

# 論文 高強度コンクリートの自己収縮応力の予測

楊 楊\*1・佐藤良一\*2・今本啓一\*3・許 明\*4

要旨：高強度コンクリートの自己収縮応力の予測においては、強度等の物性値の発現速度が速いため、打込み後初期からの弾性係数およびクリープ係数などの正確な推定が不可欠である。既往の CEB-MC 1990 を修正した推定式を、若材齢においても適用できるように、終局クリープ係数と進行速度を表す係数を修正した。これによる物性値を用い、重ね合わせ原理に基づく FEM で拘束応力を解析した。解析結果は、特に若材齢において、実験値とよく一致した。解析対象のコンクリートと物性値を求めたコンクリートの若干の配合の相違を考慮すれば、本方法は自己収縮応力の予測方法として妥当と考える。

キーワード：高強度コンクリート、自己収縮応力、温度応力、弾性係数、クリープ、FEM

## 1.はじめに

コンクリートのひび割れの発生原因として、乾燥収縮及び水和熱による温度変化はよく知られている。最近、高強度コンクリートなどでは、自己収縮の影響が無視できないことが明らかとなってきた。これらの体積変化が拘束されることにより生じる応力の予測には、自由ひずみと物性値の適切な推定、および適切な応力の解析方法が必要である。筒井ら[1]は CEB-FIP MODEL CODE 1990 (以下 MC90) によるクリープ係数を用いて、一軸拘束応力を解析したが、載荷時材齢が若いときのクリープ係数が小さいために、解析値は実測値より大きかった。

本研究では、宮澤ら[2]及び JCI 自己収縮委員会[3]によって提示された、MC90 のクリープ係数と弾性係数を高強度コンクリートの実測値に基づいて修正した式 (以下 JCI 式) を、さらに若材齢まで適用できるように修正し、重ね合わせ原理に基づいて、二次元 FEM で拘束応力を予測し、実験値と比較、検討した。

## 2.実験の概要[1]

### 2.1 コンクリート

対象とした高強度コンクリートは、W/B=25%で結合材として普通ポルトランドセメント単味のもの(OP)とシリカフェーム

10%を含む(SF) 2種類で、その配合を表 1 に示す。OP および SF の標準養生材齢 28 日の圧縮強度、弾性係数はそれぞれ 94.3N/mm<sup>2</sup>, 88.4N/mm<sup>2</sup>, 39kN/mm<sup>2</sup>, 39kN/mm<sup>2</sup>であった。

### 2.2 拘束供試体

鉄筋拘束供試体：断面は 100×100mm とし、鉄筋は D16 を 4 本配置した。供試体全断面積に

表 1 コンクリートの配合

No.	W/B	s/a	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
			W	C	SF	S	G	HWR	AE
OP	25	41.0	156	624	—	647	941	7.49	6.24
SF	25	41.0	156	562	62	647	941	8.11	6.24

HWR：高性能減水剤

\*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻(正会員)

\*2 宇都宮大学助教授 工学部建設学科、工博(正会員)

\*3 東急建設(株)技術研究所研究員 建築材料研究室、工修 (正会員)

\*4 宇都宮大学助手 工学部建設学科(正会員)

対する鉄筋比は 7.94%である。型枠拘束供試体：JIS 原案「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法（案）」に基づくものとした。コンクリート断面に対する拘束枠の鋼材比は 7.93%である。鉄筋と型枠の弾性係数はそれぞれ 204kN/mm<sup>2</sup>、210kN/mm<sup>2</sup>であり、熱膨張係数は 10×10<sup>-6</sup>/°Cを用いた。

すべての供試体は 20±1°C、70±5%R.H.の恒温恒湿室内に保存し、水分の逸散を防ぐため、脱型直後にアルミ箔粘着テープで全面シールした。これによる質量減少は材齢 70日 で 0.03%以下であった。

### 3. 応力解析

#### 3.1 コンクリートの物性値

応力解析に用いたコンクリートの自己収縮ひずみ、コンクリートの温度及び弾性係数（材齢 28日、標準養生）は実測値を用いた。自己収縮ひずみの経時変化を図 1 に示す。拘束鉄筋の温度はコンクリートの温度と同一とした。拘束枠の温度は、拡張部と長さ方向中央の実測値を用い、その間では温度は線形分布すると仮定した。

コンクリートの弾性係数の発現と載荷時材齢を考慮したクリープ係数は、以下のように修正した。

まず、JCI 式の概要を示す。ただし、本解析の対象とした OP、SF に対応する修正式の根拠となったコンクリートの水結合比は 30%(OP)、23%(SF)、結合材は普通セメントのみ(OP)、早強セメント+10% シリカフューム(SF)である[3]。

弾性係数：

$$E(t) = E_{28} \times \exp \left\{ s_E \left[ 1 - \left( \frac{28 - a_E}{t - a_E} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad (1)$$

ここに、 $E(t)$  :有効材齢  $t$  における弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)

$E_{28}$  :標準養生材齢 28日における弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)

$s_E$  :セメントの種類の影響による係数で表 2 に示す

$a_E$  :凝結時間の影響による係数(日)で表 2 に示す

$t$  :MC 90 による有効材齢(日)。

クリープ係数；

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \times \beta_c(t - t_0) \quad (2)$$

ここに、 $\phi(t, t_0)$  :有効材齢  $t_0$  で載荷された有効材齢  $t$  日におけるクリープ係数

$\phi_0$  :終局クリープ係数で

$$\phi_0 = \phi_1 \times \left[ \frac{(a-1)}{(a-t_0^b)} \right] \quad (3)$$

$\beta_c(t - t_0)$  :クリープの進行速度を表す係数で

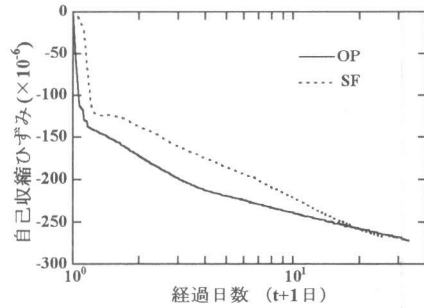


図1 自己収縮ひずみの経時変化

表 2 JCI 式の諸定数

定数	OP	SF
$\phi_1$	1.63	1.68
$a$	1.56	2.03
$b$	-0.34	-1.02
$c$	15.13	4.52
$d$	4.73	1.45
$s_E$	0.062	0.098
$a_E$	0.323	0.432

$$\beta_c(t-t_0) = \left[ \frac{(t-t_0)/t_1}{\beta_H + (t-t_0)/t_1} \right]^{0.3} \quad (4)$$

$\beta_H$ :クリープの進行速度を決める係数で

$$\beta_H = c \times t_0 - d \quad (5)$$

$t_0$ : 荷重時有効材齢 (日)

$t_1=1$  (日)

$\phi_1, a, b, c, d$ : 定数でこれらの値を表2に示す。

上述の JCI 式により得られるクリープ係数の終局値を示せば図2のようであり、OP の場合有効材齢 0.41 日、SF の場合 0.63 日より若い場合終局値は異常な値であることがわかる。しかし、最高温度はこれらの有効材齢より若いときに生じているため、温度上昇域の応力を評価できないことになる。この打込み後極初期の物性値は、通常のマスコングリートの場合応力にそれほど鋭敏に影響することはないと考えられるが、高強度コンクリートの場合温度の上昇速度とともにその発現速度が速いために、極若材齢から推定する必要がある。そこで、以下のように、JCI 式を修正、あるいは仮定して、任意の極若材齢における弾性係数とクリープ係数を定めた (以下、修正式)。

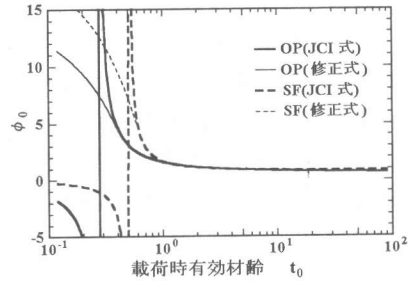


図2  $\phi_0$ と $t_0$ の関係

弾性係数 ;

$$t \leq a_E : E(t) = 1.00 \times 10^{-6} E_{28}$$

なお、本式は OP, SF の双方に適用できるとした。

クリープ係数 ;

$$\text{OP: } t_0 \leq 0.41 \text{ 日の時、 } \phi_0 = 14.32 - 25.14t_0$$

$$\text{SF: } t_0 \leq 0.63 \text{ 日の時、 } \phi_0 = 19.44 - 24.44t_0$$

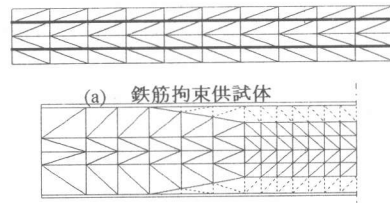
また、自己乾燥に関する  $\beta_H$  については、極初期では 0 と考えられるので

$$\beta_H \leq d/c : \beta_H = 1.00 \times 10^{-6}$$

とした。

### 3.2 解析方法

重ね合わせの原理に基づく step-by-step 法 [4] を用い、二次元 FEM で自己収縮応力の解析を行った。この方法によれば、各タイムインターバルの増分応力はクリープの進行による応力緩和を受けながら、最終ステップにおいて加算されることになる。要素分割図を図3に示す。



(b) 型枠拘束供試体

図3 要素分割

## 4. 実験及び解析結果

### 4.1 弾性係数及びクリープ係数

図4、5は、OP、SFそれぞれのコンクリートの、圧縮試験により求めた弾性係数の経時変化を JCI 式及び修正式により求めた値と比較して示したものである。修正式による計算値 (M) は、JCI 式による計算値 (J) と比べ、材齢の若い段階では、弾性係数の発現が速く、値も大きい。その結果、実測値にも近いことが認められる。これは、修正式の場合打込み後初期の温度上昇を考慮しているためである。しかし、最終的には、初期の温度の影響を考慮することの際は小さくなり、いずれも実測値と等しくなる。

図6、7には、鉄筋拘束供試体の見かけクリープ係数の経時変化について、実測値と計算値を比較して示している。見かけのクリープ係数は  $\phi = E(t)/E_e - 1$  によって求めた。ここで、 $E_e$  は実測値の場合、実測鉄筋ひずみから求めたコンクリートの拘束応力と、コンクリート中に埋め込んだひずみ計によって測定した拘束ひずみの比、計算値の場合は、載荷時材齢を18材齢設定し、これを用いて解析した各タイムステップの全応力と全拘束ひずみから求めた。 $E(t)$  は各ステップの計算値 (M) を用いた。計算値 (M) は実測値に比べ小さいが、これは拘束実験にも用いたコンクリートとクリープ実験に用いたコンクリートの若干の相違も原因の一つと考えられる。

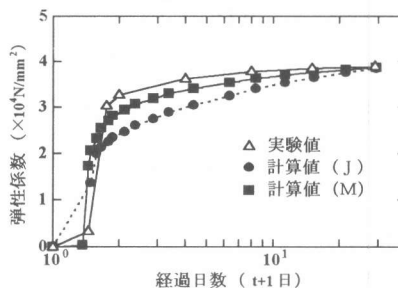


図4 弾性係数の経時変化 (OP)

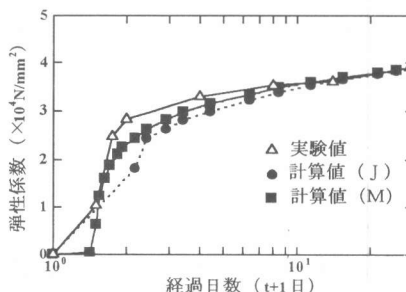


図5 弾性係数の経時変化 (SF)

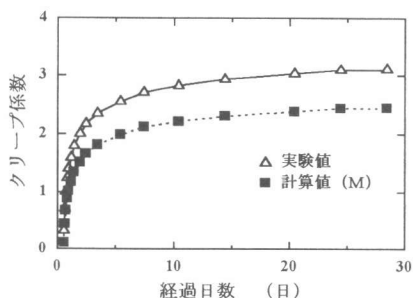


図6 クリープ係数の経時変化 (OP)

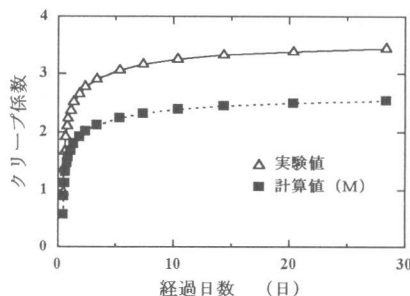


図7 クリープ係数の経時変化 (SF)

### 4.2 拘束応力

図8～11は、鉄筋拘束による場合と型枠拘束による場合の拘束応力の実験結果と解析結果を比較したものである。

JCI 式による解析値 (J) は、いずれの拘束の場合も、若材齢時の温度上昇を考慮できず、有効材齢が小さくなるために、弾性係数の計算値は小さく、クリープ係数の計算値は大きくなる。

その結果、比較的若い材齢の範囲では、拘束応力を過小評価する。しかし、経過日数の増大とともに解析値は実験値に近づいていく。これは長期になるに従い、温度の安定期間が卓越し、有効材齢の影響が小さくなるため、弾性係数及びクリープ係数の計算値と実験値との差は小さくなるためと考えられる。

解析値 (M) については、いずれの拘束の場合も、若材齢では、実験値とよく一致している。しかし、長期的には解析値は実測値より大きい。これは図6、7にみられるように解析で用いたクリープ係数が実測の見かけのクリープ係数より小さいことがその理由の一つにあげられる。

鉄筋拘束の場合、図8、9のように、SFより自己収縮の進行が速くまた大きい OP の方が初期拘束応力も速くまた大きく発現する傾向が見られる。

型枠拘束の場合では、型枠とコンクリートの温度が異なり、温度応力が生じるため、拘束応力は自己収縮応力と温度応力が加算されたものとなる。このため、鉄筋拘束の場合より型枠拘束の方が拘束応力が大きいという実験結果も解析で説明できる。

MC90 によって求めたクリープ係数を用いた一軸の拘束応力の解析結果[1]と比べ、本解析結果の方が精度が良いと思われる。

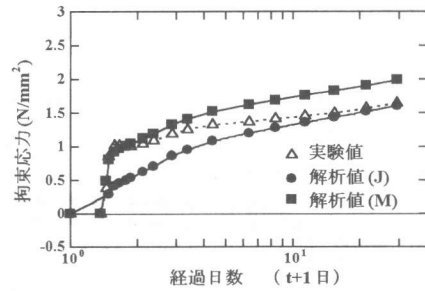


図8 拘束応力の経時変化 ( OP,鉄筋拘束)

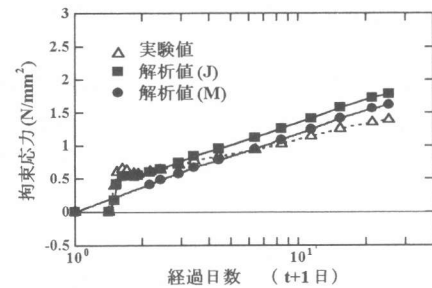


図9 拘束応力の経時変化 ( SF,鉄筋拘束)

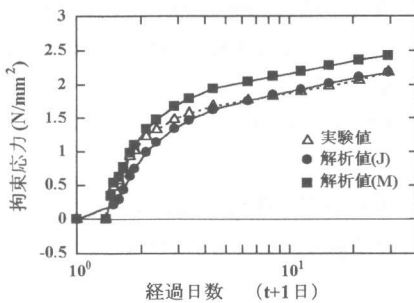


図10 拘束応力の経時変化 ( OP,型枠拘束)

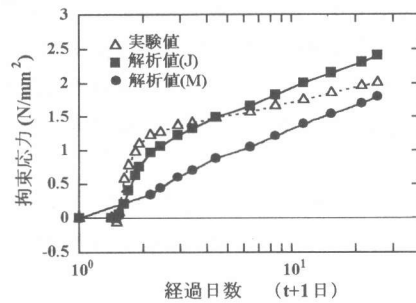


図11 拘束応力の経時変化 ( SF,型枠拘束)

### 4.3 温度応力

型枠拘束の場合の拘束応力と、鉄筋拘束の場合の拘束応力（自己収縮応力）の差が温度応力になり、これを図12、13に示す。

温度応力の解析値 (J) は、実験値よりかなり小さい。特に、SF の場合では、実測にみられる初期の圧縮応力を表現できない。この原因については、JCI 式の適用範囲外の若材齢の期間中に上昇した温度が低下し、0.41 日の型枠とコンクリートの温度差は 2.7℃と小さいためである。OP

の場合は0.63日で9.3℃の温度差があり、これによって圧縮応力が実測値より小さいながらも表現されている。

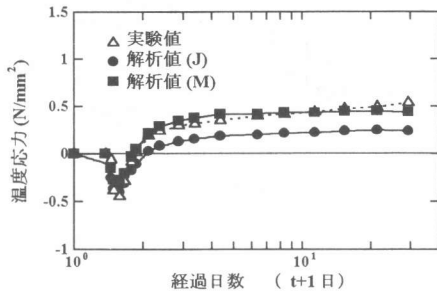


図12 温度応力の経時変化 ( OP,型枠拘束)

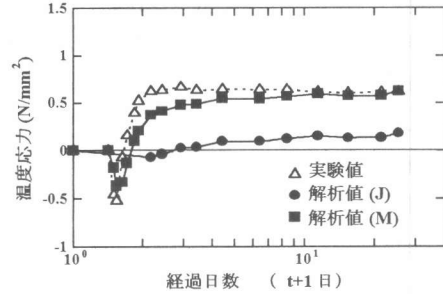


図13 温度応力の経時変化 ( SF,型枠拘束)

解析値 (J) と異なり、解析値 (M) は初期の圧縮応力、その後の引張応力と概ね温度応力の経時変化を予測できていると言える。温度応力は SF 及び OP の双方にみられるが、全拘束応力は初期に圧縮応力を示さない。これは自己収縮によるものと考えられ、解析 (M) によってほぼ説明できると言えよう。

以上示したように、高強度コンクリートの場合には極初期の温度の影響が高いために、特に温度応力と自己収縮応力が共に作用しそれらの比率が必要な場合は、打込み後初期の極若材齢からの弾性係数及びクリープ係数を推定することは重要と考えられる。

## 5.まとめ

以下に、本研究の範囲内で得られた結果を示す。

- (1) 既往のクリープの推定式を、極若材齢においても適用できるように、クリープ係数の終局値、進行速度を表す係数を修正した。
- (2) 修正式により、極若材齢で急激に生じる温度上昇の影響を考慮し、既往の式では過小評価した若材齢時の自己収縮応力を比較的精度良く予測できた。しかし、長期材齢においては過大評価した。これについてはクリープ係数の推定を含め今後の課題としたい。
- (3) 自己収縮応力と共に生じる温度応力を、修正式による物性値を用いれば、かなり高い精度で予測できることを示した。
- (4) 解析対象のコンクリートと物性値を求めたコンクリートの若干の配合の相違を考慮すれば、本修正式と重ね合わせに基づく本解析方法は自己収縮応力の予測方法として有用であると考えられる。

## [参考文献]

- [1] 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・コンクリート論文集、pp.478-483, 1996
- [2] 宮澤伸吾、大谷 博、今本啓一、佐藤良一：超高強度コンクリートの若材齢におけるクリープ係数、第 51 回土木学会学術講演会講演概要集第 5 部、pp.578-579,1996
- [3] 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.93-113, 1996,11
- [4] R.Sato, W.H.Dilger, I.Ujike.: Deformations and Thermal Stresses of Concrete Beam, Constructed in Two Stages, Proceedings of the International Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, RILEM, pp.313-320, 1994