

# 鉄筋を埋込んだコンクリート供試体の収縮ひび割れ特性

大岡 督尚\* 本田 宏武\*

**要約:** 近年、建築物の高層化に伴い、高強度コンクリートを採用する例が増えている。W/C が低くなると、乾燥収縮は小さくなるが、自己収縮が大きくなるため、全体の収縮量は必ずしも減少しない。そこで本研究では、コンクリートの収縮ひび割れ発生挙動を解明するための基礎的データを得ることを目的として、W/C の異なるコンクリートにおける収縮挙動に関する実験を行った。

実験の結果、低 W/C の高強度コンクリートにおいて、急激な自己収縮の発生が確認された。収縮予測式により算出した解析結果との比較では、乾燥収縮では土木学会普通強度式が、クリープ係数については MC90 式が良い対応を示していた。また、乾燥収縮ひび割れ試験結果と収縮応力解析結果との比較では、W/C60%~40%のコンクリートで良く一致しているが、W/C25%の高強度コンクリートにおいては大きな差が生じる結果となった。

**キーワード:** コンクリート, 水セメント比, 自己収縮, 乾燥収縮, 圧縮クリープ, 予測式, ひび割れ, 収縮応力解析

目次:	1. はじめに	3. 実験概要
	2. 実験結果	4. まとめ

## 1. はじめに

近年、建築物の高層化に伴い、高強度コンクリートを採用する例が増えている。W/C が低くなると、乾燥収縮は小さくなるが、自己収縮が大きくなるため、全体の収縮量は減少しない。そこで、本研究では、コンクリートの収縮ひび割れ発生挙動を解明するための基礎的データを得ることを目的として、W/C の異なるコンクリートにおける収縮挙動に関する実験を行った。

本報では、これらの実験結果とともに、既往の予測式から算出した自己収縮、乾燥収縮、圧縮クリープ係数解析結果および step-by-step 法による収縮応力解析結果を示し、コンクリートのひび割れ特性について報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 自己収縮、乾燥収縮、圧縮クリープ試験

本実験では、コンクリートの調合を W/C60%、40%、25%に設定した3調合(表1)とし、各調合2本の供試体を用いて自己収縮、乾燥収縮、圧縮クリープ試験を実施した。供試体は図1に示すように、φ100×200mmのプラスチック製型枠内部に埋込みゲージを取付けてコンクリート打設を行った。乾燥収縮および圧縮クリープ試験用供試体は翌日脱型後、20℃、60%の恒温恒湿室内の水槽で試験開始材齢7日目まで養生を行った。また、自己収縮測定用供試体はコンクリート打設翌日に型枠上面をアルミテープで密封し、恒温恒湿室に静置した。

表1 コンクリートの調合および使用材料

供試体記号	W/C [%]	S/a [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				
			W	C	S	G	SP
N60	60	44.5	175	292	919	881	1.752
N40	40	50.4	170	425	862	881	3.613
N25	25	52.0	170	680	681	881	13.600

C: 普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm<sup>3</sup>)  
 S: 大井川水系砂(密度 2.57g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.07%)  
 G: 津久井郡産硬質砂岩砕石 2005(密度 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.72%)  
 SP: ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

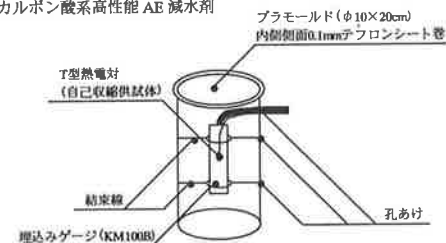


図1 収縮供試体概略図



写真1 圧縮クリープ試験状況

## 2.1 乾燥収縮ひび割れ試験

図 2 に供試体形状寸法を示す。中央部の両面には深さ 10mm の切欠きを設け、断面中心に D10 鉄筋を 1 本埋込んだ。また、弾性係数約 40N/mm<sup>2</sup> のひずみ計を埋込んだ自由収縮ひずみ供試体 (100×100×400mm) も作製した。供試体は各調合 2 体ずつとし、ひび割れ供試体の底盤面と弓型面、および自由収縮供試体の型枠面に、厚さ 0.1mm のテフロンシートを貼り付けた。供試体の打込みおよび乾燥開始材齢までは、湿布・シートがけ養生とした。材齢 7 日で脱型し (ひび割れ試験体の場合は底盤および弓形鋼板の脱型)、乾燥を開始した (写真 2)。

## 3. 実験結果

### 3.1 使用材料の力学的性質

表 2 に各コンクリートのフレッシュ時および硬化後の物性を示す。材齢 28 日の圧縮強度試験結果は W/C60% の N60 で概ね 30N/mm<sup>2</sup> であり、W/C25% の N25 では 110N/mm<sup>2</sup> を超える強度となった。また、養生条件による比較では、圧縮強度は気中養生供試体の方が高い値を示しているものの、ヤング率に関しては、標準養生供試体よりも低い値を示している。なお、表 3 に鉄筋の引張試験結果を示す。

### 3.2 自己収縮ひずみ実測値と予測値の比較

各コンクリートの自己収縮ひずみの経時変化を図 3 に示す。図中の実測値は、コンクリート練混ぜ開始から 2 時間 30 分後を原点として評価している。材齢 7 日時点での N60 および N40 の収縮量はそれぞれ 35μ、104μ であるのに対し、低 W/C の N25 では 408μ と N40 の 4 倍近い急激な自己収縮ひずみが発生しており、特に材齢 1 日以内の収縮が著しい。

実測値との比較のために、自己収縮予測式による解析を行った。予測式には、自己収縮ひずみを圧縮強度の関数で表した RILEM 式 (式 (1) および式 (2)) と、各 W/B、セメントおよび混和材の影響を考慮した宮澤らの提案式 (式 (3)) を採用した。<sup>1)</sup>

$t < 28$  日の場合 ( $f_c(t)/f_{c28} \geq 0.1$ )

$$\varepsilon_{au} = (f_{c28} - 20) \{ 2.2 f_c(t) / f_{c28} - 0.2 \} \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

$t \geq 28$  日の場合

$$\varepsilon_{au} = (f_{c28} - 20) \{ 2.8 - 1.1 \exp(-t/96) \} \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

ここに、 $f_c(t)$  : 材齢  $t$  日における圧縮強度 [N/mm<sup>2</sup>]

$f_{c28}$  : 材齢 28 日圧縮強度 [N/mm<sup>2</sup>]

$$\varepsilon_{au} = \gamma \cdot \varepsilon_{co} \cdot \beta(t) \quad (3)$$

ここに、 $\gamma$  : 1.0 (N セメント)

$\varepsilon_{co}$  : 自己収縮ひずみの最終値 [ $\times 10^{-6}$ ]

$\beta(t)$  : 自己収縮ひずみの進行を表す関数

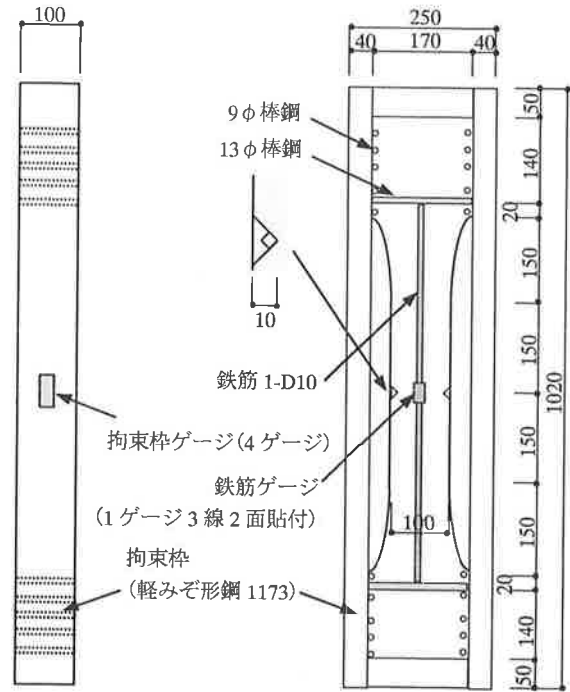


図 2 乾燥収縮ひび割れ供試体寸法 [mm]

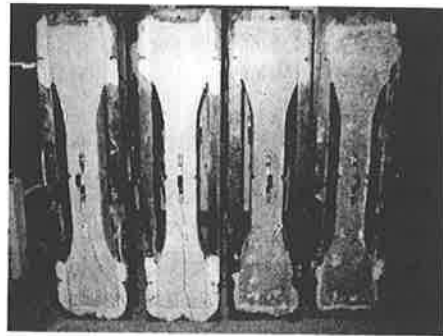


写真 2 乾燥収縮ひび割れ試験状況

表 2 コンクリートのフレッシュ時および硬化後の物性

供試体記号	フレッシュ時の特性		強度試験結果				
	スランブ (フロー) [cm]	空気量 [%]	材齢 [日]	養生	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	ヤング率 [N/mm <sup>2</sup> ]	割裂強度 [N/mm <sup>2</sup> ]
N60	17.0	4.9	1	標準	4.7	12.8	—
			3		12.6	17.4	—
			7		18.9	22.7	2.07
			28	気中	30.8	26.5	3.09
			14		25.9	24.1	2.89
			28		32.0	23.9	3.18
N40	21.0 (37.0×36.0)	3.1	1	標準	20.5	22.3	—
			3		37.7	32.2	—
			7		49.0	33.2	3.54
			28	気中	64.4	37.4	4.87
			14		60.1	34.4	3.94
			28		70.0	33.6	4.70
N25	(56.0×53.0)	1.6	1	標準	46.1	26.6	—
			3		77.6	36.0	—
			7		90.3	39.8	5.44
			28	気中	112.3	42.8	7.54
			14		105.5	41.4	5.26
			28		116.6	40.8	5.28

表 3 鉄筋引張試験結果

降伏点 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	伸び [%]	ヤング係数 [kN/mm <sup>2</sup> ]
365	507	22.5	193

解析の結果、RILEM式により得られた予測値は、実測値に対して、初期材齢、長期材齢ともに過小評価する傾向がみられた。この理由として、RILEM式では自己収縮ひずみの終局値を圧縮強度のみの関数としていることや、圧縮強度比  $f_c(t)/f_{c28}$  が材齢のみの関数として与えられているため、自己収縮ひずみの進行速度が W/C により著しく異なることが反映されていない点が影響しているものと考えられる。一方、セメントの種類や混和材の影響、コンクリート温度の影響を考慮した宮澤らの提案式による予測値は、実測値に比較的対応した結果となっており、特に N25 の初期材齢時における急激なひずみ変動を正確に再現している。

3.3 乾燥収縮ひずみ実測値と予測値の比較

図 4 に乾燥収縮ひずみの実測結果を示す。乾燥収縮ひずみは、乾燥を開始した材齢 7 日時点を中心としてプロットしている。自己収縮ひずみと異なり、低 W/C の N25 が最も収縮量が少ない結果となっている。

下式に基づき、各コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測値を算出した。解析には、MC90式(式(4))および土木学会普通強度式(式(5))と土木学会高強度式(式(6))を用いた。なお、文献 1)によれば、各予測式の適用範囲を指定しており、28日圧縮強度に対しては、MC90式は 20~88N/mm<sup>2</sup>、土木学会普通強度式は 55N/mm<sup>2</sup>以下(W/Cを低くして高強度にした場合は 70N/mm<sup>2</sup>以下)、土木学会高強度式は 120N/mm<sup>2</sup>以下と記されている。

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = \epsilon_{sh\infty} \cdot \beta_s(t - t_0) \tag{4}$$

ここに、 $\epsilon_{sh}(t, t_0)$  : 乾燥収縮ひずみ  
 $\epsilon_{sh\infty}$  : 乾燥収縮ひずみの最終値  
 $\beta_s(t - t_0)$  : 乾燥収縮ひずみの経時変化特性を表す項  
 $t, t_0$  : 材齢[日]および乾燥開始時材齢[日]

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = \left[ 1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\} \right] \cdot \epsilon_{sh\infty} \tag{5}$$

ここに、 $\epsilon_{sh}(t, t_0)$  : 乾燥収縮ひずみ [ $\times 10^{-6}$ ]  
 $\epsilon_{sh\infty}$  : 乾燥収縮ひずみの最終値 [ $\times 10^{-6}$ ]  
 $t, t_0$  : 有効材齢[日]および乾燥開始時有効材齢[日]

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{\epsilon_{sh\infty} \cdot (t - t_0)}{\beta + (t - t_0)} \tag{6}$$

ここに、 $\epsilon_{sh}(t, t_0)$  : 乾燥収縮ひずみ [ $\times 10^{-6}$ ]  
 $\epsilon_{sh\infty}$  : 乾燥収縮ひずみの最終値 [ $\times 10^{-6}$ ]  
 $\beta$  : 乾燥収縮ひずみの経時変化特性を表す項  
 $t, t_0$  : 材齢[日]および乾燥開始時材齢[日]

解析の結果、N60 および N40 は MC90 式よりも土木学会普通強度式の方が実測値に近い値を示しており、N25 の土木学会高強度式により得られた予測値はひずみ差が大きく、逆に普通強度式の方が若材齢時のひずみ変動に対応する結果となった。

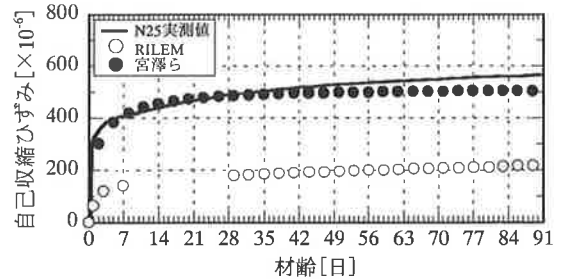
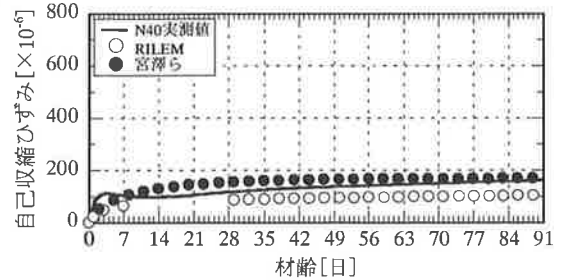
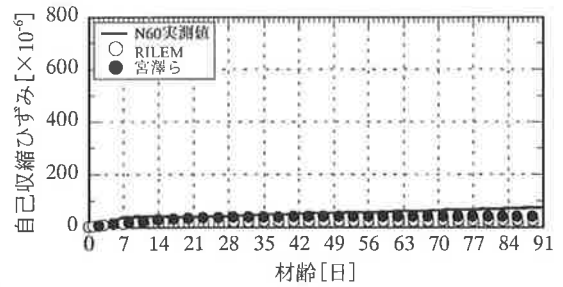


図 3 自己収縮ひずみの実測値と予測値の比較

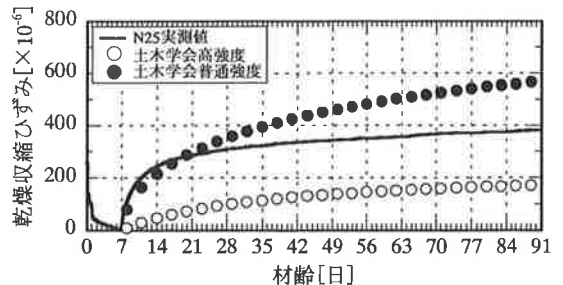
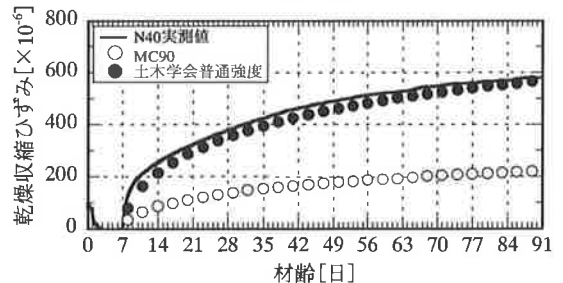
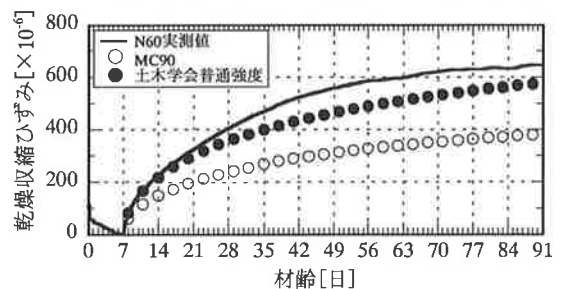


図 4 乾燥収縮ひずみの実測値と予測値の比較

### 3.4 クリープ係数の比較

圧縮クリープ試験により得られたクリープ係数と予測値との比較を図5に示す。クリープ試験は各調合とも目標圧縮強度の1/3を目安に載荷荷重を設定しており、実測ひずみから式(7)よりクリープ係数を算出した。また、クリープ係数予測には、コンクリートの調合条件、環境条件および載荷時材齢をパラメータとしたMC90式(式(8))とACI209式(式(9))を採用した。<sup>1)</sup>なお、N25についてのみ、載荷時のヤング係数比 $E_0/E_{28}$ との関係式(式(10)、(11))から求めた終局クリープ係数 $\phi_0$ およびクリープ進行速度を決定する係数 $\beta_H$ を、式(12)のMC90式に代入して算出したクリープ係数(MC90&JCI)を図に併記する。<sup>2)</sup>

$$\phi_t = \frac{(\varepsilon_{at} - \varepsilon_e - \varepsilon_{st})}{\varepsilon_c} \quad (7)$$

ここに、 $\varepsilon_{at}$ 、 $\varepsilon_e$ 、 $\varepsilon_{st}$ ：全ひずみ、弾性ひずみ、乾燥収縮ひずみ

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (8)$$

ここに、 $\phi(t, t_0)$ ： $t_0$ 日で載荷した $t$ 日でのクリープ係数

$\phi_0$ ：終局クリープ係数

$\beta_c(t - t_0)$ ：時間に依存するクリープの進行を表す係数

$$\phi(t, t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)^{0.6}}{10 + (t - t_0)^{0.6}} \right] \cdot \phi_\infty(t_0) \quad (9)$$

ここに、 $\phi_\infty(t_0)$ ：終局クリープ係数

$t_0$ ：載荷時材齢[日]

$$\phi_0 = 0.826 \cdot (E_0 / E_{28})^{-1.67} \quad (10)$$

$$\beta_H = 0.0588 \cdot \exp\{7.75 \cdot (E_0 / E_{28})\} \quad (11)$$

ここに、 $E_0$ ：載荷時のヤング係数[N/mm<sup>2</sup>]

$E_{28}$ ：材齢28日におけるヤング係数[N/mm<sup>2</sup>]

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \left\{ \frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right\}^{0.3} \quad (12)$$

ここに、 $\phi(t, t_0)$ ： $t_0$ 日で載荷した $t$ 日でのクリープ係数

$\phi_0$ ：終局クリープ係数

$\beta_H$ ：クリープの進行速度を決める係数

$t, t_0, t_1$ ：有効材齢[日]、載荷時有効材齢[日]、1[日]

解析の結果、MC90式による予測値はN60やN40で概ね実測値と対応しており、ACI209式による予測値は、W/Cに伴うクリープ係数の変動は小さく、N40以外のコンクリートについては実測値との対応がとれない結果となった。一方、MC90&JCI式による解析結果は、N25の実測値と良く一致しており、 $\phi_0$ と $\beta_H$ を適当な関数とすることで、高強度コンクリートのクリープ特性を正確に予測することが可能であると考えられる。

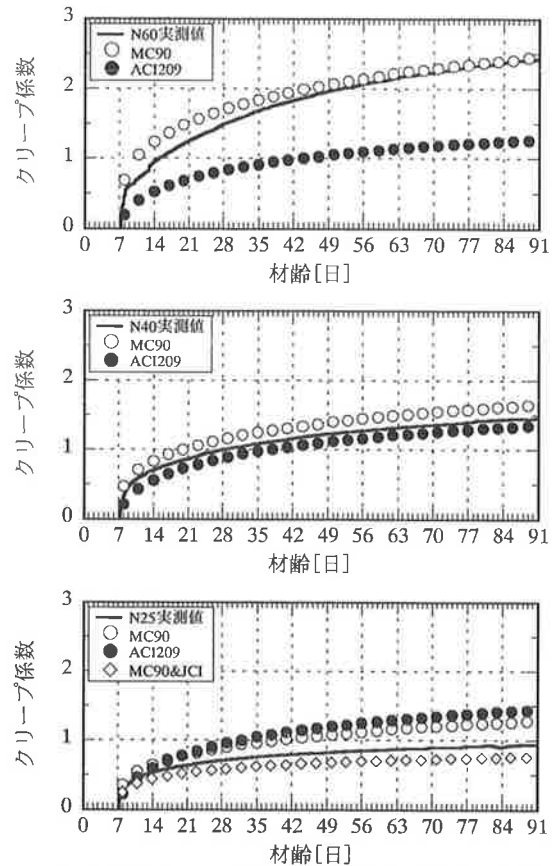


図5 圧縮クリープ係数の実測値と予測値の比較

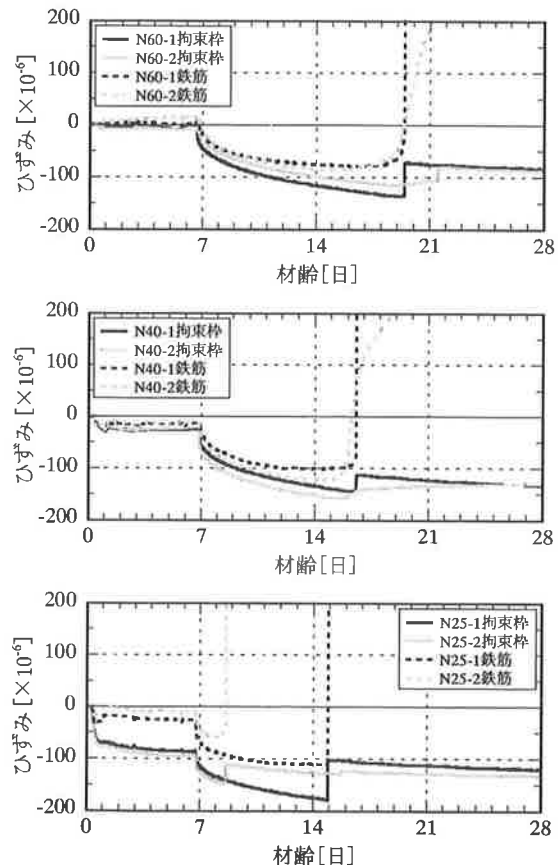


図6 拘束枠および鉄筋ひずみの測定結果

### 3.5 乾燥収縮ひび割れ試験結果

図 6 に拘束枠および鉄筋ひずみを示す。コンクリートのひび割れ発生時点において、拘束枠および鉄筋のひずみが急激に変動し、ひび割れ発生材齢は W/C が低くなるにつれて早くなる傾向がある。また、N40-2 および N25-2 は、切欠きを設けた供試体中央部以外にもひび割れが発生した。

### 3.6 収縮応力解析

図 7(a) に示した自由収縮ひずみ測定値を用いて、step-by-step 法により 1 日ステップの収縮応力解析を行った。解析に用いたヤング係数は式 (13) に示す MC90 の提案式を用い、クリープ係数は式 (14) に示す MC90 の提案式をベースとして、実測した圧縮クリープ係数と推定曲線が一致するよう  $\phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm})$  を変更した(図 7(b),(c))。また、拘束枠と内部鉄筋による応力は、式 (15) により求めた。<sup>2),3)</sup>

$$E(t) = E_{28} \cdot \sqrt{\exp\left\{s \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{\frac{1}{2}}\right]\right\}} \quad (13)$$

ここに、 $E(t)$  : 材齢  $t$  日のヤング係数 [N/mm<sup>2</sup>]  
 $t$  : コンクリート材齢 [日]  
 $s$  : 0.1(Nセメント)

$$\phi(t, t_0) = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \frac{1}{0.1 + (t_0)^{0.2}} \cdot \left[\frac{(t-t_0)}{\beta_H + (t-t_0)}\right]^{0.3} \quad (14)$$

ここに、 $\phi(t, t_0)$  : 載荷材齢  $t$  日におけるクリープ係数  
 $\phi_{RH}\beta(f_{cm})$  : 4.80 (N60), 3.56 (N40), 2.58 (N25)  
 $\beta_H$  : 325 (相対湿度 60%,  $\phi$  100×200mm 供試体)

$$\sigma_t = \frac{(\epsilon_F \cdot E_F \cdot A_F + \epsilon_s \cdot E_s \cdot A_s)}{A_c} \quad (15)$$

ここに、 $\epsilon_F, \epsilon_s$  : 拘束枠、鉄筋ひずみ測定値  
 $E_F, E_s$  : 拘束枠、鉄筋の公称断面ヤング係数 [N/mm<sup>2</sup>]  
 $A_F, A_s, A_c$  : 拘束枠断面積 (793), 鉄筋断面積 (71.3), コンクリート断面積 (7928.7) [mm<sup>2</sup>]

拘束枠・鉄筋による引張応力計算値と、自由収縮ひずみによる収縮応力解析結果を図 8 に示す。ひび割れ発生は、すべての試験体において、MC90 の純引張強度推定値(割裂引張強度の 0.9 倍)以下であった。

N60 および N40 の試験体については、実験結果と解析結果が比較的一致しているが、N25 の場合は多少差が大きい。N25 は材齢 1 日以内の収縮が著しいため、若材齢時のヤング係数やクリープ係数の近似値が実際の値と相違した可能性がある。したがって、自己収縮の大きなコンクリートの場合は、若材齢時の特性を正確に捉えなければ、収縮応力を予想することは困難と考える。

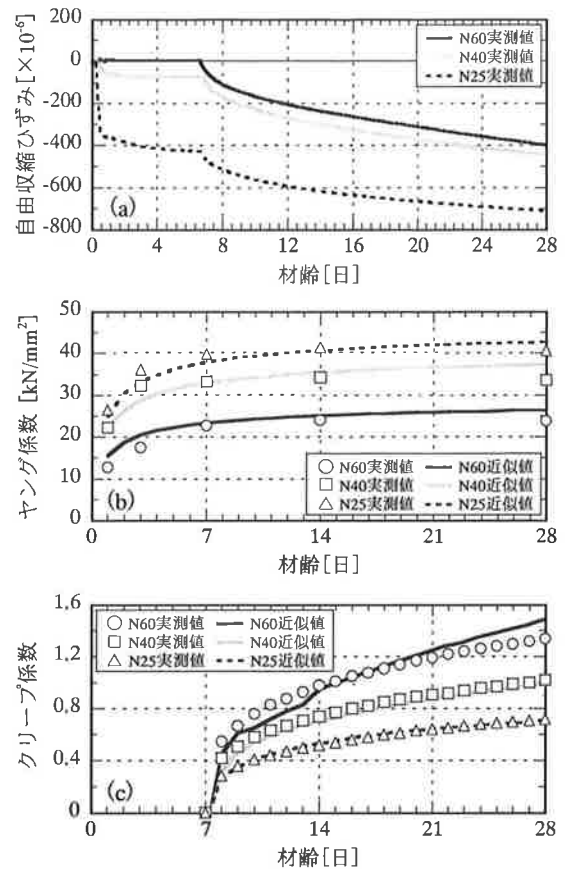


図 7 収縮応力解析に用いた解析パラメータ

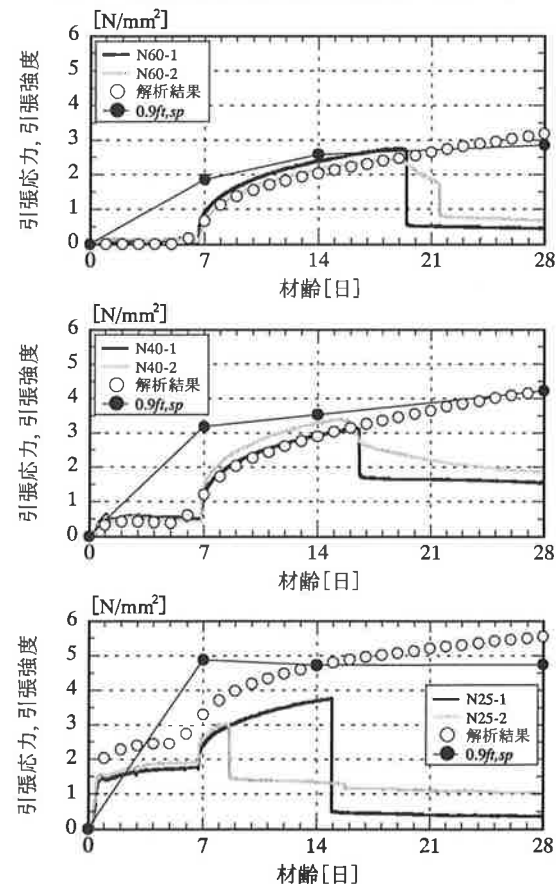


図 8 拘束応力実験結果と解析結果

#### 4. まとめ

本研究では、W/C の異なるコンクリートの収縮挙動に関する実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 低 W/C のコンクリートは、乾燥収縮やクリープによるひずみは小さいが、材齢 1 日以内に急激な自己収縮ひずみが発生する。
- 2) 既往の収縮予測式による解析では、自己収縮ひずみは宮澤式が、乾燥収縮ひずみは土木学会普通強度式が、クリープ係数については MC90 式や MC90&JCI 式が全

体的に実測値と対応する結果となった。

- 3) 乾燥収縮ひび割れ試験を行った結果、W/C60%~40% のコンクリートでは収縮応力解析結果と良く一致したが、W/C25%の高強度コンクリートにおいては、大きな差が生じた。

今後の課題として、高強度コンクリートにおけるひび割れ発生挙動を予測するため、若材齢時のクリープ特性やヤング係数を正確に推定する手法を開発する必要があると考える。

#### 謝 辞

本研究は、大同工業大学工学部建築学科教授山本俊彦先生のご指導を受け、共同で行ったものである。研究を進めるにあたり、多大なご指導・ご協力を頂きましたことをここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物への収縮ひび割れメカニズムと対応技術の現状－, 2003.4
- 2) 日本コンクリート工学協会：自己収縮委員会報告書, pp.123-132, 1996.11
- 3) CEB-FIP MODEL CODE 1990 : Comite Euro-International du Beton, Thomas Telford Ltd, 1993

## SHRINKAGE CRACKING PROPERTIES OF CONCRETE SPECIMEN WITH EMBEDDED REBAR

T.Oh-oka and H.Honda

For the purpose of obtaining fundamental data about the shrinkage cracking of concrete, the test for drying shrinkage cracking of restricted concrete, the measuring of shrinkage strain of concrete and of creep strain were performed. As the results, the drying shrinkage of concrete with lower water-cement ratio is decreasing, however the autogeneous shrinkage is increasing greatly during early age. The test results of drying shrinkage strain of concrete correspond to computed results from shrinkage prediction formula of JSCE (normal strength concrete formula), and the test results of creep coefficient correspond to MC90 formula comparatively. In drying shrinkage cracking test, the stress of the test correspond to analysis stress from step by step method, without high-strength concrete with W/C=0.25.