

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202302014



# 深基坑开挖对基坑内外桥台基础的变形影响分析

濮黎明, 肖朝昀, 朱浩杰, 黄山景

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 以福建省厦门市某下穿快速公交系统桥的隧道基坑工程为背景, 基于现场实测数据, 结合开挖过程中基坑变形特性, 分析深基坑开挖对基坑内外桥台基础的变形影响。结果表明: 坑外20#桥墩受浅层与深层土体共同作用影响, 竖向变形呈现先沉降再隆起的趋势, 水平变形以朝向基坑内侧的侧向变形为主, 受坑外回填土不密实影响, 距基坑较远的17#桥墩的侧向变形大于较近的20#桥墩; 坑内逐渐裸露的桥墩和承台的竖向变形规律一致, 坑内18#桥墩最大隆起为4.34 mm, 19#桥墩最大隆起为4.24 mm, 水平变形以顺桥向的变形为主, 垂直基坑方向的水平位移逐渐增大, 平行基坑方向的水平位移则波动变化。

**关键词:** 基坑工程; 下穿桥梁; 现场监测; 桥台变形

**中图分类号:** TU 43

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2023)05-0582-09

## Influence of Deep Foundation Pit Excavation on Deformation of Abutment Foundation Inside and Outside Foundation Pit

PU Liming, XIAO Zhaoyun, ZHU Haojie, HUANG Shanjing

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Taking the tunnel foundation pit engineering of a underpass bus rapid transit system bridge in Xiamen City, Fujian Province as the background, based on field measured data and combined with the deformation characteristics of the foundation pit during the excavation process, the influence of deep foundation pit excavation on the deformation of the abutment foundation inside and outside the foundation pit is analyzed. The results show that the 20# pier outside the pit is affected by the combined action of shallow and deep soil, and the vertical deformation first settles and then uplifts; the horizontal deformation is mainly lateral deformation towards the inner side of the foundation pit; and the lateral deformation of the 17# pier far from the foundation pit is greater than that of the 20# pier near the foundation pit due to the uncompacted backfill outside the pit. The vertical deformation pattern of the gradually exposed pier is consistent with the pattern of bearing platform in the pit, the maximum uplift of 18# pier in the pit is 4.34 mm, and the maximum uplift of 19# pier is 4.24 mm, the horizontal deformation is mainly along the bridge direction, and the horizontal displacement perpendicular to direction of foundation pit gradually increases, while the horizontal displacement parallel to direction of foundation pit fluctuates.

**Keywords:** foundation pit engineering; underpass bridge; field monitoring; abutment deformation

**收稿日期:** 2023-02-29

**通信作者:** 肖朝昀(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事隧道与地下结构、深基坑工程施工环境效应及对策、施工监测与控制技术、岩土数值计算、环境岩土工程等方面的研究。E-mail: zyxiao@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51778249); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划项目(18013086015)

高架桥是城市中一种常见的基础设施,因独特的结构形式而具有跨度大、可承受车辆动荷载、变形控制严格等特点。由于城市建设的需要,不可避免地会遇到在高架桥周边进行基坑施工的情况。例如,某新建快速路基坑右线基坑围护结构距桥桩仅 1.53 m<sup>[1]</sup>;福建省平潭试验区管廊基坑边线距桥桩的最小距离为 3 m<sup>[2]</sup>;福州市某下穿高架桥涵洞基坑距桥桩 14 m<sup>[3]</sup>。开挖卸载会引起周边土体的变形,带动基坑及其周边的桥梁基础随之变形,从而影响桥梁结构的稳定性。因此,深入研究基坑开挖对邻近桥梁基础变形的影响具有重要意义。

目前,对于开挖引起的邻近桥桩基础变形的研究主要针对坑外邻近桥桩,对坑内桥台基础的变形规律的研究较少。关于开挖对坑外桥桩基础变形的影响,一些学者通过理论解析法<sup>[4-9]</sup>先计算开挖引起坑外位移场的变化,再提出坑外桩基变形的解析解,但由于复杂地层及复杂施工条件的限制,该方法仍需进一步完善。近年来,针对开挖对邻近桥梁基础影响的研究主要采用数值模拟方法<sup>[10-14]</sup>,并据此给出主要影响因素、影响范围及控制手段。丁勇春等<sup>[15]</sup>依托上海市某下穿城市高架桥梁的地铁基坑工程,采用 Flac 3D 有限差分软件,模拟开挖对桥梁桩基的影响。在此基础上,采取对帷幕进行 180°喷射注浆、底板加固方式,控制基坑围护结构变形来维护桥桩的稳定,由此取得了较理想的加固效果。梁发云<sup>[16]</sup>基于 Winkler 地基梁和桩土协调条件,揭示土体水平变形对控制桥梁桩基变形的影响规律。张骁等<sup>[17]</sup>依托某地铁高架线路邻近工程,采用 Plaxis 软件结合 HS-Small 本构模型,对基坑开挖阶段桥桩影响区进行划分,并将桩基水平变形作为主要变形控制指标。目前,对工程建设中高架桥下穿基坑时,开挖对坑内桥梁基础变形影响的研究尚不多见,对开挖过程中的变化规律有待进一步研究。基于此,本文以福建省厦门市某下穿快速公交系统(BRT)桥的隧道基坑工程为背景,分析下穿桥梁基坑的变形及其对坑内外桥台基础的影响。

# 1 工程概况

## 1.1 基坑与桥梁概况

厦门市某明挖暗埋隧道工程在 K22+925~K22+985 段基坑下穿 BRT 桥。基坑与桥梁相对位置平面图,如图 1 所示。基坑与桥梁基础相对位置剖面图,如图 2 所示。

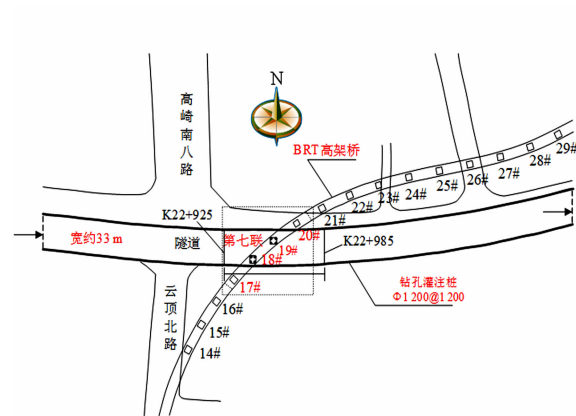


图 1 基坑与桥梁相对位置平面图

Fig. 1 Plan view of relative position between foundation pit and bridge

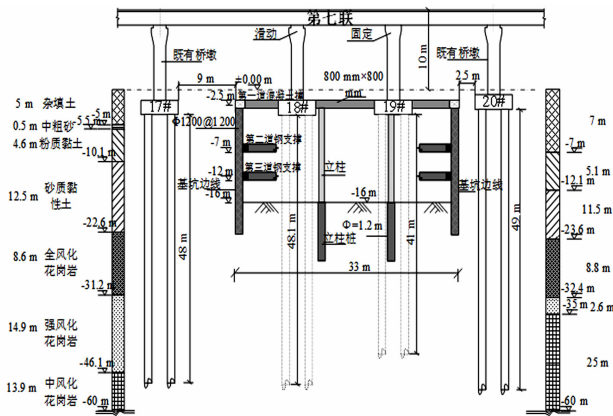


图 2 基坑与桥梁基础相对位置剖面图

Fig. 2 Section view of relative position between foundation pit and bridge foundation

该区段基坑位于高崎南八路与云顶北路交汇处的东侧,基坑正上方为既有 BRT 桥第七联,其下部为 17#~20# 桥台基础(桥墩、承台、桥桩),其中,19# 桥墩顶部与桥面浇筑在一起,其余桥墩顶部为滑动支座。18#, 19# 桥墩位于坑内,BRT 桥桩均为嵌岩桩,嵌入中风化花岗岩层的深度为 2 m。北侧坑外 20# 桥墩和承台距离基坑围护结构最近约 2.5 m,南侧坑外 17# 桥墩和承台距离基坑围护结构约 9 m。该区段基坑开挖深度约 16 m,基坑宽度约 33 m。基坑围护结构采用  $\Phi 1\ 200@1\ 200$  钻孔灌注桩+内支撑的支护方案,设两排立柱桩,布置一道 800 mm $\times$ 800 mm 混凝土撑+两道  $\Phi 609\text{ mm}\times 16\text{ mm}$  钢支撑,混凝土撑横向间距约 8 m,钢支撑横向间距约 4 m。基坑开挖将使坑内桥桩、承台及上部桥墩逐渐裸露,开挖见底后,坑底至上部桥面达 26 m,上部 BRT 桥在开挖过程中需要保持正常通车营运。

1.2 工程地质条件

根据工程地质勘察报告,该区段基坑围护桩桩底以上有 4 层土层,桩底以下有 3 层土层.第 1 层为杂填土,回填时间较短,密实度及均匀性较差;第 2 层为中粗砂,颗粒不均,砂质不纯,工程力学性质一般;第 3 层为粉质黏土,土质较纯,具有中等压缩性,强度一般;第 4 层为砂质黏性土,天然状态下的力学强度较好;第 5 层为全风化花岗岩,呈灰黄或灰白色,除石英以外其他矿物风化为粉末或粘粒,岩体已呈砂土状,手捏即散;第 6 层为强风化花岗岩,呈灰黄或灰白色,原岩结构大部分破坏,岩质软,遇水易软化,岩芯多呈砂土状,手捏易碎;第 7 层为中风化花岗岩,岩芯以柱状为主,少量碎块状,锤击声较清脆,较难击碎.场地土体的物理力学参数,如表 1 所示.表 1 中: $\gamma$  为重度; $c$  为粘聚力; $\varphi$  为内摩擦角; $E_s$  为压缩模量; $\mu$  为泊松比.

表 1 场地土体的物理力学参数  
Tab.1 Physical and mechanical parameters of site soils

土层号	土层名称	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$E_s/\text{MPa}$	$\mu$
1	杂填土	18.0	15.00	15.0	4.81	0.31
2	中粗砂	19.0	2.00	32.0	—	0.25
3	粉质黏土	20.4	20.13	17.8	7.81	0.28
4	砂质黏性土	18.8	25.00	22.0	3.78	0.26
5	全风化花岗岩	18.7	30.00	25.0	—	0.24
6	强风化花岗岩	20.0	50.00	26.0	—	0.24
7	中风化花岗岩	25.3	200.00	50.0	—	0.22

2 施工工况

基坑采用明挖法施工,2021 年 10 月 13 日开挖,2022 年 1 月 13 日底板浇筑完成,整个开挖过程历时 93 d. 基坑从开挖至底板浇筑完成共分为 5 个阶段.

为叙述方便,将 K22+925~K22+945 记为 A 区,K22+945~K22+970 记为 B 区,K22+970~K23+020 记为 C 区. 基坑施工情况,如表 2 所示.

表 2 基坑施工情况  
Tab.2 Foundation pit construction situation

阶段	工况	施工时间
1	放坡开挖至-2.5 m,浇筑第 1 道砼支撑	2021-10-13—2021-10-29
2	依次开挖 A~C 区至-6.7 m,架设第 1 道钢支撑	2021-10-30—2021-11-19
3	先开挖 A,C 区后开挖 B 区至-11.7 m,架设第 2 道钢支撑	2021-11-20—2021-12-15
4	先开挖 C 区后开挖 A,B 区至坑底-16.0 m	2021-12-16—2021-12-25
5	施作垫层并浇筑底板,先施作 C 区后施作 A,B 区	2021-12-26—2022-01-13

3 工程变形监测方案

为了全面掌握开挖过程中基坑变形及其对周边结构物的影响,在基坑施工过程中,对各分区均设置了围护结构及周边环境的监测点.桥梁测点布设在主要影响范围内的桥梁(17#~20#)上.

基坑测点平面布置图,如图 3 所示.  
桥梁测点平面布置图和剖面布置图,分别如图 4,5 所示.为了减少误差,在监测前对所有监测设备进行检定与校准.

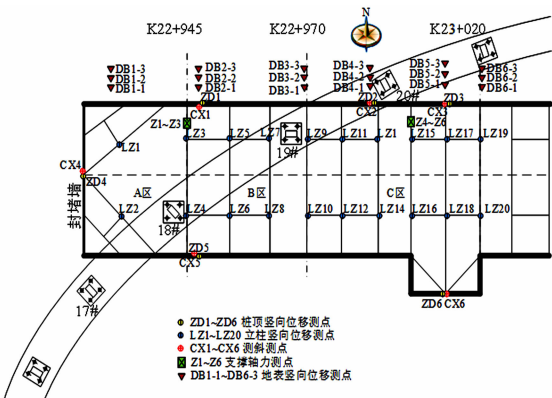


图 3 基坑测点平面布置图  
Fig.3 Layout plan of foundation pit measurement points

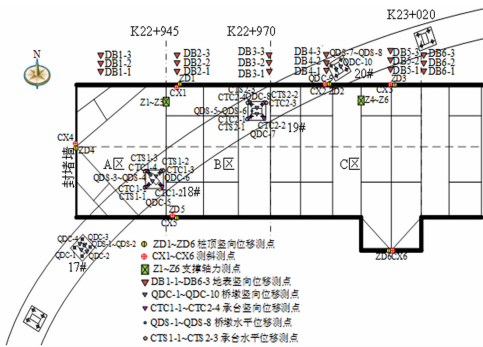


图 4 桥梁测点平面布置图

Fig. 4 Layout plan of bridge measurement points

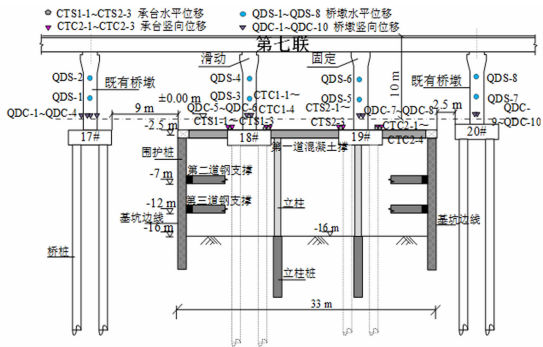


图 5 桥梁测点剖面布置图

Fig. 5 Section layout of bridge measurement points

4 基坑变形监测结果与分析

通过 K22+945 监测段面数据,对基坑开挖各阶段变形展开分析。围护桩侧向位移与坑外地表沉降曲线,如图 6 所示。图 6 中: $\delta_{h,m}$  为围护桩侧向位移(围护桩水平位移); $H_e$  为围护墙深度; $D$  为地表测点与基坑边缘的距离; $\Delta s$  为坑外地表沉降(墙后土体沉降)。由图 6 可知:围护桩侧向位移和坑外地表沉降曲线与文献[18]中厦门地区内支撑式基坑变形特征一致,围护结构侧向变形呈凸肚形,墙后地表形态大致呈三角形或凹槽形,可验证基坑围护结构变形监测结果的合理性;开挖至坑底后,断面围护桩最大侧向位移为 20.15 mm,最大沉降量为 7.55 mm,最大侧向位移未超过 GB 50497—2019《建筑基坑工程监测技术标准》的  $0.2\% H \sim 0.3\% H$  ( $H$  为基坑开挖深度)的控制值 32~48 mm。

围护桩水平位移在各工况下的变化曲线(CX6 施工损坏),如图 7 所示。

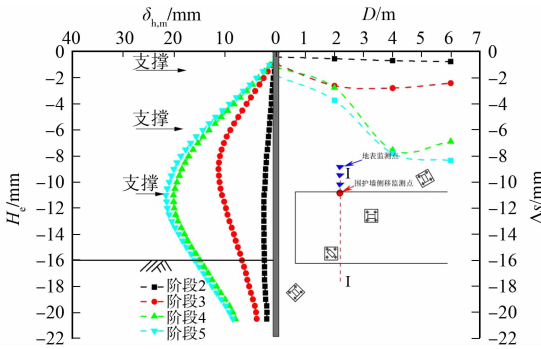


图 6 围护桩侧向位移与坑外地表沉降曲线

Fig. 6 Curves of lateral displacements of retaining piles and surface settlements outside pit

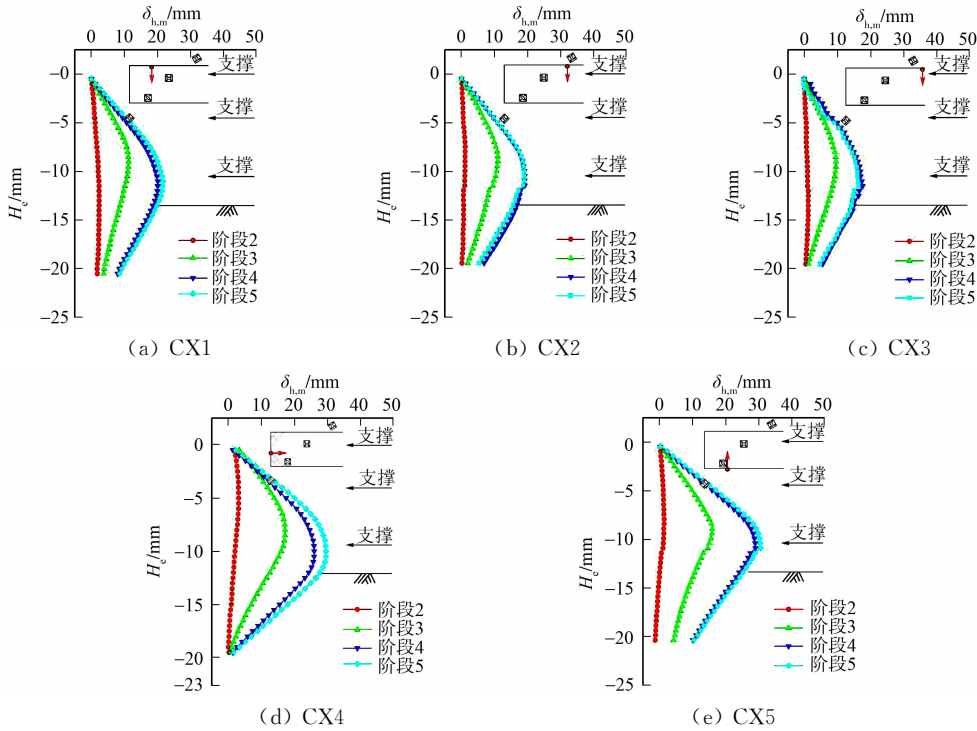


图 7 围护桩水平位移在各工况下的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of horizontal displacements of retaining piles under various working conditions



在阶段 1,2,由于放坡和浅开挖,围护桩侧向变形很小,随着开挖深度的增大,围护桩水平位移显著增大.在阶段 3,围护桩最大水平位移均增大至 10 mm 左右,但 CX4 处最大水平位移为 17.06 mm,明显大于北侧围护桩变形,这是由于该阶段施工过程中封堵墙外侧有临时堆土,进一步挤压墙体和外侧土体,使桩身外侧主动土压力增大.相较于阶段 2,3,阶段 4 的南侧围护桩水平位移增大更加显著,由阶段 3 的 15.76 mm 增大至阶段 4 的 28.91 mm.原因可能有以下 2 点:1) 受施工次序的影响,南侧 CX5 处围护桩在开挖后暴露时间更长,坑外土体产生更多蠕变;2) 南侧土体在基坑施工前刚施作完成雨水箱涵,墙后回填土体不密实,加剧了土体的蠕变.阶段 5 在开挖见底并浇筑底板后,围护桩水平位移得到有效约束,这是由于底板的浇筑增强了围护结构的整体刚度,限制了围护桩水平位移的进一步发展.

5 坑外桥台基础变形结果与分析

5.1 竖向位移分析

通过桥墩竖向位移测点数据分析坑外 20# 桥台的竖向位移,位移变化曲线(17# 测点因施工原因破坏),如图 8 所示.图 8 中: $\delta_{v,m}$  为桥墩竖向位移.由图 8 可知:开挖初期,坑外桥墩竖向位移变化小,最大沉降量约为 0.6 mm,坑外桥墩的竖向变形随着开挖深度的增大逐渐由沉降转为隆起,最大隆起(2.8 mm)发生在开挖至坑底后的测点 QDC-9 处,坑外桥墩的竖向变形是桩底以上部分土体隆起及地表以下一定区域内土体沉降综合作用的结果;开挖阶段 2 由于卸荷量较小,邻近运土通道,桥桩周边土体隆起值小于沉降值,随着开挖深度的增加,阶段 3,4 土体隆起区域逐渐扩大,导致坑外桥墩产生隆起变形.

坑外 20# 桥台差异沉降变化曲线,如图 9 所示.图 9 中:差异沉降变化通过累计变化量  $\delta_{ds}$  进行量度,此处  $\delta_{ds}$  为测点 QDC-9 与 QDC-10 竖向位移的差值( $\delta_{v,m}(QDC-9) - \delta_{v,m}(QDC-10)$ ).由图 9 可知:当开挖深度增大后,更靠近基坑处的测点 QDC-9 隆起值更大,差异沉降最大为 1.58 mm.

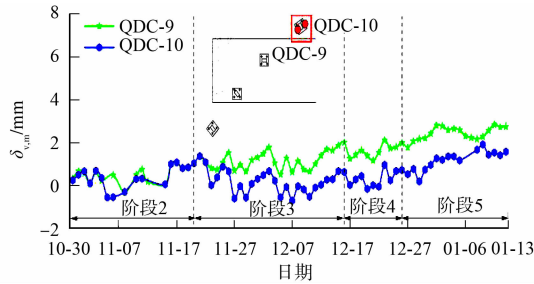


图 8 坑外 20# 桥台竖向位移变化曲线

Fig. 8 Vertical displacement variation curves of 20# abutment outside pit

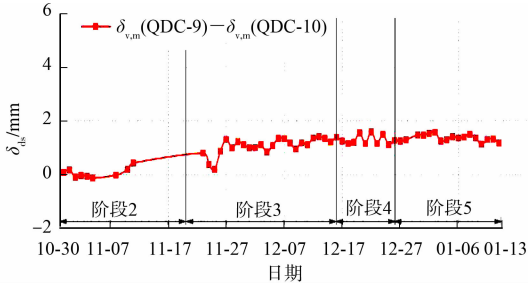


图 9 坑外 20# 桥台差异沉降变化曲线

Fig. 9 Differential settlement variation curves of 20# abutment outside pit

5.2 水平位移分析

通过桥墩水平位移测点数据分析垂直与平行基坑方向坑外桥台的水平位移,水平位移变化曲线分别如图 10,11 所示.图 10,11 中: $\delta_{vp,h}$ ,  $\delta_{pp,h}$  分别为垂直与平行基坑方向的坑外桥墩水平位移.

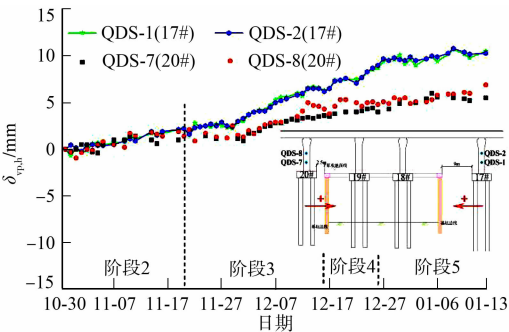


图 10 垂直基坑方向坑外桥台水平位移变化曲线

Fig. 10 Horizontal displacement variation curves of abutment outside pit perpendicular to direction of foundation pit

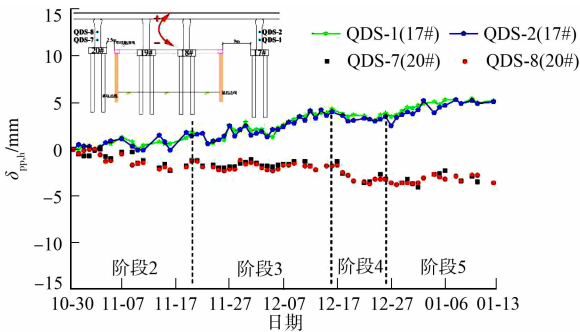


图 11 平行基坑方向坑外桥台水平位移变化曲线

Fig. 11 Horizontal displacement variation curves of abutment outside pit parallel to direction of foundation pit

由图 10,11 可知:在开挖过程中,坑外桥墩水平位移随开挖深度的增大而增大,且坑外桥墩在垂直基坑方向上呈现朝坑内整体平移的趋势,在平行基坑方向上则呈现相向而动的规律;基坑开挖至坑底后,在垂直基坑方向,坑外 17# 桥墩最大水平位移为 10.8 mm,20# 桥墩最大水平位移为 6.9 mm,在平行基坑方向上,17# 桥墩最大水平位移为 5.1 mm,20# 桥墩最大水平位移为 3.6 mm. 显然,坑外桥墩的变形主要发生在垂直基坑方向,即侧向变形上,与文献[11,17]中基坑开挖对坑外桥桩的影响主要集中在侧向位移上的结论一致.

坑外桥墩侧向位移( $\delta_{y,m}$ )与围护桩最大侧向位移( $\delta_{h,m,max}$ )的关系曲线(坑外 17# 桥墩对应的围护桩取测点 CX5),如图 12 所示.

由图 12 可知:坑外桥墩的侧向位移与围护桩最大侧向位移的变化趋势相同,说明垂直基坑方向与基坑开挖卸载的主要方向相同,均由坑外土体朝向坑内位移从而推动围护桩及坑外桥桩产生朝向坑内的位移,进而引起桥墩变化. 此外,应当注意到 17# 桥墩距基坑稍远,但其侧移量却大于距基坑边缘稍近的 20# 桥墩,这是在开挖前 17# 桥墩至基坑边缘间刚施作完成的雨水箱涵回填不密实所致,土体更易在开挖卸载下朝向坑内移动,与前述基坑南侧围护桩测点 CX5 处桩身水平位移值偏大的结果一致.

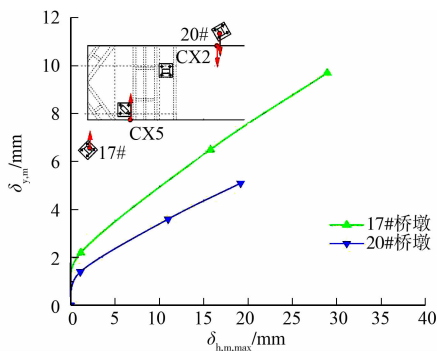


图 12 坑外桥墩侧向位移与围护桩最大侧向位移的关系曲线

Fig. 12 Relationship curves between lateral displacements of piers outside pit and maximum lateral displacements of retaining piles

## 6 坑内桥台基础变形结果与分析

### 6.1 竖向位移分析

通过桥墩和承台竖向位移测点数据分析开挖过程中坑内桥台的竖向位移,竖向位移变化曲线如图 13,14 所示. 由图 13,14 可知:坑内桥墩与承台在竖向位移上的变化规律一致,坑内桥墩与承台随开挖深度的增大而逐渐隆起,这是坑内土体开挖卸载回弹所致;阶段 1,2 开挖深度在 6.7 m 以内时,由于土体卸荷小,坑内桥台竖向位移变化不大,坑内桥台隆起值在 2 mm 左右;进入阶段 3,4 后,受土体开挖卸载作用影响,桥台隆起进一步增大,坑内 18# 桥墩竖向位移增大 1.77 mm,19# 桥墩竖向位移增大 2.42 mm;在阶段 5 垫层底板浇筑完成后,坑内土体的隆起受到抑制,从而有效限制坑内桥台的竖向隆起,坑内桥台竖向位移趋于稳定,18# 桥墩最大隆起为 4.34 mm,19# 桥墩最大隆起为 4.24 mm. 因此,当开挖深度较大时,应尽快施作垫层底板,以减小基坑开挖对坑内桥台竖向变形的影响.

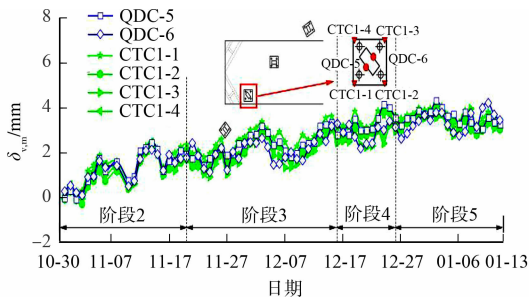


图 13 18# 桥台竖向位移变化曲线

Fig. 13 Vertical displacement variation curves of 18# abutment

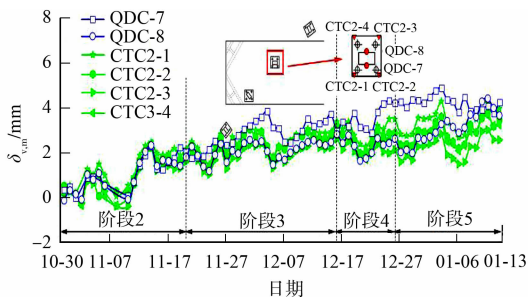


图 14 19# 桥台竖向位移变化曲线

Fig. 14 Vertical displacement variation curves of 19# abutment

坑内桥台差异沉降变化曲线,如图 15 所示. 由图 15 可知:坑内 18# 桥墩差异沉降在 0 附近波动,几乎未发生差异沉降,而 19# 桥墩呈现由基坑南侧朝向北侧的倾斜,最大差异沉降为 2.26 mm. 这是由于 19# 桥台基础更靠近基坑中心,下部桥桩由于基坑开挖产生不均匀隆起,导致上部桥台出现朝向北侧的差异沉降.

从测点中选取 8 个监测点(监测点 1~8)分析坑内 18#,19# 桥台周边竖向位移增量( $\delta_{inc,v}$ ),结果如图 16,17 所示.由图 16,17 可知:18# 桥墩和承台在阶段 3 的竖向位移增量最大(约为 2.2 mm),19# 桥墩和承台在阶段 2 的竖向位移增量最大(约为 1.7 mm),但在开挖深度更大的阶段 4,其竖向位移增量均相对较小,但坑内立柱竖向位移未见类似规律.原因可能有以下 2 点:一是虽然坑内桥台基础受土体开挖卸载回弹的影响向上隆起,但仍受到上部桥梁结构的约束作用,特别是在开挖深度较大时,桥台基础的隆起受到桥面的约束越强;二是坑内桥桩在开挖过程中逐渐裸露,裸露部分桩侧荷载转移至下部桩侧与桩端承担,桥桩端部土体对桩基的约束进一步增强,限制了桥台隆起速率的加快,坑内立柱的隆起则主要受到围护支撑结构自重、基底土的回弹作用及施工荷载等影响.

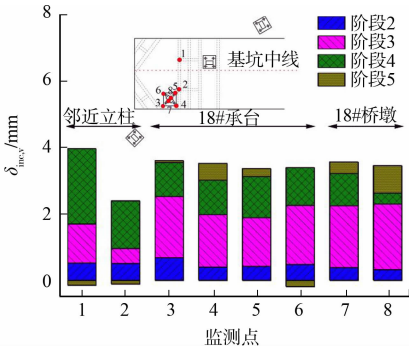


图 16 坑内 18# 桥台周边竖向位移增量

Fig. 16 Vertical displacement increments around 18# abutment in pit

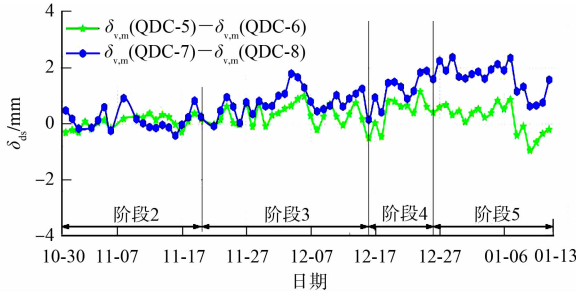


图 15 坑内桥台差异沉降变化曲线

Fig. 15 Differential settlement variation curves of abutments in pit

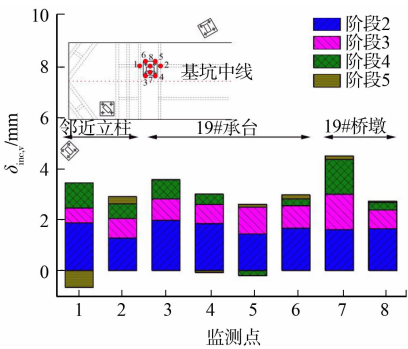


图 17 坑内 19# 桥台周边竖向位移增量

Fig. 17 Vertical displacement increments around 19# abutment in pit

6.2 水平位移分析

通过桥墩和承台水平位移测点数据分析垂直和平行基坑方向坑内桥台的水平位移,水平位移变化曲线如图 18,19 所示.图 18,19 中:正值表示自坑中心朝向 18# 桥台的垂直方向;负值表示自坑中心朝向 19# 桥台的垂直方向.

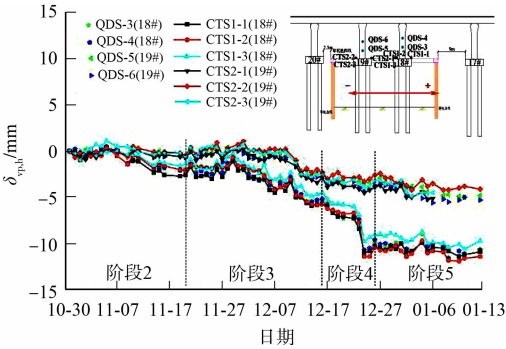


图 18 垂直基坑方向坑内桥台水平位移变化曲线

Fig. 18 Horizontal displacement variation curves of abutment in pit perpendicular to direction of foundation pit

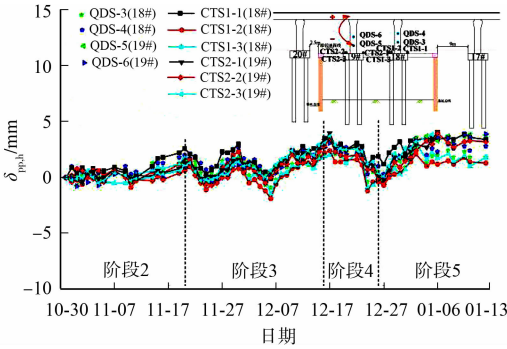


图 19 平行基坑方向坑内桥台水平位移变化曲线

Fig. 19 Horizontal displacement variation curves of abutment in pit parallel to direction of foundation pit

由图 18,19 可知:在整个开挖过程中,坑内桥台在垂直基坑方向上出现稳定增大的水平位移,这与基坑卸载方向一致,在平行基坑方向上水平位移则波动变化.值得注意的是,在阶段 4 开挖至坑底时(12 月 23 日-12 月 25 日),18# 桥墩和承台各测点水平位移同时出现陡然增大,这是现场对桩周土体的非对称开挖所致,18# 下部桥桩北侧土体先于南侧土体挖除,致使桥桩基础受到南侧未挖去土体的挤压作用,进而导致上部承台与桥墩的水平位移的变化速率陡然增大.因此,开挖时应当着重注意坑内桥台垂

直基坑方向的水平位移,坑内桥桩周边土体开挖宜采用对称开挖,以减少对桥桩的水平变形的影响. 开挖至坑底后,在垂直基坑方向,18#桥墩最大水平位移为 10.7 mm,19#桥墩最大水平位移为 3.8 mm;在平行基坑方向,18#桥墩最大水平位移为 2.7 mm,19#桥墩最大水平位移为 2.0 mm. 两坑内桥台水平位移的明显差异是因为坑内两桥台基础与上部桥面的连接方式略有不同,19#桥墩为制动墩,桥面与桥墩共同浇筑,能够承受上部结构传来的水平力,比 18#桥墩具有更强的抵抗水平变形的能力.

通过桥墩和承台水平位移测点数据分析 18#,19#桥台水平变形与开挖深度的关系,结果如图 20,21 所示. 图 20,21 中: $X$  向为平行于基坑的方向; $Y$  向为垂直于基坑的方向. 由图 20,21 可知:在开挖过程中,桥墩下部的平面位移与承台中心的位移基本一致,即坑内桥墩下部与承台在平面上发生整体变形;坑内桥台的水平位移变化速率增大主要集中在开挖深度较大的 12~16 m 的过程中,最大水平位移主要发生在  $Y$  向,相较于 19#桥墩和承台,18#桥墩和承台在该阶段的水平位移变化速率变化偏大. 这是由于该位置处桥桩周边土体开挖不对称,使逐渐裸露的桥桩承担了额外的土体侧向压力.

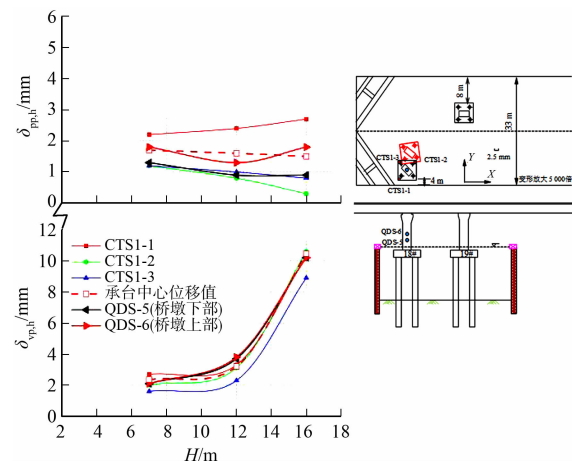


图 20 18#桥台水平变形与开挖深度的关系

Fig. 20 Relationship between horizontal deformations and excavation depths of 18# abutment

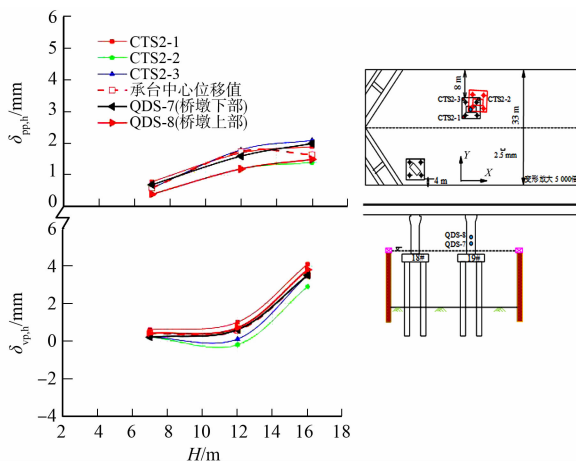


图 21 19#桥台水平变形与开挖深度的关系

Fig. 21 Relationship between horizontal deformations and excavation depths of 19# abutment

开挖至坑底后,下穿 BRT 桥范围内 17#~20#桥墩在两个方向上水平位移的平面图,如图 22 所示. 由图 22 可知:虽然坑内外桥墩在开挖过程中均产生了较大的垂直基坑方向的水平位移,但其整体的平面变形仍以平行桥面方向的顺桥向变形为主,在垂直桥面方向的横桥向变形相对较小,这说明在基坑开挖影响下,下穿区域内桥墩沿桥面方向出现了一定的滑移.

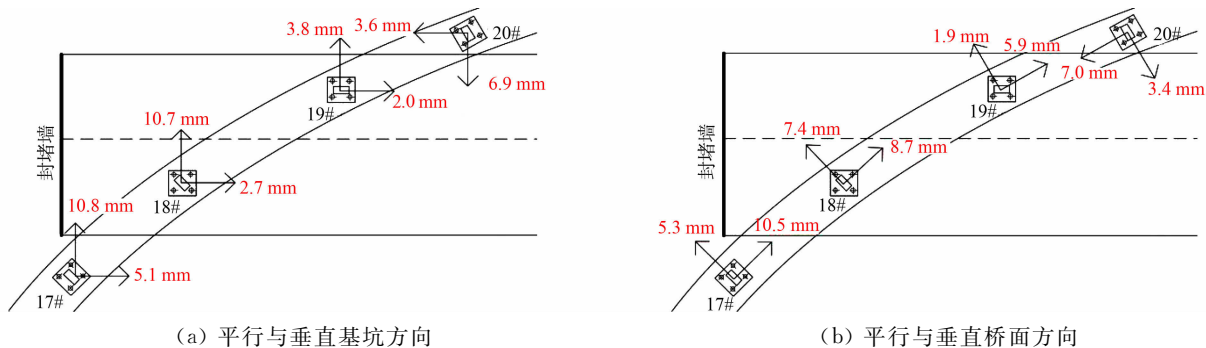


图 22 桥墩水平位移平面示意图

Fig. 22 Plan sketch of horizontal displacements of piers

## 7 结论

1) 深基坑开挖过程中,坑外桥台基础在竖向上呈现先略微沉降后隆起的趋势,这是由桩底以上部分土体隆起及地表以下一定区域内土体沉降共同作用的结果,开挖初期,最大沉降约为 0.6 mm,开挖至坑底后,坑外 20#桥墩最大隆起为 2.8 mm,最大差异沉降为 1.58 mm.



2) 坑外桥墩的水平变形主要发生在垂直基坑方向上,表现为朝向坑内位移. 邻近箱涵开挖回填不密实导致开挖卸载时基坑与坑外桥桩间土体更易朝向坑内移动,距基坑边缘更远的坑外 17# 桥墩的侧向位移比邻近的 20# 桥墩更大. 开挖至坑底后,17#,20# 桥墩最大侧向变形分别为 10.8,6.9 mm.

3) 开挖过程中,逐渐裸露的坑内桥墩与承台在竖向位移上变化规律一致,均受坑内土体卸载回弹影响随开挖深度的增大而逐渐隆起,开挖见底后,尽快浇筑底板、垫层可以有效抑制坑内桥台基础的隆起,最终 18# 桥墩最大隆起为 4.34 mm,19# 桥墩最大隆起为 4.24 mm.

4) 开挖过程中,坑内桥台基础在平面位移上为整体变形,水平变形均以垂直基坑方向变形为主;坑内桥台在垂直基坑方向上出现稳定增大的水平位移,在平行基坑方向上呈现波动变化的规律. 在垂直基坑方向上,18#,19# 桥墩最大水平位移分别为 10.7,3.8 mm. 整体而言,基坑开挖影响使下穿区域内坑内外桥台基础沿桥面方向出现了一定的滑移,平面变形以平行桥面方向的顺桥向变形为主.

参考文献:

[1] 余世为,阮世强,郎志雄. 明挖法地下道路施工对邻近桥梁桩基的影响研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(2):83-86,92. DOI:10.7672/sjgs2022020083.

[2] 徐建宁. 综合管廊深基坑施工对邻近桥梁的影响[J]. 科学技术与工程,2020,20(5):2022-2029. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2020.05.047.

[3] 吴昊,姚顺意,薛勋强,等. 基于渗流应力耦合的基坑降水及开挖对邻近桥桩的影响分析[J]. 公路交通科技,2019,36(10):59-66. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2019.10.008.

[4] ZHANG Rongjun,ZHENG Junjie,PU Hefu,*et al.* Analysis of excavation-induced responses of loaded pile foundations considering unloading effect[J]. Tunneling and Underground Space Technology,2011,26(2):320-335. DOI:10.1016/j.tust.2010.11.003.

[5] 张治国,徐晨,宫剑飞. 考虑桩侧土体三维效应和地基剪切变形的隧道开挖对邻近桩基影响分析[J]. 岩土工程学报,2016,38(5):846-856.

[6] 王明珉,孙广宇,朱立刚,等. 深基坑开挖引起的桩基承载力损失和桩身附加拉力简化计算方法[J]. 建筑结构,2019,49(22):53-58. DOI:10.19701/j.jzjg.2019.22.009.

[7] 杨涛,童立元,李丹. 基坑开挖卸荷引起的公路桥梁桩基变形受力响应[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(5):214-222. DOI:10.19815/j.jace.2019.10007.

[8] 程康,徐日庆,林存刚,等. 既有单桩在邻近基坑开挖下的水平向响应简化分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2020,54(1):91-101. DOI:10.3785/j.issn.1008-973X.2020.01.011.

[9] 杨涛,童立元,潘皇宋. 堆载及基坑开挖作用下被动桩水平受力及变形响应[J]. 东南大学学报(自然科学版),2021,51(3):449-455. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2021.03.013.

[10] 王明年,崔光耀,喻波. 广州地铁西村站近接高架桥桩基影响分区及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(7):1396-1404. DOI:10.3321/j.issn:1000-6915.2009.07.013.

[11] 丁勇春,王建华. 深基坑施工对高架基础的变形影响及控制研究[J]. 土木工程学报,2012,45(7):155-161. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2012.07.025.

[12] 魏丽敏,辛学忠,何群,等. 邻近开挖对桥梁桩基变形与内力影响分析[J]. 铁道工程学报,2017,34(5):38-44.

[13] 贺炜,潘星羽,张军,等. 河心洲地铁车站深基坑开挖监测及环境影响分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(增刊 1):478-483.

[14] 王恒,陈福全,林海. 基坑开挖对邻近桥梁桩基的影响与加固分析[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(5):1257-1265.

[15] 丁勇春,程泽坤,王建华,等. 地铁车站深基坑变形及其对邻近桥梁桩基的影响[J]. 岩土工程学报,2012,34(增刊 1):383-388.

[16] 梁发云,于峰,李镜培,等. 土体水平位移对邻近既有桩基承载性状影响分析[J]. 岩土力学,2010,31(2):449-454.

[17] 张骁,肖军华,农兴中,等. 基于 HS-Small 模型的基坑近接桥桩开挖变形影响区研究[J]. 岩土力学,2018,39(增刊 2):263-273. DOI:10.16285/j.rsm.2018.0746.

[18] 李少波. 厦门地区地铁深基坑变形特征实测统计分析[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(增刊 1):376-384.

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 方德平)