

滨海回填区深基坑支护技术分析

谢列平¹, 赵 琳², 高锐斌¹

(1. 深圳机场航空城发展有限公司, 广东 深圳 518128; 2. 日照市城乡规划服务中心, 山东 日照 276827)

摘要:滨海回填区具有地质环境复杂、软弱层较厚、地下水位高等带来的基坑开挖难度大的特点,寻找一种既安全又经济的基坑支护方式为滨海回填区基坑支护设计的一大难题。文章以深圳机场站前综合配套保障用房项目基坑支护工程为例,根据不同区域的地质情况以及后续施工工艺要求,分别采用“锚桩+三轴搅拌桩”、“双排灌注桩+三轴搅拌桩”、“复合土钉墙”3种支护方式,开挖过程中采用现场监测以及数值模型分析坑支护结构的水平与竖向位移值均小于预警值。研究结果表明:滨海回填区有针对性的按区域分段选择支护技术,可以将支护结构的变形控制在限值范围内,满足支护结构安全,且具有较好的经济性,可为滨海回填区深大基坑的开挖提供一定的指导和借鉴。

关键词:不良地质; 超大深基坑; 支护技术

中图分类号:TU758.11

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)08-0066-06

doi:10.13402/j.gcjs.2024.08.108

Analysis of deep and large foundation pit support technology under coastal backfill area

XIE Lieping¹, ZHAO Lin², GAO Ruibin¹

(Shenzhen Airport Aviation City Development Co., Ltd., Shenzhen 518128, Guangdong, China;

2. Rizhao Urban and Rural Planning Service Center, Rizhao 276827, Shandong, China)

Abstract: The coastal backfill area has the characteristics of complex geological environment, thick soft layer and high groundwater level, which makes it difficult to excavate the foundation pit. Finding a safe and economical foundation pit support method is a major problem in the design of foundation pit support in coastal backfill area. Taking the foundation pit support project of Shenzhen Airport Station Comprehensive Supporting Housing Project as an example, according to the geological conditions of different regions and the requirements of subsequent construction technology, three support methods of ‘anchor pile + three-axis mixing pile’, ‘double-row bored pile + three-axis mixing pile’ and ‘composite soil nailing wall’ are adopted respectively. In the process of excavation, the horizontal and vertical displacement values of the pit support structure are less than the early warning value by field monitoring and numerical model analysis. The research results show that the targeted selection of support technology according to regional segmentation in the coastal backfill area can control the deformation of the support structure within the limit range, meet the safety of the support structure, and have good economy, which can provide some guidance and reference for the excavation of deep and large foundation pits in the coastal backfill area.

Key words: bad geology; super deep foundation pit; the treatment technology

深圳机场站前综合配套保障用房项目建设用地源于填海造陆工程,回填时间约为15 a,根据地质报告显示,项目普遍有较深的填土、填砂和淤泥

层,此类软弱土层对工程开发有较不利的影响。城市机场扩建施工时,会对周边建筑、道路和地铁车站产生一定的影响。基坑开挖导致周围土体卸荷,

收稿日期:2023-09-20

作者简介:谢列平(1989—),男,工程师,从事结构设计相关工作。

从而对基坑周围的构筑物产生一定的影响^[1-2]。

罗战友^[3]结合某基坑设计选型实例，分析并结合钻孔灌注桩在基坑围护中的适应性，运用理正和 PLAXIS 分析软件进行基坑变形计算，证明了钻孔灌注桩基坑支护中的实用性。李瑛^[4]、李俊才^[5]、冯耀东^[6]在软土地区基坑开挖时，为保证基坑稳定性分别采用了预应力型钢组合支撑、锚拉桩、钻孔灌注桩等支护手段，并通过现场实测数据证明了手段的可靠性。秦江红^[7]、金铮等^[8]针对在承压水土层与砂性土层中基坑开挖过程中，采用锚杆支护、土钉墙支护的方法。

综上所述，目前基坑开挖支护方案主要有锚索、灌注桩、土钉墙等加固措施，但缺乏有效性针对性提出多因素共同作用下基坑开挖的支护技术。本文以深圳机场站前综合配套保障用房项目实例，该基坑位于深圳机场 T3 航站楼南侧，建设用地为滨海回填区，地块东西两侧均为机场快速路高架、南侧为市政道路、北侧为预留空地。项目工程地质情况和周边环境复杂，为确保基坑开挖施工中安全，并提出复杂环境下深大基坑支护技术分析。

1 工程地质概况

1.1 场地位置

基坑南、北侧分别为空港二道、空港六道，东西侧为领航高架、领航三路、领航四路。基坑范围分布有电力、电信、雨水、给水、污水、燃气等管线。项目基坑开挖面积约为 26 247.3 m²，支护周长约为 659 m，开挖最大深度为 8.9 m。

根据项目场地工程地质条件、基坑开挖深度及周边环境条件，CDE、FHJ 支护段基坑工程安全等级为三级，其余支护段基坑工程安全等级为二级。基坑工程全貌如图 1 所示。

1.2 水文地质条件

根据地质条件、场地及周围地形地貌分析，场地地下水按埋藏条件分为潜水和承压水，按赋存介质条件分为第四系松散层孔隙水和基岩裂隙水。

根据拟建场地地质条件、场地及周围地形地貌分析，场地地下水分为第四系孔隙水及基岩裂隙水。孔隙水主要赋存于填砂、粗砂中，其次赋存在黏土、含黏土中砂及砂质黏性土中。



图 1 深大基坑工程平面

1.3 岩土体工程特性

根据钻探揭露，场地内地层自上而下依次为：素填土 (Q_4^m)、填砂，淤泥 (Q_4^m)、砂质黏性土 (Q_4^{sl+pl})，下伏基岩为蓟县系 (Jx-Qby) 混合花岗岩。现将各岩土层的岩性特征自上而下分述如下。

本工程基坑开挖范围内以杂填土、粉土和砂质粉土为主。根据基坑的实际开挖情况，所涉及土层参数如表 1 所示。

表 1 岩土体力学参数

地层	重度/ ($kN \cdot m^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
①素填土	17.5	10.0	14.0
②填砂	19.0	—	26.0
③淤泥	16.6	8.0	5.0
④砂质黏性土	19.5	20.0	22.0
⑤强风化花岗岩	20.0	23.0	25.0
⑥中风化花岗岩	21.0	26.0	28.0

(1) 素填土(Q_4^m)：黄褐、红褐色，松散~稍密，主要由黏性土组成，局部含少量砂砾、碎石，夹植物根系，粒径为 2~5 cm，含量约 0~10%。岩芯采取率约为 85%~90%。

(2) 填砂：白、黄褐色，松散~稍密，主要为石英质颗粒，局部含少量贝壳碎屑，黏粒含量约 10%~15%，填海造路冲填形成。人工回填砂分选性好，颗粒形状多样，呈松散~稍密状，回填时间总体为 10 a 以上，已完成自重固结。岩芯采取率约为 85%~90%。

(3) 淤泥(Q_4^m)：深灰色，呈流塑状，含海洋生物残骸，具臭味，手感细腻，含有机质约为 8%~

12%，摇震无反应。岩芯采取率约为 90%~95%。

(4) 砂质黏性土(Q_4^{al+pl})：褐红、灰黄、灰白色，由下伏混合花岗岩风化残积而成，含石英砂砾约为 10%~15%，主要呈硬塑状，局部少量呈可塑状，浸水后易软化崩解。岩芯采取率约为 90%~95%。

(5) 强风化混合花岗岩($Jx-Qby$)：褐红、褐黄、肉红色，风化剧烈，原岩结构大部分破坏，岩芯呈坚硬土状或土夹碎石状，浸水后易软化崩解。该层属极软岩，岩体极破碎~破碎，岩体基本质量等级为 V 类。岩芯采取率约为 80%~90%。

(6) 中风化混合花岗岩($Jx-Qby$)：褐黄、灰白色，裂隙发育，裂隙面铁染严重，岩芯呈碎块状及短柱状，粒径为 2~6 cm，节长 8~12 cm，岩芯采取率约为 70%~75%。该层属软岩~较硬岩，岩体较破碎~破碎，岩体基本质量等级为 IV~V 类。

各地层的具体的物理力学参数如表 1 所示。

2 基坑支护技术

2.1 基坑支护方案

基坑工程中 CDE、F2HJ 支护段安全等级为三级，其余支护段基坑工程安全等级为二级。根据场地工程地质条件、基坑开挖深度、周边环境条件、施工布置等因素，本基坑采用桩锚、双排桩、复合土钉墙支护形式。各区域的支护形式如图 2 所示。

由表 2 可知，本基坑由锚桩、双排桩、复土钉墙 3 种支护类型组成，其中采用锚桩支护的有 A1B1、JA 这两段区域，主要是基坑周围构造物较为密集且淤泥层较厚，采用双排桩支护的有 AA1、B1C、E1E2、F1F2 段区域，主要是因为位于塔楼

表 2 基坑各分段的支护类型

支护区域	支护长度/m	支护类型
AA1	20	双排桩
A1B1	57	锚桩
B1C	30	双排桩
CD	125	复合土钉墙
DE	50	复合土钉墙
EE1	10	复合土钉墙
E1E2	20	双排桩
E2F1	58	复合土钉墙
F1F2	20	双排桩
F2J	140	复合土钉墙
JA	75	锚桩

区域避免影响后续塔楼桩基施工。而采用复合土钉墙支护有 CD、DE、EE1 等区域，主要集中在基坑的南北两侧，结合地勘资料，主要是由于地质环境相对较好且受周围构筑物的影响较小。

综上所述，基坑支护周长共计 695 m，根据各自的地质情况、周边构筑物确定了基坑支护的安全等级，根据支护安全等级确定了分区支护的原则，其中采用锚桩支护的周长为 132 m，占比为 20.03%，双排桩支护长度为 90 m、占长度为 14%，复合土钉墙支护总长度为 437 m，占比为 66.3%，如图 3 所示。

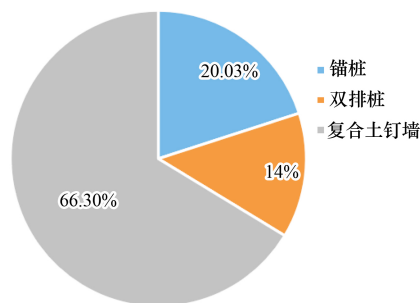


图 3 基坑中各类支护结构占比

由图 3 可知，基坑中支护类型中存在“锚桩、双排桩、复土钉墙”3 种支护形式，其中复土钉墙的支护类型占比最大，根据其土压力及周边建筑物的荷载确定各支护的构造形式。如 A1B1 段、JA 段地质条件较差，上部砂土地层厚度达到 15 m，采取预应力锚索与灌注桩的锚桩形式。而 B1C 地质条件较好则采用复合土钉墙，各支护形式的剖面图分别如图 4~6 所示，其剖面形式如图 7 所示。

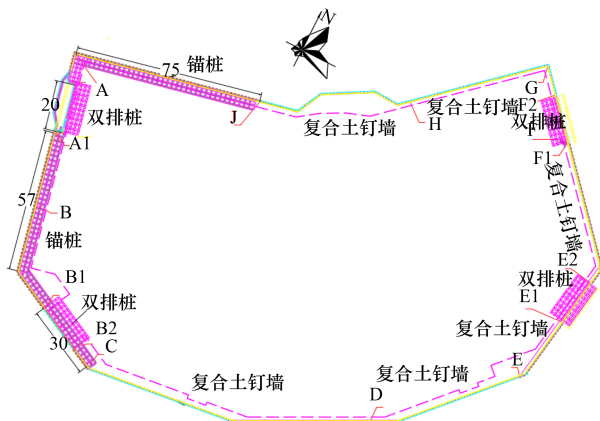


图 2 基坑的支护形式平面

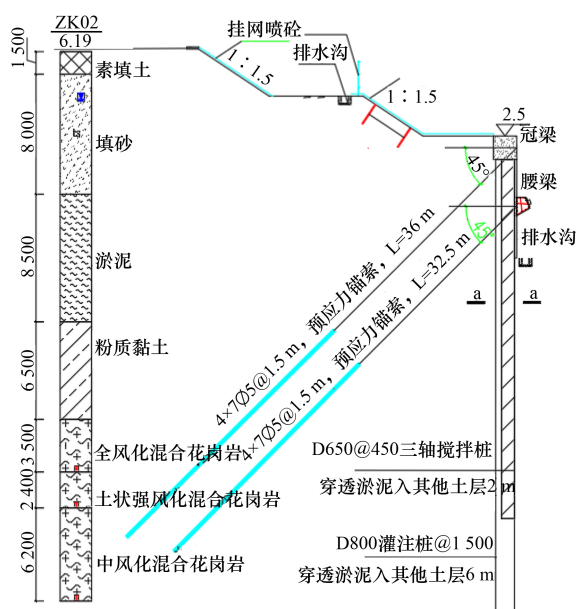


图4 锚桩支护剖面

mm

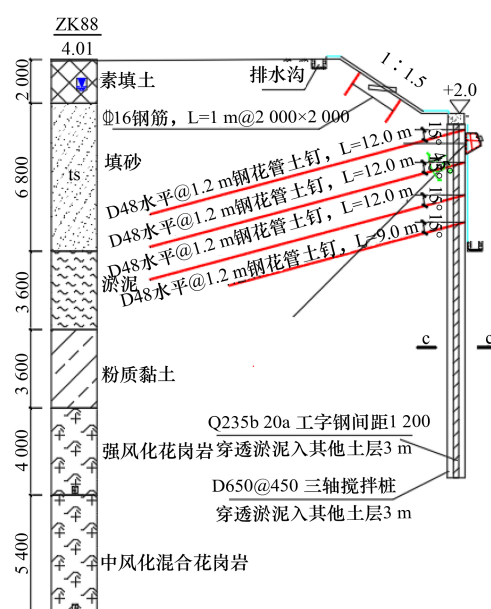


图6 复合土钉墙支护剖面

mm

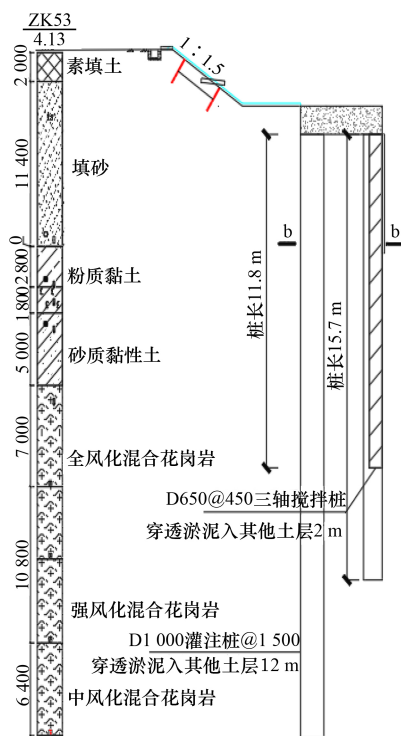


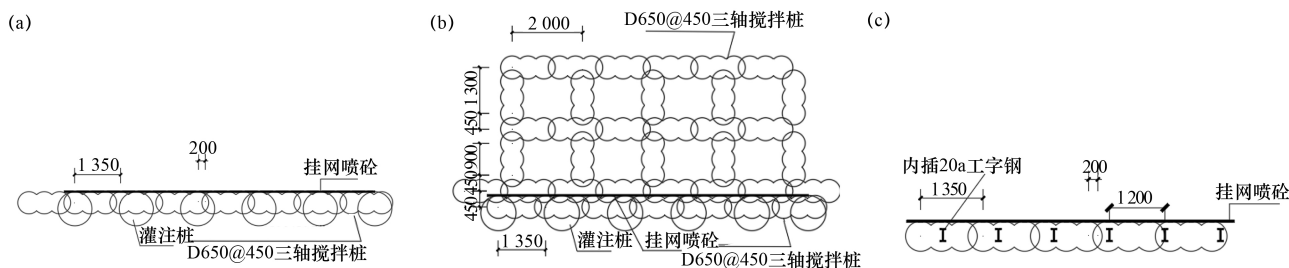
图5 双排桩支护剖面

mm

2.2 支护结构详细参数

锚桩支护: 桩采用直径 800 mm 灌注桩间距 1.5 m, 上排锚索采用直径 $4 \times 7 \varnothing 5$ mm 长度 36 m 钢绞线预应力锚索, 间距 1.5 m, 孔径为 200 mm, 锚固段长度为 25 m, 自由段长度为 11 m, 抗拔力标准值为 420 kN, 锁定力为 300 kN, 且锚固段穿越淤泥进入其他土层长度不少于 16 m。下排锚索采用直径 $4 \times 7 \cdot 5$ mm 长度 32.5 m 钢绞线预应力锚索, 间距 1.5 m, 孔径为 200 mm, 锚固段长度为 23 m, 自由段长度为 9.5 m, 抗拔力标准值为 400 kN, 锁定力为 300 kN, 且锚固段穿越淤泥进入其他土层长度不少于 15 m。三轴搅拌桩直径 650 mm, 间距 450 mm, 搅拌桩穿越淤泥入其他土层不小于 2 m。

双排桩支护: 采用直径均为 1000 mm 双排灌注桩, 间距为 1.5 m, 长度为 23 m, 桩身穿越淤泥入其他土层 12 m。三轴搅拌桩直径为 650 mm, 间距为 450 mm, 搅拌桩穿越淤泥入其他土层不小于 2 m。



(a) a—a 截面; (b) b—b 截面; (c) c—c 截面

图7 不同支护形式下各截面的剖面

mm

复合土钉墙:采用直径为 48 mm,长度为 12 m 的钢管土钉,共 4 排,纵向间距为 1.2 m。

3 基坑支护数值分析

3.1 模型建立

结合地勘资料及现场实际情况,对地质条件较差的区域进行数值分析,建立处于锚桩支护的基坑开挖的三维有限元模型,支护结构采用预应力锚索及桩具体信息如图4所示,岩土体物理力学参数取值见上表2。数值模型建立的开挖工况如图8所示,三维模型位移测点布置如图9所示。

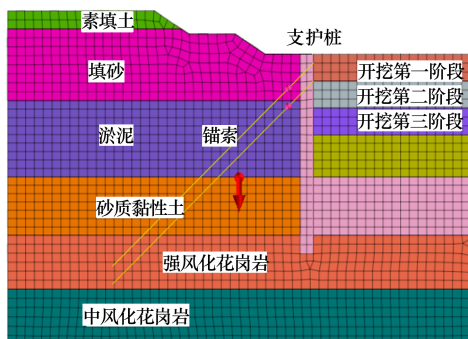


图8 数值模型建立的开挖工况

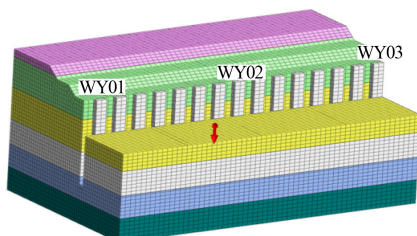
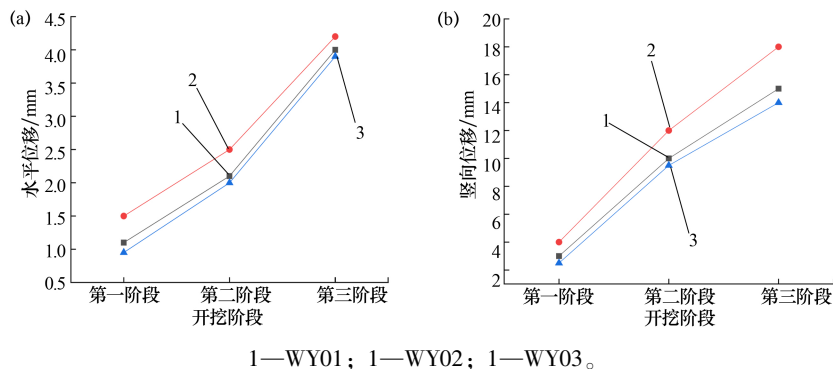


图9 三维模型位移测点布置

3.2 成果分析

将 WY01、WY02、WY03 的开挖各阶段的最终水平位移与竖向位移如图10所示。



(a) 测点各阶段水平位移曲线; (b) 测点各阶段水平位移曲线

图10 各支护结构下基坑的水平位移

由图10可知,在基坑开挖过程中,锚索支护桩水平位移在开挖阶段中,第三阶段开挖的水平和竖向位移变化幅度较大,其中变形最为显著为 WY02 支护区域的中部,累计最大水平位移为 4.5 mm,最大竖向位移为 18 cm 但均小于预警值 48 mm,基坑开挖过程支护结构处于稳定。

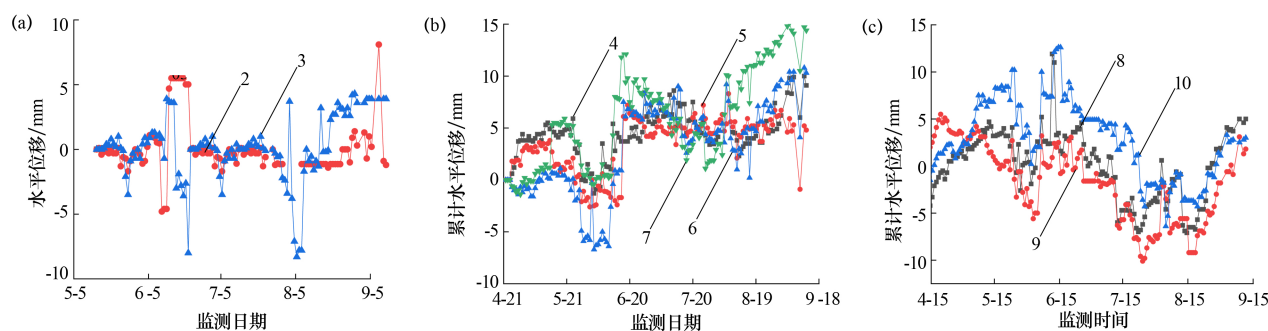
4 支护效果评价

支护结构的位移也更全面的反映了基坑支护后的稳定性,各支护形式的分段支护区域分别选取了水平位移和竖向位移测点,其中灌注桩结构支护段的测点为 WY01 ~ WY03; 双排桩预应力锚索结构支护段的测点为 WY04 ~ WY07; 复合土钉墙支护区域选取了 3 个测点,为 WY08 ~ WY10; 不同支护结构段基坑的水平位移和沉降位移变化规律如图11、12所示。

由图11可知,在基坑开挖过程中,3种支护结构水平位移变化幅度较大,其中变形最为显著为复合土钉墙支护区域,累计水平位移最大值为 13.9 mm,但均小于预警值 48 mm,基坑开挖过程支护结构处于稳定。

由图12可知,在基坑开挖施工中,各支护结构区域基坑的竖向位移变化幅度较小,复合土钉墙支护结构的基坑变形量最大,但累计竖向位移最大值仅为 18.20 mm,均小于预警值 48 mm,开挖过程中支护结构竖向位移处于稳定。

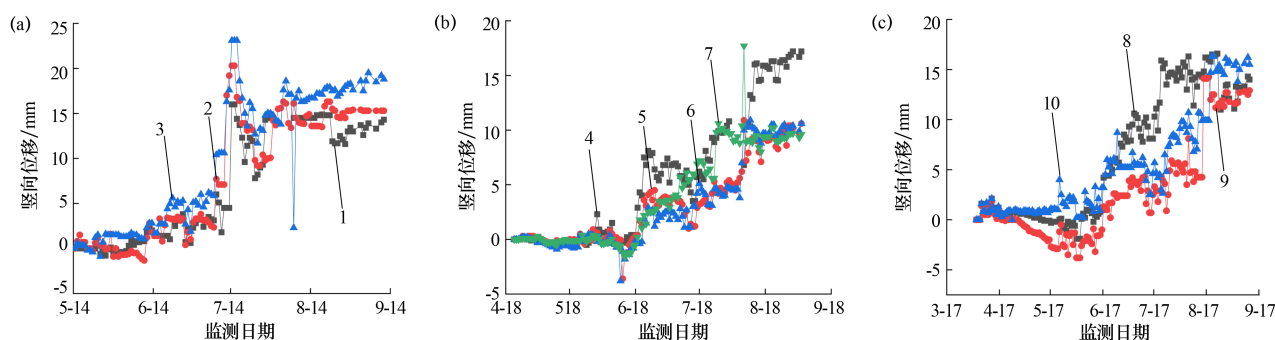
综上所述,现场实测的数据比数值分析的数值略大,主要是由于现场的支护结构的预应力损失及降雨等因素的影响,但均小于预警值,表明用支护桩加预应力锚索的方案是可行的。



1—WY01; 2—WY02; 3—WY03; 4—WY04; 5—WY05; 6—WY06; 7—WY07; 8—WY08; 9—WY09; 10—WY10。

(a) 灌注桩支护段基坑的水平位移; (b) 双排预应力锚索支护段基坑水平位移; (c) 复合土钉支护的水平位移

图 11 各支护结构下基坑的水平位移



1—WY01; 2—WY02; 3—WY03; 4—WY04; 5—WY05; 6—WY06; 7—WY07; 8—WY08; 9—WY09; 10—WY10。

(a) 灌注桩支护基坑的竖向位移; (b) 双排预应力锚索支护结构竖向位移; (c) 复合土钉支护的竖向位移

图 12 各支护结构下基坑的竖向位移

5 结 论

(1) 基于“分区域分段支护技术”原则, 滨海回填区深大基坑支护技术分析应根据其安全等级采用不同的支护技术, 可采用锚桩、双排桩及复合土钉墙支护等多种形式。

(2) 基坑中淤泥、砂土等地质环境较差且周边建筑环境复杂区域采用“双排预应力锚索 + 三轴搅拌桩”锚桩强支护, 其次采用“灌注桩 + 三轴搅拌桩”双排桩支护, 地质条件较好的采用复合土钉墙支护。

(3) 在基坑开挖过程中, 3 种支护结构水平位移变化幅度较大, 其中变形最为显著为复合土钉墙支护区域, 累计水平位移最大值为 13.9 mm, 但小于预警值 48 mm; 支护结构竖向位移变化幅度较小, 累计竖向位移最大值仅 18.20 mm, 小于预警值 48 mm, 开挖过程中支护结构基坑处于稳定。对于采用锚索支护结构同时确考虑预应力损失因素。

参考文献:

- [1] 龚晓南, 王继成, 伍程杰. 深基坑开挖卸荷对既有桩基侧摩阻力影响分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 70-76.
- [2] 徐日庆, 程康, 应宏伟, 等. 基于影像源法的基坑开挖引起的土体水平位移预测[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增1): 17-20; 72.
- [3] 罗战友, 桑军林, 邹宝平. 复杂环境下深基坑支护优化设计[J]. 科技通报, 2017, 33(3): 163-167.
- [4] 李瑛, 陈东, 刘兴旺, 等. 预应力型钢组合支撑应用于软土基坑支护[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增1): 51-55.
- [5] 李俊才, 岳颖锋, 茅奇辉, 等. 软土基坑支护中的锚拉桩结构设计[J]. 岩土力学, 2008(9): 2551-2555.
- [6] 冯耀东. 软土基坑支护[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005(增1): 193-196.
- [7] 秦江红, 唐明荣. 锚杆在砂土地层或承压水地层中注浆施工的研究[J]. 施工技术, 2009, 38(增1): 188-190.
- [8] 金铮, 姚镇华, 杨书君. 土钉墙在砂土施工中的质量控制[J]. 施工技术, 2007, 36(增2): 134-137.