

条形底板地连墙基坑斜撑段倒撑必要性研究^{*}杨开武^{1,2} 罗正高³ 蒋明伟^{1,2} 祝建勋³ 杨春阳³

(1. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 100065, 北京; 2. 城市轨道交通全自动运行系统与安全监控北京市重点实验室, 100065, 北京; 3. 北京安捷工程咨询有限公司, 100050, 北京)

摘 要 [目的] 为节约工程投资, 部分基坑斜撑段采用未完全封闭的条形底板进行基坑封底, 拆除这类基坑的最下部支撑后, 地连墙会发生较大突变。需研究条形底板地连墙基坑斜撑段倒撑施作的必要性及不同倒撑的基坑变形控制效果。[方法] 以北京地铁某拆撑后未施作倒撑且围护结构产生变形预警的基坑为案例, 通过监测数据分析拆撑后该基坑围护结构变形情况, 结合数值模拟研究不同类型倒撑对该基坑变形的控制效果。[结果及结论] 超宽薄壁地连墙基坑斜撑段拆撑后, 基坑变形超过设计阈值, 对这类基坑必须规范施作倒撑; 水平倒撑和斜倒撑的基坑变形率分别为 0.078 和 0.366, 变形量相差 4.68 倍, 水平倒撑的变形控制效果明显优于斜倒撑的; 满堂红脚手架作为倒撑替代方案, 该类基坑变形率为 0.166, 效果优于斜倒撑的而弱于水平倒撑的; 不同类型倒撑中, 仅水平倒撑和满堂红脚手架可将拆撑后基坑变形控制在设计阈值内; 完全封闭的底板结构在基坑拆撑受力转换阶段作用充分, 基坑变形率为 0.304。

关键词 轨道交通; 基坑; 条形底板; 围护结构; 倒撑

中图分类号 TV552.4⁺2:U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.029

Necessity of Inverted Supports in the Inclined Strut Section of the Foundation Pit with Strip Bottom Plate and Diaphragm Wall

YANG Kaiwu^{1,2}, LUO Zhenggao³, JIANG Mingwei^{1,2}, ZHU Jianxun³, YANG Chunyang³

(1. Beijing Municipal Rail Transit Construction Management Co., Ltd., 100065, Beijing, China; 2. Beijing Key Laboratory of Fully Automatic Operation and Safety Monitoring for Urban Rail Transit, 100065, Beijing, China; 3. Beijing Agile-Tech Engineering Consultants Co., Ltd., 100050, Beijing, China)

Abstract [Objective] In order to save project investment, strip bottom plates that are not fully closed are used for the foundation pit bottom sealing in some foundation pit inclined strut sections. After the removal of the lowest supports in such foundation pits, there will be a large abrupt change in the dia-

phragm wall. It is necessary to study the necessity of constructing the inverted support in foundation pit inclined strut sections with diaphragm wall and strip bottom plates, and the deformation control effects of the foundation pits with different inverted supports. [Method] In a case study of a metro line foundation pit in Beijing without inverted support after the support removal, an early warning of the retaining structure deformation occurred. The deformation of the retaining structure of the foundation pit after the support removal is analyzed through the monitoring data. Based on numerical simulation, the deformation control effects of different inverted support types on the foundation pit are studied. [Result & Conclusion] After the support removal in the inclined strut section of the foundation pit with an ultra-wide and thin-walled diaphragm wall, the deformation of the foundation pit exceeds the design threshold. For such foundation pits, it is necessary to standardize the construction of the inverted support. The deformation rates of the foundation pits with horizontal inverted support and inclined inverted support are 0.078 and 0.366 respectively, which differ by 4.68 times. The deformation control effect of the horizontal inverted support is significantly better than that of the inclined one. When the full-height scaffold is used as an alternative scheme for the inverted support, the foundation pit deformation rate is 0.166, with a better effect than that of the inclined inverted support but weaker than that of the horizontal inverted support. Among different types of inverted supports, only the horizontal one and the full-height scaffold can control the deformation of the foundation pit after the support removal within the design threshold. The fully closed bottom plate structure produces sufficient effects in the stress conversion stage of the foundation pit after the support removal, and the deformation rate of the foundation pit is 0.304.

Key words rail transit; foundation pit; strip bottom plate; retaining structure; inverted support

^{*}北京市轨道交通建设管理有限公司双创基金项目(SCJJ2025001)

0 引言

随着城市地下空间开发加速,基坑工程规模随之扩大,施工与设计工况的符合性是安全关键。土方转结构施工涉及内支撑拆除及倒撑施作,拆撑后存在部分基坑监测异常情况。研究表明,深基坑支护变形峰值多出现在拆撑及倒撑阶段,因此重视拆撑与倒撑设计及施工显得尤为重要。

在支撑拆除后的基坑变形控制方面,已有诸多研究成果。文献[1]提出考虑施工过程的增量算法,经大量工程实践验证,通过该方法可算出基坑开挖支护结构变形量;文献[2]推导出单道内支撑拆除后变形公式,并基于此探讨了支撑施工对周边的影响;文献[3]结合实例通过监测数据研究支撑拆除施工的影响规律;文献[4]聚焦拆除方法对支护变形影响研究;文献[5]总结了深基坑倒撑施作控变形法,剖析了特殊倒撑的特点;文献[6]从设计施工角度探究了排墙斜支撑拆撑、倒撑内力变形;文献[7]介绍了混凝土内支撑拆除技术;文献[8]提出在爆破拆除时遵循“先切后爆”控变形;文献[9]探讨了地下结构建设滞后时支撑拆除的影响;文献[10]用弹塑性有限元分析拆撑影响。

综上所述,已有研究多从不同角度剖析拆撑后的基坑变形机理,缺乏对不同倒撑及满堂红支架影响的分析,也未量化其控制基坑围护结构变形成效。本文针对基坑倒撑设置必要性进行探讨,并分析不同倒撑(含替代方案)的控制变形效果。

1 工程概况

1.1 基坑工程特点

本文选取北京地铁某拆撑后围护结构变形预警的明挖区间基坑进行研究。基坑长度为120.3 m,宽度达41.2 m,深度为18.6 m,围护结构采用600 mm厚地下连续墙,采用工字钢接头。支撑体系采用3道钢支撑,最下部设置1道倒撑。

案例基坑特殊设计在于北端两盾构井间采用非封闭式混凝土板撑(条形底板),导致拆撑后底板对端墙的横向约束显著弱化;同时,斜撑段因施工缺陷引发应力不足,叠加600 mm地连墙自身刚度偏弱,多因素耦合作用下,最下部支撑拆除后围护结构产生突变。案例基坑平面结构,以及围护结构与水文地质剖面如图1和图2所示。

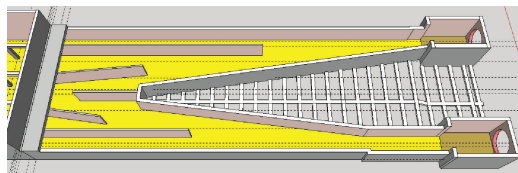


图1 案例基坑平面结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the planar structure of the foundation pit in the case

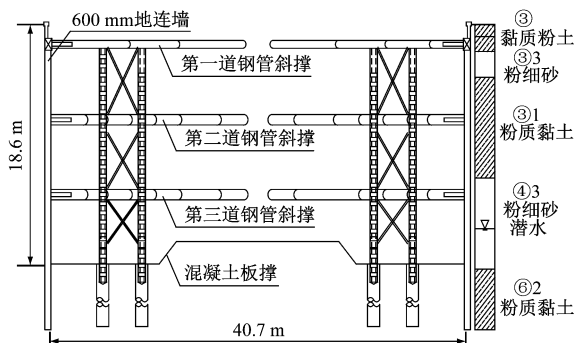


图2 案例基坑围护结构与水文地质剖面图

Fig. 2 Profile diagram of the retaining structure and hydrogeological conditions of the foundation pit in the case

1.2 工程地质条件与周边环境

基坑地层依次为黏质粉土③、粉细砂③3、粉质黏土③1、粉细砂④3、粉质黏土⑥2。开挖范围内地下水主要为潜水,地下水位约15 m。地层参数如表1所示。此基坑无环境风险。

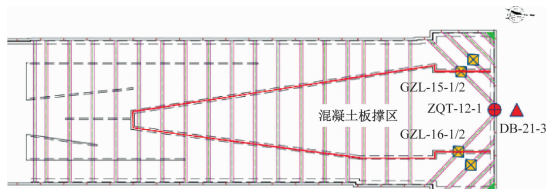
表1 案例基坑土层物理力学性质

Tab. 1 Physical and mechanical properties of soil layers in the foundation pit of the case

地层	层厚/ m	重度/ (kN/m^3)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^\circ$)	弹性模 量/MPa
③黏质粉土	10	20.0	14	27.5	19
③3 粉细砂	8	19.5	0	25.0	25
③1 粉质黏土	4	19.7	33	14.5	9
④3 粉细砂	4	19.5	0	25.0	25

2 拆撑预警与监测数据分析

案例基坑北端斜撑段拆除第三道支撑后,北端墙(ZQT-12-1)变形增量达20 mm(触发红色预警),连带引发上部第二道钢斜撑轴力突增近1 000 kN,同时北侧地面(DB-21-3)段沉降量达31 mm,多指标同步恶化,表明拆撑阶段围护结构与土体动态响应存在强耦合风险。图3为监测预警平面图。



注:GZL-15-1/2、GZL-16-1/2—支撑轴力测点;ZQT-12-1—墙体测斜测点;DB-21-3—地面沉降测点。

图3 监测预警平面图

Fig.3 Planar diagram of monitoring and early warning

2.1 墙体测斜分析

2018年7月16日,案例基坑北端盾构井第三道支撑拆除后,北端墙累计变形量由20 mm骤增至43 mm(2天阶段变形超20 mm,触发红色预警),主因是支撑拆除导致墙后土体应力瞬时释放,且既有条形底板约束失效。7月18—26日采取工字钢斜倒撑+板撑间混凝土回填措施后,墙体变形速率由10.0 mm/d降至0.5 mm/d,8 d内仅增4 mm(累计至47 mm),围护结构变形收敛,风险受控。案例基坑北端墙墙体变形曲线如图4所示。

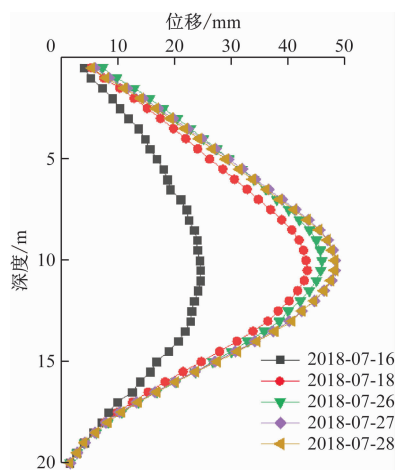


图4 北端墙墙体变形监测曲线

Fig.4 Monitoring curve of the northern end wall deformation

2.2 支撑轴力分析

北端墙支撑轴力监测曲线如图5所示。钢斜撑拆除后,上部第二道支撑(GZL-15-2与GZL-16-2)轴力受墙体变形影响由700 kN骤增至1700 kN(增速超预警阈值,触发橙色预警),第一道支撑轴力亦小幅上升但未达预警值。经补强措施后,轴力数据趋于稳定。

2.3 地面沉降分析

北端墙附近地面测点DB-21-3沉降监测曲线如图6所示。第三道钢斜撑拆除后,墙后土体变形明

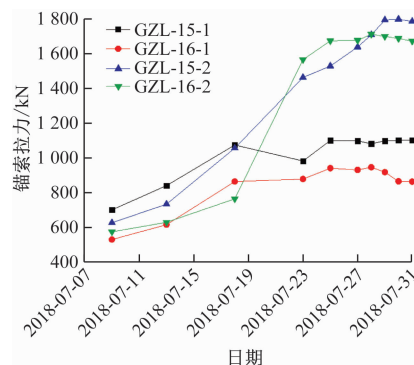


图5 北端墙支撑轴力监测曲线

Fig.5 Monitoring curve of the northern wall support axial force

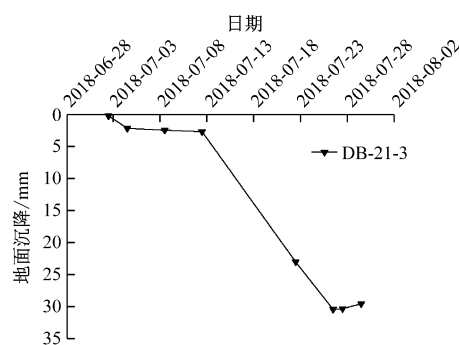


图6 北端墙地面沉降监测曲线

Fig.6 Monitoring curve of the northern end wall ground settlement

显,呈现向坑内和向下的变形趋势,地面沉降累计值由3 mm突降至34 mm,阶段变形高达31 mm,产生红色监测预警。

3 数值模拟计算分析

3.1 有限元模型建立

为研究基坑变形机理及倒撑阶段受力转换措施差异,采用有限元模拟建立基坑三维模型如图7所示。建模范围取3倍基坑深度内土体,主要涵盖至潜在影响区,岩土参数见表1,其余按设计文件赋值,以还原真实工况。

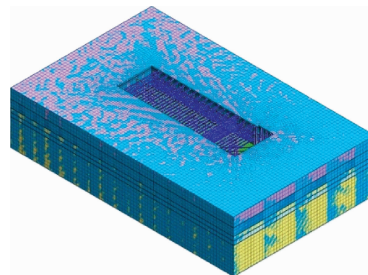


图7 案例基坑三维模型图

Fig.7 Three-dimensional model of the foundation pit in the case

基于基坑实际状态,设置 2 组原始工况,模拟基底开挖及拆撑后围护变形;并增设 3 组模拟工况,对比倒撑类型(斜撑、钢支撑)及替代方案(满堂红脚手架)的变形控制效果。针对案例基坑条形底板非封闭特性(约束力不足),补充 1 组全封闭底板工况,量化底板封闭性对变形抑制的影响。数值模拟工况如表 2 所示,各类型倒撑示意图如图 8 所示。

表 2 数值模拟工况

Tab.2 Working conditions of numerical simulation

工况	模拟内容
原始工况 1	条形底板 + 开挖至基底
原始工况 2	条形底板 + 拆撑
模拟工况 1	条形底板 + 拆撑 + 水平倒撑
模拟工况 2	条形底板 + 拆撑 + 斜倒撑
模拟工况 3	条形底板 + 满堂红脚手架
模拟工况 4	封闭底板 + 拆撑
模拟工况 5	底板封底 + 水平倒撑
模拟工况 6	底板封底 + 斜倒撑

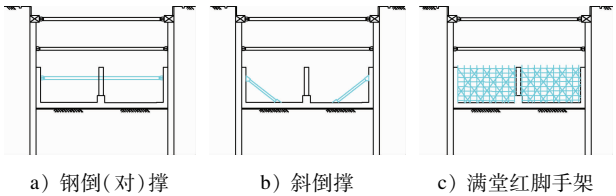


图 8 各类型倒撑示意图

Fig.8 Schematic diagram of different types of the inverted support

根据实际施工情况设置施工阶段(见表 3),进行基坑开挖过程中的变形分析。

表 3 施工阶段及模拟内容

Tab.3 Construction phase and simulation content

施工阶段	模拟内容
阶段 1	开挖至地面以下 2 m 位置,施作冠梁并架设第 1 道钢斜撑
阶段 2	开挖基坑第 1 层土方,安装第 2 道钢斜撑
阶段 3	开挖基坑第 2 层土方,安装第 3 道钢斜撑
阶段 4	开挖基坑第 3 层土方至基底,施作混凝土板撑
阶段 5	拆除第 3 道钢斜撑

3.2 模拟结果与监测数据对比分析

原始工况下的有限元模拟结果如图 9 所示。原始工况 1 和工况 2 下,斜撑段北端墙围护结构变形特征与监测数据吻合,最大变形位于第三道支撑深度(13.5 m 处),量值约 20 mm,验证了模型对深层土体应力释放及支撑-围护协同响应具有较高的模拟精度。

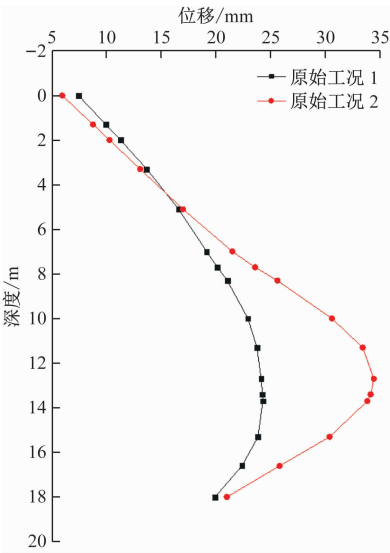


图 9 原始工况墙体变形图

Fig.9 Wall deformation diagram under the original working condition

3.3 不同类型倒撑模拟计算

案例基坑中,斜撑段北端墙因未设置倒撑,底层斜撑拆除后围护结构变形超限触发红色预警。通过数值模拟对比分析(表 2 工况)斜撑、钢支撑等倒撑类型的变形控制效果,量化不同支护方案对基坑应力释放的调控机制。

数值模拟结果(见图 10)与工程实践表明:水平倒撑(预应力 200 kN)对拆撑后变形控制最优,围护结构变形量仅为 1.9 mm(累计变形量为 26.3 mm,阈值为 30.0 mm 内),变形率为 0.078;满堂红脚手架次之(变形增量为 4.2 mm,累计变形量为 28.5

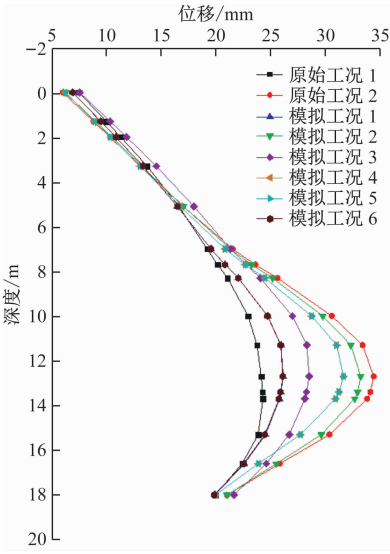


图 10 不同工况下墙体变形情况

Fig.10 Wall deformation curves under different working conditions

mm,变形率为0.166);被动斜倒撑效果最差(变形增量为8.9 mm,累计变形量为33.2 mm,超阈值,变形率为0.366)。同时,对底板封闭条件下不同倒撑控制效果进行模拟,发现各类倒撑对基坑变形控制效果与上述趋势基本一致,水平倒撑效果最佳,且当采取水平倒撑时,条形底板与封闭底板两种工况的基坑变形仅相差0.1 mm。由此可知,水平倒撑对基坑变形控制的作用非常显著。

综上所述,采用水平倒撑或满堂红脚手架为首选方案,斜倒撑与纯封闭底板无法满足要求。

4 结论

1) 针对条形底板地连墙基坑斜撑段,倒撑施作不可或缺。当基坑设计宽度大、围护结构强度低且斜撑预应力损失显著时,拆撑后内外压差骤增,墙后土体应力瞬时释放,易引发围护结构突变。通过数值模拟验证,水平倒撑与满堂红脚手架均能有效控制变形,前者变形率为0.078(累计变形量为26.3 mm),效果最优;后者变形率为0.166(累计变形量为28.5 mm),但能兼顾经济性。

2) 被动支护的斜倒撑对基坑变形的控制效果弱于封闭的底板结构,再弱于倒撑替代方案。斜倒撑、封闭的底板结构和倒撑替代方案的满堂红脚手架基坑变形率分别为0.366、0.304和0.166,其中斜倒撑及仅采用封闭底板的工况下拆撑,基坑累计变形均超过设计值。

3) 封闭的底板结构在基坑受力转换阶段作用充分。特殊的未封闭条形底板对拆撑后围护结构变形约束能力较差,不能满足基坑变形控制要求,在此类基坑中,应严格施作倒撑进行变形控制。封闭底板条件下,各类倒撑对基坑变形控制效果与条形底板的趋势一致。

参考文献

- [1] 杨光华, 陆培炎. 深基坑开挖中多撑或多锚式地下连续墙的增量算法[J]. 建筑结构, 1994, 24(8): 28.
YANG Guanghua, LU Peiyan. Incremental calculation method of multi-braced or multi-anchored diaphragm wall in deep foundation pit excavation[J]. Building Structure, 1994, 24(8): 28.
- [2] 盛棋楸, 唐忠德. 支撑拆除对基坑周边环境的影响分析与计算[J]. 建筑施工, 1998, 20(6): 41.
SHENG Qiqiu, TANG Zhongde. Analysis and calculation of the influence of support removal on the surrounding environment of foundation pit[J]. Building Construction, 1998, 20(6): 41.
- [3] 刘波, 李杰三. 支撑预应力对围护墙变形与内力的影响规律研究[J]. 岩土工程技术, 2017, 31(6): 298.
- LIU Bo, LI Jiesan. Influence on deformation and internal force of retaining wall induced by prestress of strut[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2017, 31(6): 298.
- [4] 周予启, 任耀辉, 刘卫未, 等. 深圳平安金融中心超深基坑混凝土支撑拆除关键技术[J]. 施工技术, 2015, 44(1): 32.
ZHOU Yuqi, REN Yaohui, LIU Weiwei, et al. The key technology of demolition for super deep foundation excavation concrete support of Shenzhen Ping'an financial center[J]. Construction Technology, 2015, 44(1): 32.
- [5] 朱小军. 软土深基坑工程控制拆撑变形的换撑设计方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊1): 256.
ZHU Xiaojun. Design method of changing brace to control deformation of dismantling brace in soft soil deep foundation pit engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 256.
- [6] 刘燕, 刘俊岩, 王海平. 基坑斜撑支护体系先拆后撑法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊2): 77.
LIU Yan, LIU Junyan, WANG Haiping. Study on the method of first dismantling and then supporting the diagonal bracing system of foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 77.
- [7] 刘向科, 许世雄, 张林, 等. 苏州某地下空间工程深基坑混凝土支撑拆除工序优化技术[J]. 施工技术, 2017, 46(5): 25.
LIU Xiangke, XU Shixiong, ZHANG Lin, et al. Process optimization technique of the concrete support demolition for deep foundation excavation of some underground space engineering in Suzhou[J]. Construction Technology, 2017, 46(5): 25.
- [8] 刘伟, 董超, 徐岗, 等. 临地铁超深基坑复杂混凝土内支撑拆除施工技术[J]. 施工技术, 2017, 46(6): 8.
LIU Wei, DONG Chao, XU Gang, et al. Demolition construction of the complex concrete internal bracing in deep foundation excavation adjacent to the subway[J]. Construction Technology, 2017, 46(6): 8.
- [9] 刘学增, 朱合华. 支撑拆除过程对墙体变形与内力的影响分析[J]. 地下空间, 2000(1): 47.
LIU Xuezheng, ZHU Hehua. Analysis on the influence of support removing on the deformation of wall and the internal force[J]. Underground Space, 2000(1): 47.
- [10] 崔奕, 李养平, 王波, 等. 基坑支护支撑拆除过程的弹塑性有限元分析[J]. 地铁与轻轨, 2002, 15(1): 14.
CUI Yi, LI Yangping, WANG Bo, et al. Elastic-plastic finite-element analysis in removing foundation pits supporting[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2002, 15(1): 14.

· 收稿日期:2023-07-06 修回日期:2023-09-20 出版日期:2025-05-10
Received:2023-07-06 Revised:2023-09-20 Published:2025-05-10
· 第一作者:杨开武,高级工程师,603504363@qq.com
通信作者:杨春阳,工程师,553442352@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license