

兰州轨道交通1号线被动式桩基托换技术的应用^{*}

马文杰^{1,2} 王旭³ 王炳龙^{1,2} 王博林³ 王学磊⁴

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海;

3. 兰州交通大学土木工程学院, 730070, 兰州; 4. 兰州市轨道交通有限公司, 730070, 兰州//第一作者, 博士研究生)

摘要 以兰州轨道交通1号线穿越既有桥梁鱼儿沟桥工程为研究背景, 首先采用 MIDAS-Civil 软件对其进行数值模拟, 分析托换前后既有桩与托换桩的轴力变化规律及桩基竖向位移的变化; 并进行室内模型试验, 探讨桩基的承载性能。结果表明: 桩基竖向位移最大值发生在托换后且同时截断两根桩的托换承台上方; 托换桩荷载分担比随着距离既有桩的位置由近至远依次为 29.3%、19.8%, 既有桩所在位置处荷载分担比为 40.6%; 拉应力最大值出现在截断一根桩的位置处, 为 1.69 MPa; 数值模拟承台荷载分担比约为 14.3%。室内模型试验中, 荷载分担比范围为 14.1%~14.85%。

关键词 城市轨道交通; 桩基托换; 数值模拟; 室内模型试验; 承载性能

中图分类号 TU473.1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.07.010

Application of Passive Pile Foundation Underpinning Technology on Lanzhou Rail Transit Line 1

MA Wenjie, WANG Xu, WANG Binglong, WANG Bolin, WANG Xuelei

Abstract Taking the project of Lanzhou rail transit Line 1 crossing the Yu'ergou Bridge as the research background, MIDAS-Civil software is used for numerical simulation of the project, the axial force variation law and the vertical displacement of existing pile and underpinning pile before and after underpinning are analyzed. Through the indoor model test, the bearing capacity of pile foundation is discussed. The results show that the maximum vertical displacement of pile foundation occurs at the pedestal top of two piles which are truncated at the same time, the load sharing ratio of underpinning piles with the distance of the existing piles from near to far is 29.3% and 19.8%, and the load sharing ratio of the existing piles is 40.6%. The maximum tensile stress value is 1.69 MPa, appearing at the position where a pile is truncated, and the load sharing ratio of numerical simulation is 14.3%.

merical simulation cap is 10.3%, the variation range of load sharing ratio is 14.1%~14.85% in the indoor model test.

Key words urban rail transit; pile foundation underpinning; numerical simulation; indoor model test; bearing capacity

First-author's address The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China

在城市轨道交通建设中, 桩基托换结构体系凭借自身优点, 在一线城市的轨道交通建设中已经被广泛应用, 例如北京、上海、深圳、南京等城市^[1-5]。但是在兰州、西安、西宁等饱和黄土地区, 由于黄土自身的湿陷性和高压缩性等显著特点, 使得饱和黄土地区桩基托换方面的理论与试验研究较少。文献[6]以修建的西安地铁为依据, 介绍了在施工工程中用到的桩基托换技术及对关键技术的阐述, 并且对桩基托换后结构的地震响应等后续问题也作了进一步的分析。文献[7]根据西安市某住宅楼利用预压托换桩的纠偏实例, 对预压托换桩在饱和黄土地区的应用提供了技术参考依据。文献[8]探讨了工业与民用建筑在湿陷性黄土地区中桩基托换技术的应用。文献[9-10]利用有限元软件 Midas/GTS 模拟分析了兰州市地铁隧道穿越饱和黄土区桥梁桩基托换的技术。

本文以兰州轨道交通1号线下穿鱼儿沟桥梁桩基托换工程为研究背景, 首先利用 MIDAS-Civil 软件对桩基托换前与托换后建立有限元模型进行数值模拟, 探讨桩基托换后承载力和地表位移变化是否满足桥梁相关规范要求。其次进行了室内模型试验研究, 探讨了桩基承载性能。本文采用的托换方案及其结论可为后续饱和黄土地区中被动式桥梁桩基的工程施工提供有益参考。

^{*} 国家自然科学基金项目(51778485;51608384)

1 工程概况

兰州轨道交通 1 号线鱼儿沟桥地处城关区东岗东路,于 2007 年完成改造工程。其与区间隧道的位置关系如图 1 所示。该桥梁类型为预应力混凝土空心板梁桥,跨度为 20 m;上部结构由预应力混凝土空心板梁构成,梁高 0.90 m;每片中梁及边梁宽度分别为 1.25 m 和 1.50 m,全桥由 22 片中梁和 2 片边梁组成;下部结构由桩接盖梁式桥台组成,桩的直径为 1.2 m,桩长为 17 m;每个桥台下方设 8 根基桩。

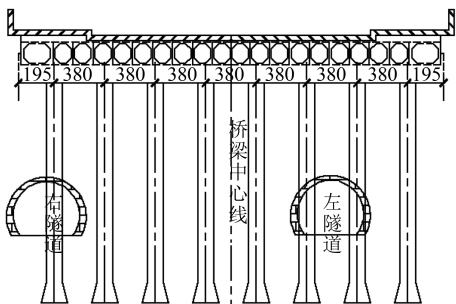


图 1 兰州轨道交通 1 号线穿越鱼儿沟桥位置示意图

兰州轨道交通 1 号线在穿越鱼儿沟桥时采用了被动式桩基托换技术,托换桩均位于既有桩的一侧。托换后 1 号桥台桩基平面布置如图 2 所示。在托换过程中,为了防止施工影响道路交通的正常运营以及尽可能地减少桩基础由于扰动产生的不均匀沉降,因而托换桩全部布置在该桥下洪道内。桩基托换采用整体托换,托换桩为桩径 1.2 m 的钻孔灌注桩,其长度与原桩一致为 12 m。对托换桩的桩基础实施预压,每个承台下布置 13 根桩。为了将既有桩与托换桩连接为整体,在既有桩和托换桩的顶部浇筑钢筋混凝土刚性承台,使其共同发挥作用。承台浇注完后,切除既有的 3 根原桩。

2 有限元数值模拟分析

2.1 整体模型建立

由于桩基布设大致对称,利用 MIDAS-Civil 软件仅对 1 号桥台桩基进行有限元模型的建立以及分析计算。桩基托换前,采用梁单元模拟盖梁、墩柱和桩,采用板单元模拟托换承台,采用原桥梁桩基梁单元模拟托换承台上部结构和下部的托换桩。

2.2 施加荷载和边界条件

1) 荷载。据 JGJ 106—2014《建筑基桩检测技术规范》,桩基模型托换前需要考虑施加的荷载为

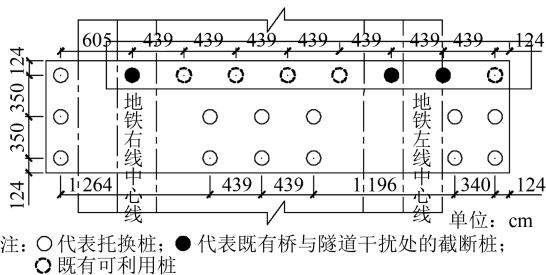


图 2 托换后 1 号桥台桩基平面布置图

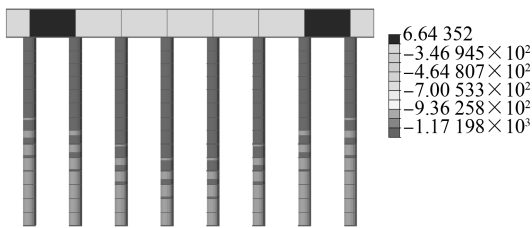
桥跨结构恒载自重、既有桩和盖梁自重,以及人群荷载和汽车荷载。桩基托换后,需要额外考虑的还有托换桩和托换承台自重以及托换承台上部土体自重。

2) 边界条件。建模过程中,土体所受到的作用力均由弹簧模拟,桩的竖直方向进行转角约束,水平方向采用土弹簧约束。本模型采用的地基土弹性系数参考日本铁道设计规范中的相应系数^[11]。

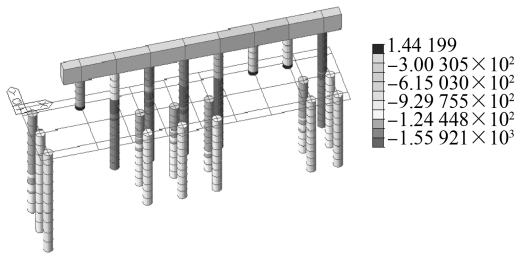
2.3 数值模拟分析结果

2.3.1 桩身轴力分析

桩基托换前后实体轴力如图 3 所示。



a) 托换前既有桩基实体轴力图



b) 托换后桩基实体轴力图

图 3 桩基托换前后实体轴力图

由图 3 可知,托换前既有桩的桩身轴力值的范围为 900~1 300 kN,既有桩对称分布;中间桩的轴力最大,其桩顶轴力达到最大值 1 290 kN,沿着两边桩逐渐减小;最外侧的桩由于边界条件土弹簧的施加,桩身受到桩侧摩阻力的影响,桩身轴力沿着桩身从上往下依次递减,桩底轴力约为 940 kN。

桩基托换后,由于托换桩位于既有桩的一侧,

因此施加的荷载产生偏心作用,使得托换后既有桩的桩身轴力大于托换桩,且随着距既有桩的距离远近,分担的荷载也不尽相同。既有桩所在的一排,桩身轴力值范围为 1 400~1 720 kN;离既有桩最远的一排托换桩,桩身轴力值范围为 700~900 kN;中间一排托换桩的桩身轴力值范围为 900~1 400 kN。既有桩所在位置处的一排桩的荷载分担比为 40.6%,随着距既有桩的距离远近,托换桩的荷载分担比第二排为 29.3%,第三排为 19.8%。由于承台的存在,使得桩顶轴力最大值位于承台下部,其值约为 1 720 kN,这与既有桩相类似,桩顶轴力最大。由此可见,在饱和黄土地区中进行桩基托换的施工时,桩身侧摩阻力更低,承载力急剧减小,同时,塑性变形影响范围更大,增大了施工风险和技术难度。

由于新增托换承台与其上方土体的质量,使得桩基整体受力增强,且由于截断了 3 根既有桩,使托换桩的桩基轴力大于既有桩。既有桩的单桩设计承载力容许值为 4 200 kN,托换后桩基的单桩轴力符合设计容许值,托换后各桩的桩顶轴力之和小于施加的总荷载及承台和上方土体质量。由此可见托换承台与其下方土体分担了 14.3% 的部分荷载。从云图可知,由于截桩的影响,使得靠近截桩处桩基承受的轴力大于离截桩较远处的桩;且相比于截断 1 根桩处,截断 2 根既有桩的位置处桩身轴力略大。

2.3.2 桩身竖向位移分析

桩基托换前后模型竖向位移云图,如图 4 所示。

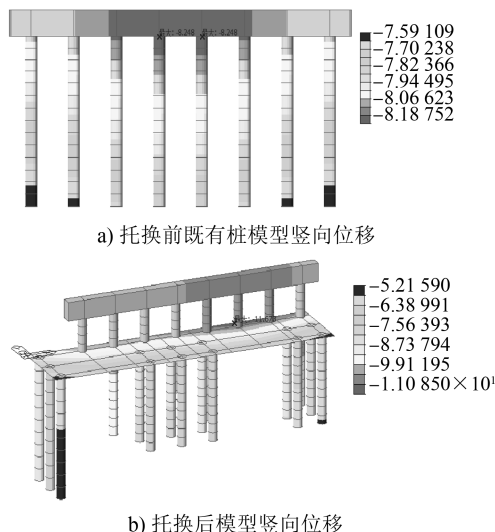


图 4 桩基托换前后模型竖向位移云图

由图 4 可知,由于托换前既有桩的布设及其

上部施加的荷载均对称,故求得的竖向位移云图也对称;桩基整体中间部位轴力最大,故竖向位移最大值 8.25 mm 出现在结构中间处;两侧桩的竖向位移最小,为 7.58 mm;其余桩的竖向位移约为 8.00 mm。

托换后,由于新增加了托换承台以及承台上方土体的质量的缘故,使得桩基结构的自重增加,故而导致托换后的桩基最大位移为 11.68 mm,其值出现在截断两根桩的承台上方;与托换前相比,其整体结构所承受的荷载远大于托换前;但是从沉降的最大竖向位移来看,两者差值仅为 3.43 mm,说明托换承台和托换桩在控制整体沉降位移发挥了重大作用,有效地分担了荷载,最大沉降位移以及相邻桩的位移差值符合公路桥涵相关规范^[15];由于托换桩的桩数增加,使得托换桩的最小位移相比既有桩的要小,其值为 5.22 mm。

2.3.3 托换承台应力分析

托换前后承台上下部应力云图如图 5 所示。

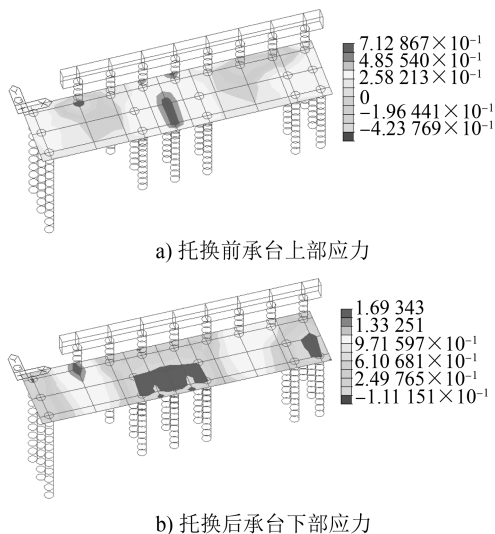


图 5 桩基托换前后承台上下部应力云图

由图 5 可知,无论托换承台上部或下部,均既有拉应力,也有压应力存在。对于托换承台上部,最大拉应力出现在离既有桩较远的托换承台中部,为 0.71 MPa;最大压应力出现在截断一根桩的位置处,为 0.54 MPa;托换承台下部所受到的拉压应力位置与托换承台上部恰好相反,最大拉应力出现在截断一根桩的位置处,为 1.69 MPa;最大压应力出现在离既有桩较远的托换承台中部,为 0.29 MPa。由此可见,托换承台所受到的拉压应力值在 C40 混凝土强度设计值范围内,故而承载力满足要求。

3 模型试验概况

3.1 模型试验相似条件

为了使模型试验得出的结论科学地指导实际工程,模型与原型必须满足物理、几何、边界等条件相似。物理相似关系则需满足:

$$C_{\mu} = 1, C_{\varepsilon} = C_{\gamma} = 1, C_{\sigma} = C_E = 1, C_{\tau} = C_G \quad (1)$$

式中:

$C_{\mu}, C_{\varepsilon}, C_{\gamma}, C_{\tau}, C_{\sigma}, C_E, C_G$ ——分别表示泊松比、法向应变、剪切应变、剪应力、法向应力、弹性模量、剪切模量的相似系数。

几何相似需满足:

$$C_u / (C_{\varepsilon} C_l) = 1 \quad (2)$$

式中:

C_u, C_l ——分别表示竖向位移和长度的相似系数。

刚度相似满足:

$$C_E C_l / C_k = 1, C_G C_l / C_k = 1 \quad (3)$$

式中:

C_k ——刚度相似系数。

边界条件的相似指的是边界约束、受力和支撑条件的相似。根据弹性力学知识可知,模型与原型的边界相似关系为:

$$C_P = C_{\sigma} C_l^2, C_M = C_{\sigma} C_l^3 \quad (4)$$

式中:

C_P, C_M ——分别为模型和原型的边界相似系数。

故最终确定模型的几何相似比为 1:20。其他物理量按照上述分析推导。

3.2 模型桩制作

模型桩的内部为边长为 20 mm 的“口”字型铝管,沿铝管间隔 250 mm 对称粘贴应变片,外部用 C30 强度等级的细骨料混凝土,模型桩制作完成后洒水养护至期限。模型桩长度有两种,按照相似比 1:20,得出模拟既有桩的模型桩桩长为 1.65 m,托换桩桩长 1.45 m,桩径均为 80 mm。本次试验共用 21 根桩,9 根模拟既有桩,其余均为托换桩。本次试验的结果主要通过粘贴在模型桩的应变片经力学公式推导得出,故粘贴桩身应变片时要格外小心,要求铝管表面光滑、清洁,焊接完毕后为了防止受潮,应变片和引出线上用 704 硅胶均匀地涂抹。焊接时为了确保不发生假焊,焊接完成后需要利用万用表在导线另一端检查是否接通。

3.3 试验装置

本次室内模型试验采用的模型槽深度为 2.5 m,槽的总平面尺寸为 3 m×3 m(长度×宽度)。模型槽的底部及四周均为钢筋混凝土板结构,壁厚均为 10 cm,在模型槽的一侧打孔截桩。刚性承台采用钢筋混凝土浇筑而成,高 20 cm,长度和宽度分别为 3 m 和 1 m。试验采用的反力梁量程为 20 t。为了更好地模拟实际加载情况,采用 3 个千斤顶同时加载,使力均布施加在桩顶。试验采用慢速维持荷载法加载,根据单桩的极限承载力估算出群桩的极限承载力值。按照该值的 1/10 加载,共加载 9 级,每级加载值为 5 kN,且根据规范判定加载失效标准。在承台上按照适当的比例共布置 6 个百分表,用以测量在托换过程中承台的沉降。

3.4 填土物理力学参数

为了尽可能使室内模型试验与现场实际情况相吻合,填筑模型槽所用的黄土从鱼儿沟桥附近分层挖取后运至实验室。经土工试验测得其主要物理力学参数分别为:最优含水率为 16%,最大干密度为 1.82 g/cm³,塑限为 17%,液限为 32%。采用分层填筑、分层夯实的原理进行填筑,每层填筑厚度为 20 cm。模型槽四周槽壁中间粘贴刻度标尺,用以保证压实度。

4 试验结果分析

4.1 荷载-沉降曲线分析

图 6 为桩身荷载-沉降曲线。在饱和黄土地区中,桩侧摩阻力优先桩身轴力发挥。从图 6 可以看出,荷载-沉降曲线前期主要受桩侧摩阻力的影响,后期则主要受桩端阻力的影响。静载试验的荷载-沉降曲线能够直观地判断出桩的极限承载力,当荷载施加至 40 kN 时,桩体沉降急速增大,说明此时桩侧土体达到屈服状态,桩侧摩阻力和桩端阻力均已达到极限值,桩体发生刺入破坏。因而可判断出原桩的极限承载力为 40 kN。

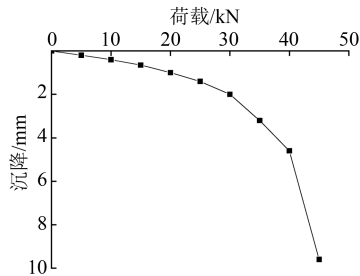


图 6 桩身荷载-沉降曲线

4.2 桩身轴力分析

对地铁右线中心线既有桩所在一排,即地铁右线中心线的左侧既有桩与右侧原桩的桩身轴力进行了分析,结果如图7~8所示。

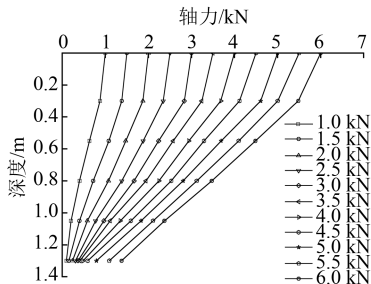


图7 托换桩轴力-深度曲线图

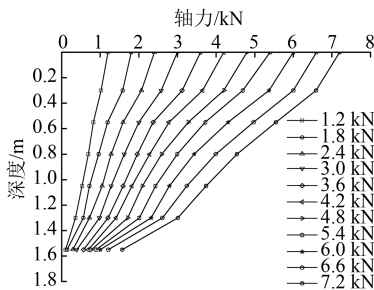


图8 原桩轴力-深度曲线图

从图7~8可以看出,桩身轴力-深度曲线大致呈线性分布,并且随着竖向荷载与深度的逐渐增大,桩身轴力的减小速度亦加快。在饱和黄土地区中,由于桩侧摩阻力发挥程度较低,故而轴力变化较大。初始加载后,由于桩侧摩阻力尚未充分发挥,轴力-深度曲线较陡,随着加载的持续进行,轴力-深度曲线逐步变缓,说明桩侧摩阻力开始发挥作用,同时桩端阻力亦逐渐增大。

4.3 承台分担荷载分析

不同荷载下承台荷载分担比随荷载变化如图9所示。

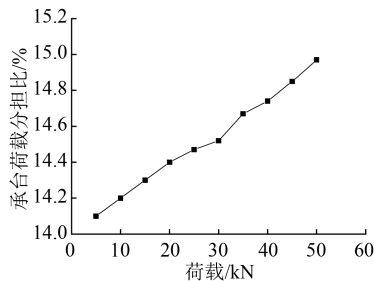


图9 承台荷载分担比随荷载变化图

从图9可以看出,当顶部施加的荷载逐渐增大

时,因为承台的刚度远远大于土体,故承台荷载分担比逐渐增大。因而竖向荷载愈大,承台荷载分担比越明显。

5 结论

1) 既有桩的桩身轴力最大值位于桥梁桩基中间,且此处竖向位移亦为最大值。在同时截断两根桩的承台上方处,竖向位移达到最大,为11.68 mm,且既有桩与托换桩桩身轴力均沿桩身依次递减。

2) 既有桩的桩身轴力大于托换桩,托换桩的荷载分担比在既有桩所在位置处的一排桩的荷载分担比为40.6%,第二排的托换桩的荷载分担比为29.3%,第三排为19.8%。

3) 截桩位置处,托换承台上部承受压应力,下部承受拉应力。拉应力最大值出现在截断一根桩的位置处,其值为1.69 MPa,数值模拟托换承台的荷载分担比约为14.3%。室内模型试验中,荷载分担比变化范围为14.1%~14.85%。根据公路桥涵相关规范,鱼儿沟桥托换方案可行。

参考文献

- [1] 黄欣.北京地铁10号线黄庄站一科南路站桩基托换施工技术[J].铁道标准设计,2009(9): 71.
- [2] 徐前卫,朱合华,马险峰,等.地铁盾构隧道穿越桥梁下方群桩基础的托换与除桩技术研究[J].岩土工程学报,2012(7): 1217.
- [3] 刘恒,徐世达,周凯.地铁下穿创业立交桥桩基托换施工技术研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2014(2): 23.
- [4] 黄晓东,黄东初.南京地铁三号线主动桩基托换工程设计[J].城市道桥与防洪,2013(3): 92.
- [5] 王莉平.既有建筑物下明挖基坑施工对桩基及周围地层的影响研究[J].兰州交通大学学报,2012(4): 49.
- [6] 李世伟,张长浩.湿陷性黄土隧道桩基托换应用及潜在问题思考[J].中国房地产业,2011(1): 128.
- [7] 刘丽萍,李向阳,王德伟,等.预压托换桩加固及顶升纠偏工程实践[J].岩石力学与工程学报,2005(15): 2795.
- [8] 童明华.托换技术在湿陷性黄土地区的应用实例[J].工业建筑,1989(3): 54.
- [9] 吴炜.饱和黄土地区桩基托换基桩承载力变异行为研究[J].兰州交通大学学报,2016(3): 29.
- [10] 崔爱华.被动式桥梁桩基托换技术在兰州地铁中的应用[J].铁道建筑,2016(2): 76.
- [11] 日本铁道综合技术研究所.铁道构造物等设计标准及解说 基础构造物·抗土压构造物[M].东京:丸善株式会社,2000.

(收稿日期:2018-08-28)