

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 高 森 直 樹
西 田 浩 和 寺 岡 勝

概 要

高強度コンクリートには若材齢時に自己収縮ひずみに起因する応力と、水和熱による温度応力が生じ、ひび割れ発生の危険性が考えられる。高強度コンクリートの実用化のためには、若材齢時にコンクリートに生じる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。ひびわれ発生の危険性評価には、高強度コンクリートの打設直後からの強度発現、収縮量を把握しておくことが重要である。

本報告では、若材齢時における高強度コンクリートの力学特性、および実大柱部材の自己収縮挙動の把握を目的とし、設計基準強度 (F_c) が 60N/mm^2 , 80N/mm^2 , 150N/mm^2 のコンクリートにおける力学特性の比較、小型試験体と実大試験体の自己収縮挙動の比較を行った結果を示す。それらを以下にまとめる。① $F_c 150\text{N/mm}^2$ 級のコンクリートは材齢 1 日前後までは硬化が進まず、材齢 2 日にかけて急速に強度発現する。② 自己収縮ひずみ、拘束応力度は試験体寸法の影響を受けるため、実大寸法で評価する必要がある。③ $F_c 150\text{N/mm}^2$ 級のコンクリートでは拘束応力度に温度応力を考慮すると、若材齢時のみでなく、硬化後にもひび割れる可能性もある。④ 実大試験体では、複数の断面で拘束応力度を評価する必要がある。

Mechanical Properties and Autogenous Shrinkage Behavior of High Strength Concrete at Early Age.

Abstract

Stresses from autogenous shrinkage and heat of hydration are considered a major contributory factor to early cracking in high-strength concretes. For practical applications of such concretes, it is vital to evaluate the effects of these cracks on the material's durability, usability and quake-resistancy. It is also important to evaluate the development process of strength and shrinkage amount from the point of the casting of the high-strength concrete.

In this report, in order to evaluate the early mechanical and autogenous shrinkage properties of high-strength concretes, various tests were undertaken using $F_c 60\text{N/mm}^2$, 80N/mm^2 , 150N/mm^2 concrete specimen in order to compare the mechanical properties of each strength. Also, comparisons of autogenous shrinkage behaviors between large and small size specimens were carried out.

As a result, the following findings were obtained;

- 1) For $F_c 150\text{N/mm}^2$ concrete, strength development during the first curing day was not great, with the majority of the strength developing on or after the second day.
- 2) Actual-size specimens should be used because specimen size affected autogenous shrinkage and restraint stresses.
- 3) For $F_c 150\text{N/mm}^2$ concrete, there was a high possibility that cracks occurred both at during early curing and after consolidation.
- 4) In the actual-size specimens, it is necessary to evaluate the restraint stress in two or more sections.

キーワード： 高強度コンクリート, 若材齢, 力学特性,
自己収縮, 拘束応力度, 試験体寸法

§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ようになった。高強度コンクリートを用いることによって、柱部材の断面積が減少し、空間の自由度が高い超高層建築物も実現できるようになる。しかし、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。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¹⁾。高強度コンクリートの実用化のためには、若材齢時にコンクリートに生じる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。ひびわれ発生の危険性評価には、高強度コンクリートの打設直後からの強度発現、収縮量を把握しておくことが重要である。

本報告では、若材齢時における高強度コンクリートの力学特性、および実大柱部材の自己収縮挙動の把握を目的とし、設計基準強度(F_c)が 60N/mm^2 、 80N/mm^2 、 150N/mm^2 のコンクリートを用いて、圧縮強度、ヤング係数の発現状況の比較、小型の模型試験体と実大試験体について自己収縮ひずみと鉄筋による拘束応力度の経時変化の比較を行った結果を示す。

なお、本報告の一部は文献 2) において発表している。

§2. 実験概要

2.1 使用材料

表 1 にコンクリートの調合、および使用材料を示す。 F_c

表1 コンクリートの調合および使用材料

調合 記号	打設日	設計基 準強度 F_c (N/mm^2)	W/B (%)	単位量 (kg/m^3)				SP使用 量(B×%)
				W	B	S	G	
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

【使用材料】

SFC150

結合材(B): シリカフューム混入セメント(シリカフューム混入率10%, 密度 3.08g/cm^3)

細骨材(S): 岩瀬産砕砂(表乾密度 2.58g/cm^3 , 吸水率1.97%)

粗骨材(G): 岩瀬産砕石(表乾密度 2.65g/cm^3 , 吸水率0.62%)

混和剤(SP): 高性能減水剤(ポリカルボン酸系)

L60, L80

結合材(B): 低熱ポルトランドセメント(密度 3.22g/cm^3)

細骨材(S): 藤野町産陸砂(表乾密度 2.60g/cm^3 , 吸水率2.75%)

粗骨材(G): 青梅産砕石(表乾密度 2.65g/cm^3 , 吸水率0.63%)

混和剤(SP): 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)

表2 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	
	スランフフロー (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 温度 ($^{\circ}\text{C}$)	雰囲気 温度 ($^{\circ}\text{C}$)	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
L80	71.0×66.5	6.5	89.3	0.7	2.426	22.2	20.5	0.307	0.385
SFC150	66.5×66.5	26.0	180超	1.6	2.518	16.2	9.0	0.539	0.635

は 60N/mm^2 、 80N/mm^2 、 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 はシリカフューム混入セメントを用いた。SFC150 の骨材は緻密さと粘り強さを持つ硬質砂岩系の岩瀬産砕石、砕砂を用いた。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 1147-2001に準じ、気温 20°C 、湿度 60%の恒温恒湿室内にて行った。SFC150 はL60 およびL80 より凝結時間が遅い結果となり、注水から約 0.5 日

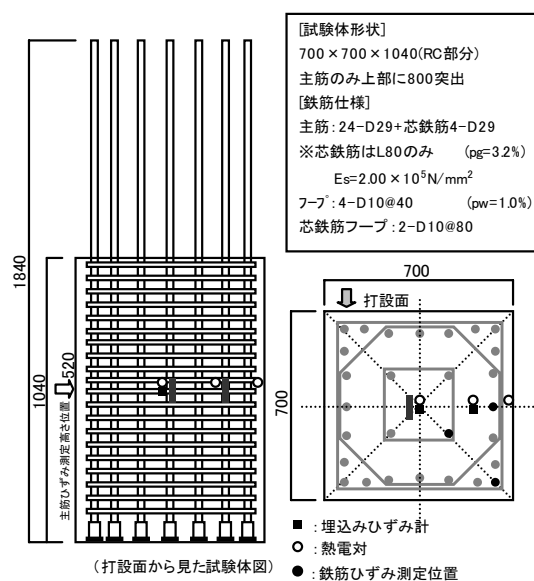


図1 有筋実大試験体形状および配筋詳細(L60, L80)

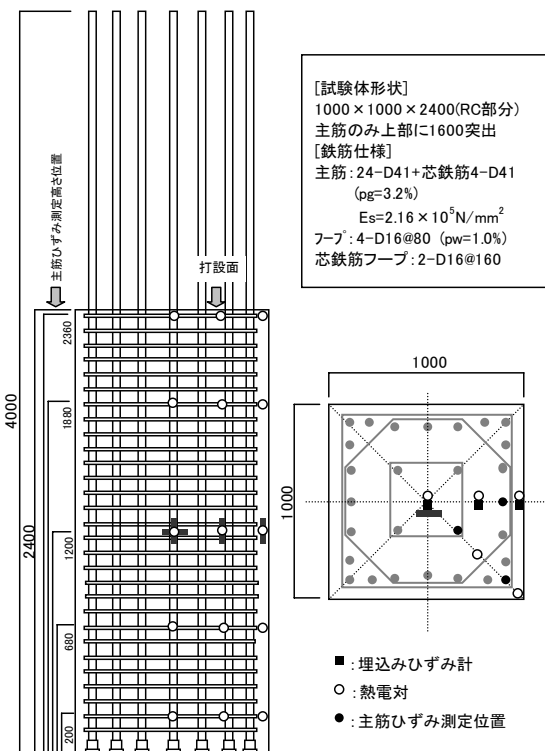


図2 有筋実大試験体形状および配筋詳細(SFC150)

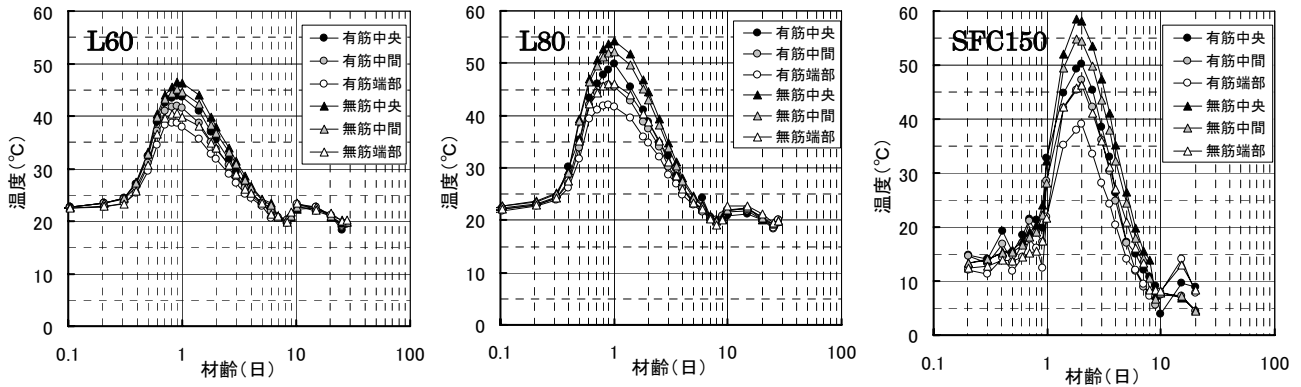


図3 実大有筋および無筋試験体の中央断面(材軸方向)における温度履歴

で始発した。

2.2 試験体

L60 および L80 の試験体形状および配筋詳細を図 1 に示す。試験体は 700mm×700mm×1040mm の有筋実大模擬柱試験体と、同寸法の無筋コンクリート試験体を各調合で作製した。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。

SFC150 の試験体形状および配筋詳細を図 2 に示す。試験体は 1000mm×1000mm×2400mm の有筋実大模擬柱試験体と、1000mm 角の無筋コンクリート試験体を作製した。ただし、無筋コンクリート試験体は上下に断熱材を配することで柱部材を模擬した。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 層打設するごとにパイププレートにて締め固めた。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 温度履歴

図 3 に有筋試験体と無筋試験体の材軸方向の中央断面における温度履歴を示す。横軸は注水時刻を起点にした材齢を表す。L60 および L80 の注水後約 1 日に対し、SFC150 は注水後約 2 日で最高温度に達した。全ての試験体で無筋の温度が高く、有筋では鉄筋の突出により約 5～10℃のクーリング効果が見られた。

図 4 に最高温度に達した材齢における中央断面の温度分布を示す。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。

3.2 圧縮強度とヤング係数の発現状況

図 5 に圧縮強度の発現状況、図 6 にヤング係数の発現

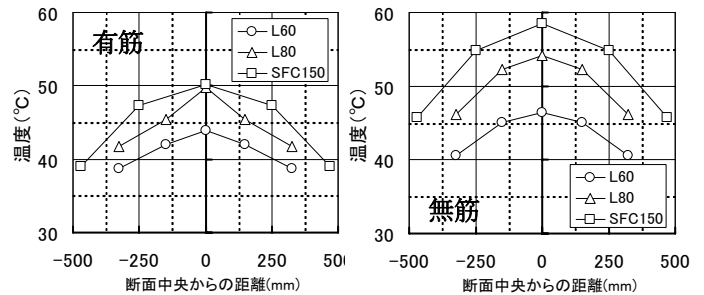


図4 最高温度時の中央断面(材軸方向)における温度分布

状況をそれぞれ示す。

図中の実測値の黒点は測定材齢 1 日を示している。また、温度履歴が異なるコンクリートを比較するために、土木学会コンクリート標準示方書・設計編に取り入れられている有効材齢を用いた³⁾⁴⁾。有効材齢は下式で表される。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp[13.65 - 4000 / \{273 + T(\Delta t_i) / T_0\}] \quad (1)$$

ここに、 t_e は有効材齢(日)、 Δt_i は温度 T の継続時間(日)、 $T(\Delta t_i)$ は期間 Δt_i における温度(℃)、 $T_0 = 1^\circ\text{C}$ である。供試体は実大試験体打設時に採取し、封緘容器に入れ屋内に放置した。圧縮強度試験は JIS A 1108¹⁹⁹⁹ コンクリートの圧縮強度試験方法に準拠し、アムスラー型万能試験機を用いて実施した。ヤング係数試験は JIS A 1149²⁰⁰¹ コンクリートの静弾性係数試験方法に準拠し、ひずみは材齢 1 日未満は試験機の載荷盤間の変位により測定し、それ以降はコンプレッソメータを用いて測定した。また、同図に MC90 発現モデル³⁾による計算結果を比較のために示す。

$$f(t_e) = f_c \cdot \exp\{s[1 - (28/t_e)^{0.5}]\} \quad (2)$$

$$E(t_e) = E_c \cdot \exp\{s/2[1 - (28/t_e)^{0.5}]\} \quad (3)$$

f_c 、 E_c は本報告では封緘養生材齢 28 日の圧縮強度およびヤング係数、 s は使用セメントの係数(0.2: 早強高強度, 0.38: 低熱)、 t_e は有効材齢(日)である。

MC90 発現モデルの適用強度範囲は 80N/mm² までであり、本報告では SFC150 が適用範囲外となるが、以下に比較検討する。

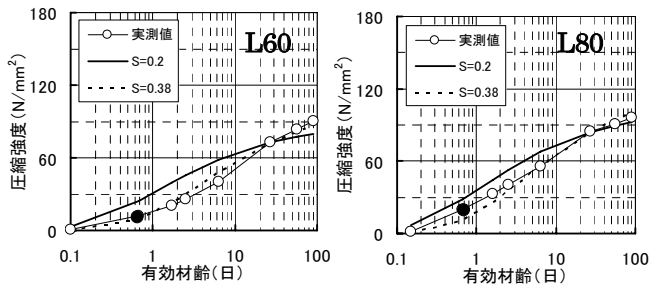


図5 圧縮強度の発現状況

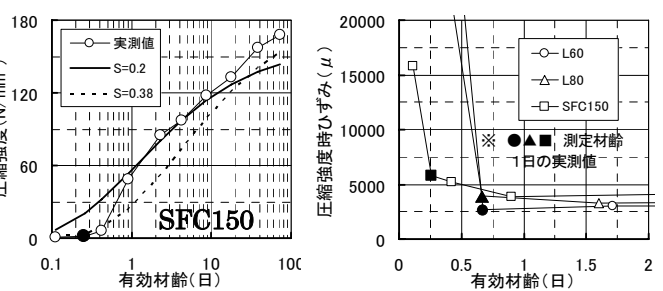


図7 圧縮強度時ひずみの経時変化

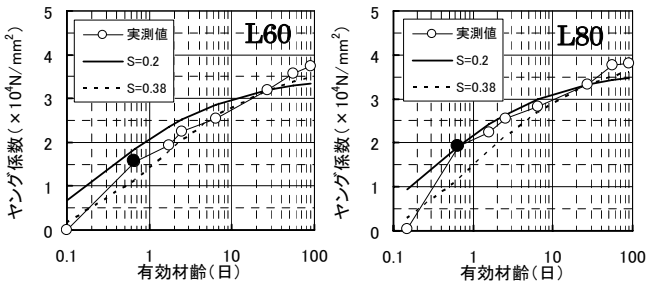


図6 ヤング係数の発現状況

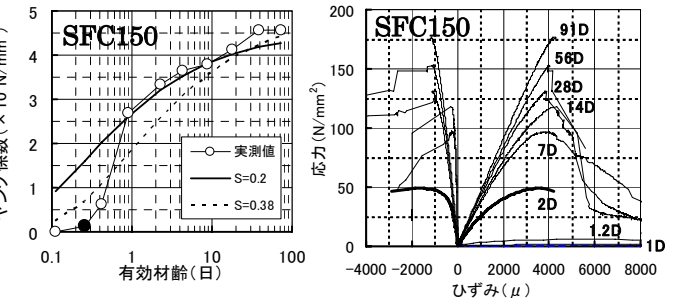


図8 応力ひずみ関係の経時変化

L60 は圧縮強度、ヤング係数ともほぼ低熱系モデルで近似でき、MC90発現モデルの適用が可能と考えられる。L80 では、特にヤング係数が有効材齢 6 日未満で早強高強度系モデルに近い結果となり、有効材齢を用いても MC90 発現モデルで近似することができなかった。SFC150 は、有効材齢 0.4 日までは低熱系モデルより発現が遅く、有効材齢 0.9 日以降早強高強度系モデルに近い結果となり、1つの MC90 発現モデルで近似することはできなかった。また、L60, L80と比べ、有効材齢 0.4 日までの発現が遅くなり、有効材齢 1 日にかけて急速に発現している。

図 7 に圧縮強度時ひずみの経時変化を示す。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 日においても大きく、あまり硬化が進行していないと推測される。

図 8 に SFC150 の応力ひずみ関係の経時変化を示す。応力ひずみ関係の経時変化、および圧縮強度とヤング係数の発現状況から測定材齢 2 日(有効材齢 0.9 日に相当)まではコンクリートの硬化が十分に進行せず韌性に富む状態が継続していたと考えることができる。

§4. 自己収縮挙動

4.1 コンクリートの圧縮強度と自己収縮挙動の関係

図 9 に材齢 28 日までのコンクリート圧縮強度と自己収縮挙動の関係を示す。図 9 の自己収縮ひずみは実大無筋試験体中央における材軸方向の測定値であり、線膨張係数を $10\mu/\text{℃}$ 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。また、以上の方法によって以降

表3 用いた材料定数

	L60	L80	SFC150
a	0.6	1.5	1.2
b	0.5	0.4	0.4
W/B	30%	23%	20%

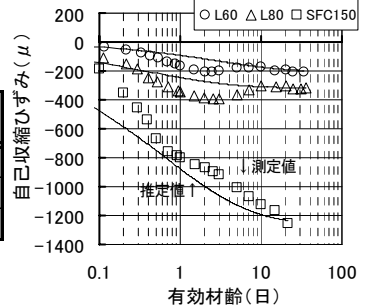


図9 コンクリート圧縮強度と自己収縮ひずみの関係

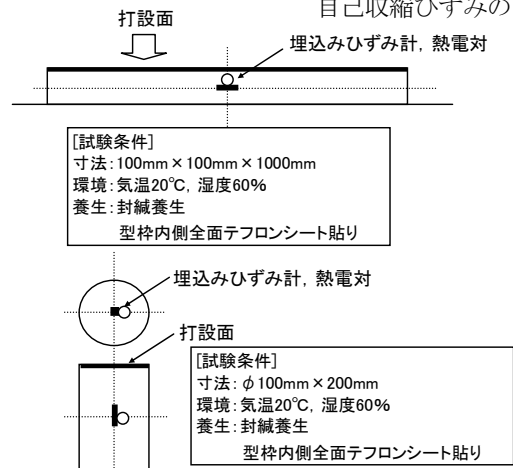


図10 角柱およびシリンダー無筋小型試験体概要

の自己収縮ひずみを求めている。

同図に田澤・宮澤が提案している予測モデル式により近似した結果を示す⁵⁾。

$$\varepsilon_{as}(t_e) = \varepsilon_{as0} \cdot \{1 - \exp[-a(t - t_{fs})^b]\} \quad (4)$$

$\varepsilon_{as}(t_e)$ は有効材齢 t_e 日での自己収縮ひずみ、 ε_{as0} は自己収縮ひずみの終局値、 t_{fs} は凝結の終結時間(日)である。本報告では t_{fs} は始発時間を用いた。a, bは材料定

数であり、W/Bにより提案されている表3に示す値を用いた。SFC150はW/B13%であり、適用範囲外となるため、提案されている材料定数の最小値である20%を用いた。予測モデルの適用範囲はW/B20～60%、コンクリート温度20～60℃である。また、予測モデルは100mm×100mm×400mmの小型角柱試験体の実験値に基づいている。

自己収縮ひずみは、材齢28日でL60は約200 μ 、L80は約400 μ 、SFC150は約1200 μ の自己収縮ひずみが生じた。測定値と予測モデルの推定値を比較すると、L60およびL80は温度上昇域で異なる。適用範囲外であるSFC150の測定値は、有効材齢1日(測定材齢2日に相当)までの収縮速度が速く、勾配が急な部分と、それ以降の緩くなる部分の2つに分かれており適合していない。予測モデルと本実験条件の違いは自己収縮ひずみを測定した試験体寸法の違いが挙げられ、自己収縮挙動が小型試験体と実大試験体で異なっている可能性がある。次に試験体寸法による影響について検討する。

4.2 試験体寸法が自己収縮挙動に与える影響

図10に角柱およびシリンダー無筋小型試験体の概要、図11に試験体寸法と自己収縮ひずみの関係を示す。自己収縮ひずみは全て無筋試験体中央における測定値である。角柱およびシリンダー試験体は材軸方向のひずみを測定したため、角柱は実大試験体の水平方向、シリンダーは鉛直方向に該当すると考える。

実大試験体の自己収縮ひずみは小型試験体より大きく、若材齢時において顕著であった。また、有効材齢を用いることで温度履歴の影響を考慮したが、試験体間で差が生じた。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200 μ 大きい結果となった。これは小型試験体でも同様の結果となっており、測定点より上部にあるコンクリートの自重による圧力が自己収縮挙動に影響を与えた一因のひとつと考えられる⁶⁾。縦打ちした

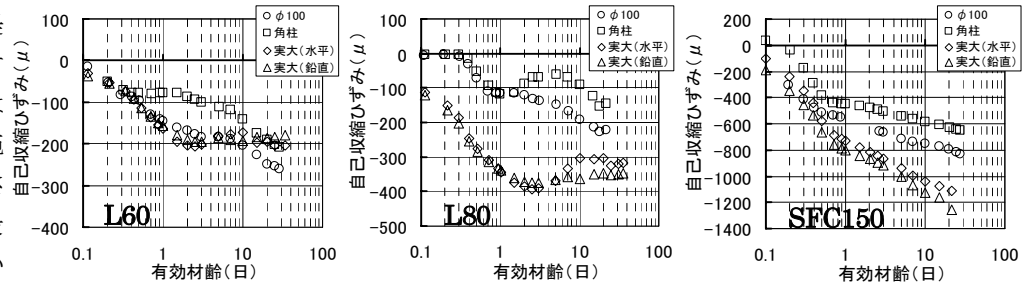


図11 試験体寸法と自己収縮ひずみの関係

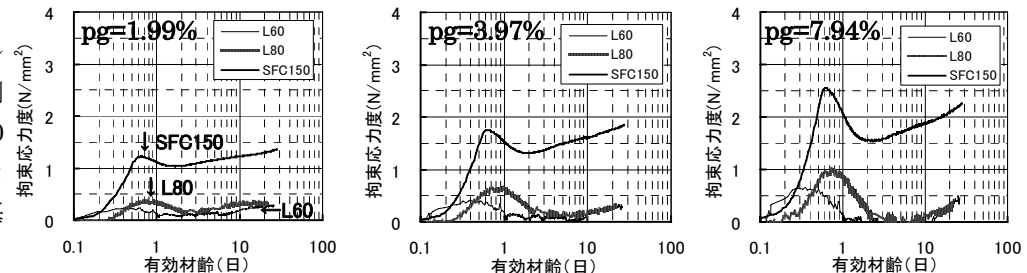


図13 小型模型試験体の拘束応力度の経時変化

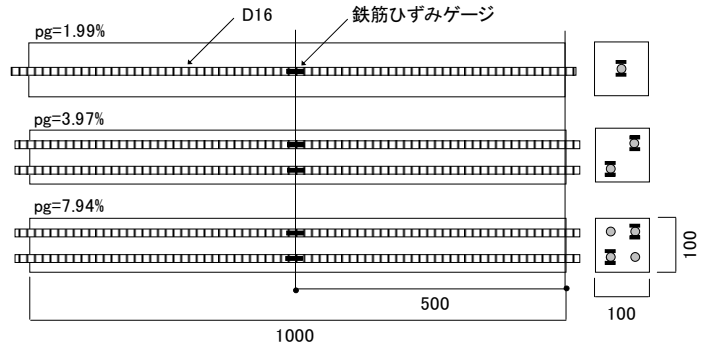


図12 小型模型試験体

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。

§5. 主筋による拘束応力度

§4の試験体寸法による影響の結果を受け、小型試験体と実大試験体の主筋による拘束応力度について検討した。

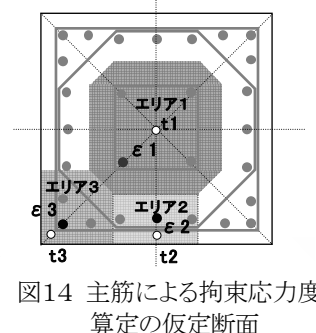


図14 主筋による拘束応力度算定の仮定断面

5.1 小型模型試験体における拘束応力度

図12に小型模型試験体を示す。実験変数を鉄筋比(p_g)とし、3水準設定した。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。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自己収縮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。

図13にそれぞれ $p_g = 1.99\%$ 、 $p_g = 3.97\%$ 、 $p_g = 7.94\%$ ごとの拘束応力度の経時変化を示す。SFC150では若材齢時に $p_g = 7.94\%$ で2N/mm²前後の拘束応力度が生じて

いるが、先に示したように材齢 2 日未満のコンクリートは韌性に富む状態にあり、ひび割れの可能性は低いと判断できる。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。

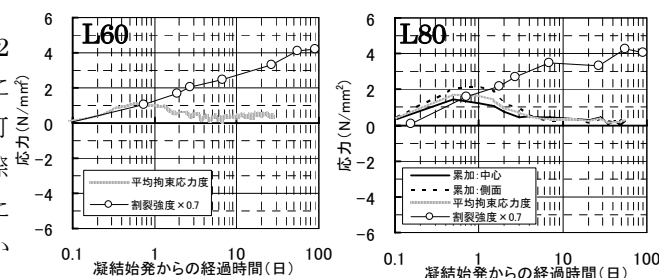


図15 断面平均拘束応力度の経時変化

5.2 実大試験体における拘束応力度

図 14 に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 $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$ 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を、鉄筋による拘束を受けたコンクリートの自己収縮ひずみとした。求めた自己収縮ひずみ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して、断面の平均拘束応力度を求めた。

図 15 に有筋試験体の材軸方向の中央断面における断面平均拘束応力度および温度応力を累加した断面平均拘束応力度の経時変化を示す。有効材齢を用いると平均化が困難なため、横軸は凝結始発からの経過時間とした。温度応力は文献 1) による方法で求めた。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⁷⁾。割裂強度試験は JIS A 1113:1999 に準拠した。

L60 と L80 は韌性に富む状態にある材齢 1 日未満で割裂強度の 70% を上回っているが、それ以降は約 0.5 N/mm^2 で推移しており、ひび割れが発生し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 3.3 N/mm^2 に達し、実大断面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。また、温度応力を累加すると、柱中心では材齢約 10 日で約 4 N/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と推測される。SFC150 のような高強度コンクリートを用いた実部材では、ひび割れ発生危険性は若材齢時だけでなく、硬化後も有り得ると考えることができる。

図 16 に断面平均拘束応力度を有筋実大試験体の材軸方向で比較した結果を示す。凡例は柱底からの高さである。中央から下半分における拘束応力度は徐々に引張応力が増加し、上半分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、材齢 10 日以降に拘束応力度が低下していることは、ひび割れ発生により、拘束が解けた状態を表している可能性が高いと考えられる。

SFC150

§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 $F_c 150 \text{ N/mm}^2$ 級のコンクリートは材齢 1 日前後までは硬化が進まず、材齢 2 日にかけて急速に強度発現する。
- ② 自己収縮ひずみ、拘束応力度は試験体寸法の影響を受けるため、実大寸法で評価する必要がある。
- ③ $F_c 150 \text{ N/mm}^2$ 級のコンクリートでは拘束応力度に温度応力を考慮すると、若材齢時のみでなく、硬化後もひび割れる可能性もある。
- ④ 実大試験体では、複数の断面で拘束応力度を評価する必要がある。

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、多大なるご協力を頂きました関係各位の皆様紙面をお借りしまして感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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, pp.363-366, 2005.
- 3) CEB-FIP Model Code 1990, Comité Euro-international du Béton, 1990.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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, pp.465-470, 2004.
- 7) 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.



ひとこと

高強度コンクリートには未解明な部分が多く存在します。今後も実用化に向けて精進していきたいと思います。

片寄 哲務

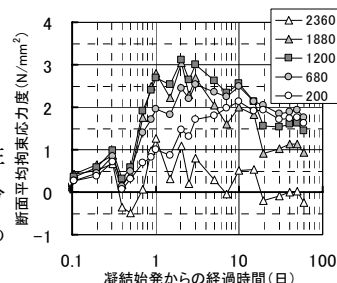


図16 拘束応力度の材軸方向での比較(SFC150)