

水利水电科学研究所

# 科学研究论文集

第 7 集

(水力学、冷却水)



水利出版社

水利水电科学研究院

# 科学研究论文集

第 7 集

(水力学、冷却水)

水利出版社

## 内 容 提 要

本书共有十三篇论文, 内容包括: 溢流坝底孔及圆弧弓形突体的空穴水流, 混凝土抗空蚀性能, 弧门的水弹性震动, 急流脉动压力, 进水口的压力分布及漩涡特性, 水库风成波, 潮波的电模拟计算, 以及火电厂的温差出流掺混和冷却水的平面流动问题。

本书可供水利水电和火电站冷却水方面的科研和设计人员阅读, 也可供大专院校有关专业的师生参考。

水利水电科学研究院

科学研究论文集

第 7 集

(水力学、冷却水)

水利水电科学研究院编

\*

水利出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 13 $\frac{7}{8}$ 印张 313千字

1982年8月第一版 1982年8月北京第一次印刷

印数 0001—2900册 定价 1.45元

书号 15047·4203

## 编者说明

我院自1963年8月至1965年7月由中国工业出版社出版了《水利水电科学研究院科学研究论文集》共六集（第1集 土工，第2集 水文、河渠，第3集 水工，第4集 灌溉、排水，第5集 结构、材料，第6集 土工）。第7集（水力学、冷却水）曾于1966年完成排版清样，后因故未能付印出版。

现我院决定自1982年起继续出版我院科学研究论文集。为了使过去的科研成果仍可供参考，第7集（水力学、冷却水）以1966年清样为基础，由作者重新做了整理加工，并增加了近期的科研成果，补充了最新的文献。第8集、第9集…等的出版日期及内容，请见《科技新书目》的预告。

水利水电科学研究院

1981年10月

## 目 录

|                                       |                         |
|---------------------------------------|-------------------------|
| 沿圆弧弓形和半弓形突体的水流压力分布和初生空穴数·····         | 许协庆 周 胜 ( 1 )           |
| 盐锅峡溢流坝底孔空穴水流模型试验研究·····               | 严 振 刘长庚 段京生 ( 14 )      |
| 混凝土抗空蚀性能的研究·····                      | 姜福田 陈 瑾 ( 40 )          |
| 有关急流脉动压力的一些研究·····                    | 李桂芬 周 胜 哈焕文 ( 53 )      |
| 下沉式弧门三维水弹性振动的计算方法·····                | 肖天铎 ( 66 )              |
| 二元圆弧及椭圆进水口的压力分布·····                  | 许协庆 赵振国 ( 84 )          |
| 方形及矩形进水口的压力分布·····                    | 朱 咸 章福仪 丁灼仪 ( 98 )      |
| 进水口漩涡特性的初步试验 ·····                    | 夏毓常 许秀芸 丁灼仪 程丽英 ( 123 ) |
| 胶木滑道摩擦系数试验研究 ·····                    | 朱仲铭 ( 133 )             |
| 考虑地转影响的二维潮波变形电模拟计算 ·····              | 赵世俊 ( 147 )             |
| 水库风壅水面及风成波的试验研究 ·····                 | 李桂芬 倪浩清 ( 157 )         |
| 二元温差出流掺混问题 ( 无限水深 ) 的研究 ·····         | 陈惠泉 陈燕茹 ( 172 )         |
| 河道冷却水平面流动问题的研究 ·····                  | 陈惠泉 许玉麟 ( 197 )         |
| 附录《水利水电科学研究院科学研究论文集》第 1 ~ 6 集目录 ····· | ( 215 )                 |



# 沿圆弧弓形和半弓形突体的水流 压力分布和初生空穴数\*

许协庆 周 胜

**【提要】** 本报告首先简要地介绍了如何利用已知的势流分析方法来计算沿明渠渠底及管道边墙上的圆弧弓形和半弓形突体的压力分布。在不同相对突体高度和圆弧半径的条件下计算了压力分布和最小压力系数。不减压下的明渠和管道压力分布试验结果和计算值符合尚好。最后给出根据计算值绘制的最小压力系数  $C_{p_{min}}$  和突体半径的关系曲线。因半径较大的突体非常接近流线体,所以  $-C_{p_{min}}$  和初生空穴数  $K_i$  是很接近的,这一点也被在变压水洞中进行的试验所证明。最后建议,在有关三角形和斜坎突体的资料还不完全以前,可利用圆弧弓形和半弓形突体的资料来估算初生空穴数。

## 一、概 述

当水流经过边界的不平整处时,可能因局部压力过低而发生空穴,甚至引起空蚀破坏。在水工建筑物的建造过程中,施工面积很大,要求把所有的混凝土表面都做得非常平滑是不现实的。因此便产生了根据什么条件来控制平整度的问题。目前研究这一问题的途径是求出不同形状突体的初生空穴数,施工时注意使突体的初生空穴数不大于水流空穴数。

边墙和坝面的突体具有各种不同且不规则的形状。为设计和施工单位提供一般数据时只能对几种典型的形状进行研究。突体外形为曲线时可近似地引用圆弧弓形和半弓形突体的数据,突体由折线组成时,则可用三角形或斜坡形突体的数据。本文仅包括管道和明渠的弓形和半弓形突体的资料,但在最后介绍了如何利用已有资料估计等腰三角形突体和斜坡突体的初生空穴数。

管道中弓形和半弓形突体的最小压力系数值,以前曾有报导[1]。本文补充了计算数据和初生空穴数的试验数据。关于明渠底部同样形式突体的研究见文献[2]。该文著者分析弓形突体的最小压力时假定流线为圆弧,但所得数值和试验数据有一定的差距;原文中试验资料虽多,但未系统整理亦未计算最小压力系数。为了利用这些资料和以下的计算结果验证,我们根据文献[2]的原始资料重新计算,结果见表1。形式F、G、H、I、J、K为弓形突体,R、△分别代表突体的半径和高度,前四种的试验系在6英寸宽(实

\* 北京大学吴声韵同学参加了明渠弓形突体的计算工作,王优强同志参加了试验工作。

表 1

## 明渠渠底圆弧弓形和半弓形突体的最小压力系数

(原始数值取自文献[2]第148、158页)

| 形 式                   |                | 组次 | 中线水深<br>$H$<br>(英尺) | $R/\Delta$ | $H/\Delta$ | 平均流速<br>$q_0$<br>(英尺/秒) | $p_{min}-H$<br>(英尺, 水柱) | $C_p =$<br>$(p_{min}-H)/\frac{\rho q_0^2}{2}$ | 试 验 设 备                    |
|-----------------------|----------------|----|---------------------|------------|------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| 弓<br>形<br>突<br>体      | F              | 22 | 0.211               | 48.2       | 5.09       | 14.51                   | -0.553                  | -0.169                                        | 6 英寸宽明渠<br>(实宽0.494<br>英尺) |
|                       |                | 23 | 0.326               | 48.2       | 7.86       | 13.47                   | -0.589                  | -0.208                                        |                            |
|                       |                | 24 | 0.327               | 48.2       | 7.89       | 11.32                   | -0.411                  | -0.207                                        |                            |
|                       |                | 25 | 0.331               | 48.2       | 7.98       | 9.40                    | -0.298                  | -0.217                                        |                            |
|                       |                | 26 | 0.214               | 48.2       | 5.16       | 8.69                    | -0.212                  | -0.181                                        |                            |
|                       |                | 27 | 0.210               | 48.2       | 5.06       | 6.72                    | -0.110                  | -0.157                                        |                            |
|                       |                | 28 | 0.103               | 48.2       | 2.48       | 14.88                   | -0.313                  | -0.091                                        |                            |
|                       |                | 29 | 0.110               | 48.2       | 2.65       | 10.59                   | -0.214                  | -0.123                                        |                            |
|                       |                | 30 | 0.114               | 48.2       | 2.75       | 6.91                    | -0.099                  | -0.132                                        |                            |
|                       | G              | 31 | 0.098               | 24.0       | 2.35       | 8.11                    | -0.170                  | -0.167                                        |                            |
|                       |                | 32 | 0.099               | 24.0       | 2.37       | 11.71                   | -0.344                  | -0.161                                        |                            |
|                       |                | 33 | 0.100               | 24.0       | 2.40       | 15.29                   | -0.551                  | -0.152                                        |                            |
|                       |                | 34 | 0.200               | 24.0       | 4.80       | 7.07                    | -0.184                  | -0.237                                        |                            |
|                       |                | 35 | 0.212               | 24.0       | 5.09       | 8.73                    | -0.318                  | -0.269                                        |                            |
|                       |                | 36 | 0.206               | 24.0       | 4.93       | 15.00                   | -0.889                  | -0.254                                        |                            |
|                       |                | 37 | 0.417               | 24.0       | 10.00      | 6.91                    | -0.245                  | -0.330                                        |                            |
|                       |                | 38 | 0.426               | 24.0       | 10.23      | 8.20                    | -0.377                  | -0.360                                        |                            |
|                       |                | 39 | 0.395               | 24.0       | 9.49       | 10.83                   | -0.585                  | -0.320                                        |                            |
|                       | H              | 40 | 0.388               | 24.0       | 4.67       | 10.70                   | -0.446                  | -0.250                                        |                            |
|                       |                | 41 | 0.432               | 24.0       | 5.19       | 7.94                    | -0.301                  | -0.308                                        |                            |
|                       |                | 42 | 0.420               | 24.0       | 5.05       | 6.90                    | -0.200                  | -0.270                                        |                            |
|                       |                | 43 | 0.207               | 24.0       | 2.49       | 14.81                   | -0.521                  | -0.153                                        |                            |
|                       |                | 44 | 0.218               | 24.0       | 2.62       | 8.44                    | -0.202                  | -0.182                                        |                            |
|                       |                | 45 | 0.216               | 24.0       | 2.59       | 6.52                    | -0.095                  | -0.144                                        |                            |
|                       |                | 46 | 0.094               | 24.0       | 1.13       | 16.26                   | -0.190                  | -0.046                                        |                            |
|                       |                | 47 | 0.107               | 24.0       | 1.29       | 10.94                   | -0.147                  | -0.079                                        |                            |
|                       |                | 48 | 0.094               | 24.0       | 1.13       | 8.45                    | -0.063                  | -0.057                                        |                            |
|                       | I              | 49 | 0.104               | 12.0       | 2.50       | 7.72                    | -0.328                  | -0.354                                        |                            |
|                       |                | 50 | 0.099               | 12.0       | 2.38       | 11.76                   | -0.693                  | -0.324                                        |                            |
|                       |                | 51 | 0.093               | 12.0       | 2.23       | 16.40                   | -1.122                  | -0.270                                        |                            |
|                       |                | 52 | 0.213               | 12.0       | 5.12       | 6.65                    | -0.283                  | -0.413                                        |                            |
|                       |                | 53 | 0.209               | 12.0       | 5.01       | 8.79                    | -0.535                  | -0.450                                        |                            |
|                       |                | 54 | 0.208               | 12.0       | 5.00       | 16.00                   | -1.640                  | -0.413                                        |                            |
|                       |                | 55 | 0.410               | 12.0       | 9.87       | 7.11                    | -0.383                  | -0.488                                        |                            |
|                       |                | 56 | 0.419               | 12.0       | 10.09      | 8.19                    | -0.578                  | -0.556                                        |                            |
|                       |                | 57 | 0.391               | 12.0       | 9.42       | 10.62                   | -0.881                  | -0.503                                        |                            |
|                       | J              | 61 | 1.890               | 12.0       | 45.5       | 4.87                    | -0.263                  | -0.715                                        | 1 英尺宽明渠                    |
|                       |                | 62 | 1.696               | 12.0       | 40.7       | 8.07                    | -0.543                  | -0.537                                        |                            |
|                       |                | 63 | 1.715               | 12.0       | 41.2       | 13.29                   | -1.440                  | -0.526                                        |                            |
|                       |                | 64 | 1.373               | 12.0       | 33.0       | 4.16                    | -0.202                  | -0.752                                        |                            |
|                       |                | 65 | 0.969               | 12.0       | 23.2       | 10.29                   | -0.930                  | -0.563                                        |                            |
|                       |                | 66 | 0.522               | 12.0       | 12.6       | 7.81                    | -0.542                  | -0.571                                        |                            |
|                       | K <sup>①</sup> | 67 | 0.741               | 12.0       | 17.8       | 8.80                    | -0.573                  | -0.478                                        |                            |
|                       |                | 68 | 1.185               | 12.0       | 28.5       | 9.89                    | -0.682                  | -0.452                                        |                            |
| 半<br>弓<br>形<br>突<br>体 | M              | 72 | 1.224               | 12.0       | 29.5       | 7.63                    | -0.257                  | -0.284                                        |                            |
|                       |                | 73 | 1.210               | 12.0       | 29.1       | 9.36                    | -0.352                  | -0.261                                        |                            |
|                       |                | 74 | 1.218               | 12.0       | 29.3       | 13.00                   | -0.720                  | -0.274                                        |                            |

① K型突体仅宽6英寸, 放在槽中央。

宽0.494英尺)明渠内进行,后二种在1英尺宽明渠中进行。 $M$ 为半弓形突体,其试验在1英尺宽明渠中进行。符号 $H$ 代表水深,试验中发现水深沿程变化甚小,表中所列为平均值。弓形突体的最小压力发生在22点,用 $p_{min}$ 代表,其他各点的压力值未列入表内。半弓形突体的最小压力发生在最高点的上游,也用 $p_{min}$ 代表。根据水深和流量算出的平均流速用 $q_0$ 表示。计算所得的最小压力系数和 $R/\Delta$ 的关系见图1,因原试验的 $H/\Delta$ 值未很好控制为整数,图中只能给出其变化范围。 $H/\Delta$ 愈小(水愈浅)—— $C_{p_{min}}$ 愈小,趋势和下面的计算结果相符。半弓形的资料只有一点,附于图6中。以下介绍本研究所进行的计算和试验。

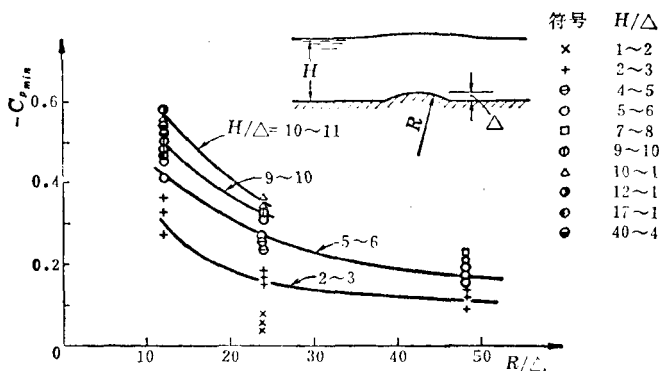


图1 明渠圆弧弓形突体的最小压力系数与 $R/\Delta$ 的关系曲线

(文献[2]资料分析结果)

## 二、分析和计算方法

本文所要分析的为图2所示的四种势流问题。引入复势 $W = \Phi + i\Psi$ ,  $\Phi$ 为流速势,  $\Psi$ 为流函数,在流动平面中 $z = x + iy$ ,则

$$\frac{dW}{dz} = u - iv = qe^{-i\theta} \quad (1)$$

式中  $u$ 、 $v$  ——沿 $x$ 、 $y$ 方向的分速;

$q$  ——流速;

$\theta$  ——流速方向和 $x$ 轴之间的夹角。

引入复变数 $\tau$ ,其定义为

$$\tau = \ln\left(U \frac{dz}{dW}\right) = \ln \frac{U}{q} + i\theta = \Omega + i\theta \quad (2)$$

式中  $U$  ——上游无穷远处之流速。

因 $W$ 为 $z$ 之解析函数, $\tau$ 亦为 $W$ 之解析函数,问题可化为在 $W$ 平面内求解 $\tau$ 值。求解方法见文献[3],本文不详细介绍其推导过程。



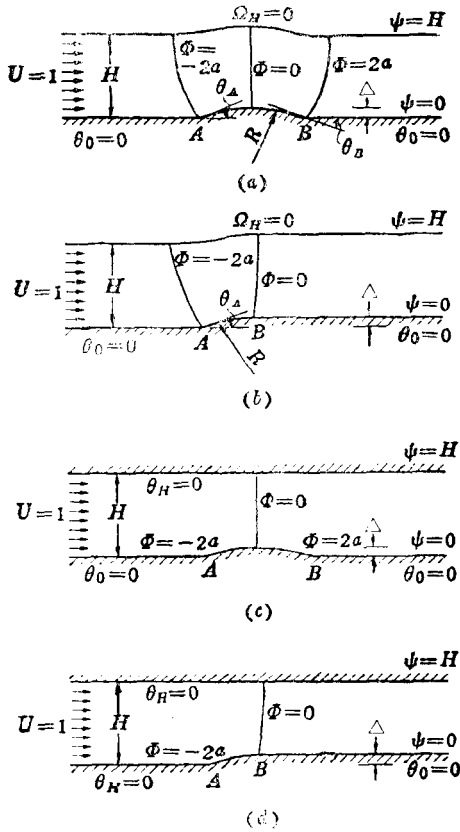


图 2 流动平面

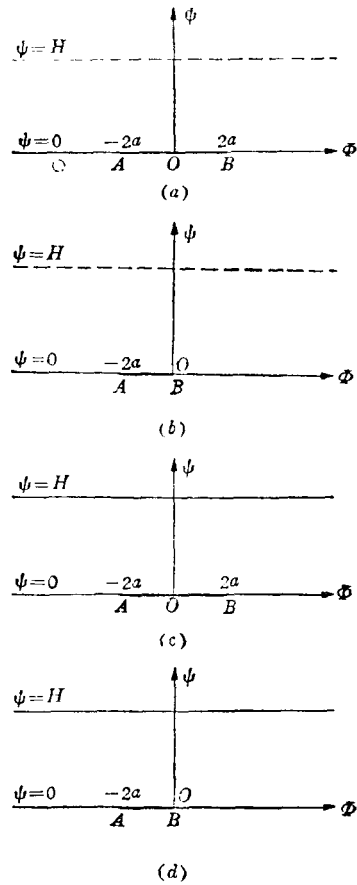


图 3 W平面

### (一) 明渠渠底的圆弧弓形突体

流动平面如图2(a)所示, 设上游水深为 $H$ , 流速 $U=1$ 。沿渠底设 $\psi=0$ , 则沿水面 $\psi=H$ 。又设 $A$ 、 $B$ 点之 $\Phi$ 值各为 $-2a$ 、 $2a$ ,  $W$ 平面如图3(a)。因突体高度很小, 可不计重力影响而认为表面流速为常数, 等于1。文献[3]中第264页给出这类问题的求解公式, 第269页给出绕流圆柱的计算(相当于半圆突体)。因在 $W$ 平面内, 沿 $\psi=0$ ,  $\theta_0$ 为已知, 沿 $\psi=H$ ,  $\Omega_H=0$ , 利用柯西型积分可得

$$\tau(W) = -\frac{1}{\pi} \int_{-2a-i0}^{2a+i0} \ln \left\{ \tanh \frac{\pi}{4H} (W - \Phi^*) \right\} d\theta(\Phi) \quad (3)$$

积分时自 $A$ 点之左积至 $B$ 点之右。沿渠底取上式的实部:

$$\Omega_0(\Phi^*) = -\frac{1}{\pi} \int_{-2a-i0}^{2a+i0} \ln \left| \tanh \frac{\pi}{4H} (\Phi^* - \Phi) \right| d\theta_0(\Phi) \quad (4)$$

沿渠底突体上下游的 $\theta$ 值皆为零, 可得

$$\int_{-2a-i0}^{2a+i0} d\theta_0(\Phi) = 0 \quad (5)$$

积分时须将 $d\theta_0$ 化为 $d\Phi$ 。设沿渠底突体表面的曲线长度为 $S_0$ ，因 $\frac{dS_0}{d\theta_0} = -R$ ， $R$ 为突体半径，因此

$$d\theta_0 = \frac{d\theta_0}{dS_0} \cdot \frac{dS_0}{d\Phi} \cdot d\Phi = -\frac{1}{Rq_0(\Phi)} d\Phi \quad (6)$$

以式(6)代入式(4)、(5)，并注意在 $A$ 、 $B$ 二点 $\theta$ 有跳跃值，可得

$$\Omega_0(\Phi^*) = \frac{1}{\pi} \int_{-2a}^{2a} \frac{1}{Rq_0} \ln \left| \tanh \frac{\pi}{4H} (\Phi - \Phi^*) \right| d\Phi - \frac{1}{\pi} \left\{ \theta_A \ln \left| \tanh \frac{\pi}{4H} (2a + \Phi^*) \right| + \theta_B \ln \left| \tanh \frac{\pi}{4H} (2a - \Phi^*) \right| \right\} \quad (7)$$

$$\theta_A + \theta_B - \int_{-2a}^{2a} \frac{d\Phi}{Rq_0} = 0 \quad (8)$$

(7)、(8)两式即为求解的基本方程。在弓形突体情形， $\theta_A = \theta_B$ 。突体高度 $\Delta$ 和 $\theta_A$ 的关系为

$$\Delta = R(1 - \cos\theta_A) \quad (9)$$

计算时设 $H$ 、 $R$ 为已知，根据希望最后得到的突体高度 $\Delta$ 来估计一个 $a$ 值，并用式(9)计算 $\theta_A = \theta_B$ 。分 $\Phi_B - \Phi_A = 4a$ 为若干等分。假定 $q_0 = q_0(\Phi)$ 后，即可用式(7)求 $\Omega_0(\Phi)$ 。知道 $\Omega_0(\Phi)$ 后，即可求 $q_0(\Phi) = e^{-\Omega_0(\Phi)}$ 。再反复利用式(8)求 $\theta_A$ ，式(7)求 $\Omega_0$ ，求 $q_0$ ，直至 $q_0$ 收敛到具有足够的精度为止。以最后 $q_0(\Phi)$ 值代入式(8)求 $\theta_A$ ，用式(9)求 $\Delta$ ，即完成了计算。但此 $\Delta$ 值不一定是预期的数值，绘制 $\frac{H}{\Delta}$ 有等值的 $C_{p_{min}}$ 和 $\frac{\Delta}{R}$ 关系曲线时很不方便。如需要可大致按 $\frac{a_1}{\Delta_1} = \frac{a_2}{\Delta_2}$ 重新估计 $a$ 值再行迭代。具体计算时如何分段求和可参考文献[3]的234页。根据 $q_0(\Phi)$ 可以推算 $q_0(S)$ ， $\Phi \sim S_0$ 关系可积分 $dS_0 = \frac{d\Phi}{q_0}$ 求得。有了沿突体表面曲线的解答后，可直接利用式(7)向上下游直线段推算，不必迭代。

## (二) 明渠渠底圆弧半弓形突体

流动平面如图2(b)所示，这时下游渠底比上游的高出 $\Delta$ ， $W$ 平面如图3(b)。问题和圆弧弓形突体一样，只是 $\theta_B = 0$ ， $B$ 点 $\Phi$ 值定为零。和式(7)、(8)、(9)对应的公式为

$$\Omega_0(\Phi^*) = \frac{1}{\pi} \int_{-2a}^0 \frac{1}{Rq_0} \ln \left| \tanh \frac{\pi}{4H} (\Phi - \Phi^*) \right| d\Phi - \frac{1}{\pi} \theta_A \ln \left| \tanh \frac{\pi}{4H} (2a + \Phi^*) \right| \quad (10)$$

$$\theta_A - \int_{-2a}^0 \frac{d\Phi}{Rq_0} = 0 \quad (11)$$

$$\Delta = R(1 - \cos\theta_A)$$

计算步骤也和圆弧弓形突体的一样。

### (三) 管道中的圆弧弓形突体

流动平面和复势平面如图2(c)和图3(c)所示。沿  $\psi = 0$  和  $\psi = H$ ,  $\theta$  皆为已知, 因此化为沿边界已知  $\tau$  的虚部如何解  $\tau$  的问题。文献[3]第234页给出求解方程式为(以  $-R$  代替式中  $R_0$ )

$$\begin{aligned} \Omega_0(\Phi^*) = & \frac{1}{\pi} \int_{-2a}^{2a} \frac{1}{Rq_0} \ln \left| \sinh \frac{\pi}{2H} (\Phi - \Phi^*) \right| d\Phi \\ & - \frac{\theta_A}{\pi} \ln \left| \sinh \frac{\pi}{2H} (2a + \Phi^*) \right| - \frac{\theta_B}{\pi} \ln \left| \sinh \frac{\pi}{2H} (2a - \Phi^*) \right| \end{aligned} \quad (12)$$

$$\theta_A + \theta_B - \int_{-2a}^{2a} \frac{d\Phi}{Rq_0} = 0$$

另一公式为

$$\Delta = R(1 - \cos \theta_A)$$

计算方法和(一)同。

### (四) 管道中的圆弧半弓形突体

流动平面和复势平面如图2(d)和3(d)所示。和(三)一样, 沿  $\Psi = 0$  和  $\Psi = H$  线  $\theta$  为已知, 不同的是下游无穷远处流速为  $\frac{H}{(H-\Delta)}$ , 故  $\Omega_\infty = -\ln \frac{H}{(H-\Delta)}$ 。以  $\theta_B = 0$ 、 $\Omega_\infty = 0$  和  $\Omega_\infty$  值代入下式:

$$\begin{aligned} \Omega_0(\Phi^*) = & \frac{1}{\pi} \int_{-2a}^0 \frac{1}{Rq_0} \ln \left| \sinh \frac{\pi}{2H} (\Phi - \Phi^*) \right| d\Phi \\ & - \frac{\theta_A}{\pi} \ln \left| \sinh \frac{\pi}{2H} (2a + \Phi^*) \right| - \frac{\theta_B}{\pi} \ln \left| \sinh \frac{\pi}{2H} (2a - \Phi^*) \right| \\ & + \frac{1}{2} (\Omega_\infty + \Omega_{-\infty}) \end{aligned}$$

见文献[3]第227页, 可得

$$\begin{aligned} \Omega_0(\Phi^*) = & \frac{1}{\pi} \int_{-2a}^0 \frac{1}{Rq_0} \ln \left| \sinh \frac{\pi}{2H} (\Phi - \Phi^*) \right| d\Phi \\ & - \frac{\theta_A}{\pi} \ln \left| \sinh \frac{\pi}{2H} (2a + \Phi^*) \right| - \frac{1}{2} \ln \frac{H}{H-\Delta} \end{aligned} \quad (13)$$

其他方程式为

$$\begin{aligned} \theta_A - \int_{-2a}^0 \frac{d\Phi}{Rq_0} &= 0 \\ \Delta &= R(1 - \cos \theta_A) \end{aligned}$$

计算方法如(一)。

## 三、计算和试验结果

本文共包括53组计算结果, 其 $\frac{H}{\Delta}$ 、 $\frac{R}{\Delta}$ 值如表2所示。

表 2

|        |     |            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |                |
|--------|-----|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------------|
| 明<br>渠 | 弓 形 | $H/\Delta$ | 5    |      |      | 10   |      |      | 20   |      |      |                |
|        |     | $R/\Delta$ | 16.5 | 22.8 | 31.8 | 19.5 | 31.9 | 53.2 | 20   | 35.8 | 48.3 |                |
|        | 半弓形 | $H/\Delta$ | 6    |      |      | 10   |      |      | 20   |      |      |                |
|        |     | $R/\Delta$ | 13.5 | 17.2 | 41.2 | 15.5 | 17.9 | 23.5 | 16.3 | 23.8 | 25.6 |                |
| 管<br>道 | 弓 形 | $H/\Delta$ |      |      |      |      |      |      | 20   |      |      |                |
|        |     | $R/\Delta$ |      |      |      |      |      |      | 16.5 | 20.3 | 26   |                |
|        | 半弓形 | $H/\Delta$ |      |      |      |      |      |      | 20   |      |      | 40             |
|        |     | $R/\Delta$ |      |      |      |      |      |      | 15.3 | 16.3 | 19.2 | 16.6 25.6 44.1 |
|        |     |            |      |      |      |      |      |      | 30.3 | 48.1 | 70.4 | 57.8 64.8 68.3 |

为了和试验校核, 计算了其中四组沿突体的压力分布 (见图4), 皆用压力系数表示。其定义沿明渠突体为 $C_p = \frac{(p - \gamma H)}{(\frac{\rho U^2}{2})}$ , 沿管道突体为 $C_p = \frac{(p - p_0)}{(\frac{\rho U^2}{2})}$ ,  $p_0$ 为上游压力。根

据53组计算可以求出 $\frac{1 - q^2}{U^2}$ ,  $q$ 为沿边墙或渠底流速,  $U$ 为上游流速。如考虑重力影响但不计摩阻, 可用能量方程求出沿管道底部:

$$\frac{(p_j - p_0)}{(\frac{\rho U^2}{2})} = 1 - \frac{q_j^2}{U^2} - \frac{y_j}{(\frac{U^2}{2g})}$$

沿明渠底部:

$$\frac{(p_j - \gamma H)}{(\frac{\rho U^2}{2})} = 1 - \frac{q_j^2}{U^2} - \frac{y_j}{(\frac{U^2}{2g})}$$

式中  $j$  ——任何一点;

$y_j$  ——该点高程。

因 $\frac{y_j}{(\frac{U^2}{2g})}$ 一般小于百分之一 ( $y_j$ 最大值为11.1毫米), 只有在图4 (b) 中影响可至

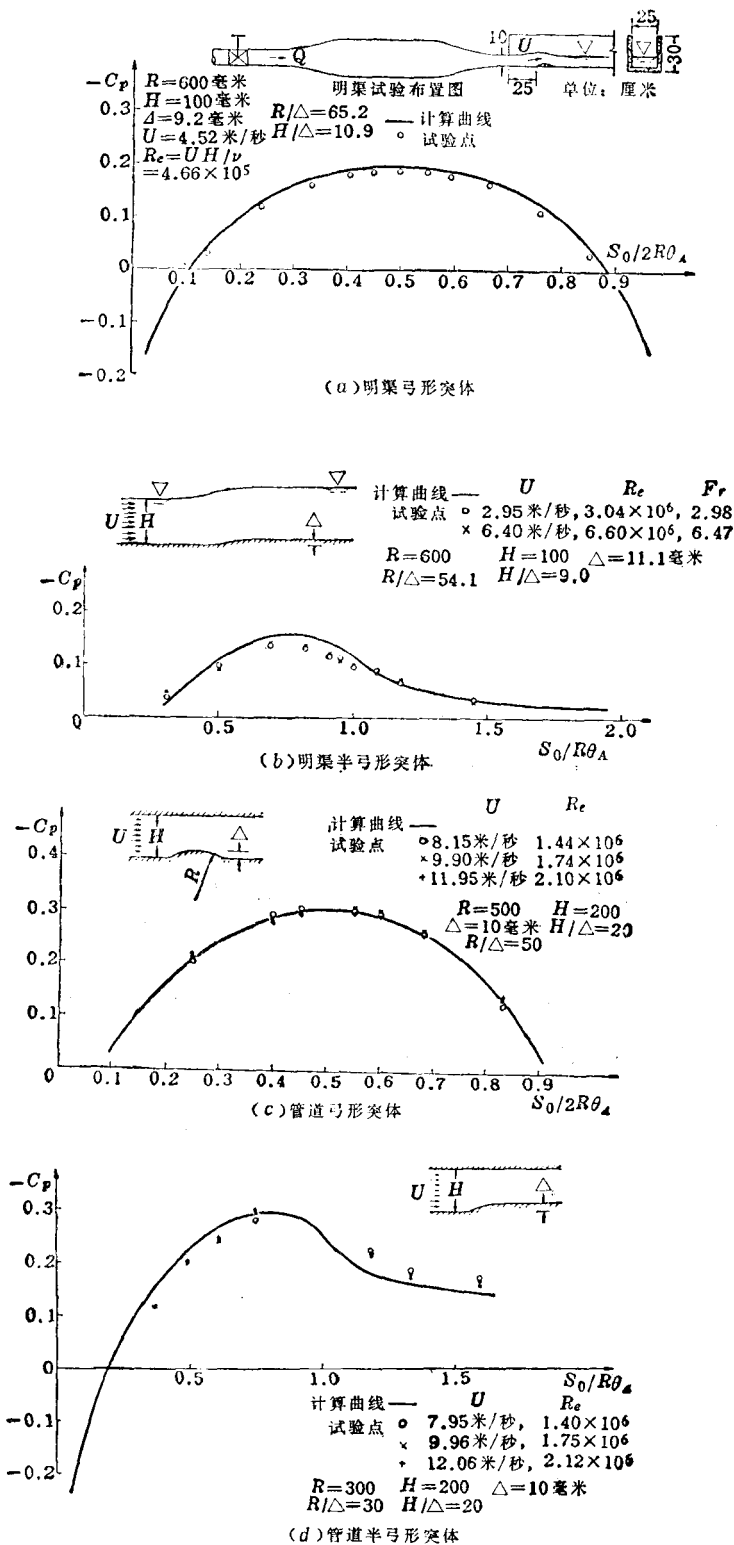


图4 沿突体的压力系数分布曲线

五十分之一, 为了统一起见, 计算结果中一律认为  $1 - \left(\frac{q^2}{U^2}\right) = C_p$ 。计算数值见图5、6。

试验包括明渠渠底突体的压力分布、管道边墙突体压力分布和管道突体初生空穴数三类。明渠试验在25厘米宽的混凝土槽中进行, 布置见图4(a)。突体系用1毫米厚的白铁皮制成, 因制成后的高度和设计高度有所出入, 故图4(a)、(b)中所注的  $\frac{H}{\Delta}$ 、 $\frac{R}{\Delta}$  值皆非整数。试验结果和计算曲线很接近, 但因分析时未考虑粘性影响, 必然引起一定的误差。计算所得的  $-C_{p_{min}}$  值较大, 亦即因粘性影响最小压力较大。明渠试验中, 流速变化范围自2.5~6.4米/秒, 水深10厘米, 雷诺数  $Re = 2.58 \times 10^5 \sim 6.60 \times 10^5$ , 佛氏数  $(Fr = U/\sqrt{gH}) 2.53 \sim 6.47$ 。

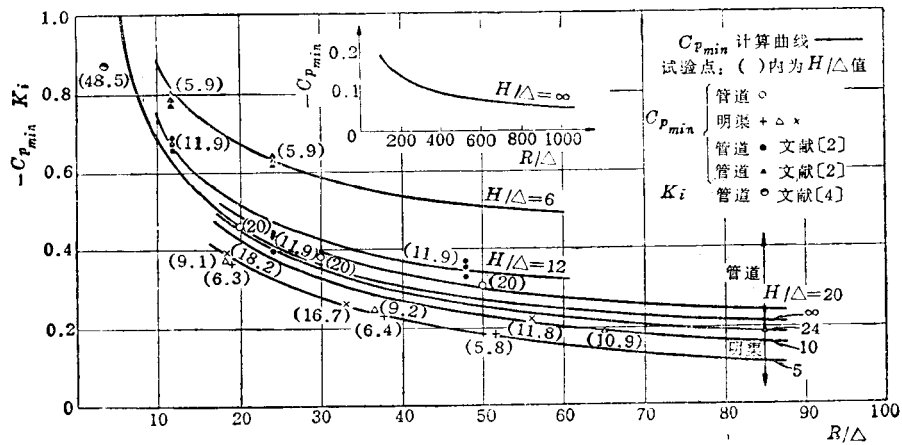


图5 边墙弓形突体的最小压力系数

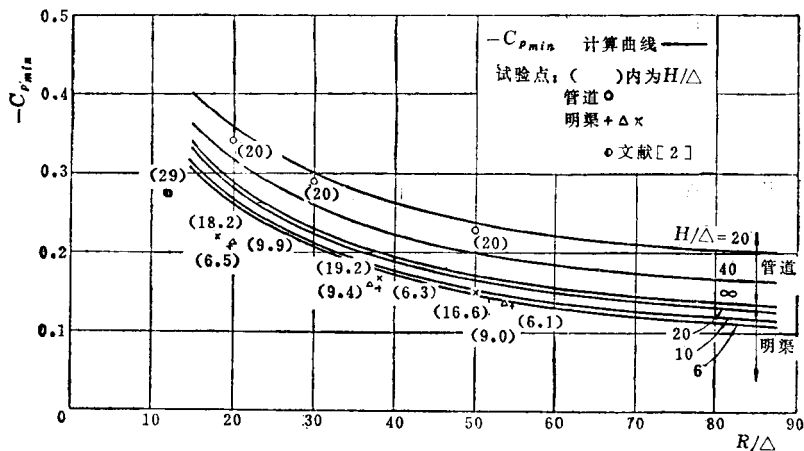


图6 边墙半弓形突体的最小压力系数

管道中沿边墙突体的压力分布试验系在水洞的20厘米方形试验段中进行。突体用黄铜在车床上加工制成。结果见图4(c)、(d)。计算所得的  $-C_{p_{min}}$  和试验值接近或稍

大; 突体愈高, 半径愈小, 差别愈大。管道试验中, 流速  $U=5.8\sim 14.5$  米/秒, 试验段高 20 厘米,  $Re=1.02\times 10^6\sim 2.55\times 10^6$ 。

管道内突体的初生空穴数试验在水洞中进行。初生空穴数  $K_i$  和  $-C_{p_{min}}$  的试验点绘于图 7、8, 以和计算所得的  $-C_{p_{min}}$  值比较。

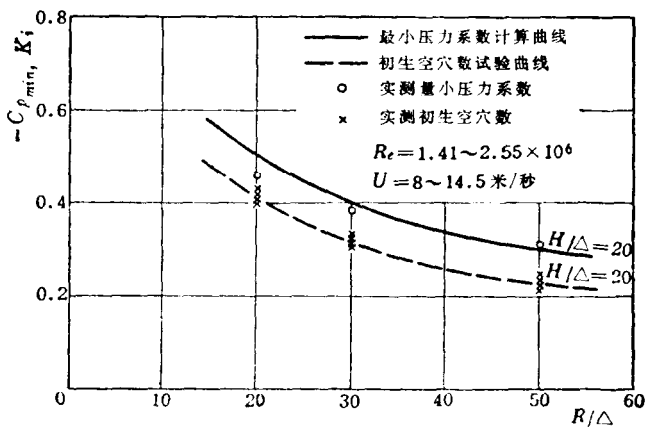


图 7 管道边墙弓形突体的最小压力系数与初生空穴数的比较

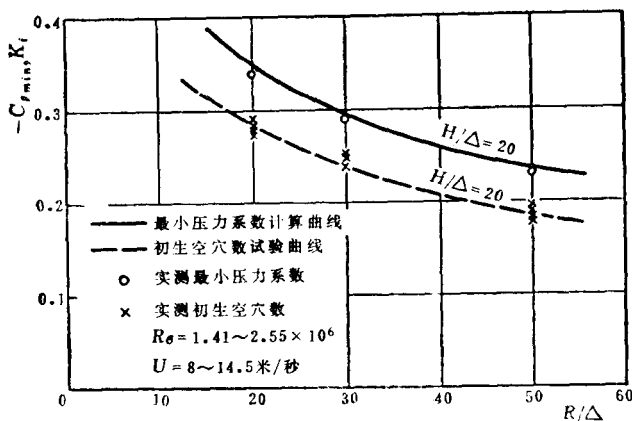


图 8 管道边墙半弓形突体的最小压力系数与初生空穴数的比较

#### 四、讨 论

本文主要目的为提供突体的初生空穴数资料, 以作控制不平整度的依据。现在可分以下几方面来讨论计算和试验结果:

(1) 根据势流分析计算所得到的最小压力系数, 可以整理成图 5、6 所示的曲线。

对任何一种突体来说,  $\frac{H}{\Delta}$  为无穷大时的  $-C_{p_{min}} \sim \frac{R}{\Delta}$  曲线将整个曲线族分为两组, 以上为管道突体曲线, 以下为明渠突体曲线。在明渠中水面可以升高, 因而水流过突体时流速和



压力的改变皆较小。当水深为无穷大时,既可认为是明渠流也可认为是管流,所以成为两种情形的分界线。

(2) 分析明渠流时设水面流速不变,即未考虑重力影响。因渠底突体的高度一般都很小,这一假设不会引入很大误差,试验资料可以说明这一点。势流分析未考虑粘性影响,亦即未涉及边界层发展和分离的问题,压力系数的计算值和试验值不完全相等。但在突体高度很小,半径很大时,差别很少。

(3) 进行初生空穴数试验时直接目测空穴何时发生,应最能做为防止空穴水流的依据。但因几何相似的物体,其初生空穴数随流速和尺寸加大而增加,在流线体情形下,逐渐接近 $-C_{p_{min}}$ 值。试验时突体尺寸和流速皆受一定的限制,且目前尚无明渠初生空穴数试验数据,因此将计算所得的 $-C_{p_{min}}$ 值绘制曲线。

(4) 空穴初生时的水流可能在边墙上造成一些麻点,还不致引起严重破坏。根据初生空穴数来防止空蚀是比较可靠的。在更小的空穴数下破坏如何,目前还不能预估。

(5) 本文给出的弓形和半弓形突体的 $-C_{p_{min}}$ ,可以当作原型的初生空穴数。圆弧弓形和半弓形突体是理想化的形状,原型因模板变形或其他原因引起的曲线形突体,其初生空穴数也可按最接近的圆弧形突体的数值来估计。在坝面或管道边墙任何一点,突体的初生空穴数不得大于这一点的过流空穴数。

(6) 在三角形突体的初生空穴数试验未得出系统资料以前,对于斜度缓于1:10的等腰三角形突体,可以参考圆弧弓形突体的资料。如在圆弧弓形内作一内接等腰三角形突体

(见图9),则 $\frac{l}{\Delta}$ 和 $\frac{R}{\Delta}$ 便有式(14)所示的关系:

$$\left(\frac{l}{\Delta}\right)^2 = 2 \frac{R}{\Delta} - 1 \quad (14)$$

因为三角形突体是非流线体,所以它的初生空穴数大于它的 $-C_{p_{min}}$ ,而它的 $-C_{p_{min}}$ 又比相对应的圆弧弓形突体的 $-C_{p_{min}}$ 大。并且它的初生空穴数也随流速和尺寸的增加而加

大。斜度 $\frac{\Delta}{l}$ 愈小,这些差别也愈小。已有的一组等腰三角形突体的室内试验数据是 $\frac{\Delta}{l} =$

$\frac{1}{10}$ ,  $\frac{H}{\Delta} \approx 20$ ,  $K_i = 0.8$ 。根据图5可知相对应的 $\frac{R}{\Delta} = 50.5$ 的弓形突体的 $-C_{p_{min}}$ 为0.30。

故 $\frac{\Delta}{l} = \frac{1}{10}$ 的等腰三角形突体的 $K_i$ 约三倍其对应圆弧弓形突体的 $-C_{p_{min}}$ 。斜度缓于 $\frac{1}{10}$ 时可用对应圆弧弓形突体 $-C_{p_{min}}$ 的三倍作为等腰三角形突体的 $K_i$ 。

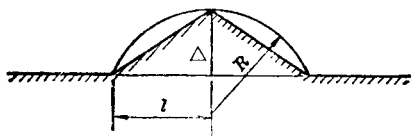


图9 等腰三角形突体示意图

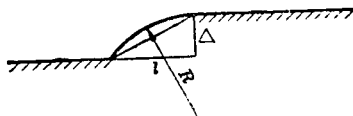


图10 斜坡突体示意图

(7) 斜坎突体如图10所示, 可认为是圆弧半弓形突体的对应突体。文献[5]第5图给出这类突体的空穴初生条件。我们根据给出的流速和压力计算了初生空穴数, 如图11的曲线1●所示。原试验所得的初生空穴数随流速大小有些改变, 改变范围用线段表示。原文中未注明 $\frac{H}{\Delta}$ 等于多少, 未说明在什么断面测的压力。原文第5图中虽绘了明渠插图, 但提到的另一文<sup>[6]</sup>中, 表明此设备有管流试验段。因此以下二点很不明确:

1)  $\frac{H}{\Delta}$ 的数值为何; 2) 试验是否在明渠试验段中进行。利用文献[5]第5图中90°的曲线和图3比较●, 估计 $\Delta$ 在 $\frac{1}{4}$ 英寸和 $\frac{5}{16}$ 英寸范围内, 文献[6]第4图●表示该设备试验段为管流,  $H = 3$ 英寸。估算出 $\frac{H}{\Delta} \approx 9.6 \sim 12$ 。根据以上所述可知文献[5]中的数据仍有局限性。

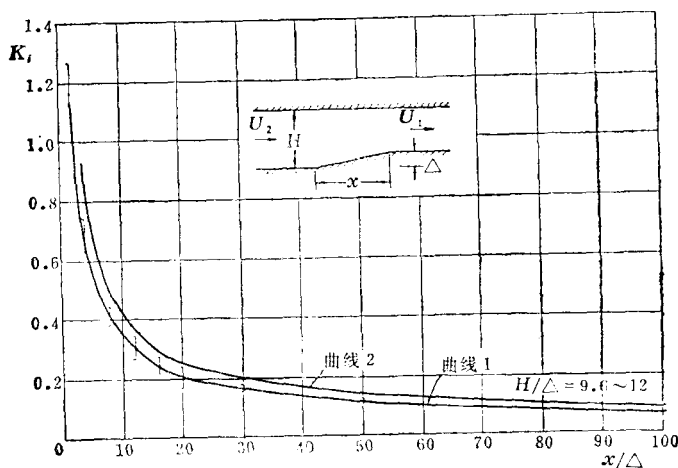


图 11 斜坡突体的初生空穴数

(文献[5]资料分析结果)

斜坡缓于1/10的升坎, 也可用圆弧半弓形突体的 $-C_{p_{min}}$ 来估计它的初生空穴数,  $R/\Delta$ 和 $l/\Delta$ 的关系仍如式(14)。例如 $\Delta/l = 1/10$ 的升坎对应于 $R/\Delta = 50.5$ 的圆弧半弓形突体。图11中的曲线2给出 $H/\Delta = 9.6 \sim 12$ ,  $\Delta/l = 1/10$ 的 $K_i = 0.41$ 。应用图6中管道资料,  $H/\Delta = 9.6 \sim 12$ ,  $R/\Delta = 50.5$ 时的 $-C_{p_{min}} = 0.24$ 。由此可得 $K_i/(-C_{p_{min}}) \approx 1.7$ 。故可近似地用圆弧半弓形突体的 $-C_{p_{min}}$ 的2倍作为对应斜坡升坎的初生空穴数。

## 五、结 语

以下几点可作控制边墙平整度的参考:

(1) 圆弧弓形和半弓形突体在图4和图5所给数据的范围内是流线体, 因此可用图

① 曲线1系原文资料,  $K_i = (p_0 - p_v)/(\rho U_1^2/2)$ ; 曲线2所给的 $K_i = (p_0 - p_v)/(\rho U_2^2/2)$ , 换算求得。

② 文献[5]未说明 $H$ 和 $\Delta$ 的尺寸, 比较该文的图3和图5, 估计 $\Delta = \frac{1}{4} \sim \frac{5}{16}$ 英寸, 根据文献[6]图4,  $H = 3$ 英寸, 故 $\frac{H}{\Delta} = 9.6 \sim 12$ 。

③ 文献[6]图4说明该设备有管流试验段, 因此文献[5]中的曲线似应为管流资料。