

面向抗灾韧性分析的交通基础设施网络建模方法综述

王海深^{1,3}, 文力航^{1,3}, 代磊磊², 李瑞敏¹, 潘鹏^{1,3}

(1.清华大学土木工程系, 北京 100084; 2.内蒙古自治区公安厅交通管理局, 内蒙古自治区 呼和浩特市 010055; 3.住房和城乡建设部数字建造与孪生重点实验室, 北京 100084)

摘要: 抗灾韧性水平是衡量交通基础设施系统功能的重要指标, 针对交通基础设施网络进行高效建模是开展韧性分析的重要前提。从网络拓扑结构、依赖关系和韧性分析属性3个方面对交通基础设施网络建模方法进行文献综述, 剖析在面向抗灾韧性分析的网络建模过程中网络拓扑结构选择和构建的特殊性; 归纳交通基础设施网络抗灾韧性分析的重点关注场景; 并对可靠度、易损性、恢复性等交通基础设施网络抗灾韧性分析中使用较为广泛的单元韧性分析属性进行梳理。研究结果表明: 面向抗灾韧性分析的单一交通基础设施子网络构建通常使用L-空间模型, 并需要进行适应性拓扑调整和简化; 多种交通基础设施综合网络通常基于超级网络模型或分层网络模型构建, 而综合交通枢纽建模可采用离散式或聚合式模型。交通基础设施网络的依赖关系可用基于拓扑或基于网络流的方法在模型中体现。

关键词: 交通基础设施; 抗灾韧性; 网络模型; 建模方法; 多式联运

A Review of Network Modeling Methods for Disaster Resilience Analysis of Transportation Infrastructure

WANG Haishen^{1,3}, WEN Lihang^{1,3}, DAI Leilei², LI Ruimin¹, PAN Peng^{1,3}

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Traffic Management Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region Public Security Department, Hohhot Inner Mongolia Autonomous Region 010055, China; 3. Key Laboratory of Digital Construction and Digital Twin, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing 100084, China)

Abstract: The level of disaster resilience is a critical metric for evaluating the functionality of transportation infrastructure systems and efficient modeling of transportation infrastructure networks is an essential prerequisite for resilience analysis. This paper presents a literature review of modeling methods for integrated transportation infrastructure networks from three perspectives: network topologies, interdependencies, and resilience analysis attributes. The paper examines the unique considerations in selecting and constructing network topologies for disaster resilience analysis, summarizes key scenarios of interest in disaster resilience studies of transportation infrastructure networks, and outlines commonly used unit-level resilience attributes in these studies, such as reliability, vulnerability, and recoverability. The findings indicate that, for disaster resilience analysis, single-mode transportation infrastructure subnetworks are typically constructed using L-space models with necessary adaptive topological adjustments and simplifications. Multimodal transportation infrastructure networks are generally developed using supernetwork models or layered network models, while discrete or aggregated models can be applied to represent comprehensive transportation hubs. The interdependencies within transportation infrastructure networks can be incorporated into models using either topology-based or network flow-based approaches.

Keywords: transportation infrastructure; disaster resilience; network model; modeling method; multimodal transportation

收稿日期: 2024-09-22

基金项目: 国家重点研发计划“交通基础设施复杂网络快速建模与智能仿真”(2021YFB2600502)、公安部科技计划项目“重大公共危机事件下分级交通管控及应急处置机制研究”(2022LL05)

作者简介: 王海深(1991—), 男, 河北沧州人, 博士, 副研究员, 研究方向为工程结构抗震韧性, 电子邮箱 whs@tsinghua.edu.cn。

通信作者: 潘鹏(1976—), 男, 湖北黄冈人, 博士, 教授, 研究方向为工程结构抗震韧性, 电子邮箱 panpeng@tsinghua.edu.cn。

1 研究背景

在洪水、地震、海啸、山体滑坡、飓风及火灾等自然灾害中,交通基础设施受损会对社会经济带来巨大损失。例如,2007年英国强降水对公路网络造成的经济损失达6 000万英镑;2009年英国坎布里亚郡的洪水造成了至少20座桥梁损坏,并产生了3 400万英镑的修复成本和巨大社会影响。同时,交通基础设施往往面临多种灾害耦合作用和相应的级联失效威胁,例如地震主余震、地震引发的滑坡/海啸、降水引发的滑坡/洪水等,可能造成更严重的损失。2008年中国汶川地震引发超过1.5万处山体滑坡,直接导致超过2万人伤亡,许多城镇因高速公路、铁路等交通基础设施的广泛破坏而陷入孤立。2011年日本“3·11”地震及其引发的海啸摧毁了23个公共汽车站,大量铁路轨道和桥墩的破坏造成列车出轨及公路和铁路网络的大范围中断。面对这种情况,充分评估并采取措施提高交通基础设施网络的抗灾韧性至关重要。

抗灾韧性是指系统功能在受灾后恢复或抵御灾害影响的能力^[1],图1展示了在灾害扰动下的系统功能损失和恢复全过程。抗灾韧性分析是近年来评估各类系统防灾减灾能力的重要手段和研究方向。M. Bruneau等^[2]在抗震领域较早提出了“韧性”一词,即工程系统在地震发生时降低破坏概率和破坏程度,以及震后功能及时快速恢复的能力,这一概念在工程抗震领域受到广泛认可。P. M. Murray-tuite^[3]率先将这一概念引入交通工程领域的系统分析中。在交通系统研究中,交通网络抗灾韧性水平的定义和量化普遍从以下两个角度展开:系统面对灾害扰动时维持自身功能的能力和扰动后系统功能恢复所需的时间与资源。

为充分了解交通基础设施网络在各种灾害影响下的表现,尽可能提高其抵抗灾害、降低损失、快速恢复使用功能的能力和水平,针对交通基础设施开展灾害场景下的网络建模和抗灾韧性分析势在必行。交通基础设施网络模型是开展交通系统抗灾韧性分析的数据基础,对现实中的交通基础设施进行网络建模是进行韧性分析的关键步骤。面向韧性分析的交通基础设施网络与普通交通流分析的网络存在差异,例如需着重考虑关键交通基础设施的抗灾韧性和网络依赖关系。交通基础设施网络抗灾韧性分析流程见图2,

网络拓扑结构、网络依赖关系和韧性分析属性是网络建模的关键环节。本文基于建模流程,对近年来国内外交通基础设施网络韧性分析研究中所采用的建模方法进行系统的梳理,指出面向交通基础设施网络韧性分析的建模工作尚存的不足并进行展望。

2 交通基础设施网络拓扑结构

交通基础设施网络由公路、铁路、航空、水运等交通方式在内的若干子网络及其相互之间的关联关系组成。在开展面向韧性分析的交通基础设施网络建模时,模型拓扑结构的复杂性很大程度上来源于子网络自身的复杂性及其相互关系的复杂性。本文分别从单一交通基础设施子网络和多种交通基础设施综合网络展开综述。

2.1 单一交通基础设施子网络

交通基础设施网络通常被简化为由节点(Nodes)和线路(Links)组成的图(Graphs)的形式。自1960年W. L. Garrison等^[4]首次将图论引入基于地理学和区域科学的交通研究领域以来,大量研究开始关注交通网络在时空维度的演化。

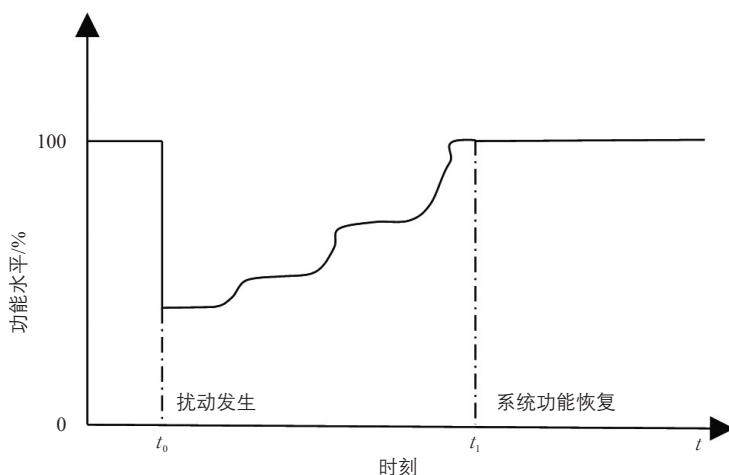


图1 灾害扰动下的系统功能变化

Fig.1 Changes of system functions under disaster-induced disruptions

资料来源:文献[1]。

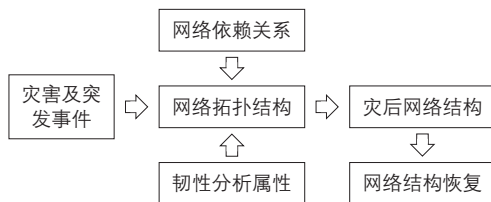


图2 交通基础设施网络抗灾韧性分析流程

Fig.2 Workflow for disaster resilience analysis of transportation infrastructure networks

2.1.1 模型结构

交通基础设施网络模型结构主要为互为对偶的L-空间(L-space)模型(也称传统模型)和P-空间(P-space)模型,还有不常用的B-空间(B-space)模型、C-空间(C-space)模型以及其他方法。

公路、铁路等交通基础网络模型中的节点通常表示居住区中心、重要设施、交叉口等,线路表示连接节点的基础设施或服务线路。这种基于实际物理空间特征的网络模型称为L-空间模型。熊丽凤^[5]采用此模型构建四川省公路和铁路基础设施网络,分析交通基础设施网络的级联失效传播机理。公路、铁路等交通基础设施网络通常具有显著的平面特征,其物理空间属于二维结构并适于用欧氏几何进行度量。与之相对,航空网络则因场站间无物理连接而被归类于非平面网络。研究表明,交通基础设施网络普遍呈现无标度类型(scale-free patterns)^[6]、小世界效应(small-world effects)等特征, S. Derrible等^[7]在研究地铁网络的鲁棒性(Robustness)时验证了全球33个城市的地铁网络系统模型同时具备这两类特征。

另有一种对偶的方法来构建网络模型,即用节点描述交通线路(如公路、铁路、水运、民航等),用线路来连接存在交叉关系的节点,通过节点连接数评估道路连通性,被称为P-空间模型。O. Cats等^[8]搭建荷兰阿姆斯特丹地区的公共交通网络P-空间模

型,评估网络容量变化下的损失水平和鲁棒性。此外,B-空间模型采用节点代表交通线路或车站,C-空间模型采用节点表示交通线路、线路表示交通线路交汇。上述3种模型在解决具体应用问题时,其参数意义和网络表达各有特点。因交通基础设施的物理属性和模型展示的直观性,既有抗灾韧性研究在交通基础设施网络建模层面仍较多采用L-空间模型。

除此之外,基于图论的交通基础设施网络模型中的线路并不总是表征物理空间中的某种联通关系。在评估美国俄克拉何马州的内河水运网络恢复力时, S. Hosseini等^[9]采用贝叶斯网络(Bayesian networks)进行建模,其中线路仅表示节点间的概率性因果关系。

2.1.2 拓扑调整

由于交通基础设施具备较强的空间特征,传统平面模型往往难以满足其网络构建需求。例如交叉节点通过桥梁或其他形式产生跨越而非相交,此时需要引入以下处理方法:1)线路仅连接起讫节点,每个节点作为 ≥ 1 条线路的端点;2)子网络内部线路在空间上保持不相交,如为交通合流处需打断并生成节点;3)不同子网络线路不相交。I. Kilanitis等^[10]采用该方法搭建了由12条单向线路组成的理想道路网络(含高速公路和普通公路,以及9个桥梁和隧道节点),并提出基于概率分析的多维交通基础设施网络综合地震风险评估方法,更真实准确地反映网络的空间特征,同时控制网络单元冗余,有助于交通基础设施网络韧性分析的精细化。

除网络构建时的拓扑调整外,在进行抗灾韧性分析时也会对网络结构进行动态调整。例如,针对确定灾害产生的交通扰动场景,直接给出交通基础设施网络各组成单元的通行功能变化情况并进行网络拓扑重新生成。B. Nikola等^[11]基于铁路线路与车站构建荷兰铁路网络,并假定交通扰动全部发生于线路,且线路仅存在完全畅通和完全中断两类状态,据此评估网络恢复过程和韧性水平。类似地,评估城市轨道交通网络在外部干扰下的脆弱性时, Zhang J. H.等^[12]也采用网络节点在发生故障时即从网络中移除的计算假定。在评估飓风导致的佛罗里达湾区大桥关闭对交通基础设施网络韧性影响时, R. Twumasi-boakye等^[13]对桥梁在拓扑上的中断与连续进行动态调整,从而分析桥梁对交通基础设施抗灾韧性的影响。

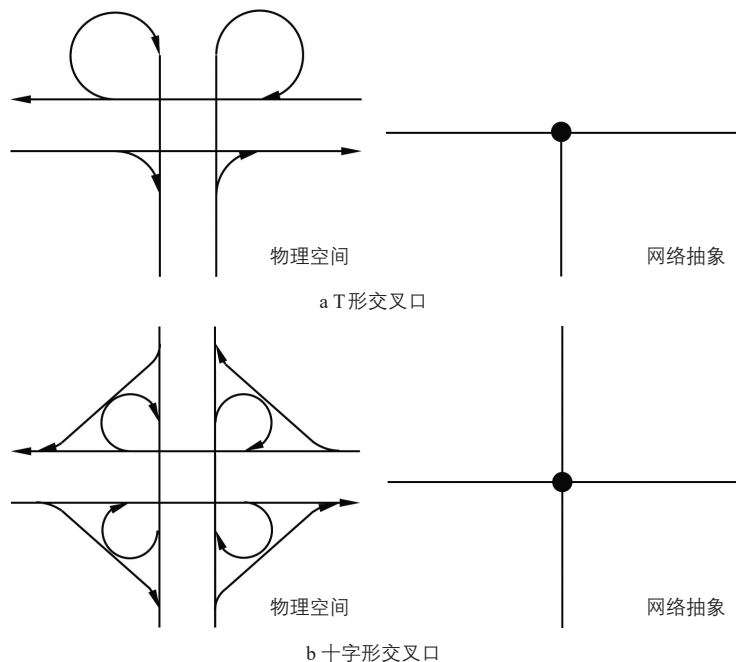


图3 道路交叉口简化处理的拓扑调整

Fig.3 Topological adjustment for simplifying road intersections

资料来源:文献[15]。

2.1.3 网络简化

交通基础设施网络的各组成部分均可抽象为节点或连线。例如,居民区、道路交叉口、交通场站、桥梁、隧道、隘口、运维设施、仓储地点等可用节点表示,各等级公路、铁路轨道、航线、路基等线状特征可用连线表示。特殊情况下,较长桥梁、隧道等也可以使用连线表示。尽管可以将各种交通方式、各等级节点和线路全部纳入交通基础设施网络模型,但为保证模型精度的同时尽量提高抗灾韧性分析的运算效率,研究者通常对交通基础设施网络的单元按照交通方式、等级等因素进行筛选,仅保留具有代表性和对抗灾韧性产生重要影响的相对高等级单元,这种简化在建立较大尺度的网络模型时尤为必要。基于瑞士莱茵河谷部分地区的道路网, J. Hackl 等^[14]构建公路交通网络模型并用于洪涝灾害影响分析,该模型的节点仅保留了居民点、道路交叉口和桥梁,线路也仅考虑国道、主干路和次干路。类似地, N. D. Safitri 等^[15]在构建广岛暴雨灾害期间交通中断影响评估模型时仅选择区域内具有代表性的交通干线(高速公路和国道)。此外,对道路交叉口进行适当的简化也是常用方法(见图3)。

除此之外,交通基础设施网络模型的结构简化可通过在属性层面(非空间层面)规定节点和线路的关系来实现,即影响网络结构的节点不必由线路连接或与GIS模型中线路平面位置重合,而可通过属性字段所属关系纳入网络模型。例如, Chang S. E. 等^[16]提出基于地震灾害场景的交通基础设施性能评估方法时,搭建洛杉矶地区高速公路交通基础设施网络:节点为高速公路交叉点和高速公路与研究区域边界的交点,线路则起到连接各节点并表征路段的作用。该方法假定地震灾害造成的交通损失全部发生在交通线路上的桥梁处,桥梁并不作为网络节点建模,而是通过位置矩阵规定其与所属交通线路的关系,从而在计算过程中通过“地震灾害—桥梁损伤—线路功能损伤”的逻辑加以体现。类似地,这种方法可以在道路并线时将其归并为单个线路要素,并在属性层面记录车道或轨道数量,从而有效提升网络模型的简洁性和计算效率。

2.2 多种交通基础设施综合网络

在真实世界中,人员和货物流动采用的

交通方式往往不止一种,例如旅客跨城市的地铁—航空远程旅行、货物跨城市的高铁—航空联运等。这种利用两种及以上交通方式将人或货物从始发地运往目的地的过程称为多式联运(multimodal transport)。灾害影响下的交通基础设施网络韧性分析往往包含多种交通方式及其相互影响和作用,因此多种交通基础设施综合网络模型需特别关注网络建模表征方法(见表1)。

2.2.1 模型结构

目前,多种交通基础设施综合网络建模方法主要有两种。

1) 超级网络模型。

超级网络理论起源于经济学领域的资金流动研究。1972年, S. C. Dafermos 等^[17]将其引入交通运输领域。文献[17]将每种交通方式对应的基础设施网络作为子网络,用表示多式联运交通流的虚拟节点和虚拟线路连接多个子网络,从而形成多种交通基础设施综合网络模型。Y. Sheffi^[18]将此模型应用于交通供需平衡分析,提出超级网络(super network)概念。在此模型中,公路、铁路、航空等子网络的线路被合并为统一的集合,对应节点同步合并,并根据分析需求补充表达子网络节点间交通流的虚拟节点或线路。基于上述方法,近年来研究者针对多式联运综合交通网络构建及韧性开展了诸多研究,充分反映了多式联运及其相互关系对交通网络抗灾韧性水平的影响。

需要注意的是,在超级网络模型中,虚拟节点及线路并不一定与真实的交通节点或线路一一对应,也可作为某一系列节点或线路的抽象表示。例如, Guo J. N. 等^[19]提出多种交通基础设施综合网络应急救援设施选址策略时,将川藏地区交通基础设施网络抽象

表1 多种交通基础设施综合网络建模表征方法

Tab.1 Representation methods for modeling multimodal transportation infrastructure networks

交通方式	节点	线路
公路	公路车站, 公路交叉口, 公路桥梁、隘口、隧道等	公路路段
铁路	铁路车站, 铁路平交道口, 铁路桥梁、隘口、隧道等	铁路路段
航空	民航机场	民航航线
水运	水运码头、水运港口、船闸等	水运航线
管道	管道交叉点、管闸	管道线路
其他	综合交通枢纽节点	多式联运线路

为90个节点和177条线路的网络模型(含铁路、公路和航空)。类似地, Chen D. J. 等^[20]分析2008年汶川地震后应急资源调度网络和可靠性评估时,采用含公路、铁路、水运和航空4种方式的交通基础设施综合网络模型,将网络节点抽象为供应点、配送中心 and 需求点3类。

基于超级网络理论的交通基础设施综合网络模型能够较好反映同一层级交通方式的独立运行和空间位置关系,同时清晰反映多式联运交通流的位置和其他具体信息。然而,在分析不同层级交通基础设施受灾韧性时因受模型结构制约,模型简化程度应根据具体韧性分析目标进行考量。

2) 分层网络模型。

分层网络模型是反映不同层次或不同属性交通基础设施综合网络结构特征的模型,用于分析交通基础设施综合网络韧性时,一般聚焦不同网络间的转运性能,即转运层的性能(见图4)。此方法中非转运层仅部分节点可与外部子网络节点产生交通流,并通过属性标注与转运层特定节点建立关联。

在分层网络模型中,转运属性设置是关键。研究中有侧重某一层级的网络研究,一般将其设置为转运层。Hong L. 等^[21]讨论交通基础设施综合网络在车站故障及恶劣天气下的脆弱性时,采用分层网络模型构建中国铁路系统网络模型,将高铁网络设为转运层。J. Verschuur 等^[22]以港口为重点对象,建立包含航海运输网络、内地运输网络和港口内部网络3个分层尺度的交通基础设施综合网络模型,分析港口这一转运层在自然灾害条件下对不同尺度的水运交通综合网络韧性的影响。若各网络层级间均无侧重,则一般会新增转运层。Ju Y. N. 等^[23]采用分层网络模型对重庆市轨道交通系统进行韧性评估,将轨道交通分为城际铁路、市域(郊)铁路和

地铁3个层级,并新增互联结构层用来处理各层之间的交通流,将轨道交通网络定义为各层网络和互联结构层的集合。C. Ferrari 等^[24]在建立意大利西北部的高速公路和铁路分层网络模型时,既考虑关键交通基础设施受灾时两种交通方式的互相影响,又设立转运层来考虑交通方式间的转换所受到的影响。

在反映多种交通基础设施综合网络不同层级间韧性水平相互影响和特定转运层韧性对网络韧性的整体影响方面,分层网络模型具有独特优势。

2.2.2 综合交通枢纽模型

在交通基础设施综合网络中,采用低等级公路或其他交通方式的线路直接连接不同交通方式的节点,是实现多式联运最直接的方法。然而,该方法在已存在综合交通枢纽节点的网络中并不总是适用。

综合交通枢纽是多种交通网络的交汇节点,也是交通基础设施综合网络中客货集散、转运与过境的节点型场所,具有组织客货运输、中转换乘、装卸储运、多式联运、信息流通和辅助服务等功能,对交通基础设施综合网络运转和抗灾韧性水平具有重要影响。在交通基础设施综合网络模型中,这类节点在物理空间上高度集聚,其内部存在的复杂交通流难以用单一节点充分表征。研究者为此提出了不同的建模思路。

1) 离散式模型。

J. Guelat 等^[25]探讨公路-铁路多式联运货物运输时提出“爆炸式”(Explosion)综合交通枢纽建模方法(见图5)。其中,转运起始点和终点分别为(1,4), (1,3), (2,3)和(2,4)。该方法假定多式联运仅在交通基础设施综合网络的节点处发生。为在模型中适当模拟客货运输的多式联运转移成本和延迟,需对发生此类运输的节点进行扩展并补充节点间必要的线路。该方法将显著增加网络的节点和线路数量,使物理空间中的单一真实节点由一系列节点代表。通过扩展和补充节点、线路的交通方式与属性信息,从而在模型中实现对节点内部多式联运过程的精细控制。S. Misra 等^[26]利用此方法将公铁联运枢纽用分离节点间的链路表示,并分析了地震作用下铁路和卡车联运网络的韧性。

在上述方法生成的单独归属于不同交通方式的节点群中引入转运节点也是一种常用方法。S. Hosseini 等^[27]提出考虑灾害影响和灾后恢复的交通货流路径优化方法时,使用了公路、铁路和水运3类运输方式的交通基

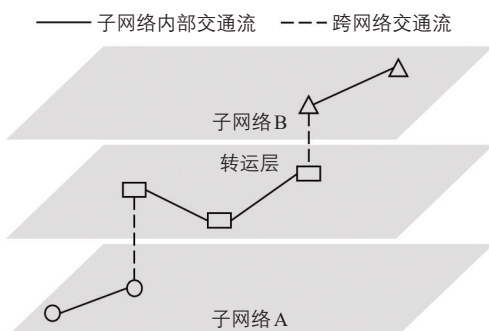


图4 多种交通基础设施综合网络分层网络模型

Fig.4 Layered network model for integrated multimodal transportation infrastructure networks

基础设施综合网络建模方法。该方法将现实中的综合交通枢纽表征为独立的“联运中转站”类型节点(见图6)。公路、铁路和水运3类运输方式的节点与线路独立存在:公路和铁路网络均由车站与车站间线路组成,部分车站间线路连接至转运节点。水运网络节点则同时包括港口/码头和运河船闸,因为后者对水运网络的运输效率往往起到控制作用,但仅港口/码头可连接到转运节点。

2) 聚合式模型。

在不同交通方式子网络的叠加过程中,综合交通枢纽对应在各个子网络中的节点的空间距离往往较近,因此存在一种忽略地理距离、将综合交通枢纽内部承担不同交通功能的节点归并为同一节点的建模方法。该方法中,首先需要确定综合交通枢纽内部发生跨子网络交通流的通行成本,若通行成本低于研究设定的阈值,则发生该交通流的相应分属于不同子网络的节点需要进行合并。李成兵等^[28]利用该方法构建了呼包鄂城市群的公路-铁路综合交通网络并开展了特定攻击策略(随意性攻击或蓄意性攻击)下的脆弱性指标分析,验证了关键节点和线路的防护性能加强对网络性能提升的有效性。Wang L. J. 等^[29]在研究综合交通网络关键节点识别方法时采用聚合式模型构建交通基础设施综合网络。该网络基于以下两条基本原则构建:将公共汽车站、普通铁路客站、高铁车站、机场或港口所在地的县或区域视为复合节点,并按照交通方式、服务对象和车站数量进行分类;如果两个节点可以通过至少一次行程连接,则生成线路以连接两个节点。该方法中,跨交通方式的运输在模型简化后的节点特征中加以考虑,而非发生在网络的线路中。

需注意,综合交通枢纽的聚合式模型在空间上对交通基础设施及相应交通流的抽象程度较高。采用该方法时,除网络拓扑结构外,往往还需关注节点迟滞、内部运输费用等相关属性对网络性能特征的影响。

总体而言,上述方法是抗灾韧性分析中常用的一些交通基础设施综合网络建模方法,与常态情况下的建模方法具有相似性,但分析目标不同。抗灾韧性分析要求网络表征更为直观,需要重点考虑交通基础设施与灾害的相互作用,以及高灾害风险节点与线路,对网络单元的类型多样性要求更高,且需要关注受灾状态与恢复过程对网络拓扑结构的动态影响。

3 多种交通基础设施综合网络依赖关系

在多种交通基础设施综合网络中,除跨交通方式运输外,还可能存在相互依赖关系。这类依赖关系通常通过关键工程结构(如桥梁、隧道等)实现网络连通,因此单一结构的失效可能同时影响多种交通方式。例如,桥梁损毁可能同时中断公路与水运服务,在抗灾韧性评估中需特别关注此类关联影响。目前网络建模中处理这类依赖关系的方法主要分为两类:基于拓扑的方法和基于网络流的方法。

3.1 基于拓扑的方法

基于拓扑的方法主要通过定义网络节点或线路的离散状态来实现分析,即每个单元仅存在故障和正常两个状态。节点发生故障的原因除灾害扰动下的自身失效外,还包括其依赖的源节点失效和上游链路断开。这种方法需要预先定义组成交通基础设施网络的节点和线路之间的依赖关系,由此可在网络分析过程中移除失效的节点或线路,从而直接影响网络的拓扑结构和指标特征。

例如,He Z. D. 等^[30]在提出网络鲁棒性评估方法时搭建了考虑3种交通方式(水运、公路和铁路)的荷兰货运网络,并据此建立

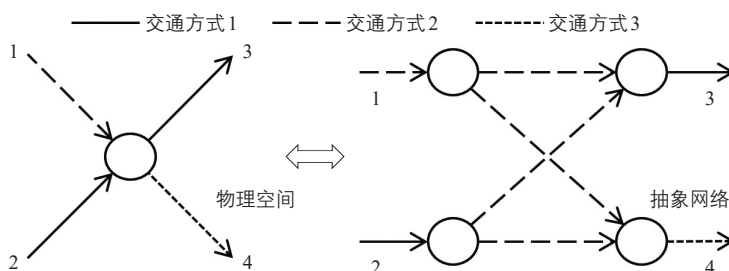


图5“爆炸式”综合交通枢纽建模方法

Fig.5 “Explosive” modeling method for comprehensive transportation hubs
资料来源:文献[25]。

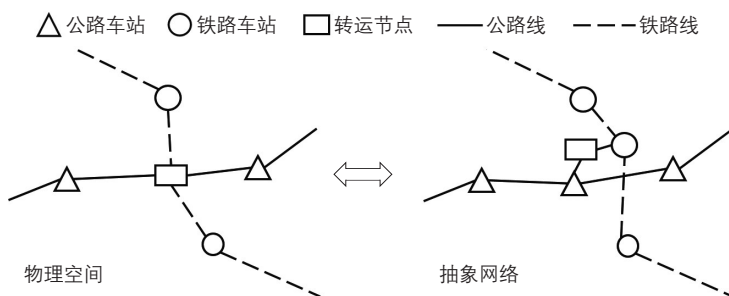


图6 引入转运节点的综合交通枢纽表征方法

Fig.6 Representation method for comprehensive transportation hubs with transfer nodes
资料来源:文献[21]。

上述特殊类型节点间的匹配及依存关系。规定两个节点之间的相互依存关系意味着如果删除其中任何一个节点,另一个节点也将被删除。Y. Almoghatwari 等^[31]在研究具有相互依赖关系的基础设施网络时也采用了类似假设,即规定网络模型中部分节点的功能状态完全依赖于其他节点的功能状态,并探讨了恢复逻辑、资源和优先度的相互影响。

基于拓扑的方法能够有效表征网络依赖关系,在灾害韧性分析中具有拓扑变化直观、计算效率高的优势,可清晰反映交通基础设施功能损失与恢复过程对综合网络抗灾韧性的影响程度。

3.2 基于网络流的方法

基于网络流的方法考虑了交通基础设施单元自身能力对实际交通需求的满足程度。在这种方法构建的模型中,节点和线路具有各自的容量属性,交通流作为相应的网络负载施加其上,节点的功能水平和失效状态由容量与交通负载的关系判定。由此,单一节点或线路的失效会导致其交通负载在其他相关单元上进行再分配,从而影响其他单元的功能水平甚至导致级联失效。例如,火山爆发导致机场关闭时,旅客的出行需求往往超出周边铁路交通网络的承载能力,并可能导致其失效。H. Baroud 等^[32]在构建水运和公路联运网络时采用了该方法,并从成本角度讨论了系统韧性水平。Chen M. D. 等^[33]在桥梁交通网络建模中,通过关联桥梁损伤状态与通行功能,实现了基于交通流分析的基础设施失效水平量化表征。基于网络流的方法能够更精确评估网络单元因依赖关系导致的功能损失,但该方法要求对单元承载能力和网络整体交通需求进行准确参数设定。

综合而言,灾害扰动将导致交通基础设施网络内各运输方式间产生复杂的交互影响与依赖效应。在进行抗灾韧性分析时,必须重点考虑多种交通基础设施网络的组成单元及其相互依赖关系,并将其完整纳入建模过程,以确保分析结果的准确性。

4 韧性分析相关的交通基础设施单元及网络属性

与传统的交通网络特征分析、交通流分配等研究不同,面向韧性分析的交通基础设施网络建模需要引入灾害扰动作为外部影响因素。在此过程中,灾害扰动如何作用于交

通基础设施网络的各个单元和子系统、对其造成的不利影响及系统功能损失等关键问题不能仅由网络的空间拓扑结构充分表达,而必须通过结合特定属性的算法设计实现。因此,在面向韧性分析的交通基础设施网络建模过程中,除构建基本的网络拓扑模型外,必须充分考虑并建立各网络单元与灾害作用的关联机制。具体而言,可通过两种路径实现:一是直接给出组成单元的功能变化;二是结合灾害水平和单元自身的可靠度、易损性和恢复能力等属性,估计单元的功能损失与恢复情况,进而综合评估网络的抗灾韧性水平。其中,可靠度、易损性和恢复性是当前抗灾韧性研究中使用较为广泛的分析属性,本文以这3种关键属性为例进行分析。

4.1 单元韧性分析属性

4.1.1 可靠度

可靠度是度量研究对象在规定使用期间和预定工作状态下满足预定功能的概率^[34]。在交通抗灾韧性分析中,可靠度模型可以提供从灾害水平到交通单元功能(如承载力、通行能力损失)的对应关系,从而满足韧性分析的需要。可靠度指标的获取主要依赖于灾害调研和数值模拟,相关研究覆盖了桥梁、隧道、边坡、道路等一系列交通基础设施单元。由于荷载的不确定性和抗力的不确定性,可靠度指标度量方法较多,最基本的是一次二阶矩理论。当抗力 R 与荷载效应 S 服从正态分布时,系统可靠指标计算公式为:

$$\beta = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{D_R - 2D_{RS} + D_S}}$$

式中: β 为系统可靠指标; m_R 为 R 的平均值; m_S 为 S 的平均值; D_R 为 R 的方差; D_S 为 S 的方差; D_{RS} 为 R 和 S 的协方差。

桥梁方面,余其鑫^[35]调查桥梁历史震害情况给出最常见的梁式桥震害矩阵,提供了与地震烈度相对应的可靠度概率指标。隧道方面,方晓庆^[36]选取历史地震灾害中的隧道震害表现进行统计回归,建立了隧道地震灾害指数评估方法。边坡方面,王余庆等^[37]从地震条件、坡角、烈度等因素出发提出一种稳定指数的计算方法及其与通行概率的联系。作为交通系统中最基础的线路单元,道路可靠性的研究更为充分。贾兴利等^[38]引入云模型理论开展风险因子识别和标定,建立震区公路灾害风险评估模型和风险指数计算方法。胡衡^[39]基于汶川地震的道路震害资料提出基于快速评估模型和震后通行概率的抗

震可靠度指标。王明振等^[40]额外考虑建筑物掉落瓦砾的影响,对道路震害可靠度的计算方法进行修正。

4.1.2 易损性

易损性是指在不同强度的灾害扰动下,工程结构达到或超过某一损伤破坏极限状态的概率,通常用一组易损性函数曲线及对应参数来表示。最常用的易损性模型为符合双参数对数正态分布的累积分布函数,易损性计算公式为:

$$f(x) = \Phi\left[\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{x}{k}\right)\right],$$

式中: $f(x)$ 为易损性函数; x 为工程需求参数; Φ 为标准正态随机变量的概率分布函数; β 为对数标准差; k 为中位值。

在抗灾韧性分析中,易损性是交通基础设施单元自身的固有属性,可以较合理地反映其抗灾能力和灾害表现,因而成为灾害韧性研究中的基础和重点。易损性函数可通过经验、数据分析、专家评估及混合方法等多种路径获得,典型易损性模型如图7所示。

在交通系统的重要基础设施中,由于桥梁的关键地位而获得了易损性研究的重点关注,国际上众多学者对桥梁在地震及其他灾害下的易损性进行了研究^[41]。中国桥梁结构的地震易损性研究起步相对较晚,刘晶波^[42]首次将数值模拟易损性方法引入钢筋混凝土桥梁易损性分析。此后,关于规则梁式桥、斜拉桥、悬索桥、隔震桥梁的地震易损性研究开始蓬勃发展,为交通系统的灾害韧性分析提供了广泛的数据基础^[43]。

除交通基础设施系统中常见的场站和桥梁单元外,H. Kim等^[44]、刘立荣等^[45]对隧道工程的地震易损性表征方法和参数取值进行研究。在既有研究基础上,P. J. Schneider^[46]提出的HAZUS-MH (Hazard-United States for Multi-Hazard)方法相对系统地构建了地震、海啸、飓风和洪水灾害下美国建筑和基础设施的易损性函数及对应的损失模型,并取得了比较广泛的应用。此外,K. Pitilakis等^[47]归纳了地震灾害下的常见关键基础设施易损性函数。

4.1.3 恢复性

交通基础设施灾害后功能恢复情况高度依赖于各组成单元的恢复能力,其通常用一组恢复函数曲线及对应参数构成的恢复模型来表示,用以描述单元功能水平随时间的变化情况。恢复函数一般采用分段函数、正态分布概率累积分布函数等表征。L. Galbusera

等^[48]针对港口设施(起重设备、输电设备)、A. Castillo^[49]针对配电系统分别开展了以灾害后单元功能与初始功能的百分比为指标的时间维度恢复模型及其参数的研究。这些研究普遍基于专家的判断,并符合按步骤的线性恢复流程。

交通基础设施往往由多个子单元组成(例如桥梁包括基础、桥墩、桥台及上部结构等),这些子单元的不同恢复需求给基础设施的功能恢复带来了显著的不确定性。因此,有学者基于概率方法对恢复模型进行研究。A. Decò等^[50]在考虑桥梁恢复模式不确定性的基础上提出桥梁剩余功能和恢复时间的概率性评估方法。A. Karamlou等^[51]提出采用均值和标准差的正态分布模型对预期恢复时间进行表征。

4.2 网络韧性分析属性

网络分析属性在传统交通系统分析中的应用已经较为成熟,部分网络分析属性也可用于交通基础设施网络抗灾韧性分析。例如,马书红等^[52]利用节点度中心性、介数中心性、可达性、连边加权路径长度、路径重要度等指标动态化实现灾害扩散模拟,从而进行韧性分析。Ju Y. N.等^[23]利用网络效率、平均最短长度、异构性和相关系数4个基本属性分析网络在受扰动时的韧性水平;Zhang J. H.等^[53]利用最大有效图、网络效率等网络属性参数分析交通基础设施网络的易损性;Qin Y. F.等^[54]使用节点度刻画港口的结构韧性,使用节点中心性刻画港口的功能

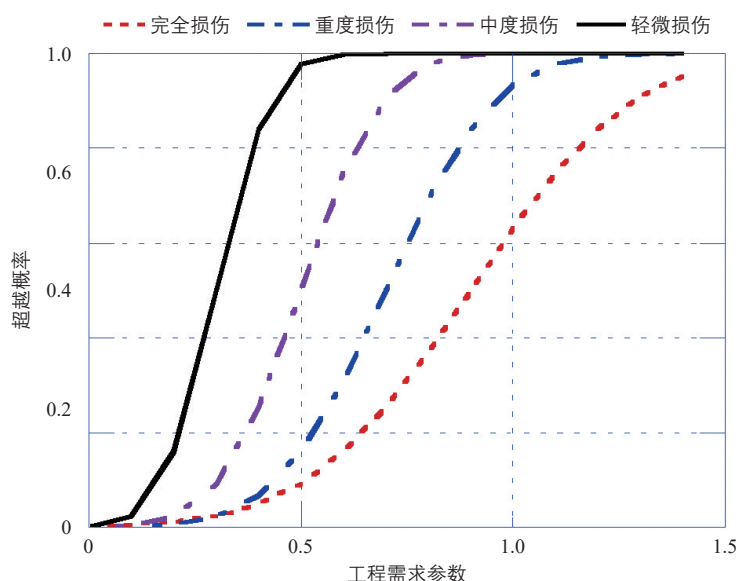


图7 典型易损性模型

Fig.7 Typical vulnerability models

韧性,使用节点可达性刻画港口的位置韧性。Sun W. J. 等^[55]对使用网络拓扑中心度和连接度进行交通基础设施网络韧性表征的科研进展进行综述。

总体而言,网络韧性分析属性更多反映的是网络的静态特征,一些经典静态网络特征仍可用于表征韧性,但由于参数和定义的多样性,直接刻画网络韧性的属性类别较多,且与所采取的韧性评估策略密切相关。

5 结论

交通基础设施网络的抗灾韧性分析对网络模型提出了更高要求,本文从网络拓扑结构、依赖关系及韧性分析属性3个方面对相关领域的研究成果进行归纳总结。同时,针对当前面向抗灾韧性分析的交通基础设施网络建模工作存在的一些不足,进行总结和展望:

1) 建模方法。当前面向抗灾韧性分析的交通基础设施网络模型大部分仅反映道路和车站等基本要素,对于其他重要的灾害高风险节点(如桥隧、山隘等)考虑欠充分,且缺乏对不同类型网络之间耦合影响的考虑。此外,交通基础设施综合网络模型多为静态模型,且多用于网络拓扑优化分析;结合灾害交通流变化的灾中期和灾后期恢复的动态网络模型构建工作较少。

2) 韧性分析属性。当前,韧性分析属性在单元和网络层面均具备了相应的理论基础,但既有研究对建筑和桥隧的灾害分析研究相对较多,针对机场、港口等类型交通基础设施开展的研究相对较少。此外,既有单元属性研究主要围绕地震灾害展开,对于洪水、台风、滑坡等自然灾害及其他复杂灾害扰动下的基础设施抗灾能力研究不够充分。对于绝大多数类型的交通基础设施单元,针对多种灾害耦合作用、基础设施老化等因素的研究也相对匮乏,网络模型的韧性分析属性研究基础需要进一步加强。

3) 建模效率。抗灾韧性分析对交通基础设施综合网络的模型精度和数据完备性要求较高,同时,对单元能力、交通需求、负载分配、关联关系等复杂因素间的关联机制均有较高的建模要求。网络建模的信息筛选、拓扑优化、数据重构等工作亟须提出更加高效的方法和工具。在大数据技术迅速发展以及交通基础设施面临的灾害不确定性显著增加的背景下,交通基础设施综合网络精细化建模和数据库建立是未来重点发展方向。

参考文献:

References:

- [1] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. Engineering structures, 2010, 32(11): 3639-3649.
- [2] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. Earthquake spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [3] MURRAY-TUITTE P M. A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions[C]//IEEE. Proceedings of the 2006 winter simulation conference. USA: IEEE, 2006: 1398-1405.
- [4] GARRISON W L, MARBLE D F. The structure of transportation networks[R]. Evanston, USA: Army Transportation Command, 1962.
- [5] 熊丽凤. 综合交通基础设施网络级联失效传播机理分析[D]. 重庆: 西南交通大学, 2019.
- XIONG L F. Analysis of cascading failure propagation mechanism in comprehensive transportation infrastructure network[D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [6] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [7] DERRIBLE S, KENNEDY C. The complexity and robustness of metro networks[J]. Physica A, 2010, 389(17): 3678-3691.
- [8] CATS O, KOPPENOL G-J, WARNIER M. Robustness assessment of link capacity reduction for complex networks: application for public transport systems[J]. Reliability engineering & system safety, 2017, 167: 544-553.
- [9] HOSSEINI S, BARKER K. Modeling infrastructure resilience using Bayesian networks: a case study of inland waterway ports[J]. Computers & industrial engineering, 2016, 93: 252-266.
- [10] KILANITIS I, SEXTOS A. Integrated seismic risk and resilience assessment of roadway networks in earthquake prone areas[J]. Bulletin of earthquake engineering, 2018, 17 (1): 181-210.
- [11] NIKOLA B, RAPHAEL FERRARI N, et al. Resilience assessment of railway networks:

- p>combining infrastructure restoration and transport management[J]. Reliability engineering & system safety, 2022, 224: 108538.
- [12] ZHANG J H, WANG Z Q, WANG S L, et al. Vulnerability assessments of weighted urban rail transit networks with integrated coupled map lattices[J]. Reliability engineering & system safety, 2021, 214: 107707.
- [13] TWUMASI-BOAKYE R, SOBANJO J O. Resilience of regional transportation networks subjected to hazard-induced bridge damages[J]. Journal of transportation engineering, part A: systems, 2018, 144(10): 04018062.
- [14] HACKL J, LAM J C, HEITZLER M, et al. Estimating network related risks: a methodology and an application in the transport sector[J]. Natural hazards and earth system sciences, 2018, 18(8): 2273–2293.
- [15] SAFITRI N D, CHIKARAISHI M. Impact of transport network disruption on travel demand: a case study of the July 2018 heavy rain disaster in Japan[J]. Asian transport studies, 2022, 8: 100057.
- [16] CHANG S E, SHINOZUKA M, MOORE J E. Probabilistic earthquake scenarios: extending risk analysis methodologies to spatially distributed systems[J]. Earthquake spectra, 2000, 16(3): 557–572.
- [17] DAFERMOS S C. The traffic assignment problem for multiclass-user transportation networks[J]. Transportation science, 1972, 6(1): 73–87.
- [18] SHEFFI Y. Urban transportation networks: equilibrium analysis with mathematical programming methods[M]. Upper Saddle River, USA: Prentice-Hall, 1985.
- [19] GUO J N, DU Q, HE Z G. A method to improve the resilience of multimodal transport network: location selection strategy of emergency rescue facilities[J]. Computers & industrial engineering, 2021, 161: 107678.
- [20] CHEN D J, FANG X F, LI Y, et al. Three-level multimodal transportation network for cross-regional emergency resources dispatch under demand and route reliability[J]. Reliability engineering & system safety, 2022, 222: 108461.
- [21] HONG L, OUYANG M, XU M, et al. Time-varied accessibility and vulnerability analysis of integrated metro and high-speed rail systems[J]. Reliability engineering & system safety, 2020, 193: 106622.
- [22] VERSCHUUR J, PANT R, KOKS E, et al. A systemic risk framework to improve the resilience of port and supply-chain networks to natural hazards[J]. Maritime economics & logistics, 2022, 24(3): 489–506.
- [23] JU Y N, YUAN H H, LI Z P, et al. Multilayer structures and resilience evaluation for multimode regional rail transit system[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2022, 16(7): 843–859.
- [24] FERRARI C, SANTAGATA M. Vulnerability and robustness of interdependent transport networks in north-western Italy[J]. European transport research review, 2023, 15: 6–27.
- [25] GUELAT J, FLORIAN M, CRAINIC T G. A multimode multiproduct network assignment model for strategic planning of freight flows [J]. Transportation science, 1990, 24(1): 25–39.
- [26] MISRA S, PADGETT JAMIE E. Estimating extreme event resilience of rail-truck intermodal freight networks: methods, models, and case study application[J]. Journal of infrastructure systems, 2022, 28(2): 04022013.
- [27] HOSSEINI S, AL KHALED A. Freight flow optimization to evaluate the criticality of intermodal surface transportation system infrastructures[J]. Computers & industrial engineering, 2021, 159: 107522.
- [28] 李成兵, 魏磊, 李奉孝, 等. 基于攻击策略的城市群复合交通网络脆弱性研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(3): 101–109.
- LI C B, WEI L, LI F X, et al. Study on vulnerability of city agglomeration compound traffic network based on attack strategy[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2017, 34(3): 101–109.
- [29] WANG L J, ZHENG S Y, WANG Y G, et al. Identification of critical nodes in multimodal transportation network[J]. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2021, 580: 126170.
- [30] HE Z D, KUMAR N, WIRDMER VAN D, et al. Robustness assessment of multimodal freight transport networks[J]. Reliability engineering & system safety, 2021, 207: 107315.
- [31] ALMOGHATHAWI Y, BARKER K, AL-

- BERT L A. Resilience- driven restoration model for interdependent infrastructure networks[J]. Reliability engineering & system safety, 2019, 185: 12–23.
- [32] BAROUD H, BARKER K, RAMIREZ-MARQUEZ J E, et al. Inherent costs and interdependent impacts of infrastructure network resilience[J]. Risk analysis, 2015, 35(4): 642–662.
- [33] CHEN M D, MANGALATHU S, JEON J-S. Seismic reliability assessment of bridge networks considering travel time and connectivity reliabilities[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2022, 51(13): 3097–3110.
- [34] 陈艳艳, 梁颖, 杜华兵. 可靠度在路网运营状态评价中的应用[J]. 土木工程学报, 2003, 36(1): 36–40.
- CHEN Y Y, LIANG Y, DU H B. The application of reliability in the road network performance evaluation[J]. China civil engineering journal, 2003, 36(1): 36–40.
- [35] 余其鑫. 基于历史震害的桥梁地震易损性研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014.
- YU Q X. Seismic fragility study of bridge based on historical damage data[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2014.
- [36] 方晓庆. 交通元件地震破坏评估方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2008.
- FANG X Q. Study of the evaluation method of transportation elements damage in earthquake[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2008.
- [37] 王余庆, 辛鸿博, 高艳平, 等. 预测岩土边坡地震崩滑的综合指标法研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 311–314.
- WANG Y Q, XIN H B, GAO Y P, et al. Study on comprehensive index method for predicting earthquake- induced landslides[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2001, 23(3): 311–314.
- [38] 贾兴利, 许金良. 基于云模型的地震区公路震害风险评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(9): 1352–1358.
- JIA X L, XU J L. Cloud model-based seismic risk assessment of road in earthquake region[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2014, 42(9): 1352–1358.
- [39] 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.
- [40] 王明振, 高霖. 道路网络抗震韧性评价模型及其应用研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(4): 110–116.
- WANG M Z, GAO L. Aseismic resilience evaluation model of the road network and its application[J]. Journal of natural disasters, 2021, 30(4): 110–116.
- [41] KURTZ N, SONG J, GARDONI P. Seismic reliability analysis of deteriorating representative us west coast bridge transportation networks[J]. Journal of structural engineering, 2016, 142(8): C4015010.
- [42] 刘晶波. 地震作用下钢筋混凝土桥梁结构易损性分析[J]. 土木工程学报, 2004, 37(6): 47–51.
- LIU J B. Seismic fragility analysis of reinforced concrete bridges[J]. China civil engineering journal, 2004, 37(6): 47–51.
- [43] ZENG X Z, ZHU S, Deng K L, et al. Rapid rehabilitation of damaged UHPC-NSC composite pier after earthquake[J]. Engineering structures, 2024, 304: 117660.
- [44] KIM H, SHIN C, LEE T, et al. A study on the development of the seismic fragility functions of the high speed railway tunnels in use [J]. Journal of the Korean GEO-Environmental Society, 2014, 15(11): 67–75.
- [45] 刘立荣, 王海彦, 黄乾. 考虑不确定因素的山岭隧道地震易损性研究[J]. 世界地震工程, 2018, 34(1): 173–178.
- LIU L R, WANG H Y, HUANG G. Study on vulnerability analysis of rock mountain tunnel considering uncertainties[J]. World earthquake engineering, 2018, 34(1): 173–178.
- [46] SCHNEIDER P J, SCHAUER B A. HAZUS: its development and its future[J]. Natural hazards review, 2006, 7(2): 40–44.
- [47] PITILAKIS K, CROWLEY H, KAYNIA A M. SYNER-G: typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk[M]. Germany: Springer, 2014.

(下转第 127 页)