

報告

[1189] 堤体増厚におけるダムコンクリートの温度解析についての一検討

正会員○南木宏和（九州大学大学院）

正会員 阪本好史（九州大学土木工学科）

正会員 牧角龍憲（九州大学土木工学科）

山口慶和（九州大学）

1. まえがき

堤体を改良して既設ダムの再利用を図る計画が近年多くなってきている。今回報告するダムにおいても、ダムの若返りを目的に改修工事が行われた。この工事は、過去にあまり例のみられない堤体上流側へのコンクリートの増厚であり、その増厚幅は堤体下部と上部では変化が大きい。

改修工事により、新コンクリートから発生した熱負荷は一体化した新旧堤体を熱変形させようとするが、新コンクリートの硬化過程ではその剛性が両堤体で異なり、変形・応力に直接影響を及ぼしてしまう。そこで問題となるのが、新コンクリートの水和熱発生にともなう温度応力である。つまり、温度的に平衡に達している旧堤体に熱負荷を加えることにより堤体内で著しい温度変化が起こり、これが増厚ダム特有の温度応力を発生させ、場合によっては有害なひびわれを発生させてしまうのである。とくにこのダム改修工事は、通常のダム工事と異なり旧堤体の拘束を大きく受けることが考えられるためより正確な温度応力の推定が必要となる。

温度応力解析をより正確に行うためには、まずもととなるコンクリート打ち込み後の温度変化の推定を精度よく行わなければならない。しかし、マスコンクリートの熱伝導解析を行う際の熱特性値は、事前の試験を通じて求めていたとしても、その値が必ずしも実際施工しているときの値に近いとは限らない。本報告では、実測値に近い推定値を与える熱特性値を用いて新コンクリート打ち込み後の温度変化についての検討を行った。

2. ダムの諸元

ダム増厚工事は、旧堤体上流側にコンクリートを1リフト1.5mで合計30リフト打ち込むことよって行われた（図-1）。各リフトの打設面は湛水養生され、側面の型枠にはメタルフォームが用いられた。

この上流増厚工事は、下流増厚に比べて止水性が確実であること、工事中のはつり等の繁雑な作業が少ないことなどのほかに、当初からダム下流面に施されていた石張りが現状のまま保持でき景観上優れているという点から決定された。しかし、この工法の場合には、新旧堤体の一体化の点で十分に検討せねばならない必要性が生じる。というのも、上流増厚は新堤体部材厚が薄いために、旧堤体側との拘束力が減少し継目が開く方向に新堤体が作用する傾向にあると考えられるからである。

なお改修工事後の堤体内部の状況を知るため、施工中に温度計等の計器がいくつか埋設された。

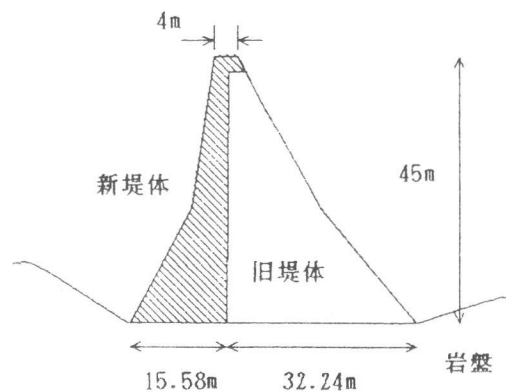


図-1 堤体断面図

### 3. 基本的な解析条件

解析にはJCIの「マスコンクリートの温度応力解析プログラム」を用いた。まず、土木学会RC示方書で与えられた定数による温度解析を行ったところ、実測値との顕著な差が認められた。そこで、どのような要因がその差に影響するのか、また熱定数の値をどのように定めれば実測値に近くなるのか検討した。その際、まず解析時間を短縮するため、解析結果が実際のダム形状で解析した場合とあまり差異がないであろうと思われる解析モデルを作成した(図-2)。このモデルに対応するコンクリートの打設温度は10°Cであり、図-2中のA点(2リフト下部)の埋設温度計による実測値と温度解析結果との比較を行った。その検討の流れは次のとおりである。

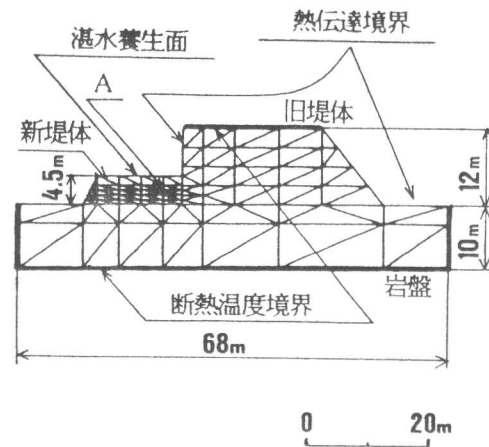


図-2 解析モデル

ケース1；断熱温度上昇試験で得られた熱特性値とRC示方書に準じて定められた熱特性値(表-1)による解析。この場合、断熱温度上昇は20°C打設時の実験結果しか得られていなかったため次の2種類の補正を行った。なお、補正には中庸熱ポルトランドセメントの特性値を用いた。その理由としては、20°C打設時の値が近かったためである(表-2)。ここでは、材令tにおけるコンクリートの断熱温度上昇量 $T$ を次の式を用いて表す。

$$T = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t}) \quad (Q_{\infty}: \text{終局断熱温度上昇量}, \gamma: \text{温度上昇速度に関する定数}) \dots (1)$$

表-1 熱定数

熱定数	新堤体	岩盤	旧堤体
比熱(kcal/kg°C)	0.25	0.18	0.21
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2440.0	2573.0	2264.0
熱伝導率(kcal/mh°C)	2.2	2.5	2.5
熱伝達係数(kcal/m <sup>2</sup> h°C)	15	15	15
〃 (湛水養生面)	7	-	-
$K_{20}$ (20°C打設時の $Q_{\infty}$ )	28.4	-	-
$\alpha_{20}$ (20°C打設時の $\gamma$ )	0.562	-	-

表-2  $K, \alpha$ の比較

	$K_{20}$	$\alpha_{20}$
示方書 <sup>1</sup>	30.0	0.594
JCI <sup>1</sup>	27.3	0.536
対象ダム <sup>2</sup>	28.4	0.562

単位セメント量: 210kg/m<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 中庸熱ポルトランドセメント

<sup>2</sup> 中庸熱高炉セメント

(a) RC示方書をもとに次式による補正[1]

$$K_{10} = \frac{Q_{\infty, 10}}{Q_{\infty, 20}} \times 28.4 = 27.55 \quad (\text{添字は打設温度})$$

$$\alpha_{10} = \frac{\gamma_{10}}{\gamma_{20}} \times 0.562 = 0.346$$

(b) マスコンクリートのひびわれ制御指針に準じた補正[2]

$$K_{10} = 30.06, \quad \alpha_{10} = 0.257$$

ケース2；不確定な6つの熱特性値(新堤体における比熱と熱伝導率、湛水養生面の熱伝達係数とその他の面の熱伝達係数、断熱温度上昇式中の $K$ と $\alpha$ )を種々変化させ、ある材令時において解析値と実測値の残差平方和が最小になる熱特性値を求める解析とその熱特性値での解析。この場

合はケース1(a)の方法によって各打設温度における断熱温度上昇式を算定した。また、解析スケジュールを表-3に示す。

ケース3；ケース2において変化させた6つの熱特性のうち、何が温度解析結果に最も影響を与えるかについての多変量解析による検討。その検討項目としては、図-3に示すピーク温度①、②、③、④ならびに相対温度差①-②、③-④の6項目を挙げた。

表-3 解析スケジュール

解析時間	外気温	備考
0日	10°C	1リフト下部打設
4	10	1リフト上部打設
9	10	2リフト下部打設及び温度計埋設
12	10	
14	10	2リフト上部打設
18	10	
19	7	3リフト打設
23	7	
35	7	
40	7	
43	7	

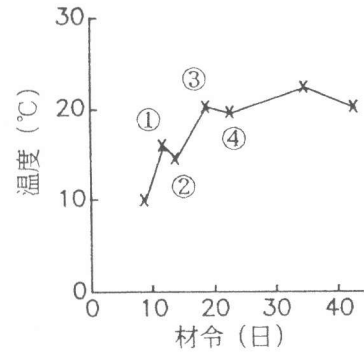


図-3 検討項目

ケース4；解析時間間隔を変更した場合の解析。コンクリートブロックの打設間隔（順次4,5,3,2,4,1日）と一定時間間隔（12時間）としたときの比較を行った。

#### 4. 解析結果及び考察

ケース1；解析の結果を図-4に示す。これから、前述3のケース1(a)あるいはケース1(b)の補正を行った解析値はともに実測値に比べ大きめに計算されていることが分かる。マスコンクリートの温度ひびわれ対策においては最高温度の推定が重要であり、本解析のように最高温度が10°C程度も異なるのは精度良い推定が行われたとは認められない。

ケース2；逆解析により得られた熱特性値は表-4のようであり、それにもとづいた解析結果は図-5のとおりである。この熱特性値では実測値とほとんど近似した結果が得られた。既往の報告[1][2]における打設温度の補正を行った断熱温度上昇曲線を比べてみると、逆解析で求めた曲線が、他よりもかなり下まわっていることが分かる（図-6）。

表-4 ケース2の結果

	熱特性値	解析値	変化の範囲
A	比熱（新堤体）	0.259	0.20~0.29
B	熱伝導率（新堤体）	2.61	1.8~2.7
C	熱伝達係数（湛水養生面）	22	5~25
D	“（その他の面）	15	20~40
E	$K_{10}$ （10°C打設時の $Q_{10}$ ）	25.57	23~28
F	$\alpha_{10}$ （10°C打設時の $\gamma$ ）	0.167	0.13~0.22

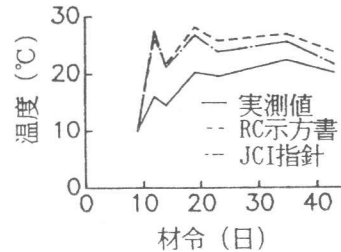


図-4 ケース1の結果

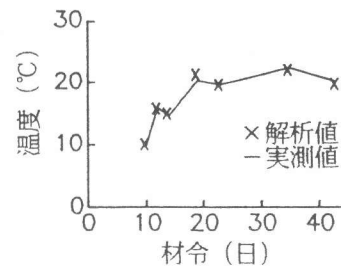


図-5 ケース2の結果

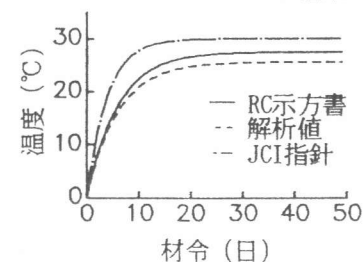


図-6 断熱温度上昇曲線

ケース3；多変量解析により標準偏回帰係数を求めると、断熱温度上昇式中のKと $\alpha$ 及び湛水養生面の熱伝達係数が大きい絶対値を示しているため、これらの影響が大きいと考えられる（表-5）。また、ケース2でC>Dという結果が得られたが、表-5より明かなように、Dを変化させてもピーク温度にはほとんど影響がみられなかったためである。表-6に、①、②、③、④についての相関係数を示す。これから①の温度の精度良い推定が重要であることが認められた。

表-5 標準偏回帰係数

項目	A	B	C	D	E	F
①	0.304	-0.233	-0.637	0.010	0.452	0.822
②	0.532	-0.599	-0.662	-0.001	0.534	0.428
③	0.492	-0.663	-0.351	-0.006	0.679	0.337
④	0.570	-0.750	-0.437	0.005	0.631	-0.138
①-②	-0.087	0.309	-0.392	0.019	0.198	1.049
③-④	-0.119	0.118	0.141	-0.022	0.143	0.953

表-6 相関係数

	①	②	③	④
①	1.00	0.89	0.77	0.52
②		1.00	0.93	0.84
③			1.00	0.87
④				1.00

ケース4；解析を行うステップの時間間隔を小さくすることにより解析の精度が良くなることは明かである。しかし時間間隔を短縮することによって、総解析時間を長くしてしまうことになるため、ある程度の解析精度が得られる解析時間間隔が必要となってくる。そこで、ケース2で得られた熱特性値を用いて解析時間間隔を短くした場合の解析を行った。その結果を図-7に示す。これから、適切な熱定数を用いた場合には時間間隔の影響をあまり受けないことが分かる。

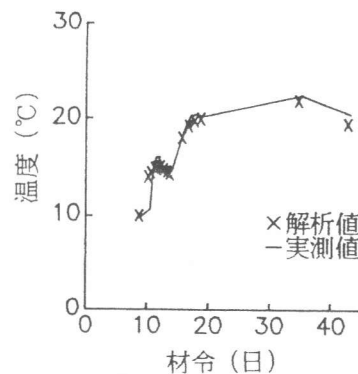


図-7 ケース4の結果

### 5. まとめ

以上の検討から、コンクリートの任意の打設温度における断熱温度上昇式の推定は、温度解析において大変重要であるということが認められた。とくに断熱温度上昇式(1)における $\gamma$ の値が最高温度に及ぼす影響は大きいため、その値についての種々の配合条件ならびに打設温度における今後のデータ蓄積と推定式の確立が必要であると思われる。

### 参考文献

- [1] 土木学会：コンクリート標準示方書【平成 3年度版】（施工編） pp.136-139,1991
- [2] 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひびわれ制御指針 pp.57-59,1986