# 論文 RC プリズムにおける自己収縮による微細ひびわれ発生と 収縮応力挙動

丸山 一平\*1・亀田 昭一\*2・鈴木 雅博\*3・佐藤 良一\*4

要旨:近年,高強度コンクリートの実用化が進んでいるが,従来から指摘されている自己収縮によるひび割れ発生危険性や,自己収縮によって生じる応力・ひび割れが及ぼす構造性能 への影響に関しては解明途上にある。本研究では,水粉体比 0.15 の超高強度コンクリートを RC 構造物に利用することを想定し,鉄筋埋設による拘束試験を行った。その結果,自己収縮に起因して鉄筋近傍に微細なひびわれが生じることを実験的に明らかにした。また,この ひび割れを応力解析上考慮するためのモデルを提案し,実験値との比較によって検証を行った。 キーワード:超部鎖ョンクリート,拘束応力,微知び嗜れ,時間依存増幾知び害れモデル,線形クリーブ則

#### 1. はじめに

近年,高性能 AE 減水剤の開発,性能向上にと もなって高強度コンクリートの実用化が進み, 実強度 150N/mm<sup>2</sup> 級のコンクリートも実用化さ れている。一方で,高強度コンクリートに固有 な現象である自己収縮に起因する応力やひびわ れが構造部材の性能に及ぼす影響に関する検討 は解明の途上にある<sup>1)</sup>。

本研究では、高強度コンクリートの自己収縮 応力が線形クリープ解析によって予測可能であ るという既往の知見と<sup>2)</sup>、高強度コンクリートに おいて自己収縮が大きい場合に、鉄筋拘束試験 による自己収縮応力が線形クリープ則に基づく 算定結果と大きく異なる例がある点<sup>3)</sup>に着目し、 1)自己収縮に起因する微細ひび割れの存在を確 認するために、鉄筋埋設による自己変形応力試 験を実施し、2)若材齢に生じるコンクリートの 微細ひび割れを考慮した応力解析手法の提案を 行う。

#### 2. 実験

#### 2.1 使用材料

実験に使用した材料の物性を表-1に示す。本 実験では普通ポルトランドセメント(OPC)及び 低熱ポルトランドセメント(LPC)にシリカフュ ームを混和した結合材を用い,それぞれ水粉体 比 0.15 の超高強度コンクリートとした。普通超 高強度コンクリート(SFNC)は,OPC にシリカフ ューム 1 を 10%置換したもの,超高強度膨張コ ンクリート(SFLCEX)は LPC にシリカフューム 2 を 9.7%置換したものとした。SFLCEX に関して は、収縮量の低減を目的として、市販の膨張材 および収縮低減剤を混和した。練り混ぜは 2 軸 撹拌ミキサーによって行い、どちらも、スラン プフローで 60±5cm、空気量は 2%以下となるよ うにした。

#### 2.2 実験方法

拘束鉄筋周囲のコンクリートにおける微細ひ び割れの有無を検証するために,図-1(1)に示 される供試体によって実験を行った。供試体寸 法は10×10×110cm である。D32 鉄筋のリブに 溝(4mm×5mm,断面欠損後の鉄筋比 8.1%)を切 り,そこに無水エタノールに油性着色料を混和 したものを打設後10時間後から水頭差を利用し

\*1 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 助教授 博(工) (正会員)

\*2 成田国際空港株式会社 工修 (正会員)

\*3 ㈱ピーエス三菱 技術本部技術研究所材工研グループ グループリーダー 工修 (正会員)

\*4 広島大学大学院 工学研究科社会環境学専攻 教授 工博 (正会員)

て流し込み,その状態を材齢9日 まで保持した。その後材齢9日に おいて供試体を割裂し,鉄筋近傍 のコンクリートを観察した。セメ ントに対してエタノールは不活 性であることから,自己収縮によ って発生した鉄筋周囲の微細な ひび割れを再水和によって塞ぐ 可能性が少ないこと,また,鉄筋 周囲に生じた微細ひび割れに,負 圧によってエタノールが侵入し, それにともなって着色されるこ とが期待される。

また、 $\phi 10 \times 20$ cm の円柱供試 体により、圧縮強度およびヤング 率、 $\phi 15 \times 20$ cm の供試体によっ て割裂引張強度、 $\phi 10 \times 40$ cm 供 試体中で埋め込み型ひずみ計(弾 性係数:約 40N/mm<sup>2</sup>)を用いて自

己収縮量を測定した。また、10×10×120cmの 供試体に鉄筋を埋設し、長手方向中央部の鉄筋 ひずみから鉄筋応力を算出し、力の釣り合いか らコンクリートの自己変形応力を算出した(図-1(2))。その際、同一寸法のダミー供試体を作製 し、温度補償用として長さ2cmの鉄筋にゲージ を貼り、耐水コーティングとブチルゴムによる 保護を行い埋設した。その鉄筋ひずみを温度ひ ずみ分として温度補正を行った。

供試体数は、圧縮強度、ヤング率、及び割裂 供試体が各材齢3体、自己収縮試験が1体、自 己変形応力供試体は各鉄筋比で2体であり、本 研究では物性値として各試験における平均値を 採用した。養生条件は20℃一定とし、すべての 供試体を材齢1日までは、型枠にポリエステル フィルムを用いて封かんし、材齢1日で脱型し、 その後はアルミテープにより封かんした。

## 2.3 実験結果

圧縮強度は材齢 28 日において SFNC が 137N/mm<sup>2</sup>, SFLCEX が 124N/mm<sup>2</sup>であった。

ヤング率,割裂引張強度,自己収縮,自己変

表-1 実験に用いた材料特性

種類	C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> S C <sub>2</sub> S		C₄AF	Blaine	密度				
	(%)	(%)	(%)	(%)	(cm <sup>2</sup> /g)	(g/cm <sup>3</sup> )				
OPC	50.0	24.1	9.5	8.9	3330.0	3.16				
LPC	30.9	48.4	4.1	9.2	3540.0	3.22				
シリカフューム1	密度: 2.20g/cm <sup>3</sup> ,比表面積: 20.0m <sup>2</sup> /g, SiO2: 94%									
シリカフューム2	密度: 2.23g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 18.6m <sup>2</sup> /g, SiO <sub>2</sub> : 95%									
細骨材	表乾密度: 2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 2.53%, 粗粒率: 2.53, 実績率: 54%									
粗骨材	最大寸法: 20mm, 表乾密度: 2.94g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.38%, 粗粒率6.19, 実績率: 59.9%									
膨張材	エトリンガイトー石灰複合系低添加型膨張材									
収縮低減剤	低級アルコールアルキレンオキシド付加物収縮低減剤									
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤									

表-2 実験に用いた調合

	W/B	s/a	W	С	S	G	SF	EX	SR	SP	D
記号	(%)	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )						% <sub>cmwt</sub>	% <sub>cmwt</sub>	
SFNC	15	31	155	930	393	988	103 (s1)		Ι	2.6	0.6
SFLCEX	15	31	149	840	398	1000	90(s2)	40	6	2.6	0.6

sl:シリカフューム 1, s2: シリカフューム 2, SFNC:OPC, SFLCEX:LPC W:液体全体量(SR 除く), SF:シリカヒューム, EX:膨張材, SR:収縮低減剤, SP:高 性能 AE 減水剤, D:消泡剤



形応力試験(D32 の場合)に関して $図 - 2 \sim 5$ に 示す。収縮,硬化,応力発現のすべてにおいて  $C_3S$ 量の多い SFNC コンクリートの発現が速い が,ヤング率,割裂引張強度に関しては材齢 28



日において同程度の値となった。

自己変形応力試験結果では、低熱セメント・ 膨張材・自己収縮低減剤の併用によって拘束条 件下でコンクリートに圧縮応力を付与すること ができた。この原理は、マスコンの温度収縮の 考え方と同様で、コンクリートの硬化過程にお いてヤング率の低い時に収縮が、硬化してから 膨脹を起こすために、最終的な応力収支として 圧縮力が付与できたものと説明される。SFNCの 場合には、材齢 28 日において約 3N/mm<sup>2</sup>の応力 がコンクリートに生じた。また、鉄筋に応力が 生じ始める材齢は、SFNC が 8.5 時間、SFLCEX が 10.0 時間であり、これらが硬化原点であると 考えられる。

図-6に微細ひび割れ発生検証実験の結果を 示す。上図が SFNC,下図が SFLCEX の結果で ある。上図に示されるように SFNC 供試体には 約5mm程度の深さまで着色が確認できた部分が あり,全域では無いが特に定着部分に多く確認 された。一方,収縮の少ない SFLCEX にはまっ たくこのような着色は確認することができなか



図-5 自己変形応力の比較(D32)

った。本実験では, 顔料中にある色材用ポリマ 一分子の大きさが微細ひび割れ確認範囲の閾値 と考えられるが, 自己収縮の大きなコンクリー トでは, 鉄筋周囲のコンクリートに微細ひびわ れが発生し得ることが明らかになった。

また,SFLCEX 供試体にひびわれが確認され なかったことで,1)溝切りによって生成された鉄 筋の鋭角部でのひびわれは本実験に大きな影響 を及ぼさないこと,2) 材齢9日の割裂時に生じ るコンクリート中のひび割れと水和進行中に生 じたひび割れが明確に区別できたことがあきら かとなった。また,水和の進行にともなってコ ンクリート内部が乾燥するため,その乾燥によ って着色アルコールが浸透する可能性も懸念さ れたが,SLNC 供試体では不均質にコンクリート 中に着色が行われていることと SFLCEX の方で もまったく浸透が見られないことから,内部の 自己乾燥による浸透は存在したとしても,本実 験では着色範囲に大きな影響を及ぼしていない ことがわかる。





## 図-6 ひび割れ検証実験結果 (上:SFNC 下:SFLCEX)

#### 3. 解析

本章では,前章で明らかになった若材齢時に 発生する微細ひび割れが応力挙動にどのような 影響を及ぼすかを定量的に議論することを目的 として,時間依存する微細ひび割れモデルを提 案し検証することとする。

## 3.1 線形クリープ解析

本解析では,筆者らが既に提案している,線 形クリープ則に基づいたクリープ変形,自己収 縮,温度変形を等価接点力として考える増分型3 次元有限要素法を用いる<sup>2)</sup>。コンクリート材料は ひび割れが入らないことを想定して等方材料を 仮定しており,ポアソン比はクリープ変形した 後も同一の値を適用できるものと仮定している。

クリープひずみは材齢28日のヤング率に対応 したクリープ係数を MC90 の修正式<sup>2)</sup>によって 表現した以下の式を採用した。

$$\phi(t,t_0) = \phi_0 \left( \frac{(t-t_0)/t_1}{\beta_H + (t-t_0)/t_1} \right)^{0.3}$$
(1)



図-7 解析に用いたクリープ係数

$$b_0 = 5.31 \left( E_c(t_0) / E_{c,28} - 1.0 \right)^2 + 1.11$$
 (2)

$$\begin{cases} 0 \le E_c(t_0) / E_{c,28} \le 0.346 \\ \beta_H = 0.000001 \\ 0.346 \le E_c(t_0) / E_{c,28} \le 1.0 \\ \beta_H = 40.5 (E_c(t_0) / E_{c,28} - 0.346) + 0.485 \end{cases}$$
(3)

ここで、 $\phi(t,t_0)$ :クリープ係数、 $\phi_i$ :クリープ係数の終局値、 $\beta_H$ :載荷材齢の影響を考慮するための係数、t:有効材齢、 $t_0$ :載荷時有効材齢、 $t_1$ :1日、 $E_c(t_0)/E_{c,28}$ :載荷時材齢のヤング率と材齢28日のヤング率の比をあらわす。

式(1)~(3)によって算出される載荷材齢の異な るクリープ係数の例を図-7に示す。これらの 値は,筆者らの行った水セメント比 0.3~0.23 の コンクリートの圧縮クリープ実験結果に基づき 定めたものであるため<sup>2)</sup>,本研究で用いたコンク リート(W/B=0.15)に対しては,大きいクリープ係 数を設定した可能性がある。この影響度合いに 関しては後述する。また,ヤング率の進展に関 しては,図-2に示した実験値を用いることと した。本解析では,圧縮クリープと引張クリー プに同一のクリープ係数が適用できると仮定し た。有限要素法では,8接点アイソパラメトリッ ク要素を用い,自己変形応力供試体に関しては 8040 要素,8845 接点でモデル化した。

### 3.2 ひび割れを有するコンクリートの解析

本解析では、コンクリートのひび割れに関し て分布ひび割れモデル<sup>4</sup>を採用した。引張軟化に 関しては、1/4 モデル<sup>5)</sup>を採用し、ひび割れ直交 方向のせん断剛性は健全なものに対して 0.25 倍をとるものとした。

破壊エネルギーに関しては, 淵脇らの の行った W/B=0.23 のコンクリートの 破壊エネルギー値を用いた。それらの 値は材齢 1 日で 182N/m(圧縮強度 49.3N/mm<sup>2</sup>), 28 日で 209N/m(圧縮強度 119.0N/mm<sup>2</sup>)である。材齢による変化は 2.3 に示した硬化原点を用いて時間軸 に対して補間した。W/B=0.15のコンク リートの破壊エネルギーに W/B=0.23 のものを適用する根拠として、これら の強度レベルのコンクリートではペー スト量が多く,かつペースト強度が骨 材強度以上になることから, 破断面が 平滑になりやすく, 圧縮強度の増大に 対して破壊エネルギーが大きく増大しない点が 挙げられる7)。

鉄筋近傍のコンクリート要素は鉄筋との付着 の影響が大きく,ひび割れ開口には付着面での エネルギー吸収が存在するため,鉄筋近傍のコ ンクリート要素に,そうでない部分のスメアー ドモデルをそのまま採用するのは不適切である。 そこで,考え方として前川らが提案している RC 構成則<sup>8)</sup>の考え方に順じ,破壊エネルギーの値を 無筋コンクリートの5倍の値と仮定し,付着の 影響を考慮することとした。

若材齢に微細ひび割れを生じたコンクリート のモデルには以下の仮定を用いた。

1)水和過程はひび割れの影響を受けない。

- 2)一度生じたひび割れは永久に残る。また,一 度生じたひび割れ面は固定されたものとす る。
- 3)要素中のコンクリートの剛性は, 過去に生じ たひび割れ幅(ひずみに換算したもの)の最 大値と破壊エネルギーによって決定される。
- 4)塑性変形は無いものと仮定し,原点指向の回 復性を持つ。

若材齢時にひび割れが生じたコンクリート要素の時間依存性の概念を示したのが図-8であ



図-8 時間依存性微細ひび割れモデル

る。以後、本モデルを時間依存性微細ひび割れ モデルと呼ぶ。

#### 3.3 解析結果および考察

**図-9**左に D32 における実験値,線形クリー プFEM解析結果及び時間依存性微細ひび割れモ デルを導入した結果について示す。SFNC に関し ては、線形クリープ解析ではコンクリートの収 縮にともなう鉄筋の変形を過大に評価しており, クリープ係数が大きい値を用いているとしても 解析上コンクリートが高い剛性を示しており, このことから収縮に基づく微細ひび割れとそれ による剛性低下を考慮する必要性を示唆してい る。一方、時間依存性微細ひび割れモデルを考 慮した場合, 材齢 1 日までの応力変化だけでな く,その後の長期的なクリープ挙動を含めたひ ずみ挙動に関しても良い精度で表現できている。 解析中, 主として 0.7-0.8 日程度に多くの微細ひ びわれが生じた。この傾向は図-9右の D10 の ケースでも同様であり,時間依存性微細ひび割 れモデルが若材齢時に発生する微細ひび割れに 基づく挙動を適切に表現できていることを表す。 また、図-9左に示すように、ひびわれが生じ 難いと思われる SFLCEX では、線形クリープ則 と時間依存性微細ひび割れモデルに大きな差異 は無く,かつ実験値に良く適合しており,





図-9 有限要素解析と実験値の比較(左D32,右D10)

SFLCEX に線形クリープ則が適応可能であることを示している。

## 4.まとめ

本研究では,普通セメントを用いた超高強度 コンクリートでは若材齢時に自己収縮に起因し て微細ひびわれが生じることを実験的に明らか にした。また,線形クリープ解析と微細ひびわ れが生じた実験の比較において乖離が生じた。 時間依存性微細ひび割れモデルを提案し,応力 解析に導入したところ実験値と良い整合性を見 せた。また,膨張材を用いた超高強度コンクリ ートに関しては線形クリープ解析が適用可能で あることも明らかとなった。

#### 謝辞

本研究の一部は、「鉄筋拘束条件下にある高強 度コンクリート中の構造欠陥の検証」(研究代表 者:丸山一平)として実施され、平成 16-17 年 度文部科学省科学研究費補助金の支援を得たも のである。関係各位に感謝の意を示す。

#### 参考文献

- 日本コンクリート工学協会,自己収縮研究 員会報告書,1996.11及び2002.9
- 2) H. Ito, I. Maruyama, M. Tanimura, R. Sato : Early

Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 2, No. 2, pp.155-174, 2004

- R. Sato, M. Xu and Y. Yang : Stressed due to Autogenous Shrinkage in High Strength Concrete and its Prediction, "Autogenous Shrinkage of Concrete", ed. E. Tazawa, E & FN SOPN, London, 1999
- Bazant, Z. P. and Oh, B. H.: Crack band theory for fracture of concrete, Materials and Structures, Vol. 16, No. 93, pp. 155-177, 1983
- Rokugo, K, et. al., Testing Methods to Determine Tensile Strain Softening Curve and Fracture Energy of Concrete, Fracture Toughness and Fracture Energy, ed. H. Mihashi et al., Balkema, 1989, pp.153-163
- 3) 淵脇秀晃,他:高強度およびリサイクルコンクリートの破壊エネルギー試験に関する実験的検討, 土木学会中国支部第52回発表会, pp.591-592,2000
- 7) Takaki, Y., Fujita M, and Sato R., 'The effect of tensile fracture energy on the size effect for shear strength of reinforced concrete beam members utilizing high strength concrete', Fracture Mechanics of Concrete Structure, ed. by Li, V., et al., (Bonnie L. S., and Annette D. P.), 2004, 877-885
- 8) 岡村甫,前川宏一,鉄筋コンクリートの非線 形解析と構成則,技法堂出版,1991.5