

日射熱による大型土木構造物の温度解析に関する研究

Study on Thermal Analysis of Large Scale Structures due to Solar Radiation Heat

粥川幸司* 二羽淳一郎** 田辺忠顕***

By Koji KAYUKAWA, Junichiro NIWA and Tada-aki TANABE

In this paper, thermal analysis of large scale structures caused by solar radiation heat was carried out.

The heat input due to the solar energy has been formulated for any point of a structure at any location on the earth and at any time point of a year considering the shading effects of surrounding other structures.

The shape function for the interpolation of thermal distribution in the direction of the thickness has been improved considering the analytical solution of the one-dimensional heat transfer. The computer program using this shape function can predict measured temperatures of a large scale structure fairly well regardless of considerably rough discretization.

1. まえがき

近年、コンクリート構造物には、大型、小型を問わず、アルカリ骨材反応、塩害などの様々な劣化損傷例が報告されており、健全性診断方法の開発が望まれている。従来から行われてきた健全性診断方法のいくつかは、適当な荷重を人工的に作用させるというものであり、簡便な診断方法とは到底なり得なかった。これに対して日射熱を外荷重とし、その熱変形をレーザー光線によって測定し、解析値との比較から、健全性診断に役立せようとする試みがなされている¹⁾。

対象構造物に与えられる日射熱は、構造物の位置、時刻、その他、空気層を透過してくる太陽光線の大気透過率、対象構造物に生ずると思われる山や他の構造物の陰などによって大きく変化するものである。そこで対象構造物に日射熱を外荷重として与える場合には、構造物に及ぼされるこれらの影響を考慮しなければならない。本研究では、これらを踏まえ、日射量を求めるための定式化、およびプログラム作成を行った。

さらに、熱変形量を正確に予測するためには、構造物に発生する温度を正しく評価することが前提となる。本研究では大型土木構造物をかなり粗い要素分割により温度解析するための手法を提案した。そして、実構造物をモデルとして日射熱を外荷重とした温度解析を行い、その解析結果を実測値と比較、検証した。

* 名古屋大学大学院 工学研究科地盤工学専攻 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

** 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

*** 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

なお、本研究は、名古屋工業大学との共同研究によるものである。

2. 日射量算定理論

日射量の算出に際しては、まず、任意地点、任意時刻における太陽方向ベクトルが必要となる。地球の公転軌道を完全円と仮定して、図-1のように地球上の絶対座標系を $\{K^*\}$ 、観測地点における直交座標系を $\{N^*\}$ とすると、これらの関係は次式により表される²⁾。

$$\{K^*\} = \{k_1^* \ k_2^* \ k_3^*\}^T = [\eta] \{N^*\} \quad (1)$$

座標変換マトリクス $[\eta]$ については文献²⁾を参照

これにより太陽方向ベクトル $\{k_2^*\}$ を定める。

ところで、対象とする構造物と太陽の間に何も存在しないときは、構造物は直接日射を受けるので式(3)より得られる日射量をそのまま構造物への入力熱として用いればよい。しかし、多くの場合、周辺の構造物や山々などにより直接の日射は遮られる。そこで図-2のように、対象とする構造物表面上に四角形要素PQRS、障害物面として三角形ABCを考える。式(1)より求められる太陽方向ベクトルを用いて□PQRSの重心Gを通る太陽方向直線と△ABCのつくる障害物面との交点をTとした時、□PQRSと△ABCの位置関係を式(2)より求める。

$$\begin{aligned} (AB \times AT) / |AB \times AT| &= e_1 \\ (BC \times BT) / |BC \times BT| &= e_2 \\ (CA \times CT) / |CA \times CT| &= e_3 \end{aligned} \quad (2)$$

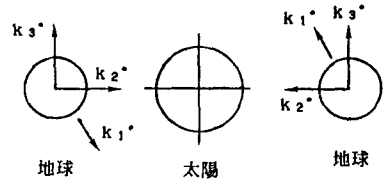
式(2)において、単位ベクトル e_1, e_2, e_3 が同一ベクトルであるならば、□PQRSは△ABCによって陰になっていると考えることとした。

構造物要素すべてについて上述の比較を行えば式(3)より任意時刻における構造物に入力される日射熱を計算することができる。

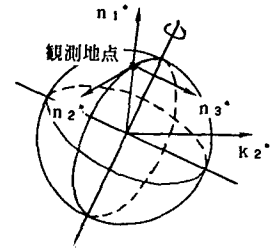
日射量計算では、直達日射量P、拡散日射量Qを用い、その和をとって理論日射量Rとした²⁾。なお、日射量は天気や大気の状態などによって、太陽輻射強度、大気透過率をパラメータとして変動するが、ここでは日射量が最大となる晴天状態を想定した。

$$\begin{aligned} P &= I_0 p^{(1/\sin H)} \cdot \{N\}^T \cdot \{k_2^*\} \cdot S \\ Q &= I_{SH} \\ R &= P + Q \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $I_0 = 1164.0 (\text{kcal}/\text{m}^2/\text{hr})$: 太陽輻射強度

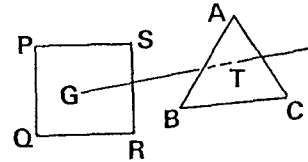


(a) 地球上の絶対座標系 $\{K^*\}$

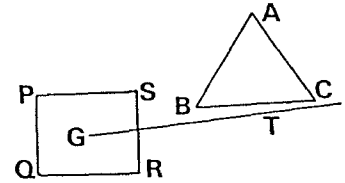


(b) 観測地点の直交座標系 $\{N^*\}$

図-1 $\{K^*\}$ 、 $\{N^*\}$ の定義



(a) 日射を遮る場合



(b) 日射を遮らない場合

図-2 構造物要素と障害物要素の関係

$$I_{SH} = I_0 \cdot \sin H \cdot (1 - p^{(1/\sin H)}) / 2(1 - 1.4 \log_e p) \quad : \text{拡散日射量}$$

p : 大気透過率

$\{N\}$: 構造物要素外向き法線ベクトル

$\sin H$: 太陽高度

$\{k_s^*\}$: 観測地点における太陽方向ベクトル

S : 構造物表面積

3. 数値解析モデルと日射量計算

(1) 数値解析モデル

数値解析モデルとして、図-3に示すような、堤頂長323m、堤高100mのコンクリートアーチ式ダムを選定した。またダムへの日射を遮る障害物として、図-4に示すようなダム周辺の山々を想定した。すなわち、図-2に対応させて、ダム表面を四角形分割し、また、障害物面は図-4の太線で示した山々の尾根線を一辺とする鉛直面を考えそれを三角形とした。なお、以後の解析には、ダム湖方向x、ダム右岸方向y、鉛直上方zとする直交座標系を用いた。

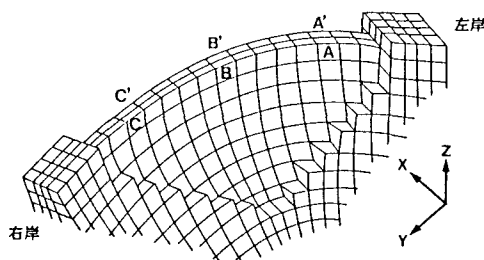


図-3 アーチ式ダム概略図

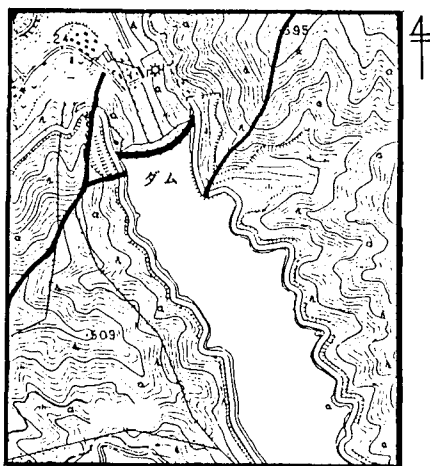


図-4 ダム周辺地形

(2) 日射量計算結果

図-5に(a)上流面側(南側)(b)下流面側(北側)のダム要素に入る日射量計算結果を示す。ここでは図-3に対応して下流面側の左岸部要素、中央部要素、右岸部要素をそれぞれA、B、C、上流面側のそれぞれに対応する要素をA'、B'、C'、として示した。(a)上流面側では、朝方、右岸部の山々がダムに陰をつくるので、右岸部要素C'に入る日射量は中央部要素B'、左岸部要素A'と比較して拡散日射のみとなっている。また、日中から午後にかけて日射量低下が見られるのは、それがダム本体の影になるためである。左岸部要素A'では午前中は中央部要素B'と同様の日射量増加が見られるが、午後2時頃からは左岸部の山の陰になるので日射量が低下する。

一方、(b)下流面側では、ほぼ全面に一日中直達日射は見られず拡散日射のみであるが、午後3時頃左岸部の山越しに直達日射を受けるので日射量増加が見られる。

このようにして得られた日射量を用いて温度解析を行った。なお、上流面側の水面下は日射量を0とした。

4. 温度計算手法

(1) 概説

有限要素法による大型土木構造物の三次元温度解析では、8 節点アイソパラメトリック 6 面体要素が用いられることが多いが、今回対象としたコンクリートアーチ式ダムは、ダム厚さ方向 (x 方向) が他の 2 方向に比べて非常に薄くなっている。その結果、厚さ方向に三層に分割し、節点数 4、要素数 3 とした分割では、図-6 (a) に示すように、表面温度の上昇、下降にともなって逆に内部節点の温度が下降、上昇するという傾向が見られた。これはダム厚さ方向が主たる熱の入力方向となっており、要素数が 3 と少ないために生じたものと思われる。

そこで、厚さ方向については、式(4)に示す一次元熱伝導方程式の厳密解を形状関数として選り有限要素解析を行うこととした。その結果、図-6 (b) に示すようにダム堤体内の温度分布はほぼ一様となり、堤体表面付近のみ日射熱、外気温によって温度変化するという結果が得られた。以下にその手法の概要を示す。

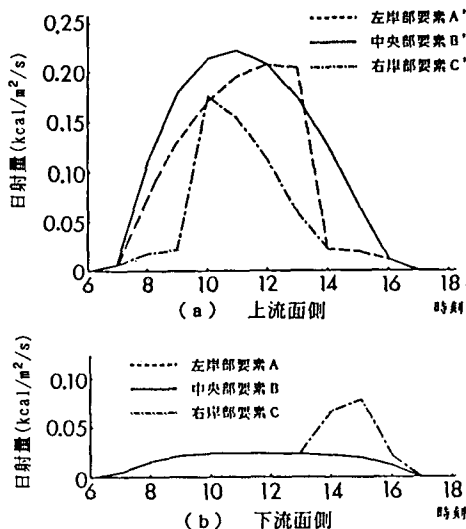


図-5 構造物要素に入る日射量分布

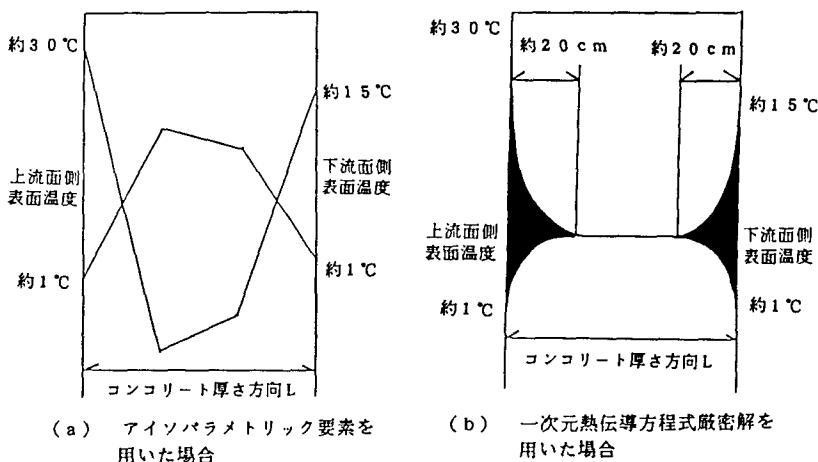


図-6 ダム堤体内温度分布

(2) 一次元熱伝導方程式の解の導入³⁾

一次元熱伝導方程式を次式に示す。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \kappa^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad (\kappa^2 = \frac{K_x}{\rho C} : \text{熱拡散率}) \quad (4)$$

$$\text{初期条件} \quad \phi(x, 0) = g(x) \quad (0 \leq x \leq L) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{境界条件} \quad \phi(0, t) &= \phi_1 \quad (t \geq 0) \\ \phi(L, t) &= \phi_2 \quad (t \geq 0) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 ϕ : 温度 K_x : 熱伝導率 L : 要素の x 方向長さ ρ : 密度 C : 比熱

式(5)、(6)に示す条件のもとで、式(4)を解いてつぎの厳密解を得る。

$$\phi(x, t) = \phi_1 F(x) + \phi_2 G(x) + H(x) \quad (7)$$

$$\text{ここで、} F(x) = 1 - \frac{x}{L} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(-\frac{2}{n\pi}\right) T_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2}x\right) \quad (8)$$

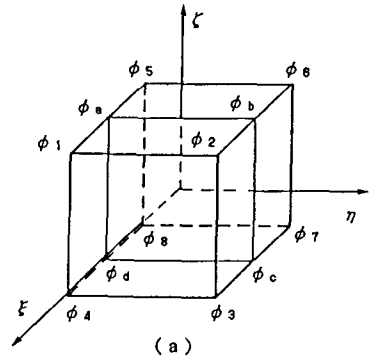
$$G(x) = \frac{x}{L} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{n\pi}\right) (-1)^n T_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2}x\right) \quad (9)$$

$$H(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2g(x)}{n\pi}\right) \{1 - (-1)^n\} T_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2}x\right) \quad (10)$$

$$T_n = \exp\left(-\frac{\kappa^2 n^2 \pi^2}{L^2} t\right) \quad (11)$$

次に、要素内での温度 ϕ を求めるために、図-7 (a)に示すような自然座標系 (ξ, η, ζ) を用いてダム厚さ方向に相当する ξ 方向に式(7)を用いる。すなわち、節点温度 $\phi_1 \sim \phi_8$ を用いて、 ξ 方向にあたる要素辺上の温度 $\phi_a \sim \phi_d$ は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \phi_a &= \phi_5 F(\xi) + \phi_1 G(\xi) + H_1(\xi) \\ \phi_b &= \phi_6 F(\xi) + \phi_2 G(\xi) + H_2(\xi) \\ \phi_c &= \phi_7 F(\xi) + \phi_3 G(\xi) + H_3(\xi) \\ \phi_d &= \phi_8 F(\xi) + \phi_4 G(\xi) + H_4(\xi) \end{aligned} \quad (12)$$



ここで $F(\xi), G(\xi), H(\xi)$ はそれぞれ式(8)、(9)、(10)で x を ξ に変換したものであり、 $H_1(\xi) \sim H_4(\xi)$ はそれぞれの辺上の初期条件を考慮したものである。これをマトリクス表示して次式を得る。

$$\begin{aligned} \{\phi_a \ \phi_b \ \phi_c \ \phi_d\}^T &= \{H_1(\xi) \ H_2(\xi) \ H_3(\xi) \ H_4(\xi)\}^T \\ &+ \begin{bmatrix} \phi_5 & \phi_6 & \phi_7 & \phi_8 \\ \phi_1 & \phi_2 & \phi_3 & \phi_4 \end{bmatrix}^T \begin{Bmatrix} F(\xi) \\ G(\xi) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

そして、 $\eta-\zeta$ 平面内においては、図-7 (b)のように二次元アイソパラメトリック要素の形状関数 $[M]$ を用いて、要素内温度 ϕ を内挿することとした。

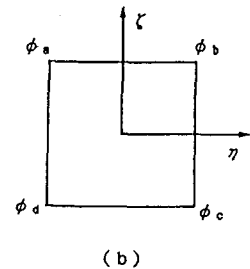


図-7 節点温度、および辺上温度の定義

$$\begin{aligned} \phi &= [M]\{\phi_a \ \phi_b \ \phi_c \ \phi_d\}^T \\ &= [M]\{H_1(\xi) \ H_2(\xi) \ H_3(\xi) \ H_4(\xi)\}^T + [M] \begin{bmatrix} \phi_5 & \phi_6 & \phi_7 & \phi_8 \\ \phi_1 & \phi_2 & \phi_3 & \phi_4 \end{bmatrix}^T \begin{Bmatrix} F(\xi) \\ G(\xi) \end{Bmatrix} \\ &= [N]\{\phi\} + [M]\{H\} \end{aligned} \quad (14)$$

(3) 温度解析手法⁵⁾

三次元非定常熱伝導問題の汎関数 χ は次式で表される。

$$\chi = \int_V \left[\frac{1}{2} \left\{ K_x \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right\} + \rho C \frac{\partial \phi}{\partial t} \phi \right] dV + \int_S q \phi dS + \frac{1}{2} \int_S \alpha (\phi - \phi_0)^2 dS \quad (15)$$

ここで、 ϕ : 温度($^{\circ}\text{C}$)

K_x, K_y, K_z : x、y、z 方向の熱伝導率($\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{sec} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

C : 比熱($\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

ρ : 密度(kg/m^3)

q : 日射量($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$)

α : 対流境界面の熱伝達率($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

ϕ_0 : 外気温($^{\circ}\text{C}$)

t : 時間(sec)

この汎関数 χ に式(14)の温度 ϕ を代入し、 χ を節点温度 $\{\phi\}$ によって最小化する。最小化を行うに当たって式(14)より $\{g\}$ を求める。

$$\{g\} = \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} \right]^T = [B]\{\phi\} + [DM]\{H\} + [DH]^T[M]^T \quad (16)$$

ただし、

$$[B] = \left[\frac{\partial N_j}{\partial x} \quad \frac{\partial N_j}{\partial y} \quad \frac{\partial N_j}{\partial z} \right]^T \quad (j = 1 \sim 8) \quad (17)$$

$$[DM] = \left[\frac{\partial M_j}{\partial x} \quad \frac{\partial M_j}{\partial y} \quad \frac{\partial M_j}{\partial z} \right]^T \quad (j = 1 \sim 4) \quad (18)$$

$$[DH] = \left[\frac{\partial H_j}{\partial x} \quad \frac{\partial H_j}{\partial y} \quad \frac{\partial H_j}{\partial z} \right]^T \quad (j = 1 \sim 4) \quad (19)$$

式(16)を用いて式(15)を次式のように書き換える。

$$\begin{aligned} \chi &= \int_V \frac{1}{2} \{g\}^T [D] \{g\} dV + \int_V \rho C \frac{\partial \phi}{\partial t} \phi dV + \int_S q \phi dS + \int_S \frac{1}{2} \alpha (\phi^2 - 2\phi\phi_0 + \phi_0^2) dS \\ &= \int_V \frac{1}{2} [\{\phi\}^T [B]^T + \{H\}^T [DM]^T + [M] [DH]] \cdot [D] \cdot [[B]\{\phi\} + [DM]\{H\} + [DH]^T[M]^T] dV \\ &\quad + \int_V \rho C \frac{\partial \phi}{\partial t} [N]\{\phi\} dV + \int_V \rho C \frac{\partial \phi}{\partial t} [M]\{H\} dV + \int_S q [N]\{\phi\} dS + \int_S q [M]\{H\} dS \\ &\quad + \int_S \frac{1}{2} \alpha [[N]\{\phi\} + [M]\{H\}]^2 dS - \int_S \alpha \phi_0 [[N]\{\phi\} + [M]\{H\}] dS + \int_S \frac{1}{2} \alpha \phi_0^2 dS \end{aligned} \quad (20)$$

ただし、

$$[D] = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \quad (21)$$

式(20)を各要素微分して、任意の節点温度に関して次式を得る。

$$\frac{\partial \chi}{\partial \{\phi\}} = [\tilde{P}]^e \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} + [\tilde{H}]^e \{\phi\} + \{\tilde{F}\}^e = 0 \quad (22)$$

ここで、

$$[\tilde{P}]^e = \int_V \rho C [N]^T [N] dV : \text{熱容量マトリクス} \quad (23)$$

$$[\tilde{H}]^e = \int_V [B]^T [D] [B] dV + \int_S \alpha [N]^T [N] dS : \text{熱伝導マトリクス} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \{\tilde{F}\}^e = & \int_S q [N]^T [N] dS - \int_S \alpha \phi_0 [N]^T dS + \int_V [B]^T [D] [DH]^T [M]^T dV + \int_V [B]^T [D] [DM] \{H\} dV \\ & + \int_S \alpha [N]^T [M] \{H\} dS : \text{荷重ベクトル} \end{aligned} \quad (25)$$

式(22)を系全体に重ね合わせると最終的な有限要素方程式は次式のようにになる。

$$[\tilde{P}]\left\{\frac{\partial \phi}{\partial t}\right\} + [\tilde{H}]\{\phi\} + \{\tilde{F}\} = 0 \quad (26)$$

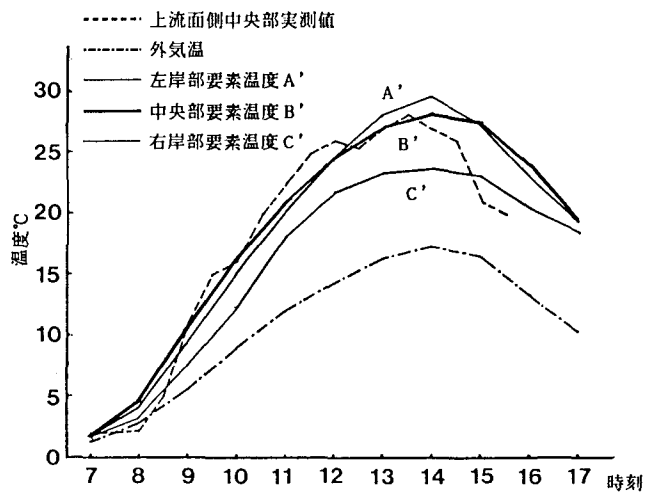
5. 温度計算結果

日射量、外気温を熱荷重として、4節までに示した手法を用いてダム全体について温度解析をした結果を図-7に示す。

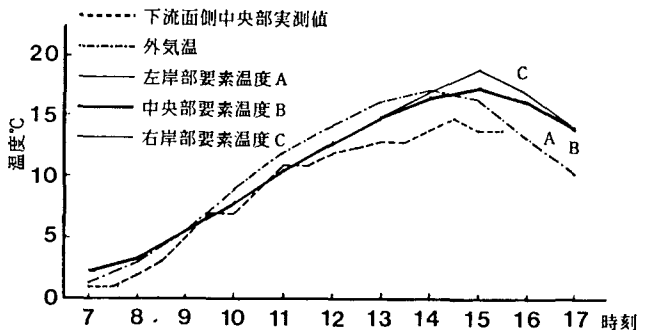
図-7(a)、(b)は、図-3に対応して、ダム下流面側、上流面側天頂部のそれぞれ左岸部要素A、A'、中央部要素B、B'、右岸部要素C、C'の表面温度であり、中央部における実測値、入力した外気温も合わせて示した。なお、解析に用いたコンクリート、および岩盤の物理特性値を表-1に示す。

日射を受けるダムの上流面側中央部要素B'では、解析値は時間的に実測値をよく追従しており、ピーク時の温度もほぼ一致している。また、中央部要素B'、左岸部要素A'に比べて右岸部要素C'が時間的に遅れて温度上昇を見せている。これは、前述したように朝方は右岸側の山々がダムに陰を落とすためである。下流面側については、ほぼ一日中日射を受けないのでほぼ全面が外気温に沿った温度上昇を見せている。しかし、図-5(b)で示したように右岸部要素については、午後に左岸部の山越しに直達日射が存在するので若干の温度上昇がみられる。

全体として、解析値は実測値をほぼ追従していると思われるが、今回は、晴天、無風の理想的な状態を想定しており、実際の



(a) 上流面側表面温度



(b) 下流面側表面温度

図-8 温度解析結果

気象条件等を考慮していない。表面温度は日射、外気温だけでなくそのほかの要因に対しても敏感に反応すると思われる。これらは、より実際に即した温度解析をおこなうための今後の課題である。

6. 結論

大型土木構造物の健全性判定のための前提として、日射による構造物の温度解析を行った。解析の結果、日射熱、および外気温を熱荷重として実構造物に入力したとしても、実構造物に生じる陰影の状態によって構造物中にはかなりの温度差がみられた。

また、今回はダム厚さ方向について一次元熱伝導方程式の厳密解を用いたが、これによってより少ない要素数で表面温度だけでなく堤体内の温度分布まで含めた構造物全体としての温度をある程度まで推定することができたと思われる。

今後は、温度解析上の諸問題を十分検討すると共に、温度応力解析を行って熱変形を算出し、実測値と比較して健全性評価のための基礎資料を集積していきたいと考えている。

表-1 コンクリート、岩盤の物理特性値

種 類	コンクリート	岩 盤
熱伝導率 (kcal/m・sec・°c)	0.000611	0.000538
熱伝達率(kcal/m ² ・sec・°c)	0.002778	0.002778
比 熱 (kcal/g・°c)	0.28	0.25
密 度 (t/m ³)	2.35	2.60
輻射吸収率 ⁴⁾	0.46	——

参考文献

1) 吉田弥智他：光素子センサーを用いた大型土木構造物の管理システムに関する研究、昭和60年度科学研究費補助金研究成果報告書、58850101、1986。
2) 田辺忠顕、遠藤孝夫、原口晃、山川秀次：日射を受ける伊方原子力発電所2号炉外部遮蔽壁の熱応力解析、電力中央研究所報告、379039、1982。
3) 小平吉男：物理数学第二巻、文献社、1933。
4) J.P.Holman (平田賢訳)：伝熱工学、ブレイン図書、1982。
5) Larry J.Segerlind (川井忠彦監訳)：応用有限要素解析、丸善、1978。

(1989年10月2日受付)