



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.024

向贵府, 许模, 崔杰, 等. 四川省万源市花楼乡董家梁滑坡特征及成因机制[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 145-149, 192. XIANG Gui fu, XU Mo, CUI jie, et al. Study on characteristics and formation mechanism of Dongjialiang landslide in Hualou Town, Wanyuan City, Sichuan Province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 145-149, 192. (in Chinese)

四川省万源市花楼乡董家梁滑坡特征及成因机制

向贵府^{1,2}, 许模¹, 崔杰², 李虎杰²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 万源市花楼乡董家梁滑坡属于典型的四川盆地周山区红层地层滑坡。通过现场调绘、工程地质勘探等手段, 揭示该滑坡为强大水压力起主导作用的滑动变形破坏。根据滑坡滑动后的空间形态及残留体特征, 将滑坡划分为滑坡启动区(A区)、滑坡西侧推挤滑动区(B区)、滑坡东侧牵引滑动区(C区)三个部分。研究表明滑坡启动始于地下水活动强烈的中部区域(A区), 水压力随雨量增加而急剧增长, 该区岩体受水压力推挤沿层面及侧裂结构面发生剪切破坏, 形成楔形体滑动, 同时牵引B区和C区岩体产生推挤、拉张、牵引滑动破坏。

关键词: 花楼乡董家梁滑坡; 红层滑坡; 成因机制

中图分类号: P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0145-05

Study on characteristics and formation mechanism of Dongjialiang landslide in Hualou Town, Wanyuan City, Sichuan Province

XIANG Gui fu^{1,2}, XU Mo¹, CUI Jie², LI Hujie²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology;

2. College of Resource and Environment, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan)

Abstract: Dongjialiang landslide in Hualou Town of Wanyuan City is a typical red bed landslide in Sichuan Basin. Several means such as field annotation and engineering geological exploration were used to reveal that this landslide was a slide deformation and failure mainly caused by powerful water pressure. Based on the spatial shape and residue characteristics after the sliding, the landslide was divided into the promoter zone (Zone A), pushing slide zone at the west side of the landslide (Zone B), and traction slide zone at the east side (Zone C). The study showed that the landslide started from the central zone (Zone A) where groundwater activity was intense. The water pressure rose sharply as the rainfall increased. Pushed by the water pressure, the rock at this zone was exposed to shear failure along the surface and sideslip surface, forming a wedge sliding while pulling the rocks at Zones B and C to produce pushing, tension, and traction sliding failure.

Key words: Dongjialiang landslide in Hualou Town; red bed landslide; formation mechanism

近年来, 受极端气候条件影响, 在大巴山红层地层中发生了较多的滑坡地质灾害, 如: 2004年9月5日的宣汉县天台乡义和村滑坡^[1,2]、2007年7月7

日达县青宁乡岩门村滑坡^[2,3]、2010年7月18日南江县凤仪乡牛马场滑坡^[3]、2011年9月18日的南江县高坪乡窑厂坪滑坡和南江县沙河镇将营村石板沟

收稿日期: 2016-01-25 修回日期: 2016-08-01 网络出版时间: 2017-01-04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170104.0925.008.html>

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2014FZ0009)

Fund: Science and Technology Plan Project of Sichuan Province(2014FZ0009)

作者简介: 向贵府(1972-), 男, 四川万源人, 讲师, 博士, 主要从事地质工程与岩土工程特性方面的教学与科研工作。E-mail: 28899600@qq.com

通讯作者: 许模(1963-), 男, 教授, 博导, 主要从事水文地质及工程地质研究与教学工作。E-mail: 875924113@qq.com

滑坡等^[4]。这些滑坡给一些场镇、村庄的居民带来较大的财产损失和严重的生命威胁。为此,一批地质工程界专家、学者对红层地层中发育的滑坡特征及成因机制开展了大量研究工作^[5-12],为红层滑坡的治理设计、预测预报提供了重要理论基础。花楼乡董家梁滑坡同样属于红层滑坡,但其又具有不同于该类滑坡的其它特殊性,主要表现为:其一,该滑坡总体滑动方向与岩层倾向成近 40° 夹角,并非完全顺层滑动,滑坡具层面、结构面共同控制的多滑面特征;其二,滑坡发生前,斜坡后缘及坡体未见拉裂缝、隆起等变形迹象,滑坡自启动到滑动破坏经历时间短,具有类似于刚体破坏的基本特征;其三,滑坡不同区域滑体运动路径差异较大,运用传统的传递系数法评价滑坡稳定性已不适用。因此,深入研究董家梁滑坡的滑动特征及成因机制,不仅可以为该类滑坡的治理及预防提供技术支撑,还可以补充完善红层岩质滑坡的机理,为县市区地质灾害调查与区划工作提供新的思路,具有重要的现实与理论意义。

1 花楼乡董家梁滑坡地质环境条件

董家梁滑坡所在斜坡区为脊状山梁的侧向临空一侧区域,斜坡坡向为 180°,近南北向,北高南低,总体坡度在 20°-30°,呈陡缓交替的阶状地形,临空条件较好(图 1)。

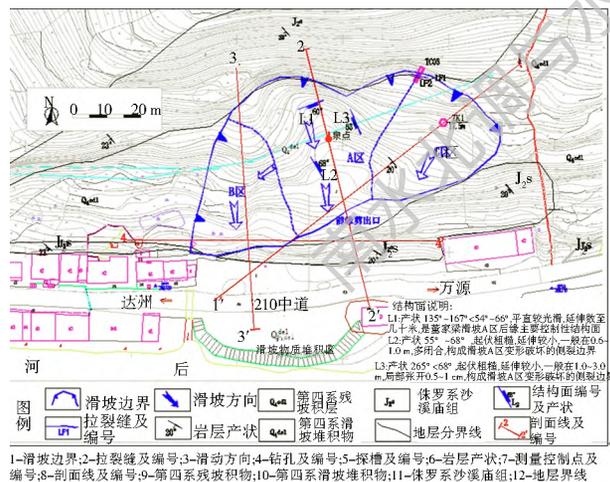


图 1 花楼乡董家梁滑坡工程地质平面图

Fig. 1 Engineering geological plane of Dongjialiang landslide at Hualou Town

区内出露地层主要为侏罗系中统上沙溪庙组 (J_2s),岩性由砂岩和泥岩组成。滑坡区斜坡上部以泥岩为主,风化强烈,岩体破碎;下部以砂岩为主,夹少量极薄层泥岩及砂质泥岩,砂岩中厚层状,岩体完整性较好,岩层总体产状为 240°~220°∠18°~23°,为倾向下游的缓倾单斜地层。

滑坡所处构造位置属大沙背斜的南西翼,紧靠

背斜核部。受构造影响,岩体中发育平行与垂直构造轴线节理裂隙,主要有三组节理:(1)节理裂隙 L1:产状,135°~167°∠54°~66°,平直较光滑,延伸数米至几十米,是董家梁滑坡主要的控制性结构面;(2)L2:产状,55°∠68°,起伏粗糙,延伸较小,一般在 0.6~1.0 m,多闭合;(3)L3:产状,265°∠63°,起伏粗糙,延伸较小,一般在 1.0~3.0 m,局部张开 0.5~1 cm。节理裂隙不仅构成滑坡的后缘及侧裂边界,同时还是斜坡区基岩裂隙水的主要运移通道。钻孔揭露滑坡地下水位置埋藏较深,但在滑坡后的滑面位置发现一泉点出露,滑坡发生数月后,该泉点仍有泉水流出,流量约 2 Lu/d。

2 花楼乡董家梁滑坡基本特征

滑坡滑动后在斜坡中后部形成一楔形的凹槽,滑坡后缘可见高达 10 余 m 的基岩滑壁,产状 150°∠72°,微起伏,较光滑,有渗水现象,滑坡滑动后形成的坡体形态见图 2。滑体物质由强风化砂泥岩滑动破碎而成的砂泥岩块石及斜坡上部第四系残坡积物组成,初期堆积物因水分较多而成浓稠泥浆状,下部块石被泥浆包裹,滑坡表面分布少量块石,块石直径在 50~100 cm 之间,滑动距离较小块石直径可达 200 cm,见图 3。滑坡滑动后,在滑坡后缘形成松动变形区,岩体因牵引拉裂而松动破碎,见图 4。通过对滑坡坡体结构、滑体变形破坏及运动特征、滑动后所形成的地形地貌等因素的综合分析,将该滑坡划分为滑坡启动区(A区)、滑坡西侧推挤滑动区(B区)、滑坡东侧牵引滑动区(C区)三个部分,见图 5。各区变形破坏特征简述如下。

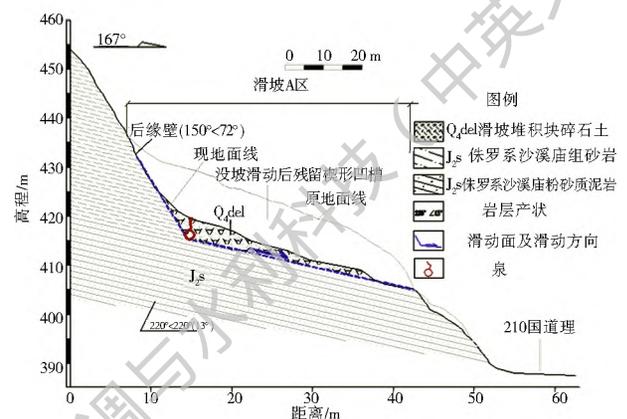


图 2 花楼乡董家梁滑坡工程地质剖面图

Fig. 2 Engineering geological profile of Dongjialiang landslide at Hualou Town

(1)滑坡启动区(A区)。该区位于滑坡中部,为结构面及层面围限而成的楔形块体,滑坡发生后形成

一楔形凹槽,见图 6。后缘滑壁为结构面 L1,该组结构面微起伏较光滑,延伸远,贯通性较好,显示该结构面为早期形成的控制性边界;L2、L3 结构面构成楔形块体的两组侧裂边界,而这两组结构面延伸短,贯通性差,但发育间距小;层面构成该区域的底部边界,裸露层面岩层为钙质页岩,层面上残留青灰色钙质薄膜,可见明显擦痕,方向与走向近一致,见图 7。



图 3 滑坡堆积物物质组成及特征

Fig. 3 Composition and characteristics of landslide debris



图 4 滑坡后缘残留体碎裂结构特征

Fig. 4 The fragmentation structure of residual landslide

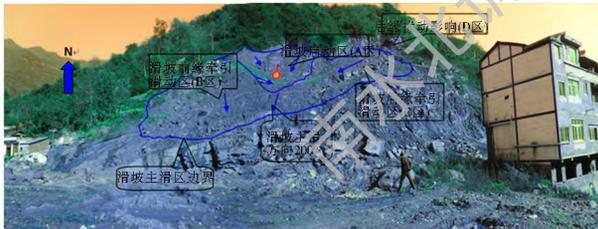


图 5 花楼乡董家梁滑坡分区图

Fig. 5 Zoning map of Dongjialiang landslide at Hualou Town



图 6 滑坡 A 区空间形态及后缘滑壁

Fig. 6 Spatial form and slide wall of Zone A of Dongjialiang landslide

(2) 滑坡前缘牵引滑动区(B 区)。该区位于滑坡西侧,即右下方位置,受 A 区岩体滑动的牵引、推

挤作用,B 区各部分表现出不同的受力形式,在外侧表现为受 A 区滑动的推挤变形,在内侧与 A 区相接部位表现为拉裂破坏变形。因 B 区沿层面方向受阻,坡面岩体松动破碎,局部发生岩体陡倾现象,大量强烈变形破坏岩体残留于斜坡中,仅少量沿顺走向沿临空方向(200°方向)滑出,见图 8。

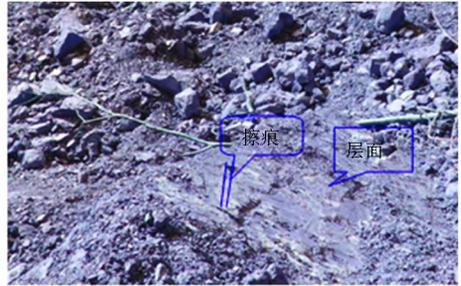


图 7 层面(滑面)特征

Fig. 7 Level (slip surface) features



图 8 B 区变形破坏特征及形态

Fig. 8 Deformation and failure characteristics and morphology of Zone B

(3) 滑坡后缘牵引滑动区(C 区)。该区位于滑坡东侧,随着 A 区岩体从滑床中剪裂挤出,一方面 C 区岩体下部失去支撑,另一方面 A 区滑动牵引作用导致该区岩体发生沿层面倾向(240°) 滑移拉裂破坏。该部分启动后,在前缘滑体牵引作用下,滑体由顺层滑动转为沿临空方向(200°) 滑动,并在滑动中因差异滑动而解体。当滑坡启动后,斜坡中水压力逐渐消散,滑坡动力转变为由滑体重力牵引,当重力下滑分力小于层面摩阻力及侧裂结构面抗力时,该部位也即滑坡边界,滑动停滞。后缘残留岩体参差不齐,撕裂特征明显(图 9)。

3 滑坡形成过程及机制分析

2010 年 7 月 16 日 17 时至 18 日 18 时,达州市由北向南出现强降雨过程,万源市城区累计降雨量达到 462.2 mm,超过有气象记录以来的历史极值。特大暴雨导致河水猛涨,水位很快涨至斜坡下部公路位置,阻塞地下水排泄通道,斜坡坡体内地下水汇聚,裂隙水水位快速增高,水压力急剧上升,并沿滑

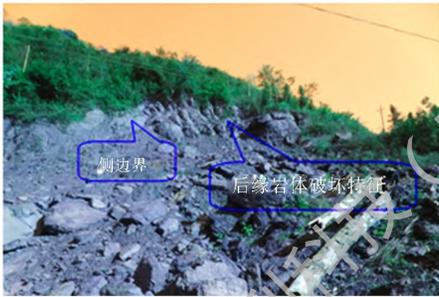


图 9 C 区形态及变形破坏特征

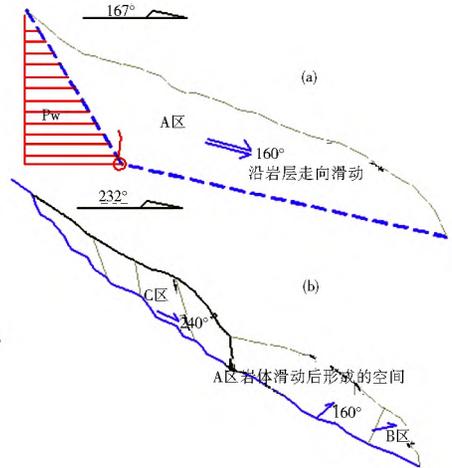
Fig. 9 Deformation and failure characteristics and morphology of Zone C

坡后壁裂隙、层面及侧向裂隙等部位产生顶托、挤入楔裂、劈裂作用。在此过程中,侧裂结构面 L2 和结构面 L3 逐渐张开、扩展,最终剪断锁固段并形成贯通性侧滑边界;同时地下水的浸润、顶托作用,层面结构面强度急剧降低。随着水压力的继续增加,当水压力与重力下滑分力的合力超过 A 区岩体的抗滑力时,该区岩体开始顺层面并沿近于走向方向 (160°) 发生滑动。该滑坡的形成过程大致可划分为能量蓄积阶段、滑坡启动破坏阶段和停滞阶段。

(1) 能量蓄积阶段。调查发现在 A 区出露滑面位置处发育泉点,泉既是地下水排泄通道,也是与地表水体相联系的通道,与泉所联系的地下水传递来自水头的静水压力。特大暴雨一方面加速了水头高度的增加,另一方面导致河水上涨阻碍了地下水的排泄。持续两天多的强降雨,在斜坡中所蓄积的高水头差转化成势能,为该区斜坡岩体的变形提供了强大的力源。由静水压力转化的势能不同于滑坡滑体重力下滑分力所转化的势能,力源来自于物体外部,同时水的流动性特征,决定了水压力具有进入裂隙、孔隙等各类空间的便利条件。

(2) 滑坡启动破坏阶段。随着降雨的持续,雨量继续增加,当积累的水头所转化的势能超过岩体中结构面强度及局部岩桥强度,岩桥被剪断,该部分岩体首先开始出现滑动破坏,随后牵引周围岩体发生变形破坏,如同多米诺骨片效应。由于 A 区受力较大,首先发生变形并直至破坏,在这一过程中,其对右下侧的 B 区产生推挤,对左上方的 C 区产生牵引张拉,因此, A、B、C 三区具有不同的变形破坏特征: A 区最先破坏,且破坏最为彻底,仅滑面后有局部残留,滑动方向与岩层走向 (160°) 近于一致; B 区滑动晚于 A 区,且在 A 区滑动推挤及拉张作用和沿倾向方向岩体阻碍共同作用下,总体沿与走向小角度夹角方向滑出,局部发生岩层陡倾现象,坡体残留大量松动破碎产物; C 区与 B 区近同时发生,但持续时间长于 B 区,滑动方向总体为顺层面倾向方向,后

缘残留大量松动变形体,滑坡启动到变形破坏过程见图 10。



(a) A 区在水压力作用下沿走向滑动; (b) A 区滑动后 C 区前缘临空而发生顺层滑动

图 10 花楼滑坡成因模式

Fig. 10 Genesis of Hualou landslide

(3) 滑坡停滞阶段。斜坡中因水头上升而集聚的能量因滑坡滑动而逐渐消善,滑体在重力作用下局部继续产生变形,当重力的下滑分力与滑坡抗滑力(结构面、滑面摩阻力及岩石抗拉强度)平衡时,滑动处于停滞状态,斜坡逐渐恢复平静。

滑坡从孕育、启动至结束的整个过程中,滑体不同部位受力情况不同,形成的力学机制也有所差异,滑坡变形受力情况包含了推挤、牵引(拉张)、和撕裂(扯)三种力学行为。

(1) 推挤作用。高水头压力沿结构面对岩体产生强烈的推挤、劈裂作用,首先将侧裂结构面 L2 和结构面 L3,以及层面结构面中的岩桥(锁骨段)剪断,促使该部分岩体首先发生滑动变形破坏,这正是所谓的水锤机制促使了滑坡的形成^[13-16]。

(2) 牵引作用。当水压力对 A 区岩体产生推挤作用的同时,由于该部分岩体与 B 区、C 区岩体并未完全脱离,岩体之间存在较强的结构联接,因此,在 B、C 区岩体中将产生张拉作用力,从而牵引该区岩体发生变形。在 B 区后侧产生顺层面走向方向的牵引破坏,前侧岩体沿倾向方向受阻,在 A 区岩体推挤作用下而形成近直立的陡倾现象,如图 7 所示;在 C 区则产生顺层面倾向的牵引滑动,其后缘滑壁及层面上均可见滑动留下的擦痕。

(3) 撕裂作用。在 C 区后部,当该区岩体在 A 区岩体牵引及自身重力作用下沿层面发生顺层滑动,张拉及牵引作用由前缘逐渐向后部传递,牵引力受层面摩阻力及侧裂结构面岩桥抗拉强度阻碍而逐渐减弱,在后缘边界处,两种力相对均衡时,表现出

对该位置岩体的撕裂作用,岩体出现参差不齐拉裂破坏特征,见图8。

4 结论

(1)花楼乡董家梁滑坡不同区域具有各自的受力机制、滑动方向。由此,将滑坡划分为滑坡启动区(A区)、滑坡前缘牵引滑动区(B区)、滑坡后缘牵引滑动区(C区)三个部分,不同部位差异滑动,形成一部位发动,多部位联动的破坏模式。

(2)滑坡滑动的主要动力来源于暴雨形成的强大渗透压力,水压力沿结构面(后缘)产生的推力及挤入劈裂作用导致滑坡A区首先发生“溃决”式滑动,随后牵引B区和C区产生顺层滑动。

(3)该类滑坡破坏模式特殊,在地质灾害调查中将场镇等人口密集区内具备滑坡基本物质条件的斜坡纳入重点评估范畴,细化并完善滑坡地质灾害调查和评估的时空范围。

参考文献(References):

[1] 黄润秋,赵松江,宋肖冰,等.四川省宣汉县天台乡滑坡形成过程和机理分析[J].水文地质工程地质,2005,32(1):13-15. (HUANG Run qiu, ZHAO Song jiang, SONG Xiao bing, et al. Deformation monitoring and failure mechanism analysis of Baishi landslide in Beichuan county[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(1): 13-15. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2005.01.003

[2] 黄润秋,许强.中国典型灾难性滑坡[M].北京:科学出版社,2008. (HUANG Run qiu, XU Qiang. Catastrophic landslides in China[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))

[3] 王鸿.达州市青宁乡岩门村滑坡成因机制分析与治理工程措施研究[D].成都:成都理工大学,2008. (WANG Hong. Formation mechanism analysis and prevention research on Yan Men landslide of Qing Ning Village in Da Zhou City [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese))

[4] 胡泽铭.四川红层地区缓倾角滑坡成因机理研究[D].成都:成都理工大学,2013.6. (HU Ze ming. Study on formation mechanism of the slow inclination landslide in red stratum region, Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013. (in Chinese))

[5] 夏开宗,刘秀敏.考虑突变理论的顺层岩质边坡失稳研究[J].岩土力学,2015,36(2):477-486. (XIA Kai zong, LIU Xiu min. Analysis of mechanism of bedding rock slope instability with catastrophe theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 477-486. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2015.02.025

[6] 冯振,殷跃平,蔡奇鹏,等.斜倾厚层山体滑坡启动机制的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(s1):2600-2604. (FENG Zhen, YIN Yue ping, CAI Qi peng et al. Modeling test on initiation mechanism of landslide in oblique inclined thick bedded mountain [J]. Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(增1): 2600-2604. (in Chinese)) DOI: 10.13722/j.cnki.

jrme. 2014. s1. 002

[7] 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. (LU Shu qiang, YI Qing lin, YI Wu, et al. Analysis of deformation and failure mechanism of Shuping landslide in Three Gorges reservoir area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1123-1130. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2014.04.013

[8] 张明,胡瑞林,殷跃平,等.川东缓倾红层中降雨诱发型滑坡机制研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(d2):3783-3790. (ZHANG Ming, HU Rui lin, YIN Yue ping et al. (Study of mechanism of landslide induced by rainfall in gently inclined red stratum in east SICHUAN basin [J]. Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(s2): 3783-3790. (in Chinese)) DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.048

[9] 范宣梅.平推式滑坡成因机制与防治对策研究[D].成都:成都理工大学,2007. (FAN Xuan mei. Study on genetic mechanism and control methods of translational gliding landslide [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007. (in Chinese))

[10] 卢海峰,陈从新,袁从华,等.巴东组红层软岩缓倾顺层边坡破坏机制分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增2):3569-3577. (LU Hai feng, CHEN Cong xin, YUAN Cong hua, et al. Analysis of failure mechanism of Ba Dong red bed soft rock gently inclined bedding slope [J]. Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(s2): 3569-3577. (in Chinese))

[11] 唐然,邓韧,安世泽.北川县白什乡老街后山滑坡监测及失稳机制分析[J].工程地质学报,2015,23(4):760-768. (TANG Ran, DENG Ren, AN Shi ze. Deformation monitoring and failure mechanism analysis of baishi landslide in beichuan county [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 760-768. (in Chinese)) DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2015.04.026

[12] 雍睿,胡新丽,唐辉明,等.推移式滑坡演化过程模型试验与数值模拟研究[J].岩土力学,2013,34(10):3018-3027. (YONG Rui, HU Xin li, TANG Hui ming, et al. Model testing and numerical simulation study of evolutionary process of thrust load caused landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 3018-3027. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2013.10.002

[13] 唐红梅,魏来,唐云辉,等.重庆地区降雨型滑坡相关性分析及预报模型[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(4):16-22. (TANG Hong mei, WEI Lai, TANG Yun hui, et al. Correlation analysis and prediction model for rainfall induced landslide in Chongqing area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 16-22. (in Chinese)) DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2013.04.012

[14] 高华喜,殷坤龙.降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J].岩土力学,2007,28(5):1055-1060. (GAO Hua xi, YIN Kun long. Discuss on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early warning and prediction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 1055-1060. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2007.05.039

(下转第192页)

- models for homogeneous shear flow [J]. *Phys Fluids*, 1991 (3): 2278-2281.
- [18] 熊莉芳, 林源, 李世武. $k-\epsilon$ 湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. *工业加热*, 2007(4): 13-15. (XIONG Lìfang, LIN Yuan, LI Shìwu. $k-\epsilon$ turbulent model and its application to the fluent[J]. *Journal of Industrial Heating*, 2007(4): 13-15. (in Chinese))
- [19] 高改玉, 张根广. 虹吸井和排水口泄流三维数值模拟及堰型优化[J]. *人民黄河*, 2012(3): 137-139. (GAO Gǎiyù, ZHANG Gēnguāng. Three dimensional numerical simulation on discharge of siphon well and overflow and optimization for weir shape[J]. *Yellow River*, 2012(3): 137-139. (in Chinese))
- [20] 段文姣, 张根广, 范仲文. 南迪普电站排水口三维数值模拟及体型优化[J]. *水电能源科学*, 2012(8): 90-93. (DUAN Wēnjiāo, ZHANG Gēnguāng, FAN Zhōngwén. Three dimensional numerical simulation of outfall of nandipur power plant and shape optimization[J]. *Water Resources and Power*, 2012(8): 90-93. (in Chinese))
- [21] 王新坤, 许文博, 赵坤, 等. 基于 CFD 的多孔管热风数值模拟与设计方法[J]. *排灌机械工程学报*, 2011(1): 82-86. (WANG Xīnkūn, XU Wēnbó, ZHAO Kūn, et al. Numerical simulation and design method of hot air for porous pipe based on CFD[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2011(1): 82-86. (in Chinese))

(上接第 149 页)

- [15] 严绍军, 唐辉明, 项伟. 降雨对滑坡稳定性影响过程分析[J]. *水文地质工程地质*, 2007, (2): 33-36. (YAN Shaòjūn, TANG Huīmíng, XIANG Wēi. Effect of rainfall on the stability of landslides[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2007, (2): 33-36. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2007.02.008
- [16] 张友谊, 胡卸文, 朱海勇. 滑坡与降雨关系研究展望[J]. *自然灾害学报*, 2007, 16(1): 104-36. (ZHANG Yǒuyǐ, HÚ Xièwén, ZHŪ Hǎiyǒng. Prospect of research on relationship between landslide and rainfall[J]. *Natural Disasters*, 2007, 16(1): 104-36. (in Chinese)) DOI: 10.13577/j.jnd.2007.0120
- [17] 李保雄, 苗天德. 红层软岩顺层滑坡临滑预报的强度控制方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003: 22(增 2) 2703-2706. (Lǐ Bǎoxióng, MIÀO Tiāndé. Strength controlling forecast method of critical landslide along red soft mudstone layer[J]. *Rock Mechanics and Engineering*, 2003: 22(s2) 2703-2706. (in Chinese))
- [18] 苏燕, 邱俊炳. 基于室内试验的降雨型滑坡机理研究[J]. *福州大学学报·自然科学版*, 2015(2): 118-122. (SŪ Yàn, QIŪ Jūnbǐng. Research on mechanism in rainfall landslides based on laboratory test[J]. *Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition*, 2015(2): 118-122. (in Chinese))
- [19] 宋娅芬, 陈从新. 缓倾软硬岩互层边坡变形破坏机制模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(2): 487-494. (SŌNG Yǎfēn, CHÉN Cǒngxīn. Model experimental study of deformation and failure mechanism of low angled slopes with interbedding of soft and hard rocks[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(2): 487-494. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2015.02.026
- [20] 谢瑾荣, 周翠英. 降雨条件下软岩边坡渗流软化分析方法及其灾变机制[J]. *岩土力学*, 2014, 35(1): 197-203. (XIÈ Jǐnróng, ZHŌU Cuìyīng. Method of seepage softening analysis and disaster mechanism in soft rock slope under rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(1): 197-203. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2014.01.005