

## 論文 低収縮化高強度コンクリートの収縮ひずみ予測式の検討

谷村 充<sup>\*1</sup>・三谷 裕二<sup>\*2</sup>・松本 健一<sup>\*2</sup>・佐藤 良一<sup>\*3</sup>

要旨：普通および低熱ポルトランドセメントを用い、膨張材、収縮低減剤を単独使用または併用した低収縮化高強度コンクリートについて、凝結始発からの自己収縮・膨張ひずみおよび材齢 7 日からの乾燥収縮ひずみ性状を、混和材・剤の使用量を変化させて実験的に検討し、着目した低収縮化材料を組み合わせる用いることにより、種々のレベルに収縮量を制御した高強度コンクリートを実現できることを確認した。さらに、収縮低減剤の効果を取り入れて既存の乾燥収縮ひずみ予測式に修正を加え、筆者らによる自己収縮・膨張ひずみ予測式と重ね合わせて用いることにより、概ね  $\pm 20\%$  の精度で全収縮ひずみを評価できることを検証した。

キーワード：高強度コンクリート、収縮ひずみ、膨張材、収縮低減剤、低熱セメント、予測式

## 1. はじめに

コンクリートの高強度化に伴う固有の問題としてクローズアップされている自己収縮は、RC 部材のひび割れ幅を増大させるなど、その使用時性能に悪影響を及ぼすため<sup>1)</sup>、その抑制技術を確立する必要がある。自己収縮の低減方法のうち、材料的アプローチによる方法については既に、基本的な知見が得られており、一般に入手可能な混和材料では膨張材や収縮低減剤の有効性が、セメントでは高ピーライト・低間隙相系の組成を有するセメントの自己収縮が小さいことが知られている<sup>2),3)</sup>。しかしながら、高強度コンクリートのひずみ挙動に及ぼす膨張材や収縮低減剤の作用に関する研究の蓄積はまだ少なく、また、これら材料による収縮低減や膨張の効果を取り入れたひずみ予測式の検討は過去行われておらず、設計に資する上でその構築が望まれる。

以上の観点より、筆者らは、普通および低熱ポルトランドセメントを用い、膨張材、収縮低減剤を単独使用または併用した低収縮化高強度コンクリートの自己収縮・膨張ひずみ特性を、混和材・剤の使用量を変化させて実験的に把握し、また、そのひずみ予測式について検討・提示した<sup>4)</sup>。本研究では、同様のコンクリートについて、材齢 7 日から乾燥を与える実験を行い、全収縮ひずみの低減に及ぼす着目

材料の使用効果を明らかにしつつ、乾燥収縮ひずみの予測式について検討を加えた。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料

セメントには、普通ポルトランドセメント(N, 密度:  $3.16 \text{ g/cm}^3$ , 比表面積:  $3310 \text{ cm}^2/\text{g}$ )および低熱ポルトランドセメント(L, 密度:  $3.22 \text{ g/cm}^3$ , 比表面積:  $3280 \text{ cm}^2/\text{g}$ )を使用した。膨張材には石灰系(密度:  $3.14 \text{ g/cm}^3$ , 比表面積:  $3310 \text{ cm}^2/\text{g}$ )を、収縮低減剤には低級アルコールアルキレンオキシド付加物を用いた。細骨材には小笠原の陸砂(表乾密度:  $2.60 \text{ g/cm}^3$ , 吸水率:  $1.44\%$ )、粗骨材には岩瀬産の碎石(最大寸法:  $20 \text{ mm}$ , 表乾密度:  $2.64 \text{ g/cm}^3$ , 吸水率:  $0.82\%$ )を用いた。また、ポリカルボン酸エーテル系の高性能減水剤を使用した。

## 2.2 実験水準およびコンクリートの配合

セメントおよび混和材料の組み合わせ、ならびにそれぞれの記号を表 - 1 に示す。膨張材および収縮低減剤の使用量は、それぞれ  $30 \sim 60 \text{ kg/m}^3$  および  $6 \sim 12 \text{ kg/m}^3$  の範囲で変化させた。記号について、例えば、N-40-6 で説明すると、“N”はセメントの種類、“40”は膨張材の単位量( $\text{kg/m}^3$ )、“6”は収縮低減剤の単位量( $\text{kg/m}^3$ )を表す。コンクリートの配合条件を

\*1 太平洋セメント(株) 中央研究所研究開発部主任研究員 博士(工学) (正会員)

\*2 太平洋セメント(株) 中央研究所研究開発部 工修 (正会員)

\*3 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻 工博 (正会員)

表 - 1 実験水準

| セメントの種類                   |    | 普通ポルトランドセメント |         |         |         |         | 低熱ポルトランドセメント |         |         |         |         |
|---------------------------|----|--------------|---------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|---------|
| 膨張材(kg/m <sup>3</sup> )   |    | 0            | 30      | 40      | 50      | 60      | 0            | 30      | 40      | 50      | 60      |
| 収縮低減剤(kg/m <sup>3</sup> ) | 0  | N-0-0        | N-30-0  | N-40-0  | N-50-0  | N-60-0  | L-0-0        | L-30-0  | L-40-0  | L-50-0  | L-60-0  |
|                           | 6  | N-0-6        | N-30-6  | N-40-6  | N-50-6  | N-60-6  | L-0-6        | L-30-6  | L-40-6  | L-50-6  | L-60-6  |
|                           | 9  | N-0-9        | N-30-9  | N-40-9  | N-50-9  | N-60-9  | L-0-9        | L-30-9  | L-40-9  | L-50-9  | L-60-9  |
|                           | 12 | N-0-12       | N-30-12 | N-40-12 | N-50-12 | N-60-12 | L-0-12       | L-30-12 | L-40-12 | L-50-12 | L-60-12 |

表 - 2 コンクリートの配合条件

|                 |                                      |
|-----------------|--------------------------------------|
| 水/(セメント + 膨張材)比 | 30 %                                 |
| 単位水量            | 175 kg/m <sup>3</sup>                |
| 単位粗骨材絶対容積       | 0.315 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> |
| スランプフロー         | 60 ± 10 cm                           |
| 空気量             | 2 %以下                                |

表 - 2 に示す。膨張材はセメントの内割で混和し、収縮低減剤および高性能減水剤は単位水量の一部として添加した。コンクリートは水平 2 軸形強制練りミキサを用い、モルタル部を 180 秒間練り混ぜた後に粗骨材を投入し、60 秒間練り混ぜて製造した。練混ぜおよび打込みは 20 ± 80% R.H. の室内で行った。

### 2.3 供試体の作製および養生方法

コンクリートの収縮・膨張ひずみを測定するための供試体は、その寸法を 100 × 100 × 400 mm とし、各配合に対して 4 本作製した。供試体の作製は、「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(改訂版 2002)」<sup>5)</sup>(以下、JCI 法)に準じて行った。供試体の養生方法は、コンクリート打込み終了後直ちに表面仕上げを行い、水分の逸散を防ぐためにポリエステルフィルム(厚さ 0.1 mm)で表面を覆い、さらにその上を湿布で覆った。脱型は、材齢 1 日の時点で行い、直ちに供試体の全面をアルミ箔粘着テープ(厚さ 0.05 mm)でシールし、封緘養生を開始した。4 本作製した供試体のうちの 2 本は、材齢 7 日の時点でアルミ箔粘着テープを取り除き、乾燥養生を開始した。封緘養生の温度は 20 ± 2 °C、乾燥養生の条件は温度 20 ± 2 °C、相対湿度 60 ± 5% とした。また、圧縮強度測定用の供試体(φ 100 × 200 mm)を各配合に対して 6 本作製し、上記封緘養生と同様の養生を行った。

### 2.4 試験方法

脱型以前の長さ変化の測定は、高感度変位計(精度: 0.001 mm)を用い、JCI 法<sup>5)</sup>に準じて行った。温度による長さの補正は、熱電対を用いて測定した供試体中心部の温度より、コンクリートの線膨張係数

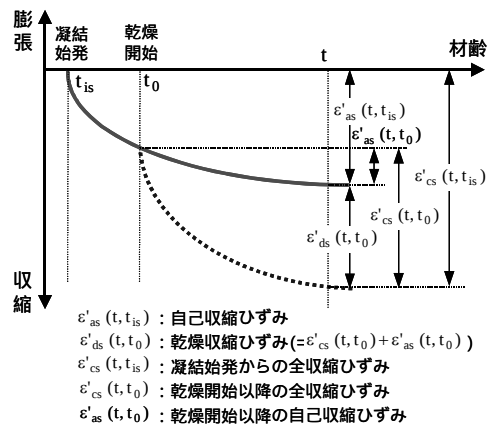


図 - 1 各種ひずみの定義

を  $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  と仮定して行った。封緘養生供試体の脱型以降および乾燥養生供試体の長さ変化は、JIS A 1129-2 に準じ、供試体作製時に設置したゲージブラグ間の距離(標点距離: 250 mm)をコンタクトゲージ(精度: 0.001 mm)を用いて測定した。自己収縮・膨張ひずみの材齢軸上の原点は凝結の始発時点とし、長さ変化の測定は材齢 91 日まで行った。結果の考察では、封緘養生供試体および乾燥養生供試体のそれぞれについて、供試体 2 本の平均値を用いる。また、すべての配合のコンクリートについて、JIS A 1147 に準じて凝結時間を測定した。圧縮強度は、材齢 28 および 91 日において JIS A 1108 に準じて測定した。

### 3. 各材料による収縮ひずみの低減効果

以下、各種ひずみを図 - 1 に示すように定義<sup>6)</sup>し、特に全収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみの低減に及ぼす低熱セメント、膨張材、収縮低減剤あるいはこれら併用の効果を、普通セメントを用いた場合と比較して検討する。乾燥収縮ひずみについては、乾燥収縮と自己収縮に単純な重ね合わせが成り立つ(乾燥の有無により自己収縮が変わらない)ものと仮定し、乾燥開始以降の全収縮ひずみから乾燥開始以降の自己収縮ひずみを差し引いて求める。なお、本論文では収縮ひずみを負、膨張ひずみを正として表す。

### 3.1 低熱セメント

凝結始発からの全収縮ひずみおよび乾燥開始以降の全収縮ひずみの経時変化を図 - 2 に示す。材齢 91 日の全収縮ひずみは N-0-0 が約  $-800 \times 10^{-6}$ 、L-0-0 が約  $-600 \times 10^{-6}$  であり、L-0-0 の方が 25% 程度小さい。乾燥開始以降の全収縮ひずみは両者でほぼ同様であり、低熱セメントによる全収縮ひずみの低減量は、材齢 7 日までの自己収縮ひずみの低減量に依存する。なお、自己収縮ひずみは、材齢 91 日の時点で N-0-0 が約  $-440 \times 10^{-6}$ 、L-0-0 が約  $-170 \times 10^{-6}$  であった。

乾燥収縮ひずみの経時変化を図 - 3 に示す。自己収縮ひずみ成分を取り除いた乾燥収縮ひずみでみると、L-0-0 の方が大きく表れる。乾燥収縮ひずみの予測について、図に併記した計算値は示方書の予測式<sup>5)</sup>(式(1))より算定したものであるが、実測値を過小に評価している。これは本研究で用いた供試体の寸法(体積表面積比: 約 22 mm)が、示方書式の適用範囲(体積表面積比: 100 ~ 300 mm)よりも小さく、乾燥がより進みやすいためであると考えられる。一方、乾燥収縮ひずみの最終値については、セメント種類による圧縮強度の違いを考慮することにより、ほぼ適切に評価できているものと考えられる。そこで、乾燥収縮ひずみの最終値は示方書式に準じた値とし、本研究の実測値を回帰して乾燥収縮の経時変化特性を表す係数(式(1)の $\beta$ )を求めると、N-0-0: 10.5、L-0-0: 10.9(示方書式では $\beta=31.5$ )が得られる。この $\beta$ 値による計算値を実測値と比較すると図 - 4 のようであり、ほぼ良く表現できている。

$$\varepsilon'_{ds}(t, t_0) = \varepsilon'_{ds\infty} \cdot (t - t_0) / \{\beta + (t - t_0)\} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon'_{ds}(t, t_0)$ : コンクリートの材齢  $t_0$  から材齢  $t$  までの乾燥収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )、 $\beta$ : 乾燥収縮の経

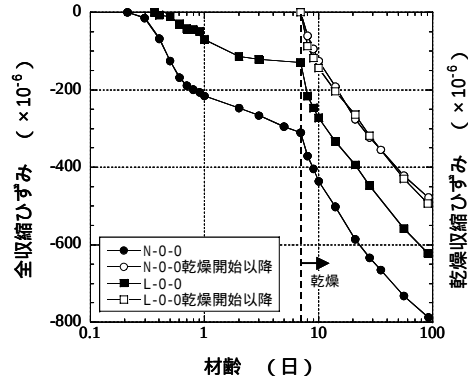


図 - 2 全収縮(セメントの影響)

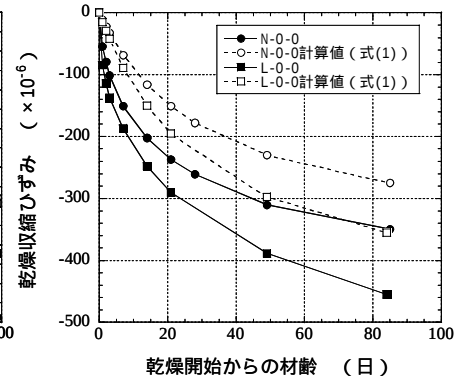


図 - 3 乾燥収縮(セメントの影響)

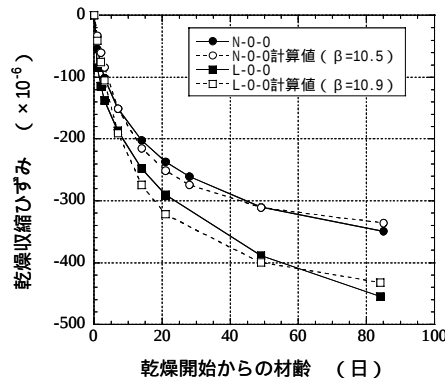


図 - 4 計算値と実測値の比較

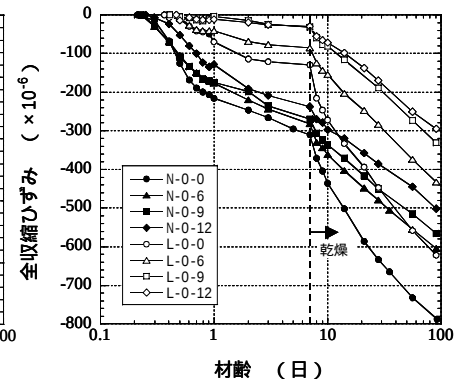


図 - 5 全収縮(収縮低減剤の影響)

時変化特性を表す項 ( $= 4W\sqrt{V/S} / (100 + 0.7t_0)$ ),  $\varepsilon'_{ds\infty}$ : 乾燥収縮ひずみの最終値 ( $= \varepsilon'_{dsp} / (1 + \eta \cdot t_0)$ ),  $\varepsilon'_{dsp} = \alpha(1 - RH/100)W / \{1 + 150 \exp(-500/f'_c(28))\}$ ,  $\eta = 10^{-4} \{15 \exp(0.007f'_c(28)) + 0.25W\}$ ,  $W$ : 単位水量 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $V/S$ : 体積表面積比 (mm),  $RH$ : 相対湿度 (%),  $f'_c(28)$ : 材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $\alpha$ : セメントの種類の影響を表す係数 ( $\alpha=11$ ),  $t_0$  および  $t$ : 乾燥開始時および乾燥中のコンクリートの有効材齢 (日)

### 3.2 収縮低減剤

収縮低減剤を添加したコンクリートの全収縮ひずみの経時変化を図 - 5 に示す。収縮低減剤の作用を凝結始発から時系列的にみれば、まず乾燥を開始するまでの自己収縮ひずみの低減に寄与し、次いで乾燥下の全収縮ひずみを低減する。すなわち、収縮低減剤は毛細管張力を駆動力として生じる収縮ひずみに対し、明らかにこれを抑制する効果を有する。この作用により、材齢 91 日の全収縮ひずみは、普通セメントを用いた場合が  $500 \times 10^{-6}$  程度 (N-0-0 に対する低減率: 約 40%), 低熱セメントを用いた場合

が $300 \times 10^{-6}$ 程度 (L-0-0 に対する低減率: 約 50%) まで低減される。

図 - 6 に、収縮低減剤添加コンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を例示する。また、図 - 7 に収縮低減剤無添加コンクリートを基準とした場合の乾燥材齢 84 日における乾燥収縮ひずみの比を示す。

乾燥収縮ひずみの低減効果は、セメント種類に拘わらず 25 ~ 45% 程度であり、添加量が多くなるほど低減率が大きい。なお、図 - 6 には、 $\beta$  の修正値を用いて求めた乾燥収縮ひずみの計算値を併記しているが、式(1)では収縮低減剤による乾燥収縮の低減効果を考慮できないために、実測値を過大に評価している。

### 3.3 膨張材

膨張材を混和したコンクリートの全収縮・膨張ひずみの経時変化を図 - 8 に示す。乾燥開始以降の全収縮ひずみに着目すると、いずれのセメントを用いた場合も膨張材を混和した場合が小さく、乾燥材齢 84 日の時点において 20 ~ 40% 程度の低減効果を生じている。乾燥を開始した材齢 7 日までの自己収縮低減作用に乾燥開始以降の全収縮ひずみの低減作用が加わる結果、膨張材混和コンクリートの全収縮ひずみは小さいレベルにとどまり 材齢 91 日において、普通セメントを用いた場合が  $-550 \sim -150 \times 10^{-6}$  程度 (N-0-0 に対する低減率: 約 20 ~ 80%)、低熱セメントを用いた場合が L-0-0 に対して混和量  $50 \text{ kg/m}^3$  でほぼゼロ  $60 \text{ kg/m}^3$  まで増やしたときにはおよそ  $200 \times 10^{-6}$  の膨張ひずみが残存した。

膨張材混和コンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を図 - 9 に例示する。自己収縮・膨張ひずみ成分が取り除かれたことにより、膨張材無混和コンクリートとの差が小さくなり、膨張材混和量の影響も

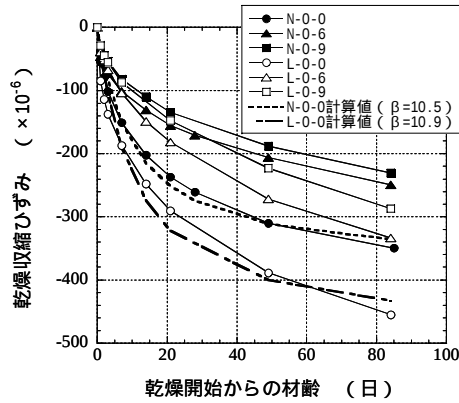


図 - 6 乾燥収縮(収縮低減剤の影響)

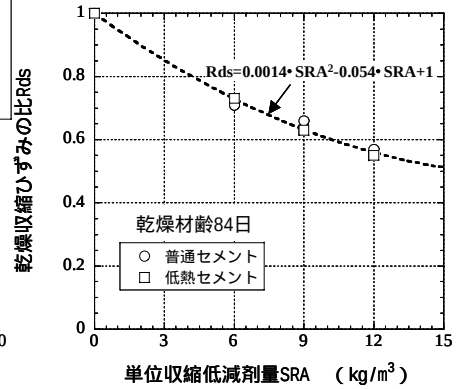


図 - 7 乾燥収縮比と低減剤量の関係

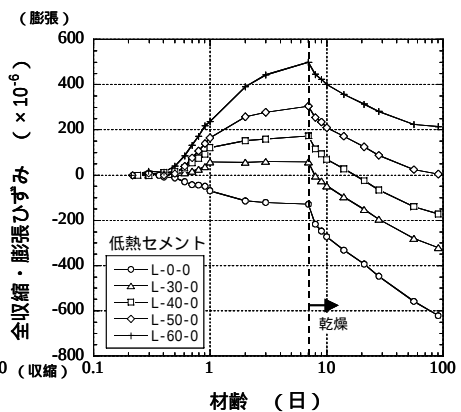
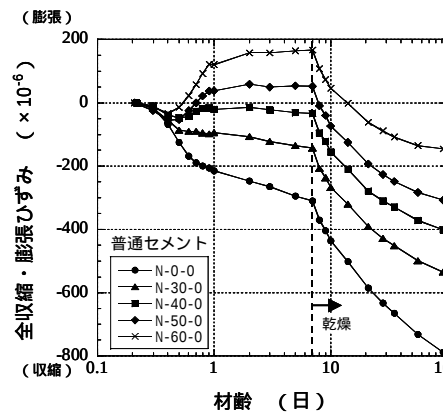


図 - 8 全収縮(膨張材の影響)

小さくなる。これより、膨張材を混和したコンクリートの乾燥収縮ひずみは、無混和のものと同様

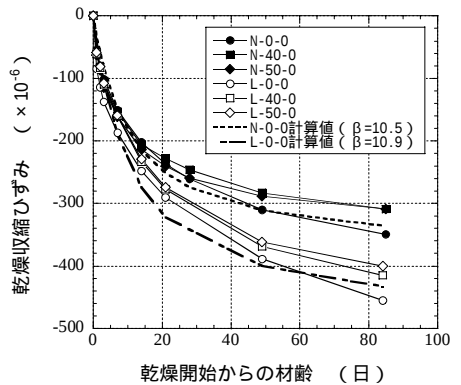


図 - 9 乾燥収縮(膨張材の影響)

に取り扱うことができると考えられる。

### 3.4 膨張材・収縮低減剤併用時

図 - 10 に、膨張材・収縮低減剤併用時の全収縮・膨張ひずみの経時変化を例示する。膨張材と収縮低減剤は併用した場合も、双方の作用がほぼ独立して発揮されることより、全収縮ひずみは非常に小さいレベルにとどまる。材齢 91 日における全収縮ひずみは、普通セメントを用いた場合が膨張材混和量  $50 \text{ kg/m}^3$  まででおよそ  $-300 \sim 0 \times 10^{-6}$  (N-0-0 に対する低減率: 約 60 ~ 100%)、 $60 \text{ kg/m}^3$  では  $150 \sim 250 \times 10^{-6}$

程度の膨張ひずみが残存した。  
低熱セメントを用いた場合は、  
L-0-0 の $-600 \times 10^{-6}$  に対し大きいもので $-120 \times 10^{-6}$  の収縮ひずみにとどまり、膨張材を  $40 \text{ kg/m}^3$  以上用いたものは、 $100 \sim 750 \times 10^{-6}$  程度の膨張ひずみが残存した。

図 - 11 に、膨張材を単独で用いたコンクリートを基準とした場合の乾燥材齢 84 日における乾燥収縮ひずみの比を示す。膨張材併用時の収縮低減剤による乾燥収縮ひずみの低減効果は、セメントの種類に拘わらず 30～50%程度であり、膨張材の使用量が多くなるほど低減率が大きく表れる。

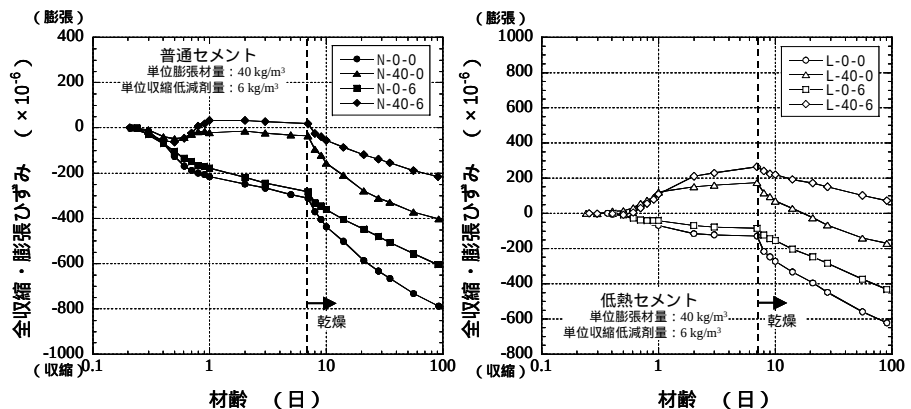
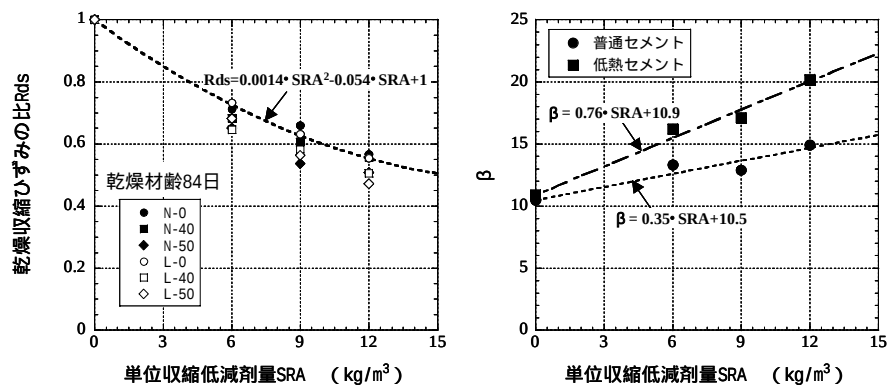


図 - 10 膨張材・収縮低減剤併用時の全収縮・膨張ひずみの経時変化の例



#### 4. 低収縮化高強度コンクリートの乾燥収縮予測式

以下、示方書の乾燥収縮ひずみ予測式(1)を基礎として、本実験結果より、乾燥収縮低減への影響が明らかな収縮低減剤の効果を取り入れたひずみ予測式について検討する。また、筆者らが過去に示した<sup>4)</sup>、膨張材および収縮低減剤の効果を検討した自己収縮・膨張ひずみの予測式と組み合わせて用いた場合の、全収縮ひずみの予測精度を検証する。

乾燥収縮ひずみの最終値に及ぼす収縮低減剤の影響は、図 - 7 に示した乾燥収縮ひずみ比を、収縮低減剤の作用を表す項として示方書式に追加し、式(2)により表現する。乾燥収縮ひずみの経時変化特性を表す項について、式(2)における  $R_{ds}$  を反映し、実測値を回帰して収縮低減剤添加コンクリートの  $\beta$  値を求め、単位収縮低減剤量との関係を図 - 12 に示す。これより、 $\beta$  値は収縮低減剤の増加に伴って直線的に大きくなっており、収縮低減剤の作用として考慮することとした。なお、式(2)において、乾燥収縮ひずみの最終値を求める際の圧縮強度には、収縮低減剤無添加コンクリートの値を用いる。

$$\varepsilon'_{ds}(t, t_0) = \varepsilon'_{ds\infty} \cdot R_{ds} \cdot (t - t_0) / \{\beta + (t - t_0)\} \quad (2)$$

ここに、 $R_{ds}$ ：収縮低減剤による乾燥収縮ひずみの低減効果を表す項、普通および低熱セメントの場合： $R_{ds} = 0.0014 \cdot \text{SRA}^2 - 0.054 \cdot \text{SRA} + 1$ ， $\beta$ ：乾燥収縮の経時変化特性を表す項、普通セメントの場合： $\beta = 0.35 \cdot \text{SRA} + 10.5$ ，低熱セメントの場合： $\beta = 0.76 \cdot \text{SRA} + 10.9$ ， $\text{SRA}$ ：収縮低減剤の単位量 ( $\text{kg/m}^3$ ) ( $6 \text{ kg/m}^3 \leq \text{SRA} \leq 12 \text{ kg/m}^3$ )。

収縮低減剤添加コンクリートの全収縮ひずみの計算値と実測値を比較して図 - 13 に例示する。乾燥収縮ひずみの最終値およびその経時変化特性の双方に修正を加えた式(2)より、全収縮ひずみを精度良く評価できている。また、膨張材混和コンクリートの全収縮ひずみの計算値と実測値を比較して図 - 14 に例示するが、精度良い予測が可能となっている。さらに、図 - 15 は、膨張材と収縮低減剤を併用したすべてのコンクリートについて、全収縮ひずみの計算値と実測値の関係を示したものであり、概ね  $\pm 20\%$  の精度が確保されている。

## 5. 圧縮強度特性

圧縮強度の試験結果より、膨張材および収縮低減剤の使用量の増加に伴い、圧縮強度が徐々に小さくなる傾向が認められた。式(3)～式(6)は、セメント種類および材齢別に、膨張材・収縮低減剤を用いないコンクリートを基準とした場合の圧縮強度の比( $f_c'$ 比)

を目的変数、膨張材および収縮低減剤の単位量を説明変数として求めた線形重回帰式である。いずれの式も分散分析の結果は 1%有意であった。

$$f_c' \text{比}(N,28d) = -0.001 \cdot EX - 0.009 \cdot SRA + 0.954 \quad (3)$$

$$f_c' \text{比}(N,91d) = -0.002 \cdot EX - 0.007 \cdot SRA + 0.991 \quad (4)$$

$$f_c' \text{比}(L,28d) = -0.002 \cdot EX - 0.013 \cdot SRA + 0.949 \quad (5)$$

$$f_c' \text{比}(L,91d) = -0.002 \cdot EX - 0.007 \cdot SRA + 0.984 \quad (6)$$

ここに、EX, SRA:それぞれ膨張材および収縮低減剤の単位量(kg/m<sup>3</sup>)。これより、例えば、膨張材および収縮低減剤の単位量をそれぞれ 40 kg/m<sup>3</sup> および 6 kg/m<sup>3</sup> とした条件で圧縮強度比を試算すると、材齢 91 日において、膨張材単独で約 0.9, 収縮低減剤単独で約 0.95, 併用した場合で 0.87 程度となる。本研究では、膨張材や収縮低減剤を使用した場合も、水セメント比を補正せずにすべての検討を行っているが、実際の適用にあたっては、圧縮強度等、低収縮性以外の他の要求性能とのバランスを考慮して、これら混和材料の最適使用量を定める必要がある。

## 6. まとめ

本研究より、以下の知見が得られた。

- (1) 着目した材料はいずれも高強度コンクリートの収縮低減に効果を有し、組み合わせる用いることにより、種々のレベルに収縮量を制御した高強度コンクリートを実現できることを確認した。
- (2) 収縮低減剤の効果を考慮した乾燥収縮ひずみ予測式および筆者らによる自己収縮・膨張ひずみ予測式を重ね合わせて用いることにより、概ね  $\pm 20\%$  の精度で全収縮ひずみを評価できる。

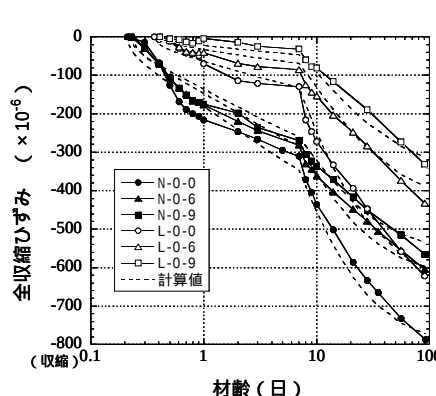


図 - 13 計算値と実測値(収縮低減剤)

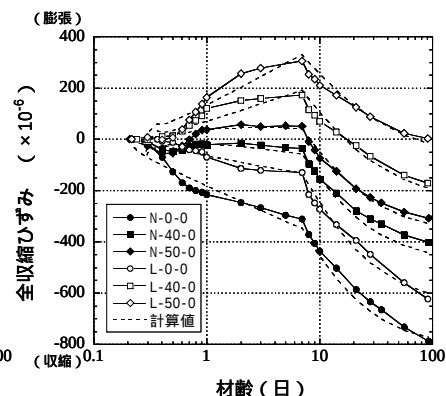


図 - 14 計算値と実測値(膨張材)

なお、低収縮化高強度コンクリート向けの汎用的ひずみ予測式の構築には、さらに温度や供試体寸法の影響などについて検討を進める必要がある。

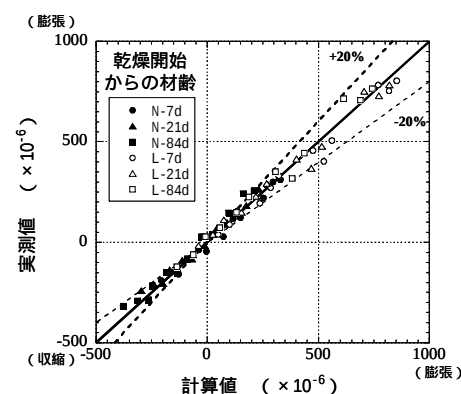


図 - 15 乾燥収縮(膨張材の影響)

## 参考文献

- 1) 谷村 充ほか: 若材齢時長さ変化を考慮した RC 曲げ部材のひび割れ・変形の一般化評価方法, 土木学会論文集, No.760/V-63, pp.181-195, 2004
- 2) 田澤榮一, 宮澤伸吾: セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響, 土木学会論文集, No.502/V-25, pp.43-52, 1994
- 3) 谷村 充ほか: 高強度コンクリートの収縮低減化に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.991-996, 2000
- 4) 谷村 充ほか: 低収縮化高強度コンクリートの自己収縮・膨張ひずみ予測式の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.493-498, 2005
- 5) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの自己収縮研究委員会報告書, pp. 51-54, 2002
- 6) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], pp.30-34, 2002