

論文 低収縮化高強度コンクリートの長期長さ変化特性

谷村 充^{*1}・三谷 裕二^{*2}・松本 健一^{*2}・佐藤 良一^{*3}

要旨：普通および低熱セメントを用い，膨張材，収縮低減剤を単独または併用して低収縮化した高強度コンクリートを対象に，凝結始発からの自己収縮・膨張ひずみ性状および材齢 7 日からの収縮ひずみ性状を材齢約 4 年まで，また，同コンクリートの鉄筋拘束による収縮・膨張応力性状を材齢約 2.5 年まで実験的に検討した。その結果，低熱セメントの自己収縮ひずみ・同応力は長期に渡り低いレベルに止まること，膨張材は収縮ひずみ・同応力の低減に特に効果的であり，長期的にも有意な効果を有すること，膨張材・収縮低減剤併用の効果は，ひずみ・応力ともに各々の効果を足し合わせるにより長期までほぼ表現できること，などが明らかとなった。

キーワード：高強度コンクリート，長さ変化，膨張材，収縮低減剤，低熱ポルトランドセメント

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耐久性能を阻害する要因ともなるため，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²⁾。筆者らはこれまで，膨張材や収縮低減剤の使用効果をより明確化する観点から，これらの単独使用または併用による高強度コンクリートの収縮低減効果に加え，鉄筋の拘束を受けて生じる収縮応力の低減効果を明らかにしてきた^{3),4)}。

本研究では 過去の検討が材齢 91 日までの期間を対象としていたのに対し，凝結始発からの自己収縮・膨張ひずみ性状および材齢 7 日からの収縮ひずみ性状を材齢 1400 日(約 4 年)まで，また，鉄筋拘束による収縮・膨張応力性状を材齢 900 日(約 2.5 年)まで実験的に検討した。

表 - 1 使用材料

セメント	N	普通ポルトランドセメント，密度：3.16g/cm ³ 比表面積：3310 cm ² /g
	L	低熱ポルトランドセメント，密度：3.22g/cm ³ 比表面積：3280 cm ² /g
膨張材	EX	石灰系，密度：3.14g/cm ³ 比表面積：3310 cm ² /g
細骨材	S	河東産山砂，密度：2.60g/cm ³ 吸水率：1.44%
粗骨材(20mm)	G	岩瀬産碎石，密度：2.64g/cm ³ 吸水率：0.82%
収縮低減剤	SRA	低級アルコールのアルキル付加物
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配(調)合

表 - 1 に使用材料を示す。コンクリートの無拘束ひずみ測定用の供試体(無拘束供試体)の作製には表 - 2 に示すコンクリートを用いた。また，鉄筋の拘束を受けて生じるコンクリートの拘束応力測定用の供試体(拘束供試体)の作製には表 - 3 に示すコンクリートを用いた。膨張材には標準添加量が 30kg/m³ のものを用いたが，本研究では高強度コンクリートで顕在化する自己収縮の相殺を目的として膨張材の添加量を増やした。コンクリートのスランプフローは，高性能減水剤の添加量により 60 ± 10 cm の範囲となるように調整し，空気量は 2%以下とした。コンクリートの練混ぜおよび打込みは 20 ℃，相対湿度 80%の室内で行った。

*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)

2.2 供試体の作製および養生方法

無拘束供試体の寸法は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ とし、各配(調)合に対して4本作製した。供試体は「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)」⁵⁾ (以下、JCI 法)に準じて作製した。供試体の養生は、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。材齢 1 日の時点で脱型を行い、直ちに供試体の全面をアルミ箔粘着テープ(厚さ 0.05 mm)でシールし、封緘状態で養生を継続した。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 , 乾燥養生の条件は温度 20 ± 2 , 相対湿度 $60 \pm 5\%$ とした。

拘束供試体の寸法は、図 - 1 に示すように $100 \times 100 \times 1500\text{mm}$ とし、各配(調)合に対して普通セメントを用いたものは 2 本ずつ、低熱セメントを用いたものは 1 本ずつ作製した。コンクリートに埋設する異形棒鋼(呼び名 D25)は、その中央部 100mm の区間を鉄筋比が約 4%となるように、リブとふしを切削して $\phi 22.5 \pm 0.5\text{mm}$ の円断面に加工した。供試体の脱型までの間、コンクリートの自由な変形が型枠に拘束されるのを防ぐための方法は「コンクリートの自己収縮応力試験方法(改訂版 2002)」⁵⁾に準拠した。拘束供試体の養生方法は無拘束供試体の場合と同様とした。普通セメントを用いて作製した供試体のうちの 1 本は、材齢 7 日の時点でアルミ箔粘着テープを取り除き、それ以降乾燥養生を行った。乾燥条件は無拘束供試体の場合と同じである。さらに、圧縮強度測定用の供試体 ($\phi 100 \times 200\text{mm}$) を各配(調)合に対して 3 本作製し、上記と同様の封緘養生を行った。

2.3 試験方法

無拘束供試体の脱型以前における長さ変化の測定は、高感度変位計(精度: 0.001 mm)を使用し、JCI 法⁵⁾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を $10 \times 10^{-6}/$ と仮定して行

表 - 2 コンクリートの配(調)合(無拘束供試体)

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	N	L	EX	S	G	SRA
NC	30	49.2	175	583	-	-	794	832	-
NE			175	543	-	40			-
NS			169	583	-	-			6
NES			169	543	-	40			6
LC	49.5	49.5	175	-	583	-	802	832	-
LE			175	-	543	40			-
LS			169	-	583	-			6
LES			169	-	543	40			6

表 - 3 コンクリートの配(調)合(拘束供試体)

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	N	L	EX	S	G	SRA
NC'	30	49.2	175	583	-	-	794	832	-
NE'			175	539	-	44			-
NS'			169	583	-	-			6
NES'			169	539	-	44			6
LC'	49.5	49.5	175	-	583	-	802	832	-
LE'			175	-	539	44			-
LS'			169	-	583	-			6
LES'			169	-	539	44			6

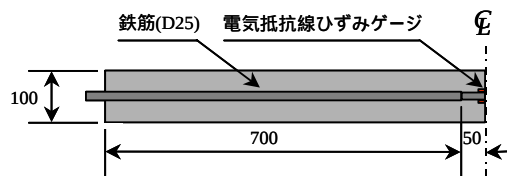


図 - 1 拘束供試体の概要(単位: mm)

った。供試体中心部の最高温度は NC が 24.5 (材齢 0.55 日)、LC が 21.8 (材齢 0.65 日)であった。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、コンタクトゲージ(精度: 0.001 mm)を用いて測定した。

拘束供試体の鉄筋ひずみは、供試体中央位置の上面および下面の 2 箇所に自己温度補償型の電気抵抗性ひずみゲージを貼付して測定した。また、すべての配(調)合のコンクリートについて、JIS A 1147 に準じて凝結始発時間を測定した。圧縮強度は、材齢 91 日において JIS A 1108 に準じて測定した。

3. 収縮・膨張ひずみ特性

3.1 自己収縮・膨張ひずみ特性

コンクリートの自己収縮・膨張ひずみと材齢の関係を図 - 2 に示す。自己収縮・膨張ひずみは供試体 2 本の平均値であり、材齢軸上の原点は凝結の始発時点としている。なお、図中では収縮ひずみを負、膨張ひずみを正として表す。

まず、セメント種類の影響について、普通セメン

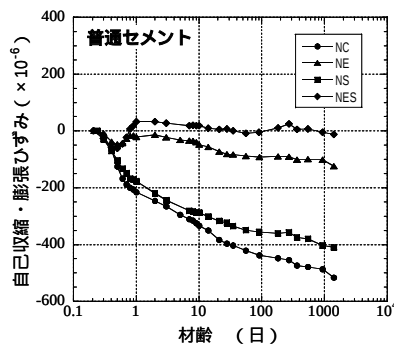


図 - 2 自己収縮・膨張ひずみと材齢の関係

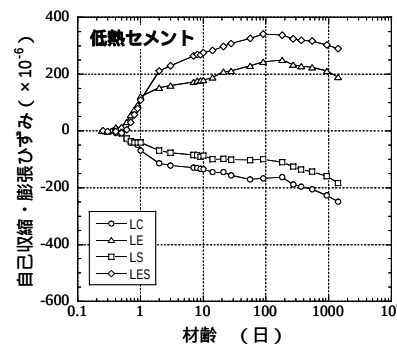


図 - 3 自己収縮ひずみの低減量(膨張材)

トを用いた NC の自己収縮ひずみは、材齢 1 日： 215×10^{-6} ，材齢 91 日： 440×10^{-6} ，材齢 1 年： 475×10^{-6} ，その後も徐々に進行し、材齢 1400 日の時点では 520×10^{-6} の大きさに達している。一方、低熱セメントを用いた LC の自己収縮ひずみは、材齢 1 日： 70×10^{-6} ，材齢 91 日： 165×10^{-6} ，材齢 1 年： 200×10^{-6} ，材齢 1400 日

の時点でも 250×10^{-6} の大きさに止まっている。すなわち、低熱セメントの自己収縮は普通セメントの場合に比べて明らかに小さく、前者に対する後者の比は、材齢 91 日：約 0.4，材齢 1400 日：約 0.5 である。

膨張材の効果について、普通セメントを用いた NC と NE を比較すると、膨張材は材齢 1 日以前に大きく生じる自己収縮ひずみをほぼ相殺しており、自己収縮の抑制に効果的であることがわかる。膨張材による自己収縮の低減率は、材齢 91 日：79%，材齢 1400 日：76% となっており、長期に渡り保持されている。低熱セメントを用いた LC と LE を比較すると、LC の自己収縮が元より小さいために 200×10^{-6} 程度の明らかな膨張ひずみを生じている。図 - 3 は、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示したものである。この自己収縮ひずみの低減量でみると、セメント種類の影響はそれほど小さくなく、材齢 1 日：約 200×10^{-6} ，材齢 91 日：約 $350 \sim 400 \times 10^{-6}$ ，材齢 1400 日：約 $400 \sim 450 \times 10^{-6}$ となっている。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しており、自己収縮の小さい低熱セメントと膨張材を組

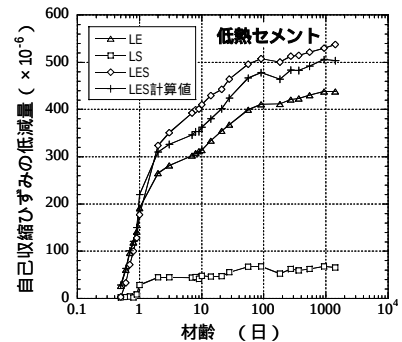
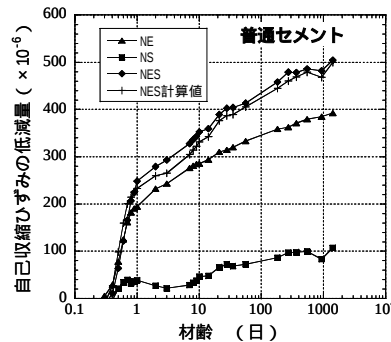


図 - 4 自己収縮ひずみの低減量と材齢の関係

み合わせることで、収縮低減以上の効果が発揮されることがわかる。

収縮低減剤の効果について、無添加コンクリートに対する自己収縮ひずみの比で比較すると、NS が材齢 1 日：0.82，材齢 91 日：0.81，材齢 1400 日：0.79 となっており、LS の場合が材齢 1 日：0.59，材齢 91 日：0.59，材齢 1400 日：0.73 となっている。すなわち、収縮低減剤は自己収縮ひずみを明らかに低減しており、その効果は長期的にもほぼ保持されている。

図 - 4 は、膨張材・収縮低減剤併用時の効果を明らかにするために、NC および LC に対する自己収縮ひずみの低減量を示したものである。図中に併記している NES および LES の膨張材および収縮低減剤による自己収縮ひずみの低減量を単純に足し合わせて求めた計算値と実測値を比較すると、短期～長期までほぼ両者が一致する結果となっている。すなわち、膨張材と収縮低減剤は併用した場合も互いの効果がほぼ独立して発揮されることがわかる。このため、膨張材・収縮低減剤併用コンクリートの自己収縮ひずみが最も小さくなっており、NES の場合がほぼゼロに抑制され、LES の場合は 300×10^{-6} 程度の膨張ひずみが保持されている。

3.2 全収縮・膨張ひずみ特性

凝結始発からの全収縮・膨張ひずみと材齢の関係を図 - 5 に示す。また、材齢 7 日からの乾燥下における全収縮ひずみと材齢の関係を図 - 6 に示す。

セメント種類の影響について、普通セメントを用いた NC の材齢 7 日(乾燥開始時)における自己収縮ひずみは 310×10^{-6} を生じており、全収縮ひずみは材齢 91 日： 790×10^{-6} 、材齢 1400 日： 945×10^{-6} に達している。乾燥下の全収縮ひずみは、材齢 91 日： 480×10^{-6} 、材齢 1400 日： 635×10^{-6} である。これに対して低熱セメントを用いた LC は、材齢 7 日の自己収縮ひずみが 130×10^{-6} 、全収縮ひずみは材齢 91 日： 620×10^{-6} (NC に対して 21% 減) 材齢 1400 日： 805×10^{-6} (NC に対して 15% 減)、乾燥下の全収縮ひずみは材齢 91 日： 490×10^{-6} 、材齢 1400 日： 675×10^{-6} となっている。すなわち、普通と低熱セメントでは乾燥下の全収縮ひずみに大きな差はないが、

低熱セメントの場合が乾燥開始までの自己収縮が小さい分だけ全収縮ひずみが小さくなる。

膨張材の効果については、材齢 7 日までの自己収縮の低減効果に加え、乾燥下における全収縮ひずみの低減作用も生じている。その結果、材齢 1400 日の時点において NE の全収縮ひずみは約 400×10^{-6} 、LE の場合は約 200×10^{-6} まで大幅に低減されている。このことは膨張材の水和反応が長期的にも持続して生じていることを示唆しており、他の物性への影響を含めて今後より詳細に検討する必要があると考えている。

収縮低減剤の効果について、乾燥下の全収縮ひずみの無添加コンクリートに対する比で比較すると、

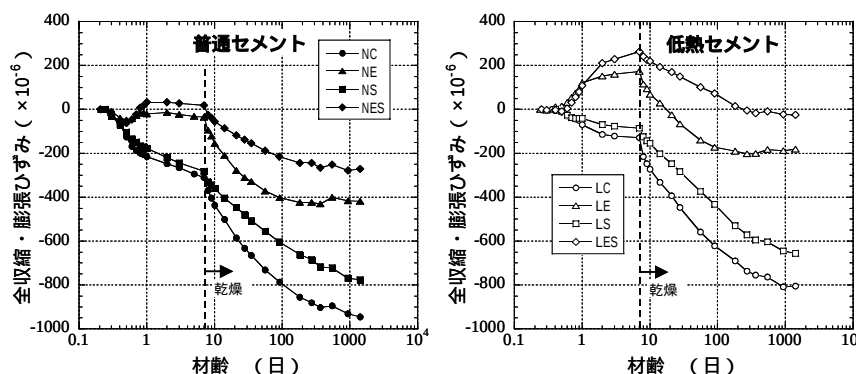


図 - 5 全収縮・膨張ひずみと材齢の関係

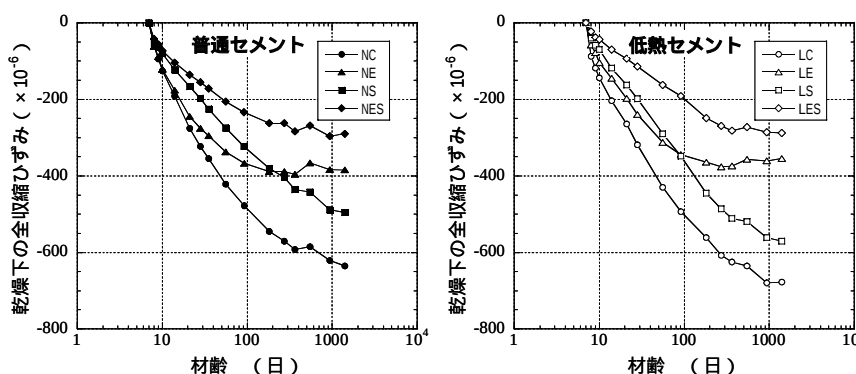


図 - 6 乾燥下の全収縮ひずみと材齢の関係

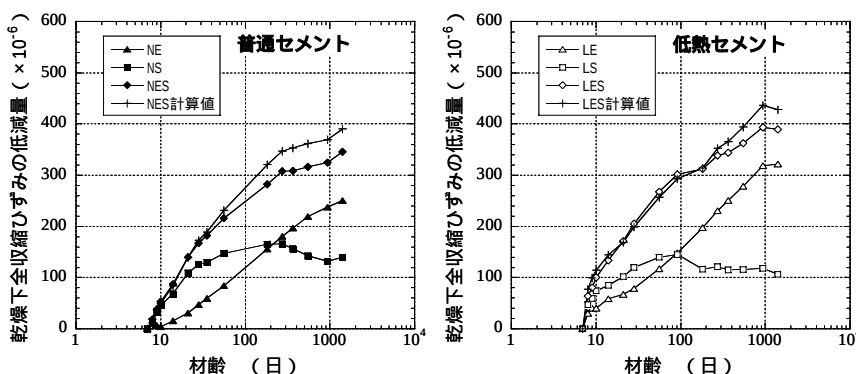


図 - 7 乾燥下全収縮ひずみの低減量と材齢の関係

NS が材齢 91 日： 0.68 、材齢 1400 日： 0.78 、LS の場合が材齢 91 日： 0.71 、材齢 1400 日： 0.84 となっている。ひずみの絶対的な低減量は材齢 91 日以降ほぼ保持されており、NS が約 150×10^{-6} 、LS の場合が約 100×10^{-6} である。

図 - 7 は、膨張材・収縮低減剤併用時の効果について、NC および LC に対する乾燥下における全収縮ひずみの低減量を示したものである。これより、自己収縮ひずみにおける場合と同様に、膨張材および収縮低減剤それぞれの低減量を単純に足し合わせて求めた計算値と実測値は短期～長期までほぼ一致する結果となっている。したがって、膨張材と収縮低減剤を併用したコンクリートの凝結始発からの全収

縮ひずみが最も小さくなり、材齢 1400 日の時点において NES が約 300×10^{-6} に止まり、LES の場合はほぼゼロ近辺となった。

4. 収縮・膨張応力特性

以下、鉄筋とコンクリートの力の釣り合いより、式(1)より求めた収縮・膨張応力(引張応力を正、圧縮応力を負)に基づいて考察する。なお、応力の材齢軸上の原点は凝結始発時としている。

$$\sigma_c = -P_s / A_c \quad (1)$$

$$P_s = E_s \varepsilon_s A_s$$

ここに、 σ_c ：断面の平均的なコンクリートの応力、 P_s ：鉄筋に生じる軸力、 A_c 、 A_s ：コンクリートおよび鉄筋の断面積、 E_s ：鉄筋のヤング係数(=200kN/mm²)、 ε_s ：鉄筋ひずみ。

4.1 自己収縮応力

コンクリートの自己収縮・膨張応力と材齢の関係を図 - 8 に示す。また、NC'およびLC'に対する自己収縮応力の低減量を図 - 9 に示す。

まず、普通セメントを用いNC'には、材齢 91 日：約 1.5N/mm²、材齢 900 日：約 1.8N/mm²の明らかな自己収縮応力を生じている。これに対してNE'の自己収縮応力は材齢 91 日：約 0.3N/mm²、材齢 900 日：約 0.5N/mm²に止まっており、膨張材の効果が明確に現れている。収縮低減剤の効果(NS')は、自己収縮応力の低減量でみると、材齢 91 日：0.25N/mm²(NC'に対して約 15%減)、材齢 900 日：0.12N/mm²(NC'に対して約 7%減)程度であり、その効果は長期材齢において小さくなる傾向が認められる。膨張材・収縮低減剤併用の効果には、図 - 9 より、各々の材料による自己収縮応力の低減効果を単純に足し合わせたものとなっている。

次に、低熱セメントを用いた場合について、LC'の自己収縮応力は材齢 91 日：約 0.2N/mm²、材齢 900 日：約 0.6N/mm²であり、普通セメントの 2 割程度

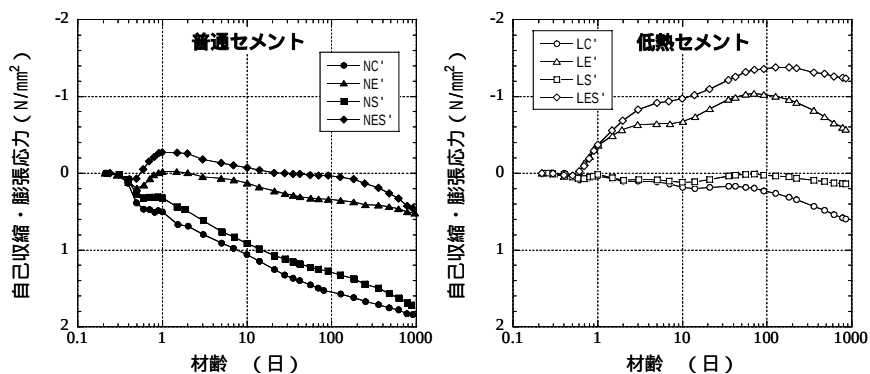


図 - 8 自己収縮・膨張応力と材齢の関係

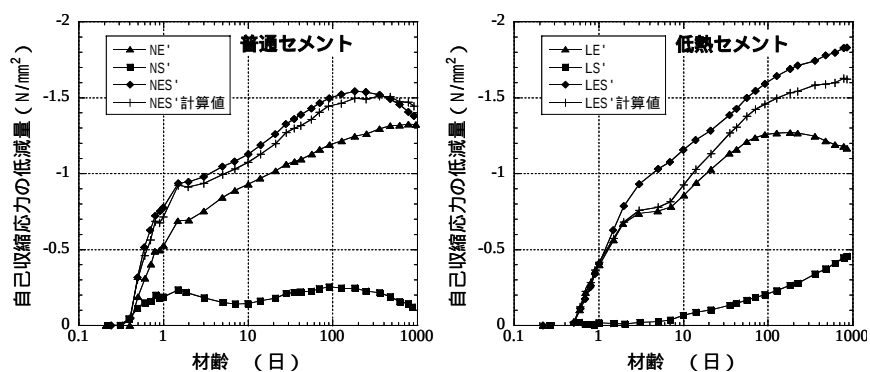


図 - 9 自己収縮応力の低減量と材齢の関係

の大きさに止まっている。収縮低減剤を添加したLS'の自己収縮応力はほぼゼロ近辺に止まっている。膨張材を混和したLE'には材齢 91 日の時点で約 1.0 N/mm²の圧縮応力が導入され、その後徐々に減少するものの、材齢 900 日の時点においてなお約 0.6 N/mm²の圧縮応力が残存している。膨張材・収縮低減剤併用の効果については、図 - 9 より、各々の効果がほぼ独立して発揮される傾向となっている。このように、膨張材および収縮低減剤のいずれもが自己収縮応力の低減に効果を有する。膨張材は特に効果的であり、長期的にも有意な効果が保持される。

4.2 全収縮応力

普通セメントを用いた場合について、凝結始発からの全収縮応力と材齢の関係を図 - 10 に示す。また、NC'に対する材齢 7 日以降の乾燥下における全収縮応力の低減量を図 - 11 に示す。NC'は、収縮応力が 3.3N/mm²に達した材齢約 400 日の時点でひび割れが発生した。すなわち、高強度コンクリートは乾燥に曝されると、凝結時から生じる大きな自己収縮に乾燥収縮が加わり、ひび割れ発生リスクが高くなる。収縮低減剤の効果については、収縮応力

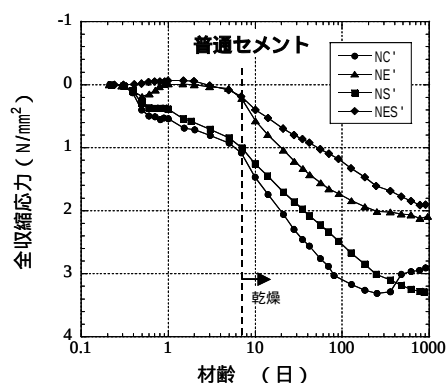


図 - 10 全収縮応力と材齢の関係

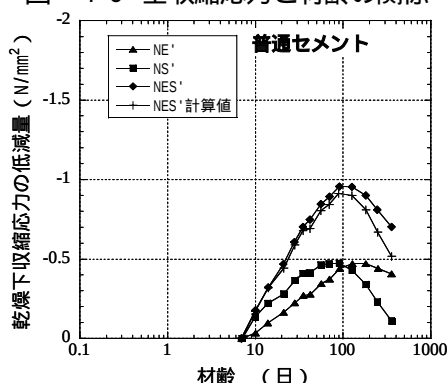


図 - 11 乾燥下収縮応力の低減量

の低減量が材齢 91 日程度で頭打ちとなっており、その後徐々に減少している。このため、材齢 900 日の時点では約 3.3N/mm^2 のかなり大きな収縮応力を生じたが、ひび割れの発生には至っていない。これに対して、NE' の全収縮応力は、材齢 900 日の時点で約 2N/mm^2 に止まっており、その進行の傾向より、さらに長期においてもひび割れ発生には至らないものと推測される。NES' の全収縮応力は最も小さくなっているが、より長期では、NE のそれと同じレベルに達する傾向が認められる。なお、膨張材・収縮低減剤併用時の効果については、乾燥下における収縮応力の場合も各々の効果をほぼ足し合わせたものとなっている。

5. 圧縮強度特性

圧縮強度試験の結果を表 - 3 に示す。必ずしも一定の傾向は認められないものの、膨張材、収縮低減剤の使用が圧縮強度に影響を及ぼす場合のあることがわかる。本研究では、膨張材や収縮低減剤を使用した場合も、水セメント比を一定としてすべての検

表 - 3 圧縮強度(封緘養生、材齢 91 日)

記号	圧縮強度 (N/mm^2)	記号	圧縮強度 (N/mm^2)
NC	105	NC'	95.8
NE	95.5	NE'	99.2
NS	105	NS'	97.2
NES	94.2	NES'	95.3
LC	96.1	LC'	99.6
LE	88.0	LE'	96.6
LS	88.8	LS'	99.2
LES	82.6	LES'	92.0

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、これら混和材料の適正な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) 低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの自己収縮ひずみ・同応力は長期に渡り低いレベルに止まる。
- (2) 膨張材は収縮ひずみ・同応力の低減に特に効果的であり、長期的にも有意な効果を有する。低熱セメントと組み合わせて用いることで、収縮低減以上の効果が得られる。
- (3) 膨張材・収縮低減剤併用の効果は、ひずみおよび応力ともに各々の効果を足し合わせることでより長期までほぼ表現できる。

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応力の低減化に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.1075-1080，2001
- 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.51-60，2002