

コンクリートアーチダムの日射による 日変位挙動に関する研究

A STUDY ON DEFORMATIONAL BEHAVIOR OF CONCRETE ARCH DAM DUE TO SOLAR HEAT IN A DAY

吉田 弥智*・田辺 忠顕**・梅原 秀哲***・上原 匠****
By Hirotomoto YOSHIDA, Tadaaki TANABE, Hidetaka UMEHARA
and Takumi UEHARA

Three dimensional deflections of a concrete arch dam due to solar heat in a daytime on March, July, and November were measured by the system consisting of two sets of theodolite with the launcher of a laser and the device which receives the laser. The thermal analysis using finite element method has been conducted to compare the measured deflections and estimate the behavior of arch dam by solar heat. It has been cleared that the obtained results from the thermal analysis estimate the behavior of all over the concrete arch dam with enough accuracy.

Keywords :deflection, concrete arch dam, finite element method, laser beam

1. ま え が き

ダムなどの大型コンクリート構造物の実際の挙動を計測することは、その構造物の維持管理において最も直接的な手段であり、また得られた情報を設計へフィードバックすることにより設計手法の合理化にきわめて有用かつ重要なものとなる。特にひびわれなどコンクリートに生じた欠陥は、構造物の剛性の低下につながり、直接構造物の変位挙動の変化となって現われる。したがって、変位挙動に着目して測定を行うことは、構造物の維持管理を行ううえで有効な手段となる。著者らは、実際の構造物の日射による熱変位挙動を測定し、解析結果との比較から、その構造物の実体を把握する目的で一連の研究を行ってきている¹⁾。

これまでに、実際の挙動を精度よく簡便に測定することを目的として、レーザー光線を用いた測定システムの開発を行い、1985年11月、1988年11月にコンクリートアーチダムの日射による1日の変位挙動の測定を行っ

た²⁾。また、1988年11月の測定の際に行ったダムコンクリート表面温度測定結果や気温等の温度データを用いて変位解析を行った³⁾。その結果、ダム堤頂部は、ダムの上流側と下流側のコンクリート表面温度の差の影響を受けて数mm変位することが明らかとなった。また、変位解析よりダム半径方向に関しては、実測結果と同様な解析結果が得られ、半径方向変位は、ダムコンクリート表面温度の測定より推定が可能となった。これまで2回の測定は、11月の晴れた日に行ったが、今回、気象条件の違いによるコンクリートアーチダムの変位挙動の把握を目的として、1989年3月、1989年7月と季節を変えて測定を行った。そこで、気象条件の違いが及ぼすダムの日変位挙動への影響について各測定ごとの気象条件をもとに検討し、解析を行い、ダムの日変位挙動の把握を試みた。また、実際の測定は日の出より日没までの約半日間で、測定点はダム堤頂部一点であるので、この解析結果より、測定点1か所だけでなくダム全体の変位挙動の推定を試みた。

2. コンクリートアーチダムの変位挙動実測結果

(1) 測定システムの概略

本研究で開発を行った測定装置および測定システムについては、すでに文献²⁾で詳しく述べてあるので、ここでは三次元測定システムの概略を簡単に説明する。レー

* 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

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

*** 正会員 Ph.D. 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

**** 学生会員 工修 名古屋工業大学大学院 工学部社会開発工学科 (同上)

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を測定対象構造物から50~150m離れた2か所に設置し、測定対象構造物測定点に隣接するように取り付けられた2台の光電変換受光器へそれぞれレーザー光線を発射する。構造物に変位が生じると、光電変換受光器も同様に変位し、光電変換受光器内レンズの受けるレーザー光線の入射量にも変化が生じる。したがって、受光器の変位、すなわち構造物の変位はレーザー光線の入射量の変化として光電変換指示計に表示される。

そして、光電変換指示計に表示された2台の光電変換受光器の変位を座標変換することにより、従来困難とされていた奥行方向を含む三次元方向の変位を0.5mmの高精度で測定することが可能となる。なお、より環境条件がよいと0.1mmの精度で測定できる。

(2) 実測概要

気象条件、特に日射量の違いがダムの1日の変位挙動にどのように作用するのかを把握することを目的として、前回は同じ季節である1985年と1988年の11月に³⁾、また、今回は季節を変えて1989年3月と1989年7月に、三次元測定システムを利用してコンクリートアーチダムの日中の変位挙動の測定を行った。

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、1971年に建設され、堤頂標高300mである。測定点はクレストゲート下のダム本体下流側壁面1か所とし、図-1に測定地点概略図を示す。なお、クレストゲートは、ダム堤頂部中央より16m左岸側に位置し、測定点における変位方向は、図に示す方向をとる。測定は4回とも日の出から30分間隔で日没まで行い、各測定時刻ごとに気温およ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1985年は1か所、他の3回は9か所で行った。コンクリート表面温度

の測定は、接触型温度計(分解能0.1°C)をコンクリート表面に接触させて行った。

(3) 実測結果

ダム湖の水位ならびに天候は、1985年11月が水位約82mで快晴、1988年11月が約90mで晴れ、1989年3月が約79mで晴れ後曇り3時過ぎに雨、1989年7月が約87mで曇り後午前11時30分より雨であった。

指示計から得られた値をもとに座標変換を行いダム堤頂部測定点の日中のX、Y、Z軸方向の変位を求めた。各測定ごとのX、Y、Z軸方向の時間経過による変位挙動を測定開始時刻の変位を0とおいて図-2~図-5に示す。ダムの日変位挙動への影響については、特に日射の影響を考慮して日中の変位挙動の検討を行うが、日射の変化は日射面のダムコンクリート表面温度の変化に置き換えて検討を行う。そこで各測定時刻ごと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-6、図-7に示す。なお、各測定時刻ごとの気温はダム下流側コンクリート表面温度にほぼ等しく、またダム湖の水温は、1日当たりの気温や日射の影響による変化がほとんどなく1日を通して11月は約12°C、3月は約7°C、7月は約17°Cで一定である。

まず、それぞれの実測結果の傾向について述べ、次に日射と他の気象条件等がダムのX、Y、Z軸方向変位に及ぼす影響について検討を行い、ダムの変位挙動の把握

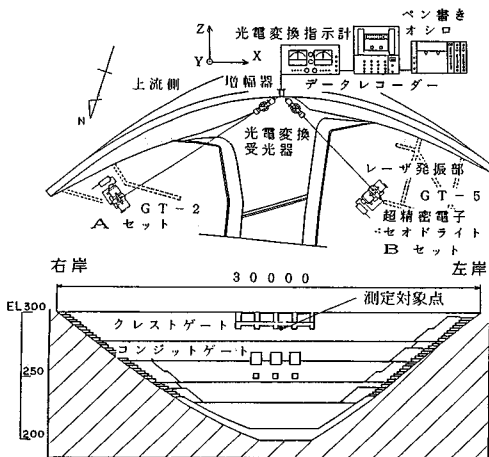


図-1 測定地点概略図

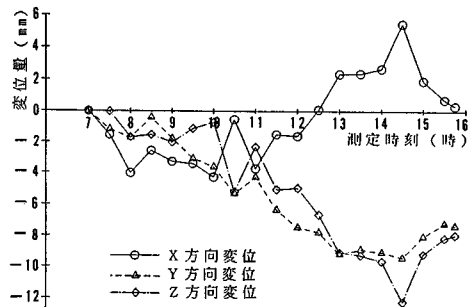


図-2 1985年11月実測結果

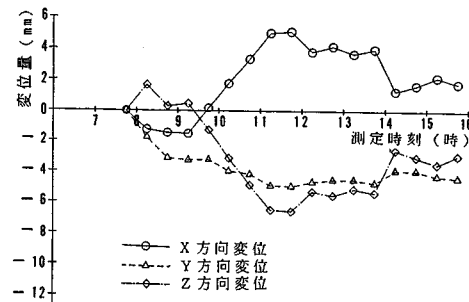
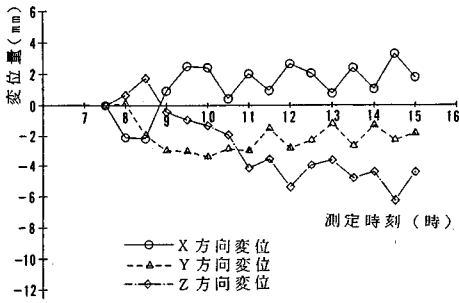
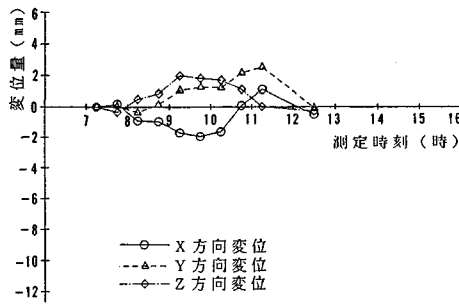


図-3 1988年11月実測結果



図一四 1989年3月実測結果



図一五 1989年7月実測結果

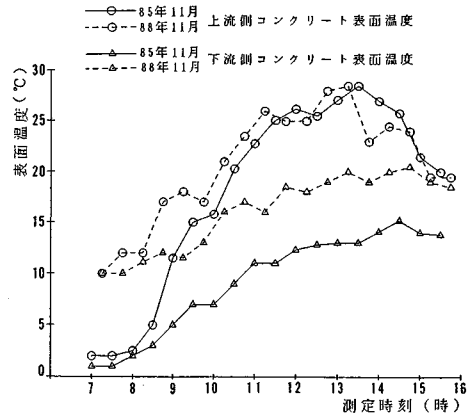
を行うことにした。

a) 実測結果の傾向

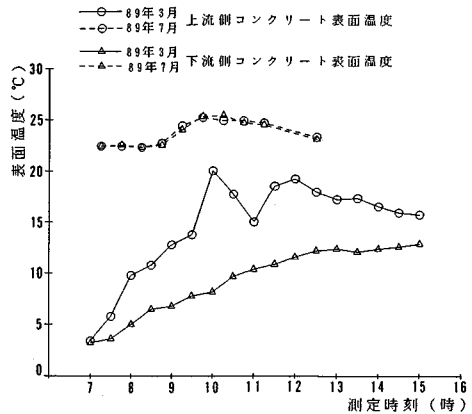
1985年11月のダム堤頂部中央の日の出から日没までの変位挙動は、測定開始時刻の変位を基準として、水平方向(X軸)についてはまず右岸側に約4mm変位が生じ、後に12時30分を境に左岸側に変位が転じ、最大約5mmの変位が生じた。鉛直方向(Y軸)については下向きに約9mmの変位が生じ、また半径方向(Z軸)については下流側へせり出す形で約12mmの変位が生じた。X、Y、Z軸各方向の最大変位時刻は午後2時30分頃である。

1988年11月も同様の傾向を示しており、水平方向はまず右岸側に約2mm変位が生じた後、9時45分頃を境に左岸側に変位が転じ、午前11時30分頃約5mmの最大変位が生じた。鉛直方向については下向きに変位が生じ、8時45分頃に約4mmの変位が生じた後はほとんど変化せず一定の変位を保ち、また半径方向は測定開始後まず上流側へ約2mm変位が生じ、9時30分頃下流側に変位が移り午前11時45分最大変位約7mmが生じた。

1989年3月の変位の傾向も1988年11月の測定結果とほとんど同じである。水平方向は1988年11月同様まず右岸側に約2mmの変位が生じ、9時頃に左岸側に変位が転じた後は、時間経過に伴い左岸側に0.2mmから2.5mmの振幅で、変位が振動した。鉛直方向は下向きに



図一六 表面温度実測結果1



図一七 表面温度実測結果2

変位が生じ、9時頃から11時まで約3mmの変位を示した後、変位が小さくなり、時間の経過につれて元に戻る傾向を示した。半径方向はまず上流側に約2mmの変位が生じた後、9時頃に下流側にせり出すように変位が転じ、4mmから6mmの変位が交互に現われ振動した。

1989年7月の変位挙動は、日射がほとんどない場合の測定となった。また、11時30分頃に降り出した雨のため、測定は12時30分で終了した。水平方向については過去3回同様まず右岸側に変位が生じ、9時45分に最大2mmの変位を示し、10時45分を境に左岸側に変位が転じるが、12時30分の時点では変位0を示した。鉛直方向は上向きに変位が生じ、11時15分に最大2.5mmの変位を示した。また、12時30分の時点では変位0を示した。半径方向においては上流側に変位が生じ、9時頃から10時30分頃まで約2mmの変位を示した。その後11時15分に変位0を示し、12時30分の時点においてもほとんど変わらなかった。

合計4回の測定を行ったが、水平方向変位の現われ方

は4回ともほとんど同じ傾向を示し、まず右岸側に変位が生じ、後に左岸側に変位が転じている。鉛直方向については11月、3月は下向きに、日射のない7月は上向きに変位が生じている。半径方向も、11月、3月は下流側に、日射のない7月は逆に上流側に変位が生じている。このように、各測定ごとの傾向が異なるため、対象としたコンクリートアーチダムの各方向に生じた変位について、各測定時の気象条件ごとに検討を行うことにした。

b) 水平方向変位

ダムの両岸は岩盤により固定されているため、ダム堤頂部中央の水平方向変位は1日の日射の変化による影響をあまり受けず、変位は小さいものと予測された。しかし、4回の実測結果をみると、図-2~図-5に示すように水平方向にもかなり変位が生じている。これは、ダムの上流面側が南東方向に向いているため、コンクリート表面の右岸側と左岸側では日射の当たり方が時間の経過に伴い変わることと、今回対象としたコンクリートアーチダムの右岸側と左岸側の岩盤のヤング係数が右岸側30000 kg/cm²、左岸側50000 kg/cm²と異なっているためと考えられる。これより、ダム堤頂中央は当日の日射量、外気温の変化などの気象条件の影響を受けて、水平方向に変位が生じると考えられる。

1985年11月、1988年11月、1989年3月は、日射および外気温の2つの影響を受けている。まずダム全体が外気温の上昇によりヤング係数の小さい右岸側に変位する。その後、時間の経過とともに、ダム上流側表面の日射面が左岸側から右岸側へと広がり、ダム全体の温度が上昇すると左岸側に変位が転じる。また、日射量の減る昼過ぎからは、元に戻る傾向を示している。

1989年7月は、前回3回と同様に、まず、外気温の上昇に伴い右岸側へと変位が生じるが、日射がないため9時45分頃から気温が下がると同時に、変位も左岸側へ転じ元に戻る傾向を示し、外気温の変化がそのまま水平方向変位として現われている。

すなわち、今回測定したコンクリートアーチダムの堤頂部中央は、日射の有無にかかわらず水平変位が生じることから、まず外気温の上昇により右岸側へ、下降により左岸側へと変位することが考えられる。そして、日射がある場合にはその影響を受け、左岸側への変位が大きく生じることが考えられる。

c) 鉛直方向変位

図-2~図-5に示すように4回の実測の結果、日射のある1985年11月、1988年11月、1989年3月については鉛直方向変位は下向きに、日射のない1989年7月は上向きに生じていることが明らかとなった。今回対象としたコンクリートアーチダムの鉛直断面は上流側へ凸の形でカーブを描き、下端固定の片持ちばりの形状をとっ

ており、また、測定点は下流側壁面に設置されている。このことから、気象条件の変化が測定点の鉛直方向変位に直接与える影響よりも、気象条件の変化により生じた半径方向変位による鉛直方向変位への影響の方が大きく現われたためと考えられる。すなわち、半径方向変位が上流側に生じるときは鉛直方向変位は上向きに、逆に下流側に生じるときは下向きに変位が生じる。4回の実測結果をみると、鉛直方向変位(Y方向変位)が半径方向変位(Z方向変位)に連動して変位挙動していることがわかり、鉛直方向変位は気象条件が直接影響を与えるよりも半径方向変位の影響を大きく受けることが明らかとなった。

d) 半径方向変位

半径方向については、ダム上流側に日射がある場合は、図-2~図-4に示すようにダム上流側コンクリート表面温度とダム下流側コンクリート表面温度の差に比例して下流側にせり出す形で変位が生じた。一方日射がない場合はほとんど変位が生じないと予測されたが、図-5に示すように、1989年7月の実測結果より日射がない場合にも逆向きの上流側への変位が生じることが明らかとなった。

そこで、気象条件の変化が及ぼす半径方向への変位については、ダム湖水面を境に測定点を含むダム上層部と下層部に分けて考えることにした。ダム上層部において日中日射がある場合、上流側コンクリート表面温度の上昇が下流側コンクリート表面温度(気温にほぼ同じ)の上昇より大きく、このため上流側が熱膨張を起こした形でダム堤頂部中央は、下流側にせり出す変位が生じる。ところで、ダム下層部では、上流側コンクリート表面は水面下のため水温と同じで温度変化はなく一定である。これに対し下流側コンクリート表面は気温の上昇に伴い温度が上昇し、上層部とは逆に下流側コンクリートの熱膨張により下層部は上層部を上流側におしやる形で変位し、間接的にダム堤頂部の変位に影響を与える。すなわち、ダム湖の上流側コンクリート表面が水面の上または下の違いにより、上流側と下流側の温度変化の状態が異なり、日中は上層部と下層部は逆向きの変位挙動を起こす。日射がある場合は、この2つの働きが組み合わさって変位が生じ、日射がない場合は下層部の影響が大きく働くと考えられる。図-8、図-9に上層部、下層部のそれぞれの上流側表面温度から下流側表面温度を差引いた温度差を測定開始時刻を基準として示す。これは、値が正の場合は上流側の温度増分の方が大きいことを意味する。1985年11月、1988年11月、1989年3月は上層部、下層部ともに温度差が大きく、各時刻ごとのそれぞれの温度差の変化量もほとんど同じである。ところが実測結果の半径方向変位の傾向は上層部の温度差に比例した形

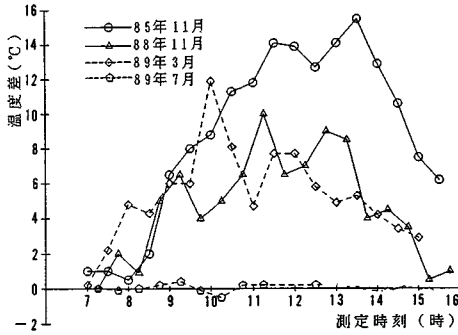


図-8 上層部表面温度差

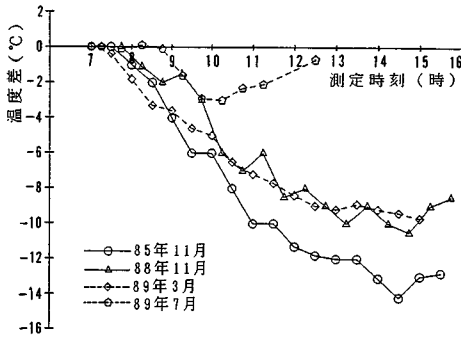


図-9 下層部表面温度差

で現われている。これに対して、7月については、上層部での温度差はほとんどなく、下層部は他の月と比較すると値は小さいが温度差が生じている。そして、7月は他の月に比べ、下層部の温度差の変化量のほうが上層部の変化量よりも大きい。この場合の実測結果の半径方向の変位の傾向は上層部ではなく下層部の温度差に比例した形で現われている。すなわち、ダム堤頂部中央の半径方向の変位は、日射がある場合は上層部コンクリート表面温度差の影響に比例し、日射がない場合は下層部コンクリート表面温度差の影響に比例すると考えられる。ただし、上層部、下層部それぞれのコンクリート表面温度差の半径方向変位への影響の割合は、日射の有無、水位、ダムの層厚、ダム内部コンクリート温度、表面温度上昇速度等によって異なると考えられるが、今回の実測結果からは、その割合については検討できなかった。

以上4回の測定結果から、日射がある場合は、水平方向は左岸側へ、半径方向は下流側へ、鉛直方向は下向きに変位が生じる。逆に、日射がない場合は、水平方向は右岸側へ、半径方向は上流側へ、鉛直方向は上向きに変位が生じる。すなわち、今回対象としたコンクリートアーチダムの堤頂部中央の日変位挙動は、平面的には上流側右岸と下流側左岸を結ぶ方向に沿って生じ、上下方向には、上流側右岸に向かって変位が生じる場合は上向きに、

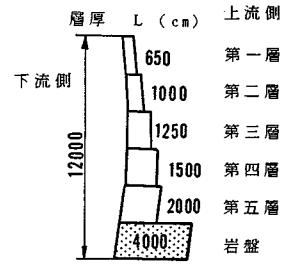


図-10 温度解析モデル

下流側左岸に向かって変位が生じる場合は下向きに変位が生じることが明らかとなった。

3. 解析の概要

これまで4回コンクリートアーチダムの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か所のみであり、測定は日の出から日没までであった。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、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の推定を目的として解析を行った。

1988年11月に行った実測結果に対する解析結果から、ダム半径方向に関して解析結果と実測結果とが同じ傾向を示した。これより、コンクリート表面温度データからの変位解析によるダム挙動の推定の見通しが得られた⁹⁾。今回新たにダムの鉛直方向に対する傾きについても考慮を行った。そこで、1989年3月、1989年7月についても同様に解析を行い、まず、測定点の実測結果と解析結果の比較検討を行った。そして、さらにダム全体の変位挙動の推定を行うことにした。

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。

(1) 温度解析

1988年、1989年における測定では、各変位測定時刻ごとに気温、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も実測した。ところで、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く、ここではコンクリート奥行方向の両端面に実測より得られた表面温度を与え、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る。ダムの層厚が高さによって異なるので、図-10に示すように高さ方向に五層に分割し、各層ごとに表面温度を与える。第一層は、実際に計測した表面温度を用いる。これに対して、第二層より第五層までは、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る。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か所、第二層より第五層までは各層ごとに1か所ずつ計13の場合について解析を行う。なお、対象としているダムの半径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測定時期の平均気温および水温を考慮して初期温度を与え、数日間は実測した表面温度が毎日繰り返して与えられるものと仮定して解析を行い、コンクリート内部の温度分布状態を求める。ここで、ダムコンクリートの熱伝導率は、2.50(kcal/mh°C)と仮定した。

(2) 変位解析

変位解析方法としては、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-11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り、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つの自由度をもつ。微小たわみ理論の仮定より、要素中央面からzの距離でのひずみ{ε}は以下の式で表わされる。

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_0\} + z\{\eta\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、{ε₀}は中央面のひずみ、{η}は中央面の曲率で以下のように表わされる。

$$\{\epsilon_0\} = [B_1]\{V_1\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\{\eta\} = [B_2]\{V_2\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、[B₁]、[B₂]は変位とひずみの関係を表わすマトリックス、また{V₁}はu、v方向の各節点変位、{V₂}はw、θ_x、θ_y方向の各節点変位、回転角である。

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く、温度解析よりダムコンクリート内部温度分布状態から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ΔT'とに分けると、熱膨張による初期ひずみ増分は以下の式で与えられる。

$$\{\Delta\epsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \alpha\Delta T \\ \alpha\Delta T \\ 0 \end{Bmatrix} = [B_1]\{V_1\} \dots\dots\dots (4)$$

$$\{\Delta\eta_0\} = \begin{Bmatrix} \alpha\Delta T' \\ \alpha\Delta T' \\ 0 \end{Bmatrix} = [B_2]\{V_2\} \dots\dots\dots (5)$$

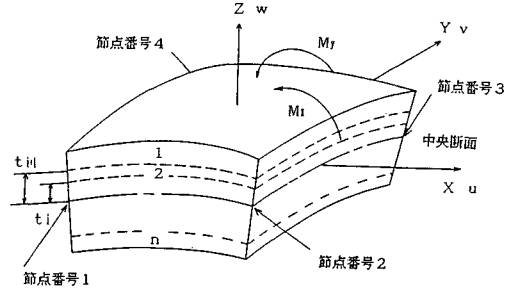


図-11 平面要素モデル

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{ΔF₀}は、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。

$$\{\Delta F_0\} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^n (t_{i+1} - t_i) \int_S [B_1]^T [D] \{\Delta\epsilon_0\} dS \\ + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (t_{i+1}^2 - t_i^2) \int_S [B_1]^T [D] \{\eta_0\} dS \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (t_{i+1}^3 - t_i^3) \int_S [B_2]^T [D] \{\Delta\epsilon_0\} dS \\ + \sum_{i=1}^n \frac{1}{3} (t_{i+1}^3 - t_i^3) \int_S [B_2]^T [D] \{\eta_0\} dS \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

$$[D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

なお、[D]は材料マトリックスで、Eは材料のヤング係数、νはポアソン比である。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-11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、層厚は各要素ごとに与えることが可能である。この節点力増分{ΔF₀}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{ΔU}は次式によって求められる。

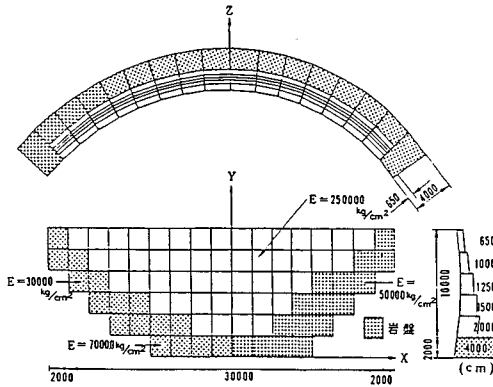
$$\{\Delta U\} = [K]^{-1} \{\Delta F_0\} \dots\dots\dots (8)$$

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。

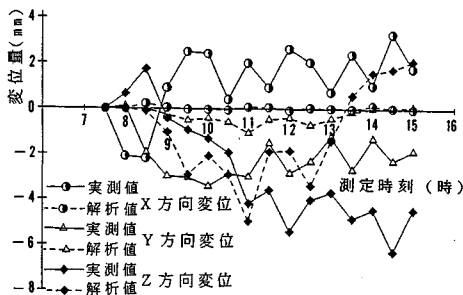
4. 解析結果と実測値との比較

(1) 解析モデルと解析条件

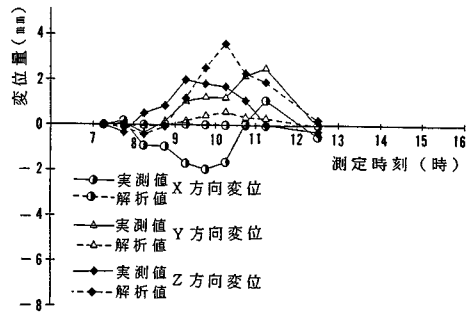
解析モデルとしては、コンクリートアーチダムの形状を考慮して、図-12に示すようなモデルとした。このモデルは周辺の岩盤の影響が考慮できるようにモデルの中に図に示すように岩盤を含んでおり、節点数105、要素数81のシェル型モデルである。なお、温度解析結果よりコンクリート内部の温度分布はコンクリート表面より約



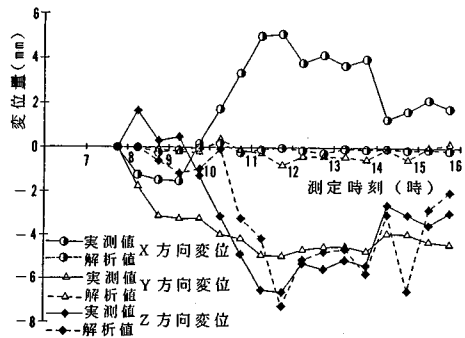
図一12 変位解析モデル



図一13 実測値と解析値との比較 (1989年3月)



図一14 実測値と解析値との比較 (1989年7月)



図一15 実測値と解析値との比較 (1988年11月)

20 cm 内部までは表面温度の影響で時間とともに変化するが、それより内部はほとんど一定であることが得られた³⁾。そこで、温度解析より求めた各測定時刻における各要素ごとの内部温度変化を 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。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左岸側岩盤 50 000 kg/cm²、右岸側岩盤 30 000 kg/cm²、底部岩盤 70 000 kg/cm²、ダム本体 250 000 kg/cm² とし、熱膨張係数は $1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ で、岩盤端部を固定とした。

(2) 解析結果と実測値との比較

解析は、図一8、図一9に示す表面温度差をもとに行っており、1989年3月、1989年7月の測定を対象とした解析結果を実測結果とともに図一13、図一14に示す。また、前回1988年11月の結果を図一15に示す。なお、図に示す解析値はいずれも実測位置での X、Y、Z 方向の変位を表わしている。

水平方向は、左右非対称モデルを採用し、左岸側、右岸側の岩盤のヤング係数にダム建設時の試験結果の値を代入したが、図一13～図一15に示すようにいずれも実測位置すなわち中央付近ではほとんど変位が生じなかった。次に、中央から左岸側へ80 m離れた地点での水平方

向に着目してみると、いずれの解析結果とも、中央の変位が下流側へ生じる場合は左岸側すなわち X 軸の正方向に、逆に上流側へ生じる場合は負方向に変位が生じた。また、中央から右岸側へ80 m離れた地点での変位は、中央の変位が下流側へ生じる場合は X 軸の負方向に、逆に上流側へ生じる場合は正方向に生じた。すなわち、ダム中央の変位が下流側に生じる場合は、ダム全体が中央に寄る形で、逆に上流側に生じる場合は、ダム全体が中央から広がる形で変位が生じる。これは、実際のダム兩岸の拘束条件が明らかでないため、解析では岩盤端部を固定としたところ、測定点に対応する中央付近では水平方向の力がつり合い、そのため、中央付近での水平方向変位がほとんど現われなかったものと考えられる。そこで、兩岸の拘束条件を任意に変えて解析し、実測位置での水平方向変位を解析より求めることを試みたが、中央付近の鉛直方向、半径方向の変位量や変位の傾向が実測結果と大幅に異なり、3方向変位はそれぞれについて実測結果を追従できなかった。ここでは実際のダム兩岸の拘束条件が把握できないため、この検討に関しては今後の課題にしたいと考えている。

鉛直方向変位は、日射のある3月の実測値が最大約-3.5 mm、11月が約-4.8 mmで、解析による変位はそれぞれ約-1 mm、約-0.8 mmである。日射のない7月の

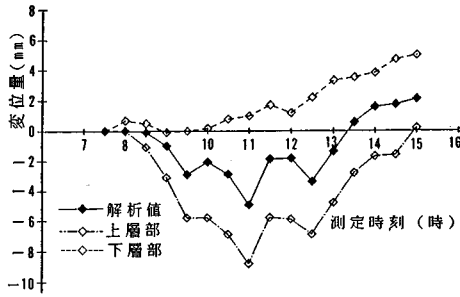


図-16 各層別の半径方向変位 (1989年3月)

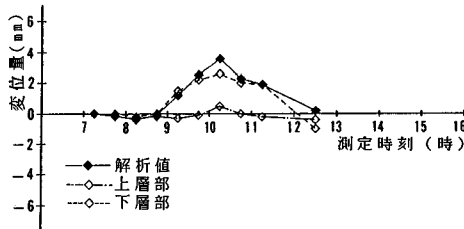


図-17 各層別の半径方向変位 (1989年7月)

実測値は最大約 2.5 mm であるが、解析値は約 0.5 mm となっている。また、図-13、図-15 に示すように半径方向変位が下流側に生じる場合は、鉛直方向変位は下向きに生じ、逆に、図-14 に示すように半径方向変位が上流側に生じる場合は上向きに生じている。これは、鉛直方向が、先に実測結果の検討で述べたように、半径方向変位に影響を受けた形で変位が生じていることを示す。ただし、解析では半径方向変位の鉛直方向変位に与える影響が小さく、実測値と差が生じたものと考えられる。しかし、今回の解析結果からいずれの場合も、解析値の時間経過に伴う傾向は、日射のある場合もない場合も実測値と一致することが明らかとなった。したがって、堤頂部の鉛直方向への日変位の傾向がこの解析により十分に把握できることが明らかとなった。

半径方向は、3月の解析結果が午後から実測とは異なる変位挙動を示しているほかは、いずれもほぼ実測値と同様な傾向を示し、変位量もほとんど一致している。また、日射のある3月と11月の変位は、図-8 に示す上層部表面温度差に似た形状を示し、日射のない7月の場合は、図-9 に示す下層部表面温度差に似た形状を示している。前述の実測結果の検討において、測定点の半径方向変位は、ダム湖水面を境にダムを上層部と下層部に分けて、それぞれの上流側コンクリート表面温度と下流側コンクリート表面温度の差を考えたところ、日射がある場合は上層部の影響が、日射のない場合は下層部の影響が大きく作用していると述べた。そこで、一例として日

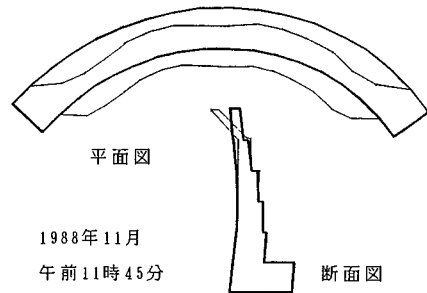
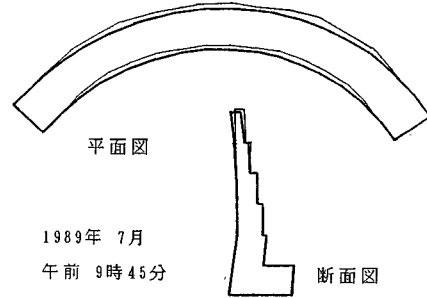
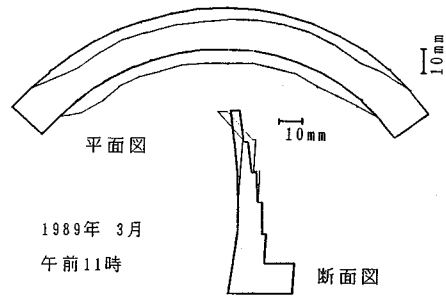


図-18 解析による日変位推定

射のある3月、日射のない7月のダム堤頂部中央の半径方向変位について、ダム上層部のコンクリート表面温度差だけを用いた場合、下層部だけ用いた場合、そして両方同時に用いた場合それぞれについて解析を行い、その検証を行うことにした。日射のある場合、上層部の表面温度差だけを用いて解析を行うと、図-16 に示すようにダム堤頂部中央は下流側方向に変位が生じ、逆に下層部だけ用いると上流側方向へ生じる。すなわち、日射のある場合、上層部と下層部では、ダム堤頂部中央の変位に与える影響が異なる。そして、図-16 から解析値が上層部のみ用いた結果と同様に下流側に変位が生じていることから、日射のある場合の堤頂部中央の半径方向変位には、上層部の表面温度差の影響が大きく作用していることがわかり、変位量は上層部と下層部の変位を足し合わせたものとほぼ一致することがわかる。これは、ダム堤頂部中央の半径方向の変位について先に実測で述べた検

討結果と一致する。なお、11月についても同様な解析結果が得られた。一方、日射のない7月については、図-17に示すように上層部の表面温度差だけを用いて解析を行った場合ほとんど変位が生じず、下層部だけ用いた場合は堤頂部中央は上流側方向に変位が生じている。そして、解析値が下層部のみ用いた結果と同様に上流側に変位が生じていることから、日射のない場合の堤頂部中央の半径方向変位には、下層部の表面温度差の影響が大きく作用していることがわかる。これも先の検討結果と一致する。したがって、上層部の表面温度差と下層部の表面温度差を両方用いて解析することで、日射のある場合も日射のない場合も、実際のダムの変位挙動の傾向を把握できることが明らかとなった。

以上の解析結果よりダム上流側と下流側コンクリート表面温度を測定し、また水位、水温、気温、コンクリート内部温度についても測定または、温度解析から仮定することより、ダムの半径方向の日変位挙動の推定が可能であり、また、鉛直方向変位の傾向の推定も可能であるといえよう。そして、実測と解析を組み合わせることにより、ダム全体の変位挙動を推定できる見通しが得られた。

そこで、各月において実測結果と解析結果が最も一致している時刻を選び、図-18に示すように測定点を含むダム堤頂部および中央鉛直断面の変位挙動を求めた。なお、太線で描いた図が測定開始時刻の状態、細線が変形を示す。日射のある3月、11月は、ダム堤頂部は全体的に下流側へせり出し、アーチの曲率の中心方向に向かって変位が生じている。また、堤頂部中央より両岸に近い場所での変位が大きいのは、ダムの形状がアーチであり、両岸が固定されているためと考えられる。さらに、中央鉛直断面における変位挙動より、日射のある場合は上層部と下層部の変位方向が逆向きであることが認められる。一方、日射のほとんどない7月は、全体的に上流側へせり出し、変位量は堤頂部中央のほうが大きく、上層部のみ変位が生じ下層部はほとんど変位が生じないことが認められる。

5. 結 論

レーザーを応用した測定システムを用いて、コンクリートアーチダムの堤頂部中央における日中の変位挙動の測定を3月、7月、11月と季節を変えて行い、気象条件が変位に与える影響について検討を行った。また、層状解析手法を用いて実測値と解析値との比較検討を行い、ダム全体の日変位挙動の把握を試みた。本研究で明らかになったことをまとめると以下のとおりである。

(1) 対象としたダムの堤頂部中央での実測結果よ

り、水平方向には、外気温の上昇に伴い右岸側へ、下降に伴い元に戻るよう左岸側へと変位が生じ、右岸側に変位が最大約6mmの変位が認められた。

(2) 堤頂部中央での鉛直方向変位の実測結果より、鉛直方向は、半径方向変位の影響を大きく受け、半径方向変位が下流側に生じるときは鉛直方向下向きに最大約8mmの変位が生じ、上流側に変位が生じるときは鉛直上向きに最大約2mmの変位が認められた。

(3) 堤頂部中央での半径方向変位の実測結果より、日射のある場合は下層部の影響もあるが主に上層部の影響を強く受けて、上層部の表面温度差に比例して下流側へ最大約12mmの変位が生じ、また、日射のない場合は上層部はほとんど影響せず下層部の影響を受けて、下層部の表面温度差に比例して上流側へ最大約2mmの変位が認められた。

(4) 解析で得られたダム堤頂部中央の半径方向変位は傾向、大きさともに実測結果とほとんど一致し、鉛直方向変位も変位の傾向が実測結果とほとんど一致した。特に日射のある場合は上層部の表面温度差の影響を、一方、日射のない場合は下層部の表面温度差の影響を大きく受けることが解析によっても明らかになった。したがって、ダムの表面温度の実測結果をもとに、温度解析、変位解析を行うことで、日射のある場合もない場合もダム全体の変位挙動を推定できる見通しが得られた。

なお今後、温度分布を他の構造物や山尾根などの影を考慮に入れて解析的に計算する手法を開発し、かつ変形解析手法の高精度化を検討するとともに、気象条件をもとに年間を通して各月ごとの日変位挙動の推定を行い、構造物の維持管理の目安となる日変位挙動の把握、さらに設計段階において変位を検討するための情報提供となる基礎資料の集積をしていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 吉田弥智ほか：日射熱による大型コンクリート構造物の温度および変形解析，土木学会論文集，第420号/V-13，pp.211～220，1990年8月。
- 2) 吉田弥智ほか：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，pp.105～114，1988年9月。
- 3) 吉田弥智ほか：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，第11回コンクリート工学年次論文報告集，pp.439～444，1989年7月。
- 4) Hand, F.R., Pecknold, D.A. and Schnobrich, W.C.: Nonlinear layered analysis of RC plates and shell, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 99, No. ST7, pp.1492～1505, Jul. 1973.

(1990.2.23・受付)