

宣功奉,林均岐,刘金龙. 2022. 交通网络震后整体功能失效评估方法[J]. 地震研究, 45(3): 362–369, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0037.

Xuan G F, Lin J Q, Liu J L. 2022. A method for assessing the overall function failure of transportation networks after an earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(3): 362–369, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0037.

交通网络震后整体功能失效评估方法^{*}

宣功奉, 林均岐, 刘金龙^{*}

(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)

摘要:以交通网络通行能力为系统功能状态评价参数,基于单元的基本属性及网络拓扑结构引进单元重要度系数,结合单元地震破坏状态及其功能失效状态的对应关系,通过加权求和得到交通网络震后的总体通行能力,并将其与震前总体容量的比值作为系统功能失效状态判断指标。最后,以某城市道路网络为例,对所提出方法的可行性进行验证。结果表明:以震害评估为基础,使用路段通行能力的变化来衡量交通网络失效水平,能够在地震灾害后快速评估交通系统震后失效水平。

关键词:交通网络;通行能力;重要度系数;功能失效;状态评估

中图分类号:U491;P315.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0666(2022)03-0362-08

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0037

0 引言

我国位于环太平洋地震带和欧亚地震带两大地震带之间,是遭受地震灾害最严重的国家之一。据统计,2008年汶川 $M_s8.0$ 地震共造成24条高速公路、161条省级以上干线公路、8618条乡村公路、6140座桥梁及156条隧道不同程度的受损(刘爱文等,2008)。从历史地震经验教训来看,地震灾害容易造成交通系统的破坏,地震发生时道路交通系统元件直接破坏和地震所产生的落石、崩塌、山体滑坡及堰塞湖等次生地质灾害导致的砸毁、掩埋、淹没等间接破坏使得交通系统通行受阻。此外,交通系统受损还会第一时间影响其他生命线工程的恢复,如供水、供电和通信等其他生命线的恢复就取决于是否能够首先将救灾人员和物资运送到受灾地区。因此,快速准确地评估震后交通受损程度,对震害防御有着重大意义。

抗震韧性问题是当前地震工程领域的研究热点,在道路交通系统震害研究中,不同阶段的路

网功能量化指标各不相同,选取更加科学可靠的功能指标一直是相关研究热点。Bocchini和Frangopol(2012)、Werner等(2005)考虑交通阻塞后路线的改变,使用通行时间和通行距离来描述功能变化。Akbarzadeh等(2017)研究了行程时间和网络中心度对城市道路韧性的影响,然而,通行时间和通行距离指标无法描述某些中断的极端情况。Ip和Wang(2011)基于交通网络的可靠路径数提出量化指标,但对不同道路在网络中的重要性差异考虑不足。Scott等(2006)综合考虑连通性和交通流,定义并量化了网络鲁棒性指数NRI,主要考虑了交通网络的拓扑性,而忽略了单元的损伤研究。吕彪等(2020)基于BPR(Bureau of Public Roads)函数描述路网通行能力的退化,以网络效率为指标来构建系统韧性指标,并给出了基于乐观和悲观角度的韧性重要度指标。Nagurney和Qiang(2007)分析所有OD(origin-destination,即起始点到目的地)对的需求来定义网络效率,但是随着路网复杂性的增加,其计算量将大大增加。肖佳(2020)考虑了道路本身震

^{*} 收稿日期:2021-11-08.

基金项目:中国地震局地震工程与工程振动重点实验室重点专项(2021EEVL0314)资助.

第一作者简介:宣功奉(1997-),硕士研究生,主要从事交通系统抗震研究.E-mail: xuangongfeng@gmail.com.

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

害及废墟埋压距离下的道路剩余宽度来量化评估地震灾害下应急期的城市交通网络的韧性。Tang等(2020)基于多维系统的贝叶斯网络模型(BNM)评估了城市交通系统韧性,讨论了城市交通的长期多维复原力的概念,并研究了韧性发展与城市经济发展之间的关系。随着交通网络灾害的进一步研究,Vishnu等(2021)不仅对行程时间及行程距离两个量化指标进行了分析,还考虑了道路交通系统灾后恢复过程中的CO₂排放量,研究了交通系统中韧性和可持续性概念的相关性。

本文从路段的通行能力出发,考虑单元的震害损害程度,提出了震后交通网络功能剩余指数的分析方法,并针对交通网络功能损失提出失效等级的划分。然后给出了更为简单准确的路段重要度评价方法,介绍了两个交通系统单元震害评估模型。最后,通过案例研究验证了该方法的可行性。

1 交通元件震害评估

交通元件震害评估能够量化地震灾害中交通系统功能的损失,也是地震前防震减灾规划和地震后应急管理的首要工作之一。交通元件震害评估基于震害评估模型,可以为交通网络功能分析提供特定的震害场景。

1.1 桥梁震害评估

采用回归统计法,对2008年汶川M_s8.0地震桥梁震害数据进行统计分析,选取桥梁结构类型、桥梁线性、场地土类型、桥墩类型、基础类型、支座类型、桥梁规模、设防烈度和实际烈度9个影响因子建立桥梁震害评估模型(余方亮,2018)。根据不同的桥梁物理参数得到相应的震害指数,并参考《生命线工程地震破坏等级划分》(GB/T 24336—2009)将桥梁破坏划分为5个等级:基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏。桥梁震害评估模型计算公式如下:

$$Y = c \prod_{i,j=1}^{m,n} a_{ij}^{x_{ij}} \quad (1)$$

式中: c 为常系数; $a_{ij}^{x_{ij}}$ 为震害影响因子的取值; Y 为桥梁震害指数($0 \leq Y \leq 1$),若小于0取0,若大于1则取1。

1.2 道路震害评估

通过对2008年汶川M_s8.0地震不同类型道路震害进行统计分析,将地震灾害下道路破坏分为路基震害、支挡结构震害和边坡震害4个类型,结合前人的研究成果,选取公路等级、路基类型、支挡结构类型、地基土类型、边坡高度和坡度、路基高差、设防烈度以及实际烈度等震害影响因子建立震害评估模型(胡衡,2018)。参照《生命线工程地震破坏等级划分》(GB/T 24336—2009)将道路破坏根据不同的震害指数划分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、毁坏5类。道路震害评估模型计算公式如下:

$$Y = c \prod_{j=1}^n \prod_{k=1}^{r_j} c_{jk}^{x_{jk}} \quad (2)$$

式中: c 表示常系数; $c_{jk}^{x_{jk}}$ 为各震害因子的取值; Y 为道路震害指数($0 \leq Y \leq 1$),若小于0则取0,若大于1则取1。

1.3 隧道震害评估

方晓庆(2008)对1995年日本阪神地震34条隧道进行统计,将隧道地震震害分为5个等级,使用最小二乘法对围岩分类、烈度覆盖层厚度、隧道长度及是否穿过断层等因素回归分析得到隧道在各烈度下的震害评估模型,并基于历史震害经验和隧道震害实际情况考虑洞口稳定性、修建时间和是否抗震设防对隧道抗震能力的影响对模型进行修正。隧道震害评估模型计算公式如下:

$$Y = \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^{r_j} \delta_{i(j,k)} b_{jk} \quad (3)$$

式中: $\delta_{i(j,k)}$ 为变量 j 中 k 项的反应情况;系数 b 为各震害因子的取值; Y 为隧道震害指数($0 \leq Y \leq 1$),若小于0则取0,若大于1则取1。

2 路段重要度

韩远等(2021)选择道路连接度、中介度、接近度和路段长度4项特征指标进行综合评价,较好地反映了路网的拓扑结构,但没有考虑不同道路通行能力差异。陆百川等(2020)选取道路等级、路段通行能力、不同时段的路段流量、旅行时间,并引入基于邻接矩阵和时空相关性的时空

影响属性指标,综合考虑路段物理特征、交通需求量和交通流时空特性,使用多属性决策方法构建路段重要度模型,结果既满足主观的知识经验又不缺乏客观性,但这种方法重要度计算量太大,不利于交通网络的快速评估。因此,本文基于路段的物理属性和网络拓扑属性提出一种具备简洁性和准确性的路段重要度评价方法。

在城市交通网络中,按照不同的交通功能可以将道路划分为主干道、次干道和支路3个类别,不同等级道路的设计速度(km/h)和设计通行能力(pcu/h)不同,导致道路服务水平具有差异,道路等级的高低与道路的通行能力有较大的相关性,通常情况下道路等级指标能够较好地反映道路的宽度(车道数)、道路状况、坡度、与建筑物的距离等参数。道路等级的路段重要度评估指标 w_i 为:

$$w_i = \{a, b, c\}, \text{ 且 } a + b + c = 1 \quad (4)$$

式中: a 、 b 、 c 分别为主干道、次干道和支路的重要度,根据曲昭伟(2013)的研究, $a = 0.5$ 、 $b = 0.3$ 、 $c = 0.2$ 。

在图论网络分析中,中心性是量化判断节点重要性的重要指标,能够反应网络拓扑性。当前主要有度中心性(DC)、中介中心性(BC)、接近中心性(CC)和特征中心性(EC)4种度量指标。度中心性是最简单的一个指标, N_i 表示网络中节点与 i 节点直接相连节点数目, $DC_s = \sum_{s=1}^g \frac{N_s}{g-1}$ 为节点 s 的标准化度中心性,其中 g 表示节点总数。

不同的路段单元在网络结构中的重要性不同,表现为不同路段阻塞或中断对交通网络连通性影响不一。使用路段的度中心性 X_i 来表示,并且量化其在网络拓扑结构中的重要度权重,具体公式如下:

$$X_i = \frac{N_i}{n-1} \quad (5)$$

$$N_i = \sum_{j=1}^n e_{ij}$$

式中: n 为交通网络中路段总数; N_i 表示与路段相连的路段数; i 与 j 为不同的路段,若 i 与 j 直接相连,则 $e_{ij} = 1$,不直接相连则为0。

震后交通网络中路段的重要度需要多因素综合考虑,通过路段的等级指标和标准化度中心性权重乘积并对其进行归一化处理,得到路段的重要度为:

$$I_i = \frac{W_i X_i}{\sum_{i=1}^n W_i X_i} \quad (6)$$

3 震后交通网络功能评估方法

交通网络功能的量化可以用路网容量(即路网通行能力)来表示,它能反映道路网的通行能力,具体表现形式为交通网络系统在特定状态下路网中所能够通行的最大标准车辆数。交通网络由许多不同路段单元构成,因此其通行能力以路段容量为基础,通过计算所有路段的通行能力,并将所有的路段单元容量以加权求和的方式获得路网的通行能力。计算对比交通网络震前正常运行状态下的通行能力和震后路段单元破坏情景下的路网通行能力以衡量交通网络在地震灾害后的功能失效水平。

根据《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012),表1给出了不同设计等级的城市道路每条标准车道的通行能力。但是有些道路没有明确划分车道分隔线,胡章立等(2012)对调查的交通数据进行回归分析,发现在一定范围内,车道宽度增加对交通通行能力提升显著,当车道宽度大于3.5 m时,车道宽度的增加并不能提升道路通行能力。因此,对于标记不明的道路,宜以每一车道为3.5 m计算标准车道数。

地震灾害发生前路网通行能力可以表示为:

$$C_0 = \sum_{i=1}^n (I_i \times N_i \times D_i) \quad (7)$$

式中: I_i 为路段 i 的重要度; N_i 为路段 i 的标准车道数; D_i 为每条车道设计通行能力。

表1 每条车道设计通行能力

Tab. 1 Design capacity of lanes

设计时速/(km·h ⁻¹)	100	80	60	50	40	30	20
通行能力/(pcu·h ⁻¹)	2 200	2 100	1 800	1 700	1 650	1 600	1 400

震后不同路段的破坏程度不同，其通行能力的损失也不尽相同，利用道路、桥梁、隧道等地震破坏评估的方法，可以得到交通元件的地震破坏指数及震害等级。兰日清等（2009）研究海城、唐山等地区的震害资料建立了桥梁损失与单体公路桥梁地震损伤程度的对应关系，常赞杰等（2020）通过模糊 C 均值聚类算法进一步验证了震害等级和通行能力折损关系的可靠性。本文参考李永义等（2014）给出的道路地震破坏等级与其通行概率之间的关系，使用通行概率来表示道路在不同等级震害情况下的通行能力的预测（表 2），可以利用不同路网单元的地震破坏等级得到其功能失效概率。

表 2 不同震害等级道路通行概率
Tab. 2 Road access probability on different earthquake damage grades

震害等级	震害指数 Y	通行状态	通行概率 P
基本完好	$[0.00, 0.10)$	允许通行	$[1, 0.9)$
轻微破坏	$[0.10, 0.30)$	限制通行	$[0.7, 0.9)$
中等破坏	$[0.30, 0.55)$	限制通行	$[0.3, 0.7)$
严重破坏	$[0.55, 0.85)$	禁止通行	0
毁坏	$[0.85, 1.00]$	禁止通行	0

表 2 中震害指数和通行概率为一个区间值，本文取路段破坏后最低通行概率代表道路破坏状态下通行概率。此外，若一个路段单元由多个交通元件组成，路段通行概率按串联方式取各路段的最小值。通过研究不同路段的通行能力折减情况，可以得到震后路网通行能力为：

$$C = \sum_{i=1}^n (P_i \times I_i \times N_i \times D_i) \quad (8)$$

式中： P_i 为震后路段的通行概率。基于此，可以利用震后破坏路网通行能力 C 和震前正常运行状态下的路网通行能力 C_0 的比值来表示交通网络整体功能剩余指数为：

$$R = C/C_0 \quad (9)$$

根据交通网络功能剩余指数的不同取值，将震后网络的功能失效水平划分为基本完好、轻度失效、中度失效和严重失效 4 个等级，见表 3。路

网功能失效等级评估流程如图 1 所示。

表 3 交通网络功能失效等级

Tab. 3 Levels of the function failure of the traffic networks				
失效等级	基本完好	轻度失效	中度失效	严重失效
R	$R \geq 0.95$	$0.8 \leq R < 0.95$	$0.5 \leq R < 0.8$	$R < 0.5$

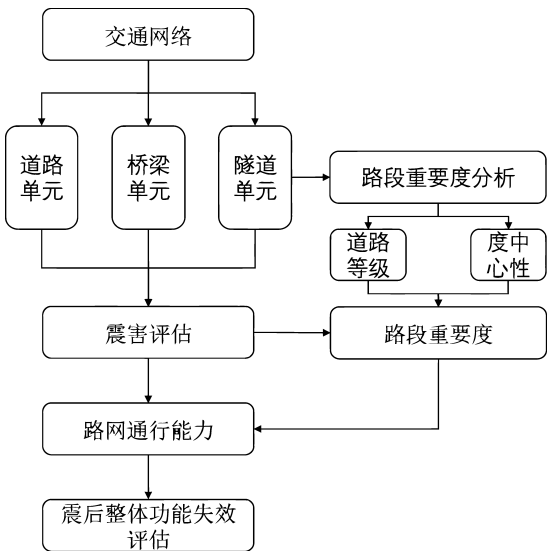


图 1 路网功能失效等级评估流程图

Fig. 1 Flow chart of road network functional failure level assessment

4 实例分析

将本文所提出的震后交通网络整体功能失效评价方法应用于城市网络实例中，研究某交通网络在遭遇不同烈度地震灾害后的服务能力变化情况。通过现场调查和资料查阅等方式，获得目标区域道路路基、支挡、边坡、路基高差、桥梁类型、桥梁线性、支座、桥墩类型、桥梁规模、车道数或道路宽度等交通元件属性。根据交通元件震害评估模型得到各路段单元在不同烈度地震下的破坏状况，结合各单元的不同地震烈度下重要度，使用基于路网通行能力的整体功能失效评估方法得出不同烈度地震下交通网络服务水平失效程度。

本文所选取研究区域交通网络包含 64 个路段节点和 100 个路段单元，其中道路单元 97 个、桥梁单元 3 个，路段总里程为 32.9 km，表 4 为震前各路段单元的重要度。

表 4 震前路段单元重要度

Tab. 4 Importance of the road element before the earthquake

编号	重要度 <i>I</i>	编号	重要度 <i>I</i>	编号	重要度 <i>I</i>	编号	重要度 <i>I</i>	编号	重要度 <i>I</i>
0	0.007 697	20	0.006 414	40	0.007 697	60	0.012 829	80	0.007 697
1	0.006 414	21	0.007 697	41	0.011 546	61	0.009 622	81	0.009 622
2	0.006 414	22	0.009 622	42	0.007 697	62	0.012 829	82	0.009 622
3	0.005 773	23	0.006 414	43	0.007 697	63	0.012 829	83	0.012 829
4	0.007 697	24	0.003 849	44	0.005 773	64	0.009 622	84	0.012 829
5	0.016 036	25	0.007 697	45	0.007 697	65	0.011 546	85	0.005 773
6	0.005 131	26	0.003 849	46	0.019 243	66	0.007 697	86	0.006 414
7	0.009 622	27	0.006 414	47	0.016 036	67	0.016 036	87	0.016 036
8	0.012 829	28	0.005 773	48	0.019 243	68	0.016 036	88	0.016 036
9	0.007 697	29	0.006 414	49	0.019 243	69	0.016 036	89	0.012 829
10	0.009 622	30	0.003 849	50	0.009 622	70	0.012 829	90	0.019 243
11	0.007 697	31	0.003 849	51	0.012 829	71	0.007 697	91	0.019 243
12	0.009 622	32	0.005 131	52	0.012 829	72	0.016 036	92	0.009 622
13	0.007 697	33	0.006 414	53	0.012 829	73	0.019 243	93	0.016 036
14	0.005 131	34	0.007 697	54	0.012 829	74	0.005 773	94	0.012 829
15	0.005 131	35	0.007 697	55	0.009 622	75	0.007 697	95	0.016 036
16	0.007 697	36	0.006 414	56	0.006 414	76	0.019 243	96	0.016 036
17	0.007 697	37	0.007 697	57	0.006 414	77	0.011 546	97	0.012 829
18	0.006 414	38	0.006 414	58	0.005 131	78	0.006 414	98	0.009 622
19	0.006 414	39	0.009 622	59	0.005 131	79	0.011 546	99	0.012 829

根据不同的地震强度，可以得到每个路段单元的震害等级。图 2 为交通网络在地震烈度为Ⅵ~Ⅹ度时的震害等级，绿色代表路段基本完好，单元功能基本不受影响，黄色、橙色分别代表轻微破坏和中等破坏，路段能够通行但是通行能力下降，红色代表严重破坏或毁坏，路段中断，通行能力丧失。随着震级的不断变大，受损单元越多，损害越严重。从图 2 可看出，地震烈度为Ⅵ度时，仅有为数不多的单元受到轻微损害；Ⅶ度时，有 20% 的路段受到一定程度破坏，但是路网整体情况比较良好；Ⅷ度时，41% 的路段受到不同程度破坏，其中以轻微破坏为主；Ⅸ度时，53% 的路段受损，受损路段的震害程度更严重，更是有 11% 的路段丧失通行能力；Ⅹ度时，绝大多数路段都受到了不同程度破坏，其中 16% 的路段严重破坏或毁坏。

采用震后路网功能评估方法，根据道路等级和路段中心度得到的重要性指数，计算出交通网络在地震发生前和发生后的通行能力，然后得到不同地震烈度下交通网络整体功能失效等级，见表 5。

表 5 不同地震烈度下交通网络功能失效水平

Tab. 5 Levels of function failure of transportation networks subjected to different intensities

烈度	震前容量	震后容量	功能指数	失效等级
Ⅵ	8 829. 89	7 936. 086	0. 898 8	轻度失效
Ⅶ	8 829. 89	7 684. 695	0. 870 3	轻度失效
Ⅷ	8 829. 89	7 285. 723	0. 825 1	轻度失效
Ⅸ	8 829. 89	6 832. 822	0. 773 8	中度失效
Ⅹ	8 829. 89	5 634. 339	0. 638 1	中度失效

图 3a 为不同地震烈度下交通网络剩余功能指数的变化趋势。从图中可看出，随着地震烈度的增加，交通网络功能剩余越少，其功能失效等级也越来越高。在烈度为Ⅵ~Ⅹ度时，随着烈度等级的增加，交通网络通行能力损失越多；在烈度为Ⅵ~Ⅷ度时，地震烈度比较低，路段单元破坏程度低，各路段通行能力只有一定程度的折减，且重要性优先级比较高的路段保存比较完好。因此，路段整体功能并无较大损失，能够满足震后救灾需求并在清理后能够快速恢复满足大部分日常需求，交通网络整体功能失效水平比较乐观，

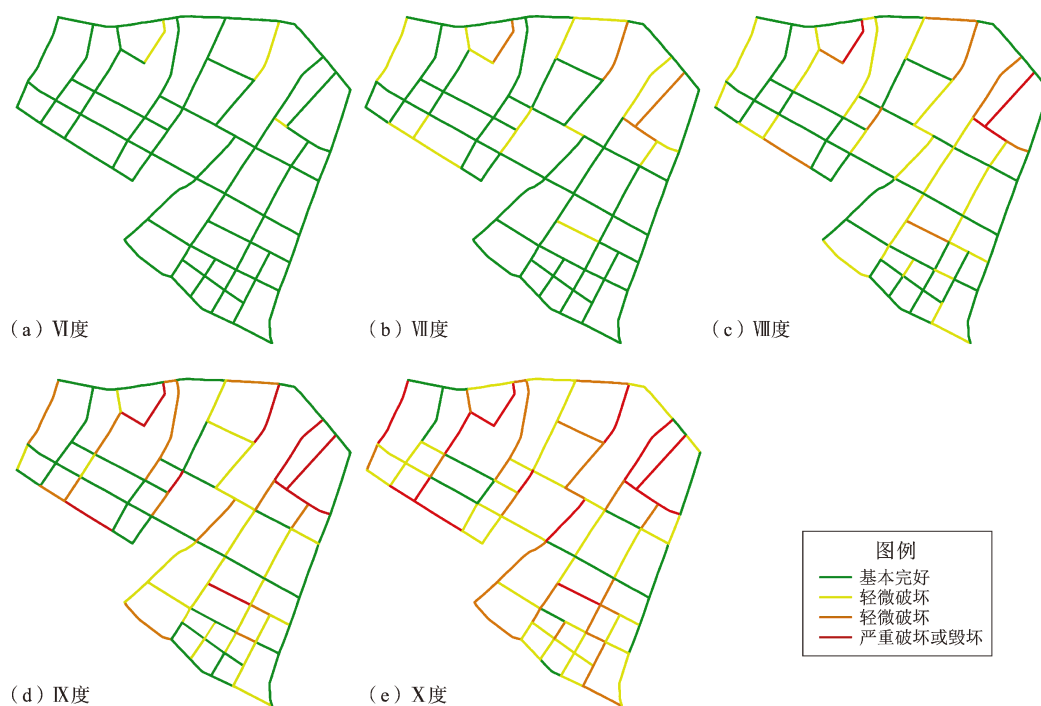


图2 不同烈度下路段震害等级

Fig. 2 Seismic damage grades of roads subjected to different intensities

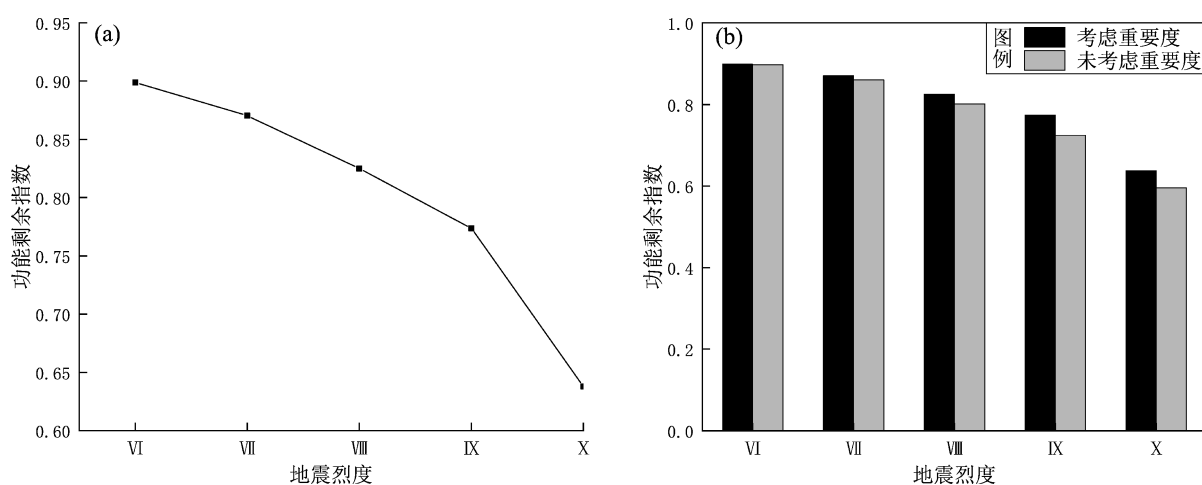


图3 不同地震烈度下交通网络功能剩余指数 (a) 以及考虑重要度与否功能剩余指数的对比 (b)

Fig. 3 Residual indexes of the function of traffic networks subjected to different intensities (a) and residual indexes whether or not involving the importance of the road element (b)

为轻度失效；在烈度为Ⅸ～Ⅹ度时，绝大多数路段都有一定程度的破坏，其中不乏震害严重致使功能完全丧失的路段，部分受灾严重区域需要根据合理的修复策略对震害时清理修复才能保证救援通道的畅通，并且由于高地震烈度下严重破坏或毁坏导致的阻塞路段大幅增加，路网功能损失更加迅速，路网整体功能为中度失效。

为了体现路段重要度的必要性，图3b对比了

考虑路段重要度和不考虑路段重要度情况下不同烈度下的路网功能剩余指数的变化。在烈度为Ⅵ～Ⅹ度时，未考虑路段重要度时的功能剩余指标都要低于考虑重要度情况下的指标，而且二者之间的差距随着地震烈度的增加而变大。究其原因，是不考虑重要度的情况忽视了不同路段在整个路网中地位的差异性，放大了部分路段单元损坏对整体功能损失的贡献，导致过高评估了路网整体

功能损失。

本文所研究的交通网络实例在烈度为Ⅵ~Ⅹ度时的功能整体保持较好,这得益于该地区较高的设防水平,此外,通行中断单元的重要度比较低也是功能剩余较为理想的重要原因。在Ⅹ度时有16%的路段丧失功能,具体失效单元见表6工况1(即基于震害评估的Ⅹ度地震烈度震害评估情景),但是其中失去通行能力的路段单元主要为非主干道,即重要度较小的“非重要道路”,此时的路网功能指数为0.6381,功能失效等级为中等失效;设置工况2将中断的道路调整为重要度高的“重要道路”,修改后发生严重破坏或毁坏单元见表6工况2,其功能指数将降低至0.3457,路网剩余功能急剧降低,功能失效等级将升级为严重失效,这一情况也与实际情况相符合,进一步验证了路段重要性指标选取方法的可靠性。

表6 不同工况下发生严重破坏及毁坏单元

Tab. 6 Road units severely damaged or destroyed on Condition 1 and Condition 2

工况	发生严重破坏及毁坏单元							
1	6	9	10	13	15	18	24	26
	27	31	32	59	66	75	87	92
2	5	46	47	48	49	60	62	63
	67	72	73	76	90	91	94	96

从路段通行能力这一功能参数出发,可通过交通网络通行能力的变化来评估路网震害下的功能失效水平。使用路段通行能力这一指标不仅能够直观且合理地量化交通网络整体功能损失程度,还可以发现交通系统的薄弱部位,并提出针对性的恢复及改建措施。

5 结论

本文以交通元件震害评估和灾害下路段通行概率为基础,基于地震灾害发生前后路段单元的通行能力变化提出了震后交通网络整体功能失效评估方法,给出了道路等级和路段介数中心性的综合指标评价评估路段重要性,并通过相应案例分析验证本文方法的可行性,得到如下结论:

(1) 本文提出的方法能够快速评价路网功能整体失效水平,有助于更加科学地估计震后路网

剩余功能状态,为震后应急救援及恢复重建工作提供参考,提高救援效率。

(2) 基于单元重要度的概念,提出路网容量的加权求和和计算方法,能够体现道路网络中各单元差异性给网络容量带来的影响,避免了复杂的网络分析过程。

本文未考虑地震导致的场地土失效及地震其他次生灾害的破坏,未来可以在完善土壤液化及山地道路滑坡等次生灾害等方面作进一步研究。

参考文献:

- 常赞杰,王胜芹,谭阳. 2020. 基于模糊C均值聚类算法的震后公路桥梁通行能力预测[J]. 信息与电脑(理论版),32(2):35-36.
- 方晓庆. 2008. 交通元件地震破坏评估方法研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 韩远,王中辉,禄小敏. 2021. POI辅助下的道路选取[J]. 测绘科学,46(4):165-171.
- 胡衡. 2018. 基于汶川地震的道路震害评估研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 胡章立,贺平,羊明. 2012. 城市道路车道宽度对通行能力的影响分析[J]. 城市道桥与防洪,(1):1-2,5.
- 兰日清,丰彪,王自法. 2009. 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,25(2):81-87.
- 李永义,周正华,蒋知之,等. 2014. 震后公路实际通行能力理论模型[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),36(5):102-106.
- 刘爱文,夏珊,徐超. 2008. 汶川地震交通系统震害及震后抢修[J]. 震灾防御技术,4(3):243-250.
- 陆百川,舒芹,马广露,等. 2020. 基于多属性TOPSIS决策的交通网络路段重要度计算[J]. 浙江工业大学学报,48(3):334-344.
- 吕彪,高自强,刘一骊. 2020. 道路交通系统韧性及路段重要度评估[J]. 交通运输系统工程与信息,20(2):114-121.
- 曲昭伟,魏强,别一鸣,等. 2013. 基于固定检测器的区域交通状态判别方法[J]. 中南大学学报(自然科学版),44(1):403-410.
- 肖佳. 2020. 城市交通系统震后应急期韧性评价研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学.
- 余方亮. 2018. 基于汶川地震的桥梁震害评估模型研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- Akbarzadeh M, Memarmontazerin S, Derrible S, et al. 2017. The role of travel demand and network centrality on the connectivity and resilience of an urban street system[J]. Transportation, 46(4):1127-1141.
- Bocchini P, Frangopol D M. 2012. Restoration of bridge networks after an earthquake: Multicriteria intervention optimization[J]. Earthquake Spectra, 28(2):427-455.
- Ip W H, Wang D. 2011. Resilience and friability of transportation networks: evaluation, analysis and optimization[J]. IEEE Systems Journal, 5(2):189-198.
- Scott D M, Novak D C, Aultman-Hall L, et al. 2006. Network robustness

- index; A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks[J]. *Journal of Transport Geography*, 14(3):215–227.
- Tang J, Heinemann H, Han K, *et al.* 2020. Evaluating resilience in urban transportation systems for sustainability: A systems – based Bayesian network model[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 121:102840.
- Vishnu N, Kameshwar S, Padgett J E. 2021. Road transportation network hazard sustainability and resilience: correlations and comparisons [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1–21.
- Werner S D, Taylor C E, Cho S, *et al.* 2005. New developments in seismic risk analysis of highway systems[C]. *Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, 1–6.
- CJJ 37—2012, 城市道路工程设计规范[S].
- GB/T 24336—2009, 生命线工程地震破坏等级划分[S].

A Method for Assessing the Overall Function Failure of Transportation Networks after an Earthquake

XUAN Gongfeng, LIN Junqi, LIU Jinlong

(*Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China*)

Abstract

In this paper, we set the traffic network capacity as a parameter to evaluate the traffic system's function. We introduce the coefficient of importance of the road unit based on the basic attributes of the road unit and the network topology. By the help of the relation between the seismic damage to the road unit and the state of its function failure, we obtain the post-earthquake, overall capacity of the traffic network by weighted summation. Then we divide the pre-earthquake, overall capacity of the traffic network by the post-earthquake, overall capacity and obtain a ratio, which is set as an index for evaluating the traffic system's function. On the basis of the seismic damage assessment, and according to the change in road capacity, our method focuses on evaluating the level of traffic network failure, and quickly assesses the failure level of the transportation system after an earthquake. Finally, we test the feasibility of our method by an urban road network.

Keywords: transportation networks; traffic capacity; coefficient of importance; functional failure; evaluation of road conditions