

中国電力 新成羽川建設所 正会員 北村 竜一

1. まえがき。

新成羽川ダムは、ダム高103m、堤体横、約43万 m^2 の「重力式アーチダム」であるが、設計施工にあたり研究開発した事項のうち、過冷却工法によるダム応力の改善について述べる。

2. 新成羽川ダムの設計方針。

新成羽川ダムは、最大出力303MW(Q_{max} = 424 m^3/sec)のダム式発電所を前提とし、各種ダム型式について比較設計を実施したが、ダムサイトの地形、地質、取水口設備、工事中の洪水処理、および、経済性、等を総合的に検討した結果、与えられた条件の中では、経済性および施工の安全性が最も優れている「重力式アーチダム」を採用することにした。

一般に、「重力式アーチダム」は、構造の特性上、通常の設計、施工法では、ダムに著しい引張応力が発生する。この問題を解決する為に、中間湛水法による「セミアーチダム理論」が開発され、「重力アーチダム」の設計は一歩前進したが、新成羽川ダムに「セミアーチダム理論」を適用するためには、発電所の工事工程を変更する必要があったので、「過冷却工法」のみによって設計を取りまとめる事にした。

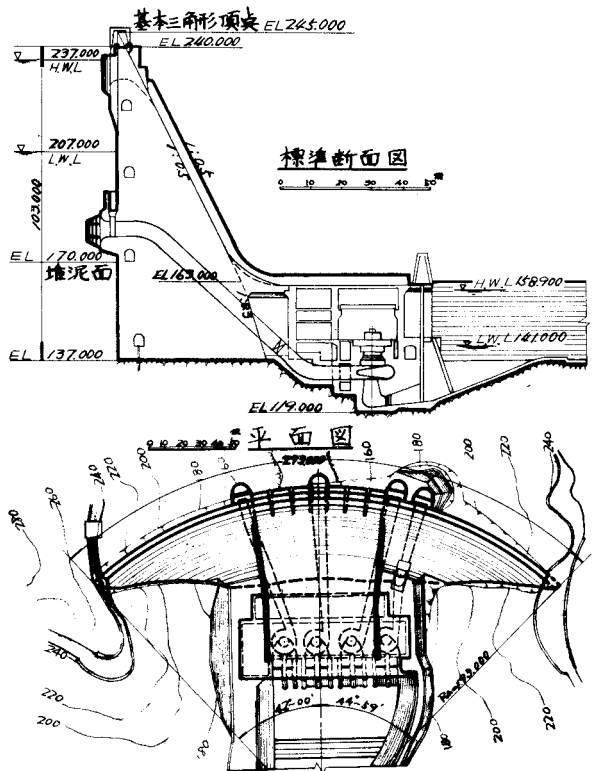
3. ダムの応力。

1) 静水圧荷重による応力。

荷重分割法(三成分調整)による計算値、および、縮尺 $\frac{1}{500}$ の石膏模型により測定した応力のうち、「静水圧荷重」と「ダムの自重」のみによる応力の最大値は、(表-1)のとおりである。

最大引張応力は、アーチエレメントのクラウン下流側に発生しており、最大圧縮応力は、片持梁エレメントの基礎に発生しているが、一般に、片持梁基礎の応力は、計算値では下流側が大きく、模型実験では上流側が大きくでている。これ

(図-1) 新成羽川ダム設計図



(表-1) (静水圧+自重)による最大応力

	圧縮応力	引張応力
計算値	27.1 $\%cm^2$ C_5 片持梁 基礎・下流側	0 5.4 $\%cm^2$ El. 170 アーチ クラウン・下流側
模型実験 ⁽¹⁾	33.5 $\%cm^2$ C_6 片持梁 基礎・上流側	0 9.0 $\%cm^2$ El. 180 アーチ クラウン・下流側

は、模型実験には谷の変形、および、接り抵抗等の影響が表われていると推定される。

2) 温度荷重による応力。

a. ダムコンクリート温度の振巾。

(図-2) ダムコンクリート温度の振巾(c)

ダムサイトの気温および貯水池の水温を(図-2)のように仮定し、本ダムのコンクリートが最終安定温度に達した後の温度変化を(1)式により求めた。

$$\tau_m = \frac{\tau_e + \tau_i}{2} = \frac{\theta A}{L} = \frac{\tau_m + \tau_m}{2} + (T_e + T_i) \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \sin(\omega t + E + \phi_A) \quad \dots [1]$$

$$\Delta T = \tau_i - \tau_e = \frac{12\theta M}{L} = (\tau_m - \tau_m) + 12(T_i - T_e) \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \sin(\omega t + E + \phi_M)$$

ここに、 τ_m = 温度変化量の線型置換後の断面内の平均温度。

ΔT = " " " 上下流面の温度差。

$$\theta A = \int_0^L dx = \frac{(\tau_m + \tau_m)L}{2} + T_e L \cdot \frac{\pi}{\omega L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi^2 (1 - \cos n\pi)}{1 + n^2 \pi^2 (\frac{L}{\omega L})^2} \sin(\omega t + E) - T_i L \cdot \frac{\pi}{\omega L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi^2 \cos n\pi (1 - \cos n\pi)}{1 + n^2 \pi^2 (\frac{L}{\omega L})^2} \cos(\omega t + E)$$

$$\times \sin(\omega t + E) + T_i L \cdot \frac{\pi}{\omega L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi (1 - \cos n\pi)}{1 + n^2 \pi^2 (\frac{L}{\omega L})^2} \cos(\omega t + E)$$

$$= \frac{(\tau_m + \tau_m)L}{2} + T_e L \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \sin(\omega t + E + \phi_A) + T_i L \sqrt{C_1^2 + D_1^2} \sin(\omega t + E + \phi_A)$$

$$\theta M = \int_0^L (x - \frac{L}{2}) dx = \frac{(\tau_m - \tau_m)L^2}{2} - T_e L^2 \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \sin(\omega t + E + \phi_M)$$

$$+ T_i L^2 \sqrt{C_1^2 + D_1^2} \sin(\omega t + E + \phi_M)$$

計算結果を図示すれば(図-2)のとおりである。

b. 単位温度荷重による温度応力。

単位温度荷重あたりの温度応力は、(2)式により求めたが、計算結果は(表-2)のようになった。

$$M_0 = \frac{1}{K} [D_1 B_0 - D_0 B_1] \quad H_0 = \frac{1}{K} [-D_1 B_1 + D_0 A_1] \quad T_0 = \frac{D_0}{C_0} \quad K = A_1 B_0 - B_1^2 \quad \dots [2]$$

なお、アーチ常数については文献(4)を使用し、荷重常数は(3)式のように取扱った。

$$\begin{aligned} \tau_m \text{ の場合 (A)} \quad D_1 &= 0 \quad D_0 = -\int_0^L EC \tau_m \sin f ds \quad D_3 = \int_0^L EC \tau_m \cos f ds \\ \Delta T \quad \text{ (B)} \quad D_1 &= -\int_0^L \frac{EC \Delta T}{L} ds \quad D_3 = -\int_0^L \frac{EC \Delta T}{L} x ds \quad D_5 = -\int_0^L \frac{EC \Delta T}{L} y ds \end{aligned} \quad \dots [3]$$

本ダムでは、パイプワークリングの実施にあたり、人工的に、アーチエレメントの上下流方向に温度勾配を付加して引張応力が発生する部分、即ち、アーチエレメントのクラウン下流側およびアバットメント上流側を局部的に追加冷却して応力のバランス、特に、引張応力の改善をはかっている。

温度応力の解析は、曲り架の温度応力を求める計算式を応用して(4)、(5)式により求めた。また、単位温度勾配あたりの応力は(表-2)のとおりである。但し、(C) = ((4)+(5))式。

(1) 内部拘束による接線方向の応力 (σ_1)

$$\sigma_1 = -ECT + \frac{EC}{\rho + \frac{y}{r}} \left(\int_0^L T dy + \frac{EC}{\rho + \frac{y}{r}} \left[\int_A T dA - \int_A \frac{y}{\rho + \frac{y}{r}} T dA \right] \right) \quad \dots [4]$$

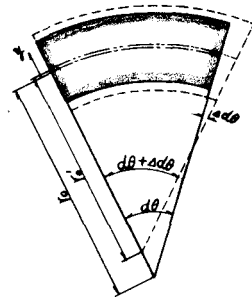
ここに、 C = コンクリートの線膨張係数、 T = 温度($^{\circ}C$)、 A = 断面積

(2) 外部拘束による接線方向の応力 (σ_0)

アーチエレメントに生ずる不静定力は、(2)式により求め、荷重項は次のように取扱った。

$$D_1 \dots s d\theta = d\theta \cdot \frac{C}{\rho + \frac{y}{r}} \left\{ \int_A T dy + \frac{EC}{\rho + \frac{y}{r}} \left[\int_A T dA - \int_A \frac{y}{\rho + \frac{y}{r}} T dA \right] \right\} \quad \dots [5]$$

$$D_3 \dots s d\theta = \frac{C}{\rho + \frac{y}{r}} \left\{ \int_0^L T dy + \frac{EC}{\rho + \frac{y}{r}} \left[\int_A T dA - \int_A \frac{y}{\rho + \frac{y}{r}} T dA \right] \right\}$$



(表-2) 単位温度荷重による温度応力 (kg/cm^2)

温度条件	(A) 断面内平均 温度の変化(Δt_m)				(B) 上下流面の 温度差 (Δt)				(C) 人工付加の 温度勾配(Δt_{art})			
単位荷重	温度降下 $\Theta/^\circ\text{C}$				$U=\Theta\alpha.5^\circ\text{C}$ $D=\Theta\alpha.5^\circ\text{C}$				温度差 1°C			
位置 標高	Cr.		Ab.		Cr.		Ab.		Cr.		Ab.	
	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D	U	D
229.5m	0.46	0.53	0.82	0.77	1.02	1.03	0.88	0.88	0.99	1.01	0.99	1.01
210m	0.89	1.29	1.55	1.22	1.02	1.06	0.76	0.79	0.99	1.02	0.99	1.02
190m	0.85	1.83	1.72	0.88	0.94	1.03	0.72	0.79	0.98	1.03	0.98	1.03
170m	0.30	1.83	1.61	0.21	0.79	0.90	0.73	0.82	0.97	1.05	0.01	0
150m	0.49	1.60	1.38	0.62	0.57	0.65	0.77	0.84	0.96	1.06	0	0

但し、Cr.=アーチクラウンの応力 Ab.=アーチアバットメントの応力 $U(D)=\text{上(下)流縁}$

4. クーリングの実施計画

貯水池の湛水に伴い、ダム上下流面に温度勾配が発生するが、この温度応力は、(図-2) および (表-2) から求めた。計算結果によれば、ダムコンクリート温度が最低の時には、頂部アーチ (Ei.229.5m) を除き、クラウンでは引張、圧縮応力とも $2\sim4\%$ 程度減少し、アバットメントでは逆に引張、圧縮応力とも $2\sim5\%$ 程度増加する傾向にある。また、コンクリート温度の最高時には、各アーチが、クラウンでは引張、圧縮応力とも $7\sim9\%$ 程度減少し、反対に、アバットメントでは引張、圧縮応力とも $6\sim10\%$ 程度加算される傾向にある。

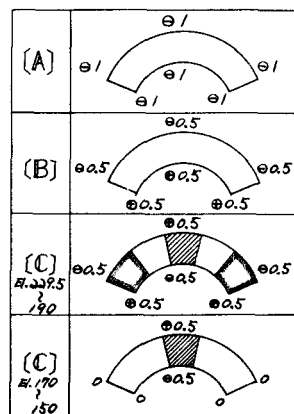
本ダムでは、引張応力の軽減をはかる為、300 J.R.T. のクーリングプラント1基を使用して、ジョイント・グラウチングを実施する近に (図-5) のとおり、ダムコンクリートの温度を、最終安定温度の下限値よりも更に $1\sim4^\circ\text{C}$ 追加冷却して、水圧荷重、等により発生した引張応力を、クラウンで 7.3% 、アバットメントで 6.4% 程度改善するように計画している。

パイプクーリングの実施にあたっては、クーリングパイプの配管を (図-4) のとおり、I型およびII型の2種類に分け、アーチエレメントのうち、引張応力が発生しているクラウンおよびアバットメントにはI型を採用して、引張応力が発生する部分を、更に、追加冷却するように計画している。

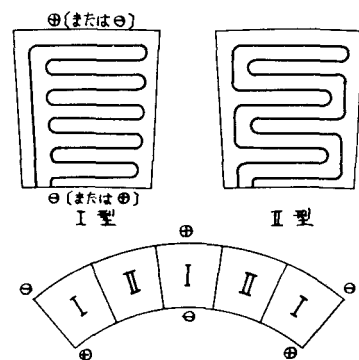
I型の配管により、ダムの上下流面で、 $3\sim4^\circ\text{C}$ 程度の人工的な温度勾配を期待しているが、期待どおりの温度勾配が付加された場合に、改善される引張応力は $3\sim4\%$ 程度である。

また、II型は、上下流面のアーチ応力が比較的バランスしている部分、即ち、人工的に温度勾配を付加しない部分に適用する。このように、I、II型の配管を有効に使い分ける事により、特別な設備を設けずに局所的な温度勾配を付加する事が出来るのみならず、原則として、クーリングパイプの通水方向を切替える手数を省く事が出来るので、一石二鳥である。

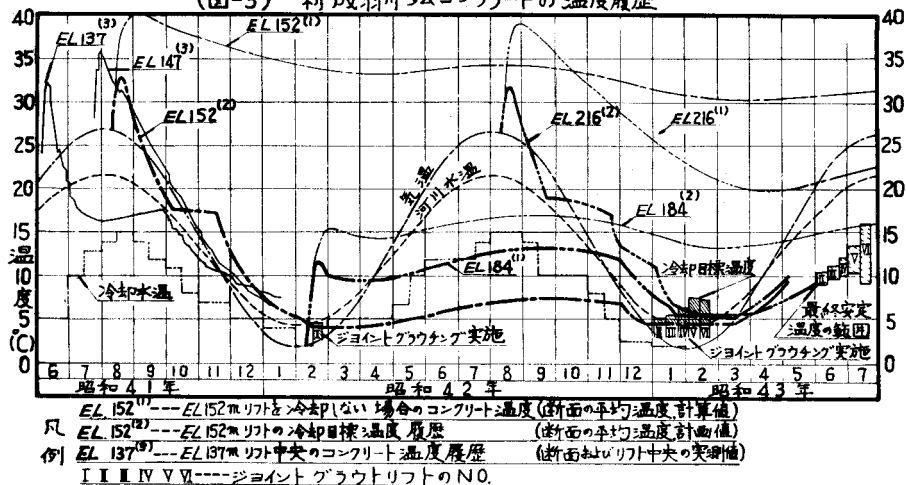
本ダムでは、上述のように、パイプクーリングを合理化す

(図-3) 単位温度荷重($^\circ\text{C}$)

(図-4) クーリングパイプの配管



(図-5) 新成羽川ダムコンクリートの温度履歴



る事により、表面近くに形成される局部応力を除き、(表-1) の引張応力を、概ね、消滅させる事が出来る予定である。

過冷却工法の反動として、夏季に、圧縮応力の増加する事が懸念されるが、荷重分割法(三成分調整)による計算結果によれば、頂部アーチ(EL.229.5m)の応力を除き、最大圧縮応力は0.96程度である。これは、温度上昇による応力と水圧荷重による応力とが相殺される傾向にあるためと考えられる。

実験結果によれば、過冷却工法が、ダムコンクリートの強度に及ぼす影響は、過冷却工法を採用しない場合に較べ、短期強度は劣るけれども、長期的には回復しており、貯水池の湛水時期までには、所要の設計強度以上になる事が判明している。

5. むすび

一般に、「重力アーチダム」は、「薄肉アーチダム」よりも地形、地質に対する適応性が大きく、「重力ダム」よりも経済性、安定性等の面で優れている場合が多い。また、ダム直下流に、大規模な発電所等を設ける場合には、重力アーチダムの有利性が更に増大する。

「重力アーチダム」の設計にあたり、パイプワーリングの実施は必須条件であるが、本文では、ワーリングの合理化、特に、人工的な温度勾配の効果について述べた。この工法は、「セミアーチダム理論」との併用も可能であり、応用範囲が広いと考えられる。

新成羽川ダムの設計にあたっては、電力中央研究所の各位に、御指導御援助を得た。また、〔4〕、〔5〕式は、電研構造研究室高野氏に電子計算機による解析の労を煩わした事を記して謝意を表する。

(参考文献)

- (1) 榎井山田、藤原佐藤：新成羽川ダム構造模型実験。電研報告Ⅱ構 63/17, 1964年。
- (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 Vol.9 No.5,6, 1959年。
- (3) 直村徳三：アーチダム小委員会における問題点。発電水力 No.56, 1962年1月。
- (4) U.S.B.R.: Treatise on Dams Chap.10 "Arch Dams". Denver, Colorado.
- (5) U.S.B.R.: "Cooling of Concrete dams". Boulder Canyon Project Final Reports.