

DOI: 10.11779/CJGE2014S1005

深圳平安国际金融中心超深基坑工程实例分析

胡海英¹, 张玉成^{2, 3, 4}, 刘惠康⁵, 饶彩琴⁶, 骆以道⁷, 刘小斌⁶

(1. 华南农业大学水利与土木工程学院, 广东 广州 510642; 2. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 3. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510610; 4. 广东省突发公共事件应急技术研究中心, 广东 广州 510610; 5. 华南理工大学土木工程系, 广东 广州 510640; 6. 深圳市建设工程质量监督总站, 广东 深圳 518028; 7. 深圳市基础工程有限公司, 广东 深圳 518026)

摘要: 深圳平安国际金融中心大厦是华南地区目前在建的最高建筑物(塔楼屋顶高度 588 m, 塔尖高度 660 m), 地上 118 层, 地下 5 层, 基坑开挖深度达到 -33.8 m, 本基坑不仅开挖深, 周边环境复杂, 且基坑开挖不仅受到了周边众多建筑物和北侧地铁隧道的限制, 在如此复杂环境下进行基坑支护设计和施工均难度较大, 结合其地质条件和周边环境, 详细介绍了该基坑设计和施工中的关键技术, 如支撑体系中采用了双圆环内支撑、止水采用了高压旋喷桩和袖阀管注浆结合的方法及结合圆环支撑采用了栈桥坡道出土等方法, 本基坑属于复杂环境条件下超深基坑, 其支护和施工关键技术可为类似工程提供借鉴和参考。

关键词: 深基坑; 双圆环; 支撑; 袖阀管; 注浆

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S1-0031-08

作者简介: 胡海英(1976-), 女, 辽宁营口人, 高级工程师, 从事岩土工程方面教学和研究工作。E-mail: 282392530@qq.com。

Case study of super-deep foundation pit of Pingan IFC

HU Hai-ying¹, ZHANG Yu-cheng^{2, 3, 4}, LIU Hui-kang⁵, RAO Cai-qin⁶, LUO Yi-dao⁷, LIU Xiao-bin⁶

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 3. The Geotechnical Engineering Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou 510610, China; 4. The Emergency Technology Research Center of Guangdong Province for Public Events Guangzhou 510610, China; 5. Department of Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 6. Shenzhen Construction Quality Supervision Center, Shenzhen 518032, China; 7. Shenzhen City Foundation Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518026, China)

Abstract: Pingan IFC is the highest building under construction in South China at present, whose top floor is 588 m high and spire's is 660 m high, with 5 floors under the ground and 118 floors above the ground. The excavation depth of foundation pit is up to -33.8 m, and the surrounding environment is complex. It is subjected to many nearby buildings and subway tunnel at its north side. Therefore, the design and construction of supports for the foundation pit are difficult. The key technical schemes for the design and construction of the foundation pit are introduced. The double-ring inner-supporting structure is used as the inner support system, and the combination of high-pressure jet grouting pile and grouting with sleeve valve pipe method is used to cut off water. Considering the ring inner-supporting structure, the earth is removed at trestle. As a super-deep foundation pit under complex environment, its design and technical solution may provide reference for similar projects.

Key words: deep foundation pit; double ring; support; sleeve valve pipe; grouting

0 工程概况

深圳平安国际金融中心超深基坑位于深圳市福田区, 总占地面积 1.9 万 m², 总建筑面积 46.1 万 m², 属于超高层办公楼, 塔楼地上 118 层, 裙楼地上 11 层, 主体结构塔顶高 588 m, 塔尖高度为 660 m, 地下室 5 层, 基坑开挖面积约 1.8 万 m², 开挖深度 29.8~33.8 m, 基坑周长 550 m^[1]。

基坑工程场地四周高楼林立, 有多栋在用的高档商场、住宅及办公楼, 还有几条市政管线和正在运营的地铁 1 号线, 基坑四周为 4 条现有道路, 北侧为福华二路, 有信息枢纽大厦, 距离地铁罗宝线通风竖井

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378131); 广东省水利科技创新基金项目(2009-25); 广东省公路管理局科技基金项目(2012-09)
收稿日期: 2014-07-28

最近不足 2 m；南侧为福华三路，西南侧有星河国际住宅小区；东侧为益田路，有卓越大厦和国际商会中心，东侧距广深港高铁基础约 27 m；西侧为星河 coco park。周边复杂的环境，对基坑支护结构的变形要求非常严格，地铁及高铁侧要求基坑支护结构的水平位移不大于 20 mm，对于基坑开挖深度达 33 m 且存在强透水性的砂层来说，支护设计和施工难度均非常大，基坑与周边建筑空间关系见图 1，基坑与周边建筑及地铁关系见图 2。

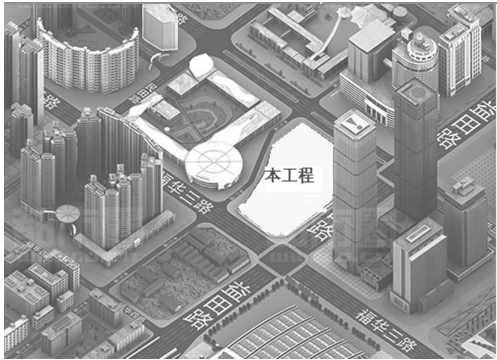


图 1 基坑与周边建筑三维关系示意图

Fig. 1 Sketch of foundation pit and surrounding buildings

本文在指出该基坑设计难点和重点基础上，详细

介绍了该基坑设计和施工中的关键技术方案，为类似工程提供参考和借鉴。

1 工程地质情况

根据钻探揭露，场地内主要分布有：①人工填土层；②第四系黏土和冲洪积层：中粗砂、黏土、粗砾砂层等；③第四系残积土层：残积土、燕山晚期花岗岩：全风化、强风化、中风化。

地下水属上层滞水、承压水和基岩裂隙水。基坑底主要位于全风化或强风化岩层，西南侧和东北侧基坑坑底位于中风化基岩中。钻探及原位测试测得的岩土体指标如表 1，典型地质剖面图见图 3，岩土体力学参数取值见表 2^[1]。

2 基坑支护设计方案

2.1 基坑的特点和难点

通过前面工程概况、周边环境和地质条件的分析，本基坑工程存在以下特点和设计难点^[2-7]：

(1) 基坑开挖深且大：主塔基坑开挖深度达 33.8 m，裙楼基坑深度达 30.8 m，基坑长约 170 m，宽约 120 m，周长约 550 m，33.8 m 的开挖深度属于超深基坑。

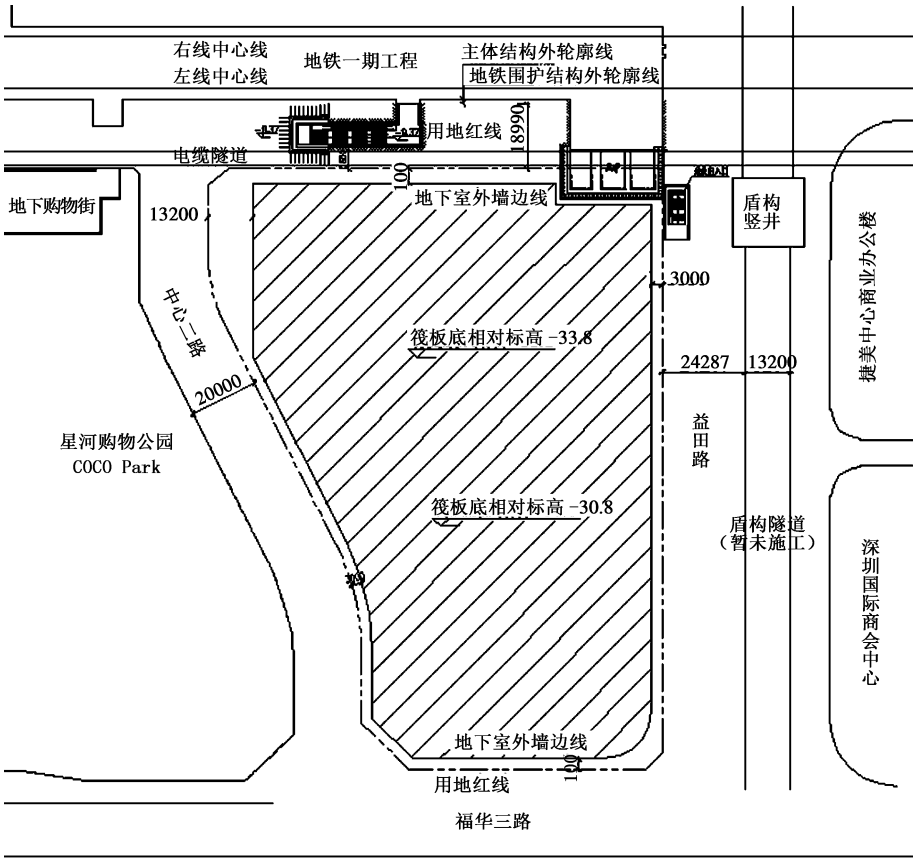


图 2 基坑与周边建筑及地铁关系平面图

Fig. 2 Plan of foundation pit, surrounding buildings and subway tunnel

表 1 地质情况及现场原位测试结果

Table 1 Geological conditions and results of in-situ tests

土层名称	层厚/m	平均层厚/m	土性状态	标准贯入 击数	重型 N _{63.5} /击	旁压模量 E _m /MPa
人工填土①	1.4~8.8	3.80	松散—稍密	11.7	3.3	—
粉质黏土②	0.6~2.2	1.30	软塑—可塑	5.2	—	2.2
黏土③-1	0.5~4.8	2.30	可塑	10.2	—	2.7
中粗砂③-2	0.6~7.5	1.90	湿—饱和, 稍密—中密	14.4	4.1	—
粉细砂③-3	1.0~4.3	1.10	湿, 稍密	10.8	3.3	—
粉质黏土③-4	0.5~8.5	2.19	可塑—硬塑	17.4	—	6.4
质粉质黏土③-5	0.5~1.6	1.16	可塑	7.9	—	—
粗砾砂③-6	0.6~6.5	1.90	饱和, 稍密—中密	20.8	5.3	—
砾质黏性土④	3.2~14.0	6.50	湿—稍湿, 可塑—硬塑	29.2	—	14.2
全风化⑤-1	1.9~10.9	4.40	岩芯呈土状	50.5	—	27.0
全风化⑤-2	1.9~10.4	4.60	岩芯呈土状	65.1	—	34.2
强风化⑥-1	1.8~26.3	13.70	岩芯呈坚硬土状	89.8	—	48.9
强风化⑥-2	0.9~7.3	5.60	芯多呈砂砾状及土夹碎块状	—	—	82.0
中风化⑦-1	0.9~12.0	—	岩芯呈块状	—	—	—
中风化⑦-2	0.6~8.1	—	岩芯呈短柱状	—	—	—

表 2 岩土体力学参数取值表

Table 2 Parameters of rock and soils

土层名称	土层编号	重度/(kN·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	摩阻力/kPa
人工填土	①	17.0	8.0	10.0	40.0
粉质黏土	②	16.0	6.0	10.0	20.0
黏土	③-1	18.0	13.0	20.0	100.0
中粗砂	③-2	19.5	27.0	0.0	120.0
粉细砂	③-3	19.5	25.0	0.0	100.0
粉质黏土	③-4	19.0	15.0	20.0	100.0
质粉质黏土	③-5	16.5	6.0	12.0	60.0
粗砾砂	③-6	19.0	30.0	0.0	140.0
砾质黏性土	④	19.5	21.0	22.0	100.0
全风化	⑤-1	20.0	25.0	35.0	120.0
全风化	⑤-2	20.0	27.0	40.0	140.0
强风化	⑥-1	20.5	28.0	45.0	160.0
强风化	⑥-2	21.0	29.0	50.0	160.0

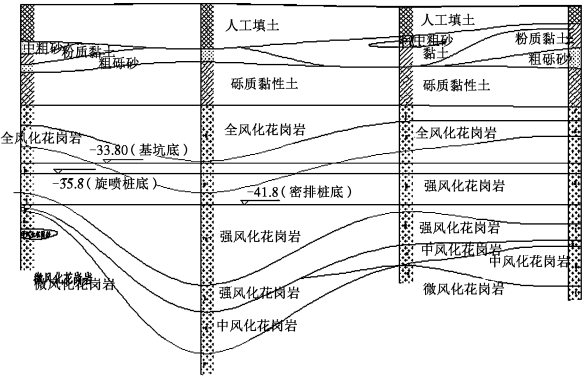


图 3 基坑范围内典型地质断面图(北侧)

Fig. 3 Typical geological section of foundation pit

- (2) 基坑开挖面积及土方量均较大: 开挖面积大约 18000 m², 开挖土方约 55 万 m³, 基坑处于闹市区, 且工期紧, 设计时要考虑施工和出入方便。
- (3) 含有软土层和透水层: 场地内有软土层: 人

- 工填土, 粉质黏土层, 中粗砂、粉细砂和粗砾砂强透水层。
- (4) 周边环境复杂: 基坑四周有多栋在用的高档商场、住宅及办公楼, 基坑开挖要考虑对建筑物的影响, 建筑物边线距离基坑边大部分在 20 m 左右, 且要考虑基坑施工期间不能对居民区和商铺营业产生影响。
- (5) 附近有市政管线和地铁 1 号线: 最近的电缆管线距离基坑边只有 3.8 m, 北侧还有正在运营的地铁 1 号线, 地铁口及风亭紧邻基坑边, 最近处仅 3.0 m, 东侧有拟建的高铁线, 距基坑边 24.3 m。
- (6) 周边环境对基坑变形要求严格: 本基坑工程的安全等级为一级, 按新规范基坑水平位移控制在 60 mm (<0.25%H, H 为基坑深度) 即可以, 但由于临近有地铁, 地铁运营要求地铁相关构筑物位移不超过 20 mm, 轨道竖向变形不大于 4 mm, 对基坑开挖深度达 33.8 m, 且存在透水层的情况下, 这个位移控制对支

护设计提出了很高的要求，支护难度相当大。

(7) 超深超大桩基施工：基础采用人工挖孔桩，主塔的桩径达到 8.0 m（开孔 9.5 m），其他基础桩直径为 5.7 m（开孔 6.8 m），桩径超大，国内外罕见，巨型桩的开挖成孔难度大，深度最大为 30 m，因此，基坑支护设计时要充分考虑基础施工，不仅支护体系和支撑立柱要避开基础桩大直径挖孔桩，且要考虑土方开挖及出土的需要。

2.2 基坑支护方案选型分析及选取思路

基坑设计方案选取需要考虑的因素有：基坑平面形状及尺寸，基坑安全等级及开挖深度，岩土体的性状及地下水条件情况，基坑周边对变形的要求，主体地下结构和基础形式，施工方案的可行性，施工工期和经济指标等^[8-11]。

(1) 锚索与内支撑的比较

由于本基坑开挖深度较大，且周边具有市政管线、地铁和建(构)筑物等，锚索的长度会在基坑受到限制，与锚索方案相比，内支撑方式较好。

(2) 地下连续墙与排桩比较分析

根据等效刚度原理排桩换算的连续墙厚度见表 3，根据深圳地区排桩和连续墙施工技术、材料价格情况，一般地下连续墙的造价约为排桩造价的 1.5~2.0 倍。

排桩在深圳地区基坑中应用较多，主要有旋挖桩和钻孔咬合桩，相比其他桩型，排桩的施工工艺成熟，施工设备多，综上所述选择排桩+内支撑支护结构。

(3) 桩型和支撑型式选择

一般基坑支护现在常用挖孔桩、泥浆护壁钻孔桩、旋挖桩与咬合桩等，本基坑开挖达 33 m，加上支护桩的嵌固深度，支护桩长在 40 m 左右，且存在砂层，因此不宜采用人工挖孔桩；另外在市区施工，泥浆护壁钻孔桩灌注桩对环境有一定影响；相比来说，旋挖桩较适合本项目，其成桩速度快；咬合桩入岩困难，不宜采用，经过综合比选，最后采用旋挖桩支护。

表 3 排桩换算的连续墙厚度表

Table 3 Thickness of continuous wall converted by row piles			
地连墙厚度 H/m $H=0.838 \times D \times (1/(1+t/D))^{(1/3)}$	排桩桩 径 D/m	排桩桩 净距 t/m	排桩桩间 距 T/m
0.96	1.20	0.20	1.40
1.08	1.40	0.40	1.80
1.04	1.60	0.60	2.00
1.17	1.60	0.80	2.40
1.37	1.80	0.60	2.40

基坑支撑体可选择纵横网格状支撑或环形支撑，由于该工程塔楼中心为“钢骨-劲性混凝土”核心筒，主塔楼外框采用 8 根巨型钢骨混凝土柱、7 道巨型斜撑和 7 道环带桁架构成，见施工照片图 4，因此考虑

其施工限制，支撑采用采用钢筋混凝土双环支撑结构，其中南侧采用单环支撑，北侧单环直径较大，采用了环中套环的内支撑，圆环与支护桩之间采用 4 道钢筋混凝土撑。综合考虑各种因素，最终基坑支护方案为：钻（冲）孔混凝土灌注桩+内支撑（圆环）+四周封闭式止水帷幕的支护方案。



图 4 双圆环支撑现场照片

Fig. 4 Double-ring inner-supporting structure

2.3 基坑具体支护设计方案

选择基坑支护方案要综合考虑地质条件、地下水、上部结构、场地平面布置、基坑周围环境及经济性等因素。基坑最终支护方案采用：钻（冲）孔混凝土灌注桩+4 道内支撑+高压旋喷桩和袖阀管注浆结合的方案，基坑平面图见图 5。

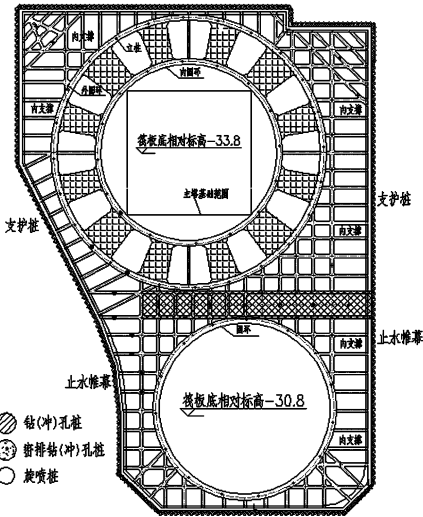


图 5 基坑平面布置图

Fig. 5 Floor plan of foundation pit

支护桩采用混凝土钻（冲）孔灌注桩，桩径有 1600 mm 和 1400 mm 两种，北侧（靠近地铁）支护桩采用 $\phi 1600@1800$ ，其他支护区域 $\phi 1400@1600$ （见图 6~8）。

混凝土强度等级为 C30，设置 4 道钢筋混凝土内支撑，并设置了两道大圆环钢筋混凝土支撑，其中支撑与地下室底板错开，主体结构核心筒布置在圆环撑

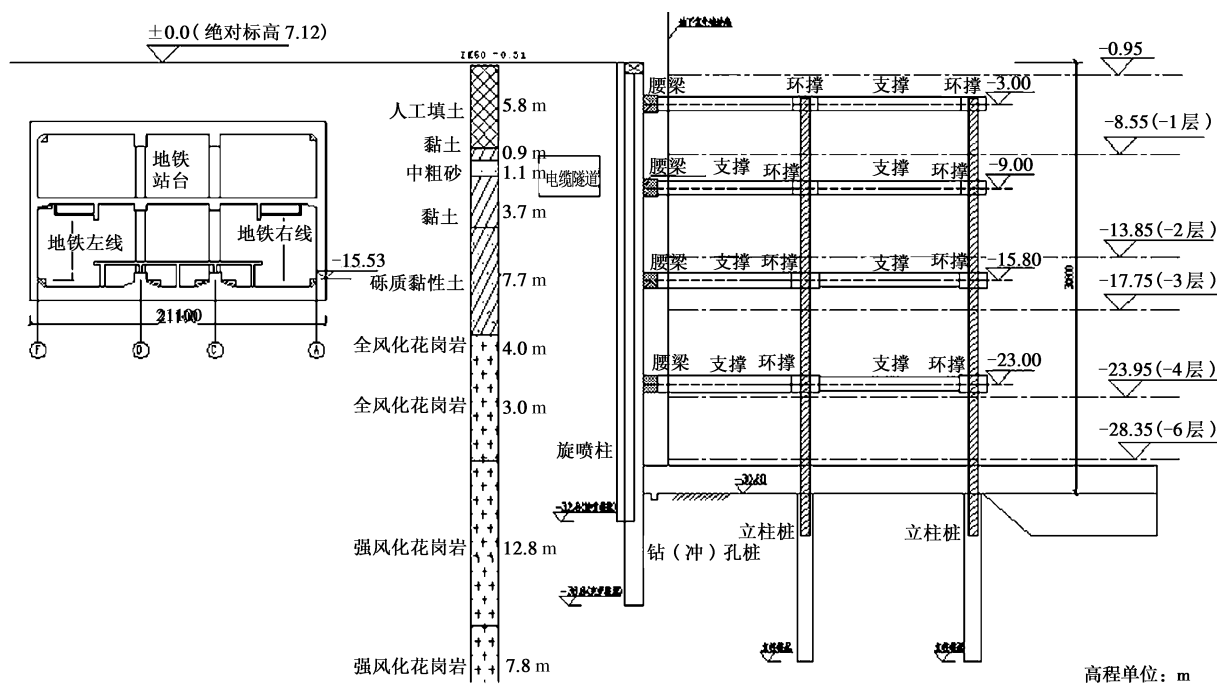


图 6 北侧典型支护剖面图

Fig. 6 Typical section of supporting structure at north side

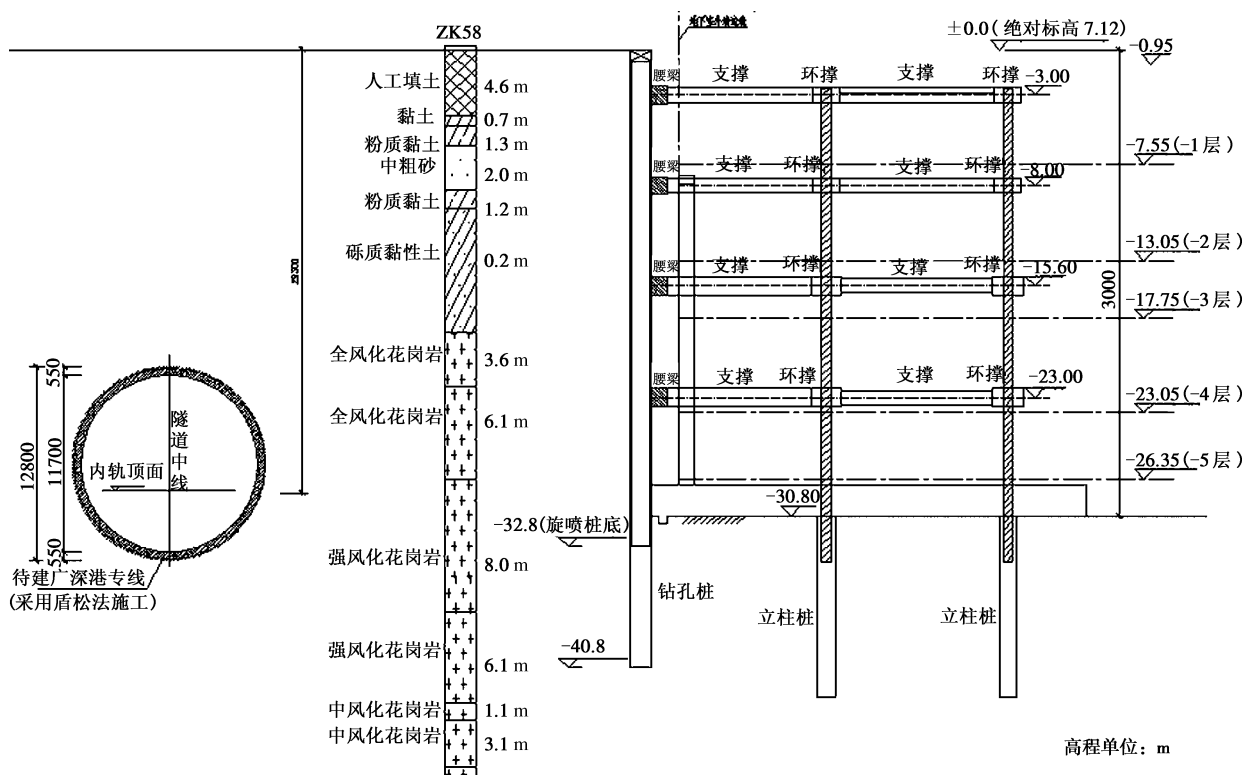


图 7 东侧典型支护剖面图

Fig. 7 Typical section of supporting structure at east side

内, 这样核心筒施工不受支护的影响, 其中主塔位置的大圆环支撑采用双圆环形式, 外环内径为 92.5 m, 内圆环内径 62.5 m, 裙楼区域采用单圆环布置, 圆环内径为 60.0 m, 具体内支撑构件尺寸和截面见表 4。

立柱采用钢管混凝土, 立柱设置均避开了基础及主体结构的柱, 钢管立柱有 $\phi 900$ mm、 $\phi 800$ mm 和 $\phi 700$ mm 3 种规格, 壁厚 20 mm, C30 混凝土填充钢管, 钻(冲)孔混凝土灌注桩为立柱基础。



图 11 基坑出土栈桥示意图及现场照片
Fig. 11 Trestle and photos of foundation pit

4 基坑监测结果分析

图 12 是 4 个测斜管实测的支护桩水平位移 (QS1 和 QS2 布置在北侧, QS3 和 QS5 布置在东侧), 支护桩的最大水平位移在 20 位置附近, QS1 的最大值为 25.13 mm, QS2 的最大值为 24.23 mm, QS3 的最大值为 20.34 mm, QS5 的最大值为 18.49 mm。图 13 是利用理正深基坑软件计算的 QS1 测斜管对应的支护断面

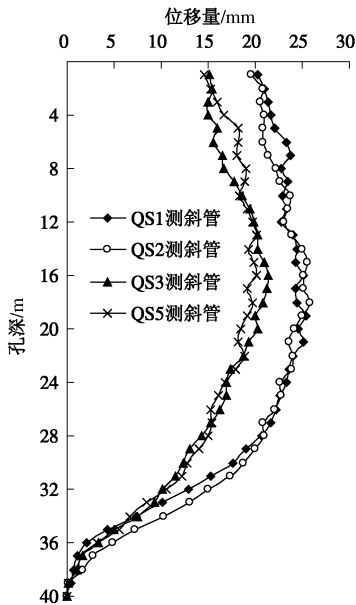


图 12 支护桩水平位移随深度变化曲线(地下室施工完成)
Fig. 12 Variation of horizontal displacement with depth of supporting piles

面, 计算出的最大位移为 31.40 mm, 实测值小于计算值, 基坑监测结果没有达到设计提出的预警值, 基坑仍处于安全状态。目前该项目的地下室部分已施工完, 现场情况见图 14。

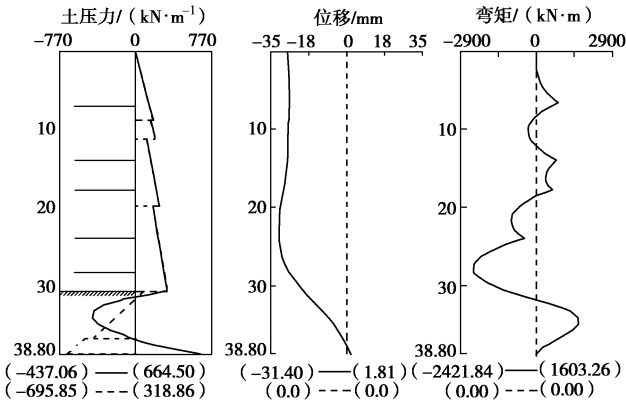


图 13 测斜管 QS1 对应支护断面的理正软件计算结果
Fig. 13 Calculated results of supporting section at QS1



图 14 地下室施工完成后的现场情况
Fig. 14 Photo of basement after construction

5 结 论

随着城市地下空间的开发, 越来越多的超大超深基坑涌现出来, 本文详细介绍深圳平安金融中心超深基坑的设计和施工方案, 并将设计计算结果和现场实测结果进行了比较, 实测结果表明, 基坑采用钻(冲)孔混凝土灌注桩+4 道内支撑+高压旋喷桩和袖阀管注浆结合的方案是安全可行的。同时也可以得出如下可供同类工程参考的建议:

- (1) 对于超深基坑, 一种支护方案已很难满足复杂基坑的设计, 应结合地质条件、周边环境 and 性价比等选用多种支护型式组合的设计方法。
- (2) 当基坑处于城市交通繁忙地段, 基坑周边有市政道路或建筑物时, 基坑施工期间对变形控制要求比较高的, 最好采用支撑刚度比较大的支护方案, 同时开挖顺序对基坑变形也影响较大。

(3) 含有透水层地质时, 基坑止水方案尤为关键, 本实例中采用了多重止水方案: 高压旋(摆)喷桩+袖阀管注浆+挂网喷射混凝土, 现场抽水试验和基坑内渗水量表明: 该止水方案的止水效果良好。

(4) 超深基坑出土方案直接影响工期, 本基坑充分利用 2 个圆环的空间, 设置了栈桥通道, 土方开挖与内支撑布置空间配合, 分段分片流水线出土。

(5) 在超深基坑中, 全方面全过程的基坑监测至关重要, 也是确保基坑和周边建筑物安全的重要手段之一。

参考文献:

- [1] 平安国际金融中心项目基坑支护工程设计[C]// 深圳地质建设工程公司, 2009. (Supporting of Super-deep Foundation Excavation of Ping'an International Financial Center[C]// Shenzhen Geology & Construction Engineering Company. 2009. (in Chinese))
- [2] 杨光华. 广东深基坑支护工程的发展及新挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(11): 2276 - 2285. (YANG Guang-hua. Development and new challenge of deep excavation in Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(11): 2276 - 2285. (in Chinese))
- [3] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 63. (YANG Guang-hua. The practical calculation method and its application for the retaining structure of the deep excavation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 63. (in Chinese))
- [4] 杨光华. 深基坑开挖中预应力锚杆或预应力支撑支护结构的计算分析[J]. 建筑结构, 1996(4): 9 - 12. (YANG Guang-hua. The analysis of the retaining structure with prestressed anchor or prestressed brace in deep excavation[J]. Building Structure, 1996(4): 9 - 12. (in Chinese))
- [5] JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (JGJ120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))
- [6] SJG05—2011 深圳市基坑支护技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (SJG05—2011 Technical code for retaining and protection of excavations in Shenzhen City[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))
- [7] 张玉成, 杨光华, 吴舒界, 等. 土钉支护结构变形与稳定性关系探讨[J]. 岩土力学, 2014, **35**(1): 238 - 247. (ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, WU Shu-jie, et al. Discussion on relationship between deformation and stability of soil nailing structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(1): 238 - 247. (in Chinese))
- [8] 张玉成, 杨光华, 姚捷, 等. 基坑开挖卸荷对下方既有地铁隧道影响的数值仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 1): 109 - 115. (ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, YAO Jie, et al. Numerical simulation and analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 109 - 115. (in Chinese))
- [9] 刘斯琴, 余晓琳, 颜全胜. 基坑开挖对下方既有地铁影响数值分析[J]. 广东土木与建筑, 2009(6): 19 - 20. (LIU Si-qin, YU Xiao-lin, YAN Quan-sheng. Numerical simulation analysis for influence of overhead excavation on existing MTR[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2009(6): 19 - 20. (in Chinese))
- [10] 张玉成, 杨光华, 钟志辉, 等. 软土基坑设计若干关键问题探讨及基坑设计实例应用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(11): 2234 - 2243. (ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, ZHONG Zhi-hui, et al. Some critical problems in soft soil pit design and design examples application analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(11): 2234 - 2243. (in Chinese))
- [11] 张玉成, 杨光华, 胡海英, 等. 软土深基坑围堰及基础施工对既有下穿管线的影响及保护措施研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(增刊 2): 364 - 370. (HANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, HU Hai-ying, et al. Effect of construction of deep excavation cofferdams and foundation in soft soils on underneath pipelines and protective measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S1): 364 - 370. (in Chinese))
- [12] 张玉成, 杨光华, 胡海英, 等. 格栅式连续墙在沉管隧道护岸工程支护中的应用[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(增刊 2): 440 - 446. (HANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, HU Hai-ying, et al. Application of grillage shaped diaphragm wall supporting the revetment project of the immersed tube tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S1): 440 - 446. (in Chinese))
- [13] 李兴高. 既有地铁线路变形控制标准研究[J]. 铁道建筑, 2010(4): 84 - 88. (LI Xing-gao. Jacking technology and monitoring during tunneling under existing metro structures[J]. Railway Engineering, 2010(4): 84 - 88. (in Chinese))