

紧邻地铁隧道上软下硬地层超深基坑施工变形控制

张跃明¹, 李松晏², 钟久强³, 余金⁴, 朱碧堂⁵

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010; 2. 中建四局第一建筑工程有限公司, 广东 广州 510800;
3. 浙江省交通规划设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310031; 4. 江西水利职业学院 建筑工程系, 江西 南昌 330013;
5. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:以紧邻深圳地铁线11号线某超深基坑工程为例,介绍上软下硬地层基坑支护结构施工和开挖过程中采取的变形控制技术,包括双重护槽和三机联动地下连续墙施工技术、坑底破碎带交替双液注浆技术、钢筋混凝土支撑轴力伺服技术等,并通过三维精细化数值模拟与监测数据的对比分析,验证上述施工技术的有效性。在此基础上探讨了基坑内支撑预加轴力影响下最大侧向变形/开挖深度关系曲线,分析其对既有地铁隧道的保护效果。

关键词:地铁隧道;超深基坑;上软下硬地层;变形控制技术

中图分类号: U455 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2023)01-0061-08

0 引言

近年来,随着中国城市地下空间开发和 TOD(以公共交通为导向的发展模式, Transit-Oriented Development)建设大规模开展,临近既有隧道的深基坑开挖工程屡见不鲜。运营隧道对变形控制要求极高,当深基坑开挖引起的环境效应控制不当时,会引起既有隧道产生过大变形,甚至造成隧道破坏,危及地铁运营安全。

为预防支护结构施工、基坑开挖卸荷对周边土体及地铁运营线产生过大影响,许多学者对常见基坑变形控制方案开展了详细研究^[1-2]。贾坚等^[3]首次在紧邻地铁区间隧道的软土地层基坑开挖工程中,研发并运用了钢支撑轴力伺服系统,有效控制了隧道水平与竖向位移。冷伍明等^[4]分析了工程桩直径、桩长及桩间距对软土地层基坑变形的影响。郑刚^[5]提出了软弱土地层基坑开挖无支撑设计理论,通过排桩优化设计实现绿色基坑理念。吴锋^[6]针对上软下硬地层中基坑开挖地连墙槽壁变形特性及成槽技术要点进行了大量分析。此外,王凌等^[7]和魏纲等^[8]也对基坑围护结构变形及内力分布特性进行了大量研究,并取得了许多有价值的成果。

目前对于常规软土地层基坑开挖变形控制手段与分析方法已较为完善,但对于上软下硬地层中紧邻地铁线超深基坑变形控制方法仍然研究较少,且控制手段较为单一,亟待提出针对该类复杂地层中紧邻地铁线大型超深基坑变形控制措施,以达到严控隧道位移的目的。

以紧邻深圳地铁11号线上软下硬地层中某超深基坑工程为例,介绍针对这类地层采用的支护结构施工和基坑开挖变形控制技术,并结合三维精细化数值模拟分析论证其应用效果,以期为同类复杂地层超深基坑开挖变形控制提供一定参考。

1 工程概况

1.1 工程概况

紧邻深圳地铁11号线某基坑工程如图1所示。工程位于深圳市南山区白石洲深圳湾超级总部基地

收稿日期:2022-11-21 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxzb.20220351

基金项目:国家自然科学基金(41972291,52020105003)

作者简介:张跃明(1982—),男,高级工程师,研究方向为地下工程。E-mail:87433578@qq.com

张跃明,李松晏,钟久强,等.紧邻地铁隧道上软下硬地层超深基坑施工变形控制[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(1):61-68.

中南部,西邻深湾三路,北临白石四道,东临深湾支一街(规划路),南邻白石支四街(规划路),占地面积约 8 760 m²。场区北侧紧邻地铁 9 号线、11 号线。在项目用地红线范围内,北侧地连墙距离深圳地铁 11 号线右线区间隧道结构外边线最近约 4.4 m,隔离灌注桩外沿距地铁 11 号线右线区间隧道结构外边线最近约 3 m,东侧、南侧、西侧地下室外墙距红线为 3 m,且周边分布有较多的通讯、电力、供排水、燃气管道等地下管线,属一级基坑。

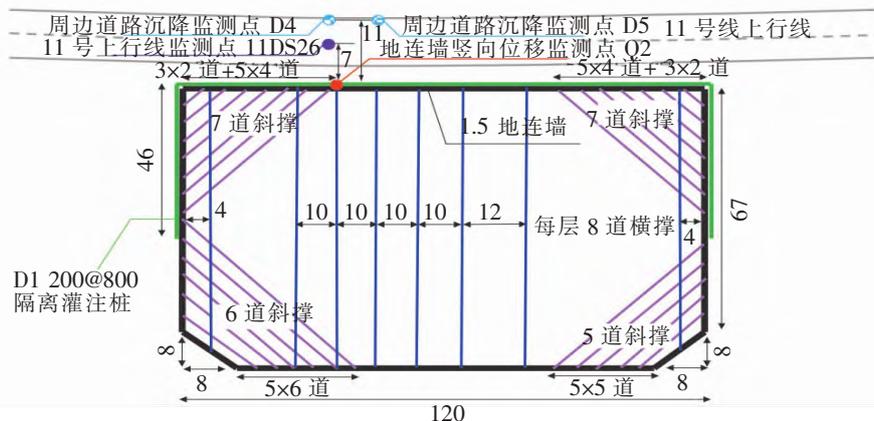


图 1 基坑平面布置图(单位:m)

基坑最大开挖深度达 42 m,开挖和施加支撑(含施加预加轴力)交替进行,内支撑结构沿纵向主要由 8 道钢筋混凝土预应力横撑及若干斜撑组成,靠近 11 号上行线隧道半边增加直径为 1 200 mm 隔离灌注桩,间距为 800 mm,地连墙厚度为 1.5 m。

1.2 地层条件

如图 2 所示,基坑从上至下共设计 8 道横撑,地下水位于地表以下 5.3 m 处,分层开挖将穿越人工填土层(素填土、填石、填砂)、海陆交互相沉积淤泥、冲洪积黏土、含黏性土砾砂层、沼泽相沉积有机质粉质黏土及第四系残积砾质黏性土、全~微风化花岗岩。除第四系残积砾质黏性土、全~微风化花岗岩外,其他各土层的工程地质性质差,对基坑的稳定不利。微风化花岗岩单轴抗压强度达 136 MPa,施工振动也会对地铁隧道产生影响。

图 3 为基坑与隧道群相对位置关系,隧道管片为 C50 强度等级混凝土, D 表示外径, d 表示内径。由图 3 可见基坑围护结构最外侧距最近的 11 号上行线外沿仅 3 m,因此基坑开挖引起的周边土体扰动将不可避免地邻近隧道群产生影响,对超深基坑开挖引起的变形控制提出了极高的要求。

2 超深基坑变形控制技术

为控制超深基坑支护结构施工和基坑开挖

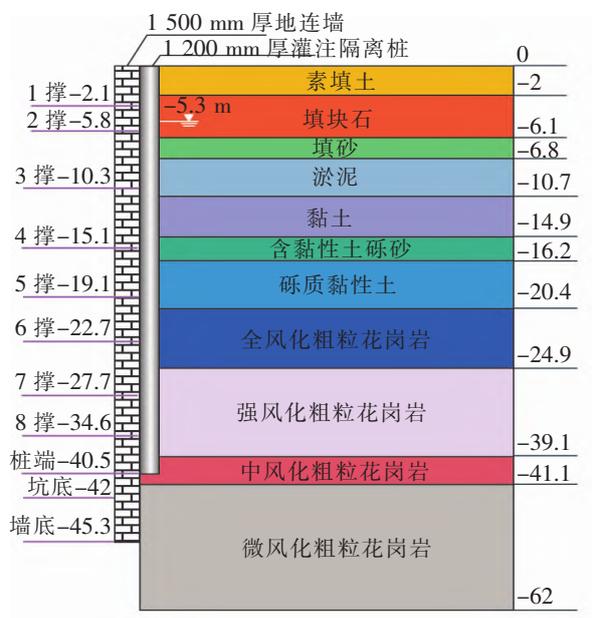


图 2 土层及内支撑分布(单位:m)

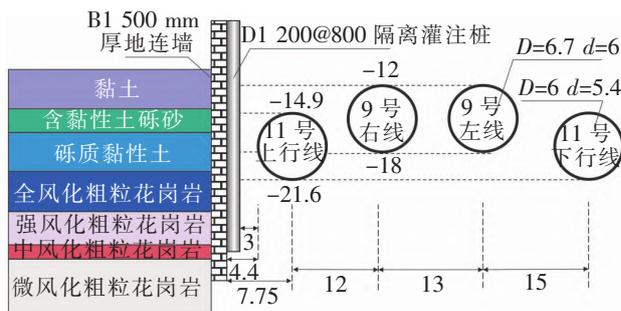


图 3 基坑与隧道群相对位置剖面图(单位:m)

变形对邻近隧道的影响,提出了紧邻既有隧道超深基坑控制施工变形成套技术,包括全回转咬合桩+双排高压旋喷桩双重护槽、地下连续墙三机联动成槽施工技术、基岩破碎带双液灌浆加固技术、轴力伺服系统施工技术等,本节将逐一对其进行介绍。

2.1 全回转咬合桩+双排高压旋喷桩双重护槽

针对超深基坑紧邻地铁隧道的情况,隔离桩施工或直接施工地连墙会对邻近地铁隧道结构扰动大。针对上述紧邻地铁入岩 30 m 的超深基坑,项目提出采用“全回转咬合桩+双排高压旋喷桩”双重护槽施工地下连续墙技术,如图 4 所示,以减少地连墙开槽对运营地铁隧道的影响。全回转咬合桩布置在地铁隧道侧,在施工时采用套筒护壁减少施工扰动;先行施工,可起到隔离地连墙施工对地铁隧道的扰动影响。采用旋喷桩控制富水砂土易塌槽导致地铁隧道发生过大变形。

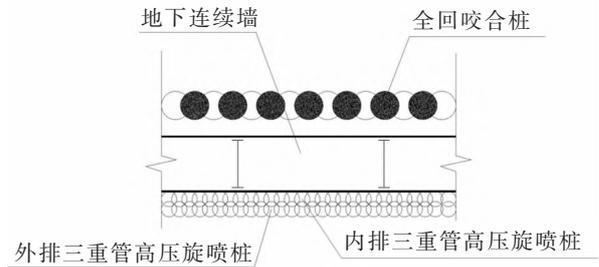


图 4 双重护槽地下连续墙施工技术

图 5 为全回转咬合桩和三重管高压旋喷桩施工照片,全回转咬合桩沿地下连续墙设置于地铁一侧,三重管高压旋喷桩沿地下连续墙设置于地下连续墙的另一侧,且三重管高压旋喷桩的内排设置于外排与地下连续墙之间,对地铁隧道周围土体扰动较小,且成槽施工全过程不抽取地下水,有效保证了紧邻地铁隧道基坑深度超深,入岩岩层超硬超厚的地下连续墙成槽施工对地铁变形控制不超过 10 mm 的要求,规避了地铁隧道发生变形的风险,克服了传统技术的不足。



图 5 全回转咬合桩+双排高压旋喷桩双重护槽现场施工

2.2 地下连续墙三机联动成槽施工技术

为加快地下连续墙的施工工期,提出了“三机联动”施工工法(见图 6),即旋挖机引孔+成槽机抓取上部土层+大功率宝峨铣槽机铣削岩层的地下连续墙成槽技术进行全工序穿插施工。地铁保护区地下连续墙厚度 1 500 mm,成槽施工过程通过泥浆进行护壁,护壁泥浆采用膨润土拌制,内掺重晶石粉外加剂维持护壁泥浆的泥浆比重不小于 1.51,防止成槽施工过程发生塌孔,可最大限度提高地下连续墙成槽施工的工效,节省 60%工期。

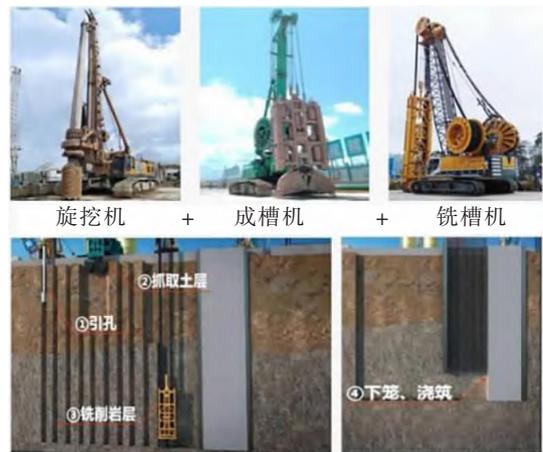


图 6 三机联动成槽施工流程图

图 7 为地下连续墙单元槽段开挖顺序图,上部覆盖层采用成槽机抓土成槽至基岩面,微风化岩孤石层通过大功率铣槽机铣削岩层成槽,再进行旋挖钻机引孔破坏中微风化岩石的完整性,有效提高了后续铣槽机岩层铣削成槽的施工工效,加快了地下连续墙的施工速度,节约了工期,节省了成本。

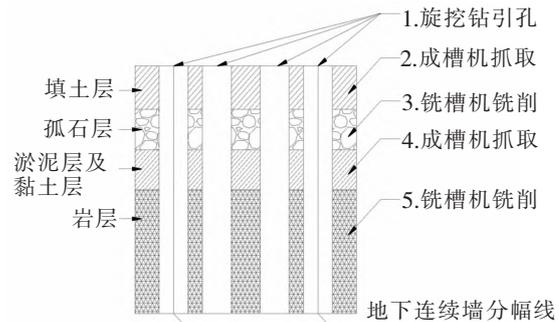


图 7 单元槽段开挖顺序示意图

2.3 基岩破碎带双液灌浆加固技术

基坑底部有纵横贯穿的破碎带,基坑地下水极易从破碎带裂缝渗入,地下水位下降导致地铁隧道变形,影响地铁运营安全,对破碎带以及地连墙四周基岩注浆,使基坑形成一个封闭空间。

传统基岩灌浆技术具有管径小、单位时间喷浆量少、浆液凝固时间长、灌注浆液单一、未与地铁监测技术结合等缺点,在紧邻地铁的超深基坑项目中,构造破碎带灌浆施工中遇到保压困难、冒浆、窜孔、水泥浆流失严重、地铁结构变形要求严格的施工难题。为此,项目创新采用相邻孔水泥浆+水玻璃交替灌浆施工技术,地铁侧土体隆起变形采用实时自动监测、地铁隧道内开展智能监测,在克服以上技术难题的基础上,有效保证了地铁运行线隧道结构的安全,极大提高了施工效率,节约了工期,具有较大的经济效益和社会效益。图 8 为双液灌浆加固技术施工流程。



图 8 基岩破碎带双液灌浆加固技术施工流程

构造破碎带基岩灌浆采用水泥浆+水玻璃双液灌浆孔同时交替双液灌浆施工做法简单高效,经过现场施工证明可以极大地提高施工效率,避免了灌浆施工水泥浆流失严重且难以保压,泥浆串孔以及冒浆问题突出的现象,同时缩短了工期,节省了成本。工程构造破碎带基岩注浆孔数 517 个,每个孔注浆长度为 10 m,注浆总长度 5 170 m。按照本工法施工工艺,该工程采用水泥浆+水玻璃交替双液注浆的方法,减少了停浆待凝次数,平均每个注浆孔节约 4 d,由于现场采用 8 台地质钻机交叉施工,517 个注浆孔共节约关键工期 80 d,节约的经济效益为 $80 \times 6 = 480$ 万元。

2.4 钢筋混凝土支撑轴力伺服控制系统

针对工程项目要求地铁隧道变形不得超过 10 mm 的控制标准,紧邻地铁超深基坑多道混凝土内支撑首次采用轴力伺服系统(见图 9),主动控制基坑开挖变形,该系统具有低压自动补偿,高压自动报警,实时监控,与第 3 方、第 4 方基坑监测平台进行联动,全方位多重安全保障基坑地。

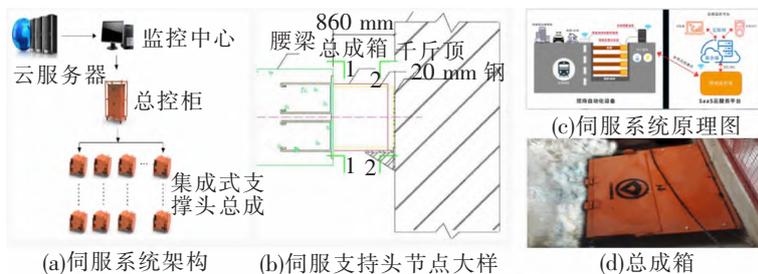


图 9 轴力伺服系统施工技术

该技术是一种基于紧邻地铁(基坑支护距离地铁结构最近仅有 3 m)、超深基坑(42.35 m)采用钢筋混凝土支撑的轴力伺服系统施工技术,创新点在于紧邻地铁超深基坑多道钢筋混凝土支撑采用伺服系统来控制基坑变形(如图 10 所示),对比传统钢筋混凝土支撑控制基坑变形,由被动控制变为主动控制,更能精准控制基坑变形。

伺服系统包含总成箱体(内含大吨位千斤顶)、自锁保护装置和自动监测装置,总成箱体具备 2 个功能:①为施加预应力的千斤顶提供工作平台;②当施加预应力的千斤顶失效或更换时,总成箱体通过锁定保护装置锁定后作为受力构件承担来自于围护结构的作用力,并且伺服系统设备具有低压补偿、高压报警等特点,有效保证了基坑以及地铁隧道安全。

伺服系统轴力施加应按照设计要求,严格按照不同开挖工况支护工况进行分级加载。施加轴力应分

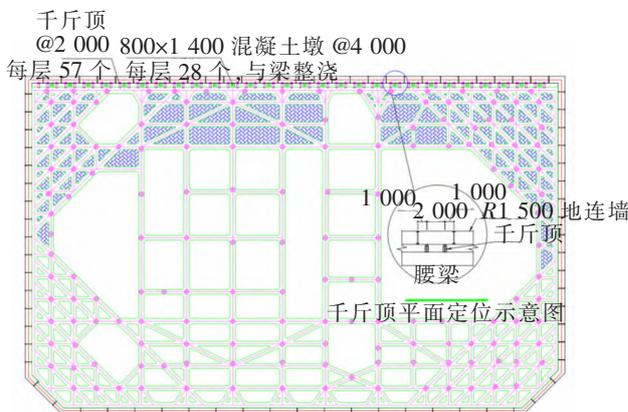


图 10 基坑北侧内支撑伺服系统平面布置图(单位:mm)

级缓慢加压,分 3 级完成,即第 1 次加载至设计轴力的 50%,第 2 次加载至设计轴力的 75%,第 3 次加载至设计轴力的 100%。各道支撑预加轴力如图 11 所示。

3 地铁隧道变形控制应用数值分析

3.1 Plaxis 3D 精细化分析模型

上软下硬地层条件下超深基坑的开挖对围护结构与周边环境的变形控制提出了苛刻要求,为探究项目深基坑开挖围护结构受力情况及其对邻近地铁线的影响以及论证上述变形控制技术的有效性,采用 Plaxis 3D 有限元分析软件,建立基坑分层降水、逐层开挖、逐道加撑的三维精细化施工模型,分析其地下连续墙侧向变形与邻近 11 号上行线隧道变形情况,并在此基础上进一步探讨钢筋混凝土支撑预加轴力对支护结构最大侧向变形/开挖深度比值的影响。三维有限元模型大小与网格划分结果如图 12 和图 13 所示,网格数量约 39 万,节点数量约 61 万。

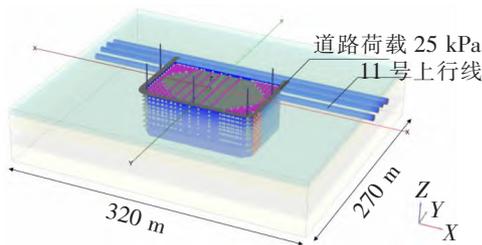


图 12 三维有限元模型

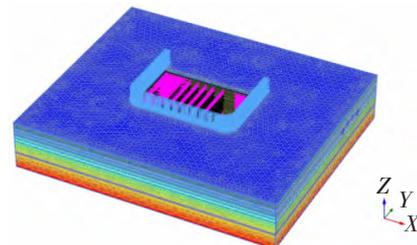


图 13 网格划分结果

模型土层与内支撑纵向分布如图 2 所示,基坑采用 C40 钢筋混凝土内支撑(除第 2 道横撑为 1.2 m×1.2 m、第 8 道横撑为 1.5 m×1.5 m 外,其余均为 1.4 m×1.4 m 方形截面),地连墙(1 500 mm 厚)与隔离灌注桩强度等级为 C40,桩单元均按等效刚度换算为板结构单元进行计算。土体本构模型除岩层采用 M-C 摩尔库伦模型外,其他均采用 HSS 小应变硬化高级土体本构,参数取值如表 1 所示,各参数取值依据文献[7]。

表 1 土体 HSS 模型及其物理力学参数

土层	底部 标高/m	$\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$c/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$\varphi/$ ($^\circ$)	小应变参数				
					$E_{50}^{\text{ref}}/$ ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/$ ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/$ ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$G_0^{\text{ref}}/$ ($\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$)	$\gamma_{0.7}/$ 10^{-3}
素填土	-2.0	16.5	8	15	3.79	3.5	10.5	55.60	2
填块石	-6.1	19.5	1	33	22.50	22.5	67.5	115.60	2
填砂	-6.8	19.3	1	32	11.00	11.0	33.0	83.70	2
淤泥	-10.7	18.0	12	28	3.75	2.5	20.0	15.80	1
黏土	-14.9	16.4	20	18	6.00	6.0	30.0	100.90	1
含黏性土砾砂	-16.2	21.0	1	34	27.00	27.0	81.0	120.10	2
砾质黏性土	-20.4	21.0	24	24	8.00	8.0	35.5	135.93	2
全风化粗粒花岗岩	-24.9	20.5	32	28	54.00	54.0	162.0	235.50	2
强风化粗粒花岗岩	-39.1	21.0	32	50	—	—	—	—	—
中风化粗粒花岗岩	-41.1	25.0	200	55	—	—	—	—	—
微风化粗粒花岗岩	-62.0	30.0	300	60	—	—	—	—	—

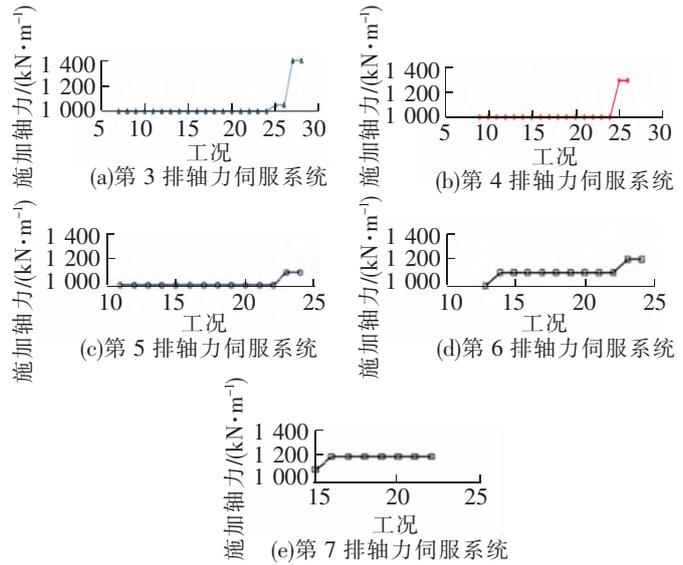


图 11 设计加载轴力伺服曲线

3.2 模型验证

为验证所建三维模型有效性,与不同施工阶段的现场监测值(地连墙侧向位移、周边道路竖向位移、隧道管片竖向位移)进行了对比,结果如图 14~图 16 所示。分别对其进行分析可知:

(1)地连墙侧向变形曲线监测值最大位移稍大于模拟值,侧向变形最大误差为 15%,整体趋势吻合较好。

(2)周边道路竖向位移监测值在第 6 到 7 道撑施工期间维持在 12.5~15 mm 之间,模拟值为 14.5~15.5 mm 之间,最大误差为 13.8%,总体趋势与监测值保持一致。

(3)11 号上行线管片竖向位移自开挖伊始逐渐增大至 5.6 mm 左右,图 16 从左至右依次为第 1 到第 8 道支撑施工节点,各节点模拟值整体趋势与监测值大致呈相同态势,最大误差不超过 14.6%。

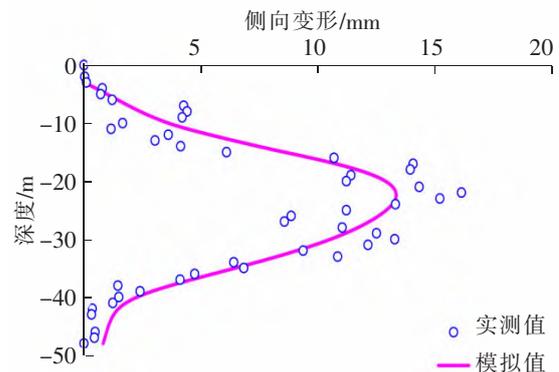


图 14 地连墙侧向变形与深度关系对比

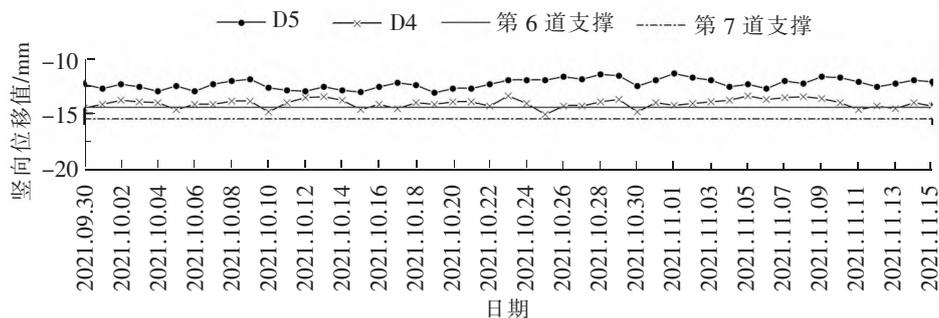


图 15 周边道路竖向位移

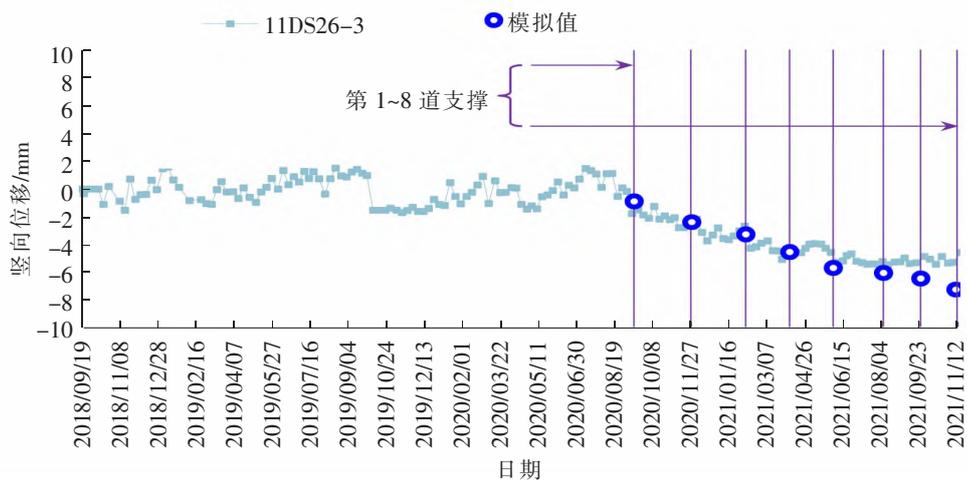


图 16 11 号上行线管片竖向位移对比

3.3 预加轴力影响下最大侧向变形/开挖深度关系曲线

在实践过程中,基坑支护结构变形一般采用经验方法和数值模拟分析方法进行计算确定。Clough et al^[9]的软黏土中支护墙最大侧向变形比(最大侧向变形与开挖深度之比)与围护结构系统刚度 S 、基底隆起安全系数 FS 之间的关系曲线,考虑到项目对第 3 到第 7 道内撑通过液压伺服系统施加了预应轴力,因此对不同预应轴力影响下最大侧向变形/开挖深度关系进行了分析。

依次按轴力值的 75%、65%、55%、45%、35%、25%、15%、5%及 0% 进行分析,对应轴力值进行无量纲化后 N/EA 依次为 0.15、0.13、0.11、0.09、0.07、0.05、0.03、0.01 及 0, N 为轴力值, E 为混凝土支撑

弹性模量, I 为截面惯性矩, EA 为支撑刚度, X_L 表示左侧地连墙水平变形(远离隧道侧), X_R 表示右侧地连墙水平变形(邻近隧道侧), h 为开挖深度, γ_w 为水重度, h_{avg} 为支撑平均竖向间距。分析时分别取 3.48、4.35(实际间距)、5.8 m, 对应预加轴力支撑数为 6 道、5 道(实际支撑数)及 4 道。得到左右侧地连墙在不同预应轴力影响下最大侧向变形/开挖深度关系曲线如图 17 及图 18 所示。

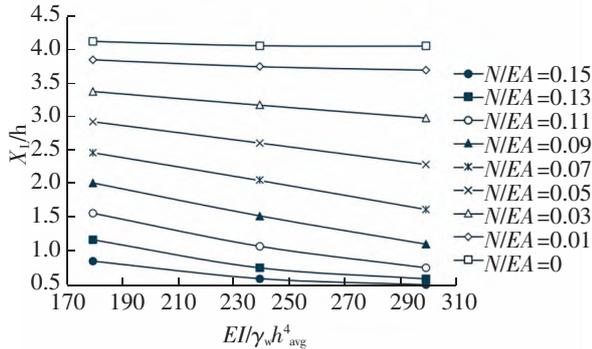


图 17 左侧地连墙变形/开挖深度曲线

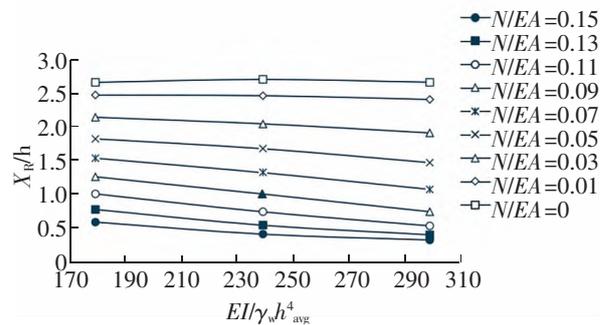


图 18 右侧地连墙变形/开挖深度曲线

由图 17、图 18 可知,同一轴力值下,随着支撑数量的增长, h_{avg} 降低, X_L/H 值逐渐变小; X_L/H 值随着 N/EA 的增大而下降,且下降速度至 $N/EA=0.09$ 时为最大值,当 $N/EA=0.09\sim 0$ 时呈线性关系,超过这一值后斜率随 h_{avg} 的增大而降低;对比左右侧地连墙可知,右侧即邻近隧道侧(有隔离灌注桩) X_R/H 值整体小于左侧,最大 X_R/H 值相比左侧减小约 34%,可知其整体支护效果远好于左侧,对邻近地铁隧道群起到了较好的变形控制保护效果。

4 结论

介绍了复杂地质条件下(以深圳某超深基坑开挖对邻近 11 号与 9 号地铁线影响为例)地铁隧道受邻近基坑开挖土体扰动的变形主动控制技术及其工程应用情况,分别从地下连续墙施工、坑底破碎带交替水泥和水玻璃灌浆加固、钢筋混凝土轴力伺服控制和隧道变形监测技术层面开展了详细分析,并通过三维精细化数值模型与监测数据进行了对比验证,在此基础上探讨了基坑预加轴力影响下最大侧向变形/开挖深度关系曲线,主要结论如下:

(1)“全回转咬合桩+双排高压旋喷桩”双重护槽技术对地铁隧道周围土体扰动较小,且成槽施工全过程不抽取地下水,规避了地铁隧道发生变形的风险,克服了传统技术的不足。

(2)通过旋挖钻机引孔+成槽机抓土+大功率铣槽机铣削岩层三机联动成槽技术,结合全回转咬合桩和三重管高压旋喷桩双重护槽成槽技术,有效保证了地铁运行线隧道结构的安全,节省施工工期达 60% 以上。

(3)基岩破碎带交替双液灌浆施工技术经实际应用验证,能够很好地解决现场施工过程中遇到的破碎带基岩灌浆难题,而且施工操作较传统基岩灌浆方法简单高效,同时能够最大限度地保证基岩灌后的止水效果。

(4)紧邻地铁超深基坑多道钢筋混凝土支撑采用伺服系统来控制基坑变形,对比传统钢筋混凝土支撑控制基坑变形,由被动控制变为主动控制,更能精准控制基坑变形,且伺服系统设备具有低压补偿、高压报警等显著优势。

(5)同一轴力值下,随着支撑数量的增长,支撑平均竖向间距 h_{avg} 降低,支护结构最大侧向变形和开挖深度比值逐渐变小;有隔离灌注桩侧 X_R/H 值整体小于无隔离桩侧,最大 X_R/H 值相比左侧减小约 34%,说明隔离桩能较好地控制支护结构变形,对邻近地铁隧道群起到了较好的变形控制保护效果。

参 考 文 献

[1]王卫东,李青,徐中华.软土地层邻近隧道深基坑变形控制设计分析与实践[J].隧道建设(中英文),2022,42(2):

163-175.

- [2]徐中华,宗露丹,沈健,等.邻近地铁隧道的软土深基坑变形实测分析[J].岩土工程学报,2019,41(S1):41-44.
- [3]贾坚,谢小林,罗发扬,等.控制深基坑变形的支撑轴力伺服系统[J].上海交通大学学报,2009,43(10):1589-1594.
- [4]冷伍明,姚康,门小雄,等.考虑工程桩效应的滨海深基坑变形特性分析[J/OL].铁道科学与工程学报:1-12[2022-06-22]. DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20220864.
- [5]郑刚.软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J].岩土工程学报,2022,44(1):1-36.
- [6]吴锋.上软下硬地层地下连续墙施工技术研究[D].合肥:合肥工业大学,2020.
- [7]王凌,张声宇,张跃明,等.南昌河流阶地内地铁车站基坑变形研究[J].华东交通大学学报,2021,38(3):31-40.
- [8]魏纲,张鑫海,林心蓓.基坑开挖引起的旁侧盾构隧道横向受力变化研究[J].岩土力学,2020,41(2):635-644.
- [9]Clough G W , O'Rourke T D . Construction induced movements of in situ walls[C]//Proceedings of ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures. New York: Geotechnical Special Publication,1990,25:439-470.

Deformation Control of Ultra-Deep Foundation Adjacent to Metro Tunnel in Upper Soft and Lower Hard Strata

Zhang Yueming¹, Li Songyan², Zhong Jiuqiang³, Yu Jin⁴, Zhu Bitang⁵

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510010, China;

2. The First Construction Co. Ltd. of China Forth Construction Bureau, Guangzhou 510800, China;

3. Zhejiang Provincial Transportation Planning Design Co. Ltd., Hangzhou 310031, China;

4. Department of Architectural Engineering, Jiangxi Water Resources Institute, Nanchang 330013, China;

5. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Taking an ultra-deep foundation pit project adjacent to Shenzhen Metro Line 11 as an example, this paper introduced the deformation control technology adopted during the construction and excavation of the foundation pit support structure of the upper soft and lower hard strata, including the construction technology of double guard trough and three-machine linkage underground continuous wall, the alternating double liquid grouting technology of the crushing belt at the bottom of the pit, and the axial force servo technology of reinforced concrete support. Through the comparative analysis of three-dimensional refined numerical simulation and monitoring data, the effectiveness of the above construction technology was verified. On this basis, the relationship curve of maximum lateral deformation/excavation depth under the influence of pre-applied axial force in the foundation pit was discussed, and its protective effect on the existing subway tunnel was analyzed.

Key words: metro tunnel; ultra-deep foundation pit; the upper soft and lower hard strata; deformation control