

アーチダムの周期的な温度応力 —— 近似計算法と観測結果の考察 ——

PERIODICAL THERMAL STRESSES IN ARCH DAMS —— APPROXIMATE CALCULATION AND OBSERVED RESULTS ——

林 正 夫*
By Masao Hayashi

要 旨 アーチダムのたわみと応力が、外気温および貯水温の年間の変動によってどの程度に変動するかについて、熱伝導論、弾性固定アーチの解法、およびアーチ片持り法にもとづいて導いた近似計算の結果と実際の諸アーチダムの観測値の両方から考察をした報告である。その結果、1) 薄いアーチダム（ここでは平均厚さが約 10 m よりも薄い程度、堤高は約 70 m 以下の程度）では年間のたわみおよび温度応力の変動が、他の静的な荷重によるそれらよりも卓越することがあり、2) このような場合は現行設計基準では考えに入れていないが年間最高温度時の安定をも吟味したほうがよいと思われる。その際はダム上下流面の温度差を考慮に入れる必要がある。3) 実際の観測値と近似計算結果は、傾向的にはかなり似ている。しかし、表面近くの強い温度勾配による応力と継目の閉閉作用など複雑な問題はなお今後の研究に待たなければならない。

1. アーチダムの温度応力の概説

大別して打設時の硬化熱の発生にともなうものとして扱っている周期的な気象条件の変動によるものより、アーチダムの温度応力は構成されている。周期的温度応力は外部温度の変化、太陽熱輻射、場合によっては風によっても影響をうけることもある。現行のダムの設計基準では堤体温度の下降による応力は、静水圧による応力と重畳されるので最低温度時を考慮することにしているが、以下の近似計算によると、年周期温度の最大昇時に最大圧縮応力が発生することが予想された。その後、内外の観測結果を検討したところ、やはり同様な傾向が薄いダムでは認められるようであるので、ここで近似計算と実測値にもとづき報告し参考に供することにする。

2. 問題の簡略化および仮定

ここでは年周期温度応力を取りあげた。硬化熱の放散にともなう問題はすでに多数の研究があり、ここでは扱わない。太陽輻射、境界面近くの対流、岩盤自体の伸縮

の影響はふくんでおらず、ダムの厚さ方向の熱移動が支配的なので版の Linear flow の熱伝導論によった。

同一標高では同一温度条件と仮定した。温度拡散率 K はダムコンクリートでは $0.0019 \sim 0.0065 \text{ m}^2/\text{hr}$ と大幅に異なるようであるが¹⁾、ここの数値計算では $0.005 \text{ m}^2/\text{hr}$ を使った。

3. 気温と貯水温の変動によるアーチダムの内部温度分布 θ 、非線形温度分布の線形置換 τ

基本式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = K \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (0 \leq x < l) \quad \dots \dots \dots (1)$$

で初期条件は $t=0$ で $\theta=f(x)$ 。 $f(x)$ は継目グラウト時の温度分布。境界条件は $x=0$ の上流面で $\theta=\theta_e(t)$ 、 $x=l$ の下流面で $\theta=\theta_i(t)$ 。この解の詳細は別に報告したので²⁾、その結果だけを過渡現象を示す項を題意により省略して記すと、

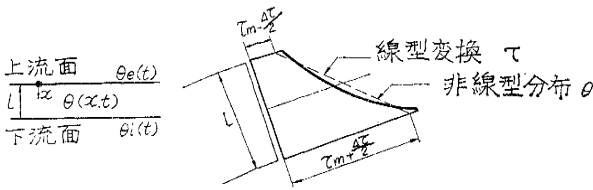
$$\begin{aligned} \theta = & T_{em} + (T_{im} - T_{em}) \frac{x}{l} + T_e \cdot 2\pi^3 \left(\frac{K}{w_e l^2} \right)^2 \\ & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^3}{1 + n^4 \pi^4 \left(\frac{K}{w_e l^2} \right)^2} \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} \sin(\omega_e t + \varepsilon_e) \\ & - T_e \cdot 2\pi \left(\frac{K}{w_e l^2} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{1 + n^4 \pi^4 \left(\frac{K}{w_e l^2} \right)^2} \sin \frac{n\pi x}{l} \cdot \\ & \sin(\omega_e t + \varepsilon_e) - T_i \cdot 2\pi^3 \left(\frac{K}{w_i l^2} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^3 \cos n\pi}{1 + n^4 \pi^4 \left(\frac{K}{w_i l^2} \right)^2} \\ & \sin \frac{n\pi x}{l} \sin(\omega_i t + \varepsilon_i) + T_i \cdot 2\pi \left(\frac{K}{w_i l^2} \right)^2 \\ & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n \cos n\pi}{1 + n^4 \pi^4 \left(\frac{K}{w_i l^2} \right)^2} \sin \frac{n\pi x}{l} \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \dots \dots (2) \end{aligned}$$

ここでは上流面温度は $\theta_e = T_{em} + T_e \sin(\omega_e t + \varepsilon_e)$ 、下流面温度は $\theta_i = T_{im} + T_i \sin(\omega_i t + \varepsilon_i)$ と正弦表示としてある。

温度 θ の非線形分布の式 (2) を構造力学的に等価な線形分布に変換し Bernoulli-Euler の仮定に立つことにする。この線形変換により弾性適合条件式を満足しないことで、さらに付加的な拘束応力を弾性学的に考えに

* 正員 電力中央研究所技術研究所 第二部研究担当

図一 断面内の温度分布の線形変換



入れることも研究されている³⁾。現在のところ温度境界条件がかなり概念的にしか設計計算では取り扱っていないこと、静水圧、自重などによる応力解析では弾力学的な応力集中を省略していることなどを考え合わせると、線形変換の仮定は実用上許容されるように思われる。断面内の平均温度 τ_m 、両面温度差 $\Delta\tau$ とし、線形置換を施すとつぎの結果を得る (図一)。

$$\tau_m = \frac{1}{2}(\tau_e + \tau_i) = \frac{\theta_A}{l} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\Delta\tau = \tau_i - \tau_e = \frac{12\theta_M}{l^2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに

$$\begin{aligned} \theta_A = \int_0^l \theta dx = \frac{l}{2} (T_{em} + T_{im}) \\ + T_e l \sqrt{A_A^2 + B_A^2} \sin(\omega_e t + \epsilon_e + \phi_{Ae}) \\ + T_i l \sqrt{C_A^2 + D_A^2} \sin(\omega_i t + \epsilon_i + \phi_{Ai}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\begin{aligned} \theta_M = \int_0^l \theta \left(x - \frac{l}{2}\right) dx = (T_{im} - T_{em}) \frac{l^2}{12} \\ - T_e l^2 \sqrt{A_M^2 + B_M^2} \sin(\omega_e t + \epsilon_e + \phi_{Me}) \\ + T_i l^2 \sqrt{C_M^2 + D_M^2} \sin(\omega_i t + \epsilon_i + \phi_{Mi}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ただし $\phi_{Ae} = \tan^{-1}\left(\frac{-B_A}{A_A}\right)$, $\phi_{Ai} = \tan^{-1}\left(\frac{D_A}{-C_A}\right)$,
 $\phi_{Me} = \tan^{-1}\left(\frac{-B_M}{A_M}\right)$, $\phi_{Mi} = \tan^{-1}\left(\frac{-D_M}{C_M}\right)$
(7)

$$\begin{aligned} A_A = 2\pi^2 \left(\frac{K}{\omega_e l^2}\right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{1+n^4\pi^4 \left(\frac{K}{\omega_e l^2}\right)^2} (1 - \cos n\pi) \\ B_A = 2\left(\frac{K}{\omega_e l^2}\right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{1+n^4\pi^4 \left(\frac{K}{\omega_e l^2}\right)^2} (1 - \cos n\pi) \\ C_A = 2\pi^2 \left(\frac{K}{\omega_i l^2}\right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 \cos n\pi}{1+n^4\pi^4 \left(\frac{K}{\omega_i l^2}\right)^2} (1 - \cos n\pi) \\ D_A = 2\left(\frac{K}{\omega_i l^2}\right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi}{1+n^4\pi^4 \left(\frac{K}{\omega_i l^2}\right)^2} (1 - \cos n\pi) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$A_M = \pi^2 \left(\frac{K}{\omega_e l^2}\right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 (1 + \cos n\pi)}{1+n^4\pi^4 \left(\frac{K}{\omega_e l^2}\right)^2} \quad \dots\dots\dots(9)$$

C_M は添字 e を i にする

$$B_M = \left(\frac{K}{\omega_e l^2}\right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1 + \cos n\pi)}{1+n^4\pi^4 \left(\frac{K}{\omega_e l^2}\right)^2}$$

D_M は添字 e を i にする

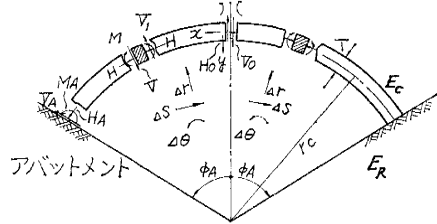
線形置換後の $0 \leq x \leq l$ の温度分布 $\tau(x, t)$ は

$$\tau(x, t) = \frac{\theta_A}{l} + \frac{12\theta_M}{l^2} \left(x - \frac{l}{2}\right) \quad \dots\dots\dots(10)$$

4. 弾性固定アーチの温度応力

従来、アーチダムの設計では τ_m だけを考え、上下流面間の温度勾配 $\Delta\tau$ の影響は省略していた。ここでは上下流面の線形置換後の温度差 $\Delta\tau$ を考慮に入れた。アーチクラウンで不静定量を考える米開拓局の方式⁴⁾で $\Delta\tau$ がどの項に入ってくるかを記すにとどめる。詳細は別に発表した文献²⁾を参照願うことにし重複をさける。結局、荷重常数⁴⁾だけに付加項がつくことになり (図一2 参照)、アーチ要素ごとに、

図二 弾性固定アーチ



$$\begin{aligned} \Delta D_1 = - \int_0^s \frac{c \Delta\tau}{T} ds = -c \Delta\tau \frac{r_c}{T} \phi_A \\ \Delta D_2 = - \int_0^s c \tau_m \sin \phi ds - \int_0^s \frac{c \Delta\tau}{T} x ds \\ = -c \tau_m r_c \text{vers } \phi_A - c \Delta\tau r_c \frac{r_c}{T} \text{vers } \phi_A \\ \Delta D_3 = \int_0^s c \tau_m \cos \phi ds - \int_0^s \frac{c \Delta\tau}{T} y ds \\ = c \tau_m r_c \sin \phi_A - c \Delta\tau r_c \frac{r_c}{T} (\phi_A - \sin \phi_A) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(11)$$

c はコンクリートの温度膨張係数で、 r_c , T は円弧アーチを考えているので一定値である (図二 参照)。筆者が作成した $\Delta\tau$ に対するアーチ応力、たわみの数値表は文献²⁾にあるので利用されたい。

5. アーチダムとしての三次元的な近似計算

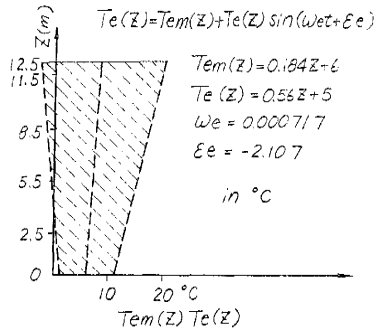
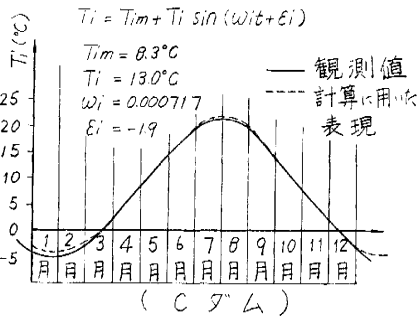
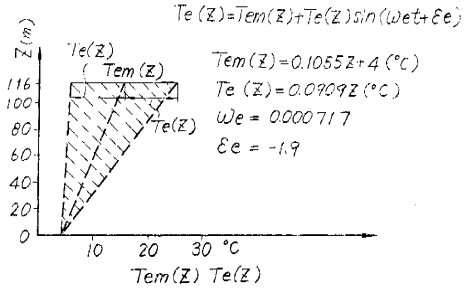
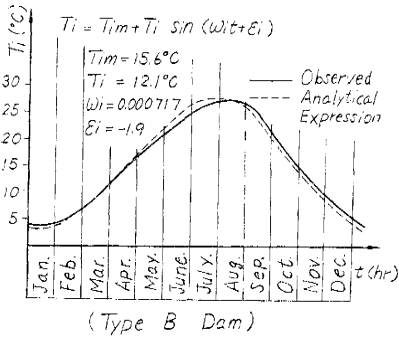
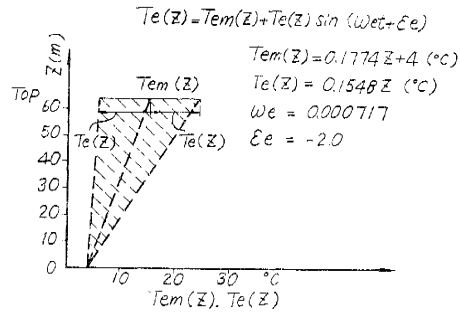
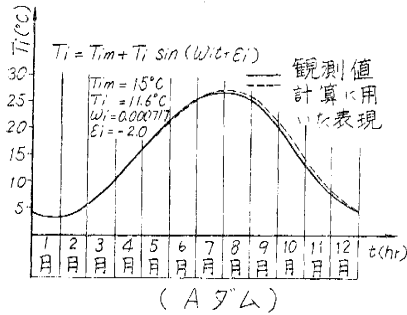
水平アーチに関しては上述のように平均的温度変化および上下流面温度差を考えに入れ、片持ばり要素では前者は無視しうるので後者の影響を考えに入れた。

貯水温度 θ_e は水深方向に線形に変化するものと考えたが、水温資料がととのえば各水深で任意に与えうる。気温 θ_i は前述のように正弦変化とし

$$\begin{aligned} \theta_e(z) = T_{em}(z) + T_e(z) \sin(\omega_e t + \epsilon_e) \\ \theta_i = T_{im} + T_i \sin(\omega_i t + \epsilon_i) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(12)$$

気温最高時 t_{imax} より堤体内部平均温度最高までの

図-3 温度状態の計算上の仮定



時間のおくれ $\phi(\text{rad}) = \left| \tan^{-1} \left(\frac{-B_A}{C_A} \right) \right|$ は各標高で相当のひらきがある(表-2)。したがって概念的に、温度応力最高の時といっても同時にダム内の各標高でピークになっていることはありえないで莫然たる表現である。

三次元的に水平アーチ要素Aと、鉛直片持り要素Cの温度変形を考えに入れ、自己つり合い荷重 $P_{Aj}, P_{Ak}, P_{Cj}, P_{Ck} \dots$ などを $j, k \dots$ 番目のアーチに作用させると $(P_j)_{j=1,2,\dots}$ を未知数とする多元一次連立方程式を得る。説明の簡単のために中央片持り法によると、 j 番

目のアーチの $\tau_m, \Delta\tau$ によるクラウンの半径方向たわみを4での係数をつかって求め、同じく半径方向等分布荷重 P_{Aj} によるクラウンのたわみを $A_j \delta P_{Aj} \cdot P_{Aj}$ 、クラウン片持りの $\Delta\tau(z)$ による j 点の温度たわみを $c_j \delta \cdot \Delta\tau$ とし、 k 点で $P_{ck}, (k-1), (k+1)$ で0なる三角荷重による j 点のたわみを $c_j \delta P_{ck} \cdot P_{ck}$ とすると、 $P_{Aj} = -P_{Cj} = P_j, P_{Ak} = -P_{Ck} = P_k$ を考慮し結局、式(13)をとけば必要な自己つり合い荷重分布が定まる。各要素の最終応力はこの自己つり合い荷重による応力と $\tau_m, \Delta\tau$ による応力を合成すればよい。

$$\left. \begin{aligned} (A_1 \delta \tau_{m1} + A_1 \delta \Delta \tau_1) + A_1 \delta P_1 P_1 &= c_1 \delta \Delta \tau - c_1 \delta P_{c1} P_1 - c_1 \delta P_{c2} P_2 - \dots - c_1 \delta P_{cj} P_j - \dots \\ (A_2 \delta \tau_{m2} + A_2 \delta \Delta \tau_2) + A_2 \delta P_2 P_2 &= c_2 \delta \Delta \tau - c_2 \delta P_{c1} P_1 - c_2 \delta P_{c2} P_2 - \dots - c_2 \delta P_{cj} P_j - \dots \\ (A_j \delta \tau_{mj} + A_j \delta \Delta \tau_j) + A_j \delta P_j P_j &= c_j \delta \Delta \tau - c_j \delta P_{c1} P_1 - c_j \delta P_{c2} P_2 - \dots - c_j \delta P_{cj} P_j - \dots \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (13)$$

表-1 数値計算に用いたアーチ ダム の特性

ダ ム	A	B	C	
方 位	E 131°30' N 34°20'	E 131°10' N 32°28'	E 139°05' N 36°53'	
堤 頂 標 高	EL 192 m	EL 483 m	EL 692 m	
堤 頂 標 高	62 m	110 m	12.5 m	
堤 頂 ス パ ン	113 m	245 m	46 m	
ス パ ン / 堤 高	1.8	2.2	3.7	
堤 頂 中 心 角	96°	120°	140°	
堤 頂 中 心 線 半 径	74.75 m	142.4 m	22.7 m	
堤 頂 厚 さ	2.5 m	7.0 m	0.7 m	
堤 底 厚 さ	8.8 m	27.7 m	1.6 m	
温度条件の仮定	T_{im}	15°C	15.6°C	8.3°C
	T_i	11.6°C	12.1°C	13.0°C
	W_i	0.000 717	0.000 717	0.000 717
	s_i	-2.0	-1.9	-1.9
	$T_{em}(z)$	0.177 4 z(m)+4	0.105 5 z(m)+4	0.184 z(m)+6
	$T_e(z)$	0.154 8 z(m)	0.090 9 z(m)	0.56 z(m)+5
	W_e	0.000 717	0.000 717	0.000 717
ϵ_e	-2.0	-1.9	-2.11	

表-2 おくれ ϕ (日)

	A ダ ム		B ダ ム		C ダ ム	
	厚 さ l (m)	ϕ (日)	l (m)	ϕ (日)	l (m)	ϕ (日)
各 標 高	2.5	4.7	7	28.5	0.68	0.4
	3.6	9.1	13.4	46.2	0.92	0.7
	4.7	14.9	19.0	50.3	1.16	0.9
	5.8	21.1	23.0	53.9	1.4	1.2
高	6.7	26.3	25.0	62.9	1.16	2.4
	7.7	32.7	27.0	67.7		
	8.8	36.9	27.7	68.3		
平均	5.8	22.8	20.3	54.0	1.2	1.1

6. 数値計算の結果の考察

すでに建設された表-1の3つのダムについて中央片持ばり法で数値計算をした結果について若干の考察を行なって見ると、

(1) 堤体内部平均温度の外部温度よりおくれは表-2より、平均的にはAダムで23日、Bダムで54日、Cダムでは約1日程度であった。

(2) アーチ要素に生じる年周期温度応力は片持ばり要素に生じるそれよりも大きい。

(3) 下部のアーチ要素のほうが上部のそれよりも年周期の温度応力は大きいことが多いようで、この傾向はダムが薄い場合にいちじるしい(ただし、上下流面近くでの極端な非線形温度分布の影響はふくまれていない)。

(4) 秋口には、通常的设计計算のときの応力状態とまったく異なった状態を生じ、たとえばクラウンでは下流側の圧縮応力が上流側のそれよりも大きくなる(図-4,5,6)。

(5) アバットメントでも秋口には下流側引張り応力、上流側圧縮応力と設計応力の傾向と異なることもあるがクラウンのそれよりは変化が小さい(アーチ方向には温度変化量一定と仮定したので、アバットメント近傍はアーチ軸方向の温度勾配も実際は相当にあるだろうから誤差はアバットメント近くではかなり大きいことを念頭におく必要がある)。

表-3 アーチ ダム の温度たわみと温度応力

ダ ム	堤 高	堤底幅	堤頂幅	気 温 年振幅	堤頂の半径方向たわみ (mm)				堤頂近くのアーチクラウン 上下流面応力 (kg/cm ²)			
					最大値	最小値	年間振幅	振 幅 最大値	冬 値	夏 値	年間振幅	振 幅 最大値
(5) A (観) 1960年	65.5 EL 195.5 EL 130	8.8	2.5	26	EL 197.4 m で 3.6 mm (1月)	-8.8 (8月)	12.4 mm (水位差 1 m)	3.4	EL 182 m 10 (1月) -2 (1月)	8 (8月) 13 (8月)	2 15	0.2 7.5
A (計)	65.5	8.8	2.5	23	1.5	-1.9	3.4 (満水)	2.3	35 21	11 42	24 21	0.7 1.0
(6) B (観) 1957年	110 EL 483 EL 373	27.7	7	21	7	11	4 (水位差 15 m)	0.57	EL 472 m 5	15 18	10 15	2.0 5.0
B (計)	110	27.7	7.7	24	31	0	31 (満水)	1.0	31 19	19 36	12 17	0.4 0.9
C (計)	12.5	12.4	0.7	26	2	-12.5	14.5	7.3	11 (1月) 9 (1月)	-16 (9月) 0 (9月)	27 9	2.5 1.0
(7) D (観) 1959年	64.5 EL 130.5 EL 66.0	1.6	6.0	19	3.8 (2月)	-6.8	10.6 (水位差 2 m)	2.8				
(8) E (観) 1952年	55	26	4.9	30	28	6	22 (水位差 2 m)	0.8				
(9) F (観) 1955年	152.5 EL 532.5 EL 380.0	16.5	3.5	16	5	-2	7 (水位差 8 m)	1.4	-6 (1月)	-8 (9月)	2	0.3

注: 1) -は上流側へのたわみ 2) 上の値は上流面の値、下の値は下流面の値

図-4 周期的な温度応力と全応力(Aダム)(計算値)

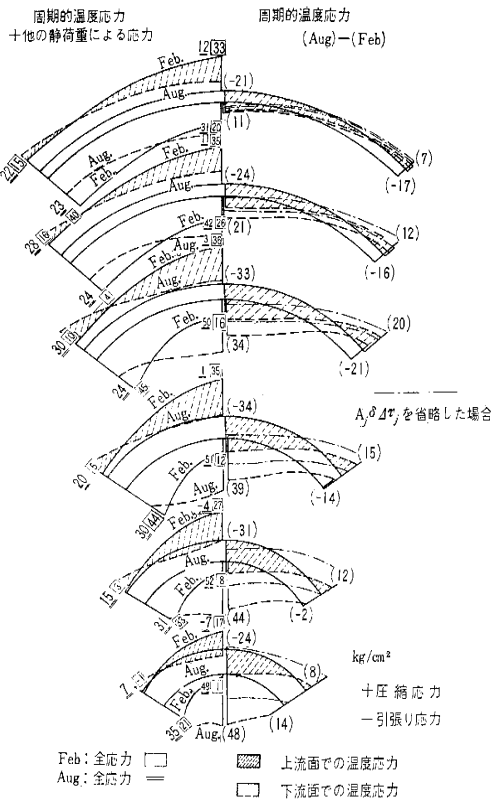
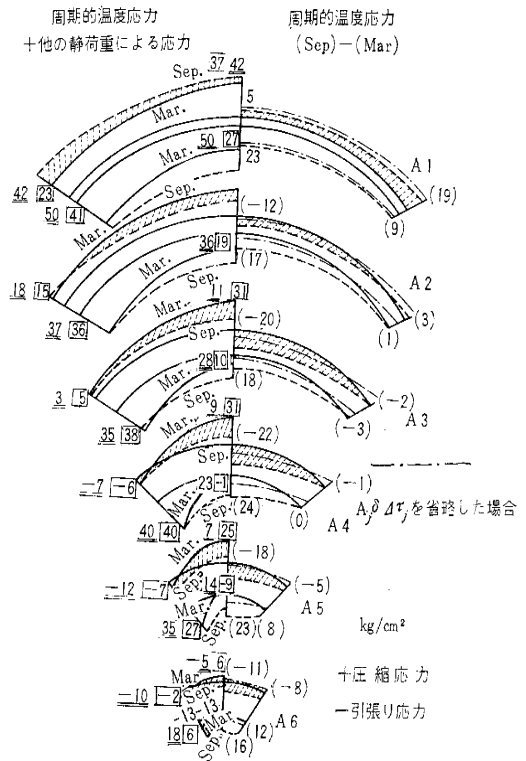


図-5 周期的な温度応力と全応力(Bダム)(計算値)



(観測値と近似計算値)

堤底近くのアーチクラウン上 下流面応力 (kg/cm ²)					堤頂近くのアーチアバットメント 上下流面応力 (kg/cm ²)					堤底近くのアーチアバットメント の上下流面応力 (kg/cm ²)					堤底近くの片持りの上下流面 応力 (kg/cm ²)									
冬	夏	年間振幅	振	幅	冬	夏	年間振幅	振	幅	冬	夏	年間振幅	振	幅	冬	夏	年間振幅	振	幅					
σ	σ	d	σ	d	σ	σ	d	σ	d	σ	σ	d	σ	d	σ	σ	d	σ	d					
EL 142 m	6	9	0.6		EL 182 m	36	36	36		EL 142 m	3	1	0.25							3	6	3	1	
15					1					4					4	13	9	2.3						
-1	41○	42	42		-3	28	31	9.7		19	15	4	0.21		4									
27	-4	31○	1.2		16	28	12	0.8		3	15	12	4		-13	-4	9	0.7						
8	32	24	3		40	24	16	0.4		33	31	2	0.06		32	21	11	0.3						
EL 410 m	4	5	5		EL 450 m	12	2	0.2		EL 410 m	6	3	1		EL 390 m	18	2	0.1						
-1					10					3				16										
5	26○	21○	4.3		12	25	13	1.1		-2	15	17	8.5		7	10	3	0.4						
25	7	18	0.7		5	3	2	0.4		-7	-12	5	0.7		-8	-10	2	0.3						
-9	14	23○	2.6		38	35	3	0.1		27	35	8	0.3		46	48○	2	0.04						
4	58	54	13.5		9	-2	11	1.3		-1	53	54	54		-51	26	77○	1.5						
1	74○	74	74		11	-14	25	2.3		6	55	49	8.2		55	22	77○	1.4						
-20	20○	40○	2.0		-10	-9	1	0.1		-14	5	19	1.4		-12	6	18	1.5						

図-6 周期的な温度応力と全応力 (Cダム) (計算値)

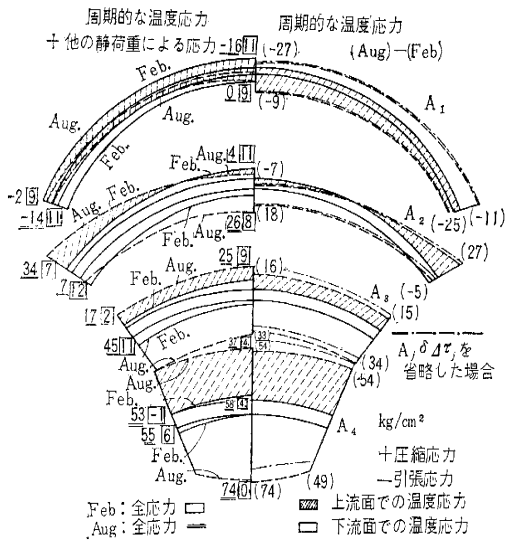
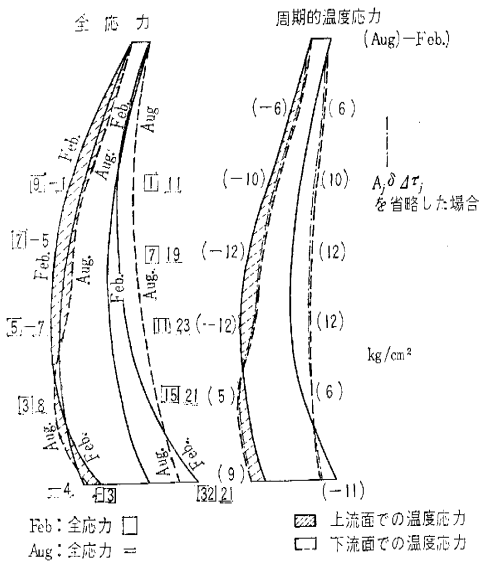


図-7 中央片持り周期的な温度応力と全応力 (Aダム) (計算値)



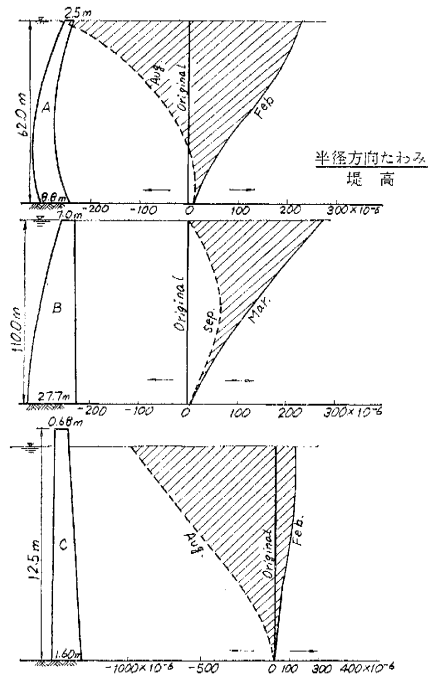
(6) 薄いアーチダムでは年周期の温度応力の全振幅が他の静荷重による応力と同等、あるいはそれ以上に達する場合が十分に予想される。

(7) 最大応力は必ずしも通常的设计概念となっているように冬季の最低温度時とはかぎられず、最高温度時に生じることも予想される。

(8) 片持り要素に生じる応力振幅はアーチのそれよりも一般的に小さいようである(図-7)。

(9) 通常的设计で行なうようにアーチの τ_m を考慮し、さらに片持りの 4τ を考慮に入れ(すなわち、アーチの 4τ は省略し)て計算すると、---のように

図-8 たわみの年間の変動(計算値)



なった。これよりアーチの 4τ を無視しても鉛直応力にはさほど影響はないが、水平アーチには大きく影響することがわかる(図-4,5,6,7)。

(10) 年間温度たわみの全振幅 δ_T の他の静荷重によるたわみ δ_S に対する比率 δ_T/δ_S はAダムで2.2, Bダムで1.0, Cダムで9.3となり、たわみは、ダムが薄いといちじるしく年間の温度変動の影響をうける(図-8)。

(11) 秋口には満水状態であっても、ダムは上流側にたわむことがある(以上は近似計算法による予測)。

7. 実ダムでの観測結果と解析的予測の対比

果たして以上の予測のように実ダムが挙動しているかどうかを、観測記録^{5)~9)}を参考させていただいて検討してみよう。この対比にあたってはつぎのような基本になっている。

(1) たわみ、応力は年間の周期的温度変動のほか、静的な他の荷重(静水圧、自重、堆泥圧)や基礎岩盤の変形、伸縮継目の閉開など多数の要因の影響の総合結果であり、各要因の分析は詳細なバックデータを必要とするが、ここでは集約された観測結果が利用できるだけなので、ここでは年周期の温度たわみ、温度応力が他の静的な荷重の影響の何%にあたるかを調べることを主目的とした。

(2) 観測結果は、たわみについては視準法、傾斜計法、下げ振り法、精密三角測量法など、ひずみについては電気抵抗線式、振動弦式、機械的伸び計式と各所各様

図-10 観測応力と観測たわみ (Bダム)

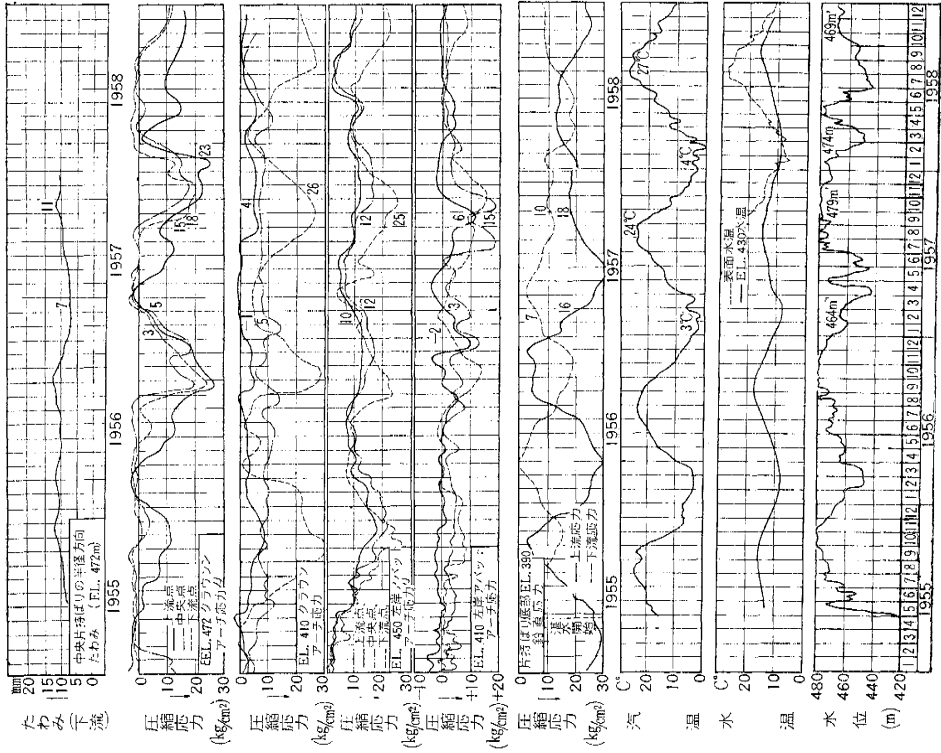


図-9 観測応力と観測たわみ (Aダム)

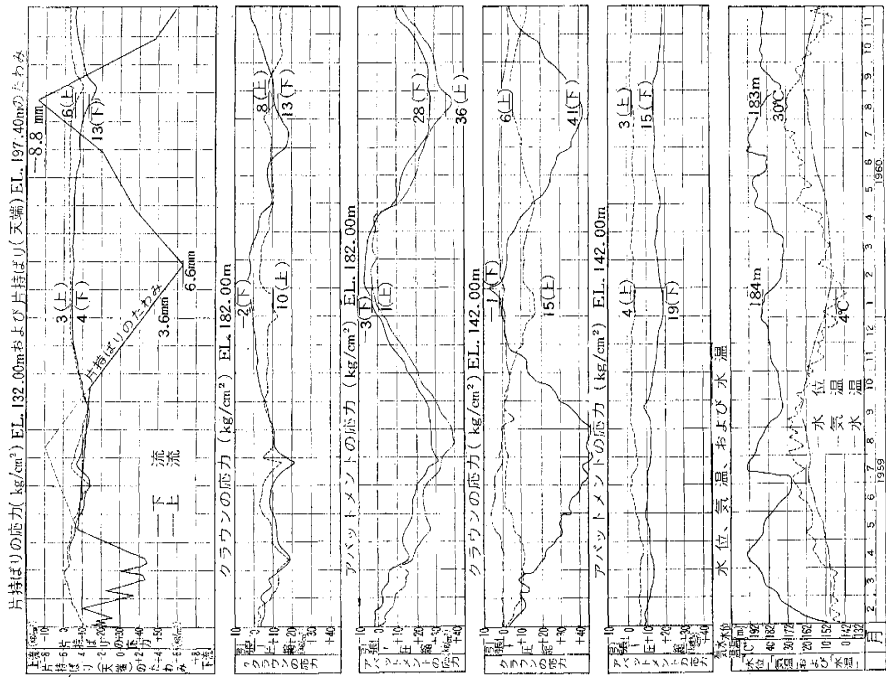


図-11 観測応力と観測たわみ (D ダム)

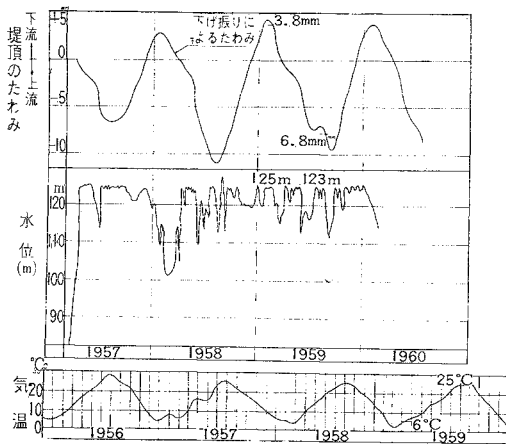
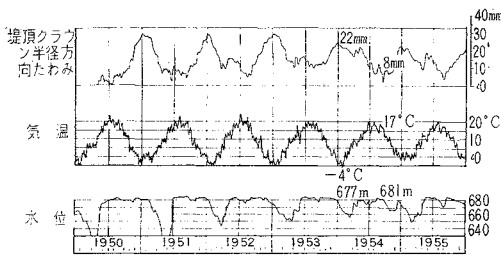


図-12 観測応力と観測たわみ (E ダム)



であり精度もさまざまであることが予想されるが並列的に比較した。

(3) 貯水位の影響を固定して論じたいために、冬と夏で、できるだけ貯水位が近接している時点を冬と夏に選ぶようにつとめた。その間の変動を外気温変動によるものと近似的に仮定した。

(4) 観測応力値は必ずしも非直線温度応力分布、あるいは等価線形分布のへり応力を示すものではなく、ダム表面から 50~100 cm 内部での値であること、ひずみ値より応力値への換算の精度、貯水圧による応力との分離の精度などを考え合わせるとまだ不十分な点が多いが、実際のダムがどうなっているかの疑問に答え得る現在のところ唯一のデータであろう。

以上に順を追って考察する。

(1) 半径方向たわみは秋口には上流側に生じ、他の静荷重によるたわみに対する年振幅の比率は薄いダムほど大きい。さきにのべた基本的な整理方法にしたがって5つのダムの観測結果を表-3のように集約した。もとの観測結果は図-9~13に示してある。図-14のようにダムの平均厚さ(ここでは堤頂と堤底の値の平均で略算)と堤頂での半径方向たわみの関係からみると、たわみの年間変動は平均厚さ 10 m 以下の場合には貯水によるたわみよりは相対的に大きいことがわかる。観測値はごく薄いダムの場合がないのは残念であるが傾向的には、近似計算と観測結果はよく似ているように思われる

図-13 観測応力と観測たわみ (F ダム)

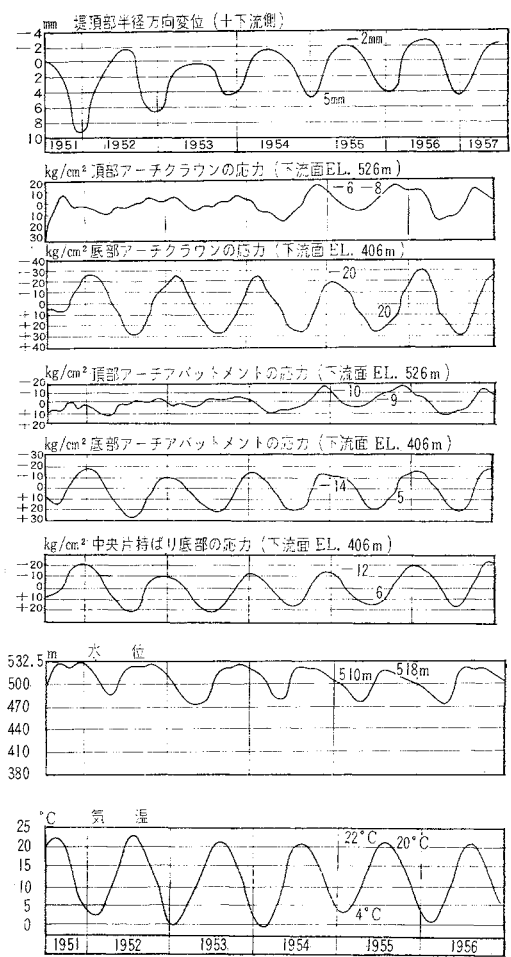
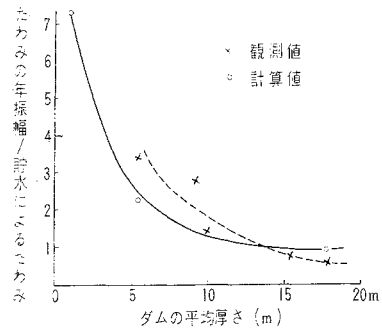


図-14 たわみの年振幅/貯水によるたわみとダムの平均厚さの関係



(図-14)。

夏から秋口にかけては薄いダムほど、いちじるしく上流側にたわむ傾向が観測結果にも明らかに認められる。

(2) 最大応力が、堤体最低温度時に生じるという従来の設計概念は必ずしも一般的でなく、薄いアーチダムでは最高温度時に最大応力が生じることもあるのだろうか。解析的に予測したこの設問を表-3の年間応力変

図-15 温度応力の年振幅の最大値とダムの平均厚さの関係

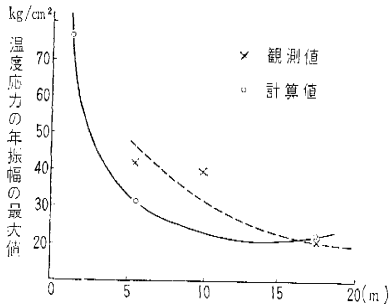


図-16 アーチの温度応力の年振幅÷貯水による応力(ヒストグラム)

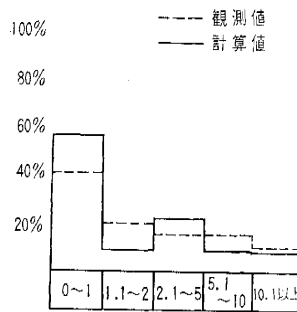
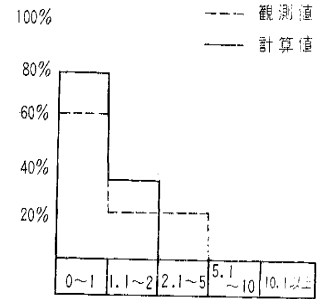


図-17 片持ばりの温度応力の年振幅÷貯水による応力(ヒストグラム)



動から考察してみる。おのおののアーチダムの年間最大応力には○印をつけたが、興味あることにほとんどすべてが夏期にあらわれる結果となった。

しかし完全にそうだといいきるにはまだ疑問が残る。それは表-3にかかげた諸点の中にダムの最大応力を運よくふくんでいたかどうかははっきりしないからである。観測点はそのような点をふくむようにあらかじめ努力はされるのだが、もう一度観測値全体を見なおしてみたところ、Aダムでは1960年について、

- EL 142 m クラウン下流側 42 kg/cm² (8月)
- EL 162 m クラウン下流側 37 kg/cm² (8月)
- EL 182 m アバットメント上流側
40 kg/cm² (8月)
- EL 162 m 中央片持ばり下流側
33 kg/cm² (8月)

となり平均厚さ 5.7 m の Aダムでは大きい応力値はすべて夏に生じているようである。

Bダムの 1957 年について

- EL 430 m アーチ クラウン上流側
30 kg/cm² (10月)
- EL 450 m アバットメント(右)上流側
29 kg/cm² (12月)
- EL 430 m アバットメント(右)下流側
29 kg/cm² (2月)
- EL 390 m 中央片持ばり上流側
30 kg/cm² (4月)

となり、平均厚さ 17.7 m の比較的厚い Bダムでは、従来の設計条件どおり冬に最大応力があらわれるようである。Cダムは年間の観測値はなく、Dダムは観測値が一方的に流れ、計器に疑問があるとされているので省略し、Fダムの 1955 年の観測値の中の大きい応力値をひろうと、

- EL 481 m アバットメント(左)下流側
20 kg/cm² (7月)
- EL 451 m アーチクラウン下流側

- 30 kg/cm² (7月)
- EL 406 m アーチクラウン下流側
28 kg/cm² (7月)
- EL 406 m 中央片持ばり下流側
20 kg/cm² (7月)

となり、平均厚さ 10 m の Fダムは Aと同傾向にある。

Eダムは応力値についてはまとまった発表を見出し得なかった。以上の例証は観測例が不十分ではあるが、薄いアーチダムでは夏期の応力状態をも検討しておくのがよいことを暗示しているように思われた。

(3) 薄いアーチダムのほうが厚い場合よりは年周期的温度応力は大きいか。この設問に対しては図-15に示した年間応力振幅の最大値と平均厚さの関係からある程度肯定できるように思われる。

(4) 年周期的温度応力は鉛直応力よりは水平アーチ応力により敏感にあらわれるか。解析にもとづくこの予測を考えるために、各アーチダムのアーチ要素上の諸点での観測値(表-3)にもとづいて、温度応力の年振幅が貯水による応力の何%にあらわれているかをヒストグラムによって図-16に示した。片持ばり要素については図-17に示した。アーチ要素に対するヒストグラムは比較的扁平となり、貯水による応力の10倍以上も年振幅応力があらわれる点が10%近くもあったのに対し、片持ばり要素に対するヒストグラムは倍数の低いほうにいちじるしくかたよっている。概念的ではあるが設問に対して肯定的な答えになるように思われる。

(5) 上部アーチにくらべ下部アーチに年間温度応力は大きくあらわれるか。この設問を考えるためには、表-3に示した各ダムの年間温度応力振幅の最大値が堤底近くのアーチであらわれることが多いことにより肯定されるように思われる。

(6) 厳密な絶対値を各アーチダムの上流面あるいは下流面、しかも、いろいろな観測点で対比するには、ダム内部および外部の温度変動をまずよく把握してから温度応力を温度条件にあわせて計算する必要があるが、

ここではむしろ、一般的な設計条件として、この種の年周期応力の変動をどの程度考慮に入ればよいかを傾向的に検討するのを主目的としたものであることをおこたわりする。

総合的に見て、平均厚さ 10 m 程度よりも薄いアーチダムでは(ほぼ高さ 70 m 以下に相当するようである)、現行設計基準では考えに入れていない最高温度時の安定をも吟味するのがよいように思う。その際、現行設計条件では考慮していないダム上下流面間の温度差を計算に入れる必要がある。

厚いアーチについては、表面近くの強い温度勾配の影響³⁾を考慮するのが望ましい。実際のアーチダムでは、半径方向継目が約 10~15 m ごとに存在するので、この種の温度応力の一部は緩和されることも考えられるが、その実態については今後の研究に待たなければならない。

むすび

(1) 薄いアーチダムでは、年周期の温度たわみおよび温度応力は、他の静的な荷重による応力、たわみよりも卓越した影響を、ダムに与えることがあることを近似計算と実際のダムについての観測記録の両方から説明した。

(2) 近似計算法は堤体内の非線形温度分布を熱伝導論より導びき、それを構造力学的に曲げモーメントと推力にもとづく変形が等価になる等価線形温度分布に変換し、この分布に対して弾性固定アーチの解法を適用した(作成した数表は文献²⁾)。アーチ要素と片持ばり要素の協同作用を考慮して近似的に数値計算を行ない、アーチ要素の温度応力が片持ばり要素のそれに比し、はるかに卓越することをのべた。

(3) 平均厚さが 10 m 程度よりも薄いアーチダムでは(ほぼ高さ 70 m 以下に相当する程度)、現行設計基準では考えに入れていない年間最高温度時の安定の吟味をも行なうのがよいように思われる。その際、現行設計

条件では考慮に入れていないダム上下流面間の温度差を計算に入れる必要がある。

(4) 近似計算法と実際の観測値は傾向的にはかなり似た結果を示しているが、表面近くの強い応力勾配、貯水温、気温のより実情に即した数理的表現など、観測結果をさらに詳細に分析して設計方法の改良につとめるべき問題は多く残されている。

(5) 末尾ながら、近似計算法の正否を検証するために各所で行なわれた実ダムの観測記録を参考とさせていただいたので、計測埋設、観測、その整理、解析にあたられた関係の方々^{5)~9)}に深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) United States, Bureau of Reclamation. Thermal Properties of Concrete.
- 2) 林 正夫: アーチダムの周期的な温度応力の解析, 電研所報, 9巻 5,6号, 1959年12月.
- 3) 村 幸雄・中村慶一・大久保忠良・飯田隆一: アーチダムの温度応力に関する理論的考察, 土木研究所報告 第104号, 1960年3月.
- 4) United States, Bureau of Reclamation. "Analyzing of Arch Dams" Denver Colorado.
- 5) 中国電力KK: 佐々並川アーチダム測定記録, 1961年.
- 6) 九州電力KK: 上椎葉アーチダム測定記録. 君島博次・中新井克子: 上椎葉アーチダムの実測結果報告, 電研II構, 5918, 1960年.
- 7) 関西電力KK: 精密三角測量による殿山ダムの変位測定 関西電力建設技術研究資料, 1958年1月. 君島博次・中新井克子: 殿山ダム実測値の解析, 電研II構, 6110, 1961年.
- 8) TONINI DINO: Les Deplacements Relatives sur le Barrage de Pieve di Cadore comparees avec les Deplacements indiques par les Calculs et par les Essais sur Modeles, Sixieme Congress des Grand Barrages, New York, 1958, R 78.
- 9) Group Edison, Milan, Les Comportement du Barrage de Santa Giustina Pendant les cinq premieres annes d'observation, compare avec les Resultats de Quelques Calculs de Verification, Sixieme Congress des Grand Barrages New York 1958, R 68.

(原稿受付: 1963. 8. 15)