

## 論文 高強度コンクリートの低収縮化と拘束応力に関する実験的検討

田中敏嗣\*1 三瀬あゆこ\*2 早川智浩\*3 佐藤良一\*4

**要旨:** 高強度コンクリートの低収縮化とそれによって鉄筋コンクリート部材に生じる拘束応力を実験的に検討した。通常の高強度コンクリートを用いた場合、鉄筋コンクリートはりの下縁には、鉄筋比によるが、自己収縮により  $2.5\sim 3.5\text{N/mm}^2$  程度の応力が生じた。これに対して、低熱ポルトランドセメントに収縮低減剤と膨張材を併用し自己収縮を大幅に低減した高強度コンクリートの場合、はり下縁に生じる応力は、鉄筋比によらず、 $0.2\sim 0.3\text{N/mm}^2$  程度極めて小さいことが認められた。これらの傾向は、重ね合せの原理に基づくクリープ解析により予測可能である。

**キーワード:** 高強度コンクリート、鉄筋コンクリート、自己収縮応力、クリープ

### 1. はじめに

高強度コンクリートや高流動コンクリートのような、水セメント比が小さく単位セメント量の多いコンクリートのひび割れの検討においては、温度応力の他に自己収縮による拘束応力の影響が無視できない。特に外部拘束の大きい RC ラーメン構造に高強度コンクリートを用いた場合では、自己収縮による拘束応力がひび割れ発生に極めて大きな影響を及ぼし、高強度コンクリートの自己収縮の低減の重要性が指摘されている<sup>2)</sup>。

これまでこの種のコンクリートの自己収縮の低減に関する研究では、収縮低減剤、膨張材およびそれらを併用した場合<sup>3)4)</sup>、低熱ポルトランドセメント(ピーライトセメント)<sup>5)</sup>、低熱ポルトランドセメントおよび膨張材の併用<sup>6)</sup>などが検討されている。鉄筋コンクリート部材のひび割れの検討においては、自己収縮による拘束応力の把握が重要であるが、これまでの研究は材料特性の検討が中心であり、コンクリートの低収縮化が拘束応力に及ぼす影響はまだ十分に検

討されているとは言えない。

そこで本研究では、高強度コンクリートの低収縮化を図るとともに、それにより鉄筋コンクリート部材に生じる拘束応力を実験的に明らかにすることを目的とした。さらに、重ね合せの原理に基づくクリープ解析により部材に生じる拘束応力の予測を行った。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料

実験には以下の材料を使用した。

- (1)セメント：普通ポルトランドセメント(記号 NC)および低熱ポルトランドセメント(記号 LC)
- (2)混和材：シリカフューム(記号 SF, 比重 2.2, 比表面積  $200,000\text{ cm}^2/\text{g}$ )
- (3)膨張材：CAS 系膨張材(記号 EX)
- (4)収縮低減剤：低級アルコールアルキレンオキシド付加物(記号 SRA)
- (5)高性能 AE 減水剤：ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤(記号 SP)

\*1 太平洋セメント(株)佐倉研究所コンクリート技術グループ 工修 (正会員)

\*2 オリエンタル建設(株)技術研究所 工修 (正会員)

\*3 宇都宮大学大学院工学研究科 (正会員)

\*4 宇都宮大学工学部建設工学科教授 工博 (正会員)

(6)骨材：細骨材；茨城県産砕砂(粗粒率 2.80，表乾比重 2.61)，粗骨材；茨城県産砕砂(粗粒率 6.78，表乾比重 2.63，最大寸法 20 mm)

## 2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-1に示す。自己収縮の低減対策を取らない通常の高強度コンクリート(記号 AS)を製造するため、普通ポルトランドセメントにシリカフェュームを内割で 10%置換し、水結合材比を 23%とした。また、自己収縮低減コンクリート(記号 LAS)を製造するため、自己収縮が低減できる材料を組合わせた。すなわち、セメントとして低熱ポルトランドセメントを用い、さらに収縮低減剤と膨張材を併用した。なお、収縮低減剤と高性能 AE 減水剤は単位水量の一部とした。

## 2.3 試験項目およびその方法

### (1)圧縮強度および弾性係数

コンクリートの圧縮強度は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」により測定した。また、コンクリートの圧縮弾性係数は、土木学会規準 JSCE-G502「コンクリートの静弾性係数試験方法(案)」により測定した。試験材齢は、若材齢時からの発現性状をできるだけ正確に把握するため、終結後から対数でほぼ等間隔になるよう選定した。得られた弾性係数の発現性は、式(1)により近似した<sup>7)</sup>。

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

ここに、

$E(t)$ ：有効材齢  $t$  日における弾性係数

$E_{28}$ ：標準養生材齢 28 日における弾性係数

$s_E$ ：セメントの種類の影響による係数

$a_E$ ：凝結時間の影響による係数

$t$ ：有効材齢(日)，式(2)による<sup>8)</sup>。

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (2)$$

ここに

$\Delta t_i$ ：温度が  $T(^{\circ}\text{C})$  である期間の日数

$T_0$ ： $1^{\circ}\text{C}$

### (2)自己収縮

はり供試体と同断面の無拘束収縮供試体(寸法  $15 \times 30 \times 50$  cm)を、表-1のコンクリートを用いて 3 本ずつ作成し、中心に埋込型ひずみ計および熱電対を設置し、自己収縮ひずみの測定を行った。

### (3)自己収縮応力

#### ①小型供試体による自己収縮応力

自己収縮低減コンクリートについて、コンクリートの自己収縮応力試験方法(案)<sup>7)</sup>を参考にして、供試体寸法を  $10 \times 10 \times 120$  cm、鉄筋比を 0.2%(D6)，0.6%(D10)，1.0%(D13) および 2.3%(D19)として、自己収縮応力を測定した。なお、中心部のコンクリート温度を熱電対により測定し、熱膨張係数を  $10 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$  と仮定して、温度ひずみの補正を行った。

#### ②はり供試体による自己収縮応力

図-1にはり供試体の寸法と配筋を示す。また表-2にこれらの供試体の鉄筋比を示す。はり供試体における自己収縮応力を測定するため、引張および圧縮鉄筋の軸方向中央部にひずみゲージを貼り付け、鉄筋のひずみを測定した。はり供試体は、ポリエステルシートおよびアルミ箔テープにより乾燥防止措置を取り、各条件で 2 体ずつ作成した。なお、断面内の温度を熱電対により測定し、上記と同様に温度ひずみの補正を行った。引張縁に生じる自己収縮応力は、平面保持を仮定し、力の釣り合いにより次式で算定した。

表-1 コンクリート配合

記号	セメント	W/B (%)	SF/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
					W	C	SF	EX	S	G	SRA	SP
AS	NC	23	10	41	161	630	70	0	629	912	0	14
LAS	LC	23	10	41	161	600	70	30	630	914	6	15.4

$$\sigma_y = \frac{P_s + P_s'}{Ac} + \frac{M \cdot h}{I_e \cdot 2} \quad (3)$$

$$P_s = A_s E_s \varepsilon_s \quad (4)$$

$$P_s' = A_s' E_s' \varepsilon_s' \quad (5)$$

$$M = P_s e_s + P_s' e_s' \quad (6)$$

ここに、

$\sigma_y$ :引張縁応力

$A_s, E_s, \varepsilon_s$ :引張鉄筋の断面積,弾性係数およびひずみ

$A_s', E_s', \varepsilon_s'$ :圧縮鉄筋の断面積,弾性係数およびひずみ

$Ac$ :コンクリートの断面積

$e_s, e_s'$ :はり高さ中心から引張,圧縮鉄筋中心の距離

$I_e$ :換算断面二次モーメント

$h$ :はり高さ

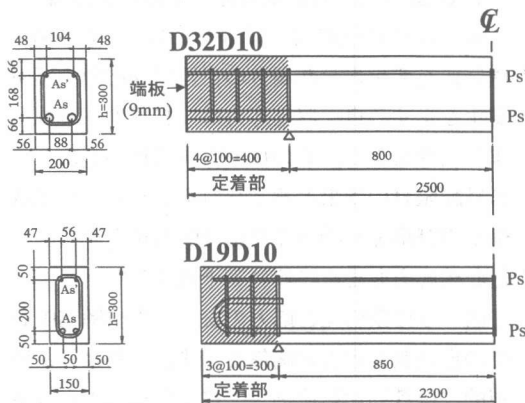


図-1 はり供試体の寸法と配筋

表-2 供試体の鉄筋比

記号	引張鉄筋		圧縮鉄筋	
	本数	鉄筋比	本数	鉄筋比
D32D10	2・D32	3.4%	2・D10	0.3%
D19D10	2・D19	1.4%	2・D10	0.4%

## 2.4 自己収縮応力の解析方法

自己収縮応力の解析には、クリープの重ね合せの原理に基づく step-by-step 法を、鉄筋拘束の場合に適用できるように改良した step-by-step2 次元有限要素法を用いた<sup>2)</sup>。

解析に必要な基本データは、自己収縮ひずみ、弾性係数およびクリープ係数である。自己収縮ひずみは実測値を、弾性係数は式(1)を用いた。

クリープ係数は、若材齢時からのクリープ挙動を正確に表現できると考えられる CEB-FIP MODEL CODE 1990 (MC90) の修正式を用いた<sup>8)</sup>。

$$\phi(t_{i+1/2}, t_j) = \phi_0 \times \left\{ \frac{(t_{i+1/2} - t_j)/t_1}{\beta_H + (t_{i+1/2} - t_j)/t_1} \right\}^{0.3} \quad (7)$$

ここに、

$\phi_0$ :終局クリープ係数:

$$\phi_0 = \phi_1 \times \left[ \frac{a-1}{a-t_j^b} \right]$$

$\beta_H$ :クリープの進行速度を決める係数:

$$\beta_H = c \times t_j - d$$

$t_i$ :MC90による有効材齢

$t_1$ :1日

本解析では $\phi_0$ および $\beta_H$ の各係数は、普通ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートおよび自己収縮低減コンクリートに対して、暫定的にそれぞれ早強セメントおよびビーライトセメントを用いた高強度コンクリートのクリープ試験から得られた次の値を用いた<sup>7)</sup>。

①通常の高強度コンクリート(AS)の解析に用いた $\phi_0$ および $\beta_H$ の各係数

$$\phi_1 = 1.68, a = 2.03, b = -1.03, c = 4.52, d = 1.45$$

②自己収縮低減コンクリート(LAS)の解析に用いた $\phi_0$ および $\beta_H$ の各係数

$$\phi_1 = 5.29, a = 1.37, b = -1.70, c = 9.30, d = 7.69$$

さらに、材齢1日未満の若材齢時においても(7)式が適用できるように、終局クリープ係数 $\phi_0$ およびクリープの進行速度を決める係数 $\beta_H$ を次のように修正した<sup>9)</sup>。

$\phi_0$ の修正

$$\text{AS} \quad t_j \leq 0.63 \quad \phi_0 = 19.44 - 24.44t_j$$

$$\text{LAS} \quad t_j \leq 0.83 \quad \phi_0 = 191.10 - 200.14t_j$$

$\beta_H$ の修正

$$\beta_H \leq d/c \quad \beta_H = 1.0 \times 10^{-6}$$

### 3. 実験結果および考察

#### 3. 1 圧縮強度および弾性係数

図-2および図-3にそれぞれ圧縮強度および弾性係数測定結果を示す。なお図-3には、式(1)の回帰結果を併記した。自己収縮低減コンクリート(LAS)は、低熱ポルトランドセメントを用いたため強度発現が遅いが、材齢 28 日で圧縮強度約 110N/mm<sup>2</sup>となり、普通ポルトランドセメントを用いた通常の高強度コンクリートとほぼ同等の値を示した。弾性係数についても、圧縮強度とほぼ同様な傾向が認められた。

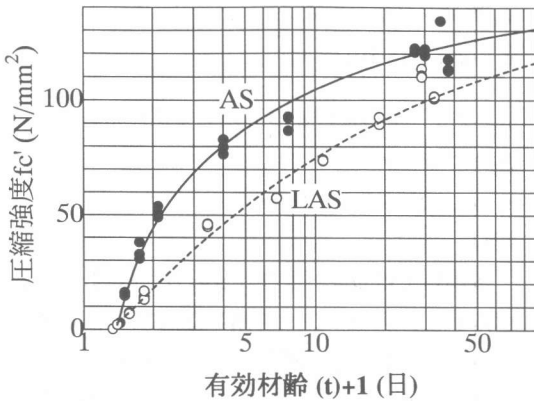


図-2 圧縮強度の発現

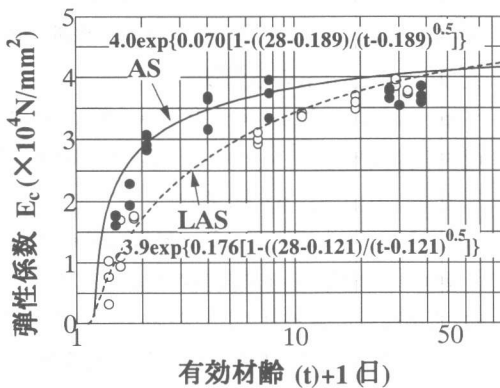


図-3 弾性係数の発現

#### 3. 2 自己収縮

図-4に自己収縮ひずみの経時変化を示す。普通ポルトランドセメントを用いた通常の高強度コンクリートの場合(AS), 長期的には  $700 \times$

$10^{-6}$ 程度の自己収縮が生じた。自己収縮低減コンクリート(LAS)の自己収縮は、材齢 1 日程度でほぼ収束し、長期的には  $250 \times 10^{-6}$ と AS の場合の  $1/3$ 程度となり、自己収縮低減効果が認められた。

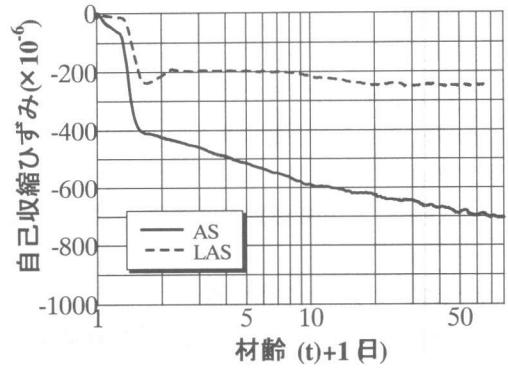


図-4 自己収縮ひずみの経時変化

#### 3. 3 鉄筋比が自己収縮応力に及ぼす影響

図-5に自己収縮低減コンクリート(LAS)の鉄筋比を変化させた場合の自己収縮応力の経時変化を示す。自己収縮応力は、材齢 0.7 日程度まで大きくなり、その後膨張側に推移した。これは膨張材の効果と考えられる。また、自己収縮が再び増加し始める材齢 10 日付近から、自己収縮応力もそれに伴い若干増加した。

図-6に鉄筋比と応力の安定した材齢 50 日での自己収縮応力の関係を示す。これより、巨視的には鉄筋比に比例して自己収縮応力が大きくなる傾向を示した。

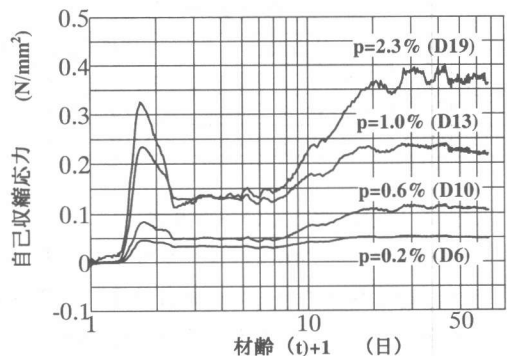


図-5 鉄筋比が自己収縮応力に及ぼす影響

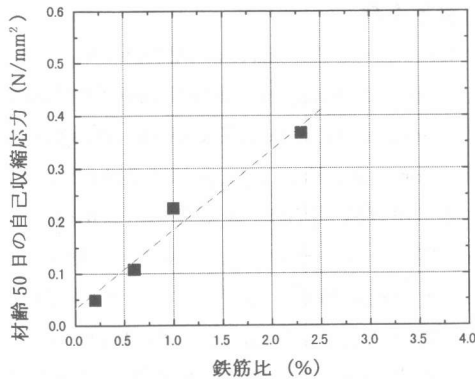


図-6 鉄筋比と自己収縮応力の関係

### 3. 4 はり供試体における自己収縮応力

図-7 および図-8 にははり供試体の引張縁に生じた応力の経時変化を示す。

通常の高強度コンクリートの場合、初期材齢から大きな応力が生じ、長期的には引張鉄筋比が 3.4% の場合(D32D10)で約 3.5N/mm<sup>2</sup>、引張鉄筋比が 1.4% の場合(D19D10)で約 2.5N/mm<sup>2</sup> の応力が引張縁に生じることが認められた。

一方、自己収縮低減コンクリートの場合、いずれのはり供試体においても引張縁に生じる応力は極めて小さく、0.2~0.3N/mm<sup>2</sup>程度であり、通常の高強度コンクリートの場合の約 1/10 となった。このことより、低熱ポルトランドセメント、収縮低減剤および膨張材の併用による高強度コンクリートの自己収縮低減は、特に拘束応力において低減効果が高いことが認められた。

このように、自己収縮の低減対策を取らない高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材には、養生期間においても自己収縮により大きな拘束応力が断面内部に作用することが明らかとなった。このような拘束応力は、ひび割れ発生荷重、せん断挙動およびたわみ等の鉄筋コンクリート部材の力学的性状に大きく影響することが予測され、今後その解明が必要と思われる。

図-7 および図-8 には、はり供試体の引張縁に発生する応力の解析結果を併記した。これ

らより、解析値は実測値の傾向を定性的には表していることが認められた。また解析値においても、自己収縮低減コンクリートを用いた場合の引張縁応力は、通常の高強度コンクリートの場合の約 1/10 となり、実測値における比率とほぼ一致した。したがって、はり供試体に発生する拘束応力は、重ね合せの原理に基づく step-by-step 法により評価できると考えられる。

ただし、本解析ではクリープ係数に文献値を用いており、解析精度を高めるために正確なクリープ係数を把握することが今後の課題である。

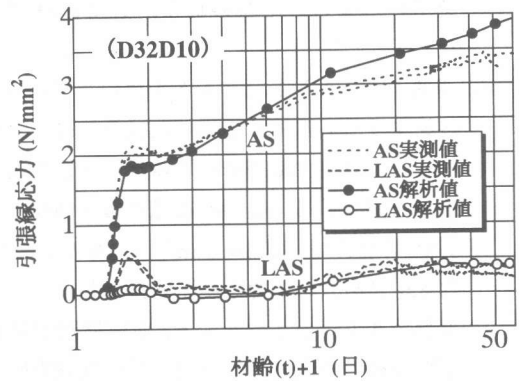


図-7 はり供試体における引張縁に発生した応力の経時変化(D32D10)

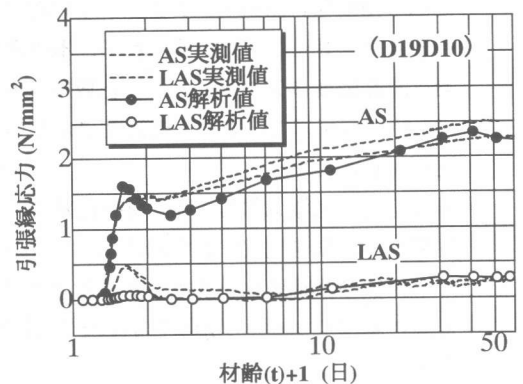


図-8 はり供試体における引張縁に発生した応力の経時変化(D19D10)

#### 4. まとめ

本研究は、高強度コンクリートの低収縮化とそれによって鉄筋コンクリート部材に生じる拘束応力を実験的に検討した。さらに、重ね合せの原理に基づくクリープ解析により部材に発生する拘束応力の予測を行った。本研究で得られた結論を要約すると次のようになる。

- (1)水結合材比 23%の高強度コンクリートの自己収縮を、低熱ポルトランドセメント、収縮低減剤および膨張材を併用することで、長期強度をほとんど低下させることなく、同一水結合材比の普通ポルトランドセメントのみを用いた場合のその約1/3に低減できた。
- (2)普通ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートにより製造したはりでは、自己収縮により養生期間中に下縁部に大きな引張応力が生じる。長期的には引張鉄筋比3.4%の場合で約3.5N/mm<sup>2</sup>、1.4%の場合で約2.5N/mm<sup>2</sup>の応力が引張縁に生じた。
- (3)低熱ポルトランドセメント、収縮低減剤および膨張材の併用により自己収縮の低減を図った高強度コンクリートを用いた場合、はり供試体下縁に生じる応力は引張鉄筋比によらず、0.2~0.3N/mm<sup>2</sup>程度となり、自己収縮低減を図らない高強度コンクリートの場合の約1/10となった。すなわち、本研究における高強度コンクリートの自己収縮低減は、特に拘束応力において低減効果が高いことが明らかとなった。
- (4)拘束応力の低減効果は、有効材齢に基づく弾性係数および自己収縮の実測値およびクリープ係数の経時変化を考慮した重ね合せの原理に基づくクリープ解析において評価できる。
- (5)今後、(4)の解析精度を高めるため、クリープ係数などの物性値を正確に把握するとともに、自己収縮低減効果の経済性の面からの検討も必要である。

#### 参考文献

- 1)E.Tazawa, Y.Matsuoka, S.Miyazawa, S.Okamoto, Effect of Autogenous Shrinkage on Self Stress in Hardening Concrete, Thermal Cracking in Concrete at Early Age, pp.221-228,1994
- 2)早川智浩, 許明, 佐藤良一, 今本啓一: 高強度コンクリートラーメンの自己収縮応力 2次元 FEM 解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1027-1032, 1998
- 3)田中敏嗣, 杉山彰徳, 小川鑑, 富田六郎: 混和材料を組合せて使用した高流動コンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.157-162, 1995
- 4)A.Ogawa, K.Sakata, S.Tanaka : A Study on Reducing Shrinkage of Highly-Flowable Concrete, Advanced in Concrete Technology , Proceedings, CANMET/ACI, pp.55-72, 1995
- 5)竹内良, 田中敏嗣, 岡本享久: ビーライトセメントを用いた高強度コンクリートの自己収縮応力とひび割れ抵抗性, 建築学会年次大会講演概要集, A-1 材料施工, pp. 297-298, 1996
- 6)近松竜一, 竹田宣典, 三浦律彦, 十河茂幸: 高強度・高流動コンクリートの低収縮化に関する基礎的研究, コンクリート工学論文報告集, Vol.19, No.1, pp.169-174, 1998
- 7)自己収縮研究委員会報告, 日本コンクリート工学協会, 1996.11
- 8)CEB-FIP MODEL CODE, 1990
- 9)楊楊, 佐藤良一, 今本啓一, 許明: 高強度コンクリートの自己収縮応力の予測, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.757-762, 1997