

# 基于 $p-y$ 曲线法分析隧道开挖条件下邻近桩基的水平反应

孙庆<sup>1,2</sup>, 杨敏<sup>2,3</sup>, 汪浩<sup>1</sup>, 周环宇<sup>1</sup>

(1. 中国建筑第三工程局有限公司技术中心, 湖北 武汉 430070; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 在分析隧道开挖条件下邻近桩基的水平反应时, 基于考虑桩土界面非线性性的  $p-y$  曲线, 引入统一极限桩土相互作用力的概念, 利用有限差分方法通过迭代求解给出隧道开挖与邻近单桩相互作用的弹塑性解答。在群桩计算中引入考虑群桩效应的  $p$ -因子( $f_m$ ), 从而得到群桩中各单桩的  $p-y$  曲线, 进而通过有限差分方法求得考虑轴力情况下群桩中各单桩的变形、转角、弯矩和剪力。同时通过已有试验和实测数据对本文方法进行验证分析, 结果表明: 本文方法与试验与实测结果得到了较好的一致性; 分析隧道开挖条件下邻近桩基的水平反应时, 群桩中的第一排桩与同位置处的单桩性质相似, 后排桩由于群桩效应的存在受到的影响将明显小于前排桩。

**关键词:** 隧道开挖;  $p-y$  曲线; 群桩;  $p$ -因子

**中图分类号:** TU473

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2012)11-2100-08

**作者简介:** 孙庆(1981-), 男, 吉林舒兰人, 博士, 主要从事岩土工程方面的施工、设计和科研工作。E-mail: sunqingking12345@163.com。

## Tunnelling-induced lateral response of adjacent piles based on $p-y$ curve

SUN Qing<sup>1,2</sup>, YANG Min<sup>2,3</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, ZHOU Huan-yu<sup>1</sup>

(1. Technical Center, China Construction Third Engineering Bureau Co., Ltd., Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In the analysis of lateral response of adjacent piles due to tunnelling, the elastic-plastic solution of tunnel-pile interaction is given based on  $p-y$  curve considering nonlinearity of pile-soil interface. The finite difference method and the concept of limiting force profile are used during calculation. For pile groups, the  $p-y$  curve of each pile in the pile groups is obtained using  $p$ -multiplier ( $f_m$ ). Then the results of pile deformation, rotation, bending moment and shear force can be given under axial force using the finite difference method. Moreover, the results obtained by the present method are compared with those from existing tests and case histories. The results show that there is a good agreement between the present computed profiles and test/field data. In the analysis of lateral response of adjacent piles due to tunnelling, the lateral response of the leading row piles in the pile groups is identical to that of the corresponding single pile. The tunnelling effects of the rear piles are lower than those of the front piles due to a positive pile group effect.

**Key words:** tunnel excavation;  $p-y$  curve; pile group;  $p$ -multiplier

## 0 引言

由于城市空间的限制和交通运输的发展, 地铁隧道大量建设和投入使用, 地铁线路的布置不可避免地要靠近已有建筑, 所以考虑地铁开挖建设过程中对附近建筑物的影响, 尤其是对建筑桩基的影响越来越显得重要。对于隧道开挖对邻近桩基影响的研究始于 20 世纪 70 年代 Morton 等<sup>[1]</sup>所做的模型试验。其后,

Ghahremannejad 等<sup>[2]</sup>、Meguid 等<sup>[3]</sup>也做了相关的 1g 模型试验。随着离心机模型试验的发展, 原型问题可以用小模型来模拟, 克服了 1g 模型的限制。许多学者作了相关的离心机试验研究, 如 Bezuijen 等<sup>[4]</sup>、Hergarden 等<sup>[5]</sup>、Loganathan 等<sup>[6]</sup>、Ran 等<sup>[7]</sup>、Ong<sup>[8]</sup>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41172248)

收稿日期: 2011-12-20

研究了黏土中隧道开挖对桩基的影响。Jacobsz 等<sup>[9]</sup>、Lee 等<sup>[10]</sup>分别研究了在密实的干砂和密实的饱和砂土中隧道开挖对桩基的影响。对于工程实例, Lee 等<sup>[11]</sup>、Selemetas 等<sup>[12]</sup>、Pang<sup>[13]</sup>、Takahashi 等<sup>[14]</sup>、Forth 等<sup>[15]</sup>分别报道了伦敦、新加坡、东京和香港等地的工程案例。除了试验与实测研究之外, 对于隧道开挖对桩基影响的理论分析方法主要包括整体分析方法和两阶段分析方法。整体分析方法主要是基于数值计算软件, 可以全面的考虑隧道开挖过程, 复杂的地层情况以及桩-土-桩的相互影响作用<sup>[16-19]</sup>。但其工作量较大, 计算时间较长, 且计算中的诸多不确定因素限制了其对施工过程的准确模拟, 难以被工程界接受。而两阶段方法计算简单, 概念明确, 在对隧道开挖引起的土体自由场变形能够很好预测的前提下, 两阶段方法可以很好地提供群桩变形的控制标准。其中较有代表性的一类方法是 Poulos 等<sup>[20-22]</sup>提出和完善的边界元法, 适用于单桩和群桩, 但该方法将桩周土体视为弹性体, 难以扩展到非线性, 而且也忽略了土体的质量, 不能有效地模拟深度效应。另一类方法是基于 Winkler 地基梁模型并利用数值手段如有限元、有限差分进行求解。Huang 等<sup>[23-24]</sup>基于 Winkler 地基梁模型和有限差分法, 考虑群桩的遮拦效应, 在引入土体屈服应力后能够近似考虑桩土作用的非线性特征。但是计算非常繁琐, 而且土体反力系数不随应力应变的改变而变化, 所以增加了相同桩基在不同地层位移作用时合理选择土体参数的难度, 结果具有一定的局限性。章荣军等<sup>[25]</sup>基于  $p-y$  曲线结合有限差分原理, 给出了竖向和水平向非线性方程组的迭代法及增量法求解过程, 但其没有考虑桩身轴力的影响, 而且  $p-y$  曲线选择单一, 并不适用于所有土体, 也没有对群桩进行分析。

本文在前人研究的基础上基于  $p-y$  曲线和有限差分方法, 引入统一极限桩土相互作用力(也称极限抗力)的概念, 通过迭代求解给出隧道开挖与邻近单桩相互作用的弹塑性解答。在群桩计算中引入 Mokwa 等<sup>[26]</sup>建议的考虑群桩效应的  $p$ -因子( $f_m$ ), 将  $y$  值对应的抗力  $p$  乘以  $f_m$  得到群桩中各排的抗力  $p$ , 从而得到群桩中各单桩的  $p-y$  曲线。进而通过有限差分方法求得考虑轴力情况下群桩中各单桩的变形、转角、弯矩和剪力。将本文方法与已有的试验与工程实测结果进行对比, 验证其适用性和合理性。

## 1 土体极限抗力的确定

土体极限抗力(极限土压力)的确定是被动桩分析的关键要素。在实际工程中, 可能影响极限抗力分布的因素如下: ①分层土体; ②表层裂隙硬黏土的存在;

③由于地下水的存在, 浅层土体发生冲刷效应; ④侧向循环荷载作用下, 桩土界面间发生裂隙; ⑤桩身的粗糙程度; ⑥桩的施工扰动对表层土体的影响, 等。然而, 已有的大部分土体极限抗力分布模式都是基于相对均质土体、有限数量、尺寸较小的桩基现场载荷试验, 所以在应用于其它土体、桩基和加载条件时必须得到进一步的验证。

基于以上原因, 采用文献[27]建议的土体极限抗力统一表达式:

$$p_u = A_L (\alpha_0 + x)^n \quad (1)$$

式中  $p_u$  为单位长度土体极限抗力;  $A_L$  为土体极限抗力分布的曲线斜率, 反应土体极限抗力的大小,  $A_L = N_g(\gamma d$  或  $s_u$  或  $q_w)d^{1-n}$ ;  $\alpha_0$  反应地面土体抗力的常数或等效土体深度;  $x$  为地面下深度;  $n$  为  $\alpha_0$  与  $x$  之和的指数, 反映土体极限抗力分布的形状;  $d$  为桩径或宽度。对于砂土、黏土和岩石, 分别采用括号中  $1d$  深度处的上覆压力  $\gamma d$ 、不排水抗剪强度  $s_u$  和岩石的单轴抗压强度  $q_w$  计算  $A_L$ 。其中,  $N_g$  为极限抗力系数。

由此可见只要确定了  $N_g$ ,  $\alpha_0$  和  $n$  三个参数就可以确定土体极限抗力分布。朱碧堂<sup>[27]</sup>针对黏土分别通过拟合有限单元上下限解的分析结果和室内试验数据, 并与桩的统一极限抗力公式的对比分析, 得出在一般条件下,  $\alpha_0=0\sim0.4$  和  $n=0.36\sim1.0$ 。在被动桩及侧向受荷桩分析中, 可选取  $n=0.7$ 。 $\alpha_0$  和  $N_g$  值可能受施工扰动、桩的连续体效应影响, 有必要通过桩的现场试验反分析。朱碧堂<sup>[27]</sup>通过对大量工程实例中实测桩基性状的反分析, 给出了黏土中  $\alpha_0$ ,  $n$  和  $N_g$  值选取的数据库, 在设计过程中可参照文献[27]进行参数选取。

## 2 地基反力模量的确定

地基反力模量的确定在被动桩的计算中十分重要。本文通过各土层处的  $p-y$  曲线来确定地基反力模量的值, 从而实现桩土之间非线性的相互作用关系。对于砂土中的  $p-y$  曲线, 选取 Reese 在 1974 年提出的计算方法, 其骨架曲线的形式参见文献[28]。对于黏土的  $p-y$  曲线, 其中 Matlock 在 1970 年提出了适用于软黏土的  $p-y$  曲线计算方法, 该方法被美国石油协会规范 (API) 采用。Reese 在 1975 年提出了适用于硬黏土的  $p-y$  曲线计算方法。Sullivan 在总结分析了 Matlock 和 Reese 的计算方法之后, 认为其结果与实测数据吻合较好, 对设计人员来说具有指导性的作用。但是土性复杂, 即使都是黏土, 由于土体参数不同, 设计人员在使用 Matlock 和 Reese 提出的  $p-y$  曲线计算方法时, 仍然面临很大困难, 尤其是对土体极限抗力  $p_u$  的选取。为此, Sullivan 在 1980 年提出了一

种计算黏土的  $p-y$  曲线统一法。本文选取 Sullivan 提出的  $p-y$  曲线统一法作为黏土中的  $p-y$  曲线计算方法, 其骨架曲线的形式参见文献[29]。

### 3 基本方程的建立与求解

#### 3.1 隧道开挖引起的土体自由场水平位移

目前关于隧道开挖引起土体自由场位移的计算方法很多, 主要包括经验法、数值方法和解析法。其中 Loganathan 等提出的基于非等量径向土体移动模式的隧道开挖引起土体自由场位移的解析解, 尽管是基于线弹性理论, 不考虑土体的非线性, 但能较准确地考虑隧道开挖断面土体收敛位移模式, 且其计算结果能够与实际情况较好地吻合。因此, 本文利用该解析解进行计算。其中隧道开挖引起的土体水平位移解为

$$u_x = -\varepsilon_0 R^2 x \left[ \frac{1}{x^2 + (H-z)^2} + \frac{3-4\mu}{x^2 + (H+z)^2} - \frac{4z(z+H)}{(x^2 + (H+z)^2)^2} \right] \cdot \exp \left\{ - \left[ \frac{1.38x^2}{(H+R)^2} + \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \right\} \quad (2)$$

式中  $\varepsilon_0$  为平均地层损失比;  $R$  为隧道外半径;  $x$  为距离隧道轴线的水平距离;  $z$  为垂直向距离, 由地表向下为正;  $H$  为隧道埋深;  $\mu$  为土体泊松比。

#### 3.2 隧道开挖条件下的被动单桩计算

为了推导隧道开挖条件下被动单桩的基本微分方程, 做如下假设: ①桩为 Winker 弹性地基梁; ②考虑桩周土体屈服的影响, 土体为弹塑性连续变形体; ③桩土间相互作用通过弹簧模拟, 桩土不发生分离, 满足变形协调条件。由侧向受荷桩基本微分方程, 可得考虑轴力情况下, 土体位移对桩基影响的控制微分方程可以表示为

$$\frac{d^4 y_p(z)}{dz^4} + \delta^2 \frac{d^2 y_p(z)}{dz^2} + 4\zeta^4 y_p(z) = 4\zeta^4 S_{gfy}(z) \quad (3)$$

式中  $\delta = \sqrt{P/E_p I_p}$ ,  $P$  为桩身轴力, 可由桩顶竖向荷载和土体竖向位移引起, 具体求解方法可参考文献[23]。 $E_p$ ,  $I_p$  分别为桩基弹性模量和惯性矩;  $\zeta = \sqrt{k_y/4E_p I_p}$ ,  $k_y$  为地基反力模量;  $y_p$  为深度  $z$  处桩身侧向位移,  $S_{gfy}$  是隧道开挖引起的土体自由场水平位移, 由公式 (2) 确定。

对于非均质地基, 桩侧土体的地基反力模量并非常数, 微分方程 (3) 无法得到精确的解析解, 采用有限差分法进行求解。将桩长分为  $n$  等份, 每段长为  $h$ , 各节点编号为  $0 \sim n$ 。桩顶和桩端各设 2 个虚拟结点  $-2$ ,  $-1$  和  $n+1$ ,  $n+2$ 。利用中心差分公式对节点  $i$  的控制微分方程式 (3) 写成差分格式为

$$y_{p,i-2} - (4 - \delta_i^2 h^2) y_{p,i-1} + (6 + 4\zeta_i^4 h^4 - 2\delta_i^2 h^2) y_{p,i} -$$

$$(4 - \delta_i^2 h^2) y_{p,i+1} + y_{p,i+2} = 4\zeta_i^4 h^4 S_{gfy,i} \quad (4)$$

对于桩顶自由的摩擦桩且作用有外力  $H_0$  和弯矩  $M_0$  时, 可知桩顶边界条件为剪力  $V(0) = H_0$ , 弯矩  $M(0) = M_0$ , 即

$$y_{p,-2} - 2y_{p,-1} + 2y_{p,1} - y_{p,2} = -\frac{2H_0 h^3}{E_p I_p} \quad (5)$$

$$2y_{p,-1} - 2y_{p,0} + y_{p,1} = \frac{M_0 h^2}{E_p I_p} \quad (6)$$

桩端边界条件为剪力  $V(L) = 0$ , 弯矩  $M(L) = 0$ , 即

$$y_{p,n+2} - 2y_{p,n+1} + 2y_{p,n-1} - y_{p,n-2} = 0 \quad (7)$$

$$y_{p,n+1} - 2y_{p,n} + y_{p,n-1} = 0 \quad (8)$$

由 4 个边界条件方程与原有的  $n+1$  个方程相结合, 消去虚拟的  $-2$ ,  $-1$ ,  $n+1$ ,  $n+2$  节点变量, 可得考虑轴力情况下隧道开挖引起单桩水平变形的差分方程为

$$\{y_p\} = [K_{ppy}]^{-1} ([K_{gfy}] \{S_{gfy}\} + \{F_{py}\}) \quad (9)$$

式中  $\{y_p\}$  为桩身水平位移列向量;  $[K_{ppy}]$  为桩身水平刚度矩阵;  $[K_{gfy}]$  为土体水平向刚度矩阵;  $\{S_{gfy}\}$  为自由场土体水平位移列向量;  $\{F_{py}\}$  为水平向外荷载列向量。都可由式 (4) ~ (8) 联立求得, 详细求解过程不在此赘述。

其他边界条件的桩基与桩顶自由摩擦桩的求解相似, 这里不再一一介绍。

#### 3.3 隧道开挖条件下的群桩计算

由于桩-土-桩之间的相互作用 (一般称为“遮拦效应”), 在相同的桩头变形条件下, 群桩中各单桩的土体抗力比相应的独立单桩的土体抗力小, 极限状态时各单桩的桩身侧移也比独立单桩的桩身侧移大。本文群桩的计算思路本质上与单桩的计算相同, 只是在  $p-y$  曲线中引入了考虑群桩效应的  $p$ -因子 ( $f_m$ )。隧道开挖过程中邻近群桩的位置简化为如图 1 所示。

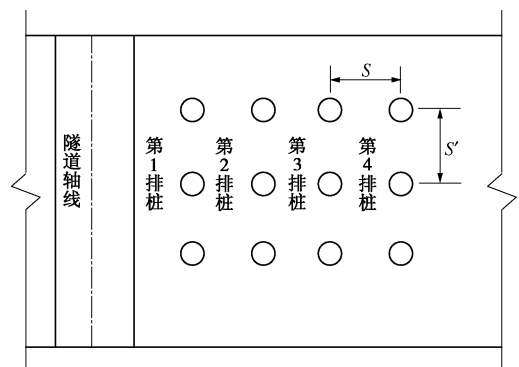


图 1 群桩相对隧道的位置简化图

Fig. 1 Sketch of pile group arrangement relative to tunnel

考虑群桩中每个单桩土体极限抗力的衰减采用 Mokwa 等<sup>[26]</sup>建议的  $p$ -因子 ( $f_m$ ), 即在单桩  $p-y$  曲线

基础上, 对于相同的侧向变形  $y$ , 将抗力  $p$  乘以折减系数  $f_m$ 。 $f_m$  的定义如下: 在单桩  $p-y$  曲线中, 将  $y$  值对应的抗力  $p$  乘以  $f_m$  得到群桩中各排的抗力  $p$ , 从而得到群桩中各单桩的  $p-y$  曲线。图 2 给出了 Mokwa 等<sup>[26]</sup>对 29 组独立的群桩试验研究进行反分析得到的  $p$ -因子( $f_m$ ), 其中  $S$  为桩排的间距,  $D$  为群桩中各单桩的等效直径。

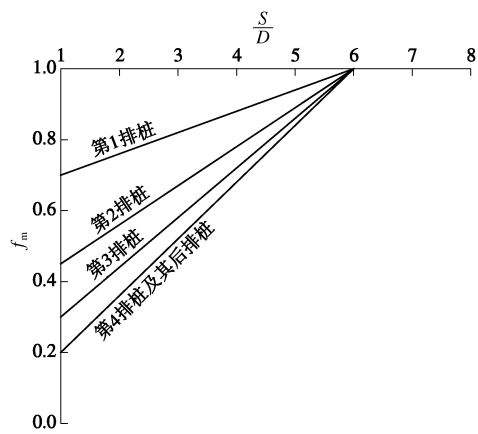


图 2  $p$ -因子( $f_m$ )的建议值

Fig. 2 Proposed curves of  $p$ -multiplier

下面对  $p$ -因子( $f_m$ )的用法及注意事项简要说明如下: ① $p$ -因子( $f_m$ )首先是由 Brown 等根据群桩荷载试验提出的经验折减系数, 因为  $p$ -因子( $f_m$ )是从试验中得出, 所以其中包括了弹性影响和遮拦效应(当群桩中桩距较小时)的影响, 不需要单独考虑弹性理论方法中  $y$ -因子的影响。②Prakash、Saran、Franke、Lieng、Rao 等分别通过试验证实当桩排间距  $S$  超过 6 倍桩径, 并且各行桩间距  $S'$  超过 3 倍桩径时, 群桩效应很小, 可以忽略, 此时群桩中的各基桩按照单桩的算法进行计算。③Brown 等、Morrison 等、McVay 等、Ruesta 等、Rollins 等通过试验都发现群桩中在同一列桩排中的各基桩可以取相同的  $p$ -因子( $f_m$ )。但是 Franke 通过试验指出, 当  $S' \leq 3D$  时, 第一排桩中角桩的弯矩和剪力最后要通过乘以表 1 中的相应数值进行修正。④Brown 等通过试验发现  $f_m$  随深度的变化很小, 而且在反分析中采用的是平均乘子对  $p-y$  曲线进行不断修正, 直到计算曲线与实测曲线吻合为止, 所以反分析得到的  $f_m$  实际上已暗含了深度的影响, 所以假设  $f_m$  沿深度方向不变是合理的。⑤通过足尺试验, 离心机试验以及 1g 模型试验可知  $f_m$  主要取决于桩排位置和桩排间距。前排桩要比后排桩分担更多的荷载, 所以其乘子也更大, 图 2 给出了  $f_m$  与桩排位置和桩排间距之间的关系。⑥McVay 等通过试验指出对于第 4 排、第 5 排及以后的桩排中的桩基  $f_m$  可以取相同的值。

表 1 群桩第一排桩中角桩的弯矩和剪力修正系数  
Table 1 Correction factors of bending moments and shear forces computed for leading row corner piles

群桩中各行桩间距 $S'$	第一排桩角桩修正系数
$3D$	1.0
$2D$	1.2
$1D$	1.6

3.4 求解过程

现以群桩中的单桩为例简要介绍一下迭代求解过程: ①输入桩基的基本参数, 如桩长、桩径和桩基弹性模量; ②输入土体参数  $n$ ,  $\alpha_0$  和  $N_g$ , 通过土体极限抗力统一表达式确定土体的极限抗力; ③沿桩身长度方向假设一组桩侧土体弹簧侧向刚度  $k_{y,i}$ , 由式 (2) 得到土体自由场水平位移; 由式 (9) 计算桩身的水平位移  $y_{p,i}$ ; ④根据  $y_{p,i}$  求出  $p-y$  曲线上对应的  $p_i$  值, 要根据上述  $p$ -因子( $f_m$ )的取值方法及注意事项选取合适的  $f_m$  与  $p_i$  值相乘, 从而得到群桩中各单桩的抗力  $p_i$ 。根据  $k_{y,i}=p_i/y_{p,i}$  可重新得到一组桩侧土体弹簧侧向刚度  $k'_{y,i}$ , 进而得到新的桩身水平位移  $y'_{p,i}$ ; ⑤比较  $y'_{p,i}$  与  $y_{p,i}$ , 如满足精度要求, 则停止计算, 求得的  $y_{p,i}$  即为实际桩身水平位移; ⑥如  $y'_{p,i}$  与  $y_{p,i}$  的差值不满足精度要求, 将  $y_{p,i}$  用  $y'_{p,i}$  代替, 重复步骤④和⑤, 直到满足精度要求为止。⑦求得桩身水平位移之后, 可根据差分法进一步得到桩身各节点的转角、弯距和剪力。

4 算例分析

4.1 Ong 的离心机试验

Ong<sup>[8]</sup>采用离心机模型试验分析了土体损失率为 3% 时, 黏土中隧道开挖对单桩及群桩内力变形的瞬时和长期影响, 如图 3 所示, 图中尺寸为离心机试验模拟的原型尺寸, 其中群桩为  $2 \times 1$  的承台群桩。土体为马来西亚高岭黏土, 其不排水抗剪强度  $s_u$  由文献[8]的建议与深度  $z$  的关系为  $s_u=1.5z$ 。根据文献[27]的建议, 可取土体参数  $n=0.7$ ,  $\alpha_0=0.1$ ,  $N_g=0.8$ 。模型桩为外边长 9.53 mm, 内边长 6.35 mm 的方形空心铝管, 为了防止水和泥土引起应变片短路而无法正常工作, 2 根桩外均涂有一层环氧树脂保护。桩横截面的最终边长为 12.6 mm, 因此 100g 时所模拟的原型桩的横截面边长为 1.26 m, 根据面积相等将桩等效为直径 1.228 m 的圆形桩。桩长为 25 m, 入土深度 22 m, 抗弯刚度  $EI$  为  $3.97 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ , 群桩试验中所用承台为 25 mm 厚, 100g 时模拟的原型承台为 2.5 m 厚。

图 4 (a)、(b) 分别为隧道开挖引起的距离隧道中心线 6 m 和 9 m 处的自由场土体位移。从图中可以看出由式 (2) 求得的 Loganathan 解与离心机试验结果相差较大, 而土体位移的计算结果对求解桩身内力和变形的影响较大。所以为了更好地模拟试验结果,

这里采用 3 次多项式的拟合曲线作为土体自由场的水平位移。在计算群桩时，由于试验中没有给出距离隧道中心线 10 m 处的土体自由场水平位移，所以这里用 9 m 处的土体水平位移近似代替。

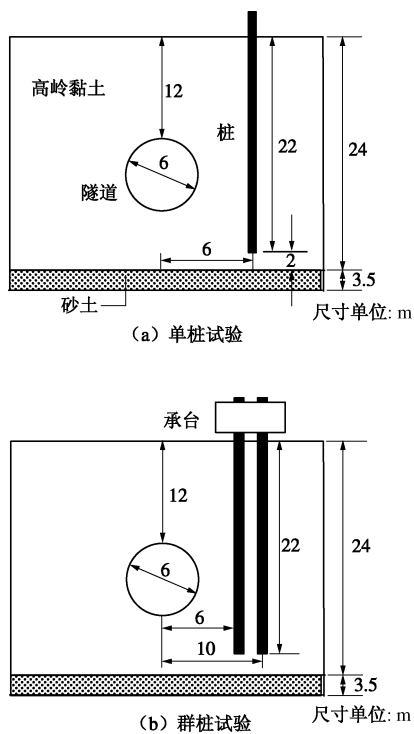


图 3 试验简图  
Fig. 3 Sketch of tests

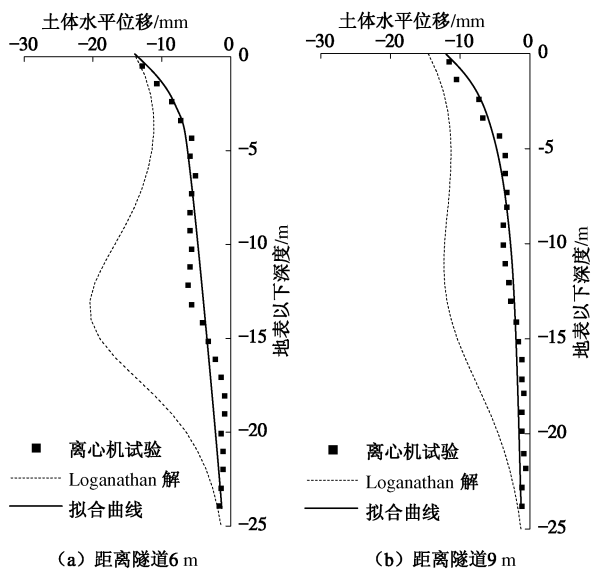


图 4 隧道开挖引起的土体自由场水平位移

Fig. 4 Tunnelling-induced horizontal soil movements

图 5,6 为采用本文方法计算得到的单桩和群桩中各单桩的弯矩与 Ong<sup>[8]</sup>的离心机试验结果比较,弯矩分布形状与试验结果取得了较好的一致性。无论是单桩还是群桩,桩身弯矩的最大值都出现在隧道中心

线附近。由于土体位移的模拟精度还不能完全反映试验中的土体位移,所以计算弯矩与试验弯矩还存在差别,但总体结果相差不大。由于计算中没有完全反映承台的约束条件,所以群桩计算中在桩顶附近的弯矩计算值与试验值有所差别。无论是试验值还是计算值,群桩中前排桩的弯矩值与同一位置处的单桩弯矩值相差不大,而群桩中后排桩的弯矩值则要比前排桩的弯矩值小。这说明在分析隧道开挖对邻近桩基影响时,群桩中的前排桩与同位置处的单桩性质相似,而由于群桩效应的存在,后排桩所受到的影响将明显小于前排桩。

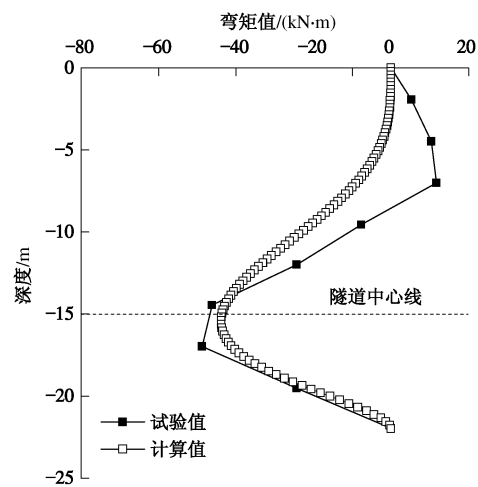


图 5 单桩弯矩比较

Fig. 5 Comparison of bending moment of a single pile

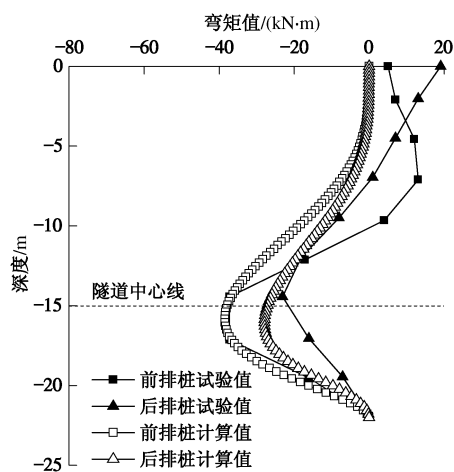


图 6 群桩弯矩比较

Fig. 6 Comparison of bending moment of pile group

4.2 工程实例

Pang<sup>[13]</sup>报道了新加坡地铁 704 工程段的一个隧道穿越高速公路高架桥墩桩基础的工程实例,其中包括北线和南线两条隧道,隧道施工前建设完成了一个 2 × 2 承台群桩的高速公路高架桥墩,并在其中两根桩

内各埋设了 4 组应变片。隧道施工时南线隧道先经过桥墩, 40 d 之后北线隧道经过该桥墩。图 7 为隧道及高架桥桩基布置图, 隧道直径 6.3 m, 埋深 21 m, 群桩由 4 根桩组成, 桩长 62 m, 桩径 1.2 m, 桩身弹性模量为 28 GPa。在桩长范围内可由文献[13]得出土体的不排水抗剪强度与深度的近似关系为  $s_u=2.4z$ 。根据文献[27]的建议, 可取土体参数  $n=0.7$ ,  $\alpha_0=0.1$ ,  $N_g=0.8$ 。根据实测南线隧道开挖时引起的地表最大沉降为 17.5 mm, 北线隧道开挖时引起的地表最大附加沉降为 21 mm, 可由 Peck<sup>[30]</sup>的方法计算得到相对应的土体损失率分别为 1.38% 和 1.67%。

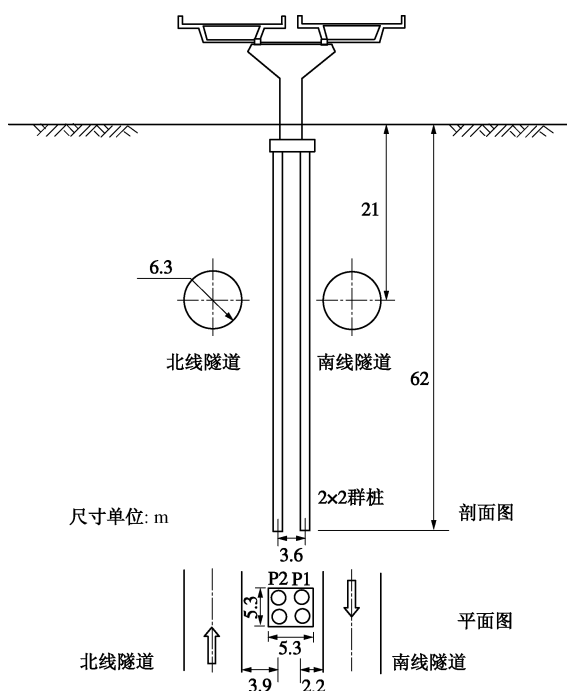


图 7 隧道和桩位布置图

Fig. 7 Layout of tunnel and pile groups

图 8, 9 为本文方法计算得到的隧道开挖引起的高架桥桩基弯矩与实测值的对比分析, 计算值与实测值吻合较好。当南线隧道开挖后引起前排桩 (P1) 的桩身弯矩要大于后排桩 (P2) 的桩身弯矩, 一方面由于群桩效应的存在, 另一方面作用在后排桩的土体位移较小, 后排桩所受到的影响明显小于前排桩。弯矩的最大值都出现在隧道中心线附近, 这些都与 Ong<sup>[8]</sup>的离心机试验结果相一致。当北线隧道开挖后 P1 的桩身弯矩有所减少, 这主要是由于对于 P1, 南线隧道和北线隧道开挖引起的水平土体位移方向相反。但弯矩值减少的幅度不大, 主要是因为 P1 距离北线隧道的距离达到 10.65 m, 所受到开挖引起的土体位移影响较小。而 P2 的弯矩变化较大, 因为 P2 距离北线隧道为 7.05 m, 所受到开挖引起的土体位移影响较大。

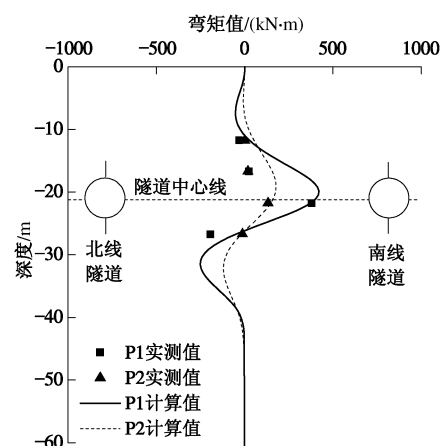


图 8 南线隧道开挖引起的桩身弯矩

Fig. 8 Southbound tunnelling-induced bending moment

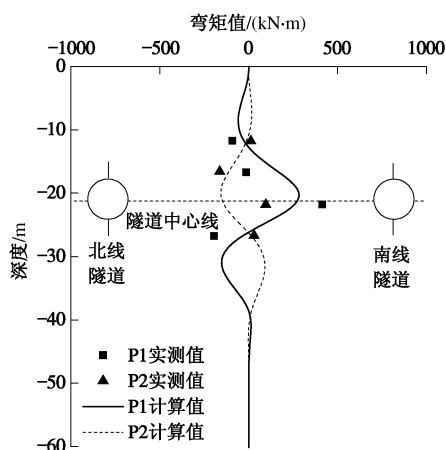


图 9 南北线隧道开挖引起的桩身弯矩

Fig. 9 Southbound and northbound tunnelling-induced bending moment

## 5 结 论

本文在基于  $p-y$  曲线和有限差分方法, 引入统一极限桩土相互作用力的概念, 通过迭代求解给出了隧道开挖对邻近单桩水平向影响的弹塑性解答。在群桩计算中引入 Mokwa 等<sup>[26]</sup>建议的考虑群桩效应的  $p$ -因子 ( $f_m$ ), 从而得到群桩中各单桩的  $p-y$  曲线。进而通过有限差分方法求得可考虑轴力情况下群桩中各单桩的变形、转角、弯矩和剪力。将本文方法与已有的试验与工程实测结果进行对比分析, 得到如下结论:

(1) 通过结合  $p-y$  曲线进行计算, 本文实现了桩土之间的非线性分析, 并通过引入  $p$ -因子 ( $f_m$ ) 大大简化了群桩计算, 虽然部分计算结果与试验与实测结果有所差别, 但总的来说本文方法与试验与实测结果得到了较好的一致性。

(2) 在理论计算与试验和实测进行对比分析中, 无论是单桩还是群桩, 桩身弯矩的最大值都出现在隧

道中心线附近。

(3) 目前计算中没有完全反应承台的约束条件, 所以群桩计算中在桩顶附近的弯矩计算值与试验值有所差别。

(4) 在分析隧道开挖条件下邻近桩基的水平反应时, 群桩中的第一排桩与同位置处的单桩性质相似, 而由于群桩效应的存在, 后排桩所受到的影响将明显小于前排桩。

#### 参考文献:

- [1] MORTON J D, KING K H. Effects of tunneling on the bearing capacity and settlement of piled foundations[C]// Proceedings of Tunneling 79, IMM, London, 1979: 57 - 68.
- [2] GHAREMANNEJAD B, SURJADINATA J, POON B, et al. Effects of tunneling on model pile foundations[C]// 6th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. London, 2006: 1157 - 1162.
- [3] MEGUID M A, MATTAR J. Investigation of tunnel-soil-pile interaction in cohesive soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2009, **135**(7): 973 - 979.
- [4] BEZUIJE A, SCHRIER J V. The influence of a bored tunnel on pile foundations[C]// CENTRIFUGE 94. Singapore, 1994: 681 - 686.
- [5] HERGARDEN H J A M, POEL J T, SCHRIER J S. Ground movements due to tunneling: Influence on pile foundations[C]// 2nd International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Rotterdam. Balkema, 1996: 519 - 524.
- [6] LOGANATHAN N, POULOS H G, STEWART D P. Centrifuge model testing of tunnelling-induced ground and pile deformation[J]. Géotechnique, 2000, **50**(3): 293 - 294.
- [7] RAN X, LEUNG C F, CHOW Y K. Centrifuge modelling of tunnel-pile interaction in clay[C]// Proceedings of Underground Singapore. Singapore, 2003: 256 - 263.
- [8] ONG C. W. Centrifuge model study of tunnel-soil-pile interaction in soft clay[D]. Singapore: National University of Singapore, 2009.
- [9] JACOBSZ S W, STANDING J R, MAIR R J, et al. Centrifuge modelling of tunnelling near driven piles[J]. Soils and Foundations, 2004, **44**(1): 49 - 56.
- [10] LEE C J, CHIANG K H. Responses of single piles to tunneling-induced soil movements in sandy ground[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**(10): 1224 - 1241.
- [11] LEE R G, TURNER A J, WHITWORTH L J. Deformations caused by tunneling beneath a piled structure[C]// Proc XIII Int Conf Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, India, 1994: 873 - 878.
- [12] SELEMETAS D, STANDING J R, MAIR R J. The response of full-scale piles to tunneling[C]// 5th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, 2005: 763 - 769.
- [13] PANG C H. The effects of tunnel construction on nearby pile foundation[D]. Singapore: National University of Singapore, 2006.
- [14] TAKAHASHI K, FUKAZAWA N, HAGIWARA T, et al. Observational control of slurry shield tunnels with super close spacing under the nearby bridge abutments loads[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, **19**: 390.
- [15] FORTH R A, THORLEY C B B. Hong Kong island line-predictions and performance[C]// 2nd International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Rotterdam. Balkema, 1996: 677 - 682.
- [16] VERMEER P A, BONNIER P G. Pile settlements due to tunneling[C]// 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Florence. Italy, 1991: 869 - 872.
- [17] MROUEH H, SHAHROUR I. Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunneling and pile foundations[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, **26**: 217 - 230.
- [18] LEE G T K, NG C W W. Effects of advancing open face tunneling on an existing loaded pile[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(2): 193 - 201.
- [19] CHENG C Y, DASARI G R, CHOW Y K, et al. Finite element analysis of tunnel-soil-pile interaction using displacement-controlled model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, **22**(4): 450 - 466.
- [20] POULOS H G, CHEN L T. Pile response due to excavation-induced lateral soil movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, **123**(2): 94 - 99.
- [21] LOGANATHAN N, POULOS H G, XU K J. Ground and pile-group response due to tunnelling[J]. Soils and Foundations, 2001, **41**(1): 57 - 67.

- [22] CHEN L T, POULOS H G, LOGANATHAN N. Pile response caused by tunneling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1999, **125**(3): 207 - 215.
- [23] HUANG M S, ZHANG C R, LI Z. A simplified analysis method for the influence of tunneling on grouped piles[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, **24**(4): 410 - 422.
- [24] 黄茂松, 张陈蓉, 李 早. 开挖条件下非均质地基中被动群桩水平反应分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(7): 1017 - 1023. (HUANG Mao-song, ZHANG Chen-rong, LI Zao. Lateral response of passive pile groups due to excavation induced soil movement in stratified soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(7): 1017 - 1023. (in Chinese))
- [25] 章荣军, 郑俊杰, 蒲诃夫, 等. 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 Rong-jun, ZHENG Jun-jie, PU He-fu, et al. Response of adjacent single pile due to tunneling based on  $p-y$  curve[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(12): 1837 - 1845. (in Chinese))
- [26] MOKWA R L, DUNCAN J M. Laterally Loaded Pile Group Effects and  $p-y$  Multipliers[J]. ASCE Geotechnical Special Publication, 2001, **113**: 728 - 742.
- [27] 朱碧堂. 土体的极限抗力与侧向受荷桩性状[D]. 上海: 同济大学, 2005. (ZHU Bi-tang. Limiting force profile and response of laterally loaded piles[D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese))
- [28] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Analysis of laterally loaded piles in sand[C]// 6<sup>th</sup> Offshore Technology Conference OTC 2080. Houston, Texas, 1974, **2**: 473 - 483.
- [29] SULLIVAN W R, REESE L C, FENSKE C W. Unified method for analysis of laterally loaded piles in clay[C]// Numerical Methods in Offshore Piling. London, 1980: 135 - 146.
- [30] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proc 7<sup>th</sup> International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, 1969, State of the Art Volume, 225 - 290.

### 请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发刊。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续 4 版确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中排列首位; 本刊被收录为国家科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊), 并被评为“百种中国杰出学术期刊”; 本刊被“中国科技论文与引文数据库”、“中国期刊全文数据库”和“中文科技期刊数据库”

等多个国内重要的数据库收录, 并可在《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》以及本刊网站全文检索; 本刊被美国工程索引 Ei Compendex 等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: (210024) 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 联系电话: (025) 85829534, 85829553; 传真: (025) 85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)