

## 中庸熱セメントを用いた超高強度コンクリートの 実大柱施工実験

飯田 康介      高森 直樹  
塩田 博之      佐々木 仁  
佐々木 聡

### 概 要

超高強度コンクリートは、若材齢時に大きな自己収縮ひずみが生じ、それが鉄筋により拘束されるとコンクリートに応力が生じる。実大部材ではさらに水和熱に起因する温度応力が加わり、ひび割れ発生の危険性がより高まることが知られている。超高強度コンクリートの実用化のため、当社では過去に低熱セメントを用いた超高強度コンクリートによる実大柱施工実験を実施し、調合や養生条件が収縮やひび割れ発生に及ぼす影響について検討を行っている。今回、新たに中庸熱セメントを用いた超高強度コンクリートについて、圧縮強度や引張強度発現など基礎的物性の把握、また、鉄筋コンクリート柱部材の若材齢時におけるひび割れ発生の危険性を評価するため、実大柱施工実験を行った。その結果、全ての試験体において部材に生じる引張応力が割裂引張強度以下であり、試験体表面及び内部にひび割れが発生しないことを確認した。

### Full scale tests into the behavior of Ultra-High-Strength Concrete using moderate-heat cement

#### Abstract

Autogenous shrinkage in ultra-high-strength concrete occurs in the early stages of the curing process with resistant stresses coming from the reinforcement bars. It is known that these cracks are initiated by stress due to hydration heat in the concrete. To create more practical ultra-high strength concrete, FUJITA performed full-scale tests to examine influences of material proportions and curing conditions on cracking for the early stages of the curing process for reinforced concrete columns using ultra-high strength concrete with low-heat cement. This year's tests focused on compressive strength, tensile strength, risk of cracking for early stages of the curing process of reinforced-concrete columns using moderate-heat cement. As a result, we confirmed that tensile stresses occurring on the reinforced-concrete column are less its tensile, and there is no crack on surface and interior of all specimens.

キーワード: 超高強度コンクリート, 中庸熱セメント,  
自己収縮ひずみ, 膨張材, 内部応力

§1. はじめに

超高強度コンクリートは、打設後 7 日間程度の若材齢時に自己収縮ひずみが生じ、それが鉄筋により拘束されるとコンクリートに応力が生じる<sup>1)</sup>。実大部材になるとさらに水和熱に起因する温度応力が加わり、ひび割れ発生の危険性がより高まることになる<sup>2)</sup>。

超高強度コンクリートの実用化のため、当社では過去に低熱セメントおよびシリカフェームを使用した超高強度コンクリートにおいて、凝結始発から材齢 7 日までを若材齢時と定義し、前述の原因による若材齢時のひび割れ発生を検討するため実大柱施工実験により性能を確認している<sup>3)4)</sup>。

今回、新たに中庸熱セメントおよびシリカフェーム、スラグせっこう系混和材を使用した超高強度コンクリートを使用した場合における若材齢時のひび割れ発生の検討を同様の実大柱施工実験により行った。本報告はその結果について報告するものである。

本実験では、ひび割れ対策として膨張材と収縮低減型高性能減水剤を併用、または単独使用した水結合材比(以下、W/B と表記)16%、22%の超高強度コンクリートの柱を対象に、鉄筋コンクリート部材の若材齢時におけるひび割れ発生の危険性を評価することを目的とする。打設時期は標準期と夏期とし、若材齢時の力学特性、内部温度や自己収縮ひずみの計測を行い、内部応力を算定することにより危険性を評価する。同時に目視観察により試験体表面およびコアボーリングとワイヤーソー切断による試験体内部のひび割れ確認を行う。また、無拘束状態を想定した 1メートル角の立方体の試験体(以下、1M 角試験体と表記)と小型試験体を作製し、収縮ひずみ、温度を計測する。使用する材料の違いが自己収縮ひずみ等各物性に及ぼす影響については、先に述べた過去の実験との比較により検討する。

なお、本報告の一部は文献 5)において発表している。

§2. 実験概要

2.1 実験計画

表 1 に実験計画、表 2 にコンクリートの調合をそれぞれ示す。Fc120N/mm<sup>2</sup> (W/B=16%)、100 N/mm<sup>2</sup> (W/B=22%) (以下、Fc120、Fc100 と表記)相当の 2 調合、打設時期は標準期と夏期とし、若材齢時の力学特性については φ100×200 の円柱供試体による圧縮強度、ヤング係数および実大柱試験体の温度分布について検討する。Fc120(標準期)については 1M 角試験体を作製して検討する。既往の低熱セメントを使用した調合の実験結果<sup>4)</sup>と

表 1 実験計画

試験体	RC部分寸法	打設時期	内 訳		打設方向	養生	測定環境
			Fc120	Fc100			
1M角	無筋 1000×1000 ×1000	標準期	○	—	縦打ち	※1	屋内
		夏期	—	—			
実大柱	有筋 1000×1000 ×2400	標準期	—	○	縦打ち	※2	屋内
		夏期	○	○※3			

※1 打設後天端面を断熱材とポリフィルムで封かん、脱型後屋内静置

※2 打設後天端面をブルーシート養生、脱型後屋内静置

※3 木製型枠を使用。この試験体以外は鋼製型枠を使用した。

表 2 コンクリートの調合

調合記号	打設日	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						収縮低減型高性能減水剤 (B×%)	収縮低減剤 (B×%)	繊維混入量 (vol%)
			W	B			細骨材	粗骨材			
				水	セメント	混和材					
Fc100(標準期)	2013/5/22	22	155	599	106	0	740	840	1.45	—	0.2
Fc120(標準期)		16	155	745	194	30	460	887	2.00	—	0.2
Fc100(夏期)	2013/7/10	22	155	599	106	0	740	840	1.50	—	0.2
Fc120(夏期)		16	155	745	194	30	460	887	1.95	—	0.2
15EH(標準期)(既往)	2005/10/4	15	155	892	101	20	479	822	2.00※1	0.49	—

※1 15EH は高性能減水剤を使用

表 3 フレッシュ試験結果

調合記号	フレッシュコンクリート試験結果						凝結試験結果 (試験方法: JIS A 1147)	
	スランプフロー (cm)	50cm フロー (sec)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	外温度 (°C)	始発 (hr)	終結 (hr)	
Fc100(標準期)	58×56	28.8	2.0	29.0	26.0	5.28	6.85	
Fc120(標準期)	69×65	10.9	1.8	28.0	16.0	6.05	8.50	
Fc100(夏期)	49×47	—	2.2	34.5	28.5	5.70	7.17	
Fc120(夏期)	63×66	11.1	1.9	40.0	32.5	5.63	8.25	
15EH(標準期)(既往)	74×73	8.0	1.5	29.4	25.5	11.76	13.44	

の比較については、Fc120 N/mm<sup>2</sup> 相当の W/B=15%、膨張材と収縮低減剤を併用した標準期打設の調合の結果を採用した(表 2 中、15EH(標準期))。

また、小型の試験体にて自己収縮ひずみを計測した。

2.2 コンクリートの製造

表 2 に示すように、Fc120 の調合は膨張材と収縮低減型高性能減水剤を併用し、Fc100 は収縮低減型高性能減水剤のみとした。結合材には中庸熱セメント及びスラグせっこう系混和材、混和剤には収縮低減型高性能減水剤、膨張材には早期反応性の石灰系膨張材、爆裂対策としてポリプロピレン繊維を全ての調合で共通とした。15EH は既往の調合<sup>3)</sup>であり、結合材には低熱セメント、シリカフェーム、膨張材を使用している。コンクリートは実機プラントで製造し、膨張材とポリプロピレン繊維は実機プラントの練混ぜ時に添加した。

表 3 にフレッシュ試験結果を示す。Fc120 のスランプフローは 65cm 程度であった。Fc100 調合のスランプフローはポリプロピレン繊維混入量が 0.2%の方が 0.1%に比べ 10cm 程度小さくなることを確認した。凝結試験では低熱セメント使用の調合に比べ、始発、終結時間共に 5 時間程度早くなる傾向を示した。これは、発熱速度の大きいセメントによる影響と、比表面積が大きい早期反応型の膨張材を使用したためと考えられる。

### 2.3 実大試験体

実大試験体は実大柱試験体と 1M 角試験体を作製した。図 1 に実大柱試験体形状および配筋詳細を示す。鉄筋コンクリート部分の試験体形状は 1150mm×1150mm×2400mm とし、配筋仕様は主筋比(芯鉄筋含む) $p_g=3.2\%$ 、横補強筋比  $p_w=0.8\%$  とした。試験体のコンクリート打設は屋内にて柱上部からバケットを用いた落とし込みとした。打設時は材軸方向に約 1000mm ずつ分けて打設し、1 層打設するごとにバイブレータで締め固めを行った。打設後は打設口付近をブルーシートで養生し、Fc120 は材齢 2 日、Fc100 については翌日脱型し、屋内に静置した。

実大柱試験体のコンクリートひずみは低弾性埋込みひずみ計、鉄筋ひずみは箔ひずみゲージ、コンクリート温度は熱電対により測定した。1M 角コンクリート試験体の形状は 1000mm 角とし、上下に断熱材を配して柱を模擬した。

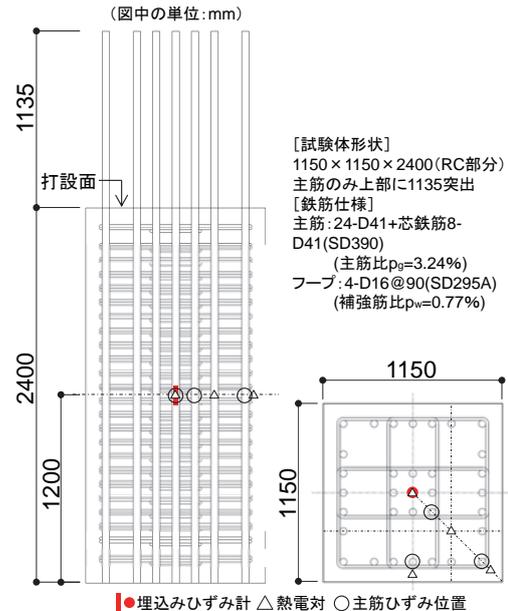


図1 実大有筋試験体形状および配筋詳細

### 2.4 小型試験体

小型試験体は本検討の比較試験として実施した。試験体寸法 100mm×100mm×400mm の無筋コンクリート試験体に低弾性埋込みひずみ計を埋込み、Fc120 および Fc100 調合の膨張剤有り、無しの計 4 調合について自己収縮ひずみを計測した。打設時期は冬期であり、打設後は屋内で封かん養生とし脱型せずにそのまま静置し計測を行った。

## §3. 若材齢時の力学特性の比較

### 3.1 圧縮強度とヤング係数

図 2 に圧縮強度の経時変化を示す。供試体は実大柱試験体と同じ屋内にて封緘養生とした。季節ごとの養生温度の影響を確認するため、凝結始発からの経過時間で比較した。また、図中に 15EH の圧縮強度の発現状況を併せて示す。Fc120(夏期)は 15EH(標準期)とほぼ同等の強度発現を示した。Fc100 について標準期と夏期を比較した場合、標準期の強度発現が若干遅く、56 日及び 91 日強度が夏期に比べ  $4\text{N/mm}^2$  程度の低い結果であったが、最終的にはほぼ同等の強度に達した。右図の有効材齢は土木学会標準示方書・構造性能照査編<sup>6)</sup>による養生温度を考慮した値である。有効材齢で合わせた場合、Fc100 の標準期と夏期、また、Fc120(夏期)と 15EH はそれぞれほぼ同一の発現性状であった。

図 3 にヤング係数の経時変化を示す。調合ごとの発現性状に差はほとんど見られず、膨張剤添加の有無、もしくは W/B に関わらず、全ての調合がほぼ同様の傾向を示した。

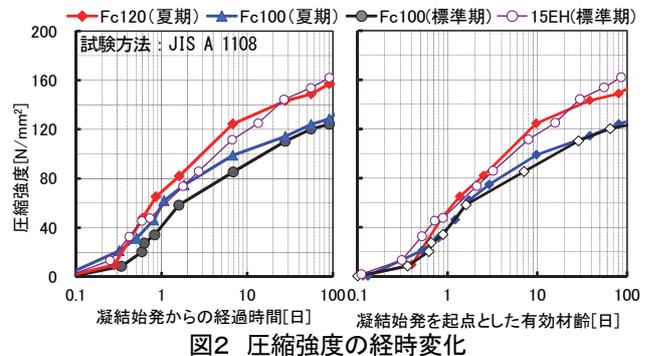


図2 圧縮強度の経時変化

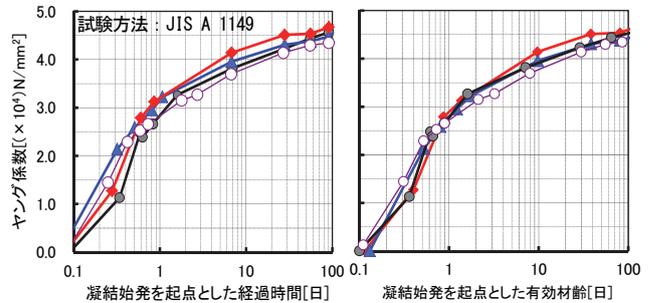


図3 ヤング係数の経時変化

有効材齢で合わせた場合においても、全ての水準の発現性状がほぼ同じであった。

### 3.2 温度分布

図 4 に実大柱試験体の中心部における温度履歴、図 5 に実大柱試験体の中央断面における最高温度到達時の温度分布を示す。最高温度は Fc120(夏期)が約  $90^\circ\text{C}$ 、Fc100 については夏期が約  $80^\circ\text{C}$ 、標準期が約  $68^\circ\text{C}$  であり、夏期と標準期とで  $12^\circ\text{C}$  の差となった。ただし、標準期は鋼製型枠、夏期は木製型枠を使用している。中心部と端部の温度差については Fc120(夏期)および Fc100(標準期)については  $22^\circ\text{C}$  から  $23^\circ\text{C}$  程度であった。

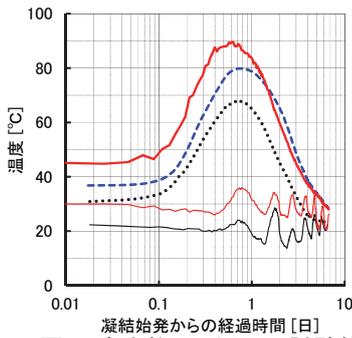


図4 実大柱コンクリート試験体中心温度の経時変化

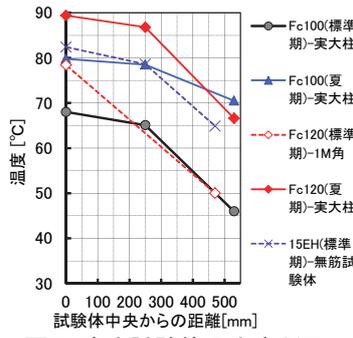


図5 実大試験体の中央断面における温度分布

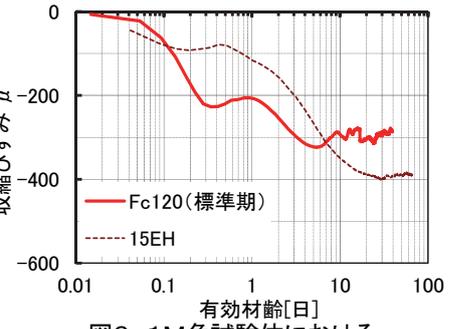


図6 1M角試験体における自己収縮ひずみの経時変化

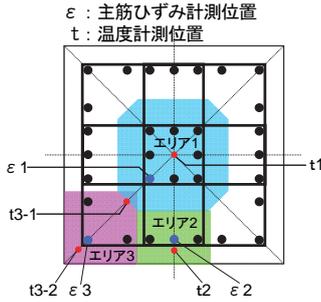


図7 算定の仮定断面

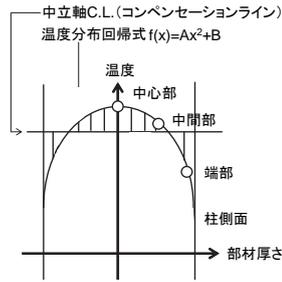


図8 温度分布モデル<sup>2)</sup>

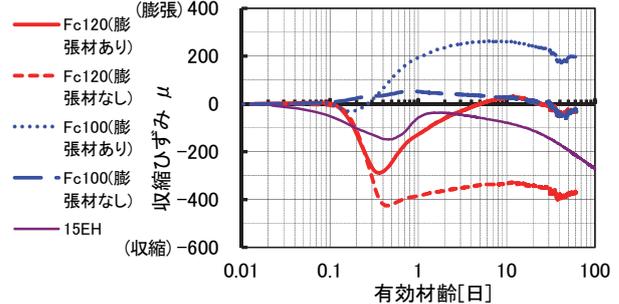


図9 小型試験体における自己収縮ひずみの経時変化

#### §4. 無筋コンクリート試験体の自己収縮挙動

##### 4.1 結合材の種類が自己収縮ひずみに及ぼす影響

図 6 に 1M角試験体における自己収縮ひずみの経時変化を示す。自己収縮ひずみは試験体中央における鉛直方向の測定値であり、線膨張係数を  $10 \mu / ^\circ\text{C}$  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である。

コンクリートの自己収縮ひずみにおいて、有効材齢 5 日程度で収縮は収まり、Fc120(夏期)は約  $300 \mu$  でほぼ一定となった。また、15EH と比較した場合、有効材齢 0.2 日までの収縮の変化は本調合の方が約  $100 \mu$  大きい、有効材齢 7 日で逆転する結果となった。

##### 4.2 膨張材の影響

図 9 に小型試験体における自己収縮ひずみの経時変化を示す。有効材齢 10 日で比較した場合、膨張材を添加することで Fc120 については  $300 \mu$ 、Fc100 については  $250 \mu$  程度膨張側へ推移した。

#### §5. 実大有筋試験体の自己収縮挙動

##### 5.1 実大柱試験体における内部拘束応力の算定方法<sup>2)7)</sup>

内部拘束による応力度の算定は①鉄筋によりコンクリートの自己収縮が拘束されることで発生する応力(以下「鉄筋拘束応力」と表記)、②試験体表面および内部の温度差により発生する内部拘束応力(以下「温度応力」と表記)を累加して求めた。算定位置は平面内で応力が最も

大きいと考えられる高さ方向中央の柱脚から 1200mm の位置の断面を対象とした。

図 7 に鉄筋拘束応力を算定するための仮定断面を示す。鉄筋拘束応力には断面内の平均値を用いた。平均鉄筋拘束応力は、断面が 3 種類のエリアで構成され、エリア内の主筋ひずみと温度は均一と仮定し、実測した主筋ひずみから温度ひずみを差し引き、鉄筋本数の重み付けを考慮し、応力の釣り合い条件から求めた。以下に、鉄筋拘束応力の算定式を示す。なお、実際にはコンクリートの線膨張係数が硬化過程で変化するため、鉄筋の線膨張係数との差異によって互いに拘束され応力が発生すると考えられるが、本検討においては考慮しないものとした。

$$\epsilon_r = \frac{(\epsilon_1 \cdot n_1 \cdot m_1) + (\epsilon_2 \cdot n_2 \cdot m_2) + (\epsilon_3 \cdot n_3 \cdot m_3)}{N} \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{\epsilon_r \cdot 10^{-6} \cdot E_s \cdot A_s \cdot N}{A_c} \quad (2)$$

$\epsilon_r$ : 断面平均拘束ひずみ  $\mu$   
 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ : 主筋の拘束ひずみ  $\mu$   
 $n$ : エリア内主筋本数 [本]  
 $m$ : エリア数 [箇所]  
 $N$ : 断面内主筋本数合計 [本]  
 $\sigma_r$ : 断面平均拘束応力 [N/mm<sup>2</sup>]  
 $E_s$ : 鉄筋のヤング係数 [N/mm<sup>2</sup>]  
 $A_s$ : 鉄筋の公称断面積 [mm<sup>2</sup>]  
 $A_c$ : 部材断面積 [mm<sup>2</sup>]

実測した温度(図 5 参照)から図 8 に示すような温度分布モデルを仮定し<sup>2)</sup>、同一断面内の温度差により生じる内部拘束ひずみ  $\epsilon_r$  を求め、文献 7) に示す step by step 法を用いて温度応力を求めた。各ステップにおけるヤング係数には実測値(図 3 参照)を用いた。また、ヤング係数はクリープひずみの影響を受けて経時変化するものとし、各ステップの応力算定に用いるヤング係数は、任意の荷重開始のステップを起点とした各ステップにおけるクリープ係数を求め、任

意の荷重開始時のヤング係数に乗じて求めた。クリープ係数の計算式は既往の研究において片寄らが低熱セメントとシリカフェームを使用したコンクリートによる実測値を用いて修正した ACI-209 型のモデル式<sup>4)8)</sup>を採用した。

### 5.2 実大柱試験体における内部拘束応力の経時変化

図 10 に内部拘束応力の試験体断面における検討位置を示す。

図 11 に実大柱試験体の断面平均鉄筋拘束応力の経時変化を示す。3 調査とも凝結始発から 10 日前後で最大値を示し、最大で Fc120(夏期)において  $3.5\text{N/mm}^2$  であった。Fc100(標準期)の拘束応力は約 3 日で最大となり約  $1.5\text{N/mm}^2$ 、Fc100(夏期)については 3 日付近まで増大した後、10 日前後から減少する傾向を示した。鉄筋拘束応力は最大で約  $2.5\text{N/mm}^2$  であった。

図 12 に中心の内部拘束応力の経時変化を示す。縦軸の正は引張側を示す。累加は凝結始発からの経過時間で合わせて行った。図中にひび割れが発生する限界の収縮応力とされる割裂強度の 70% (以下  $0.7\sigma_t$  と表記) の値を用いて比較した<sup>9)</sup>。いずれの調査も 8 日程度で引張応力が最大になる傾向を示したが、全て  $0.7\sigma_t$  以下であった。引張応力が最も大きい調査は Fc120(夏期)の  $4.5\text{N/mm}^2$  であった。

図 13 に中心の温度応力の経時変化を示す。全ての水準において凝結始発から材齢増加に共ない圧縮から引張りに転じる傾向を示した。最も大きい水準は Fc100(標準期)であり、凝結始発から 4 日時点で約  $1.0\text{N/mm}^2$  であった。

図 14 に端部の内部拘束応力の経時変化を示す。鋼製型枠を用いた試験体(Fc120(夏期)と Fc100(標準期))は 1 日程度で引張応力が最大値を示した。全て  $0.7\sigma_t$  以下であった。

図 15 に端部の温度応力の経時変化を示す。全ての水準において凝結始発から材齢増加に共ない引張りから圧縮に転じる傾向を示した。柱端部の引張応力が最も大きい値を示した水準は Fc100(標準期)において凝結始発から 0.8 日時点で  $1.7\text{N/mm}^2$  であった。

既往の 15EH と比較した場合、本調査の方が材齢初期での応力が低く、 $0.7\sigma_t$  とほぼ同じ応力で推移した 15EH に比べ、内部温度が最大となるまでのひび割れ発生の危険性は低いと考えられる(図 12 および図 14)。この原因として、本調査では比表面積の大きい早期反応型の膨張材を使用することが考えられる。

### 5.3 ひび割れに関する検討

実大柱試験体表面および内部についてひび割れ観察を

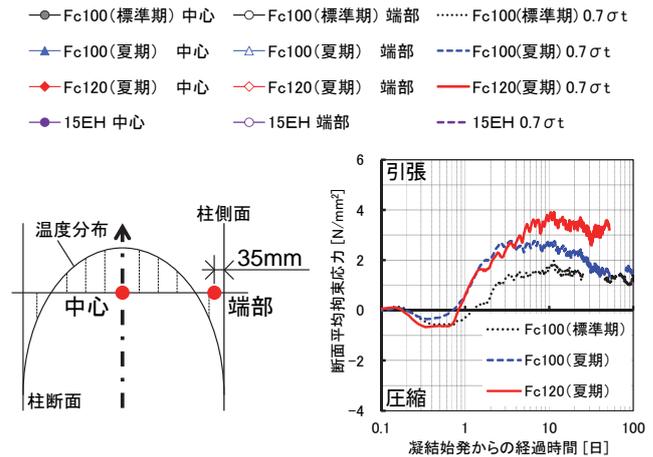


図 10 内部拘束応力  
検討位置

図 11 断面平均鉄筋拘束  
応力の経時変化

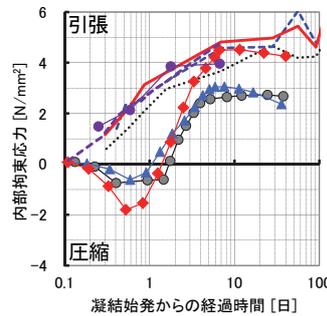


図 12 内部拘束応力(中心)  
の経時変化

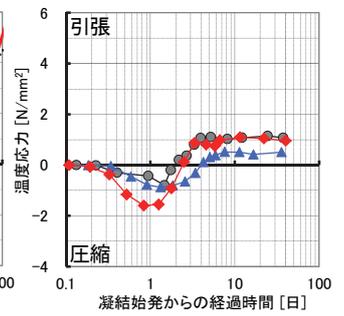


図 13 温度応力(中心)  
の経時変化

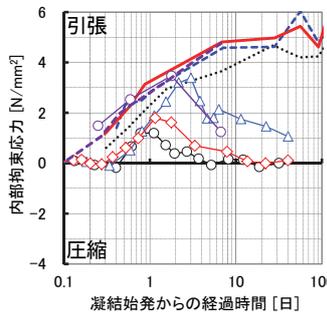


図 14 内部拘束応力(端部)  
の経時変化

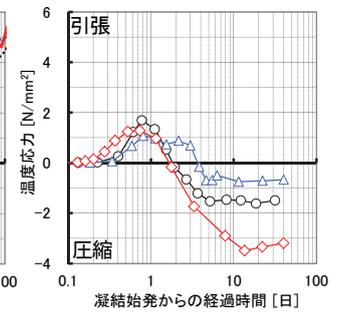


図 15 温度応力(端部)  
の経時変化

行った。試験体内部については Fc100(標準期)においては材齢 155 日、Fc120(夏期)及び Fc100(夏期)においては材齢 105 日時点でコアボーリング及びワイヤソーによる試験体の切断を行い観察した。切断位置は試験体長手、短手方向のほぼ中央位置とした。その結果、全ての試験体表面及び内部にひび割れは見当たらず、前述の算定結果と対応していると考えられる。

## §6. 実大柱試験体のコア供試体強度

図 16 に実大柱試験体のコア供試体の圧縮強度とヤング係数を示す。ヤング係数の計算式には NewRC 式<sup>10)</sup>を採用した。計算には  $\gamma=2.45$ 、設計基準強度を用いた。圧縮強度

について、全ての供試体が設計基準強度以上であり、材軸方向のバラつきはほとんど見られなかった。

## §7. 結論

中庸熱セメントおよびスラグせつこう系混和材、膨張材、収縮低減型高性能減水剤を用いた超高強度コンクリートに関して、実大柱施工実験にて得られた知見を以下にまとめる。

①圧縮強度について、Fc100 調合は標準期より夏期の方が若材齢時の発現は早いものの、長期的な圧縮強度はほぼ同等であった。Fc120 と低熱セメント使用の調合を比較した場合、若材齢時の強度発現はほぼ同じだが、長期では低熱が  $5\text{N/mm}^2$  程度大きかった。

②若材齢時からのヤング係数発現は、有効材齢を用いて比較した場合低熱セメント使用の調合も含め全ての水準において同様の発現性状を示す。

③自己収縮ひずみに関して、Fc120 においては膨張材を添加することで約  $300\mu$  膨張側に推移する傾向を示した。ただし、小型試験体では約  $0\mu$  で一定となったが、1M 角試験体の方が最終的な自己収縮ひずみは大きくなり、長期材齢では  $300\mu$  程度であった。

④鉄筋拘束応力に関して、最大値は Fc120(夏期)が  $3.5\text{N/mm}^2$ 、Fc100(夏期)が  $2.6\text{N/mm}^2$ 、Fc100(標準期)が  $1.5\text{N/mm}^2$  程度であった。

⑤内部拘束応力に関して、実大柱試験体中心における内部応力の最大値は Fc120(夏期)であり引張側に約  $4.5\text{N/mm}^2$  であった。

⑥内部拘束応力算定結果と割裂引張強度の 70% を比較することでひび割れ発生の危険性を評価した結果、全ての水準において内部拘束応力が引張強度以下であり、また、試験体表面及び内部にひび割れが無かった。これより、本調合において標準期または夏期の施工であれば、 $W/B=16\%$  については膨張材、収縮低減型高性能減水剤を併用することで、 $W/B=22\%$  については収縮低減型高性能減水剤を使用することで、内部拘束応力による柱部材の材齢初期のひび割れ発生を抑えることができると考えられる。

⑦実大柱試験体のコア供試体の圧縮強度、ヤング係数について、全ての水準において材軸方向のバラつきは見られなかった。

### 【謝辞】

本実験を実施するに当たり、株式会社テクノマテリアルに多大なるご協力を頂きました。ここに記し、謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 田澤栄一, 宮澤伸吾: コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究, 土木学会論文集, No.571/V36, pp.211-219, 1997.
- 2) 今本啓一, 大谷博: 超高強度鉄筋コンクリート架構試験体に生じ

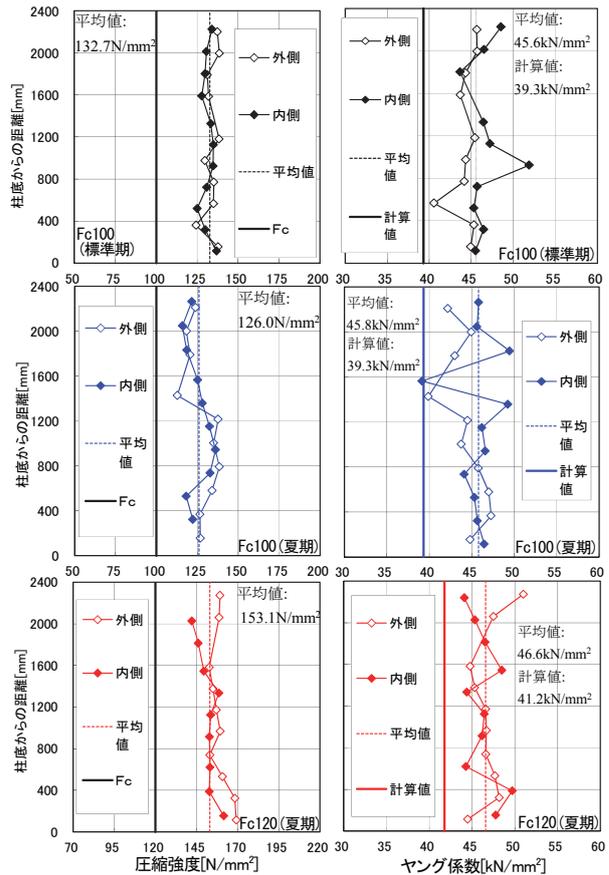


図 16 実大柱コア供試体の圧縮強度(左)とヤング係数(右)

- たひび割れに関する一検討, 日本建築学会論文報告集, No.495, pp.1-8, 1997.
- 3) 寺岡勝, 高森直樹, 片寄哲務, 西田浩和, 渡邊史夫: 超高強度コンクリートの若材齢時における力学特性に関する実験的研究-その1, その2-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.363-366, 2005.
  - 4) 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大会論文集, Vol.28, No.1, pp.497-502, 2006.
  - 5) 飯田康介, 高森直樹, 塩田博之, 佐々木仁, 佐々木聡: 中庸熱セメントを用いた高強度コンクリートのプレキャスト部材適用に関する実験的検討 その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014.
  - 6) 土木学会: コンクリート標準示方書(構造性能照査編), pp.30-37, 2005.
  - 7) 橋田浩, 黒田泰弘, 山崎庸行: CEB-FIP モデルを改良した高強度コンクリート構造部材の力学特性発現モデル, 日本建築学会構造系論文集, No.513, pp.9-14, 1998.
  - 8) ACI-209Committee209: Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structure
  - 9) 牧角龍憲, 徳光善治: コンクリートの乾燥収縮ひびわれ発生条件に関する研究, 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.185-188, 1983
  - 10) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係, 日本建築学会構造系論文集, No.474, pp.1-10, 1990.



飯田康介

### ひとこと

高品質なコンクリート構造物を提供することで、お客様から信頼を得られるよう、より一層精進して参ります。