

隧道施工对临近桩基影响的三维数值分析

杨 超¹, 黄茂松¹, 刘明蕴²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海应翔建筑设计有限公司, 上海 200233)

摘要: 通过与两阶段分析方法的对比, 表明所采用的三维整体数值分析方法能够有效地模拟隧道施工对临近桩基的影响。在此基础上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。计算结果表明: 隧道施工对临近桩基影响显著, 桩体的变形和受力状态不仅与隧道施工工况有关, 而且也与桩基的位置、长度和数目紧密相关; 桩基的存在改善局部区域内土体的受力状态, 但也加剧此处土体的变形; 桩体沿隧道轴线方向的弯矩数值较大且分布曲折, 长桩尤为明显; 群桩可以显著提高隧道施工过程中桩体的受力性能。

关键词: 隧道工程; 桩基础; 黏性土; 数值分析

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 2601 - 07

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL ANALYSIS OF EFFECT OF TUNNEL CONSTRUCTION ON ADJACENT PILE FOUNDATION

YANG Chao¹, HUANG Maosong¹, LIU Mingyun²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Yingxiang Architectural Design Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: Three-dimensional numerical analysis is used to simulate the influence of tunnel construction on adjacent pile foundation; and its comparison with two-stage method is carried out. Results show that this numerical program is able to simulate effectively the interaction effects between tunnel and piles. Based on these, a 3D elastoplastic model is established to study the whole interaction among pile, soil and tunnel in the cohesive foundation with actual tunnel construction steps. The outcome of numerical simulations shows that tunnel construction imposes a significant effect on adjacent pile foundation. The deformation and stress states of piles are closely dependent on not only the tunneling step, but also the position, length and quantity of piles. The presence of piles not only improves the stress state of the neighboring soil greatly but also aggravates the soil deformation. The pile bending moment along the tunnel axis is fairly large in value and complicated in distribution, especially for the long pile. The pile group is able to increase the stress performance of piles due to tunnel construction obviously.

Key words: tunnelling engineering; pile foundation; cohesive soil; numerical analysis

1 引言

城市地下空间的建设对周边环境的影响与控制

技术越来越引起岩土工程界的关注, 其中包括隧道施工对临近建筑物的影响。而如何准确预测隧道施工对临近桩基的影响, 并有效预防附近临近建筑物或公共设施产生过大沉降、倾斜以至开裂, 已是当

收稿日期: 2006 - 06 - 23; **修回日期:** 2006 - 11 - 30

作者简介: 杨 超(1979 -), 男, 2005 年毕业于河南理工大学工程力学专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程数值计算及本构理论等方面的研究工作。E-mail: chao806@sina.com

前隧道设计、施工中亟待解决的问题。

关于隧道与桩相互作用的研究, R. J. Mair^[1]进行了现场跟踪监测; A. Bezuijen 和 J. van der Schrier^[2]、H. J. A. M. Hergarden 等^[3]、N. Loganathan 等^[4]和 S. W. Jacobsz 等^[5]进行了大量的离心机模型试验, 发现隧道施工会改变临近桩基的受力性态。在两阶段简化方法方面, L. T. Chen 等^[6]、N. Loganathan 等^[7]以及黄茂松等^[8]采用该法分析了隧道施工对桩基的影响。在整体数值计算方法方面, H. Mroueh 和 I. Shahrouh^[9]、G. T. K. Lee 和 C.W.W. Ng^[10]采用该类方法分析了隧道与桩基相互作用的基本规律; 芮勇勤等^[11]、张宏博等^[12]针对具体工程实例利用各自的数值方法研究了桩隧间的施工力学行为。但总体来说, 关于隧道施工对桩基的三维受力特征影响的研究依然很少。本文采用连续体的快速 Lagrangian 分析法, 利用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型, 从整体上研究桩-土-隧道三者间的作用特征, 着重分析不同施工工况下单桩、群桩的位移及内力变化规律, 得出相应的结论, 可为工程实践提供良好的技术支持。

2 三维整体数值分析方法与验证

尽管两阶段分析方法易于被工程界所接受, 但整体数值计算方法能够模拟隧道施工的实际工况, 可以为合理的施工工艺提供参考依据。本文首先将整体数值计算方法与两阶段简化方法的计算结果进行对比, 然后再进行更为复杂的三维分析。三维整体分析方法采用大型商业化有限差分软件。

在两阶段分析方法^[13, 14]中, 首先要计算隧道开挖引起的土体自由位移场, 然后应用数值方法将土体位移施加于桩, 分析桩基位移和内力。N. Loganathan 等^[7]采用等效平均不排水地层损失比 ε_0 来衡量隧道断面形状的改变, 其定义(如图 1(a)所示)为

$$\varepsilon_0 = \frac{\pi \left(R + \frac{g}{2} \right)^2 - \pi R^2}{\pi R^2} = \frac{4gR + g^2}{4R^2} \quad (1)$$

式中: g 为隧道半径缩减间隙系数, R 为隧道半径。

为保证本文计算结果与两阶段简化方法计算结果的可比性, 本文计算中也考虑等效平均不排水地层损失比 ε_0 , 思路如下:

(1) 根据下式反演计算与等效平均地层损失比

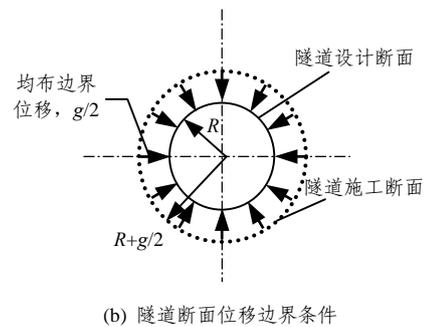
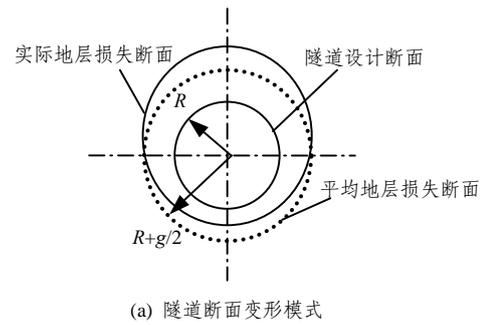


图 1 计算模型中边界条件与 ε_0 的关系

Fig.1 Relationship between boundary conditions and ε_0 in computational model

ε_0 对应的间隙系数 g :

$$g = 2R \left(\sqrt{1 + \varepsilon_0} - 1 \right) \quad (2)$$

(2) 以半径 $(R + g/2)$ 模拟实际隧道施工开挖尺寸;

(3) 沿隧道边缘施加面向隧道断面轴心方向的边界位移 $g/2$, 模拟实际的施工过程效应(如图 1(b)所示)。

采用 N. Loganathan 等^[7]采用的算例。隧道埋深 $H = 20$ m, 直径 $D = 6.0$ m; 桩长 $L_p = 25$ m, 直径 $B_p = 0.8$ m, 单桩与隧道纵轴线相距 $\Delta_{Tp} = 4.5$ m。假设土体为各向同性均匀弹性体, 弹性模量 $E_s = 24$ MPa, 泊松比 $\nu_s = 0.3$; 桩体为各向同性弹性体, 弹性模量 $E_p = 30$ GPa, 泊松比 $\nu_p = 0.25$; 未考虑施工工况和支护混凝土垫层, 平均不排水地层损失比 $\varepsilon_0 = 1.0\%$ 。桩与隧道间的相对位置如图 2 所示。

图 3 所示为采用本文计算模型得到的单桩受隧道开挖影响产生的内力、位移与 GEPAN 程序^[7]以及李 早和黄茂松^[14]所得解析解的比较。由图中可以看出, 采用本文计算模型所得的单桩内力与 GEPAN 程序和李 早和黄茂松^[14]所得解析解规律基本一致; 位移整体计算结果比 GEPAN 程序和李 早和黄茂松^[14]所得解析解略微偏小, 但分布规律十分相似。由于本文计算方法是一种整体分析方法, 而 GEPAN 程序以及李 早和黄茂松^[14]所采用的解析

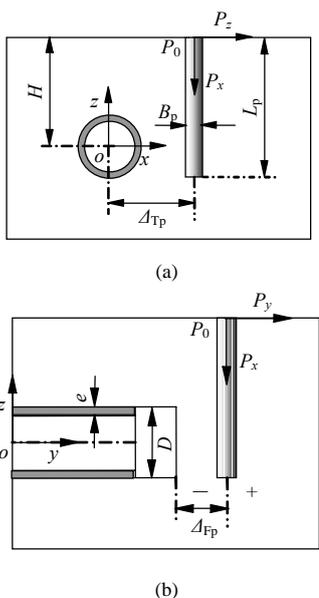


图 2 桩与隧道的相对位置
Fig.2 Relative position of pile and tunnel

方法则属于两阶段分析方法, 两者必然会有一定差异。此外, 通过群桩的计算对比同样发现, 本文计算模型能够有效地计算隧道施工对桩基的影响, 具有较好的可行性。

下文将利用本文采用的计算方法从施工工况、桩长、桩体布局等不同角度展开对桩隧相互作用机制的研究分析。

3 桩隧相互作用计算模型的构建

3.1 模型的物理力学参数

本文主要研究隧道施工对黏性土地基中桩基础力学行为的影响程度。如图 2 所示, 隧道埋深 $H = 2.5D$, 直径 $D = 7.5 \text{ m}$, 其支护垫层的厚度 $e = 0.75 \text{ m}$ 。桩的截面形状为边长 $B_p = 1 \text{ m}$ 的正方形, 桩长为 $L_p = 3D$; 单桩与隧道纵轴线相距 $\Delta_{Tp} = 1D$ 。土体、隧道垫层、桩的力学参数见表 1, 土体黏聚力为 5 kPa , 内摩擦角和剪胀角分别为 27° 和 5° 。

3.2 模型的特点、边界条件及强度准则

综合考虑计算精度和计算效率, 桩隧相互作用分析模型在 x, y, z 三个方向的尺寸分别为 $12.0D, 8.0D, 5.5D$, 而隧道、垫层、桩均取实际几何尺寸。边界条件采用位移边界条件。桩顶受到上部结构传递的轴向荷载为 $P_0 = 1\,000 \text{ kN}$ 。计算采用弹塑性本构模型, 服从 Mohr-Coulomb 屈服准则。

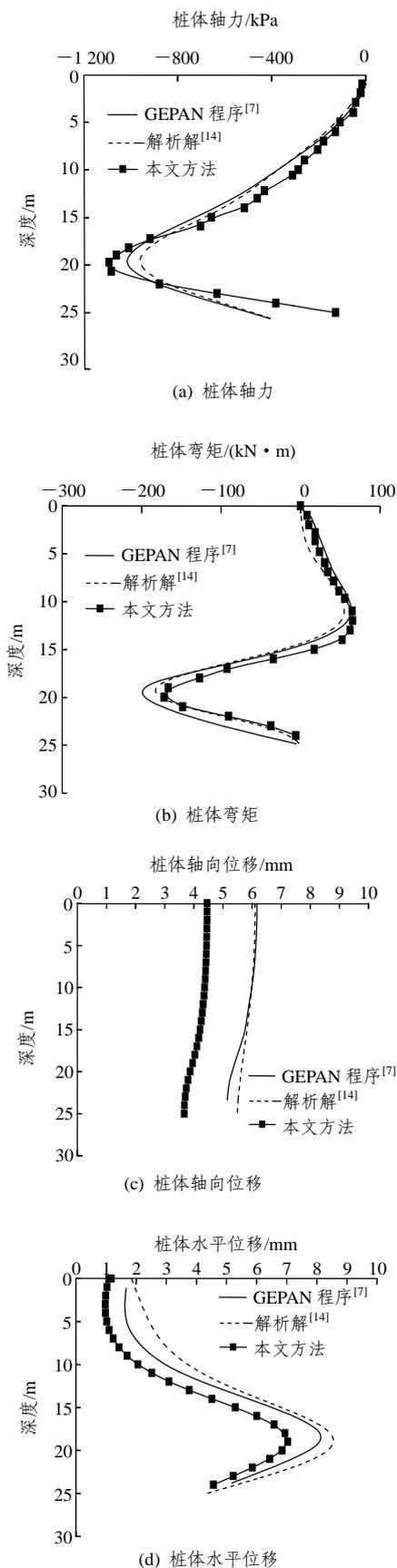


图 3 隧道附近单桩的计算结果比较
Fig.3 Comparison of results of single piles adjacent to tunnel

表1 材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of materials

材料	弹性模量/MPa	泊松比
黏性土	30	0.30
支护垫层	35 000	0.25
桩基	23 500	0.25

4 桩隧相互作用的参数分析

4.1 隧道整体变形分析

隧道贯通时土体的变形曲线如图4所示。隧道施工对地表及隧道周围土体造成了较大范围的影响，主要表现为上覆土层出现较大程度的沉降，隧道底部土体向上隆起，最大的土体变形出现在隧道顶部。由图4(a)可知，桩体的存在对其周围土体变形影响较大，施工过程中桩体的下沉引起周围土体的附加沉降，竖向变形明显增大。从图4(b)可以看出，沿隧道施工前进方向，地表土体的最大沉降主要发生在施工前期地表段，而后期地表的变形较小。隧道周围土体存在波浪状的变形，这表明在不同施工工况中土体应力都得到一定程度的释放。

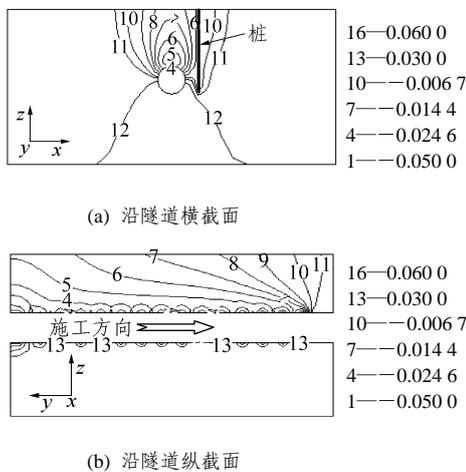


图4 隧道贯通时土体变形曲线(单位: m)

Fig.4 Soil deformation curves at the end of tunneling(unit: m)

图5为距工作面3D处隧道横截面地表的土体沉降曲线，地表的最大沉降量约为0.0007D。通过将本文所得的曲线与H. Mroueh和I. Shahrou[9]有限元法以及N. Loganathan和H. G. Poulos[15]解析法的计算结果进行对比也可以看到，利用本文的计算程序模拟实际工程具有较好的可靠性。

4.2 隧道施工对单桩的影响

4.2.1 桩体变形分析

如图6所示，隧道施工对桩体的变形发展影响

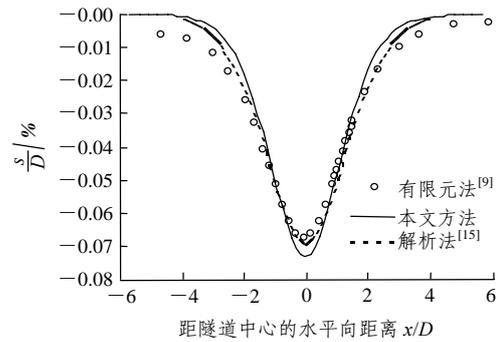


图5 隧道施工引发地表沉降曲线

Fig.5 Settlement curves of ground surface due to tunnel construction

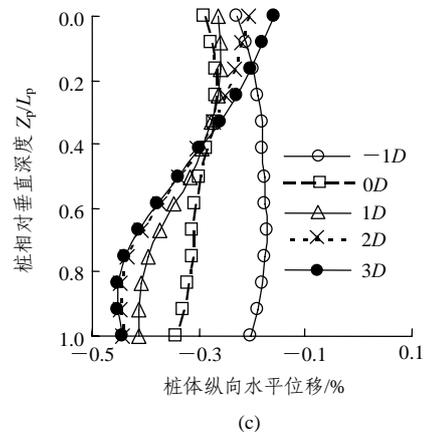
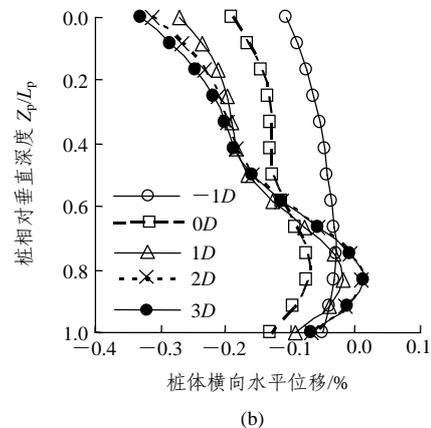
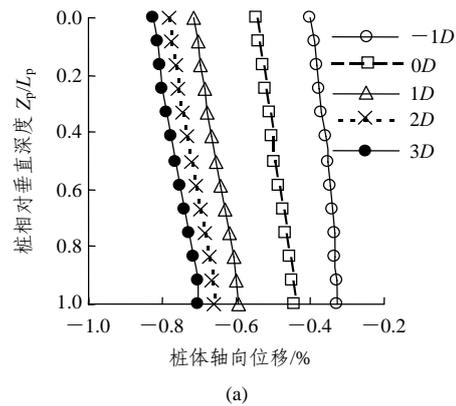


图6 不同隧道施工工况下桩体变形曲线

Fig.6 Pile deformation curves at different steps of tunnel construction

显著, 不仅在竖向发生了较大沉降, 而且在沿隧道横向(x 向)及纵向(y 向)均发生了变形。从图 6(a)可以看到, 桩顶的轴向变形略大于桩底, 但总体上沿桩长分布比较均匀; 随着隧道施工的进展, 桩体的轴向变形急剧增大。

不同隧道施工工况下桩体沿隧道横截面方向的水平位移曲线如图 6(b)所示。从图中不难发现, 工作面尚未到达桩体所处位置($\Delta_{Fp} = -1D$)时, 桩体的横向水平位移较小, 且沿桩轴向变化相对均匀。当开挖面越过桩体位置($\Delta_{Fp} \geq 0$)时, 桩体横向水平变形产生了较大屈曲, 桩顶位移最大, 但在隧道轴线水平面附近的桩体位移趋近于 0。这是因为隧道施工所引发的土体变形以垂直变形为主导。地表的沉降最大, 桩体顶部在土体侧向运动中产生了较大的附加变形。同时, 在隧道底面土体隆起, 桩体底部也发生了面向隧道方向的侧向位移。隧道因受到上、下两部分土体的垂直挤压作用发生侧向变形, 这在一定程度上抑制了该区域内土体的水平变形发展。而桩体沿隧道轴线方向的水平位移曲线(图 6(c))表明, 隧道施工引发后续开挖土体的扰动, 产生沿隧道轴向的运动趋势。因此, 桩体随施工工况的不同会产生不同形状和大小的附加弯曲。同时可以发现, 桩体的主要变形均是面向工作面的, 这与土体的运动方向一致。

4.2.2 桩体内力分析

不同桩体变形曲线必然产生不同的桩体受力特征。图 7 为隧道在不同施工工况下的桩体内力曲线。

从图 7 所示土体的沉降曲线可以看出, 上部土层的沉降导致桩侧负摩阻力相对较大, 桩体轴力沿深度增加; 在 $0.6L_p$ 深度处, 桩土间相对位移为 0, 桩体轴力值最大; 随着深度继续增加, 在桩体底部, 桩体间产生了正摩阻力, 导致桩体轴力沿深度减小。桩体轴力沿桩长呈现中间大、两头小的特点, 如图 7(a)所示。

图 7(b), (c)分别为桩体沿隧道横向(z 向)和纵向(y 向)的弯矩 M_{pz} , M_{py} 的变化规律, 其与桩体水平位移曲线(图 6(b), (c))对应。桩身弯矩 M_{py} 基本呈同一规律发展, 而 M_{pz} 则与具体的施工工况相关。桩体 2 个方向的最大弯矩均位于隧道轴线略微偏上的部位, 约 $0.8L_p$ 深度处; 并且存在 $(M_{py})_{\max} \approx 3.5(M_{pz})_{\max}$, 因此应对该方向桩体的加固予以重视。当隧道工作面越过桩体 $2D$ 后, 隧道施工对桩体的作用效果不再有明显的改变。

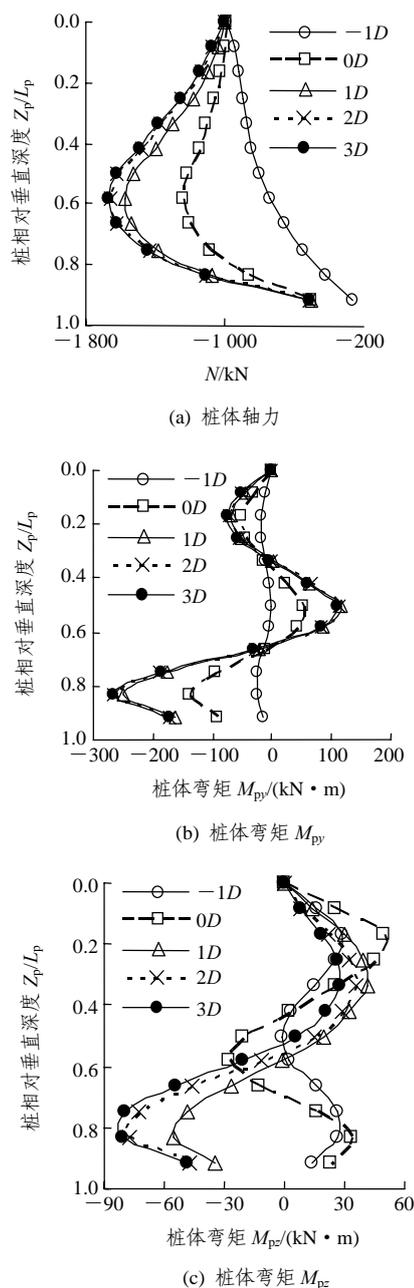


图 7 不同隧道施工工况下桩体内力曲线

Fig.7 Pile inner force curves at different steps of tunnel construction

4.2.3 隧道施工对无桩土体的影响

为了考察桩的存在对隧道施工引发土体位移的影响, 本文研究了无桩情况下土体的变化过程, 结果见图 8。从图 8 可以看出, 由于桩参与分担作用, 桩周土体的变形趋于平缓。其次, 桩体与同一位置处自由土体变形规律一致, 这说明两阶段分析方法中将自由土体变形施加于桩体以计算桩体的受力情况有一定的合理性; 另一方面, 两条曲线并不完全吻合, 这又说明两阶段方法分析被动桩的计算精度还有待于提高。

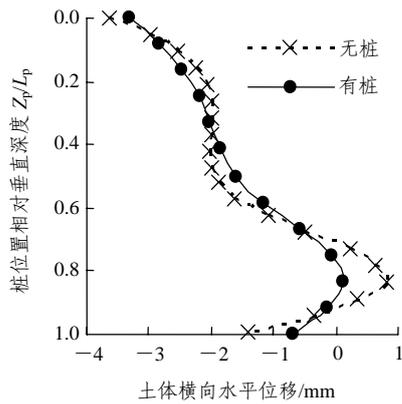


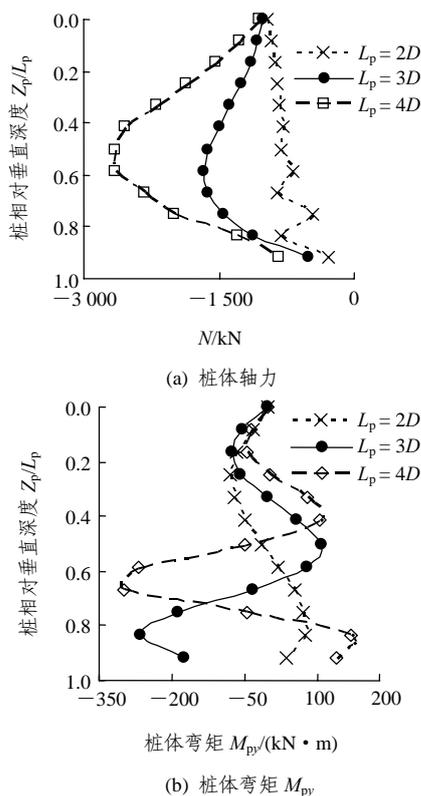
图 8 隧道施工时无桩土体的变形

Fig.8 Soil deformation when tunneling without pile

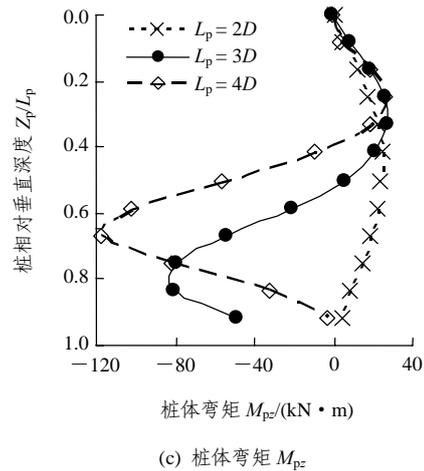
4.3 隧道施工对不同桩长的桩体内力影响分析

由图 9 可以清楚看到，隧道施工对不同长度的桩的影响程度不同。桩体轴力图 9(a)说明，短桩 ($L_p = 2D$)的轴力值较小；随着桩长的增加，桩体的轴力也显著增大。这意味着隧道开挖对长桩的轴向力学性能影响较大。

同一工况 ($L_p = 3D$)下，不同桩长的桩体弯矩曲线如图 9(b), (c)所示。由图可以看出，每一类型桩在相同的深度范围内都呈现了相近的变化规律，且最大弯矩均位于隧道水平轴线附近的区域。然而，随桩长的增加， M_{py} 曲线的反弯点的数目也随之增多， M_{pz} 曲线的弯矩值增加显著。这说明隧道施工对长桩的抗弯性能有较大程度的削弱。



(b) 桩体弯矩 M_{py}



(c) 桩体弯矩 M_{pz}

图 9 隧道施工对不同长度桩体的内力影响

Fig.9 Influences of tunnel construction on inner forces of piles with different lengths

4.4 隧道施工对群桩的影响

为了说明隧道施工对群桩的影响程度，将群桩 (见图 10)的受力状态与单桩情况(SP 曲线)进行对比。通过计算发现，近桩的最大轴力比单桩最大轴力减小约 20%，远桩的最大轴力比单桩最大轴力减小约 70%。隧道施工对远桩的影响程度远远小于近桩，这与 A. Bezuijen 等^[2, 3]的试验结论相符。与此同时，同为近桩，其沿隧道纵向的弯矩 $M_{pz12} > M_{ps} > M_{pz11}$ ，揭示了随着隧道工作面远离桩体，桩的受力状态也逐渐趋于稳定。

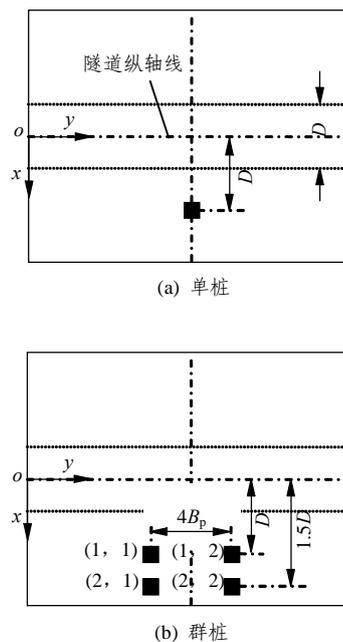


图 10 与施工隧道相临桩体的布局俯视图

Fig.10 Top view of layout of piles near the tunneling area

5 结 论

本文采用大型商业化有限差分程序, 利用弹塑性本构模型, 针对隧道施工对临近桩基的影响进行了深入探讨, 从整体上研究桩 - 土 - 隧道三者间的作用特征, 得出了如下结论:

(1) 本文采用的三维整体数值分析方法能够有效地模拟隧道施工对临近桩基的影响。

(2) 隧道施工破坏了土体原有的平衡状态, 土体中不平衡力的消散过程伴随着土体变形的发展过程; 桩的存在改善了桩周土体的受力状态, 但也加剧了该处土体的变形。

(3) 隧道施工对临近桩基影响显著, 桩体的变形和受力性态不仅与隧道施工工况有关, 而且也与桩基的位置、长度和数目紧密相关。

(4) 桩体由于隧道施工引起的沿隧道轴线方向的弯矩数值较大且分布曲折, 长桩尤为明显。因此应尽量减少对施工区域内土体的扰动, 并在该方向加强对桩基的保护措施, 以防止桩体发生剪切破坏。

(5) 群桩可以显著提高隧道施工过程中桩体的受力性能。

参考文献(References):

- [1] MAIR R J. Developments in geotechnical engineering research: application to tunnels and deep excavations[C]// Proceedings of Institution of Civil Engineers, Civil Engineering. London: [s.n.], 1993: 27 - 41.
- [2] BEZUIJEN A, VAN DER SCHRIER J. The influence of a bored tunnel on pile foundations[C]// Centrifuge'94. Rotterdam: A. A. Balkema, 1994: 681 - 686.
- [3] HERGARDEN H J A M, VAN DER POEL T J, VAN DER SCHRIER J S. Ground movements due to tunneling: influence on pile foundations[C]// Proc. of the Int. Symp. on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. London: A. A. Balkema, 1996: 519 - 524.
- [4] LOGANATHAN N, POULOS H G, STEWART D P. Centrifuge model testing of tunnelling-induced ground and pile deformations[J]. Geotechnique, 2000, 50(3): 283 - 294.
- [5] JACOBSZ S W, STANDING J R, MAIR R J, et al. Centrifuge modeling of tunneling near driven piles[C]// Proc. of the 3rd Int. Symp. on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Toulouse, France: [s.n.], 2002: 89 - 94.
- [6] CHEN L T, POULOS H G, LOGANATHAN N. Pile responses caused by tunneling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(3): 207 - 215.
- [7] LOGANATHAN N, POULOS H G, XU K J. Ground deformation and pile-group responses due to tunneling[C]// Proceedings of the 3rd National Conference of the Geo-institute of ASCE. Urbana, USA: University of Illinois at Urbana Champaign, 1999: 608 - 613.
- [8] 黄茂松, 张宏博, 陆荣欣, 等. 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): 1 379 - 1 383.(HUANG Maosong, ZHANG Hongbo, LU Rongxin, et al. Analysis of pile responses caused by tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1 379 - 1 383.(in Chinese))
- [9] MROUEH H, SHAHROUR I. Three-dimensional finite element analysis of the interaction between tunnelling and pile foundation[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26(3): 217 - 230.
- [10] 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.
- [11] 芮勇勤, 岳中琦, 唐春安, 等. 隧道开挖方式对建筑物桩基影响的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 735 - 741.(RUI Yongqin, YUE Z Q, TANG Chun'an, et al. Numerical simulation analysis of influence of tunnel excavation types on pile foundation of building[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 735 - 741.(in Chinese))
- [12] 张宏博, 黄茂松, 庄纪栋, 等. 浅埋隧道穿越建筑物桩基的施工力学分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(2): 205 - 208.(ZHANG Hongbo, HUANG Maosong, ZHUANG Jidong, et al. Mechanical analysis of construction of shallow tunnel crossing piles of building[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(2): 205 - 208.(in Chinese))
- [13] XU K J, POULOS H G. General elastic analysis of piles and pile groups[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, 24(15): 1 109 - 1 138.
- [14] 李 早, 黄茂松. 隧道开挖对群桩竖向位移和内力影响分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 398 - 402.(LI Zao, HUANG Maosong. Analysis of settlement and internal forces of group pile due to tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 398 - 402.(in Chinese))
- [15] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movement in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846 - 856.