

资助

国家自然科学基金面上基金项目（编号：41472261）

国家自然科学基金青年基金项目（编号：41202198）

中央高校基本科研业务费专项资金项目（腾飞计划）（编号：CUG150621）

中央高校基本科研业务费专项资金项目（摇篮计划）（编号：CUG130409）

三峡库区侏罗系地层滑坡中 抗滑桩布设和结构优化研究

李长冬 唐辉明 胡新丽 王亮清 王姣 等著



Plane arrangement and structure optimization
of stabilizing piles for landslides developing
in Jurassic strata of Three Gorges Reservoir Region



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

国家自然科学基金面上基金项目(编号:41472261)

国家自然科学基金青年基金项目(编号:41202198)

中央高校基本科研业务费专项资金项目(腾飞计划)(编号:CUG150621)

资助

中央高校基本科研业务费专项资金项目(摇篮计划)(编号:CUG130409)

三峡库区侏罗系地层滑坡中 抗滑桩布设和结构优化研究

Plane Arrangement and Structure Optimization of Stabilizing Piles for Landslides Developing
in Jurassic Strata of Three Gorges Reservoir Region

李长冬 唐辉明 胡新丽 王亮清 王姣 等著



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

图书在版编目(CIP)数据

三峡库区侏罗系地层滑坡中抗滑桩布设和结构优化研究/李长冬,唐辉明,胡新丽,王亮清,王姣等著. —武汉:中国地质大学出版社,2015. 11

ISBN 978-7-5625-3759-5

I. ①三…

II. ①李…②唐…③胡…④王…⑤王…

III. ①三峡水利工程-侏罗系-地层-滑坡-抗滑桩-布设-研究

IV. ①P642. 22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 253108 号

三峡库区侏罗系地层滑坡中
抗滑桩布设和结构优化研究

李长冬 唐辉明 胡新丽 等著
王亮清 王 姣

责任编辑:徐润英 王 敏

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)

邮编:430074

电 话:(027)67883511 传真:(027)67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

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

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:250 千字 印张:9.75

版次:2015 年 11 月第 1 版

印次:2015 年 11 月第 1 次印刷

印刷:荆州鸿盛印务有限公司

印数:1—800 册

ISBN 978-7-5625-3759-5

定价:58.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前言

近年来,滑坡地质灾害造成的危害日趋严重,导致了重大的人员伤亡和经济损失,其防控研究已成为全球热点课题之一。我国山地面积广大,是世界上滑坡地质灾害最严重的国家之一。由砂岩和泥岩为主相间形成的软硬相间结构地层是我国较为常见的一种滑床结构类型,广泛分布于三峡库区的秭归县、兴山县、云阳县、万州区、忠县、开县乃至四川东部等广大地区,该地区较密集发育的滑坡始终威胁着当地居民的生命和财产安全,开展软硬相间地层分布区的滑坡防治研究刻不容缓。三峡库区滑坡比较发育,尤以侏罗系软硬相间地层区滑坡发育为甚,该地区密集分布的滑坡凸显了该地区软硬相间地层岩性的独特地质特征和力学特性。

抗滑桩作为抗滑治理的主要措施之一,被广泛应用于滑坡治理工程实践中。但抗滑桩工程造价昂贵,目前抗滑桩工程实践中,抗滑桩设计的理论研究滞后于工程实践,缺乏准确和规范的取值标准,导致抗滑桩设计参数取值经验性很强,很难达到安全和经济的双重目标,造成了滑坡治理工程投资的浪费或潜在的安全隐患,甚至酿成工程事故。因此,抗滑桩的平面布置、结构型式、设计参数、施工方法等越来越引起学者们的广泛关注,如何在保证滑坡治理安全的前提下使抗滑桩工程的投资最少,无疑是摆在工程地质工作者面前的难题之一。而在侏罗系软硬相间复合地层结构中孕育的滑坡更增加了抗滑桩设计的难度,给抗滑桩设计者提出了新的难题与挑战。

侏罗系地层中滑坡防治是三峡库区滑坡防治工作中的重点之一,本书选择三峡库区侏罗系软硬相间地层的滑坡作为研究对象,在滑坡现场精细调查和测试的基础上,研究了含砂量对泥岩重塑样的影响程度,建立了泥化夹层破坏的数理统计模型,并研发了一种起伏度可控的结构面制样模具,开展不同起伏度锯齿状结构面直剪试验,揭示了侏罗系地层软硬相间异性结构面的强度特性;基于力学理论分析和数值模拟反演分析方法,提出了钢筋混凝土复合弹性模量的求解方法,揭示了不同分布滑坡推力作用下抗滑桩悬臂段桩身位移变化规律;采用有限差分数值模拟和多层弹性地基解析方法,分析了不同截面类型抗滑桩受力和变形特征,研究了软硬相间地层中不同横截面型式和桩长条件下抗滑桩的嵌固效果;基于滑坡推力分布“中间大、两侧小”的空间分布特征和“稳定性界限”概念,提出了“中间密、两侧疏”的抗滑桩平面优化布局模式,并设计了一种新型的联拱抗滑桩总体布置方案。研究成果对三峡库区乃至整个侏罗系软硬相间地层分布区的滑坡防治具有一定的理论意义与广泛的工程应用价值。

本书共分为七章,第一章由李长冬撰写,第二章由王姣、李长冬撰写,第三章由李长冬、胡新丽、刘庆涛撰写,第四章由李长冬、唐辉明、刘庆涛撰写,第五章由李长冬、王亮清、廖伟撰写,第六章由唐辉明、李长冬、吴军杰、梁德明撰写,第七章由李长冬、刘涛撰写,最后由李长冬统稿。

在本书的撰写过程中得到了相关单位、专家和研究成员的大力支持,刘涛等参与了大量图件和文字的整理工作,在此一并致谢。

由于作者学识水平所限,书中的错误、缺点在所难免,敬请广大读者批评指正。

著者

2015年9月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 研究背景与意义	(1)
第二节 国内外研究进展	(2)
一、抗滑桩优化研究	(2)
二、侏罗系地层工程特性研究	(3)
第三节 研究内容及技术路线	(4)
第二章 侏罗系地层力学强度特征	(6)
第一节 概 述	(6)
第二节 野外调查与泥岩强度测试	(6)
一、野外取样与数据采集	(6)
二、室内重塑土试验	(7)
第三节 结构面制样模具和直剪仪夹具的研发与改进	(17)
一、岩体结构面表面形态研究	(17)
二、结构面制样模具研发	(18)
三、直剪仪夹具的改装	(21)
第四节 不同起伏度锯齿状结构面直剪试验	(22)
一、结构面强度理论	(22)
二、不同起伏度锯齿状结构面直剪试验	(27)
三、试验数据处理与分析	(30)
四、小 结	(35)
第五节 不同起伏度锯齿状异性结构面力学强度研究	(36)
一、不同起伏度异性锯齿状结构面剪切变形特性研究	(36)
二、异性结构面强度估算准则确定	(40)
三、异性结构面强度估算准则验证	(42)
四、侏罗系地层异性结构面强度特征	(43)
五、小 结	(47)
第三章 抗滑桩结构与力学特性研究	(48)
第一节 抗滑桩设计理论与研究背景	(48)
一、滑坡推力计算及其分布形式	(48)
二、抗滑桩设计要素	(49)
三、刚性桩与弹性桩判定	(52)
第二节 滑坡稳定性评价及治理工程设计软件研发	(53)
一、软件特点	(53)
二、编程思路	(54)
三、编程原理	(54)

四、工程实例分析·····	(55)
五、小 结·····	(57)
第三节 抗滑桩挠度和复合弹性模量研究 ·····	(58)
一、不同滑坡推力分布模式下桩身位移研究·····	(58)
二、抗滑桩复合弹性模量的研究·····	(61)
三、工程实例分析·····	(66)
四、小 结·····	(67)
第四章 抗滑桩横截面优化研究 ·····	(68)
第一节 土拱效应理论 ·····	(68)
一、桩间土拱效应·····	(68)
二、桩后土拱效应·····	(69)
第二节 基于土拱效应的桩间距模型 ·····	(71)
一、抗滑桩与滑坡体相互作用过程分析·····	(71)
二、基于土拱效应的最大桩间距模型·····	(72)
第三节 土拱效应数值研究 ·····	(73)
一、数值模型建立·····	(73)
二、土拱效应分析·····	(75)
三、桩土荷载分担比·····	(77)
第四节 不同梯形截面型式抗滑桩优化研究 ·····	(78)
一、不同截面型式抗滑桩的研究·····	(78)
二、桩土相互作用数值计算模型的建立·····	(79)
三、不同截面型式抗滑桩桩土荷载分担比研究·····	(81)
第五节 二维黄金分割法在抗滑桩截面优化设计中的应用研究 ·····	(91)
一、二维黄金分割法的原理与算法·····	(91)
二、抗滑桩截面尺寸的优化设计·····	(92)
三、工程算例分析·····	(94)
四、小 结·····	(95)
第六节 T形横截面抗滑桩优化研究 ·····	(95)
一、结构型式·····	(95)
二、抗弯刚度分析·····	(96)
三、确定计算宽度·····	(97)
四、工程算例分析·····	(97)
第五章 侏罗系地层中抗滑桩截面和桩长优化研究·····	(102)
第一节 判定条件·····	(102)
第二节 理论分析·····	(103)
一、软岩地层分析 ·····	(103)
二、硬岩地层分析 ·····	(104)
三、软硬相间地层分析 ·····	(106)
第三节 数值模拟验证分析·····	(110)

一、模型建立	(110)
二、模拟结果分析	(111)
第四节 黄金分割法在抗滑桩锚固比优化设计中的应用	(113)
一、抗滑桩锚固比优化设计	(113)
二、工程算例分析	(115)
三、小 结	(115)
第六章 侏罗系地层中抗滑桩布设和结构优化	(117)
第一节 三维滑坡空间分布特征	(117)
第二节 推力尺度效应规律	(118)
一、斜坡稳定性评价尺度效应规律	(118)
二、考虑尺度效应的斜坡推力计算方法	(120)
三、斜坡稳定性计算与推力计算新模型	(120)
四、圆弧滑动算例分析	(120)
五、平面滑动算例分析	(123)
六、小 结	(126)
第三节 滑坡稳定性界限	(127)
第四节 基于滑坡三维空间特征的平面布设优化	(128)
一、理论设计	(128)
二、工程实例分析	(130)
第五节 抗滑结构优化设计	(135)
一、技术背景	(135)
二、发明内容	(136)
三、实施方法	(137)
四、优化建议	(139)
第七章 结论与展望	(140)
第一节 结 论	(140)
第二节 研究展望	(142)
参考文献	(143)

第一章 绪 论

第一节 研究背景与意义

滑坡是世界上危害严重的一类斜坡地质灾害,随着近年来工程建设活动的蓬勃发展,滑坡地质灾害的防控研究已成为全球热点课题之一。我国山地面积约占整个国土面积的 $2/3$,是世界上滑坡地质灾害最严重的国家之一。由砂岩和泥岩为主相间形成的软硬相间结构地层是我国较为常见的一种滑床结构类型,广泛分布于三峡库区的秭归县、兴山县、云阳县、万州区、忠县、开县乃至四川东部等广大地区,该地区较密集发育的滑坡始终威胁着当地居民的生命和财产安全,开展软硬相间地层分布区的滑坡防治研究刻不容缓。三峡库区滑坡比较发育,尤以侏罗系软硬相间地层区滑坡发育为甚。仅以三峡库区秭归县为例,该地区广泛发育有软硬相间的侏罗系地层,是我国滑坡地质灾害最为密集和严重的地区之一,如泄滩滑坡、龙王庙滑坡、白水河滑坡、千将坪滑坡、白果树滑坡、卡子湾滑坡、马家沟滑坡、金乐滑坡、岔路口万塘滑坡、狮子包滑坡和张家湾滑坡等,涉及秭归县西部长江干流、香溪河流域、童庄河流域、吒溪河流域、青干河流域和泄滩河流域等地区,如此密集的滑坡凸显了该地区软硬相间地层岩性的独特地质特征和力学特性。滑坡灾害破坏性大,造成了重大的人员伤亡和巨大的经济损失。因此,选择三峡库区软硬相间地层典型滑坡作为研究对象具有十分重要的理论意义与工程应用价值。

抗滑桩作为抗滑处治的主要措施之一,被广泛应用于滑坡治理工程实践中。但抗滑桩工程造价昂贵,单根抗滑桩造价多达数十万元,而滑坡治理工程往往需要数十根抗滑桩,总投资动辄数百万元甚至上千万元。目前抗滑桩工程实践中,抗滑桩设计的理论研究滞后于工程实践,缺乏准确、合理的标准,导致抗滑桩嵌固深度等参数多依据工程经验确定。如对于嵌固段桩长的选取一般为桩长的 $1/4 \sim 1/2$,且嵌固段桩长在软质地层中要稍长于硬质岩层;桩截面一般选用矩形截面的抗滑桩,横截面尺寸多为 $1.5\text{m} \times 2\text{m}$ 、 $2\text{m} \times 2.5\text{m}$ 、 $2\text{m} \times 3\text{m}$ 、 $2.5\text{m} \times 3.5\text{m}$ 、 $3\text{m} \times 4\text{m}$ 等多种型式;对于桩间距的布置一般考虑为 $6 \sim 10\text{m}$ (铁道部第二勘察设计院,1983)。取值经验性很强,很难达到安全和经济的双重目标,造成了滑坡治理工程投资的极大浪费或潜在的安全隐患,甚至造成工程事故。因此,抗滑桩的平面布设、结构型式、设计参数、施工方法等越来越引起学者们的广泛关注,如何在保证滑坡治理安全的前提下使抗滑桩工程的投资最少,无疑是摆在工程地质工作者面前的难题之一。

三峡工程后续工作规划三峡库区地质灾害(滑坡、崩塌、危岩和塌岸)防治规划编制大纲(2010—2020年)中,已将三峡库区的滑坡列入重点防治对象。由于三峡库区侏罗系软硬相间地层的岩性特征,极大地增加了滑坡治理的难度。通过现场调查发现,该地区多采取治理与监测相结合的方法,主要治理措施为悬臂抗滑桩。复杂的地层结构给抗滑桩设计者提出了新的难题与挑战。

因此,侏罗系地层中滑坡防治是三峡库区滑坡防治工作中的重点之一,选择三峡库区侏

罗系软硬相间地层的滑坡作为研究对象,在现场精细调查和室内抗滑桩嵌固机制理论研究的基础上,开展三峡库区侏罗系软硬相间地层中抗滑桩布设和结构优化研究,将对三峡库区乃至整个侏罗系软硬相间地层分布区的滑坡防治具有十分重要的科学理论意义与广泛的工程应用价值。

第二节 国内外研究进展

一、抗滑桩优化研究

从单桩角度考虑,抗滑桩的主要设计参数包括抗滑桩的间距、嵌固深度和截面尺寸。在桩间距研究方面,主要通过对桩间土体力学分析和土拱效应推导抗滑桩桩间距的计算公式。喻学文(2004)建立了桩间土楔体力学模型,通过对桩间土体的受力分析,推导了抗滑桩间距的计算公式。周德培等(2004)根据桩间静力平衡条件、跨中截面强度条件以及拱脚处截面强度条件,推导了桩间距的计算公式。王乾坤(2005)提出了以桩间土体的 Mohr-Coulomb 破坏准则、土体的力学平衡和桩间土体的绕流阻力计算共同控制来确定临界桩间距的方法。周应华等(2006)根据桩间土拱的静力平衡以及拱脚处土体本身的强度条件,建立了相应的桩间距计算模型。蒋良澹等(2006)利用合理拱轴线几何特征与受压破裂角方位,将黏性土土拱计算的平衡条件和强度条件综合简化为以拱脚处拱圈轴向压应力表达的形式,推导了拱曲线与桩间距上下限的计算式。Kahyaoglu et al.(2012)采用数值模拟方法,研究了基于桩间土拱效应桩间距的确定方法。

在嵌固段桩长研究方面,我国主要按照铁道部第二勘察设计院(1983)提出的经验取值区间,嵌固段桩长的选取一般为桩长的 $1/4 \sim 1/2$,且嵌固段桩长在软质地层中要稍长于硬质岩层,对于土层或软质岩层约为 $1/3 \sim 1/2$ 桩长比较适宜,但对于完整、较坚硬的岩层可以采用 $1/4$ 桩长。在确定抗滑桩嵌固段桩长的理论计算方面,国内学者也做了大量的分析。王恭先(1998)认为应考虑滑动面是否可能会向下发展,埋于滑动面以下的长度,除满足岩土体弹性抗力外,悬臂抗滑桩桩身在滑动面以下的嵌固深度一般不小于总桩长的 $2/5$ 。杨旭等(2008)分析了不同嵌固深度下桩顶的位移反应,提出西攀路永郎昔格达滑坡抗滑桩的嵌固深度设置为桩长的 $2/3$ 。周志刚(1997)对滑面倾斜条件下均质滑床中抗滑桩的嵌固深度进行了探讨。周春梅、殷坤龙(2006)考虑滑床面倾斜特征,通过改变桩的截面尺寸来确定桩的嵌固深度。蒋建国等(2001)通过公式推导,得到了嵌固深度的简化公式。胡晓军(2007)对刚性桩的公式分析,基于强度折减方法选取抗滑桩的嵌固深度。张文居等(2006)分析刚性抗滑桩的可靠性模型,研究岩土体参数的变异性对桩身嵌固深度可靠度的影响。吴坤铭等(2012)采用强度折减有限元法建立了嵌固深度的可靠性模型,进行可靠度的分析,确定桩的嵌固深度。年廷凯等(2007)在推导求解嵌固段桩前地层侧应力容许值的下限解的基础上,采用弹性桩方法计算其嵌固段深度。李寻昌等(2010)开展了土层锚杆抗滑桩系统桩侧地层抗力分布规律的室内模型试验,采用滑移线解法分别计算了抗力分布为三角形与梯形时土层锚杆抗滑桩嵌固深度。Yang et al.(2011)采用强度折减法开展了单排桩在理想均质边坡中嵌固深度的数值分析,侧重于桩的受力和加固后的稳定性研究。

目前对于抗滑桩的间距和桩嵌固长度的研究较多,而对于桩截面方面的研究开展得相对

较少。目前工程中所选用的抗滑桩横截面形状主要是圆形和矩形,对于确定滑动方向的滑坡,矩形横截面的抗滑桩受力性能要优于圆形横截面抗滑桩,在滑坡工程实践中应用广泛。胡新丽等(2007)、李长冬等(2007)分析了使单根抗滑桩成本最低的最优矩形抗滑桩的截面优化设计问题。王浩等(2009)运用有限元方法分析了锚索抗滑桩在不同截面下的受力情况,从而得出了较合理的桩的截面型式。吕庆等(2010)指出矩形截面抗滑桩比圆形截面抗滑桩更利于发挥岩土体的土拱效应。肖世国(2010)对滑坡防治工程中h型组合抗滑桩的力学特性进行了研究。Choi et al.(2015)采用解析法研究了矩形和圆形截面的桩在水平受荷作用条件下的受力和变形响应。

从抗滑桩工程的角度,需要将上述因素进行综合考虑,利用优化算法,进行抗滑桩总体的优化设计。郑束宁等(2003)、李梅等(2006)和李长冬等(2008)分别采用复合形法、粒子群算法和黄金分割法等优化算法进行优化设计。李长冬等(2012)综合考虑抗滑桩截面宽度和高度、桩间距以及嵌固比,建立综合各参数的优化解模型,利用编程采用黄金分割法进行优化算法求解,为抗滑桩的设计提供综合优化方案。赵法锁等(2007)利用先进的基于性能的结构优化设计理念、计算机信息处理技术和智能决策技术,提出了基于性能的滑坡锚碇拱形抗滑桩墙支护结构体系全局优化设计方案。Li et al.(2015)提出了基于滑坡三维空间形态和稳定性界限的抗滑桩平面布设方法,根据滑坡推力分布的理论模型和桩间距计算公式,提出了相对应的“中间密、两侧疏”的抗滑桩平面布局模式,结合滑坡“稳定性界限”,可以在保证滑坡安全的前提下显著减少抗滑桩的数量。

二、侏罗系地层工程特性研究

在侏罗系地层工程地质特性研究方面,主要从地质学角度,如分布规律、地层岩性特征、地貌特征等,对岩土体的矿物学、岩石学、地层学等特征进行了研究。中国侏罗纪的陆相沉积主要分布在各个盆地中(程强等,2004;王思恩等,1985)。在燕山运动影响下,中国东部出现了许多大小不等的裂陷红色盆地,主要分布在湖北、四川、湖南、广东、广西、福建、云南等地(王思恩等,1985),秭归盆地就是其中之一,它主要由中生代侏罗纪紫色砂页岩组成。由于长江贯穿盆地,以及新构造运动的上升影响,导致该区侵蚀基准面降低,在盆地内部形成低山、丘陵地貌(丁树文等,2000)。冯强(2008)总结出侏罗系地层中含有红层泥岩的典型岩组有7个,分别为蓬莱镇组、白田坝组、自流井组、沙溪庙组、遂宁组、莲花口组和官沟组,并指出四川省红层泥岩主要分布于侏罗系和白垩系。彭华和吴志才(2003)对我国侏罗系红层的特点和分布规律作了相关研究。

在侏罗系地层力学特性研究方面,主要采用现场调查法和试验研究方法。侏罗纪沉积的外观上以紫红色和杂色的陆相碎屑岩沉积地层属于红层的典型代表层,主要岩性为砂岩、泥岩、砂泥岩等。红层岩体具有亲水性强、透水性弱等特性,因此红层地区易发生地质灾害。侏罗系红层在世界各地有着广泛的分布(Elick, 2002),从寒武纪以后的各个时期均有出露,如德国的南部和北部盆地区分布有红层(Hecht, 2001),墨西哥湾地区分布有侏罗纪红层等(Watkins, 1999)。我国有众多铁路、公路穿越红层地区,其力学特性及其对工程建设的影响越来越受到关注,通过大量工程实践积累了一定的经验和现场资料,但多侧重于现场调查,理论研究相对较少。胡文华等(1983)采用室内试验与现场试验相结合、静力法试验与动力法试验相结合、小块岩样试验与现场岩体试验相结合等综合研究手段,从岩性与

构造、岩石的工程性质、岩体的变形与剪切、岩体的工程分级等方面对四川盆地红层的工程性质进行了研究,初步研究了四川盆地红层岩石物理力学指标变化范围以及指标间的经验、半经验关系,并对岩体的工程分级进行了初步探讨。居恢扬、顾仁杰(1984)结合红层的力学特性,针对我国南方红层滑坡开展了初步研究,并从工程地质的角度提出了红层的特定概念,对红层的展布规律、岩性特征、构造特征和工程性质作了简要论述,同时结合实例对我国南方红层地区铁道工程建设中产生的滑坡、崩塌、差异风化、翻浆冒泥等工程地质问题的原因进行了分析。杨淑碧等(1996)在对侏罗系沙溪庙组砂、泥岩进行系统流变试验的基础上,详细研究了砂、泥岩的流变特性及其相应的长期强度。吉随旺、张倬元(2000)对川中地区白垩系、侏罗系的泥岩、泥质粉砂岩的抗压强度进行了统计分析,得出了红层岩石作为地基时抗压强度的取值范围。陈志坚、卓家寿(2000)对层状岩体的岩性组合特征,软弱夹层、裂隙的分布规律以及岩体结构特征进行了分析、研究、分区分类并建立了相应的样本单元,提出了用数值分析方法模拟现场大型试验的“样本单元法”,这对含裂隙岩体力学参数在岩体结构特征研究方面的确定作出了有益的探索。

蔡跃等(2008)、范文等(2000)、何忠明等(2010)、林杭等(2010)、周科峰等(2012)开展了考虑结构特征的层状边坡稳定性研究。朱定华等(2002)对南京红层软岩流变特性进行了实验研究,发现红层软岩存在显著的流变特性,符合 Burgers 本构模型,并得到强风化泥岩、中风化泥岩、强风化泥质粉砂岩和微风化泥质粉砂岩的本构模型。张俊云等(2006)对红层泥岩边坡快速风化进行了原位监测试验,并对泥岩试样温度变化进行了试验室试验和有限元分析。结果表明:红层泥岩边坡的快速风化集中在表层 10 cm 深度范围内,气温变化和降雨次数对快速风化有重要影响。杨宗估等(2008)从滑坡形成的基本条件和触发因素两方面对三峡库区万州侏罗系红层滑坡的成因机制进行了总结和分析。陈小婷等(2009)、董金玉和杨继红等(2010)针对三峡库区平缓层状软硬相间斜坡,分析了其变形破坏的不同模式。刘彬等(2010)依托大型电站坝基岩体作为试验场地,开展了软硬相间层状复杂岩体综合变形模量原位试验研究。

在夹软岩层斜坡变形破坏研究方面,罗元华等(2005)对三峡库区奉节县新城区泥质灰岩斜坡开展了变形破坏模式的现象学研究。丁秀丽等(2005)研究了不同类型软、硬岩石的蠕变破坏特征,开展了软硬互层边坡岩体稳定性分析。黄波林、许模(2006)开展了三峡水库水位上升对香溪河流域典型滑坡的影响研究,分析了白家堡滑坡、耿家坪滑坡、白马滩滑坡发育在侏罗系地层中的滑坡在蓄水后的变形特征。Miao et al. (2014)基于环剪仪等试验,研究了三峡库区侏罗系红层滑坡的变形机制。宋玉环(2011)建立了一套软硬互层边坡变形破坏模式分析和稳定性评价与控制体系。

第三节 研究内容及技术路线

本研究内容主要包括以下五个方面:

(1) 秭归县侏罗系地层地质特征和岩性特征。在野外调查和取样的基础上,进行不同配比泥化夹层的重塑试验,研究了含砂量对泥岩重塑样的影响程度,并建立了泥化夹层破坏的数理统计模型。同时基于结构面现有研究理论分析,结合室内物理模型试验,对结构面粗糙度系数进行了量化分析研究,定量研究侏罗系软硬相间地层异性结构面的强度特性。

(2) 抗滑桩结构与力学特性研究。通过力学理论分析并结合数值模拟反演分析提出了一种钢筋混凝土复合弹性模量的求解方法,并根据不同的滑坡推力分布模式,研究了在滑坡推力作用下相应的滑面以上抗滑桩桩身位移变化规律。

(3) 抗滑桩横截面优化研究。采用三维有限差分数值模拟方法,研究了内等腰梯形和外等腰梯形抗滑桩受力和变形特征。根据刚性抗滑桩和弹性抗滑桩内力计算方法,分别对矩形和 T 形横截面抗滑桩进行刚性桩和弹性桩的内力计算分析,总结了抗滑桩桩身受力和变形与抗滑桩横截面之间的规律。

(4) 抗滑桩横截面和桩长优化研究。基于力学分析地层条件分别为均质硬岩、均质软岩和软硬相间地层条件,分析不同横截面型式下、不同桩长条件下抗滑桩嵌固效果,同时采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件进行了不同滑床地层条件下嵌固段桩周岩体受力验证分析。

(5) 侏罗系地层抗滑桩布设和结构优化。对堆积层滑坡空间形态进行概化,提出了半扁平椭球体滑坡空间模型,并基于滑坡尺度效应规律提出了滑坡推力分布的理论模型,揭示了滑坡推力分布“中间大、两侧小”的空间分布特征。根据滑坡各剖面的稳定性系数与安全系数之间的关系,提出了滑坡的“稳定性界限”确定方法,并可据此进行合理抗滑桩布设范围的确定。根据滑坡推力分布的理论模型和桩间距计算公式,提出了相对应的“中间密、两侧疏”的抗滑桩平面布局模式。

研究技术路线如图 1-1 所示。

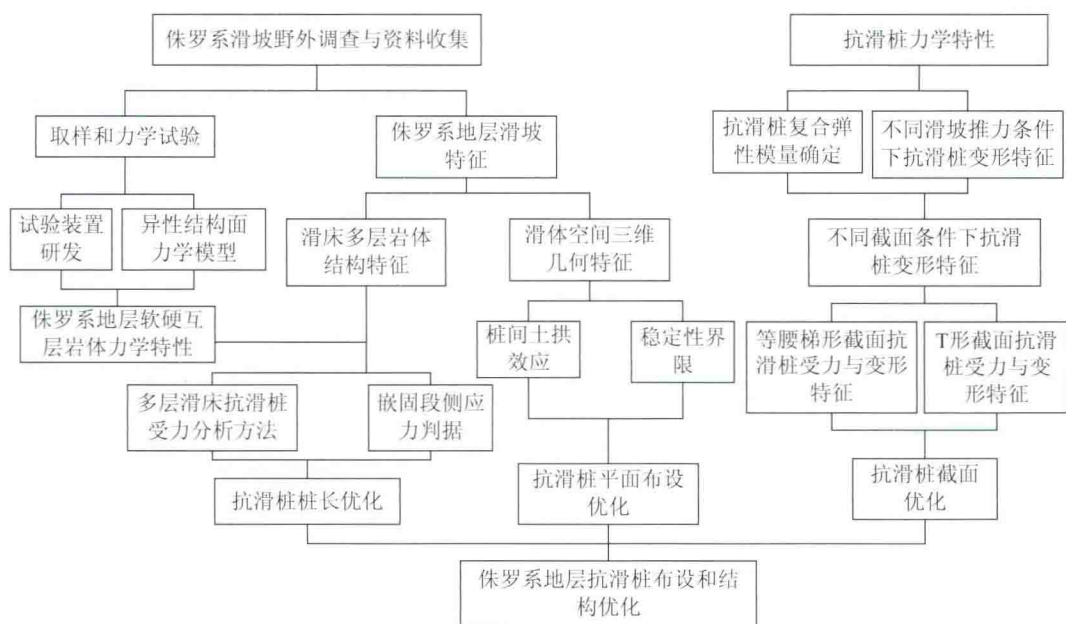


图 1-1 总体研究技术路线

第二章 侏罗系地层力学强度特征

第一节 概 述

侏罗系地层中砂岩和泥岩相间形成的软硬相间结构地层是我国较为常见的一种滑床结构类型,广泛分布于三峡库区的秭归县、兴山县、云阳县、万州区、忠县、开县乃至四川东部等广大地区,具有独特的地质和力学特性。从物理力学性质上分析,泥岩碎屑物理力学性质较差,矿物成分主要为蒙脱石、伊利石,具有亲水性强、透水性弱的特点,工程性质较差,在干湿交替变化的条件下易产生崩解。砂岩的物理力学性质则相对较好,抗风化和抗崩解能力均较强。

三峡库区侏罗系软硬相间地层结构常在薄层软岩中产生泥化夹层,形成软弱层,在重力作用下产生剪应力集中现象,致使软弱层整体发生破坏而产生地质灾害。同时,软岩的厚度以及岩层倾角也与应力集中现象的产生有着密不可分的关系,泥岩岩层的厚度越大,接触面上应力集中现象越不明显;岩层倾角越大,砂岩和泥岩接触面上的剪应力越集中,越容易发生破坏而引起崩塌等地质灾害(李守定等,2004)。

总体来说,侏罗系红层主要有以下五个方面的力学性质:①侏罗系红层通常是由软岩和硬岩相间组成,软硬层性质存在较大的差异;②侏罗系红层中的软岩性质较差,主要表现为强度低、变形大、风化严重、遇水后易软化;③侏罗系红层边坡坡面风化作用强烈;④侏罗系红层岩体的结构面中广泛发育有软弱夹层,存在缓倾软弱夹层和陡倾节理的组合;⑤侏罗系红层岩体中常发育有多组节理。由此可见,侏罗系红层是具有特殊工程性质的岩体,要合理进行侏罗系红层软岩的力学分析,正确进行红层地区岩土工程的设计施工,首先应充分认识其强度和变形特性,在此基础上合理选择参数(周应华,2006)。

第二节 野外调查与泥岩强度测试

一、野外取样与数据采集

在三峡库区内的软硬相间岩组主要分布在志留系的中上统(砂岩、泥岩、粉砂岩互层)、侏罗系的中下统(砂岩、泥岩互层)等地层中,在这些地层中发育的滑坡数量众多,尤以侏罗系软硬相间地层区滑坡发育为甚(图2-1)。如此密集的滑坡,凸显了该地区软硬相间地层岩性的独特地质特征和力学特性。因此,选择三峡库区湖北省秭归县归州镇和水田坝乡的软硬相间地层分布区作为主要的工作调查区,对工作调查区内的地层岩性进行详细勘察,选取典型地区软硬相间岩层采取野外不同类型结构面试样以及泥岩碎屑物,以进行室内物理力学试验,进而获取侏罗系软硬相间岩层的物理力学参数。此外,利用国际通用的回弹仪设备,在野外不同类型结构面的典型工作区,现场测试侏罗系软硬相间地层不同岩性(主要为

砂岩、泥质粉砂岩和泥岩)的壁岩强度值(图2-2)。



图2-1 侏罗系典型软硬相间地层

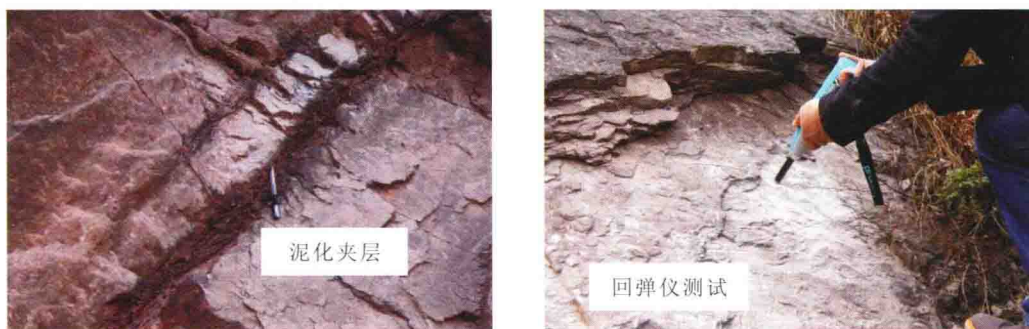


图2-2 野外取样与数据采集

二、室内重塑土试验

在工程实践中,泥化夹层是控制岩体稳定性的主要软弱面,常被视作工程岩体中物理力学性质较差的结构面,尤其在地下水长期作用下,会导致其力学强度进一步降低,从而严重威胁各类工程(如地下工程、高边坡工程、深基坑工程等)的稳定性。因此,泥化夹层历来是工程岩体稳定性研究的重点内容之一,如何准确地获取泥化夹层的力学强度参数尤显重要。由于泥化夹层常呈现出两层坚硬厚层岩体中夹有极薄软层的形式,形成条件复杂多变,结构、成分等空间分布不均匀,其力学特性不仅受夹层软岩本身同时也会受到两侧坚硬岩壁的影响,因此泥化夹层的组构特征和力学特性既不同于土又不同于岩石。目前,对泥化夹层力学强度参数的研究,主要采用现场原位测试和室内试验两种手段来获得。在现场强度测试中,主要是依靠大型原位试验,这种试验手段不仅切取原状试样困难,而且价格昂贵,推广应用难度较大。

为此,在野外现场实地取样的基础上,通过对不同配比的泥化夹层重塑样进行室内直接剪切试验,采用非线性摩尔-库仑破坏准则对泥化夹层强度加以分析,研究重塑泥化夹层的剪切变形破坏特征。通过 MATLAB 程序计算法检验最终得出泥化夹层非线性公式的最优参数,获得泥化夹层破坏的数理统计模型。

(一) 泥化夹层室内重塑试验

选取三峡库区秭归县归州镇典型边坡岩体泥化夹层作为研究对象，图 2-3 为取样区域照片。将现场取得的泥化夹层试样包装好后运回实验室，为了确保室内泥化夹层重塑试样制备的可重复性及试验结果的准确性，制定了明确统一的试样重塑过程，包括以下几个步骤：

(1) 准备重塑样所需材料。将野外取得的试样敲碎，并在研磨器中研磨，将研磨后的岩样和标准砂过 2mm 筛子，并将过筛后的试样放入试验盘内。随后将装有泥化夹层过筛试样的试验盘放入烘箱内烘干。烘箱的温度尽量控制在 105℃ 左右，烘干时间应不少于一天。



图 2-3 泥化夹层取样区域照片

根据野外泥化夹层基本物理参数，将烘干后的泥化夹层过筛试样、标准砂与水进行配比，试验中共采用了 12 种配比方案(表 2-1)，保持水的比例不变。泥岩重塑试样的密度为

表 2-1 泥岩重塑样配比 (单位：%)

含砂量	江砂 (1mm)	泥岩碎屑 (过 2mm 筛)	水
配比一	0	92	8
配比二	5	87	8
配比三	10	82	8
配比四	15	77	8
配比五	20	72	8
配比六	25	67	8
配比七	30	62	8
配比八	35	57	8
配比九	40	52	8
配比十	45	47	8
配比十一	50	42	8
配比十二	55	37	8

2.5g/cm^3 。由于试验配比的泥化夹层过筛样及标准砂可能完全利用,因此进行配比时的试样质量盛取时须比所需试样质量大些。进行试样配比时,先用试验铲将泥化夹层过筛样与标准砂铲均匀,用量筒将定量水均匀喷到土的表面,并同时用铲子将砂土与水搅匀。待搅匀之后,将装有含有一定含水量的泥岩碎屑与标准砂混合物的容器用保鲜膜包好,并静置一晚,使其充分融合,如图 2-4 所示。

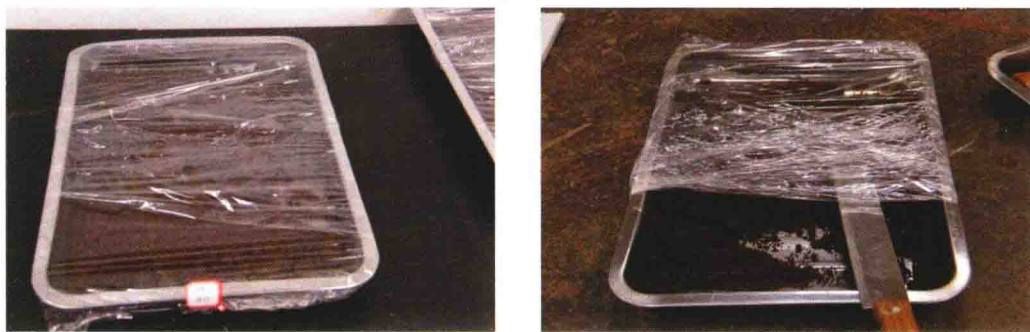


图 2-4 泥化夹层重塑试样

(2) 按试验要求,用已知质量、高度和面积的环刀和制样器,将按照规范配置好的砂土混合样制取成标准试样,并用保鲜薄膜包起。直剪试验环刀样品如图 2-5 所示。每一种含砂量的重塑样取相同试样 4~5 个,并测其密度,其密度差不应大于 0.03g/cm^3 。将所制成的不同含砂量的重塑样进行编号整理。

(3) 将室内所制备的泥岩重塑样进行直剪试验。每组试验选取 4 个试样,在四种不同垂直压力下做剪切实验,如图 2-6 所示。



图 2-5 直剪试验环刀样品



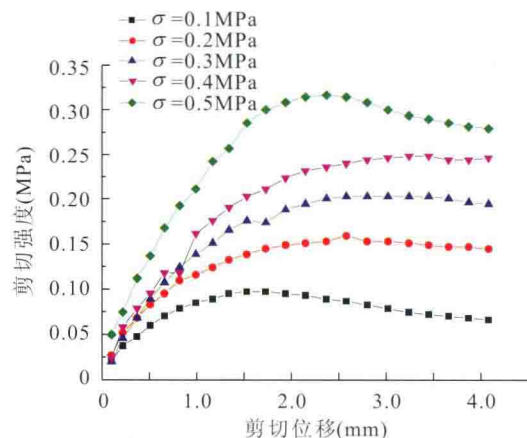
图 2-6 泥化夹层重塑样直剪试验示意图

垂直压力由现场预期的最大压力决定,由于实验室条件所限,故选取垂直压力分别为 0.1MPa 、 0.2MPa 、 0.3MPa 、 0.4MPa 。采用快剪法进行泥化夹层重塑样室内直剪试验,各垂直压力可依次轻轻施加,待垂直压力稳定后拔出固定销,以 $4\sim 12\text{r/min}$ 的均匀速率旋转手轮,确保试样在 $3\sim 5\text{min}$ 内剪坏。重塑试样试验过程中破坏的标志为:量力环中的测微表指针不再前进,或者显著后退,则表示试样已被剪坏。确定试样已剪坏后,及时记录测微表读数。剪切试验结束后,应尽快依次卸除测微表、荷载、上盒等,必要时沿剪切面取试样测定剪切后的土样含水率。

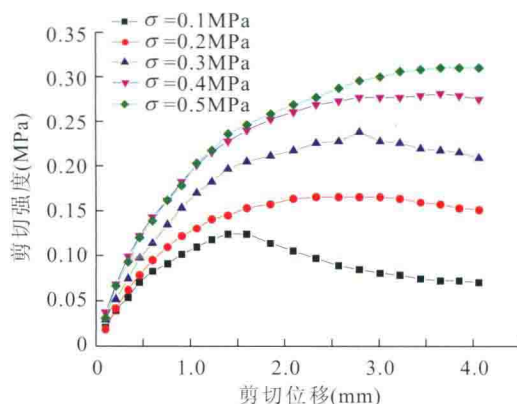
(二) 试验结果整理与分析

1. 剪应力-剪切位移关系曲线特征分析

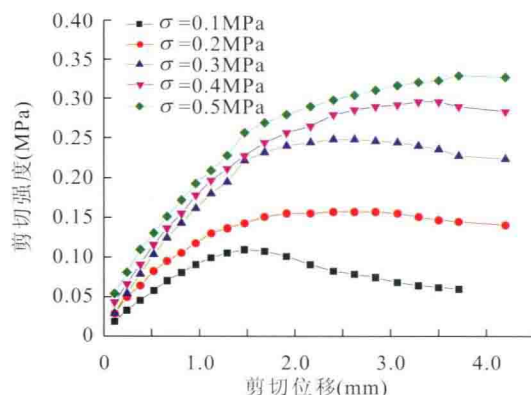
将室内试验结果进行预处理, 去除由于人为因素等造成的异常数据, 依据此绘制 12 组不同含砂量泥岩重塑样剪应力-剪切位移关系曲线, 如图 2-7 所示。对比图 2-7 (a) ~ (f) 可以看出, 泥化夹层重塑样的剪切强度随着试样中含砂量的增加而显著增加。对于同一



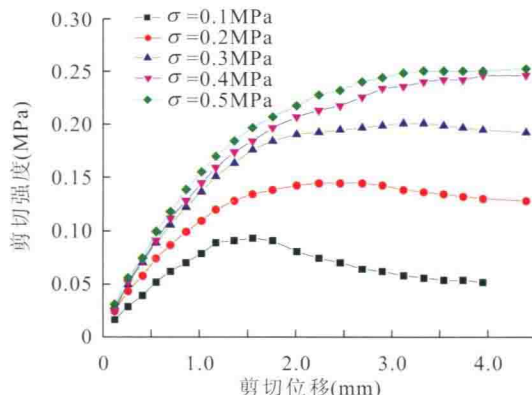
(a) 含砂量为0



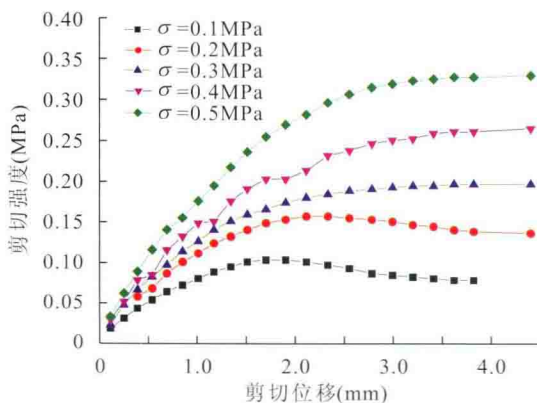
(b) 含砂量为5%



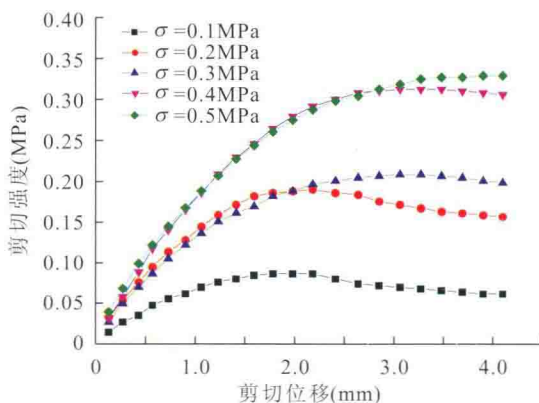
(c) 含砂量为10%



(d) 含砂量为15%



(e) 含砂量为20%



(f) 含砂量为25%