

# 論文 石灰系低添加型膨張材のひび割れ抑制効果に関する研究

佐久間隆司\*1・伊達重之\*2・柴垣昌範\*1

**要旨:** コンクリートに発生するひび割れは、構造物の耐久性を低下させるために好ましくない。コンクリートに発生するひび割れは多種多様な原因が挙げられるが、コンクリート用膨張材を適切に使用すれば、効果的にひび割れが抑制できる場合が多いことが知られている。しかし、経済的な理由から膨張コンクリートが普及しているとは言いがたい。本文では、混和量が少なくても、従来の膨張材を使用した場合と同様な性能を有する低添加型膨張材をデッキスラブのコンクリートへ適用した場合のひび割れ抑制効果について報告する。その結果、従来の膨張材と同等以上の性能を確認した。

**キーワード:** 膨張材, 膨張コンクリート, 乾燥収縮, ひび割れ

## 1. はじめに

コンクリートに発生するひび割れは、使用材料, 調合, 構造, 施工, 環境等の多種多様な原因が挙げられる。この中で、マスコンクリートでは水和熱による温度応力, 高強度コンクリートについては自己収縮応力, 外気に接する面積が大きいコンクリートでは乾燥収縮応力が、それぞれひび割れ発生の主要因になっている。ひび割れが直ちに耐久性の低下につながるとは言えないが、抑制することは耐久性を向上にさせる有力な方策の一つである。これらのひび割れ発生やひび割れ幅を減少する手段の一つとして、膨張材の使用が挙げられる。

混和材としての膨張材は経済的な面に対して、ひび割れの抑制効果が定量的に把握されていない。このため、膨張コンクリートの出荷量は生コンクリート出荷量の1%に満たないのが現状であり、普及しているとは言えない状況にある。

しかし最近では、膨張材の評価が見直され、徐々にではあるが膨張材の効果の定量化が図られている<sup>1)</sup>。また、コストパフォーマンスに優れる低添加型膨張材も開発されているが、従来の膨張材に比較してのひび割れ抑制効果については検証された例は少ない<sup>2)</sup>。

本文では、石灰系低添加型膨張材を使用したコンクリートを立体駐車場のデッキスラブへ用いた事例について、現場計測等によるひび割れ抑制効果の検証を行った結果を報告する。

## 2. 実験内容

### 2.1 石灰系低添加型膨張材の特性

表-1に石灰系低添加型膨張材の化学組成と物理的性質を、従来の石灰系膨張材と比較して示す。石灰系低添加型膨張材は、SO<sub>3</sub>量やSiO<sub>2</sub>量が少ないが、石灰量は従来の膨張材に較べて多い。これは、従来の石灰系膨張材に比較して

表-1 石灰系低添加型膨張材の化学組成と物理的性質

銘柄	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	化学成分 (%)						
			Ig. loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
石灰系 低添加型膨張材	3.19	2900	0.9	6.2	1.7	1.0	86.6	0.5	3.6
従来の石灰系膨張材	3.14	3500	0.4	9.6	2.5	1.3	67.3	0.4	18.0

\*1 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 (正会員)

\*2 石川島建材工業(株) 技術研究所 (正会員)

遊離石灰量が高いため、これにより大きな膨張量が得られる。また、使用クリンカーの粒度分布については、水和初期に消費される粒度範囲、およびポップアウトの原因となりうる大きな粒度範囲を小さくするような粒度構成として製品設計されている。

以上のような製品設計により、石灰系低添加型膨張材は従来の2/3程度の単位膨張材量で同様な膨張量が得られる膨張材である。

## 2.2 使用材料と調合

使用材料を表-2に示す。また、コンクリートの調合表を表-3に示す。石灰系低添加型膨張材を用いた調合を調合No.1として、膨張材を用いないものを調合No.2とした。

## 2.3 試験項目と試験方法

使用したコンクリートの試験項目と試験方法については表-4に示す。試験および試験体作製は全て荷卸し時点とした。作製した試験体は翌日に現場より搬送し、各強度試験を実施した。

## 2.4 現場計測方法

計測した場所は福井市内の4層の自走式立体駐車場デッキスラブのコンクリートである。膨張材の効果を判断するために、1階・2階は石灰系低添加型膨張材を調合し（以下、膨張コンクリート）、3階、ルーフ階は通常のコンクリート（以下、普通コンクリート）を用いた。尚、1階は土間部分、ルーフ階は防水部分と仕様が異なることから、膨張材を使用した2階と使用しない3階の同様な場所を比較するように計測を行った。（図-1）

測定は測温機能つき埋込み型ひずみ計を波型デッキプレートの軸方向と軸直角方向に写真-1のように設置した。また、各々の階で最もひび割れが発生しやすいとされるスロープ部分にも軸方向に設置した。さらに、無応力容器に測温機能つき埋込み型ひずみ計を設置して、発泡スチロール容器300×200×150mmにコンクリートを打設して自由ひずみも計測した。計測は、

表-2 使用材料

材料名（記号）	生産者・（産地）	物性値他
セメント（C）	M社製普通ポルトランドセメント	密度 3.16 g/cm <sup>3</sup>
混和材（Ex）	T社製石灰系低添加型膨張材	密度 3.19g/cm <sup>3</sup>
細骨材1（S1）	九頭竜川水系川砂	表乾密度 2.59 g/cm <sup>3</sup> 吸水率 2.29%
細骨材2（S2）	坂井郡三国町産陸砂	表乾密度 2.59 g/cm <sup>3</sup> 吸水率 1.92%
粗骨材（G）	九頭竜川水系川砂利	表乾密度 2.65 g/cm <sup>3</sup> 吸水率 1.69%
A E減水剤（A d）	リグニンスルホン酸系A E減水剤	標準型1種
水	福井市内福井市内地下水・上澄水	

表-3 コンクリートの調合

調合No	SL (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
					W	C	Ex	S1	S2	G	Ad
1	15±	4.5±	55	47.5	172	293	20	547	295	951	3.13
2	2.5	1.5				313	—				

表-4 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランプ試験	JIS A 1101 に従って、荷卸し時点でのスランプを測定した。
空気量試験	JIS A 1128 に従って、荷卸時の空気量を測定した。
圧縮強度試験	JIS A 1108 に従って、材齢3, 7, 28, 56日について実施した。
引張強度試験	JIS A 1113 に従って、材齢3, 7, 28, 56日について実施した。
静弾性係数試験	JIS A 1149・に従って、材齢3, 7, 28, 56日について実施した。
一軸拘束膨張試験	JIS A 6202 の拘束膨張B法に従って実施した。

打設から2週間は20分毎に、以降は3時間毎に約1ヶ月間連続的に計測を行い、その後は概ね1ヶ月毎に計測を実施した。

### 3. 試験結果

#### 3.1 使用コンクリートの試験結果

コンクリートのフレッシュ性状を表-5に示す。拘束膨張試験結果は図-2に、圧縮強度、引張強度、静弾性係数試験結果を膨張コンクリートおよび普通コンクリートについて、図-3~図-5に示す。図中に示した計算値は、コンクリート標準示方書に示されたもので、次式により算出した。

$$f_c(t) = \{t / (a + bt)\} f_{ck} \quad (1)$$

$$f_{tk}(t) = c(f_c(t))^{1/2} \quad (2)$$

$$E_e(t) = \varphi(t)(4.7 \times 10^3)(f_c(t))^{1/2} \quad (3)$$

ここに  $f_c(t)$  : 圧縮強度,  $t$  : 材齢 (日),  $f_{ck}$  : 材齢 56 日の圧縮強度,  $a, b$  : 定数,  $c$  : 0.44,  $f_{tk}(t)$  : 引張強度,  $E_e(t)$  : ヤング係数,  $\varphi(t)$  : 低減係数

すなわち、圧縮強度から引張強度およびヤング係数を計算した。

表-5 コンクリートのフレッシュ性状

調合 No	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
1	16.0	4.9	19.0
2	15.0	5.3	20.0

拘束膨張試験結果では従来の膨張材と同様な拘束膨張量が得られている。また圧縮強度試験結果では、普通コンクリートと膨張コンクリートの差はないが、算定式にあてはめると若干膨張コンクリートが大きくなっている。一方、引張強度の算定式と試験値では膨張コンクリートはやや大きく、普通コンクリートはやや小さく推移しており、ひび割れ発生の観点からは膨張コンクリートが安全側の結果となった。ヤング係数試験結果についても、圧縮強度からの算定式と試験値では、普通コンクリートはほぼ同様となり、膨張コンクリートはやや大きくなる傾向にあった。

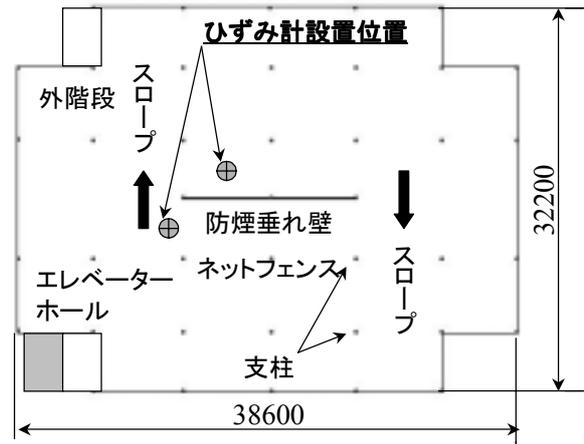


図-1 2階・3階平面図



写真-1 埋込みひずみ計設置状況

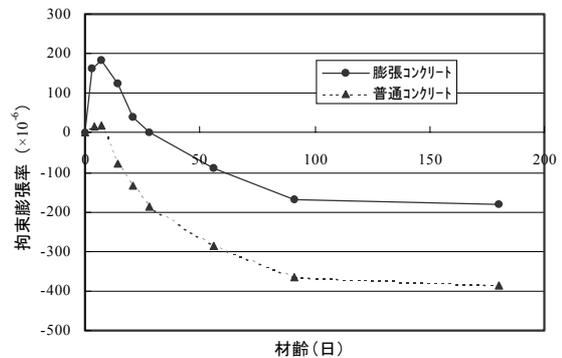


図-2 一軸拘束膨張率

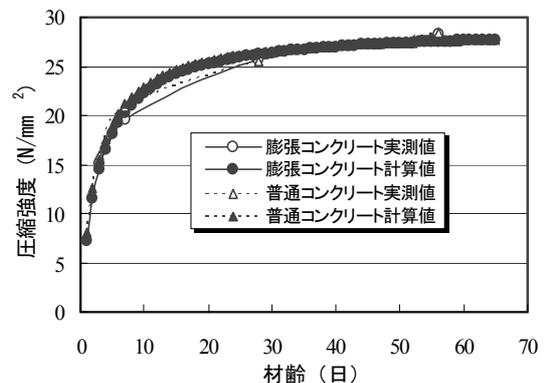


図-3 圧縮強度

### 3.2 現場ひずみ計測結果

実際には初期の線膨張係数が異なるが、部材厚が小さいので同等とし、 $10.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ と仮定して打込みから温度補正を行ない、実ひずみを算出した。膨張コンクリートの実ひずみを図-6に、普通コンクリートを図-7に示す。尚、無応力計は材齢28日までの計測となっている。膨張コンクリートは波型デッキプレートの軸方向とスロープでの軸方向の膨張量が $100 \times 10^{-6}$ 程度と小さくなった。軸直角方向については、一軸拘束膨張試験と同様な $200 \times 10^{-6}$ 程度の膨張ひずみが得られた。一方、普通コンクリートについては、初期の線膨張係数の仮定が小さいため、ひずみが若干膨張側になっている。また、拘束鉄筋比が0.43%と同様であるが、外部拘束が大きいため軸方向の収縮よりも軸直角方向の収縮ひずみが大きくなった。

それぞれのコンクリートに含まれる実ひずみは拘束ひずみ、クリープひずみ、膨張ひずみ、乾燥収縮ひずみになる。膨張材による膨張ひずみ以外は同等で、ほぼ温度履歴が同一であることから、ひずみの差を膨張材の効果として求めたものが図-8である。この図ではスロープ部分が最小で $80 \times 10^{-6}$ 、その他は $250 \sim 350 \times 10^{-6}$ となった。橋梁におけるPC場所打ちコンクリート床版では $80 \sim 100 \times 10^{-6}$ である<sup>3)</sup>ことから、スロープ部分は同等で、その他の計測箇所では、かなり大きな膨張量になった。これは、スロープ部分が大梁に近いので、橋梁床版同様に拘束度が大きくなったことに起因するものと考えられる。膨張効果が若干上昇方向にあるのは、膨張コンクリートの乾燥収縮ひずみが緩やかに増加していることによる。これについては、鉄筋のプレストレインの効果であるか環境条件的な違いであるかがあまり明確ではない。

### 4. 応力推定での効果の検証

膨張材の効果をもどのように事前の検討で評価するかについては、既往の研究で多様な対応がなされている。例えば、マスコンクリートの場

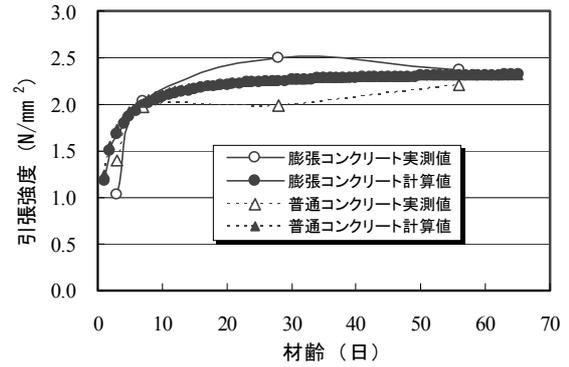


図-4 引張強度

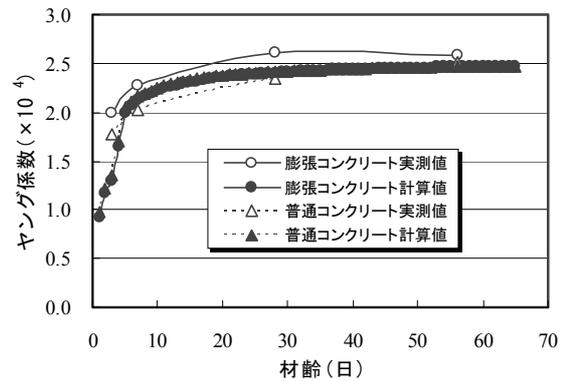


図-5 ヤング係数

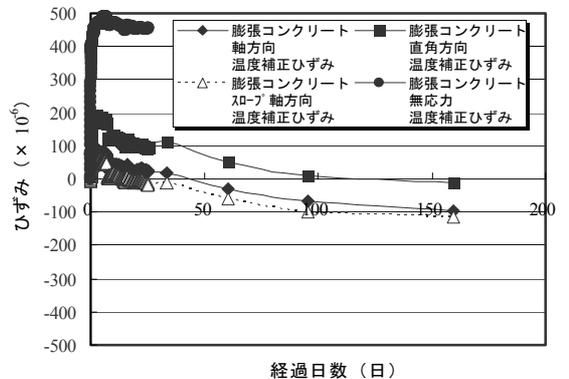


図-6 膨張コンクリートのひずみ変化

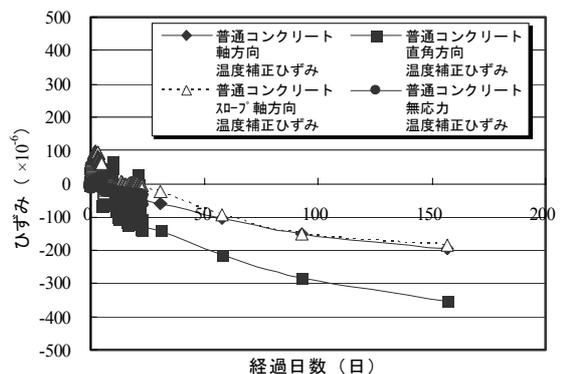


図-7 普通コンクリートのひずみ変化

合、膨張コンクリートの方の線膨張係数を小さくすること、初期有効ヤング係数<sup>4)</sup>を変えること、引張応力を低減すること等で評価することが行われてきた。一方、乾燥収縮ひずみについては、コンクリート標準示方書の算定式に係数を乗じる<sup>5)</sup>等がある。しかし、応力で評価し推定するには、膨張コンクリートの引張応力下での引張クリープや乾燥クリープの取扱いが難しい面があり、クリープ係数が普通コンクリートより大きいことやクリープ限度が小さいことが指摘されている。このため、膨張コンクリートの評価手法についての既往の研究は少ない。ここでは、まずコンクリート標準示方書にある乾燥収縮ひずみの推定式(4)を用いて、ひずみを推定した。

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108(t - t_0)^{0.56}\}] \cdot \epsilon'_{sh} \quad (4)$$

$$\epsilon'_{sh} = -50 + 78 [1 - \exp(RH/100)] + 38 \log_e W - 5 [\log_e \{(V/S) / 10\}]^2 \quad (5)$$

ここで  $\epsilon'_{sh}$  : 収縮ひずみ最終値 ( $\times 10^{-5}$ ) の推定値,  $\epsilon'_{cs}(t, t_0)$  : 材齢  $t_0$  から  $t$  までの収縮ひずみ ( $\times 10^{-5}$ ), RH : 相対湿度 65 (%), W : 単位水量 ( $172 \text{ kg/m}^3$ ), V : 体積 ( $\text{mm}^3$ ), S : 外気に接する表面積 ( $\text{mm}^2$ ), V/S : 体積表面積比 (150mm)

式(4)で算出された無拘束ひずみを用いて、一家が提案した引張応力式<sup>6)</sup>で評価した。普通コンクリートの乾燥材齢  $t$  における引張応力度算出式(6)に示す。

$$\sigma_{p-t} = \epsilon_{p-\infty} / \psi_{\infty} \cdot E_c (1 - e^{-\alpha \cdot \psi_t}) \quad (6)$$

膨張コンクリートの乾燥材齢  $t$  における引張応力度算出式(7)に示す。

$$\sigma_{ex-\infty} = -\epsilon'_e \cdot E_s \cdot p \cdot e^{-\alpha \cdot \psi_t} + \epsilon_{ex-\infty} / \psi_{\infty} \cdot E_c (1 - e^{-\alpha \cdot \psi_t}) \quad (7)$$

ここに、 $\epsilon'_e$  : 拘束下の膨張コンクリート(鉄筋)の最大膨張率,  $\epsilon_{p-\infty}$  : 普通コンクリートの最終収縮率,  $\epsilon_{ex-\infty}$  : 膨張コンクリートの最終収縮率,  $E_s$  : 鉄筋のヤング係数  $= 2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ,  $E_c$  : コンクリートのヤング係数,  $p$  : 拘束率相当の鉄筋比,  $\alpha : n \cdot p / (1 + n \cdot p)$

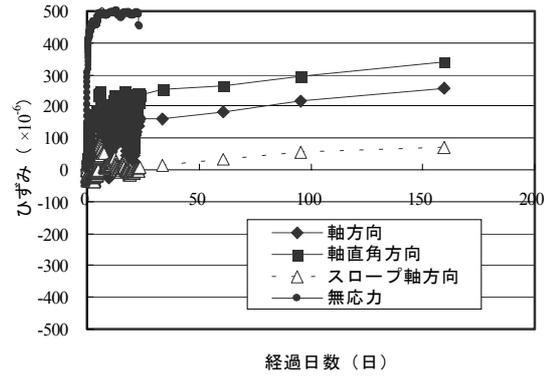


図-8 膨張材の効果

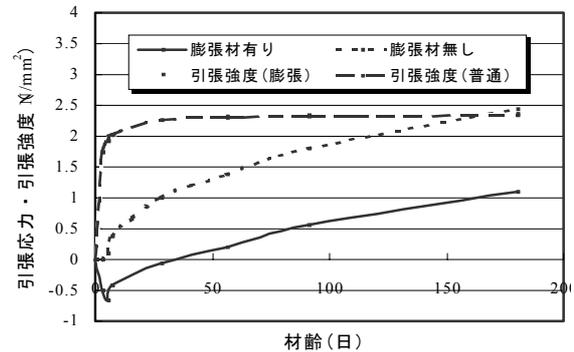


図-9 引張応力と引張強度の関係

で表される拘束率 ( $n = E_s / E_c$ ),  $\psi_{\infty}$  : コンクリートの最終クリープ係数,  $\psi_t$  : 材齢  $t$  のコンクリートのクリープ係数

今回の施工現場における拘束率は不明であるが、各部位の計測ひずみ、および無応力の計測ひずみから、 $\alpha = 0.4$  とした。拘束率を 0.4 とした場合の鉄筋比を 7.94% に換算して、膨張コンクリートがなす仕事が拘束の程度にかかわらず一定<sup>7)</sup>であるとの仮定により、拘束下の最大膨張率を  $63 \times 10^{-6}$  と算出した。また、最終収縮率は式(5)を用いて算出して  $375 \times 10^{-6}$  を得た。膨張コンクリートは無拘束状態では 90% の収縮率の低減を見込んで  $338 \times 10^{-6}$  とした。コンクリートのヤング係数は図-5 における式(3)の算定式を用い、材齢 3 日までは 0.73 として 5 日で 1.00 とした低減係数を用いた有効ヤング係数とした。クリープ係数は既往の研究<sup>8)</sup>により求められたものを用い、最終クリープを普通コンクリートで 1.0、膨張コンクリートで 1.5 とした。普通コンクリートおよび膨張コンクリートの発生応力と引張強度を図-9 に示す。膨張コン

クリートは初期に圧縮応力が導入され、引張応力が発生する時期も遅く、速度も小さいことがわかる。ひび割れ発生時期は、以下の観察結果とも一致するような結果であった。

1, 2 ヶ月ではひび割れが観察されなかったが、約3ヶ月後の観察では、普通コンクリートに18本のひび割れが発生し、膨張コンクリートには2本の微細なひび割れが発生していた。5ヶ月後では、図-10に示すように普通コンクリートは拘束が大きい柱廻りを中心に0.2~0.5mm幅のひび割れが30本発生したのに対して、膨張コンクリートはひび割れ幅が0.1mm程度の2本が発生しただけであり、長さも短かった。以上のような外観観察結果より、石灰系低添加型膨張材の格段のひび割れ抑制効果を検証できた。

## 5. 結論

石灰系低添加型膨張材を実現場で使用した結果、次のようなことが言える。

- (1) 従来の膨張材と同様な拘束膨張量が得られ、圧縮強度低下を招かないため、通常通り、セメントと置換えて使用できる。
- (2) 現場におけるひずみ計測の結果、スロープでは既往の研究結果に近く、その他の計測箇所では膨張ひずみが大きくなった。この差については大梁等の外部拘束の差によるものと考えられた。
- (3) 過去に提案された応力算定式を基本として新たにヤング係数やクリープ係数を既往の研究から入力値とした計算結果により、膨張材の効果を確認できた。
- (4) 現場の観察結果からは明らかに、石灰系低添加型膨張材を調合したコンクリートのひび割れが減少した。

**謝辞** 本論文をまとめるにあたり、群馬大学工学部辻幸和教授にご指導を戴きました。ここに深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 三谷裕二, 谷村充, 佐久間隆司, 佐竹信也:

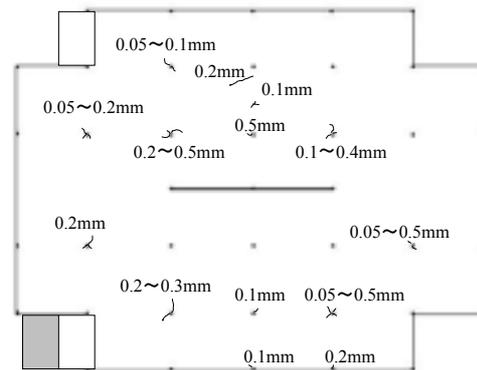


図-10 ひび割れ発生図(3階)

膨張材を混和したコンクリートの拘束膨張特性に及ぼす養生温度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003.7

- 2) 保利彰宏, 五味秀明, 鳥越隆, 辻幸和: 低添加型膨張材を用いたモデル壁における耐久性評価試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003.7
- 3) 高瀬和男, 寺田典生, 福永靖雄, 石川敏之: 場所打ちPC床版の材齢初期における膨張材効果の評価方法に関する一考察, コンクリート工学年次論文, Vol.24, No.1, 2002.6
- 4) 東邦和, 中村敏晴, 増井仁, 梅原秀哲: 膨張材を用いたマスコンクリートの収縮低減効果の研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003.7
- 5) 浦野知子, 石原昌行, 青木茂, 新村亮: 膨張材と収縮低減剤を使用した収縮応力抑制効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003.7
- 6) 一家惟俊: 膨張材によるひび割れ防止, 建築の技術 施工, 1975年8月号
- 7) 辻幸和: コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, Vol.47A, pp111-124, 1975.3
- 8) 佐竹紳也, 佐久間隆司, 細見雅生, 中本啓介: 高膨張コンクリートの調査設計・基礎物性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003.7