

DOI: 10.11779/CJGE2023S20035

盾构近接施工对摩擦桩基承载性能的影响机制及控制技术研究

林超^{1,2}, 姜蓉^{*1,3}, 肖树聪¹, 王祖贤⁴

(1. 宜春学院物理科学与工程技术学院, 江西 宜春 336000; 2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 江西丰强科技发展有限公司, 江西 宜春 336000; 4. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 针对盾构近接施工对邻近摩擦桩基建筑物的扰动问题, 基于盾构隧道开挖前后地层应力场的变化, 建立了隧道-地层-桩基相互作用下既有摩擦桩基承载力解析计算模型, 揭示了盾构近接施工对摩擦桩基承载性能的影响机制; 以一地铁盾构隧道侧穿摩擦桩基老旧建筑物施工为工程背景, 分析了盾构近接施工扰动下摩擦桩群的变形特征, 论证了地层加固对控制邻近桩基变形的有效性。研究表明: 隧道开挖后地层水平应力和剪应力的变化是影响摩擦桩基承载性能的根本原因, 桩基承载力损失与隧道施工时的地层损失率呈正比; 地层加固可有效控制隧道施工引起的地层损失, 从而降低地层和既有桩基的变形, 有效控制盾构近接施工时摩擦桩基建筑物的安全。

关键词: 盾构隧道; 摩擦桩; 承载力; 地层加固; 桩基变形

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0241-06

作者简介: 林超(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事隧道地下工程灾变防护技术方面的研究工作。E-mail: linchao8701@163.com。

Mechanism of influences of shield construction nearby friction pile foundation on its bearing capacity and its controlling techniques

LIN Chao^{1,2}, JIANG Rong^{*1,3}, XIAO Shucong¹, WANG Zuxian³

(1. Yichun University, Physical Science and Technology College, Yichun 336000, China; 2. East China Jiaotong University, State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, Nanchang 330013, China; 3. Jiangxi Fengqiang Technology Development Co., Ltd., Yichun 336000, China; 4. College of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Aiming at the disturbance problem of the adjacent friction pile foundation buildings caused by shield tunneling, based on the changes in the stress field of the strata before and after shield tunneling, an analytical calculation model for the bearing capacity of the existing friction pile foundation under the interaction of tunnel, stratum and pile foundation is established, revealing the influence mechanism of shield tunneling on the bearing performance of friction pile foundation. Taking the construction of an old building with friction pile foundation at the side of a subway shield tunnel as the engineering background, the deformation characteristics of the friction pile group under the disturbance of shield tunneling are analyzed, and the effectiveness of ground reinforcement in controlling the deformation of adjacent pile foundations is demonstrated. The research results indicate that the changes in horizontal and shear stresses in the strata after tunnel excavation are the fundamental reasons affecting the bearing performance of friction pile foundations. The loss of bearing capacity of pile foundation is directly proportional to the loss rate of formation during tunnel construction. The ground reinforcement can effectively control the ground loss caused by tunnel construction, thereby reducing the deformations of the ground and the existing pile foundations.

Key words: shield tunnel; friction pile; bearing capacity; stratum reinforcement; pile deformation

0 引言

随着城市化进程不断加速, 城市地下空间的开发越来越受到人们的关注。大规模的新建地铁盾构隧道

基金项目: 江西省自然科学基金面上项目(20232BAB204074); 中国博士后科学基金面上项目(2023M741158)

收稿日期: 2023-11-30

*通信作者(E-mail: rrq19851219@163.com)

在掘进过程中,不可避免地出现穿越既有建筑桩基的工况^[1]。隧道开挖引起的地层应力释放,造成既有桩基周围地层的应力场发生改变,从而导致桩基产生附加变形和附加内力,并造成桩基承载力发生变化,而过度的承载力损失将危及上部结构安全^[2-3]。因此,准确评价隧道近接施工对既有摩擦桩基的影响是当前城市地下空间开发所面临的较为紧迫的问题。

当前,针对隧道施工引起的邻近桩基响应问题,学者们基于现场实测、模型试验^[4-5]、数值模拟和理论解析等方法已取得了较为丰硕的成果。如李雪等^[6]针对饱和砂土地区盾构隧道超近接高铁桥墩摩擦桩的工程问题,对既有高铁桥墩桩基变形进行了现场测试;Loganathan 等^[7]和孙庆等^[8]采用离心机试验研究了隧道开挖对邻近桩基的瞬态和长期影响,指出隧道开挖影响下邻近桩基最大横向变形和附加弯矩均发生在隧道轴线附近。

隧道施工引起的邻近桩基响应问题,实质为隧道-土体-桩基之间相互作用。学者们已构建了十分丰富的解析计算模型。如 ZHANG 等^[9]基于 Pasternak 地基模型及桩侧土体影响,研究了被动桩在盾构掘进下水平向变形响应;程康等^[10]等进一步考虑桩基的横向剪切性能,将桩简化成 Pasternak 地基上的 Timoshenko 梁,进一步研究了盾构掘进引起的桩基水平变形;冯国辉等^[11-13]分别将既有桩基视为 Winkler 地基和 Pasternak 地基中的 Euler-Bernoulli 梁,分析了盾构掘进下邻近桩基的横向附加响应。

本文在既有研究的基础上,结合隧道开挖前后地层应力场的变化,建立盾构近接施工下邻近摩擦桩基承载力解析计算模型,分析了隧道施工对既有摩擦桩基承载特性的影响机制,并进一步基于三维有限元分析论证了隧道洞周地层加固对既有桩基变形控制的有效性。

1 盾构近接施工扰动下摩擦桩基承载特性分析

1.1 基本思路

盾构施工对邻近摩擦桩基承载特性的影响,实质在于隧道施工会引起周围土体应力场重分布,而导致摩擦桩侧法向正应力和切向剪应力发生变化,继而影响桩侧摩阻力。因此对于盾构施工扰动下邻近摩擦桩基承载力分析的基本思路:

(1) 隧道施工前,地层内任一点的应力状态由围岩自重生成竖向应力 σ_{v0} 、水平向应力 σ_{h0} ,将该值作为桩侧地层应力状态初始值,可求得初始桩侧阻力 Q_{s0} 。

(2) 计算隧道施工后地层内任一点的竖向应力

σ_v 、水平应力 σ_h 和剪应力 τ_{xy} , 根据此时的应力状态计算隧道施工后的桩侧阻力 Q_s 。

(3) 结合步骤 (1), (2), 求得摩擦桩基承载力变化值 $\Delta Q_s = Q_{s0} - Q_s$ 。

1.2 解析模型的建立及基本假定

为获得盾构近接施工扰动下临近摩擦桩基的承载特性,建立如图 1 所示的隧道-地层-桩基相互作用模型。图 1 中 x, y 为弹性半空间任意一点的直角坐标, r, θ 为相应的极坐标; h 为隧道轴线埋深; $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ 分别为任意一点土体径向应力、环向应力和剪应力; l 为桩基长度; x_0 为桩基轴线与隧道轴线的水平间距; r_0 为隧道开挖半径。

在理论计算时作如下基本假定:

(1) 为避免地层应力场计算时的奇异,隧道覆径比大于 1.5。

(2) 忽略土体与衬砌之间的摩擦力,即接触面处的剪应力满足:

$$\tau|_{r=r_0} = 0 \quad (1)$$

(3) 采用间隙参数 w 表征盾构开挖引起的等效地层损失,计算方法为

$$w = V_1 \frac{\pi r_0^2}{2\pi r_0} = \frac{1}{2} V_1 r_0 \quad (2)$$

式中: V_1 为地层损失率。

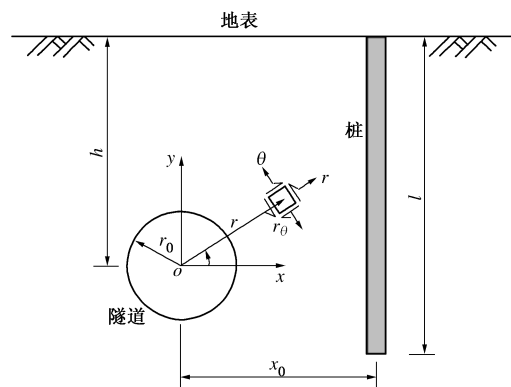


图 1 隧道-地层-桩基相互作用模型

Fig. 1 Interaction model for tunnel-stratum-pile

1.3 初始桩侧阻力 Q_{s0}

任在原岩应力状态下,桩侧任意一点的应力状态为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{v0} &= \gamma(h-y), \\ \sigma_{h0} &= k\sigma_{v0}, \\ \tau_{xy0} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: γ 为土体有效重度; k 为侧压力系数。

根据摩擦桩基承载理论,此时桩基承载力为

$$Q_{s0} = \pi d \int_l f_{s0}(y) dy = \pi d \int_l (\tau_{xy0} + k_s \sigma_{h0}) dy \quad (4)$$

式中: d 为桩基直径; f_{s0} 为初始状态下的桩侧摩阻力分布函数; k_s 为桩侧界面摩擦系数, $k_s = \tan \delta_j$; δ_φ 为界面摩擦角。

1.4 开挖扰动后桩侧阻力 Q_s

以干砂地层为例, BOBET 基于应力函数法给出了此类地层中隧道开挖后任意一点的应力, 即

$$\sigma_r = \frac{a_0}{r^2} - \frac{1}{2} \gamma h(1+k) + \left[\frac{1}{4} \gamma r(k+3) - 2c'_1 r^{-3} + \frac{1}{2} c'_1 r^{-1} \right] \sin \theta + \left[\frac{1}{2} \gamma h(1-k) - 6a'_2 r^{-4} - 2b'_2 r^{-2} \right] \cos 2\theta + \left[-\frac{1}{4} \gamma r(1-k) - 12c'_3 r^{-5} - 6d'_3 r^{-3} \right] \sin 3\theta, \quad (5a)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{a_0}{r^2} - \frac{1}{2} \gamma h(1+k) + \left[\frac{1}{4} \gamma r(3k+1) + 2c'_1 r^{-3} - \frac{1}{2} c'_1 r^{-1} \right] \sin \theta + \left[-\frac{1}{2} \gamma h(1-k) + 6a'_2 r^{-4} + 2b'_2 r^{-2} \right] \cos 2\theta + \left[\frac{1}{4} \gamma r(1-k) + 12c'_3 r^{-5} + 6d'_3 r^{-3} \right] \sin 3\theta, \quad (5b)$$

$$\tau_{r\theta} = \left[\frac{1}{4} \gamma r(1-k) + 2c'_1 r^{-3} \right] \cos \theta - \left[\frac{1}{2} \gamma h(1-k) + 6a'_2 r^{-4} + 2b'_2 r^{-2} \right] \sin 2\theta - \left[\frac{1}{4} \gamma r(1-k) - 12c'_3 r^{-5} - 6d'_3 r^{-3} \right] \cos 3\theta. \quad (5c)$$

式中: a_0 , a'_2 , b'_2 , c_1 , c'_1 , c'_3 , d'_1 , d'_3 为常数, 可根据问题的边界条件确定, 其他符号意义同前。

进一步, 可通过坐标变换将地层中一点应力状态(式(5))由极坐标系转换到直角坐标系, 即

$$\sigma_x = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} \cos 2\theta - \tau_{r\theta} \sin 2\theta, \quad (6a)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} \sin 2\theta + \tau_{r\theta} \cos 2\theta. \quad (6b)$$

将式(5)代入式(6), 结合摩擦桩基承载理论, 得到隧道开挖扰动后的桩基承载力, 即

$$Q_s = \pi d \int_l f_s(y) dy = \pi d \int_l (\tau_{xy} + k_s \sigma_x) dy. \quad (7)$$

式中: f_s 为隧道开挖后桩侧摩阻力分布函数; σ'_x , τ'_{xy} 分别表示直角坐标系下任意一点的有效水平应力和剪应力。

1.5 隧道开挖对摩擦桩基承载力的影响分析

以某地铁盾构隧道连续侧穿老旧建筑群施工为工程背景, 基于上述隧道开挖前后摩擦桩基承载理论分析, 进行隧道开挖对邻近摩擦桩基承载特性的影响分析。选取典型工况: 既有桩基及开挖隧道位于砂土地层中, 地层重度约为 18 k N/m^3 , 侧压力系数约为 0.32, 根据地勘资料, 计算时地层弹性模量和泊松比

分别取 30 MPa, 0.3; 盾构隧道开挖半径为 3.14 m, 轴线埋深为 15 m, 隧道衬砌采用 C50 钢筋混凝土管片, 管片厚度为 0.3 m, 弹性模量和泊松比分别为 34500 MPa, 0.2; 既有建筑物桩基直径为 0.5 m。为反映隧道施工对摩擦桩基承载能力的影响, 定义摩擦桩基承载力影响因子 R_Q :

$$R_Q = \frac{Q_s}{Q_{s0}}. \quad (8)$$

$R_Q > 1$ 表示承载力提高, $R_Q < 1$ 表示承载力损失, 当 $R_Q = 1$ 时表示承载力无变化。

如图 2 所示为桩隧横向间距为 $1.5r_0$, 地层损失率为 0.8% 时, 摩擦桩基承载力影响因子随桩长的变化曲线。由图可见: 承载力影响因子变化曲线随桩长的增大而呈漏斗状分布, 当 $l/h < 1.0$ 时, 承载力影响因子随桩长的增大而迅速减小, 而当 $l/h > 1.0$ 时, 承载力影响因子随桩长的增大而又逐渐增大, 并逐渐趋近于 1.0; 桩隧相对埋深越趋近 1.0, 承载力影响因子变化梯度越大, 承载力损失越多; 当桩基端部与隧道轴线相平时, 即 $l/h = 1.0$ 时, 其承载力损失最多, 在本算例中此时承载力影响因子 $R_Q = 0.17$, 桩基承载力损失 82.9%。

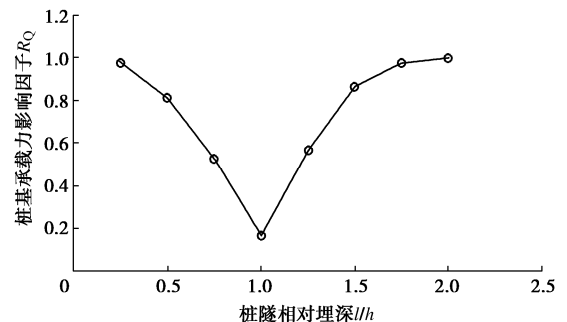


图 2 桩基承载力影响因子随桩长的变化曲线

Fig. 2 Relationship between impact factor on bearing capacity of pile and its length

如图 3 所示为当桩隧横向间距为 $3.0r_0$, 桩隧相对埋深 $l/h = 1.0$ 时, 摩擦桩基承载力影响因子随地层损失率的变化曲线。由图 3 可见: 摩擦桩基承载力损失因子与地层损失率呈线性相关关系, 随着地层损失率的增大, 摩擦桩基承载力影响因子随之线性减小; 在本算例中, 当地层损失率仅为 0.4% 时, 承载力影响因子为 0.98, 而当地层损失率增大至 1.8% 时, 摩擦桩基承载力影响因子减小至 0.15, 变化 84.7%。

2 盾构侧穿摩擦桩基建筑物控制技术

盾构隧道施工对周围岩土体造成扰动, 应力平衡状态改变造成围岩应力释放, 导致临近桩基产生沉降变形。综合前述计算分析, 从地层加固措施入手减小盾构施工对邻近桩基的影响, 通过注浆加固地层的方

式减小盾构施工扰动在地层中的传播。

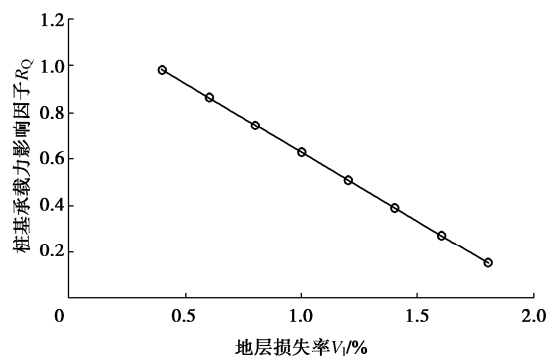


图 3 桩基承载力影响因子随地层损失率的变化曲线

Fig. 3 Relationship between impact factor on bearing capacity of pile and ground loss ratio

2.1 计算模型及计算参数

所建立的盾构-围岩-建筑物的三维数值模型如图 4 所示,模型尺寸为长 60 m (沿隧道开挖方向),宽 120 m (垂直隧道开挖方向),高 50 m (沿地层深度方向)。模型侧面约束水平位移,底部为固定边界,上表面为自由边界,共划分 56972 个单元,41673 个节点。数值模型中盾构隧道管片外径 6.0 m,内径 5.4 m,厚度 300 mm,宽度 1.2 m,采用 C50 混凝土,考虑衬砌接头对管片刚度的削弱效应,管片刚度需折减 15%。

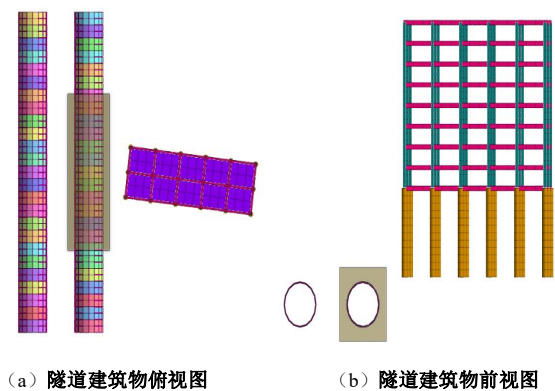


图 4 三维数值模型

Fig. 4 3D numerical model

模型中地层采用摩尔库仑模型,盾壳、隧道衬砌、同步注浆区(即后文所述的等代层)、袖阀管注浆加固区、建筑物梁板柱、桩基础均采用线弹性模型。地层、等代层、袖阀管注浆加固区采用实体单元模拟,盾壳、隧道衬砌、建筑楼板采用板单元模拟,建筑框架梁、立柱、建筑桩基采用梁单元模拟。参数取值见表 1。

2.2 盾构隧道施工过程模拟

(1) 同步注浆

在盾构机施工过程中,在盾尾管片脱出后,由于盾构机刀盘的超挖间隙、装配管片所需的操作间隙、盾构机壳的厚度 3 个因素将会在盾构管片和土体间产

生盾尾间隙。为了减小施工扰动,控制地层变形,在盾构掘进过程中将会采取同步注浆对盾尾间隙进行填充。但是实际工程中,由于地层向盾尾间隙道的移动程度、注浆体注浆后的分布情况、隧道围岩壁面受扰动的范围和程度等情况相对复杂,因此,在建模过程中通常将注浆体简化为均质的、弹性的、等厚的等代层处理,等代层的厚度 δ 可为

$$\delta = \mu \Delta \quad (9)$$

式中: Δ 为盾尾间隙的理论计算值; μ 为折减系数,取值范围为 0.7~2.0,对于极软土层取上限值,对于硬土层取下限值。

表 1 结构参数取值
Table 1 Values of structural parameters

名称	密度 $\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比
盾壳	78.5	210	0.30
隧道衬砌	25.0	29.3	0.20
建筑框架 (梁、板、柱)	25.0	20.4	0.20
桩基础	25.0	24.0	0.20
等代层	20.0	0.06	0.25
袖阀管注浆加固区	22.0	0.25	0.25

根据盾构穿越地层条件及施工扰动范围及程度取等代层厚度为 100 mm,弹性模量为 60 MPa,泊松比为 0.25,采用线弹性体模拟,并根据实际施工情况取注浆压力为 300 kPa。

(2) 土仓压力

对于土压平衡盾构机而言,掌子面的稳定一般依靠于密封土仓的土仓压力平衡掌子面前方的水土压力,并且考虑到盾构刀盘切削土体使土体剥落而导致土仓压力不稳定的情况,为了防止掌子面坍塌,根据施工经验,一般会预留 10~20 kPa 的预备压力,所以土仓压力一般按下式确定:

$$P_0 = P_c + P_w + p \quad (10)$$

式中: P_0 为土仓压力; P_c 为土压力; P_w 为水压力; p 为预备压力。其中 $P_c = \sum K_0 \gamma_i z_i$, $P_c = \gamma_w h$, K_0 为土体静止侧压力系数, γ_i 为第 i 层土的重度, z_i 为第 i 层土的厚度, γ_w 为水的重度, h 为地下水位到盾构刀盘的高度。

通过计算取土仓压力为 200 kPa 均布施加于开挖面土体上。

(3) 盾壳与地层摩擦力

盾构掘进过程,盾构机和地层发生相对运动而产生摩擦力,会使得盾构机周围土体由于剪切作用而向前运动,沿伸到地表则表现为地表隆起或者沉降。盾壳和地层间的摩擦力计算公式为

$$f = \mu_s \sum \gamma_i z_i \quad (11)$$

式中: μ_s 为盾构机与地层的摩擦系数, 通过计算得到的摩擦力为 153 kPa。

3 计算结果分析

3.1 地层位移

在整个开挖过程中, 注浆加固区附近的土体变形明显变小, 当双线隧道开挖完成后, 对于未进行注浆加固的工况来说, 沉降发生区域在左线隧道和右线隧道间呈长条带状分布, 而注浆加固后, 沉降发生区域沿开挖方向呈现“两头大, 中间小”分布, 凸向隧道左线。选取隧道轴线纵向 30 m 处的横断面作为分析断面, 对加固地层前后的地表沉降进行分析, 计算结果如图 5 所示。

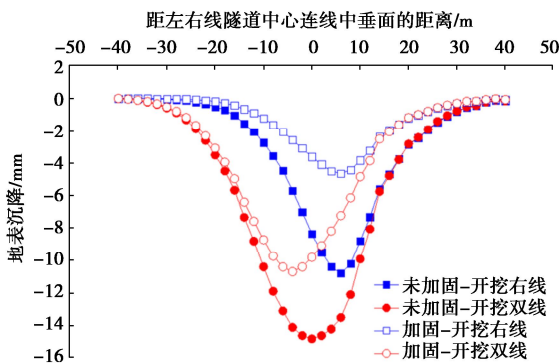


图 5 距起始开挖面 30 m 处地表横向沉降

Fig. 5 Lateral settlements of surface

由图 5 可知, 地表沉降曲线呈“U”字形, 符合“Peck”曲线分布, 并与实测数据有较好的拟合度。当右线隧道开挖完成时, 地表沉降最大值出现在右线隧道正上方, 当左线隧道开挖完成后, 地层受二次开挖扰动, 沉降值变大, 沉降槽宽度加宽, 最低点往左移动。对于距起始开挖面 30 m 处的横断面而言, 处于加固区, 受右线隧道开挖影响减小, 沉降最大值出现在左线隧道正上方附近, 注浆加固前后沉降明显变小, 最大值分别为 14.8, 10.7 mm, 降低 27.8%。

3.2 桩基变形

选取距离起始开挖面最近的一排 3 根桩进行分析, 距离隧道由近到远分别为桩基 P1, P2, P3。由图 6 可知, 双线隧道开挖完后, 由于土体的卸荷作用, 桩基发生挠曲变形, 桩基顶部向隧道方向移动, 桩基底部远离隧道移动。离隧道越远, 桩基水平位移越小, 由于上部结构的约束作用, 各单桩桩顶位移基本相同。在注浆加固后, 桩基水平位移明显减小, 桩顶最大水平位移由 2.6 mm 减少至 1.4 mm, 降低 46%。

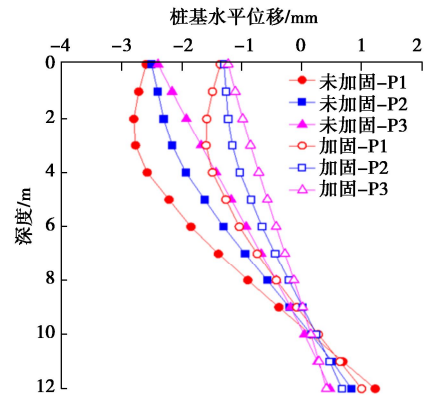


图 6 加固地层前后桩基水平位移分布曲线

Fig. 6 Distribution curves of horizontal displacement of pile foundation before and after reinforcement of strata

如图 7 所示为加固地层和未加固地层工况下左右线贯通后桩基竖向位移沿桩身埋深分布曲线。由图 7 可见: 桩身沉降沿桩身基本相同, 离隧道越远, 沉降越小, 桩基 P1, P2 沉降受隧道开挖影响较大, 在注浆加固后, 桩基沉降由 5.7 mm 减少至 2.6 mm, 降低 54%。

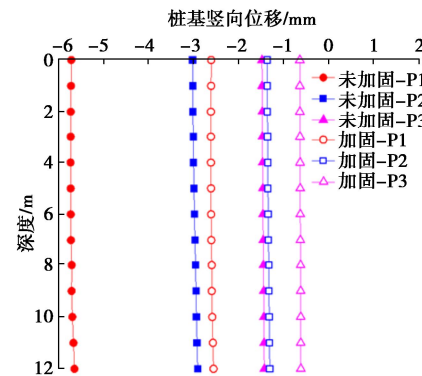


图 7 加固地层前后桩基竖向位移分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of vertical displacement of pile foundation before and after reinforcement of strata

4 结 论

针对盾构近接施工对邻近摩擦桩基的影响问题, 分别建立了隧道开挖扰动下摩擦桩基承载力解析计算模型和三维数值分析模型, 探明了隧道开挖对既有摩擦桩基承载力的影响机制, 并论证了地层加固对桩基变形控制的有效性, 得到 3 点结论。

(1) 基于摩擦桩基承载力理论和隧道开挖前后地层应力场的分析, 建立了隧道开挖影响下摩擦桩基承载力计算方法, 并定义摩擦桩基承载力影响因子分析了不同工况下隧道施工对桩基承载力的影响。

(2) 隧道施工对不同长度的摩擦桩基影响不同, 当桩端埋深与隧道轴线埋深一致时, 桩基承载力损失

最为严重,而当桩长远大于隧道埋深时其承载力损失较小;隧道施工时的地层损失率越大,桩基承载损失越严重,二者呈正相关。

(3)建立了盾构侧穿浅层摩擦桩基建筑物施工的三维有限元模型,分析了盾构侧穿桩基施工时的桩基沉降变形规律。计算结果表明在采取洞周地层加固措施后,隧道围岩注浆加固后土体变形明显变小,可有效减少临近桩基水平位移和桩身的沉降。

参考文献:

- [1] 杨敏,孙庆. 隧道开挖对邻近桩基影响的研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, **28**(1): 118-126. (YANG Min, SUN Qing. Research summary of tunnel excavation effects on adjacent pile foundation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, **28**(1): 118-126. (in Chinese))
- [2] 刘松玉,李洪江,童立元,等. 地下工程开挖卸荷既有桩基承载响应物理模拟及新进展[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(7): 1329-1338. (LIU Songyu, LI Hongjiang, TONG Liyuan, et al. Model tests and new progress of pile response due to underground excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(7): 1329-1338. (in Chinese))
- [3] 吴城,张波,雷沙沙,等. 基于FAHP-GRA法的盾构隧道穿越桥梁桩基群施工风险评估[J]. 隧道建设(中英文), 2023, **43**(增刊 2): 1-12. (WU Cheng, ZHANG Bo, LEI Shasha, et al. Construction risk assessment of shield tunnel considering bridge pile foundation group based on FAHP-GRA method[J]. Tunnel Construction, 2023, **43**(S2): 1-12. (in Chinese))
- [4] FINNO R J, LAWRENCE S A, ALLAWH N F, et al. Analysis of performance of pile groups adjacent to deep excavation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, **117**(6): 934-955.
- [5] GOH A T C, WONG K S, TEH C I, et al. Pile response adjacent to braced excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, **129**(4): 383-386.
- [6] 李雪,周顺华,王培鑫,等. 隔离桩及盾构近接施工对高铁桩基的影响分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊 1): 235-240. (LI Xue, ZHOU Shunhua, WANG Peixin, et al. Analysis of impact of isolation piles and shield tunnelling on adjacent high-speed railway pile foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S1): 235-240. (in Chinese))
- [7] LOGANATHAN N, POULOS H G, STEWART D P. Centrifuge model testing of tunnelling-induced ground and pile deformations[J]. Géotechnique, 2000, **50**(3): 283-294.
- [8] 孙庆,杨敏,冉侠,等. 隧道开挖对周围土体及桩基影响的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, **39**(7): 989-993, 1025. (SUN Qing, YANG Min, RAN Xia, et al. Test study on tunnelling-induced soil movements and pile responses[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, **39**(7): 989-993, 1025. (in Chinese))
- [9] ZHANG Z G, HUANG M S, XU C, et al. Simplified solution for tunnel-soil-pile interaction in Pasternak's foundation model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **78**: 146-158.
- [10] 程康,俞帆,梁荣柱,等. 考虑桩基剪切效应的盾构开挖对邻近桩基水平向变形分析[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 2): 178-182. (CHENG Kang, YU Fan, LIANG Rongzhu, et al. Horizontal deformation of adjacent single pile under tunneling considering shearing effect of piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S2): 178-182. (in Chinese))
- [11] 冯国辉,郑茗旺,窦炳珺,等. 盾构掘进引起的邻近群桩水平位移解析研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, **53**(4): 1371-1380. (FENG Guohui, TEY Mingwang, DOU Bingjun, et al. Analytical study of horizontal displacement of adjacent pile group caused by shield tunneling[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, **53**(4): 1371-1380. (in Chinese))
- [12] 冯国辉,郑茗旺,黄展军,等. 考虑剪切变形下隧道开挖引起邻近桩基水平向响应简化分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, **54**(1): 209-219. (FENG Guohui, TEY Mingwang, HUANG Zhanjun, et al. Simplified analysis for evaluating lateral response of adjacent pile due to tunneling considering shearing effect[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, **54**(1): 209-219. (in Chinese))
- [13] 冯国辉,周逊泉,何庆亮,等. 隔离桩对盾构掘进引起邻近高铁桩基水平位移的影响分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, **42**(4): 28-35. (FENG Guohui, ZHOU Xunquan, HE Qingliang, et al. Analysis on the influence of isolation pile on horizontal displacement of adjacent pile under high-speed railway caused by shield driving[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, **42**(4): 28-35. (in Chinese))