

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230414002

考虑地震动空间变化的区域公路网连通 可靠性研究*

高颖¹, 韩松旭¹, 曹泽林^{1,2}

(1. 河北工程大学土木工程学院, 河北 邯郸 056038;
2. 河北省地震灾害防御与风险评估重点实验室, 河北 三河 065201)

摘要: 区域公路网是社会交通大动脉和地震灾害救援生命线, 连通可靠性反映了地震灾害发生后公路网的通行能力, 地震动受震源位置及震中距的影响而具有显著的空间变化, 对公路网的震后破坏状态具有重要影响。以邯郸地区公路网为研究对象, 通过设定震源位置与震级, 研究地震动空间变化影响下的区域公路网连通可靠性。首先, 设定邯郸市1830年磁县大地震及一个虚拟地震为地震情景, 分别设置震级为 $M6.0$ 、 6.5 、 7.0 和 7.5 , 基于地震动衰减关系表达地震动空间变化, 得到公路单元对应的PGA。然后, 结合地震易损性模型分析公路单元震后通行概率。最后, 针对区域公路网空间范围大的典型特征, 优化城市道路所用的最大可能状态算法, 对邯郸地区公路网进行连通可靠性评估。结果表明, 区域尺度下公路网络单元和节点数量多、空间展布复杂, 其抗震连通可靠性与既有公路分布、区域城市位置等因素密切相关, 地震动空间变化显著影响公路单元的震后破坏状态和通行概率, 研究成果可为区域尺度公路网地震灾害评估及抗震韧性研究提供参考。

关键词: 区域公路网; 连通可靠性; 地震动空间变化; 震后通行概率

中图分类号: U412.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1051-11

Connectivity Reliability of Regional Highway Network Considering Spatial Variation in Seismic Ground Motion

GAO Ying¹, HAN Songxu¹, CAO Zelin^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Sanhe 065201, China)

Abstract: Regional highway network serves as the primary artery of social transportation and the life-line for earthquake disaster rescue. Connectivity reliability reflects the traffic capacity of the highway network following seismic hazards. Ground motions exhibit significant spatial variation influenced by the source location and epicentral distance, which have a crucial impact on the post-earthquake damage status of highway network. This study adopted the highway network in Handan area, to investigate the connectivity reliability under the influence of spatial variation in ground motions by setting seismic source locations and magnitudes. First, the 1830 Cixian earthquake and a virtual earthquake in

* 收稿日期:2023-04-14;修回日期:2023-07-24

基金项目:河北省地震灾害防御与风险评估重点实验室开放基金(FZ247102)、河北省自然科学基金(E2022402077, E2022402050)、国家自然科学基金(52308495)资助

作者简介:高颖(1977—),女,副教授,硕士。主要从事公路工程抗震研究。E-mail: gaoying@hebeu.edu.cn

通信作者:曹泽林(1990—),男,硕士,博士。主要从事近断层地震动研究。E-mail: caozelin@hebeu.edu.cn

Handan City were taken as earthquake scenarios, with the magnitudes of M6.0, 6.5, 7.0 and 7.5, respectively. The spatial variation of ground motions was expressed based on attenuation relationships to obtain the Peak Ground Acceleration (*PGA*) corresponding to highway units. Then, the post-earthquake traffic probabilities of highway units were analyzed in conjunction with the seismic vulnerability models. Finally, considering the typical characteristics of the wide spatial scale of the regional highway network, an optimization of the maximum possible state algorithm used for urban roads was conducted to evaluate the connectivity reliability of the highway network in Handan area. The results demonstrate that the regional highway network contains a huge number of units and nodes with a complex spatial distribution. Additionally, the seismic connectivity reliability is closely related to existing road distributions and regional urban locations. The spatial variation of ground motions significantly influences the post-earthquake damage status and traffic probabilities of highway units. In conclusion, the research findings provide references for seismic disaster evaluation and resilience analysis of regional highway network.

Keywords: regional highway network; connectivity reliability; spatial variation in seismic ground motion; post-earthquake traffic probability

0 引言

地震是一种难以预测的自然灾害,大地震可能导致巨大的人员伤亡、经济损失、结构破坏,对公路交通网络也具有很强的破坏力。区域公路网是区域范围内各城市之间相互联络、交织成网状分布的公路空间网络,是城市与区域经济发展的重要交通基础。相比于城市道路网,区域公路网的结构分布较为分散。当公路网遭受地震灾害时,不仅交通网络的连通可靠性降低,而且应急响应和灾后恢复也会变得极为困难。

区域公路网由不同地理位置的公路单元构成,由于其空间跨度很大,在分析连通可靠性时有必要考虑地震动空间变化的影响。地震动空间变化受震源位置、震级、地震波传播路径、介质特性、场地条件等因素的复杂影响,其中震源位置和震级会导致地震动峰值加速度(*PGA*)分布产生巨大变化,从而对区域公路网的破坏特征产生影响。

H. Mine等^[1]提出连通可靠性的概念,反映交通网络两节点之间保持连通状态的概率。连通可靠性是评价公路网应急能力的基础性指标,它反映了面对各种可能的故障或灾难情况下路网系统能够保持连通状态的能力。连通可靠性分析常用三种类型的网络,即源端-终端网络(一对一)、*k*终端网络(一对多)以及所有终端网络(多对多)^[2]。连通可靠性计算已有较多方法,包括蒙特卡洛算法、基于贝

叶斯网络算法、图简化分析法、遗传算法、最大可能状态算法^[3-7]。其中最大可能状态算法计算精度较高,避免了遍历所有网络状态效率低的问题^[8]。范文博等^[7]对最大可能状态算法进行了改进,减少了连通网络概率很小或绕行过远无实用考虑价值的状态数量。对于本文研究的区域公路网,由于其空间范围显著大于传统上分析的城市路网,改进后的最大可能状态算法仍需要根据最短路径选择情况提前设定参数,算法精度与灵活性尚难以满足计算需求,本文针对该问题开展进一步优化。

连通可靠性分析需确定震后公路单元的通行概率,在地震灾害场景中,公路单元的通行概率是指公路单元在地震作用下能够正常通过的概率,公路网路段通行情况直接反映交通系统能否满足震后应急救灾的交通需求^[9]。震后公路单元通行概率的评估方法主要包括公路易损性函数分析法^[10]和震害经验统计法^[11]。公路易损性函数分析法侧重于地震作用下公路易损性的表现,即结构单元的破坏概率。通过考虑公路在遭受不同地震作用下的破坏概率,从而考虑公路通行概率。而震害经验统计法从公路属性的角度出发,利用历史地震事件中公路受损情况的经验数据,建立公路属性和受损程度的关系模型,分析公路单元震害以得出公路通行概率。对于研究区域路网而言,两种研究方法有不同的适用性。由于区域路网的空间跨度大,易损性函数分析方法更适用于区域路网的公路单元分析,通过地震动衰减关系得到公路所在位置的

PGA,可以更合理地预测公路单元所处的实际震害。

邯郸地貌形态多变,山地丘陵占全市46%,平原区占54%,公路网覆盖区域地貌丰富。邯郸地区公路网根据地势呈现西疏东密的特点,西部地区依靠太行山脉,地势起伏较大,东部平原辽阔平展,邯郸地区公路网空间展布复杂。《京津冀协同发展规划纲要》将邯郸定义为“区域中心城市”,区域交通优越。邯郸与晋、鲁、豫三省接壤,是东出西联、通达南北关键的交通枢纽。邯郸地处华北平原地震带南部,位于北东向太行山山前断裂带南端与北西西向的磁县断裂带的交汇处^[12],地震活动强烈,潜在地震风险较高。邯郸在河北省区域交通系统具有一定代表性,具有潜在的地震风险性,因此可以作为实例来研究区域公路网的连通可靠性。

本文设置邯郸市1830年磁县大地震及一个虚拟地震为地震情景,分别设置震级为M 6.0、6.5、7.0和7.5,基于地震动衰减关系表达地震动空间变化,得到公路单元对应的PGA,结合地震易损性模型分析公路单元震后破坏概率,采用全概率公式将破坏

概率转化为通行概率。针对区域公路网空间范围大的典型特征,优化传统的最大可能状态算法,利用优化算法对邯郸地区公路网进行节点连通可靠性评估,最后分析比较考虑地震动空间变化的连通可靠性结果。

1 区域公路网模型与地震动空间变化

以河北省邯郸市为研究区域,公路网数据源自邯郸市交通运输局提供的矢量数据。由于高速公路具有很强的区域穿越性,本文不考虑高速公路。本文所研究的公路网空间尺度较大,暂不考虑如桥梁、隧道等附属结构,最终选取国道、省道及关键县道组成的区域公路网为研究对象。选用原始拓扑法将辖区视为虚拟节点,即原始法表现为道路交叉口和各辖区形成的虚拟节点抽象成节点,节点间的公路段为边,并参考了邓亚娟等^[13]提出的拓扑抽象规则。图(1)是建立的区域公路网模型,该路网共包含节点81个,公路单元149个,公路网规模覆盖全市各县,区域通达水平较高。

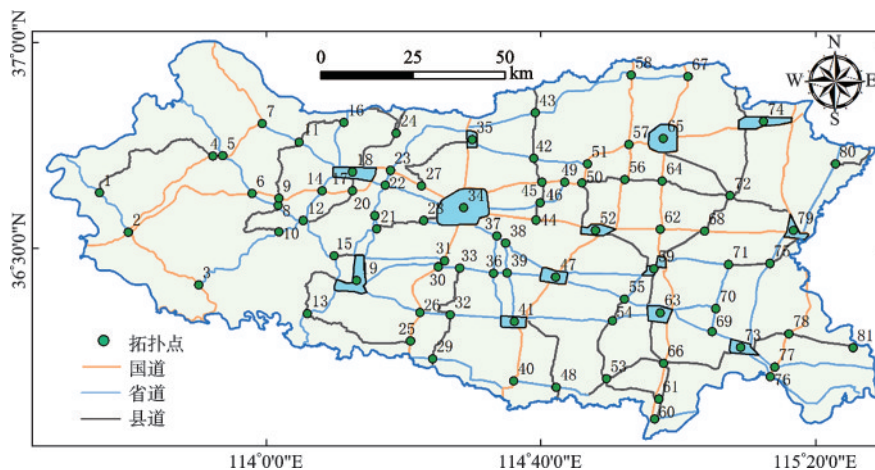


图1 邯郸地区公路网模型与节点编号

Fig.1 Highway network model and node numbers in Handan area

由于地震发生的地点和强度具有随机性,考虑到地震动空间变化的影响,本文设定2种地震情景,一是设定邯郸地区内有历史记载的最大破坏性地震^[14],1830年的磁县—彭城间地震(震级M7.5,震中位置36.4°N,114.2°E,震源深度22 km,断层走向287°,震中烈度为Ⅸ),选取该震中位置为工况1。二是考虑不同震源位置对公路网的影响,从邯郸市区发生过破坏性地震的活跃断层—太行山山前断裂带南端,假定一点为虚拟震源(震中位置36.6°N,

114.5°E,断层走向10°),选取该震中位置为工况2。

区域路网的破坏程度与地震震级、震中距直接相关,合理评估各公路单元的地震动强度是分析连通可靠性的基础。评估过程需要考虑地震动的不确定性,根据适合该区域的地震动衰减模型进行评估计算。研究区属于华北地震区,采用中国东部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系^[15],长轴、短轴的回归系数和标准差见表1,表达式如下:

$$\lg Y = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + c_4 \lg(R + c_5 e^{c_6 M}) \quad (1)$$

式中, Y 为地震动峰值加速度, cm/s^2 ; M 为震级; R 为震中距; $c_1 \sim c_6$ 为回归系数。

表 1 地震动衰减关系的回归系数与标准差

Table 1 Regression coefficients and standard deviations of ground motion attenuation relationship

地区	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	标准差
长轴	2.027	0.548	0	-1.902	1.700	0.425	0.240
短轴	1.035	0.519	0	-1.465	0.381	0.525	0.240

地震动衰减关系常用点震源模型, 未表达出地震动与断层走向之间的关系, 椭圆衰减关系模型考虑了地质构造、地下介质等因素对地震波传播的影响使模拟结果更为准确, 但使用椭圆衰减关系模型进行任意场点造成的地震动值计算比点圆模型复杂, 本文利用石建梁等^[16]提出的方法估计地震动: 对于某一给定的地震, 提前设定好震中经纬度、震级、长轴方向角和任意场点的经纬度。以震中为原

点, 建立东北向 X, Y 直角坐标系。经过坐标转换将坐标轴逆时针旋转 θ 度, 得到以椭圆长轴、椭圆短轴为 X, Y 轴的新直角坐标系, 椭圆上任意一点坐标为 (x_c, y_c) 。基于椭圆衰减关系, 通过几何关系联立以下两个方程, 求出 R_a 或 R_b 中的一值带入对应地震动衰减关系, 即可求任意场点的 PGA 。

$$\frac{x_c^2}{R_a^2} + \frac{y_c^2}{R_b^2} = 1 \quad (2)$$

$$C_1 + C_2 M + C_3 M^2 + C_4 \lg(R_a + C_5 e^{C_6 M}) = D_1 + D_2 M + D_3 M^2 + D_4 \lg(R_b + D_5 e^{D_6 M}) \quad (3)$$

为展示地震动的空间变化, 以工况 1 为例, 区域公路网在 $M7.5$ 级地震下的 PGA 如图 2 所示。为对比不同地震作用下路网遭受的破坏状态, 考虑地震动空间变化, 将公路分为 L 个 1 km 的单元, 由公式 (2)、(3) 联立计算出拆分单元的 PGA , 公路的 PGA 近似取为该各公路拆分单元 PGA 的均值^[17]。假设 $M6.0$ 、 6.5 、 7.0 、 7.5 四种不同震级, 公路单元的 PGA 如图 (3)、图 (4) 所示。

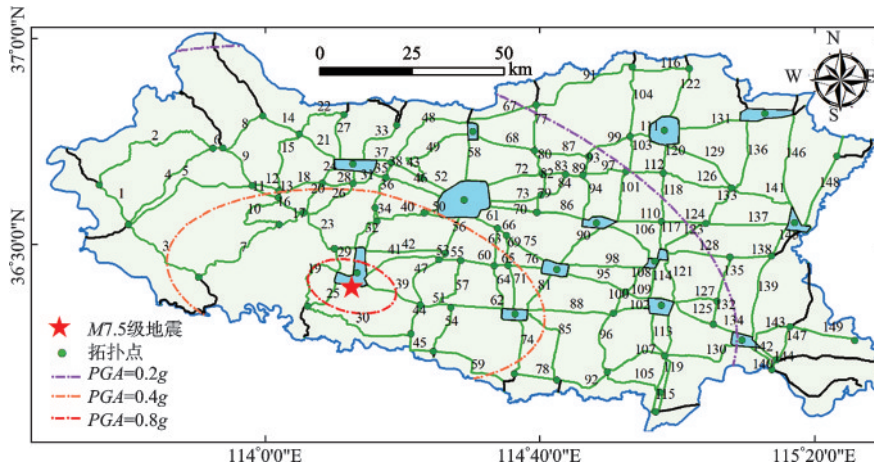


图 2 工况 1- $M7.5$ 地震的 PGA 空间变化及公路单元编号

Fig.2 Scenario 1- Spatial variation of PGA and numbering of highway units for $M7.5$ earthquake

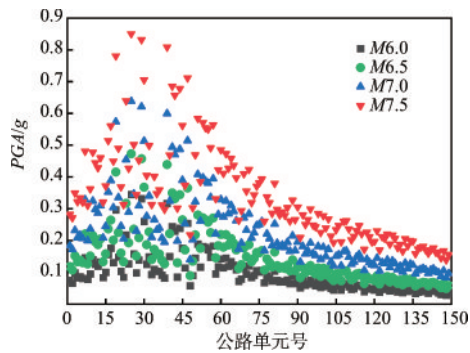


图 3 工况 1-公路单元峰值加速度

Fig.3 Scenario 1- PGA of highway units

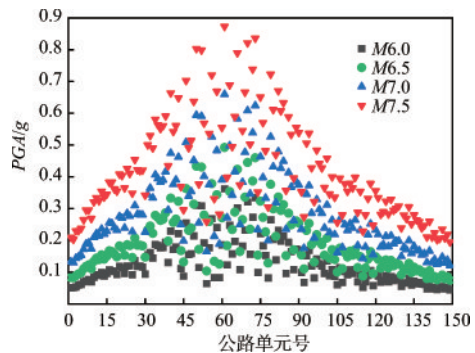


图 4 工况 2-公路单元峰值加速度

Fig.4 Scenario 2- PGA of highway units

2 公路单元通行概率分析

邯郸市位于我国东部地区,与西部地区或地震活跃地区相比,历史震害统计信息较少。考虑到不同地区公路的结构特性存在共性,在设计建造往往采用相似的标准和规范要求。本文采用李廷辉等^[10]基于汶川地震下灾区区内国省干道及部分县道的震害调查资料所建立的公路易损性模型,以此评估在不同震害下邯郸地区公路破坏程度。图5为公路单元易损性曲线。

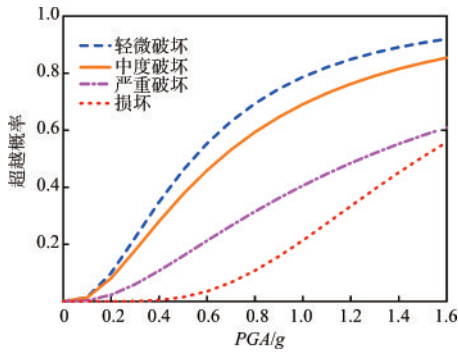


图5 公路单元易损性曲线

Fig.5 Highway unit vulnerability curves

地震灾害下单元路段的地震破坏状态对整个区域网络的通行概率具有重要影响,目前已有地震灾害资料^[11],将公路破坏程度分为公路完好、轻微破坏、中度破坏、严重破坏和损坏。公路单元通行概率需通过结合地震易损性模型分析公路不同程度的破坏概率,利用全概率公式将公路破坏概率进行转化。

为准确评估地震灾害下区域道路交通系统的抗震水平,将公路划分为若干单位长度路段,公路单元在 I_{PGA} 下不同破坏程度对应概率 $p(I_{PGA})$ 为:

$$p(I_{PGA}, \mu_h) = \Phi \left[\frac{\ln(I_{PGA}/\mu_h)}{\sigma} \right] \quad (4)$$

式中, I_{PGA} 代表地震动峰值加速度; Φ 代表标准正态分布函数; μ_h 为第 h 条公路单元受损程度均值,其标准差取常数 σ 。事件 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5 概率分别为:

$$\left. \begin{aligned} p(I_{PGA,h}, E_1) &= 1 - p(I_{PGA,h}, \mu_1) \\ p(I_{PGA,h}, E_2) &= p(I_{PGA,h}, \mu_1) - p(I_{PGA,h}, \mu_2) \\ p(I_{PGA,h}, E_3) &= p(I_{PGA,h}, \mu_2) - p(I_{PGA,h}, \mu_3) \\ p(I_{PGA,h}, E_4) &= p(I_{PGA,h}, \mu_3) - p(I_{PGA,h}, \mu_4) \\ p(I_{PGA,h}, E_5) &= p(I_{PGA,h}, \mu_4) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5 表示公路完好、轻微破坏、中度破坏、严重破坏和损坏。

参考侯本伟等^[18]利用公路破坏概率评估通行概率的方法, R 代表公路单元的通行事件,公路单元通行概率 $P(R)$ 为:

$$P(R) = \sum_{i=1}^5 p(R|E_i) p(I_{PGA,h}, E_i) \quad (6)$$

式中, $p(R|E_i)$ 表示单元处于破坏状态 E_i 的概率, $i=1\sim 5$ 所对应取值为1.0、0.9、0.6、0.3、0。

经计算得到2种工况下各公路单元在四种不同震级的对应通行概率如图(6)、图(7)所示,区域公路网通行概率如图(8)、图(9)所示。

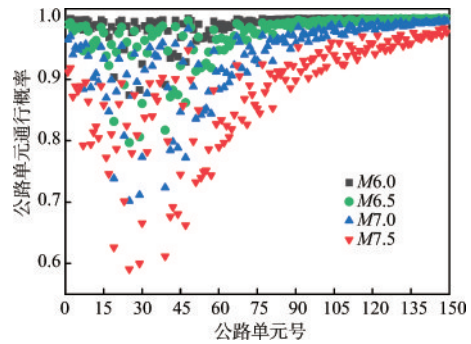


图6 工况1-公路单元通行概率

Fig.6 Scenario 1- Traffic probability of highway units

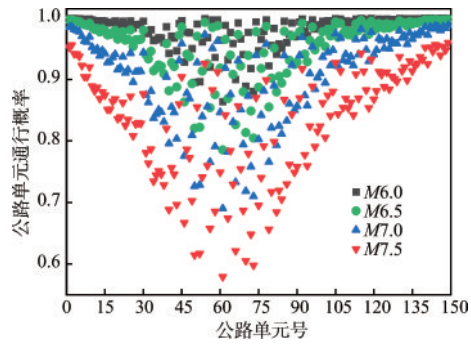


图7 工况2-公路单元通行概率

Fig.7 Scenario 2- Traffic probability of highway units

图(6)~(9)反映出8种情况下的震后通行概率具有显著的空间变化特征,具体为:(1)震源位置与断层走向不同,路网破坏所影响范围不同,离震中越近的公路单元通行概率越低。从图(6)与图(8)可以看出工况1随震级的增强会逐渐破坏西部地区的路网,在 $M7.5$ 震级下路网中50.3%的路段通行概率低于0.9,反观位于东部地区的105~149公路单元的通行概率受影响程度较小;从图(7)与图(9)可知工况2随震级的增强比工况1的影响范围更

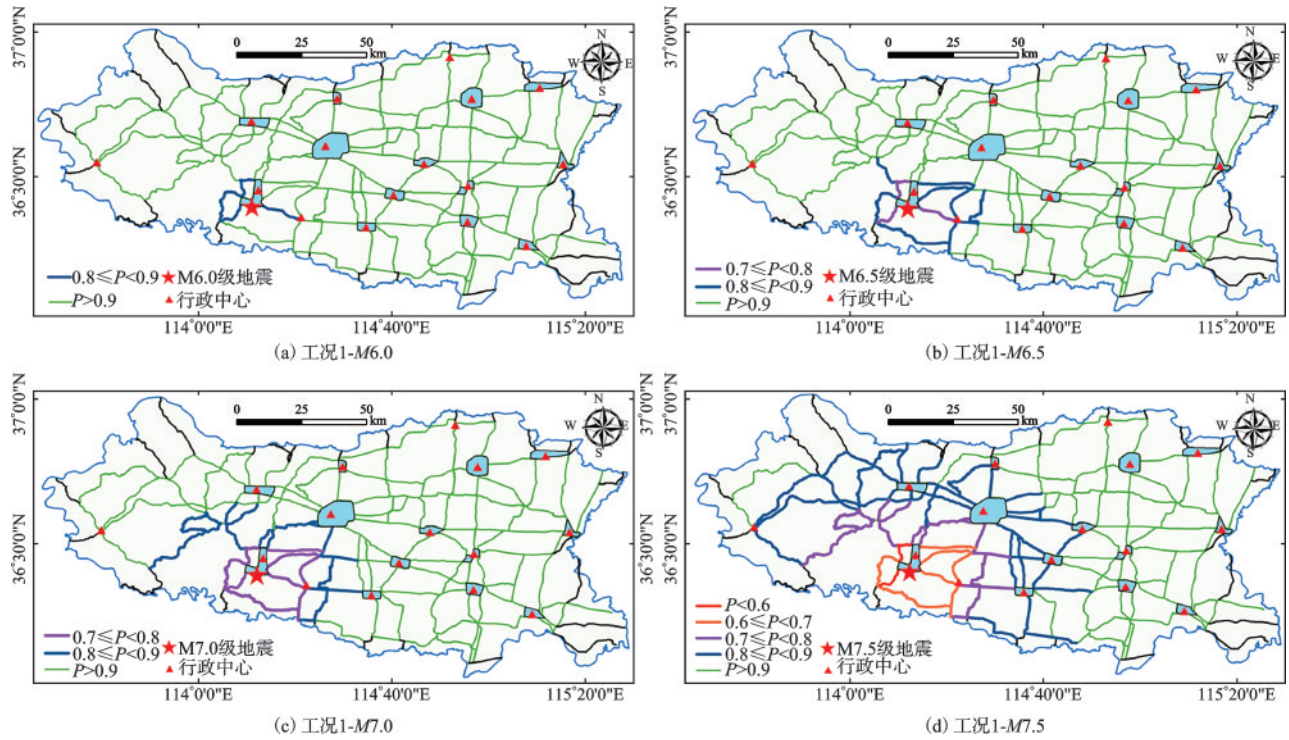


图8 工况1-区域公路网通行概率

Fig.8 Scenario 1- Traffic probability of regional highway network

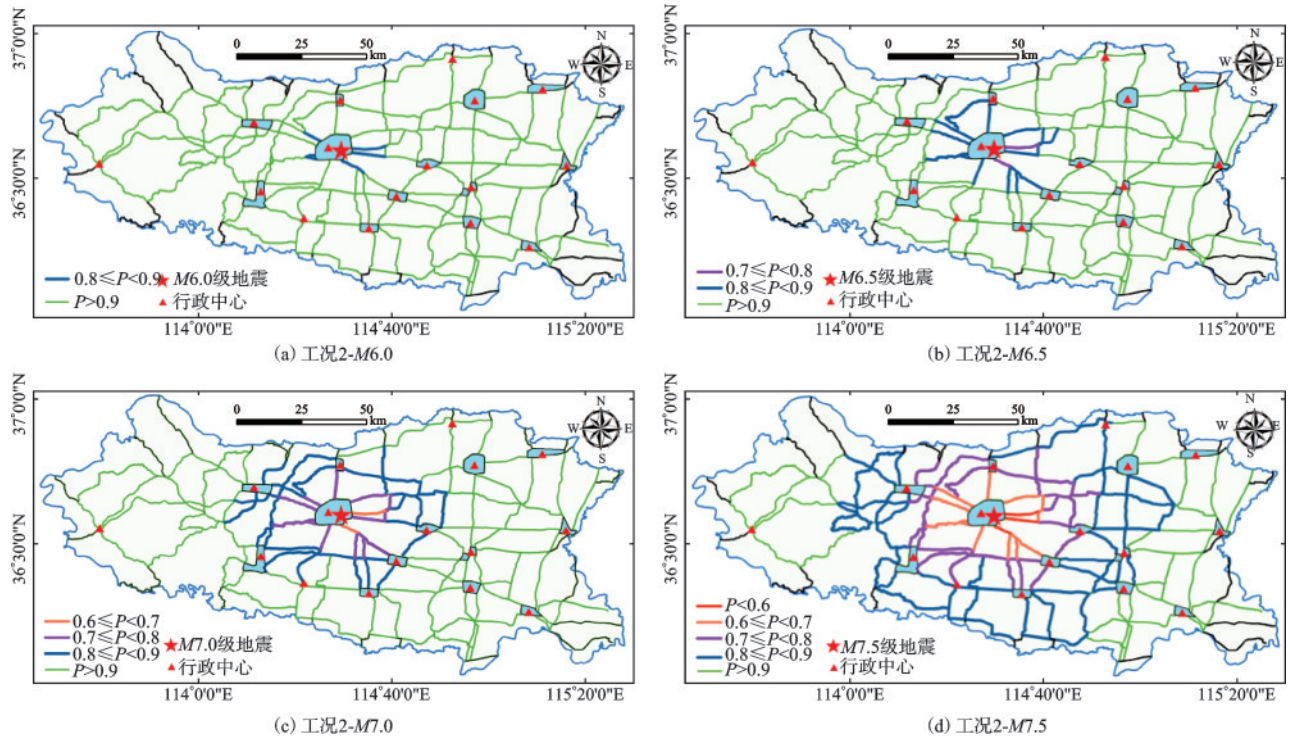


图9 工况2-区域公路网通行概率

Fig.9 Scenario 2- Traffic probability of regional highway network

广,在M7.5震级下路网中71.1%的路段通行概率低于0.9,通行概率较低的路段分布集中在34~83的公路单元。(2)随着震级的增强,在两种工况下路

网破坏的变化规律大致相同,路网破坏程度从震中向四周扩展,破坏逐渐减小。在M6.0震级下仅靠近震中区域的道路通行概率受到小幅度影响;在

M6.5震级下震中周围道路开始出现通行概率不足0.8的路段,个别路段可能通行受阻;在M7.0震级下通往震中区域的道路破坏严重,靠近震中的路段可能无法正常通行,通行状况受大幅度影响;在M7.5震级下通往震中位置的道路发生严重破坏、损坏的可能较大,道路破坏从震中辐射到周围区域,严重影响了邯郸地区公路网的通行能力。

3 区域公路网连通可靠性分析

3.1 连通可靠度评估方法

在震后连通可靠性分析模型中,路网模型以道路交叉口、区域为节点,路段作为边组成拓扑模型,定义区域路网 $G(V,E)$, V 为路网中的节点数目, E 为组成路网边的数目。各个公路单元使用二元状态(1表示通行、0表示失效)进行表述,此时路段处于正常通行状态的概率为 p ,处于失效状态的概率为 $1-p$,两点间由 n 条路段所组成的网络状态有 2^n 种互斥状态,所有状态下路网系统的累计概率为1。两点之间通行状态判定找出连通状态的累计概率即连通可靠度 C :

$$C = \sum_{i=1}^{2^n} \delta_i \cdot P_i \quad (7)$$

式中, δ_i 是连通情况判定系数,在第 i 个网络状态中,起迄点连通时 $\delta_i=1$,中断 $\delta_i=0$; P_i 是第 i 个网络状态发生的概率。

网络连通可靠度计算属于典型的NP-hard问题,计算量随网络规模增大呈现指数增加。最大可能状态算法是枚举包含 n 个易失效节点的网络的前 m 个最可能网络状态算法,本节采用范文博等^[8](2015)基于最大可能状态算法(Order算法)结合 k -最短路径算法进行改进提出的Target_Order算法,相较于Order算法,该算法对两点间最短路径进行筛选,集中考查的关键路段(即前 k 条最短路径中的路段,集合为 K),再利用Order算法计算对集合 K 状态组合进行网络状态排序。该算法去除对网络连通性影响较小或者没有影响的节点,减少了网络状态的冗余。

但当研究对象为空间跨度大的区域公路网,该算法使用仍存在以下几个缺点:Target_Order算法前置输入参数中,最大概率状态排序数目 m 和确定最短路径条数 k 的取值明显影响计算结果。其中Order算法的 m 值决定了计算精度与计算效率,在节点对间道路数量较少的情况下,当 $m < 2^n$ 时会产

生较大的误差。而 k 值需通过先验知识确定参数值,这限制了算法的灵活性;此外, k -最短路径算法的基本假设与实际需求不符,将链路长度假设为1的单位长度,侧重于两点间通行概率,但实际情况下,链路长度受救援时间、通行距离的复杂影响,使得最短路径计算结果难以满足路径择优的需求。

基于上述问题,本文对算法做出以下优化:(1)在网络预处理中,将对应道路的实际距离输入邻接矩阵中形成加权邻接矩阵。此步的修改将给予路段距离权重,进一步考虑了各个路段的实际物理长度,修改后算法秉持了实际通行道路绕行最短的原则。(2)将最短路径算法进行进一步约束,以不超过最短路径长度的30%为约束条件来筛选符合条件的路径。修改后不再对 k 的取值进行输入,提高了算法的灵活性。(3)加入对最短路径集中关键路段个数 n 的判定,经过调试,当 $n < 15$ 时,引入全枚举法,通过布尔真值表列举网络的所有可能状态;当 $n \geq 15$ 时,取 $m=10^4$,利用Order算法进行最大概率状态的排序。引用全列举法能够减少在节点较少的状态下Order算法的循环次数,从而提高计算效率和精度。优化后的连通可靠度流程如图10所示。

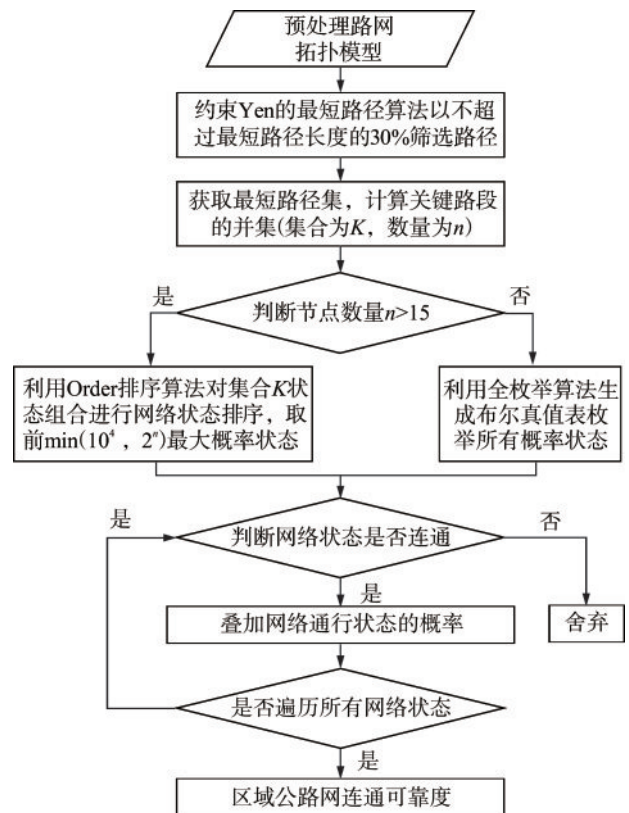


图10 优化后的连通可靠度算法流程

Fig.10 Flowchart of optimized connectivity reliability algorithm

阴影部分为算法优化部分,连通可靠度评估如下:

步骤1:预处理路网拓扑模型,对路网节点和路段编号,考虑道路的实际距离生成加权邻接矩阵 A ,并根据拟定道路通行情况输入路段通行概率 (p_i) 。

步骤2:约束 Yen 的最短路径算法以不超过最短路径长度的 30% 筛选路径。

步骤3:获取最短路径集,计算关键路段的并集(集合为 K ,数量为 n)。

步骤4:读取并判定最短路径集中路段个数 n ,当 $n \leq 15$ 时利用全枚举法生成布尔真值表枚举所有概率状态;当 $n > 15$ 时利用 Order 算法对集合 K 节点状态组合进行网络状态排序,取前 $\min(10^4, 2^n)$ 最大概率状态,进行生成关键路段网络状态集。

步骤5:判断网络状态是否连通,连通则叠加每个网络状态发生的概率,不连通则舍弃。

步骤6:当遍历所有网络状态后得到区域公路网的连通可靠度。

3.2 连通可靠性评估指标

在全枚举算法中,覆盖最短路径所产生所有网络状态的连通可靠度 C 计算式同式(7)一致;采用 Order 算法,连通可靠度 C 计算式有两部分组成:

$$C = \sum_{i=1}^m \delta_i \cdot P_i + \sum_{i=m+1}^{2^n} \delta_i \cdot P_i \quad (8)$$

在考虑前 m 个最有可能状态的连通性下,剩余网络状态存在两种极端可能,即剩余所有网络状态均能连通或剩余所有网络均不连通。则有:

$$0 \leq \sum_{i=m+1}^{2^n} \delta_i \cdot P_i \leq \sum_{i=m+1}^{2^n} P_i = 1 - \sum_{i=1}^m P_i \quad (9)$$

合并式(8)和式(9),连通可靠度 C 的范围为:

$$\sum_{i=1}^m \delta_i \cdot P_i \leq C \leq \sum_{i=1}^m \delta_i \cdot P_i + 1 - \sum_{i=1}^m P_i \quad (10)$$

路网系统连通可靠性 R_s 可用所有节点间连通可靠度的平均值表示,反映整个路网系统的连通水平。

$$R_s = \frac{1}{N^2 - N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N C_{ij} \quad (11)$$

式中, N 为区域公路网中所有的节点数; i, j 为起讫节点。

3.3 连通可靠性计算结果

为展示从其他地区到受灾地区的连通可靠性,在工况1中选取磁县(节点26)为源点,在工况2中

选取邯郸市(节点34)为源点。根据优化后算法计算节点间的连通可靠度,工况1和工况2的连通可靠度见图(11)、图(12),源点到行政区域的连通可靠度 C 和路网系统连通可靠性 R_s 见表2、表3。

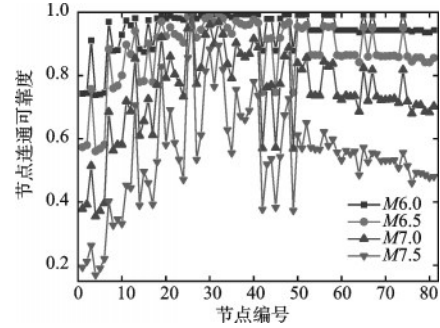


图11 工况1-不同震级下磁县(节点26)到其他节点的连通可靠度

Fig.11 Scenario 1- Connectivity reliability from Cixian (Node 26) to other nodes under different earthquake magnitudes

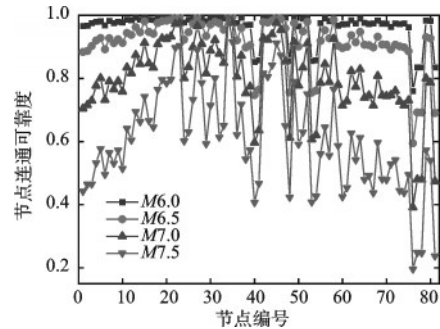


图12 工况2-不同震级下邯郸市(节点34)到其他节点的连通可靠度

Fig.12 Scenario 2- Connectivity reliability from Handan urban area (Node 34) to other nodes under different earthquake magnitudes

在工况1中,(1)峰峰、临漳、成安、肥乡和曲周在 $M6.0 \sim 7.5$ 震级下与磁县的连通可靠度相对较高,遭受地震灾害时这些区域可以及时响应并参与救援;(2)涉县、武安、永年、馆陶和大名与磁县的连通可靠度相对低,其中涉县在 $M7.5$ 震级下连通可靠性仅为 0.212 1;(3)随着震级的增加,源点与其他区域的连通可靠度急剧下降,在 $M7.5$ 震级时 66.7% 的行政区域与磁县的连通可靠度低于 0.6。同时,路网系统连通可靠性也随震级增加而急剧下降,在震级为 7.5 时降至 0.647 1。

在工况2中,(1)永年、武安、峰峰、鸡泽和肥乡在 $M6.0 \sim 7.0$ 震级下与邯郸市区的连通可靠度较

表2 工况1-不同震级下磁县(节点26)到各行政区域的连通可靠度

Table 2 Scenario 1- Connectivity reliability from Cixian (Node 26) to various administrative regions under different earthquake magnitudes

节点编号	名称	M6.0	M6.5	M7.0	M7.5
2	涉县	0.744 9	0.580 1	0.392 4	0.212 1
18	武安	0.980 8	0.920 7	0.770 7	0.526 9
19	峰峰	0.991 6	0.970 9	0.922 0	0.828 2
34	邯郸市	0.990 3	0.950 7	0.836 7	0.628 6
35	永年	0.984 9	0.932 1	0.791 7	0.554 7
41	临漳	0.993 5	0.966 8	0.889 0	0.736 9
47	成安	0.992 5	0.959 6	0.861 3	0.674 9
52	肥乡	0.992 5	0.959 4	0.856 2	0.650 9
58	鸡泽	0.992 0	0.955 1	0.837 9	0.598 4
59	广平	0.943 9	0.864 4	0.734 7	0.557 8
63	魏县	0.943 9	0.864 5	0.735 4	0.560 3
65	曲周	0.991 6	0.952 0	0.823 9	0.572 6
73	大名	0.943 4	0.858 5	0.713 2	0.508 0
74	邱县	0.991 6	0.950 9	0.818 3	0.556 4
79	馆陶	0.937 0	0.842 1	0.686 6	0.486 0
路网系统连通可靠度 R_s		0.957 6	0.896 2	0.799 8	0.647 1

表3 工况2-不同震级下邯郸市(节点34)到各行政区域的连通可靠度

Table 3 Scenario 2- Connectivity reliability from Handan urban area (Node 34) to various administrative regions under different earthquake magnitudes

节点编号	名称	M6.0	M6.5	M7.0	M7.5
2	涉县	0.967 0	0.886 8	0.716 0	0.464 7
18	武安	0.996 0	0.975 7	0.908 7	0.765 0
19	峰峰	0.996 9	0.981 7	0.927 2	0.796 3
26	磁县	0.995 8	0.974 0	0.898 9	0.732 8
35	永年	0.999 4	0.995 1	0.975 4	0.915 8
41	临漳	0.857 5	0.764 3	0.635 5	0.467 5
47	成安	0.992 9	0.959 0	0.853 8	0.649 7
52	肥乡	0.997 3	0.979 5	0.910 7	0.750 9
58	鸡泽	0.998 3	0.985 4	0.926 0	0.765 6
59	广平	0.966 7	0.903 8	0.780 1	0.586 7
63	魏县	0.974 7	0.914 3	0.773 4	0.541 8
65	曲周	0.976 4	0.906 7	0.738 9	0.479 2
73	大名	0.972 6	0.901 7	0.727 5	0.444 6
74	邱县	0.974 8	0.898 7	0.714 9	0.437 8
79	馆陶	0.982 9	0.930 5	0.800 4	0.573 1
路网系统连通可靠度 R_s		0.940 3	0.779 0	0.624 1	0.472 3

高,主要原因是邯郸市所处地理位置在区域公路网的中心,且离这些区域较近;(2)邱县、大名、涉县、临漳、曲周与邯郸市的连通可靠度较低,说明这些区域到邯郸市的公路破坏潜在风险较大,公路通行能力低。在M7.5震级时33.4%的行政区域与邯郸市的连通可靠度低于0.5。(3)路网系统连通可靠性在不同震级均比工况1要低,在M7.5震级时路网系统的连通可靠性为0.472 3,说明工况2下的地震作用对公路网的破坏影响范围更广。

通过比较分析两种工况,发现虽然震源位置不同,随着震级升高,连通可靠度均会呈现空间分布特征,度值呈阶梯下降趋势。图11中源点至50~81节点与图12中源点至1~10、65~74节点的连通可靠度变化相对一致,结果呈水平趋势。这是由于地震对公路单元的影响会随着震中距增大而逐渐衰减的结果。此外,随着震级升高,路网系统的连通可靠性下降速度存在差异,从侧面说明了路网系统连通可靠性与震源位置周围公路网的空间分布和密度特征有关。当震级上升至M6.5时,工况1的路网系统连通可靠性为0.896 2,工况2的路网系统连通可靠性为0.779,此时路网系统连通可靠性的下降百分比为20.7%,比工况1下降百分比高达13.9%,其原因是工况2设定的震源情况对邯郸地区公路网破坏影响更广泛,震中所处位置的周围路网分布集中且密集程度高,导致了路网系统连通可靠性显著降低。

4 结 论

以邯郸地区公路网为研究对象,设定1830年磁县大地震及一个虚拟地震为地震场景,分别设置震级M6.0、6.5、7.0、7.5,基于地震动衰减关系表达地震动空间变化,优化了最大可能状态算法,结合地震易损性模型分析了公路单元的震后破坏状态和通行概率,研究了考虑地震动空间变化影响的区域公路网连通可靠性,所得结论如下:

(1)区域公路网的通行概率具有显著空间变化特征,震源位置与断层走向对路网破坏特征影响范围不同,离震中越近的公路单元通行概率越低。此外,随着震级增强,不同震源位置下路网破坏状态变化规律大致相同,路网破坏程度从震中向四周扩展,破坏逐渐减小。

(2)针对区域公路网空间范围大的典型特征,

优化了城市路网所用的最大可能状态算法,在网络状态中路段较少情况下引入了全列举算法,提高了算法精度。同时,考虑了实际距离的权重,约束了最短路径算法中节点间的总距离,提高了算法灵活性,优化后算法满足了区域公路网连通可靠性计算需求。

(3)从连通可靠性评估结果来看,随震级升高,不同震源下的连通可靠度均会呈现出空间分布特征,呈阶梯下降趋势,此外,路网系统连通可靠性与震源位置周围公路网空间分布和密度特征有关,当震中位于公路网密集处时,随震级升高会导致路网系统连通可靠性下降速率变大。

本文研究成果可以为地震灾害下区域公路网连通可靠性分析提供科学依据,为邯郸地区公路网的震后连通评价提供决策建议。

参考文献:

- [1] Mine H, Kawai H. Mathematics for reliability analysis [M]. Tokyo: Asakura-Shoten, 1982: 12-14.
- [2] Almotahari A, Yazici A. A computationally efficient metric for identification of critical links in large transportation networks [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021: 107458.
- [3] 王鼎, 王晓文, 冯德成, 等. 基于蒙特卡罗模拟的城市道路网络地震易损性分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3): 558-567.
Wang D, Wang X W, Feng D C, et al. Seismic fragility analysis of urban road network based on Monte Carlo simulation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 558-567. (in Chinese)
- [4] 蒋礼果, 黄淑萍. 区域公路网震后连通可靠性分析及系统功能恢复 [J]. 地震研究, 2022, 45(3): 370-378.
Jiang L G, Huang S P. Connectivity reliability analysis and system function recovery of post-earthquake regional highway network [J]. Journal of Seismological Research, 2022, 45(3): 370-378. (in Chinese)
- [5] Monfared M A S, Rezazadeh M, Alipour Z. Road networks reliability estimations and optimizations: A bi-directional bottom-up, top-down approach [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 222: 108427.
- [6] 包元锋, 李杰. 基于遗传算法的生命线工程网络抗震优化设计 [J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(1): 21-27.
Bao Y F, Li J. Seismic reliability optimization of life-line system networks with genetic algorithms [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(1): 21-27. (in Chinese)
- [7] 范文博, 王佳伟, 杨成. 随机交通网络连通可靠度改进算法 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(6): 197-204.
Fan W B, Wang J W, Yang C. Improved algorithm for stochastic network connectivity reliability [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(6): 197-204. (in Chinese)
- [8] 岳焱超, 马建勋, 郜健, 等. 蒙特卡罗方法和 ORDER 算法在网络可靠度计算中的对比 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2013, 32(增1): 776-778.
Yue Y C, Ma J X, Gao J, et al. Comparison of Monte Carlo simulation and ORDER algorithm in calculation of network reliability [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(Sup 1): 776-778. (in Chinese)
- [9] 方东平, 李全旺, 李楠, 等. 社区地震安全韧性评估系统及应用示范 [J]. 工程力学, 2020, 37(10): 28-44.
Fang D P, Li Q W, Li N, et al. An evaluation system for community seismic resilience and its application in a typical community [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10): 28-44. (in Chinese)
- [10] 李廷辉, 林均岐, 刘金龙. 汶川 Ms8.0 地震公路易损性研究 [J]. 地震研究, 2021, 44(4): 682-688.
Li T H, Lin J Q, Liu J L. Research of highway fragility based on the Wenchuan Ms8.0 Earthquake [J]. Journal of Seismological Research, 2021, 44(4): 682-688. (in Chinese)
- [11] 胡衡. 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, 2018.
Hu H. Research on assessment method of road seismic damage based on the wenchuan earthquake [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2018. (in Chinese)
- [12] 彭远黔, 朱坤静, 冉志杰, 等. 浅层地震勘探方法在活动断层中的应用: 以邯郸市活动断层探测为例 [J]. 中国地震, 2021, 37(3): 681-694.
Peng Y Q, Zhu K J, Ran Z J, et al. Application of shallow seismic exploration of active faults: a case study of Handan active faults exploration earthquake [J]. Research in China, 2021, 37(3): 681-694. (in Chinese)
- [13] 邓亚娟, 杨云峰, 马荣国. 基于复杂网络理论的公路网结构特征 [J]. 中国公路学报, 2010, 23(1): 98-104.
Deng Y J, Yang Y F, Ma R G. Highway network structure characteristics based on complex network theory [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(1): 98-104. (in Chinese)

- [14] 刁桂苓,张四昌,赵军,等.用现今小地震研究历史强震的震源断层:以1830年河北磁县7(1/2)级地震为例[J].地震地质,1999,21(2):26-31.
Diao G L, Zhang S C, Zhao J, et al. The focal faults of historical great earthquakes inferred based on current small shocks taking an example of 1830 Cixian, Hebei, M7¹/₂ earthquake[J]. Seismology and Geology, 1999, 21(2):26-31.(in Chinese)
- [15] 俞言祥,汪素云.中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系[J].震灾防御技术,2006,1(3):206-217.
Yu Y X, Wang S Y. Attenuation relations for horizontal peak ground acceleration and response spectrum in Eastern and Western China[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(3):206-217.(in Chinese)
- [16] 石建梁,闫庆民,葛秋莹.用椭圆衰减关系模型计算任意场点烈度及地震动参数的数值方法[J].内陆地震,2011,25(1):21-28.
Shi J L, Yan Q M, Ge Q Y. An algorithm for arbitrary engineering site earthquake intensity or motion parameter using ellipsoid attenuation model[J]. Inland Earthquake, 2011, 25(1):21-28.(in Chinese)
- [17] 宗成才,冀昆,毕熙荣,等.衔接GMPE的城市燃气管网连通易损性分析[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(6):184-191.
Zong C C, Ji K, Bi X R, et al. Seismic connectivity fragility analysis for urban gas network using GMPE[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(6):184-191.(in Chinese)
- [18] 侯本伟,李小军,韩强,等.基于Monte Carlo模拟的公路网络震后连通性与通行时间分析[J].中国公路学报,2017,30(6):287-296.
Hou B W, Li X J, Han Q, et al. Post-earthquake connectivity and travel time analysis of highway networks based on Monte Carlo simulation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(6):287-296.(in Chinese)

(本文编辑:张艺)



(上接第1050页)

- [12] Subbaramaiah R, Prusty B G, Pearce G M K, et al. Crashworthy response of fibre metal laminate top hat structures [J]. Composite Structures, 2017, 160: 773-781.
- [13] Jin P, Huang F, Ming C X, et al. Study on the performance of energy absorption structure of bridge piers against vehicle collision [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 130: 85-100.
- [14] 张建强,刘伟庆,方海,等.设置新型复合材料防撞装置的车-桥碰撞数值模拟[J].中外公路,2011,31(6):200-204.
Zhang J Q, Liu W Q, Fang H, et al. Numerical simulation of vehicle-bridge collision with new composite anti-collision device [J]. Sino-foreign Highway, 2011, 31(6): 200-204. (in Chinese)
- [15] 张于晔,潘睿阳,蒋冬启.车辆撞击作用下泡沫铝防撞桥墩的动态响应特性[J].振动工程学报,2021,34(1):89-98.
Zhang Y Y, Pan R Y, Jiang D Q. Dynamic response characteristics of aluminum foam anti-collision pier under vehicle impact [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(1): 89-98. (in Chinese)
- [16] Avalle M, Belingardi G, Montanini R. Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(5): 455-472.
- [17] Wang Z, Ma H, Zhao L, et al. Studies on the dynamic compressive properties of open-cell aluminum alloy foams [J]. Scripta Materialia, 2006, 54(1): 83-87.