

黄土状粉土地层基坑开挖对周边场地变形的影响

郭浩天^{1,2,3}, 张浩民¹, 赵环宇⁴

- (1. 吉林建筑大学 测绘与勘查工程学院, 吉林 长春 130118;
2. 吉林建筑大学 季节性冻土工程灾变机理与探测防治技术创新基地, 吉林 长春 130118;
3. 吉林建筑大学 季冻区岩土工程研究所, 吉林 长春 130118;
4. 吉林省永诚建设监理有限公司, 吉林 长春 130022)

摘要:为明确西北地区黄土状粉土地层基坑开挖对周边建筑、道路、地表等场地变形的影响,基于兰州某填土场地实际深基坑工程开挖工况及监测数据,运用 midas GTS NX 有限元软件,对桩锚、内支撑结合地下连续墙两种支护方式基坑开挖过程中周边地表沉降及水平位移进行数值模拟研究。结果表明:相较于桩锚支护,采用内支撑地下连续墙支护时,周边地表最大沉降量由 0.1 mm 增至 9.77 mm(最小增幅 14%),水平位移减少 6%~50%。内支撑结合地下连续墙支护能较好控制地表水平位移,但其周边地表沉降控制能力相对于桩锚支护偏弱。建议针对黄土状粉土地层湿陷敏感、侧向易变形的特性采用分区组合支护的策略:在临近建筑物侧可优先选用桩锚支护体系抑制沉降,而在宽作业面区域采用墙撑支护体系优化侧向位移。

关键词: midas GTS 软件; 基坑支护; 桩锚支护; 内支撑地下连续墙支护; 数值模拟

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)03-0019-07

Influence of Foundation Pit Excavation Support on the Surrounding Environment of Loess-like Silty Soil Layer

GUO Haotian^{1,2,3}, ZHANG Haomin¹, ZHAO Huanyu⁴

(1. School of Exploration Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin 130118, China;

2. Seasonal Frozen Soil Engineering Disaster Mechanism and Innovative Base for Detection and Prevention Technology, Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin 130118, China;

3. Institute of Geotechnical Engineering in Seasonally Frozen Area, Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin 130118, China;

4. Jilin Yongcheng Construction Supervision Co., Ltd., Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract: To clarify the impact of foundation pit excavation on deformation of surrounding buildings, roads, and ground surfaces in loess-like silt strata in Northwest China, this study utilizes midas GTS NX finite element software to simulate the surface settlement and horizontal displacement during excavation under two support methods—pile-anchor support and internal bracing combined with diaphragm walls based on monitoring data from a deep excavation project in a filled soil site in Lanzhou. The results indicate that compared to the pile-anchor support, the maximum surface settlement with diaphragm wall and internal bracing increased from 0.1 mm to 9.77 mm (minimum increase of 14%), while horizontal displacement decreased by 6%~50%. The diaphragm wall with internal bracing effectively controls lateral displacement but exhibits weaker settlement mitigation compared to pile-anchor systems. Considering the collapsibility and lateral sensitivity of loess-like silt strata, a partitioned composite support strategy is proposed: pile-anchor systems are prioritized near existing buildings to suppress settlement, while diaphragm walls with internal bracing are applied in wide excavation zones to optimize lateral displacement control.

Keywords: midas GTS software; foundation pit support; pile anchor support; internal support for underground continuous wall support; numerical simulation

收稿日期: 2024-12-20

修稿日期: 2025-02-28

基金项目: 吉林省教育厅优秀青年项目 (JJKH20240384KJ); 吉林省科技发展计划项目 (YDZJ202201ZYTS490); 第七届中国科协青年人才托举工程 (2021QNR0001)

作者简介: 郭浩天 (1991—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土的工程性质等方面教学与科研工作。E-mail: guohaotian@163.com

随着国家西部大开发“十四五”规划的逐步推进,我国西北地区的建设如火如荼,城市建设日益深入,深基坑工程也日渐增多,规模和深度相较之前有很大变化,而基坑开挖卸荷会引起周围土体的变形沉降,危害周边建筑物结构安全^[1-2]。所以要因地制宜,根据不同的土层情况选择适合的基坑支护形式。黄土状粉土在西北地区分布广泛^[3],因其存在吸附、膨胀和收缩等特性,当遇水时,由于可溶盐胶结的团聚体被破坏,黄土状粉土湿陷性往往会增强^[4],对工程安全产生影响。在该地层基坑支护结构选型方面,众多学者研究主要集中在桩锚支护及其改进方面。杨校辉等^[5]通过分析西宁地区深基坑工程中土钉墙滑塌、桩锚支护失效案例,揭示设计施工质量隐患及土压力模型适用性的问题并提出改进方向;李英业^[6]结合高压旋喷锚索的工程应用,通过实测数据明确工艺参数对锚固体性能的影响以及杆体后端利用率问题,为黄土状土层的边坡支护提供了新的思路;王福常^[7]以某深基坑工程为例,阐述装配式钢内支撑的施工工艺及控制要点,验证了其在工期、成本、安全性上的优势,指出其地层适应性验证不足的问题;陈冬青^[8]依托河北衡水旧居住区改造工程,通过详实数据验证钢筋混凝土排桩-内支撑-水泥土搅拌桩组合支护体系的有效性(水平位移 12.2 mm~28.4 mm),并分析其结构受力特性;Liang 等^[9]结合兰州地铁 1 号线小西湖站深基坑工程,经数值模拟与实测对比,证实挡土桩加内支撑支护形式在该地层实用的可行性。采取单一的支护方式往往难以全面应对复杂多变的地质条件,需构建综合支护体系以提升整体稳定性和安全性。洪瑛等^[10]通过浙江省国际金融大厦的深基坑工程,验证地下连续墙+三道内支撑体系结合分层分区开挖策略对周边沉降(<21 mm)及土体位移(最大变形 0.5%)的控制效果;王玲^[11]提出地下连续墙“两墙合一”的联合内支撑体系,在保障基坑安全与结构稳定的同时兼具工期经济性。陈琼^[12]通过广州天河区某深基坑工程中,以全流程监测数据证实地下连续墙+三道内支撑体系对周边沉降的可控性。根据以上研究可发现,这些工程所处地质环境均为常见的粉质黏土地层,而针对具有高湿陷性、低黏聚力特性的黄土状粉土地层中内支撑与地下连续墙相结合的支护方式所开展的研究尚存欠缺。

为进一步探究黄土状粉土地层深基坑支护的优化策略,结合实际工程案例,验证新型支护技术的可

行性与经济性,为西北地区城市建设提供更为科学、安全的支护方案。本文以兰州市某填土地层深基坑工程为例,基于深基坑实际开挖工况及监测数据,运用 midas GTS NX 有限元软件,对桩锚及内支撑结合地下连续墙这两种支护方式基坑开挖过程中,在周围场地环境沉降及水平位移方面进行数值模拟研究,分析不同支护形式在黄土状粉土地层中的适用性。研究成果对于黄土状粉土地层基坑支护方式的选择具有重要理论与实际意义。

1 工程概况

在兰州某黄土状粉土地层中,基坑位于已建 24 层的居民小区 A 楼北侧,周边有一条 12 m 宽的通行道路距基坑 20 m,地下室结构边线距用地红线为 3.0 m。东侧有道路 B 和 16 层居民楼,地下室结构边线距用地红线为 6.3 m。南侧靠近北环路,有一 25 层居民楼,地下室结构边线距用地红线为 2.94 m~21.30 m。西侧是规划道路,场地交通便利。基坑平面大致呈矩形,东西长约 170 m,南北宽约 60 m,支护等级为一级。基坑的开挖深度为 -19.8 m,由于用地紧张,无法进行放坡开挖。故采用桩锚支护,支护桩采用直径 1000 mm,桩间距 2 m 的 C30 混凝土桩,桩间锚索采用钢绞线。由钻孔资料可知,场地土层主要由素填土,黄土状粉土,强风化泥质砂岩和中风化泥质砂岩组成,场地地质剖面如图 1 所示。

区域水文地质资料及土层主要力学参数如表 1 所示,该区域地下水埋藏较深,在勘探期间勘察深度范围内未见地下水,因此,设计、施工时可不考虑地下水对建筑物的影响。但根据本场地和相邻场地的经验,如果场地地表排水不畅,可能使地基土产生沉降,对施工产生影响,因此应做好施工过程中的防水措施。

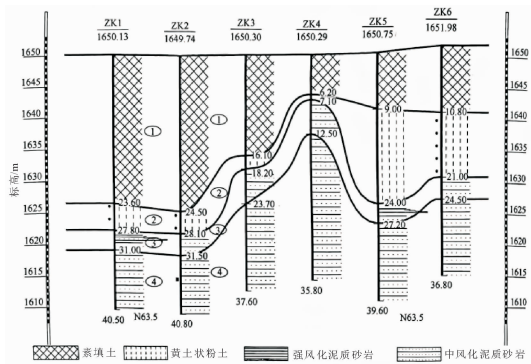


图 1 场地地质剖面图

表1 地土层主要力学参数

土层名称	重度 /(kN·m ⁻³)	泊松 比	弹性模量 /GPa	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)
素填土层	18.3	0.20	0.0085	10.0	20.0
黄土状粉土	18.5	0.25	0.04	15.9	26.7
强风化泥岩层	27.0	0.30	20	30.0	28.0
中风化泥岩层	23.0	0.30	40	40.0	32.0

注:表中参数通过室内土工试验确定;素填土与黄土状粉土试样取自现场钻孔岩芯,采用三轴压缩试验测定黏聚力和内摩擦角,通过固结试验获得弹性模量;强风化与中风化泥岩参数参考《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)并结合现场点荷载试验修正。

2 桩锚支护结构数值模拟计算

2.1 数值模拟软件确定

在岩土工程数值模拟领域,相关专业软件的选择需综合考量其适用性边界与工程的适配度。不同的软件往往在特定的工程问题上展现出独特优势,而在复杂地质条件或特殊工况下就可能暴露出局限性。例如 ABAQUS 擅长复杂的非线性问题^[13],但其操作较为复杂且岩土模块较少;FLAC3D 在大变形和动态分析中表现优异^[14],但建模效率略低并且依赖第三方工具。相比之下 midas GTS NX 凭借其专业针对性(内置常见的岩土本构模型和基础工程模板)、高效的建模能力(支持 CAD/BIM 的导入接口和自动网格划分)、以及可视化后处理模块^[15],成为了现阶段兼顾工程适用性、易用性的较优选择,尤其适合需要随时变更参数条件、注重施工阶段模拟的岩土项目,因此本文采用 midas GTS NX 来进行前期建模与后期计算。

2.2 本构模型确定

土体本构模型的选取对于其计算精度与工程适用性至关重要。在选择时要确保模型参数与土体物理力学特性(如压缩性、渗透性、强度指标等)的适配程度,且还要求数值计算结果与现场实测数据拟合较为合适。当前工程实践中常用的本构模型主要包括摩尔-库仑、德鲁克-普拉格、霍克-布朗三类,其中摩尔-库仑模型因其参数简洁、物理意义明确,广泛适用于砂土、粉土及常规黏性土。德鲁克-普拉格模型通过引入广义塑性理论,在近似均质材料分析中展现出较莫尔-库仑模型更优的普适性。霍克-布朗本构模型是针对节理岩体的非线性强度准则,主要适用于隧道、边坡等工程的破碎岩体渐进破坏分析。针对本工程涉及的黄土状粉土地层特殊性,模拟前土体本构模型的选择则显得尤为关键,主

要是因其具有高孔隙比、湿陷性及结构性特征,并且场地内还存在两层风化泥岩层,因此常规本构模型可能存在参数表征失真的风险。为此,在建立基坑支护体系数值模型前,需对该土层的本构模型适用性开展研究。基于桩-锚支护实际工程的监测数据,构建相同支护条件下的差异化模型(即分别采用摩尔-库仑、德鲁克-普拉格、霍克-布朗模型来进行模拟),对比分析土体位移监测值与模拟值确定最优本构模型。

桩锚支护模型如图 2 所示,建筑物为 3D 类型,建筑物筏板为 2D 弹性板单元;冠梁,腰梁为 1D 梁单元,锚杆为 1D 植入式桁架,相关支护材料参数取值如表 2 所示。土体采用摩尔-库仑本构模型(MC 模型)、德鲁克-普拉格本构模型(DP 模型)、霍克-布朗本构模型(H-B 模型)分别计算其位移量。

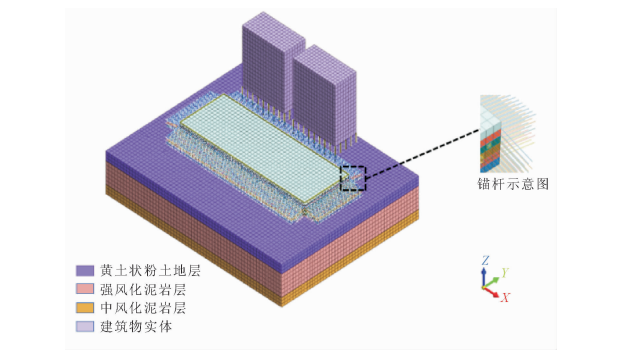


图2 桩锚支护模型简图

表2 支护结构材料参数

材料名称	重度 /(kN·m ⁻³)	泊松比	弹性模量 /GPa	阻尼比
C30 混凝土	23.7	0.3	30.0	0.05
C35 混凝土	24.2	0.3	31.5	0.05
C50 混凝土	25.0	0.3	35.0	0.05
钢绞线	76.9	0.3	22.0	0.05

注:表中 C30/C35/C50 混凝土弹性模量依据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010);钢绞线参数参考《预应力混凝土用钢绞线》(GB/T 5224—2014),并考虑施工折减系数。

施工中为保证基坑边坡安全,采用分层开挖,逐层施工的形式,能有效控制土体稳定,减少地表沉降,提高工程质量,降低风险,确保施工安全,故设置工况为每 3.3 m 开挖并且支护锚杆,以此类推共 5 次工况进行模拟计算。实际监测数据中,基坑南边中部水平位移量总量已达 26 mm,最大变化量近 5 mm,故利用此位置数据与不同本构模型计算结果进行比较,结果如图 3 所示。

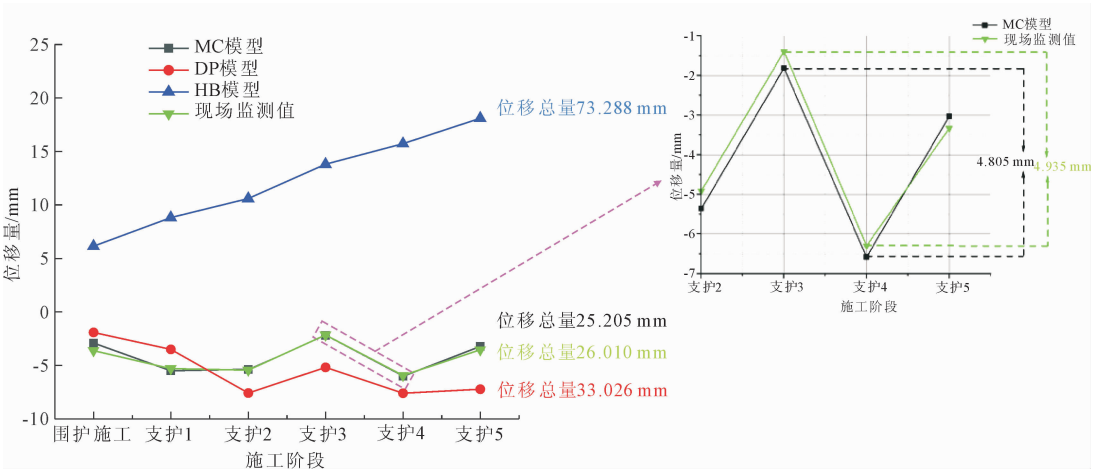


图 3 不同本构模型对比图

由图 3 所示数据可知,霍克-布朗本构模型计算所得位移量为正值且位移总量达到 73 mm,与实际结果大相径庭,表明此模型对于本工程黄土状粉土地层及下部风化岩层较不适用。德鲁克-普拉格(DP 模型)模型所得数据趋势与实际拟合度有出入,摩尔-库仑(MC)模型中,最大值与实测数据最大值接近且总位移量也与实际较为相符,结合以往类似土质地层数值模拟研究,排除建模过程的简化计算及实际施工所造成的误差,摩尔-库仑(MC)模型较为适用于本工程^[16]。

3 墙撑支护结构数值模拟计算

3.1 墙撑支护结构模型建立

为消除模型边界效应影响,基坑实体模型深度

边界、影响宽度按约 3 倍的基坑开挖深度考虑^[17],故取模型长度为 400 m,宽度为 180 m,厚度为 50 m。基坑土体及上部结构采用 3D 实体单元并赋予其弹性模量、泊松比、黏聚力等基本参数,建筑物筏板与地下连续墙均采用 2D 弹性板单元模拟,立柱、支护桩采用 2D 弹性梁单元模拟,内支撑采用 1D 梁单元,建筑物筏板桩采用 1D 植入式梁单元,建模步骤如图 4 所示。为提供基坑的侧向支撑,抵抗侧向土压力,防止基坑边缘土体的坍塌,在基坑四边取边长 3 m 的钢筋混凝土角撑,为提供水平方向上的支持,防止基坑墙体产生水平位移,确保基坑稳定性,在基坑中部设置三道宽分别为 3.86 m、3.09 m、3.86 m 的钢筋混凝土水平对撑,墙撑支护结构模型如图 5 所示。

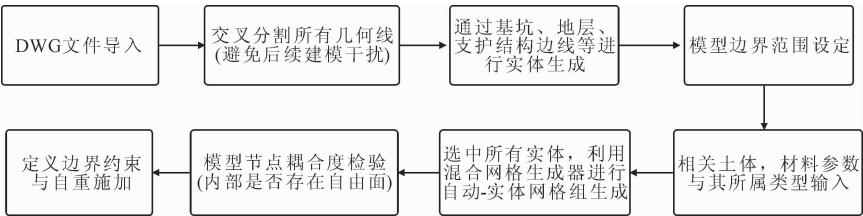


图 4 建模步骤图

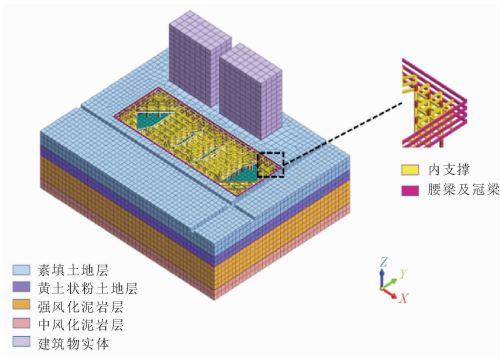


图 5 内支撑地下连续墙支护模型简图

3.2 施工工况

由于回填土体主要为黄土以及第三系砂岩块,土质条件较差,基坑开挖时要合理安排工序,通过实施合理的分段分层开挖控制策略,可有效削减因土体一次性大规模开挖作业所衍生的风险概率,进而规避了大规模塑性区形成的潜在隐患,保障了工程的安全性^[18]。在模拟施工时,将基坑分为 7 段开挖,在其开挖深度内,素填土层、黄土状粉土层为基坑主要受力及变形层。设计采用 3.2 m 分层开挖,腰梁尺寸为 $H = 800\text{ mm}$ 、 $B = 1000\text{ mm}$,支撑尺寸为

$H = 800\text{ mm}$ 、 $B = 1000\text{ mm}$,共设四层,在软件中进行施工阶段模拟时,主要过程如图 6 所示。

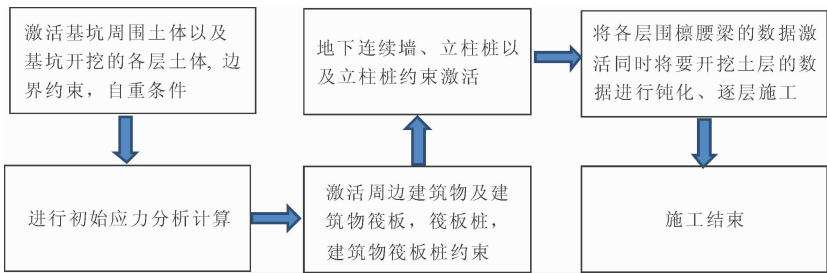


图 6 施工模拟流程图

4 结果对比分析

根据 midas GTS NX 软件模拟数据分析,关注模型周边环境竖向的沉降及水平位移。依照《建筑基坑工程监测技术标准》^[19](GB 50497—2019),为观测基坑开挖时的实际状态及其位移变化趋势,分别在北侧邻近居民楼建筑处设置 11 处观测点、东侧道路 B 处设置 8 处观测点、南侧北环路 20 处观测点,共 39 处作为此基坑位移量观测点,点位选取及现场监测如图 7 所示。

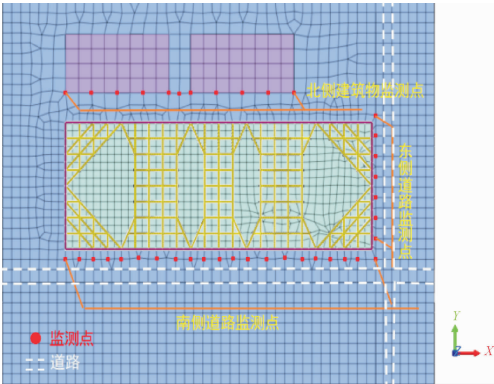


图 7 位移观测点

由于北侧建筑物紧邻基坑边线,故基坑开挖结束后其附近的水平及竖向位移量都对于建筑物的安全性有较大影响,原桩锚支护结构在 midas GTS NX 软件模拟中得出如图 8 所示,最大值为 0.0983 mm 的沉降,且各位置沉降值基本一致,而位移实地监测中,邻近建筑物沉降为 0.1 mm,两者基本相吻合,由此表明桩锚支护在竖向沉降控制方面表现较好;地下连续墙配合内支撑的支护结构开挖施工完成之后,在邻近建筑物处不同位置的沉降量最大值为 9.77 mm 左右,由于建筑物较集中于基坑西侧,此方向荷载较大且在上层支撑施工完成至下层支撑施工前,对于基坑边坡的支护可能出现不足,故各测点沉

降值均较大,但依据《建筑工程基坑支护技术规程》(GB 50218—94)中规定,一级基坑围护结构施工时,周围建筑竖向沉降绝对值在 20 mm 之内且不应出现裂缝即可认为安全,故由此可分析建筑物的整体安全性影响在可控范围之内。

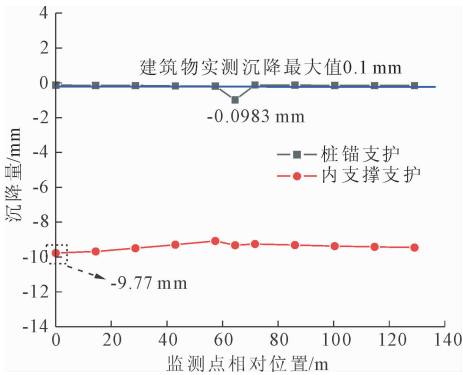


图 8 桩锚及墙撑支护时北侧建筑物沉降曲线

原基坑实际施工过程中,南侧邻近北环路也是监测重点项目。经模拟计算得出其在北环路处设置的 20 处监测点中,桩锚支护竖向沉降最大值如图 9 所示为 5.51 mm;在墙撑支护施工完成后监测点最大沉降量如图所示,其产生最大值为 7.17 mm,均值为 3.94 mm 的竖向沉降,其最大值相较桩锚支护有 30% 的增长。而在实际工程中,施工单位反映在进行桩锚支护围护桩施工时,自基坑 ±0.000 之下 -11 m ~ -28 m 深度内出现饱和土,考虑到支护桩钻孔过程中可能出现塌孔以及桩后饱和土体向基坑流动,进而引发坑外建筑物或道路沉降等问题,即刻提出采用高压旋喷桩加固桩间土的支护加固方案。但施工单位凭借其在原状土体基坑施工中积累的经验,未采用该加固方案,而是执意冒险继续按照原方案进行施工,导致饱和土体侧向流动,故在后期工程进行时,南侧北环路产生最大 13.7 mm 的下沉,现场沉降裂缝如图 10 所示。此差异也验证了模型对施工质量的预警作用。

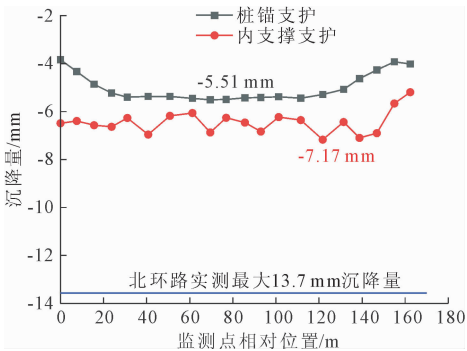


图 9 桩锚及墙撑支护时南侧北环路沉降曲线



图 10 现场沉降产生裂缝示意图

基坑南部中部水平位移总量为 26 mm,达到规范要求报警值,但原施工单位以其之前基坑施工经验为依托,未采纳自桩顶下 1.8 m、4.6 m、7.8 m 再加固 3 道锚索的建议,最终在后期施工中,基坑南侧中部至东部阶段出现 60 mm 的水平变形,与图 11 桩锚支护水平位移模拟值基本一致,严重威胁施工安全,故采用斜撑进行快速加固以遏制基坑的进一步变形,避免了基坑失稳,这也表明 midas GTS NX 软件模拟在实际施工中具有一定的参考意义。在墙撑支护的各监测点水平位移如图 12 所示,在 0.8 mm~2.6 mm 之间,最大值为 2.6 mm,总量在 15.033 mm,在不同的施工阶段中,随着基坑开挖及支护结构施工,北环路水平位移逐渐增大,到第五次开挖时,位移量加大,分析原因为此次开挖土层为黄土状粉土,粉粒作为黄土中松散结构的骨架,其中存

在着大孔隙^[20],因此导致土层支撑力欠佳。当工况进行到开挖 6 时,基坑主体支护结构施工已全部完成,故此工况下位移量偏小。但据总体分析,所采用的支护方案在竖向和水平方向上均能有效保持稳定,满足居民建筑的使用安全要求并且无需后续的紧急加固处理,符合道路安全使用的相关准则。

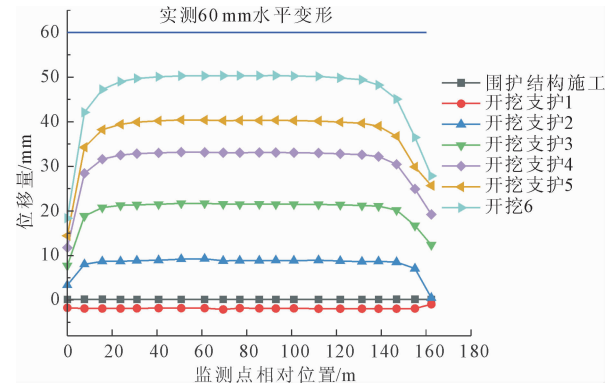


图 11 桩锚支护时南侧北环路水平位移曲线

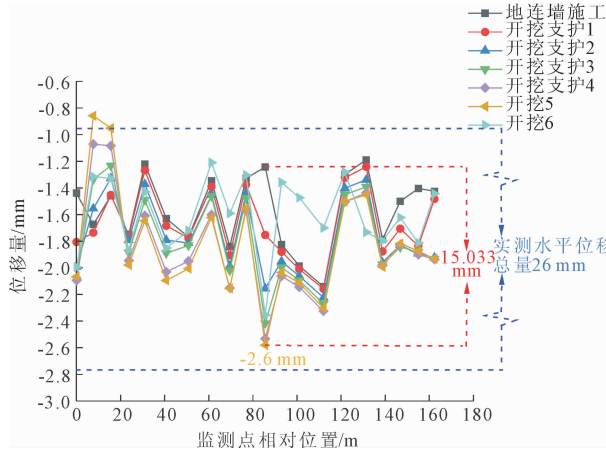


图 12 墙撑支护时南侧北环路水平位移曲线

基坑东侧道路 B 各监测点沉降量如图 13 所示,基坑东侧墙撑支护竖向沉降均值为 6.01 mm,最大沉降值 6.7 mm;桩锚支护的沉降均值为 5.17 mm,最大值 5.86 mm,相比于墙撑支护的沉降最大值有 14% 的减小,且各位置的沉降量均比墙撑支护有一定的降低,故其竖向支护效果优于墙撑支护,但两种支护形式在施工过程中产生的沉降量均在规范规定的安全范围值之内。桩锚支护模拟水平位移如图 14 所示,由图 14 可知,桩锚支护模拟水平位移最大值为 9.01 mm,墙撑支护水平位移最大量位于东部基坑中部为 8.57 mm,此处为支撑交点处受力情况复杂且土层支承略有不足,但对比桩锚支护有近 6% 的位移减少量,且不同监测点处的位移波动相比于桩锚支护更为平缓。随着施工的进行,总体位移

量缓慢增长但所有均符合规范要求安全值。

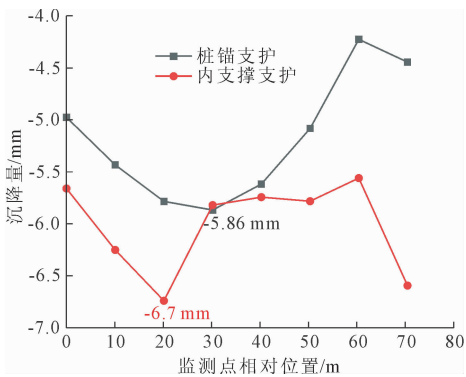


图 13 桩锚及墙撑支护时东侧道路 B 沉降曲线

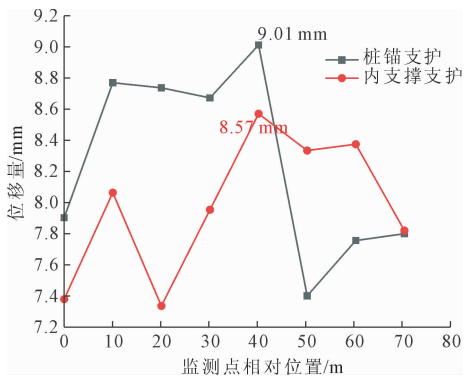


图 14 桩锚及墙撑支护时东侧道路 B 水平位移

5 结 论

以兰州某填土场地深基坑支护工程为例,结合实地地质勘察报告,运用 midas GTS NX 有限元软件,对桩锚、墙撑支护基坑开挖过程中基坑周边地面沉降及水平位移进行模拟研究,并与实际监测数据进行对比分析,结论如下:

(1) 对比分析实际位移监测数据,摩尔-库仑本构模型在黄土状粉土地层基坑支护模拟中,位移计算值与现场监测数据结果较吻合,结果显著优于德鲁克-普拉格模型和霍克-布朗模型,故黄土状粉土层可选取莫尔-库仑本构模型进行数值模拟计算与分析。

(2) 在基坑周边地表竖向沉降控制研究中,桩锚与墙撑两种支护体系下的建筑物及道路沉降值均处于安全预警阈值内,但沉降控制能力存在显著差异。桩锚支护体系表现出更优的竖向变形控制效果,其中北侧邻近建筑物最大沉降仅 0.1 mm(与实测值偏差 <5%)。墙撑支护体系下,北侧建筑沉降显著增加至 9.77 mm,增幅 90% 以上,基坑南侧道路沉降差值更为明显,其沉降值较桩锚体系升高

30%,东侧道路沉降增幅相对平缓,其最大值较桩锚支护增加 14%。墙撑支护虽能满足安全要求,但其引发的附加沉降效应在敏感区域(如临近既有建筑侧)尤为显著,而桩锚支护通过应力场重分布有效抑制了土体扰动,在复杂城市环境中更具沉降控制优势。

(3) 针对基坑周边道路出现的水平位移情况,南侧墙撑支护产生的位移总量为实际监测值的 50%,且在后期工况下保持稳定无异常波动;在基坑东侧的位移监测中,墙撑支护水平位移最值相较于桩锚支护减小了近 6%。上述数据表明,在黄土状粉土地层中采用地下连续墙结合内支撑的支护体系比桩锚支护具有更好控制基坑周围场地水平变形的效果,且在复杂工况下表现出更好的稳定性。

(4) 黄土状粉土地层中进行基坑开挖时,内支撑加地下连续墙支护结构在控制水平位移方面效果良好,但在控制竖向沉降方面相较于桩锚支护略有不足,当基坑开挖对水平位移控制要求较高时,可考虑内支撑结合地下连续墙支护形式。实际工程中可针对基坑周边环境 and 变形要求采取二者组合的支护方式。

(5) 通过多监测点模拟数据与实测数据的误差分析验证,表明模型能够有效预测黄土状粉土地层基坑变形趋势,可为支护方案优化提供参考。

参考文献:

[1] 郭延辉,严明,宋琴,等.深基坑开挖对临近既有高压天然气管道的影响[J].地下空间与工程学报,2021,17(S2):840-847.

[2] 谢晓冬,李梓焜,陈锐浩,等.基坑开挖对邻近建筑及既有地铁的影响分析[J].路基工程,2020(2):175-179.

[3] 董山.不同击实条件下黄土状粉土的剪切特性研究[D].太原:太原理工大学,2020.

[4] 姚志华.兰州地区大厚度自重湿陷性黄土地浸水试验综合观测研究.[J]岩土工程学报,2012,28(3):382-389.

[5] 杨校辉,朱彦鹏,郭楠,等.西宁地区几个基坑工程问题分析和处理[J].岩土工程学报,2014,36(S1):208-213.

[6] 李英业.高压旋喷锚索在某工程黄土状土层中的应用研究[J].中国金属通报,2022(11):231-233.

[7] 王福常.装配式钢内支撑在某深基坑中的应用[J].混凝土世界,2023(6):62-65.

[8] 陈冬青.深基坑内支撑支护体系在工程中的应用[J].建筑科学,2015,31(3):122-125.

[4] 樊超,沈健,孙学良,等. 固原市湿陷性黄土及冻融地区海绵城市建设经验思考[J]. 城市住宅,2020(5):195-199.

[5] 周延国,张彩双,王勇鑫. 素土挤密桩在某均质土坝段地基处理中的应用[J]. 水电与新能源,2022(6):1-3.

[6] 安月川. 灰土挤密桩在湿陷性黄土路基处理中的应用[J]. 工程建设与设计,2022(1):202-204.

[7] 田叶军. CFG 桩和灰土挤密桩复合地基的应用[J]. 山西建筑,2019(4):67-69.

[8] 李晓萍,李正华. 水利工程堆石混凝土定额消耗量研究[J]. 人民黄河,2024(12):151-155.

[9] 董海洋. 高路堤灰土挤密桩加固效果分析[J]. 北方交通,2023(9):46-50.

[10] 李云瑜,贾世平,苏天涛. 湿陷性黄土地区多桩型挤密桩复合地基加固效果对比研究[J]. 兰州理工大学学报,2024(10):147-152.

[11] 陈继斌. 素土挤密桩处理低含水率湿陷性黄土地基的研究与应用[J]. 中国水能及电气化,2021(7):42-44.

[12] 孙本章. 灰土挤密桩处理公路路基效果研究[J]. 北方交通,2024(12):46-49.

[13] 张利娟. 市政与水利不同定额下引水工程造价对比分析[J]. 浙江水利水电学院学报,2018(2):57-62.

[14] 周强. 灰土挤密桩地基处理技术工法特点探究[J]. 山西水利科技,2024(4):31-33.

[15] 刘好正. 挤密桩复合地基在湿陷性黄土地基处理中的应用[J]. 铁道标准设计,2010(10):14-17.

[16] 熊维,柳旻,何森,等. 湿陷性黄土地区建筑地基加固研究[J]. 铁道建筑技术,2024(12):141-145.

[17] 陈从兴,铁生年. 灰土和土挤密桩在湿陷性黄土地基中的设计与应用[J]. 建筑技术,2009(3):221-224.

[18] 张清焕. 建筑软弱地基概述[J]. 科技创新导报,2010(10):32-33.

[19] 张荣,孙楠,朱品光. 宁夏水土保持工程机修水平梯田概算补充定额研究[J]. 中国水土保持,2024(3):65-69.

[20] 王艳. 关于农田水利工程定额标准中人工预算单价的调整分析[J]. 陕西水利,2020(6):229-233.



(上接第 25 页)

[9] Liang Yaxiong, Ye Shuaihua, Huang Yiguan. Deformation rules of deep foundation pit of a subway station in Lanzhou collapsible loess stratum [J]. Applied Rheology, 2023,33(1):20230107.

[10] 洪瑛,吴薇. 地下连续墙结合三道内支撑的深基坑施工技术[J]. 浙江建筑,2004(3):25-26,61.

[11] 王玲. 地下连续墙“两墙合一”结合内支撑体系在某基坑工程中的应用研究[J]. 中国科技投资,2021(2):162-163.

[12] 陈琼. 地下连续墙+内支撑在某工程深基坑施工中的应用[J]. 建设科技,2022(11):120-122.

[13] 王国斌,叶铭,代先尧,等. 基于 ABAQUS 的斜坡桩土模型的地应力平衡方法研究[J]. 公路,2022,67(12):158-163.

[14] 盛晓杰,陆汉光. 基于 FLAC3D 的岩土预应力锚固支护数值模拟[J]. 计算机仿真,2021,38(2):206-209,295.

[15] 李明瑛,曾朋. 基于 MIDAS 深基坑桩锚支护数值模拟分析[J]. 水土保持研究,2012,19(1):250-253.

[16] 许健,杨少飞,吴海洋,等. 黄土地区深大基坑桩锚支护结构监测与数值分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(4):517-524.

[17] 常虹,肖岚心. 基于 MIDAS GTS 基坑支护数值模拟分析[J]. 吉林建筑大学学报,2021,38(3):33-36.

[18] 邹刘宗,张强,王建望,等. 深基坑分层开挖对临近高压铁塔稳定性影响[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(S2):829-834,849.

[19] 建筑基坑工程监测技术标准:GB 50497—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2020.

[20] Bai Xiaohong. Engineering properties of Lucheng loess in Shanxi [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002,24(4):515-518.