

韧性城市视角下综合管廊防灾减灾设计优化

刘 昆

中交水运规划设计院有限公司, 北京

收稿日期: 2026年3月22日; 录用日期: 2026年4月12日; 发布日期: 2026年4月24日

摘 要

随着城市化进程加速和极端气候事件频发, 提高城市基础设施的防灾减灾能力就成了关键议题。综合管廊作为城市生命线工程的核心载体, 传统设计在应对突发灾害的时候, 其适应性存在不足, 恢复力较薄弱, 很难契合韧性城市建设的要求。本研究基于韧性城市视角, 将关注点放在综合管廊防灾减灾设计优化, 弥补现有的设计在应对系统性风险以及快速进行恢复功能上的缺陷。本研究通过案例比较和多专业协同的方法, 重点从建筑以及结构专业来开展论述。在建筑专业方面, 优化管廊舱室布局、逃生救援通道以及通风排烟系统, 提高内部空间安全冗余和应急疏散效率; 在结构专业方面, 改进抗震设防标准, 引入高性能材料以及可恢复性结构设计, 极大程度上提升了管廊主体结构在灾害中的承载、变形以及灾后功能的恢复能力。研究发现, 通过开展建筑以及结构专业方面的针对性优化工作, 能够构建一个更具韧性、抗扰、适应以及快速恢复能力的综合管廊系统。本研究为综合管廊工程设计提供了具体的韧性提升策略以及实践参考, 对于保障城市生命线系统安全、推动韧性城市基础设施建设有着重要的理论以及现实意义。

关键词

韧性城市, 综合管廊, 防灾减灾, 设计优化, 建筑结构

Optimization of Disaster Prevention and Mitigation Design for Utility Tunnel from the Perspective of Resilient City

Kun Liu

CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing

Received: March 22, 2026; accepted: April 12, 2026; published: April 24, 2026

Abstract

With the acceleration of urbanization and the frequent occurrence of extreme climate events,

文章引用: 刘昆. 韧性城市视角下综合管廊防灾减灾设计优化[J]. 土木工程, 2026, 15(4): 250-257.

DOI: 10.12677/hjce.2026.154098

improving the disaster prevention and mitigation capacity of urban infrastructure has become a key issue. As the core carrier of urban lifeline projects, utility tunnels are insufficient in adaptability and weak in resilience when responding to sudden disasters in traditional design, which can hardly meet the requirements of resilient city construction. Based on the perspective of resilient city, this study focuses on the optimization of disaster prevention and mitigation design for utility tunnels to make up for the defects of existing designs in coping with systemic risks and rapid functional recovery. Through case comparison and multi-disciplinary collaboration, this paper mainly discusses from the architectural and structural specialties. In terms of architectural specialty, the layout of utility tunnel compartments, escape and rescue passages, and ventilation and smoke exhaust systems are optimized to improve the safety redundancy of internal space and the efficiency of emergency evacuation. In terms of structural specialty, the seismic fortification criteria are improved, and high-performance materials and recoverable structural design are introduced, which greatly enhance the bearing capacity, deformation resistance of the main structure of the utility tunnel under disasters and its functional recovery capacity after disasters. The study finds that targeted optimization in architectural and structural specialties can construct a utility tunnel system with stronger resilience, disturbance resistance, adaptability and rapid recovery capacity. This study provides specific resilience improvement strategies and practical references for the engineering design of utility tunnels, and has important theoretical and practical significance for ensuring the safety of urban lifeline systems and promoting the construction of resilient urban infrastructure.

Keywords

Resilient City, Utility Tunnel, Disaster Prevention and Mitigation, Design Optimization, Building Structure

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

鉴于城市化加速与极端气候事件频繁发生，促使城市基础设施防灾减灾能力的建设成为全球关注的焦点。综合管廊作为城市生命线工程的核心载体，将电力、通信、燃气、给排水等市政管线集中敷设于地下空间，其安全运行会关乎城市功能的正常运转。然而，传统综合管廊设计主要是把“抗毁”理念当作指导，着重开展提高结构强度，以此来抵御灾害荷载。在应对突发灾害的时候，会暴露出适应性不足以及恢复力薄弱等方面的问题，难以满足韧性城市开展建设工作时对基础设施所提出的系统性要求。

韧性城市理论在 20 世纪末被提出之后，经历了从生态韧性、工程韧性到社会 - 技术系统韧性的范式演进过程，Holling (1973) [1] 年首次把韧性概念引入到系统生态学当中，并且强调了系统拥有吸收变化以及维持功能的能力。之后，韧性理论向工程领域进行延伸，Bruneau (2003) 等人 [2] 在 2003 年提出地震工程领域当中的“韧性三角”框架，把韧性分解成鲁棒性以及冗余性资源性以及快速性四个维度。近些年来，韧性城市理论会更关注基础设施系统在多重风险之下的“抵抗 - 吸收 - 恢复 - 适应”全周期能力，并且强调要从静态抗灾向动态适应来转变，联合国减灾署 (UNDRR) 把城市韧性作为内容纳入可持续发展目标，促使各个国家将韧性理念融入基础设施规划以及设计标准当中。

在综合管廊防灾设计方面，国内外学者开展了诸多的研究工作。在抗震方面，研究主要聚焦于结构抗震性能评估、减隔震技术的运用以及震后功能的恢复能力等 [3]；在防火方面，相关研究对管廊内火灾蔓延规律、烟气控制策略以及结构抗火性能进行研究 [4]；在抗爆方面，针对燃气泄漏所引发的爆炸风险，

有学者进行了内爆作用下管廊结构响应特性以及加固措施的研究工作[5]；此外，有部分学者，开始关注综合管廊的风险评估方法方面的内容及与韧性城市建设的协同发展路径[6]。

现有的研究为开展综合管廊防灾设计的工作奠定了重要的基础，不过还存在着一些不足。第一点，研究的视角大多聚焦于单一灾种以及单一构件的安全性能，缺乏从韧性城市系统论的视角来对综合管廊防灾设计进行整体性的审视；第二，现有的设计方法着重把关注点放在灾害发生时的“抵抗”能力方面，对于灾后“进行恢复”以及“适应”的能力关注不足，未能形成覆盖全灾害周期的韧性设计框架；第三，建筑以及结构专业在开展优化措施方面往往是独立进行的，缺乏对多专业协同开展系统性的整合研究，这样就很难形成提高整体韧性的合力。

鉴于上述学术缺口，本研究基于韧性城市视角，以综合管廊防灾减灾设计优化为对象，重点从建筑以及结构专业维度，开展贯穿韧性理念与设计全程的策略方法的探索工作。从而构建一个融合了“抵抗-吸收-恢复-适应”多目标的设计优化框架，以便为提高综合管廊系统韧性、保障城市生命线工程的安全运行提供理论支撑以及实践参考。

2. 文献综述

2.1. 韧性城市理论发展及其在基础设施领域的应用

韧性(Resilience)概念源于生态学，其被定义成生态系统吸收变化并且维持功能的能力。20世纪90年代，韧性理论拓展到了城市研究方面，21世纪以来，韧性城市的研究进入了快速发展的时期，形成了以工程韧性、生态韧性、社会-经济韧性以及社会-技术系统韧性当作代表的多维理论框架。

在工程韧性方面，Bruneau (2003)等人[2]提出的“韧性三角”框架，它把基础设施韧性分解成了鲁棒性、冗余性、资源性以及快速性这四个核心维度。在此基础上，美国多学科地震工程研究中心(MCEER)进一步明确基础设施韧性评价量化方法，将韧性定义为系统功能损失曲线与时间轴所围成的面积，为开展韧性指标量化工作提供了理论方面的依据。Cimellaro (2009)等人[7]提出了基础设施韧性的三维度量框架，该框架包含了可靠性、冗余性以及快速性，推动了韧性理论向工程实践的转化。

2.2. 综合管廊防灾设计研究现状

综合管廊防灾设计研究将关注点集中在结构抗震、火灾防控、爆炸防护以及风险评估等方面。

在抗震设计方面，研究的重点从进行单一构件承载力的研究转移到了开展结构整体性能的研究，有学者开展了叠合装配式管廊结构抗震性能水平以及评价方法的研究工作，并且提出了基于性能来开展的抗震设计指标[8]。部分学者对装配式地下综合管廊穿越活动地裂缝的变形破坏机理的系统研究工作，揭示了节段连接形式对于结构整体性的影响规律[9]，国外学者通过开展离心机试验，对埋地管廊地震响应特性进行研究，提出基于变形控制来开展的抗震设计方法。

在防火设计领域，有学者鉴于防火视角来开展对管廊工程韧性进行评价的研究工作，构建了一个囊括火灾预防、控制、应急救援以及功能恢复等方面的评价指标体系[10]。国内外的研究普遍会对管廊内电缆以及燃气管道火灾的蔓延规律、烟气控制策略，还有结构抗火性能方面开展关注工作，研究表明，开展合理的舱室分区以及通风排烟系统的设计工作，对于控制火灾蔓延、保障人员疏散方面，会起到至关重要的作用。

在抗爆设计领域，燃气泄漏所导致爆炸的风险是研究的热点方面。有学者开展内爆作用下不同加固方式圆形综合管廊响应特征的研究工作[11]，提出基于能量耗散来开展的加固设计方法。还有学者开展了CFRP-钢筋混凝土-聚脲结构抗爆性能的研究工作，探索了复合材料在管廊抗爆加固当中的应用潜力[12]，以及通过开展模型试验来研究综合管廊燃气爆炸动力响应规律，从而为抗爆设计提供试验数据支撑[13]。

2.3. 研究述评与本文定位

基于对上述文献开展分析，目前综合管廊防灾设计研究的特性如下：在研究对象方面，从单一构件拓展到结构整体；研究方法从确定性分析朝着概率风险评估的方向演进；研究目标从开展保证安全的工作转变为进行性能的提升。然而，现有的研究工作当中，仍然存在着以下这些方面的不足：

首先，韧性理论运用的深度不够。当下的研究大多引入了“韧性”这个概念，不过缺乏与韧性理论核心维度开展系统的对接工作，还没有形成一个能够覆盖“抵抗-吸收-恢复-适应”全周期的设计框架。

第二，专业协同方面的整合工作开展得不够充分。建筑、结构以及机电等专业开展的优化措施大多比较独立，缺少对多个专业协同开展系统性整合研究，很难形成提高整体韧性的合力。

第三，对恢复能力开展研究工作比较薄弱。当前的研究主要侧重于在灾害发生时开展“抵抗”方面的能力，对于灾后功能的“恢复”重视程度不够，缺乏可恢复性结构设计以及快速修复技术等方面的系统性研究。

第四，对于适应性策略的研究有所欠缺。面对灾害情景以及功能需求所存在的不确定性，现有的设计缺少主动“适应”的能力，没有形成能够进行调整、扩展、替换的韧性设计策略。

鉴于上述学术缺口，本研究从韧性城市视角开展工作，把韧性理论的抵抗、吸收、进行恢复、适应这四个核心维度贯穿到综合管廊防灾设计优化的整个过程当中，重点从建筑以及结构专业这个方面，开展多专业协同的韧性提升策略的探索工作，来为综合管廊韧性设计提供理论支撑以及实践路径。

3. 建筑专业层面的综合管廊防灾减灾设计优化

3.1. 基于安全冗余的管廊舱室布局与功能分区优化

从韧性城市的视角来看，综合管廊舱室的布局以及功能分区应当以安全冗余为核心，通过空间隔离以及功能解耦来抑制灾害纵横扩散的趋势。由于管线类型、压力等级以及危险性各不相同，要在平面和竖向上开展“分舱-分区-分单元”多级安全单元的构建，把燃气、压力给水、电力以及通信等具有不同风险属性的管线进行分舱布置，对同舱高危管线聚集度进行减少处理，来控制由于一处失效而导致系统级功能瘫痪的概率。舱室之间应该设置防火、防爆、防水以及防烟的隔断构造，借助防火分区长度控制、防爆泄压口和水密隔舱门等措施，来构成“常规隔离-极端工况隔离”双重屏障，将管廊内灾害影响控制在最小必要范围内。结合城市重要基础设施的服务等级，适宜预留检修舱、备用舱或者可转换功能的舱室，通过冗余空间以及管线绕接路径，为灾后快速开展替代、分流以及修复工作创造条件，提高不同灾害情景当中的功能进行恢复的能力以及系统容错能力。

设计方面，舱室布局要和监测、排烟、排水以及应急疏散等系统进行统筹，把平面分区和运营管理单元、消防与抢险分区对应起来，这样有利于对灾情进行快速封控和分区处理，减少对城市生命线系统整体连续性的扰动。

上述舱室布局以及功能分区的优化措施和韧性理论各个阶段紧密关联：在抵抗阶段，把分舱布置以及隔断构造用来隔离不同风险管线，抑制灾害纵向扩散，维持关键功能连续工作；吸收阶段，双重屏障设计能够把灾害影响控制在最小必要范围当中，防止它向相邻区域进行蔓延；恢复阶段，预留检修舱以及备用舱，为灾后及时开展替代、分流以及修复工作提供冗余空间，进而缩短功能停摆的时间；适应阶段时，可以把功能舱室进行转换，并预留未来功能升级以及风险情景演化的接口，来提高系统应对不确定风险的主动适配能力。

3.2. 提升应急疏散效率的逃生救援通道与节点设计

在韧性城市视角中，综合管廊逃生救援通道以及节点的设计需要与舱室安全单元划开展协同，完

善竖向以及横向连通口体系，构建多路径短距离并且具有高可达特性的疏散网络。竖向逃生口的布置适宜对应城市道路、公共绿地以及重要建筑出入口，形成“点-线-面”衔接的疏散节点体系，并且依据管廊长度、灾害风险分布以及运营维护需求对间距进行控制，让任意一个点位到距离它最近的逃生口所需要花费的步行时间处于可接受的范围。

竖向通道需要采用防火、防烟、防水一体化的构造，并且配合防爆门、防烟楼梯间以及加压送风设施，以此来防止火焰、烟气和有毒有害气体侵入到疏散路径中，逃生口需要强化显著标识和照明导向，同时兼顾防淹没、车辆碾压以及非法侵入等方面的安全需求，以此来保证灾时能够及时识别并使用，平时可以将它和检修出入口进行复合利用，提升空间以及经济的效率。

横向连通口设计方面需要强化不同舱室之间安全可转换的能力，这样在局部舱室失效、单一逃生路径受阻时，可以让人迅速转移到相对安全的舱室或者备用疏散通道中，连通口的设置位置需要和高风险管线段、重要节点设备以及监控点的布置开展统筹考虑工作，通过适度加密高风险区段的连通频次来缩短横向转移距离。连通口的宽度以及净高需要满足双向交错通行的需求，要进行耐火分隔构造、防水闸门以及自动关闭的防烟设施的配置，平常会保持封闭或者限开的状态。发生火灾(燃气爆燃或者泄漏)，就可以在消防以及监控系统联动控制的情况下，分级来启用。应急照明、指示标识以及语音广播系统沿着竖向逃生口和横向连通口来进行连续布置，借助冗余供电并且通过独立控制模块，确保主系统失效时，仍然能够维持基本引导功能，从而提高在危险情景当中人员自救和救援队伍反向进入方面的效率与安全性。

逃生救援通道以及节点的设计在韧性各个阶段所起到的贡献如下：在抵抗阶段，多路径短距离疏散网络能够帮助人员在灾害初期快速地撤离危险区域；吸收阶段，如果局部舱室失效，横向连通口就会来实现快速转移，避免因单一逃生路径受阻，致使整体疏散失败；在恢复的阶段，冗余供电以及独立控制模块能够保障在主系统失效时，维持基本引导功能，为救援队伍反向进入创造了条件，并且缩短了应急响应的时间；在适应阶段，运用出入口复合设计策略提高了空间利用效率，使得应急设施在日常运营当中能够持续发挥作用。

3.3. 增强灾时环境保障的通风、排烟与防灾监控系统设计

综合管廊的通风、排烟以及防灾监控系统需要围绕“分区控制-智能感知-韧性保障”来开展统筹设计工作，通过常压通风、事故排烟以及有毒有害气体稀释功能的协同，开展在灾时维持可操作环境的工作。如表 1 所示，通风防烟分区适宜和舱室功能分区以及安全单元划分保持一致，形成独立的送排风系统，运用“平时串联、战时切断、就地控制”的策略，借助防火阀防烟阀以及可远程切换的调节阀开展构建分级隔断能力，预留旁通以及冗余风机来应对局部设备失效或者单一风道受阻的情况。排烟设计应当结合火灾场景模拟，优化排烟口以及补风口标高和间距，避免出现逆流以及“烟塞”现象，从而确保逃生路径区域能够维持低烟层高度和可视距离；在可能存在可燃以及有毒气体的区段，开展气体检测的工作并且进行超限联动排风，防止形成爆炸性混合气体。

防灾监控系统在韧性城市理念下应构建多源异构的感知网络，通过分布式布置温度、烟雾、气体、位移以及水位等传感器，同时和视频监控、环境参数在线监测进行交互 BIM/GIS 运维平台进行深度耦合，实现灾情早期识别、精确定位以及动态评估；如果通信受损，通过局部控制单元、自组网无线通信以及应急电源保障来开展保障工作，以实现关键风机、阀门以及照明的“就地自适应运行”，从而为抢险、排烟以及二次灾害防控拥有稳定环境以及信息支撑。

通风排烟以及防灾监控系统的韧性贡献体现于：在抵抗阶段，分级隔断以及旁通设计能够确保在局部设备失效的情况下，系统还可以维持基本功能；吸收阶段，按照火灾分区来开展独立控制工作，把烟

气控制在最小范围当中，从而为人员疏散以及救援争取时间窗口；在恢复阶段，就地自适应运行机制在通信出现受损情况时，维持关键设备功能，有为抢险排险提供环境支撑，从而缩短灾后进行恢复的周期；在适应阶段，多源异构感知网络以及 BIM/GIS 平台开展深度耦合，使得系统可以动态适配不同的灾情场景，进而为应急决策提供实时的信息支持。

Table 1. Optimization of disaster prevention and mitigation design for utility tunnels at architectural specialty level
表 1. 建筑专业层面的综合管廊防灾减灾设计优化

系统子项	优化设计要点	分区与联动策略	对韧性目标的贡献
常规通风系统	独立送排风、可变风量控制	与舱室功能分区一致，平战转换	保持日常安全环境，降低积气与潮湿风险
事故排烟系统	高效排烟风机、合理排烟口与补风口布置	按火灾分区独立控制，阀门分级切断	提升烟气控制能力，保障人员疏散与救援
有毒/可燃气排风系统	气体浓度监测与超限联动排风	高风险区段局部加密分区	抑制爆炸及中毒风险，提高环境安全裕度
防烟与分隔构造	防火阀、防烟阀与耐火风管	与安全单元边界重合，形成“气密防线”	减少烟气跨区蔓延，维持安全操作空间
防灾监控与感知系统	温度、烟雾、气体、水位及视频多源监测	分布式控制单元 + 中央平台分级管理	实现早预警、准定位与动态灾情评估
通信与电源保障	双路供电、UPS 与应急电源，局部无线自组网	主干 + 局部备份通道，失联区局部自治	在主系统失效时维持关键控制与信息通道
智能联动与平台集成	与 BIM/GIS、消防系统和疏散指引系统一体化联动	依据场景触发分区启停与路径优化	支持应急决策，缩短恢复时间

4. 结构专业层面的综合管廊防灾减灾设计优化

4.1. 基于性能的抗震设防标准与地震动参数优化

基于性能的抗震设防方法强调以功能恢复目标为导向，以综合管廊在不同地震水准下所具备的可接受损伤、功能退化以及恢复时间设置为设计控制指标，不再仅仅把构件承载力满足规范当作目标，而是设定“基本运营 - 受控损伤 - 快速恢复”等分级性能目标，来引导结构布置、构造措施以及材料选用开展统筹优化。在设防烈度地震的情况下，综合管廊结构需要整体不出现屈服现象或者让屈服情况处于可控范围之内，以此确保生命线功能不会中断；在罕遇地震的情况下，允许部分局部构件进入可修复的损伤状态，通过延性设计以及预先开展屈服机制的规划，来避免关键节点以及转换部位出现脆性破坏的情况，这样就能减轻震后修复的工作量，并且缩短进行恢复的周期。管廊结构体系适宜运用“强节点、弱构件、可更换部件”的设计思路，通过设置耗能构件、减震支座或者滑移装置，将地震能量集中在容易更换检查的部位来进行耗散，实现提升大震之后结构的可恢复以及功能韧性。

在开展地震动参数优化工作时，需要结合场地类别、地下埋深、周边建构物以及重要市政管线分布，同时综合考虑地震动峰值加速度、反应谱特性以及地震动持时对所产生的应力重分布和累积损伤方面的影响，避免直接把统一放大系数或者经验参数当作方法来使用。对软弱场地、液化土层或沿河沿海等高震害敏感区域，可采用场地地震反应分析，修正输入地震动特征，使计算地震作用更贴近实际；穿越多种地基条件或者受到断层影响的长距离综合管廊，可以分段确定地震动参数以及抗震性能目标，通过差异化设防来避免“过度设计”和“设防不足”同时存在。在满足安全性的前提条件下，实现材料用量以及构造措施的合理配置，提高整体抗震韧性和设计经济性。

4.2. 引入高性能材料与可恢复性结构体系

根据性能来开展抗震设防目标的情况下，引入高性能材料和可恢复性结构体系是提高综合管廊震后快速进行恢复能力的关键技术路径。运用高延性混凝土、纤维增强复合材料等高性能材料，能够提高构件在反复荷载下的延性以及耗能能力，让结构在大震时实现“缓慢损伤”“开展可控的开裂、有限的残余变形工作”，避免大面积的脆性破坏以及难以进行恢复的残余形变。高延性材料适宜优先运用到受力集中的部位、节点过渡的区域以及和重要市政管线相连的关键构件中，开展控制裂缝宽度的工作，减小钢筋锈蚀以及渗漏的风险，从源头降低震后维修和停运的成本。通过对材料性能开展分级配置，将普通混凝土和高延性混凝土进行合理组合，能够拥有兼顾造价、施工可行性的功能，并且保证整体安全。

在可恢复性结构体系方面，可以将力控型自复位框架、自复位剪力墙以及带可更换耗能件的支撑体系引入到综合管廊当中，并且凭借预应力筋、形状记忆合金或者专用回复装置来进行布置。结构在地震发生之后，会借助自复位力矩克服残余位移作，恢复并接近初始几何状态，从而减少舱室内管线的附加变形以及接口拉扯。

自复位构件宜布置在对管廊整体变形控制敏感的跨中与节点区域，并与减震支座、消能阻尼器形成协同工作体系，实现“耗能构件先屈服、主体结构少损伤”这样能够实现关键节点可以及时进行修复的目标布局。在设计阶段把耗能构件检修、更换的空间预留出来，节点构造选用装配化、可替换的连接形式，能够缩短震后开展抢修时间，让综合管廊作为城市生命线工程在极端灾害发生之后维持基本的运行，并且在短周期内进行恢复，使其达到正常服务水平，体现出韧性城市建设所具备的“快速恢复、可持续运营”功能要求。

4.3. 提升结构整体性与关键节点防灾韧性设计

提高综合管廊结构的整体性，需要开展节段连接、刚度以及延性的协同控制，并且构造连续性系统的设计可以保障管廊在地震、地基不均匀沉降以及外爆荷载作用下能够整体协同。如表 2 所示，管廊节段之间适宜采用“整体式主受力 + 延性耗能连接”的组合形式，通过加密端部钢筋锚固、增加套筒灌浆连接或者叠合段湿接缝等方式，来避免节段界面成为“弱环节”；在纵向以及横向构件的交汇处，把端段进行加厚，设置闭合箍筋以及抗拔钢筋，来实现弯剪承载力和节点约束刚度的协同匹配，降低关节化变形的风险。穿越变形缝以及沉降缝的管线接口，适宜采用柔性接头、伸缩节以及抗拔限位装置来进行组合设计，把缝区变形交由柔性构造优先释放，从而使主体混凝土结构保持连续并且拥有安全储备。在典型节点位置开展构造详图的标准化工作以及做法的统一，能够保证韧性指标，同时还可以提高施工的可控性以及质量的稳定性。

Table 2. Optimization of disaster prevention and mitigation design for utility tunnels at structural specialty level

表 2. 结构专业层面的综合管廊防灾减灾设计优化

构造部位	关键措施要点	预期防灾性能提升
管廊节段纵向连接	湿接缝叠合段、套筒灌浆、加密纵筋与箍筋	提高节段整体性，减小界面开裂与错台
节点核心区	闭合箍筋、加厚端段、抗拔钢筋锚固	增强节点延性与耗能能力
穿墙管线部位	加强套管、限位环与柔性密封材料	降低渗漏与局部应力集中风险
变形缝处管线接口	柔性接头、伸缩节与抗拔限位构造	保障缝区变形可控、接口不断裂
顶板与侧墙连接缝	加强钢筋锚固长度、连续止水带	提升整体抗剪能力与防水性能

5. 结语

本研究基于韧性城市视角,围绕综合管廊防灾减灾设计优化,构建了以融合“抵抗-吸收-恢复-适应”四个阶段目标的韧性设计框架,并且从建筑以及结构专业方面提出可行提升策略。在建筑当中,优化舱室布局、逃生救援通道以及通风排烟系统,提高内部空间安全冗余以及应急响应能力;在结构方面,改进抗震设防标准,引入高性能材料以及可恢复性结构体系,来提高主体结构的承载性能和灾后功能的恢复能力。本研究把各项优化措施与韧性四阶段系统进行关联,明确了每项措施对韧性目标所对应的贡献路径,以使韧性理念贯穿综合管廊全寿命周期设计得以实现。

相关研究表明,把韧性理念融入到综合管廊设计当中,可以有效提高其抗扰、吸收、进行恢复以及适应能力,并且推动城市生命线工程由被动防护朝着主动韧性方向转变。未来需要把智能化监测以及运维技术结合起来,完善多灾种耦合下韧性评估方法,推动设计标准与工程实践达成深度融合,构建全寿命周期也就是“规划-设计-建设-运维-更新”的闭环优化机制,为安全、可持续韧性城市的建设工作提供坚实的支撑。

参考文献

- [1] Holling, C.S. (1973) Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **4**, 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- [2] Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W.A. and Von Winterfeldt, D. (2003) A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, **19**, 733-752. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>
- [3] 温龙生. 韧性城市视角下小型综合管廊建设与城中村治理协同发展研究[J]. *工程建设与设计*, 2025(22): 227-229.
- [4] 白一平. 城市综合管廊风险系统性辨识与定量风险评估研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2024.
- [5] 黄东阳. 城市综合管廊燃气管道失效动态风险评估研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京石油化工学院, 2023.
- [6] 徐文庆. 内爆作用下不同加固方式圆形综合管廊响应特征研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
- [7] Cimellaro, G.P., Fumo, C., Reinhorn, A.M. and Bruneau, M (2009) Quantification of Disaster Resilience of Health Care Facilities. Tech. Rep. MCEER-09-0009, University of Buffalo.
- [8] 杨志龙. 城市综合管廊 CFRP-钢筋混凝土-聚脲结构抗爆性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2023.
- [9] 白超宇. 装配式地下综合管廊穿越活动地裂缝变形破坏机理研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2023.
- [10] 苗晗, 蒋录珍, 安军海, 等. 叠合装配式管廊结构抗震性能水平与评价方法研究[J]. *震灾防御技术*, 2023, 18(1): 53-64.
- [11] 欧阳康淼. 首都城市综合管廊建设韧性发展研究[J]. *城市管理与科技*, 2023, 24(1): 31-33.
- [12] 张海明. 基于防火视角的管廊工程韧性评价研究[J]. *建筑技术*, 2022, 53(10): 1383-1387.
- [13] 李腾飞. 城市综合管廊燃气爆炸动力响应试验研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2022.