

引用格式:张蕴灵,傅宇浩,李为乐,王栋,潘佩珠. 2020年9月20日雅西高速姚河坝崩塌调查[J]. 山地学报,2021,39(3):450-460.

ZHANG Yunling, FU Yuhao, LI Weile, WANG Dong, PAN Peizhu. Preliminary investigation on the Yaoheba rockfall along the Ya'an-Xichang Highway on September 20, 2020, Sichuan Province, Southwest China [J]. Mountain Research, 2021, 39(3):450-460.

2020年9月20日雅西高速姚河坝崩塌调查

张蕴灵¹,傅宇浩¹,李为乐^{2*},王栋³,潘佩珠¹

(1. 中国公路工程咨询集团有限公司 空间信息应用与防灾减灾技术交通运输行业研发中心,北京 100097;

2. 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; 3. 中铁二院工程集团有限责任公司,成都 610031)

摘要:近年来中国高速公路建设不断向西部高山峡谷区延伸,地质小灾害导致公路大灾害事件呈现多发趋势。2020年9月20日,四川省石棉县境内雅西高速姚河坝大桥右侧山体发生了体积约 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的崩塌,砸塌姚河坝大桥右幅两孔桥梁,造成全线交通中断,这是该高速公路运营以来最严重的地质灾害事件。通过多时相历史卫星影像、失稳后航空影像和选线阶段勘察资料的综合分析,初步揭示了该崩塌的基本特征和成灾机制:(1)该崩塌是典型的拉裂式花岗岩崩塌,高陡的临空面、中部凹腔和上部悬臂梁式突出岩体为崩塌孕育提供了有利的地形条件;(2)强风化花岗岩岩性、构造挤压导致岩体破碎,为崩塌的形成提供了有利的地质条件;(3)顺坡向、反坡向和斜切坡向的3组节理裂隙为崩塌的孕育提供了有利的坡体结构条件;(4)高速公路切坡进一步加剧了崩塌的变形;(5)前期降雨是此次崩塌失稳的直接诱发因素。此次崩塌虽然在高速公路选线阶段已经识别,但还是对高速公路造成了危害,主要原因为对崩塌体失稳规模估算偏小且未考虑后期工程开挖切坡的不利影响。残留体和潜在变形区对雅西高速存在较大风险,建议对残留体进行清除并对潜在变形进行工程治理和专业监测。

关键词:雅西高速;崩塌;失稳机制;切坡

中图分类号: O319.56

文献标志码: C

2020年9月20日12时,四川省石棉县境内雅西高速(雅安—西昌)成都至西昌方向K2084处姚河坝大桥右侧山体($102^{\circ}20'26.73''$, $29^{\circ}5'11.48''$)发生了体积约 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的崩塌灾害,导致姚河坝大桥右幅两孔桥梁垮塌,国道G108被掩埋(图1)。这是一次典型的小规模地质灾害导致的桥梁损毁重大灾害。

在新构造运动和地震活跃的高山峡谷地区,线

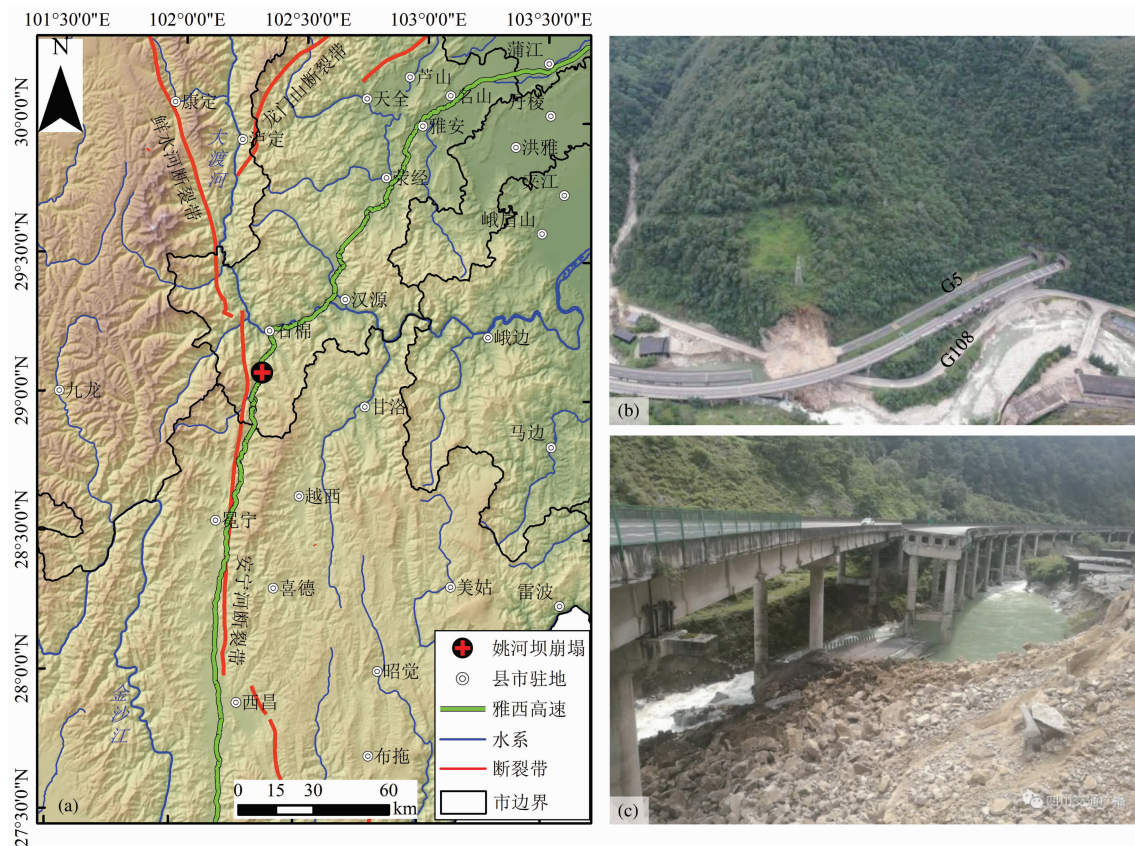
路工程两侧高陡斜坡通常会发育大量风化卸荷裂隙,切割岩体形成结构面,多处于欠稳定状态,在强震、暴雨等因素诱发下,易突发高位崩塌灾害^[1-7]。这类崩塌灾害一般位于高位,隐蔽性强,在选线阶段难于早期发现,工程开挖扰动很容易诱发。高等级公路、铁路等交通工程在选线阶段均做过详细的地质勘察工作,对查明的大规模滑坡灾害一般都会选择绕避或工程治理方案,但对小规模崩塌灾害的早

收稿日期(Received date):2020-10-09;改回日期(Accepted date):2021-06-11

基金项目(Foundation item):空间信息应用与防灾减灾技术交通运输行业研发中心开放基金(KF-2020-001);国家自然科学基金(41941019,41521002);四川省地震科技创新团队专项(201901)。[Open Fund of Transportation Industry R & D Center for Spatial Information Application and Disaster Prevention and Mitigation Technology (KF-2020-001); National Natural Science Foundation of China (41941019,41521002); Special Project of Sichuan Earthquake Science and Technology Innovation Team (201901)]

作者简介(Biography):张蕴灵(1984-),女,浙江绍兴人,高级工程师,主要研究方向:卫星遥感技术在交通运输行业中的应用。[ZHANG Yunling (1984-), female, born in Shaoxing, Zhejiang province, senior engineer, research on application of satellite remote sensing technology in transportation] E-mail:15901407461@163.com

* **通讯作者**(Corresponding author):李为乐(1982-),男,安徽太湖人,教授,主要研究方向:地质灾害早期识别与预测评价。[LI Weile (1982-), male, born in Taihu, Anhui province, Ph. D., professor, research on landslide early detection and prediction] E-mail: whylw101@163.com



注:图(b)照片由四川省公路规划勘察设计研究院有限公司提供;图(c)由四川交通广播网提供。

图 1 姚河坝崩塌位置图和现场照片:(a)研究区位置图;(b)崩塌全貌;(c)崩塌堆积区

Fig. 1 Location map and photos of the Yaoheba rockfall: (a) location; (b) a planar view of the rockfall (referred to Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd.); (c) accumulation area of the rockfall (referred to Sichuan Traffic Broadcasting)

期识别和风险防范一直是工程难题^[8]。小规模崩塌造成的重大工程灾害事件近年来时有发生。例如:2004 年 12 月 11 日,浙江省甬台温高速公路乐清市柳市镇荷岙村南侧山体发生 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高位崩塌,掩埋了整个高速公路^[1];2019 年 8 月 14 日,成昆铁路甘洛县境内埃岱 2 号和 3 号隧道之间发生 $5.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高位崩塌,导致 17 人死亡,成昆铁路中断数月之久^[9]。

雅西高速姚河坝危岩体在公路选线阶段已被识别出来,并对其潜在风险进行了评价^[10]。然而,2020 年 9 月 20 日姚河坝发生了小规模崩塌,却对雅西高速造成了通车以来最严重的灾害。本文通过收集多时相历史遥感影像、选线阶段勘察资料和失稳后无人机影像,对该次崩塌灾害的发生原因和成灾机制进行研究,以期为山区高速公路未来类似崩塌灾害早期识别和提前防范提供参考。

1 研究区概况

雅西高速公路是连接雅安市和西昌市的高速公路,全长 240 km,是北京至昆明高速公路(京昆高速 G5)在四川境内的重要组成部分,于 2007 年 3 月开始动工,2012 年 4 月全线通车^[11]。雅西高速公路由四川盆地边缘向横断山脉爬升,地形起伏大,地质条件复杂,地质灾害频发,安全营运难度大,被公认为国内乃至全世界自然环境最恶劣、工程难度最大的山区高速公路之一^[12]。雅西高速公路通车以来,已发生了 10 余起因地质灾害导致交通中断的灾害事件(表 1)。2018 年以来,雅西高速地质灾害呈现出发生频率显著增高,每年都会因地质灾害导致交通中断。2020 年 8 月以来雅西高速已累计发生地质灾害断道事件 6 次。

表 1 雅西高速公路地质灾害事件
Tab. 1 Landslide events on the Ya'an – Xicang Highway

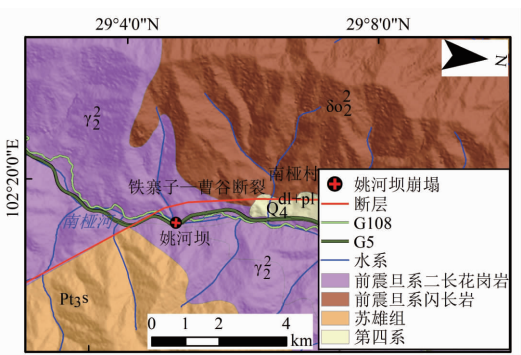
序号	发生时间	地点	灾害类型	灾害规模/ m ³
1	2011 - 07 - 03	雨城区八步石大桥内侧	滑坡	1 × 10 ⁴
2	2012 - 07 - 03	K2045	滑坡	2000
3	2012 - 07 - 22	K1959 ~ K1969	滑坡	/
4	2012 - 09 - 20	K2179 + 400	滑坡	/
5	2014 - 08 - 10	K2091 + 600	滑坡	/
6	2018 - 03 - 03	K1989 + 400 瓦厂坪大桥	滑坡	/
7	2018 - 07 - 29	K2058 和 K2068	滑坡	/
8	2019 - 08 - 05	K1958	滑坡	/
9	2020 - 08 - 12	K2090 + 700	泥石流	2000
		K2093 + 700	滑坡	5000
10	2020 - 08 - 16	菩萨岗段	滑坡	/
11	2020 - 08 - 17	K2093 + 700	滑坡、泥石流	/
12	2020 - 08 - 18	雅安南站匝道	滑坡	/
13	2020 - 09 - 14	K2044 + 800	崩塌	/
14	2020 - 09 - 20	K2084	崩塌	1 × 10 ⁴

姚河坝崩塌位于石棉县栗子坪乡南桠村附近,南桠河左岸,为侵蚀构造高中山地貌,属亚热带湿润气候,具有雨量丰沛,雨热同季,干湿分明的特点,年降水量平均 778.3 mm,主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 75%^[10]。研究区位于安宁河地震带和鲜水河地震带交汇部位(图 1),地震活动频繁,地震基

本烈度达Ⅷ度,安宁河断裂分支断裂铁寨子—曹谷断裂从研究区通过(图 2、图 3)。

2 崩塌基本特征

通过分析崩塌区多时相卫星影像和灾后无人机



注:γ₂² 为早震旦世花岗岩;δo₂² 为早震旦系石英闪长岩;Pt₃s 为震旦系上统苏雄组变质石英砂岩、粉砂岩与板岩互层;Q₄^{dl+pl} 为第四系全新统坡洪积层

图 2 研究区地质背景图

Fig. 2 Geology of the study area



图 3 研究区地貌卫星影像图

Fig. 3 Geomorphology of the study area shown by a satellite image

航拍影像,得到了姚河坝崩塌的形态特征。姚河坝崩塌可分为潜在变形区、残留体、崩塌源区和堆积区4个子区(图4a)。崩塌源区长约27 m,宽约55 m,面积约1360 m²,平均厚度约7.0 m,体积约1×10⁴ m³。崩塌堆积区长约45 m,宽约65 m,面积约2500 m²,平均堆积厚度约4.0 m。崩塌源区后缘高压铁塔下方可见一条明显的拉裂缝(图4b中粉色线所示),拉裂缝下方岩体具有再次失稳的可能性,可判断是本次崩塌的残留体。残留体长约14 m,宽约58 m,面积约900 m²,体积约5000 m³。崩塌源区后缘80 m处同样可见一条下错裂缝(图4c),下错裂缝下方坡面相对平缓,其上植被主要为灌木丛,与周边坡体发育的茂密林木形成鲜明对比。本次崩塌失稳,改变了残留体的力学状态,因此具有进一步变形失稳的可能,为潜在变形区。潜在变形区长约80 m,宽约60 m,面积约4700 m²,体积约4×10⁴ m³。

对比2007年12月6日 Quickbird 卫星影像(图5a)和2013年2月4日 Worldview-2 卫星影像(图

5b),可见雅西高速修建时对崩塌体前缘进行了较大规模切坡,并对切坡坡体下部做了格构梁支护。2013年2月4日 Worldview-2 卫星影像表明,潜在变形区植被与周围斜坡存在显著差异,崩塌潜在变形区应该发生过一次浅层滑坡。2019年10月29日高景1号卫星影像(图5c)显示此时崩塌源区色调呈浅黄色调,纹理粗糙,推测崩塌源区坡表已出现较明显的变形。

3 崩塌成因分析

姚河坝崩塌的发生原因主要包括地形条件、地质条件和坡体结构等内在控制性因素和人类工程活动和降雨等外在诱发因素。

3.1 有利的地形条件

姚河坝崩塌体发育于南桧河河谷段左岸一突出的山脊前部,距离河岸约100 m,坡脚高程约为1310 m,后缘高程约1335 m,前缘临空面高度约为25 m,斜坡倾向正东,平均坡度约70°,临空面中部



图4 崩塌分区图:(a)崩塌全貌;(b)残留体范围;(c)潜在变形区

Fig. 4 Zonation of the Yaoheba rockfall: (a) a planar view of the rockfall; (b) the residual rockmass; (c) the potential deformation area

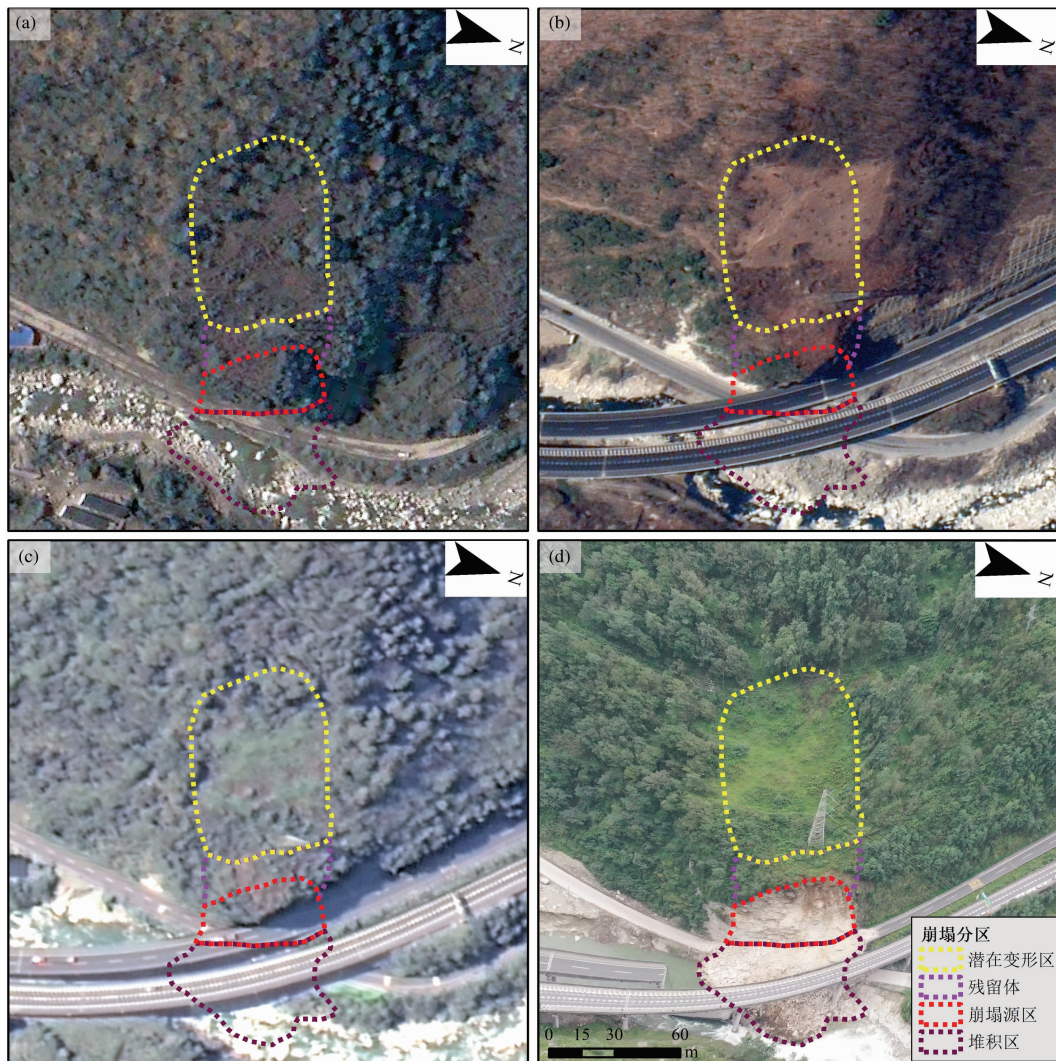


图 5 姚河坝崩塌多时相卫星影像：

(a) 2007 年 12 月 6 日 Quickbird 卫星影像；(b) 2013 年 2 月 4 日 Worldview-2 卫星影像；
(c) 2019 年 10 月 29 日高景 1 号卫星影像；(d) 2020 年 9 月 20 日无人机航拍影像

Fig. 5 Multi-temporal satellite images of the Yaoheba rockfall;

(a) Quickbird image taken on December 6, 2007; (b) Worldview-2 image taken on February 4, 2013;
(c) Gaojing-1 image taken on October 29, 2019; (d) aerial image taken on September 20, 2020

发育凹腔,上部岩体呈悬臂梁形式突出(图 6),为崩塌的孕育和变形失稳提供了非常有利的地形条件。

3.2 有利的地质条件

崩塌区地层岩性为早震旦系层状花岗岩(γ_2^2),岩层呈反倾向构造(图 6),主要由中风化和强风化花岗岩组成^[10]。安宁河断裂分支断裂铁寨子—曹谷断裂从崩塌后方约 500 m 处通过(图 3),受断裂构造错动挤压作用岩体破碎(图 7),为崩塌的孕育和变形失稳提供了非常有利的地质条件。

3.3 有利的坡体结构条件

崩塌区岩体主要发育 3 组结构面(图 8,图 9)。结构面 1(J1)为倾向东的裂隙,产状 $90^\circ \angle 75 \sim 80^\circ$,与坡向大体一致,表现为卸荷拉张,该组裂隙倾角大,发育规模大,对崩塌体的形成和发育起控制作用^[10]。结构面 2(J2)为一组倾向北西的裂隙,产状 $320^\circ \angle 46^\circ$,为反倾坡内的裂隙,表现为卸荷断裂,裂隙倾角较缓。结构面 3(J3)为一组倾向南西的裂隙,产状 $232^\circ \angle 45^\circ$,为斜切坡向裂隙,裂隙倾角较缓。崩塌所处岩体受 3 组结构面切割,非常破碎,加之前缘高陡的临空面,为崩塌体的形成和大规模失

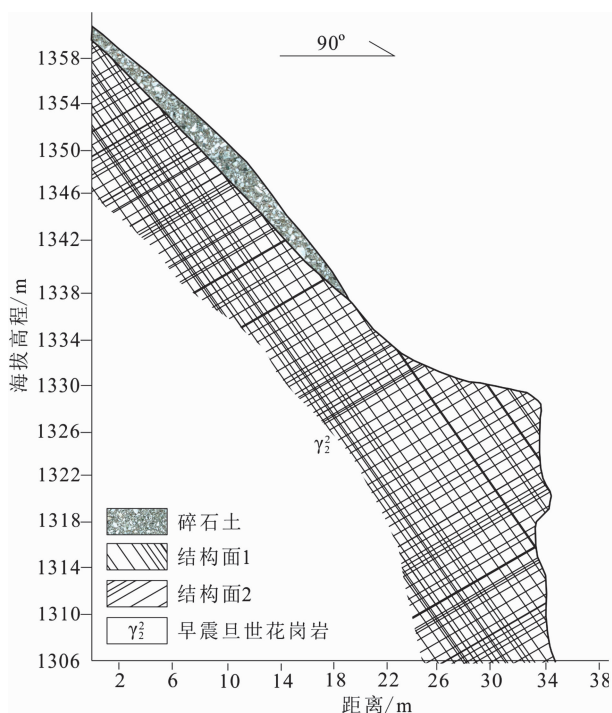


图 6 崩塌失稳前纵剖面图

Fig. 6 Longitudinal section of the Yaoheba rockfall before failure



图 7 崩塌失稳后无人机影像显示花岗岩体破碎

Fig. 7 Fragile granite rock in an aerial image

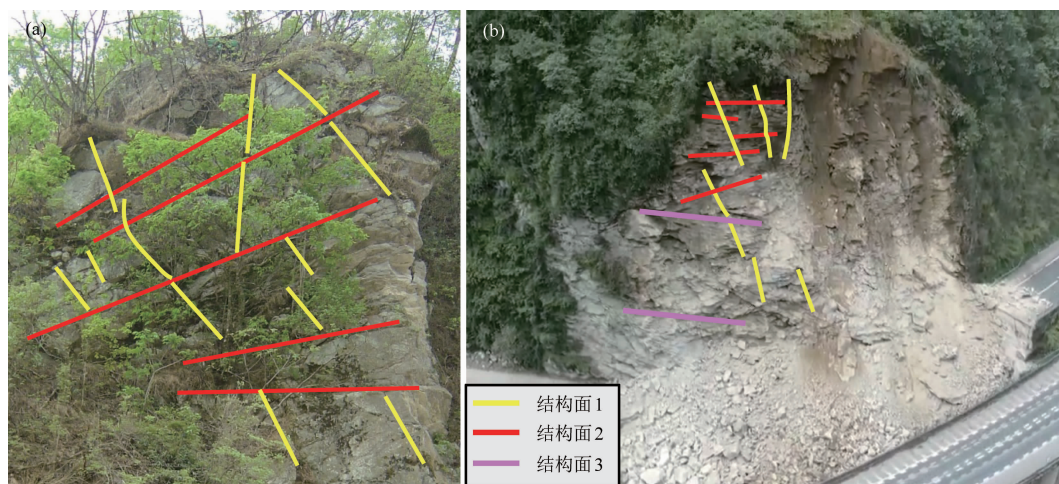


图 8 崩塌体结构面主要结构面发育情况: (a) 2011 年现场照片; (b) 2020 年 9 月 20 日航空影像

Fig. 8 Main structural planes of the Yaoheba rockfall: (a) a field photo taken in 2011; (b) an aerial photo taken on September 20, 2020

稳提供了非常有利的坡体结构条件。

3.4 人类工程活动影响

2013 年卫星影像显示雅西高速修建时对崩塌体前缘进行了大规模切坡(图 5b),破坏了坡体原有力学平衡,加剧了坡体变形。

3.5 前期降雨触发作用

据中国气象数据网提供的石棉县气象站(距离姚河坝崩塌约 15 km)数据显示,2020 年 9 月 1 日—20 日该区每天均有降雨,累积降雨量达 138.6 mm。

强降雨产生的地表水沿岩体节理裂隙下渗,在花岗岩结构面富集,浸泡软化岩体,使其岩石力学强度降低,是此次崩塌失稳的直接触发因素。

3.6 崩塌失稳机制

姚河坝崩塌属于典型的拉裂式崩塌^[13],其变形失稳可分为初始阶段、时效变形阶段、累进变形破坏阶段和破坏失稳阶段(图 10)。在初始阶段,坚硬的花岗岩体在构造抬升和河流下切共同作用下,形成陡峭的斜坡,同时岩体在断层错动挤压作用下形成

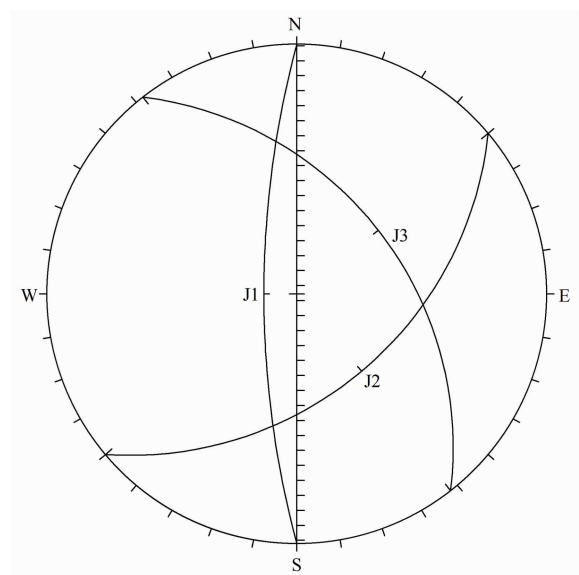


图 9 结构面赤平投影图

Fig. 9 Stereographic projection of the structural planes

表 2 2020 年 9 月 1 日至 20 日石棉县气象站日
降水量和累积降水量

Tab. 2 Daily and cumulative precipitation in Shimian
County from September 1 to 20, 2020

日期	日降水量/mm	累积降水量/mm
2020/9/1	0.4	0.4
2020/9/2	4.9	5.4
2020/9/3	2.2	7.6
2020/9/4	0.3	7.9
2020/9/5	17.8	25.7
2020/9/6	2.5	28.2
2020/9/7	0.3	28.5
2020/9/8	7.7	36.2
2020/9/9	10.0	46.2
2020/9/10	5.7	51.9
2020/9/11	16.4	68.3
2020/9/12	18.4	86.6
2020/9/13	11.2	97.8
2020/9/14	5.2	103.0
2020/9/15	5.6	108.5
2020/9/16	18.8	127.4
2020/9/17	9.5	136.9
2020/9/18	1.2	138.1
2020/9/19	0.1	138.2
2020/9/20	0.5	138.6

注:数据下载自中国气象数据网 <http://data.cma.cn/>

反倾坡内的节理裂隙,在差异风化和重力卸荷作用下形成顺坡向表层卸荷节理裂隙(图 10a);在时效变形阶段,在内外地质营力作用下顺坡向卸荷拉张裂隙生长,在坡顶位置产生垂直拉张裂缝(图 10b);在累进变形破坏阶段,拉张裂隙持续发育,在三组裂隙的切割贯通,表层岩体剥蚀坠落,坡体中下部发生小规模塌落,形成挑梁结构的临空悬岩,岩体顶部裂缝在剪切力与弯矩作用下持续向纵深扩张(图 10c);在破坏失稳阶段,拉张裂缝交错发展并逐步贯通,在降雨入渗孔隙水压力楔力作用下,结构面抗剪强度完全丧失,发生整体重力失稳(图 10d)。

4 讨论

姚河坝崩塌在雅西高速前期选线勘察阶段已经被界定为危岩,并进行了工程模拟分析,出具了研究报告:非连续变形数值模拟程序(Discontinuous Deformation Analysis, DDA)模拟结果显示,在自然状态下崩塌整体稳定,顶部凸起部分岩块在重力作用下预计会有少量塌落,估计失稳规模约 200 m³;考虑在地震工况下,崩塌规模会增加,桥墩可能受危岩块体冲击发生中部剪断,桥面向坡内倾斜坍塌^[10]。

调查数据表明,2020 年 9 月 20 日姚河坝崩塌的规模接近于地震工况下的模拟结果,明显大于自然状态下的失稳规模。因此,姚河坝崩塌事件的经验教训是,崩塌稳定性计算时充分考虑工程建设切坡对斜坡稳定性的影响。

雅西高速沿线植被茂密,地形复杂,小型潜在地质灾害隐患点多面广,采用常规地面排查、光学遥感解译和合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)等技术手段,很难做到全面早期识别^[14-17],应在技术手段上提高潜在地质灾害的识别精度。建议利用机载激光雷达测量技术(Light Laser Detection and Ranging, LiDAR)获取全线一级分水岭范围的高密度点云数据(20 点/m²以上)^[18-19],并利用植被滤除技术滤除植被得到高精度数字地面模型(Digital Terrain Model, DTM),在此基础上,对潜在崩塌和滑坡进行详细编目解译和风险评价。对识别出来的高风险隐患点安

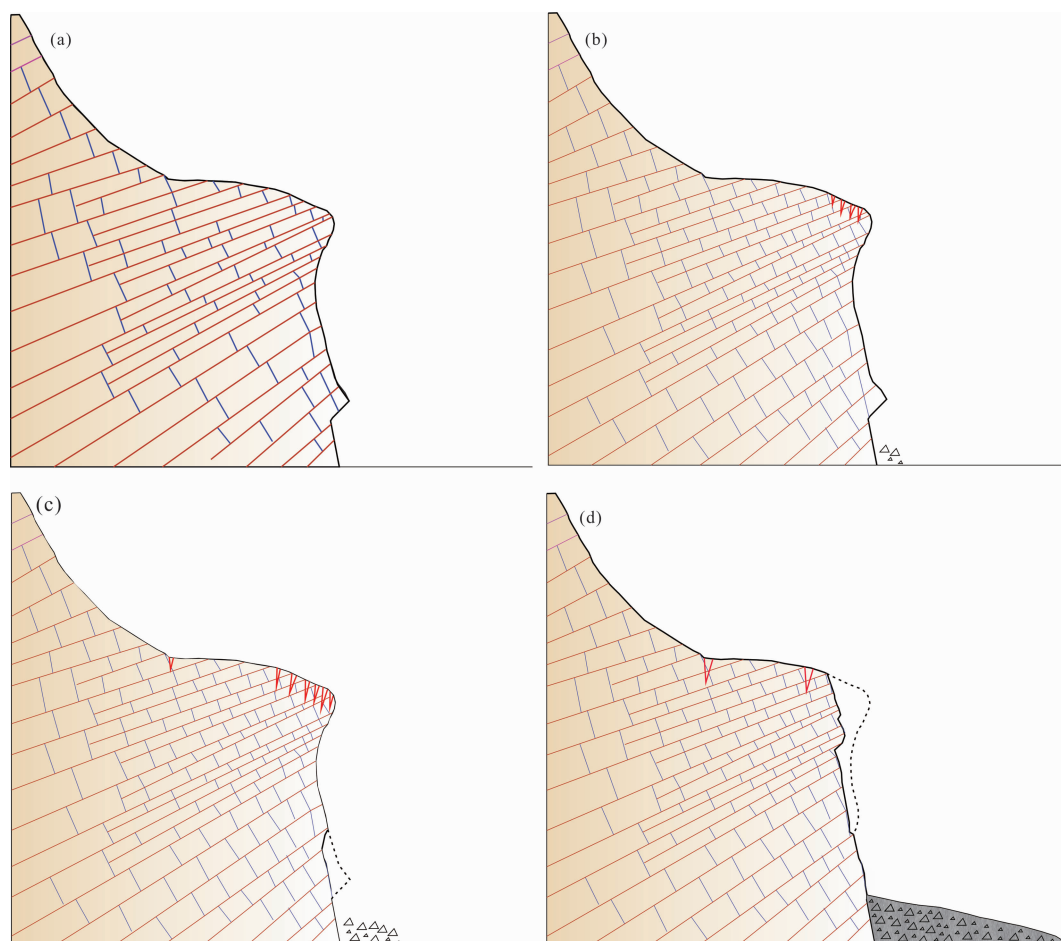


图 10 崩塌体变形破坏演化模型图：

(a) 初始阶段；(b) 时效变形阶段；(c) 累进变形破坏阶段；(d) 破坏失稳阶段

Fig. 10 Evolution model of the Yaoheba rockfall;

(a) initial stage; (b) time-dependent deformation stage; (c) progressive deformation stage; (d) failure stage

装自动化实时形变和雨量监测预警设备^[20],从而实现地质灾害隐患的早期识别和提前预警,降低灾害损失,避免人员伤亡。

5 结论

通过多时相历史卫星影像、灾后无人机影像和选线阶段勘察资料综合分析,对雅西高速姚河坝崩塌的发生原因和成灾机制进行初步分析,形成以下观点。

(1) 姚河坝崩塌可分为潜在变形区、残留体、崩塌源区和堆积区 4 个子区。失稳规模约 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$, 残留体规模约 5000 m^3 , 潜在变形区模约 $4 \times 10^4 \text{ m}^3$, 仍存在较大崩塌灾害风险。建议对残留体进行清除,并在清除残留体后对潜在变形区进行详细地质

勘探,查明其变形深度,进行有针对性的工程治理,并安装降雨量和地表形变监测仪器进行专业监测预警。

(2) 姚河坝崩塌是拉裂式花岗岩崩塌,其孕育演化的原因主要包括地形条件、地质条件和坡体结构等内在控制性因素以及人类工程活动和降雨等外在诱发因素。高陡的临空面、中部凹腔和上部悬臂梁式突出岩体为崩塌孕育发展提供了有利的地形条件;强风化花岗岩岩性、构造挤压导致岩体破碎,为崩塌的形成提供了有利的地质条件;顺坡向、反坡向和斜切坡向 3 组节理裂隙为崩塌的孕育提供了有利的坡体结构条件;高速公路切坡进一步改变了坡体应力分析,加剧了崩塌的变形;前期降雨是此次崩塌失稳的直接诱发因素。

(3) 姚河坝崩塌早期识别是成功的,但计算分

析与工程处置仍然存在不足。虽然在高速公路选线阶段已经识别,但还是对高速公路造成了重大损失,是一起地质小灾害导致公路大灾害事件。姚河坝崩塌事件主要原因为在防治设计阶段,未考虑后期工程开挖切坡的不利影响,对崩塌体失稳规模估算偏小,在工程措施上处置不当。今后类似崩塌隐患分析评价时应吸取本次灾害的经验教训,合理圈定崩塌失稳范围,优化稳定性计算参数取值,并充分考虑工程切坡对斜坡稳定性的影响。

参考文献 (References)

- [1] 詹越. 公路危岩崩塌安全监控及预警技术[D]. 重庆:重庆交通大学,2016:1-2. [ZHAN Yue. Highway dangerous-rock collapse safety monitoring and early warning technology [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2016:1-2]
- [2] 高延超,陈宁生,徐如阁,等. 芦山地震中 G318 线天全段崩塌发育规律[J]. 山地学报, 2013, **31**(5): 632-640. [GAO Yanchao, CHEN Ningsheng, XU Ruge, et al. Development and distribution of collapses induced by “4·20” Lushan earthquake: Taking Tianquan section of China national highway 318 as a sample [J]. Mountain Research, 2013, **31**(5): 632-640]
- [3] 苏生瑞,李松,程强. 汶川地震后公路边坡崩塌灾害发育规律[J]. 山地学报, 2012, **30**(3): 321-327. [SU Shengrui, LI Song, CHENG Qiang. Characteristics of the post-earthquake rockfalls of highway slopes in Wenchuan-earthquake-stricken areas [J]. Mountain Research, 2012, **30**(3): 321-327]
- [4] 张建强,苏凤环,范建容. “4·20”芦山地震崩塌滑坡与公路危险性评价—以宝兴县省道 S210 沿线为例[J]. 山地学报, 2013, **31**(5): 616-623. [ZHANG Jianqiang, SU Fenghuan, FAN Jianrong. Distribution of landslides and collapses induced by 2013 “4·20” Lushan earthquake and hazards assessment: A case study of S210 highway [J]. Mountain Research, 2013, **31**(5): 616-623]
- [5] 葛永刚,陈兴长,方华,等. 汉源县大渡河“8·6”崩塌堵河灾害研究[J]. 山地学报, 2010, **28**(1): 123-128. [GE Yonggang, CHEN Xingchang, FANG Hua, et al. Study on the disaster of Dadu river block induced by the rock fall occurred at Hanyuan county on August 6th, 2009 [J]. Mountain Research, 2010, **28**(1): 123-128]
- [6] 李秀珍,钟卫,张小刚,等. 川藏交通廊道滑坡崩塌灾害对道路工程的危害方式分析[J]. 工程地质学报,2017, **25**(5): 1245-1251. [LI Xiuzhen, ZHONG Wei, ZHANG Xiaogang, et al. Hazard ways of landslides and avalanches on road engineering in Sichuan-Tibet traffic corridor [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, **25**(5): 1245-1251] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017.05.009
- [7] 殷鑫铭,刘云鹏,王锐. 地震波作用下崩塌影响因素及破坏机制分析[J]. 工程地质学报, 2012, **20**(2): 213-221. [YIN Xinming, LIU Yunpeng, WANG Rui. Analysis of collapse effect factors and failure mechanism under seismic wave fuction [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, **20**(2): 213-221]
- [8] 陈宙翔,叶咸,张文波,等. 基于无人机倾斜摄影的强震区公路高位危岩崩塌形成机制及稳定性评价[J]. 地震工程学报,2019, **41**(1): 257-267. [CHEN Zhouxiang, YE Xian, ZHANG Wenbo, et al. Formation mechanism analysis and stability evaluation of dangerous rock collapses based on the oblique photography by Unmanned Aerial Vehicles [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, **41**(1): 257-267] . DOI: 10.3969/j. issn. 1000-0844. 2019. 01. 257
- [9] ZHU Lei, LIANG Heng, HE Siming, et al. Failure mechanism and dynamic processes of rock avalanche occurrence in Chengkun railway, China, on August 14, 2019. Landslides, 2020, **17**: 943-957. DOI: 10.1007/s10346-019-01343-z
- [10] 裴向军,裴钻,黄润秋,等. 活动断裂区高速公路边坡稳定性评价及防治措施研究报告[R]. 成都:成都理工大学,2011:14-63 [PEI Xiangjun, PEI Zuan, HUANG Runqiu, et al. Research Report on stability evaluation and prevention measures of Expressway Slope in active fault area [R]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011: 14-63]
- [11] 百度百科. 雅安—西昌高速公路[EB/OL]. (2020-12-19) [2021-06-08]. <https://baike.baidu.com/item/%E9%9B%85%E8%A5%BF%E9%AB%98%E9%80%9F%E5%85%AC%E8%B7%AF/2383045?fr=aladdin>.
- [12] 张瑞端,郭长宝,孙进忠,等. 雅西高速冕宁段主要地质灾害类型及发育规律[J]. 地质力学学报, 2013, **19**(4): 364-376. [ZHANG Rui, GUO Changbao, SUN Jinzhong, et al. Main types and development law of geo-hazards in the Mianning part of Ya'an-Xicang Expressway [J]. Journal of Geomechanics, 2013, **19**(4): 364-376]
- [13] 胡厚田. 崩塌分类的初步探讨[J]. 铁道学报, 1985, **7**(2): 90-100. [HU Houtian. Preliminary investigation on the classification of landfalls [J]. Journal of Railway Science, 1985, **7**(2): 90-100]
- [14] 许强,董秀军,李为乐. 基于天—空—地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2019, **44**(7): 957-966. [XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated Space-Air-Ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, **44**(7): 957-966] DOI: 10.13203/j.whugis.20190088
- [15] 许强,李为乐,董秀军,等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(11): 2612-2628. [XU Qiang, LI Weile, DONG Xiujun, et al. The Xinmocu landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan:

- characteristics and failure mechanism [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36** (11): 2612 – 2628] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0855
- [16] 许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2020, **45** (11): 1651 – 1659. [XU Qiang. Understanding and consideration of related issues in early identification of potential geohazards [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, **45** (11): 1651 – 1659] DOI: 10.13203/j.whugis20200043
- [17] 李为乐, 许强, 陆会燕, 等. 大型岩质滑坡变形历史回溯及其启示[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2019, **44** (7): 1043 – 1053. [LI Weile, XU Qiang, LU Huiyan, et al. Tracking the deformation history of large-scale rocky landslides and its enlightenment [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, **44** (7): 1043 – 1053] DOI: 10.13203/j.whugis20190090
- [18] 董秀军, 许强, 余金星, 等. 九寨沟核心景区多源遥感数据地质灾害解译初探. 武汉大学学报信息科学版, 2020, **45** (3): 432 – 441. [DONG Xiujun, XU Qiang, SE Jinxing, et al. Preliminary study on interpretation of geological hazards in Jiuzhaigou based on multi-source remote sensing data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, **45** (3): 432 – 441] DOI: 10.13203/j.whugis20190076
- [19] DB51/T 2696 – 2020. 四川地质灾害调查机载激光雷达数据获取技术规范[S]. 成都: 四川省市场监督管理局, 2020. [DB51/T 2696 – 2020. Technical specification for airborne lidar data acquisition in Sichuan Geological Hazard Survey [S]. Chengdu: Sichuan Market Supervision and Administration Bureau, 2020]
- [20] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报, 2021, **28** (2): 360 – 374. [XU Qiang. Understanding the landslide monitoring and early warning: consideration to practical issues [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, **28** (2): 360 – 374] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2020 – 025

Preliminary Investigation on the Yaoheba Rockfall along the Ya'An-Xichang Highway on September 20, 2020, Sichuan, China

ZHANG Yunling¹, FU Yuhao¹, LI Weile^{2*}, WANG Dong³, PAN Peizhu¹

(1. Research and Development Center of Transport Industry of Spatial Information Application and Disaster Prevention and Mitigation Technology, China Highway Engineering Consulting Corporation, Beijing 100097, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: In recent years, highway construction continues to extend to alpine and gorge areas in western China, accompanied by minor geohazard occurrences taking place along the highways with frequent and serious damages to the highways. On September 20, 2020, a collapse of about $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ occurred at the crest of rock slope immediately close to the right side of the Yaoheba Bridge in the Shimian County section of the Ya'An-Xichang (Yaxi) Highway, Sichuan Province, China. This rockfall smashed two spans of bridge decks on the right side of the Yaoheba Bridge, causing traffic interruption across the entire line. This had been the most serious geological disaster event since the Highway was operated. Through comprehensive analysis of multi-temporal historical satellite images, post-event aerial images, and archived data retrieved from geological survey report at the stage of Highway survey and design, the formation characteristics and mechanism of the rockfall were preliminarily revealed: (1) The rockfall was a typical tensile-shearing collapse in granite. The steep free-facing rock surface, concave cavity in the middle and protruding rock mass in the upper in the shape of cantilever provided favorable topographic conditions for its prerequisite; (2) Strongly weathered and fragmented rockmass provided favorable geological conditions for the collapse; (3) The combination of three groups of discontinuity planes (in the dip direction,

reverse to the dip direction and oblique to the dip direction, separately) provided favorable slope structure conditions for the collapse; (4) Slope-cutting at the feet of the rock slope as results of engineered activities further aggravated the deformation of rock slope; (5) Precipitation was the direct triggering factor of the failure of the rock slope. Although this rockfall had been successfully identified earlier in the Highway route selection stage, it still did serious harm to the Highway. The main reason was that the instability scale of the rockfall was significantly underestimated, and the adverse effect of slope cutting due to later engineering excavation was not considered in design. Currently, residual body of rockmass and potential deformation areas is posing great threat to the safety of the Yaxi Highway. It is recommended to remove the residual body and the potential deformation area should be reinforced by engineering treatment. Besides, professional monitoring for potential deformation is quite needed.

Key words: Ya'an-Xicang Highway; rockfall; failure mechanism; slope cutting