

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0075

魏昌利,陈亮,杨志华,等. 岷江上游俄寨村滑坡成因与稳定性预测[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 185-192. WEI C L, CHEN L, YANG Z H, et al. The causes and stability prediction of Ezhai Village landslide in the upper of the Minjiang river region[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 185-192. (in Chinese)

岷江上游俄寨村滑坡成因与稳定性预测

魏昌利^{1,2}, 陈亮², 杨志华³, 张瑛², 何元宵²

(1. 成都理工大学, 成都 610059; 2. 四川省地质调查院, 成都 610081; 3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 俄寨村滑坡是岷江上游、成兰铁路沿线众多大型古(老)滑坡之一, 研究其成因机理与稳定性预测, 对于地质灾害早期识别、减轻危害具有重要意义。在阐明滑坡地质背景条件、发育特征的基础上, 对其成因机理、演化过程做了分析, 采用工程地质分析、定量计算和数值模拟方法对滑坡堆积体稳定性及变形破坏机制做了研究。结果表明, 俄寨村滑坡总方量 739 万 m³, 为大型岩质滑坡, 属降雨诱发型推移式老滑坡, 滑坡变形破坏经历变形拉裂、裂缝贯通、推移滑动和停滞堆积四个阶段; 俄寨村滑坡的形成与高陡的地形条件、破碎的岩土类型、顺向斜坡结构, 以及紧邻活动断裂, 地震活动强烈有关, 受降雨诱发; 俄寨村滑坡目前整体稳定, 局部不稳定, 暴雨或地震条件下可能局部失稳。
关键词: 岷江上游; 滑坡; 成因机理; 变形; 稳定性; 预测

中图分类号: P642 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The causes and stability prediction of Ezhai Village landslide in the upper of the Minjiang river region

WEI Changli^{1,2}, CHEN Liang², YANG Zhihua³, ZHANG Ying², HE Yuanxiao²

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Sichuan Geological Survey Institute of Sichuan Province, Chengdu 610081, China;

3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The Ezhai Village landslide is one of the large landslides along the upper of the Minjiang River and the Chengdu-Lanzhou railway. It is very important for early identifying the geo-hazards and reducing the harm to explore the causes and stability prediction. On the basis of expounding the geological background and development characteristics of the landslide, this study analyzes its genetic mechanism and evolution process, and investigates the mechanism of landslide accumulation stability and deformation damage by engineering geological analysis, quantitative calculation and numerical simulation. The results show that the Ezhai Village landslide is a large rock landslide with 739×10^4 m³ volume, and an old push-down landslide induced by rainfall. It has been through four stages: deformation and crack by tension, crack penetration, push-down and stagnation accumulation. The formation of the landslide is related to the steep terrain condition, the type of broken rock and soil, and the type of slope structure. It is also closely related to the active fault and the strong earthquake, induced by rainfall. The Ezhai Village landslide is stable now as a whole but is not stable at local scale, which implies that it may be unstable in some areas under heavy rainfall or earthquake conditions.

Key words: the upper of the Minjiang river; landslide; formation mechanism; strain; stability; predict

收稿日期: 2018-08-25 修回日期: 2019-03-07 网络出版时间: 2019-03-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190319.1526.010.html>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160271; 1212011220132)

作者简介: 魏昌利(1971—), 男, 四川仁寿人, 高级工程师, 主要从事工程地质、水文地质及地质灾害方面的调查、研究工作。E-mail: weichangli@vip.qq.com

岷江发源于川西高原的松潘县境内,由于其特殊的气象、水文、地形、构造及岩土条件,沿岷江干流两岸发育许多大型、特大型甚至巨型滑坡,其中不乏古滑坡和老滑坡,这些滑坡多由地震、暴雨或人类工程活动引发,给当地生、产生活造成了巨大危害,而很多滑坡体本身也是良好的耕种和栖息地^[1-3]。近年来,岷江上游地区经济发展迅速,城镇扩建、新农村建设,旅游、水电开发,公路、铁路建设等大量工程实施,或直接遭受滑坡的危害,或引发古(老)滑坡复活,甚至产生许多新的滑坡^[4-5]。建设中的成兰铁路是我国“八纵八横”高速铁路规划网中“兰广”通道的一部分,是四川沟通西北的铁路大通道。成兰铁路从平安隧道进入岷江流域,沿岷江河谷向北进入岷江上游,沿途穿越多处大型滑坡^[6-9],松潘县俄寨村滑坡是其中之一。

俄寨村滑坡位于岷江上游松潘县城北十里乡境内,岷江干流左岸,成兰铁路从滑坡体下以隧道方式通过。俄寨村滑坡堆积体长700 m、最宽处722 m,最厚处约33 m,主滑动方向 261° ,总体积739万 m^3 ,属大型岩质老滑坡。该滑坡如果复活,可能堵塞或挤压岷江主河道,威胁下游松潘县城及沿线工程、居民安全,尤其对滑坡体上村民安置点、前缘松潘气象局,以及成兰铁路的建设及运行造成重大危害。因此,研究俄寨村滑坡成灾背景、成因机理及稳定现状,预测滑坡稳定性,对防范地质灾害危害具有重要意义。

1 区域自然条件概况

1.1 水文气象

研究区位于岷江上游干流左岸,该部位岷江平均流量 $5.5 \text{ m}^3/\text{s}$,最大流量 $20.3 \text{ m}^3/\text{s}$,最小流量 $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

研究区属高山寒温带气候,气温、降水垂直变化特征明显,气温随地势增高逐渐降低,而降水则相反。据滑坡附近松潘气象站监测资料,多年平均降雨量728.4 mm,呈双峰型,5—7月最高,8月略低,9月略高,11月至次年2月为枯季,占全年降雨量不足5%,20 min最大降水量为21.4 mm,1 h最大降水量25.3 mm,24 h最大降水量45.5 mm;昼夜温差大,多年平均气温 5.9°C ,极端最高温度 30.9°C ,最低温度 -23.1°C ;相对湿度64%;无霜期40 d;年日照1 804 h;年均蒸发量1 136.4 mm。

1.2 地形地貌

研究区位于川西高原东侧,靠近岷江源头。滑坡区海拔高程2 835~3 200 m,属侵蚀深切河谷地貌,槽谷曲流河段区。山脊部位海拔高程3 500 m,

属剥蚀、侵蚀圆顶缓坡中高山区。

1.3 地质构造

研究区构造上位于雪宝顶东西向构造带西部边缘,麻子寨向斜北东翼。滑坡前缘为岷江断裂,以西为岷江推覆构造带之大沟推覆体,北侧有北西—南东向麻子寨断层通过。岷江断裂活动强烈,新构造运动主要表现为多阶段、不均衡的抬升、震荡和掀斜^[10-11],岷江河谷较宽阔,发育不对称的五级阶地,西岸抬升较快阶地窄小,东岸阶地地形平缓,阶地发育较好。

研究区地处松潘-龙门山地震区,地震活动较频繁。附近1960年漳腊6.7级地震、1933年叠溪7.5级地震、1976年松潘-平武两次7.2级地震,以及2008年汶川8.0级地震对滑坡区影响较大。研究区地震动峰值加速度为 $0.20 \text{ g}/\text{cm}^2$,地震动特征谱周期为0.40 s。强烈的新构造活动和地震是滑坡形成的主要原因之一^[12-13]。

1.4 地层岩性

研究区基岩地层主要为三叠系上统新都桥组(T_3xn)深灰-灰黑色含炭质板岩、粉砂质板岩、钙质板岩,局部夹灰色薄-中层状不稳定砂岩、凝灰质砂岩、钙质砂岩,岩层产状 $247^\circ\angle 40^\circ$ 。岷江右岸分布三叠系上统侏倭组(T_3zh)灰-深灰色薄-中厚层变质细粒长石石英砂岩、变质粉-细粒长石杂砂岩、岩屑长石石英杂砂岩、变质钙质石英细砂岩等与粉砂质板岩、含炭质绢云母板岩呈韵律互层,岩层产状 $230^\circ\angle 60^\circ$ 。受构造影响,区内岩体较破碎。

第四系滑坡堆积(Q^{del})上部为角砾土下部块碎石,局部夹含角砾粉质黏土、黄土状土,厚度一般15~25 m;第四系全新统残坡积土(Q^{hd+cl})为角砾土、碎石土,结构松散,厚度一般小于5 m,主要分布于滑坡以上缓坡部位;岷江河道、漫滩堆积为第四系全新统上磨组上段($Q^h s^2$)砂卵石层,厚度一般1~3 m;上磨组下段($Q^h s^1$)为一级阶地堆积,基座阶地,拔河高度7~10 m,堆积厚度5~8 m,具二元结构,顶部为粉土、粉质黏土,下部为卵石土;第四系上更新统飞机坝组(Q_{pf})为岷江II~III级阶地圆砾、卵石土,分选性及磨圆度均较好,结构密实,呈半胶结状,层面倾向河道,两岸均有分布,厚度2~10 m,拔河高度20~50 m;第四系中更新统元山子组(Q_{py})为风成黄土,部分含角砾,岷江两岸均有分布,厚度一般2~5 m,垂直裂隙发育。

岷江左岸、滑坡区基岩倾向与地形坡向基本一致,属顺向坡,岷江右岸则为逆向坡。

1.5 水文地质条件

研究区地下水主要为基岩裂隙水和松散岩类孔隙水。

基岩裂隙水赋存于三叠系上统新都桥组和侏倭组板岩、砂岩裂隙中,富水性较好,主要受降雨、融雪补给,由两侧斜坡向河谷径流,方向与斜坡方向基本一致,在谷底、地形转折部位补给阶地、坡积或滑坡松散堆积体,或以下降泉方式排泄,研究区基岩下降泉点多量小,受季节影响大,枯季断流。

松散岩类孔隙水零星分布,滑坡体角砾、碎石土中富水性较好,受大气降水和基岩裂隙水补给,不具承压性,径流方向与斜坡方向基本一致,水位变幅较大,7月份钻孔揭露水位埋深7.6~15.7 m,雨季或融雪期,滑坡前缘、中部地形转折处有浸润状泉零星出露,地下水多补给河谷一级阶地堆积层。河道、一级阶地砂卵石层富水性好;二、三级阶地圆砾、卵石土富水性差;坡积层、黄土一般不含水。

2 滑坡基本特征

2.1 滑坡形态及边界特征

俄寨村滑坡位于岷江上游松潘县十里乡俄寨村^[14],滑坡中部地理坐标:东经103°36′19.4″、北纬32°40′15.6″(图1)。

俄寨村滑坡平面呈不规则半椭圆型,长841 m,后缘宽270 m,前缘宽720 m,主滑动方向261°。滑坡后缘高程3 198 m,其上为缓坡,两侧以山脊、沟谷为界,前缘为岷江河道、一级阶地,海拔高程2 846 m,滑坡高差352 m。滑坡区面积39.4万m²,其中滑

源区海拔3 000~3 198 m,面积3.7万m²,滑坡堆积体面积35.7万m²,厚度一般15~25 m,最厚处33 m,总体积739万m³,属大型岩质滑坡。



图1 俄寨村滑坡遥感影像图

Fig. 1 Remote sensing photograph of the Ezhai Village landslide

滑坡区地形坡度一般15~25°,平均约24°。滑坡后缘及两侧较陡,平均坡度约35°;中部较缓,平均约20°;前缘略陡,平均约25°。滑坡纵向上呈陡—缓—陡变化,主纵断面上滑源区坡度35.4°,中部18.7°,前缘22.3°。滑坡平均休止角22.3°。

从平面形态看,滑坡呈圈椅状,后缘及两侧滑动痕迹明显。纵向上,前缘、后缘较陡,中部平缓;横向上,两侧高、陡,中部低、缓,堆积形态明显。滑坡前缘剪出口中部略有凸出,松潘气象局背后滑坡堆积体覆盖在岷江一级阶地上(图2、3)。

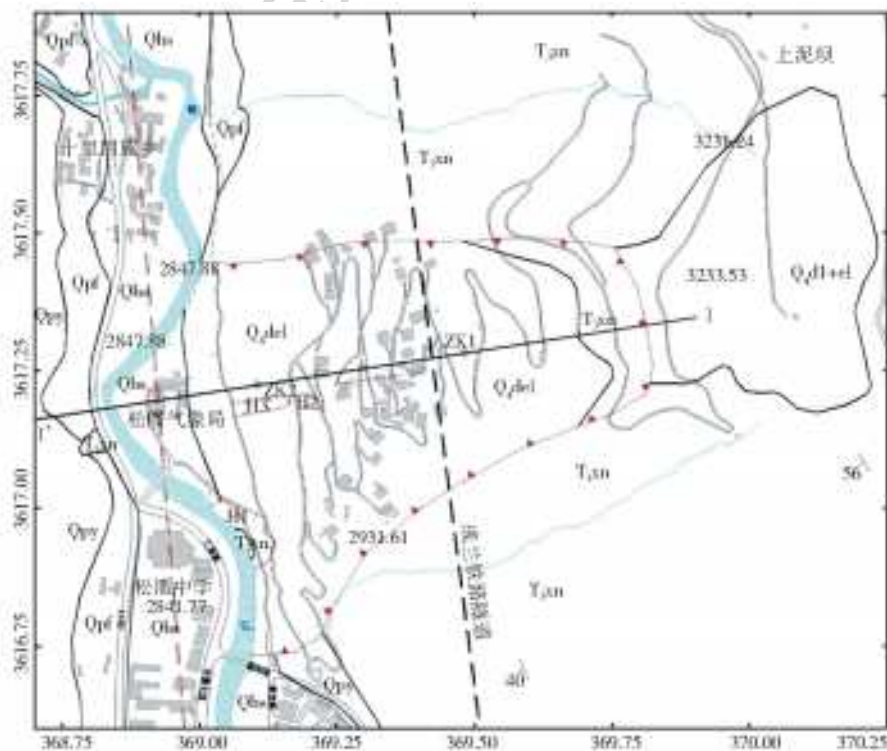


图2 俄寨村滑坡工程地质平面图

Fig. 2 Engineering geological plane map of the Ezhai Village landslide

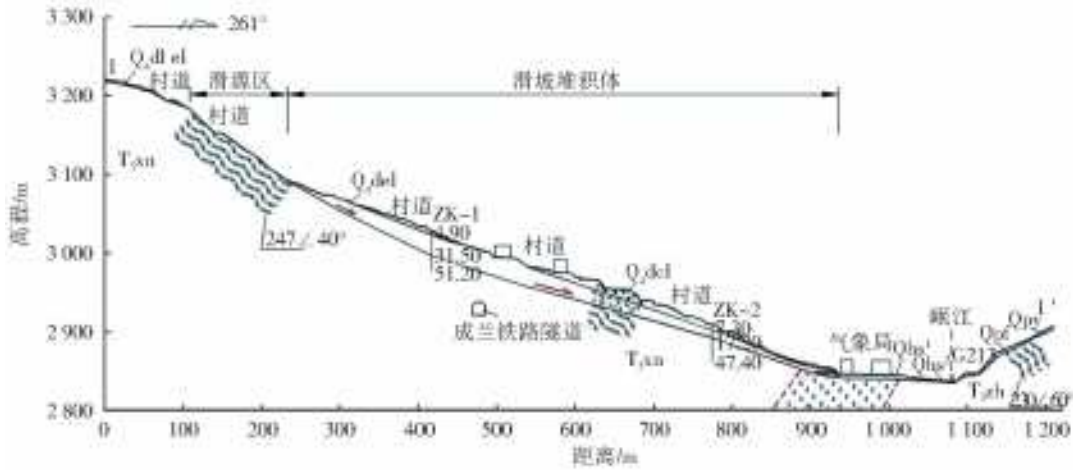


图 3 俄寨村滑坡工程地质剖面

Fig. 3 Engineering geological section map of the Ezhai Village landslide

岷江河道在滑坡前缘部位向河对岸(右岸)弯曲,因松潘气象局所在部位为一级阶地砂卵石堆积,滑坡体堆积于一级阶地之上,所以河道弯曲并非滑坡压迫河道所致,据此推断俄寨村滑坡形成时间应在全新世。

2.2 滑坡堆积体特征

俄寨村滑坡堆积体主要为角砾土、块碎石,分选性较差,稍密-中密,粉质黏土充填,局部夹含角砾粉质黏土、黄土,厚度一般 15~25 m。

角砾土,灰黄、浅灰色,粒径一般 10~30 mm,碎石含量占 20%~30%,角砾含量占 30%~50%,偶含块石,粉质黏土充填占 30%~40%。该土层均匀性差,结构松散,主要分布于滑坡体中前部地表,厚度小于 14 m。该土层天然密度 $\rho_{\text{天}}$ 为 2.1~2.2 g/cm³,孔隙比 e 为 0.4~0.6,变形模量 E_0 为 15~25 MPa,黏聚力 c 为 8~12 kPa,内摩擦角 20°~30°。

块碎石,黄灰、浅灰、深灰色,粒径一般 50~300 mm,块石含量 30%~50%,碎石含量 40%~60%,角砾

含量 20%~30%,少量粉质黏土充填,局部为碎块石土。块石、碎石成分主要为板岩、砂岩、石英。该土层结构疏松,孔隙度大,是滑坡体主要土层,广泛分布,厚度一般 10~30 m。该土层天然密度 $\rho_{\text{天}}$ 为 2.2~2.3 g/cm³,孔隙比 e 为 0.4~0.5,变形模量 E_0 为 25~35 MPa,黏聚力 c 为 0 kPa,内摩擦角 40°~50°。

2.3 滑动面与滑床特征

根据复原的俄寨村滑坡前原始地质剖面(图 4),滑带土很薄,且在不同岩土层位中滑动。

滑坡上段在基岩中滑动,滑动面与砂板岩层面基本一致,倾角 30°~40°,属顺层滑动;中段在基岩风化带中滑动,滑动面倾角变缓,约 15°~18°,属切层滑动;下段在基覆面上滑动,倾角略陡,约 18°~20°。根据反演推算及经验确定滑带土抗剪强度参数 $c=10$ kPa, $\varphi=22^\circ$ [15]。

滑床为三叠系上统新都桥组(T₃xn)板岩、砂岩,强风化带厚度 10~20 m,岩体较破碎。

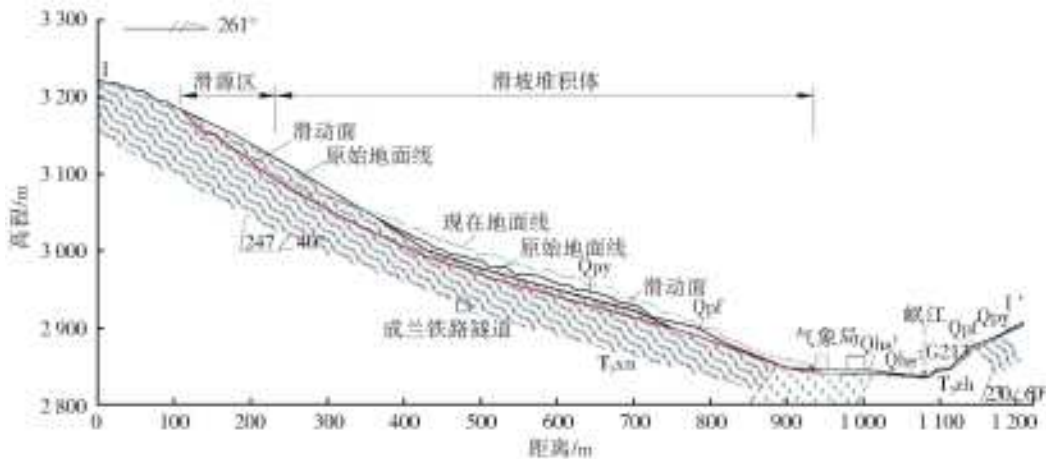


图 4 俄寨村滑坡滑前原始地质剖面

Fig. 4 Section profile of the Ezhai Village landslide before sliding

3 滑坡成因机理分析

高陡的斜坡地形是滑坡形成的前提条件^[16],俄寨村滑坡原始地形仍呈上陡、中缓、下陡的坡面形态,上部 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$,中部 $18^{\circ}\sim 20^{\circ}$,下部 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ (图4)。前缘为岷江河谷岸坡,两侧冲沟切割,形成临空面。

斜坡上部为砂板岩顺向岩质斜坡,岩层倾角与地形坡度基本一致,砂板岩中夹炭质页岩软弱夹层,容易形成滑动面。砂板岩风化破碎严重,风化带厚度大,中部缓坡区地表为中更新统元山子组风成黄土堆积,垂直节理发育,岩土结构利于雨水入渗。长期地下水流动,使基覆面上粘性土聚集,容易形成滑动面。适宜的岩土组合是滑坡形成的物质基础。

滑坡地处地壳强烈抬升区,紧邻岷江断裂,且地震活动频繁。构造对地貌形态、斜坡结构以及滑坡的形成具有控制性作用。频繁的地震活动加剧了斜坡岩体的破碎和裂隙的形成、贯通。

滑坡中部地表发现有成片的黄土、黄土状土分布,说明滑坡解体不彻底,呈整体式滑动。从堆积体

推测,后缘滑动距离较大,约 $130\sim 180\text{ m}$,前缘较小,约 $50\sim 100\text{ m}$,滑坡体主要在中前部堆积,推测属推移式滑动。

根据松潘气象站多年降雨量监测资料分析,该地区降水充沛且集中,年均降雨量 728.4 mm , 20 min 最大降水量为 21.4 mm , 1 h 最大降水量 25.3 mm , 24 h 最大降水量 45.5 mm 。大气降水渗入地下,增加孔隙水压力,软化岩土抗剪强度,增大岩土体容重。根据滑坡滑动距离不大,解体不彻底的特点,推测俄寨村滑坡属降雨诱发型。

俄寨村滑坡堆积体前缘覆盖于岷江一级阶地堆积之上,岷江一级阶地堆积为全新世早期堆积,滑坡形成于全新世;而根据滑坡形貌特征、人类活动痕迹及现场访问,该滑坡也非新滑坡;滑坡目前整体稳定。根据滑坡按年代划分标准,全新世以来发生滑动现今整体稳定的滑坡为老滑坡。因此,俄寨村滑坡为老滑坡。

综上所述,俄寨村滑坡属降雨诱发型推移式老滑坡,滑坡变形破坏经历变形拉裂、裂缝贯通、推移滑动和停滞堆积四个阶段(图5)。

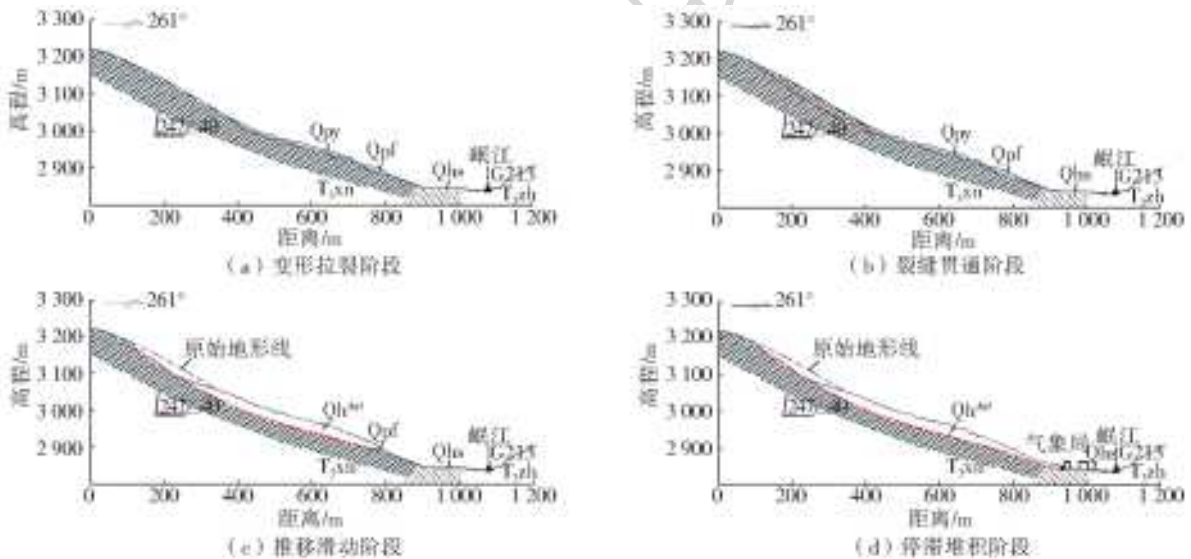


图5 俄寨村滑坡演化过程

Fig. 5 Evolution processes of the Ezhai Village landslide

4 滑坡变形与稳定性分析

4.1 变形及危害

俄寨村滑坡体上原为荒坡、耕地,2008年“5·12”汶川地震后,俄寨村民整体迁入中部缓坡部位居住,大兴土木,削坡、填土,建房、修路,现已建房30于栋,居住150余人,修建水泥路约 4 km ,并在该滑坡体上修建了截排水沟。

目前,滑源区陡坡部位偶有滚石,滑坡堆积体局

部陡坎部位不稳定,村道、排水沟局部已现开裂、挤压、沉陷。发育三处次级滑坡如下。

H1位于老滑坡前缘左测临河部位,海拔高程 $2\ 836\sim 2\ 870\text{ m}$,平面呈扁弧形,长 55 m ,宽 137 m ,面积 $6\ 500\text{ m}^2$,局部基岩出露,松散体厚度 $0\sim 3\text{ m}$,体积约 1 万 m^3 ,稳定性差,威胁村道、河道。

H2位于滑坡中部,海拔高程 $2\ 919\sim 2\ 935\text{ m}$,平面呈半椭圆形,长 34 m ,宽 25 m ,面积 700 m^2 ,滑体厚度 $1\sim 2\text{ m}$,体积约 $1\ 000\text{ m}^3$,稳定性差,威胁村道。

H3 位于 H2 下部,海拔高程 2 870~2 917 m,长条形,长 106 m,宽 24 m,面积 2 500 m²,滑体厚度 0~2 m,体积约 2 000 m³,稳定性差,威胁村道。

4.2 滑坡稳定性分析

俄寨村滑坡目前整体稳定,局部不稳定。滑坡体中部现为俄寨村集中安置点,前缘为岷江主河道、松潘县气象局,且成兰铁路从下部穿过,如果复活将造成巨大危害。

对俄寨村滑坡复活可能产生不利影响的因素主要有:(1)暴雨。研究区降雨集中,历时 20 min、1 h 最大降水量分别达 21.4 mm、25.3 mm,雨水容易使滑坡堆积体饱水增重,滑带土抗剪强度降低,地下水位抬升、水力坡度增大。(2)地震影响。研究区及周边地震活动较频繁,震级大,地震动峰值加速度 0.20 g,地震动特征谱周期 0.40 s,强震可能直接引起滑动,或致裂缝拉伸、贯通。(3)坡脚冲刷。俄寨村滑坡前缘左、右两侧受岷江河水冲刷、涨落影响,H1 次级滑坡即受此影响。(4)削坡建房、坡面加载、生产生活用水入渗对滑坡稳定性不利。不稳定区主要位于前缘陡坡(坎)、后缘(滑源区)以及中部陡坎部位。

采用传递系数法计算滑坡整体稳定性(图 6)。结果显示,滑坡在天然状态下稳定性系数 1.22,稳定性较好;暴雨和地震工况下稳定性系数分别为 1.07 和 1.08,基本稳定;在暴雨和地震同时作用下,

稳定性系数 0.99,不稳定。



图 6 滑坡稳定性计算剖面

Fig. 6 Computational section of landslide stability

为了进一步分析、预测滑坡各部位应力、应变及位移特征,采用 FLAC 有限元法对俄寨村滑坡做建模分析^[17]。滑坡三维地质模型如图 7,1、2、3 组分别为砂板岩、块碎石、角砾土,各岩土参数取值见表 1。

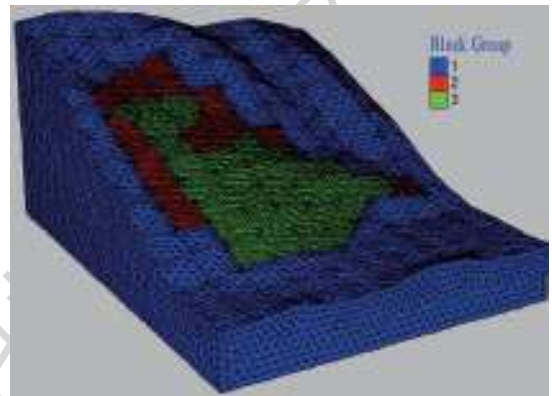


图 7 滑坡三维地质模型

Fig. 7 The 3D geological model of the landslide

表 1 岩土参数取值

Tab. 1 Values for geotechnical parameters

分组	岩性	天然容重/ (kg · m ⁻³)	饱和容重/ (kg · m ⁻³)	变形模量/ MPa	内聚力/ kPa	内摩擦力/ (°)	抗拉强度/ MPa
1	砂板岩	2 700	2 900	25 000	25	50	3.5
2	块碎石	2 250	2 400	27	0	40	0
3	角砾土	2 150	2 300	18	10	25	0

根据俄寨村滑坡暴雨条件下应变及位移图(图 8),暴雨条件下滑坡堆积体后部浅表位移量、剪切应变速率较大,竖向(Z 方向)最大位移量 0.285 m,纵向(X 方向)最大位移量 0.269 m,剪切应变速率每天最大达 0.017。滑坡堆积体中部纵向(X 方向)位移速度最大 0.155 m/d。

采用 FLAC 动力分析功能模拟地震条件下的应变及位移,输入地震波频率 2.5,加速度 0.2 g。地震条件下位移量、剪切应变速率较大部位仍发生在滑坡堆积体后部浅表(图 9),竖向(Z 方向)最大位移量 0.473 m,纵向(X 方向)最大位移量 0.342 m,略高于暴雨条件下,而速度更快,剪切应变速率每秒最大 0.595,纵向(X 方向)位移速度最

大 1.91 mm/s。

综上分析,俄寨村滑坡堆积体整体稳定,暴雨或地震条件下可能局部失稳。

5 结 论

(1)俄寨村滑坡长 841 m、宽 720 m,主滑方向 261°总方量 739 万 m³,属降雨诱发型推移式老滑坡,滑坡变形破坏经历变形拉裂、裂缝贯通、推移滑动和停滞堆积四个阶段。

(2)俄寨村滑坡堆积体天然条件下稳定性较好;暴雨或强震条件下稳定系数 1.07~1.08,整体基本稳定,局部不稳定,堆积体后部和前缘地形坡度较陡部位稳定性较差,预测最大位移量 0.269~0.473 m;

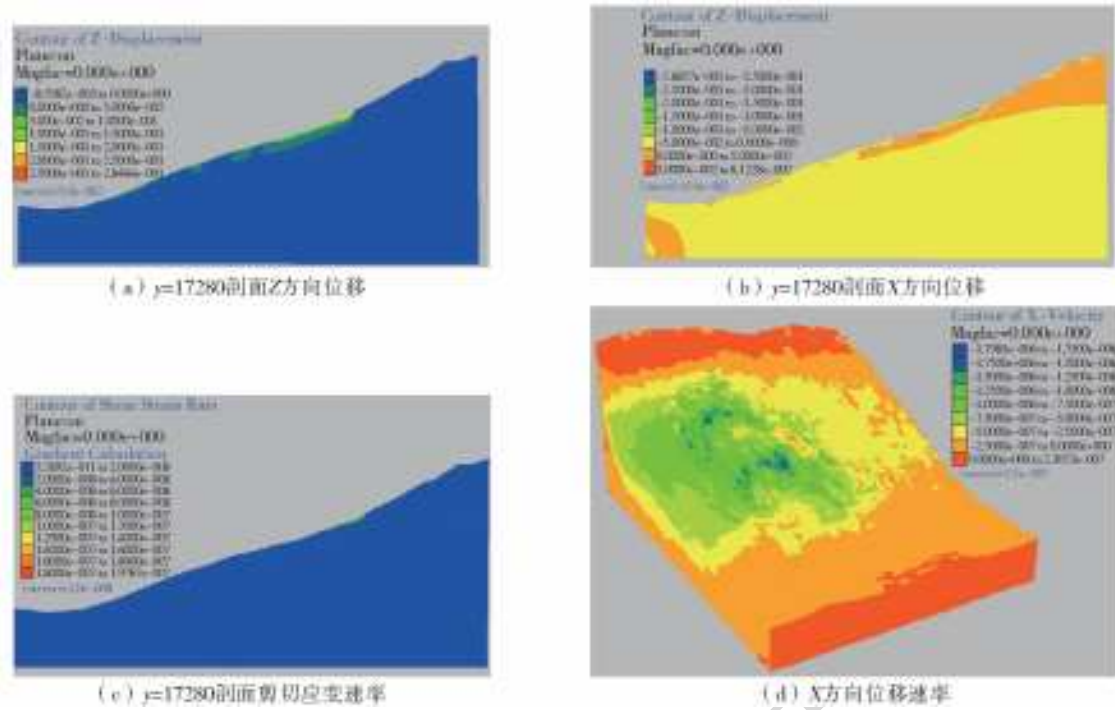


图 8 暴雨条件下数值模拟结果
 Fig. 8 The numerical simulations under rainstorm

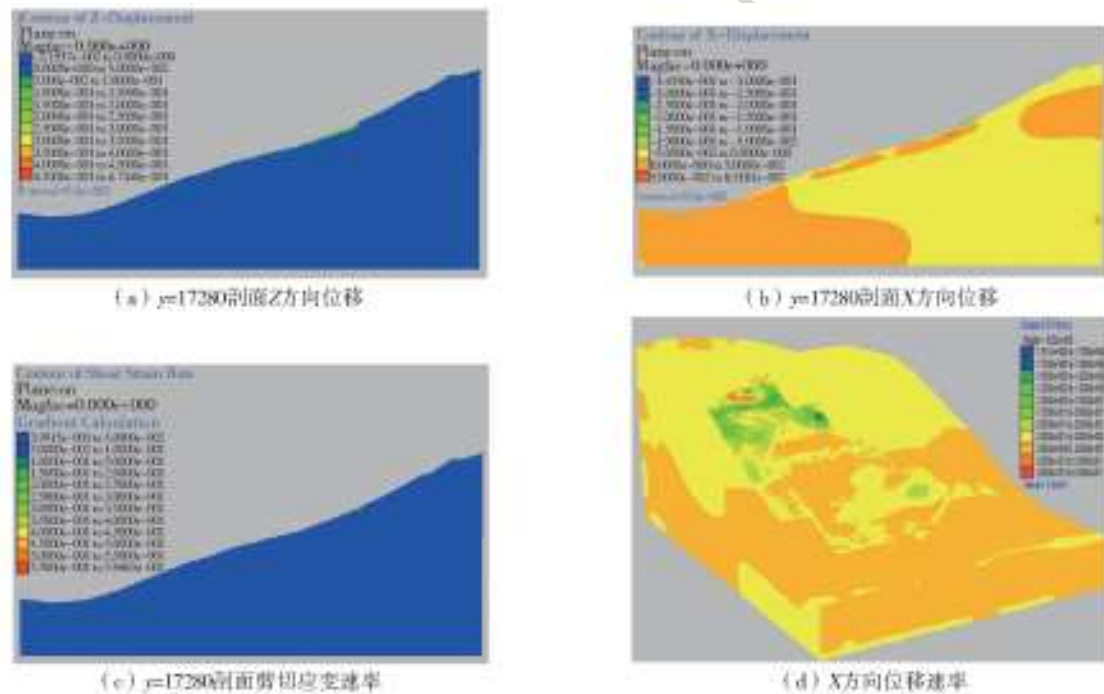


图 9 地震条件下数值模拟结果
 Fig. 9 The numerical simulations under earthquake

暴雨和强震同时作用下整体稳定性较差。雨水、雪水、生产生活用水的大量入渗,以及削坡建房、坡面加载对滑坡稳定性不利。

(3)建议加强滑坡监测,尽量减少地表水入渗,降低工程活动强度影响。

参考文献(References):

[1] 乔建平. 岷江上游崩塌滑坡分布规律研究[J]长江流域资源与环境,1994;6(4). (QIAO J P. Study on the dis-

tribution of landslides and landslides in the upper reaches of the Minjiang River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,1994;6(4). (in Chinese))
 [2] 蒋良文,王士天,刘汉超,等. 岷江上游干流岸坡主要表生地质灾害分布特征及成因浅析[J]. 地质灾害与环境保护,2002,19(1):13-17. (JIANG L W, WANG S T, LIU H C, et al. Distribution characteristics and causes of main epigenetic geological hazards on the main slope of upper reaches of Minjiang River[J]. Journal of Geo-

- logical Hazards and Environment Preservation, 2002, 19(1): 13-17. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/ j. issn. 1006-4362. 2002. 01. 004.
- [3] 常晓军, 丁俊, 魏伦武, 等. 岷江上游地质灾害发育分布规律初探[J]. 沉积与特提斯地质, 2007, 18(1): 103-108. (CHANG X J, DING J, WEI L W, et al. A study on the distribution of geological disasters in the upper reaches of the Minjiang River[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 18(1): 103-108. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/ j. issn. 1009-3850. 2007. 01. 019.
- [4] 张永双, 郭长宝, 姚鑫, 等. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. 地球学报, 2016, 37(3): 277-286. (ZHANG Y S, GUO C B, YAO X, et al. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2016, 37(3): 277-286. (in Chinese)) DOI: 10. 3975/ cagsb. 2016. 03. 03.
- [5] 郭长宝, 张永双, 王涛, 等. 南北活动构造带中段地质灾害与重大工程地质问题概论[J]. 地质力学学报, 2017, 23(5): 707-722. (GUO C B, ZHANG Y S, WANG T, et al. Discussion on geological hazards and major engineering geological problems in the middle part of the north-south active tectonic zone, China[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(5): 707-722. (in Chinese))
- [6] 杜宇本, 袁传保, 王彦东, 等. 成兰铁路主要地质灾害与地质选线[J]. 铁道工程学报, 2012(8): 11-15. (DU Y B, YUAN C B, WANG Y D, et al. Major geological hazard and geological alignment of Chengdu-Lanzhou railway journal of railway engineering society, 2012(8): 11-15. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/ j. issn. 1006-2106. 2012. 08. 003.
- [7] 刘海, 沈军辉, 魏伟, 等. 穿越古滑坡川主寺隧道施工地质问题及整治措施[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 540-546. (LIU H, SHEN J H, WEI W, et al. Geological problems and treatment measures highway tunnel through ancient landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 540-546. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/ j. issn. 1004-9665. 2012. 04. 009.
- [8] 宋章, 杜宇本, 陶玉敬, 等. 强震区成兰铁路某隧道大变形地质成因分析[J]. 铁道工程学报, 2016(10): 90-96. (SONG Z, DU Y B, TAO Y J, et al. Analysis of the geologic origin of large deformation of a tunnel of Chengdu-Lanzhou Railway in meizoseismal areas[J]. Journal of Railway Engineering, 2016, (10): 90-96. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/ j. issn. 1006-2106. 2016. 10. 019.
- [9] 任三绍, 郭长宝, 吴瑞安, 等. 成兰铁路松潘隧道入口红花屯古滑坡发育特征与稳定性分析[J]. 地质力学学报, 2017, 23(5): 754-765. (REN S S, GUO C B, WU R A, et al. Development characteristics and stability analysis of Hong Huatun ancient landslide at Songpan tunnel entrance of Chenglan railway[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(5): 754-765. (in Chinese))
- [10] 周荣军, 蒲晓虹, 何玉林, 等. 四川岷江断裂带北段的新活动、岷山断块的隆起及其与地震活动的关系[J]. 地震地质, 2000, 22(3): 285-294. (ZHOU R J, PU X H, HE Y L, et al. New activities, uplift of Minshan fault block and its relationship with seismic activity in the northern part of Minjiang fault zone in Sichuan [J]. Seismology and Geology, 2000, 22(3): 285-294. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/ j. issn. 0253-4967. 2000. 03. 009.
- [11] 唐荣昌, 文德华, 黄祖智, 等. 松潘-龙门山地区主要活动断裂带第四纪活动特征[J]. 中国地震, 1991, 7(3): 63-71. (TANG R C, WEN D H, HUANG Z Z, et al. Characteristics of quaternary activity in the main active fault zone in Songpan-Longmenshan area[J]. Earthquake Research in China, 1991, 7(3): 63-71. (in Chinese))
- [12] 包林海, 杜义, 郭启良, 等. 成兰铁路地应力测量与构造应力场分布规律研究[J]. 地质力学学报, 2017, (5): 734-742. (BAO L H, DU Y, GUO Q L, et al. In-situ stress measurement and research on tectonic stress field distribution law of Chengdu-Lanzhou railway[J]. Journal Of Geomechanics, 2017, (5): 734-742. (in Chinese))
- [13] 王运生, 张欣, 张金达, 等. 1733 年东川 Ms7.8 地震山地质灾害研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 138-144. (WANG Y S, ZHANG X, ZHANG J D, et al. Seismic mountainous geo-hazard investigation of Dongchuan Ms7.8 earthquake in 1733[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 138-144. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/ j. cnki. nsbdqk. 2017. 01. 023.
- [14] 谢封春. 遥感技术在岷江上游地区地质灾害调查中的应用[J]. 遥感信息, 1993(3): 27-31. (XIE F C. Application of RS technology in the investigation of land disasters in the upper reaches of Minjiang River[J]. Remote Sensing Information, 1993(3): 27-31. (in Chinese))
- [15] 田斌, 戴会超, 王世梅. 滑带土结构强度特征及其强度参数取值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(17): 2887-2892. (TIAN B, DAI H C, WANG S M. Strength characteristics of soil in slide zone and determination of its parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics And Engineering, 2004(17): 2887-2892. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/ j. issn: 1000-6915. 2004. 17. 007.
- [16] 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 Z Y, WANG S T, WANG L S. Engineering geology analysis principle [M]. Beijing: Geology Press, 1994. (in Chinese))
- [17] 陶志平, 周德培. 滑坡地段隧道变形机理的模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2003(3): 323-327. (TAO Z P, ZHOU D P. Model test on deformation mechanism of tunnel at landslide site[J]. Journal of Engineering Geology, 2003(3): 323-327. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/ j. issn. 1004-9665. 2003. 03. 018.