

論文 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

谷村 充^{*1}・三谷 裕二^{*2}・佐藤 良一^{*3}

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検討し，着目した低収縮化材料を組み合わせることで用いることにより，種々のレベルに自己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，既存の自己収縮ひずみ予測式を基礎とし，収縮低減剤および膨張材による収縮低減あるいは膨張ひずみを考慮した低収縮化高強度コンクリート向けのひずみ予測式を提示し， $\pm 20\%$ の精度を有することを示した。

キーワード：高強度コンクリート，自己収縮，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し¹⁾，高強度コンクリートに期待された高い構造性能と耐久性能を阻害する要因となるため，その抑制技術を確立する必要性は高い。材料的アプローチによる自己収縮の低減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^{2),3)}。しかしながら，高強度コンクリートに対する膨張材や収縮低減剤の使用効果に関する研究の蓄積は未だ少なく，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は過去になく，設計に資する上でその構築が望まれる。

そこで本研究では，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，その予測式について検討した。

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 g/cm³，比表面積：3310 cm²/g)および低熱ポルトランドセメント(L，密度：3.22 g/cm³，比表面積：3280 cm²/g)を使用した。膨張材には石灰系(密度：3.14 g/cm³，比表面積：3310 cm²/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 g/cm³，吸水率：1.44%)，粗骨材には岩瀬産の碎石(最大寸法：20 mm，表乾密度：2.64 g/cm³，吸水率：0.82%)を使用した。また，ポリカルボン酸エーテル系の高性能減水剤を用いた。

2.2 実験水準およびコンクリートの配合

着目した材料の組み合わせおよび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30～60 kg/m³および6～12 kg/m³の範囲で変化させた。記号について，例えば，N-40-9で説明すると，“N”はセメントの種類，“40”は膨張材の単位量(kg/m³)，“9”は収縮低減剤の単位量(kg/m³)を表す。

コンクリートの配合条件は，水/(セメント+膨張材)比を30%，単位水量を175 kg/m³，単位粗骨材絶対容積を0.315 m³/m³の一定とした。膨張材は，セメントに対して内割で混和し，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。コンクリートの流動性は，スランプフローが60±10 cm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 工修 (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 ³)		0	30	40	50	60	0	30	40	50	60
収縮 低減剤 (kg/m ³)	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

満たすよう、高性能減水剤の添加量により調整した。空気量は2%以下とした。コンクリートは、水平2軸形強制練りミキサを用い、モルタル部分を180秒間練り混ぜた後に粗骨材を投入し、さらに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.の試験室で行った。

2.3 供試体の作製および養生方法

コンクリートの自己収縮・膨張ひずみを測定するための供試体は、その寸法を100×100×400mmとし、各配合に対して2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)」⁴⁾(以下、JCI法)に準じて行った。また、圧縮強度測定用の供試体(φ100×200mm)を各配合に対して9本作製した。すべての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0.1mm)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日の時点でを行い、直ちに供試体の全面をアルミ箔粘着テープ(厚さ0.05mm)でシールし、封緘養生を開始した。封緘養生中の試験室内の温度は20±2の範囲で制御した。

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:0.001mm)を用い、JCI法⁴⁾に準じて行った。供試体中心部の温度を熱電対を用いて測定し、コンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して長さの補正を行った。脱型以降の長さ変化は、JIS A 1129-2(コンタクトゲージ法)に準じ、供試体作製時に設置しておいたゲージプラグ間の距離(標点距離:250mm)をコンタクトゲージ(精度:0.001mm)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、材齢91日まで長さ変化の測定を行った。結果の考察では、供試体2本

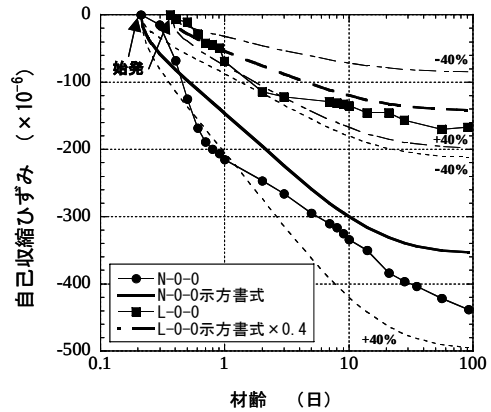


図-1 自己収縮に及ぼすセメント種類の影響

の平均値を用いる。凝結時間は全配合についてJIS A 1147に準じて測定した。圧縮強度は、材齢7, 28および91日においてJIS A 1108に準じて測定した。

3. 各材料による自己収縮ひずみの低減効果

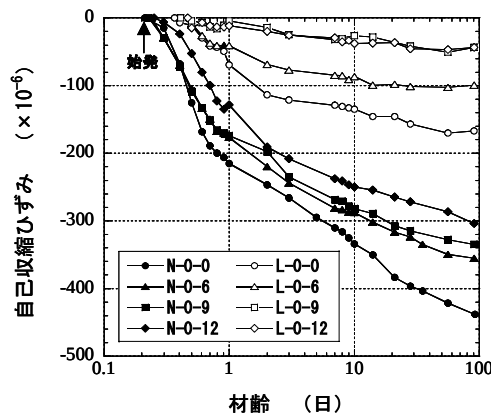
3.1 低熱ポルトランドセメント

N-0-0とL-0-0の自己収縮ひずみの経時変化を図-1に示す。図には、示方書⁵⁾に採用されている、田澤・宮澤の自己収縮ひずみ予測式⁶⁾(式(1), 以下、示方書式)より求めた計算値およびその±40%の範囲を併記する。低熱セメントを用いた場合の自己収縮ひずみは、川合らの研究⁷⁾を参考に、セメントの種類の影響を表す係数を0.4、自己収縮の進行特性を表す係数を普通セメントの場合と同じとして計算している。

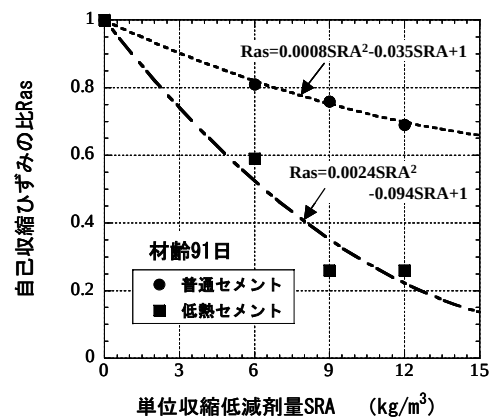
$$\varepsilon'_{as}(t, t_{is}) = \gamma \varepsilon'_{as\infty} [1 - \exp\{-a(t - t_{is})^b\}] \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon'_{as}(t)$:凝結の始発から材齢 t までのコンクリートの自己収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)、 γ :セメントおよび混和材の種類の影響を表す係数(普通セメント:1.0)、 $\varepsilon'_{as\infty}$:自己収縮ひずみの最終値($\times 10^{-6}$)($= 3070 \exp\{-7.2(W/C)\}$)、 W/C :水セメント比、 t_{is} :凝結の始発(日)、 a, b :自己収縮の進行特性を表す係数($W/C=0.3$: $a=0.6, b=0.5$)、 t, t_{is} :コンクリートの有効材齢(日)。

これより、低熱セメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみは、普通セメントの場合よりも明らかに小さいことが改めて確認できる。また、示方書式により、本結果をほぼ良く予測できている。



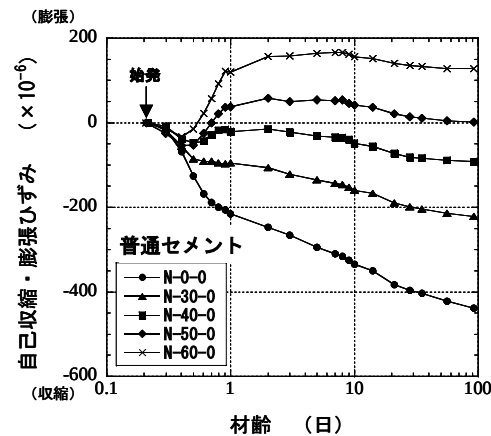
図－2 収縮低減剤の効果



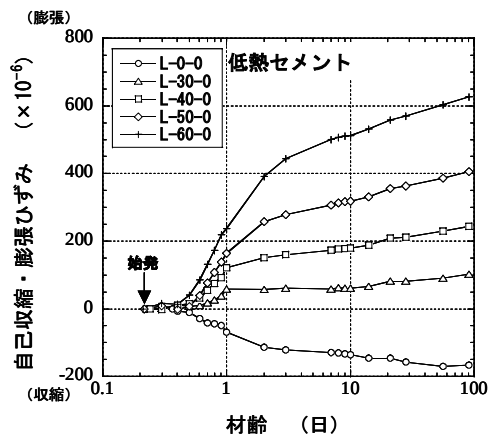
図－3 自己収縮ひずみ比と低減剤量の関係

3.2 収縮低減剤

収縮低減剤添加コンクリートの自己収縮ひずみの経時変化を図－2に示す。収縮低減剤は自己収縮ひずみの低減に明らかな効果を有し、図－3より、材齢91日における自己収縮ひずみの低減率は、普通セメントを用いた場合：20～30%程度、低熱セメントを用いた場合：40～70%程度である。



(a) 普通セメント

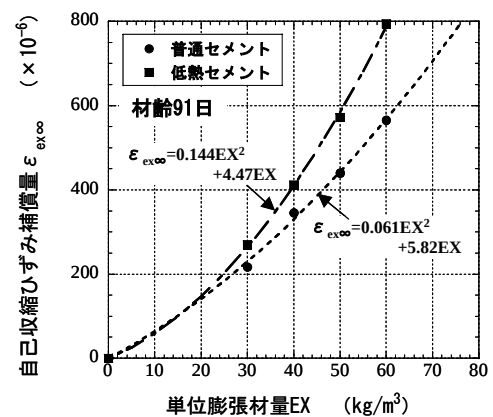


(b) 低熱セメント

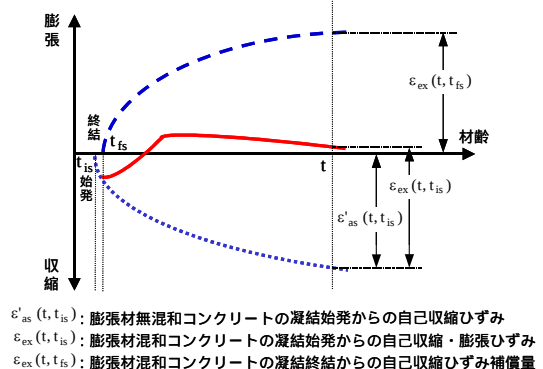
図－4 膨張材の効果

3.3 膨張材

膨張材混和コンクリートの自己収縮・膨張ひずみの経時変化を図－4に示す。材齢91日の時点で比較すると、普通セメントを用いた場合は、膨張材 30 kg/m³ の混和により自己収縮ひずみがほぼ半減し、40 kg/m³ の混和でおよそ80%の低減、50 kg/m³ では自己収縮ひずみがほぼ相殺されている。膨張材が自己収縮を大きく抑制する時期(凝結終結～数日)は、ベースコンクリートの自己収縮の発生が顕著な時期と対応しており、効果的に自己収縮が抑制されている。低熱セメントを用いた場合は、もとより自己収縮が小さいために、30 kg/m³ の混和で 100×10^{-6} 程度の膨張ひずみを生じ、混和量の増加に伴ってより顕著な膨張ひずみを生じ、60 kg/m³ まで増やしたときには、およそ 600×10^{-6} の膨張ひずみを生じた。このように、膨張材を用いた高強度コンクリートの絶対的な膨張ひずみ量は、ベースコンクリートの自己収縮ひずみ量に大きく依存する。



図－5 自己収縮ひずみ補償量と膨張材量の関係



図－6 自己収縮ひずみ補償量の定義

図-5は、材齢 91 日における自己収縮ひずみ補償量と単位膨張材量の関係を示す。自己収縮ひずみ補償量は、図-6にその定義を示すように、膨張材混和コンクリートと無混和コンクリートとのひずみ差を表し、その材齢

軸上の原点は、補償量が顕著に生じ始める凝結の終結時間とした。これより、膨張材量の増加に伴う補償量の増大傾向は、低熱セメントを用いた場合により大きい。

3.4 膨張材・収縮低減剤併用時

図-7は、膨張材・収縮低減剤併用時の自己収縮ひずみ補償量と単位膨張材量の関係を示す。同図には、膨張材を単独で用いたコンクリートに対する両者の関係も併記する。併用時の補償量については、収縮低減剤無添加コンクリートの自己収縮ひずみを基準として図-8に示すように定義した。収縮低減剤無添加コンクリートと添加コンクリートとの補償量の差が、膨張材併用時の相乗効果に対応しており、膨張材混和量が 40 kg/m^3 よりも多い場合に明らかな相乗効果を生じる。相乗効果の現れるメカニズムは十分に解明されておらず、今後の研究を待たなければならないが、その大部分は材齢 2~3 日までの膨張ひずみの増加に伴うものであり、収縮低減剤によってセメントおよび膨張材の水和反応に変化が生じ、膨張ひずみを大きくする方向に働いたことが考えられる。例えば、収縮低減剤の添加により、凝結から数日までの間におけるセメント硬化体の剛性が小さくなり（事実、凝結時間や強度発現が多少なりとも遅れる）膨張応力による変形量が大きくなった可能性が考えられる。

4. 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

以下、示方書の自己収縮ひずみ予測式(1)を基礎とし、そのひずみの最終値および進行特性に及ぼす収

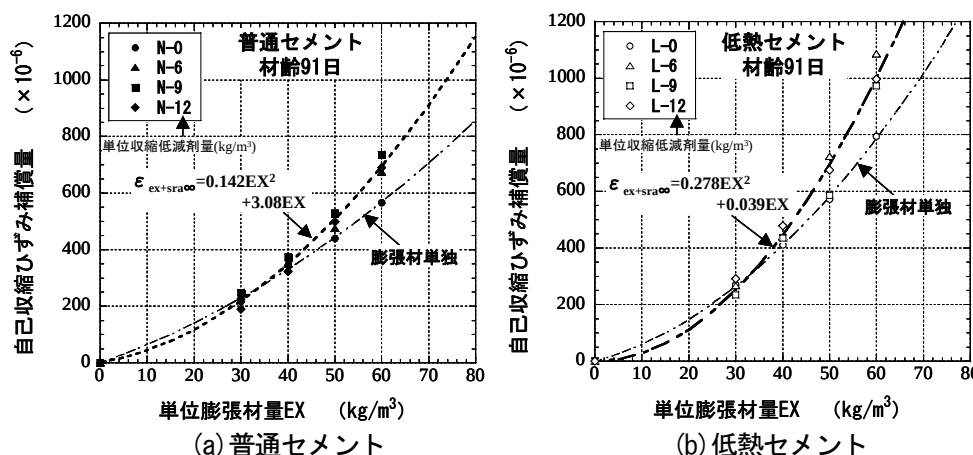


図-7 膨張材・収縮低減剤併用時の自己収縮ひずみ補償量と膨張材量の関係

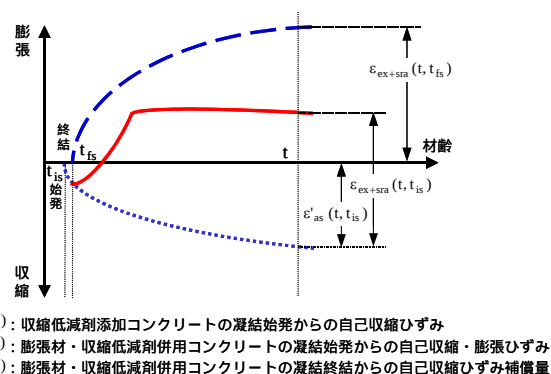


図-8 併用時の自己収縮ひずみ補償量の定義

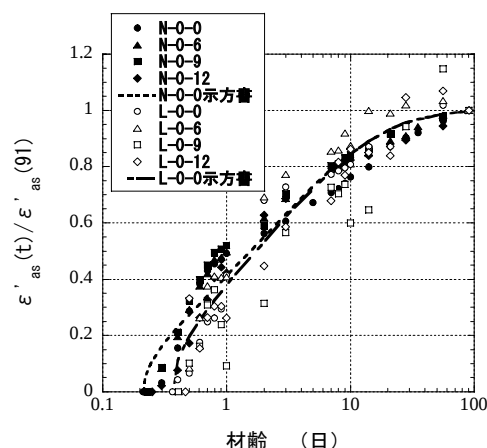


図-9 自己収縮の進行度に及ぼす低減剤の影響

縮低減剤の影響、さらに膨張材による自己収縮ひずみの補償量を考慮した、低収縮化高強度コンクリート向けのひずみ予測式について検討する。

4.1 収縮低減剤の効果を取り入れた予測式

自己収縮ひずみの最終値に及ぼす収縮低減剤の影響は、図-3の自己収縮ひずみ比を、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)により表現することとし、自己収縮の進行度に及ぼす収縮低減剤の影響は、図-9に示すように、収縮低減剤

の有無による差はさほど大きくないことより、示方書式の値をそのまま用いることとした。

$\varepsilon'_{as}(t, t_{is}) = \gamma \cdot R_{as} \cdot \varepsilon'_{as\infty} [1 - \exp\{-a(t - t_{is})^b\}]$ (2)
 ここに、 R_{as} ：収縮低減剤による自己収縮ひずみの低減効果を表す項、普通セメントの場合： $R_{as} = 0.0008 \cdot SRA^2 - 0.035 \cdot SRA + 1$ 、低熱セメントの場合： $R_{as} = 0.0024 \cdot SRA^2 - 0.094 \cdot SRA + 1$ 、 SRA ：単位収縮低減剤の量(kg/m^3) ($6 \text{ kg/m}^3 \leq SRA \leq 12 \text{ kg/m}^3$)、 a, b ：自己収縮の進行特性を表す係数 ($W/C=0.3$: $a=0.6, b=0.5$)

図-10 は、式(2)による計算値(収縮低減剤無添加コンクリートの自己収縮ひずみの最終値には実測値を使用)と実測値の関係を示しており、精度良く評価できている。

4.2 膨張材の効果を表す予測式

膨張材による自己収縮ひずみの低減効果は、先に定義した自己収縮ひずみ補償量により評価することとした。すなわち、膨張材混和高強度コンクリートの自己収縮・膨張ひずみは、示方書式(1)による膨張材無混和コンクリートの

自己収縮ひずみに、式(3)より求まる自己収縮ひずみの補償量を足し合わせることで表現するものである。自己収縮ひずみ補償量の進行特性は、図-11 に示すようであり、式(3)における係数 c および d の値は、セメント種類別に、配合ごとの実測値を用いて最小二乗法により回帰したときの平均値より定めた。

図-12 は、式(1)と式(3)の重ね合わせによる計算値(式(1)における自己収縮ひずみの最終値には実測値を使用)と実測値の関係を示しており、精度良く評価できている。

$$\varepsilon_{ex}(t, t_{fs}) = \varepsilon_{ex\infty} [1 - \exp\{-c(t - t_{fs})^d\}] \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon_{ex\infty}$ ：膨張材混和コンクリートの凝結終結からの自己収縮ひずみ補償量の最大値 ($\times 10^{-6}$)、普通セメントの場合： $\varepsilon_{ex\infty} = 0.061 \cdot EX^2 + 5.82 \cdot EX$ 、低熱セメントの場合： $\varepsilon_{ex\infty} = 0.144 \cdot EX^2 + 4.47 \cdot EX$ 、 EX ：膨張材の単位量(kg/m^3) ($30 \text{ kg/m}^3 \leq EX \leq 60 \text{ kg/m}^3$)、 t_{fs} ：凝結の終結、 c, d ：自己収縮ひずみ補償量の進行特性を表す係数、普通セメントの場合： $c=0.8, d=0.5$ 、低熱セメントの場合： $c=0.5, d=0.6$ 。

4.3 膨張材・収縮低減剤併用時の効果を表す予測式

膨張材・収縮低減剤併用時の自己収縮ひずみの低減効果については、相乗効果分を考慮することとした。すなわち、膨張材と収縮低減剤を併用したコンクリートの自己収縮・膨張ひずみは、式(2)による収縮低減剤添加コンクリートの自己収縮ひずみに、式(4)より求まる併用時の自己収縮ひずみ補償量を足し合わせることで表現するものである。併用時の補償量の進行特性に関する係数は、実測値を用いて回帰したときの平均値より、膨張材を単独で用い

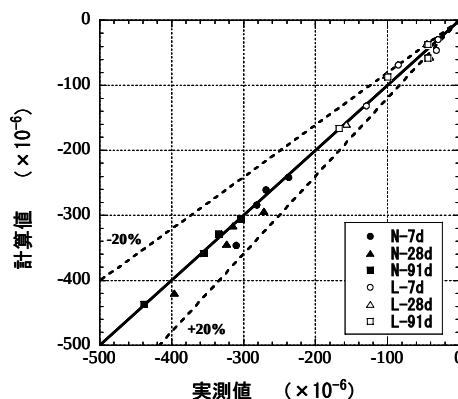


図-10 計算値と実測値の関係(低減剤)

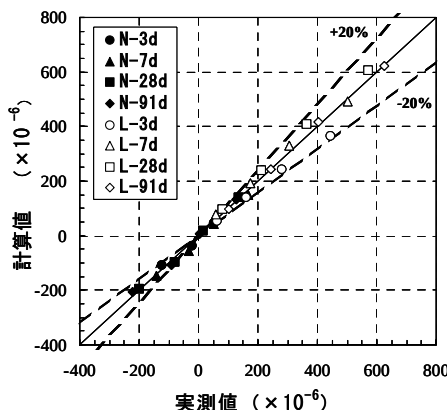


図-12 計算値と実測値の関係(膨張材)

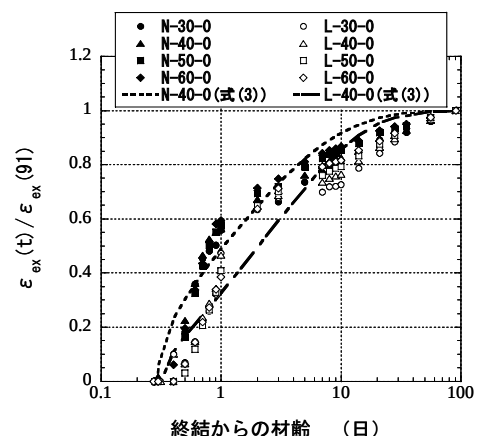


図-11 自己収縮補償量の進捗度

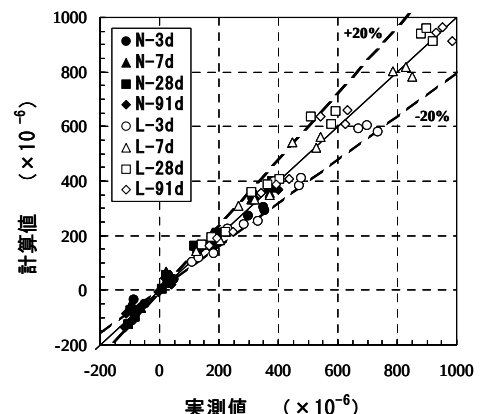


図-13 計算値と実測値の関係(併用時)

た場合と同じとして取り扱うこととした。

図-13 は、式(2)と式(4)の重ね合わせによる計算値(式(2)における自己収縮ひずみの最終値には実測値を使用)と実測値の関係を示しており、概ね $\pm 20\%$ の精度で評価できている。

$\varepsilon_{ex+sra}(t, t_{fs}) = \varepsilon_{ex+sra\infty} [1 - \exp\{-c(t - t_{fs})^d\}]$ (4)
ここに、 $\varepsilon_{ex+sra\infty}$: 膨張材・収縮低減剤併用コンクリートの凝結終結からの自己収縮ひずみ補償量の最大値 ($\times 10^{-6}$)、普通セメントの場合： $\varepsilon_{ex+sra\infty} = 0.142 \cdot EX^2 + 3.08 \cdot EX$ 、低熱セメントの場合： $\varepsilon_{ex+sra\infty} = 0.278 \cdot EX^2 + 0.039 \cdot EX$ 、係数 c, d の値は式(3)と同じ、併用する収縮低減剤の単位量の範囲は $6 \sim 12 \text{ kg/m}^3$ 。

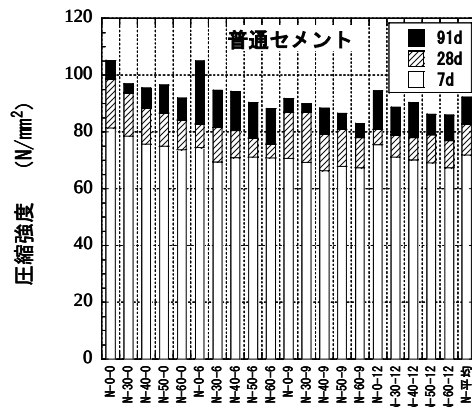
5. 圧縮強度特性

圧縮強度の試験結果を図-14 に示す。膨張材および収縮低減剤は圧縮強度に影響を及ぼし、使用量の増加に伴って徐々に圧縮強度が小さくなり、両者を併用した場合は、各々を単独で用いた場合よりもさらに圧縮強度が小さくなる傾向が認められる。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たが、所要の圧縮強度を満たすための水セメント比は、セメントの種類、膨張材や収縮低減剤の有無により多少なりとも異なる。実際には、低収縮性以外の他の要求性能を考慮して、膨張材、収縮低減剤の最適な使用量を決める必要がある。

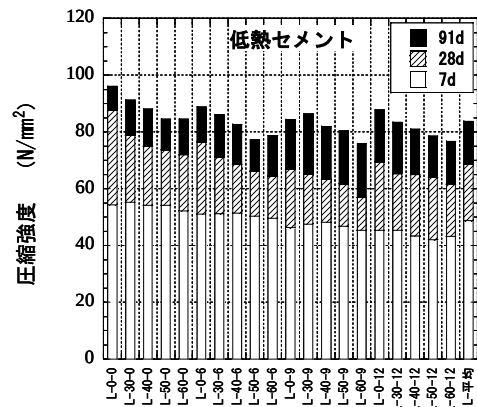
6. まとめ

本研究より、以下の知見が得られた。

- (1) 着目した材料(膨張材、収縮低減剤、低熱セメント)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、組み合わせで用いることにより、種々のレベルに自己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。



(a) 普通セメント



(b) 低熱セメント

図-14 圧縮強度特性

- (2) 既存の自己収縮ひずみ予測式を基礎とし、収縮低減剤および膨張材による収縮低減あるいは膨張ひずみを考慮した低収縮化高強度コンクリート向けのひずみ予測式を提示し、 $\pm 20\%$ の精度を有することを示した。

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

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) 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
- 5) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書 [構造的な性能照査編]，pp.30-34，2002
- 6) 田澤榮一，宮澤伸吾：コンクリートの自己収縮ひずみの予測法に関する研究，土木学会論文集，No.571/V-36，pp.211-219，1997
- 7) 川合雅弘ほか：各種セメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみ予測式，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，pp.1285-1286，2002