

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220929002

# 地下连续墙受力变形光纤监测与数值模拟研究\*

刘天翔<sup>1</sup>, 朱鸿鹄<sup>1</sup>, 程刚<sup>1,2</sup>, 谭道远<sup>1</sup>, 魏广庆<sup>3</sup>, 施斌<sup>1</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023; 2. 华北科技学院(中国煤矿安全技术培训中心)计算机学院, 北京 101601; 3. 苏州南智传感科技有限公司, 江苏苏州 215123)

**摘要:** 地下连续墙是一种常见的深基坑支护方式, 具有刚度大、防渗性能好、适应范围广等优点, 但其受力变形规律较为复杂。基于超弱光纤光栅感测技术, 对某地铁车站基坑地下连续墙水平位移进行实时监测。将监测数据与数值模拟结果进行对比, 验证了数值分析模型选取的合理性, 并基于该数值分析模型研究了不同厚度软土层中, 地下连续墙水平位移的变化规律, 通过墙体位移梯度( $D_w$ )和软土位移梯度( $D_r$ )进行临界厚度比计算。研究结果显示: 水平位移随软土厚度的变化呈“凸肚”状, 沿深度方向划分为相对稳定区、线性增长区、最大变形区和线性下降区。利用 $D_w$ 和 $D_r$ 标定出临界厚度比为0.24; 土压力变化在基坑前四步开挖过程中较为稳定, 而在第五步开挖与施工后40 d变化显著。上述研究结果为类似工程的设计、施工和监测方案的制定提供了重要参考。

**关键词:** 地下连续墙; 水平位移; 密集分布式感测; 数值模拟; 临界厚度比

**中图分类号:** TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0222-12

## Fiber Optic Monitoring and Numerical Simulation of Stress and Deformation of Diaphragm Wall

LIU Tianxiang<sup>1</sup>, ZHU Honghu<sup>1</sup>, CHENG Gang<sup>1,2</sup>, TAN Daoyuan<sup>1</sup>, WEI Guangqing<sup>3</sup>, SHI Bin<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. School of Computer Science, North China Institute of Science and Technology (National Safety Training Center of Coal Mines), Beijing 101601, China; 3. Suzhou NanZee Sensing Co. Ltd., Suzhou 215123, China)

**Abstract:** As a common support method in deep excavation, diaphragm walls have complex stress and deformation regulation, making them a hot research topic in excavations. In this paper, based on the fiber Bragg grating sensing technology, the horizontal displacements of a diaphragm wall of a subway station were measured. The monitoring data was compared with the numerical simulation results, and the rationality of the numerical analysis model was verified. Based on the numerical analysis model, the variation law of the horizontal displacement of the underground diaphragm wall in the soft soil layer of different thicknesses was studied. The critical thickness ratio was calculated by the wall displacement gradient  $D_w$  and the soft soil displacement gradient  $D_r$ . The results show that the variation of horizontal displacement of the diaphragm wall with the thickness of soft soil is generally in a shape of "con-

\* 收稿日期:2022-09-29;修回日期:2023-07-17

基金项目:国家自然科学基金项目(4207235)、国家重点研发计划课题(2018YFC1505104)资助

作者简介:刘天翔(1990—),男,硕士生。主要从事地质与岩土工程监测的研究。Email:liutx@smail.nju.edu.cn

通讯作者:朱鸿鹄(1979—),男,教授,博导。主要从事地质工程、岩土力学方面的教学和研究工作。

E-mail:zhh@nju.edu.cn

vex belly". The deformation of the diaphragm wall can be divided into relatively stable zone, linear growth zone, maximum deformation zone and linear decline zone along the depth direction. The critical thickness ratio  $\alpha_c$  was calibrated as 0.24 using  $D_w$  and  $D_r$ . The earth pressure is relatively stable in the first four excavation processes, but changes significantly after 40 days of excavation in the fifth excavation process. The research results provide a valuable reference for the design, construction, and monitoring schemes of similar projects.

**Keywords:** diaphragm wall; horizontal displacement; densely distributed sensing; numerical simulation; critical thickness ratio

## 0 引言

随着我国城市化进程的深入推进,基坑工程不断向着“长、大、深”的方向发展,建设规模、施工难度逐渐增加。深基坑支护工程施工中,地下连续墙等结构的变形特征、机理以及对周边环境的影响成为基坑工程研究领域的热点问题。一旦基坑工程处理不当,将会对周边构筑物的安全造成重大威胁,甚至可能引发严重的工程事故。因此,在深基坑工程中,对施工全过程的质量控制提出了越来越高的要求<sup>[1-3]</sup>。

基坑变形特征的研究方法主要分为数值分析法<sup>[4-6]</sup>和实测统计分析法<sup>[7-9]</sup>。前者基于一定的物理模型,能再现基坑开挖过程的变形演化特征;后者根据统计分析理论,由大量的基坑实测数据归纳出基坑变形的规律。过去几十年来,国内外围绕基坑开挖稳定性及环境影响效应开展了大量的研究。徐中华等<sup>[10]</sup>研究了上海地区软土深基坑的变形特征,分析了地下连续墙最大侧移与支撑系统刚度和深度等关系,为该地区的基坑设计提供了一定的借鉴。Y.Tan等<sup>[11-12]</sup>对比分析了软土地区超大型深基坑工程的支护方案,详细介绍了中心岛支撑方案的概况和施工流程,并结合基坑变形实测数据进行了稳定性分析。丁勇春等<sup>[13]</sup>开展了临江深基坑工程的三维数值模拟,研究了分区开挖、潮位变化对基坑变形和支撑轴力的影响。王建华等<sup>[14]</sup>通过对上海地区50个深基坑工程实测资料的挖掘分析,从统计学的角度探讨了地下连续墙的变形性状,并得出了最大侧向位移与首道支撑的位置无明显关联的结论。武朝军等<sup>[15]</sup>在苏州地铁车站基坑实测数据的基础上,分析了该地区深基坑变形的典型特征。Y.Ou等<sup>[16]</sup>对中国台北地区的深基坑工程进行了归

纳、统计,分析了最大侧向位移所处深度的影响因素,进而研究了软土深基坑变形的规律。罗耀武等<sup>[17]</sup>采用有限元分析模型,研究了某变电站环形基坑的空间效应对围护结构受力变形特性的影响。谢百钧等<sup>[18]</sup>基于回归分析,提出了一种简易评估挡墙最大变形量的新方法,并据此对比分析了多个工程的预测结果与实测结果。丁智等<sup>[19]</sup>通过对浙江地区37个软土深基坑监测数据的分析挖掘,获得了基坑最大侧移量与开挖深度之间的对应关系。应宏伟等<sup>[20]</sup>考虑深基坑逆作法施工因素,提出了基坑三维梁系有限元分析方法,并验证了该方法的有效性。

在上述研究中,基坑变形通常采用常规的岩土监测技术获取,如全站仪、测斜仪和激光测距仪等。然而,这些方法往往只能基于有限的测点对地下连续墙等支护结构的变形进行监测,数据离散且实时性差,难以满足深基坑工程精细化、分布式监测要求<sup>[21]</sup>。近年来,光纤传感技术的兴起为岩土工程监测提供了新的手段。该类技术以其独特的抗腐蚀、高精度、实时监测等优点,在基坑、边坡、隧道和地下管线等工程领域得到广泛应用<sup>[22-25]</sup>。光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating,简称FBG)是一种高灵敏度、高精度的应变和温度感测技术,可实现多测点串联形式的准分布式监测<sup>[26]</sup>。随着光纤解调技术的不断发展,近年来兴起的超弱光纤光栅感测技术(Ultra-weak fiber Bragg grating,简称UFBG)使得单线测点数大幅上升,已在基坑、边坡和桩基工程中展示出良好的应用潜力<sup>[27-28]</sup>。

本文以上海某软土深基坑工程为例,采用有限元数值方法对开挖过程中地下连续墙的侧向位移变化特征进行了模拟分析。同时,结合UFBG实测数据对模拟结果进行了验证分析,并探究了不同软土层厚度对地下连续墙变形的影响。相关结论可为类似工程的优化设计提供参考和借鉴。

# 1 案例简介

## 1.1 工程概况

本工程监测地点为上海某地铁站,具体位置如图1所示。基坑呈矩形,长、宽分别为64.05、19.6 m,采用明挖顺作法施工,围护结构选用800 mm厚地下连续墙(十字钢板/锁口接头)。基坑开挖前已建好地下连续墙,采用5道内支撑,其中第1道为800 mm×900 mm钢筋混凝土支撑,其余4道采用609 mm×16 mm的钢管支撑。本文选用的现场测点平面布置如图1所示,其中CX7为地下连续墙水平位移测点,该测点位移传感器布设于地下连续墙内,分别布设了UFBG应变感测光缆和FBG测斜仪, TYL2为土压力测点,布设了FBG土压力传感器。

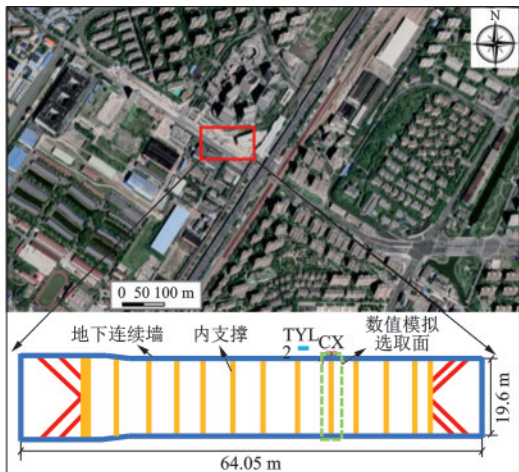


图1 监测现场平面

Fig.1 Layout of the monitoring site

## 1.2 超弱光纤光栅感测技术(UFBG)

超弱光纤光栅是一种光反射效应微弱的特种光纤光栅,其峰值反射率通常低于-30.0 dB,除了具备传统光纤光栅精度高、实时性好、抗干扰性强的特点,还具有密集分布式监测的独特优势,可在同一光纤上密集排列成千上万个测点。该技术的工作原理如图2所示,相同周期的光纤光栅可以相互穿透,实现单一光纤上大量光栅测点的复用。将多个FBG传感器布置在空间预定位置上,采用串联或其他网络结构形式连接在一起,通过时分复用技术便可以构成分布式监测网络系统。在现场监测时,由于外部温度的改变会使得反射光中心波长发

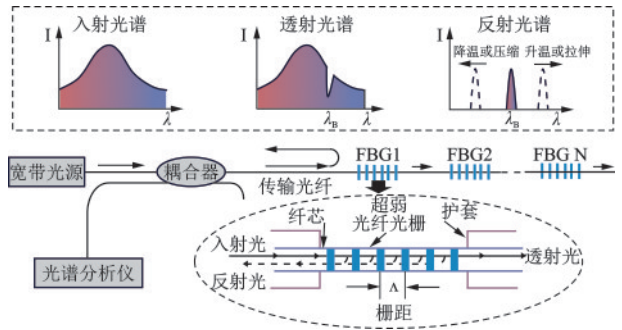


图2 超弱光纤光栅感测技术原理

Fig.2 Sensing principle of ultra-weak FBG

生一定的变化,因此现场通常需布设温度感测光缆进行应变数据的温度补偿。

## 1.3 现场传感器布设

在现场监测中,采用了苏州南智传感科技有限公司研制的混凝土专用定点密集分布式应变感测光缆(NZS-DDS-C03)。图3为各测点布设剖面图。本研究采用柜式光纤光栅解调仪(NZS-FBG-A01)采集UFBG数据,该解调仪性能特点和技术参数见表1。

在监测断面的前后钢筋笼上,布设了光纤传感器用于监测变形,混凝土专用密集分布式应变感测光缆点间距为1.0 m。为了形成一个U型布置回路,在迎土面和开挖面布设了光缆,并通过布设一条密集分布式温度感测光缆进行开挖期间的环境温度补偿。在地下连续墙钢筋笼加工过程中,沿钢筋笼一根主筋预埋一条整体倾角测线,并在开挖面以下每间隔4.0 m布设一个光纤光栅倾斜计。如图4所示,展示了光纤光栅传感器现场埋设施工过程。

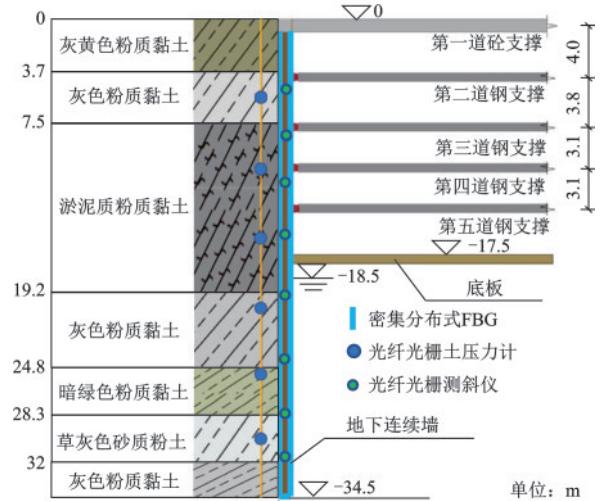


图3 CX7围护结构剖面

Fig.3 Sectional view of CX7 support structure

表1 UFBG解调仪性能特点及技术参数

Table 1 Main technical parameters of the UFBG demodulator

参数类型	参数值
波长测量范围/nm	1 527~1 568
波长分辨率/pm	≤1
波长测量精度/pm	±2
动态范围/dB	30
单通道解调速率/min	<5
单通道测量距离/km	30
单通道测量点数量/个	2 000
最高空间分辨率/m	0.5
通道数	4、8、16(可拓展)

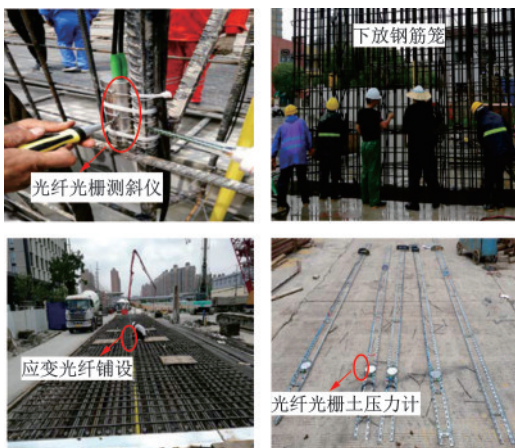


图4 光纤传感器现场埋设过程

Fig.4 Process of fiber optic sensors arrangement in the field

此外,在地下连续墙外侧1.0 m处,竖向布设了1条基坑侧壁土压力测线,用于现场土压力的监测。于基坑开挖一个月前,在地下连续墙外侧1.0 m处施工一个36.0 m深,直径117.0 mm的钻孔,将光纤光栅土压力计固定于钢筋架上,并将土压力计串联熔接,通过引线引至地表。最后,选用黏土球进行钻孔回填,由于黏土球遇水发生微膨胀,可以更好地保证钻孔回填的密实度,确保了土压力计监测结果的可靠性。

## 2 监测与数值模拟

### 2.1 计算模型及参数

本文选取测点附近的基坑剖面(图1),进行了二维弹塑性有限元模拟。该处基坑开挖深度为17.5 m,地下连续墙深度为34.5 m。首先采用有限元软件Plaxis建立了平面应变数值模型。考虑到基

坑几何形状的对称性,在数值计算时选取基坑宽度的一半进行分析。地下连续墙采用板单元模拟,混凝土支撑和钢管支撑采用锚定板单元模拟,土体的本构模型采用硬化(Hardening-soil)模型。计算过程中,不考虑基坑地下水位影响<sup>[29]</sup>,地下连续墙和内支撑的参数见表2。

表2 支护结构计算参数

Table 2 Calculation parameters of supporting structure

结构单元	单元类型	轴向刚度EA/(kN·m <sup>-1</sup> )	抗弯刚度EI/(kN·m <sup>-2</sup> )
地下连续墙	板	7.5×10 <sup>6</sup>	1.0×10 <sup>8</sup>
钢筋混凝土支撑	锚锭杆	2.1×10 <sup>7</sup>	/
钢管支撑	锚锭杆	2.1×10 <sup>6</sup>	/

如图5所示,展示了数值模拟的剖面图。拟地层自上而下依次为:①灰黄色粉质黏土;②灰色粉质黏土;③淤泥质粉质黏土;④灰色粉质黏土;⑤暗绿色粉质黏土;⑥草灰色砂质粉土;⑦灰色粉质黏土;⑧灰色粉质黏土。通过室内外试验测试得出了土体计算参数,详见表3。土体模量参数选取时参考了刘小丽等<sup>[29]</sup>的研究,主要包含标准固结排水三轴试验中的割线模量 $E_{50}^{ref}$ 、主固结仪加载中的切线模量 $E_{ocd}^{ref}$ 和卸载-重新加载的刚度模量 $E_{ur}^{ref}$ 。模型参数 $m$ 表示刚度应力水平相关幂指数,取值范围在0.5~1.0,土质越软, $m$ 越接近1.0。通过界面强度折减因子 $R_{inter}$ 对各土层的黏聚力和内摩擦角进行了折减,来表征土体与地下连续墙界面的黏聚力和内摩擦角。

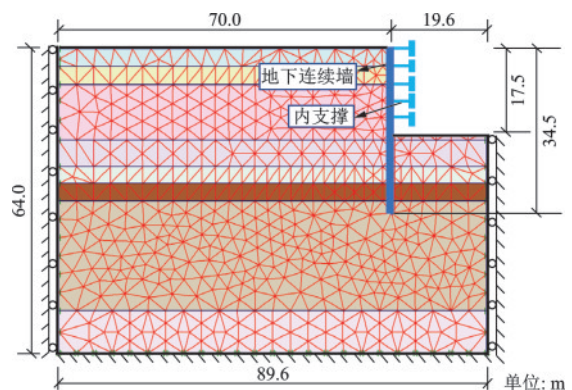


图5 数值模拟计算模型

Fig.5 Numerical simulation calculation model

### 2.2 数值模拟验证

数值模拟结果的验证是通过对比现场基坑的

表3 土体计算参数

Table 3 Soil calculation parameters

土层名称	厚度/m	容重/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	渗透系数/ ( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ )	$E_{50}^{\text{ref}}$ / MPa	$E_{\text{ced}}^{\text{ref}}$ / MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ / MPa	$m$	$R_{\text{inter}}$
①灰黄色粉质黏土	3.7	18.3	19.0	17.5	0.003	8.5	8.5	25.0	0.6	0.6
②灰色粉质黏土	3.8	18.1	11.0	22.0	0.003	7.5	7.5	22.5	0.6	0.6
③淤泥质粉质黏土	11.7	18.4	7.0	13.5	0.001	5.2	5.2	15.6	0.58	0.58
④灰色粉质黏土	5.6	17.9	10.0	15.0	0.001	6.0	6.0	18.0	0.61	0.61
⑤暗绿色粉质黏土	3.5	19.1	9.0	13.0	0.001 8	6.3	6.3	18.4	0.65	0.65
⑥草灰色砂质粉土	3.7	17.6	12.0	14.0	0.003	7.4	7.4	22.0	0.67	0.67
⑦灰色粉质黏土	23.1	17.2	16.0	19.0	0.002	8.8	8.8	26.4	0.66	0.66
⑧灰色粉质黏土	8.9	18.4	12.0	26.5	0.003	9.0	9.0	27.0	0.68	0.68

实测数据完成的。为了保证地下连续墙水平位移的监测结果可靠,采用了光纤光栅水平测斜仪和密集分布式FBG光纤监测技术两种方式。基坑采用顺作法施工,采用自下而上的开挖方法。由于篇幅限制,本文仅选取其中一个地下连续墙开挖完成时的监测数据进行分析。图6显示了基坑开挖完成时地下连续墙的水平位移值的监测结果和数值模拟结果。

基坑开挖面位于地下连续墙17.5 m深度处,由图6可以看出,数值模拟结果显示,在距离墙顶19.0 m(基坑开挖面下1.5 m)的位置,地下连续墙水平最大位移值为72.1 mm。现场采用密集分布式FBG光纤光栅监测技术和光纤光栅水平测斜仪进行实测,实测的最大位移值分别为70.2 mm和66.7 mm,最大位置位于开挖面附近。数值模拟结果的最大

水平位移略大于现场FBG光纤监测和水平测斜仪的监测值。对于最大水平位移所在的深度,数值模拟对应的深度略大于现场实测深度。这与刘小丽等<sup>[29]</sup>在上海软土地区进行的Plaxis模拟计算得出的结论一致,即数值模拟的最大水平位移略大于现场实测值,其对应深度也大于现场实测深度。此外,地下连续墙发生最大水平位移的深度范围也与王建华等<sup>[14]</sup>的研究结果相符,即80.5%的基坑最大水平位移位置在 $0.8H_0\sim 1.2H_0$ ( $H_0$ 为开挖深度)范围内。因此,通过现场实测数据与数值模拟的结果对比,结合相关学者的研究成果,可以得出结论:本文数值分析得出的地下连续墙水平最大位移量以及其所在深度的分布规律与现场实测结果接近。

此外,当地下连续墙深度超过最大水平位移深度后,数值模拟得出的水平位移结果随着深度呈逐渐减小趋势,其减小速度明显大于光纤监测和水平测斜仪的水平位移减小速度。最终,在30.0 m处,数值模拟得出的水平位移值为32.0 mm,而FBG光纤监测和水平测斜仪监测的最终水平位移分别为41.0 mm和37.0 mm。数值模拟得出的底部水平位移量明显小于现场实测的水平位移量。本文在计算过程中未考虑地下水的影响。然而,在实际的基坑工程中,降水水位一般在基坑底下约0.5 m。在水压力的作用下,现场实测的基坑开挖面下部的地下连续墙水平位移值要大于数值分析的结果。此外,由于数值模拟过程中未考虑地下连续墙顶部冠梁的围护作用,因此对于地下连续墙上部位移量,数值模拟得出的结果大于现场的实测值。然而,对于最大水平位移及其发生的位置,数值模拟与现场实测得出的结果基本一致。因此,利用本文的研究方法,可深入研究软土地区地下连续墙的最大水平

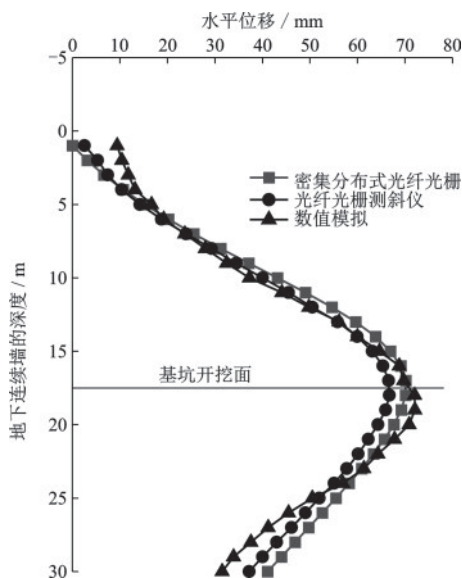


图6 地下连续墙水平位移曲线

Fig.6 Horizontal displacement curve of diaphragm wall

位移及其所在深度问题。

### 2.3 控制因素

地下连续墙因具有止水性好、刚度大的特点,已经成为上海地区深基坑工程的主要围护形式之一。影响基坑变形的因素有很多,可以大致分为三类:设计因素、施工因素和自然土质情况<sup>[30-32]</sup>。设计因素主要包括基坑的平面形状和开挖深度、围护墙刚度及入土深度、有无内支撑或支撑的刚度及其设置的位置、预应力水平、被动区土体加固等;影响变形的施工因素主要包括:分步开挖深度和宽度、开挖后支撑情况和暴露时间等;而影响基坑变形的自然因素主要包括土体的物理力学性质和基坑水环境<sup>[33]</sup>。地下连续墙的水平变形量与软土层的厚度,以及基坑开挖面积的空间效应存在较大关联。表4展示了上海地区地下连续墙变形与其他地区统计分析对比情况,其中 $\delta_{hm}$ 表示地下连续墙的最大侧移量, $H_e$ 为基坑开挖深度。可以看出,总体规律是软黏土地层中基坑地下连续墙的水平位移比硬质土层中基坑地下连续墙的水平位移大得多。在软土地区中,最大水平位移一般位于 $0.42\%H_e \sim 0.48\%H_e$ ,而在下卧岩层则变化更小,仅为 $0.05\%H_e$ ,约为软土变化位移的1/10。分析其原因在于,土层的性质对地下连续墙的水平位移产生显著影响,尤其在软土地区,地下连续墙水平位移较其他土层显著增大。因此,开展软土与地下连续墙水平位移之间的关系研究具有重要的工程意义,这对预测地下连续墙的水平变形以及在支护方式和参数选取等方面均具有重要参考价值。

根据王建华等<sup>[14]</sup>对上海50个基坑的统计研究

表4 不同土层条件下的地下连续墙变形分析对比

Table 4 Comparison of diaphragm wall deformation under different soil conditions

文献	基坑数量	土层条件	$\delta_{hm}/H_e$ (%)
徐中华等 <sup>[10]</sup>	93	上海软土	0.42
Y.Ou等 <sup>[16]</sup>	4	台北软土	0.40
C.Yoo <sup>[32]</sup>	10	表层填土与残积土、下卧岩石层	0.05
M.Long <sup>[33]</sup>	21	$h > 0.6 H_e$ 且开挖面为硬土层	0.20
	24	$h > 0.6 H_e$ 且开挖面为软土层	0.48

结果显示,上海地区软土的厚度主要集中在4.0~16.0 m。因此,本文的研究重点是探讨该范围内软土与地下连续墙变形的关系。通过分析上海某地铁基坑的工程案例,保持相关的地层和结构参数不变,并采用数值模拟的研究方法,选取软土层厚度作为变量,研究了在不同软土厚度条件下地下连续墙水平位移的变化规律。

## 3 软土厚度对水平位移影响分析

### 3.1 有限元计算模型建立

根据周学明等<sup>[34]</sup>的研究结果,上海软土层顶埋深主要集中在4.0~8.0 m,部分地区甚至不到在4.0 m。本文研究的工程案例中,软土埋深为7.5 m。因此,在数值模拟过程中,保持软土层顶部距离地面7.5 m不变,调整软土层底部的埋深,地层参数和围护结构参数的数值模拟数据都基于现场工程的数据。据王建华等<sup>[14]</sup>统计的上海50个深基坑结果显示,地下连续墙软土厚度范围是4.0~14.6 m。因此,本文在研究软土厚度对地下连续墙水平位移的影响中,软土厚度选取的范围是3.4~15.0 m。由图7可以看出,随着深度的增加,地下连续墙整体水平位移呈“凸肚”状。在连续墙深度0~7.5 m,即软土层上部的地下连续墙,在不同厚度的软土层工况下,其水平位移变化趋势基本一致。在7.5 m处的水平位移范围为22.0~25.0 mm,最大差值为3.0 mm。可以认为,不同厚度的软土层对上部地下连续墙水平位移影响较小,在该深度范围内地下连续墙水平位移量也相对较小。据此,将地面至软土层顶面范围划为I区(相对稳定区)。

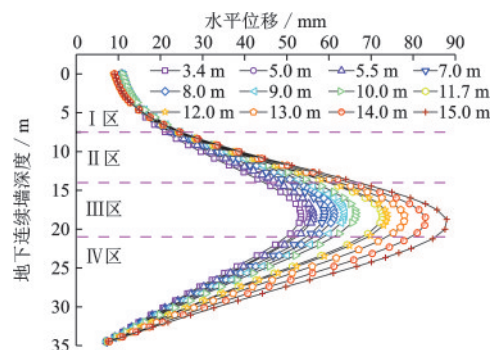


图7 不同软土厚度侧移与深度关系

Fig.7 Relationship between lateral displacements and depth with different thicknesses of soft soil

### 3.2 线性增长区特性分析

由图7可知,在软土厚度为7.5~14.0 m(0.8 $H_c$ ),地下连续墙的水平位移量随软土厚度的增加呈显著增大的趋势,并且在该范围内,地下连续墙深度与水平位移之间存在接近线性的关系。因此,将该范围划分为II区(线性增长区)。定义水平位移沿地下连续墙深度的位移梯度为(以下称墙体位移梯度):

$$D_w = \frac{\Delta\delta}{\Delta z} \quad (1)$$

式中, $\Delta\delta$ 为地下连续墙深度—水平位移曲线上某一厚度软土的水平位移变化量,m; $\Delta z$ 为 $\Delta\delta$ 对应的地下连续墙的深度变化量,m。

由图8可知,随着软土厚度的增大, $D_w$ 呈增大趋势,两者表现出良好的线性关系;当软土厚度在0~10.0 m,增加的速度相对平稳,处于缓倾段;当软土厚度大于10.0 m时, $D_w$ 增加速度显著增大,处于陡倾段;作者将软土厚度10.0 m定义为临界厚度,其对应的厚度比(软土厚度与地下连续墙深度的比值)称临界厚度比 $\alpha_{cr}=0.24$ 。在软土地区,当监测出该场地若干条下连续墙的水平位移曲线,即可求出 $\Delta\delta$ 和 $\Delta z$ ,从而求出 $D_w$ ,并可以得出软土厚度比与 $D_w$ 关系,进而预测在线性增长区该场地其软土厚度的水平位移变化曲线。

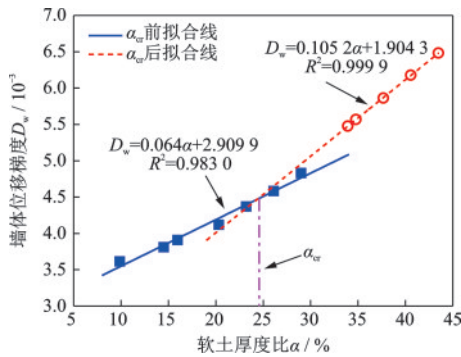


图8 II区软土厚度比 $D_w$ 关系

Fig.8 Relationship between soft soil thickness ratio and  $D_w$  in Zone II

### 3.3 最大变形区特征分析

如图7所示,在深度14.0~21.0 m,对于不同厚度的软土层,在该范围内地下连续墙的水平位移均达到最大值,或趋于最大值,地下连续墙的水平位移值随着深度变化表现出相对较稳定状态,这与徐

中华等<sup>[10]</sup>和王建华等<sup>[14]</sup>研究得出的大部分基坑最大水平位移埋深位置在0.8~1.2 $H_c$ 的结果是一致的,以及Y.Ou等<sup>[16]</sup>总结的中国台北地区10个深基坑最大水平位移深度位置的分布规律,与本文得出的规律也基本一致。因此,本文将深度范围为0.8 $H_c$ ~1.2 $H_c$ 划分为III区(最大变形区)。图9展示了徐中华等<sup>[10]</sup>通过对上海基坑工程采用地下连续墙数据整理得出的软土厚度比与最大水平位移相对深度的关系,并将其与本文数值模拟得出的结果进行了比较。

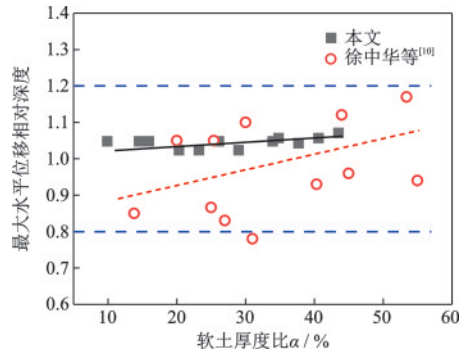


图9 III区软土厚度比与最大水平位移相对深度关系

Fig.9 Relationship between thickness ratio of soft soil and relative depth of maximum horizontal displacement in Zone III

最大水平位移相对深度是指最大水平位移深度与基坑开挖深度的比值。从图9可以看出,虽然徐中华等<sup>[10]</sup>获得的数据相对离散,但可以发现随着软土厚度的增大,地下连续墙最大水平位移的深度呈下降趋势。本文通过数值模拟得出的软土厚度比与最大水平位移相对深度的结果表明,随着软土厚度的增加,地下连续墙的最大水平位移的相对深度位置呈小幅度增长趋势。与徐中华等<sup>[10]</sup>的统计结果相比,本文的变化趋势略微不明显,这主要是由于徐中华等<sup>[10]</sup>的研究是基于上海地区不同基坑现场数据的统计,不同基坑现场施工的复杂性和工程地质条件差异等因素造成了数据相对离散。而本文仅选取了一个工程背景作数值分析,在施工过程、工程地质条件等因素均相对稳定的条件下,所得出的数据离散性相对较小。然而,上述两种研究均得出相同的结论,即随着软土厚度的增加,最大水平位移深度不断向下移动。由图7可知,数值模拟中不同厚度的软土在地下连续墙深度17.0~19.0 m范围内其水平位移达到最大值。因此,通过数值模拟可以发现,在同一场地,地下连续墙最大

水平位移所在的深度比较接近,未出现较大差异。根据这个结果,定义软土位移梯度:

$$D_r = \frac{\Delta S_{\max}}{\Delta h} \quad (2)$$

式中, $\Delta S_{\max}$ 为不同软土厚度最大水平位移差值,m; $\Delta h$ 为对应的软土厚度差值m。

通过数值模拟,可以得出如图10所示的关系。从图10可以看出,软土厚度比与 $D_r$ 呈显著的线性关系,随着软土厚度比的增大, $D_r$ 也呈增大趋势,但增加的速度相对平稳,处于缓倾段。当软土厚度比大于临界厚度比时, $D_r$ 增加速度显著增大,处于陡倾段。在软土地区,当监测出该场地若干条地下连续墙的水平位移曲线,即可求出 $\Delta S_{\max}$ 和 $\Delta h$ ,从而求出 $D_r$ ,得出软土厚度比与 $D_r$ 之间的关系,进而预测该场地最大变形区其软土厚度的地下连续墙水平位移曲线。

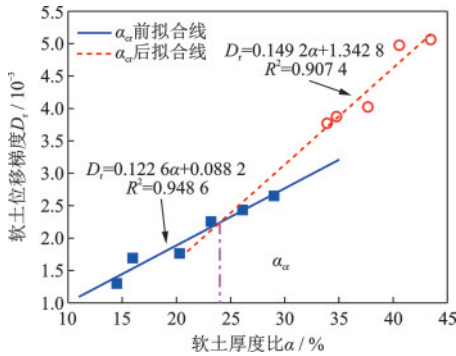


图10 III区软土厚度比与 $D_r$ 关系

Fig.10 Relationship between thickness ratio of soft soil and  $D_r$  in Zone III

图11显示了I区和II区软土位移梯度 $D_r$ 与软土厚度比的关系。从图中可知,在I区和II区中,软土位移梯度 $D_r$ 随着软土厚度比的增加没有显著变化。因此,在这两个区域中,软土位移梯度 $D_r$ 是相对稳定的,软土厚度比对 $D_r$ 影响不大。

### 3.4 线性下降区特性分析

当地下连续墙深度大于21.0 m( $1.2H_c$ )时,由图7可知,地下连续墙的水平位移显著下降,将该段定义为IV区(线性下降区)。需要注意的是,由于未考虑地下水的影响,模拟结果与实测结果存在一定差异。然而,在实际的工程建设中,最大变形区和线性增长区的地下连续墙的变形特征更为关注。因此,本文未进一步对该区数据结果进行具体分析。

基于本文工程背景和数值模拟得出的结论,提

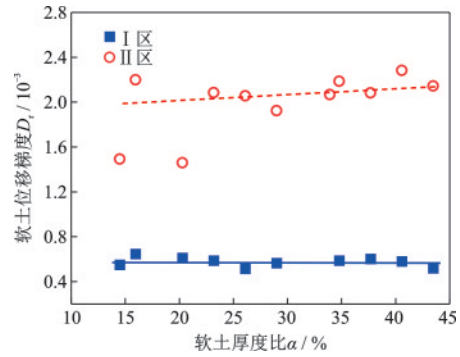


图11 不同区软土厚度比与 $D_r$ 关系

Fig.11 Relationship between thickness ratio of soft soil and  $D_r$  in different areas

出了临界厚度比的概念。然而,由于不同场地工程地质条件和施工条件的差异性,临界厚度比也存在一定的差异,因此需要通过更多的工程案例进一步优化结果。此外,本文提出的墙体位移梯度 $D_w$ 、软土位移梯度 $D_r$ 与临界厚度比之间的变化规律在软土地区具有普适性,对于软土基坑的水平变形预测具有重要的参考意义。

## 4 开挖时序对土压力影响分析

### 4.1 开挖过程土压力变化分析

在基坑开挖过程中,地下连续墙的水平位移会导致土压力的变化。通过监测点测得的土压力值与基坑开挖前的土压力(即静止土压力)之间的差值,即土压力差,可以反映出施工过程中土压力的变化情况,有助于确定基坑围护结构的受力情况。本文基于光纤光栅土压力计的监测数据,研究了不同深度处土压力差随基坑开挖进度的变化规律。

测点处软土厚度为11.7 m,通过计算得出软土厚度比为0.33,大于0.24的临界厚度比,因此测点处的土压力数据对研究软土层厚度较大的工况具有一定的代表性。在基坑开挖一个月前,在地下连续墙外1.0 m处实施钻孔,并将光纤光栅土压力计固定于钢筋架上。由于测点距离地下连续墙较近,因此可以将监测点处土压力的变化视作地下连续墙处的变化。监测点TYL2-1~6对应的地下连续墙深度分别为5.0、10.0、15.0、20.0、25.0、30.0 m。由图12可知,TYL2-2~6号土压力差随着基坑的开挖呈总体增大趋势。这是由于基坑在开挖前土压力为静止土压力,随着基坑的开挖,地下连续墙产生水平位移,土压力逐渐由静止土压力状态向主动土

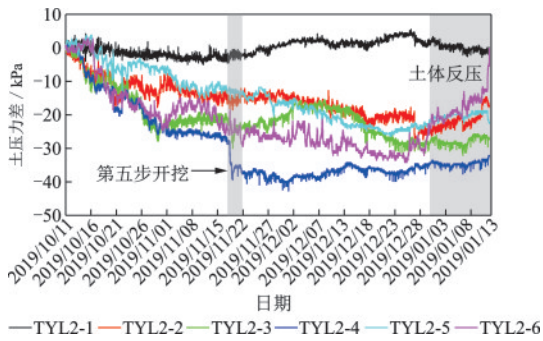


图12 土压力差与基坑开挖时间关系

Fig.12 Relationship between earth pressure difference and excavation time of foundation pit

压力状态转变,即随着基坑开挖土压力值呈逐渐减小趋势。在土压力监测点 TYL2-1 处,土压力差的变化相对较小,整个基坑开挖过程中土压力差值一直保持较小的变化。在2019年11月25日之前,土压力差值小于零。结合现场监测地下连续墙位移结果,可以发现这是由于在开挖过程中基坑上部土体的位移较小,土压力值小于初始的静止土压力值。而在11月25日之后,现场土压力值略大于初始土压力值,这是由于随着下部土体位移量增大,第一道内支撑发挥了显著的支撑作用,基坑上部的土体受到内支撑的挤压作用,产生了向基坑外部的挤压效应。此时土压力的变化呈现出由主动土压力状态向静止土压力状态过渡的趋势,土体受到挤压,进而向着被动土压力状态发展,导致该处的土压力值在后期略大于初始土压力值。

在2019年11月16日,施工现场进行了第五步开挖。根据土压力监测点 TYL2-4 的监测数据显示,在11月18日土压力差值显著增大。这是由于第五步开挖导致地下连续墙在开挖面附近产生了水平位移,同时基坑底部还未及时开始施工,导致基底反压还未形成,基坑底部产生了显著的隆起效应。综合分析土压力监测点 TYL2-4 位置处的土体,发现该处土体产生了较大的位移量,从而导致该部分的土压力值显著减小。此外,从图12可知该处土压力显著变化的滞后期约为2 d,而在11月18日后由于地下连续墙的支持作用,土压力值基本稳定。

土压力监测点 TYL2-2 和 TYL2-3 位于软土内,但由于第四道、第五道内支撑和地下连续墙发挥了显著的支护效果,因此这两个监测点在整个基坑开挖过程中,其土压力随着地下连续墙的水平位

移呈现小幅缓慢波动的趋势。

#### 4.2 开挖完成与施工后土压力变化分析

为了进一步研究基坑围护结构施工完成后土压力的变化情况,进行了基坑开挖完成与施工后土压力的变化分析。图13显示了基坑开挖完成后,地下连续墙水平位移和土压力差(土压力差均取绝对值)以及施工后40 d土压力差的关系。可看出土压力差与地下连续墙位移的变化趋势基本一致。在软土层内的土压力监测点 TYL2-3 位于基坑开挖面附近,由于第五道内支撑对土体的支护作用和底板对土体的反压作用,使得该处在开挖完成后的土压力差较小,但在施工后40 d,该处的土压力差显著增大,分析是由于该处位于第五道支撑和底板之间,软土的蠕变作用使得该处土体的变形增大,土压力由静止状态逐渐过渡到主动状态,进而导致土压力值减小。土压力监测点 TYL2-6 靠近地下连续墙底部,由于现场在基坑开挖完成后,为防止基坑的隆起,对基底实施了保护措施,所以在施工后40 d时底板的反压作用发挥了明显效果,土压力逐渐回到静止土压力状态,因此在40 d后土压力差较小。

土压力测点 TYL2-1 和 TYL2-2 处在基坑开挖结束与施工后40 d的土压力差值较为接近,基坑开挖完成至施工后40 d期间,上述两处地下连续墙位移量变化均较小,表明基坑支护措施对于基坑中上部分发挥了显著效果,对于施工后地下连续墙的变形亦有着较好的控制作用。TYL2-4 和 TYL2-5 处的土压力差较为接近,表明基坑开挖完成与施工后40 d,地下连续墙水平位移量变化较小,这是由于 TYL2-4 和 TYL2-5 两处的土压力测点均位于非软土地层内,地下连续墙和基底反压效果较好。因

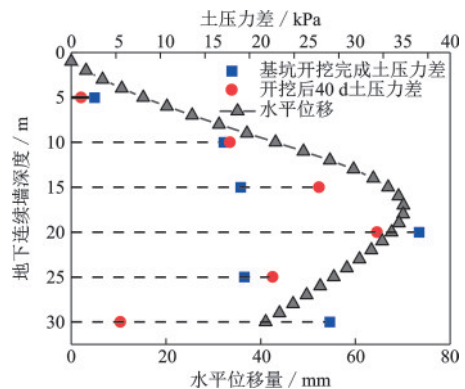


图13 土压力差与水平位移关系

Fig.13 Relationship between earth pressure difference and horizontal displacement

此,在软土地区进行地下连续墙的施工时,需要特别注意软土层附近、地下连续墙底部以及开挖面附近的监测和位移控制,以确保符合相关规范的要求,从而保障工程建设的安全。

## 5 结 论

本文以上海某软土深基坑为研究对象,开展了地下连续墙受力变形的数值分析研究,并结合光纤监测结果,分析了地下连续墙的受力变形规律。通过数值模拟的方法,本文进一步研究了不同软土厚度工况下地下连续墙的变形特征,并得出了表征基坑变形特征的参数 $D_w$ 、 $D_r$ 和 $\alpha_{cr}$ 。虽然基坑工况及土体参数不同,相关的量化结论如 $D_w$ 、 $D_r$ 和 $\alpha_{cr}$ 可能会不同,但本文的研究方法和变化规律具有普适性。得出如下结论:

(1) 地下连续墙水平位移随软土厚度的变化呈“凸肚”状。根据水平位移的变化量与地下连续墙深度关系,可将其划分为相对稳定区、线性增长区、最大变形区和线性下降区。

(2) 利用墙体位移梯度 $D_w$ 和软土位移梯度 $D_r$ 等指标,标定出临界厚度比 $\alpha_{cr}$ 为0.24,并探究了不同软土厚度条件下这些参数的经验型关系。

(3) 通过土压力与水平位移监测数据的分析,得出基坑开挖完成后,土压力在开挖面附近变化显著,滞后期约为2 d。在软土地区基坑工程施工时,应加强对软土层、地下连续墙底部以及开挖面附近的监测与变形控制。

### 参考文献:

[1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
Liu G B, Wang W D. Foundation Pit engineering manual [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2009. (in Chinese)

[2] 郑刚,朱合华,刘新荣,等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 1-24.  
Zheng G, Zhu H H, Liu X R, et al. Control of safety of deep excavations and underground engineering and its impact on surrounding environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(6): 1-24. (in Chinese)

[3] 朱鸿鹄,叶肖伟,冉龙. 基于现场实测数据的深基坑工程可靠度研究[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(9):

7-11.

Zhu H H, Ye X W, Ran L. Reliability analysis of deep excavation based on field monitoring data[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 28(9): 7-11. (in Chinese)

- [4] Guo P, Gong X, Wang Y. Displacement and force analyses of braced structure of deep excavation considering unsymmetrical surcharge effect[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 113(9): 103102.
- [5] 曹净,钱国伟,杨泽帅,等. 基于等效桁架模型的基坑双排桩结构计算模型研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(6): 943-949.  
Cao J, Qian G W, Yang Z S, et al. Study on calculation model of double-row piles retaining wall based on equivalent truss model[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering 2018, 38(6): 943-949. (in Chinese)
- [6] 应宏伟,李涛,杨永文,等. 深基坑隔断墙保护邻近建筑物的效果与工程应用分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1123-1128.  
Ying H W, Li T, Yang Y W, et al. Effect and application of partition walls in protecting adjacent buildings from deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(7): 1123-1128. (in Chinese)
- [7] 李钊,刘庭金. 深厚砂层下深基坑施工的实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(增1): 1688-1693.  
Li Z, Liu T J. Measurement analysis on construction of deep foundation pit in deep thick sand layer[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(Sup1): 1688-1693. (in Chinese)
- [8] Tan Y, Lu Y. Responses of shallowly buried pipelines to adjacent deep excavations in Shanghai soft ground [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2018, 9(2): 05018002.
- [9] 尚国文,李飒,翟超,等. 基坑开挖与邻近地铁结构变形相关性的实测分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(1): 107-115.  
Shang G W, Li S, Zhe C, et al. Monitoring data analysis on deformation correlation between foundation pit and adjacent metro structure[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(1): 107-115. (in Chinese)
- [10] 徐中华,王建华,王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 81-86.  
Xu Z H, Wang J H, Wang W D. Deformation behavior of diaphragm walls in deep excavations in Shanghai[J].

- China Civil Engineering Journal, 2008, 41(8): 81-86. (in Chinese)
- [11] Tan Y, Wang D L. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay. I: Bottom-up construction of the central cylindrical shaft[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(11): 1875-1893.
- [12] Tan Y, Wang D L. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay. II: Top-down construction of the peripheral rectangular pit [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(11): 1894-1910.
- [13] 丁勇春, 程泽坤, 王建华, 等. 临江基坑变形及受力性状三维数值分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增1): 243-247.
- Ding Y C, Cheng Z K, Wang J H, et al. Three-dimensional numerical analysis of deformation and mechanical behavior of deep excavations adjacent to river[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(Sup1): 243-247. (in Chinese)
- [14] 王建华, 徐中华, 陈锦剑, 等. 上海软土地区深基坑连续墙的变形特性浅析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 485-489.
- Wang J H, Xu Z H, Chen J J, et al. Deformation properties of diaphragm wall due to deep excavation in Shanghai soft soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 485-489. (in Chinese)
- [15] 武朝军, 陈锦剑, 叶冠林, 等. 苏州地铁车站基坑变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增1): 458-462.
- Wu C J, Chen J J, Ye G L, et al. Deformation characteristics of foundation pits of subway stations in Suzhou [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Sup1): 458-462. (in Chinese)
- [16] Ou Y, Hsieh P G, Chiou D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(5): 758-767.
- [17] 罗耀武, 凌道盛, 陈云敏, 等. 环形超深基坑围护结构受力变形特性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 617-622.
- Luo Y W, Ling D S, Chen Y M, et al. Mechanical and deformation characteristics of enclosure structure for annular extra-deep excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 617-622. (in Chinese)
- [18] 谢百钧, 简绍琦, 欧章煜. 黏土层中深基坑挡土墙最大变形量简易评估法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2285-2290.
- Xie B G, Jian S Q, Ou Z Y, A simplified evaluation method for maximum wall deflection induced by deep excavation in clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2285-2290. (in Chinese)
- [19] 丁智, 王达, 王金艳, 等. 浙江地区软弱土深基坑变形特点及预测分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增1): 506-512.
- Ding Z, Wang D, Wang J Y, et al. Deformation characteristics of Zhejiang soft soil deep foundation pits and their predictive analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup1): 506-512. (in Chinese)
- [20] 应宏伟, 王小刚, 郭跃, 等. 逆作法基坑支护结构三维  $m$  法及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增1): 37-40.
- Ying H W, Wang X G, Guo Y, et al. Three-dimensional  $m$  method for retaining structures and its application for top-down construction of excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup1): 37-40. (in Chinese)
- [21] 俞缙, 陈国平, 姜天鹤, 等. 支腿式地下连续墙支护结构现场监测分析研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增1): 447-451.
- Yu J, Chen G P, Jiang T H, et al. Field monitoring results of support structure of outrigger-type diaphragm wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Sup1): 447-451. (in Chinese)
- [22] 朱鸿鹄, 施斌, 严珺凡, 等. 基于分布式光纤应变感测的边坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 821-828.
- Zhu H H, Shi B, Yan J F, et al. Physical model testing of slope stability based on distributed fiber-optic strain sensing technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 821-828. (in Chinese)
- [23] 朱鸿鹄, 殷建华, 靳伟, 等. 基于光纤光栅传感技术的地基基础健康监测研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 109-115.
- Zhu H H, Yin J H, Jin W, et al. Health monitoring of foundations using fiber Bragg grating sensing technology [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6): 109-115. (in Chinese)
- [24] 朱鸿鹄. 工程地质界面: 从多元表征到演化机理[J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 1-19.
- Zhu H H. Engineering geological interface: From multivariate characterization to evolution mechanism[J]. Bulletin

- letin of Geological Science and Technology, 2023, 42 (1): 1-19. (in Chinese)
- [25] 董鹏, 夏开文, 于长一, 等. 浅埋隧道覆岩变形沉降的分布式光纤监测与分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(5): 724-732.  
Dong P, Xiao K W, Yu C Y, et al. Monitoring and analysis of stratum deformation and subsidence overlying a shallow tunnel using distributed optical fiber sensing technology [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39 (5) : 724-732. (in Chinese)
- [26] 王静, 肖涛, 朱鸿鹄, 等. 透水管桩现场试验光纤监测与承载性能研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(7): 1961-1970.  
Wang J, Xiao T, Zhu H H, et al. Study on bearing capacity of permeable pipe pile by field optical fiber monitoring [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42 (7) : 1961-1970. (in Chinese)
- [27] Han H M, Shi B, Zhang L, et al. Deep displacement monitoring and foundation base boundary reconstruction analysis of diaphragm wall based on ultra-weak FBG [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 117: 104158.
- [28] Ye X, Zhu H H, Wang J, et al. Subsurface multi-physical monitoring of a reservoir landslide with the fiber-optic nerve system [J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49: e2022GL098211.
- [29] 刘小丽, 马悦, 郭冠群, 等. PLAXIS 2D 模拟计算基坑开挖工程的适用性分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(4): 19-25.  
Liu X L, Ma Y, Guo G Q, et al. Applicability analysis of PLAXIS 2D simulation calculation for foundation pit excavation engineering[J]. Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2012, 42(4): 19-25. (in Chinese)
- [30] 张如林, 徐奴文. 基于 PLAXIS 的深基坑支护设计的数值模拟[J]. 结构工程师, 2010, 26(2): 131-136.  
Zhang R L, Xu N W. Numerical simulation of timbering design of deep foundation pits based on PLAXIS [J]. Structural Engineers, 2010, 26 (2) : 131-136. (in Chinese)
- [31] 朱瑶宏, 叶俊能, 刘晓虎, 等. 宁波轨道交通地下连续墙深基坑工程变形特性及控制研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(4): 66-73.  
Zhu Y H, Ye J N, Liu X H, et al. Study on deformation characteristics and control of deep foundation pit of underground diaphragm wall in Ningbo Rail Transit[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39 (4) : 66-73. (in Chinese)
- [32] Yoo C. Behavior of braced and anchored walls in soils overlying rock[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(3): 225-233.
- [33] Long M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 2001, 127(3): 203-224.
- [34] 周学明, 袁良英, 蔡坚强, 等. 上海地区软土分布特征及软土地基变形实例浅析[J]. 上海地质, 2005, 26 (4): 6-9.  
Zhou X M, Yuan L Y, Cai J Q, et al. Distribution characteristics of soft soil and deformation examples of soft soil foundation in Shanghai[J]. Shanghai Geology, 2005, 26(4): 6-9. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)