

論文 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

谷村 充^{*1}・兵頭 彦次^{*2}・佐藤 良一^{*3}

要旨：水セメント比 30%の高強度コンクリートを対象に，その自己収縮ひずみおよび自己収縮応力の低減化に及ぼす 2 種類の膨張材の効果，その効果に及ぼすセメント種類の影響について，材齢約 200 日まで実験的に検討した。その結果，自己収縮の発現が大きい時期において膨張材が有効に作用する，膨張材が自己収縮および同応力の低減に及ぼす効果は，その種類に拘わらずほぼ同等である，低熱ポルトランドセメントと膨張材を組み合わせる使用することにより低収縮化以上の効果が発揮される，膨張材の効果に与えるセメント種類の影響は，補償量で比較するとさほど大きくないこと，などが明らかとなった。

キーワード：高強度コンクリート，自己収縮，膨張材，低熱ポルトランドセメント

1. はじめに

近年，コンクリート部材の更なる構造性能の向上，高耐久化の要求に対し，高強度，高流動コンクリートが開発され，その実用化研究が活発に行われている。一方，粉体量が多く水結合材比が小さいこの種のコンクリートは，初期材齢から大きな自己収縮が発生し¹⁾，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。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において顕在化する凝結直後からの収縮を制御することは重要な課題である。収縮の低減対策は多岐にわたると考えられるが，使用材料による対策として，ビーライト含有量の多いセメント，膨張材，収縮低減剤といった混和材料の有用性が明らかとされている^{2), 3)}。しかしながら，これらの組み合わせによる収縮および収縮応力の低減効果については十分に明らかとされていない。また，長期的な性状について検討した事例も少ないのが現状である。

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，鉄筋拘束応力の低減に及ぼす 2 種類の膨張材の効果，ならびにその効果に及ぼすセメント種類の影響

について，材齢約 200 日まで実験的に検討した。

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)および低熱ポルトランドセメント(記号 L，密度：3.22g/cm³，比表面積：3280cm²/g，C₂S：54%)を使用した。膨張材(記号 EX)には，石灰系(記号 K，密度：3.14g/cm³，比表面積：3310cm²/g)および CSA 系(記号 G，密度：2.96g/cm³，比表面積：3050cm²/g)のいずれも市販品を使用した。細骨材には，静岡県小笠産の陸砂(表乾密度：2.60g/cm³，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砕石(最大寸法：20mm，表乾密度：2.64g/cm³，吸水率：0.82%，粗粒率：6.68，粒形判定実績率：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%の一定とし，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。膨張材の添加率は，その種類に

*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 建設技術グループ研究員 (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)

表 - 1 コンクリートの配合

記号	セメントの種類	膨張材の種類	W/(C+EX) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
					W	C	EX	S	G	SP
NC	N	-	30	49.2	175	583	-	794	832	7.87
NC+K		K				539	44			8.45
NC+G		G				539	44			8.45
LC	L	-		49.5		583	-	803		4.84
LC+K		K				539	44			4.72
LC+G		G				539	44			4.72

拘わらず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は、20℃、80%R.H.の試験室内で行った。なお、表 - 1 には各々のコンクリートに対する記号を併記してある。

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 22.5±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(100×200mm)を各配合に対して 15 本

作製した。圧縮供試体を含む全ての供試体の養生は、打込みから脱型までが 20℃の室内で湿潤養生とし、材齢 24 時間程度で脱型した後は、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。シールした全ての供試体は、20℃、60%R.H.の室内で養生した。

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。ここで、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。すなわち、本研究と比較的配合条件に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)を適用して求めた計測時間ステップ毎の線膨張係数の平均値と、そのステップにおける実測温度変化量から温度ひずみ増分を求め、これを積算したものを温度ひずみとした。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た。

$$\alpha(t) = A + B \cdot \exp\left\{-\frac{(t - t_0)}{C}\right\} \quad (1)$$

(t)：材齢 t 日における線膨張係数

A：材齢 28 日以降の線膨張係数(×10⁻⁶/)

(N:8.88, L:9.69)

B：実験定数 (N:22.53, L:22.17)

C：実験定数 (N:0.107, L:0.124)

t_0 ：凝結の始発時間

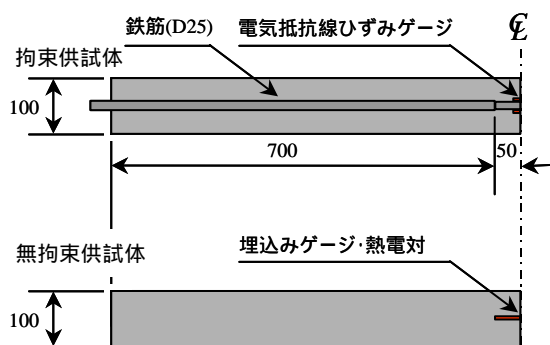


図 - 1 供試体の形状・寸法

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弾性係数を、JIS A 1108 および JIS A 1149 に従って測定した。また、JIS A 1147 に準拠してコンクリートの凝結時間を測定した。

3. 結果と考察

3.1 圧縮強度特性

図 - 2 に、封緘養生したコンクリートの圧縮強度と材齢の関係を示す。材齢 28 日で比較すると、N セメントを用いた場合、膨張材の有無やその種類に拘わらず約 85MPa であった。一方、L セメントの場合は、膨張材の混和によって、圧縮強度が若干(5~8MPa 程度)低下した。材齢 91 日で比較すると、N セメントでは膨張材を用いた場合の圧縮強度が若干(3~7MPa 程度)大きくなり、L セメントではほぼ同等となった。

図 - 3 に、圧縮強度と弾性係数の関係を示す。同一圧縮強度に対する弾性係数について、NC、NC+G ならびに NC+K を比較すると、NC > NC+K > NC+G の傾向であり、圧縮強度が高い場合において差が若干大きくなった(大きいもので 2000MPa 程度)。一方、LC と比較し、LC+G は同等、LC+K では若干大きくなった。セメント種類別では、膨張材の有無や種類に拘わらず、同一圧縮強度に対する弾性係数は、L セメントを用いた場合が若干小さい傾向であった。

このように、膨張材が圧縮強度や弾性係数に与える影響は、その種類や組み合わせるセメントの種類によって多少異なったが、本研究における膨張材量の範囲では、その影響は小さい。

3.2 極初期材齢時の自己膨張・収縮性状

図 - 4 (a) は、材齢 24 時間までの自己膨張・収縮ひずみについて、NC と NC+K を比較して示す。ひずみの起点は、凝結の始発時間としている。図中には、コンクリートの内部温度を併せて示す。図 - 4 (b) に示すのは、NC+K のひずみから NC のそれを差し引いて求めた膨張材に

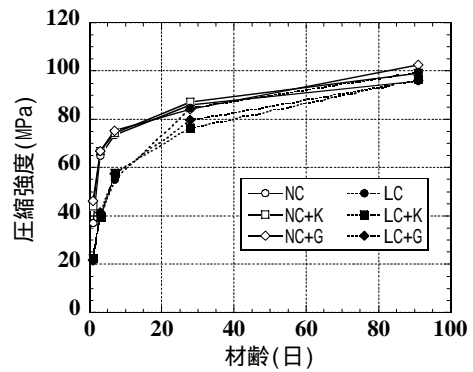


図 - 2 圧縮強度特性

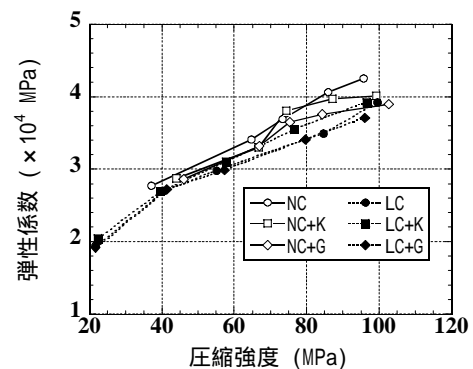


図 - 3 圧縮強度と弾性係数の関係

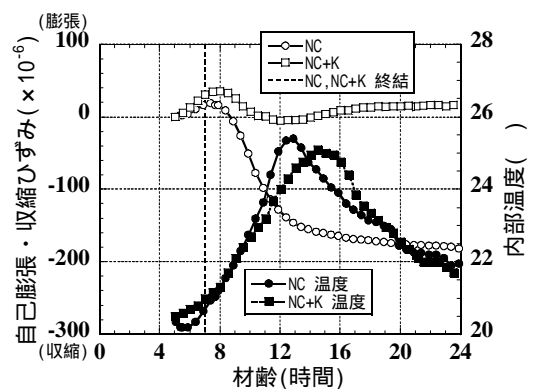


図 - 4 (a) 自己膨張・収縮ひずみ特性(NC+K)

よる自己収縮ひずみの補償量である。これらから、NC における自己収縮ひずみが急激に進行する 8 時間頃から、膨張材による補償量が大幅に大きくなっている。この時期は、凝結時間との関係から、終結後 1 時間程度に相当する。

図 - 5 には、NC と NC+K について、拘束供試体の鉄筋ひずみならびに同補償量を示す。鉄筋ひずみの変化量が大きくなる時期は、上記した時期とほぼ一致している。このように、膨張材による自己収縮の補償時期は、これを用いないベースコンクリートの自己収縮の発生が活発

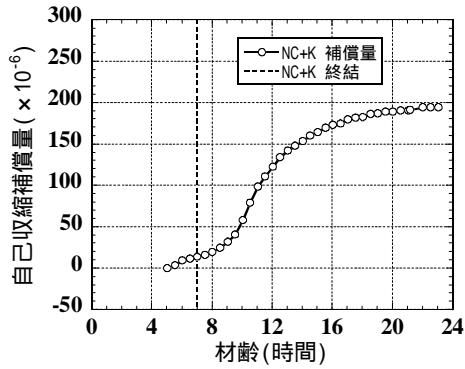


図 - 4 (b) 自己収縮ひずみの補償量(NC+K)

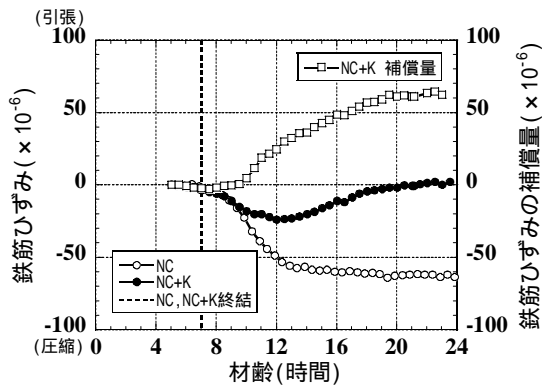


図 - 5 拘束鉄筋ひずみとその補償量(NC+K)

な時期と対応している。すなわち、自己収縮の発現が大きい時期において、膨張材が有効に作用しており、自己収縮抑制方法の一つとして、膨張材の使用は合理的であるといえる。両者の発生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。つまり、自己収縮の主要な発生要因と考えられている⁶⁾自己乾燥に起因した毛細管水の負圧による収縮応力、ならびに膨張性水和物の生成による膨張応力によってマクロな体積変化を生じるには、これら応力を受け止めるセメント硬化体の組織構造が相応に強固(微細)となる必要があり、その時期が上記した凝結後1時間程度に相当したものと考えられる。

図 - 6 (a)および図 - 6 (b)は、上記と同様な関係を、NC+G について示したものであるが、NC+K における場合とその傾向がほぼ一致しており、本研究で用いた2種類の膨張材の作用効果はほぼ同等であった。

なお、NC における自己収縮と内部温度の関係をみると、矢野ら⁷⁾による実験結果とほぼ一

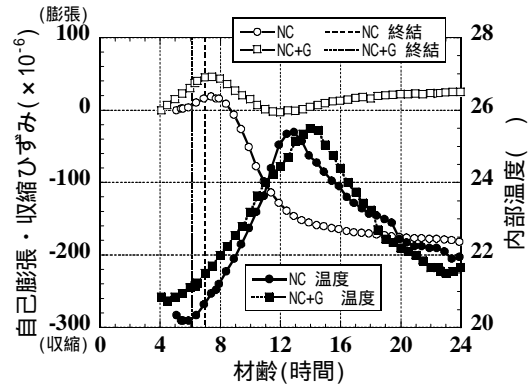


図 - 6 (a) 自己膨張・収縮ひずみ特性(NC+G)

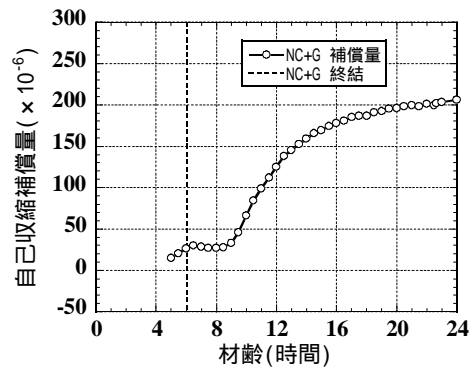


図 - 6 (b) 自己収縮ひずみの補償量(NC+G)

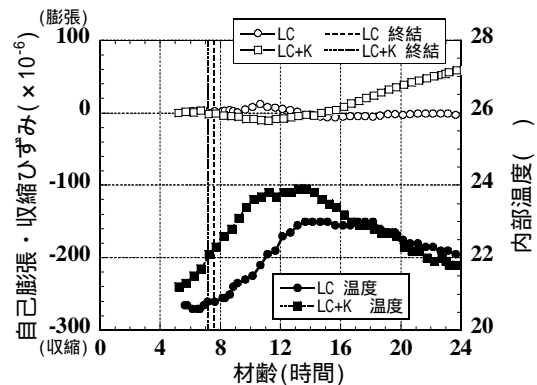


図 - 7 (a) 自己膨張・収縮ひずみ特性(LC+K)

致しており、自己収縮が急激に進行する時期は、 C_3S の水和加速期に対応していると考えられる。

図 - 7 (a)、図 - 7 (b)および図 - 8 は、上記と同様な関係について、LC と LC+K を比較したものである。図示した範囲において、LC の自己収縮ひずみはほぼゼロであり、大きな自己収縮の発生は見られなかった。膨張材によるひずみの補償量が大きくなる時期は、12時間頃からであり、凝結時間との関係では、最終後5時間程度に相当する。ここでは示さないが、LC+G の場合も同様の傾向であった。膨張材とLセメ

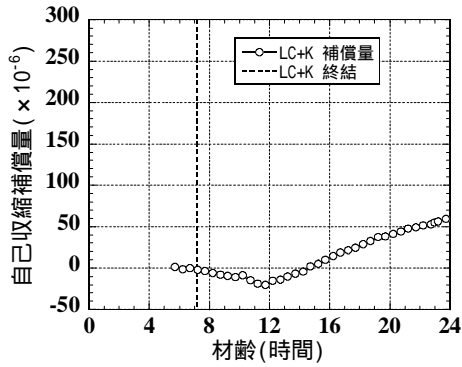


図 - 7 (b) 自己収縮ひずみの補償量(LC+K)

ントを組み合わせた場合には、膨張性水和物の生成に起因した膨張応力を受け止める組織の形成がNの場合よりも緩やかなため、マクロな体積膨張を生じる時期が相対的に遅れたものと推察される。

3.3 長期材齢における膨張・収縮性状

図 - 9 は、全てのコンクリートについて自己膨張・収縮ひずみと材齢の関係を示す。最終材齢における NC と LC を比較すると、前者の自己収縮ひずみが約 400×10^{-6} であったのに対して、後者のそれは約 100×10^{-6} (NC の約 25%) と大幅に小さくなった。膨張材を混和した場合には、ベースセメントをNセメントとした場合が、最終材齢において約 100×10^{-6} の収縮ひずみとなり、自己収縮の小さいLセメントと組み合わせた場合は 250×10^{-6} 程度の膨張ひずみを生じている。膨張材を用いたコンクリートの長期的なひずみ性状は、いずれのセメントと組み合わせた場合も、それらベースセメントのひずみ性状とほぼ対応しており、長期材齢におけるひずみの変動は、ベースセメントのそれがほぼ収束しているために小さい。

図 - 10 は、自己収縮ひずみの補償量を示したものである。最終材齢において、自己収縮ひずみの補償量は NC+K が約 310×10^{-6} 、NC+G と LC+K が約 280×10^{-6} 、LC+G のそれは約 340×10^{-6} となった。

図 - 11 は、拘束応力と材齢の関係を示す。NC の拘束応力は、最終材齢において約 1.6MPa であり、LC のそれは約 0.4MPa (NC の約 25%)

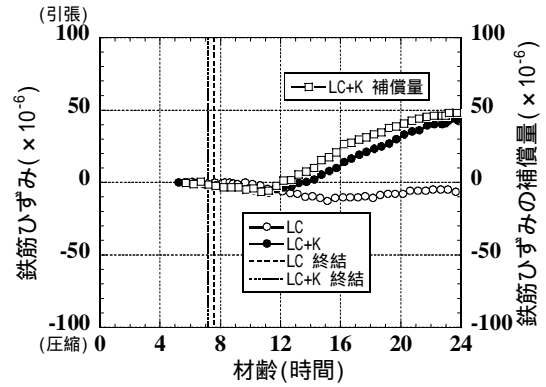


図 - 8 拘束鉄筋ひずみとその補償量(LC+K)

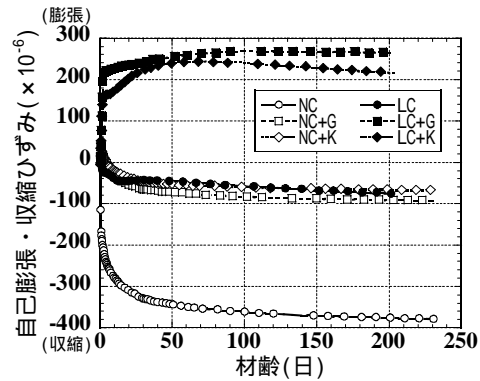


図 - 9 自己膨張・収縮ひずみ特性

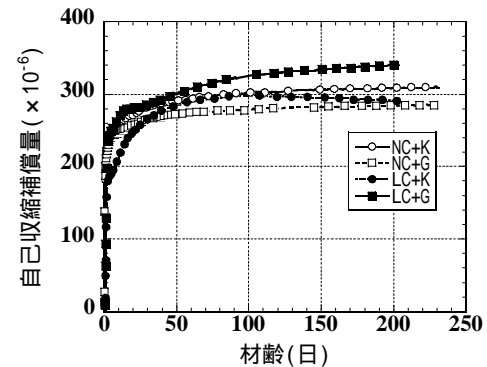


図 - 10 自己収縮ひずみの補償量

となった。膨張材を混和したものをみると、膨張材の種類に拘わらず、Nセメントと組み合わせた場合が約 0.5MPa の引張応力を生じ Lセメントとの組み合わせでは約 1MPa の圧縮応力が残留していた。このように、自己収縮ならびに同応力は、Lセメントの使用によって大幅に抑制でき、Lセメントと膨張材を組み合わせることにより、膨張材使用量をさほど増すことなく、低収縮化以上の効果が発揮される。すなわち、自己収縮に起因するひび割れの抑制に対して、Lセメントの使用は効果的であり、これと膨張材を組み合わせることにより、ひび割れ抵抗性

の大幅な向上が期待できる。

図 - 1 2 には、膨張材による自己収縮応力の補償量を示す。最終材齢において、NC+K、LC+K ならびに LC+G の自己収縮応力補償量が約 1.3MPa、NC+G のそれは約 1.2MPa となった。このように、膨張材の効果に与えるセメントの種類の影響は、膨張材を用いないベースコンクリートに対する補償量で比較すると、さほど大きくない結果であった。

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) 膨張材が圧縮強度や弾性係数に与える影響は、その種類や組み合わせるセメントの種類によって多少異なったが、その影響は小さい。
- (2) 自己収縮の発現が大きい時期において、膨張材が有効に作用しており、自己収縮抑制方法の一つとして、膨張材の使用は合理的である。
- (3) 膨張材が自己収縮および同応力の低減に及ぼす効果は、その種類に拘わらずほぼ同等であった。
- (4) 自己収縮および同応力は、低熱ポルトランドセメントの使用によって大幅に抑制でき、これと膨張材を組み合わせることにより、低収縮化以上の効果が発揮される。
- (5) 膨張材の効果に与えるセメント種類の影響は、膨張材を用いないベースコンクリートに対する補償量で比較すると、さほど大きくない結果であった。
- (6) 膨張材による補償量は、ひずみにおいて約 $280 \sim 340 \times 10^{-6}$ 、応力では 1.2 ~ 1.3MPa 程度であった。

参考文献

- 1) 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，

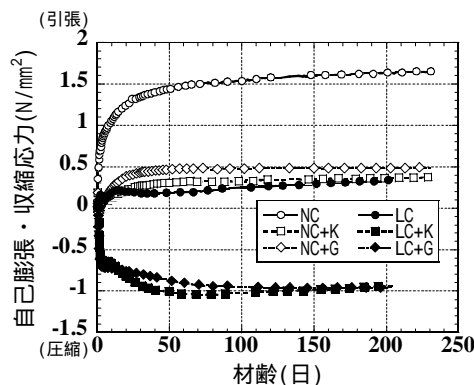


図 - 1 1 自己膨張・収縮応力特性

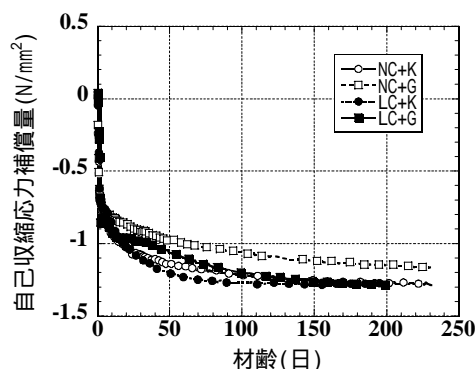


図 - 1 2 自己収縮応力の補償量

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，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，河野広隆，渡辺博志，佐藤重一：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) 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.43-50, 1996
- 7) 矢野めぐみ，名和豊春，萩原淳平，堀田智明：高流動コンクリートの自己収縮に関する実験的研究，セメント・コンクリート論文集，No.54, pp.673-679, 2000