

提升公路交通基础设施韧性技术和策略研究

高佳宁,袁国柱,由婷婷,郭丽苹

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司,天津市 300074)

摘要: 由于异常事件导致的公路灾害现象日益频发,公路交通基础设施的韧性受到了严重挑战。目前,公路领域的韧性系统研究仍处于初始阶段,尚未形成完善的技术体系。基于当前几种常见的“韧性”理论,对“韧性三角形”展开深入研究,形成公路基础设施领域的“改进韧性梯形”理论,以此来模拟灾害发生前后公路交通运输系统性能的变化。按照灾害发生的时间顺序,总结出前期预警、灾中保障、灾后恢复3个阶段的技术措施,并从多个主体角度提出公路交通基础设施韧性提升策略,为解决当前公路韧性系统构建不完善的问题奠定了良好基础。

关键词: 公路交通运输系统;韧性;韧性三角形;韧性关键技术;发展策略

中图分类号: U491.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)02-0007-04

Research on Technology and Strategy of Improving Resilience of Highway Transportation Infrastructures

GAO Jianing, YUAN Guozhu, YOU Tingting, GUO Liping

(North China Institute of Municipal Engineering Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: Due to the increasing frequency of highway disasters caused by abnormal events, the resilience of highway transportation infrastructures has been seriously challenged. At present, the research on resilience system in the field of highway is still in the initial stage, and a perfect technical system has not yet been formed. Based on the current several common "resilience" theories, the "resilience triangle" theory is further studied, and the "improved resilience trapezoid" theory is formed in the field of highway infrastructure to simulate the changes in the performance of the highway transportation system before and after the disaster. In the chronological order of disasters, the technical measures in three stages of early warning, disaster guarantee and post-disaster recovery are summarized, and the resilience improvement strategy of highway transportation infrastructures is proposed from the perspective of multiple subjects, which lays a good foundation for solving the imperfect construction of the current highway resilience system.

Keywords: highway transportation system; resilience; resilient triangle; key resilience technology; development strategy

0 引言

近年来,我国恶劣天气、地震等异常事件频发,对交通运输系统造成重大影响,引起社会各界广泛关注。公路交通运输系统是交通运输系统的重要子系统,公路交通运输系统容易遭受来自系统内部或外部突发事件的干扰,导致其服务水平下降、通行能力降低,甚至出现交通中断现象。因此,提高公路交通运输系统抵抗外部干扰的能力和及时恢复的能力,避免出现交通中断、设施浸水、救援受阻、物资中断等情况,至关重要。

交通运输部2019年印发的《国家综合立体交通

网指标框架》用于科学评估我国综合交通基础设施网络发展水平,明确提出了韧性交通网络建设指标和推动提升交通运输安全可靠水平的目标。当前,我国各城市已建立了高效、可靠的交通网络,具备了应对自然灾害、气候变化的基本能力,但韧性交通基础设施的研究和实践仍处于起步阶段,尚未形成系统完善的公路基础设施韧性关键技术储备,重点任务的实施和项目管理经验尚缺乏针对性的解决方式。随着“四新技术”的发展,公路领域已形成一批实用性强、使用性好的关键技术,因此有必要对其进行系统梳理,建立灾害的前期预警、灾中保障、灾后恢复的技术措施库,为公路交通基础设施韧性提升提供解决方案,助力公路交通基础设施韧性提升。

收稿日期: 2024-06-05

作者简介: 高佳宁(1992—),女,硕士,工程师,从事道路交通研究工作。

1 公路交通基础设施韧性研究概况

交通基础设施韧性是指交通基础设施抵御灾害、吸收冲击、恢复运行的能力。当前众多学者^[1-4]对“韧性”(resilio)理论开展了研究,常见的对于“韧性”的研究主要分为脆弱性理论、灾害过程理论、韧性评估指数、韧性的4R理论等几种。

“韧性三角形”理念是Bruneau等^[5]在对社区抗震韧性分析时,为了衡量基础设施的性能在灾害推进过程中的恶化程度而首次提出的(2003年)。在该模型中,扰动事件发生后,系统功能会直接下降到谷底,这与很多扰动时间的作用不符(见图1)。因此,Ouyang等(2012)^[6]为了模拟输电系统的韧性,提出了三阶段的工程韧性分析模型(2012年),也被称为“韧性梯形”(resilience trapezoid)。该模型由三阶段评估组成,即灾害防治阶段、灾害响应阶段和灾后恢复阶段,很好地模拟了扰动时间对系统的影响(见图1)。李辉等^[7]在2023年对公路交通韧性评估的研究中,提出多维度韧性灾害响应理论,将系统划分为初始稳态、防御抵抗、动态适应、快速恢复4个阶段。本文结合“韧性梯形”理论、公路多维度韧性灾害响应理论,构造了适用于公路交通基础设施的“改进韧性梯形”,来系统地表示随着灾害发生的时间变化,公路交通运输系统韧性的变化特征。

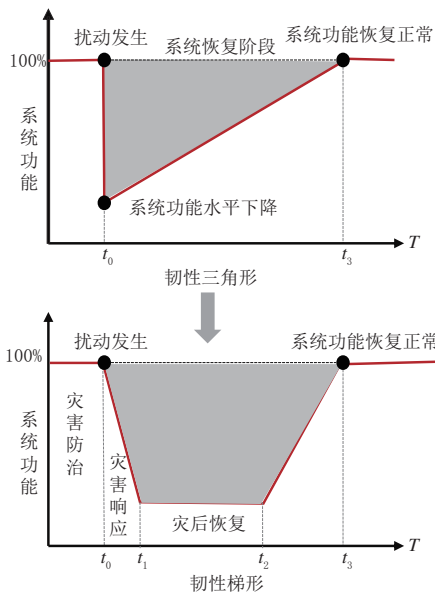


图1 韧性三角形与韧性梯形示意图

如图2所示,可根据灾害发生时间先后,将公路交通运输系统功能分为3个阶段:

(1)第一阶段为灾前预警阶段,即在扰动事件发生前,可通过日常养护工作中的灾害预警、灾害防治

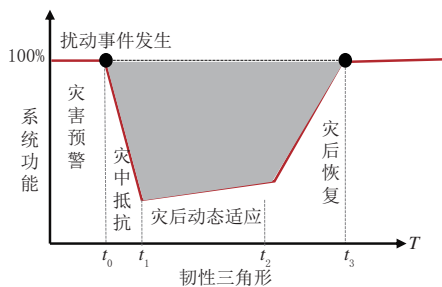


图2 改进韧性梯形示意图

等手段来降低或消除扰动事件对系统的影响;

(2)第二阶段为灾中保障阶段,即在设计、施工过程中对分部分项工程采取关键技术措施,提高系统的韧性抵抗能力;

(3)第三阶段为灾后恢复阶段,即在灾害发生后采用一些临时、柔性工程动态适应系统功能,除此之外,通过快速恢复技术,压缩系统恢复时间,尽快恢复系统功能。

2 公路交通基础设施韧性提升技术

根据本文第1章提出的公路交通运输系统改进韧性梯形理论,按照灾害发生时间先后顺序,将当前各类公路交通基础设施韧性提升关键技术划分为灾前预警、灾中保障、灾后恢复3个方面。各阶段可采取的关键技术如图3所示。

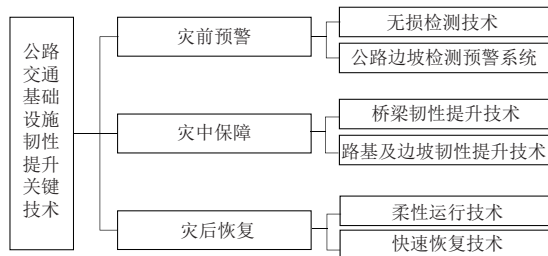


图3 韧性提升技术框架图

2.1 灾前预警

灾前预警技术重点在于灾害前,是对灾变进行主动预测和监测的技术。

(1)公路边坡监测预警系统

公路运输部印发了《道路高边坡监测预警与应急实用技术汇编(第一批)》(以下简称《汇编》)。在《汇编》中,专家初步遴选出了第一批共80项技术,涉及公路高边坡监测预警技术42项。当前,针对边坡预警技术的研究领域主要包括空天地一体化监测技术和基于各类传感、视觉识别的监测技术两个方面。

空天地一体化监测技术可实现公路边坡的全天候实时监测,系统主要由北斗GNSS、雷达、无人机等

多种监测设备以及5G、物联网和人工智能技术共同组成,可达到自动化风险评估、预警的目的,适用于边坡灾害普查以及重点边坡的长期监测。

基于各类传感、视觉识别的监测技术利用AI视觉、分布式光纤传感、探底雷达以及区域智能大模型融合,可实现高边坡安全在线监测、灾变先兆判识和实时预警,适用于边坡安全性的高时效、高精度、超前化评估。

(2)无损检测技术

在日常养护工作中:一是采用装载了三维探地雷达设备的巡检查险车,及时识别异常体、疏松体、富水区以及空洞及裂缝,同时采用道路非开挖技术进行道路修复,避免道路开挖造成的不良影响;二是采用无人机进行低空巡检,实现低空领域的调查测绘和灾害定性评价,可实现快速变形期及突发地质灾害时的快速勘察评价。

2.2 灾中保障

灾中保障的技术重点在于灾变结构的安全保持和提升。

(1)桥梁韧性提升技术

桥梁作为道路系统的关键节点,在历次灾害中,其结构毁坏都会给道路系统带来极大的冲击。针对桥梁系统的韧性提升技术主要集中在以下3点。

a. 新型韧性材料

形状记忆合金(SMA)是一种具有超弹性特性和形状记忆效应的重要智能材料,利用SMA材料制作的被动阻尼器具有抗疲劳性好、抗腐蚀性强、可恢复变形大及性能较稳定等优点。

b. 减震隔震装置

“自复位、低损伤、可控制及震后快速恢复”将成为一种新型的韧性设计理念。通过减震装置设计可以减轻桥梁结构损伤,提升桥梁可恢复性。

c. 新型结构韧性体系

新型结构韧性体系是一种可恢复的结构体系,可有效减少震后动力响应和残余位移,短时间内可恢复其使用功能。

(2)路基及边坡韧性提升技术

a. 不良地段高填方路基处治技术

该技术采用反压护道、轻质换填、加筋技术,提高路基稳定性和抗滑塌变形能力。

b. 基于智能土工格栅的道路高边坡加固-预警一体化技术

该技术应用于路基基层中,可显著提升路基承

载力、抗变形能力和抗滑能力,同时还可感知边坡滑裂面,准确高效识别边坡滑裂风险。

c. 混凝土微型钢管群桩加固技术

该技术适用于高速公路路基边坡加固施工,尤其适用于预加固、暂时稳定等浅层滑坡体加固、狭小作业场地边坡加固等。

2.3 灾后恢复

灾后恢复的重点在于灾后柔性运行和快速恢复。柔性运行的重点是基于不同设施灾损等级,提出不同等级下的加固、降载、限速、临时路网构建等柔性运行技术。

针对不同的灾害类型,快速恢复技术众多,以地震灾害为例,包括震后路基快速恢复方法——碎石注浆桩,震后新型墩柱的快速恢复方法——BFRP布-植筋复合法,震后钢筋混凝土桥墩的快速修复技术——缠绕CFRP修复等。本文重点介绍几种适用范围广、实用性强的通用技术。

(1)道路应急路面铺装技术

采用冷拌冷铺沥青混合料和高性能聚氨酯进行快速路面铺装,均能迅速恢复灾后道路,具有施工快捷、成本经济、耐久性好的特点,能够减少救援现场的扬尘和泥泞,保障安全救援。

(2)应变硬化复合胶凝材料

水毁路基快速恢复和修补的方法除了砌筑配筋式箱式挡土墙外,还可以通过韧性高、延性大、耐久性好的应变硬化复合胶凝材料,实现渗、疏水特性与冻融环境的适用性,有效抵制有害物质的入侵,提高材料耐久性。

(3)钢轨抗滑桩与挡墙组合结构

滑坡应急处治可采用钢轨抗滑桩与挡墙组合结构,可对变形阶段的滑坡进行快速应急抢修加固,有效避免重力式挡墙坡脚的大体积开挖和由此诱发的工程滑坡。

(4)装配式UHPC桁架铆钉板及T形挡土墙技术

破碎岩体边坡快速支护及加固可采用装配式UHPC桁架铆钉板及T形挡土墙技术。一方面,该技术可增加坡面的耐久性和美观性;另一方面,该技术的设计单元均为标准构建,设计灵活,施工工序少、速度快,适用于应急抢险、保通等对工期有特殊要求的工程。

(5)高聚物锚杆边坡应急抢险和快速加固技术

利用非水反应高聚物材料快速膨化的特性挤密土体,并与周围土层产生黏结效应,实现土质边坡的

锚固,施工便捷、作用迅速。

3 公路交通基础设施韧性发展策略

(1)交通行业主管部门牵头韧性交通建设顶层框架设计

一是要形成技术标准体系,为公路建设提供技术支撑;二是要完善韧性评价体系,将评价指标纳入法律法规和建设标准;三是要建立运营机构绩效奖励激励制度,推动超越强制性标准的建设和运营。

(2)加强运营管理部门韧性管理水平

一是要形成规范化施工流程,加强施工过程中的安全监控;二是要建立常态化养护机制,及时识别道路潜在风险,使风险最小化;三是要制定应急救援预案,减少灾害发生时的人员财产损失。

(3)提高从业人员技术水平

一是要开展韧性提升专题培训会,将韧性关键技术应用于实际工程项目;二是要因地制宜地确定韧性提升方案,保障方案的有效性。

(4)鼓励科研人员开展技术研发

一是要进一步确定韧性评价体系,明确韧性理论的定义和度量;二是要优化现有结构设计方法,考虑风险、气候等韧性相关因素;三是要建立考虑韧性的全生命周期成本分析方法。

4 结 语

本文对公路交通基础设施韧性关键技术及发展

策略展开研究,形成以下结论。

(1)首先对公路交通基础设施韧性发展现状展开研究,基于“韧性三角形”理论,提出了公路交通基础设施领域的“改进韧性梯形”理论,动态模拟随着时间的变化公路系统性能的变化情况。

(2)基于“改进韧性梯形”,提出按照灾害发生的时间顺序,建立基于前期预警、灾中保障、灾后恢复3个阶段的技术措施库,为公路交通基础设施韧性问题提供解决方案,助力公路交通基础设施韧性提升。

(3)从行业主管部门,运营管理部门,设计施工从业人员、科研人员等多个维度,提出公路交通基础设施韧性发展策略,为公路韧性提供系统保障。

参考文献:

- [1] 王晶,刘昊天,朱建明.基于韧性城市视角的冰雪天气下路网恢复问题研究[J].中国管理科学,2018,26(3):177-187.
- [2] 徐珺.突发公共卫生事件下城市公共交通韧性治理[J].城市交通,2020,18(5):98-101.
- [3] 仇保兴.基于复杂适应系统理论的韧性城市设计方法及原则[J].城市发展研究,2018,25(10):1-3.
- [4] 李兴华.公路基础设施韧性评价指南[S].北京:中国公路学会,2023.
- [5] 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.
- [6] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L, MIN X. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. Structural safety, 2012(36): 23-31.
- [7] 李辉,姜宇哲,贾明,等.公路交通韧性评估及提升体系发展[J].中国公路,2023(6):34-39.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

