

# 論文 逆解析手法を用いた温度応力解析の適用性の研究

東 邦和\*1・ 廣中哲也\*1・ 宍倉隆幸\*2・ 梅原秀哲\*3

**要旨:** マスコンクリートの施工時における温度応力解析の精度の向上を目的とし、大断面ボックスカルバートを対象として逆解析手法と3次元FEM解析を適用した。ひび割れ対策として低熱ポルトランドセメントを使用し、計測結果を基に同定解析を行い、逆解析のモデルと適用する測点による熱特性値の変動と精度を検討した。同定した熱特性値を用いた温度応力解析値を測定値と対照した結果、適用可能な精度とひび割れ防止効果が得られた。

**キーワード:** マスコンクリート, 逆解析, 3次元FEM, ボックスカルバート

## 1. はじめに

セメントの水和熱によりコンクリート躯体に発生するひび割れの予測のためには、温度変化を精度よく求めることが必要である。一般に温度解析は示方書<sup>1)</sup>に準拠して行われるが、測定値を基に解析によって熱特性値を求める逆解析手法の適用が行われるようになってきた。逆解析手法にはSimplex法<sup>2)</sup>、ガウス・ニュートン法<sup>3)</sup>や拡張カルマンフィルター<sup>4)</sup>を用いたものがあるが、実工事に適用した評価は十分には行われていないと考えられる。本研究では、拡張カルマンフィルターによる逆解析手法の適用性を検討した。対象とした大型のボックスカルバート構造物<sup>5)</sup>は、東京港臨海道路として施工された底版厚2.0m、壁厚1.8mのマッシュなものであり、ひび割れの発生に対する対策が要求された。そのため低熱ポルトランドセメントを採用して、底版の温度測定結果に逆解析手法を適用して熱物性値を同定し、3次元FEM解析を行って実測結果と比較して適用方法と精度およびひび割れ防止効果を検討した。

## 2. ボックスカルバートの概要

### 2.1 構造概要と使用材料

表-1 配合

水セメント比 W/C %	細骨材率 s/a %	単位量 kg/m <sup>3</sup>				混和剤 kg/m <sup>3</sup>
		W	C	S	G	
57.0	44.8	150	263	842	1077	1.052

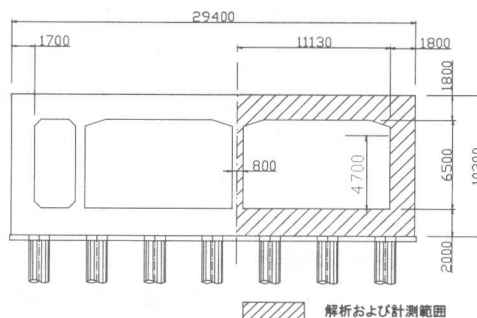


図-1 対象構造断面

コンクリートの配合を表-1に示す。セメントは低熱ポルトランドセメント(高ピーライト系C<sub>2</sub>S 56%)を使用し、細骨材は市原産陸砂、粗骨材は鳥形山産碎石Gmax 20mmを使用した。目標スランプ8±2.5cm、空気量4.5±1.5%、設計基準強度は24 N/mm<sup>2</sup>であり、強度管理材齢を91日に設定し温度低減効果が得られるようにした。ボックスカルバートの構造断面を図-1に示す。

\*1 (株)奥村組 技術研究所構造研究室 (正会員)

\*2 東京都 港湾局

\*3 名古屋工業大学教授 Ph. D. (正会員)

す。構造物延長方向のコンクリート打設ブロックの長さは30mであり、底版コンクリート打設から52日後に側壁部を打設した。側壁部の打設高さは1リフト4.7mであり、残りの側壁部と頂版は同時に打設した。

## 2.2 強度および断熱温度上昇特性

供試体は採取後1日を封緘養生し、脱型後20℃の水中において標準養生した。圧縮強度および割裂引張強度試験結果を図-2に示す。

断熱温度上昇試験は、空気循環式断熱温度上昇試験装置によって、打設温度20℃における温度上昇量を測定した。なお、試料の量は50ℓである。断熱温度上昇の近似式を式(1)に示す。

$$Q_{(t)} = Q_{(\infty)}(1 - e^{-\gamma(t-D)^\beta}) \quad (1)$$

$Q_{(t)}$  : 時間 t(日)の断熱温度上昇量 (°C)

$Q_{(\infty)}$  : 終局断熱温度上昇量(°C)

$\gamma$  : 温度上昇速度に関する定数

$\beta$  : 時間のべき乗項

D : 遅延効果に関する係数 (日)

近似式(1)で評価したときの係数値を表-2に示す。断熱温度上昇測定値と近似式(1)の曲線を図-3に示す。

## 3. 逆解析による同定

### 3.1 逆解析の適用

底版部コンクリートの温度測定結果から熱伝導率と熱伝達率を求め、これを用いてひび割れの危険性の大きい側壁部の温度応力解析を行い、その精度を検証した。逆解析手法による同定には、拡張カルマンフィルター<sup>6)</sup>を用いた推定法を適用した。

拡張カルマンフィルターを非正常熱伝導有限要素法モデルに組み込んだ逆解析のフローを図-4に示す。測定行列を求めて、拡張カルマンフィルターを適用する。測定行列は影響係数法による近似を行う。繰り返し終了の判定は推定値の変動が十分に小さくなった場合とした。

計測器の配置を図-5に示す。計測器は熱電対、コンクリートひずみ計、有効応力計を底版中央、底版端部、側壁部に設置した。逆解析に

表-2 断熱温度上昇近似式の係数値

種類	$Q_{\infty}$ (°C)	$\gamma$	$\beta$	D(日)
低熱ポルトランド	37.7	0.29	1.0	0

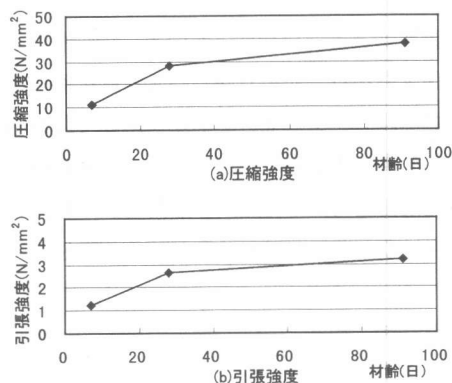


図-2 強度試験結果

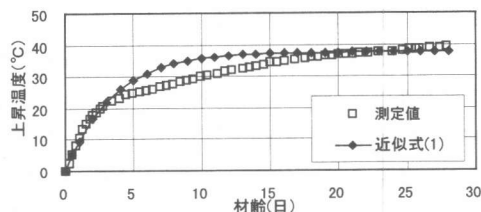


図-3 断熱温度上昇測定結果

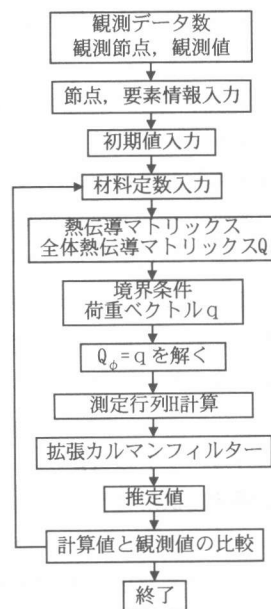


図-4 逆解析フロー

は、底版中央部の1次元モデルと底版中央部と底版端部を含めた2次元モデルを用いた。逆解析モデルを図-6に示す。逆解析による同定は、次の3種類の温度計測結果を用いて行い、解析結果を比較した。

- ①底版中央部の測点(T-1, T-2, T-3)によるコンクリートの熱伝導率と打設面の熱伝達率の同定(モデル1:1次元モデル)
- ②底版端部の測点(T-4~T-7)によるコンクリートの熱伝導率および打設面と型枠面の熱伝達率の同定(モデル2:2次元モデル)
- ③底版中央部と底版端部の測点(T-1~T-7)によるコンクリートの熱伝導率および打設面と型枠面の熱伝達率の同定(モデル3:2次元モデル)

### 3.2 逆解析の適用結果

逆解析に用いた熱特性値を表-3に示す。熱特性の初期値は、示方書<sup>1)</sup>を参考にして定めた。断熱温度上昇量は近似式を用いたものと、測定結果の曲線から計算ステップごとに、時間区分に対する温度変化量に対応する単位体積当たりの熱量を入力して計算する方法の2種類を用いた。逆解析の設定パラメータと収束までの繰り返し数および温度平均誤差を表-4に示す。解析のための熱伝導率と熱伝達率の初期値は示方書による値を用いたことから、安定した収束結果を得ることができた。収束繰り返し数と温度の測定値と解析値の平均誤差は、解析に近似式を用いたものより、ステップ入力によるものの方が小さい。温度平均誤差は、各ケースとも1℃前後であり、同定精度のよいことを示した。

熱伝導率解析結果を図-7に示す。各ケースの値に大きな違いはないが、近似式の値と比べて、ステップ入力による同定値のほうが若干大きい結果となった。

熱伝達率解析結果を図-8に示す。図-8(a)に打設面熱伝達率を示す。モデル1による底版中央部の打設面の熱伝達率同定結果は、近似式で $13\text{W/m}^2\text{℃}$ 、ステップ入力で $17\text{W/m}^2\text{℃}$ と比較的大きい値を示した。モデル2による底版端部の熱伝達率は近似式、ステップ入力ともに9

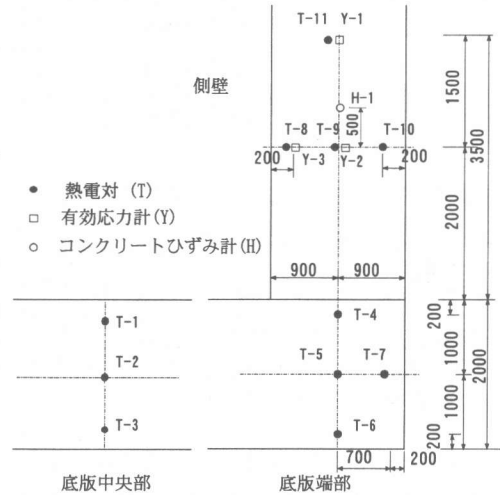


図-5 計測器の配置

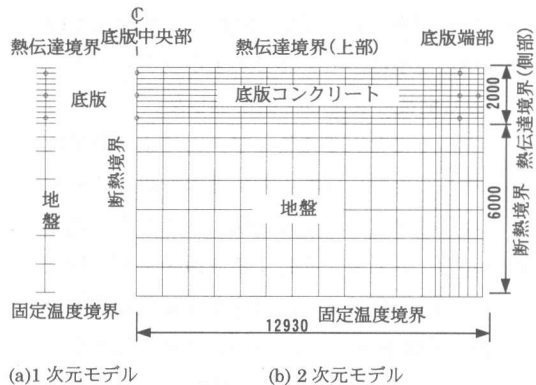


図-6 逆解析モデル

表-3 解析に用いた物性値

項目	基準値
$\lambda c$ コンクリートの熱伝導率 ( $\text{W/m℃}$ )	2.33
$Cc$ コンクリートの比熱 ( $\text{kJ/kg℃}$ )	0.924
$\rho c$ コンクリートの密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	2300
$Q_{\infty}$ 断熱温度上昇実験定数近似式	37.4
$r$ (l)	0.277
$q_i$ 断熱温度上昇ステップ値	熱量入力
$\eta$ 熱伝達率 ( $\text{W/m}^2\text{℃}$ ) 打設面	14
型枠面	8.0
$\lambda g$ 地盤の熱伝導率 ( $\text{W/m℃}$ )	3.5
$Cg$ 地盤の比熱 ( $\text{kJ/kg℃}$ )	0.80
$\rho g$ 地盤の密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	2000
$T_a$ 外気温 ( $℃$ ) 底版	8.5
$T_b$ 固定温度境界面の岩盤温度 ( $℃$ )	15.6
$T_{c0}$ コンクリートの初期温度 ( $℃$ )	16.3
$T_{g0}$ 地盤の初期温度 ( $℃$ )	15.6

表-4 設定パラメータと繰返し数および誤差

項目	底版中央部 モデル1 (1次元 モデル)	底版端部 モデル2 (2次元 モデル)	底版中央 および端部 モデル3 (2次元 モデル)
未知パラメータ数 (個)	2	3	3
観測データ数(個)	3×9点	4×9点	7×9点
収束判定条件(推定 値の変動幅)	1.0E-4	1.0E-4	1.0E-4
繰返し数(回)	22 (a) 13 (b)	15 (a) 13 (b)	9 (b)
温度測定値との平均 誤差(℃)	1.32 (a) 0.96 (b)	1.22 (a) 1.11 (b)	1.16 (b)

a:近似式 b:ステップ入力

W/m<sup>2</sup>℃前後とモデル1の約6割の値になった。また、底版中央および端部の全ての測定値を用いて同定したモデル3は、モデル1とモデル2の中間の値を示した。図-8(b)に示す側部型枠面の熱伝達率は、モデル2およびモデル3とも5 W/m<sup>2</sup>℃前後の安定した値を示した。

モデル1においてステップ入力による逆解析から得られた熱伝達率と熱伝達率を用いて解析した結果と測定値の比較を図-9に示す。地盤を含んだ1次元モデルによる底版中央部の解析では、地盤の熱特性値の設定が不確定な要素であるが、底版下部の測点(T-3)を含めて解析することにより、底版内の各点の解析値と測定値に大きな誤差はなく、熱特性値を精度良く同定できたといえる。

同様にモデル2においてステップ入力による逆解析値を用いて解析した結果と測定値の比較を図-10に示す。中央点(T-5)の温度ピークはモデル1の底版中央部(T-2)とほぼ等しい値であるが、上部測点(T-4)はモデル1の底版中央部の測点(T-1)よりピーク温度が高いことから、打設面熱伝達率はモデル1より小さい値となった。底版端部では上部と側部の2次元的な熱伝達であることや、側部型枠部の熱伝達が小さいなどの外的な要因から、底版中央部と異なった温度変化になるが、同定結果は測定値の挙動を比較的よく表すことができた。同定に用いる測点の選択により解析結果は大きく異なる場合があり、

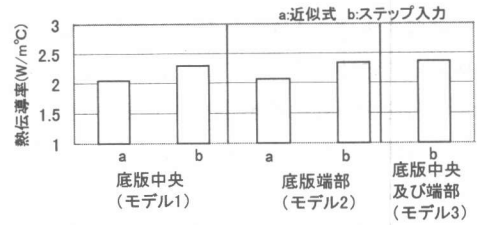
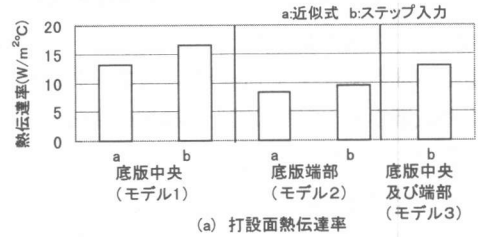
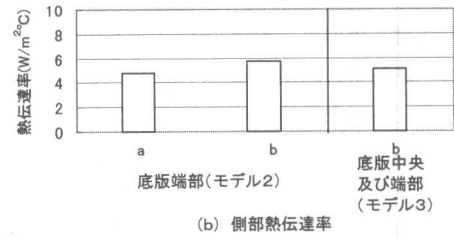


図-7 熱伝導率解析結果



(a) 打設面熱伝達率



(b) 側部熱伝達率

図-8 熱伝達率解析結果

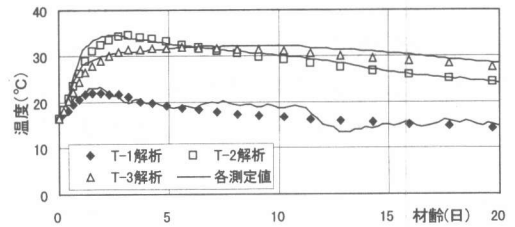


図-9 底版中央部解析結果(モデル1)

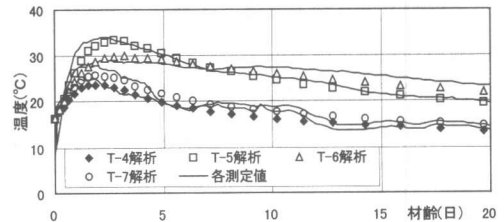


図-10 底版端部解析結果(モデル2)

逆解析の適用には適切なモデルの選択が必要となる。

ステップ入力と近似式による底版中央の温度解析値および測定値を図-11に示す。ステップ

入力の結果と比べて近似式を用いた解析値は、ピーク温度が高くなり、測定で2.5日のピーク材齢が4日に遅れ、温度の下がり勾配も小さくなる。一般に普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは、近似式により断熱温度上昇を精度良く表わすことができるが、低熱ポルトランドセメント等の低発熱型のセメントでは、近似式では逆解析に充分な結果を得ることができなかった。

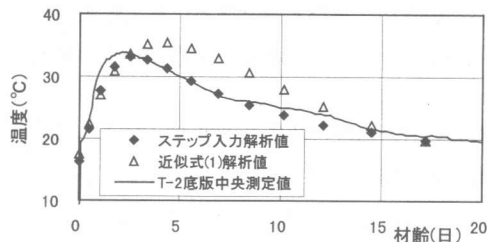


図-11 断熱温度上昇の違いによる比較

#### 4. 3次元FEM解析値と測定結果

##### 4.1 解析モデル及び解析条件

解析に用いた3次元モデルを図-12に示す。X方向は躯体断面長の1/2、Z方向は施工スパン長30mの1/2の長さとした1/4モデルである。地盤は深さ6mを解析対象とした。切断面は断熱境界であり、面外方向への変形を拘束した。

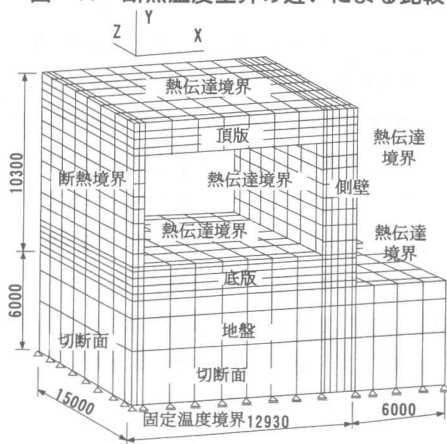


図-12 3次元解析モデル(1/4モデル)

解析条件と結果を表-5に示す。断熱温度上昇特性はステップ入力を用いた。熱伝導率と熱伝達率は、モデル1と2の平均的な値を得るモデル3により逆解析した値を用いた。

表-5 解析条件と結果

##### 4.2 温度解析結果

3次元FEM解析<sup>7)</sup>による側壁部の解析値と測定値を図-13に示す。側壁下部中心(T-9)のピーク温度の解析値は31.7℃と測定値とほぼ一致しているが、上部中心(T-11)、下部表面(T-8)の解析値は測定値より2℃程度低い結果となった。ピーク材齢は解析値、計測値ともに3.0日と一致した。これにより底版部逆解析から得た熱特性値を用いた側壁部解析の結果は、外気温や打設温度の違いがあるにもかかわらず比較的良好な精度が得られた。熱特性値を求めるために適正なモデルを用いることと断熱温度上昇にステップ入力を用いたことが精度向上の要因として挙げられる。

種別	部位：底版および側壁コンクリート	
$\lambda c$	熱伝導率 (W/m℃)	2.36
Cc	比熱 (kJ/kg℃)	0.924
qi	断熱温度上昇特性	ステップ値で熱量入力
$\eta$	熱伝達率 (W/m <sup>2</sup> ℃)	コンクリート表面：12.8 型枠面：5.09
Tc0	打設温度 (℃)	底版 16.3, 側壁 13.5
Ta	外気温	底版 8.5℃, 側壁 8.0℃
応力解析	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	29.8 (91日)
	圧縮強度回帰式 <sup>1)</sup>	a=21.6, b=0.767
	引張強度, ヤング係数	標準示方書に準拠
	線膨張係数 (1/℃)	10.0×10 <sup>-6</sup>
解析結果	内部温度の最大値と材齢	底版 34.6℃, 2.5日 側壁 32.0℃, 3.0日
	応力の最大値とひび割れ指数最小値	底版 0.61N/mm <sup>2</sup> , 2.90 側壁 1.20N/mm <sup>2</sup> , 1.49

##### 4.3 ひずみと応力解析結果

側壁部に設置したコンクリートひずみ計の測定結果を図-14に示す。本研究で用いたコンクリートはW/C=57%であり自己収縮量は小さいと考えられたので<sup>8)</sup>、応力解析に自己収縮量は

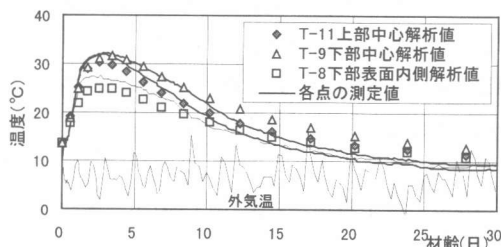


図-13 側壁温度解析結果

いていない。実ひずみ計測値は最大膨張ひずみで  $200 \times 10^{-6}$  であり、収縮ひずみは小さい値となった。

有効応力計の測定結果と FEM 解析による解析結果を図-15 に示す。FEM 解析のヤング係数、引張強度は、配合強度を基に示方書<sup>1)</sup>に準拠して圧縮強度回帰式から求めた。発生した最大引張応力の測定値は  $1.04\text{N/mm}^2$  で、解析値の  $1.20\text{N/mm}^2$  と比べて小さく、初期の圧縮応力の測定値も  $-0.32\text{N/mm}^2$  と、解析の  $-0.52\text{N/mm}^2$  と比べて小さい値を示した。解析値との差は  $0.2\text{N/mm}^2$  程度であり、逆解析による熱特性値を用いることで解析精度を上げることができた。ひび割れ指数は表-5 に示したように側壁部で、1.49 と安全な値となった。施工後の観察によっても、ひび割れは生じていないことが確認されており、低熱ポルトランドセメントの採用により、ひび割れを防止することができた。

## 5. まとめ

本研究により得られた結果を次に示す。

- (1) 拡張カルマンフィルターによる逆解析は、安定した収束性と精度が得られ、熱特性の同定に有効である。
- (2) 逆解析に用いるモデルと測定値の点数は、測定部位における熱特性値の違いを考慮して選択することが必要である。
- (3) 低熱ポルトランドセメントの断熱温度上昇は、近似式よりもステップごとに熱量を入力する方法を用いることにより解析精度を向上することができる。
- (4) 3次元解析の結果と施工結果から低熱ポルトランドセメントの採用によるひび割れ防止効果の有効性を確認できた。

謝辞：(株)奥村組技術研究所増井仁室長には多くの協力を頂き、ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) コンクリート標準示方書[施工編]土木学会、1996
- 2) 近久博志ほか：逆解析手法によるマスコンク

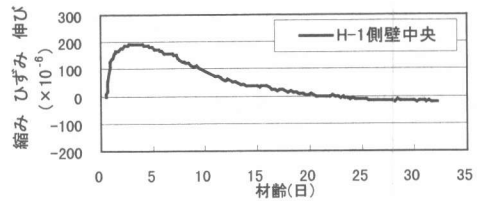


図-14 コンクリートひずみ測定結果

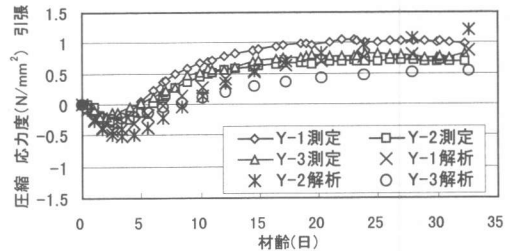


図-15 有効応力解析値と測定値

リートの熱伝達係数の評価、土木学会論文集、No. 451/V-17, pp39-47, 1992. 8

- 3) 松井邦人, 西田德行, 土橋吉輝, 潮田和司：逆解析手法によるマスコンクリートの熱特性値の推定, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 1347-1352, 1994. 6
- 4) 新美勝之, 鈴木誠, 上田稔, 佐藤正俊：拡張カルマンフィルタを用いた熱伝達係数と日射吸収率の逆解析, 土木学会第 53 回年次学術講演会, V, pp736-737, 1998. 9
- 5) 東邦和, 廣中哲也, 渡邊篤, 宍倉隆幸ほか：大断面ボックスカルバート構造物におけるひび割れ防止対策, 土木学会第 54 回年次学術講演会, V, pp232-233, 1999. 9
- 6) 佐藤忠信：講座「地盤工学における逆解析」土質工学会誌 土と基礎, No. 447, pp55-60, 1995. 4
- 7) 起橋孝徳, 東邦和, 上西隆：建築物地中梁の三次元 FEM 温度応力解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 1387-1392, 1997. 6
- 8) 「自己収縮研究委員会報告書」, 日本コンクリート工学協会, 1996. 1