

杭州淤泥质粉质黏土小应变硬化土模型 参数试验及工程应用

孟瑞军

中铁建设集团有限公司华东分公司,江苏 昆山 215300

[摘要] 小应变硬化土(HSS)模型被广泛用于软土地区分析基坑开挖对周边环境的影响。淤泥质粉质黏土是一种高灵敏性土,对基坑开挖工程有很大影响。本文介绍 HSS 模型 13 个参数及其确定方法。选取杭州淤泥质粉质黏土,开展标准固结试验、三轴固结排水试验、三轴固结排水加载—卸载—再加载试验和弯曲元试验等一系列室内试验,确定杭州淤泥质粉质黏土 HSS 模型参数的取值及其比例关系。依托杭州 2 个典型工程案例,分别建立基坑开挖三维有限元模型,分析围护结构深层水平位移和支撑轴力,并对比实测数据和数值模拟结果,验证杭州淤泥质粉质黏土 HSS 模型参数取值合理性。该研究可为淤泥质粉质黏土地层基坑开挖数值模拟 HSS 模型参数取值提供参考。

[关键词] 小应变硬化土模型; 基坑工程; 淤泥质粉质黏土; 室内试验; 数值模拟

[分类号] TU447

[文献标志码] A

Parameter tests and engineering applications of small-strain hardening soil model of mucky silty clay in Hangzhou

MENG Ruijun

East China Branch of China Railway Construction Group Co., Ltd., Kunshan 215300, China

Abstract: The small-strain hardening soil (HSS) model is commonly used to analyze the impact of excavation of foundation pits on the environment in soft soil areas. Muddy silty clay is a highly sensitive type of soil that significantly influences engineering for the excavation of the foundation pit. This paper provides an introduction to the 13 parameters of the HSS model and methods to calculate them. We subjected Hangzhou silty clay to standard consolidation tests, triaxial consolidation drainage tests, triaxial consolidation drainage loading-unloading-reloading tests, and bending element tests in the laboratory, and used the results to identify and calculate the values of parameters of the HSS model of Hangzhou silty clay. Taking two typical engineering cases in Hangzhou as examples, three-dimensional

[收稿日期] 2023-11-07。

[基金项目] 中铁建设集团有限公司科技研发计划项目(LX20-16b)。

[第一作者] 孟瑞军(1979—),男,高级工程师,研究方向:软弱土基本特性及加固技术,E-mail:18067013888@163.com。

[引用格式] 孟瑞军,2024. 杭州淤泥质粉质黏土小应变硬化土模型参数试验及工程应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),51(2):303-315.

Meng R J,2024. Parameter tests and engineering applications of small-strain hardening soil model of mucky silty clay in Hangzhou[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition),51(2):303-315.

finite element models of the excavation of the foundation pit are established, and the deep horizontal displacement and axial supporting force of the retaining structure are analyzed. A comparison of the measured data with the results of numerical simulations verified the accuracy of the parameters of the HSS model for muddy silty clay in Hangzhou. This study provides a reference for determining the values of parameters of the HSS model to numerically simulate the excavation of foundation pits in silty clay strata in the Hangzhou area.

Key words: small-strain hardening soil model; foundation pit; mucky silty clay; laboratory test; numerical simulation

随着城市建设的发展,基坑工程的规模和复杂程度越来越大,其对周围环境的变形控制要求也越来越高。正常荷载情况下,大多数安全运行的基坑工程周围土体变形($10^{-4} \sim 10^{-3}$)处于小应变($10^{-6} \sim 10^{-3}$)范围内(Mair, 1993; 顾晓强等, 2021; 董鑫等, 2023)。数值模拟被广泛应用于分析基坑开挖对周边环境的影响问题,建模过程中土体本构模型及参数的选取决定计算结果的合理性。因此,合理选取土体小应变本构模型参数对基坑开挖工程数值模拟应用具有重要意义。

小应变硬化土模型(hardening soil model with small-strain stiffness, 简称 HSS 模型)是 Benz(2007)以硬化土模型(hardening soil model, 简称 HS 模型)为基础提出的一种能反应土体小应变特性的本构模型,被广泛应用于模拟复杂环境基坑开挖对周边环境的影响(温科伟等, 2018; 陈少杰等, 2019; 林德周, 2023)。淤泥质土属于高灵敏性土,对基坑开挖工程有较大影响。目前,国内外专家已经利用 HSS 模型开展了一些淤泥质土层基坑开挖相关的数值模拟研究。如施有志等(2017)以厦门市某一地铁深基坑工程为依托,通过基坑的变形监测反算厦门地区淤泥质土和粉质黏土的 HSS 参数;李连祥等(2019)通过实际监测数据结合位移反分析得到济南典型地层土体 HSS 模型参数取值方法;陈尚荣等(2020)通过室内试验获得上海淤泥质土层 HSS 小应变模型参数,确定了 HSS 模型在分析上海地区基坑工程数值模拟的适用性;于廷新(2021)以温州紧邻铁路的深厚淤泥层基坑为例,采用 HSS 模型进行数值模拟分析深厚淤泥质地层基坑对铁路影响规律。然而,不同地区之间获得的参数差异性较大,如梁发云等(2017)列出部分不同地区淤泥质土层参数,与上海地区相比有较大差异。因此,开展杭州地区淤泥质粉质黏土 HSS 模型参数试验研究可

为杭州地区类似工程提供参考。

综上所述,开展杭州淤泥质粉质黏土 HSS 模型参数试验及工程应用研究具有重要意义。本文首先介绍 HSS 模型 13 个参数及其确定方法;其次通过系列室内试验,获得 2 种杭州淤泥质粉质黏土 HSS 模型中 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$, E_{50}^{ref} , c' , ϕ' , R_f , E_w^{ref} , G_0^{ref} 参数;最后依托杭州 2 个典型基坑开挖工程,采用 PLAXIS 软件建立基坑开挖三维有限元模型,对比分析数值模拟和实测数据,验证 HSS 模型参数取值方法的合理性。

1 HSS 模型参数

HSS 模型不仅可以考虑小应变范围内土体剪切模量随应变增大而衰减的特点,而且可以考虑软黏土的压硬性与剪胀性,区分加卸载刚度(徐中华和王卫东, 2010; 嵇一等, 2014; 李青等, 2016)。HSS 模型共有 13 个参数,包括:与模量应力水平相关的幂指数 m 、卸载一再加载泊松比 ν_w 、参考应力 P^{ref} 、剪胀角 ψ 、破坏比 R_f 、正常固结条件下的侧压力系数 K_0 、有效黏聚力 c' 、有效内摩擦角 ϕ' 、三轴固结排水剪切试验的参考割线模量 E_{50}^{ref} 、固结试验的参考切线模量 $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 、三轴固结排水卸载一再加载试验的卸载一再加载模量 E_w^{ref} 、及初始剪切模量 G_0^{ref} 和割线剪切模量衰减为 0.7 倍的初始剪切模量时对应的剪应变 $\gamma_{0.7}$ (宗露丹等, 2019; 张晋勋等, 2020)(表 1)。

通过经验可获得 m , ν_w , P^{ref} 和 ψ 的取值,如表 2 所示。对于 m ,砂土和粉土一般可取为 0.5,黏性土的取值范围为 0.5~1; ν_w 可采用 PLAXIS 软件模型手册中的建议值,一般取为 0.2; P^{ref} 一般取为 100 kPa; 对于 ψ ,砂土可取为由 $\psi = \phi' - 30^\circ$,黏性土一般取为 0。 K_0 可由 $K_0 = 1 - \sin\phi'$ 取得; c' , ϕ' , R_f 和 E_{50}^{ref} 由三轴固结排水试验测得; $E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$ 由固结试验测得; E_w^{ref} 由三轴固结排水加载一

表 1 HSS 模型参数
Table 1 Parameters of HSS model

有效黏聚力 c'	有效内摩擦角 φ'
剪胀角 ψ	三轴固结排水剪切试验的参考割线模量 E_{30}^{ref}
模量应力水平相关的幂指数 m	固结试验的参考切线模量 E_{oed}^{ref}
卸载—再加载泊松比 ν_{ur}	三轴固结排水卸载—再加载试验的卸载—再加载模量 E_{ur}^{ref}
参考应力 P^{ref}	正常固结条件下的侧压力系数 K_0
破坏比 R_f	初始剪切模量 G_0^{ref}
割线剪切模量衰减为 0.7 倍的 初始剪切模量时对应的剪应变 $\gamma_{0.7}$	

表 2 部分参数经验值
Table 2 Empirical values of partial parameters

土类	模量应力水平相关幂指数 m	卸载—再加载泊松比 ν_{ur}	参考应力 p^{ref}/kPa	剪胀角 ψ
砂土、粉土	0.5	0.2	100	$\varphi' - 30^\circ$
黏性土	0.5~1	0.2	100	0

卸载—再加载试验测得。对于小应变参数, G_0^{ref} 对基坑开挖变形影响明显, 敏感性高; 而 $\gamma_{0.7}$ 对基坑开挖变形影响较小, 敏感性较低 (王浩然, 2012)。因此, 本文仅对 G_0^{ref} 进行室内弯曲试验取值, 而 $\gamma_{0.7}$ 则采用以下经验公式取值 (Brinkgreve and Broere, 2006):

$$\gamma_{0.7} = \frac{1}{9G_0} \{ 2c' [1 + \cos(2\varphi')] + \sigma_1' (1 + K_0) \sin(2\varphi') \} \quad (1)$$

式中: σ_1' 是土体的竖向有效应力; G_0 是不同应力下的剪切模量。

2 HSS 模型参数试验

2.1 试验内容

通过开展标准固结试验、三轴固结排水试验、三轴固结排水加载—卸载—再加载试验和弯曲元试验确定 HSS 模型中杭州淤泥质粉质黏土的 c' ,

φ' , E_{30}^{ref} , R_f , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref} , G_0^{ref} 参数。工程案例 1 中基坑二期开挖深度约 10 m, 选取②₂ 淤泥质粉质黏土开展试验; 工程案例 2 中基坑开挖深度 15.4 m, 选取④₂ 淤泥质粉质黏土开展试验。

2.2 试验土样

试验土样通过薄壁取样法得到, 试验土样取自杭州 2 个典型工程 (杭州杭政储备 60 号地块和 62 号地块), 每个工程取样 6 个, 取样过程中尽量减小扰动, 按照深度由上往下依次编号。工程案例 1 的试样取样深度为 8.5 m 至 37.9 m, 由上往下依次为①₂ 砂质粉土夹粉砂、②₂ 淤泥质粉质黏土和③₂ 淤泥质粉质黏土, 依次编号为 ZK1-1~ZK1-6。工程案例 2 试样取样深度为 2.3 m 至 10.6 m, 由上往下依次为②砂质粉土、④₁ 淤泥质粉质黏土、④₂ 淤泥质粉质黏土, 依次编号 ZK2-1~ZK2-6。对 2 个工程的土样分别开展基本物理特性测试, 测试后的土层参数见表 3 和表 4。

表 3 工程案例 1 的土层参数
Table 3 Parameters of the soil in engineering case 1

土样	试样编号	深度/m	含水率/%	塑性指数	液性指数
① ₂ 砂质粉土夹粉砂	ZK1-1	8.5~8.7	12.70	3.53	0.37
	ZK1-2	9.5~9.7			
② ₂ 淤泥质粉质黏土	ZK1-3	14.5~14.7	38.85	18.40	2.06
	ZK1-4	15.5~15.7			
③ ₂ 淤泥质粉质黏土	ZK1-5	20.5~20.7	39.80	26.80	2.86
	ZK1-6	22.0~22.2			

表 4 工程案例 2 的土层参数
Table 4 Parameters of the soil in engineering case 2

土样	试样编号	深度/m	含水率/%	塑性指数	液性指数
②砂质粉土	ZK2-1	2.30~4.40	16.63	6.05	0.65
	ZK2-2				
④ ₁ 淤泥质粉质黏土	ZK2-3	4.60~6.40	40.91	15.40	1.56
	ZK2-4				
④ ₂ 淤泥质粉质黏土	ZK2-5	8.50~10.60	40.38	17.80	1.77
	ZK2-6				

2.3 试验结果

(1) 标准固结试验

图 1 是标准固结试验轴向荷载与轴向应变关系曲线。将所得的固结试验荷载与应变关系曲线进行拟合得到函数关系表达式, 曲线拟合判定系数 R^2 均为 0.99 以上。经计算得到轴向荷载 P 为 100 kPa 时试样的参考切线模量 $E_{\text{ref}}^{\text{ref}}$ 。

将试验结果平均值作为淤泥质粉质黏土的参考切线模量 $E_{\text{ref}}^{\text{ref}}$ (工程案例 1: 2.61 MPa; 工程案例 2: 2.31 MPa)。图 2 是固结试验孔隙比与轴向荷载曲线。经计算得到试样轴向荷载间隔 $P_1 = 100$ kPa 至 $P_2 = 200$ kPa 时所对应的压缩模量 E_s (工程案例 1: 2.84 MPa; 工程案例 2: 2.85 MPa)。

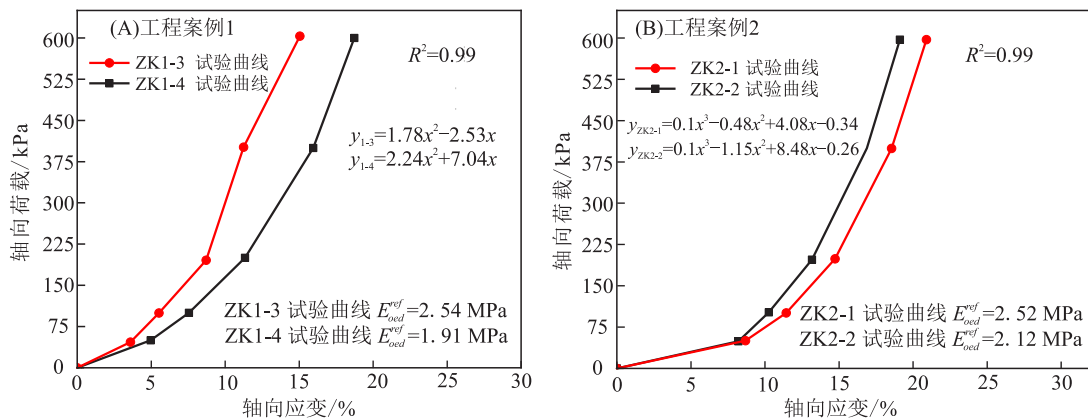


图 1 轴向荷载与应变关系曲线

Fig. 1 Curves of the relationship between the axial load and strain

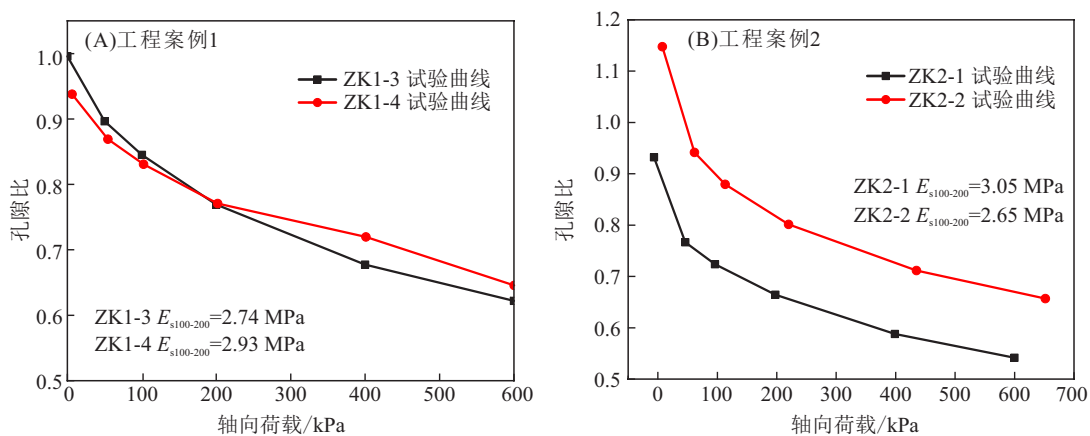


图 2 孔隙比与轴向荷载关系曲线

Fig. 2 Curves of the relationships between the axial load and the void ratio

(2) 三轴固结排水剪切试验

图 3 是在 100 kPa 围压下,通过三轴固结排水剪切试验得到的淤泥质粉质黏土的偏应力与轴向应变关系。由图可知,在 100 kPa 围压下偏应力与轴应变关系表现为应变软化。取峰值点所对应的偏应力值作为破坏值 q_f ,原点和 $0.5q_f$ 所对应的直线斜率即得到参考割线模量 E_{50}^{ref} (工程案例 1:4.43 MPa;工程案例 2:4.48 MPa)。

由偏应力—应变关系曲线拟合双曲线函数得到偏应力渐进值 q_a ,通过 $R_f = q_f / q_a$ 可计算得到试样的 R_f (工程案例 1:0.77;工程案例 2:0.92) (表 5)。图 4 是不同主应力状态下极限莫尔圆及外切线,由此得出淤泥质粉质黏土中有效黏聚力 c' 及有效内摩擦角 φ' (工程案例 1: $c' = 12.8$ kPa, $\varphi' = 28^\circ$;工程案例 2: $c' = 10.5$ kPa, $\varphi' = 31^\circ$)。

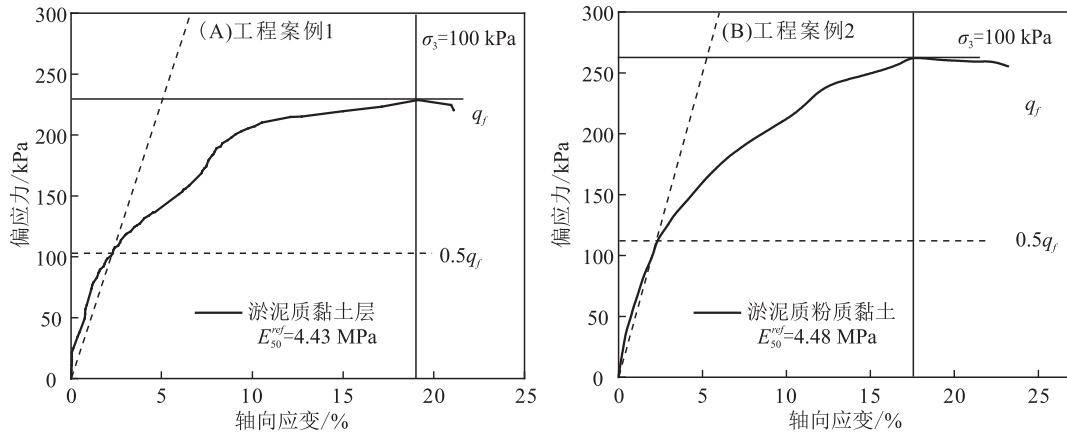


图 3 100 kPa 围压下偏应力与轴向应变关系曲线

Fig. 3 Curves of the relationships between the deviatoric stress and the axial strain under a confining pressure of 100 kPa

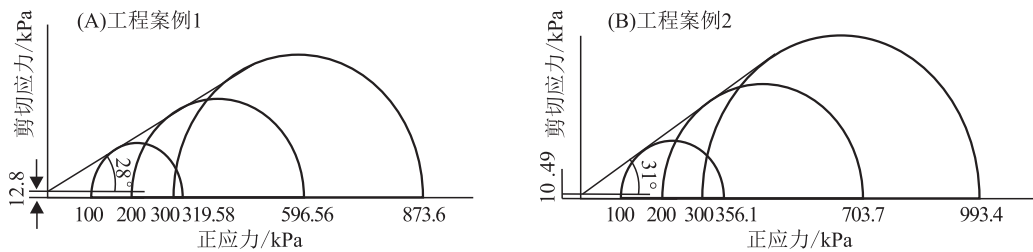


图 4 有效应力摩尔圆曲线

Fig. 4 Mohr circle curve of effective stress

表 5 破坏比 R_f
Table 5 Damage ratio R_f

	σ_3 / kPa	q_a / kPa	q_f / kPa	R_f
工程案例 1	100	183.2	238.100	0.77
工程案例 2	100	184.9	199.203	0.92

(3) 三轴固结排水加载—卸载—再加载试验

图 5 是在围压为 100 kPa 下,通过三轴固结排水加载—卸载—再加载试验得到的淤泥质粉质黏土的偏应力—轴向应变关系。试验过程中,偏应力—应变曲线构成一个滞回圈,连接滞回圈的上下 2 个端点,所得直线的斜率即为参考加载—

卸载—再加载模量 E_w^{ref} (工程案例 1:39.87 MPa;工程案例 2:24.74 MPa)。

(4) 弯曲元试验

图 6 是正弦输入信号频率为 5 kHz 和有效应力为 100 kPa 时,弯曲元试验过程中淤泥质粉质黏土的发射波和接收波波形。弯曲元试验中剪切波传播时间由初达波法和峰值法确定,是获取平均剪切波速 v_s 和 G_0 的关键。采用初达波法和峰值法得到的剪切波速传播时间 t 分别为 0.613 ms 和 0.633 ms;根据试样高度确定剪切波传播路径为 105 mm,计算得到 $v_s = 168$ m/s;由公式 $G_0 = \rho v_s^2$,

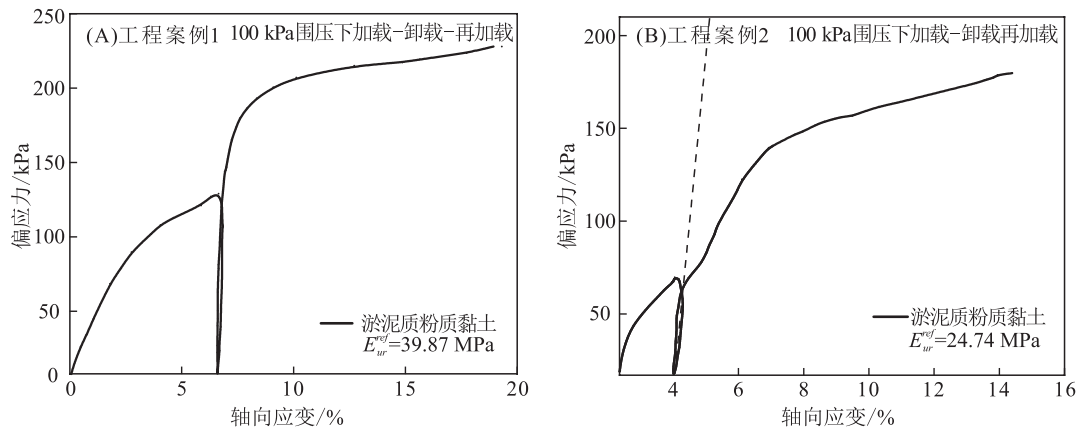


图 5 偏应力与轴向应变曲线关系
Fig. 5 Curve of the relationship between deviatoric stress and axial strain

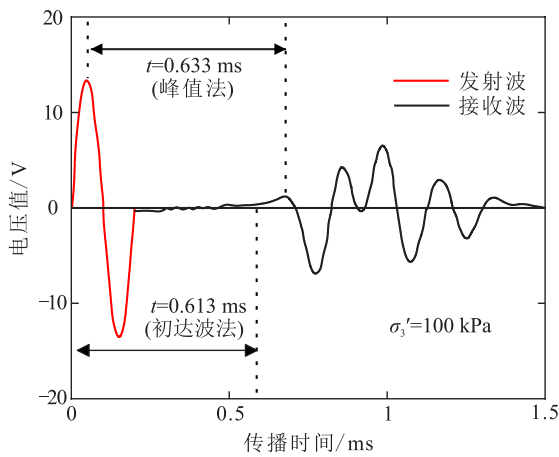


图 6 弯曲元测试波形结果
Fig. 6 Waveform of bending element test

即可得到围压 100 kPa 时的初始剪切模量 G_0^{ref} (工程案例 1: 52.7 MPa; 工程案例 2: 48.5 MPa)。

3 工程应用 1

3.1 工程概况

工程案例 1 为杭州杭政储备 60 号地块基坑开挖工程。基坑施工开挖顺序分为一期、二期、三期、四期 4 个分区。本文着重分析二期基坑开挖(图 7)。根据地质勘探资料,工程区域属于冲海积地貌,地层由上往下依次为①填土、①₂砂质粉土夹粉砂、①₃粉砂、②₁砂质粉土夹粉砂、②₂淤泥质粉质黏土、③₂淤泥质粉质黏土(图 8-A)。图 8-B 是二期基坑剖面图,二期基坑开挖区域支护形式采用排桩加混凝土内支撑,混凝土支撑桩 900@1 200 mm,桩长约为 25.9 m,采用 850@600 三轴水泥搅拌桩作为止水帷幕,内支撑截面为 800 mm×800 mm。可

以看出,①₃粉砂较薄,层厚 2~3 m;②₂淤泥质粉质黏土层较厚,层厚 13~14 m。二期基坑开挖深度约 10 m,混凝土支撑深度约 16 m 处于②₂淤泥质粉质黏土层,在施工过程中对淤泥质粉质黏土层产生的扰动容易导致基坑发生整体失稳。因此,对二期基坑土体深层水平位移(CX6, CX7, CX32, CX33, CX34)和主要内支撑轴力(ZL1-8)进行监测。需要注意的是, CX7 在施工后期损坏,没有获取数据。

3.2 有限元模型建立

基于工程案例 1,采用 PLAXIS 有限元软件进行数值模拟分析,建立基坑开挖三维模型。通过选取 4 倍开挖深度作为模型水平边界可消除边界效应(李连祥等, 2016),因此,模型尺寸为 220 m×330 m×50 m(图 9)。土层本构采用 HSS 模型,从上往下依次为:①填土、①₂砂质粉土夹粉砂、②₂淤泥质粉质黏土和③₂淤泥质粉质黏土。其中,②₂淤泥质粉质黏土 HSS 模型部分参数由本文 2.3 节试验所得,①填土、①₂砂质粉土夹粉砂和③₂淤泥质粉质黏土 HSS 模型参数由工程实测数据的反演分析所得(王浩然, 2012)。此外,参数 $\gamma_{0.7}$, p^{ref} , v_w 等由现有研究所得(王卫东等, 2013; 顾晓强等, 2021)(表 6)。由于粉砂较薄,因此不予考虑。支护桩及地下车站采用板单元进行模拟,对于圆形截面桩,板单元厚度根据等刚度原则进行换算(式 2)。模型边界条件在底面采用固定约束,在侧面采用水平约束。此外,除板单元网格粗造因数为 0.5 外,其余区块均为 1。

$$h = \sqrt[3]{\frac{3\pi D^4}{16s}} \quad (2)$$

式中: h 为等效厚度; D 为桩直径; s 为桩间距。

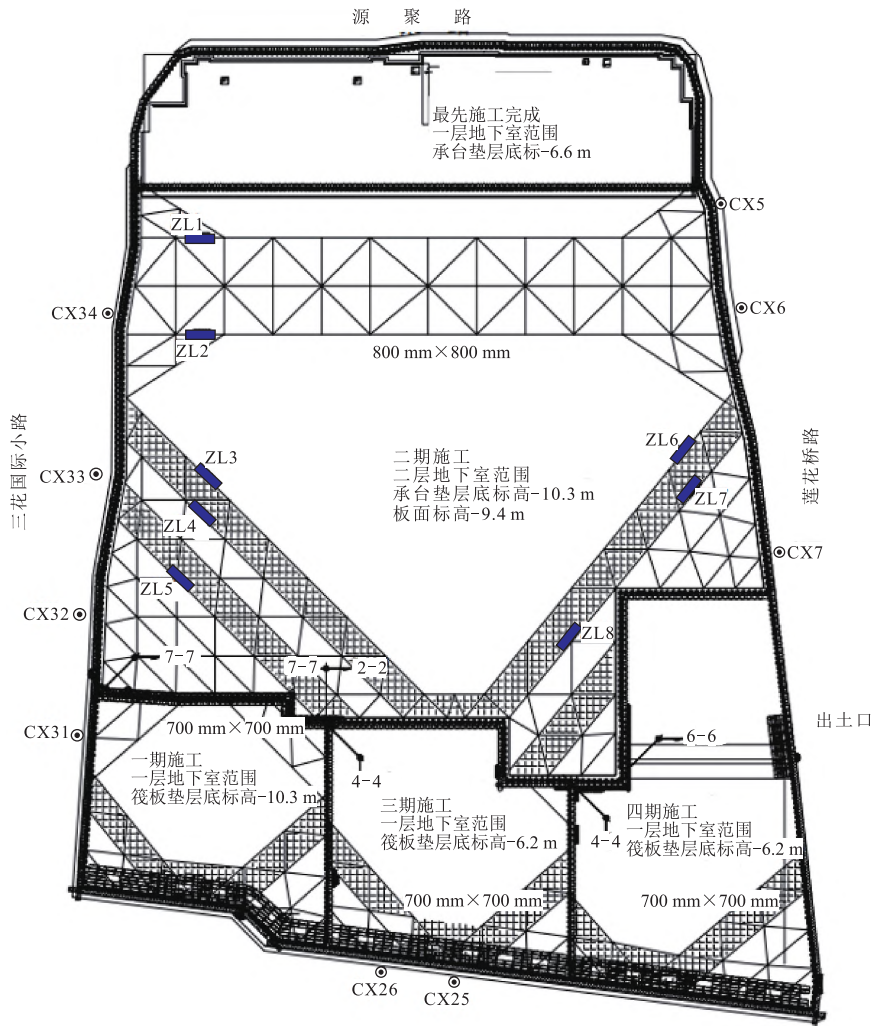


图 7 工程案例 1 的基坑平面及监测点布置

Fig. 7 Layout of the plane of the foundation pit and the monitoring points in engineering case 1

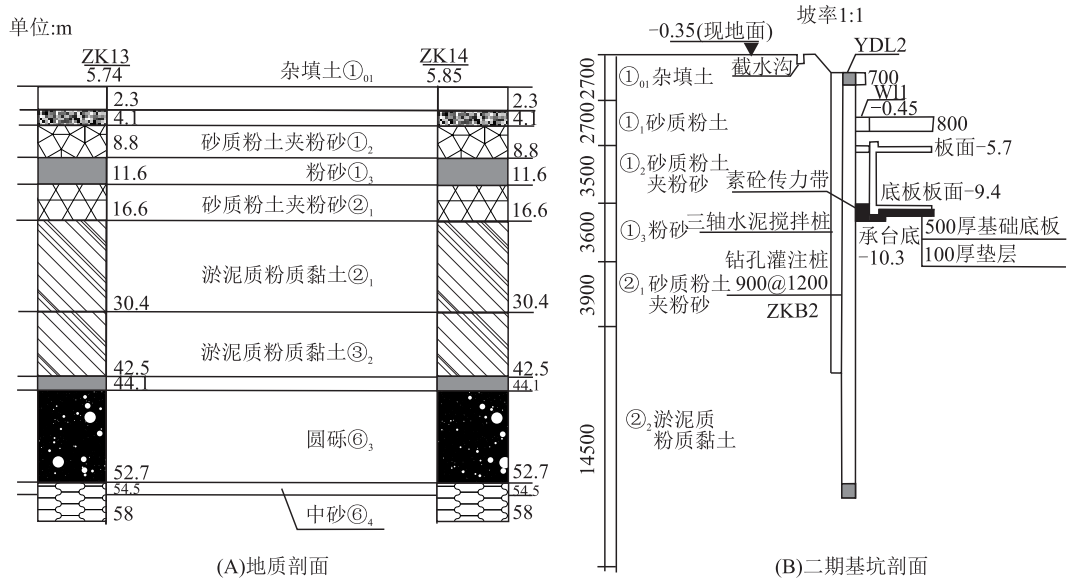


图 8 工程案例 1 的地质勘探剖面

Fig. 8 Profile of geological exploration for engineering case 1

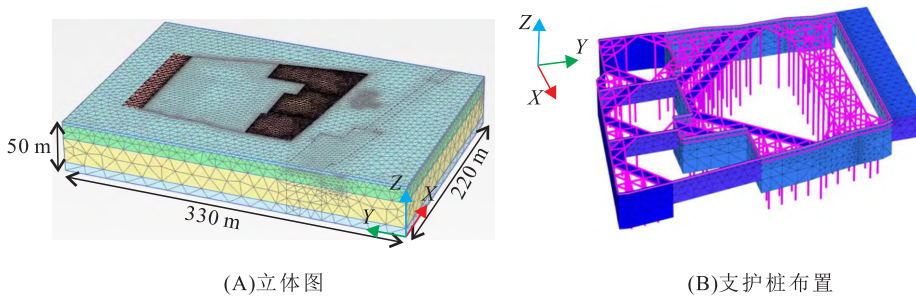


图 9 工程案例 1 的三维模型及主要结构

Fig. 9 Three-dimensional model and main structure for engineering case 1

表 6 工程案例 1 中土层 HSS 模型参数

Table 1 Parameters of the layer of soil in the HSS model for engineering case 1

土层名称	$\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$	ν_w	力学参数		E_s / MPa	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_w^{\text{ref}} / \text{MPa}$	G_0 / MPa	$\gamma_{0.7} / 10^{-4}$	m	$p^{\text{ref}} / \text{kPa}$
			c' / kPa	$\varphi' / ^\circ$								
①填土	19.0	0.2	10.0	14	9.00	9	9	45	180	2.00	0.80	100
						$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} = E_s$	$E_{50}^{\text{ref}} = E_s$	$E_w^{\text{ref}} = 5E_s$	$G_0 = 4E_w^{\text{ref}}$			
① ₂ 砂质粉土夹粉砂	18.1	0.2	3.0	27	2.68	2.61	3.23	35.67	111	2.60	0.84	100
						$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} = 0.97E_s$	$E_{50}^{\text{ref}} = 1.21E_s$	$E_w^{\text{ref}} = 13.31E_s$	$G_0 = 3E_w^{\text{ref}}$			
② ₂ 砂质粉土夹粉砂	18.7	0.2	12.8	28	2.84	2.61	4.43	39.87	52.7	3.37	0.84	100
						$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} = 0.92E_s$	$E_{50}^{\text{ref}} = 1.56E_s$	$E_w^{\text{ref}} = 14.04E_s$	$G_0 = 1.32E_w^{\text{ref}}$			
③ ₂ 淤泥质粉质黏土	17.7	0.2	11.0	28	3.80	2.76	6.17	43.67	56.77	3.41	0.84	100
						$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} = 0.73E_s$	$E_{50}^{\text{ref}} = 1.62E_s$	$E_w^{\text{ref}} = 11.49E_s$	$G_0 = 1.3E_w^{\text{ref}}$			

3.3 数值结果

图 10 是二期基坑开挖到底时,不同监测位置处(CX6,CX32,CX33,CX34)实测数据与数值模拟得到的支护桩深层水平位移。可以看出,在 4 个监测位置处,数值模拟和实测数据的支护桩深层水平变形均表现为明显的弯曲变形,最大变形发生在桩深 7 m 左右,最大值为 10.14 mm。此外,数值模拟和实测数据的曲线变形趋势相似,仅在变形大小上存在差异,且差值在 4 mm 范围内,这就说明 HSS 模型参数取值较为合理。值得注意的是,支护桩底部有明显偏差,可能是没考虑基坑底部土体卸载路径的原因。

表 7 是二期基坑开挖到底,8 个监测点处(ZL1~ZL8)实测数据与数值模拟的内支撑轴力对比。由表可知,在 8 个监测点处,实测数据与数值模拟的内支撑轴力值相差较小。除监测点 ZL3 处实测数据与数值模拟的内支撑轴力相差较大(25.0%)外,其余 7 个监测点处的内支撑轴力相差均不超过 10.0%。这与围护桩深层水平位移的对比结果相似,实测数据与数值模拟的结果相

差较小,进一步说明 HSS 模型参数取值的合理性。

4 工程应用 2

4.1 工程概况

工程案例 2 为杭州杭政储备 62 号地块基坑开挖工程。基坑工程位于地铁 1 号线明挖段南(S 区)、北(N 区)两侧,基坑开挖顺序为 N1,S1,N2,S2 同步开挖,N3,S3 待 N1,S1,N2,S2 地下室结构完成后再进行开挖(图 11)。根据地质勘探资料(图 12-A),场地从上至下主要分布土层为①₁ 填土、②₂ 砂质粉土、④₁ 淤泥质粉质黏土、④₂ 淤泥质粉质黏土、⑥₁ 淤泥质粉质黏土、⑦黏土、⑧₁ 灰色黏土及⑨₁ 粉质黏土(图 12)。淤泥质粉质黏土层埋深较浅,地面 4 m 以下均为淤泥质粉质黏土,且淤泥质粉质黏土厚度超过 21 m。工程案例 2 基坑开挖深度为 15.3 m(图 12-B)。基坑采用 800 mm 地下连续墙加 3 道混凝土内支撑分区支护。为分析基坑开挖中围护结构的变形特性,对围护结构深层水平位移进行监测(QCX8,QCX18,QCX21,QCX24)。

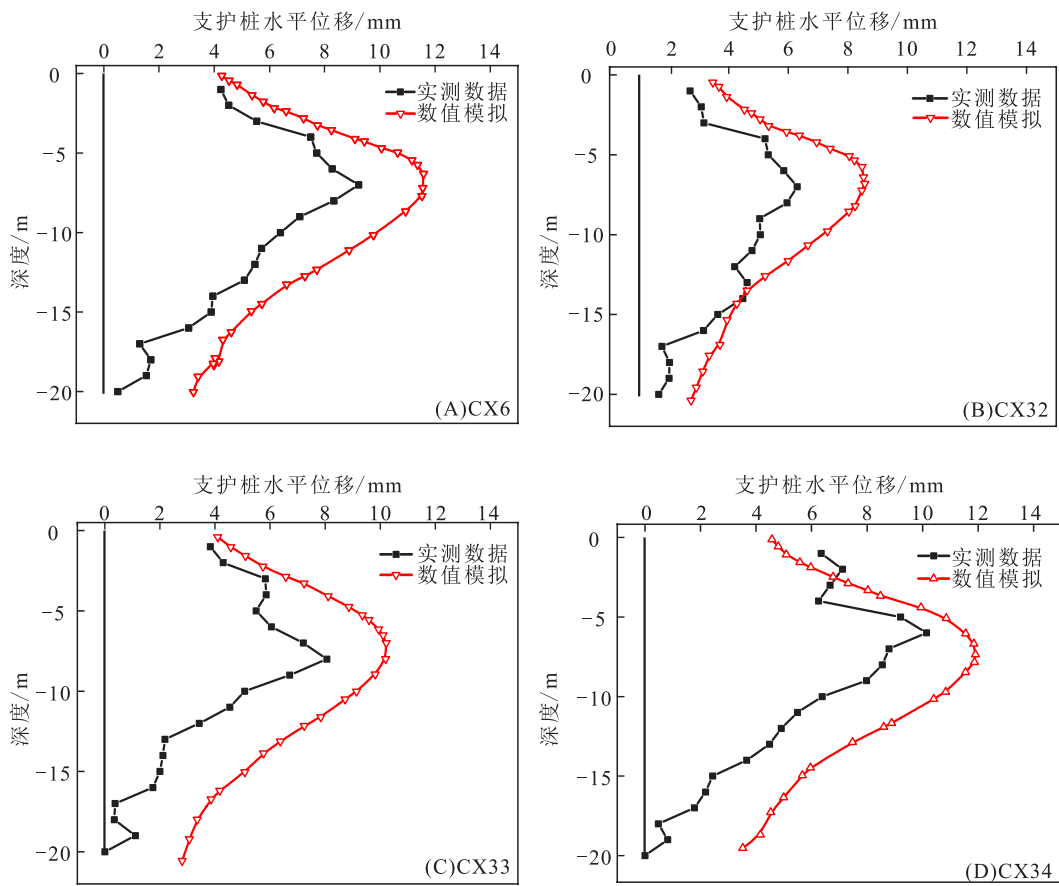


图 10 工程案例 1 中围护结构深层水平位移

Fig. 10 Deep horizontal displacement of the enclosure in engineering case 1

表 7 内支撑轴力

Table 7 Inner support axial force

支撑编号	实测数据/kN	数值模拟/kN	误差/%
ZL1	1933	2026	4.80
ZL2	1685	1853	10.0
ZL3	1722	1284	-25.0
ZL4	1452	1348	-7.20
ZL5	1366	1352	-0.01
ZL6	1625	1573	3.20
ZL7	1456	1502	3.11
ZL8	1732	1649	-4.80

4.2 有限元模型建立

基于工程案例 2,采用 PLAXIS 有限元软件进行数值模拟分析,建立基坑开挖三维模型。本项目基坑深度约 15.3 m,数值模型考虑基坑约 4 倍开挖深度的影响范围,确定有限元平面模型尺寸 350 m×200 m×50 m(图 13)。土层本构采用 HSS 模型,从上往下依次为:①填土、②砂质粉土、④₁ 淤泥质粉质黏土和 ④₂ 淤泥质粉质黏土。其中,

④₁ 淤泥质粉质黏土 HSS 模型部分参数由本文 2.3 节试验所得,①填土、②砂质粉土和 ④₂ 淤泥质粉质黏土 HSS 模型参数由经验值法所得(刘志祥和张海清,2015)(表 8)。有限元模型由土体、围护结构、内支撑和明挖区地铁隧道 4 个部分组成。地下连续墙及隧道侧壁及楼板采用板单元进行模拟,混凝土柱、桩及基坑内支撑采用梁单元进行模拟;模型边界条件和网格划分与工程案例 1 相同。

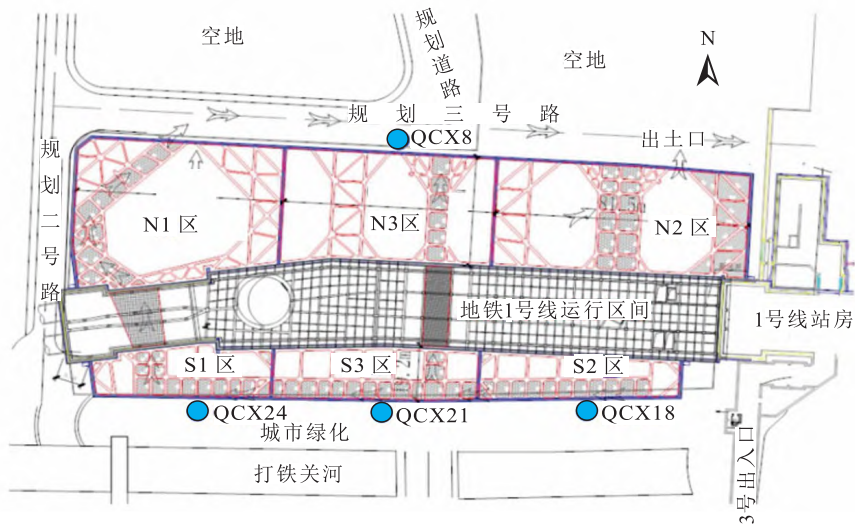


图 11 工程案例 2 的基坑平面及监测点布置

Fig. 11 Layout of the plane of the foundation pit and the monitoring points in engineering case 2

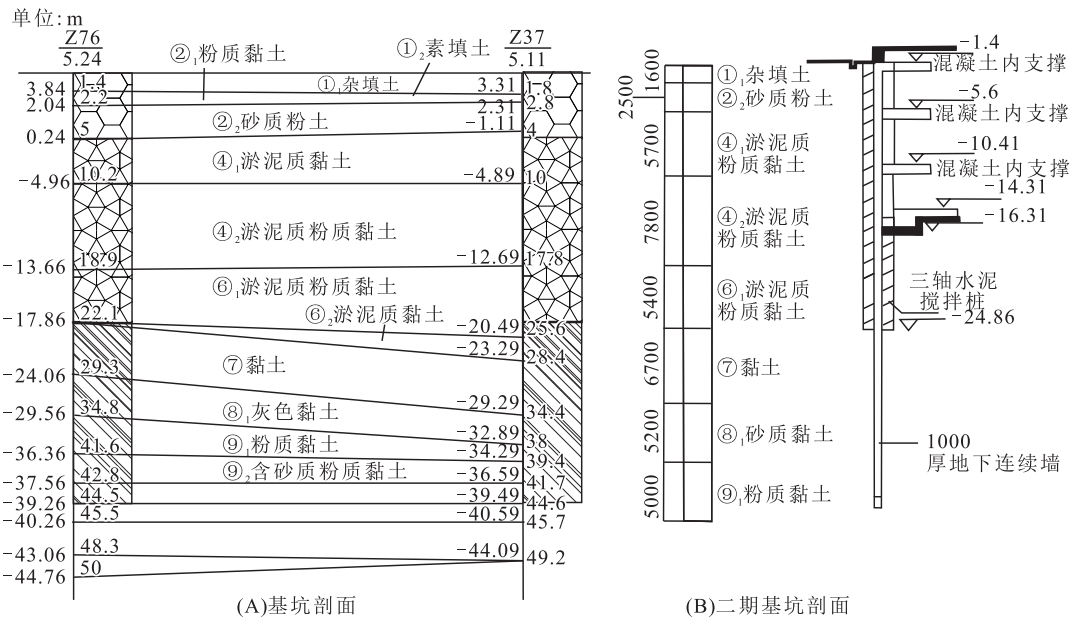


图 12 工程案例 2 的地质勘探剖面

Fig. 12 Profile of geological exploration in engineering case 2

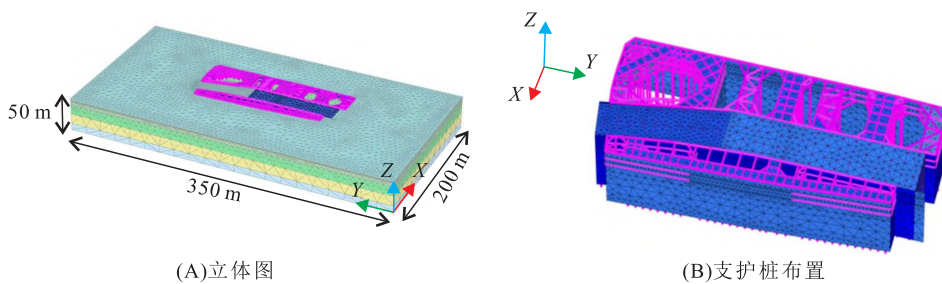


图 13 工程案例 2 的三维模型及主要结构

Fig. 13 Three-dimensional model and main structure for engineering case 2

表 8 工程案例 2 中土层 HSS 模型参数

Table 8 Parameters of the soil layer of the HSS model for engineering case 2

土层名称	$\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$	ν_w	力学参数		E_s / MPa	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_w^{\text{ref}} / \text{MPa}$	G_0 / MPa	$\gamma_{0.7} / 10^{-4}$	m	$p^{\text{ref}} / \text{kPa}$
			c' / kPa	$\phi' / ^\circ$								
① 填土	18.0	0.2	8.0	13	4.00	4	4	20	80	2.00	0.5	100
						$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} = E_s$	$E_{50}^{\text{ref}} = E_s$	$E_w^{\text{ref}} = 5E_s$	$G_0 = 4E_w^{\text{ref}}$			
① ₂ 砂质粉土	19.3	0.2	8.0	27	10.00	10	10	30	72	2.76	0.5	100
						$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} = E_s$	$E_{50}^{\text{ref}} = E_s$	$E_w^{\text{ref}} = 3E_s$	$G_0 = 3E_w^{\text{ref}}$			
④ ₁ 淤泥质粉土黏土	17.2	0.2	10.5	31	2.85	2.31	4.48	24.74	48.5	3.17	0.9	100
						$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} = 0.81E_s$	$E_{50}^{\text{ref}} = 1.57E_s$	$E_w^{\text{ref}} = 8.68E_s$	$G_0 = 1.96E_w^{\text{ref}}$			
④ ₂ 淤泥质粉质黏土	19.1	0.2	11.0	28	4.80	4.8	4.8	24	90	3.52	0.9	100
						$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} = 1E_s$	$E_{50}^{\text{ref}} = 1E_s$	$E_w^{\text{ref}} = 5E_s$	$G_0 = 3E_w^{\text{ref}}$			

4.3 数值结果

图 14 是基坑开挖到底时,不同监测位置处(QCX8, QCX18, QCX21, QCX24)实测数据与数值模拟得到的围护结构深层水平位移。与工程案例 1 相同,在 4 个监测位置处,围护结构深层水平变形均表现为明显的弯曲变形,数值模拟和实测数据的曲线变形趋势相似,仅在变形大小上存在差异,且差值在 20 mm 范围内,说明

HSS 模型参数取值在工程案例 2 中也较为合理。与工程案例 1 不同的是,最大变形发生在桩深 17 m 左右,且最大值为 76.82 mm,明显大于工程案例 1 中的变形最大值,可能是工程案例 2 基坑开挖深度(15.3 m)明显大于工程案例 1(10 m)的结果。此外,同样在围护结构底部有较明显偏差,应该也是没考虑基坑底部土体卸载路径导致的。

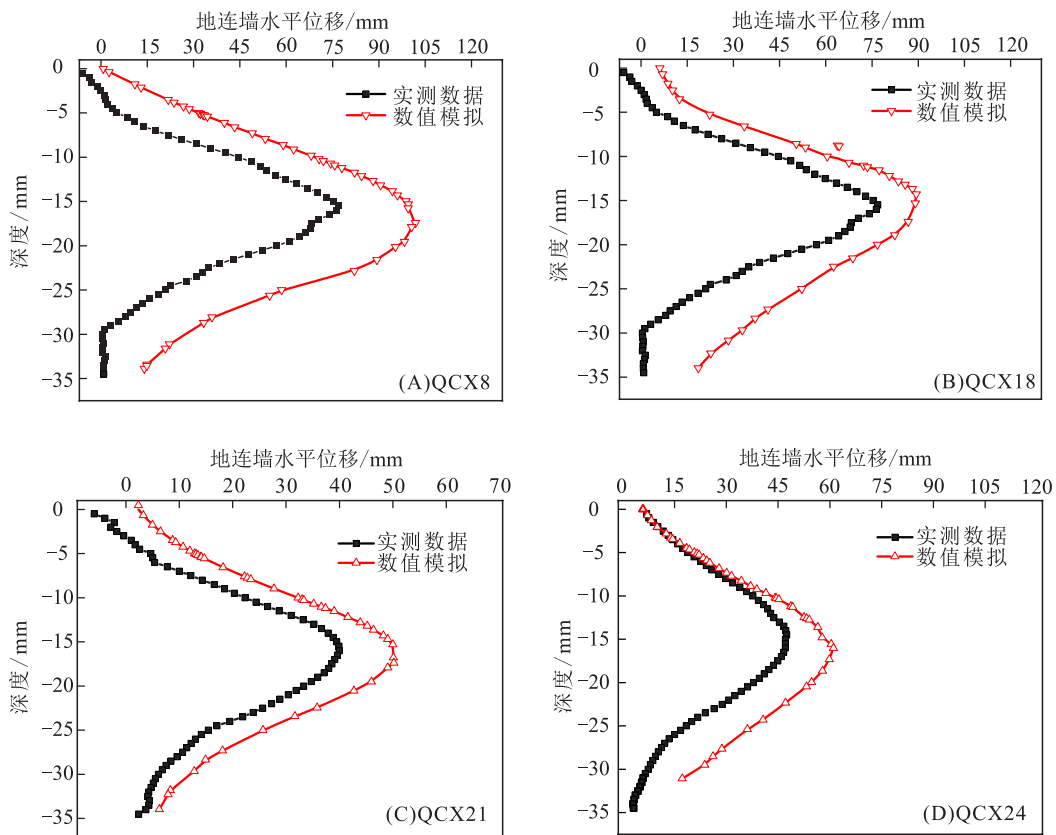


图 14 工程案例 2 中围护结构深层水平位移

Fig. 14 Deep horizontal displacement of the enclosure in engineering case 2

5 结论

本文选取杭州淤泥质粉质黏土,开展系列的室内试验获取 HSS 模型参数,依托杭州典型基坑开挖工程,建立 HSS 模型基坑开挖三维有限元模型,对比分析数值模拟和实测数据,验证 HSS 模型参数取值方法的合理性。主要结论如下:

a. 通过室内试验得到杭州淤泥质粉质黏土 HSS 模型中参数 E_{ed}^{ref} , E_s , E_{50}^{ref} , c' , φ' , E_w^{ref} , G_0^{ref} 的取值和比例关系,可以为杭州淤泥质粉质黏土地层基坑开挖数值模拟分析参数选取提供参考。

b. 依托杭州 2 例基坑工程案例,采用 HSS 模型开展基坑开挖数值模拟研究,数值模拟与实测数据的围护结构水平位移与内支撑轴力结果较为吻合,验证了 HSS 模型参数取值的合理性。

c. 工程案例在基坑底部模拟效果有一定偏差,可能是没有考虑基坑开挖过程中底部土体卸载路径影响的结果,在后续数值模拟研究中应考虑卸载路径影响。

[参 考 文 献]

陈少杰,顾晓强,高广运,2019. 土体小应变剪切模量的现场和室内试验对比及工程应用[J]. 岩土工程学报, 41(增刊 2):133-136.

Chen S J, Gu X Q, Gao G Y, 2019. Comparison and application of small strain shear moduli from field and laboratory measurements [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 41(S2):133-136. (in Chinese)

陈尚荣,李通达,梁发云,等,2020. 上海临港砂质粉土硬化土小应变模型参数研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 48(6):841-846.

Chen S R, Li T D, Liang F Y, et al., 2020. Parameters of hardening soil model with small strain of shallow sandy silt in Shanghai Lin-Gang special area[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 48(6): 841-846. (in Chinese)

董鑫,周峰,王旭东,等,2023. 基坑数值分析中 HSS 模型参数试验及应用[J]. 科学技术与工程, 23(18): 7878-7885.

Dong X, Zhou F, Wang X D, et al., 2023. Experimental and application of HSS model parameters in foundation pit numerical analysis[J]. Science and Technology and Engineering, 23(18): 7878-7885. (in Chinese)

顾晓强,吴瑞拓,梁发云,等,2021. 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, 42(3):833-845.

Gu X Q, Wu R T, Liang F Y, et al., 2021. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification [J]. Rock and Soil Mechanics, 42(3): 833-845. (in Chinese)

李连祥,刘嘉典,李克金,等,2019. 济南典型地层 HSS 参数选取及适用性研究[J]. 岩土力学, 40(10): 4021-4029.

Li L X, Liu J D, Li K J, et al., 2019. Study of parameters selection and applicability of HSS model in typical stratum of Jinan [J]. Rock and Soil Mechanics, 40(10):4021-4029. (in Chinese)

李连祥,张永磊,扈学波,2016. 基于 PLAXIS 3D 有限元软件的某坑中坑开挖影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 12(增刊 1):254-261+266.

Li L X, Zhang Y L, Hu X B, 2016. Finite element analysis of a pit-in-pit excavation based on PLAXIS 3D[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 12(S1):254-261+266. (in Chinese)

李青,徐中华,王卫东,等,2016. 上海典型黏土小应变剪切模量现场和室内试验研究[J]. 岩土力学, 37(11): 3263-3269.

Li Q, Xu Z H, Wang W D, et al., 2016. Field and laboratory measurements on shear modulus of typical Shanghai clay at small strain[J]. Rock and Soil Mechanics, 37(11):3263-3269. (in Chinese)

梁发云,贾亚杰,丁钰津,等,2017. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 39(2): 269-278.

Liang F Y, Jia Y J, Ding Y J, et al., 2017. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 39(2):269-278. (in Chinese)

林德周,2023. 小应变土体硬化模型参数试验研究及工程应用——以杭州某基坑工程为例[D]. 杭州:浙江大学档案馆.

Lin D Z, 2023. Experimental Study on Parameters of Small Strain Soil Hardening Model and Its Engineering Application—A Case Study of A Foundation Pit Project in Hangzhou[D]. Hangzhou: The Archive of Zhejiang University. (in Chinese)

刘志祥,张海清,2015. PLAXIS 高级应用教程[M]. 北京:机械工业出版社.

Liu Z X, Zhang H Q, 2015. PLAXIS Advanced Application Tutorial[M]. Beijing: Mechanical Industry Press. (in Chinese)

- Chinese)
- 施有志,林树枝,车爱兰,2017. 基于深基坑监测数据的土体小应变刚度参数优化分析[J]. 应用力学学报, 34(4):654-660.
- Shi Y Z, Lin S Z, Che A L, 2017. Optimization analysis of soil small strain stiffness parameters based on deep foundation pit monitoring data[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 34(4):654-660. (in Chinese)
- 王浩然,2012. 上海软土地区深基坑变形与环境影响预测方法研究[D]. 上海:同济大学档案馆.
- Wang H R, 2012. Research on the Prediction Method of Deep Foundation Pit Deformation and Environmental Impact in Shanghai Soft Soil Area[D]. Shanghai: The Archive of Tongji University. (in Chinese)
- 王卫东,王浩然,徐中华,2013. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J]. 岩土力学, 34(6):1766-1774.
- Wang W D, Wang H R, Xu Z H, 2013. Study on the parameters of HS-Small model in numerical analysis of foundation pit excavation in Shanghai[J]. Rock and Soil Mechanics, 34(6):1766-1774. (in Chinese)
- 温科伟,刘树亚,杨红坡,2018. 基于小应变硬化土模型的基坑开挖对下穿地铁隧道影响的三维数值模拟分析[J]. 工程力学, 35(增刊 1):80-87.
- Wen K W, Liu S Y, Yang H P, 2018. Three-dimensional numerical simulation analysis of the influence of pit excavation based on hardening soil small strain model for metro tunnel[J]. Engineering Mechanics, 35(S1): 80-87. (in Chinese)
- 徐中华,王卫东,2010. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 31(1):258-264+326.
- Xu Z H, Wang W D, 2010. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 31(1):258-264+326. (in Chinese)
- 于廷新,2021. 紧邻铁路深厚淤泥层基坑支护对策及影响研究[J]. 铁道标准设计, 65(4):52-56.
- Yu Y X, 2021. Research on influence and support counter-measure of adjacent railway deep silt foundation pit [J]. Railway Standard Design, 65(4):52-56. (in Chinese)
- 张晋勋,赵刚,张雷,等,2020. HSS 模型在盾构模拟中的应用及参数敏感性研究[J]. 地下空间与工程学报, 16(增刊 2):618-625.
- Zhang J X, Zhao G, Zhang L, et al., 2020. Application of HSS model in shield simulation and parameter sensitivity research[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 16(S2):618-625. (in Chinese)
- 嵯一,张军,宋顺忱,2014. 软土地区基坑开挖对临近高铁影响数值仿真分析[J]. 铁道工程学报, 31(2): 41-47.
- Zhuo Y, Zhang J, Song S C. 2014. Numerical simulation and analysis of influence of foundation pit excavation on adjacent high-speed railway in soft soil area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 31(2): 41-47. (in Chinese)
- 宗露丹,徐中华,翁其平,等,2019. 小应变本构模型在超深大基坑分析中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 15(增刊 1):231-242.
- Zong L D, Xu Z H, Weng Q P, et al., 2019. Application of Small Strain Constitutive Model in the Analysis of a Ultra Large and Deep Excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 15(S1): 231-242. (in Chinese)
- Benz T, 2007. Small-strain Stiffness of Soils and Its Numerical Consequences[D]. Stuttgart: The Archive of University of Stuttgart.
- Brinkgreve R B J, Broere W, 2006. Plaxis Material Models Manual[M]. Delft: Plaxis B. V.
- Mair R J, 1993. Developments in geotechnical engineering research: Application to tunnels and deep excavations [C]//Proceedings of the ICE-Civil Engineering, London.

(责任编辑:魏 威)