

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201904061

基于蒙特卡洛模拟的城市道路网络地震易损性分析*

王鼎¹, 王晓文¹, 冯德成², 朱瑞广¹

(1. 燕山大学建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 城市道路网络是重要的生命线工程系统, 其抗震性能直接影响城市震时人员逃生和震后救灾是否能够迅速开展。现阶段, 地震工程学界已发展了完善的单一路段地震易损性分析方法, 但对道路网络整体性态水平划分、破坏指标选取和地震易损性评价等问题尚无明确结果。基于此, 利用二维平面网络统计特征量作为破坏评价指标, 提出了一类城市道路网络地震易损性的评价方法, 并利用蒙特卡洛模拟方法计算了实际城市路网的地震易损性矩阵。首先, 给出了城市道路网络地震破坏模拟步骤, 包括路网建模、空间变化地震动模拟和基于路段易损性函数的路网地震破坏模拟; 然后, 利用分支数量和最大分支直径作为指标, 对城市道路网络性态水平进行了划分, 给出了基于蒙特卡洛方法的路网地震易损性分析框架; 最后, 以河北省秦皇岛市为例, 计算了城市道路网络的地震易损性矩阵。本文发展的城市路网地震易损性分析方法可为城市道路系统整体抗震安全性评价及优化设计提供参考。

关键词: 城市道路网络; 地震易损性; 蒙特卡洛模拟; 分支数量; 最大分支直径

中图分类号: TU997 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0558-10

Seismic Fragility Analysis of Urban Road Network based on Monte Carlo Simulation

WANG Ding¹, WANG Xiaowen¹, FENG Decheng², ZHU Ruiguang¹

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The urban road network is an important type of lifeline engineering systems, and its seismic performance directly affects evacuation and post-earthquake disaster relief. At present, several methods for analyzing the seismic performance of a single road section have been developed. However, there are still no clear results on the classification of damage state, selection of damage indicators, and evaluation of seismic fragility of the whole road network. In this paper, using the statistical feature values of the two-dimensional spatial network as the damage evaluation index, a method for evaluating the seismic fragility of the urban road network is proposed. The Monte Carlo simulation method is used to calculate the seismic fragility matrix of the actual urban road network. The main contents are as follows: First, the seismic damage simulation steps of the urban road network are presented, including road network modeling, spatially variable ground motion simulation, and road network seismic damage simulation; Then, using network component number and maximal component diameter

* 收稿日期: 2019-04-22; 修回日期: 2019-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408526, 51678465)、河北省自然科学基金项目(E2020203103)、河北省高等学校科学技术研究项目青年拔尖人才项目(BJ2019030)资助

作者简介: 王鼎(1985—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事地震工程研究。E-mail: wangding@ysu.edu.cn

as the damage indicators, the seismic performance level of the urban road network is determined and the framework of seismic fragility analysis of road network is given; Finally, the earthquake fragility matrix of the urban road network is calculated by taking Qinhuangdao City of Hebei Province as an example. The seismic fragility analysis method of urban road networks developed in this paper can provide reference for safety evaluation and optimization design of urban road systems.

Keywords: urban road network; seismic fragility analysis; monte carlo simulation; component number; maximum component diameter

引 言

地震易损性分析作为基于性态的地震工程全概率决策框架的核心组成部分,已成为现阶段评价工程结构和工程系统抗震性能的重要方法。地震易损性定义为结构或系统在不同强度地震作用下超越特定性态水平的概率,在宏观上反映了地震动强度与结构或系统破坏程度之间的关系^[1]。现阶段,工程结构地震易损性分析理论已趋于成熟,在实际工程抗震分析和设计中得到了广泛应用。然而,由工程结构单元构成、具有复杂平面拓扑结构的生命线系统地震易损性分析尚未形成完善理论,存在一系列亟需解决的问题。其中,城市道路网络系统整体的地震易损性评价即是地震工程研究领域的重要问题之一。

作为一类重要的生命线系统,城市道路网络连接了一个城市内几乎所有的功能区域,是保障城市人员、物质顺利流通的重要基础设施。过往地震破坏经验表明城市道路系统在强震作用下多会出现因局部路段破坏或拥堵导致的路网整体失效情况,严重影响了震时人员撤离和震后救灾重建。2004年日本新潟地震、2008年汶川大地震、2009年意大利 L'Aquila 地震、2010年智利大地震、2011年新西兰 Christchurch 地震、2016年熊本地震中均出现了明显的道路系统地震破坏,导致了严重的人员安全和经济财产损失^[2]。地震易损性分析能够对区域道路网络在不同强度地震作用下的破坏情况进行预测,对评估路网地震破坏损失、制订灾后救援计划具有实用意义。现阶段,路基、路面、路堤、路堑、城市高架桥、隧道等路网组成结构单元的抗震性能评价易损性分析研究已取得了丰富结果,区域路网地震灾害评估和抗震韧性分析成为新的研究热点。

国际研究中,S.E. Chang 等^[3]利用震后路网总长度、基于总距离的可达性指标和基于区域距离的

可达性指标对震后路网抗震性能进行了评价;N. D. Lagaros 等^[4]将神经网络方法应用到场地地质结构的地震易损性分析中,以地震动峰值加速度(PGA)为强度指标得到了梯形路堤的易损性曲线;Y. Maruyama 等^[5]根据日本历史震害资料,震后公路发生破坏无法正常通行的概率进行了统计,给出了特定长度的公路在不同强度地震作用下出现破坏区域的数量估计公式;S. Yang 等^[6]将网络连接定义为任何可能节点的平均连接状态,对路网整体通行能力进行了评价;K. Pitilakis 等^[2,7]采用对数正态分布函数模型作为易损性函数,分别对路堤、路堑、道路边坡等建立了二维有限元模型,获得了公路系统各组成单元的地震易损性曲线,并将其应用于区域路网的抗震性能评价和易损性分析;S. Argyroudis 等^[8]利用非线性有限单元模拟获得了公路路基和路堑的地震易损性函数;N.Y. Aydin 等^[9]使用巨分支的大小来评价路网的抗灾性能;Y. Zhou 等^[10]定义了路网的整体连通性和局部连通性,并采用复杂网络方法对汶川地震中四川省城市间路网的地震破坏进行了分析。

国内研究中,姜淑珍等^[11]基于模糊数学方法,考虑了桥梁结构抗震性能,对城市交通系统的地震易损性进行了分析;廖焱^[12]对汶川地震中公路路基震害进行了调查,建立了针对不同性态水平的公路地震易损性函数模型,对模型参数进行了估计;兰日清等^[13]以太原市市区公路系统为对象,基于地震高发区城市公路路基路面地震破坏特征,建立了城市公路网络震害评价方法。

综上,区域道路网络抗震性能和地震易损性研究已经取得了较为完善的成果,道路系统结构单元的地震易损性函数模型相继提出,并在实际工程中得到了应用。然而,城市路网整体地震易损性分析尚无明确的理论框架,路网性态水平划分有待进一步深入研究。基于此,本文通过建立城市道路系统的二维平面网络模型,给出了路网整体地震性态水

平标准,发展了基于蒙特卡洛模拟方法的城市路网地震易损性分析方法。首先,给出了城市道路系统的平面网络建模和地震破坏模拟方法,同时介绍了空间变化地震动合成技术;然后,提出了基于分支数量和最大分支直径的震后路网性态水平划分标准,给出了城市路网地震易损性分析的框架;最后,以河北省秦皇岛市市区路网为例,基于蒙特卡洛模拟对城市路网地震易损性进行了分析,获得了路网地震易损性矩阵。

1 城市路网地震破坏模拟

1.1 城市道路系统的网络建模

城市道路系统是由城市范围内不同功能、等级、区位的道路、以一定的密度和适当的形式组成的网络结构。城市道路网络中各级道路错综复杂,构成了二维欧几里得空间上的平面网络。最为常见的路网建模方法为道路交叉点和末端作为路网的节点,交叉点之间的路段作为路网的边^[14]。为保持交通畅通城市道路一般无道路末端,故本文中路网节点为道路交叉点。城市周边部分路段长度较长,相对于长度较短的路段更易发生地震破坏,因此需要考虑路网各边长度对其地震破坏概率的影响。特定长度的路段可视为单位长度路段的串联系统,其地震破坏概率可采用单位长度路段的易损性函数计算获得,故路网建模时可将节点间路段直接作为一条边,将其长度作为边的权重。综上,本文中城市路网模型为二维平面加权网络,其中边的权重为路段长度。二维平面加权网络的信息可由邻接矩阵 A_{RN} 给出,定义为:

$$[A_{RN}]_{ij} = \begin{cases} L_{ij} & i,j \text{ 节点之间有边相连} \\ 0 & i,j \text{ 节点之间无边相连} \end{cases} \quad (1)$$

式中, L_{ij} 为节点 i,j 间的路段长度,km; $[\cdot]_{ij}$ 为矩阵中第 i 行第 j 列位置的元素。

城市道路网络地震易损性分析需要计算路网各边的地震破坏,因此需要确定路网中节点和边的空间位置。为方便之后的空间变化地震动模拟,本文采用地震工程中常用的震中—场地坐标系。该坐标系原点选为场地几何中心, x 轴和 y 轴分别平行和垂直于震中—场地连线方向。由于地表地震波可近似认为由震中向场地传播,故坐标系 x 轴和 y 轴分别为平行和垂直场地地表地震动入射方向。

路网节点坐标表示为 $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$,其中 n 为路网节点数,路网边位置采用各边中点位置计算。本文采用矩阵 S_1 和 S_2 表示各边位置。

S_1 的各元素 $[S_1]_{ij}$ 为:

$$[S_1]_{ij} = \frac{x_i + x_j}{2}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

S_2 的各元素 $[S_2]_{ij}$ 为:

$$[S_2]_{ij} = \frac{y_i + y_j}{2}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中, S_1 为路网各边中点在平行地震波传播方向上的投影坐标矩阵; S_2 为路网各边中点在垂直地震波传播方向上的投影坐标矩阵。

需要说明的是,路网中某些路段长度较大,仅采用中点位置表示整个路段可能产生较大误差。此问题可采用在较长路段中添加节点,从而将其分割为若干段短路段的方法解决。

1.2 空间变化地震动模拟

现阶段最为常用的空间变化地震动模拟方法为谱表现方法。空间变化地震动的模拟实际上是工程场地地震动场的模拟。谱表现方法给出了由随机场演变功率谱和相干函数模拟空间相关非平稳过程的方法^[15]。谱表现方法模拟空间相关非平稳过程的公式为:

$$f_j(t) = 2 \sum_{r=1}^m \sum_{s=1}^N |H_{jr}(\omega_s, t)| \sqrt{\Delta\omega} \cdot \cos[\omega_s t - \vartheta_{jr}(\omega_s, t) + \phi_n], \quad j=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式中, m 为空间相关非平稳过程的条数,此处等于路网的边数; N 为频率分量数;各频率分量为 $\omega_s = s \cdot \Delta\omega, s=1, 2, \dots, N$; $\Delta\omega$ 为频率带宽; $H_{jr}(\omega_s, t)$ 为演变功率谱—相干函数矩阵的下三角分解矩阵,为复数; $\vartheta_{jk}(\omega, t)$ 为 $H_{jr}(\omega_s, t)$ 的相角,即:

$$\vartheta_{jk}(\omega, t) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[H_{jk}(\omega, t)]}{\text{Re}[H_{jk}(\omega, t)]} \right) \quad (5)$$

式中, $\text{Re}[\cdot]$ 和 $\text{Im}[\cdot]$ 分别为复数的实部和虚部。

本文采用文献[16]提出的考虑了断层错动过程、震源频谱特性和场地滤波效应的地震动演变功率谱模型和文献[17]提出的地震动场时变相干函数模型。

利用谱表现方法可以模拟城市道路网络各边地震中承受的地表运动过程。将空间变化地震动表示为矩阵 $G_{RN}(t)$ 的形式,其元素 $[G_{RN}(t)]_{ij}$ 表示 i, j 节点间路段受到的地震地表作用,表示为:

$$[G_{RN}(t)]_{ij} = \begin{cases} 0 & i=j \text{ 或 } i, j \text{ 节点间无边相连} \\ f_{ij}(t) & i \neq j \text{ 或 } i, j \text{ 节点间有边相连} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $f_{ij}(t)$ 为由谱表现方法(4)模拟的空间变化地震动样本。

1.3 路段易损性函数

进行城市道路网络整体地震易损性分析, 首先必须确定路网节点间单一路段的地震易损性函数。路段地震易损性函数主要通过有限元模拟和实际地震震害调查两种方法获得。其中, 有限元模拟方法为建立道路路基路面结构及其下土层的二维或三维有限元模型, 分析模型在不同强度水平地震作

用下的性态, 通过模型拟合给出路段地震易损性函数。有限元模拟方法可以经济快速地获得地震易损性函数, 其结果适用于与模型假设条件一致的道路路段, 受地震动选择或模拟方法影响较大。实际震害调查方法以震后道路实际破坏调查统计结果为基础, 通过统计路网道路地震破坏数量和破坏状况获得易损性矩阵或易损性函数。实际震害调查法以实测数据为基础, 在大样本统计的前提下具有较高准确性。

一般来说, 路段地震性态水平划分为四级, 分别为轻微破坏、中等破坏、严重破坏以及损毁^[12], 具体破坏状态见表1。

表1 路段地震性态水平

Table 1 Seismic performance level of the road section

| 性态水平 | 破坏状态 |
|------|--|
| 轻微破坏 | 路基本体没有明显震害; 路面出现细微裂缝, 轻微凹陷鼓胀现象; 不影响正常通行, 行车时速下降, 震后暂时无需修补 |
| 中等破坏 | 路基表面震害较明显, 路面有开裂错台, 局部有凹凸、鼓胀、沉降现象, 造成行车不便, 经简单处理, 能顺利通车 |
| 严重破坏 | 路基表面震害明显, 路面开裂明显, 错台严重, 凹凸、鼓胀、沉降现象导致路面损坏, 行车空间狭小或无法通行, 能步行通过, 经过一定时间清理才能恢复通车 |
| 损毁 | 路基表面震害剧烈, 开裂、错台、凹凸、鼓胀、沉降现象导致路基彻底失效, 道路中断, 无法通行, 经过长时间修理才能恢复通车 |

为计算单一路段的地震破坏状态, 定义1 km长路段的易损性函数 $F_e(I_{PGA})$ 为:

$$F_e(I_{PGA}) = \Phi \left[\frac{\ln(I_{PGA}/\mu)}{\sigma} \right] \quad (7)$$

式中, $F_e(I_{PGA})$ 是在强度为 I_{PGA} 的地震作用下, 长度为1 km的道路发生超越某一破坏状态的概率; $\Phi[\cdot]$ 是标准正态分布函数; I_{PGA} 表示以地震动峰值加速度 PGA 作为地震强度指标; μ 和 σ 是道路破坏状态所对应易损性曲线的均值和对数标准差, 可通过真实震害统计获得。

根据易损性函数的定义, 长度为 L km的道路可视为由 L 个长度为1 km的道路路段以串联方式组成的系统, 因此其在强度为 I_{PGA} 的地震作用下发生超越某一破坏状态的概率为:

$$F_L(I_{PGA}) = 1 - [1 - F_e(I_{PGA})]^L \quad (8)$$

式中, $F_L(I_{PGA})$ 为长度为 L 的道路的易损性函数。

对于由多条道路组成的城市道路网络系统, 各路段的易损性函数可以写成矩阵 $[F_{RN}(I_{PGA})]_{ij}$ 的形式, 表示为:

$$[F_{RN}(I_{PGA})]_{ij} = 1 - [1 - F_e([I_{PGA}]_{ij})]^{L_{ij}} \quad (9)$$

式中, I_{PGA} 为路网各边处的地震峰值加速度矩阵, 可由地震动矩阵 $G_{RN}(t)$ 计算, 为:

$$[I_{PGA}]_{ij} = \max_{0 \leq t \leq T} \{ [G_{RN}(t)]_{ij} \} \quad (10)$$

1.4 地震破坏随机模拟

城市道路网络中各路段的地震破坏概率由公式(9)给出。为标识地震中各路段是否达到指定破坏状态, 定义矩阵 W_{RN} 为路网震后连接矩阵, 元素为满足0-1分布的离散随机变量, 可表示为:

$$[W_{RN}]_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \text{ 且节点间无边相连, 或边达到指定破坏状态} \\ 1 & i = j, \text{ 或边未达到指定破坏状态} \end{cases} \quad (11)$$

$[W_{RN}]_{ij}$ 对应的破坏概率密度函数 $P_{[W_{RN}]_{ij}}(x)$ 为:

$$P_{[W_{RN}]_{ij}}(x) = \begin{cases} [F_{RN}(I_{PGA})]_{ij} & x = 0 \\ 1 - [F_{RN}(I_{PGA})]_{ij} & x = 1 \\ 0 & x \neq 0 \text{ 且 } x \neq 1 \end{cases} \quad (12)$$

矩阵 W_{RN} 反映了震后路网破坏状况。通过对

W_{RN} 中各 0—1 分布元素进行 Monte-Carlo 随机模拟,可以获得大量路网地震破坏状况样本,为之后的路网地震易损性分析提供统计依据。记 W_{RN}^0 为 W_{RN} 模拟样本结果,震后路网的邻接矩阵 A'_{RN} 可由震前邻接矩阵 A_{RN} 和 W_{RN}^0 计算获得,计算公式为:

$$[A'_{RN}]_{ij} = [A_{RN}]_{ij} \cdot [W_{RN}^0]_{ij} \quad (13)$$

2 城市路网地震易损性评价

如前所述,地震易损性分析指的是工程结构或工程系统在承受不同强度的地震作用下,发生不同破坏程度的可能性;亦或是工程结构或工程系统达到或超过某一极限状态的概率^[1]。地震易损性一般采用易损性函数或易损性曲线定量描述。现阶段,单体建筑、桥梁、隧道、路基路面等结构的地震易损性分析趋于成熟,地震强度指标选取和结构性态水平划分已形成共识,但是由单体结构构成的工程系统的地震易损性分析尚无统一框架,各类系统性态水平划分研究亦有待深入研究。

城市道路网络系统地震易损性分析是通过对比地震作用下路网地震破坏状态进行调查统计或数值模拟,计算不同地震强度下路网出现不同破坏状态的概率,从而获得易损性函数或易损性矩阵的过程。不同于单体结构的地震易损性分析,城市道路网络为由大量公路路段和交叉口构成的工程系统,性态水平需要根据震后运输能力进行评价。

依据路网地震破坏状态及其对整体运输能力的影响,本文将城市路网性态水平划分为四级,分别为轻微破坏,即路网中各路段全部完好或仅微量路段发生破坏,路网整体结构未发生明显变化,运输能力基本未发生下降;中等破坏,即少量路段发生破坏无法通行,路网保持连通性但网络结构发生变化,运输能力降低;严重破坏,即部分路段发生破坏无法通行,路网连通性丧失,运输能力进一步下降,但震后路网存在一个连接了大多数节点的巨分支,路网尚存在一定运输能力;完全破坏,即路网中大量路段无法通行,路网呈“碎片化”形态,无巨分支存在,路网完全丧失运输能力^[18]。路网性态水平详见表 2。

为了定量刻画上述性态水平,本文采用震后路网的分支数 N_c 和最大分支直径 D_c 作为状态指标进行地震易损性分析。如图 1(a)所示的地震前路网示意,因网络连通,任意两点间存在一条最短连接

表 2 城市路网性态水平定义

Table 2 Definition of the seismic performance level of the urban road network

| 破坏状态 | 破坏路段比例 | 路网连通性 | 巨分支 | 运输能力 |
|------|--------|-------|-----|-----------------|
| 轻微破坏 | 无或微量 | 保持 | 存在 | 运输能力几乎不受影响 |
| 中等破坏 | 少量 | 保持 | 存在 | 路网整体尺寸增大,运输能力降低 |
| 严重破坏 | 部分 | 失去 | 存在 | 尚具有一定运输能力 |
| 完全破坏 | 大量 | 失去 | 不存在 | 完全丧失运输能力 |

路径。例如,1、6 节点间的最短连接路径为 1→2→5→6,路径长度为 2.2 km;4、7 节点间的最短连接路径为 4→5→7,路径长度为 2.1 km。网络中所有最短连接路径的最大值定义为网络直径。图 1(a)中网络直径为连接 3、7 节点路径 3→2→5→7 的长度,大小为 2.8 km。震后路网分支数 N_c 定义为路网地震破坏后形成的彼此间不相连的分支数量;震后路网最大分支直径 D_c 为路网地震破坏后最大分支的网络直径。如图 1(b)所示,假设路网的边 2-4、4-5 在地震中发生破坏无法通行,此时网络断裂为两个独立分支,其中左侧分支直径为 2.7 km,右侧分支

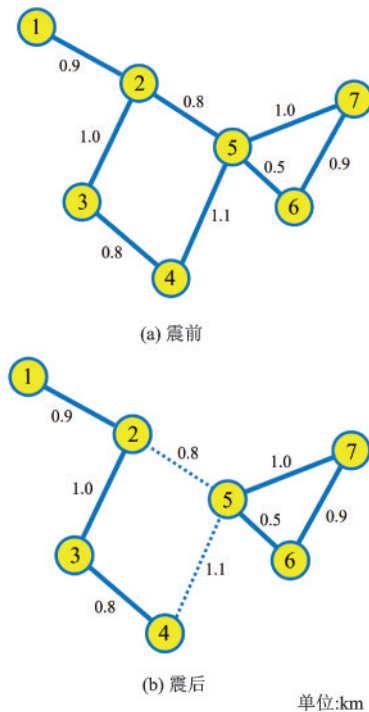


图 1 路网地震破坏示意

Fig.1 Illustration of the seismic damage of road networks

直径为 1 km。采用网络直径度量震后网络分支的大小,左侧分支直径大于右侧分支直径,故左侧分支为最大分支,路网震后最大分支直径为 2.7 km。可见,震后路网分支数 N_c 反映了路网的连通性和整体破坏程度,当 $N_c > 1$ 时路网由连通转变为非连通,且 N_c 值越大,路网平均破坏程度越大。但 N_c 仅能反映路网平均破坏程度,无法反映破坏路段在路网中的分布,故引入震后路网最大分支直径 D_c 来描述路网不连通情况下各分支的大小情况。根据空间网络理论,各边随机破坏情况下空间网络大概率出现巨分支。当路网处于连通状态,即 $N_c = 1$ 时, D_c 随着地震破坏程度增强而增大,这反映了网络中边破坏导致节点间距离增大,此时路网运输能力下降;当路网处于不连通状态,即 $N_c > 1$ 时, D_c 反映了最大分支分支的节点连接程度,可以作为巨分支是否存在指标,用于衡量震后路网运输能力的保持情况。

基于此,本文采用 N_c 和 D_c 定量反映表 2 所示的城市路网震后性能水平,见表 3。其中, D_0 为地震前未破坏路网的网络直径。本文采用 1.2 倍的 D_0 作为震后路网巨分支是否存在标准。

表 3 城市路网性能水平划分

Table 3 Classification of seismic performance level of urban road network

| 破坏状态 | 分支数量 N_c | 最大分支直径 D_c |
|------|------------|----------------|
| 轻微破坏 | 1 | $= D_0$ |
| 中等破坏 | 1 | $> D_0$ |
| 严重破坏 | > 1 | $\geq 1.2 D_0$ |
| 完全破坏 | > 1 | $< 1.2 D_0$ |

基于蒙特卡洛方法的城市路网地震易损性分析是利用地震空间变化地震动和路段破坏随机模拟结果,对不同强度地震作用下路网处于不同破坏状态或性能水平的概率进行统计,获得路网地震易损性矩阵或易损性函数。蒙特卡洛方法是一大类随机计算方法的统称,其基本思路是建立所求问题的概率模型,用计算机进行大量统计模拟或抽样,以获得问题的近似解。本文提出的路网地震易损性分析方法进行了两次蒙特卡洛模拟:一是采用谱表现方法生成空间变化地震动样本过程中的地震动频率分量相位角随机模拟;二是依据易损性函数的路段地震破坏随机模拟。本文采用易损性矩阵反映路网抗震性能,进行大量不同地震强度下的路

网破坏模拟,并计算震后路网的 N_c 、 D_c 值,确定路网破坏状态,划分地震强度区间,统计各区间上不同破坏状态的发生概率,获得路网地震易损性矩阵。具体流程如图 2 所示。

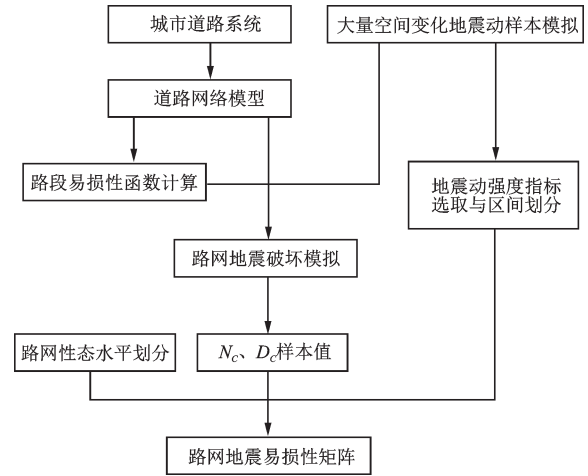


图 2 城市路网地震易损性曲线计算流程

Fig.2 Flowchart for calculating the seismic fragility curve of the urban road network

3 算例

上文所述分析框架可用于真实城市路网的地震易损性分析和路网地震易损性矩阵计算。本节以河北省秦皇岛市市区主要道路为研究对象,进行城市路网的地震易损性分析。图 3 为秦皇岛市市区主要道路的平面网络模型,其中路路边为双向四车道或更宽的主干道和次干道,路网节点为主干道或次干道间的交叉路口,两车道及更窄道路未考虑。秦皇岛市中部和东部地区人口稠密,道路分布密集,边的数量较多且长度较短;西部地区人口和建筑密

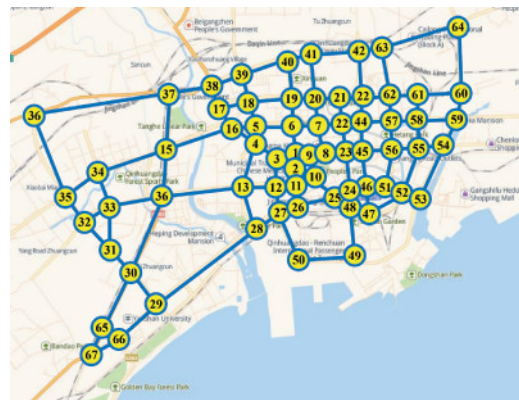


图 3 秦皇岛市市区主要道路路网

Fig.3 Road network of Qinhuangdao City

度较小,道路分布稀疏,边的数量较少且长度较长。表4给出了节点数量、边数量、平均节点度、边长平均值和边长标准差等路网基本特征量。

表4 秦皇岛市城市路网基本信息

Table 4 Characteristics of road network of Qinhuangdao City

| 网络特征量 | 数据 |
|----------|-------|
| 节点数 | 67 |
| 边数 | 115 |
| 平均度 | 3.433 |
| 边长平均值/km | 0.726 |
| 边长标准差/km | 0.305 |

进行路网地震易损性分析首先需要确定单位路长道路的地震易损性函数。本文采用廖焱^[12]提出的根据汶川地震中公路破坏统计获得的路段易损性函数参数模型。此模型为对数正态分布函数,地震动强度指标为峰值加速度PGA,路段不同性能水平对应的模型参数值各不相同。由于本研究主要考察路网通行能力,关注各路段震后能否继续通行,故单一路段易损性函数参数取值采用廖焱^[12]提出模型的严重破坏状态对应的参数值,即道路无法继续通行、需要一定时间修复才能通行对应的参数值。单位长度(1 km)路段的地震易损性函数如图4所示。

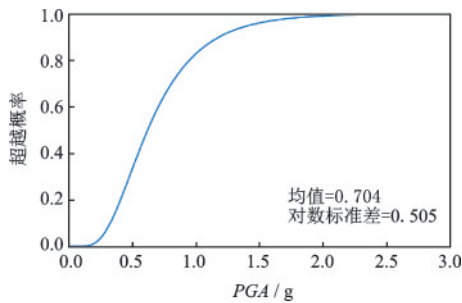


图4 1 km长度路段易损性曲线
Fig.4 Fragility curve of 1km-length road section

利用谱表现方法,模拟一次地震事件中路网各边处的空间变化地震动。如前所述,演变功率谱采用考虑断层错动过程、震源谱和场地滤波效应的非平稳地震动演变功率谱模型,模型表达式和参数取值详见参考文献[16];时变延迟相干函数采用考虑场地土层随机性的地震动场各向异性时变延迟相干函数模型,模型表达式和参数取值详见参考文献[17]。通过调整地震强度并重复模拟,可以获得多

组平均PGA各不相同的空间变化地震动样本。本算例路网具有115条边,因此每组空间变化地震动样本为115条。图5~8分别给出了平均PGA为0.25g、0.5g、0.75g和1.0g时3-12节点、7-8节点、15-37节点和32-35节点的边对应地震动。

通过计算边的地震易损性函数,可以确定特定地震动强度下路网各路段无法通行的概率。依据各边通行概率,利用蒙特卡洛模拟方法模拟各组空间变化地震动作用下路网破坏状态。图9给出了平均PGA为0.25g、0.5g、0.75g和1.0g时路网破坏状态模拟结果。

由图9可知,在PGA为0.25g时,路网中两条边发生破坏,破坏路段位于城市西部地区,路网整体结构未受明显影响;在PGA为0.5g时,城市西部较长路段均出现不能通行的情况,网络整体连通性丧失,但是中东部城市中心区域依据存在一个巨分支,中东部几乎所有节点均位于此巨分支中,路网

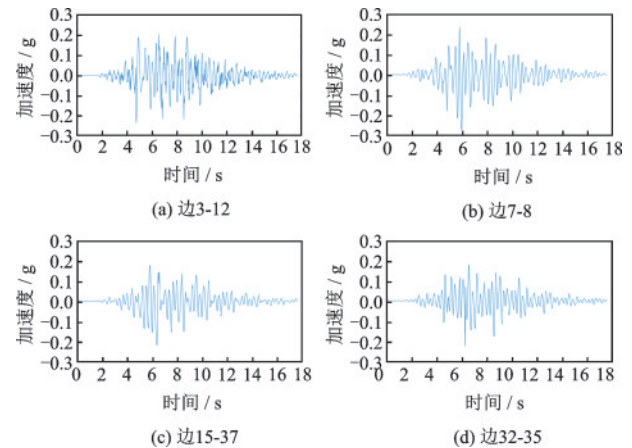


图5 空间变化地震动时程样本(PGA=0.25g)
Fig.5 Spatially variable ground motion samples (PGA=0.25g)

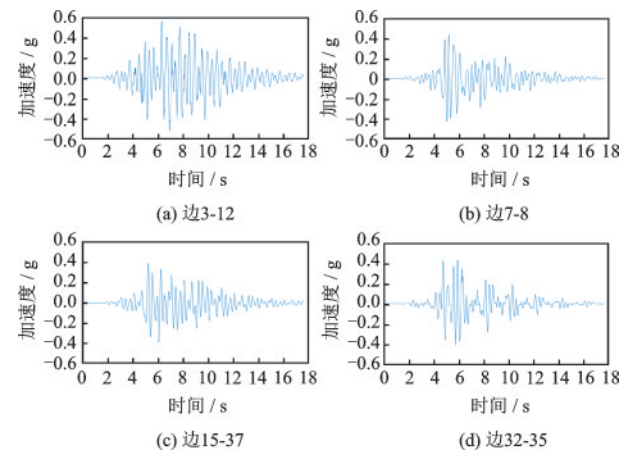


图6 空间变化地震动时程样本(PGA=0.50g)
Fig.6 Spatially variable ground motion samples (PGA=0.50g)

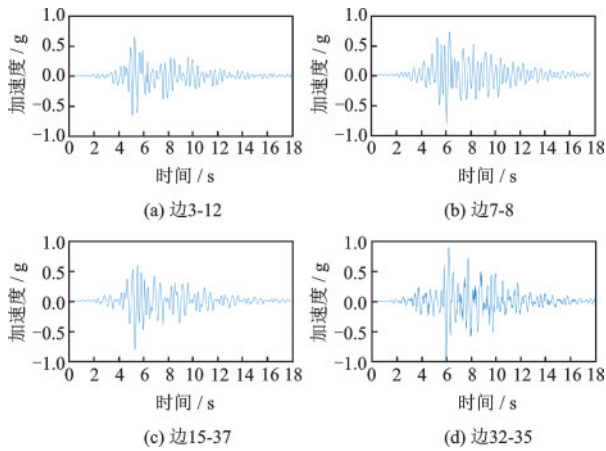


图7 空间变化地震动时程样本($PGA=0.75g$)

Fig.7 Spatially variable ground motion samples ($PGA=0.75g$)

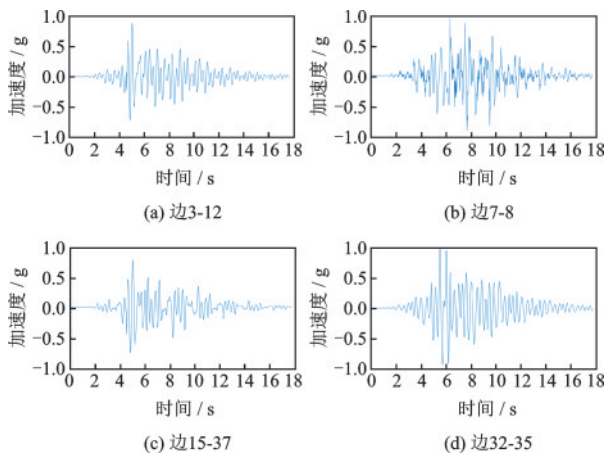


图8 空间变化地震动时程样本($PGA=1.0g$)

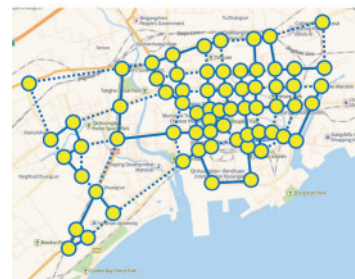
Fig.8 Spatially variable ground motion samples ($PGA=1.0g$)

依旧具有一定运输能力;在 PGA 为 $0.75g$ 时,中东部地区更多路段出现无法通行情况,巨分支依旧存在,但覆盖节点数量变少;在 PGA 为 $1.0g$ 时,中东部地区的巨分支出现断裂,路网碎片化,几乎完全丧失了通行能力。可见,随着地震动强度不断增大,边破坏数量逐渐增加,路网连通性丧失,但此时依旧存在直径较大的巨分支能够连接路网中的大多数节点,路网尚具有运输能力。直至地震动强度达到一定程度,巨分支断裂,路网出现破碎化,此时路网完全丧失运输能力。

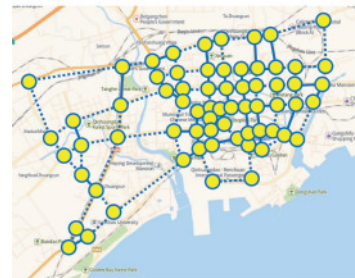
图 10~11 给出了 400 次不同强度地震模拟的震后路网分支数量、最大分支直径与空间变化地震动平均 PGA 关系。其中,分支数量随 PGA 增大而增大,最大分支直径随 PGA 增大出现先增大后减小的现象。导致最大分支直径出现先增大后减小现象的原因是:网络连通时,直径路径中的边一旦破坏将导致直径路径变化,新的直径路径更长,因此网



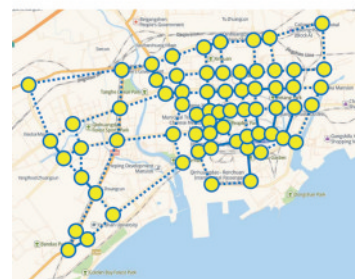
(a) $PGA=0.25g$



(b) $PGA=0.50g$



(c) $PGA=0.75g$



(d) $PGA=1.00g$

图9 震后路网破坏状态

Fig.9 Damage state of the post-earthquake road network

络直径变大;边破坏导致网络不连通时,直径路径一旦断裂原网络将分为两个或多个更小的分支,最大分支直径变小。

从图 10~11 中可以看出,当 PGA 小于 $0.25g$ 时,分支数量和最大分支直径未发生明显变化,说明路网连通状态完好,路网边几乎未发生破坏,路网通行能力未受明显影响;当 PGA 为 $0.25g\sim 0.5g$ 时,分支数量出现大于 1 的情况,最大分支直径逐渐达到峰值,说明路网丧失连通性,但连接大部分节

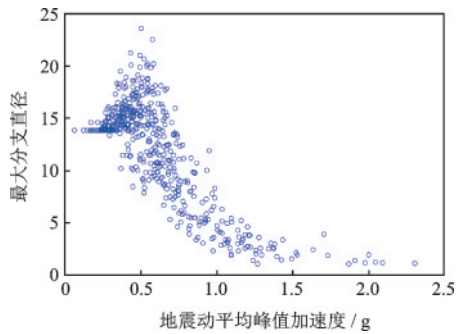


图10 震后路网最大分支直径-地震动强度关系

Fig.10 Relationship between maximum component diameter and PGA

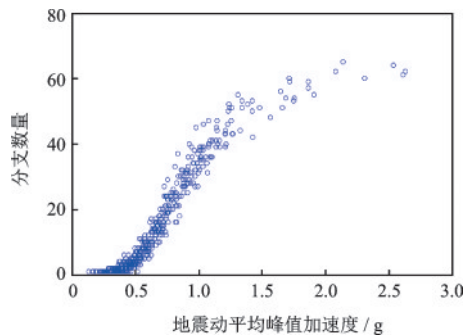


图11 震后路网分支数量-地震动强度关系

Fig.11 Relationship between maximum component diameter and PGA

点的巨分支存在,网络依旧具有一定通行能力;当PGA大于0.7g时,最大分支直径逐渐减小且趋于零,说明路网巨分支开始断裂,网络运输能力明显减弱直至消失。

进一步进行8 000次不同地震强度的路网破坏模拟,并依据表3对震后路网所处性态水平进行统计,可以获得表5所示的秦皇岛市地震易损性矩阵。地震易损性矩阵表明:当PGA小于0.25g时,路网处于轻微或中等破坏状态,路网运输能力基本不受影响或影响较小;当PGA处于0.25g~0.5g时,路网大概率处于中等破坏状态,巨分支存在,仍具有一定运输能力;当PGA处于0.5g~0.75g时,路网大概率处于中等和严重破坏状态,基本不出现完全破坏;当PGA大于0.75g时,路网发生完全破坏的概率升至约42%,易出现运输能力完全丧失的情况。表5所示的秦皇岛市路网地震易损性矩阵给出了不同强度地震情况下路网处于各类性态水平的概率,可作为路网地震损失和抗震能力的评价依据。

表5 秦皇岛市路网易损性矩阵

Table 5 Fragility matrix of the road network of Qinhuangdao City

单位:%

| 破坏状态 | 空间变化地震动平均峰值加速度/g | | | |
|------|------------------|----------|----------|-------|
| | <0.25 | 0.25~0.5 | 0.5~0.75 | >0.75 |
| 轻微破坏 | 61.88 | 7.68 | 0 | 0 |
| 中等破坏 | 38.12 | 90.91 | 48.68 | 22.02 |
| 严重破坏 | 0 | 1.41 | 50.86 | 35.94 |
| 完全破坏 | 0 | 0 | 0.46 | 42.04 |

4 结论

(1)提出了一种基于蒙特卡洛模拟的城市道路基础设施网络地震易损性分析新方法。

(2)分支数和最大分支数可作为性态指标,用于定量划分震后路网的破坏状态。分支数反映了震后路网的连通性,最大分支直径反映了是否存在连接大多数节点的路网巨分支。

(3)数值模拟结果表明,当地震动强度小于0.25g时秦皇岛市市区路网大概率发生轻微破坏,路网连通且节点间距离不会显著增加;当地震动强度大于0.5g时震后路网不连通的概率增大。路网不连通主要是由城市西部地区较长路段的地震破坏无法通行造成的。

本研究结果可为城市路网抗震性能评价和路网拓扑结构优化提供参考。本研究后续工作重点包括分析桥梁隧道等结构单元对路网地震易损性的影响、细化路网性态水平划分标准、发展路网地震易损性函数计算方法等。

参考文献:

- [1] 李宏男,成虎,王东升.桥梁结构地震易损性研究进展述评[J].工程力学,2018,35(9):1-16.
Li H N, Cheng H, Wang D Sh. Review of research progress on seismic vulnerability of bridge structures [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(9): 1-16. (in Chinese)
- [2] Pitilakis K, Kaynia A, Crowley H. SYNER-G: Typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk[M]. Dordrecht: Springer Press, 2014: 259-297.
- [3] Chang S E, Nojima N. Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective [J]. Transportation

- Research, Part A: Policy and Practice, 2001, 35(6): 475-494.
- [4] Lagaros N D, Tsompanakis Y, Psarropoulos P N, et al. Computationally efficient seismic fragility analysis of geostructures [J]. Computers & Structures, 2009, 87 (19/20): 1195-1203.
- [5] Maruyama Y, Yamazaki F, Mizuno K, et al. Fragility curves for expressway embankments based on damage datasets after recent earthquakes in Japan [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30 (11): 1158-1167.
- [6] Yang S, Hu F, Thompson R G, et al. Criticality ranking for components of a transportation network at risk from tropical cyclones [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 28: 43-55
- [7] Pitilakis K, Argyroudis S, Kakderi K, et al. Systemic vulnerability and risk assessment of transportation systems under natural hazards towards more resilient and robust infrastructures [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 1335-1344.
- [8] Argyroudis S, Kaynia A M. Analytical seismic fragility functions for highway and railway embankments and cuts [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(11): 1863-1879.
- [9] Aydin N Y, Duzgun H S, Wenzel F, et al. Integration of stress testing with graph theory to assess the resilience of urban road networks under seismic hazards [J]. Natural Hazards, 2018, 91(2): 1-32.
- [10] Zhou Y, Wang J, Sheu J B. On connectivity of post-earthquake road networks [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019, 123: 1-16.
- [11] 姜淑珍, 柳春光. 城市交通系统易损性分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2005(增1): 243-247.
Jiang Sh Zh, Liu Ch G. Vulnerability analysis of urban traffic system [J]. Seismic Resistance and Reinforcement of Engineering, 2005(Sup 1): 243-247. (in Chinese)
- [12] 廖焱. 汶川地震公路路基震害调查分析及易损性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
Liao Y. Investigation and analysis of highway subgrade seismic damage and vulnerability in Wenchuan Earthquake [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [13] 兰日清, 李小军, 王玉石, 等. 近场强震动作用下城市路基路面灾害评价方法 [J]. 地震地磁观测与研究, 2017, 38(1): 60-68.
Lan R Q, Li X J, Wang Y Sh, et al. Assessment method of urban subgrade and pavement disaster under near-field strong vibration [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2017, 38(1): 60-68. (in Chinese)
- [14] Barthelemy M. Spatial networks [J]. Physics Reports, 2011, 499: 1-101.
- [15] Cacciola P, Deodatis G. A method for generating fully non-stationary and spectrum-compatible ground motion vector processes [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(3): 351-360.
- [16] Wang D, Li C, Yan C, et al. An evolutionary spectrum model of nonstationary seismic ground motions considering extended source effect for engineering purposes [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018, DOI: 10.1080/13632469.2018.1453421.
- [17] Wang D, Wang L W, Xu J, et al. A directionally-dependent evolutionary lagged coherency model of nonstationary horizontal spatially variable seismic ground motions for engineering purposes [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 117: 58-71.
- [18] 张勇, 杨晓光. 城市路网的复杂网络特性及可靠性仿真分析 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 464-467.
Zhang Y, Yang X G. Simulation analysis of complex network characteristics and reliability of urban road network [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(2): 464-467. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)