

隧道施工对临近桩基力学特性影响分析

郭小川

重庆交通大学土木工程学院, 重庆, 400041;

摘要: 针对山城地铁隧道双侧壁导坑法开挖引起的桩-隧相互影响问题, 应用理论分析和数值计算模型, 设计了隧道与桩相隔不同距离的 7 组模拟实验工况, 研究了关于隧道侧穿既有轨道桥桩的力学机理和隧道开挖对桩基的影响。研究表明: 随着桩-隧间距的增大, 距离越远的桩沉降变形越小, 且两者间存在非线性关系; 桩基的沉降随着隧道开挖逼近逐渐变大, 但变化率逐渐趋于平稳; 当使用双侧壁导坑法开挖时桩隧距离越小的桩, 桩侧摩阻力变化率越大, 桩隧距离超过 70m 时, 开挖对桩基侧摩阻力的影响很小, 可以忽略不计。研究成果可为山城地下交通建设提供重要参考。

关键词: 地铁隧道; 临近桩基; 侧摩阻力; 有限元

DOI: 10.69979/3029-2727.24.12.002

引言

轨道交通工程穿越城市核心区域, 周边建筑物林立, 市政道路、既有桥梁密集分布。区间暗挖隧道可引发洞周一定范围内土体位移, 对扰动范围内的既有桥梁桩基产生附加应力。当隧道开挖产生的附加应力大于既有桥梁桩基的容许应力时, 将影响既有结构的正常使用, 因此, 保证既有结构的正常使用成为区间隧道施工的关键控制因素^[1]。

严格来说, 邻近隧道桩基的沉降随开挖时间和所处的空间都有一定相关性。目前常用的研究方法主要有理论分析、数值模拟和模型试验等。理论方面, 熊巨华等^[2]讨论了隧道开挖时多种因素对邻近单桩的影响, 提出隧道开挖对邻近单桩竖向受力特征的影响规律, 李早等^[3]提出了刚性承台下受荷群桩的位移内力计算的解析方法并和有限元计算的结果进行了比较, 得到了较好的一致性。靳军伟等^[4]在砂土中隧道开挖中考虑桩土相互作用, 将桩土采用两阶段计算方法, 得到开挖对邻近桩基影响的简化计算方法; 项彦勇等^[5]考虑开挖引起的地层二次应力, 提出预测桩基附近隧道开挖塑性区范围的理论方法, 并对比桩基不同形式及位置与塑性区的相互影响; 数值模拟方面, 韦京等^[6]采用 FLAC3D 数值模拟和层次分析法确定 PBA 工法(Pile-Beam-Arch Method)地铁车站下穿桥梁的最优方案, 并结合监测结果分析了关键施工阶段对地层和桩基的影响; 杨超等^[7]建立三维弹塑性模型, 模拟实际的施工过程, 从整体上研究黏性土地基中桩-土-隧道三者间的作用特征。黄鹏^[8]等将三维数值计算和现场实测相结合, 对区间暗挖隧道侧穿既

有桥桩施工扰动进行了分析, 模型试验方面, 王智德等^[9]基于理论分析, 利用 PIV 等方法完成了隧道与桩基位于不同空间位置时的 8 组模型试验, 总结了地表、地层沉降变化规律以及对桩基内力的影响。

以上研究成果仅局限于某一阶段的桩基内力分析, 而对隧道采用双侧壁导坑法开挖全过程的分析较少, 隧道开挖对不同隧桩距离引发桩基沉降位移与侧摩阻力变化区别较大, 因此, 对隧道开挖全过程侧穿既有桩基的研究尤为重要。

1 隧道侧穿既有桥桩力学机理

隧道开挖产生临空面, 洞周地层产生向临空面方向的位移。当既有桩基处于隧道开挖影响范围内, 地层位移对邻近桩基产生扰动, 如图 1 所示。

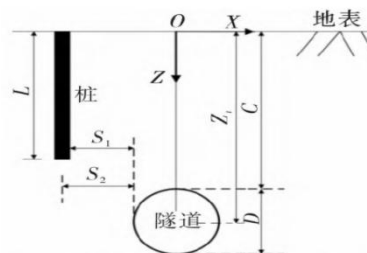


图 1 隧道开挖对邻近桩基影响图

Fig 1 Diagram of the influence of tunnel excavation on adjacent pile foundations

轨道交通桩基多为摩擦型单桩, 摩擦型单桩主要依靠桩侧摩阻力来承受上部荷载。根据不同土体的性质和类型, 可采用不同的方法进行承载力计算, 如 API、 α 法、 β 法等。摩擦桩沉降变形公式如下:

$$S_{\text{side}} = \sum_{i=1}^n \Delta S_i \quad (1)$$

式中 S_{side} : 摩擦桩的总沉降; n : 桩身划分的段数;

ΔS_i : 第 i 段桩身的沉降。

每一段的桩身沉降 ΔS_i :

$$\Delta S_i = \frac{q_{s,i} \Delta z}{E_s} \quad (2)$$

式中: ΔS_i 为第 i 段桩身的沉降; $q_{s,i}$ 为第 i 段桩身的桩侧摩擦力; Δz 为每段桩身的长度; E_s 为土体弹性模量。

隧道开挖会使周边土体产生相应的变形沉降, 从而引起附件桩基产生相应变形。现假设桩为弹性体, 土为弹塑性体, 桩土间相互作用是连续分布的弹簧模拟, 桩-土不发生分离, 满足变形协调条件^[2]。桩身单元受力如图 2 所示。

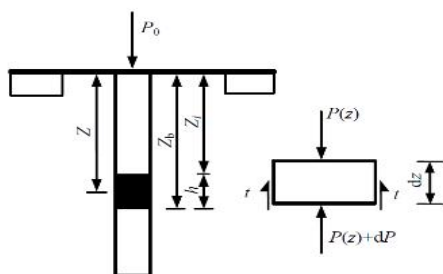


图 2 桩身单元受力图

Fig 2 Force diagram of the pile body unit

根据桩身单元平衡条件:

$$\frac{\partial P(z)}{\partial z} = -U_p t(z) \quad (3)$$

式中: U_p 为桩界面周长; $P(z)$ 为深度 z 处桩的轴力; $t(z)$ 为深度 z 处桩侧摩阻力。

微分体的竖向应变为

$$\varepsilon = -\frac{P(z)}{E_p A_p} = \frac{\partial W_p(z)}{\partial z} \quad (4)$$

式中: E_p 为桩身弹性模量; A_p 为桩身横截面积。

$W_p(z)$ 为深度 z 处桩身位移。

由 (3)、(4) 可得桩身的位移方程为

$$\frac{\partial W_p(z)}{\partial z} - \frac{U_p}{E_p A_p} t(z) = 0 \quad (5)$$

取深度开挖在深度 z 处桩侧摩阻力为

$$t(z) = \frac{k_z}{U_p} (W_p(z) - S_{\text{gfs}}(z)) \quad (6)$$

式中: k_z 为桩侧土体弹簧刚度; S_{gfs} 为隧道开挖引起的土体自由场位移。

由式 (5)、(6) 可得到土体竖向位移对桩身影响的沉降控制方程为^[11]

$$\frac{\partial W_p(z)}{\partial z^2} - \lambda^2 (W_p(z) - S_{\text{gfs}}(z)) = 0 \quad (7)$$

式中: $\lambda = \sqrt{k_z/E_p A_p}$ 。

埋隧道开挖过程中, 围岩破坏会对附件桩基础的侧摩阻力产生影响, 一些关键因素有以下四个方面:

(1) 隧道与桩的间距。桩与隧道的距离是影响侧摩阻力的重要因素。随着距离的增加, 围岩破坏对桩基础的影响逐渐减小。当桩与隧道距离较近时, 桩侧摩阻力可能受到较大的影响, 导致承载力降低。

(2) 隧道开挖深度。隧道开挖深度会影响围岩的应力分布和破坏范围。浅埋隧道开挖时, 围岩受到的扰动较大, 可能导致附近桩基础的侧摩阻力减小。随着隧道深度的增加, 围岩破坏的影响逐渐减弱。从而减弱对摩擦桩侧摩阻力的影响。

(3) 土体性质。土体的强度、变形特性和应力传递能力等因素对桩侧摩阻力的影响也很重要。例如, 软土中的桩基础受到隧道开挖影响较大, 而在硬土或岩石中的桩基础受影响较小。

(4) 隧道开挖方法。隧道开挖方法对围岩破坏程度和范围产生影响。例如, 使用盾构法开挖隧道时, 围岩受到的扰动相对较小, 对附近桩基础的影响也较小。而采用传统的开挖法 (如钻爆法) 时, 围岩扰动较大, 可能导致桩侧摩阻力降低。

2 隧道施工数值模拟

2.1 工程概况

轨道交通 15 号线是横向联系三大槽谷北部的东西向城轨快线, 其中 15 号线一期工程起点为九曲河东站, 终点为两江影视城站, 线路全长 38.7km, 车站中心里程为 YK58+771.726, 车站里程范围为 YK58+620.826~YK58+867.626, 右线中心里程轨面标高 279.216m, 结构全长 246.8m。隧道开挖影响范围内存在高架桥, 为探究隧道开挖对不同距离桩基的影响, 现建立有限元模型展开相应模拟。

2.2 模型建立

根据区间隧道施工的工程实例, 通过有限元程序 MIDAS/GTS 对隧道开挖对不同距离桩基的影响进行了模拟。隧道开挖影响洞周一定范围的地层。选取区间隧道水平轴线为 X 轴, 长度为 150m; 选取区间隧道线路方向为 Y 轴, 长度为 60m; 选取重力方向为 Z 轴, 长度为 150m, 区间隧道周边及既有桩基两侧网格局部加密。数值

计算模型按照区间隧道施工步序、支护参数实际工况进行建模,在距隧道 20m, 40m, 60m, 80m 处分别设置 $4 \times \varnothing 1800\text{mm}$ 桩基, 数值模型如图 3 所示。

隧道施工采用双侧壁导坑法。因主要研究隧道开挖后对桩基的影响, 开挖后仅考虑初期支护。

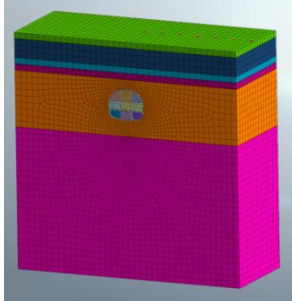


图 3 三维有限元计算模型

数值计算模型的基本假定:

(1) 数值计算模型的地层单元遵循 Mohr-Coulomb 屈服准则。

(2) 桩基采用 1D 梁单元, 摩擦桩与地层的相互作用通过设置界面单元实现。

$$K_n = E_{\text{oed},i}/t_v; K_t = G_i/t_v \quad (9)$$

式中 K_n 为法向刚度模量; K_t 剪切刚度模量; $E_{\text{oed},i} = \frac{2G_i(1-\nu_i)}{1-2\nu_i}$; ν_i 为界面泊松比, 取值 0.45; t_v 为虚拟厚度系数; $G_i = R \times G_{\text{soil}}$; G_{soil} 为土体剪切模量; R 为强度折减系数。

(3) 区间隧道采用双侧壁导坑法, 开挖后立即施作初支。施工步序图如图 4 所示。

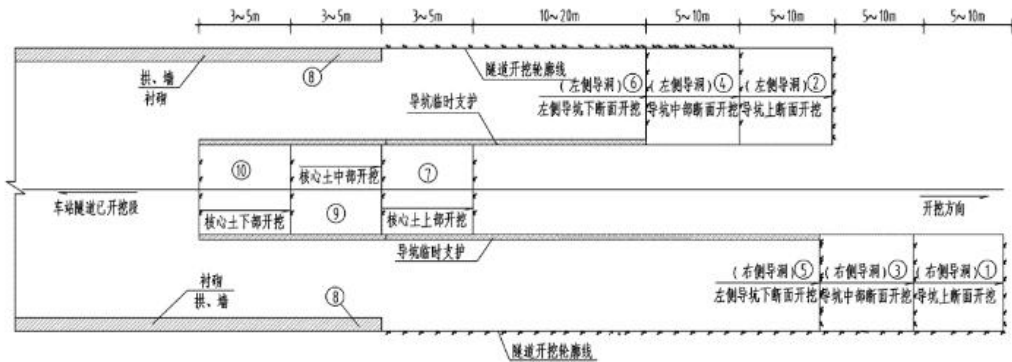


图 4 隧道施工步序平面图

(4) 初期支护采用 2D 板单元模拟。按照抗压刚度等效原则, 将格栅拱架折算至喷射混凝土中, 即

$$E_c = E_0 + \frac{A_s E_s}{A_c} \quad (10)$$

式中 E_c 为折算后初期支护弹性模量; E_0 为喷射混凝土弹性模量; A_s 为格栅拱架截面积; E_s 为格栅受力钢筋弹性模量; A_c 为喷射混凝土截面积。

(5) 计算模型采用边界位移条件, 上部为自由边界, 底面约束 X, Y, Z 三个方向的位移, 其他部分约束 X、Y 方向的位移。

数值计算模型的计算参数根据区间地勘报告得知, 区间隧道位于 IV 级围岩, 岩性较硬, 桩身埋深为 10m, 下穿素填土和砂岩, 材料参数如表 1 所示。

表 1 地层参数

土层名称	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	重度 $\gamma/\text{N} \cdot \text{m}^3$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
砂质泥岩	1600	0.37	25.6	666	32.8
初支	32500	0.25	25	/	/
桩基	38000	0.25	25	/	/
素填土	5	0.2	20	8	30
砂岩	7100	0.11	24.9	2271	43.7

3 分析与讨论

3.1 隧道开挖对不同距离桩基沉降的影响

考虑 7 种不同工况, 桩基距离隧道距离分别为 0m、12m、24m、36m、48m、60m、72m, 对比分析隧道开挖引起的地层位移对桩身的影响。隧道每间隔 10m 设置一个

监测点, 随着施工进行, 隧道沉降如图 5 所示。不同距离桩底沉降如图 6 所示。

从数据上看, 双侧壁导坑法下距离远桩桩底沉降越小, 但最终都趋于稳定。隧道沉降随着两侧导坑挖通逐渐趋于平稳。核心土开挖后沉降逐渐变大, 隧道挖通后趋于平稳。

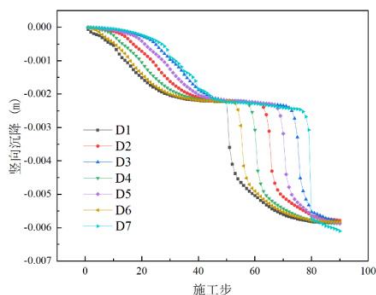


图5 隧道沉降示意图

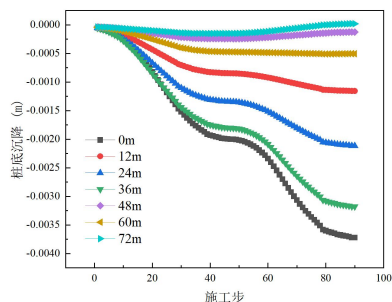


图6 桩底沉降示意图

3.2 桩身水平位移随隧道开挖的变化

在桩底，桩中，桩顶分别设置三处监测点，由图7~图12可知，双侧壁导坑法刚开始施工时对桩位移影较大。当施工步开挖到与桩水平时，Y方向位移会出现较大变化。两侧挖通后Y向位移也会出现较大变化，但随着隧道整体开挖成环Y向位移逐渐缩小解决平稳。通过对隧桩间距X于桩最大位移量y进行拟合，两者间存在非线性关系，即 $u = -0.02 + \frac{4.27}{1 + e^{\frac{x-25.26}{12.4}}}$ ，如图13所示。

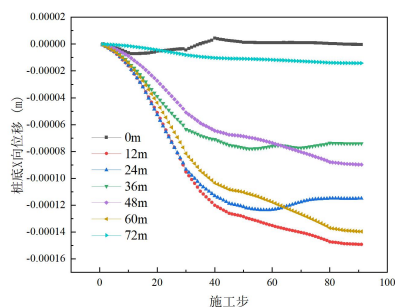


图7 桩底X方向位移

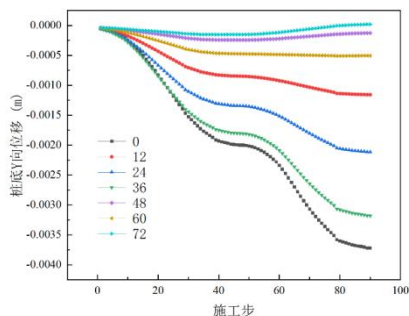


图8 桩底Y方向位移

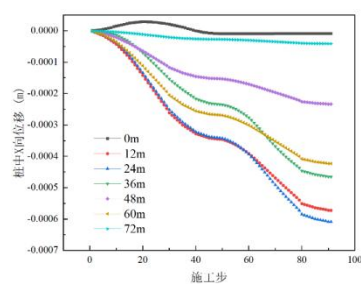


图9 桩中部X方向位移

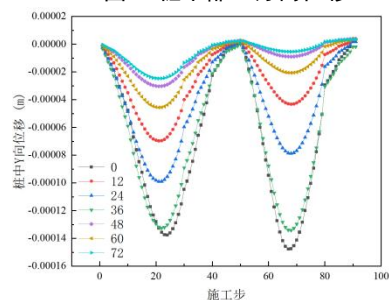


图10 桩中部Y方向位移

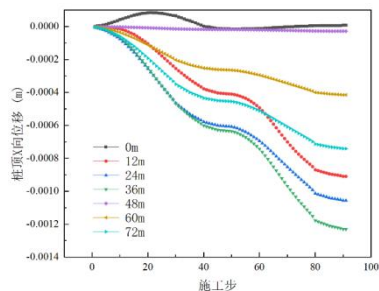


图11 桩顶X方向位移

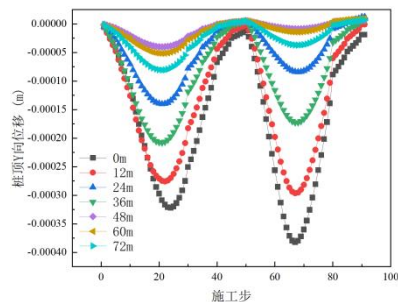


图12 桩顶Y方向位移

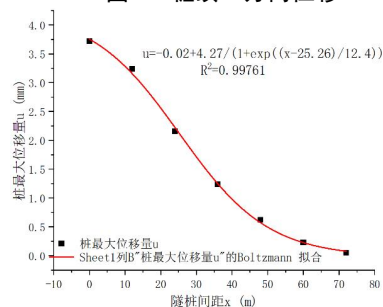


图13 隧桩间距与桩最大位移量的关系

3.3 桩侧摩阻力随隧道开挖的变化

随着双侧壁导坑法的开挖，开挖引起的土体位移会

对桩身侧摩阻力产生一定的影响。不同距离的桩因隧道开挖所受影响也有所差异。由图 14 所示,隧道正上方桩侧摩阻力变化率最为显著,达到了 15% 左右。相比之下,距隧道开挖截面越远,隧道开挖对桩侧摩阻力的影响越小,而距隧道 72m 的桩,装侧摩阻力变化仅为 1% 左右。

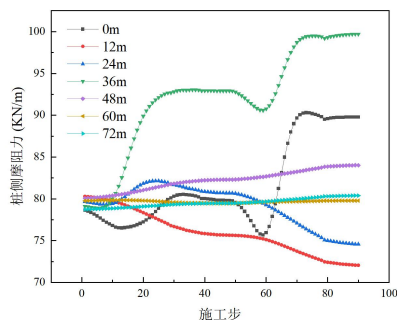


图 14 桩中部侧摩阻力变化

4 结论

结合具体的工程算例,模拟分析了隧道使用双侧壁导坑法开挖对不同距离单桩的影响。通过对比分析得到了以下结论:

(1) 双侧壁导坑法隧道开挖对单桩的影响受隧道于桩的间距、隧道开挖深度、桩的材料属性和桩基、开挖引起的地层沉降等主要因素有关。

(2) 隧道开挖时正上方桩的侧摩阻力变化最大,隧道与桩距离的变化,影响力逐渐减小。当隧道于桩相距 70m 左右时,隧道开挖对桩侧摩阻力影响较小。

(3) 不同隧桩距离,隧桩距离 x 与桩最大位移量 y 存在非线性关系, $u = -0.02 + \frac{4.27}{1 + e^{-\frac{x-25.26}{12.4}}}$

参考文献

[1]. 刘纪峰,陈福星,张会芝. 双线暗挖隧道沿线建筑物墙体开裂分析[J]河南科技大学学报(自然科学版), 2015,36(3):59-64.
Liu Jifeng, Chen Fuxing, Zhang Huizhi. Analysis of wall cracking of buildings along double track tunnel[J] Journal of Henan University of Science & Technology(Natural Science), 2015,36(3):59-64.
[2]. 熊巨华,王远,刘侃等. 隧道开挖对邻近单桩竖向受力特性影响[J]. 岩土力学,2013,34(02):475-482.
Xiong Juhua, Wang Yuan, Liu Kan, et al. Effect

s of tunneling on vertical bearing behaviors of adjacent single pile[J]Rock and Soil Mechanics. 2013,34(02):475-482.

[3]. 李早,黄茂松,戴兵. 层状地基中刚性承台群桩竖向力学分析 [J]. 同济大学(自然科学版),2007 (04): 446-450.

Li Zao, HUANG Maosong,DAI Bing. Vertical mechanical analysis of piles of rigid bearing piles in layered foundations[J].Tongji University(Natural Science Edition),2007(04):446-450.)

[4]. 靳军伟,杨敏,邓友生等. 砂土中隧道开挖对邻近桩基竖向影响的简化计算方法[J]. 岩土力学,2015,36(S1):241-246.

Jin Junwei, Yang Ming, Deng Yousheng, et al. Simplified calculating method for evaluating effect of tunneling in sands on axial force of nearby piles[J]Rock and Soil Mechanics. 2015,36(S1):241-246.

[5]. 项彦勇,冯山群. 地层自重应力场中桩基荷载对隧道开挖塑性区影响的一种理论预测方法[J]. 土木工程学报,2012,45(12):162-169.

Xiang Yanyong, Feng Shanqun. A theoretical approach for predicting the influence of pile foundation load on the potential plastic zone induced by tunnel excavation in gravitational field [J]China Civil Engineering Journal. 2012,45(12):162-169.

[6]. 韦京,王芳,孙明志. PBA 工法地铁车站下穿桥梁方案优化研究[J]现代隧道技术,2014,51(6):101-107.

Wei Jing, Wang Fang, Sun Mingzhi. Study on Optimization of Undercrossing Bridge Scheme of PBA Metro Station[J] Modern Tunnelling Technology | Mod Tunnel Technol. 2014,51(6):101-107.

[7]. 杨超,黄茂松,刘明蕴. 隧道施工对邻近桩基影响的三维数值分析[J]岩石力学与工程学报,2007,26(1):2601-2607.

Yang Chao, Huang Maosong, Liu Mingyun. Three-Dimensional Numerical Analysis of Effect of Tunnel Construction on Adjacent Pile Foundation[J] Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2007,26(1):2601-2607.

[8]. 黄鹂, 梁小勇, 李娴. 区间暗挖隧道侧穿既有桥桩施工扰动分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2016, 37(04): 66-70+75+7.

Huang Li, Liang Xiaoyong, Li Xian. Disturbance Analysis of the Side Crossing Existing Bridge Piles of the Section Underground Tunnels[J] Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science). 2016, 37(04): 66-70+75+7.

[9]. 王智德, 武海港, 杨文东等. 地铁隧道近距离侧穿邻近桩基影响的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(06): 70-76.

Wang Zhide, Wu Haigang, Yang Wendong, et al.. Study on the Influence of the Mechanical Effect of the Tunnel Passing Through the Adjacent Pile Foundation at a Close Distance[J] Journal of Wuhan University of Technology. 2022, 44(06): 70-76.