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

DEVELOPMENT OF THE SYSTEM TO MEASURE THREE-DIMENSIONAL DEFLECTION OF LARGE CONCRETE STRUCTURES USING A LASER DIODE AND A QUADRANT PIN PHOTO DIODE

吉田 弥智*・田辺 忠顕**・梅原 秀哲***・上原 匠****

By Hirotomo YOSHIDA, Tadaaki TANABE, Hidetaka UMEHARA and Takumi UEHARA

In this study the system to measure three-dimensional static and dynamic deflection with 0.5 mm accuracy from the distance of 50 m to 150 m away using a laser beam has been developed. The measuring system consists of two sets of theodolite with the launcher of a laser and the device which receives the laser. The system enables to measure the deflection along z axis as well as x and y axes. The deflection of a concrete arch dam caused by solar heat during a daytime is measured by this system, and the obtained results were discussed.

Keywords : concrete structure, deflection, laser beam

1. ま え が き

ダムや橋梁などの大型土木構造物の実際の挙動を計測することは、構造物の健全度を把握するために最も直接的手段であり、かつ、得られた情報は構造物設計手法の合理化のためきわめて有用かつ重要なものとなる。

従来大型土木構造物の変位の測定にはトランシットによる方法や写真測量法などが応用されているが、その測定精度は依頼側の要求精度を十分に満足するものではなく、精度を上げようとすると、構造物建設の段階から何らかの工夫をこらして、測定装置を構造物の中へ設置せざるを得なかった。このような装置は一般に大変高価で、ダムなどを除いて一般土木構造物には配置されていないのが実情である。したがって、ある橋梁の変形を計測する必要が生じた場合、その作業には新たに大掛かりな計測用準備が必要となり、経費の掛かる仕事とならざるを得なかった。また、十分な予算に恵まれない場合には、

局所的な変位の測定にとどまらざるを得ないのである。

そこで、本研究では最近のマイクロエレクトロニクス技術を駆使して、レーザー光線（光素子）を用いることにより、大型土木構造物の三次元方向の静的または動的な変位を 50～150 m 離れた位置から 0.5 mm の精度で簡便に測定するシステムの開発を目的とする研究を行った。そしてその基礎的応用の一歩として、実際にこのシステムを用いてダムの日射による 1 日単位の変位量の変化を測定した。このシステムは対象構造物から離れて変位を測定できるので、絶対変位を求めることが可能であり、また三次元的な変位を簡便に測定できる特徴を有している。なお、ここで本研究の題目に使われている光素子センサーとは、レーザー発振部より発射されたレーザー光線（光素子）を光電変換受光部（変位測定を行う対象構造物に取り付けられたレーザー受光部）で感知することにより対象構造物の変位を求める装置を意味する。

2. 測定システムの概要

(1) 装置のメカニズム

本研究で開発を行った測定装置は、測角精度 0.65" で水平角、天頂角が測定できるタキオメーター（ZEISS 西独製）に、レーザー発振光学部を取り付けた超精密電

* 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）

子セオドライト（写真—1），測定対象構造物に取り付けられレーザー発振光学部より発射されるレーザー光線を受光する光電変換受光器（写真—2），および受光器の対物レンズに入射するレーザー光線をA～D象限に分割し（図—1），その面積比より0.05 mmの精度で変位を算出する光電変換指示計（写真—3）とからなっている。通常のタキオメーターは測角機能だけでなく、直径10

写真—1 超精密電子セオドライト

写真—2 光電変換受光器

写真—3 光電変換指示計

cmの反射プリズムを測定対象点に設置し、それ自体から発射されたレーザー光線の反射波を感知することにより距離を測定する機構をもつ。しかし、レーザー光線は測定距離が最大4 kmとかなり遠方まで測定を行えるようにその断面が非常に小さくなっているため、測定対象点が数mmのオーダーで左右に変位しても、反射プリズムの感知範囲内であれば距離の測定は可能となるが、本研究の目的である測定対象点の変位変化は測定できない。したがって、本研究では、タキオメーターの測角機能のみを使用し、内臓のレーザー発振光学部を除去して新たに100～150 m離れた受光部で約20 mmの断面をもつレーザー光線を発射できるレーザー発振光学部を取り付け、改良を行った。これらの装置を図—2に示すように配置することにより、光電変換受光器が取り付けられた位置の変位を測定することが可能となる。なお、測定可能な変位は±10 mmまでで、光電変換指示計に表示される x 方向および y 方向の変位は次のようにして求められる。レーザー発振光学部対物レンズより発射されたレーザー光線は、図—1に示すように受光素子上（レーザー受光部対物レンズ内）に結像される。このとき各象限での受光素子からは、入射するレーザー光線の量に応じた A_1, B_1, C_1, D_1 の電圧が発生し、光電変換指示計の x 方向指示メーター、 y 方向指示メーターに次式で得られた電圧がそれぞれ表示される。

図—1 レーザー光線の入射

図—2 測定装置の構成

$$x=\eta\left[\frac{(A_1+C_1)-(B_1+D_1)}{A_1+B_1+C_1+D_1}\right].....(1)$$
$$y=\xi\left[\frac{(A_1+B_1)-(C_1+D_1)}{A_1+B_1+C_1+D_1}\right].....(2)$$

ただし、
η, ξ：電圧から実際の変位表示に直す変換関数
x, y：指示メーターより表示される x 方向変位, y 方向変位
A₁, B₁, C₁, D₁：受光素子上各象限に入射するレーザー光線に応じて発生する電圧

これらの電圧は、変位と比例関係にあり、η, ξ の実際の関数形は電氣的に調整され、10 mm が 1 000 mV となるように調節されているので x 方向および y 方向変位を読み取ることが可能となっている。

(2) 測定システム

構造物の変位は、超精密電子セオドライトから発射されたレーザー光線を、構造物に取り付けた光電変換受光器で受け、レーザー光線軸に垂直な面での受光器の移動量を光電変換指示計から読み取ることにより求めることができる。変位がレーザー光線軸に垂直な面だけの場合、すなわち 2 方向の場合は、超精密電子セオドライトと光電変換受光器を 1 セットだけ用いることにより測定が可能である。この場合は指示計で得られた値が直接構造物の変位を表わしており、座標変換を行う必要がない。一方、変位がレーザー光線軸に垂直な面だけでなくレーザー光線軸にも生じる場合、すなわち 3 方向の場合は、超精密電子セオドライトと光電変換受光器を 2 セット用いることにより測定が可能となる。この場合は、指示計で得られた値を座標変換することによって構造物の変位を求める必要がある。本研究では以下のようにして三次元方向の変位の測定を可能にした。

(3) 三次元測定システム

三次元測定システムは、超精密電子セオドライトと光電変換受光器を 2 セット用い、以下の方法で行う。図一 3 に示すように、対象構造物の測定地点の両側に 2 台の光電変換受光器を隣接して設置し、構造物から 50～150 m 離れた 2 か所の位置に超精密電子セオドライトを据え付ける。2 台の光電変換受光器の設置地点をできるだけ隣接することにより（実用上 2 点間距離は約 50 cm）、2 台の超精密電子セオドライトからそれぞれの受光器へ向けて発射されたレーザー光線は、ほとんど測定地点で交差する。構造物の測定地点における座標として、図に示すように測定地点における水平接線方向を X 軸、水平法線方向を Z 軸、そして天頂方向を Y 軸に取る。図一 3 における測定システムを三次元的に表わしたのが図一 4 である。図一 4(a) において、図中の A, B の 2 点が超精密電子セオドライト据え付け位置を、C 点が測

図一 3 三次元測定システム

図一 4 三次元座標

定地点、D、E の 2 点が光電変換受光器設置位置を示す。ところで、直線 AD と直線 BE は、A、B の 2 点の高さが同じでないかぎり、C 点で交差ししない。しかし、超精密電子セオドライト設置地点より構造物までの距離が 50～150 m で、DE 間は約 50 cm であるので、AD、BE と XY 平面との交点はほとんど C 点と一致する。したがって、ここでは C 点を AD と BE の交点とみなすことにする。A、B 点においては、超精密電子セオドライトの測角機能により各レーザー光線の方向を表わす水平角 β₁, β₂ および天頂角 (90°-α₁), (90°-α₂) が計測される。なお A、B 点における座標軸 X₁, X₂ は C 点における X 軸と平行である。また、D、E 点においては、レーザー光線の方向を z₁, z₂ 軸とすると z₁, z₂ 軸に垂直な方向である x₁, y₁ および x₂, y₂ 方向での変位が光電変

換指示計により計測される。なお光電変換指示計を水平に設置することにより x_1 および x_2 軸は水平方向にとることができる。したがって、図—4(b), (c) に示すように、D, E 点に C 点における X, Y, Z 座標を重ねると x_1 および x_2 軸は X 軸より $(90^\circ - \beta_1)$ および $(\beta_2 - 90^\circ)$ 、また y_1 および y_2 軸は天頂より α_1 および α_2 傾いた方向となる。これらの計測値を以下に示すような方法で変換することにより、測定地点 C の X, Y, Z の 3 方向の変位が求められる。

C 点での変位成分を (X, Y, Z) 、また D, E 点での変位成分をそれぞれ (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) とおくと、 x_1, y_1 および x_2, y_2 が光電変換指示計により測定される。なお、ここで C 点と D, E 点の間の距離は、ごく短いとして C 点の回転成分が D, E 点の X, Y, Z 方向の変位に及ぼす影響を無視する。 (x_1, y_1, z_1) 成分を、 (X, Y, Z) 成分に変換するマトリックスを、 $[S]$ 、 (x_2, y_2, z_2) 成分を、 (X, Y, Z) 成分に変換するマトリックスを、 $[T]$ とすると、 $[S]$ 、 $[T]$ は以下のようにベクトルの通常の変換式となる。

$$[S] = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 λ_{ij} 、 δ_{ij} は i 軸から j 軸へ方向余弦を表わす。
ところで、 X 軸と x_1 軸、 x_2 軸となす角度はそれぞれ $(90^\circ - \beta_1)$ 、 $(\beta_2 - 90^\circ)$ であり、また Y 軸と y_1 軸、 y_2 軸となす角度は α_1 、 α_2 である。 α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 は超精密電子セオドライトにより実測されるので、 X, Y, Z 軸と x_1, y_1, z_1 軸および x_2, y_2, z_2 軸との関係は既知となる。すなわち、 x_1, y_1, z_1 軸から X, Y, Z 軸へ方向余弦を用いて、マトリックス $[S]$ は以下のように表わすことができる。

$$[S] = \begin{bmatrix} \sin \beta_1 & 0 & -\cos \beta_1 \\ -\sin \alpha_1 \cos \beta_1 & \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 \sin \beta_1 \\ \cos \alpha_1 \cos \beta_1 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \cos \beta_1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

同様に x_2, y_2, z_2 軸から X, Y, Z 軸へ方向余弦を用いて、マトリックス $[T]$ は以下のように表わすことができる。

$$[T] = \begin{bmatrix} \sin \beta_2 & 0 & -\cos \beta_2 \\ -\sin \alpha_2 \cos \beta_2 & \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 \sin \beta_2 \\ \cos \alpha_2 \cos \beta_2 & \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 \cos \beta_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

これらの座標変換マトリックスを用いることにより、光

電変換指示計に表示される変位成分 (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) と構造物の測定地点における変位成分 (X, Y, Z) との関係を以下のように表わすことができる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [S]^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

- ここに、 X ：測定地点における水平方向の変位
 Y ：測定地点における天頂方向の変位
 Z ：測定地点における奥行方向の変位
 x_1, y_1 ：光電変換指示計より表示される光電変換受光器 D 地点の変位
 x_2, y_2 ：光電変換指示計より表示される光電変換受光器 E 地点の変位
 z_1, z_2 ：光電変換受光器の設置地点のレーザー光線軸方向の変位

式 (7) および式 (8) において、未知数は X, Y, Z, z_1, z_2 の 5 個で式の数 6 となり、1 つ式が余るが、これは変位の精度の確認のため使用することにする。

まず、式 (7) および式 (8) において X, Y, Z を消去し、光電変換受光器 A セット設置地点の変位 (x_1, y_1, z_1) と B セット設置地点の変位 (x_2, y_2, z_2) を用いて式を整理する。未知数 z_1, z_2 に対して式の数 3 となるので、測定変位 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) のうち 1 つを未知数として z_1, z_2 を求める。このとき未知数とした測定変位の解析結果と実際の測定結果が同じであれば、正しく測定できていると判断することができる。このようにして求めた z_1, z_2 を式 (7) または式 (8) に代入することにより測定対象構造物の任意の地点における X, Y, Z 方向の変位を求めることができる。

ところで、マトリックスに含まれる A 点および B 点の仰角 α_1, α_2 および、 X 軸と AF および BG のなす角、すなわち水平角 β_1, β_2 は以下のようにして求めることができる。 α_1 および α_2 は、超精密電子セオドライトが自動的に天頂方向を探知することができるので、直接測定することによって容易に求めることができるが、 β_1 および β_2 を求めるには、あらかじめ X 軸を設定しておく必要がある。図—3 に示すように、2 台の光電変換受光器は、いずれも水平面上に設置される。そこで、図—5 に示すように、これらの受光器 D と E を結んだ直線を X 軸とする。2 台の超精密電子セオドライトをこの水平面に投影した点を A'、B' とすると、この X 軸と A'B' とのなす角 K から幾何学的に求められる。なお、前にも述べたように、2 台の受光器は隣接して設置されるの

図-5 入射角測定

で、DとEの距離は50 cm程度である。
A'を座標の中心としてA'B'をX'軸、A'B'に垂直な軸をZ'軸とすると、DおよびEのX'座標およびZ'座標は、それぞれ以下のように表わされ、X軸とA'B'とのなす角Kは次式で求められる。

$$K = \tan^{-1} \left[\frac{Z'_2 - Z'_1}{X'_2 - X'_1} \right]$$
$$= \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\sin b_2 \sin a_2}{\sin r_2} - \frac{\sin b_1 \sin a_1}{\sin r_1}}{\frac{\sin b_2 \cos a_2}{\sin r_2} - \frac{\sin b_1 \cos a_1}{\sin r_1}} \right] \dots\dots\dots (9)$$

X'_1: D点のX'座標 X'_2: E点のX'座標
Z'_1: D点のZ'座標 Z'_2: E点のZ'座標
a_1 = ∠B'A'D a_2 = ∠B'A'E
b_1 = ∠A'B'D b_2 = ∠A'B'E
r_1 = ∠A'DB' r_2 = ∠A'EB'

したがって、β₁およびβ₂は以下の式で表わされる。
β₁ = α₁ - K
β₂ = 180 - β₂ - K }(10)

このように、β₁およびβ₂は、角度からのみで求められるので、座標変換における誤差は、超精密電子セオドライトの測角精度である0.65"に影響されるだけである。sin(0.65")≒0.0、cos(0.65")≒1.0となり、座標変換マトリックスでの誤差は、ほとんど0と考えられる。したがって、三次元測定の誤差は、光電変換指示計での変位の読み取り誤差0.05 mmと考えてよい。

最終的に、測定点の変位(X, Y, Z)は、角度α₁, β₁, α₂, β₂および光電変換受光器設置点の2方向変位x₁, y₁, x₂, y₂を測定し、式(7)、(8)を用いることによって、求められることになる。このうち、1個の式は、精度の確認に用いるものとする。

3. 装置の精度試験

変位が入射するレーザー光線の量によって表わされるため、出力される電圧は、超精密電子セオドライトと光電変換受光器との間の距離によって異なると考えられる。また出力される電圧と測定変位との比例関係が距離に影響される可能性がある。そこで、図-6に示すような測定方法で装置の精度試験を行った。すなわち、超精密電子セオドライトと光電変換受光器1セットを設置し、超精密電子セオドライトをX方向(水平方向)に1 mmずつ±9 mmまで移動し、光電変換指示計よりその変位量を読み取る。この測定を、超精密電子セオドライトと光電変換受光器との間の距離が50 m, 151 mで行い、実際の変位量と光電変換指示計の示す変位量との関係を求めた。

距離50 mの場合、超精密電子セオドライト本体を移動装置の上に乗せて移動させ、光電変換受光器を固定して行った。一方、151 mのときは、光電変換受光器を移動装置に取り付け、超精密電子セオドライトは、アスファルトの上に三脚で据え付けた。A, B 2台の超精密電子セオドライト本体または光電変換受光器をそれぞれ1方向(水平方向)に1 mmずつ移動したとき、光電変換指

図-6 精度試験

図-7 変位量と光電変換指示計値との関係

示計に表示される値と実際の移動量との関係を図-7に示す。なお、図中の直線は、各測定点より求めた回帰直線であり、点線は10 mmが1 000 mmVとなる基準線である。測定距離が50 mの場合、図に示すように測定点のばらつきがほとんどなく、移動量と光電変換指示計値との関係はほぼ基準線に一致するが、測定距離が151 mと長くなる場合、図に示すように測定点のばらつきは50 mのときに比べ少し大きく最大0.2 mm程度で、また移動量と光電変換指示計値との関係は基準線より低く現われた。

測定点のばらつきが、測定距離が50 mの場合の方が151 mの場合に比べて小さい原因として、測定距離が50 mの場合は、光電変換受光器(重量6.0 kg)をアスファルト上に三脚を用いて設置したのに対して、測定距離が151 mの場合は、超精密電子セオドライト(重量16.5 kg)をアスファルト上に三脚を用いて設置した。測定時期が夏であったため、アスファルトが溶けやすく、超精密電子セオドライトの重みで三脚が少し沈下したりして、設置が不安定であったことが考えられる。また測定距離が50 mの場合に比べて、151 mの場合は、それだけ風の影響を受けやすく、レーザー光線や設置に用いた三脚等が風によって揺れる可能性が大きくなることが考えられる。

また測定距離が50 mの場合、移動量と光電変換指示計値との関係が基準線にほぼ一致するが、測定距離151 mの場合は一致せず、実際の移動量に対して光電変換指示計値に表示された値の方が小さい。これは、50 mの測定距離でスパン調整がなされており、151 mの測定距離でもそのままの状態で行ったのが原因であると思われる。なお、スパン調整とは、図-1に示す受光素子上のスポット(レーザー光線入射断面積)の大きさにより、同じ変位量に対して受光素子から発生する電圧が異なるため、光電変換指示計に表示される変位量が基準線上にくるように行う機械調整のことをいう。

スパン調整に関してまず、スポットの大きさが測定距離によって異なることに着目して、表-1に示すように測定距離ごとにスポットの直径を測定した。光電変換受光器対物レンズの直径が60 mmで、光電変換指示計の表示範囲が±10 mmであるので、スポットの直径が40 mmを越えると測定できなくなることから、最大測定可能距離は約160 mであることが判明した。次に測定距

表-1 測定距離とスポット直径の関係

距離 (m)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Aset (mm)	22	27	26	30	29	33	35	37	45	46
Bset (mm)	20	27	29	30	30	33	38	40	43	43

図-8 5 mmの偏光を与えたときの測定距離と指示計値との関係

離ごとに行うスパン調整について検討を行った。スパン調整は、光電変換受光器対物レンズにレーザー光線を測定距離にかかわらず、平行に5 mmずらす偏光ガラスを取り付け、このとき光電変換指示計の針が5 mmを示すようにスパン調整ねじで調整することによって行った。

超精密電子セオドライトと光電変換受光器を1セットずつ用いて20 m間隔で光電変換受光器を移動させ、150 mまでx方向、y方向それぞれに対して、スパン調整を行ったところ、約70 mの測定距離まではスパン調整ねじで、調整が可能であることがわかった。しかし、70 m以上の場合はスパン調整ねじを最大にして5 mmの変位に対する光電変換指示計の値を記録しておき、測定ごとに光電変換指示計の示す値を換算し直さなければならない。そこで、光電変換指示計のスパン調整ねじを最大にして測定を行い、図-8に示すように各距離ごとの光電変換指示計の値をA、B両セットのx方向、y方向それぞれについて直線回帰を行い、相関係数を求めたところ相関係数はいずれの場合もほとんど-1.0に等しく、測定距離と指示計値は線形関係にあるといえよう。なお、測定値と回帰直線との差は最大0.3 mm程度である。70 mを越える測定距離に対しては、この関係式を用いて光電変換指示計値の示す値を変換して、変位量を求めることにした。

今回の精度試験により、超精密電子セオドライトを用いた変位量測定の測定精度は測定距離により異なるが、指示計値と変位量との誤差およびスパン調整による誤差から0.5 mm程度であることがわかった。さらに測定精度は、設置条件および気象条件等に影響を受けやすく、特にダムなど現場で測定する場合は超精密電子セオドライトおよび光電変換受光器の設置条件や測定中の気象条件に十分注意を払う必要があると思われる。

4. 三次元測定

(1) コンクリートアーチダム測定方法

三次元測定システムを利用して、ダムの日射による1

図-9 アーチダム概略図

図-10 測定地点概略図

図-11 測定システム概要図

写真-4 測定箇所

写真-5 光電変換受光器

写真-6 超精密電子セオドライト

日の変位変化の測定を行い、システムの適用について検討を行った。対象としたダムは、図-9に示すように堤高100m、堤頂長321.1mのコンクリートアーチダムである。測定時期は11月であり、測定地点は、ダム下流側のダム堤頂中央部1か所であり、図-10に測定地点概略図を、また図-11に測定システムの概要を示す。

今回の測定では、図-11に示すように光電変換受光器2台A、Bを、ダム堤頂中央部クレストゲート近くのコンクリート張り出し部壁面(堤頂より約6m下)に、アンカーボルトで水平になるように取り付けた光電変換受光器取付架台上に据え付けた(写真-4および写真-5)。そして図-10に示すように、超精密電子セオドライトAセットを約130m離れた右岸側監査廊GT-2の出口に(写真-6)、Bセットは、約100m離れた左岸監査廊GT-5の出口に三脚を用いて据え付けた。なお、A、B両セット間の距離は、約180mである。三脚の据え付けにあたり、設置場所に早強セメントで三脚の脚の先端に合う型枠を事前に作り、測定当日三脚を据え

付けた後、脚と型枠のすきまをパテで固定した。超精密電子セオドライト本体および三脚は、直射日光を避けるために発泡スチロールとアルミ箔で保護し、さらに測定中は超精密電子セオドライト設置地点全体をビニールシートで覆い直射日光を防いだ。

測定は、両方の超精密電子セオドライトよりレーザー光線を光電変換受光器対物レンズに向けて発射し、光電変換受光器に入射するレーザー光線の量より表示される1日の日射によるダムの静的な変位変化を光電変換指示計で読み取ることによって行った。なお、測定対象地点における変位方向は、図-10に示すようにX、Y、Z座標を用いた。測定値は、光電変換指示計の値を各測定時刻ごとにデータレコーダーに記録させ、測定終了後にADコンバーターを介して、パーソナルコンピュータPC8801より出力して処理した。したがって、測定は午前7時より開始し、それ以後30分間隔で測定し、5

図—12 気温およびコンクリート表面温度

分間データレコーダーに測定値を記録させた。また、図—12に示すように各測定時刻に気温および堤頂部下流側、上流側ダム表面温度の測定を行った。なお、測定値は、データレコーダーに入力した値をコンピューターにより10秒間隔で30個取り出しその平均値とした。

(2) 測定結果および考察

光電変換指示計から得られた値をセオドライトと受光器間の距離、Aセット130.070 m、Bセット100.364 mに応じて補正した x 方向および y 方向の測定値を図—13および図—14に示す。この値を用いて座標変換を行い、ダムの日射による静的変位量 (X, Y, Z) を求めた。なお、座標変換マトリックスに用いる α, β の値は、仰角および水平角より

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 10^\circ 4792 & \beta_1 &= 30^\circ 4154 \\ \alpha_2 &= 13^\circ 2144 & \beta_2 &= 137^\circ 7265 \end{aligned}$$

となった。

図—13 光電変換指示計の x 方向値

図—14 光電変換指示計の y 方向値

図—15 アーチダムの日射による変位変化

変位量を求めるには、前にも述べたように既知数が1つ多いので、 x_1, x_2, y_1, y_2 の測定値の1つを未知数として、 X, Y, Z 方向の変位を求めた。図—15にそれぞれ、 X, Y, Z 方向の変位の測定時刻ごとの変化を示す。図に示すように、 X 方向の変位および Z 方向の変位は、いずれの場合とも同じ値を示した。しかし Y 方向の変位は、 y_1 を未知数とした場合と、 y_2 を未知数とした場合とで異なる値になった。これは、光電変換受光器がほとんど同じ位置に置かれているので本来ほぼ同じ傾向を示すAセットの y 方向変位とBセットの y 方向変位が図—14に示すように異なった傾向を示したため、解析値の Y 方向変位に影響が大きく現われ、異なる結果が得られたものである。その原因として、先に仮定した回転成分を無視したことなどが考えられる。

図—15に示すように、水平方向 (X 方向) 変位は、はじめ右岸方向に変位し、その後左岸方向に変位した。最終的には変位は、元に戻っている。これは、図—12に示す気温およびコンクリート表面温度の時間変化や、ダム全体における日なた部分の時間変化より測定開始時には左岸側からダムの側壁に日光が当たり、側壁部の温度上昇に伴う膨張で、ダムが全体的に右岸方向にたわんだことと、またその後日が高くなり、午後2時ごろには、ダム右岸側壁に日光が当たり、左岸方向にたわんだことによると考えられる。次に、奥行き水平方向 (Z 方向) の変位は、下流側にせり出ている。これは、ダムの上流側に日が当たるため、ダムの上流側と下流側で図—12に示すような温度差ができ、下流側にせり出す形となって変位が生じたと考えられる。しかし、水位が高い (EL 282) ため、それほど大きな変位が生じなかったものと思われる。また、天頂方向 (Y 方向) の変位は、前にも述べたように上下どちらの方向へ変位したかは、判断がつかなかった。以上の実測より、対象となったダムの測定地点での変位は、11月では1日に水平方向に約7 mm、奥行き方向は下流に約12 mmの変位を生じることが確認できた。

天頂方向の変位については、ここで結論的なことを述べるのは差し控え、回転成分の影響を考慮してさらに検

討を加えたいと考えている。

5. 結 論

光素子センサーを用いて構造物から離れた場所で構造物の三次元的な変位を精度よく測定するシステムの開発を目的とし、基礎的な検討を行うと同時に、その応用の第一歩としてコンクリートアーチダムの日射による1日の変位変化の測定を行った。得られた結果を要約すると次のようになる。

(1) 超精密電子セオドライトと光電変換受光器を1セットずつ用いて行った精度試験より、約70 mの測定距離まではスパン調整ねじでまた70 mから160 mの測定距離ではスパン調整ねじを最大にして各距離ごとに係数をかけることにより、0.5 mmの測定精度で変位を測定できることが確認された。しかし精度が高いため、三脚の設置および風や直射日光等の影響を鋭敏に感知し、誤差を生じやすいのでその取扱いにおいては十分に注意を払う必要があることが明らかとなった。

(2) 超精密電子セオドライトと光電変換受光器を2セット用いることにより構造物から50~150 m離れた場所で構造物の三次元的な変位を測定するシステムの開

発を行った。これは、構造物の対象地点に2台の光電変換受光器を隣接して設置し、各受光器で計測された変位をマトリックス変換することにより対象地点の三次元的な変位を求めるシステムである。このシステムを用いて、高さ約100 mのコンクリートアーチダムの日射による1日の変位変化の測定を行い、11月では1日に水平方向に約7 mm、奥行き方向は下流側に約12 mmの変位を生じることが確認できた。これは、従来の計測システムに比べて格段に経費のかからない巨大土木構造物の変位測定のための簡便方法といえる。

(3) ダムの計測において、天頂方向の変位測定が必ずしも満足のいく結果とならなかった。これは、構造物から腕を伸ばして受光器を取り付けたため、構造物の回転成分の影響を受けたためと考えられる。今後設置方法等の検討を行って改良を計りたいと考えている。

本研究の装置製作にあたり(株)測機舎の皆様にご多大なご協力を頂いたことに感謝します。また、本研究は文部省科学研究費補助金(No.58850101)を受けて行ったものである。ここに付記して謝意を表します。

(1988.1.18・受付)