

“上海中心”裙房深大基坑逆作开挖设计及实践

谢小林¹, 翟杰群¹, 张羽¹, 杨科², 郭晓航², 贾坚¹

(1. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 结合位于上海浦东陆家嘴金融贸易区目前在建的中国最高楼“上海中心大厦(632 m)”裙房地下室深基坑逆作开挖的设计及实践, 探讨在上海饱和软土地区深大基坑逆作开挖的适用条件、应用特点、设计难点和技术对策、以及深基坑安全稳定和变形控制的设计技术措施。为软土地区同类深大基坑逆作法工程提供借鉴和参考。

关键词: 上海中心; 深大基坑; 逆作法

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0744-06

作者简介: 谢小林(1979-), 男, 硕士, 主要从事软土深基坑工程设计及研究工作。E-mail: thank_xl@163.com。

Design and practice of top-down method for large-scale podium basement excavation of Shanghai Tower

XIE Xiao-lin¹, ZHAI Jie-qun¹, ZHANG Yu¹, YANG Ke², GUO Xiao-hang², JIA Jian¹

(1. Architectural Design & Research Institute of Tongji University (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092 China; 2. Department of

Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China.)

Abstract: An in-depth exploration of the top-down method for large-scale basement excavation and construction in saturated soft clay area in Shanghai is introduced with respect to its application, design difficulties as well as techniques to mitigate deformation and to ensure safety and stability of the excavation. Researches are carried out with the reference to the top-down method applied to the basement construction under podium of Shanghai Tower, the tallest building in China when it is completed, which will stand at a height of 632 m in Lujiazui CBD area. It is intended to serve as a future reference for similar projects.

Key words: Shanghai Tower; deep and large excavation; top-down construction method

0 前言

上海中心大厦项目是中国目前在建的第一高楼。为加快塔楼施工进度, 确保塔楼尽早封顶, 本工程塔楼区地下室采用了外径为 123.4 m (内径 121 m) 的大直径无内支撑圆形基坑明挖顺作法进行施工^[1]。塔楼结构出±0.00 后, 裙房区基坑采用逆作法开挖施工, 以满足施工场地需要, 同时减少施工噪音、扬尘等影响, 避免支撑拆除爆破, 充分贯彻绿色建造的要求。

上海中心裙房区基坑开挖面积大, 深度深, 处于金融贸易区中心, 周边市政管线及环境复杂, 保护要求高。本文结合“上海中心大厦”裙房地下室深基坑逆作开挖的工程实践, 来探讨在饱和软土地区深大基坑逆作开挖的设计特点和难点, 以及深基坑安全稳定和变形控制的设计技术对策, 其成果可为软土地区同类深大基坑逆作法工程提供借鉴和参考。

1 工程概况

1.1 工程概况

“上海中心大厦”项目位于上海浦东新区陆家嘴金融中心区, 四周均为主干道, 并与金茂大厦、环球金融中心相邻。拟建主楼楼高 632 m (121 层), 裙房 5 层。本项目基坑总面积约 34960 m², 基地呈四边形, 每边长约 200 m, 共设 5 层地下室, 塔楼区基坑开挖深度为 31.1 m, 裙房区基坑开挖深度为 26.7 m, 局部开挖 27.7 m。本工程效果图见图 1, 场地鸟瞰图见图 2。

1.2 工程地质条件

上海位于长江三角洲入海口东南前缘, 属三角洲冲积平原。地质土层主要由饱和黏性土、粉性土以及砂土组成, 一般具有成层分布特点。本工程场地内除缺失第⑧层黏土层外, 其余各土层均有分布。深度 27 m 以上分布以淤泥质黏土、黏土及粉质黏土为主的软土层, 具有高含水率、高孔隙比、高灵敏度、低强度、高压缩性等不良地质特点。场地内浅层地下水属潜水

类型, 水位埋深一般为地表下 1.0~1.7 m。场地地表以下 27 m 处分布⑦层砂性土, 为第一承压含水层; ⑨层砂性土为第二承压含水层, 第⑦层与第⑨层承压水相互连通, 水量补给丰富。



图 1 上海中心效果图
Fig. 1 Prospective view of Shanghai Tower

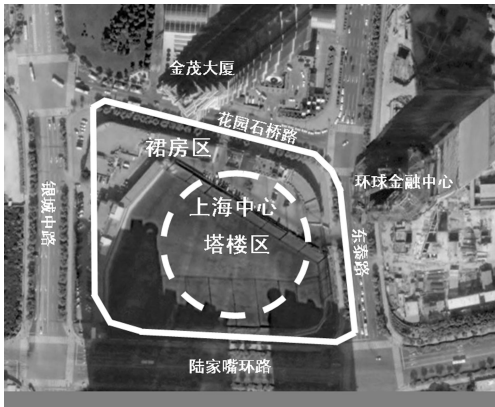


图 2 上海中心鸟瞰图
Fig. 2 Bird's eye view of Shanghai Tower

1.3 裙房基坑逆作开挖的优点

“上海中心大厦”塔楼施工工期是本工程进度控制的关键。为加快塔楼区施工速度, 结合塔楼承台为正多边形的工程特点, 将塔楼基坑设计为外径 123.4 m (内径 121 m) 的大直径无内支撑圆形基坑。塔楼结构出±0.00 后再逆作施工裙房区基坑。裙房区基坑采用逆作的设计方案具有以下优点: ①裙房区基坑逆作施工, 可利用地下室顶板作为施工场地, 解决了裙房区基坑开挖期间施工场地不足的问题; ②裙房区基坑采用逆作法施工, 利用结构梁板兼作支撑, 节省了临时支撑体系的工程量以及支撑拆除工程量; ③裙房区基坑逆作可减少施工噪音、扬尘等, 避免支撑拆除爆破, 充分贯彻了绿色建筑技术的要求。

裙房区基坑逆作施工工况详见图 3。

2 裙房基坑逆作的设计要点及对策

2.1 深大基坑逆作法的设计要点及控制指标

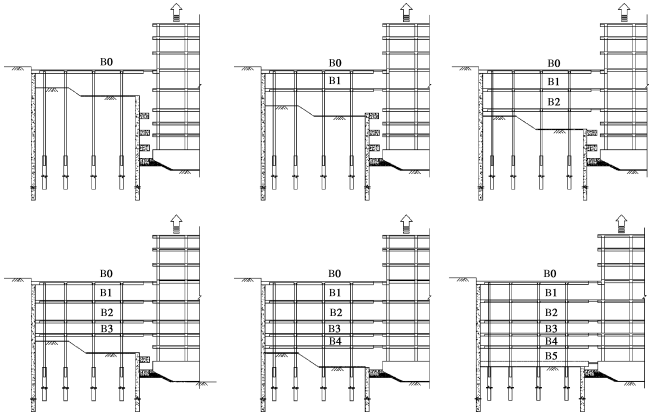


图 3 裙房基坑逆作开挖施工工况图

Fig. 3 Top-down construction flow of podium basement

上海中心裙房基坑开挖深度约 26.7 m, 开挖面积为 23660 m², 共设 5 层地下室。本工程处于饱和软土地区, 位于城市中心, 周边环境复杂、基坑开挖面积大、深度深, 根据工程特点, 裙房基坑采用逆作法施工, 并制订了以下的设计要点及控制指标。

(1) 基坑逆作变形及控制指标

在饱和软土地区, 由于深大基坑土方卸载, 应力场、位移场的变化会产生较大的坑内土体回弹和隆起量, 加之逆作施工楼板上的施工荷载分布不均, 如设计施工应对不当, 会导致过大的楼板立柱隆起与差异隆起, 易引起楼板开裂, 损害结构安全^[2]。因此, 逆作基坑开挖需严格控制楼板立柱的绝对隆起量与差异隆起量。另外, 本基坑开挖面积大、深度深, 采用逆作法施工出土效率较低, 加之饱和软土的流变性特点, 易产生较大的基坑变形^[3]。因此, 围护结构变形控制及周边地表沉降控制也是本项目设计与施工的要点。针对本工程特点, 确定裙房基坑逆作的主要变形控制指标如表 1 所示。

表 1 裙房基坑逆作变形控制指标

Table 1 Deformation requirements for top-down podium basement construction	
控制内容	设计值/ mm
立柱桩隆起	35
相邻立柱桩差异隆起	20
地墙与相邻立柱桩差异隆起	20
地连墙最大侧向位移 δ_h	$50(1.8\%H)^{[4]}$
坑外地表最大沉降 δ_v (未叠加降承压水影响)	$40(1.5\%H)^{[4]}$

(2) 两墙合一地墙围护结构体系

本裙房地下室采用地下连续墙作“两墙合一”结构形式, 逆作开挖阶段采用地墙作围护结构, 在永久使用阶段兼作地下室外墙。因此需对地墙的接头、地下室结构与地墙的连接构造以及其他设计施工措施进行专门研究, 保证地墙的受力及止水性能满足永久使用阶段的要求。

(3) 逆作开挖的竖向支撑

逆作开挖的竖向支撑体系一般采用钢格构柱临时托换地下室楼板梁柱节点。为控制工程造价,方便施工挖土,本裙房逆作法设计采用钢管柱(内浇高强度混凝土),结合柱网设计,一柱一桩,钢管柱作为永久结构的一部分,在开挖阶段作为逆作法的竖向支撑体系,在使用阶段作为裙房地下室柱的芯柱,因此对钢管柱的设计以及施工精度有着严格的技术要求,并需对钢管柱与梁的连接节点进行专门的设计研究。

(4) 按需分级降承压水

本场地内承压水含水层埋深约 29 m,承压水头埋深约在地表下 10 m,而裙房基坑开挖深度约 26.7 m,当开挖施工 B3 层时(约 16 m)需降承压水。降低承压水头压力,既有利于基坑的稳定安全,也有利于控制立柱的隆起量,保护已施工的结构楼板;但长时间和过量抽取承压水会引起周边路面过大的沉降,影响市政管线等重要公共设施的使用。因此,如何合理有效、按需分级降承压水也是本工程安全实施的要点。

2.2 设计分析预测及应对措施

(1) 基坑逆作的变形控制措施

为控制基坑开挖变形,针对上海地区饱和软土的流变性特性,应用“时空效应”理论,设计提出盆式开挖方式。按“留土护壁,限时、对称浇筑垫层,施工楼板”的原则,及时形成南北向及东西向的素混凝土垫层支撑体系及结构体系(图 4 中灰色区域),控制围护结构变形。开挖前设计针对设计工况进行了计算预测,以分级控制变形。在基坑开挖过程中,对整个开挖过程实行信息化管理,根据前一个工作日的基坑变形监测情况,调整基坑后续的挖土流程,以控制基坑开挖变形,保护周围环境。

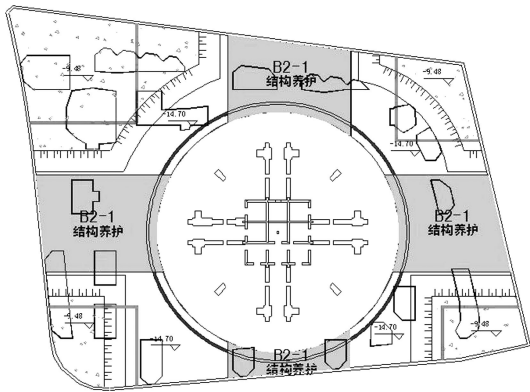


图 4 每层先形成十字对撑结构

Fig. 4 Perpendicular supporting system

(2) 两墙合一地墙的设计措施

裙房区地墙为两墙合一结构形式,为了达到控制基坑变形,确保基坑开挖阶段的安全,采用了 1.2 m 厚,48 m 深,混凝土强度等级为水下 C40 的地墙,同

时为满足永久使用阶段的要求,还采用了以下的设计措施:①采用地墙墙底注浆,以协调和控制逆作法开挖阶段地墙槽段间、地墙与桩基间的差异隆起;②在地墙锁口管钢筋笼端部设置 V 形薄钢板并在钢筋笼外包止浆帆布,以保证地墙及接头的施工质量和减少围护结构的渗漏水;③在地墙槽段分幅位置处设置扶壁柱和止水带等止水措施,以解决接缝处的防水问题。

(3) 逆作法立柱的设计

裙房基坑逆作采用的立柱结合裙房柱网设置,为一柱一桩的形式;逆作施工结束后外包钢筋混凝土作为框架柱使用。裙房的柱网尺寸基本为 10.8 m×8.4 m,为满足建筑、结构尺寸以及承载力要求,设计采用了 $\phi 550$ 钢管立柱,内灌高强混凝土,插入钻孔灌注桩。以满足施工阶段和使用阶段的安全和使用要求。图 5 为地下室结构梁与钢立柱的连接节点作法。

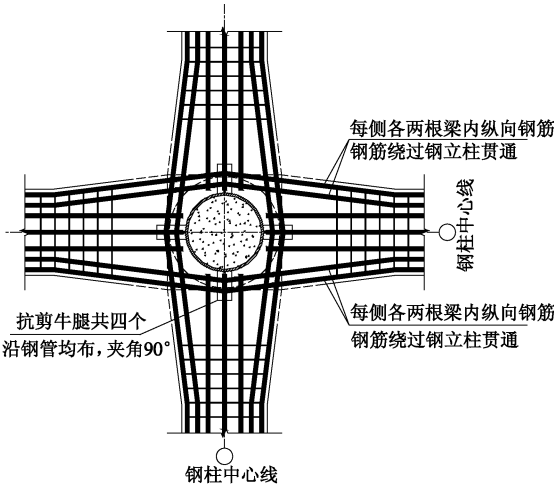


图 5 逆作法立柱与结构梁连接节点

Fig. 5 Connection details of vertical prop and basement beam

(4) 考虑立柱隆起影响的楼板结构设计

为控制裙房基坑土方卸载过程中相邻立柱桩间的差异隆起,在设计过程中,我们对不同开挖工况以及不同荷载情况下,对坑内土体回弹导致的立柱隆起量进行了计算预测分析,并根据立柱与坑边距离的远近进行修正。对结构板跨,施加计算所得的位移荷载,进行有限元应力分析,以指导楼板的结构设计。

a) 立柱隆起及差异隆起的分析预测

本工程中,我们采用 Boussinesq 解和 Mindlin 解,通过对土体附加应力及不同应力状态下的回弹模量、立柱桩的正负摩阻力的计算,估算不同工况下立柱桩隆起,从而确定合理的立柱桩的桩径、桩深等设计参数。图 6 为立柱隆起预测结果,其中 A 桩为桩顶荷载较大的立柱桩(远离取土口),B 桩为与 A 桩相邻的桩顶荷载较小的立柱桩(位于取土口边缘的立柱桩)。

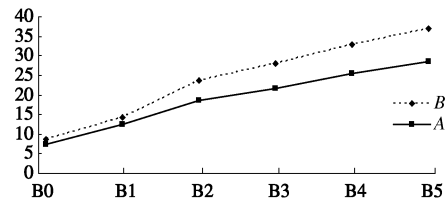


图 6 立柱桩隆起计算预测结果

Fig. 6 Prediction of vertical prop uplift

根据分析预测结果, 相邻立柱桩差异隆起小于 15 mm。但考虑到地层分布的不均匀、立柱桩间刚度的差异以及楼板分块施工导致的桩顶荷载分布不规律, 楼板设计时, 将基坑开挖阶段的相邻立柱差异隆起控制值定为 20 mm。

b) 逆作楼板在立柱差异隆起下的内力分析预测:

逆作结构楼板设计中, 我们考虑了在立柱差异隆起 20 mm 影响下的楼板附加内力分析。图 7, 8 为取土口中部 B1 结构内力的计算分析结果。

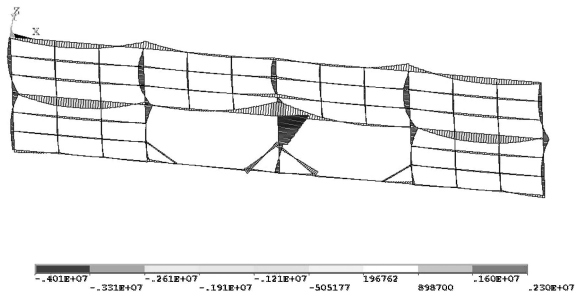


图 7 考虑立柱差异隆起的梁弯矩图 (最大值 2370 kN·m)

Fig. 7 Bending moment for B1 beams (max: 2370 kN·m)

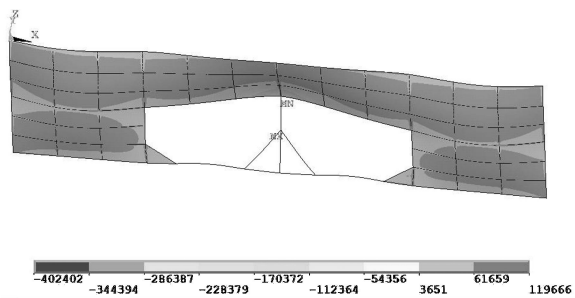


图 8 考虑立柱差异隆起的楼板弯矩图 (最大值 402 kN·m)

Fig. 8 Bending moment for B1 slab (max: 402kN·m)

根据计算预测分析可知, 相邻立柱桩差异隆起 20 mm 的情况下, 结构将产生较大的附加内力。为此, 在计算预测的基础上, 设计加强了地下室主体结构梁板的构造和配筋。

(5) 承压水抽水降压对基坑周边环境的影响预测及对策

如何降承压水以保证基坑开挖的安全稳定, 防止基坑开挖过程中承压水突涌破坏, 同时又要控制长期大量抽取承压水所带来对周边环境的影响, 成为本基坑工程的重要问题。

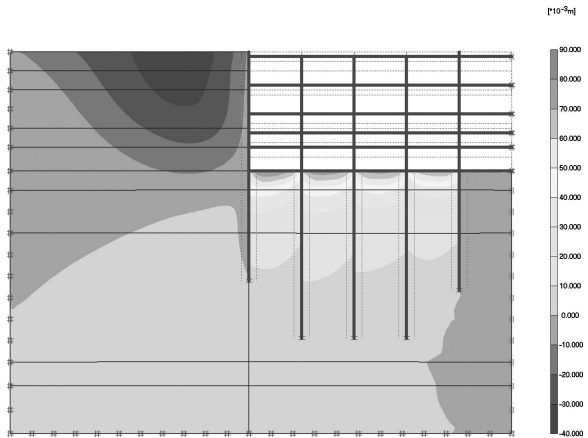


图 9 基坑开挖引起的周边地表沉降 (最大值: 36 mm)

Fig. 9 Ground settlement due to excavation (max: 36mm)

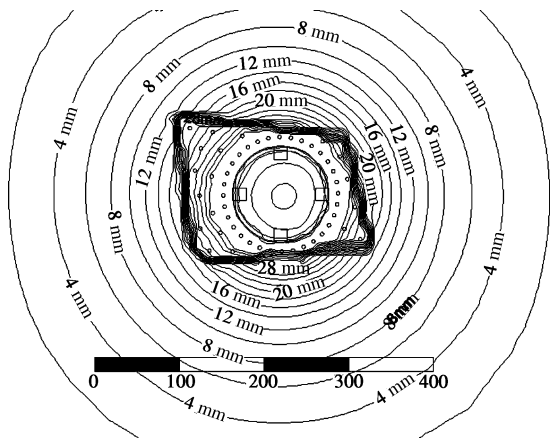


图 10 基坑降承压水引起的周边地表沉降预测 (最大值: 28 mm)

Fig. 10 Ground settlement due to dewatering of confined water

(max: 28 mm)

本项目在设计阶段, 通过数值分析, 分别模拟预测了基坑开挖以及降承压水对周边环境的影响, 计算结果见图 9, 10。由图可知, 基坑卸载导致的最大地表沉降为 36 mm, 如叠加降承压水对周围环境的影响, 最大地表沉降达 64 mm, 对周围环境有一定的影响。因此, 在工程实施过程中需采取合理有效、按需分级降压的措施, 以控制长时间大量抽取承压水对基坑周边环境的影响, 满足周边设施的使用要求。

3 工程实测值与计算值的对比分析

3.1 地墙侧向变形计算预测与实测的对比

表 2 和图 11 为裙房基坑地墙侧向变形计算预测与工程实测值 (地墙测斜 P07 孔) 的对比分析。通过图 11 和表 2 的对比分析可知计算预测结果与实测值较为吻合。

3.2 立柱隆起计算预测与实测的对比

图 12 为立柱桩隆起值与实测值的对比, 图 13 为相邻立柱桩差异隆沉实测值。由图可知, 立柱间的最

大差异隆起<20 mm, 基本满足设计阶段确定的立柱差异隆起控制指标。

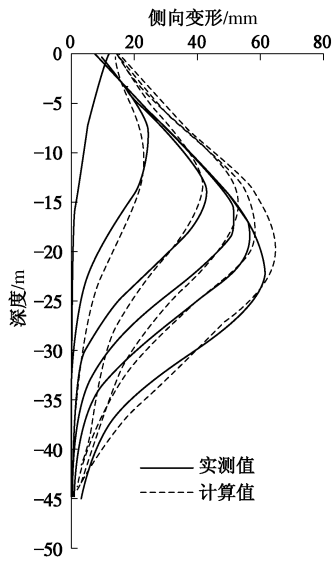


图 11 地墙侧向变形计算值与实测值 (P07) 对比

Fig. 11 Comparison between predicted value and in-situ measurements in average of diaphragm wall deformation (P07)

表 2 各阶段地墙侧向变形计算值与实测值汇总

Table 2 Theoretical predictions and in-situ measurements of diaphragm wall deformation at different stages mm

工况	地墙测斜监测数据 (P07)	计算分析结果
B0 层施工(挖至-3.8 m)	15	14
B1 层施工(挖至-9.7 m)	23	24
B2 层施工(挖至-15.7 m)	42	43
B3 层施工(挖至-19.7 m)	53	51
B4 层施工(挖至-23.4 m)	59	57
底板施工(挖至-27.2 m)	65	62

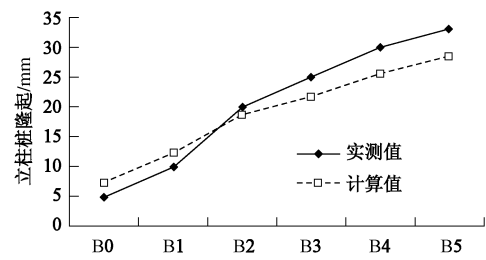


图 12 立柱隆起计算值与实测值对比(C161)

Fig. 12 Comparison between uplift prediction and in-situ measurement for props (C161)

3.3 降承压水对周边环境的预测与实测对比

图 14 为各开挖工况下的坑外最大沉降实测值与计算预测值的对比。由图可知, 模拟预测的沉降曲线及发展趋势与实测数据较为吻合; 特别需要指出的是当开挖至 16 m 左右, 开启承压水抽水井后, 场地周边地表沉降有加速的趋势。

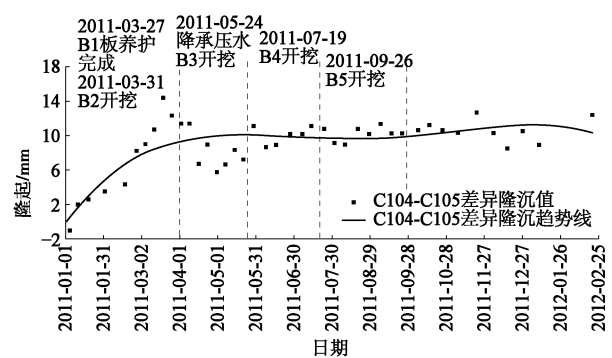


图 13 立柱差异隆起工程监测情况(C104~C105)

Fig. 13 Monitoring data of differential uplift between props

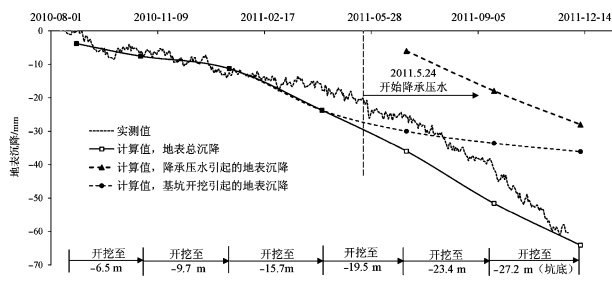


图 14 周边地表沉降预测与工程实测的比较

Fig. 14 Comparison between ground settlement predictions and in-situ measurements

通过工程实测数据与预测值的对比分析, 说明通过严格控制挖土流程, 按需分级降承压水, 降水井点分批启动, 控制承压水降深及出水量, 可将基坑开挖及降承压水对周边环境的影响控制在预期范围内。

4 结 语

图 15 为上海中心基坑逆作施工现场照片。上海中心裙房区基坑开挖面积大、深度深, 采用逆作开挖, 其设计和施工的难度大, 在大量工程调研、理论研究和科学计算的基础上, 通过对设计要点、难点的深入分析, 确定设计控制值, 并通过大量和合理的设计分析预测, 采取相应的设计对策措施并信息化施工和动态设计, 分级控制变形, 从而确保了上海中心裙房逆作法深大基坑的安全顺利实施。



图 15 上海中心基坑逆作施工现场照片

Fig. 15 In-situ photo of Shanghai Tower

参考文献:

- [1] JIA J, XIE X L, LIU C P, et al. Design and research of circular diaphragm wall for deep excavation of shanghai tower[C]// Geotechnical Special Publication: Deep and Underground Excavations, GSP 206, ASCE, 2010: 24 - 36.
- [2] 贾 坚. 逆作开挖深基坑控制卸载变形的方法与实践[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(2): 304 - 308. (JIA Jian. Deflection controlling measures and practices of deep foundation pits by use of top-down excavation method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(2): 304 - 308. (in Chinese))
- [3] 贾 坚, 谢小林. 上海软土地区深大基坑卸荷变形机制[J]. 上海交通大学学报, 2009, **43**(6): 1005 - 1010. (JIA Jian, XIE Xiao-lin. Unloading deformation mechanism of deep-large excavation in shanghai clay area[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, **43**(6): 1005 - 1010. (in Chinese))
- [4] DG/TJ 08—61—2010 基坑工程技术规范[S]. 2010: 150. (DG/TJ 08—61—2010 Technical code for excavation engineering[S]. 2010: 150. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)