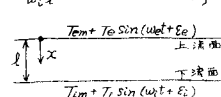


S1. アーチダムの温度応力の問題点は2つに大別でき、(A)打設後の硬化熱の発生にともなう問題。セメントの熱特性、セメント使用量、つぎめ間隔、施工速度、時期、プレリングポストリングの要不要、つぎめグラウトの時期以上の総合として硬化熱によるひびわれを避けるや否やという問題となる。(B) 外部の気温、貯水温の周期的変動により温度応力を生じる。収縮つぎめグラウト時以降の内部温度降下量を設計量とすることは *Critical Condition* として正しい。しかし近年ダムの実測技術の進歩に伴い、各種の測定値が得られ出したが、設計計算書とどうひねくつて見ても解釈に差がある結果に出くわす。これは *Actual Condition* としての実測値と *Critical Condition* としての設計値のちがいであり当然なことであり。各種の *Actual condition* を順次説明消去し、その結果として始めて *Critical Condition* としてのダムの安全性を論議できることになるであろう。このような意味で *Actual condition* の問題の1つとして所題のテーマが浮き上ってくる。その近似的な一解法と数値計算の一例を述べ、従来内部温度の平均値のみを用いていた点、誤差を招いた上下流内部温度勾配とあわせ考慮した。

S2. 貯水温 $T_e = T_m + T_e \sin(\omega t + \epsilon_e)$ 、下流面気温 $T_i = T_m + T_i \sin(\omega t + \epsilon_i)$ なる周期的変化による堤体内部温度 $\theta(x, t)$ 、この $\theta(x, t)$ なる非線型内部温度分布と静力学的に等価な線型分布で (x, t) の置換。熱は上下流方向 x の移動が支配的と考え、初期条件とつぎめグラウト時の温度分布 $f(x)$ 、厚 l 、温度伝達率 K とすると、Duhammel の定理を使い、

$$\theta(x, t) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{K^2 n^2 \pi^2 t}{l^2}} \sin \frac{n\pi x}{l} \int_0^l f(x') \sin \frac{n\pi x'}{l} dx' + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{T_m \cos n\pi - T_m \sin \frac{n\pi x}{l} e^{-\frac{K^2 n^2 \pi^2 t}{l^2}}}{\omega \frac{l^2}{K^2} \sin \frac{n\pi x}{l}} + T_m + (T_m - T_m) \frac{x}{l} \\ + \frac{2\pi K}{\omega l^2} \sum_{n=1}^{\infty} n e^{-\frac{K^2 n^2 \pi^2 t}{l^2}} \sin \frac{n\pi x}{l} \left[\frac{-T_e}{1 + \frac{n^2 \pi^2 K^2}{\omega l^2}} \left(\frac{K^2 n^2 \pi^2}{\omega l^2} \sin \epsilon_e - \cos \epsilon_e \right) \right] + \frac{2\pi K}{\omega l^2} \sum_{n=1}^{\infty} n e^{-\frac{K^2 n^2 \pi^2 t}{l^2}} \sin \frac{n\pi x}{l} \left[\frac{T_i \cos n\pi}{1 + \frac{n^2 \pi^2 K^2}{\omega l^2}} \left(\frac{K^2 n^2 \pi^2}{\omega l^2} \sin \epsilon_i - \cos \epsilon_i \right) \right] \\ + T_e 2\pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^3}{1 + n^2 \pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2} \sin \frac{n\pi x}{l} \sin(\omega t + \epsilon_e) - T_e 2\pi \left(\frac{K}{\omega l^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{1 + n^2 \pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2} \sin \frac{n\pi x}{l} \cos(\omega t + \epsilon_e) \\ - T_i 2\pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^3 \cos n\pi}{1 + n^2 \pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2} \sin \frac{n\pi x}{l} \sin(\omega t + \epsilon_i) + T_i 2\pi \left(\frac{K}{\omega l^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n \cos n\pi}{1 + n^2 \pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2} \sin \frac{n\pi x}{l} \cos(\omega t + \epsilon_i)$$


温度応力を応用力学的に取り扱うために、平面保持の仮定に立つ。 θ の面積 θ_A 、中心軸に関するモーメント θ_M が等しい条件より、非線型分布 $\theta(x, t)$ と線型な等価分布で $= \frac{\theta_A}{l} + \frac{12 \theta_M}{l^3} (x - \frac{l}{2})$ に置換することにする。周期的な問題を論ずるため $\theta(x, t)$ の過渡現象を一応、除く。数式を整理すると、

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_A &= \frac{l}{2} (T_m + T_m) + T_e l \sqrt{A_A^2 + B_A^2} \sin(\omega t + \epsilon_e - \phi_e) + T_i l \sqrt{C_A^2 + D_A^2} \sin(\omega t + \epsilon_i - \phi_i) \quad \therefore \phi_e = \tan^{-1} \left(\frac{B_A}{A_A} \right), \quad \phi_i = \tan^{-1} \left(\frac{D_A}{C_A} \right), \\ A_A &= 2\pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 (1 - \cos n\pi)}{1 + n^2 \pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2}, \quad B_A = 2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 - \cos n\pi)}{1 + n^2 \pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2}, \quad C_A = 2\pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 \cos n\pi (1 - \cos n\pi)}{1 + n^2 \pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2}, \quad D_A = 2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi (1 - \cos n\pi)}{1 + n^2 \pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2}, \\ \theta_M &= \frac{l^2}{12} (T_m - T_m) - T_e l^2 \sqrt{A_M^2 + B_M^2} \sin(\omega t + \epsilon_e - \phi_{Me}) + T_i l^2 \sqrt{C_M^2 + D_M^2} \sin(\omega t + \epsilon_i - \phi_{Mi}) \quad \therefore \phi_{Me} = \tan^{-1} \left(\frac{B_M}{A_M} \right), \quad \phi_{Mi} = \tan^{-1} \left(\frac{D_M}{C_M} \right), \\ A_M &= \pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 (1 + \cos n\pi)}{1 + n^2 \pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2}, \quad B_M = \left(\frac{K}{\omega l^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 + \cos n\pi)}{1 + n^2 \pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2}, \quad C_M = \pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 (1 + \cos n\pi)}{1 + n^2 \pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2}, \quad D_M = \left(\frac{K}{\omega l^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 + \cos n\pi)}{1 + n^2 \pi^2 \left(\frac{K}{\omega l^2} \right)^2}, \end{aligned} \right.$$

線型置換後の平均温度は $T_m = \frac{\theta_A}{l}$ 、上下流温度差は $\Delta T = T_i - T_e = \frac{12 \theta_M}{l^2}$ とする。

S3. 弾性固定円弧アーチの温度応力の解析 (厚 T 、中心線半径 r_c 、中心角 $2\phi_A$ 、温度膨脹係数 α 、温度差分布 $T = T_m + \frac{\Delta T}{2} (x - \frac{l}{2})$)。断面の都合で、結果だけを示す。アーチラウンに不静定量 ΔT の Bureau of Reclamation 方式で解き、結果も同じ意味にすると、 T が厚さ方向のみの関数の場合は $D_1 = -\alpha \Delta T \frac{T}{r_c} \phi_A$ 、 $D_2 = -\alpha T_m r_c \text{vers } \phi_A - \alpha \Delta T r_c \frac{T}{r_c} \text{vers } \phi_A$ 、 $D_3 = \alpha T_m r_c \sin \phi_A - \alpha \Delta T r_c \frac{T}{r_c} (\phi_A - \sin \phi_A)$ とすることにより、不静定量を解くことができる。従来は ΔT については考えていたが、筆者は各種の数表をくわしく共に、三次元的にアーチダムの計算の場合の ΔT 分の影響を調べた。(田谷) 変断面片持りの $\Delta T(x)$ によるタワミ $q(x)$ は $\sum \frac{C \Delta T}{T(x)} \Delta x \Delta z$ で求まる。

S4. アーチダムとしての三次元的な温度応力の解析。アーチおよび片持りの $T_m, \Delta T$ による温度タワミを求めておき、同様に Self Balancing Load (内力荷重) によるタワミを求めておき、温度、内力荷重の組合せにより、変形の一義性の条件から内力荷重の大きさが決定でき、三次元的なアーチダムとしての温度応力を求める。筆者は上樁梁ダム、佐々並ダム、櫛俣飯崎切りアーチダムの三例について、各ダムサイトの気象観測記録より、とりあえず年同様の温度振動を

Superposing of Periodical Thermal Stresses to Other Static Stresses on Crown Cantilever

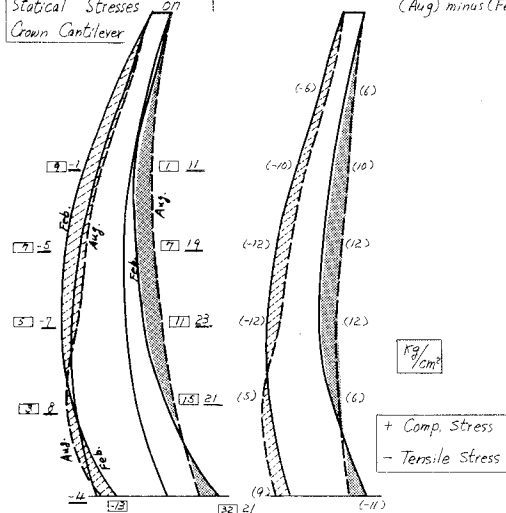
Periodical Thermal Stresses on Crown Cantilever

(Aug) minus (Feb)

Superposing of Periodical Thermal Stresses to Other Static Stresses on Arch Elements

Periodical Thermal Stresses on Arch Elements

(Aug) minus (Feb)



佐々並ダム (中国電力) では $T_m = 15^\circ\text{C}$, $T_i = 11.6^\circ\text{C}$, $\omega_i = \omega_e = 0.000717$, $E_i = E_e = -2.0$, $T_m(z) = 0.1774z^{0.24}$, $T_e(z) = 0.1548z^{0.24}$ 単位 m $^{\circ}\text{C}$ を用いた。(1) 外温度 $\max$ 内部温度 $\max$ の Time Lag は佐々並ダムの場合上部で 5^日, 下部で 37^日, 平均的には約 20^日である。上椎葉ダムの場合は上部で 25^日 最下部で 68^日, 平均的には約 54^日 と出た。但し $k = 0.005 \frac{\text{m}^2}{\text{hr}}$ を用いた。(2) 佐々並ダムの場合の周期的温度応力を図示しておいたがこれより温度応力の全振中の最大は約 $50 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 。貯水位満水にまかわらず秋口には Crown Section の Arch stress が

上流面 tension, 下流面 Comp に移ることも充分に予想できる。また 1/4 普通的设计計算の Critical Condition と全く逆傾向で (1) 最もその最大値が設計値に略近かりうる (右図下部の A-4 参照)。

(3) アバウトメントにおいても、秋口には満水状態にまかわらず、下流面より上流面の圧縮応力の方が大きいことがありうる。(4)

鉛直方向応力について見ると、秋口には満水状態にまかわらず、上流面基底部の鉛直応力は *Comp 側に移る (約 $9 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$)

(5) 以上は佐々並ダムの場合の概観である。上椎葉ダムについても同様の検討を加えれば紙面の都合で別表に全に発表しない。佐々並ダムの場合に比し、ダムが厚いために、次の様な大きな差異が佐々並ダムとの比較において見受けられる (a) 温度変化量は略ひとしいにも拘らず厚いために温度応力の全振中の最大は約 $25 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ 。(b) 厚いために内部温度分布の非線型の影響が大きく、従来の設計においては考慮しなかった ΔT の影響の方が卓越する傾向がある (6) 温度変化によるダムのタワミは多数の実測結果が出たが、本計算では $E_c = E_r = 300,000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ と仮定すると

佐々並ダムの場合 $\max$ 約 30 mm, 上椎葉ダムの場合 約 3/mm と出た。他の Static load によるタワミはそれぞれ 約 13 mm, 約 30 mm である。今後応力, タワミその他実測値との比較検討を行いたい。

— 以上 —