

## 超高強度コンクリートの自己収縮に関する実験的研究



梅本 宗宏 \*1

### 概 要

近年、超高層住宅の更なる高層化にともない、設計基準強度 150N/mm<sup>2</sup> の超高強度コンクリートを超高層住宅に実施工した報告など、超高強度コンクリートに関する研究開発が多方面で行われている。

一方で、超高強度コンクリートの特有現象である自己収縮が主原因と思われる内部応力やひび割れが構造部材の性能に及ぼす影響について指摘されており、現状では研究成果も少なく、今後も検討が必要である。

本研究では、超高強度コンクリートの自己収縮に与える材料・調合の影響を確認し、自己収縮の抑制ならびに解析的検討や実証実験を通して、実構造体にひび割れの生じない超高強度コンクリートを確立することを目的として実施した。

本報では、実験概要、室内実験における各種試験結果とその定式化、ならびに実大柱モデルを用いた実証実験結果および解析データとの比較について報告する。

### Experimental Study on Autogenous Shrinkage of Ultra High Strength Concrete

Munehiro UMEMOTO\*

Recently, the research and development concerning a super-high-strength concrete of the report etc. that really construct a super-high-strength concrete of specified design strength 150N/mm<sup>2</sup> to the skyscraper condominium is done along with making to multistory about the skyscraper condominium further by many fields.

The influence that an internal stress and the crack that seems one side and causa causans it in the autogenous shrinkage that is a peculiar phenomenon of a super-high-strength concrete exert on the performance of a structural material is pointed out, and study results are little under the present situation, and it will be necessary to examine it in the future.

In this research, it was executed to confirm the influence of the material and the mixture given to the self-shrinkage of a super-high-strength concrete, and to establish a super-high-strength concrete that the crack is not caused in a real structure through control, an analytical examination, and the proof experiment of the self-shrinkage aiming.

In this report, the outline of the experiments, the various examination results and the formulations in the laboratory experiments, and the comparison between experimental result of using real size column and analytical data, were reported.

\* 戸田建設(株) 技術研究所

\* Technical Research Institute, Toda Corp.

# 超高強度コンクリートの自己収縮に関する実験的研究

梅本 宗宏\*

## 1. はじめに

近年、超高層住宅の更なる高層化にともない、設計基準強度 150N/mm<sup>2</sup> の超高強度コンクリートを超高層住宅に実施したとの報告<sup>1)</sup> など、超高強度コンクリートに関する研究開発が多方面で行われている。

一方で、超高強度コンクリートの特有現象である自己収縮が主原因と思われる内部応力やひび割れが構造部材の性能に及ぼす影響については、現状では研究成果も少なく<sup>2), 3)</sup>、今後も検討が必要である。

本研究では、超高強度コンクリートの自己収縮に与える材料・調合の影響を確認し、自己収縮の抑制ならびに解析的検討や実証実験を通して、実構造体にひび割れの生じない超高強度コンクリートを確立することを目的として実施した。

本報では、実験概要、室内実験における各種試験結果とその定量化、ならびに実大柱モデルを用いた実証実験結果および解析データとの比較について報告する。

## 2. 研究概要

本研究では、以下の4項目について検討を行った。

- (1) **自己収縮の究明** 室内実験により超高強度コンクリートの自己収縮特性（水結合材比（以下、W/Bという）、混和材、部材寸法などの影響）を把握する。
- (2) **ひび割れ対策** 室内実験により各種混和材料（膨張材、収縮低減剤、有機繊維）を用いた場合の自己収縮抑制効果を確認する。
- (3) **解析的検討** 室内実験結果から物性値（圧縮強度、ヤング係数、引張強度、自己収縮、線膨張係数など）を定量化し、温度・応力解析による検討を行う。
- (4) **実証実験** 実大モデルの施工実験により構造体の所要品質確保、解析の妥当性を検証する。

## 3. 室内実験計画

使用材料を表-1、調合を表-2、各調合の試験組み合わせを表-3（○印を実施）に示す。水結合材比の違いで4調合、有機繊維1調合、収縮低減剤2調合、膨張材2調合、収縮低減剤・膨張材併用型1調合について各種性状を検討することとした。セメントはシリカフェューム混入セメントを用い、骨材は桜川産硬質砂岩系砕石・砕砂を用いた。

粗骨材のかさ容積は0.51m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>（一定）とした。膨張材はセメントの内割、収縮低減剤は単位水量の一部とした。各調合とも1回の練混ぜ量は70～80ℓとし、

表-1 使用材料

水 (W)	上水道水 (厚木) (H 含む)
セメント (C)	シリカフェューム混入セメント、密度 3.08g/cm <sup>3</sup>
細骨材 (S)	桜川産砕砂、表乾密度 2.60g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 1.63%
粗骨材 (G)	桜川産砕石、表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 0.57%
混和材 (H)	乾燥収縮低減剤、ポリエーテル誘導体
混和材 (EX)	石灰系膨張材
合成繊維 (PP)	ポリプロピレン繊維、密度 0.91g/cm <sup>3</sup>
化学混和剤 (SP1)	高性能減水剤 (ポリカルボン酸系)
化学混和剤 (SP2)	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系) W/B25%のみ

表-2 コンクリートの調合

調合 No.	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							SP 使用量 (C×%)
		W	C	S	G	H	EX	PP vol%	
25Base	25	165	660	770	825	-	-	-	1.30
20Base	20	155	775	697	825	-	-	-	1.65
16Base	16	155	969	533	825	-	-	-	2.20
14Base	14	155	1107	419	825	-	-	-	2.60
14PP	14	155	1107	419	825	-	0.20	-	2.60
14H8	14	155	1107	419	825	8	-	-	2.45
14H12	14	155	1107	419	825	12	-	-	2.45
14E25	14	155	1082	419	825	-	25	-	3.20
14E32	14	155	1075	419	825	-	32.5	-	3.60
14H8E25	14	155	1082	419	825	8	25	-	3.40

[目標スランプフロー] : 65±7.5cm(W/B25、20%)、  
70±7.5cm(W/B16、14%)  
[目標空気量] : 1.5±1%

表-3 試験組み合わせ

調合 No.	若材齢試験			線膨張係数	圧縮	引張	自己収縮	乾燥収縮	全ひずみ	モデル部材
	圧縮	引張	クリープ							
25Base	○	○	-	-	○	○	○	○	○	-
20Base	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
16Base	○	○	○	-	○	○	○	○	○	-
14Base	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
14PP	-	-	-	-	○	-	○	-	-	-
14H8	○	○	-	-	○	○	○	○	○	-
14H12	○	○	-	-	○	○	○	○	○	-
14E25	○	○	-	-	○	○	○	○	○	-
14E32	○	○	-	-	○	○	○	○	○	-
14H8E25	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-

所要量を2～3バッチあわせて試料とした。コンクリートの練混ぜには二軸強制練りミキサ（公称容量：100ℓ）を使用した。練混ぜはモルタル先練り方式とし、まず細骨材とセメント（膨張材を含む）を投入して15秒間空練りをした後に、水（混和剤、収縮低減剤を含む）を投入して45～210秒間でモルタルを練り上げた。次に粗骨材を投入し、90～120秒間でコンクリートを練り上げた。

室内実験における試験項目・方法を表-4に示す。実験の中心となる調合（20Base、16Base、14Base、14H8E25）は、若材齢試験（圧縮、引張、クリープ）に加え、線膨張係数、長期材齢（圧縮、引張）、自己収縮、乾燥収縮、全ひずみ、モデル部材ひずみ（20Base、14Base）を実施した。

\* 戸田建設(株) 技術研究所

強度試験は、凝結始発時間を基準として、始発後1、4、8、12、24時間で若材齢の試験を行い、その後3、7、28、56、91日で試験を行った。圧縮強度試験において、材齢3日以内の若材齢用供試体は鋼製型枠、長期材齢はプラスチック製簡易型枠を用いた。供試体の端面処理として、若材齢は硫黄キャッピング、それ以降の供試体は機械研磨によった。始発からの時間が1日未満の場合は盤間変位からヤング係数を算出し、それ以降はコンプレッソメータを用いて測定した。

若材齢クリープ試験は、凝結始発時間を基準として、1(4)、8(12)および24時間の材齢を基準に試験を行った。載荷応力は、各材齢の圧縮強度の20%を載荷した。

線膨張係数は、自己収縮を抑制し、温度変化ひずみを精度良く検出するために、-2~5℃の低温度下の範囲で温度変化を与える楊楊ら<sup>4)</sup>の方法を参考にし、線膨張係数を求めた。試験体の寸法は76×76×400mmとした。試験材齢は、凝結始発から2、6、12、24時間および2週とし、各材齢において2体ずつ試験に供した。試験体は、打設後から冷却開始まで20℃で恒温養生を行い、脱型後は、アルミ箔粘着テープで供試体全面にシールした。試験体の長さ変化量を変位計を用いて計測し、変位から試験体の長さを用いてひずみを算出した。試験体の温度変化は中央部に設置した熱電対で測定した。測定は20Base、14Base、14H8E25において実施した。

自己収縮ひずみは、JCI超流動コンクリート研究委員会の「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」<sup>5)</sup>に準拠し、10×10×40cmの鋼製型枠を用いて、供試体中央に測温機能付きの埋込み型ひずみ計(みかけの弾性係数約40N/mm<sup>2</sup>)を設置して測定した。試験体は、打込み後直ちに封かんし、恒温恒湿室(20℃・60%RH)で養生した。実測ひずみから温度ひずみ(線膨張係数10×10<sup>-6</sup>/℃一定)を差し引いて自己収縮ひずみとし、自己収縮ひずみは凝結の始発をゼロとした。また、乾燥の影響を確認するため、始発から24時間後に上面のポリエチレンシートを開放し、気乾状態の全ひずみも測定した。また、混和材料の影響を把握するため、表-2に示した調合に、表-5に示す組み合わせの調合を追加した。

実大柱内部の温度履歴を模擬するモデル部材は、上下を発泡スチロールで断熱した40×40×60cmの合板型枠内中央に前述の埋込み型ひずみ計を設置して温度とひずみを測定した。断熱温度上昇試験は、空気循環式試験装置にφ40×h40cmの試験体を用いて測定した。

#### 4. 室内実験結果

##### 4.1 フレッシュコンクリート

室内実験におけるフレッシュコンクリートの試験結果を表-6に示す。いずれのコンクリートも所要の品質を満足していた。所要のコンクリートが練り上がるまでの時間は水結合材比が小さいほど長くかかった。フローの流動停止時間は水結合材比が小さいほど長くかかったが、180秒を上限としてスランプフローの測定を行った。水結合材比が小さいほどコンクリートの

表-4 試験項目・方法

試験項目	試験方法	備考
スランプフロー	JIS A 1150	フロー時間(50cm、停止)
空気量	JIS A 1128	
コンクリート温度	温度計	
凝結時間	自動試験装置	
圧縮強度	JIS A 1108	20℃封かん
ヤング係数	JIS A 1149	盤間変位、コンプレッソメータ
割裂引張強度	JIS A 1113	
若材齢クリープ	スプリング荷重方式	φ10×20cm(1個)
線膨張係数	楊楊らの方法 <sup>4)</sup>	低温度範囲(-2~5℃)
自己収縮	埋込み型ひずみ計	全ひずみ
乾燥収縮	JIS A 1129-1	
断熱温度上昇	空気循環式	φ40×h40cm

表-5 追加した調合

調合 No.	W/B (%)	H (kg/m <sup>3</sup> )	EX (kg/m <sup>3</sup> )	備考
20BaseR	20	-	-	*
16BaseR	16	-	-	*
14BaseR	14	-	-	*
14H6	14	6	-	
14H12R		12		
14E30			30	
14H6E20		6	20	
14H6E25		6	25	
14H4E15		4	15	

[Note]\* 断熱温度上昇試験時の自己収縮も測定

W/B: 水結合材比、H: 収縮低減剤(水に置換) EX: 膨張材(セメントに置換)

表-6 フレッシュコンクリートの試験結果

調合 No.	スランプフロー (cm)	フロー時間 (s)		空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	凝結時間 (h-m)	
		50cm	停止			始発	終結
25Base	65.0 × 64.0	4.2	41.7	1.1	21.4	9-04	10-30
20Base	72.0 × 71.0	6.5	77.6	1.3	23.1	12-12	13-51
16Base	78.0 × 77.5	6.6	180	1.4	23.2	13-53	15-48
14Base	70.5 × 69.0	13.6	180	1.9	24.5	15-07	18-24
14PP	74.0 × 73.5	10.1	180	1.8	22.1	14-13	17-01
14H8	70.5 × 70.0	16.0	180	1.9	24.8	16-50	20-43
14H12	77.5 × 74.0	12.4	180	1.7	24.4	19-49	23-57
14E25	68.0 × 65.0	16.1	180	2.0	25.3	13-01	17-49
14E32	74.5 × 71.0	14.3	180	1.9	25.5	13-13	18-01
14H8E25	71.5 × 71.0	15.3	180	1.8	25.7	17-17	23-51

練上がり温度は高く、凝結時間は長くなる傾向にあった。収縮低減剤混入は無混入に比べて凝結時間は長くなるものの、膨張材混入ではむしろ短くなる傾向にあった。また、併用型では収縮低減剤混入の場合と同程度に凝結時間は長くなった。

##### 4.2 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-1に示す。始発から1日未満での初期材齢において、本実験範囲における水結合材比の違いによる強度発現の差はほとんどみられないが、それ以降、その差が顕著になった。膨張材、収縮低減剤混入により、始発からの時間が1日で最大42N/mm<sup>2</sup>あった無混入との差が、材齢91日で10N/mm<sup>2</sup>程度まで近似した。

ヤング係数(圧縮強度の1/3応力時のセカントモデュラス)試験結果を図-2に示す。始発からの材齢0.5日程度でヤング係数が急激に増加する傾向があることがわかった。

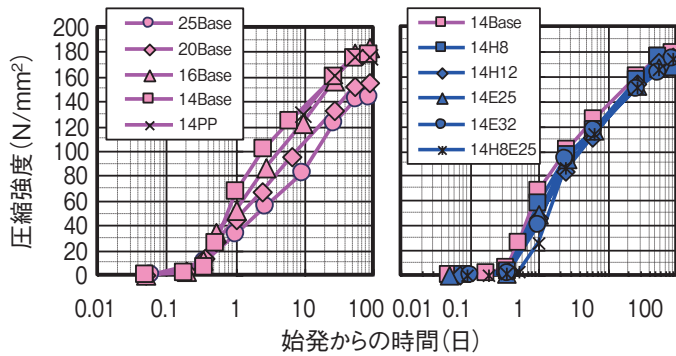


図-1 圧縮強度試験結果

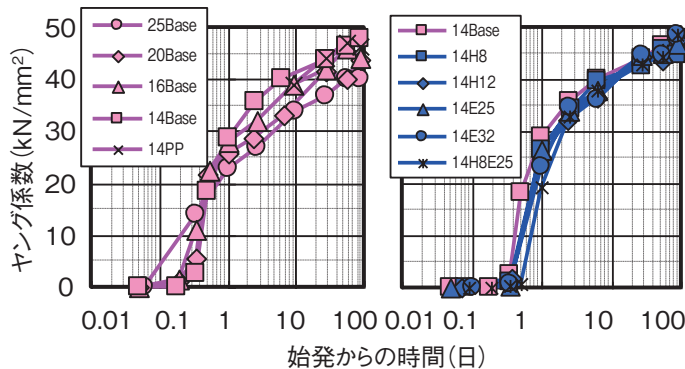


図-2 ヤング係数試験結果

### 4.3 引張強度

引張強度の試験結果を図-3および図-4に示す。若材齢試験において、混和材料を混入した割合は、混入量の増加にともなって強度発現が緩慢になるが、材齢の経過とともにその差は小さくなった。その後の材齢においては、ばらつきは大きいがおおむね6N/mm<sup>2</sup>程度であった。

### 4.4 若材齢クリープ

始発24時間後のクリープ係数は、混和材料無混入の割合で2.5～14、混和材料混入の割合で33程度であった。

### 4.5 線膨張係数

線膨張係数は、試験体内部温度とひずみの関係における、4℃から-2℃への温度下降時のデータの近似直線の傾きとした。なお、一部材齢においてはデータのばらつきを考慮し、回帰するデータの温度範囲を変更した。試験体内部温度とひずみの関係例を図-5に示す。ここで、試験体内部温度の値は、試験体中心温度と試験体近傍の不凍液温度の平均とした。線膨張係数測定結果を表-7および図-6に示す。線膨張係数は14Base、14H8E25のほうが20Baseより大きく、W/Bが低いと線膨張係数が大きくなる傾向がみられる。また、14Base、14H8E25の値はほぼ同程度となっており、線膨張係数は収縮低減剤および膨張材混入の影響をほとんど受けないと考えられる。

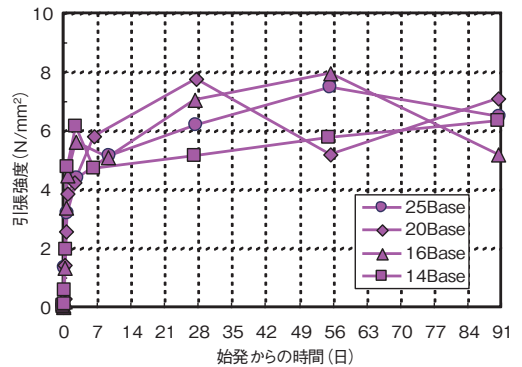


図-3 引張試験結果

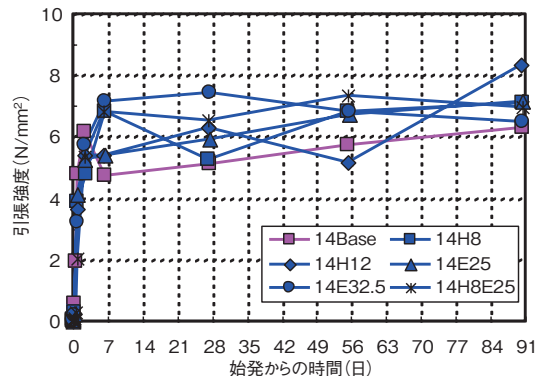


図-4 引張試験結果

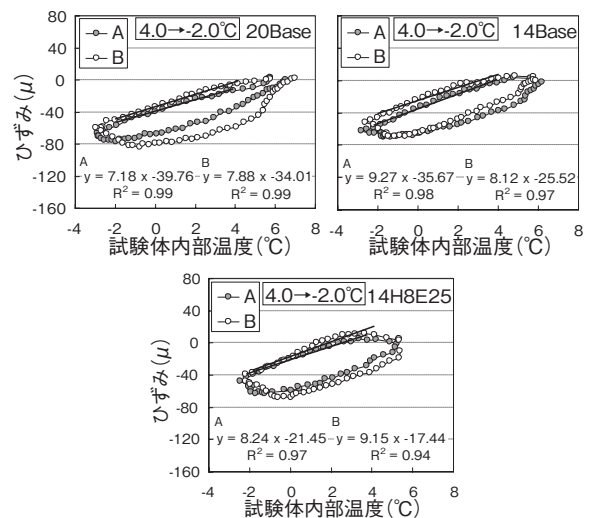


図-5 試験体内部温度とひずみの関係例(12時間後)

表-7 線膨張係数測定結果

割合 No.	始発からの経過時間				
	2時間	6時間	12時間	24時間	2週間
20Base	8.9	8.4	7.4	8.4	9.8
14Base	16.2	9.0	8.7	9.5	11.6
14H8E25	16.4	10.0	8.7	8.8	11.4

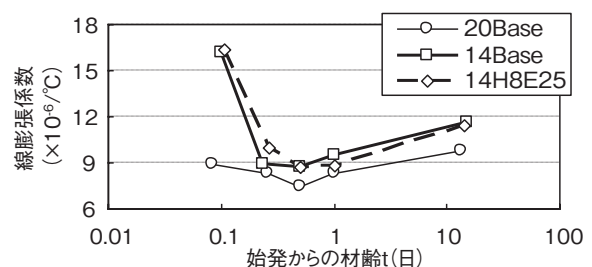


図-6 線膨張係数測定結果



### 4.6 自己収縮測定結果

図-7に、自己収縮の測定結果の一例を示す。自己収縮は、水結合材比が小さくなるほど大きくなり、初期の収縮も大きい。膨張材や収縮低減剤は、自己収縮の低減に効果があり、併用したものでは、さらに効果が大きい。また、図にはあらわしていないが、PP 繊維や乾燥の影響との差は小さかった。

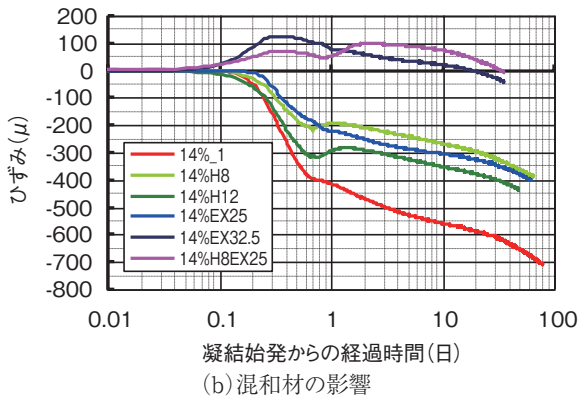
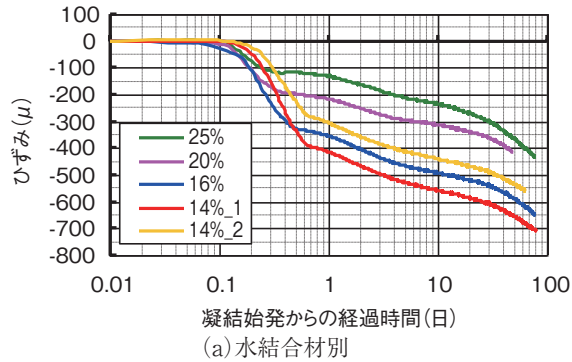


図-7 自己収縮の測定結果の一例

## 5. 実験結果の定式化

### 5.1 圧縮強度

圧縮強度と積算温度の関係を表-8および図-8に示す。若材齢の強度と長期強度では積算温度と圧縮強度の関係が同一ではないため、区間を0~8時間、8~72時間(3日)、3~28日、28日以降の4区間に分けて回帰した。

混和材料無混入の調合の強度発現は、0~8時間までは水セメント比が小さいほど緩やかで、8~72時間の区間で急激に強度が増進する結果となった。混和材料を混入した調合では、混入量が多いほど極初期強度の発現が緩慢になった。

混和材料混入による強度低減率の検討結果の一例(調合14Baseと14H8E25)を表-9および図-9、10に示す。各調合で強度を比較し低減率を算出したところ、材齢7日までは変化が大きい、それ以降はほぼ一定の値となった。このことから、低減率は積算温度の範囲ごとに定義し、積算温度210°D.D以前のデータで対数近似を行い、その値が低減率の最大値に達した以降は、最大値で一定とする定式化を行った。また、混和材料を併用する場合、データを比較検討した結果、それぞれの低減率を掛け合わせた低減率であらわせることが確認できた。

### 5.2 引張強度

圧縮強度と引張強度の関係を図-11に示す。圧縮強度と引張強度の関係は、圧縮強度が120N/mm<sup>2</sup>までは野口・友澤式<sup>6)</sup>によりあらわせると言えるが、それ以降については同式との乖離がみられるため、圧縮強度が100N/mm<sup>2</sup>以上で回帰式を算定した。このことから、圧縮強度と引張強度の関係式は野口・友澤式を用い、その値が100N/mm<sup>2</sup>以上の回帰式から求めた材齢91日の引張強度に達した以降は、同値で一定とする定式化を行った。

表-8 圧縮強度(σ<sub>c</sub>)と積算温度(M)の関係式一覧

	0~8時間	8~72時間(3日)	3~28日	28日以降
25Base	$\sigma_c = 5.396 \ln(M) - 2.752$	$\sigma_c = 21.80 \ln(M) - 41.60$	$\sigma_c = 29.09 \ln(M) - 76.93$	$\sigma_c = 17.68 \ln(M) + 5.793$
20Base	$\sigma_c = 5.911 \ln(M) - 3.359$	$\sigma_c = 27.72 \ln(M) - 50.71$	$\sigma_c = 26.78 \ln(M) - 47.22$	$\sigma_c = 19.83 \ln(M) + 1.066$
16Base	$\sigma_c = 5.308 \ln(M) - 2.974$	$\sigma_c = 34.65 \ln(M) - 65.37$	$\sigma_c = 30.27 \ln(M) - 47.72$	$\sigma_c = 23.18 \ln(M) + 2.886$
14Base	$\sigma_c = 2.726 \ln(M) - 1.507$	$\sigma_c = 46.92 \ln(M) - 101.1$	$\sigma_c = 24.78 \ln(M) - 7.693$	$\sigma_c = 16.51 \ln(M) + 49.46$
14H8	$\sigma_c = 1.903 \ln(M) - 1.354$	$\sigma_c = 47.36 \ln(M) - 108.0$	$\sigma_c = 25.63 \ln(M) - 15.50$	$\sigma_c = 12.70 \ln(M) + 73.89$
14H12	$\sigma_c = 1.183 \ln(M) - 0.624$	$\sigma_c = 43.19 \ln(M) - 101.9$	$\sigma_c = 29.01 \ln(M) - 42.24$	$\sigma_c = 18.45 \ln(M) + 31.06$
14E25	$\sigma_c = 0.904 \ln(M) - 0.116$	$\sigma_c = 46.52 \ln(M) - 108.1$	$\sigma_c = 24.42 \ln(M) - 12.29$	$\sigma_c = 13.28 \ln(M) + 64.71$
14E32.5	$\sigma_c = 1.020 \ln(M) - 0.802$	$\sigma_c = 47.91 \ln(M) - 115.8$	$\sigma_c = 22.56 \ln(M) - 3.200$	$\sigma_c = 21.10 \ln(M) + 6.495$
14H8E25	$\sigma_c = 0.474 \ln(M) - 0.287$	$\sigma_c = 55.17 \ln(M) - 154.3$	$\sigma_c = 26.60 \ln(M) - 27.96$	$\sigma_c = 18.68 \ln(M) + 25.84$

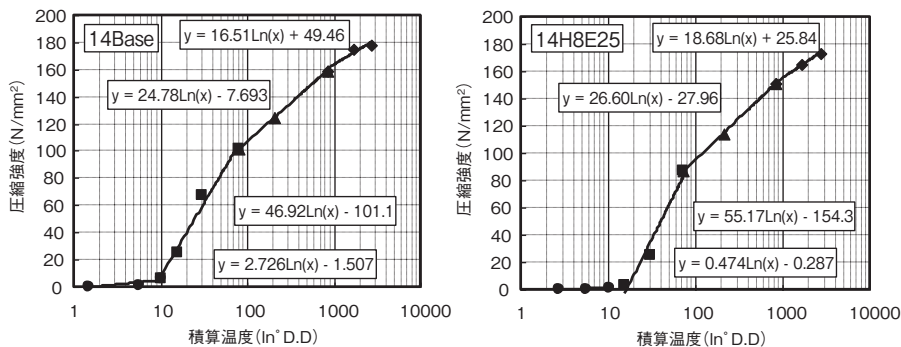


図-8 圧縮強度の定式化例(14Base、14H8E25)

表-9 強度低減率の算定例 (14H8E25)

区間	圧縮強度と積算温度の関係式		データ例			
	14Base	14H8E25	積算温度 (°D.D)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		強度 低減率
0-8h	$\alpha_c=2.725 \ln(M) - 1.507$	$\alpha_c=0.474 \ln(M) - 0.287$	3	1.49	0.23	0.16
			5	2.88	0.48	0.17
			10	4.77	0.80	0.17
			16.695	6.17	1.05	0.17
8-72h	$\alpha_c=46.92 \ln(M) - 101.1$	$\alpha_c=55.17 \ln(M) - 154.3$	16.695	31.02	1.05	0.03
			20	39.49	11.01	0.28
			30	58.52	33.38	0.57
			83.14	106.35	89.62	0.84
3-28d	$\alpha_c=24.78 \ln(M) - 7.693$	$\alpha_c=26.60 \ln(M) - 27.96$	83.14	101.84	89.62	0.88
			90	103.81	91.72	0.88
			210	124.80	114.26	0.92
			840	159.15	151.13	0.95
28d-	$\alpha_c=16.51 \ln(M) + 49.46$	$\alpha_c=18.68 \ln(M) + 25.84$	840	160.60	151.63	0.94
			1680	172.04	164.58	0.96
			2730	180.05	173.65	0.96

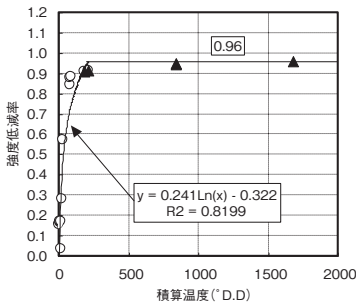


図-9 強度低減率 (14H8E25)

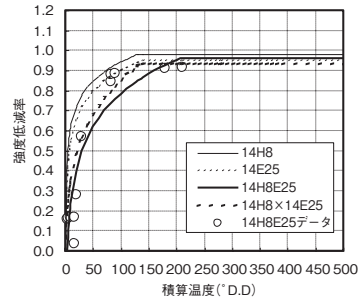


図-10 併用時の強度低減率

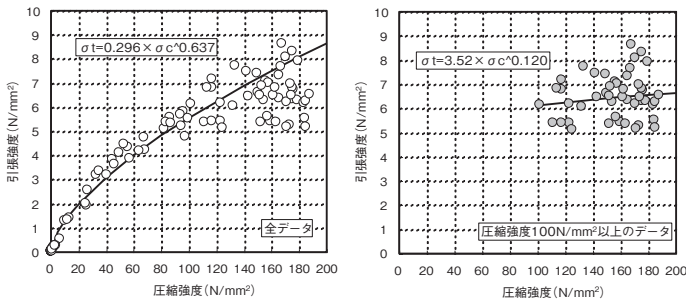


図-11 圧縮強度と引張強度の関係  
(左図: 全データ、右図: 圧縮強度 100N/mm<sup>2</sup>以上)

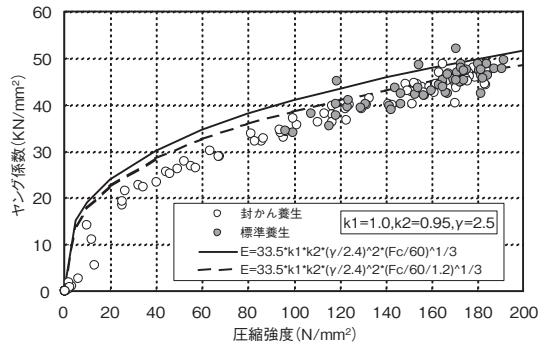


図-12 圧縮強度とヤング係数の関係

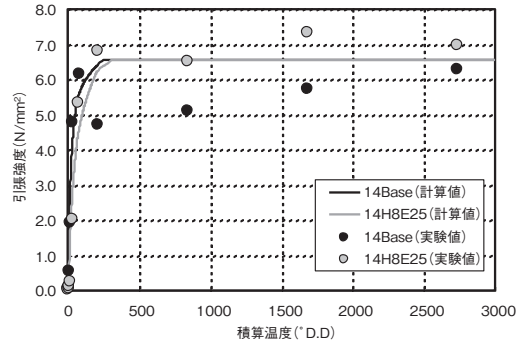
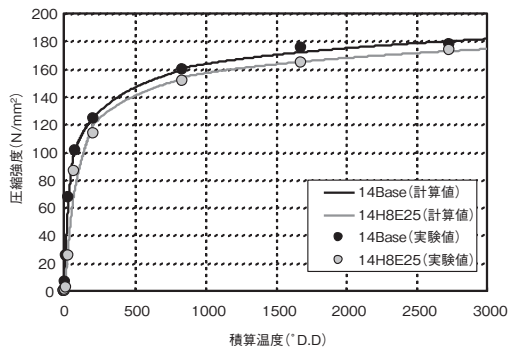


図-13 計算値と実験値の比較 (左: 圧縮強度、右: 引張強度)

### 5.3 ヤング係数

圧縮強度とヤング係数の関係を図-12に示す。NewRC式よりやや小さいが、本式でほぼ近似できると考えられる。

### 5.4 強度の定式化と実験値の比較確認

圧縮強度と引張強度について、これまで定式化した結果と実験値の比較を図-13に示す。引張強度について、実験値にばらつきはあるものの、圧縮強度、引張強度ともに定式化できていると考えられる。

### 5.5 線膨張係数

線膨張係数の定式化は、各 W/B において行い、14Base と 14H8E25 のデータは区別しないこととした。

定式化するにあたり、4つの領域に区分した。始発から 2、6、12 時間後の 3 点で近似する領域を区間Ⅰ、始発から 12、24 時間後、2 週間後の 3 点で近似する領域を区間Ⅱとした。また、始発から 2 時間より前の若材齢においては、線膨張係数の測定が困難であるため、本実験における線膨張係数の最大値である 16.4 の一定であるとし、この領域を区間Ⅲとした。さらに、始発から 2 週間後以降は線膨張係数が一定であるとし、この領域を区間Ⅳとして、区間Ⅱの近似式より算出される始発から 2 週間後の線膨張係数の値で一定とした。各区間の線膨張係数の値および式を以下に示す。

#### (1) 区間Ⅰ

線膨張係数の最大値である 16.4 の一定とした。

#### (2) 区間Ⅱ

近似は、丁らの報告<sup>7)</sup>に示されている式 (1) を用いることとした。丁らの報告で、係数 A は 28 日以後の線膨張係数としているが、本報告では、各 W/B における線膨張係数の最小値から 0.001 を引いた値とした。これは、丁らの報告ではある材齢以降は線膨張係数が一定であると考えているが、本報告では線膨張係数はある材齢で極小値をとり、その後材齢 2 週程度まで微増すると考えているためである。また、0.001 を引いたのは、始発からの材齢 t と  $\alpha(t) - A$  の関係を指数関数で近似するため、「最小値 - (1/∞)」を具体的な数値として表現する目的である。

$$\alpha(t) = A + B \exp(-t/C) \quad (1)$$

ここに、

- $\alpha(t)$  : t 日における線膨張係数
- A : 各 W/B における線膨張係数の最小値 - 0.001 (表 - 10 に各 W/B における線膨張係数の最小値を示す。)
- t : 凝結の始発からの材齢 (日)
- B, C : 定数

式 (2) のようにし、定数 B, C の値を算出することとした。

$$\alpha(t) - A = B \exp(-t/C) \quad (2)$$

始発からの材齢 t と  $\alpha(t) - A$  の関係を図 - 14 に示す。図より、W/B が異なる場合でも、始発からの材齢 t に対する  $\alpha(t) - A$  の値はほぼ同程度の値となるので、すべてのデータにおいて指数で近似した。これより、定数 B, C の値は表 - 11 のようになる。

#### (3) 区間Ⅱ

区間Ⅱにおいて、線膨張係数  $\alpha(t)$  は始発からの材齢 t が増加すると直線的に増加する傾向があるので線形近似することとした。なお、区間Ⅰと同様に評価するために係数 A を用いた式 (3) において近似することとした。

$$\alpha(t) = D_1 + E + A \quad (3)$$

ここに、D, E : 定数

表 - 10 各 W/B の線膨張係数の最小値

W/B (%)	
14	20
8.694	7.429

表 - 11 定数 B, C の値

B	C
56.5	0.0476

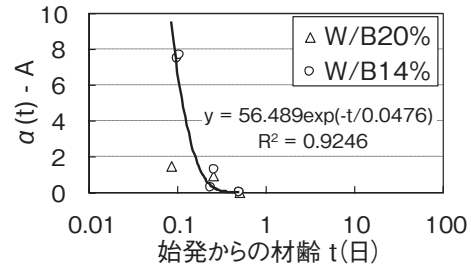


図 - 14 始発からの材齢 t と  $\alpha(t) - A$  の関係(区間Ⅰ)

表 - 12 定数 D, E の値

D	E
0.176	0.171

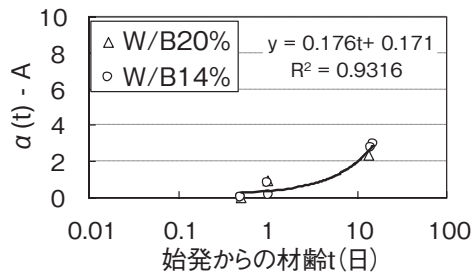


図 - 15 始発からの材齢 t と  $\alpha(t) - A$  の関係(区間Ⅱ)

式 (4) のようにし、定数 D, E の値を算出することとした。

$$\alpha(t) - A = D_1 + E \quad (4)$$

始発からの材齢 t と  $\alpha(t) - A$  の関係を図 - 15 に示す。図より、W/B が異なる場合でも、始発からの材齢 t に対する  $\alpha(t) - A$  の値はほぼ同程度の値となるので、すべてのデータにおいて線形近似した。これより、定数 D, E の値は表 - 12 のようになる。

#### (4) 区間Ⅲ

始発から 2 週間後の線膨張係数で一定とした。

ここまで定式化した結果と実測値の比較を図 - 16 に示す。図より、区間Ⅰ～区間Ⅲにおける値および式は実測値をおおむね良く評価していることがわかる。なお、係数 A の値は、実験から得られた値が W/B14, 20% の値のみである。W/B14 ~ 20% の区間のどの W/B でも線膨張係数を算出できるように、図 - 17 および式 (5) に示す線形式により、A を算出することとした。

$$A = -0.210(W/B) + 11.63 \quad (5)$$

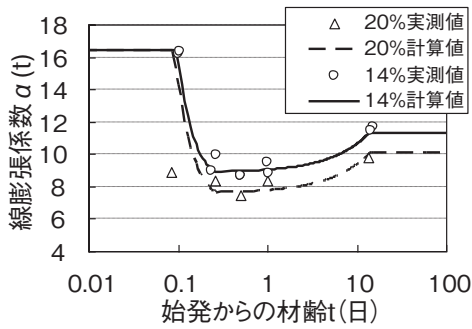


図-16 定式化結果と実測値の比較

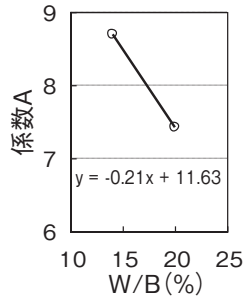


図-17 W/B と係数 A の関係

### 5.6 自己収縮

自己収縮の定式化にあたっては、示方書<sup>8)</sup>ならびに谷村らの研究<sup>9)</sup>を参考に検討を行った。また、本研究では、初期材齢の自己収縮による影響を考慮することを目的とするため、自己収縮の最終値ではなく材齢 28 日の値を用いて定式化を行った。また、混和材料の影響の定式化では、セメントロットの違いによる影響を除くため、測定値を補正した値を用い、材齢 0.5、7、28 日の値に注目して定式化を行った。

自己収縮ひずみの定式化を式 (6) に示す。

$$\varepsilon(t) = \kappa \cdot \gamma_c \cdot \gamma_a \cdot \varepsilon_{28} [1 - \exp\{-a(t - t_d)^b\}] + \varepsilon_{ex}(t) \quad (6)$$

ここに、

$\varepsilon(t)$  : 凝結始発から材齢  $t$  までの自己収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )

$\kappa$  : 部材の大きさによる係数

$\gamma_c \cdot \gamma_a$  : セメント・混和材の影響をあらわす係数

$\varepsilon_{28}$  : 材齢 28 日における自己収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )

$a \cdot b$  : 自己収縮の進行特性をあらわす係数

$t$  : 凝結の始発からの材齢 (日)

$t_d$  : 自己収縮ひずみの発生時間遅れをあらわす係数 (日)

$\varepsilon_{ex}(t)$  : 膨張材によるひずみ回復量 ( $\times 10^{-6}$ )

#### (1) 材齢 28 日における自己収縮ひずみ

図-18 に、水結合材比と自己収縮の関係を示す。測定結果を直線回帰し  $\varepsilon_{28}$  を式 (7) で表す。

$$\varepsilon_{28} = 86.425 (B/W) - 55.214 \quad (7)$$

#### (2) セメント・混和材 (収縮低減剤) の影響をあらわす係数

示方書では、普通ポルトランドセメントに対してセメント種類の係数が決められているが、ここでは、シ

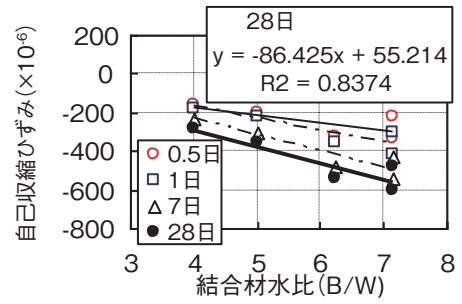


図-18 結合材水比と自己収縮の関係

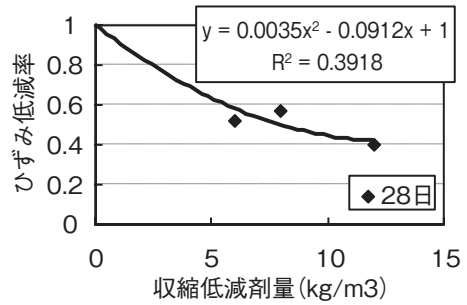


図-19 収縮低減剤と自己収縮ひずみ低減率の関係

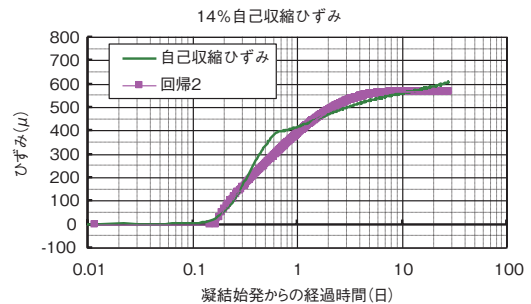


図-20 自己収縮ひずみの回帰結果の一例 (W/B=14%)

リカフェーム混入セメントとして  $\gamma_c = 1.0$  とした。図-19 に収縮低減剤とひずみ低減率の関係を示す。ここでのひずみ低減率  $\gamma_a$  は、収縮低減剤使用時のひずみ量を無混入時のひずみ値で除したもので以下の式 (8) で回帰した。

$$\gamma_a = 0.0035R^2 - 0.0912R + 1 \quad (8)$$

ここに、 $R$  : 収縮低減剤の使用量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

なお、収縮低減剤の添加量は、自己収縮ひずみの進行には大きな影響はなく、ここでは、 $\varepsilon_{28}$  のみの係数とした。

#### (3) 自己収縮の進行を表す係数

式 (6) において各調査のひずみデータが近似するように、自己収縮の進行を表す係数  $a$ 、 $b$  および  $t_d$  を求めた。図-20 に、自己収縮ひずみ回帰結果の一例 ( $W/B = 14\%$ ) を示す。また、図-21 および図-22 に、単位セメント量と各係数の関係を示す。各係数とも単位セメント量で以下の式 (9) ~ (11) に示す直線回帰を行った。

$$a = 0.0007C + 0.3962 \quad (9)$$

$$b = 0.0008C - 0.2167 \quad (10)$$

$$t_d = 0.00005C + 0.0635 \quad (11)$$



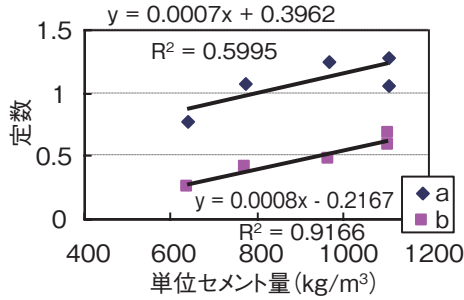


図-21 自己収縮進行特性をあらわす係数

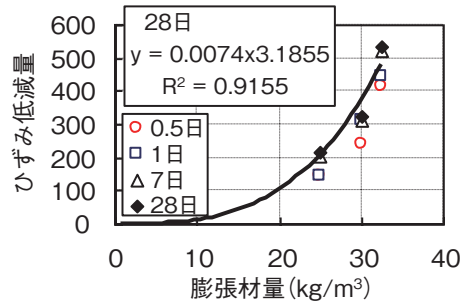


図-23 膨張材量とひずみ低減量の関係

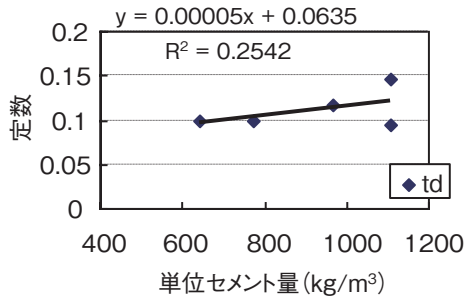


図-22 自己収縮発生時間遅れをあらわす係数

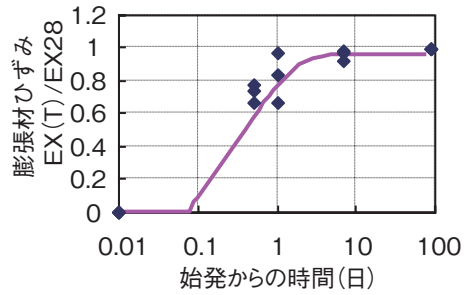


図-24 膨張材によるひずみ進行量

(4) 膨張材によるひずみ低減量

膨張材によるひずみ低減量は、収縮低減剤とは異なり、自己収縮の進行とは大きく異なった。そこで、膨張材によるひずみの低減量を以下の式 (12) により、個別の進行度とし、自己収縮に足し合わせることにより定めた。

$$\epsilon_{ex}(t) = \epsilon_{ex28} \cdot \epsilon_{is}(t) \quad (12)$$

ここに、

$\epsilon_{ex28}$  : 膨張材によるひずみ低減量 (材齢 28 日)

$\epsilon_{is}(t)$  : 膨張材によるひずみの進行量

また、 $\epsilon_{is}(t)$  は以下の式 (13) によった。

$$\epsilon_{is}(t) = \epsilon_t [1 - \exp \{-\alpha (t - t_0)^\beta\}] \quad (13)$$

ここに、

$\epsilon_t$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $t_0$  : 膨張材のひずみの進行量をあらわす係数

図-23に膨張材量とひずみ低減量の関係を示す。図より、膨張材量によるひずみの低減量を以下の (14) 式に回帰した。

$$\epsilon_{ex28} = 0.0074EX^{3.1855} \quad (14)$$

図-24に、膨張材によるひずみの進行量を示す。図より係数、 $\epsilon_t$ :0.959、 $\alpha$ :1.684、 $\beta$ :0.728、 $t_0$ :0.08を回帰した。

また、部材の大きさによる係数 $\kappa$ は、モデル部材との比較により、 $\kappa$ :1.2~1.8の係数とした。

6. 実証実験

本研究では、室内実験結果ならびに自己収縮対策の検証を行うとともに、実験結果の定式化および後述する自己収縮解析の実証を行うため、2種類の自己収縮抑制対策を施した  $F_c = 150N/mm^2$  級の超高強度コ

ンクリートで実大モデル試験体を作製し、強度特性と自己収縮特性を確認するとともに、実大モデル実験と解析の結果について検証した。

6.1 実証実験概要

(1) 使用材料およびコンクリートの調査

表-13に使用材料を、表-14にコンクリートの調査をそれぞれ示す。調査は、水結合材比14%の調査を基準として、目標スランプフロー  $70 \pm 7.5cm$ 、目標空気量  $1.5 \pm 1.0\%$  とし、混和剤の固形分量は単位水量によって補正した。自己収縮抑制対策は2種類とした。対策1は乾燥収縮低減剤  $10kg/m^3$  を添加し、対策2は乾燥収縮低減剤  $10kg/m^3$  と石灰系膨張材  $20kg/m^3$  を添加した。なお、石灰系膨張材はセメントの内割に、乾燥収縮低減剤は単位水量の一部とした。

表-13 使用材料

使用材料	使用材料の詳細	
水	W	東京都上水道水
結合材	B	シリカフェューム混入セメント：密度 $3.08g/cm^3$
細骨材	S	桜川産砕砂：表乾密度 $2.59g/cm^3$ 、FM2.63
粗骨材	G	桜川産砕石：表乾密度 $2.65g/cm^3$ 、FM6.60 実積率61%
混和材	H	乾燥収縮低減剤：ポリエーテル誘導体
混和材	EX	石灰系膨張材、密度 $3.16g/cm^3$
混和剤	SP	高性能減水剤：ポルカルボン酸系、 固形分30%

表-14 コンクリートの調査

調査	W/B (%)	単位量 (kg/m³)						SP 使用量 (C×%)
		W	C	S	G	H	EX	
対策1	14	155	1107	427	811	10	-	2.35
対策2	14	155	1087	427	811	10	20	2.35

## (2) コンクリートの製造

コンクリートの製造は、レディーミクストコンクリート工場（東京都中央区）で行った。コンクリートは2軸強制練りミキサ（公称容量 6.0m<sup>3</sup>）を用い、1バッチの練混ぜ量は 2.0m<sup>3</sup>とした。練混ぜはモルタル先練り方式とした。細骨材、セメント、水（混和剤、収縮低減剤含む）を投入して 270 秒間でモルタルを練り、次に粗骨材を投入して 180 秒間でコンクリートを練り上げた。

## (3) 試験体

試験体は、茨城県つくば市（輸送時間約 100 分）で作製した。図-25 に無筋試験体の概要を、図-26 に有筋試験体の概要を示す。無筋試験体は、断面寸法 1000 × 1000mm、高さ 1050mm とし、上下それぞれ発泡スチロールで断熱した。有筋試験体は、断面寸法 1000 × 1000mm、高さ 2000mm で、主筋には USD685 を用いて 32 - D41 を配筋し、帯筋には SPR785 を用いて □UD16@100 を配筋した。コア供試体はコア寸法を Φ 100 × 200mm とし、原則として有筋試験体は下部 200mm から上方向に 2 本、中央から振り分けて 2 本、上部 200mm から下方向に 2 本の計 6 本を採取し、無筋試験体は中央から 2 本ずつ振り分けて計 4 本採取した。

打設については、有筋試験体は容量 0.5m<sup>3</sup> のバケツで 4 層に、無筋試験体はアジテータ車より直接 2 層に分割して行った。各層打設時にバイブレータの先端が前の層に入るように締め固めた。

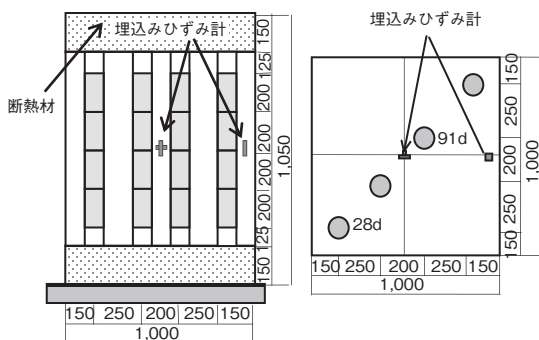


図-25 試験体図（無筋試験体）

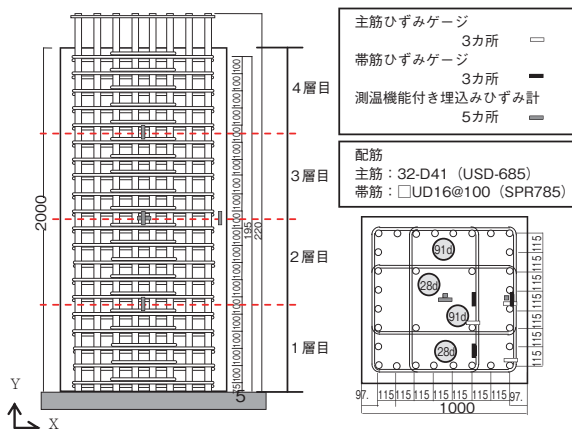


図-26 試験体図（有筋試験体）

## (4) 試験項目および方法

試験項目は、フレッシュコンクリート、強度試験、温度の測定、自己収縮の測定とした。表-15 に、試験項目、試験方法、養生方法および試験材齢を示す。

強度試験は、圧縮強度試験、ヤング係数試験、割裂引張試験とし、表-15 に示す試験方法、養生および試験材齢で実施した。供試体は、始発後 10 時間までの若材齢には鋼製型枠を、これ以降の材齢にはプラスチック製簡易型枠を用いた。始発からの時間が 10 時間以内の場合は盤間変位からヤング係数を算出し、それ以降はコンプレッソメータを用いて測定した。

コンクリート温度および自己収縮ひずみの測定は、図-26、図-27 に示すように実大モデル試験体に测温機能がある埋込みひずみ計を設置して材齢 91 日まで測定した。自己収縮ひずみは、計測位置における材軸方向の測定値であり、線膨張係数を 10.5 μ / °C と仮定して温度ひずみを求め、実ひずみから差し引いた値とした。

## 6.2 実証実験結果

### (1) コンクリートの製造および打設

表-16 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。いずれのコンクリートも目標値を満足していた。対策 2 については、膨張材の影響と考えられるが、出荷後 1 時間以上経過した荷卸時の 50cm フロー時間が増加した。このため、打設速度が遅くなったが、施工性への影響は許容できる範囲であった。

### (2) 強度試験結果

図-27 に圧縮強度の試験結果を、図-28 にヤング係数の試験結果を、図-29 に割裂引張強度の試験結果を示す。おおむね室内実験の結果と同様の傾向を示しており、所要の品質を満足している。ヤング係数について、始発後 10 時間までの若材齢では室内試験と比べ若干小さい値を示した。

表-15 試験項目、試験方法、養生方法および試験材齢

試験項目	試験方法	養生方法および試験材齢
スランブフロー	JIS A 1150	出荷時および荷卸し時
フロー時間	JIS A 1150	対策 2 は荷卸し後 80 分後にスランブフロー、
空気量	JIS A 1128	フロー時間および温度を測定
温度	温度計	
圧縮強度	JIS A 1108	現場封かん（始発後 2h(対策 2)、4h(対策 1)、10h, 2.4, 7.28, 56, 91d)
ヤング係数	JIS A 1149	標準、簡易断熱、コア(7, 28, 56, 91d)
割裂引張強度	JIS A 1113	現場封かん（終結, 2.4h, 2.4, 7.28, 56, 91d)
自己収縮ひずみ	埋込みひずみ計	有筋試験体、無筋試験体、気中養生 コンクリート打設直後より材齢 91 日まで

表-16 フレッシュコンクリートの試験結果一覧

	注水時刻	試験時刻	スランブフロー (cm)	50cm フロー時間 (s)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
対策 1	出荷	① 8:39 ② 9:13	75.5 × 75.5	9.90 (180)	1.9	35.0
	荷卸	11:10	77.0 × 74.5	6.78 (180)	1.1	34.1
対策 2	出荷	① 10:36 ② 11:06	75.0 × 75.0	9.90 (180)	1.8	35.0
	荷卸	13:25	70.5 × 66.0	20.19 (180)	1.4	36.2
	荷卸後 80 分	14:45	71.0 × 67.5	13.29 (180)	-	36.5

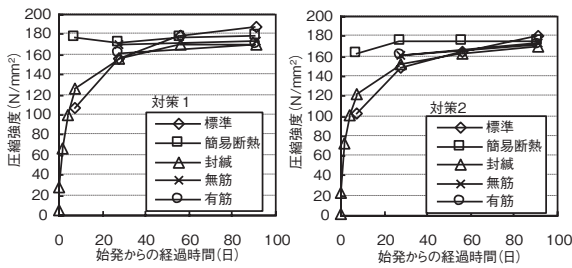


図-27 圧縮強度試験結果

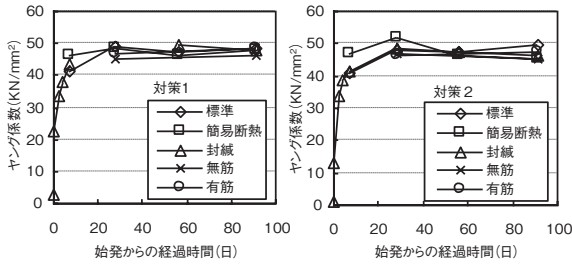


図-28 ヤング係数試験結果

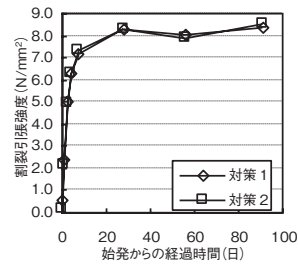


図-29 割裂引張強度試験結果

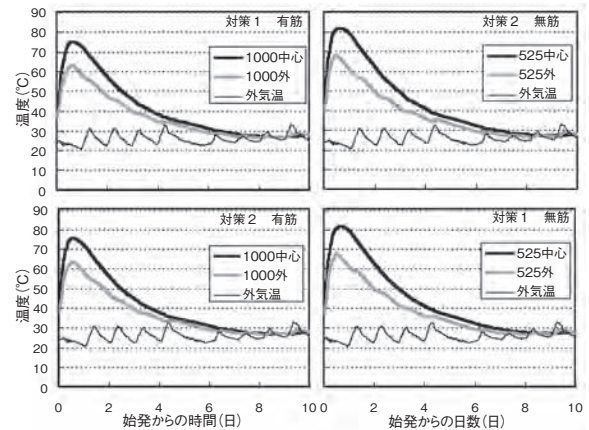


図-30 温度測定結果

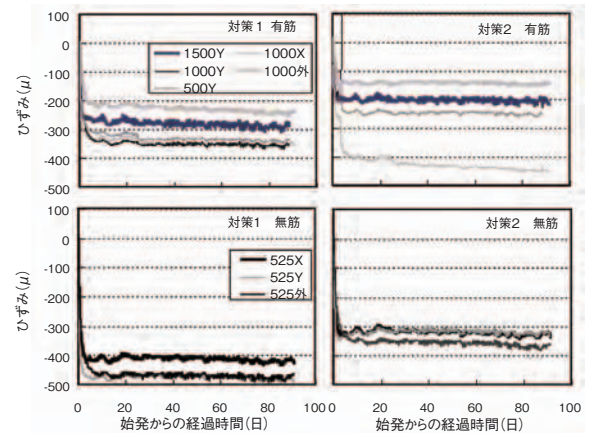


図-31 ひずみ測定結果

(3) 温度測定結果

図-30に、温度測定結果を示す。有筋試験体の最高温度は、対策1中央部で凝結始発より約13時間30分で75.0℃、対策2中央部で凝結始発より約12時間30分で75.6℃であった。無筋試験体の最高温度は、対策1中央部で凝結始発より約16時間で81.6℃、対策2中央部で凝結始発より約14時間で81.8℃であった。

有筋試験体と無筋試験体で最高温度が約6℃、最高温度到達時間が2～3時間の差が認められた。これは、有筋試験体は鉄筋が上部に露出しており、この鉄筋からの放熱により最高温度が低くなったと推測される。

(4) ひずみ測定結果

図-31に、実大モデル試験体のひずみ測定結果を示す。有筋試験体のひずみは、対策1で約300μ、対策2で約200μであった。無筋試験体のひずみは、対策1で450μ、対策2で350μであった。室内実験では、水結合材比14%程度の自己収縮が600～800μとなっており、収縮低減剤および膨張材を添加することによる自己収縮低減効果が確認された。しかし、対策2の高さ1000mm中心部のX方向(1000X)およびY方向(1000Y)で、ひずみ測定値に大きな変動が認められた。これは、ひずみ計位置が打設時の打重ね部であり、そこに自己収縮の応力が集中したため、局部的に微細なひび割れが発生したと推測される。また、この箇所を強度試験用コア採取時にひび割れの有無を確認したが、コア採取時には打重ね部によりコア供試体が分割することなく採取可能であった。

7. 実証実験解析

実証実験解析は、対策1、対策2について室内実験から定式化した結果を用いて3次元有限要素法プログラムで解析し、実証実験実測値と解析値について温度および自己収縮ひずみの妥当性を確認した。

7.1 解析モデル

解析モデルは、1/4モデルとし、鉄筋は弾塑性トラス要素を使用した。図-32に、メッシュ分割図を示す。

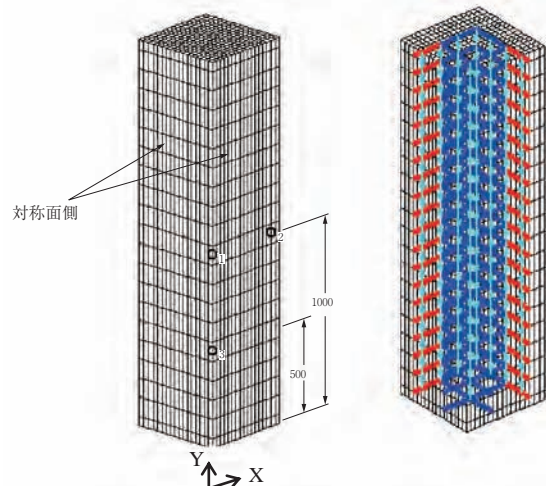


図-32 メッシュ分割図および出力部位



### 7.2 境界条件

温度解析の境界条件は、上面が対流熱伝達境界（側面熱伝達率 1.5 日まで  $8W/m^2C$ 、7 日まで  $4W/m^2C$ 、7 日以降  $12W/m^2C$ 、正面熱伝達率  $14W/m^2C$ ）とし、コンクリートの初期温度は  $39.1C$  とした。応力解析の境界条件は、下面の鉛直方向変位を拘束、対称面は対称条件（面に垂直方向変位を拘束）を与えた。

### 7.3 気温

気温は、実測データより日平均気温に換算して使用した。図-33 に、解析に用いた気温データを示す。

### 7.4 物性値

物性値は、表-17 に示す値を用いた。コンクリートのヤング係数、圧縮強度、引張強度、線膨張係数、自己収縮ひずみは 5 章で定式化したものを、クリープ構成則は文献(10)、(11) を改良したものをユーザーサンプルチンで定義して使用した。

### 7.5 温度解析の結果

図-34 に、温度履歴を示す。温度履歴は試験体中心および外側において解析の結果と実証実験でおおむね同じ結果であった。

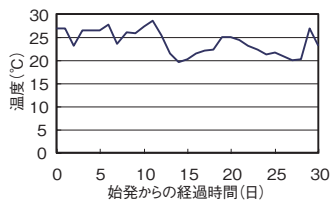


図-33 解析に用いた気温データ

表-17 物性値

熱伝達率	2.7 (W/m <sup>2</sup> C)
密度	2500 (kg/m <sup>3</sup> )
比熱	1.15 (kJ/kgC)
1.15 (kJ/kgC)	$T=K(1-\exp(-\alpha t))$ $k=48$ (C), $\alpha=2.6$
ポアソン比	0.2
鉄筋のヤング係数	210000 (N/mm <sup>2</sup> )
鉄筋の線膨張係数	10 μ

### 7.6 体積ひずみの結果

図-35 に、対策 1 の体積ひずみの履歴（計算値）および実証実験実測値を示す。結果は、対策 1、対策 2 とともに同様な傾向であったため対策 1 のみを示した。体積ひずみの履歴は、高さ 1000mm、500mm 中心で X よび Y 方向とも、実測値と計算値（クリープ+自己収縮）が初期材齢からよく整合している。高さ 1000mm 外側では、初期材齢から計算値に比べ実測値が小さくなる傾向が認められた。これは、自己収縮ひずみの定式化に部材温度の条件が考慮されていないこと、ならびに部材係数を決定する際、部材中心のひずみ値から係数を決定したため、計算値では実部材の中心の温度条件で計算されているためと考えられる。

### 7.7 パラメータ解析

#### (1) 解析概要

解析ケースは無対策、対策 1、対策 2 を基本として水結合材比を 14%、16%、20% と変化させたケース、水結合材比 14% では、収縮低減剤を 6、10、14kg と変化させたケース、膨張材を 15、20、25、32.5kg と変化させたケース、収縮低減剤を 10kg 一定で膨張材を 15、20、25kg としたケース、膨張材を 20kg 一定でヒビダンを 6、10、14kg としたケースで実施した。解析条件ならびに物性値は実証実験の解析と同一とした。

#### (2) 解析結果

解析結果は、図-32 の出力部位に示す試験体の中央部の結果を示した。

図-36 に、結合材水比と材齢 28 日ひずみの関係を示す。無対策、対策 1、対策 2 共に解析結果は結合材水比が低くなるにつれてひずみは小さくなる傾向を示

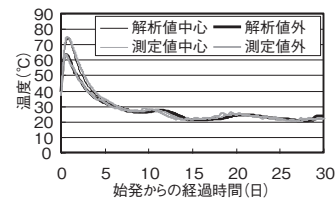


図-34 温度履歴

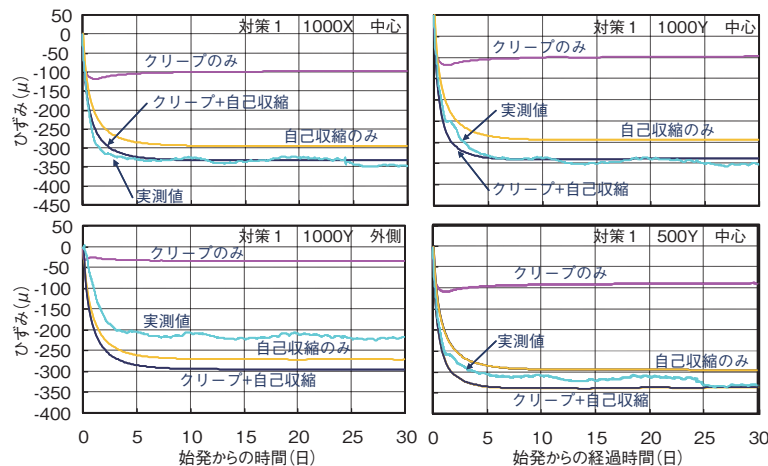


図-35 体積ひずみの解析結果と実測値（対策 1）



した。室内実験結果と解析結果の比較は、実験結果と比較して解析結果のひずみが大きくなる傾向が認められた。

図-37に、収縮低減剤混入量と材齢28日ひずみの関係を示す。解析結果は、収縮低減剤混入量の増加にともないひずみは小さくなる傾向が認められた。収縮低減剤混入量は、10kgまではひずみの減少量が大きくなったが、10kgから14kgへ増加した場合にはひずみの減少量は小さくなった。室内実験結果と解析結果の比較は、フジタのN0(膨張材なし)で解析結果よりひずみが大きくなったもののそれ以外では実験結果の方がひずみは小さくなった。図-38に、膨張材混入量と材齢28日ひずみの関係を示す。解析結果は、膨張材混入量の増加にともないひずみが小さくなり、ひずみの減少量は膨張材混入量が多くなるほど大きい。実験値との比較では、フジタおよび戸田建設の実験共に150~250 $\mu$ 程度実験値のひずみが小さくなる傾向を示した。

解析の結果、水結合材比、収縮低減剤混入量、膨張

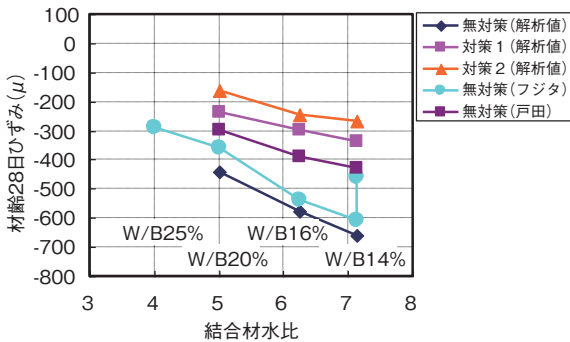


図-36 結合材水比と材齢28日ひずみの関係

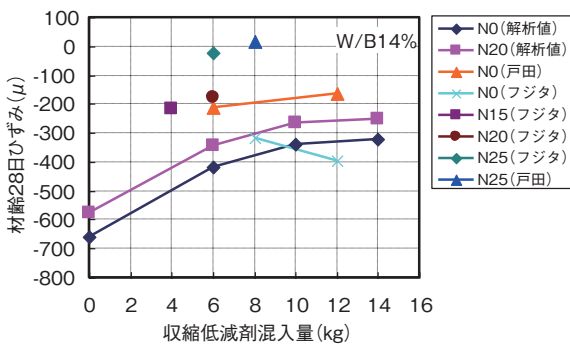


図-37 収縮低減剤混入量と材齢28日ひずみの関係

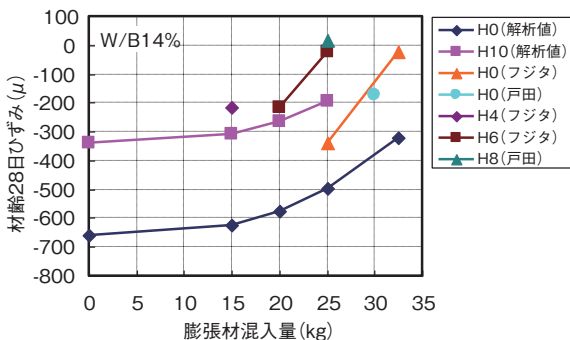


図-38 膨張材混入量と材齢28日ひずみの関係

材混入量のどの結果においても実験結果より解析値のほうがひずみは大きくなる傾向が認められた。この結果は、自己収縮の定式化に起因するものであるが、定式化の際に定めた部材係数 $\kappa = 1.2$ による影響と推測される。

### 7.8 ひび割れ抑制効果

図-39に、結合材水比とひび割れ指数の関係を示す。ひび割れ指数は、引張強度を主応力で除したもので、ひび割れ指数が小さくなるほどひび割れ発生確率は高くなる。ひび割れ指数について、今回は「有害なひび割れの発生を制限したい場合」の標準値である1.00を基準とした。図より、結合材水比が低くなるほど、ひび割れ指数は直線的に大きくなることがわかった。無対策(収縮低減剤および膨張材無混入)の場合、水結合材比が約16%以上であれば、ひび割れ指数は1.00以上となった。対策1および対策2の場合、今回の水結合材比の範囲内であれば、いずれの水結合材比においてもひび割れ指数は1.00を上回った。

図-40に、水結合材比14%における収縮低減剤混入量とひび割れ指数の関係を示す。収縮低減剤の混入量が10kgまでは混入量の増加にともないひび割れ指数は大きくなったが、混入量が10kgを超えるとひび割れ指数への影響は小さくなった。また、膨張材の混入量が0kgおよび20kgのいずれの場合においても、収縮低減剤の混入量が6kg以上であれば、ひび割れ指数は1.00以上となった。

図-41に、水結合材比14%における膨張材混入量とひび割れ指数の関係を示す。膨張材の混入量が20kgまではひび割れ指数への影響は小さいが、混入量が20kgを超えると混入量の増加にともないひび割

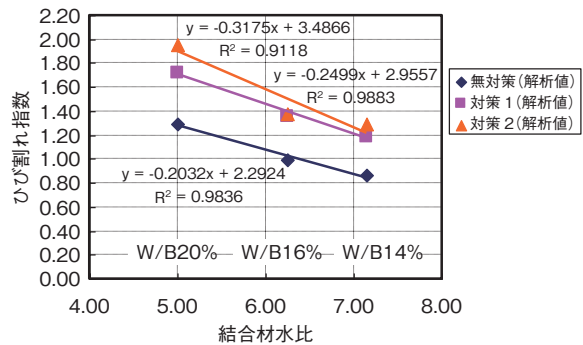


図-39 結合材水比とひび割れ指数の関係

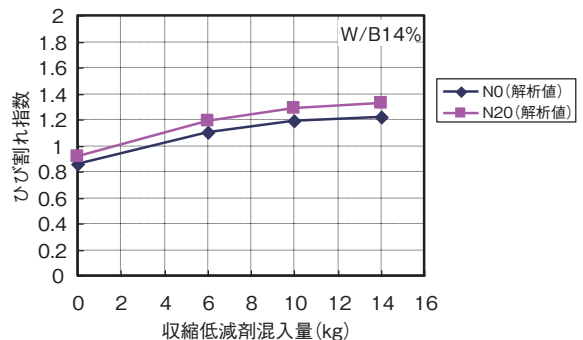


図-40 収縮低減剤混入量とひび割れ指数の関係

れ指数は大きくなった。収縮低減剤の混入量が0kgの場合、膨張材の混入量が約25kg以上であれば、ひび割れ指数は1.00以上となった。収縮低減剤の混入量が10kgの場合、膨張材が無混入であっても、ひび割れ指数は1.00以上となった。

表-18に、水結合材比14%における収縮低減剤と膨張材の混入量の組み合わせによるひび割れ指数の値を示す。なお、解析ケース以外の数値は、直線補間により算出した。表より、水結合材比14%の場合にひび割れ指数を1.00以上とする条件は、膨張材の混入量に関わらず収縮低減剤を6kg以上混入するか、収縮低減剤を混入しない場合は膨張材を27.5kg以上混入する必要がある。

以上のことから、ひび割れ指数を1.00以上とする条件をまとめると、下記の通りとなる。

- ・水結合材比を16%以上とする。
- ・水結合材比が16%未満の場合、膨張材の混入量に関わらず収縮低減剤を6kg以上混入するか、収縮低減剤を無混入とするのであれば膨張材を27.5kg以上混入する。

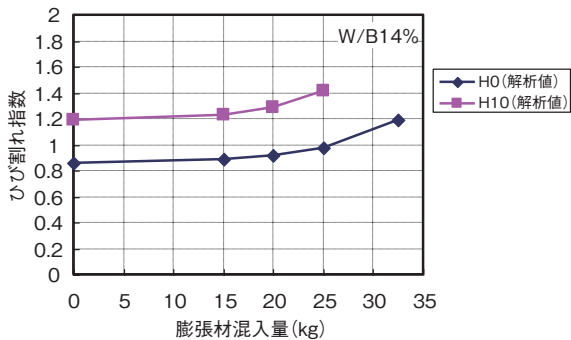


図-41 膨張材混入量とひび割れ指数の関係

表-18 収縮低減剤と膨張材の混入量の組み合わせによるひび割れ指数 (水結合材比14%)

膨張材混入量 (kg)	収縮低減剤混入量 (kg)					
	0	6	8*	10	12*	14
0	0.86	1.10	1.14	1.19	1.20	1.22
15.0	0.89	1.13	1.16	1.23	1.26	1.30
17.5*	0.90	1.16	1.20	1.26	1.28	1.31
20.0	0.92	1.19	1.24	1.29	1.31	1.33
22.5*	0.95	1.21	1.28	1.35	-	-
25.0	0.98	1.24	1.32	1.41	-	-
27.5*	1.05	-	-	-	-	-
30.0	1.12	-	-	-	-	-
32.5	1.19	-	-	-	-	-

\*: 解析を実施していない混入量 (直線補間により算出)

## 8. まとめ

本研究は、 $F_c = 100\text{N/mm}^2$  を超える超高強度コンクリートでは、自己収縮ひずみが大きくなり、実構造体コンクリートに自己収縮の影響と考えられるひび割れが生じる可能性が大きくなっていることを受け、このひび割れの原因究明ならびにひび割れ対策を行うことを目標とし、超高強度コンクリートの自己収縮に与える材料・調合の影響を実験で確認し、必要な収縮対策を行い、解析的検討や実大モデルの実証実験を通して、実構造体にひび割れの生じない超高強度コンク

リートを確立することを目的とし実施した。

本研究の成果としてまとめると以下のようになる。

- (1) 自己収縮性状の基本特性の把握および自己収縮対策を把握した (20°C)。
- (2) 超高強度コンクリートの若材齢物性を取り込んだ温度応力解析が可能になった。
- (3) 調合要因 (W/B・混和材料) の影響を考慮した解析検討が可能になった。
- (4) コンクリートの物性試験でひび割れ検討が可能になった。

本研究結果は、超高強度コンクリートの実験データとして貴重な資料を保有するものとなり、当初の目的を十分達成して、今後の実物件の検討に有効に活用できるものとする。しかしながら、温度や鉄筋の影響評価など課題も残す結果となり、今後の更なる研究が継続されるものを望むものである。

本研究は、(株)熊谷組・佐藤工業(株)・戸田建設(株)・西松建設(株)・(株)間組・(株)フジタ・前田建設工業(株)が共同で行った研究成果の一部を取りまとめたものである。関係各社ならびに実験担当者に謝意を表します。また、本実験を行うにあたり、竹本油脂(株)、晴海小野田レミコン(株)より多大な御協力をいただきました。ここに記して深謝致します。

## 【参考文献】

- 1) 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
- 2) 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
- 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報告集，vol.617, pp.1 - 8, 2007.7
- 4) 楊揚・佐藤良一・田澤栄一：硬化過程にある高強度コンクリートの線膨張係数測定方法の一提案，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.22, No.2, pp.961 - 966, 2000
- 5) コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(II)，1994.5
- 6) 野口貴文・友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文報告集，vol.472, No.6, pp.11 - 16, 1995
- 7) 丁海文他：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講演会論文集，Vol.22, No.2, pp.955 - 960, 2000
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書，2002
- 9) 谷村充・三谷裕二・佐藤良一：低収縮化高強度コンクリートの自己収縮・膨張ひずみ予測式の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.1, pp.493 - 498, 2005
- 10) 萩原伸治：高強度コンクリートの若材齢における力学特性と圧縮および引張クリープ挙動に関する実験的研究，コンクリート工学論文集，第11巻1号，pp.39 - 47, 2000.1
- 11) 高森直樹・片寄哲務・西田浩和・寺岡勝：膨張材と収縮低減剤を用いた超高強度コンクリートの自己収縮挙動-その1 実験概要-，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.97 - 98, 2006.9