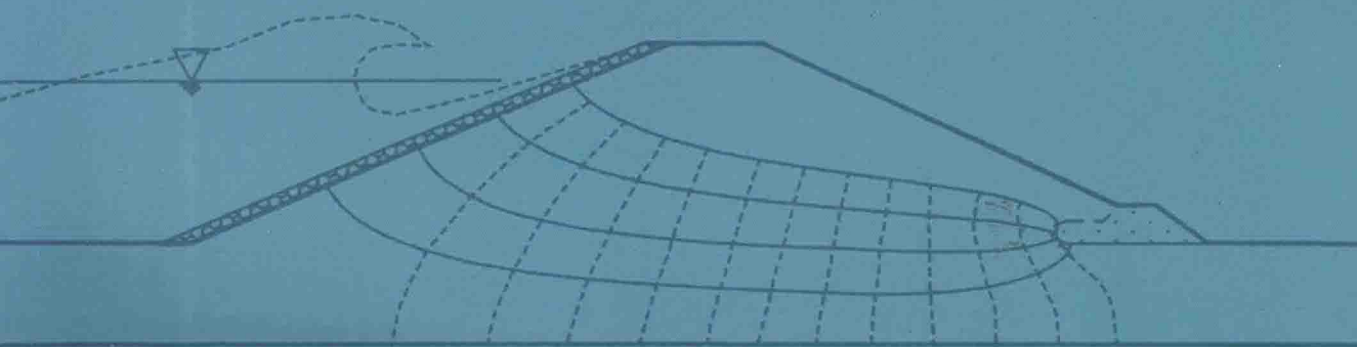


SAFETY OF EARTH DAM AND LEVEE
WITH HYDRODYNAMIC FORCES CALCULATION

堤坝安全与水动力计算

毛昶熙 段祥宝 毛宁



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

SAFETY OF EARTH DAM AND LEVEE
WITH HYDRODYNAMIC FORCES CALCULATION

堤坝安全与水动力计算

毛昶熙 段祥宝 毛 宁

Mao Changxi Duan Xiangbao Mao Ning

南京水利科学研究院 资助出版



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书主要是述评讨论与堤坝安全密切相关的水动力计算问题,即堤坝内部的渗流渗透力与外部的水流冲刷和波浪冲击力。并列专章讨论滑坡、管涌、滤层、崩岸护坡、观测资料分析等。附参考文献约两百篇,多半是作者的研究成果。可供从事堤坝、闸坝、水库岸坡等设计、管理、科研、教学工作参考。

图书在版编目(CIP)数据

堤坝安全与水动力计算/毛昶熙主编. —南京:河海大学出版社,2012.9

ISBN 978-7-5630-3158-0

I. ①堤… II. ①毛… III. ①堤坝—安全 ②堤坝—水动力—计算 IV. ①TV871

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 212243 号

书 名 堤坝安全与水动力计算

书 号 ISBN 978-7-5630-3158-0/TV·333

责任编辑 龚 俊

责任校对 梁 伟 袁 忠

封面设计 黄 煜

出版发行 河海大学出版社

地 址 南京市西康路 1 号(邮编:210098)

电 话 (025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)

经 销 江苏省新华发行集团有限公司

排 版 南京理工大学资产经营有限公司

印 刷 南京工大印务有限公司

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 19.5 插页 1 485 千字

版 次 2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

定 价 50.00 元

目 录

前 言	1
第 1 章 堤坝稳定性与渗流渗透力	3
1-1 堤坝稳定的条件	3
1-2 渗流控制的基本内容与原则	4
1-3 简要渗流计算和渗控措施	6
1-3.1 不透水地基上的土坝	6
1-3.2 降低浸润线的排水措施	8
1-3.3 透水地基上的土坝(下游无水)	11
1-3.3.1 弱透水地基上的土坝($k_0 < k$)	12
1-3.3.2 强透水地基上的土坝($k_0 > k$)	13
1-3.3.3 坝坡与地面的出渗坡降及其防护	14
1-3.4 透水地基上的土坝(下游有水)	16
1-3.4.1 计算方法	16
1-3.4.2 算例	17
1-4 各向异性场土坝渗流	19
1-4.1 各向异性场转换原理和流网	19
1-4.2 碾压土坝各向异性渗流场实例	20
1-4.2.1 强透水地基上的土坝	20
1-4.2.2 不透水地基上的土坝	21
1-4.3 碾压土坝各向异性场的危害与防止	22
1-5 绕坝三向渗流	22
1-5.1 均质土坝三向渗流抬高下游坝坡和两岸渗水高度试验	23
1-5.2 强透水地基上土坝三向渗流渗控措施比较试验	25
1-5.3 地基透水性对抬高渗流自由面的影响试验	31
1-5.4 心墙土坝三维(三向)渗流计算	32
1-5.5 绕坝三向渗流抬高自由面分析与计算公式	34
1-5.6 绕坝三向渗流的危害与防止	37
1-6 非稳定渗流计算	38
1-6.1 库水位下降过程土坝浸润线位置计算	38
1-6.1.1 计算公式推导	38
1-6.1.2 实例计算	40

1-6.1.3 库水位下降快慢的综合参数指标	43
1-6.2 库水位骤降时的土坝浸润线下降试验和计算	44
1-6.3 洪峰过程堤防浸润线进展距离	48
1-6.3.1 不透水地基上的土堤	48
1-6.3.2 透水地基上的土堤	50
1-6.3.3 强透水堤基有防渗墙的堤内湿润线进展	53
1-6.3.4 考虑非饱和土的吸力作用	54
1-6.3.5 典型洪峰(正弦曲线)的简化公式	55
1-7 渗透力	56
1-7.1 单位渗透力的推导	56
1-7.2 力的转化与力的图示	58
第1章及前言 参考文献	60
第2章 水流波浪与崩岸护坡	62
2-1 水流冲刷	62
2-1.1 概述	62
2-1.2 泥沙砾石起动流速	62
2-1.2.1 希尔兹曲线	62
2-1.2.2 起动流速与粒径的关系曲线	64
2-1.2.3 细泥沙与黏性土的起动流速	66
2-1.2.4 粗颗粒砂砾石的起动流速	67
2-1.2.5 非正规水流的块石起动流速	68
2-2 局部冲刷	68
2-2.1 冲刷机理与冲刷基本公式	68
2-2.2 闸坝下游冲刷公式	70
2-2.3 各类型冲刷公式	73
2-2.4 黏性土冲刷与浑水冲刷	74
2-2.5 急射水流岩基河床冲刷	75
2-3 河湾水流冲刷	76
2-3.1 河湾水流特征	76
2-3.2 河湾冲刷部位与冲刷深度	80
2-3.3 河湾的演变	82
2-4 河床冲淤平衡断面估算	83
2-5 江河崩岸与防护措施	85
2-5.1 崩岸原因	85
2-5.2 崩岸类型	86
2-5.3 崩岸实例	87
2-5.4 崩岸防护措施	88
2-6 抛石护岸	89

2-6.1 水流作用下抛石大小计算	89
2-6.2 水下抛石落距定位计算	91
2-6.3 抛石护岸护底范围与布局	93
2-7 波浪冲击	96
2-7.1 波浪作用下泥沙起动	96
2-7.2 波浪冲击下抛石或护坡块体的稳定性	99
2-7.2.1 护坡渗流稳定性	99
2-7.2.2 浪击诱发渗流作用下护坡块体稳定性计算公式	102
2-7.2.3 公式比较与试验资料验证	104
2-8 关于面层护坡设计	106
2-8.1 块体铺面护坡	106
2-8.2 封闭面层护坡	107
2-8.3 面层护坡上的水动力计算	110
第2章 参考文献	112
第3章 滑坡	114
3-1 滑坡计算简介	114
3-1.1 滑坡计算方法与安全系数	114
3-1.2 滑坡计算的垂直条分法(圆弧滑动)	115
3-2 滑坡计算条分法存在的问题	117
3-3 滑坡计算的渗透力有限元法	120
3-3.1 圆弧滑动	120
3-3.2 复合圆弧滑动	127
3-3.3 直线浅层滑坡	128
3-3.4 折线浅层滑坡	130
3-3.5 沿土工膜或防渗层滑动	132
3-3.6 土工膜加筋网护坡抗滑计算实例	133
3-3.7 山体滑坡泥石流的地震力算法	134
3-4 滑坡计算条分法与渗透力有限元法的比较	138
3-5 关于滑坡计算渗透力有限元法的讨论	142
3-6 滑坡的监测与控制措施	148
3-6.1 滑坡迹象与监测	148
3-6.2 滑坡控制措施及实例	149
3-6.3 滑坡后处理及实例	150
第3章 参考文献	151
第4章 管涌	153
4-1 管涌险情与管涌定义	153
4-2 向上渗流管涌的临界坡降	154

4-2.1 均匀砂的临界坡降	154
4-2.2 黏性土的临界坡降	155
4-2.3 管涌的允许坡降	156
4-3 砂砾石的管涌临界坡降	157
4-3.1 管涌土与非管涌土的判别式	157
4-3.2 管涌的临界坡降公式推导	161
4-4 砂砾石各级颗粒的管涌临界坡降	163
4-5 坡面出渗的管涌临界坡降	169
4-6 堤坝下游坡脚地面渗流出口坡降与管涌防护	173
4-7 外部管涌与内部管涌的临界坡降	177
4-8 堤基渗流管涌冲蚀发展砂模型试验	178
4-8.1 堤基渗流管涌临界坡降试验	178
4-8.2 洪峰过程堤基渗流管涌试验	190
4-9 堤基管涌冲蚀发展理论分析计算	194
4-9.1 洪水水位下堤基渗流管涌问题	195
4-9.2 洪峰传播过程堤基渗流理论分析与验证	202
4-10 有地下水流时堤基管涌发展的理论分析计算	207
4-11 判别管涌险情的临界流速和渗流量法	213
4-12 管涌抢险措施	217
4-13 管涌、流砂与液化	220
第4章 参考文献	223
第5章 滤层	226
5-1 滤层作用、分类与设置部位	226
5-2 滤层要求及其研究进展	228
5-3 滤层结构与设计准则	229
5-3.1 粒状滤层	229
5-3.1.1 几何封闭滤层	229
5-3.1.2 几何不封闭滤层	231
5-3.2 土工织物滤层	235
5-4 保护黏土的滤层	238
5-5 透水混凝土滤管与塑料滤网布	241
5-6 井管滤层的淤堵及其抽洗复苏试验	244
5-6.1 室内抽洗井模拟试验	245
5-6.2 现场抽洗减压井试验	245
第5章 参考文献	247
第6章 渗流观测资料分析	249
6-1 渗流压力观测设备与布局	249

6-2 渗流量及水质观测与布局设置	252
6-3 渗流水头观测资料分析	255
6-3.1 测点水位历时过程线	255
6-3.2 测点水位迟后时间	256
6-3.3 测压管的其他用处	258
6-3.4 测点水位相关线	259
6-3.4.1 相关线与选点方法	259
6-3.4.2 相关线实例	260
6-3.5 特定库水位下测点水位过程线	263
6-3.6 测点水头位势分析	265
6-3.7 测压管水位异常现象分析	265
6-3.8 测点水位异常预报险情的必要充分条件	272
6-4 渗流量观测资料分析	274
6-5 绘制流网分析	278
6-6 数据统计分析	280
6-7 计算分析或试验研究的配合	282
6-8 综合分析及结语	283
第 6 章 参考文献	284
附录	285
渗流作用下土坝边坡稳定性有限元法分析(英文)	286

CONTENTS

FOREWORD	1
Chapter 1 Stability of earth dam and levee with seepage flow and seepage force	3
1-1 Stability requirements of earth dam and levee	3
1-2 Basic contents and rules of seepage control	4
1-3 Simply essential calculation and control measures of seepage flow	6
1-3.1 Earth dam on impermeable foundation	6
1-3.2 Drainage measures to lower saturation line	8
1-3.3 Earth dam on permeable foundation, no tail water	11
1-3.3.1 Earth dam on less permeable foundation	12
1-3.3.2 Earth dam on strong permeable foundation	13
1-3.3.3 Exit gradient of seepage and protection on dam slope and ground surface	14
1-3.4 Earth dam on permeable foundation, existing tail water	16
1-3.4.1 Calculation method	16
1-3.4.2 Calculation example	17
1-4 Anisotropic seepage field of earth dam	19
1-4.1 Transformation of anisotropic field and flow net	19
1-4.2 Illustration for anisotropic seepage field of rolled earth dam	20
1-4.2.1 Earth dam on strong permeable foundation	20
1-4.2.2 Earth dam on impermeable foundation	21
1-4.3 Harm and prevention of anisotropic field in rolled earth dam	22
1-5 Three dimensional seepage flow around dam	22
1-5.1 Experiment of the ascending seepage line on downstream slope of homogeneous earth dam and bank due to 3-D seepage flow	23
1-5.2 Experiment of different seepage control measures in 3-D seepage flow around dam on strong permeable foundation	25
1-5.3 Experiment of the permeability of foundation to affect raising phreatic surface	31
1-5.4 3-D seepage flow calculation of core wall earth dam	32
1-5.5 Analysis and calculating formula of raising phreatic surface due to 3-D seepage flow around dam	34
1-5.6 Harm and prevention of 3-D seepage flow around dam	37
1-6 Unsteady seepage calculation	38
1-6.1 Location of saturation line in earth dam during water level descending of	

reservoir	38
1-6.1.1 Derivation of calculating formula	38
1-6.1.2 Practical examples calculation	40
1-6.1.3 Parametric index to define rapid or slow of the water level descending of reservoir	43
1-6.2 Experiment and calculation of the saturation line descending in earth dam during sudden drawdown of water level in reservoir	44
1-6.3 Saturation line progressing distance in levee during a flood peak	48
1-6.3.1 Levee on impermeable foundation	48
1-6.3.2 Levee on permeable foundation	50
1-6.3.3 Saturation line progresses in levee on strong permeable foundation with anti-seepage wall	53
1-6.3.4 Considering the suction effect of unsaturated soil	54
1-6.3.5 Simplified formulas of typical sine curve flood peak	55
1-7 Seepage force	56
1-7.1 Derivation of unit seepage force	56
1-7.2 Transformation of forces and schematic diagram	58
References of Chapter 1 including Forword	60
Chapter 2 Current flow and wave with collapse of river-bank and revetment	62
2-1 Current flow scour	62
2-1.1 General aspects	62
2-1.2 Threshold velocity of sediment and gravel stone	62
2-1.2.1 Shields diagram, 1936	62
2-1.2.2 Relation curve between threshold velocity and grain diameter	64
2-1.2.3 Threshold velocity of fine sediment and cohesive soil	66
2-1.2.4 Threshold velocity of coarse grain, sandy gravel	67
2-1.2.5 Threshold velocity of abnormal flow for riprap scour	68
2-2 Local scour	68
2-2.1 Scour mechanism and basic formula of scour	68
2-2.2 Scour formula for downstream of sluice-dam	70
2-2.3 Scour formulas for different conditions	73
2-2.4 Scour on coheslve soil and scour by silting water	74
2-2.5 Scour of shooting flow on rock bed	75
2-3 Scour of river bend	76
2-3.1 Characteristics of river bend flow	76
2-3.2 Scouring portion and scouring depth along river bend	80
2-3.3 Alteration of river bend	82
2-4 Calculation for equilibrium section of river bed by scouring and silting	83
2-5 Collapse of riverbank and protection measures)	85

2-5.1	Causes of collapse for riverbank	85
2-5.2	Types of riverbank collapse	86
2-5.3	Practical examples of bank collapse	87
2-5.4	Measures for collapse of riverbank	88
2-6	Riprap to protect river bank	89
2-6.1	Calculation for size of riprap under current flow	89
2-6.2	Calculation for falling distance and position of riprap under water	91
2-6.3	Riprap protection scope and arrangement	93
2-7	Wave attack	96
2-7.1	Incipient motion of sediment under wave action)	96
2-7.2	Stability of riprap or revetment blocks under wave attack	99
2-7.2.1	Seepage stability of revetment	99
2-7.2.2	Calculation formula for stability of revetment blocks under induced seepage flow by wave attack	102
2-7.2.3	Formulas comparison and verified by experimental data	104
2-8	Discussion on design of covering layer revetment	106
2-8.1	Blocks pavement revetment	106
2-8.2	Confined covering layer revetment	107
2-8.3	Calculation of hydrodynamic forces on covering layer revetment	110
	References of Chapter 2	112
Chapter 3	Slope sliding	114
3-1	Brief introduction on slope sliding calculation	114
3-1.1	Calculation method of slope sliding and safety factor	114
3-1.2	Slope sliding calculation by vertical slices method, circular arc sliding	115
3-2	Problems in slices method of sliding calculation	117
3-3	Slope sliding calculation using seepage force by F.E.M	120
3-3.1	Circular arc sliding	120
3-3.2	Composite circular arc sliding	127
3-3.3	Sliding of shallow layer along straight line plane	128
3-3.4	Slope sliding of shallow layer along broken line plane	130
3-3.5	Sliding along geomembrane or anti-seepage layer	132
3-3.6	Sliding calculation example using geomembrane and geogrid	133
3-3.7	Calculation method of seismic force for mountain slope sliding with debris flow	134
3-4	Comparison of slope sliding calculation between slices method and FEM with seepage force	138
3-5	Discussion on FEM with seepage force	142
3-6	Monitoring and control measures against slope sliding	148
3-6.1	Slope sliding phenomena and its monitoring	148
3-6.2	Control measures and practical examples of slope sliding	149

3-6.3 Measures with practical examples after slope sliding	150
References of Chapter 3	151
Chapter 4 Piping	153
4-1 Piping risk and definition of piping	153
4-2 Critical gradient of piping for seepage flow upward	154
4-2.1 Critical gradient of uniform sand	154
4-2.2 Critical gradient of cohesive soil	155
4-2.3 Allowable gradient of piping	156
4-3 Critical piping gradient of sandy gravels	157
4-3.1 Criterion of piping soil and non-piping soil	157
4-3.2 Formula derivation for critical gradient of piping	161
4-4 Critical gradient of piping for various grain sizes in sandy gravels	163
4-5 Critical gradient of piping at seepage slope	169
4-6 Exit gradient of seepage and piping protection at toe of earth dam or levee	173
4-7 Critical gradient of exterior and interior piping	177
4-8 Sand model test for piping erosion development along levee foundation ...	178
4-8.1 Experiments on piping critical gradient of seepage flow along levee foundation	178
4-8.2 Piping experiments of seepage flow along levee foundation during a flood peak	190
4-9 Analytical calculation of piping erosion development along levee foundation	194
4-9.1 Piping problem of seepage flow along levee foundation under flood peak level	195
4-9.2 Theoretical analysis and verification of seepage flow along sand foundation during a flood tide peak transmission	202
4-10 Theoretical analysis and calcutation on piping development along levee foundation considering groundwater flow	207
4-11 Discrimination of piping risk by method of critical velocity and seepage discharge	213
4-12 Measures of rapid removing piping risks	217
4-13 Piping, Quick sand and Liquefaction	220
References of Chapter 4	223
Chapter 5 Filter	226
5-1 Filter's function, types and position in structures	226
5-2 Filter's requirement and development	228
5-3 Filter structures and design criteria	229
5-3.1 Granular filters	229
5-3.1.1 Geometrically closed filters	229
5-3.1.2 Geometrically open filters	231
5-3.2 Geotextile filter	235

5-4	Filter to protect cohesive soil	238
5-5	Permeable concrete filter tube and plastic filter cloth	241
5-6	Restoration experiment for well filter clogging	244
5-6.1	Simulated test to wash well clogging at laboratory	245
5-6.2	Field experiment of washing relief wells clogging	245
	References of Chapter 5	247
Chapter 6	Analysis of observation data for seepage flow	249
6-1	Observation equipment and arrangement of seepage pressure	249
6-2	Observation of seepage discharge with water quality and equipment	252
6-3	Analysis of observation data for seepage head	255
6-3.1	Duration curve of piezometric level	255
6-3.2	Time lag of piezometric level	256
6-3.3	Other uses of piezometer	258
6-3.4	Relation curve of piezometric level	259
6-3.4.1	Relation curve and method of selection points	259
6-3.4.2	Practical examples of relation curve	260
6-3.5	Duration curve of piezometric level at specific water level of reservoir	263
6-3.6	Potential analysis of piezometric head	265
6-3.7	Analysis of abnormal phenomena for piezometric level	265
6-3.8	Necessary and sufficient conditions to predict risk from abnormal piezometric level	272
6-4	Analysis of observation data for seepage discharge	274
6-5	Analysis by drawing flow net	278
6-6	Statistical analysis of data	280
6-7	Accompanied with numerical analysis or experimental study	282
6-8	Synthetic analysis with conclusion	283
	References of Chapter 6	284
APPENDIX		285
	Analysis of slope stability of earth dam under seepage flow by F. E. M.	286

前言

FOREWORD

建国 60 年来,已兴建水库土坝 8 万余座,堤防 28 万余 km,说明我国水利建设的巨大成就。堤坝工程在水利建设中可能是占比最大、最普遍的投资项目,也是最直接关系到民生问题的工程。因为堆土挡水,司空见惯,也就容易忽略技术性上的要求,所以完工后遗留下的问题也多。据 1981 年统计的建坝资料,被列为病险水库近半。堤防方面每年汛期洪水泛滥,甚至堤防决口。追查原因,不是归咎于设计考虑不周,就是施工质量不好,或是管理不当。尚未听说,包括非土质的闸坝工程失事在内,是问责于计算错误的。而实际上在工程计算中确实存在着某些概念不清计算错误的问题,它必然会导致工程设计不是危险就是浪费。所以曾把这些问题在第五届全国水工渗流学术会议上专题报告讨论过^[16],希望引起注意。再写这本书也是希望能正确计算那些影响堤坝安全的内外水动力,即渗透力与水流波浪力。

在水动力中,影响整体溃坝起主导作用的自然是内部的渗透力。所以,我们较早编制了渗透力计算滑坡的有限元程序,被搁置几年后由黄文熙教授推荐到岩土学报发表^[22],却遭到了土力学派的反对,并在随后的 20 年间利用学报优势不断反对渗透力算法。最后,达不到预期目的,又于 2003 年底,学报第 6 期主编撰写“焦点论坛”,号召岩土界组织起来反对渗透力观点,说它是虚构的,必须积分,计算很繁,违反了科学崇尚简洁的原则等。甚至还把这些错误概念编入高等土力学教材,而且还拒绝刊登为渗透力辩解、答辩论文,以致形成了“一言堂”学风,也影响了水利部其他学报刊物拒登“渗透力”论文。例如,有一篇鉴定会上推荐的论文,得到某学报退稿的通知是:“赐稿〈渗透力计算承压水降深〉一文不能接受,依据是岩土学报院士主编写文反对渗透力,文附后,鉴谅。”可见办刊物迷信权威之甚!因此为了学术发展,笔者就把这些情况材料投诉到最高学术权威机构科学院、工程院等,也亲自到北京上访,炎炎烈日下跑过两趟,希望能调查这次某学报有组织地攻击不同学术观点的学霸学风。但回音却是劝解“和谐”,不是要执行所倡导的百家争鸣方针。无奈也凑巧,接到一封科技日报社主办的“中国科学家论坛会”邀请函,启发我把这些投诉材料寄到媒体报社科技日报,请在人民大会堂开幕式上递交给中科院领导,并希望在报上发表。这样很快得到了中科院 2005 年 11 月 18 日的正式回信:“你的来信材料已转寄院士所在大学党委。”看后不免令人诧异!几年又过去了,也不知“皮球”踢到哪里?就是这样,石沉大海无人过问,自然学风依旧。我们写的参加在国内召开的滑坡国际会议英文稿“论渗透力”也被拒登,修改土石坝设计规范也不能写入渗透力计算字样,攻读学位博士论文,怕导师敏感也得把渗透力字样删掉,等等。看到听到这些影响学术发展的现象仍然如此严重,笔者只好再写这一本书从理论上、实践中,甚至基本概念上,来维护水工渗流学科的发展及其应发挥的作用。不然,那些水库大坝、江海堤防在那洪水泛滥、浪涛冲击下也平静稳定不下来。

关于水库大坝,特别是土石坝工程,其破坏力当以渗流为最。回顾坝工建设和土石坝发展过程,都是随着设计施工中如遇困难的不断克服而由低坝向高坝发展。从 20 世纪 60 年

代起,建混凝土坝的好岩基渐少,高土石坝相对增多很快(С. М. Слиский, 1979),如前苏联的最高罗贡斯克坝,高 335 m,努列克坝高 300 m;美国的奥罗维尔坝,高 235 m 等^[6]。然而,促使土石坝发展的科学基础,坝工学者布雷特(Breth, 1972)在《土石坝工程发展现状》^[38]一文中写道:首先就是破坏及防止控制的规律,也就是对渗流破坏和渗流控制的发展规律。这种以渗流为首要的提法,可以由国内外垮坝失事统计资料数据加以论证^[1],即渗流破坏最多,占 30%~40%。因此,土石坝的发展,首先是建立在渗流理论和防渗技术的不断提高的基础上。渗流破坏得以防止,高土石坝就有条件向前发展。例如,坝体浸润线位置和孔隙水压力分布的计算和控制方法的改进,就为坝坡稳定分析进一步提供了可靠性。管涌、接触冲刷等渗透变形的临界水力坡降和滤层防护的研究,为防止局部集中渗流破坏提供了预防和有效防护措施。这些水工渗流的发展,还可参考文献^[6]。至于更多、更早的坝工学者认为渗流学科是促使土石坝发展的首要科学基础的,如大卫登可夫(Davidenkoff, 1964)著文《堤坝渗流与稳定性》^[9],卡色葛兰德(Casagrande, 1961)著文《坝基和坝座的渗流控制》^[36]等,以及土力学奠基人太沙基(Terzaghi, 1929)强调说“对坝基质量鉴定,不仅要对地质条件进行研究,而且要精通渗流水力学”^[36]。都说明渗流问题在坝工建设发展中的重要性,没有渗流安全就不可能有大坝安全。

无论是土石坝或堤防,如果没有外力作用,它们都会在自重作用下趋于稳定,只有在外力侵袭作用下会发生不稳定、不安全的问题。例如,堆起来的自然休止干砂土坡,含得葛伦(Cedergren, 1977)作为无限坡分析^[37]:干坡的滑动安全系数 $\eta=1$,有地震时 $\eta=0.7$,有渗流时 $\eta=0.5$,地震加渗流时 $\eta=0.25$ 。由此可以说明外力作用时才能使坝坡失稳,主要外力就是地震和渗流。不过,地震是局部地区和间或性的,而渗流却是普遍存在和经常性的。更概括些说,这两个破坏力是“地”和“水”。水是无孔不入,地又是多孔体,其间必定是相互关联;特别是各自形态不同,互相作用也异。例如,水对混凝土坝来说,认为坝不透水时,只需考虑坝表面上的静水压力,坝前水推力和坝基浮力或扬压力;若有波浪水流冲击,也是作用在坝体外部作为表面水压力考虑。但若一旦水侵入坝体孔隙形成渗流,例如土坝,就必须更正确地考虑内部的渗透力,而且随着坝体各处的不均匀性甚是悬殊,是土坝失稳破坏的主力。因此本书内容影响堤坝稳定性的水动力将在第 1 章主要叙述堤坝内部的渗流场计算分析和渗透力。其次是外部的水动力,将在第 2 章叙述波浪冲击、水流冲刷和护坡的稳定性以及内外水力有关的基本规律。因为堤坝水力稳定性可以区别为总体稳定性和局部稳定性。前者主要是滑坡问题,后者主要是局部土的渗透变形,常见的就是管涌问题。这两者水力稳定性问题,主要是渗透力的破坏作用及渗透力在计算中的应用,将另列第 3 章、第 4 章专章讨论。然后第 5 章叙述防护渗流出口破坏的滤层。最后第 6 章是探测内部隐患评价土石坝稳定性的原型观测资料分析,也是取得真实内部水动力(渗透力)资料、便于验证和土石坝安全的计算方法。全书内容密切关联着水动力作用下土坝岸堤的稳定性计算分析及其防护措施。

为了凸显写这本书的愿望:在科学发展观的旗帜下,维护渗流学科的发展及其对水库大坝安全应发挥的作用。学术要认真公平讨论,学风也不可迷信权威^[44]。因此就把 20 年来岩土学报组织讨论反对“渗透力有限元法计算滑坡”的内容编入第 3 章。为了更广泛地欢迎国内外学者讨论指正,再把那篇滑坡英文稿编在书末,作为附录。

第 1 章 堤坝稳定性与渗流渗透力

Chapter 1 STABILITY OF EARTH DAM AND LEVEE WITH SEEPAGE FLOW AND SEEPAGE FORCE

本章开始叙述堤坝的稳定性要求和必要的渗流控制措施,并简要叙述常规的渗流计算及其排水防护措施;然后对土坝的各向异性渗流、绕坝三向渗流和库水位骤降、缓降等问题,以及堤防的非稳定渗流和洪峰过程等问题进行较多的讨论;最后由渗流场的计算分析引向有关动水压力的渗透力和力的平衡计算法则,也为另立专章的滑坡与管涌提供了应用渗透力简化计算土坝岸堤稳定性的途径。

1-1 堤坝稳定的条件 (Stability requirements of earth dam and levee)

除去特别不利的地质情况(比如处于坝址处的滑坡),一般来说,保证土坝和堤防的稳定条件如下:

- ① 不得遭到淹没,除非有特别防淹没的坝例外。
- ② 作为一个整体必须稳定,即在水压力与自重作用下,整个坝不能发生破坏与滑动。
- ③ 在选定筑坝材料和现存地基情况下,从渗流和孔隙水方面考虑,坝坡必须稳定。此外,迎水坡面还需防止波浪冲击,背水坡面还需防止雨水冲刷。堤防还需多一个防止水流冲刷。
- ④ 渗流不能从堤坝中和底部将土冲出。

除需要满足上述条件外,设计土坝时有时需考虑到,坝体渗漏与坝下渗漏损失不得超过一定限度。另外,在底土会发生沉陷的情况下需检查坝体各部分的沉陷差(尤其是在坝中建造泄水设备时)是否在许可范围内,是否有必要改变坝的设计方案。

上述的几个稳定条件中,第①个条件(不被淹没)在于正确选定坝顶的高程以及泄水工程(溢洪道与底孔等)的工作能力,设计标准可根据径流条件(坝)、洪水位(河堤)、海平面变化与波高(海堤)的研究结果而定。因此,满足第①个稳定条件与我们所谈的稳定性无关,只有在设计中许可堤被淹没过水,才需要特别研究确定适应的堤断面。另外,假定坝是不被淹没的。

余下的三个稳定条件②③④中,第②条件作为满足整体坝的稳定,一般是不成问题。在坝的稳定发生问题时,大多数情况下只表现在坝坡的滑动,同时在底部承载力低(如黏土、泥炭土与极软黏土)时底部一定深度区域也会随之滑动。因此,地基安全性应与坝坡稳定性一起考虑。

为了保证土坝、堤防的稳定性,只有稳定条件③、④两条,即边坡稳定性与防渗流冲蚀土体安全性,在设计土坝时必须满足。这两条也就是滑坡与渗透变形管涌问题,都是坝体内部渗流的渗透力(导致堤坝失稳的主要水动力)起着决定性作用。

1-2 渗流控制的基本内容与原则(Basic contents and rules of seepage control)

欲满足上节所述堤坝稳定条件,首先就是要保证渗流安全,也就必须有渗流控制方案措施。本节将首先概括论述渗流控制的内容及原则,然后再接续以下各节叙述有关的计算分析。

为保证渗流安全,先就渗流控制问题概括叙述如下^[1, 12]。

渗流问题的外观主要是建筑物及其地基与侧岸的破坏和漏水,重点是土的渗流破坏或渗透变形;而引起破坏的内在因素则是渗流水的作用。因此需要通过试验计算或探测来查明渗流场的分布,或者结合不同建筑物类型和发生渗流问题的部位,着重求得下列的水力因素:

(1) 渗流水头(或压力)

对闸坝地基的有压渗流,需要知道建筑物地下轮廓线上的水头分布或浮托力(扬压力)线,以便核算闸坝的稳定性;确定下游出口处截墙或板桩下端的水头,核算出口处该深度地基土是否有发生管涌、局部流土的危险。对于土坝岸堤的无压渗流,则应知道浸润线的位置和坝体内的渗流压力分布,以便核算坝坡稳定;利用土坝下游排水设备降低浸润线使其离开下游坡面有足够的深度,防止冰冻;确定坝基防渗铺盖和斜墙或心墙的沿程渗流水头损失,用以核算设计适宜的 lengths 和厚度。有时为了检查地基某一深度处沿松软土层面的滑动可能性,还需要了解该层面的水头分布。为了检查切断强透水层地基的截墙抗渗强度,还要知道截墙两侧的水头差;为了防止水库下游和堤防背水侧的沼泽化、盐碱化,还应核算下游农田地下水位升高的位置。

(2) 渗流坡降(或流速及渗透力)

由上述的水头分布,很容易得出渗流坡降或流速以及渗透力。应该考虑最大的渗流出口坡降,便于选用滤层,防止外部管涌;对于管涌土的地基,尚应知道地基中的渗流坡降,检验是否会发生内部管涌,影响地基的稳定性;对粗细粒层交界面以及和闸坝基底的接触面,为了避免接触渗流冲刷或细粒的流失,还应知道接触面的渗流坡降或流速;自然,穿过黏土防渗铺盖、心墙、截墙等构件的渗流坡降也应求出,以便核算这些构件的抗渗强度是否满足。有时还得确定坝体内的渗透力,以便核算坝坡稳定性。

(3) 渗流量

计算下游排出的渗漏水量,作为核算排水尺寸的设计依据。有时需要知道穿过透水地基和绕坝端的渗流量,以便估计水库的漏水损失或施工基坑排水设备的容量。对于已建水库则应密切注视漏水量的发现。

因此,渗流控制的基本内容和任务相应如下:

1) 控制下游的剩余水头或水位,减轻下游护坦的浮托力或降低两侧岸渗出水面的高度,增强下游边坡的稳定性;对于保护农田方面则需要控制一定的地下水位,不致因兴修水