

水库土质库岸 崩滑与防治

沈细中 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水库土质库岸崩滑与防治

沈细中 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书设有三篇共 15 章,全面系统地总结了大型水库土质库岸崩滑灾害发生的特点及原因,根据典型水库库岸土体试验成果,揭示库岸土体湿化变形规律、库水位升降及降雨等工况时非饱和土的强度变化规律;考虑库岸土体湿化变形及强度变化等因素影响建立库岸稳定确定性分析模型;引入突变理论、人工智能等理论,建立库岸稳定非确定性评价模型;提出了土质库岸崩滑防治对策,并辅之实例分析,具有较高的工程应用价值。本书可为从事水利工程设计、生产及科研人员探讨水库库岸失稳机理及防治技术提供参考与借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

水库土质库岸崩滑与防治 / 沈细中主编. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2011. 7
ISBN 978-7-5084-8825-7

I. ①水… II. ①沈… III. ①土质—水库—土崩滑塌—防治②土质—水库—坍岸—防治 IV. ①TV697.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第142035号

书 名	水库土质库岸崩滑与防治
作 者	沈细中 主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 11.25印张 267千字
版 次	2011年7月第1版 2011年7月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	30.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《水库土质库岸崩滑与防治》

编写人员名单

主编 沈细中 黄河水利委员会黄河水利科学研究院

参编 兰 雁 黄河水利委员会黄河水利科学研究院

杨 勇 黄河水利委员会黄河水利科学研究院

应敬浩 黄河勘测规划设计有限公司

张 慧 长江科学院河流研究所

前言

自 19 世纪 40 年代起,随着世界各国大型水利水电工程建设的迅猛发展,美国、奥地利、俄罗斯及捷克等地水库岸坡失稳事故时有发生,尤其是 1963 年著名的意大利瓦伊昂水库滑坡事件造成 2600 人死亡的严重后果,引起工程界的足够重视。我国近年来已建及拟建的大型水利水电工程众多,如长江三峡水利枢纽工程、黄河小浪底水利枢纽工程、雅砻江二滩水电站工程、南水北调工程等揭开了我国水利水电建设的新篇章,为我国的经济建设与社会可持续发展打下了坚实的基础。与此同时也产生库岸稳定性问题,库岸崩塌、滑动等事故时有发生,危及下游的大坝及人民生命财产安全,我国每年因滑坡造成的经济损失达 100 亿元以上。因此深入研究大型水库岸坡的变形破坏特征及主要影响因素,建立合适的库岸稳定预测及安全评价模型,对于评价岸坡的稳定性,确保水库正常运行,维持河流健康生命意义重大。

据统计,库岸边坡失稳过程大约 40% 发生在水位上升时期,包括初期蓄水;60% 的水库滑坡发生在库水位骤降时,说明库水位升降对滑坡的发生有着重大的影响。国内外学者通过对瓦伊昂滑坡及其他滑坡事件研究表明,库岸稳定主要与水文气象、地质地貌、河流及水动力、地震及人类活动等有关。在此基础上,Cojean (1990) 等在考虑边坡结构的情况下对稳定性演化进行了定量分析。后来建立了剩余推力法、极限平衡法、数值分析法、图解法及复合法等库岸稳定确定性分析方法,其中数值分析法的发展较快,有限元分析已经从平面到三维,从弹性到弹-塑-黏性,使有限元分析结果更能反映实际情况。之后引入模糊、神经网络、遗传算法等理论,建立了一系列的库岸稳定非确定性分析方法。从理论上说,实际中没有绝对确定性,因而非确定性分析更接近实际情况,发展前景广阔。

对于土质库岸,在库水位骤然升降及降雨入渗较长等条件下,库岸坡体内水分改变,渗水压力场重新分布,土体处于非饱和-饱和交替变化状态,土料产生湿化变形,强度降低,易发生库岸崩塌与滑动。而目前土质库岸边坡崩滑数值模拟较少考虑滑坡体土体参数随渗流场的变化,常采用饱和土体有效强度参数进行滑坡体稳定及应力应变计算,难以真实表征与模拟土质库岸崩塌与滑动发生的本质及过程。

本书作者经过四年研究，深入调查了大型水库土质库岸崩滑灾害发生特点及原因，实地选取小浪底水库及三门峡西段村水库岸坡典型土样，进行了大量库岸土体试验，根据试验成果，揭示土料的湿化变形规律、库水位升降及降雨等工况时非饱和土的强度变化规律。在此基础上，建立考虑库岸土料湿化变形及强度变化等因素影响的库岸稳定确定性分析模型；并通过引入突变理论、人工智能等理论，建立库岸稳定非确定性评价模型，据此提出相应库岸崩滑防治对策。

全书共分三篇 15 章，第一篇调研，分析了国内外水库边坡失稳研究动态，介绍水利水电工程岸坡失稳特点，以及试验典型断面基本情况；第二篇试验，以小浪底水库及三门峡西段村水库岸坡典型土质为研究对象，总结分析库岸边坡土料湿化变形、非饱和土强度及现场监测试验成果、影响因素及变化规律；第三篇机理与防治研究，根据试验成果，建立库岸稳定性分析的确定性 & 非确定性评价模型，在此基础上，提出大型水库土质库岸崩滑相应防治对策，并进行实例分析。

本书较好地解释了库水位升降引起库岸崩滑事故的根本原因及主要影响因素，提出考虑多因素（土的湿化变形、非饱和土强度变化、水位升降及降雨）影响的库岸稳定确定性分析方法，引入突变理论、人工智能建立库岸稳定非确定性评价模型，可为广大从事水利工程设计、生产及科研工作的工程技术人员了解水库库岸失稳机理及其防治提供参考与借鉴。

本书编写人员分工如下：黄河水利委员会黄河水利科学研究院沈细中编写第 8 章～第 12 章，兰雁编写第 4 章～第 7 章，杨勇编写第 13 章、第 15 章；黄河勘测规划设计有限公司应敬浩编写第 1 章、第 2 章；长江科学院河流研究所张慧编写第 3 章、第 14 章；全书由沈细中统稿校核。在本书的编写过程中得到了常向前、冷元宝、张敏、张俊霞、李莉、杨小平、马卫东、李海晓、孟献颖、王笑冰、郑军、刘巍巍等同志的协助及大力支持；编写过程中，参考并引用了国内外大量专家学者的科技成果；本书得到了国家自然科学基金重点项目（编号：60934009）、科技部科研院所社会公益研究专项（编号：2005DIB3J054）经费的资助，在此一并表示最诚挚的谢意。

由于土质库岸组成各异，失稳情况较为复杂，本书仅以小浪底水库及三门峡西段村水库库岸为例进行试验及分析研究，尚存在诸多缺点与不足之处，敬请读者批评指正，相关意见或建议请发电子邮件至 shenxz@126.com。

编者

2011 年 3 月

目 录

前言

第一篇 调 研

1 绪论	3
1.1 边坡稳定研究动态	3
1.2 库岸崩滑机理及防治研究动态	4
1.3 土质库岸崩滑机理及防治研究动态	7
2 水利水电工程岸坡稳定情况调查	13
2.1 概述	13
2.2 小浪底水利枢纽工程	15
2.3 三门峡槐扒黄河提水工程	22
3 典型断面基本情况	25
3.1 小浪底水库 1 号、2 号滑坡体	25
3.2 三门峡西段村水库泄洪道边坡崩滑体情况	29
3.3 典型断面选取	33

第二篇 试 验

4 常规土工试验成果与分析	39
4.1 现场土体的物性试验	39
4.2 颗粒分析试验	40
4.3 固结及渗透力学试验	41
4.4 直剪力学强度试验	44
4.5 常规三轴力学试验	46
5 湿化变形试验成果与分析	53
5.1 湿化变形试验成果	53
5.2 湿化变形试验成果分析	54
6 非饱和土试验成果与分析	57
6.1 非饱和土土水特征及力学试验	57
6.2 非饱和土试验成果规律分析	59

7 现场监测成果	66
7.1 小浪底水库 1 号、2 号滑坡体地表变形监测网布设	66
7.2 小浪底水库 1 号、2 号滑坡体表面变形监测成果	67
7.3 三门峡西段村水库消力池滑坡体观测成果	69
7.4 小浪底水库 1 号滑坡体水平位移成果分析	69
7.5 小浪底水库 1 号滑坡体垂直位移成果分析	71

第三篇 机理与防治研究

8 土质库岸饱和—非饱和渗流分析	77
8.1 概述	77
8.2 计算模型与参数	77
8.3 库岸饱和—非饱和渗流分析	79
9 库岸土体湿化变形研究	87
9.1 概述	87
9.2 湿化变形分析原理	87
9.3 算例分析	88
10 非饱和土的强度特性与本构模型研究	95
10.1 非饱和和低液限黏土总应力强度指标计算公式	95
10.2 非饱和和低液限黏土有效应力强度指标计算公式	100
10.3 非饱和土的修正 Duncan—Chang 模型	104
11 库岸稳定确定性分析模型研究	106
11.1 概述	106
11.2 土质库岸安全评价的极限平衡法	106
11.3 土质库岸安全评价的有限单元法	121
12 库岸稳定非确定性分析模型研究	127
12.1 概述	127
12.2 库岸稳定参数反分析模型	127
12.3 库岸稳定预测模型	134
12.4 库岸稳定安全评价模型	139
13 土质库岸崩滑防治对策研究	145
13.1 监测和预报	145
13.2 综合治水	146
13.3 减载与反压	146
13.4 主动防护	147
13.5 被动防护	147

13.6	滑带土改良·····	148
13.7	坡面防护·····	148
13.8	防护措施综合运用·····	149
14	实例分析 ·····	151
14.1	小浪底库岸 1 号滑坡体概况·····	151
14.2	小浪底库岸 1 号滑坡体稳定计算模型·····	152
14.3	水库蓄水过程滑坡体稳定分析·····	154
14.4	滑坡体稳定性分析方法与参数的合理性评价·····	157
14.5	滑坡体稳定性分析成果·····	159
14.6	滑坡体防治措施评价·····	160
15	结语 ·····	165
	参考文献 ·····	167

第一篇 调 研



1 绪 论

1.1 边坡稳定研究动态

1.1.1 国外边坡工程稳定性研究动态

工程实践的需要是岩土工程得以快速发展的主要动力,边坡工程的稳定性问题是岩土工程的主要研究内容之一。纵观国外边坡工程稳定性研究的发展历程^[1-2],大体可划分为以下三个阶段。

第一阶段:20世纪20年代以前,边坡工程稳定性研究处于起步阶段。边坡工程稳定性的计算分析,基本采用材料力学和土力学的原理和方法,以半经验、半理论性质并假定滑动面具有某一固定位置和形状为显著特点。

第二阶段:到20世纪50年代,边坡工程稳定性分析进入了重要发展阶段。以采用均质体弹塑性理论和极限平衡理论,能够考虑岩体材料的特性及岩体结构面对边坡失稳的控制作用为显著特点。

第三阶段:20世纪60年代以后,边坡工程稳定性分析进入了深入发展阶段。将岩体视为黏弹性、弹塑性或具有裂隙的脆性介质,并开展了岩体非均质、各向异性、非连续性、岩体应力应变关系及岩体流变特性等研究。

1.1.2 我国边坡工程稳定性研究动态

我国边坡工程稳定性问题的研究可划分为以下四个阶段^[3]。

第一阶段:20世纪50年代,我国开始对露天煤矿边坡、铁路路堑边坡和引水渠道边坡问题进行研究。当时着重从边坡工程造成的地质灾害出发,进行边坡工程破坏的定性分类,利用刚体极限平衡法以及工程地质类比法,对边坡工程的稳定性进行评价和设计^[4]。

第二阶段:20世纪60年代,孙玉科等提出了岩体结构及控制的观点^[5-7],划分边坡岩体的结构类型,并应用赤平极射投影原理,提出了实体比例投影法,进行块体破坏的计算、判断边坡工程的稳定性。同时,结合露天煤矿边坡工程稳定性研究,开展了野外大型工程岩体的力学试验^[8-9],在边坡工程的稳定性计算方面取得了很大的进展。

第三阶段:从20世纪70年代开始,进行边坡工程变形破坏机制的研究。在计算分析方面,不仅应用极限平衡原理,还应用弹塑性力学等理论,并广泛采用有限单元法等来分析边坡工程变形的破坏条件,评价边坡工程的稳定性。到20世纪70年代末80年代初,已经形成了一套比较完整的工程地质力学理论和方法^[10],积累了比较丰富的工程实践经验。

第四阶段:20世纪80年代以后,边坡工程稳定性研究进入了一个新的发展阶段。随着计算理论及计算机技术的迅猛发展,数值模拟技术已广泛应用于边坡工程稳定性研究

中^[11], 并逐步从定性过渡到半定量研究边坡工程的变形破坏及其内部的作用过程, 从整体上认识边坡工程变形破坏的机制和边坡工程稳定性的发展趋势; 与此同时, 诸多学科间的相互交叉、渗透, 许多与现代科学有关的系列理论方法^[12-15]得到应用, 使边坡工程稳定性研究进入了一个新的发展阶段。

1.2 库岸崩滑机理及防治研究动态

20 世纪初, 一些国家就开始从事库岸崩滑机理研究, 进行了结构模型试验, 并逐渐建立了相似理论, 提出了一些理论公式。20 世纪 60 年代, 以 E. Fumagalli 为首的专家们在意大利结构模型试验所开创了工程地质力学模型试验技术。J. A. Shby 最早把倾斜台面模型技术用于研究边坡破坏机制及过程。随后, 葡萄牙、苏联、法国、德国、美国、日本等也开展了库岸模型试验研究。目前模型试验相似判据的理论推导已趋于成熟, 相似材料的研究也取得了一些成果。

从 20 世纪 70 年代开始, 中国水利水电科学研究院、南京水利科学研究院、长江科学院、黄河水利科学研究院、清华大学、武汉水利电力大学、河海大学、四川大学、华北水利水电学院、郑州大学、黄河规划勘测设计研究院等单位, 结合大型水利水电工程中库岸稳定问题, 开展了试验研究, 如对葛洲坝、三峡、小浪底、二滩、锦屏等工程中的库岸崩滑及防治问题开展了大量研究, 取得了一大批重要的研究成果。

我国学者开展了大型水利工程库水位升降后边坡失稳模拟试验, 试验研究方法常采用离心机模型、人工水槽、小比例实体模型模拟边坡变形破坏过程。西南交通大学黄涛(2002)应用相似条件, 模拟一含软夹层均质边坡模型, 得到了均质边坡稳定性与地表水入渗量历时关系曲线。南京水利科学研究院徐光明等(2003)应用离心模型试验对工程中颇为关注的带有与边坡走向一致的倾斜基岩面进行了研究, 对基岩面存在软弱夹层的边坡稳定性和破坏模式进行了比较详细研究, 并利用极限平衡法对试验结果进行了计算分析。四川大学张林等(2005)开展了锦屏一级水电站高拱坝坝肩整体稳定地质力学模型试验研究, 重点模拟两坝肩岩体中软弱结构面强度弱化的影响, 研制了适合该工程的变温相似材料及试验模拟新技术, 并在模型上进行了强度储备与超载相结合的综合试验。浙江大学李焕强等(2008)应用边坡小实体模型, 开展降雨入渗对边坡性状影响的模型试验, 构建不同坡角边坡物理模型, 开展人工模拟降雨实验, 对坡体进行分层量测。同济大学姜海西等(2008)应用人工水槽, 模拟升降水作用下岩质边坡破坏过程, 利用波流系统进行升降水位, 量测并分析岩质边坡各测点的应力变化。通过开展大量模型试验, 辅之以理论分析, 推动了库岸崩滑及防治研究的进程。

1.2.1 库岸崩滑机理^[16]

水库滑坡是由于斜坡岩土体抗剪强度的降低及下滑力增大而造成的。影响斜坡岩土体抗剪强度降低及下滑力增大的因素很多, 包括库岸地形、地质结构、物质组成、库水位变化及人类活动等, 其中斜坡岩土体的地形地貌、地质结构与物质组成等是产生滑移的内在条件; 而地下水位的频繁变化、库区移民修建住房与公路等土木工程建设也往往是促使斜坡岩土体滑移的外部因素。对水库滑坡来说, 产生滑移的原因是多方面, 往往是这些因素

相互作用的结果。

1.2.1.1 地层岩土体性质

在库区斜坡岩土层中,具有透水构造、聚水条件(包括库水位骤降而滑坡体内水体难以及时排出)和软弱面(该软弱面也有隔水作用)等条件时,容易形成水库滑坡。

1.2.1.2 库岸地质构造

岩土体构造和产状对库岸斜坡岩土体的稳定、滑动面的形成和发展影响很大,一般堆积层和下伏岩层接触面越陡,下滑力越大,滑坡发生的可能性也越大。容易产生滑坡的地质构造主要有:活动性强的构造单元交接带易产生滑坡,诸如在槽向斜、槽背斜、断褶带、块断带等活动性强的构造单元;斜坡岩土体多不稳定,滑坡分布密集;不同构造单元的接合面(带),滑坡分布较集中。

1.2.1.3 库岸地形地貌

库岸斜坡岩土体周边地形及地貌与斜坡岩土体滑动的产生有重要关系。从局部地形可以看出,下陡中缓上陡的山坡地形和上部呈马蹄形的环状地形,且汇水面积较大时,在坡积层中或沿基岩面容易发生滑动。库岸两侧起伏不平的丘陵地貌,往往容易形成堆积层滑坡。在坚硬岩层分布区,顺层条件下,可连续产生许多岩体顺层滑坡;在易风化成黏性土的岩层(如泥灰岩)分布区,以及第三系、第四系湖盆边缘的低丘地区,则常有残积成因的黏性土滑坡连片分布。另外,线状延伸的断层陡崖或其下的崩积、坡积地貌常分布有堆积层滑坡,在断层裂隙水或其他地表、地下水作用下,常产生堆积物沿下伏基岩面的滑动。

1.2.1.4 水位变化

水库滑坡与库水位变化密切相关,水位涨落是影响水库滑坡产生的重要因素。由于水位上涨时,岸边土体被浸泡软化,水位下降时产生动水压力,促使水库岸边滑坡的产生。实践证明,大多数水库滑坡常发生在水位骤降时期。另外,水库水位上升,库岸前缘或坡脚受库水位浸没,并受库水波浪等的反复冲刷,将改变地下水运动条件,形成新的地下水通道,也是造成新滑坡和诱使老滑坡复活的重要原因。

1.2.1.5 人类活动

很多滑坡的形成是由于人为的工程活动造成的。据不完全统计,现代频繁的滑坡灾害至少一半以上与人们的工程开发活动有关,水库滑坡就是人们改变山区河流自然条件而产生的一种滑坡。人为因素主要表现在:修筑拦河坝闸,为了发电、防洪等效益而人为控制水库水位,或快速提高库水位,或快速下降库水位,这些都极易造成水库两岸斜坡岩土体,特别是两岸古滑坡体等滑动失稳;库区移民村镇搬迁建设过程中在坡脚处挖坡造地、修路等,往往出现由于切坡不当,破坏山体的支撑部分,使得斜坡岩土体失去平衡而下滑;村镇修建过程中大量弃土、弃渣往往堆弃在库区河道两侧,当堆弃在古滑坡体、崩塌体等不适当位置时,会引起老滑坡体复活或造成新的滑坡;人为地破坏山坡表层覆盖,破坏了自然排水系统,引起地面渗水作用加强,促进了斜坡岩土体的活动,加速滑动变形。

1.2.1.6 其他

地震引发的滑坡也时有发生,在河川山谷修建大坝,使河流水位抬高上百米,改变了水库及周边的地应力,会出现诱发地震,而水库周边的诱发地震,又会引起水库两侧的斜



坡岩土体的不稳定,出现滑动。另外,在水库边坡区爆破及机械振动等都可能增加下滑力,振松土体结构,易于渗水,同时也会减小土体内抗剪强度而引起斜坡岩土体的滑动。

1.2.2 库岸崩滑防治研究动态^[17-19]

滑坡,作为一种主要地质灾害,由于其产生的条件、作用因素、运动机理的多样性、多变性和复杂性,预测困难,治理费用昂贵,一直是世界各国研究的重要地质和工程问题之一。近20年来,特别是“国际减灾十年活动”开展以来,国际上研究和防治滑坡灾害空前活跃,各项研究进一步扩展和深入,防治工程措施也在完善已有措施的基础上向轻型化、小型化方向发展。在地质灾害防治工程上,我国重点加强了崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害的防治,优先抓好重大地质灾害防治工程。20世纪90年代以来,完成了一批有影响的大、中型地质灾害防治工程,如长江三峡链子崖危岩体防治工程、黄腊石滑坡防治工程、南昆线八渡车站滑坡防治工程与云南省区域泥石流防治工程等。

20世纪60~70年代,我国崩塌、滑坡防治主要采用削方减载、地表排水、桩或墙支挡等工程措施,其中多采用桩、墙等被动受力结构开展治理。20世纪80年代初引入了主动受力的预应力锚固技术,使崩塌、滑坡治理从单纯的被动抗塌、抗滑进入主动或主动与被动相结合的新阶段,为崩塌、滑坡治理带来了新的抗塌、抗滑方法和防护结构。进入20世纪90年代,预应力锚固技术得到了广泛应用,在大型滑坡治理中,预应力锚固技术使用较多;同时开发与应用了斜坡内部加固的多种新型灌浆技术,发展了垂直排水钻孔与深部水平排水隧道相结合的地下排水技术,引进和发展欧洲式柔性拦截网和日本预应力混凝土框格梁坡面防护技术等。

与其他地质灾害治理一样,滑坡防治工程实质上是对灾害地质体的工程地质过程进行控制和改造,使之朝着有利的方向发展。随着新奥法和挪威法的引入,滑坡防治已从单纯采用被动支护进入到采用主动支护(如桩、墙等),以及主动与被动支护(如锚索、锚拉桩等)相结合的阶段。

滑坡防治工程要求地质勘察、设计与施工有机结合,并以“地质”为主线贯穿始终,以“设计”为桥梁沟通“地质”和“施工”。在设计阶段,首先要进行场地详勘,查明滑坡的几何边界条件。通过实验室测试和反算求得滑面的物理力学参数,计算评价滑坡的稳定现状,模拟评价各种治理方案的有效性,并选定最优方案,最后进行施工图设计和监测系统设计。

现代滑坡防治工程设计中,并行设计是现代设计的重要内容,在综合集成制造系统领域中已广泛应用。由于滑坡体条件非常复杂,并行设计必须建立在非常充分的可行性研究基础上;其次,在监测基础上对设计进行反馈,根据现场的实际监测情况,进行动态设计或信息化施工,建立智能专家系统,在20世纪60年代以来,已取得了显著的经济效益。在越来越重视环保的今天,绿色设计已成为现代滑坡防治工程设计的重要组成部分。如在四川省宜宾市翠屏山滑坡防治工程设计和著名风景名胜区陕西骊山明圣宫滑坡防治工程设计中,结合公园的“风水”,在治理滑坡的同时更加美化环境。绿色设计的另一方面的主要内容是地质灾害的开发性治理,重庆万县市望江路滑坡治理在利用抗滑桩阻滑的同时,也考虑其承重性,利用抗滑桩来作为建筑物的基础。湖北巴东二道沟滑坡防治工程设计抗滑桩不仅具有阻滑功能,还具有立交桥基和加固城建局大楼基础的作用。

在滑坡治理工程的实施程序方面,张倬元认为在施工阶段,施工前先建立监测系统获取治理前的初始监测数据,并在施工过程中进行监测以了解施工干扰对稳定性的影响和保证施工安全。

1.3 土质库岸崩滑机理及防治研究动态

1.3.1 土体湿化变形研究方面

湿化是指非饱和土体浸水后在自重作用下土颗粒重新调整其相互之间的位置、改变原来结构,土体产生的变形称为湿化变形^[20-21]。地下水的渗透流动,将对坡体产生动水压力,在动水压力作用下,可能产生潜蚀作用及流沙、管涌等现象,破坏岩土体的结构和强度;同时,由于水的浸泡产生一系列如水解、溶解和碳酸化作用等化学反应,从而改变岩土体的矿物成分,导致岩土体细观结构发生破坏,改变结构特性而影响岩土体的力学性能,即软化。对于黏性土边坡或软土边坡,在地下水的作用下,土体强度将比干燥时大为降低,浸水后的软化现象非常明显,特别是湿陷性黄土、膨胀土边坡,遇水后将急剧变形,严重影响边坡稳定。

黄土在遇水作用时结构破坏产生显著附加沉陷的性能,即黄土湿陷性。黄土的湿陷变形与压缩变形有显著的不同,一般压缩变形是随荷载的增加,使变形量增大,而水的连接阻力的减小是不显著的,压缩变形是逐渐进行的,而且过程较长。湿陷变形是在荷载没有变化的情况下,由于水的渗入而使土的连接阻力显著减弱的一种特殊变形,水浸湿前后土的连接变化很大,所以湿陷往往在较短的时间内形成,且变形量大。水在湿陷过程中所起的作用相当复杂,是一个物理化学作用过程^[20]。原始状态下的黄土含水率较小,土体三相体系中的孔隙基本为空气充填,骨架结构中土粒表面吸附的水膜很薄,水膜具有固体的某些特征,吸力可达几百到上万个大气压,此时吸附水膜在土体骨架中起强化结构的作用。当水分补充时,具有较大吸附力的固体颗粒,有水膜厚度增大,势能降低的趋势,从而导致颗粒间联系力减弱,以致散化。另外,土颗粒接触点处,起胶结作用的结晶盐,在吸附大量水分后,溶解分离,失去连接作用,发生湿陷。大量的水不仅使土体骨架中的固体颗粒间连接力减弱,破坏了土体的原始结构,而且在土粒产生相对位移时起润滑作用。

膨胀土是颗粒高度分散、成分以黏土矿物为主、对环境的湿热变化敏感的高塑性黏土,主要特征为:颗粒组成中胶粒含量较多;黏土矿物成分中蒙脱石等强亲水性矿物占主导地位;土体含水率增大时,体积膨胀并形成膨胀压力;土体干燥失水时,体积收缩并形成收缩裂缝;膨胀收缩变形随环境湿热变化往复发生,导致土的强度衰减,通常液限大于40%,遇水体积膨胀是膨胀土的重要特征。

目前,在土体湿化变形的研究方面,主要是针对土石坝,国内外学者已建立起多种可用于进行土石坝湿化变形计算的计算模型和方法,如由 Nobari 和 Duncan^[21]提出的基于双线法的初应变求解方法;李广信(1990)^[22]提出的割线模型和塑性模型以及沈珠江(1988)^[23]提出的 $C_w - D_w$ 模型等。李广信^[22]应用割线模型和 $C_w - D_w$ 模型计算了小浪底心墙坝在初次蓄水时坝体的湿化变形。研究表明,假定湿化变形与围压力 σ_3 无关,使用

$C_w - D_w$ 湿化模型会导致计算得到的堆石表面层湿化变形过大。魏松等 (2007)^[24]对某坝的粗粒土料进行了不同围压和湿化应力水平下保持应力水平不变的三轴湿化变形试验,研究了湿化变形量及湿化前后的应力-应变体变关系。王强等 (2007)^[25]应用二维随机场局部平均理论和 Duncan - Chang 模型,建立二阶非线性摄动随机有限元分析模型,对某高速公路砂土路基的湿化变形和稳定性进行了可靠度分析。

虽然土体湿化变形研究方面取得了一定的成果,积累了宝贵的资料,试验技术也日益先进,但就目前国内外开展的试验内容与方法来看,都还存在不少值得探讨的问题,如怎样描述土体干湿渐变过程的研究较少,同时,目前库岸稳定分析时较少考虑土体湿化变形的影响,对于水库初次蓄水易发生崩滑的原因难以解释。

1.3.2 非饱和土强度变化规律研究方面

非饱和土在自然界广泛地存在,真正的饱和土在自然界是很少的,尤其在干旱与半干旱地区,由于受气候条件的影响,存在着若干种具有特殊性质的土类,如膨胀土、崩解土(黄土等)、残积土等,统称为“特殊土”,均具有非饱和土的基本特性,即土体内通常存在着吸力。

仲晓晨 (2003)^[26]利用改进后的三轴试验仪,运用轴平移技术,通过试验研究了吸力对非饱和膨胀土强度特性的影响,试验表明,吸力摩擦角 ϕ^b 随吸力变化而变化,两者有一定的相关关系,并在此基础上对非饱和土强度理论公式和有效应力公式进行了修正。

肖元清等 (2005)^[27]为了探讨基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响,采用非饱和土固结排水三轴剪切试验进行了研究,得出在较小的基质吸力范围内基质吸力与抗剪强度之间存在着线性关系。

罗晓辉等 (2007)^[28]基于 Fredlund 的非饱和土抗剪强度理论,在土坡极限平衡分析方法中,考虑分条的土条底面与条间的基质吸力分布对土体抗剪强度的贡献,从而提出了考虑基质吸力作用的土坡极限平衡分析方法。

林鸿州、李广信等 (2007)^[29]通过压力板仪和直剪仪组合试验,探讨了击实土抗剪强度和基质吸力的关系。通过对比土水特征曲线与抗剪强度的关系,并综合其他研究成果,提出了非饱和土中吸力对抗剪强度的影响规律。对于无黏性土,在边界效应区不产生假黏聚力,且内摩擦角不变;在过渡区与非饱和残余区,假黏聚力和基质吸力的关系存在峰值且变化较大,内摩擦角则随吸力增加而增加。对于黏性土,残余体积含水率所对应的最小吸力可能是影响抗剪强度的界限值,小于此吸力值, ϕ^b 可近似为常数。但在非饱和残余区,黏聚力将随土状态路径的不同而变化,对于重塑土,黏聚力降低;对于原状土,黏聚力可能不变或增加。

凌华、殷宗泽 (2007)^[30]在非饱和土强度的研究中,选择含水率代替吸力,研究非饱和土强度随含水率的变化,试验结果表明:随着含水率的增大,强度明显减小,表明含水率对强度的影响较大;且在一定含水率范围内,强度指标随含水率的增大线性减小,并在此基础上建立了引入考虑含水率影响的非饱和土总应力强度公式。

综上所述,开展非饱和土强度研究时,人们多关注非饱和土的基质吸力、含水率对强度的影响,而较少考虑土体密实状况对强度指标的影响,与实际情况不符。而且对土体干湿渐变过程研究较少;目前尚未建立考虑含水率、密实度影响的强度指标公式。