

論文 膨張コンクリートの膨張エネルギーに関する実験的検討

糟谷 守^{*1}・芝 祐介^{*2}・小澤 満津雄^{*3}・森本 博昭^{*4}

要旨: コンクリートの体積変化によるひび割れ抑制の方法の一つとして膨張材を使用する方法がある。しかし、コンクリートに膨張材を加えた膨張コンクリートの膨張性能について、十分に定量化されていないのが現状である。そこで本研究では、コンクリートの初期応力解析における膨張コンクリートの性能評価を目的として、仕事量一定則に基づく初期応力解析による方法の適用性を検証した。膨張コンクリートの膨張エネルギーと積算温度の関係を膨張コンクリートの一軸拘束試験により求め、得られた膨張エネルギーと積算温度の関係をを用いて、一軸拘束供試体の拘束応力を解析的に求め、実測値との比較を行った。

キーワード: 膨張コンクリート, 仕事量一定則, 膨張エネルギー, 積算温度

1. はじめに

コンクリートの体積変化に伴うひび割れ抑制方法のひとつとして、膨張材の使用が挙げられる。しかし、膨張材を使用したコンクリート(以下、膨張コンクリート)の膨張性能について、十分に定量化されていないのが現状である^{1)~5)}。そこで本研究では、コンクリートの初期応力解析における膨張コンクリートの性能評価を目的として、一軸拘束試験により膨張エネルギーと

積算温度との関係を求めた。次に、実験より得られた膨張エネルギーと積算温度との関係を用いて、同一配合の一軸拘束供試体における拘束応力を求め、実験値と解析値の比較を行った。

2. 膨張コンクリートの膨張エネルギーの算定

本研究では膨張コンクリートの一軸拘束試験による実験結果より、単位体積あたりの膨張コンクリートが鋼材に対してなす仕事量を求めて

表-1 使用材料

材料	記号	種類・性質など
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.15g/cm ³
膨張材	E	エトリングイト系膨張材
細骨材	S	揖斐川産川砂, 密度: 2.59g/cm ³
粗骨材	G	揖斐川産玉砕石, 密度: 2.62g/cm ³
混和剤	Ad	AE減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体)

表-2 示方配合

	W/(C+E)	単体量 (kg/m ³)					
	%	W	C	E	S	G	Ad
PL	57	180	316	0	851	926	3.16
EX		180	296	20	851	926	3.16

*1 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (非会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 助手 工博 (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

表-3 フレッシュコンクリートの性状

	EX	PL
スランプ(cm)	22	13
空気量(%)	5.2	4.7
温度(°C)	18	16

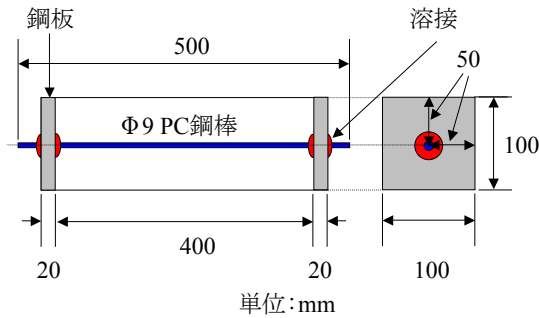


図-1 拘束供試体の形状寸法

表-4 圧縮強度試験結果

日	EX	PL
1	5.37	4.58
3	15.4	-
7	24.1	-
28	29.7	31.6

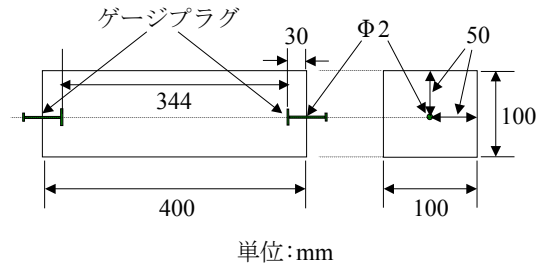


図-2 自由供試体の形状・寸法

膨張エネルギーを評価した。式(1)~(5)に断面中央に鋼材を配置した一軸拘束供試体における膨張コンクリートの仕事量の算出式を示す。

$$e_{che} = \frac{1}{2} \sigma'_c \varepsilon_c = const. \quad (1)$$

$$\sigma'_c A_c = \sigma_s A_s \quad (2)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s \quad (3)$$

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad (4)$$

$$e_{che} = \frac{1}{2} p E_s \varepsilon_s^2 \quad (5)$$

ここに、 e_{che} ：仕事量(N・mm/mm³)、 σ'_c ：コンクリートの応力(N/mm²)、 ε_c ：膨張ひずみ、 σ_s ：拘束鋼材の応力(N/mm²)、 ε_s ：拘束鋼材ひずみ、 A_s ：鋼材の断面積(mm²)、 A_c ：コンクリートの断面積(mm²)、 E_s ：拘束鋼材の弾性係数(N/mm²)、 p ：拘束鋼材比

3. 膨張コンクリートの一軸拘束試験

3.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料、表-2 に本研究で使った普通コンクリート(PL)と膨張コンクリート(EX)

の示方配合を示す。水結合材比は 57%とした。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、膨張材は CSA 系のマスコンクリート用低添加型を使用した。膨張材の使用量はセメントの内割りで 20kg/m³とした。混和剤は、AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体)を用いた。表-3, 4 にフレッシュコンクリートの諸試験値と圧縮強度試験結果の一例を示す。

3.2 供試体の寸法・形状

拘束供試体と無拘束供試体の形状・寸法を図-1, 2 および写真-1 に示す。図より、供試体は 100×100×400mm の角柱供試体とした。拘束供試体は断面中央に φ9mm の PC 鋼棒を配置して、両端を 100×100×20mm の鋼板で拘束した。PC 鋼棒と鋼板は溶接した。無拘束供試体は、「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法改訂版 2002」⁶⁾に準拠し、両端に計測用ゲージプラグを配置した。供試体と型枠との間には摩擦を低減するために、テフロンシートを配置した。計測項目は、供試体の体積変化による変形量と供試体内部温度とした。

3.3 計測方法

拘束および無拘束供試体ともにコンクリート

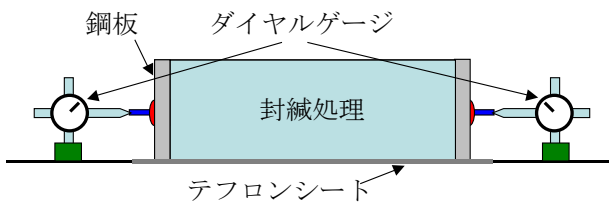


図-3 拘束ひずみ計測装置

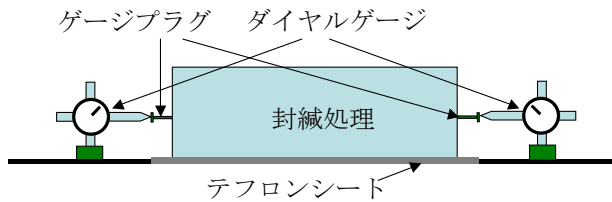


図-4 自由ひずみ計測装置

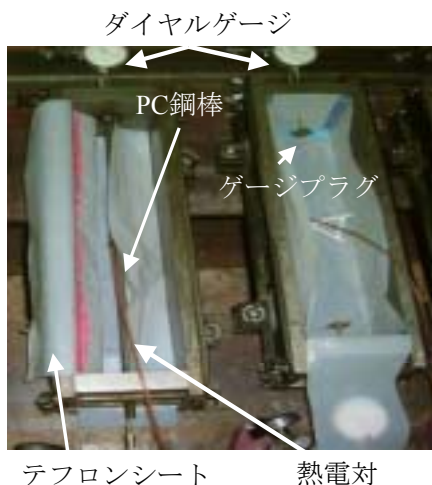


写真-1 供試体の形状

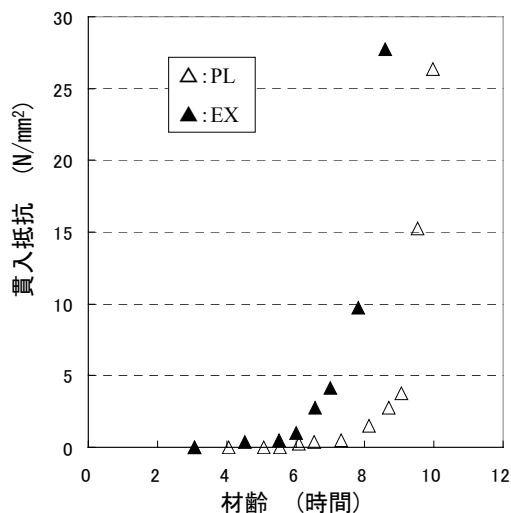


図-5 凝結試験結果

を打ち込み後、恒温恒湿環境（温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $70\% \pm 5\%$ ）に設置した。JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」⁷⁾を実施し、凝結始発付近を目安に脱型し、封緘処理を行った。図-3, 4 に示すように拘束供試体と無拘束供試体ともに、供試体長手方向の変位をダイヤルゲージにて1日毎に計測した。計測結果から「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法改訂版 2002」⁶⁾に基づきひずみを求めた。

4. 実験結果

4.1 凝結試験

凝結試験結果の一例を図-5 に示す。図より、普通コンクリートは約7時間で凝結始発に至り、その後急激に貫入抵抗が増加し、約8.5時間で凝結終結に達した。一方、膨張コンクリートは約8.5時間で凝結始発に至り、約10時間で凝結終結に達した。

4.2 普通コンクリートの拘束供試体と無拘束供試体ひずみの経時変化

図-6, 7 に普通コンクリートの拘束供試体と無拘束供試体のひずみの経時変化をそれぞれ示す。図より、拘束供試体ひずみは最終的に -70×10^{-6} 程度に落ち着く傾向を示した。一方、無拘束供試体ひずみは材齢10日までは変化量が大きい、材齢10日以降は変化量が小さくなり、 -100×10^{-6} 程度に落ち着く傾向を示した。

4.3 膨張コンクリートの拘束供試体と無拘束供試体ひずみの経時変化

図-8, 9 に膨張コンクリートの拘束供試体と無拘束供試体のひずみの経時変化をそれぞれ示す。図より、拘束ひずみは材齢5日までは変化量が大きい、材齢5日以降は変化量が小さくなり、 180×10^{-6} 程度に落ち着く傾向を示した。一方、無拘束ひずみは材齢5日までは変化量が大きい、材齢5日以降は変化量が小さくなり、 300×10^{-6} 程度に落ち着く傾向を示した。ここで

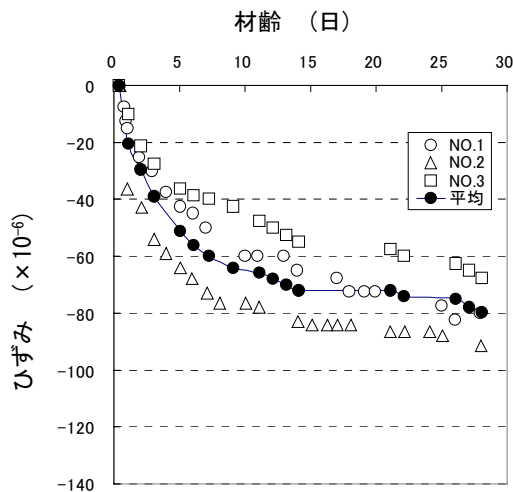


図-6 拘束供試体ひずみの経時変化
(普通コンクリート)

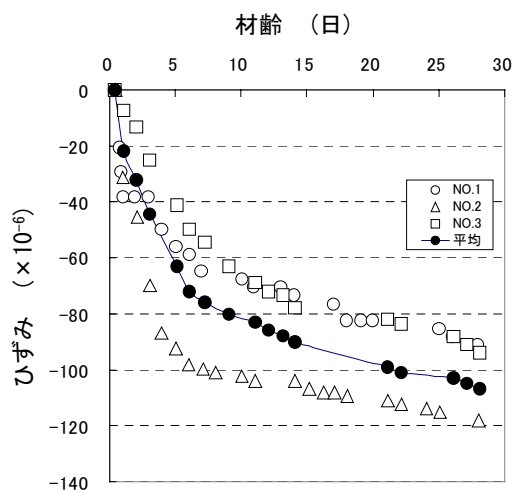


図-7 無拘束供試体ひずみの経時変化
(普通コンクリート)

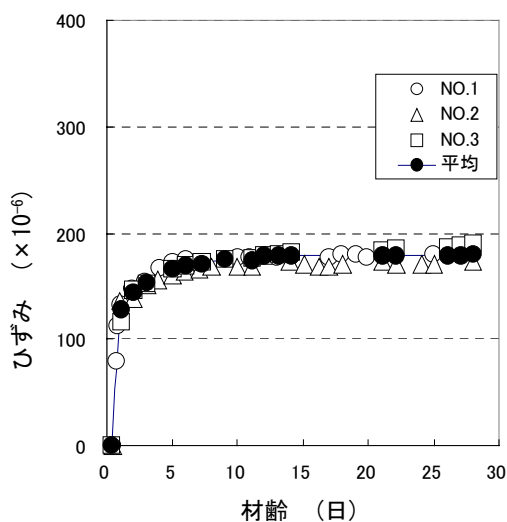


図-8 拘束供試体ひずみの経時変化
(膨張コンクリート)

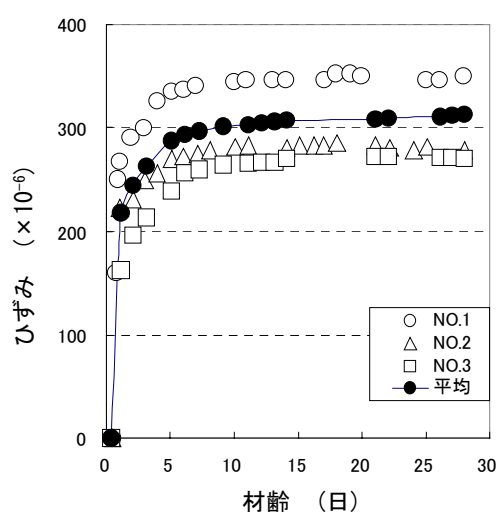


図-9 無拘束供試体ひずみの経時変化
(膨張コンクリート)

得られた拘束ひずみの結果を用いて膨張エネルギーの算定を行う。

4.4 膨張エネルギーと積算温度との関係

図-8 より得られた膨張コンクリートの拘束ひずみに、式(1)~(5)を適用して得られる仕事を近似的に単位体積当たりの膨張エネルギーとして、積算温度との関係を求めた結果を図-10 に示す。図より、膨張エネルギーは積算温度 150 日・℃まで変化量が大きいですが、それ以降は変化量が小さくなり、 $2.00 \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{mm}/\text{mm}^3$ 程度に落ち着く傾向を示した。

5. 膨張コンクリートの拘束応力算定

実験的に求めた単位体積あたりの膨張エネルギーを使用して、仕事量一定則^{1)~5)}により、一軸拘束供試体のコンクリート応力と拘束鋼材応力を算定し、実測値との比較を行った。図-11 に膨張コンクリートの拘束供試体に生じる変形の概略を示す。まず、実験より得られた拘束ひずみと式(6)~(7)からコンクリート拘束応力と拘束鋼材応力の実測値を算定した。

$$\Delta\sigma_{sm} = -E_s \Delta\varepsilon_t \quad (6)$$

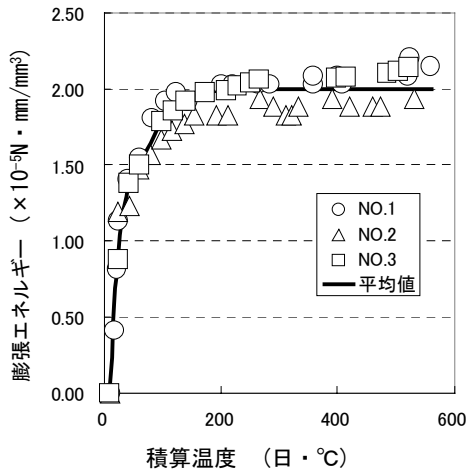


図-10 膨張エネルギーと積算温度との関係

$$\Delta\sigma_{cm} = \frac{A_s}{A_c} \Delta\sigma_{sm} \quad (7)$$

ここに、 $\Delta\sigma_{sm}$:拘束鋼材応力(N/mm²), $\Delta\sigma_{cm}$:コンクリート応力(N/mm²), A_s :拘束鋼材の断面積(mm²), A_c :コンクリートの断面積(mm²), $\Delta\varepsilon_t$:拘束ひずみ, E_s :拘束鋼材の弾性係数(N/mm²)

一方、コンクリート応力と鋼材の応力は、式(6)~(7)を用いて解析的に求めることができる。式中の膨張ひずみ $\Delta\varepsilon_{che}$ は、実験により同定した膨張コンクリートの膨張エネルギー~積算温度の関係を用いて、仕事量一定則により、式(8)~(9)で表される。本研究では、まず膨張ひずみ $\Delta\varepsilon_{che}$ を仮定し、式(10)を満足するように、Newton法により収束計算を実施して解を求めた。式中にある E_c は、実験で求めた材齢1日、3日、7日、28日における膨張コンクリートの弾性係数を対数近似したものを使用した。図-12に実験で求めた膨張コンクリートの弾性係数の経時変化を示す。

$$\Delta\sigma_{ca} = E_c (\Delta\varepsilon_t - \Delta\varepsilon_{che}) \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_{sa} = E_s \Delta\varepsilon_t \quad (9)$$

$$\Delta\varepsilon_{che} = \frac{\int_{V_c} \sigma_{all} \Delta\varepsilon_t dV_c + \int_{V_c} E_c \Delta\varepsilon_t^2 dV_c + \Delta e_{che}}{\int_{V_c} E_c \Delta\varepsilon_t dV_c} \quad (10)$$

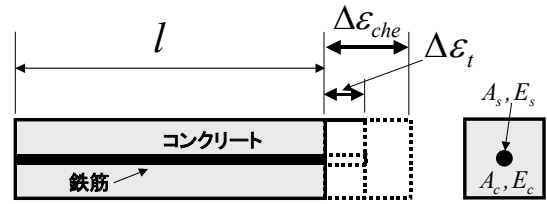


図-11 拘束供試体に生じる変形(膨張)

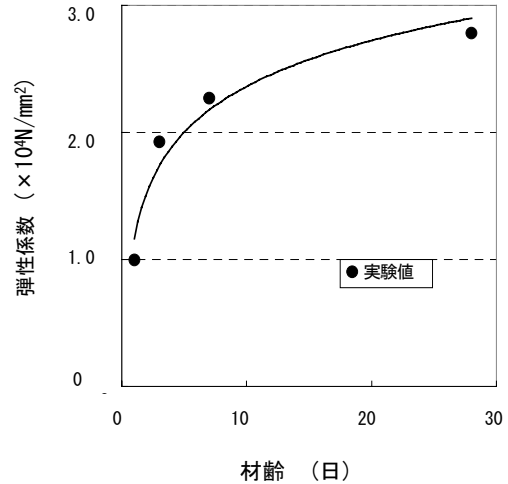


図-12 弾性係数の経時変化

$$-\Delta E_{che} = \int_{V_c} \sigma_{all} \Delta\varepsilon_t dV_c \quad (11)$$

ここに

Δe_{che} :膨張エネルギー(N・mm/mm³), $\Delta\sigma_{all}$:全応力(N/mm²), $\Delta\varepsilon_t$:拘束ひずみ, E_s :拘束鋼材の弾性係数(N/mm²), E_c :コンクリートの弾性係数(N/mm²), $\Delta\sigma_{sa}$:拘束鋼材応力(N/mm²), $\Delta\sigma_{ca}$:コンクリート応力(N/mm²)

6. 応力の実測値と解析値の比較

図-13にコンクリート応力の実測値と解析値の比較を示す。図より、実測値は材齢10日まで変化量が大きいが、それ以降 -0.23N/mm^2 に落ち着く傾向を示している。一方、解析値も材齢10日まで変化量が大きいが、収束値が -0.20N/mm^2 程度である。次に、図-14に拘束鋼材応力の実測値と解析値の比較を示す。図より、実測値は材齢10日まで変化量が大きいが、それ以降 36N/mm^2 に落ち着く傾向を示している。一方、解析値も材齢10日まで変化量が大きいが、収束

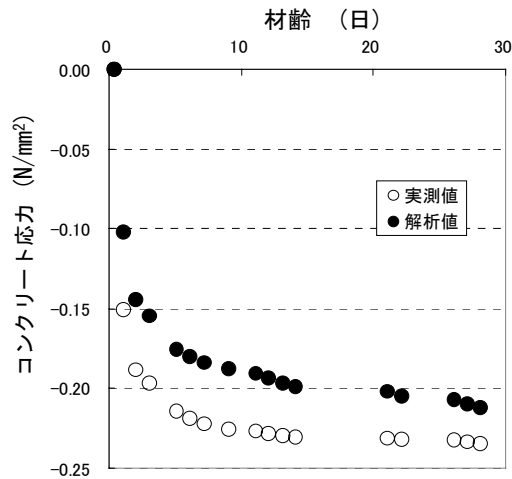


図-13 コンクリート応力の実測値と解析値の比較

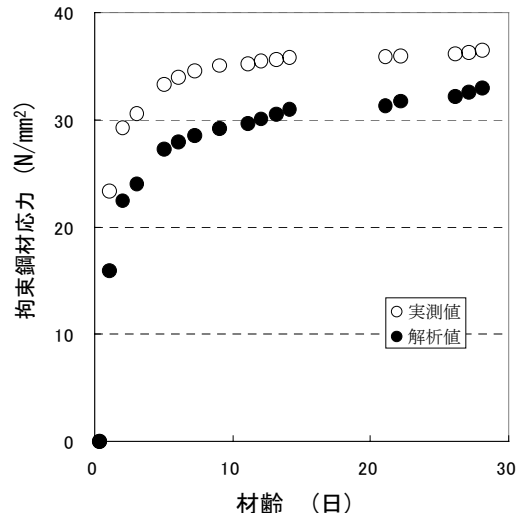


図-14 拘束鋼材応力の実測値と解析値の比較

値が 30N/mm^2 程度である。以上より、コンクリートと拘束鋼材の解析値は、実測値をやや小さく評価する傾向にあるが、全体的には実測値をよく捉えている。今回の実験で計測した膨張エネルギーは膨張コンクリートの鋼材に対する仕事量であり、膨張コンクリート自体に蓄えられるエネルギーなどが含まれていないため、拘束応力の解析値は実測値をやや小さく評価したと考えられる。また、本解析手法では、膨張エネルギー評価においてクリープの影響は含まれるため、解析でクリープを考慮せずに計算が可能である。

7. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 標準的配合の膨張コンクリートの膨張エネルギーと積算温度との関係を、一軸拘束試験により求めることができた。
- 2) 膨張エネルギーは積算温度 $150\text{日}\cdot^\circ\text{C}$ まで変化量が大きいが、それ以降は変化量が小さくなり、 $2.00 \times 10^{-5}\text{N}\cdot\text{mm}/\text{mm}^3$ に落ち着く傾向を示した。
- 3) 得られた膨張エネルギー評価式を用い、膨張エネルギー一定則に基づく拘束応力解析を行った結果、解析値は実測値よりやや小さな値を示したが、全体的には良好な推定結果が

得られた。

謝辞

本研究を実施するに当たり、膨張材の提供等のご協力を頂いた電気化学工業(株)保利彰宏氏、宮口克一氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：膨張コンクリートによる構造物の高機能化／高耐久化に関するシンポジウム,2003
- 2) 土木学会：膨張コンクリート設計施工指針，コンクリートライブラリー75,1992
- 3) 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研究，土木学会論文報告集 NO.235，pp.111-124,1975
- 4) 辻幸和：ケミカルプレストレスおよび膨張分布の推定方法，日本コンクリート工学協会年次論文集，NO.6，vol.19，pp.99-105,1981
- 5) 辻幸和：コンクリート工学における膨張エネルギーの評価方法，日本コンクリート工学協会年次論文集，NO.10，vol.26，pp.5-13,1988
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書，pp.51-57，2002
- 7) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧，技報堂，pp.215-219、1996