

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.018



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



泸定6.8级地震公路抢通保通方案

赵飞^{1,2,3}, 朱明^{2,3}, 李杰^{1,2}, 徐益飞^{2,3}, 但晨^{2,3}, 肖怡^{2,3}, 邱瑞成^{2,3}

(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. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 成都 610017; 3. 交通运输部BIM技术应用行业研发中心, 成都 610017)

摘要: 2022年9月5日, 四川泸定发生6.8级地震, 公路沿线诱发了大量的地质灾害, 造成多处公路损坏或断道, 极大地影响了抗震救灾工作。快速摸清震区公路网的受损情况和抢通保通难度, 对震后救援至关重要。为此, 对震区公路受损情况进行调查, 会同地方交通部门完成公路的抢通保通任务。调查发现了507处受损点, 公路灾害以崩塌滑坡为主, 占总灾害的90%以上。公路灾害具有数量多、规模小、连片分布的特点, 公路震害与地震烈度正相关, 与断层距离、河流距离负相关。在不利因子组合下, 公路震害程度明显加剧, 局部位置的公路受损率可达到92.5%。在抢通保通阶段, 利用龙头石及大岗山电站的库区水运资源, 快速建立5处码头, 建立起通往震中的生命通道, 让应急队伍快速进入灾区, 让伤员第一时间运送出来; 灾后交通网的重建充分利用水运资源, 不追求道路等级与路线指标, 公路重建以提高公路的抗灾能力及韧性为目标。

关键词: 公路工程; 泸定地震; 同震灾害; 抢通保通; 公路受损率

中图分类号: U418.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)03-0216-11

Analysis of highway recovery from Ms 6.8 Luding Earthquake in 2022

ZHAO Fei^{1,2,3}, ZHU Ming^{2,3}, LI Jie^{1,2}, XU Yifei^{2,3}, DAN Chen^{2,3}, XIAO Yi^{2,3},
QIU Ruicheng^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, P.R. China; 2. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, P. R. China; 3. BIM Research & Development Center, Ministry of Transport, Chengdu 610017, P. R. China)

Abstract: On September 5th, 2022, an earthquake with magnitude 6.8 happened in Luding, Sichuan Province, which caused severe geological disasters and brought heavy workload for rescue. It was urgent to find out the damaged roads in the disaster-hit area and assess the difficulty of rescue work. Multiple damaged roads were investigated and 507 damaged points were found. Characterized by large number, small scale, and continuous

收稿日期: 2022-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(41872723); 四川省科技计划(23NSFSC4969); 四川交通院科技项目(232021001)

作者简介: 赵飞(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事公路勘察设计及其BIM技术研究, E-mail: zfclassic580@qq.com。

徐益飞(通信作者), 男, 高级工程师, E-mail: yifei@bimscodi.cn。

Received: 2022-11-25

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 41872723); Sichuan Science and Technology Program (No.23NSFSC4969); Science and Technology Project of Sichuan Communication Surveying & Design Institute (No. 232021001)

Author brief: ZHAO Fei (1983-), senior engineer, main research interests: highway survey and design and BIM technology research, E-mail: zfclassic580@qq.com.

XU Yifei (corresponding author), senior engineer, E-mail: yifei@bimscodi.cn.

distribution, landslides and collapse accounted for more than 90% of the total damage. The severity of highway damage was positively correlated with the seismic intensity, while it was negatively correlated with the distance from fault zones and rivers. Under the combination of adverse impact, the degree of disasters on high way significantly increased. In some regions, even 92.5% roads were damaged. During the road reopening and recovery, a strategy of using the water transport resources in the reservoir area of Longtoushi and Dagangshan Hydropower Station to quickly establish five wharves and a green pathway to the epicenter was proposed. The reconstruction of the transportation network made full use of the water way instead of focusing on the road grade and indicator, aiming to improve the road resistance to natural disasters.

Keywords: highway engineering; Luding Earthquake; coseismic hazard; emergent transport recovery; highway damage rate

当发生重大地质灾害时,公路作为应急抢险的重要通道,具有运送应急装备、抢险人员和伤员等功能。当重大灾害造成公路破坏与断道时,快速抢通应急道路,保证公路的应急通行^[1-3],对应急抢险工作尤为重要。

破坏性地震是诱发山区地质灾害的重要因素,会引发滑坡、崩塌、泥石流等不同类型的地质灾害。在汶川8.0级地震中,地震诱发大型滑坡、崩塌、泥石流等,吉随旺等^[4]、吴家熠等^[5]研究了公路典型震害特征及道路破坏机理,孙丽静等^[6]、张春生等^[7]研究了地震作用下公路边坡的破坏特征;在尼泊尔8.1级地震中,潘毅等^[8]研究了地震诱发滑坡、泥石流、崩塌等灾害,其对公路沿线的居民房屋造成较大破坏;在九寨沟7.0级地震中,地震诱发的同震灾害以崩塌、滑坡为主,梁靖等^[9]研究了地震地质灾害发育的分布规律;在泸定6.8级地震中,地震诱发大量的同震灾害,以崩塌和滑坡为主,范宣梅等^[10]、王欣等^[11]研究了同震灾害的空间分布规律,李为乐等^[12]研究了地震诱发大量次生灾害。

公路沿线由地震诱发大量的崩塌、滑坡等同震灾害,导致公路多处破坏或断道。为了快速抢通断道公路,保证公路的应急通行,需研究公路受损特征,空间分布规律。在地震灾害空间分布规律方面,Lai等^[13]、Liu等^[14]、Zhao等^[15]研究了不同影响因子对地震灾害空间分布规律的影响,发现烈度、坡度、至断层距离因子对空间分布规律影响较为明显;在地震对公路破坏方面,Han等^[16]、赵飞等^[17]、王茂等^[18]、裴来政等^[19]、Ali等^[20]研究了地震对桥梁、隧道、路基、边坡、挡防等构筑物的影响,揭示了公路破坏的特征;在公路抢通保通方面,向波等^[21]、王维嘉等^[22]提出了路基、隧道抢通保通常见方案,Akbari等^[23]、刘金龙等^[24]研究了应急物资的调配及应急条件下交通服务能力的评估方法,在应急条件下,快速评估交通的服务能力。文献分析可知,大部分学者研究侧重于灾害预测、震害特征、空间分布等,仅少量学者研究了灾后公路抢通保通方案。

2022年9月5日12时52分,四川省泸定县(北

纬29.59°,东经102.08°)发生6.8级地震^[10]。地震后,笔者深入地震灾区,对震区的国省干线、县道、通村路等主要公路受损情况进行调查。根据调查资料,分析公路沿线诱发的同震灾害、空间分布规律及影响因素;针对不同公路受损类型,提出不同的抢通保通方案。结合震后的重建工作,因地制宜地制定了永临结合(即临时抢通方案需结合后期重建工作,综合考虑抢通保通方案)的抢通保通方案,为后续交通网络抗震研究提供了翔实的基础数据。

1 公路震害调查情况

地震后,对震区的国省干线、县道、通村路(国省道4条、339 km),县乡及村道(22条、198 km)等主要公路受损情况进行调查。调查发现,泸定地震诱发公路沿线的地质灾害类型以崩塌、滑坡为主,局部位置存在泥石流。崩塌、滑坡灾害占同震灾害的90%以上(图1),崩塌184处,滑坡119处。

沿线公路的同震崩塌及滑坡总体上表现为数量多、规模小、连片分布的特点,这与震中为位于鲜

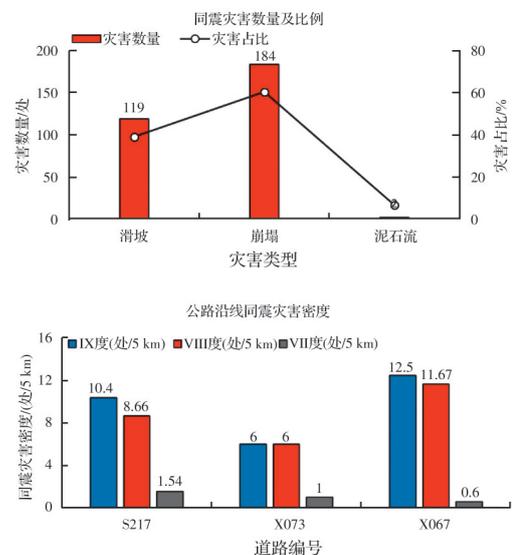


图1 公路沿线同震灾害类型及密度

Fig. 1 Type and density of co-seismic disaster along the highway

水河、龙门山及安宁河三大断裂带汇合处有关。

总体上,公路灾害主要分布在Ⅷ度烈度区以上的范围,公路破坏以路基破坏为主,桥梁与隧道等结构物的主体基本无破坏;路基破坏的表现形式主要有路基路面裂缝、挡防破坏、路基垮塌、路基掩埋或冲毁等。在Ⅸ、Ⅷ度烈度区公路灾害发育,公路灾害平均密度(灾害点数量与公路长度的比值)为10处/5 km;在S217线大渡河大桥(石棉界)至田湾河大桥段(图2(a))、县道X066马厂至王岗坪段(图2(b))、村道Y021幸福村通村路(图2(c))、村

道C034湾东村通村路(图2(d))等公路沿线局部路段集中诱发同震崩塌及滑坡灾害群。S217线大渡河至田湾河大桥段7 km,诱发崩塌滑坡17段,受损严重且不能通行路段长4 km,公路灾害平均密度达到22处/5 km,为S217线全线受损最严重路段。S217线沿大渡河展布,是贯通灾区的干线公路,是连接泸定和石棉县的唯一通道,是地震灾区的生命通道。S217线与通往草科乡的县道X073线构成地震破坏最严重区域的“T”形干线交通网(图3)。



(a) S217线大渡河大桥(石棉界)至田湾河大桥段



(b) 县道X066马厂至王岗坪段



(c) 村道Y021幸福村通村路



(d) 村道C034湾东村通村路

图2 震区公路沿线同震地质灾害集中发育路段

Fig. 2 The sections along the roads in the seismic area where the geological disasters are concentrated

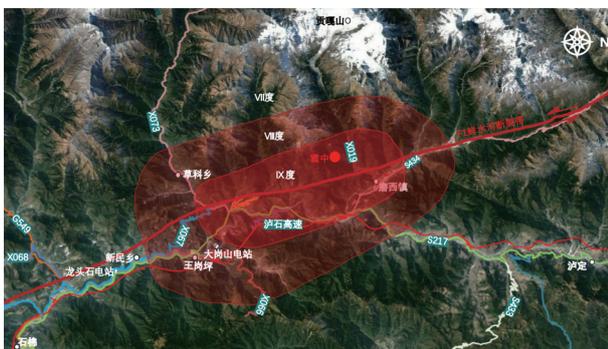


图3 震区公路网分布图

Fig. 3 Map of the road network in the earthquake zone

2 公路震害的空间分布规律

2.1 不同影响因子

泸定地震调查了507个工点,包含桥梁、隧道、边坡、挡防、不良地质等公路沿线相关工点,覆盖Ⅵ~Ⅸ度烈度区主要干线公路及重要乡镇村道路。

根据Fan等^[25]、王欣等^[11]的研究,结合泸定地震灾害空间分布的特征,公路沿线的同震灾害空间分布规律主要受地震、地形地貌及地质三大类因素的影响,三大影响因素可细分为地震烈度、至断层距离、高程、至河流距离、坡度、地层岩性6个因子。将6个因子参数采用统计分析方法,对不同因子分级统计(表1)。

对公路受损影响较明显的震害点为破坏程度中度以上的震害点,轻微破坏对公路破坏影响较小,基本不影响道路的通行,主要统计公路破坏程度为中度破坏、严重破坏的震害点。统计分析因子分级内公路震害数量(T)、公路震害分级占比(P)、公路分级受损率(R)3个指标,具体计算式为

$$P = T/A$$

$$R = L/M$$

式中: P 为公路震害分级占比,反映该因子条件下公

表 1 公路沿线公路震害因子分级表
Table 1 Classification of seismic hazard factors for roads along the highway

类型	名称	分级
地震	烈度	9、8、7、6
	至断层距离/km	<1、1~2、2~3、3~5、5~8、8~12、>12
	高程/m	<1 000、1 000~1 500、1 500~2 000、2 000~2 500、>2 500
地形地貌	至河流距离/m	<100、100~200、200~500、>500
	坡度/(°)	<10、10~30、30~40、40~50、50~70、>70
地质	地层岩性	第四系、三叠系、二叠系、花岗岩、闪长岩、基性岩、其他

路破坏影响程度;R为公路分级受损率,反映该因子条件下公路受损比例;T为因子分级内公路震害数量,反映该因子条件下公路受损程度;A为总震害数量;L为因子分级内受损长度;M为因子分级内公路里程。

公路分级受损率是评价某一影响因子的重要指标,可直接反映在某一影响因子下公路的受损率及破坏程度,分析公路震害的空间分布规律,具体结果如下:

1)地震影响因子

统计分析地震烈度及至断层距离对公路同震

灾害的影响。中国地震局的监测与研究表明,泸定地震发生 7 s 后鲜水河断裂带的破裂转为主要往南东方向发展,持续 18 s,破裂总长度约 40 km,最大滑动量 1.84 m,烈度区域分布范围基本与监测数据一致,破坏最为严重区域位于震中的南东侧。

震害数量与烈度呈正相关关系(图 4(a))。在Ⅷ、Ⅸ度烈度区震害最严重,Ⅸ度烈度区的公路受损率达到 37.5%;Ⅶ度烈度区公路震害数量、公路震害分级占比、公路分级受损率都显著降低,公路分级受损率为 6.45%,仅相当于Ⅷ度烈度区的 1/4;在Ⅵ度烈度区地震基本对公路无影响。

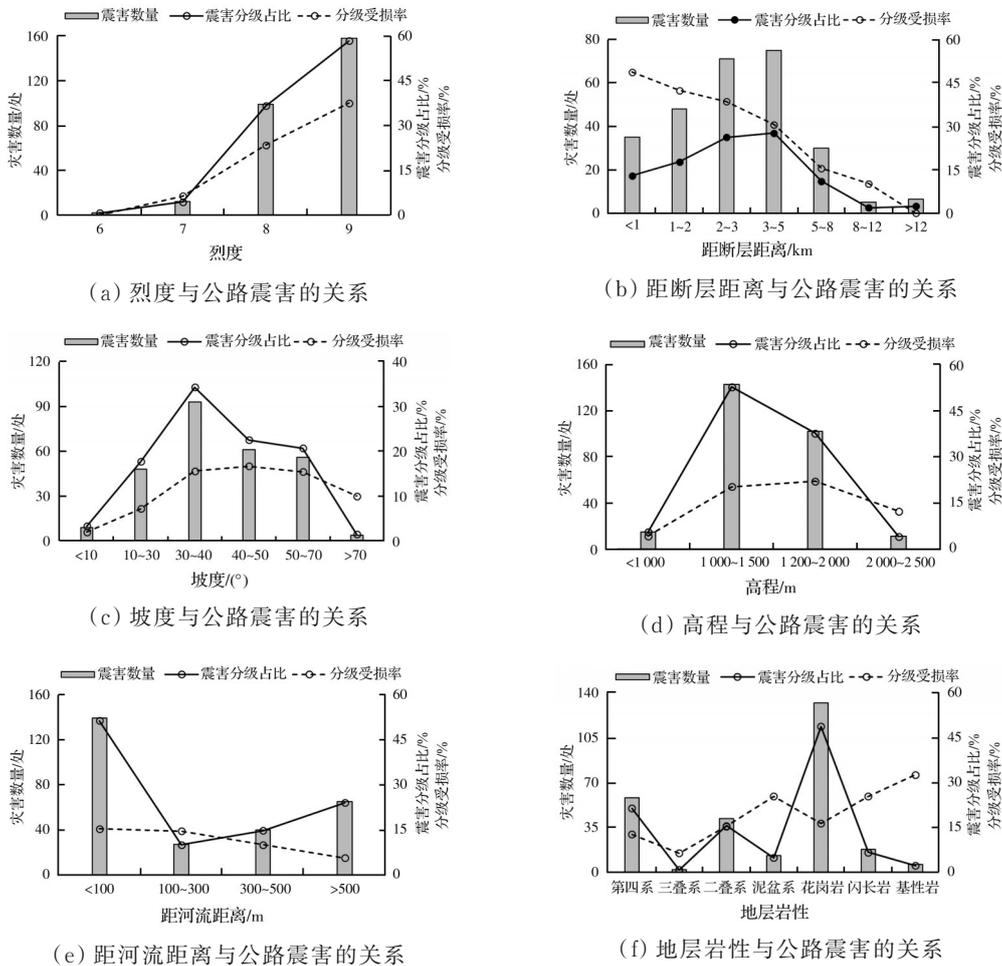


图 4 不同影响因子下公路震害分布规律

Fig. 4 The spatial distribution patterns of seismic hazard by different controlling factors along the highway

公路震害主要分布在距离断层2~5 km范围内(图4(b)),位于此距离范围内的公路震害分级占比、公路分级受损率最高。这与Ⅸ度烈度区的公路主要分布在大渡河两岸(大渡河电站库区两岸),至断层距离2~5 km有关;小于2 km的公路主要分布在Ⅷ、Ⅶ度烈度区,震害相比较轻,公路分级受损率较低。当至断层距离大于8 km后公路分级受损率显著降低。

2) 地形地貌影响因子

在高程因子方面,地震诱发的公路同震灾害主要分布在1 000~2 000 m高程范围内的斜坡上,这与震区公路网主要分布在1 000~2 000 m高程范围内有关。

在距离河流距离因子方面,地震诱发的公路同震灾害主要分布在距河流距离小于100 m范围内的沿溪斜坡(图4(c)~(e)),诱发的同震灾害与距河流距离呈负相关,且大多数震害均小于100 m,这与公路主要沿着大渡河及其支流分布,距离河流较近有关。

在坡度因子方面,地震诱发的公路同震灾害主要分布在坡度 30° ~ 70° 的斜坡上。这与斜坡稳定性及抗震能力有关,当斜坡坡度较缓时稳定性较好,抗震能力强;当斜坡坡度太陡时,稳定性差,在暴雨等常规条件下就已发生破坏;斜坡在 30° ~ 70° 坡度条件下,处于欠稳定-基本稳定状态,在极端的地震条件下,斜坡易产生破坏。

本次地震诱发公路同震灾害主要分布在1 000~2 000 m高程范围内的斜坡上,坡度 30° ~ 70° ,距河流距离小于100 m范围内的沿溪斜坡(图4(c)~(e))。诱发的同震灾害与距河流距离呈负相关,且大多数震害均小于100 m,这与公路主要沿着大渡河及其支流分布,距离河流较近有关。

根据航飞影像及现场调查,县道X067的桩号范围K55~K65段(10 km)位于石棉县团结村,该村位于上顶,距河流较远,但至断层距离小于100 m,且位于Ⅷ度烈度区,岩性以花岗岩为主,结果发现该道路沿线基本没受损,仅局部位置存在小规模崩塌,说明距河流距离的地形地貌因子对震害影响明显,可能与距离河流越远,地下水较少,花岗岩风化程度弱,斜坡稳定性较好有关。

3) 地质影响因子

根据公路震害与地层岩性关系图可知(图4(f)),在花岗岩组公路震害最严重。这与震区花岗岩分布范围广有关,在断层的东侧80%以上为花岗岩组,震害数量占本次公路震害的50%。主要原因

是花岗岩风化后呈碎裂状,自身稳定性差,在地震作用下诱发地震灾害的概率大。

公路分级受损率最高(达到32.6%)的为基性岩,其次为泥盆系(达到25.35%)及闪长岩(26.36%)。基性岩、泥盆系及闪长岩主要分布在Ⅸ度烈度区的公路沿线,至断层距离小于2 km。

同处于Ⅸ度烈度区,且至断层距离小于2 km的三叠系,公路分级受损率仅6.4%。主要原因是三叠系以砂岩、砾岩、泥灰岩等为主,抗风化能力较强,风化后以含黏土的碎石为主,自身稳定性较好。

2.2 多影响因子组合

根据不同因子与震害关系的分析,泸定地震对公路震害分布规律、受损程度影响较为明显的因子包括地震烈度、至断层距离、至河流距离、坡度及地层岩性,而高程因子影响较轻。其中,公路震害数量与地震烈度正相关,与至断层距离、至河流距离负相关。公路震害空间分布规律在不同区域的控制因子不一样。而且在不利影响因子组合下,公路震害程度明显加剧。

S217贯通整个泸定地震震区,从泸定(小桩号方向)沿大渡河两岸展线,达到石棉县(大桩号方向)。为了分析不同区域的控制性影响因子,分析在不同影响因子叠加作用下的震害特征,统计分析了S217在不同影响因子条件下公路受损率(见表2)。

由表2可知,除了Ⅸ度烈度区控制性影响因子较为复杂,其他区域主要受地震烈度控制,表现为公路受损率与地震烈度正相关。泸定侧(K800~K828)Ⅶ度、石棉侧(K908~K966)Ⅵ度烈度区以外区域,地震对公路基本无影响。

在相同烈度条件下,震中北侧的泸定方向比南侧石棉方向公路震害轻。泸定侧(K828~K839)Ⅷ度烈度区公路受损率仅为石棉侧(K861~K877)的1/6,泸定侧(K828~K839)Ⅷ度烈度区跟石棉侧(K877~K908)Ⅶ度烈度区公路受损率接近。这与泸定地震发生7 s后鲜水河断裂带的破裂转为主要往南东方向发展,持续18 s有关;断层破裂向南东方向持续时间更长,造成的公路受损率更高。

在不同的影响因子组合下,Ⅸ度烈度区的公路受损率差异极大。在花岗岩路段(K849~K852、K855~K857),至断层距离(1~3 km)、至河流距离(小于100 m)、坡度(30° ~ 40°)等不利因子组合下,公路受损率最大达到92.5%;三叠系岩组路段(K852~K855、K857~K858),至断层距离(1~3 km)、至河流距离(小于100 m)、坡度(30° ~ 40°)等不利因子组合下,公路平均受损率18.5%;三叠系岩组路段的公

表2 在各类影响因子作用下S217线沿线公路受损率
Table 2 Road damage rate along S217 under various impact

里程	长度/km	公路受损率/%	控制因子	影响因子					
				烈度	与断层距离/km	高程/m	与河流距离/m	坡度/(°)	地层岩性
K800~K828	28	0.01	烈度	7	15.0	1 300	<300	10~15	花岗岩
K828~K839	11	4.20	烈度	8	7.0	1 170	<300	10~20	闪长岩
K839~K845	6	2.30	坡度	9	4.5	1 150	<300	<10	第四系
K845~K849	4	0.00	隧道						
K849~K852	3	88.90	地层岩性	9	2.2	1 126	<100	30~40	花岗岩
K852~K855	3	16.80	地层岩性	9	2.4	1 120	<100	30~40	三叠系
K855~K857	2	92.50	地层岩性	9	1.9	1 130	<100	30~40	花岗岩
K857~K858	1	20.20	地层岩性	9	1.7	1 128	<100	30~40	三叠系
K858~K861	3	1.20	桥梁隧道	9	3.1	1 154	<100	30~40	花岗岩
K861~K877	16	24.50	烈度	8	5.8	1 153	<100	30~40	花岗岩
K877~K908	31	6.60	烈度	7	1.8	980	<100	30~40	花岗岩
K908~K966	58	0.01	烈度	6	9.5	1 990	>500	30~40	

路受损率为花岗岩组的1/5,说明地层岩性对公路震害及受损程度影响显著。在斜坡坡度很缓(小于10°)路段(K839~K845),至断层距离(3~5 km)、至河流距离(小于300 m)、烈度(Ⅸ度)等不利因子组合下,公路平均受损率2.3%。

从对S217公路受损率分析结果可知,烈度、坡度、地层岩性3个因子为对公路受损率影响明显的主要控制因子;只有当3个主要控制因子都处于最不利条件下,公路受损率才会最高;当有1个或以上的主要控制因子不处于不利条件,则公路受损率均比较低。

3 公路抢通保通方案

3.1 公路抢通保通总体方案

在汶川大地震、九寨沟等多次大地震中,已有学者在研究公路的抢通保通技术及思路。在总结前人的基础上,泸定地震公路抢通保通以“因地制宜、水路并进、就地取材、永临结合”为原则。

地震后,进入Ⅸ度烈度区的公路多处断道,通往居民较多的草科乡、幸福村、湾东村、磨西镇等重点乡镇的道路不通,人员和设备不能到达灾区,伤员不能及时送出,极大地影响了应急工作的开展。

现场技术专家结合现场情况,利用龙头石电站及大岗山电站的库区(图5),在下游龙头石库区建立2个临时码头(1号新民码头、2号王岗坪码头),在上游大岗山库区建立3个临时码头(3号大岗山码头、5号郑家坪码头、7号得妥码头),快速建立应急水运通道,与区间公路网第一时间建立了震区应急交通网,初步恢复交通网。应急队伍和技术专家携带必要的应急物资。石棉方向人员从新民码头上船,到达王岗坪码头,步行至大岗山电站的大岗山

码头上船,可到达郑家坪码头,进入灾区,或者在王岗坪码头下船步行至灾区。泸定方向人员从沙坝码头上船,可直接到达得妥、郑家坪码头,进入灾区,第一时间到达灾区。技术专家进入灾区后快速排查灾区受损情况,应急队伍可快速开展抢险工作,抢救伤员。



图5 库区码头布置图

Fig. 5 The layout of the dock in reservoir area

大型抢险设备方面,一是在建的泸石高速沿线有大量的施工机械可投入抢险工作;二是从S217两头的石棉和泸定方向,投入大型设备一边抢通公路一边向震区推进;三是从S217的泸定方向进入,利用大岗山库区,用动力舟桥运送大型设备进入灾区不同路段。最后,在公路沿线,多点施工,保证公路早日抢通,保证公路的通行。

在伤员运送方面。在公路未抢通前期,伤员可通过区间车辆或步行至郑家坪、王岗坪码头等码头,再通过水运通道将受伤人员快速转运到石棉或泸定;在公路抢通后,伤员可直接通过公路转运到石棉或泸定;当发生次生灾害,导致公路断道时,可继续通过水运通道转运伤员。

后期,为保障人民群众出行和灾后恢复重建设

备、物资运输,充分利用库区水运资源。在龙头石库区建设新民码头和王岗坪码头,在大岗山库区建设大岗山码头、田湾河码头、郑家坪码头、得妥临时码头、沙坝码头和新华村码头共8个码头。

3.2 重点路段抢通保通方案

总体抢通保通方案为采用临时防护措施对路基灾害点临时防护,以满足道路保通需要。临时防护方案类型包括落石槽、清理落石、被动防护网、路肩墙或护脚墙、临时钢棚洞、主动防护网、局部清危石、清理边沟、设安全哨、监测预警等。结合公司研发的公路设计平台,融合航测地形影像、卫星影像、灾情数据、全景影像、烈度图等多源数据,直接在三维GIS场景中快速制定抢通保通方案,提高方案确定的效率。根据不同震害类型、受损程度、抢通保通不同阶段,选择不同的抢险方案。震区破坏最严重的干线公路为S217,选择该公路破坏最严重,且影响道路通行的重点路段具体说明不同震害类型的抢通保通方案。

1) S217线K855+420~K855+870段滑坡抢通保通方案

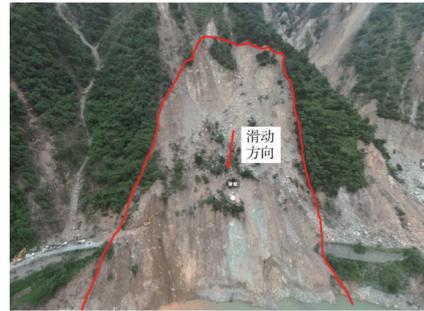
受损情况:地震诱发滑坡(图6(a)),长度为400 m,高度为180~200 m,厚度为10~15 m,体积约8.5万 m^3 ,物质组成主要为碎、块石。成因主要为震后覆盖层内沿基岩面的滑动。滑坡体内路基完全被覆盖,坡面角度约 40° ,大桩号侧边界有基岩出露,基岩下部路基损坏,路肩墙外倾,道路上有崩塌体堆积在路基上。

抢通保通方案(图6(b)):因堆积层厚,土方量较大,采用直接完全清除不可取,也容易引发二次滑动。直接采用从滑坡体上开挖便道的方式,先打通履带式挖掘机的道路,后多台挖掘机共同挖掘,加快抢通时间。履带式挖掘机可上的道路坡度可到达 $30^\circ\sim 40^\circ$,挖掘机道路通后,再进一步降低坡度供其他应急车辆通行的应急便道,道路纵坡按 $10\%\sim 12\%$ 控制,可最快速度打通道路,保证道路的临时通行及应急保通。

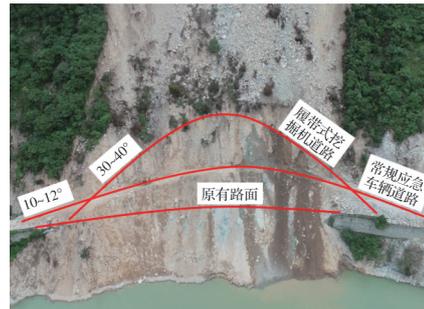
2) S217线金光村路基垮塌抢通保通方案

受损情况:该路段半填半挖路基长250 m,约 $3/4$ (150 m)的路基宽度滑移,其余路段出现贯通裂缝。主要原因为公路外侧临空,原路基采用半填半挖,外侧修建挡墙的方案通过。在泸定地震作用下公路外侧土体主动土压力增大,导致墙底土体滑动破坏,最终引起路肩墙整体失稳、垮塌。

抢通保通方案:路基滑移段采用回填处理,满足应急通行需求。保通阶段对回填段坡脚进一步反压支挡,对于出现贯通裂缝未滑移段采用钢管桩



(a) 滑坡全貌图



(b) 滑坡抢通保通方案示意图

图6 S217线K855+420~K855+870段滑坡图

Fig. 6 Landslide of K855+420 ~ K855+870 section of S217



图7 S217线金光村路基垮塌图

Fig. 7 Subgrade collapse of Jinjiang village of S217

加固。

3) S217线大渡河大桥至田湾河大桥段崩塌、滑坡灾害群抢通保通方案

受损情况:泸定地震导致该段路基有17段边坡发生破坏,规模较大有8段,受损段占线路总长55%。受损最严重的路段(表3)位于大渡河(图8(a))附近3 km(公路受损率88.9%)及田湾河大桥附近2 km(公路受损率92.5%),为S217全线受损最为严重路段。灾害型式以高位崩塌、基岩滑坡为主,后缘最大高差近200 m,危害性大。其中,K854+980处(图8(b))高约200 m的高位滑坡造成原路约80 m范围完全破坏,需在岩壁新开通道,且高位落石严重,施工作业安全风险很高,在保证人员设备安全的前提下,开展高位清危、防护及新开通道工作。

表3 库区水运设施拟建码头表

Tab.3 Proposed wharf construction for water transport facilities in the reservoir area

序号	码头名称	库区名称	客运泊位	滚装泊位	位置	用途
1	新民码头	龙头石电站库区	10	0	新民乡海尔村	居民出行
2	王岗坪码头	龙头石电站库区	4	0	王岗坪乡挖角村	居民出行
3	大岗山码头	大岗山电站库区	2	2	王岗坪乡	居民出行和货物运输
4	田湾河码头	大岗山电站库区	2	1	爱国村乡	居民出行和货物运输
5	郑家坪码头	大岗山电站库区	2	0	郑家坪	居民出行
6	新华村码头	大岗山电站库区	0	1	新华村	居民出行和货物运输
7	得妥码头	大岗山电站库区	0	1	得妥镇	居民出行和货物运输
8	沙坝码头	大岗山电站库区	0	1	沙坝村	居民出行和货物运输

抢通保通方案:抢通措施包括清除现有公路上堆积体,局部路基损毁段向内扩宽,上坡边挂网喷浆,增设钢棚洞等。保通措施采用主动防护网、钢棚洞,外侧路肩墙、护栏等,保障灾后重建期间人员和施工车辆等的区间交通通行。同时,在龙头石库区建设2个码头,在大岗山库区建设6个码头,采用水路共有的交通模式,提高震区的交通通行能力。

别路网中的关键节点和薄弱节点,提高关键节点的抗震设防能力等措施,保证区域路网的抗灾韧性^[26]。利用库区水运资源,建设码头工程和相应库区航道配套工程,提高水运通道的抗灾能力。

1)公路路网重建

恢复S217线及已有的县乡村道路,其中S217与在建的泸定至石棉高速公路(2024年通车)在大渡河两岸形成双通道。泸石高速是一条等级高、通行条件好的公路,则S217线的恢复重点应该是提高抗灾能力,不以建设路线指标高、道路等级高、路基宽度宽等为重建目标,以强化路基内外侧边坡支护强度为主,局部困难地段采用隧道或桥梁通过,要做到因地制宜,以提高大渡河沿线通道的整体抗震能力为指导思想。

2)水运设施建设

为满足“9·5”泸定6.8级地震灾后抢险及灾后重建居民出行需求、物资、设备运输等需要,结合现场踏勘及地方需求,水运基础设施包括龙头石库区和大岗山库区8座码头工程及相应库区航道配套工程,建设内容包括码头工程、航道工程以及相应的配套工作。

拟建8座码头(见表3)分别位于龙头石库区和大岗山库区,其中龙头石电站库区2个码头,大岗山库区6个码头。大岗山电站库区的大部分码头也安装了滚装泊位,可供货物的运输,可运输应急物资;在应急状况下,也能保证一定的应急物资运输到灾区。

航道工程主要包括大岗山电站库区得妥至大岗山约24 km及龙头石电站库区王岗坪至新民约7 km航道建设工程,主要包括航标、航道清淤、航道挖槽、锚地、丁坝等工程的建设。

配套工程主要包括配套公路、管理站房等工程的建设。

4 结论与建议

2022年9月5日,泸定发生Ms 6.8级地震,技



(a) 大渡河大桥桥头附近滑坡群



(b) 路基完全垮塌图

图8 S217线大渡河大桥至田湾河大桥段崩塌、滑坡灾害群

Fig. 8 Collapse and landslide disasters in the section from Dadu River Bridge to Tianwan River Bridge of S217

3.3 公路恢复重建研究

震区交通恢复重建的总体目标为提高交通系统抗灾能力,增强交通网的韧性。因此,制定了“因地制宜、水路并进、多通道建设”的基本重建思路。

重建总体方案包括公路网恢复和水运设施建设。结合地方路网现状和规划,评估震后公路路网的连通性,结合道路通行能力和服务人口比例,识

术团队争分夺秒摸清道路受损情况,会同当地交通管理部门,现场确定应急抢通方案。现场灾情数据实时通过自主研发的“抗震救灾指挥系统”传输至前线指挥部,通过自主研发的“经天路图公路设计平台”快速制定公路的抢通保通方案,为交通的抢通保通工作提供技术支撑。主要研究结论及建议如下。

1)明确了震区公路受损情况及破坏特征。地震后,对地震灾区的国省干道(4条、339 km、及县乡村道(22条、198 km),共计537 km公路的震害进行了调查。调查发现泸定地震诱发的公路沿线地震灾害类型主要为崩塌、滑坡,局部位存在泥石流。崩塌及滑坡灾害占比同震灾害的90%以上。同震灾害具有数量多、规模小、连片分布的特点。灾害集中区位于S217线的Ⅸ度烈度区内,在大渡河附近的同震灾害密度最大可达到22个/5 km。建议加强危险路段的抗震设计,做好崩塌、滑坡等多发灾害的应急措施,提高道路的抗灾能力。

2)揭示了各类因子对公路震害空间分布规律的影响。通过分析地震、地形地貌及地质3大类共6个因子与公路震害分布的规律,发现公路震害主要控制性因子为地震烈度、至断层距离、至河流距离、坡度及地层岩性。其中,以地震烈度控制性表现得最为明显,高程因子影响较轻。公路震害最严重的因子组合为烈度Ⅷ度以上、至断层距离小于5 km、斜坡坡度 $30^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 、至河流距离小于100 m及花岗岩地区。在最不利因子组合下,公路受损率最大达到92.5%。建议进行公路同震灾害预测算法模型研究时,将公路同震灾害空间分布规律的影响因子作为参考样本。

3)在抗震救灾中,可充分利用多种资源,以快速建立应急通道。地震后,震中附近公路受损严重,抢通时间太长。充分利用了龙头石电站及大岗山电站的库区水运资源,选择了5处位置作为应急水运码头,快速建立起通往震中的生命通道,极大地提高了抢险效率。建议在今后的应急抢险工作中,要因地制宜,充分利用多种资源服务抢险。

4)提出了公路灾后重建的总体指导思想。恢复重建以“因地制宜、水路并进、多通道建设”为基本重建思路,重建包括公路网恢复及水运设施建设。公路方面,以泸石高速为主要通道,S217线的重建不以公路等级、线形指标为控制因素,以抗灾能力强、韧性高为标准;水运方面,建设8处永久码头,包括客运和滚装泊位;通过水路多通道来提高灾区交通网的抗震能力。建议今后的震后公路重建方面,应合理利用多种交通资源,建立多通道交通网,强化重点路段抗震设计,提高区域路网的抗

灾韧性,保证道路在应急条件下的通行。

致谢:感谢四川省公路规划勘察设计研究院有限公司提供了部分现场公路震害调查数据及VR全景;感谢高分辨率对地观测系统四川数据与应用中心(高分四川中心)提供了灾区卫星影像;感谢地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学)提供了遥感解译成果;感谢四川省交通运输厅公路局、雅安市交通运输局、石棉县交通运输局等现场人员的帮助。

参考文献

- [1] 续颖, 来逢波, 王彤彤. 高速交通对区域发展的影响机理与调控策略[J]. 交通科技与经济, 2021, 23(4): 73-80. XU Y, LAI F B, WANG T T. The influence mechanism and regulation strategy of high-speed transportation on regional development [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2021, 23(4): 73-80. (in Chinese)
- [2] 申立银, 陈洋, 杜小云. 重庆交通基础设施与区域经济发展的关系研究[J]. 现代城市研究, 2018, 33(6): 123-130. SHEN L Y, CHEN Y, DU X Y. Measuring the relationship between transportation infrastructures and regional economic growth: The case of Chongqing [J]. Modern Urban Research, 2018, 33(6): 123-130. (in Chinese)
- [3] LI S L, TEO K L. Post-disaster multi-period road network repair: work scheduling and relief logistics optimization [J]. Annals of Operations Research, 2019, 283(1): 1345-1385.
- [4] 吉随旺, 唐永建, 胡德贵, 等. 四川省汶川地震灾区干线公路典型震害特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1250-1260. JI S W, TANG Y J, HU D G, et al. Analysis of typical seismic damages of highways in Wenchuan earthquake-induced hazard areas in Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1250-1260. (in Chinese)
- [5] 吴家熠, 林均岐, 刘金龙. 汶川地震道路破坏机理浅析[J]. 震灾防御技术, 2020, 15(3): 526-536. WU J Y, LIN J Q, LIU J L. Analysis of road destruction mechanism of Wenchuan earthquake [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2020, 15(3): 526-536. (in Chinese)
- [6] 孙丽静, 赵中宝, 潘家伟, 等. 鲜水河断裂带康定段雅拉河断裂深部应力应变状态及其孕震环境[J]. 岩石学报, 2021, 37(10): 3225-3245. SUN L J, ZHAO Z B, PAN J W, et al. The stress and strain state of Yalaha fault in the Kangding segment of

- the Xianshuihe fault zone and its seismogenic environment [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(10): 3225-3245. (in Chinese)
- [7] 张春生, 赖道平, 吴关叶, 等. 强震作用下复杂边坡块体破坏模式和破坏特征研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(12): 4620-4626.
ZHANG C S, LAI D P, WU G Y, et al. Failure mode and characteristics study of complex slope blocks under strong earthquake [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(12): 4620-4626. (in Chinese)
- [8] 潘毅, 王忠凯, 时胜杰, 等. 尼泊尔8.1级地震加德满都一樟木沿线民居震害调查与分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(3): 35-44.
PAN Y, WANG Z K, SHI S J, et al. Investigation and analysis on seismic damage of residential buildings along the highway from Kathmandu to Zhangmu in Ms 8.1 Gorkha Earthquake [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(3): 35-44. (in Chinese)
- [9] 梁靖, 裴向军, 温勇, 等. 2017年九寨沟地震地质灾害发育分布规律研究[J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(5): 181-188.
LIANG J, PEI X J, WEN Y, et al. Research on development and distribution rules of geohazards in Jiuzhaigou earthquake in 2017 [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(5): 181-188. (in Chinese)
- [10] 范宣梅, 王欣, 戴岚欣, 等. 2022年Ms 6.8级泸定地震诱发地质灾害特征与空间分布规律研究[J]. *工程地质学报*, 2022, 30(5): 1504-1516.
FAN X M, WANG X, DAI L X, et al. Characteristics and spatial distribution pattern of Ms 6.8 Luding earthquake occurred on September 5, 2022 [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(5): 1504-1516. (in Chinese)
- [11] 王欣, 方成勇, 唐小川, 等. 泸定Ms 6.8地震诱发滑坡应急评价研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(1): 25-35.
WANG X, FANG C Y, TANG X C, et al. Research on emergency evaluation of landslides induced by the Luding Ms 6.8 Earthquake [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 25-35. (in Chinese)
- [12] 李为乐, 陈俊伊, 陆会燕, 等. 泸定Ms 6.8地震对海螺沟冰川的影响应急分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(1): 47-57.
LI W L, CHEN J Y, LU H Y, et al. Emergency analysis of the impact of the Luding Ms 6.8 earthquake on Hailuoguo Glacier [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 47-57. (in Chinese)
- [13] LAI F, SHAO Q F, LIN Y, et al. A method for the hazard assessment of regional geological disasters: A case study of the Panxi area, China [J]. *Journal of Spatial Science*, 2021, 66(1): 143-162.
- [14] LIU Y R, SUN Y, DONG Q, et al. Geological hazard risk assessment based on GIS in Mianchi County [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1961(1): 012021.
- [15] ZHAO B, LI W L, SU L J, et al. Insights into the landslides triggered by the 2022 Lushan Ms 6.1 Earthquake: Spatial distribution and controls [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(17): 4365.
- [16] HAN Q, DU X L, LIU J B, et al. Seismic damage of highway bridges during the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 8(2): 263-273.
- [17] 赵飞, 李杰, 朱明, 等. 泸县6.0级地震公路震害特征分析及信息化技术应用研究[J]. *公路*, 2022, 67(9): 284-291.
ZHAO F, LI J, ZHU M, et al. Analysis on the characteristics of highway damage in Luxian 6.0-magnitude earthquake and research on the application of informatization [J]. *Highway*, 2022, 67(9): 284-291. (in Chinese)
- [18] 王茂, 罗庆. 汶川大地震中道路破坏及设计反思[J]. *铁道工程学报*, 2009, 26(2): 21-24.
WANG M, LUO Q. Thoughts on design of the damaged road by Wenchuan Earthquake zone [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2009, 26(2): 21-24. (in Chinese)
- [19] 裴来政, 刘应辉, 庄建琦. 汶川地震震后都汶公路的恢复与重建[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(Sup1): 140-146.
PEI L Z, LIU Y H, ZHUANG J Q. Restoration and reconstruction of Du-Wen highway after the Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 42(Sup1): 140-146. (in Chinese)
- [20] ALI I, SU L J, ASGHAR A, et al. Numerical analysis of rockfall and slope stability along the Karakorum Highway in Jijal-Pattan [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(1): 36-47.
ALI I, SU L J, ASGHAR A, et al. Numerical analysis of rockfall and slope stability along the Karakorum Highway in Jijal-Pattan [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(1): 36-47.
- [21] 向波, 何云勇, 蒋劲松, 等. 公路路基灾后抢通及保通技术研究[J]. *公路*, 2020, 65(3): 174-183.
XIANG B, HE Y Y, JIANG J S, et al. Research on urgent recovery of transport and maintaining open-to-traffic technologies of highway subgrade after disaster [J]. *Highway*, 2020, 65(3): 174-183. (in Chinese)
- [22] 王维嘉, 向波, 钟勇, 等. 公路隧道灾后抢通及保通技术研究[J]. *公路*, 2019, 64(3): 194-202.

- WANG W J, XIANG B, ZHONG Y, et al. Research on urgent transport recovery and maintaining technologies of highway tunnel after disaster [J]. *Highway*, 2019, 64(3): 194-202. (in Chinese)
- [23] AKBARI V, SAYARSHAD H R. Integrated and coordinated relief logistics and road recovery planning problem [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 111: 103433.
- [24] 刘金龙, 林均岐, 潘毅, 等. 泸定6.8级地震交通网络应急服务能力分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(6): 1121-1129.
- LIU J L, LIN J Q, PAN Y, et al. Analysis of emergency service capability of transportation network after Luding Ms6.8 earthquake [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(6): 1121-1129. (in Chinese)
- [25] FAN X M, SCARINGI G, XU Q, et al. Coseismic landslides triggered by the 8th August 2017 Ms 7.0 Jiuzhaigou earthquake (Sichuan, China): Factors controlling their spatial distribution and implications for the seismogenic blind fault identification [J]. *Landslides*, 2018, 15(5): 967-983.
- [26] 王海燕, 孙小年, 王明文. 高烈度地震区公路路网抗震设防思路与方法[J]. *公路交通科技*, 2011, 28(12): 127-132.
- WANG H Y, SUN X N, WANG M W. Earthquake fortification approaches for highway network in high-intensity earthquake zones [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2011, 28(12): 127-132. (in Chinese)

(编辑 胡玲)