文章编号: 1006-6616 (2017) 01-0078-10

三峡库区反倾岩质滑坡防治措施研究

谭维佳¹,代贞伟^{1,2},陈云霞³,覃 雯⁴

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054;

2. 中国地质调查局武汉地质调查中心,武汉 430205;

3. 重庆市铜梁区国土资源和房屋管理局,重庆 402560;

4. 重庆市地质矿产勘查开发局 107 地质队, 重庆 401120)

摘 要:选取巫峡段茅草坡一典型反倾岩质滑坡为研究对象,阐述了库岸滑坡防治措施的分阶 段设计流程(原则、思路和方法):首先基于已有的地质勘察资料和现阶段岸坡变形破坏特征分 析岸坡变形破坏过程及现阶段所处的变形阶段,确定其相应的失稳模式和主控因素,提出滑坡 防治比选方案;其次对于滑坡不同变形破坏阶段进行合理划分,运用数值模拟对滑坡防治各比 选方案的治理效果开展岸坡不同变形破坏阶段的全过程评价,对比分析制定较合理的防治措施。 研究结论主要有:(1)对同一岸坡而言,当其处于不同变形阶段时,其变形破坏模式和主控因 素不完全相同,且同一防治方案的治理效果差别较大;(2)就茅草坡现阶段而言,滑坡处于变 形破坏过程的坡脚弱化滑移阶段,此阶段变形破坏的主控因素为消落带岩体的弱化和滑移,格 构护坡方案的造价低且防治效果最好,而锚杆锚固方案造价高且效果低。

关键词:三峡库区;反倾岩质滑坡;茅草坡岸坡;变形模式;防治措施

中图分类号: P642.22 文献标识码: A

0 引言

库岸滑坡是水利工程建设中普遍存在的问题, 以长江经济带三峡水库为例,库岸地势陡峻,水 位周期性波动,库岸滑坡现象十分严重,而滑坡 灾害防治措施的科学合理制定往往与其致灾成因、 变形破坏模式和几何边界条件具有密切的关联, 因此,如何选取技术可行、安全可靠的防治工程 方案,对滑坡防灾减灾具有重要的科学研究意义 及工程应用价值。随着我国诸多水利水电工程的 高速发展,水库建成蓄水后,将形成大量的涉水 岸坡,很多岸坡原本稳定的地质环境将受到很大 扰动,尤其在三峡库区,滑坡地质灾害的防治将 面临巨大挑战,事关长江沿岸居民和沿江航道的 安全^[1-2]。2008 年 11 月 23 日,重庆市巫山县巫峡 龚家方发生滑坡,约 38×10⁴ m³ 岩土体在短短几 分钟内滑入长江,引起高达 31.8 m 涌浪,造成直 接经济损失 800 余万,间接经济损失多达上亿 元^[3-5]。龚家方周边数个岸坡,属于典型的水库型 反倾岩质岸坡,在内部因素(地质环境、岩体结 构)和外部因素(库水波动、降雨、地震、人类 工程活动)双重影响下出现了相似的变形 迹象^[6-8]。

目前对水库型滑坡的研究较多集中在库水波 动条件下滑坡渗流场变化^[9-10]、库水作用下滑坡 稳定性变化规律^[11-12]、水库型滑坡的诱发因素及 其作用机制^[13-14]、水库型滑坡预测预报模型^[15-16] 等方面,然而对库水作用下反倾岩质滑坡的防治 措施研究较少,尤其是以往类似岸坡防治方案设 计,多以极限平衡法计算所得的稳定性作为岸坡 防治依据,仅考虑当下时间节点的岸坡稳定性,

收稿日期: 2016-06-30

基金项目:"十二五"国家科技支撑项目(2012BAK10B01);中央高校基本科研业务费资助项目(自然科学类310826161013);中国地质调查局地质调查项目(12120114079101,DD20160268)

作者简介: 谭维佳 (1988-), 男, 地质工程专业, 博士, 工程师, 主要从事工程地质与地质灾害研究工作。E-mail: 371422852 @ qq. com

缺少岸坡变形阶段区分的重要环节,忽视了对岸 坡演化趋势的整体把握。

因此,本文选取巫峡段茅草坡一典型反倾岩 质滑坡为研究对象,阐述了此类滑坡防治措施的 分阶段设计原则、思路和方法,并运用数值模拟 对滑坡防治各比选方案的治理效果开展岸坡不同 变形破坏阶段的全过程评价,对比分析提出较合 理的防治措施,可为类似库岸滑坡防灾减灾措施 的科学制定提供一定的参考。

1 滑坡区工程地质概况

重庆市巫山县茅草坡岸坡,位于长江巫峡口 的左岸,距巫山主城区5km,上距重庆475km, 下距三峡大坝125km,属于侵蚀中低山河谷地貌 (见图1),山脉走向受区域构造控制作用,整体呈 NEE 展布,山脊从西向东为长江大桥一大石坡— 望天坪—阴坡—棺材盖一线,山脊高程730m(文 峰观)~1211.5m(棺材盖),山脊宽度5~10m。

滑坡区域地处大巴山弧形褶带与新华夏系交 接复合部位,构造形迹为齐跃山断裂带及一系列 紧密褶曲,主要构造为横石溪背斜和巫山复向斜,



图 1 滑坡区地貌 Fig. 1 Landscape of Maocaopo bank slope

构造线与长江河谷斜交(见图2)。滑坡位于横石 溪背斜近轴部及北西翼轴向北60~70°东,该区段 背斜顶部及翼部均为嘉陵江组,在横石溪一带长 江两岸核部最老出露志留系,背斜顶部产状平缓, 翼部变陡,北西翼倾角17~50°,南东翼倾角10~ 70°,背斜总体形态近似箱形。横石溪背斜属于紧 密型褶皱,伴有若干小型断裂,且裂隙较发育, 是形成崩塌与滑坡的主要构造作用因素。



图 2 三峡库区地质构造纲要图 (据殷跃平) Fig. 2 Structure outline map of Three Gorges Reservoir region

滑坡区降雨充沛,多年平均降水量1087.4 mm, 主要集中于每年5~10月份,占全年降水量的 68.8%。滑坡区地层岩性主要可分为上部的三叠系上 统嘉陵江组和下部的三叠系下统大冶组。上部的三叠 系上统嘉陵江组以碳酸盐岩为主,为含水层,赋存溶 蚀裂隙水;下部的三叠系下统大冶组以灰岩为主,为 相对隔水层;地表局部分布第四系崩坡积层及冲洪积 层,赋存松散岩类孔隙水。

2 滑坡基本特征

2.1 滑坡形态特征

茅草坡岸坡地形北高南低,前缘高程为80m, 后缘高程为616m,相对高差536m。岸坡呈长舌 状平面形态,宽约100m,纵向长758m,总体地 形较陡,坡角44~54°,下陡上缓,前缘推测滑动 倾角为 32~36°, 面积(斜面积)约 12.15× 10⁴ m², 坡向 156~170°。

该岸坡上游为龚家方斜坡,下游为独龙斜坡, 坡体两侧以季节性冲沟为界(切割深度约15~ 20 m), 坡体上另有三条季节性浅冲沟, 前缘直抵 长江(见图3)。滑坡区地形坡度陡,接受大气降 水补给,绝大部分顺坡直接排泄至长江,少量经 岩土体裂隙入渗向长江排泄。滑坡区地下水受地 形条件控制, 汇水面积小, 在地表浅部地下水贫 乏,裂隙仅为地表水、地下水快速过水通道,水 位变动带地下水受库水涨落而涨落。



图 3 茅草坡岸坡全貌 Fig. 3 Full view of the Maocaopo bank slope

2.2 滑坡地质结构特征

茅草坡岸坡在145 m水位长211.3 m,岸坡临 江段中部表层分布少量崩坡积、库岸滑塌堆积碎 块石土,覆盖层厚度1~4m,基岩为三叠系下统 大治组三段、四段薄~极薄层状泥质灰岩、中~ 厚层状灰岩,三段层间夹页岩,岩层产状 310~ 330°∠24~62°, 坡体结构为反向坡, 坡面岩体在



(a) 坡面弯曲破碎岩体

图 5

构造、重力作用下裂隙发育,极破碎~较破碎, 破碎岩体总厚 13.29~19.80 m (见图 4)。岸坡岩 体中发育一组纵张裂隙,产状135~165°∠52~65° 的裂隙为主;另外发育两组 X 型剪切裂隙,产状 分别为 35~55°∠62~82°和 185~195°∠62~76°。



Fig. 4 Engineering geological profile of 2-2'

据现场揭露, 斜坡中部弯曲变形深度为 5.20~ 12.69 m, 斜坡下游弯曲变形深度为 12.50~26.50 m, 岩体破碎,且从地表到深部,倾角逐渐增大,下游较 上游弯曲变形显著。滑坡区无断层通过,近地表岩体 在重力作用下,有弯曲变形的现象,弯曲破裂面未全 面贯通,未形成连续的破裂面(见图5)。



(b) 坡脚极破碎岩体

斜坡近地表岩体结构及变形迹象 Fig. 5 Structure and deformation of the rock mass in near-surface of slope

岸坡现有破坏形式主要包括(1)在局部坡角 大于外倾裂面倾角的地段发生滑塌;(2)以嘉陵江 一段厚层灰岩为界,坡面岩体发生弯曲变形,下游 侧近江段岩体极破碎,呈散裂结构,变形明显。

80

2.3 滑坡变形阶段及变形模式^[17]

茅草坡岸坡在构造、重力作用下弯曲变形明显,弯曲变形分布高程 145~456 m,目前弯曲破裂面并未全面贯通。控制其稳定性关键在于对岸坡变形的控制,使其不具备进一步弱化条件,潜在滑动面的演化就会在"孕育"或发展阶段结束,从而不会进入最终的累积变形阶段。

茅草坡为典型的反倾岩质岸坡,由于岸坡中 部存在中厚层灰岩岩梁,使其变形破坏过程具有 一定特殊性。岸坡成型后,在降雨和风化作用下, 岩体发生风化剥蚀和崩解,坡形变陡,坡脚压缩, 坡脚对上部坡体支撑力逐渐减小,岸坡变形加剧。 岸坡岩层在重力作用下出现倾倒大变形,中上部 较硬岩层发生 V 状倾倒,下部较软岩层发生弯曲 压缩,导致岩层发生拉断或压裂破坏并伴有较小 裂隙产生。由于岸坡中部岩梁以及结构面间岩桥 的存在,承担了上部坡体的部分压力,坡体内无 长大贯通面,总体处于基本稳定状态。

当三峡水库建成蓄水后,长江水位在145~ 175 m间周期涨落成为岸坡的常态工况,坡脚消落 带经受库水位周期性波动、冲刷、淘蚀作用,岩 体弱化,强度降低,岩体加剧碎裂;结构面强度 降低,岩桥剪断。坡脚形成较小贯通面,该部分 岩体在库水作用下出现塌岸或小范围滑移,贯通 面逐渐向上延伸,岸坡表现为自下而上的滑动模 式。由于岸坡中部存在较高强度的厚层岩梁,当 滑坡发展到该层时会出现不连续的滑动,该阶段 简称坡脚弱化滑移阶段。

随着时间推移,当下部贯通面逐渐延伸至岩 梁,岸坡下部滑动区对其上部岩体基本失去支撑 作用,上部倾倒区岩体的重力全部由中部岩梁承 担并无法向下传递,此时中部岩梁将维持岸坡的 受力平衡和稳定性,岩梁应力逐渐累积,当其应 力大于其最大强度,或超过其疲劳强度时,岩梁 出现脆性破坏,上下滑动面贯通,整个岸坡出现 结构性倾倒崩塌。此阶段破坏极具突发性;由于 整体出现崩滑解体,岩土体运动速度较快,破坏 在极短时间内完成。岸坡总是由中下部先破坏, 然后上部岩体失去支撑而崩塌,该阶段简称岩梁 断裂一倾倒崩滑阶段。

依据现场工程地质调查并结合岸坡变形迹象 可推断,茅草坡岸坡处于变形破坏过程中的坡脚 弱化滑移阶段,此阶段变形破坏的主控因素为消 落带岩体的弱化和滑移。

3 滑坡防治方案对比研究

3.1 防治方案选取

在进行岸坡防治方案选择时,首先采用极限 平衡法对该岸坡稳定性进行计算,选取主剖面以 自重 + 175 m 水位降至 145 m + 50 年一遇暴雨 + 地 震最危险工况进行稳定性计算,其稳定系数 1.02, 岸坡剩余推力计算为 6222 KN,设计剩余下滑力为 8828 KN,可知茅草坡岸坡在计算工况处于欠稳定 状态。由于采用极限平衡法计算反岩质岸坡稳定 性时假定岸坡内存在贯通潜在滑面,显然无法考 虑茅草坡岸坡的中部厚层灰岩岩梁锁固作用,即 将其视为已破坏。据前文分析可知,当潜在滑面 贯通时岸坡已由坡脚弱化滑移阶段发展到了岩梁 断裂-倾倒崩滑阶段。

基于以上分析结果,对该岸坡设计以下两种 防治方案。

(1) 防治方案一

肋柱锚索(见图 6):锚索采用 15 束单根长度 30m 的钢绞线,肋柱梁采用钢筋混凝土现浇梁,治 理方案总预算 3764.59 万元。治理工程具体布置 如下:



Fig. 6 Diagram of No. 1 treatment plan

锚索水平间距按 4.0 m 布置,型号为 15 束 1
× 7 φs15.2 钢 绞 线,孔 径 为 200,锚 固 长 度 为
8.5 m,自由锻 20 m,张拉段 1.5 m。锚索总长

30 m, 与水平面夹角为 15°。锚索固结水泥砂浆 M30。锚索设计锚固力为 T = 2000 KN。共 16 排, 827 根。圈梁底排设置于高程 184 m, 顶排高程为 248 m。肋柱按4 m 间距设置, 肋柱梁沿坡形布置。 纵横梁断面 80 cm (高) ×80 cm (宽), 埋置深度 为 40 cm, C30 混凝土, 受力主筋为9~12Φ28, 箍 筋 4 肢 Φ10@ 80。四周设圈梁, 断面与肋柱相同。 顶排及底排锚索据圈垂直间距为 2 m。

(2) 防治方案二

岸坡消落带受多年江水冲刷岩体十分破碎, 设计采用格构锚固护坡工程进行治理。工程总体 布置包括:格构锚固+喷射玻璃纤维砼面板护坡 (见图7)。



Fig. 7 Diagram of No. 2 treatment plan

工程布置在高程 155.5m~178 m 高程处,垂 直高度为 22.5 m,长约 95 m。共设置 8 排锚杆, 格构梁间距 3 m×3 m,锚杆共计 260 根。格构梁 间采用喷射玻璃纤维混凝土面板护坡。局部坡段 岩体破碎,先喷射素混凝土封闭坡面后,进行注 浆加固,达到设计强度后,对坡面实施格构锚固 护坡施工。护岸面积约为 2900 m²。该方案工程总 投资 1357.5 万元。

对消落带采用格构护坡防护。格构梁尺寸: 宽300 mm×高400 mm,格构间距3 m×3 m,采用 C25 混凝土现浇,连梁纵筋采用6Φ16。格构梁嵌 入地下 0.2 m。格构梁间采用喷射混凝土板护坡, 板厚 15 cm,采用 C25 玻璃纤维混凝土(由4%抗 碱玻璃纤维和混凝土组成)喷射而成,排水孔间 距1.5 m,孔与水平面夹角60°,排水管进水口处 设置反滤砂包,孔口包裹土工布。面板配置单层 双向 Φ10@200 钢筋网片。锚杆上下排垂直间距 3 m,水平间距按3 m 布置,锚杆钢筋为1Φ28,8 排锚杆长度 L = 8 m、10 m 布置,锚杆水平倾角 15°。最底排锚杆,孔口高程为157 m。锚杆固结 水泥砂浆 M30。锚杆为全粘结锚杆,共260 根。

3.2 数值模拟分析

茅草坡岸坡目前处于坡脚弱化滑移阶段,简称为阶段1;而当潜在滑面贯通时岸坡则由坡脚弱 化滑移阶段发展至岩梁断裂-倾倒崩滑阶段,简称 为阶段2。

对于茅草坡岸坡,首先计算其治理前的稳定 性,为岸坡治理前工况,以此作为对比标准,以 此来检验各防治方案对岸坡的防治效果。

为了检验方案一和方案二在岸坡不同变形阶段的治理效果,利用 FLAC3D 软件对岸坡治理前、阶段1用方案一、阶段1用方案二、阶段2用方案 一、阶段2用方案二,共5种工况进行稳定性数值 计算,得到岸坡的最大位移云图、剪应变增量云 图,进行对比,分析两种方案分别在两个变形阶段防治效果的差别。

(1) 岸坡最大位移

由最大位移云图可见(见图 8),在岸坡的变 形阶段1(坡脚弱化滑移阶段),施加防治方案一 以后,岸坡最大位移从30 mm减小为13 mm,降 幅为57%,施加防治方案二以后,岸坡最大位移 从30 mm减小为4 mm,降幅达87%。

在岸坡的变形阶段 2 (岩梁断裂-倾倒崩滑阶段),施加防治方案一以后,岸坡最大位移从 30 mm减小为 14 mm,降幅为 53%,施加防治方案 二以后,岸坡最大位移从 30 mm 减小为 26 mm, 降幅仅有 13%。

(2) 剪应变增量

由剪应变增量云图可见(见图9),在岸坡的 变形阶段1(坡脚弱化滑移阶段),施加防治方案 一以后,岸坡剪应变增量从0.0085减小到 0.0065,降幅为24%;而施加防治方案二以后, 岸坡剪应变增量由0.0085减小到0.00022,降幅 高达97%。

在岸坡变形阶段2(岩梁断裂-倾倒崩滑阶段),施加防治方案一以后,岸坡剪应变增量从



图 8 最大位移云图 Fig. 8 Maximum displacement nephogram

0.0085 减小到 0.0070,降幅 17%;而施加防治方 案二以后,岸坡剪应变增量几乎无变化。

综合分析以上计算结果发现,在反倾层状内 嵌岩梁式岩质岸坡变形破坏过程中,若岸坡处于 坡脚弱化滑移阶段,方案二(消落带格构护坡) 防治效果更佳;若岸坡处于岩梁断裂-倾倒崩滑阶 段,方案一(岸坡中部锚杆锚固)防治效果更佳, 方案二则在该阶段几乎无治理效果。因此,下面 分析这两种最优组合条件下岸坡变形区的变化 趋势。

由塑性区分布图(见图10)可看出,未治理 情况下岸坡塑性区由消落带下缘一直延伸至岸坡 中部,且下部多发生剪切破坏,中部多发生拉张 破坏,变形区分布规律与滑动区和倾倒区的分布 规律较吻合,也印证了基于工程地质分析的岸坡 变形破坏模式的判断。在岸坡变形阶段1,施加防 治方案二以后,岸坡的变形区几乎消失,防治效 果显著,充分证明岸坡破坏的主控区域为消落带, 对该区域进行防治能起到事半功倍的效果。

在岸坡变形阶段2,岸坡稳定性的主控因素为 中部岩梁,施加防治方案一以后,防治区以上变 形区域明显减小,可见该方案对中部岩梁及上部 倾倒区岩体起到很好的稳定作用,但防治区以下 消落带的剪切变形区几乎不受影响,可见此方案



图 9 剪应变增量云图 Fig. 9 Maximum shear strain increment nephogram

仅适用于变形阶段2。

通过对反倾层状内嵌岩梁式岩质岸坡破坏过 程的分析,可判断出茅草坡岸坡目前处于破坏过 程的第1阶段——坡脚弱化滑移阶段,因此由其破 坏模式可知此阶段岸坡稳定性的主控因素为消落 带岩体的弱化和滑移,则岸坡的防治部位应以消 落带为主。

经过专家评审,最终选用方案二(消落带格 构锚固+护坡)对茅草坡岸坡进行防治,于2013 年7月2日~2013年9月6日水库低水位运行阶段 由重庆市208建设工程公司施工完成(见图11)。

3.3 防治方案治理效果对比分析

通常在进行岸坡防治设计时,并未对岸坡变 形阶段进行区分,仅以极限平衡法所得的稳定性 作为岸坡防治依据,只考虑当下时间点的稳定性, 而忽视了对岸坡演化趋势的分析。因此本文提出 岸坡防治设计的分阶段讨论思想,主张先定性分 析,根据岸坡变形特征,判定其在长期破坏过程 中所处的阶段,进而确定岸坡此时的变形模式和 主控因素,以及岸坡的未来发展趋势,再以此来 指导岸坡的防治方案设计。

对两种方案在岸坡不同变形阶段的稳定性计



塑性区分布图 图 10 Fig. 10 plastic zone distribution

算结果进行对比,从最大位移、剪应变增量 和塑性区分布等角度分析了各方案的适用阶段。 现将两种方案防治效果对比如下(见表1),由上 表分析可知:同一岸坡,当其处于不同变形阶段 时,其变形破坏模式和主控因素完全不同,同一 防治方案的防治效果则差异显著。

4 结论

以茅草坡岸坡为实例,研究了反倾岩质岸坡 的防治方法,得出以下结论:

(1) 茅草坡岸坡目前处于坡脚弱化滑移变形 破坏阶段,此阶段变形主控因素为坡脚消落带岩 体的弱化和滑移;而采用极限平衡法计算岸坡稳 定性是基于斜坡内存在贯通潜在滑面的假设前提, 显然对于茅草坡而言, 仅适用于其变形发展最后 阶段——岩梁断裂-倾倒崩滑阶段。

(2) 数值模拟分析可知在岸坡的坡脚弱化滑 移阶段,格构护坡方案的造价低且防治效果最好, 而锚杆锚固方案造价高且效果低;在岸坡的岩梁 断裂-倾倒崩滑阶段,锚杆锚固方案的防治效果最 好,格构护坡方案几乎没有防治效果;即同一岸 坡同一防治方法在不同变形阶段的防治效果会差 别很大:

(3) 基于不同防治方案在岸坡不同变形阶段 的防治效果,提出岸坡防治设计的分阶段讨论思 想: 主张先对岸坡进行定性分析, 在确定岸坡所 处变形阶段基础上,确定其失稳模式和主控因素, 以此来指导岸坡的防治工程设计,从而最合理的 选择防治方法。

致谢 在野外地质调查和资料收集过程中. 得到了重庆市地质矿产勘查开发局 107 地质队和 208 地质队的帮助,在此表示感谢。

Table 1 Treatment effect comparison of different plans								
	主要措施	防治位置	锚杆长度/ m	工程造价/ 10 ⁴ 元	防治效果			
防治 方案					阶段1		阶段 2	
					最大位移	剪应变增量	最大位移	剪应变增量
					降幅/%	降幅/%	降幅/%	降幅/%
方案一	锚索锚固	184~248 m (岩梁下部)	30	3764.6	57	24	53	17
方案二	格构锚固 + 混凝土护坡	156~178 m (消落带)	8~10	1357.5	87	97	13	0

85



(a) 治理中的M4上游库岸



(b) 部分治理完成的M4上游库岸

图 11 治理工程现场施工图 Fig. 11 Construction site of treatment project

参考文献

- [1] 殷跃平.长江三峡工程移民迁建区地质灾害及防治研究
 [M].北京:地质出版社,2004.
 YIN Yue-ping. Major geologic hazard and prevention on the releation site at the Three Gorges [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.
- [2] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理 [M].北京: 地质出版社,1994.
 ZHANG Zhuo-yuan, WANG Shi-tian, WANG Lansheng.

Fundamental analysis of engineering geology. Beijing: Geological Publishing House, 1994.

- [3] YIN Y, Wang H, Gao Y, et al. Real-time monitoring and early warning of landslides at relocated Wushan Town, the Three Gorges Reservoir, China [J]. Landslides, 2010, 7 (3): 339 ~ 349.
- [4] HUANG Bo-lin, YIN Yue-ping, LIU Guangning, et al. Analysis of waves generated by Gongjiafang landslide, Three Gorges Reservoir, China. Landslides, 2012, 9 (3): 395 ~405.
- [5] 黄波林.水库滑坡涌浪灾害水波动力学分析方法研究
 [D].中国地质大学(武汉)博士论文.2014.
 Water Wave Dynamic Analysis Method Study on Landslidegenerated Impulse Wave Hazard in Reservoirs [D]. A Dissertation Submitted to China University of Geosciences for the Doctor Degree of Geological Engineering. 2014.
- [6] 卢海峰,刘泉声,陈从新.反倾岩质边坡悬臂梁极限平衡 模型的改进[J].岩土力学,2012,33 (2):577~584.
 LU Hai-feng, LIU Quan-sheng, CHEN Cong-xin. Improvement of cantilever beam limit equilibrium model of counter-tilt rock slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33 (2):577~ 584.
- [7] 吴宝和. 地表水和地下水对岩质边坡稳定性影响及防渗措施
 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14 (3): 1401 ~

141.

WU Bao-he. Influence of surface and ground water on the rock slope stability and seeping prevention. The Chinese journal of geological hazard control, 2003, 14 (3): 140 ~ 141.

- [8] 孙广忠等.中国典型滑坡 [M].北京:科学出版社,1988.
 SUN Guang-zhong, et al. Representative landslides in China.
 Beijing: Science press, 1988.
- [9] 沈明荣,邓海荣.水下岩质边坡在波浪作用下的稳定性分析[J].工程地质学报,2006,14(5):609~615.
 SHEN Ming-rong, DENG Hai-rong. Finite element analysis of submerged rock slope stability underwave acttion [J].工程地质学报,2006,14(5):609~615.
- [10] 邹丽芳,徐卫亚,宁宇,等.反倾层状岩质边坡倾倒变形 破坏机制综述 [J].长江科学学院院报,2009,26 (5): 25~30.
 ZOU Li-fang, XU Wei-ya, NING Yu, et al. Overview of topping failure mechanism of countertendency layered rock slopes [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26 (5): 25~30.
- [11] 左保成,陈从新,刘小巍,等.反倾岩质边坡破坏机制模型 试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24 (19): 3505~3511.

ZUO Bao-cheng, CHEN Cong-xin, LIU Xiao-wei, et al. Modeling experiment study on failure mechanism of counter-tilt rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (19): 3505 ~ 3511.

- [12] ADHIKARY D P, DYSKIN A V. Modelling of progressive and instantaneous failures of foliated rock slopes [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, 40 (4): 349 ~ 362.
- [13] 郭志华,周创兵,盛谦,等. 库水位变化对边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学,2005,26 (sup.):29~32.
 GUO Zhi-hua, ZHOU Chuang-bin, SHENG Qian, et al. Influence of reservoir water variation on slope stability [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (sup.):29~32.

- [14] 刘红岩,秦四清. 库水位上升条件下边坡渗流模拟[J]. 工程地质学报,2007,15(6):796~801.
 LIU Hong-yan, QIN Si-qing. Simulation of seepage field in bank slope due to reservoir water level change [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(6):796~801.
- [15] 廖红建,盛谦,高石夯,等. 库水位下降对滑坡体稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24 (19):3454~3458.
 LIAO Hong-jian, SHENG Qian, GAO Shi-hang, et al. Influence of drawdown of reservoir water level on landslide stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (19): 3454~3458.
- [16] 刘才华,陈从新,冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究 [J]. 岩土力学,2005,26 (5):769~773.
 LIU Cai-hua, CHEN Cong-xin, FENG Xia-ting. Study on mechanism of slope instability due to reservoir water level rise [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (5):769~773.
- [17] 谭维佳. 三峡库区反倾层状内嵌岩梁式岩质岸坡失稳机理和防治研究 [D]. 长安大学, 2015.
 TAN Wei-jia. A study of the instability mechanism and failure control of the anti-dip stratified rock slope with embedded rock beam in the Three Gorges Reservoir Region [D]. Chang'an University, 2015.

STUDY ON CONTROL MEASURES OF COUNTER-TILT ROCK LANDSLIDE IN THREE GORGES RESERVOIR REGION

TAN Weijia¹, DAI Zhenwei^{1, 2}, CHEN Yunxia³

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang' an University, Xi' an, Shaanxi 710054, China;

2. Wuhan Centre of China Geological Survey, China Geological Survey, Wuhan, Hubei 430205, China)

Abstract: In this paper, Maocaopo in the Wu Gorge section, a typical anti-dip rock landslide, was taken as the research object to describe the phased design process of prevention and control measures for this type of landslide (principle, idea and method): First, the deformation failure process and the current deformation stage of the bank slope were analyzed on the basis of existing geological survey data and the characteristics of bank slope deformation failure at the current stage, so as to determine the corresponding instability mode and main control factors, then propose alternative schemes for landslide prevention and control. Second, different deformation failure stages of the landslide were reasonably divided. Numerical simulation was applied to carry out whole-process evaluation of the outcome of each alternative scheme for landslide prevention and control at different deformation failure stages of the bank slope. Reasonable prevention and control measures were established through comparative analysis. Main conclusions of the research include the followings: (1) For the same bank slopes, their deformation failure mode and main control factors are not exactly the same at different deformation stages, and the same prevention and control scheme renders significantly different outcomes. (2) For the current stage of Maocaopo, the landslide is at the slope toe weakening and slipping stage of the deformation failure process. The main control factor of deformation failure at this stage is the weakening and slipping of rock mass in the hydro-fluctuation belt. The scheme of slope protection with lattice needs a lower construction cost and produces a better prevention and control effect, while the scheme of bolt anchoring needs a higher construction cost but has a poorer effect.

Key words: Three Gorges Reservoir Region; counter-tilt rock landslide; Maocaopo bank slope; deformation mode; control measures