

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.076



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



软土深基坑分区开挖变形规律

陈南桥¹, 王雪鹏², 林刚¹, 徐长节^{2,3}, 熊毅², 曹化锦⁴

(1. 浙江省地矿建设有限公司, 杭州 310053; 2. 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室(华东交通大学), 南昌 330013; 3. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058; 4. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430061)

摘要:以杭州新世界望江新城4号深基坑工程为例,全面监测基坑的分区开挖过程。通过对地连墙变形、土体侧移、墙顶沉降以及坑外土体沉降等监测数据的深入分析,结合PLAXIS 3D有限元软件建立基坑分区开挖数值模型,对比数值模拟结果与实际监测数据,验证模型的准确性,同时补充监测数据的不足。结果表明,在基坑开挖过程中,地连墙变形呈现出典型的抛物线变化规律,且在坑后施工阶段出现向坑内的推回位移;坑外土体的变形特征与地连墙相似,但变形幅度相对较小;随着基坑开挖的进行,坑外土体的沉降逐渐增大,受环境因素影响,其位移曲线与传统抛物线有一定差异;在基坑开挖及坑内主体结构施工过程中,墙顶沉降呈现出“先隆起后沉降”的明显趋势。

关键词:基坑;软土;分区开挖;现场监测;数值模拟

中图分类号: TU753.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)01-0089-11

Deformation characteristics of soft soil deep foundation pit partitioned excavation

CHEN Nanqiao¹, WANG Xuepeng², LIN Gang¹, XU Changjie^{2,3}, XIONG Yi², CAO Huajin⁴

(1. Zhejiang Geology and Mineral Construction Co., Ltd., Hangzhou 310053, P. R. China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering (East China Jiaotong University), Nanchang 330013, P. R. China; 3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China; 4. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430061, P. R. China)

Abstract: In this study, the deep foundation pit project of No.4 Wangjiang New City of Hangzhou New World is taken as a case study, and the zonal excavation process of the foundation pit is comprehensively monitored. Through the in-depth analysis of the monitoring data of the diaphragm wall deformation, soil inclinometer measurements, wall top settlement, and ground settlement outside the pit, and combined with the numerical

收稿日期: 2024-06-05

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3009400); 国家自然科学基金(52238009); 江西省自然科学基金(20223BBG71018)

作者简介: 陈南桥(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事工程施工管理研究, E-mail: 1279345755@qq.com.

徐长节(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xucj@zju.edu.cn.

Received: 2024-06-05

Foundation items: National Key R & D Program of China (No. 2023YFC3009400); National Natural Science Foundation of China (No. 52238009); The National Science Fund of Jiangxi Province (No. 20223BBG71018)

Author brief: CHEN Nanqiao (1980-), senior engineer, main research interest: engineering construction management, E-mail: 1279345755@qq.com.

XU Changjie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xucj@zju.edu.cn.

model of the foundation pit zonal excavation established by PLAXIS 3D, we compare the numerical simulation results with the actual monitoring data to validate the accuracy of the model and to supplement the insufficiency of the monitoring data. The results show that the deformation of the diaphragm wall during the excavation of the foundation pit presents a typical parabolic variation pattern, and a push-back displacement toward the pit occurs during the post-excavation construction stage. The deformation characteristics of the soil outside the pit are similar to those of the diaphragm wall, but its deformation magnitude is relatively small. With the progress of foundation pit excavation, the ground settlement outside the pit increases gradually, and its displacement curve deviates from the traditional parabolic variation pattern due to the influence of environmental factors. In addition, the wall top settlement shows a clear trend of “first heave and then settle” during the foundation pit excavation and the construction of the main structure inside the pit.

Keywords: foundation pit; soft soil; zonal excavation; field monitoring; numerical simulation

随着城市化进程的不断深入,高层建筑和地铁等基础设施的建设需求日益增长,基坑开挖的规模也随之越来越大^[1-2]。基坑工程作为这些工程的基础,不仅需要考虑工程本身的结构安全,还要兼顾对周边环境的影响,尤其是在城市中心区域,基坑工程往往面临复杂地质条件和周边环境的多重约束。Tan等^[3]指出,在相同的开挖深度下,基坑面积越大,开挖引起的变形也越大。这种变形可能对周边的建筑物、地下管线、交通主干道以及地铁线路等造成影响,进一步增加工程的复杂性和风险。

开挖引起基坑变形是常见的工程问题,特别是软土地区,软土土质松软,土体强度及刚度较小,可提供的水平抗力与抵抗变形能力均较小,导致软土基坑的围护结构及周边土体变形往往较大,使得基坑周边环境设施面临严峻考验^[4]。针对这一问题,许多学者开展了研究:对一些小型基坑,往往通过注浆、三轴搅拌桩等土体加固方式改良基坑周边土体的性质,提高土体抗剪强度、降低土的压缩性,从而减小基坑开挖产生的变形^[5-8]。熊伟等^[9]和寿旋等^[10]对基坑被动区土体加固区的深度、宽度展开了研究,结果表明,随着基坑加固深度和宽度的增加,基坑各项变形指标均显著降低,但当达到某一特定值后,变化就不显著了。有效加固深度和宽度的推荐范围分别为基坑高度的40%~60%以及60%~100%。王洪木等^[11]研究发现,对坑底注浆加固后,桩顶水平位移、坑后地表最大沉降及桩身最大弯矩均显著减小。但一些大型基坑开挖时,由于基坑开挖面积过大,大面积土体应力释放,导致在相同深度下基坑变形更大。Tan等^[12-13]对上海地区多个大型基坑实测数据进行整理发现,当基坑的平面尺寸在30 000~50 000 m²时,其围护结构的最大侧向变形是面积小于6 000 m²基坑的3~5倍,变形对周边环境的影响也更加明显。在大规模开挖下,注浆及土体加固措施对基坑变形的控制效果微乎其微,

为此,有学者提出将大基坑分成若干小型基坑,可有效减小基坑变形^[14-15]。曾超峰等^[16-17]以天津某地铁基坑开挖前的抽水试验为背景,采用有限元软件分析了基坑内部有无隔墙对基坑变形的影响,发现地连墙设有隔墙的部位位移显著减小,地连墙整体变形也显著减小。Ou等^[18-20]通过三维数值计算分析了分隔墙间距、坑底以上分隔墙高度、分隔墙插入深度、坑角效应、基坑宽度对基坑围护墙水平位移的影响。

已有研究多聚焦于基坑整体开挖或分隔墙开挖模式,但针对软土地区复杂环境下大面积基坑分区开挖且预留土体作为分隔带的变形研究较少,且现有研究多基于数值模拟,缺乏实测数据支撑。笔者以杭州市新世界望江新城4号分隔型深基坑为背景,通过现场监测及数值模拟对基坑变形特性进行系统分析,以明确分区基坑间的相互影响。

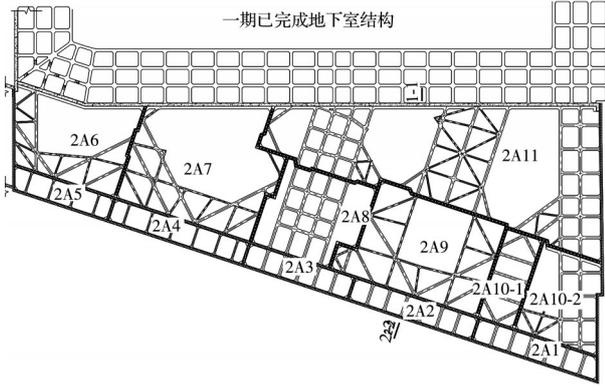
1 工程背景

1.1 项目简介

拟建项目位于杭州市上城区望江新城核心区域内,集商业、办公、酒店、住宅于一体,共7个地块,分两期施工。项目红线总占地面积127 748 m²,设地下室1~3层。其中5~7号地块为一期工程,1~4号地块为二期工程。本工程为二期4号地块基坑围护设计,二期项目整体设置1~3层地下室,基坑面积约40 000 m²,基坑周长约800 m;1层地下室区域普遍开挖深度约12.5 m,2层地下室开挖深度约16.5 m,3层地下室区域基坑普遍开挖深度约17.5 m,如图1所示。

1.2 工程及水文地质条件

根据地勘报告,场地深度范围内的岩土层可划分为10个工程地质层,从上至下分别为(1)杂填土、(2)砂质粉土、(3)粉砂、(5-1)粉砂夹砂质粉土、(5-



(a) 基坑示意图



(b) 现场航拍图

图 1 基坑平面图

Fig.1 Foundation pit plan

11)黏质粉土、(5-2)砂质粉土、(6)淤泥质粉质黏土夹粉土、(7)粉质黏土、(8)粉质黏土、(9-1)粉质黏土夹粉砂、(9-2)细砂、(9-3)圆砾、(9-4)卵石、(11b)强风化凝灰岩、(11c)中等风化凝灰岩。各土层物理力学参数详见表 1。

项目基坑开挖范围内的地基土主要为填土、砂

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

编号	土层名称	层厚/ m	γ / (kN/m ³)	c / kPa	φ / (°)	E / MPa
(1)	杂填土	3.4	17.5	8.0	10.0	4.0
(2)	砂质粉土	1.9	18.9	6.3	32.6	8.0
(3)	粉砂	5.7	19.5	3.7	36.6	14.0
(5-1)	粉砂夹砂质粉土	4.0	19.1	4.8	34.6	12.0
(5-11)	黏质粉土	1.3	18.7	9.1	27.4	6.0
(5-2)	砂质粉土	4.1	19.0	5.7	33.7	10.0
(6)	淤泥质粉质黏土 夹粉土	3.4	17.6	15.0	12.9	3.0
(7)	粉质黏土	4.8	18.9	39.7	18.9	8.5
(8)	粉质黏土	2.3	18.3	28.4	15.8	5.0
(9-1)	粉质黏土夹粉砂	3.3	19.3	30.0	21.9	11.5
(9-2)	细砂	3.3	20.1	2.3	40.0	18.0
(9-3)	圆砾	6.7	20.0	3.0	40.0	30.0
(9-4)	卵石	7.7	20.0	3.0	42.0	35.0
(11b)	强风化凝灰岩	1.1	22.0	35.0	25.0	38.0
(11c)	中等风化凝灰岩		24.0	200.0	32.0	50.0

质粉土、粉砂、砂质粉土夹粉砂、黏质粉土等。土体渗透性较高,基坑渗漏水风险较大。拟建场地根据勘探点揭露,基坑主要分布 3 层地下水,分别为潜水、承压水和基岩裂隙水。潜水埋藏较浅,埋深为 1.17~3.10 m。承压水主要位于下部砂层(9-2)中。基岩裂隙水主要赋存于下部风化基岩裂隙中。

1.3 基坑围护结构及施工顺序

4 号基坑南侧地下 2 层基坑围护形式采用 800 mm 地连墙,埋深 34 m;外侧采用 700 mm TRD 工法作为槽壁加固兼止水帷幕,内侧采用 850 mm 三轴水泥搅拌桩进行槽壁加固;中间采用埋深 33 m、直径 1 000 mm 的钻孔桩作为分隔桩。同时在地连墙交界处及地连墙和钻孔桩交界处采用 MJS 工法桩进行止水加强。地铁控制保护区范围外采用 3 道混凝土支撑,地铁控制保护区范围内采用 1 道钢筋混凝土支撑+3 道伺服钢支撑。基坑剖面图如图 2 所示。

表 2 支护结构参数

Table 2 Support structures parameters

支护结构	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	尺寸/mm
地连墙	31.5	0.2	800 mm / 1 000 mm
钻孔灌注桩	31.5	0.2	1 000 mm
钢筋混凝土支撑	31.5	0.2	800 mm × 800 mm
型钢组合支撑	205.0	0.3	H400 mm × 400 mm × 13 mm × 21 mm

项目邻近地铁的 4 号地块基坑设置了分坑,并实行分区开挖施工,主要施工顺序为:2A11→2A2、2A4、2A10-1→2A1、2A5、2A7、2A9→2A6、2A8、2A10-2→2A3。基坑主要施工节点见表 3。

2 现场监测及分析

2.1 监测方案

为确保基坑施工过程中基坑、周边建筑物及地下管线的安全,并对基坑施工进行指导,对地下连续墙、深层土体位移、地表沉降、周边建筑物、地下管线、支撑轴力、立柱等对象进行实时监测,监测点位布置见图 3。

2.2 监测结果

2.2.1 地连墙水平位移

图 4 为 2A2 号坑和 2A4 号坑地块施工过程中基坑围护结构侧向位移变化曲线。由图 4 可知:在初始阶段,基坑开挖较浅,地连墙呈悬臂式变形,顶部位移最大;而随着开挖深度的增加,地连墙位移的变形形态逐渐由“悬臂式”转变为“鼓肚形”分布^[21]。这是由于基坑开挖初期顶部钢筋混凝土支撑还未完全发挥作用,地连墙顶部位移逐渐增大,故变形

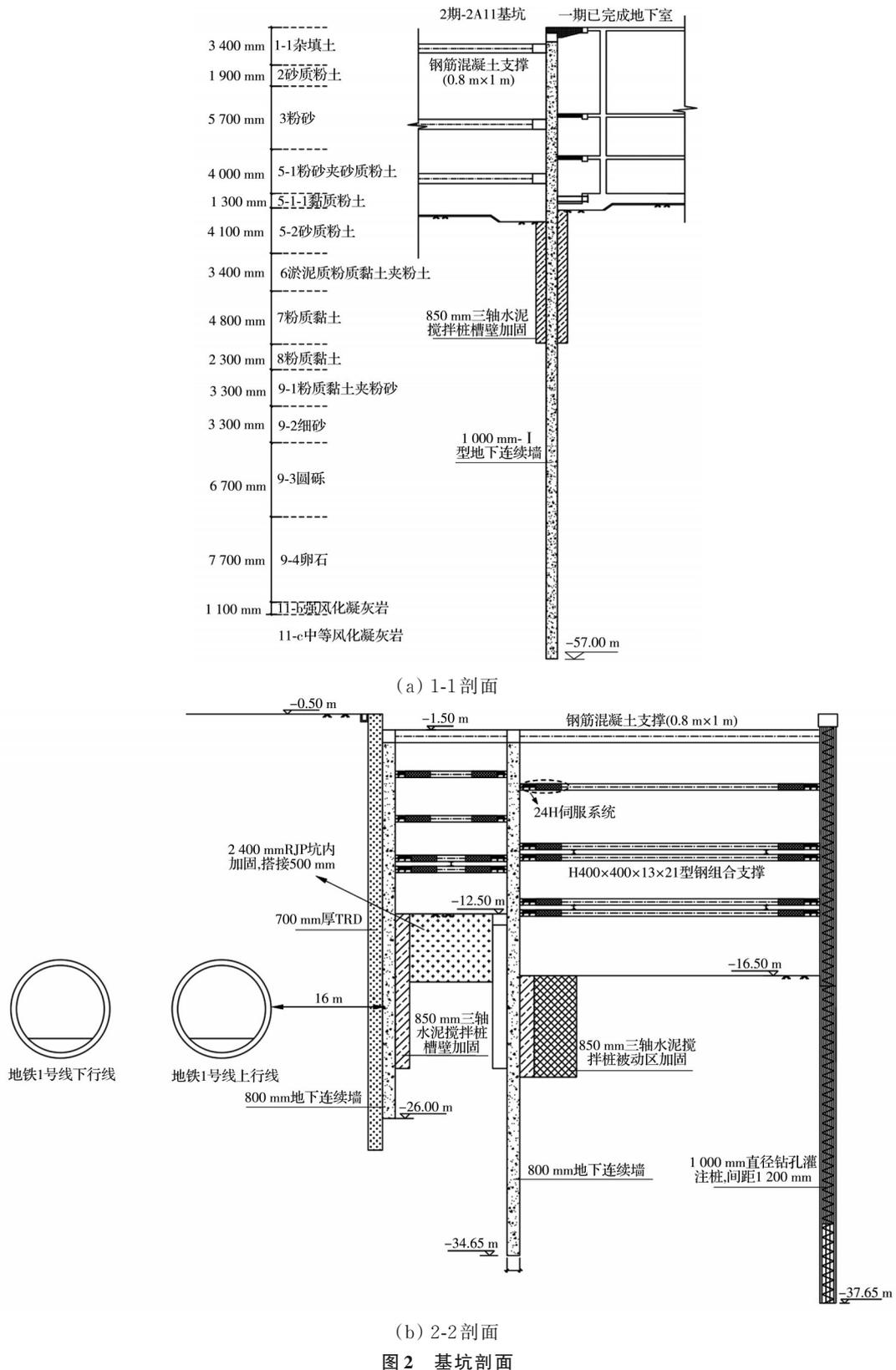


Fig. 2 Sections of foundation pit

为“悬臂式”；而随着施工周期的推进及挖深的增加，混凝土支撑逐渐发挥作用，地连墙顶部位移被限制，变形形态转变为“鼓肚形”。随着基坑开挖深度的增加，地连墙最大侧移也均表现出不断增大的趋势，且最大侧移出现位置也随挖深逐渐向下发展。其中 ZQT/C/S34 处最大侧移为 12.0 mm，出现在

埋深 15 m 处；但 ZQT/C/S35 处最大位移为 9.4 mm，出现在埋深 7.5 m 处。这是由于 2A4 区基坑施工之前 ZQT/C/S35 处地连墙内部下侧的测斜管出现损坏，导致 ZQT/C/S34 和 ZQT/C/S35 处监测位移及最大位移出现位置均存在较大偏差。

值约 $0.056\%H$, 显著低于徐中华等^[22]和万星等^[23]得出的墙体最大侧移量平均值。这是由于该工程采用分区开挖施工, 在基坑内部设置了许多内隔墙, 将大面积基坑分成若干小基坑; 根据 Tan 等^[3]的研究, 基坑面积越小, 引起的变形也越小, 且内隔墙处的坑角效应能限制地连墙变形。

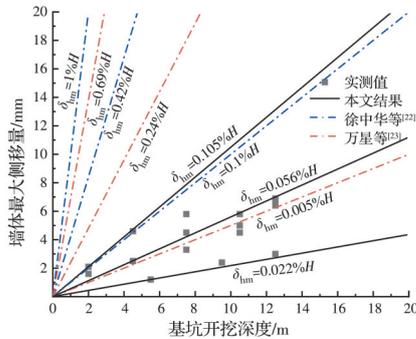
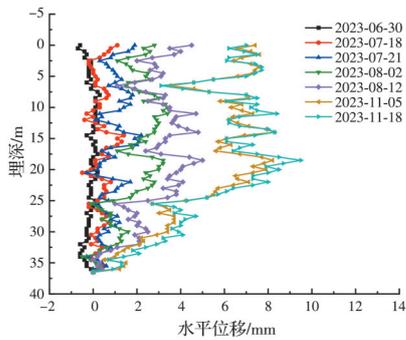


图 5 墙体最大侧移与开挖深度关系

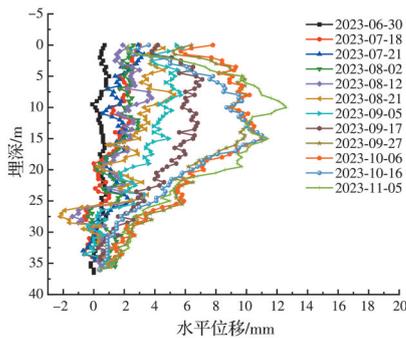
Fig. 5 Maximum lateral movement of walls versus depth of excavation

2.2.3 深层土体水平位移

图 6 为 2A2 和 2A4 号基坑施工过程中坑外深层土体水平位移曲线。由图 6 可知, CX27 号监测点位深层土体水平位移主要呈“悬臂式”变形^[24], 顶部位移最大。2A2 基坑施工完成后, CX27 测点最大位移约 8 mm, 对比上述 ZQT/S/C34 测点地连墙在相同时间的变形, 坑外土体水平位移值相对较小。而



(a) CX27 号监测点位土体水平位移



(b) CX28 号监测点位土体水平位移

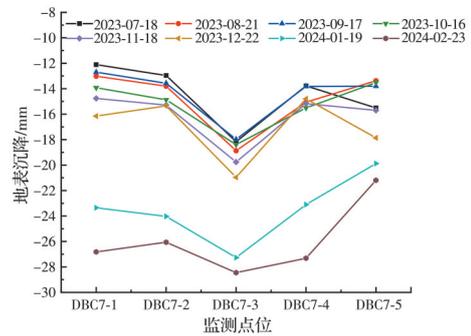
图 6 土体水平位移变化曲线

Fig. 6 Horizontal displacement variation curves of soil

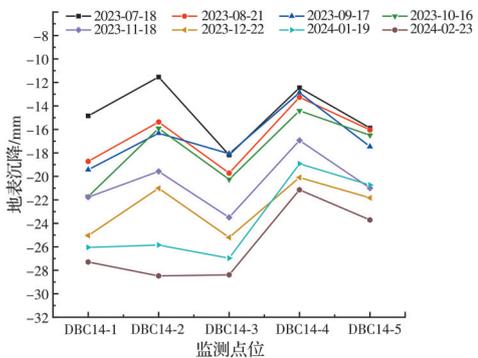
CX28 号测点深层土体水平位移在 2A4 号基坑开挖过程中主要呈“悬臂式”变形, 后期逐渐发展为“抛物线形”变形, 土体水平位移最大值约 13 mm; 与上述 ZQT/C/S35 测点地连墙在相同时间的变形相比, 土体水平位移反而更大。由此可见, ZQT/S/C35 地连墙实际水平位移要大于监测数据, 而设备损坏是导致监测数据小于实际位移的主要原因。

2.2.4 坑外地表沉降

基坑开挖会对周边环境土体造成扰动, 故对基坑开挖过程中周围土体的地表沉降进行实时监测。图 7 为监测点位 DBC7-1~5 和 DBC14-1~5 随 2A4、2A2 号基坑开挖过程的沉降变化情况。由图 7 可知: DBC7 和 DBC14 处的地表沉降值随基坑开挖逐渐增大, 最大沉降值均在 28 mm 左右, 但沉降量的增长趋势存在差异, 如 DBC7 处在 12 月 22 日前沉降量缓慢增长, 12 月 22 日后出现突变; 且两处变化曲线与传统的“对勾形”地表沉降不同^[25], 这是由于基坑南侧存在大片厂房区域(见图 1(b)), 厂房施工作业情况不同, 且存在车辆进出等不确定因素; 同时基坑施工过程中, 坑边渣土车、材料运输车辆等的



(a) DBC7 监测点处地表沉降



(b) DBC14 监测点处地表沉降

图 7 坑外地表沉降变化曲线

Fig. 7 Surface settlement variation curves outside pits

作业扰动, 导致了上述现象。其中 DBC7 处地表沉降值随着与基坑距离的增加呈先增大后减小的趋势, 而 DBC14 处地表沉降值随着与基坑距离的增加

呈减小-增大-减小-增大的趋势,与以往研究中“凹槽形”坑外地表沉降不同,可能是由于以往研究多未考虑坑外荷载或仅考虑恒载,而本工程中车辆的动载作用导致了该差异。由此可见,实际工程存在显著的不确定性。

图 8 为 DBC4-1、DBC7-1、DBC10-1、DBC14-1 和 DBC16-1 处地表沉降随时间的变化情况。由图 8 可知,各个监测点位的地表沉降值随时间存在一定波动,但整体呈逐渐增大趋势;各个监测点位的沉降并非从 0 开始,这是由于 2023 年 6 月 18 日之前 1~3 期基坑和 2A11 号区域已开展开挖作业,对该区域沉降产生了影响,各点的沉降量差约 5.45、15.93、16.33、12.89、7.93 mm,远小于施工预警值 35 mm。由此可知,在分区开挖方案下,基坑周边地表沉降得到了有效控制。

2.2.5 墙顶沉降

选取围护墙墙顶监测点位 ZQC3、ZQC5、ZQC34

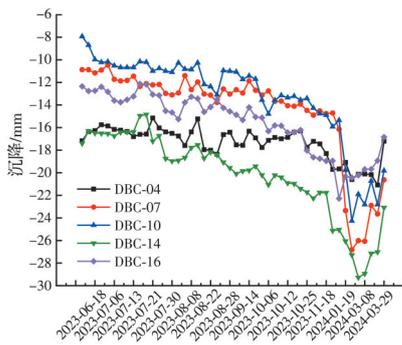


图 8 地表沉降时程曲线

Fig. 8 Time history curves of surface settlement

和 ZQC35,分析其竖向位移随基坑开挖的变化曲线,如图 9 所示。

由图 9 可知:各监测点位地连墙的竖向位移均存在一定波动,但变化趋势大致相同,整体呈现从平稳到先增大后减小的变化特征。这是由于基坑开挖是一个应力释放的过程,随着基坑的开挖,基坑内侧土层压力减小,围护结构内外压力差逐渐增大,而随着应力释放,坑底发生隆起变形,从而带动周围墙体向上运动。基坑开挖初期,应力释放较小,坑底隆起变形较小,不足以带动墙体变形,所以出现前期平缓阶段,随着基坑开挖深度的增加,坑底隆起逐渐增大,从而使得墙体向上位移量逐渐增大。基坑开挖过程中,ZQC3、ZQC5、ZQC34 和 ZQC35 地连墙的最大竖向位移分别为 2.42、2.84、5.83、1.64 mm,远小于控制值 20 mm。其中监测点位 ZQC35 在基坑开挖过程中出现沉降现象,原因可能是实际施工中基坑周边作业车辆通行、堆载等因素产生的影响。

11 月 2 日后,墙顶竖向位移呈明显下降趋势,监测点位 ZQC3、ZQC5、ZQC34 和 ZQC35 的最大沉降值分别为 -8.05、-5.96、-6.00、-7.66 mm。其原因是:在基坑开挖过程中,上部土体被挖除,原有力学平衡遭到破坏,坑底土体产生卸荷回弹变形(即坑底隆起变形),从而带动围护结构隆起;基坑卸荷完成后,应力释放趋于稳定,在结构施工阶段,基坑地连墙在其自重作用下逐渐回落^[26-27]。

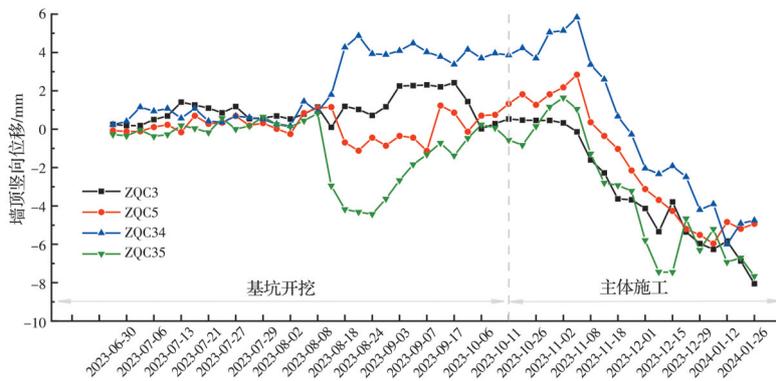


图 9 地连墙竖向位移随开挖时程变化曲线

Fig. 9 Time-history curves of vertical displacement of underground diaphragm walls during excavation

3 数值模拟及优化分析

3.1 有限元模型

采用有限元软件 PLAXIS 3D 建立基坑开挖三维数值计算模型,模型基坑长、宽分别为 200、86 m,其中 1、2、3 层地下室开挖深度分别为 12.5、16.5、

17.5 m。在进行数值建模时,为了消除边界效应,模型边界范围选择开挖深度的 3~5 倍,且边界到基坑底部的距离为最终开挖深度的 1~3 倍。因此,计算模型的三维尺寸为 350 m×200 m×70 m,由 200 755 个单元组成。在模型计算过程中,在模型周围设置

法向约束来限制模型的位移,在模型底部设置固定约束来限制模型的变形,模型顶部为自由面。

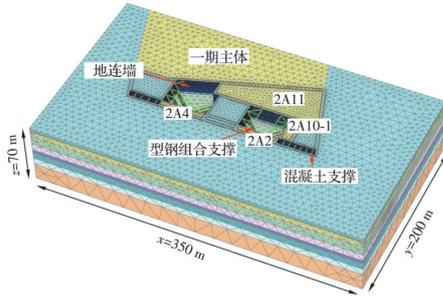


图 10 基坑有限元模型

Fig. 10 Finite element model of the foundation pit

3.2 土体与结构模型

与其他土体本构模型相比,小应变刚度(HSS)硬化土模型能更好地反映开挖工程的力学变形特征^[28-29]。因此,采用Benz等^[30]开发的HSS模型进行有限元模拟,模型参数取值参照文献^[31-32],见表1。数值模型中,地连墙采用线弹性板单元模拟;排桩支护则基于刚度等效原则,同样采用板单元模拟;钢筋混凝土支撑和型钢组合支撑均采用锚杆单元模拟,支撑参数见表2。其中,通过对钢支撑施加预加轴力,以模拟伺服控制效果。

由于实际工程中采用的是分区开挖方式,且现场施工情况较复杂,无法完全复现,故对施工步骤做了相应简化,具体流程见表4。对于实际工程中基坑开挖完成后主体结构施工至±0.00 m的工序,本次模拟也做了相应简化,采用“减重混凝土”方式进行模拟。减重混凝土采用线弹性实体单元,其刚度与混凝土结构相同,容重则根据实体占比进行消减。

3.3 数值与试验对比

3.3.1 土体位移

分析整理模型数据与CX27、CX28的实测数据,绘制不同开挖工况下的深层土体水平位移曲线,如图11所示。图11(a)为监测点位CX28数值模拟与实测结果对比,从图11(a)可知,在基坑开挖过程中,坑外深层土体位移整体呈现抛物线形变形模式,随着基坑开挖深度的增加,最大土体位移逐渐增大,且最大位移出现位置也逐渐向下;CX28测点在2A4号基坑开挖完成后最大位移为-6.74 mm,出现在埋深-15.6 m处。将工况25下的数值模拟与实测结果进行对比,从图11(a)可知,无论数值模拟还是现场监测,深层土体水平位移均呈抛物线形变化。在-15 m以下位置,深层土体水平位移的变形曲线及数值大小均吻合较好,而在-15 m以上位

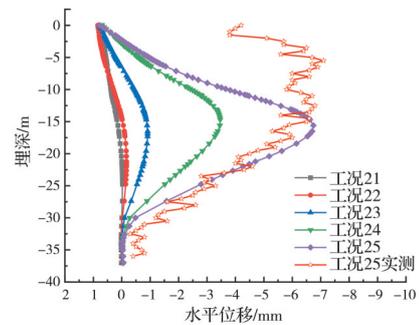
表 4 施工步骤

Table 4 Construction steps

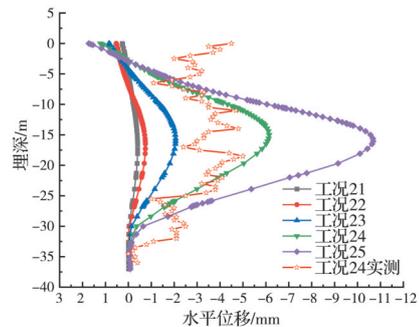
施工流程	状态
阶段1	初始应力平衡
阶段2	一期主体结构施工
阶段3	围护结构施工
阶段4~7(工况11~14)	2A11逐层开挖至坑底
阶段8	主体2A11施工至±0.00m
阶段9~13(工况21~25)	2A2、2A4、2A10-1逐层开挖至坑底
阶段14	主体2A2、2A4、2A10-1施工至±0.00 m
阶段15~19(工况31~35)	2A1、2A5、2A7、2A9逐层开挖至坑底
阶段20	主体2A1、2A5、2A7、2A9施工至±0.00 m
阶段21~25(工况41~45)	2A6、2A8、2A10-2逐层开挖至坑底
阶段26	主体2A6、2A8、2A10-2施工至±0.00 m
阶段27~30(工况51~54)	2A3逐层开挖至坑底
阶段31	主体2A3施工至±0.00 m

置数值模拟结果与实测结果差距较大。这是由于数值模拟是一个理想过程,做了大量假设,不能完全考虑场地地质条件的复杂性、基坑外荷载、天气温度等因素的影响;而上部差别较大的原因可能是基坑施工过程中坑边各种施工作业车辆等的影响,导致实测结果中上部变形较大。

土体位移的模拟结果较为理想,就二者变化趋



(a) CX28测点



(b) CX27测点

图 11 深层土体水平位移模拟与实测对比

Fig. 11 Comparison of simulated and measured horizontal displacement of deep soil

势而言,数值模拟可在一定程度上预估基坑开挖引发的整体位移,配合施工监测,可满足基坑施工的安全性和经济性要求。数值模拟中最大土体位移为 -6.74 mm ,而实测结果最大位移为 -7.1 mm ,二者仅相差 0.36 mm ,这也可证明三维有限元模型可用来模拟基坑开挖过程,弥补监测的不足。

3.3.2 地表沉降

提取地表沉降监测点 DBC-4、DBC-7、DBC-10、DBC-14 和 DBC-16 在相同时间节点沉降量的模拟值与监测值,如图 12 所示。从图 12 可知,数值模拟结果普遍小于实测结果,这是由于数值模型均为理想状态,对土层进行了简化,并未考虑基坑周围可能出现的临时堆载、车辆荷载等不确定因素;但除 DBC-7 处沉降结果相差较大外,其他监测点位的沉降结果偏差较小,这也说明模拟计算的各项参数选取较为合理。

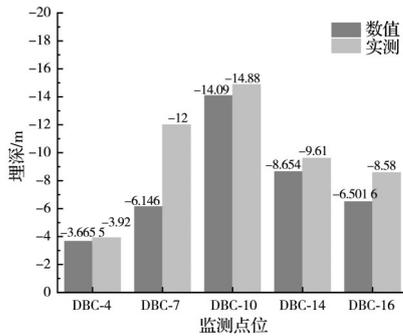


图 12 地表沉降模拟与实测对比

Fig. 12 Comparison of simulated and measured surface settlement

3.3.3 地连墙位移

提取数值模型中 ZQT/C/S35 测点处地连墙的水平位移,如图 13 所示。从图 13 可知,地连墙位移沿深度呈“抛物线形”变化趋势,变形量随开挖深度逐渐增大,且最大位移出现位置也随开挖深度的增加逐渐向下。在 2A4 号坑开挖完成后,最大位移为 -7.5 mm ,出现在埋深 -16.5 m 的位置;且在 2A7

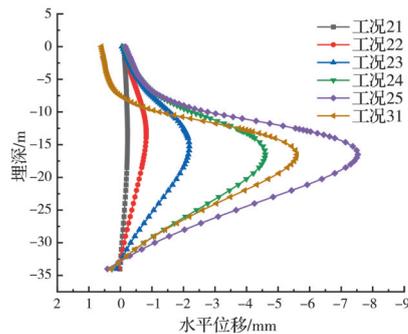


图 13 ZQT/C/S35 测点处地连墙水平位移数值模拟结果

Fig. 13 Numerical simulation results of horizontal displacement of diaphragm wall at ZQT/C/S35 test point

号基坑开挖后,该处地连墙出现了推回位移,这与 ZQT/C/S34 处地连墙变形趋势类似,该结果可弥补监测点位 ZQT/C/S35 损坏的不足。

4 结论

以杭州新世界望江新城 4 号深基坑为工程背景,通过现场监测及数值模拟分析了软土深基坑分区开挖的基坑变形特性,结论如下:

1) 跳挖施工过程中,部分地连墙位移会出现推回现象,位移呈先增大后减小的变化趋势,需合理设计地连墙结构。

2) 基坑施工过程中,地连墙顶部沉降呈先上升后下降的变化趋势。

3) 软土基坑采用分区开挖的方式能有效控制基坑周边土体位移及地表沉降,其变形量远小于预警值。

4) 由于工程的不确定性,有些部位无法实时监测,可通过数值模拟予以弥补。

参考文献

- [1] 郑俊杰, 乔雅晴, 章荣军. 被动加固区参数变异性对软土深基坑变形行为的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6): 1-8.
ZHENG J J, QIAO Y Q, ZHANG R J. Effect of spatial variability of engineering properties on holistic performance of passive zone improvement for deep excavation in soft soil [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 1-8. (in Chinese)
- [2] 李琳, 李彬, 刘东, 等. 深厚软土区深大异形基坑开挖对临近建构筑物的影响[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 140-145.
LI L, LI B, LIU D, et al. Influence of the excavation of large irregular deep foundation pit on adjacent buildings in soft soil area [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(1): 140-145. (in Chinese)
- [3] TAN Y, FAN D D, LU Y. Statistical analyses on a database of deep excavations in Shanghai soft clays in China from 1995 - 2018 [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2022, 27(1): 04021067.
- [4] 陈凌铜, 朱丹, 杨超, 等. 隔水帷幕对深基坑降水开挖变形控制的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(4): 24-32.
CHEN L T, ZHU D, YANG C, et al. Influence of waterproof curtain on deformation control of deep foundation pit dewatering and excavation [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(4): 24-32. (in Chinese)
- [5] 贺建清, 王朦, 陈立国, 等. 有机质对软土次固结特性的影响机制研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(2):

- 366-373.
HE J Q, WANG M, CHEN L G, et al. Influence mechanism of organic matter on secondary consolidation characteristics of soft soil [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(2): 366-373. (in Chinese)
- [6] 秦爱芳, 李永圃, 陈有亮. 上海地区基坑工程中的土体注浆加固研究[J]. *土木工程学报*, 2000, 33(1): 69-72, 82.
QIN A F, LI Y P, CHEN Y L. Study on stabilizing grout of excavation pits in Shanghai district [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(1): 69-72, 82. (in Chinese)
- [7] 濮居一, 刘波. 软弱地层中基坑土体加固对下卧地铁隧道变形及开挖影响区的控制效果[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(增刊2): 146-149.
PU J Y, LIU B. Control effect of foundation pit soil reinforcement on deformation and excavation influence area of underlying subway tunnel in soft stratum [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(Sup 2): 146-149. (in Chinese)
- [8] 夏梦然. 深基坑基底注浆加固效果数值模拟分析[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(1): 64-69.
XIA M R. Numerical simulation analysis of jet grouting effect of deep excavation bottom [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(1): 64-69. (in Chinese)
- [9] 熊伟, 邓建林, 钟庆华, 等. 基坑底部土体裙边加固模型试验与数值模拟研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(5): 9-17.
XIONG W, DENG J L, ZHONG Q H, et al. A model test and numerical study of skirt border reinforcement in the bottom of the excavation [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(5): 9-17. (in Chinese)
- [10] 寿旋, 徐肖华, 孙苗苗, 等. 软土地区深基坑被动土体加固高度改进研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(增刊1): 104-108.
SHOU X, XU X H, SUN M M, et al. Study on improvement of passive soil reinforcement height of deep foundation pit in soft soil area [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(Sup 1): 104-108. (in Chinese)
- [11] 王洪木, 陈金锋, 刘佳, 等. 反压土及注浆对重庆深基坑的影响研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(增刊1): 472-479.
WANG H M, CHEN J F, LIU J, et al. Research on the influence of earth berm and grouting on deep foundation pit in Chongqing [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(Sup 1): 472-479. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] ZHOU N, YANG J H. Spatial effect analysis of a long strip pit partition wall and its influence on adjacent pile foundations [J]. *Sustainability*, 2023, 15(13): 10409.
- [15] FENG C L, ZHANG D L, WANG H L, et al. Study on the mechanism and effect of a partition wall controlling foundation pit deformation in the soft-soil area [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022(1): 3608423.
- [16] 曾超峰, 廖欢, 李森坤, 等. 内隔墙长度对抽水引发基坑围挡侧移的影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2021, 55(12): 2252-2259.
ZENG C F, LIAO H, LI M K, et al. Effect of buttress wall length on retaining wall deflection induced by dewatering [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021, 55(12): 2252-2259. (in Chinese)
- [17] 曾超峰, 王硕, 宋伟伟, 等. 内隔墙对开挖前抽水引发软土区地铁深基坑变形的控制效果[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(6): 1277-1286.
ZENG C F, WANG S, SONG W W, et al. Control effect of cross walls on metro foundation pit deformation induced by pre-excavation dewatering in soft soils [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(6): 1277-1286. (in Chinese)
- [18] OU C Y, HSIEH P G, LIN Y L. Performance of excavations with cross walls [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(1): 94-104.
- [19] OU C Y, LIN Y L, HSIEH P G. Case record of an excavation with cross walls and buttress walls [J]. *Journal of GeoEngineering*, 2006, 1(2): 79-86.
- [20] OU C Y, HSIEH P G, LIN Y L. A parametric study of wall deflections in deep excavations with the installation of cross walls [J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 50: 55-65.
- [21] 乔世范, 蔡子勇, 张震, 等. 南沙港区软土狭长深基坑围护体系性状[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2022, 56(8): 1473-1484.
QIAO S F, CAI Z Y, ZHANG Z, et al. Behavior of retaining system of narrow-long deep foundation pit in soft soil in Nansha Port Area [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2022, 56(8): 1473-1484. (in Chinese)

- [22] 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)
- [23] 万星, 戈铭, 贺智江, 等. 南京软土地区基坑墙体变形性状研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 85-88.
WAN X, GE M, HE Z J, et al. Study on deformation behavior of foundation pit wall in Nanjing soft soil area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup 1): 85-88. (in Chinese)
- [24] 王吉豪, 张隆, 宋业春, 等. 房建深基坑施工中周围土体变形监测及分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊 1): 2865-2869.
WANG J H, ZHANG L, SONG Y C, et al. Monitoring and analysis of surrounding soil deformation in building deep foundation pit construction [J]. Building Structure, 2023, 53(Sup 1): 2865-2869. (in Chinese)
- [25] 冷伍明, 姚康, 门小雄, 等. 考虑工程桩效应的滨海深基坑变形特性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(4): 1347-1358.
LENG W M, YAO K, MEN X X, et al. Analyses on deformation characteristics of coastal deep excavation considering the effect of engineering piles [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(4): 1347-1358. (in Chinese)
- [26] 祝建勋, 杨春阳, 罗正高, 等. 北京地铁地连墙基坑变形规律研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(3): 35-42.
ZHU J X, YANG C Y, LUO Z G, et al. Deformation law of foundation pit connecting Beijing subway and ground [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(3): 35-42. (in Chinese)
- [27] 常万波, 许有俊. 既有围护防护下深大基坑内部施工对坑外地表变化影响分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊 2): 2499-2504.
CHANG W B, XU Y J. Analysis of the influence of internal construction of deep and large foundation pit on the surface change outside the pit under the protection of existing enclosure [J]. Building Structure, 2023, 53(Sup 2): 2499-2504. (in Chinese)
- [28] WANG T, DENG T T, DENG Y F, et al. Numerical simulation of deep excavation considering strain-dependent behavior of soil: A case study of Tangluo street station of Nanjing metro [J]. International Journal of Civil Engineering, 2023, 21(4): 541-550.
- [29] NG C W W, ZHENG G, NI J J, et al. Use of unsaturated small-strain soil stiffness to the design of wall deflection and ground movement adjacent to deep excavation [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 119: 103375.
- [30] BENZ T, SCHWAB R, VERMEER P. Incorporating small-strain stiffness into geotechnical analysis [J]. Bautechnik, 2007, 84(11):749-761.
- [31] 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. (in Chinese)
- [32] 顾晓强, 陆路通, 李雄威, 等. 土体小应变刚度特性的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 312-317.
GU X Q, LU L T, LI X W, et al. Experimental study of small strain stiffness properties of soil [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(3): 312-317. (in Chinese)

(编辑 朱备)