

論文 高強度コンクリートの収縮低減化に関する一検討

谷村 充*¹・兵頭 彦次*²・佐藤 達三*³・佐藤 良一*⁴

要旨：普通および低熱ポルトランドセメントを用いた水セメント比 30%の高強度コンクリートについて、収縮低減剤、膨張材の単独使用あるいは併用が自己収縮ひずみの低減に及ぼす効果を実験的に検討した結果、以下のことが明らかとなった。すなわち、①自己収縮ひずみの低減効果はセメントの種類によって異なる、②いずれの材料の場合も低熱ポルトランドセメントと組合わせた場合に低減効果が大い、③併用による低減効果は個々に用いた場合よりは大きくなるが、単純な重ね合せとはならない、④低熱ポルトランドセメントを使用したコンクリートへの併用は相乗効果をもたらす。

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

1. はじめに

高強度コンクリートは水結合材比が小さく、自己収縮が顕在化すること¹⁾、さらに自己収縮に起因した応力がひび割れの発生要因として無視できないことが明らかとされている^{2)・3)}。一方、コンクリート構造物の高層化・高耐久化などの要求からは、高強度コンクリートを適用するケースがさらに増えるものと考えられ、高強度コンクリートの自己収縮の低減化は重要な課題である。

これまで、高強度コンクリートの自己収縮の低減化がその使用材料によって検討されており、膨張材や収縮低減剤が有効であるとされている⁴⁾。しかしながら、これら材料による自己収縮の低減効果については、セメント種類の影響など十分には明らかとされていないのが実状である。

そこで本研究では、普通および高ビーライト系のポルトランドセメントを使用した水セメント比 30% (設計基準強度: 80N/mm²) のコンクリートを対象に、収縮低減剤、膨張材、さらにこれらの併用が自己収縮ひずみの低減に及ぼす効果を実験的に検討した。

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 (記号NC, 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 (記号LC, 密度: 3.22 g/cm³, 比表面積: 3280 cm²/g, C₂S: 54%) を、細骨材には静岡県小笠産の陸砂 (表乾比重: 2.60, 吸水率: 1.44%, 粗粒率: 2.64, 実績率: 67%), 粗骨材には茨城県岩瀬産の碎石 (最大寸法: 20mm, 表乾比重: 2.64, 吸水率: 0.82%, 粗粒率: 6.68, 粒形判定実績率: 60.9%) を使用した。収縮低減剤 (記号SRA, 市販品) にはアルキレンオキド系、膨張材 (記号EX, 市販品) にはCSA系 (比重: 2.96) を使用した。混和剤にはポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用した。

2. 2 コンクリートの配合

表-1に、実験の組合せを示す。単位水量は175kg/m³とし、高流動性を有するコンクリートとするために単位粗骨材絶対容積を0.315m³/m³の一定とした。高性能減水剤の添加量は、ス

*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副主任研究員 工修 (正会員)

*2 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研究員

*3 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研究員 工修 (正会員)

*4 広島大学教授 工学部第四類 (建設系) 工博 (正会員)

表-1 実験の組合せ

W/ (C+EX) (%)	セメント の種類	SRA無 (0 kg/m ³)				SRA有 (6 kg/m ³)		
		EX無	EX30	EX40	EX50	EX無	EX30	EX40
30	NC	●	●	●	●	●	●	●
	LC	●	●	-	-	●	●	-

注1) ●は実施した配合を表す。例えば、EX30は単位膨張材量 30kg/m³を表す。

注2) SRAは練混ぜ水、EXはセメントの一部とした。

ランプフローが 60±5 cmの範囲となるように調整し、コンクリートの空気量は2%以下とした。

なお、コンクリートの練混ぜは、20℃、相対湿度 80%の試験室内で行った。

2.3 試験方法

収縮・膨張ひずみ測定用の供試体寸法は 100×100×400mmとし、1配合に対して2本作製した。成形方法は日本コンクリート工学協会・自己収縮研究委員会の「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(案)⁵⁾」(以下、JCI案)に従って行った。脱型までは20℃、相対湿度 80%、脱型後はその全面をアルミ箔粘着テープ(厚さ 0.05mm)でシールし、20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿室で養生した。

長さ変化の測定はJCI案に従って行い、長さ変化の原点は、JIS A 6202 付属書1によった凝結の始発時間とした。脱型までの供試体中心部の温度を熱電対により測定し、コンクリートの熱膨張係数を 10×10^{-6} として温度ひずみの補正を行った。長さ変化の測定は、材齢 91 日の時点まで行い、供試体 2 本の平均値を自己収縮・膨張ひずみとした。

また、材齢 1, 3, 7, 28 および 91 日における圧縮強度(標準養生、供試体: $\phi 100 \times 200$ mm)を、JIS A 1108 に準拠して測定した。

なお、封緘供試体の質量変化率は、0.01%以下であった。ひずみについて、2本の供試体間の差は、最大で 50×10^{-6} 程度であった。

3. 結果および考察

3.1. 圧縮強度特性

図-1に、配合種類と圧縮強度の関係を示す。

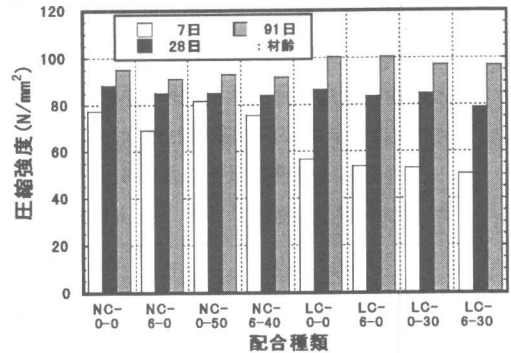


図-1 圧縮強度特性

以下、図中の記号NC-6-40は、(セメントの種類)-(SRAの添加量)-(EXの混和量)を表すものである。

強度発現はセメントの種類、SRAの添加およびEXの混和によって異なるが、一般的な設計基準材齢である28日の時点では、使用材料に拘わらず 80 N/mm^2 程度である。なお、ここに示さなかった配合についても同等であった。

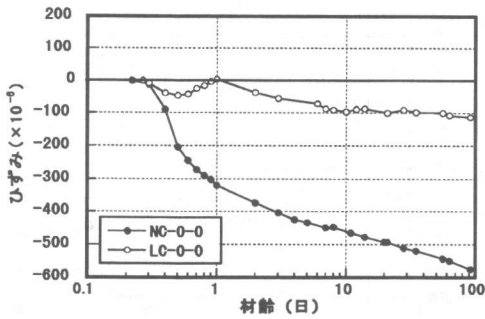
3.2. ひずみ特性

以下、自己収縮ひずみを低減化したコンクリートと基準コンクリートとのひずみの差(以下、収縮低減量)に着目し考察する。収縮低減量の算出は、全配合の凝結始発時間(ひずみ測定の原因)を勘案し、材齢 0.4 日(約 10 時間)からとした。

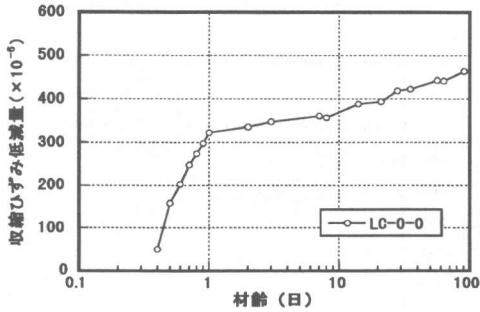
(1) LCの効果

図-2は、セメントの種類が異なる場合について、材齢とひずみおよび収縮低減量の関係を示す。基準コンクリートはNC-0-0とした。

これより、NC-0-0の自己収縮ひずみの発生速度は、LCの場合より大きく、LCの場合が材齢 10 日程度でほぼ収束しているのに対し、材齢 91 日以降も漸増する傾向にある。材齢 91 日にお



(a) ひずみ



(b) 収縮低減量

図-2 ひずみと収縮低減量の経時変化 (セメント種類)

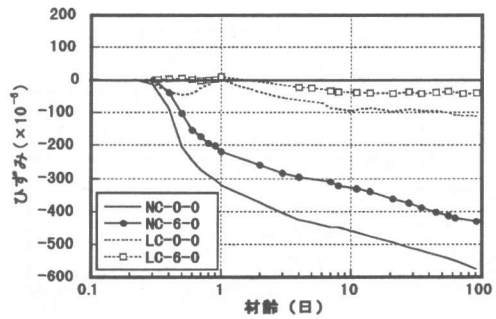
ける自己収縮ひずみをみると、NCの場合が約 600×10^{-6} 、LCが 100×10^{-6} と、NCをLCとしたことによる収縮低減量は 500×10^{-6} (低減率; 80%)となり、長期的にはさらに増加する傾向にある。このように、LCの適用によって大幅な自己収縮の低減が可能である。

なお、LC-0-0について、材齢1日以前で膨張ひずみが生じているが、これはエトリンガイトの生成に起因しているものと考えられる⁶⁾。

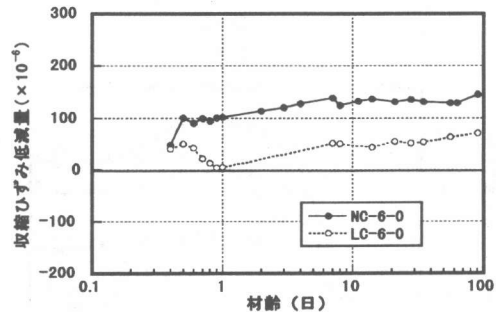
(2) SRAの効果

図-3は、SRAを添加したコンクリートと無添加の基準コンクリートについて、材齢とひずみおよび収縮低減量の関係を示したものである。基準コンクリートはNC-6-0、LC-6-0のそれぞれに対し、NC-0-0およびLC-0-0であり、図中には基準コンクリートのひずみも併せてプロットしてある。また、図-4には、基準コンクリートに対する自己収縮ひずみの低減率を材齢(7日以降)との関係で示す。

これらより、SRAの添加は自己収縮ひずみを



(a) ひずみ



(b) 収縮低減量

図-3 ひずみと収縮低減量の経時変化 (SRA)

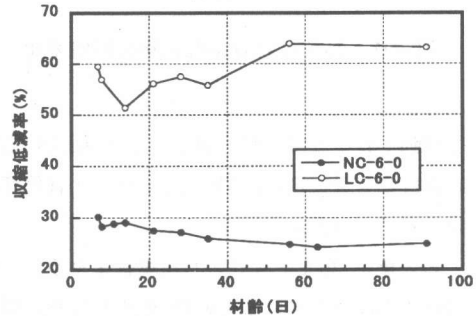


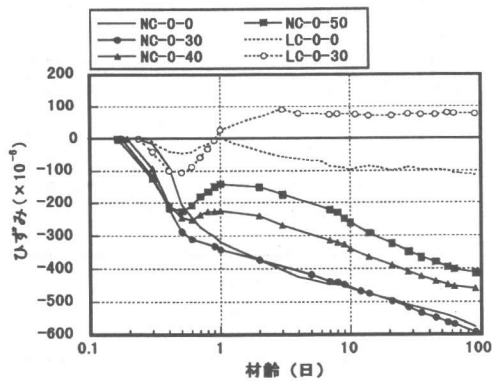
図-4 収縮低減率の経時変化 (SRA)

低減するが、その低減率はセメントの種類によって異なることが明らかである。収縮低減量では、材齢91日においてNCの場合が約 150×10^{-6} 、LCが約 70×10^{-6} である。低減率で比較すると、NCの場合が約 25%、LCが約 65%と、LCと組合せた場合が大きい。

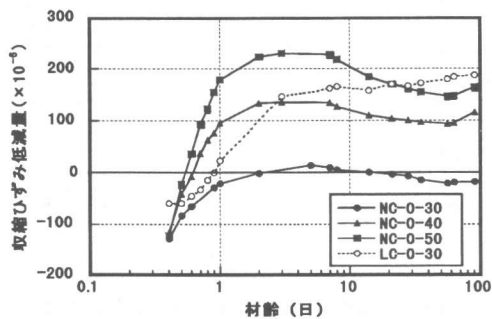
(3) EXの効果

図-5は、EXを混和したコンクリートと無混和の基準コンクリートについて、材齢とひずみおよび収縮低減量との関係を示している。

EXを混和したNC系の収縮低減量を見ると、



(a) ひずみ



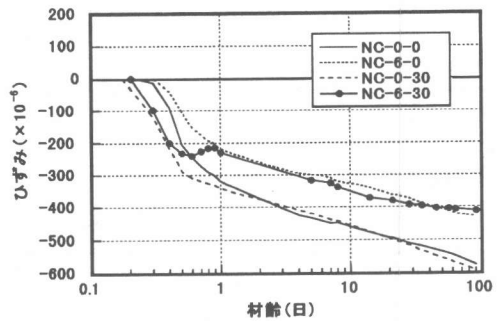
(b) 収縮低減量

図-5 ひずみと収縮低減量の経時変化 (EX)

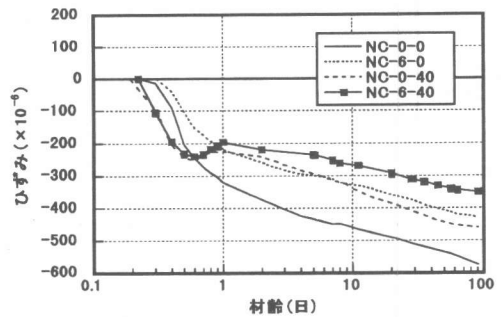
①材齢1日までに急激に増加する, ②最大収縮低減量はEX量にほぼ比例する, ③材齢7日程度以降は漸減する傾向がある。

EX量を 30 kg/m^3 とした場合をみると, 膨張ひずみは生じているものの, 他のEX量の場合に見られるひずみの膨張側への移行が生じない結果となった。材齢91日における収縮低減量を, SRAの場合(図-3)と比較すると, EX量を 50 kg/m^3 とした場合が約 150×10^{-6} とSRAの添加による場合と同等である。

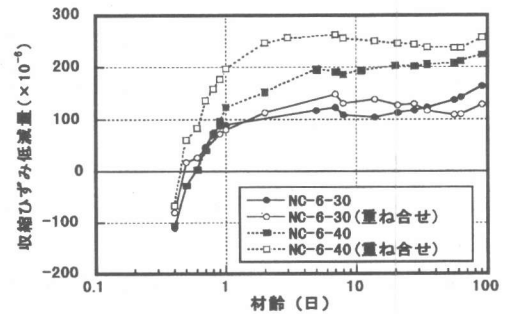
一方, LC-0-30の収縮低減量をみると, ①材齢3日までに急激に増加するが, NCの場合に比べて膨張ひずみの発生が緩やかである, ②材齢3日程度以降も若干増加する傾向がある。EX量を同一としたNC-0-30の場合と比較すると, 材齢91日における収縮低減量は約 200×10^{-6} 大きくなっており, EX量を 50 kg/m^3 としたNC-0-50との比較でも同等以上である。



(a) ひずみ (EX 30 kg/m^3)



(b) ひずみ (EX 40 kg/m^3)



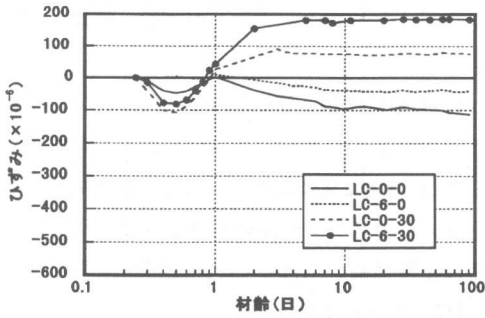
(c) 収縮低減量

図-6 ひずみと収縮低減量の経時変化 (SRA-EX併用: NC)

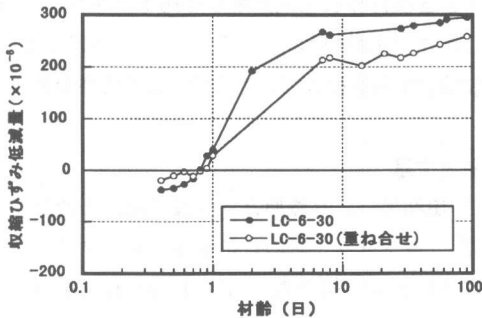
以上のことより, EXによる収縮低減効果はセメントの種類によって異なり, LCと組合せた場合に大きくなることが明らかとなった。この理由としては, LCの場合にはEXによる膨張性水和物の生成と硬化体の骨格形成とのタイミングが良いことなどが考えられる。

(4) SRAとEXの併用効果

図-6は, NCの場合について, SRAとEXを併用したコンクリートのひずみおよび収縮低



(a) ひずみ



(b) 収縮低減量

図-7 ひずみと収縮低減量の経時変化 (SRA-EX併用: LC)

減量を材齢との関係で示している。基準コンクリートはNC-0-0であり、SRAおよびEXを単独使用した場合についても、併せてプロットしてある。さらに収縮低減量を示した(c)の図中には、SRAとEXの重ね合せ効果を検討するために、各々の材料を単独使用した場合の収縮低減量を重ね合せて求めた計算値をプロットしてある。

EX量に拘わらず、実測に基づいた収縮低減量は、重ね合せによる場合と材齢にともなう変化傾向は概ね一致しているが、その絶対量は異なっている。材齢91日における収縮低減量を見ると、単独使用の場合(図-3および図-4)よりは大きくなるが、単純に重ね合せた場合よりは小さい結果である。一方、図-7はLCの場合を示したものである。実測によった収縮低減量の材齢にともなう変化傾向は、重ね合せた場合と同様であるが、その絶対量はNCの場合とは異なり大きくなっている。材齢91日における増加量は約 50×10^{-6}

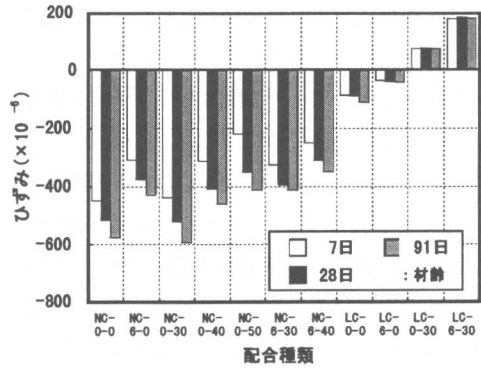


図-8 配合種類とひずみの関係

(増加率; 20%)である。すなわち、LCを使用したコンクリートへの併用によって、相乗効果もたらされている。EX量を同一としたNC-6-30と比較すると、材齢91日における収縮低減量は、 150×10^{-6} 程度大きくなっている。

以上のことより、SRAとEXを併用したことによる収縮低減効果は、個々に用いた場合よりは大きくなるが単純な重ね合せとはならないこと、LCを用いたコンクリートへの併用は相乗効果をもたらすことが明らかとなった。

なお、初期材齢における自己収縮の発生速度を見ると、セメントの種類に拘わらずEXの混和によって大きくなっている。これはEXの水和反応に起因していると考えられるが、今後自己収縮との関係について検討する必要がある。

(5) 全配合の比較

図-8は、全配合について材齢7、28および91日における自己収縮・膨張ひずみを示したものである。

NC系については、材齢91日における自己収縮ひずみは、NC-6-40の場合が最も小さく、収縮低減の観点からはSRAとEXの併用が効果的である。しかしながら、収縮の低減化が図れた配合間での自己収縮ひずみの差を見ると、最大でも 100×10^{-6} 程度と、材料やその使用量を変えたことによる影響はそれほど大きくない結果である。また、自己収縮ひずみの絶対量としては、N

C-6-40 の場合でも 350×10^{-6} 程度と、依然高いレベルにある。NC系については、膨張材の種類の影響などについて、今後検討を行う予定である。

一方、LCの場合については、これを用いたコンクリートの自己収縮は小さい。SRAの添加によって自己収縮ひずみは 50×10^{-6} 程度と極めて小さくなっており、EXの混和によっては 80×10^{-6} 程度の膨張ひずみを有している。さらに、これらを併用すると相乗効果をとめない、 200×10^{-6} 程度の膨張ひずみを発現している。低熱ポルトランドセメントと膨張材や収縮低減剤とを適正に組合せることで、圧縮強度 100 N/mm^2 以上の超高強度コンクリートに対しても、自己収縮ひずみを極めて小さくできる可能性がある。

なお、本研究は、自己収縮の低減化を自由ひずみの観点から検討したものであり、今後は拘束条件下での自己収縮応力、ひび割れ抵抗性などの観点からの検討が必要である。

4. まとめ

本研究の範囲において以下のことが明らかとなった。

(1) 普通ポルトランドセメントを低熱ポルトランドセメントと置き換えることで、大幅な自己収縮の低減が可能である。材齢 91 日における低減率は 80% であった。

(2) 収縮低減剤の添加は自己収縮ひずみを低減するが、自己収縮ひずみの低減率はセメントの種類によって異なり、低熱ポルトランドセメントの場合が大きい。材齢 91 日における低減率は、普通が約 25%、低熱が約 65% であった。低熱ポルトランドセメントと収縮低減剤を組合せることで、自己収縮ひずみは 50×10^{-6} 程度と極めて小さくなった。

(3) 膨張材による自己収縮の低減効果はセメントの種類によって異なり、低熱ポルトランドセメントと組合せた場合が大きい。低熱ポルトランドセメントを用い膨張材量を 30 kg/m^3 としたコンクリートの場合、無混和のものに対する自己収縮ひずみの低減（補償）量は、膨張材量を 50 kg/m^3

とした普通セメントの場合と同等以上であった。

(4) 収縮低減剤と膨張材の併用による自己収縮の低減効果は、個々に用いた場合よりは大きくなるが、単純な重ね合せとはならない。低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートへの併用は相乗効果をもたらし、その増加率は約 20%（材齢 91 日）であった。

(5) 以上のことから、低熱ポルトランドセメントと膨張材や収縮低減剤とを適正に組合せることで、超高強度コンクリートに対しても、自己収縮ひずみを極めて小さくできる可能性がある。

参考文献

- 1) 田澤榮一、宮澤伸吾、佐藤 剛、小西謙二郎：コンクリートの自己収縮，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.561-566，1992
- 2) 宮澤伸吾、田澤榮一、佐藤 剛、佐藤克俊：鉄筋拘束による超高強度コンクリートの自己収縮応力，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.57-62，1993
- 3) 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
- 4) 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.1，No.1，pp.157-162，1995
- 5) 日本コンクリート工学協会，自己収縮研究委員会報告書，pp.195-198，1996
- 6) 高橋俊之、中田英喜、吉田孝三郎、後藤誠史：セメントペーストの自己収縮に及ぼす水和反応の影響，コンクリート工学論文集，第 7 巻第 2 号，pp.137-142，1996