

预制节段装配式综合管廊在地震作用下的动力响应分析

安然

中国市政工程华北设计研究总院有限公司第四设计研究院

摘要：针对预制节段装配式综合管廊在地震作用下的动力响应，本研究进行了全面分析，深入探讨了结构特性、材质选择与接合方式对其抗震性能的影响。通过时程分析与频谱分析方法，对地震作用引发的应力和变形响应进行评估，特别是对节段连接部位的响应进行了细致研究。考虑地震特性、土壤条件和结构布局等因素对动力响应的作用，提出了优化结构设计、改进节段连接技术以及应用抗震支撑和隔震系统的灾害减缓措施。

关键词：预制节段装配式综合管廊；地震动力响应；结构设计

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.16.040

引言

随着城市基础设施复杂度的增加，预制节段装配式综合管廊作为一种高效、可靠的地下设施运输解决方案，其抗震性能的研究显得尤为重要。考虑到地震对城市基础设施的潜在破坏力，理解和提高管廊的地震动力响应能力是保障城市安全运行的关键。本研究围绕管廊的设计特点、材料选用、连接方式及其在地震作用下的动力表现进行深入分析，旨在评估不同地震影响下的应力和变形响应，探索提升其抗震性能的有效途径。

一、预制节段装配式综合管廊的结构特点

（一）预制节段的设计与材料

预制节段式综合管廊的设计与材料选择关键在于确保结构的稳定性与耐久性，同时兼顾地震动力响应的要求。在设计阶段，主要采用高强度混凝土或钢筋混凝土，这些建筑材料不只具备优越的承载力，也能在一定程度上吸收及分散地震带来的能量，有效降低结构损伤。尤其是高性能混凝土，凭借其卓越的抗压强度与抗裂性能，使得预制节段在较大地震作用力下亦能保持完整无损。面对地震的影响，预制节段还需采用轻质化设计思路，减轻结构自身重量，从而减少地震作用下的惯性力影响。采用轻质材料，例如泡沫混凝土、轻质骨料混凝土等，既可以确保结构的强度，也助于显著降低总重。此外，材料选择还应考虑到环境适应性，确保在多变的环境条件（例如湿度、温度波动）下，维持其良好性能，避免因腐蚀或老化而影响使用寿命。

（二）装配式管廊的结构组成

装配式管廊以模块化预制单元为构建核心，其快速组装及高效施工特性显著。该管廊主要由底板、侧壁与顶板构成，各构件均于工厂预制，从而严格控制质量。

底板确保管廊稳定支撑，其设计充分考量了承重需求，适应多样的地质与负荷状况。侧壁在承载结构重量的同时，还需满足防水、防潮等要求，保障内部环境稳定。顶板设计除需确保结构安全外，也考虑到隔热与隔音性能，以营造良好的运营环境。连接各预制单元时，采取高强度螺栓或特制锁扣结构，以实现紧密连接，便于日后的维护与替换。此连接方式增强了结构的稳定性与密封性，并能在一定程度上缓解地震影响，提升抗震性能。管廊内部根据不同的功能需求设计了多样化的隔断，分隔出电力、通信、给排水等功能区，各区域的内部结构及材质选择均针对所承载管道的特点进行优化，以满足安全与功能划分的要求。如电力管线区域采用了防火、防爆材料，给排水区则注重防水与抗腐蚀能力^[1]。

（三）节段连接方式及其对结构性能的影响

节段连接技术在预制节段式综合管廊建设中具有决定性作用，它直接关系到管廊整体的稳固性、耐用性及抗震能力。其连接手段包括螺栓连接、焊接、粘接和专门设计的机械锁扣等多种形式。这些技术各有优势，选择时需综合考虑工程实际与抗震防护的需求。螺栓连接以其施工便捷、连接稳固及易于拆修的特点而受到广泛采纳。利用预置的孔位和高强螺栓可实现节段间的紧密连接，该方法在遭受地震影响时能够赋予结构一定的延展性和柔韧性，允许在承受地震力时有微小位移，避免了刚性连接可能引起的损坏。焊接作为永久连接手段，通过形成一体化结构，增强了整体刚度与密封性，适合对结构完整性及防水性有较高要求的应用场景。但在地震中，焊点可能变为应力集中的弱点，影响抗震性能。粘接利用高效胶粘剂连接节段，此法在降低结构重量、增强密封性上有其独特优势，其提供的柔性和减震能力有助于地震时分散应力，降低损伤。机械锁扣的独特设计通过精细机械结构达到快速而牢靠的连接，结合了螺栓的可拆性和焊接的一体化优点，在地震中能够适度调整位置，增加结构的适应性和弹性，减轻地震造成的伤害^[2]。

二、预制节段装配式综合管廊的地震动力响应分析

（一）分析方法概述（如时程分析、频谱分析等）

在预制节段装配式综合管廊的地震动力响应研究中，运用多元分析技术对结构在地震影响下的性能进行评估。时程分析和频谱分析，作为该领域的两大关键技术，被广泛采用以支撑研究，并为结构设计提供了科学的依据。时程分析，亦即时间历程分析，是通过引入真

实地震记录或模拟地震波，来直接评估结构在地震影响下的动态行为。此方法能充分反映地震作用的随机性与非线性特征，依据数值积分技术，估算出结构在地震期间的位移、速度与加速度等关键响应参数。其优点在于能详尽呈现结构面对具体地震作用时的动态响应过程，从而使工程师能精确评估结构的抗震能力及识别潜在风险点。频谱分析，则是依托结构的动态特征及地震动力的频谱属性进行的分析。它通过分解地震动力作用为不同的频率组成部分，并结合结构的固有频率与阻尼比，估计结构在主要频率处的反应。通常，频谱分析采用反应谱法，这一间接技术可有效预测结构在特定地震影响下可能遭遇的最大反应。与时程分析相较，频谱分析在计算效率方面具有显著优势，特别是在初步设计阶段或进行结构快速评估时尤为适用。这两种方法各具特色，时程分析提供深入的动态响应信息，有利于细致探究结构的抗震性；频谱分析则侧重于评估最大可能反应，适合于设计阶段的快速筛查及优化。

（二）地震作用下管廊的应力、变形响应

震力作用于管廊，结构内会产生复杂的应力分布及变形模式。这些应力与变形的规模与分布，直接影响到管廊的安全性及功能完整性。在地震初期，管廊结构可能主要展现出弹性响应，即变形完全由地震引发的应力所决定，并且在地震作用消失后能恢复至原始状态。随地震作用的持续与强度增加，结构可能进入弹塑性阶段，此时部分结构构件可能产生永久性变形。尤其是连接节点与支撑系统，它们可能成为应力集中的区域，其塑性变形对于评估结构的抗震性能至关重要。就应力响应而言，地震引发的剪切力与弯矩将直接作用于管廊的底板、侧墙及顶板上，使得这些结构构件呈现出不同程度的应力状态。在设计与分析过程中，须格外关注这些部件的应力水平，确保它们在最不利的地震影响下保持结构完整。变形响应涉及管廊的整体及局部位移、裂缝发展及结构总体稳定性。地震作用可能导致管廊发生横向滑移、纵向伸缩或局部屈曲等情况，控制这些变形对于确保管廊内部设施与管线的安全运行极为重要。过度的变形可能会引起管线断裂或设备损坏，从而影响城市基础设施的正常运行^[3]。

（三）节段连接部位的特殊响应分析

节段连接处在预制节段装配式综合管廊的地震动分析中具有极其重要的作用。作为结构整体的核心节点，这些连接处的响应对管廊的抗震性有着决定性作用。在地震影响下，连接处所承受的应力与变形既显现了结构的局部特性，也关系到整体的稳定与安全。地震力引起的动态负荷作用于管廊时，由于连接处的结构和材料属性，它们通常是应力集中的部位。这些区域可能承受比其他部分更大的剪力、拉力或压力，因而，其设计与施工必须保证能抵御这些力的影响，避免断裂或脱

节，这对维护管廊在地震期间的完整性至关重要。对连接处的特殊响应分析需要全面考虑连接方式、材料力学性能及地震动力特征。举例而言，螺栓连接处在地震中可能松动，焊接部分由于应力集中可能出现裂缝。因此，分析时须对这些潜在薄弱环节进行详细检视，评估不同地震情形下的响应表现。此外，连接部位的动态响应还受到整体构造和地震波传播特性的制约。地震波的不同频率成分可能使某些连接处发生共振，导致局部应力剧增。因此，特殊响应分析应包含频率分析，以识别潜在的共振危险并实施适当设计措施以防止或减缓此问题^[4]。

（四）影响因素分析（地震特性、土壤条件、结构布局等）

影响预制节段式综合管廊在地震影响下动态反应的因素复杂多样，涵盖了地震特性、土壤条件、结构设计等关键因素。这些要素的综合影响决定了管廊在地震发生时的性能表现及其安全性。地震的特征，包括震级、持续时间、加速度谱及频率成分，对管廊的动态反应具有决定性影响。地震类型的差异（例如，远场地震与近断层地震）会导致不同的地震波特性，进而对管廊产生不同的影响。举例而言，近断层地震通常伴随强烈的初动及高频成分，这可能会给管廊带来更为严重的损害。土壤条件同样是一个关键因素，影响管廊对地震的响应。不同类型的土壤（例如砂土、黏土和岩石）显示出不同的动态特性，如剪切波速和阻尼比等，这些特性会影响地震波的放大效果和频率成分。例如，软土层可能增强地震动的效果，而置于岩石基础之上的结构可能直接承受更高频率的震动。特别地，对于建立在松散饱和砂土之上的管廊，土壤液化现象是一个需要特别关注的风险。结构设计，如管廊的布局、跨越方式和内部隔断配置，对其抗震能力也具有重大影响。管廊的布局与地震波的传播方向有关，可能会影响地震作用下的应力分布和变形模式。跨越方式（例如直埋或架空）决定了管廊与地面或其他结构间的相互作用，从而影响其地震响应。内部隔断的配置不仅影响管廊的刚度和质量分布，也可能改变地震中内部组件的相互作用。

三、防震减灾措施与设计建议

（一）结构设计优化措施

结构设计的优化措施对于增强预制节段装配式综合管廊的抗震性能发挥着关键作用。这些建议包括材料的精心选择、结构布局的合理优化、连接节点的精细设计及新技术的应用，旨在提升管廊面对地震等自然灾害时的稳定与安全。在材料选择上，基于高强度和高韧性材料的使用是首要考虑因素。举例来说，高性能混凝土与高强度钢材的运用能显著增加承载力与延性，使得结构在遭遇地震力时能展现出更优的形变适应性，进而降低受损程度。同时，鉴于环境影响，挑选耐腐蚀、抗老

化材料有助于延伸管廊使用年限，并减少养护开销。关于结构布局的优化，则通过精心设计提升结构的整体及局部抗震能力。比如，实施灵活的管廊布局设计，可适配不同地理及地形条件，减轻地震影响。布局中引入隔震或减震装置，如隔震支座及减震器，有效隔绝地震能量，避免结构遭受重创。在连接节点设计上，注重细节的优化以确保连接部位的强韧性。采纳可靠的连接方案，例如预应力螺栓连接、高强度焊接技术，并设计充足的冗余度与适宜的变形容忍度，可在地震发生时减少节点破损的可能。此外，对连接部分实施易于检测和维护的设计，有利于及时识别及修复潜在损伤，确保结构的长期安全^[5]。

（二）节段连接技术的改进

节段连接技术的优化对预制节段装配式综合管廊的结构稳定性及其抗震性的提升发挥着关键作用。这些优化措施目的在于通过增强连接节点的可靠度、耐用性及适应性，确保在地震等自然灾害条件下，管廊系统能够维持其完整性与功能性。优化方案包括使用更高强度的连接材料，例如，采纳高性能钢或先进合金，这类材料能够增强承载力与延性，使得连接节点在面对更大应力时仍能保持稳定无损。同时，这些材料通常具备更优越的抗腐蚀特性，能在恶劣环境中维持长期稳定。技术优化亦涵盖连接方式的创新，比如，应用预应力技术能够在连接节点预先施加力量，提升结构的初始刚性和稳定性，进而降低地震影响下的结构位移与形变。引入新型机械锁扣系统，这类系统设计灵活，能够实现快速装拆且在地震作用下自动调整，有效分散应力，减轻局部损伤。连接技术的优化还包括接缝设计的精细化，通过精确控制接缝尺寸与形态及采用特殊填充材料，比如高弹性橡胶或定制黏合剂，增强接缝的密封和减震功能。该设计既阻挡水分和污染物侵入结构，也能在地震中吸收额外能量，减少结构损害。另外，增强连接节点的监控与检测技术也是优化的一环。通过传感器与实时数据分析，监控连接节点的应力与变形状况，及时识别潜在问题并实施维修或加固，极大增强管廊系统的安全性与可靠性。

（三）抗震支撑与隔震系统的应用

抗震支撑与隔震系统在提升预制节段装配式综合管廊的抗震性能上扮演着至关重要的角色。这些技术通过提高结构的刚度和韧性，或者通过隔离和减缓地震能量的传播，有效地减轻了地震对结构的影响，确保了管廊系统在地震期间的稳定性与安全性。抗震支撑系统通过向管廊结构中添加如交叉钢支撑、钢板剪力墙或加固混凝土墙等额外的支撑元件，提升了结构抵御地震力的能力。这些支撑元件在地震期间提供额外的水平与垂直刚度，有助于限制结构的横向位移和减少其变形。通过精心设计的支撑配置，显著增强了结构的整体及局部稳定

性，降低了因地震引起的损害。与此同时，隔震系统通过在结构基座与上部结构之间安装隔震支座，如橡胶隔震支座、滑动隔震系统或摩擦摆隔震装置，实现对上部结构与地震动力的有效隔离。这些隔震装置能够吸收并分散地震能量，限制地震作用对上部结构的影响，从而保护管廊不受严重损害。隔震系统的设计需考虑结构特性、地震特性及施工条件，以确保在各种地震强度条件下的有效性。抗震支撑与隔震系统的选用，需依据细致的地震风险评估和结构动力分析，兼顾结构的具体状况与地震作用的特征。这涉及地震动力参数、结构响应特性及土壤-结构互动等因素的评估。通过这些分析，能够合理地选择和布置抗震支撑与隔震系统，确保其性能达到设计要求。

四、结论

通过深入分析预制节段装配式综合管廊在地震作用下的动力学响应，本研究揭示了结构特性、材料选用、接合方式及地震特征等因素对其抗震性能的综合作用。利用时程分析与频谱分析方法，本文不仅精确评估了特定地震条件下管廊的动态响应，而且重点研究了节段连接部位的响应表现，为抗震设计提供了关键指导。进一步地，通过探讨不同因素对管廊地震响应的影响，本研究提出了一系列有针对性的设计优化和减灾策略，包括结构设计的优化、接合技术的改良及抗震支撑与隔震系统的应用，目的是提升管廊系统的整体抗震能力。这些成果为实际工程设计提供了宝贵的参考，对增强城市基础设施的抗震能力、确保城市安全稳定运行有着重要的作用。

参考文献

- [1]潘钦锋, 许立英, 郭瑞, 等. 干式连接分片预制装配式综合管廊的地震响应分析[J]. 南昌大学学报: 工科版, 2021, 43(4): 6.
- [2]王述红, 贺宇, 索善泽, 等. 预制装配式与现浇整体式综合管廊受力对比分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(9): 3.
- [3]黄鹤, 常萍. 预制装配式综合管廊不均匀沉降与节间纵向张拉力相关性分析[J]. 四川水泥, 2021(8): 90.
- [4]黄子渊, 汤爱平, 黄德龙, 等. 非均匀场地节段预制综合管廊接头地震响应分析[J]. 特种结构, 2022, 39(1): 10.
- [5]谷音, 邱诗榕, 熊梦婷, 等. 预制综合管廊-接头-场地土地震响应分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(3): 10.

作者简介: 安然(1979年06月), 男, 汉族, 河北阜城县人, 硕士研究生, 高级工程师, 职务: 所长、副总工, 研究方向: 地下综合管廊结构专业、建筑结构专业、水处理结构。