

城市轨道交通深基坑支护结构抗震性能浅析

齐东武

中铁第六勘察设计院集团有限公司 广东 广州 510000

摘 要:城市轨道交通深基坑施工工况复杂,周边环境制约因素多,支护结构的抗震稳定性是工程防灾减灾的关键。本文结合轨道交通基坑工程特点与区域地震地质条件,分析支护结构抗震工作机理,总结地震荷载作用下结构的受力特征、变形规律及失效形式。针对当前工程抗震设计适配性不足、施工管控疏漏、地质预处理不完善、监测运维体系滞后等突出问题,提出针对性优化策略。研究旨在提升深基坑支护结构抗震能力,降低地震引发的基坑失稳及次生灾害风险,保障城市轨道交通工程建设与运营安全。

关键词:城市轨道交通;深基坑;支护结构;抗震性能;结构优化

引言

城市轨道交通是现代化城市交通体系的核心骨干,地下线路与站点建设多依托深基坑工程完成。城市核心区基坑施工环境复杂,开挖深度大、周边建构筑物密集、地下管线交错,对支护结构的整体稳定性要求极高。我国多数城市处于地震设防区域,地震产生的动荷载会改变土体应力状态,极易诱发基坑支护变形、失稳等安全隐患。为有效防控地震灾害风险,保障轨道交通工程建设与运营安全,本文结合基坑工程抗震相关规范与现场工况,系统分析深基坑支护结构抗震工作现状,梳理现存典型问题并提出针对性优化对策。

1 工程概述与抗震基础理论

1.1 研究背景

城市化进程持续推进推动城市轨道交通网络快速扩张,中心城区轨道交通站点多依托密集建筑群、地下管线开展施工,深基坑工程成为轨道交通建设的核心分项工程。城市核心区域土地空间受限,轨道交通基坑普遍具备开挖深度大、支护跨度大、周边环境复杂的特点,结构稳定性直接关乎工程施工安全与周边建筑安全。我国地震带分布广泛,多数城市处于地震活跃区域,地震荷载引发的土体扰动、结构变形极易造成基坑支护开裂、位移甚至坍塌事故。随着轨道交通工程建设规模不断扩大,深基坑支护结构的抗震性能成为地下工程安全研究的重点内容,开展相关性能分析具备重要的工程实践价值。

1.2 深基坑支护结构抗震原理

城市轨道交通深基坑支护结构的核心作用是抵御基坑外侧土体压力、地下水压力及外部动荷载影响,维持

基坑土体平衡。地震发生时,地震波产生的往复剪切力会改变基坑周边土体的应力状态,打破原有土体与支护结构的受力平衡。支护结构抗震性能的核心体现为结构抵御地震荷载变形、维持整体完整性的能力。常见的轨道交通深基坑支护形式包括地下连续墙、排桩支护、钢板桩及复合支护结构,不同支护结构的刚度、整体性、抗变形能力存在明显差异,在地震作用下的响应特征各不相同^[1]。刚性支护结构整体刚度大,地震作用下变形量小,但易出现应力集中破损;柔性支护结构适配土体变形,不易发生整体性坍塌,但地震往复荷载作用下易产生累积残余变形。

1.3 工程抗震性能评价标准

现阶段城市轨道交通深基坑支护结构抗震性能评价,主要依托《建筑抗震设计标准》、《地下结构抗震设计标准》、《建筑工程抗震设防分类标准》、《建筑与市政工程抗震通用规范》、《城市轨道交通结构抗震设计规范》、等行业标准开展。评价核心指标包含结构最大位移、墙体沉降差、土体滑移量、结构应力峰值等静态与动态参数。规范根据城市抗震设防烈度、基坑开挖深度、周边环境重要性,划分不同的抗震设防等级,明确支护结构在多遇地震、罕遇地震作用下的变形限值与承载力要求。轨道交通深基坑作为重要市政基础设施,抗震设防标准高于普通建筑基坑,需满足小震无损、中震可控、大震不塌的基本抗震要求,保障地震工况下基坑结构不发生灾难性破坏,规避次生灾害发生。

2 城市轨道交通深基坑支护结构抗震现存问题

2.1 抗震设计体系适配性不足

当前多数轨道交通深基坑支护设计重点聚焦静态土

体压力、地下水压力的承载计算,对地震动荷载的动态响应考量不够全面。设计过程多采用简化地震计算模型,忽略城市中心城区复杂地质条件的影响,未充分考虑基坑周边土体分层特性、地下空洞、管线排布对地震波传播的干扰作用。部分设计人员沿用普通建筑基坑抗震设计参数,未结合轨道交通基坑大深度、大跨度、高荷载的工程特性调整设计指标,导致支护结构刚度、配筋率、锚固深度等参数与实际抗震需求不匹配。部分复合支护结构设计存在体系衔接漏洞,支护构件之间的抗震协同性不足,地震作用下局部结构受力过载,率先出现变形破损,进而引发整体结构失稳。

2.2 施工工艺管控影响抗震性能

施工环节的工艺偏差与质量缺陷是导致支护结构抗震性能衰减的重要因素。地下连续墙、排桩等主体支护结构施工时,若槽段清理不彻底、混凝土浇筑密实度不足、钢筋笼安装偏移,会造成结构内部存在缝隙、空洞等质量缺陷,大幅降低结构整体刚度与抗震承载力。锚杆、钢支撑等辅助支护构件施工中,张拉应力控制不精准、支撑安装垂直度偏差超标、节点焊接质量不达标等问题,会导致支护体系受力不均,地震荷载作用下节点位置易发生断裂、脱落^[2]。基坑开挖过程存在超挖、过快开挖等不规范施工行为,破坏周边土体原始应力结构,造成土体预沉降、微变形,降低土体与支护结构的协同抗震能力,加剧地震工况下的结构变形风险。

2.3 地质环境预判与处理不完善

城市轨道交通线路穿越区域地质条件复杂多样,软土、砂土、回填土等软弱地层分布广泛,此类地层抗震动扰动能力极差。部分工程前期地质勘察工作深度不足,仅开展常规土层参数检测,未针对性测试地层动力特性、地震响应参数,无法精准判断地震作用下土体液化、滑移风险。对于存在砂层、淤泥层的基坑场地,未落实有效的地基加固、防渗处理措施,地震发生时,软弱土层易发生液化沉降,导致支护结构底部悬空、受力失衡。部分基坑临近河道、地下水富集区域,地下水渗流作用会弱化土体强度,加剧地震引发的土体流变现象,进一步降低支护结构整体抗震稳定性。

2.4 抗震监测与运维体系滞后

现阶段轨道交通深基坑工程监测多聚焦静态变形、沉降数据监测,针对地震动态荷载的专项监测体系尚未普及。多数施工现场未布设地震动力监测设备,无法实时采集地震作用下支护结构的应力变化、动态位移、振动频率等核心数据,难以精准掌握结构抗震响应状态。

基坑运维阶段的抗震巡检工作流于形式,缺乏常态化的结构损伤排查、性能检测机制,支护结构长期受土体腐蚀、温差变化、车辆振动等因素影响,产生的微小裂缝、构件老化等缺陷不断累积,持续削弱结构抗震性能^[3]。同时,现有工程缺乏完善的地震应急处置预案,面对突发地震灾害,无法快速开展风险研判与应急处置,易导致灾害范围扩大。

3 城市轨道交通深基坑支护结构抗震性能优化策略

3.1 优化抗震设计方案提升适配性

城市轨道交通深基坑工程场地环境复杂,周边建筑物密集、地下管线错综复杂,常规静态抗震设计模式难以适配动态地震荷载的作用特征。为切实提升支护结构的场地适配性与抗震储备,需结合项目实际建设条件与地方抗震设防标准,对传统抗震设计体系进行改良升级,改变仅依靠静态土体荷载开展结构验算的单一设计方式,推行静态验算与动力仿真相结合的复合型设计模式。在设计前期,依托全方位、精细化的场地地质勘察成果,结合场区土层分布、地下构筑物排布、管线敷设情况等关键因素,建立贴合现场真实工况的地震动计算模型,精准分析地震波传播过程中的衰减、折射与扰动规律,准确测算支护结构在地震往复荷载作用下的应力分布与形变特征。结合基坑开挖深度、场地抗震设防烈度及周边环境保护等级,灵活选用适配的支护结构类型,针对超深、高风险轨道交通基坑,优先采用地下连续墙搭配多层钢支撑的复合支护体系,有效增强结构整体刚度与整体协同性。同时细化结构参数设计工作,科学调整结构配筋规格、锚固埋设深度及支撑布设间距,优化各构件节点的连接构造方式,让各支护单元可以均匀分担荷载,缓解局部应力集中问题,稳步提升支护结构整体抗震承载性能。

3.2 规范施工工艺严控施工质量

施工质量是决定深基坑支护结构抗震能力的关键环节,需依托全过程精细化管控模式,消除施工瑕疵带来的抗震性能衰减问题。主体支护结构施工期间,需严格把控地下连续墙、排桩成型关键工序,彻底清理槽段杂物与沉渣,采用分层匀速浇筑方式完成混凝土施工,精准定位钢筋笼安装位置,并根据现场温湿度条件落实标准化养护工序,有效规避墙体空洞、疏松、偏位等质量问题,保证支护主体结构整体密实度与受力均匀性。锚杆与钢支撑等临时支护构件施工时,需按照设计标准精准把控张拉数值与安装偏差,重点核查节点焊接焊缝厚度、锚固牢固程度,杜绝节点松动、受力不均等问题。基坑土方开挖严格遵循分层分段、对称平衡的施工

要求,合理把控单次开挖深度与推进速率,杜绝超挖、突挖等违规操作,维持基坑周边土体原始应力平衡状态^[4]。现场同步落实常态化抽检与工序验收制度,针对结构整体刚度、节点承载强度及周边土体稳定状态开展专项核查,及时排查并整改施工隐患,从施工源头保障支护结构抗震性能满足工程设防要求。

3.3 强化复杂地质条件预处理

城市轨道交通基坑场地土质条件错综复杂,软弱夹层、松散砂层与地下水富集地层分布不均,这类特殊土质在地震动扰动下极易出现强度衰减,是诱发支护结构失稳的核心诱因。为有效改善场地抗震基础条件,需针对性落实场地勘察与预处理加固工作。工程前期需细化地质勘察内容,不再局限于常规静力参数检测,重点摸排场区软弱土层、砂质土层的动力响应特征,精准定位地震作用下易发生液化、滑移的危险区域,为后续加固方案制定提供真实依据。针对基坑基底及侧壁周边的软弱土体,结合场地实际工况选用高压旋喷、深层注浆、土体换填夯实等成熟工艺,有效提升土体密实度与整体整体性,大幅增强土层抵御地震扰动的能力,杜绝地震工况下土体液化、不均匀沉降等问题。同步配套完善基坑防渗排水系统,依托止水帷幕、降水井点等设施阻断地下水渗流通道,减少水体侵蚀对土体结构强度的破坏。毗邻河道、低洼地貌的基坑场地,还需增设边坡防护与防冲刷构造,全方位夯实地基稳定性,为支护结构平稳受力、抵御地震荷载提供可靠的场地基础。

3.4 搭建智能化抗震监测运维体系

为补齐轨道交通深基坑抗震管控短板,需结合现代智能监测技术,搭建适配地下基坑工况的动态监测与运维管理体系。摒弃传统单一静态监测模式,在基坑墙体主体、钢支撑连接节点、周边土体关键点位布设高精度监测设备,持续捕捉地震工况下结构振动幅度、瞬时位移、应力波动等关键数据,实现基坑抗震状态全天不间断管控。通过配套的数据处理系统整合现场监测信息,完成数据筛选与动态分析,精准判别支护结构形变异常、受力超标等安全隐患,第一时间推送预警信息,为现场管控预留处置时间^[5]。日常运维工作中,落实定期人工巡检与设备检测相结合的管理模式,逐一排查结构表层裂缝、构件老化、连接松动等细微损伤,及时开展修复加固处理,防止微小缺陷长期累积引发结构抗震性能大幅下降。结合场地

抗震设防要求与工程实际情况,细化地震应急处置流程,明确灾害发生后的隐患排查、现场防护、险情管控等工作内容,快速化解地震带来的安全隐患,全面保障基坑结构与周边市政环境的整体安全。

3.5 完善抗震管理制度与应急体系

技术优化是提升基坑抗震能力的核心,完善的抗震管理制度与应急体系则是重要保障。当前轨道交通基坑工程多侧重施工技术管控,地震专项管理机制不够健全,岗位权责模糊,日常抗震管控较为松散。针对上述问题,可结合工程实际建立标准化抗震管控体系,明确各参建单位岗位职责,将抗震隐患排查、设备养护、技术核验等工作纳入日常管理,杜绝人为管控疏漏。依据场地抗震设防要求制定分级地震应急方案,细化地震灾害发生后的现场管控、隐患排查与加固修复流程。定期开展抗震专项培训与应急演练,提升工作人员险情处置能力,高效控制灾害发展。制度管理与技术优化相互配合,可形成全方位抗震防护体系,有效提升深基坑支护结构的安全储备。

结束语

综上所述,深基坑支护结构抗震性能直接决定城市轨道交通地下工程的安全底线。目前轨道交通深基坑工程在抗震设计、施工管控、地质处理、智能运维等方面仍存在诸多不足,地震荷载与复杂工况叠加会显著放大工程风险。通过优化抗震设计方案、规范标准化施工流程、强化复杂地质预处理、搭建智能监测运维体系,可有效提升支护结构抗震稳定性。后续需持续结合场地地质条件优化抗震技术,切实规避地震灾害隐患,保障轨道交通工程长期安全稳定运行。

参考文献

- [1] 曹萌芽.城市轨道交通大型地下空间结构抗震性能设计[J].工程建设和设计,2021,(19):91-93+120.
- [2] 杨威.城市轨道交通土建施工中深基坑支护技术的优化应用[J].流体测量与控制,2026,7(3):103-106.
- [3] 施卫华.轨道交通土建施工深基坑支护结构健康状态评估研究[J].时代汽车,2026,(6):151-153.
- [4] 王彬.城市轨道交通地下结构抗震性能分析与研究[J].江苏建筑,2025,(1):15-19.
- [5] 申子龙.地铁车站深基坑支护结构变形机理及控制技术[J].广东建材,2026,42(1):88-91.