

大断面ボックスカルバートのひび割れ防止対策と 逆解析手法を用いた温度応力解析

東 邦和* 廣中哲也* 増井 仁**
國行 薫*** 曾我典仁*** 島本昌弘***

1. はじめに

セメントの水和熱による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。対象とした大型のボックスカルバート構造物¹⁾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。対策として低熱ポルトランドセメントの採用が考えられ、事前解析によりひび割れ防止効果を低発熱高炉セメントB種と比較して検討した。

一方、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ている。²⁾³⁾⁴⁾本研究では、拡張カルマンフィルタによる逆解析手法⁵⁾を適用した。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

ボックスカルバートの構造断面を図-1に示す。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。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(高ビーライト系C₂S 56%)を使用し、細骨材は

市原産陸砂、粗骨材は鳥形山産砕石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/mm²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。

2.2 断熱温度上昇特性

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。一般に用いられ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(℃)

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量(℃)

γ : 温度上昇速度に関する定数

β : 時間のべき乗項

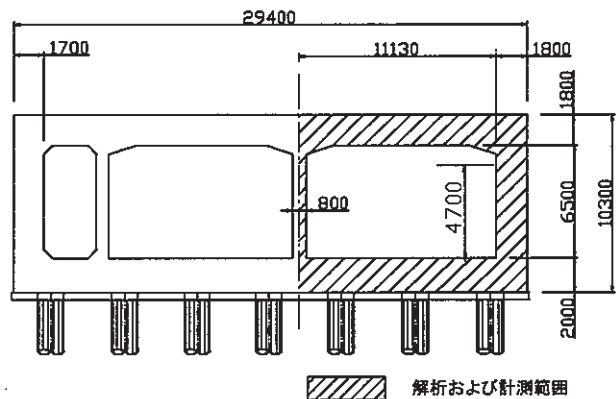


図-1 解析断面

表-1 配合

セメントの種類	水セメント比 W/C %	細骨材率 s/a %	空気量 %	単位量 kg/m ³				混和剤 kg/m ³
				W	C	S	G	
低熱ポルトランド	57.0	44.8	4.5	150	263	842	1077	1.052
低発熱高炉B種	58.3	45.7	4.5	140	240	873	1077	0.960

*構造研究室 **土木研究室 ***東京支社土木部

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-2に示す。

3. 事前解析

3.1 解析条件と解析結果

事前解析の結果を、施工時に測定した実測値と比較する。温度解析は地盤を考慮した2次元FEM、応力解析はCP(Compensation Plane)法により解析した。温度解析には、断熱温度上昇特性として近似式(1)を用いた。解析モデルの範囲は図-1に斜線で示す。解析条件と解析結果を表-3に示す。

解析の結果、底版では低発熱高炉B種の場合でもひび割れ指数⁶⁾が1.62となり、ひび割れ発生の可能性は低い結果を得た。ひび割れの危険性の高い側壁では、低熱ポルトランドセメントのひび割れ指数1.23に比べて低発熱高炉B種は1.04と小さい値となった。よって低発熱高炉B種ではひび割れ発生の可能性が大きいと判断し、底版側壁ともに低熱ポルトランドセメントを採用した。

3.2 解析値と測定結果の対比

側壁部の測定値と解析値を図-3に示す。計測器の配置は図-5に示す。打設温度は測定値から13.5℃であり、解析の10.0℃より3.5℃高い結果となった。ピーク温度は側壁中心で31.7℃であり、解析の27.1℃よりも4.6℃高くなった。温度ピーク材齢も計測値では3日であり、解析の4日と比べて早くなっており、初期

の発熱速度は、解析に用いた値よりも大きくなる結果となった。

測定による最大引張応力度は1.04N/mm²(図-15参照)であり、解析の1.62N/mm²と比べて小さい値と

表-2 断熱温度上昇近似式の係数値

種類	Q_{∞} (°C)	γ	β	D(日)
低熱ポルトランド	37.7	0.29	1.0	0

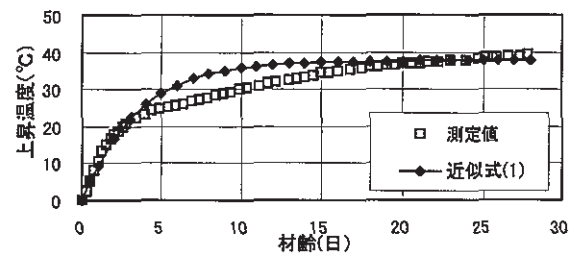


図-2 断熱温度上昇測定結果

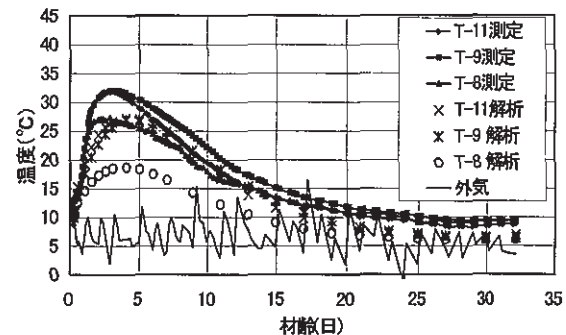


図-3 側壁部温度測定値と解析値

表-3 解析条件と解析結果

種別 (部位: 底版および側壁)	低熱ポルトランドセメント	低発熱高炉セメントB種
打設温度 (°C)	底版 17.6、側壁 10.0	
単位体積重量 (kg/m ³)	263	240
断熱温度上昇特性	$Q_{\infty}=37.67$ (側壁) $r=0.222$ (側壁)	$Q_{\infty}=35.44$ (側壁) $r=0.387$ (側壁)
比熱 (kcal/kg°C)	0.22	0.22
熱伝導率 (kcal/mhr°C)	2.0	2.0
単位体積重量 (kg/m ³)	2340	2340
熱伝達率 (kcal/m ² hr°C)	型枠 : 7 コンクリート表面 : 12	
圧縮強度 (N/mm ²)	29.8 (配合強度)	
圧縮強度回帰式	$a=21.6, b=0.767$	$a=9.652, b=0.912$
引張強度, ヤング係数	土木学会標準示方書施工編に準拠	
線膨張係数 (1/°C)	10.0×10^{-6}	10.0×10^{-6}
内部温度の最大値と材齢	底版 38.9°C, 5.0日 側壁 27.1°C, 4.0日	底版 42.1°C, 3.0日 側壁 32.0°C, 3.0日
応力の最大値とひび割れ指数最小値	底版 0.99N/mm ² , 2.00 側壁 1.62N/mm ² , 1.23	底版 1.34N/mm ² , 1.62 側壁 2.05N/mm ² , 1.04

なった。

また、初期の圧縮応力の値も測定では -0.32N/mm^2 であり、解析の -0.64N/mm^2 と比べて小さい値を示した。発生引張応力は解析における引張強度 1.98N/mm^2 より小さく、ひび割れは生じないことが予測された。施工後の観察によっても、微細なヘアクラック以外は生じていない。事前解析を基に施工した結果から、低熱ポルトランドセメントの適用によりひび割れ防止の効果が得られた。

4. 逆解析による同定

4.1 逆解析の適用

解析精度向上のため、逆解析を適用した。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。

拡張カルマンフィルターを非定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

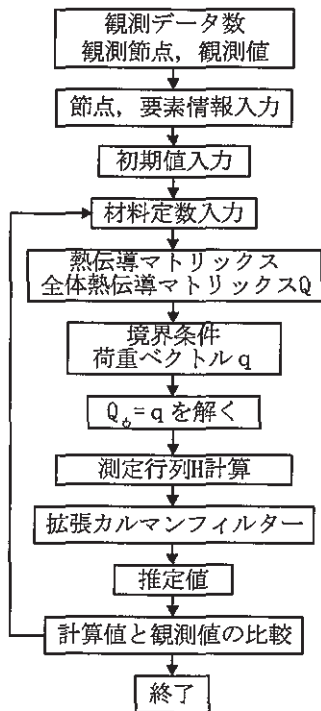


図-4 逆解析フロー

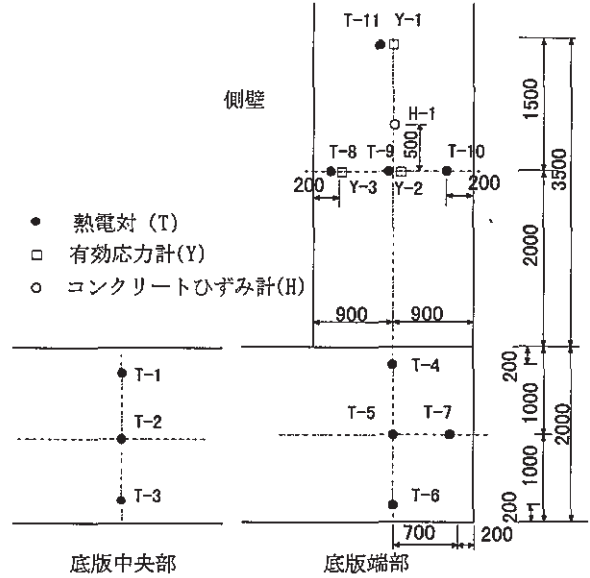


図-5 計測器の配置

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)

4.2 逆解析の適用結果

逆解析に用いた物性値を表-4に示す。熱特性の初期値は、示方書⁶⁾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

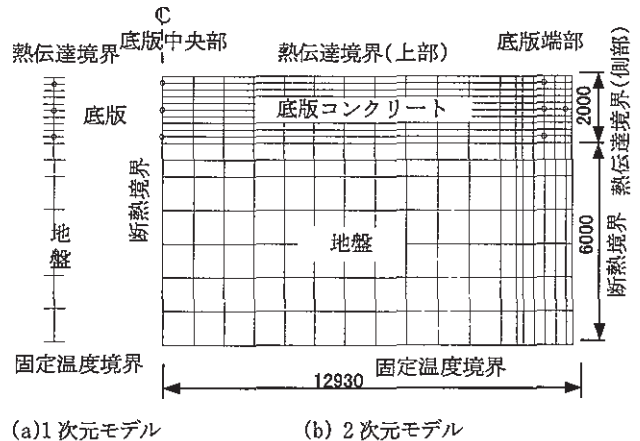


図-6 逆解析モデル

表-4 解析に用いた物性値

項目	基準値		
λ_c	コンクリートの熱伝導率 ($W/m^{\circ}C$)	2.33	
C_c	コンクリートの比熱 ($kJ/kg^{\circ}C$)	0.924	
ρ_c	コンクリートの密度 (kg/m^3)	2300	
Q_{∞}	断熱温度上昇実験定数近似式(1)	37.4	
r		0.277	
q_i	断熱温度上昇ステップ値	熱量入力	
η	熱伝達率 (W/m^2C)	打設面 型枠面	14 8.0
λ_g	地盤の熱伝導率 ($W/m^{\circ}C$)	3.5	
C_g	地盤の比熱 ($kJ/kg^{\circ}C$)	0.80	
ρ_g	地盤の密度 (kg/m^3)	2000	
T_a	外気温 ($^{\circ}C$)	底版	8.5
T_b	固定温度境界面の岩盤温度 ($^{\circ}C$)	15.6	
T_{c0}	コンクリートの初期温度 ($^{\circ}C$)	16.3	
T_{g0}	地盤の初期温度 ($^{\circ}C$)	15.6	

表-5 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 及び端部 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 ($^{\circ}C$)	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

いた。逆解析の設定パラメータと収束までの繰返し数および温度平均誤差を表-5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 $^{\circ}C$ 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 W/m^2C 、ステップ入力で17 W/m^2C 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

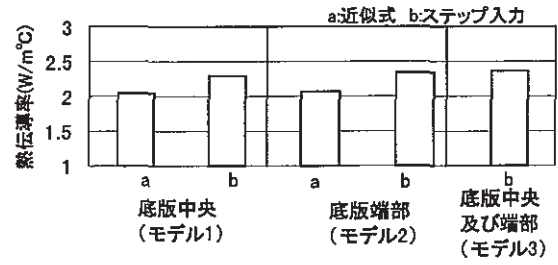
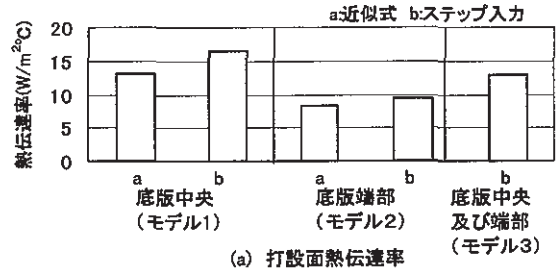
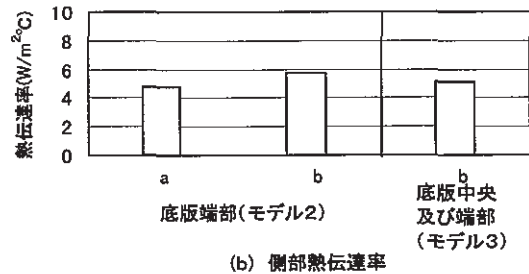


図-7 熱伝導率解析結果



(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

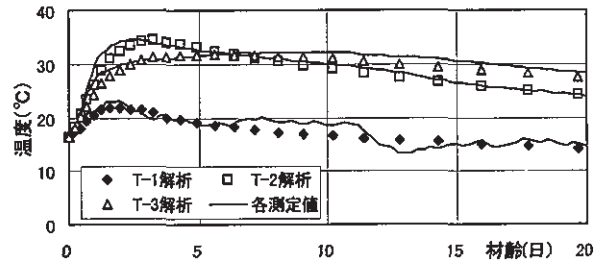


図-9 底版中央部解析結果(モデル1)

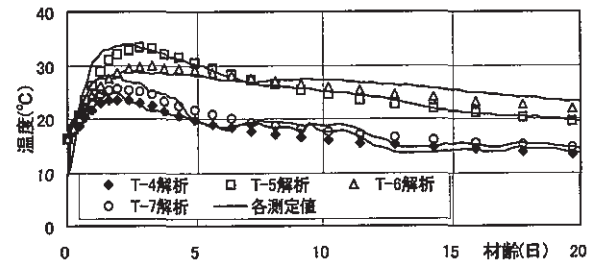


図-10 底版端部解析結果(モデル2)

に9 W/m^2C 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 $5 \text{ W/m}^2\text{C}$ 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導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良好に表すことができた。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、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(1)により断熱温度上昇を精度良く表すことができるが、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。

5. 3次元FEM解析値と測定結果

5.1 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。

解析条件と結果を表-6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。

5.2 温度解析結果

3次元FEM解析⁷⁾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

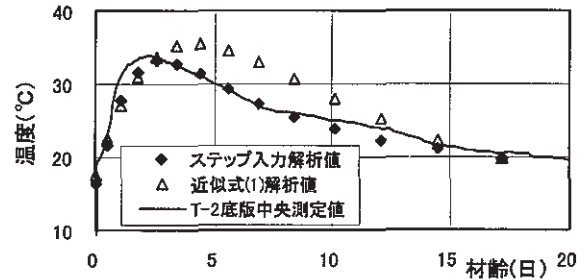


図-11 断熱温度上昇の違いによる比較

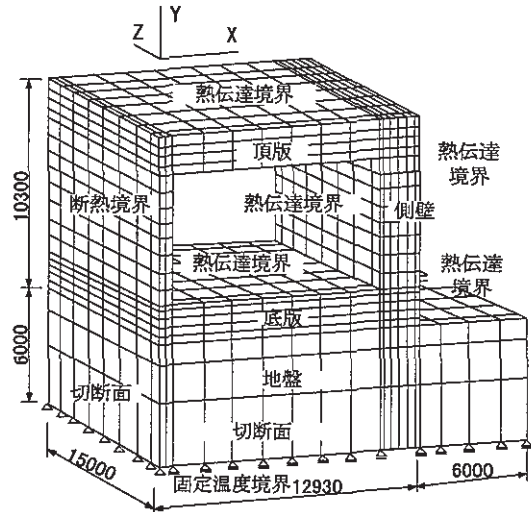


図-12 3次元解析モデル(1/4モデル)

表-6 解析条件と結果

種別	部位：底版および側壁コンクリート	
λ_c	熱伝導率 ($\text{W/m}^2\text{C}$)	2.36
C_c	比熱 ($\text{kJ/kg}^2\text{C}$)	0.924
q_i	断熱温度上昇特性	ステップ値で熱量入力
η	熱伝達率 ($\text{W/m}^2\text{C}$)	コンクリート表面：12.8 型枠面：5.09
T_{c0}	打設温度 ($^{\circ}\text{C}$)	底版16.3, 側壁13.5
T_a	外気温	底版8.5 $^{\circ}\text{C}$, 側壁8.0 $^{\circ}\text{C}$
応力解析	圧縮強度 (N/mm^2)	29.8 (91日)
	圧縮強度回復式 ¹⁾	$a=21.6, b=0.767$
	引張強度, ヤング係数	標準示方書に準拠
	線膨張係数 ($1/^{\circ}\text{C}$)	10.0×10^{-6}
解析結果	内部温度の最大値と材齢	底版34.6 $^{\circ}\text{C}$, 2.5日 側壁32.0 $^{\circ}\text{C}$, 3.0日
	応力の最大値とひび割れ指数最小値	底版0.61 N/mm^2 , 2.90 側壁1.20 N/mm^2 , 1.49

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を得ることができた。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。

5.3 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⁸⁾、応力解析に自己収縮量は考慮しないものとした。実ひずみ計測値は最大膨張ひずみで 200×10^{-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⁶⁾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測定値は 1.04N/mm^2 で、解析値の 1.20N/mm^2 と比べて小さく、初期の圧縮応力の測定値も -0.32N/mm^2 と、解析の -0.52N/mm^2 と比べて小さい値を示したが、解析値との差は 0.2N/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-6に示したように側壁部で、1.49と安全な値となった。

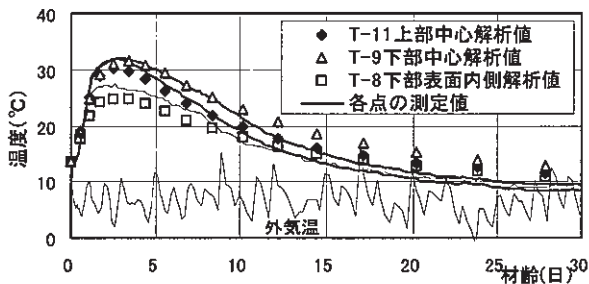


図-13 側壁温度解析結果

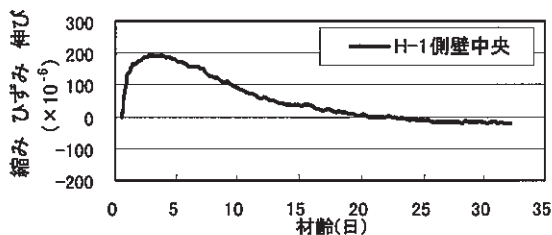


図-14 コンクリートひずみ測定結果

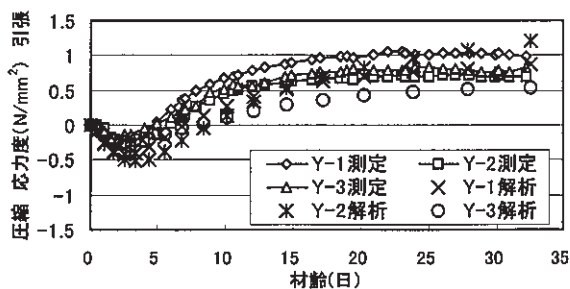


図-15 有効応力解析値と測定値

6. 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

本研究の遂行にあたっては、名古屋工業大学の梅原教授にご指導を頂いた。また、東京都港湾局の渡邊篤氏、宍倉隆幸氏には多大な協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 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
- 2) 近久博志ほか、「逆解析手法によるマスコンク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ー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) 片山 徹、「応用カルマンフィルター」、朝倉書店、1983
- 6) 土木学会、「コンクリート標準示方書[施工編]」、1996
- 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) 日本コンクリート工学協会、「自己収縮研究委員会報告書」、1996.1