

熊本大学工学部

正員

三池 亮 次

〇

学生員

田 中 重 範

福岡市役所

正員

木 下 雅 常

1 要旨

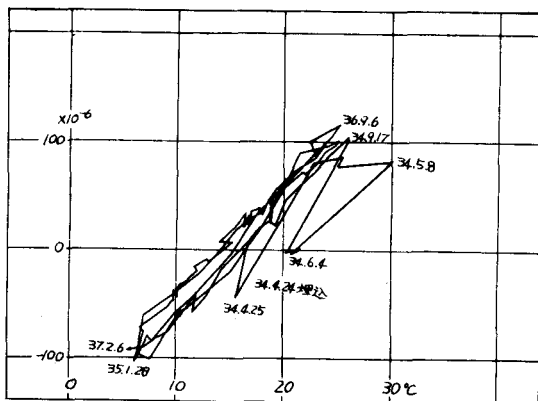
実測資料によるアーチダムのたわみの挙動解析については、重回帰分析、主成分分析法の適用によりかなり詳細な研究が行われてきたが、ひずみの挙動解析についてはそれが水圧荷重、温度荷重あるいは局部的固有応力等の影響を受けかなり複雑な動きを示すため、ダム管理所において豊富なデータの集積があるにもかかわらず解析が困難な状態にある。

本研究では、まず下流面近傍に下流面に垂直に埋設されたひずみ計によるひずみの値が近似的に零となること、および上流面近傍の上流面に垂直方向のひずみ在水圧荷重のみの影響を受ける仮定に立脚して、重回帰分析によりコンクリートの温度膨脹係数 C_t および弾性係数 E_c の値を推定し、ひずみの体積膨脹補正、温度膨脹補正およびポアソン比の補正を行い、さらに重回帰分析を適用することによってひずみの構造すなわち水圧荷重、温度荷重による各ひずみの持分を推定し、アーチダムの応力の挙動特性を考察しようとするものである。

2. コンクリートの温度膨脹係数および弾性係数の推定

(1) 理論

アーチダムに埋設されたひずみ計によるひずみの実測値 ε は、弾性係数 E_c を乗ずることによって直ちに応力が得られるような補正ひずみ ε' ではない。 ε' を求めるためにはコンクリートの温度膨脹係数 C_t およびポアソン比 ν の適正な値を推定しひずみの実測値 ε に対して体積膨脹、温度膨脹およびポアソン比の補正を行わなければならない。 C_t の推定には無応力ひずみ計による方法があり、また ν については無応力ひずみ計より得られる C_t を使用して、下流面に垂直に埋設されたひずみ計の数個の資料に対して、その値を零とするように算定する方法がとられている。²⁾



しかしながら、とくにアーチダム上部断面のひずみは温度の影響を顕著に受けるため、図-1 稜北ダムの無応力ひずみ計の挙動 (El. 275) C_t の値の僅かな変動によって、ひずみの温度膨脹補正値が大きく変わるから、より合理的で正確な C_t および ν の算定方法が望まれる。ここではポアソン比 ν の値を仮定し、重回帰分析により C_t の最適解の誘導を試みる。

(a) 下流面に近接するひずみ計

下流面近傍に下流面に垂直に埋設されたひずみ計による実測ひずみ値 ε は温度膨脹のみに帰因して

変動する。図-2に示すような成分ひずみ計 (E_1, E_2, E_3, E_4, E_5) において E_1 を下流面に垂直なひずみ計, E_2, E_4 をおのおのアーチ方向片持はり方向ひずみ計とする。各ひずみ計 E_i による実測ひずみを ε_i とすれば, ε_i に対して温度膨脹補正を行ったひずみ ε'_i は

$$\varepsilon'_i = \varepsilon_i - C_t \Delta t \quad \text{----- (1)}$$

ただし $i = 1, 2, 3, 4, 5$ であり, Δt はひずみ計埋設点における等置直線温度上昇量とする。ここに等置直線温度上昇量を採用したのは, ε'_i として固有温度応力に基づくひずみを除いた値を求め, 図-2 5成分ひずみ計解析を容易にするためであり, またひずみ計埋設時以降たん水開始までのひずみは, クリープ等の影響を受けきわめて複雑な履歴をとるので, 解析の起算をたん水開始時にとり ε_i および Δt の値とした。 ε'_i に対してポアソン比の補正を行えば補正ひずみ ε''_i が得られる。すなわち

$$\begin{aligned} \varepsilon''_i &= \frac{1}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ (1-\nu) \varepsilon'_i + \nu (\varepsilon'_2 + \varepsilon'_4) \right\} \\ &= \frac{1}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_i \end{aligned} \quad \text{----- (2)}$$

(1)式を(2)式に代入すれば

$$\varepsilon_i = (1-\nu) \varepsilon'_i + \nu (\varepsilon'_2 + \varepsilon'_4) = \varepsilon_i + \nu (\varepsilon_2 + \varepsilon_4 - \varepsilon_i) - (1+\nu) C_t \Delta t$$

しかるに弾性理論によれば

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 + \varepsilon_4 &= \frac{1}{2} (\varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + \varepsilon_5) \\ \therefore \varepsilon &\equiv \varepsilon_2 + \varepsilon_4 - \varepsilon_1 = \frac{1}{2} (\varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + \varepsilon_5) - \varepsilon_1 \end{aligned} \quad \text{----- (3)}$$

であるから

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i + \nu \varepsilon - (1+\nu) C_t \Delta t \quad \text{----- (4)}$$

さてここで ε''_i したがって ε_i の値を近似的に零とする条件あるいは,

$$\sum \varepsilon_i \rightarrow \text{最小} \quad \text{----- (5)}$$

とする C_t を与えられた ν に対する最適温度膨脹係数とすれば, 最小二乗法により

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sum \varepsilon_i^2}{\partial C_t} &= 2 \sum \varepsilon_i \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial C_t} = 0 \\ \therefore C_t &= \frac{\sum \varepsilon_i \Delta t + \nu \sum \varepsilon \Delta t}{(1+\nu) \sum \Delta t^2} \end{aligned} \quad \text{----- (6)}$$

となる。(6)式により稜北ダムのクラウンの EL.275, EL.285, における下流面ひずみ計 E-22, E-28 埋設のコンクリートの C_t は $\nu = 0.2$ に対しておのおの $11.83, 14.54$ $(\times 10^{-6})$ であった。図-3 は E-22 の $\nu = 0.2, C_t = 11.83$ に対する ε''_i ($i = 1, 2, 4$) の挙動をプロットしたものであるが, ε''_i の値はきわめて小さく解析の精度が良好であることを示唆する。同様に, C_t および ν の両値に対して (5) 式を満足する ν および C_t の値を最小二乗法により求めることが可能である。この方法によれば E-22 の $\nu = 0.1025, C_t = 12.47$ $(\times 10^{-6})$ を得た。

(b). 上流面に近接するひずみ計

上流面近傍に上流面に垂直に埋設されたひずみ計による実測ひずみ ε_1 は温度膨脹と水圧荷重の影響を受け変動する。したがって (2) 式に (3) 式を代入して得られる次式

$$\varepsilon_1'' = \frac{\varepsilon_1 + \nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} - C_t \frac{\Delta t}{1-2\nu} \quad \text{-----(7)}$$

よって、実測ひずみより温度膨脹によるひずみを差し引けば、 ε_1'' は水压荷重のみに影響を受け水位に関する回帰係数 b_h 、水位 h 、計器埋設点の標高 h_c に対して

$$\varepsilon_1'' = b_h(h - h_c) \quad \text{------(8)}$$

となるべきである。ここに $h < h_c$ のとき $h - h_c = 0$ とする。

(7), (8) 式より観測誤差 e に対して、次の線型回帰模型が成立する。すなわち

$$\frac{\varepsilon_1 + \nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} = C_t \frac{\Delta t}{1-2\nu} + b_h(h - h_c) + e \quad \text{----- (9)}$$

上式の未知量 C_t および b_h の最確値は重回帰分析により求めることができる。なおコンクリートの弾性係数を E_c 、水の単位体積重量を w とし、引張応力によるひずみを正にとるとき

$$\varepsilon_1'' = - \frac{w(h - h_c)}{E_c} \quad \text{----- (10)}$$

であるから、(8), (10) 式より、次式

$$E_c = - \frac{w}{b_h} \quad \text{----- (11)}$$

を得、コンクリートの弾性係数の推定が可能である。

綾北ダムのクラウンの EL.275 の上流面近傍のひずみ計 E-21 について解析の結果 $\nu = 0.18$ のとき $C_t = 11.81$ (×10⁻⁶) を得た。なおこの場合の水压荷重によるひずみが小さいためか検定の結果 b_h は棄却された。

また EL.245 の上流面近傍に埋設されたひずみ計 E-8 については、 $\nu = 0.18$ のとき $C_t = 8.67$ (×10⁻⁶) であった。また $b_h = -0.5786$ (×10⁻⁶) であり、したがってこの点におけるコンクリートの弾性係数 E_c の値は $w = 1 \text{ ton/m}^2$ とすれば

$$E_c = \frac{1}{0.5786} \times 10^6 \text{ (ton/m}^2\text{)}$$

$$= 175,000 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

となる。 b_h の不偏分散の平方根は 0.1067 (×10⁻⁶) であり、 E_c の不偏分散の平方根は、 $32,000 \text{ kg/cm}^2$ であった。また C_t の不偏分散の平方根は 0.739 (×10⁻⁶) であった。

3. ひずみの重回帰分析

かくして誘導されたポアソン比 ν に対する最適温度膨脹係数 C_t を使用して、補正ひずみ ε'' を求め、この ε'' と堤体平均温度 t 、温度こう配 α 、および水位 h の間に次の線型回帰模型

$$\varepsilon'' = \sum_i a_i(t_i - t_{i0}) + \sum_i b_i(\alpha_i - \alpha_{i0}) + C_1(h - h_0) + C_2(h - h_0)(h_c - h) + C_3(h - h_0)^2(h_c - h) \quad \text{----- (12)}$$

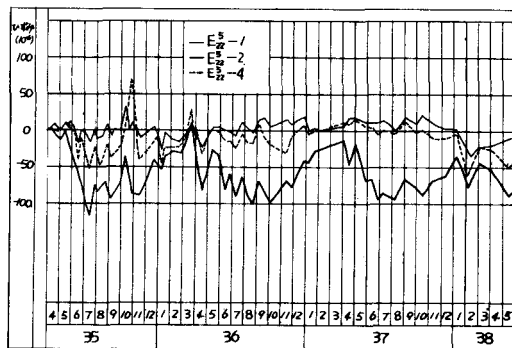


図-3 補正ひずみ変動図

が成立するものとし、重回帰分析によって偏回帰係数 $\hat{\alpha}_i$, $\hat{\beta}_i$, $\hat{\gamma}_i$ を計算すれば、各荷重によるひずみの持分が推定される。ここに、 $t_{1.0}$, $\alpha_{1.0}$ はたん水開始の時における堤体平均温度および温度こう配であり、 h_0 はたん水開始の水位、 h_c はアーチ作用部分におけるアーチダムの天端標高とする。また、 t_i , α_i 等における添字 i は標高番号で $i=1, 2, 3$ はおのおの EL.245, EL.275, EL.285 を表わす。EL.275 の下流面の近傍に埋設された E_{22} のアーチ方向のひずみ ε_{22-2}'' に対して解析の結果

$$\varepsilon_{22-2}'' = -10.28(t_2 - t_{2.0}) + 8.510(t_3 - t_{3.0}) - 28.04(\alpha_2 - \alpha_{2.0}) - 1.375(h - 238.94) + 0.04273(h - 238.94)(291.5 - h) \quad \text{----- (13)}$$

同様に E_{22} の片持ばり方向のひずみ ε_{22-4}'' に対して

$$\varepsilon_{22-4}'' = -19.86 - 6.373(t_1 - t_{1.0}) + 2.748(t_3 - t_{3.0}) - 21.61(\alpha_2 - \alpha_{2.0}) \quad \text{----- (14)}$$

を得た。 ε_{22-2}'' に対して不偏分散の平方根は 12.27×10^{-6} , ε_{22-4}'' に対して 25.34×10^{-6} であった。

ε_{22-2}'' の解析結果を図示した図-4 より次の事項を考察することができる。

① Creep はたん水開始以降存在しないものとして解析した。昭和38年以降において、実測ひずみが計算ひずみよりずれてくるのは、片持ばりにクラックが発生する等の原因により次第に応力が大きくなるためであると考えられる。

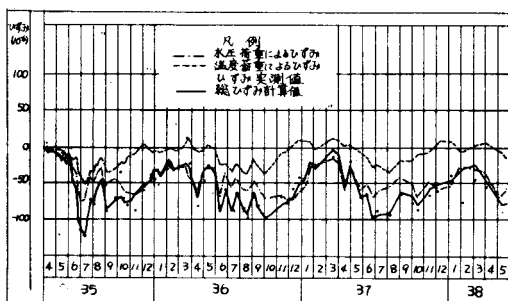


図-4 続北ダムの ε_{22-2}'' の挙動解析図

②、水圧荷重によるひずみは水位 EL.291.5 に対して 72.3×10^{-6} 、温度荷重によるひずみの変化量は、 65.3×10^{-6} であった。これを $E_c = 200,000 \text{ kg/cm}^2$ として応力に換算すれば、水圧荷重に対して 14.5 kg/cm^2 、温度荷重に対して 13.1 kg/cm^2 となる。

また (14) 式に示すとおり、 ε_{22-4}'' に対して水圧荷重によるひずみは棄却された。これは、水圧荷重によるひずみが、線型回帰モデルの誤差 σ の不偏分散の平方根の値 25.34×10^{-6} に比して十分大きい値をとらないために生じたものであろう。

4. 結論

堤体上下流面に垂直に埋設されたひずみ計のひずみ ε_i' から、重回帰分析によってひずみ計埋設先のコンクリートの膨脹係数 C_t および弾性係数 E_c を求める方法を提案し、 E_{22} のひずみ計に対してひずみの補正計算および重回帰分析の結果を紹介した。

電子計算は熊大 FACOM 231 を使用した。なお本研究につき御指導、御教示を受けた熊大福井教授、および土木研究所石井、中村、飯田各ダム、技術管理部室長、資料を提供された宮崎県企業局に厚く謝意を表す。

参考文献

- 1) K Nakamura, R. Iida, R. Miike: "Analysis on Behaviour of Arch Dam by Multivariate Analytical Method" VIIIth Congress on Large Dam 1964
- 2) M. Rocha, J.L. Serafin, A.F. da Silveira, M.Q. Guerreiro: "A Method of Quantitative Interpretation of the Results Obtained in Observation of Dams". R.36. the VIII Congress on Large Dam, New York, 1958