

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyh.2024.02.062

上海软土条形市政深基坑变形性状的实测研究

袁青峰

(上海浦东工程建设管理有限公司,上海市201210)

摘要: 对一个挖深17.5 m的多道支撑上海软土条形市政深基坑的变形进行实测分析,研究发现其围护墙侧向位移沿深度方向呈典型弓形分布,并存在一定踢脚变形,对在影响范围内“坑中坑”,深坑对浅坑围护墙侧向位移影响明显,在设计上增加匝道外侧围护插入比以及在匝道外侧围护与深坑第一道围檩之间设置混凝土传力带,可有效减小匝道外侧开挖变形;同时抗隆起安全系数与最大侧移关系之值处于经典的统计范围之内,围护墙最大侧移与挖深之比值基本介于0.30%~0.77%,处于二、三级变形控制线之间;墙后地表沉降分布曲线与上海基坑标准预测曲线更为契合,其与墙体侧移比值基本介于0.4~2.0,其均值为0.80,无匝道区域平均值相对偏大;立柱桩回弹具有明显的空间反应特征,基坑中间位置的回弹量约为均值的1.3~1.45倍和基坑边侧立柱桩回弹量的2倍,空间反应特征较为明显。

关键词: 条形市政基坑;软土;墙体侧移;地表沉降;立柱回弹

中图分类号: TU47

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)02-0288-06

0 引言

随着城市建设发展,市政基础设施逐渐向地下空间拓展,如地铁、综合管廊以及城市地下道路等。基坑作为市政地下工程的核心环节,具有技术难度高、开挖风险大等特点。作为主要危大工程,其自身安全和周边环境保护一直是基坑工程关注的重点。为保证基坑安全与控制环境风险,变形监测是基坑工程信息化施工的核心内容,同时也为验证勘察设计的合理性与安全性提供依据。深基坑变形实测已被世界各国学者广泛研究^[1-7],相关研究成果对预测和校验围护结构设计合理性以及周边地表变形具有重要意义。

岩土具有明显地域特性,各地区的地质条件、围护类型以及设计施工水平均对基坑变形特征有明显影响。自20世纪90年代以来,上海已完成大量各种类型基坑施工,亦累积大量工程实测数据,但主要以工民建和地铁基坑为主^[8-16],本文以杨高路(世纪大道-浦建路)市政改建工程基坑实测为研究对象,并与上海现有实测数据作对比,分析特定条件下长条形市政深基坑变形特征,以更好反馈设计与施工。

1 项目概况与地质条件

杨高路(世纪大道-浦建路)道路改建工程位于浦东新区花木行政中心,线路呈西南-东北走向,属于杨高路商务走廊核心路段。改建工程范围北起世纪大道下立交(世纪大道环岛桃林路),南至浦建路(浦建路跨线桥),工程范围全长约1.975 km,沿线交叉有蓝村路、峨山路(花木路)和世纪大道。杨高路主线隧道全长1.78 km,新建隧道长1 357.29 m,老隧道改造段420 m,在浦建路北侧、花木路北侧分别设置一对主线出入口。本工程改建对提升保障杨高路的干线功能和改善杨高路商务走廊交通功能具有重要作用。

改建后杨高路主线采用地道形式,为城市主干路。地道标准车道宽度为10.5 m,由此结构标段净宽度为27 m(1 m防撞侧石+0.5 m侧向安全带+10.5 m车道宽+0.5 m侧向安全带+0.5 m防撞侧石+1 m中隔墙+0.5 m防撞侧石+0.5 m侧向安全带+10.5 m车道宽+0.5 m侧向安全带+1 m防撞侧石);匝道展宽段最宽处为46.8 m;匝道段为8.5 m。

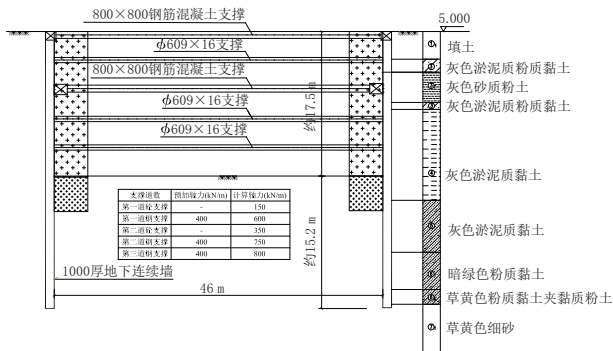
为便于分析,取有代表性的K1+980~K2+240段基坑作为分析对象。本段地道总长260 m,宽度约47 m,其中K1+980~K2+108段主线两侧包含匝道。该区域主线开挖深度约为17.5 m,两侧匝道挖深约为2.7~8.7 m。

收稿日期: 2023-10-23

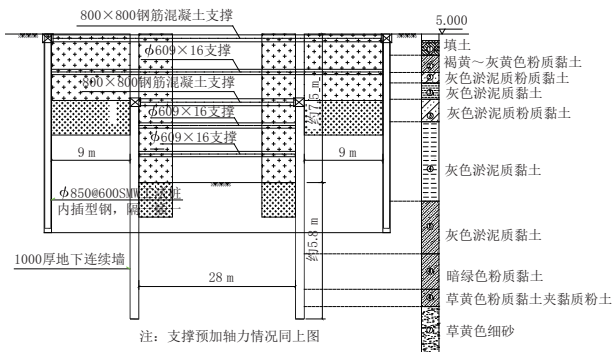
作者简介: 袁青峰(1975—),男,本科,高级工程师,从事市政工程建设管理工作。

根据周边环境条件,本项目基坑环境保护等级为二级,为减小开挖引起的变形,基坑主线段采用1 000 mm地下连续墙进行围护,并作为后期主体结构侧墙的一部分。在有匝道区域,其外侧采用SMW工法进行围护,与主体基坑形成“坑中坑”的围护型式。其开挖横断面与地层分布如图1所示。

本项目地貌单元为滨海平原地貌类型,场地内对开挖有影响的土层自上而下可划分为7大层及若干亚层,其中①₁层为填土,②~⑤层为全新世Q4沉积层,⑥~⑦层为上更新世Q3沉积层,如图1所示。



(a)无匝道位置



(b)有匝道位置

图1 基坑断面与地层分布图

基坑采用钢筋混凝土支撑与型钢支撑相结合的模式,第一、三道采用混凝土支撑,第二、四、五道采用钢支撑,混合型支撑布置充分利用了两种支撑类型优点,既利用了钢筋混凝土支撑刚度大、承载能力高、变形小、安全性高的特点,又利用了钢支撑施工灵活、速度快以及可回收利用的优点,同时钢筋混凝土支撑在一定程度上克服钢支撑承载力和刚度均相对较小的劣势。

2 相关定义与监测布置

基坑采用先撑后挖施工方法,并尽量加快施工进度。施工过程中每道钢支撑预加轴力,大小约为设计轴力的50%~70%。表1为基坑开挖与回筑过程中的主要工况定义。

表1 基坑开挖主要阶段

阶段	施工内容
Stage 1(a)	施工地下连续墙及坑内加固
Stage 1(b)	降水准备及预降水
Stage 1(c)	挖到第一道混凝土支撑标高
Stage 1(d)	浇筑第一道混凝土支撑
Stage 2(a)	挖到第二道钢支撑标高
Stage 2(b)	安装第二道钢支撑,并预加轴力
Stage 3(a)	挖到第三道混凝土支撑标高
Stage 3(b)	浇筑第三道混凝土支撑
Stage 4(a)	挖到第四道钢支撑标高
Stage 4(b)	安装第四道钢支撑,并预加轴力
Stage 5(a)	挖到第五道钢支撑标高
Stage 5(b)	安装第五道钢支撑,并预加轴力
Stage 6(a)	挖到基坑底标高
Stage 6(b)	浇筑底板
Stage 7	拆撑和回筑阶段

为方便表达,相关符号定义如图2所示。

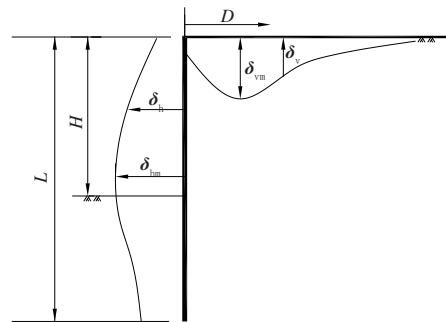


图2 相关变量符号定义

本基坑支撑平面布置及相应的监测布置图如图3所示。

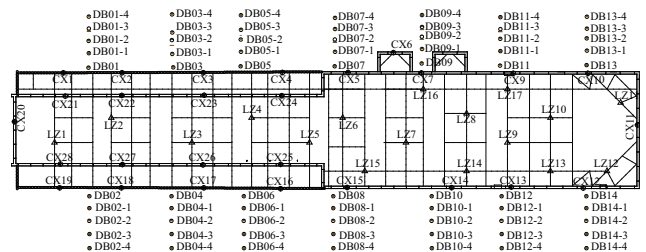


图3 基坑平面及相应的监测点布置

3 围护结构侧向位移实测分析

3.1 典型断面侧向位移分布

本基坑典型断面位置的围护结构侧向位移如图4所示,从图4可以看出,匝道基坑匝道侧的最大侧向位移深度位置约为10 m,明显处于匝道开挖面以下,其在0~10 m位置侧向位移明显与主体段位置(CX5和CX18)趋同,而纯主体段地下连续墙最大侧

向位移深度位置基本在坑底开挖面附近。

从图4可以看出,受坑中坑影响,匝道基坑匝道侧变形明显受主线基坑开挖影响,在匝道区域挖到底以后,主线区域进一步开挖导致匝道基坑围护墙下部进一步产生变形,匝道基坑围护墙下部明显呈现踢脚状变形,表明深坑距离浅坑围护结构在一定距离范围内时,坑中深坑开挖对浅坑侧向位移有明显影响。

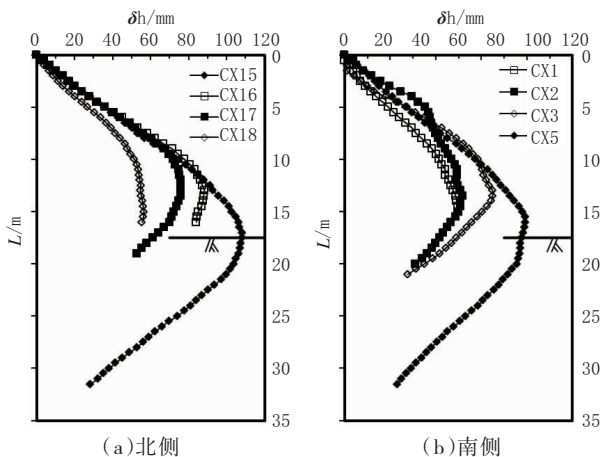


图4 开挖期间的墙体侧移

从现场实测结果来看,对类似坑中坑结构,进一步加大外侧围护结构插入比可以明显改善匝道外侧围护底部踢脚变形,从而进一步有效控制变形。

对主线基坑围护墙而言,在开挖过程中墙底仍发生一定的踢脚变形,表明围护墙在1:0.9的插入比情况下,墙底仍处于移动状态,尚未达到完全嵌固程度。

3.2 时间对侧向位移影响

如图5所示,从墙体最大侧移在开挖阶段 Stage 2(a)~Stage 6(b)的变形可以看出,在整个开挖阶段,围护墙在持续变形,同时随着开挖深度的增加,其变形速率相对有所增加,直至底板浇筑阶段 Stage 6(b)后才逐渐稳定。

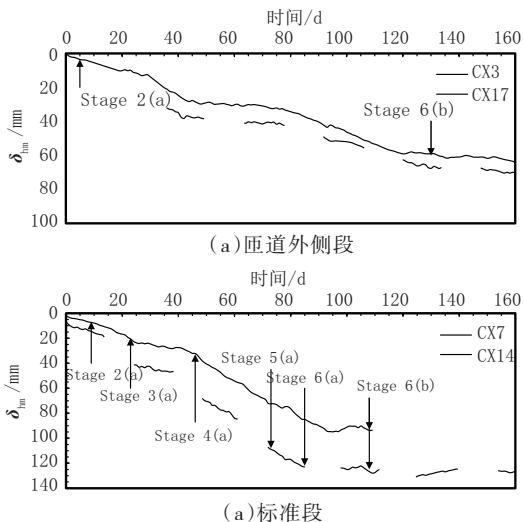


图5 最大墙体侧移与开挖阶段的关系

这表明同其它软土基坑一样,受软土固结与蠕变影响,时间对基坑墙体最大侧移影响非常明显,即基坑变形不只发生在每一开挖工况,在支撑施工和放置期间仍持续发生变形。因此,从控制变形的角度,在围护和支撑条件相同的情况下,快挖快撑是减小开挖变形的最有效手段,且相对不增加工程成本。

需要特别指出的是,对匝道外侧段(CX3和CX17测点),其变形在区间主线深坑开挖期间一直在发展,且从图4可以看出,其最大变形深度位置约为12m处,这表明匝道外侧变形明显受深坑开挖影响。从设计与施工角度而言,如果在匝道外侧围护结构与深坑第一道混凝土支撑围檩之间设置一定厚度混凝土传力带,应能有效控制匝道外侧围护变形和相应地表沉降发生量。

3.3 基于经验图表的侧向位移比较分析

对围护墙侧向位移,工程上一般采用 Mana and Clough(1981)^[2]基于大量工程实测数据建立起来的反应墙体最大侧向与位移抗隆起安全系数两者关系的经典统计图表,如图6所示,通过该图表上下限分布来评价开挖对围护结构侧向位移的影响程度。从图6可以看出,当抗隆起安全系数超过2.0以后,其上下限分布趋于稳定。

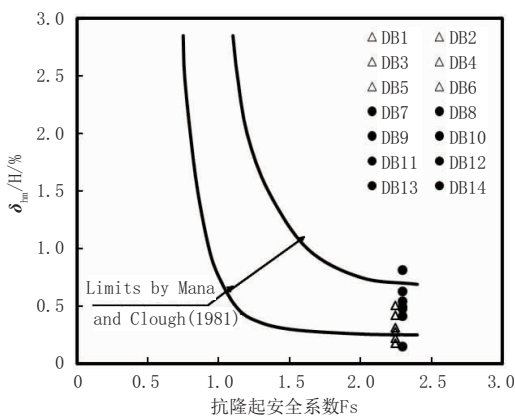


图6 抗隆起安全系数与最大侧向位移关系

从图6可以看出,本项目的两者关系分布基本处于该上下限区间,但有匝道区域受坑内存在一定反压的影响,其实测数据主要处于该区间的下限区域,有少量数据更低于该下限区间值;对无匝值区域,其实测数据主要靠近该区间的上限区域,有个别甚至超出该上限曲线。

上海地区其他工程实测数据亦基本处于下限区间,而新加坡软土基坑实测数据基本超出上限值^[9]。

由此可知,最大侧向位移与抗隆起安全系数之间比值大小主要取决于地质条件与具体施工情况。

如新加坡软土相比上海软土,其含水量和孔隙比更大,导致其比值明显要比上海地区大。对同为上海地区基坑,文献中提到的金茂大厦和地铁基坑由于施工要求和标准相对较高,导致与本项目基坑相比,其比值相对偏低。

3.4 侧向位移控制效果分析

上海基坑技术标准中对采用地下连续墙围护的墙侧移与挖深的统计区间值如图7所示,其围护墙最大侧移与挖深之比值基本介于0.30%~0.77%,均值为0.49%;同时环保等级一、二、三级变形控制线亦绘制于图中。

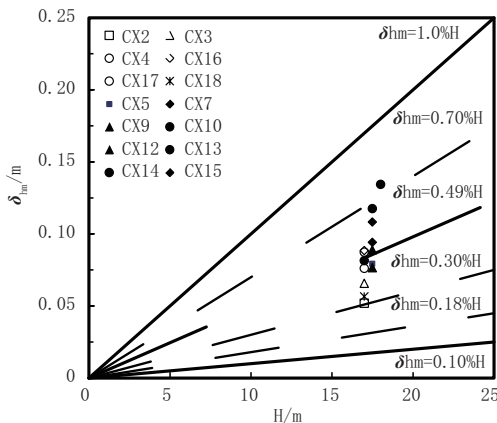


图7 最大侧向位移与挖深关系分布图

从图7可以看出,本项目的数据离散性较大,但仍处于0.10%~1.0%大区间,其变形值仍总体超过二级变形控制线,但不超过三级变形控制线(除个别点位外)。这表明变形控制在上海软土基坑工程实践中仍是工程重点控制目标,需重点控制各关键节点工期,尤其是基坑施工总工期。

4 坑后地表沉降实测分析

4.1 典型断面地表沉降分布

基坑周边布置14组地表沉降监测断面,其归一化后的地表沉降分布如图8所示。

类似于围护结构侧向位移,受坑中坑反压的影响,有匝道区域的地表沉降明显小,坑内9m宽的土体反压明显抑制了地表沉降,其最大归一化沉降约为0.50%;而对应于无匝道区域,其地表沉降明显要大于有匝道区域,其归一化最大沉降达到了0.80%。

同时,在无匝道区域,南侧的地表沉降整体要大于北侧,在围护类型、支撑强度以及地质条件基本一致的情况下,变形大小与开挖方式、地面超载大小有直接关系。对条状基坑,一般是以单边出土为主,从一侧向另一侧开挖,基于上海地区软土具有的固结

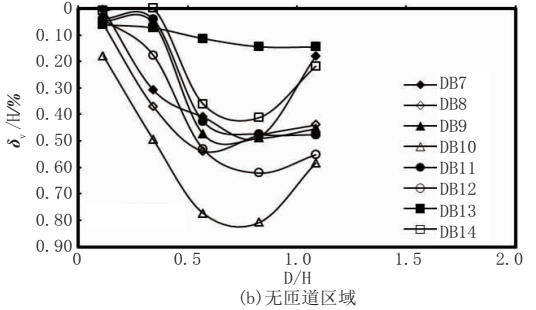
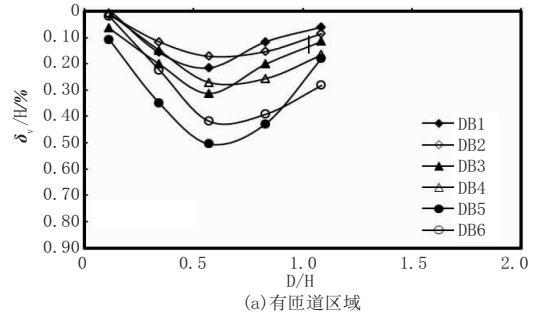


图8 各断面地表沉降分布

与蠕变特性,先挖土一侧处于无支撑暴露状态时间长,从而围护墙产生一定增量侧向位移,由于围护墙侧向位移与地表沉降的正相关性,因此地表沉降会有一些增加量。

4.2 地表沉降变形特征分析

基坑墙后地表沉降分布曲线一直是基坑工程分析的重点,以便于分析与评判开挖对基坑周边环境的不利影响和主要影响区。

为方便对比,将上海基坑技术标准的预测曲线、Clough^[3]和Hsieh^[6]的经典评价曲线绘制于一图中,如图9所示。从图9可以看出,本项目的沉降曲线呈典型的勺形分布,与上海标准预测曲线和Hsieh^[6]曲线更为接近,但在0~0.8 d/H区间,本项目与上海基坑技术标准的预测曲线更为契合。

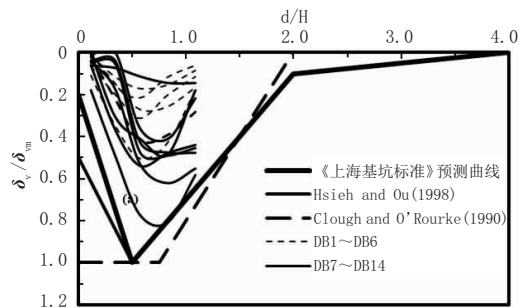


图9 归一化的地表沉降断面分布特征

5 地表沉降与墙体侧移关系

如图10所示,基于上海基坑技术标准^[17]的地表沉降与围护墙最大侧移之比值的统计区间值,其比值基本介于0.4~2.0,其均值为0.80。本项目两者关系数据符合上海标准的统计规律,且基本上围绕在

$\delta_{vm}=0.8\delta_{hm}$ 上下波动,从图 10 中可以看出,有匝道区域两者关系整体不超过 0.80,而无匝道区域则明显超过 0.80,其总体平均值基本上在 0.90 左右。有匝道区域两者关系比值整体偏小,原因是坑内匝道区域反压存在导致该区域抗隆起安全系数明显较无匝道区域要高,抗隆起安全系数越大,其对地表沉降抑制作用亦明显。

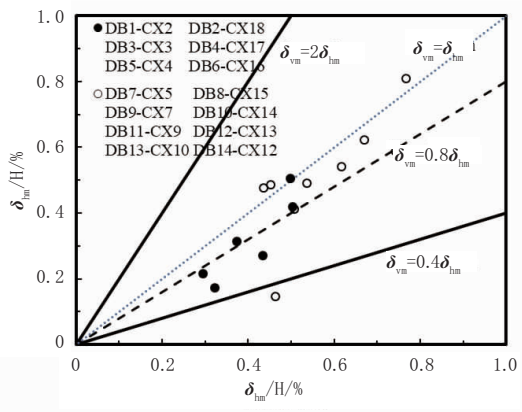


图 10 最大地表沉降与最大墙体侧移的关系

时间因素对两者比值也有一定影响。上海地铁深基坑的关系数据在 0.4~0.5 之间^[17],其按地铁施工规范采用“分块、分小段”快速施工而导致开挖引起坑后的土体沉降固结不充分,而使得两者关系比值明显偏小;另外新加坡软土基坑实测关系超过 1.0^[7],主要亦与其基坑施工期较长(约 1 年左右)有正相关性。

通过数据分析,说明尽量加快基坑施工,缩短施工周期,即使在同样围护墙变形大小情况下,也能有效减小地表沉降,从而保护周边环境。

6 立柱桩回弹分析

如图 11 所示,从 16 根立柱桩回弹情况来看,其平均值约为 41 mm,约为开挖深度的 2.3‰。从图 11 可看出,立柱桩回弹具有很大离散性,如 LZ6 ~ LZ8 回弹量约为平均值的 1.3~1.45 倍,而 LZ11 ~ LZ13 回弹量仅约为平均值的 0.63~0.70 倍。

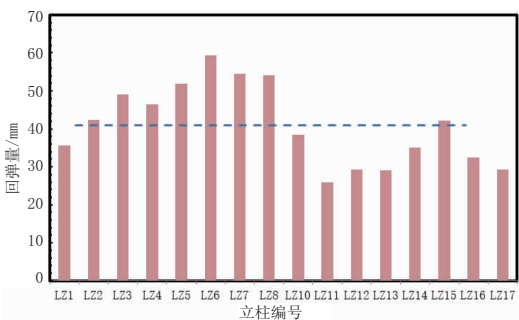


图 11 立柱桩回弹分布图

从原因上分析,立柱回弹具有空间反应特征,其大小与其在基坑平面位置有一定相关性。

如 LZ6 ~ LZ8 基本上位于基坑中间位置,受边界约束较弱,而 LZ11 ~ LZ13 处于基坑边侧,受边界约束明显较强,故其回弹量明显较小,只有中间位置立柱桩 LZ6 ~ LZ8 的 1/2。

7 结论

通过对本项目基坑的变形实测数据分析,可得出如下结论:

(1)从典型断面围护墙侧向位移来看,变形呈典型的弓形分布底部存在一定踢脚变形,匝道外侧基坑围护墙下部明显呈现踢脚状变形,表明当深坑距离浅坑围护结构在一定距离范围内时,“坑中坑”中深坑对浅坑围护墙侧向位移有明显影响。在设计上,增加匝道外侧围护插入比和在匝道外侧围护与深坑第一道混凝土支撑围檩之间设置混凝土传力带,可以有效减小匝道外侧围护变形和相应地表沉降发生量。

(2)时间对围护结构最大侧移影响非常明显,快挖快撑是减小开挖变形的最有效手段,且不增加工程成本。

(3)本项目抗隆起安全系数与最大侧移关系处在经典的 Mana and Clough(1981)图表的上、下限曲线之间,无匝道区域主要靠近该区间的上限,而有匝道区域受反压的影响,主要处于该区间的下限。

(4)围护墙最大侧移与挖深之比值基本介于 0.30%~0.77%,数据离散性较大,均值为 0.49%。其变形值仍总体超过二级变形控制线,但总体上不超过三级变形控制线。

(5)墙后地表沉降分布曲线呈勺形分布,与上海标准预测曲线更为契合。

(6)地表沉降与墙体侧移比值基本介于 0.4~2.0,其均值为 0.80,两者关系数据符合上海标准的统计规律。有匝道区域的比值整体不超过 0.80,无匝道区域平均值基本上在 0.90 左右。

(7)立柱桩回弹具有明显的空间反应特征,基坑中间位置的回弹量约为均值的 1.3~1.45 倍,而基坑边侧立柱桩回弹量只有中间位置的回弹量的 1/2。

参考文献:

[1] Peck, R.B. Deep excavation & tunneling in soft ground[C]. Mexico City: 7th Int. Conf. Soil Mech. Fdn. Engrg., State-of-the-Art- Report. Proc, 1969: 225-281.
 [2] Mana A.I., Clough G.W. Prediction of movements for braced cuts in

- clay[J]. Geotech. Engrg., ASCE, 1981, 107(6):759-777.
- [3] Clough, R.W., O'Rourke, T.D. Construction induced movements of in-situ walls [C]. Ithaca, N.Y.: In Proceedings, Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE Special Conference, 1990:439-470.
- [4] Ng, C.W.W. Observed performance of multi-propped excavation in stiff clay[J]. J. Geotech. Engrg., ASCE, 1998, 124(9):889-905.
- [5] Ou, C. Y., Liao, J. T., Lin, H. D. Performance of diaphragm wall constructed using top-down method[J]. J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, 1998, 124(9):798-808.
- [6] Hsieh, P.G., Ou, C.Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 1004-1017.
- [7] Long, M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, 2001, 127(3):203-224.
- [8] 徐中华, 王卫东, 王建华. 上海软土地区上海银行大厦深基坑工程的实测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S1): 4639-4644.
- [9] Zhong W. Wang, Charles W.W. Ng, Guo B. Liu. Characteristics of wall deflections and ground surface settlements in Shanghai [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(6):1243-1254.
- [10] 王卫东, 朱伟林, 陈崢, 等. 上海世博 500kV 地下变电站超深基坑工程的设计、研究与实践[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(S1): 564-576.
- [11] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 136(7): 985-994.
- [12] 徐中华, 王卫东, 王建华. 逆作法深基坑对周边保护建筑影响的实测分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(10):88-96.
- [13] 刘铭, 李翔宇. 上海地铁车站深基坑连续墙变形的统计[J]. 低温建筑技术, 2011, 152(2):81-83.
- [14] 崖尚松. 上海地铁 M2 线曲阜路车站基坑围护墙体变形监测数据分析[J]. 广东公路交通, 2017, 151(4):104-109, 127.
- [15] 李宁, 张祥, 张得焯, 等. 考虑槽壁及坑底联合加固的上海地铁车站基坑变形特性分析[J]. 结构工程师, 2020, 36(1):148-154.
- [16] 薛飞, 蒋文杰, 王天佐, 等. 上海天山路地铁车站深基坑开挖施工监测分析[J]. 绍兴文理学院学报(自然科学), 2021, 41(2):22-28.
- [17] DG/TJ08-61-2018, 基坑工程技术标准[S].

(上接第 270 页)

采取初支背后注浆、二衬背后注浆、全包防水层、局部径向注浆等注浆治水措施, 2022 年隧道日均排水量稳定在雨季 230 m³、旱季 153 m³, 均远小于设计预期。

(4) 实践证明, 蓉江四路越江隧道工程位于以弱风化泥质砂岩、泥岩地层中, 地质条件清楚, 选取恰当的工法及采取有效的治水、排水、防水措施后, 城市道路以隧道形式穿越城市中的江河湖泊的总体设计

方案是可行的。

参考文献:

- [1] 豆世康. 城市水下浅埋暗挖隧道最小覆盖层厚度确定方法[J]. 城市道桥与防洪, 2021(6):340-346.
- [2] 项志敏, 袁仁爱, 罗田郎. 浏阳河隧道全包型防排水系统类型及施工关键技术[J]. 给水排水, 2010(1):137-141.
- [3] JTG/T 3371-2022, 公路水下隧道设计规范[S].
- [4] 史义雄. 高速铁路越江隧道排水泵房设计探讨[J]. 给水排水, 2014(1):26-30.