

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202411014



基坑开挖引起地下连续墙水平位移 与地表沉降数值模拟

李坤鹏¹, 陈士海¹, 叶刚楠², 陈韦羽³, 陈建福⁴

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 福建铭泰集团有限公司, 福建 厦门 361000;

3. 福建永旺建设集团有限公司, 福建 龙岩 364000;

4. 中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 为准确分析地下连续墙水平位移与地表沉降规律, 利用数值模拟结合现场实测的方法, 对基坑开挖变形进行系统研究。建立基坑开挖的三维有限元模型, 采用修正剑桥本构模型, 计算基坑开挖引起的地下连续墙水平位移与坑外地表沉降。同时, 引入 Pasternak 双参数模型, 推导挠曲微分方程并利用有限差分法计算地下连续墙水平位移。将数值模拟结果与现场实测数据, 以及理论计算结果进行对比, 验证数值模拟的合理性。利用数值模拟的方法进一步研究地下连续墙, 内支撑等对水平位移与地表沉降的影响规律。研究结果表明: 增大地下连续墙厚度、地下连续墙弹性模量、钢支撑直径能够有效减小地下连续墙水平位移与地表沉降; 基坑变形具有显著的空间效应, 具体表现为距离坑角 20 m 内, 地下连续墙水平位移与地表沉降随着离坑角距离的增大而增大, 20~100 m 地下连续墙水平位移与地表沉降保持不变。

关键词: 基坑工程; 三维有限元模型; 地下连续墙水平位移; 地表沉降; 修正剑桥本构模型

中图分类号: TU 478

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)03-0264-08

Numerical Simulation on Horizontal Displacement of Diaphragm Wall and Surface Settlement by Foundation Pit Excavation

LI Kunpeng¹, CHEN Shihai¹, YE Gangnan²,
CHEN Weiyu³, CHEN Jianfu⁴

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Mingtai Group Limited Company, Xiamen 361000, China;

3. Fujian Yongwang Construction Group Limited Company, Longyan 364000, China;

4. China Railway 14 Bureau Group Great Shield Engineering Limited Company, Nanjing 210000, China)

Abstract: To accurately analyze the horizontal displacement of the diaphragm wall and surface settlement, a systematic study on the deformation of the foundation pit was conducted using numerical simulation combined with field measurement method. A 3-dimensional finite element model of the foundation pit excavation was established, adopting a modified Cambridge constitutive model to calculate the horizontal displacement of the

收稿日期: 2024-11-02

通信作者: 陈士海(1964-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事岩土工程防灾减灾的研究。E-mail: cshblast@163.com。

基金项目: 福建省住建行业科技计划项目(2022-K-292)

diaphragm wall and the surface settlement outside the pit by the foundation pit excavation. The Pasternak 2-parameters model was introduced, the bending differential equation was derived, the finite difference method was used to calculate the horizontal displacement of the diaphragm wall. The numerical simulation results were compared with the field measurement data and the theory calculation results to verify the numerical simulation. The numerical simulation method was used to further investigate the influence of the diaphragm wall and internal supports, etc on horizontal displacement and surface settlement. The research results show that increasing the thickness of the diaphragm wall, the elastic modulus of the diaphragm wall, steel support diameter could effectively reduce the horizontal displacement of the diaphragm wall and surface settlement. The deformation of the foundation pit exhibits significant spatial effects, within 20 m from the corner of the pit, the horizontal displacement of the diaphragm wall and surface settlement increase with the distance from the corner of the pit; within 20-100 m, the horizontal displacement and surface settlement remain unchanged.

Keywords: foundation pit engineering; 3-dimensional finite element model; horizontal displacement of diaphragm wall; surface settlement; modified Cambridge constitutive model

地下连续墙水平位移与地表沉降控制是现有基坑工程中重点考虑的问题,在地下连续墙水平位移方面,王淞等^[1]运用 Plaxis 3D 有限元软件进行基坑安全性分析,对倾斜桩组合支护形式进行了优化。刘性锋等^[2]利用高级分析有限元软件 ABAQUS 对基坑开挖的全过程进行了模拟,对基坑开挖过程中围护结构的水平与竖向位移进行了分析。刘锐等^[3]应用有限元软件,对不同分部开挖的方案进行数值模拟计算,得出不同开挖顺序下围护结构变形规律。赵意晋等^[4]基于软弱土体的修正剑桥本构关系(MCC)建立了三维有限元模型,并对基坑开挖引起的围护结构水平位移进行了仿真模拟。李文杰等^[5]利用 Plaxis 有限元软件进行数值模拟分析,研究开挖引起的围护结构水平位移规律。郁志伟等^[6]以上海市软土地区深基坑为研究对象,研究深基坑不同围护结构形式的变形特性。张超翔等^[7]通过理论分析、现场实测和三维快速拉格朗日方法(FLAC3D)对支护结构进行综合分析。宋卓华等^[8]建立了有限单元法数值模型,对基坑阳角部位的地下连续墙变形进行了系统研究。

在地表沉降方面,仇文岗等^[9]通过有限元数值模拟建立了基坑开挖的数值模型,分析不同工况时的地表沉降。白学平^[10]通过建立三维数值模型,对基坑围护结构、地面沉降等进行了对比分析。肖国清等^[11]采用 FLAC3D,分析了基坑开挖及降水对周围地表沉降的影响。陈晓鹏等^[12]建立大型三维有限元模型,对地铁深基坑的开挖引起的地表沉降进行数值模拟。朱彦鹏等^[13]采用岩土通用有限元分析系统(MIDASGTS),对深基坑在开挖过程中的地表沉降进行模拟计算。陶勇等^[14]依托江苏省南京市江北新区江漫滩地层地下空间基坑群工程,对比了不同开挖时序下围护结构变形、地表沉降、坑底隆起规律。王锦涛等^[15]利用数值模拟的方法,研究不同深基坑开挖进程中地表沉降变形、底部土体隆起变形、深基坑内支撑稳定性和连续墙及墙后土体变形的演化规律。胡建林等^[16]利用岩土工程通用仿真分析软件 MIDAS-GTS/NX,对排桩支护变形和地表沉降进行数值模拟。现有的研究对基坑开挖引起的地下连续墙水平位移与地表沉降进行了分析,但是没有对基坑的各个工况进行系统。本文通过 ABAQUS 数值模拟的方法,对地铁深基坑施工变形进行模拟,研究各个施工参数对地下连续墙水平位移与地表沉降的影响规律。

1 工程概况

福建省厦门市某地铁车站主体围护结构采用地下连续墙+内支撑体系,基坑支护结构剖面图,如图 1 所示。地下连续墙采用 C30 混凝土,深度为 24.5 m,厚度为 1 000 mm。采用 3 道内支撑,第 1 道为混凝土支撑,水平间距为 6 m,弹性模量为 30 GPa;第 2、3 道支撑直径均为 609 mm,厚度均为 16 mm,水平间距均为 6 m,弹性模量均为 210 GPa。第 1 道支撑位于深度 0.2 m 处,第 2 道支撑

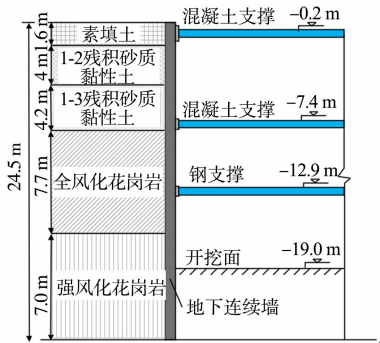


图 1 基坑支护结构剖面图
Fig. 1 Section diagram of foundation pit support structure

位于深度 7.4 m 处,第 3 道支撑位于深度 12.9 m 处。

地下连续墙深度从上到下依次为素填土、1-2 残积砂质黏性土、1-3 残积砂质黏性土、全风化花岗岩、强风化花岗岩。土层物理力学参数,如表 1 所示。表 1 中: h 为厚度; γ 为重度; c 为黏聚力; ϕ 为有效内摩擦角; I_p 为塑性指数; E_t 为土堆弹性模量; G 为剪切模量; ν 为泊松比。

表 1 土层物理力学参数
Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layer

土层名称	h/m	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	c/kPa	$\phi/(\text{^\circ})$	I_p	E_t/MPa	G/MPa	ν
素填土	1.6	17.8	8	10	18.2	25	34.2	0.34
1-2 残积砂质黏性土	4.0	18.5	20	15	13.3	34	47.9	0.30
1-3 残积砂质黏性土	4.2	18.4	22	16	13.3	36	50.0	0.32
全风化花岗岩	7.7	19.7	28	19	11.4	45	63.5	0.30
强风化花岗岩	58.6	20.5	21	28	10.4	68	99.7	0.25

2 三维有限元模型

现场基坑的尺寸为 200 m×20 m×19 m,有限元模型,如图 2 所示。三维有限元模型中,以地下连续墙后的 4 倍开挖深度、坑底以下的 2 倍开挖深度为基坑开挖影响区域,因此,基坑三维有限元模型整体尺寸为 360 m×160 m×70 m。模型采用修正剑桥本构模型,土地下连续墙及支撑均采用实体单元模拟,模型底部为固定边界,顶部为自由边界,侧向边界约束法向位移。地下连续墙与土体法向为硬接触,切向使用罚函数,地下连续墙与支撑之间采用绑定约束,网格类型为 C3D8。土层修正剑桥模型参数,如表 2 所示。表 2 中: λ 为塑性体积模量对数; R 为临界状态应力比; κ 为弹性体积模量对数; e 为孔隙比。

表 2 土层修正剑桥模型参数
Tab. 2 Modified Cambridge constitutive parameters of soil layers

土层名称	λ	R	κ	e	ν
素填土	0.169	0.37	0.016 9	0.76	0.34
1-2 残积砂质黏性土	0.089	0.57	0.008 9	0.68	0.30
1-3 残积砂质黏性土	0.089	0.61	0.008 9	0.68	0.32
全风化花岗岩	0.057	0.73	0.005 7	0.72	0.30
强风化花岗岩	0.041	1.11	0.004 1	0.62	0.25

数值模拟过程有如下 9 个步骤:1) 地应力平衡;2) 激活地下连续墙;3) 第 1 次开挖到-1 m;4) 激活第 1 道砼支撑;5) 第 2 次开挖到-8 m;6) 激活第 2 道钢支撑;7) 第 3 次开挖到-13 m;8) 激活第 3 道钢支撑;9) 第 4 次开挖到-19 m。

3 基坑开挖的地下连续墙水平位移

3.1 地下连续墙水平位移计算模型

地下连续墙水平位移计算模型,如图 3 所示。图 3 中: k 为地基反力模量; F_h 为内支撑对地下连续墙计算宽度内的弹性支点水平反力; w_z 为地下连续墙在内支撑截面处的水平位移。地下连续墙水平位移计算模型对 Winkler 单参数地基模型进行改进,增加一个剪切层,此剪切层只能产生剪切变形而不可压缩,从而使各弹簧单元之间存在剪切的相互作用。该模型包括 3 个基本假定:

- 1) 剪切层只产生剪切变形,不产生压缩变形;
- 2) 地下连续墙与地基土体紧密相贴,其变形与接触处的地基变形协调;

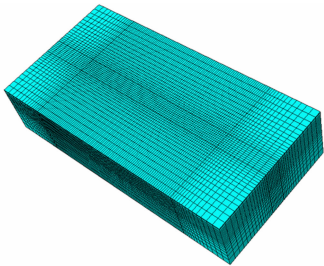


图 2 有限元模型
Fig. 2 Finite element model

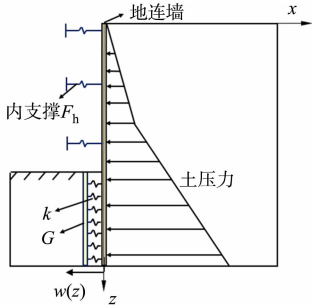


图 3 地下连续墙水平位移计算模型
Fig. 3 Horizontal displacement calculation model of diaphragm wall

3) 不考虑地下连续墙与地基间摩擦力。

Pasternak 双参数地基模型中, 地下连续墙假设为地基上的弹性长梁, 地下连续墙挠曲自由段微分方程为

$$EI \frac{d^4 w_t}{dz^4} + F_h - P_A B = 0. \tag{1}$$

式(1)中: E 为地下连续墙的弹性模量; I 为截面惯性矩; B 为水平荷载计算宽度, $B=5\text{ m}$; P_A 为主动区土压力。

嵌固段微分方程为

$$EI \frac{d^4 w_t}{dz^4} - GB \frac{d^2 w}{dz^2} + kBw - P_A B = 0. \tag{2}$$

考虑到方程为高阶非齐次方程, 较难得到解析解, 可利用差分法将其离散, 桩体沿全长分为 n 等份, 每段长度(l)为 0.5, 地下连续墙离散有 $n+5$ 个节点单元(首尾共有 4 个虚拟单元)。有限差分示意图, 如图 4 所示。

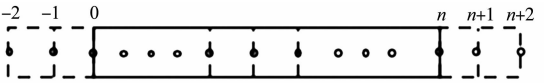


图 4 有限差分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of finite difference

墙顶与墙底均为自由边界, 边界条件施加于虚拟单元 0、 n 处, 因此, 墙顶弯矩 $M_0=0$, 墙顶剪力 $Q_0=0$, 墙底弯矩 $M_n=0$, 墙底剪力 $Q_n=0$, 即

$$\left. \begin{aligned} M_0 &= EI \frac{d^2 w_0}{dz^2} = 0, \\ Q_0 &= EI \frac{d^3 w_0}{dz^3} = 0, \\ M_n &= EI \frac{d^2 w_n}{dz^2} = 0, \\ Q_n &= EI \frac{d^3 w_n}{dz^3} = 0. \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

令 $\alpha=EI/l^4$, $\xi=GB/l^2$, $\eta=kB$, 因此, 自由段挠曲差分方程为

$$[\alpha \quad -4\alpha \quad 6\alpha \quad 4\alpha \quad \alpha] \times [w_{i+2} \quad 4w_{i+1} \quad 6w_i \quad 4w_{i-1} \quad w_{i-2}]^T + F_h - P_A B = 0. \tag{4}$$

嵌固段挠曲差分方程为

$$[\alpha \quad (4\alpha+\xi) \quad -(6\alpha+2\xi+\eta) \quad -(4\alpha+\xi)+\xi] \times [w_{i+2} \quad w_{i+1} \quad w_i \quad w_{i-1} \quad w_{i-2}]^T - P_A B = 0. \tag{5}$$

弯矩边界条件差分(M)为

$$M = \frac{EI}{l^2} (w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}). \tag{6}$$

剪力边界条件差分(Q)为

$$Q = \frac{EI}{2l^3} (w_{i+2} - 2w_{i+1} + 2w_{i-1} - w_{i-2}). \tag{7}$$

当 $i=0$ 时, 由桩顶弯矩、剪力边界条件, 有

$$w_{-1} = 2w_0 - w_1, \tag{8}$$

$$w_{-2} = 4w_0 - 4w_1 + w_2. \tag{9}$$

当 $i=n$ 时, 由桩底弯矩、剪力边界条件, 有

$$w_{n+1} = 2w_n - w_{n-1}, \tag{10}$$

$$w_{n+2} = 4w_n - 4w_{n-1} + w_{n-2}. \tag{11}$$

对自由段差分取 $i=0, 1, 2, \cdots, m$, 将式(8)、(9)代入; 对嵌固段差分取 $i=n, n-1, n-2, \cdots, m$, 将式(10)、(11)代入, 便可得到最终的计算支护桩水平位移的表达式, 即

$$Kw = F. \tag{12}$$

式(12)中: F 为外荷载列向量; K 为墙身水平刚度矩阵, 即

$$K = \begin{bmatrix} 2\alpha & -4\alpha & 2\alpha & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ -2\alpha & 5\alpha & -4\alpha & \alpha & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha & -4\alpha & 6\alpha & -4\alpha & \alpha & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \alpha & -4\alpha & 6\alpha & -4\alpha & \alpha & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \alpha & -4\alpha - \xi & 6\alpha + 2\xi + \eta & -4\alpha + \xi & \alpha & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \alpha & -4\alpha - \xi & 6\alpha + 2\xi + \eta & -4\alpha + \xi & \alpha \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \alpha & -4\alpha - \xi & 5\alpha + 2\xi + \eta & 2\alpha - \xi \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 2\alpha & -4\alpha & 2\alpha + \eta \end{bmatrix};$$

w 为墙身节点水平位移列向量,即

$$w = [w_0 \quad w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad \cdots \quad w_{n-3} \quad w_{n-2} \quad w_{n-1} \quad w_n]。$$

3.2 模型参数

对于第 i 层土体剪切模量(G),有

$$G_i = E_{t,i}t/6(1 + v_i)。$$
 (13)

式(13)中: $E_{t,i}$ 为第 i 层土体土体弹性模量; v_i 为第 i 层土体的泊松比; $t=11D$, D 为地下连续墙厚度。

i 层地基反力模量(k_i)的选取为

$$k_i = 0.65 \left(\frac{E_{t,i}D^4}{EI} \right)^{0.083} \times \frac{E_{t,i}}{(1 - v_i)^2}。$$
 (14)

内支撑弹性支点刚度系数为

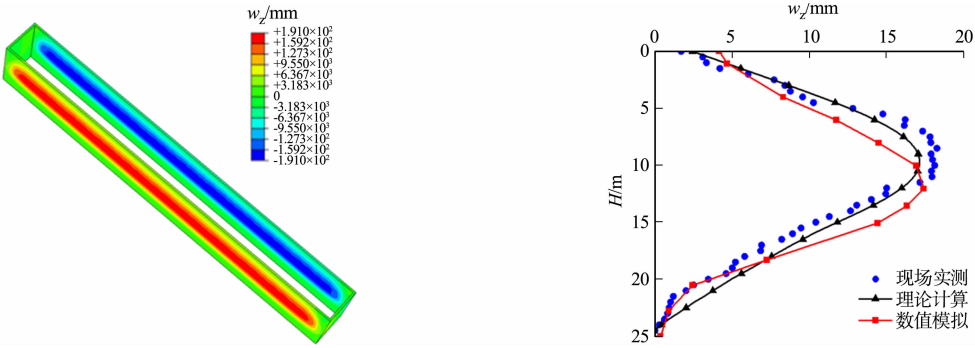
$$\left. \begin{aligned} F_h &= k_t(w_t - w_{t,0}), \\ k_t &= \epsilon E_c X d / \beta l_0 \delta。 \end{aligned} \right\}$$
 (15)

式(15)中: $w_{t,0}$ 为地下连续墙在内支撑截面处的初始水平位移; β 为支撑不动点调整系数; ϵ 为支撑松弛系数,对于混凝土支撑和预加轴力的钢支撑, $\epsilon=1$,对于不预加轴力的钢支撑, ϵ 为 $0.8 \sim 1.0$; E_c 为支撑材料弹性模量; X 为支撑的截面面积; l_0 为受压支撑构件长度; δ 为支撑水平间距。

4 数值模拟与理论验证分析

4.1 模型合理性验证

地下连续墙水平位移数值模拟验证,如图 5 所示。图 5 中: H 为地连墙的深度。由图 5 可知:数值模拟、理论计算、现场实测的地下连续墙水平位移均为“鼓肚形”,3 者十分接近,最大水平位移分别为 17.6、17.1、18.1 mm,证明数值模拟方法在预测地连墙水平位移方面具有较高的精度。



(a) 水平位移云图 (b) 地下连续墙水平位移曲线

图 5 地下连续墙水平位移数值模拟验证

Fig. 5 Numerical simulation verification of horizontal displacement of diaphragm wall

地表沉降数值模拟验证,如图 6 所示。图 6 中: S 为距离坑角的距离; L 为地表沉降。由图 6 可知:数值模拟与现场实测的地下连续墙水平位移均为“勺形”,其沉降分布趋势类似,最大沉降分别为 17.2、15.1 mm。因此,对比数值模拟与理论计算,以及现场实测数据,证明数值模拟计算结果的合理性。

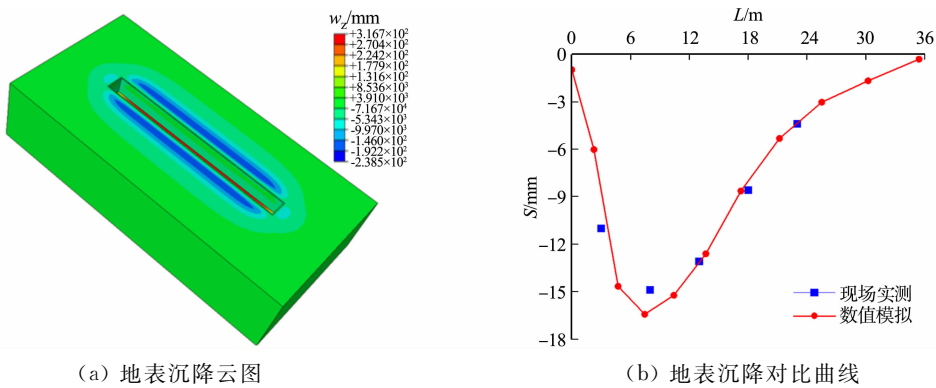


图 6 地表沉降数值模拟验证

Fig. 6 Numerical simulation verification of surface settlement

基坑变形的空间分布规律,如图 7 所示。由图 7(a)可知:当距离坑角 20 m 以内时,地下连续墙水平位移随距离坑角位移的增大逐渐增大,坑角处水平位移最小,仅为 1.53 mm;当距离坑角 20 m 时,水平位移达到最大,最大值为 17.6 mm;当距离坑角 20~100 m 时,地连墙水平位移保持不变。由图 7(b)可知:当距离坑角 20 m 以内时,地表沉降随距离坑角位移的增大逐渐增大,坑角位置处沉降最小,仅为 1.49 mm;当距离坑角 20 m 时,地表沉降达到最大,最大值为 17.2 mm;当距离坑角 20~100 m 时,地表沉降保持不变,这说明基坑开挖变形具有明显的空间效应。

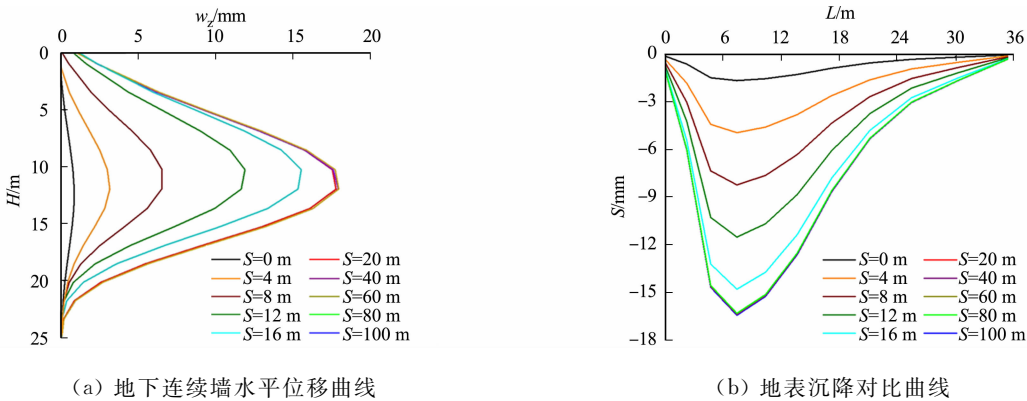


图 7 基坑变形的空间分布规律

Fig. 7 Spatial distribution of foundation pit deformation

4.2 不同墙厚下基坑变形规律

不同地下连续墙厚度下水平位移与地表沉降规律,如图 8 所示。

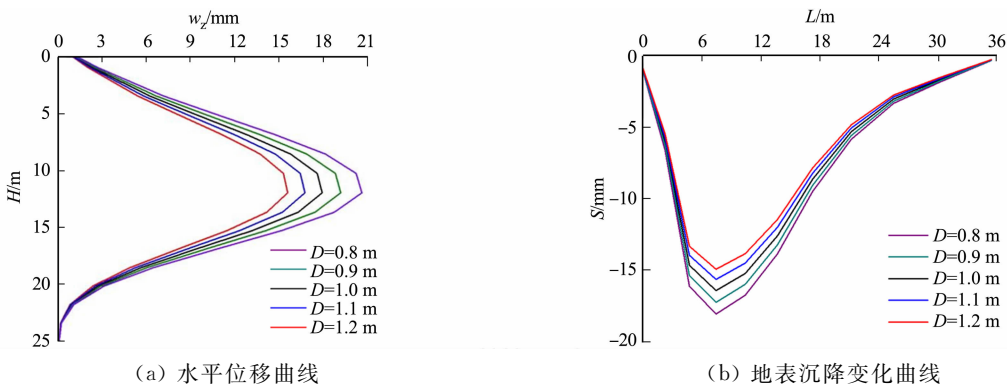


图 8 不同地下连续墙厚度下水平位移与地表沉降规律

Fig. 8 Horizontal displacement and surface settlement under different thickness of diaphragm wall

由图 8(a)可知:随着墙体厚度的增加,墙身水平位移减小,这是由于地下连续墙厚度增加导致地下连续墙抗弯刚度增加,在相同土压力与支撑力作用下,地下连续墙水平位移减小。由图 8(b)可知:随着墙体厚度的增加,对应的地表沉降减小,这是因为地下连续墙厚度增加导致地下连续墙水平位移减小,

附加应力降低,因此,地表沉降减小。

4.3 不同地下连续墙模量下基坑变形规律分析

$E=28.0、30.0、31.5、32.5$ GPa,对应的混凝土等级分别为 C25、C30、C35、C40,不同地下连续墙弹性模量下水平位移与地表沉降规律,如图 9 所示。

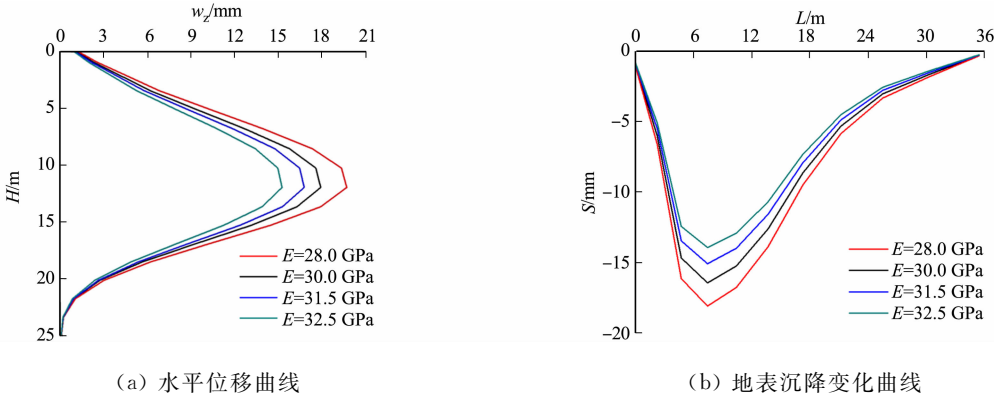


图 9 不同地下连续墙弹性模量下水平位移与地表沉降规律

Fig. 9 Horizontal displacement and surface settlement under different elastic modulus of diaphragm wall

由图 9(a)可知:随着地下连续墙弹性模量增加,水平位移减小,这是因为增大弹性模量时,地下连续墙抗弯刚度增大,因此,地下连续墙水平位移减小;最大位移均出现在地下连续墙深度 10 m 左右,使用等级更高的混凝土,增大地下连续墙弹性模量对控制地下连续墙水平位移效果明显。由图 9(b)可知:地下连续墙弹性模量增加,地表沉降减小,这是因为地下连续墙弹性模量增加导致地下连续墙水平位移减小,附加应力降低,最终产生的地表沉降减小,说明增大地下连续墙弹性模量对控制地表沉降效果明显。

4.4 不同钢支撑直径下基坑变形规律

不同钢支撑直径下水平位移与地表沉降规律,如图 10 所示。图 10 中: φ 为钢支撑直径。

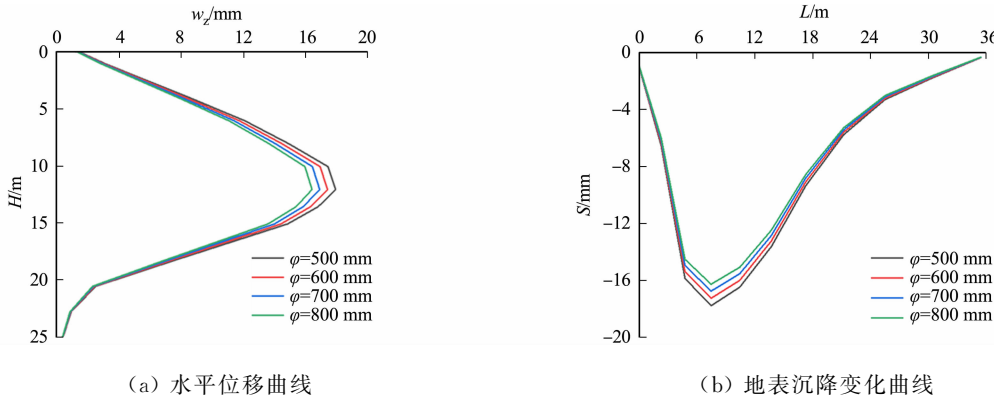


图 10 不同钢支撑直径下水平位移与地表沉降规律

Fig. 10 Horizontal displacement and surface settlement under different steel support diameters

由图 10(a)可知:随着钢支撑直径增加,连续墙水平位移减小,这是因为增大钢支撑直径时,内支撑抗压能力增强,限制地下连续墙水平位移,增大钢支撑直径对控制地下连续墙水平位移效果明显。由图 10(b)可知:随着钢支撑直径增加,地表沉降减小,这是因为钢支撑直径增加导致地下连续墙水平位移减小,附加应力降低,最终产生的地表沉降减小,说明增大钢支撑直径对控制地表沉降效果明显。

5 结论

1) 利用 ABAQUS 建立基坑开挖的三维有限元模型,计算得到开挖引起的地下连续墙水平位移与地表沉降,同时引入 Pasternak 双参数地基模型,推导挠曲微分方程并利用有限差分法计算地下连续墙水平位移,将数值模拟结果与理论计算结果,以及现场实测结果进行对比分析,证明数值模型的合理性。

2) 通过现场实测与数值模拟结合,对地下连续墙厚度、地下连续墙弹性模量、钢支撑直径等进行参

数分析,结果表明,地下连续墙厚度越大,开挖引起的水平位移与地表沉降越小;地下连续墙弹性模量越大,开挖引起的水平位移与地表沉降越小;钢支撑直径、钢支撑壁厚越大,开挖引起的水平位移与地表沉降越小,符合实际规律。

分析基坑开挖变形的空间效应,距离坑角 20 m 范围内,坑角附近变形最小,随着距离坑角位置越远,基坑变形逐渐增大。当到达距离坑角 20 m 以外范围,地下连续墙水平位移与地表沉降保持恒定。

参考文献:

[1] 王淞,刘永超,张建新,等.深厚软土地区倾斜桩组合支护基坑稳定性研究[J].地下空间与工程学报,2024,20(2): 556-565,576. DOI:10.20174/j. JUSE. 2024. 02. 22.

[2] 刘性锋,刘禹,李辉,等.地铁站深基坑桩撑支护开挖变形[J].科学技术与工程,2023,23(33):14332-14341. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-1815. 2023. 33. 032.

[3] 刘锐,方成成,储朱敏,等.城市地铁站深大基坑分区开挖顺序优化研究[J].隧道建设(中英文),2023,43(增刊 2):513-522. DOI:10.3973/j. issn. 2096-4498. 2023. S2. 056.

[4] 赵意晋,刘恒,蔡晓慧,等.深厚软土地层中异形地铁站深基坑开挖三维数值模拟分析[J].南京工业大学学报(自然科学版),2023,45(5):563-572. DOI:10.3969/j. issn. 1671-7627. 2023. 05. 011.

[5] 李文杰,赵杰.基于 HSS 模型与分布式光纤监测的内支撑深基坑变形特性分析[J].科学技术与工程,2023,23(18):7913-7923. DOI:10.3969/j. issn. 1671-1815. 2023. 18. 038.

[6] 郁志伟,张克胜,宋卓华,等.软土地层深基坑围护结构变形分析及模拟研究[J].建筑结构,2022,52(增刊 2):2373-2377. DOI:10.19701/j. jzjg. 22S2341.

[7] 张超翔,张志强.深基坑桩锚支护结构位移分析及数值模拟[J].科学技术与工程,2022,22(18):8022-8029. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-1815. 2022. 18. 036.

[8] 宋卓华,张克胜,翟浩博,等.软土地层深基坑阳角部位地下连续墙变形特性分析[J].建筑结构,2022,52(增刊 1): 2491-2496. DOI:10.19701/j. jzjg. 22S11612.

[9] 仇文岗,严玉苗,袁运涛,等.基坑扩底承载式斜撑支护变形数值模拟研究[EB/OL]. (2024-05-10)[2024-12-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20240508.1732.004.html>.

[10] 白学平.河湖相沉积软土地层地铁站深基坑施工位移分析[J].城市轨道交通研究,2023,26(6):62-67. DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.011.

[11] 肖国清,李瑞雪.长江漫滩地区深大基坑开挖工程半逆作半顺作法研究[J].重庆大学学报,2022,45(7):45-52. DOI:10.3969/j. issn. 1673-9604. 2019. 08. 127.

[12] 陈晓鹏,陈士军,吴烈,等.绍兴地铁一号线深基坑开挖过程数值分析[J].济南大学学报(自然科学版),2022,36(4):444-451. DOI:10.13349/j. cnki. jdxbn. 20220309. 001.

[13] 朱彦鹏,李凤岐,杨校辉,等.兰州地铁红砂岩基坑开挖监测与数值模拟分析[J].兰州理工大学学报,2022,48(1): 121-127. DOI:10.3969/j. issn. 1673-5196. 2022. 01. 019.

[14] 陶勇,吕所章,杨平,等.南京江北新区相邻深浅基坑开挖时序优化研究[J].建筑科学与工程学报,2021,38(6): 108-118. DOI:10.19815/j. jace. 2021. 09021.

[15] 王锦涛,雷鹏,刘涛影,等.车站深基坑变形规律与稳定性分析[J].科学技术与工程,2021,21(22):9533-9540. DOI:10.3969/j. issn. 1671-1815. 2021. 22. 049.

[16] 胡建林,孙利成,崔宏环,等.基于修正摩尔库伦模型的深基坑变形数值分析[J].科学技术与工程,2021,21(18): 7717-7723. DOI:10.3969/j. issn. 1671-1815. 2021. 18. 045.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)