

DOI: 10.11779/CJGE20220661

上海超深基坑环境变形时空分布特性实测分析

李航^{1,4}, 李泽文¹, 廖少明^{*1,2}, 李志义³, 钟铎炜³

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海 200065; 4. 中国建筑第八工程局有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 基于工程现场实测数据, 对深度为 31.3 m 的上海某超深基坑开挖引起的环境变形特性进行了研究分析。结果表明, 与上海常规深度 (12~20 m) 的软土基坑工程相比, 超深基坑的环境影响明显偏大, 表现出显著的时空分布特性: ①坑外地表沉降规律随墙体侧向变形的空间分布形态差异而变化, 墙体侧向变形由中部向角部变化越平缓, 坑外的地表沉降影响范围越大, 由中部至坑角收敛越快, 坑外地表沉降影响区域则越集中, 影响范围也相对较小; ②受坑角效应影响, 平行于基坑围护结构的地表沉降由中心向坑角沉降迅速减小, 并呈高斯分布规律, 影响范围延伸至坑角后 $1.5H_e$ (H_e 为基坑深度); ③建筑物变形表现出显著的三维特性, 靠近基坑围护结构中部的建筑物沉降量显著大于基坑角部, 同时均伴随较大的扭转变形; ④当平行于基坑围护结构的建筑物横跨坑角区域时, 最危险点均位于坑角附近 $0.5H_e$ 范围内, 其损伤程度与建筑物和基坑的位置关系和建筑物刚度有密切关系; ⑤相对于常规深度基坑, 本工程对地表沉降的主要影响范围偏大, 达到 $3H_e$ 左右, 但最大地表沉降位置偏小, 位于墙后 $0.5H_e$ 附近; ⑥地表沉降最大值 δ_{vm} 介于 $0.03\% \sim 0.50\% H_e$ 之间, 且与墙体最大侧移值 δ_{hm} 之间的关系平均为 $\delta_{vm} = 0.6\delta_{hm}$ 。

关键词: 软土地层; 超深基坑; 环境变形; 时空分布; 建筑物及管线

中图分类号: TU470.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)08-1595-10

作者简介: 李航(1991—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为基坑工程及历史建筑保护。E-mail: zgnydxlh@163.com。

Field measurement of time-space distribution behaviors of environmental settlement of an ultra-deep excavation in Shanghai soft ground

LI Hang^{1,4}, LI Zewen¹, LIAO Shaoming^{1,2}, LI Zhiyi³, ZHONG Huawei³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Urban Construction Municipal Engineering Co., Ltd., Shanghai 200065, China; 4. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Based on the extensive field observations, the environmental deformation characteristics of a 31.3 m-deep excavation in Shanghai soft ground are investigated. The results show that compared with the general excavations with a depth ranging from 12 to 20 m, the ultra-deep excavation presents significant environmental effects and time-space distribution behaviors: (1) The influence zone of settlement near the long side of the excavation is related to the wall deflection distribution on the plane. The more gently the lateral wall displacement changes from the middle area to the corner, the more extensive the influence zone is. The faster the lateral wall displacement transits from the middle to the corner of the excavation, the more concentrated the influential zone is. (2) Due to the corner effects, the ground surface settlement decreases rapidly from the center to the corner, and exhibits a Gaussian distribution law, with the influence range extending to $1.5H_e$ (depth of excavation) behind the excavation corner. (3) The deformation of buildings exhibits distinct three-dimensional characteristics. The buildings located near the excavation corner have less settlement than those near the center of the excavation, accompanied by a certain torsional deformation. (4) When the buildings paralleling to the retaining wall cross the corner of the excavation, the most dangerous point is located within $0.5H_e$ near the corner of the excavation, and its damage degree depends on the relative location between the buildings and the excavation and their stiffness. (5) Compared with the conventional deep excavations, the ultra-deep excavation leads to a larger primary influence zone for ground surface settlement, reaching about $3H_e$, but the location of the maximum surface settlement is closer to the wall, nearly $0.5H_e$ behind the retaining wall. (6) The maximum ground surface settlement δ_{vm} is about $0.03\% \sim 0.50\% H_e$, and the relationship

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52090082); 上海市“科技创新行动计划”自然科学基金面上项目 (19511100802)

收稿日期: 2022-05-23

*通信作者 (E-mail: liaosm@126.com)

between the maximum ground surface settlement δ_{vm} and the maximum lateral wall displacement δ_{hm} can be expressed by $\delta_{vm}=0.6\delta_{hm}$ averagely.

Key words: soft clay; ultra-deep excavation; environmental deformation; space-time distribution; building and pipeline

0 引言

基坑开挖引起的围护结构变形导致地层产生运动,进而引发邻近既有设施产生变形和不同程度损伤^[1]。尤其在中国大城市密集城区,基坑与邻近建(构)筑物的位置关系复杂多样^[2],从而表现出更为显著的空间变形特性。

目前,许多研究^[3-9]对基坑开挖引起的坑后地表沉降数据进行了大量的统计分析,揭示了坑后地表沉降的分布特性,提出了地表沉降的半经验预测方法,它们对于初步预测和评估邻近基坑的既有建筑物变形来说非常实用。然而,这些半经验半理论方法往往是基于基坑中部坑后地表沉降的实测数据所得,适用于可简化为平面应变问题来考虑的情形;当受周边环境条件限制,出现建(构)筑物位于基坑角部或平行于基坑长边等复杂多样的情形时,上述方法则可能不再适用,而需要考虑基坑的三维变形特性,以得到更为合理的分析结果。Ou 等^[10]和 Lee 等^[11]采用数值模拟方法初步探讨了基坑三维坑角效应,认为坑角效应取决于基坑的长深比、长宽比、硬土层的相对深度和支撑体系刚度等因素。Finno 等^[12]通过有限元数值模拟对基坑三维效应进行了系统分析,认为长高比是基坑三维效应的主导参数,当基坑长高比大于6时,基坑中部断面可视为平面应变问题。Wang 等^[13]、Liu 等^[14]

和 Tan 等^[15]对上海地铁车站基坑围护结构变形的三维效应进行了研究,认为长条形基坑的坑角效应不显著,但在靠近坑角部位的墙体侧移和地表沉降均小于其他部分。

通过对以上文献的研究分析,可以发现目前对于基坑开挖三维效应的研究主要集中在围护结构侧向变形上;由于能够充分体现该三维效应的地表沉降数据十分有限,导致对于开挖引起的周边环境时空分布特性和风险认识尚不清晰。为此,本文依托上海中心城区某开挖深度为31.3 m的超深基坑,对地表沉降、周边建筑物和市政设施实施了严密的观测。基于实测数据,着重分析了上海软土地层中超深基坑开挖引起的周边地层变形、管线及建筑物变形的时空分布特性,与其他基坑工程案例进行横向对比,必将有助于工程界对超深软土基坑环境变形风险的认识,从而采取更加有效、更具针对性的保护措施。

1 工程概况

1.1 项目背景及周边环境

本工程位于上海市区,基坑平面尺寸为74.8 m × (24.4~34.4) m,开挖深度约为31.3 m,远超一般基坑开挖深度(图1)。由于施工场地位于上海密集城区,周边环境十分复杂,分布有多处既有建筑

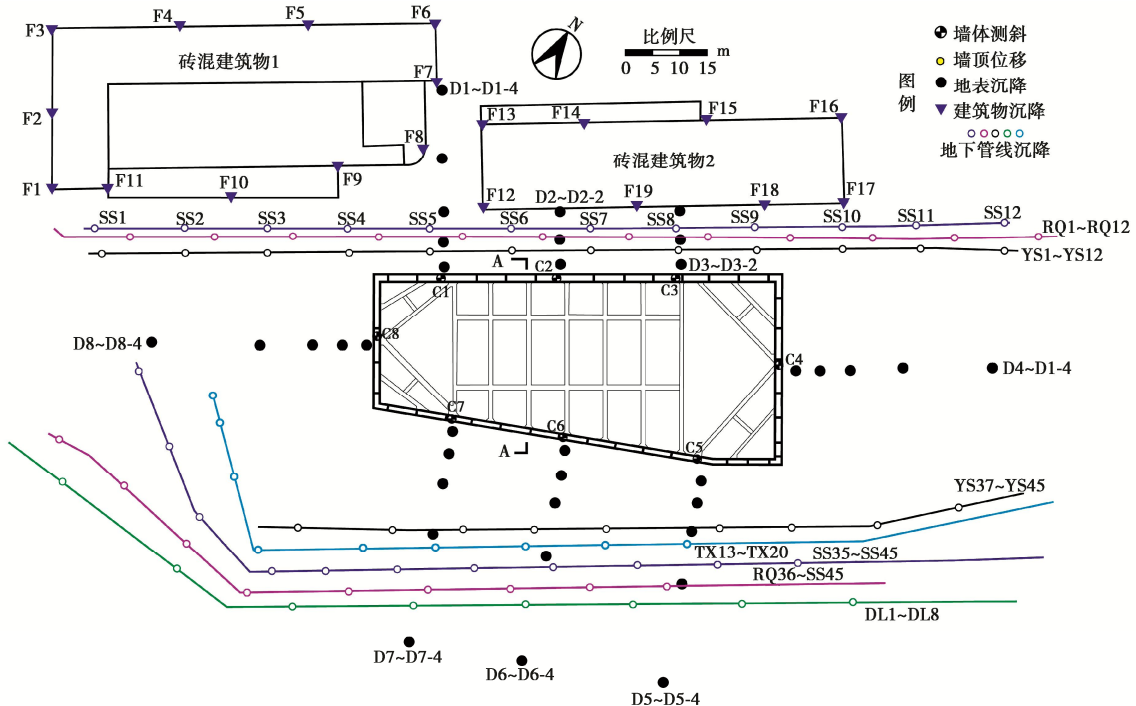


图1 基坑平面及周边环境

Fig. 1 Site plan of excavation and surrounding environment

物及市政基础设施。这些保护对象的存在给超深基坑施工带来了诸多挑战和困难。

如图 1 所示, 基坑北侧有两处建筑物, 建筑物 1 为六层砖混结构, 采用筏板基础; 建筑物 2 为三层砖混结构, 采用条形基础。基坑与两处建筑物的最小净距分别为 12.3, 9.7 m。基坑北侧和南侧分布有大量市政管线, 其中北侧管线与基坑间距仅为 5.3 m, 而南侧管线与基坑最小净距约为 16.3 m。这些建筑物和市政管线均位于基坑 1 倍开挖深度范围内, 按照上海市基坑工程规范^[18], 该基坑环境保护等级为 1 级。

基坑围护结构采用地下连续墙, 厚度为 1.2 m, 深度达 70 m, 其中受力段为 63 m, 受力段以下 7 m 为加长段, 墙底位于硬土层, 用以隔离坑内外水力条件, 减小坑内降水对抗外水位的影响。从上至下共设 6 道钢筋混凝土支撑, 分为 7 层土方开挖, 除第一层悬臂开挖深度为 1.8 m 外, 其余各层开挖深度为 5.2, 5.3, 5.1, 5.0, 4.6, 4.3 m (图 2)。

1.2 地质及水文条件

根据项目地质勘察报告, 拟建场地在 95.0 m 深度范围内, 主要包括填土、粉质黏土、淤泥质黏土、黏土、粉质黏土与粉砂互层, 以及粉砂层 (图 2)。地层中缺失上海滨海软土典型地层中的第⑥层硬黏土层、第⑦₁砂质粉土和第⑦₂粉砂层。

表 1 为场地范围内土体的基本物理力学参数, 坑底深度位于⑤₃₋₁粉质黏土层, 开挖范围内的土层大部分均为工程性质较差的软土地层, 尤其是④号淤泥质黏土和⑤₁黏土层厚度较大, 其压缩性高、灵敏度大, 易受到周围施工的扰动而导致土体强度降低。另外, 由于坑底以下局部土层的缺失, 导致坑底以下也分布有较厚的黏土层, 因此, 在本工程中地连墙深度较大, 达到 70 m 才进入硬土层。

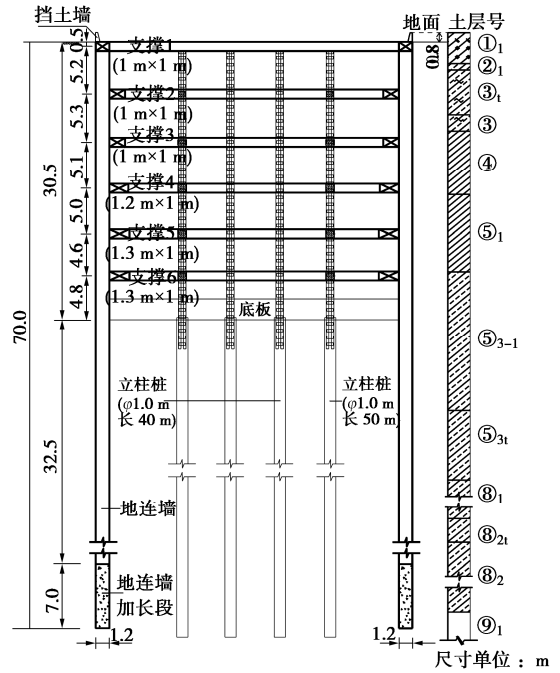


图 2 基坑典型剖面图 (A-A 剖面)

Fig. 2 Typical cross section of deep excavation (A-A)

此外, 场地内分布有潜水和承压水, 潜水水位埋深为 0.5~0.7 m; ⑤_{3t}层为微承压含水层, ⑧₂层、⑧_{2t}层和⑨层为承压含水层并呈连通状态。基坑开挖前对坑内进行预降水疏干, 采用真空降水管井方式降水, 使水位降低至坑底以下 1~2 m 以保证土方开挖。对于⑤_{3t}微承压含水层, 以及⑧_{2t}层和⑨层承压含水层采用管井按需降水, 保证坑底土体满足抗承压水稳定性要求。

2 施工及监测布置

图 3 为基坑开挖阶段的实际施工工况。由于赶上春节假期, 停工约 17 d, 其余开挖阶段均连续进行。需要提及的是, 坑内降水施工在基坑第一层土方开挖

表 1 土层基本物理力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of soil layers at site

土层序号	土层名	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	黏聚力 c / kPa	含水率 $w / \%$	压缩系数 $a_{s0.1-0.2} / \text{MPa}^{-1}$	渗透系数 $K_v / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	灵敏度 S_t
①	填土	—	—	—	—	—	—	—
③ _t	黏质粉土夹淤泥质粉质黏土	18.5	26.0	9	32.0	0.20	6.16×10^{-5}	—
③	淤泥质粉质黏土	17.4	15.0	13	43.4	0.81	4.96×10^{-7}	3.6
④	灰色淤泥质黏土	16.8	11.5	13	50.6	1.06	1.08×10^{-7}	4.2
⑤ ₁	黏土	17.8	15.5	17	38.1	0.60	3.14×10^{-7}	3.4
⑤ ₃₋₁	粉质黏土	18.1	21.0	17	34.1	0.43	1.35×10^{-6}	3.1
⑤ _{3t}	灰色黏质粉土夹粉质黏土	18.2	21.5	19	33.6	0.33	2.34×10^{-5}	—
⑧ ₁	粉质黏土	17.9	18.5	22	36.8	0.44	—	—
⑧ _{2t}	粉砂夹粉质黏土	19.3	34.0	3	24.9	0.16	—	—
⑧ ₂	粉质黏土与粉砂互层	18.6	22.0	21	31.1	0.32	—	—
⑨ ₁	灰色粉砂	19.6	35.0	0	23.0	0.12	—	—

前开始,并持续降水至坑底开挖面处,之后开始后土方的开挖,并保持坑内水位位于坑底以下。由于该施工场地位于上海市区,周边环境复杂,保护对象众多,为充分认识和研究超深基坑开挖对环境变形时空分布特性,对墙体测斜、地表沉降、管线沉降和建筑物沉降监测点位进行了细致的部署(见图1)和严密的监测。

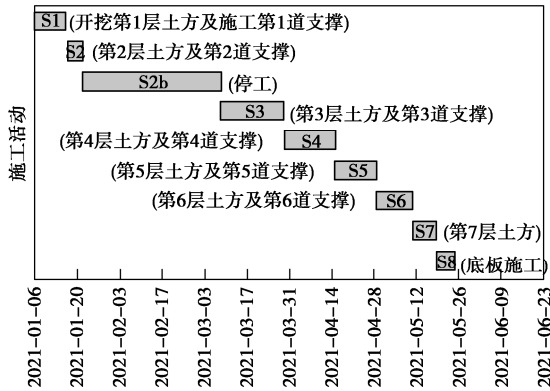


图3 基坑实际施工工况

Fig. 3 Practical construction process

3 基坑环境变形实测分析

基坑周边既有建筑物和邻近设施响应是由地层运动引起,其本质上取决于基坑开挖卸荷导致的围护结构变形。图4展示了基坑典型位置C2与C6处墙体测斜。可以看出墙体侧移呈“鼓腹型”,符合内支撑基坑墙体侧移曲线的一般规律。随着开挖深度的增加,墙体最大侧移值及其所在深度均不断增加;最大侧移对应深度位于坑底开挖面以下一定深度范围内。同时,随着土方开挖和支撑安装,坑底开挖面以下深层位置的墙体位移也较为显著,开挖完成时墙底侧向位移分别达到19,22mm。

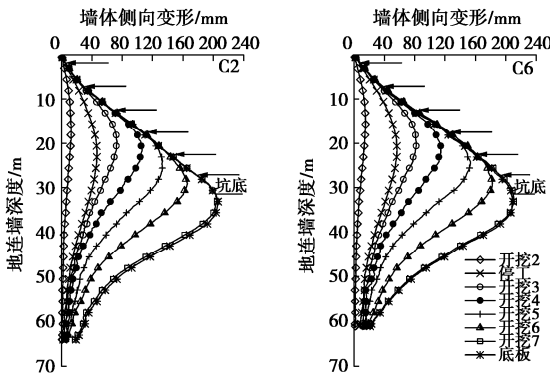


图4 地连墙侧向变形曲线

Fig. 4 Deflections of retaining walls

图5总结了基坑开挖结束时,C1~C8测斜点处最大侧向变形 δ_{hm} 和对应的坑后最大地表沉降 δ_{vm} 在

平面上的分布,并作为后续分析时的参考。可以看出,各测斜点的 δ_{hm} 具有显著差异,位于基坑短边(C4和C8)的 δ_{hm} 均小于 $0.2\%H_c$ (H_c 为开挖深度),明显小于基坑长边各点的 δ_{hm} ;即使是同样位于基坑长边的各测斜点,它们之间的 δ_{hm} 也呈现不均匀特性。各测斜点对应的坑后最大地表沉降 δ_{vm} 与上述 δ_{hm} 的变化特点保持一致,围护结构的时空变形特性会映射到三维空间环境中,使之呈现显著的时空变形特性。

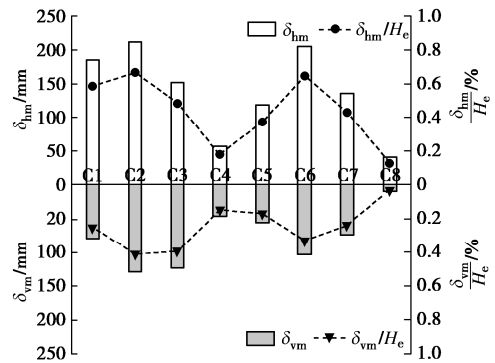


图5 地连墙最大侧移及墙后地表最大沉降分布

Fig. 5 Distribution of maximum wall deflections and maximum settlements behind wall

3.1 地表沉降的时空分布规律

(1) 地表沉降随时间发展规律

图6为各测点的坑外地表沉降随时间发展曲线。大部分点沉降随着开挖的进行均呈不断增加的趋势,而在坑后地表沉降中,发展速率最快、沉降量最大的点位于坑后一定距离处;开挖结束时,最大地表沉降约130mm(D2-2)。此外,个别点在开挖过程中出现隆起,其中与围护墙紧邻的D5和D7点较为明显,其原因可能是由于此处墙土接触面摩擦力较大,墙体在向上运动过程中并带动邻近土体产生移动。该现象在基坑短边处更为显著,作用范围也更广,D8~D8-2均产生不同程度的隆起,这表明基坑尺寸及空间效应不仅对围护结构侧向变形有影响,甚至还会影响墙后地表沉降的分布特性。

在春节停工期间,地表沉降随着时间推进仍逐渐增大,在持续约20d后趋于稳定,这种变化趋势与围护结构侧向变形的发展趋势基本同步,说明墙体侧移的发展对该阶段地表沉降起主导作用,降水对地表沉降影响较小。在S4~S7阶段,各点最大地表沉降 δ_{vm} 的变化速率并未随开挖和支撑施工速度的加快而减小,反而比起S2和S3有所加快:以基坑长边C2和C6点对应的坑后地表沉降点(D2-2和D6-2)为例,D2-2和D6-2点从S2和3阶段对应的平均沉降速率分别从0.7,0.6mm/d显著增加至S4~S7阶段的1.6,1.3mm/d,增加幅度约为130%。当开挖至坑底并浇筑底板后,沉降速率变化放缓。

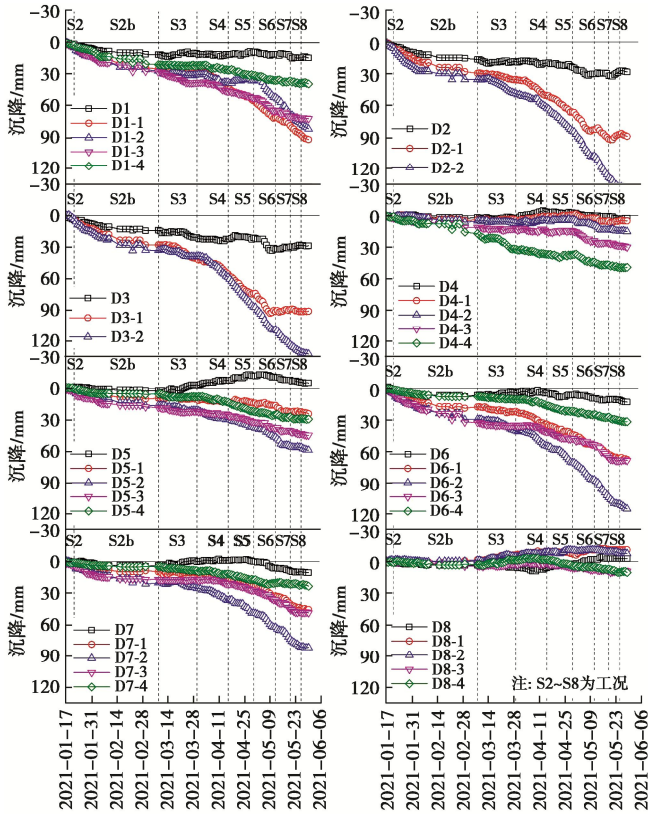


图 6 地表沉降随时间发展曲线

Fig. 6 Development of ground surface settlement with time

为了更好地展示地表沉降的规律, 图 7 给出了各开挖深度下地表沉降最大值 δ_{vm} 的统计数据。与相关研究结果对比分析发现: 本基坑开挖引起的地表沉降最大值大致分布在 $(0.03\% \sim 0.50\%) H$ 之间。尽管其上限值大于基坑规范中环境等级为 1 级时建议的地表沉降控制值^[16], 但小于徐中华^[17]统计的上海地区地下室深基坑的地表沉降范围, 基本符合 Clough 等^[5]对硬黏土地层中地表沉降的统计范围和 Tan 等^[18]对上海地铁车站基坑引起的地表沉降的统计范围。

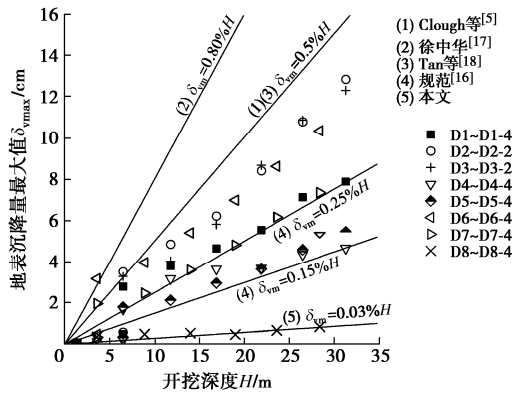


图 7 地表沉降与开挖深度的关系

Fig. 7 Relationship between surface settlement and excavation depth

(2) 地表沉降的空间分布规律

基坑开挖导致的地层运动内在地具有三维效应, 并与围护结构侧向变形的分布有密切关系。利用各测点的地表沉降实测数据, 通过线性插值绘制了坑后约 25 m 范围内的地表沉降云图, 并连同基坑围护结构最大侧向变形轮廓线 (图 8)。由该云图可以发现, 墙体最大侧移由中部向坑角快速收敛, 呈现三维坑角效应, 这种三维效应使得地表沉降在基坑不同侧呈现出不同的分布规律: ①位于基坑长边的坑外地表沉降要显著大于基坑短边; ②基坑长边的坑外地表沉降影响区域与围护结构侧向变形在平面上分布有关, 北侧长边墙体侧向变形在中部区域变化相对平缓, 但对于坑外地表影响范围更大, 而南侧长边墙体的侧向变形由中部至坑角收敛较快, 此时坑外地表沉降影响区域更加集中, 影响范围也相对较小。

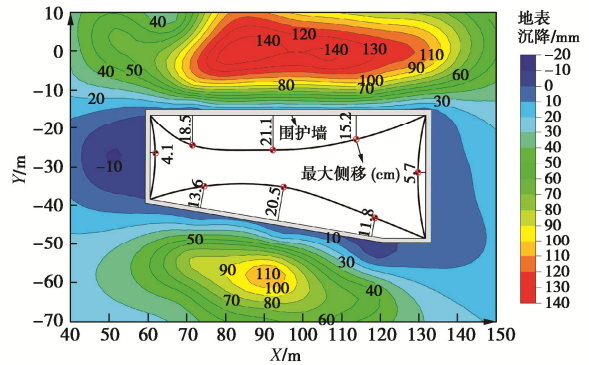


图 8 地表沉降空间分布云图

Fig. 8 Nephogram of ground surface settlement distribution

图 9 给出了垂直于围护结构的坑后地表沉降分布, 其中 S/H_c 表示归一化的沉降测点与地连墙间距, δ/H 为归一化的地表沉降, H 和 H_c 分别为阶段开挖深度和最终开挖深度。通过与其他已有工程实践的经验曲线进行比较, 可以发现本工程地表沉降变形大于 Tan 等^[18]所搜集的上海地铁车站基坑开挖引起的地表沉降, 小于徐中华^[17]所统计的地下室基坑开挖的地表沉降, 整体上介于 Peck^[3] (I区, 软-硬黏土) 和 Clough 等^[5] (硬-非常硬的黏土) 的包络线之间。

从地表沉降的分布特性上看, 本工程对地表沉降的主要影响范围偏大, 但最大地表沉降位置与基坑之间的相对距离偏小, 具体来讲其主要影响范围大约在 3 倍开挖深度 (H_c) 以内, 要大于常规基坑的主要影响区范围, 最大沉降位置位于 $0.5 H_c$ 附近。经过现场施工工况调研, 分析其原因主要为: ①本基坑最大开挖深度为 31.3 m, 相对常规的 15~20 m 软土深基坑而言, 本基坑开挖前的疏干降水深度扩大近一倍, 降水卸荷引起的挡土墙前期变形及坑外沉降影响十分显著, 另外长时间抽降承压水也导致坑外地层产生了部

分沉降；②上海一般在大约深度 30~50 m 范围存在第⑥层硬黏土层、第⑦粉砂等坚硬持力层，这对 15~20 m 深基坑坑底被动区形成有效约束，而在本基坑坑底以下 (>30 m) 正好缺失上述硬土地层，代之以强度和刚度均较差的深厚黏土地层，被动区不能形成有效约束，地连墙在坑底以下部分依然产生了较大的侧向变形，且最大侧移深度下移至坑底以下。两种原因直接导致本深基坑地表沉降的影响范围扩大至 $3H_e$ 。因此基坑设计施工中，建议：①对超深基坑应加强前期降水的控制，不能一降到底，应真正做到按需降水；②对深部地层缺失地段的深基坑，应加强底部支撑或坑底加固，并加大监测范围。

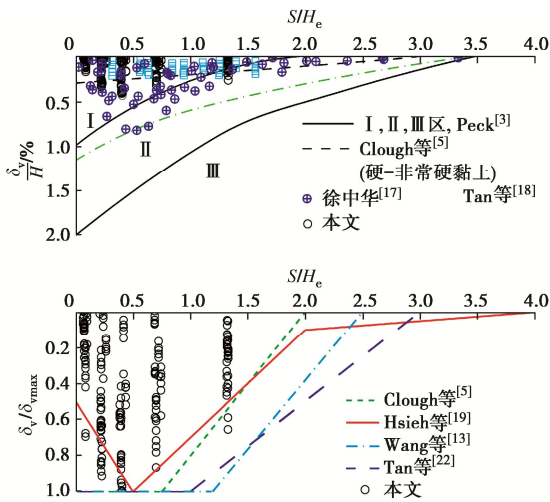


图9 垂直于围护结构方向的地表沉降分布

Fig. 9 Distribution of ground surface settlement perpendicular to retaining wall

结合其他文献统计结果进行对比发现，本案例与其他研究中提出的地表沉降分布模式均有一定的相似性，但整体上与 Hsieh 等^[19]提出的沉降分布模式更为接近。

3.2 周边管线沉降的时空分布特性

(1) 管线沉降随时间分布特性

图 10 展现了管线沉降监测点 (RQ1~RQ12、SS1~SS12 和 YS1~YS12) 随时间发展情况，这些地下市政管线均与基坑北侧长边围护结构平行并延伸至远处 (见图 1)。在开挖结束时，燃气管线 RQ1~RQ12 (直径 $\varphi=700$ mm, 壁厚 $t=5$ mm)、给水管线 SS1~SS12 ($\varphi=1000$ mm, $t=5.25$ mm) 以及雨水管线 YS1~YS12 ($\varphi=850$ mm, $t=80$ mm) 的最大沉降值分别为 99.0, 118.9, 56.0 mm。这种差异可能与各道管线的位置、埋深以及管道材质等因素有关，后文中将结合地表沉降数据，对影响管线沉降的主导因素进一步分析。

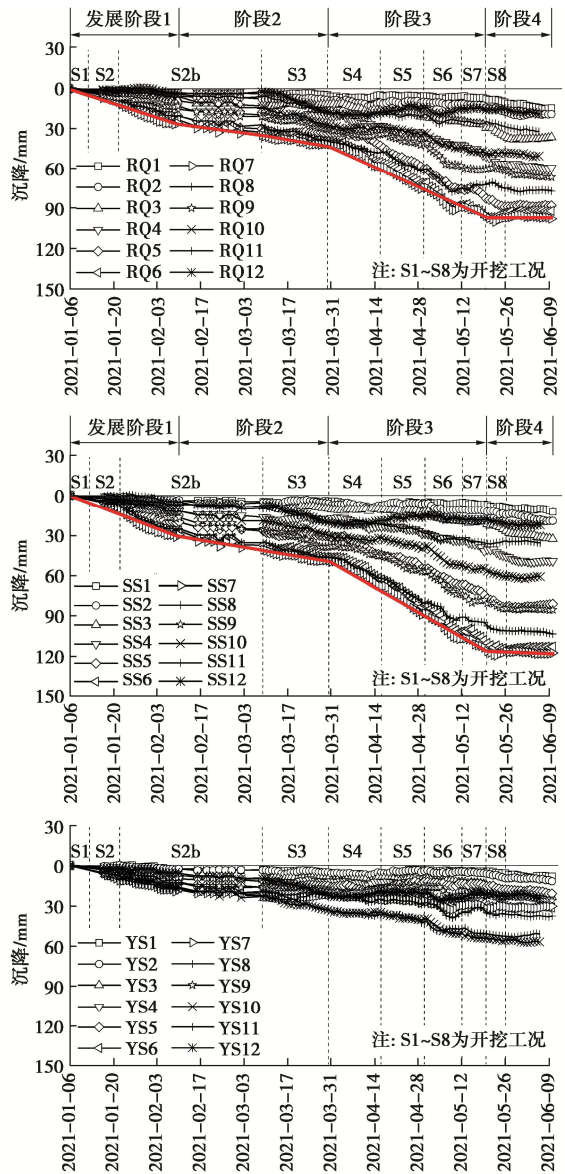


图10 管线沉降随时间发展曲线

Fig. 10 Development of pipeline settlement with time

从沉降速率来看，管线的整个沉降过程呈现 4 个阶段的变化特点，尤以管线 RQ1~RQ12 和 SS1~SS12 为突出：第一阶段为 S1~S2b，RQ、SS 和 YS 管线最大沉降速率分别为 0.63, 0.83, 0.48 mm/d；第二阶段为 S2b~S3，各管线最大沉降速率分别减小至 0.44, 0.53, 0.14 mm/d；第三阶段为 S4~S7，各管线最大沉降速率快速上升达到 1.57, 1.86, 0.35 mm/d；第四阶段为底板开始施工至拆撑前，在底板浇筑完成后，各管线沉降逐渐趋于稳定，大部分管线沉降点的沉降速率减小至不到 0.1 mm/d。在不同阶段，开挖引起的管线沉降速率差异，可能与以下两个因素有关：①在 S4~S6 阶段，开挖土层均为压缩性高、抗剪强度差、灵敏度高的淤泥质黏土或黏土层，因此开挖导致的围护结构侧移更大，同时也引起了管线沉降速率的快速增加；②由于在 S4~S7 阶段，基坑施工速度加快，

相邻两层土方开挖的时间基本小于或等于 14 d, 而在此期间还需要完成混凝土支撑的施工, 因此混凝土支撑强度可能还未全部发挥, 不能提供足够的支撑刚度。

(2) 管线沉降的空间分布特性

图 11 为管线(RQ1~RQ12、SS1~SS12 和 YS1~YS12)沿基坑围护结构平行方向的沉降分布曲线。在开挖至坑底时, 各管线沉降曲线表现为下凹变形模式, 近似呈高斯分布规律, 基坑中部管线的沉降量和曲率最大; 经过估算, 对于采用铸铁管的 SS1~12, 最大曲率为 4.8×10^{-4} , 最大拉应力为 28.8 MPa, 虽然不会引起管材强度破坏, 但过大的转角会对管线连接薄弱处造成较大威胁。

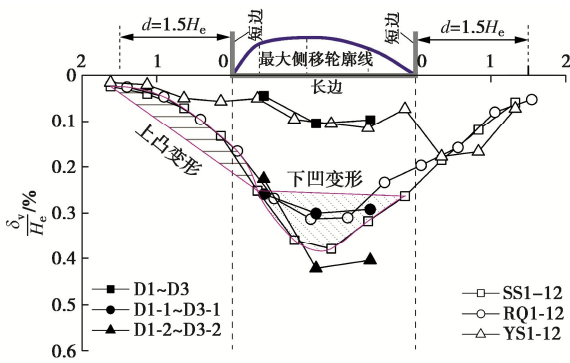


图 11 管线沉降沿基坑围护结构平行方向的分布

Fig. 11 Distribution of pipeline settlement parallel to excavation

结合地表沉降分布, 可以看出管线沉降与地表沉降的分布形式相似性较高, 且平面位置相近的地表和管线沉降测点, 测得的沉降值也较为接近 (YS1~YS12 与 D1~D3、RQ1~RQ 12 与 D1-1~D1-3、SS1~SS 12 与 D2-1~D2-3), 这表明管线沉降与管线材质和尺寸关系似乎不大, 而主要取决于管线与基坑的距离。这也从另外一个角度说明管线和地表沉降之间具有良好的对照性, 利用管线空间分布规律可以进一步揭示较大范围内的地表沉降分布, 从而克服以往研究中大多着眼于垂直于基坑围护结构的局部地表沉降的不足。结合本工程, 可以发现: ①沿基坑长边方向, 在围护结构边缘以外, 管线依然会产生较大沉降, 并在跨越围护结构边缘的两侧约 $0.5H_e$ 范围内沉降快速变化, 产生约 1.8×10^{-3} 的角变形; ②基坑开挖引起的地表沉降影响范围可扩展至围护结构边缘以外 $1.5H_e$, 与基坑中部管线沉降的下凹变形模式不同, 在坑角附近至坑角以外 $1.5H_e$ 范围内管线沉降呈上凸变形模式。

3.3 周边建筑物沉降的时空分布特性

(1) 建筑物沉降随时间分布特性

图 12 展示了基坑开挖过程中两处邻近建筑物沉降发展变化。随着开挖深度的增加, 建筑物沉降也不断增加; 在开挖结束时, 两处建筑物最大沉降值分别

为 53.6 mm (F9) 和 127.2 mm (F12), 最大差异沉降分别为 47.0, 52.7 mm。与管线沉降相比, 建筑物沉降亦呈 4 个阶段变化, 但发展相对滞后, 后半程施工期发展快, 其中邻近基坑中部的#2 建筑物测点 (F12, F18, F19) 及位于基坑角部的#1 建筑物测点 (F9) 最终也难稳定。其原因主要为建筑物变形不仅受基坑开挖导致的地层运动影响, 而且开挖对建筑物地基土体的扰动, 会导致建筑物与土体之间发生相互作用, 产生进一步的变形和结构内力调整。

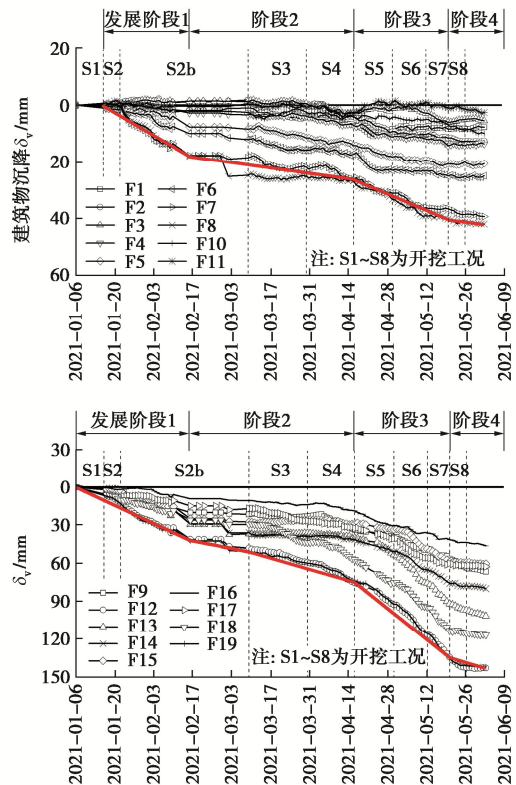


图 12 建筑物沉降随时间发展

Fig. 12 Development of building settlements with time

(2) 建筑物沉降的空间分布特性

基坑开挖导致的空间变形特性同样也反映在建筑物的沉降上, 利用建筑物沉降和地表沉降实测数据, 经过线性插值得到如图 13 所示的建筑物及其附近地表沉降云图。

观察图 3 可以发现: ①以基坑长边中部为中心向周围辐射, 建筑物沉降大小与建筑物和基坑长边中心距离呈正比, 呈现显著的空间效应; ②位于坑角部位的建筑物沉降明显小于位于基坑长边中部的建筑物沉降, 因此可以利用这种空间特性对不同建筑物进行针对性措施, 将建筑物沉降控制在限值以内; ③受空间效应影响, 建筑物除产生较大差异沉降外, #1 和#2 建筑物的最大扭转角变形分别约为 1.3×10^{-3} 和 1.6×10^{-3} , 这种扭转变形同样会对建筑结构的受力产生不利影响。

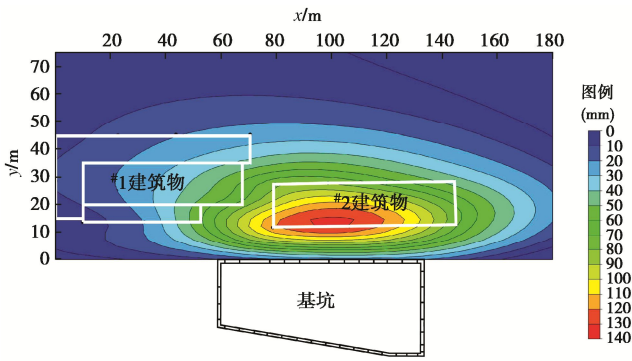


图 13 建筑物及地表沉降云图

Fig. 13 Nephogram of buildings and ground surface settlements

图 14 (a), 14 (b) 给出了与基坑长边平行的建筑物外墙在各个开挖工况下的沉降曲线, 并连同附近管线或地表沉降进行比较。

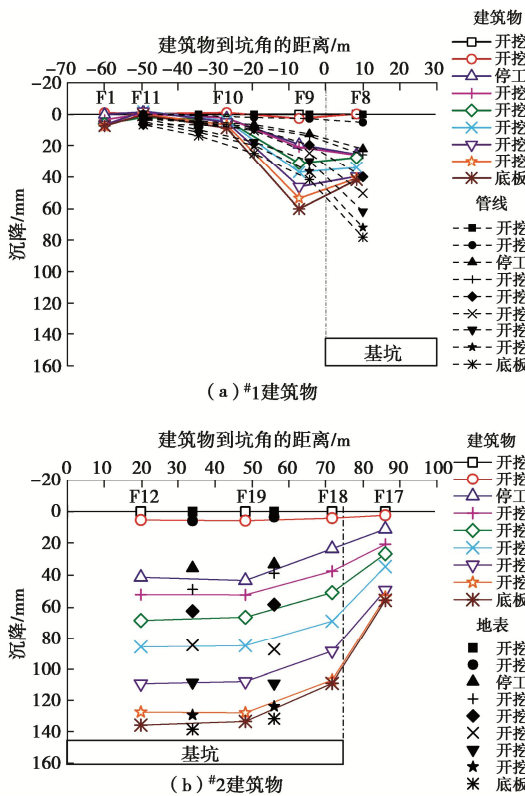


图 14 建筑物沉降曲线随工况发展变化

Fig. 14 Building settlement profile developed during construction process

可以发现, 随着基坑开挖深度的增加, 建筑物沉降量及差异沉降均不断增加。在开挖结束时, #1 建筑物的最大沉降发生在位于角部的 F9, 最大沉降量为 53.6 mm; 最大角变形为 2.4×10^{-3} , 发生在位于基坑角部以外的 F9 和 F10 之间。#2 建筑物的最大沉降量为 127.2 mm, 最大角变形为 3.6×10^{-3} , 同样发生在位于基坑角部附近及以外的 F18 和 F17 之间, 该最大角变形接近上海市地基基础规范^[20]给出的该类建筑物容许值 4.0×10^{-3} 。反观靠近基坑中部的建筑物部分,

沉降相对平缓, 差异沉降不大。尽管靠近基坑中部区域的建筑物沉降量要远大于基坑角部的建筑物, 但两者的共性特点是对于平行于基坑围护结构并跨越坑角的建筑物, 最危险点均位于基坑角部及以外的局部区域内, 此时建筑物会由于角变形过大而导致结构损伤。此外, 尽管位于角部的#1 建筑物最大角变形小于基坑中部的#2 建筑物, 但位于#1 建筑物沉降模式为上凸型, 这种变形模式较#2 建筑物所呈现的下凹型变形模式会进一步削弱建筑物抵抗变形能力, 因此对于角部建筑物的变形控制和观测需要引起重视。

建筑物自重和结构刚度也是影响建筑物变形的重要因素。从建筑物沉降与附近地表或管线沉降之间的横向比较来看, 在开挖前期, #2 建筑物沉降量略大于地表沉降, 但随着开挖深度的增加, 建筑物沉降与地表沉降变化基本保持同步, 这说明#2 建筑物自重和刚度较小, 调节不均匀沉降的能力较弱。相反, 由于#1 建筑物自重和刚度均较大, 在开挖初期建筑物呈整体倾斜的趋势, 建筑物刚度能够有效发挥调节不均匀沉降的作用; 随着开挖深度的增加, F8 和 F9 的沉降量继续增加, 但远离基坑角部超过 20 m 以外的 F10、F11 和 F1 点的沉降则未显著增加, 甚至出现上抬, 这种现象产生的原因可能为: F9 和 F10 之间的差异沉降过大, 导致 F9 和 F10 之间建筑物基础产生裂缝, 削弱了建筑物局部刚度, 再叠加建筑物自重影响, 因此产生了明显大于管线的沉降。

3.4 环境沉降变形和墙体侧移的关系

图 15 展示了无量纲化地表沉降最大值 δ_{vm} 与墙体最大侧移值 δ_{hm} 的关系。地表沉降最大值 δ_{vm} 介于 $(0.4 \sim 0.8) \delta_{hm}$, 按照线性关系进行拟合可表示为 $\delta_{vm} = 0.6 \delta_{hm}$ 。与上海地区其他基坑案例^[17, 19, 21-22]进行比较, 可以发现 δ_{vm} 和 δ_{hm} 的关系处于较为宽泛的范围

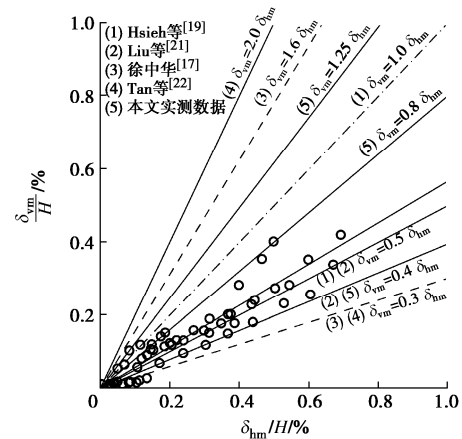


图 15 无量纲化的地表沉降最大值和墙体最大侧移之间的关系
Fig. 15 Relationship between normalized maximum wall deflection and maximum ground surface settlement

内,可见对于不同工程而言,需要综合评估施工方法、地层条件和基坑形状等因素,才能给出合理的 δ_{vm} 和 δ_{hm} 关系。

4 结论和建议

本文基于实测数据探究了上海软土地层 31.3 m 超深基坑对周边环境影响的时空效应,得到以下 6 点结论和建议。

(1) 基坑开挖引起的周边环境变形呈四阶段变化特征,不同阶段沉降速率有较大差异:地表和管坑沉降表现为相同的阶段性特征,在开挖后半程沉降速率显著提高,并在底板完成浇筑后很快达到稳定;建筑物沉降发展则相对滞后,在开挖结束时达到稳定的时间更长。

(2) 基坑长边的坑外地表沉降影响区域与围护结构侧向变形在平面上分布有关,墙体侧向变形中部向角部区域变化越平缓,坑外的地表沉降影响范围越大;墙体的侧向变形由中部至坑角过渡越快,坑外地表沉降影响区域则越集中,影响范围也相对较小。

(3) 受基坑长深比和长宽比影响,围护墙体在平面上呈中部大两边小空间变形特点,表现出明显的坑角效应;受坑角效应影响,平行于基坑方向的地表沉降由中心向角部迅速减小,近似呈高斯分布规律,影响范围延伸至坑角后 $1.5H_e$ (H_e 为开挖深度)。

(4) 建筑物沉降呈明显三维特性,靠近基坑中部区域的建筑物沉降量大,呈下凹型变形模式;位于基坑角部的建筑物沉降量小,呈上凸型变形模式。除差异沉降将外,建筑物也会产生最大为 1.6×10^{-3} 的扭转变形。

(5) 当平行于基坑围护结构的建筑物横跨坑角区域时,最危险点均位于坑角附近 $0.5H_e$ 范围内。在本工程中,该区域内的最大角变形达到 3.6×10^{-3} ,建筑物局部承重结构发生结构损伤的可能性较大。在实际工程中,应充分重视该类建筑物的变形控制和变形监测。

(6) 相对于常规深度基坑,本工程对地表沉降的主要影响范围偏大,但最大地表沉降位置偏小,约位于 $0.5H_e$ 附近;地表沉降最大值 δ_{vm} 位于 $(0.03\% \sim 0.50\%) H_e$,垂直于基坑的坑外地表沉降的主要影响范围区约 $3.0H_e$;地表沉降最大值 δ_{vm} 介于 $(0.4 \sim 0.8) \delta_{hm}$,两者呈近似线性关系,可表示为 $\delta_{vm} = 0.6\delta_{hm}$ 。

参考文献:

[1] BOSCARDIN M D, CORDING E J. Building response to excavation-induced settlement[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **115**(1): 1-21.

[2] LI H, TANG Y J, LIAO S M, et al. Structural response and preservation of historic buildings adjacent to oversized deep excavation[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2021, **35**(6): 04021095.

[3] PECK. Deep excavation and tunnelling in soft ground[C]// ICSMFE Proc 7th Int Conf SMFE State of the Art Volume. Mexico: Balkema, 1969: 225-290.

[4] MANA A I, CLOUGH G W. Prediction of movements for braced cuts in clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1981, **107**(6): 759-777.

[5] CLOUGH R W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in-situ walls[J]. Specialty Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, 1990: 430-477.

[6] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, **30**(5): 758-767.

[7] KUNG G T, JUANG C H, HSIAO E C, et al. Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(6): 731-747.

[8] 王卫东, 徐中华, 王建华. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(11): 1659-1666. (WANG Weidong, XU Zhonghua, WANG Jianhua. Statistical analysis of characteristics of ground surface settlement caused by deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(11): 1659-1666. (in Chinese))

[9] 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.

[10] OU C Y, CHIOU D C, WU T S. Three-dimensional finite element analysis of deep excavations[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(5): 337-345.

[11] LEE F H, YONG K Y, QUAN K C N, et al. Effect of corners in strutted excavations: field monitoring and case histories[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(4): 339-349.

[12] FINNO R J, BLACKBURN J T, ROBOSKI J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(1): 30-36.

[13] WANG Z W, NG C W, LIU G B. Characteristics of wall deflections and ground surface settlements in Shanghai[J].

- Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(5): 1243-1254.
- [14] LIU G B, JIANG R J, NG C W W, et al. Deformation characteristics of a 38 m deep excavation in soft clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(12): 1817-1828.
- [15] TAN Y, WEI B, DIAO Y P, et al. Spatial corner effects of long and narrow multipropped deep excavations in Shanghai soft clay[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, **28**(4): 04014015.
- [16] DG/TJ08—61—2018 基坑工程技术标准[S]. 上海: 同济大学出版社, 2018. (DG/TJ08—61—2018 Technical Code for Excavation Engineering[S]. Shanghai: Tongji University Press: 2018. (in Chinese))
- [17] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. (XU Zhonghua. Deformation Behavior of Deep Excavations Supported by Permanent Structure in Shanghai Soft Deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese))
- [18] TAN Y, WEI B. Observed behaviors of a long and deep excavation constructed by cut-and-cover technique in Shanghai soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(1): 69-88.
- [19] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(6): 1004-1017.
- [20] 上海市地基基础设计标准: DGJ08—11—2018[S]. 上海: 同济大学出版社, 2019. (Foundation Design Code: DGJ08—11—2018[S]. Shanghai: Tongji University Press: 2019. (in Chinese))
- [21] LIU G B, NG C W, WANG Z W. Observed performance of a deep multistrutted excavation in Shanghai soft clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(8): 1004-1013.
- [22] 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.

CHINA ROCK 2023 第二十次中国岩石力学与工程学术年会第 2 号通知

为了加强我国岩石力学与工程领域的学术交流, 促进岩石力学与岩土工程领域科技创新, 经研究决定, 于 2023 年 10 月 20-22 日召开“CHINA ROCK 2023 第二十次中国岩石力学与工程学术年会”。为更好地秉承“规模化、国际化、一体化”办会精神, 服务好广大岩石力学与工程相关领域在校大学生和青年会员, 将在京外组织各地中心会场。北京主会场将设置不同议题的分会场。现将会议有关事项通知如下:

一、举办单位

指导单位: 中国科学技术协会 (CAST)

主办单位: 中国岩石力学与工程学会 (CSRME); 国际地质灾害与减灾协会 (ICGdR)

承办单位: 国际岩石力学与岩石工程学会各专业委员会; 中国岩石力学与工程学会各专委会、分会、省级学会等

二、会议时间、主会场地点

时间: 2023 年 10 月 20-22 日 (10 月 20 日报到), 主会场地点: 北京九华国际会展中心。

三、论文投稿与出版

为进一步贯彻《中国岩石力学与工程学会“十四五”规划》, 落实“将论文写在祖国大地上”, 提高 CHINA ROCK 会议成果质量, 大会设三种论文发表方式, 投稿截止日期为 2023 年 7 月 15 日。具体安排如下:

(1) 学会主办及合作期刊发表

作者须在各期刊主页自行投稿, 投稿时请务必标注所参与的会场信息。如, 在中文期刊投稿系统注明“ChinaRock 2023 以

及分会场编号/中心会场名称”, 在英文期刊投稿系统注明“ChinaRock 2023, Session No./ Local Session No.”。

(2) 会议论文集

大会会议论文集由中国建筑工业出版社出版 (有 ISBN 号)。作者直接投稿全文, 投稿网址: <http://chinarock.csrme.com>。

(3) 会议摘要集

大会会议摘要集仅需投递 500 字左右摘要 (无 ISBN 号), 投递网址: <http://chinarock.csrme.com>。

四、科技创新工业展览会

学术会议同期, 还将举办“CHINA ROCK 2023 第二十次中国岩石力学与工程学术年会科技创新工业展览会”, 创建国际一流 CHINA ROCK 品牌展会, 搭建展示交流平台。

本次展会继续采用“线下+线上”的模式, 线下设置六大主题展区, 同时打造线上 VR 展厅; 继续以“国际化、规模化、一体化”为方向, 为工程装备制造单位、科研院所及相关企、事业单位搭建科技创新展示交流平台。

六大主题展区总体规划: ①重大工程展区; ②重点实验室及高校创新成果展区; ③新材料、新仪器、新设备、新软件展区; ④CSRME 科学技术奖及优秀项目展区; ⑤礼赞科学家精神与青托展区; ⑥学术期刊及科普基地展区。

联系方式: 潘秋景 qiujing.pan@csu.edu.cn (征文), 胡丹婷 010-6266 0545 (分会场/中心会场), 崔家宇 15810687582 (展览), 大会邮箱: chinarock_csrme@163.com。

(中国岩石力学与工程学会 供稿)