三峡库区黄泥巴蹬坎滑坡变形机制

易庆林[1,2,3], 赵能浩[1,2]

(1. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: [目的] 研究黄泥巴蹬坎滑坡的变形规律及失稳机制,旨在为库区同类型滑坡的研究提供借鉴。[方法] 分析该滑坡的宏观变形特征,结合专业监测数据,研究其变形规律及失稳机制,并运用数值模拟计算研究库水位下降的致滑机理。[结果] 黄泥巴蹬坎Ⅰ号滑体变形严重,分别于 2007 年 4—6 月,2009 年 4—6 月,2012 年 4—6 月发生加速变形,且加速变形速率逐次呈快速增长趋势。库水位下降对该滑坡稳定性的影响表现为坡体外部卸荷效应和内部动水压力推动作用。一方面,库水位下降使得指向坡内的静水压力消失,导致抗滑力减小。另一方面,库水位下降引起坡内地下水位下降,地下水沿滑带方向渗流,产生的动水压力推动滑坡向外发生变形。[结论] 目前黄泥巴蹬坎滑坡处于欠稳定状态,库水位下降加之连续强降雨是导致黄泥巴蹬坎滑坡变形失稳的主要因素。

关键词: 三峡库区; 黄泥巴蹬坎滑坡; 变形规律; 失稳机制

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2016)02-0042-06 **中图分类号**: P642.22

文献参数: 易庆林, 赵能浩. 三峡库区黄泥巴蹬坎滑坡变形机制[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 42-47. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.009

Deformation Mechanism of Huangnibadengkan Landslide in Three Gorges Reservoir Area

YI Qinglin[1,2,3], ZHAO Nenghao[1,2]

(1. *Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-environment in Three Gorges Area of Hubei Province, Yichang, Hubei* 443002, *China*; 2. *Ministry of Education Key Laboratory of Geological Disaster of Three Gorges Reservoir Area, China Three Gorges University, Yichang, Hubei* 443002, *China*; 3. *National Field Observation and Research Station of Landslides In Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, China Three Gorges University, Yichang, Hubei* 443002, *China*)

Abstract: [Objective] Studying the deformation rule and failure mechanism of Huangnibadengkan slope in order to achieve accurate prediction of landslide and provide reference for similar type of landslides research. [Methods] Through the analysis of its macroscopic deformation characteristics and based on professional monitoring data, the deformation rule and failure mechanism of this slope was studied. Meanwhile, slide mechanism mainly caused by water level falling is analyzed using the numerical calculation. [Results] Serious deformation happened in slide mass Ⅰ of Huangnibadengkan slope, which experienced accelerating deformation for three times, occurred in April to June in 2007, 2009 and 2012, respectively. The effects that reservoir water drawdown makes on this landslide are considered as two aspects: unloading on slope surface and internal hydrodynamic pressure. That means, on one hand, the horizontally slope-inward hydrostatic pressure disappears, as a result, the resistance force will decrease; on another hand, the underground water level drops triggered by reservoir water drawdown, will result in outward deformation of the landslide pushed

收稿日期: 2015-03-30 **修回日期**: 2015-05-19

资助项目: 水利部公益性行业科研专项项目"岸坡安全生命周期诊断评价与防护新技术示范"(201401029); 国家自然科学基金项目(51439003)

第一作者: 易庆林(1966—),男(汉族),湖北省松滋市人,硕士,教授级高级工程师,主要从事防灾减灾工程、变形监测等方面的研究。E-mail: yiqinglin@ctgu.edu.cn。

通信作者: 赵能浩(1990—),男(汉族),湖北省鄂州市人,硕士研究生,研究方向为地质灾害防治。E-mail: zhaonh@foxmail.com。

byhydrodynamic pressure. [Conclusion] The Huangnibadengkan landslide is in an unstable state at present, and falling of reservoir water level and continuous heavy rain are proved to be the main factors that lead to the deformation of this landslide.

Keywords: Three Gorges reservoir area; Huangnibadengkan landslide; deformation rule; failure mechanism

三峡水库自 2003 年蓄水以来,已造成一系列库岸边坡失稳案例[1-6]。库岸滑坡对当地人民生命财产安全以及航运造成了重大威胁[7-10]。库区涉水滑坡灾害引起了学者专家们的广泛关注,关于这方面的研究成果也颇为丰富[11-18]。三峡库区重庆市云阳县黄泥巴蹬坎滑坡为库区二期专业监测滑坡,该滑坡自 2004 年实施监测以来,一直持续变形[19]。该滑坡体上住有 9 户居民,共 26 人受威胁。且滑坡距长江主航道 1.4 km,一旦失稳,不仅造成滑坡体上居民的生命财产损失,而且还会对长江出航道过往船只造成涌浪威胁。

因此本文拟对该滑坡的变形失稳机制进行深入分析,以做到准确预测预报,确保生命财产安全,对库区同类型滑坡的研究提供借鉴意义。

1　滑坡概况

1.1　区域地质条件

黄泥巴蹬坎滑坡位于重庆市云阳县人和街道莲花社区 2 组,长江支流箭竹溪左岸,距河口 1.4 km。该滑坡所在斜坡结构为横向坡,斜坡坡顶高程为 400 m,坡高 267 m,坡长 653 m,斜坡整体坡度约为 22°,坡向为 276°。

该斜坡平面上呈横长形,剖面上呈上凹下凸形,在高程 225～250 m 范围内为宽 200 m 的平台,平台处物质成分主要为崩积物,块石含量较多,该平台沿着后缘基岩陡崖延伸,平台以下地形呈 16°的凸形坡,坡脚处被箭竹溪所切割,形成高约 15 m 的临空面。坡体的物质主要为碎块石土,为坡积物。黄泥巴蹬坎滑坡在该斜坡平台以下的坡积物中发育(图 1)。

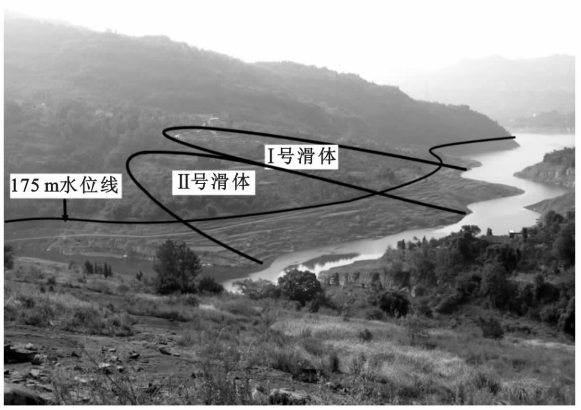


图 1　研究区黄泥巴蹬坎滑坡全貌

第四系土为紫红色夹灰绿色碎块石土,土石比约为 2∶8,碎石粒径为 3～10 cm,大者 60～100 cm,土层厚 3～50 m,靠近斜坡后部土层较薄,前部土层较厚,结构松散,为第四系残坡积土。该斜坡基岩为侏罗系中统上沙溪庙组灰绿色厚层—巨厚层长石砂岩,泥质粉砂岩与粉砂质泥岩不等厚互层,基岩倾角沿坡顶至坡脚有所变缓,倾向变化不大,依次为 170°∠26°,155°∠20°,150°∠15°,160°∠5°。该斜坡位于铁峰山背斜南东翼,其基岩发育两组裂隙:(1) 320°/NE∠70°,多闭合,少量切层,每 0.2 m 一条,延伸稳定;(2) 75°/NE∠70°,多闭合,少量切层,每 0.5 m 一条,延伸稳定。裂隙(1)切割裂隙(2)。两组裂隙面与层面共同影响岩体的完整性,裂隙控制滑坡的后缘及边界地貌走向。

1.2　滑坡基本特征

黄泥巴蹬坎滑坡可分为Ⅰ,Ⅱ号滑体,Ⅰ号滑体位于南侧,Ⅱ号滑体位于北侧(图 1)。Ⅰ号滑体平面上呈舍形,剖面呈直线形,主滑方向为 212°,为斜顺坡,前缘高程 130 m,后缘高程 250 m,后缘以上为平台地貌,左侧边界为冲沟地貌,右侧边界 190 m 以下为鼓丘地貌,190 m 以上为临空面。其纵长 530 m,宽 180 m,厚 30 m,面积约为 9.54×10^4 m^2,体积约为 2.86×10^6 m^3。Ⅱ号滑体平面上呈矩形,剖面呈凸形,主滑方向为 265°,为横向坡,前缘高程 145 m,后缘高程 210 m,后缘以上为基岩陡坎,左侧与Ⅰ号滑体共边界,右侧边界为临空面。其纵长 180 m,宽 260 m,厚 10 m,面积约为 4.68×10^4 m^2,体积约为 4.68×10^6 m^3。根据监测资料及本次现场调查,目前Ⅰ号滑体变形较为严重,Ⅱ号滑体基本无宏观变形,GPS 地表位移监测数据显示,Ⅰ号滑体地表位移变形远大于Ⅱ号滑体。滑体物质为紫红色夹灰绿色碎块石土,土石比约为 3∶7,碎石粒径为 3～10 cm,大者 30～50 cm,土层厚 3～40 m,靠近斜坡后部土层较薄,前部土层较厚,结构松散。滑带处物质为粉质黏土夹碎块石,遇水易软化。滑床基岩为侏罗系中统上沙溪庙组灰绿色厚层—巨厚层长石砂岩,泥质粉砂岩与粉砂质泥岩不等厚互层。

2　滑坡变形特征分析

2.1　宏观变形

2.1.1　*后缘宏观变形*　(1) 滑坡后缘一家民房处出

现多处墙裂缝，据测量，该民房东面墙体裂缝QL01，下宽3 cm，上宽1 cm，延伸3 m，墙裂缝多呈下宽上窄，为拉裂缝。通过吊重物测得该民房墙体顶部向224°方向倾斜24 cm，与滑坡主滑方向大致相同，据访问，该变形初次出现于2008年，以后每年3月退水时变形进一步加剧。(2) 后缘240 m高程处的公路亦发生较大变形，沿着公路出现走向160°，延伸超过100 m，宽3～10 cm的弧形裂缝，裂缝走向与滑坡后缘走向大致相同，该段公路向滑坡主滑方向错动30 cm，据访问，该变形初次出现于2002年，以后每年3月退水时变形进一步加剧。

2.1.2 *左侧边界宏观变形* (1) 左侧边界215 m高程处有公路穿过，经过该边界处的路段因滑坡变形而导致该处路面破坏，据访问该处曾发生过较大的剪切变形，具体时间不详，为滑坡滑动剪切所致，随着滑坡的变形，该左侧边界冲沟会进一步下切。(2) 左侧边界前缘可见体积约30 m^3的坍塌体，向箭竹溪坍塌，变形时间不详，据分析为滑坡滑动过程中对右侧边界以外的基岩产生挤压作用，使其破碎，加之两组裂隙面及岩层面的控制，且前缘临空，从而发生坍塌，随着滑坡的变形，该处坍塌会进一步加剧。

2.1.3 *右侧边界宏观变形* (1) 在右侧边界后缘公路下方高程为220 m处，见一大坍滑体，长40 m，宽30 m，后缘见30 cm裂口，沿300°方向滑动，为浅层坍滑，据访问，该处坍滑发生于2014年6月初，据分析，该坍滑体上部因修公路，对该处土体有扰动，公路来往车辆对其产生加载作用，加之滑坡整体变形的影响，该处土体出现裂缝，在降雨作用下即发生坍滑，在雨季该坍滑体变形会加剧。(2) 在右侧边界高程190 m以下，可见长200 m，宽100 m的次级小滑坡，其滑动方向为248°，该次级滑坡体上可见多处地裂缝及局部小型坍滑，变形时间不详，据分析，在大滑坡的滑动过程中，中后部滑体向前滑动，因前部滑体下伏基岩产状较缓，前部滑带处具较大的抗滑阻力，进而前部滑体将中后部滑体的推力传递至两侧，加之右侧地形较陡，土体结构松散，前缘临箭竹溪，具临空面，从而产生该次级滑坡。

2.2 地表位移监测数据分析

黄泥巴蹬坎滑坡为三峡库区二期专业监测灾害点，于2004年10月份开始实施专业监测。在Ⅰ，Ⅱ号滑体上共安装了9个GPS地表位移监测点(YY025-YY033)。从监测数据来看(图2)，位于Ⅰ号滑体上的YY025，YY026，YY027，YY028等4个监测点累计位移较大，截止于2014年5月31日，该4点累积位移分别为2 865，3 578，3 244，3 806 mm，位移方向分别为246°，211°，203°，209°。而位于Ⅱ号滑体上的YY029，YY030，YY031，YY032，YY033等5个监测点累积位移较小，分别为88，433，96，218，611 mm，位移方向分别为245°，252°，276°，265°，282°。从各监测点的位移大小及方向，加之现场调查的变形特征，可证实Ⅰ号滑体的主滑方向为212°，Ⅱ号滑体的主滑方向为265°，且Ⅰ号滑体整体变形严重，滑距较远，Ⅱ号滑体仅局部发生变形，未发生明显整体滑移。

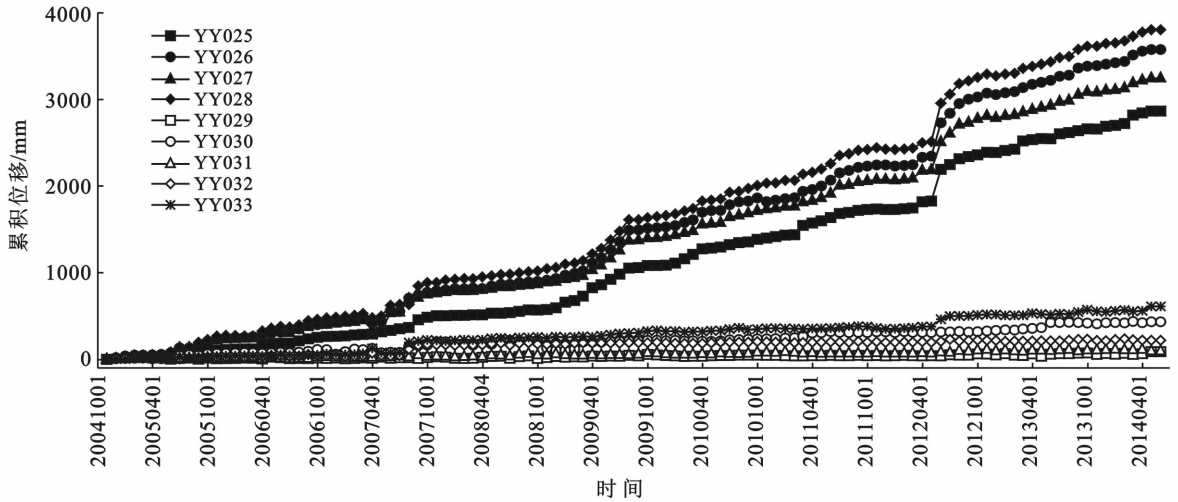


图2 滑坡地表累积位移-时间曲线

鉴于Ⅰ号滑体变形较严重，本研究着重分析Ⅰ号滑体的变形规律。从图2可以看出，YY025，YY026，YY027，YY028等4个点的累积位移—时间曲线呈台阶状增长，且表现出3个较为明显的台阶，分别出现于2007年4—6月，2009年4—6月和2012年4—6月。因此，可将累积位移—时间曲线划分为7段，

即:2004 年 11 月至 2007 年 3 月为第 1 段,为自监测以来的第 1 次匀速增长段;2007 年 4—6 月为第 2 段,为第 1 次加速增长段;2007 年 7 月至 2009 年 3 月为第 3 段,为第 2 次匀速增长段;2009 年 4—6 月为第 4 段,为第 2 次加速增长段;2009 年 7 月至 2012 年 3 月为第 5 段,为第 3 次匀速增长段;2012 年 4—6 月为第 6 段,为第 3 次加速增长段;2012 年 7 月至 2014 年 5 月为第 7 段,为第 4 次匀速增长段。为了量化以上各段的增长速率,且考虑到 YY025,YY026,YY027,YY028 等 4 个点的变形规律大致相同,选取变形量最大的监测点 YY028 作为研究对象,计算了其在各阶段的平均月位移速率(如图 3 所示)。从图 3 中可以总结两点重要信息:(1) 该滑坡的加速变形段(即第 2,4,6 段)平均月位移速率逐次增加,呈指数增长趋势;(2) 该滑坡的匀速变形段(即第 1,3,5,7 段)平均月位移亦逐次增加,其中第 1 段与第 3 段跨度较大,第 3,5,7 段呈平稳增长趋势。

根据分析结果,该滑坡的加速变形段均发生在 4—6 月,且自 2007 年后变形加剧,不难推断该滑坡的变形与库水位和降雨的关系十分密切。因此对该滑坡累积位移与库水位和降雨量的关系进行分析。由图 4 可得,加速变形阶段正值库水位下降之际,且期间降雨量较为充沛,由此可知库水位下降以及连续强降雨加速了该滑坡的变形。野外调查人员根据当地老百姓反映得知,每年库水位下降期间,家里房屋裂缝变形增大,且靠近后缘的公路变形亦在此期间内加剧。自 2007 年 156 m 蓄水,2008—2009 年 175 m 试验性蓄水后,该滑坡的变形表现出明显的加速增长趋势。为此,对自监测以来的月位移速率与库水位的关系进行分析(图 5),结果表明,每一次月位移速率增大的时候,正值库水位下降之际,证实了库水位下降对该滑坡的稳定性影响十分明显。

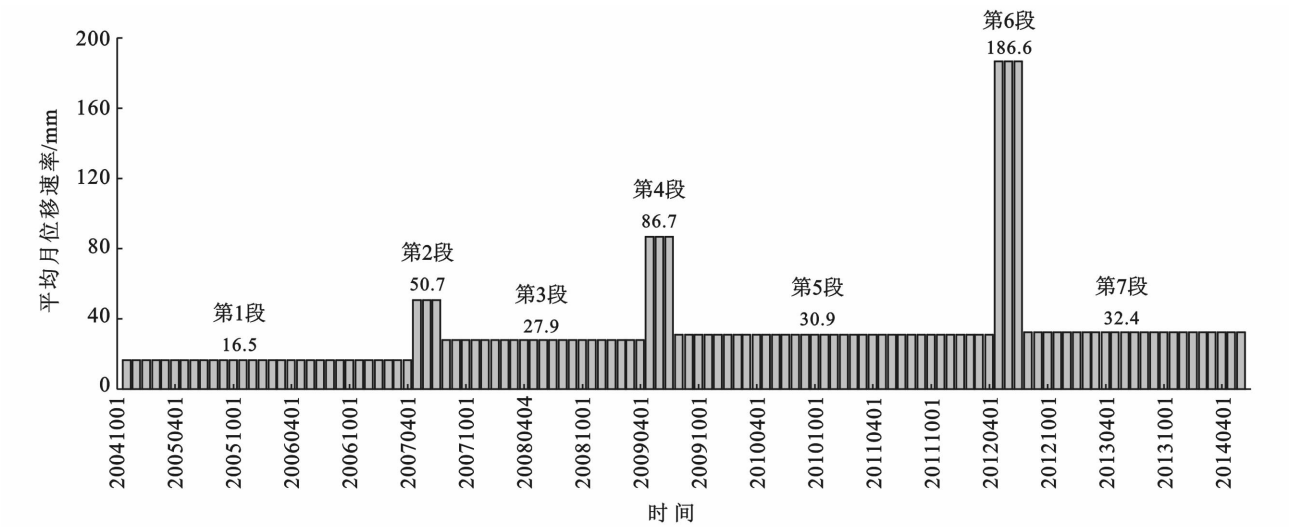


图 3　监测点 YY028 变形速率分段

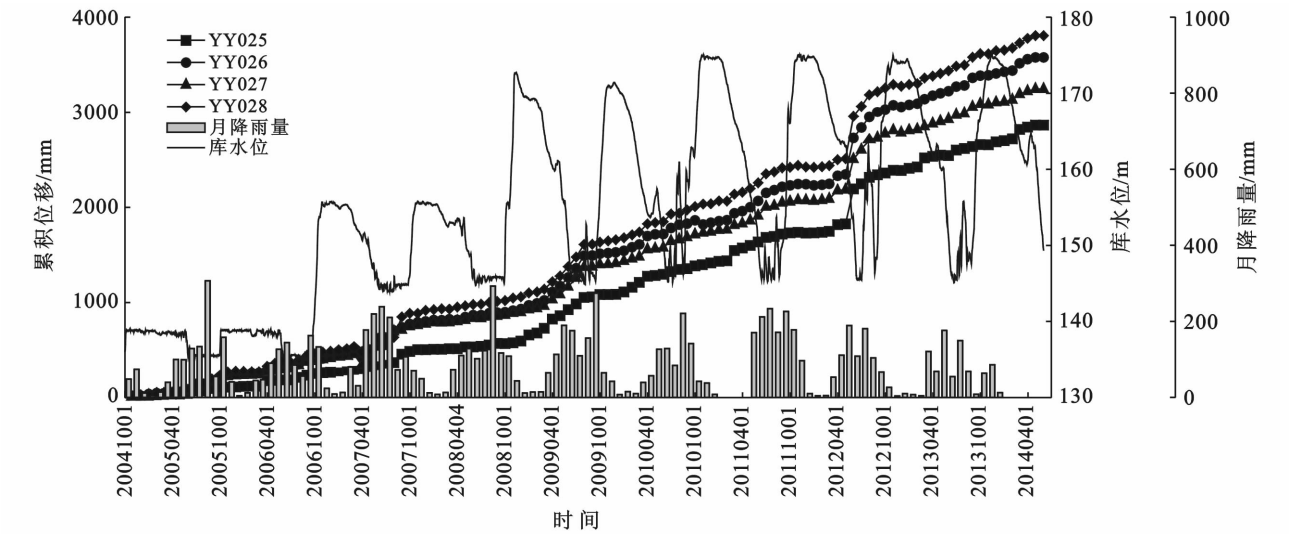


图 4　Ⅰ号滑体地表累积位移-库水位-降雨量-时间关系曲线

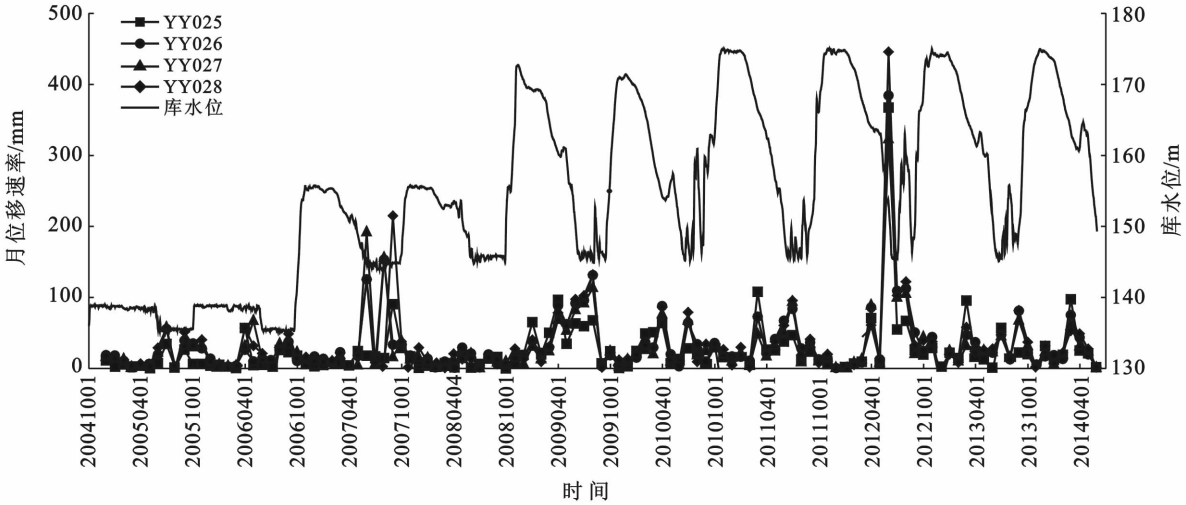


图 5 Ⅰ号滑体地表月位移速率-库水位-时间关系曲线

2.3 滑坡成因机制分析

根据现场调查及资料收集,分析认为地形地貌、地层岩性、库水位变化、大气降雨以及人类工程活动等是控制该滑坡变形及影响其稳定性的主要因素。(1) 地形地貌。该滑坡所在斜坡后缘平台上的崩积物为其提供物质基础,滑坡地貌呈凸形,前缘被箭竹溪所切割,形成基岩陡坎,为其提供卸荷空间。(2) 地层岩性。该滑坡所在基岩地层为侏罗系中统上沙溪庙组灰绿色厚层—巨厚层长石砂岩,泥质粉砂岩与粉砂质泥岩不等厚互层,属于易滑地层,且滑坡为斜顺坡,后缘基岩倾角较大,不利于上覆土体的稳定。(3) 库水位变化。该滑坡在回水区滑体厚度较大,达 30～40 m,且透水性较差,在库水位下降的过程中,坡内地下水位滞后于库水位的变化,不能及时排出,坡内外产生较大的压力差,此为影响该滑坡稳定的主要因素之一。(4) 大气降雨。大气降雨时,雨水一部分以地表径流形式汇入箭竹溪中,一部分则被洼地截留或向下入渗,一方面增加了滑体的重力,导致下滑力增大;另一方面补给地下水,滑带处粉质黏土被地下水浸泡,软化,导致抗滑力降低,从而导致滑坡失稳。(5) 人类工程活动。该滑坡前部左侧曾因“移土培肥”被开挖,为滑坡提供了良好的卸荷空间,导致Ⅰ号滑体向 212°方向滑移,据分析,此次人工改造对该滑坡的变形发展影响较大。此外,滑坡后缘人类工程活动强烈,修有民房和公路,对滑坡后缘产生加载作用,增加了其滑动力。

在这些影响因子的共同作用下,Ⅰ号滑体沿着 212°方向顺着“楔形槽”发生加速变形,滑移一定距离后,受左侧基岩陡崖的阻挡,部分下滑力自左向右传递,推动右侧土体变形,从而产生右侧前部次级滑坡。随着Ⅰ号滑体的加速滑移,Ⅰ号滑体与Ⅱ号滑体逐步解体。Ⅱ号滑体土体较薄,且位于横向坡上,其下滑力较小,故变形远小于Ⅰ号滑体。

3 库水位下降致滑机理分析

分析可知,该滑坡变形受库水位下降影响十分明显,加之连续强降雨的激励,从而导致加速变形。因此,重点研究变形较大的Ⅰ号滑体受库水位下降的影响机制。从库水位下降导致坡体外部卸荷和坡体内部动水压力拖曳作用两方面分析。

3.1 外部卸荷效应

在库水位上升以及维持高水位运行的期间,坡体涉水部位表层受到静水压力作用,相当于坡体表层阻滑段增加了外部荷载,对滑坡体产生两方面的作用效果,一方面对滑体产生指向坡体内侧的推力作用,抵消了部分下滑力;另一方面,对滑体前部产生竖直向下的压力作用,增加了滑带处土体的有效正应力,从而提高了其抗剪强度,增大了阻滑力。这两方面的作用效应均提高了滑坡的稳定性。一旦库水位下降,坡体外部作用力消失,滑体下滑力增大,且阻滑力减小,其稳定性将随之降低。为了更好地说明上述卸荷效应,对黄泥巴蹬坎滑坡进行了渗流场模拟及稳定性计算。本研究将滑体划分为 72 个条块,模拟了库水位从 175～145 m 过程中滑体表层的受力情况。选取了模型中第 63 号条块进行受力分析,当库水位为 175 m 时,该块体受到垂直于块体表面的静水压力作用,大小为 1 390.9 kN,将该作用力沿滑带方向和垂直滑带方向分解为 F_1 和 F_2,沿滑带方向力 F_1 抵消了部分下滑力,垂直滑带方向力 F_2 增加了滑带正应力,提高了抗剪强度,增加了抗滑阻力。而当库水位下降至

145 m时,该条块外部作用力消失。由此说明,库水位下降,从外部静水压力的变化来看,增加了坡体下滑力,减小了抗滑阻力,从而促使滑坡稳定性降低。

3.2　内部动水压力

在库水位下降的过程中,坡体内地下水位也随之下降,由此而产生指向坡体前部的渗流作用。地下水在向水压较低处渗流的过程中,受到土体颗粒的阻碍,从而对土体产生向坡体外侧的拖曳作用,即渗透力,整体上表现为对滑体产生向外的推力作用,增加了其下滑力[20]。本研究模拟了库水位从 175 m 下降至 145 m 过程中滑坡内部的渗流特征,结果表明,库水位下降过程中,坡内地下水多沿滑带方向向前缘渗流,在水压较低处渗出,且越靠近前缘渗流速度越大。由此可见,在库水位下降过程中,该滑坡内部动水压力对滑坡产生了向外的推动作用,增大了其下滑力,故稳定性降低。

4　结 论

(1) 黄泥巴蹬坎滑坡分为Ⅰ号和Ⅱ号滑体,其中Ⅰ号滑体为斜顺坡,滑带较深,目前变形严重;Ⅱ号滑体为近横向坡,滑带较浅,目前变形不明显。

(2) 黄泥巴蹬坎Ⅰ号滑体分别于 2007 年 4—6 月,2009 年 4—6 月,2012 年 4—6 月发生加速变形,且加速变形速率呈快速增长趋势;其他时间段呈匀速蠕滑变形,且各匀速变形阶段的变形速率呈缓慢增长趋势。

(3) 控制黄泥巴蹬坎滑坡变形及影响其稳定性的因素主要包括地形地貌、地层岩性、库水位变化、大气降雨以及人类工程活动等 5 个方面,其中库水位下降和连续强降雨是导致该滑坡加速变形的最主要因素。

(4) 库水位下降对黄泥巴蹬坎滑坡稳定性的影响表现为坡体外部卸荷效应和内部动水压力推动作用。库水位下降,对滑体施加的指向内侧的推力消失,导致下滑力增大;前部阻滑段滑带处土体有效正应力减小,土体抗剪强度降低,导致阻滑力减小。库水位下降引起坡内地下水位下降,地下水沿滑带方向渗流,产生的动水压力推动滑坡向外变形。

[参 考 文 献]

[1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(3):433-454.

[2] 廖秋林,李晓,李守定,等. 三峡库区千将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(17):3146-3153.

[3] 刘天宇,杨建辉,杨强,等. 库水位升降对李家坡滑坡稳定性的影响[J]. 中国水土保持,2013(4):52-54.

[4] 程温鸣,彭令,牛瑞卿. 基于粗糙集理论的滑坡易发性评价:以三峡库区秭归县境内为例[J]. 中南大学学报:自然科学版,2013,44(3):1083-1090.

[5] Li Deying, Yin Kunlong, Leo Chin. Analysis of Baishuihe landslide influenced by the effects of reservoir water and rainfall[J]. Environ Earth Science, 2010,60(4):677-687.

[6] Du Juan, Yin Kunlong, Lacasse S. Displacement prediction in colluviallandslides, Three Gorges Reservoir, China[J]. Landslides, 2013,10((2):203-218.

[7] 陈剑,李晓,杨志法. 三峡库区滑坡的时空分布特征与成因探讨[J]. 工程地质学报,2005,13(3):305-309.

[8] 易庆林,易武,尚敏. 三峡库区某滑坡变形影响因素分析[J]. 中国水土保持,2009(7):32-34.

[9] 易武,孟召平,易庆林. 三峡库区滑坡预测理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2011.

[10] 彭令,牛瑞卿,赵艳南,等. 区域滑坡灾害风险评估:以长江三峡库区秭归县为例[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2013,43(3):891-899.

[11] 肖诗荣,刘德富,胡志宇. 三峡库区千将坪滑坡地质力学模型研究[J]. 岩土力学,2007,28(7):1459-1464.

[12] 肖诗荣,刘德富,姜福兴,等. 三峡库区千将坪滑坡地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(5):1023-1030.

[13] 肖诗荣,刘德富,胡志宇. 三峡库区千将坪滑坡高速滑动机制研究[J]. 岩土力学,2010,31(11):3531-3536.

[14] 卢书强,易庆林,易武,等. 三峡库区树坪滑坡变形失稳机制分析[J]. 岩土力学,2014,35(4):1123-1130.

[15] 肖诗荣,卢树盛,管宏飞,等. 三峡库区凉水井滑坡地质力学模型研究[J]. 岩土力学,2013,34(12):3534-3542.

[16] 贺可强,王荣鲁,李新志,等. 堆积层滑坡的地下水加卸载动力作用规律及其位移动力学预测:以三峡库区八字门滑坡分析为例[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(8):1644-1651.

[17] 王尚庆,徐进军,罗勉. 三峡库区白水河滑坡险情预警方法研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2009,34(10):1218-1221.

[18] 卢书强,易庆林,易武,等. 库水下降作用下滑坡动态变形机理分析:以三峡库区白水河滑坡为例[J]. 工程地质学报,2014,22(5):869-875.

[19] 中国地质科学院探矿工艺研究所. 三峡库区云阳县二期地质灾害预警工程专业监测报告[R]. 重庆:云阳地质灾害监测站,2013.

[20] 殷跃平. 三峡库区地下水渗透压力对滑坡稳定性影响研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2003,14(3):4-11.