

論文

[1074] 大型土木構造物に対する日射熱入力、熱変形に関する研究

正会員○粥川 幸司 (名古屋大学大学院)

正会員 田辺 忠顕 (名古屋大学工学部)

1. はじめに

近年、コンクリート構造物では、大型、小型を問わず、アルカリ骨剤反応、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。従来からこの種の診断方法は、適当な荷重を人工的に作用させる必要があり、簡便な診断方法とは、到底なり得ない。そこで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、健全性診断に役立たせようとする試みがなされている。

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わるものである。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にいれなければならない。

本研究ではこれらの影響を踏まえた日射量を求めるための定式化、及びプログラム作成を行った。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応力解析を行い、その変位量を実測値と比較、検証した。

2. 日射量の算定理論

(1) 太陽方向ベクトル

日射量の算出にあたっては、観測地点における適当な座標系を設定し、これを用いて、時間をパラメータに持った太陽方向ベクトルを求めなければならない。まず、地球の公転軌道を完全円と仮定し、太陽、地球における各座標系を

図-1 のようにとる。また、観測地点Oにおける直交座標系として地球中心O' とOを結ぶ方向に n_1^* 、Oから真南に n_2^* 、 n_1^* と n_2^* の外積を n_3^* に取る。{N*} と {K*} の間には次の関係が成り立つ。

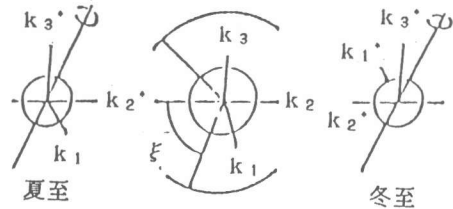


図-1 {k}, {k*} ベクトルの定義

$$\begin{Bmatrix} k_1^* \\ k_2^* \\ k_3^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \xi & \sin \xi & 0 \\ -\sin \xi & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} n_1^* \\ n_2^* \\ n_3^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{11} & \eta_{12} & \eta_{13} \\ \eta_{21} & \eta_{22} & \eta_{23} \\ \eta_{31} & \eta_{32} & \eta_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_1^* \\ n_2^* \\ n_3^* \end{Bmatrix} \quad (1)$$

[η] マトリクスの内容については文献1)を引用した。

1月1日からかぞえた日数を a ($1 \leq a \leq 365$)、時を b ($0 \leq b \leq 23$)、分を c ($0 \leq c \leq 59$)とすれば、1月1日より a 日目 b 時 c 分までの総分数 d ($0 \leq d \leq 525600$)、地球回転角 ξ 、及び、1日の時角 θ は次式より求められる。

$$d = 1440(a - 1) + 60b + c \quad (2)$$

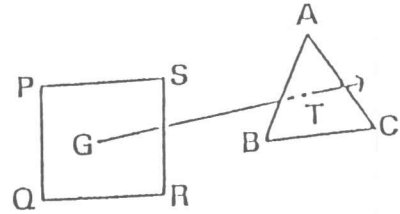
$$\xi = 2\pi(d - 248400) / 525600 \quad (3)$$

$$\theta = -\pi / 2 + \pi(60b + c) / 720 + \pi(d - 248400) / 263520 \quad (4)$$

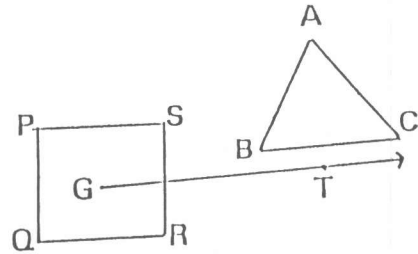
(2) 対象構造物と日射を遮る障害物の関係

構造物と太陽の間に何も存在しないとき、構造物は直接太陽日射を受けるので(7)式を用いて得られる日射量をそのまま構造物への熱入力として温度応力解析を行えばよい。しかし多くの場合、他の構造物や山などの障害物によって直接の日射は遮られ、また、このことは時間と共に変化する。そのために以下の手法を用いて陰の計算を行った。

図-2に示すように構造物表面上に四角形要素PQRS、構造物から見て日射を遮るような障害物面を想定し、その面上に3点を取り△ABCをつくる。座標計算を行うため南、東、鉛直上方をそれぞれx, y, z軸とする直交座標系を想定する。先に求めた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が障害物面と交わる点をTとする。



(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

$$(AB \times AT) / |AB \times AT| = e_1 = (e_{11}, e_{12}, e_{13})$$

$$(BC \times BT) / |BC \times BT| = e_2 = (e_{21}, e_{22}, e_{23}) \quad (5)$$

$$(CA \times CT) / |CA \times CT| = e_3 = (e_{31}, e_{32}, e_{33})$$

$$(e_{11} = e_{21} = e_{31}) \cap (e_{12} = e_{22} = e_{32}) \cap (e_{13} = e_{23} = e_{33}) \quad (6)$$

(5)式で見ると、△ABCの各辺と、各頂点とTを結ぶ線分をベクトル化し、それらの外積をとり単位ベクトル e_1, e_2, e_3 をつくる。(6)式が成立するとき、すなわち、 e_1, e_2, e_3 が同一ベクトルであるならば、Tは△ABCの内部に存在することになり、この時、□PQRSは△ABCによって日射を遮られることになる。

ひとつの構造物平面要素に対して障害物要素すべてについて上述の作業を行えば、その構造物要素が陰であるか否かを判断することができ、これを構造物要素すべてについて行えば構造物全体として日射のあたる領域と陰になる領域を知ることができる。そして、陰影の状態を知って(7)式を用いれば構造物に入射される全日射量を計算することができる。

(3) 日射量の算出

ここでは、直達日射量P、拡散日射量Qを用い、それらの和をとって理論日射量Rとした。また、大気透過率については実際には一日のうちで午前と午後とでその値が異なるが、今回はこれを1日中一定とした。

$$P = I_0 p^{(1/\sinh)} \cdot N \cdot k_2 \cdot (\text{表面積})$$

$$Q = I_{SH}$$

$$R = P + Q$$

(7)

ここに、 $I_0 = 1164.0 (\text{kcal/m}^2/\text{hr})$: 太陽輻射強度 p : 大気透過率

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

N : 構造物要素平面外向き法線ベクトル

$\sinh = k_2 \cdot n_1$: 太陽高度

3. 数値解析モデルと日射量計算

(1) 数値解析モデル

本研究の主題を満たす土木構造物として図-3に示すような、提頂長323m、提高100mのコンクリートアーチ式ダムを数値解析モデルとして選定した。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囲の山々を考え、その尾根線を一辺とする鉛直面を想定した。また、先に述べた日射量の算出、及び以降の温度応力解析のために、ダム右岸方向x、ダム湖方向y、鉛直上方zとする直角座標系を想定した。

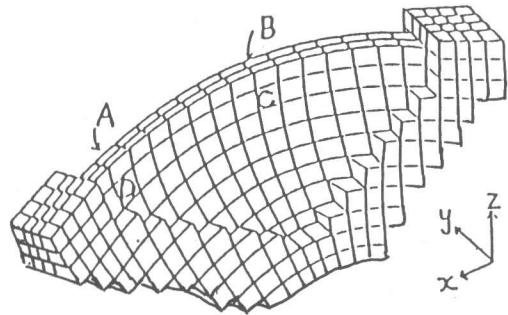


図-3 アーチ式ダム概略図

(2) 日射量計算結果

図-5にダム要素にはいる日射量計算結果を示した。A、Bはそれぞれダム上流側（南側）における右岸部、及び中央部の要素、また、C、Dは、それぞれB、Aの下流側（北側）の要素にはいる日射量である。

A、Bを比較してAでは、午前中日射が多いのは、その要素面法線が太陽方向に近くなるためであり、また、午後日射量が低下するのはダム本体による影になるためである。また、C、Dでは、ほぼ一日中直達日射がなく拡散日射のみであるが、Dでは午後3時頃左岸の山越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、熱変形計算を行った。なお、4節の温度、変形計算では、上流側側の水面下は日射量を0とした。

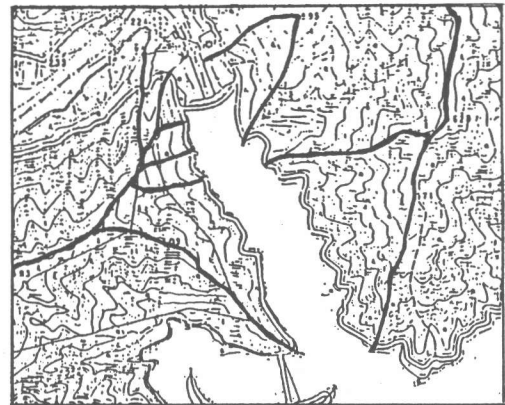


図-4 ダム周辺地形

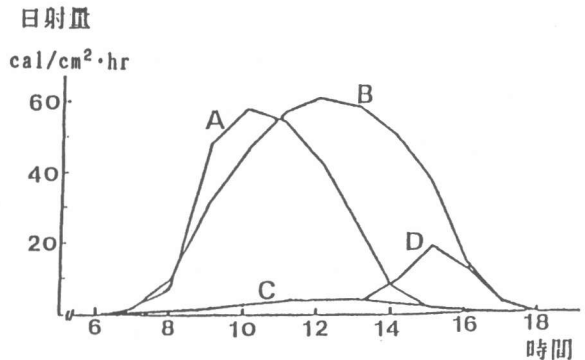


図-5 構造物要素にはいる日射量

4. 温度、及び熱変形計算結果

(1) 温度、変形計算手法

温度及び変形解析は、8節点アイソパラメトリック6面太陽祖を用いた三次元有限要素法で行った。温度解析プログラムは次式に示す三次元非定常熱伝導方程式を定式化したものである。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - C \rho \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

ここで、固定温度境界、熱の対流境界はそれぞれ(9)、(10)式に示す通りである。

$$T(x, y, z) = T_0(x, y, z) \quad (9)$$

$$K_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + K_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + K_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z + q + h(T - \theta) = 0 \quad (10)$$

ここに、

T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

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

C : 比熱 ($\text{cal/g } ^{\circ}\text{C}$)

ρ : 密度 (g/cm^3)

l_x, l_y, l_z : 方向余弦

q : 日射量 ($\text{cal/cm}^2 \text{ sec}$)

h : 対流境界表面の熱伝達率 ($\text{cal/cm}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C}$)

θ : 外気温 ($^{\circ}\text{C}$)

次に、温度応力は、温度解析によって得られた各節点ごとの温度を用いて各要素毎に次式によって求められる。

$$\{\sigma\} = \{\sigma_1\} - [D] \times \{\epsilon_0\} \quad (11)$$

ここで、要素内の各積分点で用いる初期ひずみ $\{\epsilon_0\}$ は、その要素を構成する各節点での温度による初期ひずみ $\{\epsilon_0\}_j$ を用いて次式によって表される。

$$\{\epsilon_0\} = \sum_{j=1}^8 N_j \{\epsilon_0\}_j \quad (12)$$

また $\{\sigma_1\}$ は、次式に示す各要素毎の初期ひずみによる等価節点力を、要素が結合された前項造形の節点に作用する外力とした場合、その外力によって生じる各要素ごとの応力である。

$$\{F\} = \int \int \int [B]^T [D] \{\epsilon_0\} dV \quad (13)$$

ここに、

$[B]$: ひずみ節点変位マトリクス

$[D]$: 応力ひずみマトリクス

N_j : 形状関数

この外力 $\{F\}$ によって各節点に生じる変位 $\{\delta\}$ は次式によって求めることができる。

$$\{\delta\} = [K]^{-1} \{F\} \quad (14)$$

$$\text{ここに、} (K) = \int \int \int (B)^T (D) (B) dV$$

(2) 温度計算結果

ダムは、ほぼ、上流側が南、下流側が北を向いており温度計算では、3節で求められた日射量と外気温を熱荷重として与えた。ここでは11月のある1日を想定した温度計算結果を図-6に示した。ここで、(a)は上流側面の要素提頂部節点温度で左岸側要素節点□、中央部節点□、右岸側要素節点□であり、(b)は、下流側面における要素提頂部節点温度で数字はそれぞれ上流側面の節点に対応している。また、ここには、1日の外気温変化、ダム表面温度実測値（提頂部上流側端部A，提頂部下流側端部B）も示した。

両図を比較してみると、下流側面はどの要素もほぼ外気温、実測値に沿った温度上昇を見せており、またピーク時も外気温とほぼおなじ午後2時頃となっている。このことから、日射を受けないコンクリート表面温度は、外気温とほぼおなじであることが分かる。

これに対して、上流側面では、実測値、

解析値ともかなりの温度上昇を見せており、下流側面に対して約10℃高い温度となっている。また、それぞれの要素についてみると、右岸側要素□は比較的早い時刻から温度が下がり始めている。これは要素面に対して太陽方向が早い時間帯で傾き始め、午後1時頃からは完全な影とはならないまでもあまり強く日射を受けないことによるものである。これとは逆の現象が下流側面右岸側要素□に現れている。これは前述したように、この時間帯については、上流側面ではなく、下流側面の一部に日射が入るためである。これによって下流側面要素□は他よりも高い温度を示すことになる。また上・下流側面いずれも温度ピーク時を過ぎると急激に外気温に沿うようになるのは、ダムが左岸側の山陰に入ってしまうためである。

全体としては、以上のような方法で得られたダム表面温度はほぼ実測値と一致しており、これらの計算方法が妥当なものであることがわかった。

(3) 熱変形計算結果

先に得られた温度結果を用いて、変位計算を行った結果を図-7に示す。ここで(a)，(b)はそれぞれ、ダム天場中央地点におけるダム湖方向変位（下流方向、負）、鉛直変位（鉛直下方、

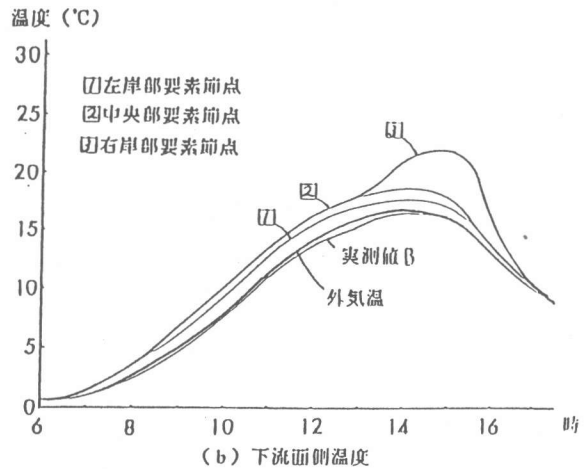
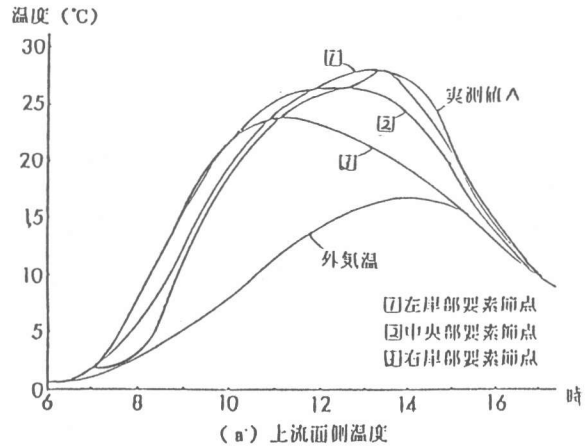


図-6 温度計算結果

負)である。また、コンクリート、及び岩盤の物理特性値を表-1に示す。

これらを見て、1日のダムの変位は下流側方向に実測で約12.0mm、解析で約10.5mm、また鉛直下方にそれぞれ約9.0mm、4.0mmである。これらはいずれも日射熱による上流側面部の温度上昇によりダム本体が下流側にせり出す形となって変位が生じたためと考えられる。

解析では、変形ピーク時の厚さ方向変位量は実測値と近いと思われる値が得られているが、一日のダムの変形がいずれの方向でも、解析上の温度上昇にともなって時間的にかなり早く現れており、今回の解析値は、必ずしも実測値と一致していない。これらは要素分割の方法など、解析上の問題のほか、コンクリートの剛性、岩盤の剛性など種々の原因が考えられる。また、実測の誤差も有り得る。さらに何箇所かの変位を実測しそれらの実測値と解析値を比較することにより、ダム本体の実用剛性を推定し得れば、初期の目的を達することになる。

5. 結論

大型土木構造物の健全性判定の一手法として、日射による構造物の温度変化、変形量を求めることを行ってきた。現段階では、解析、実測ともに不十分さは免れない。しかし、これまでのことから次のようなことが言えると思われる。即ち、日射熱及び外気温を熱荷重として実構造物に入力するとき構造物に生じる陰影によって温度にかなりの差がみられる。そしてこの温度差による構造物の変形などの影響は小さいとはいえない。

今後は、変形解析上での諸問題を十分検討するとともに、実測精度の向上など、健全性評価のための基礎資料を集積して行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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、pp.106-145
- 3) 矢作ダム工事誌：建設省中部地方建設局矢作ダム工事事務所、1971、pp.102-104

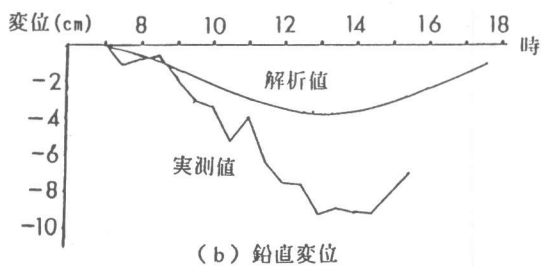
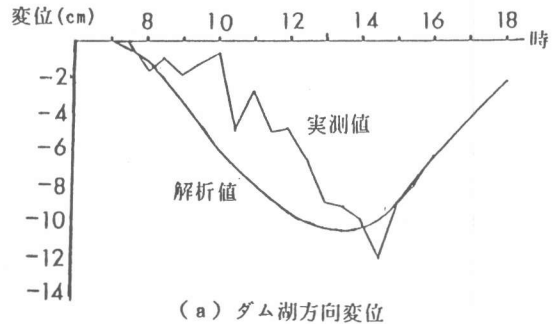


図-7 変位計算結果

表-1 コンクリート、岩盤の物理特性値²⁾

種 類	コンクリート	岩 盤
弾性係数(kg/cm ²)	250000	70000
熱伝導率(cal/cm s °C)	0.00611	0.00539
熱伝達率(cal/cm ² s °C)	0.00028	0.00028
比 熱(cal/g °C)	2.35	2.60
密 度(g/cm ³)	0.28	0.25