

RC 巻き立て補強工法における膨張材のひび割れ抑制効果

コンクリート研究室 平川 信之
指導教官 丸山 久一

1. はじめに

阪神大震災以降、耐震設計の見直しに伴い、既設橋脚にコンクリートを巻き立てた補強工事が数多く採用されている。既設コンクリート橋脚に約 30cm 程度のコンクリート巻き立てを行う場合には、マスコンクリートとしての検討は必要とはならないが、径 40cm ほどの鋼管に 1m 程度のコンクリートを巻き立て、橋脚を再構築する場合には、マスコンクリートとしておよびコンクリートの温度収縮に対する鋼管の拘束により材齢初期にひび割れの危険性が指摘される。マスコンクリートとしての材齢初期の温度応力によるひび割れに対して、膨張材が有効であることは多くの文献により明らかである¹⁾。しかし、その多くは温度応力解析により膨張材の効果を示した後に実構造物へ適用を図り、ひび割れが発生しなかったことを示すものが多く、実構造物において膨張材の有無により材齢初期の温度応力によるひび割れの発生差を実験的に明らかにした報告は数少ない。

本研究では、膨張材の有無および鉄筋の有無をパラメータとした計 4 体の鋼管を有する供試体を作製し、ひび割れの発生度合いに差が出るようにした。これらの実験を基として、温度応力解析により熱物性値や力学的物性値のシミュレーションを行い、熱伝達率、線膨張係数、断熱温度上昇曲線を同定するとともに、実構造物モデルの解析においてひび割れの有無を評価し膨張材の効果を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

図-1 に試験に用いた供試体の概要を示す。供試体寸法は短手方向 78cm、長手方向 168cm、厚さ 90cm とした。実橋の既設鋼管の位置を再現す

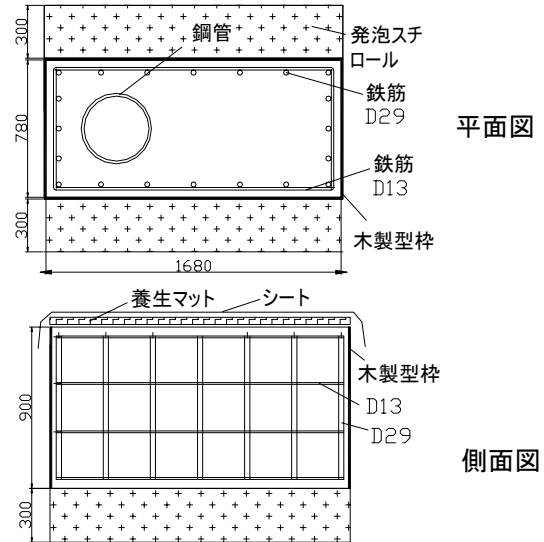


図-1 供試体の概要

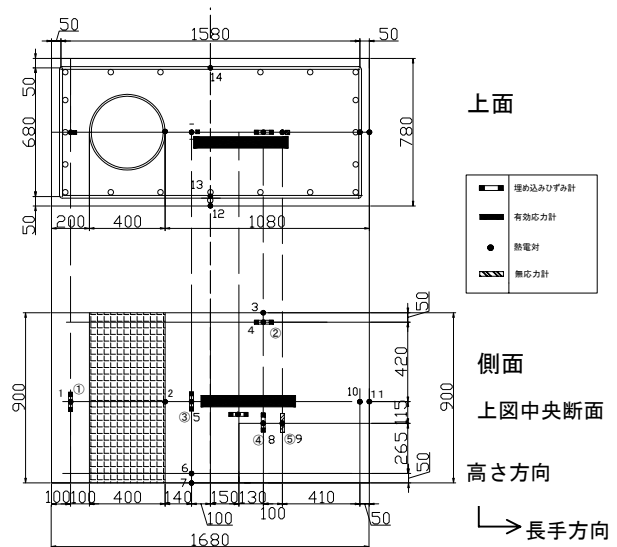


図-2 計測センサー配置図

るため、中心より偏心した位置に鋼管を据えた。供試体の境界面は、底面及び側面長手方向は、木製型枠と厚さ 30cm の発泡スチロールを用い、側面短手方向は木製型枠のみとした。供試体上面は養生マットとシートを用い、適宜散水を行った。養生期間は 7 日とし、その後養生マット、シート、木製型枠、及び発泡スチロールを取り外した。

表-1 コンクリート供試体の配合と品質

種類	圧縮強度 (N/mm ²)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	重量(kg/m ³)					
						セメント*1	水	膨張材*2	細骨材	粗骨材*3	混和剤
普通コンクリート	37.1	20.8	2.7	45.0	40.0	400	180	-	671	1058	4.00
膨張コンクリート	40.1	21.0	3.7	45.0	40.0	378	180	22.5	671	1058	4.00

*1：早強ポルトランドセメント *2：石灰・エトリンガイト複合系膨張材（水和熱抑制型）

*3：骨材の最大寸法 25mm

表-2 供試体の打設状況

種類	打設日	打込み 温度(°C)	外気温 (°C)
普通コンクリート	H15.10.1	23.2	22.6
膨張コンクリート	H15.10.1	22.9	22.6

2.2 実験方法

図-2 に示す位置に熱電対，埋込みひずみ計，無応力計，および有効応力計などの計測センサーを配置した。熱電対は計測されたひずみの温度補正を行うため，埋込みひずみ計と同位置に配置し，またそれぞれの境界面の熱伝達率を求めるために，コンクリート境界と境界から 5cm 内側に入った位置に配置しコンクリートの温度を測定した。埋込みひずみ計は，事前解析を行った結果より，引張応力が比較的大きな場所に配置し，有効応力計はコンクリート厚中央の長手方向に配置した。

表-1 に本実験に用いたコンクリート供試体の配合と品質を示す。供試体は膨張材を添加しないコンクリート（以下，普通コンクリート）と膨張材を添加したコンクリート（以下，膨張コンクリート）の 2 種類とした。

表-2 に供試体の打設日，コンクリートの打込み温度，およびコンクリート打込み時の外気温を示す。

3. 実験結果

3.1 温度計測結果

図-3 に供試体中央と表面の温度履歴を示す。本試験体ではセメント量を 400kg/m³ 添加していることにより材齢 1 日で約 71°C とコンクリート内部温度が非常に高くなった。また，水和熱抑制型の膨張材を添加することにより約 4°C 程度の発熱抑制が見られる。表面と内部では約 17°C

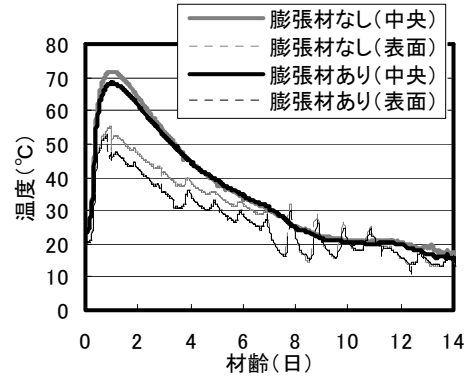


図-3 膨張材の有無による温度履歴

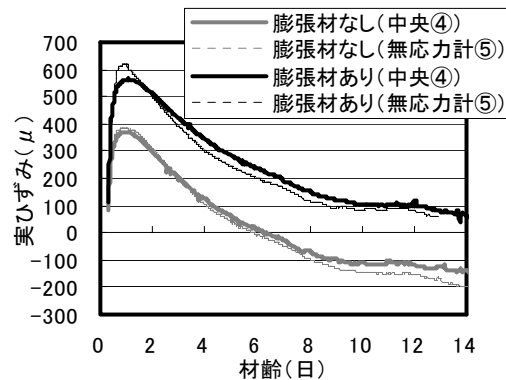


図-4 膨張材の有無による実ひずみ履歴

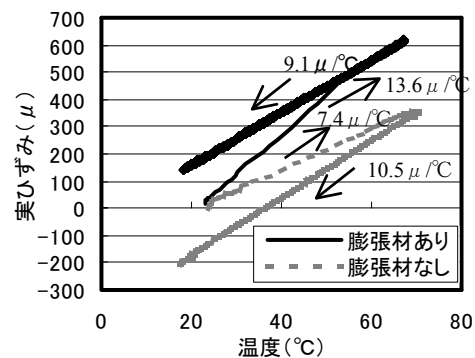


図-5 実ひずみと温度の関係

の温度差があった。

3.2 実ひずみの計測結果

図-4 に膨張材の有無による実ひずみ履歴を示す。実ひずみはコンクリートの厚い部分中央の下面から約 300mm の位置にある（図-2④，

⑤) 埋込みひずみ計より求めたものである。また、実ひずみの計測開始は計測センサーとコンクリートの付着の発現を考慮してコンクリート打設6時間後を初期値とし補正を行った²⁾。図-4より膨張コンクリートの実ひずみは最大で約600 μ 、普通コンクリートの実ひずみは約400 μ で、本試験体では200 μ 程度の膨張作用が認められる。

3.3 見かけの線膨張係数

図-5に無応力計により計測された実ひずみと温度の関係を示す。この図で得られる勾配は、見かけの線膨張係数を示している。膨張コンクリートの実ひずみは温度上昇過程において膨張作用により普通コンクリートより大きくなっており、下降過程においては、膨張コンクリートで線膨張係数が9.1 $\mu/^\circ\text{C}$ 、普通コンクリートで10.5 $\mu/^\circ\text{C}$ となった。なお、解析ではこの線膨張係数を膨張材の効果として温度上昇時・下降時と2段階に分け導入する。

3.4 有効応力の計測結果、ひび割れ状況

有効応力計より計測された応力を図-6に示す。着目位置はコンクリートの厚い部分の中央の長手方向(図-2の有効応力計)である。計測値より、膨張材を添加することにより温度下降時の収縮過程において0.6N/mm²程度の応力緩和があったことがわかる。また、膨張材の有無に依らず着目位置ではひび割れが発生する可能性は低いと考えられる。

本試験体は、膨張材を添加しない無筋コンクリートにのみ脱型の材齢7日には鋼管周りに円周上にひび割れていた。ひび割れ幅は0.05mm以下で破壊に決定的なひび割れとは言い難いが、その後徐々に進展した。

4. 再現解析

4.1 解析概要

図-7に本解析に用いた解析モデルを示す。解析モデルは対象性を考慮して1/2をモデル化した。本解析には、コンクリート非線形温度応力解析プログラム「ASTEAMACS」を用いた。

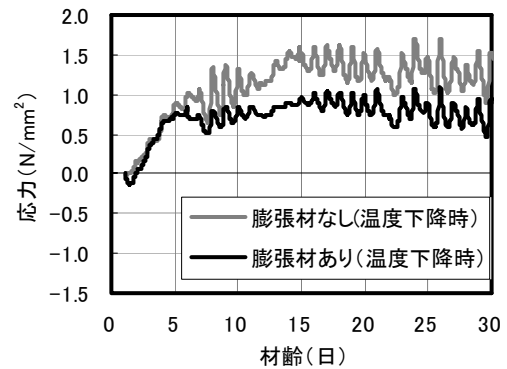


図-6 膨張材の有無による応力履歴

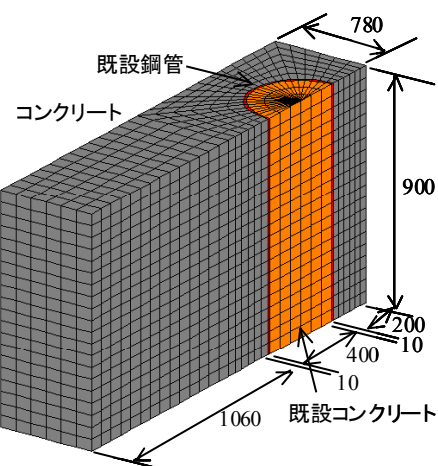


図-7 解析モデル

表-3 解析条件

	項目	鋼管		巻立てコンクリート	
温度 解析 条件	打設温度($^\circ\text{C}$)	—	—	—	22.8
	熱伝導率($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$)	25	—	—	2.7
	比熱($\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$)	0.4	—	—	1.15
	密度(kg/m^3)	7850	—	—	2300
	断熱温度上昇特性	—	—	—	断熱温度上昇試験値
	熱伝達率($\text{W}/\text{m}^2^\circ\text{C}$)	計測値より算出した値をそのまま代入			
型枠 残存 期間 (日)	外気温($^\circ\text{C}$)	—		測定温度	
	型枠残存期間(日)	—	—	7	
応力 解析 条件	圧縮強度(N/mm^2)	430	JSCE実験式: $a=4.5, b=0.95, d=1.11$		
	引張強度(N/mm^2)	430	$0.44 \times [f_c(t)]^{0.5}$		
	弾性係数(N/mm^2)	195000	$\phi(t) \times 4700 \times [f_c(t)]^{0.5}$		
	ポアソン比	0.3	0.18		
	線膨張係数($\mu/^\circ\text{C}$)	12	膨張材なし	温度上昇時7.4, 下降時10.5	膨張材あり

既設鋼管とコンクリート、既設コンクリートと既設鋼管の接続部は接点共有とした。

4.2 物性値の検討

本解析では、見かけの線膨張係数を温度上昇時・下降時の2段階に分け解析に導入した。解析に用いた力学的物性値および熱物性値等の解析条件を表-3に示す。弾性係数はコンクリート

標準示方書³⁾に示されている初期クリープによる低減を考慮した有効弾性係数を用いた。

表-3 に示した物性値を用いて算出した実ひずみの解析値と計測値を図-8 に示す。ここで、実ひずみは膨張を正、収縮を負とした。計測値と解析値はほぼ一致しており、温度応力解析における物性値が妥当であったと言える。

4.3 有効応力の評価

4.3.1 計測値と温度応力解析値の比較

ここでは有効応力計により測定した応力計測値と温度応力解析値の比較を行う。有効応力計は校正係数を乗ずるだけで容易に応力を計測することができる。しかし、材齢初期の圧縮力を正確に測定しているかどうかなど、材齢初期において有効応力計の値には疑問が残る点がある。そこで本論文では、温度ピーク時の有効応力を0として温度下降時の収縮応力の比較を行う。上記の方法では膨張材の効果によるケミカルプレストレスがない場合の温度下降時における膨張材による応力緩和がどの程度であったか判断することができる。図-9 に有効応力計より得られた計測値と応力解析値の比較を示す。着目位置はコンクリートの厚い部分の中央の長手方向(図-2 の有効応力計)である。解析値はやや過大評価となっているが安全側であり計測値を精度よく再現することができたといえる。

4.3.2 温度応力解析における温度ひび割れ判定

実験では材齢初期に膨張材を添加しない供試体の鋼管表面のまわりに円周上にひび割れが確認された。図-10 にひび割れ発生位置における応力の解析値を示す。膨張材を添加しないコンクリートは、材齢初期で約 2.0N/mm^2 の引張応力が発生し、膨張材を添加したコンクリートでは 1.5N/mm^2 の引張応力が発生していることから、 0.5N/mm^2 程度の膨張材による応力緩和が確認できる。また膨張材を添加しない場合、材齢 1 日前後でその時点の引張強度を上回っており、ひび割れが発生する可能性が非常に高い。材齢 14 日では膨張材の効果はより顕著に現れ、 1.0N/mm^2 程度の引張応力の低減が認められる。

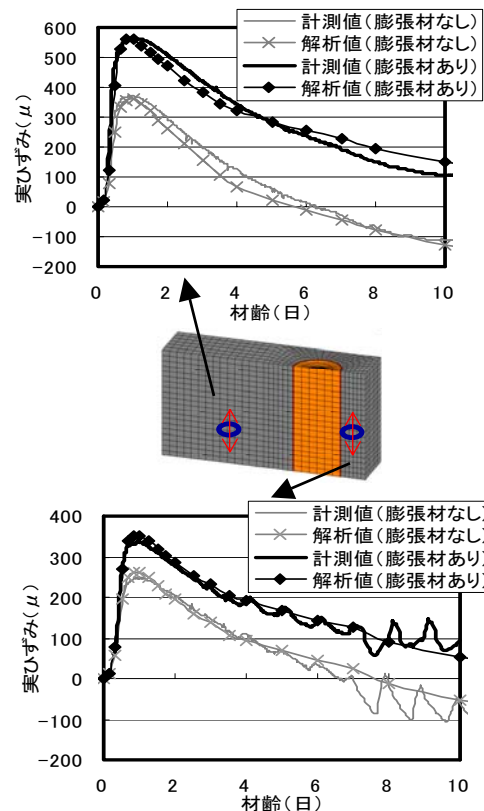


図-8 実ひずみの計測値と解析値の比較

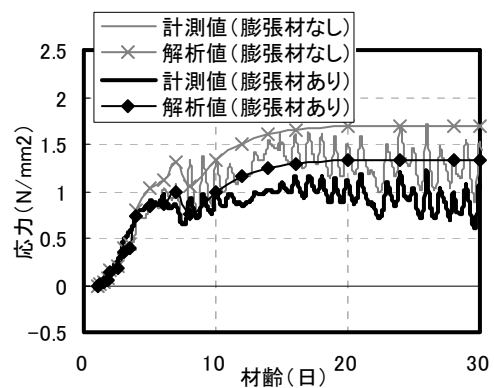


図-9 有効応力計測値と解析値の比較

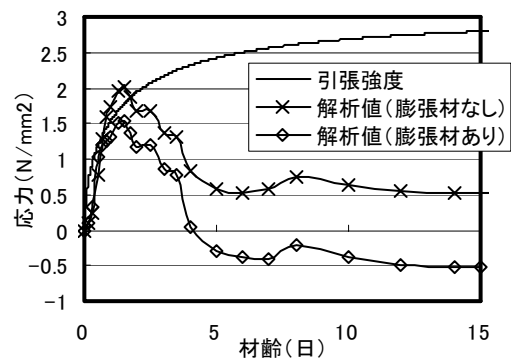


図-10 鋼管付近の温度応力の比較

表-4 普通セメントコンクリートの解析条件

項目	鋼管	巻立てコンクリート			備考	
		1リフト	2リフト	3リフト		
打設温度(°C)	20	25	25	20		
熱伝導率(W/m°C)	25	2.7				
比熱(kj/kg°C)	0.4	1.15				
密度(kg/m³)	7850	2300				
断熱温度 上昇特性	Q _∞ (°C)	—	44.6	44.6	45.0	
	γ	—	1.325	1.325	1.074	
熱伝達率(W/m²°C)	1	木製型枠:8養生マット:5脱型後:13				
型枠残存期間(日)	—	15	21	38		
応力 解析 条件	圧縮強度(N/mm²)	430	JSCE実験式:a=4.5,b=0.95,d=1.11			
	引張強度(N/mm²)	430	0.47 × [f' c(t)] ^{0.5}			※1
	弾性係数(N/mm²)	195000	φ(t) × 4700 × [f' c(t)] ^{0.5}			※2
	ポアソン比	0.3	0.18			
	線膨張係数(μ/°C)	12	温度上昇時7.4, 下降時10.5			※3

5. 実構造物モデルにおける膨張材の効果

5.1 温度応力解析概要

図-11 に本解析に用いた解析モデルおよび着目要素を示す。解析モデルは対象性を考慮して1/2をモデル化した。既設鋼管とコンクリートは接点共有とした。解析対象は巻立てコンクリート部で、3リフトに分割して打設を行う設定とした。着目断面は、第1リフト高さ方向中心とし、構造物内外の温度差による引張応力が卓越する要素①、温度下降過程におけるコンクリートの体積収縮を既設鋼管が拘束することにより大きな引張応力が発生する要素②に着目した。解析条件の一例として、膨張材を添加しないコンクリート（普通セメントコンクリート）について表-4に示す。

5.2 膨張材の効果

実験より温度上昇時と下降時で膨張材効果により、見かけの線膨張係数が温度上昇時・下降時で変化したことを確認した。本解析では膨張材による体積変化を線膨張係数に置き換え導入した。

5.3 温度応力解析結果

5.3.1 普通セメントコンクリートの応力履歴

膨張材を添加しないコンクリート（普通セメントコンクリート）の応力履歴を図-12に示す。構造物端部の着目要素①の応力は発熱がピーク

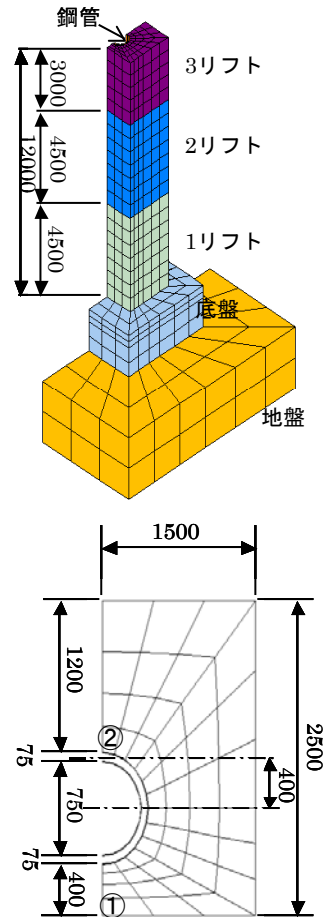


図-11 解析モデルと着目要素

となる材齢2日付近で1.0N/mm²の引張応力が発生している。鋼管近傍の着目要素②では、材齢16日でその時点の引張強度を上回り、最大で2.5N/mm²の引張応力が作用した。なお、鋼管近

傍の要素②においてはひび割れの方向は円周方向と考えられる。

5.3.2 膨張コンクリートの応力履歴

膨張材の効果として、見かけの線膨張係数を温度上昇時と下降時の2段階に分け与える方法により算出した膨張コンクリートの応力履歴を図-13に示す。構造物端部の着目要素①の応力は材齢2日で 1.0N/mm^2 で膨張材を添加しない場合の応力とほとんど変わらない。鋼管近傍の着目要素②では、材齢16日で 1.83N/mm^2 の引張応力が作用しており、膨張材を添加することにより 0.6N/mm^2 程度の引張応力の緩和が認められる。また、最大引張応力は引張強度を超えておらず、膨張材を添加することによりひび割れを抑制できると考えられる。

6. まとめ

膨張材の添加の有無によりひび割れの発生の差を実験的に確認し、その計測結果を温度応力解析によりシミュレーションし、実構造物モデルに適用したところ以下の知見が得られた。

- (1) 水和熱抑制型の膨張材を添加することにより、普通セメントコンクリートと比較して供試体の内部および表面ともに 4°C 程度の発熱抑制が確認された。
- (2) 計測値より算定した見かけの線膨張係数を温度上昇時・下降時で2段階に分け膨張材の効果として温度応力解析に用いた場合、計測値との整合性を確認できた。
- (3) 実験において膨張材が添加されずかつ鉄筋も入っていない供試体の鋼管周りにひび割れが発生した。温度応力解析においても熱物性値および力学的物性値を適切に設定することにより再現性が確認できた。
- (4) 実構造物モデルの温度応力解析において、膨張材の効果を見かけの線膨張係数に置き換え適用すると、構造物の鋼管近傍で引張応力の緩和が認められた。

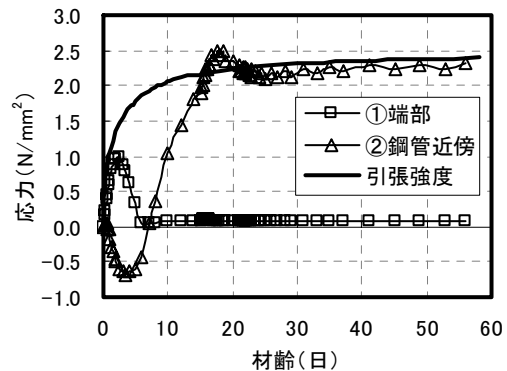


図-12 普通セメントコンクリートの応力履歴

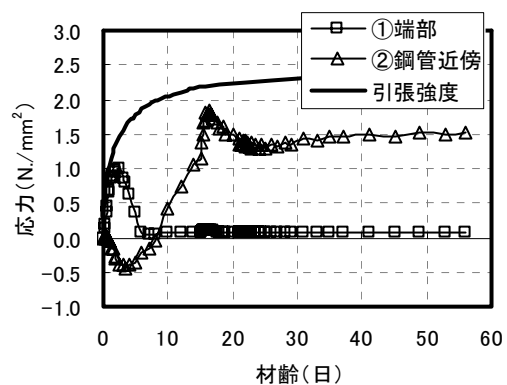


図-13 膨張コンクリートの応力履歴

7. 参考文献

- 1) たとえば、中村時雄，斉藤文男，湯室和夫，佐野隆行：高ビーライト系低発熱セメントと水和熱抑制型膨張材を併用した高度浄水処理施設の側壁部マスコンクリート対策，コンクリート工学，Vol.36，pp.28-34，1998.9
- 2) 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提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.549-554，2002.6
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編，（2002年度制定），2002