

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.06.21

岷江上游槽谷曲流段大型古滑坡成因与复活性分析 ——以松潘县元坝子古滑坡为例

魏昌利^{1,2}, 张 璘², 冯文凯¹, 杨志华³, 陈 亮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, 四川 成都 610059;
2. 四川省地质调查院, 四川 成都 610081; 3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 岷江上游靠近分水岭部位的槽谷曲流河段, 由于地壳抬升缓慢, 河谷宽、岸坡缓, 降雨量相对偏少, 通常被认为发生大型滑坡的可能性较小。但通过笔者近年来的调查发现, 在岷江上游红桥关至西宁关的槽谷曲流段两岸大型滑坡密集发育, 且大多具有地震滑坡的特征, 同时个别滑坡受后期江水冲刷、工程开挖等因素影响复活。文章选取其中较为典型的元坝子滑坡为例进行解剖, 元坝子滑坡位于岷江曲流凹岸, 长 780 m, 宽 480 m, 体积 $293 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。通过地质分析、测年鉴定和数值模拟, 认为该滑坡是历史地震引发的大型岩质古滑坡, 其发展经历了斜坡裂缝、地震滑坡、河流下切和前缘复活等阶段。稳定性计算结果显示, 目前滑坡整体天然工况下稳定性好, 极端暴雨工况下欠稳定, 受江水冲刷、降雨、融雪等因素影响, 出现局部变形复活。建议应加强滑坡变形监测, 避免整体滑动造成堵江、威胁成兰铁路安全。

关键词: 曲流; 古滑坡; 地震滑坡; 古滑坡复活; 岷江

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)06-0141-09

Formation mechanism and reactivation analyses of large ancient landslides in the meandering trough valley of the upper Minjiang River: A case study of the Yuanbazi ancient landslide in Songpan County

WEI Changli^{1,2}, ZHANG Ying², FENG Wenkai¹, YANG Zhihua³, CHEN Lang²

(1. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Sichuan Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China; 3. Institute of Geo-mechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: It is usually considered that there is less occurrences and rare possibility of large landslides in the meandering valley near the waterhead in the upper reaches of the Minjiang River, since this area has slow uplift of the earth's crust, wide valley, slow bank slope, and less rainfall. However, it is found by the author's survey in recent years that there are a lot of large landslides developed along the meandering river in the upper reaches of the Minjiang River from the Hongqiao Pass to the Xining Pass. Most of them are characterized by seismic landslides, and a few landslides have the signs of resurrection under the influence of river scouring and later engineering excavation. The Yuanbazi ancient landslide is selected as a typical example. This landslide developed on the concave bank of the Minjiang River, and is 780 m long and 480 m wide, and has a volume of $293 \times 10^4 \text{ m}^3$. Based on geological analysis, dating and numerical simulation, it is considered that this landslide is a typical large-scale rock ancient landslide in the area triggered by historical

收稿日期: 2018-04-01; 修订日期: 2018-06-10

基金项目: 中国地质调查局项目资助(DD20160271;1212011220132)

第一作者: 魏昌利(1971-),男,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

earthquakes, and it has experienced the evolution process of slope cracking, earthquake landslide, river downcutting and resurrection of the front. The stability calculation results show that the whole of landslide will be steady under the natural condition, and will be unsteady under the rainstorm conditions. Due to river erosion, rainfall, melting snow and other factors, local deformation and resurrection occurred. It is suggested that the monitoring of the landslide deformation should be strengthened to avoid blocking the river and threatening the safety of the Chengdu-Lanzhou Railway.

Keywords: meandering river; ancient landslide; landslide triggered by earthquake; landslide resurrection; Minjiang River

岷江上游位于青藏高原向四川盆地的过渡地带,山高谷深、褶皱断裂发育、岩体破碎、地震活动频繁,加之降水充沛、人类工程活动沿河且集中,滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害发育^[1~5]。近年来,岷江源区经济快速发展,旅游开发、城镇、公路、铁路建设等工程逐渐增多,地质灾害问题也日益凸出。

已有研究表明,在岷江干流及其主要支流的深切峡谷河段地质灾害尤其发育、危害严重^[6~8]。而在靠近分水岭部位的槽谷曲流河段,由于地壳抬升缓慢,河谷宽、岸坡缓,降雨量偏少,地质灾害相对较少,也多被认为发生大型滑坡的可能性小,没有引起特别关注。但通过笔者近年在该区域的调查研究,发现在岷江上游红桥关至西宁关的槽谷曲流段两岸大型滑坡却密集发育,从红桥关至西宁关 25.4 km 槽谷曲流河段共发育大型滑坡 14 处,平均线密度达 1.81 处/km,远高于其上游、下游河段。这些古滑坡多具有地震滑坡的特征。特别是近年来人类工程活动快速扩张,加之该区域进入地震频发期,以及气候变化、降雨量增多,导致了一些古滑坡复活。例如,国道 G213 川主寺隧道南出口滑坡是一个巨型古滑坡,施工导致隧道口滑坡体局部复活^[6];红花屯古滑坡因成兰铁路切坡及强降雨,导致 $120 \times 10^4 \text{ m}^3$ 古滑坡堆积体发生复活,花费巨资治理^[7];元坝子滑坡、俄寨滑坡等也都出现局部复活迹象。

已有研究认为,该区多期、密集发育的断裂,变质、破碎的岩体及斜坡结构是滑坡形成的基本条件;频发的地震,以及干旱、融雪、降雨交替的气候是主要诱发因素。研究这些古滑坡的特征、成因机理和演化过程,评价其稳定性和复活性,对于该地区地质灾害的早期识别和风险防范意义重大。因此,本文在分析岷江上游槽谷曲流段自然地理、地质环境的基础上,总结了大型古滑坡的特征及分布规律,研究其成因机理和复活性,并以元坝子滑坡为例,研究滑坡形成条件、成因机理与演化过程,对其稳定性及发展趋势做了评价。

1 岷江上游曲流段孕灾背景

1.1 自然地理条件

岷江上游槽谷曲流河段位于松潘县红桥关至西宁关之间的岷江干流上,全长 25.4 km。该河段靠近岷江源头,红桥关距岷江分水岭——弓嘎岭约 30 km,控制流域面积 $1\,420 \text{ km}^2$,流量 $3.2 \sim 20.3 \text{ m}^3/\text{s}$,平均 $5.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。曲流河段谷底海拔高程 $2\,710 \sim 2\,960 \text{ m}$,平均纵坡降 1%,谷宽 $600 \sim 700 \text{ m}$,谷坡 $18^\circ \sim 22^\circ$ 。两侧山脊海拔高程 $3\,400 \sim 4\,500 \text{ m}$,属圆顶中高山地貌。

研究区属高山寒温带气候,多年平均降水量 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。20 分钟最大降水量为 21.4 mm ,1 小时最大降水量 25.3 mm ,24 小时最大降水量 45.5 mm ;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 。

1.2 地质环境

研究区以岷江干流为界,西侧为岷江推覆构造带之大沟推覆体,由东向西平行发育 NNW 向延伸的高屯子向斜、大沟向斜和阿英平梁向斜,并被大沟断层切断。东侧以雪山断裂为界,北部为摩天岭地块,由南向北平行发育 NEE 向延伸、向北凸出的黑账房背斜、三塘水向斜和林坡背斜;南部为雪宝顶东西向构造带,发育 NWW 向延伸的郎求向斜、大寨乡背斜、麻子寨向斜和麻子寨断层。新构造运动主要表现为多阶段、不平衡的抬升、震荡和掀斜,岷江河谷较宽阔,发育不对称的多级阶地,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,附近有记录的较大地震主要有 638 年红花屯 5 级地震、1960 年漳腊 6.75 级地震、1953 年扎尕山 5.5 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。研究区地震动峰值加速度为 $0.20g$,地震动特征谱周期为

0.40 s。

研究区主要出露三叠系中统杂谷脑组(T_2z)、上统新都桥组(T_3xn)、侏倭组(T_3zh)深灰-灰黑色板岩、变质砂岩夹千枚岩、灰岩,北部出露少量石炭系、二叠系浅灰-深灰色灰岩夹泥质灰岩、白云岩、页岩。第四系主要沿江分布。第四系残坡积土(Q_4^{dl+el})主要为角砾土、碎石土,结构松散,厚度一般小于5 m,主要分布于缓坡部位;岷江河道、漫滩堆积为第四系全新统上磨组上段(Q_h^{s2})砂卵石层,厚度一般1~3 m;上磨组下段(Q_h^{s1})为一级阶地堆积,基座阶地,海拔高度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_p^f)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,顶部有黄土、黄土状土,岷江两岸均有分布,厚度可达50余米。

2 岷江上游曲流段大型古滑坡特征、成因及复活性分析

2.1 滑坡特征

野外调查发现,岷江上游红桥关至西宁关发育的14处大型古滑坡(图1、表1),其中岷江右岸6处、左岸8处。滑坡体方量 $100 \times 10^4 \sim 770 \times 10^4 \text{ m}^3$,总方量约 $4\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。这些滑坡都沿岷江断裂带分布,且均属岩质滑坡,岩性主要为三叠系中、上统较为破碎的板岩、变质砂岩、千枚岩等,岩体风化破碎带厚度一般为30~60 m,同时现场调查发现,这些滑坡大多从坡顶启动,滑动距离较远,从坡顶直达最低处的岷江河谷呈现“一滑到底”特征。从发生滑坡后残留的滑壁分析,大部分滑坡具有不连续的滑动面,且剪出口位置相对较高,一般位于斜坡中下部。

2.2 滑坡成因及复活性分析

这些滑坡分布于岷江两岸,左岸多属顺向坡,右岸多属逆向坡,滑坡发育于岷江断裂带的变质岩地层,岷江断裂破碎带宽度数十米至数百米,两侧岩层受强烈挤压破碎严重^[8],新构造活动形迹明显,地震活动强烈,有记载的中、强地震有7次,其中公元638年在红花屯附近发生5.7级地震,1960年在漳腊发生6.75级地震,1953年在西格堡岷江西支断裂上发生5.5级地震。因此分析认为强烈的地震是该地段大型滑坡集中的主要原因,通过现场调查也证实这些滑坡具有滑动距离较远、滑动面不连续、剪出口较高、一滑到底等典型的地震滑坡特征^[14]。经地质分析、测年鉴定,这些滑坡是更新世以来形成的古滑坡。现场定性判定目

前滑坡整体稳定性均较好,但其中10处滑坡因江水冲刷、工程开挖局部不稳定,在强震或持续、强降雨条件下,滑坡堆积体可能局部复活。

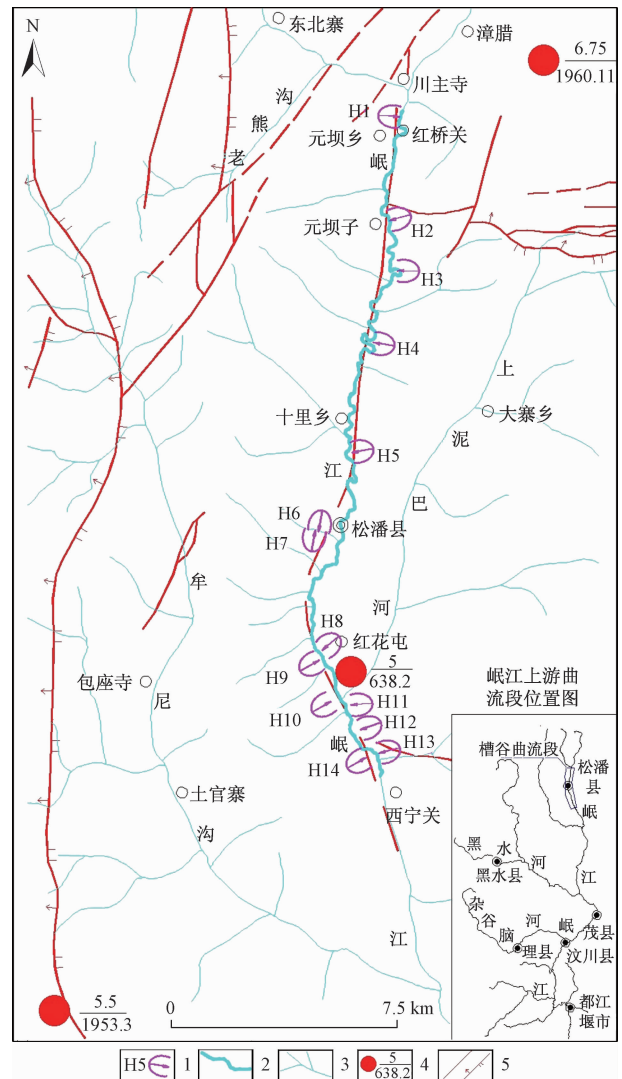


图1 岷江上游槽谷曲流段大型古滑坡分布图

Fig.1 Distribution of large ancient landslides in the meandering trough valley in the upper reaches of the Minjiang river

1—大型滑坡及编号;2—曲流河段;3—河流;4—地震震中;5—断层

3 元坝子古滑坡成因机理与演化过程

松潘县十里乡元坝子滑坡为区内典型滑坡,滑坡位于岷江上游槽谷曲流段岷江干流左岸,处于岷江大拐弯的凹岸(图2)。斜坡结构为逆向坡,滑坡左右侧各发育一条冲沟,滑体岩性为板岩和变质砂岩,岩体破碎严重,风化破碎带厚度达几十米厚,且滑坡区紧邻岷江断裂和雪宝顶断裂两大区域性断裂。这些地质背景代表了该区段地震滑坡的普遍特征,为地震条件下发

高海拔 3 238 m, 相对高差 350 m。滑坡右侧以山脊为界, 左侧以沟谷为界。滑坡纵长约 780 m, 上宽下窄, 中后部最宽约 480 m, 前缘宽约 250 m。滑坡区面积

$26.2 \times 10^4 \text{ m}^2$, 其中堆积体面积 $18.9 \times 10^4 \text{ m}^2$, 滑体平均厚度 15.5 m, 体积 $293 \times 10^4 \text{ m}^3$, 规模大型, 滑坡主滑动方向 249° (图 3)。

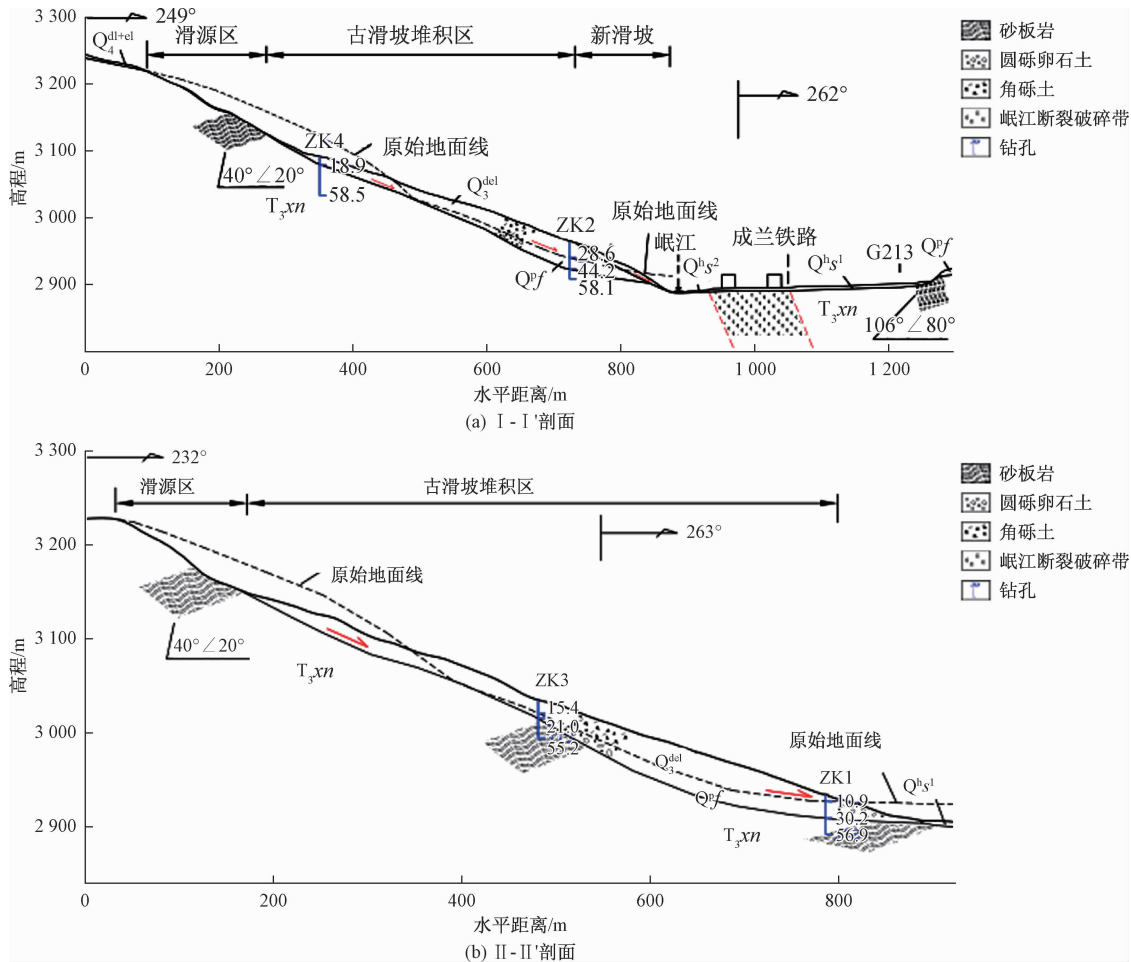


图 3 元坝子滑坡工程地质剖面图
Fig. 3 Engineering geological profile of the Yuanbazi landslide

滑坡区平均地形坡度约 23° , 滑源区较陡, 一般 $25^\circ \sim 35^\circ$, 堆积区较缓, 一般 $20^\circ \sim 25^\circ$ 。滑坡体厚度一般 10 ~ 25 m, 中部最厚处近 30 m。滑体物质主要为含角砾粉质黏土、碎石角砾土; 含角砾粉质粉土, 灰色、灰褐色, 可塑状, 角砾含量约占 10% ~ 40%, 粒径一般 5 ~ 15 mm, 成分以砂岩、板岩为主, 该层主要分布于地表, 厚度一般 5 ~ 10 m, 局部夹于下部角砾土中; 碎石角砾土, 灰、深灰色, 中密-密实, 粒径一般 2 ~ 15 cm, 角砾含量约占 40% ~ 50%, 碎石含量约占 30% ~ 40%, 少量砂、粉质黏土充填, 成分为砂岩、板岩, 强风化状, 该层分布于滑动面以上, 厚度一般 10 ~ 25 m。滑带土主要为深灰色粉质黏土, 可塑状, 含少量角砾、腐殖质、贝壳等, 厚度 0.1 ~ 0.5 m。据钻孔揭露, 滑床上段为三叠系上统新都桥组砂板岩, 下段为第四系上更新统

飞机坝组圆砾卵石土。

3.3 成因机理分析

根据滑坡地面、滑面形态和堆积物现状复原滑坡原始地形 (图 3) 可以看出, 滑坡原始地面线呈阶梯型。上部滑源区接近分水岭, 地形坡度较缓; 中部剪出口段地形坡度较陡, 约 $35^\circ \sim 45^\circ$, 提供了良好的临空条件; 下部滑覆堆积区二、三级阶地地形坡度相对较缓。

滑坡区紧邻岷江断裂和雪宝顶断裂两大区域性断裂, 且地震活动频繁, 三叠系上统新都桥组板岩、砂岩破碎严重, 风化破碎带发育深度达数十米, 为滑坡发生提供了物质基础。该基岩地层产状 $40^\circ \angle 20^\circ$, 属倾向坡内的逆向斜坡, 仅在降雨条件下很难形成滑坡。

从滑动面形态分析, 从上至下呈陡—缓—陡的变化, 第一个缓平台具地震抛射滑面特征。据钻孔揭露,

中、前部滑坡体覆盖在二、三级阶地堆积的圆砾、卵石土上,而不是被向前推挤,仍呈现出地震滑覆的特征。从滑源区和堆积物推断,滑坡滑动距离 150 ~ 350 m,最远达 400 m 以上,平均休止角 21°。

滑坡堆积体物质细碎、结构较致密,表现出充分解体及后期固结的特点。钻孔揭露中前部滑动带土(滑床为上更新世圆砾、卵石土)中含有树木残体,取样后在美国 BETA 实验室进行¹⁴C 测年,测年结果为 $11\,250 \pm 40$ a,证明该滑坡为晚更新世末形成的古滑坡。

3.4 滑坡触发因素模拟分析

根据反演推测的滑前原始地形,采用 FLAC^{3D} 软件模拟暴雨和地震工况下的变形特征,分析滑坡触发因素。滑动前为基岩斜坡,滑体为风化破碎砂岩、板岩,根据调查、反演和地区经验确定模拟参数,风化破碎砂岩、板岩参考碎石土取值。

结果显示,暴雨工况下,坡体处于完全饱水状态,总位移从坡体内部 2.0 mm 至坡表达到最大 1.7 cm (图 4),水平位移从坡体内 2.0 mm 至坡表达到最大 1.3 cm,垂向位移从坡体内 2.0 mm 至坡表最大 1.2 cm。坡体中部存在应力集中,剪应变主要集中在坡体中上部,但剪应变值较小,剪应变增量集中在坡体中上部,但未贯通(图 5)。

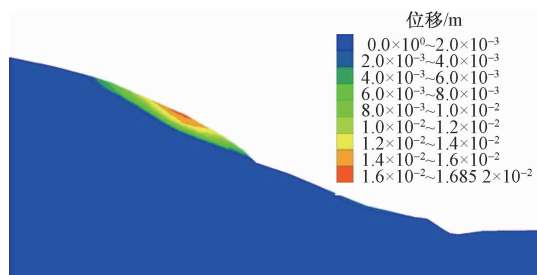


图 4 暴雨状态下总位移场特征

Fig. 4 Characteristics of the total displacement field under heavy rain

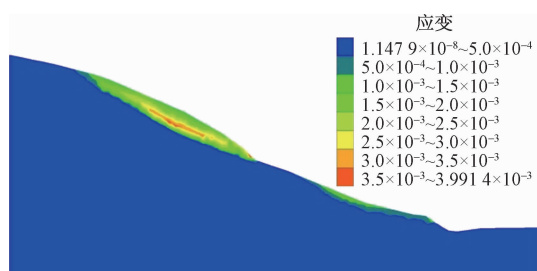


图 5 暴雨状态下剪应变增量特征

Fig. 5 Characteristics of the shear strain increment under heavy rain

地震工况下,地震加速度取 0.2g,坡体发生变形破坏,总位移从坡体内部 5.0 cm 至坡表达到最大约 36.1 cm (图 6),水平位移从坡体内 2.0 cm 至坡表达到最大 8.6 cm,垂向位移从坡体内 5.0 mm 至坡表达到最大 35.5 cm。坡体中部出现较明显的剪应变集中带,剪应变增量集中在坡体中上部,且发生贯通(图 7),斜坡稳定性变差。

对比显示,原始斜坡对地震的敏感性明显强于暴雨,因此推测元坝子滑坡是由地震引发的古滑坡。

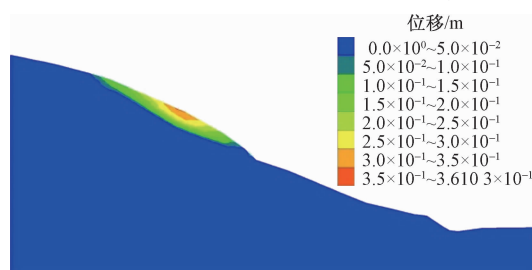


图 6 地震状态下总位移场特征

Fig. 6 Characteristics of the total displacement field under earthquake

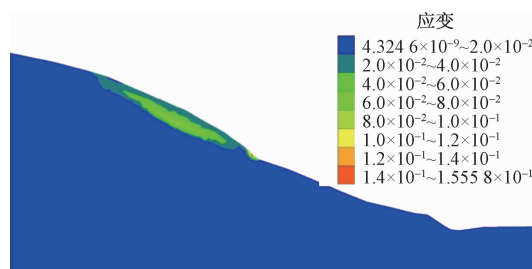


图 7 地震状态下剪应变增量特征

Fig. 7 Characteristics of the shear strain increment under earthquake

3.5 滑坡演化过程分析

根据现场调查分析认为,元坝子滑坡发生至今大致经历了四个阶段:(1)在原始地形下,晚更新世河床形成,受临空面影响后缘顶部产生拉张裂缝(图 8a);(2)受历史地震诱发,发生地震滑坡,滑动距离 150 ~ 350 m,滑坡堆积物覆盖于下方河流阶地之上(图 8b);(3)滑坡发生后,后期河流下切,形成现代河床(图 8c);(4)由于滑坡位于岷江凹岸,坡脚长期受江水冲刷,滑坡前缘产生局部复活滑动(图 8d)。

4 元坝子滑坡现状稳定性分析

采用传递系数法对滑坡堆积体现状稳定性进行计算(图 9)。计算参数根据勘查测试、反演计算结合地区经验确定:滑体土天然重度 20 kN/m^3 ,饱和重度

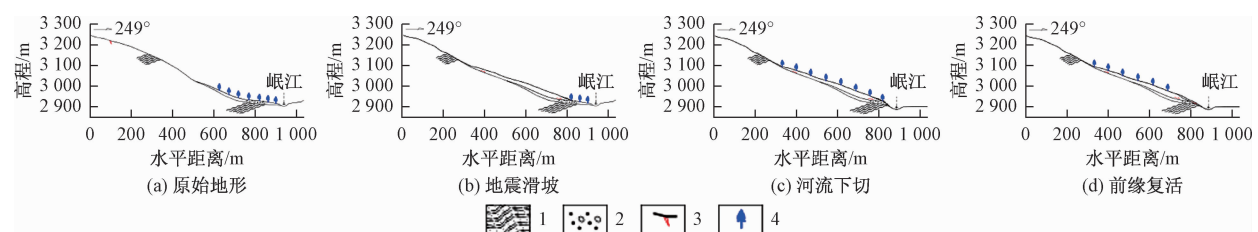


图8 滑坡演化过程示意图

Fig. 8 Schematic diagram showing the evolution process of the landslide

1—砂板岩;2—圆砾卵石土;3—滑坡裂缝;4—树木

21.5 kN/m³,滑带土内摩擦角 20°,内聚力 30 kPa,水平地震力参数 0.16,计算结果显示古滑坡堆积体整体在天然、地震工况下稳定性好,在极端暴雨工况下基本稳定—欠稳定,在暴雨和地震同时作用下滑坡不稳定(表2)。

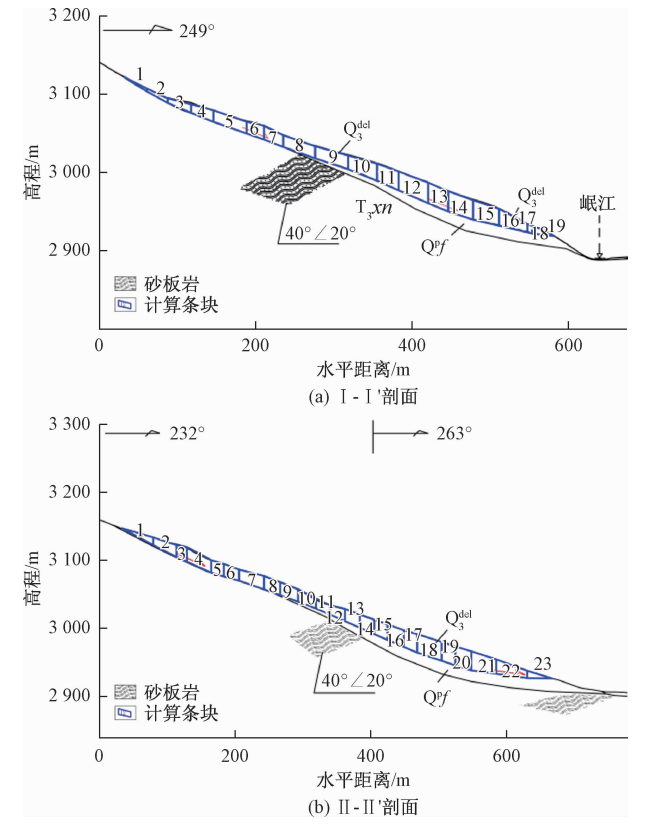


图9 滑坡稳定性计算剖面示意图

Fig. 9 Schematic profile showing the stability computation of the landslide

表2 滑坡稳定性计算结果表

Table 2 Calculation results of the landslide stability

计算剖面	稳定性系数			
	天然工况	地震工况	暴雨工况	暴雨+地震工况
I-I'	1.32	1.17	1.10	0.98
II-II'	1.33	1.18	1.02	0.91

目前,元坝子滑坡出现局部变形复活现象。在堆积体前缘左侧发育一处小型滑坡,平面形态呈半圆形,长 150 m,前缘最宽 145 m,体积 $8.7 \times 10^4 \text{ m}^3$;堆积体中部冲沟边缘发育一处浅表层小型滑坡,呈弧形,长 30 m,宽 60 m,体积 2300 m^3 ;在堆积体中上部发育一条与斜坡平行的裂缝,断续延伸约 15 m,宽 5~20 cm,最大可见深度 50 cm。江水冲刷是前缘复活的主要原因,降雨、融雪渗入增加岩土重度,降低裂隙面、滑带土抗剪强度,也是局部变形复活的原因。

5 结论

(1) 岷江上游槽谷曲流段因其特殊的自然、地质环境条件,从红桥关至西宁关 25.4 km 河道两侧共发育大型古滑坡 14 处,这些滑坡多具地震滑坡的特征,目前整体稳定性较好,但个别因江水冲刷、工程开挖等诱发因素而导致局部复活。

(2) 元坝子古滑坡位于岷江上游槽谷曲流段岷江大拐弯凹岸,纵长约 780 m,中部最宽处约 480 m,滑坡区面积 $26.2 \times 10^4 \text{ m}^2$,平均厚度 15.5 m,体积 $293 \times 10^4 \text{ m}^3$,通过测年及数值模拟分析确定该滑坡为晚更新世由历史地震诱发的大型岩质古滑坡。

(3) 分析认为,元坝子滑坡从发生至今经历了斜坡裂缝扩展、地震滑坡、河流下切和前缘复活等演化过程。同时,通过稳定性计算分析认为元坝子古滑坡堆积体在天然、地震工况下稳定性好,在极端暴雨工况下处于基本稳定—欠稳定状态,在暴雨和地震同时作用下可能失稳。

(4) 建议加强对包括元坝子滑坡在内的岷江上游槽谷曲流段大型滑坡稳定性的监控,避免产生滑坡堵江事件,确保区内成兰铁路以及当地居民生命财产安全。

参考文献:

[1] 梁云甫,李廷强,鲍志言,等. 岷江流域上游水文地

- 质工程地质综合地质调查报告[R]. 成都:四川省地矿局成都水文队,1989. [LIANG Y P, LI T Q, BAO Z Y, *et al.* Comprehensive geological survey of hydrogeological engineering geology in upper Minjiang river[R]. Chengdu: Chengdu Hydrographic Team, Sichuan Geological Bureau,1989. (in Chinese)]
- [2] 魏昌利,罗明,廖维,等. 岷江流域松潘县地质灾害详细调查成果报告[R]. 成都:四川省地质调查院,2011. [WEI C L, LUO M, LIAO W, *et al.* Report on the detailed investigation of geological disasters in Songpan County, Minjiang River [R]. Chengdu: Sichuan Geological Survey,2011. (in Chinese)]
- [3] 魏昌利,廖维,陈亮,等. 岷江流域地质灾害详细调查成果集成[R]. 成都:四川省地质调查院,2013. [WEI C L, LIAO W, CHEN L, *et al.* Integration of detailed investigation of geological hazards in Minjiang River [R]. Chengdu: Sichuan Geological Survey, 2013. (in Chinese)]
- [4] 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 preliminary exploration on the distribution law of geological hazards in upper Minjiang River [J]. Sedimentary Geology and Tethyan geology, 2007, 18(1):103-108. (in Chinese)]
- [5] 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.* Analysis on the distribution characteristics and cause of major geological hazards on the main bank slope in the upper reaches of the Minjiang River [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2002,19(1):13-17. (in Chinese)]
- [6] 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):365-370. [QIAO J P. Study on the landslides regularities of distribution in the upper reaches of Minjiang River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Valley, 1994,6(4): 365-370. (in Chinese)]
- [7] 蒋良文. 岷江上游活动断裂及主要地质灾害研究[D]. 成都:成都理工学院. 1999. [JIANG L W. Study on the active faults and the main geological hazards in the upper reaches of Minjiang River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1999. (in Chinese)]
- [8] 王兰生,杨立铮,李天斌,等. 四川岷江叠溪较场地震滑坡及环境保护[J]. 地质灾害与环境保护, 2000,11(3): 195-199. [WANG L S, YANG L C, LI T B, *et al.* Evolution mechanism of Jiaochang earthquake landslide on Ming River and its controlling [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(3): 195-199. (in Chinese)]
- [9] 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 measures of tunnels construction through ancient landslide Chuanzhu temple[J]. Journal of Engineering Geology, 2012,20(4):540-546. (in Chinese)]
- [10] 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 HongHuatun ancient landslide at Songpan tunnel entrance of Chenglan railway [J]. Journal of Geomechanics, 2017,23(5):754-765. (in Chinese)]
- [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):4-71. [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):4-71. (in Chinese)]
- [12] 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)]
- [13] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析[J]. 工程地质学报,2009,17(1):29-38. [YIN Y P. Analysis of landslide characteristics of Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009,17(1): 29-38. (in Chinese)]
- [14] Romeo R. Seismically induced landslide displacements: a predictive model[J]. Engineering Geology, Special Issue, 2000, 58(3/4):337-351.
- [15] Keefer D. V. Landslides caused by earthquakes[J]. Geological Society of America Bulletin, 1984, 95

- (4):406-421.
- [16] 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.* Study on the effect of active fault Geological hazards on the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(3): 277-286. (in Chinese)]
- [17] Zhang Y, Guo C, Lan H, *et al.* Reactivation mechanism of ancient giant landslides in the tectonically active zone: a case study in Southwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(2):1719-1729.
- [18] 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.* An Introduction to geological disasters and major engineering geology problems in the middle section of the North-South active tectonic belt [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(5): 707-722. (in Chinese)]
- [19] 钱海涛, 张力方, 修立伟, 等. 中国地震地质灾害的主要类型与分布特征[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 119-127. [QIAN H T, ZHANG L F, XIU L W, *et al.* The main types and distribution characteristics of geohazard by earthquake in China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 119-127. (in Chinese)]
- [20] 徐永强, 殷志强, 撒兰鹏. 鲁甸 8·03 地震区甘家寨特大型滑坡发育特征及演化过程研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 550-558. [XU Y Q, YIN Z Q, SA L P. The developing characteristics and evolution process of Ganjiazhai large scale landslide in Ludian 8·03 earthquake area of Northeast Yunnan [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(4): 550-558. (in Chinese)]
- [21] 刘云鹏, 邓辉, 黄润秋, 等. 反倾软硬互层岩体边坡地震响应的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(3): 30-37. [LIU Y P, DENG H, HUANG R Q, *et al.* Numerical simulation of seismic response of anti-dumping rock slope interbedded by hard and soft layers[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(3): 30-37. (in Chinese)]

责任编辑: 汪美华

(上接第 126 页)

- [7] 周家作, 谭龙, 韦昌富, 等. 土的冻结温度与过冷温度试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 777-785. [ZHOU J Z, TAN L, WEI C F, *et al.* Experimental research on freezing temperature and super-cooling temperature of soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 777-785. (in Chinese)]
- [8] 吴镇, 岳祖润, 王天亮. 哈齐客专细圆砾土冻结温度测试分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2013, 26(1): 37-40. [WU Z, YUE Z R, WANG T L. Test analysis on freezing temperature of fine round gravel soil in Harbin-Qiqihaer railway[J]. Journal of Shijiazhaung Tiedao University (Natural Science), 2013, 26(1): 37-40. (in Chinese)]
- [9] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. [GB/T50123—1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Plans Publishing House, 1999. (in Chinese)]
- [10] 贺俊, 杨平, 何文龙. 苏州地铁典型土层冻土力学特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 39(5): 72-76. [HE J, YANG P, HE W L. Mechanical behavior research of typical frozen soil clay in Suzhou subway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 39(5): 72-76. (in Chinese)]
- [11] 孙谷雨, 杨平, 刘贯荣. 南京地区冻结粉质粘土邓肯-张模型参数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 2990-2995. [SUN G Y, YANG P, LIU G R. Experimental test on constitutive relationship of Nanjing frozen silty clay considering Duncan-chang model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 2990-2995. (in Chinese)]
- [12] 徐学祖, 王佳澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 82-84. [XU X Z, WANG J C, ZHANG L X. Physics of frozen soil [M]. Beijing: Science Press, 2001: 82-84. (in Chinese)]

责任编辑: 汪美华