ 100×200mm の供試体を用い、材齢 24 時間、48 時間、7 日、28 日、91 日に測定した。また、割裂による引張強度を材齢 7 日、28 日、91 日に測定した。一部の材齢では、図 2.14 に示す簡易断熱養生供試体についても試験を行った。

表 2.10 試験項目

試験項目		詳細
フレッシュ性状		スランプフロー，空気量，温度，単位容積質量
自己収縮 ひずみ	20℃養生	100×100×400mm 角柱供試体，埋込型ひずみ計を使用（n=1）
	簡易断熱 養生	400×400×700mm の発泡スチロール内の 100×100×400mm 角柱供試体，埋込型ひずみ計を使用（n=1）
自己収縮 拘束応力	20℃養生	100×100×1000mm 角柱供試体，埋込鉄筋 D13, D22, D32 による鉄筋拘束試験（鉄筋比 1.3%, 3.9%, 7.9%, n=1）
	簡易断熱 養生	400×400×1300mm の発泡スチロール内の 100×100×1000mm 角柱供試体，埋込鉄筋 D22 による鉄筋拘束試験（鉄筋比 3.9%, n=1）
強度・ ヤング係数	封かん養生 (20℃)	圧縮強度：24 時間，48 時間，7 日，28 日，91 日（n=2），ヤング係数（n=1） 割裂引張強度：7 日，28 日，91 日（n=2）
	標準養生	圧縮強度：28 日，91 日（n=3）
	簡易断熱 養生	圧縮強度：7 日，28 日，91 日（n=2），ヤング係数（n=1） 割裂引張強度：28 日（n=2）

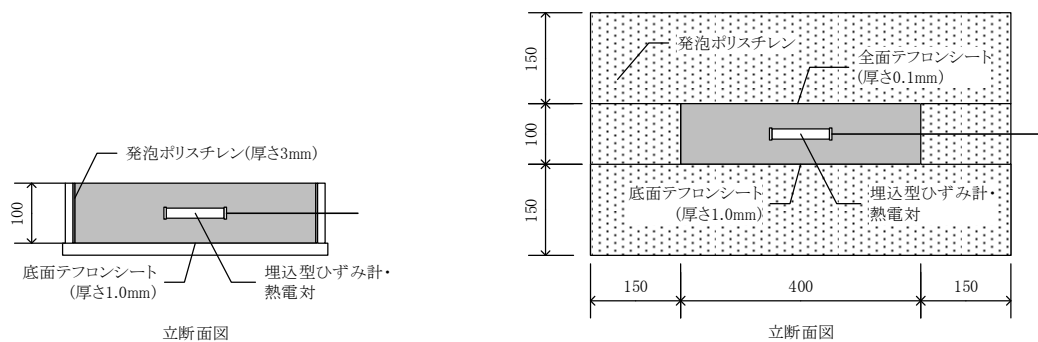


図 2.12 自己収縮ひずみ測定用供試体の概要（左：20℃養生用，右：簡易断熱養生用）

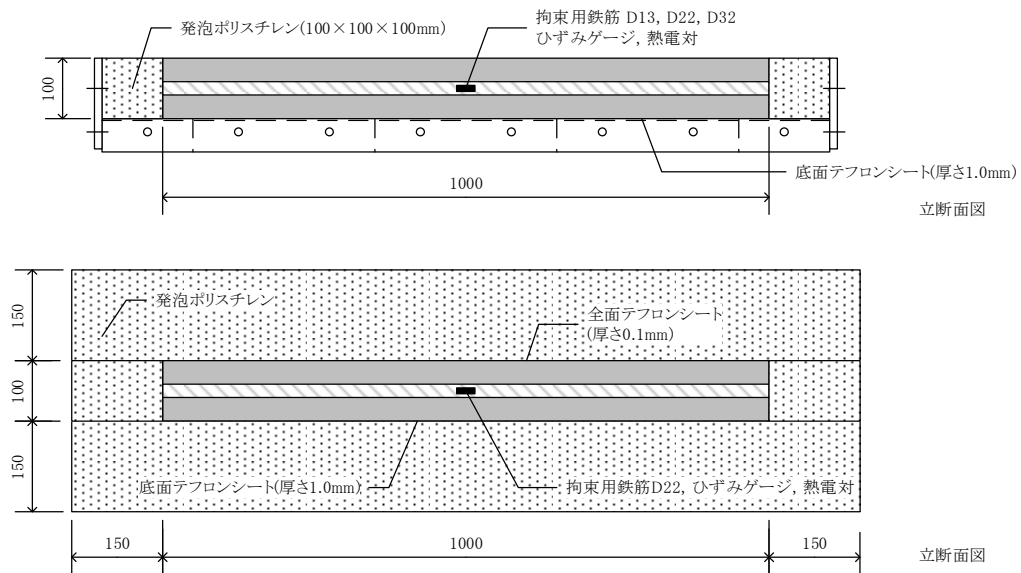


図 2.13 自己収縮拘束応力測定用供試体の概要（上：20℃養生用，下：簡易断熱養生用）

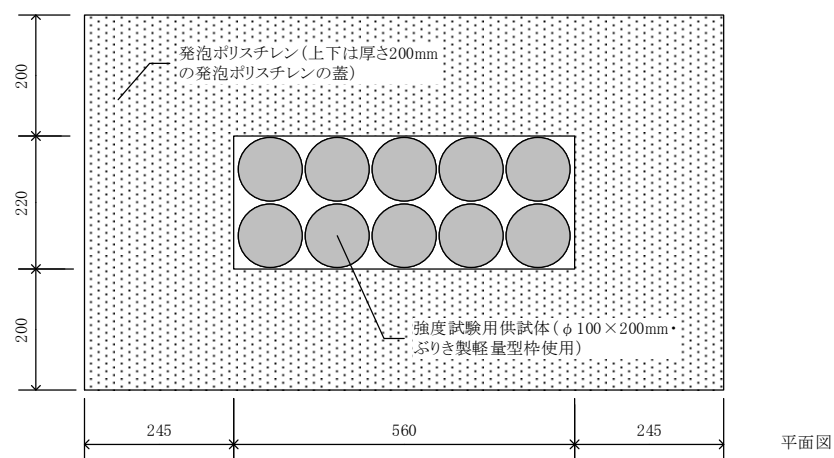


図 2.14 強度試験用供試体の簡易断熱養生の概要

2.3.2 実験結果および考察

2.3.2.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表 2.11 に示す。前節の試験結果と同様に、収縮低減剤を用いると高性能減水剤の使用量はやや少なくなる傾向を示した。スランプフローは、水結合材比 17%と 15%の目標 $75\pm 5\text{cm}$ 、20%の目標 $70\pm 5\text{cm}$ を概ね満足したので、フレッシュコンクリートの性状確認後、供試体を作製した。

表 2.11 フレッシュコンクリートの試験結果

調合 記号	W/B %	SP/B %	練り時間 秒	SLF cm	Ts50 秒	AIR %	CT ℃	UW t/m ³
20	20	1.15	150+90	73.0	10.2	1.0	21.8	2.448
20T	20	1.05	150+90	71.0	9.9	1.3	22.0	2.432
17	17	1.35	180+90	76.0	12.7	1.5	22.9	2.458
17T	17	1.25	210+90	78.5	12.5	1.3	22.6	2.455
15	15	1.60	300+90	79.0	13.8	1.4	24.5	2.473
15T	15	1.50	330+90	80.0	14.5	1.4	23.8	2.475

SP/B:高性能減水剤使用量, SLF:スランプフロー, Ts50:50cm フロー到達時間, AIR:空気量,

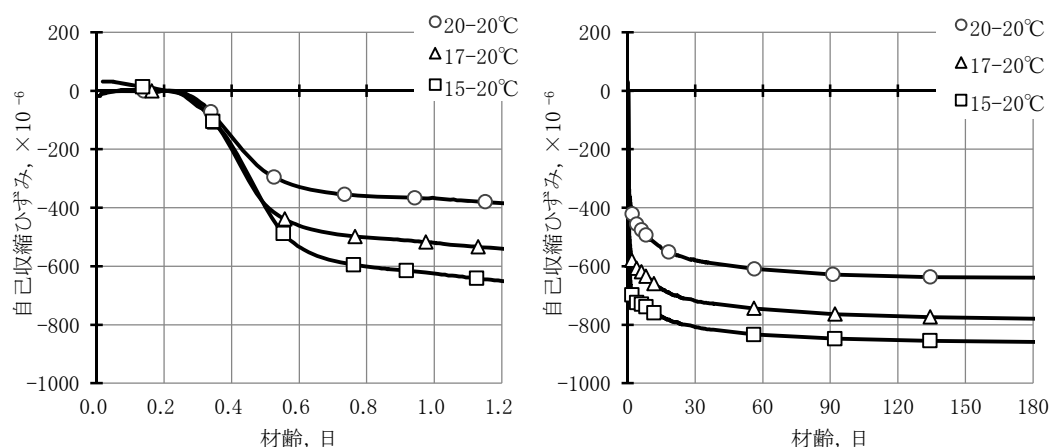
CT:コンクリート温度, UM:単位容積質量

2.3.2.2 20℃養生の収縮ひずみおよび拘束応力

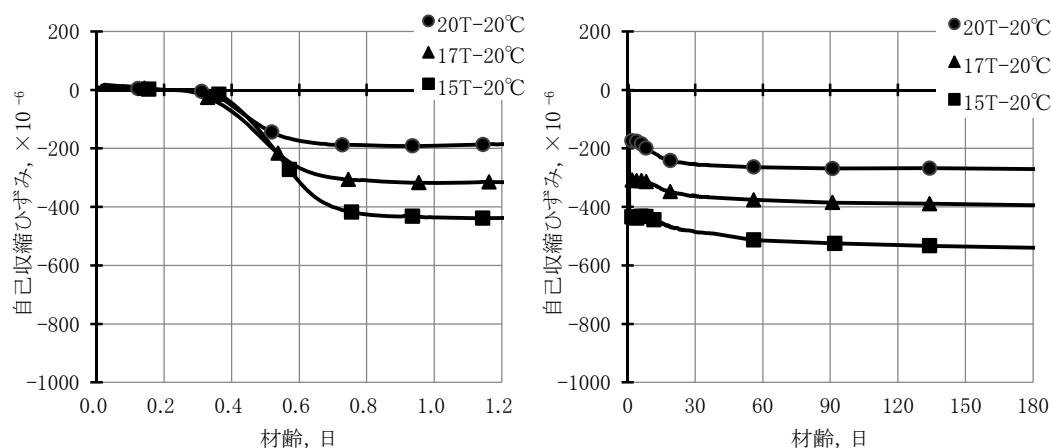
20℃養生の自己収縮ひずみの経時変化図 2.15 に示す。同図では、前節と同様に、有効材齢の原点をコンクリートの練上がり時とし、有効材齢 0.2 日の自己収縮ひずみをゼロとした。また、コンクリートの線膨張係数を $10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として温度ひずみを差し引いて自己収縮ひずみとした。自己収縮ひずみは、水結合材比 (W/B) の低下に伴って増加する傾向を示した。収縮低減剤を使用しない場合、W/B=20%の 20℃養生 (20-20℃) のひずみ量は、材齢 1 日で 370×10^{-6} 、材齢 28 日で 580×10^{-6} 、材齢 6 か月で 640×10^{-6} であるのに対して、W/B=17% (17-20℃) では、材齢 1 日で 520×10^{-6} (W/B=20%の 1.4 倍)、材齢 28 日で 710×10^{-6} (同 1.2 倍)、材齢 6 か月で 780×10^{-6} (同 1.2 倍) となり、W/B=15% (15-20℃) では、材齢 1 日で 630×10^{-6} (W/B=20%の 1.7 倍)、材齢 28 日で 800×10^{-6} (同 1.4 倍)、材齢 6 か月で 860×10^{-6} (同 1.3 倍) となった。このように、水結合材比が小さいほど自己収縮ひずみは大きくなるが、特に若材齢においてその傾向は顕著であった。

収縮低減剤の自己収縮ひずみ低減効果は顕著であり、W/B=20%の 20℃養生 (20T-20℃) のひずみ量は、材齢 1 日で 190×10^{-6} (無混和の 50%)、材齢 28 日で 250×10^{-6} (同 40%)、材齢 6 か月で 270×10^{-6} (同 40%) となり、W/B=17% (17T-20℃) では、材齢 1 日で 320×10^{-6} (無混和の 60%)、材齢 28 日で 360×10^{-6} (同 50%)、材齢 6 か月で 390×10^{-6} (同

50%), W/B=15% (15T-20°C) では, 材齢 1 日で 440×10^{-6} (無混和の 70%), 材齢 28 日で 480×10^{-6} (同 60%), 材齢 6 か月で 540×10^{-6} (同 60%) となった。収縮低減剤による低減率は, 若材齢ほど, 水結合材比が大きいほど, 大きい傾向を示し, 収縮低減剤を使用していないコンクリートのひずみ量に対して, W/B=20%は約 50~60%の減, W/B=17%は約 40~50%の減, W/B=15%は約 30~40%の減となった。



a) 収縮低減剤無し



b) 収縮低減剤使用

図 2.15 自己収縮ひずみの経時変化

次に, スラグせつこう系高強度用セメントに収縮低減剤を用いた高強度コンクリートの自己収縮ひずみの経時変化を数式表現するために, 一般的な自己収縮ひずみの進展予測式(2.6)を用い, それぞれの調合の測定値から最小二乗法で式(2.6)の定数を求めた。

自己収縮ひずみ； $\varepsilon_f(t) = -H \cdot (1 - \exp(-K \cdot (t - 0.3)^L))$ (2.6)

ここで、 $\varepsilon_f(t)$ は有効材齢 t (日) における自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 H は自己収縮ひずみの最終値、 K および L は定数である。近似式の係数と水結合材比の関係を図 2.15 に示す。自己収縮ひずみの最終値に係る定数 H は、収縮低減剤を用いることにより 300×10^{-6} 程度小さくなる事が分かる。また、定数 K および L は、数値が大きいほど最終値に早く近づくことになるが、水結合材比が小さいほど、また、収縮低減剤を用いると、自己収縮ひずみは早く収束することが分かる。

表 2.12 自己収縮ひずみの近似式(2.6)の定数

調査 記号	W/B %	収縮低減剤	自己収縮ひずみの近似式(2.6)		
			H	K	L
20	20	なし	625	0.88	0.35
20T	20	低減剤	280	0.83	0.30
17	17	なし	725	1.23	0.42
17T	17	低減剤	330	6.25	1.35
15	15	なし	775	1.93	0.73
15T	15	低減剤	460	5.75	1.64

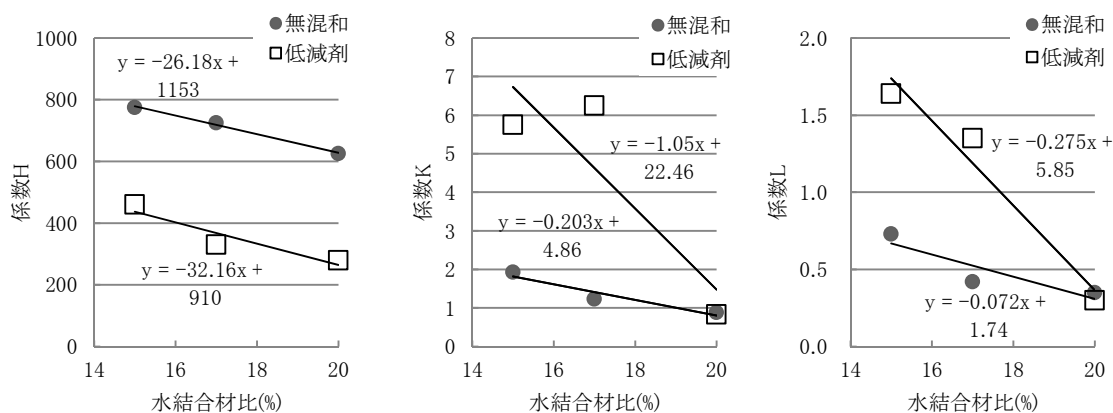


図 2.16 水結合材比と式(2.6)の係数との関係

次に、20℃養生の自己収縮拘束応力の経時変化について、収縮低減剤を用いていない調査を図 2.17 に、収縮低減剤を使用した調査を図 2.18 に示す。ここで、自己収縮拘束応力は、表 2.13 に示す鉄筋を用い、式(2.1)で計算した。

自己収縮拘束応力は、収縮低減剤の有無に依らず、鉄筋比が大きく拘束が大きいものほど大きくなった。文献 3)では、鉄筋拘束が大きかつ自己収縮ひずみが大きい場合は、自己収縮ひずみに起因する微細ひび割れによりコンクリートと鉄筋の付着に劣化が生じ、拘束が緩和するために応力が小さくなり、逆に、自己収縮ひずみの小さいコンクリートのほ

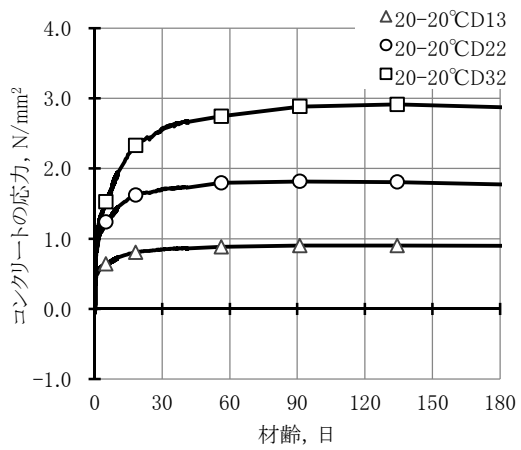
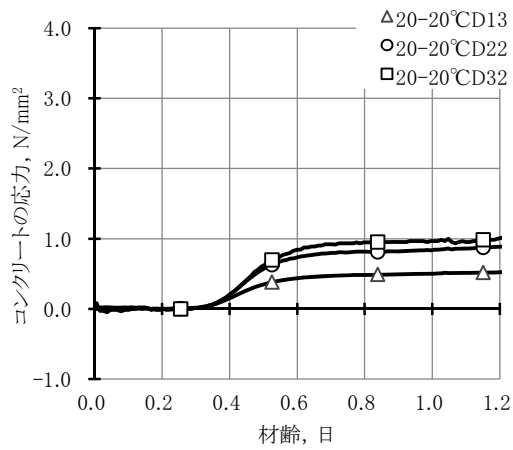
うが大きな応力を生じた例が報告されている。しかし、今回の実験ではそのような傾向は見られず、低水セメント比で収縮低減剤未使用のため自己収縮ひずみが大きいコンクリート（W/B=15%，収縮低減剤なし）においても、拘束が大きいものほど大きな応力が生じており、付着が健全であることが推察された。

収縮低減剤を使用しない場合、W/B=20%の20℃養生（20-20℃）の応力は、D13、D22、D32（鉄筋比は1.3、3.9、7.9%）の順に、材齢1日で0.50、0.84、0.97N/mm²、材齢6か月で0.90、1.8、2.9N/mm²となった。W/B=17%（17-20℃）では、材齢1日で0.61、1.2、1.5N/mm²（W/B=20%の1.2、1.4、1.5倍）、材齢6か月で0.95、2.1、3.3N/mm²（同1.1、1.2、1.1倍）となり、W/B=15%（15-20℃）では、材齢1日で0.78、1.5、1.9N/mm²（W/B=20%の1.6、1.8、2.0倍）、材齢6か月で1.1、2.4、3.4N/mm²（同1.2、1.3、1.2倍）となった。このように、水結合材比が小さいほど応力は大きくなるが、自己収縮ひずみと同様に、若材齢においてこの傾向が大きい。また、拘束が大きいものほど、材齢1日以降の応力の増加が大きい傾向を示す。

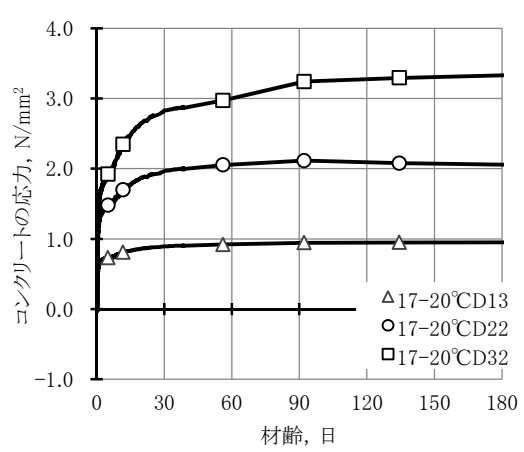
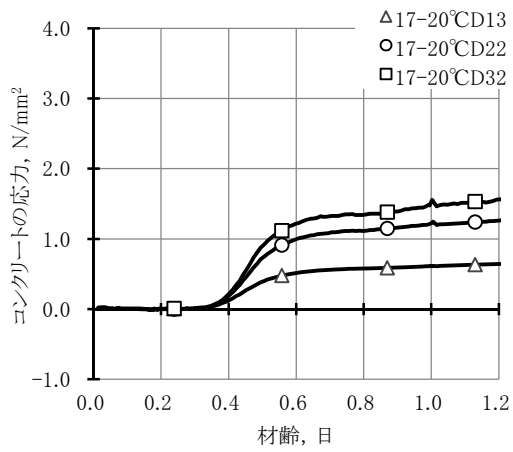
収縮低減剤の応力低減効果も顕著であり、W/B=20%の20℃養生（20T-20℃）の応力は、D13、D22、D32（鉄筋比は1.3、3.9、7.9%）の順に、材齢1日で0.22、0.31、0.32N/mm²（無混和の0.4、0.4、0.3倍）、材齢6か月で0.40、0.56、0.91N/mm²（同0.4、0.3、0.3倍）となった。W/B=17%（17T-20℃）では、材齢1日で0.33、0.47、0.50N/mm²（無混和の0.5、0.4、0.3倍）、材齢6か月で0.44、0.82、0.76N/mm²（同0.5、0.4、0.2倍）となり、W/B=15%（15T-20℃）では、材齢1日で0.42、0.70、0.85N/mm²（無混和の0.5、0.5、0.4倍）、材齢6か月で0.50、0.79、1.3N/mm²（同0.5、0.3、0.4倍）となった。このように、収縮低減剤を使用していない同じ水結合材比のコンクリートに対して、いずれの水結合材比、拘束度、材齢においても応力を50%以下まで低減した。また、水結合材比15%で拘束鉄筋D22を用いた前節の結果と同様に、収縮低減剤を用いたコンクリートの応力は材齢1日前後で一旦低下する傾向を示したが、水結合材比が大きいコンクリートの場合はこの傾向が小さく、D32を用いた拘束が大きいものは材齢1日以降の応力増加が大きくなったため、材齢6か月の応力が材齢1日より小さくなることはなかった。

表 2.13 拘束鉄筋の力学性状

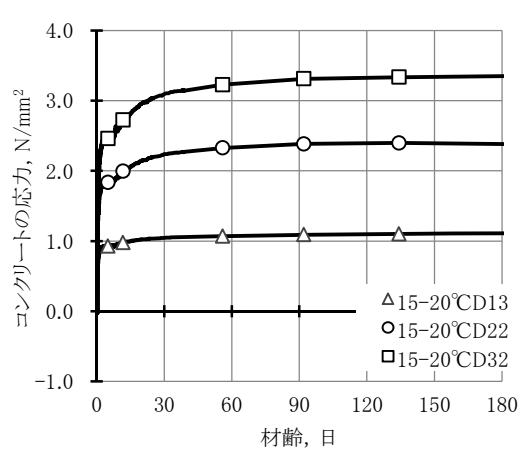
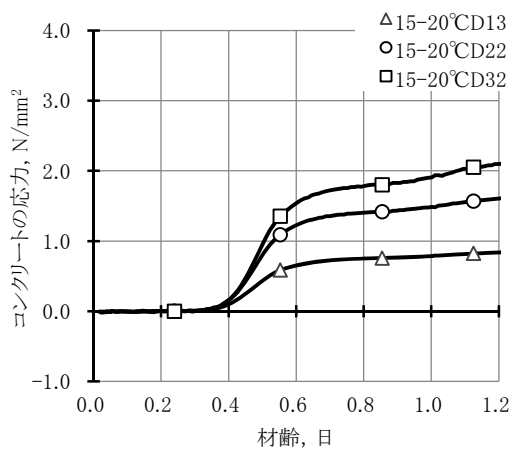
拘束鉄筋		降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸 び %	切断 位置	ヤング係数 kN/mm ²
D13 (A=1.267cm ²)	平均	361	612	15.4	A	186
D22 (A=3.871cm ²)	平均	377	533	20.0	A	178
D32 (A=7.942cm ²)	平均	379	539	25.4	A	169



W/B=20%, 収縮低減剤なし

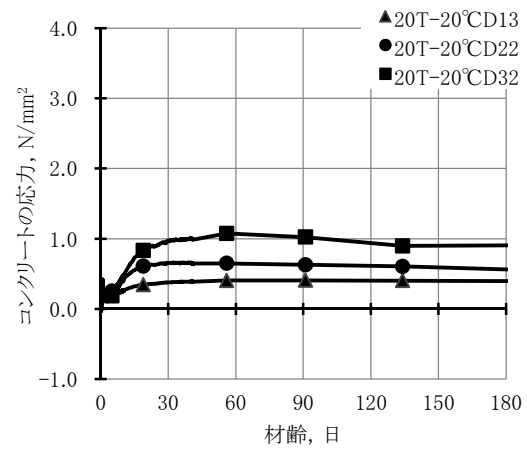
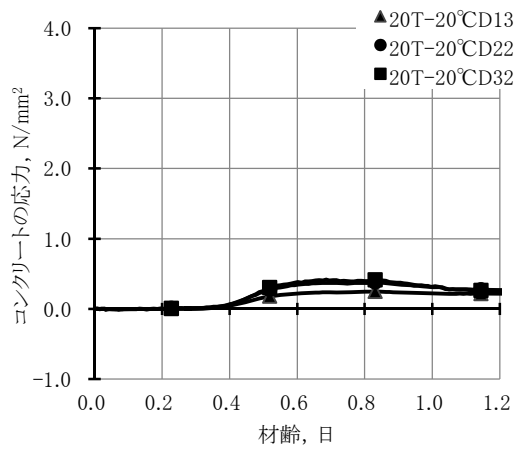


W/B=17%, 収縮低減剤なし

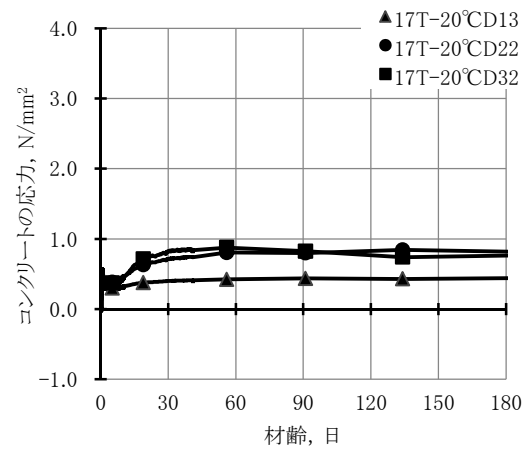
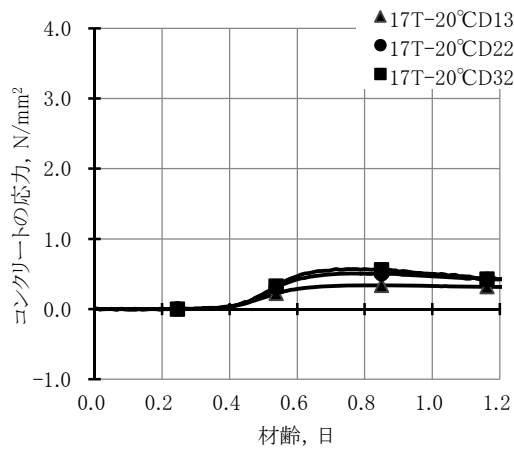


W/B=15%, 収縮低減剤なし

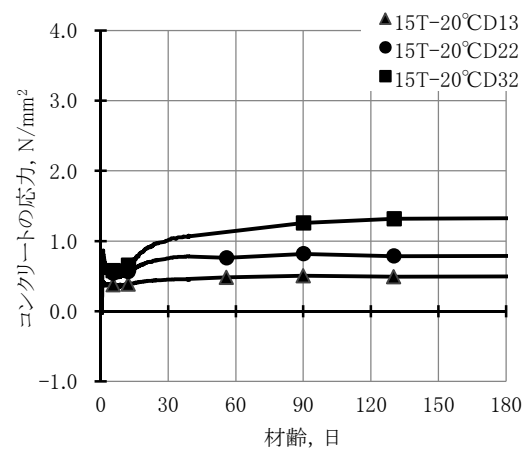
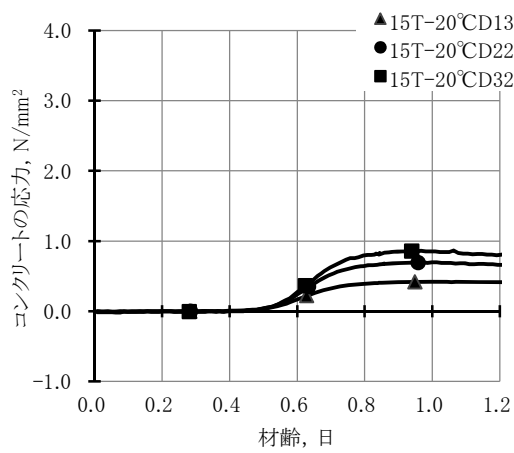
図 2.17 自己収縮拘束応力の経時変化 (続く)



W/B=20%, 収縮低減剤使用



W/B=17%, 収縮低減剤使用



W/B=15%, 収縮低減剤使用

図 2.18 自己収縮拘束応力の経時変化 (続き)

2.3.2.3 簡易断熱養生による収縮ひずみ、拘束応力および線膨張係数

簡易断熱養生した自己収縮ひずみ用、拘束応力用および強度試験用供試体の温度履歴を図 2.19 に示す。同図によれば、水結合材比 15%において、収縮低減剤を用いると温度上昇がやや遅延している。また、全体的に自己収縮ひずみ用供試体の最高温度がほかの供試体よりやや低くなっている。しかし、ここで用いた簡易断熱養生方法、水結合材比の範囲、収縮低減剤の有無の組合せであれば、温度履歴に大きな差は無く、材齢 1 日程度に最高温度 50～60℃に達し、材齢 7 日程度にほぼ室温の 20℃まで降下した。

簡易断熱養生供試体および 20℃養生供試体のひずみの経時変化を図 2.20 に示す。同図のひずみは、全ひずみで示しているため、簡易断熱養生条件では材齢 1 日近傍に膨張のピークを有する温度ひずみを含んでいる。しかし、収縮低減剤を用いていない調査では、材齢 1 日までの自己収縮ひずみの増大が大きいと、膨張側に向かうことなく収縮側を推移した。また、材齢 7 日の時点では 20℃まで温度が降下するので温度ひずみは小さいと考えられるが、水結合材比 20%と 17%のケースでは、簡易断熱養生供試体のひずみは 20℃養生のひずみより収縮側にやや大きく、自己収縮ひずみの進行が早まっていることが分かる。

簡易断熱養生供試体および 20℃養生供試体の拘束応力の経時変化を図 2.21 に示す。同図から、収縮低減剤は、簡易断熱養生条件においても拘束応力を低減し、有効に作用している。しかし、簡易断熱養生条件の拘束応力は、20℃養生条件の拘束応力よりかなり小さくなっており、特に材齢 1 日より少し前からの応力の増大が顕著である。材齢 1 日以降の場合、自己収縮ひずみの増大は比較的小さいため、温度降下に伴う温度ひずみの影響の可能性はある。ただし、温度降下時の温度ひずみによってコンクリートに引張応力が発生する条件は、コンクリートの線膨張係数が拘束鉄筋の線膨張係数より大きい場合である。

ここで、コンクリートの線膨張係数の算出を試みる。線膨張係数の算出には、自己収縮ひずみ用供試体で測定した全ひずみを、自己収縮ひずみと温度ひずみに分離する必要がある。そこで、全ひずみの経時変化について、温度履歴が異なる簡易断熱養生した供試体と 20℃養生した供試体の比較をするため、式(2.7)によって 20℃換算の有効材齢を算出する。

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/1} \right] \quad (2.7)$$

ここで、 t は有効材齢（日）、 Δt は温度 T が継続する期間（日）、 $T(\Delta t_i)$ は Δt_i の間継続するコンクリートの温度である。

次に、最高温度 60℃程度の簡易断熱養生と 20℃養生では、同一有効材齢における自己収縮ひずみは等しいものと仮定する。また、線膨張係数は、湿潤状態および絶乾状態に対して含水率 60～70%で大きくなる傾向を示すなど含水率依存性⁵⁾が知られるが、文献^{6, 7, 8)}を参考に若材齢では硬化コンクリートより大きく、材齢 1 日程度以降はほぼ一定値に収束するものとし、線膨張係数の経時変化は式(2.7)の指数減少関数に近似する。

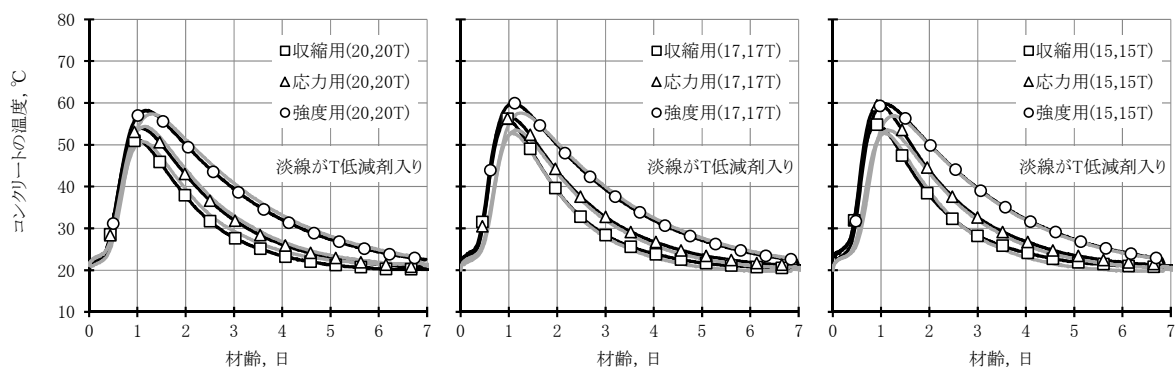


図 2.19 簡易断熱養生による供試体の温度履歴

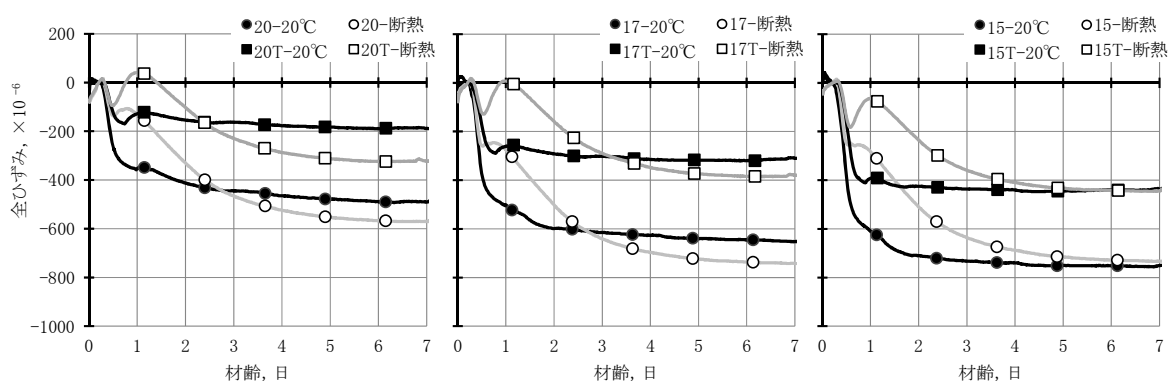


図 2.20 簡易断熱養生供試体および 20°C養生供試体の全ひずみの経時変化

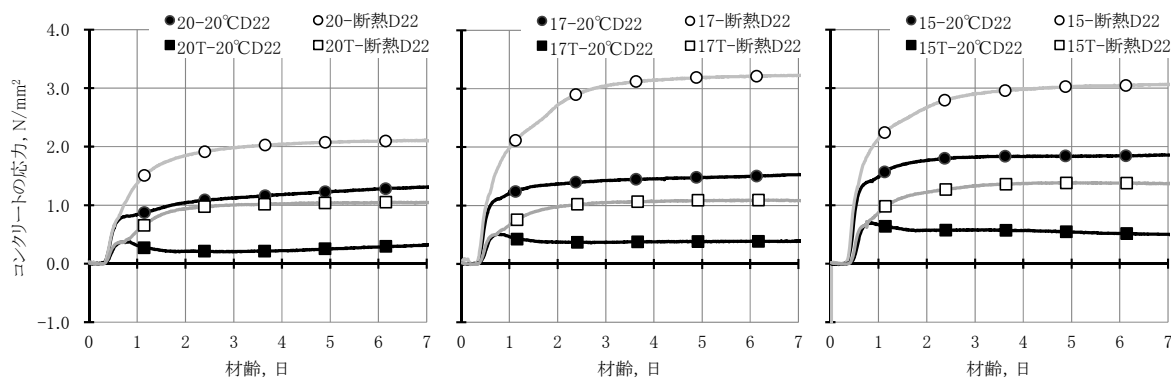


図 2.21 簡易断熱養生供試体および 20°C養生供試体の拘束応力の経時変化

$$\text{線膨張係数: } \alpha(t) = A + B \cdot \exp\{-(t - t_0)/C\} \quad (2.8)$$

ここで、 $\alpha(t)$ は有効材齢 t (日) における線膨張係数、 A は硬化コンクリートの線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)、 t_0 は凝結に係る時間で 0.3 日、 B および C は定数である。

式(2.8)の定数 A , B , C をパラメータとして、簡易断熱養生供試体の全ひずみから温度ひ

ずみを除去して自己収縮ひずみを求め、20℃養生の自己収縮ひずみとほぼ一致するように同定計算を行った。線膨張係数の同定結果を表 2.14 および図 2.22 に示す。また、全ひずみから温度ひずみを除去して求めた自己収縮ひずみの経時変化を図 2.23 に示す。今回の検討の結果では、水結合材比 20%と 17%の線膨張係数は鉄筋より小さい。

表 2.14 同定した線膨張係数の近似式(2.8)の定数

調合 記号	線膨張係数の近似式(2.8)		
	A	B	C
20	10.5	5	0.1
20T	8.5	10	0.1
17	11	10	0.02
17T	11	20	0.05
15	13	50	0.1
15T	12	100	0.1

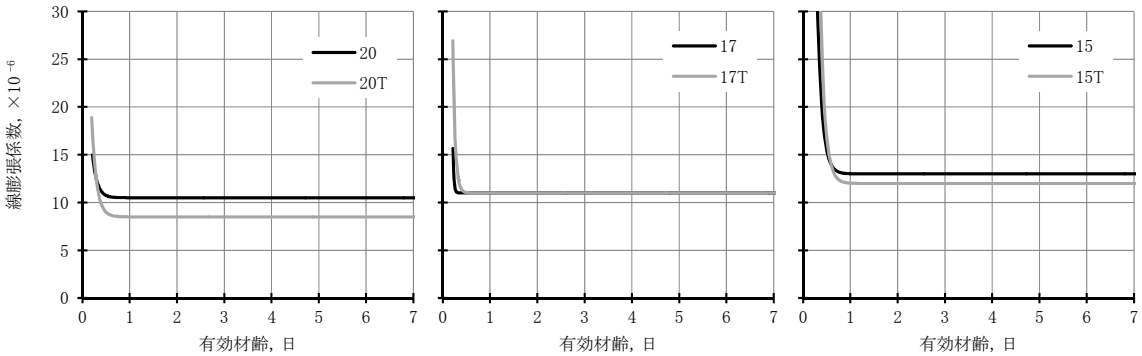


図 2.22 線膨張係数の経時変化

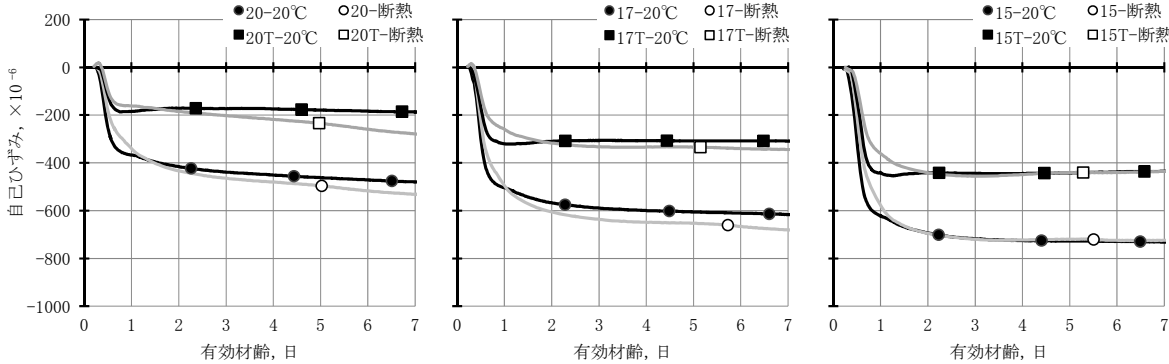


図 2.23 全ひずみから温度ひずみを式(2.8)によって除去した自己収縮ひずみ

2.3.2.4 圧縮強度およびヤング係数

20℃封かん養生および簡易断熱養生したコンクリートの圧縮強度の経時変化を図 2.24, ヤング係数の経時変化を図 2.25 に示す。同図の時間軸は式(2.7)による有効材齢とした。また, 各図には強度発現曲線も併記した。強度発現曲線は前節で検討した式(2.2)および式(2.3)とし, 式の係数は前節の若材齢試験で定めた以下の値を用いた。

$$\text{圧縮強度;} \quad f_c(t) = f_c(28) \cdot \exp\left(A \cdot \left(1 - \left(\frac{28-0.2}{t-0.2}\right)^B\right)\right) \quad (2.2)$$

ここで, $f_c(28)$: 材齢 28 日の圧縮強度, t : 有効材齢,
収縮低減剤なしは $A=0.059$, $B=0.894$, 収縮低減剤ありは $A=0.084$, $B=0.868$ とする。

$$\text{ヤング係数;} \quad E_c(t) = E_c(28) \cdot \exp\left(C \cdot \left(1 - \left(\frac{28-0.3}{t-0.3}\right)^D\right)\right) \quad (2.3)$$

ここで, $E_c(28)$: 材齢 28 日のヤング係数, t : 有効材齢,
W/B=15~17%は $C=0.0028$, $D=1.462$, W/B=20%は $C=0.0063$, $D=1.250$ とする。

圧縮強度発現式は, 材齢 28 日までの 20℃封かん養生した供試体の強度を精度よく推定しているが, 簡易断熱養生した供試体および材齢 91 日の 20℃封かん養生供試体の強度をやや低めに推定している。しかし, 圧縮強度発現式は, 圧縮強度と引張強度の関係式を介して, ひび割れ発生強度を算出する目的で使用されるものであるため, 強度を低めに推定することは安全側の評価を行うことになる。また, 自己収縮拘束応力の計算においては, 若材齢の挙動の把握が重要であるため, この圧縮強度発現式をひび割れ評価に用いることは可能であると考えられる。

ヤング係数発現式は, 材齢 7 日を高めに推定しているケースもみられるが, 20℃封かん養生と簡易断熱養生のいずれの養生についてもよい精度で推定できている。また, 収縮応力解析においてヤング係数は弾性ひずみに乗じて応力を算出するものであるから, 高めのヤング係数の推定値は安全側の評価につながると考えられる。よって, このヤング係数発現式をひび割れ評価に使用することは妥当であると判断される。

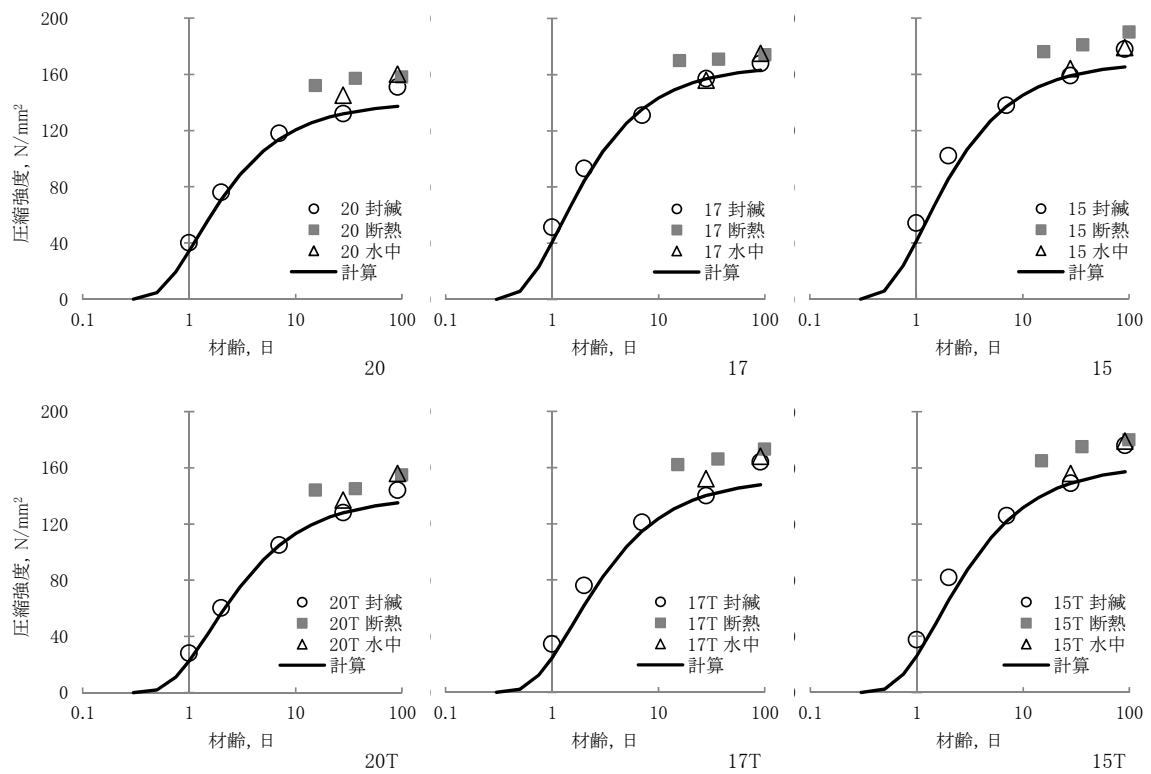


図 2.24 圧縮強度試験結果と近似式の関係

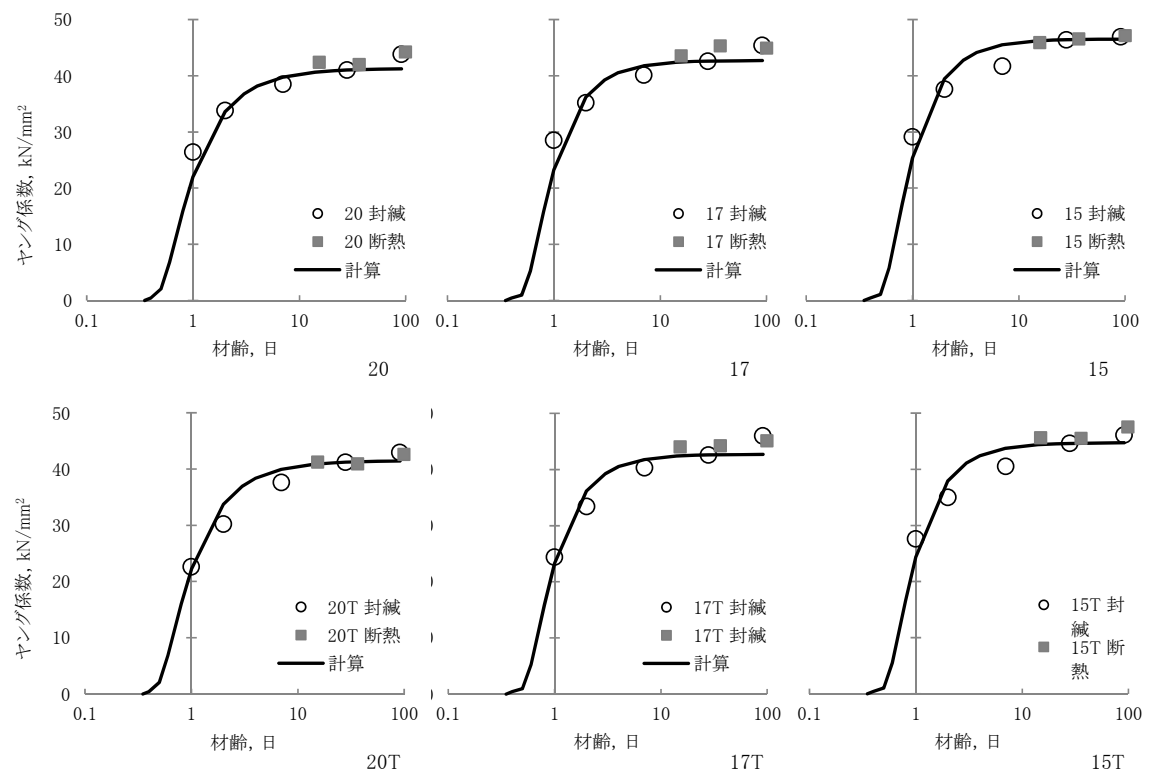


図 2.25 ヤング係数試験結果と近似式の関係

2.3.2.5 拘束度とひび割れ発生確率

異なる径の埋込鉄筋を用いた鉄筋拘束試験の結果、最も拘束度が大きく自己収縮が大きいコンクリートに最も大きな応力が発生したため、自己収縮ひずみによって鉄筋周りにひび割れが生じ、付着劣化によって応力が緩和するという現象は生じていないものと考えられた。ここでは、鉄筋拘束試験による応力を計算によって求め、実測値との比較によってクリープ以外の応力緩和が生じていた可能性があるかどうかの確認を行う。また、応力や強度の変動係数を仮定し、水結合材比と拘束度に応じたひび割れ発生確率を算出し、収縮低減剤を使用する目安を作成することとした。

鉄筋拘束試験によるコンクリート応力は、2.2.2.4 に示した **step-by-step** 法を用いて算出した。計算に用いる材料データは次のようにした。

- ・ 自己収縮ひずみは、水結合材比と収縮低減剤の有無を条件に、式(2.6)および図 2.16 から推定して用いた。
- ・ コンクリートのヤング係数は、2.3.2.4 の式(2.3)´および材齢 28 日の 20℃封かん養生のヤング係数試験値（調合記号 20, 20T, 17, 17T, 15, 15T の順に、41.0, 41.2, 42.6, 42.6, 46.4, 44.6kN/mm²）を用いた。
- ・ クリープひずみは、JCI 自己収縮委員会の式(2.4)の一部の定数を変更して用いた。
- ・ 拘束鉄筋のヤング係数等は 表 2.13 の値を用いた。
- ・ ひび割れ発生確率の算定には、コンクリートのひび割れ強度が必要である。圧縮強度と割裂引張強度の関係を図 2.26 に示す。同図から、引張強度は材齢にかかわらず式(2.9)によって評価できると仮定する。
- ・ ひび割れ発生強度は、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説（以下、学会収縮ひび割れ指針）」を参考に、割裂試験による引張強度の 0.7 倍とした。
- ・ 引張強度の算定に用いる圧縮強度は、式(2.3)´および材齢 28 日の 20℃封かん養生の圧縮強度試験値（調合記号 20, 20T, 17, 17T, 15, 15T の順に、132, 128, 157, 140, 159, 149N/mm²）を用いた。

$$\begin{aligned} \text{引張強度;} & \quad f_t(t) = 0.15 \cdot f_c(t)^{0.75} \\ \text{ひび割れ発生強度;} & \quad f_{cr}(t) = 0.7 \cdot f_t(t) \end{aligned} \quad (2.9)$$

ここで、 $f_t(t)$ 、 $f_c(t)$ 、 $f_{cr}(t)$ は有効材齢 t 日の引張、圧縮、ひび割れ発生強度である。

ひび割れ発生確率は、学会収縮ひび割れ指針を参考に算出した。ひび割れは、応力がひび割れ発生強度を上回るときに発生するものとし、応力およびひび割れ発生強度のそれぞれを正規分布に従う確率変数として取り扱う。応力の変動係数は 15%、強度の変動係数は 30%、安全係数は 1.0 としてひび割れ発生確率の経時変化を求める。

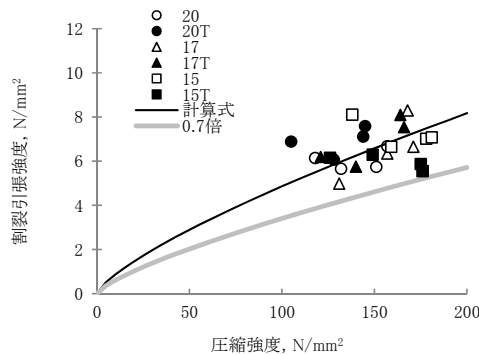
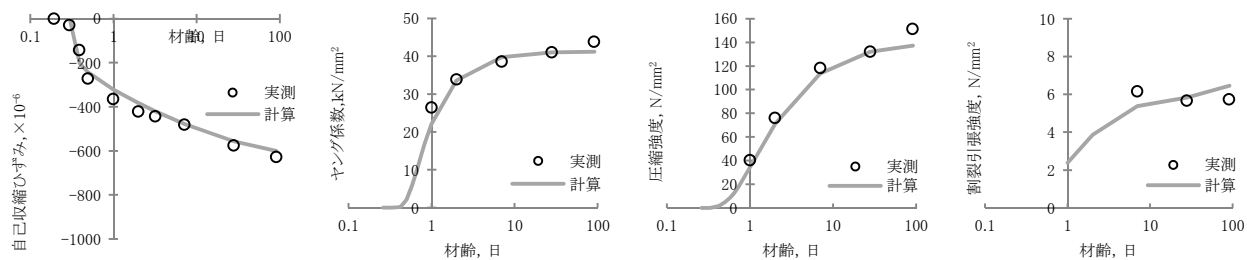


図 2.26 圧縮強度と割裂引張強度の関係

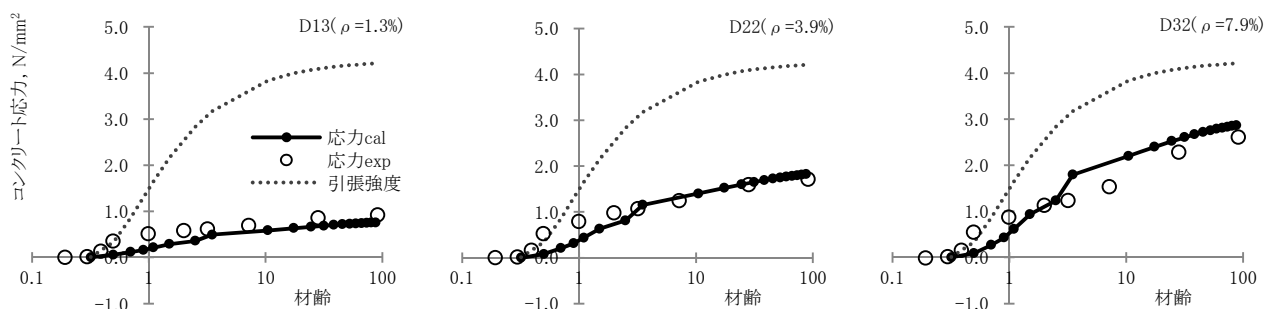
鉄筋拘束試験体に生じる応力等の試験結果と解析結果の比較を図 2.27～図 2.32 に示す。各図の上段に、計算に用いた材料データを実測値と比較して示したが、割裂引張強度の発現式を除き、概ね実測値に沿ったものとなっている。割裂引張強度については、実測値にばらつきがみられ、初期材齢においては計算に用いた発現曲線よりも強度が高かった可能性がある。

各図中段に、鉄筋径毎に、コンクリート応力の計算値と実測値の比較を示す。収縮低減剤を用いていない調合記号 20, 17, 15 については、若材齢の応力計算値がやや小さい傾向にあるが、いずれも実測値と良い対応を示している。特に拘束度の大きい場合に、計算値に比べて実測値が小さくなるという傾向は認められないので、自己収縮ひび割れによる付着劣化などのクリープ以外の応力緩和が生じていた可能性はないものと考えられた。

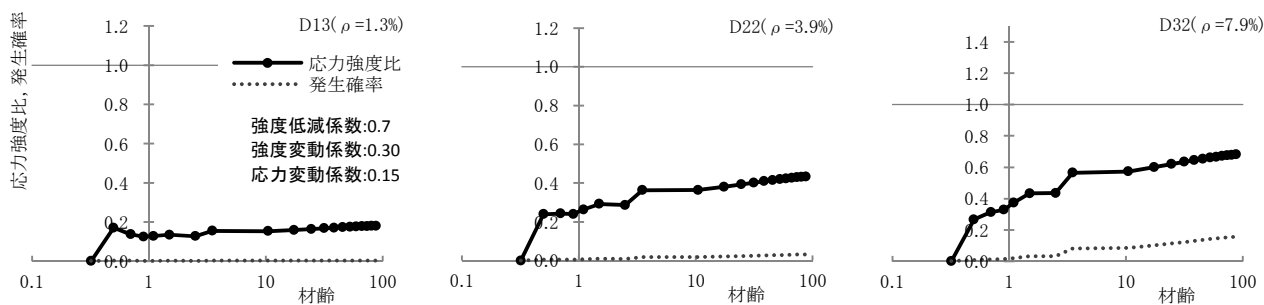
各図下段に、応力強度比とひび割れ発生確率を示す。水結合材比 20%については、収縮低減剤を使用していない調合記号 20 においても、最も拘束が大きい D32(鉄筋比 7.9%)の場合のひび割れ発生確率は 0.5 以下に収まっている。調合記号 20T に示すように、収縮低減剤を用いれば、ひび割れ発生確率は 0.05 以下になる。水結合材比 17%および 15%の場合は、収縮低減剤の有無にかかわらずひび割れ発生確率が高いケースが見られた。収縮低減剤を用いるほうが発生確率の高いケースもみられるが、これは、初期材齢の割裂引張強度など材料モデルの精度の悪さに依存するところが多い。仮に収縮低減剤を用いたコンクリートにひび割れが生じて、収縮量が小さいことからひび割れの量を減ずることが可能となるため、水結合材比 17%以下の領域では収縮低減剤の使用が必要であると考えられる。



a) 材料データ



b) 自己収縮応力の実測値と計算値の比較

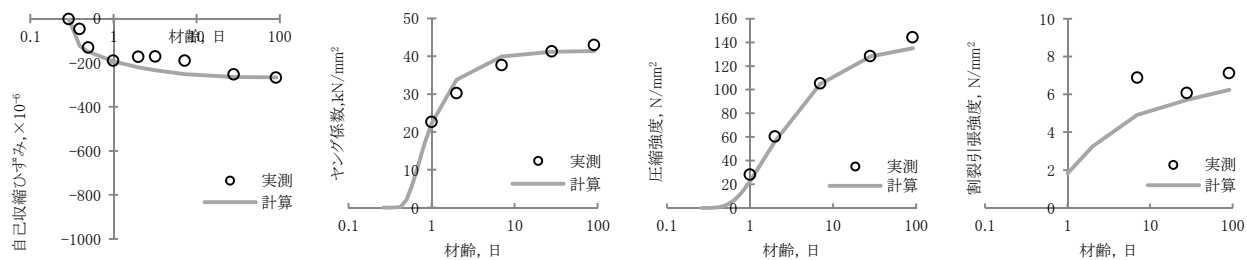


c) 応力強度比とひび割れ発生確率

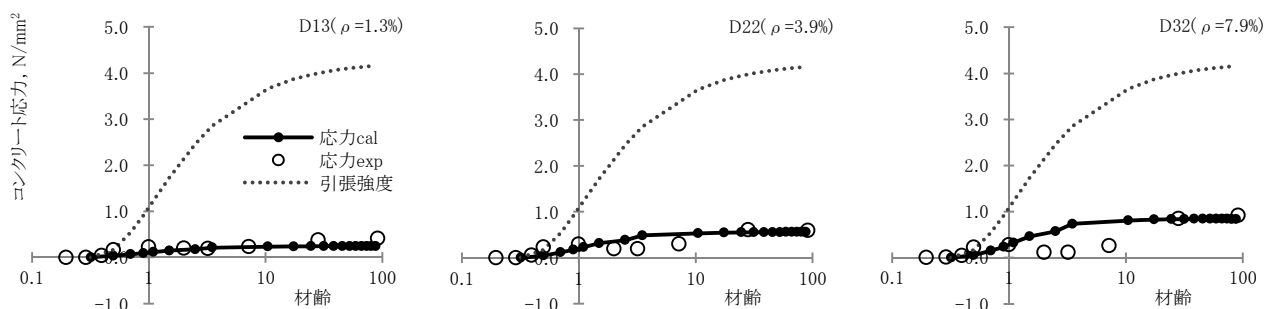
調合記号: 20

(水結合材比 20%, 収縮低減剤なし)

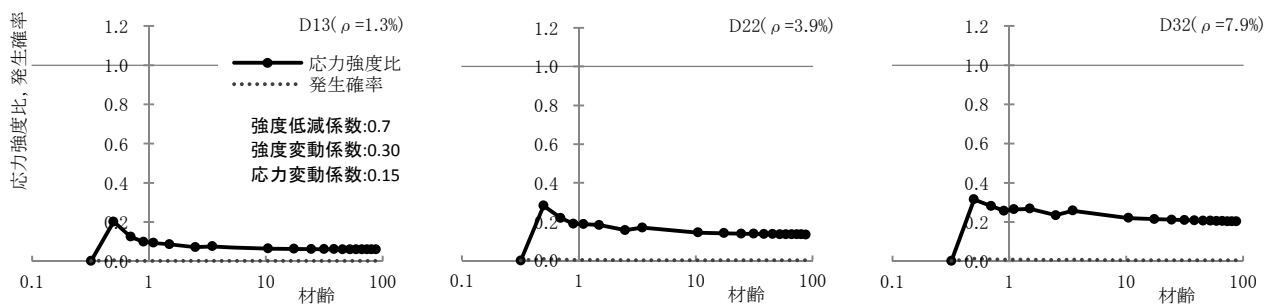
図 2.27 鉄筋拘束試験体に生じる応力等の試験結果と解析結果の比較 (1)



a) 材料データ



b) 自己収縮応力の実測値と計算値の比較

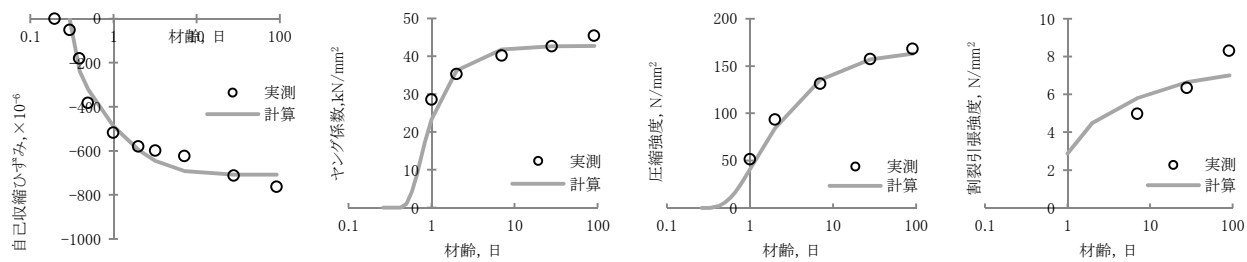


c) 応力強度比とひび割れ発生確率

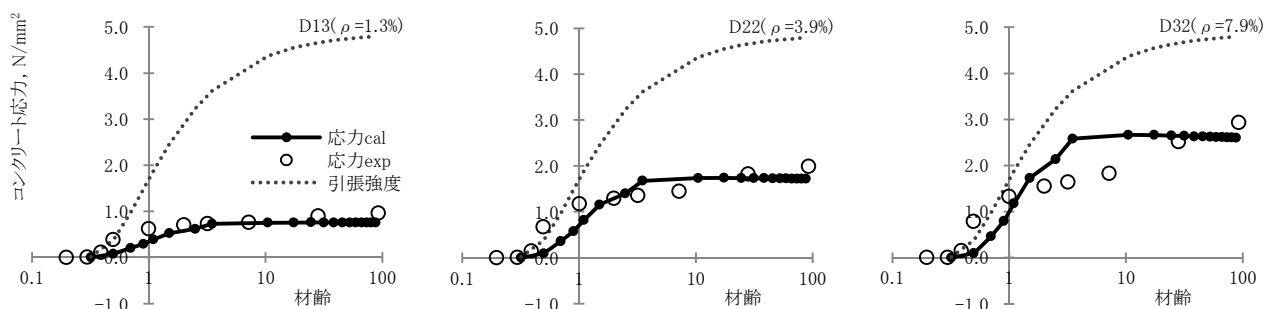
調査記号: 20T

(水結合材比 20%, 収縮低減剤使用)

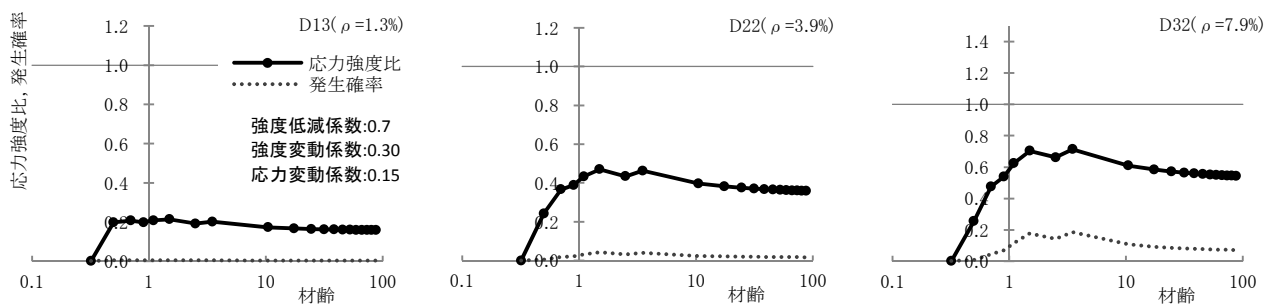
図 2.28 鉄筋拘束試験体に生じる応力等の試験結果と解析結果の比較 (2)



a) 材料データ



b) 自己収縮応力の実測値と計算値の比較

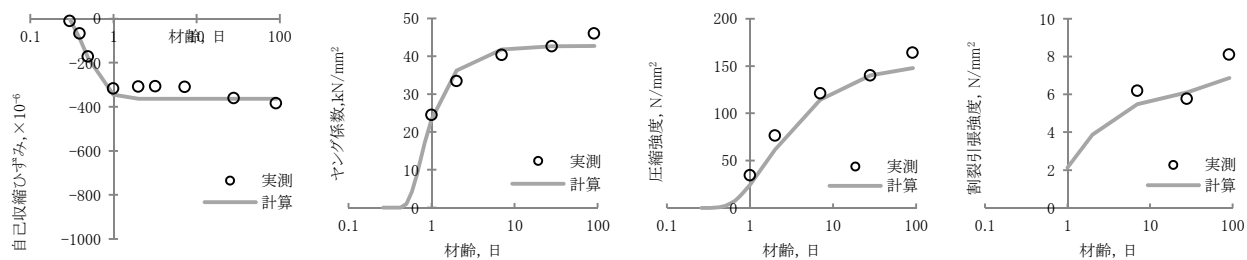


c) 応力強度比とひび割れ発生確率

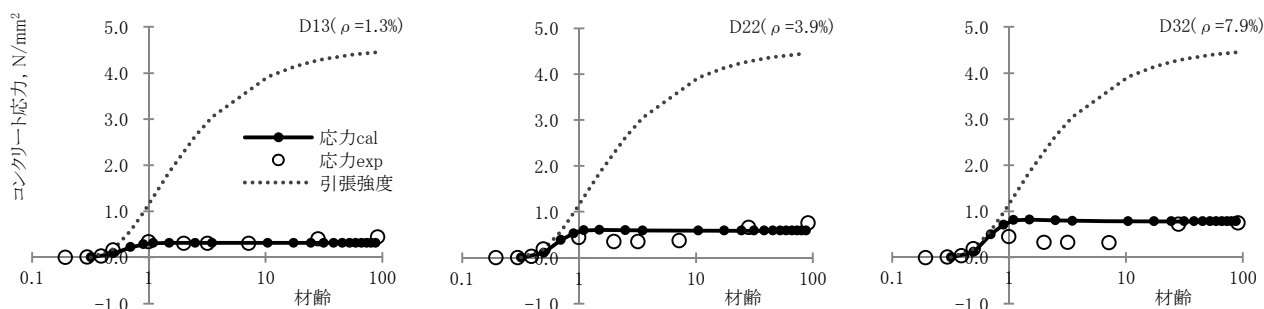
調合記号:17

(水結合材比 17%, 収縮低減剤なし)

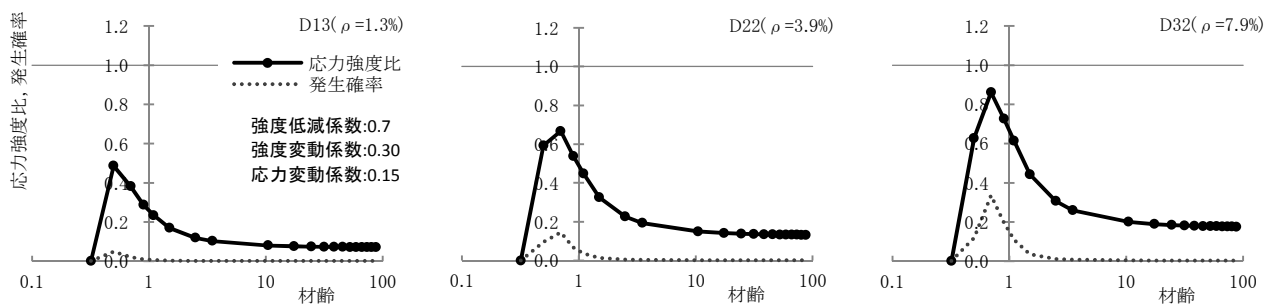
図 2.29 鉄筋拘束試験体に生じる応力等の試験結果と解析結果の比較 (3)



a) 材料データ



b) 自己収縮応力の実測値と計算値の比較

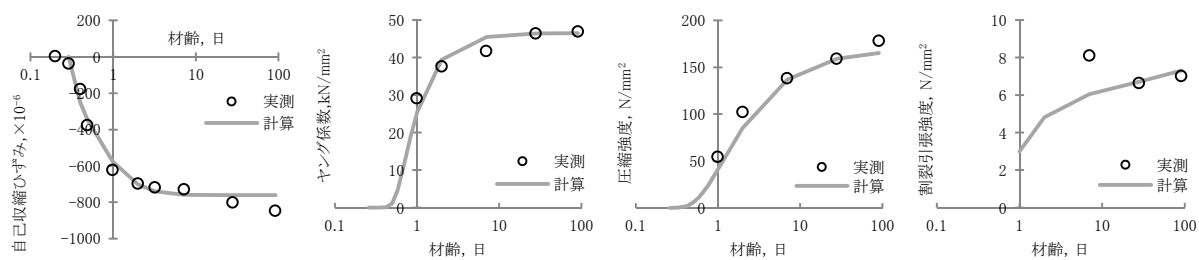


c) 応力強度比とひび割れ発生確率

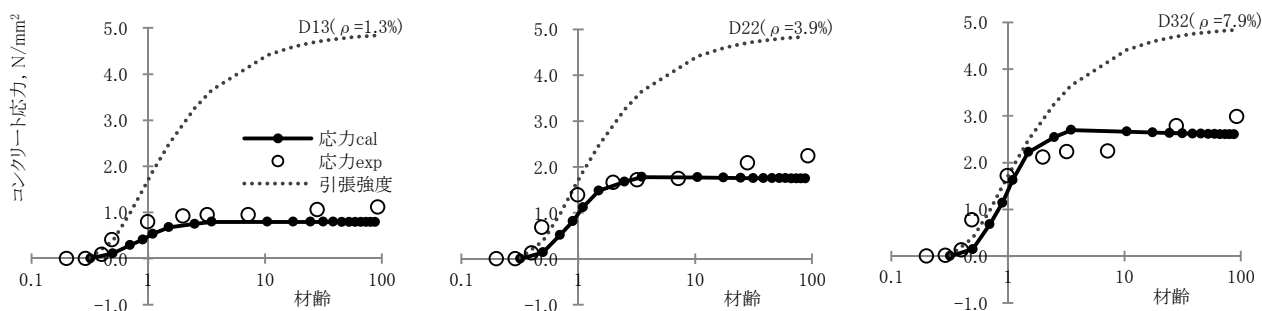
調合記号: 17T

(水結合材比 17%, 収縮低減剤使用)

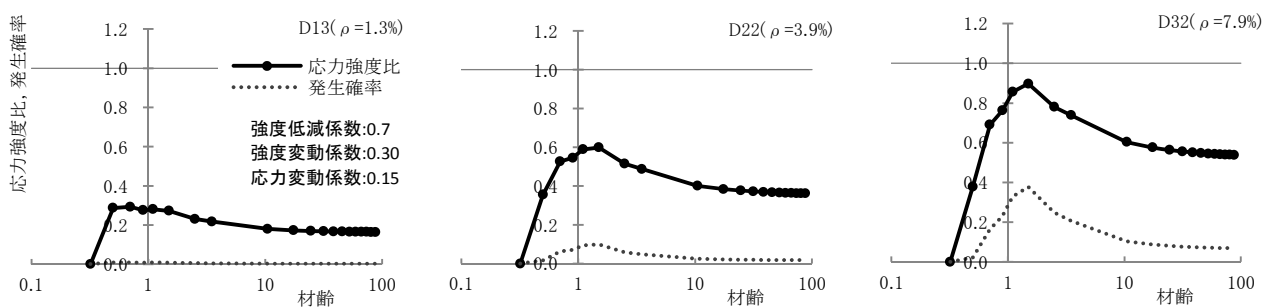
図 2.30 鉄筋拘束試験体に生じる応力等の試験結果と解析結果の比較 (4)



a) 材料データ



b) 自己収縮応力の実測値と計算値の比較

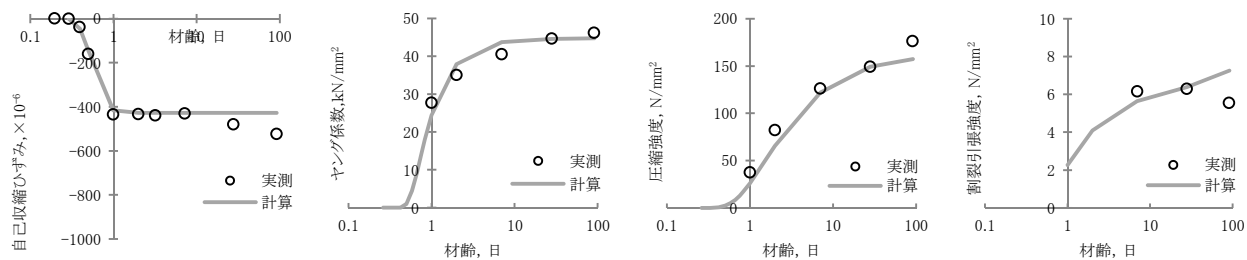


c) 応力強度比とひび割れ発生確率

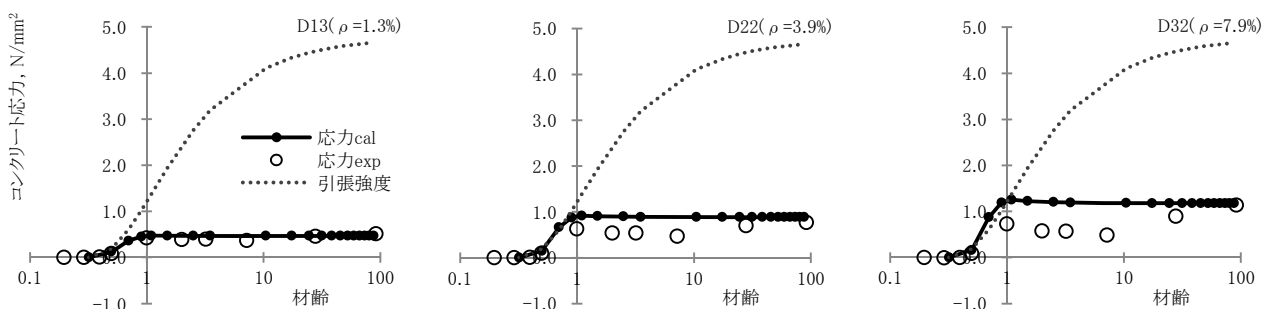
調査記号:15

(水結合材比 15%, 収縮低減剤なし)

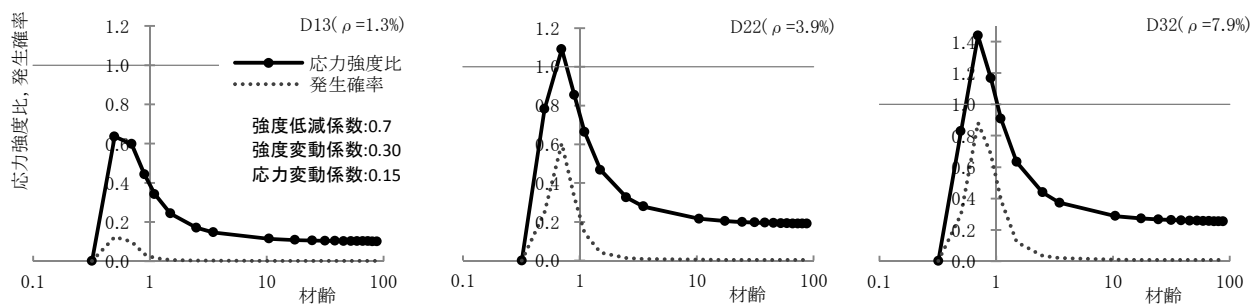
図 2.31 鉄筋拘束試験体に生じる応力等の試験結果と解析結果の比較 (5)



a) 材料データ



b) 自己収縮応力の実測値と計算値の比較



c) 応力強度比とひび割れ発生確率

調査記号: 15T

(水結合材比 15%, 収縮低減剤使用)

図 2.32 鉄筋拘束試験体に生じる応力等の試験結果と解析結果の比較 (6)

2.4 まとめ

本章では、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、無水せっこう、シリカフェュームをあらかじめ混合した高強度用セメントを用いた高強度コンクリートに対する収縮低減剤の効果を把握するとともに、若材齢ヤング係数試験、拘束度が異なる鉄筋拘束試験を実施し、収縮拘束応力の計算方法について検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) 収縮低減剤は全て水に置換して用いたが、収縮低減剤を用いると同一スランプフローを得るための高性能減水剤の使用量はやや少なくなる
- 2) 自己収縮ひずみは、材齢 1 日までに急速に増加する。また、水結合材比が小さいほど自己収縮ひずみは大きくなるが、特に若材齢においてその傾向は顕著である。材齢 1 日から材齢 6 か月の収縮ひずみの増加量は、収縮低減剤を用いない場合 $160 \sim 190 \times 10^{-6}$ 程度に対して、収縮低減剤を用いた場合 $20 \sim 40 \times 10^{-6}$ となり、収縮低減剤は、材齢初期の急速な自己収縮を抑えるとともに、その後の増加率も抑制する。収縮低減剤による低減率は、若材齢ほど、水結合材比が大きいほど大きく、収縮低減剤を使用していないコンクリートのひずみ量に対して、 $W/B=20\%$ は約 $50 \sim 60\%$ の減、 $W/B=17\%$ は約 $40 \sim 50\%$ の減、 $W/B=15\%$ は約 $30 \sim 40\%$ の減となった。
- 3) 拘束試験において、コンクリートの応力値に変化が生じるのは、ほぼ凝結の終結時間からであり、応力は自己収縮ひずみと同様に材齢 1 日までに急速に増加する。また、収縮低減剤を用いると、材齢 1 日において $50 \sim 70\%$ 程度、材齢 6 か月では $30 \sim 50\%$ 程度に低減する。収縮低減剤を用いたコンクリートの応力は、材齢 1 日から一旦低下する場合がある。
- 4) 収縮低減剤を用いた場合の材齢 1 日強度はやや遅延する。ヤング係数は、始発時には 0.05 kN/mm^2 以下、終結時には 0.1 kN/mm^2 程度と十分小さいが、自己収縮ひずみと同様に急速に増大し、材齢 0.6 日には 3 kN/mm^2 程度、材齢 1 日には 25 kN/mm^2 程度に達する。
- 5) 圧縮強度、ヤング係数、クリープ特性、自己収縮ひずみ、線膨張係数について、数式化を検討した。圧縮強度発現式には収縮低減剤の影響が認められたが、ヤング係数の数式には大きな影響は無かった。
- 6) これらの材料データを用いて step by step 法で高強度コンクリートのひび割れ発生確率を求めた。この結果、水結合材比 17% および 15% の場合は、拘束が高い場合に、収縮低減剤の有無にかかわらずひび割れ発生確率が高いケースが見られた。仮に収縮低減剤を用いたコンクリートにひび割れが生じて、収縮量が小さいことからひび割れの量を減ずることが可能であるため、水結合材比 17% 以下の領域では収縮低減剤の使用が必要であると考えられた。

第2章 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：自己収縮委員会報告書，pp.93-113，1996.11
- 2) 黒岩秀介，渡邊悟士，陣内浩，並木哲：150N/mm²級コンクリートの自己収縮と拘束応力について，日本建築学会学術講演梗概集 A-1，pp.389-390，2005.7
- 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，Vol.73，No.629，pp.1035-1042，2008.7
- 4) 日本建築学会：膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状，p.1862013.7
- 5) 石田征男，佐藤嘉昭，清原千鶴，永松静也：モルタルおよびセメントペースト試験体の線膨張係数に関する研究，日本建築学会九州支部研究報告，第 36 号，pp.81-84，1997.3
- 6) 丁海文，河野広隆，渡辺博志，佐藤重一：高強度コンクリートの線膨張係数に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vo l.22，N o.2，pp.955-960，2000
- 7) 萩原伸治，梶田佳寛，中村成春：高強度コンクリートの若材齢における熱膨張係数に関する実験，日本建築学会構造系論文集，No.572，pp.9-16，2003.10
- 8) 楊楊，佐藤良一：高強度コンクリートの長さ変化の成分分離とその評価，セメント・コンクリート，No.655，pp.41-47，2002.7

第3章 収縮低減剤を用いた高強度コンクリート模擬柱部材の長期材齢における収縮およびコア強度

3.1 はじめに

コンクリートの高強度化に伴い、自己収縮が高強度コンクリートの懸念材料となっている。このような背景から、 $F_c100\text{N/mm}^2$ を超えるコンクリートの場合は、多くの建築物において何らかの自己収縮対策が採用されており¹⁾、収縮低減剤も採用されている。しかし、収縮低減剤が高強度コンクリートの自己収縮対策に用いられたのは比較的最近であり、収縮低減剤を用いた高強度コンクリートの長期材齢における収縮ひずみやコア強度に関する報告はほとんどない。

本章は、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、無水せっこう、シリカフュームを混合した高強度コンクリート用セメント（以下、スラグせっこう系高強度用セメント）を用いた水結合材比 16%で収縮低減剤を混和した高強度コンクリート模擬柱部材について、材齢 7 年までの収縮ひずみおよびコア強度の調査結果を示すものである。模擬柱部材は、冬期、標準期、夏期の 3 シーズンに作製し、材齢 7 日、28 日、56 日、91 日、182 日のコア強度調査²⁾し、その後長期間保管しているものである。本調査の結果、コア強度は、打込みの季節、水結合材比、収縮低減剤の使用の有無にかかわらず増進が認められること、一方、収縮はいずれも収束の傾向を示し、室内試験と同様の収縮低減剤の効果が長期材齢においても認められることなどのデータが得られたので、その詳細について示す。

3.2 調査計画

3.2.1 要因と水準

コンクリートの水結合材比は 150N/mm^2 級を対象とする水結合材比 16%と比較用の水結合材比 21%の 2 水準である。模擬柱部材は冬期、標準期、夏期の 3 シーズンに製造し、表 3.1 に示すように、冬期の試験は「w」、標準期は「a」、夏期は「s」の添え字で区別した。また、水結合材比 16%において収縮低減剤を使用した調合は「SRA」、収縮低減タイプの高性能減水剤を用いた調合は「SPSR」とした。

コンクリートの使用材料および調合を表 3.2 に示す。結合材は、普通ポルトランドセメント、スラグせつこう系混和材³⁾、シリカフュームを 7:2:1 で混合したスラグせつこう系高強度用セメントを用いた。水結合材比 16%の骨材は、安山岩系の碎石・砕砂を用いた。水結合材比 21%の骨材は、安山岩系の碎石と天然砂を用いた。化学混和剤は、ポリカルボン酸エーテル系の高性能減水剤を用い、「SPSR」には 2.2 で使用したグリコールエーテル系化合物による収縮低減成分が配合された高性能減水剤（収縮低減タイプ）を用いた。また、「SRA」には、低級アルコール系の収縮低減剤を 7.0kg/m^3 使用した。なお、化学混和剤および収縮低減剤は、水結合材比 16%の化学混和剤の固形分を除き、単位水量の一部とみなした。また、火災時の爆裂対策として、水結合材比 16%の場合は有機繊維を 0.22vol%、水結合材比 21%の場合は 0.11vol%混入した。

コンクリートの製造は実機ミキサで行い、製造量は 1 調合あたり 3m^3 とした。練混ぜはモルタル先練り方式とし、練混ぜ時間は水結合材比 16%ではモルタル 120 秒、粗骨材投入後 90 秒、水結合材比 21%ではモルタル 90 秒、粗骨材投入後 60 秒を基本とした。模擬柱部材への打込みおよび供試体の採取は練上がり 90 分後に行い、表 3.3 に示すように、この時のスランプフローは $60\pm 10\text{cm}$ 、空気量は 1.4~2.5%の範囲であった。

表 3.1 コンクリートの種類

調合記号	打込み季節	水結合材比	収縮低減材料
21w	冬期	21%	—
16w		16%	—
16w-SRA			低級アルコール系収縮低減剤 (SRA)
21a	標準期	21%	—
16a		16%	—
16a-SRA			低級アルコール系収縮低減剤 (SRA)
16a-SPSR			高性能減水剤 (収縮低減タイプ) (SPSR)
21s	夏期	21%	—
16s		16%	—
16s-SRA			低級アルコール系収縮低減剤 (SRA)
16s-SPSR			高性能減水剤 (収縮低減タイプ) (SPSR)

表 3.2 コンクリートの使用材料，調合

季節	調合記号	W/B %	空気 量 %	W kg/m ³	B kg/m ³	S kg/m ³		G1 kg/m ³	SRA kg/m ³	SP/B %		Fiber vol%
						S1	S2			SP1	SP2	
冬 期	21w	21	2	155	738	603	—	912	—	1.3	—	0.11
	16w	16	1.5	150	938	—	548	817	—	1.475	—	0.22
	16w-SRA	16	1.5	150	938	—	548	817	7	1.4	—	0.22
標 準 期	21a	21	2	155	738	603	—	912	—	1.4	—	0.11
	16a	16	1.5	150	938	—	548	817	—	1.675	—	0.22
	16a-SRA	16	1.5	150	938	—	548	817	7	2	—	0.22
	16a-SPSR	16	1.5	150	938	—	548	817	—	—	2	0.22
夏 期	21s	21	2	155	738	603	—	912	—	1.75	—	0.11
	16s	16	1.5	150	938	—	548	817	—	3.5	—	0.22
	16s-SRA	16	1.5	150	938	—	548	817	7	3.5	—	0.22
	16s-SPSR	16	1.5	150	938	—	548	817	—	—	3.25	0.22

B；スラグせつこう系高強度用セメント（密度 2.99g/cm³，普通ポルトランドセメント：スラグせつこう系混和材：シリカフューム＝7：2：1）
 S1；千葉県君津市産山砂（表乾密度 2.61g/cm³，吸水率 1.51%），
 S2；山梨県大月市産安山岩砕砂（表乾密度 2.62g/cm³，吸水率 2.47～2.91%），
 G1；山梨県大月市産安山岩砕石（Gmax20mm，表乾密度 2.62～2.63g/cm³，吸水率 2.26～2.68%）
 SRA；低級アルコールアルキレンオキシド付加物の収縮低減剤
 SP1；ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤
 SP2；ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤＋グリコールエーテル系収縮低減成分
 Fiber；有機繊維

化学混和剤および収縮低減剤は，W/B=0.16 の化学混和剤の固形分を除き，単位水量の一部とした。

表 3.3 打込み時（練上がりから 90 分後）のフレッシュ性状

調合記号	SP/B %	SLF cm	Ts50 秒	Ts 秒	AIR %	CT ℃	Temp ℃	UM t/m ³
21w	1.3	51.0	37.3	68	1.4	14	11	2.449
16w	1.475	65.8	28.4	189	1.5	19	12	2.472
16w-SRA	1.4	62.3	33.7	201	1.8	18	10	2.465
21a	1.4	56.5	22.9	77	1.7	24	21	2.453
16a	1.675	56.0	57.5	-	2.1	27	24	2.468
16a-SRA	2	62.0	42.4	166	2.1	27	22	2.465
16a-SPSR	2	60.5	44.2	187	2.0	27	24	2.463
21s	1.75	56.0	17.1	76	1.8	30	23	2.430
16s	3.5	57.3	75.9	247	2.5	34	26	2.453
16s-SRA	3.5	60.0	49.2	246	1.9	33	25	2.463
16s-SPSR	3.25	63.0	32.4	242	1.8	35	27	2.468

SP/B:高性能減水剤使用量，SLF:スランプフロー，Ts50:50cm フロー到達時間，Ts:フロー停止時間，AIR:空気量，
 CT:コンクリート温度，Temp:気温，UM:単位容積質量

3.2.2 試験項目および方法

主な試験項目を表 3.4 に示す。

表 3.4 試験項目

試験項目		詳細
フレッシュ性状		スランプフロー，空気量，温度，単位容積質量
圧縮強度 ($\phi 100 \times 200\text{mm}$)	標準養生	材齢 7 日，28 日，56 日，91 日 (n=3)
	模擬柱部材 コア	材齢 7 日，28 日，56 日，91 日 (n=5)，182 日 (n=10)， 7 年 (n=5,10)
自己収縮ひずみ ($100 \times 100 \times 400\text{mm}$)	20℃封かん	埋込型ひずみ計による (1 本)
	簡易断熱	埋込型ひずみ計による (1 本: $400 \times 400 \times 700\text{mm}$ の EPS 内)
模擬柱部材のひずみ	—	埋込型ひずみ計による (柱中心と表層から 50mm の各 1 か所)
分析等	模擬柱部材 コア (長期材齢)	圧縮強度用コア試験体の含水率 熱分析 (TG-DTA) 粉末 X 線回折 (XRD) 不溶残分

(1) 供試体による圧縮強度および自己収縮ひずみ

供試体 ($\phi 100 \times 200\text{mm}$) による圧縮強度試験は，標準養生材齢 7 日，28 日，56 日，91 日 (供試体数 n=3) に行った。また，供試体 ($100 \times 100 \times 400\text{mm}$) による自己収縮ひずみおよび内部温度については，中央部に低弾性 (弾性係数 40N/mm^2) の埋込型ひずみ計および T 型熱電対を埋設して，20℃条件および厚さ 200mm の発泡スチロールによる簡易断熱条件にて，調査毎に各 1 体の測定を行った。コンクリートの打込みは，型枠の内側にテフロンシートを敷いて，コンクリートと型枠の間に生じる摩擦を低減して行った。20℃条件の供試体の養生は，打込みから脱型までを打込み面にビニルシートを密着させてその上から湿布で覆う湿潤養生とし，材齢約 24 時間の脱型以降を，全面をアルミ箔粘着テープでシールする封かん養生とした。なお，いずれの供試体も，打込み以降，20℃，80%RH の恒温恒湿室内で保管した。

(2) 模擬柱部材の温度，ひずみ，コア強度および含水率，

模擬柱部材の一例を図 3.1 に示す。模擬柱部材は，断面寸法を $1000 \times 1000\text{mm}$ ，高さを 1100mm とし，上下に厚さ 150mm の発泡スチロールを設けて上下方向の熱の出入りを遮断することにより実際の柱の中央部を模擬するものとした。模擬柱部材には T 型熱電対を中心部，表層から 50mm およびその中間部に埋設し，水和熱による温度履歴を測定した。また，中心部および表層から 50mm の位置に低弾性の埋込型ひずみ計を垂直方向に埋設し，自己収縮などによるひずみの測定を行った。

コアによる構造体コンクリートの圧縮強度試験は、材齢 7 日、28 日、56 日、91 日、182 日および 7 年に実施した。材齢 91 日までのコアは、模擬柱部材の断面中心とコーナーの中間部分から 1 本採取し(図 3.1 の中間)、切断後、端面研磨した 5 個のコア供試体を用いた。材齢 182 日については、断面中心付近(図 3.1 の内)およびコーナー付近(図 3.1 の外)より各 1 本採取し、それぞれから 5 個、合計 10 個のコア供試体を用いた。材齢 7 年については、標準期については断面中心付近およびコーナー付近から各 1 本採取し、合計 10 個のコア供試体を用い、夏期および冬期については中心付近から採取した 5 個の供試体を用いた。後述するが、標準期の断面中心付近およびコーナー付近のコアの強度は、断面中心付近のほうがやや低いもののその差は小さいため、コア採取位置の違いが平均値に大きな影響を及ぼすことはなかった。

材齢 7 年のコア供試体については、強度試験後の破片を用いて 105℃乾燥による質量含水率を測定した。図 3.1 に示したように、コア供試体は長さ 1100mm の 1 本のコアから 5 個作製したが、含水率は、最上段、中段、最下段の 3 個を用い、これらの平均とした。強度試験後の破片は、約 400g～1500g と様々の大きさであったが、いずれも恒量になるまで 105℃の乾燥炉で乾燥させて絶乾質量を求め、乾燥による減量分を絶乾質量で除して質量含水率とした。

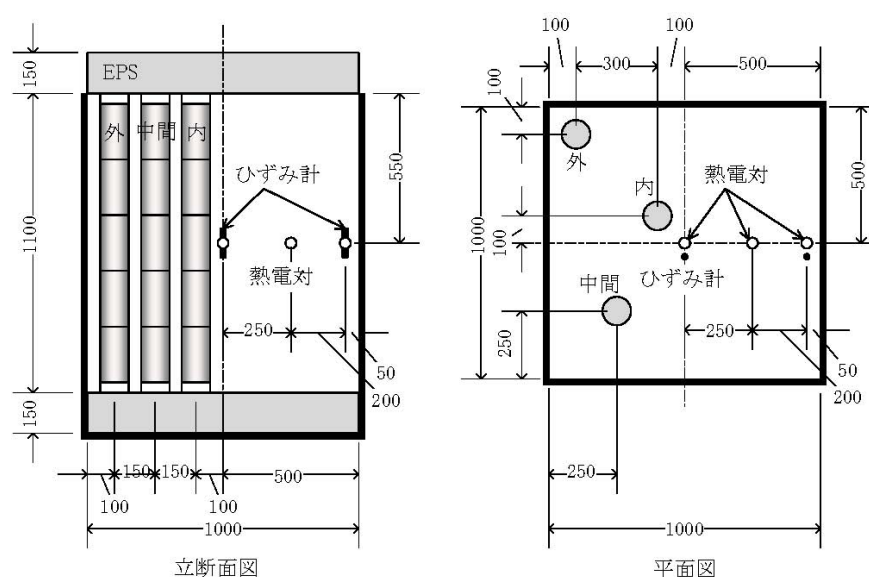


図 3.1 模擬柱部材の一例

(3) 熱分析および粉末 X 線回折分析

標準期に作製した模擬柱部材から材齢 8 年目にコアを採取し、熱分析 (TG-DTA) および粉末 X 線回折分析 (XRD) を行い、長期材齢における水和生成物の確認を行った。分析用のコアは模擬柱部材の側面から径 ϕ 75mm で深さ 150mm まで抜き取り、深さ 100~150mm の部分を分析用試料として使用した。分析の前処理は、コア供試体を約 6mm の円盤に切断し、アセトンに 30 分程度浸漬して水和を停止した後、2 週間程度の D-dry 乾燥を行い、粗骨材を除去しながら粗粉碎し、その後ふるい網 $75\mu\text{m}$ を全通するよう微粉碎した。

TG-DTA は、昇温速度 $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 、窒素フロー環境の条件で室温から 1000°C までの測定を行った。TG-DTA では、水酸化カルシウム量、炭酸カルシウム量、結合水量について、収縮低減剤の有無の比較を目的として行った。水酸化カルシウム量は、 450°C 付近の吸熱ピークに着目し、 $400\sim 500^\circ\text{C}$ の熱重量減量値を $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が CaO と H_2O に分解する際に H_2O が減量したものとして換算した。炭酸カルシウム量は、 700°C 付近で CaCO_3 が CaO と CO_2 に分解して、 CO_2 分が減量したものとして換算した。結合水量については、 105°C から 1000°C の減量から求めた。なお、分析に用いた試料はコンクリートを粉碎したものであるため、試料中に多くの骨材が含まれる。そこで、分析した試料に含まれる骨材量を推定するために、粉碎したコンクリート試料および骨材試料について希塩酸による不溶残分量を求めた。コンクリート試料中の骨材量は、コンクリート試料の不溶残分量を、骨材単独の不溶残分量で除して求めた。骨材単独の不溶残分量は、安山岩砕砂については実測の 88.1% とし、調合記号 21a に使用した千葉県君津市産山砂については、セメント協会 F-18 資料Ⅱ全国の骨材分析結果による河川系骨材の不溶残分量の平均値である 95.6% とした。

XRD は、Bruker AXS 社の D8 ADVANCE にて、ターゲット $\text{CuK}\alpha$ 、管電圧 40kV、管電流 40mA、走査範囲 $4\sim 70^\circ 2\theta$ 、ステップ幅 0.02° 、スキャンスピード $1^\circ/\text{min}$ の条件で測定した。試料には、内部標準物質としてコランダム ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) を内割で 10wt% 混合した。XRD 測定データから、解析ソフト TOPAS4 (Bruker AXS 社) のリートベルト解析によって、クリンカー鉱物、水和生成物および骨材鉱物の含有量を定量した。解析対象は、 C_3S (mono, triclinic), C_2S , Gypsum, Bassanite, Anhydrite, Periclase, エトリンガイト (Ettringite), モノサルフェート (Monosulphate), 水酸化カルシウム (Portlandite), 炭酸カルシウム (Calcite), Anorthite, Montmorillonite, Quartz, Epistilbite, Anorthite sodian, Brownmillerite (Si,Mg) とした。

3.3 調査結果および考察

3.3.1 模擬柱部材の水和熱による温度履歴

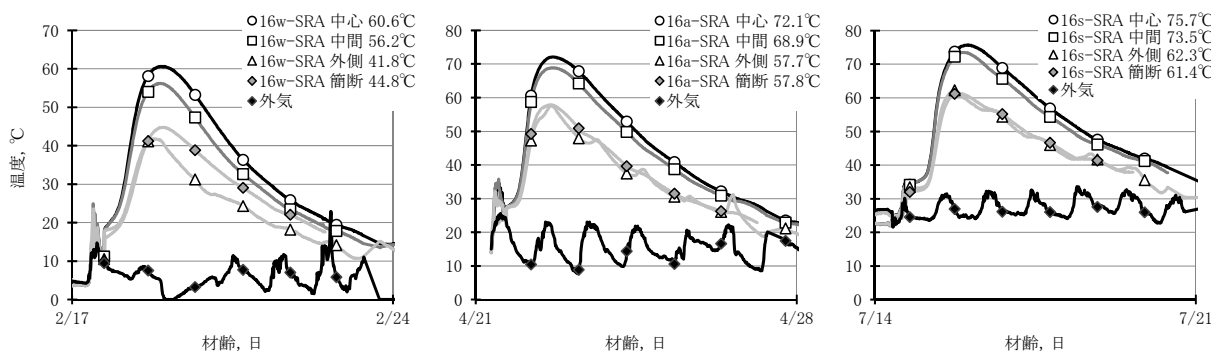
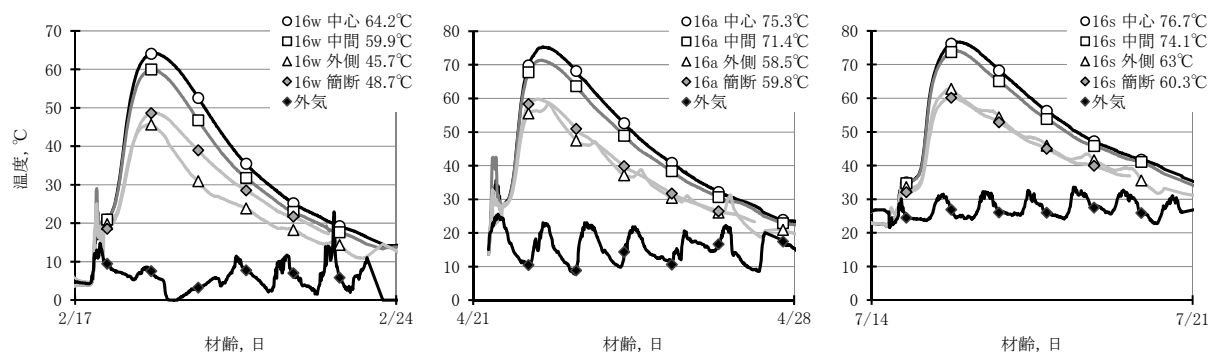
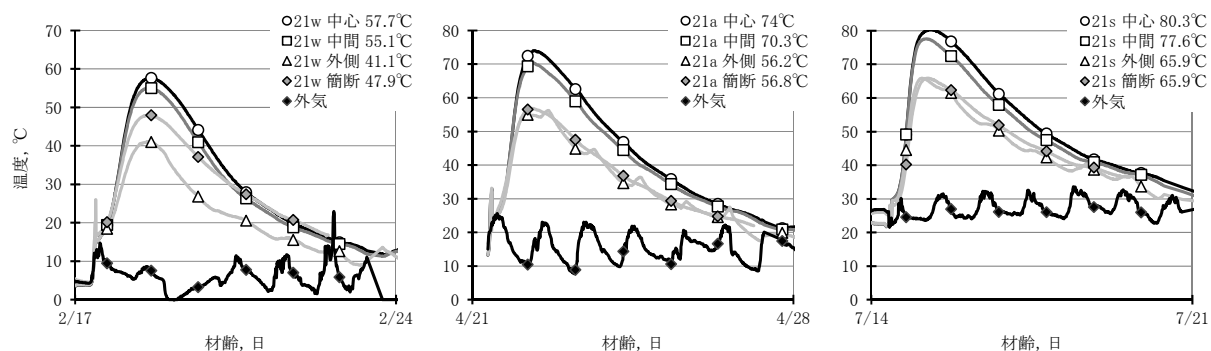
模擬柱部材の温度履歴を図 3.2 に示し、各調合の最高温度および打込み温度からの温度上昇量を表 3.5 に示す。同表には、温度上昇勾配を表すものとして、測定間隔 15 分間における温度上昇量の最大値も併記した。

打込み時のコンクリート温度は、練混ぜの順番や日内の気温変化の影響もあるが、全ての季節で水結合材比 16%のほうが水結合材比 21%より 3～5℃程度高くなった。また、最高温度は、全ての調合で夏期、標準期、冬期の順となった。しかし、夏期の水結合材比 16%の調合（16s、16s-SRA、16s-SPSR）は、高性能減水剤の使用量が多くなったので、温度上昇の開始時期がやや遅延するとともに温度上昇勾配が緩やかになり、水結合材比 21%の調合（21s）より最高温度が低くなった。水結合材比 16%の調合の比較では、収縮低減剤（SRA）および収縮低減タイプの高性能減水剤（SPSR）を使用した場合の最高温度は、収縮低減剤を使用していない調合よりも低くなった。また、温度上昇勾配も SRA および SPSR を用いると緩やかになった。

表 3.5 模擬柱部材の最高温度および温度上昇量

調合記号	W/B %	打込 温度 ℃	気温 ℃	模擬柱部材の温度 ℃						簡易断熱 ℃		
				中心			中間		外側			
				最高	(上昇量)	上昇 勾配	最高	(上昇量)	最高	(上昇量)	最高	(上昇量)
21w	21	14	11	58	(44)	0.9	55	(41)	41	(27)	48	(34)
16w	16	19	12	64	(45)	1.1	60	(41)	46	(27)	49	(30)
16w-SRA	16	18	10	61	(43)	0.9	56	(38)	42	(24)	45	(27)
21a	21	24	21	74	(50)	1.4	70	(46)	56	(32)	57	(33)
16a	16	27	24	75	(48)	1.7	71	(44)	59	(32)	60	(33)
16a-SRA	16	27	22	72	(45)	1.4	69	(42)	58	(31)	58	(31)
16a-SPSR	16	27	24	67	(40)	1.2	64	(37)	56	(29)	54	(27)
21s	21	30	23	80	(50)	1.9	78	(48)	66	(36)	66	(36)
16s	16	34	26	77	(43)	1.6	74	(40)	63	(29)	60	(26)
16s-SRA	16	33	25	76	(43)	1.4	74	(41)	62	(29)	61	(28)
16s-SPSR	16	35	27	75	(40)	1.3	72	(37)	61	(26)	60	(25)

*：測定間隔 15 分間における温度上昇量の最大値



左から,
冬期, 標準期, 夏期

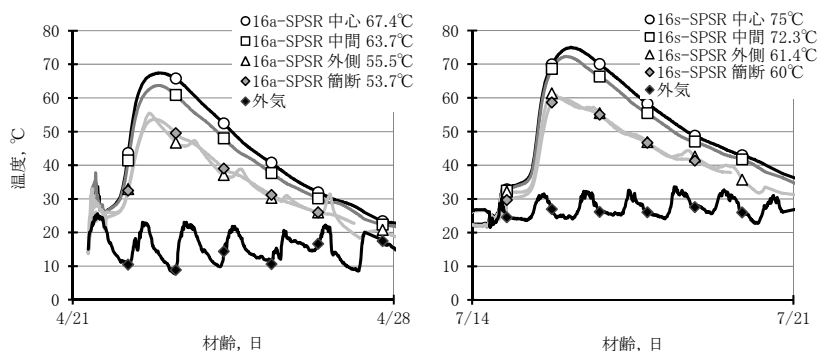


図 3.2 模擬柱部材の温度履歴

3.3.2 模擬柱部材のコアによる強度発現および含水率

模擬柱部材のコアの強度発現を図 3.3 に調合毎に示す。標準期の強度がいずれの調合もやや高い傾向を示すが，打込みの季節，水結合材比，収縮低減剤の使用の有無にかかわらず，材齢の対数軸上で材齢 7 年まではほぼ直線的な強度増進が認められた。また，直線の勾配は収縮低減剤を用いた調合のほうがやや大きい傾向を示し，収縮低減剤を用いた調合の強度は，材齢 91 日の時点では無混入と同等かやや低いが，材齢 7 年では同等かやや高くなった。材齢 7 年のコア強度は，16a-SRA がもっとも高く 200N/mm²に達した。

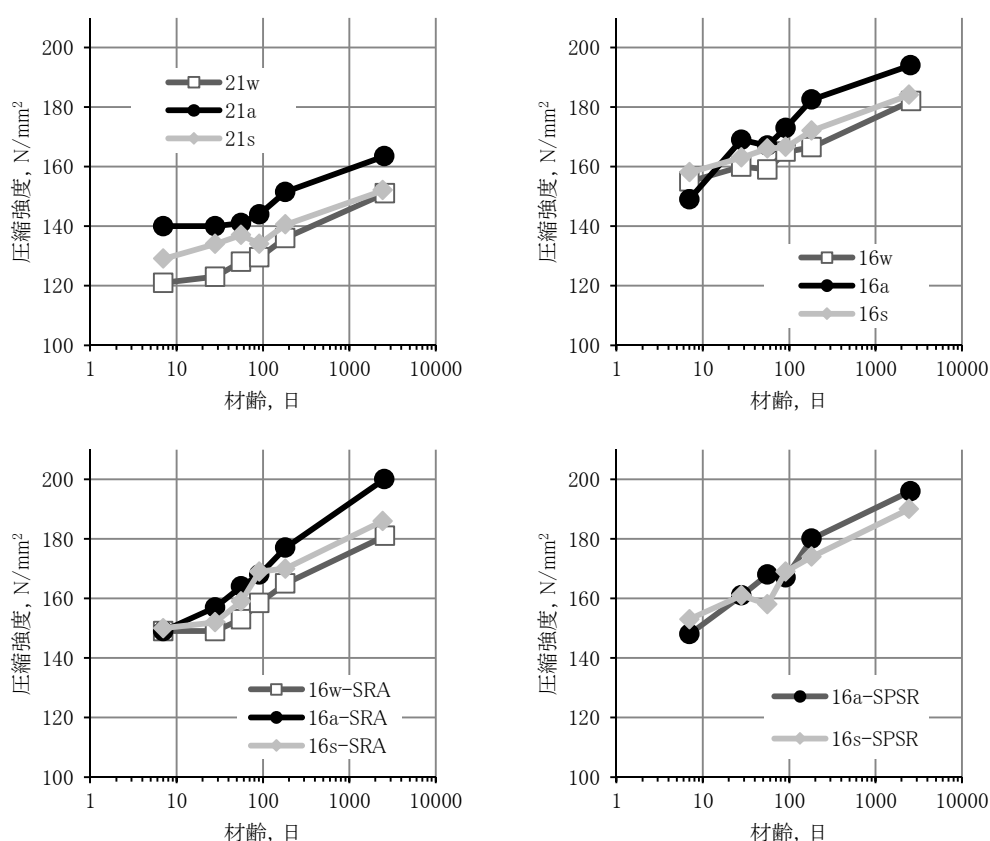


図 3.3 模擬柱部材のコアによる強度発現

材齢 91 日と材齢 7 年のコア強度の比較を図 3.4 に示す。材齢 7 年のコア強度は，すべて材齢 91 日のコア強度の 1.1～1.2 倍の範囲にあるが，水結合材比 16%の調合の比較では，収縮低減剤を用いた場合の比率は，無混入よりやや大きい傾向を示した。この強度クラスでは，一般に，標準養生の材齢 28 日の圧縮強度よりも構造体コンクリートの材齢 91 日の圧縮強度のほうが高いが，材齢 7 年のコア強度は，標準養生の材齢 28 日の強度の 1.3～1.5 倍まで達している。なお，標準期では断面中心付近およびコーナー付近の 2 か所からコア

を採取したが、断面中心付近の強度がやや低い傾向を示すものの採取位置に有意な差は認められず、平均値に大きな影響はなかった。

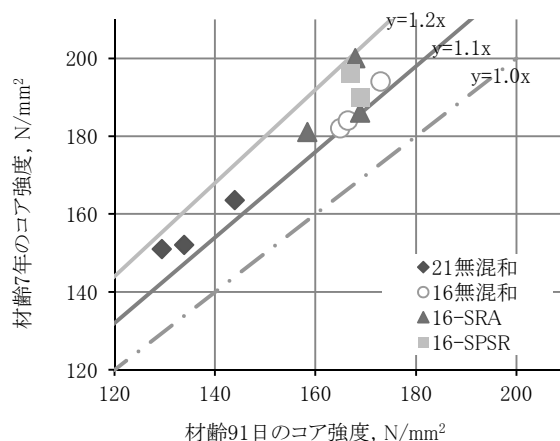


図 3.4 材齢 91 日と 7 年のコア強度

材齢 7 年のコア供試体の強度試験後の破片から求めた 105℃乾燥による質量含水率を図 3.5 に示す。質量含水率はいずれも 4%を超える高い値を示した。いずれのコンクリートもスラグせつこう系混和材を用いているためにエトリンガイトの生成量が多いことが予想される。エトリンガイトの結晶に結合している水のうち 2/3 程度の水は比較的遊離しやすく、60℃付近から骨格は崩れないものの脱水する⁴⁾とされているので、105℃乾燥による減量には結合水の一部が含まれていると考えられるが、高い含水率が長期の圧縮強度の増進に寄与したものと考えられる。水結合材比、打込みの季節、収縮低減材料の有無と含水率の関係を見ると、水結合材比 16%の質量含水率は水結合材比 21%に比べて低く、打込みの季節が冬期の場合の含水率は比較的高く、収縮低減剤（SRA）を用いた場合の含水率は無混和に比べて低いなど、強度が高いものほど含水率が低い傾向を示した。また、コーナー付近より断面中心付近のほうが含水率はやや低く、初期の水和による高温履歴の影響が長期材齢まで残っていることが確認された。

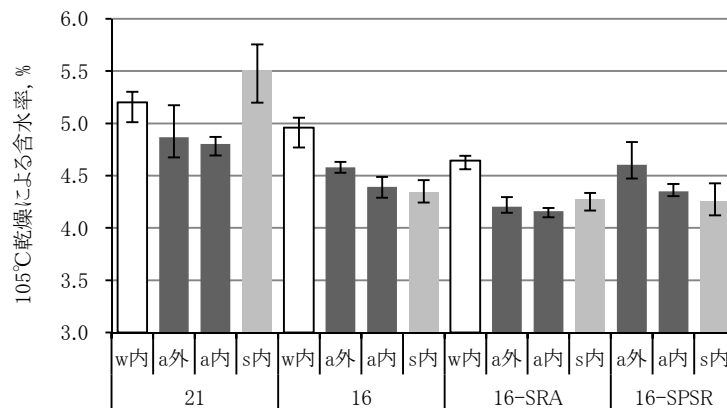
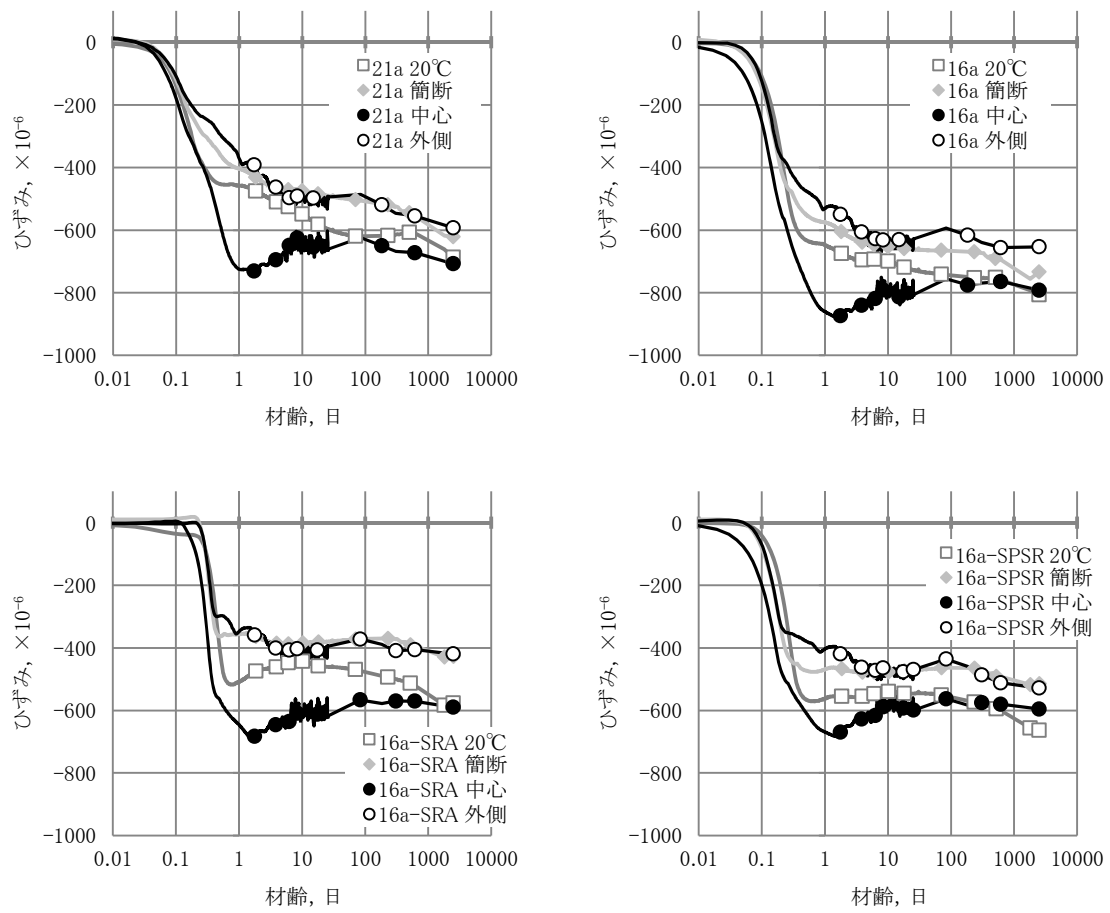


図 3.5 材齢 7 年のコアの含水率

3.3.3 模擬柱部材のひずみ変化

標準期に作製した 4 調合 20a, 16a, 16a-SRA, 16a-SPSR について、調合毎の模擬柱部材および小型供試体（100×100×400mm）のひずみ履歴を図 3.6 に示す。同図には、模擬柱部材の中心部および表層から 50mm の部分に埋設したひずみ計によるものと、20℃封かん養生した小型供試体、簡易断熱養生して温度降下後に 20℃封かん養生した小型供試体に埋設したひずみ計によるものを併記している。図中のひずみは、コンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として温度ひずみを差し引いたものとした。全体的に、最高温度が 70℃程度を超えた模擬柱部材の中心部のひずみは大きく、最高温度が 60℃程度以下の模擬柱部材の表層付近および簡易断熱養生の供試体のひずみは小さい傾向を示した。また、20℃養生の供試体のひずみは漸増の傾向を示し、材齢 7 年において、模擬柱部材の中心部のひずみとほぼ同等となった。

図 3.7 に、打込みの季節が異なる模擬柱部材のひずみの比較を、調合毎に中心部と外側の表層部に分けて示す。同図から、模擬柱部材のコア強度は長期でも増加傾向を示していたが、水結合材比 16%の収縮ひずみはほぼ収束していることが分かる。また、室内試験と同様の収縮低減剤の効果が長期材齢においても認められること、打込みの季節が異なっても最終的なひずみはほぼ等しくなる傾向があることなどが確認された。



(20°C：封かん，簡断：簡易断熱後 20°C封かん，中心：構造体中心，外側：構造体表層から 50mm)

図 3.6 供試体および模擬柱部材のひずみの比較

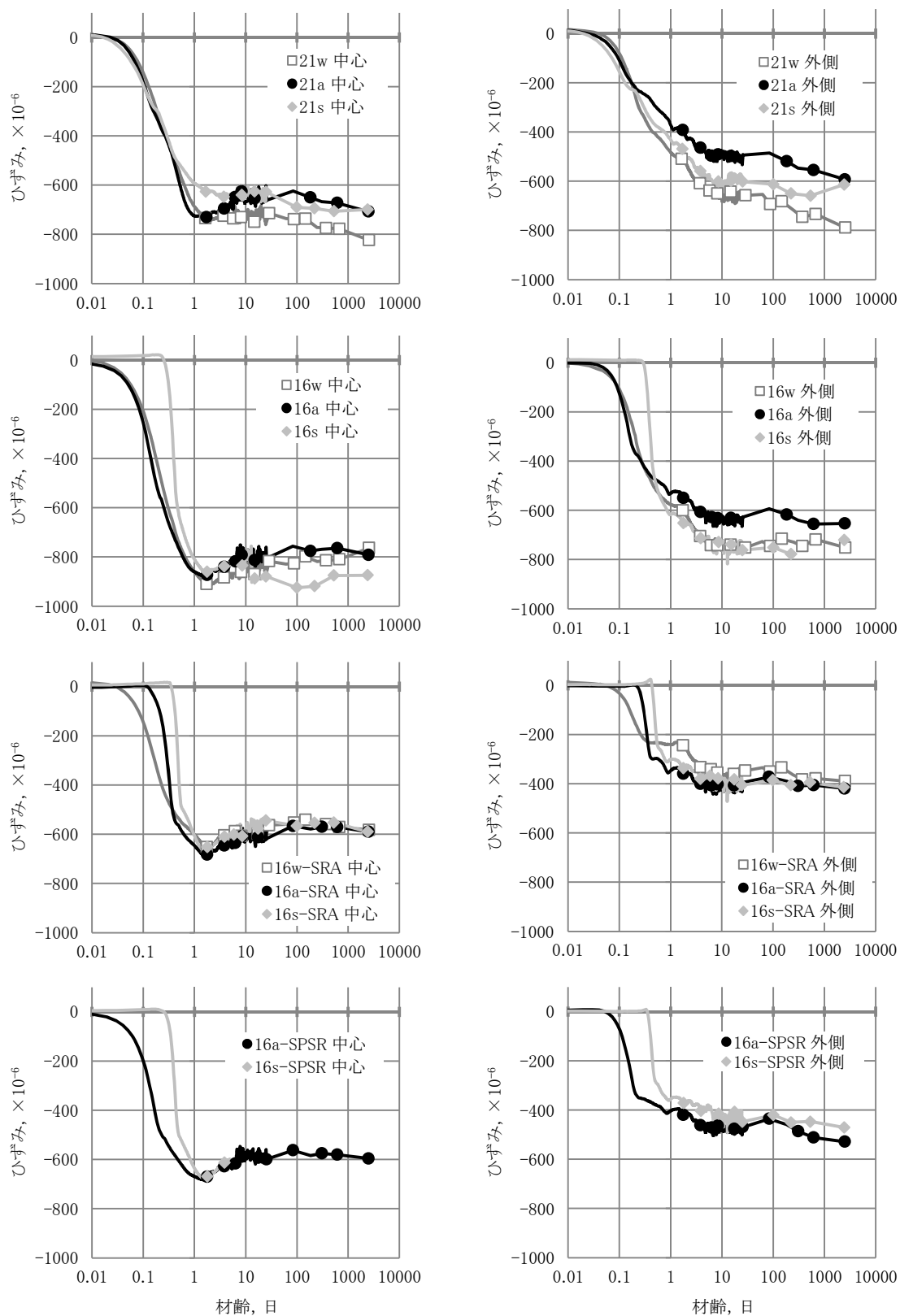


図 3.7 打込みの季節が異なる模擬柱部材のひずみの比較

3.3.4 熱分析および粉末X線回折分析

材齢 8 年目に、標準期に作製した模擬柱部材 4 体からコアを採取し、粗骨材を取り除きながら粉砕した試料について、熱分析 (TG-DTA) および粉末 X 線回折 (XRD) 析を行った。

TG-DTA 曲線から求めた水酸化カルシウム量、炭酸カルシウム量、結合水量を図 3.8 に示す。450℃付近および 700℃付近の吸熱ピークは非常に小さいものであったが、水酸化カルシウム量は 400～500℃の減量から換算した。炭酸カルシウム量は、700℃付近の DTA および TG の微分曲線から区間を定め、その区間の減量から換算した。結合水量は、105～1000℃の減量値から求めた。同図は、試料に含まれる骨材量を希塩酸による不溶残分から推定し、骨材を除いたセメントペーストに対する比率で表した。同図から、水酸化カルシウム量は、収縮低減剤を用いたものがわずかに少ないものの、大差は無いことが確認された。第 4 章の実験において、収縮低減剤の有無を実験条件にして、20℃養生の材齢 48 時間、28 日、91 日の水酸化カルシウム量を TG-DTA によって求めているが、水酸化カルシウムの含有量は、本章と同様に、収縮低減剤を用いてもほぼ同等の結果が得られている。模擬柱部材の試料は、比較的表面から近い位置（表面から 100～150mm）で採取したコアによるものであり、表層から 50mm の温度測定結果によれば、材齢約 1 日に最高 60℃程度の水和熱による高温履歴を経験していると想定される。シリカフェームを用いた高強度コンクリートの水酸化カルシウム量は、初期に高温履歴を受けた場合、シリカフェームのポゾラン反応に伴う消費が材齢約 1 日から急速に進み、材齢 7 日以降はほとんど変化しないことが報告されている⁵⁾。今回の測定結果は、既往の研究例と比べて全体的に水酸化カルシウム含有量がやや多い換算結果になっているが、若材齢から長期材齢にわたり、収縮低減剤の混入が高強度コンクリートの水酸化カルシウム含有量に及ぼす影響は小さいことが分かった。一方、700℃付近の減量から求めた炭酸カルシウム量については、通常の高性能減水剤を用いた調合および高性能減水剤（収縮低減タイプ）を用いた調合に比べて、低級アルコール系の収縮低減剤を用いた調合（16a-SRA）が多く、105～1000℃の減量値には収縮低減剤の有無による差はほぼ見られなかった。

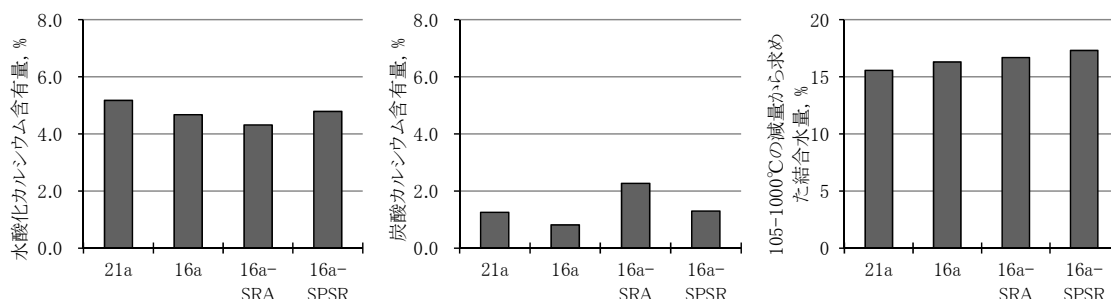


図 3.8 熱分析結果

コンクリート試料の粉末 X 線回折図を図 3.9 に示す。同図には、安山岩砕砂および高強度コンクリート用セメントを単独で測定した回折パターンも併記した。いずれの試料にも、エトリンガイト、モノサルフェート、水酸化カルシウム、炭酸カルシウム、石英、未水合のクリンカー鉱物等、および内部標準物質として内割 10wt% で混合したコランダム（内部標準）の回折ピークが認められる。

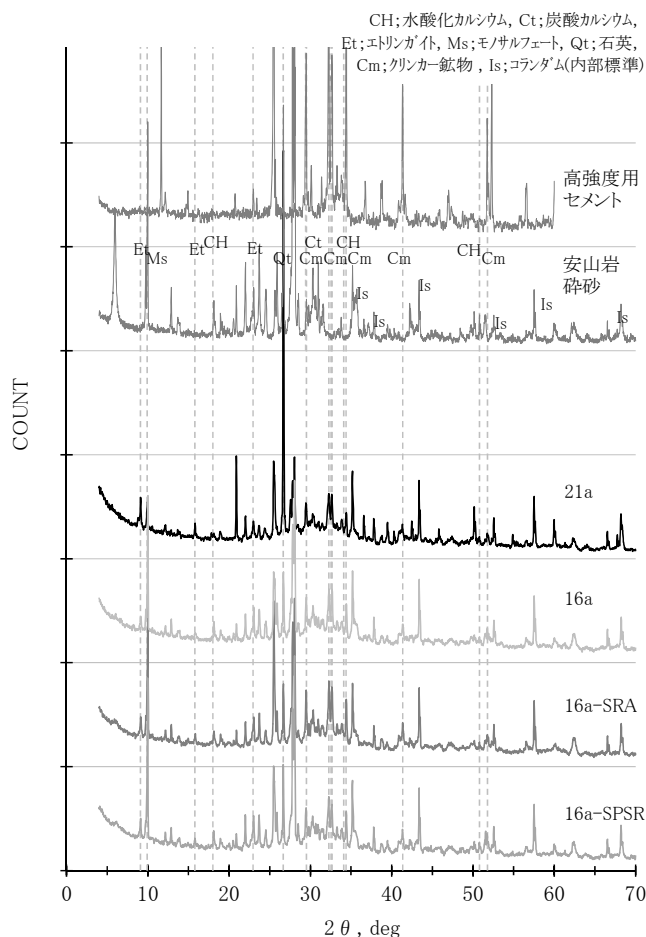


図 3.9 粉末 X 線回折図（材齢 8 年）

XRD の測定データから、解析ソフト TOPAS4 (Bruker AXS 社) のリートベルト解析によって、クリンカー鉱物、水和生成物および骨材鉱物の含有量を定量した。結果を図 3.10 上段に示す。このうち、Anorthite, Montmorillonite, Quartz, Epistilbite, Anorthite sodian, Brownmillerite (Si,Mg) を骨材鉱物とし、これらの総和を骨材成分比として求めると、21a, 16a, 16a-SRA, 16a-SPSR の順に、42.2%, 37.9%, 41.4%, 41.2% となった。一方、希塩酸による不溶残分量の測定値 31.3%, 39.2%, 34.2%, 38.7% と、骨材単独の不溶残分量 (21a は文献値の 95.6%, その他は安山岩砕砂の測定値 88.1%) から試料中の骨材量を求めると、32.7%, 44.4%, 38.8%, 44.0% と推定される。これらの結果から、粗骨材を取り除きなが

ら粉砕したコンクリート試料の骨材量は、リートベルト法による骨材成分比と不溶残分量から求めた骨材量にやや差異は生じたが、概ね 40%と推定される。

次に、リートベルト解析によるコンクリート試料の定量値から骨材成分を除去し、セメントペーストベースの含有量に換算して図 3.10 下段に示す。解析対象は、 C_3S (mono, triclinic), C_2S , Gypsum, Bassanite, Anhydrite, Periclase, エトリンガイト (Ettringite), モノサルフェート (Monosulphate), 水酸化カルシウム (Portlandite), 炭酸カルシウム (Calcite) となるが、収縮低減剤を用いた 16a-SRA ではアモルファスの割合が小さく非晶質水和物の生成量が異なる可能性があるなど、水和生成物の構成はやや異なっている。しかし、いずれの調合もかなりの C_3S および C_2S が残存している。杉山ら⁶⁾は、 $Fc60N/mm^2$ および $Fc100N/mm^2$ 級の模擬柱部材から試料を採取し、XRD により材齢 15 年においても未水和の C_3S および C_2S の残存を報告している。今回の試験体においても、前述の 4%を超える高い含水率と未水和セメント鉱物の残存から材齢 7 年までの強度増進が説明され、今後の緩やかな強度増進やひび割れが生じた際の自己修復の可能性も示唆される。

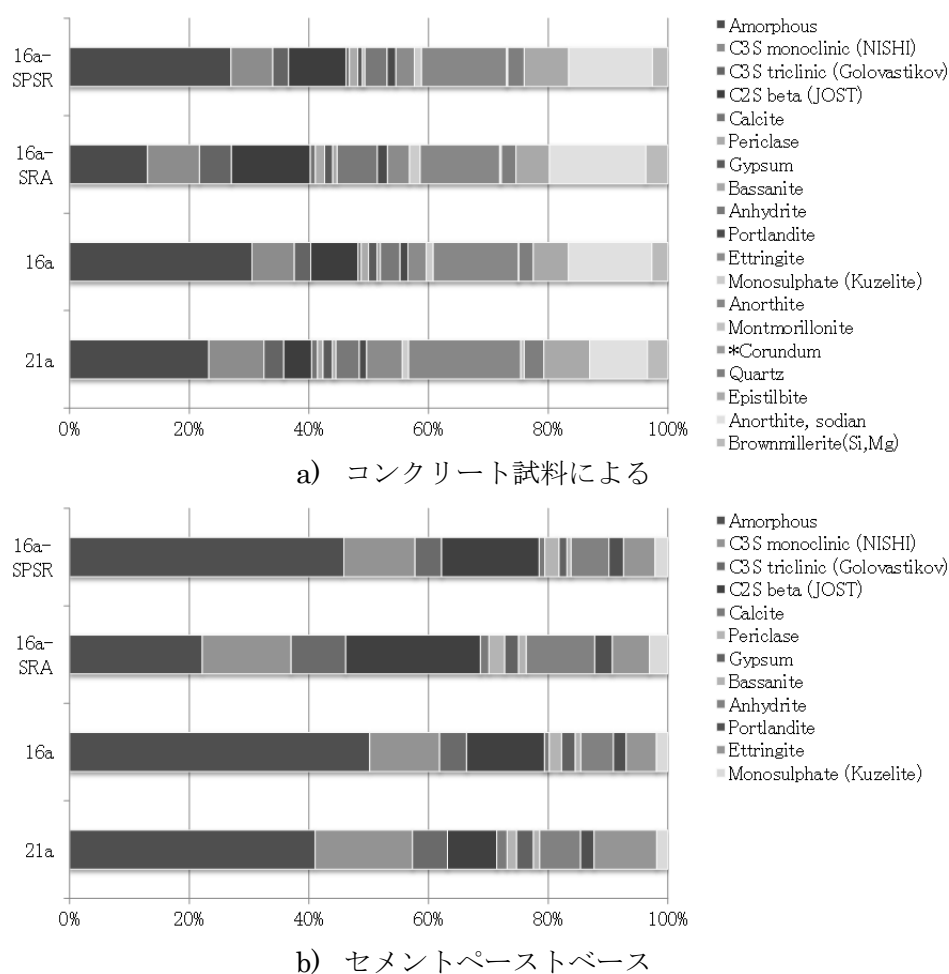


図 3.10 リートベルト解析によるクリンカー鉱物，水和生成物および骨材鉱物の比較

3.4 まとめ

第 3 章では、水結合材比 16%の収縮低減剤を用いた高強度コンクリート模擬柱部材について、材齢 7 年の収縮ひずみおよびコア強度等の調査を行った。 $F_c100\text{N/mm}^2$ を超えるコンクリートでは何らかの自己収縮対策が採用されているが、収縮低減剤が高強度コンクリートの自己収縮対策に用いられたのは比較的最近であり、収縮低減剤を用いた高強度コンクリートの長期材齢における収縮ひずみやコア強度に関する報告はほとんどない。そこで、冬期、標準期、夏期の 3 シーズンに作製し、長期間保管していた模擬柱部材について調査を行い、以下の結果を得た。

- 1) 模擬柱部材のコア強度は、打込みの季節、水結合材比、収縮低減材料の有無にかかわらず、材齢の対数軸上で材齢 7 年までほぼ直線的な増進が認められた。材齢 7 年のコア強度は、標準養生の材齢 28 日の強度の 1.3~1.5 倍まで増進した。
- 2) 収縮低減剤を用いたコンクリートの強度は、材齢 91 日の時点では無混入と同等かやや低いが、材齢 7 年では同等かやや高くなり、収縮低減剤を用いた水結合材比 16%の材齢 7 年のコア強度は、 200N/mm^2 に達した。
- 3) コアの質量含水率はいずれも 4%を超える高い値を示した。また、水結合材比 16%の質量含水率は水結合材比 21%に比べて低く、打込みの季節が冬期の場合の含水率は比較的高く、収縮低減剤を用いた場合の含水率は無混和に比べて低いなど、強度が高いものの含水率は低い傾向を示した。
- 4) 水結合材比 16%の模擬柱部材における収縮ひずみは、材齢 7 年においてほぼ収束し、室内試験と同様の収縮低減剤の効果が長期材齢においても認められた。
- 5) コア試料の粉末 X 線回折分析 (XRD) から、いずれの調合も C_3S および C_2S などの未水和セメント鉱物がかなり残存していることが分かった。未水和セメント鉱物の残存と高い含水率から上述の長期の強度増進が説明され、さらに、今後の強度増進やひび割れが生じた際の自己修復の可能性が示唆された。

第3章 参考文献

- 1) 日本建築学会：膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状, p271, 2013.7
- 2) 黒岩秀介, 渡邊悟士, 陣内浩, 並木哲：収縮低減剤を用いた 150N/mm²級コンクリートの諸特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.89-90, 2006.7
- 3) 日本建築学会：JASS 5 M-701（高強度コンクリート用セメントの品質基準）および 同附属書 3（スラグせっこう系混和材の品質基準），建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, pp.716-719, 2009
- 4) 坂内秀雄, 中川晃次：エトリンジャイトの加熱変化, 石膏と石灰, Vol.97, pp.253-259, 1968.11
- 5) 三谷裕二, 番地成朋, 谷村充, 丸山 一平：高温度履歴を受けた低水結合材比シリカフェーム混和セメントの強度および水和反応特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1495-1500, 2009
- 6) 杉山央, 榊田佳寛, 阿部道彦, 安田正雪：高強度コンクリートを用いた実大柱部材の材齢 15 年における強度性状および中性化, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.631, pp.1459-1466, 2008.9

第4章 人工軽量骨材による高強度コンクリートの自己収縮対策

4.1 はじめに¹⁾

超高層 RC 造建築物の下層階の柱には、設計基準強度 100N/mm^2 を超えるコンクリートが使用されている²⁾。このような低水結合材比のコンクリートは、自己収縮ひずみが大きくひび割れの危険性を指摘されている。事例調査によれば、水結合材比 16% 以下の場合には自己収縮抑制のために収縮低減剤や膨張材などの収縮低減材料が使用されている³⁾が、これらの混和材料は、使用量の増加に伴い収縮低減効果は高まるものの強度への悪影響が大きくなるため、収縮をゼロにすることは難しい。特に、高強度コンクリートにおける膨張材の使用は、過添加の場合に遅れ膨張破壊を生じる懸念が有り、限定的な使用量に留めざるを得ない状況である。

一方、実施例は少ないものの、人工軽量骨材や高吸水性樹脂を用いると、これらの材料からの水の供給（内部養生効果）によって自己収縮ひずみが低減することが知られている^{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11)}。高田ら^{6, 7)}は、比較的高い強度と吸水率を有する石炭灰人工骨材を使用し、粗骨材置換率 30% では約 60% の収縮低減が得られるものの強度低下率が 22% と大きい⁴⁾ため、粗骨材置換率 20% として収縮低減剤を併用し、材齢 91 日の圧縮強度が 150N/mm^2 、材齢 180 日の自己収縮ひずみが 200×10^{-6} のコンクリートを実現した。成川ら⁸⁾は、人工軽量粗骨材よりも人工軽量細骨材を使用するほうが強度低下率は小さいと考え、汎用的な膨張頁岩系人工軽量細骨材を使用した水結合材比 20% のコンクリートの実験を行い、圧縮強度 100N/mm^2 クラスにおいて強度低下率を 10% 程度に収めつつ、自己収縮ひずみをほぼ無くせることを示した。妻ら^{9, 10, 11)}は、絶乾状態および表乾状態の軽量粗骨材を使用して水結合材比 25% のコンクリートで疑似完全拘束試験を行い、表乾状態の軽量粗骨材を用いれば、強度低下率は 20% を超えるもののひび割れの危険性はかなり低下することを示した。また、水結合材比 25% のセメントペーストに軽量粗骨材を埋設し、骨材周囲のペーストの分析および組成像観察から、軽量粗骨材からセメントペーストに水分が供給されている可能性を示した。

海外では、2002 年に Hoff ら¹²⁾、2007 年に RILEM¹³⁾、2011 年に NIST¹⁴⁾によって、内部養生に関する技術の現状がまとめられ、2013 年には ACI¹⁵⁾から軽量骨材を用いた内部養生に関する委員会報告が発刊されるなど、欧州および米国において活発な研究が行われている。これらの文献によれば、水和で消費される水分を飽水軽量骨材から供給させるという内部養生の概念は 1991 年に Philleo¹⁶⁾ によって提案され、1995 年頃からドイツ¹⁷⁾、オランダ^{18, 19)}、イスラエル²⁰⁾などを中心に盛んに研究が行われている。また、2005 年には内部養生に必要な軽量骨材量の算定式が Bentz ら²¹⁾により提案され、文献¹⁴⁾では、軽量骨材

の置換率を変化させた水セメント比 30%のモルタルの自己収縮ひずみを測定し、置換率 23.7%で十分な養生効果が得られるなど、算定式の妥当性が示されている。

以上のように、人工軽量骨材を用いることが自己収縮の低減に有効であることは既に明らかである。しかし、実際の建築物への適用を考慮すると、国内の汎用的な膨張頁岩系人工軽量骨材の使用が望ましいが、これらを設計基準強度 100N/mm^2 を超えるコンクリートに適用した例はなく、自己収縮抑制効果や圧縮強度への影響、水和に関する分析などのデータも不足している。

第4章では、設計基準強度 100N/mm^2 を超えるコンクリートの自己収縮低減を目標とし、実務での適用を前提として、膨張頁岩系人工軽量細骨材の使用量と自己収縮ひずみや圧縮強度との関係などを実験的に明らかにするとともに、熱分析および粉末 X 線回折分析などを行い、水和生成物などが普通細骨材を用いた場合と大きく異なることは無いかを確認することとした。さらに、レディーミクストコンクリート工場で実際に製造を行い、高温履歴を受ける模擬柱部材における構造体コンクリートの強度発現および自己収縮ひずみを確認することとした。

4.2 実験概要

4.2.1 予備試験

本実験に先立ち、汎用的な膨張頁岩系人工軽量骨材の細骨材および粗骨材の使用が、高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を予備試験によって確認した。試験方法は、骨材を、①砕石（表乾密度 2.60g/cm^3 ，吸水率 3.11% ）＋陸砂（表乾密度 2.62g/cm^3 ，吸水率 1.86% ），②人工軽量粗骨材＋陸砂，③砕石＋人工軽量細骨材，④人工軽量粗骨材＋人工軽量細骨材の組合せとする 4 種類のコンクリートの圧縮強度を比較するもので、結合材は普通ポルトランドセメント，スラグせっこう系混和材，シリカフュームを $7:2:1$ で混合したスラグせっこう系高強度用セメントを使用し，単位水量は 150kg/m^3 ，水結合材比は 20% ，細骨材率は 50% （粗骨材および細骨材の絶対容積はいずれも 290L/m^3 ）とした。図 4.1 に圧縮強度の試験結果を示す。これらの標準養生材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度は，① 99.6N/mm^2 ，② 65.0N/mm^2 ，③ 106N/mm^2 ，④ 68.0N/mm^2 ，コンクリートから 5mm ふるいでウェットスクリーニングしたモルタルの圧縮強度は，① 101N/mm^2 ，② 107N/mm^2 ，③ 99.3N/mm^2 ，④ 108N/mm^2 となり，人工軽量粗骨材の使用による強度低下率は，人工軽量細骨材に比べて非常に大きいことを確認した。よって，本実験では，人工軽量粗骨材を対象外とし，人工軽量細骨材について検討することとした。人工軽量粗骨材の場合は，コンクリート中に分散して配置される人工軽量細骨材に比べて，空隙欠陥の集中と水分供給の非効率さの面で不利であると考えた。

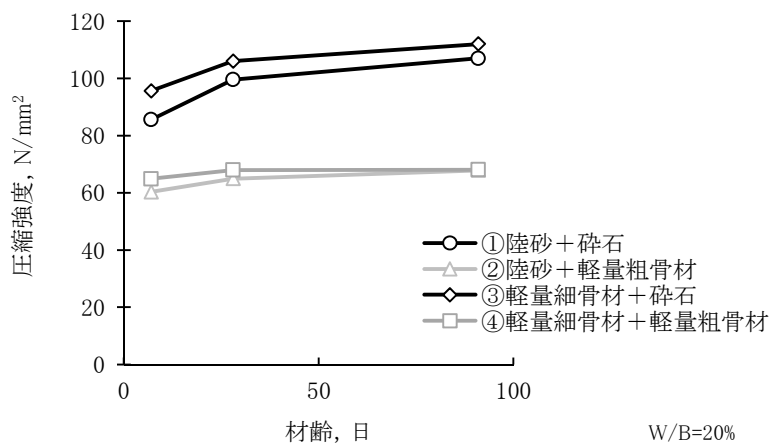


図 4.1 軽量細骨材および軽量粗骨材の使用による圧縮強度への影響

4.2.2 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表 4.1 に示す。本実験の目的は、圧縮強度を確保しつつ自己収縮ひずみを低減できる人工軽量細骨材の使用量を明らかにすることであるため、コンクリートの変動要因は、人工軽量細骨材の使用量および水結合材比（以下、W/B とする）とした。人工軽量細骨材の使用量は、細骨材の絶対容積における置換率で表し、0%、50%、100%の 3 水準とした。W/B は、設計基準強度 100～150N/mm² を目標に、15%および 20%の 2 水準とした。また、実建築物への適用実績²²⁾が有る収縮低減剤を使用した普通骨材による高強度コンクリートを比較用とした。

表 4.1 実験の要因と水準

要因	水準
人工軽量細骨材の置換率	0%, 50%, 100%
水結合材比(W/B)	15%, 20%
比較用	収縮低減剤使用(普通骨材)

4.2.3 使用材料、調合および練混ぜ

コンクリートの使用材料を表 4.2 に示す。結合材には普通ポルトランドセメント、スラグせっこう系混和材、シリカフェームをあらかじめ混合したスラグせっこう系高強度用セメント²³⁾を使用し、人工軽量細骨材には膨張頁岩系、普通骨材には安山岩系の砕石・砕砂を使用した。また、高性能減水剤にはポリカルボン酸系、収縮低減剤には低級アルコール系を使用した。ここで、内部養生のために使用した人工軽量細骨材は、膨張性頁岩を粉碎・焼成して製造する汎用品で、表層に熔融ガラス質のシェルを有する多孔質材料である。文献^{24,25)}によれば、全空隙率は 30vol%程度で、250nm に空隙径のピークがある。なお、人工軽量骨材には脱水時に膨張傾向を示すものがある。これは、メニスカスの消失によるものと説明され、比較的揃った細孔を持ち小さい細孔の分布量が少ない場合に生じやすい²⁴⁾と指摘されている。

コンクリートの調合を表 4.3 に示す。調合は全 8 種類であるが、いずれも単位水量は 150kg/m³、単位粗骨材量は 300L/m³、目標空気量は 2.0%とした。また、細骨材は、調合記号 15%00、15%SR、20%00、20%SR には砕砂のみを用い、15%10、20%10 には人工軽量細骨材のみを用い、15%05、20%05 は人工軽量細骨材および砕砂を容積比で 50%ずつ混合して用いた。15%SR および 20%SR には収縮低減剤を使用し、その使用量は、収縮低減率として 40%程度の実績²²⁾がある 7.0kg/m³とした。

コンクリートの練混ぜには容量 55L の水平 2 軸形強制練りミキサを使用し、まず結合材

と細骨材を 15 秒間空練りし、次に水と混和剤を投入して途中で掻き落としを挿んで W/B=20%の場合は 240 秒間、W/B=15%の場合は 420 秒間練り混ぜ、最後に粗骨材を投入して 90 秒間練り混ぜた。

表 4.2 コンクリートの使用材料

結合材	B:	スラグせつこう系高強度用セメント（密度 2.99g/cm ³ ，普通ポルトランドセメント：スラグせつこう系混和材：シリカフューム＝7：2：1）
細骨材	LWS:	膨張頁岩系人工軽量細骨材（表乾密度 1.88g/cm ³ ，吸水率 14.0%，粗粒率 2.76，微粒分量 6.7%）
	S:	安山岩系砕砂（表乾密度 2.62g/cm ³ ，吸水率 2.88%，粗粒率 2.72，微粒分量 5.4%）
粗骨材	G:	安山岩系碎石（表乾密度 2.60g/cm ³ ，吸水率 2.78%，Gmax=20mm）
混和剤	SRA:	低級アルコールアルキレンオキシド付加物の収縮低減剤
	SP:	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤（空気量調整剤を別添）

表 4.3 コンクリートの調合

W/B %	調合 記号	単位量 kg/m ³						SP/B %	備考
		W	B	LWS	S	G	SRA		
15	15%00	150	1000	0	514	780	—	1.55	対策無し
	15%05			184	257		—	1.60	軽量 50%置換
	15%10			368	0		—	1.58	軽量 100%置換
	15%SR			0	514		7.0	1.50	比較用・低減剤
20	20%00	150	750	0	731	780	—	1.20	対策無し
	20%05			262	365		—	1.20	軽量 50%置換
	20%10			525	0		—	1.20	軽量 100%置換
	20%SR			0	731		7.0	1.10	比較用・低減剤

※：LWS の単位量も表面乾燥飽水状態における値を示した。

単位水量から SRA および SP 使用量に相当する水量を減じた。

この他、各調合同一量の空気量調整剤（消泡剤）を別添した。

4.2.4 試験項目および方法

4.2.4.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートについては、練上がり直後のスランプフロー、50cm フロー到達時間、コンクリート温度、単位容積質量および空気量の測定を行った。スランプフローの目標は 60cm 程度とした。また、空気量の測定は、軽量骨材を使用しているため、JIS A1116（フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法及び空気量の質量による試験方法（質量方法））で行った。

4.2.4.2 自己収縮ひずみ、内部温度、電気抵抗

自己収縮ひずみおよび内部温度については、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体の中央部に低弾性（弾性係数 40N/mm^2 ）の埋込型ひずみ計および T 型熱電対を埋設して測定した。各センサの埋込み位置を図 4.2 に示す。コンクリート内部の水分消費に関する情報を得るために、同じ供試体の端部から 50mm の位置にセラミックセンサ²⁶⁾を埋設し、周波数 1kHz の交流を用い、印加電圧 1V で電気抵抗を測定した。セラミックセンサの外観を図 4.3 に示す。セラミックセンサは、吸・放水性に優れたセラミックを基材とし、 $20 \times 5 \times 2\text{mm}$ の薄片の 2 面に電極を貼り付けて、セラミック部分の含水変化などに伴う電気抵抗変化から、センサ周辺のセメント硬化体の含水率変化や相対湿度変化を把握しようとするものである。今回用いたセラミックセンサの基材の空隙構造は、図 4.4 に示すように、 $8\mu\text{m}$ 程度の空隙径にピークを持つものである。

コンクリートの打込みは、型枠の内側にテフロンシートを敷いて、コンクリートと型枠の間に生じる摩擦を低減して行った。供試体の養生は、打込みから脱型までは打込み面にビニルシートを密着させてその上から湿布で覆う湿潤養生とし、材齢約 24 時間で脱型した後は、直ちに全面をアルミ箔粘着テープでシールする封かん養生とした。なお、打込み以降、供試体は、 20°C 、80%RH の恒温恒湿室内で保管した。自己収縮ひずみは、実測のひずみから温度ひずみ（線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ と仮定）を差し引いて求めた。また、ひずみのゼロ点は打込み直後とした。供試体数は各調合 2 個とし、2 個の平均値で評価した。

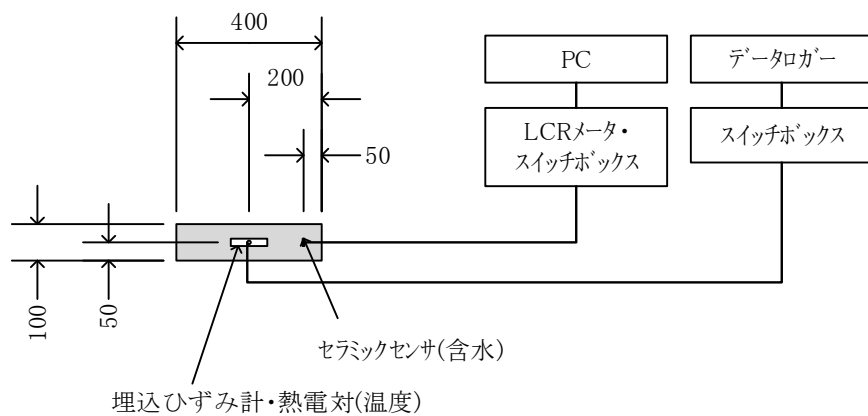


図 4.2 各センサの埋込み位置

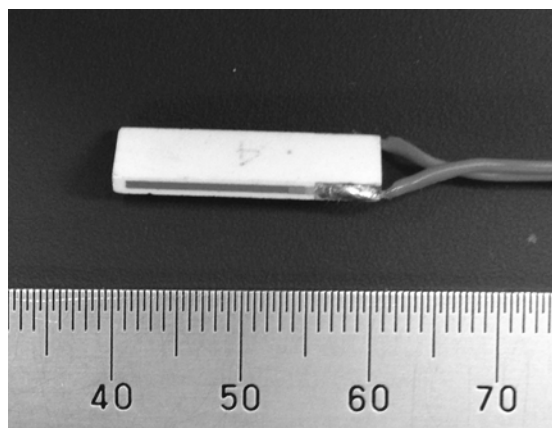


図 4.3 使用したセラミックセンサ

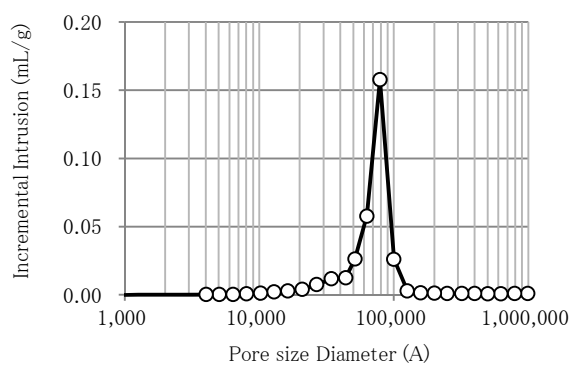


図 4.4 セラミックセンサの基材部の空隙構造

4.2.4.3 内部湿度

内部湿度については、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の供試体を用い、円中心位置に $\phi 10\text{mm}$ 、深さ 100mm 程度の孔を設け、市販のデジタル湿度計のセンサ部を適宜挿入し、孔内の空気の湿度を測定した。供試体の孔は、 $\phi 10\text{mm}$ の棒を埋設しながらコンクリートを打込み、半日程度で棒を引き抜いて設け、20%05のみ不具合により硬化後にドリルで設けた孔を用いた。供試体は、湿度測定時以外はシールして密封し、 20°C 、80%RHの恒温恒湿室内で保管した。湿度計は、高分子電気抵抗式で、精度 $\pm 3\%\text{RH}$ ($30 \sim 90\%\text{RH}$, $15 \sim 35^\circ\text{C}$)、 $\pm 5\%\text{RH}$ ($90 \sim 98\%\text{RH}$) のものを用いた。測定は、結露の恐れがあったので材齢 7 日以降に行った。また、精度がやや低いため、湿度計 2 台を用いて確認しながら測定を行った。供試体数は各調合 1 個とした。

4.2.4.4 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度については、 20°C 封かん養生供試体を用いて材齢 24 時間、48 時間、7 日、28 日、91 日の強度発現を求め、標準 (20°C 水中) 養生供試体を用いて材齢 28 日および 91 日の強度も求めた。静弾性係数の測定は、封かん養生供試体を用いて行った。供試体数は、封かん養生を各材齢 2 個、標準養生を各材齢 3 個とした。

4.2.4.5 熱分析 (TG-DTA) および粉末 X 線回折分析 (XRD)

TG-DTA は、水酸化カルシウム量とおおよその結合水量について、調合間の比較を目的とし、XRD は、調合間の水和生成物の比較を目的として行った。分析用の試料は、 5mm 以下のウェットスクリーニングしたモルタルを打込み、 20°C 封かん養生した $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の供試体を用いた。分析の前処理については、材齢 48 時間、28 日、91 日において、供試体を約 6mm の円盤に切断し、アセトンに 30 分程度浸漬して水和を停止した後、2 週間程度の D-dry 乾燥を行い、粗粉碎後にふるい網 $75\mu\text{m}$ を全通するよう微粉碎した。

TG-DTA は、材齢 48 時間、28 日、91 日の試料を用い、昇温速度 $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 、窒素フロー環境の条件で室温から 1000°C までの測定を行った。

XRD は、材齢 28 日の試料を用い、Bruker AXS 社の D8 ADVANCE にて、ターゲット $\text{CuK}\alpha$ 、管電圧 40kV 、管電流 40mA 、走査範囲 $4 \sim 70^\circ 2\theta$ 、ステップ幅 0.02° 、スキャンスピード $1^\circ/\text{min}$ の条件で測定した。試料には、内部標準物質としてコランダム ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) を内割で 10wt% 混合した。測定データから、解析ソフト TOPAS4 (Bruker AXS 社) のリートベルト解析によって、クリンカー鉱物、水和生成物および骨材鉱物の含有量を定量した。解析対象は、 C_3S (mono, triclinic), C_2S , Gypsum, Bassanite, Anhydrite, Periclase, エトリンガイト (Ettringite), モノサルフェート (Monosulphate), 水酸化カルシウム (Portlandite), 炭酸カルシウム (Calcite), Anorthite, Montmorillonite, Quartz, Epistilbite, Anorthite sodian, Brownmillerite (Si,Mg) とした。

4.2.5 実機試し練り

4.2.5.1 コンクリートの種類

温度一定の室内試験に引き続き実機ミキサによる試し練りを行い、水和熱による高温履歴を受ける模擬柱部材を作製し、構造体コンクリートの自己収縮ひずみおよび圧縮強度発現の確認を行った。コンクリートは、スラグせつこう系高強度用セメントを用いた $\text{Fc}100\text{N/mm}^2$ および $\text{Fc}150\text{N/mm}^2$ 相当の水結合材比 20%と 15%とした。高強度コンクリートの製造実績が豊富なレディーミクストコンクリート工場で練混ぜを行い、現場に運搬後、模擬柱部材に打込んだ。

コンクリートの種類を表 4.4 に示す。実工事での使用が可能な大臣認定品の $\text{Fc}100\text{N/mm}^2$ (20-0) および $\text{Fc}150\text{N/mm}^2$ (15-0) を比較用とし、前者の細骨材の 125L/m^3 を人工軽量細骨材に置換した調合 (20-1)、後者の細骨材の 125L/m^3 および 168L/m^3 を人工軽量細骨材に置換した調合 (15-1 および 15-2) について調査した。 $\text{Fc}100\text{N/mm}^2$ のスランプフローの目標値は 650~700mm、空気量の目標値は 2.0%とし、 $\text{Fc}150\text{N/mm}^2$ はそれぞれ 750mm と 1.5%とした。コンクリートの使用材料を表 4.5 に示す。

表 4.4 コンクリートの調合（実機試し練り）

W/B %	調合 記号	単位量 kg/m^3								SP1/B %	SP2/B %	備考
		W	B	LWS	S1	S2	S3	G1	G2			
20	20-0	155	775	0	315	315	—	875	—	2.65	—	対策無し
	20-1	155	775	206 [234]	152	152	—	875	—	2.70	—	軽量砂置換
15	15-0	150	1000	0	—	—	495	—	824	—	2.25	対策無し
	15-1	150	1000	206 [234]	—	—	168	—	824	—	2.10	軽量砂置換
	15-2	150	1000	277 [314]	—	—	55	—	824	—	1.93	軽量砂置換

※：LWS の単位量も表面乾燥飽水状態における値を[]で示した。単位水量から SP 使用量に相当する水量を減じた (W/B15%は SP の固形分を考慮)。この他、各調合同一量の空気量調整剤 (消泡剤) を別添した。

表 4.5 コンクリートの使用材料（実機試し練り）

結合材	B:	スラグせつこう系高強度用セメント (密度 2.99g/cm^3 、普通ポルトランドセメント：スラグせつこう系混和材：シリカフューム=7：2：1)
細骨材	LWS:	膨張頁岩系人工軽量細骨材 (表乾密度 1.87g/cm^3 、吸水率 15.5%、粗粒率 2.73、微粒分量 6.4%)
	S1:	市原産山砂 (表乾密度 2.57g/cm^3 、吸水率 2.59%、粗粒率 2.23、微粒分量 1.0%)
	S2:	鳥形山産石灰砕砂 (表乾密度 2.62g/cm^3 、吸水率 1.97%、粗粒率 2.85、微粒分量 3.2%)
	S3:	安山岩系砕砂 (表乾密度 2.62g/cm^3 、吸水率 2.50%、粗粒率 3.35、微粒分量 4.6%)
粗骨材	G1:	峯朗産石灰砕石 (表乾密度 2.70g/cm^3 、吸水率 0.79%、 $G_{\text{max}}=20\text{mm}$)
	G2:	安山岩系砕石 (表乾密度 2.63g/cm^3 、吸水率 2.33%、 $G_{\text{max}}=20\text{mm}$)
混和剤	SP1:	ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤 (空気量調整剤を別添)
	SP2:	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤 (空気量調整剤を別添)

4.2.5.2 実機試し練りにおける試験測定項目

フレッシュコンクリートについては、出荷時および受入れ時のスランプフロー、50cm フロー到達時間、コンクリート温度、空気量および単位容積質量を調査した。

供試体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）による圧縮強度は、全ての調合について、標準養生材齢 7 日、28 日に試験を行った。また、水結合材比 15%の調合は、40℃温水養生の材齢 28 日について試験を行った。構造体コンクリート強度は、模擬柱部材からコアを採取し、成型研磨後、材齢 28 日に試験を行った。

模擬柱部材については、内部温度、自己収縮ひずみおよび電気抵抗（含水）を測定した。模擬柱部材の概要を図 4.5 に示す。同時に、供試体（ $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ ）について、各調合 1 個、合計 5 個の内部温度、自己収縮ひずみおよび電気抵抗（含水）を測定した。供試体の各センサの埋込位置は図 4.2 と同じとしたが、養生は 20℃一定ではなく、現場養生とした。なお、供試体は、型枠との縁切りおよび乾燥防止策は室内試験と同様に行い、打込みから翌日まではビニルシートを密着させてその上から湿布養生を行い、脱型後はアルミ箔粘着テープを全面に貼り付け、さらにビニール袋で密封する封かん養生とした。

なお、内部温度測定には T 型熱電対、自己収縮ひずみには低弾性（弾性係数 40N/mm^2 ）の埋込型ひずみ計、内部湿度変化には前述のセラミックセンサを用いた。また、セラミックセンサについてはあらかじめ比抵抗の温度依存を確認した。

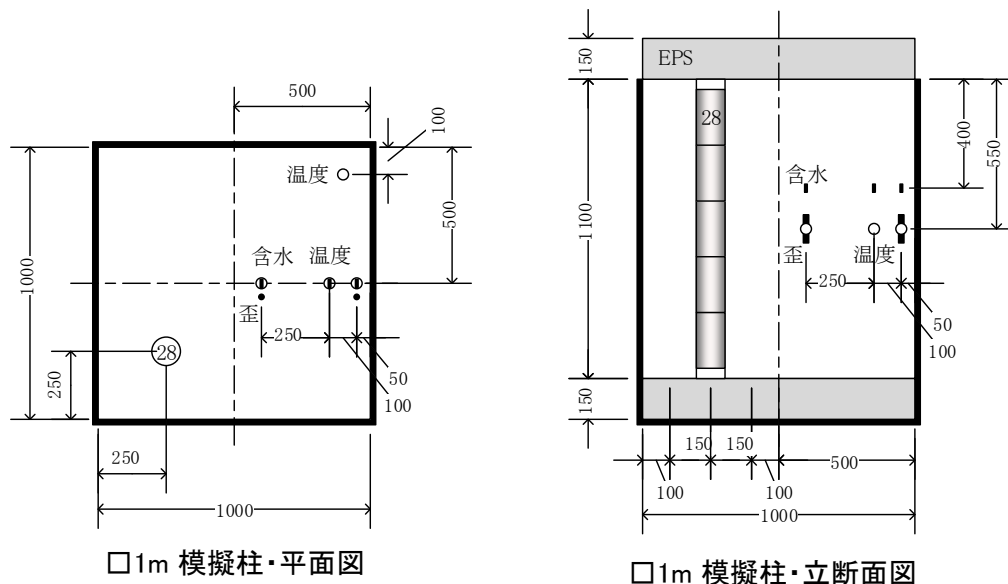


図 4.5 模擬柱部材の概要

4.3 実験結果および考察

4.3.1 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表 4.6 に示す。人工軽量細骨材の置換率が異なる調合を、水結合材比 20%では同一の高性能減水剤の使用量で練り混ぜ、水結合材比 15%ではほぼ同一の高性能減水剤の使用量で練り混ぜたが、いずれもスランプフロー60cm 程度のものが得られた。また、50cm フロー到達時間についても、人工軽量細骨材の置換率による影響は顕著ではなかった。空気量調整剤は全調合で同一の使用量としたが、質量方法で測定した空気量はいずれも 2%程度となった。これらの結果から、本検討の水結合材比の範囲では、細骨材の一部あるいは全部を人工軽量細骨材に置換しても、フレッシュコンクリートの性状への影響は小さいことが確認された。この一因として、今回使用した砕砂と人工軽量細骨材の粗粒率および微粒分量がほぼ等しかった点などが挙げられる。

表 4.6 フレッシュコンクリートの試験結果

W/B %	調合 記号	SP/B %	MA/B %	SLF cm	Ts50 秒	CT ℃	AIR1 %	AIR2 %	UM kg/m ³
15	15%00	1.55	0.04	62.1	26.0	25.4	1.7	2.0	2.445
	15%05	1.60		64.1	18.6	25.1	2.2	2.2	2.366
	15%10	1.58		57.0	29.1	25.2	2.6	2.0	2.297
	15%SR	1.50		69.1	18.2	24.9	1.8	1.8	2.448
20	20%00	1.20	0.04	64.0	13.5	24.4	1.5	1.6	2.422
	20%05	1.20		59.8	17.5	24.0	2.6	2.1	2.305
	20%10	1.20		63.3	14.3	23.6	2.8	2.3	2.199
	20%SR	1.10		56.0	18.9	24.6	1.9	2.0	2.412

SP/B: 高性能減水剤の使用量, MA/B: 空気量調整剤(消泡剤)の使用量

SLF: スランプフロー, Ts50: 50cm フロー時間, CT: コンクリート温度, AIR1: エアメータの読み値による空気量, AIR2:

JIS A1116 質量法による空気量, UM: 単位容積質量

4.3.2 自己収縮ひずみ、内部温度、電気抵抗および内部湿度

材齢 1 日までの自己収縮ひずみ、内部温度、セラミックセンサによる電気抵抗の経時変化を図 4.6 に示す。コンクリートの練上がり温度が約 24℃、恒温室の室温が 20℃であったため、打込み直後のコンクリートの温度はいずれも低下傾向を示した。その後、材齢 0.2～0.4 日程度から、水和発熱によって温度は上昇傾向に転じた。この時期は、おおよそ凝結の始発時間に相当する。また、人工軽量細骨材を使用していない調合記号 15%00, 15%SR,

20%00, 20%SR では、自己収縮ひずみの急激な増加が、温度上昇とほぼ同時期から始まった。一方、人工軽量細骨材を使用した 15%05, 15%10, 20%05, 20%10 の自己収縮ひずみは、温度上昇が開始しても増加せず、15%10, 20%05, 20%10 では逆にやや膨張傾向を示すなど、通常、材齢 1 日程度以内に生じる急速な自己収縮を、人工軽量細骨材の使用によって完全に防止できることが確認された。なお、温度上昇量などの傾向には、水結合材比による差は見られるものの、人工軽量細骨材の有無による差は認められなかった。

セラミックセンサによる電気抵抗をみると、人工軽量細骨材を使用していない 15%00, 15%SR, 20%00, 20%SR では、温度の上昇とほぼ同時に電気抵抗の急速な上昇がみられた。一方、人工軽量細骨材を使用した 15%05, 15%10, 20%05, 20%10 の電気抵抗の上昇は比較的緩やかな傾向を示した。前述のとおり、セラミックセンサは、吸・放水性に優れたセラミック部分の含水率変化などに伴う電気抵抗変化から、センサ周辺のセメント硬化体の水分消費に関する情報を得ようとするものである。人工軽量細骨材を使用していない調合の自己収縮の増大は、電気抵抗の急速な上昇から、水分の減少が大きく関与しているものと推察される。一方、人工軽量細骨材を使用した調合は、温度上昇の傾向には差がみられないことから水和の進行はほぼ同様であると考えられるため、電気抵抗の上昇が緩やかであることは、比較的水分の減少が小さいことを意味し、人工軽量細骨材からの水の供給が影響したものと推察される。丸山ら²⁷⁾は、中性子ラジオグラフィによって、材齢 1 日前後における飽水軽量モデル骨材からセメントペーストへの水分移動の可視化に成功しているが、セラミックセンサにおいてもコンクリートにおいて同様の傾向が間接的に示された。丸山ら²⁸⁾は、軽量骨材を高強度コンクリートに用いた際の膨潤現象について、メニスカスによる負圧だけでなく、自由水中の物質濃度に基づく浸透圧を挙げている。浸透圧は、供給されようとする水とセメント硬化体中の自由水とのイオン濃度差が大きく、硬化体に生じている圧力を上回れば、空間を押し広げてセメント硬化体内部に水が浸入し、全体が膨潤すると説明している。今回の測定結果において、人工軽量細骨材からの水の供給があるにもかかわらずセラミックセンサの電気抵抗が上昇しているのは、水和に伴う自由水のイオン濃度の上昇に伴い、人工軽量骨材から水分が移動しているのと同様に、セラミックに含まれていた水分もセメント硬化体に移動したことを示すものと考えられる。

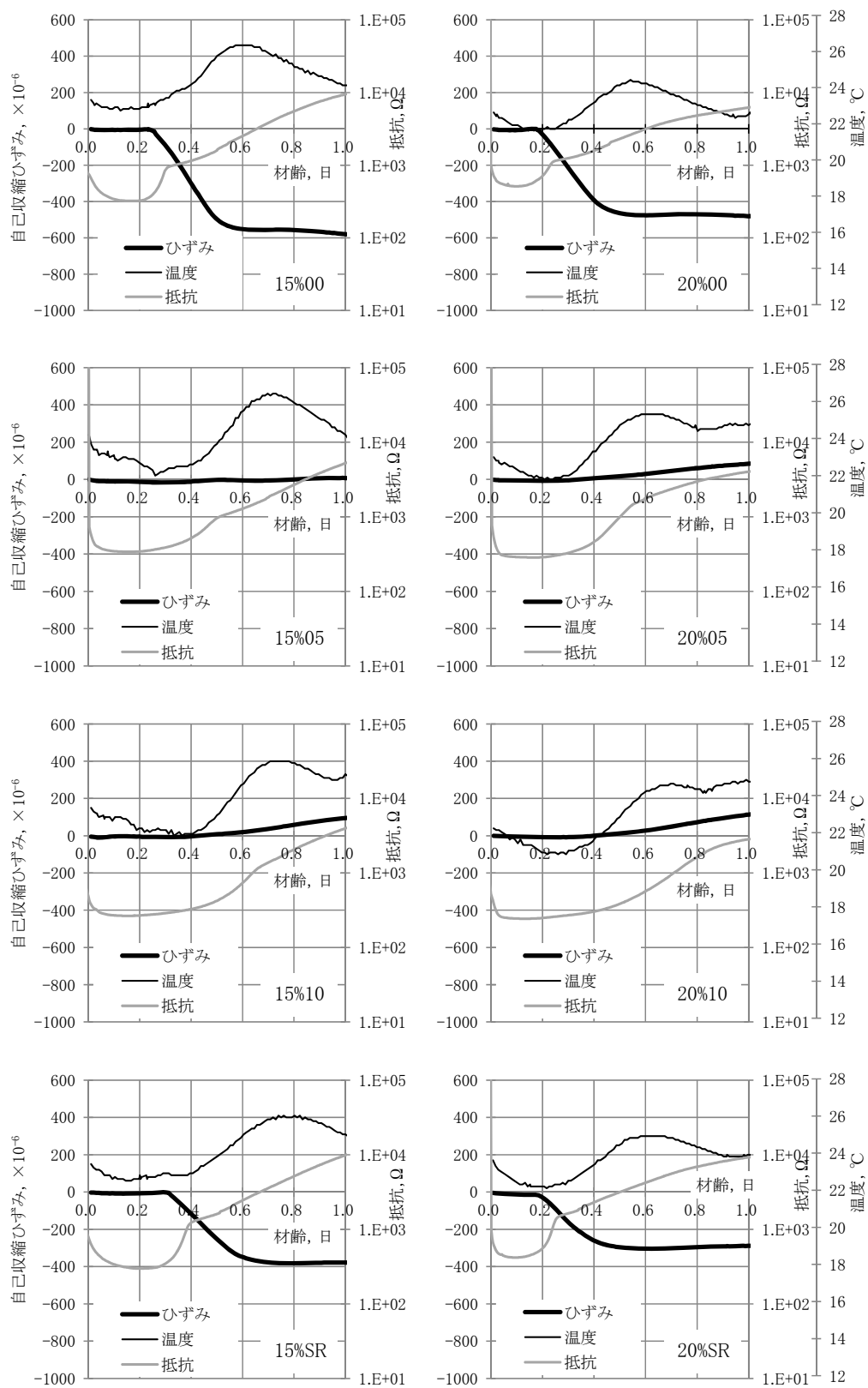


図 4.6 材齢 1 日までの自己収縮ひずみ，温度，セラミックセンサによる電気抵抗の経時変化

材齢 400 日までの自己収縮ひずみの経時変化を図 4.7 に示す。無対策の 15%00 および 20%00 は、材齢 56 日において各々 -880×10^{-6} 、 -800×10^{-6} の収縮ひずみを示し、その後の変化は小さく、材齢 400 日時点では各々 -880×10^{-6} 、 -820×10^{-6} となった。収縮低減剤を用いた 15%SR および 20%SR は、無対策の 50%程度まで収縮を低減した。一方、細骨材の全てを人工軽量細骨材に置換した 15%10 および 20%10 は、膨張側を推移し、材齢 56 日において各々 $+320 \times 10^{-6}$ 、 $+480 \times 10^{-6}$ に達し、その後、前者はやや収縮方向に、後者はやや膨張方向に推移して、材齢 400 日時点では各々 $+270 \times 10^{-6}$ 、 $+520 \times 10^{-6}$ の膨張ひずみとなった。細骨材の半分を人工軽量細骨材で置換した 20%05 も膨張側を推移し、材齢 13 日の $+210 \times 10^{-6}$ の膨張ひずみをピークとして、材齢 56 日に $+140 \times 10^{-6}$ 、材齢 200 日に $+20 \times 10^{-6}$ と漸減して膨張側にほぼ収束した。同じく細骨材の半分を人工軽量細骨材で置換した、より低水セメント比の 15%05 については、低収縮域を緩やかに推移し、材齢 56 日において -170×10^{-6} 、材齢 200 日において -240×10^{-6} の収縮ひずみとなった。

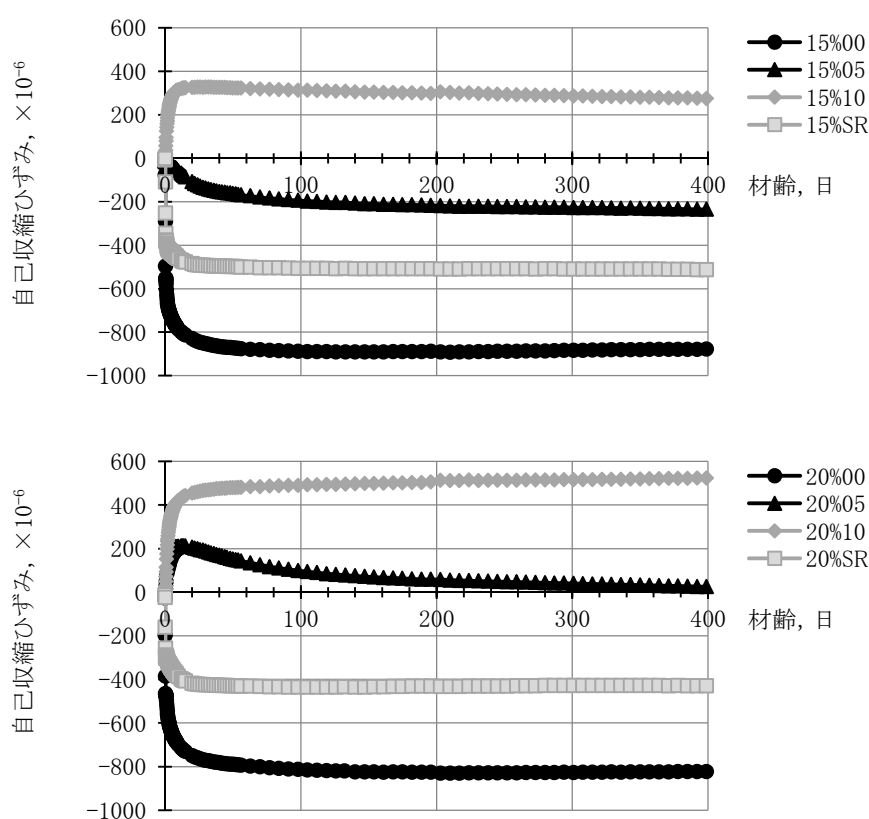


図 4.7 自己収縮ひずみの経時変化

人工軽量細骨材の使用量と自己収縮ひずみの関係を図 4.8 に示す。同図に示すように、人工軽量細骨材の使用量と自己収縮ひずみは良い相関関係を示し、本検討の水結合材比 15～20%の範囲であれば、これらの関係に及ぼす水結合材比の影響は小さい結果となった。図中に記載した回帰式によれば、自己収縮ひずみの制御に必要な人工軽量細骨材の使用量の目安が得られる。自己収縮ひずみを -200×10^{-6} 以下に収めるために必要な人工軽量細骨材の使用量は約 90L/m^3 以上、収縮をゼロとする場合の使用量は約 125L/m^3 、 $+200 \times 10^{-6}$ の膨張ひずみを導入するための使用量は約 165L/m^3 と計算される。人工軽量細骨材の使用量 125L/m^3 に相当する吸水量は、絶乾密度 1.65g/cm^3 、吸水率 14.0%より約 30kg/m^3 となる。なお、水和熱により高温履歴する実大の柱では、自己収縮ひずみが 20°C に比べて 200×10^{-6} 程度大きくなった測定例もあるので²⁹⁾、収縮抑制に必要な人工軽量細骨材の使用量はやや増加する可能性が考えられる。

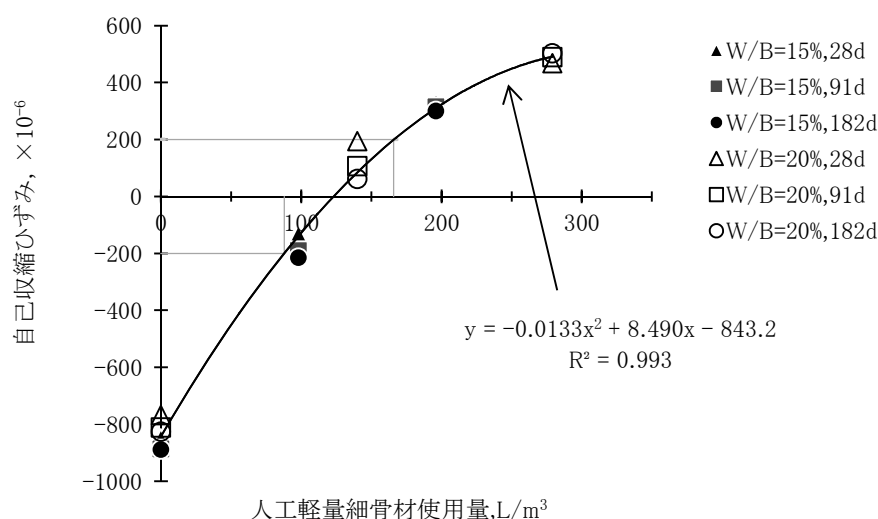


図 4.8 人工軽量細骨材の使用量と自己収縮ひずみの関係

高分子電気抵抗式湿度計で測定した、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の封かん供試体孔内の湿度の経時変化を図 4.9 に示す。概ね収縮ひずみが小さいコンクリートほど相対湿度は高く、人工軽量細骨材を使用したものについては、その使用量（単位量）が多いものほど相対湿度が高い傾向を示した。無対策の 15%00 および 20%00 の相対湿度は概ね 85%RH 以下に収束し、収縮低減剤を用いた 15%SR および 20%SR は 85%RH 程度となった。また、人工軽量細骨材の使用量が最も多い 20%10 では 95%RH を超え、次いで 15%10 では 90～95%RH、20%05 では 90%RH 程度、使用量が最も少なく収縮側を推移した 15%05 では約 85%RH となった。

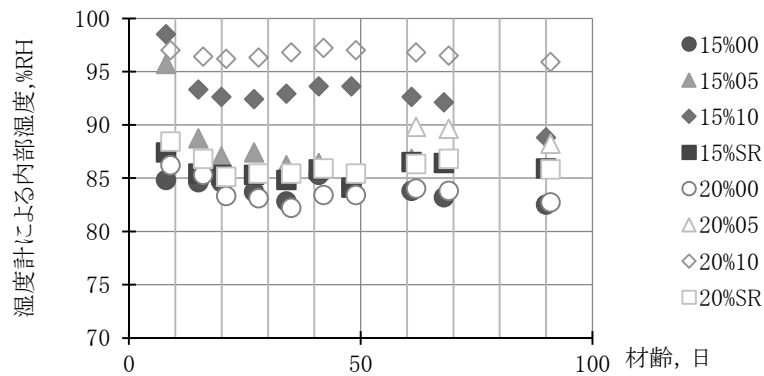


図 4.9 高分子電気抵抗式湿度計による内部湿度の経時変化

4.3.3 圧縮強度および静弾性係数

20℃封かん養生および標準養生した供試体の圧縮強度の発現状況を図 4.10 に示す。収縮低減剤を使用した 15%SR および 20%SR については強度発現が遅れる傾向を示したが、人工軽量細骨材を使用したコンクリートにこのような顕著な傾向は認められなかった。細骨材の全てを人工軽量細骨材で置換した 15%10 および 20%10 の 20℃封かん養生供試体による圧縮強度は、材齢 24 時間、28 日、91 日において、無対策の 85～95%に低下したが、細骨材の半分を人工軽量細骨材に置換した 15%05 および 20%05 の強度は、いずれの材齢においても、無対策とほぼ同等の強度を示した。また、人工軽量細骨材を使用していない調合の標準養生供試体による圧縮強度は 20℃封かん養生とほぼ同等であったが、人工軽量骨材を使用した調合では、理由は不明であるが、20℃封かん養生による圧縮強度のほうがやや高い傾向を示した。

人工軽量細骨材の使用量と圧縮強度低下率の関係を図 4.11 に示す。圧縮強度低下率は、人工軽量細骨材を使用したコンクリートの強度を、人工軽量細骨材を使用していないコンクリートの強度で除して百分率で表した。同図によれば、人工軽量細骨材の使用量と圧縮強度低下率とは良い相関関係を示し、本検討の水結合材比 15～20%の範囲であれば、これらの関係に及ぼす水結合材比の影響は小さいものとなった。図中に記載した回帰式を用いて、図 4.8 から求めた自己収縮ひずみ -200×10^{-6} となる人工軽量細骨材使用量 90L/m^3 について圧縮強度低下率を計算すると 99%になり強度低下はほぼ無く、収縮ゼロとなる使用量 125L/m^3 では圧縮強度低下率 97%、 $+200 \times 10^{-6}$ 程度の膨張を見込める使用量 165L/m^3 では圧縮強度低下率 95%と計算される。このように、汎用の膨張頁岩系の人工軽量細骨材を用いても、圧縮強度を確保しつつ自己収縮ひずみの低減が可能であることを確認できた。

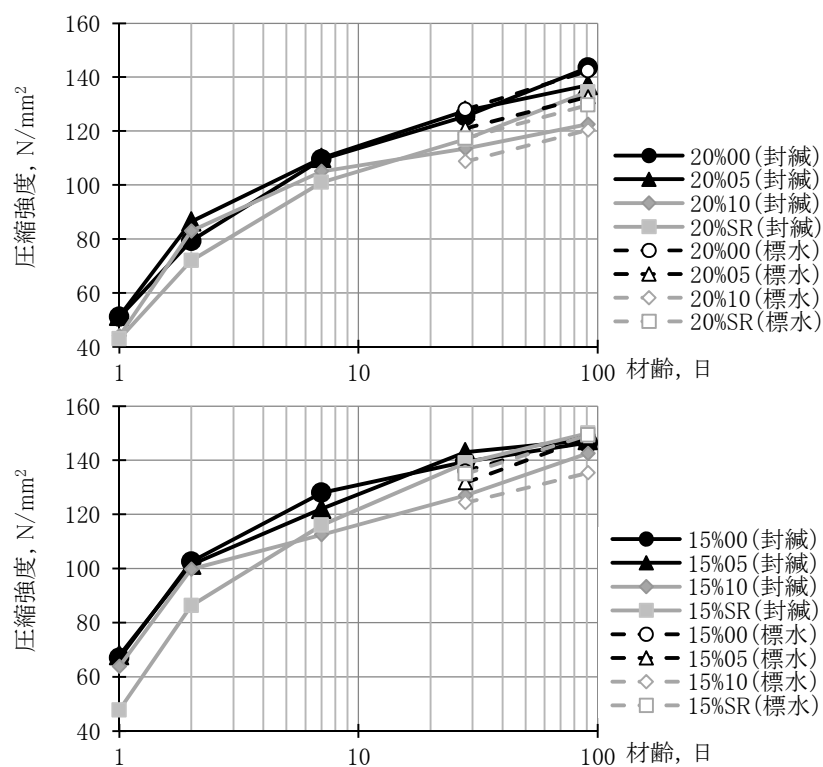


図 4.10 コンクリートの圧縮強度発現

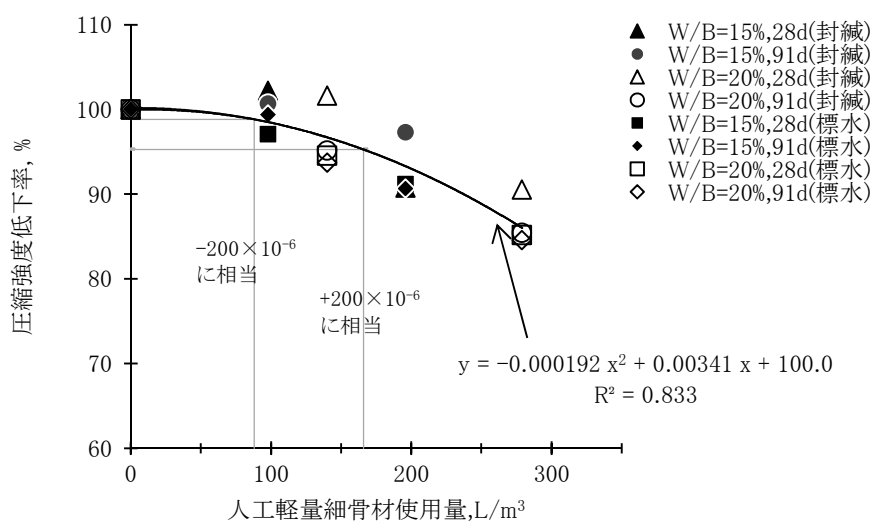


図 4.11 人工軽量細骨材の使用量と圧縮強度低下率の関係

圧縮強度と静弾性係数の関係を図 4.12 に示す。同図には、20℃封かん養生供試体の材齢 24 時間、48 時間、7 日、28 日、91 日の結果を示した。また、圧縮強度と単位容積質量から静弾性係数を算出する JASS 5 の式による曲線を併記した。曲線の算出にあたり、単位容積質量 γ は今回の封かん供試体の範囲である 2.20t/m³ および 2.45t/m³ とし、粗骨材の種類で定まる修正係数 k_1 はいずれも安山岩碎石を使用しているので 0.95、混和材の種類で定まる修正係数 k_2 はいずれもシリカフュームと高炉スラグ微粉末を使用しているので 0.95 とした。同図のプロットには人工軽量細骨材を使用していない調合が半数含まれるが、比較的ばらつきの小さい直線状の分布となった。また、低い強度領域にプロットされる若材齢の静弾性係数は、人工軽量細骨材の使用の有無にかかわらず、JASS 5 の算定式より低い傾向を示した。これらの傾向から、人工軽量細骨材の使用の影響は、今回の使用量の範囲であれば比較的小さく、JASS 5 の算定式で考慮されている単位容積質量の補正 $(\gamma/2.4)^2$ と同程度かそれ以下であると考えられる。

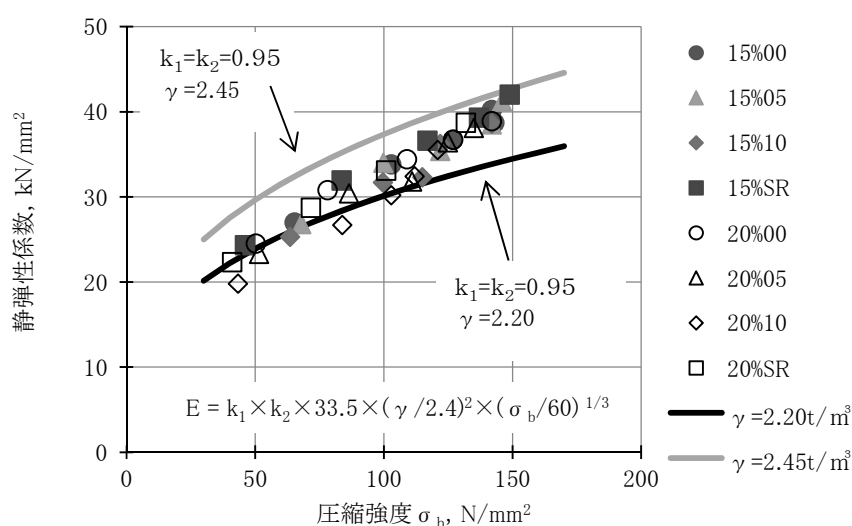


図 4.12 圧縮強度と静弾性係数の関係

4.3.4 熱分析および粉末 X 線回折分析による確認

熱分析 (TG-DTA) は、ウエットスクリーニングモルタルの材齢 48 時間、28 日、91 日について行った。450℃付近の吸熱ピークから 400～500℃の減量値を求め、水酸化カルシウムの含有量に換算した結果を図 4.13 に示す。換算にあたり、希塩酸による不溶残分量をモルタル試料、人工軽量細骨材 (95.6%)、砕砂 (88.1%) について求め、モルタル試料中の骨材量を推定した。水酸化カルシウムの含有量は、骨材を差引いたセメントペーストに対する比率で表した。図 4.14 には、105～1000℃の減量値から求めた結合水量を示す。

一般に、高強度コンクリートにおける水酸化カルシウムの含有量は、水結合材比が低いほど小さい³⁰⁾。本検討においても、15%00 と 20%00 の比較において同様の傾向が認められた。また、水結合材比 20%において、人工軽量細骨材を使用した 20%05、20%10 の材齢 48 時間の水酸化カルシウム含有量は明らかに大きく、軽量骨材からの内部養生効果が確認された。このような傾向は、表ら⁹⁾による水セメント比 25%のセメントペーストと人工軽量粗骨材の界面に着目した実験でも確認されており、今回、コンクリートからウェットスクリーニングで採取したモルタルの粉砕試料においても同様に認められた。材齢 28 日および 91 日の水酸化カルシウム含有量は、シリカフュームのポゾラン反応などにより材齢とともに消費され、人工軽量細骨材の有無による差は小さくなった。

これらの結果から、人工軽量細骨材の空隙に含まれていた水分は、水和にも寄与し、セメントペースト部分の強度をいくらか上昇させたと推察される。このセメントペーストの強度上昇が人工軽量細骨材の空隙・欠陥による強度への悪影響を相殺し、本実験の条件では使用量 90L/m³以下の範囲において、コンクリートとしての強度低下を抑えたものと考えられる。なお、図 4.14 に示す 105～1000℃の減量によって求めた結合水量には、調合間による明確な差は認められなかった。

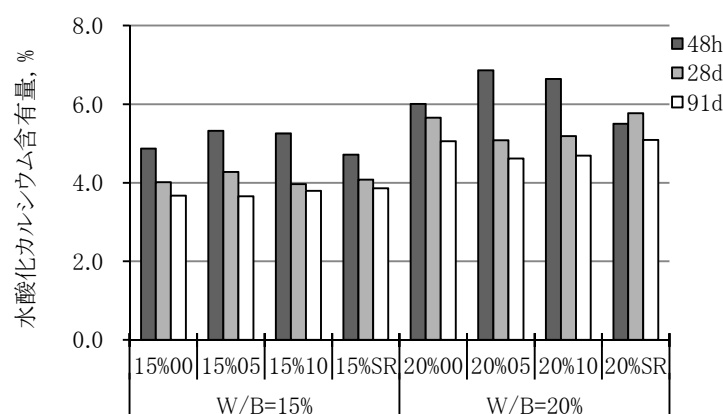


図 4.13 熱分析 (TG-DTA) による 400～500℃の減量値

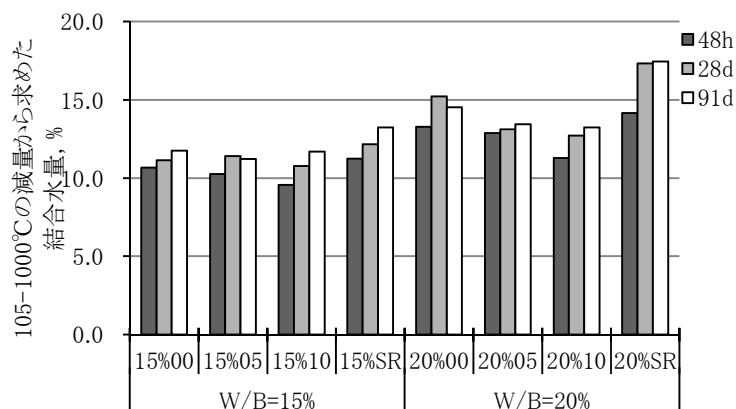


図 4.14 熱分析 (TG-DTA) による 105～1000℃の減量値

材齢 28 日のウェットスクリーニングモルタル試料の粉末 X 線回折図を図 4.15 に示す。同図には、安山岩砕砂および人工軽量細骨材を単独で測定した回折パターンも併記した。いずれのモルタル試料にも、エトリンガイト、水酸化カルシウム、炭酸カルシウム、石英、未水和のクリンカー鉱物等の回折ピークが認められる。また、15%10 および 20%10 以外の砕砂が混入しているモルタル試料にはいずれも 10° 付近に顕著な回折ピークが見られる。

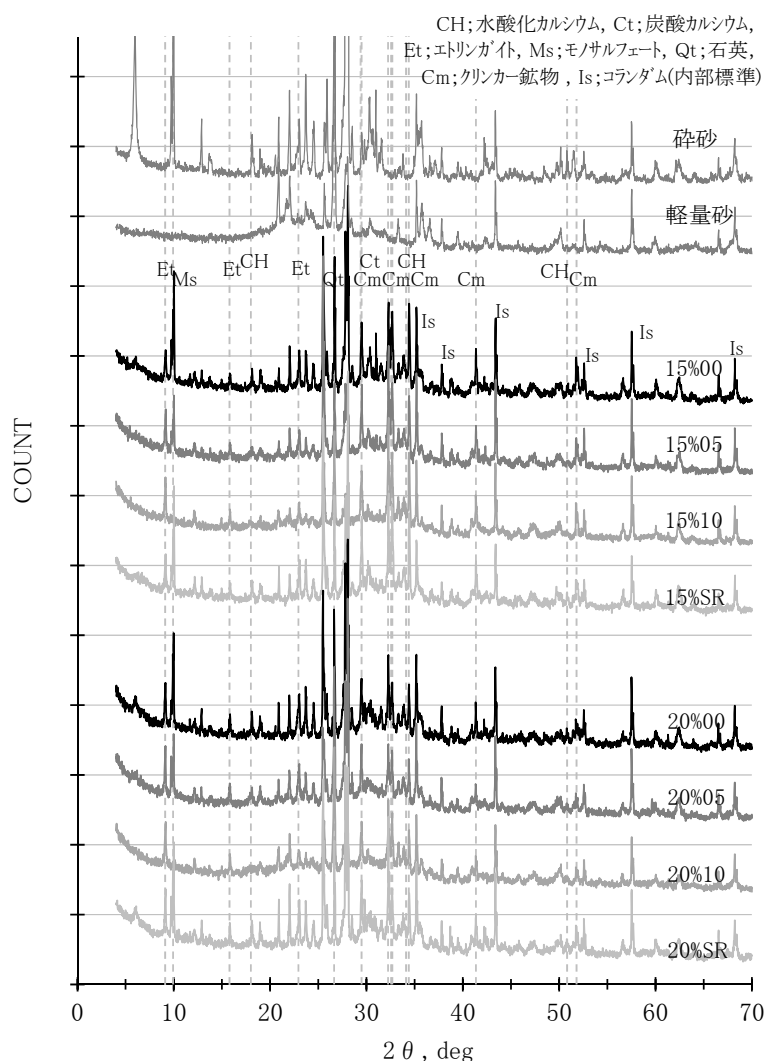


図 4.15 粉末 X 線回折図 (材齢 28 日)

ここで、初期材齢の膨張に関与すると思われるエトリンガイトおよび水酸化カルシウムの生成量に及ぼす人工軽量細骨材の有無の影響を相対比較するために、リートベルト解析を行った。モルタルおよび骨材のリートベルト解析結果を図 4.16 に示す。安山岩砕砂は、Anorthite, Montmorillonite, Quartz, Anorthite sodian などの骨材鉱物が 85%を超える

が、軽量骨材にはアモルファスが 40%程度含まれているため、リートベルト解析結果から骨材構成比を定めるのは難しい。そこで、前出の不溶残分量から求めた試料中の骨材量を用いて、リートベルト解析によるモルタルベースのエトリンガイト、水酸化カルシウム、炭酸カルシウムの定量値の補正を行い、セメントペーストベースの含有量に換算した。図 4.17 に結果を示す。エトリンガイトは水結合材比 20%では人工軽量細骨材を用いた場合にやや多い傾向を示すものの水結合材比 15%ではそのような傾向は見られず、その他についても人工軽量細骨材の有無の影響に顕著な傾向は認められない。

以上の結果から、人工軽量細骨材を用いた場合、初期材齢においてはセメントの水和に若干の影響を及ぼすものの、長期での水和反応速度や生成した水和生成物は人工軽量細骨材を用いても普通細骨材を用いた場合と大きく異なることを確認することができた。

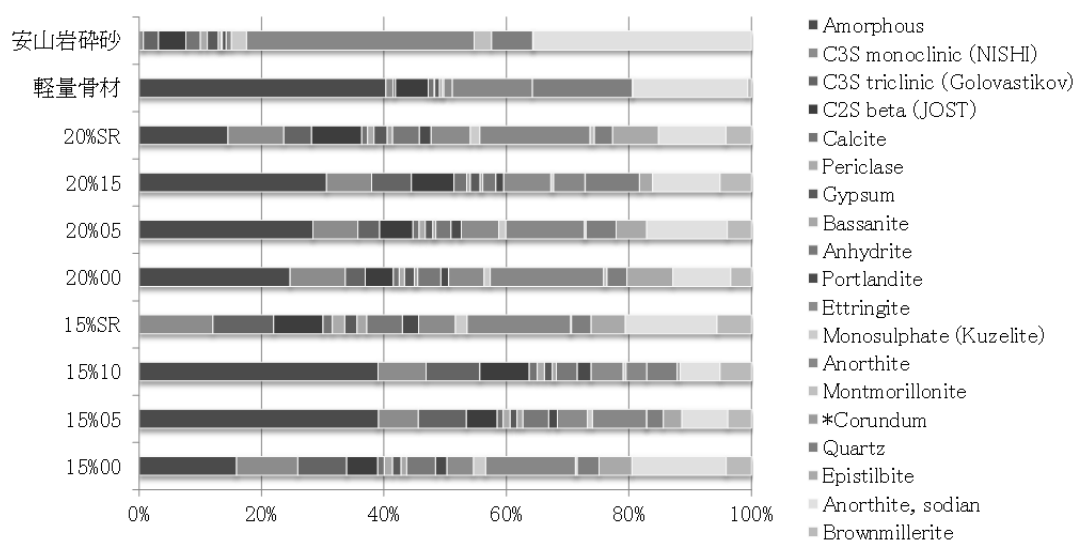


図 4.16 モルタルのリートベルト解析結果

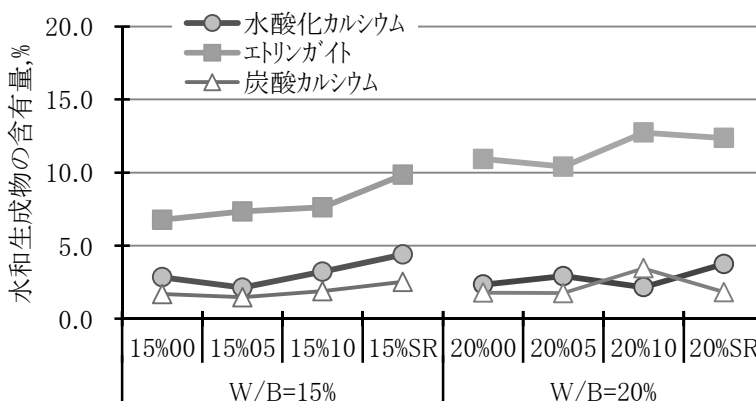


図 4.17 粉末 X 線回折パターンから求めた水和生成物の比較

4.3.5 実機試し練りによる検証

4.3.5.1 製造時および荷卸し時のフレッシュコンクリートの性状

製造時および荷卸し時のフレッシュコンクリートの性状を表 4.7 に示す。レディーミクストコンクリート工場での製造は、容量 3.0m³の水平 2 軸形強制練りミキサを用い、1 バッチの練混ぜ量を 1.0～1.5m³とし、1 調合あたり複数バッチ分のコンクリートを 1 台のトラックアジテータに積載した。コンクリートの練混ぜ時間は、水結合材比 20%では、細骨材、結合材、水、混和剤を投入してモルタルとして 90 秒間、粗骨材を投入してコンクリートとして 90 秒間、合計 180 秒間とした。水結合材比 15%では、モルタルとして 240 秒間、コンクリートとして 180 秒間、合計 420 秒間とした。人工軽量細骨材は表面水率 4.0%のものを使用した。練混ぜにおいて、特に人工軽量細骨材使用を用いた場合の練混ぜ時間への影響等は無かったが、実務での材料計量においては、人工軽量細骨材の使用量によっては残りの通常の細骨材量が過少になり、細骨材計量器の計量精度と許容計量誤差の関係に留意が必要である。

高性能減水剤の使用量については、直前の工場での室内試験結果を参考にして調合間で変化させたが、実機ミキサでは使用量に応じてスランプフローが上下しており、軽量細骨材を用いた場合の顕著な傾向は見い出せなかった。また、運搬中において、軽量細骨材に含まれた水分の出入りによるスランプフローの経時変化がやや懸念されたが、約 1 時間の運搬時間におけるスランプフローの経時変化は小さく、空気量の経時変化も小さいことがわかった。荷卸し時のスランプフローは、水結合材比 20%では 600～700mm、水結合材比 15%では 710～760mm の範囲となったが、フレッシュコンクリートの状態は粗骨材の分離もなく良好であり、そのまま模擬柱部材へ打ち込み、振動機による締固めを行った。

以上のように、通常の設定で製造可能であること、1 時間程度の運搬ではスランプフローおよび空気量の経時変化は小さいなど、十分実用可能であることを確認した。

表 4.7 製造時および荷卸し時のフレッシュコンクリートの性状

W/B %	調合 記号	SP/B %	MA/B %	時期	試験 時刻	SLF cm	Ts50 秒	CT ℃	AIR1 %	AIR2 %	UM kg/m³	
20	20-0	2.65	0.10	製造時	9:45	68.4	6.4	20	1.6	1.7	2.443	
		荷卸時		10:40	60.6	6.9	20.8	1.6	1.2	2.454		
	20-1	2.70		製造時	10:45	67.9	6.2	19.0	1.8	1.7	2.351	
		荷卸時		11:40	70.0	6.9	20.4	1.6	1.6	2.353		
15	15-0	2.25		製造時	14:35	72.3	11.7	21.0	1.5	2.5	2.445	
		荷卸時		15:30	75.4	10.2	22.8	1.9	2.6	2.442		
	15-1	2.10		製造時	15:33	69.3	12.5	21.0	1.9	2.1	2.361	
		荷卸時		16:45	71.5	15.4	21.8	1.6	1.6	2.374		
	15-2	1.93		製造時	16:30	69.8	11.3	21.0	1.9	2.3	2.324	
				荷卸時	17:55	71.7	13.4	20.8	2.1	2.3	2.323	

SP/B: 高性能減水剤の使用量, MA/B: 空気量調整剤(消泡剤)の使用量, SLF: スランプフロー, T_s50: 50cm フロー時間, CT: コンクリート温度, AIR1: エアメータの読み値による空気量, AIR2: JIS A1116 質量法による空気量, UM: 単位容積質量

4.3.5.2 模擬柱部材および小型供試体の温度、ひずみ、電気抵抗、圧縮強度

(1) 温度履歴

断面寸法 $1000 \times 1000 \text{mm}$ の模擬柱部材の温度履歴を、調合毎に図 4.18 に示す。図中には、模擬柱部材の中心部、外側（表面から 50mm 内部）およびその中間の 3 点、外気温、自己収縮ひずみ測定用の小型供試体（ $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ ）の温度履歴を示した。

通常細骨材のみを用いた水結合材比 20% の 20-0 の温度は、打込み時約 21°C に対して、中心部では 71.2°C 、外側では 56.2°C まで上昇した。中心部の温度上昇量は約 50°C 、中心部と外側の温度差は約 15°C となった。

一方、人工軽量細骨材のみを用いた水結合材比 20% の 20-1 の温度は、打込み時約 21°C に対して、中心部では 75.7°C 、外側（表面から 50mm 内部）では 50.5°C まで上昇し、温度上昇量は通常骨材より大きい約 55°C 、内外温度差は通常骨材とほぼ同等の約 15°C となった。

水結合材比 15% でも同様の傾向が見られ、通常細骨材のみを用いた 15-0、人工軽量細骨材を用いた 15-1、15-2 の順に、中心温度は 68.6°C 、 75.9°C 、 77.5°C 、温度上昇量は約 45°C 、 54°C 、 56°C となり、人工軽量骨材を用いた場合に最高温度は高くなる傾向を示した。内外温度差は、約 16°C 、 17°C 、 18°C と大きな差はない。

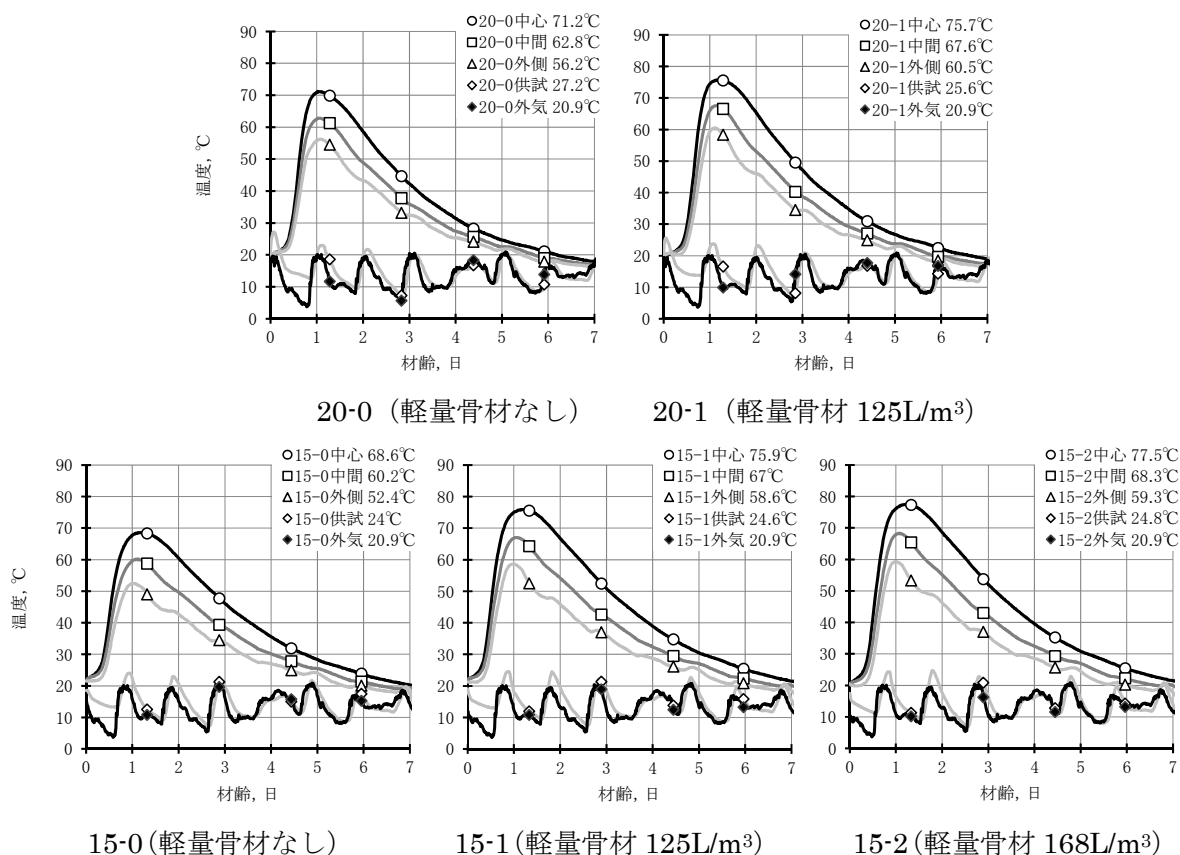
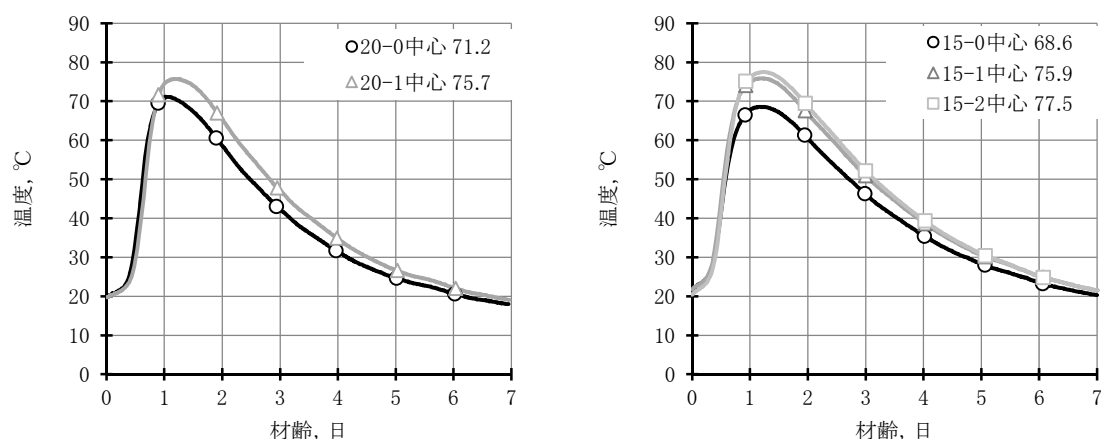


図 4.18 模擬柱部材と供試体（□ $100 \times 400 \text{mm}$ ）の温度履歴

擬柱部材の中心部の温度履歴の比較を図 4.19 に示す。同図に示すように、約 50℃までの温度上昇勾配は人工軽量細骨材の有無にかかわらず同様であるが、50℃を超えるあたりから温度差が生じ、最終的には人工軽量細骨材を用いた調合の最高温度は 5℃以上高くなった。一般に、コンクリートの含水率が高くなると比熱は大きくなり、セメント量が等しく時間当たりの発熱量が等しい場合には、水和による温度上昇量は高くなる。最高温度の上昇の影響要因としては、人工軽量細骨材の使用量は少ないものの含水率が高くなることによる比熱の上昇や、軽量骨材から供給される水分による水和の活発化などが考えられる。



(左図は水結合材比 20%, 右図は水結合材比 15%)

図 4.19 模擬柱部材（中心部）の温度履歴の比較

(2) ひずみ履歴

模擬柱部材および小型供試体に埋め込んだひずみ計による全ひずみの履歴を調合毎に図 4.20 に示す。図中には、模擬柱部材の中心部、外側（表面から 50mm 内部）、自己収縮ひずみ測定用の小型供試体（100×100×400mm）の全ひずみの履歴を示した。

通常の細骨材のみを用いた水結合材比 20%の 20-0 の全ひずみの履歴は、材齢 1 日までの温度上昇期にも収縮側を推移しており、自己収縮ひずみが熱膨張ひずみよりも大きいことが分かる。模擬柱部材の温度がピークを越え、ほぼ打込み時の温度まで低下してくる材齢 7 日時点の全ひずみは、この期間の線膨張係数が一定で、かつ外部からの拘束がない条件を仮定すれば、自己収縮ひずみとほぼ等しいと考えられるが、 -600×10^{-6} に達する大きなものとなった。

一方、人工軽量細骨材を用いた水結合材比 20%の 20-1 の全ひずみは、材齢 1 日までの温度上昇期には膨張側に増加しているため、自己収縮ひずみは熱膨張ひずみよりも小さいことが分かる。また、自己収縮ひずみとほぼ等しいと考えられる材齢 7 日時点の全ひずみは、

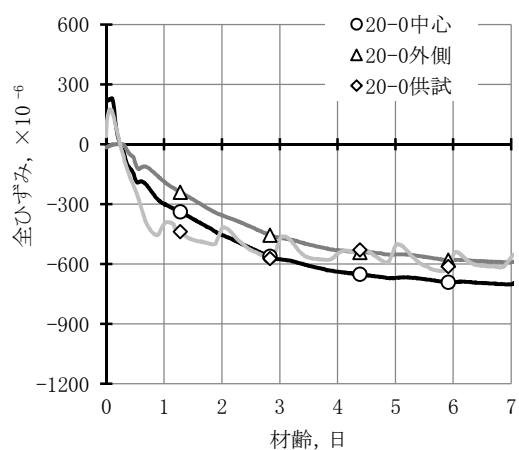
- 100×10^{-6} 程度の小さなものとなった。

水結合材比 15%でも同様の傾向が見られ、通常細骨材を用いた 15-0 の場合、打込み直後から収縮側を推移し、材齢 7 日では -1000×10^{-6} 程度のかかなり大きい収縮ひずみが確認された。なお、この水結合材比の領域の高強度コンクリートについては、通常は、第 2 章に示す収縮低減剤または収縮低減タイプの高性能減水剤が使用されている。

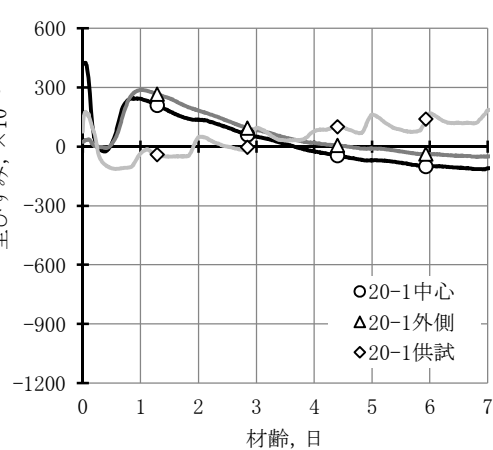
これに対し、人工軽量細骨材を用いた 15-1 および 15-2 は、材齢 1 日までの温度上昇期には膨張側を推移しており、自己収縮ひずみは熱膨張ひずみに比べて小さく、また、自己収縮ひずみとはほぼ等しいと考えられる材齢 7 日時点の全ひずみは、15-1 では -100×10^{-6} 程度、15-2 ではほぼゼロである。

$100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体による自己収縮ひずみ履歴の比較を図 4.21 に示す。ここでは、石灰石砕石を用いた水結合材比 20%の調合の線膨張係数を全期間 $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、安山岩砕石を用いた水結合材比 15%の調合の線膨張係数を全期間 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として温度履歴から熱ひずみを算出し、全ひずみから除去することで自己収縮ひずみを求めた。図 4.20 に示した全ひずみの履歴では、温度の日内変動の影響による日内振幅が見られるが、図 4.21 では振幅がほぼ除去されていることから、仮定した線膨張係数は概ね妥当なものと考えられる。同図によれば、通常細骨材のみを用いた水結合材比 20%の 20-0、水結合材比 15%の 15-0 の材齢 28 日での自己収縮ひずみはそれぞれ -600×10^{-6} 、 -1200×10^{-6} 程度の大きなものとなった。一方、人工軽量細骨材を用いた 20-1、15-1、15-2 の場合、高温履歴を受けない供試体の条件では自己収縮ひずみはほぼ除去され、 $+300 \times 10^{-6}$ 程度の膨張側を推移している。

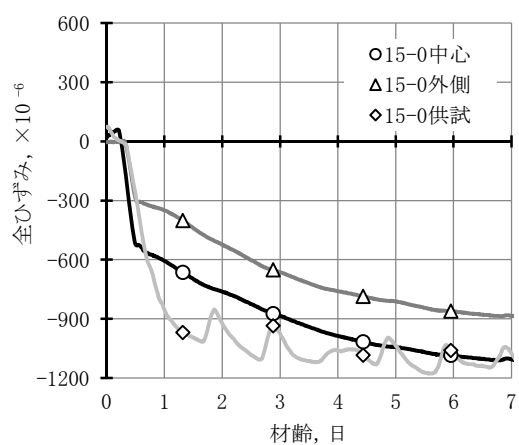
$1000 \times 1000 \times 1100\text{mm}$ の模擬柱部材について、全ひずみから図 4.21 と同様の方法で熱ひずみを除去したひずみの推移を図 4.22 に示す。このひずみは、自己収縮ひずみと、最大 20°C 程度の内外温度差に起因する内部拘束ひずみを含むものと考えられる。内部拘束ひずみ成分は、温度上昇期は中心部において収縮方向に、表層部においては膨張方向に作用する。したがって、自己収縮ひずみは、柱中央部では温度上昇時に同図のひずみのややプラス側を、一方、柱の表層付近はややマイナス側を推移していると考えられる。よって、人工軽量細骨材を用いた 20-1、15-1、15-2 の自己収縮ひずみは、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体では膨張側を推移したものの、高温を履歴した模擬柱部材では収縮側を推移しており、高温履歴によって自己収縮ひずみがやや増加した可能性が考えられる。なお、軽量細骨材の使用の有無にかかわらず内外温度差はほぼ同等であったことから内部拘束ひずみはほぼ同等と想定されるため、同図のひずみ差は自己収縮ひずみの差であり、軽量細骨材による自己収縮ひずみの低減効果は模擬柱部材においても顕著であることが確認された。



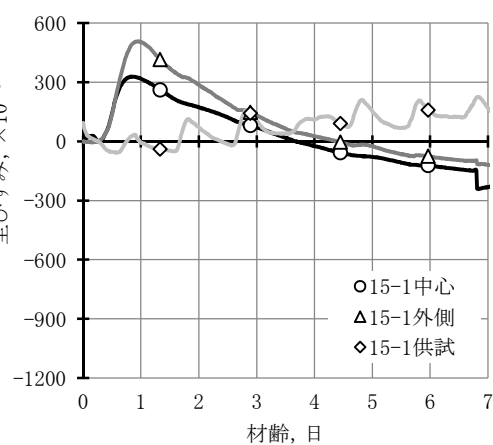
20-0 (軽量骨材なし)



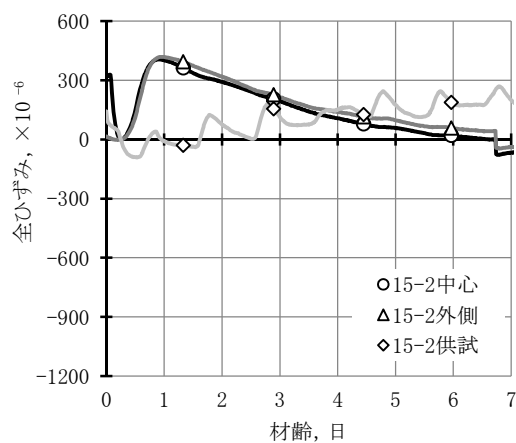
20-1 (軽量骨材 125L/m³)



15-0 (軽量骨材なし)



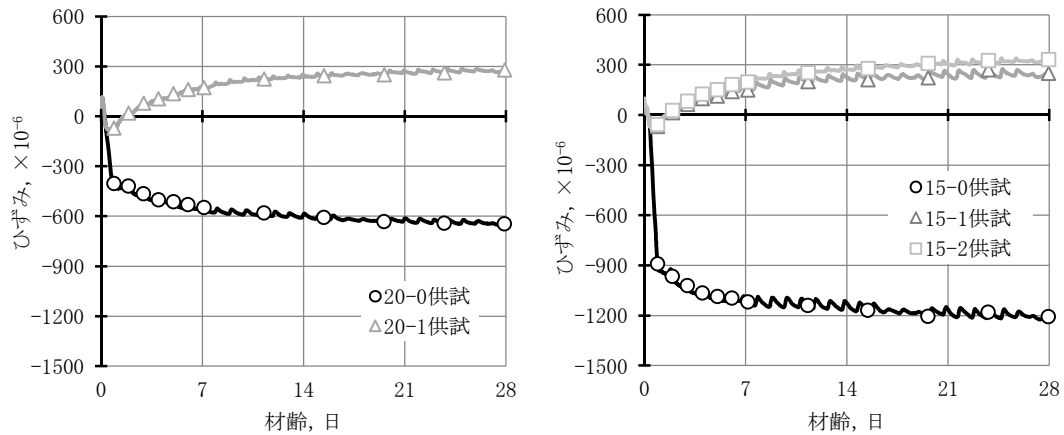
15-1 (軽量骨材 125L/m³)



15-2 (軽量骨材 168L/m³)

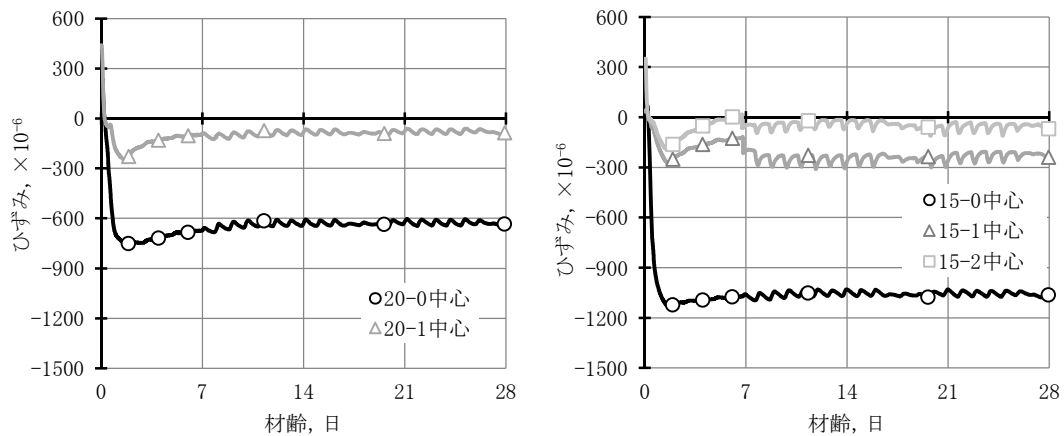
熱ひずみを含む

図 4.20 模擬柱部材と供試体 (100×100×400mm) の全ひずみ履歴

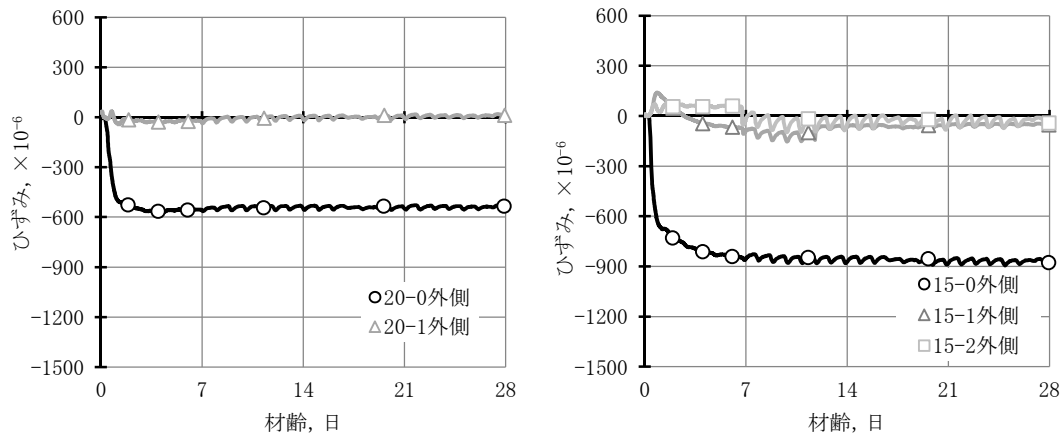


(左図は水結合材比 20%, 右図は水結合材比 15%)
水結合材比 20%は線膨張係数 $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 水結合材比 15%は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として熱ひずみを除去

図 4.21 供試体 (100×100×400mm) の自己収縮ひずみ履歴の比較



(柱中央部：左図は水結合材比 20%, 右図は水結合材比 15%)



(柱の表層から 50mm の位置：左図は水結合材比 20%, 右図は水結合材比 15%)

水結合材比 20%は線膨張係数 $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 水結合材比 15%は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として熱ひずみを除去

図 4.22 模擬柱部材のひずみ (熱ひずみ除去) 履歴の比

(3) 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を表 4.8 に示す。標準養生を行った供試体の圧縮強度は軽量骨材の置換率に応じてやや低下する傾向を示すが、 125L/m^3 の置換の場合の圧縮強度の低下率は 5%以下に収まった。図 4.11 の室内試験における人工軽量細骨材の使用量と圧縮強度低下率の関係式によれば、軽量骨材量 125L/m^3 および 168L/m^3 の強度は、表乾密度 1.87g/cm^3 とすると、各々 97%, 95%となる。この関係式は材齢 28 日のコア強度とよい対応を示した。

表 4.8 圧縮強度の比較

W/B %	調合 記号	標準養生		40℃温水養生	コア
		7 日	28 日	28 日	28 日
20	20-0	106 [1.00] (2.50)	128 [1.00] (2.51)	—	119 [1.00] (2.48)
	20-1	102 [0.96] (2.39)	127 [0.99] (2.39)	—	123 [1.03] (2.38)
15	15-0	122 [1.00] (2.52)	149 [1.00] (2.50)	167 [1.00] (2.52)	158 [1.00] (2.49)
	15-1	118 [0.97] (2.44)	140 [0.94] (2.43)	151 [0.90] (2.41)	153 [0.97] (2.39)
	15-2	114 [0.93] (2.38)	130 [0.87] (2.37)	151 [0.90] (2.36)	149 [0.94] (2.35)

単位：N/mm², []内は-0 との強度比, () 内は単位容積質量 t/m³

(4) 電気抵抗について

模擬柱部材では、水和熱による温度履歴の影響があるので、測定に先立ちセラミックセンサの電気抵抗と温度の関係を把握するための予備試験を行った。予備試験では、センサを $100\times 100\times 100\text{mm}$ 程度のコンクリートに埋め込んだ試験体を作製し、水中で温度変化を与え、電気抵抗の測定を行った。図 4.23 に示すように、温度 20～80℃の範囲において、電気抵抗の対数は絶対温度の逆数と概ね線形関係にあることを確認した。この関係を用いて、模擬柱部材のセラミックセンサの抵抗値は、20℃の場合に換算して比較することとした。

模擬柱部材と供試体 ($100\times 100\times 400\text{mm}$) のセラミックセンサによる電気抵抗の時間変化を図 4.24 に示す。模擬柱部材においても、4.3.2 と同様に、人工軽量細骨材を用いたコンクリートにおいては抵抗の上昇は遅れる傾向を示した。この期間は、水分の減少が小さく、人工軽量細骨材から水が供給されていたものと考えられる。

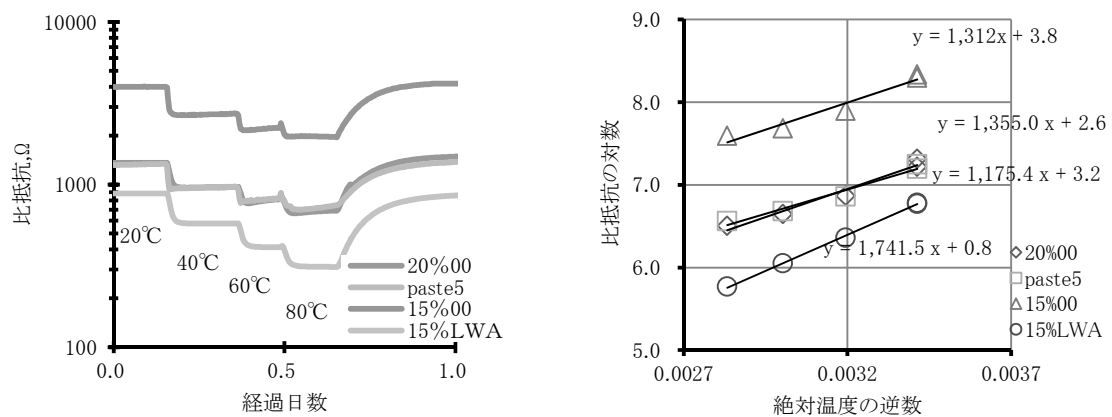


図 4.23 セラミックセンサの抵抗と温度の関係

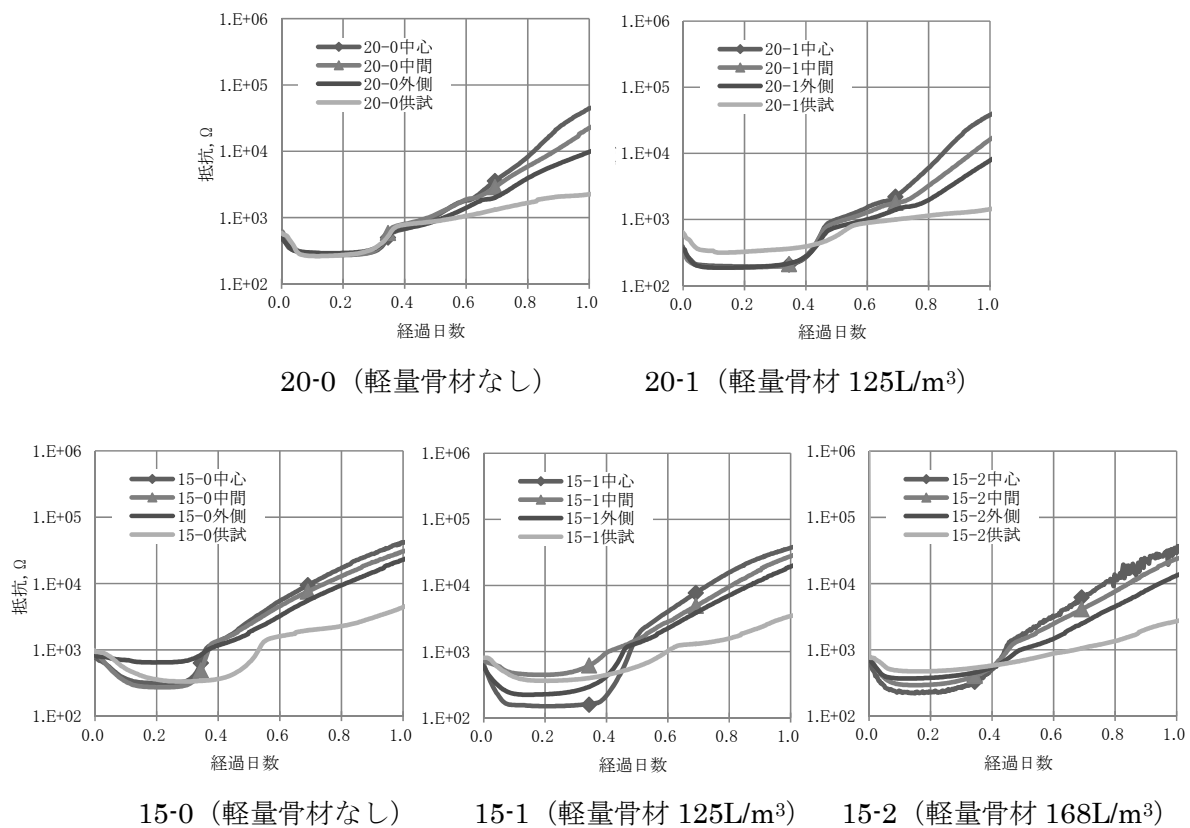


図 4.24 模擬柱部材と供試体 (100×100×400mm) のセラミックセンサによる抵抗

4.4 まとめ

第4章では、設計基準強度 100N/mm^2 を超える高強度コンクリートにおける自己収縮ひずみの低減を目的に、人工軽量細骨材の内部養生効果に着目して検討を行った。実務での適用を前提として、汎用的な膨張頁岩系の人工軽量細骨材を選択し、その使用量と自己収縮ひずみおよび圧縮強度との関係を求める実験、実機ミキサによる試し練りなどを行い、水結合材比 15～20%の範囲において、以下の結果を得た。

- 1) 細骨材の一部あるいは全部を人工軽量細骨材に置換しても、フレッシュコンクリートの性状への影響は小さい。
- 2) 材齢 1 日程度以内に生じる急速な自己収縮ひずみを、人工軽量細骨材の使用によって防止できる。また、セラミックセンサの電気抵抗の上昇が緩やかになることから、人工軽量細骨材からの水の供給が推察された。人工軽量細骨材の使用量と自己収縮ひずみ量は水結合材比にかかわらず良い相関関係を示し、自己収縮ひずみをゼロにするための人工軽量細骨材使用量は 125L/m^3 以上と計算される。
- 3) 高分子電気抵抗式湿度計による供試体孔内の湿度は、収縮ひずみが小さいものほど高く、人工軽量細骨材の使用量が大きいコンクリートほど高い。
- 4) 人工軽量細骨材を使用したコンクリートに強度発現の遅延はない。人工軽量細骨材の使用量と圧縮強度低下率についても良い相関関係を示し、汎用の膨張頁岩系の人工軽量細骨材でも、圧縮強度を確保しつつ自己収縮ひずみの低減が可能である。静弾性係数に及ぼす影響も比較的小さい。
- 5) ウェットスクリーニングモルタルの熱分析から、人工軽量細骨材を用いた場合、材齢 48 時間の水酸化カルシウム生成量が多くなる、また、材齢 91 日の試料の粉末 X 線回折分析から、普通細骨材を用いた場合の水和生成物との差異は無い。
- 6) 実機試し練りから、1 時間程度の運搬ではスランプフローおよび空気量の経時変化は小さく十分実用可能であること、模擬柱部材の最高温度は人工軽量細骨材を用いた場合に 5°C 以上高くなること、模擬柱部材においても自己収縮ひずみの低減効果は大きく、コア強度への影響は比較的小さいことを確認した。

第4章 参考文献

- 1) 黒岩秀介, 陣内浩, 並木哲, 名和豊春: 人工軽量細骨材による高強度コンクリートの自己収縮低減, 日本建築学会構造系論文集 Vol.79, No.695, pp.19-26, 2014.1
- 2) 小室努, 服部敦志: 高層コンクリート建築物の設計, コンクリート工学, Vol.51, No.1, pp.68-71, 2013.1
- 3) 日本建築学会: 膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状, p271, 2013.7
- 4) 小山明男: 軽量骨材の水分特性に着目したコンクリートの特性に関する最近の研究, コンクリート工学, Vol.40, No.6, pp.35-38, 2002.6
- 5) 五十嵐心一, 川村満紀, 神崎暁史: 軽量骨材の使用による高強度コンクリートの自己収縮の低減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.399-404, 2002.6
- 6) 高田和法, 柳井修司, 渡部貴裕, 一宮利通: 超高強度コンクリートの自己収縮低減に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1007-1012, 2003.7
- 7) 日紫喜剛啓, 高田和法, 大野俊夫, 一宮利通, 盛田行彦: 自己収縮を低減した 150N/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, No.781/V-66, pp.101-112, 2005.2
- 8) 成川史春, 藤木英一, 石川雄康: 人工軽量細骨材の自己収縮低減用材料としての適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.435-436, 2006.9
- 9) 裴晟哲, 早野博幸, 野口貴文, 丸山一平, 長井宏憲: 軽量コンクリートの自己収縮ひび割れ低減効果に関する研究, その 1 拘束下のひび割れポテンシャル評価, その 2 化学分析および細孔構造観察による評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.875-878, 2008.9
- 10) 裴晟哲, 早野博幸, 野口貴文, 長井宏憲: 軽量骨材の自己収縮ひび割れ低減効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.565-570, 2009.7
- 11) 裴晟哲, 早野博幸, 野口貴文, 長井宏憲: 軽量骨材の自己収縮ひび割れ低減効果に関する研究, その 3 モデルコンクリート試験体における長期材齢の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.273-274, 2009.8
- 12) Hoff, G.: The Use of Lightweight Fines for the Internal Curing of Concrete, Northeast Solite Corporation., 2002
- 13) RILEM report 41 : Internal curing of concrete, eds. K. Kovler and O.M. Jensen, RILEM Publications S.A.R.L., 2007
- 14) Dale P. Bentz and W. Jason Weiss : Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review, NISTIR 7765, 2011.2
- 15) ACI Committee 308 and ACI Committee 213: Report on Internally Cured Concrete Using Prewetted Absorptive Lightweight Aggregate, 2013.7
- 16) Philleo, R.: Concrete Science and Reality, Materials Science of Concrete II, American Ceramic Society, Westerville, Ohio, pp.1-8, 1991

-
- 17) Weber, S., and Reinhardt, H.: A Blend of Aggregates to Support Curing of Concrete, Proceedings of the International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway, pp.662-671, 1995
- 18) van Breugel, K., and de Vries, H.: Mixture Optimization of Low Water/Cement Ratio, High-Strength Concretes in View of Reduction of Autogenous Shrinkage, Proceedings International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes, University of Sherbrooke, Canada, pp.365-382, 1998.
- 19) Lura, P.: Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2003
- 20) Bentur, A., Igarishi, S., and Kovler, K.: Control of Autogenous Shrinkage Stresses and Cracking in High Strength Concretes, Proc. 5th International Symposium of High Strength/High Performance Concrete, Sandefjord, Norway, pp.1017-1026, 1999.6
- 21) Bentz, D., Lura, P., and Roberts, J. : Mixture Proportioning for Internal Curing. Concrete International, Vol.27, No.2, PP.35-40, 2005.2
- 22) 陣内浩, 黒岩秀介, 渡邊悟士, 寺内利恵子, 飯島真人, 阿部剛士, 小田切智明, 南輝弥 : 設計基準強度 150N/mm² の高強度コンクリートの強度管理手法の検討と品質管理結果, 日本建築学会技術報告集, Vol.13, No.25, pp.7-12, 2007.6
- 23) 日本建築学会 : JASS 5 M-701 (高強度コンクリート用セメントの品質基準) および 同附属書 3 (スラグせっこう系混和材の品質基準), 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, pp.716-719, 2009
- 24) 近藤連一, 関口明男, 皆川忠昌 : 人工軽量骨材の細孔径分布と膨張収縮特性, セメント技術年報, pp.485-492, 1966
- 25) 三浦隆広, 菊池雅史, 小山明男, 秋庭淳二 : 多孔質骨材の品質評価項目としての空隙特性, 日本建築学会構造系論文集, No.547, pp.1-7, 2001.4
- 26) 名和豊春, 出雲健司, 矢野めぐみ, 湯浅昇 : モルタル硬化体中の湿度変化と自己収縮の関係, セメント・コンクリート論文集, No.55, pp.218-225, 2001
- 27) 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.74, No.645, pp.1905-1912, 2009.11
- 28) 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.247-255, 2009.8
- 29) 黒岩秀介, 渡邊悟士, 陣内浩, 並木哲 : 収縮低減剤を用いた 150N/mm² 級コンクリートの諸特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.89-90, 2006.7
- 30) 小泉信一, 菅俣匠, 榊田佳寛 : 200N/mm² 級高強度コンクリートの強度発現性に及ぼすシリカフュームの反応の温度依存性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.659, pp.15-22, 2011.1

第5章 新しい収縮低減剤によるコンクリートの乾燥収縮対策

5.1 はじめに¹⁾

前章までは、比較的最近に問題が顕在化してきた高強度コンクリートの自己収縮ひずみの対策について述べてきた。一方、水セメント比が大きい一般のコンクリートでは、自己収縮ひずみは小さいものの、水分の逸散に伴う乾燥収縮ひずみが大きく、乾燥収縮ひび割れの低減は鉄筋コンクリート構造物の大きな課題の一つである。近年、コンクリート構造物の高耐久化に伴いひび割れに対する関心が高まっており、日本建築学会では、2008年に収縮ひび割れ制御設計・施工指針案を発刊し、2009年に建築工事標準仕様書 JASS 5 のなかで計画供用期間が長期の場合は使用するコンクリートの乾燥収縮ひずみに規定値を設けるなどの対応を行っている。

ひび割れの抑制には、収縮低減剤を使用してコンクリートの乾燥収縮を低減させる方法が有効である^{2, 3)}とされている。既存の代表的な収縮低減剤は、ポリオキシアルキレングリコールのアルキルエーテルを基本構造とした非イオン界面活性剤で、JASS 5 では、「セメント硬化体の毛細管空隙中の水の表面張力を低下させ、水の逸散蒸発に伴う毛細管張力を小さくし、コンクリートの乾燥収縮および自己収縮を低減する効果を持つ混和剤」と解説されている。しかし、既存の収縮低減剤は、コンクリートの空気量の調整を難しくし、耐凍害性を低下させる、レディーミクストコンクリート工場でのミキサやトラックアジテータ洗浄の際の泡立ちや回収水に悪影響を及ぼす等の指摘^{2, 4, 5)}があり、実際の工事に採用されることは少ない。

近年、従来とは異なる機構に基づいて開発された新しい収縮低減剤が実用化⁶⁾された。新しい収縮低減剤は、特殊ポリオキシアルキレングリコール誘導体を主成分とし、コンクリート中の水分保持によって収縮を低減するものである。

図 5.1 に、新しい収縮低減剤（新 SRA と称する）と既存の代表的な収縮低減剤（既存 SRA と称する）による水溶液の表面張力の測定結果を示す。固形分濃度 0.1, 1.0, 2.0 および 5.0wt% 水溶液を $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の条件に調温後、白金リングを用いるデュ・ニュイ法により表面張力を測定した。既存 SRA の表面張力は、水の 72.4mN/m に対して、0.1~5wt% の濃度で約 35mN/m まで低下している。一方、新 SRA の表面張力は、1wt% 以上の濃度で約 61mN/m を示しており、新 SRA の毛細管張力を低減する効果は、既存 SRA に比べて小さい。

図 5.2 に、新 SRA と既存 SRA を使用したモルタルの収縮ひずみおよび質量減少率の経時変化を示す。試験は JASS 5 M-402 附属書 1 に準拠して行い、新 SRA の使用量はセメント質量の 2%（固形分）とし、既存 SRA の使用量はセメント質量の 2%（液体）とした。新

SRA および既存 SRA の乾燥材齢 4 週での収縮ひずみは、SRA を使用しないプレーンモルタルのいずれも 70%程度であり、ほぼ同等である。一方、質量減少率の傾向は、SRA の種類によって異なる。既存 SRA を使用したモルタルの質量減少率はプレーンに比べて大きく、多くの水分がモルタル供試体から蒸発している。これは、既存 SRA の添加により空隙水の表面張力が低下し、水の蒸発平衡が成り立つ細孔の径が小さくなるため、水分蒸発量が増加したと考えられる。一方、新 SRA を使用したモルタルの質量減少率はプレーンモルタルに比べて小さく、新 SRA においては供試体からの水分蒸発の抑制により収縮を低減していると考えられる。保水性を有する新 SRA の特徴は、界面活性剤系の既存品と比較して、収縮低減効果を確保しつつ耐凍害性を改善させた点、コンクリートの製造性および施工性が良好な点である。

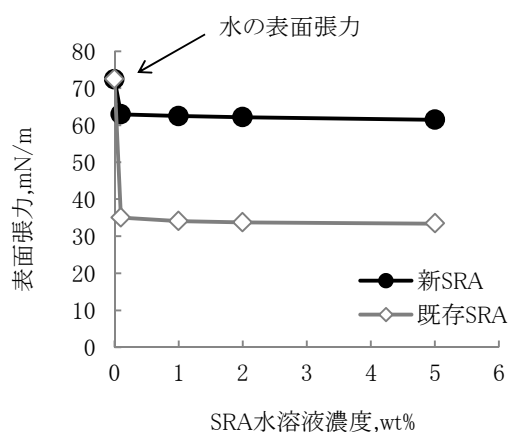


図 5.1 SRA 水溶液の表面張力

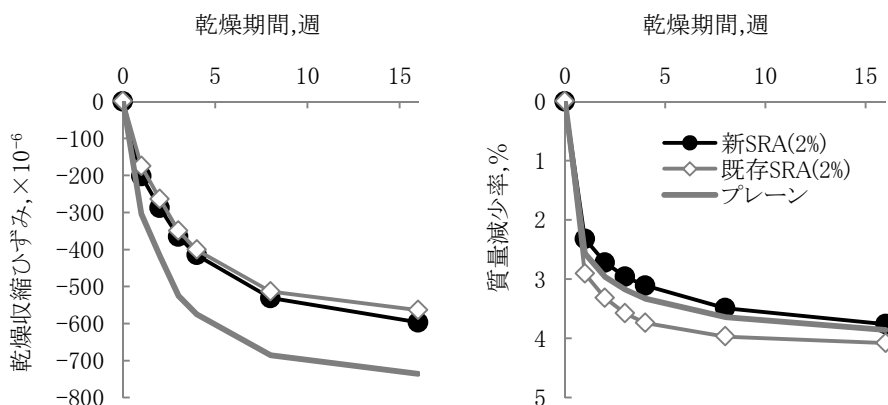


図 5.2 SRA モルタルの収縮ひずみと質量減少率の経時変化

第 5 章では、新 SRA を用いたコンクリートの特性、ひび割れ抵抗性、製造性および施工性について実験的検討を行い、その有効性を評価することとし、本章の構成は次のとおり

とした。

最初に、水セメント比および粗骨材種類が異なる 3 種類のコンクリートを用いて、収縮低減剤の種類や使用量がフレッシュ性状、強度、耐久性等のコンクリートの特性に及ぼす影響を調査した。特に、使用量が増えると乾燥収縮以外の性能に悪影響を与える懸念があったので、やや過大な使用量の範囲まで確認した。

次に、軽量コンクリート 2 種を対象に、新 SRA によるひび割れ抵抗性の改善効果を確認した。著者らは、既報⁶⁾において、普通コンクリートのひび割れ抵抗性を調査し、新 SRA の使用量が増大するに従い、拘束ひび割れ試験のひび割れ材齢が長くなり、ひび割れ抵抗性が向上することを報告した。本研究では、人工軽量骨材から十分な水分供給があるコンクリートにおいても、保水性を特徴とする新 SRA が有効であるかを拘束ひび割れ試験にて確認した。

最後に、新 SRA に期待されるコンクリートの製造性および施工性を 2 シリーズの実機製造試験により確認した。まず、レディーミクストコンクリート工場の実機ミキサで新 SRA を混和したコンクリートと一般のコンクリートを交互に連続で混練し、次バッチの一般のコンクリートに悪影響がないかを確認した。次に、工事現場にてトラックアジテータに新 SRA を添加・攪拌し、均等質なコンクリートができるかどうかを確認した。現場添加の場合は、単位水量を減じずに SRA を外割で添加することになるので、このようなコンクリートの品質変化についても確認した。

5.2 新しい収縮低減剤を用いたコンクリートの特性

5.2.1 実験概要

コンクリートの使用材料および調合を表 5.1 に示す。収縮低減剤の種類や使用量がフレッシュ性状、強度、耐久性等に及ぼす影響を把握するために、水セメント比・粗骨材種類が異なる 3 種類のコンクリートを用いて、表中の収縮低減剤の種類および使用量の組み合わせについて比較を行った。収縮低減剤は、保水性を有する新 SRA と、既存 SRA の 2 種類とした。新 SRA の使用量は 10kg/m^3 、 20kg/m^3 、 30kg/m^3 （固形分率 50%）の 3 水準とし、既存 SRA は標準使用量の 6kg/m^3 とした（図中では既存 SRA を EP と略記する）。粗骨材は硬質砂岩碎石または石灰碎石、水セメント比は 55% または 40% とした。セメントは普通ポルトランドセメントとし、高性能 AE 減水剤・AE 剤は市販品を用いた。コンクリートのスランプは 18cm、空気量は 4.5% を目標とした。なお、SRA は単位水量の一部と考え、単位水量から SRA 使用量に相当する水量を減じることとした。

これらの 15 種類のコンクリートについて、フレッシュ性状、圧縮強度（JIS A1108）、乾燥収縮（JIS A1129-1、附属書 A）、凍結融解抵抗性（JIS A1148）の試験を行い、9 種類のコンクリートについて、ブリーディング量（JIS A1123）、凝結時間（JIS A1147）、促進中性化深さ（JIS A1153）の試験を行った。また、フレッシュコンクリートの気泡間隔係数を浮力法^{7, 8)}により測定した。浮力法とは、フレッシュコンクリート中の気泡を粘性係数の大きな溶液中で分散し、水中を上昇させる際の気泡の浮力の変化を測定して、ストークスの法則を用いて気泡組織を解析するものである。

表 5.1 コンクリートの使用材料および調合

種類	調合 記号	W/C %	S/a %	単位量 kg/m ³						SRA* ¹	
				W	C	S1	S2	G1	G2	種類	kg/m ³
S40	S40-0	40	44.0	170	425	302	453	965	—	—	—
	S40-10									新 SRA	10
	S40-20										20
	S40-30										30
	S40-EP									既存 SRA	6
S55	S55-0	55	48.6	170	309	353	529	936	—	—	—
	S55-10									新 SRA	10
	S55-20										20
	S55-30										30
	S55-EP									既存 SRA	6
L55	L55-0	55	48.6	170	309	353	529	—	964	—	—
	L55-10									新 SRA	10
	L55-20										20
	L55-30										30
	L55-EP									既存 SRA	6

C: 普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)

S1: 石灰砕砂(表乾密度 2.70g/cm³, 吸水率 1.36%, FM=1.77, 微粒分量 3.9%)

S2: 山砂(表乾密度 2.60g/cm³, 吸水率 2.72%, FM=3.47, 微粒分量 0.82%)

G1: 硬質砂岩碎石(表乾密度 2.65g/cm³, 吸水率 0.86%, 微粒分量 2.9%)

G2: 石灰碎石(表乾密度 2.73g/cm³, 吸水率 0.79%, 微粒分量 2.1%)

*1 単位水量から SRA 使用量に相当する水量を減じた

5.2.2 実験結果および考察

5.2.2.1 フレッシュ性状・ブリーディング量・凝結時間

フレッシュコンクリートの試験結果を表 5.2 に示す。高性能 AE 減水剤の使用量は、新 SRA を混和すると SRA 無混和に比べてやや減少する傾向を示し、新 SRA に若干の減水効果が認められた。AE 剤の使用量は、既存 SRA では SRA 無混和の 7~12 倍の量に増加したが、新 SRA では AE 剤の大幅な増量は不要であった。ブリーディング量は、新 SRA の使用量に応じて低減する傾向を示し、新 SRA の使用量 20kg/m³では無混和の 1/2 以下となった。一方、既存 SRA のブリーディング量には減少は見られなかった。凝結時間は、新 SRA の混和により始発・終結ともやや遅延(+60 分以下)したが、既存 SRA に比べると遅延の程度は小さかった。浮力法による気泡間隔係数は、新 SRA を混和した場合は無混和と同等かやや小さく、既存 SRA を混和した場合は 400 μm 程度以上に増加した。

以上のように、新 SRA は、使用量 30kg/m³までの範囲において、スランプ、ブリーディ

ング量、凝結などへの悪影響は小さいことが明らかになった。また、連行空気の管理は通常とほぼ同様でよく、既存 SRA に比べて凍結融解抵抗性や製造性に有利と思われる結果が得られた。さらに、練混ぜ時には単位水量や減水剤使用量を増やす必要はないが、打込み後には水の移動を拘束し、ブリーディングを抑制する効果が有ることが分かった。

表 5.2 フレッシュコンクリートの試験結果

調合 記号	SRA kg/m ³	SP /C%	AE /C%	SL cm	AIR %	CT ℃	UM kg/m ³	BD cm ³ /cm ²	凝結 h:m		AVA μm
									始発	終結	
S40-0	0	0.85	0.0045	18.2	5.5	22	2,315	0.07	6:10	8:15	272
S40-10	10(新)	0.75	0.0065	19.0	5.6	22	2,310	—	—	—	245
S40-20	20(新)	0.75	0.0065	16.4	5.5	22	2,317	0.02	6:35	8:55	251
S40-30	30(新)	0.85	0.0075	19.2	5.1	22	2,318	—	—	—	216
S40-EP	6(既存)	0.90	0.0550	19.2	4.1	23	2,345	—	—	—	395
S55-0	0	1.20	0.0025	17.6	5.2	22	2,288	0.13	7:05	9:35	377
S55-10	10(新)	1.10	0.0050	18.2	5.8	22	2,279	0.08	7:30	9:50	288
S55-20	20(新)	1.05	0.0020	18.0	5.0	23	2,292	0.06	7:25	9:50	310
S55-30	30(新)	1.10	0.0022	18.5	4.4	23	2,311	0.04	7:50	10:25	298
S55-EP	6(既存)	1.15	0.0300	16.6	4.9	23	2,311	0.16	7:45	10:30	399
L55-0	0	1.25	0.0035	18.6	5.9	23	2,305	0.15	6:40	9:20	315
L55-10	10(新)	1.15	0.0040	19.5	5.9	22	2,314	—	—	—	250
L55-20	20(新)	1.15	0.0030	19.3	6.0	22	2,315	0.06	7:35	10:10	184
L55-30	30(新)	1.00	0.0020	19.9	5.6	22	2,327	—	—	—	241
L55-EP	6(既存)	1.25	0.0250	18.4	4.6	22	2,349	—	—	—	711

SP:高性能 AE 減水剤 標準形 I 種(ポリカルボン酸エーテル系化合物)

AE:AE 剤 I 種(高アルキルカルボン酸系イオン界面活性剤)

SL:スランプ, AIR:空気量, CT:コンクリート温度, UM:単位容積質量, BD:ブリーディング量

AVA:浮力法による気泡間隔係数

5.2.2.2 圧縮強度

標準養生供試体の圧縮強度を図 5.3 に示し、各材齢の SRA 無混和のコンクリートに対する強度比を図 5.4 に示す。新 SRA の使用量が増加すると、圧縮強度は低下する傾向を示した。また、新 SRA を 20kg/m³ 混和した場合の強度比は、材齢 4 週において 90～92%、材齢 13 週において 93～96%となり、材齢が進むにつれて強度比は回復する傾向を示した。既存 SRA (図中では EP と略記) にも初期材齢の強度低下は認められたが、新 SRA のほうが強度比は小さく、実務においては水セメント比を下げる等の対策が必要と考えられた。

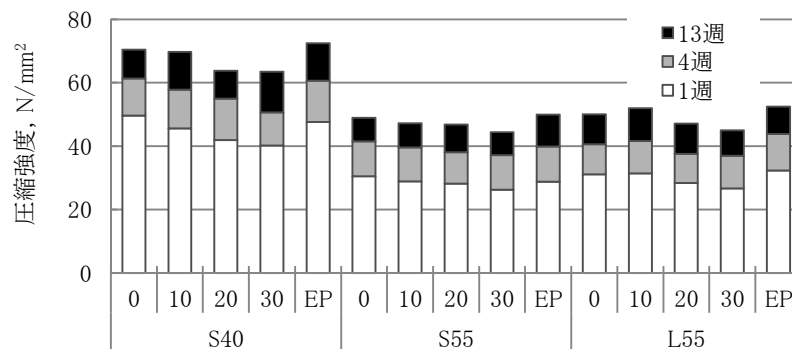


図 5.3 圧縮強度試験の結果

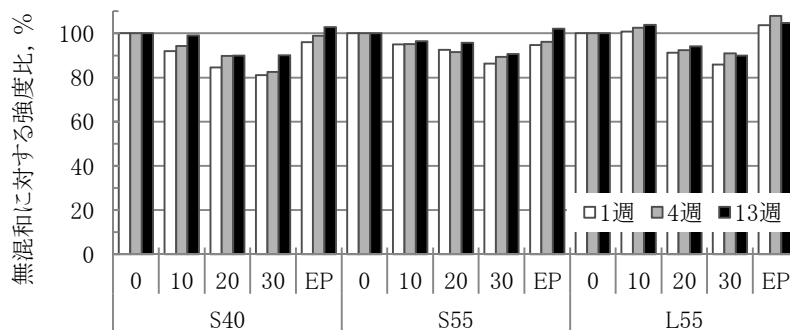


図 5.4 無混和に対する圧縮強度の比

5.2.2.3 乾燥収縮

乾燥収縮ひずみの経時変化を図 5.5 に示し、各乾燥材齢における SRA 無混和に対する乾燥収縮ひずみの比を収縮比として図 5.6 に示す。収縮ひずみは新 SRA の使用量 0～30kg/m³ の範囲において、使用量に応じて直線的に低減する傾向を示し、新 SRA を 20kg/m³ 混和すると、既存 SRA (図中では EP と略記) によるコンクリートの収縮ひずみとほぼ同等になった。また、新 SRA を 20kg/m³ 混和したコンクリートの収縮比は、乾燥期間 4 週において 59～64%、26 週において 76～89% となり、乾燥期間が進むにつれて収縮比は大きくなった。ただし、乾燥材齢 52 週までの乾燥収縮ひずみの曲線はいずれもほぼ収束の傾向にあるので、新 SRA を混和したコンクリートと無混和との乾燥収縮ひずみの差は、最終乾燥収縮ひずみにおいても乾燥材齢 52 週時点とほぼ等しいと推察される。

3 種類のコンクリート (SRA 無混和、新 SRA を 20kg/m³ 混和、既存 SRA を混和) の質量減少率の経時変化を図 5.7 に示し、乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係を図 5.8 に示す。新 SRA を混和したコンクリートの質量減少率は、SRA 無混和と比較して小さい。一方、既存 SRA を混和したコンクリートの質量減少率は、SRA 無混和とほぼ同等か、S55 と L55 (W/C=55%) の長期材齢ではやや大きい。また、図 5.8 によれば、池尾らの研究⁹⁾にもあ

るように、特に乾燥初期において、既存 SRA の質量減少は SRA 無混和と同等であるにもかかわらず、収縮ひずみが小さくなる傾向が見られた。著者らは、既報 ⑥において、SRA 無混和、新 SRA を混和、既存 SRA を混和した 3 種類の硬化モルタルについて、水銀圧入により細孔構造を測定し、新 SRA と既存 SRA のいずれも 5nm 以上の細孔量が増加していることを確認した。新 SRA と既存 SRA のいずれも細孔の粗大化および若材齢の強度低下がみられるが、新 SRA の質量減少が小さい点に、新 SRA の保水効果が確認される。

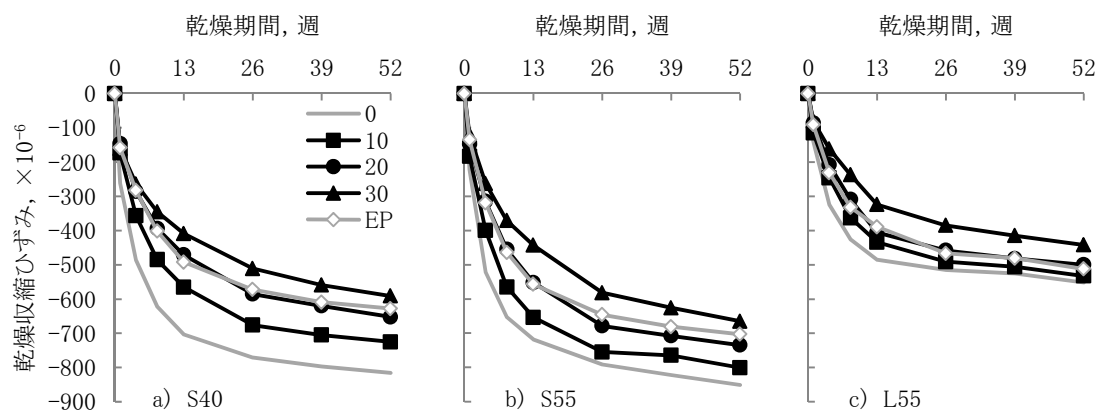


図 5.5 乾燥収縮ひずみの経時変化

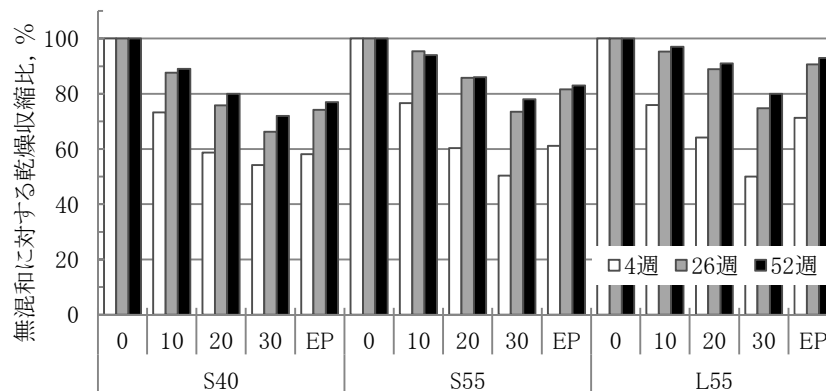


図 5.6 無混和に対する乾燥収縮ひずみの比

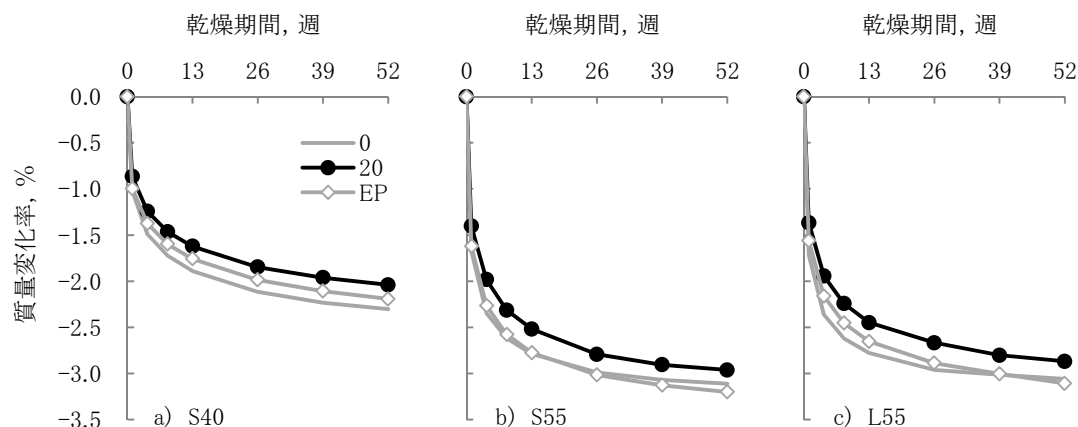


図 5.7 質量減少率の経時変化

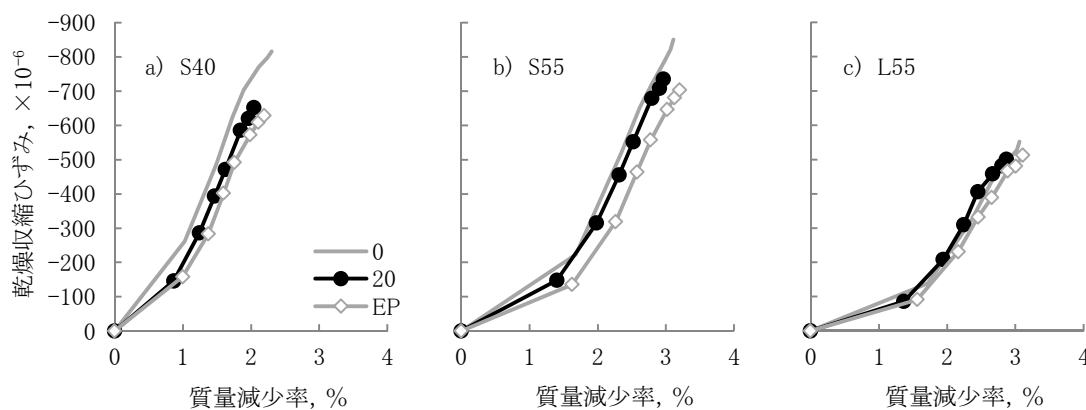


図 5.8 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係

5.2.2.4 凍結融解抵抗性

凍結融解抵抗性試験による相対動弾性係数の推移を図 5.9 上段に示し、耐久性指数を図 5.10 に示す。JASS 5²⁾では、収縮低減剤を使用するコンクリートは、凍結融解抵抗性が劣る場合があるとしている。本試験においても、既存 SRA によるコンクリートは、良好な耐久性の目安である 300 サイクルで相対動弾性係数 60% 以上を満足していない。本試験では、既存 SRA によるコンクリートは、目標の空気量を満足したものの、浮力法による気泡間隔係数は $400\mu\text{m}$ 程度以上となったため、良好な空気泡を連行できなかったことが凍結融解抵抗性の低下の原因の一つと考えられる。一方、新 SRA を混和したコンクリートは、SRA 無混和のコンクリートと比較して、使用量 30kg/m^3 では水セメント比 55% において明らかに劣ったが、使用量 10kg/m^3 、 20kg/m^3 では大きく劣ることはなかった。

なお、石灰碎石を用いた水セメント比 55% のコンクリート (L55) の凍結融解抵抗性は、同じ水セメント比の硬質砂岩碎石を用いたコンクリート (S55) に比べて劣る傾向を示した。

石灰石骨材を用いたコンクリートの耐凍害性はやや低下するという研究報告^{10, 11)}は複数ある。千歩ら¹⁰⁾は、石灰石は線膨張係数が小さいため、粗骨材とモルタルとの線膨張係数の差により生じる微視的溫度応力などを、耐凍害性の低下の原因としてあげている。

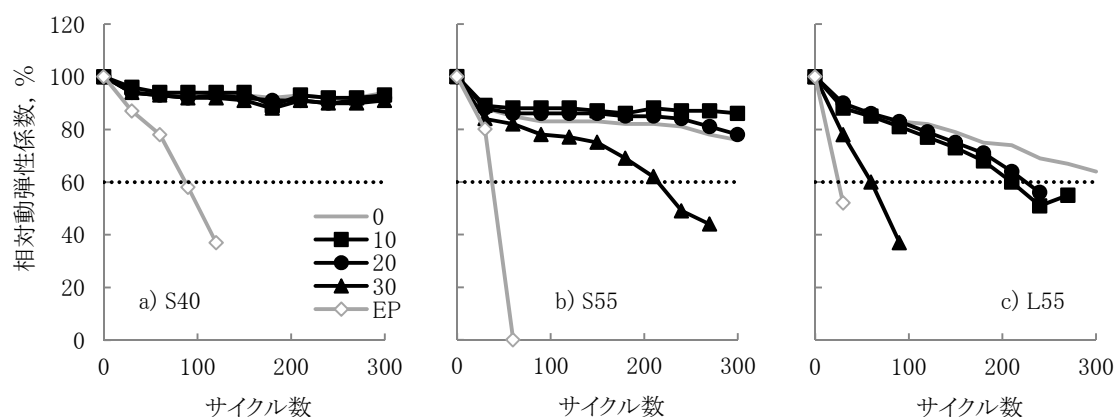


図 5.9 凍結融解抵抗性試験による相対動弾性係数の推移

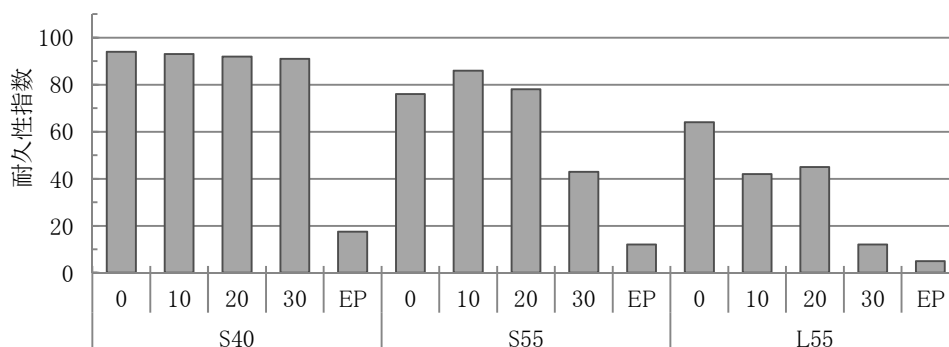


図 5.10 凍結融解抵抗性試験による耐久性指数

5.2.2.5 促進中性化深さ

促進中性化試験による中性化深さの推移を図 5.11 に示し、中性化速度係数を図 5.12 に示す。中性化速度係数は、促進期間 4 週および 26 週の中性化深さ(mm)を、促進期間(週)の平方根で除して求めた。新 SRA を混和したコンクリートの促進期間 4 週の中性化速度係数は無混和よりも大きいが、促進期間 26 週では無混和と比較して同等かやや改善される傾向を示した。また、既存 SRA にも中性化抵抗性の改善効果が認められた。既存 SRA の中性化抑制の原因として、全ら¹²⁾は既存 SRA の消泡作用による緻密化、八十島¹³⁾らは空気量の減少をあげている。一方、新 SRA の空気量は無混和のコンクリートとほぼ等しいので、新 SRA の中性化抑制に関しては空気量以外の要因が考えられる。大和ら¹⁴⁾の研究では、コ

ンクリートの質量減少率が小さいほど中性化速度係数が小さくなっている。新 SRA を混和したコンクリートは、圧縮強度がやや低いために初期の中性化は早く進行するが、質量減少率が小さく乾燥が抑制されるため、長期的な中性化抵抗性が改善されたと考えられる。

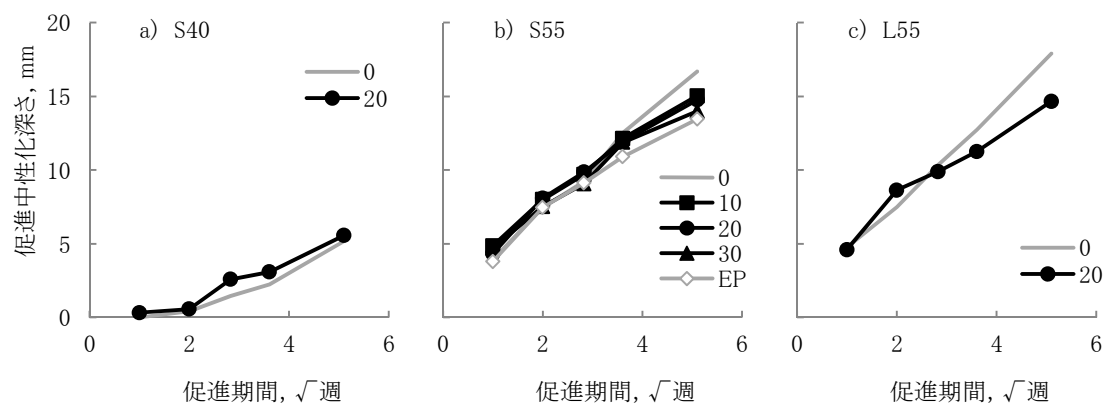


図 5.11 促進中性化試験による促進中性化深さの推移

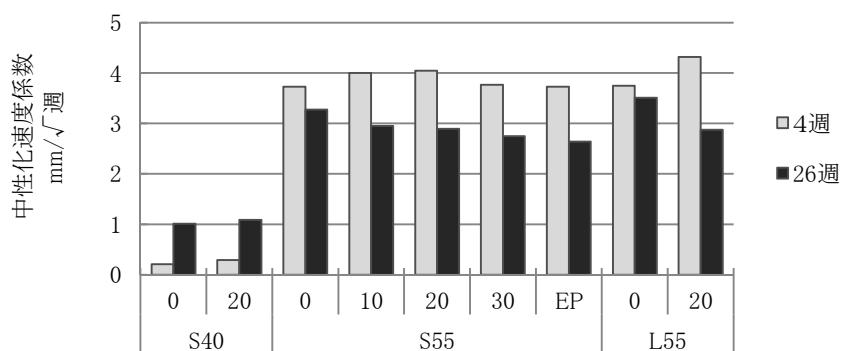


図 5.12 促進中性化試験による中性化速度係数

5.3 新しい収縮低減剤を用いたコンクリートのひび割れ抵抗性

5.3.1 実験概要

著者らは、既報⁶⁾において、新 SRA の使用量を 0kg/m^3 、 10kg/m^3 、 20kg/m^3 （固形分率 50%）の 3 水準、粗骨材を硬質砂岩碎石、石灰碎石の 2 水準とする 6 調合の普通コンクリート（W/C=50%）について、ひび割れ抵抗性を調査し、この結果、新 SRA の使用量が増大するに従い、拘束ひび割れ試験のひび割れ材齢が長くなり、ひび割れ抵抗性が向上することを報告した。

本実験では、人工軽量骨材を用いた軽量コンクリート 2 種を対象に新 SRA によるひび割れ抵抗の改善効果を確認することとした。人工軽量骨材は、コンクリート硬化体からの水分蒸発を抑制する効果はないものの、蒸発によって失った水分を補填することにより、乾燥によりコンクリート内部に発生するメニスカスの量を抑制すると考えられる。このような水分供給が十分なコンクリートにおける新 SRA の効果の確認を実験の目的とした。

実験に用いた新 SRA 有・無の 2 種類のコンクリートの使用材料および調合を表 5.3 に示す。新 SRA の使用量は 15kg/m^3 （固形分 7.5kg/m^3 ）とし、単位水量は 185kg/m^3 とした。

表 5.3 ひび割れ抵抗性試験の使用材料および調合

調合記号	W/C %	S/a %	単位量 kg/m^3						混和剤使用量 /C%	
			W	C	S1	S2	G	SRA	Ad	AE 助剤
無混和	54.2	49.8	185	342	388	295	426	—	0.8	0.3
						340	545			
新 SRA	54.2	49.8	185	342	388	295	426	15*1	0.8	0.3
						340	545			

S2 および G の上段は絶乾、下段は表乾

C: 普通ポルトランドセメント, W: 上水道水

S1: 山砂 60%と砕砂 40%の混合砂(表乾密度: 2.62g/cm^3 , 吸水率 1.59%)

S2: 人工軽量細骨材(絶乾密度 1.65g/cm^3 , 表乾密度: 1.90g/cm^3 , 吸水率 15.5%)

G: 人工軽量粗骨材(絶乾密度 1.29g/cm^3 , 表乾密度: 1.65g/cm^3 , 吸水率 27.0%)

SRA: 新収縮低減剤, Ad: AE 減水剤

*1 単位水量から SRA 使用量に相当する水量を減じた

試験項目は、フレッシュ性状、圧縮強度、乾燥収縮、拘束ひび割れ試験とした。圧縮強度の試験材齢は 1 週、4 週、13 週とし、供試体は打込み翌日に脱型後、材齢 7 日までを標準養生 (20°C 水中)、7 日以降を $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{RH}$ で保管した。乾燥収縮は、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体を 2 体作製し、埋込み型ひずみ計 (KM100BT) による連続測定を行った。供試体

は、打込み翌日に脱型し、材齢 7 日まで 20℃水中養生とし、7 日以降を 20℃・60%RH の恒温恒湿室内で保管した。拘束ひび割れ試験は、図 5.13 に示すように、100×100×1000mm に拘束筋 φ32mm-1100mm（両端 450mm の区間は M33 相当のネジきり）を埋設した試験体を用い、拘束筋中央部に貼付した表・裏 2 枚のひずみゲージでひずみの連続測定を行った。供試体数は 2 体とし、養生条件は圧縮強度および乾燥収縮供試体と同様とした。

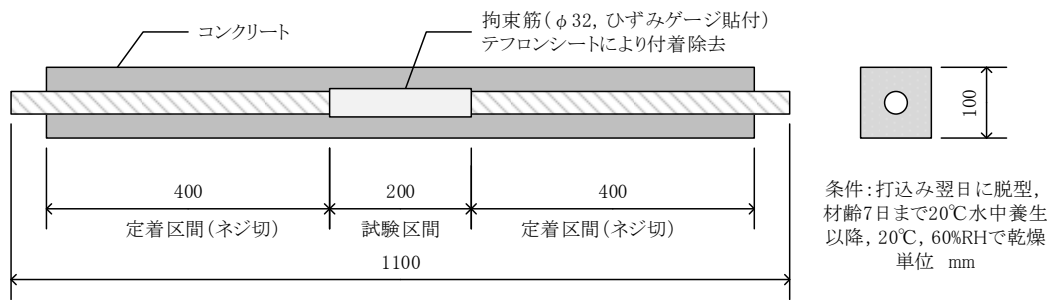


図 5.13 ひび割れ抵抗性試験体の詳細

5.3.2 実験結果および考察

5.3.2.1 フレッシュ性状・圧縮強度

フレッシュコンクリートの試験結果および圧縮強度の試験結果を表 5.4 に示す。新 SRA を混和した場合の強度比は、材齢 1 週，4 週，13 週において各々 90%，92%，92% となり，前節の普通コンクリートと比較して，材齢が進むにつれて強度比が改善する傾向がやや小さいものの，ほぼ同様の強度比となった。

表 5.4 フレッシュコンクリートおよび圧縮強度の試験結果

調合記号	フレッシュ試験					圧縮強度 N/mm ²		
	SL	SLF	CT	AIR	UM	標準水中	7 日以降気乾	
	cm	cm	℃	%	t/m ³	7 日	28 日	91 日
無混和	24.0	49.0×48.5	20.1	5.5	1.818	26.9 (1.87)	43.0 (1.75)	51.4 (1.71)
新 SRA	24.4	47.5×47.0	19.9	6.1	1.814	24.1 (1.86)	39.5 (1.77)	47.5 (1.71)

SL:スランプ, SLF:スランプフロー, CT:コンクリート温度, AIR:空気量, UM:単位容積質量

()内の数字は供試体の単位容積質量(t/m³)

5.3.2.2 乾燥収縮・収縮拘束応力

埋込み型ひずみ計による自由ひずみの経時変化を図 5.14 に示す。自由ひずみには、材齢 1 週までの水中養生期間において 40×10^{-6} 程度の膨張が見られた。材齢 1 週を原点として乾燥収縮ひずみを算出すると、乾燥材齢 4 週（材齢 5 週）において SRA 無混和の乾燥収縮ひずみは 275×10^{-6} 、新 SRA 混和は 209×10^{-6} 、SRA 無混和に対する乾燥収縮ひずみの比（収縮比）は 76% となった。また、乾燥材齢 26 週では、SRA 無混和の乾燥収縮ひずみは 719×10^{-6} 、新 SRA 混和は 635×10^{-6} 、収縮比は 88% となり、前節とはひずみの測定方法や新 SRA の使用量がやや異なるものの、軽量コンクリートにおいても概ね普通コンクリートと同様の収縮低減効果が得られることを確認できた。

乾燥収縮が鉄筋に拘束されることにより発生するコンクリートの引張応力（拘束収縮応力）の経時変化を図 5.15 に、ひび割れ発生時の材齢、応力、各種ひずみを表 5.5 に示す。コンクリートの応力は、ひずみゲージによる鉄筋ひずみ、コンクリートと鉄筋の断面積比、鉄筋のヤング係数から換算した。計測の零点はコンクリート打込み直後とした。拘束応力は材齢 1 週までの水中養生期間において圧縮側に増大し、圧縮応力のピークは SRA の有無によらずほぼ同等の値となった。材齢 1 週以降の拘束応力は乾燥に伴い引張側に増大するが、その増大割合は SRA 無混和のほうが大きい。また、ひび割れ発生材齢は、SRA 無混和の 27.7 日に対して、新 SRA 混和は 40.3 日に増大した。このように、軽量コンクリートにおいても、新 SRA の効果が顕著に認められ、新 SRA の混和によって拘束収縮応力が低減し、ひび割れ材齢が長くなることを確認できた。

なお、新 SRA 混和の収縮ひび割れ発生強度（ひび割れ発生時の応力）は、無混和より小さい。一方、新 SRA 混和のひび割れ発生時の拘束引張ひずみは、無混和より大きい。したがって、新 SRA 混和のヤング係数は小さく、クリープは大きいことも考えられるが、自由収縮供試体のひずみにややばらつきが見られたため、これらについては今後の検討課題としたい。

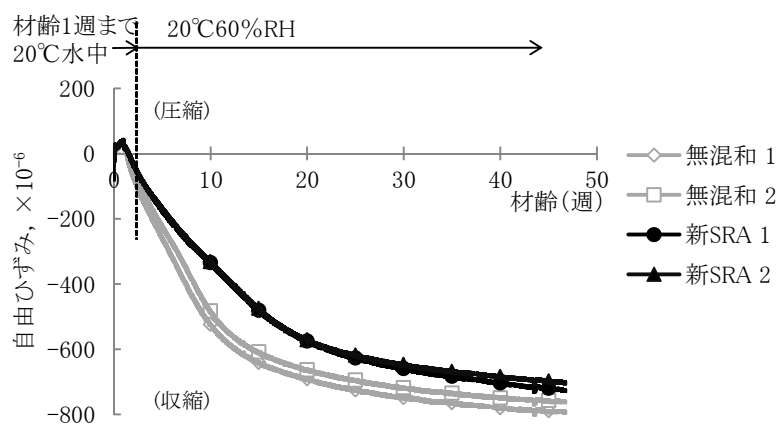


図 5.14 自由ひずみの経時変化

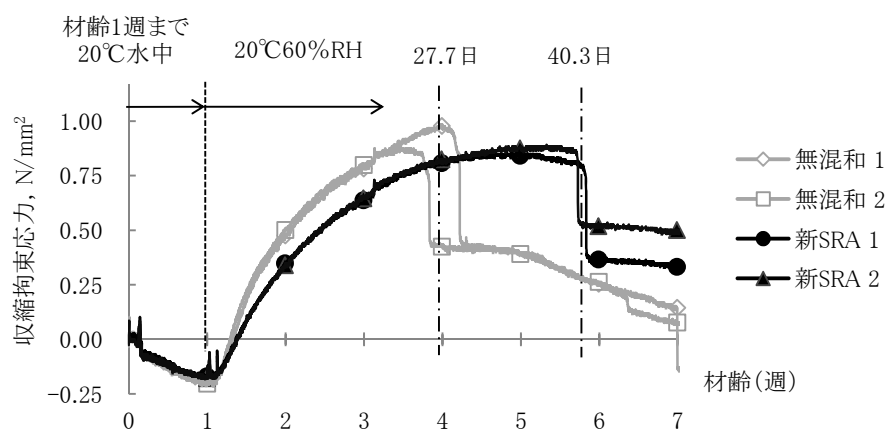


図 5.15 収縮拘束応力の経時変化

表 5.5 ひび割れ発生時の材齢，応力，各種ひずみ

調合記号		材齢 日	応力 (ひび割れ発生強度) N/mm ²	鉄筋 ひずみ × 10 ⁻⁶	自由収縮 ひずみ × 10 ⁻⁶	拘束引張 ひずみ × 10 ⁻⁶
無混和	1	29.1	0.92	-51	-183	135
	2	26.2	0.83	-46		
	平均	27.7	0.88	-49		
新 SRA	1	40.6	0.77	-43	-198	153
	2	40.0	0.85	-47		
	平均	40.3	0.81	-45		

5.4 新しい収縮低減剤を用いたコンクリートの製造性・施工性

5.4.1 実験概要

著者らは、既報⁶⁾において、新 SRA を混和したコンクリートについてレディーミクストコンクリート工場で製造実験を実施し、新 SRA を混和したコンクリートは通常の場合と同様に実機ミキサで製造でき、フレッシュ性状、圧縮強度、乾燥収縮率のいずれも十分な性能が得られることを報告した。

従来の界面活性剤系の収縮低減剤は、レディーミクストコンクリート工場の実機ミキサで練混ぜを行った場合、他の工事現場に出荷する次のバッチのスランブや空気量に悪影響を及ぼすことが有るため、実機ミキサで混練せずに、トラックアジテータに積載後のコンクリートに添加して攪拌する製造方法が一般に行われている。一方、新 SRA は、連行空気の管理は通常とほぼ同様でよく、実機ミキサで混練しても次のバッチのコンクリートへの影響が小さいと予想される。そこで、本実験では、通常の出荷を想定し、レディーミクストコンクリート工場の実機ミキサで新 SRA を混和したコンクリートと一般のコンクリートを交互に連続で混練する方法（シリーズ 1）と、工事現場でトラックアジテータに新 SRA を添加して攪拌する方法（シリーズ 2）による製造実験を行った（図 5.16 参照）。

実験に用いたコンクリートの使用材料および調合を表 5.6 に示す。

シリーズ 1 では、高炉スラグ系混和材（BS）の置換率を 45.2%とした 33-15-20BB 相当のコンクリートを用いて、新 SRA を 15kg/m^3 （固形分 7.5kg/m^3 ）混和した「BB-SRA」と、新 SRA を混和しない「BB-無混和」のコンクリートを連続で 3 回繰り返して製造した。コンクリートは、工場出荷時のフレッシュ性状を確認後、工事現場まで 20～40 分かけて運搬し、現場到着時のフレッシュ試験および供試体採取を行った。試験項目は、フレッシュ性状、ブリーディング量、圧縮強度、乾燥収縮率、促進中性化深さとし、既存の収縮低減剤で指摘される空気量の調整の困難さおよび次バッチへの悪影響の有無を確認した。また、供試体採取後、コンクリートポンプで圧送し、スラブに打ち込み、左官仕上げを行い、施工性を確認した。

シリーズ 2 では、33-15-20N の JIS 認証品に、工事現場にて新 SRA を外割で 15kg/m^3 添加したコンクリートと、33-18-20N の JIS 認証品のコンクリートを比較した。ここで、33-15-20N の新 SRA 添加前のコンクリートを「N-添加前」、添加後のコンクリートを「N-SRA 後添」、比較用の 33-15-20N を「N-無混和」と称す。なお、新 SRA をトラックアジテータに添加後の攪拌時間は中速（ドラム回転数 7～11rpm 程度）で 2 分間とした。試験項目は、フレッシュ性状、ブリーディング量、圧縮強度、乾燥収縮率、促進中性化深さとし、単位水量を減じずに SRA を外割で添加することによる品質への悪影響について調査した。また、トラックアジテータによる練混ぜの効果を確認するために、「N-SRA 後添」のコンクリートをトラックアジテータから排出させながら 3 段階で試料を採取し、スラン

プ、空気量、加圧濾過水の全有機炭素量（TOC）を比較した。TOC は、スランプおよび空気量だけでは新 SRA が分散しているかどうかの判断は難しいと予想されたこと、および新 SRA は液相中に多量に存在していると考えられることから、フレッシュコンクリートから採取した加圧濾過水に対して測定を行い、アジテートの効果の評価の参考にすることとした。



生コン工場のミキサで新 SRA を
混練する製造方法（シリーズ 1）



トラックアジテータに新 SRA を投入・
攪拌する製造方法（シリーズ 2）

図 5.16 製造方法の確認試験

5.4.2 実験結果および考察

5.4.2.1 フレッシュ性状

シリーズ 1 の工場出荷時、現場到着時のスランプおよび空気量を図 5.17 および図 5.18 に示す。同図から、新 SRA は、新 SRA を混入していない次バッチのコンクリートのフレッシュ性状に悪影響を及ぼしていないことが確認できる。また、レディーミクストコンクリート工場において排水の泡立ち等はみられず、特別な対応は不要なことを確認した。

シリーズ 2 の「N-SRA 後添」をトラックアジテータから排出させながら 3 段階で採取した試料のスランプ、空気量、TOC を、ベースコンクリートである「N-添加前」の結果と合わせて図 5.19 に示す。これより、2 分間の中速攪拌で概ね混合できると考えられるが、排出始めと終わりの TOC に差異が見られたので、現場添加の攪拌時間については更なる検討が必要である。また、 15kg/m^3 の現場添加によってスランプが 4.5cm 増大したので、流動化コンクリートのようにスランプの増大に見合う細骨材率等の補正が必要な場合もあると考えられる。

工事現場にて採取したコンクリートのブリーディング量を図 5.20 に示す。試験方法は JIS A1123 に準拠したが、試料数は $n=1$ とし、コンクリート温度は $12\sim 15^\circ\text{C}$ 、容器への打込みと測定は 20°C 室内で行った。「BB-SRA」および「BB-無混和」の比較から、ブリーデ

ィング量がやや多い高炉スラグ系コンクリートではブリーディングの抑制に有効であること、また、「N-SRA 後添」と「N-無混和」の比較から、単位水量を減じずに新 SRA を外割で 15kg/m³ 添加してもブリーディングの増加はないことが確認された。

シリーズ 1 の「BB-SRA」および「BB-無混和」のコンクリートは、図 5.21 に示すように、スラブ状部材への打込みを行ったが、ポンプ圧送、打込み・締固め、均し・押さえなどの左官作業等のいずれもほぼ同様の施工性であることを確認した。特に、冬期の施工試験のため、左官の仕上げ作業の遅れが懸念されたが、5.2.2.1 に示したように、新 SRA の凝結遅延はわずかであり、またブリーディング量は低減の傾向にあるため、左官の最終仕上げ作業に入るタイミングにも顕著な差は無かった。なお、拘束の少ないスラブ状部材であるが、打設後 1 年経過時において、ひび割れは認められない。

表 5.6 製造・施工性試験の使用材料および調合

シリーズ	調合記号	W/B (%)	調合 (kg/m ³)									
			W	C	BS	S1	S2	G1	G2	Ad	SP	SRA
1	BB-SRA	47.8	175	201	166	543	234	665	294	2.9	—	15 ^{*1}
	BB-無混和	47.8	175	201	166	543	234	665	294	2.9	—	-
2	N-添加前	51.5	165	321	—	600	258	663	292	—	3.21	-
	N-SRA 後添											(15) ^{*2}
	N-無混和	51.5	170	330	—	603	260	645	284	—	3.30	-

C : 普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)、BS:高炉スラグ系混和材(密度 2.89g/cm³)、B=C+BS

W : 上水道水

S1:混合砂(表乾密度 2.61g/cm³)、S2:砕砂(表乾密度 2.63g/cm³)

G1:砕石(表乾密度 2.62g/cm³)、G2:石灰砕石(表乾密度 2.70g/cm³)

Ad :AE 減水剤(高性能タイプ)、SP;高性能 AE 減水剤、SRA:収縮低減剤

*1 単位水量から SRA 使用量に相当する水量を減じた

*2 現場投入のため、単位水量を減じずに SRA を外割で添加

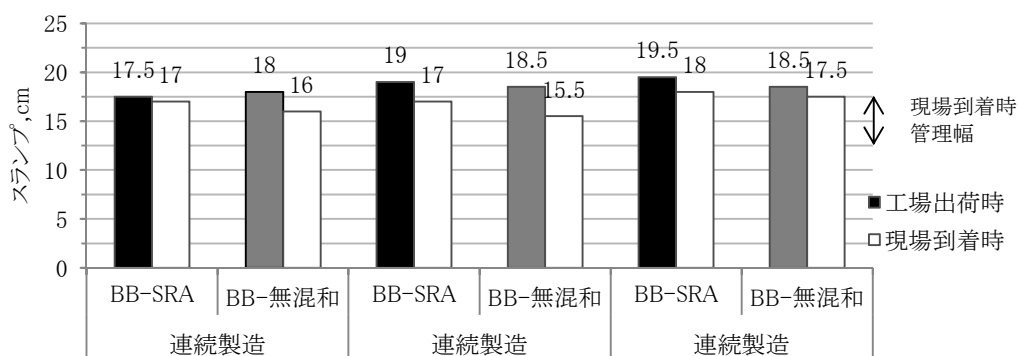


図 5.17 連続製造時のスランプ

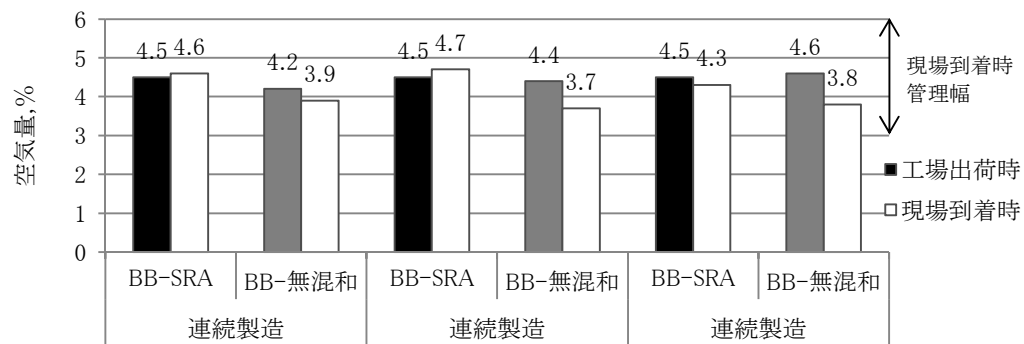


図 5.18 連続製造時の空気量

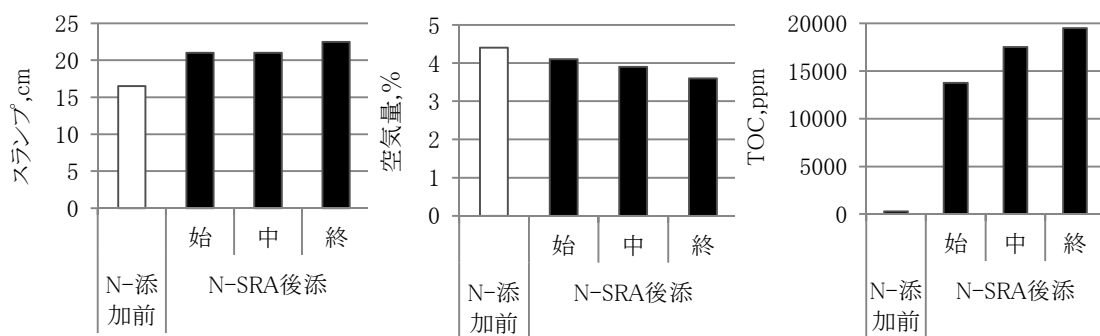


図 5.19 SRA 現場添加によるスランプ・空気量・TOC

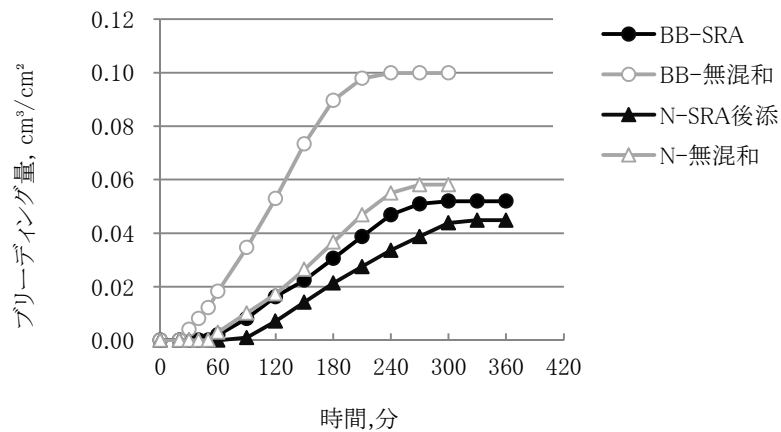


図 5.20 ブリーディング量の比較



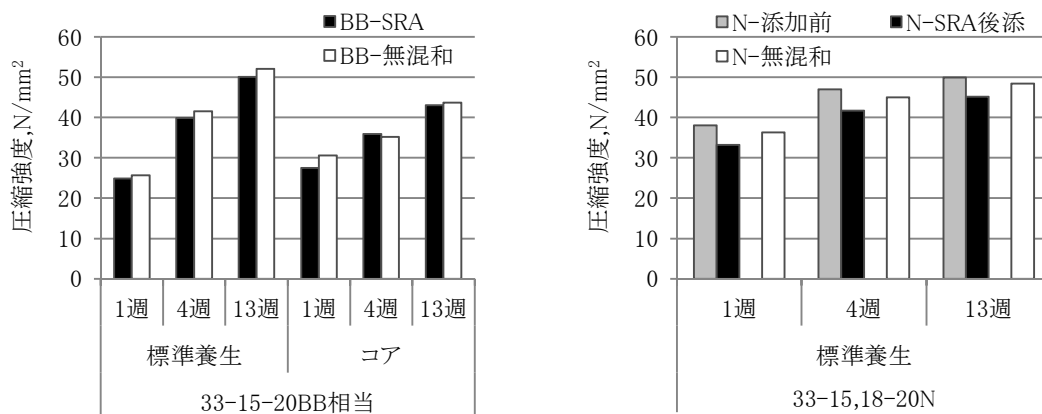
図 5.21 スラブへの打込み状況

5.4.2.2 圧縮強度

工事現場にて採取した供試体の圧縮強度を図 5.22 に示す。

シリーズ 1 の「BB-SRA」および「BB-無混和」については、断面寸法 $1000 \times 1000 \text{mm}$ の模擬柱部材から採取したコア供試体による圧縮強度も併記した。両者の比較によれば、圧縮強度は新 SRA の混和によってやや低下の傾向を示したが、その差は 3N/mm^2 に満たない小さなものであった。また、コア供試体による圧縮強度に関しても、新 SRA 混和による影響はほとんどなかった。

一方、シリーズ 2 の新 SRA を外割で 15kg/m^3 現場添加した「N-SRA 後添」の圧縮強度は、「N-添加前」および「N-無混和」に対して $3 \sim 5.3 \text{N/mm}^2$ 程度低下した。したがって、単位水量を減じずに新 SRA を外割で添加する場合は、呼び強度で 3～6 程度の補正が必要であると考えられた。



(左 ; シリーズ 1, 右 ; シリーズ 2)

図 5.22 圧縮強度の比較

5.4.2.3 乾燥収縮

工事現場にて採取した供試体の収縮ひずみおよび質量減少率（JIS A 1129-1，附属書 A）を図 5.23 に示す。

高炉スラグ系混和材を用いたシリーズ 1 の「BB-無混和」に対する「BB-SRA」の乾燥収縮ひずみの比（収縮比）は，乾燥材齢 4 週において 87%，乾燥材齢 26 週において 90% となり，やや 4 週における収縮比は大きいですが，概ね室内試験と同等の結果が得られた。また，質量減少率は「BB-SRA」のほうが緩やかであり，保水効果が確認された。

シリーズ 2 において，新 SRA を外割で 15kg/m^3 添加した「N-SRA 後添」の収縮ひずみも，「N-添加前」および「N-無混和」に比べて改善された。「N-無混和」に対する「N-SRA 後添」の乾燥収縮ひずみの比は，乾燥材齢 4 週において 67%，乾燥材齢 26 週において 88% となった。また，ベースコンクリートの「N-添加前」に対する「N-SRA 後添」の乾燥収縮ひずみの比は，乾燥材齢 4 週では 74%，乾燥材齢 26 週では，ややばらつきがみられ，95% となった。

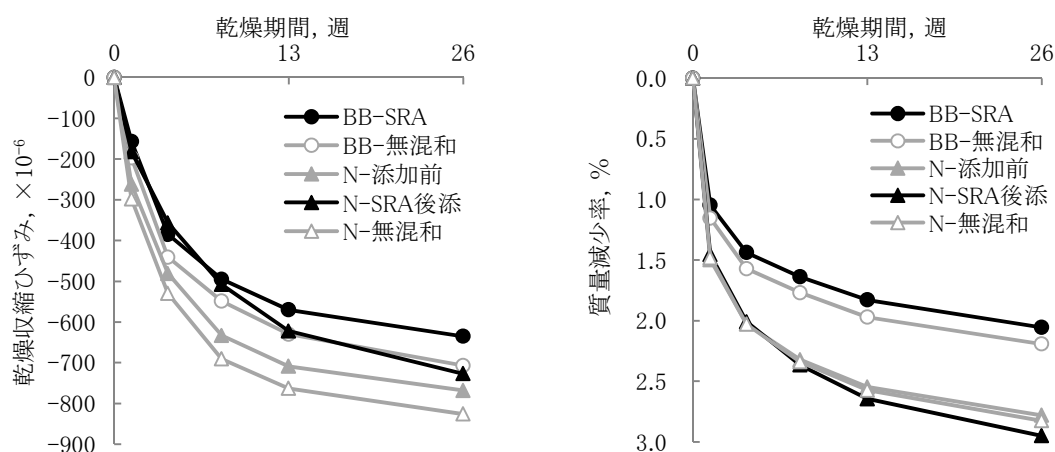


図 5.23 乾燥収縮ひずみ・質量減少率の経時変化

5.4.2.4 促進中性化深さ

現場にて採取した供試体の促進中性化深さ（JIS A 1153）を図 5.24 に示し，中性化速度係数を図 5.25 に示す。中性化速度係数は，促進期間 4 週および 26 週の中性化深さ(mm) を，促進期間(週)の平方根で除して求めた。

高炉スラグ系混和材を用いたシリーズ 1 の「BB-SRA」と「BB-無混和」の比較から，新 SRA を混和したコンクリートの中性化抵抗性は，無混和のコンクリートと同等かやや改善されることが再確認された。

シリーズ 2 の「N-SRA 後添」の中性化深さは，新 SRA を外割で添加しているにもかかわらず

わらず、「N-添加前」あるいは「N-無混和」とほぼ同等であり、中性化抵抗性への悪影響は小さいことを確認した。

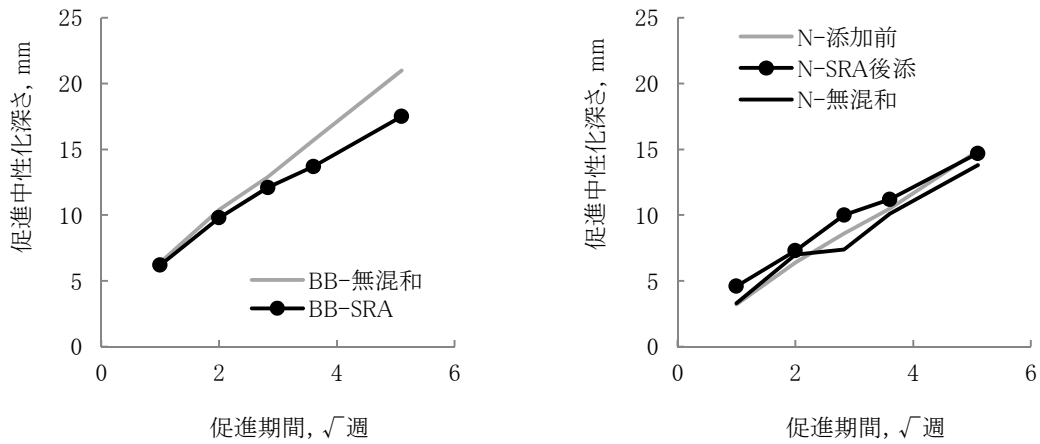


図 5.24 促進中性化深さの推移

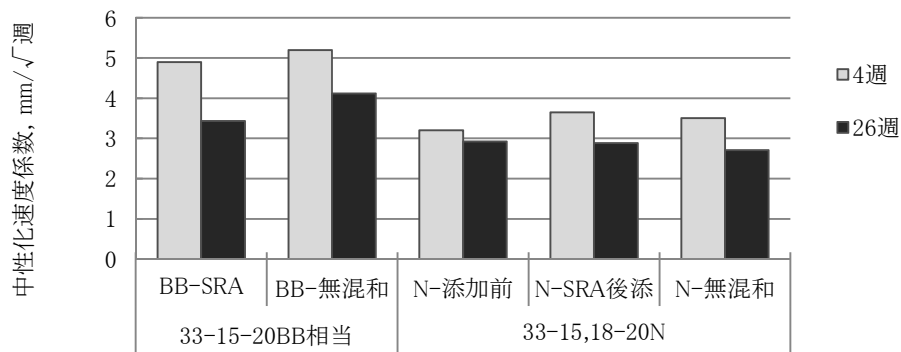


図 5.25 促進中性化試験による中性化速度係数の比較

5.5 まとめ

保水性を有する新収縮低減剤は、収縮低減効果と耐凍害性の改善を両立させた点、既存の界面活性剤系の収縮低減剤と比較してコンクリートの製造および施工性が良好な点を特徴とする。第 5 章では、保水性を有する新収縮低減剤を混和したコンクリートの特性、ひび割れ抵抗性、製造・施工性について実験的検討を行い、以下の結果が得られた。

- 1) 既存の収縮低減剤による水溶液の表面張力は、水の 72.4mN/m に対して、 $0.1\sim 5\text{wt}\%$ の濃度で約 35mN/m まで低下する。一方、新収縮低減剤は、約 61mN/m を示し、毛细管張力を低減する効果は小さい。
- 2) 同等の収縮低減性を持つ新収縮低減剤によるモルタルと既存の収縮低減剤によるモルタルの質量減少率の傾向は異なる。前者の質量減少率はプレーンモルタルに比べて小さく、水分蒸発の抑制により収縮を低減する。後者の質量減少率はプレーンに比べて大きく、空隙水の表面張力が低下し、水の蒸発平衡が成り立つ細孔の径が小さくなるためか、多くの水分が供試体から蒸発する。
- 3) コンクリートの乾燥収縮は、新収縮低減剤の使用量に応じて低減できる。また、軽量コンクリートによる拘束ひび割れ試験から、発生応力の低減とひび割れ材齢が長くなることを確認した。
- 4) 新収縮低減剤の混和により、ブリーディング量は低減傾向を示し、凝結時間はやや遅延する。また、圧縮強度はやや低下するが、材齢に従い改善する。
- 5) 耐凍害性は、使用量 20kg/m^3 （固形分 10kg/m^3 ）以下の範囲において、無混和のコンクリートより大きく劣ることはない。また、中性化抵抗性は無混和のコンクリートと比べて同等かやや改善される。
- 6) レディーミクストコンクリート工場の実機ミキサによる練混ぜ試験から、次のバッチの品質に悪影響がないこと、排水の泡立ち等はみられないことを確認した。また、工事現場での添加・攪拌試験から、後添加で製造したコンクリートにおいては、細骨材率や圧縮強度の補正が必要な場合があるが、耐久性への悪影響は小さいことを確認した。

第5章 参考文献

- 1) 黒岩秀介, 正長眞理, 名和豊春: 保水性を有する新収縮低減剤を混和したコンクリートに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集 Vol.78, No.686, pp.639-646, 2013.4
- 2) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書 鉄筋コンクリート工事 JASS 5, p.128, 2003
- 3) 谷村充: ひび割れ低減対策—収縮低減剤の原理・効果と使用例, コンクリートテクノ, Vol.23, No.1, pp.38-47, 2004.1
- 4) 神本英喜, 石川浩三, 内田美生: 収縮低減剤を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.410-417, 2000
- 5) 笠井芳夫, 坂井悦郎: 新セメント・コンクリート用混和材料, 技術書院, p.219, 2007
- 6) 正長眞理, 閑田徹志, 黒岩秀介, 西田朗, 名和豊春ほか: 保水性を有する新収縮低減剤を混和したコンクリートの実用化 (その 1~5), 日本建築学会大会学術講演梗概 A-1, pp.453-462, 2011.8
- 7) 浜幸雄, 太田宏平: フレッシュコンクリートによる気泡組織の測定方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.669-674, 2004
- 8) 枚田健, 名和豊春: ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤の気泡について, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.648, pp.231-240, 2010.2
- 9) 池尾陽作, 三井健郎, 井上和政, 木之下光男, 三浦豊司, 稲垣順司: コンクリートの乾燥収縮に及ぼすセメントと収縮低減剤の影響 その 1 コンクリートの乾燥収縮率と強度特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.543-544, 2002
- 10) 千歩修, 浜幸雄, 松村光太郎, 袴谷秀幸: コンクリートの耐凍害性に及ぼす粗骨材の線膨張係数と石粉の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.787-792, 2000
- 11) 大西利勝, 井上正一, 黒田保, 藤田龍二: 微粒分が多い石灰石骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮と耐凍害性, コンクリート工学年次論文集, Vol.34No.1, pp.82-87, 2012
- 12) 全洪珠, 原貴義, 中村正俊, 嵩英雄: フライアッシュコンクリートの強度・耐久性に及ぼす連行空気および収縮低減剤の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.187-192, 2005
- 13) 八十島治典, 篠崎徹, 梅本宗宏, 端直人, 小島雅樹, 小林利充: 各種乾燥収縮低減剤を用いたコンクリートに関する研究 その 2 セメントの種類による影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.201-202, 2001
- 14) 大和功一郎, 荒川琢也, 蜂須賀元文, 阿部道彦: 各種 P C a コンクリートの促進中性化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.647-652, 2010

第6章 結論

1 章では、本研究の背景と目的を述べるとともに、既往の文献調査をもとに関連する課題を整理した。

背景として、近年、コンクリートは著しい高強度化を示す一方で低水セメント比に由来する自己収縮ひずみによるひび割れの危険性が指摘されていること、一方、水セメント比が大きい一般コンクリートにおいても、水分の逸散に伴う乾燥収縮ひずみに由来するひび割れの発生が未だに大きな課題として残っており、収縮低減剤にも普及を妨げている要因があることなどを示した。また、本研究の目的は、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、シリカフェームなどからなる環境負荷低減セメントを用いた高強度コンクリートに対して、収縮低減剤による低収縮化を定量的に予測する手法を提案すること、さらなる低収縮化が期待できる人工軽量細骨材による自己収縮低減方法について実用化の可能性を示すこと、耐凍害性を改善した新しい収縮低減剤について一般の強度領域を対象として実用化の可能性を示すことであることを示した。

2 章では、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、シリカフェームなどからなる高強度コンクリートに対する収縮低減剤の効果を実験的に把握し、収縮低減剤による自己収縮ひび割れの抑制を、鉄筋拘束したコンクリートの応力挙動から定量的に評価する方法について検討した。この結果、特殊な高強度コンクリート用セメントに対しても収縮低減剤は有効であること、クリープを考慮した **step by step** 法の適用により収縮低減剤による低収縮化の定量評価が可能であることなどを示した。

3 章では、収縮低減剤を用いた高強度コンクリートについては、長期材齢における性状に関する報告がほとんどないため、材齢 7 年の高強度コンクリートの模擬柱部材を用いて収縮ひずみと圧縮強度について調査を行った。この結果、圧縮強度は材齢の対数軸上ではほぼ直線的な増進を示すこと、一方、収縮ひずみはほぼ収束しており、収縮低減剤は長期材齢でも無添加と同等に強度を示すとともに、収縮ひずみを低減していることを明らかにした。

4 章では、吸水率が高い人工軽量細骨材による内部養生効果に着目した高強度コンクリートの低収縮化の検討を行った。この結果、従来は高強度コンクリートの強度低下を招くために設計基準強度 100N/mm^2 クラスの高強度コンクリートでは使用されていなかった汎用の人工軽量細骨材によって、材齢 1 日程度以内に生じる急速な自己収縮ひずみをほぼ防止できること、圧縮強度を確保しつつ自己収縮ひずみの低減が可能な使用量があること、

若材齢の水酸化カルシウム生成量がやや増加していることから水和への寄与が認められるものの、その後の材齢では水和生成物に顕著な差は認められないことを示した。また、模擬柱部材を用いてセメントの水和反応に伴う発熱によって高温履歴を経ても、その低収縮効果は保持されることを確認し、近々に実用化できる対策であることを示した。

5 章では、一般の強度の乾燥収縮を対象とし、収縮低減効果と耐凍害性の改善を両立させた保水性を有する新収縮低減剤を用いたコンクリートについて検討を行った。この結果、室内試験にて、各種のコンクリートの性能を確認し、乾燥収縮は新規の収縮低減剤の使用量に応じて低減でき、かつ耐凍害性は既存の収縮低減剤に比べて大きく改善されることを確認できた。また、従来の表面張力を低減するタイプの収縮低減剤で問題となった空気量や流動性への悪影響がないため、レディーミクストコンクリート工場で通常コンクリートと混合製造できることを現場実験で実証し、一般の強度のコンクリートの乾燥収縮ひび割れ対策として有効であること、などを示した。

6 章では、本論文で得られた結論を取りまとめた。本研究の手法によって、対象構造物に応じてコンクリートの低収縮化が可能であることなどを総括した。

謝 辞

本論文は、筆者が大成建設株式会社技術センターにて行ってきた研究成果と北海道大学大学院工学院環境循環システム専攻博士後期課程在学中の研究成果をとりまとめたものです。

本研究を行うにあたり、北海道大学大学院・名和豊春 教授には、ご多忙にもかかわらず論文審査における主査を務めて頂くとともに、終始温かいご指導を賜りました。先生のご厚情に深く感謝申し上げます。論文審査における副査として貴重なご助言を頂きました北海道大学大学院・佐藤努 教授、廣吉直樹 教授、胡桃澤清文 准教授には心より感謝申し上げます。

大成建設株式会社技術センターでは、辻田修 センター長、藤井俊二 技師長、森川泰成 副センター長、是永健好 部長、成原弘之 室長には、長きにわたりご指導ご支援を賜りました。深く感謝致します。また、本研究の遂行において、並木哲 チームリーダー、陣内浩 主席研究員、渡邊悟士 副主任研究員、山本佳城 副主任研究員、吉田泰 研究員、太田貴士 研究員、大成有楽不動産株式会社 邑楽光夫 技師、ならびに協力会社の皆様に多大なご協力を頂き、大変感謝しております。

第 5 章の実験にあたっては、清水建設株式会社 西田朗氏、鹿島建設株式会社 閑田徹志氏、株式会社日本触媒 正長眞理氏、ならびに関係者の皆様に貴重な示唆を頂きました。厚く御礼申し上げます。

最後に私事になりますが、この論文のとりまとめを陰で支えてくれた家族、妻洋子、湧也、樹生、そして両親に感謝します。