

Research and Application of Recoverability Evaluation Method for Urban Road Network After Earthquake

Du Jie^{1,2}, Lin Junqi^{1,2}, Liu Jinlong^{1,2}

¹Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, China

²Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Administration, Harbin, China

Email address:

hitdujie@163.com (Du Jie), linjunqi1964@163.com (Lin Junqi), liuliu_jinlong@163.com (Liu Jinlong)

To cite this article:

Du Jie, Lin Junqi, Liu Jinlong. Research and Application of Recoverability Evaluation Method for Urban Road Network After Earthquake. *Science Discovery*. Vol. 6, No. 5, 2018, pp. 327-331. doi: 10.11648/j.sd.20180605.13

Received: July 13, 2018; Accepted: September 12, 2018; Published: September 18, 2018

Abstract: China is situated between the Eurasian seismic belt and the Circum-Pacific seismic belt, therefore earthquake often happened on it. In recent years, earthquakes have occurred frequently in China, such as the Jiuzhaigou earthquake, the Yushu earthquake, and the Wenchuan earthquake. The damage caused by these earthquakes to the urban road traffic system will lead to the paralysis of urban functions, which will directly affect the speed of post-earthquake rescue and increase the difficulty of rescue. In order to quickly assess the resilience of urban traffic after the earthquake, and then develop emergency evacuation and rescue routes, based on the reliability evaluation method of road network, this paper gives the calculation method of urban road network traffic reliability. Reliability determines the time necessary for the road network to return to normal capacity after the earthquake. The recoverability model of urban road network is evaluated through the established urban road network recoverability model, and the model is used to evaluate the recoverability of some road networks in Zhongshan District of Dalian City, and the prosperous area of Zhongshan District in Dalian is obtained. Part of the road network can recover better after the earthquake. It can provide reference for post-earthquake emergency rescue, avoidance and evacuation, medical rescue and other work.

Keywords: Urban Road Network, Recoverability, Reliability Assessment, Degree of Reliability

城市路网震后可恢复性评估方法的研究及应用

杜杰^{1,2}, 林均岐^{1,2}, 刘金龙^{1,2}

¹中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨, 中国

²中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 哈尔滨, 中国

邮箱

hitdujie@163.com (杜杰), linjunqi1964@163.com (林均岐), liuliu_jinlong@163.com (刘金龙)

摘要:我国地处欧亚地震带与环太平洋地震带之间,是一个多地震的国家。近些年来,我国地震频繁发生,如九寨沟地震、玉树地震、汶川地震等。这些地震对城市道路交通系统造成的破坏会导致城市功能的瘫痪,会直接影响震后救援的速度并增加救援难度。为了能够在震后对城市交通的恢复能力进行快速评估,进而制定紧急疏散、救援路线,本文在借鉴路网络可靠性评价方法的基础上,给出了城市路网通行可靠度的计算方法,根据可靠度判定震后路网恢复正常通行能力所必须的时间。通过建立的城市路网震后可恢复性模型对城市路网的可恢复性进行评估,并应用该模型对大连市中山区部分路网进行可恢复性评估,得出了大连市中山区繁华地区部分路网震后可恢复性能较好,可以为震后应急救援、避灾疏散、医疗救护等工作提供参考。

关键词：城市路网，可恢复性，可靠性评估，可靠度

1. 引言

随着城市化进程的加快，城市人口数量的增多，生命线工程在人们的日常生活中发挥着越来越重要的作用。地震的发生会导致道路等生命线工程的破坏，从而造成城市功能的瘫痪。城市的道路交通系统即是物资运输的通道，也是震时疏散受灾群众和应急救援的通道，因此震后道路交通系统的快速恢复对于人员疏散、抢险救灾、医疗救护具有重要的意义。而目前对震后可恢复性的研究仅仅局限于对建筑物、钢框架结构、桥梁以及给水管网的研究，而对城市交通系统也仅仅是震后可靠性的研究，故城市路网震后可恢复性的研究尤为重要。

本文以路段和桥梁的可靠性评估为基础，结合城市路网的抗震可靠性模型和可恢复性模型对城市路网的可恢复性进行评估，并以大连市中山区部分路网为对象，采用该方法进行评估。以下就本文可恢复性评价的研究过程展开详细讨论。

2. 城市路网可恢复性的评估

2.1. 路段的可靠性评估

震后路段的可靠性主要与道路本身的受损情况和沿线建筑物倒塌的有关。鉴于近年来，国内外震害调查表明，对于平原城市，由于城市道路的路基较好，发生地震时由于路基破坏而造成道路不连通的概率较低，且城市道路与高速公路以及国道、省道不同，可以暂不考虑边坡和支档结构的震害，因此在对道路可靠性进行评估时，可忽略道路本身受损造成的影响，将道路沿线建筑物的倒塌对道路通行能力的影响作为震后道路可靠性最主要的影响因素。

(1) 沿街建筑物距道路的富裕宽度 w_{ijk} 按如下公式计算：

$$w_{ijk} = w_d + \frac{1}{2} w_s + d_{ijk} \quad (1)$$

式中， w_{ijk} 为第 k 类第 j 栋建筑物第 i 层处的道路富裕宽度；

i 为建筑物层数， i 取 1, 2, …, n_f ， n_f 为所计算建筑物的总层数；

j 为建筑物栋数， j 取 1, 2, …, n_b ， n_b 为所计算路段该类建筑总栋数；

k 为建筑物结构类型的编号，分别为砌体结构、底部框架结构、多层混凝土结构、高层混凝土结构；

w_d 为路段单元中沿街建筑物距人行道的平均距离；

w_s 为路段单元中人行道平均宽度；

d_{ijk} 为第 k 类第 j 栋建筑物第 i 层后退或外挑距离，当为后退距离时取正，当为外挑距离时取负，无后退或外挑时取 0。

(2) 震后第 k 类第 j 栋建筑物第 i 层倒塌瓦砾阻塞量 Ω_{ijk} 按如下公式计算：

$$\Omega_{ijk} = \frac{\frac{2}{3}(H_{ijk} + h) - w_{ijk}}{\frac{2}{3}H_{ijk}} A_{ijk} \quad (2)$$

式中， H_{ijk} 为第 k 类第 j 栋建筑物第 i 层到建筑地面的高度；

h 为建筑地面与路面的高差，建筑地面高于路面时取正值，反之取负值；

A_{ijk} 为第 k 类第 j 栋建筑物第 i 层的建筑面积。

(3) k 类建筑物倒塌瓦砾阻塞量 Ω_k 按如下公式计算：

$$\Omega_k = \sum_{j=1}^{n_b} \sum_{i=1}^{n_f} \Omega_{ijk} \quad (3)$$

(4) 一般当建筑物严重破坏或完全倒塌时，才会产生瓦砾，故需要计算 k 类建筑物倒塌瓦砾量占其总建筑面积百分比 j_k ，计算公式如下：

$$\psi_k = 0.5Y_k\% + D_k\% \quad (4)$$

式中， $Y_k\%$ 为 k 类建筑物严重破坏建筑面积占其总面积的百分比；

$D_k\%$ 为 k 类建筑物倒塌建筑面积占其总面积的百分比；

(5) 震后路段单元总倒塌瓦砾阻塞量 Ω 按如下公式计算：

$$\Omega = \sum_{k=1}^4 \psi_k \Omega_k \quad (5)$$

(6) 路段总可靠度的计算

$$P_{st} = \begin{cases} 1 - \frac{\Omega/L}{\Omega_c/L_c} & \text{当 } \Omega \leq \Omega_c \\ 0 & \text{当 } \Omega > \Omega_c \end{cases} \quad (6)$$

式中， P_{st} 为某路段的通行可靠度。

Ω_c 为瓦砾阻塞量临界值，取 5000 m^2 ；

L 为相应实际路段的长度；

L_c 标准路长，取 1000 m 。

表1 震害等级和相应的震害指数。

震害等级	宏观现象
基本完好	部分构件为Ⅴ级破坏，个别构件为Ⅳ级破坏现象。
轻微破坏	部分构件为Ⅳ级破坏，个别构件为Ⅲ级破坏现象。
中的破坏	部分构件为Ⅲ级破坏，个别构件为Ⅱ级破坏现象，经修复仍可恢复原设计的功能。
严重破坏	大部分构件Ⅱ级为破坏，个别构件Ⅰ级破坏现象，难以修复。
倒塌	大部分构件为Ⅰ级和Ⅱ级破坏，结构已濒于倒塌或已摧毁。

2.2. 桥梁的可靠性评估

桥梁是交通工程的重要组成部分，因此作为城市桥梁亦是城市路网的重要组成部分。城市桥梁是指城市范围内，修建在河道上的桥梁和道路与道路立交、道路跨越铁路的立交桥及人行天桥。发生地震时，桥梁一旦严重破坏，整个路段在较长时间内将处于瘫痪状态，因此城市桥梁的可

靠性直接影响到城市路网的可靠性，进而影响城市路网的震后可恢复性。本文以地震烈度、场地土类别、结构类型、桥梁线性、桥墩类型、基础类型、支座类型、桥梁规模、设防烈度等九种主要影响因素作为震害因子，通过建立经验统计回归模型来对桥梁的可靠性进行评估。
桥梁的震害程度计算公式如下：

$$Y=c\prod_{i,j=1}^{m,n}a_{ij}^{x_{ij}} \tag{7}$$

式中， Y 为桥梁震害指数；
 c 为常数；
 a_{ij} 为桥梁第*i*种震害因子第*j*分项中的回归系数；
 x_{ij} 为桥梁第*i*种震害因子中第*j*分项的参数取值，若桥梁符合则取值为1，不符合则取值为0。

表2 桥梁震害指数和可靠度。

震害程度	特征	震害指数	可靠度
基本完好	结构构件完好，桥面无明显变形，个别非结构构件可有破损，不需修理可继续使用。	$0.00\leq Y<0.10$	1-Y
轻微破坏	桥面、桥台、桥墩、桥拱、桥塔、主梁等的混凝土部件表面出现细裂缝，局部表面混凝土剥落，支撑连接部位轻微变形，不需修理或稍加修理即可通行。	$0.10\leq Y<0.30$	
中等破坏	桥墩混凝土出现明显裂缝，梁移位，梁端混凝土出现明显裂缝，拱脚有明显裂缝，桥塔结构轻微变形，墩台轻微移动，出现明显裂缝，引桥下沉，支座与梁连接的螺栓部分剪断，震后需限制通行（限速、限载），需要进行加固修复后才能正常通行。	$0.30\leq Y<0.55$	
严重破坏	桥墩混凝土出现贯通裂缝、剥落，梁、拱出现贯通裂缝或破碎，桥塔结构变形，悬索或拉索（杆）锚具出现滑动，墩台滑移、断裂或严重倾斜，基础破坏明显。需要进行大修后才能通行。	$0.55\leq Y<0.85$	
倒塌	落梁、塌拱、墩台折断、倒塔、断索等现象已经发生或随时可能发生，整个桥梁已不能使用，需重建。	$0.85\leq Y<1.00$	

对含有桥梁的路段的可靠性进行计算时，可以将桥梁按照串联模型的可靠度进行计算，两者之间有一个可靠性为0的，则系统的可靠性为0。串联系统可靠度计算方法如下式：

$$P=P_r\times P_b \tag{8}$$

式中， P_b 为桥梁的可靠度；
 P_r 为路段的可靠度。
把城市交通系统作为一个平面网络，计算每一路段（路段单元、桥梁单元）震后的可靠度，再采用蒙特卡罗模拟的方法，确定路网中各个起讫点的连通可靠性。

表3 道路网络震害等级、震后恢复时间及可靠度对照表。

震害等级	震后恢复时间	可靠度
基本可靠	1周	$0.8\leq P\leq 1.0$
中等可靠	1个半月	$0.4\leq P<0.8$
严重不可靠	5个月	$0\leq P<0.4$

$$L_j(t)=P_j\cdot L_j \tag{9}$$

式中， $L_j(t)$ 为震后第*j*段可恢复通行能力的主（次）干道的长度；
 P_j 为第*j*段主（次）干道的可靠度；
 L_j 为第*j*段路的实际长度。

经以往资料研究表明，当震害等级为基本可靠时，即可靠度为 $0.8\leq P<1.0$ 时，道路的通行能力几乎不受任何影响，道路连通性较高，满足通行能力；当震害等级为中等可靠，即可靠度 $0.4\leq P<0.8$ 时，道路网络的连通性会受到影响，交通网络系统的可靠性降低，道路会受到堵塞，但是堵塞状况并不严重，可以满足一定的通行能力；当震害等级为严重不可靠时，即可靠度 $0\leq P<0.4$ ，大部分路段的可靠性已有明显降低，有的路段已被堵塞，道路通行能力受到严重影响。

2.3. 城市路网的可恢复性评估

城市路网可恢复性可以被定义为灾后道路通行能力 $C(t)$ 和灾前道路通行能力 $C(T_{Dis}^-)$ 之间的比例如下：

$$f_e(t)=\frac{C(t)}{C(T_{Dis}^-)} \tag{10}$$

$$C(t)=\sum_{j=N_{AR}}L_j(t) \tag{11}$$

式中： $f_e(t)$ 为可恢复性指数；
 $L_j(t)$ 为震后第*j*段可恢复通行能力的主（次）干道的长度；

N_{AR} 为可恢复通行能力的主（次）干道的数量。

表4 可恢复性等级与可恢复性指数对照表。

可恢复性指数	评级等级
0.9~1.0	优秀
0.8~0.9	良好
0.6~0.8	中等
<0.6	差

3. 大连市中山区部分主（次）干道震后可恢复性评估

大连市的道路网由道路和桥梁两部分组成。由于震后路网的可恢复性主要依赖于主干道和次干道以及桥梁的可恢复性，因此本文以主干道、次干道、桥梁作为研究对象。本文以大连市中山区较为繁华地区主次干道及桥梁为研究对象。大连市中山区较为繁华地区路网平面图如图1所示，共有33个节点，47个路段，其中包括4座桥梁（梁式桥）。

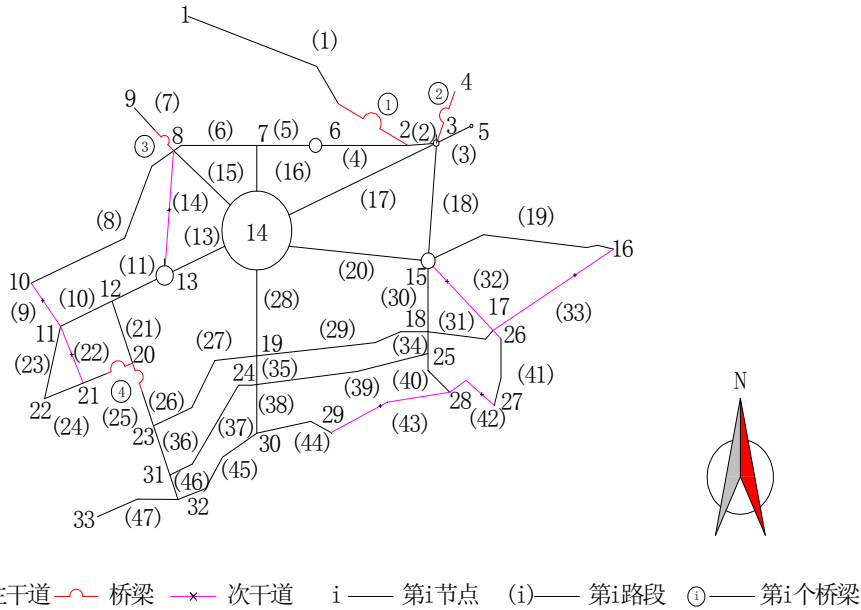


图1 大连市中山区部分路网平面图。

可靠度评估结果如表5:

表5 大连市中山区不同烈度下路段连通可靠性百分比（%）。

烈度	基本可靠	中等可靠	严重不可靠
VI	97.8	2.2	0.0
VII	89.7	10.3	0.0
VIII	75.5	24.4	0.1
IX	60.2	25.7	14.1

从表5可以看出，随着烈度的增加，路网的通行可靠性显著下降，在遭遇VI、VII、VIII度地震时，大连市中山区繁华地段路网通行能力基本良好，在IX度地震作用下，严重不可靠路段已经达到24%。

可恢复性评估结果如表6:

表6 大连市中山区不同烈度下路网可恢复性。

烈度	可恢复性指数	评级等级
VI	1	优秀
VII	1	优秀
VIII	0.99	优秀
IX	0.85	良好

总体来看，大连市中山区繁华地区部分路网震后可恢复性评估结果是:地震烈度为VI度、VII度、VIII度时，可恢复性能为优秀，震后路网可以保持通行能力；地震烈度为

IX度，可恢复性能为良好，震后路网通行能力较好。总体来说，大连市中山区繁华地区部分路网震后路网可恢复性能较好。

4. 结论

本文根据道路路网路段和桥梁的可靠度、可恢复性指数计算和地震破坏的经验，建立了城市路网震后可恢复性评估的方法，并用此方法对大连市中山区繁华地区道路路网进行了可恢复性评估，得出了大连市中山区繁华地区部分路网震后可恢复性能较好。

致谢

本文为中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2018A02)的阶段性成果之一。

参考文献

[1] 余方亮.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, 2018, 4-26.

- [2] 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, 2015, 9-17。
- [3] 郭恩栋, 赵钊, 王再荣, 刘智, 高霖, 王亚东.改进的梁式公路桥震害评估方法[J].北京工业大学学报, 2013,39(2):193-195。
- [4] 李英民, 王丽萍, 刘立平.山地城市震后建筑物倒塌瓦砾阻塞量预测模型[J].解放军理工大学学报, 2010, 11(4), 439-444。
- [5] 郭恩栋、孙柏涛、刘如山等. 2009.GB/T 24336-生命线工程地震破坏等级划分[Z]. 北京:中国标准出版社, 2009。
- [6] 杜鹏.交通系统震害预测中瓦砾堆积问题的改进[J].世界地震工程, 2007, 3:161-165。
- [7] 陶小林.山地城市交通系统震害预测及应用研究[D].重庆:重庆大学, 2007,7-26。
- [8] 谢礼立.城市防震减灾能力的定义及评估方法[J].地震工程与工程振动, 2006, 26(3):2-5。
- [9] 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。
- [10] 赵国兴, 陈淮, 李杰.震后城市交通系统评估与改建[J].世界地震工程, 1996, 8(3):6-10。
- [11] 朱美珍.公路桥梁震害预测的实用方法[J].同济大学学报, 1994, 22(3):279-282。
- [12] Ansal A. Urban resilience for emergency response and recovery (pp.227-234). Switzerland:Springer International Publishing.