

[2008] 重力式コンクリートダム の拘束度と温度応力簡易解析法について

正会員 ○山川 秀次 (電力中央研究所)
 正会員 川原場博美 (電力計算センター)
 正会員 大沼 博志 (電力中央研究所)
 正会員 原口 晃 (電力中央研究所)

1. まえがき

コンクリートダムのようなマッシブな構造物では、水和熱による温度応力ひびわれの制御が重要な課題となる。コンクリートの温度応力に関するパラメータは非常に多く、しかもかなり複雑な現象である。そこで、温度応力を適切に制御するためには、施工条件、気象条件等を忠実に模擬した温度応力解析を行い、ひびわれの発生に対する余裕度を定量的に評価することが重要となる。

一般にコンクリートダムは数10リフトに分けて施工するため、境界条件等が各リフト毎に変化する。そこで、各リフト毎に温度応力解析を行う必要があり、計算のために莫大な労力を要しているのが現状である。このため、温度応力に起因するひびわれ発生有無の評価を行うために、予め解析を実施する場合でも、最も適切と考えられる施工条件を忠実に模擬した解析を通常1ケース実施し、その結果に基づき、配合、施工条件等の修正を行うだけの場合がほとんどである。すなわち、修正した配合、施工条件等を忠実に模擬した解析による温度応力の定量的な評価を実際に行う場合は非常に希なケースであると言えよう。

本報告では、先ず計画通りの施工条件ならびに施工条件を変更した中規模重力式コンクリートダム(冬期にコンクリートの打設休止期間有り)の2ケースの温度応力解析結果に基づき、この種のコンクリートダムにおける温度応力の実体を明らかにした。次に、この種のコンクリートダムの温度応力発生メカニズムに基づき、施工条件を変更した場合に適用できる温度応力に起因するひびわれの制御と計算量の低減を目的として開発した精度の良い温度応力簡易解析法について概述した。

2. コンクリートダムの温度応力解析

重力式コンクリートダムにおける温度応力の実体を把握する目的で、2ケースの施工条件(計画通りの場合と内部コンクリートの引張応力が最大となる箇所を含む上下10リフトのコンクリートの打設温度を計画当初より5℃低下させた場合)を考慮した2次元有限要素法による温度応力解析を実施した。

2.1 解析で対象としたダムの概要

解析で対象としたダムは、高さ70m、堤体積約13万 m^3 、堤頂長140m、L/H(堤体底辺長/堤高)=1.01の重力式コンクリートダムで、レアー工法により49リフトに分けて、12月から3月の冬期を除く約2年間で施工を行うものとした。コンクリートの打設間隔は、岩着部のハーフリフト(厚さ:0.75m)となる第1リフトから第5リフトで約5日前後とし、第6リフト以降は1週間から10日前後とした(ただし、冬期のコンクリート打設休止期間を除く)。また、単位結合材料は、内部コンクリートで150kg(F/C+F=0.3)および外部コンクリートで210kg(F/C+F=0.3)であり、普通ポルトランドセメントを使用するものとした。

2.2 解析で用いた諸元

温度応力解析で用いたコンクリートならびに岩盤の熱特性を表-1に、コンクリートの断熱温度

上昇式を表-2に示す。また、外気温の経年変化は式(1)の正弦曲線により表されるものとした。

$$T_a = 14.8 \sin(2\pi(N-122)/365) + 5.8 \quad \dots\dots(1)$$

ここで、
 T_a : 外気温(°C)

N : 1月1日からの通算日

さらに、コンクリートの打設温度は最低で7°C、最高で20°Cとし、この条件を満たす場合には式(2)により表されるものとした。また、施工条件を変更した解析ケースでは、5リフトから14リフトの打設温度を式(2)で求められる値よりも5°C低い値とした。

$$T_c = \frac{S(T_a \cdot W_a + T_a \cdot W_s) + T_w \cdot W_w}{S(W_a + W_s) + W_w} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、
 T_c : コンクリートの打設温度(°C)

T_a : 骨材およびセメントの温度(°C)、ただし外気温と同じ
 T_w : 水温(°C)、ただし式(3)で表されるものとする

S : 骨材およびセメントの比熱(kcal/kg°C)
 W_a, W_s, W_w : 骨材、セメント、水の重量(kg)

$$T_w = 7.7 \sin(2\pi(N-127)/365) + 5.5 \quad \dots\dots(3)$$

コンクリートの弾性係数等の力学特性は表-3に示した通りであり、岩盤の弾性係数およびポアソン比はそれぞれ50,000kgf/cm²および0.20とした。

2.3 解析結果の検討ならびに考察

重力式コンクリートダムにおける温度応力の実体を把握するため、代表点として引張応力がそれぞれ最大となる夏期に打設した岩着部近傍の内部コンクリート(以後A点と言う)と越年後の夏期に打設した下流面近傍の外部コンクリート(以後B点と言う)を選び、これらの箇所における温度ならびに応力履歴の特徴を検討ならびに考察した。

表-4および表-5はそれぞれA点とB点における温度ならびに応力履歴が施工条件の差異により、どの程度変化するかを示したものである。表-5から、B点(外部コンクリート)における温度ならびに応力履歴は、施工条件を変更しても全く変化が認められないことが明らかとなった。この理由としては、B点とA

表-1 コンクリートならびに岩盤の熱特性

項目	単位	コンクリート*	岩盤
熱伝導率(K)	Kcal/m·hr·°C	2.11	2.57
比熱(C)	Kcal/kg·°C	0.296	0.25
熱膨張係数(α)	10 ⁻⁶ /°C	8.7	8.5
比重(ρ)	kg/m ³	2410	2500
熱伝達率(H)	Kcal/m ² ·hr·°C	H=8(側面) H=3(表面)	8

* : 断熱温度上昇式を除き内部コンクリートと外部コンクリートは同じ値

表-2 断熱温度上昇式

打設温度(°C)	実験式*の各定数	内部コンクリート	外部コンクリート
10	K	13.5	18.3
	α	0.43	0.59
	β	0.82	0.78
15	K	12.8	17.8
	α	0.64	0.72
	β	0.73	0.75
20	K	12.1	17.3
	α	1.00	0.92
	β	0.64	0.68

* : $T = K(1 - \exp(-\alpha t^\beta))$

表-3 コンクリートの力学特性

コンクリートの配合	項目	材令						
		1日	3日	7日	14日	28日	91日	
内部コンクリート	圧縮強度(kg/cm ²)	15	56	112	147	189	238	
	弾性係数(×10 ⁵ kg/cm ²)	0.25	1.50	2.50	2.72	2.86	2.91	
	ポアソン比	0.167						
外部コンクリート	圧縮強度(kg/cm ²)	31	91	166	220	260	291	
	弾性係数(×10 ⁵ kg/cm ²)	0.65	1.99	2.64	2.78	2.99	3.14	
	ポアソン比	0.167						

表-4 岩着部近傍の温度ならびに応力履歴(施工条件変更の影響)

項目	施工条件	材令(日) : 打設開始からの経過時間										
		5	10	14	36	71	209	574	939	1304	1669	2034
温度(°C)	計画通り	33.3	31.6	31.9	30.2	28.5	24.8	19.8	17.3	15.6	14.2	13.1
	変更あり	32.2	30.9	30.9	29.5	27.9	24.4	19.5	17.1	15.5	14.1	13.0
応力(kgf/cm ²)	計画通り	-1.17	0.50	1.57	0.06	5.47	8.93	21.7	25.3	26.5	27.0	27.2
	変更あり	-0.88	0.08	1.50	0.26	5.23	8.34	19.5	23.1	24.3	24.7	24.9

点との高低差が約30m

表-5 下流面近傍の温度ならびに応力履歴(施工条件変更の影響)

すなわち20リフト程度離れていること、ならびにB点での外気温変動に起因する応力が内部拘束

項目	施工条件	材令(日)：打設開始からの経過時間										
		2	7	14	21	90	160	236	601	966	1331	1696
温度(°C)	計画通り	30.3	28.3	29.9	28.1	22.1	12.5	5.17	2.48	1.49	0.87	0.43
	変更あり	30.3	28.3	29.9	28.1	22.1	12.5	5.17	2.48	1.49	0.87	0.43
応力(kgf/cm ²)	計画通り	-0.73	1.09	-0.11	1.76	7.00	22.6	34.0	31.4	27.9	25.0	22.7
	変更あり	-0.73	1.09	-0.11	1.76	7.00	22.6	34.0	31.3	27.8	24.9	22.6

によりほぼ生じていることが考えられる。図-1はB点における長期的な応力履歴を示している。この図より、B点における応力はB点のコンクリート打設後約1年弱経過した時点で最大引張応力34.0kgf/cm²を生じた後、漸減することがわかる。

一方、表-4から、A点(内部コンクリート)における温度ならびに応力履歴には、施工条件の変更すなわち打設温度を5°C低下させた効果が明らかに認められる。

図-2はA点における長期的な温度履歴を示している。この図から、A点における温度はこの位置のコンクリート打設後5年程度経過した時点でも、漸減していることがわかる。また、この図と表-4より、施工条件の差異による両者の温度差が次第に少なくなる傾向が認められる。図-3はA点における長期的な応力履歴を示している。この図よりA点のコンクリート打設後1年程度経過すると、この位置の応力にも外気温の季節変動の影響が認められること、および、施工条件の差異により生じる両者の発生応力増分の差は高々2年程度でほぼ無くなることわかる。さらに、図-2と図-3とを比較することにより、A点のコンクリート打設後2年以上経過すると、単位温度変化量に対する発生応力増分が漸減すること、および引張応力の漸増傾向は最終安定温度に至る迄継続することがわかる。これは、岩着部の

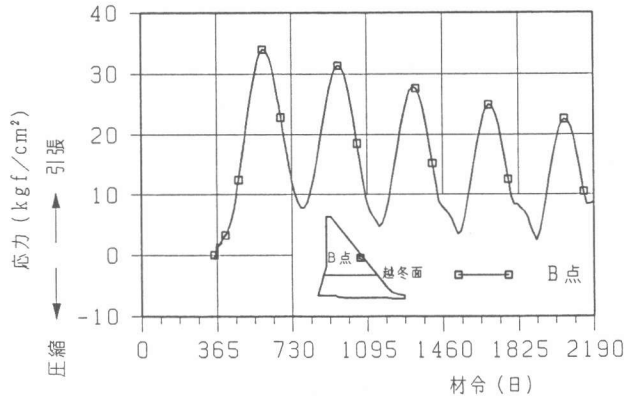


図-1 下流面近傍の応力履歴(B点)

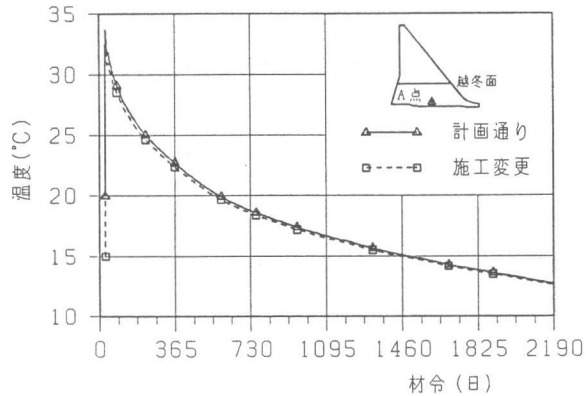


図-2 岩着部近傍の温度履歴(A点)

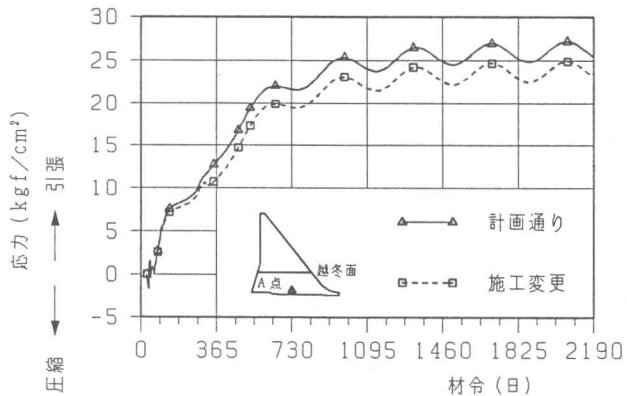


図-3 岩着部近傍の応力履歴(A点)

コンクリートを打設後2年程度経過すると、コンクリート躯体の温度降下に起因する体積変化に追隨して、次第に同程度の体積変化が岩盤自体にも生じていることを示唆している。さらに、この事実はコンクリート躯体に対する岩盤の拘束度が経時的に変化することを意味している。

これらの検討結果は、従来の定説すなわちクーリングを実施しない重力式コンクリートダムでは、最終安定温度に達するまでに一般に10数年程度を要し、しかもコンクリート躯体内部の最大引張応力は最終安定温度に達した時点に生じるといわれている点では一致しているが、拘束度の長期的な特色では異なっている。

上記の結果は2ケースだけの非常に限定された解析結果から得られたものであるが、以下に示す理由からかなりの普遍性を持つものと考えられる。

- 1) ダムコンクリートの場合には非常に貧配合であるため、一般に大幅な配合の変更はない。高々単位セメント量を20kg/m³程度減少できればいい方である。すなわち、断熱温度上昇曲線の大幅な変更はない。
- 2) 夜間打設やプレクーリングによる打設温度の低下量は経済性も併せて考慮すると5℃程度である。
- 3) 温度応力が問題となるのは一般に暑中コンクリートであり、暑中コンクリートの打設期間は1年間のうちで2箇月程度と短期間である。

以上の検討結果から、コンクリートダムの水和熱による温度応力ひびわれを制御するためには、最終安定温度に至るコンクリート躯体内部の最大引張応力を精度良く推定すればよいことになる。

3. 温度応力簡易解析法の開発

コンクリートダムにおける最大引張応力 $\sigma_{t,max}$ を推定する近似式¹⁾として一般に下式が用いられている。

$$\sigma_{t,max} = R \alpha_c \{ (T_1 - T_2) E c_2 - T_1 E c_1 \} \quad \dots\dots(4)$$

ここに、

R : 拘束度

$E c_1$: 材令約1ヵ月迄の平均弾性係数

$E c_2$: 材令約1ヵ月から最終安定温度に達する迄の平均弾性係数

T_1 : 材令約1ヵ月の最高温度

T_2 : 最終安定温度

α_c : コンクリートの熱膨張係数

この近似式では、コンクリート躯体の温度上昇過程ならびに降下過程における単位温度変化量に対して一様な拘束度を仮定している。

図-4は温度応力解析結果より得られたダム躯体内部のA点における温度降下量と発生応力(引張)との関係を示している。この図から、単位温度変化量に対する発生応力(引張)ならびに拘束度の大きさが経時的に変化することがわかる。すなわち、コンクリート躯体内部の最大引張応

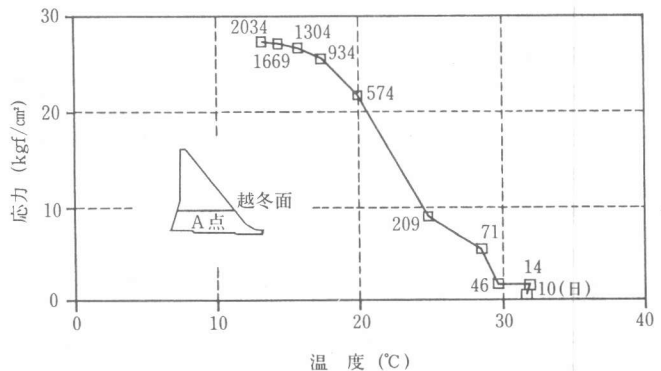


図-4 温度降下量と発生応力の関係(A点)

力 $\sigma_{t,max}$ は、図-3に示した引張応力の最大値(ピーク値)をそれぞれ結び、拘束度の経時変化を次式を用いて算出することにより、有限要素法とほぼ同等の精度で表わせることを示唆している。

$$\sigma_{t,max} = \sum_i R_{i+1} \alpha_c (T_i - T_{i+1}) E_{c,i+1} \quad \dots\dots(5)$$

ここに、 R_{i+1} : 材令 i ヶ月から $i+1$ ヶ月までの平均拘束度

T_i : 材令 i ヶ月における温度

$E_{c,i+1}$: 材令 i ヶ月から $i+1$ ヶ月までの平均弾性係数

図-5に式(5)を用いて求められたA点における拘束度の経時変化を示す(施工条件は計画通り)。

コンクリートダムの水和熱による温度応力ひびわれ発生有無の評価を行う際の手順を以下に述べる。

ステップ: 1

- ① 施工条件、配合、気象条件等の与条件を設定する。
- ② 2次元有限要素法を用いた温度解析によりクリティカルポイントの温度履歴 $T_a(t)$ を求める。
- ③ 2次元有限要素法を用いた応力解析によりクリティカルポイントの応力履歴を求める(解析期間: 最終安定温度における最大引張応力の推定可能な材令迄)。
- ④ ②と③を用いてクリティカルポイントにおける拘束度 R_i の経時変化を算出する。

ステップ: 2

- ⑤ 変更した施工条件等を忠実に模擬した温度解析を行う(解析期間: クリティカルポイントにおけるコンクリートを打設後、少なくとも7~8リフト上部のコンクリートを打設する材令 t_p 迄)。
- ⑥ 上記の⑤で求められた温度履歴を式(5)へ代入し、最大引張応力を算出する。

なお、式(5)により最大引張応力を推定する場合には、最終安定温度に達する材令迄の温度履歴を必要とするため、温度履歴 $T(t)$ は以下の式で求められるものと仮定した。

$$T(t) = T_a(t) - \Delta T_{tp} \quad (t_p \leq t \leq 1095)$$

$$T(t) = T_a(t) - \Delta T_{tp} + \frac{(t - 1095)}{731} \Delta T_{tp} \quad (t_p \leq t \leq 1826)$$

$$T(t) = T_a(t) \quad \dots\dots(6) \quad (1826 \leq t : \text{材令(日)})$$

$$\Delta T_{tp} = T_a(t_p) - T(t_p)$$

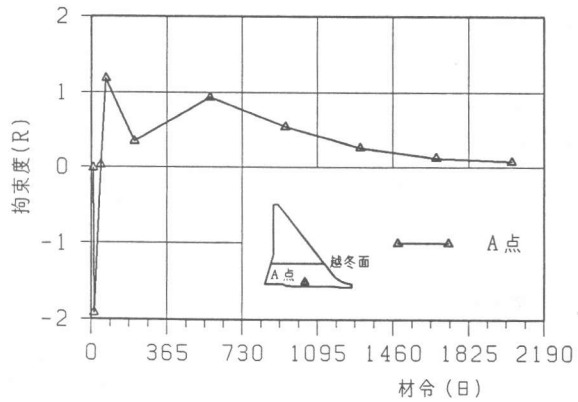


図-5 岩着部近傍での拘束度の経時変化(A点)

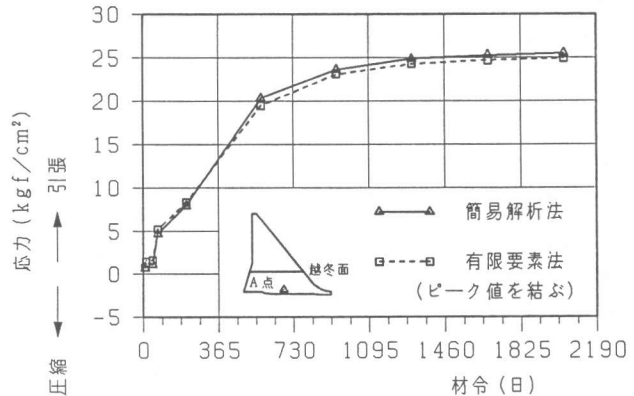


図-6 解析結果の比較(簡易解析法と有限要素法)

式(6)は、変更した施工条件に関して有限要素法を用いて求めた温度解析打ち切り時点(材令 t_p)の温度(材令 t_p では簡易解析の温度と一致)と施工条件が計画通りの場合の解析結果から求めた温度差が、簡易解析では変化せずに3年間継続し、その後の2年間で直線的に減少し、最終的に零になることを示している。さらに、5年以上経過した材令では、簡易解析の温度と施工条件が計画通りの場合の温度とが一致することを示している。

前述した手順により算出した温度履歴を用いて求めた簡易解析法による応力履歴と有限要素法により求めた施工条件を変更した場合の応力履歴の比較を図-6に示した。この図から、両者は非常に良好な一致を示しており、本簡易解析法の妥当性が示されたものと考えられる。

図-7は本簡易解析法を用いて重力式コンクリートダム
の温度応力に起因するひびわれ発生の評価を行う際の解析
フローを示している。

4. おわりに

本報告では、重力式コンクリートダムの水和熱に起因する温度応力の実体を明らかにした。次に、この成果に基づき、この種のダムの水和熱による温度応力ひびわれの制御を目的として開発した高精度な温度応力簡易解析法を示した。この方法を用いることにより、温度応力ひびわれの評価に要する計算時間が大幅に低減されるだけでなく、従来の近似解析法よりも高精度の解析が可能となった。

5. 参考文献

- 1) マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書：日本コンクリート工学協会、1985年

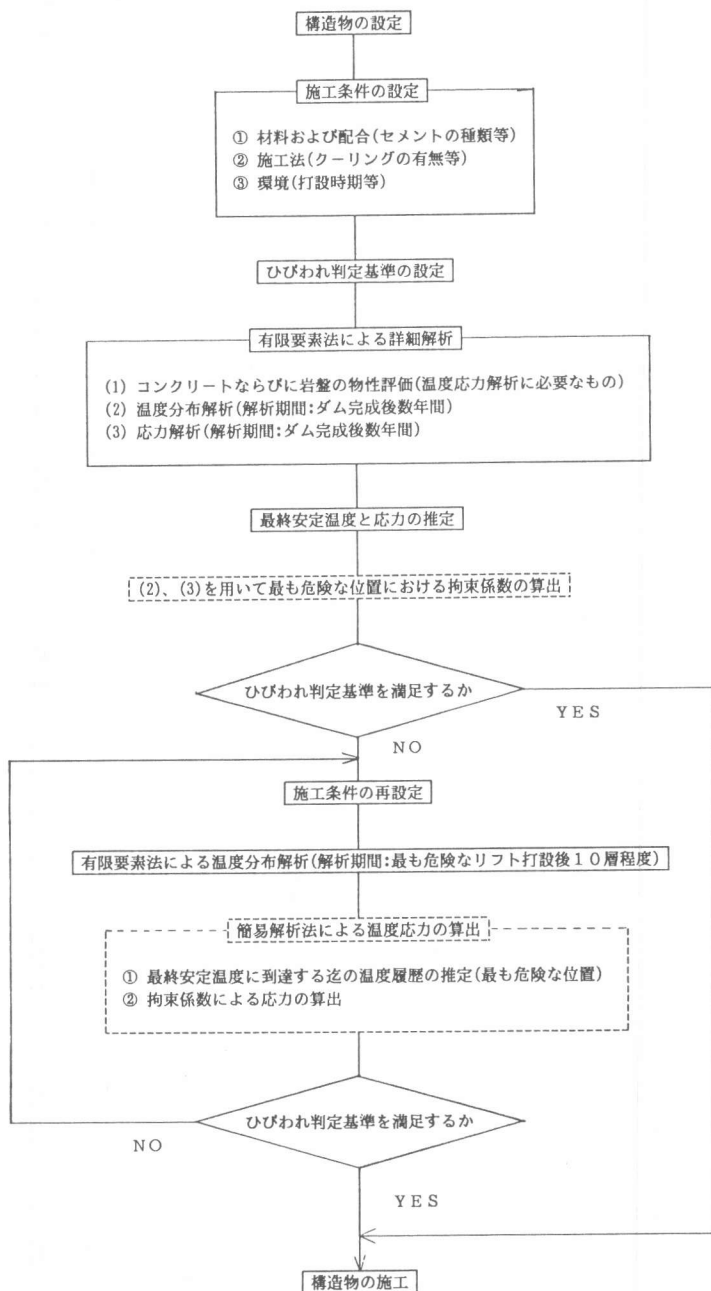


図-7 簡易温度応力解析法によるひびわれ評価のフロー

この方法を用いることにより、温度応力ひびわれの評価に要する計算時間が大幅に低減されるだけでなく、従来の近似解析法よりも高精度の解析が可能となった。