

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221116002

泸定6.8级地震交通网络应急服务能力分析*

刘金龙^{1,2}, 林均岐^{1,2}, 潘毅^{3,4}, 宋佳雨³

(1. 中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 611756;
4. 抗震工程技术四川省重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 2022年9月5日12时57分, 四川省泸定县发生6.8级地震。受自然地理环境等因素的影响, 本次地震对灾区公路交通网络造成了比较严重的破坏, 给震后应急救援工作带来了较大阻碍, 极大地考验了灾区交通网络的应急服务能力。本文介绍了灾区交通网络的概况及其地震破坏情况, 建立了路网应急服务能力评价方法, 并将单位时间到达重点救援目标的最大交通量作为其评价指标。以本次地震灾区的交通网络为例, 结合交通网络应急抢通过程的考察数据, 对交通网络应急服务能力的下降及其恢复过程进行了分析, 对灾区交通网络地震韧性进行了定性讨论, 以期对交通网络的地震韧性评价提供参考。

关键词: 泸定6.8级地震; 交通网络; 应急服务能力; 恢复过程

中图分类号: P315.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1121-09

Analysis of Emergency Service Capability of Transportation Network after Luding M6.8 Earthquake

LIU Jinlong^{1,2}, LIN Junqi^{1,2}, PAN Yi^{3,4}, SONG Jiayu³

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 4. Key Laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: At 12:57 on September 5, 2022, an Ms6.8 earthquake occurred in Luding County, Sichuan Province. Affected by factors such as the natural geographical environment etc., the earthquake caused serious damage to the highway transportation network in the disaster area, which brought great obstacles to the emergency rescue work after the earthquake. The post-earthquake rescue process severely tested the emergency service ability of the transportation network in the disaster area. The general situation and the seismic damage of the highway transportation network were first introduced in this paper, then an evaluation method for transportation network emergency service capability based on the maximum traffic volume arriving at key rescue targets per unit time was proposed. Taking the

* 收稿日期:2022-11-16;修回日期:2022-12-01

基金项目:地震工程与工程振动重点实验室重点专项(2021EEEEVL0314)、四川省自然科学基金项目(2022NSF-SC0423)资助

作者简介:刘金龙(1978—),男,副研究员,博士。主要从事生命线工程抗震研究。E-mail:liujinlong@iem.ac.cn

通讯作者:潘毅(1977—),男,教授,博导,博士。主要从事结构工程抗震与加固研究。E-mail:panyi@swjtu.edu.cn

transportation network in the disaster area as an example, combined with the investigation data of the emergency repair process of the transportation network, this paper analyzed the decline and recovery process of the emergency service ability of the transportation network, and qualitatively discussed the seismic resilience of the transportation network. It is expected that the work in this paper can provide some valuable references to the seismic resilience evaluation of transportation networks.

Keywords: Luding Ms6.8 earthquake; transportation network; emergency service ability; recover process

引言

2022年9月5日12时57分,四川省甘孜州泸定县发生6.8级地震,震源深度16 km,给灾区交通网络造成了严重破坏。地震发生后,交通部启动国家地震应急三级响应,并在次日将响应级别提升至二级,迅速组织专家赶赴震区现场协助指导工作,同时调配装备物资赶赴震区,开展灾情核查、道路抢通和次生灾害防范等抗震救灾工作。

交通网络作为重要的基础设施,长期以来都是开展抗震救灾工作的主要载体^[1],然而其地震易损性较高,在地震中容易遭到破坏^[2-3]。特别是我国西部山区的交通网络,地震中破坏概率更高^[4]。这是由于我国西部山区自然地理环境特殊,多数地区具有坡度陡峭、岩性强度低、坡体结构松散等特点^[5-6],而山地普遍具备滑坡及地质灾害形成的条件,使得受地震地质灾害的影响非常巨大。一旦交通网络发生破坏,不仅会造成巨大的经济损失,还会给灾区的抗震救灾工作造成极大阻碍,严重影响应急救援工作的效率^[7]。

交通网络应急服务能力是其抵抗地震作用并保障震后应急救援工作开展的能力,是交通网络抗震韧性的一种体现。目前,在交通网络地震破坏及应急保障方面的研究工作主要集中在三个方面:(1)以地震易损性为基础的震后通行能力评估,典型代表如M.Shinozuka等^[8]、Eunsoo Choi等^[9]、兰日清等^[10],主要目的是分析震后交通网络地震破坏的物理状态,是后续进一步研究的基础;(2)基于路网连通性或路网容量的震后交通系统可靠性研究,如宋建学等^[11]、田方帅^[12]、A. Chen等^[13],其从可靠性的角度对整个路网的破坏情况进行评价,更侧重于网络可靠性分析方面的研究;(3)震后交通应急决策模型及方法等,如郭恩栋等^[14]、汤爱平等^[15]、刘劼^[16],此类研究主要是依据路网地震破坏的评估结

果,为应急救援或物资调配路线的优选提供指导方案。然而,现有的研究针对交通网络应急服务能力的较少,仅马兆有等^[17]、相超等^[18]从组织支撑、响应决策、资源保障、现场处置等社会维度对交通网络应急服务能力进行了评价,鲜有涉及交通网络发生破坏以及破坏后恢复速度方面的研究。

为了科学合理的评价地震中灾区交通网络保障应急救援工作开展的能力,课题组成员对泸定地震灾区的交通网络进行了震害调查,并结合交通部门发布的应急抢通数据,从交通网络抵抗地震破坏及其震后恢复过程的角度出发,建立交通网络应急服务能力的物理评价模型,利用该方法对灾区路网震后应急服务能力进行了评价。

1 灾区交通系统概况及震害情况

1.1 灾区路网概况

本次地震的震中位于甘孜州泸定县磨西镇,经中国地震局组织专家评定,极震区地震烈度达到Ⅸ度,Ⅶ度区影响范围涉及泸定县、石棉县、天全县、荣经县、汉源县、康定市6个市县。提取该区域内的主干道路网络,可以发现区域内的主要干线包括7条公路,分别是雅叶高速G4218、国道G318、京昆高速G5、国道G108、省道S211、省道S434、省道S215,如图1所示。由图1可知,在灾区北方有一条东西走向的高速公路G4218,是雅安和康定之间的主要连通线路。与G4218线路走向接近的是G318线,两者的线路大部分重合,在功能上有一定的重复。灾区的南方有一条高速公路G5,呈东北-西南走向,途经汉源、荣经两个县,是凉山州与雅安之间的主要通道。与G5线路走向接近的也有一条国道,即G108线。除了这4条主干道外,还有2条南北走向的省道,分别为S211线和S215线。其中,S211线由南至北贯穿石棉县和泸定县,几乎通过了整个重灾区。因此,该条线路对本次地震的应急救

援工作非常重要。除此之外,还有一条比较隐蔽的省道S434线(亦称榆磨公路),此线路由康定市直接到达镇中磨西镇。然而,该条线路中途需要翻越海拔3 830 m的雅家梗,道路大多以盘山公路为主,给大型机械设备的运输带来一定的难度。

本次地震灾害较重的乡镇主要是泸定县的磨西镇、燕子沟镇、得妥镇以及石棉县的新民乡、王岗坪乡、草科乡等6个乡镇,如图1中的红色标识点。由图1可知,对于此次地震的应急救援,外界救灾力量主要来自雅安、康定与石棉三个方向,除了一部分可以通过省道S434线直接进入磨西镇和燕子沟镇,大部分救援力量需要通过G4218和G5到达灾区外围。然而,想要进入震中的重灾区,就必须途径省道S211线,表明该条省道对本次地震后的应急救援工作是非常重要的。值得指出的是,由于两条高速公路G4218、G5的存在,与之路线重叠的两条国道G318和G108在救灾中的利用率被大大降低。

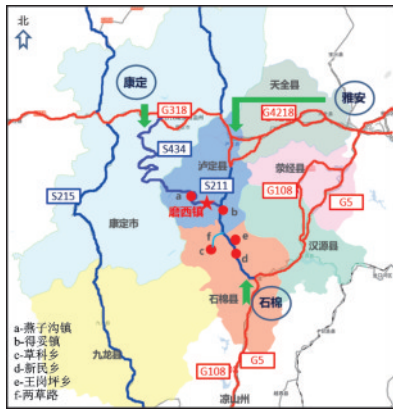


图1 灾区主干交通网络

Fig.1 Main transportation network map of disaster area

1.2 灾区路网破坏情况

根据交通部官方发布的数据^[19],截至9月8日7时30分,在本次地震中,交通系统共计核查公路16 708 km,包含8 085处点位(其中,桥梁3 837座,隧道604座,路基段、边坡1 446处,涵洞2 198座),发现受损172处。除了高速公路未发现明显的破坏以外,国道G318线、省道S211线和省道S434线均出现不同程度的损伤。其中,S211线是受损最严重的,破坏主要集中在泸定县联合村隧道至石棉县新民乡一段约20 km的路段上。该段道路多处发生大规模的崩塌滑坡,导致道路几乎全线毁坏,如图2所示。S434线的破坏主要集中在磨西镇至得妥镇金光村一段,长度约7 km,在磨西河大桥及贡都曲线

弯路两个路段的破坏比较严重,典型破坏如图3所示。G318线和G108线的破坏比较轻微,仅出现了几处小规模边坡滑坡,对道路整体通行的影响不大,如图4、5所示。除国、省干道遭到破坏以外,还有约40条农村公路受损中断,如通往泸定县湾东村、紫雅场村、共和村等许多村庄的道路中断,这使得震后应急救援工作面临极大的挑战。



(a) 石棉县草科乡段破坏情况



(b) 石棉县至王岗坪乡段破坏情况

图2 S211线石棉县王岗坪乡至泸定县联合村隧道段的典型破坏

Fig.2 Typical damage examples on road S217 from Wanggangping Township to Lianhecun tunnel



(a) 磨西河大桥处崩塌落石掩埋路基



(b) 贡都曲线弯路处路堤边坡崩塌

图3 S434线磨西镇至金光村段典型破坏

Fig.3 Typical damage examples on road S434 from Moxi Township to Jinguang Village



图4 G318道路甘谷地超限站处崩塌

Fig.4 Collapse at Gangudi weight station of road G318



图5 G108道路石棉县境内宰羊段崩塌

Fig.5 Collapse at Zaiyang of road G108 in Shimian County

总体来说,本次地震中交通网络遭到的破坏比较严重。震中附近的道路受地质灾害的影响较大,其破坏主要以边坡崩塌滑坡为主,并伴随路基路面的下沉开裂以及挡土墙坍塌等现象,导致了部分主干道中断。桥梁和隧道的破坏则比较轻微,在现场实际考察过程中,并未发现有桥梁和隧道因地震受损而中断的情况。

2 交通网络应急服务能力评价方法

交通网络的应急服务能力是指单位时间内输送救灾力量(包括救援所需要的队伍、装备、物资等)到救援区域并能够将伤员转运至目标医院的能

力。因此,评定一个交通网络应急服务能力的大小,不仅要分析输送救灾力量以及转运伤员数量的多少,还要分析输送这些数量所需要的时间^[20-21]。易知,交通网络的应急服务能力与输送的数量成正比,与所需时间则成反比。基于此,建立交通网络应急服务能力评定模型。

2.1 道路通行能力指标

一段道路输送能力的大小主要取决于道路本身的基准通行能力。基准通行能力是在规定的车道宽度、侧向净宽、交通组成和驾驶员条件下一条车道的某一截面在单位时间内能够通过连续交通流的最大标准车辆数。该参数是公路工程设计中非常重要的一项功能指标,是车道设计通行能力的基础^[22]。其中一种常用的基准通行能力模型为基于车头间距模型,见公式(1):

$$C = \frac{1000v}{\bar{h}_s} \quad (1)$$

式中, \bar{h}_s 为平均最小车头间距; v 为车辆速度。

按照等制动距离考虑,则基准通行能力见公式(2):

$$C = \frac{1000v}{vt + d_4 + L} \quad (2)$$

式中, t 为平均最短反应时间; d_4 、 L 分别为前后两车之间的安全距离和前车车长。

依据式(2)可以计算一条车道的基准通行能力。

另外,根据《公路路线设计规范》^[22]和《公路工程技术标准》^[23]和可以得到不同等级公路的基准通行能力,见表1。表1中高速公路、一级公路和二、三、四级公路均以单向基准通行能力来表示。依据该方法,可以计算一条道路的基准通行能力,确定路网中每条道路的最大运输量。

表1 不同等级公路车道基准通行能力

Table 1 Standard traffic capacity of different classes of highways

等级	高速公路			一级公路			二、三、四级公路		
设计速度/(km·h ⁻¹)	120	100	80	100	80	60	80	60	≤40
基准通行能力/(pcu·(h·ln) ⁻¹)	2 200	2 100	2 000	2 000	1 800	1 600	1 400	1 250	1 200

注:如果对应的设计速度在表中不能找到,则使用等比例插值法获得相应的基准通行能力

2.2 应急服务能力评价模型

历史震害表明,在地震烈度达到Ⅷ度的区域,会造成一定的人员伤亡。随着地震烈度的增加,人

员伤亡的比例呈指数级增长^[24]。地震发生后,烈度较高的震中区域是需要进行救援的重点区域,而在震中区域人员相对集中的城镇则是需要关注的重点救援目标。因此,本文将这些重点救援目标作为

交通网络的服务对象,定义交通网络对第*i*重点救援目标的应急服务能力见公式(3):

$$C_e^i = \frac{C_i}{T_i} \quad (3)$$

式中, C_i 为通往第*i*个重点救援目标最短路径的基准通行能力; T_i 为第*i*个重点救援目标最短路径的通行时间。

若该条最短路径上包含不同通行能力的路段,则可以各路段长度占路径总长度的比例为权重系数,将各路段的能力进行加权求和得到该条最短路径的应急服务能力。

实际地震中,各个目标需要救援的急迫程度有所不同,在救援力量受限时,需要合理支配以将救援效率发挥到最大。为此,综合考虑各重点救援目标的受灾程度、灾民数量、救灾难度等因素,给定每个目标一个权重系数 γ_i ,依据各个救灾目标的重要程度进行排序,且有 $\sum \gamma_i = 1$,将所有重点救援目标的应急服务能力进行加权求和,则得到交通网络对救援区域的应急服务能力 C_e ,即有:

$$C_e = \sum_{i=1}^n \gamma_i C_e^i \quad (4)$$

通过公式(4)可以评价交通网络对震中区域重点目标的应急服务能力。当交通网络因地震发生破坏后,道路的基准通行能力和通行时间都会发生变化,交通网络的应急服务能力必然下降。因此,利用震后与震前交通网络应急服务能力的比值,可以了解应急服务能力受地震影响的强弱,并对交通网络的抗震韧性进行定性评估。

3 灾区交通网络应急服务能力

根据本次地震的破坏情况,将磨西镇、燕子沟镇、得妥镇、新民乡、王岗坪乡、草科乡等6个乡镇作为本次地震的重点救援目标^[25],并依据图1确定各重点救援目标在路网中的位置。本次地震中,高速公路没有受到破坏,外界救灾力量可通过G4218和G5两条高速公路汇聚到康定市、泸定县以及石棉县。因此,可以将这三个城市作为救援力量的始发点,以确定到达各个重点救援目标的最短路径。结合路网中各条道路的基本属性,计算到达各重点救援目标最短路径的应急服务能力,并考虑震后各个重点救援目标的权重系数,通过加权求和得到路网初始的应急服务能力。各重点救援目标及路径基本信息见表2,通过计算得到路网初始应急服务能力为1 046.9 pcu/h²。

震后,根据交通网络总体破坏情况,判断各救援目标的初始最短路径是否连通,如中断则需重新选择路线,见表2。其中磨西镇和燕子沟镇两个目标的初始最短路径因地震中断,但还存在其他路径与康定市连通。因此重新选择路径,将救援路线改为由康定市出发经省道S434到达。另外4个重点目标则临时中断,没有路径可以到达。重新计算各目标最短路径的应急服务能力,汇总后得到交通网络针对6个重点目标的应急服务能力下降为199.7 pcu/h²,只有初始能力的19.1%。可见震后第一时间,交通网络应急服务能力损失非常严重,急需进行抢通修复。

表2 重点救援目标基本信息

Table 2 Basic information of key rescue targets

重点救援目标	最大烈度	最短路径	基准通行能力/(pcu·h ⁻¹)	距离/km	设计速度/(km·h ⁻¹)	权重系数	初始应急服务能力/(pcu·h ⁻²)	是否中断	震后最短路径	抢通时间	震后应急服务能力/(pcu·h ⁻²)
磨西镇	IX	泸定县-S211-S434	1 200	50	40	0.3	288.0	否	康定市-S434	9月6日 16:00	146.5
燕子沟镇	VIII	泸定县-S211-S434	1 200	57	40	0.1	84.2	否	康定市-S434	9月6日 16:00	53.2
得妥镇	IX	泸定县-S211	1 200	44	40	0.2	218.2	是	无	9月6日 15:30	0
草科乡	VIII	石棉县-S211-两草路	1 000	49	40 (30)	0.15	91.8	是	无	9月8日 9:00	0
王岗坪乡	VIII	石棉县-S211	1 200	38	40	0.15	189.5	是	无	9月6日 15:00	0
新民乡	VII	石棉县-S211	1 200	27.4	40	0.1	175.2	是	无	9月5日 16:00	0

4 交通网络抢通及应急能力恢复

4.1 交通网络应急修复

震后,根据现场调查信息,并结合部分交通部门发布的数据,得到各重点救援目标的抢通时间,详见表2。石棉县的新民乡于9月5日下午16:00左右首先得以抢通。这是由于新民乡距离石棉县城比较近,便于开展救援。同时,S211线石棉至新民一段的总体破坏较轻,多以小规模滑坡崩塌为主,抢通速度较快。至6日下午15:00,S211线石棉县城通往王岗坪乡的塌方点基本打通。这标志着王岗坪乡的应急通道抢通,其中两个典型震害点的抢通照片如图6所示。省道S211线金光大桥段是大型机械设备由泸定县通往震中区域的唯一通道,是泸定县通往磨西镇及得妥镇方向的重要咽喉道口,因路基垮塌造成道路中断,垮塌长度约150 m,高度约20 m,如图7所示。该段道路严重制约了震后应急救援工作的开展,经过21个半小时全力抢险,终于实现半幅抢通。



图6 省道S211线王岗坪方向震后应急抢通

Fig.6 Post-earthquake emergency repair of provincial highway S211 at Wanggangping

省道S434磨西河大桥段和贡都回头曲线段的破坏及修复情况分别如图8和图9所示。这两段道路是泸定县城通往磨西镇的必经之路。磨西河大桥段因边坡高陡且山体松散,地震中边坡发生崩塌



图7 省道S211线金光大桥段修复

Fig.7 Post-earthquake emergency repair of provincial highway S211 at Jinguang bridge



图8 省道S434磨西河大桥段修复

Fig.8 Post-earthquake emergency repair of provincial highway S434 at Moxihe bridge

将路基路面掩埋。贡都回头曲线段则是路堤边坡连同大半路基路面整体滑入燕子沟河,以至于原本7.5 m宽的路面剩下不到一半,且剩余路面也呈脱空状态,导致无法通行。至6日下午16:00时,中国安能集团、蜀道集团将两段道路连续抢通,至此打通了由泸定县城通往震中磨西镇的最快通道。



(a) 道路整体垮塌



(b) 修复后的便道

图9 省道S434贡都回头曲线段修复

Fig.9 Post-earthquake emergency repair of provincial highway S434 at Gongdu curve

至8日9:00时,王岗坪乡到两草路口的省道211线应急通道被抢通,而两草路上的塌方滑坡点已在7日下午得以清理,至此王岗坪到草科应急通道全部打通,救援车辆可由石棉县直抵草科乡进行应急救援,如图10所示。



(a) 两草路边坡崩塌滚石



(b) S211边坡滑坡被抢通

图10 通往草科乡的两草路破坏及抢通

Fig.10 Seismic damage and emergency repair of Liangcao road to Caoke Township

4.2 交通网络应急服务能力

交通网络的道路抢通完成,但所抢通的路段通行能力较差。这是由于很多未清理彻底的残余滑坡体堆积在道路两侧,挤占了部分车道的有效通行宽度,影响了行车速度。此外,路基路面的开裂、凹陷、凸起等破坏也降低了路面平整度,使得应急修复路段的行车速度还无法达到初始设计要求。对于道路宽度的变化,可根据《公路路线设计规范》^[22]中车道宽度、路肩宽度与通行能力修正系数的对应关系,利用修正系数对行车速度进行折减。对于路面平整度的影响,则参考《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》^[26]中的相关规定,以现场考察的行车速度记录数据为主,对通行速度进行适当修正。

计算该区域路网针对6个重点救援目标的应急通行能力随时间的变化曲线,如图11所示。其中,纵坐标为归一化后的应急服务能力,横坐标为时间,以地震发生时刻为时间零点。由图11可知,地震发生后路网针对重点目标的应急通行能力急剧下降,只有初始能力的20%左右。随着时间的推移,应急通行能力逐渐提升,3个小时后就迅速恢复至初始能力的35%,26小时后达到初始能力的50%,27小时后恢复至初始能力的80%。后续的增速开始变缓,至震后68小时,恢复至初始能力的87.3%。至此,针对重点目标的应急服务能力基本修复完成。从恢复过程曲线来看,路网针对重点救援目标的应急通行能力恢复速度比较快,在1天后就恢复了约80%,其地震应急阶段的抗震韧性能力比较良好,对震后黄金72小时应急救援提供了有力的保障。

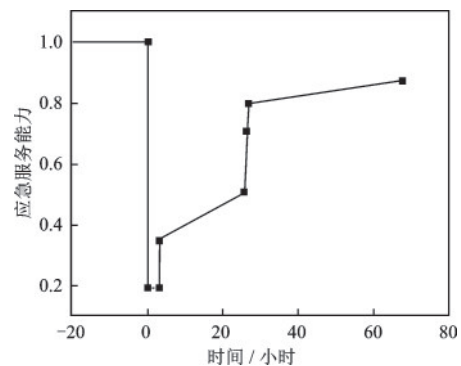


图11 交通网络应急服务能力恢复曲线

Fig.11 Recovery curve of transportation network emergency service capability

从整个区域来看,除了图 11 所指的 6 个重点乡镇之外,还有很多需要救援的山村。据交通部门统计,震后第一时间约有 40 条村道中断。如果将这些道路中断的村子也作为救援目标,交通系统应急服务能力的恢复过程则会延长。例如,直到 9 月 28 日,S211 郑家坪至联合村隧道段、联合村隧道至湾东村段、王岗坪乡至发旺村的生产生活通道等路段才得以应急抢通^[27]。至此,受“9·5”泸定地震影响的主要应急通道抢通工作基本完成,共历时 24 天。虽然这些通村的道路打通工作较慢,但此次地震救援过程中采用了水陆空联合救援手段,救援队伍乘冲锋舟通过水路、或利用直升机由空中直接进入“孤岛”实施救援,快速地完成了救援工作,有效减少了震后应急救援工作对传统道路交通的依赖,提高了震后救援效率。

5 结 论

本文提取和概述了泸定 6.8 级地震灾区的主干交通网络,分析了重点目标的救援线路。针对震后灾区交通网络应急服务能力评价手段欠缺的现状,提出了以基准通行能力为指标的交通网络应急服务能力评价方法,并对本次地震交通网络的应急服务能力进行了评价,得到以下主要结论:

(1)本次地震灾区交通网络的破坏比较严重。道路受地质灾害的影响较大,是交通网络破坏的主要部分。道路的震害主要表现为边坡、路基路面和挡土墙的破坏,是影响震后通行的主要因素。桥梁和隧道的破坏则比较轻微,对震后应急通行影响较轻。

(2)灾区交通网络应急服务能力受地震影响下降较大,但震后恢复速度较快,整体韧性表现较好。震后第一时间,灾区交通网络应急服务能力急剧下降,剩余能力不足震前的 20%。随着应急抢通工作不断开展,震后 3 小时应急服务能力恢复至 35%,震后 27 小时应急服务能力迅速恢复到震前的 80%。由此可见,灾区 6 个重点乡镇交通网络的应急服务能力恢复速度较快,具有较好的地震应急韧性能力,为 72 小时黄金救援时间提供了有力保障。

(3)本文提出的交通网络应急服务能力评估方法具有良好的可行性和实用性。该方法原理简单,概念清晰,不受路网结构类型、网络分析理论等因素的限制,不需要大量的网络分析计算,并可以考

虑交通网络中所有道路的破坏情况。因交通网络中各种乡村道路数据获取难度较大,本文仅以主干道为例进行评估,但计算结果与实际情况基本吻合,验证了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] 刘爱文,夏珊,徐超. 汶川地震交通系统震害及震后抢修[J]. 震灾防御技术,2008(3):243-250.
Liu A W, Xia S, Xu C. Damage and emergency recovery of the transportation systems after Wenchuan earthquake[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention,2008(3):243-250. (in Chinese)
- [2] 尹洪英. 道路交通运输网络脆弱性评估模型研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.
Yin H Y. Research on vulnerability assessment model of road transportation network[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011. (in Chinese)
- [3] 王龙,李小军,杨理臣,等. 青海玛多 7.4 级地震发震断裂特性及工程震害成因分析研究[J/OL]. 应用基础与工程科学报,1-10[2022-12-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3242.tb.20210615.1759.002.html>
Wang L, Li X J, Yang L C, et al. Analysis and research on the seismogenic fault characteristics and the cause of engineering damage in Qinghai Maduo M7.4 earthquake[J/OL]. Journal of Basic Science and Engineering: 1-10[2022-12-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3242.tb.20210615.1759.002.html>(in Chinese)
- [4] 杜修力,韩强,李忠献,等. 5.12 汶川地震中山区公路桥梁震害及启示[J]. 北京工业大学学报,2008,34(12):1270-1279.
Du X L, Han Q, Li Z X, et al. The seismic damage of bridge in 2008 Wenchuan earthquake and the lessons from its damage [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008,34(12):1270-1279. (in Chinese)
- [5] 涂国祥. 西南河谷典型古冰水堆积体工程特性及稳定性研究[D]. 成都:成都理工大学,2010.
Tu G X. Study on the engineering properties and stability of typical ancient outwash congeries in Southwestern Valley, China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2010. (in Chinese)
- [6] 潘毅. 芦山 6.1 级地震山区典型震害调查与分析[R]. 成都:西南交通大学土木工程学院,2022.
Pan Y. Investigation and analysis of typical seismic damage in mountainous area of Lushan M6.1 earthquake [R]. Chengdu: School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [7] 刘琛. 城市路网地震应急救援管理研究[D]. 南京:南京理工大学,2017.

- Lin C. Study on urban road network emergency management under earthquake [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [8] Shinozuka M, Feng M Q, Lee J, et al. Statistical analysis of fragility curves [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126(12):1224-1231.
- [9] Choi Eunsoo, Des Roches Reginald, Nielson Bryant. Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(2):187-199.
- [10] 兰日清, 丰彪, 王自法. 震后公路桥梁通行能力快速评估技术研究 [J]. *世界地震工程*, 2009, 25(2):81-87.
Lan R Q, Feng B, Wang Z F. Study on the fast assessment of traffic capacity of highway bridges after strong earthquakes [J]. *World Earthquake Engineering*, 2009, 25(2):81-87. (in Chinese)
- [11] 宋建学, 李杰. 震后城市交通系统连通性模拟 [J]. *自然灾害学报*, 1996, 5(1):73-78.
Song J X, Li J. Simulation on accessibility of post-earthquake urban transportation system [J]. *Journal of Natural Disasters*, 1996, 5(1):73-78. (in Chinese)
- [12] 田方帅. 城市应急道路网络抗震可靠性研究及应用 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
Tian F S. Research and application on seismic reliability for urban emergency road network [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese)
- [13] Chen A, Yang H, Lo H K. et al Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2002, 36(3): 225-252.
- [14] 郭恩栋, 赵振东, 余世舟, 等. 交通系统地震应急智能辅助决策技术研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 2003, 23(2):128-133.
Guo E D, Zhao Z D, Yu S Z, et al. Study on smart auxiliary decision-making techniques for post-earthquake emergency response of transportation systems [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 23(2):128-133. (in Chinese)
- [15] 汤爱平, 陶夏新, 谢礼立, 等. 震后应急反应辅助决策系统研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 2001, 21(1):145-151.
Tang A P, Tao X X, Xie L L, et al. Study of aid-decision system for post-earthquake response [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2001, 21(1):145-151. (in Chinese)
- [16] 刘劫. 基于 GIS 的交通系统震后应急评估系统研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011.
Liu J. Study on post-earthquake emergency evaluation method of traffic engineering based on GIS [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2011. (in Chinese)
- [17] 马兆有, 王长君, 李平凡, 等. 区域高速公路网应急救援能力评价体系建模研究 [J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2011, 35(4):714-717, 722.
Ma Z Y, Wang C J, Li P F, et al. On the study of regional highway network emergency rescue capability evaluation system model [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2011, 35(4):714-717, 722. (in Chinese)
- [18] 相超, 张曦, 刘小勇, 等. 公共安全视角下的交通网络综合应急能力评估 [J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2021, 43(5):418-422, 435.
Xiang C, Zhang X, Liu X Y, et al. Comprehensive emergency capacity assessment of transportation network based on the public safety perspective [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2021, 43(5):418-422, 435. (in Chinese)
- [19] 中华人民共和国交通运输部: 因泸定地震受损公路 172 处, 主要为边坡垮塌、高位滑坡 [EB/OL]. (2022-09-08) [2022-12-06]. <https://www.mot.gov.cn/>
- [20] 李永义. 交通系统地震应急决策模型与方法 [J]. *国际地震动态*, 2015(4):43-44.
Li Y Y. Method and model of earthquake emergency decision making on traffic system [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2015(4):43-44. (in Chinese)
- [21] 杜进有. 区域交通网络分析方法 [D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
Du J Y. Study on analysing methods of regional traffic network [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002. (in Chinese)
- [22] 公路路线设计规范: JTG D20—2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [23] 公路工程技术标准: JTG B01—2014 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [24] 南燕云, 刘亢, 高博伟, 等. 2011—2020 年中国大陆地震人员伤亡基本特征分析 [J]. *灾害学*, 2021, 36(4):42-47.
Nan Y Y, Liu K, Gao B W, et al. Characteristic analysis of earthquake caused casualties in mainland China in 2011-2020 [J]. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(4):42-47. (in Chinese)
- [25] Qu Z, Zhu B J, Cao Y T, et al. Rapid report of seismic damage to buildings in the 2022 *M* 6.8 Luding earthquake, China [J]. *Earthquake Research Advances*, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2022.100180>.
- [26] 公路工程质量检验评定标准(第一册土建工程): JTG F80 / 1—2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [27] 四川省交通运输厅: 受“9·5”泸定地震严重影响阻断的省道 217 线全线打通应急通 [EB/OL]. (2022-09-30) [2022-12-06]. <http://jtt.sc.gov.cn/>.

(本文责编: 赵霞)