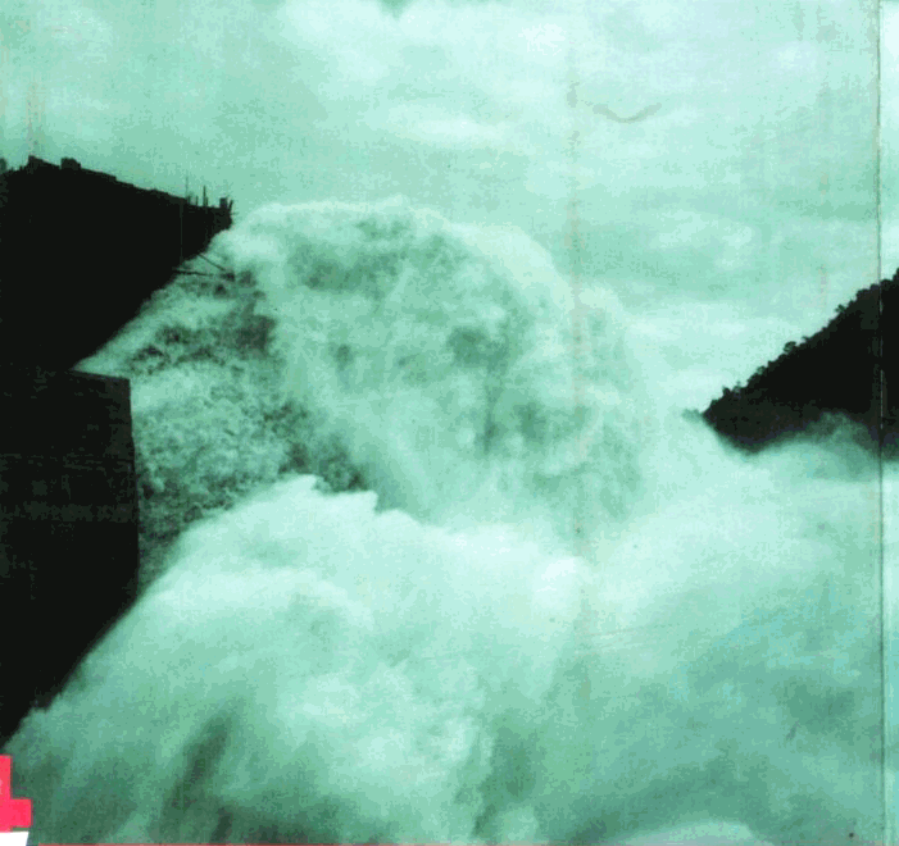




泄水建筑物消能防冲论文选集

——纪念冬俊瑞教授逝世一周年

刘沛清 主编

中国科学技术出版社

泄水建筑物消能防冲论文选集

——纪念冬俊瑞教授逝世一周年

刘沛清 主编

中国科学技术出版社

·北 京·

图书在版编目(CIP)数据

泄水建筑物消能防冲论文选集:纪念冬俊瑞教授逝世一周年/刘沛清主编. —北京:中国科学技术出版社,2000.6

ISBN 7-5046-2842-5

I. 泄… II. 刘… III. 泄水建筑物-消能(水流)-研究-文集 IV. TV135.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 61147 号

中国科学技术出版社出版

北京海淀区白石桥路 32 号 邮政编码:100081

电话:62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市燕山印刷厂印刷

*

开本:850 毫米×1168 毫米 1/32 印张:9.5 插页:1 字数:253 千字

2000 年 9 月第 1 版 2000 年 9 月第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:28.00 元

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

内 容 简 介

本书收集了冬俊瑞教授生前所撰写的或主要参加的具有一定代表性的学术论文,它们分别包括了底流、面流、挑流、戽流等消能形式的主要研究成果。

本书可供从事水工建筑物消能防冲研究领域的科技工作人员参考。

编者的话

为了纪念我们敬爱的导师,我国著名的水工建筑物水力学专家,原清华大学教授冬俊瑞同志逝世一周年之际,我们六位学生编辑并联合赞助这本论文选集的出版,以缅怀为我国水利建设和教育事业贡献毕生精力的冬俊瑞教授,并对他生前所倡导和从事的水工建筑物消能防冲领域的主要研究成果进行交流,以企为我国从事该领域的水利科技工作者提供有益的参考。

冬俊瑞教授的夫人刘瑞苓老师自始至终对本书的组稿、出版过程给予了极大的支持和关注。

清华大学水力学教研室的余常昭、李玉梁、黄继汤、李玉柱、李永祥等老师为本书的组稿给予大力支持,并提出许多宝贵意见。

中国科学院遥感所李乃煌副所长、卫政研究员在本书的出版过程中也给予大力帮助。在此一并致谢。

学生姓名:(按入学时间排名)

周建国(硕士) 赖翼峰(硕士) 徐一春(硕士)

柴 华(硕士) 王艳明(硕士) 刘沛清(博士)

2000年3月

冬俊瑞教授生平简介

冬俊瑞教授,1930年5月生于河北省丰南县,1952年毕业于清华大学土木系水利组,毕业后一直在清华大学水利系任教,1954年加入中国共产党。曾担任水力学实验室副主任、主任,水力学教研组副主任,中国共产党水力学党支部书记、水利系总支委员会副书记、水利系党委委员,系工会副主席、系教学委员会顾问,中国水力学会水力学专业委员会委员、常务秘书、秘书长,水利水电科学基金委员会评议委员,山西水利职工大学兼职教授等职。冬俊瑞教授因患病医治无效于1999年10月24日在北京逝世,终年69岁。

冬俊瑞同志自参加工作以来始终坚持在教育第一线,1955年冬俊瑞同志主持水力学实验室建设,在前苏联专家指导下,将实验室改建为当时国内最先进的水力学实验室。此后,他一直关心着实验室建设和发展,对实验室的发展作出了突出的贡献。冬俊瑞同志曾为我校水利、工物、机械等系讲授过《水力学》、《流体力学》等多门课程。教学工作认真负责,精益求精,努力做到教书育人,注意理论联系实际,效果良好,深受学生敬爱。参加编写的《水力学》荣获国家教委优秀教材一等奖。

冬俊瑞同志长期从事水工水力学研究,曾参加和负责过永定河三家店引水工程、三峡大坝、密云水库、潘家口水利枢纽、五强溪电站、小浪底水库、小湾电站、铜鼓滩航远枢纽、构皮滩水利枢纽等十多个大中型水利水电工程的水工模型实验和水力学专题研究,在水工水力学方面具有很深的造诣。结合研究任务培养了一批研究生,在国内外刊物上发表数十篇论文、报告,出版有《水力学实验》等著作,是我国知名的水工建筑水力学专家。为我国水利水电事业的发展贡献了毕生精力。

序

(编者的话:冬俊瑞教授在世时已形成本文集的雏形,以下的序是由冬教授请余先生撰写的,经余先生同意现原样刊出。)

水利水电建设中,泄水建筑物的消能防冲措施对整个工程的安全运用起保证作用,其建筑费用往往占工程总造价的一个很大比例,使得消能防冲成为工程全局设计的关键问题之一而受到重视。

冬俊瑞教授从毕业后留校任教伊始,既较早地参与了北京三家店永定河拦河闸引水工程水工模型试验的科研工作。随着新中国水利事业的发展,科学与生产劳动相结合的教育方针的贯彻,他多年来参与并负责了多项重点水利工程的水力试验科研任务,特别是在泄水建筑物下游的消能防冲方面,从实践中取得了丰富的经验;并提炼出若干专题,通过承担国家科研攻关项目和自然科学基金资助课题,很好地完成了任务,提出不少很有价值的成果,在重要的会议上交流和国内外主要期刊发表,得到同行的重视和肯定。

本论文集虽仅收集了论文 22 篇,多为 80 年代至 90 年代近期的文章,其实也反映了冬俊瑞教授早年工作的基础,时代上覆盖了 50 年代至 90 年代的主要工作。内容上则在我国消能防冲领域的底流型、面帘流型和挑流型三个主要方面均有新的进展;不仅在工程设计的方法计算上,如帘流型中单圆弧式消力帘及帘式消力池的水力特性;挑流型中对岩基冲刷深度的估算;底流型中齿形尾坎消力池的特性等研究成果;而且在消能机理方面应用激光测速和热膜测速新技术,探测了消能区流段的水流结构和紊动特性,其中面流消能机理与紊动特性的研究成果填补了该项研究的空白。在紧密结合我国工程实际上,从五十年代末的密云水库起直到近年的三峡大坝和小湾 200m 以上高拱坝等重大工程设计都起到了应有的作用。

论文集不仅较全面地反映了消能防冲的实质性内涵,而且由此也可窥见本课题在我国的发展梗概。对于从事水利水电工程建设的

广大技术工作者,以及大专院校该专业的教学人员、高年级本科生和研究生都将是一本很有价值的参考书。

本人与冬俊瑞教授共事四十多载,相知至深,对冬俊瑞教授科研作风的严谨、工作的细致甚为钦佩。出此片言为文集代序,也表祝贺出版之忱。

余常昭

1999年6月于清华园



冬俊瑞教授(1930 - 1999)

目 录

第一章 底流水跃消能

齿形尾坎消力池水力特性研究	(1)
齿形尾坎消力池消能紊动特性研究	(13)
消力池及辅助消能工设计的探讨	(26)

第二章 面流消能

面流消能工程的运行情况与分析	(40)
面流衔接流态的合理运用	(49)
应用二维激光测速系统研究面流消能的紊动特性	(59)
面流消能水面波动特性的试验研究	(69)

第三章 戽流与戽池消能

单圆弧式消力戽水力特性的研究	(78)
戽式消力池的水力特性研究	(98)
面流和戽流平衡冲刷深度估算	(110)
Experimental Study on Turbulent Characteristics and Wave Parameters Under Bucket Energy Dissipators ...	(118)

第四章 挑流消能与冲刷

三峡水利枢纽溢流坝挑流基岩冲刷研究	(133)
挑射水流对岩基河床冲刷的探讨	(152)
在岩缝中脉动压力传播机理探讨	(167)
高坝挑流冲坑流场的数值模拟	(177)
水垫塘内冲击射流特征及其对岩石河床的冲刷	(192)

在冲刷坑底部岩块上的脉动上举力·····	(205)
基岩的抗冲能力及其分类·····	(219)
小湾水电站拱坝下游冲刷平衡深度的试验研究·····	(226)
应用随机振动理论分析岩块的起动过程·····	(239)
热膜测速技术在高坝挑射水流特征与消能机理研究中 的应用·····	(255)
Experimental Investigation of Fluctuation Uplift on Rock Blocks at the Bottom of the Scour Pool Downstream of Three-Gorges Spillway ·····	(271)

第一章 底流水跃消能

齿形尾坎消力池水力特性研究*

冬俊瑞 李永祥

(清华大学)

1 引言

齿形尾坎是德国水力学家 T. Rehbock 根据 Karlsruher 河工实验室试验资料于 1933 年总结提出的。人们称为雷伯克齿坎。它能把消力池中主流分散成上下两层水股,在短距离内可使流速分布调整成底部小上部大的表层式分布,同时齿槽分流水股与坎后底滚相互作用也增强消能效果,可减轻下游河床的冲深。而且对短海漫有较好的适应性,又利于排走尾坎前后的砂石,同时齿形尾坎对泄流有均化作用,可减轻因上游来流不均匀或流量分布不均所造成的冲刷等^[1]。

齿形尾坎消力池在中低水头闸坝工程上应用广泛,我国 50 年代在治淮工程中多有应用。文献[2]总结了部分成果。美国垦务局推荐的 II 型消力池中齿形尾坎是主要消能措施^[3],并规定了结构尺寸和应用条件。文献[4,5]及有关资料^{①②}对齿形尾坎的消能特征等作了概括,都肯定了它对改善下游流速分布、增强消能作用及减少下游

* 刊于《水利学报》1985 年第 8 期。

① 北京水电勘测设计处译。下游护坦设有齿槛的溢流坝。1978 年。

② 长江水利水电科学研究院,东北勘测设计院研究所等。泄水建筑物下游的消冲防冲问题。1980 年。

冲刷和缩短海漫长度的作用。已有实践表明,齿形尾坎仅适用于中低水头($<60\text{m}$)和较小的单宽流量($q \leq 46.5\text{m}^2/\text{s}$)。对单宽流量 q 高达 $180\text{m}^2/\text{s}$ 和更高的水头条件能否采用,本文经过结合国内某电站溢流坝消能方案的试验研究,初步分析表明齿形尾坎是可以应用于大的单宽流量 q 和较高水头的。

试验是在玻璃水槽中选取 2 孔溢流坝进行的,溢流坝正常高水位为 115m ,堰顶高程为 90m ^①;设计水位 122.3m , q 为 $169.61\text{m}^2/\text{s}$,校核水位 125.7m , q 为 $181.95\text{m}^2/\text{s}$ 。消力池长 175m ,池底高程为 42m 。池末尾坎比较了三种形式:连续(梯形)尾坎(池 1 方案)、齿形尾坎(池 2)和台阶尾坎(池 3)。每种坎形又作了海漫长度 $l_p = 100\text{m}$ 与 50m 两组试验。海漫下游为 $d_{50} = 6\text{mm}$ ($D_m = 7\text{mm}$) 均匀砾石的动床模型,参见图 1。

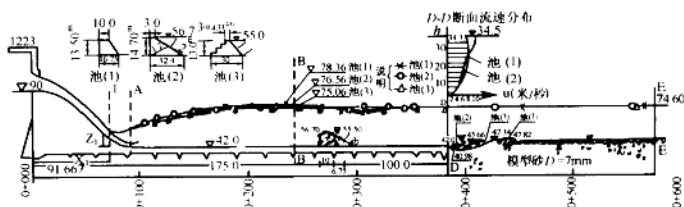


图 1 模型试验消力池水面线及冲坑图(单位:m)

2 齿形尾坎消力池水力特性试验与分析

现针对齿形尾坎消力池的动床冲刷特征、消能过程分析、尾水波动要素及齿形尾坎的空蚀问题等作试验分析,并以连续尾坎作对比。

2.1 冲刷特征参数分析

由图 1 动床冲刷成果可知,齿形尾坎消力池(方案 2)的冲深 ds

① 清华大学水力学教研组。五强溪水电站溢流坝断面模型试验报告。1983 年。

最浅;尤其海漫缩短 50m 后,它有更好的适应性,冲深比其他两个方案更浅,而且坎后未产生床料回卷现象,这充分表明了齿形尾坎的前述优点。对局部冲刷问题,引入冲刷能力系数 K' ,则冲坑中最大水深 t_s 可写成下式^[6]:

$$t_s = K'q/v_0 = K't \quad (1)$$

式中 q 为海漫末端的单宽流量; v_0 为床料的起动流速,即为河道均匀流条件下床料起始推移冲动的流速,经比较,选用武汉水院公式 $v_0 = 1.34 \sqrt{(\gamma_s - \gamma)gd/\gamma(h_D/d)^{0.14}}$, h_D 为海漫末端断面水深。因此 K' 系数常 > 1 。设冲刷稳定后冲坑中平均流速为 v_{0s} ,则与 v_0 成下列关系:

$$K' = t_s \cdot v_0/q = v_0/v_{0s} \quad (1a)$$

现将不同方案的 K' 值列入表 1,可看出连续尾坎 K' 值(平均值为 1.739)比齿形尾坎的 K' 值(平均值为 1.557)为高,表明冲刷能力系数 K' 也反映出齿形尾坎的冲刷作用要小得多。如能积累更多的 K' 值,则可由已知的 q 和床料的起动流速 v_0 代入式(1)直接估算出 t_s 和冲刷深度 $ds = t_s - h_t$ 值(h_t 为尾水深)。当海漫长度缩短为 50m 时,齿形尾坎的 K' 值减小得更多,这更显示出齿形尾坎对缩短海漫长度和减少冲刷的作用。

将海漫末端流速分布不均匀系数 α_0 引入冲刷公式^[7],式(1a)的 K' 可写为

$$K' = \varphi' \sqrt{2\alpha_0 - y/h_D}, \quad (2)$$

式中 α_0 为动量改正系数; y 为最大流速点距河床高度; φ' 为反映消能工、尾坎形式的经验系数。

将 φ' 值计算如表 1,齿形尾坎平均 φ' 值为 1.378,连续尾坎平均 φ' 值为 1.48,也说明齿形尾坎优于连续尾坎。

表 1 冲刷能力系数 K' , 起动流速 v_0 , 经验系数 φ' 计算成果

l_p (m)	z_u (m)	q (m^2/s)	z_d (m)	方案	D—D 断面			ds (m)	t_s (m)	v_{0s}	v_0	K'	φ'
					h_D (m)	α_0	y						
100	115.0	139.75	71.0	池(1)	29.56	1.065	27.28	3.18	29.74	4.70	7.808	1.662	1.513
				池(2)	29.9	1.045	28.58	2.27	29.17	4.79	7.821	1.633	1.533
	122.3	169.61	74.6	池(1)	34.5	1.067	26	5.94	37.44	4.53	7.979	1.761	1.499
				池(2)	34.33	1.178	32	3.0	34.33	4.94	7.974	1.614	1.352
	125.7	181.95	75.7	池(1)	33.96	1.079	24.5	6.06	37.02	4.582	7.961	1.62	1.351
				池(2)	34.16	1.117	32.8	3.06	34.22	4.956	7.968	1.499	1.328
50	122.3	169.61	74.6	池(1)	33.42	1.113	27.3	9.06	39.48	4.296	7.944	1.849	1.558
				池(2)	32.34	1.171	30.5	3.56	32.9	5.155	7.907	1.533	1.297
	125.7	181.95	75.7	池(1)	33.96			10.26	41.22	4.115	7.961	1.804	
				池(2)	33.72			3.75	34.47	4.921	7.954	1.507	

2.2 消能过程分析与估算

尾坎消力池包括池中水跃段消能和下游海漫段消能。水跃段消能占主要部分, 主要因在急流与面滚之间的交界面附近流速梯度很大, 紊动强度也最大, 并产生强烈的附加切应力, 使水流的部分机械能较快地转化为热能而消耗掉, 这已为试验所验证。这个过程是由于水跃中的大尺度旋涡, 通过剪切作用从时均流动中取得能量, 再通过旋涡的不断拉伸、变形, 逐渐变成小尺度旋涡, 通过流体的粘性作用, 能量耗损转化为热能。但这一耗能过程定量上仍难以表述, 目前仅能应用脉动分量的紊动强度来表示^[8]。加设尾坎后, 池中水跃为淹没式强迫水跃; 尾坎高度、坎形和淹没度将对消能产生影响, 齿形尾坎因有分流作用, 跃后水深壅高不大, 淹没度较小, 故其消能作用优于连续坎。

至于下游海漫段消能, 由于齿槽分流, 在尾坎下游形成底部旋

滚,它与顶部主流水股之间也存在流速梯度较大的交界面,过齿槽与过齿坎水流之间也有流速不等的剪切层,这些剪切层一方面使跃尾已经减弱了的紊动强度有所增加,同时齿形尾坎对紊流脉动的衰减作用很显著,加大了紊动耗能作用,并沿海漫长度逐渐衰减。参考前苏联 Н. А. Преображенский 的试验成果^[9],结合本试验的设计水位资料计算脉动特征 p'/γ , N , C_p' 值如表 2。可看出齿形尾坎的紊动强度 N 和脉动压强系数 C_p' 值都比矩形连续(或梯形)坎者小得多,这也验证了齿形尾坎对衰减紊动强度和耗能作用均比另一坎型为佳。

表 2

坝 型	$F_{\gamma A}$	$\frac{1}{h_c}$	$\frac{A}{h_c} = \frac{p'}{\gamma h_c}$	h_c (m)	l (m)	$\frac{p'}{\gamma}$ (m 水柱)	$N = \sqrt{\frac{p'^2}{\gamma h_c}}$	$C_p' = \frac{\sqrt{p'^2}}{\rho v_b^2/2}$
(1)连续坎	6.325	14	0.05	14.318	200.5	0.716	0.0208	0.581
(2)齿形坎	6.325	14	0.026	14.318	200.5	0.372	0.0108	0.299

按淹没水跃估算(图 1)由跃首断面 1-1 至跃尾断面 B-B 和海漫末端断面 D-D 之间的消能量与消能效率 K_j 、 K'_j 如表 3。可以看出,齿形尾坎方案 2,在消力池段中消能作用较大,但至海漫末端消能量 E'_{L1D} 和 K'_{j1D} , K_{j1D} 却和连续尾坎者相近。这说明现有计算时均流动消能量的公式,反映不出实际流体紊动能量的迁移与消耗过程,计算结果是偏大的;它不能宏观地说明齿形尾坎衰减紊动强度减少下游冲刷的耗能情况,这就提出了需要应用现代量测技术深入探讨紊动水流消能机理的新课题。还曾参照文献[10~12]的公式估算消能,因其均属于时均流动公式,因此也说明不了问题。

将估算的时均水流消能率 K_{j1D} 与冲刷能力系数 K' 拟合成线性回归方程^[13]为

$$K_{j1D} = 0.905 - 0.237 K' \quad (3)$$

经检验,相关系数 $r = 0.978$,大于信度为 1% 的起码值 0.959。

2.3 水面波动要素测量分析

由于齿形尾坎能调整流速分布,这种表层式流速分布能否引起较大的尾水波动,从而对下游电站、引航道的运行及两岸防护等产生较大影响呢?为此应用电容式钼丝水位计与光线示波器量测了典型断面 $B-B$ 、 $D-D$ 与 $E-E$ 的全波瞬态图,见图 2。样本时间模型为 37 ~ 52 秒,合原型为 7 ~ 10 分钟。据文献[6]及有关资料^① 对图示波形按强迫不规则的中水波分析了如下波动要素:

表 3 消能量及消能效率估算

海漫长		$l_p = 100m$						$l_p = 50m$			
$Z_a(m)$		115.0		122.3		125.7		122.3		125.7	
$q(m^2/s)$		139.75		169.61		181.95		169.61		181.95	
$Z_d(m)$		71.0		74.6		75.7		74.6		75.7	
方 案		池(1)	池(2)	池(1)	池(2)	池(1)	池(2)	池(1)	池(2)	池(1)	池(2)
跃首断面	Z_1	19.08	11.55	21.62	17.73	18.89	16.0	20.88	15.54	22.5	15.42
	φ_1	0.93	0.93	0.95	0.95	0.96	0.96	0.95	0.95	0.96	0.96
	v_1	30.233	32.275	32.22	33.27	34.22	34.97	32.42	33.85	32.25	35.12
	E_1	65.714	64.697	74.58	74.20	78.618	78.39	74.505	73.987	78.903	78.346
跃尾断面	h_B	32.34	30.00	36.36	34.56	37.09	35.88	34.2	33.06	35.52	33.84
	E'_{1B}	32.42	33.59	37.11	38.4	40.3	41.2	39.06	39.58	42.04	43.03
	K_{j1B}	0.493	0.519	0.498	0.518	0.513	0.526	0.524	0.535	0.533	0.549
	α_B	1.402	1.669	1.426	1.469	1.384	1.378				
	E'_{L1B}	32.04	32.85	36.64	37.84	39.83	40.71				
	K'_{j1B}	0.488	0.508	0.491	0.51	0.507	0.519				

① 姜洪恩、波高样本的采集及其经验分布——不规则波数据处理软件研究之二。
南京水利科学研究所,1982年。