

DOI: 10.7672/sgjs2026070024

西安地铁8号线深基坑稳定性有限元分析*

赵小涛

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 针对深基坑工程中地下连续墙的变形稳定性问题,依托西安地铁8号线环园中路停车场深基坑工程,采用PLAXIS 3D有限元软件建立三维数值模型,系统分析了不同结构建模方式及支护设计对地下连续墙变形特性的影响。通过对比实体单元与板单元模拟地下连续墙的差异,探讨了斜撑设置与坑底水泥搅拌桩在支护体系中的作用。结果表明:采用实体单元模拟地下连续墙能更准确地反映其实际变形形态,与监测数据吻合良好;板单元模型虽计算效率高,但会高估墙体位移,结果偏于保守。斜撑能显著提高支护体系整体刚度,减少墙体水平位移20%~30%,有效抑制“鼓肚”变形;坑底搅拌桩通过与地下连续墙协同工作,提供底部嵌固作用,明显降低深层“踢脚”式位移。

[关键词] 地铁;深基坑;地下连续墙;有限元分析;监测;位移

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0024-07

Finite Element Analysis of Deep Foundation Excavation Stability for Xi'an Metro Line 8

ZHAO Xiaotao

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: Aiming at the deformation stability of diaphragm walls in deep foundation excavation engineering, based on a deep foundation excavation engineering of the Huanyuan Middle Road parking lot of Xi'an Metro Line 8, a three-dimensional numerical model was established by using PLAXIS 3D finite element software, and the influence of different structural modeling methods and support designs on the deformation characteristics of diaphragm walls was systematically analyzed. By comparing the difference between the solid element and the plate element to simulate the diaphragm wall, the role of the inclined support setting and the cement mixing pile at the bottom of the foundation excavation in the support system is discussed. The results indicate that the simulation of diaphragm walls by solid elements can reflect its actual deformation form more accurately, which is in good agreement with the monitoring data. Although the plate element model has high computational efficiency, it will overestimate the wall displacement, and the result is conservative. The diagonal brace can significantly improve the overall stiffness of the support system, reduce the horizontal displacement of the wall by 20% ~ 30%, and effectively inhibit the “bulging” deformation. The mixing pile at the bottom of the foundation excavation works together with the diaphragm wall to provide the bottom embedding effect and significantly reduce the deep-seated “kick-in” displacement.

Keywords: subways; deep foundation excavation; diaphragm wall; finite element analysis; monitoring; displacement

0 引言

基坑开挖过程中支护变形是基坑内土体被移

除后,周围土体对挡土墙产生的主动土压力引起的。陆超等^[1]、邱明明等^[2]分析了挡墙在不同开挖阶段下的变形行为。对于地下连续墙的变形,部分研究识别出两种典型的变形模式:悬臂型变形和深层内倾型变形^[3-4]。张子辰等^[5]通过现场监测研究

* 中铁十八局集团有限公司 2024 年度科研创新项目(2024-031)

[作者简介] 赵小涛,助理工程师,E-mail:proteus22@163.com

[收稿日期] 2025-12-04

发现,悬臂型变形通常出现在开挖初期,此时支撑体系(如支撑杆或楼板)尚未安装,最大水平位移出现在基坑顶部附近深度约0.5m处,而深层内倾型变形则发生在支撑系统安装完成、开挖继续向更深远处进行时。张义等^[6]通过仿真研究发现当支护施工完成后,最大位移往往发生在开挖面附近。Ou等^[7]的研究也得出了类似结论,他们指出挡墙的最大水平位移通常出现在开挖面附近,其值一般为开挖深度的0.2%~0.5%。由于不同的变形模式会导致不同形式的地表沉降,因此确定挡墙变形计算方法对于预测地表变形具有重要作用。

在深基坑开挖时往往需要采用多种支护结构来支撑周围土体,支护结构的稳定性目前大多采用仿真模拟验证设计的可靠性。其中支撑梁、腰梁以及既有桩基等结构在地下工程施工中均发挥着重要作用,而这些构件的模拟建模往往决定了计算结果的准确性。Hsiung等^[8]利用三维有限元方法模拟了某深基坑工程,该研究中的地下连续墙采用板壳单元建模。此外,Hsieh等^[9-10]也在其对深基坑开挖的三维仿真分析中,采用线弹性梁单元对地下连续墙支撑梁进行建模,但未考虑斜撑与基坑底部桩基的影响。这一类研究均采用简化为面以及线单元的建模方式模拟工程中的支护结构,提高了计算效率,简化了计算模型^[11]。彭斌等^[12]也对深基坑施工时地下连续墙的变形规律进行了分析,采用实体单元模拟地下连续墙以及支撑梁。Jamsawang等^[13]则针对深基坑底部深层水泥搅拌桩以及地下连续墙的侧向位移与支撑内力进行了数值模拟研究,其中搅拌桩以及地下连续墙均采用非渗透弹性体积单元建模,支撑梁则采用梁单元,楼板采用板单元,预测的挡墙侧向位移与实测数据吻合良好。赵凌云等^[14]采用Abaqus软件建立了沿海地区某深基坑工程的三维有限元模型,在该模型中,重力式挡墙采用三维实体单元建模,而桩锚等结构物则采用线单元建模。这些研究大多采用实体单元以及实体单元结合结构单元的方式模拟深基坑工程当中的挡墙以及支撑体系,得到的数值预测结果均与现场实测数据吻合良好。但对于一些复杂形式的模型而言,完全采用实体网格建模计算,不仅会增大建模复杂度,同时也会极大降低计算效率,因此两种方法的使用应当根据具体工程结构的特征而定。

现有研究表明,在深基坑分析中并非所有构件都必须采用简化的结构单元模拟,但不同结构对整体分析结果的影响程度存在差异。因此本研究基

于西安地铁8号线环园中路停车场(现永城路停车场)基坑工程,对不同建模方法在深基坑结构建模中的应用与适用性进行对比分析。研究内容包括地下连续墙以及斜支撑与搅拌桩的建模方式,建模分析采用PLAXIS 3D AE.02进行。本研究最终对深基坑有限元结构建模中各结构要素的建模选择提出了建议,为工程设计与数值分析提供参考。

1 工程概况

1.1 深基坑工程概况

西安地铁8号线2标环园中路停车场主要位于杨家庄站—堡子村站区间,其中环园中路停车场基坑为双柱三跨3层基坑,基坑1区开挖深度最大达24m,属于深基坑,采用顺作法施工。环园中路停车场1区的基坑施工顺序如表1所示,停车场位于凤城五路北侧旧城改造范围内,并沿东西向布置。基坑1区的平面布置如图1a所示,施工场地呈矩形,深度最大部分长57.4m,宽23.5m,长宽比 $L/W=2.44$ 。环园中路停车场基坑外包总长150m,除基坑1区剩余西侧基坑(2区)开挖深度为16.2m,长93.6m,宽22m。基坑1区共3层,周围土体由厚0.8m、深26m的地下连续墙支护,如图1b所示。部分地下连续墙墙段下方设置了埋深为49m的槽型桩进行加固,桩体厚度与地下连续墙相同(0.8m)。槽型桩的主要功能是为地下连续墙提供竖向承载力。基坑内部为抵抗侧向土压力,支护结构采用了2道钢支撑体系。此外,为保证基坑坑底承载力,在基坑场地内施作了水泥搅拌桩,其设置原则为基于场地内的软土地基分布,同时结合车站内各层结构布置特征确定。因此在该基坑两侧布置了搅拌桩加固地基,由于基坑中部为电梯井,因此并未设置搅拌桩加固。

表1 1区施工顺序

Table 1 Construction sequence for excavation area 1

施工步序	施工活动
1	现场浇筑地下连续墙、搅拌桩及开挖至-1.600m
2	安装并预加载第1道支撑梁,深度为1m,并开挖至-8.600m
3	安装并预加载第2道支撑梁,深度为8m,并开挖至-15.600m
4	安装并预加载第3道支撑梁,深度为15m,并开挖至-25.000m
5	在24~25m处完成素混凝土以及垫层基础
6	拆除第3道支撑系统,并在深度15m处浇筑地下3层楼板
7	拆除第3道支撑系统,并在深度8m处浇筑地下2层楼板

注:3道支撑的预加荷载均为设计荷载的30%;仅对开挖过程进行数值模拟(步序1~4)

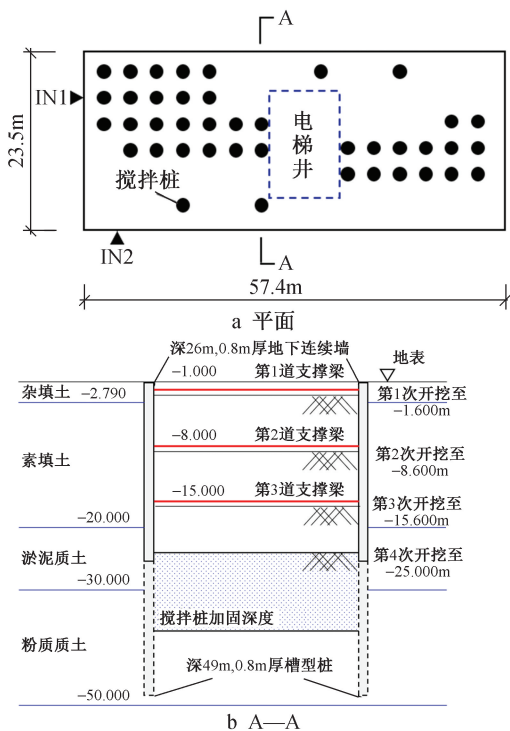


图 1 基坑 1 区

Fig. 1 Area 1 of foundation excavation

1.2 工程地质条件

环园中路停车场基坑揭露地层情况为:①₁ 杂填土、①₂ 素填土、②₂ 淤泥质土、③₁ 粉质黏土、③₃ 中砂、③₄ 粗砂、③₅ 砾砂、强风化带⑤₁₋₂ 泥质粉砂岩、中等风化带⑤₁₋₃ 泥质粉砂岩、⑤₄₋₂ 钙质泥。本站基坑开挖范围存在①₂ 层素填土、③₁ 粉质黏土、③₁₋₁ 淤泥质土、③₃ 中砂、③₄ 粗砂、③₅ 圆砾。

1.3 场地周边环境

基坑位于凤城五路北侧旧城改造范围下方,停车场东南角存在 5~7 层混凝土结构(造纸厂宿舍)。为了保护基坑周围建筑,从基坑支护结构形式和地下水 2 个方面采取措施,基坑支护采用 0.8m 厚地下连续墙并采用 H 型钢接头,第 1 道支撑采用钢筋混凝土支撑以有效减少基坑变形,防止基坑外地下水位下降。造纸厂宿舍楼房与地下连续墙之间采用 $\phi 850@600$ 三轴搅拌桩并内插 $700 \times 300 \times 13 \times 24$ 型钢,隔一插一,桩底均进入强风化岩层以下 0.5m,桩长 34m,地下连续墙相应位置处基坑侧槽壁加固采用 $\phi 850@600$ 三轴搅拌桩,长度为 9m。同时要求施工时严密监测,必要时充填注浆。

2 深基坑开挖有限元分析

2.1 本构模型及网格参数

西安市地处关中平原,南倚秦岭山脉,北临渭北黄土台塬,整体地质构造属于渭河断陷盆地(汾渭地堑的一部分)。基坑周边土层分为 7 个不同地

层,包括淤泥质土、粉质黏土、砂土层、泥质砂岩、钙质泥岩、下伏岩浆岩、变质岩以及沉积岩等。部分针对黏土特性的研究^[15]发现由于长期抽取地下水,西安市部分区域孔隙水压力下降,如图 2 所示,因此在本研究中孔隙水分布被模拟为水位下降条件。而黏结硬化模型(HSM)是常用的黏土本构模型之一,该模型采用邓肯-张双曲线应力应变^[16],其中刚度与应力相关。

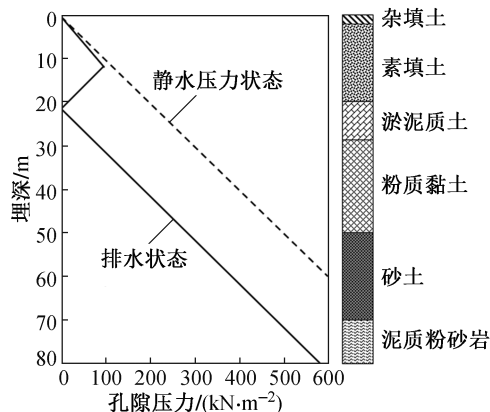


图 2 黏土孔隙压力分布

Fig. 2 Distribution of pore pressure of clay

代加林^[17]研究了黏土的 HSM 土壤模型,同时基于固结仪和三轴试验的结果,对 HSM 土壤参数进行了数值标定。顾晓强等^[18]以及 Likitlersuang 等^[19]提供了一套完整的黏土 HSM 模拟参数,如表 2 所示。在本研究中采用 Likitlersuang 提供的 HSM 模型模拟软质和硬质黏土。

基坑 1 区场地开挖采用 PLAXIS 3D 三维有限元分析软件进行建模计算,如图 3 所示。土体部分网格采用 5 节点四面体单元,网格节点采用二次函数加密来提高计算精度。建立的三维模型总体尺寸为 $140\text{m} \times 103\text{m} \times 80\text{m}$,共划分 264 163 个单元。模型 4 个侧边界施加水平位移约束以限制侧向移动,模型底部设置为固定位移约束,防止竖向与水平位移。为验证边界条件对计算结果的影响,同时对靠近边界区域的变形结果进行了监测与分析。结果表明,模型未出现明显的边界效应,说明所设边界范围足以避免约束干扰计算精度。

2.2 结构建模选择

在深基坑施工过程中,通常会设置多种支护结构以支撑周围土体。为了优化模型以提升计算效率,对整体受力与变形影响较小的构件进行了简化,主要分析了施工过程中地下连续墙、基坑支撑、坑底桩基等主要结构的受力与变形特性。

表 2 HSM 本构模型输入参数

Table 2 Input parameters of the HSM constitutive model

土层	厚度/m	重度 γ_b / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 $c'/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	内摩擦 角 $\varphi'/$ ($^\circ$)	剪胀角 $\psi'/$ ($^\circ$)	$E_{50}^{\text{ref}}/$ MPa	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/$ MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/$ MPa	ν_{ur}	m	K_0^{nc}	R_f	R_{inter}
杂填土	2.79	18.0	1	25	0	45.60	45.60	136.8	0.2	1	0.58	0.9	0.7
素填土	17.21	16.5	1	23	0	0.80	0.85	8.0	0.2	1	0.70	0.9	0.7
淤泥质土	10.00	17.5	10	25	0	1.65	1.65	5.4	0.2	1	0.60	0.9	0.7
粉质黏土	20.00	19.5	25	26	0	8.50	9.00	30.0	0.2	1	0.50	0.9	0.7
砂土	20.00	19.0	1	27	0	38.00	38.00	115.0	0.2	0.5	0.55	0.9	0.7
泥质粉砂岩	17.00	20.0	25	26	0	8.50	9.00	30.0	0.2	1	0.50	0.9	0.9

注: E_{50}^{ref} 为排水三轴试验割线刚度; $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为渗透仪加载下的参考切线刚度; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为加载/卸载刚度; ν_{ur} 为泊松比; m 为指数幂; K_0^{nc} 为静止土压力系数; R_f 为失效比; R_{inter} 为界面强度折减系数。

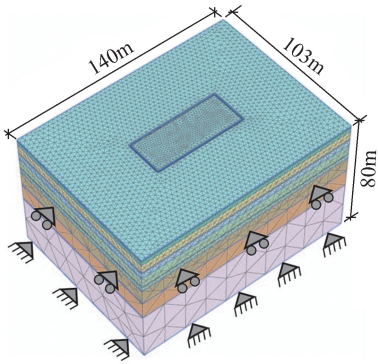


图 3 三维模型

Fig. 3 The 3D model

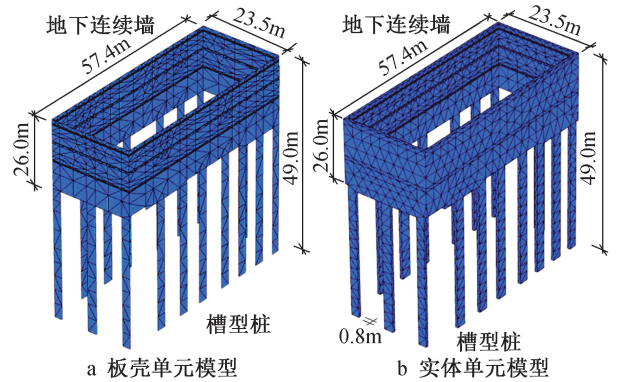


图 4 地下连续墙建模

Fig. 4 Modeling of diaphragm walls

2.2.1 地下连续墙

地下连续墙通常按弹性材料进行模拟。现有研究中地下连续墙或被简化为有厚度参数的弹性板单元进行简化建模,或采用线弹性、不可渗透的三维实体单元进行模拟。因此本研究分别采用了这两种建模方式对地下连续墙进行模拟计算,图 4a 为简化成弹性板壳单元的计算模型,图 4b 则为按照地下连续墙设计图纸建立的三维实体单元计算模型。其中,在板单元模型中,地下连续墙的厚度并未在三维几何模型上呈现,而是通过板单元的参数输入(如厚度 d)间接考虑。而在实体单元模型中,墙体的厚度通过模型几何尺寸直接定义,因此在该方案中无法像板单元那样灵活调整厚度,另外采用实体单元建模的计算量与建模工作量明显更大。板壳模型中混凝土连续墙体的刚度主要由弹性模量 E 、泊松比 ν 、厚度 d 以及单位重度差 γ (混凝土与土体单位重度之差)共同控制,以修正非体单元模型的力学响应,板单元的参数输入如表 3 所示。对于采用实体单元建模的情况,本研究使用四面体单元模拟地下连续墙,材料特性采用线弹性本构、设置为不可渗透边界,并根据排水类型进行了参数设定,如表 4 所示。

表 3 地下连续墙建模参数

Table 3 Parameters of the diaphragm wall

参数	厚度 d/m	单位重度差 $\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 $E/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	泊松比 ν
地下连续墙	0.8	16	24 800	0.15
楼板	1.0	23	24 800	0.15

表 4 地下连续墙系统采用体积单元建模时的参数

Table 4 Parameters when the diaphragm wall system is modeled using volume units

参数	厚度 d/m	单位重度差 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	泊松比 ν	排水性
地下连续墙	0.8	23	24 800	0.15	不排水

2.2.2 支撑梁

深基坑施工中常设置支撑梁以减小地下连续墙变形,其中斜撑通常设置在支撑两端,以缩短支撑的跨度、增强结构整体稳定性,且一般以 45° 角安装于主支撑与地下连续墙之间。对于基坑内支撑系统的模拟,在建模中考虑了两种情况:含斜撑工况(见图 5a)以及无斜撑工况(见图 5b)。在 PLAXIS 3D 中,可以根据研究需求通过启用或关闭

相关选项来简便模拟“有斜撑”与“无斜撑”两种情形。模型中所有支撑均采用梁单元模拟,梁单元需要输入的参数如表 5 所示。

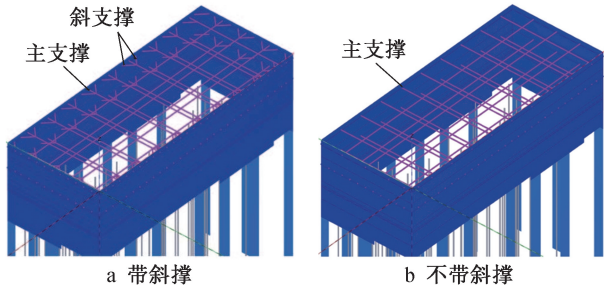


图 5 支撑梁建模
Fig.5 Modeling of support beam

表 5 支撑系统采用梁结构单元模拟时的参数取值
Table 5 Parameter values when the support system is simulated using beam structural units

参数	梁断面面积 A/m^2	单位重度差 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	弹性模量 $E/(kN \cdot m^{-2})$	z 方向抗弯惯性矩 I_3/m^4	y 方向抗弯惯性矩 I_{22}/m^4
钢支撑	2.19×10^{-2}	77.15	210 000	2.24×10^{-4}	6.66×10^{-4}

2.2.3 坑底桩基

搅拌桩常被用于软土地基加固,通过提升地基承载力以保证上部结构稳定性,避免不均匀沉降以及附加水平位移超限。在本研究中分别分析了两种情况:即设置了搅拌桩的模型与未设置搅拌桩的模型(见图 6)。搅拌桩采用嵌入式梁单元进行建模,其输入参数如表 6 所示。嵌入式梁由带有特殊界面单元的梁单元组成,用以模拟桩与周围土体之间的相互作用。该相互作用包括桩侧摩阻力 f_s 和桩端阻力 q_{end} 。其中侧摩阻力和端阻力可近似为 $f_s = \alpha s_{u,ave} \pi D$ 和 $q_{end} = 9s_{u,end} \pi D^2/4$,其中 $s_{u,ave}$ 和 $s_{u,end}$ 分别为桩长范围内土体的平均不排水抗剪强度和桩端处土体的不排水抗剪强度。

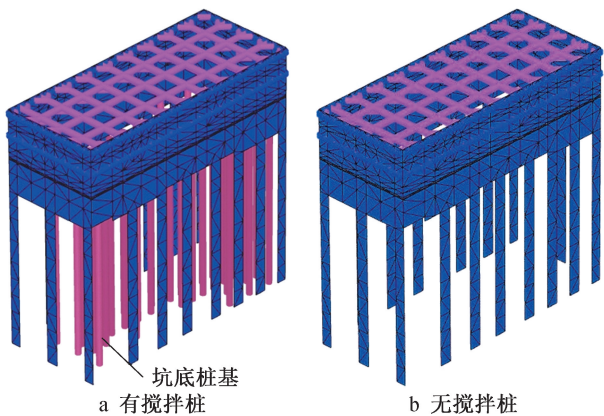


图 6 基坑坑底桩基模型
Fig.6 Modeling of piles at the bottom of the foundation excavation

表 6 水泥搅拌桩采用结构单元建模时参数取值
Table 6 Parameter values when cement mixing is modeled using structural units

类型	弹性模量 $E/(kN \cdot m^{-2})$	单位重度差 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	桩径/m	桩侧摩阻力/ $(kN \cdot m^{-1})$	桩端阻力/kN
实心圆桩	24 800	23	1.2	260	2 443
实心圆桩	24 800	23	0.8	173	1 086

注:平均表面摩擦力 $f_s = 69kN/m^2$;平均桩端摩阻力 $q_b = 2 160kN/m^2$

3 计算结果

3.1 地下连续墙影响分析

针对环园中路停车场深基坑施工,本节采用不同建模方法对深基坑地下连续墙变形进行计算分析。数值模拟时基坑开挖步骤按照表 1 所示的施工顺序进行。对于采用板单元和实体单元建模的两种地下连续墙模型,将墙体位移结果与监测数据进行了对比,如图 7 所示。图中编号 2~4 与表 1 中描述的施工阶段对应。图 7 中同时给出了由测斜仪(IN1 和 IN2)在第 3 和第 4 阶段测得的数据,测斜仪安装位置如图 1a 所示。结果表明,数值模拟结果与现场监测数据在变形趋势上吻合良好,均呈现出典型的基坑开挖深层水平位移模式,即墙体变形随深度先增大后减小,最大位移发生在基坑中部深度范围内。具体而言,在开挖的第 3 与第 4 阶段,采用实体单元模拟的地下连续墙其计算结果与测斜仪监测值更为接近,变形曲线形态和最大位移量均拟合较好,表明该模型能更真实地反映墙体的实际工作状态。相比之下,采用板单元的简化模型则系统地高估了墙体的水平变形,计算结果整体偏于保守。这一差异主要源于板单元模型无法精确模拟墙体与土体在三维空间中的相互作用及其截面特性。综上,实体单元模型在本工程的精细变形预测中表现出更高的准确性,而板单元模型虽计算效率更高,但更适用于对变形进行保守估计的初步设计阶段。研究结果验证了所建立三维有限元模型的有效性,并为类似地质条件与支护形式的深基坑工程变形预测提供了参考。

3.2 斜支撑的影响分析

不同施工阶段下两种支撑方案(即考虑和不考虑斜支撑)下的墙体变形数值结果如图 8 所示。结果表明设置斜撑对有效控制墙体变形起到了至关重要的作用。在 2 个测点(IN1 与 IN2)在不同开挖阶段(3 与 4)时,有斜撑工况(黑色实线)的计算结果与监测数据(黑色方点)吻合良好,其变形曲线平缓,最大位移量较小;而无斜撑工况(红色虚线)计算结果则大于墙体的实际水平变形,其最大位移量

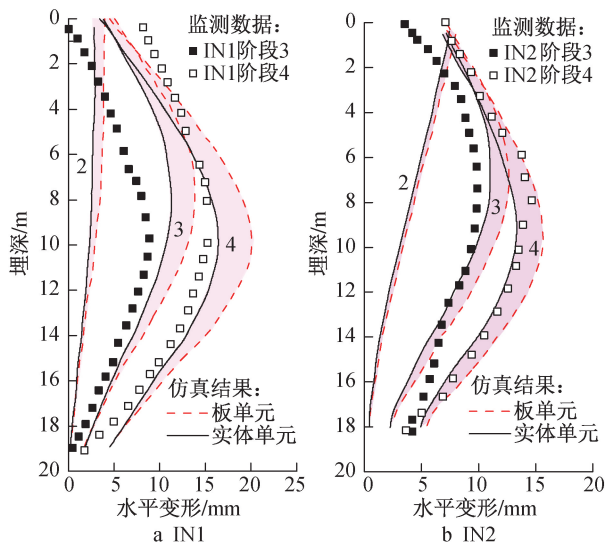


图7 采用板单元以及实体单元时地下连续墙的变形量

Fig. 7 The deformation of the diaphragm wall when using plate units and solid units

较有斜撑工况增大 20%~30%，且变形曲线形态呈现出曲率增大效应。这表明在本工程采用的支撑体系中，斜撑通过缩短主支撑的跨度、形成空间协同受力网络，极大地增强了支护体系的整体刚度，从而有效约束了地下连续墙的侧向位移。数值结果与监测数据的一致性，不仅验证了模型中斜撑模拟的准确性，也证实了实际工程中斜撑设计的必要性与合理性。

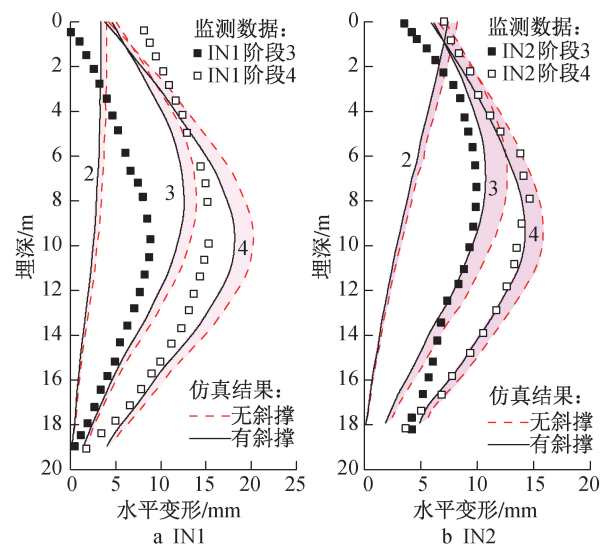


图8 有无斜撑模型对比

Fig. 8 Comparison of models with and without diagonal braces

3.3 坑底搅拌桩的影响分析

考虑和不考虑基坑底部桩基的两种工况数值模拟结果如图9所示。坑底桩基对限制墙体深层变

形具有显著作用。在两个测点的整个开挖过程中，有桩基工况（黑色实线）的计算结果与现场监测数据（黑色方点）高度吻合，其变形曲线在深度15m以下迅速收敛，表明桩基提供了有效的底部嵌固。反之，无桩基工况（红色虚线）的变形曲线在墙体中下部（10~20m深度）的位移量显著增大，最大位移增大15%~25%，且变形形态呈现出明显的“踢脚”趋势，即墙底向坑内的位移加剧。这证实了坑底搅拌桩通过其侧摩阻力和端阻力，不仅承担上部结构荷载，更关键的是与地下连续墙协同工作，共同抵抗坑外土体的侧向压力，从而有效抑制了墙体的深层刚体位移和坑底隆起。因此，在本工程的深基坑设计中，坑底搅拌桩是控制支护体系整体稳定性和变形不可或缺的重要构件。

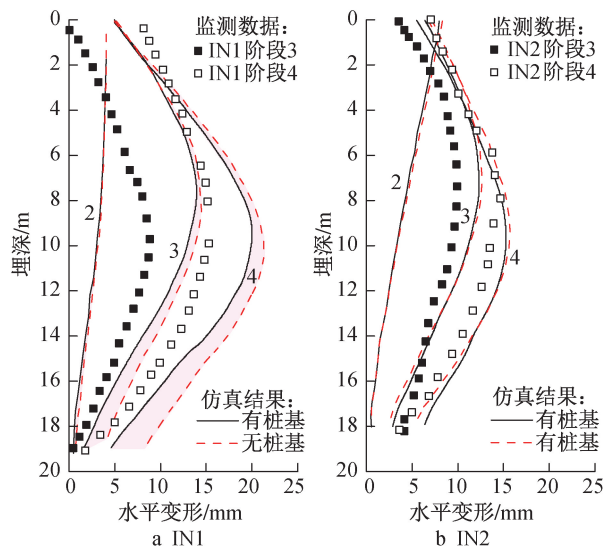


图9 有无搅拌桩的模型对比

Fig. 9 Comparison of models with and without mixing piles

4 结语

依托西安地铁环园中路停车场深基坑工程，通过建立 PLAXIS 3D 精细有限元模型，系统分析了不同建模方法与支护设计方案对地下连续墙变形特性的影响，并通过与现场监测数据对比，得出以下结论。

1) 采用实体单元模拟地下连续墙，其计算结果在各个施工阶段均与监测数据吻合良好，能更真实地反映墙体的实际受力与变形形态。而板单元简化模型虽计算效率高，但会系统性地高估墙体的水平变形，结果偏于保守。因此，对于类似本工程的复杂深基坑设计与研究，推荐采用实体单元以获取更精确的变形预测。

2) 支撑体系中设置斜撑对控制基坑变形至关

重要。分析表明,无斜撑工况会显著增大墙体水平位移20%~30%,并加剧“鼓肚”效应。而有斜撑的工况与监测数据高度一致,证实了斜撑通过形成空间受力体系,有效提高了整体支护刚度,是保证基坑稳定性的关键构件。

3) 基坑底部设置的搅拌灌注桩不仅用于承担竖向荷载,更在限制支护结构深层变形方面发挥重要作用。无桩基工况下,墙体下部出现明显的“踢脚”式位移,而有桩基工况则通过与地下连续墙的协同工作,提供了有效的底部嵌固,抑制了坑底隆起和墙体的深层刚体位移,确保了支护体系的整体稳定性。

参考文献:

- [1] 陆超,郑坚杰. 复杂环境地铁深基坑地下连续墙变形分析[J]. 工程建设,2025,57(10):81-88.
LU C, ZHENG J J. Deformation analysis of underground continuous wall of subway deep foundation pit in complex environment [J]. Engineering construction, 2025, 57(10): 81-88.
- [2] 邱明明,杨果林,申权,等. 深厚富水砂层排桩挡墙深基坑施工变形特性研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),2020,59(3):107-117.
QIU M M, YANG G L, SHEN Q, et al. Deformation characteristics of foundation pit excavation of row-pile supporting in deep water-rich sandy stratum[J]. Acta scientiarum naturalium Universitatis Sunyatseni, 2020, 59(3): 107-117.
- [3] 邵荣华. 软土地区深基坑地下连续墙变形及支护体系受力分析[J]. 四川水泥,2025(8):28-30.
SHAO R H. Deformation of diaphragm wall of deep foundation pit in soft soil area and stress analysis of supporting system [J]. Sichuan cement, 2025(8): 28-30.
- [4] 周东波,梅源,刘子扬,等. 东部沿海软土车站深基坑开挖地连墙变形规律[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(12):41-46,54.
ZHOU D B, MEI Y, LIU Z Y, et al. Deformation law of diaphragm wall in deep foundation pit excavation of soft soil stations along the eastern coast [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural sciences), 2024, 43(12): 41-46, 54.
- [5] 张子辰,严长江,李旺. 某黄土深基坑复合土钉墙变形监测分析[J]. 兰州工业学院学报,2023,30(1):27-31.
ZHANG Z C, YAN C J, LI W. Analysis on deformation monitoring of composite soil nailing wall in a loess deep foundation [J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2023, 30(1): 27-31.
- [6] 张义,张书伟,贾建伟. 地铁车站盖挖逆作法深基坑地连墙变形机理研究[J]. 建筑结构,2022,52(S2):2401-2405.
ZHANG Y, ZHANG S W, JIA J W. Research on the deformation mechanism of the connecting wall of the deep foundation pit with the reverse method of cover and excavation of the subway station [J]. Building structure, 2022, 52(S2): 2401-2405.
- [7] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation [J]. Canadian geotechnical journal, 1993, 30(5): 758-767.
- [8] HSIUNG B B, YANG K H, AILA W, et al. Three-dimensional effects of a deep excavation on wall deflections in loose to medium dense sands [J]. Computers and geotechnics, 2016, 80: 138-151.
- [9] HSIEH P G, OU C Y, LIN Y L. Three-dimensional numerical analysis of deep excavations with cross walls [J]. Acta geotechnica, 2013, 8(1): 33-48.
- [10] HSIEH P G, OU C Y, HSIEH W H. Efficiency of excavations with buttress walls in reducing the deflection of the diaphragm wall [J]. Acta geotechnica, 2016, 11(5): 1087-1102.
- [11] 胡军. 软弱地层深基坑开挖地下连续墙变形分析[J]. 现代城市轨道交通,2015(3):47-49,53.
HU J. Analysis of underground continuous wall deformation in soft soil deep foundation pit excavation [J]. Modern urban transit, 2015(3): 47-49, 53.
- [12] 彭斌,袁杰,张小勇,等. 圆砾地层深基坑地下连续墙变形特性分析[J]. 土木工程学报,2017,50(S1):65-69.
PENG B, YUAN J, ZHANG X Y, et al. Analysis on deformation of diaphragm wall in round gravel strata [J]. China civil engineering journal, 2017, 50(S1): 65-69.
- [13] JAMSAWANG P, JAMNAM S, JONGPRADIST P, et al. Numerical analysis of lateral movements and strut forces in deep cement mixing walls with top-down construction in soft clay [J]. Computers and geotechnics, 2017, 88: 174-181.
- [14] 赵凌云,路威,秦景,等. 软土深基坑组合开敞式支护数值模拟与监测分析[J]. 水利水电技术,2020,51(2):155-161.
ZHAO L Y, LU W, QIN J, et al. Numerical simulation and monitoring analysis of composed open-typed support for deep soft soil foundation pit [J]. Water resources and hydropower engineering, 2020, 51(2): 155-161.
- [15] 谢荣,扈胜霞,李勇,等. 南昌重塑红黏土强度特性试验研究[J]. 水力发电,2025,51(3):119-124.
XIE R, HU S X, LI Y, et al. Experimental study on strength characteristics of remolded red clay in Nanchang [J]. Water power, 2025, 51(3): 119-124.
- [16] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [17] 代加林. 软黏土中吸力式桶形基础上拔离心模型试验与数值分析[D]. 杭州:浙江大学,2020.
DAI J L. Centrifugal and numerical study on uplift behaviour of suction caissons in soft clay [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [18] 顾晓强,吴瑞拓,梁发云,等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学,2021,42(3):833-845.
GU X Q, WU R T, LIANG F Y, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification [J]. Rock and soil mechanics, 2021, 42(3): 833-845.
- [19] LIKITLERSUANG S, SURARAK C, WANATOWSKI D, et al. Geotechnical parameters from pressuremeter tests for MRT Blue Line extension in Bangkok [J]. Geomechanics and engineering, 2013, 5(2): 99-118.