

软土地区轨道交通桥梁下方灌注桩小净距施工影响

朱兆斌

(杭州铁路设计院有限责任公司, 310043, 杭州)

摘 要 [目的]我国沿海软土地区灌注桩与运营轨道交通桥梁、桥墩间小净距的施工影响正成为制约城市轨道交通规划与建设的又一瓶颈因素,因此有必要研究小净距钻孔灌注桩施工对周围地层和桥墩的变形影响。[方法]以浙江某城市道路桩板结构形式下穿轨道交通桥梁在建工程为例,通过设计土体侧向变形监测试验和搭建既有桥梁、桥墩的位移智能监测系统,分析了深厚软土区地层与测斜孔的协同变形特性,以及钻孔灌注桩施工对周围地层及桥墩变形的影响规律。[结果及结论]为使测斜孔与地层具有较好的协同变形,软土区测斜孔施工后应稳定停留 6 d;淤泥层对施工加载、卸载过程的敏感性较高,由施工引发的软土地层变形量最大;在施工条件下,桥墩 3 个方向的变形幅值约为未施工的 2~3 倍;成孔开挖和混凝土浇筑工序对桥墩深度方向的扰动影响较显著,因此已运营轨道交通桥梁下部施工的监测重点应为竖向位移。

关键词 轨道交通;软土地区;灌注桩小净距施工

中图分类号 U443.15

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.026

Impact of Small Clearance Bored Pile Construction under Rail Transit Bridges in Soft Soil Area

ZHU Zhaobin

(Hangzhou Railway Design Institute Co., Ltd., 310043, Hangzhou, China)

Abstract [Objective] The impact of small clearance construction between bored piles and piers of operational rail transit bridges in China's coastal soft soil areas is becoming a bottleneck factor restricting urban rail transit planning and construction. Therefore, it is necessary to study the impact of small clearance bored pile construction on the deformation of surrounding strata and bridge piers. [Method] Taking an ongoing project of urban road pile-slab structure under passing the rail transit bridge in Zhejiang Prov. as example, through designing soil lateral deformation monitoring tests and building a displacement smart monitoring system for bridge and piers, the coordinated deformation characteristics between deep soft soil strata and inclinometer boreholes are analyzed, together with the impact law of bored pile construction on the deformation of

surrounding strata and bridge piers. [Result & Conclusion]

To ensure good coordination in deformation between inclinometer boreholes and strata, inclinometer boreholes in soft soil areas should remain for 6 days after the completion of construction. The sensitivity of the silt layer to the construction loading and unloading process is high, resulting in the maximum deformation of soft soil strata induced by construction. Under construction conditions, the deformation amplitude of the bridge piers in three directions is about 2 to 3 times that of non-construction conditions. The drilling excavation process and concrete pouring process have a significant disturbance effect on the depth direction of bridge piers. Therefore, the monitoring focus of construction beneath operational rail transit bridges should be put on vertical displacement.

Key words rail transit; soft soil area; bored pile small clearance construction

随着我国公路网、铁路网的持续加密和融合建设,线路间交叉或并行的复线率越来越高,与运营铁路邻近的施工也愈发频繁^[1]。由于 TB 10182—2017《公路与市政工程下穿高速铁路技术规程》对运营铁路桥墩和路基变形控制要求极为严格,我国沿海软土地区灌注桩与运营轨道交通桥梁、桥墩间小净距的施工影响正成为制约城市轨道交通规划与建设的又一瓶颈因素。

文献[2-3]的研究结果表明,相比于预制桩和锤击桩工艺,钻孔灌注桩工艺的施工扰动更小,但其施工影响范围可达 1.5 倍桩深。因此,不合理开挖势必会导致周围地层产生较大的变形,进而严重危害赋存其中的桥墩等结构的安全。文献[4]分析了灌注桩施工对周围地铁隧道的影响。文献[5]研究了钢套管钻孔灌注桩施工对高速铁路基变形的影响。然而,已有文献研究中均未报道过无钢套管护壁灌注桩与运营轨道交通桥梁桩基间小净距施工条件对地层和桥墩的变形影响。

浙江某沿海在建城市道路下穿运营轨道交通桥梁工程(以下简称“下穿桥梁工程”)中,淤泥质土

层厚度超过 30 m, 地层承载力低、变形灵敏度高, 施工中极易发生变形, 目前尚缺乏相关实测数据和可供借鉴的工程经验。基于此, 本文以该下穿桥梁工程为例, 分别设计了深厚层软土区钻孔灌注桩施工地层变形监测试验和桥墩位移自动监测系统, 分析了软土区测斜孔在施工后的稳定变形特性, 以及钻孔灌注桩施工流程对周围地层和轨道交通桥梁、墩柱的变形影响规律。本文研究可为后续类似钻孔灌注桩邻近运营轨道交通桥梁的施工提供经验与借鉴。

1 工程案例

1.1 工程概况

新建城市道路位于我国东南部沿海地区, 设计时速为 40 km/h。工程概况示意图如图 1 所示, 详细施工区域位于既有线路 A 和既有线路 B 的桥梁下方。待测区灌注桩的设计形式为钢筋混凝土桩, 设计深度为 52 m, 直径为 0.8 m, 横向间距为 6.5 m。其中, 既有线路 A 和既有线路 B 的桥梁跨距均为 32 m, 桥墩尺寸为 12.3 m(长) × 5.7 m(宽) × 2.5 m(高), 承台尺寸为 7.7 m(长) × 4.9 m(宽) × 2.0 m(高), 承台桩基础分别为 8 根直径 125 cm 和 6 根直径 100 cm 的钻孔灌注桩, 桩深度分别为 58 m 和 61 m。

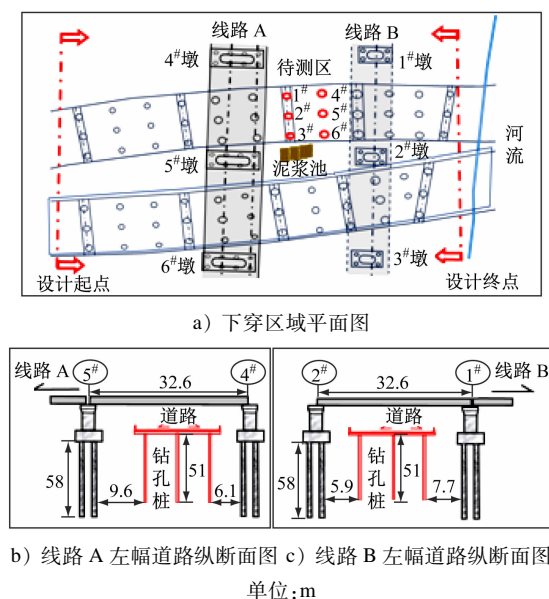


图 1 工程概况示意图

Fig. 1 Diagram of engineering overview

1.2 地层条件

拟建场区为第四纪晚更新世沉积地层, 主要由

杂填土、粉质黏土、淤泥、黏土和圆砾层组成, 具有成层分布特点。地层主要岩土物理力学参数如表 1 所示。

表 1 地层主要岩土物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of main geological strata

名称	厚度/m	重度/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	压缩模 量/MPa
①杂填土	0 ~ 6.5	16.6	33.3	15.7	2.5
②粉黏土	0 ~ 2.1	17.9	23.1	13.3	3.5
③淤泥	25.2 ~ 31.6	17.0	10.8	6.8	1.8
④黏土	30.2 ~ 34.7	17.9	23.3	12.0	3.5
⑤圆砾	43.9 ~ 45.3	25.0		33.0	60.0

2 施工现场成桩试验及监测方案

2.1 成桩工艺

灌注桩成桩工艺示意图如图 2 所示。现场只埋一节 2 m 深的钢护筒保护孔口, 通过泥浆自上而下流动提高钻进与排渣效率, 孔内护壁泥浆可以平衡水位、润滑切土和防止塌孔。主要施工过程包括钻进成孔、浇筑混凝土和混凝土硬化 3 个阶段。

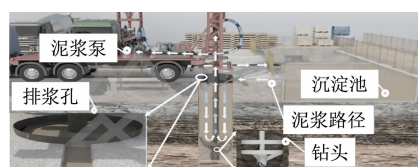


图 2 灌注桩成桩工艺示意图

Fig. 2 Diagram of bored pile construction process

2.2 试验方案

为分析钻孔灌注桩施工全过程引起的周围地层和轨道交通桥梁的变形情况, 本文采用测斜管和测斜仪开展土体侧向变形监测试验, 变形监测频率为 0.5 m/组。现场试验中, 测斜孔布置方案和施工工艺如图 3 a) 所示, 1#、2#和 3#测斜管分别埋设在距钻孔桩钢套管边缘 2.5 m、3.5 m 和 5.5 m 处, 钢套管直径为 1.2 m, 基坑和钢套管埋深为 2 m, 测斜管内径为 0.06 m, 外径为 0.07 m。由于测斜孔的施工直径为 0.15 m, 远大于测斜管直径, 所以测斜管植入钻孔后, 需使用细填料填充测斜管与钻孔壁间的空隙, 以快速实现稳定的协同变形。最终, 3 根测斜管埋深分别为 45 m、42 m 和 45 m。

为解决桥墩变形监测费时、费力等问题, 结合全站仪和棱镜等设备设计的桥墩变形自动监测方案如图 3 b) 所示。现场桥墩变形监测数据可以通

过互联网技术实时传至用户电脑,实现在线自动监测。现场桥墩监测网断面及待测桥墩棱镜布设方案如图 3 c) 所示。桥墩上布置两层棱镜,距离地面高度分别为 2 m 和 4 m,每层布置 2 枚棱镜,通过全站仪对每个桥墩布置的 4 枚棱镜(L1—L4)进行逐点扫描,获得桥墩变形位移数据。监测系统中,每个桥墩的采样频率为 2 h/次,且棱镜的 x 向、 y 向和 z 向位移分别对应桥墩水平面横向、水平面顺向和高度方向位移。

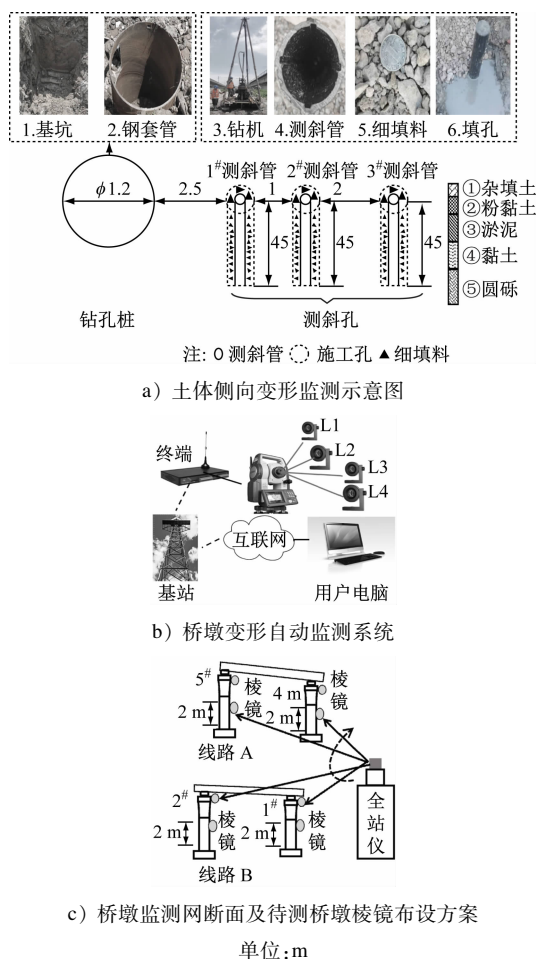


Fig. 3 Diagram of field test monitoring schemes

总体试验规划为:2023 年 5 月 16 日—5 月 17 日,1[#]、2[#]和 3[#]测斜孔依次施工完毕;2023 年 5 月 16 日—5 月 22 日为钻孔稳定时间;2023 年 5 月 23 日灌注桩施工。

3 试验结果分析

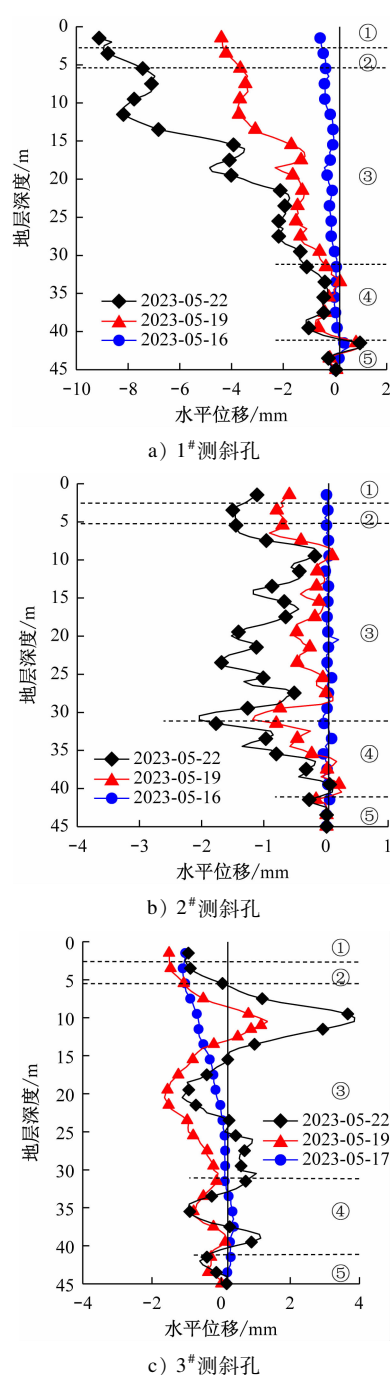
3.1 软土区测斜孔的稳定变形特性

在软土区现场试验中,测斜管与地层协同变形

是施工位移准确监测的前提。提取 2023 年 5 月 16 日—5 月 22 日 1[#]、2[#]和 3[#]测斜孔的实测数据,不同日期下,3 个测斜孔的水平位移如图 4 所示。稳定期间,3 个测斜孔的水平位移演变规律因钻孔位置及施工顺序的差异而存在显著差异。1[#]测斜孔最先施工且细集料填充量最大,2[#]测斜孔施工期间因塌孔导致细集料填充量最少,属于欠密实状态,说明 1[#]测斜孔在施工后成孔填充的密实状态要优于 3[#],2[#]测斜孔在施工后成孔填充的密实状态最差。

对比图 4 a) 和图 4 c) 可知:1[#]和 3[#]测斜孔周围地层的主要变形区为淤泥质土层中、上部,黏土和圆砾层变形较小,地层最大变形深度范围为 8 ~ 13 m,这是由于 1[#]和 3[#]测斜孔下部填充状态较好,测斜孔稳定期间变形主要发生在淤泥地层中、上部,测斜孔水平位移曲线呈上大下小的姿态。由于基坑开挖和钢套管埋设过程破坏了地层平衡,因此距基坑最近的 1[#]测斜孔的孔口区侧向水平位移最大。此外,施工中由于 2[#]钻孔发生塌孔,导致测斜管埋入深度小于 1[#]和 3[#]钻孔深度,加之塌孔引起堵塞导致钻孔底部空间填充状态较差,欠密实状态下 2[#]测斜孔稳定期间的水平位移曲线表现为下部变形大于上部变形,30 ~ 35 m 深度处的淤泥质土层同粉质黏土及黏土的过渡区为主要变形区,这也说明随着测斜孔稳定期的延长,2[#]测斜孔下部因地层应力释放产生了自密实变形,即延长测斜孔稳定期可以降低软土区地层不稳定变形的干扰,有利于提高变形监测精度。

稳定中期(2023 年 5 月 19 日)和稳定末期(2023 年 5 月 22 日)两个阶段下,3 个测斜孔的水平位移如图 5 所示。3 个测斜孔在两个阶段的水平位移发展规律相似,在淤泥层上部位置,不同测斜孔的水平位移差异显著。稳定末期,3 个测斜孔的水平位移幅值分别为 $5.49\% D_s$ 、 $1.37\% D_s$ 和 $2.57\% D_s$ (D_s 为测斜孔施工直径),以中间位置 2[#]测斜孔的水平位移为基准,1[#]和 3[#]测斜孔的最大水平位移值在稳定中期分别为 3.76 mm 和 1.50 mm,在稳定末期分别为 7.74 mm 和 4.37 mm,说明稳定期测斜孔的水平位移发展具有明显的方向性。这是由于 1[#]、2[#]和 3[#]测斜孔依次顺序施工,1[#]和 3[#]测斜孔的地层应力及位移属单侧释放,2[#]测斜钻孔属双侧释放,因此稳定末期,1[#]和 3[#]测斜孔的水平位移曲线呈现单侧偏移姿态,由于 1[#]测斜孔距 2[#]测斜孔比



注:水平位移以远离灌注桩为正,以朝向灌注桩为负;余类同。

图4 不同日期下3个测斜孔的水平位移

Fig. 4 Lateral displacement of three inclinometer boreholes on different dates

3#测斜孔远,所以2#测斜孔的位移曲线为负,变形更靠近1#测斜孔。

3.2 灌注桩成桩施工对地层变形的影响

稳定末期,测斜孔和地层具有协同变形特性,以稳定末期测斜孔累积位移为基准,不同开挖深度 h 和开挖间距下,地层深度和地层水平位移的关系

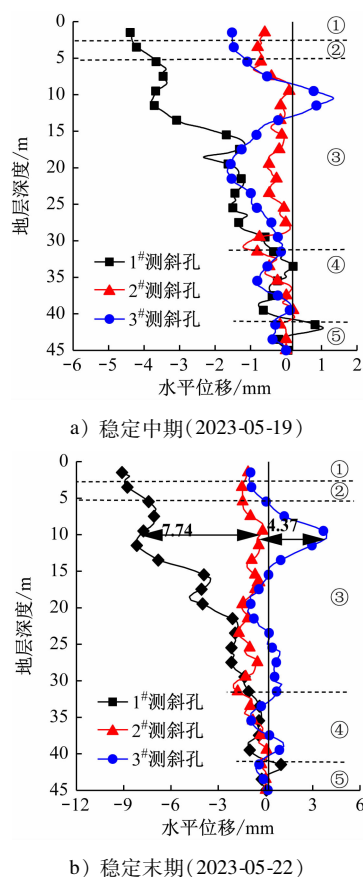


图5 不同阶段下3个测斜孔的水平位移

Fig. 5 Lateral displacement of three inclinometer boreholes at different stages

如图6所示。由图6 a)可知:地层水平位移随着开挖深度的增大而增大,地层水平位移最大值位于淤泥地层顶部;淤泥及以下地层水平位移随着地层深度的增大而依次减小;当 $h = 45$ m时,地层水平位移最大值为 -4.02 mm,约为灌注桩直径的0.5%。这表明在开挖施工过程中,地层发生了径向内缩变形。导致该现象的主要原因为淤泥抗剪强度较黏土和圆砾地层低,随着开挖深度的增大,淤泥地层孔壁土体环向应力水平有所降低,在挤压作用下淤泥地层比黏土和圆砾地层更易发生屈服变形破坏。因此,黏土和圆砾层的水平位移远小于淤泥层的水平位移。由图6 b)可知:1#、2#和3#测斜孔处的地层水平位移均为负,在深度方向上的地层位移发展规律具有一致性。这表明开挖施工过程中,不同开挖间距的3个测斜孔处的地层均发生了内缩变形,且地层的内缩变形主要集中在淤泥层,其主要变形深度范围为0~20 m。不同间距处,地层最大水平位移值排序为1#测斜孔的地层水平位移>2#测斜孔的地层水平位移>3#测斜孔的地层水平位移,说明施

工对地层水平位移的影响随着灌注桩间距的增大而减小,其中 3[#]测斜孔处的地层最大变形量仅为 1.1 mm。

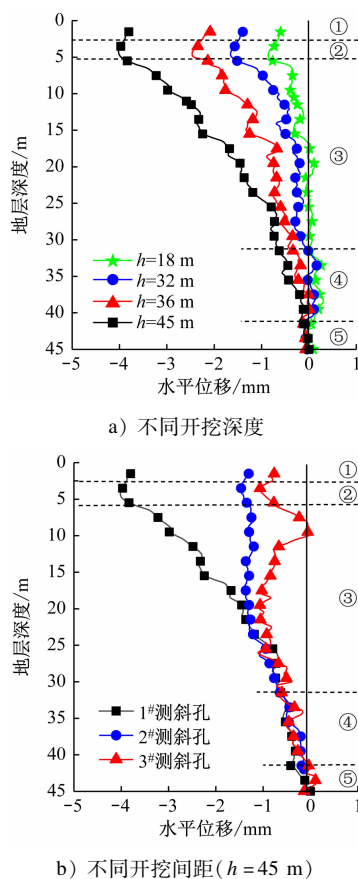


图6 不同开挖深度和开挖间距下地层深度和地层水平位移的关系

Fig. 6 Relation between stratum depth and stratum lateral displacement under different excavation depth and excavation spacing conditions

对比灌注桩成孔开挖阶段、混凝土浇筑阶段和混凝土硬化阶段(浇筑混凝土 1 d 后)3 个阶段下的地层水平位移,如图 7 所示。在成孔开挖阶段,由于孔壁土体卸载,地层水平位移表现为一定程度的径向内缩变形。在混凝土浇筑阶段,随着流态混凝土自下而上逐步置换为护壁泥浆,重度大的混凝土对孔壁向外的压力大于土体对孔壁向内的压力,此时孔内存在径向加载导致孔壁受到挤压,最终引起地层水平位移变形正向发展,此阶段孔壁的变形演变主要呈现为中间大、两边小的姿态。这是由于新灌注混凝土介于纯液体和纯固体之间,其浅部侧压力往往呈液压分布,当达到地层临界深度 h_{crit} 后,侧压力的增长随地层深度的增大明显减缓,地层受到挤

压导致的最大变形约位于 $h_{crit} = h/3$ 处^[5]。稳定期间,流态混凝土硬化导致水平应力消散,此时孔壁土体发生卸载,测斜孔处的淤泥地层发生了一定的负向变形,说明 3 个成桩阶段中淤泥地层均易发生变形,其主要原因为软土地层对荷载敏感性较高。因此,软土区的成桩施工应重点防治淤泥层的变形影响。

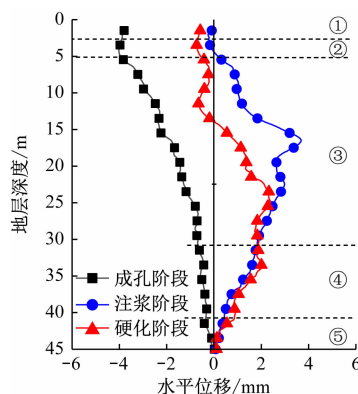


图7 灌注桩成孔-注浆-稳定阶段的地层水平位移对比
Fig. 7 Comparison of stratum lateral displacement in bored pile drilling-grouting-stabilizing stage

3.3 灌注桩施工对轨道交通桥梁、桥墩变形的影响

钻孔灌注桩施工主要包括初始阶段(J1)、施工护壁泥浆渠阶段(J2)、成孔开挖阶段(J3)、混凝土浇筑阶段(J4)和施工后稳定阶段(J5)5 个工序。灌注桩施工全过程中,1[#]、2[#]、4[#]和 5[#]桥墩测点 3 个方向的位移演变规律,如图 8 所示。在温度、湿度和风力等环境因素影响下,初始阶段,桥墩位移幅值为 0.26 mm,位移变化水平较低。施工护壁泥浆渠邻近线路 A 的 4[#]和 5[#]桥墩侧,故施工护壁泥浆渠阶段末期,4[#]桥墩 x 向和 y 向位移变化显著高于 1[#]和 2[#]桥墩对应位移。该阶段中,桥墩 z 向的位移累积变形远大于 x 向和 y 向的位移累积变形,说明地面施工对邻近既有线路桥墩竖向位移的影响远大于平面位移,因此邻近运营轨道交通桥梁的施工中,桥墩变形监测重点为其竖向位移的变化。

钻孔开挖前,地层可视为处于静止或弹性平衡状态的半无限空间体,而钻孔开挖施工会打破地层的平衡状态,进而引起桥墩变形位移快速发展。成孔开挖阶段,4 个桥墩 x 向和 z 向位移先增大后减小,y 向位移变化随着桥墩位置的不同而具有显著差异。在 4 个桥墩的 y 向变形位移中,1[#]桥墩 y 向位移变化幅值最大。在桥墩 3 个方向的变形位移中,4 个桥墩在 z 向的变形显著高于 x 向和 y 向位

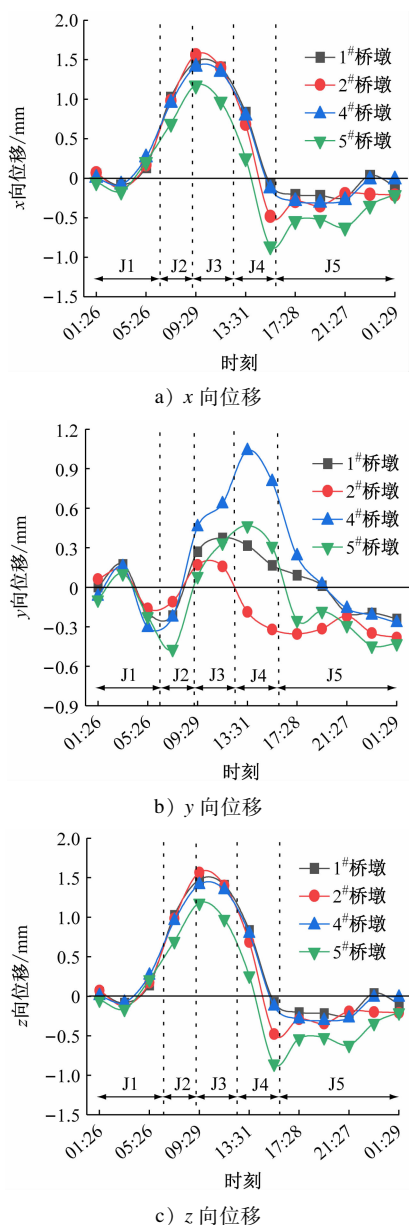


图8 灌注桩施工工序对桥墩位移的影响

Fig. 8 Influence of bored pile construction process on bridge pier displacement

移,2#桥墩 z 向变形最大值为1.56 mm。混凝土浇筑阶段,地层呈径向加载状态,1#桥墩 z 向变形位移幅值为1.04 mm,显著高于无施工影响下的桥墩变形幅值。施工后稳定阶段,由于混凝土硬化导致自身体积缩小,且地层静水压力逐渐消散,桥墩位移在稳定阶段前期(2~4 h)仍然存在波动,5#桥墩 z 向位移幅值为0.62 mm。4 h后,桥墩3个方向的变形位移趋于更低水平,且与初始位移十分接近,说明桩基施工后,地层应力存在2~4 h的平衡稳定期。综上所述,成桩各工序对邻近轨道线路桥梁、

桥墩位移演变均有影响,成孔开挖和混凝土浇筑工序对桥墩扰动最显著。

4 结语

通过现场试验和数值模拟的方法系统地研究了深厚层软土区测斜孔工后稳定变形特性和钻孔灌注桩施工对周围地层和桥墩变形的影响。主要获得以下结论:

1) 软土区测斜管与地层实现稳定协同变形所需停留时间比一般地层(3~4 d)更久,建议新施工的测斜钻孔应停留不少于6 d的稳定期,其稳定期间测得测斜孔的最大变形位移约为(1.37%~5.49%) D_s 。

2) 钻孔灌注桩开挖、注浆和稳定等工序对软土区地层和轨道交通线路桥墩的水平位移均有影响,其中施工开挖和注浆工序的影响较为显著。淤泥层对施工加载、卸载过程的敏感性较高,由施工引发的软土地层变形量最大。在施工条件下,桥墩3个方向的变形幅值约为未施工的2~3倍。

3) 距离灌注桩5.5 m处的地层位移受施工影响较小,施工中桥墩综合变形幅值较低,说明本案例中的灌注桩与轨道交通桥梁墩台桩基间距(5.98 m)能有效降低桩基施工对桥墩基础变形的影响。

参考文献

- [1] 李恒一,王志杰,何晟亚,等. 地铁基坑下穿铁路桥的桥墩保护设计方案合理性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(7): 180.
LI Hengyi, WANG Zhijie, HE Shengya, et al. Rationality study on pier protection and design scheme of metro foundation pit under-crossing railway bridge[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(7): 180.
- [2] 周立波,罗伟锦,夏雯,等. 钻孔灌注桩施工对临近电力顶管隧道的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(9): 265.
ZHOU Libo, LUO Weijin, XIA Wen, et al. Study on bored piles construction influenced on adjacent pipe-jacking tunnel of electric power[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(9): 265.
- [3] 葛鹏,黄方林,温伟斌,等. 钻孔灌注桩开挖对紧邻既有桥梁影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(12): 3111.
GE Peng, HUANG Fanglin, WEN Weibin, et al. Study on the influence of bored pile excavation on the adjacent existing bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(12): 3111.

(下转第163页)

- 路概况[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 9.
- HOU Xiufang, FENG Chen, ZUO Chao, et al. Statistical analysis of urban rail transit in Chinese mainland in 2022[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(1): 9.
- [3] 路清泉, 苏立勇, 张志伟, 等. 地铁车站装配式站台板拆分设计与连接方法研究[J]. 施工技术, 2021, 50(4): 12.
- LU Qingquan, SU Liyong, ZHANG Zhiwei, et al. Research on the disassemble and connection design of prefabricated platform slab in subway station[J]. Construction Technology, 2021, 50(4): 12.
- [4] 杜修力, 李洋, 许成顺, 等. 1995 年日本阪神地震大开地铁车站震害原因及成灾机理分析研究进展[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 223.
- DU Xiuli, LI Yang, XU Chengshun, et al. Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai Subway Station during 1995 Osaka-Kobe Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 223.
- [5] TAO L, DING P, YANG X, et al. Comparative study of the seismic performance of prefabricated and cast-in-place subway station structures by shaking table test[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2020, 105: 103583.
- [6] 杨秀仁, 黄美群, 林放, 等. 地铁车站预制装配式结构注浆式榫槽接头试验方案研究[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(5): 83.
- YANG Xiuren, HUANG Meiqun, LIN Fang, et al. Experimental method of grouted mortise-tenon joint for prefabricated metro station structure[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(5): 83.
- [7] 杨秀仁, 林放, 黄美群. 地铁车站预制装配式结构注浆式单榫长接头抗弯承载性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 111.
- YANG Xiuren, LIN Fang, HUANG Meiqun. Research on flexural bearing capability of long grouted single mortise-tenon joints for prefabricated metro station structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 111.
- [8] 张学龙, 高向宇, 杨秀仁, 等. 装配式地铁车站结构榫槽接头压弯性能研究[J]. 特种结构, 2018, 35(5): 73.
- ZHANG Xuelong, GAO Xiangyu, YANG Xiuren, et al. Mechanical performance of tongue and groove joints in assembled metro stations[J]. Special Structures, 2018, 35(5): 73.
- [9] 章玉伟, 杨桃, 励吾千. 基于接触面非线性分析的榫槽拼装接头的数值分析[J]. 公路, 2021, 66(2): 281.
- ZHANG Yuwei, YANG Tao, LI Wujian. Numerical analysis of tenon-groove assembled joint based on nonlinear analysis of contact surface[J]. Highway, 2021, 66(2): 281.
- [10] 叶亮, 丁先立, 项宝, 等. 装配式地下车站 CHC 型钢-混凝土组合接头受弯性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(4): 120.
- YE Liang, DING Xianli, XIANG Bao, et al. Bending performance of CHC steel-concrete combined joint in underground prefabricated metro station [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(4): 120.
- [11] 林放, 彭智勇. 装配式地铁车站不同结构型式对注浆式榫槽接头的力学性能影响[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(3): 420.
- LIN Fang, PENG Zhiyong. Influence of different structure types of prefabricated metro station on mechanical properties of grouted mortise-tenon joint [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(3): 420.
- [12] 秦浩, 赵宪忠. ABAQUS 混凝土损伤因子取值方法研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(6): 27.
- QIN Hao, ZHAO Xianzhong. Study on the ABAQUS damage parameter in the concrete damage plasticity model [J]. Structural Engineers, 2013, 29(6): 27.
- 收稿日期:2023-08-14 修回日期:2023-09-14 出版日期:2024-07-10
Received:2023-08-14 Revised:2023-09-14 Published:2024-07-10
- 第一作者:藏廷伟,正高级工程师,zang_yw@hdec.com
通信作者:王博川,博士研究生,2310180@tongji.edu.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 157 页)

- [4] 丁智, 张霄. 桩基施工对邻近既有地铁隧道影响的数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 390.
- DING Zhi, ZHANG Xiao. Numerical analysis of influence of pile foundation construction on adjacent metro tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(2): 390.
- [5] 陕耀, 肖蔚雄, 马伟叁, 等. 软土地区钢套管钻孔灌注桩施工对临近高速铁路基变形影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(7): 2372.
- SHAN Yao, XIAO Weixiong, MA Weisan, et al. Influence of developed Benoto piling on deformation of adjacent high-speed railway subgrade in soft soil area[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(7): 2372.
- 收稿日期:2023-10-15 修回日期:2023-11-14 出版日期:2024-07-10
Received:2023-10-15 Revised:2023-11-14 Published:2024-07-10
- 通信作者:朱兆斌,高级工程师,zhuzb@hztlsjy.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license