

韧性城市理念下地下综合管廊抗震性能提升 关键技术研究

郑红昌

新疆红星建设工程（集团）有限公司，新疆 哈密 839000

DOI:10.61369/UAID.2024100001

摘要：随着城市化进程的加速，城市面临的自然灾害风险日益增加，韧性城市建设成为保障城市可持续发展的关键。地下综合管廊作为城市生命线工程的重要组成部分，其抗震性能直接关系到城市在地震等灾害下的正常运行。本文基于韧性城市理念，深入探讨了地下综合管廊抗震性能提升的关键技术。首先分析了地下综合管廊在地震作用下的破坏机理，接着从结构设计与优化、新型材料应用、减隔震技术以及智能监测与评估等方面阐述了提升抗震性能的关键技术手段，最后对未来的研究方向进行了展望，旨在为地下综合管廊的抗震设计、建设与维护提供理论支持和技术参考，助力韧性城市建设。

关键词：韧性城市；地下综合管廊；抗震性能；关键技术

Research on Key Technologies to Improve Seismic Performance of Underground Utility Tunnels under the Concept of Resilient City

Zheng Hongchang

Xinjiang Red Star Construction Engineering (Group) Co., LTD. Hami, Xinjiang 839000

Abstract： With the acceleration of urbanization, cities are facing increasing risks of natural disasters, making the construction of resilient cities a key factor in ensuring sustainable urban development. As an important component of a city's lifeline engineering, the seismic performance of underground utility tunnels is directly related to the normal operation of the city during disasters such as earthquakes. Based on the concept of resilient cities, this paper delves into the key technologies for improving the seismic performance of underground utility tunnels. Firstly, it analyzes the failure mechanism of underground utility tunnels under earthquake action. Then, it elaborates on the key technical means to improve seismic performance from aspects such as structural design and optimization, application of new materials, seismic isolation and mitigation technology, as well as intelligent monitoring and evaluation. Finally, the paper provides an outlook on future research directions, aiming to provide theoretical support and technical reference for the seismic design, construction, and maintenance of underground utility tunnels, and to contribute to the construction of resilient cities.

Keywords： resilient city; underground integrated pipe corridor; seismic performance; key technology

韧性城市强调城市在面对自然灾害、突发事件等冲击时，能够迅速恢复并保持基本功能的能力。地下综合管廊将电力、通信、给排水等多种管线集中敷设于地下隧道空间内，有效避免了传统直埋管线易受破坏、维修困难等问题，是城市基础设施现代化建设的重要标志。然而，地震作为一种极具破坏力的自然灾害，可能对地下综合管廊造成严重破坏，导致城市功能瘫痪。因此，在韧性城市理念下，研究地下综合管廊抗震性能提升关键技术具有重要的现实意义。

一、地下综合管廊地震破坏机理分析

（一）地震动特性影响

地震动的强度、频谱特性和持续时间等特性对地下综合管廊的破坏有重要影响。强震作用下，地震波的能量传递到管廊结构，使其产生惯性力。不同频谱特性的地震波与管廊结构的自振

频率相互作用，可能引发共振现象，导致结构动力响应加剧。而较长的地震持续时间会使管廊结构承受反复的振动作用，加速结构的疲劳损伤，增加破坏风险。

（二）场地条件作用

场地地质条件对地下综合管廊的地震响应有显著影响。软弱土层在地震作用下易发生较大的变形，导致管廊结构承受不均匀

的地基变形,产生附加应力,可能引发管廊结构的开裂、错位等破坏。而坚硬土层或岩石场地,地震波的传播特性不同,管廊结构受到的地震作用也有所差异。此外,地下水位的高低也会影响管廊结构的地震响应,高水位可能增加管廊结构的浮力,降低其稳定性。

(三) 管廊结构自身因素

管廊的结构形式、尺寸、材料性能以及施工质量等自身因素也会影响其抗震性能。不同结构形式的管廊(如矩形、圆形等)在地震作用下的受力特点不同,圆形管廊在承受内压和地震作用时具有较好的受力性能。管廊的尺寸越大,其惯性力也越大,对地震作用的响应越明显。材料性能方面,混凝土强度、钢筋的屈服强度等参数直接影响管廊结构的承载能力和变形能力。施工质量问题,如混凝土浇筑不密实、钢筋连接不牢固等,会降低管廊结构的整体性和抗震性能。

二、韧性城市理念下地下综合管廊抗震性能提升关键技术

(一) 结构设计与优化技术

在地下综合管廊结构设计与优化中,需从多方面着手以提升抗震性能。结构选型是基础,要依据场地条件与地震作用特点精准抉择。圆形管廊因在地震时应力分布均匀,抗弯、抗扭能力出色,在地质复杂、地震烈度高的区域优势尽显;而矩形管廊虽空间利用率高、施工便利,但抗震设计时需着重加强,可通过增加墙体厚度、设置暗柱等措施,强化其抗震表现。结构布置的合理性也至关重要。横断面布置上,要科学规划管线布局,既要避免管线相互干扰,又要为管廊结构预留充足空间,以抵御地震作用。纵断面布置时,需充分考虑地形与地质条件,合理设置伸缩缝、沉降缝等构造措施,以此适应地基可能发生的不均匀变形,降低地震作用下结构附加应力,防止因地基变形引发结构损伤^[1]。结构连接环节是保障管廊整体性的关键。采用预应力钢筋连接、螺栓连接等可靠方式,能确保管廊在地震时各部分协同受力,避免连接部位率先破坏。此外,还需强化管廊与周边土体的相互作用,通过设置土钉、锚杆等加固手段,提高管廊结构的侧向约束能力,增强其整体稳定性,使管廊在地震作用下能保持较好的力学性能与结构完整性。

(二) 新型材料应用技术

在地下综合管廊建设中,新型材料应用技术为提升其抗震性能提供了有力支撑。高性能混凝土凭借自身特性展现出显著优势,它具备高强度、高耐久性以及出色的抗渗性。将其应用于管廊结构,可大幅提升结构的承载能力与抗裂性能。在地震作用时,能有效减少结构损伤。采用高强等级的高性能混凝土,还能优化管廊结构设计,减小截面尺寸,降低结构自重,进而削弱地震作用影响。而且,高性能混凝土卓越的耐久性,使其能抵御地下复杂环境的侵蚀,如潮湿、酸碱腐蚀等,极大延长管廊结构的使用寿命,降低后期维护成本。纤维增强复合材料(FRP)同样表现亮眼,它具有高强度、轻质且耐腐蚀的特质。在管廊结构

里,FRP材料有多种应用方式。用FRP布包裹加固管廊,可显著增强结构的抗弯、抗剪承载能力,还能有效限制裂缝的扩展;以FRP筋替代传统钢筋作为受力筋,既能提升结构的抗拉性能,又避免了钢筋易锈蚀的问题,保障了管廊结构在长期使用过程中的稳定性,减少了因钢筋锈蚀引发的结构安全隐患。形状记忆合金(SMA)则拥有独特的形状记忆效应与超弹性性能。在管廊结构中合理设置SMA阻尼器、SMA连接件等部件,地震发生时,这些部件能够吸收并耗散大量地震能量,有效减小结构的动力响应^[2]。当管廊结构因地震产生变形后,SMA材料会凭借自身的相变特性恢复原状,实现自动复位,极大提高了管廊结构的抗震恢复能力,确保其在震后能尽快恢复正常功能。

(三) 减隔震技术

在地下综合管廊抗震技术体系中,减隔震技术是降低地震灾害影响、保障结构安全的关键手段,主要包括基础隔震、层间隔震与消能减震三类技术。基础隔震技术通过在管廊结构与基础间设置隔震层,切断地震能量向上部结构的传递路径。其中,橡胶隔震支座是常用装置之一,它兼具出色的水平变形能力与可靠的竖向承载能力。在地震作用下,橡胶隔震支座能够产生较大水平位移,使管廊结构自振周期有效延长,从而避开地震动的卓越周期,大幅减小地震作用对结构的影响。滑动隔震支座则依靠摩擦滑动机制发挥作用,当地震波传来时,支座通过摩擦滑动消耗地震能量,将结构加速度响应控制在较低水平,避免管廊结构因加速度过大而遭受破坏。对于多层管廊结构,层间隔震技术展现出独特优势。它通过在管廊各层之间设置隔震层,减少地震作用在层间的传递。该技术可根据管廊具体结构形式和所处区域的地震作用特点进行灵活设计,例如调整隔震层的刚度、阻尼等参数,实现针对性的抗震性能优化,提升管廊结构整体抗震能力。消能减震技术则聚焦于通过在管廊结构中设置消能装置来耗散地震能量^[3]。金属屈服阻尼器利用金属材料在塑性变形阶段的能量吸收特性,将地震能量转化为金属的内能;摩擦阻尼器借助摩擦力做功消耗地震能量;粘滞阻尼器利用粘滞流体的阻尼特性,将地震能量转化为热能散发出去。这些消能装置协同工作,有效减小管廊结构的地震响应,为管廊主体结构安全构筑起坚实防线。

(四) 智能监测与评估技术

在提升地下综合管廊抗震性能的进程中,智能监测与评估技术发挥着至关重要的“诊断师”与“决策参谋”作用,贯穿于结构安全保障的各个环节。传感器监测技术是获取管廊结构抗震状态信息的“触角”。在管廊的关键部位科学布置加速度传感器、应变传感器、位移传感器等多种类型传感器^[4]。加速度传感器宛如敏锐的“感知器”,精准捕捉管廊结构在地震波冲击下的加速度响应,其数据能直观反映地震作用强度,为判断地震对管廊的影响程度提供基础依据。应变传感器如同结构的“体检仪”,实时监测管廊结构的应变变化,哪怕微小的应变异常都能被及时察觉,进而判断结构是否已出现损伤隐患。位移传感器则像精准的“标尺”,精确测量管廊结构的位移情况,以此评估结构的变形程度,为判断结构是否处于安全变形范围内提供关键数据。数据传输与处理技术搭建起信息传递与深度挖掘的“桥梁”。建立高

效稳定的数据传输系统，确保传感器采集到的海量数据能实时、准确地传输至监控中心。借助大数据分析、人工智能算法等先进技术，对监测数据进行深度处理与分析，挖掘数据背后的潜在规律。通过不断学习大量监测数据，可构建出管廊结构的动力响应模型和损伤评估模型，实现对管廊结构抗震性能的实时评估与精准预警，提前预判可能出现的结构风险^[6]。健康诊断与决策支持技术是保障管廊结构安全运行的“指挥官”。基于智能监测与评估结果，对管廊结构的健康状况进行全面诊断。一旦监测数据出现异常或结构出现损伤，系统会立即发出预警信号。决策支持系统根据管廊结构的损伤程度和地震作用特点，迅速制定科学合理的维修加固方案，为管廊结构的维护和管理提供精准指导，助力管廊结构在震后快速恢复功能。

三、未来研究方向展望

（一）多学科交叉融合研究

在提升地下综合管廊抗震性能的研究领域，多学科交叉融合犹如强劲引擎，驱动着创新发展。这一复杂课题跨越土木工程、材料科学、地震工程、信息技术等多个学科边界，各学科优势互补、协同共进，方能攻克难关。土木工程为管廊抗震设计搭建起结构框架，奠定力学基础；材料科学聚焦微观特性，为结构赋予抗震“基因”，不断研发高强度、高韧性、耐腐蚀的新材料；地震工程深入剖析地震波传播规律与结构响应机制，为抗震设计提供科学依据；信息技术则搭建起实时感知与智能决策的桥梁。展望未来，应进一步深化多学科交叉融合。依托材料科学突破，开发具备能量吸收、自修复等特性的智能材料，增强结构韧性；借助信息技术浪潮，构建基于物联网、大数据的智能监测评估体系，实现全生命周期动态管理。通过多学科协同创新，为地下综合管廊打造坚不可摧的抗震防线，保障城市生命线工程安全稳定运行。

（二）复杂地质条件下抗震技术研究

在地下综合管廊的实际建设场景中，复杂地质条件犹如隐匿的“暗礁”，给抗震设计带来诸多难题。软土地区土体含水量高、压缩性大且强度低，地震作用下土体易发生流动变形，管廊结构易出现整体倾斜、差异沉降等问题，影响其正常使用甚至引发结

构破坏；岩溶地区地质构造复杂，地下溶洞、溶槽分布无规律，地震波传播时会在岩溶空洞处产生反射、折射，造成管廊结构局部应力集中，破坏风险加剧；断层破碎带岩体破碎、稳定性差，地震引发的断层错动会直接冲击管廊结构，产生巨大剪切力，导致结构开裂、错位。鉴于此，未来需加大对复杂地质条件下抗震技术的研究投入。结合不同地质特征，创新抗震设计方法，如软土区采用桩基础与隔震支座联合设计，岩溶区优化管廊线路与加强局部支护，断层破碎带设置缓冲耗能装置。同时，探索与之适配的施工工艺，保障管廊抗震性能。

（三）全寿命周期抗震性能研究

地下综合管廊作为城市地下“生命线”工程，设计使用年限通常长达数十年甚至上百年，其抗震性能并非一成不变，而是处于动态演变之中。在漫长的使用周期里，诸多因素会对管廊结构抗震性能产生显著影响。材料老化是重要一环，混凝土碳化、钢筋锈蚀等问题会逐步削弱结构强度与韧性；环境侵蚀同样不可小觑，地下潮湿环境、化学物质渗透等会加速结构劣化；地震作用累积效应也不容忽视，多次地震的冲击会使结构产生微小损伤并逐渐累积，降低抗震能力。为保障管廊结构长期安全运行，未来亟需开展全寿命周期抗震性能研究。深度融合材料科学、结构力学、环境科学等多学科知识，综合考虑上述因素，构建涵盖结构全生命周期的抗震性能评估模型。通过该模型，可精准预测不同阶段抗震性能变化趋势，提前制定维护加固策略，实现从设计、施工到运维的全过程抗震性能动态管控。

四、结论

在韧性城市理念下，提升地下综合管廊的抗震性能是保障城市安全运行的重要举措。本文从地震破坏机理分析入手，阐述了结构设计优化、新型材料应用、减隔震技术以及智能监测与评估等提升地下综合管廊抗震性能的关键技术。通过合理应用这些关键技术，可以有效提高地下综合管廊的抗震能力，减少地震灾害对城市的影响。未来，还需要进一步加强多学科交叉融合研究，解决复杂地质条件下的抗震技术难题，开展全寿命周期抗震性能研究，为地下综合管廊的抗震设计、建设与维护提供更加完善的理论和技术支持，推动韧性城市建设不断向前发展。

参考文献

- [1] 李刚, 赵文博, 杨梦柔. 地下管廊减隔震装置抗震性能分析 [J]. 西安科技大学学报, 2023, 43 (05): 933-940.
- [2] 叶志权, 董宏源, 梁厚燃, 等. 装配式地下综合管廊抗震性能影响因素分析 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (23): 10238-10246.
- [3] 任青, 王恒栋, 邹家坤, 等. 地下综合管廊抗震措施研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2022, 51 (01): 95-98+105.
- [4] 王辉. 装配式钢结构地下综合管廊应用技术研究 [J]. 建材与装饰, 2020, (11): 38-39.
- [5] 刘纯, 戚振强. 城市地下综合管廊建设管理模式及关键技术 [J]. 智能城市, 2017, 3 (03): 86.