鉄筋拘束による高強度コンクリートの収縮応力とその抑制

太平洋セメント（株）　正会員　○谷村　充　　太平洋セメント（株）　正会員　鶴田昌宏
同　上　正会員　三谷裕二　　同　上　正会員　兵頭彦次

1．はじめに

高強度コンクリートは，乾燥に曝されると，凝結直後から生じる大きな自己収縮に乾燥収縮が加わるため，両者を足し合わせた全収縮量は無視し得ない大きさになる。この収縮が鋼材に拘束された場合，コンクリートには引張応力が生じ，時にはひび割れ発生に至る[1)]。たとえひび割れ発生に至らない場合であっても，蓄積された応力はひび割れ，変形などの使用性能に悪影響を及ぼし[2)]，ひいては耐久性の低下をもたらす。高強度コンクリートには，構造性能や耐久性能の向上が期待されており，その収縮の制御は重要な課題である。本報では，鉄筋拘束による高強度コンクリートの収縮応力と，その抑制における膨張材，収縮低減剤の効果について，材齢約 800 日まで検討した結果を述べる。

2．実験概要

2．1．使用材料および配合

表１に使用材料，表２にコンクリートの配合を示す。

表１　使用材料

セメント	C	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ，密度:3.16g/cm^3
膨張材	EX	石灰系，密度:3.14g/cm^3
細骨材	S	小笠産陸砂，密度:2.60g/cm^3, FM:2.84
粗骨材(20mm)	G	岩瀬産砕石，密度:2.64g/cm^3, FM:6.61
収縮低減剤	SRA	低級ｱﾙｺｰﾙのｱﾙｷﾚﾝｵｷｼﾄﾞ付加物
高性能減水剤	SP	ﾎﾟﾘｶﾙﾎﾞﾝ酸系

表２　コンクリートの配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量（kg/m^3）					
			W	C	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

水/(セメント＋膨張材)比を 30%の一定とし，単位水量を 175kg/m^3，単位粗骨材絶対容積を 0.315m^3/m^3 の一定とした。膨張材の混和率は，セメントに対して内割で 7.5%(単位量：44kg/m^3)とし，収縮低減剤の使用量は，通常のコンクリートで実績のある 6kg/m^3 とした。高性能減水剤の添加量は，スランプフローが600±50mmの範囲となるように調整しており，空気量は 2%以下とした。なお，材齢 28 日の圧縮強度(封かん養生)は，いずれのコンクリートも約 80N/mm^2 であった。

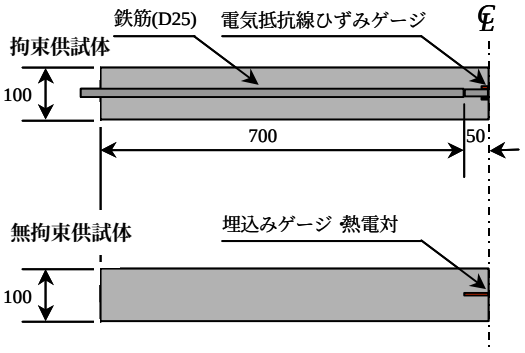
2．2．供試体および養生

自己膨張・収縮ひずみを測定する供試体(無拘束供試体)，ならびに鉄筋の拘束によって生じる拘束応力を測定する供試体(拘束供試体)は，図－１に示すように，その寸法を 100×100×1500mm とし，各配合に対してそれぞれ 1 本ずつ作製した。拘束供試体に埋設した異形棒鋼(呼び名 D25)の中央 100mm 区間は，リブとふしを取り除いてφ22.5±0.5mm の円断面としており，この部分の鉄筋比は約 4%である。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，JCI「コンクリートの自己収縮応力試験方法(案)」[3)]に準拠した。コンクリートの練混ぜは 20℃，80%R.H.の試験室内で行い，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。材齢 1 日の時点で脱型し，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，材齢 7 日まで封かん状態で養生した。その後，打設面，底面および両端面を除く 2 側面のアルミ箔粘着テープを取り除き，20℃，60%R.H.の試験室内で乾燥を開始した。

2．3．試験方法

コンクリートの自由ひずみ量は，無拘束供試体の中心部に埋設した低弾性型の埋込型ひずみ計(見かけの弾性係数：約 40N/mm^2)を用いて測定した。同時に，埋込型ひずみ計の近傍に設置した熱電対を用いてコンクリートの温度を測定し，埋込型ひずみ計の実ひずみから温度ひずみを差し引き自己膨張・収縮ひずみとした。この場合，コンクリートの線膨張係数は若材齢で大きく，時間依存性のあることを考慮し，丁ら[4)]の線膨張係数回帰式を適用して温度ひずみ分を求めている。

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ひずみゲージを貼付して測定し，上下の平均値を各供試体の鉄筋ひずみとした。



図－１　供試体の形状・寸法

キーワード：高強度コンクリート，収縮応力，膨張材，収縮低減剤
連絡先（千葉県佐倉市大作 2-4-2，電話：043-498-3905，FAX：043-498-3821）

３．結果および考察

３．１．膨張・収縮特性

図－２は，凝結始発時からの収縮ひずみと材齢の関係を示す。基準の NC は，材齢 7 日の時点で約 300×10^{-6} の自己収縮ひずみを生じ，材齢 800 日における全収縮量は約 800×10^{-6} であった。収縮低減剤を混和した NS の材齢 800 日における全収縮量は約 700×10^{-6} となっており，NC に対する全収縮量の低減率は約 15%である。膨張材を混和した NE により材齢7日までの自己収縮はほぼ抑制されており，その後乾燥により収縮を生じるが，材齢 800 日での全収縮量は約 450×10^{-6} に留まった。収縮低減剤よりも膨張材の効果が大きく現れており，後者による自己収縮の抑制が功を奏している。膨張材と収縮低減剤を併用した NES の全収縮量は最も小さく，材齢 800 日の時点で約 350×10^{-6} であった。

図－３は，乾燥を開始した材齢 7 日からの収縮ひずみについて，NE，NS および NES と NC との差（収縮ひずみの低減量）を求めて示したものである。また，図中の計算値は，膨張材および収縮低減剤を各々単独で用いた場合の収縮ひずみの低減量を単純に足し合せて求めたものであり，いわば個々の材料による作用が独立して発揮されるとした場合の予測値である。NE における収縮ひずみの低減量は，材齢の進展にともなって徐々に増加しており，膨張材の水和反応が長期的にも徐々に進んでいることが考えられる。NS の低減量は，材齢 100 日程度で頭打ちとなっており，その後，徐々に減少する傾向がみられる。両者を併用した NES の実測値と計算値を比較すると，両者併用の効果はほぼ個々の効果を足し合わせたものとなっていることがわかる。併用した場合も互いの効果がほぼ独立して発揮された結果であり，これは，膨張材と収縮低減剤ではその作用機構が全く異なるためと考えられる。

３．２．収縮応力特性

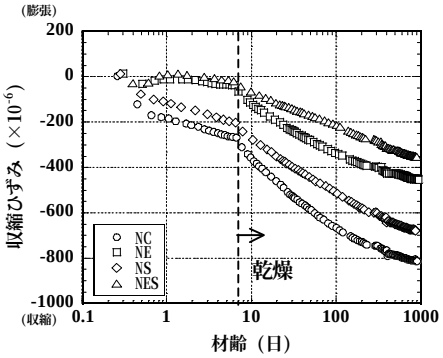
図－４は，全てのコンクリートについて，収縮応力と材齢の関係を示す。収縮応力は，鉄筋の実測ひずみより鉄筋に生じている応力を求め，これをコンクリートの断面積で除して求めている。なお，図における応力の起点は，凝結始発時である。また，図－５は，上記ひずみの場合と同様に，収縮応力の低減量を求めて示したものである。

基準の NC は，材齢約 400 日の時点でひび割れが生じ，その時の収縮応力は約 $3.3N/mm^2$ であった。NS は，収縮応力を抑制しているが，先のひずみの場合と同様に，低減量は材齢 100 日程度で頭打ちとなり，その後徐々に減少している。その結果，材齢 800 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。一方，NE の収縮応力は，材齢 7 日までの自己収縮応力はほぼ抑制され，材齢 800 日での全収縮応力は約 $2N/mm^2$ に留まっており，その進展の傾向より，さらに長期においてもひび割れ発生は抑制されるものと推測される。NES の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にある。なお，膨張材と収縮低減剤の併用による効果は，収縮応力の場合も個々の効果をほぼ足し合わせたものとなっている。

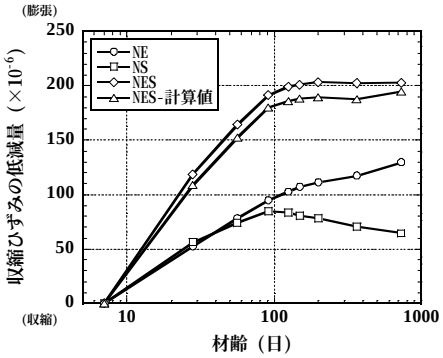
４．まとめ

約 800 日間乾燥に曝した高強度コンクリートの収縮応力を実験的に検討し，以下のことが明らかとなった。すなわち，膨張材，収縮低減剤はいずれも収縮応力の抑制に寄与する。大きな自己収縮抑制作用を有し，乾燥後も幾分かの膨張応力を呈する膨張材は特に効果的である。乾燥後の両者併用による収縮抑制効果は，ほぼ個々の効果を足し合わせたものとなる。

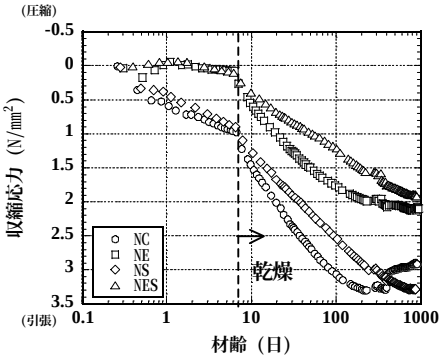
［参考文献］　1)林田都芳ほか：高強度コンクリートの乾燥収縮と自己収縮による拘束応力，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.643-648，2000.　2)平松洋一ほか：自己および乾燥収縮を考慮した RC 部材の変形・ひび割れ幅の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.745-750，2002.　3)日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.199-201，1996.　4)丁 海文ほか：高強度コンクリートの線膨張係数に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.955-960，2000.



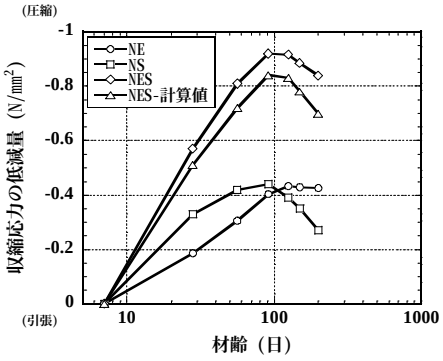
図－２　収縮ひずみの経時変化



図－３　収縮ひずみの低減量



図－４　収縮応力の経時変化



図－５　収縮応力の低減量