

邻近桩基受隧道开挖影响的多因素三维有限元分析

韩进宝^{1,2}, 熊巨华^{1,2}, 孙 庆^{1,2}, 杨 敏^{1,2}

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 建立了邻近桩基受隧道开挖影响的位移控制 (DCM) 三维有限元数值分析模型, 通过与离心机实验结果的对比, 验证了该数值模型的有效性。在此基础上进行了一系列的参数模拟试验, 结果表明: 桩基内力和变形都随桩长与隧道的埋深比的增大而减小, 但弯矩的降幅不明显; 桩的轴力、侧向变形、沉降以及弯矩都随隧道与桩水平距离 X_{pile} 的增大而减小; 桩身的最大弯矩和最大轴力都随地层损失比的增大而增大。桩身内力和变形随着土体固结的完成而逐渐增大, 轴力和弯矩分别增加约 1 倍和 2 倍, 工程中应考虑隧道开挖对桩基的长期影响。

关键词: DCM; 隧道开挖; 桩基; 有限元分析

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0339-06

作者简介: 韩进宝(1985-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 从事岩土工程方面的研究。E-mail: 2009hanjinbao@tongji.edu.cn。

Multi-factor three-dimensional finite element analysis of effects of tunnel construction on adjacent pile foundation

HAN Jin-bao^{1,2}, XIONG Ju-hua^{1,2}, SUN Qing^{1,2}, YANG Min^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2.

Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Using the displacement control method (DCM), a three-dimensional finite element model is established to analyze the effects of tunnel construction on the adjacent pile foundation, and the effectiveness of this three-dimensional model is demonstrated through the back analysis of centrifuge tests. Based on these, parametric studies are implemented. The results of numerical simulations show that the internal force and deformation of tunneling-induced pile depend mainly on the pile-tunnel distance X_{pile} , pile length to tunnel depth ratio L_p/H_{tun} and volume loss V_L . The internal force and deformation decrease with the increase of L_p/H_{tun} , but the bending moment is not significantly affected. With the increase of X_{pile} the axial force and lateral deformation of the pile and settlement and bending moment all decrease, both the maximum bending moment and the maximum axial force of the pile increase with the increase of V_L , when $V_L = 3.3\%$, the internal force and deformation of the pile double or treble those after the consolidation of the soil, and the tunneling-induced long-term behavior of the pile should be considered in the tunnel design and construction.

Key words: DCM; tunneling; pile foundation; finite element analysis

0 引 言

城市中地铁隧道开挖会影响已有建筑桩基的稳定性和完整性。为了解桩基由于隧道开挖引起的内力和变形, 国内外许多学者作了相关研究。Morton 等^[1]的室内模型试验以及 Loganathan 等^[2]的离心机试验指出隧道开挖会对邻近桩基引起比较明显的轴力和弯矩, 尤其是在软弱土层中影响更为显著。他们也指出影响的大小还主要取决于桩与隧道之间的距离以及桩长与隧道埋深的相对关系。Chen 等^[3]、Loganathan 等^[4]、李早等^[5-6]采用两阶段方法分析了隧道开挖对桩基的

影响, 这种方法通过解析方法得出隧道开挖引起的自由场土体位移, 然后将土体位移施加到桩上, 通过数值方法求解桩基的反应。

对于隧道和桩相互作用的复杂性, 理论上可以通过有限元法进行分析。通常用来模拟隧道开挖的方法有两种, 一种是采用受力控制的有限元方法(简称 FCM 法), 一种是采用位移控制的有限元方法(简称 DCM 法)。Simpson 等^[7]、Dasari 等^[8-9]利用 FCM 法预测的沉降曲线比实测的沉降槽要宽, 而且最大值也比

实测的要小。虽然 Addenbrooke 等^[9]通过改进的土体本构模型使 FCM 法得到了改善, 但是土体的远场位移仍然与实测相差较大。Loganathan 等^[10]以及 Park^[11]建议的解析方法克服了 FCM 法的不足, 预测的土体位移与实测值符合较好。隧道开挖对桩基的影响主要归因于隧道开挖引起的土体位移对桩基的影响, 所以弄清桩基受力和变形的关键是准确预测隧道开挖引起的土体位移。Cheng 等^[12]基于解析方法并根据对现场实测数据与离心机试验结果的反分析提出了一种模拟隧道开挖的 DCM 法, 并用此方法分析了隧道开挖对桩基的影响, 证明了 DCM 法简单、实用, 与实测和试验值更加接近。杜佐龙等^[13]基于 DCM 法模拟了隧道开挖对邻近群桩的影响并与已有文献的分析结果进行了对比, 一致性较好。

本文采用 DCM 法对隧道开挖引起邻近桩基的受力和变形进行三维有限元分析。首先建立 DCM 三维有限元模型, 并用 Ong 等^[14]的离心机实验结果验证该模型的有效性。其次利用有限元方法进行一系列参数模拟试验, 包括隧道与桩的水平距离 X_{pile} 、桩长与隧道的埋深比 L_p/H_{tun} 、地层损失比 V_L 对桩基受力和变形的影响, 最后进行了隧道开挖对桩基长期影响的分析。

1 分析方法

隧道与桩的相对位置关系如图 1 所示。计算中土体采用的模型为 Harding-Soil(H-S)模型, 此模型是一个可以模拟包括软土和硬土在内的不同类型土体行为的模型, 此模型由 Schanz^[15]提出。在主偏量加载下, 土体的刚度下降, 同时产生了不可逆的塑性应变。在固结排水三轴试验中, 轴向应变与偏差应力之间的关系可以很好地由双曲线来拟合。而且也考虑了土体的剪胀性并引入了一个屈服帽盖。该模型适于模拟隧道开挖条件下土体的性状。

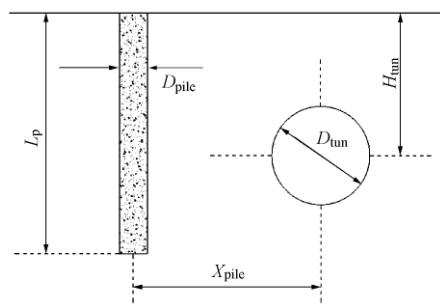


图 1 隧道和桩的相对位置

Fig. 1 Relative location of tunnel and pile

由于目前工程界对软土盾构隧道造成的地层损失比^[10, 13]已有比较合理的预测, 而且目前大部分的室内试验都是通过控制地层损失比来模拟隧道开挖对周围环境及建筑物的影响。地层损失比定义为

$$V_L = \frac{\pi \left(R + \frac{g}{2} \right)^2 - \pi R^2}{\pi R^2} \times 100\% = \frac{4gR + g^2}{4R^2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, R 为隧道半径, g 为隧道收缩的间隙参数, 间隙参数 g 的确定已由 Lee 等^[16]给出。

利用 DCM 法模拟隧道开挖时不考虑隧道开挖的实际过程, 直接在隧道边缘施加结点位移来模拟开挖。根据 Cheng 等^[12]建议的隧道断面变形如图 2 所示, 这也是现在被工程界广泛接受的隧道收缩方式。外圆为隧道施工断面, 内圆为隧道设计断面。这种方法虽不能准确模拟具体的施工环节, 但能够较好模拟地层损失。Pang^[17]采用此方法对新加坡地铁东北线一段隧道开挖对桩基影响的实测数据进行了全面的有限元分析, 且与实测分布拟合良好。

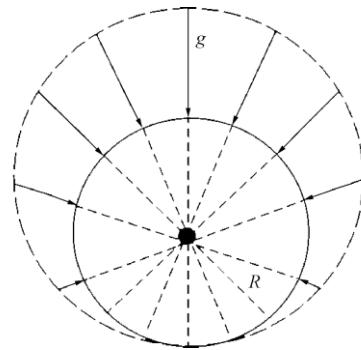


图 2 隧道断面变形

Fig. 2 Deformation of tunnel cross-section

2 算例分析

2.1 模型简介

为了验证所用土体模型以及 DCM 法的合理性, 下面用 Plaxis 软件建立有限元模型模拟 Ong 等^[14]的离心机实验。以下所述实验中的模型尺寸若无特殊说明皆为原型尺寸。实验中的隧道直径 D_{tun} 为 6 m, 隧道埋深 H_{tun} 为 15 m, 隧道衬砌材料为钢, 假设为线弹性体, 其弹性模量 E 为 2×10^5 MPa, 泊松比 ν 为 0.2。实验中的桩基材料为方形铝管, 在 100g 条件下相当于直径 1.3 m 的 C40 混凝土灌注桩。桩长 L_p 和桩宽 D_{pile} 分别为 22 m 和 1.2 m, 桩的轴向刚度 EA 和抗弯刚度 EI 分别为 33083 MN 和 3970 MN m², 且隧道与桩的距离 X_{pile} 为 6 m。此模型参数的物理意义可参考文献[15]。土体重度以及抗剪强度指标根据 Ong 等^[14]的实验确定, 其他参数取值方法参考文献[15]。土体具体参数: 天然重度 $\gamma = 16.0$ kN/m³, 饱和重度 $\gamma_{sat} = 16.0$ kN/m³, 三轴排水试验割线模量 $E_{50}^{ref} = 1.49$ MPa, 切线压缩模量 $E_{oed}^{ref} = 1.49$ MPa, 卸载 - 再加载模量 $E_{u}^{ref} = 4.47$ MPa, 模量应力相关幂指数 $m = 1$, 参考应力 $p^{ref} = 100$ kPa, 卸载 - 再加载泊松比 $\nu = 0.2$, 侧应力系数 K_0^{rc}

$=0.609$, 渗透系数 $k=2 \times 10^{-9}$ m/s, 内聚力 $c_{ref}=3.0$ kPa, 内摩擦角 $\phi=23^\circ$, 剪胀角 $\psi=0^\circ$ 。

由于几何模型的对称性, 故取模型的一半进行分析, 有限元模型如图 3 所示, 其尺寸与离心机的原型尺寸一致为 26 m \times 28 m \times 20 m (XYZ), 在模型底部施加竖向和水平向固定约束, 侧边界施加水平向固定约束, 对称边界施加对称约束, 地下水位位于地表, 且模型表面为自由边界。桩采用实体单元进行模型, 隧道由程序中自带的隧道模型来模拟, 其中桩和隧道的模型参数如前所述。地层损失比为 3.3% 与 Ong 等^[14]的离心机实验一致。

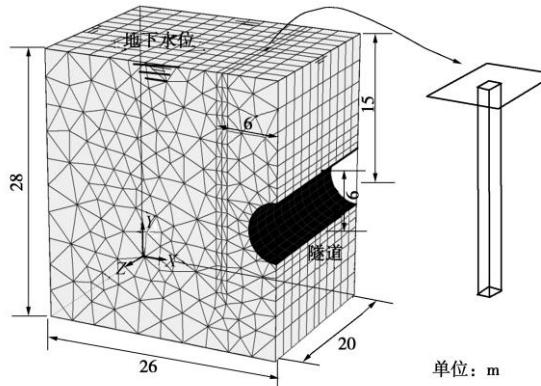


图 3 三维有限元网格

Fig. 3 Three-dimensional finite element mesh

2.2 结果分析

图 4 给出了隧道开挖引起邻近桩基的轴力、弯矩以及侧向变形与文献[14]的离心机实验的比较。从图中可以看出桩身弯矩和侧向变形与实验结果较为一致; 但是桩身轴力比实验值偏大, 但分布规律比较相似。由于有限元模拟与实验条件不可能完全一致, 所以两者的结果必然会有一定差异, 但总体的分布规律以及变化趋势是相似的, 说明本文采用的有限元程序可以较好的分析隧道开挖对邻近桩基的影响。

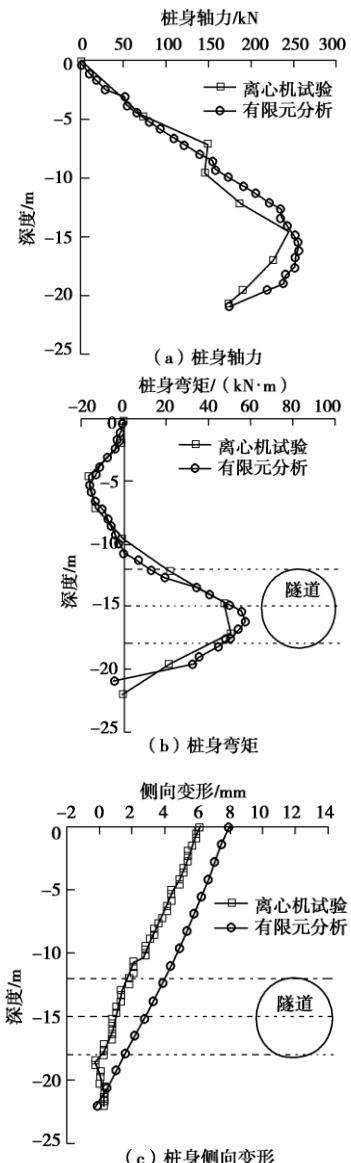


图 4 有限元分析与离心机实验结果比较

Fig. 4 Comparison of results between finite element analysis and tests

3 多参数模拟分析

3.1 桩长与隧道埋深比的影响

模型参数和土体性质与模拟 Ong 等^[14]实验的参数相同, 只是地层损失比取为 1% (以下分析除有特殊说明外地层损失比皆为 1%)。为了分析桩长与隧道埋深比(L_p/H_{tun})不同情况下隧道开挖对桩基的影响, 文中选取 L_p/H_{tun} 分别为 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 进行计算, 结果如图 5 所示。

从图 5 (a) 可以看出桩身轴力随着 L_p/H_{tun} 的增大而增大; 当 $L_p/H_{tun} \geq 1$ 时轴力先增大后减小, 最大值均出现在隧道轴线深度(-15 m)附近, 这与 Loganathan 和 Ong 等的实验结果相符。这说明对于 $L_p/H_{tun} \geq 1$ 的情况, 在隧道起拱线深度以上土体的位移大于桩的沉

降(图5(d)), 沿桩身产生的是负摩阻力, 而在隧道起拱线深度以下桩的沉降大于土体的位移, 沿桩身产生的是正摩阻力, 所以桩的轴力在隧道起拱线深度处出现拐点达到最大值。由图5(d)桩基和土体的沉降曲线可以说明上述结论的正确性。

由图5(b)可知桩身弯矩随 L_p/H_{tun} 的增大而增大, 但增幅很小, 最大值也都出现在隧道轴线深度(-15 m)附近, 但当 $L_p/H_{\text{tun}} \geq 1.2$ 时弯矩值几乎不再增加。桩身的侧向变形如图5(c)所示, 当 $L_p/H_{\text{tun}} < 1$ 时桩身沿深度的侧向变形基本相同, 说明桩整体随土体移动; 当 $L_p/H_{\text{tun}} \geq 1$ 时桩顶侧向变形最大并沿深度逐渐减小, 而且桩身侧向变形随着 L_p/H_{tun} 的增大而增大, 当 $L_p/H_{\text{tun}} \geq 1.2$ 时侧向变形几乎不再增加。

从图5(d)可以看出, 对于 $L_p/H_{\text{tun}} < 1$ 的情况桩基沉降大于土体竖向位移, 此时桩端位于Jacobsz等^[18]指出的隧道开挖引起桩基沉降较大的影响区域内, 所以桩基沉降较大。

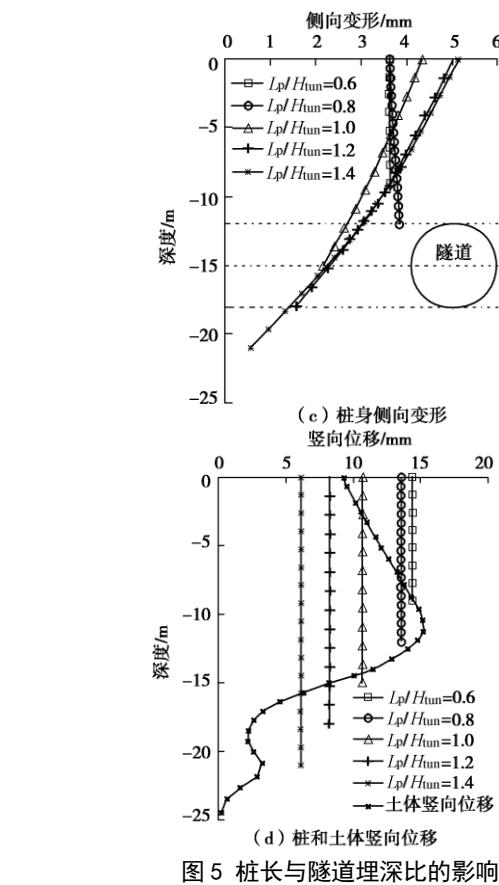
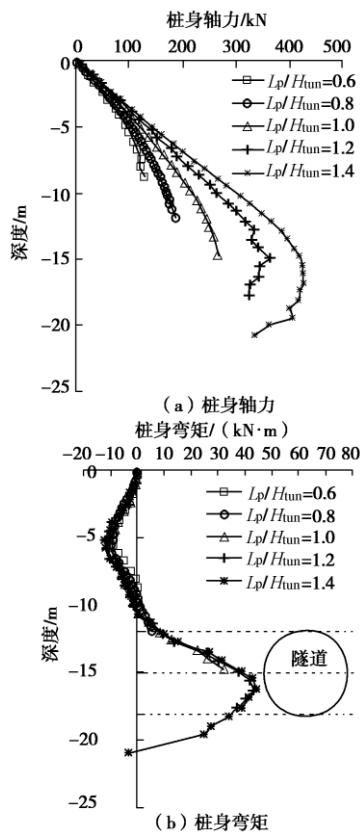
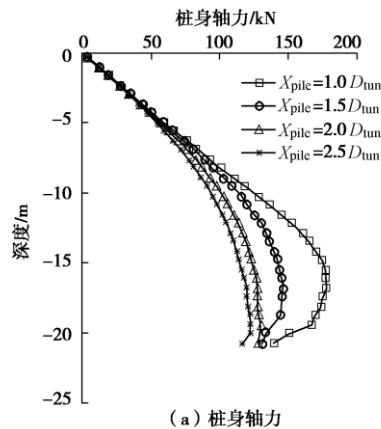


Fig. 5 Effects of pile length to tunnel depth ratio

3.2 隧道与桩水平距离的影响

当桩长取为21 m, 地层损失比为1%, 根据隧道与桩水平距离 X_{pile} 分别为6, 9, 12, 15 m即 $1.0D_{\text{tun}}$, $1.5D_{\text{tun}}$, $2.0D_{\text{tun}}$, $2.5D_{\text{tun}}$ 的不同情况进行计算, 结果如图6所示。从图中可以看出桩的轴力、侧向变形、沉降以及弯矩都是随着 X_{pile} 的增加而减小的, 尤其是



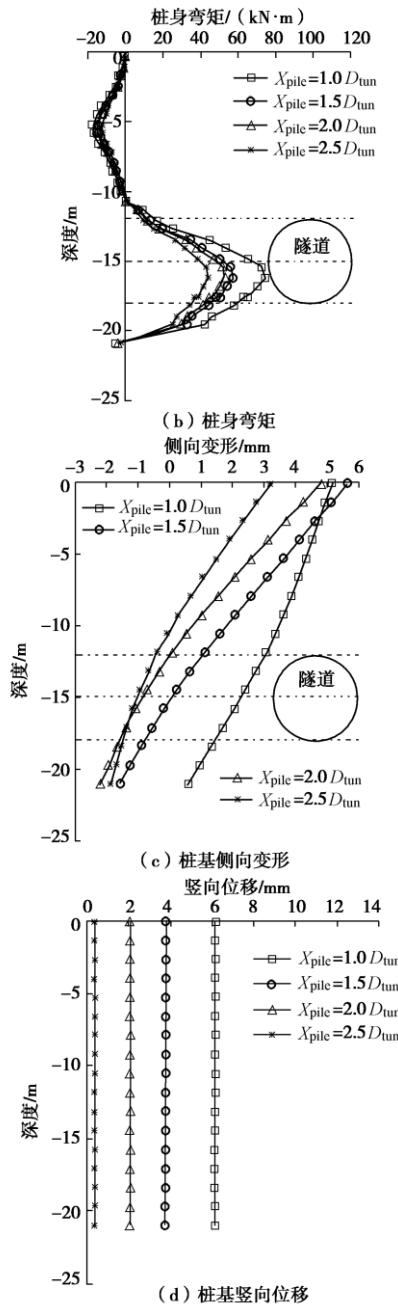


图 6 隧道与桩水平距离的影响

Fig. 6 Effects of pile-tunnel distance

当 X_{pile} 为 $2.5D_{\text{tun}}$ 时桩的沉降已非常小, 所以当隧道与桩的水平距离大于 2.5 倍隧道直径时隧道开挖对桩基沉降的影响可以忽略不计。

3.3 地层损失比的影响

当隧道与桩水平距离取为一倍隧道直径即 6 m, 地层损失比分别取 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 桩长与隧道埋深比 L_p/H_{tun} 分别为 1.4, 1.2, 1.0, 0.8 的不同情况进行计算, 结果如图 7 所示。从图中可以看出无论 L_p/H_{tun} 为何值柱身的最大弯矩和最大轴力都随地层损失比的增加而增大; 而且无论地层损失比为何值柱身的最大弯矩和最大轴力都随 L_p/H_{tun} 的增加而增大, 但是 L_p/H_{tun} 为 1.2 和 1.4 时的最大弯矩比较接近。

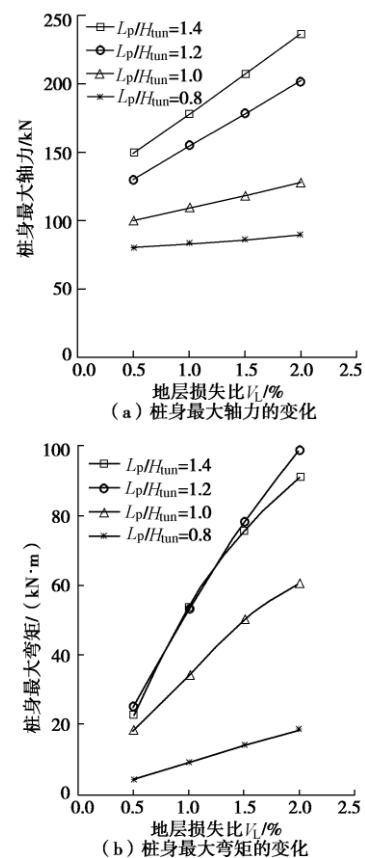
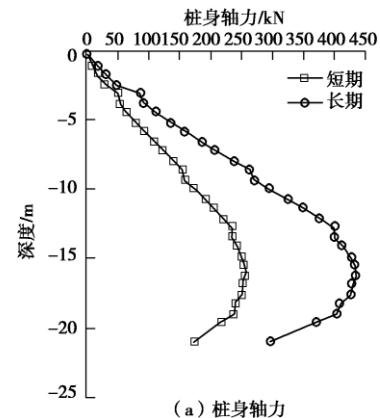


图 7 地层损失比的影响

Fig. 7 Effects of volume loss

3.4 长期效应的影响

模型参数和土体性质与模拟 Ong 等^[14]实验的参数相同, 地层损失比取 3.3%, 采用排水条件来模拟隧道开挖对桩基的长期影响。计算中首先采用塑性分析, 得到隧道开挖之后瞬时引起的土体位移。然后进行固结分析, 一直持续到所有节点上的超静水压值都小于 10^{-4} kPa 时为止, 得到隧道开挖引起的土体长期位移。将计算结果与 2.2 中计算的隧道开挖对桩基的瞬时影响进行比较, 如图 8 所示。



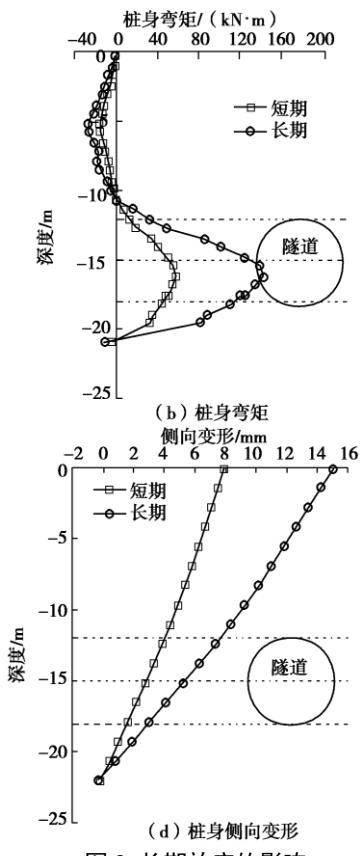


图 8 长期效应的影响

Fig. 8 Effects of long-term effect

从图 8 中可以看出土体完成固结之后桩身轴力、弯矩以及侧向变形都有显著增加, 这与 Ong 等^[14]的实验结果相一致。其中, 桩身最大轴力的长期值接近于短期最大轴力值的两倍 (分别为 480 kN 和 250 kN); 桩身最大弯矩长期值甚至接近于短期最大弯矩值的 3 倍 (分别为 140 kN·m 和 50 kN·m); 桩身侧向最大变形的长期值为短期最大变形的两倍 (分别为 15 mm 和 7.8 mm)。所以, 隧道设计施工过程中应考虑隧道开挖对邻近桩基内力和变形的长期影响。

当地层损失比取其它值时, 桩身最大内力的长期值与短期值见表 1。从表 1 可以看出, 桩身内力和变形随着土体固结的完成而明显增大, 轴力和弯矩分别增加约 1 倍和 2 倍, 工程中应考虑隧道开挖对邻近桩基的长期影响。

表 1 桩身最大内力短期值与长期值

Table 1 Short-term and long-term maximum internal forces of pile

地层损失比/%	桩身最大轴力/kN		桩身最大弯矩/(kN·m)	
	短期值	长期值	短期值	长期值
0.5	149.9	274.8	22.7	64.0
1.0	178.0	338.2	53.8	150.6
1.5	207.1	363.4	75.8	216.0
2.0	236.7	424.7	91.1	265.1

4 结 论

本文基于 DCM 法利用 H-S 土体本构模型对隧道

开挖引起邻近桩基的受力和变形进行了三维有限元分析, 通过算例对比以及参数分析得出如下结论:

(1) 采用基于 DCM 法的三维有限元分析方法可以有效分析隧道与桩基相互作用的问题。

(2) 隧道开挖所引起的桩基内力和变形主要取决于隧道和桩基的相对位置关系以及地层损失比的大小。桩基内力和变形都随桩长与隧道的埋深比的增大而减小; 桩的轴力、侧向变形、沉降以及弯矩都随隧道与桩水平距离 X_{pile} 的增加而减小; 桩身的最大弯矩和最大轴力都随地层损失比的增加而增大。

(3) 隧道开挖的长期效应会引起桩基内力和变形的显著增大, 因此实际工程中要对隧道开挖引起的邻近桩基内力和位移的长期影响予以重视。

参 考 文 献:

- [1] MORTON J D, KING K H. Effects of tunneling on the bearing capacity and settlement of piled foundations[C]// Proc. Tunneling, London, 1979: 57 - 68.
- [2] LOGANATHAN N, POULOS H G, STEWART D P. Centrifuge model testing of tunneling-induced ground and pile deformations[J]. Géotechnique, 2000, **50**(3): 283 - 294.
- [3] CHEN L T, POULOS H G, LOGANATHAN N. Pile responses caused by tunnelling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, **125**(3): 207 - 215.
- [4] LOGANATHAN N, POULOS H G, XU K J. Ground and pile-group response due to tunneling[J]. Soils and Foundations, 2001, **41**(1): 57 - 67.
- [5] 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 Mao-song. 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))
- [6] 李早, 黄茂松. 隧道施工条件下临近群桩水平力学反应分析方法[J]. 工业建筑, 2009, **39**(1): 79 - 84. (LI Zao, HUANG Mao-song. A analytical method for lateral behavior of pile groups adjacent to tunneling[J]. Industrial Construction, 2009, **39**(1): 79 - 84. (in Chinese))
- [7] SIMPSON B, O'RIORDON N J, CROFT D D. A computer model for the analysis of ground movements in London clay[J]. Géotechnique, 1979, **29**(2): 149 - 175.
- [8] DASARI G R. Modelling the variation of soil stiffness during sequential construction [D]. Cambridge: University of Cambridge, 1996.
- [9] ADDENBROOKE T I, POTTS D M, PUZRIN A M. The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction[J]. Géotechnique, 1997, **47**(3):

- 693 - 712.
- [10] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, **124**(9): 846 - 856.
- [11] PARK K H. Elastic solution for tunneling-induced ground movements in clays[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2004, **4**(4): 310 - 318.
- [12] 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.
- [13] 杜佐龙, 黄茂松, 李早. 基于地层损失比的隧道开挖对临近群桩影响的 DCM 方法[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(10): 3043 - 3047. (DU Zuo-long, HUANG Mao-song, LI Zao. DCM-based on ground loss for response of group piles induced by tunneling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009,
- 30**(10): 3043 - 3047. (in Chinese))
- [14] ONG C W, LEUNG C F, YONG K Y, et al. Experimental study of tunnel-soil-pile interaction[C]// *Proc Underground Singapore*, Singapore, 2007: 55 - 66.
- [15] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. The hardening soil model: formulation and verification[C]// *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, Balkema: 1999: 281 - 296.
- [16] LEE K M, ROWE R K, LO K Y. Subsidence owing to tunneling I: estimating the gap parameter[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, **29**(6): 929 - 940.
- [17] PANG C H. The effects of tunnel construction on nearby pile foundation[D]. Singapore: National University of Singapore, 2005.
- [18] JACOBSZ S W, STANDING J R, MAIR R J, et al. Centrifuge modeling of tunneling near driven piles[J]. *Soils and Foundations*, 2004, **44**(1): 49 - 56.

(本文责编 胡海霞)