

## I 緒言

揚水式発電所の大型化に伴って、比較的幅の狭い河谷に建設される大規模発電所建屋の設置位置の選定がダムの洪水対策とも関連して重要な問題となつてきている。オ1図は最近中国電力株式会社によって高梁川水系成羽川に建設された新成羽川発電所であるが、この例は発電所設置位置の一つの解決策を示すものである。図のように高さ103mの重力アーチ式ダムの直下流に峡谷を横断して出力300MWの揚水式発電所を建設し、発電所の屋根を幅60m、長さ50mにわたって設計洪水流量2400%の洪水吐のシュートに利用し、さらに洪水流をスキージャンプ式に発電所放水路に放流するようになってゐる。本ダムの計画に当って、最大流速3%を超える高速な洪水流が発電所屋根にどのような荷重を与えるかということが問題になり、設計時において水理模型実験を基礎とした検討が行なわれた。この結果、洪水放流時に発電所屋根に作用する荷重を静的および動的荷重共に屋根上のシュートに沿って奔流する乱流境界層の特性に関連づけて解析し、これに基づいて発電所建屋の構造設計が行なわれた。

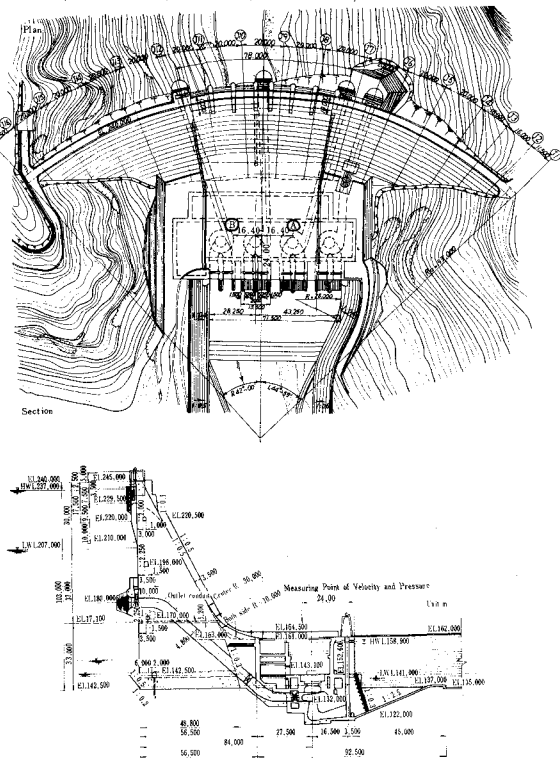
ダムの完成に当り、設計時における推定値の適合性およびダム、発電所の洪水時における安全性を検証する目的で実物ダムにおける人工的な洪水放流実験が行なわれた。洪水の放流量は人工的洪水という制約から1000%、750%、500%の3種にとどまったが、実物規模における高速流の特性および水路壁面に作用する動荷重は設計時の推定値と良く一致し、設計条件の妥当性が確かめられた。

## II 流速および圧力の測定方法

発電所屋根に作用する荷重は垂直および切線方向共に屋根面に沿って奔流する乱流境界層の特性に関連づけて定められるものと考えられるので、屋根上の垂直方向の流速分布を知らねばならない。このために12孔の多孔式ピトー管をオ1図に示したA点に設置して流速分布の測定を行なった。多孔式ピトー管の詳細はオ2図に示すようであるが、動水圧は銅パイプによって屋根版の下に導き計測した。流速による動水圧は最大約6%に達するものと推定されたので、その測定にはグルドン管

\* 安芸周一「発電所屋根をシュートに利用したスキージャンプ式洪水吐の水理解析」オ20回年報

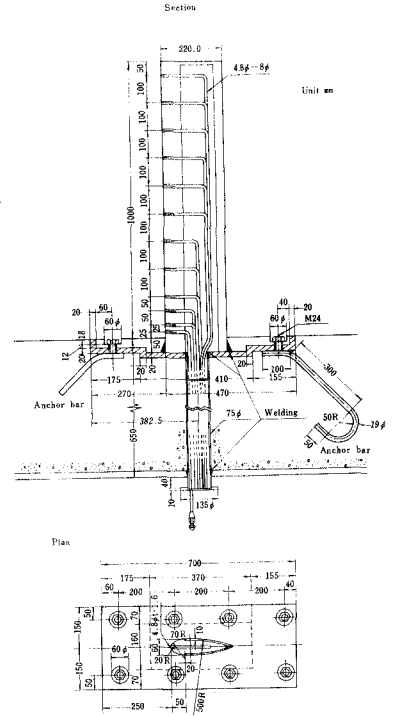
オ1図 新成羽川ダムの概要



式圧力計を用いた。ブルドン管は直径20mm, 測定範囲0~10kg/cm<sup>2</sup>の標準型を選び、実験室内において高速ジェットおよびコンプレッサーを用いて検定した。高速ジェットによる検定においてもブルドン管の指針は良く安定し、目盛との対応も良好であった。しかし、実物の流れでは乱流境界層内の強い乱れのためにある程度の指針の振れは避け難いものと考えられたので、12ヶのブルドン管指針を一一定時間毎に同時撮影し、その指示値の平均をもって流速を求めるものとした。

圧力の測定は歪計式圧力変換器を用いて行なった。圧力の測定は圧力と流速分布の特性と関連づけて解析する目的でオ1図に示すように流速測定点と流水口中に線と点とを以て対稱なB点を基準点とした。そして、圧力変動の空間的規模を測定する目的で基準点を原点として流れ方向に7ヶ、流れと直角方向に4ヶの圧力計を設置した。圧力計の受圧面直径は30mm, 圧力測定範囲0~1kg/cm<sup>2</sup>, 固有振動周期1KC/secである。圧力計設置の模式図をオ3図に示すが、11ヶの圧力計の出力は屋根版を通して導かれ、直流増幅器を経て磁気テープに<sup>同時</sup>記録された。

オ2図 多孔式ピトー管



オ3図 圧力計設置模式図

## Ⅱ シュート上の流れの特性

流速分布の測定結果をオ4図に示す。図のように、流れは流速分布の一般的な主流部と乱流境界層部分の2つに明瞭に区分される。ここで境界層内の流速分布が粗面の新数分布則に従うものとして解析すると

$$\frac{v}{v_*} = 8.48 + 5.75 \log \frac{y}{\bar{z}} \quad (1), \quad \frac{v_*}{v_*} = 8.48 + 5.75 \log \frac{\delta}{\bar{z}} \quad (2)$$

但し、 $v_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ : 摩擦速度,  $v$ : 境界層内で底面より  $y$  の点の流速,  $\delta$ : 境界層厚,  $\bar{z}$ : 粗度

ここで、壁面剪断力  $\tau_0$  は局所抵抗係数  $C_f$  を用いて

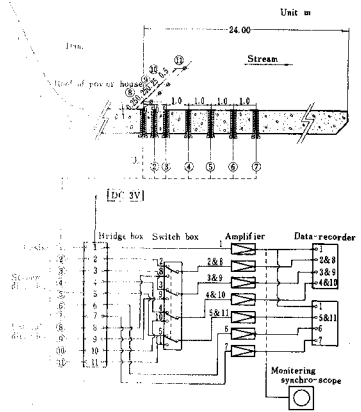
$$\tau_0 = C_f \frac{\rho v_*^2}{2} \quad (3), \quad (2), (3) \text{より}$$

$$C_f = \frac{2}{(8.48 + 5.75 \log \frac{\delta}{\bar{z}})^2} \quad (4)$$

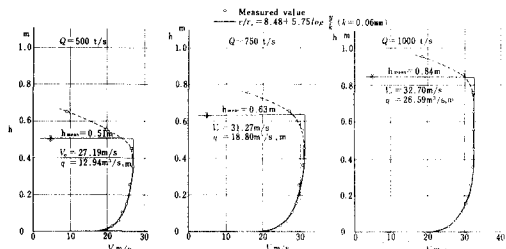
また、(1), (3)より

$$\frac{v}{v_*} = 8.48 \sqrt{\frac{C_f}{2}} + 5.75 \sqrt{\frac{C_f}{2}} \log \frac{y}{\bar{z}} \quad (5)$$

(5)式は流速測定値  $v/v_*$  と  $C_f$  と  $\bar{z}$  の関数として示すものであるから、 $v/v_*$  と  $y$  の実測値を用いて(5)式の関係を最もよく表現する  $C_f$  と  $\bar{z}$  の組合せを図式的に求めると、 $\bar{z} = 0.06 \text{ mm}$ ,  $C_f = 0.0022$



オ4図 流速分布測定結果



と定められた。従って、境界層厚  $\delta$  は(4)式より  $\delta = 0.35 \text{ m}$  と求められる。オ4図の実線は(5)式の計算結果であるが、 $v$ ,  $\delta$  の実測値共に計算値と良く一致することが解る。(3)式より  $v_0$  を求め、(1)式によって実験値を整理したものがオ5図であるが、屋根上の流れは粗面の対数分布則で良く表現される。

ここで、流速測定時の流速分布がどのような過程で形成されたかということを知るためには屋根上の流れの乱流境界層の発達過程を知らねばならない。

水平水路上の2次元乱流境界層流の基本式は

主流部のエネルギー方程式として

$$E = \frac{v_0^3}{2g} + R = \text{const} \quad (6)$$

境界層部の運動量方程式として

$$\frac{C_f}{2} = \frac{d}{dx} \left( \frac{\delta^*}{H} \right) + \frac{(2+H)}{H} \frac{\delta^*}{v_0} \frac{dv_0}{dx} \quad (7)$$

連続式として

$$q = v_0 (R - \delta^*) \quad (8)$$

但し、 $q$ : 単位幅当りの流量、 $\delta^*$ : 境界層排除厚

$$H = \delta^* / \theta, \theta: \text{境界層運動量厚}$$

(6), (7), (8) 式および(1)式より、乱流境界層の発達過程として次式が得られる。

$$\frac{d\delta^*}{dx} = \frac{v_0 (v_0 - 11.5 v_*) \cdot (q - v_0^3)}{(8.48 + 5.75 \log v_0 \delta^* / 5.75 R v_*)^2 \left\{ q - v_0^3 + g v_0 (2 + v_0 / (v_0 - 11.5 v_*)) \delta^* \right\}} \quad (9)$$

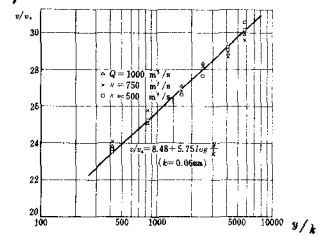
$$\frac{dv_0}{dx} = \left( \frac{g v_0^2}{q - v_0^3} \right) \frac{d\delta^*}{dx} \quad (10)$$

(9), (10) 式によって、乱流境界層の発達過程を求めるためには初期条件として屋根上流端での  $\delta$  が与えられねばならないが、これを解析的に求めることは難しい。アクリル樹脂製の滑面水路の模型実験結果の一例をオ6図に示すが、図のように屋根始端にはほぼ一様な流速分布を生じ、あたかも境界層形成の初期のように見える。そして、この一様な流速分布に対して壁面抵抗による境界層が次第に発達して行く。このような一様な流速分布が屋根始端に形成される理由をバケットカーブ部の急激な圧力勾配の変化による流れの混合にあるものとし、実験のシュートにおいても同様な混合作用のあるものと仮定し、(9), (10) 式計算の初期条件として模型実験値の実物換算値を与えた。計算結果はオ7図に示す通りであり、境界層の発達過程は実測値と良好一致を示している。

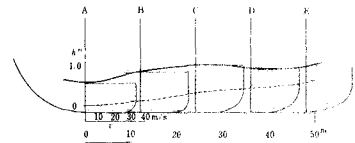
#### IV シュートに作用する力

シュートに作用する力は高流速の乱流変動のために時々刻々不規則に変動する動的な力である。この

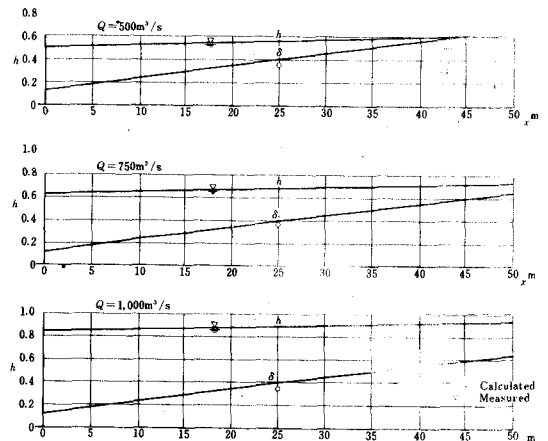
オ5図 流速分布



オ6図 境界層発達過程 (模型実験)



オ7図 境界層発達過程 (実測値)



内、時間平均的な垂直下よび切線方向の力は水深による重力および平均摩擦カとして境界層の発達から解析され、それぞれ  $Q = 1.000 \text{ } \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ sec}}$  に対し、 $0.84 \text{ } \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ sec}}$  および  $0.12 \text{ } \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ sec}}$  であった。一方、屋根面には周波数範囲  $5 \sim 300 \text{ } \frac{1}{\text{sec}}$ 、最大振幅約  $3 \text{ } \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$  ( $1.000 \text{ } \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ sec}}$ ) の不規則な圧力変動が垂直方向に作用したが、これは乱流境界層内の壁面圧力変動<sup>\*</sup>として良く説明された。境界層内には強い速度勾配のために激しい渦が形成され、これが流れによって輸送される間に不規則な圧力変動を壁面に与える。この圧力変動は流れの乱れと平均的剪断力の相互作用が主たる成因でありその強度は次式で与えられる<sup>\*</sup>。

$$\sqrt{P_w} = \beta C_f \frac{P U^2}{2} \quad (11) \quad \text{但し、} P_w: \text{圧力の平均値} \\ \text{よりの偏差}$$

$\beta$  は常数であるが、乱れと圧力計の尺度の関数であり、オ8図のような実験結果<sup>\*</sup>が示されているが、実測値はこれと良く対応し、 $d/\delta_* \rightarrow 0$  の値として  $\beta = 3.9$  と与えられた。ここに、 $d$  は圧力計受圧面の直径である。

圧力変動の空間的規模およびそれが流れによって輸送される速度は圧力変動の時間空間相関の解析から求められる。

$$R(\xi, \eta, \tau) = \frac{P_w(x, y, t) P_w(x+\xi, y+\eta, t+\tau)}{\sqrt{P_w(x, y, t)} \sqrt{P_w(x+\xi, y+\eta, t+\tau)}} \quad (12)$$

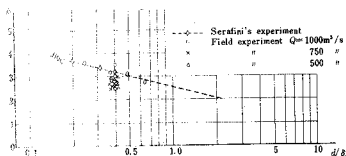
但し、 $\xi, \eta$ ;  $x, y$  方向の距離、 $\tau$ ; 時間差

圧力変動の流れ方向の相関  $R(\xi, 0, \tau)$  および流れと直角方向の相関  $R(0, \eta, \tau)$  の計算結果はオ9図のようである。図のように、流れ方向の相関は圧力変動の輸送形態を明瞭に示し、輸送速度は  $U_c = \frac{\xi}{\tau_{\text{cpe}}}$  より、 $U_c \approx 0.8 U$  と求められた。一方、流れと直角方向の相関は流れ方向に較べてかなり小さく、位相的に同時性を有する圧力変動の空間的規模は流れ方向に約  $14 \delta_* \approx 1.2 \text{ m}$ 、流れと直角方向に約  $2 \delta_* \approx 0.18 \text{ m}$  と推定された。また、圧力変動は広い周波数帯にわたる不規則変動であり、そのパワー・スペクトル関数の一例をオ10図に示す。

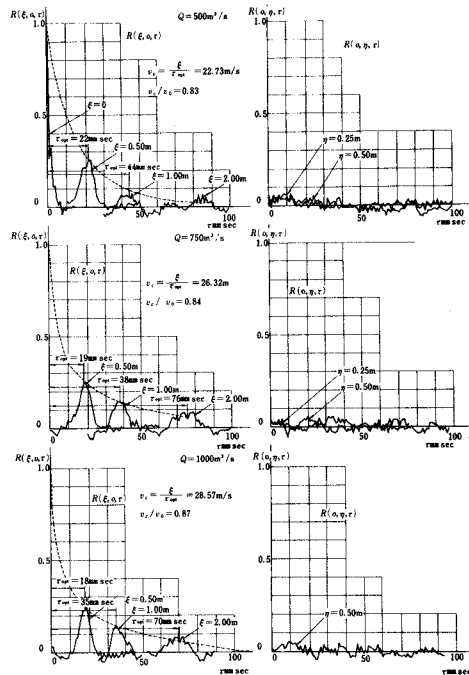
## V 結語

以上のように、発電所屋根上のシュートの流速分布および荷重条件は設計時に予期したように乱流境界層の特性と関連づけて良く説明された。圧力変動は不規則なこと、位相的に同時性を有する範囲の細分化されていることから振動の外カとしてきびしいものではなく、発電所建屋の不安な振動の発生は全く認められなかった。

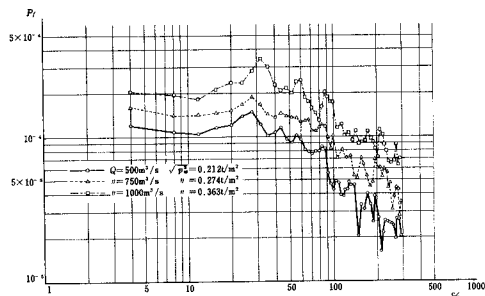
オ8図  $\beta$  と  $d/\delta_*$  の関係



オ9図 時間空間相関係数



オ10図 パワー・スペクトル関数



\* Serafini "Wall Pressure Fluctuations and Pressure Velocity Correlations in a Turbulent Boundary Layer" NASA Report R-165