

隧道临近既有铁路桥桩基施工扰动影响的数值分析研究

张学钢¹, 张丹锋², 刘可², 黄阿岗王¹, 胡利平^{2,3}

(1. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

3. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300)

摘要: 针对哈尔滨地铁 1 号线哈尔滨南站至农科院站区间暗挖隧道设计与施工方案, 运用有限元方法, 采用数值模拟地铁暗挖隧道上下台阶法施工, 同时上行线超前下行线 20 m, 分析研究其对上部铁路桥桩基力学与位移影响变化规律。研究结果表明, 地铁开挖使上部铁路桥桩基侧呈负摩阻力状态, 并随开挖掌子面的临近, 桩基轴力、侧表面摩阻力和位移都呈增大趋势, 变化速率也逐渐加快; 在垂直隧道轴线方向, 随桩基与隧道距离的减小, 受力和位移变化更复杂、明显; 并且开挖上台阶和后施工的下行线都对桩基影响大。研究结果可为本工程提出相应重点控制区域和关键施工工序, 并为后续类似工程提供一定理论依据。

关键词: 地铁工程; 暗挖隧道; 既有桩基; 数值分析

中国分类号: TU31213; TU31211

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)02-0217-07

Influence of the metro undercut excavation tunnel construction on existing railway bridge pile foundation

ZHANG Xuegang¹, ZHANG Danfeng², LIU Ke², HUANG Egangwang¹, HU Liping^{2,3}

(1. Shaanxi Railway Institute, Shaanxi Weinan 714000, China; 2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech. Xi'an 710055, China; 3. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., LTD. Tianjin 300300, China)

Abstract: Based on the Harbin Metro Line 1 between Harbin South station and Nongkeyuan station section undercut excavation tunnel design and construction scheme was used, by the finite element method, Numerical simulation of metro undercut excavation tunnel up-down bench cut method construction, was also applied and upgoing line advancing downgoing line 20m was analysed. The variation law of mechanics and displacement of its influence on the upper railway bridge pile foundation was studied. The research results show that the pile flank surface frictional resistance of upper railway bridge pile foundation is negative state in metro excavation, and with the excavation tunnel face near, axial force, flank surface frictional resistance and displacement of pile foundation are increased and the rate of change has gradually accelerated. In the direction of the vertical axis of tunnel, force and displacement is more complex, obviously with decreasing pile foundation and tunnel distance; The pile foundation made a big difference by excavation of up-bench cut and later, construction of downgoing line. The research results can be used for the project and put forward the corresponding key control areas and key construction procedures, and provided certain theoretical basis for the later similar engineering.

Keywords: metro engineering; undercut excavation tunnel; existing pile foundation; numerical analysis

随着城市人口的急剧增加, 交通压力变大, 城市土地被高度化利用, 地下铁道接近既有结构物施工的实例越来越多, 并逐渐成为隧道施工技术的一个重要组成部分。隧道近接结构物施工不同于一般施工, 在设计和施工各阶段必须考虑对既有结构物的影响, 两者结构类型、位置关系等都与结构受力和变形有密切关系^[1-2]。针对隧道施工对邻近桩基础的影响, 国内外学者进行了一系列的研究, J.D.Morton 和 K.H.King^[3]通过室内试验研究隧道开挖对邻近桩基承载力与沉降的影响, 分析了邻近施工引起的单桩承载力降低的机理; Loganathan 等^[4]

采用离心试验模拟研究隧道开挖对地面和桩基变形的影响, 提出了不同距离隧道引起桩基础变形的估算公式; Chen L T 等^[5]假设土体为理想弹性介质, 分析隧道开挖对桩体的影响, 给出了不同的隧道施工方式引起的桩基承载力变化的基本特性; Lee T K 等^[6]运用三维弹塑性耦合固结数值分析, 研究了隧道开挖对邻近承载桩的影响及土-隧道-桩的相互作用机制。国内张云军等^[7]探讨不同埋深隧道开挖引起地面、邻近建筑物角点的沉降规律, 并分析了桩体和地板弯矩、轴力与剪力的变化规律; 黄茂松等^[8]针对浅埋隧道开挖及截桩处理的工程实例, 应用

收稿日期: 2014-09-10

修改稿日期: 2015-04-15

基金项目: 陕西省教育厅 2013 年科学研究计划(自然科学专项)项目 (2013JK0990)

作者简介: 张学钢 (1976-), 男, 副教授, 主要从事隧道与地下工程方面的教学和科研工作. E-mail: 18191277018@163.com

两阶段分析法推导了浅埋隧道开挖引起顶部分层土层中桩基的变形及附加应力公式,提出了相应的计算方法。杨晓杰等^[9]通过三维拉格朗日有限差分法数值模拟分析,从桩侧摩阻力、桩端总抗力和桩底段轴力等方面模拟分析了浅埋暗挖隧道近距离穿越建筑桩基施工引起桩基承载力的变化规律;提出了隧道施工对桩基承载力的影响主要表现为对桩侧摩阻力和桩端总抗力两方面的影响的结论。提出了采用地层注浆加固或桩基托换等措施以控制桩基承载力和桩体沉降。章荣军等^[10]基于桩土界面非线性 p-y 曲线,分析了隧道开挖对邻近单桩的影响,提出了一种分析隧道开挖下邻近单桩响应的修正简化算法。

目前国内外已有的对隧道施工引起的临近桩基的影响,多是针对具体工程或从理论上分析单桩的状态,对双洞施工引起的群桩的变化及不同开挖方式对不同位置桩的影响分析还鲜见报道。为之,以在建哈尔滨地铁1号线哈尔滨南站站至农科院站区间双线地铁暗挖隧道穿越三跨桥施工为工程背景,通过系统深入的数值模拟试验,分析了双洞隧

道不同开挖方式引起的三跨桥桩基础的变形、受力特性,得出隧道开挖对邻近既有桩基力学与位移影响变化规律,为该工程安全、顺利穿越三跨桥施工提供了技术支持。

1 工程概况

哈尔滨地铁1号线哈尔滨南站至农科院站区间为下穿铁路桥区段,穿越段1-8号桥为框构桥,4、5号桥扩建部分及9号桥为桩基桥,地铁上下行线间距13.5 m,净距7.3 m,上行线上方地表为学府路主道,下行线上方地表为学府路辅道。只考虑9号桥,其桥基情况为:9号桥为简支梁桥,其王方桥台距离下行线最近为1.824 m,桩基为直径1.0 m的钻孔灌注桩,下行线结构距离9号桥桩心1.825~5.942 m,上行线结构距离桩心2.596~8.121 m,均为桩心至结构垂直距离,桩底标高与隧道初支距离为5.2~5.6 m,桩顶位于地表,桩底离隧道拱底4 m。同一桥台下桩心至桩心距离为1.7 m,其与隧道位置关系如图1所示。

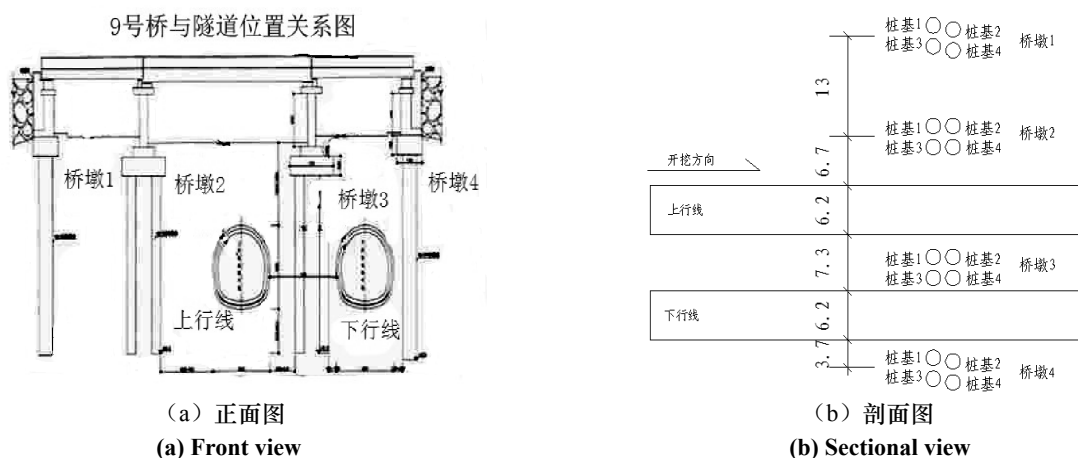


图1 9号桥与隧道位置关系图

Fig.1 No. 9 bridge and tunnel location relational diagram

2 数值分析模型及参数

2.1 数值分析模型

哈尔滨地铁1号线哈尔滨南站站至农科院站区间双线隧道下穿9号简支梁桥分析模型计算范围上部取至地表,下部至隧道仰拱下30 m,左取40 m,右取30 m,纵向60 m。隧道左右为水平约束,下部为竖向约束,前后为垂直其面的约束,地表为自由面边界^[11-13]。数值模型分析中将土体视为连续、均质、各向同性介质;土体初始应力场不考虑地下水作用,仅为土体本身自重应力场;计算中支护结

构体系采用弹性模型,计算区域内土体为连续理想塑性介质,并运用摩尔-库仑弹塑性模型进行计算,其屈服准则为:

$$f_x = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2\sqrt{N_\phi} = 0 \quad (1)$$

式中: $N_\phi = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$; 为凝聚力, ϕ 为摩擦角。

数值模拟中土体采用实体单元、初支为板单元、锚杆为植入式桁架单元、桩为桩单元进行模拟,并用接触单元模拟桩与土体间的摩擦效应,桩侧切向和法向刚度分别取为100 MPa 和98 000 GPa,摩

擦-相对深度曲线坡度为 1 kN/m^2 , 桩端承载力 $3\,000\text{ kN}$, 桩端弹簧刚度。

计算中, 考虑地下交通影响, 取地表面道路荷载为 97.65 kN/m^2 , 桩顶荷载: 中间两桥墩下的桩基, 每根施加竖向 940 kN , 侧边两桥墩下的桩基, 每根施加竖向 340 kN 的荷载。

2.2 施工过程模拟

隧道模拟开挖上行线超前下行线 20 m , 采用上

下台阶法施工, 循环进尺 5 m 。先拱部 180° 范围锚杆施工, 在开挖上台阶土体, 喷混紧跟掌子面, 最后开挖下台阶土体、喷混, 等全部施工完毕, 拆除临时支护, 最后施做二次衬砌, 隧道支护参数为: 锚杆采用 $\Phi 25$, $L=3.0\text{ m}$, 环向间距 0.3 m , 纵向间距 1 m ; 初支采用 C20 网喷混凝土, 全断面喷射; 钢筋网为 $\Phi 6.5@150\times 150$ 焊接钢筋网; 格栅钢筋纵向 0.5 m 。隧道模拟施工工况如图 2 所示。

表 1 材料物理力学参数

Tab.1 Physico-mechanical parameters of materials

编号	名称	厚度 /m	重力密度 / $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	粘聚力 /kPa	内摩擦角 / $^\circ$	弹性模量 /MPa	泊松比
1	杂填土	2	19.6	11	13	292	0.32
2	粉质粘土	9	18.8	40	20	180.8	0.28
3	粉质粘土	4	19.2	43	20	217.6	0.28
4	粉质粘土	30	19.4	43	20	230	0.28
5	初支	0.25	25			21 000	0.2
6	锚杆		78.5			210 000	0.3
7	桩基		25			27 000	0.21



图 2 模拟施工工况

Fig.2 Simulation of construction conditions

2.3 计算参数

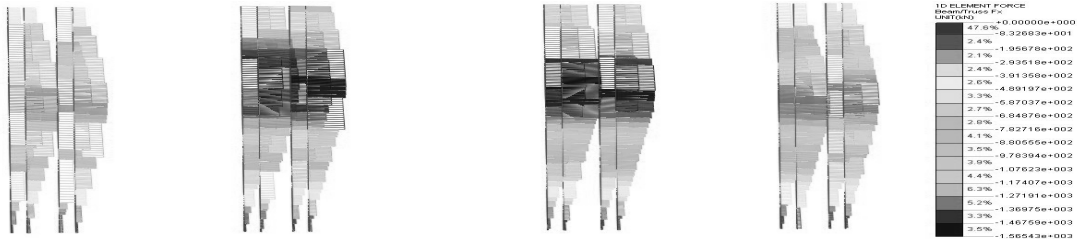
根据地质勘察资料以及规范^[14-15]和经验, 各材料物理力学参数如表 1 所示。其中钢筋网和格栅钢架通过提高初支的物理力学参数来等效处理^[16]。

3 铁路桥桩基计算结果分析

3.1 桩基最大轴力随施工变化结果分析

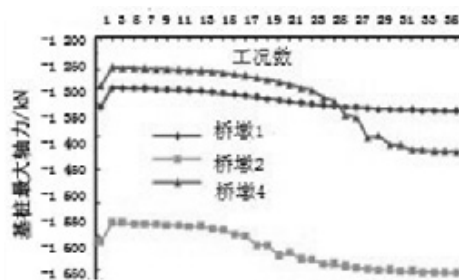
桩基最大轴力变化云图如图 3 (a) 所示。对于桥墩 1、2 和 4 下的四根桩基, 轴力大小相近, 变化规律也相似, 所以只在每个桥墩下取一根桩基进行变化结果分析, 轴力变化规律如图 3 (b) 所示。对于桥墩 3 下四根桩基, 由于上行线超前下行线 20 m 施工, 且两平行隧道分布于桥墩 3 两侧, 所以桥墩 3 下的四根桩基变化有所不同, 轴力变化规律如图 3 (c) 所示。由图得见: 最大桩身轴力不在桩顶, 说明在隧道施工过程中, 桩侧摩阻力呈负摩阻力状态, 这对桩基的承载力非常不利, 这主要是由于隧道的开挖, 土体发生的沉降大于桩的轴向位移, 导致桩侧土体对桩基产生负摩阻力。随着隧道掌子面的推进, 桩基最大轴力呈台阶式递增, 在轴力不变区间为隧道下台阶开挖, 说明掌子面下台阶的开挖

对桩基最大轴力影响很小, 主要为上台阶开挖对轴力的影响。桩基最大轴力随施工推进呈递增趋势, 且最大轴力距桩顶 15 m 处, 即隧道断面上下台阶交界水平处, 该断面是铁路桥桩基的控制截面。桥墩 1 下的桩基距隧道开挖比较远, 所以增长趋势缓慢, 最终轴力与初始轴力相比只增加了 35.94 kN , 同比递增 3% 。桥墩 2 下的桩基其最大轴力随隧道的开挖呈递增趋势, 最终轴力与初始轴力相比增加了 74.83 kN , 同比递增 5.1% , 并且当开挖第 11 步, 即上行线隧道掌子面距桩基 20 m 处时, 其变化加剧, 随着掌子面与桩基距离的减小, 变化趋势进一步加大, 当上行线掌子面通过并远离桩基 20 m 处时, 其变化才趋于平缓。桥墩 4 下的桩基同样随隧道的开挖, 其最终轴力与初始轴力相比增加了 126.74 kN , 同比递增 10.2% , 同样当上行线隧道掌子面距桩基 20 m 时, 其桩基最大轴力开始有所增加, 平均增幅 1.3% ; 当开挖到第 18 步, 即上行线开挖了 40 m , 下行线开挖了 20 m , 下行线掌子面距桩基 20 m 处时, 变化进一步加剧, 平均增幅达到 7.5% , 之后才趋于平缓。



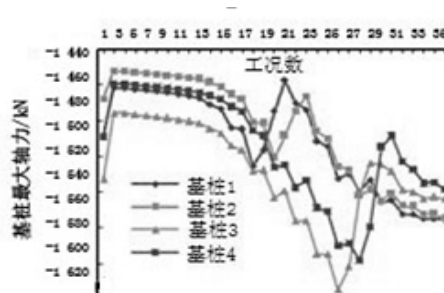
(a) 桩基最大轴力变化云图/kN

(a) The variation cloud picture of the maximum axial force of pile foundation



(b) 桥墩 1、2 和 4 下桩基

(b) The pile foundation under bridge pier 1.2 and 4



(c) 桥墩 3 下桩基

(c) The pile foundation under bridge pier 3

图 3 桩基最大轴力变化规律

Fig.3 Variation law of the maximum axial force of pile foundation

桥墩 3 下的桩基 1 和桩基 2 位于上行线隧道一侧, 桩基 3 和桩基 4 位于下行线隧道一侧, 并且由于上行线超前下行线 20 m 施工, 所以其变化规律有所不同. 但总体变化趋势都是随着隧道的开挖, 其最大轴力呈递增变化, 直至开挖到第 11 步, 即上行线隧道掌子面距离桩基 20 m 处时, 变化开始加剧, 同比增加 34.68 kN, 平均递增 2.4 %. 最后当下行线隧道开挖到第 32 步, 即掌子面通过并远离桩基 15 m 时, 桥墩 3 下的四根桩基最大轴力才基本保持稳定不变. 其中当上行线隧道掌子面开挖到距桩基 1 纵向 5 m 处时, 其最大轴力开始减小, 直到上行线隧道掌子面位于桩基 1 处才停止减小, 期间最大轴力减小 48.37 kN 平均递减 3.2 %; 之后最大轴力又呈递增趋势, 直到下行线掌子面距桩基 15 m 处才保持稳定, 同比增加 78.36 kN, 平均递增 5.4%. 当上行线隧道掌子面开挖到第 17 步, 即掌子面位于桩基处时, 桩基 2 最大轴力开始减小, 直到掌子面通过并远离桩基 2 纵向 5 m 才停止减小, 期间同比减小 34.53 kN, 平均递减 2.3%, 之后最大轴力又开始加大, 增加了 68.03 kN, 平均递增 4.6 %. 当下行线隧道掌子面开挖到距桩基 3 纵向 10 m 处时, 桩基 3 最大轴力开始减小, 直至掌子面位于桩基处才停止减小, 期间同比减小 66.28 kN, 平均递减 4.2 %, 之后隧道掌子面远离桩基, 其最大轴力才又增加, 平均递增 1 %. 当下行线隧道掌子面距离桩基 4 纵向 5 m 处, 桩基 4 最大轴力开始减小, 直至掌子面通过并远离桩基 4 纵向 5 m 才停止减小, 期间同比减小 70.44 kN, 平均递减 4.5 %, 之后又以平均 2 % 的趋势递增.

3.2 桩基侧表面最大摩阻力随施工变化结果分析

桩基侧表面最大摩阻力变化规律如图 4 所示, 由图 4 得出: 所有桥墩下桩侧表面最大摩阻力在上行线隧道掌子面距桩基 20 m 处开始变化明显, 之前都呈缓慢增长态势, 并且在下行线隧道掌子面距

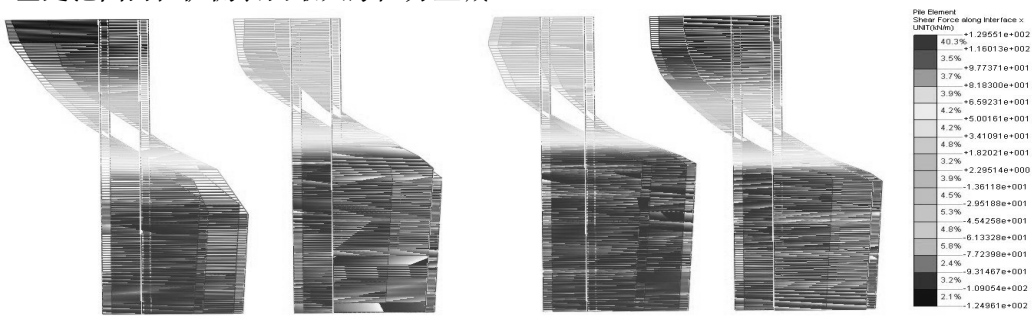
桩基 15 m 处时, 桩侧表面最大摩阻力才又基本保持不变.

桥墩 1 下的四根桩基桩侧表面最大摩阻力都呈增长趋势, 在上行线隧道掌子面开挖到第 11 步之前, 即掌子面距离桩基 20 m 处, 桩侧表面最大摩阻力基本不变, 之后才开始变化明显. 最大增加 8.446 kN, 平均增幅 8 %. 桥墩 2 下的桩基 1 和桩基 2, 即远离隧道侧的桩基, 其桩侧表面最大摩阻力同桥墩 1 下桩基桩侧表面最大摩阻力变化一样, 只是最大增加 11.54 kN, 平均增幅 18.7 %; 桩基 3 增加 10.8 kN, 平均增幅 17.7 %; 桩基 4 增加了 8.6 kN, 平均增幅 14.7 %. 但桩基 3 在掌子面距桩基 15 m 处时, 桩侧最大摩阻力开始减小, 当掌子面通过并远离桩基 5 m 时, 桩侧表面最大摩阻力才又恢复增长趋势, 在此期间减小 1.95 kN, 平均递减 3 %. 桩基 4 在掌子面距桩基 5 m 处时, 桩侧表面最大摩阻力开始减小, 当掌子面位于桩基处时, 桩侧表面最大摩阻力才又恢复增长趋势, 期间减小 2.9 kN, 平均递减 4.5 %.

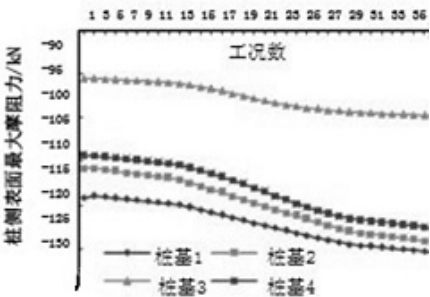
桥墩 3 下上行线隧道侧桩基 1 侧表面最大摩阻力在掌子面距桩基 20 m 处之前增长缓慢, 之后急剧变化直至掌子面距桩基 5 m 处, 此期间平均增幅 9.4 %, 在掌子面距桩基 5 m 到掌子面位于桩基处期间桩侧表面最大摩阻力呈递减趋势, 平均递减 10 %, 之后在掌子面通过桩基并距桩基 10 m 范围内又呈递增趋势, 且平均增幅达到 12.1 %, 之后随掌子面的远离, 呈缓慢增长状态. 桩基 2 与桩基 1 变化规律一样, 只是其桩侧最大摩阻力变化比桩基 1 稍微延后. 但位于下行线隧道侧桩基 3 侧表面最大摩阻力在下行线隧道掌子面距桩基 5 m 处才开始递减, 直至掌子面位于桩基处才恢复增加趋势, 期间平均递减 11.6 %, 之后平均增加幅度 3 %. 桩基 4 桩侧表面最大摩阻力变化规律与桩基 3 一样, 只是比桩基 3 侧表面最大摩阻力稍微延后. 桥墩 4 下

靠近隧道侧的桩基 1 和桩基 2 在下行线隧道掌子面距桩基 5 m 之前其桩侧表面最大摩阻力都呈增加趋势, 其平均递增 11.7 %, 在掌子面距桩基 5 m 到掌子面位于桩基处范围内, 桩侧表面最大摩阻力呈减

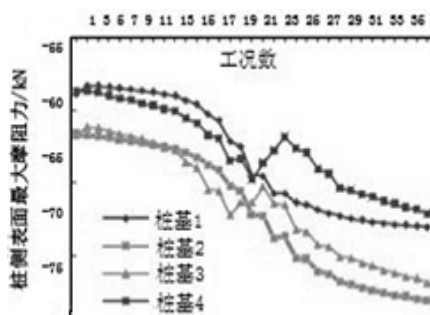
小状态, 其平均递减 7.7 %, 之后又呈增加趋势. 远离隧道侧的桩基 3 和桩基 4 随着隧道开挖推进, 一直都呈增加趋势, 其平均递增为 16.3 %.



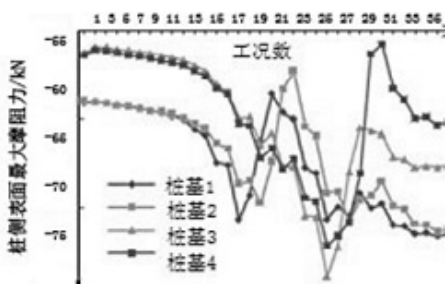
(a) 桩基侧表面摩阻力变化云图/kN
(a) The variation cloud picture of the frictional resistance of pile foundation flank surface



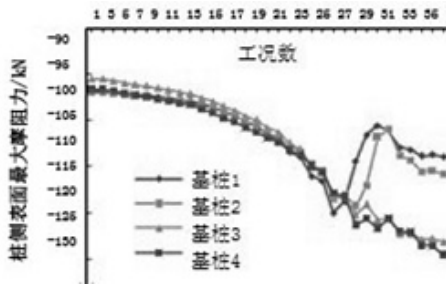
(b) 桥墩 1 下桩基
(b) The pile foundation under Bridge pier 1



(c) 桥墩 2 下桩基
(c) The pile foundation under Bridge pier 2



(d) 桥墩 3 下桩基
(d) The pile foundation under Bridge pier 3



(e) 桥墩 4 下桩基
(e) The pile foundation under Bridge pier 4

图 4 桩基侧表面摩阻力变化规律

Fig.4 Variation law of the frictional resistance of pile foundation flank surface

3.3 桩基位移随施工变化结果分析

桩基侧向位移变化云图如图 5 (a) 所示. 由于每个桥墩下四根桩的位移变化量和变化规律都一样, 所以只在每个桥墩下取一根桩基进行结果分析. 桩基纵向位移变化规律如图 5 (b) 所示, 桩基侧向位移变化规律如图 5 (c) 所示. 由图 5 得出: 桥墩下桩基纵向位移变化规律基本一致, 都在上行线隧道掌子面距离桩基 20 m 左右开始呈增大趋势, 直到下行线隧道掌子面离开桩基 20 m 左右才基本保持不变. 桥墩 1 下的桩基由于距离隧道横向 20 m 左右, 所以其纵向位移基本保持不变. 上行线隧道

的开挖对桥墩 2 下的桩基纵向位移影响大, 此施工期间位移占总位移的 37 %, 其最终位移 7.11 mm. 下行线隧道的开挖对桥墩 4 下的桩基纵向位移影响较大, 此施工期间位移占总位移的 31 %, 其最终位移 6.55 mm. 上行线隧道和下行线隧道的开挖对桥墩 3 下桩基的纵向位移影响都很大, 上行线隧道施工期间位移占总位移的 15 %, 下行线隧道施工期间位移占总位移的 31 %, 且下行线隧道施工期间纵向位移变化速率明显高于上行线隧道施工期间纵向位移变化速率, 说明下行线隧道的施工对桥墩 3 下桩基纵向位移影响更大, 因此在后施工隧道期间应更密

切关注桥墩3下桩基的纵向位移。

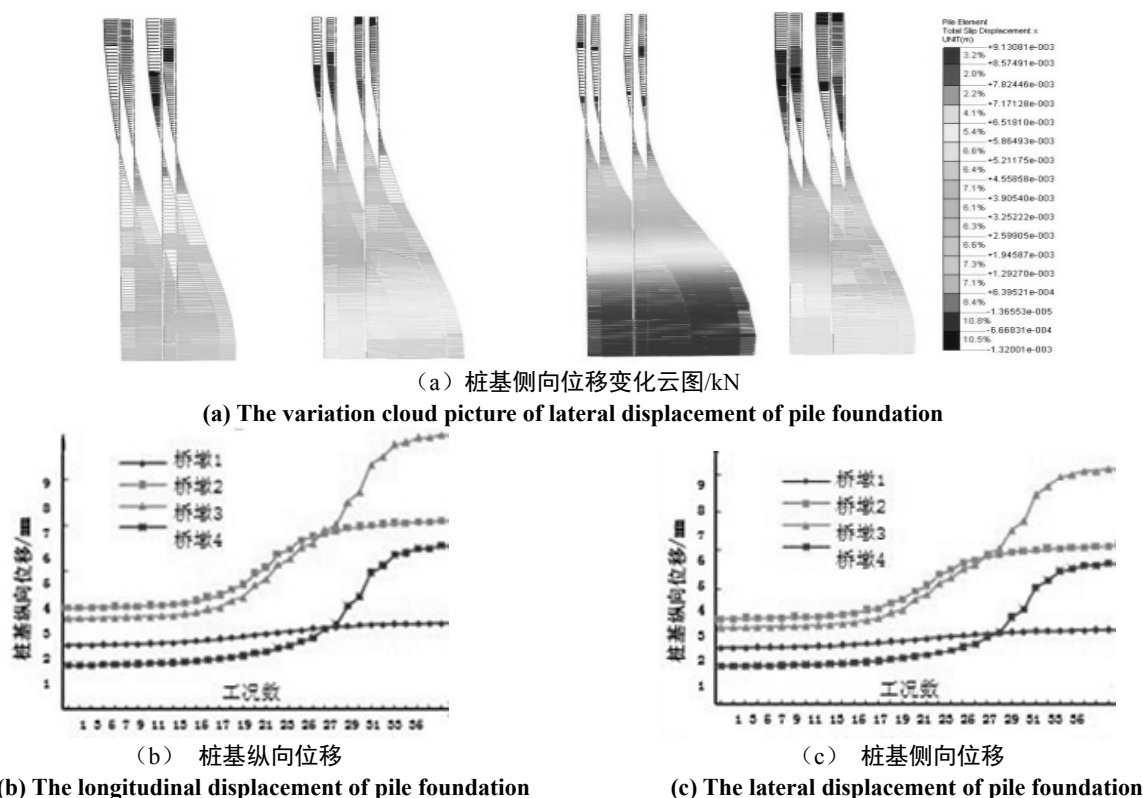


图5 桩基位移变化规律

Fig.5 Variation law of the displacement of pile foundation

桥墩下桩基侧向位移变化规律也基本一致,且与桩基纵向位移变化规律相同,也是从上行线隧道掌子面距离桩基20 m左右开始发生变化,在下行线隧道掌子面离开桩基20 m左右才基本保持不变。同样由于桥墩1下桩基距离隧道横向20 m左右,所以其桩基侧向位移基本不受隧道开挖影响。桥墩2下桩基侧向位移受上行线隧道开挖影响大,施工期间侧向位移占总位移的23%,最终侧向位移7.1 mm。桥墩4下桩基侧向位移受下行线隧道开挖影响大,此施工期间桩基侧向位移占总位移的35%,最终侧向位移6.7 mm。同样桥墩3下桩基侧向位移受上行线和下行线隧道开挖影响都很大,上行线隧道开挖期间桩基侧向位移占总位移的14.7%,下行线隧道开挖期间桩基侧向位移占总位移的31.7%,最终侧向位移9.1 mm,且下行线隧道开挖对侧向位移的变化影响速率明显大于上行线隧道开挖对侧向位移的变化影响速率,说明桥墩3下桩基侧向位移受下行线隧道开挖影响更大,因此后施工的下行线隧道开挖期间也要密切关注桥墩3下桩基的侧向位移。

3.4 数值分析的讨论及施工建议

数值分析表明,桩基最大轴力变化最大的是桥

墩4下桩基,增长了10.2%;变化最复杂的是桥墩3下桩基,其最大轴力在掌子面到达前呈增长趋势,最大增长量为6.8%,但当掌子面通过时,又呈减小趋势,恢复4.5%,之后才又缓慢增加,其最终值与初始值相比,增长量在5.5%左右。同样桩基侧表面最大摩阻力变化最大的也是桥墩4下桩基,其远离隧道侧的桩基3和桩基4增长量为14.9%,靠近隧道侧的桩基1和桩基2由于在掌子面通过时恢复了一部分,增长量为13.7%;变化最复杂的也是桥墩3下桩基,也由于在掌子面通过时侧表面摩阻力恢复一部分,且恢复值比桩基1和桩基2更大,因此最终增长量不大,仅为10.7%左右。桩基纵向和侧向位移在隧道开挖过程中都一直呈增长趋势,增长量最大的是桥墩3下桩基,增长了1倍左右。

因此,隧道开挖对桩基轴力、侧表面摩阻力和位移都有一定程度影响,特别是桩基上部侧表面为负摩阻力^[25],相当于为桩基施加了额外荷载,对其承载力很不利,且桩基最大轴力距桩顶15 m,即上下台阶交界面处,这同时也是桩基上部负摩阻力与下部正摩阻力交界处,因此必须采取措施对桩基加以保护,最终通过对桩基四周进行袖阀管注浆加固以增强侧摩阻力才使桩基处于正常工作范围内。可

见在邻近既有桩基隧道开挖中采用上下台阶法,上行线超前下行线,并与桩基四周进行注浆加固相结合方案可行。

4 结论

针对哈尔滨地铁1号线哈尔滨南站至农科院站区间隧道的设计和施工方案,进行有限元数值模拟分析,论证地铁暗挖隧道施工过程中,其邻近既有桩基的受力与变形规律,提出了相应的关键施工工序以供设计和参考,并得出以下主要结论:

(1) 在地铁隧道施工过程中,桩基上部侧表面摩阻力呈负摩阻力状态,对桩基受力很不利,必须采取有效措施减小桩侧负摩阻力,以提高桩体承载力。

(2) 在采用上下台阶法施工隧道时,上台阶的开挖对邻近桩基最大轴力的影响很大,因此在施工阶段,对于上台阶的施工应多加注意。

(3) 邻近既有桩基隧道施工中,隧道开挖使桩基轴力、侧表面摩阻力和位移都呈增长趋势。当桩基与隧道横向距离减小,其轴力变化速率加快,桩侧表面摩阻力变化也更明显和复杂,并当一侧有隧道通过时,桩基受近距离隧道施工影响大,当两侧都有隧道通过时,两侧隧道施工影响都很大,但后施工隧道对其影响更大,这是由于后施工隧道对桩基影响产生叠加作用,因此在后施工隧道时,应更加注重对桩基的影响。

参考文献 References

- [1] 张志强,何川.地铁盾构隧道近接桩基的施工力学行为研究[J].铁道学报,2003,25(1):92-95.
ZHANG Zhiqiang, HE Chuan. Research on mechanics behaviour of a shield tunnel construction in metro adjacent to existing pile foundation[J]. Journal of The China Railway Society, 2003, 25(1): 92-95.
- [2] 林刚,何川.盾构隧道基础上修建三连拱地铁车站结构参数研究[J].铁道学报,2003,25(6):93-98.
LIN Gang, HE Chuan. Study on structural parameters of the three-arch metro station built on the basis of shield tunnels[J]. Journal of The China Railway Society, 2003, 25(6): 93-98.
- [3] MORTON J D, KING K H. Effects of tunneling on the bearing capacity and settlement of piled foundations [C] // Proceedings of Tunneling 79. London: IMM, 1979: 57-68.
- [4] LOGANATHAN N. Centrifuge model testing of tunneling-induced ground and pile deformations[J]. Geotechnique, 2000, 50(3): 283-294
- [5] CHEN L T. Pile responses caused by tunnelling [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1999, 125(3): 207-215.
- [6] LEE T K. Effects of advancing open face tunneling on an existing loaded pile[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2005, 131(2): 193-201.
- [7] 张云军.隧道开挖对邻近桩基影响的二维数值分析[J].地下空间与工程学报,2005,1(6):832-836.
ZHANG Yunjun. Two-dimensional numerical analysis of adjacent pile foundation responses caused by tunneling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 832-836.
- [8] 黄茂松.浅埋隧道施工对建筑物桩基的影响分析[J].岩土力学,2006,27(8):1379-1383.
HUANG Maosong. Analysis of pile responses caused by tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1379-1383.
- [9] 杨晓杰.地铁隧道近距穿越施工对桩基承载力的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1290-1295.
YANG Xiaojie. Study on effect of metro tunnelling on carrying capacity of pile foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1290-1295.
- [10] 章荣军.基于p-y曲线分析隧道开挖对邻近单桩的影响[J].岩土工程学报,2010,32(12):1837-1845.
ZHANG Rongjun. Response of adjacent single pile due to tunneling based on p-y curve[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1837-1845.
- [11] Itasca Consulting Group. User's manual of fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions[M]. 2nd ed. Itasca Consulting Group, 1997: 100-150.
- [12] 王述红,唐春安.数值试验在岩石力学实验教学中的应用[J].实验技术与管理,2003,20(6):140-143.
WANG Shuhong, TANG Chuna. Application of numerical experimentation on rock mechanics experiment teaching[J]. Experimental Technology and Management, 2003, 20(6): 140-143.
- [13] 宋战平,慕彦波.岩溶隧道施工关键技术及工程应用研究[M].西安:陕西科学技术出版社,2013:12-13.
SONG Zhanping, MU Yanbo. Research on the key technology and engineering application of the karst tunnel construction under complex geology[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 2013: 12-13.
- [14] TB10003-2005.铁路隧道设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2005.
TB10003-2005. Code for design on tunnel of railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- [15] JGJ94-2008.建筑桩基技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
JGJ94-2008. Technical Code for Building Pile Foundations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [16] 李围,何川.盾构隧道基础上修建三条平行隧道地铁车站的施工力学行为研究[J].现代隧道技术,2004,41(1):5-9.
LI Wei, HE Chuan. Study on the mechanical behavior of a metro station with three parallel tubes[J]. Modern Tunneling Technology, 2004, 41(1): 5-9.

(本文编辑 沈波)