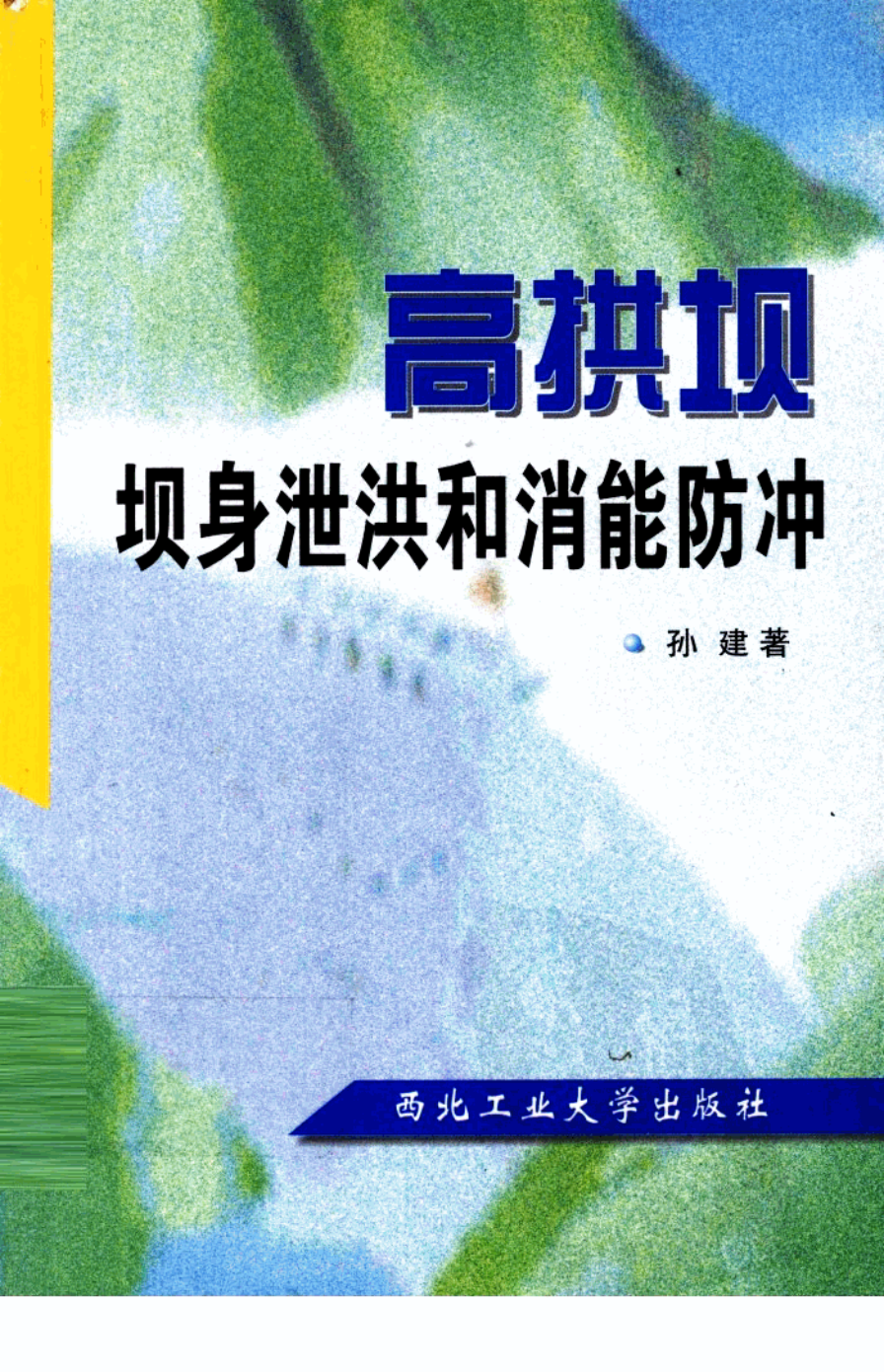




高拱坝

坝身泄洪和消能防冲

● 孙建著

西北工业大学出版社

高拱坝坝身泄洪和消能防冲

Flood Discharge and Energy Dissipation by Jets from Outlets in High Arch Dam

孙 建 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书介绍了作者在水垫塘水力学方面的最新研究成果,内容主要包括挑流水舌在空中以及在水垫塘中的扩散规律、水舌空中掺气对水垫塘底板动水压强的缩尺影响、多股分层挑流水舌作用下水舌入水优化间距及基岩冲刷平衡深度的数学模型、多股挑流水舌上下碰撞及左右碰撞作用下基岩冲刷平衡深度的数学模型、护坡不护底水垫塘基岩冲刷平衡深度的估算方法、护坡不护底水垫塘体型的试验研究、平底水垫塘底板稳定的数值模拟和反拱水垫塘底板稳定性的研究。

本书可供水利工程研究、设计人员及大专院校水利专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高拱坝坝身泄洪和消能防冲/孙建著. —西安:西北工业大学出版社, 2002. 6

ISBN 7-5612-1426-X

I. 高… II. 孙… III. ①高坝; 拱坝-坝体-泄水能力-研究 ②高坝; 拱坝-坝体-消能(水流)-研究 IV. TV642. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 095984 号

出版发行: 西北工业大学出版社

通信地址: 西安市友谊西路 127 号 邮编 710072 电话: 029-8493844

网 址: <http://www.nwpup.com>

印 刷 者: 长安县第二印刷厂

开 本: 850 mm×1168 mm 1/32

印 张: 9

字 数: 221 千字

版 次: 2002 年 8 月 第 1 版 2002 年 8 月 第 1 次印刷

印 数: 1~1060 册

定 价: 25.00 元

前 言

自从新中国诞生至今 50 多年来,我国在水利水电建设方面取得了巨大成就,现已是世界上建坝数量最多的国家^[1]。其中,拱坝有两个显著的特点:一是高拱坝数量剧增。坝高现已超过 200 m,正向 300 m 级迈进。例如,1999 年建成的二滩拱坝,坝高为 240 m;金沙江上拟建的溪洛渡拱坝,坝高为 283 m;澜沧江上拟建的小湾拱坝,坝高为 292 m,建成后将是世界上最高的双曲拱坝。二是坝身泄量和坝身泄洪功率大为增加。例如,溪洛渡坝身泄量超过 $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$,泄洪功率达 32.7 GW,两个指标均达同类坝型的世界之最。坝高和泄洪功率增大给狭窄河谷泄洪消能带来了巨大困难。为此,国家科委在国家“八五”和“九五”期间,对高拱坝泄洪消能的关键技术问题进行了重点研究。在“九五”期间,清华大学水电系承担了两项国家“九五”重点科技攻关子题项目,分别是“小湾工程水垫塘优化布置动床模型试验研究”^{*}和“溪洛渡水电站反拱水垫塘优化与底板稳定性试验研究”^{**}。作者作为主要完成人之一,承担并完成了这两项“九五”攻关项目。在此基础上经过提炼和深化,完成了博士论文“高拱坝坝身泄洪消能防冲研究”(指导教师是清华大学水电系余常昭教授、李玉柱教授和陈长植教授)。在对博士论文经过再提炼和加工之基础上,撰写了本专著。

* 国家“九五”重点科技攻关项目:小湾工程水垫塘模型试验研究(96-221-05-01-02),负责人李玉柱。

** 国家“九五”重点科技攻关项目:溪洛渡水电站反拱水垫塘优化与底板稳定性试验研究(96-221-05-02-02),负责人陈长植。

高拱坝坝身泄洪消能防冲分为水流和地质两个方面。本书是水力学方面的研究成果。内容涉及水垫塘基岩冲刷和衬砌水垫塘稳定性诸方面。全书共分14章。第1章绪论对冲坑水力学和衬砌水垫塘水力学研究进展作了综述;第2章~第5章对挑流水舌在空中及在水垫塘中的扩散规律进行了研究,并对水舌掺气带来的水垫塘底板动水压强的缩尺影响进行了探讨;第6章~第9章对分层挑流水舌作用下,表中孔水舌上下碰撞和左右溢洪道水舌碰撞作用下基岩冲刷平衡深度以及护坡不护底水垫塘体型进行了研究;第10章~第14章对平底水垫塘底板稳定性和反拱水垫塘底板稳定性进行了研究。

由于作者水平有限,错误难免,诚请批评指正,不胜感激!

作者感谢清华大学水电系李玉柱教授和陈长植教授提供了一个研究国家“九五”重点科技攻关项目的宝贵机会,使作者有幸踏入水力学及河流动力学学科的最前沿,并展现个人的能力。在攻读博士期间,余常昭教授、李玉柱教授和陈长植教授对科学孜孜不倦的追求,严谨求实的治学态度和独到创新的学术思想,使作者受益匪浅,愿以他们作为毕生学习的榜样。

感谢西安理工大学水电学院李建中教授、阎晋垣教授的鼓励和鞭策。

感谢妻子、女儿和家人的理解与支持,没有他们默默无闻的奉献,作者终将一事无成。

孙 建

2001年8月21日于西安

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 冲坑水力学研究进展	1
1.1.1 河床岩石局部冲刷的各种理论	1
1.1.2 河床岩块拔出模式和冲刷机理	5
1.1.3 基岩抗冲流速	7
1.1.4 模型散粒体起动流速	8
1.1.5 河床岩石局部冲刷模拟方法	8
1.1.6 冲坑水力学数值模拟	11
1.1.7 冲坑水力学研究存在的问题	12
1.2 衬砌水垫塘水力学研究进展	15
1.2.1 根据水跃性质划分水垫塘内水流流态	16
1.2.2 根据自由紊动射流划分水垫塘内水流流态	17
1.2.3 水垫塘临底流速	18
1.2.4 水垫塘底板的动水压强	18
1.2.5 水垫塘底板的稳定性	22
1.2.6 动水压强在底板缝隙中传播规律的研究	23
1.2.7 底板块上举力	27
1.2.8 底板块水平作用力	28
1.2.9 反拱水垫塘研究	28

1.2.10 水垫塘设计标准	29
1.2.11 防止水垫塘底板失稳的工程措施	29
第2章 二元挑流水舌空中扩散规律的研究	30
2.1 二元挑流水舌空中扩散厚度	30
2.1.1 水舌空中阻力因数	30
2.1.2 水舌扩散厚度	33
2.1.3 水舌抛射轨迹	35
2.1.4 计算过程	36
2.2 二元挑流水舌掺气浓度	37
2.2.1 掺气水舌空中扩散厚度	37
2.2.2 掺气水舌浓度计算和比较	38
2.3 小 结	39
第3章 三元挑流水舌空中横向扩散规律的研究	40
3.1 三元挑流水舌空中横向扩散的影响因素和试验 研究条件	40
3.1.1 影响因素分析	40
3.1.2 试验研究条件	42
3.2 表孔三元挑流水舌空中横向扩散规律	42
3.2.1 连续式鼻坎	42
3.2.2 底板延伸鼻坎(“半椭圆舌头型鼻坎”)	46
3.2.3 不对称表孔鼻坎	46
3.2.4 不同边墙扩散角的比较和最优边墙扩散角	47
3.3 中孔三元挑流水舌空中横向扩散规律	48

3.4	计算实例	50
3.5	小 结	51
第4章	挑流水舌在水垫塘中的扩散规律研究	52
4.1	自由紊动射流简述	52
4.1.1	二元自由紊动射流理论	53
4.1.2	三元自由紊动射流研究	55
4.1.3	两股自由紊动射流试验研究	57
4.2	二元挑流水舌在水垫塘中的扩散规律研究	60
4.2.1	水舌轴线上的流速分布	60
4.2.2	沿水舌厚度方向最大紊流切应力位置	62
4.2.3	紊流切应力和脉动压强的关系	64
4.3	三元挑流水舌在水垫塘中的扩散规律研究	66
4.3.1	水舌轴线上的流速分布	66
4.3.2	沿水舌厚度和宽度方向的扩散流速	67
4.3.3	水垫塘中任意位置处的扩散流速	68
4.3.4	水垫塘临底流速和动水压强	68
4.3.5	水垫塘临底流速和动水压强计算和试验验证	71
4.4	小 结	72
第5章	掺气对水垫塘底板动水压强缩尺影响的探讨	73
5.1	掺气水舌在水垫塘中扩散的基本方程	74
5.2	计算结果分析	77
5.3	水垫塘底板动水压强缩尺影响的估计	78
5.4	小 结	81

第 6 章 多股分层挑流水舌作用下基岩冲刷平衡深度的研究	82
6.1 多股分层挑流水舌在水垫塘中扩散的	
水力特点	83
6.1.1 水舌入水分布	83
6.1.2 水垫塘中三个扩散区域	84
6.2 水舌入水优化间距范围和最优间距	86
6.2.1 M 点定义和 P 点定义	86
6.2.2 水舌入水优化间距的定义	88
6.2.3 水舌入水优化间距的数学模型	88
6.3 单宽流量	92
6.3.1 几个单宽流量的定义	92
6.3.2 完全混合区中单宽流量的确定	93
6.3.3 计算单宽流量	96
6.4 基岩冲刷平衡深度的预报公式	96
6.5 基岩冲刷平衡深度的计算流程	99
6.6 小湾基岩冲刷平衡深度的验证	100
6.6.1 小湾工程概况	100
6.6.2 水舌入水间距和计算单宽流量	100
6.6.3 试验和计算结果的比较	103
6.7 卡里巴拱坝下游冲刷平衡深度的验证	104
6.7.1 工程概况	104
6.7.2 六中孔平面布置的特点	107
6.7.3 中孔孔口的水力特点	108

6.7.4 水舌在水垫塘中扩散的水力特点	109
6.7.5 基岩冲刷平衡深度的计算和验证	109
6.8 小结	110
第7章 挑流水舌碰撞作用下基岩冲刷平衡深度的研究	111
7.1 挑流水舌上下碰撞作用下基岩冲刷平衡深度的 数学模型	111
7.1.1 碰撞流速	113
7.1.2 碰撞消能效率	114
7.1.3 碰撞能量损失	117
7.1.4 碰撞宽度	117
7.1.5 基岩冲刷平衡深度的分析计算	120
7.2 挑流水舌左右碰撞作用下基岩冲刷平衡深度的 数学模型	122
7.2.1 碰撞流速	123
7.2.2 碰撞能量损失	126
7.2.3 空中扩散宽度和碰撞宽度	126
7.2.4 碰撞后水舌突变	128
7.2.5 基岩冲刷平衡深度的分析计算	128
7.3 小 结	129
第8章 护坡不护底水垫塘基岩冲刷平衡深度的研究	130
8.1 护坡不护底水垫塘基岩冲刷平衡深度	130
8.2 护坡不护底水垫塘坡角处冲刷平衡深度	133
8.3 预挖水垫塘冲刷平衡深度	135

8.3.1 移去堆丘后的冲刷平衡深度	135
8.3.2 预挖水垫塘冲坑分析	138
8.4 小 结	140
第 9 章 护坡不护底水垫塘体型的试验研究	141
9.1 较宽河谷条件下基岩冲刷平衡深度的研究	141
9.2 二道坝高度对水垫塘基岩冲刷平衡深度的影响	143
9.3 护坡不护底水垫塘优化体型的试验研究	146
9.3.1 边坡因数为 0.5 的水垫塘体型	146
9.3.2 边坡因数为 1.1 的水垫塘体型	147
9.3.3 勺型水垫塘体型	148
9.3.4 不同水垫塘体型的比较	151
9.4 小 结	151
第 10 章 平底水垫塘底板块稳定的数值模拟	153
10.1 水垫塘底板块表面动水压强分布	153
10.1.1 动水压强幅值	154
10.1.2 脉动压强相位	155
10.1.3 脉动压强构造	156
10.1.4 脉动压强模拟检验	158
10.2 底板缝隙中的动水压强分布	160
10.2.1 缝隙中一维瞬变流方程的简化	160
10.2.2 缝隙中动水压强波速估算	161
10.2.3 缝隙中的阻尼项	162
10.2.4 特征线方程	162

10.2.5	初始条件和边界条件	163
10.2.6	特征线方程求解	163
10.3	模型中各个影响因素的分析	164
10.3.1	阻尼影响	164
10.3.2	波速影响	165
10.3.3	不同脉动压强样本的影响	173
10.4	数学模型的试验验证	173
10.5	底板缝隙中动水压强的分布规律	173
10.5.1	缝隙中动水压强幅值分布规律	173
10.5.2	缝隙中脉动压强的时域和频域	175
10.6	底板缝隙中流速的变化规律	179
10.7	板块上举力变化规律及瞬时最大上举力机理分析	182
10.7.1	板块上举力变化的规律	182
10.7.2	板块产生最大瞬时上举力的机理分析	183
10.8	板块失稳条件	185
10.9	板块稳定性计算和预测	188
10.10	小 结	189
 第 11 章 动水压强在反拱水垫塘底板缝隙中传播规律的试验研究		
11.1	试验条件及试验组合	191
11.1.1	反拱水垫塘底板分缝和试验模型简化	191
11.1.2	模型制作和试验条件	192
11.1.3	试验组合	194

11.1.4	动水压强采样参数	195
11.2	底板缝隙中动水压强的影响因素	195
11.3	底板缝隙中动水压强幅值分布规律	196
11.3.1	拱圈下游端为盲缝	196
11.3.2	拱圈下游端为通缝	199
11.3.3	缝口对脉动压强幅值衰减的影响	202
11.3.4	缝中动水压强幅值特征	203
11.4	底板缝隙中动水压强的时域和频域特性	204
11.4.1	缝中动水压强时域特性	204
11.4.2	缝口及缝中脉动压强相位同步范围	207
11.4.3	缝中动水压强频域特性	211
11.5	小 结	218
第 12 章	反拱水垫塘底板的稳定机理	220
12.1	反拱水垫塘底板分缝	220
12.2	拱圈结构形式	220
12.3	拱圈荷载和拱圈最不利位置	221
12.3.1	拱圈上的动水荷载	222
12.3.2	瞬时上举力径向分布荷载最大位置	223
12.4	拱圈稳定性机理	225
12.5	拱圈稳定条件	227
第 13 章	反拱水垫塘拱端推力的试验研究	229
13.1	拱端推力试验条件	229
13.2	影响拱端推力的因素	233
13.3	拱端推力幅值变化规律	233

13.3.1 拱端推力分布规律·····	233
13.3.2 拱端推力随下游水位的变化规律·····	240
13.4 拱端推力的时域和频域特性·····	240
13.5 拱端推力的水力计算·····	244
13.5.1 拱端推力时均值的计算模型·····	244
13.5.2 拱端推力时均计算值与试验值比较·····	247
13.6 小 结·····	249
第 14 章 反拱水垫塘和平底水垫塘底板稳定性及其荷载 ···	251
14.1 水垫塘底板稳定性条件·····	251
14.1.1 平底水垫塘底板稳定性条件·····	251
14.1.2 反拱水垫塘底板稳定性条件·····	252
14.2 两种水垫塘底板荷载比较·····	252
14.2.1 平底板块上举力试验研究·····	252
14.2.2 反拱底板可能的极限拱端推力荷载·····	255
14.2.3 反拱底板锚固对底板荷载和底板厚度的影响 ·····	256
14.3 小 结·····	257
附录 ·····	259
附录 1 小湾工程坝身和水垫塘布置参数 ·····	259
附录 2 溪洛渡工程坝身和水垫塘布置参数(XA15 方案)····· ·····	261
参考文献 ·····	263

第 1 章 绪 论

1.1 冲坑水力学研究进展

1.1.1 河床岩石局部冲刷的各种理论

冲坑水力学研究的是挑、跌流水舌作用下围绕河床岩石局部冲刷方面的水力学问题。世界各国的水利工作者在近一个世纪以来对此进行了大量的研究,其中,研究较为系统的是前苏联和我国,目前已形成了各种岩石冲刷理论并建立了数十个冲坑水深预报公式。但岩石冲刷机理异常复杂,从挑、跌流形成气水两相流水舌,到紊动水流作用下岩块拔出和沉积,均受到掺气、岩石节理块大小和构造、岩石裂隙、断层发育程度、节理块胶结程度等因素制约,涉及两相流动力学、岩石力学、水文地质学、岩石水力学等学科。原型观测证明较好的冲坑预报公式误差也在 $10\% \sim 30\%$ ^[2,3]。可见,现有冲刷理论和冲坑预报公式都有一定的适用范围,更不能适用新型挑流鼻坎形式(如窄缝挑坎、宽尾墩挑坎和掺气分流墩等新型消能工)和新型消能方式(如采用多股水舌分层挑跌流、挑流水舌碰撞泄洪等)。因此,冲刷水力学仍待进一步发展。

岩石局部冲刷理论主要有以下几种。

1.1.1.1 以脉动上举力理论研究基岩冲刷

前苏联 Г. А. 尤季茨基是研究河床岩石局部冲刷^[4~8]的开创者之一。他认为岩石局部冲刷(岩块从座穴中拔出和移动)是瞬时压力(脉动和时均)在岩缝中传播的直接结果。这个力包括岩石表

面的动水压力和岩缝中的动水压力。他的试验是在一个二元水槽中进行的。槽上游设置了一个挑角为 35° 的溢流坝挑流鼻坎,在坝下游槽底设计了一个岩块座穴,穴内安放了一个岩块,四周有缝隙,动水压力可以传到岩石底面。试验时量测了这两个力的合力(面压力而非点压力),然后再化为压强水头。这个力实际上就是岩块上举力。我国在 20 世纪 80 年代和 90 年代对岩石节理块的脉动上举力荷载进行了研究^[9,10],提出了脉动压力最大振幅的计算公式^[10]。

Г. А. 尤季茨基的研究是系统的,成果很有应用价值,其冲坑预报公式虽有缺陷,但仍可借鉴。不足之处在于未把岩块上举力和紊动水舌的扩散规律相关起来,从而使成果更具有应用价值。

1.1.1.2 从消能理论来研究岩石局部冲刷

陈椿庭提出了岩石局部冲刷的消能理论^[11]。他从水流能量平衡的角度出发,提出了水垫单位消能率的概念,求得满足消能要求的水垫体积,然后再根据冲坑形状,得到水垫内最大水深。陈椿庭公式形式简单,在我国水利界广泛应用。我国水电部东北勘测设计院、水电部第十一局设计院和中国水利水电科学研究院等单位,对公式中的冲刷系数 K 值,根据原型观测资料和岩石物理性质,制定了 K 值表^[12],设计时可根据岩石的分类选用。因此,陈椿庭公式具有较大的实用价值。

陈椿庭理论存在的问题在于借用平底二元水跃共轭水深和消能率公式进行推导。二元水跃的特点是水流受平底固壁所限,上部水流作紊动扩散,有一个表面旋滚。而冲坑内水流属于三元水跃,冲击区上、下游两侧水流均作自由紊动扩散,至少有两个水跃旋滚。因此,两者水跃消能率不会相同,有试验资料^[13]证明了两种情况下的消能率相差 1.19~3.64 倍。公式推导中所用典型冲坑宽深比对于松散卵石,入射角较小,特别是小鼻坎的情况较为接近;对于大挑射角,床料为混凝土块(模拟岩石)时,冲坑形状较为狭深,

可能会有较大出入。此外,当流量、河床地质条件一定时,陈椿庭理论认为冲坑水垫深度不变,但冲坑水垫深度可能与下游堆丘高度和河床基岩底高程有关。有学者^[14,15]按照河床下游堆丘高度和丘顶水深把冲坑流态分为深水型和浅水型,这一点不无道理。

1.1.1.3 以淹没射流理论研究岩石局部冲刷

河床岩石局部冲刷与挑流水舌在水垫中扩散的近壁流场和压力场有关。日本林掘郎等人在断面水槽中通过对冲坑流场的观测,建立了冲坑底部松散体平衡方程^[16]。德意志联邦共和国根据射流在冲坑中的扩散试验,提出“冲坑深度约为40倍二元射流入水宽度或20倍圆柱射流入水直径”的结论^[17]。国外有人通过观测射流在水垫中的流场,建立了冲坑水深估算公式;国内余常昭^[14,15]、冬俊瑞^[18]、崔广涛^[19]等人根据冲坑临底流速和岩块起动流速相等的条件,建立了冲坑水深估算公式,并给出岩块抗冲系数表。所建立的冲坑估算公式在一定条件下可参考使用。

1.1.1.4 以二元淹没水跃理论建立冲坑平衡水深预报公式

陈菊清^[3]根据水跃理论把冲坑流态分为临界水跃和淹没水跃,建立了临界水跃共轭水深关系,并把这种关系推广到冲坑淹没水跃流态中,再利用一定几何关系,导出冲坑水深。有学者^[10]认为冲坑内为逆坡淹没水跃,利用冲击射流理论导出冲坑水深。两种方法均把反映岩石性质等不确定因素放到一个系数当中,再从原型资料中寻求系数,并对岩石进行分类,从而建立岩石冲刷深度的预报公式。这种冲坑水深预报公式在一定条件下可参考使用。

1.1.1.5 应用随机振动理论预报冲坑水深

刘沛清^[10]应用随机振动理论研究了岩块振动过程和脉动上举力之间的动态关系,更进一步认识了岩块冲刷机理,在此基础上建立了冲坑水深及其发展过程的预报公式。该预报公式在一定条件下可参考使用。