

库水作用下的 滑坡渗流、力学与稳定性

KUSHUI ZUOYONGXIA DE
HUAPO SHENLIU LIXUE YU WENDINGXING

汪 斌 唐辉明 朱杰兵 著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

库水作用下的 滑坡渗流、力学与稳定性

KUSHUI ZUOYONGXIA DE
HUAPO SHENLIU LIXUE YU WENDINGXING

汪 斌 唐辉明 朱杰兵 著



中国地质大学出版社

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

库水作用下的滑坡渗流、力学与稳定性/汪斌,唐辉明,朱杰兵著. —
武汉:中国地质大学出版社,2015.12
ISBN 978-7-5625-3752-6

I. ①库…

II. ①汪…②唐…③朱…

III. ①三峡水利工程-水库-滑坡-渗流-研究②三峡水利工程-水库-
滑坡-流体动力学-研究③三峡水利工程-水库-滑坡-稳定性-研究

IV. ①TV697.3②P642.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 315557 号

库水作用下的滑坡渗流、力学与稳定性 汪斌 唐辉明 朱杰兵 著

责任编辑:陈琪

责任校对:周旭

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号) 邮政编码:430074

电话:(027)67883511 传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:880 毫米×1230 毫米 1/32

字数:198 千字 印张:6.875

版次:2015 年 12 月第 1 版

印次:2015 年 12 月第 1 次印刷

印刷:武汉市籍缘印刷厂

ISBN 978-7-5625-3752-6

定价:35.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

三峡库区是滑坡等地质灾害多发地带。自 2003 年 135m 蓄水伊始,到 2006 年 156m 蓄水位以来,绝大多数滑坡经受到了库水位作用的考验没有复活。但库水位波动对滑坡的稳定性和变形破坏失稳的影响机制仍为迫切需要解决的重要应用课题之一。选取三峡库区三大滑坡之一的巴东县黄土坡滑坡前缘临江崩滑堆积体及深部滑带土作为研究对象。在流变试验的基础上,对滑带土的流变特性和长期强度进行了研究,建立了应力、应变和时间三者关系的蠕变方程,为滑坡的建模和稳定数值计算奠定力学基础;另外,将前缘崩滑堆积体作为渗流场以及其与应力场耦合分析的工程实例,建立了三峡库区典型的地质-渗流场-应力场三位一体的耦合计算的概化模型,对不同工况下的滑坡的流固耦合作用进行了理论和数值模拟分析。

总之,滑坡滑带土的流变性以及滑坡渗流场与应力场耦合作用的研究是当前岩土工程和工程地质界研究的热点。本书正是建立在这一内在因素和外在因素分析基础之上,进行了以下主要内容的研究。

(1)滑坡区的工程地质特征是研究滑坡的形成、变形、破坏机制的基础,也是建立地质-渗流场-应力场三位一体的耦合计算的概化

模型的基本前提。重点研究了黄土坡滑坡区的工程地质条件,以及前缘临江崩滑堆积体的空间组成结构、软弱层的物质成分及物理力学性质等。

(2)三峡库区一些滑坡的变形与复活的控制因素在于滑带土的力学特性强度损伤积累和时间效应,这一内在的地质力学机理与外在的地面变形演化过程彼此呼应。因此,影响滑坡稳定性的一个重要因素在于滑动带土的长期蠕变效应。对滑坡滑带土的蠕变特性进行研究并建立适合该滑坡蠕变特性的应力、应变和时间三者关系的方程就显得十分必要。研究了黄土坡滑坡 I[#] 崩滑体 TP3 平硐处的深部滑带土的长期蠕变特性,建立适合该滑坡的蠕变特性的 Bugar's 方程,并对参数进行了无约束非线性回归辨识。基于滑带土的常规试验和蠕变试验研究,得到了瞬时强度与残余强度破坏包络线,滑带土的峰值强度包线与长期强度包线。

(3)推导了多孔介质饱和-非饱和、稳定-非稳定渗流问题的微分方程以及方程的有限元格式,用有限元分析程序对库水位变化下引起含泥化夹层(软弱带)的斜坡的饱和-非饱和渗流场进行了全面的分析,包括水位波动的动态自由面的变化特征和坡体内孔隙水压力(基质吸力)、体积含水量、稳定性系数等的变化规律,最后应用到黄土坡滑坡前缘的非饱和渗流场的研究中。主要成果有两点。①库水位上升或是下降,不同水力特征的层状岸坡内在开始前几个时步内总形成一个楔形的非饱和区(位于相对弱透水层与坡面相交部位)和两个渗流自由面。这与 Rulon 和 Freeze(1985)用类似结构砂坡来研究降雨入渗时在坡体内形成的双自由面相似。②岩土体的饱和渗透系数、土水特征函数以及坡体的结构特征等共同决定了水

位升降过程中岸坡内孔隙水压力和浸润线的分布。模拟结果可为对库岸尤其对于含弱透水层边坡的稳定性评价及岸坡的排水加固优化设计提供理论依据。

(4)根据库水位波动对滑坡产生的力学作用,总结出库水位下降引起的3种类型孔隙水压力。据不同的水文地质条件,归纳并分析了地下水对斜坡稳定性影响的力学机制的3种模式,即潜水含水层模式、纯承压含水层模式和承压水与潜水含水层的混合模式。阐述了非饱和土力学理论,将其应用于滑坡的稳定分析中。对传统极限平衡分析方法进行延拓,将考虑基质吸力对抗剪强度贡献的Morgenstern-Price条分法应用到岸坡的稳定性计算中。结果表明,在库水位下降过程中,稳定性系数总体变化趋势是先减然后递增,然后趋于达到一个稳定的常数;总存在一个最小的稳定性系数,它对应一个最危险水位,一般发生在库水位开始下降后10~15m。通过比较考虑基质吸力与不考虑基质吸力对滑动面的抗剪贡献所计算的稳定性系数,前者计算的稳定性系数稍大,一般要大0.5%左右。

(5)阐述并严格地推导了Terzaghi准三维固结和Biot三维固结微分方程,并对其进行比较分析。对基于虚功原理的渗流场和应力场的微分方程进行空间域及时间域离散,充分考虑双场耦合作用,推导出以位移增量和孔隙水压力增量为方程域变量的饱和-非饱和岩土体耦合固结控制方程。

(6)基于滑坡区的工程地质特征,考虑不同岩性物理特性及水力学参数在空间上的差异性,建立了三峡库区典型的地质-渗流场-应力场的耦合计算概化模型。通过对5种典型工况下的黄土坡滑

坡 I[#] 崩滑堆积体的应力场与渗流场耦合的 FEM 模拟分析, 得出以下 3 点结论。①蓄水前, 仅在前缘浅层极小区域出现塑性区, 说明总体上, 浅层与深层滑坡均稳定。在库水位蓄水过程中, 前缘的最大剪应力随库水位上升而变大, 方向几乎与滑动面倾向一致, 而且剪应力集中带有向浅层滑坡体后缘扩展的趋势。位移场及变形集中分布在高应变梯度带的滑动面上, 且呈前缘位移大的牵引式变形, 塑性区有沿浅层滑带向后缘扩展趋势。当库水位 175m 时, 模拟成果表明, 塑性区有向后缘纵深处发展贯通趋势, 已对深部滑体的稳定性产生了影响。②由于耦合计算充分考虑了库水位作用下的应力边界和水头边界的变化, 坡体内的渗透的体积力以及坡外的库水压力, 在快速蓄水和泄水工程中, 模拟结果表现出不同于单场计算的孔压场, 具有明显的 Cryer 效应。③通过工况五的数值模拟以及基于极限平衡法的稳定性计算, 得出滑坡的位移场、塑性区扩展趋势以及稳定性变化趋势; 得出影响滑坡稳定性变化趋势的主要力学机制, 即库水位下降前期, 作用在滑带上的有效应力的增加以及基质吸力对抗剪强度增加, 对滑坡稳定性的有利影响小于渗透力和超孔压力对滑坡的不利影响, 而后期(本例中 $t \geq 6d$)前者对滑坡稳定性的有利影响大于后者对滑坡的不利影响。这正是影响滑坡稳定性变化趋势的主要力学机制。

著 者

2015 年 4 月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 研究意义	(1)
第二节 国内外研究现状	(4)
一、滑带土的蠕变特性研究现状	(4)
二、土的饱和-非饱和渗流研究现状	(7)
三、流固耦合作用研究现状	(11)
第三节 主要研究内容和成果	(16)
一、主要研究内容	(16)
二、本书的主要成果及创新之处	(17)
第二章 黄土坡滑坡工程地质特征	(19)
第一节 黄土坡滑坡区域地质条件	(19)
一、黄土坡滑坡概况	(19)
二、地形地貌	(19)
三、地层岩性	(20)
四、地质构造	(21)
五、水文地质条件	(23)
第二节 临江崩滑堆积体特征	(24)
第三节 软弱层与滑带物理力学特征	(33)
第四节 本章小结	(36)

第三章 黄土坡滑坡滑带土蠕变特性研究	(37)
第一节 岩土体流变特性基本理论	(37)
一、土的流变特性	(38)
二、土的典型蠕变特性	(39)
第二节 土的流变本构模型与蠕变方程	(41)
一、土流变的经验本构模型	(41)
二、土流变的元件模型	(46)
第三节 黄土坡滑坡滑带土蠕变试验	(48)
一、试样来源与常规土工试验	(48)
二、滑带土的蠕变试验	(49)
三、定常蠕变参数的辨识计算	(53)
四、试验数据分析与成果	(55)
第四节 本章小结	(65)
第四章 库岸滑坡的非饱和渗流规律	(67)
第一节 非饱和孔隙介质渗流特性	(67)
一、非饱和孔隙介质的达西定律	(67)
二、土水特征曲线	(68)
三、非饱和土体渗透系数	(71)
第二节 非饱和渗流微分方程	(72)
一、控制方程的推导	(72)
二、方程的定解条件	(75)
三、Seep 程序的有限元解	(75)
第三节 库岸斜坡的非饱和渗流规律的探讨	(78)
一、算例的计算模型	(79)

二、渗流场的计算参数的选取·····	(80)
三、渗流场的计算与结果分析·····	(80)
第四节 黄土坡滑坡临江崩滑堆积体渗流的数值分析·····	(97)
一、崩滑堆积体地下水的赋存条件·····	(97)
二、地下水渗流模型·····	(100)
三、初始条件渗流模拟·····	(101)
四、渗流的成果及分析·····	(103)
第五节 本章小结·····	(107)
第五章 地下水位对滑坡的力学作用机制·····	(109)
第一节 库水位下降引起的孔隙水压力作用·····	(109)
一、自重渗流产生的孔隙水压力作用·····	(109)
二、超孔隙水压力作用·····	(110)
三、滑体渗透差异产生的承压水压力·····	(111)
第二节 地下水位对斜坡稳定性的影响模式·····	(111)
一、潜水含水层模式·····	(111)
二、纯承压含水层模式·····	(113)
三、承压水与潜水含水层的混合模式·····	(114)
第三节 考虑非饱和强度的斜坡稳定性分析·····	(116)
一、非饱和土的摩尔-库仑理论·····	(116)
二、摩根斯坦-普赖斯法·····	(117)
三、岩土力学性质指标的确定·····	(122)
四、斜坡稳定性分析·····	(123)
第四节 库水位变动引起滑坡失稳的力学机理·····	(129)
一、库水作用诱发滑坡失稳破坏成因·····	(129)
二、库水对滑坡稳定性影响机理·····	(131)

三、考虑流固耦合作用的滑坡变形破坏机理	(134)
第五节 本章小结	(136)
第六章 渗流场与应力场耦合作用方程	(138)
第一节 多孔介质的渗流场与应力场耦合模型	(138)
一、Terzaghi 准三维固结原理	(138)
二、Biot 固结方程	(140)
三、比奥(Biot)理论与太沙基(Terzaghi)理论的比较	(143)
第二节 渗流场与应力场的相互影响	(144)
一、渗流场对应力场的影响	(144)
二、应力场对渗流场的影响	(146)
三、流固耦合作用中应注意的问题	(148)
第三节 渗流与应力耦合场的有限元方程	(149)
一、非饱和土本构关系	(149)
二、应力场有限元方程	(151)
三、渗流场有限元方程	(152)
四、耦合场的有限元求解	(155)
第四节 本章小结	(158)
第七章 黄土坡滑坡的流固耦合分析	(159)
第一节 黄土坡前缘堆积体渗流场与应力场耦合分析	(159)
一、计算模型的建立	(159)
二、计算工况	(160)
三、计算参数的选取	(161)
四、有限元计算结果分析	(162)
第二节 库水位下降对滑坡变形及稳定性影响研究	(177)

一、库水位下降对滑坡变形影响	(177)
二、库水位下降对滑坡稳定性影响的机理	(181)
第三节 黄土坡滑坡堆积体变形监测分析	(183)
一、钻孔倾斜仪观测成果	(183)
二、平硐短基线监测成果	(188)
第四节 本章小结	(189)
第八章 结论及展望	(192)
第一节 结 论	(192)
第二节 展 望	(196)
主要参考文献	(198)

第一章 绪 论

第一节 研究意义

当前,对一些滑坡失稳起控制性作用的滑带土的流变性以及滑坡渗流场与应力场耦合作用的研究是当前岩土工程和工程地质界研究的热点课题之一。

研究表明,大型滑坡的变形与复活的一个重要因素在于滑带土的力学特性强度损伤积累和时间效应,这一内在的地质力学机理与外在的地面变形演化过程彼此呼应。土体在剪应力作用下,除了瞬时的弹性剪切变形外,还伴随着与时间相关的剪切蠕变变形。当前在岩土工程界,土的流变研究不仅仅局限在软、黏土(Prevost, 1976; Murayama, 1983; Yoginder, Richard, 1977; Edward, James, 1980; 陈铁林等, 2001),还涉及到一些滑坡滑带土的研究(韩爱果等, 2001; 刘品辉, 1996; 宋克强等, 1994; 王文星等, 1996)。就滑坡而言,尽管它的初始力学状态满足平衡条件,经过长期蠕变,则可能朝着不稳定的方向发展。在重力作用以及适当的岩性和构造条件下,会形成蠕变带(Masahiro, 1992)。特别对于长江三峡库区典型大型滑坡来说,譬如黄土坡滑坡、赵树岭滑坡和泄滩滑坡等,滑带土的母岩大多是砂岩、泥岩,一般是细粒土成分占优势的黏性土,其土力学特征具有更多的相同之处。因此,建立适合库区典型滑坡的滑带土的蠕变特性的本构模型就显得十分必要。

另外,水库蓄水及水库运行后库水位的频繁波动,将可能引起滑坡

复活或促成新的不稳定滑体,不仅给人民的生命财产造成重大损失,而且影响到电站的安全运行和经济效益。据不完全统计,三峡库区在 175m 库水位影响的范围内共有大小滑坡 1190 余个,各类变形体分布更是广泛(晏同珍等,2000;孙广忠,1997)。水库 2003 年蓄水后诸如黄土坡、红石包、谭家坪等许多滑坡部分或完全被水浸没。尤其库水位在 145~175m 周期涨跌时,滑坡将会受到河流地质作用和库水动力作用,使得原已稳定的滑坡再度复活,库水位波动不仅弱化岩体力学强度、减轻岩体有效重力,而且还改变库岸边坡内地下水的渗流场。渗流场的改变同样改变了坡体内的应力场,进而影响了坡体介质的体应变和孔隙率的变化,反而又影响渗流特性,这样就要求我们重视库岸边坡中的渗流场和应力场耦合作用的研究。

渗流场和应力场耦合作用所导致的库区滑坡事件屡见不鲜。1995 年法国 66.5m 高的马尔帕萨拱坝在初次蓄水时即溃决。意大利瓦依昂拱坝坝高 265m,水库设计正常高水位为 722.5m,1963 年 10 月 9 日,库水位上升至 700m 高程时,左岸大坝 1.8km 处,发生 $2.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的巨型滑坡,以 25~30m/s 的速度顺层下滑进入水库,引起涌浪超过坝顶 150~250m,约有 $3 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的水量渲泄而下,致使一个村庄被毁,近 3000 人死亡,整个水库变成一个石库。许多学者对意大利瓦依昂水库滑坡的原因进行过详细地分析,认为是因库水位上升引起岩体中地下水位抬升,增加了岩体的浮托力而导致的一种破坏。该水库两岸岩体渗透性良好,库水位迅速上升引起的地下水位抬升,滞后时间短,在库岸边坡坡脚产生极大的扬压力,使正应力减少,抵抗滑动的摩擦阻力降低,而产生滑坡。在瓦依昂水库滑坡事件之后,人们清醒地认识到了对滑坡体破坏的力学机理研究的不足,各国学者开始重视人类工程活动与周围的地质环境之间的相互作用,并加强了它们之间的流固耦合研究。

一般地,斜坡渗流分析与稳定性和应力分析通常是分开独自进行,即先不考虑坡体的应力-应变关系单独进行渗流场的分析,然后根据渗流计算结果,赋予坡体内不同区域岩土体不同容重来进行稳定性及应

力分析。尽管这种方法简单易行且已积累了一定的工程实践经验,但其没有真实客观地反映渗流场与应力场之间的相互作用、相互影响的机理。事实上,两者是相互影响的:渗流场的改变会导致渗流体积力和渗透压力的改变,使作用在坡体上的应力场的分布发生改变;而应力场的改变,会引起体积应变的改变,使坝体内各部分的孔隙率发生改变,渗透系数也随之变化,从而改变坝体渗流场的分布。两者的这种相互作用结果,会使斜坡体达到一种双场的耦合平衡状态,形成渗流场影响下的稳定应力场和应力场影响下的稳定渗流场。但由于斜坡体不像土坝具有均质且具有明显的边界条件,斜坡地质体中被尺寸、方向性质不同的软弱带或结构面切割,因此,对斜坡的流固耦合研究增加了难度。不少学者已经做了许多研究工作(唐辉明等,2002;唐辉明等,2000;胡新丽等,2006;徐则民等,1998;张伟,2004;郭玉龙,2005;柴军瑞等,1997;陈庆中等,1999;丁秀丽等,2004),但研究结果还远未达到工程应用要求,有待进一步深入和完善。

其实,库水位波动作用下的库岸斜坡也是一种常见的非饱和斜坡,在渗流场的求解过程中,考虑地下水渗流时大多只考虑饱和渗流,没有考虑非饱和区和暂态饱和区,对斜坡的稳定性评价也未考虑基质吸力对稳定性所作的贡献,从而使评价结果与实际有所出入。库水位波动的可变边界对渗流场的影响、非均质渗流特性(尤其是含有多层泥化夹层)、渗流模型、饱和和非饱和渗流场与应力场的全耦合作用等问题远未得到满意的解决(汪斌等,2006)。因此,要想正确地认识库水位对滑坡稳定性影响的力学机制,就必须从非饱和渗流及其与应力的耦合作用这两个角度出发,分别计算考虑不同效应的稳定性。因此,研究斜坡内渗流场与应力场耦合分析模型具有重要的理论和实际意义。

选取三峡库区三大滑坡之一的巴东县黄土坡滑坡前缘崩滑堆积体及深部滑带土作为研究对象。一方面,对滑带土的流变试验和流变机制、蠕滑特征和长期强度进行研究,建立合适的滑带土的蠕变方程,为滑坡的建模和稳定数值计算奠定了力学基础。另一方面,以前缘崩滑堆积体作为工程实例,建立了由多层泥化夹层控制的地质-渗流场-渗

流场与应力场耦合计算的概化模型,对滑坡的非饱和渗流场及其与应力场耦合作用进行了数值模拟分析,为进一步研究库水作用下滑坡的变形失稳机制提供了理论依据。

第二节 国内外研究现状

库区滑坡滑带土的长期强度和时间效应关系到土的流变性,而库水对滑坡的力学作用研究关系到饱和-非饱和渗流问题和流固耦合作用的问题。对这两个问题的研究一起构成了本书的重点。现分别将各领域国内外的研究现状简述之。

一、滑带土的蠕变特性研究现状

土的流变学是工程流变学的一个重要分支,在滑坡、泥石流等地质灾害防治领域关系到岩土体长期的稳定性和安全,特别是研究滑带土的蠕变特性具有重要的学术和实际意义。

物体受力变形中存在与时间有关的变形性质即为流变(维亚洛夫,1987)。在岩土工程中,挡土墙的位移随时间的发展、斜坡和边坡稳定性随时间的破坏、地基的长期沉降和倾斜、隧道施工时的地表沉降及变形,土石坝的长期沉降等(沈珠江等,1998;安关峰,2001),都说明土体不仅具有弹性、塑性,还具有黏滞性即流变性,是一种黏弹塑性体。这样,在土体的本构关系里,就不应仅仅是应力和应变两者之间的关系,而是应力、应变和时间三者之间的关系。

最早人们是从线性黏弹性变形开始研究的,它是根据研究物体的弹性和黏性的共同表现而得。宾哈姆在他 1919 年的著作中奠定了流变学的基础,提出了黏滞塑性的概念(维亚洛夫,1987)。后来,开尔文(Klevin)在他的名著《关于金属的弹性和黏滞性》中研究了弹黏介质的流变状态方程,它描述了弹性变形发展的滞后过程(后效过程)。黏弹性方程首先由马克斯威尔(Maxwell)为了描述松弛现象而提出,后来开尔文和 Voigt 提出了可以描述后效现象的方程。包尔兹曼(Boltz-

mann)在叠加原理上推导出了遗传蠕变理论:在过去某时刻 T_i 加上的荷载到任一时刻 t 引起的变形等于每个互不相干的荷载到时刻 t 引起变形的总和。它分为线性遗传蠕变理论和非线性遗传蠕变。该理论为流变积分模型奠定了理论基础,并为蠕变试验中的分级加载方式提供了依据。

Taylor D W 和 Merchant W 于 1940 年率先在土体的固结分析中考虑土体的流变性质,实现了计算分析中考虑土体变形的时间效应。随后,在 Geuze 和陈宗基(1959)等国内外学者的努力下,考虑土体流变特性的理论和实践范围不断拓广,认识不断加深,并在岩土工程中发挥了重要作用。

流变性质研究分微观和宏观两方面。前者重点从土的微观结构研究土具有流变性质的原因和影响土流变性质的因素。陈宗基(1959)提出了片架结构理论。在基于速率过程(Rate Process)理论(或称分子流动理论)的基础上,国外 Mitchell、Campanella、Singh(1968), Christensen、Wu(1964), Bazant、Ozaydin、Krzek(1975),国内学者施斌(1997,2002)对黏性土的应力-应变和应力-应变-时间关系进行了研究。然而,微观结构研究只能从理论上作定性分析,其发展程度不够,且成本较高,不适合工程实践需要。

目前,各国学者所做的工作大部分属于宏观流变学的范畴。它假定土是均一体,采用直观的物理流变模型来模拟土的结构和特性,通过模型的数学力学分析,建立有关的公式,以定量分析土的流变性质及其对工程的影响。

Broadbent 和 Ko(1971)发展了试验流变学,试验流变学成功地描述了实际流变效应并能用来控制边坡的自行破坏。流变试验可分为现场流变试验和室内流变试验。现场流变试验主要依托实际工程,布置观测仪器,定时测量。其数据来源可靠,但是工作量较大、耗时长,且所获数据有限。目前在对斜坡观测方面(Yang、Sokobiki,1996)应用越来越多。土室内流变试验是在实验室的流变仪上对土样按研究的需要进行流变试验,如单轴、三轴压缩和直剪试验等。用于岩土流变试验的专