

(155) 高強度コンクリートの収縮及びクリープについて

宇都宮大学大学院 建設学専攻 ○楊 楊
 宇都宮大学工学部 建設学科 許 明
 宇都宮大学工学部 建設学科 正会員 佐藤良一
 オリエンタル建設(株) 技術研究所 正会員 手塚正道

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮、水和熱による温度変形などの体積変化現象は古くから知られているが、近年、高強度コンクリートにおいて水和による自己収縮の影響が無視できないことが認められている^[1]。従来の普通コンクリートを用いたPC部材では、乾燥収縮、クリープの影響を取扱っているが、高強度コンクリートを用いた場合、自己収縮を加え、乾燥収縮及びクリープの影響はまだ十分に分かっていない。このため、高強度コンクリートに対して、若材齢を含む収縮特性、クリープ特性を把握する必要がある。しかし、よく採用されているCEB-FIP MODEL CODE(以下MC90)^[2]は高強度コンクリート特性の予測において、特に若材齢の場合、適用できないと指摘されている^[3]。かつ、これらの特性に関するデータが不十分で、定量的な評価に至っていないのが現状である。

そこで、本研究では、高強度コンクリートを用いたRC、PRC、PC部材の長期変形の解析的研究の一環として、圧縮強度100MPaクラスの高強度コンクリートを対象として、部材断面と同じ大きさの供試体を用い、自己収縮、乾燥開始材齢を変えた乾燥収縮、載荷時材齢を変えたクリープに関する実験を常温、常湿の室内で行い、収縮、クリープ特性を検討し、実測値に基づいて、MC90の予測式の改良を試みた。さらに、自己収縮及び乾燥収縮によるプレストレスロス調べた。

2. 実験概要

2.1 材料及び配合

実験に使用した高強度コンクリートの材料及び配合を表1、表2に示す。

表1 使用材料

使用材料	仕様
セメントC	早強ポルトランドセメント 比重: 3.14; 比表面積: 4420 cm ² /g
シリカフュームSF	比重: 2.20; 比表面積: 2×10 ⁵ cm ² /g; SiO ₂ : 91%
細骨材S	鬼怒川産川砂(安山岩) F.M.: 2.69; 比重: 2.61
粗骨材G	鬼怒川産川砂(安山岩) F.M.: 6.68; 比重: 2.63
高性能減水剤SP	ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体

2.2 供試体の作製

自己収縮、乾燥収縮及びクリープ実験の供試体寸法は200×250×300mmとした。

鋼製型枠を横向きに寝かせ、埋込みゲージ、熱電対を供試体中央に固定して置いた。供試体の変形を拘束しないように型枠内側の底面、側面及び端面にテフロンシートを貼り、温度上昇により膨張の生じることを考慮して、さらに、端面においてテフロンシートと型枠の間に厚さ2mmのゴムシートを配置した。

打込後水分の逸散を防ぐため、コンクリートの表面仕上げを行った直後から脱型までラップフィルムを仕上げ面に密着させ、その上に湿布を敷き、静置した。約12時間後、脱型し、直ちにアルミテ-

表2 コンクリートの配合

W/(C+SF) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						Flow (cm)
		W	C	SF	S	G	SP	
25	45	150	540	60	766	940	13.20	52×53

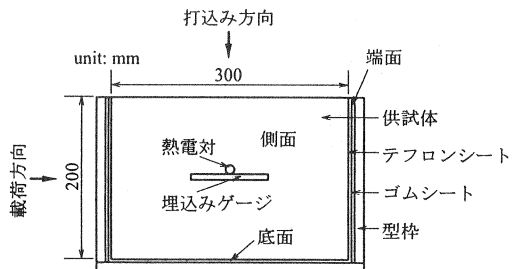


図1 供試体及び型枠の概要

プで供試体の全面にシールした。シールした直後から5ヶ月を経て 200×250×150mm の供試体の質量変化は最大 0.05%であった。型枠と供試体の概要を図1に示す。

圧縮強度及び弾性係数試験はφ 100×200mm の円柱体を用い、載荷まで封緘養生及び28日標準養生した。

2.3 温度及び湿度

常温、常湿の室内で実験を行った。実験期間における環境の温度、湿度の変化を図2に示す。熱電対によりコンクリートの温度を計測し、(1)に示す Arrhenius 式で有効材齢を算出し、これを用いて実験データを整理した。

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

ただし、 t : 有効材齢(日) ; Δt_i : 温度が $T(\Delta t_i)$ である期間の日数 ; $T(\Delta t_i)$: 温度 (°C) ; $T_0 : T_0 = 1^\circ\text{C}$

2.4 実験方法

供試体のひずみを弾性係数 49MPa、測定長さ 100mm の埋込み型ゲージで、温度を熱電対で測定し、線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ を用いて温度変形を除いた。埋込み型ひずみゲージの弾性係数が 49MPa であるため、それ以下の極初期のコンクリートひずみの正確に測定できないので、ここで 0.26 日の値を初期値とした (始発時点に相当であるので、以下始発時点とする)。

乾燥開始材齢、載荷時材齢及び供試体の数量を表3に示す。

乾燥開始材齢まで供試体をシールした状態でひずみを測定し、乾燥開始材齢から側面のアルミテープを外して乾燥させ、ひずみを測定した。

クリープ実験は二種類 (基本クリープ、全クリープ) に分けられ、載荷時のコンクリート強度の 20% の圧縮応力を導入した。クリープ実験には、図3に示す実験装置を用い、荷重変動を±1%の範囲内にアキュムレータで調整した。

自己収縮及び乾燥収縮の実験結果は3体、クリープの実験結果は2体の実験値の平均値とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 強度及び弾性係数

圧縮強度及び弾性係数の発現の実験結果を有効材齢で整理したものを図4、5に示す。実験結果に基づいて、凝結時間の影響を考慮し^[4]、MC90 の圧縮強度と弾性係数の予測式を回帰により修正した結果を併せて示す。

図4、5に示すように、若材齢の時、圧縮強度及び弾性係数の発現は非常に速い。特に、圧縮強度の発現と比べ、弾性係数の発現の方が速

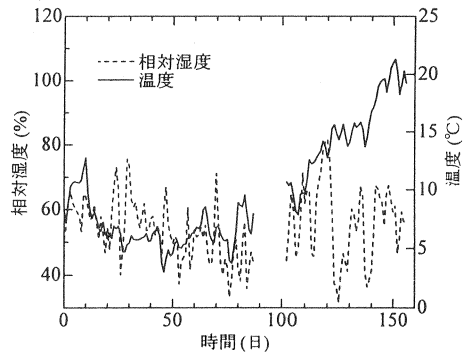


図2 実験期間の温度及び湿度の経時変化

表3 実験条件及び供試体の数量

実験項目	乾燥開始有効材齢 (日)	載荷時有効材齢 (日)	供試体数量	
自己収縮	シール		3	
全収縮	0.44		3	
	0.85		3	
	1.74		3	
	11.70		3	
	28.91		3	
クリープ		0.44	2	
		0.85	2	
		1.74	2	
		11.70	2	
		28.91	2	
	全クリープ	11.70	0.44	2
		11.70	0.85	2
		11.70	1.74	2
		11.70	11.70	2
		28.91	28.91	2

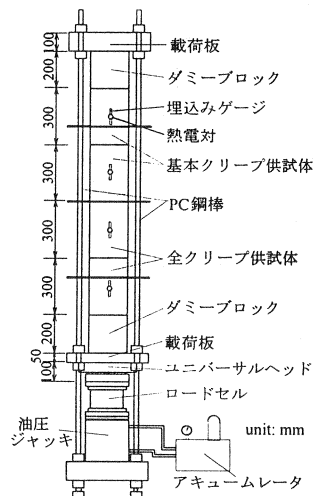


図3 クリープ実験装置

く、有効材齢1日で28日の弾性係数の67%に達している。これに対し、圧縮強度は28日の圧縮強度の42%である。これによって、若材齢に生じる自己収縮の進行が速く、ひずみの値も大きい高強度コンクリートでは、拘束による応力の増大も速く、若材齢においてひび割れが発生しやすくなる。

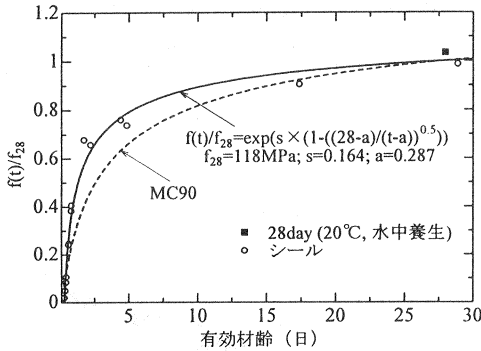


図4 圧縮強度の経時変化

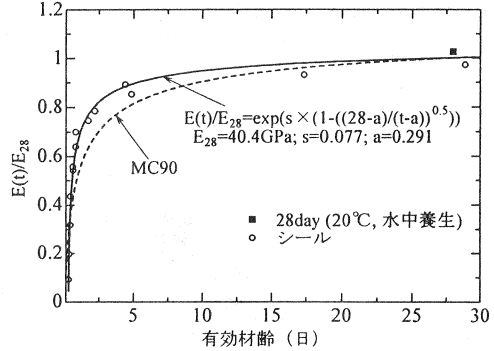


図5 弾性係数の経時変化

3.2 自己収縮

図6に自己収縮ひずみ経時変化を示す。自己収縮ひずみは、初期材齢に急激に増加した後、徐々に増加する。有効材齢0.44日での自己収縮ひずみの値は95日でのひずみの約33%に達している。0.85日で約61%、1.74日で約64%、11.7日で約85%、28.91日で約91%である。

実験値を用いてMC90の乾燥収縮の予測式を終局ひずみ及び進行速度について以下のように修正した。

$$\varepsilon_{as} = \varepsilon_{as0} \left[\frac{(t-t_s)/t_1}{\beta_{as} + (t-t_s)/t_1} \right]^a \quad (2)$$

ただし、 ε_{as} ：自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)； ε_{as0} ：自己収縮ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)， $\varepsilon_{as0} = -460$ ； β_{as} ：進行速度に影響する係数， $\beta_{as} = 14.25$ ； a ：実験定数， $a = 0.21$ ； t ：有効材齢(日)； t_s ：始発時の有効材齢(日)， $t_s = 0.26$ ； t_1 ： $t_1 = 1$ 日。

3.3 乾燥収縮

普通強度のコンクリートでは、Davisら¹⁵⁾の報告にもあるように、自己収縮ひずみは最大 100×10^{-6} 程度であることから実用上無視され、乾燥収縮だけを考慮してきたが、高強度コンクリートの場合、自己収縮が極めて大きく無視できないとよく言われている。そこで、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの重ね合わせが成り立つものと仮定して、各ひずみの占める割合を実験的に評価する。

図6に全収縮ひずみ(自己収縮ひずみ+乾燥収縮ひずみ)を示す。

全収縮ひずみに対し、有効材齢95日での乾燥収縮ひずみの割合は、乾燥開始有効材齢0.44日の場合で27%、0.85日で21%、1.74日で19%、11.70日で10%、28.91日で6%であって、乾燥開始有効材齢が遅いほど小さくな

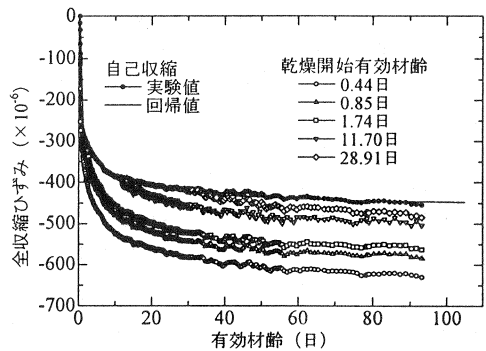


図6 自己収縮及び全収縮ひずみの経時変化

る傾向が見られる。この原因は材齢の増大とともに水和反応が進行し、蒸発可能な水量は少なくなり、かつ、コンクリートは緻密になるためと考えられる。従って、全収縮に対して高強度コンクリートの乾燥収縮の発生割合は小さい。

図7のように、乾燥開始後の全収縮ひずみは自己収縮ひずみとほぼ線形関係を示している、乾燥開始材齢が遅いほど線形関係は顕著になる。さらに、図8のように、乾燥収縮ひずみは乾燥開始後から発生した自己収縮ひずみと線形に近い関係になっている、その比率は0.7で、かつ、その比例定数は乾燥開始材齢に依存しない。即ち乾燥開始後から発生する自己収縮から乾燥収縮を評価できることである。

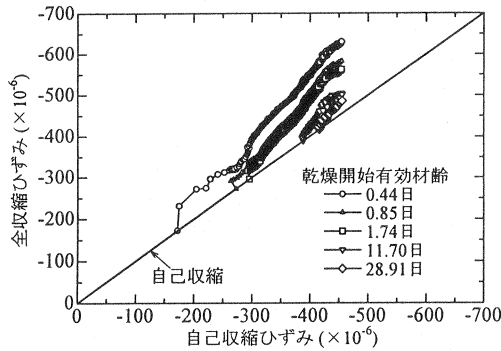


図7 全収縮ひずみと自己収縮ひずみとの関係

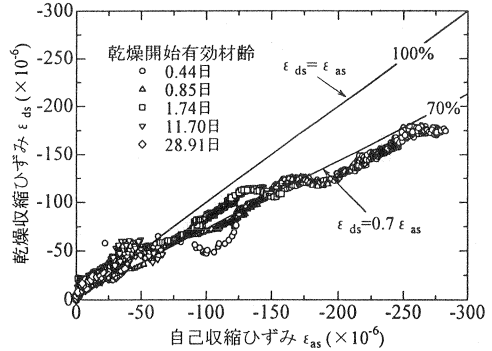


図8 乾燥収縮ひずみと自己収縮ひずみとの関係

3.4 クリープ

3.4.1 基本クリープ

基本クリープひずみは、シールされたクリープ供試体のひずみから、載荷時の弾性ひずみ及び自己収縮ひずみを差し引いて求めたものである。載荷時材齢の異なる単位基本クリープひずみの経時変化を図9に示す。

図9に示すように、若材齢に載荷した場合、載荷時有効材齢0.44日の単位基本クリープひずみと0.85日の単位基本クリープひずみとの差はかなり大きく、単位クリープひずみは材齢の経過により急激に減少する。載荷時有効材齢0.85日以後、異なる載荷時材齢間の単位基本クリープひずみの差は小さくなっていく傾向がみられる。この現象については、クリープの発生機構から説明できると考えられる。即ち、コンクリートのクリープは連続載荷によるゲル水の緩慢な圧出と移動が主因と考えられるが^[6]、高強度コンクリートの場合、初期において、密実なセメント硬化体がまだ十分に形成されていないので、普通コンクリートと同様にゲル水の圧出はまだ容易であると考えられる。しかし、材齢の経過とともにセメント硬化体は普通コンクリートより速く密実になり、クリープひずみは急に減少する。そして、コンクリート内部構造は緻密となり、載荷時材齢によるクリープひずみの変化は小さくなる。

3.4.2 全クリープ

全クリープひずみは、シールしないクリープ供試体のひずみから、載荷時弾性ひずみ及び全収縮ひずみを差し引いて求めたものである。載荷時材齢の異なる単位全クリープひずみの経時変化を図9に示す。単位全クリープひずみは単位基本クリープひずみより大きく、乾燥の影響が認められる。有効材齢95日での単位基本クリープ

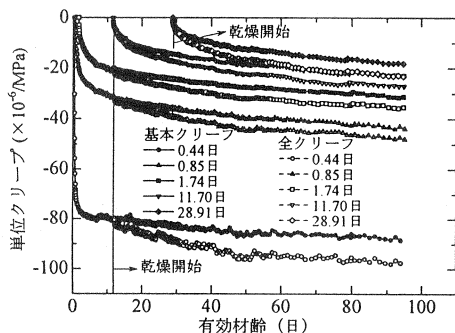


図9 クリープに及ぼす載荷時材齢の影響

ひずみに対して、単位全クリープひずみは乾燥により約8%から26%大きくなる。

3.4.3 クリープ係数

基本クリープと乾燥の影響を受ける場合の全クリープ係数の実測値を図10に示す。クリープ係数を求めるとき、28日標準養生の弾性係数を用いた。

有効材齢95日での基本クリープ係数と全クリープ係数の差は0.1~0.3程度である。

基本クリープ係数の実測値に基づいて、MC90の予測式のクリープ係数の終局値 ϕ_0 、進行速度を決める係数 β_H を修正し、基本クリープ係数 $\phi(t, t_0)$ を近似した。この修正式は以下のようである。

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \times \left[\frac{(t - t_0) / t_1}{\beta_H + (t - t_0) / t_1} \right]^{0.3} \quad (3)$$

$$\phi_0 = 1.10 \times \left[1 + (t_0 + 0.33)^{-2.96} \right] \quad (4)$$

$$\beta_H = 0.35t_0^2 + 8.73t_0 \quad (5)$$

ただし、 $\phi(t, t_0)$:基本クリープ係数; ϕ_0 :終局基本クリープ係数; β_H :クリープ進行速度に及ぼす内部組織変化の影響を載荷時材齢を用いて表わす係数; t :有効材齢(日); t_0 :載荷時有効材齢(日); $t_1 = 1$ 日。

$\phi_0 - t_0$ 、 $\beta_H - t_0$ の関係の回帰近似曲線と実測値を図11に示す。

載荷時材齢の増大とともに、 ϕ_0 は最初急に小さくなり、以後減少速度は遅くなり収束する。

MC90では、 β_H は湿度によるクリープの進行速度に影響を与える係数で、載荷時材齢と無関係とされているが、高強度コンクリートの場合、材齢の経過に伴って内部組織の生成は速く、そのため、載荷によるセメントゲルから水の圧出及び移動は難しくなる。したがって、若材齢で載荷した場合、 β_H は小さく、クリープの進行が急速に進むが、載荷時材齢が遅くなると β_H は t_0 に伴って急激に増加しクリープの進行速度は遅くなる。以上の観点から、実験結果に基づいて $\beta_H - t_0$ を放物線で近似することとした。

式(3)、(4)、(5)を用いた基本クリープ係数の計算結果と実験値とを比較したものを図12に示す。クリープ係数の計算値は実験値とほぼ一致している。

3.5 プレストレスロス

PC部材に対して、自己収縮および乾燥収縮によりプレストレスロスが生じるが、それらの程度を調べるため、図13に示すはりを一軸モデルと仮定し、Step-by-Step法により応力を解析した。解析において、PC導入時点を有効材齢1、3、5日、導入応力を940MPa

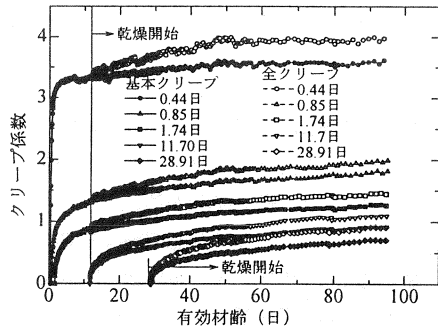


図10 クリープ係数に及ぼす載荷時材齢の影響

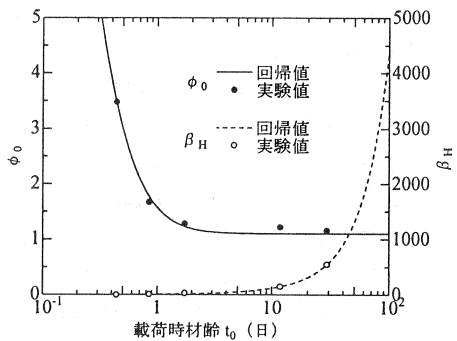


図11 ϕ_0 及び β_H と t_0 の関係

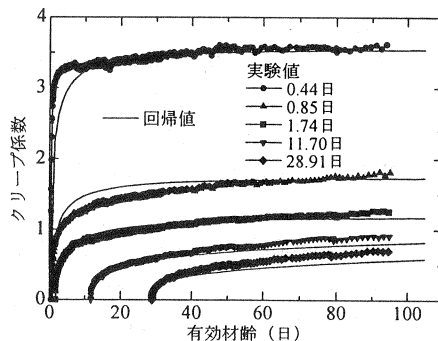


図12 クリープ係数の計算値と実験値との比較

とした。コンクリートの弾性係数およびクリープ係数について前述の回帰式で求めた。自己収縮ひずみおよび全収縮ひずみについては実験値を用いた。

図14に示すように、PC鋼材の応力は収縮により減少する。自己収縮による有効材齢90日での減少率は1日にPC導入の場合、3.6%で、3日にPC導入の場合、2.6%で、5日にPC導入の場合、2.1%である。これに対して、全収縮による減少率はそれぞれ5.4%、3.6%、2.9%である。従って、高強度コンクリートでは収縮によるプレストレスロスに自己収縮の寄与率は乾燥収縮より大きいが、プレストレスロスの値はそれほど大きくない。これはPC導入時までには生じる自己収縮が大きいためである。

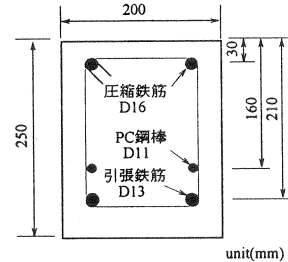


図13 モデルはりの断面

4. まとめ

以上の実験結果と考察から、以下の結論が得られた。

- ・若材齢での高強度コンクリートの弾性係数と圧縮強度の発現は速い、特に弾性係数の発現が速い。
- ・高強度コンクリートの自己収縮は非常に大きく、初期材齢に急激に増加し、その後は徐々に増加する。
- ・乾燥収縮は自己収縮よりかなり小さい。乾燥収縮ひずみは乾燥開始後から発生する自己収縮ひずみの約70%の割合で比例的に増加し、その比例定数は乾燥開始材齢に依存しない。
- ・若材齢の高強度コンクリートにおいてクリープの進行はきわめて速く、載荷時材齢の増大とともに急に遅くなる。有効材齢95日での単位全クリープひずみは単位基本クリープひずみより8~26%大きい。
- ・実験値に基づいてMC90の乾燥収縮及びクリープの予測式を修正した。得られた自己収縮ひずみ及びクリープ係数の回帰式での計算値は実験値とほぼ一致しているが、材料及び配合が限定しているため、より広い適用範囲での検討が今後の課題である。
- ・高強度コンクリートにおいて、収縮によるプレストレスロスに対する自己収縮の寄与率は大きく、ロスの値は大きくない。

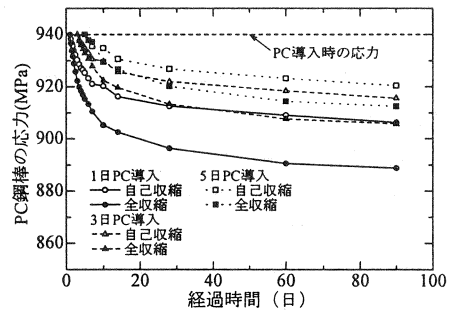


図14 自己収縮及び全収縮によるプレストレスロス

参考文献

- [1] 田澤栄一, 宮沢伸吾, 佐藤剛, 小西謙二郎: コンクリートの自己収縮, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, pp. 561-566, 1992
- [2] CEB-FIP Model Code 1990
- [3] 筒井英之, 佐藤良一, 許明: 高強度コンクリートの自己収縮応力に関する検討, セメントーコンクリート論文集, pp. 478-483, 1996
- [4] 自己収縮委員会: 自己収縮委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp. 1-5, 1996. 11
- [5] H. E. Davis: Autogenous Volume Change of Concrete, ASTM, 40, pp. 1103-1110, 1940
- [6] A. M. Neville, W. H. Dilger and J. J. Brooks: Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, London and New York, pp. 158-181, 1983