

异型变宽连续梁桩基托换变形监测分析*

杨正华¹ 段军朝² 郭庆军¹ 鄢玉胜³(1. 西安工业大学建筑工程学院, 710021, 西安; 2. 中建三局基础设施建设投资有限公司, 430061, 武汉;
3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安//第一作者, 正高级工程师)

摘要 针对国内首例地铁暗挖隧道下穿异型变宽连续梁桩基主动托换工程, 详细介绍了其主要监测项目、监测频率和主要控制值, 采用远程自动监测和人工监测相结合的数据监测方式, 通过对监测数据的回归分析, 得到了整个托换工程中围护桩倾斜变化曲线和桥墩位移变化曲线, 并进一步分析了托换过程中的顶升力与变形关系。研究结果表明: 施工期间的各项监测结果均在预期范围内, 控制效果良好; 桩基主动托换桥墩位移容许值的确定, 应考虑现有的施工工艺及设备在正常情况下可以达到的水平, 以及千斤顶顶升完毕至后期隧道施工完毕可能产生的结构变形; 千斤顶顶升阶段被顶升桥墩的竖向位移与千斤顶加载力为非线性关系。

关键词 异型变宽连续梁; 桩基托换; 桥墩位移监测

中图分类号 U442.55

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.12.019

Deformation Monitoring Analysis of Pile Foundation Underpinning of Irregular Widening Continuous Beam

YANG Zhenghua, DUAN Junchao, GUO Qingjun, YAN Yusheng

Abstract Targeting the first active pile underpinning engineering in China for metro underground-excavated tunnel under-passing irregular widening continuous beam, the main monitoring items, monitoring frequency and main control values are introduced in detail. By data monitoring mode combining remote automatic monitoring and manual monitoring, and through regression analysis of the monitoring data, the variation curves of retaining piles inclination and bridge piers displacement in the whole underpinning engineering are obtained. The relationship between lift-up force and deformation during underpinning process is further analyzed. Research results show that the monitoring data of construction is within the expected range, and the deformation control effect is good. The allowable values of pier displacement for active pile foundation underpinning should be determined by considering the achievable

performance with existing construction technology and equipment under normal conditions, and the structural deformation that may occur from the completion of hydraulic jack lift-up to the completion of later stage tunnel construction. The relationship between the vertical displacement of the lifted pier and the hydraulic jack loading force during hydraulic jack lift-up process is nonlinear.

Key words irregular widening continuous beam; pile foundation underpinning; pier displacement monitoring

First-author's address School of Civil & Architecture Engineering, Xi'an Technological University, 710021, Xi'an, China

在城市地铁修建过程中, 为避免拆迁既有建筑物, 常使用基础托换技术。桩基础托换是常用基础托换方式之一, 其又分为主动托换和被动托换。主动托换适用于托换荷载大、变形控制要求严格的建筑物, 其变形控制具有主动性^[1], 具有技术难度大、工序复杂、风险高及施工周期长的特点。

为安全有效地实施桩基托换工程, 需要制定监测方案, 明确监测项目、监测频率及相关控制指标等。桩基托换实施过程中, 要对沉降变形和受力等进行全过程实时监测, 并对监测数据进行系统性分析, 以及及时掌握托换过程中基础受力与变形的关系, 对后期变形和顶升力进行有效预测。为此, 我国学者开展了相关工作, 文献[2]根据深圳地铁3号线下穿广深铁路项目的相关监测工作, 给出了主要监测项目和监测值; 文献[3]对成都西环铁路刚构桥桩基托换进行了相关监测及数据分析; 文献[4]利用自动化监测技术开展了连续多跨桩基托换的施工监测; 文献[5]对立交桥桥台桩基托换开展了基坑围护结构的监测。在上述桩基托换监测项目中, 被托换的上部桥梁结构相对简单, 托换吨位

* 陕西省软科学研究计划项目(2022KRM030)

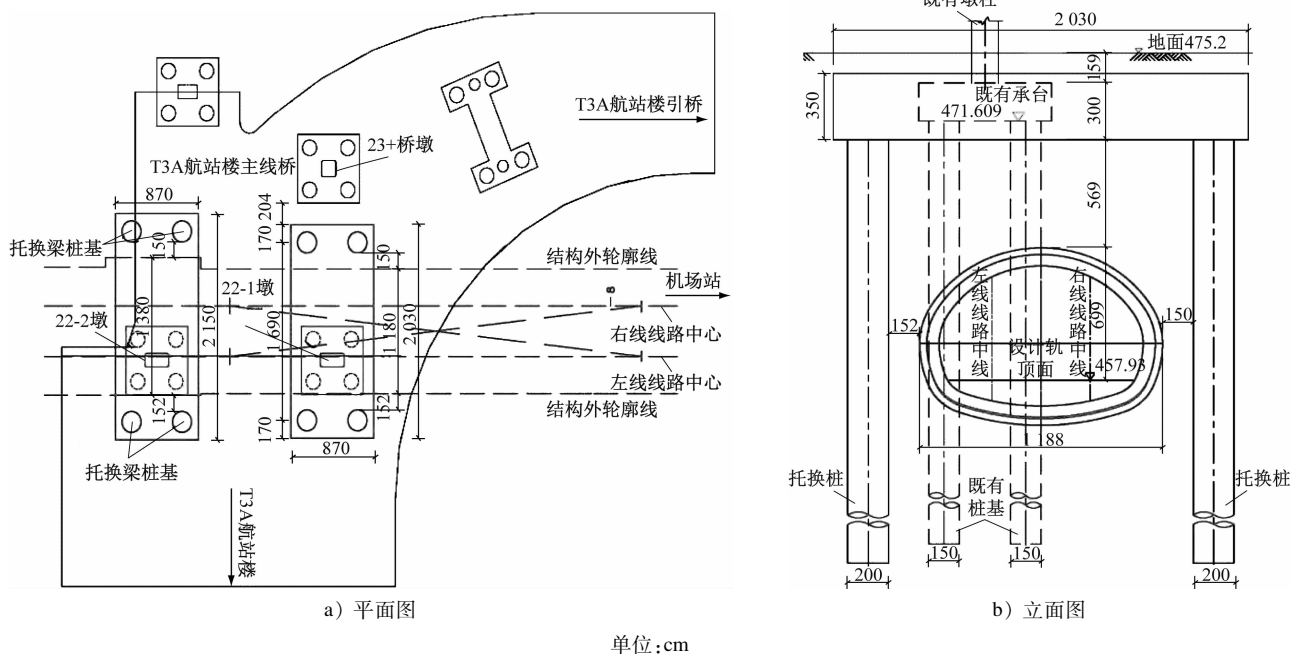
不大。本文以西安北客站至咸阳机场城际铁路(以下简为“机场城际线”)下穿匝道区异型变宽连续梁为工程背景,通过对监测数据的分析,总结托换工程中相关位移及内力的变化规律。

1 工程概况

机场城际线连接西安北客站和咸阳机场两大交通枢纽,采用地铁制式,并在咸阳机场范围内地

下敷设。为满足咸阳机场站的站位要求,咸阳机场站的站后双线暗挖隧道需下穿 T3 航站楼主线桥 22-1 墩和 22-2 墩 2 处桥墩共 8 根桩基。

为保证施工期间 T3 航站楼的交通组织正常,在不中断既有桥梁交通的前提下,经工程技术、经济等综合比选,采用对既有 22-1 墩和 22-2 墩桩基实施主动托换方案。被托换的桥墩最大轴力约为 13 000 kN。桩基托换布置图如图 1 所示^[6]。



单位:cm

图1 桩基托换布置图

Fig. 1 Layout of pile foundation underpinning

被托换的 22-1 墩和 22-2 墩上部结构为匝道区钢筋混凝土变宽连续梁,桥梁宽度由 35.00 m 渐变至 15.25 m。桥梁为 4 跨,跨度分别为 24.045 m、21.023 m、11.837 m 及 22.182 m。

托换方案采用托换梁外包既有承台的形式。托换梁与既有结构通过“植筋+凿毛+界面剂”来连接。托换梁为预应力混凝土结构,22-2 墩托换梁尺寸为 21.5 m(长)×8.7 m(宽)×3.5 m(高)。每处桥墩新施做 4 根 $\phi 2.0$ m 桩基,用于托换既有的 4 根 $\phi 1.5$ m 的桩基。

桩基托换主要施工过程为:托换桩施工→基坑开挖→既有承台植筋凿毛→托换梁施工→千斤顶顶升、既有桩卸载→既有桩切割→封桩(托换桩和托换梁固结)→暗挖隧道施工。在千斤顶顶升过程中,为安全起见,在托换梁和托换桩之间设置钢垫块;每次顶升完毕,用楔形垫块将托换梁与托换桩

填塞密实。为保证结构安全,2 处桥墩托换交替施工,先施工 22-1 墩桩基托换工程,待其完成后再施工 22-2 墩桩基托换工程^[7]。

2 主要监测项目和监测频率

在桩基托换过程中,除了对托换结构体系本身进行监测外,还需对既有桥梁结构和邻近建筑物进行监测和监控,跟踪掌握不同托换施工阶段对既有桥梁结构所产生的影响,实现信息化施工,控制变形速率,确保既有桥梁运营安全。

在工程实施前制定了详细监测方案并进行评审。监测方案包括监测项目、测点布设、监测频率、仪器设备、控制指标等内容。监测工作需选用专业的监测队伍。

监测项目包含应力、应变、位移和沉降等。监测以自动化监测为主,人工监测为辅,两者相互配

合、相互验证。监测周期从托换桩开始施工到隧道施工完毕。各阶段的主要监测项目^[8]和监测频率见表 1。

表 1 主要监测项目及监测频率

工况	监测项目	监测频率
托换桩施工及基坑开挖	①被托换墩及相邻墩的墩顶位移;②围护桩倾斜、应力	人工监测部分 1 次/d, 自动监测系统实时监测
托换梁施工	墩顶位移、托换梁变形及应力	人工监测部分 1 次/d, 自动监测系统实时监测
千斤顶顶升, 既有桩切割	①托换桩受力、沉降量; ②托换梁变形及应力; ③桥墩墩顶位移	实时监控
托换桩-梁固结施工(封桩)	①托换梁变形及应力; ②桥墩墩顶位移	人工监测部分 1 次/d, 自动监测系统实时监测
隧道开挖施工	①托换桩受力、沉降量; ②托换梁变形及应力; ③桥墩墩顶位移	人工监测部分 1 次/d; 自动监测系统实时监测

3 主要监测设备及监测控制值

自动化监测系统包括测量机器人、棱镜、通信箱及供电电缆、信号转换器、计算机及专用软件等。测量机器人型号为拓普康 MS05AX, 可实现自动跟踪、自动照准、智能识别和遥测控制等。自动监测系统后台配有专用云端, 其通过配套分析软件可对收集到的数据进行储存、处理和分析, 实现了实时且高精度的测量。

人工测量部分: 采用水准仪监测位移, 采用测斜仪监测倾斜情况。根据对整个托换结构体系的分析, 结合目前的施工精度和监测水平, 确定主要位移监测指标及控制值如表 2 所示。

表 2 主要位移监测指标及控制值

监测指标	警戒值	控制值
被托换桥墩墩顶竖向位移/mm	±3	±5
相邻 2 个桥墩墩顶竖向位移差值/mm	3	5
相邻 2 个桥墩墩顶横向相对位移/mm	5	20
相邻 2 个桥墩墩顶纵向相对位移/mm	5	20
顶升加载期间托换桩沉降速率/(mm/h)	0.1	0.1

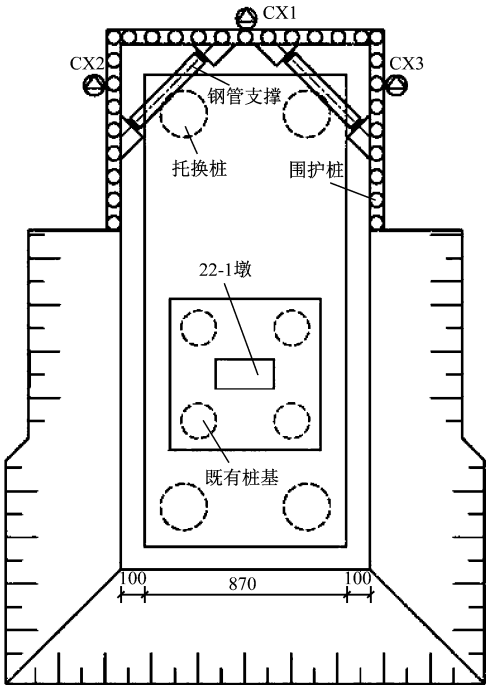
4 主要监测结果分析

4.1 围护桩的倾斜分析

22-1 墩托换梁与既有 23⁺墩的承台外缘净距离

仅为 2 m 左右, 为减少托换梁基坑开挖对 23⁺墩的影响, 邻近 23⁺墩的基坑部分施工采用垂直开挖、排桩围护。围护桩采用 $\phi 600\text{ mm}@1\,000\text{ mm}$ 的钻孔灌注桩, 桩顶设置钢筋混凝土冠梁。

围护桩长度为 10 m, 其中埋入基坑底部的长度为 4 m。在 22-1 墩基坑三面围护桩中, 各选择 1 个围护桩进行测斜。3 个测斜管布置如图 2 所示。在每个测斜管中, 每隔 0.5 m 设 1 个测点。采用移动测斜仪配合手持式测斜读数仪进行测斜观测。



尺寸单位: cm
注: CX1、CX2、CX3 为测斜管编号。

图 2 围护桩测斜管布置图

Fig. 2 Layout of retaining pile inclinometer tube

由测斜管各测点的位移变化数据, 可得各施工阶段围护桩的倾斜变化情况。CX1 测斜管不同测点深度处的位移变化情况如图 3 所示。

由图 3 可知: 随着施工的进行, CX1 测斜管所测围护桩产生了偏向基坑方向的位移; 顶升前的围护桩倾斜速率大, 顶升后的围护桩倾斜速率变小。此外, 围护桩倾斜情况随着测点深度的变化而变化, 随着围护桩测点深度的增加, 测点位移值变小, 围护桩倾斜变化速率变小。经分析, 其主要原因是随着围护桩深度的增大, 土体对围护桩的嵌固效应增强。

4.2 桥墩位移

桥墩位移是桩基主动托换时千斤顶顶升力最

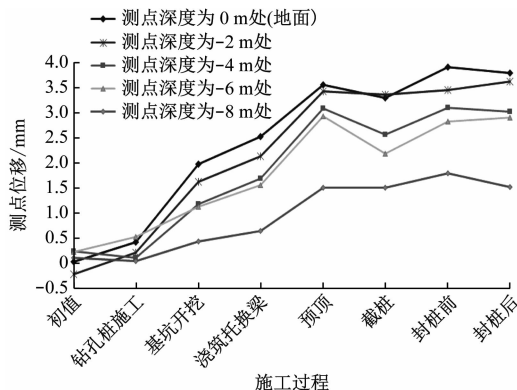


图3 CX1 测斜管不同测点深度处的位移变化图

Fig.3 Displacement variation diagram of each measuring point depth of CX1 inclinometer tube

直接的反映。为保证既有结构的安全,需保证桥墩的位移一直在容许范围内。在施工过程中,被托换桥墩和相邻桥墩的位移监测数据均较多,本文选择有代表性的 22-1 墩,对墩身位移进行分析。

4.2.1 桥墩竖向位移

利用测量机器人自动监测各关键施工工序中 22-1 墩的竖向位移。施工前,先读取桥墩竖向高程初始读数。根据桥墩竖向位移自动测试结果,绘制初始阶段至封桩阶段的墩身竖向位移变化曲线如图 4 所示。

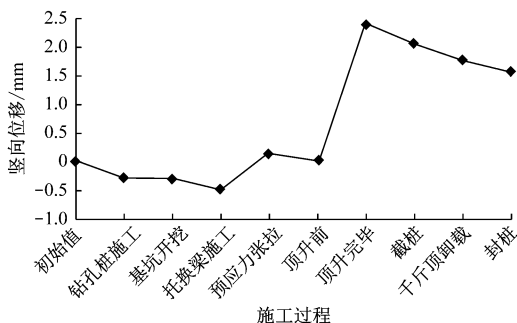


图4 22-1 墩竖向位移变化曲线

Fig.4 Change curve of 22-1 pier vertical displacement

结合图 4 进一步分析可知,随着托换钻孔桩施工和基坑开挖,22-1 墩既有桩基的桩侧摩阻力下降,桥墩产生竖向沉降,最大沉降值为 0.5 mm;托换梁预应力张拉使得托换梁产生反拱效应,导致桥墩略微抬升,抬升位移为 0.2 mm;在加载顶升过程中,桥墩被抬高 2.4 mm;顶升完毕至截除既有桩的过程中,随着土体应力重分布,桥墩下沉;截除 22-1 墩既有 4 根桩后,22-1 墩相对于初始状态抬升了 2.1 mm;自既有桩被切割至封桩阶段,22-1 墩下沉,且累计沉降值为 0.5 mm。经分析:既有桩被切割后,

托换桩所受轴向力变化,进而导致托换桩沉降;千斤顶回油泄压后,托换梁和托换桩间的刚性垫块受压产生变形。

监测结果表明:在保证既有结构安全的前提下,通过千斤顶顶升桥墩,可补偿后期截桩后受力体系转换产生的竖向变形和垫块压缩变形,进而使既有墩在桩梁固结后高于初始状态,以弥补桩梁固结后发生的长期沉降和下部隧道暗挖施工导致的已托换结构沉降。

相对于初始状态而言,托换施工过程中被托换桥墩的最大抬升位移为 2.4 mm,最大沉降位移为 0.5 mm,均远小于警戒值(3.0 mm)及控制值(5.0 mm)。

4.2.2 桥墩纵向和横向位移

选择 22-1 墩有代表性的监测点,进行监测数据统计分析。22-1 墩墩身纵向位移及横向位移在各施工阶段的变化分别如图 5、图 6 所示。

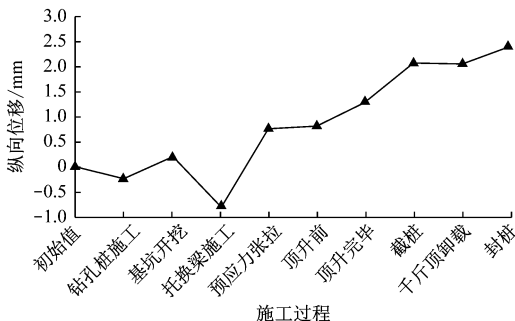


图5 22-1 桥墩纵向位移变化曲线

Fig.5 Change curve of 22-1 pier longitudinal displacement

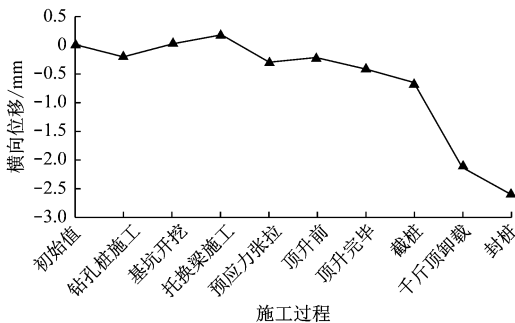


图6 22-1 桥墩横向位移变化曲线

Fig.6 Change curve of 22-1 pier lateral displacement

图 5 显示:在基坑开挖前,桥墩纵向位移变化很小,基本无位移;在托换梁混凝土浇筑完毕至封桩阶段,桥墩纵向位移逐渐增大,其中顶升完毕至截桩阶段的桥墩纵向位移变化速率较大。

经分析,22-1 墩产生纵向位移的主要原因为:

托换梁两端千斤顶顶升过程不同步或两端千斤顶顶升力比例与实际结构存在偏差;被托换的桥墩不在托换梁的跨中,而预应力钢束及张拉力均按托换梁跨中对称,故钢束张拉时被托换桥墩会产生纵向位移。

图 6 显示:顶升前的桥墩横向位移很小,相应横向位移值在 ± 0.5 mm 以内;横向位移主要发生在截桩后;既有桩截桩至千斤顶卸载阶段,桥墩横向位移迅速增加了 1.5 mm;至封桩结束,桥墩横向位移增至 2.6 mm。

在整个托换施工过程中,22-1 墩监测点的最大纵向位移为 2.4 mm,最大横向位移为 2.6 mm。可见,纵、横向位移值均较小,且在警戒值 3.0 mm 范围内,满足相关要求。这说明施工中各项位移控制措施安全有效,整体可控。

4.2.3 墩身竖向位移差

在托换施工中,相邻桥墩的竖向位移差均满足监测方案变形值的要求。选择具有代表性的 22-1 墩和 22-2 墩来分析竖向位移差,其变化情况如图 7 所示。

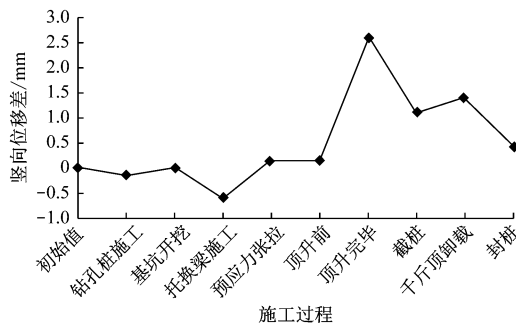


图 7 22-1 墩和 22-2 墩的竖向位移差变化曲线

Fig. 7 Change curve of vertical displacement difference between 22-1 pier and 22-2 pier

分析图 7 可知:

1) 在 22-1 墩顶升施工前,22-1 墩和 22-2 墩相邻位移差很小。两桥墩不均匀竖向位移差在 ± 0.5 mm 以内。考虑到测量误差,可近似认为两桥墩间基本无不均匀沉降。

2) 在 22-1 墩托换施工的全过程中,该墩与 22-2 墩的最大竖向位移差为 2.6 mm,发生在 22-1 墩顶升完毕时。究其原因,22-1 墩桩基托换与 22-2 墩桩基托换先后进行,当 22-1 墩进行托换顶升时,22-2 墩桩基托换施工尚未开始。

3) 在托换各施工阶段,22-1 墩和 22-2 墩竖向

位移差均远小于控制值 3 mm,满足设计要求。

4.2.4 千斤顶顶升阶段墩身位移

在托换顶升过程中,千斤顶采用分级加载,整个顶升加载共分 8 级,最大加载 $F_0 = 1.08F_d$ (F_d 为千斤顶的顶升荷载设计最大值),各级加载依次为 $1.2F_d$ 的 20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%。

在顶升前,读取桥墩高程测试点的初值;在每级加载顶升后,分别测得测点的高程,并计算桥墩竖向位移。最终得到 22-1 墩分级加载与桥墩竖向位移的关系如图 8 所示。

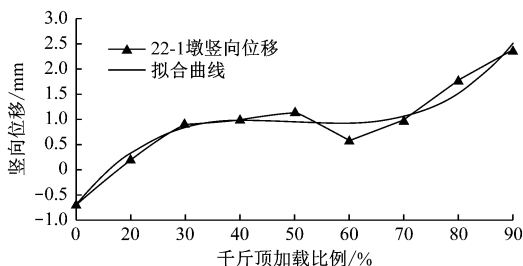


图 8 千斤顶加载过程中 22-1 墩的竖向位移变化

Fig. 8 Change of 22-1 pier top vertical displacement in hydraulic jack loading process

由图 8 可见,在顶升阶段,被托换桥墩的竖向位移与顶升力大小并非线性关系。在千斤顶加载初期,被托换桥墩随顶升力增大而上抬,上抬位移增速较快;待千斤顶加载比例至 30% 时,桥墩上抬位移变化减缓,趋于稳定;当千斤顶加载比例大于 70% 时,被托换桥墩竖向位移才重新随着顶升力增大而增大;当千斤顶加载比例为 90% 时,22-1 墩上抬位移为 2.4 mm。

图 8 中,千斤顶加载比例从 50% 增至 60% 时,桥墩竖向位移变小,产生相对沉降。经分析,主要原因为该加载段间隔时间为 1 d,托换桩的沉降得以充分发展,而其他各相邻级加载段时间间隔较短,均为 2 h。

5 结论

1) 桩基托换工序复杂,施工风险高,制定行之有效且完善的监测方案至关重要。监测方案应结合具体项目制定,应充分利用现代监测手段开展信息化施工监测。

2) 在确定桩基主动托换桥墩位移容许值时,应结合现有的施工工艺及设备在正常情况下可以达到的水平,并充分考虑千斤顶顶升完毕至后期隧道

施工完毕可能产生的结构变形。

3) 在主动托换千斤顶顶升阶段,被顶升的桥墩竖向位移与千斤顶加载力为非线性关系。在加载初期及后期,竖向位移随加载力增长较快;在加载中期,受结构内力重分布影响,竖向位移随荷载的变化速率减缓。

参考文献

- [1] 周志伟. 深圳地铁大轴力桩基托换技术[J]. 隧道建设, 2003(4): 39.
ZHOU Zhiwei. Underpinning technology of pile foundation with large axial force in Shenzhen metro[J]. Tunnel Construction, 2003(4): 39.
 - [2] 胡强, 柯学贤, 张勇. 广深铁路桥梁桩基托换施工监测技术研究[J]. 铁道建筑, 2009(3): 98.
HU Qiang, KE Xuexian, ZHANG Yong. Research on monitoring technology of bridge pile foundation underpinning construction in Guangzhou-Shenzhen railway[J]. Railway Engineering, 2009(3): 98.
 - [3] 姚全德, 荣亚兵. 桩基托换监测技术在成都西环铁路桥中的应用[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2014(4): 20.
YAO Quande, RONG Yabing. The application of pile foundation underpinning monitoring technology in west railway bridge in Chengdu[J]. Journal of Changchun Institute of Technology(Natural Science Edition), 2014(4): 20.
 - [4] 尹志清, 杨海. 自动化监测技术在连续多跨桩基托换中的应用[J]. 公路, 2019(2): 110.
YIN Zhiqing, YANG Hai. Application of automatic monitoring technology in underpinning of continuous multi-span pile foundation[J]. Highway, 2019(2): 110.
 - [5] 刘军, 徐志军, 原方, 等. 立交桥桥台桩基托换基坑支护设计与监测[J]. 岩土工程学报, 2019(增刊2): 217.
LIU Jun, XU Zhijun, YUAN Fang, et al. Design and monitoring of foundation pit support project for pile foundation underpinning of abutment of interchange bridges[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019(S2): 217.
 - [6] 杨正华. 地铁隧道下穿异型连续梁桩基托换设计[J]. 铁道标准设计, 2018(6): 104.
YANG Zhenghua. Design of pile foundation underpinning for metro tunnels under-passing irregular continuous beam[J]. Railway Standard Design, 2018(6): 104.
 - [7] 王国玉. T3航站楼主线桥桩基托换施工技术[J]. 低碳世界, 2018(7): 324.
WANG Guoyu. Pile foundation underpinning construction technology of T3 main line bridge[J]. Low Carbon World, 2018(7): 324.
 - [8] 陈慧建, 张林杰, 王婷, 等. 自动化监测在大型桥梁桩基托换变形监测中的应用[J]. 工程勘察, 2017(增刊2): 464.
CHEN Huijian, ZHANG Linjie, WANG Ting, et al. The application of automatic monitoring in deformation monitoring of large bridges' pile foundation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017(S2): 464.
- (收稿日期: 2020-12-15)
-
- (上接第 105 页)
- HONG Rongbao, CAI Haibing, LU Chanrui. Research progress and prospect on ground thawing settlement in subway tunnel construction by the artificial ground freezing method[J]. Mine Construction Technology, 2020(3): 13.
 - [10] 赵红光, 张映根. 冻结加固技术在长地铁联络通道施工中的应用[J]. 隧道建设, 2010(3): 292.
ZHAO Hongguang, ZHANG Yinggen. Application of freezing consolidation technology in construction of long connecting tunnels of metro works[J]. Tunnel Construction, 2010(3): 292.
 - [11] MARWAN A, ZHOU M M, ZAKI ABDELREHIM M, et al. Optimization of artificial ground freezing in tunneling in the presence of seepage flow[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 75: 112.
 - [12] 王鹏, 林斌, 侯海杰, 等. 冻结管布置形式对冻结壁温度场发展规律影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2019(12): 38.
WANG Peng, LIN Bin, HOU Haijie, et al. Study on influence of freezing tubes layout on development law of temperature field of freezing wall[J]. Coal Science and Technology, 2019(12): 38.
 - [13] 崔源. 超长地铁联络通道水平冻结温度场变化规律分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019(8): 54.
CUI Hao. Temperature field variation law of the horizontal freezing in ultra-long subway connecting aisle[J]. Urban Mass Transit, 2019(8): 54.
 - [14] YANG Y, LEI D, CAI H, et al. Analysis of moisture and temperature fields coupling process in freezing shaft[J]. Thermal Science, 2019, 23(3 Part A): 1329.
 - [15] 伍世龙, 郑军, 郭书刚. 北林区间 2 号联络通道双排冻结孔温度场形成研究[J]. 建井技术, 2021(3): 7.
WU Shilong, ZHENG Jun, GUO Shugang. Study on temperature field formation of double-row freezing holes in No. 2 cross-passage between Bei-Lin Stations[J]. Mine Construction Technology, 2021(3): 7.
 - [16] 陈冠任, 陈军浩, 李栋伟, 等. 地铁长联络通道双侧冻结温度场及地表冻胀变形研究[J]. 煤炭科学技术, 2021(4): 193.
CHEN Guanren, CHEN Junhao, LI Dongwei, et al. Study on bi-lateral freezing temperature field and surface frost heaving deformation of long connected aisle of underground railway[J]. Coal Science and Technology, 2021(4): 193.
- (收稿日期: 2021-11-07)