

超高強度コンクリートの自己収縮に関する実験的研究

野中 英 * 佐藤孝一 * 金森誠治 *

設計基準強度が 150N/mm²級の超高強度コンクリートは、水結合材比が小さく、単位結合材量が多くなるため、自己収縮ひずみが 600~800×10⁻⁶になる場合があり、この自己収縮ひずみが主要因と思われる内部応力やひび割れの発生が懸念されている。

本実験的研究は、(1)室内実験により、高強度コンクリートの自己収縮に関する各種物性値を把握すると同時に、膨張剤、収縮低減剤を用いた自己収縮抑制対策の効果を確認し、(2)室内試験の結果より物性値を定量化(定式化)し、温度・応力解析ソフトに使用するデータベースを作成し、(3)2種類の自己収縮抑制対策を施した Fc=150N/mm²級の超高強度コンクリートの実大モデルによる、自己収縮に関する各種物性を確認するとともに、温度、応力解析の結果と比較・検証した。

キーワード：超高強度コンクリート、自己収縮、膨張剤、収縮低減剤、実証実験

1. はじめに

近年、超高層住宅の更なる高層化に伴い、設計基準強度(以下 Fc と略記) 150N/mm²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¹⁾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、Fc=150N/mm²級の超高強度コンクリートは、水結合材比(以下 W/B と略記)が小さく、単位結合材量が多くなるため、自己収縮ひずみが 600~800×10⁻⁶になる場合があり、これによる内部応力やひび割れが構造部材の性能に及ぼす影響は今後も検討が必要である。

本実験的研究では、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、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いる。

本研究の研究概要は、以下の3項目に大別できる。

(1)自己収縮に関する各種物性の把握 室内実験により、超高強度コンクリートの自己収縮に関する各種物性値を把握すると同時に、自己収縮抑制対策を施した配合の各種物性値に関しても記した。

(2)各種物性値の定量化 室内試験の結果より物性値を定式化し、温度・応力解析ソフトのユーザーサブルーチンとして組み込むためのデータベースを作成した。

(3)実証実験 自己収縮抑制対策を施した Fc=150N/mm²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、自己収縮に関する各種物性を確認するとともに、実大モデル実験と温度・応力解析の結果について検証した。

2. 自己収縮に関する各種物性の把握

2.1 実験概要

(1)使用材料

Table 1 に、使用材料を示す。セメントはシリカフェーム混

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。また、自己収縮抑制材料としてポリエーテル系乾燥収縮抑制剤、石灰系膨張剤、合成繊維(ポリプロピレン繊維)を使用した。

(2)コンクリートの調合および練り混ぜ

Table 2 に、コンクリートの調合を示す。コンクリートの調合は、水結合材比の違いで4調合、合成繊維1調合、収縮低減剤2調合、膨張材2調合、収縮低減剤・膨張剤併用型1調合について各種性状を検討することとした。粗骨材かさ容積は 0.51m³/m³(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、所要量を2~3バッチ併せて試料とした。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。

(3)試験項目および方法

Table 3 に、室内実験における試験項目・方法を示す。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(20Base, 14Base)を実施した。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

Table 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 2.60g/cm ³ 、吸水率 1.63%
粗骨材(G)	桜川産砕石、表乾密度 2.66g/cm ³ 、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 ³
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

* 技術研究所 建設材料研究グループ

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。ヤング係数の測定は、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。

コンクリートの線膨張係数は、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²⁾の方法を参考にして求めた。試験体の寸法は76×76×400mm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。試験体の長さ変化は、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、試験材齢は、凝結始発から2,6,12,24時間および2週とした。

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バラツキを考慮し、回帰するデータの温度範囲を変更した。

自己収縮ひずみは、JCI 超流動コンクリート研究委員会

Table 2 コンクリートの調合

調合 No.	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)							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%

Table 3 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 ²⁾	低温度範囲(-2~5℃)
自己収縮	埋込型ひずみ計	全ひずみ
乾燥収縮	JIS A 1129-1	

Table 4 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

の「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」³⁾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/mm²)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10×10⁻⁶/℃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。

2.2 実験結果

(1) フレッシュコンクリート

Table 4に、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かかった。水結合材比が小さいほどコンクリートの練り上がり温度は高く、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。

(2) 圧縮強度・ヤング係数

Fig.1に、圧縮強度試験結果を示す。始発から1日未満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/mm²あった無混入との差が、材齢91日で10N/mm²程度まで近似した。

Fig.2に、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認められた。

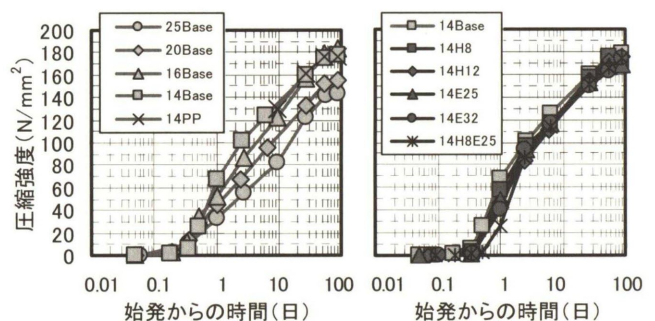


Fig.1 圧縮強度試験結果 (左図:ベース、右図:膨張剤、収縮低減剤混入)

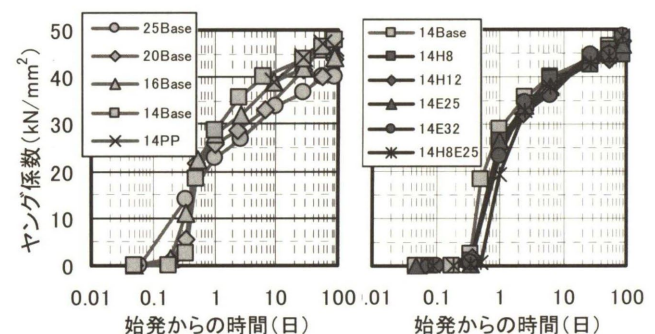


Fig.2 ヤング係数試験結果 (左図:ベース、右図:膨張剤、収縮低減剤混入)

(3) 引張強度

Fig. 3 に、引張強度の試験結果を示す。引張強度は、凝結始発時間を基準として、始発後 1, 4, 8, 12, 24 時間の若材齢および 3, 7, 28, 56, 91 日で試験を行った。若材齢試験において、混和材料を混入した調査は、混入量の増加に伴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、バラツキは大きい概ね 6N/mm² 程度であった。

(4) 線膨張係数

Fig. 4 に、線膨張係数測定結果を示す。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。

(5) 自己収縮

Fig. 5 に、自己収縮の測定結果(水結合材比別)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。また、図には表していないが、PP 繊維や乾燥の影響との差は小さかった。

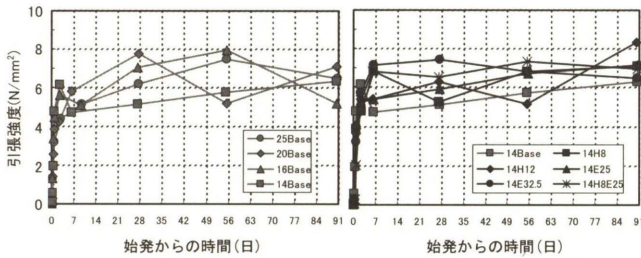


Fig. 3 引張強度試験結果 (左図:ベース、右図:膨張剤、収縮低減剤混入)

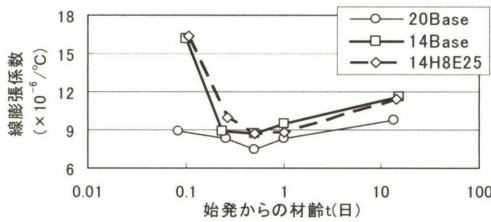


Fig. 4 線膨張係数測定結果

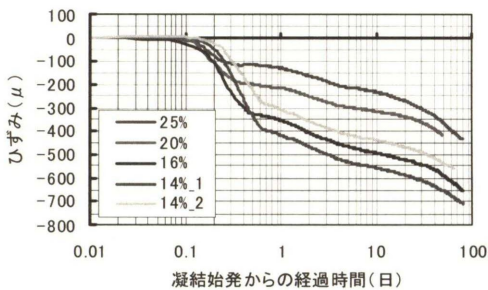


Fig. 5 自己収縮測定結果

3. 各種物性値の定量化

3.1 圧縮強度・ヤング係数

Fig. 6 に、圧縮強度の定式化例 (14Base、14H8E25)

を、Table 5 に、Fig. 6 の定式化例に従い定式化した関係式の一覧を示す。ごく初期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 区間に分けて帰した。

混和材料無混入の調査の強度発現は、8 時間までは水結合材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した。混和材料を混入した調査では、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 (調査 14Base と 14H8E25) を Table 6 および Fig. 7, 8 に示す。各調査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表せることが確認できた。

Table 5 圧縮強度 (σ_c) (N/mm²) と積算温度 (M) (Ln° D.D) の関係式一覧

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

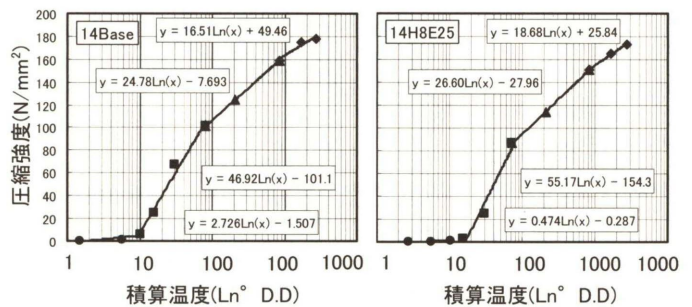


Fig. 6 圧縮強度の定式化例 (14Base, 14H8E25)

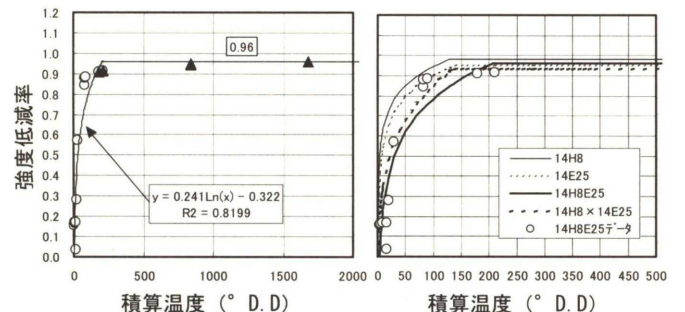


Fig. 7 強度低減率 (14H8E25)

Fig. 8 併用時の強度低減率

Fig. 9 に、圧縮強度とヤング係数の関係を示す。NewRC 式よりやや小さいが、本式で近似できると考えられる。

3. 2 引張強度

圧縮強度と引張強度の関係を Fig. 10 に示す。圧縮強度と引張強度の関係は、圧縮強度が 120N/mm² までは野口・友澤式⁴⁾により表せると言えるが、それ以降については同式との乖離が見られるため、圧縮強度が 100N/mm² 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/mm² 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。

3. 3 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 (×10⁻⁶m/°C) の一定であるとし、この領域を区間 0 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 III とし、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 0

線膨張係数の最大値である 16.4 (×10⁻⁶m/°C) の一定とした。

(2) 区間 I

近似は、丁らの報告⁵⁾に示されている式 3.3 (1) 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 α(t) - A の関係を指数関数で近似するためで、「最小値 - (1/∞)」を具体的な数値として表現する目的である。

$$\alpha(t) = A + B \exp(-t/C) \quad 3.3(1)$$

ここに、α(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 (Table 6 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 3.3 (2) により、定数 B, C を算出することとした。

$$\alpha(t) - A = B \exp(-t/C) \quad 3.3(2)$$

始発からの材齢 t と α(t) - A の関係を Fig. 11 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 α(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 Table 8 のようになる。

(3) 区間 II

区間 II において、線膨張係数 α(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 3.3 (3) において近似することとした。

$$\alpha(t) = Dt + E + A \quad 3.3(3)$$

ここに、D, E : 定数式 3.3 (4) により、定数 D, E を算出することとした。

$$\alpha(t) - A = Dt + E \quad 3.3(4)$$

始発からの材齢 t と α(t) - A の関係を Fig. 12 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 α(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 Table 8 のようになる。

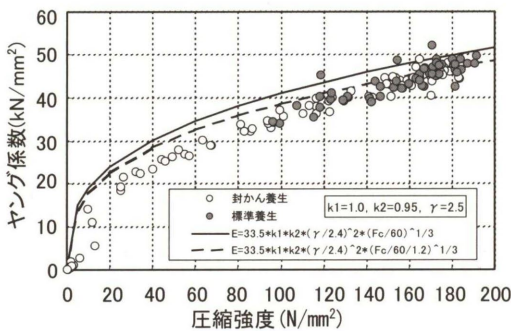


Fig. 9 圧縮強度とヤング係数の関係

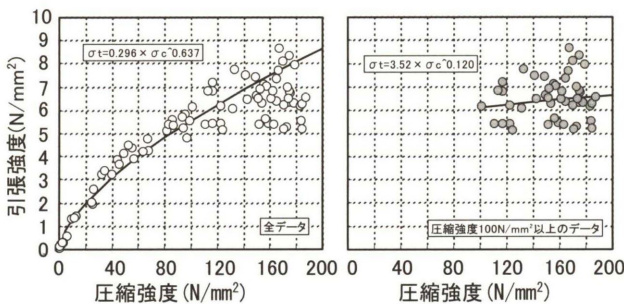


Fig. 10 圧縮強度と引張強度の関係

(左図 : 全データ, 右図 : 圧縮強度 100N/mm² 以上)

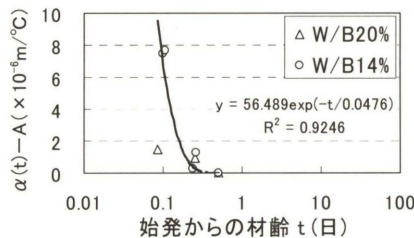


Fig. 11 始発からの材齢 t と α(t) - A の関係 (区間 I)

Table 6 各 W/B の線膨張係数最小値

W/B (%)	最小値
14	8.694
20	7.429

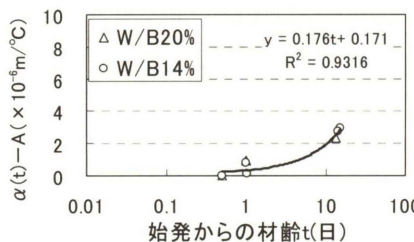


Fig. 12 始発からの材齢 t と α(t) - A の関係 (区間 II)

Table 7 定数 B, C の値

B	C
56.5	0.0476

Table 8 定数 D, E の値

D	E
0.176	0.171

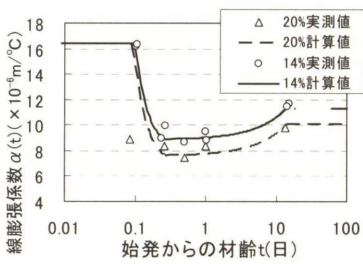


Fig.13 定式化結果と実測値の比較

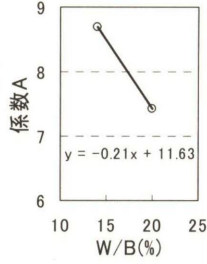


Fig.14 W/Bと係数Aの関係

(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 Fig. 13 に示す。図より、区間0～区間Ⅲにおける値および式は実測値を概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、Fig. 14 および式 3.3(5) に示す線形式により、A を算出することとした。

$$A = -0.210(W/B) + 11.63 \quad 3.3(5)$$

3.4 自己収縮

自己収縮の定式化にあたっては、示方書⁶⁾ならびに谷村らの研究⁷⁾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, 1, 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 3.4(1) に示す。

$$\epsilon(t) = \kappa \cdot \gamma_c \cdot \gamma_a \cdot \epsilon_{28} [1 - \exp\{-a(t - t_d)^b\}] + \epsilon_{ex}(t) \quad 3.4(1)$$

ここに、

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

κ : 部材の大きさによる係数

$\gamma_c \cdot \gamma_a$: セメント・混和材の影響を表す係数

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

a・b: 自己収縮の進行特性を表す係数

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表す係数(日)

$\epsilon_{ex}(t)$: 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

Fig.15 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 ϵ_{28} を式 3.4(2) で表す。

$$\epsilon_{28} = 86.425(B/W) - 55.214 \quad 3.4(2)$$

(2) セメント・混和材 (収縮低減剤) の影響を表す係数

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、シリカフェーム混入セメントとして $\gamma_c = 1.0$ とした。Fig.16 に収縮低減剤量とひずみ低減率の関係を示す。ここでのひずみ低減率 γ_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 3.4(3) で回帰した。

$$\gamma_a = 0.0035R^2 - 0.0912R + 1 \quad 3.4(3)$$

ここに、R: 収縮低減剤の使用量 (kg/m^3) である。

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

(3) 自己収縮の進行を表す係数

式 3.5(1) において各調合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。Fig. 17, 18 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 3.4(4)～(6) に示す直線回帰を行った。

$$a = 0.0007C + 0.3962 \quad 3.4(4)$$

$$b = 0.0008C - 0.2167 \quad 3.4(5)$$

$$t_d = 0.00005C + 0.0635 \quad 3.4(6)$$

(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 3.4(7) により、個別の進行度とし、自己収縮に足し合わせるにより定めた。

$$\epsilon_{ex}(t) = -\epsilon_{ex28} \cdot \epsilon_{ts}(t) \quad 3.4(7)$$

ここに、 ϵ_{ex28} : 膨張材によるひずみ低減量(材齢28日)

$\epsilon_{ts}(t)$: 膨張材によるひずみの進行量

また、 $\epsilon_{ts}(t)$ は以下の式 3.4(8) によった。

$$\epsilon(t) = \epsilon_t [1 - \exp\{-\alpha(t - t_d)\beta\}] \quad 3.4(8)$$

ここに、 $\epsilon_t, \alpha, \beta, t_d$: 膨張材のひずみの進行量を表す係数

Fig. 19 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 ($EX kg/m^3$) によるひずみの低減量を以下の 3.4(9) 式に回帰した。

$$\epsilon_{ex28} = 0.0074EX^{3.1855} \quad 3.4(9)$$

Fig. 20 に、膨張材によるひずみの進行量を示す。図より係数、 ϵ_t : 0.959, α : 1.684, β : 0.728, t_0 : 0.08 を回帰した。比較により、 κ : 1.2～1.8 の係数とした。

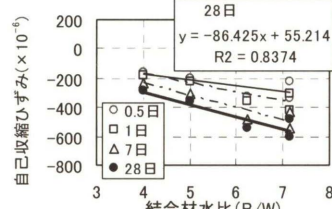


Fig. 15 結合材水比と自己収縮ひずみ

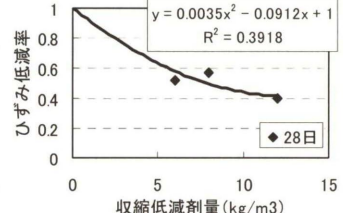


Fig. 16 収縮低減剤量とひずみ低減率

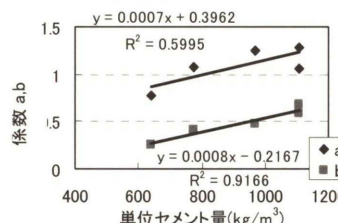


Fig. 17 自己収縮進行特性を表す係数

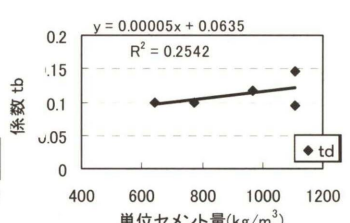


Fig. 18 自己収縮発生時間遅れを表す係数

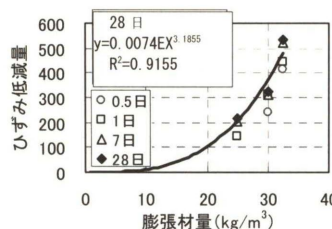


Fig. 19 膨張材量とひずみ低減量

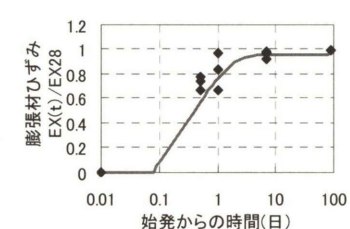


Fig. 20 膨張材によるひずみ進行量

4. 実証実験

4.1 実験概要

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 $F_c=150\text{N/mm}^2$ 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結果を報告する。

(1) 使用材料およびコンクリートの調査

Table 9 に使用材料を、Table 10 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、目標スランブフロー $70 \pm 7.5\text{cm}$ 、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。

(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^3)を用い、1バッチの練混ぜ量は 2.0m^3 とした。練混ぜはモルタル先練り方式とした。

(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。Fig.21 に無筋試験体の概要を、Fig.22 に有筋試験体の概要を示す。無筋試験体は、断面寸法 $1000 \times 1000\text{mm}$ 、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 $1000 \times 1000\text{mm}$ 、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 $\square\text{UD16@100}$ を配筋した。コア供試体はコア寸法を $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 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本ずつ振分けて計4本採取した。

(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。Table 11 に、試験項目、試験方法、養生方法および試験材齢を示す。

測定は、「2. 自己収縮に関する各種物性の把握」の試験項目および方法と同様に実施した。

コンクリート温度および自己収縮ひずみの測定は、Fig.21,22 に示すように実大モデル試験体に測温機能がある埋め込みひずみ計を設置して材齢 91 日まで測定した。

4.2 実験結果

(1) コンクリートの製造および打設

フレッシュコンクリートの試験結果は、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) 圧縮強度・ヤング係数

Fig.23 に圧縮強度の試験結果を、Fig.24 にヤング係数の試験結果を示す。概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

Table 9 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%

Table 10 コンクリートの調査

調査	W/B (%)	単位量 (kg/m^3)						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

[目標スランブフロー]: $70 \pm 7.5\text{cm}$

[目標空気量]: $1.5 \pm 1.0\%$

Table 11 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 対策2は荷卸し後 80 分後にスランブフロー、フロー時間および温度を測定
フロー時間	JIS A 1150	
空気量	JIS A 1128	
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,24h,2,4,7,28,56,91d)
自己収縮ひずみ	埋め込みひずみ計	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

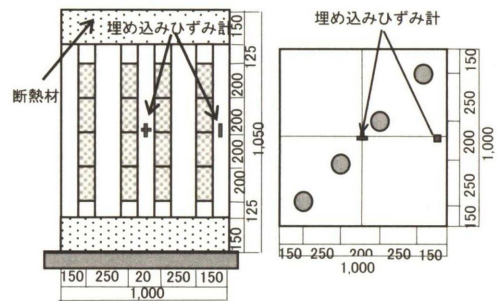


Fig. 21 試験体図 (無筋試験体)

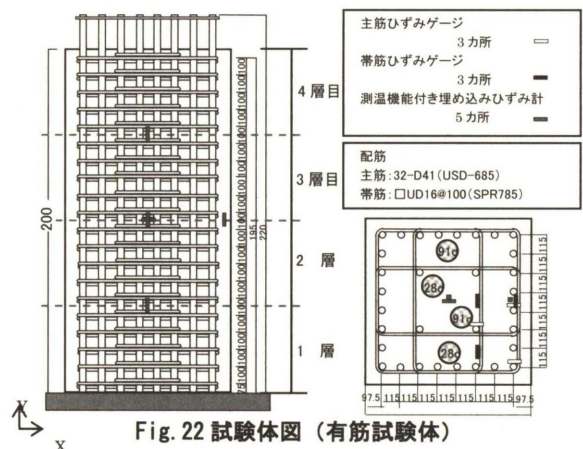


Fig. 22 試験体図 (有筋試験体)

を示した。圧縮強度は、対策1および対策2で同様な傾向を示した。

(3) 温度測定結果

Fig.25 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℃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℃であった。温度測定結果の傾向は、対策1と2で同等であった。

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で露出しており、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

Fig. 26 に、実大モデル試験体のひずみ(クリープひずみ+自己収縮ひずみ)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%程度の自己収縮が約600μ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と

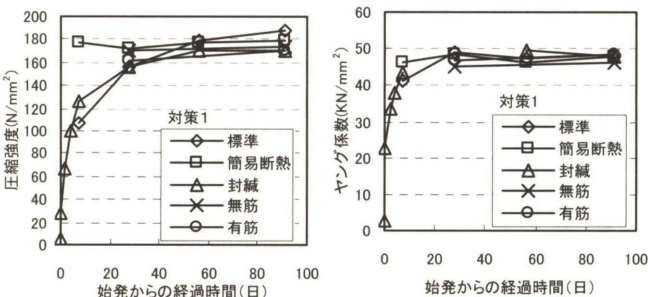


Fig. 23 圧縮強度試験結果

Fig. 24 ヤング係数試験結果

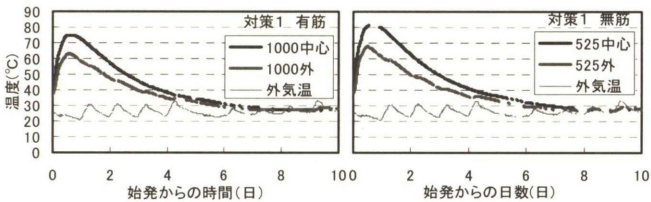


Fig. 25 温度測定結果

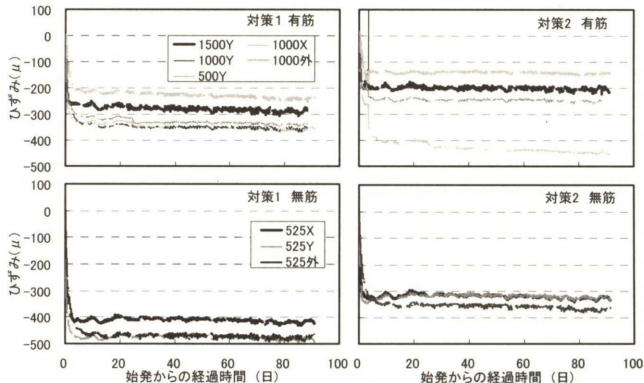


Fig. 26 ひずみ測定結果

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。

4. 3 実験解析

実験解析は、対策1、対策2についてその2からその4で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。

(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。Fig.27 に、メッシュ分割図を示す。

(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/m²℃, 7日まで4W/m²℃, 7日以降12W/m²℃, 正面熱伝達率14W/m²℃)とし、コンクリートの初期温度は39.1℃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。

(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。Fig.28 に、解析に用いた気温データを示す。

(4) 物性値

物性値は、Table 12 に示す値を用いた。コンクリートの

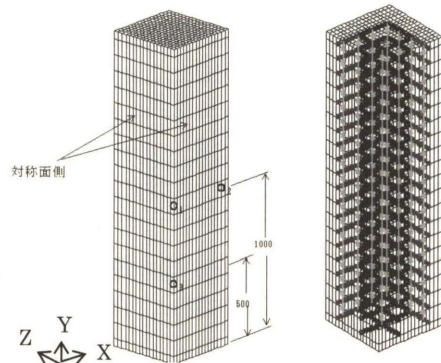


Fig. 27 メッシュ分割図および出力部位

Table 12 物性値	
熱伝達率	2.7 (W/m ² ℃)
密度	2500 (kg/m ³)
比熱	1.15 (kJ/kg℃)
断熱温度上昇	T=K(1-exp(-αt)) k=48(℃), α=2.6
ポアソン比	0.2
鉄筋のヤング係数	210 (KN/mm ²)
鉄筋の線膨張係数	10 (×10 ⁻⁶ m/℃)

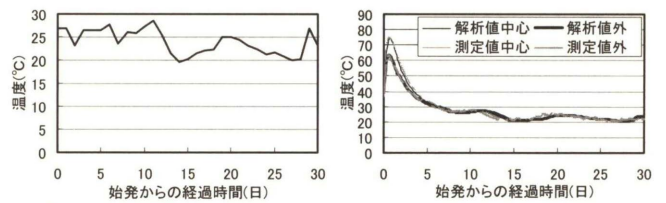


Fig. 28 解析に用いた気温データ

Fig. 29 温度履歴

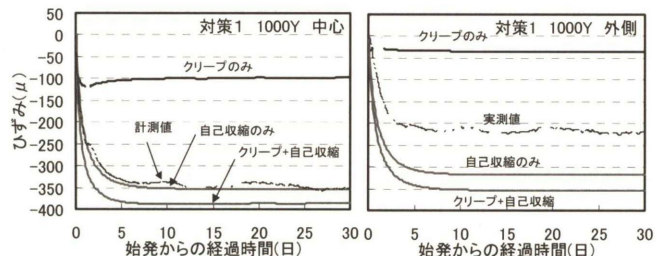


Fig. 30 体積ひずみの解析結果と実測値 (対策1)

ヤング係数, 圧縮強度, 引張強度, 線膨張係数, 自己収縮ひずみはその2~その4で定式化したものを, クリーブ構成則は文献⁸⁾⁹⁾を改良したものをユーザーサブルーチンで定義して使用した。

(5) 温度解析の結果

Fig.29 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概ね同じ結果であった。

(6) 体積ひずみの結果

Fig.30 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 中心で材齢2日程度の初期材齢では, 計算値と実測値(クリープ+自己収縮)が整合しているが, それ以降の材齢においてはその差は大きくなった。高さ1000mm 外側では初期材齢から計算値と実測値に差が認められ, その差も中心部と比較して大き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の部材係数, ならびに部材温度の条件が考慮されていないためと考えられる。

5. まとめ

本実験的研究で得られた結果をまとめて, 以下に示す。

- (1) 室内実験により, 超高強度コンクリートの自己収縮に関する各種物性値を把握すると同時に, 自己収縮抑制対策を施した配合の各種物性値を明らかにした。
- (2) 室内実験の結果より, 超高強度コンクリートの強度、線膨張係数, 自己収縮を定式化し, 温度・応力解析ソフトのユーザーサブルーチンとして組み込むためのデータベースを作成した。
- (3) 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, 自己収縮

に関する各種物性を確認した。

- (4) 実大モデル実験と温度・応力解析の結果について検証し, 実大モデル実験と温度応力解析の結果に整合性があることを確認した。

謝辞

本研究は, 熊谷組と, 佐藤工業, 戸田建設, 西松建設, ハザマ, フジタ, 前田建設工業の共同研究成果の一部です。多大なご協力をいただきました関連各社に謝意を表します。

参考文献

- 1) 上田, 阿部, 山下, 大津: 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) 楊楊, 佐藤, 田澤: 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
- 3) 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
- 4) 野口, 友澤: 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
- 5) 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
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書, 2002
- 7) 谷村他: 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
- 8) 萩原他: 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
- 9) 高森他: 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. 09

Experimental Study on Autogenous Shrinkage of Ultra High Strength Concrete

Akira NONAKA, Koichi SATO and Seiji KANAMORI

Abstract

There is a case of the ultra high-strength concrete with specified design strength 150N/mm² class becomes autogenous shrinkage of $600\sim 800 \times 10^{-6}$ because water-binder ratio is small and the unit binder content increases. Internal restraining stress and outbreak of crack that autogenous shrinkage seems to cause are concerned about.

This experimental study is (1) I grasped various properties of matter value about autogenous shrinkage of ultra high-strength concrete by indoor experiment. I confirmed the effect of measures to control autogenous shrinkage when I used expansive admixture and shrinkage reducing agent. (2) I carried out the formulation of properties of matter value based on the indoor experiment and made database to use for the analysis software of temperature and stress. (3) I confirmed various properties of matter about autogenous shrinkage the full-size model of ultra high-strength concrete with specified design strength of 150N/mm² class that two kinds of measures to control autogenous shrinkage were adopted. In addition, I compared it with the result of temperature and stress analysis.

Keywords: high-strength concrete, autogenous shrinkage, expansive admixture, shrinkage reducing agent, proof experiment