

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.192

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 土体硬化模型参数试验研究及其在南昌地区基坑工程的应用

刘伟煌<sup>1</sup>, 朱怀龙<sup>2</sup>, 贺斯进<sup>3</sup>, 言建标<sup>4</sup>, 徐长节<sup>1,5</sup>

(1. 华东交通大学 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 南昌 330013;  
2. 江西交通职业技术学院, 南昌, 330013; 3. 南昌轨道交通集团有限公司, 南昌, 330038;  
4. 浙江杭海城际铁路有限公司, 杭州, 314000; 5. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058;)

**摘要:** 基坑开挖数值分析的关键在于土体本构的选择和计算参数的合理选取, 硬化模型(HS模型)是应用较为广泛的模型之一。通过采用 GDS 空心扭剪试验仪(SS-HCA)和常规固结仪完成大量室内试验, 获取了南昌地区软土层的硬化模型参数, 对各层土参数中模量之间的比例关系进行探讨, 并将试验得到的结果与相关文献的结果进行比较和总结。运用 PLAXIS 有限元数值计算软件, 对南昌某地下室深基坑工程进行数值模拟, 土体本构模型采用程序内置的 HS 模型。结果表明, 围护桩深层水平位移的实测数据与数值计算结果基本吻合, 表明获取的 HS 模型参数及方法适用于南昌地区基坑开挖的数值分析。

**关键词:** 土体硬化模型; 基坑工程; 空心扭剪试验仪; 室内试验

**中图分类号:** TU411.3; TU753.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)06-0038-10

## Experimental study on parameters of hardening soil model for soils and its application in foundation pit engineering in Nanchang

LIU Weihuang<sup>1</sup>, ZHU Huailong<sup>2</sup>, HE Sijin<sup>3</sup>, YAN Jianbiao<sup>4</sup>, XU Changjie<sup>1,5</sup>

(1. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 2. Jiangxi V & T College of Communications, Nanchang 330013;  
3. Nanchang Rail Transit Co., Ltd., Nanchang 330038, P. R. China; 4. Zhejiang Hanghai Intercity Railway Co., Ltd., Hangzhou 314000, P. R. China; 5. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China)

**Abstract:** The significance of numerical analysis of foundation pit excavation lies in the selection of soil constitution and reasonable input parameters. The hardening model (HS model) is one of the soil constitutive models that are widely used. In this paper, the GDS Hollow Torsion Shear Tester (SS-HCA) and consolidation apparatus were used to complete a series of laboratory tests. The parameters of the

**收稿日期:** 2020-08-04

**基金项目:** 国家杰出青年科学基金(51725802); 国家自然科学基金(51878276)

**作者简介:** 刘伟煌(1995-), 男, 主要从事基坑工程研究, E-mail: 824098351@qq.com。

贺斯进(通信作者), 男, 高级工程师, E-mail: 1697296226@qq.com。

**Received:** 2020-08-04

**Foundation items:** National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 51725802); National Natural Science Foundation of China (No. 51878276)

**Author brief:** LIU Weihuang (1995-), main research interest: foundation pit engineering, E-mail: 824098351@qq.com.  
HE Sijin (corresponding author), senior engineer, E-mail: 1697296226@qq.com.

hardening model of the soft soil layer in Nanchang were obtained through the tests. The proportional relationship between the modulus of each layer of soil parameters has been discussed. The experimental results were compared with the result from literatures. Then, the PLAXIS finite element software was used to conduct numerical simulation of a certain basement deep foundation pit project in Nanchang. The soil constitutive model adopted the programmed HS model. The results show that the calculated value of the deep horizontal displacement of the retaining pile is basically consistent with the measured value. The HS model and the determination method for parameters have been proved to be applicable in numerical analysis of foundation pit excavation engineering in Nanchang area.

**Keywords:** hardening soil model; foundation pit engineering; hollow torsional shear tester; laboratory test

随着经济的发展,南昌地区的基坑数量也随之增多,基坑规模也越来越大,加之城市用地日益紧张,基坑周边常遇到地下管线、地铁隧道、高架桥等建筑。在这种复杂情况下,基坑工程除满足自身的变形要求外,还需要保证其周边环境的安全性,这对基坑工程的设计提出了更高的要求。目前,分析基坑开挖对周边环境的影响的方法有解析法和相关规范法<sup>[1-2]</sup>。但考虑问题的复杂性,传统的解析法和规范法难以真实地反映基坑开挖期间对周边环境的影响。随着有限元和计算机的发展,数值分析法<sup>[3-5]</sup>越来越成为深基坑变形分析中常用且有效的方法,而数值分析法的关键问题之一在于采用合适的土体本构模型和选取合理的计算参数<sup>[6]</sup>。

土体硬化本构模型(HS模型)适用于基坑开挖的数值分析,它能得到较合理的围护桩(墙)位移、支护结构内力和坑外地表沉降<sup>[6]</sup>。但由于HS模型包含的计算参数较多,要获得完整的HS模型参数难度很大。一些学者已对获取HS模型参数进行了一些研究,Calvello等<sup>[7]</sup>通过反演分析法得到了芝加哥地区软土层的HS模型参数,并探讨了该方法影响其结果准确性的因素。李连祥等<sup>[8]</sup>运用位移反分析方法获得济南典型土层的HS模型参数。刘畅<sup>[9]</sup>通过室内三轴试验对天津地区某深基坑软土的硬化模型参数进行测定,获取了其部分模量参数。梁发云等<sup>[10]</sup>通过大量的室内试验得到上海地区较为完整的土体HS模型参数。陈尚荣等<sup>[11]</sup>通过室内试验获得了上海临港粉质砂土的HS模型参数。由于不同地区土体的硬化模型参数值存在一定差异,直接运用已有研究成果进行数值分析会对结果的准确性产生一定偏差。目前还没有对南昌地区土体硬化模

型参数获取的相关报道。为此,针对南昌地区软土进行了室内土工试验,以获取其硬化模型参数 $c'$ 、 $\varphi'$ 、 $R_f$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 和 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ ,并对获取的HS模型参数各种模量之间的比例关系进行探讨。随后,运用PLAXIS有限元数值计算软件对南昌某地下室深基坑工程进行数值模拟,将围护桩水平位移的计算结果与实测结果进行对比,从而验证获取的HS模型参数及方法在南昌地区基坑开挖工程中的适用性。

## 1 HS模型及参数介绍

HS模型,即土体硬化本构模型,是由Schanz等<sup>[12]</sup>提出的一种以塑性理论为基础的双屈服面模型,塑性部分采用了各向同性硬化准则。HS模型共包含11个参数:有效黏聚力 $c'$ 、有效内摩擦角 $\varphi'$ 、刚度应力水平相关幂指数 $m$ 、参考应力 $p^{\text{ref}}$ 、三轴排水剪切试验的参考加、卸载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、固结试验中的参考割线模量 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 、三轴排水剪切试验的参考割线模量 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、破坏比 $R_f$ 、静止侧压力系数 $K_0$ 、土的剪胀角 $\psi$ 、加卸载泊松比 $\nu_{\text{ur}}$ 。其中,参数 $K_0$ 、 $\psi$ 、 $p^{\text{ref}}$ 、 $\nu_{\text{ur}}$ 、 $m$ 可参照已有的研究成果来确定,本文主要通过室内试验确定其他6个参数。

## 2 试验过程

### 2.1 现场取样

试验共采集了南昌地区某深基坑工地的4种不同的土样,每层土样取土深度也不相同,其中,各层土样的取土深度为3.0、6.2、7.5、10.1 m,对应的土层分别为黏土层②、淤泥质粉质黏土层③、粉质黏土层④和砂质粉土层⑤。其基本物理力学参数指标如表1所示。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soils

土层 序号	取土深 度/m	含水率 $w/\%$	重度 $\gamma/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	初始孔 隙比 $e_0$
②黏土	3.0	29.21	18.00	0.98
③淤泥质粉质黏土	6.2	31.10	17.10	1.24
④粉质黏土	7.5	26.15	20.30	0.69
⑤砂质粉土	10.1	24.48	20.50	0.81

## 2.2 试验方法及试验设备

针对 4 种不同的土样,分别通过 3 种不同类型的室内试验来测定其参数  $c'$ 、 $\varphi'$ 、 $R_f$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$  和  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 。1)通过常规三轴固结排水剪切试验获得参数  $c'$ 、 $\varphi'$ 、 $R_f$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ ; 2)通过三轴固结排水加、卸载试验获得加载模量参数  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ ; 3)通过标准固结试验获得切线模量参数  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 。

根据 3 种不同的试验分别采用不同的试验设备,其中,三轴固结排水剪切试验和三轴固结排水加、卸载试验采用的是 GDS 空心扭剪试验系统(SS-HCA),见图 1,它包含常规 GDS 系统三轴仪的所有功能,由于 GDS 空心扭剪试验仪的试样为空心圆柱试样;而三轴试验试样为圆柱试样,因此,试验前需要将其底座换成常规 GDS 系统三轴试验的圆柱底座,见图 2。标准固结试验所采用的仪器为常规固结仪。



图 1 GDS 空心扭剪试验仪器图

Fig. 1 Pictures of hollow torsional shear tester GDS



图 2 装样过程示意图

Fig. 2 Diagrams of soil sample loading process

## 2.3 试验方案及步骤

2.3.1 常规三轴固结排水剪切试验 为了获得土样②~⑤的 HS 模型参数  $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $R_f$ 、 $c'$  和  $\varphi$ ,进行了三轴固结排水剪切试验,在试验中,需对 4 种不同土样设置 3 种不同的围压,其中,考虑到土层②埋深较

浅,因此,取 70、100、200 kPa 3 种不同围压,其余土样(③~⑤)所取的围压为 100、200、300 kPa。

常规三轴固结排水剪切试验包括以下步骤: 1)试样制备:将现场取回的原状土用切土盘制备成圆柱试样,试样尺寸为 100 mm×50 mm(高度×直径),然后用游标卡尺量取试样的实际直径和高度,并称其质量; 2)预饱和:为了使试样充分饱和并节省时间,将制备好的试样放入饱和缸进行真空抽气饱和,饱和时间为 24 h; 3)反压饱和:压力室充满水后,打开围压、反压以及孔压阀门,围压设置为 110 kPa,反压设置为 100 kPa,时间设置为 3 h; 4)B 值检测:设置围压 140 kPa,反压不变并保持关闭,测孔隙水压力系数 B,若  $B = \Delta u / \Delta \sigma > 95\%$ ,认为试样达到饱和; 5)固结:打开反压阀门,设置围压  $\sigma_3$ ,对试样进行等向固结,时间设置为 48 h; 6)排水剪切:排水剪切采用等应变速率控制,排水剪切速率设置为 0.005 2 mm/min。当试样应变值达到其最大应变值的 20%时,停止试验。

2.3.2 三轴固结排水加、卸载-再加载试验 三轴固结排水加、卸载试验包含 7 个步骤,其中,步骤 1)~6)与三轴固结排水剪切试验相同,步骤 7)进行轴向加、卸载-再加载试验。选择 GDS-ttAdvanced Loading 试验模块,采用轴向应力进行控制,将围压设置为 100 kPa,打开反压阀门设置反压为 0。首先,轴向加载到试样预计破坏偏应力的 40%,当达到目标值时,立即轴向卸载到 0,然后再进行轴向加载到试样预计破坏偏应力的 60%。

2.3.3 标准固结试验 为获取固结试验中的参考割线模量  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ ,进行了标准固结试验,试验给土样②~⑤施加 5 种不同等级的荷载(50、100、200、400、800 kPa)。试验步骤依据土工试验标准进行。

## 3 试验结果分析

### 3.1 三轴固结排水剪切试验

图 3 为土样②~⑤偏应力  $q(q = \sigma_1 - \sigma_3)$  与轴向应变的关系曲线,其参考围压均为  $\sigma_3 = 100$  kPa。

由图 3 可知,轴向应变在 0~10%时,各层土的偏应力随着轴向应变的增加而增大,当轴向应变达到一定范围时,偏应力也逐渐保持平缓或者稍微有所下降。当轴向应变达到 15%时,曲线所对应的纵坐标(偏应力值)即为破坏值  $q_t^{[13]}$ ,由此可得,②~⑤层土样的  $q_t$  分别为 220.23、240.95、258.21、308.51 kPa。连接曲线的原点和  $0.5q_t$  所对应的点,其直线斜率即为  $E_{50}^{\text{ref}}$ ,因此,可以得到围压为



100 kPa时②~⑤层土样的参数  $E_{50}^{ref}$  分别为 4.8、2.8、4.9、9.1 MPa。另外,取曲线稳定段对应的偏应力值作为渐近线值  $q_a$ ,通过计算可得②~⑤层土样破坏比  $R_f$  ( $R_f = q_f/q_a$ ) 分别为 0.95、0.90、0.92 和 0.96。将上述参数值  $E_{50}^{ref}$  和  $R_f$  汇总于表 2。

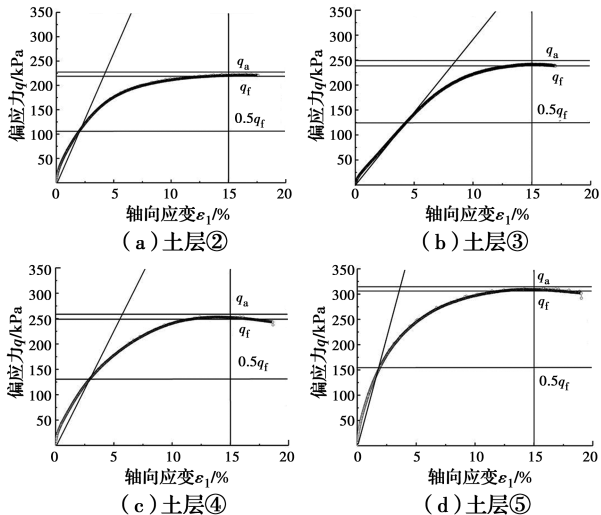


图 3 ②~⑤层土样三轴试验应力-应变曲线  
Fig. 3 Strain-stress curves of triaxial CD test on soil layers(②~⑤)

表 2 ②~⑤层土体  $E_{50}^{ref}$  和  $R_f$  值

Table 2 Values of  $E_{50}^{ref}$  and  $R_f$  of soil layers(②~⑤)

土层	$E_{50}^{ref}$ /MPa	$R_f$
②黏土	4.8	0.95
③淤泥质粉质黏土	2.8	0.90
④粉质黏土	4.9	0.92
⑤砂质粉土	9.1	0.96

为获取各层试样的有效黏聚力  $c'$  和内摩擦角  $\phi'$ ,将各层土样分别进行其他两种围压的三轴固结排水剪切试验,图 4 为各层土样的摩尔应力圆,由图 4 可知,②~⑤层试样的摩尔圆均相切于同一条直线,由此可得各层土的有效黏聚力  $c'$  和内摩擦角  $\phi'$ ,并将其汇总于表 3。

表 3 ②~⑤层土体  $c'$  和  $\phi'$  值

Table 3 Values of  $c'$  and  $\phi'$  of soil layers(②~⑤)

土层	$c'$ /kPa	$\phi'$ /( $^\circ$ )
②黏土	8.6	29.2
③淤泥质粉质黏土	6.5	25.6
④粉质黏土	25.8	28.2
⑤砂质粉土	2.0	36.8

3.2 三轴固结排水加载-卸载-再加载试验结果

图 5 为各层土样加、卸载试验的偏应力与轴向

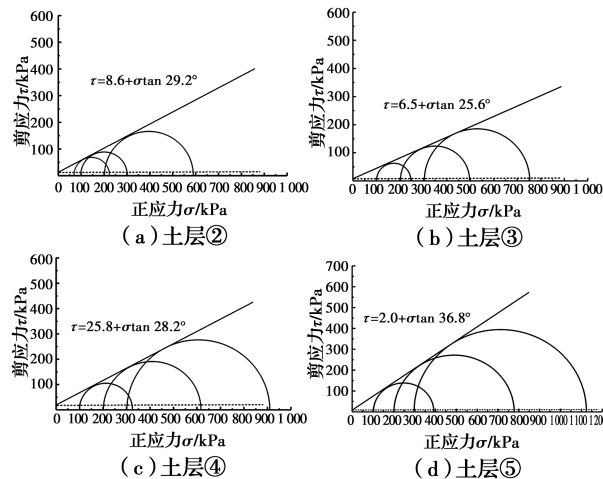


图 4 ②~⑤层土体摩尔应力圆曲线  
Fig. 4 Mohr circle of soil layers (②~⑤)

应变关系曲线。

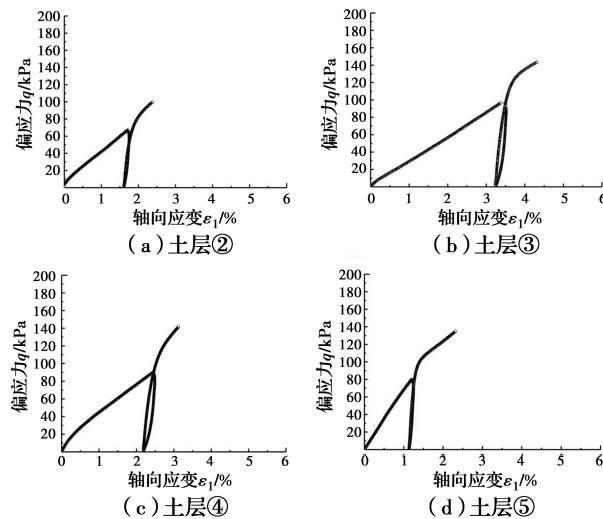


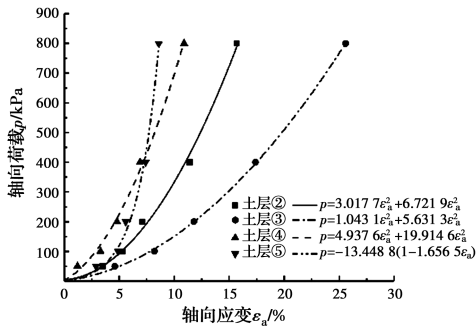
图 5 ②~⑤层土三轴加、卸载试验应力-应变曲线  
Fig. 5 Strain-stress curves of triaxial CD loading unloading-reloading rests on soil layers (②~⑤)

由图 5 可知,当初次加载时,轴向应变随着荷载的增大而逐渐增加,卸载时,偏应力-应变曲线陡降,并且轴向应变稍有减小,再次加载,曲线开始变陡而随后逐渐变缓。各层土样曲线在加载-卸载-再加载试验过程中均表现为一个滞回圈。由参考文献[14]可得,将曲线滞回圈的两端点进行连接,该直线斜率表示围压 100 kPa 下试样的参考卸载再加载模量  $E_{ur}^{ref}$ 。综上所述,②~⑤土层的  $E_{ur}^{ref}$  值分别为 38.6、36.2、39.3、59.1 MPa。

3.3 标准固结试验结果

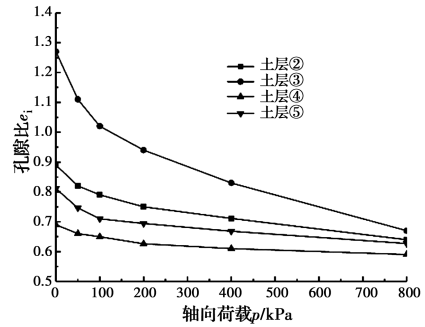
图 6 为各土层在不同轴向荷载下与轴向应变关系曲线,图中的曲线通过拟合函数所获得,②~⑤层土样轴向荷载与轴向应变曲线拟合函数分别为  $p =$

$3.017 7\epsilon_a^2 + 6.721 9\epsilon_a$ 、 $p=1.043 1\epsilon_a^2 + 5.631 3\epsilon_a$ 、 $p=4.937 6\epsilon_a^2 + 19.914 6\epsilon_a$ 、 $p=-13.448 8(1-1.656 5\epsilon_a)$ ，其中，每层土样曲线的拟合函数  $R^2$  均为 0.99。由图 6 可知，各层土样的轴向荷载与轴向应变曲线变化规律基本相同，当轴向荷载较小时，曲线变化较为平缓，随着轴向荷载的逐级加大，曲线在逐渐变陡，曲线的斜率也随之增大。参考割线模量  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$  为轴向荷载为 100 kPa 时曲线的斜率，由此可根据其曲线的拟合函数获得  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ ，通过计算可得，各层土样的参考割线模量  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$  分别为 3.8、2.3、5.2、8.0 MPa。



**图 6 各土层固结试验的轴向荷载与应变关系曲线图**  
**Fig. 6 Relationships between load and strain of consolidation test**

为了得到各层土的压缩模量  $E_{s1-2}$ ，将固结试验的孔隙比与轴向荷载的关系曲线绘制于图 7，由图 7 可知，各层土的孔隙比随着轴向荷载的增大而逐渐减小，当轴向荷载达到 800 kPa 时，各土层的孔隙比趋于平缓，通过计算可得，土层(②~⑤)的压缩模量  $E_{s1-2}$  分别为 6.1、2.5、6.8、10.6 MPa。



**图 7 各土层固结试验的孔隙比与轴向荷载关系曲线图**  
**Fig. 7 Relationships between load and void ratio of consolidation test**

### 4 试验结果对比分析

通过 3 种不同的室内试验，获得南昌地区软土层(②~⑤)的 HS 模型参数  $c'$ 、 $\varphi'$ 、 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  和  $R_f$ 。将上述参数的取值汇总于表 4。从表 4 可知，南昌地区土层③的  $c'$ 、 $\varphi'$ 、 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  和  $R_f$  均小于土层②和④。砂质粉土层⑤的  $c'$  值均小于土层②~④， $\varphi'$  值均大于②~④层土样。②~⑤层土样的  $E_{50}^{\text{ref}}$  和  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$  之间的比例关系基本相同 ( $E_{50}^{\text{ref}} = 0.94 \sim 1.3E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ )；对于  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  和  $E_{50}^{\text{ref}}$  两者之间的比例关系，②~⑤层土体较为接近 ( $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 6.5 \sim 12.9E_{50}^{\text{ref}}$ )，南昌地区砂质粉土层⑤的  $E_{50}^{\text{ref}}$  值是  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$  的 1.2 倍， $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  值是  $E_{50}^{\text{ref}}$  的 6.5 倍；而对于  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$  与  $E_{s1-2}$  两者之间关系，土层②~⑤的比例关系大致相同 ( $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 0.62 \sim 0.76E_{s1-2}$ )。

表 4 土体 HS 模型参数对比表

Table 4 Comparisons of parameters of the HS model for soils

土体名称	$c'/\text{kPa}$	$\varphi'(^{\circ})$	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$R_f$	$E_{s1-2}/\text{MPa}$	模量比例关系
南昌地区 (本次试验)	②黏土	29.2	3.8	4.8	38.6	0.95	6.1	$E_{50}^{\text{ref}} = 1.3E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$
								$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 8.0E_{50}^{\text{ref}}$
								$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} = 0.62E_{s1-2}$
								$E_{50}^{\text{ref}} = 1.2E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$
③淤泥质粉质黏土	25.6	2.3	2.8	36.2	0.90	2.5	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 12.9E_{50}^{\text{ref}}$	
							$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} = 0.74E_{s1-2}$	
							$E_{50}^{\text{ref}} = 0.9E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$	
							$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 8.0E_{50}^{\text{ref}}$	
④粉质黏土	28.2	5.2	4.9	39.3	0.92	6.8	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} = 0.76E_{s1-2}$	
							$E_{50}^{\text{ref}} = 1.2E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$	
							$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 6.5E_{50}^{\text{ref}}$	
							$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} = 0.75E_{s1-2}$	
⑤砂质粉土	36.8	8.0	9.1	59.1	0.96	10.6	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 6.5E_{50}^{\text{ref}}$	
							$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} = 0.75E_{s1-2}$	
							$E_{50}^{\text{ref}} = 1.2E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$	
							$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 6.5E_{50}^{\text{ref}}$	

续表 4

土体名称	$c'/\text{kPa}$	$\varphi'(^{\circ})$	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$R_f$	$E_{s1-2}/\text{MPa}$	模量比例关系	
上海地区 <sup>[10]</sup>	②黏土	10.37	29	3.7	4.7	38.8	0.91	5.9	$E_{50}^{\text{ref}}=1.2E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=8.4E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}=0.36E_{s1-2}$
	③淤泥质粉质黏土	8.13	34	2.5	3.0	33.9	0.68	2.3	$E_{50}^{\text{ref}}=1.1E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=11.6E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}=1.06E_{s1-2}$
	④淤泥质黏土	4.96	27	3.6	3.9	36.6	0.72	4.3	$E_{50}^{\text{ref}}=1.08E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=9.4E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}=0.85E_{s1-2}$
	⑤粉质黏土	16.90	34	5.9	6.4	42.4	0.89	6.7	$E_{50}^{\text{ref}}=1.08E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=6.7E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}=0.87E_{s1-2}$
天津滨海软土地区 <sup>[9]</sup>	②粉质黏土			3.8	2.8			1.8	$E_{50}^{\text{ref}}=0.7E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=2.1E_{50}^{\text{ref}}$
	③淤泥质黏土			3.5	2.3			1.8	$E_{50}^{\text{ref}}=0.7E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=2.1E_{50}^{\text{ref}}$
	④黏土			5.0	5.3			2.8	$E_{50}^{\text{ref}}=1.1E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=1.8E_{50}^{\text{ref}}$
	⑤粉质黏土			5.6	2.9			4.0	$E_{50}^{\text{ref}}=0.5E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=1.4E_{50}^{\text{ref}}$
无锡地区 <sup>[15]</sup>	③粉质黏土			4.8	8.0	25.2			$E_{50}^{\text{ref}}=0.7E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=3.2E_{50}^{\text{ref}}$
北京地区 <sup>[16]</sup>	粉质黏土			4.0	3.9	17.8	0.8	3.6	$E_{50}^{\text{ref}}=E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=4.5E_{50}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}=1.1E_{s1-2}$
Lacustrine Clay <sup>[17]</sup>				37.6	37.6		150.4		$E_{50}^{\text{ref}}=E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=4E_{50}^{\text{ref}}$
Upper Blodgett <sup>[18]</sup>				1.6	2.4		10	0.7	$E_{50}^{\text{ref}}=E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=4.3E_{50}^{\text{ref}}$

为了对比分析,表 4 中还列出了其他地区土体的参数。南昌地区各土层  $E_{50}^{\text{ref}}$  值为  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$  的 0.9~1.3 倍,这与上海地区<sup>[10]</sup>的 1.02~1.2 倍、天津滨海软土地区的 0.5~1.1 倍、无锡地区粉质黏土的 1.7 倍、北京地区粉质黏土的 1 倍、奥地利 Lacustrine Clay<sup>[17]</sup> 的 1 倍以及美国 Upper Blodgett<sup>[18]</sup> 的 1.5 倍比例比较接近。南昌地区各土层  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  值为  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$  的 6.2~12.9 倍,这与上海地区<sup>[10]</sup>的 6.7~11.2 倍、Lacustrine Clay<sup>[17]</sup> 软土地区的 4 倍以及美国 Upper Blodgett<sup>[18]</sup> 的 4.5 倍比例比较接近,大于天津滨海地区软土的 1.4~2.1 倍。

## 5 工程验证

### 5.1 工程概况

南昌某地下室深基坑项目位于南昌市西湖区孺

子路与船山路交汇处,整个基坑平面呈“L”形,场地北侧为孺子路,西侧为船山路,南面及东面为居民区,基坑平面位置如图 8 所示。基坑包括 B01 和 B04 两地块,并将其两个地块整体设计,基坑周长约 470 m<sup>2</sup>,面积约 5 900 m<sup>2</sup>。B01 和 B04 地块基坑开挖顺序不同,先施工 B01 地块,后施工 B04 地块,开挖深度分别约为 11.45、10.85 m,工程采用钻孔灌注桩作为围护结构,B01 和 B04 地块的围护桩桩长分别为 19.45、21.85 m,桩径 1 m,中心距 1.2 m,在围护桩桩顶布置冠梁,冠梁截面尺寸为 1 200 mm×800 mm(长×宽);在 B01 地块竖直方向设置两道钢筋混凝土支撑,分别架设于桩顶以及距桩顶 3.0 m 位置处,在 B04 地块桩顶设置一道钢筋混凝土内支

撑,内支撑横截面均为 1 000 mm×800 mm(长×宽),图 9 为支护体系剖面图。

支撑、围护桩、立柱桩的物理力学参数见表 5。

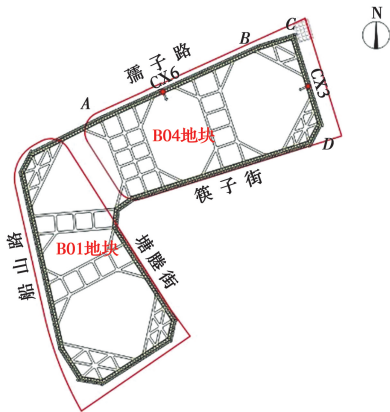


图 8 基坑平面位置示意图

Fig. 8 Pictures of plane position of foundation pit

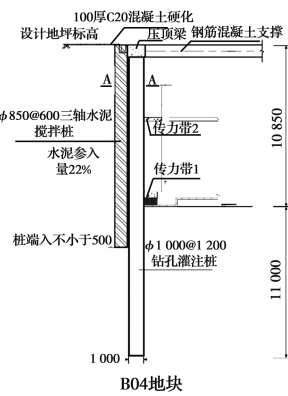


图 9 B04 地块支护体系剖面图 (单位:mm)

Fig. 9 Pictures of profile of area B04 support system(unit: mm)

## 5.2 计算模型与参数

5.2.1 计算模型 采用 PLAXIS 3D 有限元软件对该工程进行数值模拟,有限元模型尺寸为 400 m×300 m×50 m(长×宽×深),土体采用 10 节点四面体实体单元模拟,本构模型采用软件程序自带的 HS 本构,内支撑结构、冠梁和立柱桩均采用梁单元模拟。为了计算方便,围护结构采用 6 节点板单元模拟,并将排桩等效为地下连续墙,等效厚度采用文献 [19]公式计算,此外,采用 12 节点界面单元模拟土和结构的相互作用。土体四周约束其法向位移,底部约束其竖向及水平位移。为了既能节约模型计算成本又能得到较为精确的计算结果,模型网格划分精度选择中等粗细程度,并且对围护墙、支撑以及立柱桩附近的网格进行局部加密,整个计算模型共包含 15 462 个计算单元,计算模型网格划分见图 10。

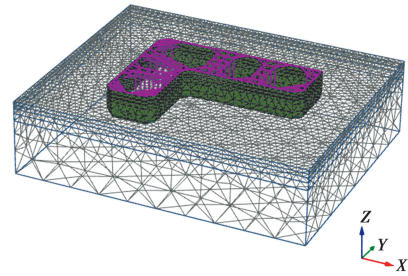


图 10 有限元网格

Fig. 10 Finite element mesh

表 5 内支撑、围护桩、立柱桩计算参数

Table 5 Parameters for the support, retaining pile and column pile

项目	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\mu$	$E/\text{GPa}$
内支撑	24	0.18	30
围护桩	24	0.18	28
立柱桩	24	0.18	28

5.2.2 土体参数的选取 模型中土层(②~⑥)采用 HS 模型,土层(②~⑤)参数  $c'$ 、 $\varphi'$ 、 $E_{\text{urd}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  和  $R_f$  根据试验结果取值,其他参数根据表 6 中已有文献成果取值。土层⑥为圆砾层,其基本参数可根据工程勘察报告取得: $c'=0$ 、 $\varphi'=37.3^\circ$ ,重度  $\gamma=20.5 \text{ kN/m}^3$ ,泊松比  $\nu=0.2$ ,压缩模量  $E_{\text{s}1-2}=35 \text{ MPa}$ 。对于南昌地区圆砾层,目前还没有对  $E_{\text{urd}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$  和  $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  研究的相关报道,其参数取值可参考文献 [20]获得,由此可得本工程场地②~⑥土层 HS 模型参数,具体见表 7。土层⑦为泥质粉砂岩层,土体本构采用摩尔库伦模型(MC 模型),基本参数: $c'=35 \text{ kPa}$ 、 $\varphi'=200^\circ$ ,泊松比  $\nu=0.2$ ,重度  $\gamma=23.5 \text{ kN/m}^3$ ,弹性模量  $E=0.36 \text{ MPa}$ ,综上,可得模型中全部土层参数。

表 6 HS 模型部分参数取值

Table 6 Evaluation of partial parameters of HS model

$p^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$\nu_{\text{ur}}$	$K_0$
100 <sup>[21]</sup>	一般取 0.2 <sup>[21]</sup>	$(1 - \sin \varphi')$ <sup>[22]</sup>
	$\psi$	$m$
砂土: $\varphi' > 30^\circ$ 取 $(\varphi' - 30^\circ)$ , $\varphi' < 30^\circ$ 取 $0^\circ$ <sup>[23]</sup> ;		粉土和砂土:一般取 0.5 <sup>[24]</sup> ;
黏性土:一般取 $0^\circ$ <sup>[21]</sup>		黏性土:取 0.5~1 <sup>[25]</sup>



表 7 土体(②~⑥)HS 模型参数指标

Table 7 Parameters of HS model of soil layers

土层	平均厚度/m	$c'/\text{kPa}$	$\varphi'/(^{\circ})$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$K_0$	$\psi$	$m$	$p^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\nu_{\text{ur}}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$R_f$
②	2.7	8.6	29.2	18.00	0.51	0	0.8	100	0.2	4.8	38.6	3.8	0.95
③	2.6	6.5	25.6	17.10	0.57	0	0.8	100	0.2	3.8	34.2	2.3	0.90
④	1.5	25.8	28.2	20.30	0.53	0	0.8	100	0.2	4.9	39.3	5.2	0.92
⑤	2.1	2.0	36.8	20.50	0.40	0	0.8	100	0.2	9.1	59.1	8.0	0.96
⑥	4.3	0	37.3	20.50	0.39	7.3	0.8	100	0.2	26.3	131.5	26.3	0.90

5.3 计算结果分析

为了监测基坑开挖期间基坑围护结构的变形,保证施工过程中基坑的安全性,在围护桩内埋设了多个测点,如图 8 所示,现取 AB 和 CD 两段,其对应的两个测点分别为 CX6 和 CX3,分析基坑开挖过程中围护桩沿深度方向的变形规律。图 11 为基坑开挖期间围护桩水平位移实测值与计算值的对比曲线。由图 11 可知,围护桩的深层水平位移曲线的分布状态随着基坑的逐次开挖在发生变化,并且在基坑开挖面以上的水平位移值逐渐增大,而基坑开挖面以下的水平位移值变化较小,当开挖至基坑底时,

桩体的水平位移达到最大,且最大值出现在桩顶。桩体测点 CX3 和 CX6 最大水平位移的实测值分别为 16.09、17.21 mm,数值模拟的最大水平位移值分别为 17.08、17.91 mm,测点 CX3 和 CX6 的实测数据与数值模拟结果变形规律基本一致,其中,对于测点 CX6,基坑第 3 次开挖至坑底时计算值稍大于实测值,总体而言,吻合较好。

6 结论

针对南昌地区软土进行了室内土工试验,获得了土体的 HS 模型参数值,并将所得到的参数运用到南昌地区的基坑工程的数值分析中,得到如下结论:

1)通过室内试验获得了南昌地区土体 HS 模型的主要参数  $c'$ 、 $\varphi'$ 、 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  和  $R_f$  的取值及其模量之间的比例关系。

2)南昌地区③层土样的  $c'$ 、 $\varphi'$ 、 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  和  $R_f$  均小于②和④层土样。②~⑤层土样的  $E_{50}^{\text{ref}}$  和  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$  之间的比例关系基本相同 ( $E_{50}^{\text{ref}} = 0.9E_{\text{ocd}}^{\text{ref}} \sim 1.3E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ ), $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  和  $E_{50}^{\text{ref}}$  两者之间的比例关系较为接近 ( $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 6.5E_{50}^{\text{ref}} \sim 12.9E_{50}^{\text{ref}}$ )。

3)南昌地区砂质粉土层⑤的  $c'$  值小于②~④层土样, $\varphi'$  值大于②~④层土样, $E_{50}^{\text{ref}}$  值是  $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$  值的 1.2 倍, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  值  $E_{50}^{\text{ref}}$  值是 6.5 倍, $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$  是  $E_{s-2}$  的 0.75 倍。

4)运用 PLAXIS 有限元数值软件对南昌某地下室深基坑工程进行三维数值分析,有限元数值计算结果与实测数据吻合较好,验证了获取的 HS 模型参数及方法适用于南昌地区基坑开挖的数值分析。

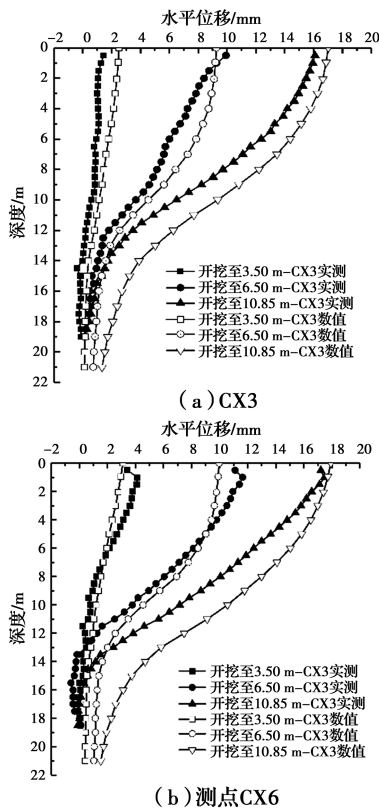


图 11 围护桩水平位移对比曲线图

Fig11 Comparisons of horizontal displacement of piles

参考文献:

[1] 陈晓平, 闫军. 深基坑支护结构的三维杆系有限元分



- 析[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 258-261.
- CHEN X P, YAN J. 3D pole system FEM analysis for bracing structure of deep foundation pit [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 22(3): 258-261. (in Chinese)
- [2] 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations; JGJ 120-1999 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999. (in Chinese)
- [3] 胡海英, 张玉成, 杨光华, 等. 基坑开挖对既有地铁隧道影响的实测及数值分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(Sup2): 431-439.
- HU H Y, ZHANG Y C, YANG G H, et al. Measurement and numerical analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36 (Sup2): 431-439. (in Chinese)
- [4] 林杭, 陈靖宇, 郭春, 等. 基坑开挖对邻近既有隧道变形影响范围的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4240-4247.
- LIN H, CHEN J Y, GUO C, et al. Numerical analysis on influence of foundation pit excavation on deformation of adjacent existing tunnel [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46 (11): 4240-4247. (in Chinese)
- [5] 林敏博, 刘润, 徐余, 等. 基坑开挖对抗拔桩承载特性影响的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(Sup2): 735-739.
- LIN M B, LIU R, XU Y, et al. Numerical analysis of bearing behaviors of uplift piles during pit excavation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(Sup2): 735-739. (in Chinese)
- [6] 宋广, 宋二祥. 基坑开挖数值模拟中土体本构模型的选取[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 86-94.
- SONG G, SONG E X. Selection of soil constitutive models for numerical simulation of foundation pit excavation [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(5): 86-94. (in Chinese)
- [7] CALVELLO M, FINNO R J. Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis [J]. *Computers and Geotechnics*, 2004, 31(5): 410-424.
- [8] 李连祥, 刘嘉典, 李克金, 等. 济南典型地层 HSS 参数选取及适用性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 4021-4029.
- LI L X, LIU J D, LI K J, et al. Study of parameters selection and applicability of HSS model in typical stratum of Jinan [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10): 4021-4029. (in Chinese)
- [9] 刘畅. 考虑土体不同强度与变形参数及基坑支护空间影响的基坑支护变形与内力研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- LIU C. Analysis of deformation and stress due to deep excavation considering different deformation and strength parameters of soil and space effect of excavation and retaining structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [10] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 269-278.
- LIANG F Y, JIA Y J, DING Y J, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(2): 269-278. (in Chinese)
- [11] 陈尚荣, 李通达, 梁发云, 等. 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), 2020, 48(6): 841-846.
- CHEN S R, LI T D, LIANG F Y, et al. 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)*, 2020, 48(6): 841-846. (in Chinese)
- [12] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. The hardening soil model: Formulation and verification [M]//Beyond 2000 in Computational Geotechnics-10 years of PLAXIS. Routledge, 2019: 281-296.
- [13] 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- Standard for soil test method: GB/T 50123-1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)
- [14] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- LI G X. *Advanced Soil Mechanics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)
- [15] 陈峰. 无锡地铁基坑典型地层本构模型适应性研究[D]. 上海: 同济大学, 2011.
- CHEN F. Adaptability of constitutive model for typical soil layers in Wuxi metro excavation [D]. Shanghai: Tongji University, 2011.

- [16] 周恩平. 考虑小应变的硬化土本构模型在基坑变形分析中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
ZHOU E P. Application of hardening soil model with small-strain in deformation analysis for foundation pit [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [17] LÜFTENEGGER R, SCHWEIGER H, SCHARINGER F. 3D finite element analysis of a deep excavation and comparison with in situ measurements [M]// Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, CRC Press, 2008: 193-199. .
- [18] ROBOSKI J F. Soil parameters for constitutive models of compressible Chicago glacial clays [EB/OL].
- [19] LIAO S M, WEI S F, SHEN S L. Structural responses of existing metro stations to adjacent deep excavations in Suzhou, China [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(4): 04015089.
- [20] 刘志祥, 张海清. PLAXIS 高级应用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.  
LIU Z X, ZHANG H Q. PLAXIS Advanced Application Course [M]. Beijing: China Machine Press, 2015. (in Chinese)
- [21] BRINKGREVE R B J, BROERE W. Plaxis material models manual [M]. Delft, 2006.
- [22] GAO D Z, WEI D D, HU Z X. Geotechnical properties of Shanghai soils and engineering applications [M]// Marine Geotechnology and Nearshore/Offshore Structures, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959: ASTM International, 1986: 161-178.
- [23] BOLTON M D. Discussion: The strength and dilatancy of sands [J]. Géotechnique, 1987, 37(2): 219-226.
- [24] JANBU J. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial test [C]//Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Wiesbaden, 1963,1: 19-25.
- [25] 徐中华, 王建华, 王卫东. 主体地下结构与支护结构相结合的复杂深基坑分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (Sup1): 1355-1359.  
XU Z H, WANG J H, WANG W D. Analysis of a complicated deep excavations supported by substructures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (Sup1): 1355-1359. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)