# 論文 高強度コンクリートの温度応力と自己収縮応力の実測と解析

小澤満津雄\*1・石田真吾\*2・森本博昭\*3

要旨:高強度コンクリートの一軸拘束試験により,温度応力と自己収縮応力を測定した。自 己収縮応力のみおよび温度応力と自己収縮応力の複合応力が作用した場合の一軸拘束試験を 行うことにより,初期応力の発現性状を明らかにした。また,実験と並行して初期応力のク リープ解析を Step-by-Step法,増分法により実施し解析精度の検証を行った。その結果, Step by Step 法が拘束応力を精度よく評価できることが明らかとなった。 キーワード:高強度コンクリート,温度応力,自己収縮応力,クリープ解析,一軸拘束試験

1. はじめに

コンクリートの体積変化に伴うひび割れの原 因として,自己収縮応力と乾燥収縮応力および セメントの水和熱膨張による温度応力等が挙げ られる。これらの初期応力を精度よく解析によ って推定するためには、コンクリートの物性を 把握する必要がある。著者らは,現在までに若 材齢高強度コンクリートのクリープ評価法<sup>1)</sup>お よび熱膨張係数評価法<sup>2)</sup>の検討を行っている。

本研究では,高強度コンクリートを対象とし て,JIS 原案法の一軸拘束試験を実施し,温度 応力と自己収縮応力が複合した拘束応力の発現 性状について,実測の熱膨張係数を用いた初期 ひずみからの熱ひずみと自己収縮ひずみの分離 を試みるとともに,著者らが提案しているクリ ープ評価法<sup>1)</sup>を用い,拘束応力のクリープ解析 (step-by-step法, 増分法)を実施した。 2. 研究計画

表 - 1 に研究計画を示す。試験は,自己収縮 供試体をAシリーズ(以下AS),自己収縮+温度 膨張供試体をATシリーズ(以下,ATS)とす る。上記の2シリーズにおいて,一軸拘束試験 を実施し,以下の項目について検討を行った。

- 1) 自己収縮応力の測定
- 2) 自己収縮応力と温度応力の複合応力の測定
- 3) 1),2)の場合における拘束応力の step-bystep 法と増分法によるクリープ解析の結 果と実測値の比較
  - 3. 実験概要
  - 3.1配合

表 - 2 に示方配合を示す。セメントは普通ポ ルトランドセメントを使用した。水セメント比 は 30%で混和剤として,高性能 AE 減水剤(ポ リカルボン酸系架橋ポリマー複合体)を使用し

表 - 1 研究計画

記号	種類	供試体	寸法 (mm)	供試体形状	温度履歴
AS	自己収縮	拘束	150×100×750(試験区間断面 100×100)	ドックボーン	20 一字
		無拘束	100×100×750 角柱		20 - Æ
ATS	自己収縮 + 温度膨張	拘束	150×100×750(試験区間断面 100×100)	ドックボーン	変化あり
		無拘束	100×100×750	角柱	図-2 参照

\*1 岐阜大学助手 工学部社会基盤工学科 工修 (正会員)

\*2 大有建設(株) (非会員)

\*3 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 工博 (正会員)

た。表 - 3 にフレッシュコンクリートの性質を 示す。表-4 に各シリーズを温度 20 ,湿度 80 ±5%の環境下で養生した供試体の所定の材齢 で圧縮強度試験と弾性係数の試験結果を示す。

3.2 一軸拘束試験装置の概要

一軸拘束試験は JIS 原案法 3)を用いた。図 - 1 に試験装置の概要を示す。拘束供試体の断面寸 法は 100×100mm で, 全長 750mm, 試験区間 長 500mm のドッグボーン型である。無拘束供 試体は断面寸法が 100×100mm で,全長 750mm である。コンクリートの伸縮を計測す るために,供試体中央部に埋め込み型ひずみゲ ージ(T 社製 KM50F)を配置した。 拘束鋼管の断 面積は 213mm<sup>2</sup> である。4 本の拘束鋼管中央部 の両面に各2枚のひずみゲージを貼り付け,拘 束鋼管のひずみを測定した。また,供試体内部 の温度変化を計測するために,熱電対を配置し た。測定項目は,拘束供試体が 拘束鋼管ひず  $み \Delta \varepsilon_{\ell}$ , 拘束供試体ひずみ  $\Delta \varepsilon_{\ell}$ , 供試体内部 温度△ファ(平均)である。無拘束供試体は 無 拘束供試体ひずみ  $\Delta \varepsilon_{\ell}$ , 供試体内部温度  $\Delta T_{\ell}$ (平均)とした。ATS供試体は,強制的に温度 変化を与えるため,供試体内部に電熱線をらせ ん状に配置した。

3.3 実験手順

コンクリートを型枠に打設後,凝結始発時間 10hr.まで,湿布養生を行った。その後,一軸拘 束試験体の側板を外し,封緘を行った。無拘束 供試体も脱型後,封緘作業を行った。ATS は図 -2 に示す温度履歴により温度変化を与えた。 上記の作業終了後,30 分毎にひずみ等の計測 を行った。養生室の環境条件は,温度20 およ び湿度 80±5%である。

3.4 各ひずみと拘束応力の算出方法

拘束供試体と無拘束供試体から求めたひずみ よりJCI自己収縮委員会報告書<sup>4)</sup>を参考にして, 各ひずみ成分の計算を行う。熱膨張係数は実測 値の近似式を用いた<sup>2)</sup>。ASは熱ひずみ成分Δε, を無視する。以下に各ひずみと拘束応力の算出 式を示す。



図 - 1 一軸拘束試験(JIS 原案法)

表 - 2 示方配合

W/C	s/a	単位量 ( kg/m <sup>3</sup> )					
%	%	W	С	S	G	Ad	
30	44.2	132	440	840	1060	22	

#### 表-3 フレッシュコンクリートの性質



表 - 4	圧縮強度	•	弾性係数試験結果
-------	------	---	----------

	I	AS	ATS		
材齢	fc	Ec	fc	Ec	
(日)	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	
1	15.0	17.3	19.0	19.4	
3	46.3	31.4	44.4	33.3	
7	55.1	33.6	61.8	37.1	
14	57.9	36.6	66.1	37.5	
27	65.4	37.1	72.3	39.4	

$$\Delta \varepsilon_{r} = \Delta \varepsilon_{a} + \Delta \varepsilon_{r} + \Delta \varepsilon_{e} \tag{1}$$

$$\Delta \varepsilon_{f} = \Delta \varepsilon_{a} + \Delta \varepsilon_{r}$$
<sup>(2)</sup>

$$\alpha = 1700/(mat - 290) + 9.5$$
(3)

 $\Delta \varepsilon_{t} = \alpha \cdot \Delta T \tag{4}$ 

$$\Delta \varepsilon_{k} = \Delta \varepsilon_{f} - \Delta \varepsilon_{r}$$
<sup>(5)</sup>

$$\Delta \sigma_r = -A_s / A_c \cdot E_s \cdot \Delta \varepsilon_s \tag{6}$$

ここに,  $\Delta \varepsilon_i$ : 拘束供試体ひずみ(×10<sup>-6</sup>),  $\Delta \varepsilon_i$ : 自己収縮ひずみ(×10<sup>-6</sup>),  $\Delta \varepsilon_i$ : 熱ひずみ(× 10<sup>-6</sup>),  $\Delta \varepsilon_i$ : 応力ひずみ(×10<sup>-6</sup>),  $\alpha$ :熱膨張係数 (実測値)(×10<sup>-6</sup>/),  $\Delta \varepsilon_i$ : 無拘束供試体ひずみ (×10<sup>-6</sup>),  $\Delta \sigma_i$ :拘束応力(N/mm<sup>2</sup>),  $\Delta \varepsilon_i$ : 拘束ひずみ (×10<sup>-6</sup>),  $E_i$ : 鋼管の弾性係数(N/mm<sup>2</sup>),  $E_i$ : コン クリートの弾性係数(N/mm<sup>2</sup>), mat : 積算温度 (・hr.),  $\Delta T$ :供試体の平均温度変化()

4. 拘束応力のクリープ解析

4.1 クリープ関数

基本クリープ関数は圧縮クリープ試験の結果 から決定したものを用いた<sup>1)</sup>。クリープの載荷 時材齢<sup>7</sup>のスタートは 1.5 日である。以下にク リープ算定式を示す。

$$\phi(\tau, t) = \gamma(\tau) \cdot \beta(t) \tag{7}$$

$$\beta(t) = \{l - exp(-b(\tau) \cdot t^{\wedge} c(\tau))\}$$
(8)

 $\gamma(\tau) = 44/\tau + 26 \tag{9}$ 

$$b(\tau) = 1.3 / \tau^2 + 0.3 \tag{10}$$

$$c(\tau) = 0.55 \cdot \{1 - exp(-0.9 \cdot \tau^{0.8})\}$$
(11)

ここに,  $\phi(\tau,t)$ : 単位クリープひずみ(× 10<sup>-6</sup>/N/mm<sup>2</sup>),  $\gamma(\tau)$ : 最終クリープひずみ(× 10<sup>-6</sup>/N/mm<sup>2</sup>),  $\beta(t)$ : クリープ進行関数, t: 載 荷期間(日),  $\tau$ : 載荷時材齢(日)( $\tau \ge 1.5$ 日),  $b(\tau), c(\tau)$ : 実験定数

4.2 Step-by-Step 法<sup>4)</sup>

step-by-step 法は JCI 自己収縮委員会から提案 された自己収縮応力の算定法である。 Step-by-step 法はクリープの進展によるリラクセーションを考慮することができる。拘束供試体の弾性応力増分  $\Delta \sigma_{\epsilon}(t_{i})$ を求め,各時間ステップの弾性応力増分  $\Delta \sigma_{\epsilon}(t_{i})$ にリラクセーション 関数を乗じることによって,式(14)からコンク リート応力 ⊿σ, を求めた。本研究では、リラク セーション関数として,有効弾性係数算出の際 の弾性係数低減率と同形の関数を用いた。以下 に一連の応力算定式を示す。コンクリートの弾 性係数は,表-4 に示す各材齢における値を線 形補間することにより決定した。

$$\Delta \varepsilon_{e}(t_{i}) = \Delta \varepsilon_{r}(t_{i}) - (\Delta \varepsilon_{i}(t_{i}) + \Delta \varepsilon_{a}(t_{i}))$$
(12)

$$\Delta \sigma_{\epsilon}(t_{i}) = \Delta \varepsilon_{\epsilon}(t_{i}) \cdot E_{\epsilon}(t_{i})$$
(13)

$$\sigma_{i} = \sum_{i=1}^{n} \Delta \sigma_{e}(t_{i}) \cdot R(i)$$
(14)

$$R(i) = \frac{1}{1 + \varphi_i(t_i)} \tag{15}$$

$$\varphi_{i}(t_{i}) = \frac{\varepsilon_{cr}(t_{i})}{\varepsilon_{c}(t_{i})} = \frac{\phi(\tau, t)}{I/E_{c}(t_{i})}$$
(16)

ここに, $\Delta \sigma_{e}(t_{i})$ : *i* ステップ時の弾性応力増分 (N/mm<sup>2</sup>), R(i): *i* ステップ時のリラクセーショ ン関数, $\sigma_{i}$ : *i* ステップにおけるコンクリート応 力(N/mm<sup>2</sup>),  $\varphi_{i}(t_{i})$ : *i* ステップの時間 $t_{i}$ におけ るクリープ係数

4.3 増分法

増分法はJSCE やJCIのマスコンクリートの 温度応力検討委員会報告書 5で示されている方 法である。ある時間増分に対する弾性ひずみ増 分にクリープの影響を考慮した弾性係数(有効 弾性係数)を掛けて,応力増分を求める方法であ る。クリープ係数は $\tau$ =1.5日のクリープ関数に より決定した。以下に応力算定式を示す。

$$E_{e}(t_{j}) = \frac{E(t_{j})}{\left(1 + \varphi(\tau, t) \cdot \frac{E(t_{j})}{E_{28}}\right)}$$
(17)

$$\Delta \sigma(t_j) = \Delta \varepsilon_{\epsilon}(t_j) \cdot E_{\epsilon}(t_j)$$
(18)

$$\sigma_{i} = \sum_{i}^{i} \Delta \sigma(t_{i})$$
(19)

ここに,  $E_{e}(t_{j})$ :ステップ j における有効弾性係 数(N/mm<sup>2</sup>),  $E(t_{j})$ :ステップ j における弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>),  $\Delta \varepsilon_{e}(t_{j})$ : ステップ j における拘束ひず み増分,  $\sigma_{i}$ : ステップ i における応力 (N/mm<sup>2</sup>),  $\Delta \sigma(t_{j})$ :ステップ j における 弾性応力増分 (N/mm<sup>2</sup>).

### 5. 実験結果

AS は測定開始を材齢 0.47 日とし ATS は 1.13 日を測定開始材齢とした。

# 5.1 温度履歴

図 - 3 に AS および ATS の温度履歴を示す。 AS は,供試体内部の温度が拘束と無拘束供試 体ともに,ほぼ 20 一定であることがわかる。 ATS は供試体に図 - 2 の温度履歴となるように, 電熱線より強制的に熱を与えたものである。無 拘束供試体は,ほぼ設定した温度履歴に従って 変化している。しかし,拘束供試体は2日で最 高温度が43 程度までしか上昇しなかった。こ れについては,本研究では試験装置全体に断熱 材を巻き,冷却防止を図ったが,十分な効果が 得られなかったことに起因する。拘束供試体と 無拘束供試体の温度履歴の差については, 5.2(3)ATS の自己収縮ひずみの推定で述べるよ うに補正計算を行った。

5.2 ひずみの経時変化

(1) AS

図 - 4 に温度 20 の拘束供試体における各ひ ずみの経時変化を示す。まず,無拘束供試体の ひずみ $\Delta \varepsilon_f = \Delta \varepsilon_a$ は,材齢2日までは,自己収縮 ひずみ進行速度は大きく,120×10<sup>-6</sup>程度である が,それ以降に自己収縮進行速度は緩やかにな り材齢 30日で 250×10<sup>-6</sup>程度となる。拘束供試 体ひずみ $\Delta \varepsilon_r$ は,材齢 30日で 150×10<sup>-6</sup>程度で あった。

(2) 自己収縮ひずみの温度依存性について 自己収縮ひずみの温度依存性について種々の 研究<sup>6)</sup>および議論がなされているが,明確な結 論に至っていないのが現状である。図-5にAS と ATS の自己収縮ひずみと積算温度評価との 関係を示す。図より,AS の自己収縮ひずみは, 極値を 280×10<sup>-6</sup>程度として徐々に漸近してい くことがわかる。一方,ATS の無拘束供試体の 自己収縮ひずみは初期の温度上昇域で 280× 10<sup>-6</sup>まで達し,その後はほぼ一定値に落ち着い ている。以上より,自己収縮ひずみの温度依存 性について,材齢初期の急激な温度上昇が,自 己収縮の発現に大きく影響するが,温度履歴の 違いが生じても,自己収縮ひずみの終局値はほ ぼ一定値をとる傾向が認められた。

(3) ATS

5.1 の温度履歴で述べたように, ATS 無拘束 供試体と拘束供試体の温度履歴が設定温度と大 きく異なったため,拘束供試体に発現した自己 収縮ひずみの推定が必要となった。そこで, AS



(温度 20 一定)の自己収縮ひずみと ATS の 無拘束供試体の自己収縮ひずみを平均化して, ATS 拘束供試体の自己収縮ひずみとした。その 根拠として,以下の3つを示す。図-4より, 拘束供試体の温度上昇量が無拘束供試体の温度 上昇量のほぼ半分であること。 図-5より, AS および ATS の無拘束供試体の自己収縮ひず みは極値が280×10<sup>-6</sup>程度であり 温度履歴によ って,自己収縮ひずみ進行速度が違うこと。 5.2(2)より,自己収縮ひずみを積算温度で評価 することが困難であったこと。図-6 に平均化 して推定した ATS 拘束供試体の自己収縮ひず みの経時変化を合わせて示す。図より推定値は, 材齢2日程度までひずみ進行速度が大きく 200 ×10<sup>-6</sup> 程度となる。それ以降,推定値のひずみ 進行速度は緩やかとなり, 28 日で 250×10<sup>-6</sup> 程 度となった。この自己収縮ひずみの推定値を用 いて,整理した各ひずみの経時変化を図-7に 示す。まず,温度ひずみ△ε,は材齢2日で150 ×10<sup>-6</sup>まで膨張し,その後,-50×10<sup>-6</sup>程度まで 収縮している。自己収縮ひずみ△ε。は,材齢27 日で 120×10<sup>-6</sup> 程度である。拘束供試体ひずみ  $\Delta \varepsilon_r$ は,急激な温度上昇に対してある程度のタ イムラグをもって発現するため、材齢1日で20 ×10<sup>-6</sup>程度であるが,その後,材齢30日で150 ×10<sup>-6</sup>程度となった。

5.3 拘束応力の実測値と解析値の比較

ここでは,温度20,湿度80±5%の環境下 で養生した場合の弾性係数を用いた。

(1) AS

図 - 8 に拘束応力実測値と弾性解およびクリ ープ解析値(Sep-by-Step法,増分法)の経時変 化を示す。まず,実測値で,材齢 2.4 日までに 拘束応力の発現速度は大きく,0.6N/mm<sup>2</sup> に達す る。その後,緩やかに増加し,材齢 30 日で 1.04N/mm<sup>2</sup>の拘束応力が生じている。次に,Stepby-Step 法と増分法によるクリープ解析値は, ともに材齢 30 日において 1.7N/mm<sup>2</sup>程度であり, 実測値に比べて安全側の評価となった。応力が 単調増加する場合は,Step-by-Step 法と増分法に



図 - 7 ひずみの経時変化(ATS)

大きな差は見られなかった。実験方法が JCI 法 と JIS 原案法で違いはあるが,同様の結果が,

JCI コンクリートの自己収縮研究委員会にお いても報告されている<sup>n</sup>。

(2) ATS

図 - 9 に拘束応力の実測値と弾性解およびク リープ解析値(Step-by-Step法,増分法)を示 す。実測では初期の温度上昇時に材齢1.0日で 圧縮応力-1.0N/mm<sup>2</sup>が発現し,その後温度が低 下し,20 一定値となる材齢11日で引張応力 1.11N/mm<sup>2</sup>が発現していることがわかる。これ に対して,Step-by-Step法を用いた場合,材齢2.4 日で圧縮応力が-0.86/mm<sup>2</sup>となり,材齢11.1日で 引張応力は1.35N/mm<sup>2</sup>程度で,ほぼ一定となっ た。また,増分法を用いた場合,材齢2.6日で 圧縮応力が-1.22/mm<sup>2</sup>となり,引張応力の最大値 は0.54N/mm<sup>2</sup>程度となった。解析値と実測値を 比較すると,温度変化ありの場合、Step by Step 法が増分法に比べて実測値をよく表す結果となった。これについて,Step-by-Step法はクリープの影響を材齢によって考慮できるため,実測値を比較的よく表現できたものと考えられる。一方,増分法は,載荷時材齢1.5日のクリープ関数を基準とした。材齢が初期の場合はクリープ量が大きいため,引張側で実測値を小さく(危険側に)評価したものと考えられる。特に,応力反転以降で実測値との差が大きくなる傾向が認められる。増分法ではクリープの取り扱いについて,更に検討をする必要があると思われる。

# 6. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 一軸拘束試験装置を用いて,自己収縮応力 と温度応力の複合応力を測定した。
- 2) 自己収縮ひずみの温度依存性について,材 齢初期の急激な温度上昇が,自己収縮の発現 に大きく影響するが,温度履歴の違いが生じ ても,自己収縮ひずみの終局値はほぼ一定値 をとる傾向が認められた。
- 3) 応力が単調増加する場合,Step-by-Step法および増分法は実測値を安全側に評価した。応力反転がある場合,Step-by-Step法は比較的実測値を安全側に評価するが,増分法は危険側に評価する結果となった。応力が反転する場合のクリープの取り扱いを更に検討する必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 小澤満津雄,森本博昭:若材齢高強度コン クリートのクリープ推定法:コンクリート 構造物のクリープおよび時間依存変形に関 するシンポジウム,日本コンクリート工学 協会,pp.259-266,2001,7
- 小澤満津雄,吉田知記,森本博昭:若材齢 高強度コンクリートの熱膨張係数の評価に 関する研究,第 56 回セメント技術大会講演 要旨,セメント協会,pp.156-157,2002
- 3) 仕入豊和,青柳征夫,川瀬清孝:コンクリ





ートのひび割れ試験法(案),コンクリート 工学協会,Vol.23,NO.319,pp.40-54,1985

- 4) 自己収縮委員会報告書:日本コンクリート 工学協会,1996,11
- 5) マスコンクリート温度応力研究委員会報告書:日本コンクリート工学協会 1998,4
- 6) 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,N0.571V-36,pp.211-219,1997.8
- 7) コンクリートの自己収縮研究委員会報告書:日本コンクリート工学協会,2002,9