

水利水电科学研究院

科学研究论文集

第 3 集

(水 工)

中国工业出版社



本书中共有11篇論文，內容都是涉及水工方面的。論及溢流坝、梯形挑流鼻坎、射流空中扩散、挑流冲刷、各型轉換段的減蝕几何形式、明流管道、不衬砌岩石隧洞、水工建筑物振动、虹吸溢道、矩形明渠弯道、电厂冷却池等方面的問題。所介紹的研究成果对于从事水工設計与科研的同志极有参考价值。

水利水电科学研究院
科学研究論文集
第 3 集
(水 工)

*

水利电力部办公厅图书編輯部編輯(北京阜外月坛南营房)
中国工业出版社出版(北京佟麟閣路丙10号)
(北京市书刊出版事业許可証出字第110号)
中国工业出版社第二印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印張 $13^{1/2}$ ·字数277,000
1963年11月北京第一版·1963年11月北京第一次印刷
印数0001—1,840·定价(10-7)1.90元

*

統一书号: 15165·2516(水电-332)

目 录

溢流坝水力特性的研究·····	龔振瀛 张有天(1)
梯形挑流鼻坎試驗研究報告·····	丁賢文(17)
射流空中扩散試驗研究初步报告·····	郭可詮 陈炳新 高又生 蔡逢春(31)
挑流冲刷若干問題的探討及冲刷深度估算公式的比較·····	朱荣林 蔡逢春(41)
各型轉換段的减蝕几何形式·····	肖天鐸(59)
明流管道通气量分析·····	高又生(93)
不衬砌岩石隧洞的摩阻損失·····	周 胜(109)
水工建筑物若干振動問題的分析·····	謝省宗(122)
空穴数对虹吸溢道水力特性影响的試驗研究·····	陈椿庭 严 振 陈 瑾(142)
矩形明渠弯道急流的研究·····	赵振国(164)
滄县冷却池研究·····	陈惠泉 岳鈞堂(196)

溢流坝水力特性的研究

龔振瀛 張有天

【提要】坝頂溢流因有曲率影响，不同于一般的陡槽或渠道水流，它的水力特性具有特殊的規律。关于这方面的研究已經有了不少成果。但以往的研究或者采用了一些簡化的假設，或者所研究的边界条件較为簡單，和实际情况有一定的差別。目前，流量系数和坝面压力都还没有实用的計算公式。

作者假定流綫曲率分布符合于 $\rho^* = R + my$ ，对基本公式进行了理論推导，得出了坝面压力分布、流速分布、坝頂水深以及流量系数等的計算公式；并对几种常見的溢流坝頂形状进行了試驗研究，求出了各种坝型的 m 值。試驗証明，計算結果接近于試驗数据。

一、引言

溢流坝是水利樞紐中重要的建筑物。洪水往往通过溢流坝宣泄至下游，从而保证了水利樞紐的安全。因之，对溢流坝的水力特性进行研究是十分必要的。溢流坝与一般的陡槽或渠道不同，它的水流边界是由垂直面的曲綫組成，水流受曲率影响，因而使問題大为复杂。过去已有不少学者对曲率的影响作过研究。如劳弗尔(H. Lauffer)提出了同心圆理論^[1]。陈椿庭从同心圆理論出发得出了圓頂坝水力特性的表达式，并对圓頂坝作了大量的試驗和分析研究^[2]。耶格(Ch. Jaeger)从一般情况出发来考虑曲率的影响，并对圆弧坝进行了某些研究^[3]。他們的研究都得出了一定的成果，在理論上有一定的意义。但是，他們大都研究边界条件較为簡單的頂部情况，和实际溢流坝的形状有一定的差別，所以，研究的成果还不能直接完滿地用于实际工程。目前在設計溢流坝頂时，無論是坝頂形状、流量系数还是坝面压力等一般都依賴試驗或經驗来决定。

这次研究的目的是，除了在理論分析方面作一些探討外，主要在于結合实际情况，对工程中常見的几种溢流坝頂型式进行試驗研究，初步得出决定坝面形状、流量系数和坝面压力的方法。在这方面今后还需要作进一步的研究。我們提出这个初步成果，是希望得到各方面提出的意見和指正，并提供設計者参考。

二、溢流坝水力特性的分析

对于一个已给定的溢流坝，其坝面上各点的曲率是已知的。沿溢流坝面下泄的水束，其下缘流线的曲率应与坝面曲率相同，因而也是已知的。但是，水束内部和自由表面的流线曲率分布是怎样的，还是一个理论上尚未解决的问题。为了能够进行理论分析，必须作出某些假设。最简单的假设是：在同一法线上各点流线的曲率半径皆等于坝面的曲率半径。这一假设只有当曲率和水深都较小的情况下才能应用；若运用至溢流坝顶，必将产生较大的误差。另外一个假设是同心圆理论，即假设流束法线上各点的流线具有同一曲率中心，亦即

$$\rho = R + y. \quad (1)$$

式中 ρ 为水束断面中在 y 处的流线曲率半径； R 为溢流坝坝面的曲率半径； y 为离坝面的法向距离。

同心圆理论较之等曲率假设是改进了一步。但是，根据文献〔2〕的试验资料，从这种理论导得的结果与试验数据也还有一定的出入。因而还是不够精确的。

现在我们主要参考文献〔3〕，就法线上各点流线曲率不作同心圆分布的一般情况，对溢流坝水力特性的关系进行推导。

考虑图1所示的恒定平面水流。设 x 、 y 为坝面任意点沿切线和法线方向的坐标轴。水束断面上 $A'A''$ 两点的压力差可表示为：

$$dp = \frac{\partial p}{\partial n} dn + \frac{\partial p}{\partial s} ds. \quad (2)$$

式中 dn 、 ds 分别为 $A'A'' = dy$ 在过 A 点流线的法线和切线方向的投影。

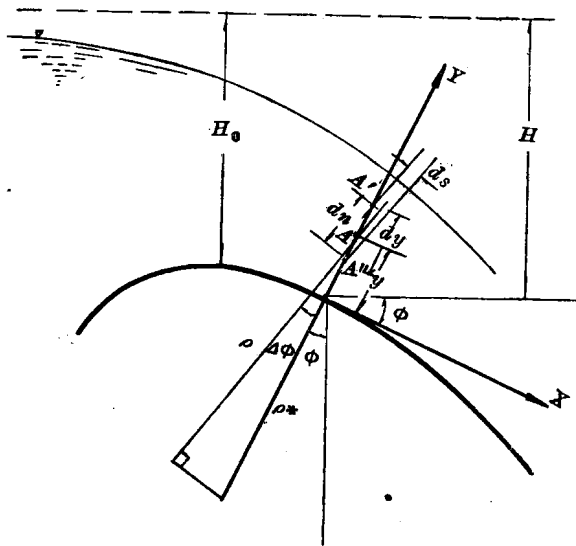


图1

假定沿程摩阻损失可以略去不计, 则沿一流线的伯努利能量方程式为:

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(y^* \cos \phi + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \right) = 0. \quad (3)$$

式中 ϕ 为坝面某点法线与铅垂线的交角; y^* 为通过 A 点的流线轨迹上各点的水深。

由式(3)得:

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial s} = -\sin \Delta \phi \cos \phi - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial s}. \quad (4)$$

沿法线方向的运动方程式为:

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{1}{g} \frac{v^2}{\rho} - \cos \Delta \phi \cos \phi. \quad (5)$$

因为 $\frac{\partial n}{\partial y} = \cos \Delta \phi$ 、 $\frac{\partial s}{\partial y} = \sin \Delta \phi$, 则由式(2)、(4)、(5)得:

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial y} = -\cos \phi - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial s} \sin \Delta \phi + \frac{1}{g} \frac{v^2}{\rho} \cos \Delta \phi. \quad (6)$$

对于势流有:

$$y \cos \phi + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \text{常数}. \quad (7)$$

将此式对 y 取导数得:

$$\cos \phi + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (8)$$

由式(6)和(8)消去 $\frac{\partial p}{\partial y}$ 可得:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\cos \Delta \phi}{\rho} + \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial y}, \quad (9)$$

又

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial y}, \quad (10)$$

故式(9)成为:

$$\frac{dv}{v} = -\frac{\cos \Delta \phi}{\rho} dy = -\frac{dy}{\rho^*}. \quad (11)$$

这就是水流受曲率影响的基本公式。式中 $\rho^* = \frac{\rho}{\cos \Delta \phi}$ 。

在这里, 我们引用下面的假定:

$$\rho^* = R + my. \quad (12)$$

式中 m 称为曲率系数, 对于不同的坝顶型式有不同的数值, 可由试验来决定。

将式(11)沿水深方向积分得:

$$v = C \left(\frac{1}{R + my} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (13)$$

式中积分常数可由水面条件决定。当 $y=h$ 时 $v_h = \sqrt{2g(H - h \cos \phi)}$ 。同时垂直断面上任一点的速度 $v = \sqrt{2g(H - p/\gamma - y \cos \phi)}$ 。最后得到断面流速分布规律为:

$$\frac{v}{v_h} = \left(\frac{R+mh}{R+my} \right)^{\frac{1}{m}} = \sqrt{\frac{H-p/\gamma-y\cos\phi}{H-h\cos\phi}}. \quad (14)$$

由此, 得到 p 、 v 和 q 的表达式为:

$$\frac{p}{\gamma} = (H-y\cos\phi) - (H-h\cos\phi) \left(\frac{R+mh}{R+my} \right)^{\frac{2}{m}}. \quad (15)$$

引入曲率指数 $i = \frac{h}{R}$, 则式(15)成为:

$$\frac{p}{\gamma} = (H-y\cos\phi) - (H-h\cos\phi) \left(\frac{1+mi}{1+mi\frac{y}{h}} \right)^{\frac{2}{m}}. \quad (16)$$

为了分析研究的方便, 把式(16)进一步化成:

$$\frac{p}{\gamma} = (h-y)\cos\phi + (H-h\cos\phi) \left[1 - \left(\frac{1+mi}{1+mi\frac{y}{h}} \right)^{\frac{2}{m}} \right]. \quad (17)$$

$$\text{令} \quad K_p = 1 - \left(\frac{1+mi}{1+mi\frac{y}{h}} \right)^{\frac{2}{m}}, \quad (18)$$

K_p 称为压力校正系数, 则

$$\frac{p}{\gamma} = (h-y)\cos\phi + (H-h\cos\phi)K_p. \quad (19)$$

在坝顶曲率为凸曲率的情况下, K_p 恒为负值。这说明压力 p/γ 必定小于静水压力 $(h-y)\cos\phi$; 并且当溢流坝顶上水头增加时, 坝面上的压力必定是降低的。只有当 $R=\infty$ 时, K_p 才为零。此时压力才符合静水压力的分布规律。

同样, 可把式(14)写成:

$$v = \sqrt{2g(H-h\cos\phi)} \left(\frac{1+mi}{1+mi\frac{y}{h}} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (20)$$

溢流坝单宽流量可由上式沿水深积分求得。设 $m \neq 1$:

$$q = \int_0^h v dy = \sqrt{2g(H-h\cos\phi)} \frac{1}{m-1} \left[R+mh - R \left(1 + \frac{1+h}{R} \right)^{\frac{1}{m}} \right], \quad (21)$$

$$q = \sqrt{2g(H-h\cos\phi)} \frac{R}{m-1} \left[(1+mi) - (1+mi)^{\frac{1}{m}} \right]. \quad (22)$$

可以简化成:

$$q = K'_q h \sqrt{2g(H-h\cos\phi)}. \quad (23)$$

式中 K'_q 称为流量系数,

$$K'_q = \frac{(1+mi)^{\frac{1}{m}}}{(m-1)i} \left[(1+mi)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]. \quad (24)$$

坝顶水深可应用通过最大流量的条件 $\frac{dq}{dh} = 0$ 求出:

$$h_c = \frac{m - (1 + m i_c)^{\frac{1-m}{m}}}{m - (1 + m i)^{\frac{1-m}{m}} + 0.5(m-1)K'_q} \quad (25)$$

用 $K_{h_c} = \frac{h_c}{H_0}$ 表示坝顶处相对临界水深系数，并作变换得：

$$K_{h_c} = \frac{2}{3} + \frac{i_c [m - (1 + m i_c)^{\frac{1-m}{m}}] + (m-1)K'_q}{3 \{ i_c [m - (1 + m i_c)^{\frac{1-m}{m}}] + 0.5(m-1)K'_q \}} \quad (26)$$

式中第二项为正值。由此得到 K_{h_c} 之值恒大于 $\frac{2}{3}$ 。这说明坝顶水深 $h_c > \frac{2}{3} H_0$ ，而对于流线无曲率的平行水流，如众所知， $K_{h_c} = \frac{2}{3}$ 。

通常坝顶流量采用下式表示：

$$q = K_q \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad (27)$$

式中流量系数

$$K_q = \sqrt{1 - K_{h_c}} \frac{K_{h_c}}{i_c(m-1)} \left[(1 + m i_c) - (1 + m i_c)^{\frac{1}{m}} \right] \quad (28)$$

K_q 之值与水深有关。在溢流坝顶水头增加时，流量系数也会随之增大。

三、試驗研究

試驗研究的目的有二：验证上节理论公式的正确性；求出各不同类型溢流坝的曲率系数 m 。

对于任何一个溢流坝，我們都可以假定沿全溢流坝面的 m 为一常数。这种假定是可以允许的。因为在坝顶以下部分，坝面的曲率半径 R 均甚大，而水深又在逐渐减小，此时 $\rho^* = R + my$ 的第二项只占很小的比重。为了方便，我們便假定坝顶以下部分与坝顶具有同一个 m 值。因之，我們便可通过試驗测出坝顶各项水力特性值，代入上节理论公式求出 m 。

坝顶边界上的压力公式可由式(17)化得：

$$\frac{p_0}{\gamma} = h_c + (H_0 - h_c) \left[1 - (1 + m i_c)^{\frac{2}{m}} \right] \quad (29)$$

令 $K_{p_0} = \frac{p_0}{\gamma} / h_c$ 为坝顶之压力校正系数，即

$$K_{p_0} = 1 + \left(\frac{H_0}{h_c} - 1 \right) \left[1 - (1 + m i_c)^{\frac{2}{m}} \right] \quad (30)$$

我們可以此式作为依据，从試驗資料中求出 m 值，再用其他水力特性的計算式来校核此 m 值。如果一个 m 值能够同时适合任意的 i_c 和各个公式，这就说明引用的假设 $\rho^* = R + my$ 是正确的。

显然, 各种不同类型的溢流坝因其顶部进口形状不同, 对流线曲率分布的影响也将各异。我们依照常用的溢流坝类型, 做了四个不同的模型(图2), 它可以概括一般的溢流坝坝顶类型。

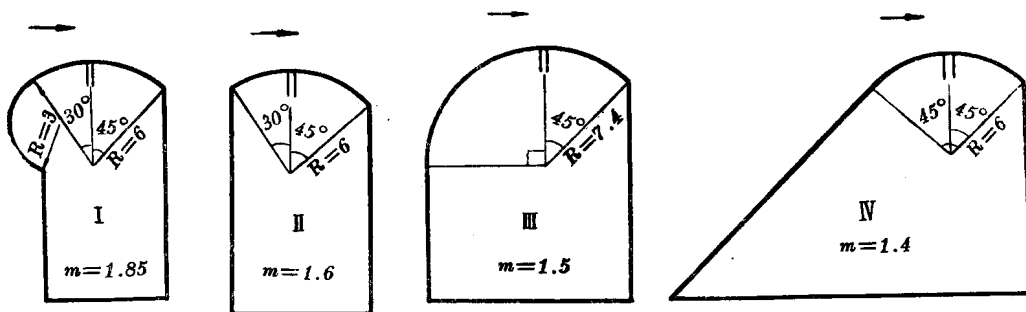


图2

(单位: 厘米)

试验结果证明了我们所推导公式的正确性, 也证明了进口形状不同, 对流线曲率分布的影响也不同, 因而 m 值也有所差异。

将试验结果绘成下面三组关系曲线:

$$K_{p_0} = f(i_c);$$

$$K_q = f(i_c);$$

$$K_{h_c} = f(i_c).$$

结果求出, 当 m 为下列各值时:

模型 I $m=1.85$;

模型 II $m=1.6$;

模型 III $m=1.5$;

模型 IV $m=1.4$,

试验点均非常接近理论曲线(图3、4、5、6)。

与此同时, 将文献[2]的圆顶坝试验资料和本文中模型 III(即 $m=1.5$) 进行比较, 试验点与本文的理论曲线甚为接近, 而与文献[2]中依据同心圆假设导出的理论曲线相差较大(图7)。

我们还引用了文献[2]的资料, 对坝顶断面的流速和压力沿水深的分布作了整理。其结果与本文理论曲线也很相近。

此外, 我们又设计了一个完整的溢流坝模型, 目的是为了验证坝面压力分布的理论公式。这个模型顶部为 95° 的圆弧, 是一种圆弧进口坝(图8)。试验结果发现, 由于坝顶下游部分的影响, 曲率系数 m 值比模型 III 提高了($m=1.7$), 并且 $K_{h_c} = f(i_c)$ 的试验点也比理论曲线抬高了, 它符合于新的试验关系:

$$K_{h_c} = 0.705.$$

除 K_{h_0} 外, K_{p_0} 与 K_q 的試驗点与理論曲綫仍然非常接近(图 9)。

在坝面不同位置的五个测压管所测到的坝面压力与計算所得压力值也很相近(图10)。因之,說明本文所得出的表达式是正确的。

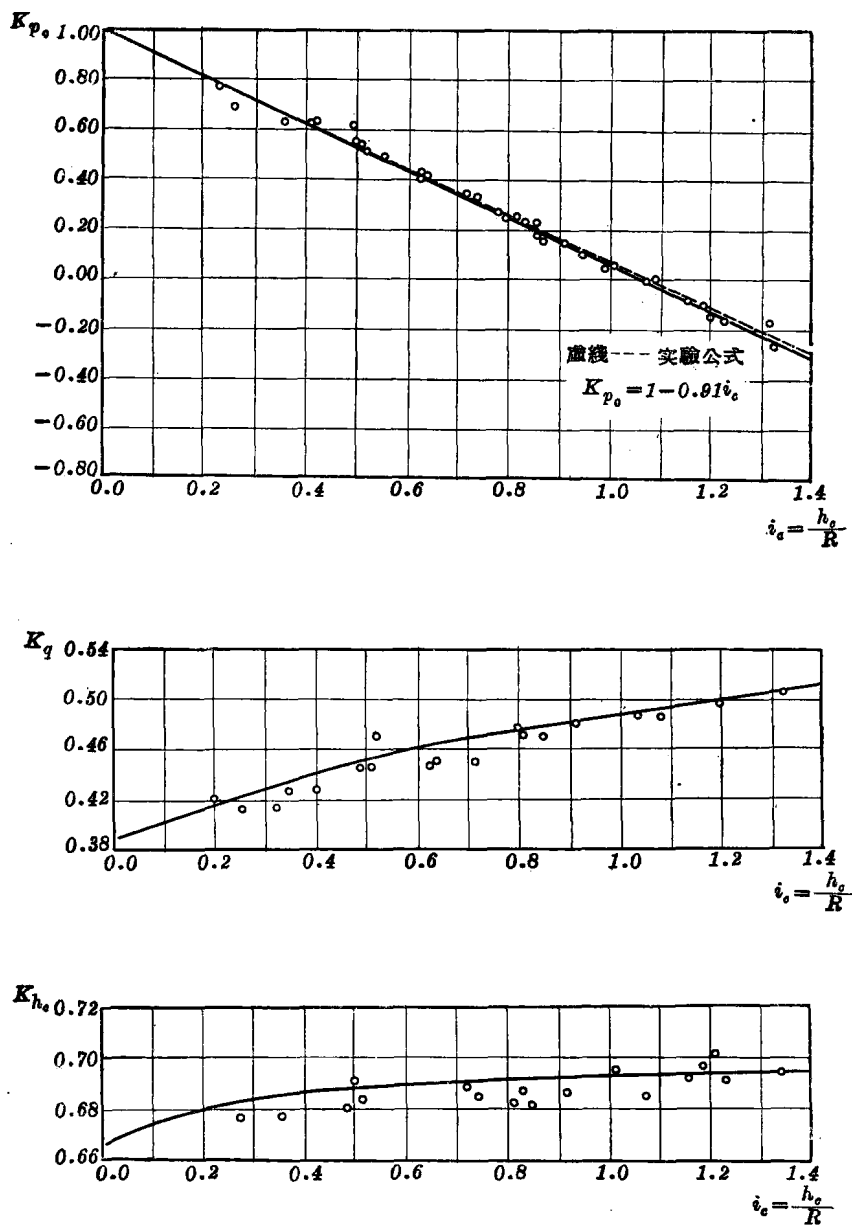


图 3

模型 I $m=1.85$

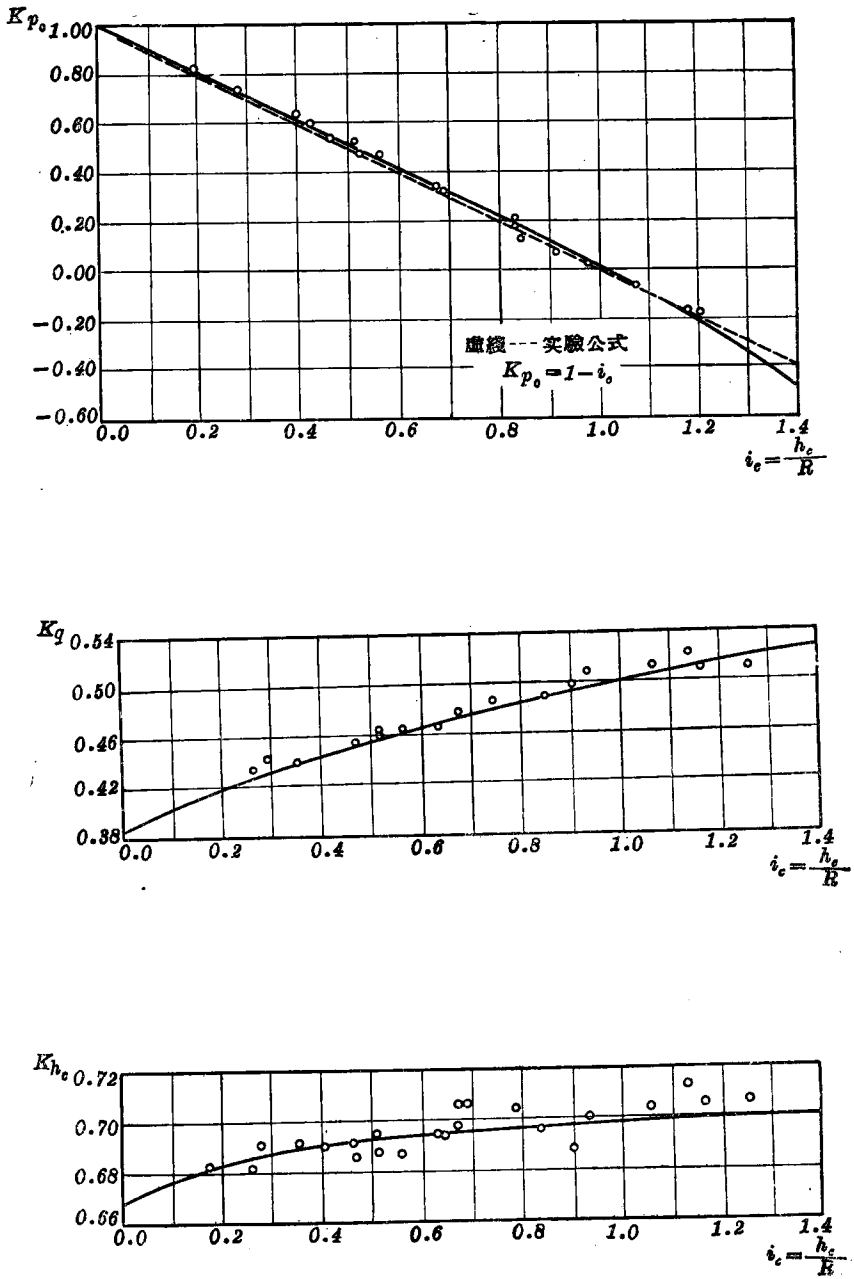


图 4

模型 II $m=1.6$

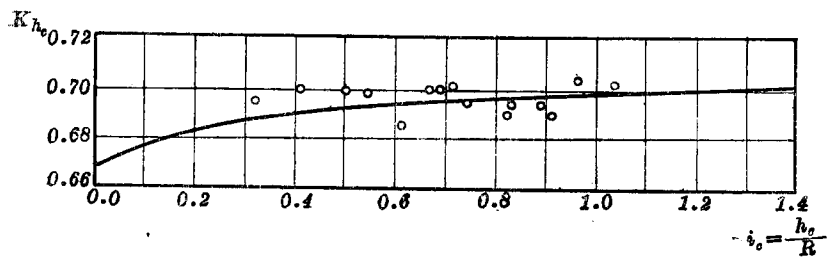
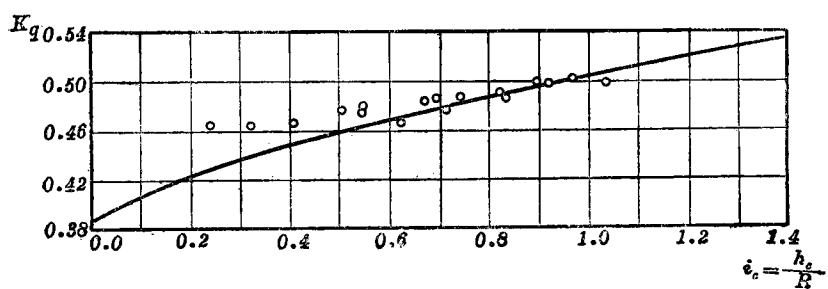
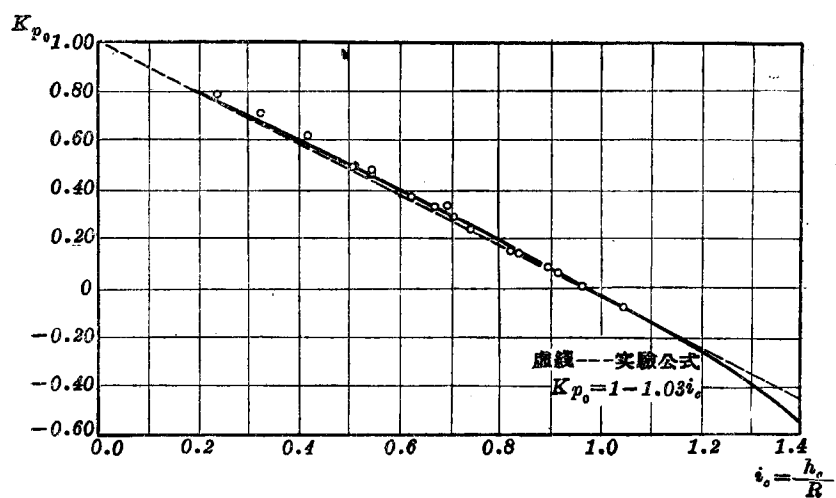


图 5
 模型 III $m=1.5$

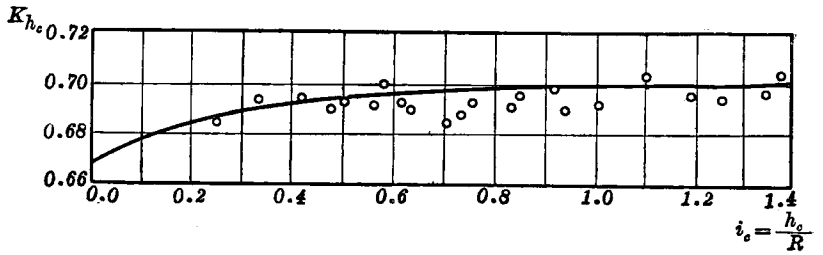
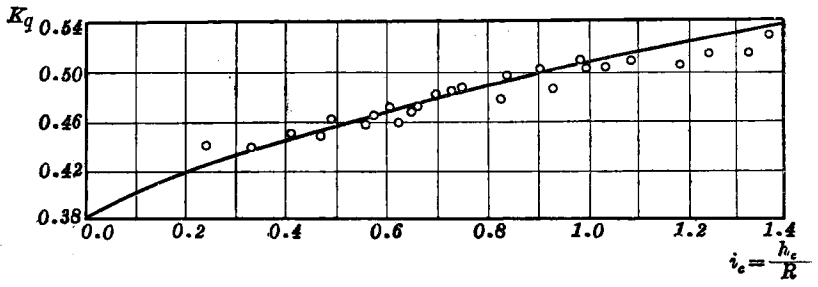
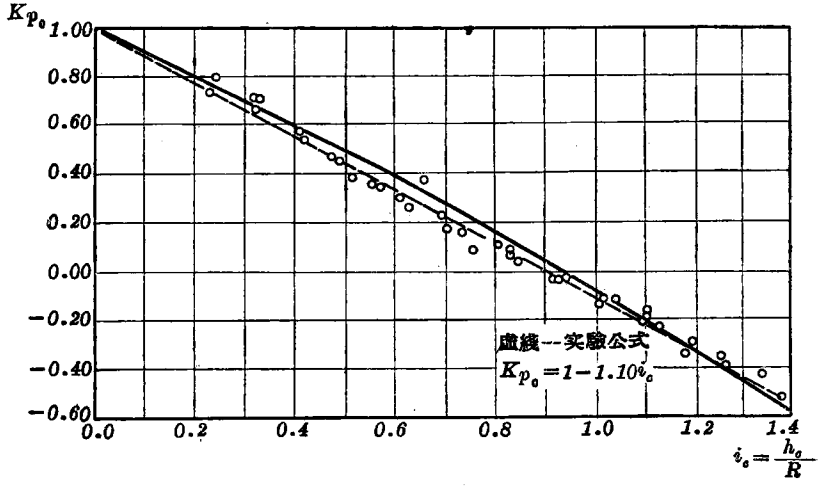


图 6

模型 IV $m=1.4$

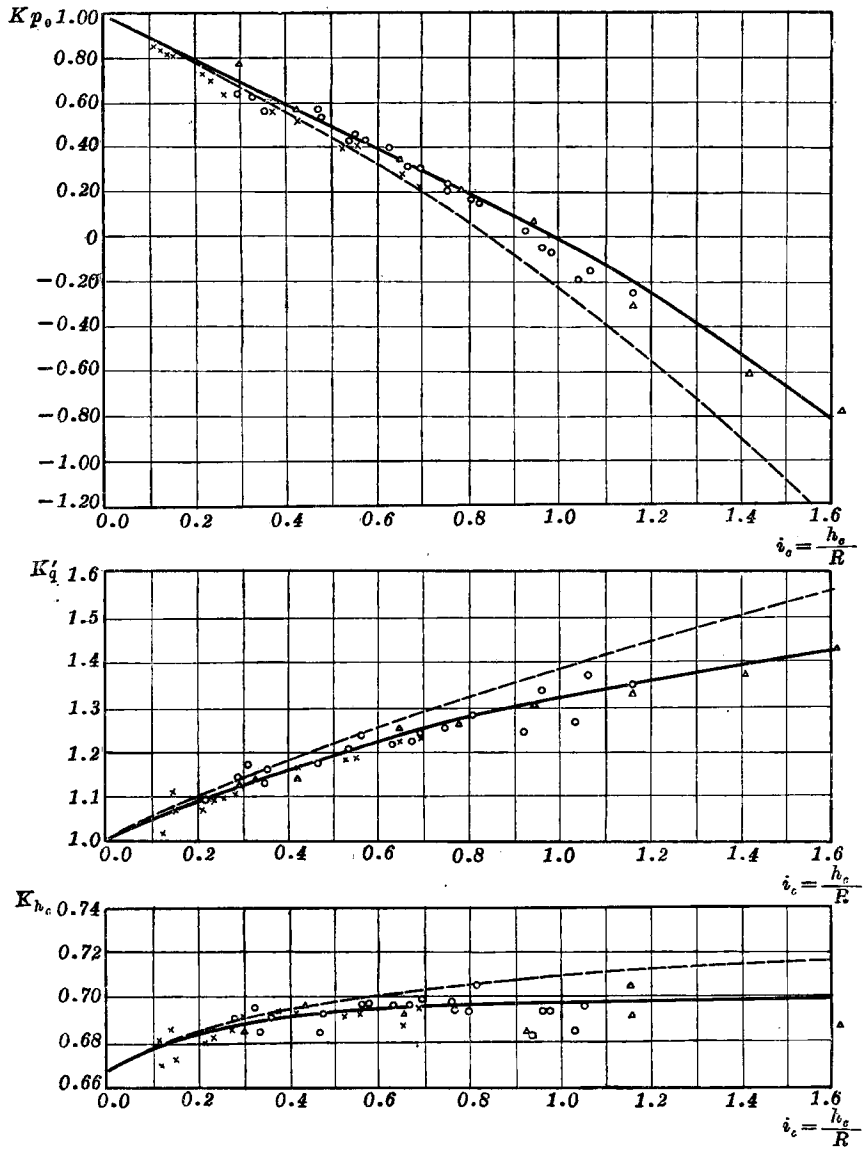


图 7

实线——理论公式($m=1.5$)

$$K_{p0} = 1 + \left(\frac{1}{K_{h_c}} - 1 \right) \left[1 - (1 + m i_c)^{\frac{2}{m}} \right] \quad (30')$$

$$K'_q = \frac{(1 + m i_c)^{\frac{1}{m}}}{(m-1) i_c} \left[(1 + m i_c)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] \quad (24)$$

$$K_{h_c} = \frac{2}{3} + \frac{i_c \left[m - (1 + m i_c)^{\frac{1-m}{m}} \right] + (m-1) K'_q}{3 \left\{ i_c \left[m - (1 + m i_c)^{\frac{1-m}{m}} \right] + 0.5(m-1) K'_q \right\}} \quad (26)$$

虚线——同心圆理论公式^[2]

$$K_{p0} = 1 - i_c(2 + i_c) \left(\frac{1}{K_{h_c}} - 1 \right)$$

$$K'_q = \left(1 + \frac{1}{i_c} \right) \log_e(1 + i_c)$$

$$K_{h_c} = \frac{1 + \log_e(1 + i_c)}{1 + \left(\frac{3i_c + 1}{2i_c} \right) \log_e(1 + i_c)}$$

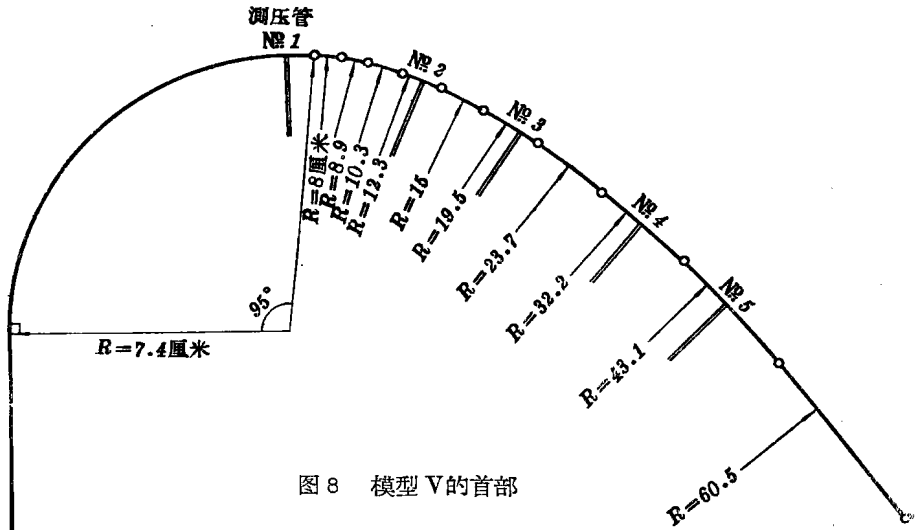


图8 模型V的首部

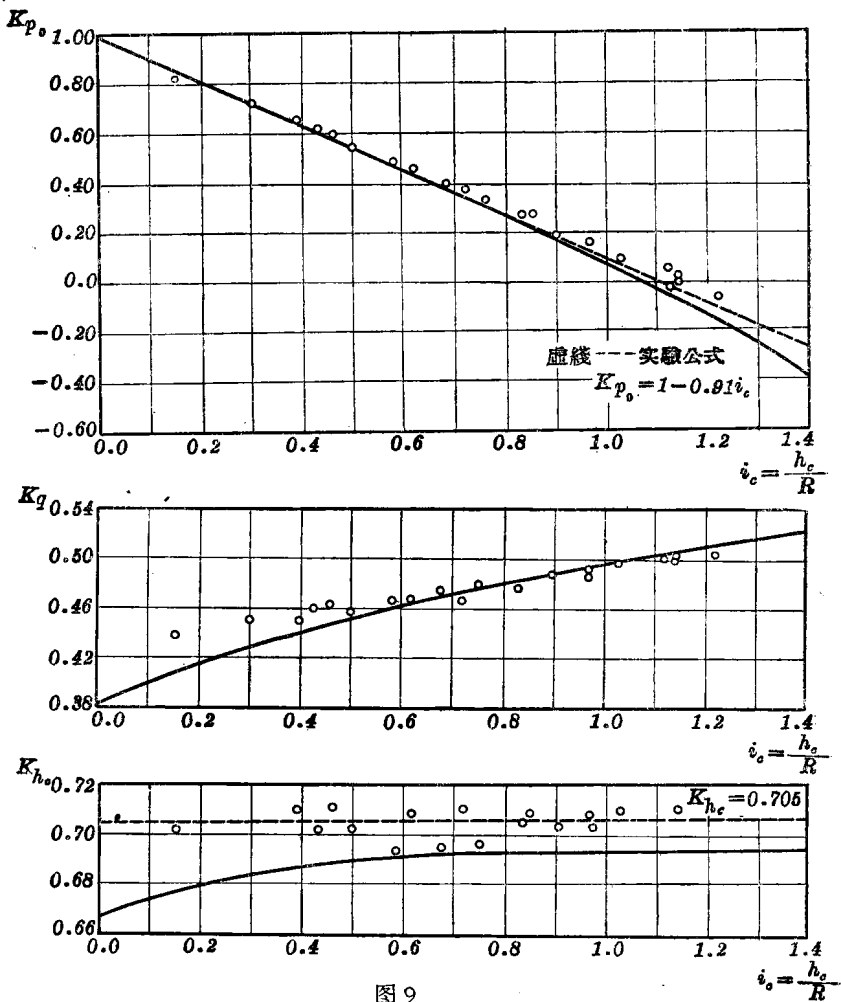


图9
模型V $m=1.7$

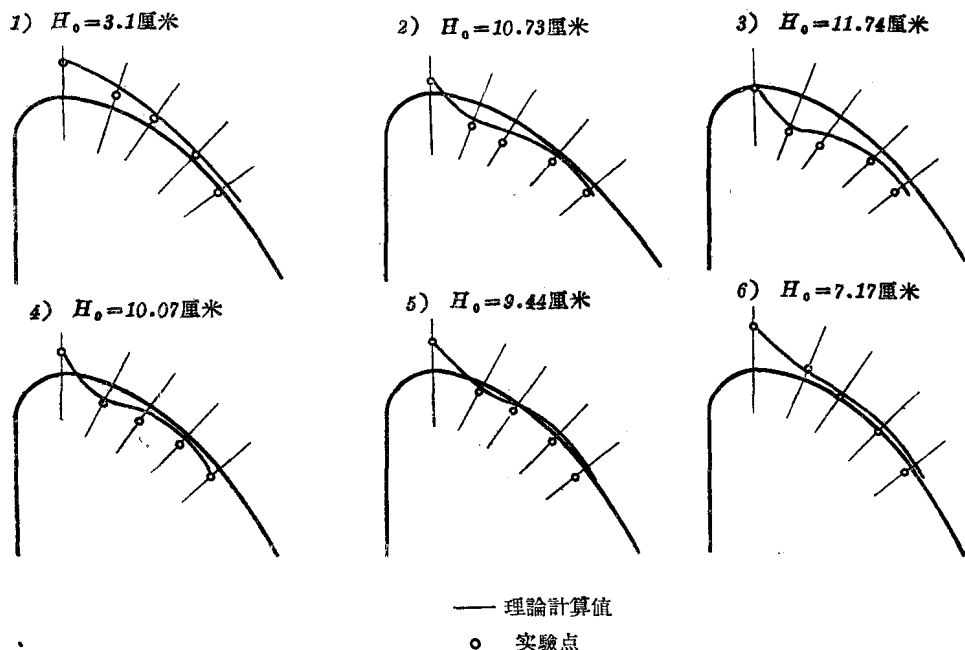


图10 坝面压力分布图

四、关于理論公式的实际应用的一些說明

1. 溢流坝等压坝面曲綫的决定

由式(15)可解得坝面曲率半徑 R 的表达式:

$$R = \frac{mh}{\left(\frac{H - p_0/\gamma}{H - h \cos \phi}\right)^{\frac{m}{2}} - 1} \quad (31)$$

这就是决定等压坝面曲綫依据的公式。对于某一給定的設計水头和給定的坝面压力，就可以求得相应的坝面曲率值。

設图 11 为一等压坝面曲綫(对某一設計水头而言)，則依曲率的定义:

$$\frac{1}{R} = \frac{d\phi}{ds},$$

且 $\frac{dy}{ds} = \sin \phi$; $\frac{dx}{ds} = \cos \phi$ 。由此可以得到 $dy = R \sin \phi d\phi$, 和 $dx = R \cos \phi d\phi$ 。代入式(31), 可以把 R 化为 ϕ 的函数关系式, 通过对上式的积分, 然后消去参数 ϕ , 便可得到等压坝面曲綫的方程式 $y = f(x)$ 。但因 R 的关系式甚为复杂, 这个积

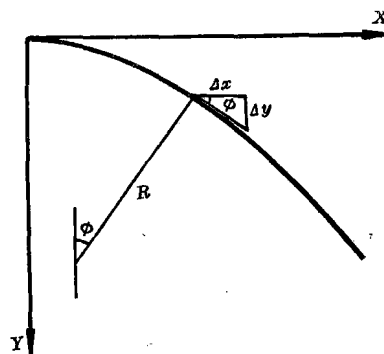


图 11

分很难得出简单的结果。因此，设计等压坝面线只能采用近似的方法。

坝顶曲率 R_c 的公式为：

$$R_c = \frac{mh_c}{\left(\frac{H_0 - p_0/\gamma}{H_0 - h_c}\right)^{\frac{m}{2}} - 1} \quad (32)$$

由前节的试验成果可知， K_{h_c} 大致为一常数($K_{h_c} = 0.705$)。因此，以 $h_c = 0.705H_0$ 代入上式即可求出 R_c 。用这一 R_c 为半径向下游画一中心角为 $\Delta\phi$ 的圆弧(图12)，此圆弧终点的坐标为：

