

四川長壽桃苑溪水電廠
暗渠及引水管水流情形之探討

中央水利實驗處編

民國三十三年九月

四川長壽桃花溪水電廠

暗渠及引水管水流情形之探討

- 一. 緣起
- 二. 流量之估計
- 三. 暗渠粗糙率之推算及其水流情形
- 四. 引水管粗糙率之推算及水頭之損失
- 五. 水輪機之效率及負荷之討論
- 六. 結論
- 七. 建議

附圖目錄

- $\frac{M32}{1}$ 桃花溪水電廠噴水口面積及流量係數與塞針位置之關係曲線圖
- $\frac{M32}{2}$ 桃花溪水電廠噴水口之流量與塞針位置之關係曲線圖
- $\frac{M32}{3}$ 桃花溪水電廠暗渠之水流情形圖
- $\frac{M32}{4}$ 桃花溪水電廠引水管之水頭損失與流量關係曲線圖
- $\frac{M32}{5}$ 桃花溪水電廠水輪機之有效水頭與流量關係曲線圖
- $\frac{M32}{6}$ 桃花溪水電廠負荷與水頭之關係曲線圖

四川長壽桃花溪水電廠

暗渠及引水管水流情形之探討

緣起

四川長壽桃花溪水電廠原設計之發電量 900 瓩，經建築完竣，實行供電以來，其電量始終未達到此數，顯係實際水流情形與預期者不符。其癥結何在，實有所討之必要，爰依據龍溪河水力發電工程處施測該廠之各項記錄，詳加研究，並將結果擇要分述如次：

二 流量之估計

考電量不能上增之原因，不外兩端：一為流量不敷，一為水頭之損失過巨。是以流量之測驗甚為重要。桃花溪水電廠所用流量，係于廠房之尾水溝末端建一矩形銳角量水堰以測定之。但該堰以行近水流過於紛亂，殊難得一可靠之數值。茲利用引水管末端之噴水口 (Nozzle) 以求其流量。設噴水口之流量係數能正確選定，則不獨全部水輪機及電機之性能，可以測定，即各單位輪機之性能，亦可求得。根據 Gibson's "Hydraulics and its applications" 第 423 頁所載直徑 $7\frac{1}{2}$ " 之塞針

噴水口，其流量係數為0.965至0.838。又據 Daugherty's "Hydraulic Turbines" 第114頁所載直徑2.4"之塞針噴水口其流量係數為0.85至0.95。爰採定桃花溪水電廠噴水口之流量係數與塞針移動距離之關係如圖 $\frac{M32}{1}$ 。又噴水口之面積與塞針之位置二者相互之關係，亦可按實測尺寸求得，繪為曲線如圖 $\frac{M32}{1}$ 。噴水口之面積及流量係數既為已知值，則其流量可按下列式計算之：

$$Q = C_d A \sqrt{2g H_e / 10}$$

式中 Q = 流量以每秒公升計

C_d = 流量係數

H_e = 有效水頭以公尺計

A = 噴水口之面積以平方公分計

在上式中，假定有效水頭 H_e 為某值，則每一塞針之位置，解有相應之流量。如此可得一相同水頭之流量與塞針位置關係曲線。同理，命 H_e 為其他數值，即可求得一額有效水頭之曲線。如圖 $\frac{M32}{2}$ 。

設以相同之負荷為根據，令有效水頭 H_e 為各種不同之數值，按保證之效率 e (Guaranteed Efficiency)，求其流量。其算式如下：

$$\text{負荷 } Kw = \frac{H_e Q}{102} \times e \quad Q = \frac{102 Kw}{H_e e}$$

上式中， K_w 為某固定值，則任一 H_e 即得一相應之流量，如此亦可繪出一組等負荷線羣，參閱圖 $\frac{M32}{2}$

如噴水口之有效水頭 H_e 及塞針之位置，均為已知值，即可按圖求得其流量及負荷各為若干。

桃花溪水力試驗記載表(三)僅5月29日之記錄完整無缺，茲求得流量如下：

第一部 水輪機

| 時間 | 塞針位置 | | 水頭 (公尺) | 流量 (秒公方) | [根據曲線] |
|-------------------|-------------------|------------------|------------|-------------|--------|
| | 讀(吋)數 | 淨(吋)長 | | | |
| 月日時分 5 29 4 30 | 4 $\frac{1}{2}$ | 4 $\frac{1}{8}$ | 71.9 | 0.491 | *有效水頭用 |
| 40 | 5 $\frac{9}{16}$ | 5 $\frac{3}{16}$ | 68.8 | 0.528 | 壓力之讀 |
| 50 | 4 $\frac{7}{16}$ | 4 $\frac{1}{16}$ | 68.3 | 0.475 | 致說明見 |
| 月日時分 5 29 5 10 | 3 $\frac{11}{16}$ | 3 $\frac{5}{16}$ | 72.9 | 0.433 | P.9. |
| 20 | 3 $\frac{9}{16}$ | 3 $\frac{3}{16}$ | 72.9 | 0.422 | |
| 30 | 5 $\frac{1}{8}$ | 4 $\frac{3}{14}$ | 70.8 | 0.522 | |

第二部 水輪機

| | | | | | |
|-------------------|------------------|-------------------|------|-------|--|
| 月日時分 5 29 4 30 | 2 $\frac{7}{8}$ | 2 $\frac{1}{2}$ | 74.4 | 0.357 | |
| 40 | 3 $\frac{1}{4}$ | 2 $\frac{7}{8}$ | 72.3 | 0.391 | |
| 50 | 3 $\frac{5}{16}$ | 2 $\frac{15}{16}$ | 73.3 | 0.398 | |
| 月日時分 5 29 5 10 | 3 $\frac{1}{16}$ | 2 $\frac{11}{16}$ | 73.9 | 0.374 | |
| 20 | 3 $\frac{1}{4}$ | 2 $\frac{7}{8}$ | 74.4 | 0.349 | |
| 30 | 3 $\frac{1}{4}$ | 2 $\frac{7}{8}$ | 74.4 | 0.349 | |

第三節 水輪機 總流量(秒公方)

| | | | | | |
|----------------------|-------------------|-------------------|------|-------|-------|
| 月 日 時 分 5 24 4 30 | $3 \frac{3}{8}$ | 3 | 72.0 | 0.407 | 7.289 |
| 10 | 6 | $5 \frac{5}{8}$ | 68.0 | 0.535 | 1.454 |
| 50 | $4 \frac{11}{16}$ | $4 \frac{5}{16}$ | 70.0 | 0.497 | 1.370 |
| 月 日 時 分 5 24 5 10 | $4 \frac{9}{16}$ | $4 \frac{3}{16}$ | 71.0 | 0.493 | 1.300 |
| 20 | $4 \frac{11}{16}$ | $4 \frac{5}{16}$ | 70.0 | 0.497 | 1.268 |
| 30 | $4 \frac{3}{16}$ | $4 \frac{13}{16}$ | 70.0 | 0.522 | 1.393 |

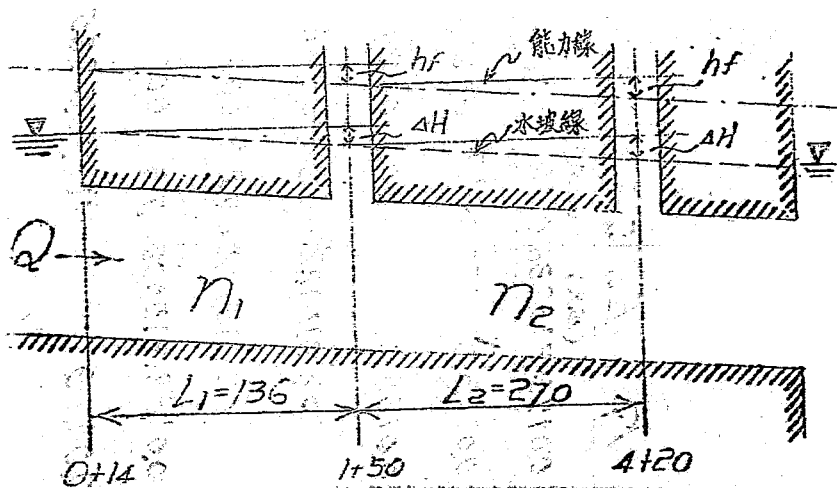
三、暗渠粗糙率之推算及其水流情形

流量既已求得，即可根據測驗所得暗渠之水深水位以計算暗渠之糙率。茲按桃花溪水力記載表(一)之記錄查視暗渠開挖情形，分為兩段計算；自0+14至1+50為第一段，1+50至4+20為第二段。4+20以下至平直井，其糙率與第二段同。

茲將計算式列下：

$$V_m = \frac{Q}{A_m} = \frac{1}{n_m} R_m^{0.7} S^{0.5}$$

$$\therefore n_m = \frac{A_m}{Q} R_m^{0.7} S^{0.5} = \frac{A_m}{Q} R_m^{0.7} \left(\frac{hf}{L}\right)^{0.5}$$



當暗渠全部流滿時，能力損失 hf 與 ΔH 相等。故
段內水位之高差即水頭之損失。上式可寫為：

$$Q = \frac{A_m}{R_m} R_m^{0.7} \left(\frac{\Delta H}{L} \right)^{0.5}$$

$$\text{今 } A_m = 1.56 \text{ m}^2, R_m = 0.316 \text{ m}$$

$$n_1 = \frac{1.56 \times 0.316^{0.7} \sqrt{\Delta H}}{Q \sqrt{136}} = 0.0596 \frac{\sqrt{\Delta H}}{Q}$$

$$n_2 = \frac{1.56 \times 0.316^{0.7} \sqrt{\Delta H}}{Q \sqrt{270}} = 0.0423 \frac{\sqrt{\Delta H}}{Q}$$

| 時期 | 流量 | E_3 | E_4 | $E_3 - E_4 = \Delta H_1$ | n_1 | E_6 | $E_4 - E_6 = \Delta H_2$ | n_2 |
|------------|-------|--------|--------|--------------------------|--------|--------|--------------------------|--------|
| 月日時分 | (秒公方) | (公尺) | (公尺) | (公尺) | | (公尺) | (公尺) | |
| 5 29 4 30 | 1.289 | 315014 | 315865 | 0.149 | 0.0179 | 315236 | 0.629 | 0.0261 |
| 40 | 1.454 | 315990 | 315812 | 0.178 | 0.0173 | 315153 | 0.629 | 0.0236 |
| 50 | 1.370 | 315993 | 315845 | 0.148 | 0.0168 | 315043 | 0.802 | 0.0276 |
| 時分 5 10 | 1.300 | 315997 | 315802 | 0.195 | 0.0202 | 315122 | 0.680 | 0.0268 |
| 20 | 1.263 | 315994 | 315844 | 0.150 | 0.0182 | 315102 | 0.742 | 0.0288 |
| 30 | 1.393 | 315998 | 315843 | 0.155 | 0.0168 | 315092 | 0.751 | 0.0263 |

平均值 $n_1 = 0.0179$

$n_2 = 0.0265$

通過暗渠之最大流量究有若干及真井內水位之變化如何均為研究發電量之先決問題。

根據所求得之暗渠各段粗糙率，上項問題均可一一予以推策。為便于計算起見，假定有某固定流量，通過暗渠，如真井內之水位為已知真，按不均衡水流 (Non-uniform flow) 或管流計算，即可求得進水口前水位之高度。

圖 $\frac{M32}{3}$ 所示為計算之結果。圖中曲線係代表等流量時進水口與真井水位之關係。當真井內之水位甚高時暗渠之水流全部屬於管流，進水口前之水位與真井內之水位漲落之高度完全相同，成為 45° 之直線關係。設真井內之水位漸次向下低降，則暗渠之水流逐漸成為明渠水流 (Open Channel flow)，如水位再行低降至某一限度時接近真井部份為降低曲線 (Drop-down Curve) 如降低曲線範圍不超過暗渠之總長進水口前之水位即不再改變，則二者水位之關係成一水平之直線。(參閱圖 $\frac{M32}{3}$)。連接水平線與 45° 之斜線者為一平緩之曲線 (Transition Curve)。但當流量為 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 及 $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 時，此項等流量曲線均有一處間斷不相連接。即當真井內之水位為 31.4、73.4 公尺，其水位與暗渠頂板相接時，水流或由明渠水流突然改為管流，或由管流突然改為明渠水流，進水口前之水位亦因而有突然之變。如圖 $\frac{M32}{3}$ 所示。當進水口前之水位超過 316.025

公尺時，接近進水口處之暗渠即全部為水充滿。以 aa 線表示此項高度。設直井之水位超過 314.734 公尺時，接近直井處之暗渠亦全部充水，以 bb 線表示之。在 aa 線之上， bb 線之右，暗渠自進水口以迄直井，均為水充滿，其水流情形與管流 (Pipe flow) 無異，在 aa 線之下， bb 線之左，自進水口以迄直井，暗渠內各處之水位均低於其頂板，其水流情形與明渠水流 (Open Channel flow) 完全相同。在 aa 線之上 bb 線之左，與 aa 線之下， bb 線之右，暗渠內之水流，部分屬於管流，部分為明渠水流。計算時，需注意管流及明渠水流在暗渠中之位置及其長度。又明渠水流中視流量與水位之不同，或為回水曲線 (Back Water Curve) 或為降落曲線 (Drop-down Curve) 亦需分別推算。

在上述計算之步驟中，均係假定流量為固定值，而推算直井及進水口前之水位。但實際上，進水口前之水位為一固定值，水輪機需用流量時，則自動調節直井內之水位，以符合其要求。

今項頂之高度為 316.00 公尺。在通常情形下，進水口前之水位多與此高度相等。按圖求得直井內之水位與流量之關係如下表：

| | | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $Q \text{ m}^3$ | 1.8 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.1 |
| $H \text{ m.}$ | 314.16 | 314.57 | 314.73 | 314.85 | 314.99 | 315.73 | 315.27 | 315.39 |

由上表觀之，直井之水位在3.4.16以下，通過暗渠之流量為 $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ，遠較原設計需用之流量 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 為大，故發電量不足之原因，不在於暗渠。且鑿斜噴水口之最大流量亦大於原設計之數量（參閱圖 13E），癥結所在，不源於流量之短少，而必歸於水頭之損失過巨，其至為明顯。

四. 引水管粗糙率之推算及水頭損失

引水管粗糙率之推算，係利用各噴水口與水壓表A處能力高度之差異，以求得之。其折灣及支管等之特殊損失 (Extra Losses) 則係根據 W. Kaufman 著 Hydromechanik 第二冊 95 頁所載試驗數值計算。茲求得直徑 24" 之鋼管及直徑 12" 支管與直井之摩擦係數，其平均值為 $f_{24"} = \frac{1}{369}$ 及 $f_{12"} = \frac{1}{294}$, $f_{40"} = \frac{1}{423}$ 爰將計算之方法，舉例說明如次：

$$5 \text{ 月 } 29 \text{ 日 } 5 \text{ 時 } 10 \text{ 分} \quad Q_{\text{Total}} = 1.300 \text{ m}^3/\text{s}$$

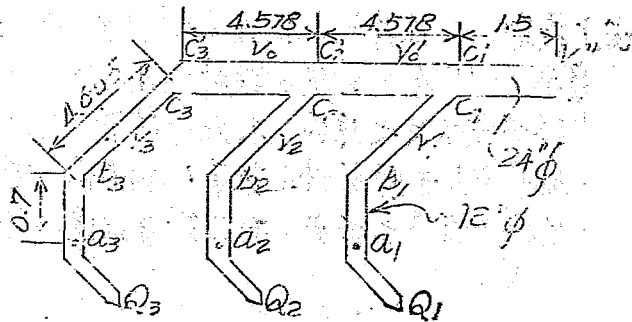
$$Q_1 = 0.433 \text{ m}^3/\text{s} \quad Q_2 = 0.374 \text{ m}^3/\text{s} \quad Q_3 = 0.493 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_{12"} = 0.073 \text{ m}^2 \quad A_{24"} = 0.292 \text{ m}^2$$

$$V_1 = 5.94 \text{ m/s} \quad \frac{V_1^2}{2g} = 1.79 \text{ m} \quad V_0 = 1.68 \text{ m/s} \quad \frac{V_0^2}{2g} = 0.145 \text{ m}$$

$$V_2 = 5.12 \quad \frac{V_2^2}{2g} = 1.34 \quad V_0' = 2.97 \quad \frac{V_0'^2}{2g} = 0.45$$

$$V_3 = 6.76 \quad \frac{V_3^2}{2g} = 2.32 \quad V_0'' = 4.46 \quad \frac{V_0''^2}{2g} = 1.01$$



| | $\frac{P \cdot l}{W} \frac{v^2}{2g}$ [MJ] | $\frac{v^2}{2g}$ [MJ] | h_f [MJ] | E [MJ] |
|--------|--|--------------------------|---|--------------------------------|
| Q_3 | 71.0 | 232 | | 300.93 |
| C_3 | | | $(f \frac{5305}{0.305} + 232) \frac{v^2}{2g} = 109 f_1 + 109 f_2$ | $301.67 + 40.4 f_1$ |
| C_3' | | | $298 \frac{v^2}{2g} = 1.45$ | $303.12 + 40.4 f_1$ |
| C_2' | | | $(\frac{4.578}{2} \frac{v^2}{2g} = 1.5 f \frac{v^2}{2g} = 109 f_2)$ | $303.12 + 40.4 f_1 + 109 f_2$ |
| C_1' | | | $7.5 f \frac{v^2}{2g} = 3.38 f_2$ | $303.12 + 40.4 f_1 + 4.47 f_2$ |
| Q_2 | 73.9 | 134 | | 302.85 |
| C_2 | | | $(0.7 \cdot 1 f_1 + 0.7 f_2) \frac{v^2}{2g} = 2.43 + 233 f_1$ | $303.28 + 23.3 f_1$ |
| C_2' | | | $1.46 \frac{v^2}{2g} = 0.66$ | $303.94 + 23.3 f_1$ |
| C_1' | | | $7.5 f \frac{v^2}{2g} = 3.38 f_2$ | $303.94 + 23.3 f_1 + 3.38 f_2$ |
| Q_1 | 72.9 | 179 | | 302.30 |
| C_1 | | | $(17.41 f_1 + 0.7 f_2) \frac{v^2}{2g} = 0.57 + 312 f_1$ | $302.87 + 31.2 f_1$ |
| C_1' | | | $0.91 \frac{v^2}{2g} = 0.92$ | $303.79 + 31.2 f_1$ |

故 C_1' 點比能之平均高度 = $(303.12 + 40.4 f_1 + 4.47 f_2) +$

$(303.94 + 23.3 f_1 + 3.38 f_2) + (303.79 + 31.2 f_1)$

$$= 303.62 + 31.63 f_1 + 262 f_2$$

而壓力表 A 處之比能高度 = $311.78 + 1.01 = 312.79$

$$hf = 312.79 - (303.62 + 31.63 f_1 + 262 f_2) = 9.17 - 31.63 f_1 - 262 f_2$$

$$\text{但 } hf = \left(f_2 \frac{15}{0.61} + 0.053 + f_2 \frac{6891}{0.61} + 1265 + f_2 \frac{7768}{0.61} \right) \frac{V_0''^2}{29}$$

$$= (1318 + f_2 \frac{14809}{0.61}) \times 1.01 = (1318 + 243 f_2) \times 1.01 = 133 + 245 f_2$$

$$9.17 - 31.63 f_1 - 262 f_2 = 133 + 245 f_2$$

$$247.62 f_2 = 784 - 31.63 f_1$$

$$f_2 = 0.0317 - 0.128 f_1$$

$$\text{假定 } f_1 = \frac{1}{29} \quad f_2 = 0.0317 - 0.0044 = 0.0273 = \frac{1}{36.6}$$

根據 Nikuradse 氏之管流摩擦係數圖

$$\text{當 } f_2 = \frac{1}{36.6} \text{ 其相對粗糙度 } \frac{R_n}{\epsilon} = 68$$

$$\text{今 } R_n = 1525 \text{ cm 故絕對粗糙度 } \epsilon = 0.224 \text{ cm.}$$

$$\text{支管之 } R_n = 761 \text{ cm } \frac{R_n}{\epsilon} = \frac{761}{0.224} = 34.9$$

$$\text{從摩擦係數圖求得 } f_1 = \frac{1}{29.2}$$

直井之摩擦係數可按下法求之。

$$\text{其直徑為 } 40'' = 101.6 \text{ cm } R_n = 254 \text{ cm. } (= d/4)$$

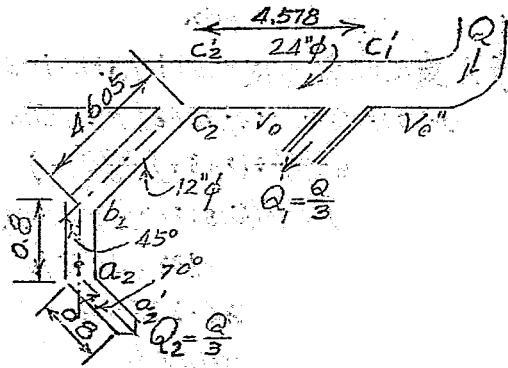
$$\text{其絕對粗糙度同為 } \epsilon = 0.224 \text{ cm.}$$

$$\text{故相對粗糙度 } = \frac{R_n}{\epsilon} = \frac{254}{0.224} = 113.5$$

$$\text{從摩擦係數圖求得 } f_2 = \frac{1}{41.7}$$

直井鋼管及支管之摩擦係數既已求得，則可據此以求各種流量時水頭之總損失。

茲根據第二部水輪機之噴水口起計算，並假定流量係平均分配于每一噴水口，其算式如下：



$$A_{12''\phi} = 0.073 \text{ m}^2 \quad A_{12''\phi}^2 = 0.00532$$

$$A_{24''\phi} = 0.292 \quad A_{24''\phi}^2 = 0.0851$$

$$A_{40''\phi} = 0.810 \quad A_{40''\phi}^2 = 0.655$$

$$\begin{aligned} \text{自 } a_2' \text{ 至 } C_2 \text{ 之水頭損失 } h_{f1} &= \left(f_1 \frac{6205}{0.305} + 0.878 + 0.32 \right) \frac{V_0^2}{2g} \\ &= \frac{(203f_1 + 1.198) Q^2}{9 \times 0.00532 \times 29} \\ &= (21.6f_1 + 12.75) Q^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_2 \text{ 至 } C_1 \quad h_{f2} &= 1.99 \frac{V_0^2}{2g} = 1.99 \left(\frac{2}{3} Q \right)^2 \frac{1}{0.0851 \times 29} \\ &= 0.53 Q^2 \end{aligned}$$

$$C_1 \text{ 至 } C_1' \quad h_{f3} = \frac{5 \times 4.578}{1.2 \times 0.61} \times \frac{V_0^2}{2g} = 1.995 f_2 Q^2$$

$$\text{自 } C_1' \text{ 至 直井底部} \quad h_{f4} = \left(f_2 \frac{1.5}{0.61} + 1.263 + f_2 \frac{0.8907}{0.61} \right) Q^2$$

$$\begin{aligned}
 & + f_2 \frac{7.7678 + 31.108}{0.61} \left) \frac{V_0^2}{29} \right. \\
 & = \left(f_2 \frac{178.193}{0.61} + 1318 \right) \frac{Q^2}{0.0851 \times 29} \\
 & = (175f_2 + 0789) Q^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{自直井底部至頂 } hf_5 &= \left(4.5 + f_3 \frac{19.516}{1.046} \right) \frac{V_0^2}{29} = (4.5 + 1.921f_3) \times \\
 & \times \frac{Q^2}{0.655 \times 29} = (0.35 + 1.495f_3) Q^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{故引水管水頭之總損失 } Hf &= hf_1 + hf_2 + hf_3 + hf_4 + hf_5 \\
 &= (1.275 + 0.53 + 0.789 + 0.35 + 2.16f_1 \\
 & \quad + 1.995f_2 + 1.76f_2 + 1.495f_3) Q^2 \\
 &= (2.944 + 2.16f_1 + 1.77995f_2 + 1.495f_3) Q^2
 \end{aligned}$$

$$\text{今求得 } f_1 = \frac{1}{2.94} \quad f_2 = \frac{1}{3.69} \quad f_3 = \frac{1}{4.23} \quad \text{代入上式得}$$

$$Hf = (2.944 + 0.735 + 4.81 + 0.035) Q^2 = 8.524 Q^2$$

| $\frac{Q}{1.135}$ | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 0.9 | 0.7 | 0.5 | 0.3 |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|------|
| Q^2 | 289 | 256 | 225 | 196 | 169 | 144 | 121 | 81 | 49 | 25 | 0.09 |
| $\frac{Hf}{1.135}$ | 2461 | 2199 | 1918 | 1670 | 1440 | 1226 | 1030 | 690 | 417 | 213 | 0.77 |

流量愈大，則水頭之損失愈多。因水頭之損失係與流量之平方成正比例故也。

根據圖 $\frac{M32}{2}$ 當有效水頭為 82 公尺，且為全負荷

(Full Load) 300 KW. 時，每部水輪機之流量為 $0.492 \text{ m}^3/\text{s}$ ，三部總流量共為 $1.476 \text{ m}^3/\text{s}$ 。如噴水口全開 (Full Gate) 其有效水頭為 82 公尺時，每部水輪機之流量為 $0.587 \text{ m}^3/\text{s}$ ，三部總流量共為 $1.76 \text{ m}^3/\text{s}$ 。由此得下表：

| | Q [m^3/s] | H_e [M.] | 引水管之水頭損失 H_f [M.] | 所需直井水位高度 [M.] | 現有直井水位高度 [M.] |
|-----------|----------------------------------|---------------|------------------------|------------------|------------------|
| Full Load | 1.476 | 82 | 7.8.2 | 327.81 | 314.90 |
| Full Gate | 1.76 | 82 | 26.5 | 336.11 | 314.38 |

自上表可知，兩種情形下，引水管之水頭損失，均屬過巨。設欲維持全負荷 (Full Load) 時之情形，需將 H_f 由 7.82 m 減至 5.29 m 。即需將原有直徑 24" 之鋼管及生鐵管改為直徑 32"。原有直徑 12" 之支管改為 16"。直井之直徑仍可照舊。茲將計算結果繪于圖 $\frac{M32}{5}$ 並附算式如下：

根據前式

$$h_{f1} = (203f_1 + 1.198) \frac{Q^2}{9 \times A_1^2 \times 29} = (0.115f_1 + 0.00678) \frac{Q^2}{A_1^2}$$

$$h_{f2} = 1.99 \times \frac{4}{9} \frac{Q^2}{A_2^2 \times 29} = 0.045 \frac{Q^2}{A_2^2}$$

$$h_{f3} = f_2 \times \frac{4.578}{0.61} \times \frac{4}{9} \frac{Q^2}{A_3^2 \times 29} = 0.1698 f_2 \frac{Q^2}{A_3^2}$$

$$h_{f4} = (294f_2 + 1.318) \frac{Q^2}{A_4^2 \times 29} = (1.498f_2 + 0.0671) \frac{Q^2}{A_4^2}$$

$$h_{f5} = (262 + 1921 \times \frac{1}{423}) \frac{Q^2}{0.655 \times 29} = 0.2395 Q^2$$

(註：直井之直徑不改，其長度亦不變，但緊接直井之鋼管改大，其特殊損失之係數原為4.5改為2.62)

又假定支管與幹管之直徑其比例仍為1:2，則 $A_1:A_2 = 1:4$ 水頭之總損失 $H_f = [(0.115 f_1 \times 4 * 0.00678 \times 4) + 0.045 + (1498 f_2 + 0.0671) + 0.1698 f_2] \frac{Q^2}{A_1^2} + 0.2395 Q^2$
 $= [(0.1392 + 0.46 f_1 + 15.15 f_2) \frac{1}{A_1^2} + 0.2395] Q^2$

今 $H_f = 529^m$ $Q = 1.476^m^3/s$ 又 $A_1 = \frac{\pi}{4} D_1^2$

由試誤法 (Method of try and error) 求得 $D_1 = 3.16'' f_1 \frac{1}{323}$, $f_2 \frac{1}{39.5}$ 故採用直徑32''之引水管。

$$\therefore A = \frac{\pi}{4} \times (0.813)^2 = 0.518^m^2 \quad A^2 = 0.268$$

$$H_f = (0.1392 + 0.46 \times \frac{1}{323} + 15.15 \times \frac{1}{39.5}) \frac{Q^2}{A^2} + 0.2395 Q^2$$

$$= (\frac{0.5373}{0.268} + 0.2395) Q^2 = (2.005 + 0.2395) Q^2 = 2.2445 Q^2$$

由此可求得管徑增大後，水頭之損失如下表：

| | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\frac{Q}{m^3/s}$ | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 0.9 | 0.7 | 0.5 | 0.3 |
| Q^2 | 2.89 | 2.56 | 2.25 | 1.96 | 1.69 | 1.44 | 1.21 | 0.81 | 0.49 | 0.25 | 0.09 |
| $\frac{H_f}{m}$ | 6.5 | 5.76 | 5.06 | 4.41 | 3.80 | 3.24 | 2.72 | 1.82 | 1.10 | 0.56 | 0.20 |

按圖 $\frac{M32}{3}$ 當進水口前之水位為316.0公尺時

可求得各種流量時之直井水位。該項水位減去引水管之水頭損失，即得水輪機之有效水頭。圖 $\frac{M32}{5}$ 所繪：一為現在情形下之有效水頭曲線，一為管徑增大後之有效水頭。二者相互比較，即可知水輪機使用之情形矣。

五 水輪機之效率及負荷之討論

在前述之計算中，均係根據一項假定，即噴水口之流量係數是也。究竟計算結果及其推斷是否正確無誤，應核驗其使用之範圍。茲就水輪機之效率及負荷推究之。水輪機之流量及引水管水頭之損失，既已求得，則可進而推算其效率，以與保證之效率，互相比較。附表如下：

表 1 水輪機之 Input, Output and Efficiency.

| Series | (Measured) | | (Promises) | | Head (m) | Actual | | Eff. | Guaranteed | | |
|-----------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|----------|------------|-------------|-------|------------|-------|--|
| | E ₁ (m) | E ₆ (m) | Q (m ³ /s) | H ₁ (m) | | Input (kW) | Output (kW) | | Eff. | Eff. | |
| 7/2043031 | 1065 | 315236 | 1289 | 14.0 | 730 | 931 | 742 | 79.7% | 767% | +39% | |
| 10 | 316260 | 315153 | 1454 | 18.0 | 695 | 992 | 757 | 76.4% | 768% | -0.6% | |
| 50 | 316099 | 315043 | 1370 | 16.0 | 714 | 959 | 754 | 78.6% | 767% | +25% | |
| 5.10 | 316463 | 315122 | 1300 | 14.3 | 732 | 934 | 753 | 80.8% | 767% | +5.4% | |
| 20 | 316064 | 315102 | 1268 | 13.6 | 739 | 920 | 746 | 81.0% | 767% | +5.5% | |
| 30 | 316062 | 315052 | 1393 | 16.4 | 710 | 971 | 755 | 77.8% | 767% | +1.5% | |
| H. 226 | | | | | | | | | | | |
| 3/20420 | 316045 | 314993 | 151 | 193 | 680 | 1009 | 700 | 69.4% | 763% | -9.0% | |
| 20 | " | 315243 | 124 | 130 | 746 | 908 | 690 | 75.9% | 762% | -0.6% | |
| 40 | " | 315176 | 132 | 14.8 | 727 | 942 | 705 | 74.8% | 764% | -2.1% | |
| 50 | " | 315268 | 122 | 12.6 | 750 | 899 | 694 | 77.2% | 763% | +1.2% | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|--------|--------|-------|------|------|-----|-----|------|------|------------|--|--|
| 5/21 | 2:15 | 315020 | 315921 | 0.475 | 1.9 | 8643 | 402 | | | | | | |
| | 30 | " | 315811 | 0.67 | 3.8 | 8440 | 554 | | | | | | |
| | 50 | 316018 | 315481 | 0.99 | 8.5 | 7937 | 769 | 254 | 331% | 681% | -51.6% (?) | | |
| | 7:00 | 316024 | 315482 | 0.96 | 8.2 | 7967 | 764 | 410 | 537% | 521% | -25.6% (?) | | |
| | 10 | " | 315541 | 0.93 | 7.4 | 8053 | 735 | 544 | 740% | 744% | -0.6% | | |
| | 20 | 316017 | 315537 | 0.94 | 7.6 | 8032 | 740 | 512 | 693% | 739% | -6.2% | | |
| | 30 | 316004 | 315551 | 0.92 | 7.3 | 8064 | 728 | 540 | 741% | 743% | -0.4% | | |
| | 35 | " | | | | | | | | | | | |
| | 5:20 | 316019 | 315281 | 1.19 | 12.1 | 7557 | 882 | 705 | 798% | 761% | +5.0% | | |
| | 30 | 316018 | 315191 | 1.30 | 14.3 | 7328 | 934 | 697 | 748% | 763% | -1.8% | | |
| | 40 | 315989 | 315271 | 1.22 | 12.6 | 7506 | 898 | 680 | 757% | 762% | -0.6% | | |
| | 50 | " | 315201 | 1.30 | 14.3 | 7329 | 933 | 690 | 743% | 742% | -0.25% | | |
| | | | | | | | | | | | | | |

參閱上表，則知計算所得之最大效率較保證之效率約大百分之五。效率之計算係根據下式：

$$\text{效率} = \frac{\text{負荷}}{K Q H_e}$$

上式中， K 為一常數，負荷^係直接測得，其值亦屬不變。 H_e 之值雖係計算所得，然與實際測量數值，應屬一致。蓋此即噴水口前壓力表之讀數加流速水頭再減去倒壓力表處至噴水口之能力損失此項損失約畧與流速水頭相等，故壓力表之讀數即 H_e 也。因測驗中記錄不全，故以計算方法求之，其值並不因假定流量之大小而有改變。故效率為一常數除以流量所得之值。即效率與流量成反比如流量增大百分之一，則效率應減小百分之一。

設欲使計算之效率與保證之最大效率相同，即效率

應減小百分之五，故流量應增大百分之五。而流量又與流量係數成正比，即流量係數應增大百分之五。

但暗渠之粗糙率，又與流量成反比，如流量加大百分之五，其值應按同一比例減少之。

$$\text{則 } n_1 = 0.0265 (1 - 0.05) = 0.0252$$

$$n_2 = 0.0179 (1 - 0.05) = 0.0170$$

暗渠之粗糙率變小，其可能通過之流量反因而增多，且更較需用者為大。

以常識判斷，實際之效率不致大於計算所得之效率。換言之，即噴水口之流量係數可能較採定者為大，不致更小，而暗渠之粗糙率較計算所得為小，而不致更大。據此，則通過暗渠之流量更較前節計算者為多。故仍足證明前節之推斷無誤。

至于負荷與水頭之關係，茲申論如次。根據桃花溪水力測驗表(三)及(四)之記錄，按每部水輪機之水頭及負荷之關係繪為曲線如圖 $\frac{M 32}{6}$ 。圖中各測點雖不整齊，然並無突然變化之現象，其平均值仍為一平整之曲線。即負荷增加時，其有效水頭僅漸次向下低落，而非突降。換言之，即水頭之損失隨負荷之增多而加大，其變化為漸次遞增，而非突變。

致水頭之全部損失，計由三部組成：(一)暗渠之水頭損失。(二)迴溜之損失及(三)管流之損失。

暗渠之剖面大，水流至緩，其損失甚小。水流由暗

渠折入直井，因方向突然改變，其力量稍失平衡，即激
急迴溜，亦有能力之消耗。經本處舉行迴溜試驗，測定
其損失甚微，可畧而不計。水流入引水管，以剖面大小
，流速大增，大部損失消耗于此。故桃花溪水電廠發
電量不能增加之主因，厥惟管流之損失過巨。

六. 結論

綜上所述，結論如次：

(1) 暗渠之橫斷面積及坡度等均屬適合，其水頭之
損失亦屬不大。設進水口前水位為 316.0 公尺，直井
水位低於 314.16 公尺時，暗渠流量達每秒 18 公方，
已超過三部水輪機之最大需要。

(2) 噴水口之最大流量，據圖 $\frac{1132}{5}$ 求得為 1576 $\frac{m^3}{s}$ ，
已超過三部水輪機之最大需要。

(3) 迴溜之損失，經試驗測得甚微，可畧而不計。

(4) 發電量不能上增之原因，主要由於管流之水頭
損失過巨。換言之，即引水管之直徑太小，以致水輪機
不能得到所需之有效水頭。

七. 建議

(1) 將進水口前，攔河壩之壩頂高度增加 30 公分，
使最低水位不致低於 316.0 公尺。

(2) 引水管之直徑改用32吋。

完

中

龍溪河水力發電廠工程處

桃花溪水力試驗記錄表(一)

三十二年五月

水面高度

觀測者

29日

| 時間 | 測針1(燈水口前) | | 測針2(燈水口前) | | 測針3(橋洞前) | | 測針4(第一視察井) | | 測針5(第二視察井) | | 測針6(第三視察井) | | | |
|-------------------------------|-----------|-----|-----------|-----------|----------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------|-----------|
| | 時 | 分 | 讀數 | 水準高 E1 | 讀數 | 水準高 E2 | 讀數 | 水準高 E3 | 讀數 | 水準高 E4 | 讀數 | 水準高 E5 | 讀數 | 水準高 E6 |
| 4 | 30 | 428 | 316065 | 627 | 316024 | 318014 | 1029 | 315865 | 987 | 315538 | 2065 | 315236 | | |
| 4 | 40 | 421 | 316060 | 625 | 316000 | 315990 | 1082 | 315812 | 1110 | 315205 | 1982 | 315153 | | |
| 4 | 50 | 420 | 316059 | 642 | 316003 | 315993 | 1049 | 315845 | 1009 | 315510 | 1872 | 315043 | | |
| 5 | 10 | 424 | 316063 | 638 | 316007 | 315007 | 1043 | 315802 | 1016 | 315503 | 1951 | 315122 | | |
| 5 | 20 | 425 | 316064 | 641 | 316004 | 315994 | 1050 | 315844 | 1018 | 315501 | 1931 | 315102 | | |
| 5 | 30 | 423 | 316062 | 637 | 316008 | 315998 | 1051 | 315843 | 1017 | 315502 | 1925 | 315096 | | |
| Remark E3 = E2 - 0.010 (0.22) | | | | | | | | | | | | | | |
| 30日 | 4 | 20 | 406 | 316045 | 662 | 315965 | 479 | 315950 | 1054 | 315840 | 987 | 315532 | 1820 | 314923 |
| | 4 | 30 | 406 | 316045 | 663 | 315964 | 482 | 315955 | 1058 | 315836 | 986 | 315533 | 2042 | 315243 |
| | 4 | 40 | 406 | 316045 | 662 | 315965 | 474 | 315950 | 1058 | 315836 | 990 | 315529 | 2005 | 315176 |
| | 4 | 50 | 407 | 316045 | 668 | 315959 | 491 | 315946 | 1065 | 315829 | 925 | 315394 | 2893 | 315264 |

龍溪河水力發電廠工程處

桃花溪水力試驗記錄表(三)

三十二年五月

水壓力及流量

觀測者 _____

| 時 間 | | | 水壓表 A (Upper) | 水壓表 B (Lower) | | 流 量 | |
|-----|---|----|---------------|---------------|----------|-----------|-----------|
| 日 | 時 | 分 | 讀 [m] 數 | 讀 [m] 數甲 | 讀 [m] 數乙 | 測針 [m] 讀數 | 流 [cms] 量 |
| 29 | 4 | 30 | 21.9 | | | 0.690 | 1.310 |
| | | 40 | 23.7 | | | 0.690 | 1.310 |
| | | 50 | 24.6 | | | 0.695 | 1.320 |
| | 5 | 10 | 24.7 | | | 0.697 | 1.330 |
| | | 20 | 24.6 | | | 0.697 | 1.330 |
| | | 30 | 24.8 | | | 0.700 | 1.340 |
| 30 | 4 | 20 | 29.4 | 35.8 | | 0.695 | 1.320 |
| | | 30 | 21.2 | 35.4 | | 0.685 | 1.290 |
| | 5 | 40 | 25.0 | 35.2 | 34.7 | 0.695 | 1.320 |
| | | 50 | 25.0 | 35.3 | 34.8 | 0.705 | 1.350 |

| | | | | | | | |
|----|---|----|--|---------------------------------------|-----|-------|------|
| 31 | 2 | 30 | 283 | 416 | 411 | 0.200 | 0.18 |
| | | 40 | 279 | 412 | 407 | 0.315 | 0.37 |
| | | 50 | 267 | 388 | 383 | 0.380 | 0.47 |
| | 3 | 00 | 263 | 388 | 383 | 0.565 | 0.94 |
| | | 10 | 263 | 385 | 381 | 0.575 | 0.96 |
| | | 20 | 264 | 388 | 383 | 0.580 | 0.98 |
| | | 30 | 265 | 387 | 392 | 0.570 | 0.95 |
| | | 40 | 262 | 386 | 381 | 0.560 | 0.92 |
| | | 50 | 258 | 370 | 365 | 0.625 | 1.10 |
| | | 60 | 255 | 375 | 370 | 0.560 | 1.21 |
| 32 | 5 | 20 | 253 | 352 | 347 | 0.640 | 1.15 |
| | | 30 | 251 | 365 | 360 | 0.660 | 1.21 |
| | | 40 | 251 | 362 | 357 | 0.640 | 1.15 |
| | | 50 | 252 | 354 | 349 | 0.650 | 1.18 |
| | | | Elev. at Center of gauge = 287.078 | Elev. at Center of gauge = 274.380 | | | |

龍溪河水力發電廠工程處

桃花溪水力試驗記錄表(三)

三十二年五月

水輪機

觀測者 _____

| 時間 | | | 第一部水輪機 | | | 第二部水輪機 | | | 第三部水輪機 | | |
|----|---|----|---------------------------|--------------------------|--------|---------------------------|--------------------------|---------|---------------------------|--------------------------|--------|
| 日 | 時 | 分 | 轉速(RPM) W ₁ | 水頭(公尺) H ₁ | 葉針位置 | 轉速(RPM) W ₂ | 水頭(公尺) H ₂ | 葉針位置 | 轉速(RPM) W ₃ | 水頭(公尺) H ₃ | 葉針位置 |
| 29 | 4 | 30 | 575 | 71.9 | 4 1/2 | 585 | 74.4 | 2 7/8 | 575 | 72.0 | 3 3/8 |
| | | 40 | 580 | 68.8 | 5 9/16 | 585 | 72.3 | 3 1/4 | 575 | 68.0 | 6 |
| | | 50 | 585 | 68.3 | 4 1/16 | 585 | 73.3 | 3 5/16 | 575 | 70.0 | 4 1/16 |
| | 5 | 10 | 585 | 72.9 | 5 1/16 | 585 | 73.9 | 3 1/16 | 575 | 71.0 | 4 9/16 |
| | | 20 | 585 | 72.9 | 3 9/16 | 585 | 74.4 | 3 1/4 | 575 | 70.0 | 4 1/16 |
| | | 30 | 590 | 70.8 | 5 1/8 | 585 | 74.4 | 3 1/4 | 575 | 70.0 | 4 3/16 |
| | | | | 88.9 | | | 88.7 | | | 88.9 | |
| 30 | 4 | 20 | 575 | 74.5 | 3 7/16 | 580 | | 3 3/4 | 575 | | 3 |
| | | 30 | 580 | 74.5 | 3 1/2 | 578 | | 3 1/16 | 575 | | 3 |
| | | 40 | 578 | 74.5 | 3 9/16 | 578 | | 3 1/16 | 572 | | 3 1/16 |
| | | 50 | 580 | 74.0 | 3 9/16 | 580 | | 3 3/4 | 570 | | 3 1/8 |
| | 5 | 00 | 580 | 73.4 | 3 3/4 | 580 | | 3 15/16 | 572 | | 3 1/16 |

