

DOI: 10.11779/CJGE201712008

三峡库区塔坪 H2 古滑坡台阶状复活变形的库水-降雨耦合作用机制

黄 达^{1,2}, 顾东明², 陈智强³, 朱 宏², 陈赐金⁴

(1. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401;
3. 重庆市地质矿产勘查开发局 107 地质队, 重庆 401120; 4. 巫山县地质灾害整治中心, 重庆 404700)

摘要: 三峡水库蓄水以来, 出现了大量大规模的老滑坡体复活现象。较多大型复活滑坡体的监测位移-时间曲线呈台阶状阶跃变化。此类滑坡的稳定状态识别难度较大, 严重影响治理方案及治理时机的选择。以巫山曲尺塔坪 H2 滑坡为例, 通过地质、位移监测及数值模拟方法, 研究了此滑坡在实际降雨与库水涨落条件下渗流场、稳定性以及变形场演化规律。在汛期及库水位变动时期滑坡会发生变形, 特别是库水位下降诱发滑坡前缘变形, 并对后部坡体产生牵引作用。而降雨主要影响库水位变动带以上部分滑体的变形, 并对前缘坡体产生推动作用。在周期性降雨和库水位涨落的循环作用下, 滑坡体反复受到“推-拉”作用, 导致滑坡的位移-时间曲线呈现台阶状阶跃特征。总体来说, 库水位涨落是滑坡变形的主要因素, 而降雨促进了滑坡变形进一步发展。

关键词: 三峡库区; 滑坡; 台阶状变形; 库水位; 降雨

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)12-2203-09

作者简介: 黄 达(1976-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩体力学及地质灾害方面的研究与教学工作。

E-mail: hdcqy@126.com.

Hybrid effects of rainfall and reservoir level fluctuation on old Taping H2 landslide in Wushan County in Three Gorges Reservoir area

HUANG Da^{1,2}, GU Dong-ming², CHEN Zhi-qiang³, ZHU Hong², CHEN Ci-jin⁴

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation Engineering, Hebei University, Tianjin 300401, China; 3. No.107 Team of Chongqing Geology Exploring Bureau, Chongqing 401120, China; 4. Geological Disaster Control Center of Wushan County, Chongqing 404700, China)

Abstract: Since the first impoundment of Three Gorges Reservoir, a large number of old landslides have shown signs of reactivation. Usually, the displacements of these large landslides are characterized by a stepped pattern. Besides, the stability identification of the slides is difficult, which severely affects the choice of appropriate measurements and timing of treatment. By taking the H1 sliding mass of Quchi landslide as an example, based on the geological survey, displacement monitoring and numerical modelling, the seepage field, stability and deformation of the landslide under the influence of reservoir level fluctuation and rainfall are fully studied. It is revealed that the changes in reservoir levels have a great influence on the deformation of the landslide, especially, the significant deformations at the toe are induced by reservoir drawdown, which then “drags” the masses in the upper part down. The precipitation affects the deformation of sliding mass above the water fluctuation zone, whose collapse “pushes” the masses at the toe downslope. Under the periodic action of changes in reservoir levels and rainfall, the sliding masses are subjected to “drag-push” influences iteratively and thus exhibit a staged deformation characteristic. On the whole, the fluctuating water level is the main trigger of the deformation while the precipitation facilitates this progress.

Key words: Three Gorges Reservoir area; landslide; step-like deformation; reservoir level; rainfall

0 引言

自三峡水库 2009 年首次蓄水到 175 m 以来, 三峡水库水位在 145~175 m 高程之间运行, 大幅度库

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41472245, 41672300); 重庆市国土房管科技计划项目(CQGT-KJ-2014049); 中央高校基本科研业务费重大项目(106112016CDJZR208804)

收稿日期: 2016-09-13

水位上升和周期调节恶化了库区地质环境，使得库区滑坡灾害问题变得更加突出，特别是出现了更多更大规模的老滑坡体复活现象^[1]。较多监测数据表明，较多大型复活滑坡堆积体的位移-时间曲线呈台阶状阶跃变化。基于滑坡变形及水文监测数据发现，台阶状位移特征的时序分布与降雨和库水位涨落密切相关。关于降雨及库水位涨落诱发滑坡的机制已有了大量的研究^[2-7]。

降雨条件下滑坡的变形机制，受雨型及滑坡地质条件所控制^[2]，滑坡变形也常与降雨在时间上存在一定的滞后性^[3, 7]。从非饱和土力学理论角度来说，降雨诱发滑坡非饱和区的基质吸力与降雨因素密切相关^[8]。数值模拟^[7, 9]、现场监测^[10]、非饱和及渗流理论^[11]和模型试验^[12]可较好地分析降雨诱发滑坡的应力场、渗流场及变形场演化，是研究降雨滑坡变形机制的主要方法。

库水位涨落对堆积体边坡的稳定性影响较大，造成坡体内浸润面波动^[13]，对坡内岩土体产生侵蚀、潜蚀及渗流力等工程地质及力学作用，甚至有学者认为库水位骤降对渗透系数也有影响^[14]。对库区堆积体滑坡而言，研究滑坡体内地下水渗流场和变形响应特征，是分析库水位变化对滑坡变形的影响机制的重要内容^[15]。如徐文杰等^[16]以金沙江梨园电站大型土石混合边坡为例，阐述了滑坡在库水位升降过程中的地下水的变化规律及稳定性特征；潘书华^[17]三峡库区塘角村1号滑坡以及李家坡滑坡为例，分析了滑坡体内孔隙水压力以及滑坡变形对于库水位变化的响应特征，讨论了库水位升降对滑坡稳定性的影响规律。

本文以巫山曲尺塔坪H2滑坡为背景，基于长期的现场监测数据及地表变形调查，结合数值模拟分析，研究了降雨-库水位耦合作用下H2滑坡台阶状变形特征，阐述了滑坡变形与库水位升降及降雨的相关性，揭示了滑坡台阶状变形的诱发机制。

1 滑坡简介及地质背景

塔坪滑坡位于重庆市巫山县曲尺乡，长江北岸瞿塘峡出口地段。东距三峡大坝148.3 km，距巫山县城24 km；西距奉节县城11 km，距重庆市457 km。塔坪滑坡为一古滑坡，地处长江北岸，地貌属构造—侵蚀、剥蚀低中山河谷地貌类型，地势北高南低。滑坡区后缘高程310 m，前缘最低高程80 m左右，相对高差230 m左右。勘察及现场调查资料显示曲尺塔坪古滑坡处于整体稳定状态，而存在变形的是古滑坡前部次级老滑坡：H1滑坡和H2滑坡，即H1滑坡和H2滑坡属古滑坡的部分复活。塔坪滑坡的全貌及平面图

如图1所示，本文仅研究H2滑坡。

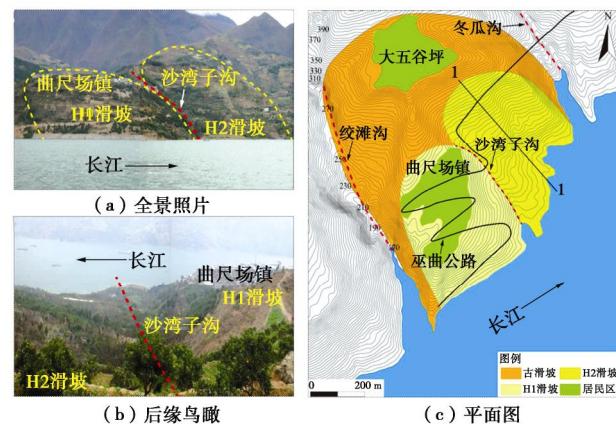


图1 曲尺塔坪古滑坡全貌及平面图

Fig. 1 General view of Taping landslide

H2滑坡地貌形态呈“圈椅状”（图1(a)），脊靠大五谷坪，后缘高程350 m，前缘抵长江；东以冬瓜沟为界，西以沙湾子沟为界，纵向长720~850 m，横向宽275~400 m，分布面积约 $23.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，滑体平均厚度约25.0 m，体积约 $590 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，属大型滑坡。

H2滑体物质组成主要为粉质黏土夹碎块石及碎裂岩体（如图2(a)所示）。其中粉质黏土夹碎块石中粉质黏土呈黄色、灰黄色，稍湿，硬塑，含砂量较重；块石为石英砂岩、长石石英砂岩风化破碎产物，棱角状，块径约为5~30 cm，最大达1.3 m，含量15%~50%，自上而下呈增加趋势。下部为似层状碎裂岩，岩性为灰色、灰黄色中细粒长石石英砂岩与石英砂岩、粉砂质泥岩，厚7.8~23 m。由于滑体长期蠕滑变形，碎裂岩体破碎，岩层产状极不清晰。

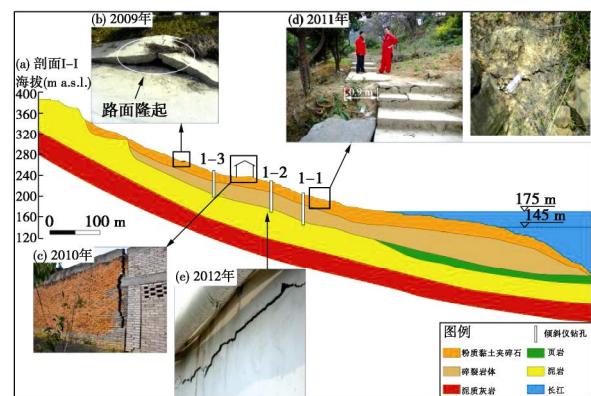


图2 H2滑坡工程地质剖面图

Fig. 2 Geological section of Taping landslide

H2滑坡滑床为三叠系中统巴东组基岩地层，其岩性为紫红色泥岩、灰色粉砂质泥质灰岩不等厚互层，中厚—厚层状，在滑坡前缘及东侧冬瓜沟沟壁均有出露，产状连续，层序接触正常。H2老滑体主滑面为粉细砂岩中的页岩风化物夹层，层厚10~30 cm，滑面

后缘陡($25^\circ \sim 33^\circ$),中间缓($12^\circ \sim 20^\circ$),前缘趋于平缓,如图2(a)所示。

2 现场调查及监测系统

三峡水库蓄水以来曲尺塔坪滑坡多次出现变形迹象。2009年5月—9月,H2滑坡中部出现了许多宏观变形特征:H2滑坡中部出现局部开裂,滑坡中部的公路出现隆起现象(图2(b));此后,2010年—2012年间,每年5月—9月份滑坡均产生新的变形迹象(图2)。为监测该滑坡变形及进一步了解其变形机理,在H2滑坡体建立了监测系统。包括地表变形GPS监测点、地下水位监测点以及深部变形监测点,如图3所示。

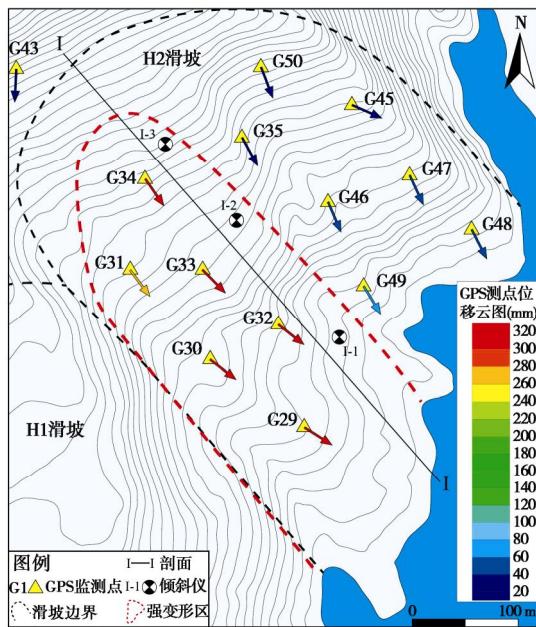


图3 监测系统及GPS监测数据(箭头表示水平位移量及方向,2013年5月)

Fig. 3 Monitoring system of landslide and GPS monitoring results

3 监测数据分析

3.1 地表位移监测分析

在H2滑体上布置了G29~G50共22个地表变形监测点,各监测点水平位移量及方向分布如图3所示。地表位移监测表明,H2滑体左侧为强变形区,该区的GPS监测点(G29~G34)水平位移为240~320 mm,而右侧的GPS监测点位移值均小于60 mm。强变形区测点位移方向(图3)表明各部分运动方向基本一致,且位移大小接近,这些数据表明:H2滑坡左侧滑体可能的运动方式是整体滑移。

图4为H2滑坡强变形区I—I剖面上3个监测点G32、G33、G34在2009年11月16日—2013年9

月31日间的位移监测曲线。测点的水平位移明显大于垂直方向位移,这与H2滑坡整体较缓的地形有关。3个监测点在监测时段内滑坡的位移曲线呈明显的台阶状发展,且台阶高度一年比一年大:在每一个水文年内(第一年10月—9月),5月—9月为滑坡的“活跃期”;测点位移快速增长;10月—4月为滑坡的“休眠期”,滑体几乎不发生位移。结合监测点位移与库水位及降雨数据,可以发现:滑坡的“活跃期”对应于水库的枯水期。该时期内,水库处于低水位,并且雨量充沛;而滑坡的“休眠期”对应于水库高水位阶段,并且该时段内雨量较少。由此推断,滑坡的位移突变是由汛期强降雨以及库水位快速下降有关。

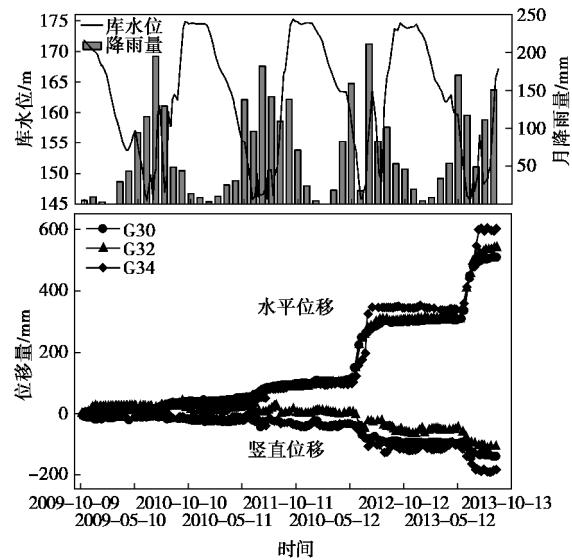


图4 GPS监测点累计位移与库水位、降雨量关系曲线

Fig. 4 Temporal relationship among displacements at selected GPS stations and precipitation and reservoir level

3.2 深部位移监测分析

滑坡深部位移监测采用湖南湘银河传感科技有限公司生产的YH50103A固定式测斜仪,其测量范围为 $\pm 30^\circ$,分辨率为 0.01° (0.17 mm)。图5为埋设在滑坡I—I剖面线上的深部位移监测孔累积位移—深度曲线。从图中可以看出,监测孔位移开始增加处约位于40~50 m附近。在钻孔I-2取出的岩芯中观察到明显擦痕(图6,深度约50 m)。由此推断,H2发生剪切滑移,剪切面大致位于基岩界面处。通过监测资料可以看出,该滑坡在滑面以上呈整体运动,滑动面(带)以上位移较大,而下部位移较小。

此外,监测数据表明,滑坡在2012年后变形逐渐加速。在2010年5月—2011年12月间,测斜仪I-1,I-3的位移增量分别为50,70 mm,位移速率为33.3,50 mm/a。但是,在2012年3月—2013年5月间,位移增量增至75,132 mm,速率分别增至50,88 mm/a,

变形速率明显增大。这表明曲尺 H2 滑坡稳定性逐年恶化。

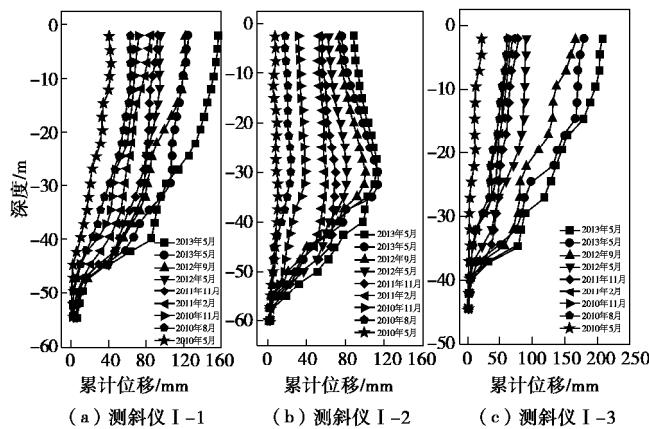


图 5 GPS H2 滑坡深部位移监测数据

Fig. 5 Measured data from inclinometers installed on H2



图 6 I-2 钻孔岩芯揭示的剪切光面 (深度约 45 m)

Fig. 6 Polished surface in I-2 borehole (depth of about 45 m)

4 库水位-降雨耦合作用模拟

4.1 数值模型建立

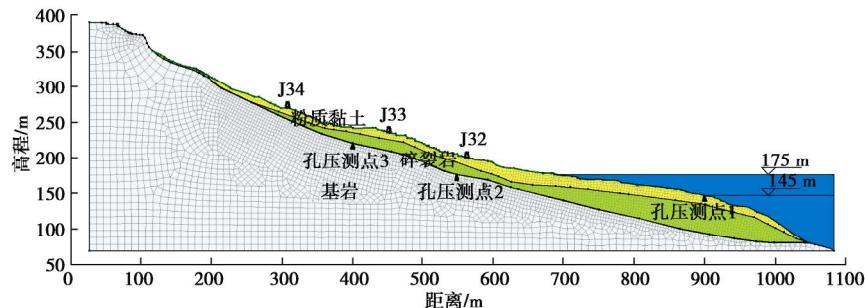


图 7 H2 滑坡数值模型

Fig. 7 Numerical model for H2 landslide

表 1 数值模拟参数表

Table 1 Parameters of numerical modeling

材料介质	重度/(kN·m ⁻³)		黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)		渗透系数/(m·d ⁻¹)	弹性模量/MPa	泊松比
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和			
粉质黏土	19.6	20.2	25	20	18	14	0.562	60	0.3
碎裂岩	21.3	22.5	44	35	30	28	0.864	120	0.3
滑带	20.8	21.7	18	16	14	12.5	0.0069	60	0.3
滑床	24	—	—	—	—	—	—	2000	0.25

依据监测数据可以看出滑坡变形主要发生在每年 6 月—9 月份。而该时期内(雨季)充沛的降雨以及库区降水均为该滑坡破坏的潜在因素。本研究采用数值模拟方法, 分析这两者对滑坡变形的具体影响。基于曲尺塔坪滑坡的地质勘测资料, 以 H2 滑坡的 I—I 剖面为研究对象建立二维模型, 采用数值模拟软件 GEO-STUDIO 分析滑坡的渗流场、变形场以及稳定性。根据实际地形及地层建立模型并分别赋予其粉质黏土层、碎裂岩层及滑带层的物理力学参数。由于基岩层为泥岩及泥质灰岩, 所以在渗流场模拟及边坡稳定性分析中将基岩层作为不透水层处理, 而在变形模拟中将该层视为线弹性材料。H2 滑坡数值网格模型如图 7 所示, 其中 J32、J33、J34 标识处为监测点位置。

结合勘测资料及三峡库区巫峡地段的类似工程, 确定计算参数具体值见表 1。研究时段内库水位在 145~175 m 范围内波动时, 将坡面 175 m 以下范围设置为水头边界。175 m 以上坡面设置为单位流量边界模拟降雨。滑带与基岩的接触面设置为不透水边界, 不考虑基岩内的渗流。变形分析中, 只需约束模型底部及左侧的法向位移。以 2009 年 12 月 27 日作为模拟的初始时间点, 在渗流分析中, 将水头边界设置为当日实际库水位高度 169.6 m, 将单位流量边界设置为 2010 年度总降雨量平均至每天的降雨强度 2.02 mm/d。进行稳态计算并将所得渗流场结果作为模型的初始渗流场状态。

4.2 渗流特征

(1) 孔隙水压力

图 8 为 3 个孔隙水压力监测点的模拟结果。其中

孔压测点1(位于滑坡前缘)变化规律与库水位监测曲线完全一致, 没有受到降雨影响。孔压测点2位于坡体中后部175 m高程处且靠近滑带位置, 其监测曲线起伏规律与库水位涨落规律基本相符, 但受到降雨的干扰, 在降雨集中时段该点孔隙水压力均有上升现象。孔压测点3位于滑坡内高程219 m处靠近滑带位置, 其监测曲线起伏规律与降雨量增减规律一致, 但表现出一定的滞后性。在库水位变动区, 低水位处滑坡体前缘浅层地下水位变化主要受库水位涨落因素控制, 而高水位处靠近滑带位置地下水位则受到库水位及降雨的联合作用影响。位于库水位变动区以上部位, 滑坡内地下水位则主要受降雨因素影响。

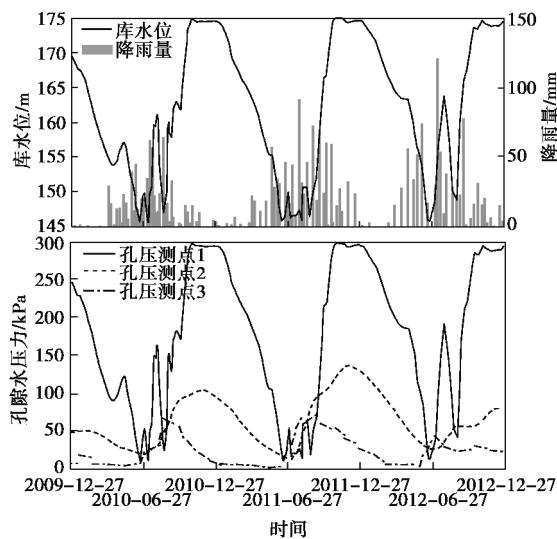


图 8 H2 滑坡孔隙水压力-时间曲线

Fig. 8 Pore water pressure-time curves of H2 landslide

(2) 渗流场年度变化规律

以2012年1月1日—2013年1月1日1周年为例, 阐述库水位升降-降雨耦合作用下H2滑坡体内渗流场变化规律。2012年1月起库水位开始下降, 至4月26日库水位从174.6 m下降至163.4 m, 下降速度相对缓慢, 平均约0.097 m/d。如图9(a)所示, 相比初始渗流场状态, 在4月10日滑坡前缘地下水位明显下降, 坡体内形成指向坡外的渗流场。而滑坡中后部地下水渗流状态没有明显变化。

4月26日后库水位开始加速下降, 至6月16日库水位下降至145.8 m, 平均下降速度约0.345 m/d, 最大日下降速度达0.8 m/d。如图9(b)所示, 相比库水位缓慢下降的情况, 此时滑坡体内形成的指向坡外的渗流明显增强。且由于4月—6月该地区迎来一波降雨高峰期(此次降雨期降雨强度不大, 但持续时间较长, 属于久雨型降雨), 导致滑坡中后部地下水侵润线抬高, 渗流强度增强。

7月份该地区迎来了第二波降雨高峰期(此时段

降雨强度较大, 属于暴雨型降雨)。此时段水库库水位上升, 最高达到164 m。如图9(c)所示, 由于库水位的上升, 坡体内指向坡外的渗流场减小, 并在前缘坡面处出现指向坡内的渗流。且暴雨的出现使坡体中后部雨水入渗强度明显增加, 地下水渗流强度增强, 侵润线较之前有明显抬高。

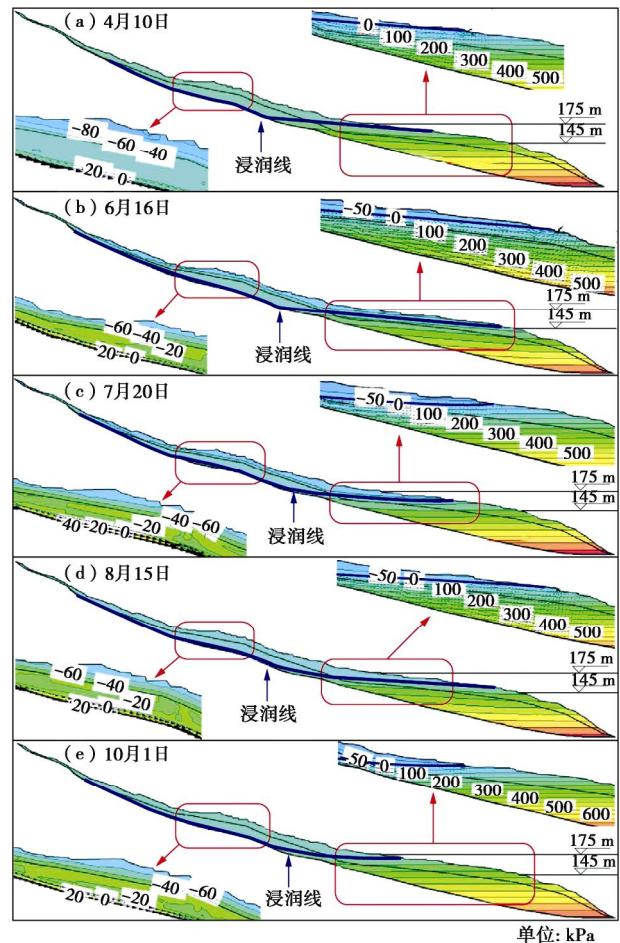


图 9 2012年不同时期渗流场及孔隙水压力

Fig. 9 Seepage fields and pore water pressures of landslide at different time of 2012

7月底—8月洪峰过去后, 库水位逐渐由164 m下降至148.6 m, 平均下降速度约0.46 m/d。如图9(d)所示, 由于库水位骤降, 滑坡体内再次形成指向坡外的渗流场。加之暴雨过后雨水入渗至滑体底部, 滑坡中后部地下水侵润线明显抬高, 渗流强度显著增强。

8月28日—11月1日, 库水位由148.6 m上升至174.6 m。降雨高峰期过后该地区降雨量逐渐减小。库水位上涨过程中滑坡前缘坡面附近地下水位迅速升高, 形成指向坡内的渗流场, 而滑坡中后部地下水不断向前缘渗流, 侵润线逐渐降低(图9(e))。

4.3 稳定性分析

如图10所示, 滑坡稳定性系数受库水位影响最为明显, 其中库水位下降时稳定性系数降低, 而上升时

升高,且库水位涨落速度越快稳定性系数的增减速度和幅度越大。而降雨进一步促进了滑坡体稳定性系数的降低。2012年度滑坡稳定性系数变化强烈,且下降幅度最大,在此以该年度为例,具体说明稳定系数变化规律(图11)。

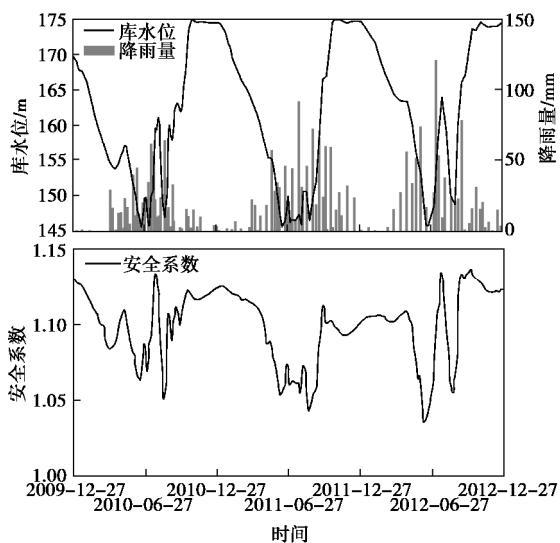


图 10 H2 滑坡稳定性系数变化曲线

Fig. 10 Curves of safety factor of H2 landslide

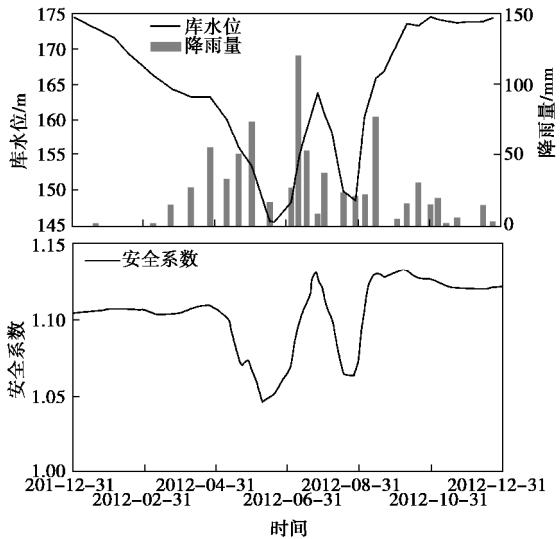


图 11 2012 年 H2 滑坡稳定性系数变化曲线

Fig. 11 Curves of safety factor of H2 landslide in 2012

1月2日—3月8日,库水位以较慢的速度下降,但依然维持在高水位状态,滑坡稳定性系数变化较小。3月8日—4月26日,库水位下降速度减慢,与此同时,4月以前当地降雨量很小,滑坡处于排水状态,坡体内地下水位不断降低。此时段滑坡的稳定性系数下降极缓,甚至在4月份开始出现回升趋势。4月26日后库水位开始加速下降,坡体内渗流强度增大,边坡稳定性系数同时加速下降。5月10日左右滑坡中后

部地下水侵润线开始抬升。直到6月16日库水位降至145.8 m的过程中,滑坡前部渗流场不断增强,坡体中后部由于雨水入渗,地下水侵润线不断抬高,该时段滑坡的稳定性系数快速下降,并在6月16日达到最低值1.037。6月16日—7月26日库水位上涨,虽然此时因降雨导致坡体中后部地下水渗流增强,但由于库水位的上升导致坡体前缘形成指向坡内的渗流,边坡稳定性系数开始快速回升。7月26日—8月28日库水位由164 m快速下降至148.6 m,加之降雨入渗至滑坡中部,使该部位地下水位抬高,渗流强度增强,滑坡的稳定性系数也随之快速下降,稳定性系数最低降至1.055。8月28日—11月1日库水位上涨,滑坡稳定性系数开始回升。11月1日之后库水位稳定在174 m左右,边坡稳定性系数也趋于稳定。整个过程中边坡稳定性系数的变化规律与库水位涨落规律基本保持一致,可见库水位的涨落对H2滑坡稳定性的影响起主要控制作用。

4.4 变形分析

将渗流场模拟结果导入GEO-SIGMA/W模块,计算并监测J32、J33、J34三个监测点的位移。

图12为各监测点的位移-时间曲线的模拟结果,也具有明显的台阶状变形特征。模拟期间滑坡共发生了3次位移突变,其中第一次位移突变发生于2010年8月,第二次发生于2011年8月,第三次发生于2012年6月中旬至7月,前两次位移突变位移增量较小,第三次位移增量较大。从每次位移突变的幅度来看,滑坡中部的J33监测点位移最大,后部的J34点次之,前部的J32点位移最小。

由图12可见,G33点实测位移-时间曲线在2010年—2012年间同样发生了3次位移突变:第一次发生于2010年8月,位移突变量为28 mm,与模拟位移突变量32 mm相差12.5%;第二次发生于2011年7月—8月中旬,位移突变量为60.5 mm,与模拟结果47.2 mm相差22%;第三次发生于2012年6月中旬—7月,位移突变量为234 mm,与模拟结果214.6 mm相差8.3%。

在第一次位移突变中滑坡中部监测点J33位移量较大,而J32与J34位移量相对较小。如图13(a)所示,此次变形主要发生于滑坡中部。由位移监测曲线结合孔隙水压力曲线变化规律分析发现,2010年位移突变于8月,此时滑坡后缘孔压测点3的孔隙水压力值正处于上升阶段,并在8月28日达到最大,滑坡变形时间与后缘底部孔隙水压力上升的时间吻合。可见此次变形是由于雨水入渗至滑坡中部陡缓交接易于积水部位,地下水位上升,滑坡抗滑力弱化,且地下水

的渗流增加了滑坡的下滑力，导致滑坡该部位稳定性下降，发生局部变形。

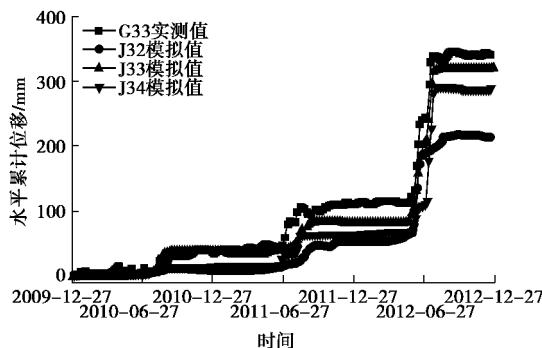


图 12 H2 滑坡监测点位移-时间曲线

Fig. 12 Displacement-time curves of H2 landslide

2011年8月滑坡发生第二次变形，此次变形中滑坡中部与后部的J33与J34监测点位移均较大，且J34监测点发生了两次突变：第一次突变发生在6月22日左右，第二次与J33监测点位移突变同时发生于8月1日左右。由降雨入渗导致滑坡底部孔隙水压力升高的规律来看，6月中旬滑坡后缘底部孔隙水压力升高，由于雨水入渗导致滑坡后缘发生变形。至7月底雨水向前缘汇集导致滑坡中部孔隙水压力上升，在雨水渗流以及后缘变形坡体推动作用下，滑坡中部再次发生变形并与后缘坡体形成整体变形区（图13（b））。

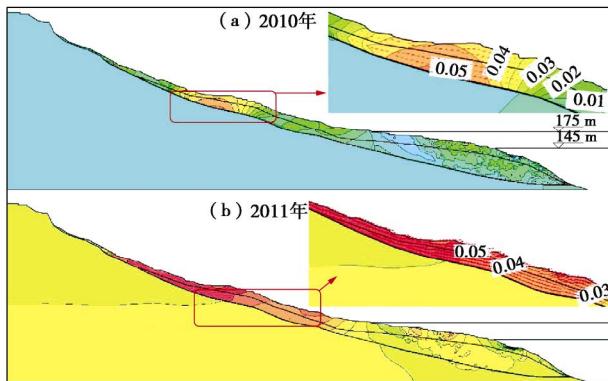


图 13 滑坡变形云图

Fig. 13 Deformation contours in 2010 and 2011

滑坡第一、第二次变形均主要由降雨因素导致了滑坡中后部的局部变形，这两次变形量相对较小。滑坡第三次变形幅度远远大于前两次变形，发生在5月20日—9月10日间，整个位移发展过程可以分为以下两个阶段（由图14所示）。

（1）5月23日—6月20日左右，滑坡发生了一次变形。最靠近库水位的J32监测点位移增加了123 mm，滑坡中部的J33监测点位移增加了108 mm，滑坡后缘J34监测点位移增加了40 m。靠近库水位的J32

监测点位移发展幅度最大，滑坡体位移增量依次向后缘逐渐减小。由于该时段内库水位骤降，坡体内形成指向坡外的渗流，加之水的浮托力消散，库水位变动区范围附近滑坡下滑力增大，导致局部稳定性降低，最终表现为滑坡中前部库水位变动影响带滑坡发生局部变形。可见库水位的快速下降是造成该阶段变形发展的主要原因。

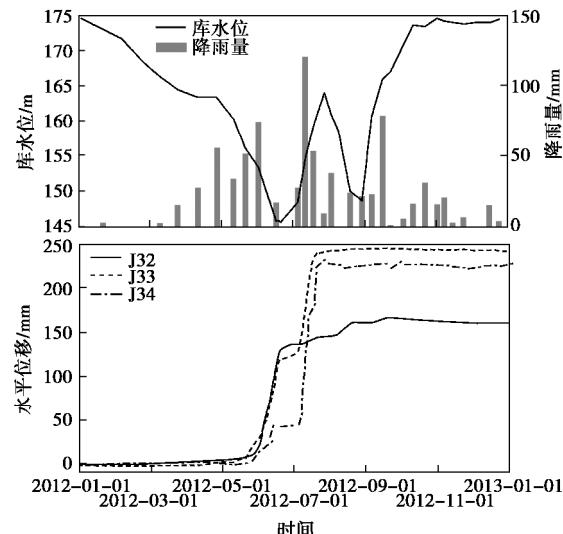


图 14 2012 年滑坡位移-时间曲线

Fig. 14 Displacement-time curves of landslide in 2012

（2）7月4日开始，该地区出现大强度降雨，从孔隙水压力监测曲线可以看到，此时滑坡后部孔隙水压力不断上升。至7月26日左右滑坡出现了第二次剧烈变形，其中滑坡后缘J34监测点的位移在此阶段增加了180 mm，滑坡中部J33监测点位移增加了107 mm，靠近库水位J32监测点位移增加了10 mm。该时段滑坡后缘位移发展幅度较大，并向前缘逐渐递减。滑坡中后部为主要变形区，变形量向前缘逐渐减小。在这个过程中滑坡前缘由于库水位上升，坡体内形成指向坡内的渗流，滑坡抗滑力增加，滑坡体前部的稳定性是有所提高的，其变形量较小；而由于暴雨影响，滑坡后缘坡体内地下水侵润线抬升，渗流增强，滑坡下部滑力增加，加之由于滑坡中部的较大变形为后缘发生变形提供了有利条件，滑坡后缘出现了局部变形。降雨为此阶段滑坡变形的主要诱因。

从滑坡变形的整个过程来看，滑坡是由降雨-库水位耦合作用下产生的渐进式变形，降雨削弱滑坡中后部的稳定性，使滑坡后部发生局部变形对滑坡中前部产生推动作用。而库水位骤降使滑坡中前部库水位变动影响带滑体发生局部变形，对滑坡产生牵引作用。在降雨及库水位骤降的“推—拉”（前部牵引-后部前推）耦合作用下，滑坡坡体不断劣化，使得滑坡监测

位移 - 时间曲线呈现台阶状阶跃变化规律。

5 结 论

(1) H2 滑坡在库水位变动区, 坡面附近地下水位变化主要受库水位涨落因素控制, 而靠近滑带位置地下水位则受到库水位及降雨的联合作用影响。位于库水位变动区以上部位滑坡内地下水位则主要受降雨因素影响。

(2) 库水位涨落是影响 H2 滑坡稳定性的控制因素, 其中库水位下降时稳定性系数降低, 库水位上升时稳定性系数升高, 且库水位涨落速度越快稳定性系数的增减速度和幅度均越大。H2 滑坡经历的 3 次位移突变中降雨是诱发第一次与第二次突变的主要因素, 分别导致滑坡中部和后部发生局部变形。而第三次位移突变主要受库水位骤降影响, 导致滑坡中前部发生局部变形, 并最终与滑坡中后部形成整体较大变形。

(3) 库岸涉水边坡形成台阶状变形是降雨-库水位耦合作用下滑坡体内地下水渗流场发生周期性变化的结果。库水位的涨落会使库水位变动区附近滑体发生局部变形, 并对后部滑体产生牵引作用。降雨会使中后部滑体发生局部变形, 并对前缘坡体产生推动力作用。在周期性降雨和库水位涨落的循环作用下, 滑坡体反复受到“推-拉”作用导致堆积体变形甚至失稳。滑坡在降雨-库水位涨落耦合作用下呈现出渐进式变形破坏特征。滑坡的最终破坏由滑坡中部岩体控制, 先发生破坏的前部岩体只是给中、后部岩体提供了变形空间^[18]。

参考文献:

- [1] 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. (LU Shu-qiang, YI Qing-lin, YI Wu, et al. Study on dynamic deformation mechanism of landslide in drawdown of reservoir water level—taking Baishuihe landslide in Three Gorges Reservoir area for example[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(5): 869 - 875. (in Chinese))
- [2] 谢守益, 徐卫亚. 降雨诱发滑坡机制研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999(1): 22 - 24. (XIE Shou-yi, XU Wei-ya. Mechanism of landslides induced by precipitation[J]. J Wuhan Univ of Hydr & Elec Eng, 1999(1): 22 - 24. (in Chinese))
- [3] 林孝松, 郭 跃. 滑坡与降雨的耦合关系研究[J]. 灾害学, 2001(2): 88 - 93. (LIN Xiao-song, GUO Yue. A study on coupling relation between landslide and rainfall[J]. Journal of Catastrophology, 2001(2): 88 - 93. (in Chinese))
- [4] 戚国庆. 降雨诱发滑坡机理及其评价方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2004. (QI Guo-qing. Study on the mechanism of rainfall-induced landslide and its evaluating method[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004. (in Chinese))
- [5] IADANZA C, TRIGILA A, NAPOLITANO F. Identification and characterization of rainfall events responsible for triggering of debris flows and shallow landslides[J]. Journal of Hydrology, 2016.
- [6] PARONUZZI P, RIGO E, BOLLA A. Influence of filling-drawdown cycles of the Vajont reservoir on Mt Toc slope stability[J]. Geomorphology, 2013, 191: 75 - 93.
- [7] ZANGERL C, EBERHARDT E, PERZLMAIER S. Kinematic behaviour and velocity characteristics of a complex deep-seated crystalline rockslide system in relation to its interaction with a dam reservoir[J]. Engineering Geology, 2010, 112(1/2/3/4): 53 - 67.
- [8] 朱 伟, 程南军, 陈学东, 等. 浅谈非饱和渗流的几个基本问题[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 235 - 240. (ZHU Wei, CHENG Nan-jun, CHEN Xue-dong, et al. Some fundamental problems of unsaturated seepage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 235 - 240. (in Chinese))
- [9] 赵 娜, 张 琪, 左永振. 天台乡滑坡降雨启滑机制研究 [J]. 中国水运(理论版), 2007, 11: 95 - 96. (ZHAO Na, ZHANG Qi, ZUO Yong-zhen. Study on the failure mechanism of Tiantaixiang landslide induced by rainfall[J]. China Water Transport, 2007, 11: 95 - 96. (in Chinese))
- [10] 李增涛. 极端降雨型滑坡的加载位移耦合预测参数及灾变动力预测判据研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013. (LEE Zeng-tao. Study on the load-displacement coupled prediction parameters and catastrophic dynamic prediction criterion of the landslides induced by extreme rainfall[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2013. (in Chinese))
- [11] 吴仁铣. 降雨诱发的滑坡作用机制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013. (WU Ren-xian. Research on landslides mechanism induced by rainfall[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese))
- [12] 左自波. 降雨诱发堆积体滑坡室内模型试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013. (ZUO Zi-bo. Investigation on rainfall-induced colluvium landslides using laboratory model tests[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese))

- Chinese))
- [13] 郑颖人, 唐晓松. 库水作用下的边(滑)坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1115 - 1121. (ZHENG Ying-ren, TANG Xiao-song, Stability analysis of slopes under drawdown condition of reservoirs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1115 - 1121. (in Chinese))
- [14] 刘新喜, 夏元友, 练操, 等. 库水位骤降时的滑坡稳定性评价方法研究[J]. 岩土力学, 2005(9): 1427 - 1431, 1436. (LIU Xin-xi, XIA Yuan-you, LIAN Cao, et al. Research on method of landslide stability valuation during sudden drawdown of reservoir level[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(9): 1427 - 1431, 1436. (in Chinese))
- [15] 魏进兵. 水位涨落诱发水库滑坡的机制研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2006. (WEI Jin-bing. Effects of reservoir level fluctuations on reactivation of landslide in reservoir area[D]. Wuhan: Chinese Academy of Science (Institute of Rock and Soil Mechanics), 2006. (in Chinese))
- [16] 徐文杰, 王立朝, 胡瑞林. 库水位升降作用下大型土石混
- 合体边坡流-固耦合特性及其稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009(7): 1491 - 1498. (XU Wen-jie, WANG Li-chao, HU Rui-lin. Fluid-solid coupling characteristics and stability analysis of soil-rock mixture slope in rising and drawdown of reservoir water levels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009(7): 1491 - 1498. (in Chinese))
- [17] 潘书华. 三峡库区典型堆积层滑坡复活与库水位波动关系研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2013. (PAN Shu-hua. Research on relationship between reservoir water level fluctuation and reactivation of typical accumulation landslides in Three Gorges Reservoir Area[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese))
- [18] 卢应发, 黄学斌, 刘德富. 边坡稳定分析条块力-位移法及其应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2787 - 2798. (LU Ying-fa, HUANG Xue-bin, LIU De-fu. Slice block force-displacement method of slope stability analysis and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2787 - 2798. (in Chinese))

第十届全国基坑工程研讨会（第1号征文通知）

由中国建筑学会建筑施工分会基坑工程专业委员会主办，兰州理工大学承办的“第十届全国基坑工程研讨会”将于2018年9月在甘肃省兰州市召开。

主办单位: 中国建筑学会建筑施工分会基坑工程专业委员会

承办单位: 兰州理工大学

协办单位 (排名不分先后): 中铁西北科学研究院; 兰州大学; 西北民族大学; 兰州交通大学; 甘肃土木工程科学研究院; 《岩土工程学报》编辑部; 《岩土力学》编辑部 (待增补)

会议主题: ①基坑工程设计理论与实践及其新进展、行业的发展趋势; ②基坑工程施工和监测领域的技术、新工法和新设备; ③基坑工程及特殊岩土层中的地下水问题及控制技术; ④基坑施工对周围环境的影响评估与控制技术; ⑤地铁深基坑工程中的设计、施工与监测技术; ⑥黄土、软弱土等特殊

土地区基坑设计与施工的关键技术; ⑦深基坑工程支护结构与降水相关问题数值模拟研究; ⑧超深基坑工程的设计、施工与监测的关键技术; ⑨基坑工程领域的信息化技术及其应用; ⑩重、大、特基坑工程的典型案例和基坑工程事故分析。

重要日期安排: ①2018年4月30日前提供论文电子版一份, 发送至邮jikenghy2018@163.com。②论文将组织学术委员会专家评审, 录用通知及修改意见将在2018年5月31日前通知作者。③作者根据修改意见和排版要求定稿, 于2018年6月20日前将修改稿和修改说明电子版发到会议组委会。

会议秘书处联系地址: 甘肃省兰州市七里河区兰工坪路287号, 兰州理工大学土木工程学院 (730050)。联系人: 周勇 13119308411, 叶帅华13893624445, 韦正德13639330876, 杨校辉 15095338032。会议论文提交电子邮箱: jikenghy2018@163.com。

(第十届全国基坑工程研讨会会务组 供稿)