

缪逸飞. 保定市交通系统抗震可靠性分析[J]. 华南地震, 2018, 38(3): 62–67. [MIAO Yifei. Reliability Analysis of Transportation System in Baoding City [J]. South China journal of seismology, 2018, 38(3): 62–67]

## 保定市交通系统抗震可靠性分析

缪逸飞

(北京工业大学, 北京 100124)

**摘要:** 通过研究城市交通系统各组成单元的可靠性, 针对保定市交通系统进行震害预测。采用蒙特卡罗随机模拟技术和道路、桥梁单体易损性分析方法以及模糊综合评判法, 给出了不同烈度下交通系统网络中各节点的可靠度, 分析了选取不同的源点以及源点个数对整个网络系统可靠性的影响。根据保定市交通系统中道路和桥梁的震害预测结果, 指出了保定市需要改建、加固的路段以及对保定市火车站作为应急中心合理性的分析, 从而为保定市交通系统震前防灾规划提出对策及建议。

**关键词:** 交通系统; 车站选址; 可靠度评价; 蒙特卡罗模拟

中图分类号: U491; P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2018)03-0062-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.03.009

## Reliability Analysis of Transportation System in Baoding City

MIAO Yifei

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Based on the study of reliability of each unit of urban traffic system, this paper predicts the earthquake damage of traffic system in Baoding city. Monte Carlo method, vulnerability analysis method of road and bridge unit and fuzzy comprehensive evaluation method are used to analyze the reliability of each node in the network under different intensities. At the same time, the paper analyzes the influence of the selected different source points and the number of source points on the reliability of the whole network system. According to the prediction results of road and bridge damage in Baoding city transportation system, it is pointed out that the road section needs to be reconstructed and reinforced, and the rationality of railway station location in Baoding city needs to be analyzed. Finally the paper puts forward some suggestions and countermeasures for pre-earthquake disaster prevention planning of Baoding city traffic system.

**Keywords:** Transportation system; Station location; Reliability evaluation; Monte Carlo simulation

收稿日期: 2018-01-01

作者简介: 缪逸飞(1967–), 男, 硕士研究生, 主要从事地震工程和城市防灾减灾研究。

E-mail: 164306437@qq.com.

## 0 引言

交通系统作为一个城市生命线工程的重要组成部分主要由道路、桥梁组成。历次地震显示由于交通系统的破坏而导致整个城市的救灾难度陡然增大,因此在制定防灾规划时,需要对已建成的路段包括街道桥梁等破坏可能性进行预测,指出何处需要加固与扩建,对现有应急避难场地位置进行分析并考虑何处为其最佳的驻地,使地震发生时城市交通系统能够保持足够的运输能力,这些方面在一个城市防灾规划中都是至关重要的。

保定市交通发达,市区多数道路为平整的沥青混凝土路面或水泥混凝土路面,环线路路面等级高且养护较好,多数主干道路基路面稳定,有跨河桥梁。2000年以来,保定市对主城区范围内的道路进行了新建和改造,形成了以快速路、主次干道为主干网络,支路和小街巷为辅助的道路交通系统。市区路网骨架由“井”字形快速路和主干路构成。保定市2000年以来新建的桥梁不多,相当一部分桥梁没有采用隔震支座等抗震措施,墩台高度都小于5 m,上部结构大部分为A连续梁,少部分为简支梁,支座形式基本为一般支座。保定市主城区所属区域为华北地层区,华北平原分区之冀中小区,场地为第四系全新统冲洪积而成,因此地貌单元属于华北冲洪积平原。场地土为中软土,地貌单一,地层结构较稳定,分布规律,无不良地质现象,场地类型以Ⅲ类为主,设防烈度为Ⅶ度。

## 1 分析方法

交通系统抗震可靠性分析,就是分别对道路、桥梁和路边建筑物进行震害预测并综合考虑其影响用模糊综合评判法给出每个路段通行概率,进而再用蒙特卡罗法得出整个城市路网的连通可靠性,最后对现有应急避难场所位置进行分析得出最佳救援点位置。

### 1.1 单体易损性分析

#### 1.1.1 道路易损性分析

陈一平,陈欣根据以往的震害经验提出经验评估法<sup>[1]</sup>用于公路路基路面的震害预测。从道路的震害现象可以看出地震动强度、路基土类型、场地类别、地基失效程度、路基类型、路基高程和设防烈度是影响路基路面破坏的主要因素。

第*i*路段平均震害指数 $\overline{\text{ind}}$ 为:

$$\overline{\text{ind}} = \left[ \prod_{j=1}^9 X_{ij} \right] \times 0.2 - 0.1 \quad (1)$$

式(1)中, $X_{ij}$ 是第*i*个路段第*j*个震害因素所对应的量化值,若 $\overline{\text{ind}} \geq 0.6$ ,则取 $\overline{\text{ind}} = 0.6$ 。当震害指数小于0.15时,破坏程度为基本完好;当震害指数介于0.15和0.3之间时,破坏程度为轻微破坏;当震害指数大于0.30时,破坏程度为中等破坏。

#### 1.1.2 桥梁易损性分析

目前,实际应用的桥梁震害预测方法主要有经验统计法和规范校核法。经验统计法适合于桥梁群体震害预测,亦可用于建设年代较早的重要简支梁桥的单体震害预测。规范校核法建立在规范和准强度破坏准则之上,尚不能很好考虑钢筋混凝土延性抗震性能,比较适合于圬工砌体类材料桥梁的震害预测。由于保定市主城区桥梁绝大多数为跨径较小的中、小型桥梁,且桥梁的建造年代、结构形式以及所处地质构造总体上相近,因此主要采用经验统计法。

基于我国唐山、海城、通海等地震中100多座公路桥梁震害的统计分析,根据桥梁抗震分析及所统计的样本资料情况,选取如下9个要素作为震害因子:①桥址处的地震烈度;②场地土类型;③地基失效液化沉陷、地裂程度;④上部结构型式;⑤支座类型;⑥墩台高度;⑦墩台类型与材料;⑧基础类型;⑧跨长和跨数。每座桥梁的震害指标实际上是该座桥的九个加权系数相乘之积。同济大学朱美珍教授建立了如下形式的震害预测经验公式<sup>[2]</sup>:

$$A = W_0 \prod_{j=1}^9 \prod_{k=1}^{2 \text{ 或 } 2} W_{jk}^{X_{jk}} \quad (2)$$

$$X_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{预测桥的 } j \text{ 项目中有 } k \text{ 类因素} \\ 0, & \text{预测桥的 } j \text{ 项目中无 } k \text{ 类因素} \end{cases} \quad (3)$$

式(2)、(3)中,A为震害预测指标值, $W_0$ 、 $W_{jk}$ 为计算系数。

用上式进行桥梁震害预测时,对应于基本完好,轻微破坏,中等破坏,严重破坏的临界震害预测指标值为1.23, 2.20, 3.38和4.40。

#### 1.1.3 瓦砾堆积计算

研究表明,公路交通系统中每条公路的车道宽度对行车速度都有影响。同时,沿街建筑倒塌形成瓦砾堆积对道路通行能力也有较大影响。

砾堆的总土方量 $\Omega$ :

$$\Omega = \frac{2}{3} \sum_{i=1}^3 A_i \cdot \psi_i \quad (4)$$

式(4)中:  $\Omega$  为瓦砾堆总土方量;  $A_i$  为严重破坏和倒塌的沿道路立面面积之和;  $\psi_i$  为公路严重破坏面积百分比的一半和倒塌面积百分比之和。然后利用公式  $Q=Q/l \times b$ ,  $Q_c=Q_c/l_c \times b_c$  计算瓦砾阻塞密度和临界瓦砾阻塞密度并进行比较<sup>[3]</sup>, 来确定瓦砾堆积路段的通行概率:

当  $Q \leq Q_c$  时,  $P_w = 1.0 - \frac{Q}{Q_c}$ ; 当  $Q > Q_c$  时,  $P_w = 0$ 。

其中,  $Q$  为瓦砾阻塞量密度;  $Q_c$  为临界瓦砾阻塞量密度, 取 0.25;  $l$ 、 $l_c$  为路段的长度和标准计算长度;  $b$ 、 $b_c$  为路段的有效宽度和标准有效宽度。

## 1.2 道路通行概率计算

将道路和桥梁计算出的震害指数对应结果按照表 1 换算成通行概率  $P_r$ 、 $P_b$ 。并按如下两种情况进行计算<sup>[4]</sup>。

表 1 桥梁单元的通行概率(建议值)

Table1 Connective probability of bridge(proposed value)

| 道路<br>震害 | 基本<br>完好 | 轻微<br>破坏 | 中等<br>破坏 | 严重<br>破坏 | 毁坏 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----|
| 通行概率     | 1.0      | 0.8      | 0.6      | 0.1      | 0  |

### 1.2.1 不包含桥梁的路段

这种路段的“路段单元”通行概率即整个路段通行概率, 路段本身通行概率与瓦砾堆积路段通行概率相乘即可得该路段的通行概率值。

### 1.2.2 包含桥梁的路段

对于这种路段, 相当于“路段单元”和“桥梁单元”的串联, 当路段和桥梁这两者其中有一个受到破坏, 则这个路段实际就是遭到了破坏, 其通行概率就相当于“路段单元”和“桥梁单元”的通行概率以及考虑瓦砾堆积后的通行概率之积。

## 1.3 交通系统连通可靠性分析

交通网络系统连通性采用蒙特卡罗随机模拟技术, 它是一种随机抽样的方法, 以概率模型为基础, 按照概率模型所描绘的过程, 通过模拟实验作为实际问题的近似解。对于大型的复杂网络, 蒙特卡罗法计算效率较高, 随着迭代次数的增加, 精度在一定范围内也会有不断提高的趋势, 迭代次数为 5 000<sup>[5]</sup>次即能较好满足精度要求。用蒙特卡罗随机模拟技术求解网络可靠性问题时, 可分

为以下 4 个步骤<sup>[6]</sup>: ① 确定网络各边的破坏概率, 即通行率。② 利用随机数发生器产生随机数集并与各边破坏率比较。③ 对模拟出来的网络破坏状态, 依网络的拓扑结构记录各汇点在此次模拟中的状态。④ 进行 5 000 次模拟, 统计源点与各汇点的连通状态的频率, 即可得出整个管网的连通性。

## 1.4 城市交通系统救援活动可靠性评价

分析评价城市救援活动的可靠性, 是求解交通网络系统中重要点(OD:Origin-Destination)<sup>[7]</sup>之间的连通可靠性, 即是以某一重要场所为源点, 以其他节点为汇点, 计算源点与汇点之间的连通可靠度。对于城市道路交通系统而言, 需要评价震后各种救援活动的可靠性。本文采用网络可靠性分析方法中的蒙特卡罗模拟方法对保定市火车站作为应急避难中心的可靠性进行评价。

而火车站是否为最佳应急避难场所, 还需要再进行计算, 即以其他节点为汇点, 计算源点与汇点之间的连通性。可对于一个网络模型, 以哪个汇点为源点其整个系统抗震可靠度最高。求得每个汇点为源点时各个汇点的可靠度, 采用公式(5)来找这个最佳源点。

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m X(i) \quad i=1, \dots, n \quad (5)$$

取其中最大的  $\bar{X}$  所对应的点即为最佳源点, 此时系统可靠度最高。

当有  $m$  个源点时, 则任意一个汇点与这  $m$  个源点之间都有  $m$  个不同的连通概率值。此时, 这一汇点的可靠度由这  $m$  个连通概率共同决定。此汇点可靠度  $P_L$  为:

$$P_L = 1 - \sum_{i=1}^n (1 - P_L(i)) \quad i=1, \dots, n \quad (6)$$

## 2 分析结果

### 2.1 道路及桥梁易损性分析结果

经计算, 保定市道路桥梁在不同烈度下易损性结果见图 1~3。在 VII 度和 VIII 度地震烈度作用下, 路基路面发生不同程度的裂缝、涌包、沉陷、塌滑或喷砂冒水现象, 路段处于轻微破坏状态, 在 IX 度地震烈度作用下, 局部的路基路面出现比较严重的裂缝、沉陷、塌滑或喷砂冒水现象, 可能影响车辆的行驶速度, 削减交通量, 需及时排查抢修。



图1 VII度地震烈度下桥梁震害预测结果

Fig.1 Seismic damage prediction results of bridge under VII intensity



图2 VIII度地震烈度下桥梁震害预测结果

Fig2 Seismic damage prediction results of bridge under VIII intensity



图3 IX度地震烈度下桥梁震害预测结果

Fig.3 Seismic damage prediction results of bridge under IX intensity

2.2 交通系统连通可靠性预测结果

将保定市城市道路简化为 94 个节点和 157 条边线的大型网络图 (图 4)。

以道路和桥梁单体破坏以及瓦砾阻塞量作为判别指标, 计算各路段在 VII 度、VIII 度和 IX 度地震烈度下通行概率, 计算结果如下表 (表 2)。最后用蒙特卡罗法迭代 5000 次, 求得各汇点与源点的连通可靠度。

2.3 城市交通系统最佳模型选择

经计算在 VII、VIII、IX 地震烈度下 最大分别是 64 号节点、45 号节点和 36 号节点。分别考察以 32 号为源点和以 64 号为源点以及 32 号和 64 号为共同源点情况下各汇点可靠度。结果见图 5~7。

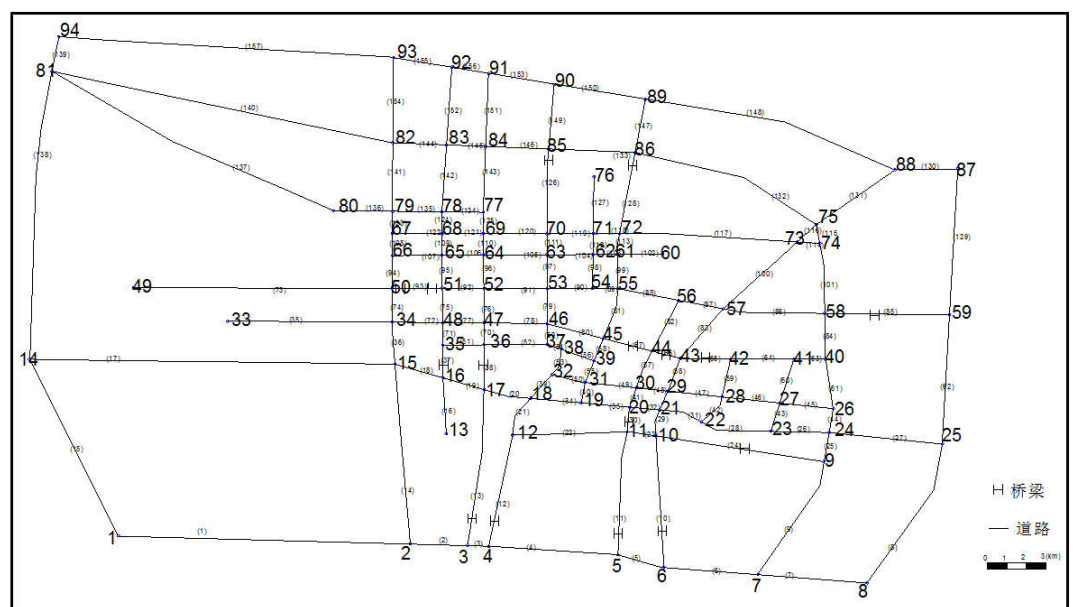


图4 保定市道路简化网络图

Fig.4 Simplified network diagram of Baoding roads

表 2 路段通行概率计算结果(主干道)

Table 2 calculation results(Main road)

| 路段名称 | 震害预测(VII) | 震害预测(VIII) | 震害预测(IX) |
|------|-----------|------------|----------|
| 长城大街 | 0.854 9   | 0.520 1    | 0.390 2  |
| 恒祥大街 | 0.835 1   | 0.509 8    | 0.360 4  |
| 乐凯大街 | 0.809     | 0.496 3    | 0.300 8  |
| 朝阳大街 | 0.829 5   | 0.503 8    | 0.339    |
| 复兴路  | 0.831 9   | 0.505 1    | 0.347 3  |
| 七一路  | 0.835 2   | 0.51       | 0.360 4  |
| 东风路  | 0.754 4   | 0.467 4    | 0.205 7  |
| 天威路  | 0.832 2   | 0.506      | 0.348    |
| 三丰路  | 0.763 7   | 0.475 6    | 0.240 9  |
| 水源路  | 0.715 7   | 0.446 8    | 0.133 5  |
| 永华大街 | 0.716 7   | 0.448      | 0.137 5  |
| 利民路  | 0.838 3   | 0.515 4    | 0.370 9  |

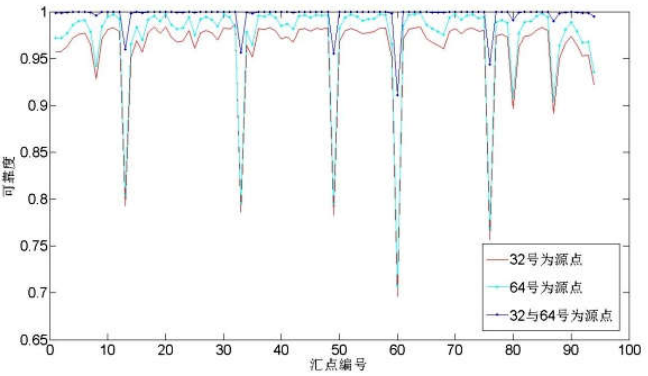


图 5 VII下设定不同的源点各汇点可靠度

Fig.5 Set the reliability of each point at different source points under VII intensity

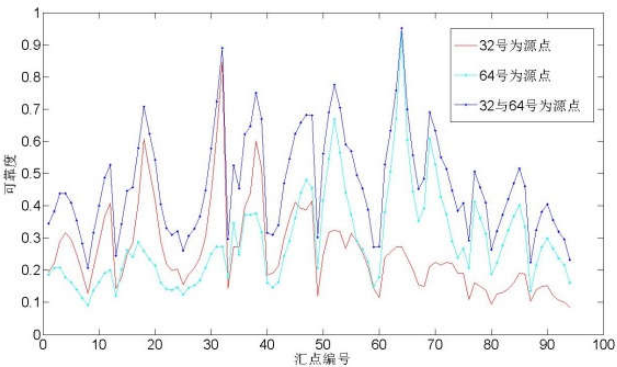


图 6 VIII下设定不同的源点各汇点可靠度

Fig.6 Set the reliability of each point at different source points under VIII intensity

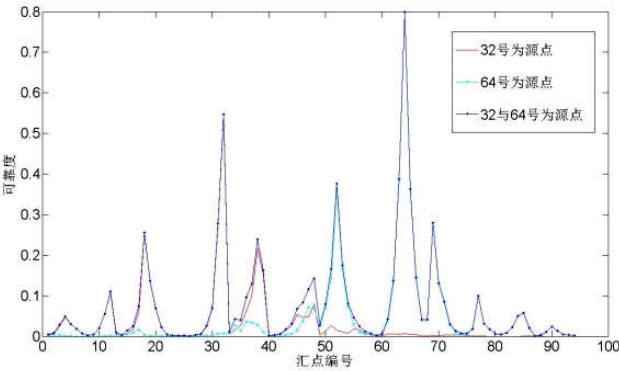


图 7 IX下设定不同的源点各汇点可靠度

Fig.7 Set the reliability of each point at different source points under IX intensity

3 结语

图 1~3 可以看出保定市主城区道路绝大多数在Ⅶ度地震烈度作用下都能维持正常工作,但在普通居民区和城中村等区域内的道路有可能受到倒塌房屋的影响。这些地方道路狭窄,如果房屋倒塌产生废墟堆积,会给疏散和救援带来很大障碍。在Ⅷ度和Ⅸ度地震烈度作用下,在地震中受到中等破坏的路段,可以采取应急工程措施进行处理,准备大型抢险救灾机械和应急保障方案,一般可以保证地震发生以后,城市的主要交通不会中断。

表 2 看出在大于Ⅶ度地震烈度作用下,如永华大街和水源路等路段的抗震连通性迅速降低。这些路段大多发生在老城区,建议加强对支路、小街巷以及老旧城区内道路的改造,降低建筑密度,进行道路拓宽,提高道路的通行概率,保证道路畅通,不仅有利于缓解主次干道的交通压力,

还有利于突发事件下老旧城区、建筑密集区人群的疏散。

保定市火车站(32号汇点)位于市区中部,是地震应急的重要交通枢纽之一,由于保定火车站具有重要的抗震救灾价值,在车站附近可以考虑规划应急避难场地,作为地震应急的物资堆场和人员转运场。图 5~7 看出在不改变道路网拓扑结构的情况下,在较高地震烈度下,设定源点的选取以及源点的数量对部分汇点的抗震连通可靠度有着较大影响。当设定 64 号为源点与 32 号(火车站)为源点相比,各汇点平均可靠度在Ⅶ度、Ⅷ度、Ⅸ度下提升 1.44%, 14.17%, 46.88%;同时设定 32 号与 64 号为源点与 32 号为源点相比,各汇点在Ⅶ度、Ⅷ度、Ⅸ度下平均可靠度提升 3.82%, 83.46%, 145.10%。在未来规划时,可在天鹅西路与朝阳北大街交界处、在新市区乐凯南大街以西与天威西路以南交叉区域,北市区七一东路以北与长城北大街以东交叉区域规划建设

1~2 个大型公园,作为地震应急的避难场所。同时,将学校、医院和体育场馆等公共建筑逐步改造成防灾避难场所,在震时作为应急避难场地为保定市政府震后恢复重建工作提供帮助。

#### 参考文献:

- [1] 陈一平,陈欣. 公路交通系统震害预测计算机辅助系统 DPLH 简介[J]. 建筑科学,1994,6(4):71-75.
- [2] 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):280-282.
- [3] 柳春光,姜淑珍. 泰安市交通系统易损性分析[R]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2001.
- [4] 李杰. 生命线工程抗震[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [5] 赵慧乾,郭明珠,翟长达. 基于蒙特卡罗法的城市燃气管网抗震连通可靠性分析[J]. 地震研究,2015,(02):292-296+334.
- [6] 王海超,党素华,赵洪涛. 城市公路网络系统最佳可行流及其可靠性[C]. 北京:第五届全国地震工程会议,1998.
- [7] 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.