

論文

[1073] レーザー光線を用いたコンクリートアーチダムの日変位挙動に関する研究

正会員 ○上 原 匠 (名古屋工業大学大学院)

正会員 梅 原 秀 哲 (名古屋工業大学工学部)

正会員 吉 田 弥 智 (名古屋工業大学工学部)

1. まえがき

ダムや橋梁等の大型土木構造物の実際の挙動を把握することは、構造物の健全性を知るうえで最も直接的な手段であり、得られた情報は構造物設計手段の合理化のため極めて有用かつ重要なものである。そこで、大型土木構造物の変形の測定を精度よく簡便に行うことを目的として、レーザー光線を用いた測定システムの開発を行い、これを用いて1985年11月に、コンクリートアーチダムの一日の変位挙動を測定した¹⁾。ダムの一日の変位挙動に影響を与える要因として、ダム湖の水位、気温、日射量等が考えられる。本研究は、ダムの日変位挙動に与える日射の影響を検討するため、他の要因がほぼ同じ条件になる1988年11月に再び測定を行い、前回との比較検討を行った。また、ダムコンクリート上流側と下流側の表面温度実測結果を用いてダムの日変位挙動の推定を試み、実測値との比較を行った。

2. 測定システムの概要

本研究で開発を行った測定装置は、図-1に示すようにレーザー光線発射装置を備えた超精密電子セオドライトと、これより発射されたレーザー光線を受光する光電変換受光器、その変位量を表示する光電変換指示計から構成される。三次元の測定を行う場合、すなわち、奥行き方向の変位を求める場合は2セット用いて、指示計値を座標変換することより構造物の変位が求まる。図-2に三次元測定システムを示す。図-3に示す三次元座標において、測定対象構造物に設置した受光器の変位は、レーザー光線をz軸とした三次元座標x, y, zにおけるx, y軸2方向の変位が指示計に表示される。構造物の三次元方向の変位X, Y, Zは、これより以下に示す座標変換の式を用いて求められる。

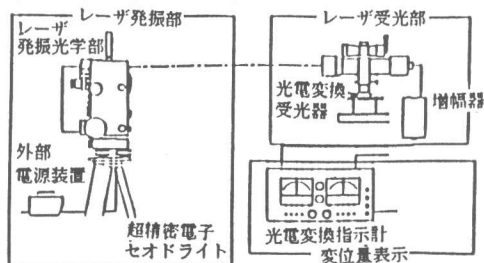


図-1 測定装置の構成

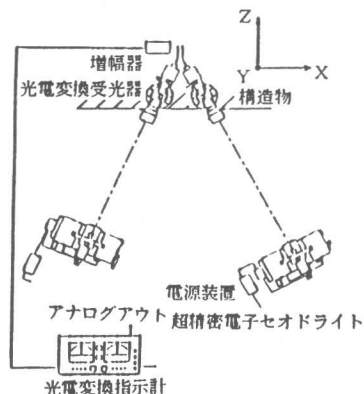


図-2 三次元測定システム

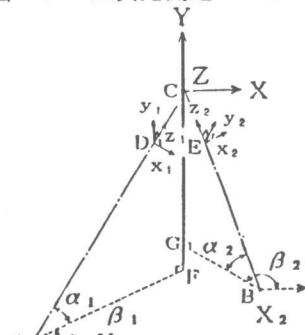


図-3 三次元座標

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (S)^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \cdots (1) \quad (S) = \begin{bmatrix} \sin \beta & 0 & -\cos \beta \\ -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha & -\sin \alpha \sin \beta \\ \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha & \cos \alpha \sin \beta \end{bmatrix} \cdots (2)$$

なお、 α はセオドライトから受光器を覗いた時の仰角、 β は測定対象構造物の水平方向軸(X軸)となす水平角である。また、この測定システムを用いることで、50~150 m離れた位置から

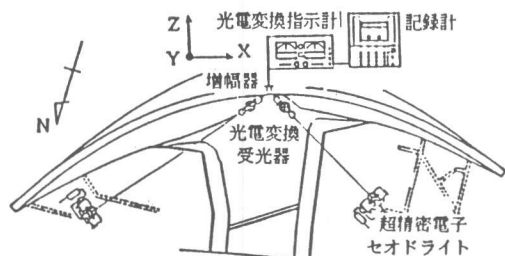


図-4 測定地点概略図

構造物の三次元方向の各変位を 0.5mm の高精度で簡便に測定することが可能となる。

3. コンクリートアーチダムの日変位測定結果

3.1 測定概要

前回同様、三次元測定システムを利用してダムの日射による一日の変位の測定を行い、変位挙動に関する比較検討を行った。対象としたダムは、堤高 100m、堤頂長 321.1m のコンクリートアーチダムで、測定地点はダム下流側のダム堤頂中央部一点とした。図-4 に測定地点概略図を示す。なお、測定点における変位方向は、図に示す方向をとる。測定は午前 7 時 45 分より 30 分間隔で午後 3 時 45 分までであり、各測定時刻毎に気温及びダム堤頂部下流側、上流側のコンクリート表面温度の測定を行った。85 年の測定日におけるダム湖の水位は約 82m、88 年は約 90m である。

3.2 測定結果

指示計から得られた値をもとに座標変換を行いダムの日射による一日の X、Y、Z 軸方向の変位を求めた。85、88 年の X、Y、Z 軸方向の時間経過による変位の変化を図-5、6、7、に、この時の測定地点のダム上流側と下流側コンクリート表面の温度の変化を図-8 に示す。なお、各測定時刻毎の気温はダム下流側コンクリート表面温度にほぼ等しい。85 年と 88 年の下流側コンクリート表面温度は約 8℃ の差があるが、上流側コンクリート表面温度はほぼ同じでピークも午後 1 時である。図-5、6、7 に示すように、85 年と 88 年の各変位の傾向はほぼ同じである。しかし、全体的に 88 年の変位が 85 年に比べて小さく、Z 軸方向の変位の最大値は 85 年が 12mm であるのに対して、88 年では 7mm である。また、最大変位の生じている時刻は、85 年は午後 2 時 15 分、88 年は午前 11 時 45 分であり、表面温

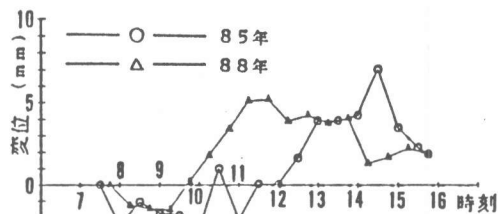


図-5 X 方向変位比較

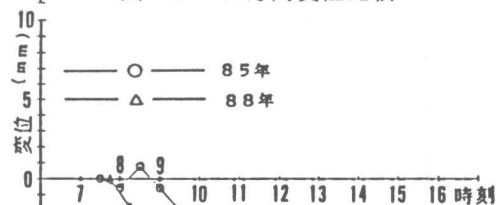


図-6 Y 方向変位比較

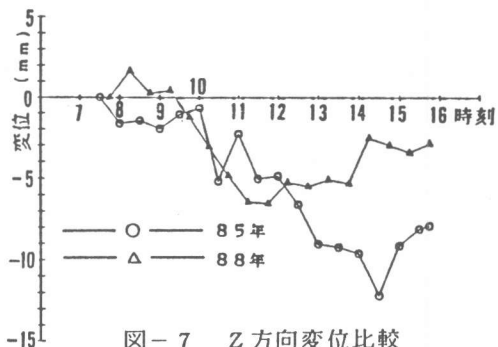


図-7 Z 方向変位比較

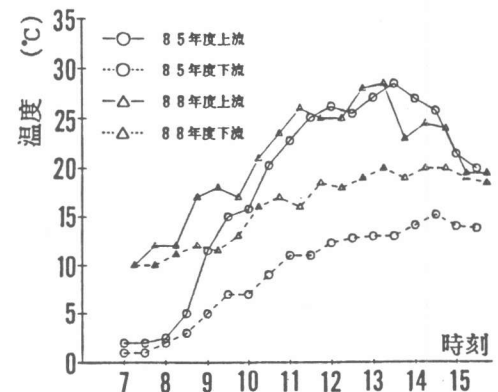


図-8 コンクリート表面温度

また、最大変位の生じている時刻は、85 年は午後 2 時 15 分、88 年は午前 11 時 45 分であり、表面温

度のピーク時刻と一致しない。そこで、図-9に示すように、ダム上流側と下流側のコンクリート表面温度の差を各時間毎に検討した。その結果、85年におけるダム表面の温度差は、午後1時45分に最大16℃であるのに比べ、88年は午前11時15分に最大10℃であることが確認された。これより、ダムの日変位はダム上流側と下流側のコンクリート表面温度の差に比例して現れることが明らかとなった。ただし、85年と88年とも温度差の最大値が生じた時刻より30分遅れて変位の最大値が生じるのは、コンクリート表面から内部への熱の伝導に要する時間のずれが原因であると考えられる。

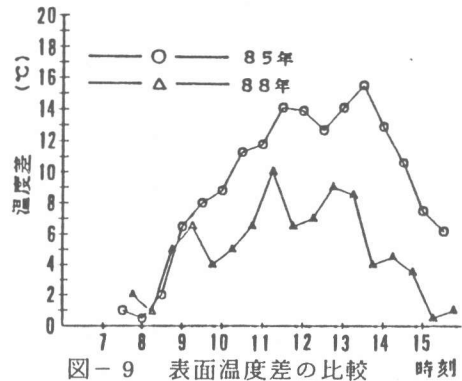


図-9 表面温度差の比較

4. 解析の概要

85年と88年にダムの日変位挙動の測定を行ったが、測定点は受光器を設置した場所1箇所のみであった。ダム全体の挙動を調べるには、いくつかの場所に受光器を設置して測定すればよいが、測定が複雑になりまた経済的にも問題がある。そこで、測定点を含むダム全体の日変位挙動を把握することを目的として、解析を行うことにした。解析は、ダム全体の1日の温度変化を求める温度解析と、その温度結果を用いて1日の変位挙動を解析する変位解析に分けることができる。

4.1 温度解析

温度解析手法として田辺ら²⁾が行ったように、日射量を推定してダム全体の1日の温度変化を求める方法がある。ところで、88年における測定では、30分間隔で気温、ダム堤頂部上流側および下流側のそれぞれ9点のコンクリート表面温度を実測した。

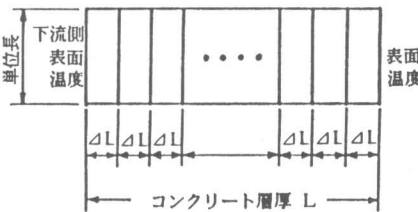


図-10 奥行き方向の温度解析層厚モデル

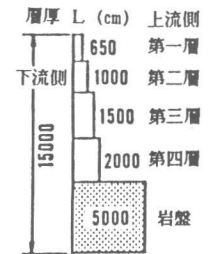


図-11 高さ方向の温度解析モデル

また、コンクリート内部の温度分布は表面からの熱の流出入のみを考えればよい。したがって、ここではコンクリート奥行き方向の両端面に実測より得られた表面温度を与え、図-10に示す一次元の温度解析モデルを用いてシュミット法による温度解析を行い、コンクリート内部の温度分布状態を求めた。さらに、ダムの層厚が高さによって異なるので、図-11に示すように高さ方向に四層に分割し、各層毎に表面温度を与えた。第一層は、実際に計測した表面温度を用いた。これに対して、第二層より第四層までは、第一層の実測結果より下流側表面温度は1日中日陰であり、気温にはほぼ等しいことが得られているのでその値を用いた。また、上流側表面は水面下であり、水温はダム施設より得られた測定結果を用いた。このようにして第一層は9箇所、第二層より第四層までは各層ごとに1箇所ずつ計12の場合について解析を行った。なお、対象としているダムの奥行き方向の長さを考慮すると、ダム内部におけるコンクリート温度はある一定期間の表面温度に支配されると考えられる。そこで、内部温度の初期値として11月の平均気温および水温を考慮して10℃を与え、数日間は実測した表面温度が毎日繰り返し与えられるものと仮定して解析を行い、収束する値を求めた。ここで、ダムコンクリートの熱伝導率は、2.50 (kcal/mh℃)と仮定した。温度解析の結果、各層とも図-12に示すように表面より約20cm内部までは、表面温

度の影響で時間とともに変化した。しかし、それより内部はほとんど一定で表-1に示すような温度を示した。

4.2 変位解析

変位解析方法として、一般にコンクリートのスラブやシェル構造物を解析する際に用いられる層状解析手法を適用した。この手法は図-13に示すようにスラブやシェルを小さい平面要素に分割するだけでなく厚さ方向にも分割することにより、厚さ方向の材料特性の変化を考慮できるものである。要素としては、Pecknoldの20自由度の四辺形シェルを用いた³⁾。この要素では1つの節点は、x軸方向の変位u、y軸方向の変位v、z軸方向の変位w、x軸方向の回転角 θ_x 、y軸方向の回転角 θ_y の5つの自由度を持つ。微小たわみ理論の仮定より、要素中央面からzの距離での歪み $\{\varepsilon\}$ は以下の式で表される。

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_0\} + z \{\eta\} \dots \dots (3)$$

ここに、 $\{\varepsilon_0\}$ は中央面の歪み、 $\{\eta\}$ は中央面の曲率で以下のように表される。

$$\{\varepsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}$$

$$= [B_1] \{V_1\} \dots \dots (4)$$

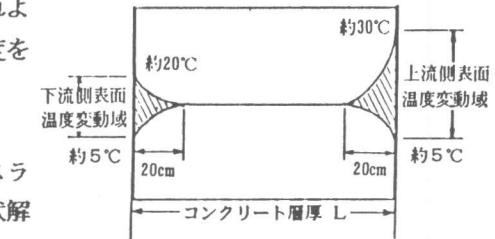


図-12 内部温度の分布状態

表-1 内部温度解析結果

高さ方向の温度解析モデル	第一層	第二層	第三層	第四層
内部温度 (°C)	13	11	10	10

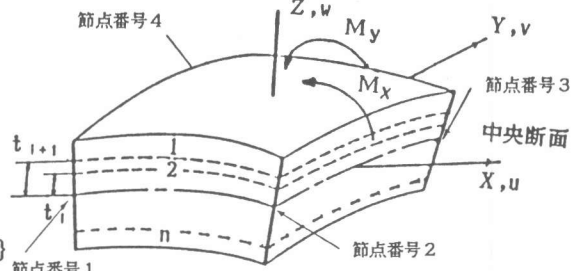


図-13 層状解析モデル

$$\{\eta\} = \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2}{\partial y^2} \\ -\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} w \end{Bmatrix}$$

$$= [B_2] \{V_2\} \dots \dots (5)$$

ここで、u、v、wは変位ベクトルである。 $[B_1]$ 、 $[B_2]$ は変位とひずみの関係を表すマトリックス、また $\{V_1\}$ はu、v方向の各節点変位($u_1, u_2, u_3, u_4, v_1, v_2, v_3, v_4$)、 $\{V_2\}$ はw、 θ_x 、 θ_y 方向の各節点変位、回転角($w_1, \theta_{x1}, \theta_{y1}, w_2, \theta_{x2}, \theta_{y2}, w_3, \theta_{x3}, \theta_{y3}, w_4, \theta_{x4}, \theta_{y4}$)である。

次に仮想仕事の原理を適用することにより、1つの要素内で以下のような荷重と変位の関係が得られる。

$$\begin{Bmatrix} F_{v1} \\ F_{v2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (t_{i+1} - t_i) \int_S [B_1]^T (D) [B_1] dS \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (t_{i+1}^2 - t_i^2) \int_S [B_2]^T (D) [B_1] dS \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (t_{i+1}^2 - t_i^2) \int_S [B_1]^T (D) [B_2] dS \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{3} (t_{i+1}^3 - t_i^3) \int_S [B_2]^T (D) [B_2] dS \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{Bmatrix} \dots \dots (6)$$

なお、〔D〕は材料マトリックスであるが、この解析では弾性状態にあるコンクリートアーチダムを対象としている。また、図-13に示すように t_i は中央面から i 番目の層上端までの距離とし、層厚は各要素毎に与えることが可能である。式(6)に示される剛性マトリックスは局所座標で導かれたものであるので、要素を組み立て、つり合い式をたてるには、全体座標への変換が必要である。このようにして全体座標で表した要素の剛性マトリックスは

$$[k] = [T]^T [K'] [T] \dots \dots \dots (7)$$

で表される。ただし、〔T〕は座標変換マトリックスで〔K'〕は局所座標で表した要素の剛性マトリックスである。以上の方法によって、アーチダムのようなシェル構造物の変位を求めることができる。

ところで、この解析方法で温度応力問題を解く場合は、温度による初期ひずみ問題として解けばよい。温度解析より求めた要素の重心における温度変化を ΔT 、厚さ方向の温度変化の勾配を $\Delta T'$ とすると、熱膨張による初期ひずみ増分は以下の式で与えられる。

$$\{\Delta \epsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T' \\ 0 \end{Bmatrix} = [B_1] \{V_1\} \dots (8) \quad \{\Delta \eta_0\} = \begin{Bmatrix} \alpha \Delta T' \\ \alpha \Delta T \\ 0 \end{Bmatrix} = [B_2] \{V_2\} \dots (9)$$

これらの初期ひずみ増分による各要素における節点力増分 $\{\Delta F_0\}$ は、式(6)より

$$\{\Delta F_0\} = \left\{ \begin{array}{l} \int_{t_{i-1}}^{t_i} (t_{i+1} - t_i) \int_S [B_1]^T (D) \{\Delta \epsilon_0\} dS \\ \quad + \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{1}{2} (t_{i+1}^2 - t_i^2) \int_S [B_1]^T (D) \{\eta_0\} dS \\ \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{1}{2} (t_{i+1}^2 - t_i^2) \int_S [B_2]^T (D) \{\Delta \epsilon_0\} dS \\ \quad + \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{1}{3} (t_{i+1}^3 - t_i^3) \int_S [B_2]^T (D) \{\eta_0\} dS \end{array} \right\} \dots (10)$$

として求められる。この節点力増分 $\{\Delta F_0\}$ をすべての節点について求め、構造物全体で重ね合わせることで、温度によって生じる変位増分 $\{\Delta U\}$ は次式によって求められる。

$$\{\Delta U\} = [K]^{-1} \{\Delta F_0\} \dots \dots \dots (11)$$

ここに〔K〕は構造物全体の剛性マトリックスである。以上のようにして日射により生じる変位が求められる。

5. 解析結果と実測値との比較

5.1 解析モデルと解析条件

解析モデルとしては、コンクリートアーチダムの形状を考慮して、図-14に示すようなモデルとした。なお、図は左岸側半分を示しているが、解析は左右対称として取り扱わず、全体を対象とした。このモデルは周辺の岩盤の影響が考慮できるようにモデルの中に図に示すように岩盤を含んでおり、節点数66、要素数48のシェル型モデルである。さきに温度解析より求めた各測定時刻における各要素毎の内部温度変化を ΔT 、厚さ方向の温度勾配の変化を $\Delta T'$ として層状解析に導入し、ダムの日変位を求めた。なお、この解析ではコンクリート内部の温度変化を直線分布に置き換える必要がある。そこで、図-15に示すように温度分布曲線と置き換えた直線分布とのなす面積が、直線を挟んで等しくかつその一次モーメントが等しくなる直線を求め、各測定時刻毎の温度変化を ΔT 、 $\Delta T'$ に分けて表した。岩盤およびコンクリートのヤング係数は、ダム建

設時の岩盤およびコンクリートの試験結果をもとに 50000 kg/cm^2 、 250000 kg/cm^2 とし、熱膨張係数は $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ で、岩盤端部を固定とした。

5.2 解析結果と実測値との比較

88年における測定を対象としたZ方向変位の解析結果と実測結果を図-16に示す。時間のずれはあるが解析結果と実測結果はほとんど同じ傾向を示しており、最大変位量もほぼ等しい。このことからダム上流側と下流側コンクリート表面温度を測定することにより、ダムの奥行き方向の日変位挙動の推定が可能であると言えよう。一方、X軸方向の変位は、各測定時刻毎の左岸側と右岸側の実測温度の差が 2°C 程度であり、また解析モデルの形状および物理特性値を左右対称としたことにもより、解析ではほとんど現れず、Y軸方向の変位も傾向としては実測にほぼ一致するものの変位量は 2 mm 程度で実測値より小さく現れた。

6. 結論

本研究で明らかになったことをまとめると以下の通りである。

(1) レーザー光線を用いた三次元の変位を測定するシステムを用いて1985年、1988年にコンクリートアーチダムの日射による一日の変位挙動の測定を行い、これらと比較したところ、ダムの日変位は時間的なずれはあるものの、ダムの上流と下流側のコンクリート表面の温度差の大小に比例して現れることが明らかとなった。

(2) ダムの上流と下流側のコンクリート表面温度をもとに層状解析手法を用いて日変位解析を行ったところ、ダム奥行き方向に関しては実測結果と同じ傾向を示し、コンクリート表面温度データをもとに変位解析によるダムの挙動の見通しが得られた。今後、ダムの季節毎による日変位挙動を測定し、季節変化にともなう表面温度の違いによる影響や水位等の変位に及ぼす影響についての検討を行う予定である。

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三次元変位測定システムの開発に関する研究 土木学会論文集 第397号/VI-9 1988年9月
- 2) 田辺忠顕 他：大型土木構造物に対する日射熱入力に関する研究 土木学会第43回年次学術講演会 昭和63年10月
- 3) Frank R.Hand, David A.Pecknold, and William C.Schnobrich; "Nonlinear layered analysis of RC plates and shell", Journal of the Structural Division, ASCE Vol.99, No.ST7, Jul 1973, pp.1492-1505

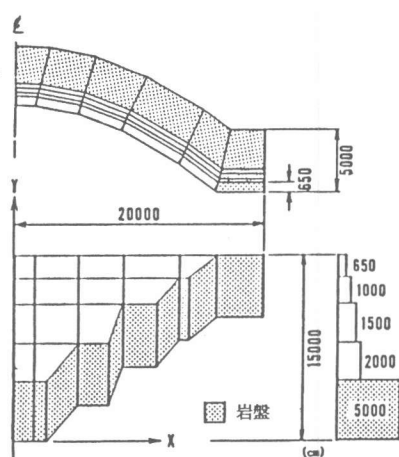


図-14 変位解析モデル (左岸側)

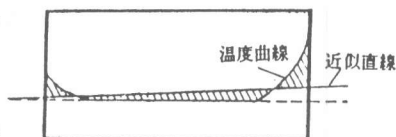


図-15 直線近似モデル

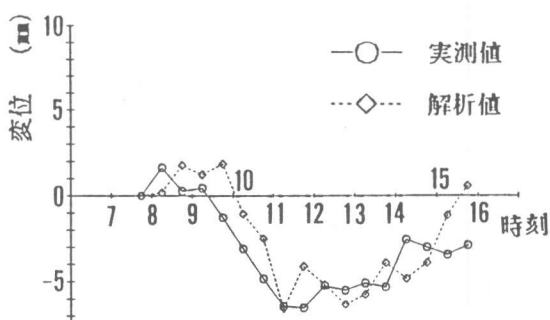


図-16 実測値と解析値の比較