

論文 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

片寄 哲務*1・高森 直樹*2・西田 浩和*3・寺岡 勝*4

要旨: 高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材には自己収縮ひずみに起因する応力と温度応力が生じる。本報ではそれら内部応力によるひび割れ発生の危険性を評価するためにコンクリートの圧縮強度、部材寸法および鉄筋の有無を実験変数として若材齢時の力学特性、自己収縮挙動の検討を行った。その結果、(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、 $F_c 150\text{N/mm}^2$ 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。

キーワード: 高強度コンクリート、若材齢、自己収縮ひずみ、部材寸法、内部応力

1. はじめに

近年、 100N/mm^2 を超える高強度コンクリートを用いた実施工例が見受けられる。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¹⁾。また、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増すと考えられる²⁾。高強度コンクリートの実用化のためには、若材齢時よりコンクリートに生じるそれら内部応力によるひび割れ、およびそのひび割れが耐久性、使用性、耐震性に及ぼす影響について評価することが不可欠である。

本報告では、高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材のひび割れ発生の危険性を評価することを目的とし、コンクリートの圧縮強度、部材寸法および鉄筋の有無を実験変数として若材齢時の力学特性、自己収縮挙動について検討し、併せて内部応力を検討した結果を示す。なお、本報告の一部は文献3)において発表している。

2. 実験概要

2.1 実験計画

若材齢時の力学特性については温度応力を求めるために温度分布およびヤング係数について

表 - 1 コンクリートの調合

調合記号	打設日	設計基準強度 F_c (N/mm^2)	W/C (%)	単位量 (kg/m^3)				混和剤 使用量 ($B \times \%$)
				W 水	C※ セメント	細骨 材	粗骨 材	
L60	2005/4/19	60	31	160	516	884	848	1.35
L80	2005/4/19	80	26	160	615	803	848	1.4
SFC150	2005/2/8	150	13	155	1192	344	822	2.45

※L60, L80: 低熱ポルトランドセメント
SFC150: シリカフェーム混入セメント(混入率10%)

検討した。自己収縮挙動については無筋コンクリート試験体および有筋試験体を作製し、それぞれについてコンクリートの圧縮強度および部材寸法を実験変数として比較検討した。

2.2 使用材料

表 - 1 にコンクリートの調合を示す。設計基準強度(F_c)は実施工で用いられる頻度の高い 60N/mm^2 および 80N/mm^2 、今後実施工で用いられることが予想される上限を想定して 150N/mm^2 の3水準を設定した。L60 およびL80 は低熱ポルトランドセメント、SFC150 はシリカフェーム混入セメントを用いた。コンクリートは実機プラントで練り混ぜた。

表 - 2 に荷卸時フレッシュ試験および圧縮強度試験結果を示す。フロー停止時間から見ると高強度ほど粘性が高いことが分かる。また、凝結試験はJIS A 1147²⁰⁰¹に準じ、気温 20°C 、湿度 60% の恒温恒湿室内にて行った。SFC150 はL

*1 (株)フジタ	技術センター	研究員	工修	(正会員)
*2 (株)フジタ	技術センター	主任	工修	(正会員)
*3 (株)フジタ	技術センター	主任研究員	工修	(正会員)
*4 (株)フジタ	技術センター	副所長	博士 (工学)	(正会員)

60 およびL80 より凝結始発時間が遅く、注水から約 0.5 日で始発した。

2.3 無筋コンクリート試験体

表 - 3 に無筋コンクリート試験体の概要、図 - 1 に無筋小型模型試験体を示す。小型模型試験体は角柱およびシリンダーの 2 種を作製した。これに対し、L60 と L80 の実大試験体は 700mm×700mm×1040mm の無筋柱部材を作製し(図 - 3 参照)、SFC150 は 1000mm 角の無筋コンクリート試験体を作製し、上下に断熱材を配することで柱部材を模擬した。

2.4 有筋試験体

表 - 4 に有筋試験体の概要を示す。各調合小型模型試験体 1 体、実大試験体 1 体を作製した。

図 - 2 に有筋小型模型試験体を示す。鉄筋比(p_g)は 3 水準設定し、 $p_g=1.99\%$ は実大断面(図 - 3、図 - 4 参照)の鉄筋量の少ない部位、 $p_g=3.97\%$ は断面の平均、 $p_g=7.94\%$ は鉄筋量が多い局所的な部位を想定した。測定は気温 20℃、湿度 60%の恒温恒湿室内にて行い、封緘養生とした。型枠内側は摩擦が生じないようにテフロンシートで全面を覆った。

図 - 3 に L60 および L80 の実大試験体の形状および配筋詳細を示す。試験体断面は実大無筋コンクリート試験体と同寸法とした。試験体のコンクリート打設は、注水から約 1 時間後に開始し、屋内で平打ちとした。打設後は材齢 6 日で脱型し、屋内に放置した。

図 - 4 に SFC150 の実大試験体形状および配筋詳細を示す。試験体のコンクリート打設は、注水から約 2 時間後に開始し、屋外にて縦打ちとした。材軸方向に約 500mm に分けて打設し、1 層打設するごとにバイブレータにて締め固めた。打設後はシート養生とし、材齢 7 日で脱型、屋外に放置した。

3. 若材齢時における力学特性

3.1 温度分布

図 - 5 に実大試験体の最高温度に達したときの中央断面の温度分布を示す。L60 および L80 の注水後約 1 日に対し、SFC150 は注水後約 2

表 - 2 フレッシュ試験および圧縮強度試験結果

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		圧縮強度試験結果(N/mm ²) 28D/91D (封かん養生)
	スランプフロー (cm)	50cm フロー 到達時間 (S)	フロー 停止 時間 (S)	空気 量 (%)	単位容 積質量 (kg/m ³)	コンクリ- ト温度 (°C)	雰囲気 温度 (°C)	始発 (日)	終結 (日)	
L60	62.0×61.5	9.6	54.7	1.6	2.408	22.2	18.8	0.311	0.389	72.9/90.4
L80	71.0×66.5	6.5	89.3	0.7	2.426	22.2	20.5	0.307	0.385	84.3/96.1
SFC150	66.5×66.5	26.0	180	1.6	2.518	16.2	9.0	0.539	0.635	133/168

表 - 3 無筋コンクリート試験体概要

分類	試験体	寸法(mm)	内訳			打設 方向	養生	測定環境
			60	80	150			
小型	円筒	φ100×H200	○	○	○	縦打ち	封緘	恒温恒湿室 (気温20℃, 湿度60%)
	角柱	100×100×1000	○	○	○	平打ち		
実大	模擬柱	700×700×1040	○	○	—	平打ち	※	屋内
		1000×1000×1000	—	—	○	縦打ち		屋外

※実大有筋試験体と同様(本文参照)

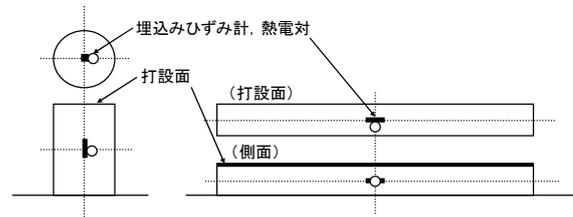


図 - 1 無筋小型模型試験体

表 - 4 有筋試験体概要

分類	試験体	寸法(mm) ※RC部分	内訳			打設 方向	養生	測定環境
			60	80	150			
小型	角柱	100×100×1000	○	○	○	平打ち	封緘	恒温恒湿室 (気温20℃, 湿度60%)
実大	柱	700×700×1040	○	○	—	平打ち	※	屋内
		1000×1000×2400	—	—	○	縦打ち		屋外

※本文参照

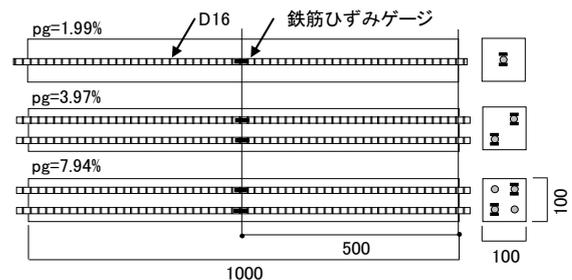


図 - 2 有筋小型模型試験体

日で最高温度に達した。高強度の試験体ほど中央と端部の温度差が大きく、SFC150 の有筋試験体では最大約 10℃、無筋試験体では最大約 15℃であった。鉄筋の突出により約 5~10℃のクーリング効果が見られた。一方、小型模型試験体中心部の温度上昇は小さく(変化量が小さいため図示省略)、短時間で恒温恒湿室内温度とほぼ同じ温度に戻った。

3.2 ヤング係数の発現状況

図 - 6 にヤング係数の発現状況を示す。発現状況は土木学会標準示方書・構造性能照査編に示されている有効材齢を用いた⁴⁾。

図 - 7 に圧縮強度時ひずみ(ϵ_B)の経時変化を示す。L60, 80 は測定材齢 1 日で一定となり、硬化していると判断できる。SFC150 は測定材齢 1 日では ϵ_B が約 0.6% で、ヤング係数から推測してもあまり硬化が進行せず、靱性に富む状態が継続していたと考えられる。

4. 無筋コンクリート試験体の自己収縮挙動

図 - 8 に無筋の小型模型試験体および実大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、無筋コンクリート試験体中央における実ひずみから線膨張係数を $10\mu/\text{C}$ と仮定した温度ひずみを差し引いた値である。

4.1 強度による比較(実大試験体)

測定材齢 28 日の自己収縮ひずみの比率は L60:L80:SFC150=1:2:6 程度となっており、SFC150 が非常に大きく収縮し、L60 と L80 と違い長期に渡り収縮し続けていた。

4.2 部材寸法による比較

有効材齢を用いることで温度履歴の影響を考慮したが、実大試験体の自己収縮ひずみは小型試験体より大きく、強度が高いほどその傾向は顕著であった。つまり、自己収縮ひずみの大きさを決定する要因が温度のみではなく、試験体の寸法も影響するものと考えられ、自己収縮挙動は実大寸法で評価する必要があると考えられる。特に SFC150 の実大試験体は自己収縮ひずみの測定方向による差が若材齢時に発生し、打設面に対して鉛直(材軸)方向の方が約 200μ 大きい結果となった。これは測定点より上部にあ

るコンクリートの自重による圧力も一因と考えられる⁵⁾。一方、縦打ちした SFC150 に対し平打ちした L60 および L80 は測定方向による差が小さかった。なお、実大試験体をコアボーリン

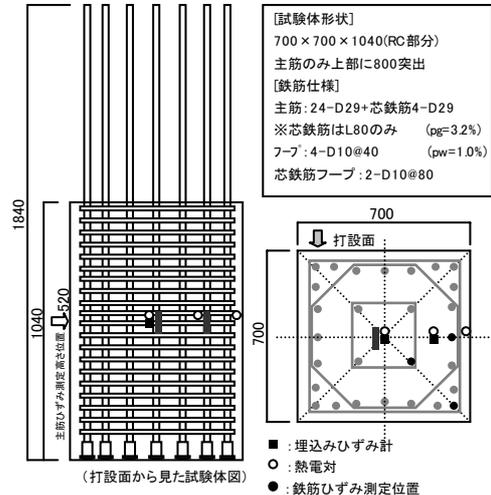


図 - 3 実大有筋試験体形状および配筋詳細 (L60, L80)

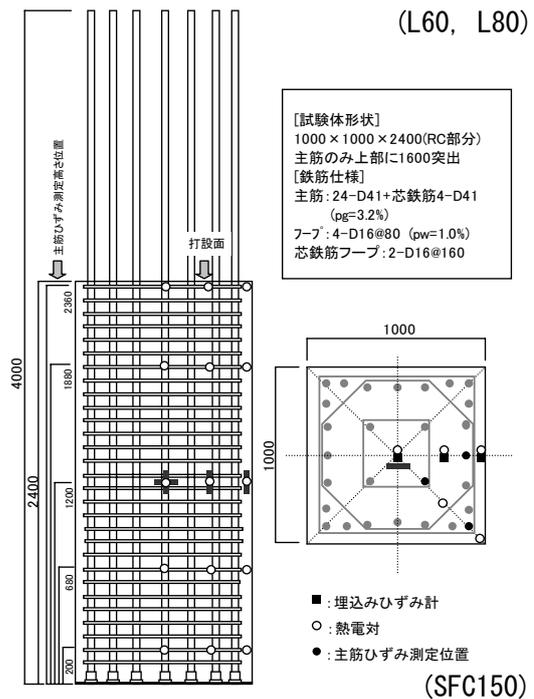


図 - 4 実大有筋試験体形状および配筋詳細 (SFC150)

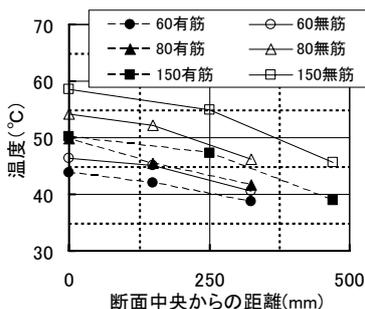


図 - 5 中央断面の温度分布

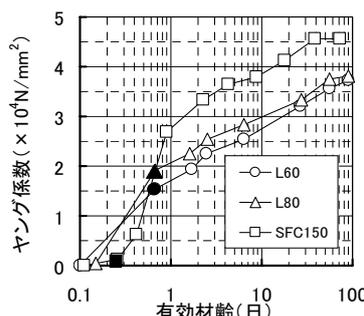


図 - 6 ヤング係数の発現状況
※●▲■: 測定材齢 1 日の実測値

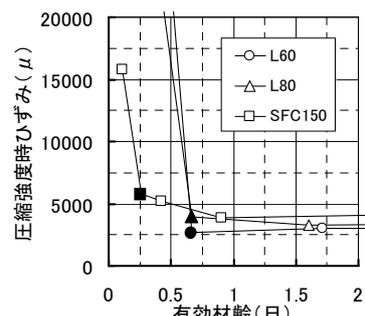


図 - 7 圧縮強度時ひずみの経時変化

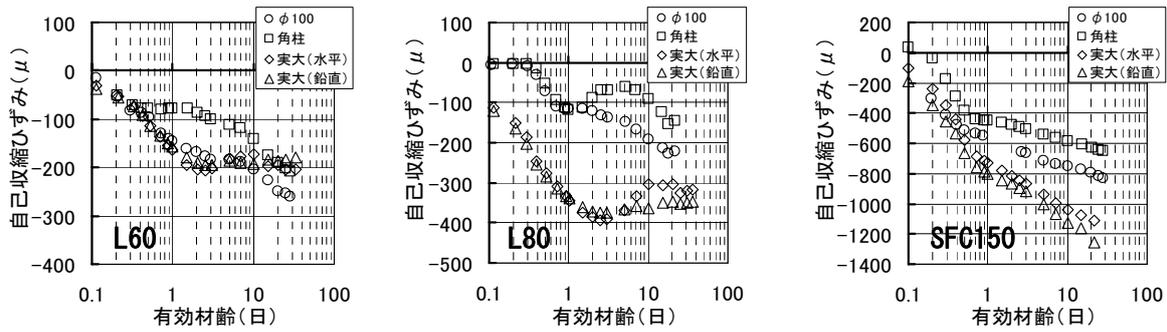


図 - 8 無筋コンクリート試験体における自己収縮ひずみの経時変化

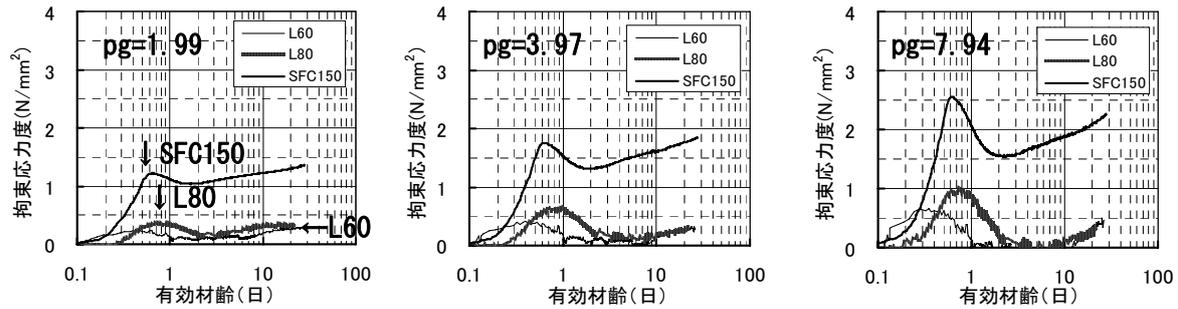


図 - 9 小型模型試験体の拘束応力度の経時変化

グシ、ひび割れの有無を確認した結果、いずれのコンクリート圧縮強度の試験体もひび割れが確認されなかった。

5. 有筋試験体の自己収縮挙動

5.1 小型模型試験体

図 - 9 に鉄筋比ごとの拘束応力度の経時変化を示す。断面の平均拘束応力度は応力の釣合条件から鉄筋に生じたひずみと鉄筋のヤング係数(D16 : $E_s = 1.99 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)と鉄筋比(p_g)の積で求めた。温度応力は、断面および温度上昇が小さいためここでは考慮しないこととした。

L60 と L80 の拘束応力度が 0.5 N/mm^2 以下で推移する一方、SFC150 では $p_g = 7.94\%$ で 2 N/mm^2 前後の拘束応力度が生じていた。しかし、若材齢時のコンクリートの圧縮強度時ひずみ (ϵ_B) とヤング係数の発現状況から判断して、ひび割れ発生の可能性は低いと考えられる。実際に試験体を目視により観察したところ、ひび割れは見られなかった。

5.2 実大試験体

(1) 内部応力の算定方法^{2), 6)}

図 - 10 に実大試験体の主筋による拘束応力度算定の仮定断面を示す。断面が3種類のエリアで構成されると仮定し、実測した主筋ひずみ

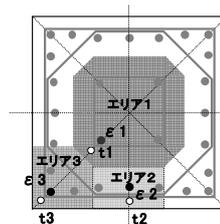


図 - 10 算定の仮定断面

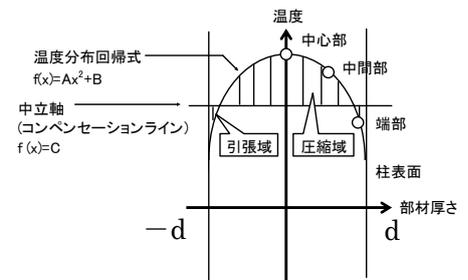


図 - 11 温度分布モデル²⁾

$\epsilon_1 \sim \epsilon_3$ から熱電対で測定した温度 $t_1 \sim t_3$ による温度ひずみを除いた主筋ひずみ ($\epsilon_1' \sim \epsilon_3'$) でエリア内の主筋ひずみを代表させ、鉄筋本数の重み付けを考慮し、応力の釣り合い条件から断面の平均拘束応力度を求めた。

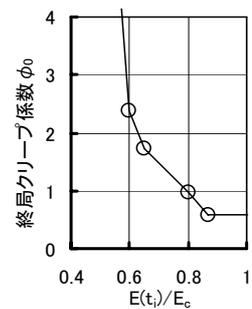


図 - 12 ϕ_0 と $E(t_i)/E_0$ の関係

温度応力は、実測した温度(図 - 5 参照)から図 - 11 に示すような温度分布モデルを仮定し²⁾、同一断面内の温度差により生じる内部拘束ひずみ ϵ_{tr} を求め、以下に示す step by step 法を用いて求めた^{2), 6)}。各ステップにおけるヤング係数は実測値(図 - 6 参照)を用い、クリープ係数は別途実施した試験の実測値より求めた⁷⁾。

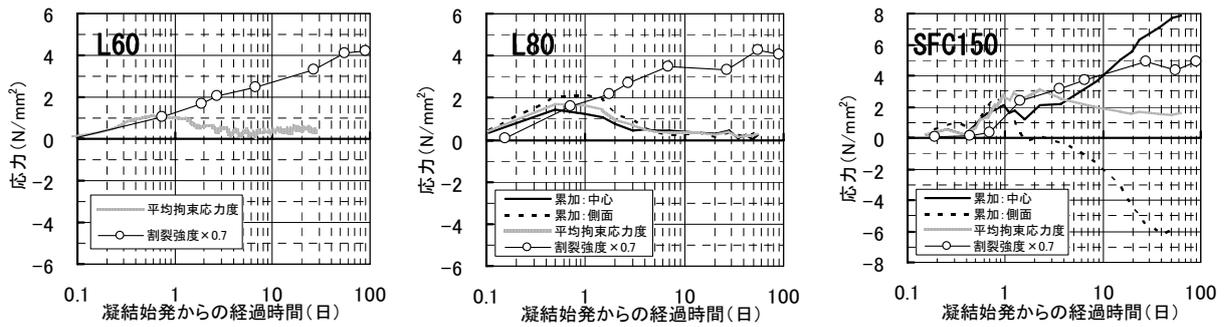


図 - 13 実大有筋試験体の中央断面における内部応力の経時変化

$$\sigma(t_{i+1/2}) = \sigma(t_{i-1/2}) + \Delta \sigma(t_i) \quad (8)$$

ここで、

$$\Delta \sigma(t_i) = \frac{1}{J(t_{i+1/2}, t_i)} [\varepsilon_c(t_{i+1/2}) - \varepsilon_{cf}(t_{i+1/2}) - \varepsilon_{ec}(t_{i-1/2})]$$

$$J(t_{i+1/2}, t_i) = \frac{1}{E(t_i)} + \frac{\phi(t_{i+1/2}, t_i)}{E_c}$$

$$\varepsilon_{tr} = \varepsilon_c(t_{i+1/2}) - \varepsilon_{cf}(t_{i+1/2})$$

$$\varepsilon_{ec}(t_{i-1/2}) = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta \sigma(t_j) \cdot J(t_{i+1/2}, t_j)$$

- $\sigma(t_{i+1/2})$: ステップ $t_{i+1/2}$ のコンクリート応力
- $\varepsilon_c(t_{i+1/2})$: ステップ $t_{i+1/2}$ のコンクリートひずみ(=測定値-温度ひずみ)
- $\varepsilon_{cf}(t_{i+1/2})$: ステップ $t_{i+1/2}$ のコンクリートの自由ひずみ
- $\phi(t_{i+1/2}, t_i)$: ステップ t_i で荷重開始したステップ $t_{i+1/2}$ におけるコンクリートのクリープ係数
- $E(t_i)$: ステップ t_i のコンクリートのヤング係数
- E_c : 材齢28日のコンクリートのヤング係数

図 - 12 にSFC150 における終局クリープ係数 ϕ_0 と $E(t_i)/E_c$ の関係を示す。実測していないステップにおける終局クリープ係数は直線補間して求め、荷重開始材齢7日以降は一定値とした。step by step法は任意のステップから荷重開始した各ステップにおけるクリープ係数を求める必要があるため、ACI-209 型のモデル式⁸⁾に求めた ϕ_0 を代入し算出した。以下にモデル式を示す。

$$\phi(t_{i+1/2}, t_i) = \phi_0 \frac{(t_{i+1/2} - t_i)^{0.6}}{\beta + (t_{i+1/2} - t_i)^{0.6}} \quad (9)$$

ここで、

$$\beta = \alpha \exp \left[5.0 \frac{E(t_i)}{E_c} \right]$$

- β : クリープの進行速度を決める係数
- α : 実測値に対応するように定める係数

(2) 内部応力の経時変化

図 - 13 に実大試験体の材軸方向の中央断面における温度応力を累加した内部応力の経時変化を示す。横軸は凝結始発からの経過時間とした。また、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%の値を用いて比較した⁹⁾。割裂強度試験はJIS A 1113⁻¹⁹⁹⁹⁾に準拠した。

L60 と L80 は材齢1日未滿で割裂強度の70%を上回っているが、それ以降は約 0.5N/mm^2 で推移しており、ひび割れが生じている可能性は低い。SFC150 の平均拘束応力度は若材齢時に割裂強度の70%を上回り、最大 3.3N/mm^2 に達し、実大断面の平均値に近い鉄筋比である $p_g=3.97\%$ の小型試験体と比較しても大きい結果となった。温度応力を累加すると、柱中心では材齢約10日で約 4N/mm^2 の引張応力が生じ、割裂強度の70%を上回っており、ひび割れが発生している可能性が高い。SFC150 のようなコンクリートを用いた実大部材では、ひび割れ発生の危険性は若材齢時だけでなく硬化後も有り得ると考えられる。

図 - 14 に SFC150 の断面平均拘束応力度を実大試験体の材軸方向で比較した結果を示す。凡例は柱脚からの高さである(図 - 4 参照)。柱脚における拘束応力度は徐々に引張応力が増加し、柱頭は減少する傾向が見られた。実部材では各断面で自己収縮挙動が異なるため、複数の断面で拘束応力度を評価する必要があると考えられる。また、中央断面において、材齢10日以降に拘束応力度が大きく低下していることは、ひび割れが材齢10日前後に発生し、拘束が解けた状態を表していると考えられる。

(3) SFC150 の実大有筋試験体のひび割れ発生状況

図 - 15 に SFC150 の実大有筋試験体の切断面を示す。ひび割れの有無を確認するために試験体を材軸方向および材軸方向の中央断面において切断した。図中の太線は目視確認可能であった幅 0.4mm のひび割れ、他は幅 0.04mm 以下のひび割れである。切断面の目視で確認できたひび割れは中央断面付近に水平に生じており、切断時に水が浸透することにより確認された試験体表面のひび割れと繋がっていた。ひび割れの

発生は、断面周辺の主筋位置のみならず、断面中央部にも生じており、コリンズの指摘したひび割れ発生モデル¹⁰⁾とは若干異なっている。

以上から SFC150 級のコンクリートを用いた実部材の内部応力によるひび割れ発生危険性を評価するためには、有筋の実大試験体で検討することが必要であることがわかる。

今後、Fc150N/mm²級のコンクリートの実用化のためには自己収縮ひずみ、水和熱を低減する等ひび割れ対策を講じる必要があり、また、そのひび割れ対策を取る必要のある強度の境界を定めることが必要である。

6. 結論

高強度コンクリートに関して、若材齢時の力学特性と自己収縮挙動について分かった知見を以下にまとめる。

- (1) 無筋コンクリート試験体では、コンクリートの強度が高く、部材寸法が大きくなるほど自己収縮ひずみは大きくなった。
- (2) 有筋試験体では、コンクリートの強度が高く、部材寸法が大きくなるほど内部応力は大きくなり、特にFc150N/mm²級の実大部材では中央断面付近に水平に表面まで貫通するひび割れが生じた。
- (3) 以上より、内部応力によるひび割れ発生危険性検討・評価は、実大有筋部材で行う必要があると考えられる。

謝辞

本実験を実施するに当たり、貴重なご意見・ご指導を頂きました京都大学・渡邊史夫教授に感謝致します。また、(株)フジタ林和也氏、佐々木仁氏、佐藤幸博氏に多大なるご協力を頂きました。

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

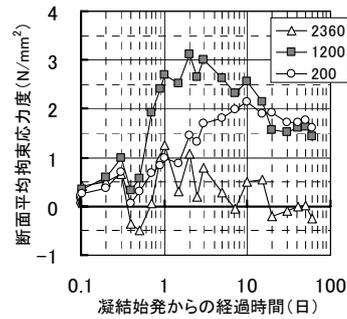


図 - 14 拘束応力度の材軸方向の比較 (SFC150)

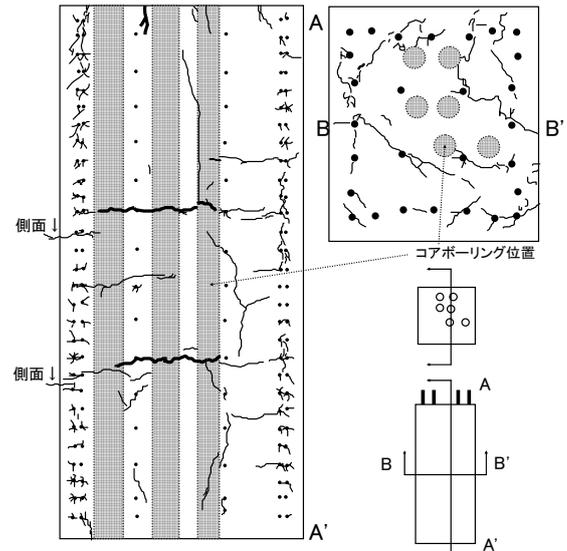


図 - 15 実大有筋試験体の切断図 (SFC150)

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に生じ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) 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，フジタ技術研究報告, No.41, pp.25-30, 2005
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書(構造性能照査編), pp30-37, 2002
- 5) 山下良平，大下英吉：極初期に加圧されたセメントペーストの自己収縮挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集, 第 26 巻, pp465-470, 2004.
- 6) 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, No513, pp.9-14, 1998.
- 7) 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, pp363-366, 2005.
- 8) ACI-209Committee209:PredictionofCreep,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, pp185-188,1983
- 10) Michael P.Collins,Denis Mitchell and JamesG. MacGregor:Structural DesignConsiderations for High-StrengthConcrete,Concrete International,pp 27-34,May1993.