

DOI: 10.7672/sgjs2026070017

富水软土地区深基坑降水开挖变形机理与控制*

武玉山¹, 马玉龙¹, 周阳¹, 于磊¹, 张才德¹, 张轩宁²

(1. 中铁七局集团西安铁路工程有限公司, 陕西 西安 710032;

2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

[摘要] 为研究富水软土地区地铁车站深基坑施工对地层及围护结构的变形规律, 依托佛山地区某深基坑工程, 结合修正莫尔-库伦本构关系建立降水开挖三维数值分析模型, 利用数值模拟研究深基坑降水及开挖引起的基坑变形特性, 并对比分析了围护结构设计参数对控制变形的效果。结果表明: 地下连续墙侧移模式呈现出明显的“内凹形”且最大侧移在 $0.04\%H_w \sim 0.18\%H_w$, 基坑开挖和降水均会对墙体侧向位移的发展造成影响, 但开挖引起的墙体侧移约为降水引起的 1.7~2.4 倍; 随着基坑降水和开挖深度的增加, 地表沉降明显增大, 主要沉降变形影响范围在距离基坑 $0.3H_w \sim 2.2H_w$, 其中最大沉降约在 $0.15\%H_w \sim 0.6\%H_w$, 最大沉降点随着基坑开挖逐渐向外移动, 当开挖至基底时, 最大沉降点距基坑边 $1.2H_w$; 增大内支撑的刚度可以明显减小基坑沉降和地下连续墙侧移, 但刚度增大到一定程度其对基坑和围护结构的约束作用并不显著; 而降低内支撑的刚度会增加坑外地表沉降及围护结构侧移, 且变形幅度更大; 地下连续墙最大侧向位移、地表峰值沉降、地下连续墙墙底侧移量与插入比之间存在较好的拟合关系。

[关键词] 地铁车站; 深基坑; 地下连续墙; 降水; 变形; 数值模拟

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0017-07

Deformation Mechanism and Control of Deep Foundation Excavation Dewatering and Excavation in Water-rich Soft Soil

WU Yushan¹, MA Yulong¹, ZHOU Yang¹, YU Lei¹, ZHANG Caide¹, ZHANG Xuanning²

(1. China Railway Seventh Bureau Group Xi'an Railway Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710032, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: To study the deformation law of stratum and retaining structure caused by deep foundation excavation construction of a subway station in a water-rich soft soil area, a three-dimensional numerical analysis model of dewatering and excavation is established based on a deep foundation excavation project in the Foshan area and the modified Mohr-Coulomb constitutive relationship. The deformation characteristics of a foundation excavation caused by dewatering and excavation of a deep foundation excavation were studied by numerical simulation, and the effect of design parameters of the retaining structure on controlling deformation was compared and analyzed. The results indicate that the lateral displacement mode of the diaphragm wall presents an obvious “concave shape,” and the maximum lateral displacement is $0.04\%H_w \sim 0.18\%H_w$. The excavation and dewatering of the foundation excavation will affect the development of the lateral displacement of the wall, but the lateral displacement of the wall caused by excavation is about 1.7~2.4 times that caused by dewatering. With the increase of dewatering and excavation depth, the surface settlement increases significantly. The main settlement deformation is in the range of $0.3H_w \sim 2.2H_w$ from the foundation excavation, and the maximum settlement is about $0.15\%H_w \sim 0.6\%H_w$. The maximum settlement point gradually moves outward with the excavation of the foundation excavation. When the foundation excavation is excavated to the base, the maximum settlement point is $1.2H_w$ away from the edge of the foundation excavation. Increasing the stiffness of the inner

* 陕西省重点研发计划(2020SF-373)

[作者简介] 武玉山, 高级工程师, E-mail: 1483386496@qq.com

[收稿日期] 2025-11-10

support can significantly reduce the settlement of the foundation excavation and the lateral displacement of the diaphragm wall, but the constraint effect on the foundation excavation and the retaining structure is not significant when the stiffness increases to a certain extent. Reducing the stiffness of the inner support will increase the surface settlement outside the pit and the lateral displacement of the retaining structure, and the deformation range is larger. There is a good fitting relationship between the maximum lateral displacement of the diaphragm wall, the peak settlement of the ground surface, and the lateral displacement and the insertion ratio of the bottom of the diaphragm wall.

Keywords: subway stations; deep foundation excavation; diaphragm wall; dewatering; deformation; simulations

0 引言

随着我国城市化进程的持续推进,地面公共交通系统日益拥堵,已难以满足城市居民的出行需求。近年来,各大城市纷纷推进城市轨道交通建设,地铁车站深基坑频繁出现在城市中心,深基坑施工引发的环境变形问题也受到广泛关注。为确保基坑开挖过程的安全,开挖前必须将地下水位降低至开挖面以下。然而,基坑降水过程中的水位迅速变化会打破基坑周围渗流场原有的平衡,进而导致土体应力场的变化,最终引起地层位移场的变化。渗流场的重分布不仅会导致围护结构侧移、坑底隆起及坑外土体沉降,还可能对邻近建筑物、地下管线等设施造成潜在危害,构成不容忽视的工程风险。因此,深基坑在富水软土地层中的降水开挖变形机制及其控制措施,已成为岩土工程领域学者广泛关注的重要课题。

针对降水与开挖共同作用下的基坑变形特性,目前已有诸多学者采用数值模拟、现场试验、实测分析、理论分析等方法开展研究^[1-4]。秦杏春^[5]通过有限元数值模拟与地区工程经验相结合的方法,分析了西安市某深基坑开挖及降水对邻近地铁结构变形的影响,并指出降水会导致周边环境较大沉降,建议在施工中加强监测;迟民良等^[6]利用室内模型试验模拟基坑干砂开挖与降水开挖过程,通过对比不同工况条件下地下连续墙受力变形的变化特点及内在联系,分析了基坑降水开挖对地下连续墙受力变形的影响机制;刘帅^[7]通过数值模拟方法研究了富水地层地铁车站基坑在降水开挖过程中的变形规律,指出对于高渗透性地层应适当增加围护结构厚度以控制变形,提出了合理设计围护结构、加固周边土体、控制降水及优化施工时序等变形控制措施;喻义天等^[8]依托某地铁站基坑工程,采用室内模型试验方法,研究了抽水速度和降水深度对坑外水位变化、围护结构变形、地表沉降、孔隙水压以及土压力的影响;熊浩等^[9]以南京长江漫滩

地区某悬挂式帷幕地铁基坑工程为背景,建立基坑开挖降水耦合作用的流固耦合数值分析模型,研究基坑降水开挖耦合变形的一般特征以及地下连续墙插入比对环境影响的控制作用;张裕等^[10]通过 Midas GTS NX 软件对邻近综合管廊的富水砂层深基坑工程进行数值模拟,结合现场监测数据分析了降水开挖对周边地表及既有管廊沉降的影响;韩旭等^[11]基于某地铁站深基坑工程案例,采用计算流体力学和离散元耦合的方法(CFD-DEM 方法),建立深厚富水砂土地层深基坑数值模型,揭示了开挖降水全过程引起的围护结构侧向位移、地表沉降和坑底隆起变形规律,并对基坑变形控制措施展开讨论。

佛山市位于珠江三角洲的西北部,且濒临中国南海,地下水含量高,基坑内降水常引发坑外水位下降进而诱发周边地面沉降。目前基坑降水设计以基于当地实测数据的统计分析经验方法为依据,但仍然存在工程风险防范的不确定性,因此有必要对佛山富水软土地区基坑降水开挖变形特性开展系统研究,以期为该类地区基坑施工设计及周边环境提供指导。

1 工程概况

1.1 工程简介

本地铁车站基坑沿东西向布置,为单柱双跨 2 层车站。基坑主体由标准段和端头井组成,基坑长约 239.2m,标准段宽度约 19.7m,深约 17.08m,面积约 4 868m²。车站采用明挖顺作法施工,基坑主体围护结构选用地下连续墙+内支撑的形式,3 道内支撑分别为 2 道混凝土支撑和 1 道钢支撑。基坑标准段典型断面如图 1 所示。

1.2 工程与水文地质条件

本车站基底主要位于④_{2B} 淤泥质土及④_{N2} 粉质黏土层中,开挖深度内以砂土层为主,各土层主要物理力学参数如表 1 所示。

本场地属于河口三角洲,地下水位埋藏浅,初

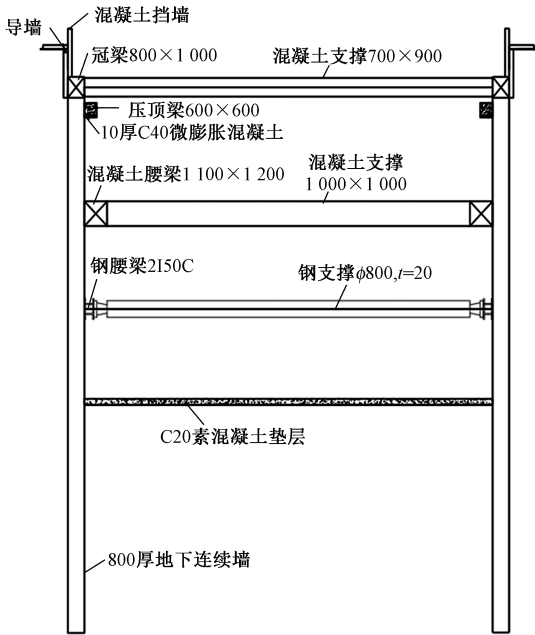


图1 基坑标准段围护结构剖面

Fig. 1 Longitudinal profile of the standard section enclosure structure of foundation excavation

表1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

地层	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/ ($^{\circ}$)	泊松比	压缩 模量/ MPa
杂填土	18.3	19.30	12.85	0.40	4.8
中粗砂	19.5	5.00	35.00	0.30	7.0
粉质黏土	19.3	14.10	28.34	0.32	7.3
淤泥质土	19.9	7.82	10.33	0.43	3.4
全风化细砂岩	22.9	17.90	32.27	0.27	6.3
中风化细砂岩	23.9	17.90	32.27	0.24	8.5

见水位埋深 0.30~3.70m(高程-3.700~4.100m), 稳定水位埋深 0.70~4.80m(高程-4.600~3.750m)。地下水位较高, 基坑进行土方开挖时需保证坑内水位在开挖面以下 0.5~1.0m。

2 有限元模拟

为研究本深基坑工程开挖、降水对地层变形的影响, 选用适合复杂工况计算的 Midas GTS 软件进行数值分析。

2.1 有限元模型建立

为充分探究富水软土地区地铁站基坑开挖、降水对基坑支护结构及地层变形特性的影响, 综合基坑场地范围设定模型尺寸: 模型 x 方向 200m, y 方向 500m, z 方向 50m, 如图 2 所示。约束模型侧边及底部水平位移、底部竖向位移; 模型底部为不透水边界, 侧边界为透水边界(保持水力补给)。依据岩土勘察报告及基坑设计资料, 既有材料参数如表

2 所示。

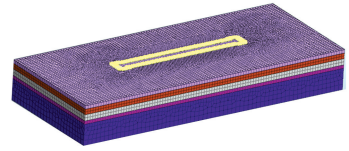


图2 基坑变形数值分析模型

Fig. 2 Numerical analysis model of foundation excavation deformation

表2 支护结构材料参数

Table 2 Parameters of supporting structure materials

结构参数	重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	泊松比
C35 钢筋混凝土	25.5	35	0.25
C30 钢筋混凝土	25.0	30	0.20
钢支撑	78.5	206	0.30

在有限元建模时, 考虑基坑建模的经济性和开挖施工工况, 进行以下基本假设。

1) 假定混凝土支撑、地下连续墙、钢支撑等地铁车站基坑支护结构为弹性材料。

2) 土体为弹塑性材料并采用修正的莫尔-库伦模型。

3) 模型土的渗透系数和强度参数等物理性质在基坑降水过程中不发生变化。

4) 模型的初始渗流状态是稳定的渗流场, 模型中的土是均匀的。

2.2 施工过程模拟

采用分层降水及开挖施工以降低开挖对周边环境的影响, 每级开挖施工前将地下水位降至开挖面以下 1m, 数值模型选用稳定渗流分析, 初始水位设置在基坑侧边界并保持恒定, 模拟边界的水力补给并在基坑内部设置水位面, 数值模型分层降水水头边界如图 3 所示。

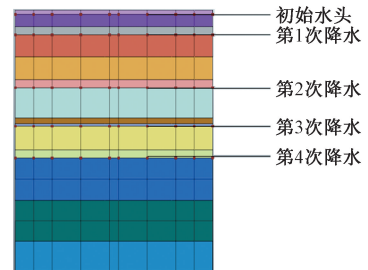


图3 分层降水水头边界

Fig. 3 Stratified precipitation head boundary

根据基坑施工方案, 工况设计如下: ①工况 1, 激活场地范围内的土体和水头, 进行初始渗流场分析; ②工况 2, 激活土体边界约束, 进行初始应力平衡分析; ③工况 3, 位移清零; ④工况 4, 进行地下连

续墙施工;⑤工况5,进行第1次降水,水位面降至第1次开挖面下1m(-3.000m);⑥工况6,第1次降水变形分析;⑦工况7,开挖至第1道支撑底部,并施作第1道混凝土支撑;⑧工况8,进行第2次降水,水位面降至第2次开挖面下1m(-9.500m);⑨工况9,开挖至第2道支撑底部,并施作第2道混凝土支撑;⑩工况10,进行第3次降水,水位面降至第3次开挖面下1m(-14.200m);⑪工况11,开挖至第3道支撑底部,并施作第3道支撑(混凝土支撑+钢支撑);⑫工况12,进行第4次降水,水位面降至基坑底下1m;⑬工况13,开挖至基坑底部。

2.3 模型验证

为验证有限元计算模型的准确性,选取本基坑开挖进行至工况7~13时测斜孔ZQT13处的最大墙体侧向位移(δ_{vm})实测结果,并与本模型计算结果进行对比分析,如图4所示。从图4可以看出,计算值与实测值之间最大误差为1.32mm,即本模型对基坑开挖降水模拟较为准确。这说明建立的数值模型和确定的参数是合理的,计算结果能较为准确地反映出基坑变形规律,可用于后续深入研究。

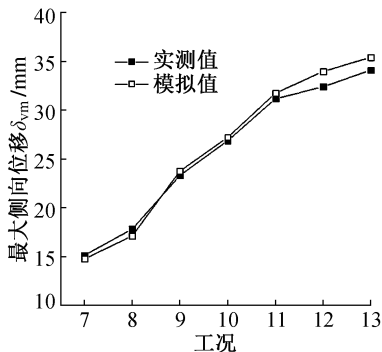


图4 最大墙体侧向位移对比

Fig. 4 Comparison of maximum wall lateral displacement

3 基坑模型计算结果分析

3.1 地下连续墙侧向位移

为更直观地体现出基坑地下连续墙侧向变形特性,选取从基坑第1次降水至开挖至基底(工况6~13)的侧向变形数据进行分析,得到地下连续墙侧向位移(δ_v)分布如图5所示。由图5可知,本基坑地下连续墙侧移模式呈现出明显的“内凹形”,这是由于内支撑的存在,地下连续墙墙体侧移会受到约束,同时随着基坑逐渐向下开挖,地下连续墙两侧土体高差产生的土侧压力差使围护墙体产生进一步向坑内一侧的变形;此外,地下连续墙随着基坑降水和开挖深度的增大而增大,且最大侧移在 $0.04\%H_w \sim 0.18\%H_w$,同时随着基坑开挖面的下移,发生最大侧移的深度也向下移动;基坑开挖和降水

均会对墙体侧向位移的发展造成影响,各工况下产生的侧移占总侧移量的比例分别为10.8%,26.1%,6.6%,13.6%,6.9%,14.3%,8.0%和13.7%,即开挖引起的墙体侧移量约为降水引起的1.7~2.4倍;由此可见,富水软土地区深基坑土方开挖是导致地下连续墙发生侧向位移主要因素。

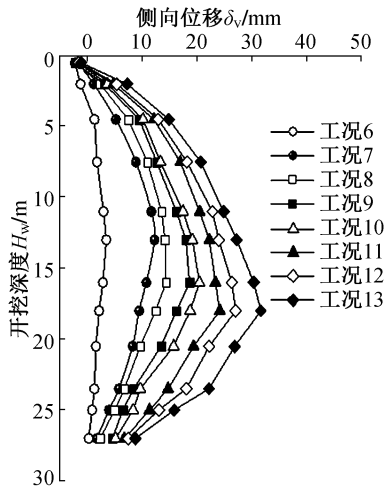


图5 各阶段地下连续墙侧向位移

Fig. 5 Lateral displacement of diaphragm wall at different stages

3.2 坑外地表沉降

为探究基坑开挖深度和发生坑外最大地表沉降处与基坑距离的关系,构造无量纲常数 d/H_w ,其中 d 为与基坑的距离, H_w 为基坑开挖深度,得到基坑降水开挖过程中地表沉降(δ_h)与无量纲常数 d/H_w 的关系如图6所示。

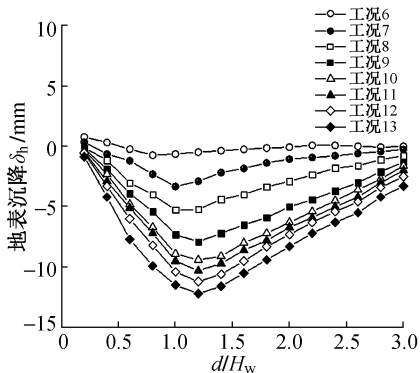


图6 各阶段下地表沉降

Fig. 6 Ground surface subsidence at different stages

从图6可以看出,随着基坑降水和开挖的进行,坑外土体发生了显著的竖向沉降,且最大沉降点不断向基坑外侧拓展。不管是降水施工还是土方开挖施工,产生的沉降曲线均呈现为“凹槽形”;同时随着基坑降水和开挖深度的增加,地表沉降明显增大,对地层的扰动愈发严重,且主要沉降变形影响

范围主要在距离基坑 $0.3H_w \sim 2.2H_w$, 其中最大沉降为 $0.15\%H_w \sim 0.6\%H_w$; 坑外最大沉降点在工况 6 时发生在距离基坑 $0.8H_w$ 处, 随着基坑逐渐向下进行降水和开挖, 最大沉降点也向着远离基坑的一侧变化, 在开挖至基底时, 最大沉降点距基坑边 $1.2H_w$ 。

4 基坑降水开挖变形影响因素分析

由于富水软土地区深基坑进行坑内降水时, 坑内外的水力联系难以被隔断, 会造成坑外水位显著下降, 进而诱发各类工程问题。因此本节在前面所建立的计算模型基础上, 通过改变内支撑的刚度和地下连续墙插入比对基坑开挖变形的影响进行分析。

4.1 内支撑的刚度对变形的影响

在上文建模的基础上, 保持其他条件不变, 通过调整混凝土支撑和钢支撑的刚度, 分别为初始刚度的 0.75 倍、 1.25 倍、 1.5 倍和 1.75 倍进行模拟计算, 记初始内支撑的刚度为 EI , 选取开挖至基坑底部时的模拟值进行分析。

不同刚度下基坑地表沉降和地下连续墙水平位移曲线如图 7, 8 所示, 可以看出: 当内支撑刚度从 EI 增加到 $1.75EI$ 时, 地下连续墙水平位移和周边地表沉降都逐渐减小, 且发生最大水平位移处的深度位置保持不变, 约出现在基坑底部附近, 在墙体深度 24m 以下时地下连续墙受刚度的影响较小; 基坑周边地表在一开始的沉降速率较大, 在距离基坑边约 15m 时沉降速率明显减缓, 此时的地表沉降可达到最大沉降值的 85% , 在超过 35m 后变化值很小, 可认为基坑开挖影响范围约 35m 。

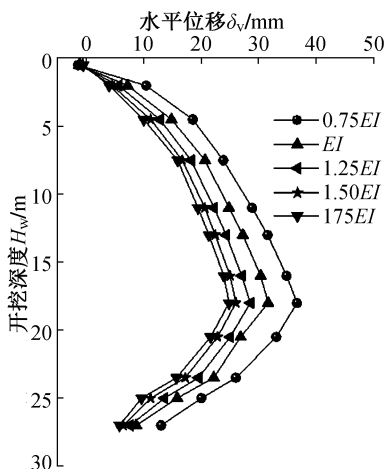


图 7 地下连续墙水平位移曲线

Fig. 7 Horizontal displacement curve of diaphragm wall

由表 3 可以看出, 当内支撑刚度由 EI 增加到 $1.75EI$ 的过程中, 墙体侧移最大值依次变为原本的

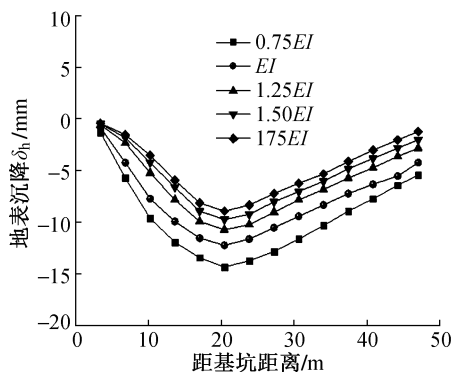


图 8 地表沉降曲线

Fig. 8 Settlement curve of ground surface

90.2% , 82.3% , 78.5% , 依次减小了 9.8% , 7.9% , 3.8% , 地表最大沉降分别变为原来的 87.7% , 79.5% , 72.9% , 减小了 12.3% , 8.2% , 6.6% ; 而当内支撑刚度由 EI 减小到 $0.75EI$ 时, 地下连续墙侧移增大到原来的 1.15 倍, 周边地表最大沉降增大至原本的 1.17 倍。

表 3 内支撑的不同刚度对基坑变形影响

Table 3 Different stiffness of the support on the foundation excavation deformation

刚度	地下连续墙位移/mm	位移变化量/mm	地表沉降/mm	沉降变化量/mm
$0.75EI$	36.6	0	-14.3	0
EI	31.6	-5.0	-12.2	2.1
$1.25EI$	28.5	-3.1	-10.7	1.5
$1.5EI$	26.0	-2.5	-9.7	1.0
$1.75EI$	24.8	-1.2	-8.9	0.8

通过上述分析可知, 增大内支撑的刚度可以明显减小基坑沉降和地下连续墙侧移, 但刚度增大到一定程度其对基坑和围护结构的约束作用并不显著; 而降低内支撑的刚度会增加坑外地表沉降及围护结构侧移, 且变形幅度更大。在追求变形控制效果的同时, 必须关注刚度提升带来的工程量与造价影响。数值模拟表明, 支撑刚度由 EI 提升至 $1.75EI$ 时, 地下连续墙最大侧移与地表最大沉降分别减少了约 22.3% 与 27.1% , 但此举通常意味着需增大支撑截面或提高材料强度, 将直接导致混凝土与钢材用量增加、构件自重上升, 进而增加施工难度与工期。鉴于刚度超过 $1.5EI$ 后控制收益已不显著, 而工程成本仍成比例增长, 在实际工程设计中, 应进行技术经济综合比选, 建议将支撑刚度设定在 $1.25EI \sim 1.5EI$ 的合理区间, 以实现安全性与经济性的统一。

4.2 地下连续墙插入比对变形的影响

围护结构插入比(坑底以下墙体插入的深度 $L/$

最大开挖深度 H_w 是影响基坑侧向变形的重要参数之一。而目前对于佛山富水软土地区基坑围护结构插入比研究较少,因此对该地层条件下插入比对控制变形效应研究有长远的实践意义。

本基坑选取的插入比为 0.6,为更完备地分析插入比的影响规律,选取 10 种插入比(0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0,1.1,1.2,1.3)工况进行分析,如图 9~11 所示。

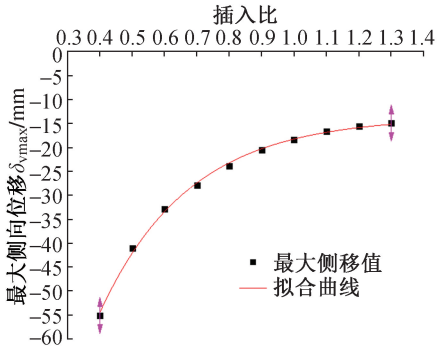


图 9 最大侧移与插入比关系曲线

Fig. 9 Relation curve between maximum lateral displacement and insertion ratio

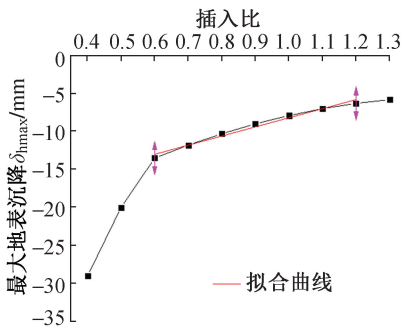


图 10 最大地表沉降与插入比关系曲线

Fig. 10 Relation curve between maximum surface settlement and insertion ratio

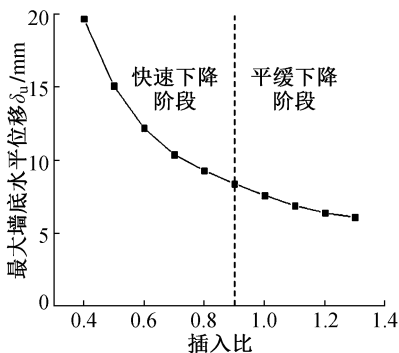


图 11 最大墙底水平位移与插入比关系曲线

Fig. 11 Relation curve between horizontal displacement of maximum wall bottom and insertion ratio

由图 9~11 可知,地下连续墙最大侧向位移

δ_{vmax} 与插入比(p_r)整体上呈现出一种非线性的曲线变化关系,并且 δ_{vmax} 随着 p_r 的增大而逐渐减小,两者之间的关系曲线可拟合为: $\delta_{vmax} = -174.43 \exp(-p_r/0.28) - 13.56$;当 p_r 介于 0.4~0.8 时处于快速减小阶段,在这个阶段通过增大 p_r 可以很好地抑制地下连续墙的侧移,当 p_r 介于 0.8~1.3 时减小幅度受 p_r 影响很小,在这个阶段再盲目增大 p_r 并不经济;地表沉降峰值 δ_{hmax} 随 p_r 增大而减小,且呈现出非线性关系,当 p_r 介于 0.6~1.2 时,地表最大沉降与 p_r 关系可拟合为: $\delta_{hmax} = 12.77p_r - 19.50$ 。此外,地下连续墙墙底侧移量 δ_u 也随 p_r 的增加而显著减小,呈现出抛物线式下降,由图像曲率可分为 p_r 介于 0.4~0.6 的快速下降阶段和 p_r 介于 0.9~1.3 的平缓下降阶段,最终通过增大 p_r ,使 δ_u 由 19.6mm 降至 6.1mm,由此可知,增大 p_r 可显著解决过量的墙底踢脚变形问题。

增大地下连续墙插入比虽能有效控制变形,但也伴随着显著的工程量与造价增长。本工程案例中,插入比(p_r)从 0.6 增大至 0.8 时,地下连续墙最大侧向位移降低了约 35%,墙底水平位移降低了约 42%,控制效果极为明显。然而,插入深度每增加 1m,意味着地下连续墙的总深度相应增加,这不仅直接增加了混凝土浇筑方量、钢筋用量以及槽段成槽工作量,也延长了施工周期,并可能因遇到更深部复杂地层而增加施工风险与措施费用。分析表明,当 $p_r > 0.8$,继续增大插入比对变形的抑制效果趋于平缓,呈现出“收益递减”的特性。因此,从全生命周期成本角度考虑,盲目追求过大的插入比并不可取。综合变形控制效果与工程造价因素,建议在富水软土地区,将地下连续墙插入比优化设定在 0.7~0.9,此举能在有效保障基坑稳定与环境安全的同时,最大限度地控制围护结构的建造成本。

根据本研究的数值模拟分析,为确保富水软土地区地铁车站深基坑安全稳定,施工过程中可以采取以下措施:首先,可优化地下连续墙插入比(p_r)至 0.8 左右,能有效抑制地下连续墙侧移,并减少地表沉降和墙底水平位移;其次,考虑到基坑开挖引起的土体水平位移最大值在 $0.04\%H_w \sim 0.18\%H_w$,坑外最大沉降约在 $0.15\%H_w \sim 0.6\%H_w$,且主要变形集中在开挖面附近 $0.3H_w \sim 2.2H_w$ 范围内,合理增大内支撑刚度能够显著降低基坑沉降和地下连续墙侧移,但需控制在经济合理的范围内,避免过度约束导致工程成本增加;最后,实施分层降水和分阶段开挖策略,严格控制降水速率和开挖深度,以减少对地层的扰动,并通过实时监测墙体侧移和地表

沉降数据,及时调整施工方案,确保施工安全和周边环境的稳定。

5 结语

本文依托富水软土地区深基坑工程案例,建立降水开挖三维数值分析模型,利用数值模拟研究深基坑降水及开挖引起的基坑变形特性,并对比分析了围护结构设计参数对控制变形的效果,主要得到以下结论。

1) 地下连续墙侧移模式呈现出明显的“内凹形”且最大侧移在 $0.04\%H_w \sim 0.18\%H_w$ 范围内,基坑开挖和降水均会对墙体侧向位移的发展造成影响,但开挖引起的墙体侧移量约为降水引起的 1.7~2.4 倍。

2) 随着基坑降水和开挖深度的增加,地表沉降明显增大,主要沉降变形影响范围在距离基坑 $0.3H_w \sim 2.2H_w$,其中最大沉降约在 $0.15\%H_w \sim 0.6\%H_w$,最大沉降点随着基坑开挖逐渐向外移动,当开挖至基底时,最大沉降点距基坑边 $1.2H_w$ 。

3) 增大内支撑的刚度可以明显减小基坑沉降和地下连续墙侧移,但刚度增大到一定程度其对基坑和围护结构的约束作用并不显著;而降低内支撑的刚度会增加坑外地表沉降及围护结构侧移,且变形幅度更大。

4) 地下连续墙最大侧向位移 δ_{vmax} 与插入比 (p_r) 整体上呈现出一种非线性的曲线变化关系,并且 δ_{vmax} 随着 p_r 的增大而逐渐减小,两者之间的关系曲线可拟合为: $\delta_{vmax} = -174.43 \exp(-p_r/0.28) - 13.56$; 地表峰值沉降 δ_{hmax} 随 p_r 增大而减小,且呈现出非线性关系,当 p_r 介于 0.6~1.2 时,地表最大沉降与 p_r 关系可拟合为: $\delta_{hmax} = 12.77p_r - 19.50$; 增大 p_r 可使地下连续墙墙底侧移量 δ_u 由 19.6mm 降至 6.1mm,可显著解决过量的墙底踢脚变形问题。

参考文献:

[1] 祁凌飞,曲新钢,周山君,等.富水砂层深基坑悬挂式止水帷幕降水方案优化研究[J].工程力学,2023,40(S1):213-218.
 QI L F, QU X G, ZHOU S J, et al. Dewatering design optimization for deep excavation with suspended impervious curtain in water-sandy layer[J]. Engineering mechanics, 2023, 40(S1): 213-218.

[2] 骆祖江,成磊,张兴旺,等.悬挂式止水帷幕深基坑降水方案模拟优化[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(6):1946-1956.
 LUO Z J, CHENG L, ZHANG X W, et al. Simulation and optimization of dewatering scheme for suspended impervious curtain in deep foundation pit[J]. Journal of Jilin University (earth science edition), 2022, 52(6): 1946-1956.

[3] 薛秀丽,廖欢,曾超峰,等.既有地下结构水-土阻隔效应对基坑抽水引发地层变形影响机制[J].岩土工程学报,2023,45(1):103-111.

XUE X L, LIAO H, ZENG C F, et al. Barrier effects of existing underground structures on deformation of strata induced by dewatering of foundation pits[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2023, 45(1): 103-111.

[4] 刘祥勇,宋享桦,谭勇,等.南通富水砂性地层地铁深基坑抽水回灌现场试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(7):1331-1340.
 LIU X Y, SONG X H, TAN Y, et al. Field tests on groundwater recharge of deep excavations in Nantong water-rich sandy stratum[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2020, 42(7): 1331-1340.

[5] 秦杏春.深基坑开挖及降水对邻近地铁结构变形影响分析[J].施工技术(中英文),2025,54(13):57-62.
 QIN X C. Analysis on influence of deep foundation excavation and precipitation on deformation of adjacent subway structure[J]. Construction technology, 2025, 54(13): 57-62.

[6] 迟民良,梁禄钜,徐长节,等.降水开挖共同作用下地连墙受力变形机制模型试验研究[J].岩土工程学报,2025,47(2):365-375.
 CHI M L, LIANG L J, XU C J, et al. Model tests on stress and deformation mechanism of diaphragm wall under combined effects of dewatering and excavation[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2025, 47(2): 365-375.

[7] 刘帅.富水地层地铁车站基坑降水开挖变形与控制措施研究[J].施工技术(中英文),2024,53(21):103-108.
 LIU S. Research on deformation and control measures of dewatering excavation in the subway station foundation excavation in water-rich stratum[J]. Construction technology, 2024, 53(21): 103-108.

[8] 喻义天,丁海滨,刘昆,等.基坑开挖前坑内预降水对基坑变形的影响[J].公路交通科技,2024,41(3):72-82.
 YU Y T, DING H B, LIU K, et al. Influence of pre-excavation dewatering in pit on foundation pit deformation[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2024, 41(3): 72-82.

[9] 熊浩,伍军,蔡国庆.长江漫滩悬挂式止水帷幕基坑变形规律研究[J].北京交通大学学报,2023,47(6):130-137.
 XIONG H, WU J, CAI G Q. Study on deformation characteristics of deep excavation with suspended curtain in Yangtze River floodplain[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(6): 130-137.

[10] 张裕,王俊鹏,钟伟慈,等.富水砂层深基坑降水开挖对邻近综合管廊的影响[J].施工技术(中英文),2024,53(9):73-78.
 ZHANG Y, WANG J P, ZHONG W C, et al. Influence of dewatering excavation of deep foundation excavation in water-rich sand layer on adjacent comprehensive pipe gallery[J]. Construction technology, 2024, 53(9): 73-78.

[11] 韩旭,刘俊城,张建辉,等.深厚富水砂土地层深基坑开挖降水变形研究[J].建筑结构,2022,52(S2):2246-2255.
 HAN X, LIU J C, ZHANG J H, et al. Deformation induced by deep excavation and dewatering in thick water-rich sandy strata[J]. Building structure, 2022, 52(S2): 2246-2255.