

ダム嵩上げ時の温度応力の実測と温度応力 検討手法についての一提案

ESTIMATION OF THERMAL STRESS OF A CONCRETE DAM AT HEIGHTENING CONSTRUCTION

田 辺 忠 顕*・原 口 晃**・内 田 敏 久***

By Tada-aki TANABE, Akira HARAGUCHI and Toshihisa UCHIDA

1. 序

ダムを嵩上げて、貯水容量を大幅に増大し、ダムの拡大再活用を計る試みが、利水需要の増大に伴って増加する趨勢にある。コンクリート重力ダムの背面にコンクリートを打設し一体化する嵩上げ方式の場合の技術的問題点としては、新コンクリートの水和熱発生に伴う温度応力が最大のものとして挙げられる。

すなわち、すでに温度的に平衡に達している旧堤体に、体積的にその数 10% から、場合によっては旧堤体体積以上の新コンクリートを打ち継ぐために、旧堤体は背面に巨大な熱負荷を負うことになる。

熱負荷に伴う堤体の熱変形は、一体化した新旧堤体が受けるのであるが、新コンクリートの硬化過程では、その剛性が新旧両堤体相互で異なり、変形・応力が直接に影響される。

堤体内に発生し貯留する熱塊は、その堤高、堤体積によっても異なるが、大約 10 年から 20 年をかけて消滅するものであり、その間、堤体は内部熱負荷の影響を受け続けるのである。このほかにも、外部的な気温変化の影響を受けることはいうまでもない。

このような温度変化は、堤体内に嵩上げ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るのであって、新コンクリートの配合、ブロック割り、打設方法は、上記のひびわれを防止することを最大の技術的要目として決定されなければならない。特に旧堤体上流面のひびわれは、湛水後、揚圧力を堤体内に発生させるので、極力防ぐ必要があり、新堤体設計における最大の検討事項である。

上記の問題点のほか、新旧コンクリートの打継ぎ面に

作用する応力の最大値と強度との関係も堤体の一体化の確保という観点から、検討されなければならない点であって、十分な安全度を確保する手段がとられねばならない。

過去に嵩上げを行って、一体化した事例としては、米国の Balch ダム¹⁾、Mansfield ダム¹⁾、Ross¹⁾ ダム、わが国の中国電力王泊ダム²⁾、富士製鉄（当時）桜山ダム³⁾、⁴⁾などが挙げられる。これらの中で、上記問題点について、解析的に入念な検討を行った例は中国電力の王泊ダム（広島県太田川水系）である。

王泊ダムでは、旧堤体（60m）を 10.5m 嵩上げしたが、最大の検討要目として、新堤体打設に伴う温度応力特に旧堤体上流面に発生する引張応力に着目して、詳細な検討が行われた。

まず、初期温度分布として、一度にすべての堤体コンクリートが打設されたと仮定して打設後 28 日時点の温度分布を採用している。次に最終安定温度として、年平均気温を用い、それらの温度差に起因する応力分布を、新旧コンクリート・岩盤ともに同一ヤング係数を有するとして解析している。この結果、旧堤体上流面に 8 kg/cm² の鉛直引張応力が計算され、ひびわれ発生の危険を考慮してパイプクーリングが行われた。

コンクリートに発生する引張応力が数 kg/cm² のところで、クーリングの必要性のあるなしが定まるのであるなら、上記の解析もさらに精度のよいものになり得て、解析上の仮定もできる限り事実在即するものが望ましいことはいうまでもない。

本研究では、過去の研究において考慮されなかった

- (i) ダム嵩上げリフト工程
- (ii) 各リフトごとのコンクリートの水和発熱過程
- (iii) コンクリートの硬化による剛性変化の過程
- (iv) 外気温の変化による放熱現象の変化

など、実現象を忠実に模擬できる計算コードを開発し、これを実際のダム嵩上げ工事に適用した。そして、嵩上

* 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部

** 正会員 (財)電力中央研究所土木技術研究所主査研究員

*** 正会員 中部電力(株)水力部次長

げ工事中およびダム完成後を含める2年余にわたって、その挙動を実測し、理論解析との比較を試みた。

実測に関しては、過去多くのコンクリートダムが建設され、施工時のコンクリートの温度上昇、その後の温度応力に関して、特に慎重な注意が払われてきており、ダムが損傷を受けたときの被害の甚大さを考慮して、建設後もダム堤体の変形、応力変動、温度変化などを長年にわたってモニタリングしているのが通例である。しかしこれらの実測に対応して理論予測の適合性、設計時に考慮した仮定の適合性について、実測値との比較を行って十分な検討がなされたとはいいいえず、実測結果は、いわば、ダムの現状把握のデータとしての利用しかなされていなかった。

今回、中部電力奥矢作揚水発電所⁹⁾の上池ダムとして嵩上げされた黒田ダムに対して、事前に十分な解析を行うことができ、かつ完成後の堤体に対しても2年余にわたるかなり詳細な実測を行うことができ、その解析値に対する実挙動の裏づけを得ることができた。この実測値と理論値との比較は、ダムの実挙動に対するわれわれの鮮明な知見ともなった。

本報告は、このような検討の結果を述べると同時に、コンクリートダム嵩上げ時の設計要因、すなわちコンクリートの配合の考え方、打設工程の選択基準など一般に嵩上げ時の温度応力への対処方法を論じたものである。

2. 温度応力のシミュレーション手法

解析は有限要素法により行った。大きく分けて3つの部分からなり、発熱率が時間的に変化する非定常熱伝導解析とヤング係数が時間の関数として表わされる増分形の応力解析ならびにクリープ解析である。

2次元の非定常熱伝導方程式は、式(1)のように表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + Q(t, \theta) = \rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 k_x, k_y はそれぞれ x, y 方向の熱伝導率、 C は比熱、 ρ は密度、 Q は発熱率で、コンクリートの水和発熱率を表わす。コンクリートの水和反応は化学反応であるため、 Q は時間依存であるばかりでなく、温度依存でもある。したがって厳密には式(1)に対しては、通常の熱伝導方程式に対する汎関数を用いることができない。しかし、 $\partial \theta / \partial t$ の項を、時間軸を固定して考えることにより変分を施さなかったのと同様に、各時間ステップで $Q(t, \theta)$ は定数と考えることにより、次の汎関数を用いることができる。

すなわち、

$$\begin{aligned} \Pi = & \int \int \left[\frac{1}{2} \left\{ k_x \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \right\} \right. \\ & \left. - \left(Q - \rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) \theta \right] dx dy + \int_s q \theta ds \\ & + \int_s \frac{1}{2} \alpha (\theta - \theta_\infty)^2 ds \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

q は、境界上の熱流束で、 θ_∞ は外気温、 α は熱伝達率である。温度 θ に対して、適当な変位関数を考えることにより、次の連立微分方程式が導ける。

$$[H] \{\theta\} + [P] \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial t} \right\} + \{F\} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここで $[H]$ は熱伝導マトリックス、 $[P]$ は、温度勾配に関する係数マトリックス、 $\{F\}$ は、熱荷重ベクトルである。式(3)を解くのに無条件安定な Wilson, Clough の差分スキームを用いた。すなわち

$$\begin{aligned} \left([H] + \frac{2}{\Delta t} [P] \right) \{\theta_t\} = & [P] \left\{ \frac{2}{\Delta t} \{\theta\}_{t-\Delta t} \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_{t-\Delta t} \right\} - \{F\}_t \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで $\{F\}$ の各項は、 $F_i = \sum_j \int_v Q(t) N_j dV \dots\dots\dots (5)$

となるが、コンクリートのその時間ステップにおける発熱率を用いる必要があり、それは前にも述べたようにその時点における環境温度ならびに打設後の経過時間の関数である。その適切な値は実験的に定める必要がある。

上記のようにして、各時刻の温度分布が得られれば、そのときの応力分布は、通常温度膨張による初期ひずみ問題として解くことになる。ただし、コンクリートは時間の経過に伴い硬化するので、ヤング係数は刻々と増大する。本解析においては、この場合の構成方程式を以下のように仮定した。

$$\begin{aligned} \{d\epsilon_e\} = & \{d\epsilon\} - \{d\epsilon_T\} - \{d\epsilon_c\} \\ = & \frac{1}{E(t)} \begin{bmatrix} 1 & -\nu(t) & 0 \\ -\nu(t) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2\{1+\nu(t)\} \end{bmatrix} \{d\sigma\} \\ & \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$\{d\epsilon_e\}$ 、 $\{d\epsilon\}$ 、 $\{d\epsilon_T\}$ 、 $\{d\epsilon_c\}$ は、それぞれ各時間間隔における弾性ひずみ増分、全ひずみ増分、温度膨張ひずみ増分、クリープひずみ増分である。

温度膨張ひずみ増分は、式(1)を解いて、ただちに

$$\{d\epsilon_T\} = [\alpha \Delta \theta, \alpha \Delta \theta, 0]^T \dots\dots\dots (7)$$

と得られる。ここで温度膨張係数 α は、材令による強度変化によっては、ほとんど影響されないといわれており、時間依存はないものとした。したがって、コンクリートが硬化した後に、温度膨張係数を実験的に求め、それを初期材令の場合にも適用した。

クリープ則に関しては、温度ならびに応力が変動する場合について、一般的に成り立つ式が提案されていない。しかし、ある程度実験的証明¹⁰⁾もなされ、理論的考

察もなされている、ひずみ硬化則を近似的に適用した。

まず最初に、クリープ関数 φ を応力 σ , 載荷材令 τ (σ), 載荷時間 t , 温度 T の関数とすると、クリープひずみ増分 $d\epsilon_c$ は、一軸の場合を考えて、

$$d\epsilon_c \Big|_{\substack{\tau=\tau \\ T=T \\ t=t}} = \frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} \cdot \frac{d\sigma}{d\tau} d\tau + \frac{\partial \varphi}{\partial t} dt + \frac{\partial \varphi}{\partial T} dT$$

状態 $A(\sigma_1, t_1, T_1)$ から状態 $B(\sigma_2, t_2, T_2)$ へ変化した場合のクリープひずみ増分 $d\epsilon_c$ を次のようにして求めることにした。まず状態 A のときまでにすでに生じているクリープひずみを ϵ_{cA} とすると

$$\epsilon_{cA} = \int_0^{t^*} \frac{\partial \varphi}{\partial t} dt \Big|_{\substack{\sigma=\sigma_1 \\ T=T_1}} \dots\dots\dots (8)$$

を満たす t^* を求める。ただし、 $\sigma=\sigma_2, T=T_2$ でコンスタントとする。次に A から B に至るクリープひずみ増分を次のようにして求める。

$$d\epsilon_c = \epsilon_{cB} - \epsilon_{cA} = \int_0^{t^*+(t_2-t_1)} \frac{\partial \varphi}{\partial t} dt \Big|_{\substack{\sigma=\sigma_2 \\ T=T_2}} - \int_0^{t^*} \frac{\partial \varphi}{\partial t} dt \Big|_{\substack{\sigma=\sigma_1 \\ T=T_1}} \dots\dots\dots (9)$$

ここでクリープ関数の具体的な形は、実際に試験を行って決定した。ただし応力 σ と温度 T の影響に関しては、その影響が線形であることを仮定し、載荷時間 t の影響は \log 式で表わした。

ところで、上述の手法は、マスコンクリートの温度応力発生過程を逐一シミュレートしており、嵩上げダムの時間経過による温度・応力の変動を詳細に知るためには、最適の方法といえるが、計算機容量ならびに計算時間を多大に使用するため、各種のパラメーターの影響を検討するパラメトリック・スタディには、必ずしも適当でない。

パラメトリック・スタディのために上記の解析に基づいて以下の手法を提案する。ただし、ここで新たに提案する手法は、一種の重ね合わせ法であるため、クリープ解析は行えない。

温度応力を剛性の変化、温度変化を考慮して、時間ステップごとに計算すると、 i ステップで生じる応力増分 $\{d\sigma_i\}$ は次のように表わされる。

$$\{d\sigma_i\} = [D_i] \{ [B] \{ du_i \} - \{ d\epsilon_{0,i} \} \} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $[D_i]$, $\{ du_i \}$, $\{ d\epsilon_{0,i} \}$ は、それぞれ i ステップでの応力・ひずみの関係を表わすマトリックス、変位増分ベクトル、初期ひずみベクトルである。各ステップの応力増分の和が生じている応力だから、

$$\{\sigma\} = \sum_i [D_i] \{ [B] [K_i]^{-1} \{ dF_i \} - \{ d\epsilon_{0,i} \} \} \dots\dots\dots (11)$$

となる。 $[K_i]$, $\{ dF_i \}$ は、 i ステップでの剛性マトリックス、初期ひずみ増分に対応する節点力ベクトルであ

る。

ここで、式 (9) を、材令が経過して剛性の変化が事実上なくなった時点からの応力増分とそれまでに生じている応力増分とに分けると、

$$\begin{aligned} \{\sigma\} &= \sum_i \{ [D_i] [B] [K_i]^{-1} \{ dF_i \} - [D_i] \{ d\epsilon_{0,i} \} \} \\ &+ ([D] [B] [K]^{-1} \{ dF \} - [D] \{ d\epsilon_0 \}) \\ &= \{\sigma_1\} + \{\sigma_{II}\} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

ただし、

$$\{\sigma_1\} = \sum_i \{ [D_i] [B] [K_i]^{-1} \{ dF_i \} - [D_i] \{ d\epsilon_{0,i} \} \} \dots\dots\dots (13 \cdot a)$$

$$\{\sigma_{II}\} = [D] [B] [K]^{-1} \{ dF \} - [D] \{ d\epsilon_0 \} \dots\dots\dots (13 \cdot b)$$

$\{\sigma_1\}$ は、 K_i が逐次変化するので、各ステップごとに応力を求めなくてはならないが、 $\{\sigma_{II}\}$ については次の操作が可能である。 $\{ dF \}$ は、初期ひずみ (温度膨張ひずみ) による荷重成分だから、一要素が 1°C の温度変化を生じたときの荷重として、

$$\{F\}^e = - \int_v [B]^T [D] \{ \alpha \} dv \dots\dots\dots (14)$$

となる。すなわち、 j 要素のみが 1°C の温度変化を生じたときの堤体各部の応力は、 j 要素を除いて、

$$\{\sigma_{II}\}_j = [D] [B] [K]^{-1} \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \vdots \\ \{F\}_j^e \\ \vdots \\ 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

となる。ただし、 j 要素については、 $-[D] \{ d\epsilon_0 \}$ を付け加える。

すべての要素 ($j=1 \sim n$) について、 $\{\sigma_{II}\}_j$ を求めると、これは堤体の一部が 1°C の温度変化を生じたときの堤体各部の応力変動を示している。堤体の着目点、たとえば旧堤体上流面の特定箇所、あるいは打継面の特定箇所に着目して、 $\{\sigma_{II}\}_j$ を描くと、これはその部位の温度応力影響線となっている。

温度応力影響線を用いて、 $\{\sigma_{II}\}$ を求めるためには、剛性の変化がなくなった時点から、求める時点までの温度差を算出して、各部位の影響度との積をつくり、すべての部位での積の和を求めることによって得られる。 $\{\sigma_1\}$ についても各剛性変化のステップごとに、その影響線を求めておけば、同様に検討が可能である。

ここで、先の温度差を求めるために、応力変動がピークに達する時点までの時間経過に伴う温度変化が必要となるが、応力がピークに達するときの温度を限界温度また限界温度と初期温度との差を限界温度差と定義する。

また、応力変動のピークは一つではなく、いくつもある場合があることに注意する必要がある。すなわち、温度変化が季節によって大きく影響される部位 (ダム堤体の表面部) では、応力も季節的に変動し、限界温度は一

定期間ごとに、とびとびに現われることになる。

3. 黒田ダムにおける上記手法の適用

(1) 黒田ダムの概要

上記の解析手法を適用したのが、中部電力奥矢作揚水発電所(109.5万kW)の上池である黒田ダムである。同ダムは愛知県北設楽郡稲武町の標高約850mに位置しており、矢作川最上流部の貯水池として、昭和9年に築造された重力式コンクリートダム(堤高35m)である。

同堤体に、ほぼ同体積の新コンクリートを図-1に示したように打ち継いで、10.2mの嵩上げを行うことになり、温度応力の詳細な検討が必要となった。

そのため、上記手法を適用することになったが、適用にあたって、事前に明らかにしておくべき条件、あるいは定数として、以下のものが挙げられた。

- 旧堤体ならびに岩盤については、
- (i) 新コンクリート打設時の旧堤体初期温度分布
- (ii) 旧堤体ならびに岩盤の温度膨張係数、熱伝導率、比熱、境界における熱伝達率
- (iii) 岩盤ならびに旧堤体のヤング係数・クリープ係数
- また、新堤体については、
- (iv) 新コンクリートの温度膨張係数、熱伝導率、比熱、境界における熱伝達率
- (v) 各リフトごとの打設温度
- (vi) 各配合ごとの断熱温度上昇率
- (vii) コンクリートの硬化過程におけるヤング係数の増大率
- (viii) コンクリートの硬化過程によって影響されるクリープ係数の変化率
- (ix) 新コンクリートの引張強度の増大率
- (x) 打設が始まって完了するまでの打設工程ならびにその各時点の外気温

である。

これらの諸条件、諸定数は次のようにして決定した。まず、(i)の旧堤体初期温度分布については、旧堤体・岩盤の全領域で13°Cの年平均気温の初期温度条件を与え、半年間の外気温変化を旧堤体ならびに岩盤の露出表面に与える非定常熱伝導計算を行い、新コンクリート第1リフト打設時に得られた温度分布をもって、初期条件とした。このようにして求めた第1リフト打設日3月下旬時点の初期温度分布を図-3に示した。

(ii)ならびに(iii)の岩盤および旧堤体の物性値³⁾は、旧堤体ならびに岩盤から、ボーリングにより試験体を切

表-1 岩盤および旧堤体コンクリートの諸定数

	岩 盤	旧堤体コンクリート
熱膨張係数 $\alpha(\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	9.6	10.8
熱伝導率 $K(\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$	2.16	2.0
比 率 $C(\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$	0.24	0.247
比 重 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	2593	2343
熱伝達率 $(\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$	10	10
ポアソン比	0.3	0.17
ヤング率 (kg/cm^2)	50000	109000

表-2 新堤体コンクリートの熱定数

	$C=220\text{ kg}/\text{m}^3$	$C=170\text{ kg}/\text{m}^3$	$C=148\text{ kg}/\text{m}^3$ $F=37$
熱膨張係数 $\alpha(\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	9.5	9.6	9.6
熱伝導率 $K(\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$	2.4	2.4	2.4
比 熱 $C(\text{kcal}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$	0.267	0.267	0.267
比 重 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	2417	2417	2389
断熱温度上昇 (kcal/m^3)	$Q=16.07 \times (1-e^{-0.3t-0.45t^2})$	$Q=12.42 \times (1-e^{-0.3t-0.45t^2})$	$Q=10.8 \times (1-e^{-0.3t-0.45t^2})$
熱伝達率 $(\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$	10	10	10
ポアソン比	0.17	0.17	0.17

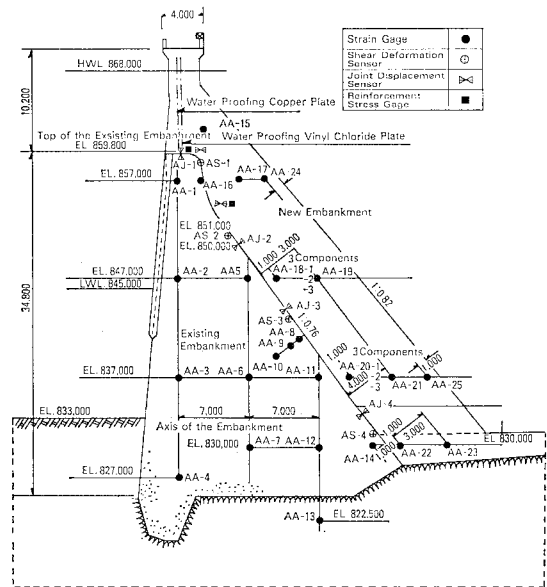


図-1 奥矢作揚水発電黒田ダムの諸元ならびに計器埋設位置

り出し実験を行って求めた。ただし岩盤のヤング係数については、形状寸法の小さな供試体について求めた値を直接用いることはできず、節理などの地質調査結果などを参考にして決定した。また岩盤の熱定数についても、岩質から推定した値を用いた。これらの結果を表-1に記す。

(iv)、(vi)については、各配合ごとに実験を行ってその値を定めた。それらの結果を表-2に記す。(v)、(x)は相互に関係するものであり、検討の結果から最終的に決定した嵩上げのリフトスケジュール、リフトごとの打設温度、打設時の外気温をまとめて、図-2に示した。

(viii) のクリープ係数の基礎実験結果ならびに各配合の断熱温度上昇曲線を、図-4、図-5 にそれぞれ示した。(vii) のコンクリートの硬化過程におけるヤング係数の増大率については、まず標準養生状態における強度増進率を求めておき、次に断熱温度上昇曲線と打設後経過材令との積で表わされる Maturity Factor を上記増進率にあてはめ、圧縮強度を推定した。次に圧縮強度と

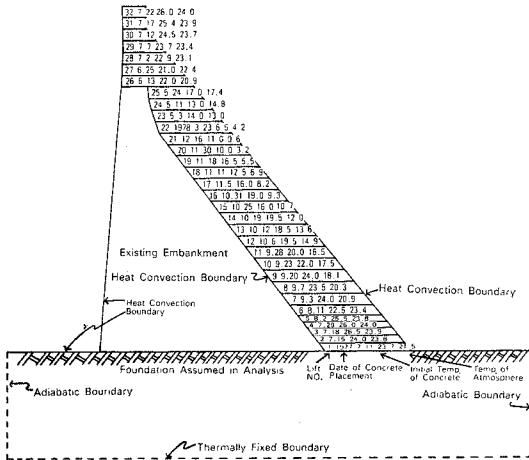


図-2 嵩上げ部分のリフトスケジュール、打設温度ならびに外気温の変化

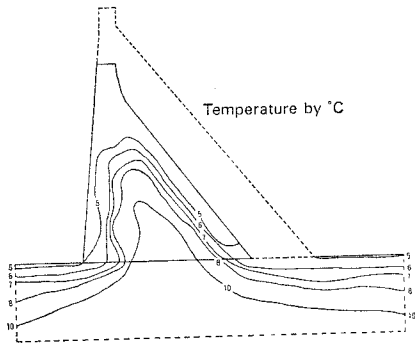


図-3 黒田ダム旧堤体の3月下旬の温度分布

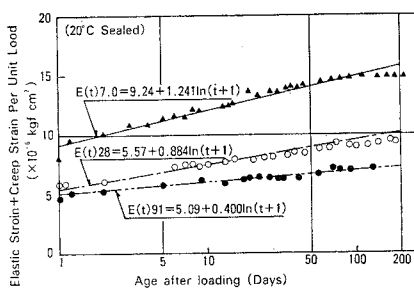
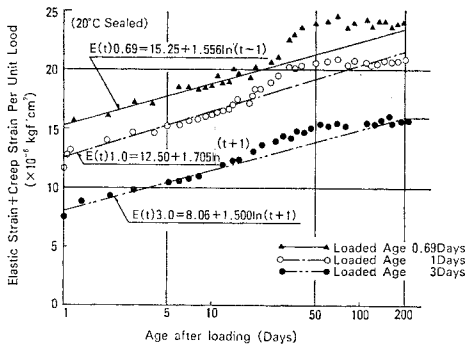


図-4 各種載荷材令によるクリープ曲線

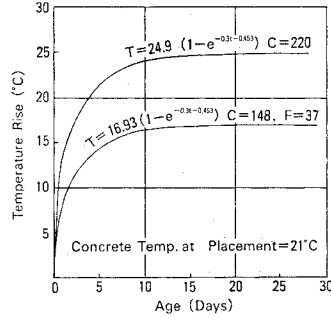


図-5 各配合の断熱温度上昇曲線

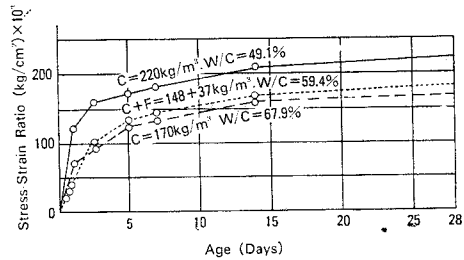


図-6 材令とヤング係数との関係

ヤング係数との関係を標準養生の場合について求め、Maturity Factor によって推定された圧縮強度をその関係にあてはめ、ヤング係数を推定した。この結果を図-6 に示す。

これらの諸定数を使用して、各打設ステップを考慮に入れた逐次シミュレーションを行った。その結果から最適な打設工程、使用セメント量、クーリングの必要性の有無、打継ぎ面の工法などの決定を行った。

打設工事は、昭和 52 年 7 月に始まり、同年の冬期一時中止期間を経て、翌年 7 月下旬に完了した。

コンクリート打設と同時に、各種の計測器が埋設され温度、ひずみの実測が開始された。実測は、嵩上げ完成後現在に至るまで継続されている。

本報告では、工事開始後 2 年ないし 3 年までの実測値をもとに考察を行うことにする。

(2) ダム堤体における温度ならびにひずみの実測

堤体の計器埋設位置は、最大堤高にほぼ等しいブロックの中央で、その新コンクリートブロックの打設水平断面は 10 m (ダム軸方向) ×

11 m (ダム上下流方向)である。その代表的な計器埋設断面図は図-1に示されている。図-2は、約45 mの全高を1年間かけて打設したこと、また外気温の年気温変化幅が25°C程度であったことを示している。

代表的断面における埋設計器はカールソンタイプのひずみ計が25本(3成分2本,1成分23本)、せん断変位計が4本、鉄筋応力計が2本である。

旧堤体と新堤体との境界が実線で示されているが、鉄筋応力計は旧堤体上流面の劣化した表面部を除却して新コンクリートを打設した部位へ、また、継目計は旧堤体と新堤体との境界打継目へ、せん断変位計も同境界の継目計とほぼ同一の位置へ埋設した。

ひずみ計の埋設内訳は、旧堤体下約2.3 mの深さの岩盤中に1本、旧堤体に14本、新堤体に10本であり、その埋設位置は新旧堤体とも堤高を5分割したほぼ同一標高とした。なお、旧堤体ないし岩盤中への埋設は嵩上げ開始10か月前で、コアボーリングして所定の位置を定めた。

(3) 実測温度

堤高を均等に分割した5つのレベルごとに、実測温度と計算温度を比較し、図-7に示した。実測は昭和52年夏から54年秋へ至る2年余である。示した測点は、新堤体が主であるが、それに近い旧堤体部分の温度も含まれている。次の2点を除いて、全体的に、実測値と解析値との一致性はよい。

図から、新コンクリートの打設初期に、実測値と計算値がかけ離れている場合が見受けられるのが第1点である。この理由としては、打設時間が10時間以上になる場合が多く、このような場合には、同じリフトであっても、打設前半と打設後半で、日射の影響、発熱開始後の時間など、温度条件が同一リフトでもかなり異なることが挙げられ

る。第2の相違点として、EL. 847 mの部分の新コンクリートの中央部分の温度が、初めて経験する冬期に、計算ではかなり急速に低下しているのに対して実測値はそれほど低下していないことが挙げられる。

この時点付近で打設を一時中止し、一冬を過ごしたのであるが、その間この表面部の熱伝達率を計算では直接外気に接するとして、10 kcal/(m²・h・°C)としているのに対し、実際にはシートをおくなどの防護処置を講じて熱伝達率がより小さくなっていることがその理由として考えられる。

上記の2点を除いて、これらの比較図から、計算値は実測値を初期段階から2年余り、いずれの点においても

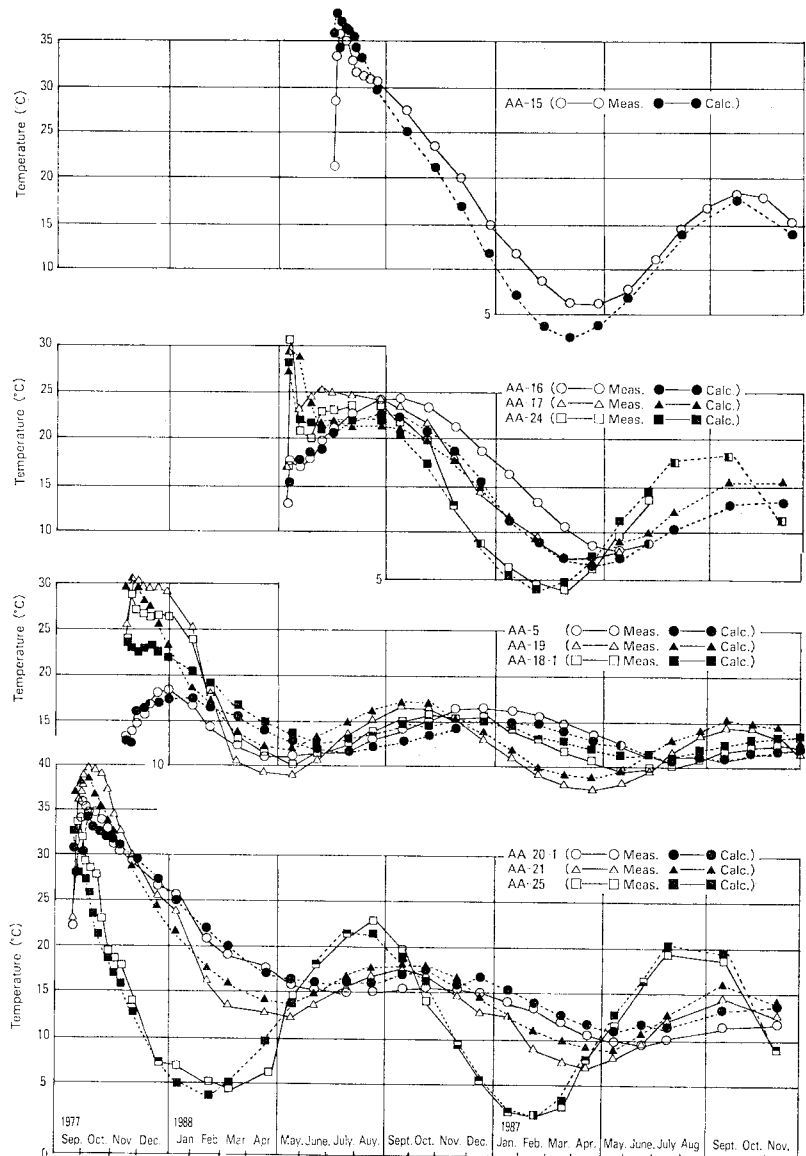


図-7 堤体各部の実測温度と計算値

非常によく追随していると判断されよう。

岩着部に近い EL. 837 m のレベルでは、ダムの上下方向寸法が長くなるために年周期の変動も 5°C 前後と少なく、緩やかに最終安定温度に向かいつつあることがわかる。また逆に、堤厚が小さい EL. 860 m のところでは、厚みの中心部でも、約 13°C の年変動を生じて、その変動中心が徐々に一定温度に向かいつつあることがわかる。

(4) 実測ひずみ

温度と同様に、実測ひずみと計算ひずみとの代表的比較図を各レベルごとに、図-8 に示した。測定期間はいずれも打設後2年ないし3年である。また、実測ひずみは、温度膨張あるいは収縮によるひずみ成分、クリープによるひずみ成分、応力によるひずみ成分の和としての全ひずみである。ひずみ計はカールソンタイプのひずみ計である。

全般的には、解析によって得た値は、実測ひずみをほ

ぼ正確に推定し得ているが、打設後2か月前後までの推定は、その後の推定に比べると精度が悪いのが特徴的である。それにもかかわらずこれらの比較から、実測と予測の一致が強調されてよいように考えられる。打設直後の一致性が大きく乱れるのは、EL. 847 m のところと、岩着部の EL. 827 m の一部でしかも新堤体側のみである。他のレベルにはそのような乱れはまったくない。

温度に関する実測と計算値についても、他の部位に比べて、この近傍の初期の不一致が大きい。これらから 847 m 近傍の打設中に、数値シミュレーションに合致しない何らかの変更が生じていたことが考えられることは先に指摘した。

各高さの断面ごとに考察すれば、最もダムの上下流方向の幅が狭くなる堤頂付近では、ダムの厚さが 15 m 程度存在しても、ダムの中心部まで温度変動・ひずみ変動の生じることが示されており、新旧コンクリートの一体性がこのような部位で最も嚴重な注意を受けなくてはならないことを示している。

また、各断面とも季節の変動を繰り返しながら、徐々に一定周期へ収斂しつつある様子がよくうかがえる。

このように、温度ならびにひずみに関して、実測値と解析値と一致性が実証されたが、応力に関しては、実測されていないために直接的検証が行えなかった。ひずみの計算値ほどの精度は望めないまでも、2.(2) で述べた手法による計算応力値もかなり信頼おけるものと考えられた。

図-9 に、解析によって得た最初の冬の等応力線を示したが、最も応力的にクリティカルな時点で、堤体上流面の最大引張応力が 9.5 kg/cm² であることが示されている。この応力値は、背面に熱負荷が存在しない場合にも発生し得る応力値とほぼ等しいことに注意されたい。

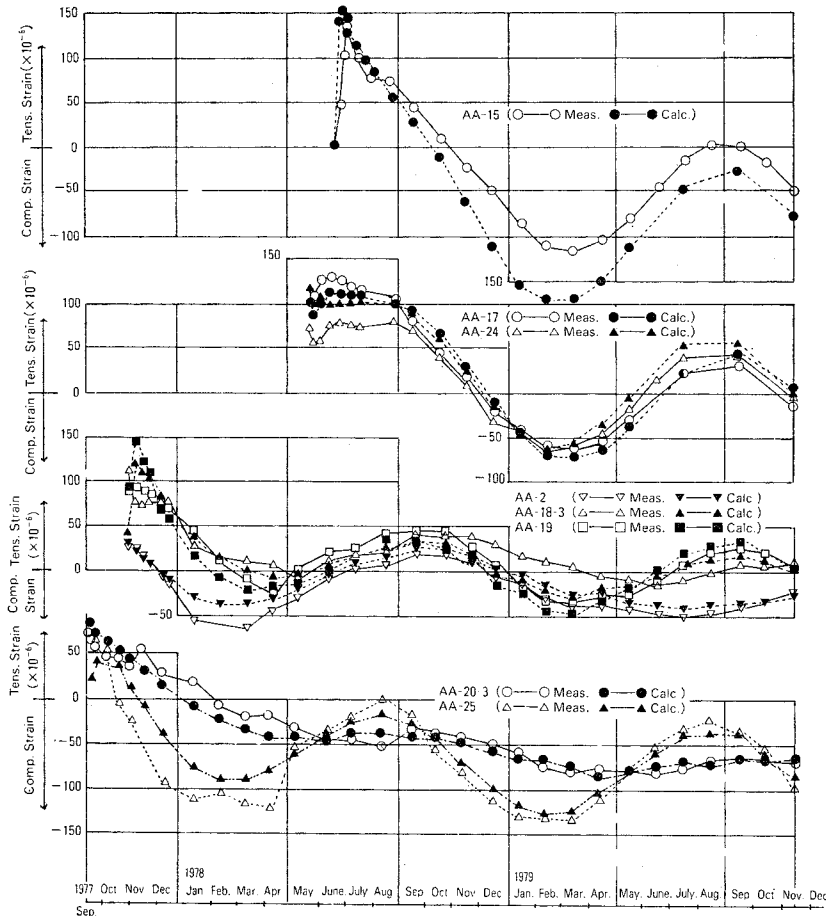


図-8 堤体各部の実測ひずみと計算値

(5) 打継面におけるずれの実測

新旧両堤体の打継面には、2ブロックについて、合計8個のせん断変位計と10個の継目計が埋設され、打継ぎ面の平行方向のずれ、直交方向の剝離を計測している。これらの計器はいずれも30cm程度の測長間の長さ変化を求めるものであるが計器自身の温度補正ならびにコンクリートの温度補正をせねばならず、最終的に得られた結果にはかなりの誤差が含まれるであろう。したがって、初期のコンクリートのヤング係数が変化する時期・温度が水和熱によって急上昇する時期のデータはあまり信用できないと思われる。しかし、長期的季節変動がみられるデータについては、十分に信頼性があるから、その点でダムの一様性を判断し得る。これら18個のデータについて、季節的変動が測定されたのは、わずか1点で、旧堤体上端の水平面においてである。この測定点における変動幅は、約0.8mm/年であった(図-10参照)。これらの結果から現状における新ダムの一様性を判断するならば、局所的な損傷があり得るが、全体としてはまったく一体化しているといえる。これは、全体が一体化しているとして求めた計算ひずみと実測ひずみとが、ダムのすべての箇所ではほぼ一致していることから推論し得る。

打継面に作用するせん断応力ならびに直角方向の応力を解析した結果、最も厳しい季節において、両応力ともに、数 kg/cm^2 で、この程度の応力であれば新旧コンクリートの打継面の強度をより大きく設計することが十分可能であり、黒田ダムの場合にもその条件が満たされたと判断し得る。

ダム嵩上げ時の温度応力解析をFEMによって行い、実際の嵩上げ工程も含む詳細なシミュレーション結果から嵩上げ工程等を決定し実施した。実測値が得られるまでは、この種の解析がどの程度までコンクリートの硬化遷移過程も含む温度応力発生現象を模擬し得るか、明らかではなかった。その後2年半の実測値を得たので、これをシミュレーション結果と対応させた結果、十分、その実用性を検証し得たと考えている。ただし、マスコンクリートの温度応力全般について上記手法が適用できると考えているわけではなく、より富配合のマスコンクリートで温度上昇が 20°C 以上にもなる場合には、初期硬化過程のコンクリートの物性、外部拘束の実態などは、本シミュレーションで考慮されなかった複雑な要因を含んでおり、今後の検討にまたなければならぬであろう。ダムのような極貧配合、低発熱率のコンクリートを使用し、表面処理を十分に行う場合には、リフト境界の一様性を仮定してもよさそうであり、かつ2次元平面応

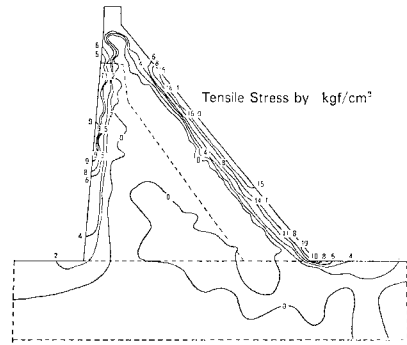


図-9 2月上旬における堤体の応力分布

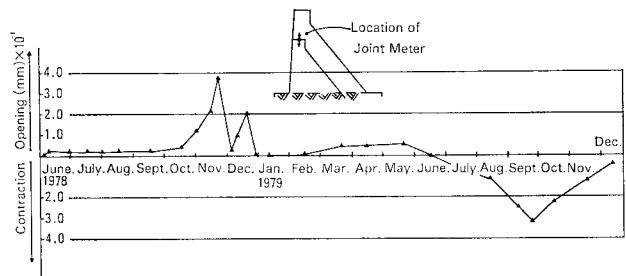


図-10 継目計による変位変化

力解析でよいようである。

4. 嵩上げダムにおける応力的限界状態

次に、一般的に、ダム嵩上げ時の温度応力問題の考察を述べる。この考察は、解析的検討に基づくものである。したがって、それが正しいとされるためには、各種の解析上の仮定の正しいことが検証される必要があるが、それは前に述べた実ダムにおける実測値と解析値との一貫性から十分であると判断する。

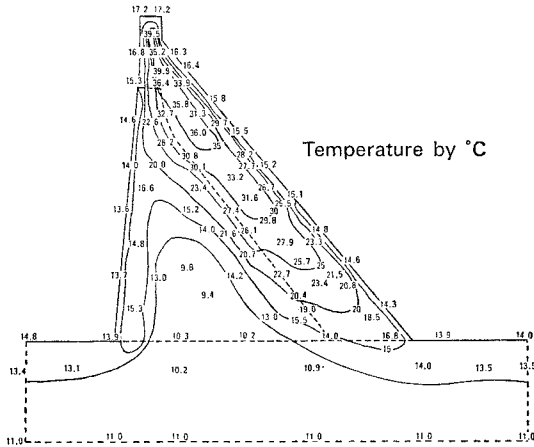
考察を行うためのモデルダムとして、前記の黒田ダムとまったく同じ、嵩上げの対象となりやすい中程度の高さ35mのダムを採用し、以下のように計算する。

ダム地点の外気温変化は1月下旬に -2.0°C の最低値、7月下旬に 24°C の最高値となるSine curveとする。幅10mの新堤体を打ち継ぐことにより、ダムの高さも10m高くなる。黒田ダムとまったく同じである。

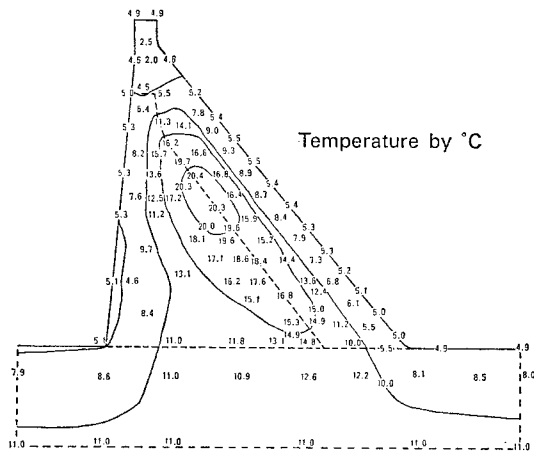
新堤体の打設スピードは、1週間に1リフト(1.5m)打ち上がるとし、工期は4月中旬から10月上旬までとする。コンクリートの発熱量としては、単位セメント量 $220\text{kg}/\text{m}^3$ に相当する $Q=16.07(1-e^{-0.3t-0.45t^2})\text{kcal}/\text{m}^3$ を使うことにする。

(1) 嵩上げダムの熱発生および放散過程

嵩上げに伴ってダムは、温度的に、いかなる変遷を経験するか、上記のシミュレーションによって追ってみる。



図—11 打設完了直後の温度分布



図—12 打設後半年後の温度分布

打設開始直前の堤体および岩盤の温度分布として、まず、図—3と同種のものが得られる。その結果によると、ダム外表面の温度分布は外気温にほぼ近く、堤体中心部では年平均気温に一致していること、また等温線は外表面にほぼ平行でダム形状に類似の曲線を描くことがわかる。

次に、嵩上げコンクリートを全部打設し終わった段階(10月中旬)での温度分布を 図—11 に示した。ちょうど熱の塊が、新堤体部分の中心にあるような温度分布をなしていることがわかる。

この熱塊は時間の経過につれて冷却されながら、徐々に新旧ダム堤体の中心部へ移動してゆく。図—12 に完成後半年経過した3月下旬時点の温度分布を示したが、その様子がよく示されている。この経過をたどりつつ、10数年後にはこの熱塊は消滅し去り、ついには外気温との熱平衡のみを満たす最終安定温度に達する。

(2) 嵩上げダムの応力の限界状態

上記の温度変動ならびに新コンクリートの剛性変動が、ダム堤体各部位の応力状態を変動させ、ある場合には、ひびわれ発生などの事故につながることになる。

嵩上げ途中のダムあるいは嵩上げされたダム堤体は、どの時点で、どの部位で温度応力的にクリティカルな状態にさらされるかの、応力の限界状態は、主として次の4つの部位で検討されなくてはならない。

- (i) 上流側旧堤体の表面
- (ii) 新リフト打設中の各外表面
- (iii) 完成した後の新堤体側表面
- (iv) 新旧両堤体の打ち継ぎ面

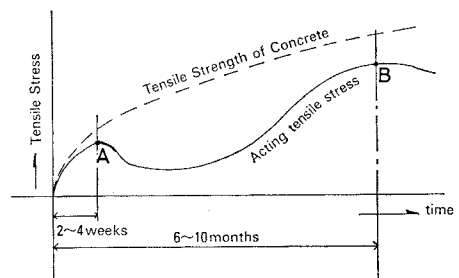
これらの部位が応力的に最大の作用を受ける時期は、各部位によって異なる。

しかし、いずれの場合にも 図—13 で示す模式図のごとく把握することが可能である。すなわち、打設後2~4週間の間に発生するピークA、これはコンクリートの水和熱の直接的な影響であり、短期的なものである。場合によっては上層のリフトの発生熱の影響を受けて近傍に山がもう一つ発生する場合もある。次の大きなピークは打設後数か月以上経て発生するB点で外表面であれば、この時期は冬期2月~3月頃に一致し、内部であれば夏期8月~9月頃に一致する。これは明らかに外部雰囲気温度による影響であるが、この値は内部熱塊との相対的温度差、温度勾配によって決定される。

(i)の上流側旧堤体表面は、新コンクリート打設中はほとんどその影響を受けず、新堤体完成後初めて迎える冬期ないし次年の冬期に最大引張応力を受ける。すなわちピークBによって決定される。

(ii)の新リフトについては、短期的要因が支配的で打設後1か月程度までが問題となる。通常のマスコンクリートひびわれ発生問題にほぼ等しい。すなわちピークAによって支配される。

(iii)の完成後の新堤体表面については、完成後3~4年にかけて最大引張応力が冬期に発生し、その後減少に転ずるものの、比較的高応力の状態がかなり長い間続く。すなわちピークBが打設後数年にわたって増大し続



図—13 限界応力の時間変化

けるのである。

(iv)の打継面では、A・B 両点ともクリティカルになり得るがB点の影響の方が大きいようである。

上記のようにダム嵩上時に、応力的に問題となる部位は主として4か所であるが、このうち(ii)の新リフトに関する短期的問題と(iii)の新堤体側の長期的問題は嵩上工事に特有なものではなく、通常の新ダムの施工時にも問題となる点であり、これらの考察は別の機会に譲る。したがって嵩上工事特有の問題として(i)の背面の熱負荷による旧堤体上流面の引張応力の程度について主たる考察を加える。なお、(iv)の打継面への作用力について一部考察する。

考察を進めるにあたって、先に述べた限界温度差に関してまず検討を行う。初期温度に関しては、嵩上げ打設完成後7日時点の温度分布を用いることが適切と考えられる。嵩上げコンクリート打設完了後7日経過後は、背面熱負荷が旧堤体上流面引張応力度に及ぼす直接的な影響は、零に近いことが解析の結果から得られているからである。

長期的な限界温度差としては、当然のことながら初期温度と最終安定温度との差がとられるべきであろう。

いずれの場合にも、最終安定温度は、外気温のみを熱荷重とする非定常熱伝導解析によって得ることができる。ダム表面部の温度は、季節によって変動し、モデルダムの場合には、気温変化による堤体内の温度変動が、表面から10mの深部にも及んでおり、限界温度差はこの表面部では、初期温度と冬期の最低温度との差がとられなければならない。

従来のダムの温度応力の算定の際には、王泊ダムの場合に限らず、最終安定温度として、年平均気温をとっているから、実は引張応力度を過小に算定しており、冬期にはより大きな引張応力が表面には作用する。以下の検討では、この点を考慮に入れて考察を行っている。また図14にモデルダムの上流面 EL. 845 m 領域への σ_{II} に対応する温度応力影響線を示しておく。

背面の熱負荷によって、旧堤体上流面に引張応力が発生するのであれば、背面の熱発生量を低減することによって上流面の引張応力も低減すると考えられるが、打設完了後1~2年の範囲では必ずしもそうではない。図15に単位セメント量 220 kg/m^3 を全嵩上げ部分に使用する場合(ケース a)、表面部と内部とで打ちわける場合(表面部 $C=220 \text{ kg/m}^3$ 、内部 $C=170 \text{ kg/m}^3$ 、ケース b)、セメント量の25%をフライアッシュで置き換える場合(ケース c)、の短期的限界温度差と長期的限界温度差とを示した。ここで、短期的限界温度差とは、嵩上げ打設完成後7日の時点から半年を経た2月時点までの温度差であり、長期的限界温度差とは、同初期温度と最終安定

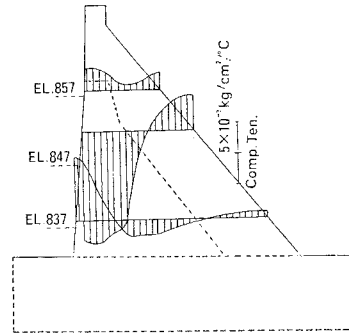
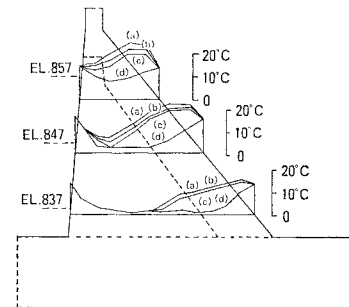
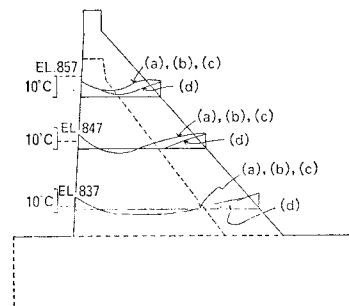


図14 温度応力影響線



(a) 長期限界温度差



(b) 短期限界温度差

図15

温度との温度差である。

図から、短期的限界温度差は、(a)、(b)、(c)間でまったく差がない。これは、単位セメント量を25%減じても、あるいはフライアッシュによる置き換えを行っても、1~2年の間に生じる上流面の温度応力は、ほとんど、元の場合と差がないことを示している。実際に非定常熱伝導・応力解析を行って、このことは確かめてある。

長期限界温度差には、各ケースで $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ の温度差があるので、これに対応する応力差が生じようが、最終安定温度に達するには、10年以上の期間を要し、このような長期になればクリープの影響によりその程度の応力差を減じてしまうことも考えられ、ダム嵩上げ時の上流側引張応力に関しては、単位セメント量の低減効果が

表-3 配合条件, 打設工程を変化させた計算ケース

種類	新堤体コンクリートの配合	新堤体打設工程	計算の初期条件
a	$C=220 \text{ kg/m}^3$	1 リフト 1.5m を 7日 サイクル 工期 4月10日～ 10月8日	堤体をすべて 11°C とし, 外気温を半年間 Sineカーブで変化させて求めた。
b	使用セメント量を外側 2.5m と内側で打ち分ける。 内側 $C=170 \text{ kg/m}^3$ 外側 $C=220 \text{ kg/m}^3$	aに同じ	aに同じ
c	内外コンクリートを打ち分けてフライアッシュを入れる。 $C=148, F=37 \text{ kg/m}^3, F/(C+F)=0.2$	aに同じ	aに同じ
d	$C=220 \text{ kg/m}^3$ 使用セメント量は a と同じ。	1 リフト 1.5m を 7日 サイクル 14リフトまで 4月10日～ 7月10日, その後冬期を越して翌年 4月3日～6月26日間に残り15リフト打設する。	aに同じ

大きくないことがわかる。

それらに比較して, ケース d に示してある施工工程の調整効果は大きい。ケース d は EL. 845 m のところで打設を中止し, 冬期の間に, 自然放熱によってそれまでの嵩上げ部分を冷却し, 翌春になって残りの嵩上げを完成させた場合であるが, 短期・長期限界温度差ともに大幅に減じているのがわかる。なお, 以上の温度差による応力成分は σ_{II} に相当するものであるが, 背面熱負荷による旧堤体上流面の σ_I 成分は, 本モデルダムの場合には零に近いことが数値シミュレーションの結果から判明している。

黒田ダムの場合には, このような工期を採用することにより, 旧堤体上流面に発生する応力を, 背面の熱塊の影響をほとんど受けないまでに減じ得た。

したがって, 嵩上工事の上流面引張応力の低減手法としては, 嵩上げ途中における熱の自然放散が最適であることが結論されよう。

なお新旧両堤体の一体性については, モデルダムのサイズでは, いずれのケースについても, 新旧堤体の接継面における最大せん断応力, 最大直方向応力は 10 kg/cm^2 以下で, 打ち継ぎ面の処理方法さえ注意すれば, 一体化は, それほど困難ではないことが示されている。

5. 嵩上げ工事における温度応力検討手法の提案

嵩上げ工事における最大の問題点は, 上流側旧堤体表面部の引張応力の低減と, 新旧打ち継ぎ面の一体性の確保である。中でも旧堤体上流面のひびわれ防止が, 最大の技術的要点として挙げられる。上記引張応力に影響を及ぼす要因として, 新コンクリートの配合, 打設工程,

クーリングの有無などがある。旧堤体上流面の引張応力の算定に際して, これらのさまざまな影響を, 条件の異なる個々のダムについて, 比較的容易に検討し得るように, 以下の方法を提案する(図-16 参照)。

(1) まず, 有限要素法による分割要素ごとに, 単位温度変化を与えて, 各部

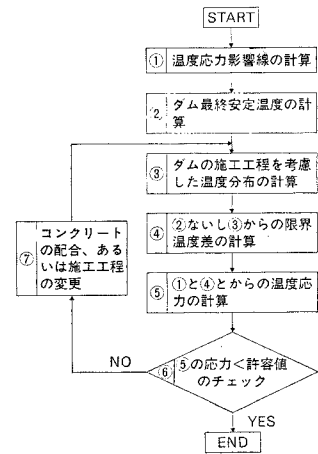


図-16 温度応力計算のフロー図

位の温度応力影響線を算出する。

(2) 嵩上完成断面に対して, 外部気温のみの変動を考えて, 1年分の非定常熱伝導計算を行う。すなわち, 最終安定温度を算出する。

(3) 嵩上工程を考慮に入れた非定常熱伝導計算を行う。この場合, 求める計算精度に応じて, 嵩上工程のステップ数を, 増減する。

(4) (2)と(3)との温度差から, 限界温度差を算出する。ただし, 初期温度として嵩上げ打設完了後7日時点の温度分布をとる。

(5) (1)と(4)との積から, 考慮している部位の温度応力を計算する。

(6) もし, (5)で得た温度応力が, 許容値よりも大きい場合には, (1)の影響線の大きな部位の温度を下げる工夫をする。それは打設工程の変更であったり, 局部的クーリングであったりする。

(7) (3)~(6)を繰り返して, 応力が許容値内に収まったところで終了する。

提案した手法によれば, 非定常熱伝導計算は何度か行う必要があるが, 応力解析はほとんど行わなくてよい。剛性を変化させる逐次応力解析は, 膨大な計算時間を要するので, その部分を省いたのである。熱伝導解析は, それに比べれば自由度が半減するのでわずかな時間で済む。

先に述べた黒田ダムの場合にも上記手法が使用されたのであって, 旧堤体上流鉛直方向に発生する応力が, 単位セメント量を低減しても, フライアッシュで置き換えても, ほとんど変化せず, 嵩上げ完了後の冬期には, 14 kg/cm^2 の引張応力が発生するのが認められた。この応力は旧堤体圧縮強度 180 kg/cm^2 に比べるとかなり大きな値で, これを低減せねばならなかったが, 温度応力が, 単位セメント量の低減に伴って低減しない根拠が不

明であったための確な方針を立て得なかった。しかし、その後、この理由が、前節で述べたように判明した。また、それでは、いかにして引張応力を低減するかとの問題になったとき、影響線を見て、その影響の大なるところの限界温度差を減ずればよいということから、一冬そのレベルのところでもコンクリート打設を中止し自然冷却するという発想が生まれた。このように試行錯誤の段階で、各種の案を検討するとき、上記の手法が有効であった。

6. 結 論

既設コンクリート重力式ダムの一形式嵩上げ工事の最大の問題点である水和による温度応力について、事前に解析的検討を加え実ダムに適用した。工事中工事後を含めて2年余の実測値と解析値とを比較検討した結果、ダムの実挙動について理論的予測が十分可能であることが判明した。これは嵩上げダムに限らず一般の新規ダムの場合にもあてはまることである。

上記のように実証された詳細な逐次シミュレーションに基づき、温度応力検討のための比較的簡単な手法を提案した。

これは限界温度差を求めること、温度応力影響線を求めることから成り立っており、一度この種の要因が明らかになれば、設計施工上の各種要因の選択が比較的容易

に行えるものである。

長年にわたる解析実測の結果から本報告をまとめるにあたって、中部電力奥矢作水力建設所の方々から甚大なご援助を賜りました。ここに厚く感謝申し上げます。また電力中央研究所構造部の江頭栄子氏からも、計算の実施、結果の整理にあたって多くのご援助をいただき、ここにお礼の言葉を述べさせていただきます。

参 考 文 献

- 1) 近藤正雄：大会課題第20 関係論文に関する報告（ダム嵩上げ関係），大ダム，No. 9, 1959 年.
- 2) 中国電力：王泊ダム嵩上げ計画報告書，1956 年8月.
- 3) 阪口義明・丹羽義次・森 忠次・諏訪正男：桜山ダム嵩上げ工事の検討（その1），発電水力，No. 54, 1961年9月.
- 4) 阪口義明・丹羽義次・森 忠次・諏訪正男：桜山ダム嵩上げ工事の検討（その2），発電水力，No.55, 1961年11月.
- 5) 中部電力：奥矢作揚水発電所建設計画の概要，1974 年1月.
- 6) 阿部博俊・青柳征夫・田辺忠顕：プレストレストコンクリート圧力容器の高温クリープ性状とクリープ解析について，コンクリートジャーナル，No. 6, 1974 年6月.
- 7) 吉田弥智：中部電力黒田ダム堤体コンクリート試験報告書，名古屋工業大学土木工学科コンクリート研究室，1973 年12月.
- 8) 原口 晃・田辺忠顕・河角 誠・岡沢孝雄：黒田ダム嵩上げ工事におけるコンクリート打設計画の検討（その1）—コンクリートの力学的，熱的性質の実験検討，電力中央研究所土木技術研究所報告，No. 375561, 1976 年3月.

(1982.2.8・受付)