

論文 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

谷村 充*¹・兵頭 彦次*²・大森 啓至*³・佐藤 良一*⁴

要旨: 水セメント比 30% の高強度コンクリートについて, その収縮応力の低減化に及ぼす収縮低減剤や膨張材種類の影響を実験的に検討した。その結果, ①各種膨張材とも収縮応力の低減に効果的であり, 膨張応力の大きなものでは, 最大で約 0.7MPa の圧縮応力が導入された, ②コンクリートが乾燥を受ける場合の収縮応力の抑制には, 膨張材と収縮低減剤の併用が特に効果的である, ③収縮応力に及ぼす収縮低減剤と膨張材の併用効果は, 個々の効果の重ね合せによって概ね推定できること, などが明らかとなった。

キーワード: 高強度コンクリート, 収縮応力, 収縮ひずみ, 膨張材, 収縮低減剤

1. はじめに

高強度コンクリートは粉体量が多く水結合材比の小さいことから, 初期材齢から大きな自己収縮の発生することが明らかとされている¹⁾。この収縮が鉄筋などに拘束されて生じる拘束応力は相当に大きくなる場合があり^{2), 3)}, RC部材などのひび割れ強度の低下およびそれによる耐久性能への悪影響が懸念されている。今後, 種々の目的で高強度コンクリートの構造部材への利用が予想され, この種のコンクリートの低収縮化を図ることは重要な課題である。

これまで, 高強度コンクリートの低収縮化が使用材料の面から検討されており, 膨張材や収縮低減剤の有効性が示されている^{4), 5), 6), 7)}。しかしながら, これら混和材料を使用した高強度コンクリートに関して, 乾燥を受ける場合の収縮性状や, 収縮の低減効果に及ぼす膨張材種類の影響などについては, 十分には明らかとされていないのが現状である。

そこで本研究では, 設計基準強度 80N/mm² を有する高強度コンクリートを対象とし, その収縮応力の低減化に及ぼす収縮低減剤や膨張材種類の影響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), 細骨材には静岡県小笠産の陸砂(表乾密度: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:20 mm, 表乾密度: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)には低級アルコールのアルキレンオキシド付加物, 膨張材(記号EX)にはCSA系(記号G, 密度:2.96 g/cm³)および2種類の石灰系(記号K, 密度:3.14 g/cm³ならびに記号NEX, 密度:3.10 g/cm³)のいずれも市販品を使用した。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, コンクリートの配合を示す。表中には各々のコンクリートに対する記号を併記した。収縮低減剤を含めた単位水量および単位粗骨材絶対容積は, それぞれ 175 kg/m³ および 0.315 m³/m³ の一定とした。膨張材の添加率

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 コンクリート技術グループ主任研究員 工修(正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 コンクリート技術グループ研究員(正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 コンクリート技術グループリーダー

*4 広島大学教授 工学部第四類(建設系) 工博(正会員)

表-1 コンクリートの配合

記号	EX の種類	W/(C+EX)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
				W	C	EX	S	G	SRA	SP
NC	-	0.3	49.2	175	583	-	794	832	-	7.87
NC+SRA	-			169		-			6	8.16
NC+G	G			175	539	44	791		-	8.45
NC+K	K						794		-	8.45
NC+NEX	NEX						793		-	7.87
NC+SRA+K	K			169			794		6	8.16

は、その種類に拘わらずセメント量の内割で7.5%の一定とした。高性能減水剤の添加量は、スランプフローが 60 ± 5 cmの範囲となるように決めた。コンクリートの空気量は2%以下とした。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 供試体

供試体としては、自由ひずみを測定する供試体(以下、自由供試体)および鉄筋の拘束によって生じる拘束応力を測定する供試体(以下、拘束供試体)を、それぞれ各配合に対して2本作製した。これらの形状・寸法を図-1に示す。また、圧縮供試体(ϕ 10×20 cm)を各配合に対して15本作製した。コンクリートと型枠との摩擦を防ぐための処置は、JCI 自己収縮研究委員会の「コンクリートの自己収縮応力試験方法(案)⁸⁾」(以下、JCI 案)に準拠した。全ての供試体は、脱型まで20℃、相対湿度 80%の試験室内で湿潤養生を行い、材齢約1日の時点で脱型を行った後、その全面をアルミ箔粘着テープ(厚さ0.05 mm)でシールした(以下、封緘供試体)。自由供試体および拘束供試体の内の1

本は、材齢7日の時点で打設面、底面および両端面を除く2側面のみアルミ箔粘着テープを取り除き、20℃、相対湿度 60%の試験室内で養生した(以下、乾燥供試体)。

2.4 測定方法

自由供試体のコンクリートひずみは、供試体の中央部に埋設した低弾性型(弾性係数:約40MPa)の埋込みゲージによって測定した。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JCI 案に準拠し $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として温度ひずみを補正した。熱膨張係数には時間依存性があり、若材齢時では大きくなることが報告されている⁹⁾が、ここでは測定を行っていないため、この値を用いた。

拘束供試体の中心部には、異形鉄筋(呼び名:D25)を埋設した。鉄筋の中央10 cm区間はリブとふしを取り除き、その中心位置の上下面に、電気抵抗線ひずみゲージを貼付した。拘束鉄筋比は4.0%である。

コンクリートの圧縮強度および弾性係数の測定は、それぞれJIS A 1108 およびJSCE-G502に準拠して行った。試験材齢は1, 3, 7, 28および91日とした。

3. 結果および考察

3.1 強度特性

図-2に、コンクリートの圧縮強度と材齢の関係を示す。コンクリートの種類に拘わらず、材齢1日の時点で40MPa程度、材齢28日の時点では85MPa程度である。

図-3は、コンクリートの圧縮強度と弾性係数

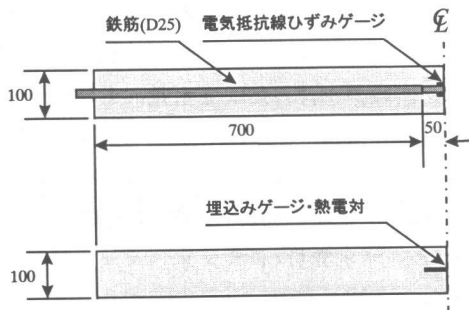


図-1 供試体形状・寸法

の関係を示す。同一圧縮強度における弾性係数は、長期材齢になるとNCと比較し他のコンクリートは若干小さくなる傾向にあるが、その差は最大でも 2000MPa 程度である。このように、収縮低減剤や膨張材が強度特性に及ぼす影響は、本研究における使用量の範囲では小さい。

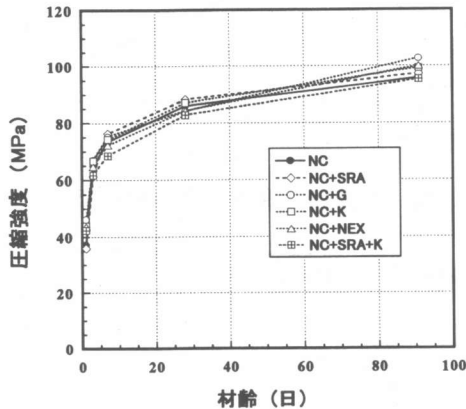


図-2 圧縮強度特性

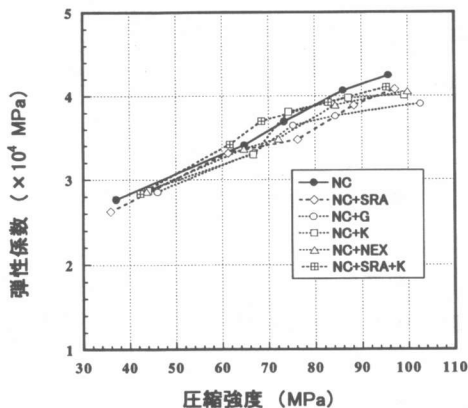


図-3 圧縮強度と弾性係数の関係

3.2 自由ひずみ

図-4に、封緘供試体の自由ひずみと材齢の関係を示す。ひずみの起点は、凝結始発時間に達した時点とした。基準である NC の自己収縮ひずみは、材齢 91 日の時点で約 350×10^{-6} である。収縮低減剤を添加した NC+SRA は、NC の自己収縮ひずみを約 20% 低減している。これは、著者らが既に報告した結果⁶⁾と同様である。膨張材を単独使用した場合について、GとK

はほぼ同様な傾向を示している。NCに対するひずみの低減率は約 90% であり、大幅に自己収縮を低減している。一方、NEX のそれは他の膨張材とは異なっており、約 200×10^{-6} の大きな膨張ひずみを発現した。収縮低減剤と膨張材 K を併用することで、収縮ひずみはより抑制されている。

図-5は、封緘供試体の場合について、活発な膨張ひずみの発現がほぼ終了する材齢 7 日からの自由ひずみの変化量を示す。NCと膨張材を混和したコンクリートを比較すると、いずれの膨張材の場合も収縮ひずみの絶対量が小さくなっている。この理由としては、材齢 7 日以降も若干ながら持続的に膨張の生じていることが考えられる。

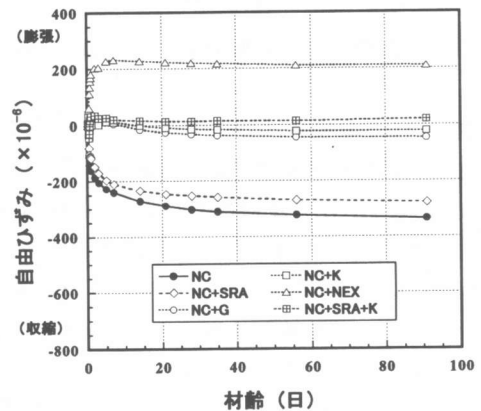


図-4 自由ひずみの経時変化(封緘供試体)

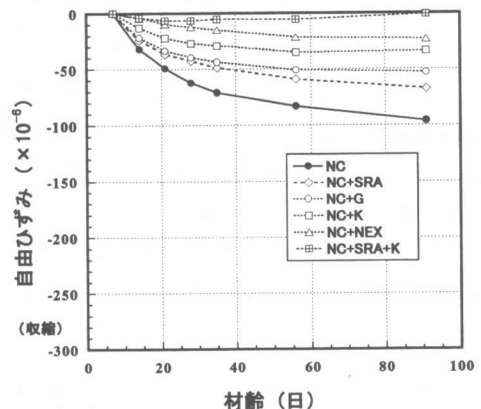


図-5 材齢 7 日からの自由ひずみの変化量(封緘供試体)

図-6は、乾燥供試体の自由ひずみと材齢の関係を示す。乾燥を受けることでいずれのコンクリートの場合も、収縮ひずみが大きくなっており、NCのそれは材齢91日の時点で約 600×10^{-6} である。

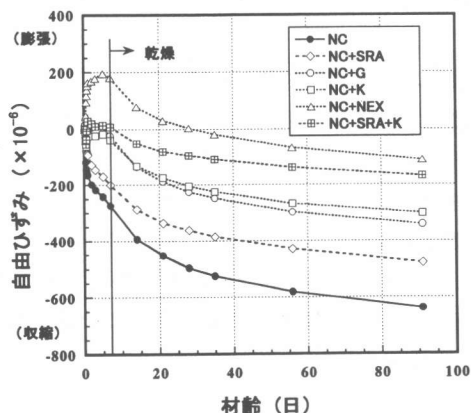


図-6 自由ひずみの経時変化(乾燥供試体)

図-7は、乾燥供試体の場合について、材齢7日からの乾燥収縮ひずみの変化量を示す。ただし、ここでの乾燥収縮ひずみは、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみには重ね合わせが成り立つものとし、乾燥供試体のひずみから、材齢7日を起点とした封緘供試体のひずみを差し引くことで求めている。図より、膨張材GとNEXの乾燥収縮ひずみは、NCとほぼ一致している。膨張材Kのそれは、NCよりも絶対量が小さく、乾燥を受ける場合にも持続的に若干の膨張を生じていることが考えられる。収縮低減剤の添加は、乾燥収縮ひずみを約25%低減し、収縮低減剤と膨張材Kを併用した場合には、それらの効果が累加されることで低減率は約35%である。

図-8は、収縮低減剤と膨張材Kを併用したコンクリートについて、収縮低減剤と膨張材を各々単独に使用した場合の収縮ひずみの低減効果を単純に重ね合わせることで求めた計算値を、実測値とともに示している。封緘供試体、乾燥供試体いずれの場合にも、計算値と実測値はほぼ一致しており、併用の効果は個々の効果の重ね合わせによって概ね推定できる。

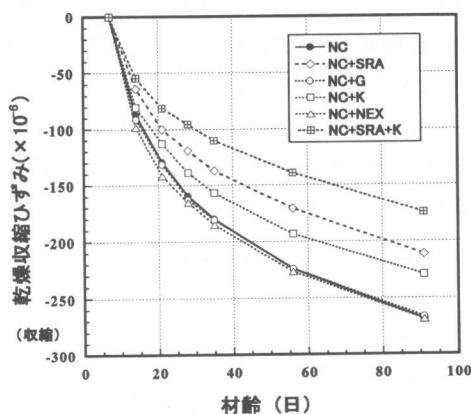


図-7 乾燥収縮ひずみの経時変化

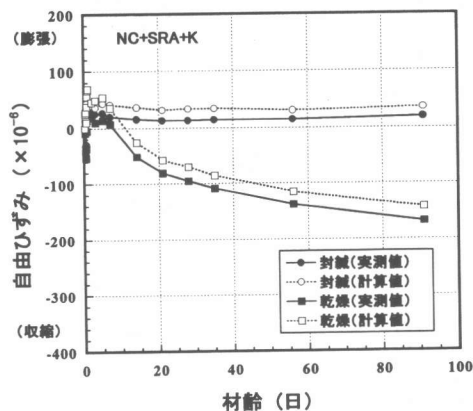


図-8 自由ひずみの重ね合わせ

3.3 拘束応力

図-9は、封緘供試体の拘束応力と材齢の関係を示す。ここで、拘束応力は、拘束供試体の鉄筋ひずみを用い、拘束力がコンクリート断面に一樣に作用するものと仮定し、JCI案⁸⁾に示される計算式から求めた。この場合の鉄筋の弾性係数は、試験を行っていないため一般的な $2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ とした。拘束応力の起点は凝結始発時点としている。NCの拘束応力は、材齢91日の時点で約1.5MPaである。収縮低減剤を添加したNC+SRAの拘束応力は、NCと比較し約10%小さい。膨張材GおよびKは自己収縮応力を大幅に低減しており、NCに対する低減率は前者が約70%、後者が約80%である。NEXの場合は、最大で約0.7MPaの圧縮の拘束応力

が導入され、その後徐々に低下するが、材齢 91 日の時点においても約 0.4MPa の圧縮応力を保持している。

NEX は膨張材の使用量が他と同じであっても、大きな膨張応力を有することから、ケミカルプレストレス用の高強度コンクリートなどに有効に利用できると考えられる。

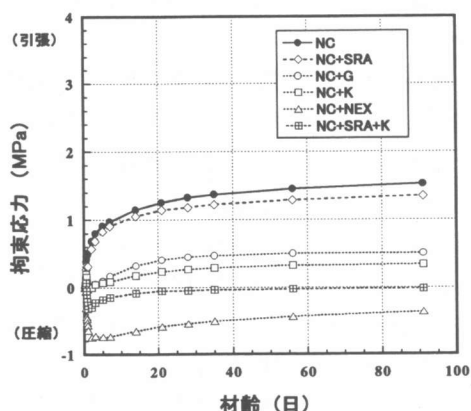


図-9 拘束応力の経時変化(封緘供試体)

図-10は、乾燥供試体の拘束応力と材齢の関係である。乾燥を受けることでいずれのコンクリートの場合も収縮応力は大きくなっており、NCのそれは材齢 91 日の時点で約 3MPa となったが、ひび割れが発生するまでには至っていない。収縮低減剤と膨張材 K を併用したコンクリートをみると、収縮応力の発生速度が最も小さくなっており、材齢 91 日においては NEX とほぼ同じ収縮応力を示した。

図-11は、材齢 7 日からの乾燥収縮応力の変化量を示す。ただし、乾燥収縮応力は、自己収縮応力と乾燥収縮応力の重ね合わせが成り立つものとし、乾燥供試体の収縮応力から、材齢 7 日を起点とした封緘供試体の自己収縮応力を差し引くことで乾燥収縮応力を求めている。図より、膨張材を混和したコンクリートの乾燥収縮応力の発現傾向をみると、NC のそれに追従している。一方、収縮低減剤を添加したコンクリートの変化量は NC の場合より小さく、乾燥収縮応力の発生を持続的に約 35 % 低減しており、膨

張材 K と併用した場合にも同様な効果を発揮している。このように、収縮低減剤は上述した自己収縮応力の低減効果と対比すると、特に乾燥を受ける場合の収縮応力の低減に効果的である。

これより、コンクリートは一般に乾燥を受ける条件で使用される場合が多いことから、比較的初期の材齢において収縮応力を大幅に抑制する膨張材と、その後の乾燥によって生じる乾燥収縮応力を持続的に抑制する収縮低減剤の併用は、極めて効果的であるといえる。

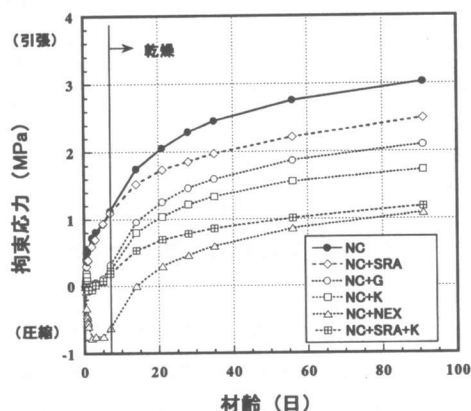


図-10 拘束応力の経時変化(乾燥供試体)

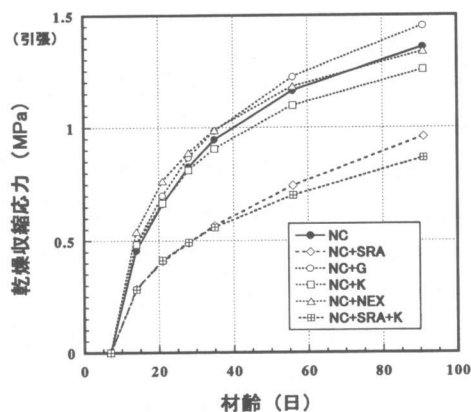


図-11 乾燥収縮応力の経時変化

図-12は、収縮低減剤と膨張材を併用したコンクリートについて、収縮低減剤と膨張材を各々単独に使用した場合の収縮応力の低減効果を単純に重ね合わせることで求めた計算値を、実測値とともに示している。計算値と実測値は

乾燥の場合ほぼ一致しており、封緘の場合にも概ね一致している。すなわち、上述したはずみの場合と同様に、応力に対しても、収縮低減剤と膨張材の併用効果は個々の効果の重ね合わせによって概ね推定できる。

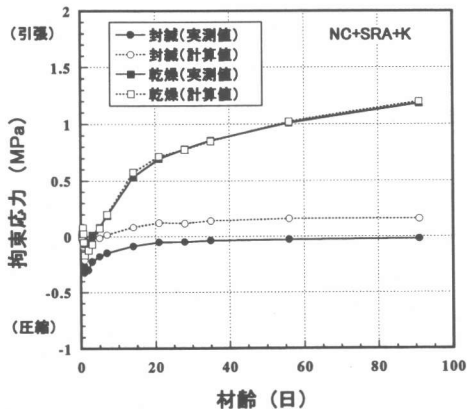


図-12 拘束応力の重ね合わせ

なお、今後は、膨張材を混和した高強度コンクリートの膨張・収縮性状に関し、その温度依存性やより長期にわたる膨張安定性などの観点から検討を行う予定である。

4. まとめ

本研究の範囲内において、以下のことが明らかとなった。

- (1) 膨張材は収縮応力の低減に効果的である。膨張材 G と K はほぼ同等の性能を有しており、自己収縮応力の低減率は、前者が 70%、後者が 80% であった。
- (2) NEX は、他の膨張材と比べて大きな膨張応力を発現し、封緘供試体の場合において最大で約 0.7MPa の圧縮の拘束応力が導入され、材齢 91 日の時点においても約 0.4MPa の圧縮応力を保持していた。
- (3) 収縮低減剤は特に乾燥を受ける場合の収縮応力の低減に効果的である。
- (4) コンクリートが乾燥を受ける場合の収縮応力の抑制には、膨張材と収縮低減剤の併用が特に効果的である。

(5) 収縮低減剤と膨張材を併用したことによる収縮応力の低減効果は、個々の効果の重ね合わせによって概ね推定できる。

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
- 5) Sato, R., Tanaka, S., Hayakawa, T., and Tanimura, M.: Experimental studies on reduction of autogenous shrinkage and its induced stress in high strength concrete, Proceedings of the 2nd International Research Seminar in Lund, pp.163-171, 1999
- 6) 谷村 充、兵頭彦次、佐藤達三、佐藤良一：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報告集，Vol.22，No.2，pp.991-996，2000
- 7) 谷村 充、市村高央、兵頭彦次、下山善秀、石森正樹：膨張材を混和した高強度コンクリートの自己収縮特性，土木学会年第 55 回年次学術講演会講演概要集 V，pp.560-561，2000
- 8) 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
- 9) 楊楊、佐藤良一、田澤榮一：硬化過程にある高強度コンクリートの線膨張係数測定方法の一提案，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.961-966，2000