

# 発電水力 (I)

## 水路工作物

宮地 一郎\*

### 1. はしがき

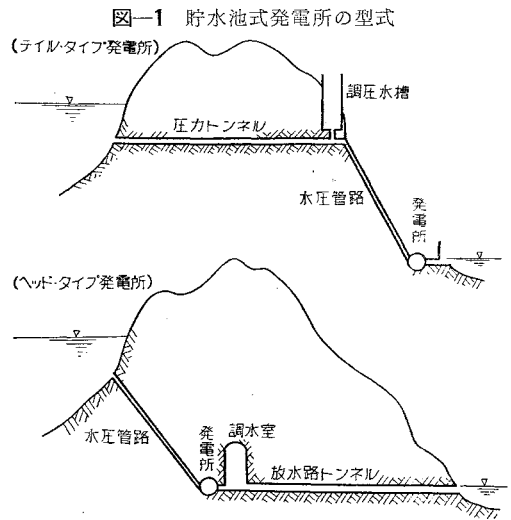
水路工作物には、取水口のスクリーン、自働除塵装置、ゲート、取水塔、表面取水装置等から、空気管、側路管、沈砂および排砂設備、水路トンネル、開水路、溪流取水装置、測水設備、普通水槽、調圧水槽、水圧管路に到るまで種々の工作物があり、これらのうちには水路橋、水圧鉄管、調圧水槽等のごとく、設計計算の方法がほぼ確立されているものもあるが、設計にあたって経験や実験におとところが大きである工作物も非常に多い。これらの多方面にわたる水路工作物について詳述することは、限られた紙数の中では困難であるので、2つの項目を取りあげてみることにした。

### 2. 圧力トンネル

近時、フラットな運転をして効率のよい新鋭大火力発電所と組み合わせる尖頭時負荷を受持つ貯水池式発電所の必要が叫ばれているが、この貯水池式発電所の型式を発電所の水路系統中の位置によつて大別すると、発電所が水路の下流端付近にあるテイルタイプ (Tail Type) と、水路の上流端付近にあるヘッドタイプ (Head Type) に分類される。ヘッドタイプの発電所においては、水路の大部分は放水路となり、ほぼ無圧トンネルであるが、テイルタイプの発電所においては水路の大部分は圧力トンネルとなり、その設計水圧も貯水池の大規模化にともなつて増大し、数 10 m となつている。これらの型式については、地点の地形地質等を勘案した経済性にもとづいて選定を行なうべきであり、圧力トンネルの工法および工費が、地点の経済性に大きな影響を与える場合も多い。ここに、圧力トンネル設計の考え方の一端を紹介して参考に供したいと思う。

岩盤中には、岩石重量その他の原因により応力が作用しているが、この中にトンネルが掘削されるとトンネル断面の周辺における応力分布は、掘削前とは変化するものと考えられる<sup>1)</sup>。いまトンネルが堅固で等質な岩盤の深部を通過すると仮定すれば、トンネル掘削前の岩石中の鉛直方向応力は、岩石の鉛直かぶり  $z$ 、岩石の単位

\* 正員 東京電力KK 建設部土木課



体積重量を  $w$  とすれば、次式のように静水圧的に作用していると仮定できる。

$$\sigma_v = zw$$

測点に横方向外力が加わらない場合の水平方向応力の大きさは  $zw$  に等しいが、付近の地質構造によつて横方向の応力が加えられることもあるので、一般には次式で表わされる。

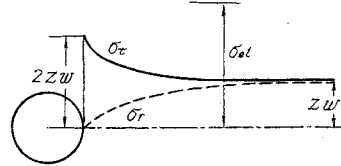
$$\sigma_h = Nzw$$

ここに  $N$  は地質構造による常数で、0.1~3 程度の実測値がみられている。

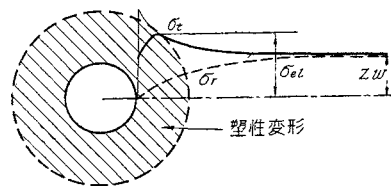
いま  $N=1$  の岩盤中に円型断面のトンネルを掘削し

図-2 トンネル周辺の応力分布

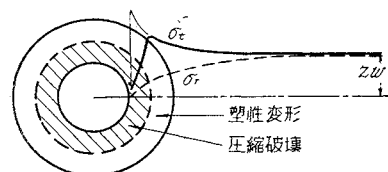
(イ)  $\sigma_{\theta l} > \sigma_{\theta \max} = 2zw$  の場合



(ロ)  $\sigma_{\theta l} < \sigma_{\theta \max} < \sigma_{\theta r}$  の場合



(ハ)  $\sigma_{\theta \max} > \sigma_{\theta r}$  の場合



た場合、断面周辺の応力分布状態は、弾性理論によると図-2に示すごとく、円辺の切線方向圧縮応力  $\sigma_t$  および半径方向圧縮応力  $\sigma_r$  は、岩石の弾性限界を  $\sigma_{el}$ 、破壊強度を  $\sigma_{cr}$  とすれば、 $\sigma_{el} > \sigma_t = 2zw$  の場合、それぞれ  $2zw$  および 0 となり、中心よりへだたるに従つておのおの  $zw$  に収れんし、トンネル掘削面は安定している。 $\sigma_{el} < \sigma_{t \max} < \sigma_{cr}$  の場合には、この部分に塑性変形を生じ、 $\sigma_{t \max} > \sigma_{cr}$  の場合には、この部分に圧縮破壊を、その外周に塑性変形を生ずる。

$N$  が 1 以外の場合には初期応力の分布は上述とは異なり、掘削後の上記の各場合における条件も異なってくる。

次に圧力トンネルの設計について、一般的な場合を取り上げる。いま、岩盤中に半径  $R$  の掘削を行ない、半径  $R_s$  の内張り鉄管と間にコンクリートを充填した構造の圧力トンネルを考える(図-3参照)。

まず内圧に対する設計の検討の第一段として、最小かぶりの決定がある。最小かぶりの表現の一種に次式で表わされる Cover ratio ( $C_r$ ) がある。

$$C_r = \frac{H}{p}$$

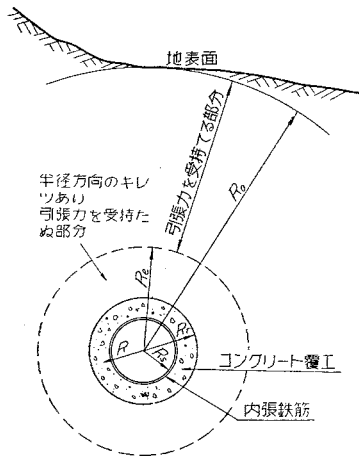
ここに  $H$  は鉛直かぶり、 $p$  は内圧である。最小かぶりは、鉛直上方の岩石の水中重量が内圧よりも大であるという条件で、下式のように表わされ、岩石の単位体積重量  $\rho_r$  を 2.5 とすれば、 $C_r$  はほぼ 0.7 より大でなければならない。

$$\frac{(\rho_r - 1) \times H}{p} \geq 1$$

$C_r$  が 0.7 より小さい場合には、全内圧を覆工で受持つように設計しなければならない。

図-3のトンネルにおいて内圧  $p$  は、内張り鉄管、コンクリート覆工、岩盤の順に力を伝達されるが、内圧のかかる以前には、コンクリート硬化時の温度上昇後、通水による温度降下によつて内張り鉄管とコンクリートとの間には、間ゲキ  $y_0$  が生じていると仮定する。岩盤は完全な弾性体ではなく、塑性変形をするので、その変形量を弾性変形量に比較して  $(1+K)$  とすれば、内圧

図-3 圧力トンネル断面



$p$  による内張り鉄管の半径方向の変形  $d_s$  は、コンクリート覆工および岩盤の半径方向の弾性変形量を、それぞれ  $d_c$  および  $d_r$  とすれば、次式で表わされる。

$$d_s = d_c + d_r(1+K) + y_0 \dots\dots\dots (1)$$

内張り鉄管の受持つ内圧を  $p_s$ 、管厚を  $T_s$ 、内張り鉄管の弾性係数および切線方向引張り応力を  $E_s$  および  $\sigma_s$  とすれば

$$d_s = \frac{\sigma_s \cdot R_s}{E_s} \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_s = \frac{p_s \cdot R_s}{T_s}$$

$$\therefore d_s = \frac{p_s \cdot R_s^2}{E_s \cdot T_s} \dots\dots\dots (3)$$

(1), (3) より

$$d_s = d_c + d_r(1+K) + y_0 = \frac{p_s \cdot R_s^2}{E_s \cdot T_s} \dots\dots\dots (4)$$

覆工コンクリートが切線方向の引張り力を受持たないと仮定し、コンクリートの弾性係数、半径方向応力および半径方向ヒズミを、それぞれ  $E_c$ 、 $\sigma_c$  および  $\delta_c$  とすれば、

$$\sigma_c = (p - p_s) \frac{R_s}{R}$$

$$\delta_c = (p - p_s) \frac{R_s}{R \cdot E_c}$$

ゆえに半径方向の総ヒズミ  $d_c$  は、

$$\begin{aligned} d_c &= \delta_c \int_{R_s}^{R_r} dR \\ &= \frac{(p - p_s) R_s}{E_c} \int_{R_s}^{R_r} \frac{dR}{R} \\ &= \frac{(p - p_s) R_s}{E_c} \log_e \frac{R_r}{R_s} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$= 2.3 \frac{(p - p_s) R_s}{E_c} \log \frac{R_r}{R_s} \dots\dots\dots (6)$$

岩盤の変形については、岩の物理的性質の考え方のいかんによつて、種々の解が考えられる。岩盤が全然引張り力を受持たないと仮定すれば、岩盤の変形量  $d_r$  は、コンクリートの弾性係数と岩盤の有効弾性係数がほぼ等しい場合が多いので、コンクリート覆工の厚さを無視し、岩盤は直接内張り鉄管と密着していると仮定し、半径  $R_0$  の岩石のシリンダーを考えれば、(5)式と同様にして次式が得られる。

$$d_r = \frac{(p - p_s) R_s}{E_r} \log_e \frac{R_0}{R_r} \dots\dots\dots (7)$$

岩盤が引張り力を受持つと仮定した場合、岩のポアソン比を  $\nu$  とすれば、次式が常用される。

$$d_r = \frac{(p - p_s) R_s}{E_r} \left[ \frac{R_0^2 + R_r^2}{R_0^2 - R_r^2} + \nu \right] \dots\dots\dots (8)$$

$R_r$  に比較して  $R_0$  が大きい場合には(8)式は次式のごとくなる。

$$d_r = \frac{(p - p_s) R_s}{E_r} (1 + \nu) \dots\dots\dots (9)$$

(7), (8), (9) 式の変数項を  $\nu = 0.2$  とおいて  $R_0/R_r$

との関係を図示すれば図-4のごとくなり、 $R_0/R_r$ により非常に異なった数値を示すので、岩盤の変形量を示す一般解は図-3に示すごとく、(7)式を適用する部分と $R_0$ と(8)、(9)式を適用できる残りの部分とにかぶりを二分し、おのおのの部分の計算で得られた変形量を合計すればよい。

上記各式における各常数を決定するために、現地に試験トンネルを掘削し、各種試験を行なうことがある。試験トンネルの水圧試験の場合、十分に時間をかけたくり返し荷重試験を行なうと、岩盤は図-5の実例に見られ

図-4 岩盤の変形量

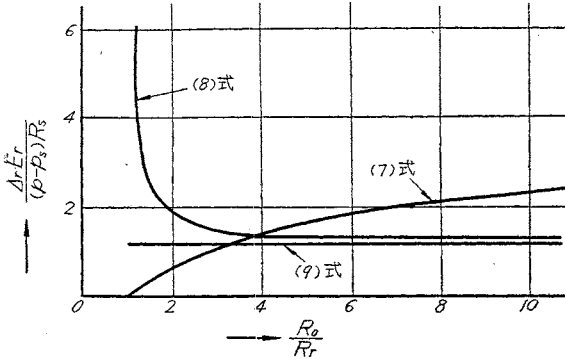


図-5 試験トンネル岩盤変形の実例

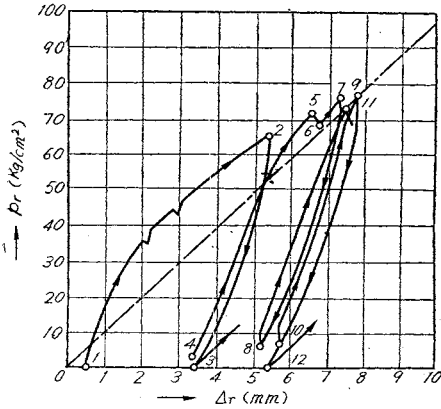
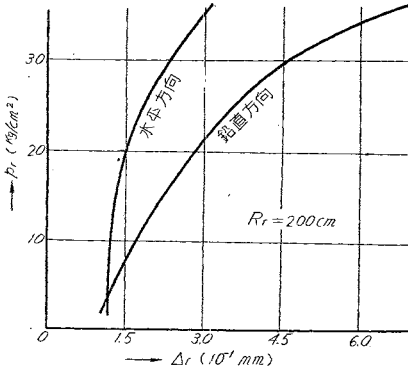


図-6 試験トンネルにおける方向別岩盤変形の実例



るような塑性変形を行なっている。また、これは特定方向の変形であるが、測定方向によつて変形量に非常に差があることは図-6の実例によつても明らかであるので、設計に使用する数値の決定には十分慎重でなければならぬ。

試験トンネルにおける水圧試験結果を利用して、設計トンネルの岩盤変形量を推定する方法の一つとして、次式を用いることがある。

$$\Delta_r = \Delta_r' \cdot \frac{p_r \cdot R_r}{p_r' \cdot R_r'}$$

ここに、 $\Delta_r, p_r$  および  $R_r$  は設計トンネルの； $\Delta_r', p_r'$  および  $R_r'$  は試験トンネルのそれぞれ岩盤の半径方向変形、トンネルの内圧および内径とする。上式の計算に用いる  $\Delta_r'$  および  $p_r'$  の値が短時間の1回荷重試験の結果であれば、 $\Delta_r$  の計算値にさらに塑性変形分を推定して加算しなければならず、くり返し荷重試験の結果であれば、塑性変形分は、すでにふくまれていることになる。

次に、温度降下による内張り鉄管とコンクリートの間ゲキ、グラウトによる鉄管の初期応力等の影響を考慮した一般式を考えてみよう。いま試験トンネルにおける短時間の1回荷重試験時の変形係数を  $M$  とすれば、

$$M = \frac{p_r \cdot R_r}{\Delta_r} = \frac{(p-p_s) R_s}{\Delta_r}$$

$$\therefore \Delta_r (1+K) = \frac{(p-p_s) R_s}{M} (1+K) \dots\dots (10)$$

温度変化  $C$  による内張り鉄管とコンクリート覆工との半径方向の間ゲキ  $y_0$  は、 $w$  を常数とすれば次式で表わされる。

$$y_0 = w \cdot C \cdot R_s \dots\dots (11)$$

内張り鉄管とコンクリートの中にグラウトを行ない、内張り鉄管に  $\sigma_g$  の圧縮応力が働らくようにすれば、半径方向の変形  $y_0$  は次式で与えられる。

$$y_0 = -\frac{\sigma_g \cdot R_s}{E_s} \dots\dots (12)$$

(2), (3), (6), (10), (11), (12) 式を (4) 式に代入すれば

$$\Delta_s = 2.3 \frac{(p-p_s) R_s}{E_c} \log \frac{R_r}{R_s} + \frac{(p-p_s) R_s}{M} (1+K)$$

$$+ w \cdot C \cdot R_s - \frac{\sigma_g \cdot R_s}{E_s} = \frac{\sigma_s \cdot R_s}{E_s}$$

$$2.3 \frac{(p-p_s)}{E_s} \log \frac{R_r}{R_s} + \frac{(p-p_s)}{M} (1+K) + w \cdot C - \frac{\sigma_g}{E_s} = \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$$\therefore (p-p_s) \left[ \frac{2.3}{E_s} \log \frac{R_r}{R_s} + \frac{1+K}{M} \right] + w \cdot C - \frac{\sigma_g}{E_s} = \frac{\sigma_s}{E_s}$$

ここに、 $\frac{E_s}{E_c} = n, \frac{E_s}{M} = m$  とおけば

$$(p-p_s) \left[ 2.3 \cdot n \cdot \log \frac{R_r}{R_s} + m(1+K) \right] = \sigma_s - E_s \cdot w \cdot C + \sigma_g$$

$$\therefore (p-p_s) = \frac{\sigma_s - E_s \cdot w \cdot C + \sigma_g}{2.3 \cdot n \cdot \log \frac{R_r}{R_s} + m(1+K)}$$

実状に応じて上式を運用すれば、岩盤の受持つ圧力が計算できる。以上で一応内圧に対する設計の検討を終り、次に外圧に対する設計を考える。外圧に対するコンクリート覆工の設計法については、従来多くの方法が発表されているので、ここでは省略し、上述と同様な構造の圧力トンネルにおける内張り鉄管の外圧に対する検討を行なうこととする。薄い鉄板のシリンダーが外圧を受けた場合、現実の鉄管のごとく真円でないとシリンダー中には曲げモーメントを生ずる。真円からのヒズミが大きいほど、座屈を生ずる可能性が大である。Timoshenkoによれば薄いシェル限界応力  $\sigma_{cr}$  は次式で表わされる。

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{12(1-\nu^2)} \cdot \frac{T^2}{R^2} (n^2 - 1) \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 $E, T, R$  および  $\nu$  は、それぞれシリンダーの弾性係数、板厚、管の半径およびポアソン比であり、 $n$  は変形後の波の数とする。ゆえに図-7に示すごとく、

$$n = \frac{\pi R}{L} \quad 2L = \text{ヒズミ波形の長さ}$$

となる。外圧を受けてシリンダーが座屈を起こす瞬間と、外圧を受ける以前のシリンダー半径の差  $y_s$  は次式で表わされる。

$$y_s = \frac{\sigma_{cr} \cdot R}{E} (1 - \nu^2) \dots\dots\dots (14)$$

また、外圧により生ずるヒズミ波形の半径方向の最大ヒズミを  $y_m$  とすれば、半径の変形量  $y$  は次式で表わされる。

$$y = y_m \cdot \sin \frac{\pi x}{L}$$

ヒズミ波形に沿う波の1/2の長さ  $L_c$  は

$$L_c = 2 \int_0^{L/2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \cdot dx$$

ゆえに、ひずんだのちの全周長  $S$  は

$$S = 2n \times 2 \int_0^{L/2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \cdot dx \\ \doteq 4n \left[ \frac{L}{2} + 1.236 \frac{y_m^2}{L} \right]$$

ヒズミ発生前後の平均半径の差  $y_c$  は

$$y_c = \frac{S - 2nL}{2\pi} \\ = \frac{4n \left[ \frac{L}{2} + 1.236 \frac{y_m^2}{L} \right] - 2nL}{2\pi}$$

$$= \frac{4 \times 1.236 n \cdot y_m^2}{2\pi L} \\ = \frac{n^2 y_m^2}{4R} \dots\dots\dots (15)$$

最大半径方向変位は、すべての原因の変位の合計であるから、(14)、(15)式より次式が得られる。

$$y_m = y_0 + y_s + y_c \\ = y_0 + \frac{\sigma_{cr} \cdot R}{E} (1 - \nu^2) + \frac{n^2 \cdot y_m^2}{4R} \dots\dots\dots (16)$$

合計変形が  $y_m$  になったときの鉄板の曲げモーメントは、直圧縮力が  $y_m$  なる偏心をして作用しているとして計算できるから、このときの応力が降伏点応力  $\sigma_y$  になったときに破壊が起こるとして、 $\sigma_{cr}$  も次式より計算できる。

$$\sigma_y = \sigma_{cr} \left( 1 + \frac{6 y_m}{T} \right) \dots\dots\dots (17)$$

(13)、(16) および (17) 式より  $y_m$  を消去して

$$\frac{E}{(1-\nu^2)} = E'$$

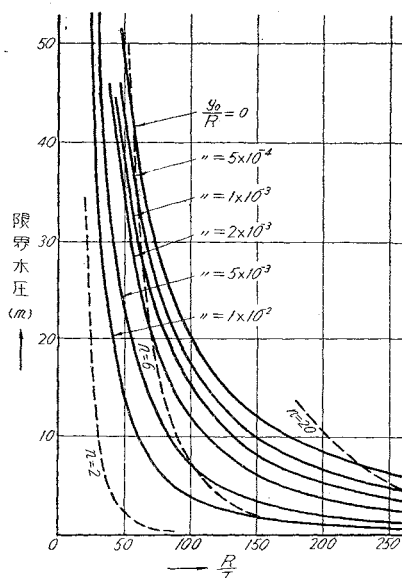
とおけば

$$\left[ \frac{\sigma_y - \sigma_{cr}}{2E'} + \frac{6\sigma_{cr}}{\sigma_y - \sigma_{cr}} \left( \frac{y_0 + \sigma_{cr}}{R + E'} \right) \right] \frac{R^2}{T^2} \\ - \frac{R}{T} + \frac{\sigma_y - \sigma_{cr}}{24\sigma_{cr}} = 0 \dots\dots\dots (18)$$

上式により、 $y_0, \sigma_y$  等を与えれば  $\sigma_{cr}$  と  $R/T$  の関係が求められる。いま (18) 式より、 $\sigma_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$  において、種々の  $y_0/R$  に対する限界外圧を図示すれば図-8のごとくなる。

(18) 式および図-8はおのおの限界値を示しているから、設計には別に安全率を考慮しなければならない。図中の実線は鉄管がコンクリート覆工中に含まれている

図-8 限界水圧と  $R/T$  との関係



場合で、点線はコンクリートには包まれていないが、ヒズミ曲線の波の数を限定された場合を示す。上法によつて検討した管厚が、外圧に対して安全でなければ、管厚を増すか補剛を行なわなければならない。

補剛を行なうには、真円保持の目的で内張り鉄管をコンクリート覆工内面に緊着させ、半径方向の変位を困難にする方法と、ヒズミ波形の波の数を増加させる目的で内張り鉄管周辺の各点の半径方向、または切線方向の変位を困難とするように制約する方法とがある。(18)式および図-8で明らかなように、鉄管の座屈に対する安定性は  $y_0/R$  を小にするほど増加する。 $y_0/R$  を小にするには、工場製作および、すえつけの管理をよくして真円を保持し、コンクリート打込みおよび硬化時の鉄管のブレーキングまたは、コンクリート硬化後の間ゲキグラウト等によるべきであろう。ヒズミ波形の波の数 ( $n$ ) を限定して座屈に対する安定性を増加させるには、ハリネズミ式の鋼ひげ (Hedge hog spine の名称あり) を全周に沿つて  $n$  コ設けて、半径方向の変位を制限するか、または平鋼等の長手方向補剛材を全周に沿つて  $2n$  本設けて、半径方向の変位は許すが、切線方向の回転を制限する方法がある。また水圧鉄管に用いる円環補剛材を設けてもよい。

### 3. 調圧水槽の安定条件

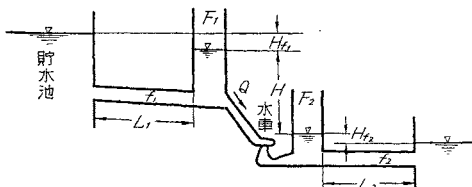
図-9 に示すような水理系統において水車の弁を開閉すれば、上流側の水路には圧力変化が生ずるので、この圧力変化が圧力水路の上流部まで伝わるのを防止するために調圧水槽を設ける。調圧水槽は、水車使用水量の変化にともない、圧力水路の流量が使用水量に等しくなるまでの間、所要の運転を行なうため、水槽により水量の補給または貯溜を行なうるに十分な容積を持たなければならないと同時に、水車調速機のサージング自励作用に対しても減衰作用をする一定面積を持つ必要がある。これらサージングの減衰するための条件を安定条件と称する。

#### (1) トーマ (Thoma) の安定条件

いま、図-9 の圧力水路内の水の運動方程式と、調圧水槽に関する水の連続方程式は、それぞれ次のごとくなる。

$$\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} = z - cv^2 \quad (19)$$

図-9 調圧水槽系統図



$$F \cdot \frac{dz}{dt} = Q - f \cdot v \quad (20)$$

ここに、 $L, f, c$  および  $v$  は圧力水路の断面積、長さ、損失係数および平均流速、 $Q$  は使用水量、 $g$  は重力の加速度、 $F$  および  $z$  は調圧水槽の面積および水位とする。

(19), (20) 式より  $v$  を消去すれば、

$$\frac{LF}{gf} \cdot \frac{d^2z}{dt^2} + z = 0$$

$$z = C_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + C_2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (21)$$

ここに、サージングの周期を  $T$  とすれば

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{LF}{gf}} \quad (22)$$

いま、最大使用水量  $Q_0$  時の圧力水路流速を  $v_0$  とすれば、

$$\left. \begin{aligned} &t=0 \text{ のとき } z=0 \\ &\left(\frac{dz}{dt} = -\left(\frac{f}{F}\right)v_0 \right) \end{aligned} \right\} \text{より (21) 式は}$$

$$z = -v_0 \sqrt{\frac{LF}{gF}} \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}$$

全負荷遮断時の  $z_1$  は

$$z_1 = v_0 \sqrt{\frac{LF}{gF}} \quad (23)$$

水車調速機が水車出力を一定に保つように動作するとし、有効落差、使用水量、および水車の効率をそれぞれ  $H, Q$  および  $\eta$  とすれば、調速方程式は

$$\eta \cdot H \cdot Q = N = \text{const.} \quad (24)$$

一定負荷で運転している発電所の調圧水槽水位が、なんらかの原因で微小振動を生じたとし、

$$\left. \begin{aligned} z &= z_0 + z' \\ v &= v_0 + v' \\ Q &= Q_0 + Q' \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

とおき、(19), (20), (24) 式に代入する。この場合

$$\left. \begin{aligned} z' &\ll z_0 \\ v' &\ll v_0 \\ Q' &\ll Q_0 \end{aligned} \right\} \text{と考へて、}$$

$z', v', Q'$  と、その微係数について2乗以上の項を無視すれば、各式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{L}{g} \cdot \frac{dv'}{dt} &= z' - z_0 cv_0 v' \\ F \cdot \frac{dz'}{dt} &= Q' - f v' \\ -Q_0 z' + H_0 Q' &= 0 \end{aligned} \right\}$$

3式より  $v', Q'$  を消去し、(22), (23) 式および  $H_G = H_0 + z_0$  から次の振動方程式をうる。

$$\frac{d^2 z'}{dt^2} + \frac{4\pi}{T} \cdot \frac{z_0}{z_1} \left(1 - \frac{fL}{2cgH_0F}\right) \frac{dz'}{dt} + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \frac{1}{H_0} (H_G - 3z_0) z' = 0$$

この方程式で表わされる微小振動が減衰するために

は、復元係数 ( $z'$  の係数) および減衰係数 ( $dz'/dt$  の係数) がともに正である必要があるから次の2式をうる。

$$F \geq \frac{fL}{2cgH_0} = F_{Th} \dots \dots \dots (26)$$

または

$$F = nF_{Th}$$

$$z_0 < \frac{H_G}{3} \dots \dots \dots (27)$$

(26) 式はサージングが定常運転の水位に復しうるための条件 (静的安定条件) であり, (27) 式は定常運転水位の近くで減衰性であるための条件 (動的安定条件) である。両式を単動調圧水槽に関するトーマの安定条件という。種々の型式の調圧水槽で条件が異なる場合は, 上記の安定条件を再検討して修正しなければならない。

(2) 大きな振動の安定

大きな振動の安定については Thoma の式を修正した次の Jaeger の式がある。

$$F = \left(1 + 0.482 \frac{z_1}{H_0}\right) F_{Th}$$

(3) 制水口型調圧水槽の安定

$\Delta p/r$  を制水口抵抗とすれば, 調速方程式は

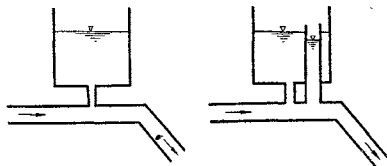
$$\eta \left(H \pm \frac{\Delta p}{r}\right) Q = N = \text{const.}$$

となり, カッコ内の変化は単動調圧水槽の場合より大きく, 予想に反して安定関係はより敏感であるから, 上式を考慮に入れた解析的方法により, 数サイクルにわたるサージングの試算を行ない, 減衰性を確かめる必要がある。

(4) 差動調圧水槽の安定

制水口が大きい場合, または微小振幅の場合は制水口型調圧水槽の場合と同様であるが, 制水口が小さい場合は, ライザー内水位は水槽水位と独立して大きく振動するから, ライザー面積がトーマの条件を満足しなければならない。ゆえに, 特に低落差の場合には, (3) と同様, サージングの試算により安定性を確認するのが普通である。

図-10 制水口型調圧水槽 (左) と差動調圧水槽



(5) 2つ以上の水槽系の安定

2つ以上の水槽系については Evangelisti は次のような微小振動の安定条件を与える実用式を示しているから, 次式による設計完了後, 調速方程式を考慮したサージングの試算により安定性を確認しなければならない。

図-11 のごとく, 水車の上流側に2つの水槽がある

場合,

$$F > \frac{Q^2}{2g z_0 H_0} \cdot \frac{L}{f}$$

ここに

$$\begin{cases} F = F_2 + \phi_1 F_1 \\ \phi_1 = \left(1 - \frac{2z_0}{H_0}\right) \frac{H_{f1}}{z_0} \\ \frac{L}{f} = \frac{L_1}{f_1} + \frac{L_2}{f_2} \end{cases}$$

図-11 水車上流に2つの水槽がある場合

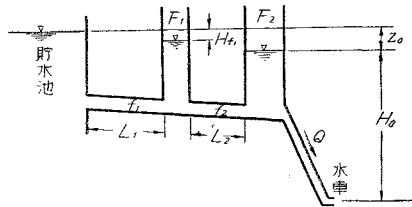


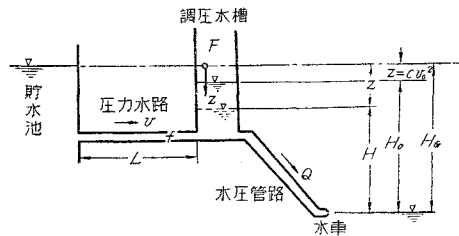
図-12 のごとく, 水車の上下流におのおの1つずつの水槽がある場合

$$\begin{cases} F_1 > \frac{F_{Th}^*}{1 - \frac{2H_{f2}}{H} \cdot H_{f1}} \\ F_2 > \frac{F_{Th}^{**}}{1 - \frac{2H_{f1}}{H} \cdot H_{f2}} \end{cases}$$

ここに

$$\begin{cases} F_{Th}^* = \frac{Q^2 L_1}{2g H_0 H_{f1} f_1} \\ F_{Th}^{**} = \frac{Q^2 L_2}{2g H_0 H_{f2} f_2} \end{cases}$$

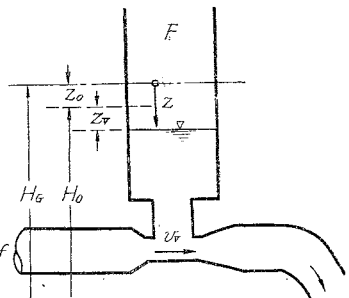
図-12 水車の上下流に1つずつの水槽がある場合



(6) 速度水頭を考慮する場合

図-13 のごとく, ライザー直下にベンチュリー管を設ければ, 狭さく部の流速  $v_v$  による速度水頭  $v_v^2/2g$  は安定条件に影響を与えずなわち,

図-13 ベンチュリー型調圧水槽



圧力水路および調圧水槽内では速度水頭は損失とみなされるが、出力計算にはこれを差引かないから調速方程式は次のごとくなる。

$$\eta Q \left( H_G - z + \frac{vV^2}{2g} \right) = N = \text{const.}$$

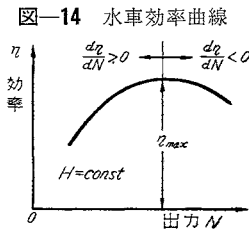
$\frac{vV^2}{2g} = z_V$  とおけば、安定条件の式は次のごとくである。

$$F \geq \frac{v_0^2}{2g} \cdot \frac{L \cdot f}{(H_0 + 2z_V)(z_0 + z_V)}$$

上式は特に低落差の場合  $F_{Th}$  の縮小に役立つが、水槽水位が低い場合、ライザー上部の水深が浅いから水面が躍り、上式の効果は不安定なものとなるので、設計上注意が必要であろう。

### (7) 水車効率曲線の影響

いままで、水車効率  $\eta$  は一定である、と仮定してきたが、事実上は図-14のごとくなるので、 $H + z = H_0 + x$  とすれば、出力  $N$  の関数として表わされる。



$$\eta = \eta(N) = \eta_0 + \left( \frac{d\eta}{dx} \right)_0 x + \dots$$

$\frac{N}{N_0}$  は  $\left( \frac{H_0 + x}{H_0} \right)^{3/2}$  に比例するから

$$\left( \frac{d\eta}{dx} \right)_0 = - \left( \frac{d\eta}{dN} \right)_0 \left( \frac{dN}{dx} \right)_0 = - \frac{3}{2} \cdot \frac{N_0}{H_0} \left( \frac{d\eta}{dN} \right)_0$$

ゆえに安定条件は

$$F \geq \frac{v_0^2}{2g} \cdot \frac{L \cdot f}{H_0 c v_0^2} \left[ 1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{N_0}{\eta_0} \left( \frac{d\eta}{dN} \right)_0 \right]$$

図-14により明らかなように、低負荷時には  $\frac{d\eta}{dN}$  の値は大きく調圧水槽の安定性は増大するが、 $\frac{d\eta}{dN} < 0$  の部分では、安定性はかえって減少することになる。

### (8) 摩擦損失の影響

水圧管路の摩擦損失は、使用水量の増加とともに増加して有効落差を減ずるから、 $\frac{d\eta}{dN} < 0$  と同様に調圧水槽の安定性を減少させる。水圧管路の長い場合には一定のチェックが必要であろう。圧力水路の摩擦損失も使用水路の増加とともに増加して有効落差が減少するから、出力を一定に保つためには、さらに水量を増さなければならず、不安定化の方向に作用する。上述のおのおのについてはサージングの数値計算によつて安定性のチェックを行なう。水路の粗度係数選定の適否は安定条件に大きく影響するから注意を要する。

### (9) 並列運転の影響

A発電所が他の調圧水槽のない発電所群と並列運転をしている場合を考えよう。 $N_s$  を系統の全出力、 $N$  およ

び  $N_0$  を A および A 以外の発電所の出力とすれば、

$$N_s = N + N_0$$

図-15は出力

と回転数の関係を A 発電所と全系統とのおのおのについて特性曲線で表わしたものである。

この場合、A 発電所の特性曲線は全系統

の曲線よりも一般的に急傾斜となる。並列運転中は全系統発電所の回転速度は、ある回転速度に比例するとみなしうから、A 発電所が出力  $N_0$  の場合、全系統の出力は  $N_s$  で、A 発電所の曲線 (I) 上の m 点は水平線  $m-n$  上にある。いま、A 発電所の調圧水槽水位が  $H_0$  より  $(H_0 + x)$  になれば、曲線 (I) 上の m 点は水平に次式の  $\epsilon$  だけ移動する。

$$\epsilon = \frac{3}{2} N_0 \frac{x}{H_0}$$

A 発電所が単独運転をしているならば、 $N_0 = \text{const.}$  になるように回転速度は  $mm'$  だけ大となるが、並列運転のため系統の出力  $N_s = \text{const.}$  となるよう、曲線 (II) の n 点は  $n_1$  に移り、m は  $n_1$  を通る水平線上の  $m_1$  に移る。すなわち全系統発電所の回転速度変化  $\Delta w$  は

$$\Delta w = nn_1 = \epsilon \frac{dw}{dN_s}$$

A 発電所の出力変化  $\Delta N$  は m と  $m_1$  の横座標の差になるから次式で表わされる。

$$\Delta N = \epsilon - \Delta w \frac{dN}{dw} = \epsilon - \epsilon \frac{dw}{dN_s} \cdot \frac{dN}{dw} = \epsilon \left( 1 - \frac{dN}{dN_s} \right)$$

$$k = \frac{dN}{dN_s} \cong \frac{N}{N_s} \text{ とおけば}$$

$$\Delta N = \frac{3}{2} \cdot \frac{x}{H_0} N_0 (1 - k)$$

ゆえに A 発電所の出力  $N$  は

$$N = N_0 + \Delta N = N_0 \left\{ 1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{x}{H_0} (1 - k) \right\}$$

これより安定条件の式は次のようになる。

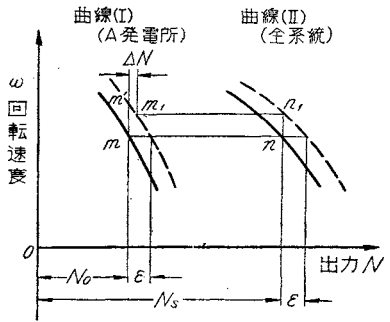
$$F \geq \frac{v_0^2}{2g} \cdot \frac{L \cdot f}{H_0 c v_0^2} \left[ 1 - \frac{3}{2} (1 - k) \right]$$

ここで、 $k=1$  ( $N=N_s$  で A 発電所単独) の場合

$$F \geq F_{Th}$$

となり、 $k=1/3$  の場合  $F=0$  となる。すなわち、A 発電所の出力が全系統の  $1/3$  以下の場合には、調圧水槽の面積がいかに小さくとも、安定運転が可能となるわけである。

図-15 並列運転中の特性曲線



### (10) 調速機の影響

以上の考察は、水車調速機が完全に調速方程式に従って動作するという仮定のもとに行なわれたのであるが、現実の機械には調速方程式に忠実には従わないものも考えられる。また、調圧水槽を有しているが、サイクル調整的には使用せず、給電指令の命ずる出力を安定して発電できるように調速機を定点にリミットする発電所も多い。かかる場合、調速方程式を根拠とした上述のような安定の問題は論じられない。

### (11) 調圧水槽経済設計の一考察

低落差、大量の発電所では、(26)式によつて明らかなごとく、 $F_{\min}$  は大きくなり、工費は莫大なものとなるので、設計上、 $F$  の縮小の問題が生ずる。この水槽工事費を節減するため、越流式調圧水槽を計画するのも一方法であるが、ヘッドタイプ的一种として発電所を貯水池直下に設け、放水路を無圧水路にすれば、調圧水槽を設けずに調圧水槽がある場合と同様に、給電指令に即応できる発電所としての機能を持たせ、かつ圧力水路および調圧水槽の工事費を節減できる。この場合、放水庭が放水路に設けた調圧水槽として安定性が問題になるの

は、洪水時放水路が圧力水路となる数刻の間だけで、発電所は一般に並列運転をしており、水車調速機は給電指令の命ずる出力にリミットされているから、出力調整を注意して行なえば、まず問題は起らないであろう。

調圧水槽の安定条件については、以上の議論に述べられたとおり、影響する要素が多種多様であるから、その設計に当つては安全側、危険側の各要素を徹底的に究明して、それらの軽重を慎重に判断し、妥当な構造を定めなければならない。

### 参考文献

- 1) F.W. Patterson, R.L. Clinch and I. W. McCaig: "Design of Large Pressure Conduits in Rock" Journal of the Power Division, Proceedings of A.S.C.E., Dec. 1957
- 2) E.W. Vaghan: "Steel Linings for Pressure Shafts in Solid Rock" Journal of the Power Division, Proceedings of A.S.C.E., April, 1956
- 3) 林 泰造:「水撃作用とサージタンク」, 応用水理学 (I), 丸善, 東京, 1958
- 4) Charles Jaeger: "Die Wasserschlossschwingungen" Technische Hydraulik, Kapitel C, Verlag Birkhäuser, Basel, 1949
- 5) Charles Jaeger: "Present trends in surge tank design" Trans. Institution of Mech. Eng., No. 2, 1954
- 6) Calame, J., et Gaden, D.: "Théorie des Chambres d'équilibre". Gauthier Villars, Paris, 1926

## 実用数値計算法

信州大学教授 工学博士

谷本 勉之助 著 (最新刊)

[A5 P. 330 定価 550円 函入 750円]

### 実用解析の理論とその応用!!

本書は、実用解析学の分野のうち、とくに

- (1) 内挿法及びその幅の広い応用
- (2) 方程式の数値解法
- (3) 数値積分法およびその応用

などの事項に対して詳述し、手のこんだ数式の計算の手順と技巧を、勞せずして理解できるよう留意してあります。本書の終章には、手回し計算器による各種の能率的な簡易計算法を付して、各方面での実際計算への活用を図っています。設計技術に携われる方々の好伴侶として一読をおすすめします。

(主要内容) 実用数値積分, 各種の内挿式, 内挿式による微積分, 菱形図形と内挿式一般論, 階乗函数・階差商・不等間隔内挿, 2次元内挿式, 内挿式における演算子法, 数表の細分内挿, 2引数の数表の細分内挿, 群の和から成分値を求めること, Euler-MacLaurin型の積分と和, 行列式及び連立1次方程式, 高次超越方程式の数値解法, 高次方程式の数値解法, 高次多元連立方程式の数値解法, 精密函数値の計算, 超精密計算法, 計算機の能率的な使い方 その他

定評ある技術書!!

## 新橋梁工学(I)

★総論・単桁橋 小池啓吉・小池修二共著

橋梁工学の第1人者が、全知識と豊かな経験から得られた技術とを傾けて、新たに著わしたもの。特に設計の実務的な応用面に主眼をおき、優れた設計例、付図・写真・資料を収めて徹底的に懇切詳細に説き進めた。設計技術者、学生諸氏の必備必読の、最も新しい橋梁工学の決定版。

(A5・P540・¥1000・760)

[10月下旬発売]

## コンクリート工学

★施工篇 工学博士 小野竹之助著

施工能率を主とする近代施工法全般の詳細を、最新の成果をとり入れて懇切丁寧に叙述した。工事用各種機械、設備についても詳述してある。内容は概論、材料の選択貯蔵、配合設計、材量の計量、練り混ぜ、コンクリートの運搬・打込・締固め、コンクリートの養成・打継目、伸縮継目及び目地、鉄筋工、型枠工、表面仕上げ、防水工、修理、特殊の場合のコンクリート施工、特殊コンクリート及びモルタル、コンクリート舗装の施工、ダム・コンクリートの施工その他

(A5・P. 400・¥600・750)

## 森北出版株式会社

東京・神田・小川町3の10  
振替東京34757 電(29)2616・4510