

DOI: 10.11779/CJGE2014S2033

多种支护型式在超大深基坑工程设计中的组合应用

张玉成^{1, 2, 3}, 杨光华^{1, 2, 3}, 胡海英⁴, 钟志辉⁵, 温勇¹, 陈富强^{1, 2, 3}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广州 510610; 2. 广东省岩土工程技术研究中心, 广州 510610; 3. 广东省突发公共事件应急技术研究中心, 广州 510610; 4. 华南农业大学水利与土木工程学院, 广州 510642; 5. 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘要: 随着城市化建设和地下空间开发的不断加速, 单一支护方法已难于满足现在复杂的基坑设计, 而多种支护方案组合应用于基坑设计变得越来越普遍。本文在总结目前基坑支护型式及基坑设计中存在问题的基础上, 以某一超大深基坑工程设计为例, 详细介绍和分析了复杂环境下多种支护型式共用的基坑支护设计及计算结果, 为类似工程提供参考和借鉴。

关键词: 基坑支护设计; 复杂环境; 多种支护型式; 组合应用

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0198-07

作者简介: 张玉成(1975-), 男, 内蒙古武川人, 博士后, 教授级高级工程师, 从事岩土工程方面的咨询、设计研究。

E-mail: 125340752@qq.com。

Combined application of multiple support forms in design of super-large deep foundation pits

ZHANG Yu-cheng^{1, 2, 3}, YANG Guang-hua^{1, 2, 3}, HU Hai-ying⁴, ZHONG Zhi-hui⁵, WEN Yong¹, CHEN Fu-qiang^{1, 2, 3}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 2. The Geotechnical Engineering Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou 510610, China; 3. The Emergency Technology Research Center of Guangdong Province for Public Events Guangzhou 510610, China; 4. College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642; 5. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the continuous development of urbanization constructions and underground space excavations, the single and simple support form is difficult to satisfy the design of complex foundation pits nowadays. While the application of multiple support forms become more and more popular in foundation pit engineering. Based on the summary of support forms and the existing problems in the design of foundation pits, the design of a super-large deep foundation pit is taken for an example, and the combined application of multiple support forms in the design of the foundation pit with complex surroundings is introduced and analyzed. It may provide reference for similar projects.

Key words: support design of foundation pit; complex surrounding; multiple support form; combined application

0 引言

随着城市地下空间的不断开发, 基坑工程的设计和施工也越来越复杂, 基坑设计选择方案时不仅要考虑: 基坑支护安全等级、地质条件、基坑深度、主体结构及基础型式、周边环境、基坑平面尺寸及形状、施工场地条件、施工工艺的可行性、经济指标和施工工期等众多因素, 而且还要结合当地的技术水平, 习惯与偏爱等。现在在大城市中心区进行基坑设计已变成了一个系统工程, 工程问题、安全问题、环境问题和社社会问题等都要考虑^[1-3]。基于以上原因, 单一支护方法已难于满足现在复杂基坑的设计, 而多种支护型式在深基坑工程中的组合设计应用则变得越来越普遍。本文在总结目前深基坑支护型式及深基坑设计中

存在问题的基础上, 以某一深大基坑工程设计为例, 详细分析了复杂条件下多种支护共用的基坑支护设计, 为类似工程提供参考和借鉴。

1 深基坑支护型式

1.1 常用基坑支护型式^[4-5]

深基坑支护型式主要有: 放坡开挖、悬臂式、重力式、内撑式、拉锚式、土钉墙及其它支护结构(门架式、拱式组合、沉井支护、冻结法和逆作法等), 其

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

中在实际工程中应用比较多的是: 放坡开挖、土钉墙与复合土钉墙、桩墙式支护(排桩、多排桩、地下连续墙、型钢水泥土墙)、逆作拱墙和逆作与盖挖等。

1.2 基坑支护的新技术和新工艺

近几年, 在深基坑支护中发展的新支护技术有:

(1) SMW (soil mixing wall) 工法^[6]: 亦称新型水泥土搅拌桩墙, 即在水泥土桩内插入 H 型钢等, 将承受荷载与防渗挡水结合起来, 使之成为同时具有受力与抗渗两种功能的支护结构围护墙。SMW 工法有强身强度高、止水效果好、噪声小、对环境影响小等优点, 但存在应用经验不足, 插入型钢不易回收, 造价较高等缺点。

(2) TRD 工法^[7]: 该工法由日本 90 年代初开发研制, 后引进中国, 其基本原理是利用链锯式刀具箱竖直插入地层中, 然后作水平横向运动, 同时由链条带动刀具作上下的回转运动, 搅拌混合原土并灌入水泥浆, 形成一定厚度的墙体, 以取代目前常用的高压喷射灌浆、单轴和多轴水泥土搅拌桩组成的柱列式地下连续墙。其主要特点是成墙连续, 表面平整, 厚度一致, 墙体均匀性好。

(3) 预应力桩墙 (PPW) 工法^[8]: 根据计算所得桩墙弯矩, 在桩墙中配置一定数量的无黏结高强钢绞线 (底部锚固), 在基坑开挖前, 给桩墙施加一定的预应力, 使计算开挖后桩的受拉侧预先受压。待基坑开挖后, 桩受拉侧拉应力逐渐增大, 但由于事先的受压预应力的作用, 使其仍处于受压或小受拉状态, 从而提高桩墙的承载能力; 同时, 由于桩墙布置预应力高强钢绞线, 外力的作用很快反应到钢绞线上, 而不会像无预应力的桩墙需等到桩墙变形一定程度后受力钢筋才逐渐发挥作用, 从而可以减少桩墙的变位。

(4) LJK 工法^[9]: 水泥搅拌桩墙和土钉、土锚联合为主的基坑支护施工方法。

(5) 中心岛式: 中心岛式挖土是从中间向四周开挖, 先开挖周边土方, 最后挖去中心土墩土方。中心岛(墩)式挖土, 宜用于大型基坑, 支护结构的支撑形式为角撑、环梁式或边桁架式, 中间具有较大空间情况下。优点: 挖土和运土的速度快。缺点: 由于首先挖去基坑四周的土, 支护结构受荷时间长, 在软黏土中时间效应显著, 有可能增大支护结构的变形量, 对于支护结构受力不利; 另外中心岛预留土体一般是放坡体, 放坡体的作用如何合理计算还需进一步研究。

如引言所述, 近几年基坑工程越来越复杂, 使得多种支护方式组合应用也变得非常普遍。

2 基坑支护设计中仍需解决的问题

2.1 土压力计算模式合理选用

在对基坑支护结构受力计算时, 首先要确定支护结构上作用的荷载大小, 通常以支护结构上作用的土压力来计算, 所以支护结构上土压力大小和分布形式是否符合实际在支护结构设计中尤为重要。目前基坑支护结构上计算土压力的模式有三种^[1, 10] (如图 1 所示): 图 1 (a) 为挡土侧用三角形模式的主动土压力, 被动侧用被动土压力模式; 图 1 (b) 为在开挖面以上挡土侧用三角形分布的主动土压力, 开挖面以下用矩形模式, 被动侧用被动土压力, 或用被动土压力减去主动侧虚线部分的土压力模式; 图 1 (c) 为对挡土侧经验土压力模式, 如 Terzaghi-Peck 经验土压力模式等。然而, 实际中的基坑设计, 采用哪种土压力计算模式合理还没有一个明确的结论; 另外基坑施工开挖是逐步完成的, 作用于支护结构的荷载是个增量过程, 与图中的全量荷载存在一定差异。因此, 如何合理确定基坑土压力模式对基坑支护设计意义重大。

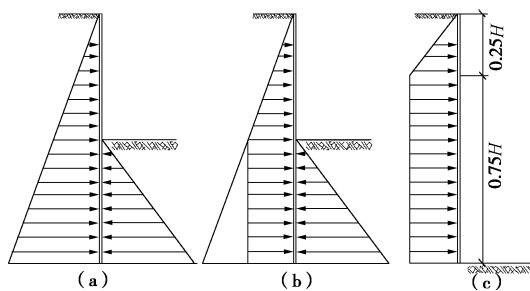


图 1 基坑支护计算常用土压力计算模式

Fig. 1 Typical calculation mode of soil pressure for foundation pit support

2.2 超深基坑设计岩土体力学参数确定

近年来, 随着以大型地下空间、大型交通枢纽为代表的城市地下空间及超高层建筑的发展, 基坑开挖深度越来越深, 国内已有多个基坑开挖深度超过 30 m, 如: 广州东塔基坑深达 30 多米; 天津站交通枢纽工程最大开挖深度达 32.5 m, 上海世博变电站 34 m; 深圳平安大厦基坑开挖深度达 33.8 m 及上海董家渡修复工程基坑深度达 41 m 等。这些超深基坑工程的出现, 彰显了中国基坑工程方面的成就和发展水平, 同时也对中国基坑工程技术提出了挑战。

与一般基坑相比, 由于超深基坑工程特殊的应力条件改变了地基土的应力条件, 对土力学的试验和计算提出了一些有待研究和解决的问题, 如: 超深基坑支护中土压力的合理模式; 超深基坑工程对土体应力条件的改变; 超深基坑工程对土体强度变形特性的影响等, 尤其, 如何确定土的抗剪强度和变形指标, 提供更加符合工程实际情况的设计参数, 对保证超深基坑工程安全性至关重要。

2.3 基坑变形与稳定的问题

现有基坑规范中变形控制大部分是根据基坑等级确定的,规定一个变形允许值,没有结合基坑的支护类型、地质情况、周围因素来确定,更没有将基坑的安全系数与位移建立起对应关系,导致实际基坑监测中无法动态判断基坑的安全情况,只能根据设计提供的位移预警值来判断其安全性,无法做到定量判断。其实基坑的变形控制值应主要考虑两个因素来确定^[1, 11]: ①基坑支护结构允许的最大变形值; ②基坑周边环境能允许的最大变形值,取二者之间最小值作为基坑允许的变形值。目前这方面的研究不多,杨光华教授利用变模量强度折减法建立了土钉支护位移与安全系数的关系^[11]。

3 工程案例

3.1 工程概况

该工程为多栋集办公和商业的大型建筑基坑,占地总面积约 65473 m²,附属裙楼属多层,地下室 3 层,基坑开挖深度为 14.7~16.40 m,基坑支护周长约为 725 m,基坑周边环境复杂,基坑北侧为市政路及在建的地铁二号线,距离地铁隧道边线约 12~18 m,距离市政道路边线约 18 m,地铁出入口距离基坑边线很近,约 3.5 m; 基坑东侧为市政路及拟建的地铁三号线,距离地铁隧道边线约 14 m,距离市政道路边线约 18 m; 基坑西侧也为市政道路,距离市政道路边线约 12 m,距离周边建筑约 55 m。南侧为轻轨及 CBD 广场基坑。基坑平面及周边情况如图 2 所示,基坑与相邻构建物关系如图 3 所示。

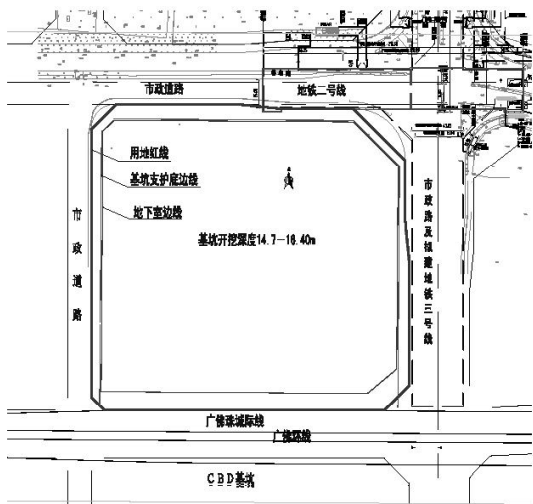


图 2 基坑平面图及周边情况示意图

Fig. 2 Plane and surroundings of foundation pit

本基坑开挖深度较大,最深 16.4 m,面积较大(230 × 240 m),东侧及北侧为在建的地铁结构,对变形敏

感,且本基坑东侧、东北侧及西侧坑壁存在较厚淤泥质土软弱土层,尤其是东侧局部泥质土达到 19~22 m,另外,基坑南侧为在建轻轨,且与 CBD 广场基坑连通,存在力不平衡问题。

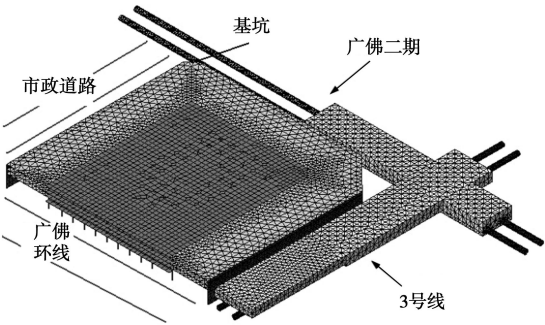


图 3 基坑与相邻构建物关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of relationship between foundation pit and surrounding buildings

从工程概况介绍可知,该深基坑工程周边环境非常复杂,对基坑变形控制要求比较高,尤其要考虑基坑开挖对地铁隧道的影响。

3.2 场区地层条件

本场区地层自上而下按成因类型分为: ①填土层 (Q^m), 平均厚度 2.96 m; ②淤泥质土, 平均厚度 12.59 m; (2-1)中砂夹层, 平均 4.25 m; (2-2)粉质黏土夹层, 平均 3.92 m; ③粉质黏土砂, 平均厚度 6.58 m, ④全风化岩带, 平均厚度 2.96 m; ⑤强风化岩带平均厚度, 6.65 m; ⑥中风化岩带, 平均厚度 8.02 m; ⑦微风化岩带。典型地质剖面如图 4 所示。

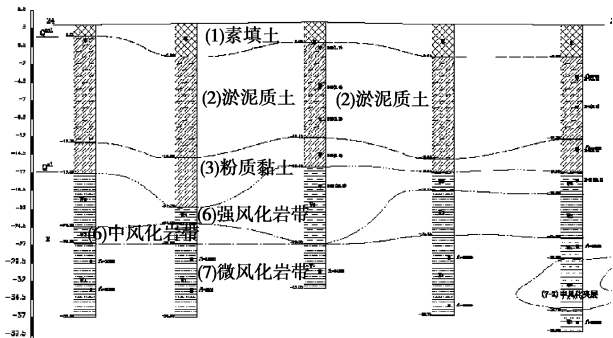


图 4 基坑范围内典型地质断面图

Fig. 4 Typical geological section of foundation pit

3.3 支护设计方案

(1) 基坑支护的特点和难点

通过工程概况和地质条件的介绍可知,本基坑工程的特点及设计难点如下: ①基坑周边情况复杂,四周都有建(构)筑物,要考虑基坑开挖对周边建(构)筑物的影响,四周有 2 条地铁线路,北边地铁出入口距离基边线坑边仅 3.5 m,基坑开挖过程中不能对商

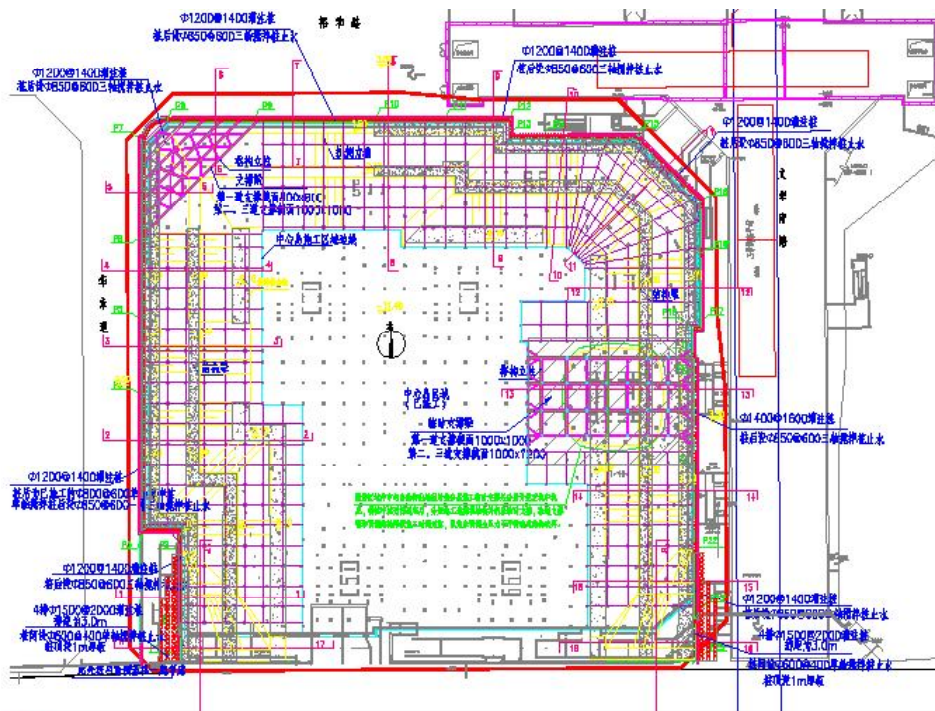


图 5 基坑支护平面图和分区信息

Fig. 5 Plane of support and partition information of foundation pit

铺营业产生影响,对变形要求比较高;②地质条件较差:东北侧及西侧坑壁存在较厚淤泥质土软弱土层,尤其是东侧局部泥质土达到 19~22 m;③开挖范围大且深,基坑开挖面积较大 230×240 m,深度最深达 16.4 m,还存在坑中坑问题,主楼基坑比裙楼基坑深 3 m 多;④基坑环境不对称,基坑北侧是广佛二期地铁线路,南侧的轻轨及 CBD 地块相连采取同时开挖挖通,南侧无需支护,导致基坑一侧有支护开挖,另一侧为无支护结构大开挖,支护结构承受不对称荷载,这也是本基坑的难点问题。

(2) 基坑选型分析

基坑支护方案的选择要综合考虑场地地质条件、场地地下水、建筑物上部结构、施工场地平面布置、场地周围建筑环境及工程造价等影响因素,工程由于周边有在建的地铁及轻轨等公共交通设施经过,另外,基坑长度和宽度和开挖面积均比较大,开挖深度也较深,且南侧与 CBD 广场基坑连通不需支护还存在不平衡力的传递问题。

由于基坑尺寸较大,且南侧是大开挖,因此对撑和内撑方式不易实现;另外基坑周围的地铁支护结构已经施工,预应力锚索施工方法对其影响很大,所以锚索也难以在该基坑中应用。

综合本基坑特点、地质条件、场地周边环境、基坑及周围构筑物安全及造价等多方面因素考虑,经过对比分析,基坑总体支护采用拟采用“中心岛式+逆作法”方案,具体基坑支护方案为:①基坑西侧及北

侧采用 $\phi 1200@1400$ 的灌注桩支护,东侧有地铁施工,且局部淤泥质土较厚,采用 $\phi 1400@1600$ 的灌注桩支护,基坑坑底位于淤泥质土层,需进行坑内加固;②坑内侧采用放坡,并用搅拌桩加固,顺作法中心部位基础及地下室结构,形成中心岛;③东侧及西侧通过连接支护桩及建筑结构楼板形成支撑体系,再开挖周边土体;④基坑南侧未支护,因此北侧支护结构的力需要平衡,在基坑北侧采用桩+抗侧剪力墙,抗侧剪力墙用来抵抗北侧土压力;⑤南侧与轻轨相连接处,采用多排悬臂桩支护,桩顶设 1000 厚板,坑底及坑外,采用水泥搅拌桩加固处理;⑥基坑止水方案:基坑支护桩后采用 $\phi 850@600$ 的三轴搅拌桩进行止水;⑦基坑坑内土体加固深度超过 20 m 区域采用三轴搅拌桩加固,小于 20 m 区域采用 $\phi 600@400$ 单轴搅拌桩加固。

基坑支护平面图、分区信息及支护类型如图 5 所示,不同工法支护平面如图 6 所示。

北侧有地铁二号线,且南侧与 CBD 连接部分采用大开挖,没有支护结构,导致北侧存在不平衡力,因此在北侧设置了抗剪墙 (6 m×0.8 m) 来平衡不对称支护引起的不平衡力,支护结构断面如图 7 所示,设计时利用数值方法确定不平衡力。中心岛外侧采用逆作法施工,放坡开挖部分进行了搅拌桩加固,主要作用是保证放坡部分的稳定性,另外也作为基坑支护桩的被动区反压。

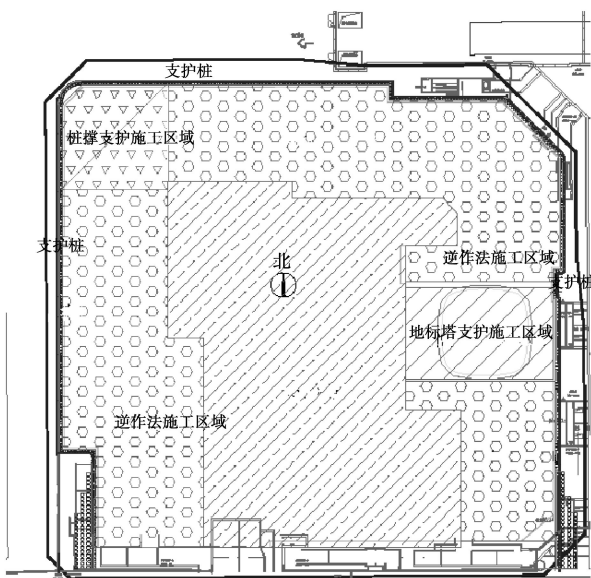


图 6 不同工法支护平面图

Fig. 6 Plane of support with different construction methods

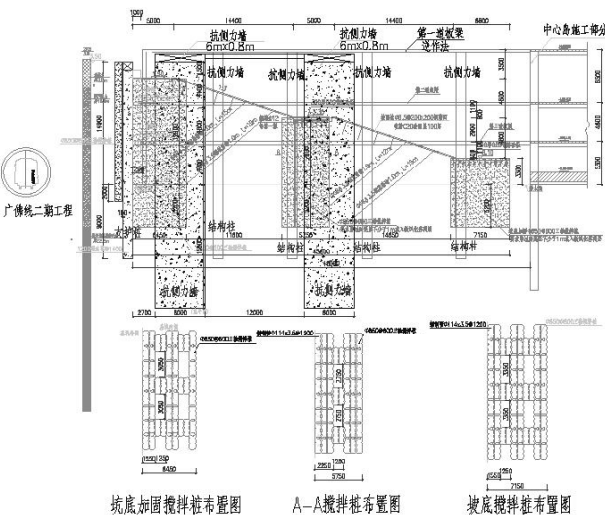


图 7 北侧基坑支护典型断面图(地铁二号线侧)

Fig. 7 Typical section of support of foundation pit at north side (side of Metro Line 2)

东侧有地铁三号线换乘站, 支护结构断面如图 8 所示。西侧基坑外围市政道路, 支护结构断面如图 9 所示。

综上所述, 本基坑设计中用到的支护方式有: ① 支护桩 (北侧采用 $\phi 1200@1400$ 混凝土灌注桩支护, 东侧采用 $\phi 1400@1600$ 的混凝土灌注桩); ② 内支撑 (西北角采用混凝土斜撑); ③ 基坑支护桩与中心岛之间区域采用放坡+土钉, 并用搅拌桩加固; ④ 中心岛外侧采用逆作法, 利用楼板和梁柱结构作为支撑体系; ⑤ 抗剪墙, 平衡不对称支护引起的不平衡力; ⑥ 中心岛, 中心部分采用中心岛来施工, 中心岛内主体结构施工到正负零高程后开始施工逆作法部分。

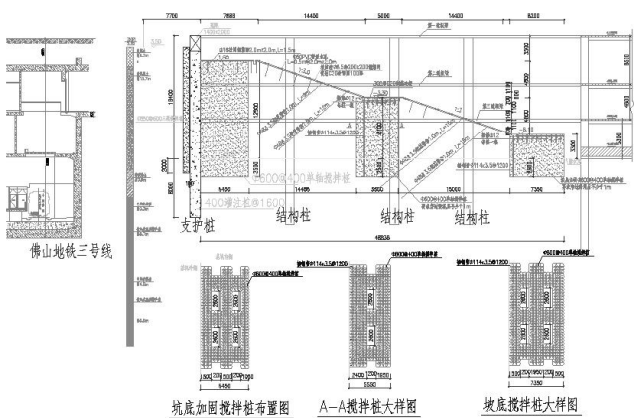


图 8 东侧基坑支护典型断面图(地铁三号线侧)

Fig. 8 Typical section of support of foundation pit at east side (side of Metro Line 3)

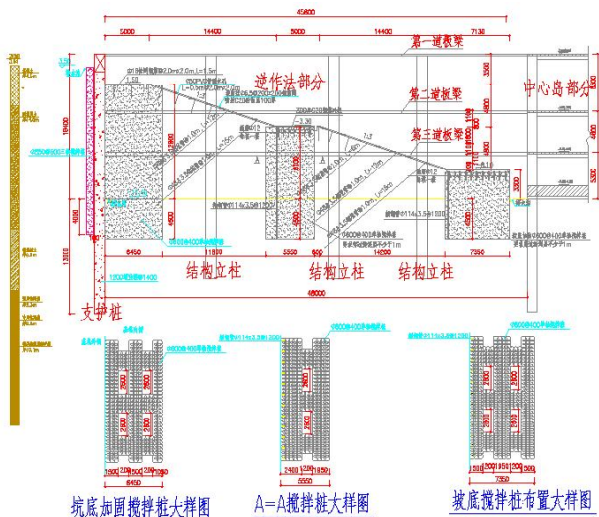


图 9 西侧基坑支护典型断面图

Fig. 9 Typical section of support of foundation pit at west side

3.4 基坑支护计算及结果分析

利用理正深基坑、广东水科院开发的增量法基坑软件 and 大型数值分析软件 Midas 对该基坑支护进行计算, 土体参数取值如表 1 所示。

表 1 土体计算参数

Table 1 Parameters of soils

地层代号	岩土名称	天然密度 ρ $/(g \cdot cm^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ_c $(^\circ)$	变形模量 E_0 $/MPa$	泊松比 ν	锚固体与土体摩阻力标准值 $/kPa$
<1>	填土	1.85	10	12	4.0	0.30	20
<2>	淤泥质土	1.70	6	7	2.0	0.36	15
<2-1>	中砂夹层	1.90	0	25	35	0.28	55
<2-2>	粉质黏土	1.85	22	15	40	0.27	50
<4>	全风化	2.25	28	18	60	0.25	70
<5>	强风化	2.30	60	28	150	0.24	90
<6>	中风化	2.40	150	33	1000	0.22	150
<7>	微风化	2.50	200	35	2000	0.20	200

坑内加固区为格构式水泥土搅拌桩, 处理后的强度指标按强度等效方法计算, 具体如下:

搅拌桩加固后等效指标按下式计算^[12]:

$$c=c_1w_1+c_2(1-w_1) \quad , \quad (1)$$

$$\varphi=\arctan\left(\frac{\tan\varphi_1}{1+\frac{K_2}{\beta K_1}}+\frac{\tan\varphi_2}{1+\frac{\beta K_1}{K_2}}\right) \quad . \quad (2)$$

式中 w_1 为水泥搅拌桩的面积置换率; c_1 为搅拌桩桩身黏聚力; c_2 为被处理土体黏聚力; K_1 为搅拌桩的刚度; K_2 为桩周软土部分的刚度; β 为桩的沉降与桩周软土的沉降之比, 一般可取 0.5。

式 (2) 桩的刚度 K_1 为 $K_1=\frac{k_1\cdot k_2}{k_1+k_2}$, 其中 $k_1=\frac{A_1E}{2a(1-\mu^2)\omega}$, $k_2=A_1E/L$ (桩身压缩刚度)。

桩体水泥土的指标取为 $c_1=60\text{ kPa}$, $\varphi_1=24^\circ$, 淤泥质土指标取为 $c_2=6\text{ kPa}$, $\varphi_2=7^\circ$ 。

表 2 为不同施工步下的基坑累计最大水平位移。从表 2 中可见, 基坑支护结构的位移主要发生在放坡开挖阶段, 在逆作法阶段支护桩的位移增加较小; 从表中也可以看出两种计算方法计算的支护结构位移比较接近, 理正计算结果包络图如图 10, 11 所示。

表 2 不同施工阶段基坑最大位移计算结果

Table 2 Maximum displacements of foundation pit at different construction stages					
序号	施工阶段	Midas 计算结果		理正深基坑结果	
		北侧最大位移/mm	东侧最大位移/mm	北侧(9-9)最大位移/mm	东侧(12-12)最大位移/mm
1	放坡+中心岛	14.3	24.2	14.9	9.56
2	加第一层楼板	14.9	24.5	14.9	22.14
3	加第二层楼板	15.5	25.3	15.3	23.45
4	加第三层楼板	17.8	26.7	16.1	29.54
5	开挖到基坑底	19.8	26.2	16.5	33.23

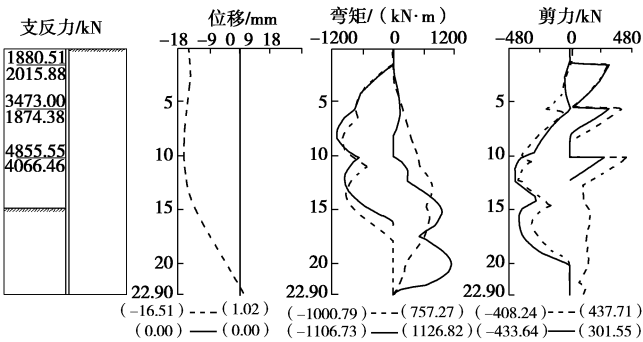


图 10 北侧 9-9 基坑支护剖面计算结果包络图

Fig. 10 Envelopes of 9-9 section of support of foundation pit at west side

图12为开挖到基坑底时整体模型和支护桩的水平位移云图, 由图12可知, 基坑的累计最大位移发生在东南角, 约为26.2 mm, 靠近北侧和东北侧的支护结构最大变形为19.8 mm。

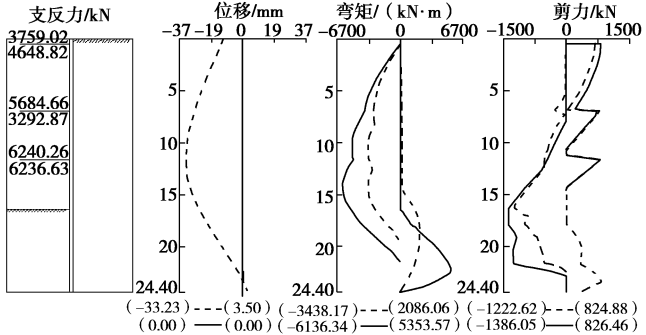


图 11 东侧 12-12 基坑支护剖面计算结果包络图

Fig. 11 Envelopes of 12-12 section of support of foundation pit at east side

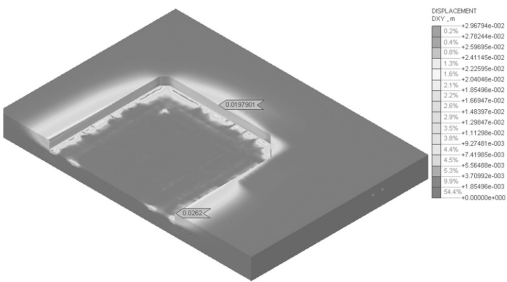


图 12 整体模型及支护桩的水平位移(开挖到基坑底)

Fig. 12 Horizontal displacements of whole model and support piles (after excavation to the bottom of foundation pit)

表 3 为基坑开挖卸荷引起的地铁隧道位移结果。由表 3 可知, 基坑开挖卸荷引起的地铁隧道最大位移约 4.7 mm, 说明基坑开挖卸荷对隧道有一定影响。

表 3 隧道/站房最大位移及位置

Table 3 Maximum displacements and positions of tunnel or station buildings			
序号	施工阶段	隧道/站房最大位移/mm	位置
1	放坡+中心岛	3.9	广佛二期左线
2	加第一层楼板	3.9	广佛二期左线
3	加第二层楼板	4.1	广佛二期左线
4	加第三层楼板	4.2	广佛二期左线
5	开挖到基坑底	4.7	广佛二期左线

4 结 论

虽然深基坑工程已发展几十年了, 但随着城市化和地下空间开发的加速, 深基坑面临的新问题也越来越多。本文在总结基坑工程新工艺和需要解决问题的基础上, 针对一个超大深基坑设计案例介绍了多种支护型式的组合应用, 可以得出如下 3 点结论及建议:

(1)目前大城市地下空间中基坑设计和施工越来越复杂, 单一一种支护方案已很难满足复杂基坑的设计, 更多的需要结合地质条件、周边环境和性价比等选用多种支护型式组合的设计方法。

(2) 基坑处于城市交通繁忙地段, 基坑周边有市政道路或地下交通路线的构筑物的, 基坑施工期间对变形控制要求比较高的, 基坑支护设计中可根据边界条件选用不同方案、调整开挖顺序和优化施工组织设计等方法来满足工程建设的经济性和安全性。

(3) 本文中的工程案例用了近 8 种基坑支护型式, 设计选型和计算思路可为同类工程提供借鉴。

参考文献:

- [1] 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))
- [2] 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))
- [3] 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))
- [4] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 2012. (JGJ 120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 2011. (in Chinese))
- [5] SJG 05—2011 深圳市基坑支护技术规范[S]. 深圳, 2011. (SJG 05—2011 Technical code for retaining and protection of excavations in Shenzhen City[S]. Shenzhen, 2011. (in Chinese))
- [6] 张璞, 柳荣华. SMW 工法在深基坑工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(增刊): 1104 - 1107. (ZHANG Pu, LIU Rong-hua. The application of SMW method in foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(S0): 1104 - 1107. (in Chinese))
- [7] 李星, 谢兆良, 李进军, 等. TRD 工法及其在深基坑工程中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2011, **7**(5): 945 - 950. (LI Xing, XIE Zhao-liang, LI Jin-jun, et al. TRD method and its applications in the deep excavation engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, **7**(5): 945 - 950. (in Chinese))
- [8] 丁仕辉, 陆岸典, 丁仕煌. 深基坑支护预应力桩、墙施工方法[P]. 中国: CN 1431369 A, 2003. (DING Shi-hui, LU An-dian, DING Shi-huang. A Construction method for prestressed piles and walls with deep foundation ditches being supported[P]. China: CN 1431369 A, 2003. (in Chinese))
- [9] YJGF293—2006 LXX 工法[S]. 2006. (YJGF293-2006 LXX construction method[S]. 2006. (in Chinese))
- [10] 杨光华. 深基坑开挖中多支撑支护结构的土压力问题[J]. 岩土工程学报, 1998, **10**(6): 113 - 115. (YANG Guang-hua. The earth pressure problems for the multi-braced retaining structure of deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **10**(6): 113 - 115. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 杨光华. 软土地基中几个问题的分析[C]// 广东省岩土工程与基础工程学术会议论文集, 1993. (YANG Guang-hua. Analysis of several problems in soft soil foundation[C]// Proceedings of Guangdong Province symposium on geotechnical engineering and foundation engineering, 1993. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)