

治淮闸坝 工程水力学

●周名德 著

论 文 集

SELECTED WORKS
ON HYDRAULICS OF
SLUICE-DAMS FOR
HARNESSING THE HUAIHE RIVER



海洋出版社

序 一

中、低水头闸坝工程的主要特点在于：量大面广、形式多种多样、管理运用便利，深受群众欢迎。周名德高级工程师从事治淮工程闸坝模型试验及水力学专题研究已 50 年，刻意钻研，经验丰富，善于从实践中发现问题，进行提炼总结，同时注意观测技术的提高。

《治淮闸坝工程水力学论文集》搜集作者 50 年来的论文 25 篇，多数曾在国内刊物及国际性学术讨论会上发表，题文鲜明，引用的实测资料（包括原型观测）多，相应制成了不少成果曲线和经验算式，行文通畅，总结性强。诸篇之间，也有较强的关联。对于十分复杂的泥沙问题、掺气问题、振动问题也有专题论文。论文集的出版，将受到广大科技人员欢迎，建议列为治淮 50 周年纪念中、闸坝水力学试验研究总结的组成部分。



2000.9.1 于北京

序 二

淮河是我国第一条全面治理的大河。50年来，遵照毛主席“一定要把淮河修好”的号召，已经取得举世瞩目的成就，决定于2000年10月召开治淮50周年经验总结和21世纪持续治淮战略研讨会，这是非常必要和及时的。会议号召广大科技工作者积极撰稿，为持续治淮献计献策。遥想当年治淮，南京水利实验处被指定为治淮试验研究基地，所有治淮工程包括水库和闸坝都在这里进行试验研究，我们有责任把有关治淮科研成果加以总结献给大会。为此，长期从事治淮科研工作的周名德同志，将过去治淮闸坝工程试验研究论文作了适当修改补充，整编成册（25篇论文），标题为《治淮闸坝工程水力学论文集》，其中多篇是获奖项目或在国际学术会议上发表过，在国内外有一定的影响。相信本论文集的出版，必将对21世纪持续治淮及防洪减灾工程起到技术借鉴作用。

顺便写序之余，也对治淮作一回顾。一开始就以当时南京水利实验处作为治淮试验研究基地，让我和陈惠泉同志前往蚌埠淮河水利委员会商讨治淮工程的水工模型试验。回南京后，就积极展开了治淮研究，日夜放水进行淮河上的闸坝、水库等模型试验，两三个月就拿出成果供设计修改，其积极性之高，现在看来望尘莫及。几次到治淮工地参观，更是在“一定要把淮河修好”的大旗招展下，热火朝天地紧张施工。回想这些感人场面，实在令人兴奋难忘。不觉50年过去，终于制服了多灾多难的淮河，全流域发生了巨大变化，已经成为我国重要的商品粮、棉、油产地和煤、电能源基地。作为水利工作者，无不为之欢欣鼓舞。希望这次盛会能全面地总结治淮经验和教训，把主要的成功经验包括治淮精神和优秀科研成果带到21世纪。

毛永熙

2000.9.1 于南京

前 言

我长期从事水工模型试验和水工水力学研究。从 20 世纪 50 年代开始即参与以中、低水头闸坝为主的治淮工程水工模型试验,包括苏北灌溉总渠、淮河入江水道、江苏通榆河及近期淮河入海水道等大型水利枢纽工程。在完成生产任务的同时,根据心得体会和所积累的经验,撰写了有关专题述评和学术论文,多数曾在《水利学报》、《水利水运科学研究》、《江苏水利科技》等刊物及国际学术讨论会上发表。本书编选的 25 篇文章,大都是从具体治淮工程试验中提炼和总结出来的,其中,消能冲刷和流量系数等部分成果已被部颁《水闸设计规范》(新版)所采纳。此外,凡有同事参与编写的少数篇章均按原作发表时的署名次序在附注中标明,以志谢忱。文集中若干篇章虽非治淮试验成果,但与治淮工程有关,故亦收录在内。限于水平,文中不当之处在所难免,深望读者讨论指正。

本论文集主要包括:水闸消能防冲和老化加固、涵闸高淹没度泄流能力、闸基渗流和排水减压、大型立交地涵淤减淤、闸坝水力学原型观测、灌区量水设备以及水工闸门和输水管振动等专题,基本上概括了以中、低水头闸坝为主的水工水力学技术关键问题。

本论文集承蒙我国著名水工水力学专家陈椿庭和毛昶熙两位教授审阅并写序,笔者谨此表示衷心的感谢。二老对治淮的贡献,将永远铭记在人们心中。

时光荏苒,治淮已经历了 50 个春秋,往事依依,记忆犹新。值此治淮 50 周年大庆之日,谨以此文集献给为治淮作出贡献的同志们,并祝 21 世纪持续治淮取得更大成就。

最后,本书得到南京水利科学研究院出版基金资助及海洋出版社精心刊印,在此一并致谢。

作 者

2000 年 9 月于南京

作者简介



作者近照

周名德,高级工程师,浙江宁波人,1931 年 5 月出生于日本神户,1937 年回国。1949 年考入前中央大学水利系,1950 年参加治淮。1952 年毕业于南京大学。毕业前后,一直在南京水利科学研究院(前身为南京水利实验处)从事淮河水文资料整编和治淮水工模型试验。40 余年来,先后主持水工模型试验和专题研究 30 余项(治淮工程约 15 项),并以第一作者署名,撰写试验研究报告和学术论文 70 余篇,有一半以上在国内外学术刊物和国际学术讨论会上发表,其中重要成果获江苏省科技进步一等奖(1996 年)和水利部科技进步二等奖(1991 年)以及水利电力部优秀科技

成果三等奖（1981年）各一项。此外，与毛昶熙教授合著《闸坝工程水力学与设计管理》（水利电力出版社，1995年）。退休后，受水利部科技司委托，主编《水工（常规）模型试验规程》（水利电力出版社，1995年），已在全国发布实施。

目 次

闸坝下游消能冲刷试验研究.....	(1)
闸下黏土局部冲刷与模拟相似	(10)
水闸消力池底板厚度与破坏实例分析	(15)
低弗氏数新型消力池的水力设计	(26)
水闸老化加固水力学问题研究	(32)
平原水闸高淹没度流量系数分析	(40)
总渠立交地涵泄流能力试验研究	(48)
总渠立交地涵水工泥沙问题研究	(54)
废黄河泥沙特性及河床演变分析	(63)
废黄河地涵防淤问题综合研究	(71)
闸坝消能方式简要述评	(77)
明渠高速水流自掺气问题述评	(84)
灌区量水设备与水计量研究进展	(93)
闸坝水力学原型观测.....	(101)
水工气流模型试验研究.....	(111)
水工模型试验测速仪器的改进——小毕托管研制总结.....	(122)
闸门振动与防振措施.....	(131)
圆筒闸门整体振动试验研究.....	(141)
输水管横向振动的理论与应用.....	(148)
A Study on Dissipating Energy and Scour below Sluice-Dams with Low Froude Number	(156)
Local Scour on Earth Bed below Sluice-Dams	(164)
Analysis of Transverse Vibration of a Pipe Containing Flowing Fluids	(169)
The Multifunctional Micro-Pitot Tube and Its Applications	(174)
An Experimental Method for Vibration of Cylinder Gates	(181)
Theoretical Solution of Added Mass Induced by Vibration of a Pipe Containing Flow Fluids	(186)
后记.....	(191)

Contents

Preface by Professors Chen Chunting & Mao Changxi

Foreword by the Author

A Study on Dissipating Energy and Scour below Sluice Dams	(1)
A Study on Similarity of Local Scouring of Cohesive Material in Hydraulic Model Test	(10)
Analysis on Thickness of Stiller Slab and Its Failure Example	(15)
Hydraulic Design of a New Type Stilling Basin at Low Froude Number	(26)
A Study of Hydraulic Problems on Aged Strengthening of Sluice Dams	(32)
Analysis on Discharge Coefficient of Plan Sluices at High Submergence Ratio	(40)
A Study on Discharge Capacity of Underground Culvert with Grade Separation at Main Canal	(48)
Test Research of Hydraulic and Sediment of Underground Culvert with Grade Separation at Main Canal	(54)
Analysis on Sediment Characteristics and Evolution of River Bed at Waste Yellow River	(63)
Synthetic Research of Preventive Siltation Problems of Underground Culvert at Waste Yellow River	(71)
A Summary of Dissipating Energy Manners of Sluice-Dams	(77)
Review of Self-Aerated Flow in Open Channel at High Velocity	(84)
A Development of Measuring Water Equipment and Quantity Meter in Irrigation District	(93)
Prototype Investigations of Hydraulic on Sluice-Dams	(101)
Air Model Tests on Hydraulic Structure	(111)
An Improvement of Velocimeter Using in Hydraulic Model Tests ——A Summary of Micro-Pitot Tube	(122)
On the Vibration of Hydraulic Gates and Its Control Measures	(131)
An Experimental Technique on Global Vibration of Cylinder Gate	(141)
On the Theory and Applications of Transverse Vibration of a Conveying Pipe	(148)
A Study on Dissipating Energy and Scour below Sluice-Dams with Low Froude Number	(156)
Local Scour on Earth Bed below Sluice-Dams	(164)
Analysis of Transverse Vibration of a Pipe Containing Flowing Fluids	(169)

The Multifunctional Micro-Pitot Tube and Its Applications	(174)
An Experimental Method for Vibration of Cylinder Gates	(181)
Theoretical Solution of Added Mass Induced by Vibration of a Pipe Containing Flow Fluids	(186)
Remark	(191)

闸坝下游消能冲刷试验研究

【提要】 本文根据治淮 25 座水闸模型试验资料, 在早期研究基础上, 通过专题研究, 补充消力池折坡扩散水跃、翼墙扩散型式和粘土局部冲刷等问题, 提出有实用价值的研究成果, 可供今后水闸设计参考。

一、前言

闸坝工程一般多采用水跃消能,主要消能工为消力池。20世纪50年代初,美国垦务局推荐几种定型消力池,都是根据二元水跃的理论与实验而得的,同实际工程的三元扩散水跃存在一定差异,并且这些定型消力池,均未考虑消除波状水跃的措施。对低弗氏数的水闸来说,闸下波状水跃是经常发生的,其危害性不容忽视。再从现有文献资料来看,近年来大多偏重于高坝岩基冲刷,对土基尤其是软土地基的冲刷研究并未引起足够的重视,而大量水闸工程,特别是平原水闸正是修建在软土地基上。本文根据近年来的室内试验资料和工程实践经验,对此问题作了进一步的分析和补充。

二、折坡扩散水跃共轭水深

(一) 经验公式的求解

中、低水头闸坝工程通常采用上斜下平的消力池。按池中水跃位置可以分为4种类型,即:平底水跃、折坡水跃、临界斜坡水跃和斜坡水跃等,其中折坡水跃的首尾端分别位于变坡点的上下游(图1)。由于该型水跃比较稳定,一般设计常将折坡水跃作为消能控制标准,故该水跃出现的机会最多。但因斜坡部分的水跃体积是个变量,理论分析较为困难,长期以来,一直查用布雷德利(Bradley, 1957)曲线求解共轭水深(图2)^[1]。图2中 h_2 是虚拟的平底水跃共轭水深, L_s 是斜坡段的水跃长度。图解法的缺点是不能指示 h_{2B}/h_2 大到何值,折坡水跃开始向临界斜坡水跃转变,从而容易产生误差。

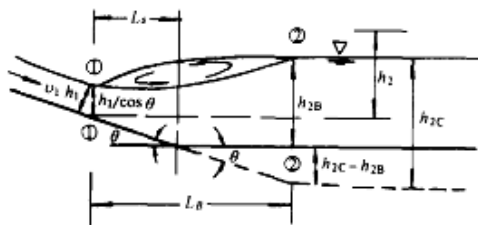


图 1 折坡水跃示意图
虚线为临界斜坡水跃边界

• 原载《水利水运科学杂志》，1988年第3期。作者：周名德，毛昶熙（指导）。系1991年水利部科技进步二等奖系列论文之一。英文稿刊载在《6th Congress, The Asian and Pacific Regional Division of the International Association for Hydraulic Research, Kyoto Japan, 1988》（本论文集）。

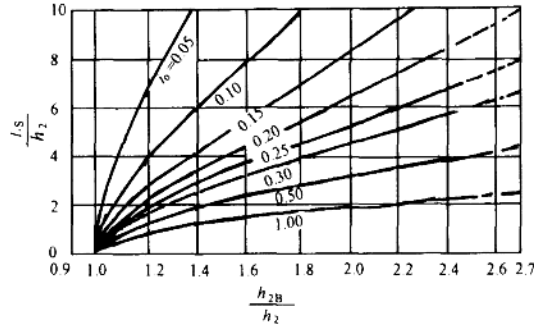


图2 折坡水跃的图解

后来, 文献 [3] 在文献 [2] 的基础上, 给出折坡水跃共轭水深的半经验公式为

$$\frac{h_{2B}}{h_1} = \frac{1}{2\cos\theta} \left[\sqrt{1 + \frac{8F_1^2 \cos^3\theta}{1 - 2\phi i_0 K}} - 1 \right] \quad (1)$$

式中: ϕ , K ——折坡水跃的形状系数和体积系数。

当 $K=1$ 时, 即为金氏临界斜坡水跃公式 (Kindsvater, 1944)。当 $\phi=0$ 时, 即熟知的平底水跃公式。引用布雷德利的试验资料通过反算, 作出 $\phi=f(i_0)$ 和 $K=f(L_s/L_B, i_0)$ 的经验曲线 (图3, 图4)。便可根据 (1) 式求出折坡扩散水跃的共轭水深。

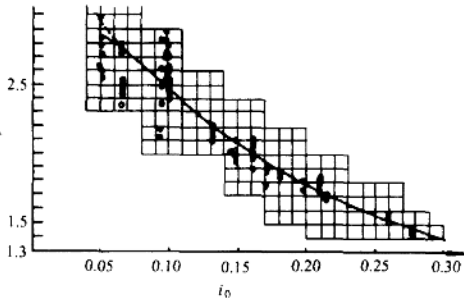


图3 $\phi=f(i_0)$ 关系曲线

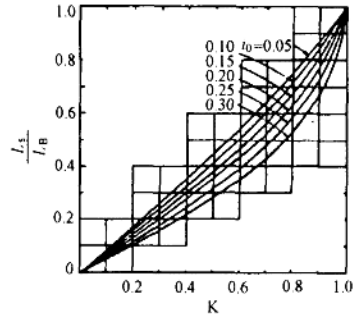


图4 $K=f\left(\frac{L_s}{L_B}, i_0\right)$ 关系曲线

(二) 实验验证

应该指出, 式 (1) 只适用于二元折坡水跃, 对于实际工程的三元水跃是否有效, 需要通过实验检验。实验简单布置见图5, 部分实验成果见表1。对实验资料进行分析后, 得出三元折坡水跃的经验公式为

$$\frac{h_{2B}}{h_1} = \frac{1}{2\cos\theta} \left[\sqrt{1 + \frac{8F_1^2 \cos^3\theta}{1 - 2\phi i_0 K}} - 1 \right] \left[\frac{b_1}{b_2} \right]^{0.25} \quad (2)$$

(2) 式与 (1) 式相比, 主要是引进扩散率 b_1/b_2 因子, 所以跃后共轭水深的计算值与实测值十分吻合 (表1), 证明 (2) 式是可行的。

消能中占有相当重要的地位。

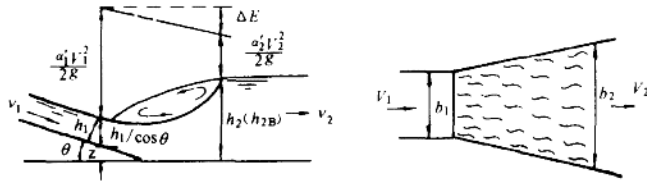


图6 折坡扩散示意图

为了分析消能率与下游水深之间的关系,对(4)式求导并使之等于0:

$$\frac{d\left(\frac{\Delta E}{E_1}\right)}{d\left(\frac{h_2}{h_1}\right)} = -\frac{1 - \alpha'_2 \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^2 \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^3 F_1^2}{\frac{z}{h_1} + \frac{1}{\cos \theta} + \alpha'_1 \frac{F_1^2}{2}} = 0 \quad (6)$$

有
$$\alpha'_2 \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^2 F_1^2 = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^3 \quad (7)$$

则
$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{b_1}{b_2} F_1\right)^{2/3} (\alpha'_2)^{1/3} \quad (8)$$

或
$$h_2 = \left(\frac{Q^2}{b_2^2 g}\right)^{1/3} (\alpha'_2)^{1/3} = \sqrt[3]{\frac{\alpha'_2 q^2}{g}} = h_k \quad (9)$$

(8)式表明,当 $h_2/h_1 = (b_1/b_2 F_1)^{2/3}$ 时,折坡水跃消能率最大。(9)式表明,当下游为临界水深时,消能率亦最大。由此推论,下游尾水愈深,消能率愈低。

(二) 实验验证

综上所述,水跃消能率与弗氏数、共轭水深比和单宽流量等有关,尤与弗氏数的关系最为密切。现根据折坡扩散水跃的实验结果以及某工程的模型试验资料,按 $F_1 - \Delta E/E_1$ 的关系绘图(图7)。由图可见,消能率与弗氏数的规律性较好。图中曲线2为(4)式计算值,与试验值吻合较好。当 $2.5 < F_1 < 5.0$ 时,折坡扩散水跃的消能率为 25% ~ 50%,较平底辐射水跃的计算值为小,而较矩形平底水跃的计算值稍大,此与现有理论一致。

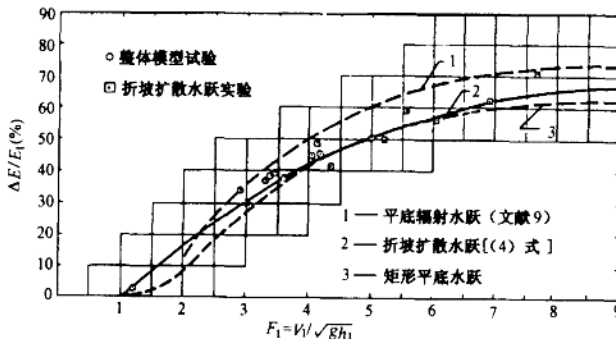


图7 折坡扩散水跃 $F_1 - \Delta E/E_1$ 关系曲线

应该指出,由于消能率在空间的分布不均,故相同的消能率并不一定产生同样的冲刷模式。因此,消能率必须密切结合工程的实际流态才有实用意义。

三、闸下波状水跃及其避免

斜跌坎式消力池在较大尾水变化范围内均可形成稳定的折坡水跃或斜坡水跃。但当尾水进一步升高时,水跃上溯至跌坎前的平台上(即平台水跃)。根据不同的尾水高程,平台水跃基本上分为3种型式(图8)。图8中a型水跃的跃尾和b型水跃的跃首均位于跌坎前平台边缘。这两种水跃根据动量平衡原理,可得到下列两个方程^[5],用以求解水跃首尾端的共轭水深。

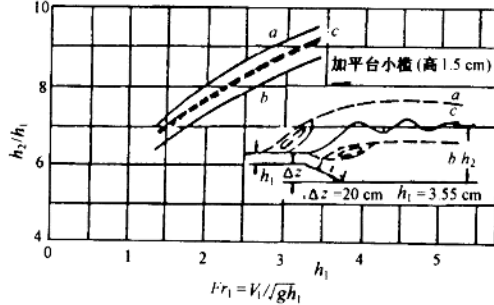


图8 波状水跃适应范围的试验结果

对于a型水跃

$$F_1^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \left(1 - \frac{h_2}{h_1} \right)^{-1} \left[1 - \left(\frac{h_2}{h_1} - \frac{\Delta z}{h_1} \right)^2 \right] \quad (10)$$

对于b型水跃

$$F_1^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \left(1 - \frac{h_2}{h_1} \right)^{-1} \left[\left(\frac{\Delta z}{h_1} + 1 \right)^2 - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^2 \right] \quad (11)$$

介于a、b型水跃之间的c型水跃为波状水跃见图8。

众所周知,波状水跃对于闸坝下游的消能扩散十分不利。水流出池后继续保持急流前进,不随两侧翼墙扩散,致使闸下两侧产生回流,甚至形成折冲水流(图9),造成渠底或岸坡的严重冲刷。为了消除波状水跃,文献[6]通过大量的模型试验,提出在消力池跌坎前沿平台上加设一道小槛,这样使波状水跃的适应范围明显缩小(图8中粗实线所示),或能使射流挑起后跌入池中,变波状水跃为折坡水跃(图10),以达到充分利用消力池的目的。这一措施经工程实践证明是行之有效的。为使小槛具有较强的抗冲能力,在结构上宜与闸底板联结成为整体。同时,小槛应离开闸墩尾端一段距离,以利于越槛水流的扩散。槛的适宜高度约为收缩断面水深的1/3~1/5,一般不超过0.5 m。

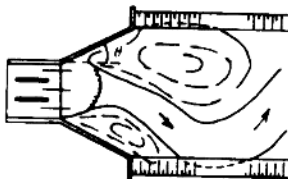


图9 折冲水流示意图



图10 平台小槛改变流态示意图

根据试验, 作用在小槛上的冲力为

$$R = C \frac{V_c^2}{2g} A \quad (12)$$

式中: V_c ——收缩断面流速; A ——小槛迎水面面积; C ——阻力系数, 当 $0.02 < e/x < 0.05$ 时, $C = 0.5$, 其中 x ——小槛距收缩断面的距离, e ——小槛高度。

一般情况下, 小槛的单宽冲力应小于 10 kN/m 。

四、消力池翼墙型式的优化

翼墙的作用在于促使出闸水流的均匀扩散, 尽快恢复下游河渠水流的正常流速分布。据调查, 目前已有工程以圆弧型翼墙居多。根据原型观测验证, 得出修正后翼墙扩张角的经验公式^[7] (图 11):

$$\operatorname{tg} \alpha = 0.19 \sqrt{1 + 3 \sum (p/h) (h_2/H)^{1/4}} \quad (13)$$

式中: h_2 ——消力池底以上水深; H ——上下游水头差; $\sum (p/h)$ ——槛齿等辅助消能工高度 p 与该处水深 h 比之和。不过, 由于消力池内流态复杂多变, 由射流到淹没射流, 或自由堰流到高淹没度潜流均可能发生。因此, 采用单一的翼墙曲线型式和扩张角未必能适应所有遇到的流态, 而且圆弧型翼墙的扩张角再大, 与下游正常渠道的衔接段仍较长。为此, 在文献 [7] 的基础上, 提出突扩式翼墙布置型式 (图 12)。布置特点为:

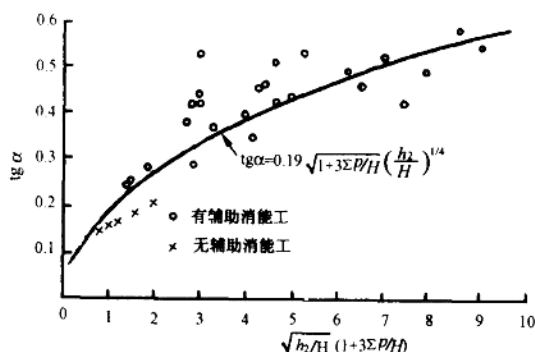


图 11 圆弧型翼墙扩张角

(1) 消力池斜坡部分由于经常处于急流状态, 必须采用直立式边墙, 扩张角为 7° 左右。

(2) 消力池斜坡末端一般处于跃首部位, 利用水跃扩散的有利条件, 翼墙在该处开始突扩, 扩张角增大约 25° , 直至消力池尾端。

(3) 出尾槛后的水流属缓流状态, 一般不再设置消能工, 但可考虑再次突扩。突扩后翼墙, 扩张角仍为 25° , 或用扭曲面与下游正常渠道相衔接。

如果翼墙材料不是混凝土而是浆砌块石, 则允许将消力池内翼墙做成复式坡面。沿坡脚的扩张角仍为 25° , 坡面与上游直墙交会处自然形成突扩区。

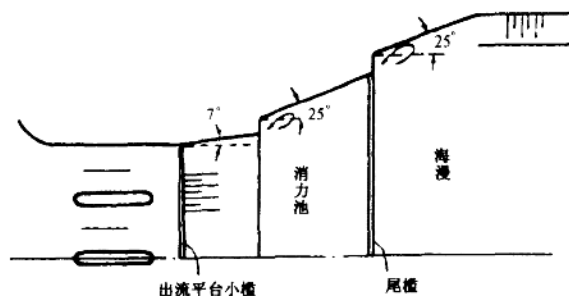


图 12 突扩式翼墙布置型式

突扩式翼墙人为地将消力池两侧的水流形成回流。基于回流中心压力较低，且与主流之间有较强的剪应力，促使水流急剧扩散，这样翼墙扩张角比没有突扩时可增大很多。在无辅助消能工的情况下，跃后缓流最大扩张角将由常用的 15° 增至 25° (图 13)。加上突扩后由于断面加宽使翼墙长度更为缩短。同时，试验还表明，即使在闸门全开呈高淹没度泄流情况下，突扩式翼墙仍能获得满意的扩散效果^[10]。

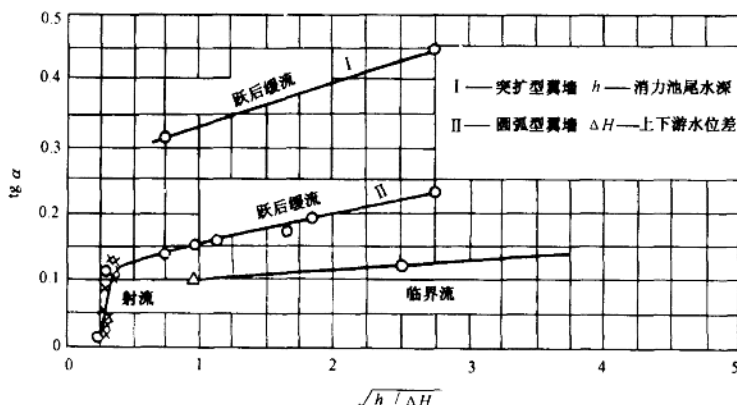


图 13 翼墙扩张角综合分析结果

五、闸下粘土局部冲刷

闸坝下游水流经水跃消能以后，由于跃后剩余能量的作用（包括紊动能）以及水流扩散不均等因素，消力池后未经加固的河床与岸坡仍会受到一定程度的冲刷（图 14）。为了估计河床受冲后的安全程度，需预先知道冲刷坑的深度。通过 40 个模型 219 组试验资料验证，文献 [8] 提出的无黏性土局部冲刷深度的公式是符合实际情况的，即

$$t = \frac{0.66q \sqrt{2a - y/h}}{\sqrt{(s-1)gd(h/d)^{1/6}}} \quad (14)$$

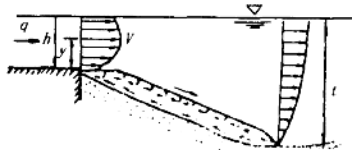


图 14 局部冲刷坑形成示意图

式中： t ——冲刷坑在水面以下的深度； q ——单宽流量，应取护坦或不冲海漫末端的最大

值; h ——护坦末端水深; y ——护坦末端垂流速分布的最大值距底面的高度; $\alpha = (1.0 \sim 1.5)$ ——流速分布不均匀性的动量修正系数; d ——冲刷河床的松散体颗粒直径; s ——土的相对密度; g ——重力加速度。

为了建立黏性土与非黏性土之间的等价关系, 取剪应力或凝聚力作为黏性土的抗冲指标, 并取 4 种土样在 60 cm 宽的玻璃水槽内进行 23 组黏性土的局部冲刷试验。土样的物理指标见表 2。对各试验组次的冲刷坑深度进行量测, 然后利用 (14) 式反算得出黏土等价粒径的经验公式^[10]:

$$d = 0.53 C^{2.73} \quad (15)$$

或
$$d = 0.033 \tau^{1.71} \quad (16)$$

式中: d ——等价平均粒径 (m); τ ——土的剪应力 [kgf/cm^2 ($= 10^2 \text{kPa}$)]^{*}; C ——土的凝聚力 (10^2kPa)。

表 2 试验土样物理指标

土粒组成		土粒 相对密度	干容重 γ_d (g/cm^3)	含水量 W (%)	孔隙比 e	饱和度 G	塑性指数 I_p	内摩擦角 ϕ (°)	凝聚力 C ($\times 10^2 \text{kPa}$)
0.050~ 0.005mm (%)	<0.005 mm								
44~62	13~48	2.70	1.24~1.50	28~42	0.8~1.1	0.90~0.98	10~20	13.5~29	0.05~0.15

本试验先将土样晒干碾成粉末, 然后浸填在水槽内作为可冲河床。待土中的饱和水通过槽底的织物滤层自然排尽或经过人工压实后, 再放水进行试验, 除得到黏土等价粒径外, 同时得到等价粒径和允许不冲流速的关系 (表 3)。

表 3 土的凝聚力与允许不冲流速

单位凝聚力 C ($\times 10^2 \text{kPa}$)	0.05	0.10	0.15	0.20
平均等价粒径 d (mm)	0.15	0.97	2.94	6.45
水深 1m 时的允许不冲流速 v_d (m/s)	0.32	0.59	0.86	1.12

当已知黏土的允许不冲流速后, 则可用下式计算海漫末端的冲坑深度^[11]:

$$t = 1.05 \frac{q}{v_c} + h \quad (17)$$

$$v_c = v_{c1} h^{1/6} \quad (18)$$

式中: t ——冲坑在水面以下的深度 (m), q ——海漫末端单宽流量 (m^2/s), h ——海漫末端河床水深 (m), v_c ——水深 h 时河床允许不冲流速 (m/s)。

计算表明, 在同样土质情况下, (14) 式或 (17) 式算得的冲坑深度基本一致, 只是前者用等价粒径; 后者用不冲流速。

六、结 语

本文是在早期研究基础上, 通过专题研究对中、低水头闸坝工程的消能冲刷问题进行

* 对文中涉及的工程单位, 采取标注的方式说明和法定计量单位的转换关系 (以下同), 特此说明——编者注。

行系统总结。同时,补充折坡扩散水跃、翼墙扩张型式和黏土局部冲刷等问题,为新型消力池的水力设计提供研究成果。

参考文献及资料

- [1] Bradley J. N. and A. J. Peterka Hydraulic design of stilling basins (Basin V). Jour. Hydraulic Division, ASCE, 1957: 83 (Hy5)
- [2] Kindsvater, C. E. The hydraulic jump in sloping channel. Trans. of ASCE, 1944: 109, p. 1107
- [3] 王瑞彭. 折坡消力池水跃水力计算. 水利学报, 1987: (2)
- [4] 毛昶熙. 闸坝下游消能指标问题. 人民黄河, 1986: (4)
- [5] Hus En-Yun, Discussion on control of the hydraulic jump by sills, by John W. Forster & Raymond A. shrinde, Trans. of ASCE
- [6] 毛昶熙, 周名德等. 闸下消能初步综合研究. 南京: 南京水利实验处, 1955
- [7] 毛昶熙. 土基上闸坝下游冲刷消能问题. 水利学报, 1984: (1)
- [8] 毛昶熙等. 水工建筑物下游局部冲刷综合研究. 北京: 水利电力出版社, 1959
- [9] Khalifa A. M. *et al.* A radial hydraulic jump. Jour. ASCE, 1979: (Hy9)
- [10] 周名德, 蒋梁, 毛昶熙. 低弗氏数闸坝下游消能冲刷实验研究报告. 南京: 南京水利科学研究院, 1987
- [11] Россинский К. И. Местный размыв речного дна в нижних бьефах крупных гидротехнических сооружений. Проблемы регулирования речного стока, С.94—187, Выпуск 6, АН СССР, 1956