

論文 高強度コンクリートの自己収縮応力の低減化における膨張材の効果

谷村 充^{*1}・三谷 裕二^{*2}・鶴田 昌宏^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨：高強度コンクリートの自己収縮応力の低減化に及ぼす膨張材の効果を，収縮低減剤と併用した場合も含め，10～30 の養生温度下において実験的に検討し，以下のことを明らかにした。すなわち，膨張材は材齢初期における進行の速い自己収縮を有効的に補償することに加えて，長期にわたって徐々に進行する自己収縮を補償する作用も有する。自己収縮応力の低減に及ぼす膨張材・収縮低減剤併用時の効果において，養生温度に拘わらず 5%程度以上の相乗効果が発揮された。膨張材および収縮低減剤が自己収縮応力の低減に及ぼす効果は，いずれの養生温度の場合も自己収縮ひずみの低減における効果とほぼ対応する。

キーワード：高強度コンクリート，自己収縮，拘束応力，膨張材，収縮低減剤，養生温度

1. はじめに

高強度コンクリートにおいては，初期材齢から大きな自己収縮が発生し，RC 部材などでは鉄筋の拘束によってひび割れが生じやすくなることが指摘されている¹⁾。今後，種々の目的により，高強度コンクリートを利用するケースは増えるものと予想され，この種のコンクリートにおいて顕在化する自己収縮の抑制は重要な課題である。自己収縮低減における使用材料面での対策として，膨張材，収縮低減剤が有効であることは既に知られている^{2), 3)}。しかし，これら混和材料による自己収縮応力の低減効果については十分な検討がなされておらず，特に，その効果に及ぼす養生温度の影響について検討した事例はほとんどないのが現状である。

そこで本研究では，水/(セメント+膨張材)比 30%の高強度コンクリートを対象に，自己収縮応力の低減に及ぼす膨張材の効果を，収縮低減剤と併用した場合も含め，10～30 の養生温度下において実験的に検討した。

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 N，密度：3.16g/cm³，比表面積：3310cm²/g)を使用した。膨張材には石灰系(記号 EX，密度：3.14g/cm³，比表面積：3310cm²/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(記号 SRA)を用い，それぞれ市販品を使用した。細骨材には，静岡県小笠産の陸砂(記号 S，表乾密度：2.60g/cm³，吸水率：1.44%，粗粒率：2.64，実積率：67%)，粗骨材には茨城県岩瀬産の碎石(記号 G，最大寸法：20mm，表乾密度：2.64g/cm³，吸水率：0.82%，粗粒率：6.68，粒形判定実積率：60.9%)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用いた。

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。水/(セメント+膨張材)比を 30%，単位水量を 175kg/m³，単位粗骨材絶対容積を 0.315m³/m³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/m³)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 600±50mm の範囲となるように調整しており，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および打設は，10，20，30 の養生温度別に，それぞれ 10・70%R.H.，20・80%R.H.，30・70%R.H.の試験室内で行った。

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所第 1 研究部 建設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) 中央研究所第 1 研究部 建設技術グループ 工修 (正会員)
 *3 太平洋セメント(株) 中央研究所第 1 研究部 建設技術グループ 工修
 *4 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 コンクリートの配合

記号	セメント	W/(C+EX) (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)					
				W	C	EX	S	G	SRA
PL	N	30	49.2	175	583	-	794	832	-
EX					539	44			-
SRA					583	-			6
EX+SRA					539	44			6

2.3 供試体の作製と養生

自己膨張・収縮ひずみを測定する供試体(以下、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(以下、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、この部分における拘束鉄筋比は約 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)」⁴⁾に準拠した。また、圧縮強度測定用の供試体(φ100×200mm)を各配合に対して 15 本ずつ作製した。圧縮供試体を含む全ての供試体の養生について、打設から脱型までは湿潤養生とし、材齢約 24 時間で脱型した後は、その全面をアルミ箔粘着テープ(厚さ 0.05mm)でシールする封緘養生とした。養生温度が 10 および 30 の供試体はシール後、そのまま試験室内で養生し、20 の供試体については、シール後 20 , 60%R.H.の室内に移動して養生した。

2.4 測定方法

無拘束供試体におけるコンクリートのひずみは、その中央部に埋設した低弾性型の埋込みゲージ(弾性係数：約 40MPa)によって測定した。熱電対を用いて埋込みゲージ位置におけるコンクリートの温度を測定し、埋込みゲージによる実測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。温度ひずみの算出にあたっては、コンクリートの線膨張係数が若材齢で大きく、時間依存性のあることを考慮した。

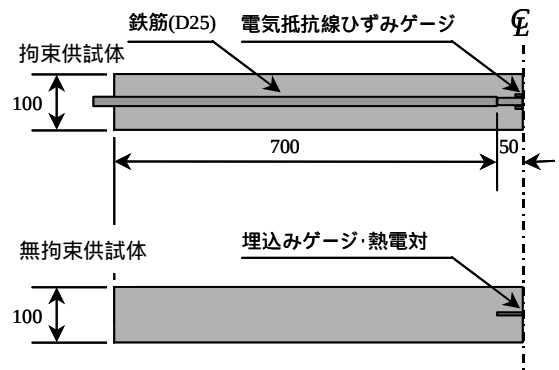


図 - 1 供試体の形状・寸法

すなわち、本研究と比較的配合条件の近い高強度コンクリートに対する丁ら⁵⁾の線膨張係数回帰式(1)を適用し、温度ひずみ分を求めた。なお、式(1)における凝結の始発時間 t_0 には、本研究による実測値を用いている。

$$\alpha(t) = 8.88 + 22.53 \cdot \exp\left\{-\frac{(t - t_0)}{0.107}\right\} \quad (1)$$

$\alpha(t)$: 材齢 t 日における線膨張係数

t_0 : 凝結の始発時間

拘束供試体における鉄筋ひずみは、鉄筋中央位置の上下面に貼付した自己温度補償型のひずみゲージによって測定した。

材齢 1, 3, 7, 28 および 91 日における圧縮強度および静弾性係数を、JIS A 1108 および JIS A 1149 に従って測定した。また、コンクリートの凝結時間を JIS A 1147 に準拠して測定した。

3. 結果と考察

3.1 強度特性

図 - 2 に、圧縮強度(封緘養生)と有効材齢の関係を示す。膨張材、収縮低減剤の混和による圧縮強度への影響は、20 養生においてはほとんど認められない。10 養生の場合、材齢 28 日までの圧縮強度は、膨張材、収縮低減剤の有

無に関係なくほぼ同等となっているが、材齢 91 日においては、膨張材、収縮低減剤のそれぞれを単独で使用した場合に約 8%、両者併用した場合に約 15%の圧縮強度の低下が認められた。30 養生では、材齢 7 日より圧縮強度に差が生じており、材齢 91 日において、収縮低減剤を混和した場合の圧縮強度は、膨張材の有無に関係なく約 10%小さくなった。このように、膨張材、収縮低減剤が圧縮強度に与える影響は、養生温度により異なっていた。養生温度によっては幾分かの圧縮強度の低下をもたらす場合もある。

図 - 3 に、静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。多少のばらつきはあるものの、静弾性係数は圧縮強度により一元的に表すことができ、膨張材および収縮低減剤の使用が両者の関係に及ぼす影響は小さい。

3.2 基準コンクリートの収縮性状

図 - 4、図 - 5 に、各々基準コンクリートの自己収縮ひずみおよび自己収縮応力の経時変化を示す。これらの起点は凝結始発時間としている。図中には終結時間を併記した。自己収縮応力は、鉄筋ひずみの平均値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た。これより、20 養生を基準とした場合、30 養生における自己収縮ひずみおよび同応力は、より早い材齢で生じ始めるが、材齢にともなうそれらの進行速度は、逆に小さくなっている。10 養生では、この逆の傾向がみられる。自己収縮応力の大小関係は、材齢 91 日の時点で $20 > 10 > 30$ となっており、その大きさは、10、20 養生の場合に約 1.5N/mm^2 、30 では 1.1N/mm^2 程度であった。

3.3 膨張材の作用効果

図 - 6、図 - 7 は、各々膨張材混和コンクリートの自己膨張・収縮ひずみおよび自己膨張・収縮応力の経時変化を示す。比較のため、基準コンクリートの結果も併記した。両図において、膨張材混和コンクリートと基準コンクリートとの差は、膨張材の実質的な作用によるものであり、ここでは、これを補償量と呼ぶことにする。

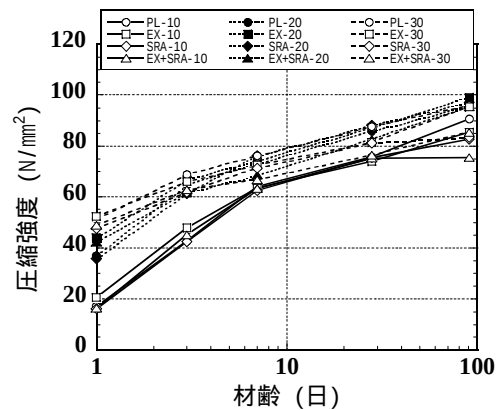


図 - 2 圧縮強度と材齢の関係

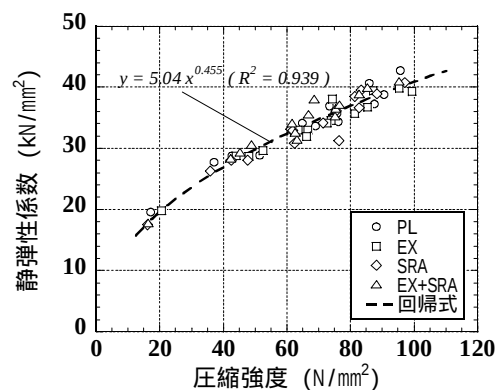


図 - 3 静弾性係数と圧縮強度の関係

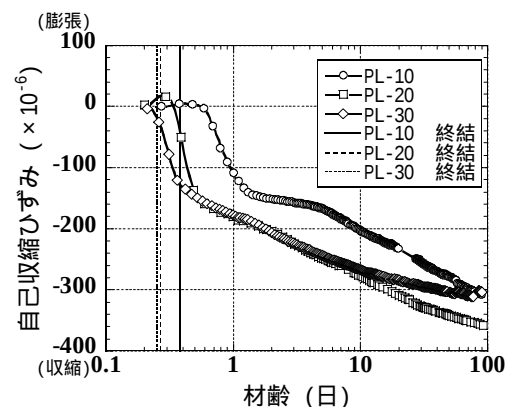


図 - 4 基準コンクリートの自己収縮ひずみ

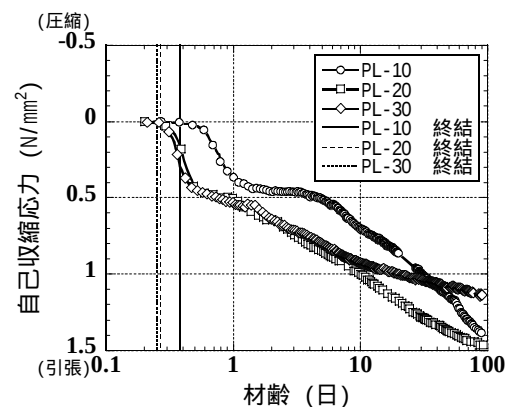


図 - 5 基準コンクリートの自己収縮応力

この補償量を、ひずみと拘束応力のそれぞれについて示したものが図 - 8 , 図 - 9 である。これより、補償量が生じ始める時期は、いずれの養生温度の場合も、材齢 1 日以前において基準コンクリートの自己収縮ひずみ・同応力の発生が大幅に大きくなる時期とほぼ対応している。また、3 日以前の初期材齢における補償量の大小は、基準コンクリートの自己収縮ひずみ・同応力の大小と対応しており、自己収縮が大きい 30 養生の場合には補償量が大きく、これが小さい 10 養生の場合は補償量も小さい。

自己収縮の発生開始時期と膨張材の補償作用が開始される時期がほぼ一致することについては、セメント硬化体の組織形成に関係しているものと推察される。セメントの水和反応によって硬化体が巨視的な体積減少を生じ始める時期は、水和が進行して硬化体の骨格が形成され、自己乾燥に起因した毛細管張力が作用し始める時期であると考えられる⁶⁾。一方、膨張性水和物による膨張作用によって巨視的な体積膨張を生じるためにも、この作用を受け止めるセメント硬化体の骨格形成が必要である。つまり、双方とも硬化体の骨格形成と関連しており、このことが自己収縮の生じ始める時期と膨張作用の生じ始める時期がほぼ一致した理由であると考えられる⁷⁾。

また、7 日以降の材齢においても、補償量は徐々に増加しており、増加割合は養生温度が低い場合により大きくなっている。結果的に、材齢長期における補償量は、養生温度に拘わらず 1.2N/mm^2 程度となった。補償量が徐々に増加するのは、長期的にも若干の膨張作用が生じているためと考えられる。膨張コンクリートが有効な膨張作用を呈するためには、膨張材の水和反応とセメントの水和反応の時間的一致が重要であるが⁸⁾、温度が低いほど両者の水和は遅れ、逆に高い場合は促進される。両者の微妙なバランスが養生温度によって影響を受け、上記の現象が生じたものと考えられる。

以上のことより、初期材齢での進行の速い自

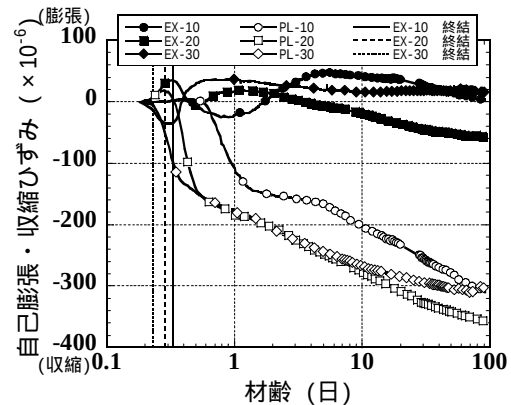


図 - 6 膨張材混和時の自己膨張・収縮ひずみ

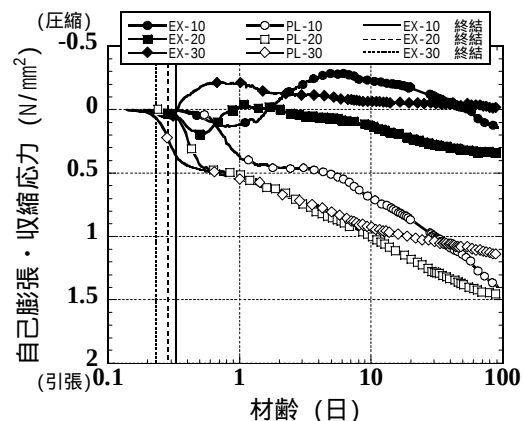


図 - 7 膨張材混和時の自己膨張・収縮応力

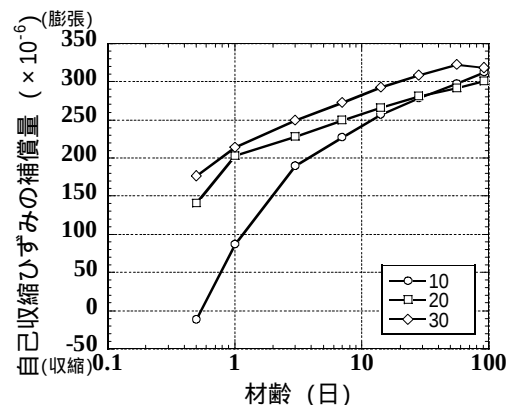


図 - 8 自己収縮ひずみの補償量

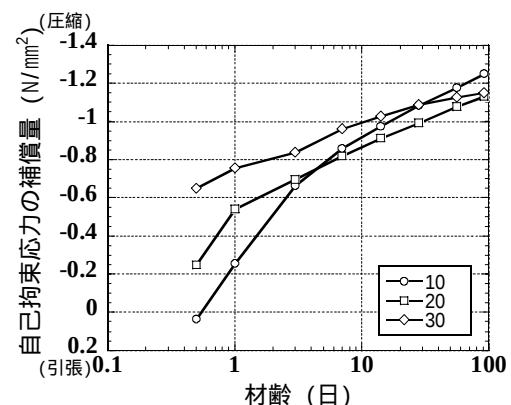


図 - 9 自己収縮応力の補償量

己収縮を大きな膨張作用によって抑制し、長期にわたって徐々に進行する自己収縮をも補償する作用を兼ね備えた膨張材の使用は、自己収縮抑制方法の一つとして、効果的かつ合理的であるといえる。これらの作用により、材齢初期から長期にわたり、膨張材混和コンクリートの拘束応力は、10、30 の場合はほぼゼロとなり、20 の場合もゼロ近辺となった。

図 - 10 は、膨張材が自己収縮ひずみと同応力の補償に及ぼす作用効果の相違を検討するために、基準コンクリートの自己収縮ひずみおよび同応力と、膨張材によるこれらの補償量の比(図中では 補償比)を求めて示したものである。これより、10 養生の場合に、ばらつきが大きくなっているものの、膨張材が自己収縮ひずみの補償に及ぼす効果と自己収縮応力の補償に及ぼす効果とは、概ね対応している。

3.4 収縮低減剤の作用効果

図 - 11、図 - 12 に、各々収縮低減剤混和コンクリートの自己収縮ひずみおよび自己収縮応力の経時変化を示す。基準コンクリートの結果も併記した。収縮低減剤の効果は、養生温度に拘わらず、基準コンクリートの自己収縮ひずみ・同応力の発生にほぼ付随して生じている。

図 - 13 は、自己収縮ひずみおよび同応力の双方について、基準コンクリートに対する収縮低減剤混和コンクリートの比(以下、低減比)を示したものである。低減比は、これが小さいほど収縮低減効果が大いことを意味する。図より、養生温度に拘わらず、ひずみ、応力いずれの場合も材齢初期で小さく、7 日以降ほぼ一定となっている。材齢 7 日以降におけるこれらの比の絶対値は、0.85 ~ 0.9 程度であった。30 養生におけるひずみの低減比は幾分大きく 0.95 程度である。つまり、ひずみに対する低減効果と応力に対する低減効果がほぼ対応する結果である。なお、自己収縮応力の低減比が、3 日以前の初期材齢においてひずみの場合よりも小さくなっているが、これは収縮低減剤の混和によって弾性係数の発現が幾分遅れたためであると考

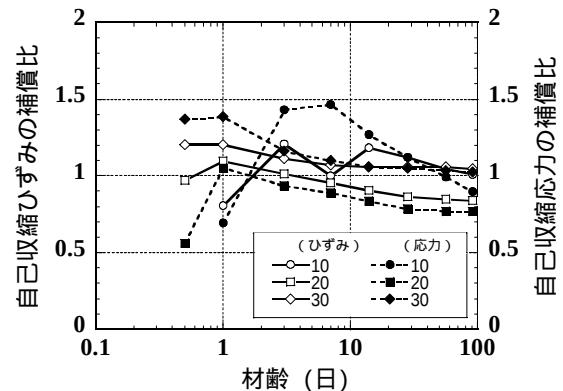


図 - 10 自己収縮ひずみ・応力の補償比

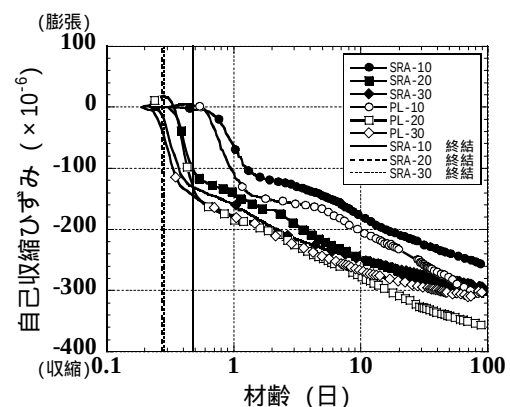


図 - 11 収縮低減剤混和時の自己収縮ひずみ

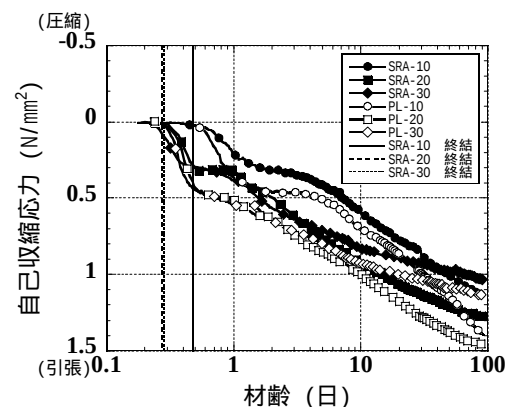


図 - 12 収縮低減剤混和時の自己収縮応力

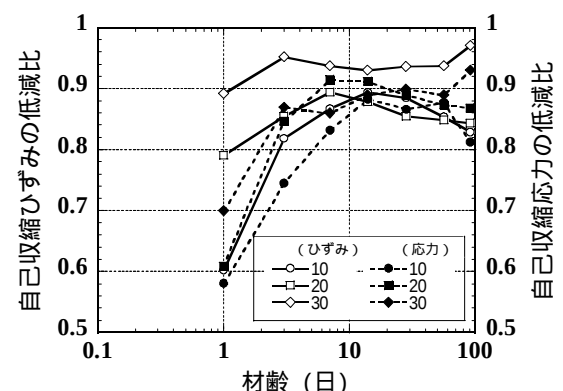


図 - 13 自己収縮ひずみ・応力の低減比

えられる。

3.5 膨張材・収縮低減剤併用による作用効果

図 - 1 4 は、膨張材、収縮低減剤併用時の自己収縮応力の補償量と、各々を単独で用いた場合の補償量を比較して示す。図中の計算値は、膨張材および収縮低減剤のそれぞれを単独で用いた場合の補償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たとした場合の予測値である。図中には、併用時の実測補償量に対する各々の補償量の比率を併記した。併用時の補償効果における各材料の寄与率を比較すると、膨張材単独で 78～89%，収縮低減剤単独では 6～17%となっており、膨張材の効果が大きく現れている。

併用時の比率における計算値と実測値との差は、併用によって生じた相乗作用分と考えることができる。これをみると、10、30 養生の場合に約 5%程度、20 では約 10%の相乗効果が発揮されている。両者併用により、個々の材料の効果を足し合わせた以上の効果が期待できる。

4. まとめ

高強度コンクリートの自己収縮応力の低減化に及ぼす膨張材の効果を、収縮低減剤と併用した場合も含め、3 養生温度下において実験的に検討し、以下の結論を得た。

- (1) 膨張材は、材齢初期における進行の速い自己収縮を有効的に補償することに加えて、長期にわたって徐々に進行する自己収縮を補償する作用も有する。
- (2) 膨張材を混和したコンクリートの拘束応力は、いずれの養生温度の場合も材齢初期から長期にわたりほぼゼロ近辺となった。
- (3) 収縮低減剤が自己収縮応力の低減に及ぼす効果は、養生温度に関係なく 10～15%であった。
- (4) 自己収縮応力の低減に及ぼす膨張材・収縮低減剤併用時の効果において、養生温度に拘わらず 5%程度以上の相乗効果が発揮された。

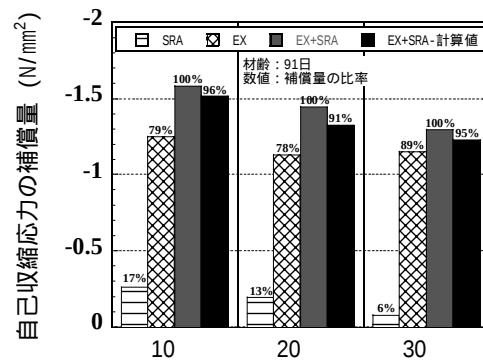


図 - 1 4 膨張材・収縮低減剤の併用効果

- (5) 膨張材および収縮低減剤が自己収縮応力の低減に及ぼす効果は、いずれの養生温度の場合も自己収縮ひずみの低減における効果とほぼ対応する。

参考文献

- 1) 宮澤伸吾ほか：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集，Vol.15，No.1，pp.57-62，1993
- 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，自己収縮研究委員会報告書，pp.195-198，1996
- 5) 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
- 6) 田澤榮一，宮澤伸吾：水和による自己収縮，コンクリート工学，Vol.32，No.9，pp.25-30，1994
- 7) 谷村 充ほか：膨張材を用いた高強度コンクリートの自己膨張・収縮特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.951-956，2002
- 8) 山崎之典：膨張性混和材を用いたコンクリートの膨張機構，セメント・コンクリート，No.352，pp.10-18，1976