

邯郸地区公路网络特征研究

崔朝阳

河北工程大学土木工程学院

DOI:10.12238/etd.v6i1.11742

[摘要] 本研究以河北省邯郸地区为例,开展区域尺度下干线公路网络抗震能力评估研究。基于复杂网络理论,分别运用原始法和対偶法构建公路网络拓扑模型,重点考察节点度分布、平均路径长度、聚类系数及介数中心性等拓扑特征参数。研究表明,该区域干线公路网络具有显著的无标度特性,其节点度分布服从幂律分布,但未表现出小世界网络特征。这一发现为区域交通基础设施的抗震韧性评估提供了新的分析视角,对完善地震灾害情景下的路网可靠性评估方法具有重要参考价值。

[关键词] 区域公路网络; 网络特征; 抗震能力

中图分类号: U491 **文献标识码:** A

Study on Seismic Robustness of Arterial Highway Network for the Regional Scale

Zhaoyang Cui

School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering

[Abstract] In this study, we take Handan area of Hebei Province as an example to evaluate the seismic capacity of trunk road network at the regional scale. Based on the complex network theory, the topological model of the highway network was constructed by using the primitive method and the dual method, respectively, and the topological characteristic parameters such as node degree distribution, average path length, clustering coefficient and betweenness centrality were investigated. The results show that the arterial highway network in this region has significant scale-free characteristics, and its node degree distribution obeys the power-law distribution, but does not show the characteristics of small-world network. This finding provides a new analytical perspective for the seismic resilience assessment of regional transportation infrastructure, and has important reference value for improving the road network reliability assessment method under seismic disaster scenarios.

[Key words] Regional highway network; Network characteristics; Earthquake resistance

引言

区域公路网络是城市与区域经济发展的重要交通基础,是区域范围内各城市之间一种大尺度空间网络。地震等各种不确定风险严重威胁着公路网络的安全运行^[1]。强烈地震会使公路网络受到严重破坏,交通可达性与流动水平大幅降低,影响震后应急救援和运输。作为城市间生命线工程的重要组成部分,区域干线公路的网络特征及其抗震能力受到关注。

Albert等^[2]研究了无标度网络和随机网络的鲁棒性,引起对复杂网络理论的关注。邯郸地区位于华北平原地震带南缘,地处太行山前断裂带与磁县断裂带的构造交汇区域,具有显著的地震活动特征。该区域北北东向的太行山山前断裂带与北西西向的磁县断裂带相互交错,形成了独特的地质构造格局,导致区域地震风险等级较高。基于这一地质背景,本研究选取邯郸地区干线公路网络作为典型案例,运用复杂网络理论中的原始法和対偶法构建拓扑模型,系统研究区域公路网络的结构特性

及其空间分布规律,以此为基础分析区域干线公路网络的抗震能力。

1 区域公路网络模型构建

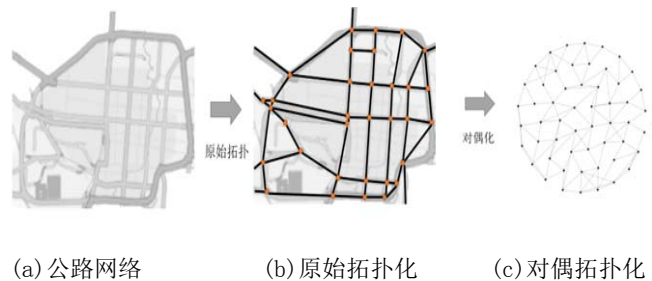


图1 原始法与対偶法建模原理

在交通网络拓扑建模研究中,原始法和対偶法作为两种主流建模方法各具特色(如图1所示)。其中,原始法直观反映实际地理关系,保留节点的空间位置和道路长度信息^[3],对偶建模方

法将关注重点转向路段间的连接关系,通过构建路段网络来表征交通流的转移特性,从而更好地揭示关键路段在网络中的功能重要性^[3]。本文将两种方法相结合进行建模,以更合理地表达区域公路网络特征。

首先分析河北省邯郸市辖区的公路网络矢量数据。由于高速公路具有很强的区域穿越性,参考邓亚娟等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,从不同建模角度出发,采用原始法及对偶法分别构建邯郸地区干线公路网络拓扑结构。为简化模型构建,将城区视为虚拟节点,不再考虑城市区域内部道路,原始法的表现为,将道路交叉口和各城市虚拟节点抽象成节点,节点间的公路段为边;对偶法表现为,将公路段抽象成节点,与道路交叉口和城市虚拟节点的连接为边^[3]。基于ArcGIS平台对公路网络节点及路段进行处理及编号,采用原始法建模形成81个节点,149条边;采用对偶法建模形成149个节点,484条边。

2 区域公路网络特征指标

在复杂网络理论框架下,网络拓扑结构可系统划分为规则网络、随机网络、小世界网络和无标度网络四种基本类型。区域公路网络作为一种典型的空间基础设施网络,其演化过程受到地理约束、经济发展、人口分布等多重因素的共同作用,呈现出独特的拓扑特征。判断公路网络是否具有复杂网络特性的核心标准在于验证其是否满足小世界效应或呈现无标度特征。

近年来,随着复杂网络理论的发展,研究者们提出了多个维度的量化指标来刻画网络拓扑特征。其中,节点度及其分布特征反映了网络的连接密度和异质性;平均路径长度表征了网络的传输效率;聚类系数揭示了网络的局部聚集特性;介数中心性则度量了节点或边在网络中的枢纽作用。基于这些指标,本研究构建了系统的区域公路网络特征分析框架,为深入理解路网拓扑结构及其功能特性提供了量化依据。

节点度 k_i 作为基础性结构指标,用于量化表征节点与其他节点的直接连接数量。该指标在交通网络评价中具有重要应用价值:节点度值越大,表明该节点与周边节点的连通性越强,在网络中的重要性也相应提高。其计算公式为:

$$k_i = \sum_i a_{ij} \tag{1}$$

式中, 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。

平均路径长度L指是衡量网络全局连通效率的重要指标。该指标通过计算网络中所有节点对之间最短路径的算术平均值,来量化表征网络的整体连通特性。平均路径长度L计算公式为:

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

式中: d_{ij} 为连接任意2个节点i和j间最少路段数量。

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^[3]。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。

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^[3],计算公式为:

$$B(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma(s,t|v)}{\sigma(s,t)} \tag{4}$$

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之间经过节点的最短路径数量。

3 结论

通过上述特征指标,确定邯郸地区公路网络原始法与对偶法模型的复杂网络特征,具体见表1。原始法的平均度值为3.63,在网络中占比为41.7%;平均路径长度为5.193;平均聚类系数为0.247。对偶法的平均度值为6.497,在网络中占比为40.9%;平均路径长度为5.063;平均聚类系数为0.509。

表1 邯郸地区干线公路网络特征

特征量	原始法	对偶法
节点数	81	149
边数	149	484
平均度	3.63	6.497
平均路径长度	5.193	5.063
平均聚类系数	0.247	0.509

Watts和Strogatz认为小世界网络特性应具有较小的平均路径长度和较大的聚类系数,小世界网络评估公式为:

$$L \leq L_{Random} = \frac{\ln(N)}{\ln(\langle k \rangle)} \tag{5}$$

$$C \geq C_{Random} = \frac{\langle k \rangle}{N} \tag{6}$$

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。

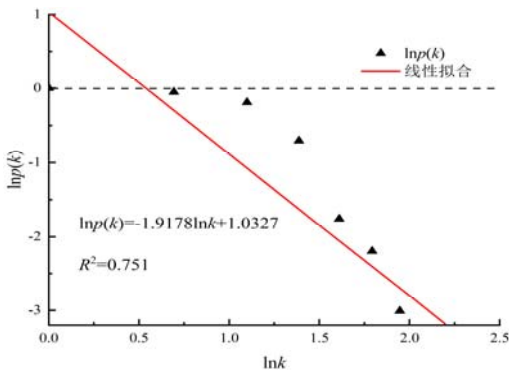
为判断基于原始法和对偶法所构建的公路网络模型是否符

合小世界网络,从式(7)、式(8)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,这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。

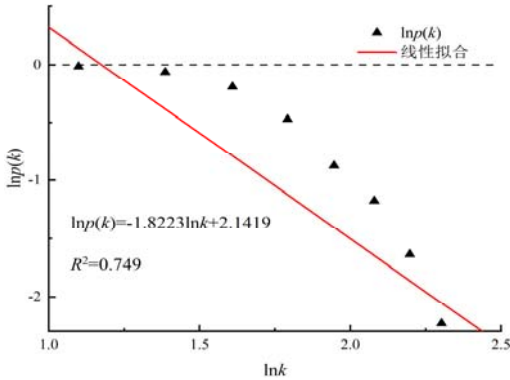
表2 两种拓扑方法构建的邯郸地区公路网络与同规模随机网络的特征指标对比

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,这种服从幂律分布节点度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2为节点累计度 $p(k)$ 拟合结果。



(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2 邯郸地区区域公路网络累计度分布

当公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,原始法拟合结果发现,累计度分布并非为严格线性下降趋势,拟合函数斜率为-1.9178, $r=-k+1$,即幂指数 r 为2.9178,符合似幂律分布。同理,对偶法拟合结果也符合似幂律分布。利用T检验方法对两种模型进行显著性检验,原始法模型 $P=0.005$,对偶法模型 $P=0.002$,均小于0.05。因此,原始法和对偶法构建的邯郸地区公路网络均符合无标度网络特性。

[参考文献]

[1]李廷辉,林均岐,刘金龙,等.汶川MS8.0地震公路易损性研究[J].地震研究,2021,44(04):682-688.
[2]Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Error and Attack Tolerance of Complex Networks[J]. Nature, 2000(1):378-382.
[3]邓亚娟,杨云峰,马荣国.基于复杂网络理论的公路网络结构特征[J].中国公路学报,2010,23(01):98-104.

作者简介:

崔朝阳(2000--),男,汉族,河北省邯郸市人,硕士研究生。主要从事公路工程抗震研究。