

喉道直線式虹吸溢道設計

Design of Straight Leg Siphon Spillway

農復會副工程師

胡 文 章 譯述

W. J. Hu

農復會正工程師

溫 理 仁 校核

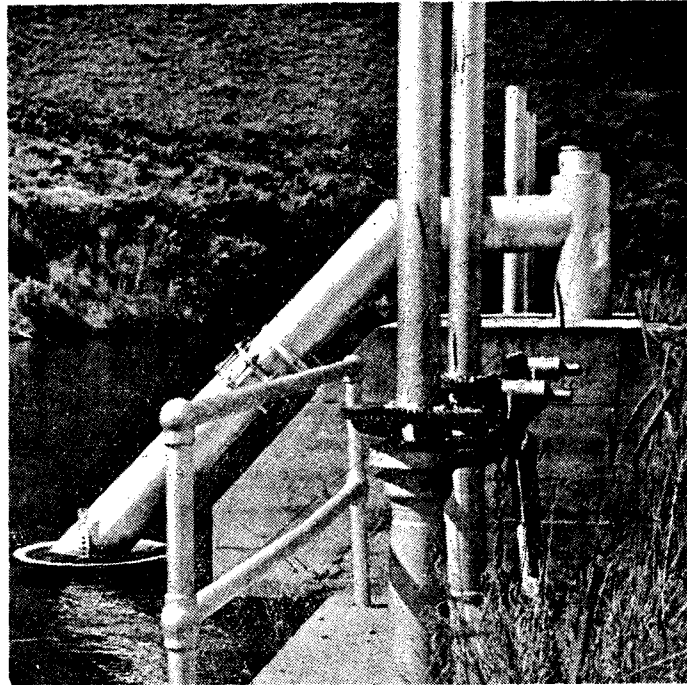
L. J. Wen

一、前 言

渠道虹吸溢道係屬渠道保護工的一種。渠道因暴雨或豪雨而由進水口或流入工流入於渠內的洪水，或因渠道堵塞而積水時，如無適當的排洪或洩洪設施，渠中的水位將繼續高漲，而發生溢流、渠岸崩塌等現象，進而危害附近農田、道路、村莊及公共設施。

虹吸溢道發生作用時，其靜水壓力往往不超過當地的大氣壓力。因此，有時稱為低水頭虹吸溢水工，其以低水頭即可迅速排出大量之水量。吾人家庭所用的抽水馬桶，即屬低水頭虹吸溢水工的一種。

虹吸溢道其目的在於排除渠中多餘之水量，其建造費用較其他同目的之排水構造物如渠道側溢道、簡易排水門等為高昂；但如因空間受限制而無法施設渠道側溢道，或由人工操作啓閉之排水門無法配合排水時限而須有自動排水設施時，虹吸溢道為唯一最佳之自動排水方法。臺灣灌溉渠道大多漫長，進水口常位於山區，渠道常設有流入工供山洪流入，故洪水流入渠中機會至多。由於人工操作管理無法配合排水時限，渠道需設虹吸溢水工供自動排水，以維渠道安全。（參閱圖一）



圖一 渠道虹吸溢道與排水門同時設置以策渠道之安全。

虹吸溢道和渠道輸水系統中所用的倒虹吸工不同。倒虹吸工係藉「正壓力」將水量經過低窪處送至下游，故設計上除考慮水力安全因素外尚須考慮結構安

全因素，管道須能承受正水壓力而無龜裂現象發生，如使用工廠預製水泥管，應選用適當的壓力管。虹吸溢道係藉「負壓力」將水吸上並越過頂部而排至下游

之排水溝或河道，管道承受負水壓力，有時稱之為「真虹吸工」(True Siphon)。

渠道保護工所採用之低水頭虹吸溢道，由美國內政部墾務局自民國卅一年開始模型試驗研究以來，迄今已有多種型式被推出，但其中以喉道 S 曲線型式居多。臺灣所使用者亦以該型式為多。最近該局又推出另一種型式，即喉道改為直線型式，其優點為：

(1) 溢道中之空氣較易被排出，即排水量較大。

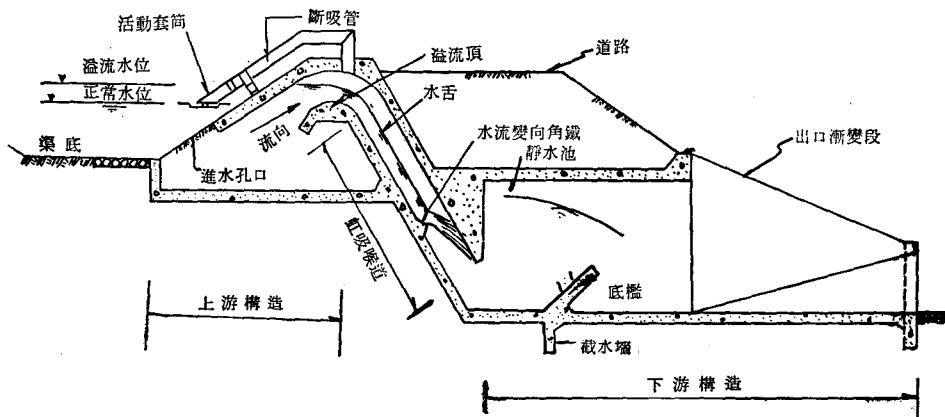
(2) 直線喉道中因設有水流變向裝置 (Deflector)，且水流在直線管道中之流程較 S 曲線管道為短，故減短虹吸開始作用時間，即容易發生虹吸作用。

(3) 虹吸開始作用所需水頭較低，故可提高渠道安全度。

(4) 施工較易及工程費較省。

二、主要構造及虹吸作用

如圖二所示，虹吸溢道構造主要部份分為：



圖二 直線式虹吸溢道主要構造說明

(1) 上游構造：包括上游進水孔口及溢流頂管，供為進水及溢流之用。

(2) 虹吸喉道或管道：供為虹吸及排水之用。

(3) 下游構造：包括靜水池、消能底檻及出口漸變段等。

(4) 斷吸管：供給空氣於虹吸喉道以中止虹吸作用並停止排水。

(5) 水流變向角鐵 (Deflector Angle)：改變喉道中水流方向，使之成為拋射形水舌並與對面管壁相接觸，以便發生虹吸作用。

當渠道中水位上升而高出虹吸溢道溢流頂時，水流經過虹吸溢道正如流過溢流堰，發生溢流現象。假如渠道中水位繼續上升，溢流量亦隨之增加。當喉道之水流產生足夠的流速時，喉道內將發生虹吸作用，同時大量水量由渠道排出。因此，渠中水位迅速降低。如渠中水位降低至斷吸管口以下時，空氣進入喉道，致使虹吸作用立即停止。

設計虹吸管道時應注意管道水流能充分發生虹吸作用及充分利用管道面積。為達到此目的，虹吸管道中之空氣須全部排除。在虹吸溢道內，流經溢流頂之水量到達喉道尾端過程中，喉道內之空氣和水成為

混合體而流出。如流量一直增加並產生足夠流速帶走喉道中全部空氣時，則喉道將變成真空而充份發生虹吸作用，此時溢流頂處之壓力將低於大氣壓力，曰之次大氣壓力 (Subatmosphere)。直線型式虹吸溢道在距喉道尾端 2D 處 (如圖五所示) 設有水流拋射設施，稱為水流變向器 (Deflector)，其功能為冀求能迅速達到上述虹吸作用。其作用過程為當水流沿喉道底流到水流變向器時，被改變流向而離開喉道底成為拋射體水舌，投射到喉道尾端頂部，此時空氣無法由靜水池進入，喉道中之空氣將逐漸被水流帶出，終於變成真空而發生虹吸排水作用。如渠中多餘水量已被吸排除，水位降低至原有正常水位時，空氣將由溢流頂上之斷吸管進入，以致停止虹吸作用之排水。

三、設計時應考慮事項

(1) 流量：如水流不受出口水位之影響，則流過溢流頂之水流，將如同自由渦流 (free vortex flow)，其流速 V_x 與距漩渦中心軸之距離 R_x 成反比，即數學上表示公式為： $V_x \cdot R_x = \text{常數}$ 。

由圖五得： $V_x R_x = V_s R_s \dots\dots\dots(1)$

(1) 式中： $R_s =$ 溢流頂半徑 (m)，

$V_s =$ 溢流頂流速 (m/sec),
 $R_x =$ 與溢流頂同圓心時任意點流線之半徑 (m),

$V_x = R_x$ 處之水流速 (m/sec)。

設 dq 為 dR_x (任兩 R_x 之微差) 段之片斷單位寬流量, V_x 為其流速,

則 $dq = V_x \cdot dR_x$

將(1)式代入上式, 得 $dq = \frac{V_s \cdot R_c}{R_x} \cdot dR_x$

積分之, $\int dq = V_s \cdot R_c \int \frac{dR_x}{R_x}$

則得 $q = V_s \cdot R_c \cdot \log_e \frac{R_s}{R_c} \dots \dots \dots (2)$

或 $Q' = B \cdot V_s \cdot R_c \cdot \log_e \frac{R_s}{R_c} \dots \dots \dots (3)$

(2)及(3)式中: $q =$ 單位寬流量 (cms/m),

$B =$ 溢流頂寬 (m),

$Q' =$ 溢流量 (c.m.s.)

設 $h_{v_s} =$ 溢流頂處之速頭

將 $V_s = \sqrt{2g h_{v_s}}$ 代入(3)式

得 $Q' = B \cdot R_c \cdot \sqrt{2g h_{v_s}} \cdot \log_e \frac{R_s}{R_c} \dots \dots \dots (4)$

式(4)中 R_c 與 R_s 為固定值, 則 Q' 隨 h_{v_s} 而變, 而 h_{v_s} 則與溢流水深、當地大氣壓力及水頭損失有關 (該關係請參照美國墾務局出版之 *Design of Small Dams* 一書), 一般設計採用 $h_{v_s} = 0.7 \cdot h_{AT}$, $h_{AT} =$ 當地大氣壓力, 以水柱高公尺表示之。大氣壓隨地面高程而變, 其關係如下表:

表一 地面高程與大氣壓力關係表

地面高程 (以平均海平面為準) (m)	大 氣 壓 力		
	水 銀 柱 (mm)	釐 米 巴 (mb)	水 柱 (cm)
-500	806.15	1074.78	1096.0
0	760.00	1013.25	1033.2
500	716.02	954.61	973.4
1000	674.13	898.76	916.5
1500	634.25	845.60	862.3
2000	596.31	795.01	810.7
2500	560.23	746.92	761.6
3000	525.95	701.21	715.0
3500	493.59	657.80	670.8
4000	462.49	616.60	628.8
4500	433.18	577.52	588.9
5000	405.40	540.48	551.1

(來源: Linsley, Ray K. 等著 "Hydrology for Engineers" McGraw-Hill Book Company, 1974年版)

$$\therefore Q' = B \cdot R_c \cdot \sqrt{2g \times 0.7 \times h_{AT}} \cdot \log_e \frac{R_s}{R_c} \dots \dots (5)$$

按一般情形, 虹吸溢道下游出口設有一水位, 其高低將影響虹吸流量。由於其水位淹沒喉道尾端, 出口如同潛孔口 (參閱圖五)。潛孔口流量計算公式為:

$$Q = CBD\sqrt{2gH} \dots \dots \dots (6)$$

式中: $C =$ 孔口係數, 採用 0.6,

$B =$ 溢道寬 (m),

$D =$ 喉道開孔度 (m),

$H =$ 溢流頂與下游水位高差 (m), 或稱為作用水頭,

$g =$ 重力加速度 $9.8 \text{ m}^2/\text{sec}$

比較(5)式及(6)式, Q 應小於或等於 Q' , 故虹吸溢道流量公式應為:

$$Q = CBD\sqrt{2gH} \leq BR_c \cdot \sqrt{2g \times 0.7 \times h_{AT}} \cdot \log_e \frac{R_s}{R_c} \dots \dots \dots (7)$$

$$\text{或 } q = CD\sqrt{2gH} \leq R_c \cdot \sqrt{2g \times 0.7 \times h_{AT}} \cdot \log_e \frac{R_s}{R_c} \dots \dots \dots (8)$$

(2)水頭: 作用水頭 H , 不能大於當地大氣壓力 h_{AT} , 且混凝土必須能承受該內負壓力。

(3)進水孔口: 其斷面積應大於或等於喉道斷面積之兩倍。進水孔口應設於渠中正常水位之下, 其沉水深 S_m 為:

$$S_m \text{ (m)} \geq (1.5 h_o + 0.15)$$

式中 $h_o =$ 進水孔口速頭, 以 m 表示

或 $S_m \text{ (cm)} \geq 30 \text{ cm}$

(4)溢流頂: 溢流頂應高於渠道正常水位 6 公分。有時可以使用可調整溢流頂, 但有一缺點, 即影響虹吸作用時間。為求較佳的流量係數, 溢流頂之設計

建議採用 $\frac{R_s}{D} = 2$, 或 $R_c = \frac{3}{2} D$

(5)喉道 (虹吸管道): 為便利施工及可使漂流物能順利流過喉道, 喉道開孔度設為 $D \geq 60 \text{ cm}$, 喉道寬 $B \geq 90 \text{ cm}$, 通常使用兩孔以上, 以免過寬, 增加荷重。

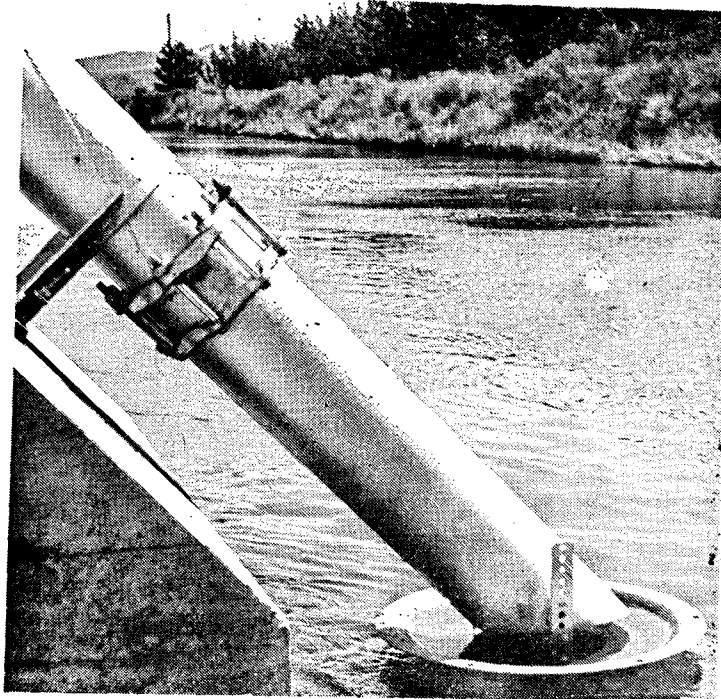
(6)喉道下游直線段: 此為直線式虹吸溢道之特點。其優點已如上述。水流變向器設於距喉道出口 2D 處 (詳圖五), 其作用亦如前述。喉道出口尾端接於靜水池, 從管中隨水流出的空氣在靜水池中變成汽泡而回入空中。

(7)斷吸管: 供給空氣入喉道以中止虹吸作用。進

口位於渠道正常水位，出口接於喉道。出口位置必須準確，其中心應與溢流頂垂直軸成 15° (如圖五所示)。斷吸管斷面積為喉道斷面積之 $\frac{1}{24}$ 。進口段為活動套筒，可配合渠中水位，加以調整。套筒接合處必須密封或可用牛油加以密閉。斷吸管之構造如圖三及五所示。

當渠內水位降低至正常水位時，斷吸管進口露出

水面，空氣由此進入，中斷虹吸作用而停止排水。但由於空氣進入之速度甚快，進口處產生負壓力，渠道水將被空氣吸入喉道，致使虹吸作用無法完全停止而排水亦將繼續。因此，預期之渠道正常水位無法維持。為避免此缺點，本設計在進口處裝設一金屬盤(圖三)，以避免水由斷吸管進入喉道，而使虹吸排水作用完全停止。



圖三 斷吸管與入口金屬盤配合作用使虹吸溢道運用自如。

(8) 靜水池：虹吸喉道出口潛入靜水池。其作用為避空氣從下游出口進入喉道，及消除大量能量，以免下游渠道受損。靜水池底檻(sill)頂端須與喉道出口頂同高。靜水池應有足够的出水高 (free board)，使池中空氣變成汽泡回入大氣中。如靜水池下游退水路水深不影響靜水池水流，則

$$\text{靜水池高 (cm)} = d_e (\text{靜水池臨界水深}) + h_{v_e} (\text{靜水池臨界速頭}) + 30 \text{ cm}$$

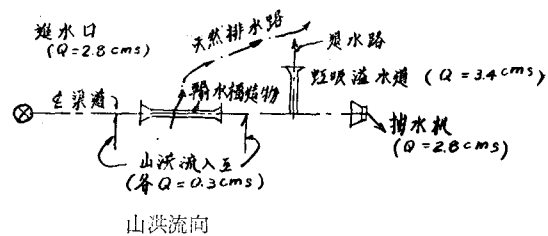
靜水池寬與虹吸喉道同寬，流量在 2.8 c. m. s. 或以下時，建議最小池寬為 90 公分。

(9) 出口漸變段：設計原則與一般構造物出口漸變段者同。兩岸漸變擴大角度可採用 25° 。

(10) 拋石保護工：為保護進出口土渠安全，拋石長度最少需要 2 公尺。

(11) 滲流長度：應按 Lane 氏潛流理論決定截水

牆深度及數目。



圖四 虹吸溢道佈置圖

四、設計例

(A) 已知條件：渠道構造物之佈置示如圖四。

(1) 渠道正常水位水理條件：

渠道為土渠，計劃流量 $Q_n = 2.8 \text{ c. m. s.}$ ，
底寬 $B = 2.5 \text{ m}$ ，出水高 $f_b = 0.64 \text{ m}$ ，
水深 $d_n = 1.13 \text{ m}$ ，渠高 $h_B = 1.80 \text{ m}$ ，

渠坡 S. S. = 1.5:1 (水平:垂直)。

(2) 估計經由流入工流入的總洪水量為 0.6 c. m. s.

(3) 估計作用水頭 $H=1.83$ m (參閱圖五)。

(4) 下游退水路斷面尺寸與渠道相似。

(5) 退水路出口接自然排水溝。其具有足夠容量容納由虹吸溢道排出的流量。

(6) 虹吸溢道之地面高程 = 1828 m, 由表一以插入法求出, 大氣壓力 $h_{AT}=8.32$ m

(B) 設計計算:

(1) 已知: $Q=3.40$ c. m. s.

$$H=1.83 \text{ m,}$$

$$h_{AT}=8.32 \text{ m.}$$

(2) 設計採用 $C=0.6$, $\frac{R_c}{D}=2.0$

(3) 設喉道開孔度 $D=0.60$ m

(4) 溢流頂尺寸: $R_c=2.0 \times D=2.0 \times 0.6=1.20$ m

$$R_c=R_c-\frac{D}{2}=1.2-0.3=0.90 \text{ m}$$

$$R_s=R_c+\frac{D}{2}=1.2+0.3=1.50 \text{ m}$$

(5) 流量計算:

(a) 孔口公式:

$$q=CD\sqrt{2gH}=0.60 \times 0.60 \times \sqrt{2 \times 9.8 \times 1.83}$$

$$=2.156 \text{ c.m.s./m} \approx 2.16 \text{ c.m.s./m}$$

(b) 旋渦流 (Vortex Flow) 公式即式(8):

$$q_{max}=R_c \cdot \sqrt{0.7h_{AT} \times 2g} \times \log_0 \frac{R_s}{R_c}$$

$$=0.90 \times \sqrt{0.7 \times 8.23 \times 2 \times 9.8} \times \log_0 \frac{1.5}{0.9}$$

$$=4.89 \text{ c.m.s./m.}$$

(6) 由上計算, 得 $q < q_{max}$, 故設計可採用 $q=2.16$ c.m.s./m, 如 $q > q_{max}$, 則須降低 H 值, 或改變 D 或 R_c 值, 使 $q < q_{max}$, 再決定 q 值。

(7) 喉道寬: $b=\frac{Q}{q}=\frac{3.40}{2.16}=1.574$ m,

採用 $b=1.6$ m.

(8) 斷吸管道設計: 斷吸管斷面積 (A_p) = $\frac{1}{24}$ 喉道

面積 (A_t), $\therefore A_p = \frac{A_t}{24} = \frac{1.6 \times 0.6}{24} = 0.04 \text{ m}^2$,

令內徑 = D_p ,

$$\text{則 } \frac{\pi}{4} \times D_p^2 = 0.04$$

$$\therefore D_p = \sqrt{\frac{0.04 \times 4}{\pi}} = 0.226 \text{ m}$$

採用 $D_p=9$ 吋鍍鋅鐵管或硬質 PVC 管。

(9) 靜水池:

(a) 底檻 (sill) 高, $h_s=1.5D=1.5 \times 0.6=0.90$ m

(b) 池寬 $W_p=b$ (喉道寬) = 1.6 m

(c) 池高 $h_2=1.5D+d_c+h_{v_c}+0.30$

$$q=\frac{Q}{W_p}=\frac{3.4}{1.6}=2.125 \text{ cms/m}$$

$$d_c=\sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}=\sqrt[3]{\frac{(2.125)^2}{9.8}}=0.772 \text{ m}$$

$$h_{v_c}=\frac{d_c}{2}=\frac{0.772}{2}=0.386 \text{ m}$$

$$\therefore h_2=1.5 \times 0.6 + 0.772 + 0.386 + 0.30 = 2.358 \text{ m}$$

採用 $h_2=2.4$ m

(10) 出口漸變段設計: 假定退水路之水理條件為:

流量 $Q_w=3.4$ c.m.s., 底寬 $b_w=2.4$ m, 水深 $d_w=1.22$ m, 側坡 S. S. = 1.5:1; 採用直線型漸變段, 其底寬 B_T 與靜水池同寬, 則 $B_T=W_p=1.60$ m; 出口水位與土渠同, 則出口處水面寬

$T_c=B_T+2 \times 1.5 \times d_w=1.6+3 \times 1.22=5.26$ m, 故由靜水池出口至漸變出口之水面擴散為:

$$T_c - W_p = 5.26 - 1.6 = 3.66 \text{ m}$$

$$\text{單側擴散} = \frac{3.66}{2} = 1.83 \text{ m}$$

假定擴散角度 = 25°

$$\therefore L_T = \frac{1.83}{\tan 25^\circ} = \frac{1.83}{0.466} = 3.93 \text{ m}$$

採用 $L_T=4.0$ m。由 $B_T=1.6$ m 到 $b_w=2.4$ m 另設土渠漸變。

(11) 進水孔口浸水深檢算: 孔口長為:

$$2D=2 \times 0.6=1.2 \text{ m, 寬=喉道寬=1.6 m。}$$

$$\text{流速 } V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{2D \times 1.6} = \frac{3.4}{2 \times 0.6 \times 1.6}$$

$$=1.77 \text{ m/sec, 設進水流速水頭為 } h_o,$$

$$\text{則 } h_o = \frac{V^2}{2g} = \frac{1.77^2}{2 \times 9.8} = 0.16 \text{ m}$$

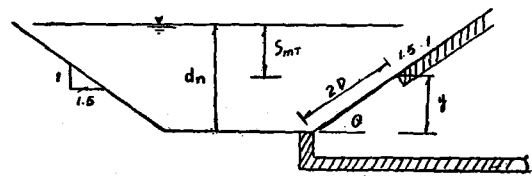
由三之 (3),

$$S_m = 1.5h_o + 0.15 = 1.5 \times 0.16 + 0.15 = 0.39 \text{ m}$$

又按實際進口沉水深 S_{mT}

$$S_{mT} = d_n - y = d_n - 2D \sin \theta$$

式中 d_n 為渠道正當水深 $d_n=1.13$ m



$$\sin\theta = \frac{1}{\sqrt{1.5^2 + 1^2}} = \frac{1}{1.803} = 0.5547$$

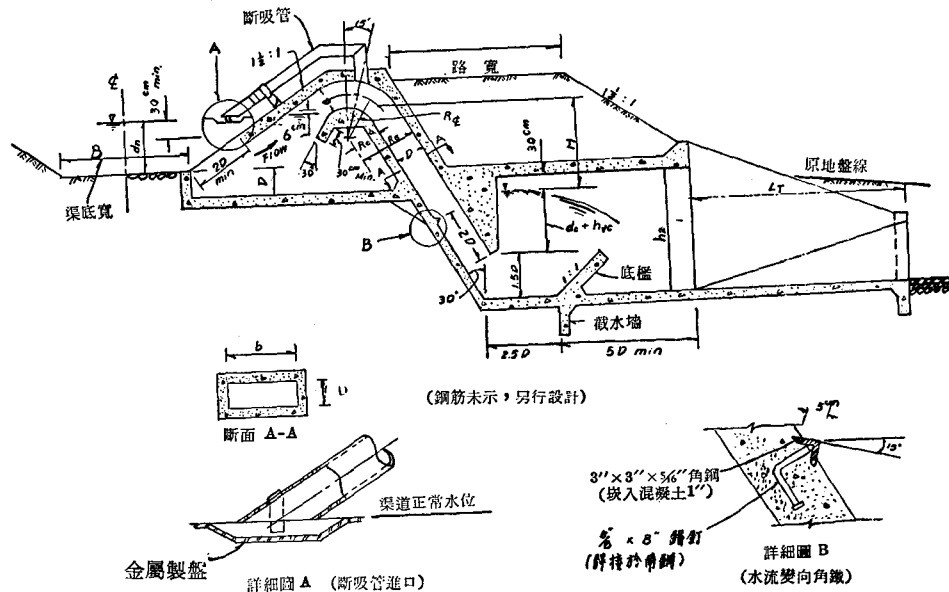
$$\therefore S_{mT} = 1.13 - 2 \times 0.6 \times 0.5547 \\ = 0.464\text{m} > 0.39\text{m O.K.}$$

(2) 拋石保護工設計：如渠道及退水路均為土渠，則入口及出口均應有適當的拋石砌或石保護工，其長度最少 2 公尺。

(3) 滲透水流檢算：按 Lane 氏滲透水流長度，求截水牆深度長及數目，以期基礎安全（在此略）

後 語

本文取材自 "Design of Small Canal Structures" 一書，1974 年 U.S. Bureau of Reclamation 出版。



圖五 直線吼式虹吸溢洪道標準設計圖

參 考 書 籍

1. "Design of Small Canal Structures" U. S. Bureau of Reclamation, 1974.
2. "Design of Small Dams (Second Edition-Revised Reprint)", U. S. Bureau of Reclamation, 1974.
3. "Design Standards No. 3, for Canals and Related Structures", Bureau of Reclamation, 1967.
4. McBirney, W. B., "Some Experiments with Emergency Siphon Spillways", ASCE Proceedings 1807, Hydraulic Division, October 1958.
5. Linsley, Ray K. Jr., Kohler, Max. A. and Paulhus, Joseph L. H., "Hydrology for Engineers", 2nd edition, McGraw-Hill Book Company 1974.

農 工 消 息

本會會員證原為每年換發一次，嗣經第廿一屆第二次理監事會議決，重新設計永久性之會員證業已印妥，各位會員如欲申請，請寄一吋半身像片一張，及永久會費，以便寄發。非永久會員者，亦請惠將歷年未交之常年會費，寄交郵政劃撥儲金 11426 帳號，實為感荷。