

Deformations and Problems in a Subway Station Excavation in Deep Paleochannel Region in Shanghai

Chaoqun Wang^{1,2*}, Xiaoming Tang³, Yanbin Gao^{3#}, Zhengyuan Yang³

¹Shanghai Shentong Metro Co., Ltd., Shanghai

²School of Emergency Management and Safety Engineering, China Mining University, Beijing

³Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: [#]yanbin_gao@tongji.edu.cn

Received: Aug. 1st, 2019; accepted: Aug. 16th, 2019; published: Aug. 23rd, 2019

Abstract

There are still big challenges in the deep excavation in soft clay area. The ground settlement, lateral displacement, pillar uplift and supporting internal force of a subway station in deep paleochannel region with a relatively large thickness of soft clay (over 40 m) in Shanghai are introduced. For the standard segment, the ratio of the surface maximum ground surface settlement to the excavation depth (δ_v/H) is 0.3% - 0.6%. The ratio of the maximum lateral displacement of the underground diaphragm wall to the excavation depth (δ_{hm}/H) is 0.17% to 0.46%. When the excavation depth exceeds 12 m, the lateral displacement increased significantly, exceeding the warning value ($\delta_{hm}/H = 0.4\%$), and showing signs of kicking in some parts. The uplift of the pillars is significant and they are in the range of 60 mm to 80 mm, which is much larger estimated value of 20 mm. The uplift causes the first reinforced concrete strut to generate tension and cracks, which affects the distribution of forces of the struts and the stability of the supporting system. The mechanism of the bottom uplift and the analysis method and control methods of the pillar uplift are the key issues needed to be solved in the subway station excavation under this kind of geological conditions.

Keywords

Deep Paleochannel, Subway Excavation, Deformation, Pillar Uplift, Stability

上海深古河道区地铁车站基坑变形及相关问题

王超群^{1,2*}, 汤小明³, 高彦斌^{3#}, 杨正园³

¹上海申通地铁集团有限公司, 上海

*第一作者。

#通讯作者。

²中国矿业大学应急管理与安全工程学院, 北京

³同济大学地下建筑与工程系, 上海

Email: "yanbin_gao@tongji.edu.cn

收稿日期: 2019年8月1日; 录用日期: 2019年8月16日; 发布日期: 2019年8月23日

摘要

深厚软土区的深基坑工程仍然具有较大的挑战性。本文介绍了上海地区软粘土厚度较大(40 m以上)的深古河道区某地铁站基坑(开挖深度17.6 m)的地表沉降、连续墙侧向位移、立柱隆起和支撑内力的特征。该车站标准段基坑地表最大沉降 δ_v 与开挖深度 H 的比值 δ_v/H 在0.3%~0.6%; 地下连续墙最大侧向位移 δ_{hm} 与开挖深度 H 的比值在0.17%至0.46%之间, 开挖至12 m以后侧向位移明显加大, 部分位置超过报警值($\delta_{hm}/H = 0.4\%$), 并出现踢脚迹象; 立柱隆起明显, 开挖至坑底时的最大隆起量在60~80 mm, 远超出隆起量为20 mm的设计条件。较大的立柱隆起使第一道钢筋混凝土支撑处产生拉力并产生裂缝, 影响了支撑轴力的分布以及支撑的稳定性。坑底隆起的具体机理以及立柱桩隆起的分析方法和控制措施是该类地质条件下深基坑工程需重点解决的问题。

关键词

深古河道, 地铁基坑, 变形, 立柱隆起, 稳定性

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

深厚软土地区由于地质条件差, 深基坑开挖过程中非常容易产生较大的变形, 包括地表变形、围护结构侧向变形以及立柱桩的隆起, 严重的甚至导致基坑失稳。其中, 由于坑底稳定性不足而导致的围护结构产生较大变形以及围护结构失稳的案例很多, 其中最有名案例的是2004年新加坡的Nicoll Highway基坑倒塌[1]。我国也有类似的工程案例, 例如杭州一号线某地铁站倒塌[2]。对这一类问题, 有些学者对坑底隆起稳定性的分析方法开展研究[3] [4] [5] [6] [7], 有些则对坑底土体以及立柱隆起量的计算方法进行研究[8] [9] [10] [11], 但至今仍然未得到很好的解决。由于基坑变形与地质条件和施工工况密切相关, 通过一些典型案例的分析, 对认识特定地质条件下的基坑变形特征以及存在的风险仍然具有重要的意义。

上海属于较为典型的天然软土地基区, 软土主要为滨海沼泽相堆积类型。在第四纪时期, 长江口由于受古气候、古环境和地质构造的影响, 经历了6次海侵、海退, 在江、湖、海的交替作用, 以及沉积、冲刷或切割、再沉积的反复作用, 在不同时期沉积了不同的古河道地层[12] [13] [14]。本文所指的深古河道地层指的是晚更新世末(距今一万年)沉积的古河道地层, 具有埋深大(底部最大埋深达50米)、分布广、厚度大(总厚度约30多米)、成分复杂(以黏性土层为主, 含有粉土和粉砂层)的特点[13] [14]。除了上海地区外, 我国东南沿海其他地区也有大量的深古河道地层分布, 如杭州湾的古钱塘江河道。目前对于这类地质条件下深基坑支护结构变形特征的认识还不成熟。本文以上海在建18号轨道交通线中的一个地铁站为工程背景, 介绍深古河道区地铁站基坑施工过程中围护结构产生的变形以及相关问题, 希望

能够对该类地质条件下地铁车站基坑工程的设计施工有所帮助。

2. 车站基坑介绍

场地属滨海平原地貌，位于晚更新世时期深切古河道内。场地 50 m 深度范围内的土层分布以及各土层的物理力学特性如图 1 所示，具体包括含水率 w 、孔隙比 e_0 、重度 γ 、塑性指数 I_p 、液性指数 I_L 、扁铲实验测得的侧压力系数 K_0 和十字板剪切试验测得的不排水抗剪强度 C_u 。场地埋深 4.39 m~21.04 m 内分布的③层、④层、⑤₁₁层为典型的软土，含水率高(大于 40%)、强度低(不超过 40 kPa)。埋深 21.83 m~41.7 m 为由⑤₁₂、⑤_{31a}、⑤_{31b}和⑤₄层组成的含水率较高、强度较低的古河道地层。埋深 43.3~45.7 m 范围内为渗透性较大、强度较高的⑦₁₂和⑦₂层土，也是该场地的承压含水层。

车站基坑总体平面图见图 2 所示。基坑总长约 208 m，标准段长约 175.2 m，宽度 22 m，最大开挖深度 17.6 m；南北两个端头井形状相同，长 16.3 m，宽 26.8 m，北端头井基坑开挖深度约为 19.1 m，南端头井基坑开挖深度约 19.5 m。布置的监测点包括地表沉降(编号为 D)、地下水位(编号为 SW)、地下连续墙侧向变形(编号为 Q)、立柱隆沉(编号为 LZ)。标准段和端头井地下连续墙厚度为 800 mm，标准段墙深 32.5 m，端头井墙深 36.5 m，入土比为 0.84~0.87。标准段围护结构的布置见图 2。标准段共 4 道支撑，端头井 6 道支撑，第 1 道为钢筋混凝土支撑，其余为 $\Phi 609$ 钢支撑。立柱桩为钻孔灌注桩，直径为 $\Phi 800$ ，长 30 m。坑底 3 m 深度范围内采用旋喷桩加固。基坑采用明挖顺作法施工。自南端头井向北端头井单向分层开挖，见图 3 所示，标准段开挖分五层，开挖深度依次为 5.9 m、9.1 m、12.1 m、15.1 m、17.64 m，分别用 S₁~S₅ 表示；端头井开挖分六层，开挖深度依次为 5.9 m、9.5 m、12 m、14.5 m、17 m、19.5 m，分别用 S₁~S₆ 表示。基坑开挖期间采用疏干井排导基坑内潜水。

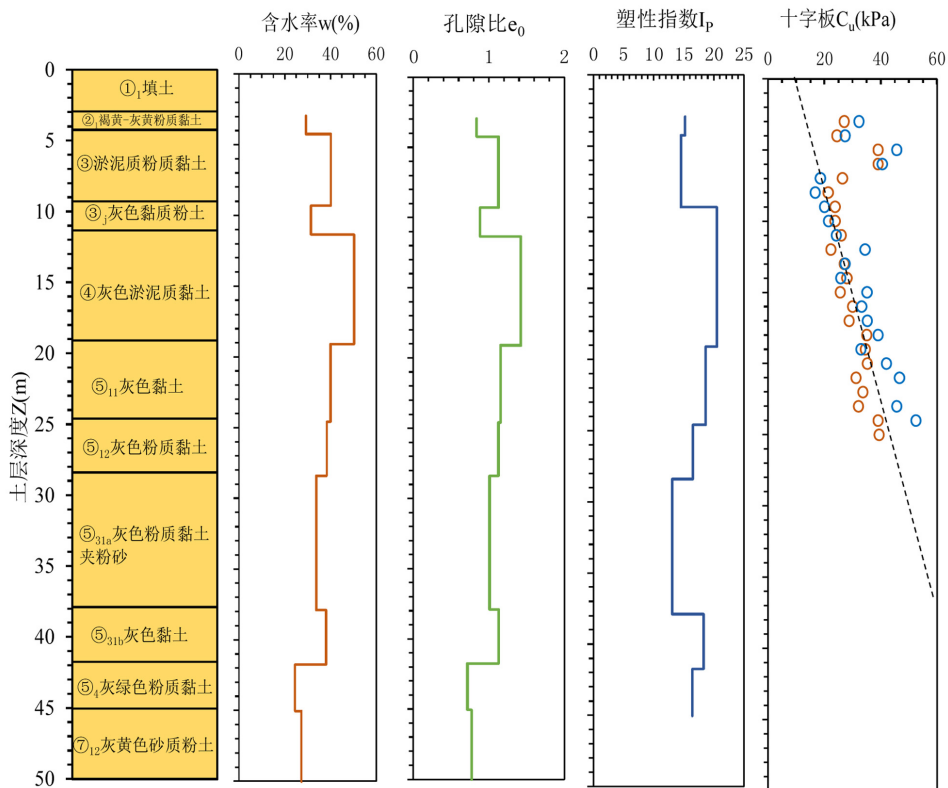


Figure 1. Soil layers and soil characteristics
图 1. 场地土层分布及土层特性

3. 地表沉降

标准段三个轴线的东西两侧共 6 个断面的地表沉降曲线见图 4(a)所示, 南、北端头井共 6 个段面的地表沉降曲线见图 4(b)所示。从图中可以看出, 周边地表沉降均呈 U 型, 即地表沉降 δ_v 随离开坑边距离 d 的增大先增大至最大值, 然后逐渐减小。标准段周边地表沉降 δ_v 普遍大于端头井地表沉降。标准段最大地表沉降大多在 50~100 mm, 端头井最大地表沉降大多在 40~80 mm 左右, 沉降最大的点基本出现在距离基坑 10 m 的地方。基坑标准段两侧地表沉降存在差异, 同一轴线上东侧地表沉降(图 4(a)实线)略小于西侧(图 4(b)虚线), 可能与两侧周边环境的差异有关, 东侧地表建筑荷载要小于西侧。

将各断面地表沉降用基坑开挖深度 H 归一化处理, 整理得到 $\delta_v/H \sim d/H$ 关系曲线, 如图 5 所示。图 5 中还给出了王建华、王为东等[15] [16]对上海软土地区基坑工程统计得到的地表沉降包络线, 以及 Peck 绘制了沉降分区图[17]。可以看出, 标准段 δ_v/H 的最大值大多在 0.2% 至 0.6% 之间, 端头井的略小一些。地表沉降数据点均在王建华给出的包络线内。标准段地表沉降数据点大部分分布于 Peck 所分的 I 区范围内, 少数数据点分布于 II 区; 端头井的地表沉降数据绝大部分分布于 I 区。Peck 分区中 II、III 区对应的地层条件与上海地区地层条件相似, 这表明在相似地层条件下, 该地铁基坑的地表沉降较 Peck 给出的地表沉降要小得多。这可能是由于 Peck 所统计基坑的主要围护形式是钢板桩等柔性支护体系, 而本工程采用的是刚度较大的地下连续墙, 且钢支撑采用了预加轴力。

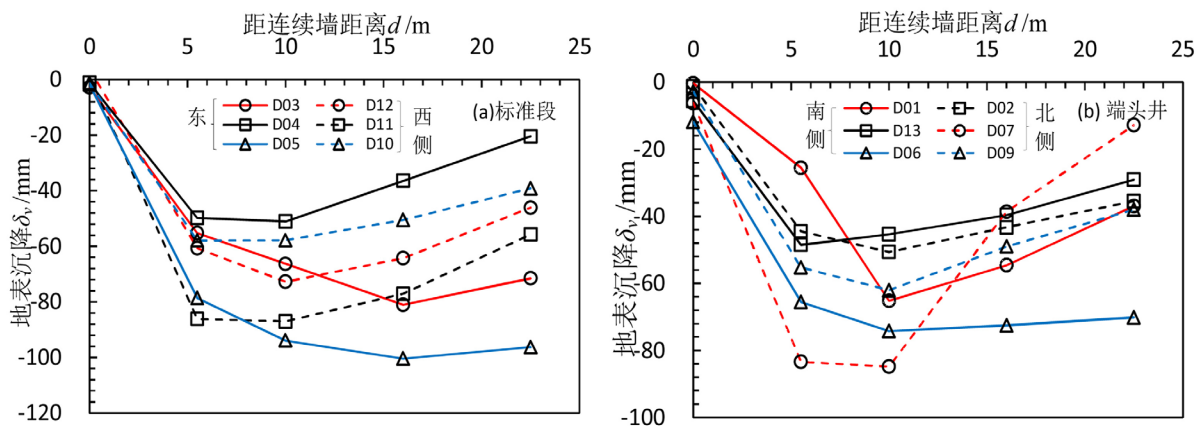


Figure 4. Ground settlement in each section
图 4. 各断面地表沉降曲线

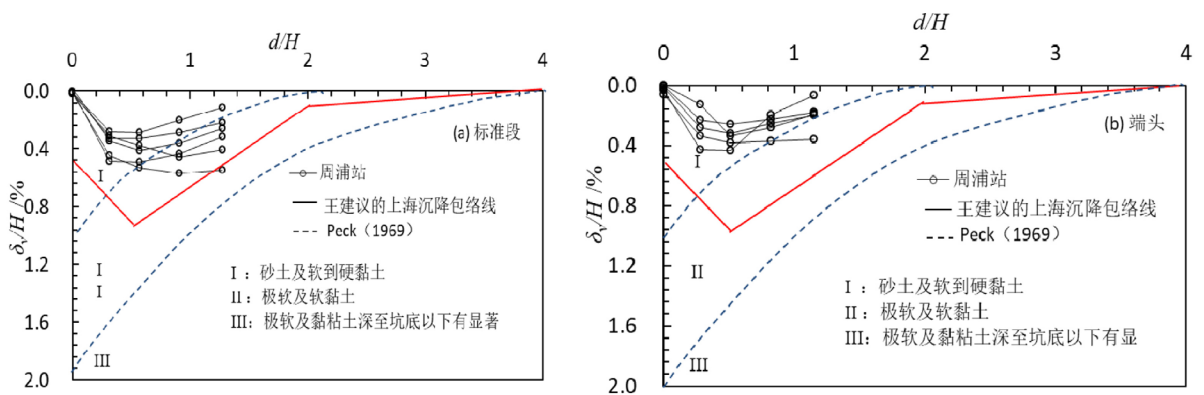


Figure 5. The normalized ground settlements
图 5. 归一化地表沉降曲线

4. 连续墙侧向变形

图 6 给出了标准段(测斜孔 Q9)和端头井(测斜孔 Q28)在不同开挖步下地下连续墙侧向位移 δ_h 与深度 H 的关系。标准段地下连续墙在开挖至坑底时, 墙脚侧向位移突然增加大 20 mm 左右, 最大侧向位移 δ_{hm} 增加到 60 mm 左右, 表明坑底隆起安全性在开挖最后一层土时迅速降低。设计预估的标准段最大侧向位移 δ_{hm} 仅为 24.6 mm, 不到实测值的一半。受空间效应和周边环境等因素的影响, 端头井的侧向位移较小, 最大侧向位移 δ_{hm} 在 40 mm 左右, 且未出现踢脚现象。

图 7 给出了标准段和端头井地下连续墙最大侧向位移 δ_{hm} 与开挖深度 H 关系。最大侧向位移 δ_{hm} 随开挖深度的增加而增大。标准段最大侧向位移 δ_{hm} 在 $0.17\%H \sim 0.46\%H$ 。开挖步 S_4 和 S_5 下最大侧向位移的增加速率($\Delta\delta_{hm}/\Delta H$)较 $S_1 \sim S_3$ 快; 开挖至坑底时, 最大侧向位移 δ_{hm} 值多在 40~60 mm。南北端头井的最大侧向位移与开挖深度的关系分别为 $\delta_{hm} = 0.17\%H$ 和 $\delta_{hm} = 0.31\%H$ 。北端头井具有较大的侧向位移, 可能与施工过程中的一些细节有关。

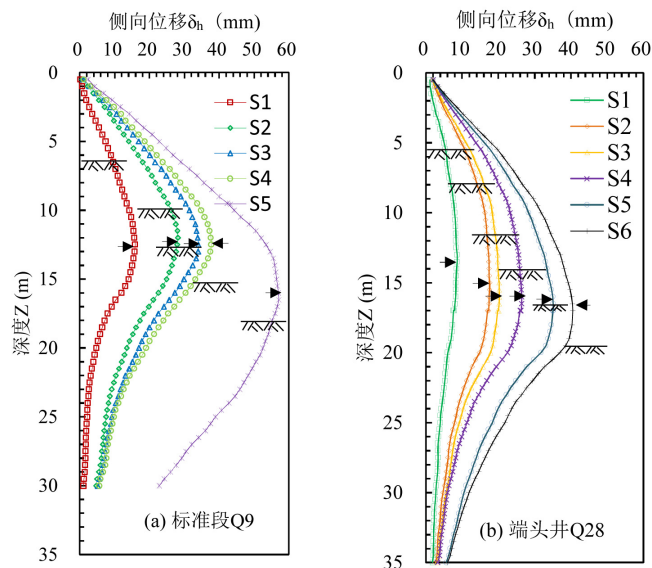


Figure 6. Lateral displacements of diaphragm wall
图 6. 连续墙侧向位移

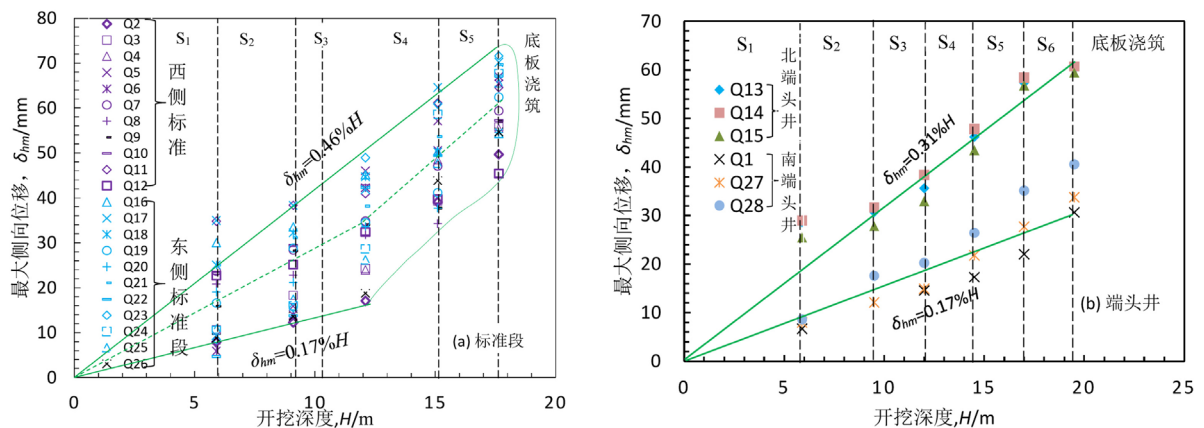


Figure 7. The relationship between maximum lateral displacement δ_{hm} and H
图 7. 最大侧向位移 δ_{hm} 与 H 的关系

5. 立柱隆起

开挖卸载会造成坑底土体的隆起，但是隆起变形的机理较为复杂[18]。坑底土体的隆起会抵消立柱所受的支撑重量荷载，甚至造成立柱隆起。作为代表，图 8 给出了标准段的立柱 LZ9 和端头井的立柱 LZ1 的立柱隆沉 δ_z (以隆起为正)与开挖深度 H_e 及时间 t 的关系图。随着开挖深度的推进，立柱隆起量增加；标准段的立柱最大隆起量可达 60~80 mm 左右，为设计给出的立柱隆起控制值 20 mm 的 3 至 4 倍；端头井的立柱最大隆起量则普遍小于 30 mm，这主要是由于尺寸效应的缘故。从图中可以看出，在底板浇筑阶段，由于有荷载的施加，立柱隆起有明显的回落。

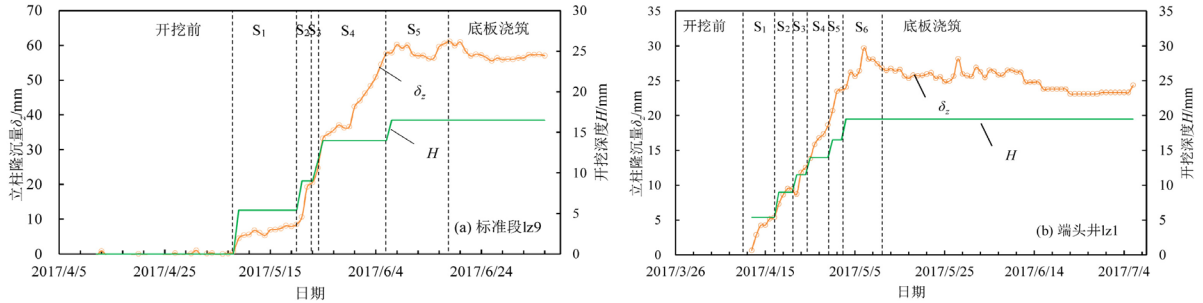


Figure 8. Variations of pillar uplift and excavation depth with time
图 8. 立柱隆沉量与开挖深度随时间的变化

图 9 中分别给出了标准段 11 个立柱(LZ2~LZ12)和端头井的 2 个立柱(LZ1 和 LZ13)的隆起量 δ_z 与开挖深度 H 的关系图。可以看出，立柱隆起与开挖深度呈明显的正相关。总体来讲，立柱隆起量随着开挖深度的增加而增加，但是隆起速率($\Delta\delta_z/\Delta H$)却并不相同。按照立柱隆起速率的变化情况，基本上可以划分为三个阶段，第一阶段为 $S_1\sim S_3$ ，具有较小的速率，第二阶段为 S_4 ，具有较大的速率；第三阶段为 S_5 ，速率有所下降。

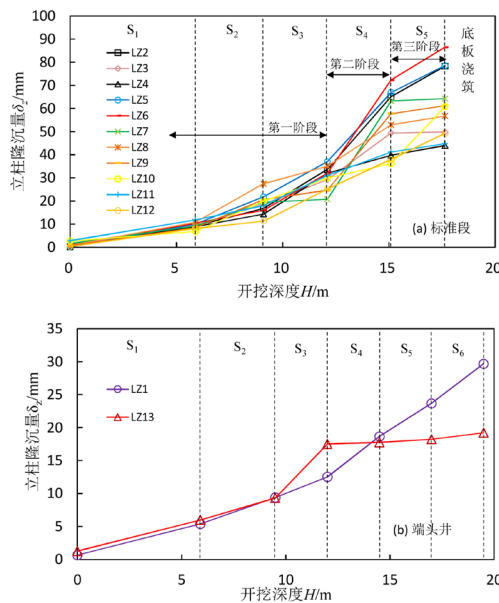


Figure 9. The relationship between pillar uplift and excavation depth
图 9. 立柱隆沉量与开挖深度的关系

6. 支撑轴力

图 10 为标准段(ZL5)在不同开挖步各支撑的轴力 F 。第 1 道钢筋混凝土支撑的轴力随开挖深度的增大逐渐变小, 开挖至坑底时呈现较大的拉力(-1800 kN)。现场可见钢筋混凝土支撑出现明显上拱且支撑中部产生裂缝。这应该与立柱隆起上顶使支撑产生较大的弯矩有关。可以预测, 若第 1 道支撑采用钢支撑, 则非常容易导致支撑坠落而发生工程事故。第 2 道支撑的轴力随开挖深度的增大而有增大的趋势, 可能的原因是混凝土支撑拉力作用下地下连续墙对第 2 道钢支撑产生了较大的压力。第 3~5 道支撑轴力随开挖深度的增大而增大, 底部的第 5 道支撑的轴力最大。

设计计算给出的结果中, 第一道混凝土支撑的轴力为 1600 kN, 第四道钢支撑的轴力最大, 为 1795 kN。从现场监测到的结果来看, 第一道混凝土支撑的受力状态与设计状态差别较大, 立柱隆起改变了支撑体系的受力特征, 出现了拉应力, 这一点在第一道混凝土支撑的设计中需要关注。另外, 也表明了在该类地质条件下第一道支撑采用混凝土支撑(而不是钢支撑)的必要性。

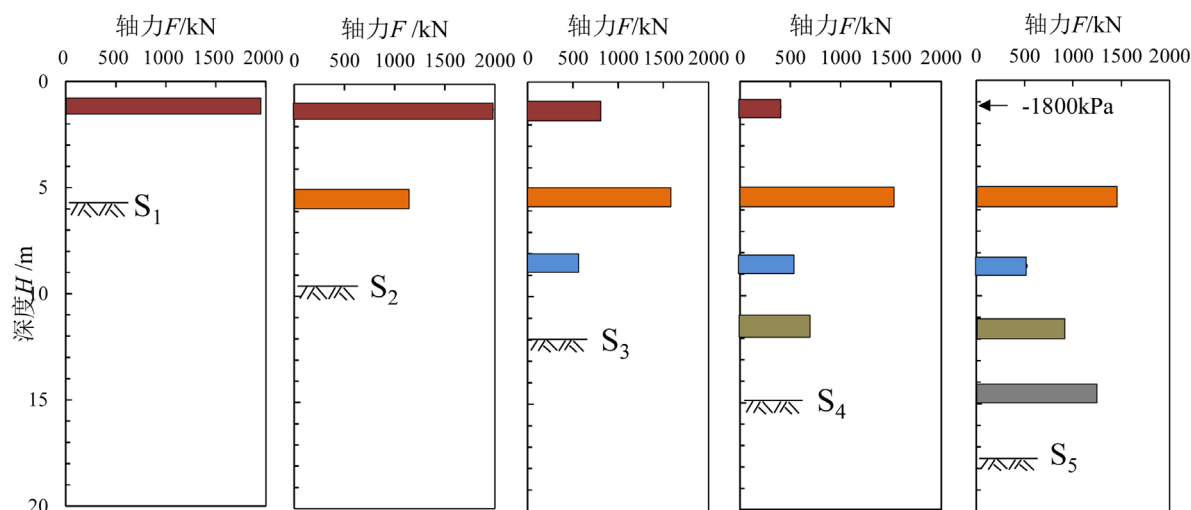


Figure 10. Strut axial force F measured at the standard segment (ZL5)

图 10. 标准段(ZL5)各工况的支撑轴力 F

7. 结论与讨论

介绍了黏性土厚度较大的深古河道区一个典型地铁车站基坑(开挖深度 17.6 m)的地表沉降、侧向位移、立柱隆起和支撑内力, 一些特殊的现象总结如下:

1) 当开挖至 10 m 至 12 m 以上时, 标准段地下连续墙侧向变形以及立柱隆起出现明显增大的现象, 分别为设计计算值的 2 倍和 3.5 倍左右, 表明坑底隆起安全性处于较低的水平。

2) 标准段过大的立柱隆起导致第一道混凝土支撑受拉开裂, 并影响了支撑体系的内力分布。过大的立柱隆起严重影响了钢支撑和混凝土支撑的安全, 产生事故的风险较大, 需要在工程中予以重视。

3) 由于尺寸效应, 端头井的地下连续墙侧向变形与立柱隆起较小, 基本在设计计算和相关规范控制范围内。表明该类地质条件下端头井虽然开挖深度较大, 但是安全性能能够得到保证。

在 18 号线的地铁车站基坑建设过程中, 深古河道区多个车站表现出过大的立柱隆起(多在 50~80 mm 之间, 为正常地层区的 3 倍左右), 成为威胁基坑施工安全性的一个普遍问题, 因此这些特殊现象的产生应该与所处的地质条件有关。该类地质条件下地下连续墙底部出现明显的位移以及威胁支撑体系安全的过大的立柱隆起应该与深厚软土层坑底隆起安全性不足有关。坑底隆起安全性不足导致坑外土体在自重

作用下向坑内流动,进而造成立柱上拔。另外,深古河道区地层中大多夹有薄层砂土因而渗透系数较大,卸载造成的深厚软土层的固结回弹可能也是立柱出现较大隆起的一个原因。

除了需要进一步研究了解该类地质条件下坑底土体隆起和立柱隆起的机理外,关于立柱隆起的计算方法以及控制技术的研究也是设计施工中迫切需要解决的问题。在本文给出的案例中,设计方按照上海规范得到的坑底隆起安全系数为3.1,满足规范要求的2.5的规定,显然高估了实际所处的状态,这个问题是值得思考并予以重视的。

参考文献

- [1] Singapore Government Ministry of Manpower (2005) Report of the Committee of Inquiry into the Incident at the MRT Circle Line Worksite That Led to the Collapse of the Nicoll Highway on 20 April 2004.
- [2] Chen, R.P., Li, Z.C., Chen, Y.M., Ou, C.Y., Hu, Q. and Rao, M. (2015) Failure Investigation at a Collapsed Deep Excavation in Very Sensitive Organic Soft Clay. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **29**, Article ID: 04014078. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000557](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000557)
- [3] 周建, 蔡露, 罗凌晖, 应宏伟. 各向异性软土基坑抗隆起稳定极限平衡分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 1-10.
- [4] 应宏伟, 王小刚, 张金红. 考虑基坑宽度影响的基坑抗隆起稳定分析[J]. 工程力学, 2018, 35(5): 127-133.
- [5] 王志虹, 张朋来. 坑底抗隆起圆弧滑动模式规范条文适用性研究[J]. 山西建筑, 2017, 43(8): 58-60.
- [6] 张飞, 李镜培, 孙长安, 沈广军, 李飞. 软土狭长深基坑抗隆起破坏模式试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2825-2832.
- [7] 俞建霖, 龙岩, 夏霄, 龚晓南. 狭长型基坑工程坑底抗隆起稳定性分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(11): 78-87.
- [8] 楼晓明, 杨晶, 李德宁, 等. 立柱桩在深基坑分步开挖过程中的上拔位移分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 193-198.
- [9] 操小兵, 金文, 李镜培, 姚建平. 基坑开挖卸荷引起立柱桩的隆起位移计算[J]. 结构工程师, 2018, 34(1): 131-137.
- [10] 曾晋. 考虑支护位移和水压力的基坑底部隆起量估算改进方法[J]. 水利科技与经, 2018, 24(9): 15-18.
- [11] 杜磊, 王育平. 软土地层深基坑隆起变形规律及其对周围建筑物的影响[J]. 施工技术, 2016, 45(15): 99-103.
- [12] 周学明, 袁良英, 蔡坚强, 等. 上海地区软土分布特征及软土地基变形实例浅析[J]. 上海国土资源, 2005, 26(4): 6-9.
- [13] 孙永福. 上海及长江口第四纪沉积层中埋盖的古河道[J]. 上海国土资源, 1988(4): 9-16.
- [14] 高大铭, 陈振荣, 吕全荣. 上海陆域地区古河道溺谷相沉积层工程地质特征研究[J]. 上海国土资源, 1998, 19(4): 11-21.
- [15] 王建华, 徐中华, 陈锦剑, 等. 上海软土地区深基坑连续墙的变形特性浅析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 485-489.
- [16] 王卫东, 徐中华, 王建华. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1659-1666.
- [17] Peck, R.B. (1969) Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, 225-290.
- [18] Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1948) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, New York.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org