

深基坑工程装配式边坡支护体系设计与受力特性研究

汪雪兰 禹梦洋 欧阳乐

中铁第四勘察设计院集团有限公司 湖北 武汉 430000

【摘要】 传统深基坑边坡支护多采用现浇混凝土、土钉墙等工艺，存在现场湿作业多、施工周期长、材料损耗大、拆除困难、环境污染突出等问题，难以适配绿色施工与快速施工要求。装配式边坡支护凭借模块化预制、现场拼装、可回收复用、绿色低碳等优势，成为深基坑支护技术的重要发展方向。为明确装配式支护体系的工程适配性与受力规律，本文以城市城区深基坑工程为依托，设计模块化装配式钢框架边坡支护体系，完成体系整体结构、节点连接、锚固系统优化设计，结合 Midas GTS 有限元软件开展基坑开挖全过程数值模拟，系统研究支护结构应力分布、侧向变形、土体位移及节点受力特性，对比传统支护与装配式支护的受力与变形差异。工程实测表明：优化后的装配式支护体系受力均匀、整体性强，基坑最大侧向变形控制在 15mm 以内，土体沉降量显著降低，相较于传统土钉墙支护，施工工期缩短 30%，材料回收率达 90%以上。研究结果可为深基坑装配式边坡支护的结构设计、受力优化及工程应用提供理论支撑与实践参考。

【关键词】 深基坑工程；装配式边坡支护；体系设计；节点构造；受力特性；数值模拟

1 绪论

1.1 研究背景与意义

随着城市更新与地下空间开发持续推进，城区深基坑工程呈现开挖深度大、周边环境复杂、施工场地受限、环保要求严苛等特点。常规现浇式边坡支护、土钉墙、排桩支护工艺依赖大量现场浇筑、养护作业，施工工序繁琐，产生大量建筑垃圾与扬尘污染，且支护结构刚度不均、后期拆除难度大，临时支护结构无法周转复用，工程经济性与环保性较差。

装配式边坡支护采用工厂标准化预制构件、现场快速拼装的施工模式，构件精度高、施工速度快、可循环利用，契合建筑绿色化、工业化发展趋势。但现阶段装配式支护体系存在结构设计不统一、节点受力复杂、整体协同性差、受力演化规律不明确等问题，部分工程因节点设计不合理、受力验算不精细，出现支护局部变形超标、节点松动、边坡滑移等隐患。因此，开展深基坑装配式边坡支护体系优化设计与受力特性系统研究，明确结构受力、变形演化规律，对完善装配式基坑支护设计体系、提升施工安全性、推动绿色基坑工程发展具有重要理论与工程价值。

1.2 国内外研究现状

国外较早开展装配式基坑支护技术研究，已形成标准化、模块化钢支护体系，依托精细化数值模拟实现结构受力精准验算，构件适配性与复用率较高，但成套体系造价偏高，适配国内复杂地层的参数优化不足。国内学者针对装配式基坑支护开展大量研究，多数研究聚焦单一施工工艺优化与工程应用，验证了装配式支护高效、绿色的优势；部分研究通过数值模拟分析支护变形规律，但对装配式支护整体体系设计、节点受力特

性、结构与土体协同作用机制的系统性研究较为薄弱，尚未形成完善的设计与受力分析体系，制约了该技术的规模化推广应用。

1.3 研究内容与技术路线

本文主要研究内容：一是结合深基坑边坡支护工况，优化设计模块化装配式钢框架支护体系，完善主体结构与节点构造设计；二是利用有限元数值模拟，分析基坑分层开挖过程中支护结构应力、侧向变形、土体沉降及节点受力特性；三是对比装配式支护与传统支护的力学性能与工程效益；四是结合现场监测数据验证体系可靠性，总结装配式支护受力规律与设计施工要点。

技术路线：工程工况分析→装配式支护体系优化设计→有限元模型建立与工况模拟→受力变形特性分析→传统与装配式方案对比→现场监测验证→结论与技术总结。

2 工程概况与支护难点

2.1 工程概况

本工程为城市核心区商业综合体深基坑项目，基坑开挖尺寸 95m×62m，最大开挖深度 11.2m，属于二级深基坑工程。场区地层自上而下依次为杂填土、粉质黏土、粉土，土体承载力偏低、压缩性高，边坡自稳性较差。基坑周边紧邻市政道路、居民建筑及地下管线，环境保护与变形控制要求严格，施工禁止大面积湿作业，需采用绿色、快速、高精度的边坡支护工艺。原设计传统土钉墙支护存在施工慢、污染大、不可回收等问题，拟优化采用装配式边坡支护体系。

2.2 深基坑边坡支护核心难点

(1) 地层稳定性差：表层杂填土松散，粉质黏土遇水易软化，基坑开挖过程中边坡易出现滑移、坍塌、表层剥落等病害。

(2) 变形控制严格：周边建构筑物及管线对沉降、位移敏感度高，需严格控制边坡侧向变形与地表沉降。

(3) 施工工况受限：城区施工场地狭窄、环保管控严格，传统现浇支护湿作业多、扬尘大、工期长，无法满足施工要求。

(4) 装配式体系受力复杂：模块化拼装结构节点多，受力传递路径复杂，易出现应力集中、节点受力不均、整体协同性不足等问题。

3 装配式边坡支护体系优化设计

3.1 支护体系整体方案设计

结合工程工况，优化设计模块化钢框架+预应力锚杆+预制防护面板装配式边坡支护体系。整体结构由竖向工字钢立柱、横向槽钢横梁、预制钢筋混凝土防护面板、预应力锚固系统、专用连接节点组成，所有钢构件工厂标准化预制加工，现场螺栓拼装连接，无现场焊接、无现浇养护作业，可实现快速施工、循环复用。

体系设计核心参数：竖向立柱采用 I20b 工字钢，间距 1.5m；横向横梁采用 [16a 槽钢，竖向间距 2.0m；预制防护面板厚度 80mm，工厂预制 C30 混凝土面板；锚杆采用 $\Phi 28$ 精轧螺纹钢，锚固长度 8.0m，水平间距 1.5m、竖向间距 2.0m，与框架节点精准对应，实现受力集中传递、结构协同承载。

配图说明 1：深基坑装配式边坡支护体系整体结构示意图

3.2 关键节点构造优化设计

节点是装配式支护体系受力薄弱环节，传统拼接节点存在接触面小、螺栓受力不均、易松动变形等缺陷。本文优化设计一体化刚性连接节点，采用加厚钢板连接板+双螺栓对称紧固结构，连接板厚度 12mm，配套 10.9 级高强螺栓，增大节点接触面积，避免局部应力集中。同时在梁柱节点位置设置加劲肋板，提升节点抗剪、抗弯承载力，有效解决拼装结构整体性差、节点易变形的问题。

3.3 支护体系设计优势

相较于传统支护体系，优化后装配式支护优势显著：一是工业化预制生产，构件精度高，结构刚度均匀，受力传递稳定；二是现场纯拼装作业，施工速度快，无湿作业污染，绿色环保；三是钢构件可完全拆卸回收、周转复用，大幅降低材料成本；四是节点刚性强，整体协同受力性能优异，变形控制效果好。

4 有限元数值模拟与受力特性分析

4.1 有限元模型建立

采用 Midas GTS NX 有限元软件建立基坑三维数值模型，模型尺寸 $200\text{m} \times 150\text{m} \times 30\text{m}$ ，包含土层、装配式支护结构、锚杆、防护面板等组件。土体采用摩尔-库伦本构模型，钢结构采用弹性本构模型，锚杆采用植入式桁架单元，精准模拟结构与土体协同受力状态。模拟基坑分层开挖工况，分层开挖厚度 2.0m，共 6 层开挖至设计标高，分析各开挖阶段支护结构应力、变形、土体沉降及节点受力规律。

4.2 模拟计算参数设置

材料类型	弹性模量/MPa	泊松比	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
杂填土	18.5	0.32	18.2	8.0	16.0
粉质黏土	32.0	0.28	19.5	22.0	22.0
粉土	45.0	0.25	20.0	16.0	26.0
Q235 钢结构	2.06×10^5	0.30	78.5	—	—

4.3 支护体系受力特性分析

通过多工况数值模拟，总结装配式边坡支护核心受力特性：一是应力分布均匀，钢框架主体结构最大应力 142.6MPa，小于钢材屈服强度，无局部应力集中现象，优化后的刚性节点可有效传递土体侧向压力，结构整体受力均衡；二是应力随开挖深度增加呈梯度增长，每层开挖完成后短时间内应力小幅增长并快速趋于稳定，结构受力稳定性良好；三是锚杆与钢框架协同受力显著，锚杆承担大部分侧向土压力，框架结构起到整体约束、均匀传力作用，大幅提升边坡整体稳定性。

4.4 结构变形与土体沉降特性分析

各开挖阶段支护结构侧向变形与地表沉降数据如下表所示。

开挖工况	开挖深度/m	支护最大侧向变形/mm	地表最大沉降/mm
第一步开挖	2.0	4.2	2.1
第二步开挖	4.0	7.5	4.3
第三步开挖	6.0	9.8	6.2
第四步开挖	8.0	12.1	7.9
第五、六步开挖	11.2	14.5	9.2

由数据可知，基坑开挖全过程支护结构变形呈“上部小、中部大、底部收敛”的分布规律，最大侧向变形出现在基坑开挖深度中部位置，终期最大变形仅 14.5mm，远低于规范 30mm 限值；地表沉降整体平缓，无突变沉降，表明装配式支护体系整体刚度大、变形控制能力强，可有效约束土体位移，保障边坡稳定。

配图说明 2：基坑支护结构侧向变形与土体沉降云图

5 装配式与传统支护方案对比分析

为验证装配式支护体系的综合优势，从力学性能、施工效率、环保效益、经济效益四个维度，与传统土钉墙支护进行对比分析。

(1) 力学性能: 传统土钉墙支护整体性较弱, 土体变形不均匀, 最大侧向变形可达 22mm; 装配式支护结构整体性强、受力均匀, 变形控制精度提升 34%, 边坡稳定性更高。

(2) 施工效率: 传统土钉墙需钻孔、注浆、养护、喷浆等多道湿作业, 单段边坡施工周期 12d; 装配式支护纯拼装作业, 无需养护, 施工周期仅 8d, 工期缩短 30%。

(3) 环保效益: 传统支护产生大量混凝土废渣、扬尘, 材料一次性使用无法回收; 装配式钢构件回收率超 90%, 无建筑垃圾, 湿作业极少, 绿色环保优势突出。

(4) 经济效益: 传统支护材料不可复用, 综合造价偏高; 装配式构件可多次周转, 单次工程材料成本降低 25%以上, 长期复用经济效益显著。

6 现场施工控制与监测验证

6.1 现场施工关键控制要点

构件进场前严格校验预制尺寸、钢材材质、螺栓精度, 杜绝不合格构件进场; 边坡开挖严格分层分段施工, 随挖随支护, 缩短土体裸露时间; 框架拼装保证节点贴合紧密, 高强螺栓采用扭矩扳手统一紧固, 确保节点受力均匀; 锚杆张拉分级加载, 锁定预应力值, 保障土体与支护结构协同受力; 施工完成后定期检查节点紧固状态, 防止后期松动变形。

6.2 现场监测结果验证

基坑施工全过程布设监测点位, 实时监测边坡侧向位移、地表沉降、支护应力变化。实测结果表明: 基坑全程最大侧向

变形 14.2mm, 地表最大沉降 8.9mm, 与数值模拟结果高度吻合, 无变形超标、边坡滑移、节点松动等问题, 支护体系受力稳定、成型质量优良, 完全满足规范及工程使用要求。

7 结论与展望

7.1 结论

1) 针对深基坑边坡支护痛点, 优化设计的模块化钢框架装配式支护体系, 通过刚性节点与锚固系统协同设计, 解决了传统装配式支护整体性差、节点应力集中、受力不均的缺陷, 结构整体刚度大、协同受力性能优异。

2) 装配式支护结构受力分布均匀, 变形呈梯度稳定增长, 基坑最大侧向变形控制在 15mm 以内, 地表沉降平缓, 相较于传统土钉墙支护, 变形控制精度显著提升, 可有效保障深基坑边坡稳定性。

3) 装配式边坡支护施工高效、绿色低碳、可循环复用, 相较于传统工艺, 施工工期缩短 30%, 材料回收率超 90%, 综合成本降低 25%, 兼具力学性能优势与经济环保价值, 适配城区深基坑绿色快速施工需求。

7.2 展望

本文研究的装配式支护体系适用于常规土层深基坑边坡工程, 后续可结合复杂岩土地层、超大深基坑工况, 进一步优化构件参数与节点构造; 同时可结合智能监测技术, 构建装配式支护结构受力变形实时预警体系, 进一步提升装配式基坑支护工程的智能化、精细化管控水平。

参考文献:

- [1] 曹文昭, 吴旭君, 张兴杰. 装配式基坑支护技术发展现状与展望[J]. 工业建筑, 2025, 55(04):168-179.
- [2] 钟立超, 蒙强, 罗贤民. 深大基坑边坡绿色装配式面层防护结构受力与变形分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(08):156-161.
- [3] 陈伟, 陈晓洁. 深大基坑轴向拉压双向受力装配式支撑结构施工技术[J]. 施工技术, 2024, 53(15):26-30.
- [4] 张宇, 李博文. 深基坑装配式钢框架支护结构受力特性及优化设计[J]. 岩土工程技术, 2024, 38(02):102-107.
- [5] 刘阳. 城市深基坑装配式可回收支护施工与变形控制研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(11):89-94.
- [6] 陈浩. 模块化装配式基坑边坡支护体系施工应用研究[J]. 工程质量, 2024, 32(05):72-76.
- [7] Zhang C, Li S. Mechanical properties and optimization design of prefabricated slope support for deep foundation pit[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 92:109876.