

論文 自己収縮の温度依存性を考慮した高強度コンクリート柱部材の初期材齢時発生応力の解析

河野政典^{*1}・榎田佳寛^{*2}・上西 隆^{*1}・萩原伸治^{*3}

要旨：本研究では、100N/mm²級高強度コンクリートにおける自己収縮ひずみの温度依存性を把握するため、養生温度を要因とした実験的検討を行い、その結果に基づき自己収縮ひずみの温度依存性を考慮した実大鉄筋コンクリート柱部材の初期材齢時の発生応力を、Step-by-step 法を用いて解析的に検討した。実験および解析の結果、自己収縮ひずみは、養生温度に依存し養生温度が高いほど大きいことがわかり、温度依存性を適切に評価した自己収縮ひずみを用いて、精度よく自己収縮応力を求められた。また、温度応力を累加することで、柱部材における発生応力も解析的に捉えることができた。

キーワード：高強度コンクリート、自己収縮の温度依存性、発生応力、Step-by-step 法

1. はじめに

近年、コンクリートの高強度化の研究開発が精力的に行われており、現在では100N/mm²級コンクリートの実用化が検討されている。しかし、高強度コンクリートは、水和発熱による温度上昇が大きいこと、水和に伴う自己収縮が大きいことから、初期材齢から温度ひずみと自己収縮ひずみの拘束による複合応力が発生し、構造部材のひび割れが危惧されている¹⁾。

ひび割れの発生防止を検討する上では、初期材齢における発生応力の予測が必要となってくる。温度ひずみによる発生応力については解析可能な状況である²⁾。しかし、自己収縮については近年になり研究され始めている³⁾が、自己収縮の温度依存性については明らかにされていない。実大の柱部材では内部温度上昇が大きいいため、発生応力の予測精度を向上させるには自己収縮の温度依存性を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、100N/mm²級高強度コンクリートにおける自己収縮ひずみの温度依存性について把握するため、養生温度を要因とした実験的検討を行った。また、自己収縮ひずみの温度依存性を考慮した実大鉄筋コンクリート柱

部材の初期材齢時における発生応力を解析的に検討した。

2. 自己収縮の温度依存性に関する実験

2.1 実験概要

(1) 実験要因と水準

養生温度を実験要因とし、水準は20℃、40℃、60℃の3水準とした。なお、練り上がり温度はいずれも20℃とした。

(2) 使用材料と調査

使用材料を表-1に、コンクリートの調査を表-2に示す。水結合材比は22%とし、シリカフェームはセメント質量に対し10%を内割りで置換した。練り上がり時の目標値は、スランプロー60±10cm、空気量2±1%とした。

(3) 実験方法

コンクリートの自己収縮ひずみは、JCI 超流動コンクリート研究委員会報告書Ⅱ「(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法」に準拠し、100×100×400mmの角柱試験体を用いて測温機能付き埋込み型ひずみ計で、温度も同時に測定した。試験体はコンクリート打設後、水分の逸散および吸水がないように封かん状態とし、

*1 (株) 奥村組 技術研究所 建築研究室 (正会員)

*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)

3時間 20℃養生して、その後所定の温度で 28 日間養生した。なお、試験体名を養生温度別に T20, T40, T60 と称す。

凝結時間は、ウエットスクリーニングモルタルを上記と同じ養生を行いプロクタ貫入抵抗試験により測定した。

2.2 実験結果

自己収縮ひずみの測定結果を図-1 に示す。養生温度の違いについて検討するため、材齢は、CEB-FIP MC90 の式 (1) ³⁾ を用いて有効材齢で表した。自己収縮ひずみは、凝結の始発時のひずみをゼロ点とした。凝結始発の有効材齢は、試験体 T20 で 0.38 日, T40 で 0.35 日, T60 で 0.36 日であり、ほぼ同材齢であった。線膨張係数は、材齢 91 日後に T20 試験体を用いて、短時間に養生温度を変化させ、その時のひずみと温度の関係から求めた $11.5 \times 10^{-6}/\text{℃}$ を用いた。

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

ここに、 t : 有効材齢 (日)
 Δt_i : 温度が T (℃) である期間の日数
 $T_0 = 1 \text{℃}$

初期材齢における自己収縮ひずみとコンクリート温度を図-2 に示す。自己収縮は、ごく初期材齢においては、養生温度に関わらずひずみの発生量はほぼ一致していた。これは、有効材齢 0.4 日までは、いずれの試験体も温度上昇過程にあったためと考えられる。初期の温度上昇過程ではひずみの発生速度は大きく、その速度は温度上昇が緩やかになるまで維持されている。T60 では温度の上昇期間が他の試験体に比べ長く、そのため、水和反応もより活発であったため、初期のひずみ量が大きかったと考えられる。図-1 に示したように、その後のひずみの増加も、養生温度が高いほど大きく、有効材齢 50 日におけるひずみは、T60 は T20 の約 1.7 倍、T40 は T20 の約 1.4 倍であり、自己収縮ひずみが温度に依存していることがわかった。

2.3 自己収縮ひずみの予測

自己収縮ひずみの予測式としては、式 (2) に示す田澤宮澤式 ³⁾ が提案されている。

表-1 使用材料

セメント C	高比重・ライト系低熱セメント 密度: 3.20, ブレーン値: 4120cm ² /g 組成化合物: C ₂ S=35%, C ₃ S=46%, C ₄ A=3%
細骨材 S	鬼怒川産川砂 表乾密度: 2.58, 吸水率: 2.64%
粗骨材 G	岩瀬産硬質砂岩砕石 (最大骨材寸法 20mm) 表乾密度: 2.64, 吸水率: 0.734%, 実積率: 63.5%
シリカフューム SF	スラータイプ [®] のシリカフューム 濃度: 50%, 密度: 1.39 スラー中のシリカフューム成分 密度: 2.20, ブレーン値: 18.5m ² /g, SiO ₂ : 93.4%
混和剤 add	ポリカルボキシル系高性能 AE 減水剤 密度: 1.045

表-2 コンクリートの調合

W/B (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
		W	C	SF	S	G
22	38	160	655	73	569	956

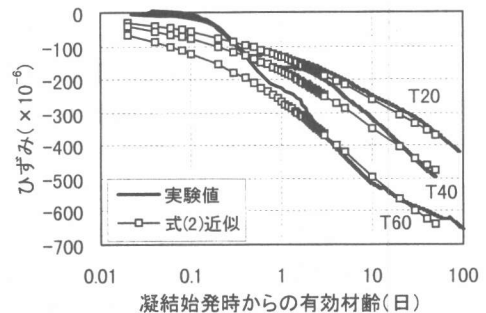


図-1 自己収縮測定結果と式 (2) による近似

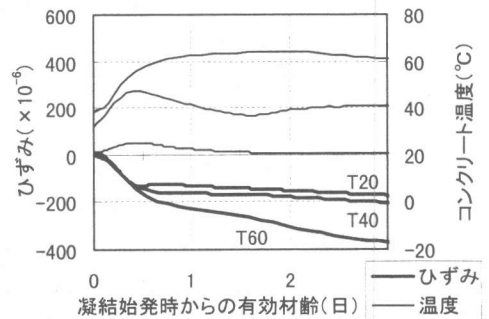


図-2 初期材齢の自己収縮ひずみと温度

$$\varepsilon_{as} = \varepsilon_{\infty} \{ 1 - \exp(-A \cdot t^B) \} \quad (2)$$

ここに、 ε_{as} : 自己収縮ひずみ
 ε_{∞} : 自己収縮ひずみの終局値
 t : 凝結始発後からの有効材齢 (日)
 A, B : 定数

養生温度を考慮した自己収縮ひずみを予測するため、各養生温度における自己収縮ひずみと

有効材齢の関係を式(2)を用いて近似した。式(2)を用いて近似した結果を図-1に、各養生温度における ϵ_{∞} 、および係数A、Bの値を表-3に示す。式(2)を用いておおよそ自己収縮ひずみを表すことができるものの、ごく初期材齢におけるひずみの発生過程は実験値とやや異なる。本研究では、ごく初期材齢の自己収縮ひずみによる応力について検討するため、ここでは式(3)を用いて実験値を近似し、初期材齢における実験値との適合性の向上を図った。

$$\epsilon_{as} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot t')} \cdot \epsilon_{\infty} \cdot [1 - \exp(-A \cdot t'^B)] \quad (3)$$

ここに、 α, β : 定数

式(3)を用いて近似した結果を図-3に、各養生温度における係数 α 、 β の値を表-3に示す。式(3)によって初期材齢からのひずみの発生過程を適切に表現することができる。

今回の調合および温度範囲においては、温度との関係式は、 ϵ_{∞} は式(4)、Aは式(5)、 β は式(6)で表され、Bおよび α は養生温度に関わらずそれぞれ0.4、19と一定値となった。温度ごとの係数の値を式(3)に代入すれば養生温度に応じた自己収縮ひずみを求めることができる。

$$\epsilon_{\infty} = -81.1 \cdot (T+10)^{0.506} \quad (4)$$

$$A = 0.0015 \cdot (T+10) + 0.332 \quad (5)$$

$$\beta = -0.145 \cdot (T+10) + 20.85 \quad (6)$$

ここに、T : 養生温度

3. 柱部材の発生応力の検討

3.1 解析対象柱

解析の対象とした柱部材の断面形状を図-4に示す。断面寸法を1.0m×1.0m、高さ3.0mとし、D41の主筋を24本配した。コンクリートの水結合材比は22%とし、使用材料、調合は表-1、2に示すものと同様である。

コンクリート温度と鉄筋ひずみの計測を、図-4に示す位置で行った。コンクリート温度の測定結果を図-5に示す。試験体の温度は、練上がり後約18.5時間で最高温度に達し、その後、

表-3 近似式の係数

	養生温度	ϵ_{∞}	A	B	α	β
T20	20℃	-455	0.38	0.4	19	16.4
T40	40℃	-580	0.40	0.4	19	13.8
T60	60℃	-700	0.44	0.4	19	10.6

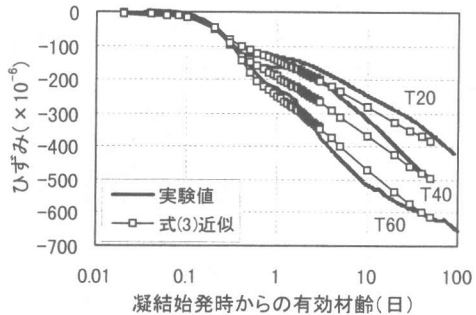


図-3 自己収縮測定結果と式(3)による近似

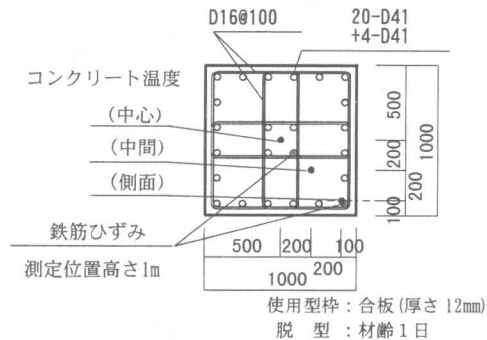


図-4 柱部材の断面形状

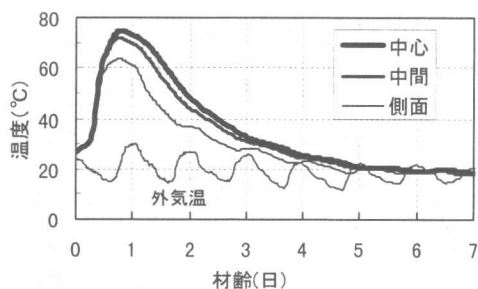


図-5 コンクリート温度の測定結果

徐々に温度が降下し、材齢5日目には外気温と同程度となった。

3.2 解析方法

柱部材に生じる応力の解析には、クリープの重ね合わせ原理に基づいた、Step-by-step法を用いた。応力算出式を式(7)に示す。

$$\sigma(t_{i+1/2}) = \frac{1}{J(t_{i+1/2}, t_i)} \{ \varepsilon_c(t_{i+1/2}) - \varepsilon_{ce}(t_{i-1/2}) - \varepsilon_{ct}(t_{i+1/2}) \}$$

$$J(t_{i+1/2}, t_i) = \frac{1}{E(t_i)} + \frac{\phi(t_{i+1/2}, t_i)}{E_{28}} \quad (7)$$

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

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

- ここに、 $\sigma(t_{i+1/2})$: ステップ $t_{i+1/2}$ での
コンクリートの応力 (N/mm²)
 $\varepsilon_c(t_{i+1/2})$: ステップ $t_{i+1/2}$ でのコンクリートの
実ひずみ (部材に発生する
全てのひずみ)
 $\varepsilon_{ct}(t_{i+1/2})$: ステップ $t_{i+1/2}$ でのコンクリートの
自由ひずみ
 $\phi(t_{i+1/2}, t_i)$: ステップ t_i で荷重された
ステップ $t_{i+1/2}$ でのクリープ係数
 $E(t_i)$: ステップ t_i でのコンクリートの
ヤング係数 (N/mm²)
 E_{28} : 標準養生材齢 28 日のコンクリート
のヤング係数 (= 47.5kN/mm²)

鉄筋による拘束応力の解析は、柱部材を一軸モデルとして、同一断面においては、主筋とコンクリートの力が釣り合い、かつ、両者のひずみが同値であるという条件 (式 (8)) に基づいて行った。

$$A_c \cdot J(t_{i+1/2}, t_i) \{ \varepsilon_c(t_{i+1/2}) - \varepsilon_{ce}(t_{i-1/2}) - \varepsilon_{ct}(t_{i+1/2}) \} \\ + A_s \cdot E_s \cdot \{ \varepsilon_s(t_{i+1/2}) - \varepsilon_{sT}(t_{i+1/2}) \} = 0 \quad (8)$$

$$\varepsilon_c(t_{i+1/2}) = \varepsilon_s(t_{i+1/2})$$

- ここに、 A_c : コンクリートの断面積 (= 0.968m²)
 A_s : 主筋の全断面積 (= 0.032m²)
 E_s : 主筋のヤング係数 (= 190kN/mm²)
 $\varepsilon_s(t_{i+1/2})$: ステップ $t_{i+1/2}$ での主筋の実ひずみ
 $\varepsilon_{sT}(t_{i+1/2})$: ステップ $t_{i+1/2}$ での主筋の温度ひずみ

コンクリートの自由ひずみ (ε_{ct}) には、自己収縮ひずみと温度ひずみを足し合わせたものを用いた。コンクリートと主筋の温度は実測値を用いた。部材内の温度差により生じる温度応力は、コンクリートの実ひずみ (ε_c : 部材に発生する全てのひずみ) を 0 とし、コンクリートの自由ひずみ (ε_{ct}) に内部拘束による温度ひずみを用いて解析した。

3.3 コンクリートの特性値と評価式

応力解析に用いるコンクリートの自己収縮ひずみ、クリープ係数、ヤング係数、および温度

差による内部拘束ひずみの算出方法を以下に示す。線膨張係数は、 $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を用いた。また、本解析でも、各コンクリートの特性値は式 (1) を用いて有効材齢で表した。

(1) 温度依存性を考慮した自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみは、柱部材のコンクリート温度に応じて式 (3) および (4) (5) (6) から算出するが、温度は随時変動するため、式 (9) を用いて温度変化に対応した自己収縮ひずみを求めた。

$$\varepsilon_{as} = \sum_{i=1}^n \{ \varepsilon_{as}(t_i, T^*) - \varepsilon_{as}(t_{i-1}, T^*) \}$$

$$T^* = (T(t_i) + T(t_{i-1})) / 2 \quad (9)$$

ここに、 $\varepsilon_{as}(t_i, T^*)$: ステップ t_i のコンクリート温度 T^* におけるひずみ

図-6 に式 (9) から求めた、柱部材コンクリート温度に応じた自己収縮ひずみと、温度依存性を考慮していない 20°C 養生の自己収縮ひずみを示す。

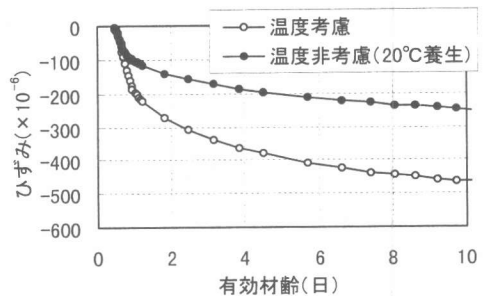


図-6 自己収縮ひずみの解析結果

(2) コンクリートのヤング係数

ヤング係数は、柱試験体の温度履歴に追従させて養生した供試体および、標準水中養生供試体の強度試験から得られたヤング係数と有効材齢との関係から、CEB-FIP MC90 式を修正し提案されている式 (10)³⁾ を用いて求めた。ヤング係数と有効材齢の関係を図-7 に示す。

$$E(t) = E_{28} \cdot \exp \left\{ S_0 \left[1 - \left(\frac{28-t_f}{t-t_f} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad (10)$$

- ここに、 $E(t)$: 有効材齢 t でのコンクリートのヤング係数 (N/mm²)
 E_{28} : 標準養生材齢 28 日のコンクリートのヤング係数 (= 47.5kN/mm²)
 S_0 : ヤング係数の発現の速さを表す係数 (= 0.095)
 t : 有効材齢 (日)
 t_f : 凝結の始発時間 (= 0.41 日)

(3) クリープ係数

若材齢から生じる引張応力を解析するには、若材齢時からの引張クリープ挙動を把握する必要がある。そのため筆者らは、文献4)で、100N/mm²級コンクリートの封かん状態における引張クリープ試験を実施し、単位クリープひずみの評価式(11)を得た。クリープ係数は、式(11)および式(12)から求めた。

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon_{cr}^{\infty} \cdot [1 - \exp[-\alpha \cdot (t - t_0)^{\beta}]]$$

$$\varepsilon_{cr}^{\infty} = -142.8 \cdot R_e + 142.6 \quad (11)$$

($\varepsilon_{cr}^{\infty} > 0$ とする)

$$R_e = E(t_0) / E_{28}$$

$$\phi(t, t_0) = \varepsilon_{cr} / \varepsilon_e \quad (12)$$

$$\varepsilon_e = 1 / E_{28}$$

ここに、 ε_{cr} : 単位クリープひずみ ($\times 10^{-6} / N/mm^2$)
 $\varepsilon_{cr}^{\infty}$: 終局の単位クリープひずみ ($\times 10^{-6} / N/mm^2$)
 t : 着目している有効材齢(日)
 t_0 : 荷重開始有効材齢(日)
 α, β : クリープ進行速度を表す定数
 $\alpha = 0.394, \beta = 0.581$
 $E(t_0)$: 荷重開始有効材齢 t_0 でのコンクリートのヤング係数 (N/mm^2)
 $\phi(t, t_0)$: 有効材齢 t_0 で荷重された有効材齢 t でのクリープ係数
 ε_e : 単位弾性ひずみ ($\times 10^{-6} / N/mm^2$)

(4) 内部拘束による温度ひずみ

内部拘束による温度ひずみは、柱部材内における温度分布を柱中心軸に対して対称形の2次曲線と仮定して、Compensation Line(中立軸)を求め、算出した。2次曲線は、コンクリート温度の計測点の中心、中間、側面の3点の近似式として求めた。

3.4 解析結果

(1) 自由ひずみ

自己収縮ひずみと温度ひずみを足し合わせて求めたコンクリートの自由ひずみ(ε_{ct})を図8に示す。自由ひずみは、初期材齢においては温度上昇が大きいため膨張ひずみとなる。その後、材齢の経過に伴い自己収縮ひずみが増加し、温度も下降するため、自由ひずみは膨張から収縮ひずみとなる。コンクリート温度が外気温と同程度となる材齢5日では、自己収縮の温度依存性を考慮した場合、約 600×10^{-6} の収縮ひずみとなった。温度依存性を考慮しない場合と、

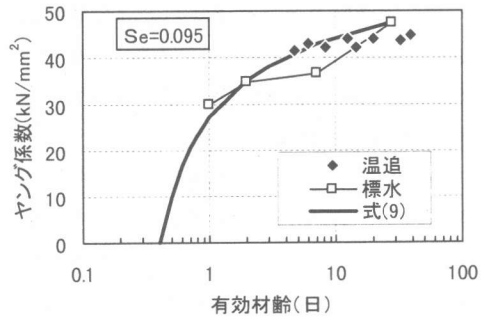


図-7 ヤング係数と有効材齢の関係

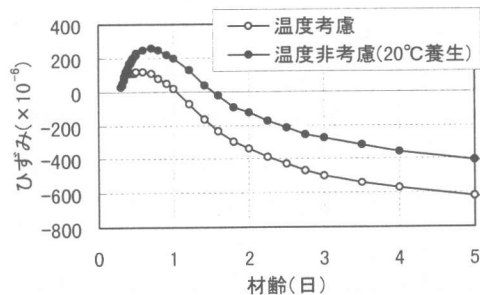


図-8 自由ひずみの解析結果

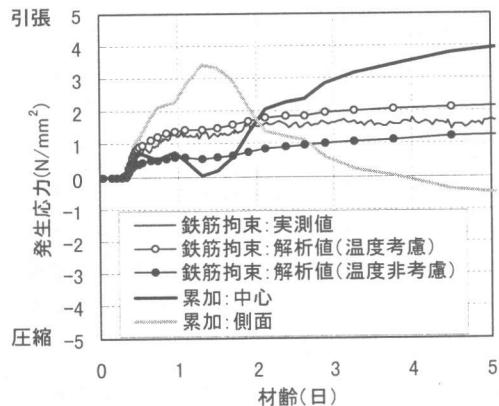


図-9 発生応力の解析結果

考慮した場合とのひずみ差は、材齢0.7日程度で既に約 150×10^{-6} 、材齢5日ではその差は約 200×10^{-6} 生じる。

(2) 鉄筋拘束応力

自己収縮ひずみが鉄筋により拘束され生じる鉄筋拘束応力の解析結果を図9に示す。図には、柱部材の鉄筋ひずみの計測結果から算出した実測応力も併せて示す。実測応力は、鉄筋の実測ひずみから鉄筋の温度ひずみを差し引き、

そのひずみに鉄筋のヤング係数および全鉄筋断面を乗じ、コンクリートの断面積で除し求めた。ここで、鉄筋の線膨張係数は $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、ヤング係数は $190\text{kN}/\text{mm}^2$ を用いた。

自己収縮の温度依存性を考慮しなかった場合の解析値は、実測値よりも小さく危険側の評価となった。温度依存性を考慮した場合の解析値は実測値とおおむね一致し、温度依存性を考慮した自己収縮の推定方法を含めた、解析方法の妥当性が確認できたと考えられる。

(3) 温度応力の累加

鉄筋拘束応力に内部拘束による温度応力を累加した解析結果を図-9に示す。解析位置は温度測定を行った、中心および側面とした。鉄筋拘束応力には自己収縮の温度依存性を考慮した解析値を用いた。

温度応力を累加した中心部の応力は、温度上昇時には、鉄筋による拘束応力と温度応力が相殺され、内部温度差が最大となる材齢 1.3 日後での発生応力は小さい。温度下降時には、温度応力も引張側となり、かつ、材齢の進行に伴いクリープひずみも小さくなるため、引張応力が徐々に大きくなっている。

側面の引張応力は、内部温度差が最大となる材齢 1.3 日で最も大きく約 $3.4\text{N}/\text{mm}^2$ であった。鉄筋による拘束応力は、自己収縮ひずみが拘束されて生じる応力であり、それは引張応力の 41% 程度を占めていた。

文献 4) の引張クリープ試験における強度試験結果において、圧縮強度と引張強度は、式 (13) の関係があった。

$$F_t = \gamma \cdot F_c^{0.5} \quad (13)$$

ここに、 F_t : 引張強度 (N/mm^2)

F_c : 圧縮強度 (N/mm^2)

γ : 定数 (= 0.618)

側面が最大引張応力に至った時の引張強度は、式 (12) から約 $6.1\text{N}/\text{mm}^2$ であり、最大引張応力は引張強度の 56% 程度であった。高ピーライト系低熱セメントの使用により、コンクリートの発熱や自己収縮ひずみを抑制できたと考えられ、柱部材にひび割れの発生はみられなかったが、

初期材齢においては、温度内部温度差が最も大きくなる時点でひび割れの発生の可能性が高いことが示された。

4. まとめ

今回の実験および解析で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) $100\text{N}/\text{mm}^2$ 級コンクリートの自己収縮ひずみは養生温度に依存し、養生温度が高いほど自己収縮ひずみも大きい。
- (2) 今回用いた温度依存性を考慮した自己収縮ひずみの推定式で、ごく初期材齢からの発生ひずみを適切に表すことができた。
- (3) 実大柱部材では初期材齢においてコンクリートの内部温度が上昇するため、自己収縮ひずみの温度依存性を考慮せずに応力解析を行った場合、鉄筋により拘束され生じる自己収縮応力を危険側に評価してしまう。
- (4) 温度依存性を適切に評価した自己収縮ひずみを用いた場合、精度よく自己収縮応力を求めることができる。
- (5) 初期材齢において鉄筋コンクリート柱部材の側面に生じる引張応力は、内部温度差が最大となる材齢 1.3 日で最も大きく、約 $3.4\text{N}/\text{mm}^2$ であった。

謝辞

本研究の遂行にあたって、多大なご協力をいただきました宇都宮大学の中村成春助手、知久馬崇志氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 今本啓一ほか：超高強度鉄筋コンクリート架構試験体に生じたひび割れに関する一検討，日本建築学会構造系論文集，No. 495，pp. 1~8，1997. 5
- 2) 起橋孝徳ほか：建築物地中梁の三次元 FEM 温度応力解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19，No. 1，pp. 1387-1392，1997. 6
- 3) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，1996. 11
- 4) 萩原伸治ほか：高強度コンクリートの若材齢における力学特性と圧縮および引張クリープ挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 11，No. 1，pp. 39-50，2000. 1