

“十二五”国家重点图书出版规划项目
交通运输建设科技丛书·水运基础设施建设与维护

E_{rosion}
in Dam Downstream

坝下冲刷



乐培九 张华庆 李一兵 著



人民交通出版社
China Communications Press

“十二五”国家重点图书出版规划项目

交通运输建设科技丛书·水运基础设施建设与养护

交通运输建设科技项目经费支持

坝 下 冲 刷

乐培九 张华庆 李一兵 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书较系统地介绍了坝下冲刷有关的泥沙问题、河床变形问题及相关研究的成果,书中第1篇用理论和实际相结合的方法阐述了坝下冲刷河床的演变规律和特点;第2篇介绍了坝下冲刷悬移质、推移质和河床质调整规律的理论和数学表述模式;第3篇介绍了河床变形预报方式、方法及其新改进。

本书内容新颖、逻辑缜密、概念清晰、论述简明、实用性强,可供水利、水运部门工程设计、规划等科技人员和相关专业院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

坝下冲刷/乐培九等著. —北京:人民交通出版社,2013.5

(交通运输建设科技丛书·水运基础设施建设与养护

)

ISBN 978-7-114-10565-4

I. ①坝… II. ①乐… III. ①坝基—冲刷 IV.

①TV64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 084726 号

“十二五”国家重点图书出版规划项目

交通运输建设科技丛书·水运基础设施建设与养护

书 名:坝下冲刷

著 作 者:乐培九 张华庆 李一兵

责任编辑:曲 乐 李 喆

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:14.25

字 数:357千

版 次:2013年6月 第1版

印 次:2013年6月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-10565-4

定 价:34.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

交通运输建设科技丛书编审委员会

主 任：赵冲久

副主任：李祖平 洪晓枫 罗 强

委 员：赵之忠 林 强 付光琮 石宝林 张劲泉 费维军
关昌余 张华庆 蒋树屏 沙爱民 郑健龙 唐伯明
孙立军 王 炜 张喜刚 吴 澎 韩 敏

总 序

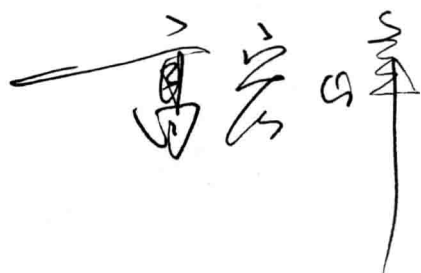
“十一五”以来，交通运输行业深入贯彻落实科学发展观，加快转变发展方式，大力推进交通运输事业又好又快发展。到2010年年底，全国公路通车总里程突破400万公里，从改革开放之初的世界第七位跃居第二位，其中高速公路通车里程达到7.4万公里，居世界第二位；公路货运量从世界第六位跃居第一位；内河通航里程、港口货物和集装箱吞吐量均居世界第一。交通运输事业的快速发展不仅在应对国际金融危机、保持经济平稳较快发展等方面发挥了重要作用，而且为改善民生、促进社会和谐作出了积极贡献。

长期以来，部党组始终把科技创新作为推进交通运输发展的重要动力，坚持科技工作面向交通运输发展主战场，加大科技投入，强化科技管理，推进产学研相结合，开展重大科技研发和创新能力建设，取得了显著成效。通过广大科技工作者的不懈努力，在多年冻土、沙漠等特殊地质地区公路建设技术，特大跨径桥梁建设技术，特长隧道建设技术和深水航道整治技术等方面取得重大突破和创新，获得了一系列具有国际领先水平的重大科技成果，显著提升了行业自主创新能力，有力支撑了重大工程建设，培养和造就了一批高素质的科技人才，为发展现代交通运输业奠定了坚实基础。同时，部积极探索科技成果推广的新途径，通过实施科技示范工程，开展材料节约与循环利用专项行动计划，发布科技成果推广目录等多种方式，推动了科技成果更多更快地向现实生产力转化，营造了交通运输发展主动依靠科技创新，科技创新更加贴近交通运输发展的良好氛围。

组织出版《交通运输建设科技丛书》，是深入实施科技强交战略，加大科技成果推广应用的又一重要举措。该丛书共分为公路基础设施建设与养护、水运基础设施建设与养护、安全与应急保障、运输服务和绿色交通等领域，将汇集交通运输建设科技项目研究形成的具有较高学术和应用价值的优秀专著。丛书的逐年出版和不断丰富，将有助于集中展示交通运输建设重大科技成果，传承科技创新文化，体现交通运输行业科技人员的智慧，促进高层次的技术交流、学术传播和专业人才培养，并逐渐成为科技成果转化的重要载体。

“十二五”期是加快转变发展方式、发展现代交通运输业的关键时期。深入

实施科技强交战略，是一项关系全局的基础性、引领性工程。希望广大交通运输科技工作者进一步增强做好交通运输科技工作的责任感和紧迫感，团结一致，协力攻坚，努力开创交通运输科技工作新局面，为交通运输全面、协调和可持续发展作出新的更大贡献！

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '高' (Gao), '宏' (Hong), and '峰' (Feng), which together mean 'Gao Hong'. The signature is written in a cursive, flowing style.

2011年12月6日

前 言

我国幅员辽阔，人口众多，但人们赖以生存的水资源匮乏，且分布不均衡。为了有效调控、兴利除害，新中国建立后，在一些大江大河中相继建成了大中型水利枢纽，如1961年建成的黄河三门峡水利枢纽、1974年建成的汉江丹江口水利枢纽和2003年蓄水运用的长江三峡水利枢纽等。水库建成后，坝上游发生严重淤积，而坝下游则发生严重冲刷。坝下冲刷对工业生产、农业灌溉及民生取水等工程，河防工程，水运工程，生态环境等都产生了重大影响。如何正确评估各种影响，防患于未然，是国计民生中的重大课题。

坝下冲刷与水库淤积是一个问题两个方面。起因是水库蓄水，导致泥沙在水库内淤积；水库下泄泥沙减少，甚至是清水，导致坝下水流输沙失去平衡而发生冲刷。坝下冲刷是河床自动调整重建平衡的结果，在重建平衡过程中，河流要素如比降、河宽、水深、断面形态、床沙级配等都在不断发生变化，直至达到冲刷平衡为止。这些要素的变化相互关联，相互制约，涉及河床演变学和泥沙运动力学中诸多的理论问题，具有极高的理论价值。

新中国建立后，鉴于三门峡水库淤积的严重教训，国家对泥沙问题十分重视，花巨资进行了河流泥沙观测，积累了丰富的实测资料，为水库淤积和坝下冲刷研究打下了坚实的基础。泥沙问题前人做过大量研究，有不同命名的专著，但命名《坝下冲刷》的尚未见。坝下冲刷既涉及河床演变问题，又涉及泥沙运动问题，是泥沙问题宏观与微观的结合。随着三峡工程的兴建，继水库淤积之后广泛地开展了坝下冲刷研究，至今方兴未艾。为了使研究向纵深发展，著者抛砖引玉，在前人研究的基础上，将已有部分研究成果进行了梳理，旨在强化概念，深化机理；对部分常用成果进行了对比分析，旨在提高适用性；对有争议或尚无定论的问题进行了探索和讨论，旨在使问题深化。主线是围绕冲刷预报中有关问题，试图使预报简便、方法有所改进、精度有所提高。

刘鹏飞、程小兵、王艳华、朱玉德、黄美玲和崔喜凤等参与了本书有关研究、资料搜集和整理、文字打印和绘图工作。本书凝聚了他们的汗水和智慧，是大家共同劳动的结晶，特深致谢意！

交通运输部天津水运工程科学研究院和内河港航研究中心的领导及全体同事在本书的编写和出版工作中给予大力支持、关怀和资助，谨表示衷心感谢！

受作者水平所限，书中观点、方法、立论和演绎错谬难免，敬请赐教！

李悦九 二〇一二年六月
时年七十五

目 录

第 1 篇 坝下河床演变

第 1 章 水库下游再造床	003
1.1 概述	003
1.2 河床下切	004
1.2.1 河床下切的实例	004
1.2.2 最大冲刷深度	006
1.2.3 影响冲刷深度的主要因素	008
1.3 河宽变化	010
1.3.1 河宽调整实例	010
1.3.2 影响河宽变化的主要因素	012
1.4 断面形态调整	014
1.4.1 平滩水位下的河相系数 ζ 的变化	014
1.4.2 不同水位下河相系数 ζ 的变化	015
1.4.3 河槽容积的变化	016
1.4.4 滩槽高差变化	016
1.5 纵剖面的调整	017
1.6 床沙级配调整	020
1.6.1 床沙粗化类型	020
1.6.2 床沙粗化实例	024
1.6.3 粗化对再造床的影响	026
本章参考文献	031
第 2 章 坝下河床演变机理及河型转化	032
2.1 纵向变形特点和机理	032
2.1.1 悬移质沿程冲刷机理	032
2.1.2 推移质沿程冲刷的特点	037
2.1.3 纵向变形特点	042
2.2 平面变形	045
2.2.1 游荡型河段	045
2.2.2 分汊型河段	051
2.2.3 弯曲型河段	053

2.2.4 浅滩演变	058
2.3 河床冲刷对水位的影响	059
2.3.1 影响水位变化的主要因素	060
2.3.2 冲刷前后水位变化特性	060
2.3.3 水位降落与断面调整关系	064
2.4 河型转化问题	067
2.4.1 河型分类及其成因	067
2.4.2 不同河型的河床稳定性	078
2.4.3 建库对坝下河床稳定性的影响	080
2.4.4 冲刷条件下的河型转化	081
本章参考文献	083

第2篇 河床演变泥沙问题的数学描述

第3章 悬移质含沙量恢复基本问题	087
3.1 平面二维悬移质运动扩散方程	087
3.1.1 平均含沙量以体积加权方式表示	087
3.1.2 平均含沙量以流量加权方式表示	089
3.1.3 平面二维扩散方程的有关系数	090
3.2 饱和含沙量垂线分布	092
3.2.1 扩散理论的应用	092
3.2.2 绝对含沙量沿垂线分布	098
3.3 一维不平衡输沙方程的解及 α 系数	101
3.4 均匀沙水流挟沙能力	103
3.4.1 概述	103
3.4.2 功能原理的应用及有关公式	104
3.5 非均匀沙挟沙能力	106
3.5.1 非均匀沙挟沙能力模式概述	107
3.5.2 饱和度与非均匀沙挟沙能力	109
3.6 冲泻质与床沙质	116
3.6.1 悬移质、推移质和床沙的关系	116
3.6.2 D_{k1} 的确定	118
3.6.3 D_{k2} 的确定	120
本章参考文献	121
第4章 推移质输沙基本问题	123
4.1 推移质输沙质量守恒方程	123
4.2 推移质输沙率	125

4.2.1 均匀输沙率	125
4.2.2 非均匀输沙率	128
4.3 推移质级配确定方法	131
4.3.1 概述	131
4.3.2 影响推移质级配的主要因素	132
4.3.3 分组粒径输沙率法	133
4.3.4 公式验证	133
4.4 冲刷条件下的不平衡输沙	136
4.4.1 恒定流冲刷输沙率的变化特性	136
4.4.2 恒定梯级流量清水冲刷输沙率的变化特性	140
4.4.3 非恒定流清水冲刷输沙率变化特性	141
4.4.4 非恒定流的梯级概化	148
本章参考文献	149
第5章 床沙级配的调整及其估算	151
5.1 掺混层和粗化层厚度	151
5.2 沙波高度	153
5.3 掺混层级配的估算	155
5.3.1 已有计算模式	155
5.3.2 沙波床面掺混层级配的估算	157
5.4 粗化层级配估算	159
5.4.1 卵石夹沙河床粗化层厚度及其级配估算	159
5.4.2 分选型粗化层级配估算	160
5.4.3 置换型粗化层级配估算	161
本章参考文献	163

第3篇 河床演变预报计算与模拟

第6章 河床演变预报计算	167
6.1 饱和输沙模式	167
6.2 非饱和输沙模式	170
6.2.1 悬移质非饱和输沙模式	170
6.2.2 推移质非饱和输沙模式	171
6.3 简易计算模式	171
6.3.1 清水冲刷推移质冲刷量随时间和空间变化的计算	172
6.3.2 冲刷深度计算	173
6.3.3 “极限水深”和“止冲流速”	175
6.3.4 水位降落及最大冲刷深度的估算	177

6.3.5 天然河道有关问题的处理	178
本章参考文献.....	180
第7章 阻力计算	181
7.1 阻力的基本概念	181
7.2 均匀流阻力	181
7.3 非均匀流阻力	183
7.3.1 渐变流阻力	183
7.3.2 急变流阻力	184
7.3.3 综合阻力	184
7.4 动床阻力	185
7.4.1 动床阻力构成及其变化规律	185
7.4.2 动床阻力的确定方法	190
7.4.3 预报计算及公式的检验	199
本章参考文献.....	201
第8章 河床变形实体模拟若干问题	203
8.1 主要相似条件	203
8.2 流速比尺的确定	204
8.2.1 阻力相似	204
8.2.2 弗氏数相似	206
8.3 起动相似	206
8.3.1 推移质模型	206
8.3.2 悬移质模型	208
8.4 悬移相似	209
8.5 水流输沙相似	210
8.5.1 悬移质挟沙相似	210
8.5.2 推移质输沙相似	211
8.6 时间比尺	211
8.6.1 水流时间比尺	211
8.6.2 河床变形时间比尺	212
8.6.3 比尺调整	213
本章参考文献.....	214
索引	215

第 1 篇 坝下河床演变

第1章 水库下游再造床

1.1 概 述

冲积河流具有自动调整的趋向性,其调整就是力求保持一定的相对平衡,形成“平衡河流”。所谓“平衡河流”J. H. Mackin(1948年)定义为^{[1],[2]}:“一条平衡河流是经过一定的年月以后,坡降经过精致的调整,在特定的流量和断面特征条件下,正好具有使来自流域的泥沙能够输移下泄的流速。平衡河流是一个处于平衡状态的系统,它的主要特点是控制因素中任何一个因素的改变都会带来平衡的位移,其移动的方向能够吸收改变所造成的影响。”钱宁(1989年)认为在 Mackin 的定义中,除了过分强调坡降调整的作用以外,对于冲积河流的平衡倾向性和调整过程中的反馈特点都作了充分的反映^[2]。

在自然状态下由于年内,年际来水来沙条件的变化,河槽不可能总是正好与其相适应,平衡河流免不了要发生一定程度的变化。但是河床自动调整又总是朝着使变形减小或消失的方向发展,即向平衡方向发展。在一个相当长的时间内随着来水来沙的周期性变化,河床也在作周期性的调整。但其调整始终围绕着一个中心作上下位移,该中心就是一种相对平衡,是一种暂时的,或者说是动态平衡。

水库修建后,坝上游来水来沙条件虽未发生改变,但河段出口边界条件发生了重大的变化;坝下游河床边界条件未发生改变,而河段进口来水来沙条件却发生了重大变化,两者均使原先平衡被打破,进入一个再造床的漫长岁月。水库上游重建平衡是以淤积来实现的,最终将实现淤积平衡;而下游重建平衡是以冲刷来实现的,最终将实现冲刷平衡。淤积平衡要求水流条件增强,冲刷平衡要求水流条件减弱,两者截然相反。

淤积平衡既要悬移质淤积达到平衡,也要推移质淤积达到平衡;对于平原河流,由于悬移质输沙量远大于推移质,只要悬移质淤积达到平衡,就可以认为是淤积平衡;冲刷平衡则不然,因为冲刷使床沙粗化而不可悬,只存在唯一的推移质冲刷平衡。

推移质冲刷平衡实际是一种静平衡,即冲刷至极限平衡时床沙不再运动,床沙不动,推移质输沙率为0。在恒定均匀流条件下可表示为:

$$U - U_c \leq 0 \quad (1-1)$$

式中, U 为断面平均流速(m/s); U_c 为床沙起动流速(m/s)。

以水流连续方程、运动方程(曼宁公式)及沙莫夫公式代入式(1-1)可得:

$$(Q/B)^{\frac{5}{3}} J / n^2 \leq K D^{\frac{20}{21}} \quad (1-2)$$

式中, Q 为流量(m^3/s); B 为河宽(m); J 为能坡; D 为床沙粒径(m); n 为包括沙粒和形态阻力在内的综合糙率; K 为系数,水平床面 $K=77.4$,逆坡或沙波迎水面 $K>77.4$ 。

若只用水流连续方程代入式(1-1)则可得:



$$Q/Bh^{\frac{7}{6}} \leq K'D^{\frac{1}{3}} \tag{1-3}$$

式中, h 为断面平均水深(m), 是 n 和 J 的函数, n 越大、 J 越小, h 越大; K' 为与 K 相类似的系数。

坝下冲刷重建平衡河流体系内各种要素都要发生调整, 调整的目标是满足式(1-2)或式(1-3)。式中 Q 为流域加诸的外在因素, B 、 h 、 D 、 n 、 J 都是内在因素, 是可调的, 各要素既有独立性, 又相互依存, 调整极其复杂多样, 既有个性又有共性, 其中 B 、 h 、 D 是调整的基本要素, n 、 J 潜于 h 之中。下面通过坝下冲刷的一些实例加以阐述。

1.2 河床下切

宽浅断面河底的切应力大于两壁^[2], 若河床可冲, 冲刷便始于河底, 导致河床下切, 而后才会有河床展宽。

1.2.1 河床下切的实例

(1) 丹江口水库下游

丹江口水库建库后的 1960~1978 年, 近坝段黄家港—光化段冲刷最深, 平均冲深 2.48m, 其以下河段冲深递减, 宜城以下由于床沙细, 覆盖层厚, 冲刷厚度转而增大; 远离大坝的泽口以下先淤后冲, 不仅冲走了前期淤积物, 而且净冲刷达 1.0m 左右, 丹江口水库下游各河段冲刷深度见表 1-1^[3]。

丹江口水库下游各河段冲刷深度 表 1-1

地名	距坝里程 (km)	不同时段冲淤深度(m)				
		1960~1978 年	1968~1978 年	1968~1977 年	1977~1984 年	1968~1984 年
黄家港	6					
光化	26	-2.48				
太平店	66	-1.03				
茨河	82	-0.99				
襄阳	109	-0.76				
宜城	159	-0.60				
碾盘山	223	-1.49				
泽口	377		-0.56			
岳口	409			1.10	-2.14	-1.04
仙桃	460			2.61	-2.45	-0.44
汉川	539			1.61	-2.46	-1.01

(2) 万安水库下游

赣江万安水库坝下 10km 处有支流龙泉河入汇, 冲刷河段约 20km。水库运用后 1984~1992 年河段以冲为主, 只有支流入汇断面略有淤积。1992~1996 年近坝段继续冲刷, 其余河段以淤为主, 见图 1-1。近坝段冲刷强烈, 至 1996 年 11 月坝下 1.9km 处平均冲深 2.01m, 其中原深槽平均冲深 1.77m, 即边滩冲深大于深槽, 最大冲深 2.3m^[4]。

(3) 黄河天桥水电站下游

黄河为多沙河流,其中游天桥水电站为蓄清排浑运用,建库前坝下为冲、淤交替以淤为主的河道,床沙为中、细沙。1975 年水库建成后,改变了来水来沙过程,河道汛期淤积,非汛期冲刷,冲刷大于淤积,坝下 6km 的府谷站平均河底高程至 1987 年下降约 2.0m 左右,而其下游 249km 的吴堡站河床高程基本维持不变,见图 1-2^[5]。

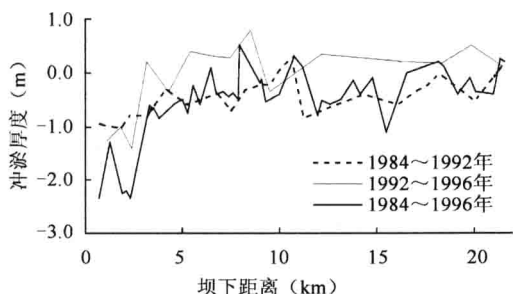


图 1-1 万安水库下游河床沿程冲淤厚度

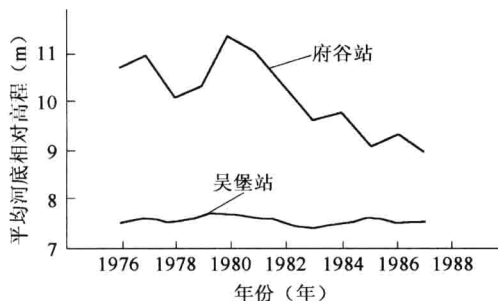


图 1-2 府谷站、吴堡站平均河底相对高程变化

(4) 长江葛洲坝下游

长江葛洲坝为低水头枢纽,1981 年蓄水运用,至 1985 年水库基本冲淤平衡,其下游发生冲刷,水位下降,枯水水面线变化如图 1-3 所示。其中 1966~1980 年,下荆江系统裁弯,产生自下而上的溯源冲刷,石首以上水位大幅下降,水面线变陡;1980~1998 年,除溯源冲刷余波影响外,更主要是葛洲坝影响,冲刷自上而下进行,比降变缓,趋于恢复与 1966 年比降一致。芦家河以上为卵石夹沙河床,其下为沙质河床,因而出现了坡陡^[6]。

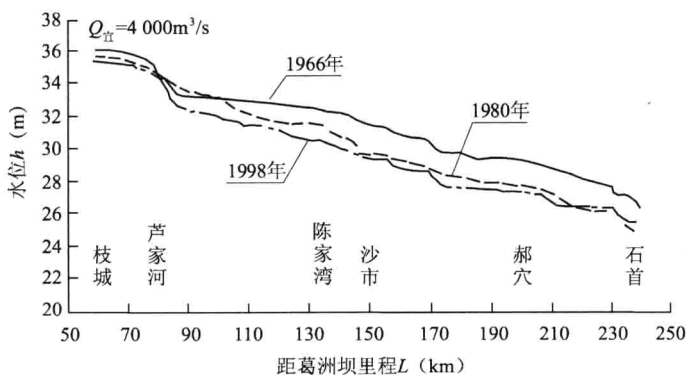


图 1-3 枝城至石首河段枯水水面线

(5) 国外水库下游情况^[2]

钱宁在他的《河床演变学》一书中,给出了由 Williams 和 Wloman 所统计的美国 21 座水库中 9 座水库坝下冲刷深度随时间的变化情况,见图 1-4,由图可知:

①起冲至稳定一般需要 10~20 年,其中最短的是密苏里河兰德尔坝下游约 5 年,最长的是密苏里河加里森坝下游冲刷 22 年还未见稳定。

②最大冲刷深度一般不超过 3m,其中最小的是雷德河丹尼尔森坝下 27km 处只有约 40cm,最大的科罗拉多河格伦峡谷坝下游 16km 处达 7.0m 之多。