

邯郸地区干线公路网络特征与抗震韧性研究

崔朝阳, 王可意, 魏嘉

(河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为准确评估邯郸地区干线公路网络的结构特征与抗震韧性,构建基于原始法与对偶法的网络拓扑模型,分析网络的结构属性及中心性指标,选取最大连通子图相对规模和网络全局效率作为核心指标,引入随机攻击、度攻击、介数攻击、动态度攻击和动态介数攻击等多种震前攻击策略,模拟不同情境下的网络响应特性。并以磁县地震和一个虚拟地震为案例,构建震后攻击模式,分析受灾范围变化及其对鲁棒性的影响。结果表明:邯郸干线公路网络具有无标度网络特性,但不具备小世界特征;其中中部地区节点的度中心性和介数中心性普遍高于0.8,连通性显著优于外围区域,而周边地区介数中心性普遍低于0.25,呈现网络边缘效应。在鲁棒性分析中,动态介数攻击对网络破坏程度最大;震后情景中,随着PGA代表的地震波及范围扩大,网络鲁棒性持续降低。研究成果可为邯郸地区交通工程抗震韧性研究提供借鉴,也为类似灾害下鲁棒性分析提供参考。

关键词: 公路网; 抗震韧性; 鲁棒性; 网络特征; 攻击策略

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)01-0144-09

Characteristics and Seismic Resilience of Trunk Highway Network in Handan Area

CUI Zhaoyang, WANG Keyi, WEI Jia

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei China)

Abstract: To accurately assess the structural characteristics and seismic resilience of the trunk highway network in Handan, a network topology model was developed using both primal and dual approaches. The analysis focused on structural attributes and centrality indicators, with the relative size of the largest connected subgraph and global efficiency adopted as key robustness metrics. Several pre-earthquake attack strategies were implemented, including random attack, degree-based attack, betweenness-based attack, and their dynamic variants, to simulate the network's response under different scenarios. A post-earthquake attack model was also established using a historical earthquake in Cixian and a hypothetical seismic event. Nodes were attacked based on their peak ground acceleration (PGA) values to analyze the impact of affected area size on network robustness. The results show that the Handan highway network exhibits scale-free characteristics but does not display small-world properties. Nodes in the central region generally have high degree and betweenness centrality values (above 0.8), indicating stronger connectivity compared to peripheral areas, where betweenness centrality is typically below 0.25. Among the pre-earthquake strategies, dynamic betweenness attack caused the most severe degradation of network robustness. In post-earthquake scenarios, robustness declines as the PGA-based impact area increases. This study offers insights

收稿日期: 2025-04-17

修回日期: 2025-07-24

接受日期: 2025-08-13

基金项目: 河北省教育厅科学研究项目(BJK2023062)

作者简介: 崔朝阳(2000-),男,硕士研究生,主要从事公路工程抗震研究

通信作者: 王可意(1988-),女,副教授,研究生导师,博士,主要从事公路工程抗震研究,E-mail: wangkeyi@hebeu.edu.cn

引用格式: 崔朝阳,王可意,魏嘉. 邯郸地区干线公路网络特征与抗震韧性研究[J]. 河南科学, 2026, 44(1): 144-152.

Cui Z Y, Wang K Y, Wei J. Characteristics and seismic resilience of trunk highway network in Handan Area[J]. Henan Science, 2026, 44(1): 144-152.

for improving the seismic resilience of transportation infrastructure in Handan and provides a methodological reference for robustness analysis under similar disaster scenarios.

Key words: highway network; seismic resilience; robustness; network characteristics; attack strategy

0 引言

《京津冀协同发展规划纲要》和《中原经济区规划》将邯鄲定位为“区域性中心城市”^[1],邯鄲与晋、鲁、豫三省接壤,是东出西联、通达南北的关键交通枢纽,其干线公路网承担着重要的运输任务。公路网络面临各种不确定的风险和挑战,如交通拥堵、路面损坏、地震灾害等因素均给交通网络的运输能力、效率、安全造成影响。邯鄲地处华北平原地震带南部,位于北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会处^[2],地震活动强烈,潜在地震风险较高。遭受地震后,公路网受灾辐射面积广,通畅能力不足,不仅影响应急救援工作进行,在灾后重建过程中甚至会给整个区经济发展带来困难。

Albert等^[3]研究了无标度网络和随机网络的鲁棒性,掀起了复杂网络理论的研究热潮。目前网络特征与鲁棒性的研究已经在陆地运输^[4-6]、海洋货物运输^[7-8]、空中运输^[9-10]等领域得到了广泛应用,然而在干线公路网的研究较为有限。抗震鲁棒性是指干线公路网在地震前后能够保持通行的能力,包括震前和震后鲁棒性。震前鲁棒性用于评估公路网络在地震发生前的承受和适应能力,震后鲁棒性用于指导在地震发生后恢复与重建能力。目前鲁棒性研究多数基于复杂网络指标排序对震前鲁棒性分析^[11-12],不能准确反映地震灾害影响的鲁棒性。为此,借助地震峰值加速度(PGA)来表达地震灾害对公路网的影响强度很有必要。构建路网拓扑模型是网络特征研究的基础,现有交通网络建模方法主要为原始法和对偶法。原始法能直观地反映实际的地理关系,保留节点的空间位置和道路长度信息^[13]。而对偶法更能体现路段间的相互关系,直观地反映出各路段在公路网的重要程度^[14]。鉴于两种方法各有侧重,结合两种方法建模能更合理地评价邯鄲地区的干线公路网络特征。

为此,本研究提出创新思路,基于原始法和对偶法建立邯鄲地区干线公路网的拓扑模型,研究公路网络结构特征及中心性指标。选取最大连通子图相对规模、网络全局效率作为抗震鲁棒性指标。设计随机攻击、度攻击、介数攻击、动态度攻击、动态介数

攻击作为震前攻击策略,评估公路网的震前鲁棒性;选取1830年磁县大地震及一个虚拟地震为地震情景,以PGA大小排序对节点攻击作为震后攻击策略,以PGA考虑地震受灾范围影响对鲁棒性指标分析,综合评估公路网的震后鲁棒性。

1 干线公路网络拓扑特征分析

1.1 干线公路网研究对象及模型构建

邯鄲市位于河北省最南隅,地处 $113.28^{\circ}\sim 115.48^{\circ}\text{E}$, $36.03^{\circ}\sim 37.01^{\circ}\text{N}$ 之间,以邯鄲城区为枢纽,辐射周围地区呈现出“一枢两环七横九纵”的公路网,邯鄲地区西高东低,公路网根据地势呈现出西疏东密的特点。道路数据来源于邯鄲市交通运输局提供的矢量数据,对研究公路要素进行分类,并标出行政中心位置,如图1所示。

由于高速公路具有很强的区域穿越性,参考邓亚娟等^[15]提出的拓扑抽象规则,不考虑高速公路,选取国道、省道和关键县道作为研究对象,从实际地理关系和路段重要程度两个角度出发,采用原始法及对偶法构建邯鄲地区干线公路网拓扑结构。为便于模型构建,在拓扑建模中不再考虑各辖区的内部道路,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;对偶法表现为公路段抽象成节点,与道路交叉口和各辖区形成的虚拟节点连接为边。采用ArcGIS软件对公路网节点及路段进行处理并编号,生成原始法和对偶法网络拓扑点分布图,如图2所示。基于Gephi软件建模,在原始法中形成81个节点,149条边;在对偶法中形成149个节点,484条边。

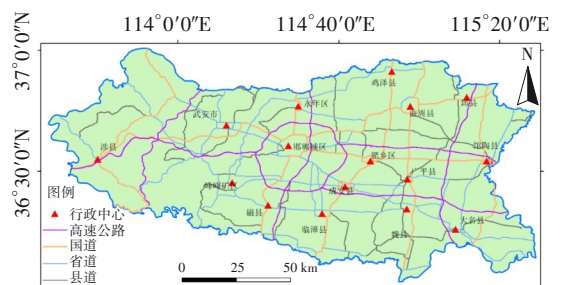


图1 邯鄲地区干线公路网

Fig.1 Trunk highway network in Handan area

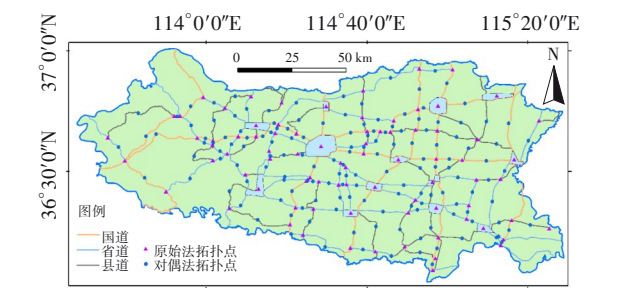


图2 原始法及对偶法网络拓朴点分布

Fig.2 Distribution of network topological points by primitive and dual methods

1.2 干线公路网络基础特征指标分析

1.2.1 节点度与度分布

节点度 k_i 又称连接度,是指一个节点所连接的边数,是评价路网拓朴结构的基础指标^[16]。在公路网络评价中,节点度值越大,连通性越强。网络平均节点度计算公式为:

$$k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{ij}, \tag{1}$$

式中: N 为公路网络中节点总数, a_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间的连接,如果 i 和 j 相连, a_{ij} 为1,否则 a_{ij} 为0。

从图3看出两种建模方法的网络节点度值均呈现出聚集分布特点,原始法节点度值集中于3和4之间,在网络中占比为41.7%;对偶法的节点度值集中于5和6之间,在网络中占比40.9%。同时,两者节点度分布大致呈现幂律分布的特征,即较少的节点拥有较高的节点度值,而大多数节点的节点度值较低。

1.2.2 平均路径长度

平均路径长度指网络中所有节点对之间平均最短距离,它反映网络节点间的分离程度,也是衡量在

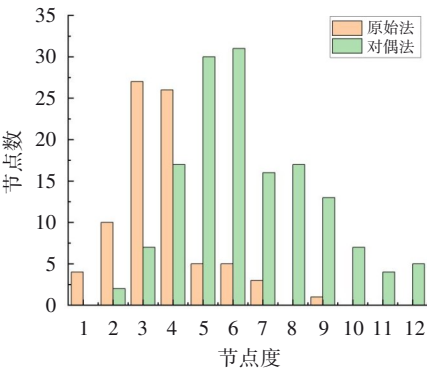


图3 邯郸地区干线公路网络度值分布

Fig.3 Distribution of degree values of trunk highway network in Handan area

网络攻击后剩余网络连通性的重要指标^[16]。平均路径长度和网络连通性有一定关系,平均长度越小,连通性就越好。平均路径长度 L 计算公式为:

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}, \tag{2}$$

式中: d_{ij} 为连接任意2个节点 i 和 j 间最少路段数量。

原始法及对偶法所计算公路网平均最短路径分别为5.193和5.063。相较于城市路网^[9],邯郸干线公路网受到路网空间展布影响,辗转节点数目多,平均最短路径较长。

1.2.3 聚类系数

聚类系数反映网络节点聚集情况的参数,判断路网是否发达,聚类系数越高,说明节点重要程度越高^[16]。聚类系数 C_i 计算公式为:

$$C_i = \frac{2m}{n(n-1)}, \tag{3}$$

式中: n 为节点 i 与其他节点直接相连的数量, m 为 n 个节点间的实际边数。

经计算,采用原始法得到邯郸地区公路网的平均聚类系数 $C=0.247$,采用对偶法得到平均聚类系数 $C=0.509$,将两种建模方法经计算整理的复杂网络相关特征分析结果如表1所示。

表1 邯郸地区干线公路网络特征

Tab.1 Network characteristics of Handan trunk highway network		
特征量	原始法	对偶法
节点数	81	149
边数	149	484
平均节点度	3.63	6.497
平均路径长度	5.193	5.063
平均聚类系数	0.247	0.509

1.3 干线公路网络结构特征分析

Watts 和 Strogatz^[17]指出小世界网络特性应同时具有较小的平均路径长度和较大的聚类系数,小世界网络评估式为:

$$L \leq L_{\text{Random}} = \frac{\ln(N)}{\ln(\langle k \rangle)}, \tag{4}$$

$$C \geq C_{\text{Random}} = \frac{\langle k \rangle}{N}, \tag{5}$$

式中: $\langle k \rangle$ 为网络的平均度; N 为网络中节点总数; L_{Random} 为随机网络的平均路长度; C_{Random} 为随机网络的聚类系数。

为验证基于原始法和 对偶法所构建的公路网络模型是否符合小世界网络,从上式得到同规模随机网络的平均路径长度和聚类系数如表 2 所示,两种建模方法的平均路径长度大于随机网络指标值。经对比,基于两种建模方法构建的公路网络均不符合小世界网络特性。说明邯郸地区干线公路网络呈现节点的高度聚集性,但在全局范围内路径较长,具体体现为通勤、出行时间较长,道路之间的连接性较弱,缺乏便捷的转换和衔接路段。

表 2 公路网络与同规模随机网络的特征指标对比

Tab.2 Comparison of characteristic indicators with random networks of the same scale

特征指标	原始法同规模随机网络	对偶法同规模随机网络
平均路径长度	3.409	2.674
聚类系数	0.044	0.043

Barabási 和 Albert^[18]提出无标度网络模型,即节点度的分布在双对数坐标里是一条直线,与网络的特征长度无关,这种节点度服从幂律分布的性质称之为网络的无标度特性。两种建模方法的节点总数较小,对累计度分布进行拟合,准确性更高。其中横坐标 $\ln k$ 表示路网度的对数,纵坐标 $\ln p(k)$ 表示度累计概率的对数,图 4 为节点累计度 $p(k)$ 拟合结果。

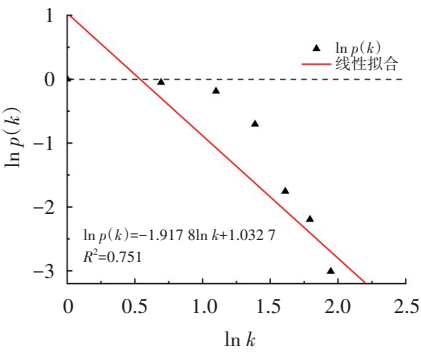
当道路网络具有无标度特征时,幂指数 r 的取值通常介于 $(2,3)$ 之间^[13],原始法所拟合的函数为 $\ln p(k)=-1.917\ 8\ln k+1.032\ 7$,从拟合函数结果可以看出累计度分布并非严格线性下降趋势。拟合函数斜率为 $-1.363\ 9$, $r=-k+1$,即幂指数 r 为 $2.917\ 8$, $r\in(2,3)$,符合似幂律分布。同理,对偶法所拟合的函数也符合似幂律分布特征。利用 T 检验方法对两种模型进行显著性检验,原始法模型 $P=0.005<0.05$,对偶法模型 $P=0.002<0.05$,认为原始法和 对偶法构建的邯郸地区公路网均符合无标度网络特性。

1.4 中心性指标

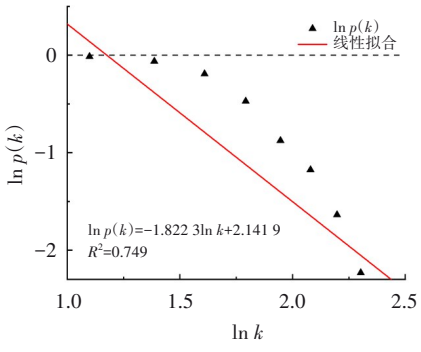
1.4.1 度中心性

度中心性是一种最简单的关键节点识别方法,度中心性越高的节点,说明它在网络中的连接越多,对网络的影响也越大。度中心性高的节点表示它连接了更多的道路,交通流量也更大,从而对整个交通网络的运行和稳定性有着更为重要的作用。为方便在不同复杂网络中对度中心性进行比较,进行标准化处理,节点 i 的度中心性计算公式为:

$$DC(i)=\frac{k_i}{N-1},\tag{6}$$



(a)原始法拓扑的公路网累计度分布



(b)对偶法拓扑的公路网累计度分布

图 4 邯郸地区干线公路网络累计度分布

Fig.4 Cumulative degree distribution of trunk highway network in Handan area

式中: k_i 代表节点度值, N 代表网络中所有节点数量, $N-1$ 代表任一节点最大可能的度值。

从整体看,图 5 中度中心性较大节点按辖区范围分布于邯郸地区的中部和东部,西部地区节点与其他区域节点连通性较差,其次可以看出路网边缘节点度小。在原始法模型中邯郸城区、临漳、武安、成安、肥乡及广平辖区的度中心性值大于 0.8,说明这些交叉口或虚拟节点在路网中担任枢纽,对公路对接和连通起重要作用。在对偶法模型中磁县、临漳、魏县、肥乡及广平辖区的度中心性大于 0.8,意味着这些公路的相互连接程度高。

1.4.2 介数中心性

介数中心性反映某节点对网络中的最短路径的传控效能^[19],反映出该节点在整个网络的信息传递和流动中的作用。在交通网络中,介数中心性高的节点可以连接不同的交通路径,从而在整个交通系统中具有重要的转换和调节作用。

介数表示一个节点在所有节点对之间最短路径上出现的次数之和,计算公式为:

$$B(v)=\sum_{s\neq v\neq t\in V}\frac{\sigma(s,t|v)}{\sigma(s,t)},\tag{7}$$

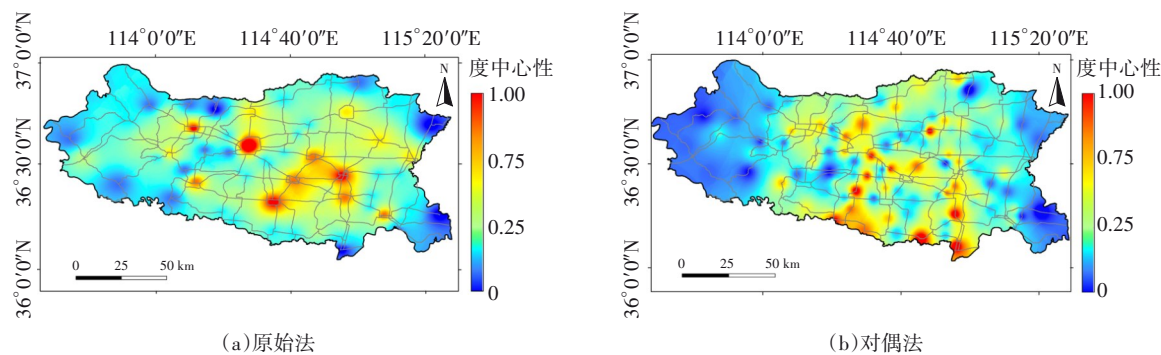


图5 邯郸地区干线公路网度中心性分布

Fig.5 Centrality distribution of trunk highway network in Handan area

式中: s 和 t 是网络中的任意两个节点, $\sigma(s,t)$ 是 s 和 t 之间的最短路径数量, $\sigma(s,t|v)$ 是 s 和 t 之间经过节点 v 的最短路径数量。

标准化处理后节点 i 的介数中心性计算公式为:

$$BC(i)=\frac{2}{(N-1)(N-2)}B(i)。$$

(8)

图6中介数中心性高的区域按辖区集中在邯郸地区中部,原始法模型的介数中心性较为集中,其中邯郸城区、肥乡、武安和广平辖区指标值大于0.8,这些节点是公路网的枢纽与核心,对区域辐射影响力强,西部辖区(涉县、武安等)的指标值在0.25以下,东北部辖区(鸡泽、大名等)的指标值也在0.25左右,说明邯郸中部地区的介数中心性要显著高于周边地区;对偶法模型的介数中心性指标分布零散,指标值集中分布0.3~0.7的节点多,不过邯郸中部地区的介数中心度较高,表现出这些公路对整体网络的控制能力。

2 干线公路网抗震鲁棒性分析

2.1 抗震鲁棒性分析指标

2.1.1 最大连通子图相对规模

在公路网络鲁棒性分析中,最大连通子图可以

反映出公路遭受攻击后的网络拓扑结构变化及破坏程度。当网络中某些节点或边遭受攻击或故障时,如果最大连通子图大小没有明显降低,说明网络鲁棒性强。最大连通子图相对规模计算公式为:

$$S'=\frac{N'}{N},$$

(9)

式中: N' 代表最大连通子图中节点数总和, N 为初始网络中节点数总和。

2.1.2 网络全局效率

网络连通效率是指网络中任意两个节点之间的平均最短路径的倒数,网络全局效率为网络所有节点间效率的均值,是评价网络通行能力的重要指标。当网络中任意两点间有边直接相连时,全局效率为1,网络鲁棒性最强;当网络中所有节点孤立,全局效率为0,鲁棒性最差,计算公式为:

$$E=\frac{1}{N(N-1)}\sum_{i,j\in N,i\neq j}\frac{1}{d_{ij}},$$

(10)

式中: d_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的最短路径长度。

2.2 攻击策略

2.2.1 攻击策略假设

干线公路网往往遭受诸多因素的干扰,在鲁棒

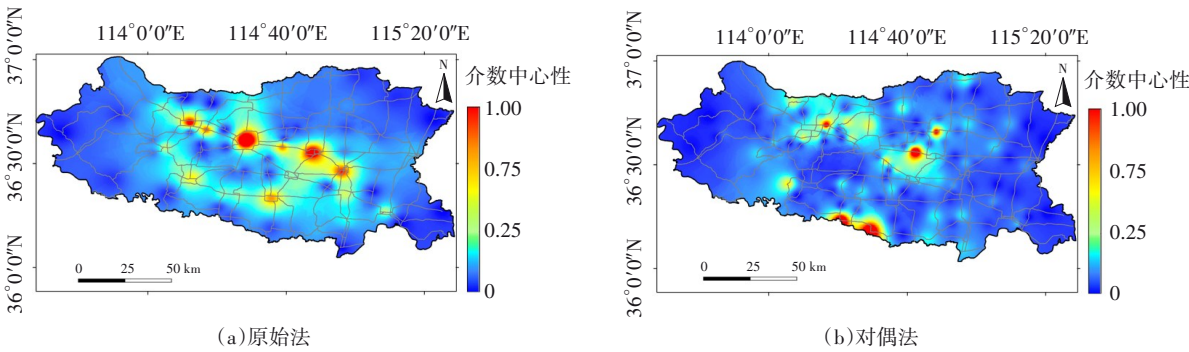


图6 邯郸地区干线公路网介数中心性分布

Fig.6 Betweenness centrality distribution of trunk highway network in Handan area

性研究中常用随机节点攻击和蓄意节点攻击策略进行分析。原始法和对偶法构建干线公路网模型的剔除节点意义有所不同,在原始法下节点失效代表某交叉口或虚拟节点失效;在对偶法下节点失效代表某条路段发生堵塞或断交。针对干线公路网的结构特征,为便于更好地分析和评估,对攻击策略假定以下前提^[6-7]:

- 1)进行攻击干扰时每次攻击5%比例的节点。
- 2)按照某种规则选择攻击节点,以最大限度地削弱网络的连通性,直至网络瘫痪。
- 3)网络中的节点在攻击前后没有自我修复的能力,即被攻击的节点不会恢复。

以原始法和对偶法建立的拓扑模型为研究对象,从震前攻击策略和震后攻击策略分析邯鄲地区公路网的抗震鲁棒性。

2.2.2 震前攻击策略

采用随机攻击和蓄意攻击作为震前攻击策略,随机攻击策略是指随机选择干线公路网络中的节点进行攻击,无论该节点是关键节点还是非关键节点都会进行攻击。其中蓄意攻击分为静态蓄意攻击和动态蓄意攻击,静态蓄意攻击是按照一定顺序进行有目的性破坏,达到对整个网络造成最大化破坏的目的;动态蓄意攻击策略是基于静态蓄意攻击策略而实现的,与静态蓄意攻击策略相比,每次攻击节点后完成对网络鲁棒性评价指标的再计算,实时更新节点数据。震前攻击策略共5种,分别为随机攻击、度攻击、介数攻击、动态度攻击、动态介数攻击。

2.2.3 震后攻击策略

以地震发生后PGA大小排序进行静态蓄意攻击作为震后攻击策略,考虑到地震动空间变化的影响,为邯鄲地区设定了2种地震情景,一是设定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°),选取该震中位置作为工况1;二是从邯鄲地区活跃断层-太行山山前断裂带南端选定一点(震中位置36.6°N、114.5°E,断层走向10°)作为虚拟震源位置,设定震级M7.5,选取震中位置作为工况2。根据邯鄲地区所处地理位置,采用中国东部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系^[20],利用石建梁等^[21]提出的方法评估原始法中公路交叉口、辖区虚拟节点及对偶法中公路中点位置的地震峰值加速度(PGA),得到两种建模方法在两种工况下的PGA值,见表3。

表3 震后攻击策略的攻击节点顺序及对应PGA大小
Tab.3 The order of attack nodes and corresponding PGA size of post-earthquake attack strategies

工况1				工况2			
原始法		对偶法		原始法		对偶法	
编号	PGA/g	编号	PGA/g	编号	PGA/g	编号	PGA/g
19	0.841	25	0.850	34	0.853	61	0.873
13	0.750	29	0.832	37	0.834	73	0.836
15	0.741	39	0.809	38	0.769	70	0.821
...	...	...	...	...	...	...	...
74	0.142	146	0.144	80	0.194	144	0.202
80	0.127	148	0.139	81	0.176	149	0.194

2.3 干线公路网抗震鲁棒性分析结果

基于MATLAB编程软件,采用震前攻击和震后攻击两种模拟攻击策略,分别记录路网逐渐崩溃过程中的最大连通子图相对规模和全局网络效率两个指标。

邯鄲地区干线公路网在不同攻击策略下的抗震鲁棒性指标变化如图7所示。随着攻击的范围越来越大,公路网的最大连通子图相对规模和全局效率变化均呈现下降的趋势。无论是随机攻击还是蓄意攻击,两个指标在初期均呈下降趋势,节点和边的移除直接破坏了公路网的连通性,导致最大连通子图相对规模和全局效率变化降低。

由图7(b)和(d)可以看到,网络全局效率变化指标分层明显,从高到低排序的攻击方式为随机攻击、静态蓄意攻击、动态蓄意攻击。在随机攻击策略下,路网移除节点比例在0~57.2%时,最大连通子图相对规模下降较快,直到60%时,下降速率稍显缓和;随后在移除节点比例86.5%时,路网接近完全崩溃。随机攻击对两种模型的抗震鲁棒性测定指标曲线相对平缓,在移除20%比例的节点后仍保持线性下降,由此说明邯鄲地区干线公路网络在随机攻击下表现出较强的鲁棒性。

在静态蓄意攻击策略下,介数攻击比度攻击对鲁棒性影响程度高,攻击初期的抗震鲁棒性指标下降较快,在移除节点攻击比例达到20%前指标曲线呈线性下降,20%至55%时呈阶梯状下降趋势,55%之后鲁棒性指标的对应值均低于0.1,最终直至网络瘫痪。从曲线变化看出,首先,按照节点度及介数从大到小排序的攻击节点策略对网络性能影响更大;其次,随攻击比例增大,攻击节点度和介数较大节点将对原始网络结构特征产生较大的改变,这种改变会产生对网络结构影响较大的孤立节点,破坏了起

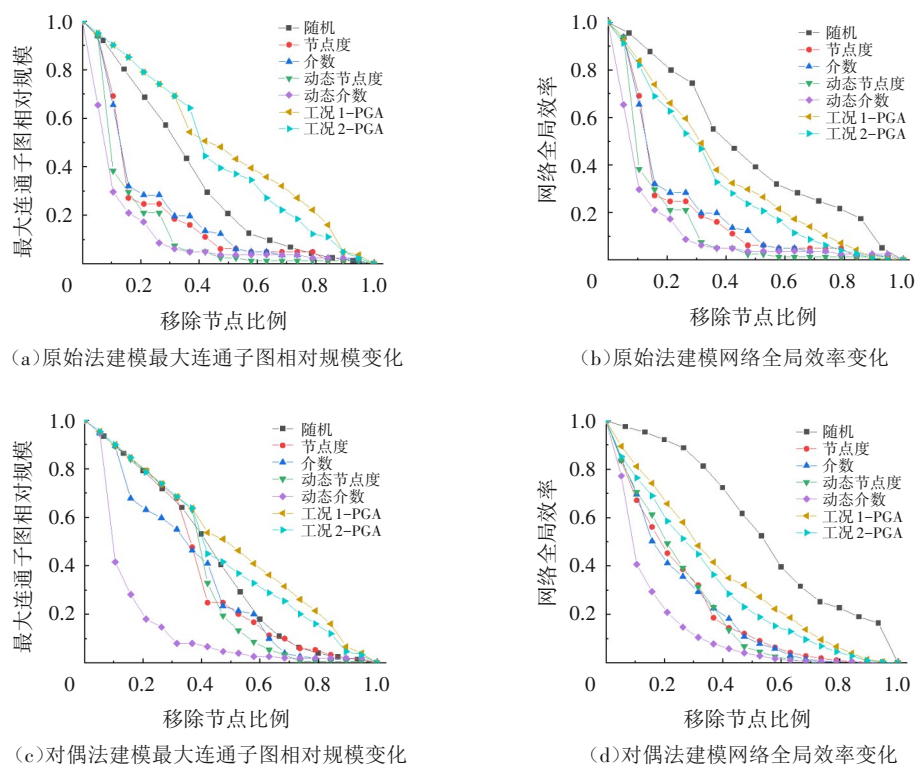


图7 不同攻击策略的抗震鲁棒性指标变化

Fig.7 Changes in seismic robustness indicators for different attack strategies

初度值和节数较大节点的作用,使得静态蓄意攻击对后续攻击剩余网络的性能影响随之降低。

动态蓄意攻击相比静态蓄意攻击下降速率快,动态蓄意攻击基于攻击反馈不断更新调整数据,每次均攻击现有网络节点度及度值最大的节点,在移除20%比例的节点时公路网络基本处于瘫痪状态。其中动态介数攻击是所有攻击中反应最灵敏的策略,会导致路网结构产生巨大变化,这也说明在网络中节点度及介数较大的节点对维持网络结构具有重要作用。

两种模型的鲁棒性曲线变化也存在一定差异,在最大连通子图相对规模中静态蓄意攻击存在的陡降节点位置不同,原始法在移除15%节点比例后降至0.3,而对偶法移除40%节点比例后降至0.3;在网络全局效率中对偶法模型比原始法模型的鲁棒性曲线更平滑,节点度攻击与动态节点度攻击曲线相差不大,指标变化说明对公路交叉口、虚拟节点的攻击比路段攻击发生网络结构变化更剧烈。

相较于震前攻击策略,震后攻击策略按照PGA排序移除节点的鲁棒性指标值下降平稳,最大连通子图相对规模指标的鲁棒性最强,网络全局效率指标的鲁棒性仅次于随机攻击策略,说明以PGA排序

的逐步移除节点对鲁棒性影响不显著。其次由于工况2选取震源位置的公路分布密集、空间展布复杂,工况2-PGA攻击比工况1-PGA攻击对鲁棒性的影响强。

由于大地震灾害具有突发性及强烈破坏性,按照移除节点比例的攻击策略仅能捕捉地震发生瞬时的鲁棒性变化。为直观地分析震后公路在不同震害下的鲁棒性特征,以PGA表达地震灾害影响范围来测定鲁棒性指标更合理。

如图8所示,无论是对原始法模型节点攻击还是对对偶法模型节点攻击,鲁棒性指标都随PGA降低而下降,在最大连通子图相对规模指标中,PGA大于0.6 g时网络结构发生改变较小,PGA小于0.6 g时曲线斜率开始加速下降,直至网络结构崩溃;网络全局效率指标与前者指标类似,不同点在于PGA小于0.6 g时的下降速率更快。从攻击方式来看,鲁棒性指标曲线表现出明显差异,在最大连通子图相对规模指标中,原始法节点攻击比对偶法节点攻击的鲁棒性影响程度大,在工况2的PGA为0.2 g时指标值已降至0;在网络全局效率指标中对偶法节点攻击比原始法节点攻击对鲁棒性影响程度大,在两种工况的PGA为0.3 g时路段攻击移除节点已使公路网络崩溃。

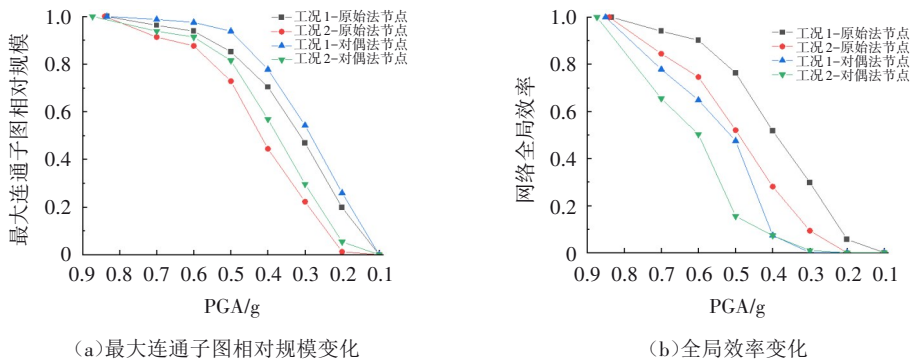


图8 考虑受灾范围影响的鲁棒性指标变化

Fig.8 Changes in robustness indicators considering the impact of disaster scope

3 结论

采用原始法和对偶法构建邯郸地区干线公路网模型,以度分布、平均路径长度、平均聚类系数分析了干线公路网络的结构特征和中心性指标;制定了震前攻击策略评估网络的震前鲁棒性,制定了以PGA大小排序对节点攻击的震后攻击策略,考虑受灾范围对鲁棒性的影响,评估网络的震后鲁棒性;以最大连通子图相对规模、网络全局效率2个指标分析该网络的抗震鲁棒性,得出以下结论:

1)通过分析干线公路网络结构特征,判断出邯郸地区干线公路网不具备小世界特性,虽然节点呈现较强的聚集性,但平均路径较长,缺乏便捷转换和衔接;邯郸地区干线公路网具备无标度网络特性,说明路网存在中心节点,少数节点在路网中发挥关键作用,中心性指标分析表明,相较于邯郸地区西部,中部、东部连通性较好。

2)以最大连通子图相对规模和网络全局效率作为衡量鲁棒性的测定指标,确定随机攻击、节点度攻击、介数攻击、动态节点度攻击、动态介数攻击为震前攻击策略,以地震发生后PGA大小排序进行静态蓄意攻击作为震后攻击策略,同时考虑受灾范围对鲁棒性的影响,构建了干线公路网抗震鲁棒性评估模型。

3)在抗震鲁棒性分析中,震前攻击策略的随机攻击对鲁棒性指标影响最小,静态蓄意攻击策略会使原始网络产生大量孤立节点,对鲁棒性影响较大,动态蓄意攻击中动态介数攻击对鲁棒性的影响最大;在震后攻击策略下,以PGA排序的移除节点对干线路网的鲁棒性影响不显著;考虑受灾范围影响的鲁棒性指标随PGA降低而下降,当PGA为0.6 g时

出现拐点,指标开始加速下降,直至网络崩溃。另一方面,移除原始法节点对网络拓扑结构影响大,移除对偶法节点对网络通行能力影响大。

参考文献:

- [1] 韩松旭. 邯郸地区公路网络特征与抗震连通可靠性研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2023.
Han S X. Study on characteristics and seismic connectivity reliability of highway network in Handan area[D]. Handan:Hebei University of Engineering,2023.
- [2] 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[J]. Earthquake Research in China,2021,37(3):681-694.
- [3] Albert R, Jeong H, Barabási A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature,2000,406(6794):378-382.
- [4] 强添纲,赵明明,裴玉龙. 城市多模式交通网络的复杂网络特性与鲁棒性研究[J]. 交通信息与安全,2019,37(1):65-71.
Qiang T G, Zhao M M, Pei Y L. An analysis of characteristics of complex network and robustness in Harbin multi-mode traffic network[J]. Journal of Transport Information and Safety,2019,37(1):65-71.
- [5] 赵善男. 城市公共交通复合系统级联失效及故障恢复策略研究[D]. 北京:北京交通大学,2021.
Zhao S N. Study on cascading failure and fault recovery strategy of urban public transport composite system[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2021.
- [6] 王江波,陈书润,苟爱萍. 基于复杂网络方法的粤港澳大湾区城际高速公路路网鲁棒性研究[J]. 公路,2023,

- 68(5):198-204.
Wang J B, Chen S R, Gou A P. Research on robustness of intercity expressway network for the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area based on complex network method[J]. Highway, 2023, 68(5):198-204.
- [7] 张金伟. 海上丝绸之路班轮航运网络特征及鲁棒性分析[D]. 大连:大连海事大学, 2020.
Zhang J W. Study on characteristics and robustness of liner shipping network of the Maritime Silk Road[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [8] 杨盼盼. “海上丝绸之路”集装箱运输网络鲁棒性分析及优化[D]. 西安:西安邮电大学, 2021.
Yang P P. Study on robustness analysis and optimization of container transportation network of the Maritime Silk Road[D]. Xi'an: Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [9] 徐凤, 朱金福, 苗建军. 基于复杂网络的空铁复合网络的鲁棒性研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2015, 12(1): 40-45.
Xu F, Zhu J F, Miao J J. The robustness of high-speed railway and civil aviation compound network based on the complex network theory[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2015, 12(1):40-45.
- [10] 胡军, 王雨桐, 何欣蔚, 等. 基于复杂网络的全球航空网络结构分析与应用[J]. 计算机科学, 2021, 48(增刊1): 321-325.
Hu J, Wang Y T, He X W, et al. Analysis and application of global aviation network structure based on complex network[J]. Computer Science, 2021, 48(S1):321-325.
- [11] 邱慧. 灾后公路网修复序列研究[D]. 西安:长安大学, 2016.
Qiu H. Study on post-disaster highway network restoration sequence[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [12] 轩俊伟. 基于复杂网络的城市道路网鲁棒性分析[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2015.
Xuan J W. Study on robustness analysis of urban road network based on complex network[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2015.
- [13] 叶彭姚. 城市道路网拓扑结构的复杂网络特性研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2012, 10(1):13-19.
Ye P Y. Complex network characteristics of urban road network topology[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2012, 10(1):13-19.
- [14] 赵国锋, 苑少伟, 慈玉生. 城市路网的复杂网络特性和鲁棒性研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(1):119-124.
Zhao G F, Yuan S W, Ci Y S. Analysis of complex network property and robustness of urban road network[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(1):119-124.
- [15] 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.
- [16] 张佳垚. 不同攻击条件下城市道路网络的鲁棒性分析[D]. 大连:大连交通大学, 2020.
Zhang J Y. Study on robustness analysis of urban road network under different attack conditions[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2020.
- [17] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. Nature, 1998, 393(6684):440-442.
- [18] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439):509-512.
- [19] 李治成, 吉立新, 刘树新, 等. 基于拓扑有效连通路径的有向网络链路预测方法[J]. 电子科技大学学报, 2021, 50(1):127-137.
Li Z C, Ji L X, Liu S X, et al. A method of link prediction in directed network based on effective connectivity path[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2021, 50(1):127-137.
- [20] 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.
- [21] 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.

(编辑 许军策)