

# 软土地层隧道开挖对邻近桩基影响数值分析

刘晓成 冯 劲 周红升 熊志辉

(浙江数智交院科技股份有限公司 杭州 310030)

**[摘要]** 以某典型软土地层中隧道侧穿桩基为例,采用数值模拟方法开展了隧道开挖对不同位置处桩基的影响程度分析研究。结果表明:隧道开挖引起地表的竖向和水平位移显著影响的区域分别分布在距离隧道中心 $0\sim 3D$ 和 $1D\sim 3D$ ( $D$ 为隧道外径)范围内,其沉降曲线与经验公式的一致性验证了数值模型的可靠性;同时,桩顶沉降受开挖影响的区域与地层显著沉降区基本一致;随着桩基与隧道中心线的距离增大,桩基的安全区范围逐渐增大而警戒区范围逐渐缩小;对比桩身沉降和水平位移,可考虑采用桩顶位移作为桩基变形的控制指标,当盾构掘进通过桩基且与其净距达到 $10L$ ( $L$ 为管片宽度)左右时,隧道开挖对桩基变形的影响最明显,可为现场盾构施工中的变形控制提供参考。

**[关键词]** 软土地层;盾构隧道;开挖施工;桩基变形;数值分析

## 1 引言

随着城市地下空间大规模开发,城市土地被高度地集约化利用,促使越来越多地铁隧道穿越既有建筑物,从而不可避免地下穿或侧穿高层建筑和高架桥的桩基。当隧道开挖引起的地层变形超过一定范围时,将对周边桩基的变形和受力产生不利的影响,甚至危及上部结构物的安全,导致一系列环境岩土问题。因而,针对隧道开挖施工对邻近桩基影响的研究引起了国内外学者的重视,采用的主要方法包括:现场实测、理论解析、模型实验以及数值分析。项彦勇等(2011、2012)<sup>[1,2]</sup>提出了预测隧道开挖二次应力和塑性区形状和范围的理论方法;Morton等(1979)<sup>[3]</sup>通过室内实验分析了隧道开挖对桩基承载力和变形影响的机理;Jacobsz等(2002)<sup>[4]</sup>、Ong等(2005)<sup>[5]</sup>通过离心模型实验研究了隧道开挖对桩基的影响效应;Lee等(2006)<sup>[6]</sup>运用三维弹塑性数值分析,探讨了土体-隧道-桩基的相互作用以及隧道开挖对邻近桩基的影响;朱逢斌等(2008)<sup>[7]</sup>结合数值分析和模型实验的结果,验证了数值模拟隧道开挖对邻近桩基影响的可靠性。此外,隧道开挖对

桩基的影响还与两者结构类型、位置关系等因素密切相关。张云军等(2005)<sup>[8]</sup>讨论了不同埋深隧道开挖引起邻近构筑物的沉降规律;杨晓杰等(2006)<sup>[9]</sup>考虑了桩侧摩阻力、桩端总抗力和桩底段轴力等因素对浅层隧道开挖引起桩基承载力变化的规律。综上所述,目前隧道开挖对桩基影响的研究主要包括桩基与隧道的几何尺寸、材料特性、桩土作用以及相对位置(下穿或侧穿)。在实际工程中盾构隧道以侧穿桩基为主,上海、广州、杭州等地地铁隧道埋深大多在 $10\text{m}\sim 25\text{m}$ 之间,而桩身长度一般远大于隧道埋深。因此,本文以某典型软土地层中隧道侧穿桩基为例,着重分析隧道开挖时不同位置处桩基的变形规律,并根据盾构掘进对桩基的影响程度为现场施工提供指导。

## 2 数值分析模型及参数

为了分析隧道开挖时不同位置处桩基的变形规律,本文以杭州某典型软土地层为例,分别计算盾构隧道侧穿桩基时对不同距离处桩基的变形影响。

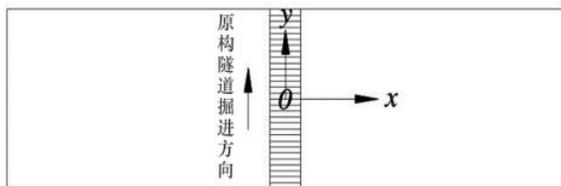
### 2.1 数值分析模型

如图1所示,数值分析模型的计算域为 $x=$

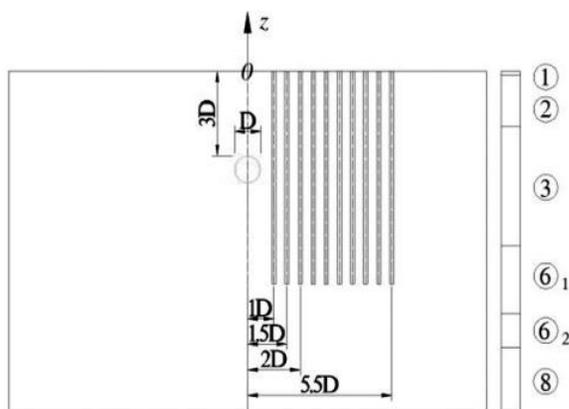
收稿日期:2021-07-27

作者简介:刘晓成(1992-),男,正高级工程师,主要从事岩土工程方面工作。

-60m~60m、 $y = -18\text{m} \sim 18\text{m}$ 、 $z = -80\text{m} \sim 0\text{m}$ 。其中， $y$ 轴为盾构隧道掘进方向； $z = 0\text{m}$ 平面为地层表面，土层从上到下依次为①粘土、②粘质粉土、③淤泥质粘土、⑥<sub>1</sub>粉质黏土、⑥<sub>2</sub>粉质黏土以及⑧全风化岩。地铁盾构隧道外径  $D = 6.6\text{m}$ ，其上部覆土层厚度为  $3D = 19.8\text{m}$ 。桩基（直径  $\Phi = 1\text{m}$ 、桩长  $L_p = 50\text{m}$ ）设置在  $y = 0\text{m}$ 的平面上，当桩基与隧道中心线的距离为  $1D$ 、 $1.5D$ 、 $2D$ 、 $2.5D$ 、 $3D$ 、 $3.5D$ 、 $4D$ 、 $4.5D$ 、 $5D$ 、 $5.5D$ 时（桩号依次为 1# ( $x = 1D$ ) ~ 10# ( $x = 5.5D$ )），分别计算隧道施工引起的桩基变形。数值模型中的土体采用修正摩尔-库伦弹塑性模型进行计算；管片和桩基采用弹性模型进行分析。土体、管片和桩基分别采用实体单元、板单元以及桩单元进行模拟；采用接触单元模拟桩与土体之间的摩擦效应，桩侧切向和法向刚度分别取  $48465\text{kPa}$  和  $126000\text{kPa}$ ，桩端承载力  $220\text{kN}$ ，桩端弹簧刚度  $25000\text{kN/m}$ 。为考虑上部结构向桩基传递荷载，桩顶采用集中荷载，取值为  $1600\text{kN}$ （向下）。有限元计算模型见图 2，边界条件为：模型底面位移全部约束，侧向均约束法向方向位移。

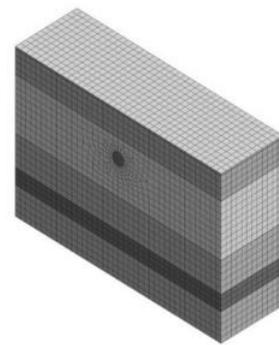


(a) 俯视图

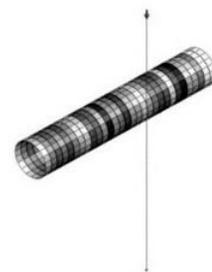


(b) 立面图 ( $y = 0$ )

图 1 数值分析模型



(a) 土体模型



(b) 管片、桩基及荷载

图 2 计算模型网格

## 2.2 施工过程模拟

隧道模拟开挖单线长  $36\text{m}$ ，盾构每次掘进进尺为  $1.2\text{m}$ ，沿  $y$ 轴方向把隧道分为 30 步开挖；每步开挖后进行管片支护，每环管片宽  $L = 1.2\text{m}$ ，厚  $t = 0.35\text{m}$ ，从  $y = -18\text{m}$  ( $-15L$ ) 处分步施工到  $y = 18\text{m}$  ( $15L$ ) 处，共计 30 环管片，管片采用 C30 混凝土。

## 2.3 相关计算参数

根据地质勘查资料以及规范<sup>[10]</sup>和工程经验，各材料物理力学参数如表 1、2 所示。

表 1 土体物理力学参数

编号	名称	厚度 /m	$\gamma$ / $\text{kN} \cdot \text{m}^3$	$c$ /kPa	$\varphi$ /°	$E_s$ /MPa
1	粘土	1	18.8	25.5	5.4	3.6
2	粘质粉土	12	19.1	15.5	23.3	7.61
3	淤泥质粘土	28	17.4	20.4	13	2.7
4	粉质黏土	16	18.6	29.6	15.9	4.12
5	粉质黏土	8	19.4	32.2	21.7	6.05
6	全风化岩	15	19.5	1	45	50

表2 桩基、管片物理力学参数

编号	名称	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^3$	$E/\text{MPa}$	$\nu$
1	管片	25	$3.0\times 10^4$	0.2
2	桩基	24	$3.0\times 10^4$	0.2

### 3 数值模拟结果分析

#### 3.1 模型可靠性分析

为研究开挖施工对不同位置桩基的影响，先分析未设置桩基条件下隧道开挖引起地层位移场变化的情况，以此验证上述数值分析模型的可靠性。图3是隧道开挖完成后  $y=0\text{m}$  平面处各地层的变形云图，其地表沉降和水平位移参见图4。根据 Peck 公式<sup>[11]</sup>及相关参数计算得到地表最大沉降值为  $11.80\text{mm}$ ，与数值模拟结果  $13.72\text{mm}$  相近，由图4(a)可知两者的沉降曲线也基本一致，从而保证了分析模型的可靠性。

此外，图4(a)表明在地表距离隧道中心线距离  $x>3D$  时，地表沉降曲线开始趋于缓和，可视为轻微影响区域。从图4(b)中可以发现，当  $x=1D$  时，地表水平位移接近  $3\text{mm}$ ，变形效果明显；当  $x=2D$  时，水平位移达到最大值  $3.72\text{mm}$ ；当  $x>3D$  时，水平位移开始降低到  $3\text{mm}$  以内，可知此处水平位移影响开始减弱。

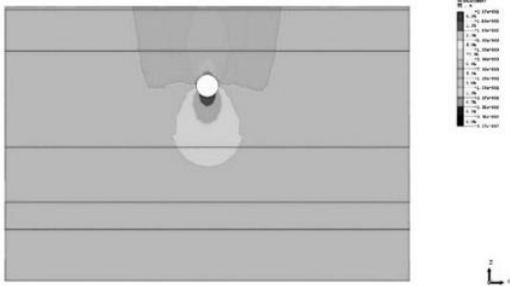
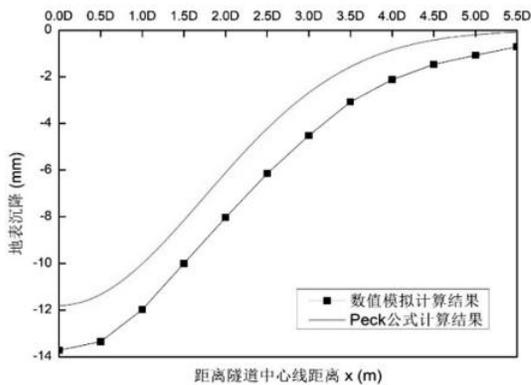
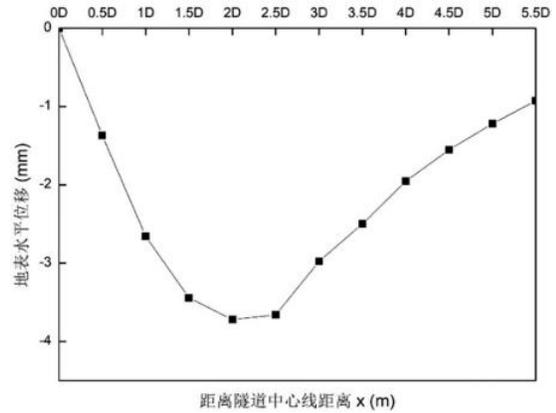


图3 地层总体沉降云图



(a) 地表沉降



(b) 地表水平位移

图4 地表沉降和水平位移 ( $y=0\text{m}$  处)

#### 3.2 邻近桩基的变形控制标准

鉴于地铁隧道施工引起桩基变形暂未有明确的规范性条文，通常涉及桩基承载力和上部结构允许沉降值等因素的约束。目前国外相关经验表明，日本新干线高架桥的相对垂直和水平变形允许值分别为  $5\text{mm}$  和  $3\text{mm}$ ；道路立交桥垂直和水平变形允许值分别为  $25\text{mm}$  和  $10\text{mm}$ 。国内一般将隧道开挖引起的桥桩沉降和水平位移允许值分别控制在  $5\text{mm}\sim 20\text{mm}$  和  $5\text{mm}\sim 10\text{mm}$  之间<sup>[12]</sup>。本文涉及的深厚淤泥质粘土层具有高压缩性和低强度的特点，导致隧道开挖引起的地层变形显著（地表沉降达  $13.72\text{mm}$ ），是典型的软土地层。结合上述标准以及经验，拟取沉降范围的中位数  $12\text{mm}$  作为沉降极限值，取沉降范围的最小值  $5\text{mm}$  作为沉降警戒值，取警戒值的  $60\%$  ( $3\text{mm}$ ) 作为沉降预警值。类比沉降控制标准，水平变形的极限值、警戒值和预警值依次取为  $8\text{mm}$ 、 $5\text{mm}$  和  $3\text{mm}$ ，见表3。

表3 桩基变形控制标准

标准	预警值	警戒值	极限值
沉降值	3	5	12
水平位移	3	5	8

#### 3.3 邻近桩基的变形计算结果

##### 3.3.1 桩顶竖向沉降

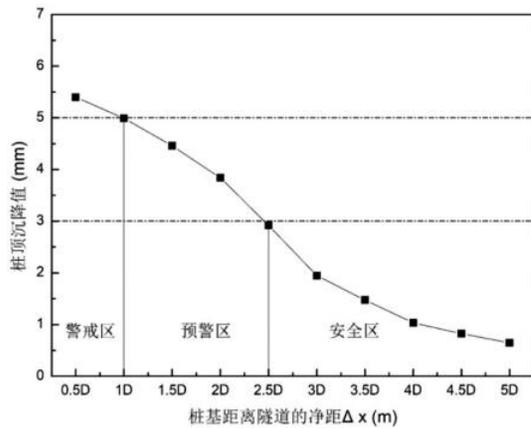


图5 桩顶竖向沉降计算结果

图5是桩顶沉降值随隧道与桩基净距 $\Delta x$ 的变化曲线。由图5可知，隧道开挖后1#桩基( $\Delta x=0.5D$ )的桩顶竖向位移最大，其沉降值为5.4mm。随着隧道与桩基的净距逐渐增大，桩顶竖向位移呈现出下降趋势。当隧道与桩基净距 $\Delta x$ 为5D时，10#桩顶沉降值为0.65mm，并且与地表沉降值趋于一致，表明此时隧道开挖对桩基沉降的影响很小。根据上述拟定的桩基变形控制标准，可将距离隧道不同净距处的桩基划分为三种类型：警戒区、预警区以及安全区。当 $0.5D \leq \Delta x \leq 1D$ 时，桩顶沉降超过警戒值5mm，因此将该区域划为警戒区；当 $1D \leq \Delta x \leq 2.5D$ 时，桩顶沉降高于预警值3mm而小于警戒值，因此将该区域称作预警区；当 $\Delta x \geq 2.5D$ 时，桩顶沉降已低于预警值，并且逐渐减小而趋于恒定，因此将该区域划为安全区。上述分析表明，隧道开挖对桩基竖向位移的影响主要集中在警戒区和预警区，两者与隧道开挖引起地表显著沉降的区域基本一致。

### 3.3.2 桩基水平位移

如图5所示，当隧道与桩基净距不同时桩身水平位移随埋深的变化规律。从图中可以发现，不同净距下各桩基的第一挠曲零点都在埋深10m附近处。然而，各桩的第二挠曲零点差异显著，其中1#桩基的第二挠曲零点埋深相对较浅，在-30m附近处。随着桩基与隧道净距的增加，各桩基第二挠曲零点的埋深也逐渐增加并不断趋于桩底-50m处。桩身最大负向水平位

移发生在桩顶，而最大正向水平位移处于埋深22m附近，与隧道埋深23.1m基本一致。根据桩基变形控制标准，可以发现2#~5#桩基的桩顶和桩身水平位移都大于预警值3mm，但仍未超过警戒值5mm；而6#~10#桩基的水平位移都在安全范围内，并且随着隧道与桩基净距的增加而不断减小；此外，1#桩基由于桩端土体的水平位移约束和桩基自身的刚度作用，导致其第一、二挠曲零点相对距离最短，所以1#桩顶和桩身最大水平位移均未超过预警值3mm。

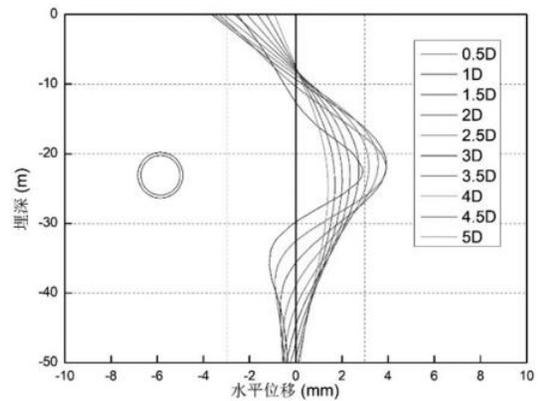


图6 桩身水平位移计算结果

结合上述关于桩顶沉降和桩身水平位移的分析结果，当以变形作为控制标准时，可采用桩顶沉降和水平位移作为隧道开挖引起桩基变形的控制指标，以此判定隧道开挖对桩基的影响程度。

### 3.4 隧道开挖对桩基的影响范围

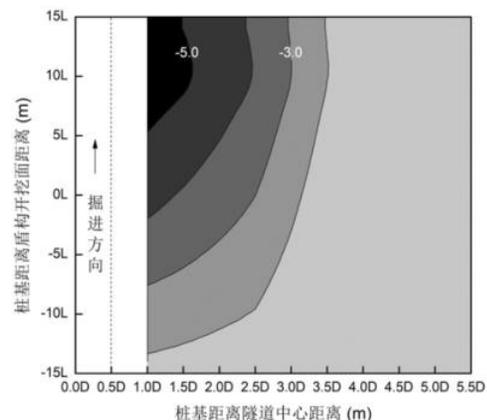


图7 盾构掘进过程中不同位置处桩顶沉降

为进一步分析隧道开挖时不同位置处桩基

的变形规律,将各桩基桩顶沉降随隧道盾构掘进的变化绘制成云图7。以距离隧道中心线1D的1#桩为例,当盾构沿掘进方向距离桩基-7.5L(负值表示隧道未到达)时,隧道开挖引起的桩顶沉降已大于预警值3mm;随着盾构持续推进,桩基变形逐渐突显;当盾构沿掘进方向距离桩基5L(正值表示隧道已通过)左右时,桩基变形开始超过警戒值5mm。因此,在施工过程中对于1#桩基而言,当盾构断面与桩基的净距小于-7.5L时,桩基变形处于安全区;当盾构断面与桩基的净距在-7.5L~5L范围内时,桩基变形处于预警区;当盾构断面与桩基的净距大于5L时,桩基变形处于警戒区。随着桩基与隧道中心线的距离增大,2#~10#桩基的安全区范围逐渐增大而警戒区范围逐渐减小。

此外,从盾构隧道施工角度看,当盾构断面通过桩基且与其净距达到10L左右时,隧道开挖对桩基变形的影响最明显,表明在盾构掘进过程中需要及时注浆以控制地层变形。其中,警戒区最远影响到距离隧道中心线1.75D,预警区最远影响到距离隧道中心线3D。上述针对隧道开挖对桩基影响的分析,可以为现场施工提供理论指导。

#### 4 结论

针对软土地层盾构隧道开挖对邻近桩基的影响,本文通过数值模拟方法分析了距离隧道中心线不同位置处桩基受开挖引起地层位移的影响程度,并对不同程度的影响范围进行分区,为现场盾构施工中的变形控制提供参考,得出以下主要结论:

(1) 数值计算结果表明隧道开挖后地表沉降曲线与经验公式基本一致,验证了本文数值模型的可靠性;此外,地表竖向和水平位移受开挖显著影响的区域范围分别为 $0 \leq x \leq 3D$ 和 $1D \leq x \leq 3D$ 。

(2) 隧道开挖对桩基竖向位移的影响主要集中在警戒区( $0.5D \leq \Delta x \leq 1D$ )和预警区( $1D \leq \Delta x \leq 2.5D$ ),与开挖引起地层显著沉降的区域基本一致;桩身最大水平位移在桩顶0m和隧道

埋深23.1m附近,但均为超过警戒值5mm,综合考虑可采用桩顶位移作为桩基变形的控制指标。

(3) 随着桩基与隧道中心线的距离增大,1#~10#桩基的安全区范围逐渐增大而警戒区范围逐渐缩小;当盾构断面通过桩基且与其净距达到10L左右时,隧道开挖对桩基变形的影响最明显,其中警戒区最远影响到距离隧道中心线1.75D,预警区最远影响到距离隧道中心线3D。

#### 参考文献

- [1] 项彦勇,周金录,路威. 承载地层隧道开挖二次应力和塑性区的理论预测方法[J]. 土木工程学报, 2011(5): 115-122.
- [2] 项彦勇,冯山群. 地层自重应力场中桩基荷载对隧道开挖塑性区影响的一种理论预测方法[J]. 土木工程学报, 2012(12): 162-169.
- [3] MORTON J D, KING K H. Effects of tunneling on the bearing capacity and settlement of piled foundations [C] // Proceedings, Tunneling 79. London: IMM, 1979: 57 - 68.
- [4] JACOBSZ S W, STANDING J R, MAIR R J. Centrifuge modeling of tunneling near driven piles [C] // Geotechnical Aspect of Underground Construction in Soft Ground. Toulouse, 2002: 89 - 94.
- [5] ONG C W, LEUNG C F, YONG K Y, CHOW Y K. Centrifuge modeling of pile responses due to tunneling in clay [J]. Underground Singapore, 2005, 128(4): 327 - 336.
- [6] LEE C J, JACOBSZ S W. The influence of tunneling on adjacent piled foundations [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21: 430.
- [7] 朱逢斌,杨平, Ong C W. 盾构隧道开挖对邻近桩基影响数值分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2).
- [8] 张云军,宰金珉,王旭东,等. 隧道开挖对临近桩基影响的二维数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6).
- [9] 杨晓杰,邓飞皇,聂雯,等. 地铁隧道近距穿越施工对桩基承载力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1290-1295.
- [10] JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范[S].
- [11] Peck R. B. Deep excavation and tunneling in soft soil. State of the Art Report. Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, 1969: 225-290.
- [12] 杜彬. 地铁车站浅埋暗挖法施工对邻近桩基的影响及控制措施[D]. 北京交通大学博士学位论文. 2006.