

浅埋隧道施工对建筑物桩基的影响分析

黄茂松, 张宏博, 陆荣欣

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 浅埋隧道穿越上部桩基础的问题值得关注。在概述目前研究成果的基础上, 采取两阶段分析方案, 利用分层土体的剪切位移法, 着重分析了浅埋隧道开挖引起的土体移动对隧道顶桩位移及轴力的影响, 并与整体有限元计算结果进行了比较, 结果表明该计算方法是合理的, 且计算量小, 无需建立复杂的计算模型, 在工程领域有较好的实用性。

关 键 词: 浅埋隧道; 截桩处理; 两阶段分析法; 剪切位移法

中图分类号: U 456

文献标识码: A

Analysis of pile responses caused by tunneling

HUANG Mao-song, ZHANG Hong-bo, LU Rong-xin

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

Abstract: More attention has focused on the issue of shallow tunneling across pile foundation. In this paper, a two-stage approach is used to analyze axial forces and displacements of pile caused by shallow tunneling. Free-field tunneling-induced ground moving is estimated based on an analytical solution given by Loganathan and Poulos (1998a). A simplified finite difference formulation is then developed, based on the Winkler model of soil reaction, for computing the pile response induced by the estimated free-field ground movements. Finally, a case history has been studied with both the proposed two-stage approach and a complete finite element analysis. The results obtained by both methods are in fair agreement. Because the simplified method does not need complex model, it can be used well in engineering.

Key words: shallow tunnel; cutting pile; two-stage analysis; shearing displacement method

1 引 言

随着隧道、地铁工程建设的增多, 浅埋隧道开挖对周围环境影响问题越来越受到关注, 其中由于线路、空间的限制所造成的浅埋隧道穿越楼房桩基础的问题尤具代表性。浅埋隧道开挖不可避免地会引起周围地层的变形, 从而引起隧道顶部或临近桩基的变形, 产生轴向或侧向的附加应力, 但目前对于隧道开挖引起上部桩基变形和承载特性的变化的研究较少, 因此, 对此工程现象进行探讨具有较大的实际意义。

关于浅埋隧道开挖引起临近桩基础承载特性变化的分析方法主要分为两种, 即整体分析法和两阶段分析法。整体分析法就是将土体和结构物(桩)作为一个整体来进行分析, 通常利用有限元方法进行计算分析; 两阶段分析法则把隧道施工对桩的影响分成两个阶段来分析。第 1 阶段, 分析浅埋隧

道开挖引起的周围土体的变形, 可采用经验方法或有限元等数值方法; 第 2 阶段, 将桩周土体的变形施加到桩上, 分析桩的变形及内力变化。

国内外学者已经开展了有关隧道开挖对临近桩基础的影响研究, Morton 等^[1]和 Loganathan 等^[2]分别进行了室内模型试验和离心模型试验研究, 在分析方法方面, Chen 等^[3]、Loganathan 等^[4]、王占生^[5]采用两阶段分析方法评价了隧道施工对桩基的影响。其思路是: 首先, 估计隧道施工引起的自由场地情况下桩基位置处土体的位移, 然后把所估计的土体位移施加于桩, 利用各种方法(比如剪切位移法、弹性理论法、有限差分法、有限单元法或边界元法等), 分析桩的内力和位移。值得一提的是 Mroueh 等^[6]采用整体有限单元法分析了隧道施工对附近单桩和群桩的影响, 文中采用非相关联的 Mohr-Coloumn 准则的理想弹塑性模型。尽管整体有限元分析法可以分析各种复杂情况, 但从工程实

用角度看,两阶段分析方法更容易被工程技术人员所接受。文献中的有关两阶段方法基本上限于均匀土层,且一般桩基离开隧道有一定的距离,并没有涉及到本文所关注的截桩处理问题。另外,现有文献中也没有有关两阶段法和整体有限元法比较的讨论。

本文针对浅埋隧道开挖及截桩处理的工程实例进行了计算分析,首先应用两阶段分析法对浅埋隧道开挖引起顶部分层土层中桩基的变形及附加应力进行了公式推导,提出了相应的计算方法,并与整体有限元分析结果进行了比较,结果表明本文所提出的计算方法是合理的,可满足工程计算精度。

2 浅埋隧道施工对上部桩基础影响的分析方法

2.1 浅埋隧道施工引起周围土层的变形

自由场条件下隧道施工引起隧道中心线处拱顶至地表各点沉降值可近似采用 Loganathan 等^[7]所提出的计算公式来表示:

$$s(z) = \varepsilon R^2 \left(-\frac{z-h}{x^2 + (z-h)^2} + (3-4\nu) \frac{z+h}{x^2 + (z+h)^2} - \frac{2z[x^2 - (z+h)^2]}{[x^2 + (z+h)^2]^2} \right) e^{\{-[1.38x^2/(h+R)^2] + [0.69z^2/h^2]\}} \quad (1)$$

式中 $s(z)$ 为自由场地时隧道施工引起的土体竖直沉降; R 为隧道拱的半径; z 为地表以下深度; h 为隧道轴线的深度; ν 为泊松比; ε 为地层损失比; x 为距隧道中心线的水平距离。

2.2 受影响桩的分析

对于隧道顶部的桩基础,用连续分布的竖向弹簧来模拟桩与桩侧土之间的相互作用,桩端与桩端下隧道拱的支撑通过超静定拱来模拟,如图 1。桩采用弹性杆单元模拟,每一单元与土体之间都用弹簧联系,桩与土之间保持弹性接触,桩-土间不发生滑动,桩端与拱弹性接触,由桩的荷载传递微分方程可以得到深度 z 处受影响桩的桩身位移微分方程:

$$\frac{d^2 w(z)}{dz^2} - \frac{k(z)}{A_p E_p} (w(z) - s(z)) = 0 \quad (2)$$

式中 $w(z)$ 为某深度处桩身位移; A_p , E_p 分别为桩的截面积和弹性模量; $k(z) = 2\pi G_s(z) / \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right)$, G_s 为土体的剪切模量, r_0 , r_m 分别为桩的半径和有效影响半径。

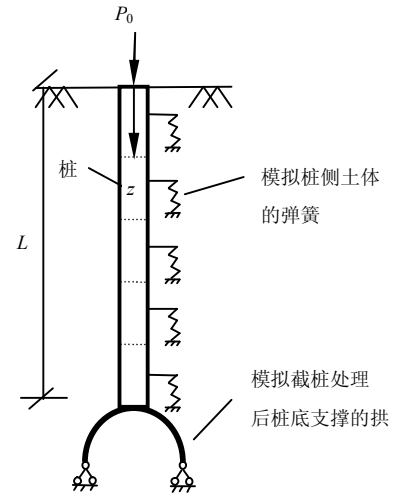


图1 土体竖向移动作用下单桩模型图

Fig.1 Calculation model of soil deformation acting on single pile

其边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw(z)}{dz} \Big|_{z=0} &= -\frac{P}{A_p E_p} \\ \frac{dw(z)}{dz} \Big|_{z=L} &= -\frac{P_b}{A_p E_p} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 L 为桩长; P 为桩顶竖向荷载; P_b 为桩底反力。

按结构力学的超静定拱可以建立桩底阻力与沉降量之间的关系如下:

$$w_b = \frac{R^3}{EI} \left(\frac{3\pi}{8} - \frac{1}{2\pi} - 1 \right) P_b \quad (4)$$

式中 w_b 为桩底位移; E 为拱的弹性模量; I 为拱的惯性矩,由开挖时托住桩体的整体钢架确定。

对于分层土体,土体的剪切模量随深度而变化,此时难以求出解析解,可以通过差分方法求得桩身节点位移^[8],如图 2 所示,将桩长 L 分成 n 等份。

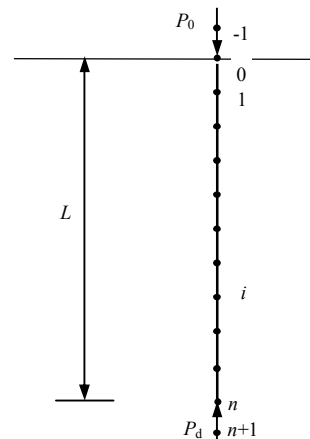


图2 单桩有限差分示意图

Fig.2 Sketch of finite difference used in calculation method

采用有限差分形式，对式(2)写出节点 1~n-1 的差分表达式为

$$w_{i-1} - \left(2 + \frac{L^2 k_i}{n^2 A_p E_p} \right) w_i + w_{i+1} = - \frac{L^2 k_i s_i}{n^2 A_p E_p} \tag{5}$$

式中 s_i 为第 i 节点处土体沉降； $k_i = \frac{2\pi G_{si}}{\ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)}$ ， G_{si}

为第 i 节点处土体剪切模量。

根据桩顶边界条件，在节点 0 处有：

$$w_1 - \left(1 + \frac{L^2 k_0}{2n^2 A_p E_p} \right) w_0 = - \frac{L^2 k_0 s_0}{2n^2 A_p E_p} - \frac{LP_0}{nA_p E_p} \tag{6}$$

根据桩底边界条件，在节点 n 处有

$$w_{n-1} - \left[1 + \frac{L^2 k_n}{2n^2 A_p E_p} + \frac{LEI}{nA_p E_p R^3 \left(\frac{3\pi}{8} - \frac{1}{2\pi} - 1 \right)} \right] w_n = - \frac{L^2 k_n s_n}{2n^2 A_p E_p} \tag{7}$$

由式(5)~(7)得到单桩差分方程为

$$[K_p]\{w\} = [K_s]\{s\} + \{Q\} \tag{8}$$

式中 $[K_p]$ 为桩的刚度矩阵； $\{w\}$ 为桩身结点位移列向量； $[K_s]$ 为土的刚度矩阵； $\{Q\}$ 为外荷载列向量； $\{s\}$ 为自由场地时隧道施工在桩位置处引起的土体竖向位移列向量。

采用上述方法求得节点位移后，进一步可以求得受影响桩的桩端阻力、桩侧摩阻力、桩身轴力分布。

3 工程实例分析

3.1 工程简介

武隆隧道出口段处位于怀化—重庆电气化隧道 D2k197+960~D2k197+990 之间，隧道穿越了汇邦制药厂的楼房桩基（如图 3），穿越段全长 30 m。设计为单线电气化隧道，V 级整体式衬砌，开挖宽度为 7.4 m，高度为 9.12 m，隧道开挖需松动爆破。根据工程勘察报告，武隆隧道出口处地段地表为人工回填松土及第四系全新统坡残积砂黏土，厚 3.7~9.05 m；下层为泥岩、砂岩夹页岩风化层，为极严重风化~严重风化带，属 V 级围岩；隧道开挖范围内为风化泥岩、砂岩夹页岩风化层。本文采用的计算参数见表 1。

3.2 两阶段法分析结果

根据上述数据，采用基于剪切位移法的有限差分格式，通过计算得到桩顶荷载为 1 000 kN 条件下的桩身位移、桩侧摩阻力以及桩身轴力分布，如图

4 所示，计算所需的自由场位移由式（1）估算得到，取 $\varepsilon=4.3\%$ 。由图可得出如下规律：

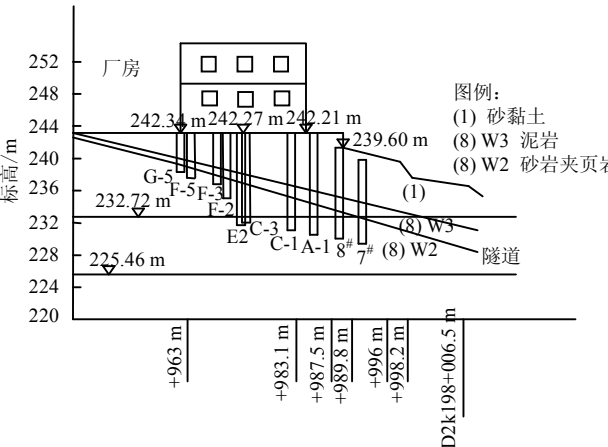


图 3 楼层桩基纵断面图
Fig.3 Skiagraph of piles and building

表 1 洞室围岩及支护材料计算参数

Table 1 Parameters of rock and supporting material						
岩层	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	密度 ρ $/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	凝聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	备注
砂黏土	40	0.3	1.9	70	15	层厚 0~7.5 m
泥岩	300	0.23	2.0	200	20	层厚 7.5~8.5 m
砂岩夹页岩	800	0.2	2.05	350	35	层厚 8.5~44 m
注浆长管棚	5 000	0.2	2.5	/	/	直径为 89 mm
注浆区围岩	1 000	0.38	2.1	100	22.5	
初次衬砌	7 000	0.16	2.5	/	/	厚 200 mm
二次衬砌	21 000	0.16	2.5	5 206	34	厚 600 mm
桩基	20 000	0.15	2.5	5 206	34	直径为 1.3 m

(1) 从自由场计算结果看，拱顶位移大于地表位移，但由于摩阻力作用使桩周土体自拱顶至地表变形基本一致，故由剪切位移法原理，桩体下部负摩阻力最大，如图 4(b)所示，同时引起桩体轴力随深度增加而增大。

(2) 由计算结果分析，若不考虑桩体的存在，则桩周土体位移较大。但实际桩周土体位移与桩体位移基本一致，表明桩体有阻碍土体下沉的作用，故土体相对桩体有一种向下运动的趋势，引起负摩阻力，桩体轴力增大，如图 4(c)所示，表明本文采取两阶段分析法计算隧道开挖引起桩的变形在规律上是正确的。

3.3 整体有限元分析

3.3.1 整体有限元模型的建立

隧道围岩及桩基附近有限元网格如图 5 所示。计算模型长 50 m，高 44 m，隧道及支护结构按实际尺寸确定。模型考虑了地表荷载和地下洞室上覆岩层自重以及结构荷载。地应力场按自重应力场考虑。边界条件采用位移边界条件，两侧面、底面均受法向约束^[9]。上部荷载作用于桩顶，单桩荷载 $P_0=$

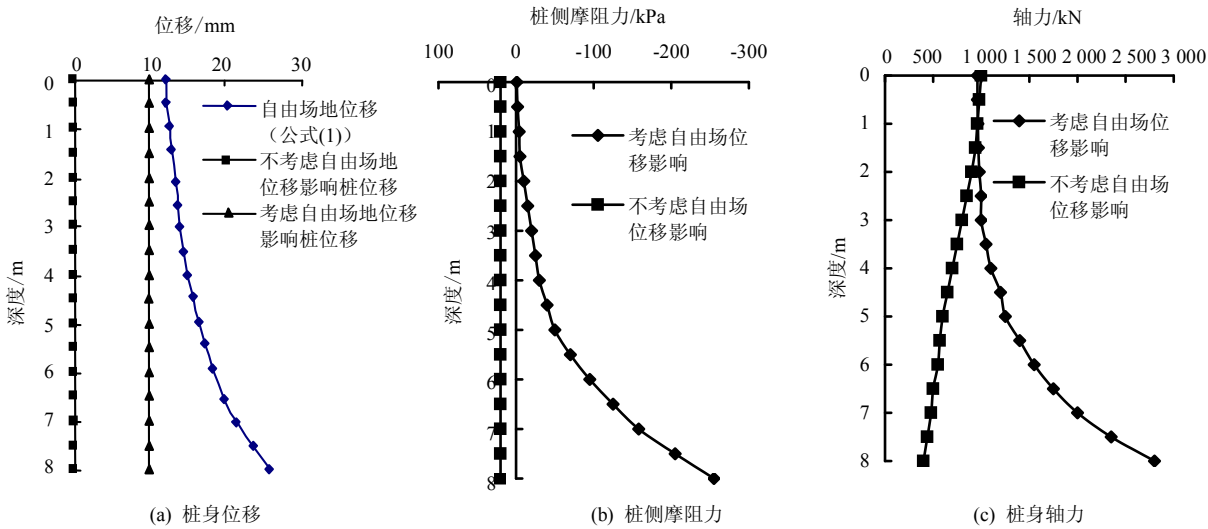


图 4 剪切位移法计算结果
Fig.4 Results calculated in shear displacement method

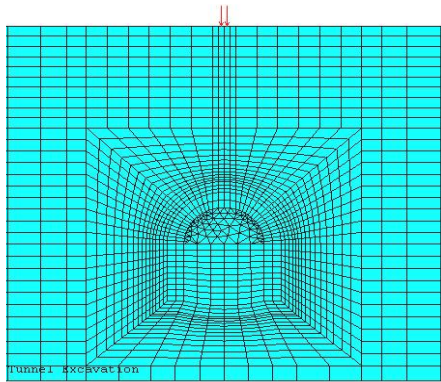


图 5 隧道围岩及桩基附近有限元网格
Fig.5 FEM grids of tunnel and pile

1 060 kN。爆破荷载对隧道的影响按初始模量的 80 % 进行折减^[10]来模拟。计算采用弹塑性本构模型，按照实际的施工步骤进行模拟分析，其中大管棚支护及锚杆支护效果采用提高土体模量的 1 倍为准^[11]。

3.3.2 隧道截桩处理模拟过程

- (1) 大管棚超前支护，进行土体注浆。
- (2) 开挖上台阶，上部围岩初次衬砌（锚杆、喷射混凝土）。
- (3) 开挖下台阶，下部围岩施工初次衬砌（锚杆、喷射混凝土），设仰拱。
- (4) 支护开挖轮廓处桩基底部，截断桩基，施工二次衬砌。

3.3.3 计算结果分析

结果表明(图 6、图 7)，隧道开挖截桩处理对上部桩基的影响是很明显的，桩侧土体位移自地表至拱顶的位移是非常接近的，相对自由场位移来说，隧道开挖引起的桩侧土体位移很小，表明桩体对土

体存在正摩阻力作用，而且由图 6(b)知轴力随深度增大，表明摩阻力的值也随深度而逐渐增大。

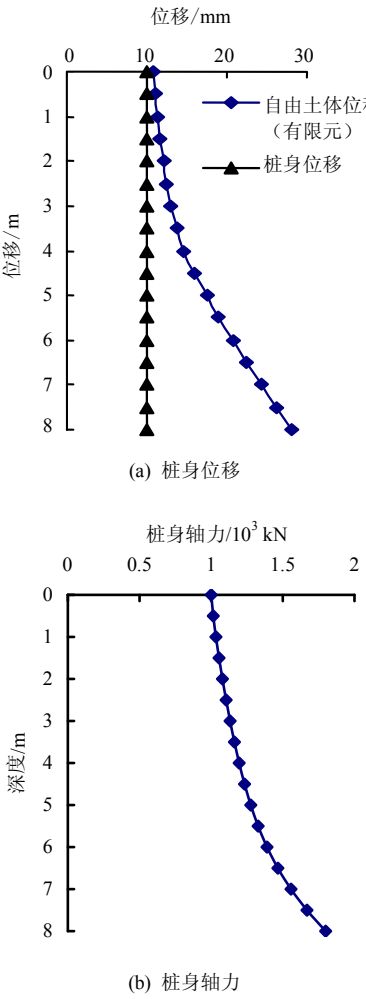


图 6 有限元计算结果
Fig.6 Results calculated in FEM code

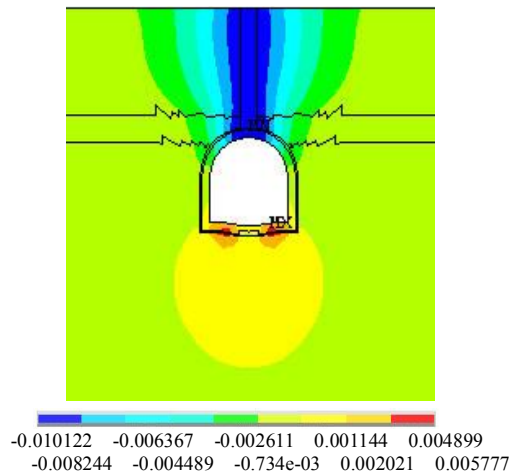


图7 隧道-桩结构竖向位移图 (单位: m)

Fig.7 Vertical displacement of tunnel and pile (unit: m)

由有限元分析可知, 剪切位移法与有限元分析结果较为接近, 因此, 本文提出的两阶段分析方案利用剪切位移法进行计算是合理的, 结果是较为准确的。相比有限元方法, 该方法需要的参数较少, 物理概念明确, 易被工程界接受; 但剪切位移法不能全面反映隧道开挖对周围环境的影响, 存在一定的局限性。

4 结 语

本文采用两阶段分析方案, 利用剪切位移法, 着重分析了浅埋隧道开挖过程中桩周土体移动对桩体摩阻力及轴力的影响。通过与有限元计算结果的比较, 两者计算得出的结果 (包括轴力、位移) 是基本一致的, 证明该方法计算结果是合理的, 且计算量小, 在工程领域有较好的实用性。

参 考 文 献

- [1] Morton J D, King K H. Effect of tunneling on the bearing capacity and settlement of piled foundations[A]. Proceedings of Tunneling 79[C]. London: IMM, 1979. 57—68.
- [2] Loganathan N, Poulos H J, Stewart D P. Centrifuge model testing of tunneling-induced ground and pile deformations[J]. *Geotechnique*, 2000, 50(3): 283—294.
- [3] Chen L T, Poulos H G, Loganathan N. Pile responses caused by tunneling[J]. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 1999, 125(3): 207—215.
- [4] Loganathan N, Poulos H G, Xu K J. Ground deformation and pile-group responses due to tunneling[A]. *Proceedings of the III National Conference of the Geo-Institute of ASCE*[C]. Urbana: University of Illinois at Urbana Champaign, 1999.
- [5] 王占生, 王梦恕. 盾构施工对周围建筑物的安全影响及处理措施[J]. *中国安全科学学报*, 2002, 12(2): 45—49.
WANG Zhan-sheng, WANG Meng-shu. Effects of shield-driven tunneling on the safety of adjacent buildings and its countermeasures[J]. *China Safety Science Journal*, 2002, 12(2): 45—49.
- [6] Mrooueh 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: 217—230.
- [7] Loganathan N, Poulos H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, ASCE*, 1998, 124(9): 846—856.
- [8] Poulos H G, Davis E H. *Pile Foundation Analysis and Design*[M]. New York: Wiley, 1980.
- [9] 芮永勤, 岳中琦, 唐春安, 等. 隧道开挖方式对建筑物桩基影响的数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(5): 735—741.
RUI Yong-qin, YUE Zhong-qi, TANG Chun-an, et al. Numerical simulation analysis on influence of tunnel excavation types on pile foundation of building[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(5): 735—741.
- [10] ZHU Weishen, LI Shucai, LI Shuchen, et al. Systematic numerical simulation of rock tunnel stability considering different rock conditions and construction effects[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2003, 18: 531—536.
- [11] 郑余朝. 地铁区间重叠隧道近接施工力学行为三维数值模拟[硕士学位论文 D]. 成都: 西南交通大学, 2000.