

中國科學院水利部水利科學研究院

研 究 報 告

1

圓頂壩自由溢流水力特性中的曲率影响
高压閘門的水力特性

水 利 出 版 社

1958年1月

目 錄

水工1 圓頂壩自由溢流水力特性中的曲率影响

提 要.....	1
一、引 言.....	1
二、測線上能量的分布.....	2
三、二元水流凸曲率影响的基本公式.....	3
四、圓頂壩自由溢流的水力特性.....	5
五、圓頂壩模型試驗成果.....	8
六、实用溢流壩模型試驗验证資料.....	17
七、結 語.....	22
参考文献.....	23

水工2 高压閘門的水力特性

提 要.....	25
一、概 述.....	25
二、水力特性的指标.....	27
三、試驗研究的方法.....	33
四、几种常用高压閘門的水力特性.....	39
五、結 語.....	62
参考文献.....	64

圓頂壩自由溢流水力特性中的曲率影响

(水工 1)

陈 椿 庭

提 要

本文根据劳弗尔 (H. Lauffer) 氏在兩項假定 (● 垂直測綫上各点所含能量为常数, ● 流綫呈同心圓弧) 下所導得的基本公式, 作了詳細的补充引伸, 得出圓頂壩自由溢流时各項水力特性中的曲率影响計算公式。作者曾進行了大、中、小三个圓頂壩模型的試驗共 118 組, 試驗成果基本上和導得的計算公式相合致。文中并根据試驗資料制定了一些經驗公式, 应用时可更簡便。此外, 也曾搜集了 16 个实用溢流壩包括 27 种断面曲綫形式的流量系数模型試驗資料, 來驗證流量系数所受的曲率影响, 基本上也相符合。

一、引 言

通过水工建筑物的二元明渠水流, 有时由于底部有豎曲率或水面有跌落壅高等情形, 而致流綫帶有顯著的曲率, 在水力計算中必須考慮由流綫曲率所引起的影响。例如: 溢流壩自由溢流时, 流綫帶有凸曲率, 壩峯水深即不同于按平行流动所算得的臨界水深, 彭胄 (Bundschu) 氏流量系数可大于 1, 且流量系数常随上游水头而增大; 寬頂堰尾端的水深也因流綫有凸曲率而較平行流的臨界水深为小; 臨界水深量水仪也因流綫帶有曲率而發生困难。流綫曲率所引起的影响, 可認為首先反映在使水深方向的水压力分布, 不复遵守靜水压力分布規律; 因而在流速分布、流量、臨界水深、臨界压力分布等方面, 都引起了一系列的影响。流綫的曲率影响問題是廣泛存在的, 有时可很嚴重, 例如局部流綫的曲率过甚时, 可產生嚴重的負压, 甚至產生气穴現象和空蝕作用。为了探明通过溢流壩等水工建筑物的水流运动規律, 必須对流綫的曲率影响問題進行研究。

对于二元明渠水流的豎曲率影响問題, 已有不少学者做过研究, 其中劳弗尔 (Harald Lauffer) 和蒲斯 (Paul Boss) 二氏的工作, 奠定了基礎。作者根据劳弗尔氏所作的兩項假定, 对同心圓流綫的曲率影响計算公式, 作了詳細的补充推引, 并在玻璃水槽內進行了大、中、小三个圓頂壩模型的一系列試驗, 并搜集了 16 个实用溢流

壩（包括27种断面曲綫形式）的流量系数模型試驗資料，基本上驗證了推引所得的計算公式。文中并根据試驗成果求得一些經驗公式，也可供参考应用。

本文首先說明垂直測綫上能量的各个組成部分和分布情形，并用簡單明了的曲綫圖來加以表示。其次根据勞弗尔氏在兩項假定下推引所得二元明渠水流的豎曲率影响基本公式，進而詳細地推引了圓頂壩自由溢流时各項水力特性中曲率影响的計算公式。又次介紹了三个圓頂壩模型試驗所獲得的主要成果，与推引所得的各項計算公式進行核驗比較。最后搜集了3个实用溢流壩在不同上游水位下的流量系数模型試驗資料，以及13个实用溢流壩（包括24种断面曲綫形式）在設計水头下的流量系数模型試驗資料，与本文的流量系数理論計算公式及实验公式進行驗證比較。

文中所用的符号在第一次出現时加以說明。圓頂壩試驗系在美國密尼苏达大学聖安东尼瀑布（St. Anthony Falls）水工試驗室內進行，試驗中用的是英制單位。实用溢流壩的流量系数模型試驗資料，兩個是在南京水利实验处進行的，其余都是美國垦务局的資料，后者也是英制單位。本文的成果分析全都是無尺度的算式和曲綫，应用时不須換算單位。本稿承北京水利科学研究院黃文熙副院長核閱，謹此志感。

二、測綫上能量的分布

对于恆定不变的二元明渠水流，根据位能理論，垂直于流綫的豎測綫上的各点，都含有相等的能量。一般單位重水体所含的能量，常用水柱高度來代表。为了对測綫上能量的分布取得明哲的認識，可將总能 H 先划分为靜能 H_s 和流速水头 h ，再將靜能 H_s 划分为位能 z 和压能 p/γ （其間 γ 是水的比重），沿測綫繪成能量分布圖。如第1圖（a），渠底縱向傾斜角为 φ ：水流流綫都是平行于渠底的直綫，沿鉛垂綫方向水深为 t ，沿垂直于流綫方向的水深为 d ，以通过圖中 A 点的縱坐标代表变动的水深 y ，横坐标代表各种能量的組成部分，如位能 z 、压能 p/γ 、靜能 H_s 、流速水头或动能 h 、总能 H 等，在圖中可作得“ z 綫”、“ H_s 綫”和“ H 綫”， H_s 綫和 z 綫的横坐标距差代表压能 p/γ ， H 綫和 H_s 綫的横坐标距差代表流速水头 h 。在上述的条件下， H_s 綫和 H 綫是兩条垂直豎綫。代表离渠底为 y 处的一般情形，可寫成下式：

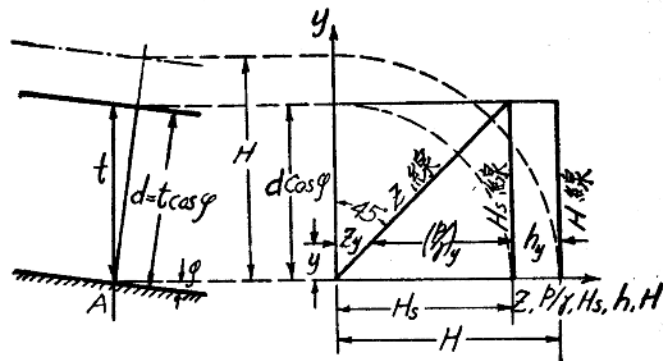
$$\left. \begin{aligned} \text{位能} \quad z_y &= y \cos \varphi \\ \text{压能} \quad (p/\gamma)_y &= (d-y) \cos \varphi \\ \text{靜能} \quad H_{s_y} &= (z + p/\gamma)_y = d \cos \varphi = \text{常数} = H_s \\ \text{动能} \quad h_y &= \frac{v_y^2}{2g} = H - H_s = \text{常数} = \frac{q^2}{2gd^3} \\ \text{总能} \quad H_y &= \text{常数} = H = H_s + h \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 q 是已知的單位寬度流量。以上代表流綫不帶曲率的平行水流的能量分布情况。

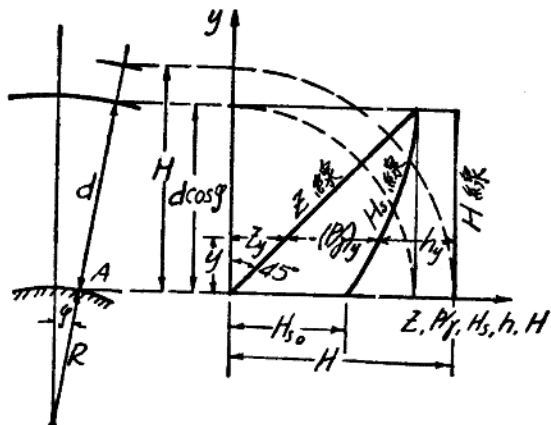
第1圖（b）为水流流綫具有凸曲率时的能量分布圖。圖中位能 z 綫代表几何关系，仍是和縱坐标成 45° 夾角的直綫，当位流理論假定仍可適用时，总能 H 綫仍是垂直豎綫，代表 $H = \text{常数}$ ，但由于凸曲率的影响，压能 $(p/\gamma)_y < (d-y) \cos \varphi$ ，因而

圖中靜能 H_s 綫成为曲綫，动能或流速水头 h_v 也隨之不等於常數。压能 $(p/\gamma)_v \approx (d-y) \cos \varphi$ 可認為流綫帶有豎曲率后的基本反映，其余流速、流量等也均和平行水流發生相应的差异。

以上 (1) 式和第 1 圖(a)、(b)，都可以很簡易的改变成为無尺度比值的形式。



第 1 圖 (a)



第 1 圖 (b)

三、二元水流凸曲率影响的基本公式

二元水流流綫帶有豎曲率后，測綫上的水压力分布由靜水压力分布的直綫改为曲綫，此項基本影响求得后，可進而求得在流速、流量等水力特性方面所產生的曲率影响。勞弗尔氏基于兩項假定：(1) 垂直測綫上各点所含的能量均相等，(2) 流綫均系同心圓弧，推演得曲綫水流在垂直測綫上的压力分布公式如下。

如第 2 圖，距渠底以上 y 处 A 点單元立方体 $dx \cdot dy \cdot 1$ 上的作用力有如下 4 項：

(1) 重力 $\gamma dx \cdot dy$ ，(2) 离心力 $\frac{\gamma}{g} \cdot \frac{v_y^2}{r} dx \cdot dy$ ，(3) 下方的压力 $p_y dx$ ，(4) 上方的压力 $(p_y + \frac{\partial p_y}{\partial y} dy) dx$ 。沿測綫方向寫出力的平衡方程式如下：

$$\gamma dx dy \cos \varphi - p_y dx + (p_y + \frac{\partial p_y}{\partial y} dy) dx - \frac{\gamma v_y^2}{rg} dx dy = 0 \quad (2)$$

式中 r (或 r_y) 是该点的流线曲率半径, φ 是该测线和铅垂线的夹角。上式可简化为:

$$\frac{\partial(p_y/\gamma)}{\partial y} = \frac{v_y^2}{rg} - \cos \varphi \quad (3)$$

(3) 式是曲线水流垂直测线上压力分布的一般通式。

根据上述两项假定, 对于同心圆弧凸曲线水流, 可对 (3) 式内的 v_y 和 r 作如下的代换:

$$\text{假定(1): } \frac{v_y^2}{g} = 2h_y = 2\left(H - y \cos \varphi - \frac{p_y}{\gamma}\right) \quad (4)$$

$$\text{假定(2): } r = R + y \quad (5)$$

式中 R 是渠底的曲率半径。(4)、(5) 两式代入 (3) 式, 积分后可得测线上的压力分布公式:

$$\frac{p_y}{\gamma} = (d - y) \cos \varphi + (H - d \cos \varphi) \left[1 - \left(\frac{d + R}{y + R} \right)^2 \right] \quad (6)$$

上式方括号内的无尺度校正项, 以 K_p 示之, 称为压力校正系数:

$$K_p = 1 - \left(\frac{d + R}{y + R} \right)^2 = 1 - \left(\frac{1 + \frac{d}{R}}{1 + \frac{d}{R} \cdot \frac{y}{d}} \right)^2 \quad (7)$$

当渠底为直线时, R 可视为 ∞ , (7) 式中 $K_p = 0$, 此时 (6) 式即同于 (1) 式的第 2 行。当流线带有凸曲率时, (7) 式内相对水深 $y/d \leq 1$, 可见 $y < d$ 时 K_p 恒为负值, 即凸曲率水流的水压力较相应的平行水流为小。(7) 式中除相对水深 y/d 外, 比值 d/R 起决定性作用, 称为曲率指数, 以 i 示之:

$$i = d/R \quad (8)$$

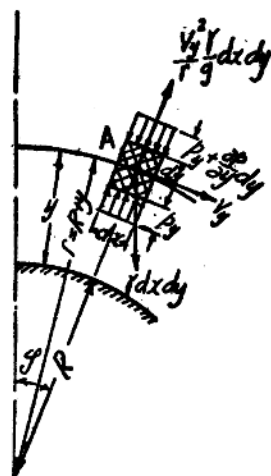
(8) 式代入 (7) 式后, 得

$$K_p = 1 - \left(\frac{1 + i}{1 + i \cdot \frac{y}{d}} \right)^2 \quad (9)$$

对于相同的 y/d 比值, 曲率指数 i 愈大, K 的绝对值或曲率的影响为愈大; 当曲率指数 i 为常数时, 曲率影响随 y/d 的减小而加大。

因之, 对于凸曲线水流而言, 测线上的能量分布公式由平行水流的 (1) 式改为:

$$\left. \begin{aligned} z_y &= y \cos \varphi \\ (p/\gamma)_y &= (d - y) \cos \varphi + (H - d \cos \varphi) \left[1 - \left(\frac{1 + i}{1 + i \frac{y}{d}} \right)^2 \right] \\ H_{s_y} &= (z + p/\gamma)_y = H - (H - d \cos \varphi) \left(\frac{1 + i}{1 + i \frac{y}{d}} \right)^2 \\ h_y &= H - H_{s_y} = (H - d \cos \varphi) \left(\frac{1 + i}{1 + i \frac{y}{d}} \right)^2 \\ H &= \text{常数} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$



第 2 圖

(6)式或(10)式即为最重要的凸曲率影响基本公式。(10)式的示意图见第1图(b)。

由(10)式的第4行,可得测线上的流速分布公式为:

$$v_y = \sqrt{2gh_y} = \sqrt{2g(H-d\cos\varphi)} \left(\frac{1+i}{1+i\frac{y}{d}} \right) \quad (11)$$

对(11)式进行积分,得凸曲线水流的单位宽度流量为

$$q = \int_0^d v_y dy = d \sqrt{2g(H-d\cos\varphi)} \left(1 + \frac{1}{i} \right) \log_e(1+i) \quad (12)$$

令(12)式内的流量校正系数为 K_q , 上式改为:

$$\left. \begin{aligned} q &= K_q \cdot d \cdot \sqrt{2g(H-d\cos\varphi)} \\ K_q &= \left(1 + \frac{1}{i} \right) \log_e(1+i) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

由于凸曲线水流的曲率指数 i 为正值, 所以 K_q 恒大于1, 即溢流量比平行水流为大。平行水流的 $R=\infty$, $i=0$, (13)式的 $K_q=1$ 。

其他在临界条件下的水力特性所受的曲率影响, 详见下节。

四、圆顶堰自由溢流的水力特性

作者曾选择了堰顶为半圆形上下游为直立面的圆顶堰, 作为研究二元明渠水流暨曲率影响的简单模型, 如第3图的示意。认为圆顶堰自由溢流时堰峰测线的水力特性所受的曲率影响, 近似地符合于劳弗尔氏所作的两项假定, 从而推引得一系列的曲率影响计算公式。并就大、中、小三个圆顶堰模型进行了118组试验, 以资核校比较。

略去短距离内的能量损失, 水流的比能量以堰峰测线为最小, 所以即以此作为临界断面, 对(13)式取微分式等于零, 可求得堰峰的临界水深 d_c 如下式 (此处 $\varphi=0$, $\cos\varphi=1$):

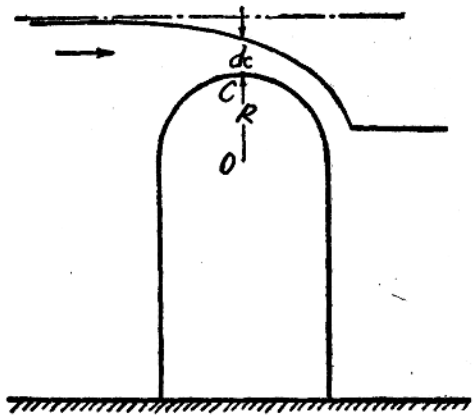
$$d_c = \frac{1 + \log_e(1+i_c)}{1 + \log_e(1+i_c) + 0.5K_q} \cdot H \quad (14a)$$

式中 i_c 为相应于临界水深 d_c 的曲率指数, $i_c = d_c/R$; 令式中的系数为临界水深系数, 以 K_{d_c} 示之:

$$K_{d_c} = \frac{d_c}{H} = \frac{1 + \log_e(1+i_c)}{1 + \log_e(1+i_c) + 0.5K_q} \quad (14b)$$

式中流量系数 K_q 见(13)式。当流线带有凸曲率, i_c 为正值, 上式 K_{d_c} 恒较 $2/3$ 为

大, 亦即堰峰的临界水深 $d_c > \frac{2}{3}H$ 。对于流线无曲率的平行水流, 则 $i_c=0$, $K_q=1$,



第3图

$$K_{d_c} = 2/3。$$

將(14b)式代入(13)式, 得总能 H 为常数时的最大溢流量 q_{max} 为:

$$q_{max} = \frac{K_q^{1.5}}{\sqrt{1 + \log_e(1 + i_c)}} \sqrt{g \cdot d_c^{1.5}} \quad (15)$$

式中的系数用另一流量系数 K'_q 代表, 可得:

$$q_{max} = K'_q \sqrt{g \cdot d_c^{1.5}} \quad (16a)$$

$$K'_q = \frac{K_q^{1.5}}{\sqrt{1 + \log_e(1 + i_c)}} \quad (16b)$$

观(16a)式, 可見 K'_q 即为壅塞測綫的臨界佛勞特 (Froude) 数 Fr_c ; 流綫帶凸曲率时, $i_c > 0$, K'_q 或 Fr_c 的数值大于 1。平行流的 $i_c = 0$, K'_q 或 Fr_c 等于 1。

由过壅塞單寬流量 q 算得的二元平行水流臨界水深, 用 d'_c 表示以作区别, 算式如下:

$$d'_c = \sqrt[3]{q^2/g} \quad (17)$$

以此作为标准, 比較(14a)式凸流綫水流臨界水深 d_c 的大小, 令另一臨界水深系数为 $K_{d'_c}$:

$$K_{d'_c} = \frac{d_c}{d'_c} = \left(\frac{1}{K'_q} \right)^{2/3} = \frac{\sqrt[3]{1 + \log_e(1 + i_c)}}{K_q} \quad (18)$$

已知凸流綫水流的 $i_c > 0$, $K'_q > 1$, 所以 $K_{d'_c} < 1$ 。也就是說: 圓頂壅的壅塞臨界水深 d_c 大于 $(2/3)H$, 但比同一流量在平行流动时的臨界水深 d'_c 为小, 这可說明了寬頂堰尾端水深小于平行流臨界水深的問題。

如果用总能头 H 來計算过壅的流量 q , 令另一流量系数为 K''_q , 如下式:

$$q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \cdot K''_q \cdot H^{1.5} \quad (19)$$

根据上述演化, 可得 K''_q 的算式为:

$$K''_q = \frac{3}{2\sqrt{2}} K'_q \cdot K_{d'_c}^{1.5} \quad (20)$$

K''_q 即为克拉姆 (Kramer) 氏堰流流量系数, 和彭胃氏流量系数 μ 具有如下关系:

$$\mu = \sqrt{3} K''_q \quad (21)$$

当流綫帶有凸曲率时, $K''_q > 0.576$, $\mu > 1$; 在平行流动时 则为 $K''_q = 0.576$, $\mu = 1$, 这說明了溢流壅彭胃氏流量系数可大于 1 的問題。(19)式的克拉姆氏流量系数 K''_q 还可化成其他形式的流量系数, 因系根据上游水头直接進行計算, 所以应用最为广泛。

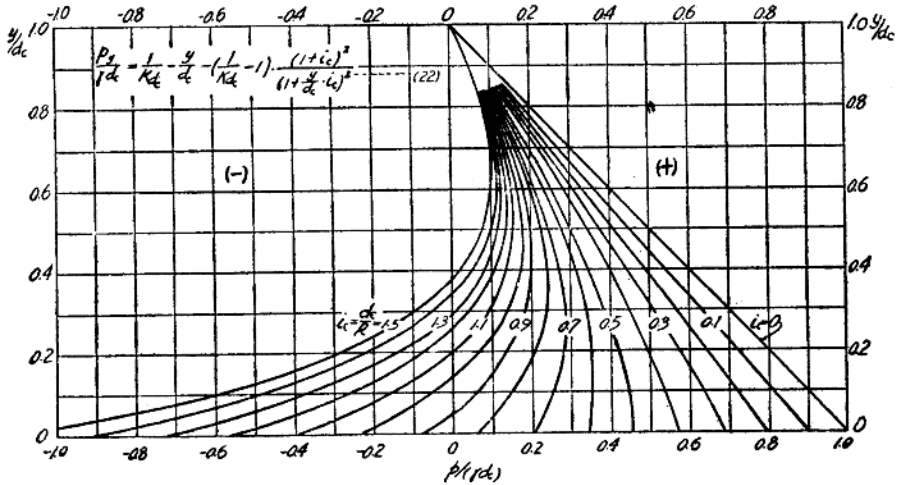
壅塞測綫的压力公布公式, 可將 $d = d_c$ 、 $H = d_c/K_{d_c}$ 、 $\cos \varphi = 1$ 代入(10)式的第 2 行來求得:

$$(p_v/\gamma d)_c = \frac{1}{K_{d_c}} - \frac{y}{d_c} - \left(\frac{1}{K_{d_c}} - 1 \right) \left(\frac{1 + i_c}{1 + i_c \frac{y}{d_c}} \right)^2 \quad (22)$$

以 $y=0$ 代入上式, 得壩峯 C 点的無尺度压力比值, 用 K_{p_c} 示之:

$$K_{p_c} = (p_0/\gamma d)_c = 1 - i_c(2 + i_c) \left(\frac{1}{K_{d_c}} - 1 \right) \quad (23)$$

(22)式繪成曲綫, 如第4圖所示。圖中縱坐标为相对水深 y/d_c , 横坐标为 $(p_y/\gamma d)_c$, 每一曲綫的曲率指数 i_c 为一常数。当 $i_c=0$, 代表平行水流的靜水压力分布規律; 約当 $i_c=0.85$, 壩峯 C 点的压力为 0; 約当 $i_c=1.45$, 壩峯 C 点的压力 $(p_0/\gamma d_c) = -1$ 。



第4圖

同样, 將 $d=d_c$ 、 $H=d_c/K_{d_c}$ 、 $\cos \varphi=1$ 代入 (10) 式的第 4 行或 (11) 式, 可得壩峯測綫的流速分布公式为:

$$v_{y_c} = \sqrt{2gd_c} \cdot \sqrt{\frac{1}{K_{d_c}} - 1} \cdot \frac{1 + i_c}{1 + i_c \frac{y}{d_c}} \quad (24)$$

当 $y=0$, C 点的臨底流速 v_b 为:

$$v_b = \sqrt{2gd_c} \cdot \sqrt{\frac{1}{K_{d_c}} - 1} \quad (25a)$$

当 $y=d_c$, C 点的水面流速 v_s 为:

$$v_s = \sqrt{2gd_c} \cdot \sqrt{\frac{1}{K_{d_c}} - 1} \cdot (1 + i_c) \quad (25b)$$

对 (24) 式沿水深進行積分, 仿 (12) 式可得壩峯測綫的平均流速 v_m 为:

$$v_m = K_q \sqrt{2gd_c} \cdot \sqrt{\frac{1}{K_{d_c}} - 1} = K_q \cdot v_b \quad (25c)$$

壩峯測綫的流速分布曲綫既已求得，能量校正系数 α 和动量校正系数 β 也都可借積分求得。

在上述算式演化过程中，可見曲率指数 $i_c = d_c/R$ 为最主要的参变数。当壩峯的曲率半径 R 为已知时，壩峯的临界水深 d_c 为最主要的自变量，各項水力特性如压力分布、流速分布、流量系数等，均为随 i_c 而改变的函数。如計算工作中最先給出的为壩峯曲率半径 R 及上游总能头 H ，則可通过試算或檢用曲綫，在求得 d_c 的数值后再对各項水力特性進行計算。

五、圓頂壩模型試驗成果

为了探索二元明渠水流壩曲率的影响，作者曾在 50 公分寬玻璃水槽內進行了三种不同尺寸的圓頂壩模型試驗，研究自由溢流时的水力特性，以与前述根据兩項假定所導得的理論計算公式進行核驗比較。壩的几何形狀如第 3 圖，模型的尺寸、試驗的范围和 118 組次的分配如第 1 表：

第 1 表

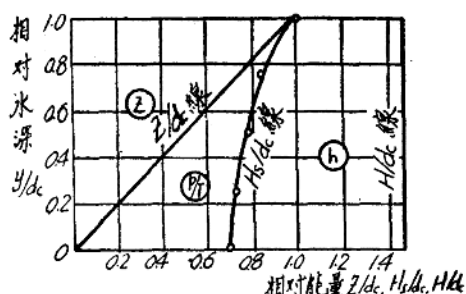
圓頂壩模型試驗范围及組次分配

項 目	大 模 型 (I)	中 模 型 (II)	小 模 型 (III)
圓頂半径 R (公分)	10.98	8.32	5.72
流量范围 Q (公升/秒)	2.1~39	3.9~59	3.9~62
壩峯临界水深 d_c (公分)	1.2~7.6	1.7~9.7	1.7~9.2
曲率指数 $i_c = d_c/R$	0.11~0.69	0.20~1.16	0.30~1.60
試驗組次及編号	I·1~I·27	II·1~II·61	III·1~III·30
相对壩高 P/R	2.45	2.31	2.04

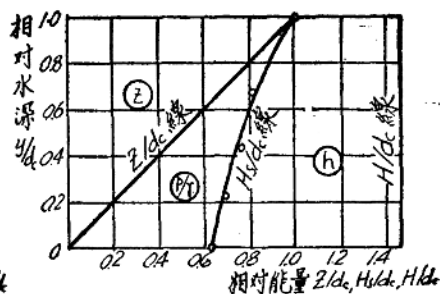
模型用金屬管及薄鋼板加工精制，壩頂部分設測压孔 5 个，每隔 30° 一个（見第 11 圖的附圖），上游直立面設測压孔 2 个，借測压板測讀边界压力分布；壩峯測綫的流速分布用普朗特 (Prandtl) 型畢托 (Pitot) 管施測；壩峯測綫压力分布用頂端不开孔、側面开許多小孔、狀如畢托管的压力管施測；自由溢流的水面綫借滑动測針測得；流量由銳緣平口堰板測定，經過量水箱的精密衡重率定。

試驗成果以壩峯測綫的自由溢流水力特性为最主要，除潛沒流的临界指标部分不在本文發表外，其余各項依曲綫圖分別簡述如次。

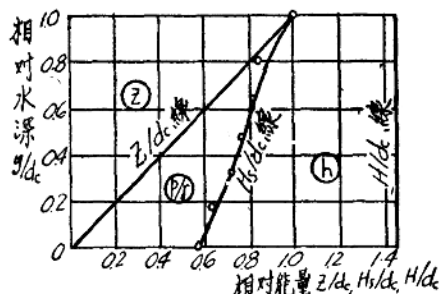
壩峯測綫的能量分布曲綫，就每一模型选择 6 組試驗成果，依第 1 圖 (b) 的表示方法，分別繪成第 5、6、7 圖。圖中按曲率指数 i_c 的大小次序排列，可看出压力分布曲綫随 i_c 的加大而愈脫离于靜水压力分布規律的情形。圖的下方系將“ z 綫”改成垂直豎綫后所繪得的压力分布曲綫，以便和第 4 圖直接比較。除大势符合而有一定差异存在外，水面下第一測点的压力特別偏小，很是明顯。圖中总能头“ H 綫”上未將实验結果点上，但实验結果是符合于第 (1) 項假定的。



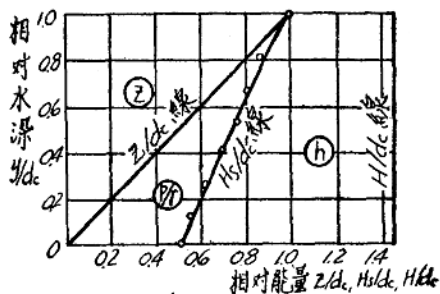
(a) I-7, $d_c/R = 0.230$, $F_r = 1.057$,
 $H = 0.122'$, $d_c = 0.083'$, $Q = 0.240 \text{ m}^3/\text{s}$



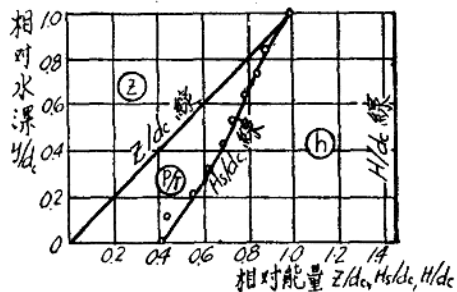
(b) I-8, $d_c/R = 0.264$, $F_r = 1.053$,
 $H = 0.139'$, $d_c = 0.095'$, $Q = 0.293 \text{ m}^3/\text{s}$



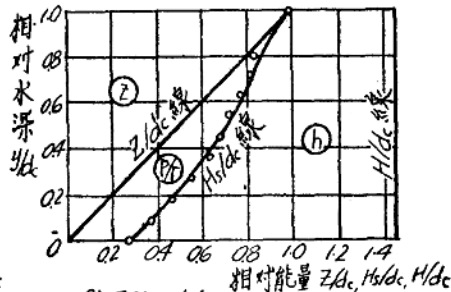
(c) I-12, $d_c/R = 0.361$, $F_r = 1.090$,
 $H = 0.188'$, $d_c = 0.130'$, $Q = 0.486 \text{ m}^3/\text{s}$



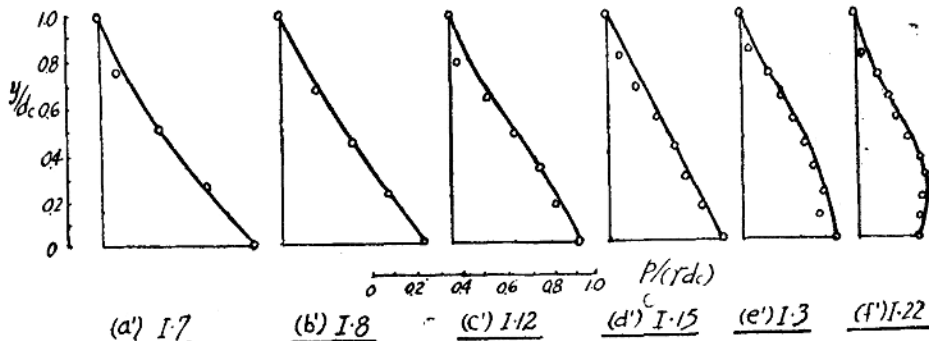
(d) I-15, $d_c/R = 0.427$, $F_r = 1.100$,
 $H = 0.223'$, $d_c = 0.154'$, $Q = 0.630 \text{ m}^3/\text{s}$



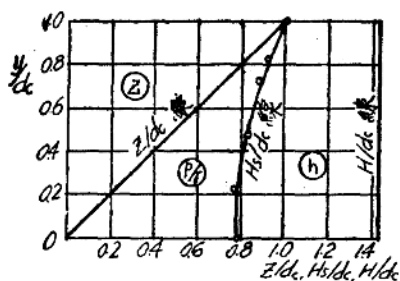
(e) I-3, $d_c/R = 0.552$, $F_r = 1.121$,
 $H = 0.288'$, $d_c = 0.199'$, $Q = 0.945 \text{ m}^3/\text{s}$



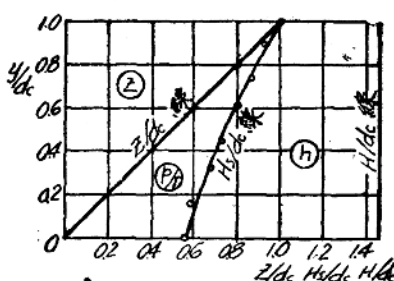
(f) I-22, $d_c/R = 0.648$, $F_r = 1.161$,
 $H = 0.339'$, $d_c = 0.233'$, $Q = 1.240 \text{ m}^3/\text{s}$



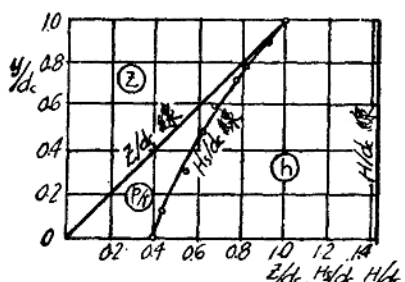
第5圖



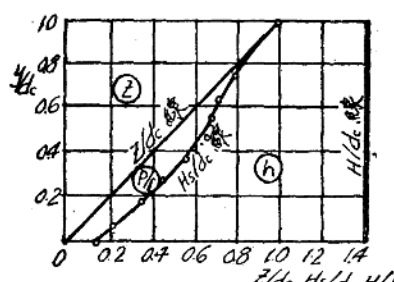
(a) II-33, $d_c/R=0.319$, $F_r=1.091$,
 $H=0.125'$, $d_c=0.087'$, $Q=0.266$ m³/s



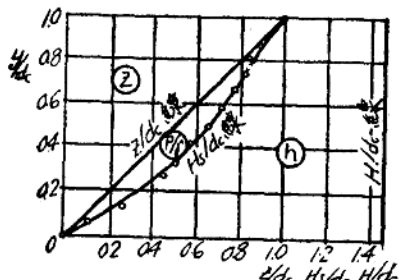
(b) II-34, $d_c/R=0.463$, $F_r=1.130$,
 $H=0.186'$, $d_c=0.127'$, $Q=0.486$ m³/s



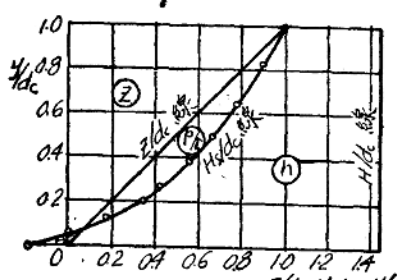
(c) II-17, $d_c/R=0.630$, $F_r=1.140$,
 $H=0.248'$, $d_c=0.172'$, $Q=0.772$ m³/s



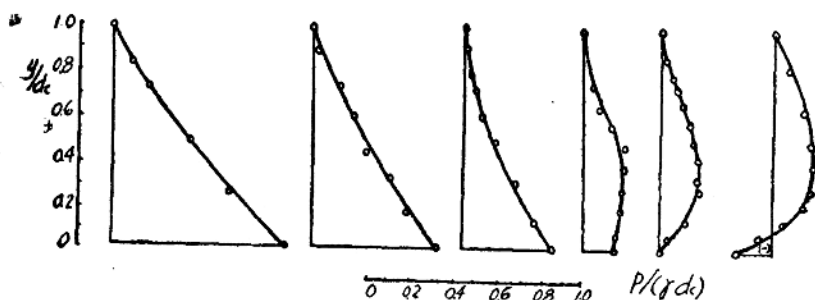
(d) II-14, $d_c/R=0.817$, $F_r=1.172$,
 $H=0.316'$, $d_c=0.223'$, $Q=1.170$ m³/s



(e) II-15, $d_c/R=0.920$, $F_r=1.190$,
 $H=0.367'$, $d_c=0.251'$, $Q=1.420$ m³/s



(f) II-19, $d_c/R=1.055$, $F_r=1.286$,
 $H=0.413'$, $d_c=0.288'$, $Q=1.887$ m³/s



(a') II-33

(b') II-34

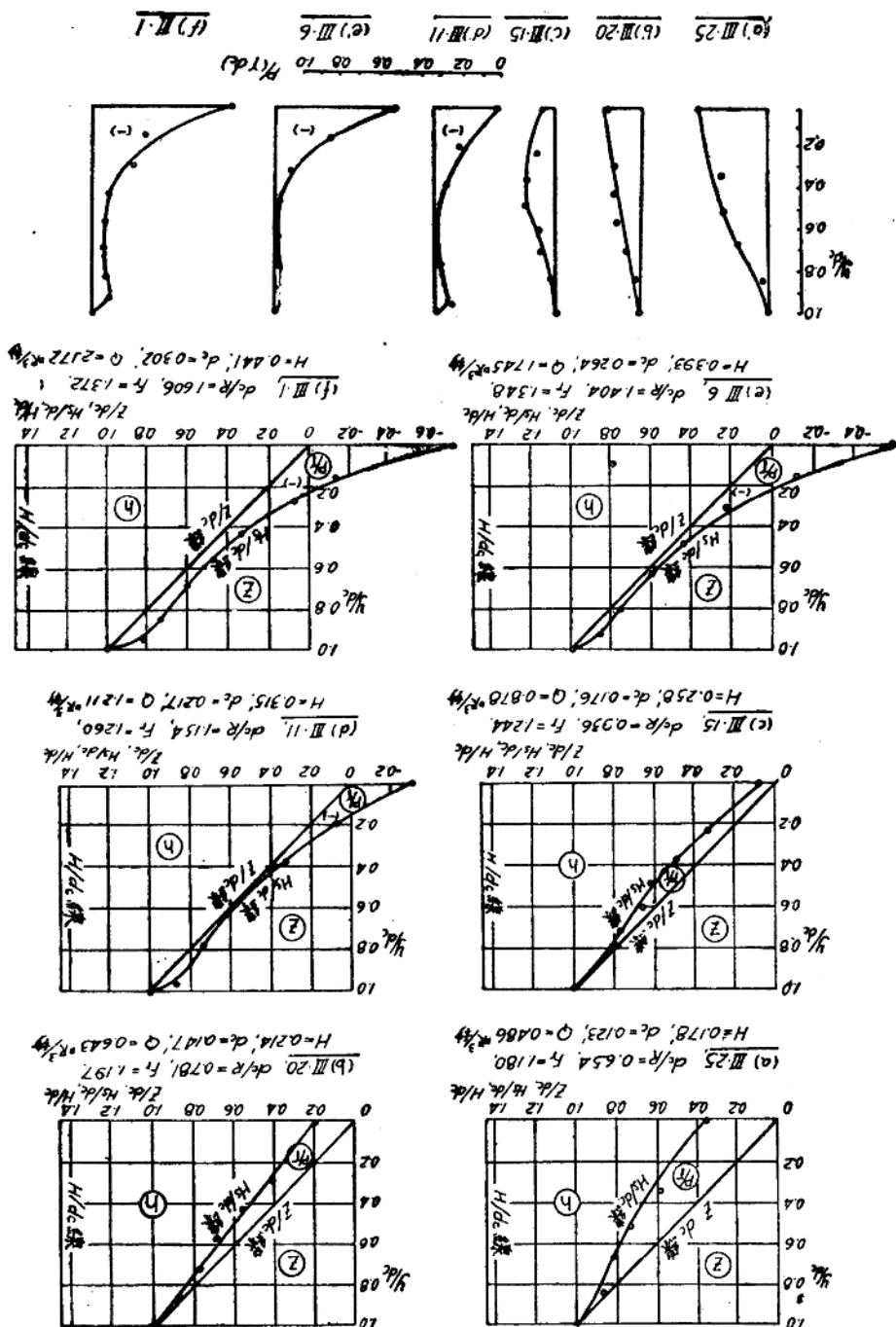
(c') II-17

(d') II-14

(e') II-15

(f') II-19

第6圖

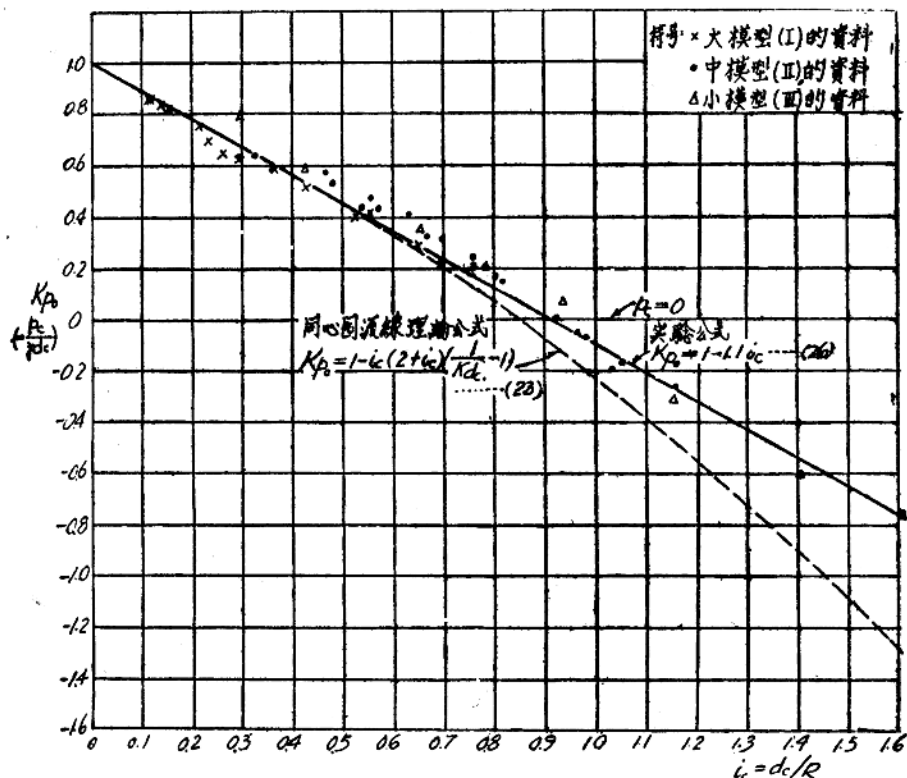


第7圖

第8圖所示，為壩峯C点的压力校正系数 K_{pc} 与曲率指数 $i_c = d_c/R$ 間的关系。圖中对于大、中、小三个模型的試驗成果，分別用不同的符号表示(第9~13圖同此)，依同心圓流綫所導得的 K_{pc} 理論算式(23)式)如圖中的虛綫。實驗點子在 $i_c \leq 0.8$ 時和(23)式的虛綫很接近， $0.8 < i_c < 1.6$ 之間的實驗點子和虛綫脫離，而全部點子得用一直綫通過，如圖中實綫，代表實綫的公式是：

$$K_{pc} = 1 - 1.1 i_c \quad (26)$$

即約當 $i_c = 0.9$ 時，壩峯C点的压力為0。三个模型的點子稍有分离趨勢，但不明顯。



第8圖

第9圖表示壩峯臨界水深隨曲率指數而改變的情形。圖(a)代表“ $K_{dc} \sim i_c$ ”关系，圖中虛綫為依同心圓流綫導得的理論算式，由(13)、(14b)兩式可得：

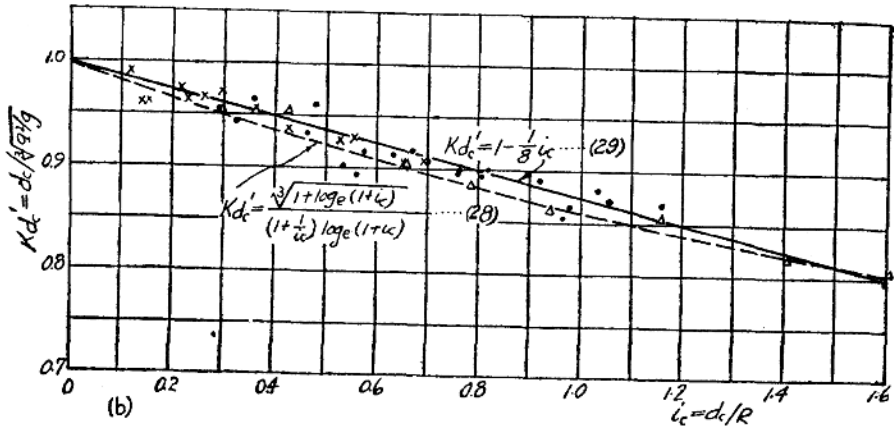
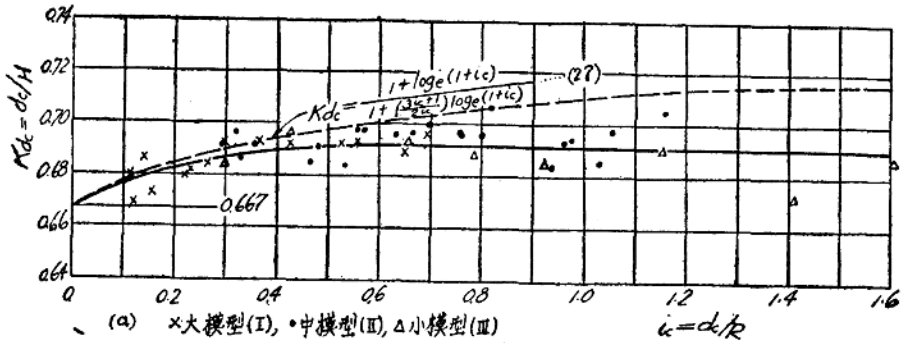
$$K_{dc} = \frac{d_c}{H} = \frac{1 + \log_e(1 + i_c)}{1 + \left(\frac{3i_c + 1}{2i_c}\right) \log_e(1 + i_c)} \quad (27)$$

實測點子和虛綫相差較大，但 K_{dc} 仍較 $2/3$ 為大，大部分點子在 $K_{dc} = 0.68 \sim 0.70$ 之間，在 $0.3 < i_c < 1.6$ 範圍內，可約略用 $K_{dc} = 0.69$ 來代表，如圖中實綫。圖(b)代表“ $K_{dc}' \sim i_c$ ”关系，圖中虛綫代表(13)、(18)二式合併所得的理論算式：

$$K_{d_c}' = \frac{d_c}{\sqrt[3]{q^2/g}} = \frac{\sqrt[3]{1 + \log_e(1 + i_c)}}{\left(1 + \frac{1}{i_c}\right) \log_e(1 + i_c)} \quad (28)$$

三个模型的实验点子和虚线很接近，为便利起见，得用直线通过，如图中实线所示，实线的公式为：

$$K_{d_c}' = 1 - \frac{1}{8} i_c \quad (29)$$



第9圖

第10圖所示为三种流量系数 K_q 、 K_q' 、 K_q'' 和 i_c 间的关系。圖(a)中虚线代表 K_q 的理论算式，見(13)式，实验点子和虚线尚接近，通过点子的实线可用下列经验公式代表：

$$K_q = 1 + 0.42 i_c - 0.10 i_c^2 \quad (30)$$

圖(b)中虚线代表 K_q' 的理论算式，將(13)式代入(16b)式后得：

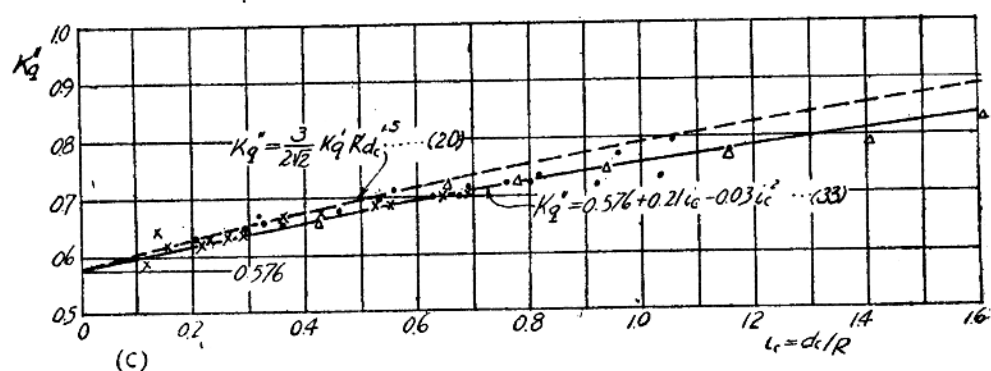
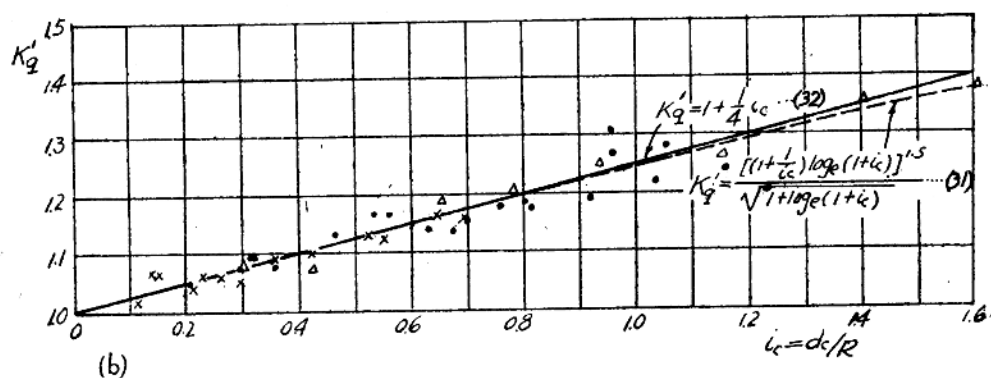
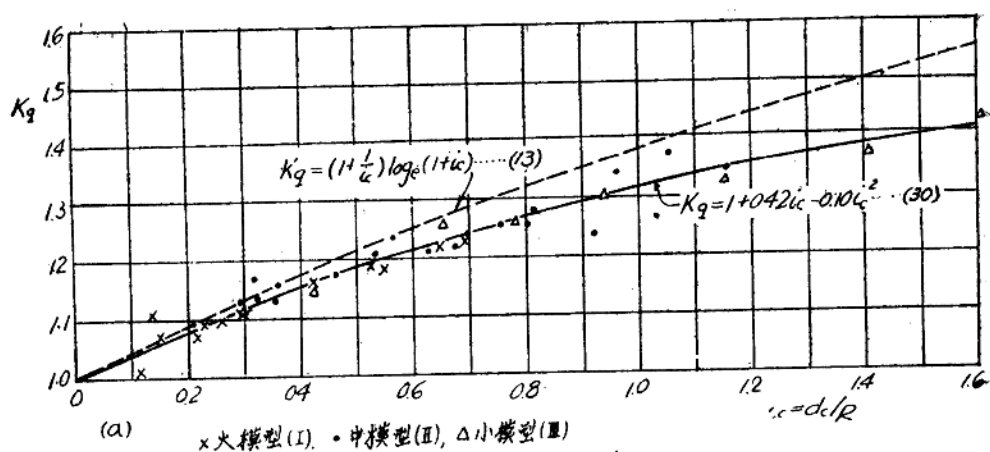
$$K_q' = \frac{\left[\left(1 + \frac{1}{i_c}\right) \log_e(1 + i_c)\right]^{1.5}}{\sqrt{1 + \log_e(1 + i_c)}} \quad (31)$$

实验点子和虚线也尚接近，圖中可用一直线来通过实验点子，直线的公式是：

$$K_q' = 1 + \frac{1}{4} i_c \quad (32)$$

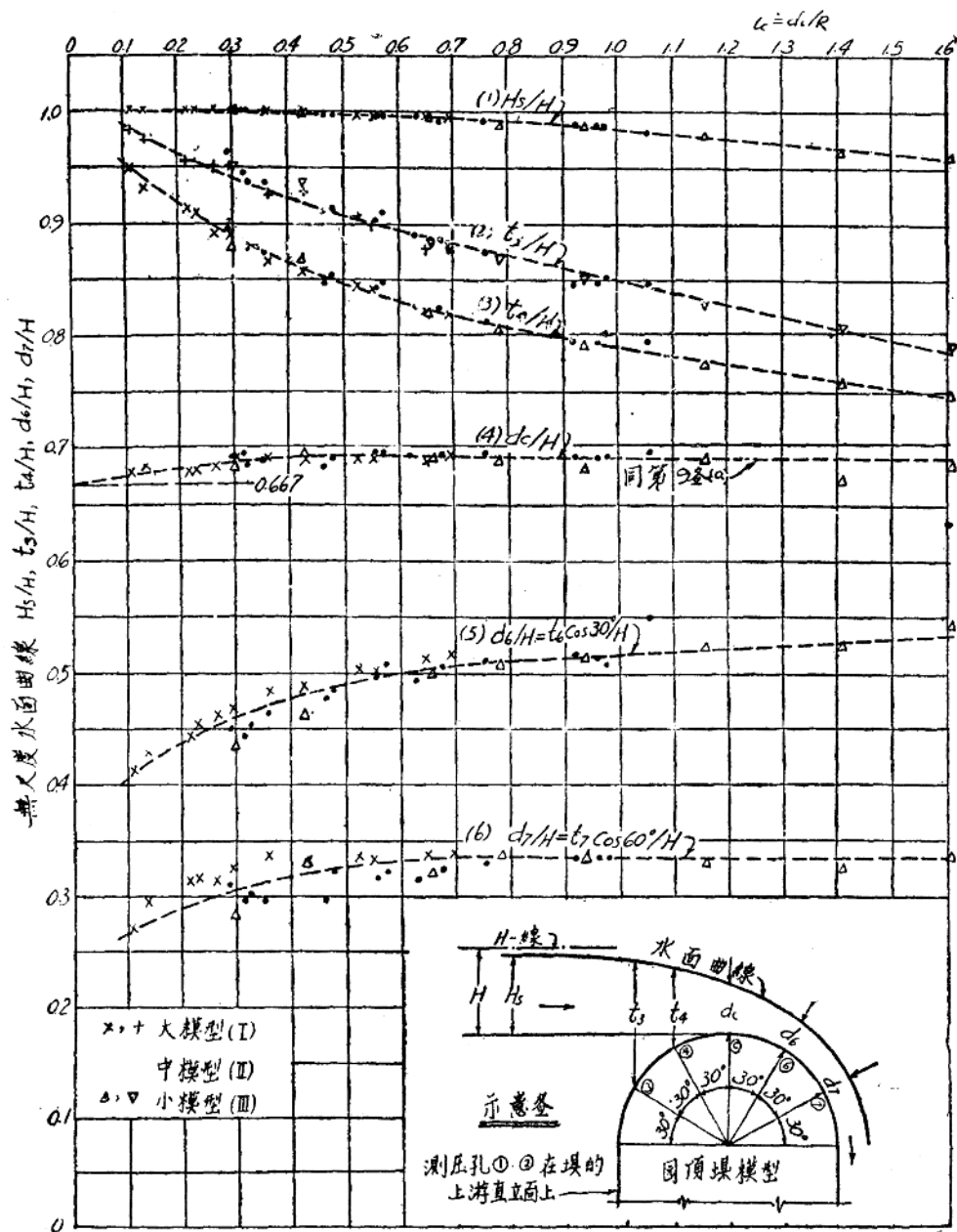
前已指明, K'_q 即为壅塞测线的临界傅劳特氏数, 其值大于 1。圖(c)的虛綫代表 K''_q 的理論算式——(20)式, 將(14b)、(31)兩式代入后可得函数式 $K''_q = f(i_c)$;
圖中实验点子尚接近于虛綫, 实綫的经验公式是:

$$K''_q = 0.576 + 0.21i_c - 0.03i_c^2 \quad (33)$$



第10圖

圓頂壩自由溢流的無尺度水面曲綫見第 11 圖，圖中 6 條曲綫分別代表 H_s/H 、 t_3/H 、 t_4/H 、 d_c/H 、 d_6/H 、 d_7/H 隨 i_c 而改變的情形，符號的說明見圖中所附的示意圖。大、中、小三個模型的試驗成果，尚屬彼此合致，但吻合的程度有所差異。曲



第 11 圖