

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.03.003

组合支护式深基坑开挖数值模拟及影响因素分析

钱顾前, 李大华, 王 迪, 汪亚林

(安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 以某桩锚桩撑组合支护的基坑工程为依托, 通过 MIDAS GTS NX 有限元软件对基坑开挖过程进行还原模拟, 同时探究桩锚桩撑所占比例的变化对基坑支护结构变形的影响。模拟结果表明: 随着桩锚支护所占比例的增加, 支护结构变形与锚杆轴力均逐渐增大并趋于稳定, 但是内支撑轴力则呈现出逐渐减小的变化趋势。

关键词: 组合支护; 支护结构变形; 锚杆; 内支撑

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)03-0016-08

引文格式: 钱顾前, 李大华, 王 迪, 等. 组合支护式深基坑开挖数值模拟及影响因素分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(3): 16-23.

Numerical Simulation and Influencing Factor Analysis of Combined Support Deep Foundation Pit Excavation

QIAN Guqian, LI Dahua, WANG Di, WANG Yalin

(School of Civil Engineer, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Based on a foundation pit project supported by a combination of anchor and pile supports, a simulation has been made of the excavation process of the foundation pit by using MIDAS GTS NX finite element software. Meanwhile, an exploration and an analysis are made of the influence of changes in the proportion of anchor and pile supports on the deformation of the foundation pit support structure. The research results indicate that as the proportion of pile anchor support increases, the deformation of the support structure and the axial force of the anchor rod gradually increase and tend to stabilize, while the internal support axial force shows a gradually decreasing trend.

Keywords: combination support; deformation of supporting structure; anchor rod; internal support

由于基坑周围环境的复杂性, 以及为了在保证基坑安全性的同时尽可能地降低基坑支护的成本^[1], 单一支护方式已经不能够满足现在基坑支护方案设计的需求^[2], 故组合支护体系^[3]应运而生。同一基坑中的支护方案可以根据周边环境、经济效益, 以及安全性等因素进行分段设计^[4], 在保证基坑安全性的同时, 可以降低基坑工程临时性工程的资源投入^[5], 也

可以以较短的时间去完成深基坑开挖。本文拟结合某桩锚桩撑组合支护式深基坑实际开挖情况, 以及对比模拟结果与监测数据的贴合度, 运用有限元分析软件 MIDAS GTS NX 对基坑开挖过程进行最大精度的还原模拟, 同时探究组合支护中桩锚桩撑所占比例的变化对基坑支护变形的影响, 本研究对类似基坑工程具有积极的指导意义。

收稿日期: 2024-04-03

基金项目: 马鞍山首建工程质量检测咨询有限公司与安徽建筑大学合作基金资助项目 (HYB20220091)

作者简介: 钱顾前, 男, 安徽建筑大学硕士生, 主要研究方向为现代工程施工力学与结构理论及管理技术,

E-mail: 1654045860@qq.com

1 工程概况

1.1 工程条件

本研究中选用工程为某市地下车库基坑支护工程。该工程地上建筑由1栋17层和1栋25层主楼以及连体地下车库组成。基坑开挖深度为12 m。结合拟建建筑物周围管线及建筑物条件、支护方案的技术可行性、基坑工程造价等因素,针对拟建建筑物所在场地土层的特点,确定4个拐角地段采用“排桩+内支撑支护”方案,两道内支撑主撑截面尺寸均为800 mm×900 mm,连接主支撑梁间的次支撑梁尺寸为500 mm×600 mm。首道混凝土内支撑与冠梁搭接,中心标高为-2.35 m;第二道混凝土内支撑与腰梁搭接,中心标高为-7.35 m;所采用的混凝土强度等级均为C30。其余地段采用“排桩+预应力锚索”的支护方式,两层锚杆均采用3根Φ15.24 钢绞线制作,孔径为180 mm,长为22 m,自由端长度为9 m,倾角与水平夹角为15°。水平间距为1.1 m(一桩一锚)及2.2 m(隔桩1锚)。锚杆预应力为90 kN,设计抗拔力为350 kN。整体支护方式如图1所示,桩锚段以及桩撑段的支护详图见图2(图中尺寸单位为mm)。

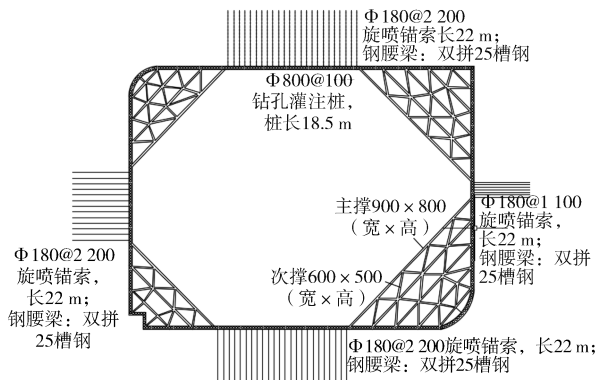
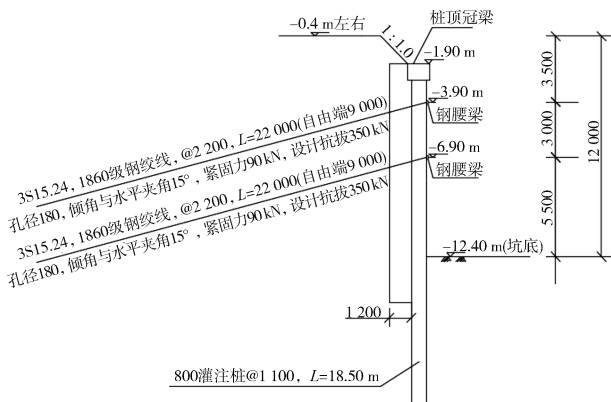
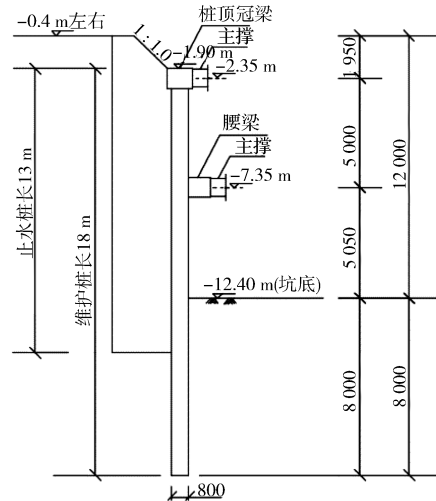


图1 基坑整体支护图

Fig. 1 Overall support diagram



a) 桩锚支护



b) 桩撑支护

图2 支护详图

Fig. 2 Supporting details

1.2 工程地质条件

拟建建筑物所在场地岩土自上而下为: 1) 素填土。以黏性土为主, 局部夹杂少量碎石子、砖块等。2) 粉质黏土。褐黄色, 可塑, 夹条带状灰色黏土; 干强度中等, 韧性中等。3) 风化闪长岩。灰黄、灰白色, 原岩成分已风化为黏土矿物, 结构基本被破坏。4) 强风化闪长岩。灰褐、青灰色, 结构大部分被破坏。5) 层中风化闪长岩。青灰色, 岩体完整程度分类属于较完整。典型地质剖面图(测点32处地质剖面图)及建筑物与勘测测点平面布置图见图3、图4。各土层主要力学性质见表1。

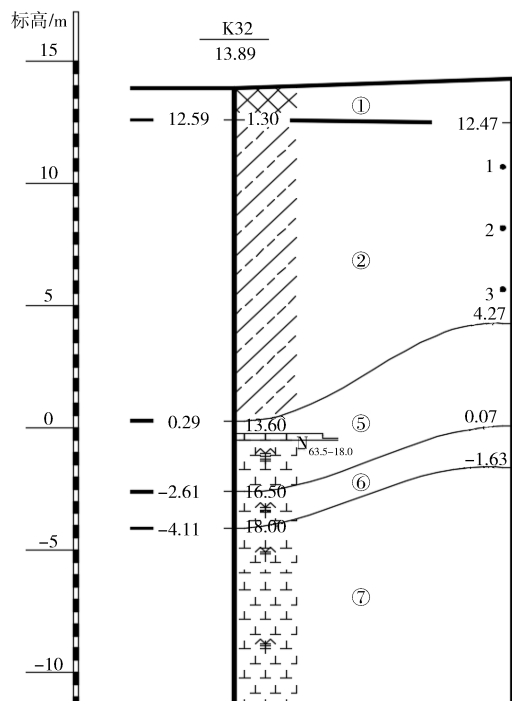


图3 典型地质剖面图

Fig. 3 Typical geological profile map

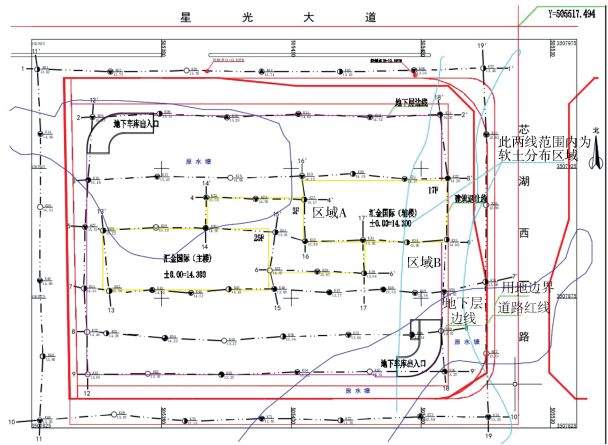


图 4 建筑物与勘测测点平面布置图

Fig. 4 Floor plan of the building and survey points

拟建场地上层滞水主要存在于首层杂填土以及浅部黏土中，无自由稳定水面，主要补给来源为大气降水，地下水位随季节变化，主要以蒸发方式排泄，并受地表水径流影响。基坑开挖前，已将地下水位降到基坑坑底标高以下，所以本文所涉及软件模拟基坑开挖过程中降水及地下水产生的影响忽略不计。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the soil layer

土体名称	容重 / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	内摩擦角 / ($^{\circ}$)	黏聚力 / kPa	孔隙比	泊松比
素填土	18.2	11.5	10.0	0.880	0.30
可塑粉质黏土	19.3	14.1	32.0	0.774	0.30
硬塑粉质黏土	20.4	20.9	63.0	0.620	0.30
全风化闪长岩	21.5	(25)	(30)	—	0.29
强风化闪长岩	23.1	(30)	(42)	—	0.26
中风化闪长岩	25.0	—	(50)	—	0.25

注：() 为经验值。

1.3 监测方案

本项目相关测点布置如图 5 所示。

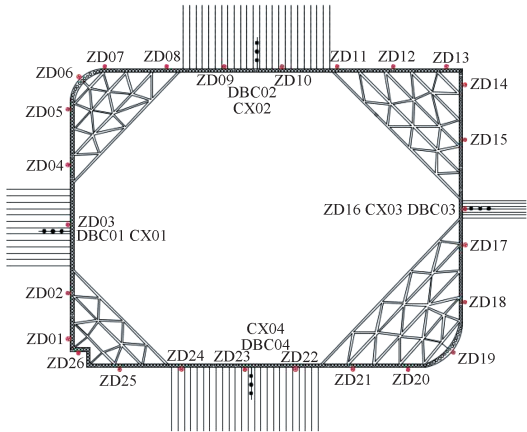


图 5 基坑监测点布置示意图

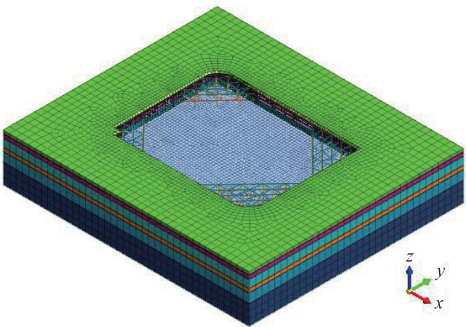
Fig. 5 Schematic diagram of the layout of foundation pit monitoring points

基坑支护工程是一种具有很大风险性的临时工程，施工应按照动态设计、信息化施工规定^[6]，确保基坑本身、周围建筑物以及地下管线的安全，因此进行基坑监测是非常必要的。

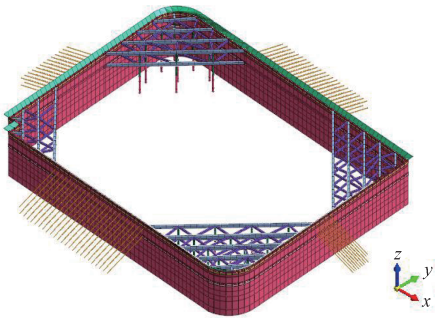
2 基坑开挖的数值模拟分析

2.1 模型简介

在进行相关文献阅读的基础上，结合实际工程经验，设定基坑开挖的竖向影响范围为距坑底 2 倍基坑开挖深度范围内，水平方向的影响范围为开挖深度的 2~3 倍^[7]，为确保基坑开挖影响范围被完全考虑到且不会因为模型尺寸过大而影响运行速度^[8]，本文竖向选取坑底距模型底部 3 倍开挖深度，水平边界距基坑边界选取 4 倍开挖深度，所以三维模型 x 、 y 、 z 轴对应的长、宽、高分别为 233, 203, 45 m。根据现场施工，可将本基坑分为 6 次开挖，先以 1:1 的坡比进行放坡开挖，然后边开挖边支护。在三维建模时将围护桩等效为地连墙进行建模，基坑及支护模型整体图如图 6 所示。



a) 基坑模型图



b) 支护模型图

图 6 基坑及支护模型图

Fig. 6 Foundation pit and support model diagram

2.2 参数设置

2.2.1 土层参数

场地环境较为复杂，在进行地质勘查时发现部分土层在拟建场地并不是广泛分布，所以在建模时仅在局部分布的土层不进行考虑。广泛分布于拟建场地的

土层, 其相关物理力学参数见表1。

2.2.2 结构材料参数

除围护桩以外建模所涉及的结构材料参数均按照实际尺寸、材料进行设置。围护桩采用等效地连墙^[9]的方法进行换算, 经计算, 桩径为800 mm、间距为1 100 mm的围护桩可等效为602 mm厚的地连墙。模型中所涉及的结构材料参数如表2所示。

表2 结构材料参数

Table 2 Structural material parameters

结构名称	截面尺寸	容重 / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量 / MPa	单元 类型
地连墙	$T=0.602\text{ m}$	25.00	0.21	30 000	2D 板 单元
喷混	$h=0.08\text{ m}$	23.56	0.20	25 500	2D 板 单元
冠(腰)梁	$0.9\text{ m}\times 1.2\text{ m}$	25.00	0.21	30 000	1D 梁 单元
立柱	$0.45\text{ m}\times 0.45\text{ m}$	78.50	0.30	206 000	1D 梁 单元
立柱桩	$D=0.8\text{ m}$	25.00	0.21	30 000	1D 梁 单元
内支撑 (主撑)	$0.8\text{ m}\times 0.9\text{ m}$	25.00	0.21	30 000	1D 梁 单元
内支撑 (次撑)	$0.5\text{ m}\times 0.6\text{ m}$	25.00	0.21	30 000	1D 梁 单元
锚杆	$D=0.015\text{ m}$	76.98	0.30	206 000	植入式 桁架

2.3 基坑开挖工况设置

施工工况的设置通常按照基坑开挖过程中土体开挖以及支护结构的施工先后顺序划分, 本文中基坑开挖全过程划分成7个工况, 各工况详见表3。

表3 开挖分析施工步

Table 3 Excavation analysis construction steps

编号	工 况
1	初始地基应力阶段。激活所有土层、边界约束、重力荷载, 勾选初始位移清零
2	钝化开挖1土层(1:1放坡开挖1.5 m)
3	钝化开挖2土层(开挖1.3 m), 激活喷混、地连墙、冠梁、首道内支撑、立柱、立柱桩约束
4	钝化开挖3土层(开挖1.0 m), 激活第一层锚杆、钢腰梁、锚杆预应力
5	钝化开挖4土层(开挖3.15 m), 激活第二层锚杆、钢腰梁、锚杆预应力
6	钝化开挖5土层(开挖0.7 m), 激活腰梁、第二道内支撑
7	钝化开挖6土层(开挖4.35 m)

2.4 监测及模拟数据分析

2.4.1 监测数据分析

本节拟对基坑中所布置的监测点获得的监测数据进行整理, 并选取基坑北侧的地表沉降监测点DBC02-1~02-3自基坑开挖直至开挖至坑底为期150 d的监测数据进行分析, 并绘制了该监测点地表沉降

随基坑开挖进程变化曲线, 如图7所示。

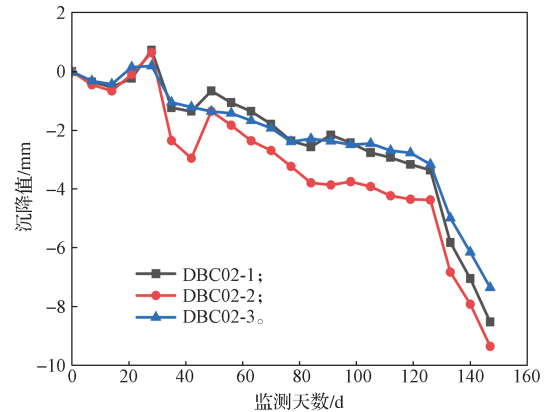


图7 基坑监测点沉降曲线

Fig. 7 Settlement curve diagram of foundation pit monitoring points

由图7可知, 随着基坑开挖的进行, 各测点的沉降量大致呈现逐渐增加的趋势, 但是可以看出在监测日期为第18 d以及第38 d时, 有着明显的上升趋势, 在这两个时间点之所以造成这种现象, 可能是因为在第18 d时围护桩的施工挤压土体, 造成沉降减小; 在第38 d时, 则是因为锚杆的施工以及其发挥作用, 作用在支护桩上的锚索力要大于桩后的主动土压力, 使支护桩产生向坑外的位移趋势, 所以沉降会一定程度地减小。

由于在施工过程中对测点的保护措施不够, 所以部分测点在锚杆进行施工时遭到破坏, 但基坑北侧处CX02测点保留完整, 对其监测数据进行整理, 并绘制围护桩深层次水平位移随基坑开挖进程的变化曲线, 如图8所示。

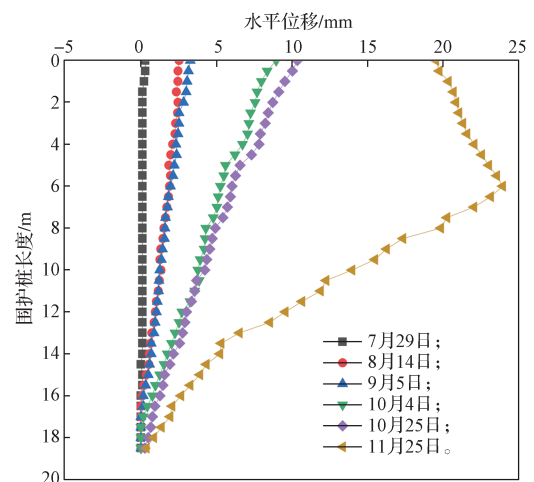


图8 围护桩深层次水平位移曲线

Fig. 8 Curve diagram of the deep horizontal displacement of retaining piles

由图8可知, 随着基坑开挖进行, 桩身水平变形增大, 基坑开挖结束时, 该测点处围护桩深层次水平

位移最大值为 23.9 mm, 小于预警值 45 mm, 支护结构处于安全状态。围护桩最大变形处随着开挖的不断进行逐渐由桩顶下移, 桩身变形曲线由“前倾式”转变成“鱼腹式”, 最终在开挖结束时桩身变形最大处位于桩身高度 6 m 左右, 位于围护桩中上部。

2.4.2 模拟结果分析

根据数值分析结果, 提取基坑四边围护结构变形最大处, 围护桩最大变形曲线如图 9 所示。

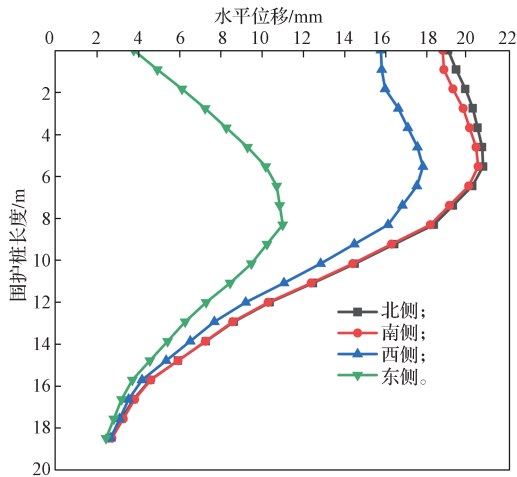


图 9 基坑四侧围护桩最大变形曲线

Fig. 9 Maximum deformation curves of the retaining piles on four sides of the foundation pit

分析图 9 所示基坑四侧支护结构最大变形可知, 变形最大处均位于桩锚支护段跨中位置处, 且桩身最大变形由大到小排序为基坑北侧 20.77 mm、基坑南侧 20.51 mm、基坑西侧 17.82 mm、基坑东侧 11.38 mm。桩锚支护段在基坑北、南、西、东四侧长度占比各为 40%, 38%, 28%, 9%, 由此可知, 随着桩锚段所占比例的增加, 围护结构的变形也逐渐增大, 由图 9 可以看出, 基坑东侧支护结构变形最大处围护桩的变形趋势与最大变形所在处与桩锚支护部分表现出一致性。北侧支护结构的变形趋势与最大变形所在处则与桩锚支护表现出一致性。所以当桩锚支护所占比例超过一定范围时, 桩锚支护对整体支护结构所产生的控制作用就显得微乎其微。

据数值分析结果提取基坑四边沉降最值, 如图 10 所示。其中所取点连线垂直于基坑边缘, 正值代表该位置处为隆起, 负值则代表该位置发生沉降。由图 10 可知基坑北侧沉降最值为 9.43 mm、基坑南侧沉降最值为 9.29 mm、基坑西侧沉降最值为 8.03 mm、基坑东侧沉降最值为 5.10 mm。可以发现随着桩锚支护长度所占基坑边长比例的增大, 沉降值也越来越大, 这也说明桩锚支护对于控制地表沉降的效果要强于桩锚支护。并且可以看出基坑四侧沉降曲线由

近到远均呈现先增大后减小的“抛物线”式, 且沉降最值所在位置均处于距基坑边缘 5 m 处。

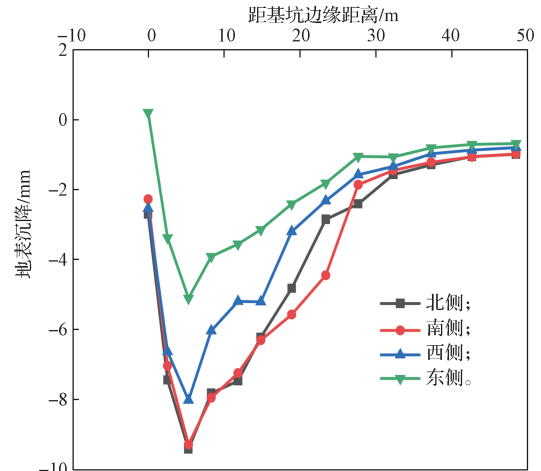
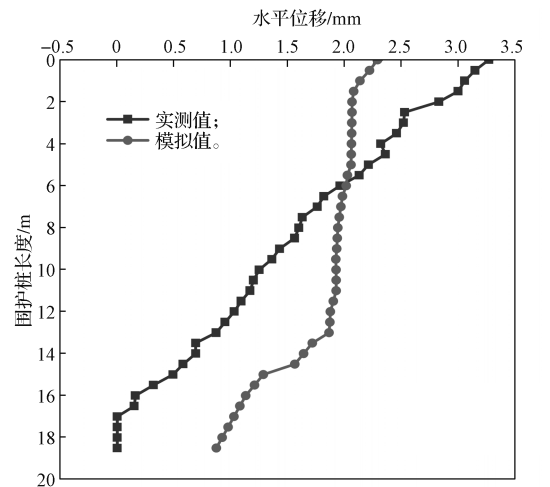


图 10 基坑四侧沉降最值曲线

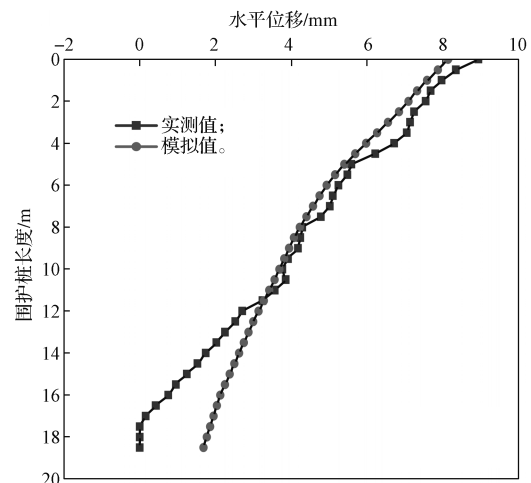
Fig. 10 Maximum settlement curves on the four sides of the foundation pit

2.4.3 模拟结果与监测数据对比

选取围护桩深层次水平位移 CX02 的监测值与数值分析模拟结果进行对比, 结果如图 11 所示。



a) 工况 4



b) 工况 5

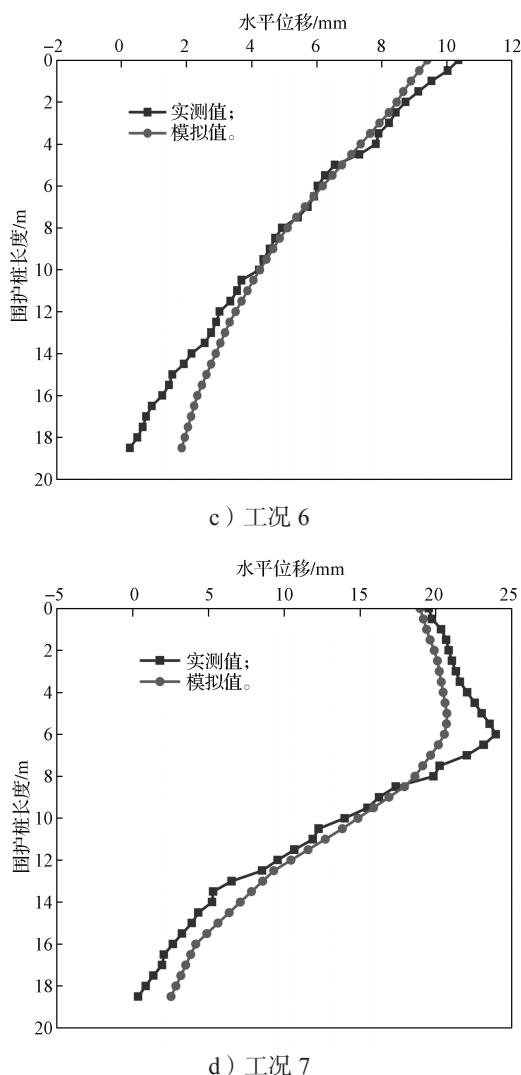


图 11 CX02 监测点水平位移对比图

Fig. 11 Comparison of the horizontal displacement of CX02 monitoring points

从图 11 所示水平位移对比图可以看出, 桩身水平位移实测值曲线与模拟值所呈现的变化趋势大致相同, 但是可以看出, 在支护结构的中下部监测数据与数值模拟结果存在较严重的偏差, 这是因为实际测量时, 认为测斜管底部为一种固定端, 从而忽略了其水平位移^[10]; 可以看出在开挖结束时实测曲线最大位移变形处所处位置与模拟曲线相同, 最大值所处位置均距围护桩顶部约 6 m; 而且可以看出模拟值整体小于实测值, 模拟结果中桩身水平位移最大值为 20.76 mm, 而实测值为 23.9 mm, 之所以模拟结果与实测数据产生一定偏差, 原因可能有以下几点: 首先, 在进行软件模拟时无法对基坑周边施工所产生的车辆荷载以及堆积荷载进行准确还原; 其次, 可能是由于施工时间跨度较大, 期间会有雨季, 以及基坑在开挖之后支护不及时; 最后, 可能是由于工程所在地层的复杂性、不均匀性, 在模拟过程中为方便对

基坑进行还原, 对地层进行了一定程度的简化, 假设其各层均匀分布^[11], 这也会造成模拟结果与实测数据产生一定偏差。但模拟结果与实测曲线具有一定程度的相似性, 两者之间的偏差也在合理范围之内, 因此可以运用此模型进行下一步的参数影响分析。

3 组合支护比例变化的数值分析

为探究桩锚桩撑段比例对支护结构变形的影响, 通过改变西北侧最外侧角撑的位置来改变桩锚桩撑段比例, 以此建立对比模型。模型一: 取消西北侧最外侧角撑; 模型二: 将最外侧角撑向内移动 4.5 m; 模型三: 原基坑模型; 模型四: 将最外侧角撑向外移动 4.5 m; 模型五: 在最外侧角撑 9.0 m 处加一道角撑。此时, 基坑北侧桩锚段所占比例分别为 33%, 36%, 40%, 43%, 47%, 基坑西侧桩锚段所占比例为 19%, 24%, 28%, 32%, 37%。

首先, 根据对照模型所获得有限元软件计算结果, 提取东北侧桩撑支护部分两层混凝土支撑轴力最大值, 以及围护桩最大水平位移, 结果如表 4 所示。

表 4 不同桩锚所占比例下桩撑部分变形及轴力

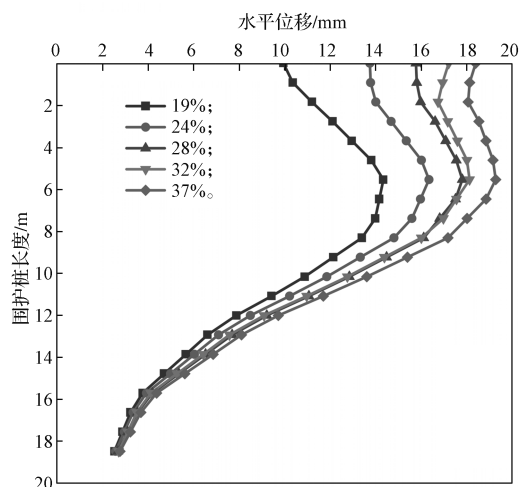
Table 4 Partial deformation and internal force of pile supports under different proportions of pile anchors

桩锚支护 所占比例 /%	第一层轴力 最大值 /kN	第二层轴力 最大值 /kN	最大水平 位移 /mm
33	2 040.11	2 955.54	11.75
36	2 010.50	2 945.04	11.85
40	1 992.16	2 879.71	12.29
43	1 985.46	2 873.70	12.31
47	1 917.05	2 871.91	12.32

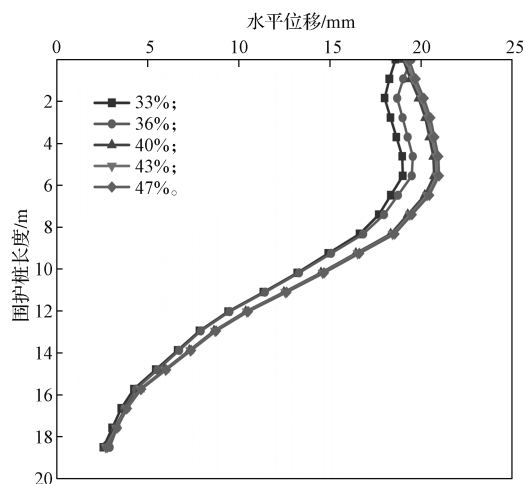
由表 4 可以看出, 随着桩锚支护段长度在北侧所占比例的增加, 支撑轴力值出现逐渐减小的变化趋势; 桩身水平位移则出现逐渐增加的趋势, 但可以看出当桩锚支护段所占比例大于 40% 时, 桩身最大水平位移增加幅度变得不明显。

根据对照模型所获得有限元软件计算结果, 绘制不同桩锚段所占比例下北侧以及西侧最大支护桩桩身位移, 如图 12 所示。由图 12 可知, 随着桩锚段所占比例的增加, 支护桩桩身位移最大值逐渐增加, 当桩锚段所占比例大于 40% 时变化幅度变得不明显, 因此在进行桩锚桩撑组合支护结构设计时, 需将桩锚段比例控制在 40% 以内, 使得桩撑段发挥较大作用。同时可以看出, 当桩锚段所占比例在 24%~37% 时, 围护桩桩身变形曲线大致呈现为“S”型, 桩身变形

最大值一直在桩顶以下 6 m 处, 但在此范围内桩顶位移逐渐增加, 故对桩顶监测需加强。



a) 基坑西侧

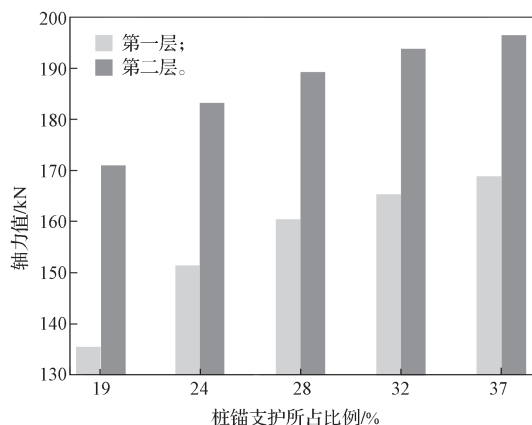


b) 基坑北侧

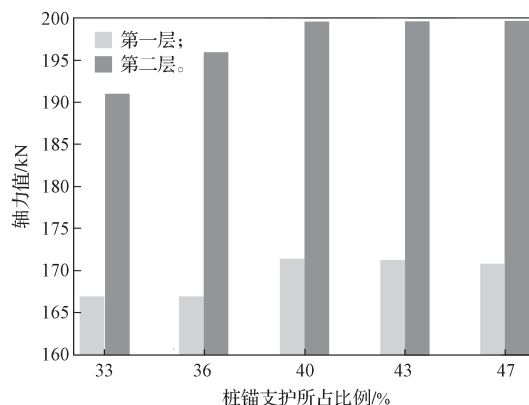
图 12 不同桩锚段所占比例下围护桩最大水平位移

Fig. 12 Maximum horizontal displacement of retaining piles under the proportion of different pile anchor sections

图 13 所示为在不同桩锚段比例下锚杆轴力最大值变化图。



a) 基坑西侧



b) 基坑北侧

图 13 不同桩锚段比例下锚杆轴力最大值变化图

Fig. 13 Variation diagram of the maximum axial force of the anchor rod under different pile anchor section ratios

由图 13 可知, 在基坑西侧两层锚杆的轴力最大值均随着桩锚支护所占比例的增加而增加, 且变化幅度逐渐减小; 而基坑北侧两层锚杆轴力最大值在桩锚支护所占比例逐渐增大的情况下逐渐趋于定值, 这说明当桩锚支护所占比例超过一定值时, 桩锚支护对其内力将不产生影响。

4 结论

本文运用有限元分析软件 MIDAS GTS NX 对某桩锚桩撑组合支护式深基坑进行开挖过程的三维模型建立, 将数值分析结果与实际监测数据进行对比, 以此验证有限元模型与实际基坑的贴合度, 在此基础上对模型进行设计参数改变, 分析了桩锚桩撑比例变化对组合支护结构的影响, 得出以下结论:

1) 具有与本工程类似特点的面积适中、开挖较深、周边场地较为开阔的基坑工程适合采用桩锚桩撑组合支护结构, 该组合支护结构综合了桩锚支护以及桩撑支护的优点, 在保证基坑安全性的前提下, 极大地减少了工程投入, 提高了施工效率。

2) 通过分析基坑数值分析模拟结果表明, 因基坑支护结构并非对称结构, 基坑四侧桩锚支护段所占比例各不相同。随着桩锚支护段长度在四侧各占比例的增加, 基坑四侧桩身变形最大值、沉降最大值以及锚杆轴力最大值均随之增大。基坑周边地表沉降均随着开挖深度的增加而增加, 且沉降值随着距基坑边缘距离的增加呈现先增加后减小的“抛物线”形式, 沉降最值位于距基坑边缘 0.4 倍开挖深度处。

3) 随着桩锚段所占比例的增加, 基坑支护结构的变形以及锚杆轴力均逐渐增加, 但是当桩锚段所占比例大于 40% 时, 这种增加幅度变得不明显, 且当

桩锚段比例为24%~37%时,围护桩变形呈现“S”型,此时需加强对桩顶位移的控制与监测。

参考文献:

- [1] 朱 渊. 深基坑安全监测数据分析及数值模拟研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2021.
ZHU Yuan. Data Analysis and Numerical Simulation of Deep Foundation Pit Safety Monitoring[D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2021.
- [2] 韦四江, 李鑫鹏, 黄英俊. 加锚裂隙岩层损伤机理及围岩控制现状及展望[J]. 煤炭工程, 2023, 55(8): 88-95.
WEI Sijiang, LI Xinpeng, HUANG Yingjun. Present Situation and Prospect of Damage Mechanism and Surrounding Rock Control of Anchored Fractured Rock[J]. Coal Engineering, 2023, 55(8): 88-95.
- [3] 邱建强. 深基坑支护中多种支护方案的组合应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(17): 201-202, 256.
QIU Jianqiang. The Combined Application of Several Support Schemes in Deep Foundation Pit Support[J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(17): 201-202, 256.
- [4] 郭 杰. 钻孔咬合桩围护结构设计要点及设计优化研究[J]. 铁道建筑, 2009, 49(6): 80-83.
GUO Jie. Important Issues in Design of Enclosing Structure in Form of Cast in Site Interlock Piles and Its Design Optimization[J]. Railway Engineering, 2009, 49(6): 80-83.
- [5] 田 野, 余地华, 邓昌福, 等. 基坑工程安全风险评价体系研究与应用[C]//2023年全国工程建设行业施工技术交流会. 北京:《施工技术(中英文)》杂志社, 2023: 536-539.
TIAN Ye, YU Dihua, DENG Changfu, et al. Research and Application of Safety Risk Assessment System for Foundation Pit Project[C]//2023 National Engineering Construction Industry Construction Technology Exchange Conference. Beijing: Construction Technology (Chinese and English) Magazine, 2023: 536-539.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 5-10.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations: JGJ 120—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012: 5-10.
- [7] 魏焕卫, 孙元硕, 尚文涛. 不规则基坑开挖导致支护结构变形及控制研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(19): 1-6.
WEI Huanwei, SUN Yuanshuo, SHANG Wentao. Study on Deformation and Control of Support Structure Caused by Irregular Foundation Excavation[J]. Construction Technology, 2022, 51(19): 1-6.
- [8] 王 瑞, 陈海霞, 王广峰. ANSYS有限元网格划分浅析[J]. 天津工业大学学报, 2002, 21(4): 8-11.
WANG Rui, CHEN Haixia, WANG Guangfeng. Analysis of ANSYS Finite Element Mesh Dividing[J]. Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology, 2002, 21(4): 8-11.
- [9] 王 迪, 李大华, 张俊龙, 等. 连续阳角型基坑开挖对临近建筑物影响的有限元分析[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2023, 39(6): 72-76.
WANG Di, LI Dahua, ZHANG Junlong, et al. Finite Element Analysis of the Influence of Continuous Cation Excavation on Adjacent Buildings[J]. Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition), 2023, 39(6): 72-76.
- [10] 赵 斐. 软土地区桩撑桩锚组合支护结构基坑变形分析[D]. 广州: 广州大学, 2019.
ZHAO Fei. Deformation Analysis of Foundation Pit of Pile-Supported Pile-Anchor Combined Supporting Structure in Soft Soil Area[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019.
- [11] 史宏博, 聂 棒, 王安明, 等. 地层厚度非均匀性对基坑支护结构稳定性的影响研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊2): 2608-2615.
SHI Hongbo, NIE Bang, WANG Anming, et al. Study on the Influence of Non-Uniformity of Stratum Thickness on the Stability of Foundation Pit Supporting Structure[J]. Building Structure, 2023, 53(S2): 2608-2615.

(责任编辑: 申 剑)