

[6] ダムコンクリートの温度応力の実測と解析

正会員 白石 文雄 (奥村組技術研究所)
 正会員○上西 隆 (奥村組技術研究所)
 増井 仁 (奥村組技術研究所)
 森田 修二 (奥村組技術研究所)

1. まえがき

マッパなコンクリート部材に発生する温度ひびわれを制御するにあたっては、事前に、コンクリートの温度変化や、発生する応力を精度よく推定する必要がある。現在までに、これらについて、種々の実験や解析が行われ、問題点も徐々に解明されている。

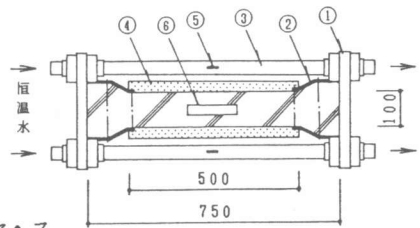
本報告では、ダムコンクリートで行った、温度、ひずみ、応力の計測結果について述べるとともに、FEM解析値や Schmidt法、Compensation Line法 (以下C.L法) の解析値と実測値を比較・検討した結果について述べる。

2. 有効応力計についての予備実験

実構造物での計測に先立ち、コンクリートの若材令時における有効応力計 (ロードセル型) の計測値の信頼性を確かめるため、実験を行った。

試験装置は、図-1に示すように、コンクリートの硬化過程の温度変化による変形を、鋼板および鋼管で拘束するものである。¹⁾コンクリートに発生する応力を中央部に埋設した有効応力計 (20mm×20mm×200mm) で、拘束鋼管のひずみをワイヤ・ストレイン・ゲージで測定した。

有効応力計の計測値と鋼管ひずみからの換算応力 (鋼管の弾性係数: $2.37 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$) との関係を図-2に示す。これより、コンクリートの硬化過程で発生する応力も、有効応力計で正しく計測できることが確認された。



1	反力鋼板	4	断熱材
2	定着鋼材	5	ストレイン・ゲージ
3	拘束鋼管	6	有効応力計

図-1 試験装置概要

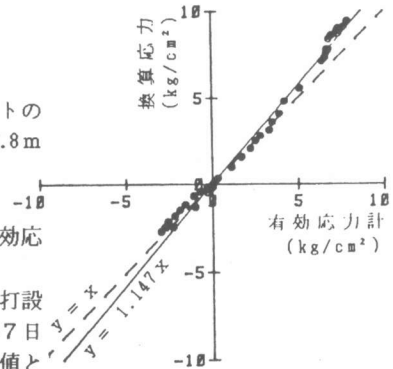


図-2 応力の比較

3. 計測概要

計測は、図-3に示すように、ダムの2リフトで行った。リフトの大きさ (底面) は、リフトAは15m×21m、リフトBは15m×19.8mで、リフトの高さは1.5mである。計測リフトの両側は、既にコンクリートが打設されている。

計器は、各リフトの中心に、図-4に示す位置に埋設した。有効応力計の寸法は、80mm×80mm×800mmである。

計測は、リフトAを打設した9月26日から約1.5ヶ月行った。打設間隔は、リフトAからリフトBが9日、リフトBから次リフトが7日である。各リフトの全計器埋設後、計測値が安定した時点を初期値と設定した。その時刻は、リフトAでは、下部計器埋設から約7時間後、

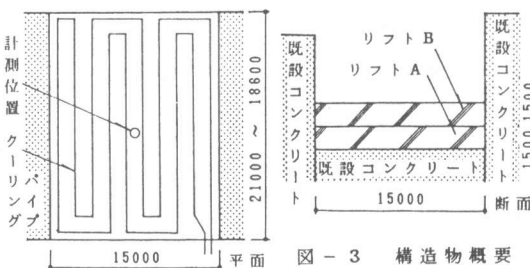


図-3 構造物概要

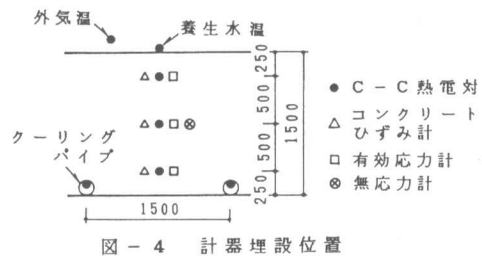


図-4 計器埋設位置

上部埋設から約1時間後であり、リフトBでは、下部、上部埋設からそれぞれ、約7時間後、約3時間後である。

4. コンクリートの物性

コンクリートの配合を表-1に示す。強度試験用供試体および計測位置付近のコンクリートは、40mmふるいでウェット・スクリーニングしたものを使用した。

表-1 コンクリートの配合

セメント 種類 (mm)	G 量 (kg)	スランブ (%)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	配合 (kg/m ³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
普通ポ	150	4	3	68.8	26.0	110	160	546	1642	0.4

(1) 圧縮強度、弾性係数

圧縮強度、弾性係数の試験は、標準養生供試体で行った。圧縮強度と積算温度の関係を図-5に、圧縮強度と弾性係数の関係を図-6に示す。なお、積算温度は、次式より求めた。

$$M = \sum (\theta c + 10) \cdot \Delta t$$

M: 積算温度 (°C・hr) Δt: コンクリートの養生温度がθc (°C)である期間 (hr)

(2) 熱膨張係数

無応力計内のコンクリートの温度とひずみの変化量の関係を図-7に示す。これより、コンクリートの熱膨張係数は、極く初期には、 $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度と大きく、その後、温度上昇時には、 $10 \sim 11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ となる。温度が降下する段階では、 $3 \sim 5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とかなり小さくなっており、その後、 $8 \sim 9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度に安定する。

5. 計測結果

(1) 温度の経時変化

コンクリート温度の経時変化を図-8に示す。

打設温度は、リフトAでは22~23°C、リフトBでは19~20°Cである。最高温度は、リフトAの中央部では、約2日後で38.7°C、リフトBの中央部では、約2.5日後で37.0°Cである。リフトA、Bとも次リフトを打設した影響で温度が再上昇しているが、その上のリフトの影響はほとんどみられない。

(2) 応力、有効ひずみの経時変化

リフトA、Bの応力、有効ひずみ

の経時変化を、それぞれ図-9、10に示す。有効ひずみの算出では、コンクリートの熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とした。

リフトA、Bとも同様の傾向で変化しており、コンクリートの温度上昇時には、上部、中央部、下部とも圧

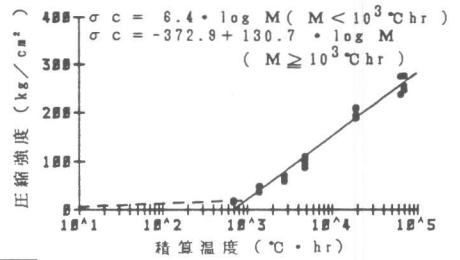


図-5 圧縮強度～積算温度

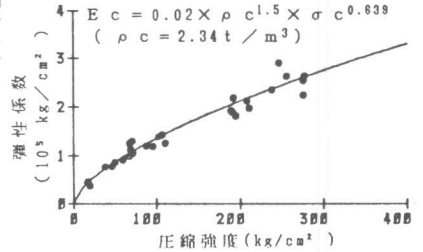
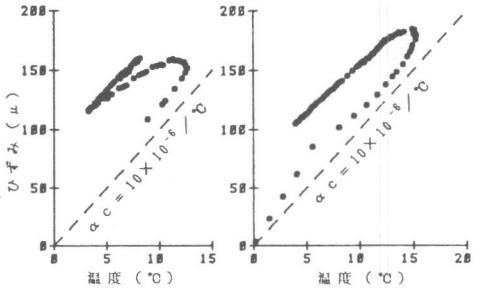
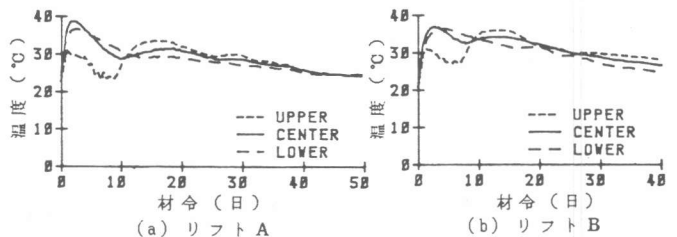


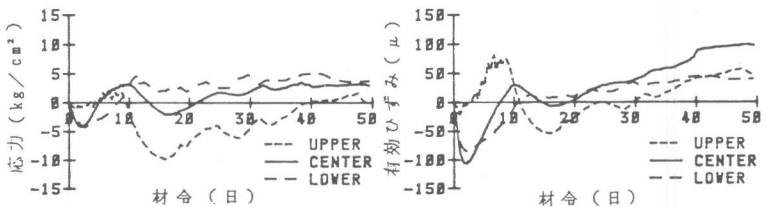
図-6 圧縮強度～弾性係数



(a) リフトA (b) リフトB
図-7 コンクリートの熱膨張係数



(a) リフトA (b) リフトB
図-8 温度の経時変化



(a) 応力の経時変化 (b) 有効ひずみの経時変化
図-9 リフトA

縮応力が発生し、温度が降下し始めると引張側へ移行する。次リフトを打設すると、上部、中央部では温度が再上昇するため、応力は圧縮側へと移り、その後、温度が降下するにつれて徐々に引張側へ移行している。

(3) 応力緩和率

リフト中央部での、応力と有効ひずみの関係を図-11に示す。

コンクリート温度が上昇、降下するまでの期間について、次式により応力緩和率を求めた。

$$k = Ee / Ec$$

$$Ee = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$$

k: 応力緩和率 Ee: 有効弾性係数 Ec: 弾性係数 $\Delta\sigma, \Delta\epsilon$: 各時間ステップごとの応力、有効ひずみの増分

図-12 応力緩和率と有効材令 (20°Cを基準) の関係を図-12に示す。

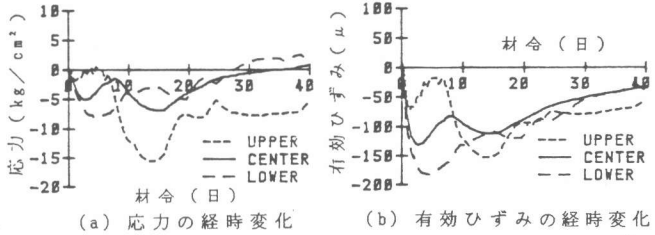


図-10 リフトB

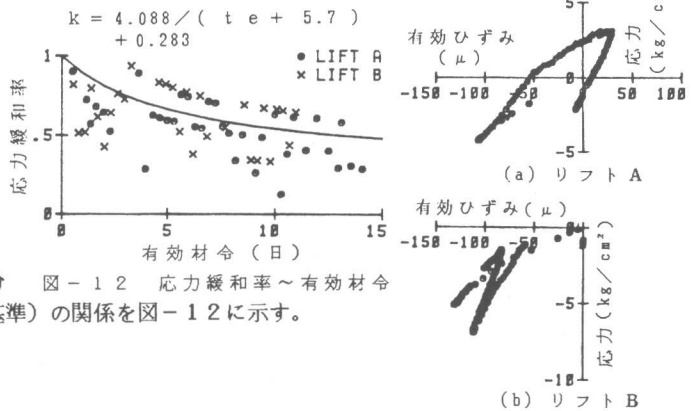


図-11 応力～有効ひずみ

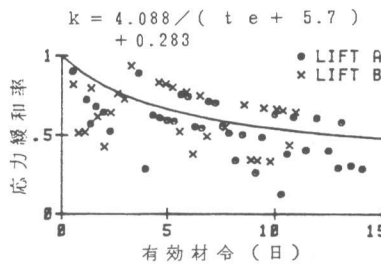


図-12 応力緩和率～有効材令

6. 解析結果

(1) 解析モデル、解析条件

FEM (二次元) および Schmidt法、C.L法の解析モデル、および境界条件を図-13に示す。FEMでは、クーリング・パイプ間をモデル化した。解析は、4リフトについて打継ぎを考慮して、LIFT2 (リフトA) 打設後30日まで行った。

解析に用いた各種の定数²⁾ および解析条件を表-2に示す。パイプ・クーリングは、周期的に通水と滞水を繰返しているが、解析では水温を25°C一定とした。また、パイプとの境界は熱伝達境界とし、熱伝達率を大きくとった。

FEM応力解析のフローを図-14に示す。FEM解析では、底面は、水平、鉛直方向変位とも拘束し、側面は、水平方向変位を拘束した。C.L法³⁾の外部拘束係数を表-3に示す。C.L法での

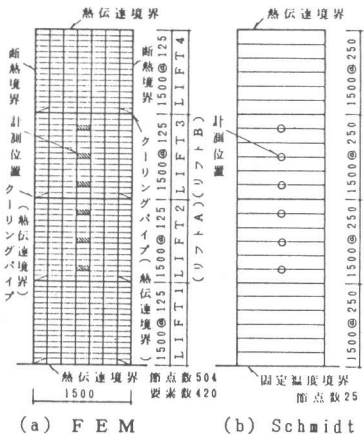


図-13 解析モデル

表-2 解析に用いた定数、条件

	FEM		Schmidt法 C.L法	
	FEM	Schmidt法 C.L法	FEM	Schmidt法 C.L法
熱伝達率 (kcal/m ² ·hr·°C)	1.7	—	LIFT1	25°C
比熱 (kcal/kg·°C)	0.23	—	LIFT2, 3	23°C
密度 (kg/m ³)	2342	—	LIFT4	20°C
断熱温度上昇	LIFT1	発熱なし	LIFT2~3	9日
	LIFT2~LIFT4	T=22X(1-e ^{-0.85t}) T:°C t:日	LIFT3~4	7日
熱伝達率 (kcal/m ² ·hr·°C)	LIFT1と既設コンクリートとの境界	4	0~14日	20°C
	滞水養生における境界	20	15~17日	25°C
	大気と接する境界	10	18~30日	15°C
クーリング・パイプとの境界	40	—	滞水養生の期間	各LIFT打設後4日間
	—	—	パイプ・クーリングの水温	25°C
熱膨張係数	10×10 ⁻⁶ /°C	—	ポアソン比	1/6

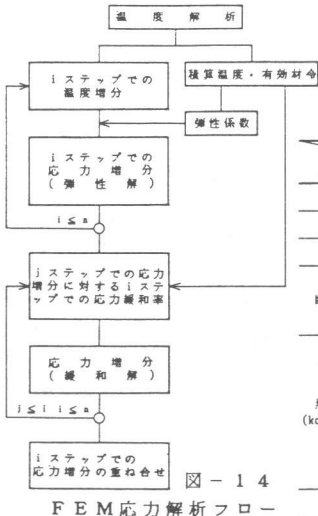


図-14 FEM応力解析フロー

弾性係数は、各リフトの断面平均温度から求めた積算温度をもとに算出し、解析には、各ステップの有効材令での応力緩和率を乗じた有効弾性係数を用いた。

(2) 温度の解析結果

温度の解析値と実測値の比較を図-15に示す。

リフトAでは、打継ぎまでは各部とも、両者はよく一致している。リフトBでは、解析値の方が、ピーク温度が高く、ピークの時期もやや早くなっており、温度降下速度も解析値の方が大きい。これは、リフトBの初期温度が解析値の方が高いこと、そのため発熱速度が大きいことや、コンクリートの熱拡散率が実際よりやや大き

めであったことなどのためと思われる。リフトBのこのような違いが、リフトAの打継ぎ以後の解析値にも影響している。

(3) 応力の解析結果

応力の解析値と実測値の比較を図-16に示す。リフトA、Bとも、解析値と実測値は同様の傾向で変化している。

リフトAでは、応力の反転時期は、ほぼ一致しているが、リフトBでは、温度解析の影響で反転時期がずれている。

温度がピークに達するまでの圧縮応力の増加量、およびピーク後の引張応力の増加量は、どちらも解析値の方が大きい。これは、解析では初期材令の弾性係数を大きく算出していること、実測では温度降下時のコンクリートの熱膨張係数がかなり小さいこと、また、応力緩和と特性が、圧縮応力増加域と引張応力増加域とは異なることなどのためと思われる。

表-3 外部拘束係数

	LIFT2まで	LIFT3まで	LIFT4まで
E_c / E_n	1.0		
L/H	5.0	3.33	2.5
R_n	0.6	0.45	0.4
R_m (ピーク前)	1.1	0.9	0.8
R_m (ピーク後)	1.7	2.0	2.0

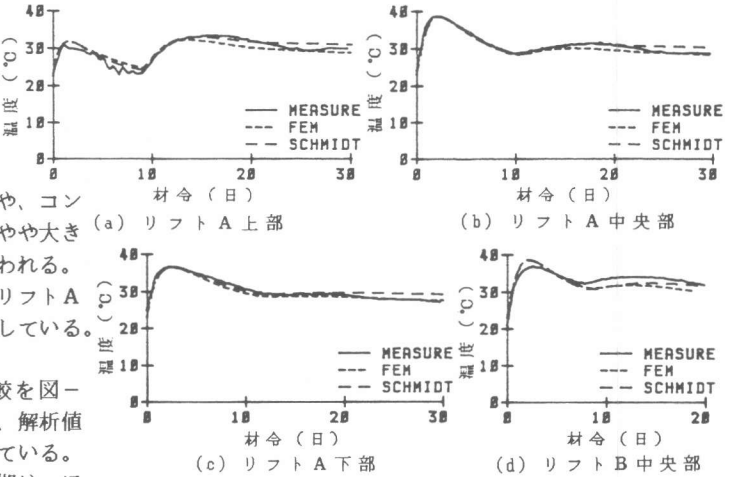


図-15 温度解析値と実測値の比較

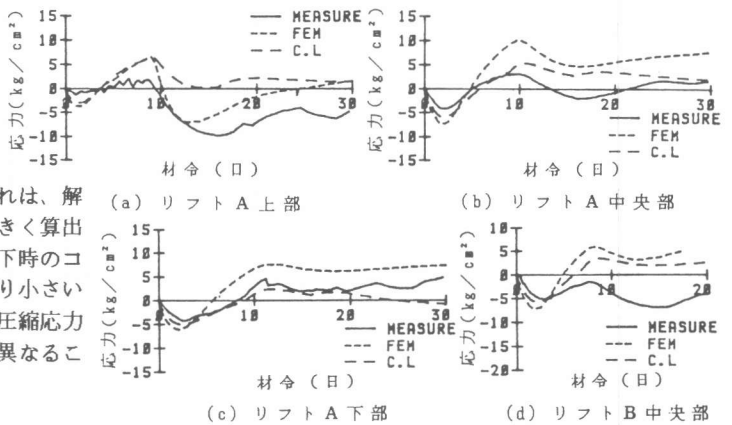


図-16 応力解析値と実測値の比較

7. まとめ

今回の実測、解析の結果を要約すると次の通りである。

- (1) コンクリートの硬化過程で発生する応力も、有効応力計により計測可能である。
- (2) コンクリートの熱膨張係数は、初期材令では、一般的な値より大きく、温度の降下時には小さくなっている。
- (3) 温度解析では、FEM、Schmidt法とも実測値と良く近似しており、十分予測可能である。
- (4) 応力解析では、FEM、C.L法とも定性的には一致しているが、定量的には問題がある。より精度良く推定するためには、初期材令での弾性係数の発現状況や、材令、温度変化に伴う熱膨張係数の推移、さらに、応力反転前後の応力緩和と特性などを把握し、解析に適用していく必要がある。

参考文献

- 1) 「JIS原案 コンクリートの水和熱による温度ひびわれ試験方法(案)」 コンクリート工学 vol. 23 No. 3
- 2) 「コンクリート工学ハンドブック」、「マスコンクリートの温度応力推定方法に関する既往の研究とその総括」など
- 3) 「マスコンクリート温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム」 日本コンクリート工学協会