

基于韧性城市理念的道路桥梁防灾减灾设计研究

刘 亚

新余市祥铖建筑工程设备有限公司 江西新余 338000

摘 要：本文基于韧性城市理念，系统研究了道路桥梁防灾减灾的设计策略与实施路径。研究首先剖析了韧性城市对道路桥梁“生命线”与“韧性骨架”的功能定位，指出传统防灾设计在应对复杂风险时存在刚性、孤立与被动的局限性。进而，提出从“抗力设计”向“全过程韧性设计”的转变，并构建了涵盖提升结构鲁棒性、增强系统冗余度与保障快速恢复功能三大核心设计策略。为实现这些策略，文章进一步规划了全生命周期一体化设计、多灾害综合防御以及智能化监测与预警系统融合三条关键实施路径。该研究旨在将道路桥梁从被动防御的工程构筑物，转变为具备吸收、适应与快速恢复能力的智能生命体，为提升城市整体韧性、保障生命线工程安全提供系统性理论指导与实践范式。

关键词：韧性城市；道路桥梁；防灾减灾；设计策略

引言

随着气候变化与城市化进程加速，城市面临的灾害风险日益复杂严峻。道路桥梁作为城市生命线系统的核心节点，其防灾能力直接关系到城市安全与灾后恢复效率。传统以“抗力”为核心的防灾设计理念，在应对超越设防标准的极端事件时显得力不从心。因此，引入韧性城市理念，将道路桥梁的设计目标从“防止失效”转向“吸收、适应和快速恢复”，已成为现代城市基础设施建设的必然要求，具有重要的理论与现实意义。

一、韧性城市理念对道路桥梁防灾设计的要求

（一）道路桥梁系统在城市韧性中的功能定位

在韧性城市理论框架下，道路桥梁系统的功能定位超越了传统交通基础设施的通行服务属性，被赋予了城市“生命线”和“韧性骨架”的核心战略地位。其功能定位体现在三个层面：一是作为城市运行的生命线通道，道路桥梁是应急救援物资运输、人员疏散、救援队伍通行的物理基础，灾害发生时其可用性决定城市能否有效应急响应，其韧性关乎交通效率及居民生命安全与生存保障。二是作为城市功能恢复的连接网络，灾后城市功能恢复依赖路桥网络畅通，有韧性的路桥系统能确保城市内外有效连接，为灾后重建和经济恢复提供条件。三是作为城市空间结构与社会韧性的物理支撑，路桥网络定义城市形态、连接社区与功能区，设计良好的韧性路桥系统能维持社区联系、保护社会结构完整、增强居民心理与集体行动能力。从韧性城市视角看，道路桥梁系统是

嵌入城市复杂系统、承载多重功能的关键基础设施^[1]。

（二）韧性视角下的防灾设计目标转变

韧性理念的引入，促使道路桥梁防灾设计的目标发生了根本性的转变，从传统的“抗力设计”向“全过程韧性设计”演进。传统防灾设计的核心目标是“防止失效”，即通过提高结构强度，确保在预设等级的灾害作用下，桥梁不发生倒塌或严重损坏。这种设计范式以结构安全为唯一导向，评价指标主要是承载力、延性等物理参数。而韧性视角下，设计目标扩展为“吸收、适应和快速恢复”能力的综合体现。具体转变如下：其一，设计目标从单一结构安全扩展到系统功能维持。韧性设计更关注桥梁灾害中和灾后能否维持或快速恢复关键通行功能，轻微损伤但能快速修复通行的桥梁，在韧性评价中可能更优。其二，设计关注的灾害范围从确定性事件扩展到不确定性情景。传统设计基于明确设防标准，韧性设计需考虑“黑天鹅”事件，要求系统应对未知冲击。其三，设计时间维度从灾害瞬间扩展到全过程。韧性设计涵盖灾前预防、灾中应急和灾后恢复，评价指标从物理性能扩展到恢复时间等综合性指标。这种转变本质是从静态、刚性防御思维转向动态、灵活、以系统功能持续为导向的适应性思维。

（三）传统防灾设计理念的局限性分析

传统道路桥梁防灾设计理念在保障工程安全方面取得了显著成就，但在应对城市复杂系统所面临的现代风险时，其局限性日益凸显。这些局限性主要体现在以下三个方面：首先是设计理念的“刚性”与“孤立性”。传

统设计以“硬抗”思路,依赖结构自身强度和刚度抵抗灾害。刚性设计面对超设防标准灾害时,易突发整体性破坏,缺乏冗余方案。设计常将桥梁独立分析,忽略其作为网络节点失效对路网和城市系统级联失效的影响。风险评估具“静态性”与“单一性”,基于历史灾害数据设固定设防标准,难适应气候变化新趋势,未考虑多灾害耦合情景。功能保障“被动”,灾害后功能恢复依赖外部救援,鲜少主动考虑快速修复条件,致恢复周期长、放大灾害间接损失。传统设计理念局限于缺系统思维、对动态风险响应不足、缺乏对功能持续性的关注,这是韧性城市理念欲弥补和超越的核心^[2]。

二、基于韧性理念的道路桥梁防灾设计策略

(一) 提升结构鲁棒性的设计策略

提升结构鲁棒性的设计策略,其核心目标是确保道路桥梁在遭遇超出设计预期的极端荷载作用时,能够避免发生不成比例的连续性倒塌,维持结构的整体稳定性。鲁棒性设计超越了传统规范中对单一构件承载力的要求,更侧重于结构系统的内在联系和荷载重分布能力。实现这一策略的关键在于引入“多道防线”的设计思想。第一道防线为主要受力构件,按规范承担正常及可预见荷载。主要构件在极端事件局部破坏后,第二道防线(结构内部冗余联系和备用传力路径)激活。如桥梁设计中设横梁、系梁等联系构件,某主梁失效时,荷载可通过其传至相邻主梁,避免整跨垮塌。材料与构造上,鲁棒性设计强调延性和耗能能力,采用高延性材料和允许大变形的连接构造,使结构塑性阶段仍能承载,耗散能量,避免脆性破坏。此外,关键构件防护设计很重要,如对桥墩、桥台设防撞岛、加强基础埋深,降低初始损伤概率。因此,提升鲁棒性策略从“防破坏”转向“防崩溃”,构建有自适应和内力重分布能力的结构系统,确保局部受损时整体结构稳定,为应急和修复提供物理安全保障^[3]。

(二) 增强系统冗余度的设计策略

增强系统冗余度的设计策略,其着眼点从单个桥梁结构扩展至整个道路桥梁网络,旨在通过在网络层面提供多条可选路径,来保障城市交通系统在灾害冲击下的功能持续性。系统冗余度是网络韧性的物理基础,可避免交通网络的功能性瘫痪。实现该策略,首先要在城市规划层面优化路网结构,构建网格状、环状或多环放射状路网,取代传统树状或单一走廊结构,降低单一路径中断对整体通行能力的影响;其次,在关键交通走廊规划建设平行或可替代通道,如在跨越重要河流或峡谷时

建设备用桥梁,平时分流交通,灾害时承担关键作用;此外,还应注重不同交通方式的协同,形成一体化立体交通应急体系,道路桥梁受损时可通过其他交通方式运输人员和物资。增强系统冗余度的策略是风险分散思想,通过构建多重保障稀释灾害冲击效应,确保城市交通核心功能不因局部失效而丧失。

(三) 保障快速恢复功能的设计策略

保障快速恢复功能的设计策略,其核心在于将“可恢复性”和“可修复性”作为与结构安全同等重要的设计目标,通过前瞻性的设计,最大限度地缩短灾后功能中断时间。这一策略将设计焦点从灾害发生时的“生存”问题,转向了灾害发生后的“重生”问题。其关键措施首先体现在构件的模块化与标准化设计上。将桥梁设计成由标准化、模块化构件(如预制梁段、桥墩、桥面系)拼装而成,构件工厂预制、现场快装。构件损坏时,可从储备库调取更换,缩短修复时间,避免传统养护期。其次,对关键节点进行可检、可修、可换设计,将受力复杂、易损节点设为可检测、接近、更换单元,采用可更换连接形式,预留操作通道和监测接口,以便快速发现评估损伤、高效修复。再者,融入智能监测与诊断技术,在桥梁内部预埋监测设备,实时采集数据,灾害后自动评估损伤和承载能力,为决策提供科学依据,避免人工评估的滞后和主观。保障快速恢复功能的策略是“灾前主动准备”的设计哲学,在设计建造阶段植入“快速修复基因”,让道路桥梁像生物体一样快速愈合,恢复生命线功能^[4]。

三、道路桥梁韧性防灾设计的实施路径

(一) 全生命周期一体化设计路径

全生命周期一体化设计路径是实施韧性防灾设计的根本方法论,它要求将韧性理念贯穿于道路桥梁项目的规划、设计、施工、运营、维护直至拆除更新的所有阶段,实现各阶段信息的无缝传递与决策的协同一致。传统设计模式在项目竣工后结束,后续运营维护与前期设计脱节,使韧性设计意图难维持。一体化设计路径通过建立统一数字信息平台(如BIM)打破阶段壁垒。规划与设计阶段,要考虑结构灾害性能,同步制定全服役期韧性维护策略并集成到BIM模型;施工阶段,施工方按设计确保韧性构造措施质量,反馈施工信息形成“数字孪生”体;运营维护阶段,管理者依据数字孪生体和监测数据执行维护计划,预警结构性能退化,灾害后调用修复预案指导抢修。该路径核心是将韧性从静态目标转变为全生命周期动态管理优化过程,确保前期韧性成本

持续回报,避免韧性“折损”,实现道路桥梁韧性效益最大化^[5]。

(二) 多灾害综合防御设计路径

多灾害综合防御设计路径是应对现代城市复杂风险环境的必然选择,它要求在道路桥梁设计中,摒弃针对单一灾害进行独立设计的传统做法,转而采用系统化的方法,统筹考虑多种灾害(如地震、洪水、强风、撞击等)及其耦合作用的综合影响。传统设计常“一事一议”,如抗震只考虑地震、抗洪只考虑洪水,这种割裂思维或引入新风险、导致意外破坏。实施综合防御路径,需先全面开展多灾害风险识别与情景分析,评估所在地自然灾害发生概率、强度及关联性,如地震引发液化等。设计时寻求抵御多种灾害的“共性解”或“协同解”,如提高桥墩配筋率和延性、设置防撞护栏。对无法用单一措施解决的冲突,建立基于性能的分级防御体系,设定不同性能目标,确保结构不连续倒塌。该路径促使设计者宏观、系统审视安全与韧性,通过资源整合与策略协同,以经济高效方式提升道路桥梁应对复杂灾害的适应能力,避免重复建设和防御盲区。

(三) 智能化监测与预警系统融合路径

智能化监测与预警系统融合路径,是将现代信息技术与防灾设计深度融合,为道路桥梁的韧性赋能,使其从被动的物理结构转变为具备主动感知、智能分析和预警能力的“智能生命体”。这条路径的核心在于构建一个覆盖结构本体、周边环境及交通流场的立体化感知网络,并建立与之配套的数据分析与决策支持系统。在结构本体层面,通过布设光纤光栅、加速度传感器、位移计、GPS等监测设备,实时获取结构在荷载和环境作用下的响应数据,如应力、应变、振动频率、模态参数等。这些数据通过无线传输技术汇集到云端数据中心,利用结构健康诊断算法,对结构的损伤状态、安全裕度和剩余寿命进行持续评估。在环境与交通层面,融合气象站、水位计、交通摄像头、地磁传感器等外部数据,实时监测风速、雨量、水位、车流量等关键信息。融合路径的关键在于建立一个多源异构数据的融合分析平台。该平台能够利用人工智能和机器学习算法,挖掘不同数据之间的关联关系。例如,模型通过分析历史数据,可学习特定风速和车流组合下桥梁的振动模式,实时监测数据偏离该模式时系统预警。灾害来临前,系统根据气象预

警提前评估桥梁风险等级,为交通管制和应急预置提供决策依据;灾害发生时,系统能瞬时判断结构损伤,自动生成灾情评估报告指导应急响应。该路径实施使道路桥梁韧性不再仅依赖物理属性,增添信息层面的“感知韧性”和“决策韧性”,实现从“事后响应”到“事前预警、事中控制”的跨越,提升城市应对灾害的主动性和有效性。

结语

在当今灾害频发且类型日益复杂的背景下,基于韧性城市理念的道路桥梁防灾减灾设计研究具有极其重要的现实意义。传统设计理念在应对现代灾害时暴露出的诸多局限,促使我们必须寻求新的设计范式。而韧性城市理念所倡导的结构鲁棒性提升、系统冗余度增强以及快速恢复功能保障等设计策略,为道路桥梁防灾设计指明了新的方向。通过全生命周期一体化设计路径,可将韧性理念融入项目各阶段,确保设计意图贯彻和韧性效益最大化;多灾害综合防御设计路径能以系统、经济手段应对灾害威胁;智能化监测与预警系统融合路径为道路桥梁赋予“智慧大脑”,实现从被动防御到主动防控的转变。未来,随科技进步和城市韧性需求增长,基于韧性城市理念的道路桥梁防灾设计将不断完善,为城市交通系统提供保障,守护城市生命线和人民福祉。

参考文献

- [1]王琳.后疫情时代下多民族集聚区韧性更新城市设计研究——以九龙县外来社区为例[D].成都理工大学,2021.
- [2]张泉,薛珊珊,邹成东.基于雨洪管理的社区韧性评价及优化策略研究[J].资源与生态学报:英文版,2022,13(3):11.
- [3]张佑玮.基于景观格局视角的城市生态韧性定量测度及提升策略研究——以汉中市为例[D].西北大学,2022.
- [4]葛懿夫,翟国方,何仲禹,等.韧性视角下的综合防灾减灾规划研究[J].灾害学,2022(001):037.
- [5]汤慧,胡亚琪.韧性城市理念引导下中小城镇防灾减灾规划研究:以突发性公共卫生事件为例[J].湖南城市学院学报:自然科学版,2021,30(2):5.DOI:10.3969/j.issn.1672-7304.2021.02.0006.