コンクリート工学年次論文報告集 11-1 1989

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

正会員〇粥川 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

日射重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 {k}, {k'} ベクトルの定税

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。

 $\left[\cos\xi\sin\xi\right] \left[\alpha_1\alpha_2\alpha_3\right]^{-1}$  $(n_1)$ k<sub>1</sub> BIB2B3 = 721 722 723 n 2° (1) $= |-\sin \xi \cos \xi 0|$ n 2' k 2\* 7 31 7 32 7 33 ln 3' 0 0 k a\* 717273 [n] 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)、地球回転角を、及び、1日の 時角のは次式より求められる。 d = 1440(a - 1) + 60b + c(2)  $\xi = 2\pi (d - 248400) / 525600$ (3)  $\theta = -\pi / 2 + \pi (60 \text{ b} + \text{c}) / 720 + \pi (d - 248400) / 263520$ 

(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点をとり△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□ P Q RS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。



(b) 日射を遮らない場合 図ー2 構造物要素と障害物要素の関係

$$(A B \times A T) / | A B \times A T | = e_1 = (e_{11}, e_{12}, e_{13}) (B C \times B T) / | B C \times B T | = e_2 = (e_{21}, e_{22}, e_{23}) (C A \times C T) / | C A \times C T | = e_3 = (e_{31}, e_{32}, e_{33}) (e_{11} = e_{21} = e_{31}) \bigcap (e_{12} = e_{22} = e_{32}) \bigcap (e_{13} = e_{23} = e_{33})$$
(6)

(5) 式で見るように、△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e1、e2、e3をつくる。(6)式が成立するとき、すなわち、e1、 е2、 е3 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。

(4)

P = Igp<sup>(1/sinh)</sup> ・N<sup>\*</sup>・k<sub>2</sub><sup>\*</sup>・(表面積) Q = I<sub>SH</sub> R = P + Q ここに、Ig =1164.0(kcal/m<sup>2</sup>/hr) :太陽輻射強度 p:大気透過率 I<sub>SH</sub>=Igsinh ・(1-p<sup>(1/sinh)</sup>)/2(1-1.4logep):拡散日射量 N<sup>\*</sup>:構造物要素平面外向き法線ベクトル

sinh=k<sub>2</sub>\*・n<sub>1</sub>\*: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1 00m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 する直交座表系を想定した。

(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面側 (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の下流面側 (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

 cal/cm<sup>2</sup>・hr

 のはダム本体による影になるためである。ま

 60

 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、上流面側の水面下は日射量を0 とした。



図ー3 アーチ式ダム概略図





- 447 -

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節点アイソバラメトリック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。

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

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

$$K_{x} \frac{\partial T}{\partial x} \ell_{x} + K_{y} \frac{\partial T}{\partial y} \ell_{y} + K_{z} \frac{\partial T}{\partial z} \ell_{z} + q + h (T - \theta) = 0$$
(10)

ここに、

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。

$$\{\sigma\} = \{\sigma_1\} - \{D\} \times \{\varepsilon_0\}$$
(11)

ここで、要素内の各積分点で用いる初期ひずみ { ε 。} 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 { ε 。} 」を用いて次式によって表される。

$$\{\varepsilon_0\} = \sum_{j=1}^{n} N_j \{\varepsilon_0\}_j$$
(12)

また {σ<sub>1</sub>} 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。

 $\mathcal{LL}(K) = \int \int (B^{T}(D) (B) dV$ 

## (2) 温度計算結果

ダムは、ほぼ、上流面側が南、下流 面側が北を向いており温度計算では、 3節で求められた旦射量と外気温を熱 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 面側の要素提頂部節点温度で左岸側要 素節点①、中央部節点②、右岸側要素 節点③であり、(b)は、下流面側に おける要素提頂部節点温度で数字はそ れぞれ上流面側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(提頂部上流面側 端部A,提頂部下流面側端部B)も示 した。

両図を比較してみると、下流面側は 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、上流面側では、実測値、



解析値ともにかなりの温度上昇を見せており、下流面側に対して約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てみると、右岸側要素固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 面側右岸部要素固に現れている。これは前述したように、この時間帯については、上流面側では なく、下流面側の一部に日射が入るためである。これによって下流面側要素団は他よりも高い温 度を示すことになる。また上・下流面側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、 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1 0.5mm、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 変 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 など種種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



種類	コンクリート	岩 躲
弾性係数(kg/cm²)	250000	70000
熱伝導率(cal/cm s'c)	0.00611	0.00539
熱伝達率(cal/cm <sup>2</sup> s ℃)	0.00028	0.00028
比 熱(cal/g°C)	2.35	2.60
密 度(g/cm³)	0.28	0.25

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