重力式コンクリートダムの外気温条件の違いによる温度応力への影響分析

日本大学理工学部　正会員　○櫻井　達朗
同　上　正会員　塩尻　弘雄

１．はじめに

重力式ダムコンクリートのようなマスコンクリートにおける温度応力に起因するクラック発生は、止水性、構造安定性等のダムの機能にかかわる。特に、近年の合理化施工（RCD 工法、ELCM）に代表されるレア打設工法のように、打設レア長が長大になると、温度応力に対する内部拘束的な効果がより厳しくなり、クラック発生の危険性が増大する。本報文は、重力式コンクリートダムにおいて、2 次元 FEM により、外気温条件の違いによる温度応力への影響を分析し、温度規制計画に役立だてるべく検討したものである。

２．検討ケース

外気温条件は、以下のケースを設定した。

①ケース 1：T=12.5+12.5×sin(2π(t-120)/365)（通年打設）
②ケース 2：T=17.5+12.5×sin(2π(t-120)/365)（ケース 1 の平均気温＋5℃、通年打設）
③ケース 3：T=12.5+15.0×sin(2π(t-120)/365)（ケース 1 の年振幅＋2.5℃、通年打設）
④ケース 4：T= 7.5+12.5×sin(2π(t-120)/365)（ケース 1 の平均気温―5℃、越冬打設）
⑤ケース 5：T= 7.5+15.0×sin(2π(t-120)/365)（ケース 1 の平均気温―5℃、年振幅＋2.5℃、越冬打設）

３．解析モデル

本報文で取り扱う重力式コンクリートダムは、堤高 60m、下流面勾配が 1:0.8 として、解析モデルは、3m 厚さの外部コンクリート、内部コンクリート、基礎岩盤の 3 種類の物性を考慮した。2 次元 FEM 解析モデルを図-1 に示す。

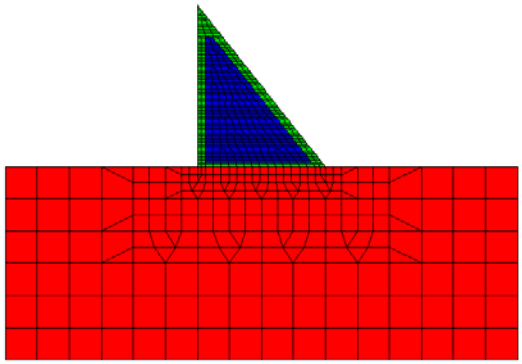

図-1　解析モデル

４．解析条件

(1) 熱定数

内部，外部コンクリート及び基礎岩盤の密度、比熱、熱伝導率、熱伝達率は、コンクリート標準示方書［設計編］（土木学会、2007）及び多目的ダムの建設（ダム技術センター、1987）に示された値を参考として、表-1 のように設定した。

表-1　熱定数一覧表

区分	密度 g/cm³	比熱 J/kg・℃	熱伝導率 W/m・℃	熱伝達率 W/m²・℃
ｺﾝｸﾘｰﾄ	2.3	1050	2.33	14
基礎岩盤	2.65	795	3.45	14

(2) 断熱温度上昇式

内部、外部コンクリートとも中庸熱セメントとし、断熱温度上昇式は、(1)式とした。フライアッシュは 30% とした。その定数 Q_∞、α は、コンクリート標準示方書［設計編］（土木学会、2007）より表-2 とした。

$$Q(t)=Q_\infty\left[1-\exp\left(-\alpha t\right)\right] \qquad (1)$$

表-2　断熱温度上昇式の定数一覧

区分	C(kg/m³)	Q_∞ (℃)	α
外部	140（200）	21.4	0.345
内部	98（140）	16.8	0.332

(3) 弾性定数

コンクリートの有効弾性係数 $E_e(t)$ は、コンクリート標準示方書［設計編］（土木学会、2007）に示された(2) 式より算定した。圧縮強度の推定式 $f_c'(t)$ における定数 a、b は、コンクリート標準示方書［設計編］（土木学会、2007）から設定した。また、基礎岩盤の弾性係数

キーワード　温度応力，クラック，有限要素法
連絡先　〒101-8308　東京都千代田区神田駿河台 1-8　日本大学理工学部土木工学科　ＴＥＬ03-3259-0876

は、Ec/Er=4 とし、ポアソン比は一般値とした。

$$E_e(t) = \Phi(t) \times 4{,}700 \times \sqrt{f_c'(t)} \quad (2)$$

$$f_c'(t) = \left(t / (a + bt)\right) \times f_c'(91) \quad (3)$$

表-3　弾性定数の物性値一覧表

区分	物性値	外部	内部(RCD)
コンクリート	圧縮強度推定式の定数 (MPa)	a =6.2 b =0.93 $f_c'(91)$ =42.0	a =6.2 b =0.93 $f_c'(91)$ =23.0
	弾性係数の補正係数	$\varphi(t)$ =0.73　材令 3 日まで $\varphi(t)$ =1.0　材令 5 日以降	
	ポアソン比	ν =0.2	
	熱膨張係数	α =10×10^{-6}	
基礎岩盤 (Ec/Er=4)	弾性係数	E =5,640N/mm^2	
	ポアソン比	ν =0.3	

(4) 打込み温度

打込み温度は、運搬、打込み終了時までの温度上昇量を考慮して、練上り温度（外気温）に 2℃を加えた値とした。通年打設の打込み温度は、5℃以上 25℃以下とし、越冬打設の打込み温度は、5℃以下の場合、コンクリートを打設しないように設定した。

(5) リフトスケジュール

リフト厚は 75cm で、越冬期間以外の打設間隔は 7 日とし、打設開始時期は 4 月とした。

5．解析結果

各検討ケースの最大引張歪一覧表を表-4 に示し、最小主歪分布を図-2 に示す。

表-4　最大引張歪（μ）一覧表

検討ケース	内部コンクリート	外部コンクリート
ケース 1	92.16	65.62
ケース 2	91.91	74.40
ケース 3	102.02	81.46
ケース 4	96.72	119.73
ケース 5	105.98	148.20

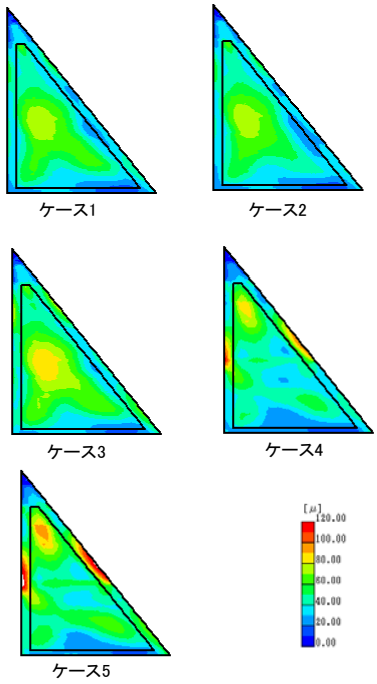

図-2　最小主歪分布

ケース 1（92.16μ）に対して、外気温の平均温度を 5℃上げた場合（ケース 2）、発生した最大引張歪はほとんど変わらなかった。これは、年振幅が変わらず、平均温度が高い温暖な気候では、温度応力への影響はほとんどないといえる。

ケース 1（92.16μ）に対し、外気温の年振幅 2.5℃上げた場合（ケース 3）、最大発生歪が 1.1 倍（102.02μ）になった。外気温の年振幅が大きくなったことから、堤体内部と上下流面の温度に差が拡がり、最大引張歪が少し大きくなったものと考える。

ケース 1（92.16μ）に対し、外気温の平均温度 5℃下げ、越冬打設した場合（ケース 4）、最大発生歪が 1.3 倍（119.73μ）になった。また、ケース 1（92.16μ）に対し、外気温の平均温度 5℃下げ、年振幅 2.5℃上げて越冬打設した場合（ケース 5）、最大発生歪が 1.6 倍（148.2μ）になった。最も大きな引張歪が生じる結果となった。これは、越冬することで、越冬面及び上下流面と堤体中央部での温度降下量の差異が大きくなり、内部拘束により、引張歪が大きくなったものと考えられる。

以上の結果から、通年打設の場合、平均気温や年振幅が大きくなっても、温度応力への影響は少ないことがわかった。越冬打設の場合、通年打設に比べ温度応力への影響は大きくなることがわかった。これにより、温度応力クラック抑制対策として、越冬期の保温養生を充分に対策していくことに留意する必要があると考える。

6．おわりに

外気温条件の違いによる温度応力の影響は、特に越冬打設の場合に大きいことがわかった。温度規制計画では、越冬期に留意する必要がある。今後は、外気温に加え、ダム規模、単位セメント、打設速度、打設開始時期、岩盤拘束の違いによる温度応力の影響を分析し、温度規制計画に役立てるべく検討する予定である。