

# 各向异性参数对隧道施工引起地表位移的影响

张培森<sup>1</sup>,潘志存<sup>2</sup>,颜伟<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学资源与环境工程学院, 山东青岛 266510; 2. 金桥煤矿, 山东济宁 272200)

**摘要:**利用三维有限差分程序,研究了静止侧压力系数 $K_0$ 及各向异性模量比值 $n$ 对隧道施工引起的地表下沉位移的影响。结果表明:Peck公式的预测值比FLAC3D所得到的地表最大下沉位移值要大,且横向沉降槽的宽度较窄;地表最大下沉位移值随各向异性模量比值 $n$ 的增大而增大,且横向沉降槽也随之变宽,而静止侧压力系数 $K_0$ 对地表最大下沉位移的影响则反之。

**关键词:**静止侧压力系数;三维快速拉格朗日分析程序;各向异性模量比;地表位移

中图分类号:U455 文献标志码:A 文章编号:1672-3767(2011)01-042-05

## Influence of Anisotropic Parameters on Surface Displacement Induced by Tunnel Construction

ZHANG Peisen<sup>1</sup>, PAN Zhicun<sup>2</sup>, YAN Wei<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China; 2. Jinqiao Coalmine, Jining, Shandong 272200, China)

**Abstract:** The influences of static lateral pressure coefficient  $K_0$  and anisotropic modulus ratio  $n$  on surface subsidence and displacement induced by tunnel construction were researched by using three-dimension explicit finite-difference program. Some conclusion can be drawn; the maximum subsidence values predicted by Peck method was larger than that by FLAC3D, and the width of transverse settler was narrower. The maximum subsidence and displacement values increased along with the increase of anisotropic modulus ratio  $n$ , and at the same time, the transverse settler was wider, but the influence of static lateral pressure coefficient  $K_0$  on the maximum subsidence and displacement was reverse.

**Key words:** static lateral pressure coefficient; FLAC3D; anisotropic modulus ratio; surface displacement

随着城市的高速发展,地面构筑物及地下管线越来越密集,地下空间资源越来越紧张,并且城市地下工程施工多集中于城市的商业繁华地带或人口密集区,因此,正确预测工程施工对周围环境及已有构筑物的影响非常重要。近年来,国内外学者逐步展开针对城市地下工程施工引起地表变形问题的研究:赵德安等<sup>[1]</sup>利用FINAL软件分析了静止侧压力系数变化对隧道衬砌力学行为的影响程度;张海波等<sup>[2]</sup>分析了盾构推进过程中隧道周围及地表处土体的位移和变形以及横断面不同深度上的沉降分布规律;朱维申等<sup>[3]</sup>对无支护结构以及有无预应力锚索有锚杆有衬砌的小浪底水利枢纽地下厂房岩体力学行为进行了分析。研究表明,地下工程施工引起地表变形的影响因素很多,如土体参数、管道半径、埋设深度、施工水平及体积损失等,且上述研究多把土体作为各向同性材料进行考虑,而实际上土体经过长期复杂的地质作用,多表现出固有各向异性、应力诱导各向异性等特性,即 $G_{vh}/G_{vh} \neq 1$ <sup>[4-6]</sup>。同时唐世栋等<sup>[7]</sup>指出,在岩土工程设计中,静止侧压力系数 $K_0$ 是一个非常重要的参数。目前,研究静止侧压力系数 $K_0$ 及各向异性模量比值 $n$ 对隧道施工引起地表下沉位移影响的文献还不多见,同时由于盾构施工引起的地表和地层位移具有三维性、历时性、地域性特点,用二维模型来研究盾构施工对地层变形影响时,虽在一定程度上可以反映隧道的开挖过程,但不能反

收稿日期:2010-02-25

基金项目:中国博士后基金项目(20090461257);山东科技大学科学研究“春蕾计划”项目(2009AZZ180).

作者简介:张培森(1977—),男,山东曹县人,讲师,博士,主要从事地下空间开发与利用及数值计算等教学、科研工作。

E-mail: peisen\_sky@163.com.

映开挖纵向的沉降过程。因此,本文采用三维数值分析方法对静止侧压力系数  $K_0$  及各向异性模量比值  $n$  对隧道施工引起地表下沉位移的影响展开研究。

## 1 计算条件

### 1.1 几何模型

根据某地铁隧道的实际情况,上覆土体的平均厚度  $H$  取 17.7 m,隧道直径  $D$  取 6.8 m。为消除边界影响,计算模型的几何尺寸为沿走向( $Y$ )取 50.0 m,沿深度( $Z$ )取 80.0 m,沿倾斜方向( $X$ )取 124.0 m,其计算范围和网格划分如图 1 所示。

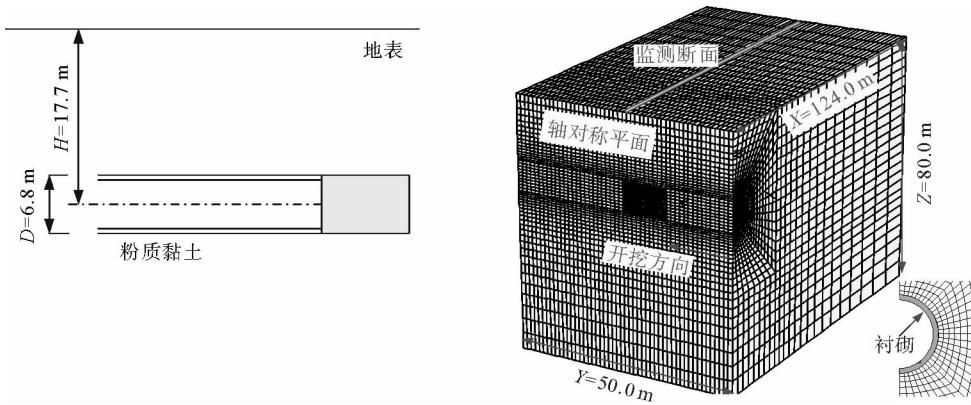


图 1 计算模型示意图

Fig.1 The sketch of calculation model

### 1.2 计算模型

大量现场实测数据表明,实际工程(如地铁、基坑、地基等)中岩土体应变都很小,主要集中在 0.01%~0.3%之间<sup>[8-11]</sup>,因此,本文对静止侧压力系数  $K_0$  及各向异性模量比值  $n$  对隧道施工引起地表下沉影响分析采用非线性各向异性弹性模型。

为了更加真实地反映土体与衬砌之间的共同作用对地表变形的影响,对衬砌采用壳单元(Shell 单元),同时对土体与衬砌结构之间的接触面采用 Interface 单元。为模拟盾构的动态推进过程,采用开挖步距为 1 m 的土体单元,在开挖面后 10 m 处释放开挖土体单元平衡反力。

### 1.3 计算参数

为了避免多层土体相互交叉影响,更好地分析静止侧压力系数  $K_0$  及各向异性模量比值  $n$  对隧道施工引起地表下沉的影响,把计算区域内的土体作为单一介质,土体基本参数如表 1 所示。

表 1 土体基本物理参数表  
Tab.1 The basic physical parameters of soil

垂向弹模 $E_v/\text{kPa}$	泊松比 $\nu_{vh}$	泊松比 $\nu_{hh}$	垂向剪切模量 $G_{vh}/\text{kPa}$	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	弹模比值 $n=E_h/E_v$	静止侧压力系数 $K_0=\sigma'_h/\sigma'_v$						
5 500	0.145	0.145	2 475	1 985	0.8	1.0	1.2	1.6	0.5	0.8	1.0	1.2

## 2 计算结果与分析

### 2.1 横向地表沉降规律

图 2 描述了不同开挖时步条件下,地表下沉位移与横向距离地铁轴线距离的动态关系。从图 3 可见,横向地表沉降曲线与 Peck 公式<sup>[12]</sup>或一系列修正的 Peck 公式<sup>[13-14]</sup>所给出的地表沉降曲线吻合较好,近似为正态分布曲线。其中,Peck 横向分布公式为

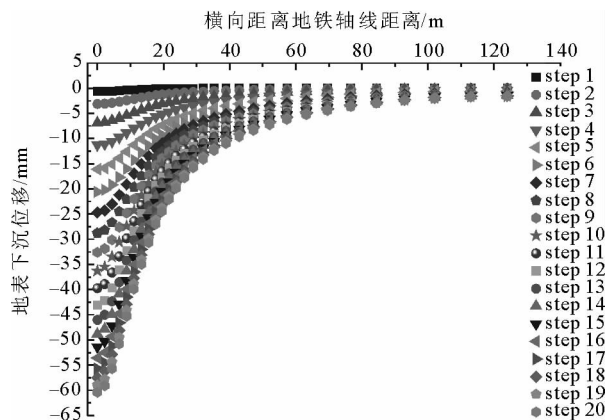


图2 不同开挖时步下地表下沉位移与距离地铁轴线距离的关系图

Fig. 2 The relation between distance from tunneling axis and ground surface subsidence displacement under condition of different steps

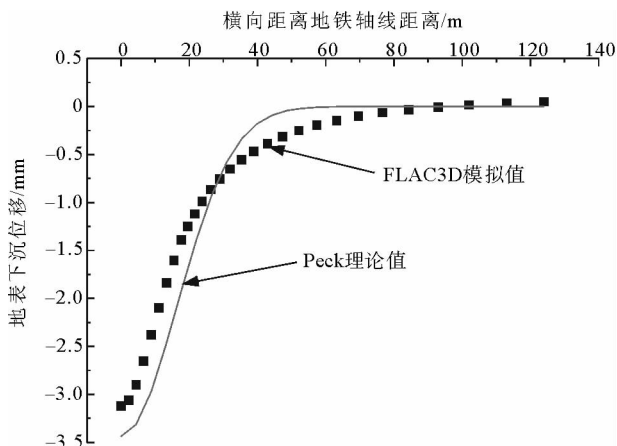


图3 step2 状态下两种方法预测值的比较图

Fig. 3 The comparison of prediction values by two methods under step 2

$$\delta_{z, \max} = \frac{V_s}{i\sqrt{2\pi}} \approx \frac{V_s}{2.5i}, \quad (1)$$

$$\delta_z(x) = \delta_{z, \max} e^{-\frac{x^2}{2i^2}}, \quad (2)$$

$$i = \frac{H}{\sqrt{2\pi} \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}. \quad (3)$$

式中： $\delta_{z, \max}$ 为最大下沉位移，mm； $\delta_z(x)$ 为正交于地铁轴线的平面内垂直向位移，mm； $i$ 为沉降槽宽度系数； $\varphi$ 为土体内摩擦角， $^\circ$ ； $V_s$ 为体积损失； $H$ 为地铁轴线的埋深，m。

Peck法以大量现场实测为基础，使用简单，应用性较强，但缺乏理论基础。同时该公式是在压力平衡式施工方式出现之前形成的，没有考虑平衡压力对减缓地表下沉的有利影响，其预测结果一般都大于实测值<sup>[15-17]</sup>。

## 2.2 纵向地表沉降规律

图4所示为地表沉降的纵向变化过程，可分为4个阶段<sup>[18-19]</sup>：微小变形阶段、变形急剧增大阶段、缓慢变形阶段、变形基本稳定阶段。

从图4中FLAC3D模拟值与 $\delta_z$ 拟合值比较可知，采用式(4)能够很好地描述在纵向方向上地表下沉位移与开挖时步之间的关系。

$$\delta_z = \delta_{z, \max} / (1 + i e^{-\frac{\sin\alpha}{2} \cdot x}). \quad (4)$$

## 2.3 各向异性模量比值对地表沉降的影响

各向异性模量比值对地表下沉位移的影响如图5所示。从图5可以看出，在其他参数不变的条件下，地表下沉位移值随各向异性模量比值的增大而增大，同时在横向平面内地表位移沉降槽也随之变宽，但相对而言变化幅度都不是很大。

## 2.4 静止侧压力系数对地表沉降的影响

静止侧压力系数对地表下沉位移的影响如图6所示。从图6可以看出：在其他参数不变的条件下，地表下沉位移随静止侧压力系数 $K_0$ 的增大而减小，同

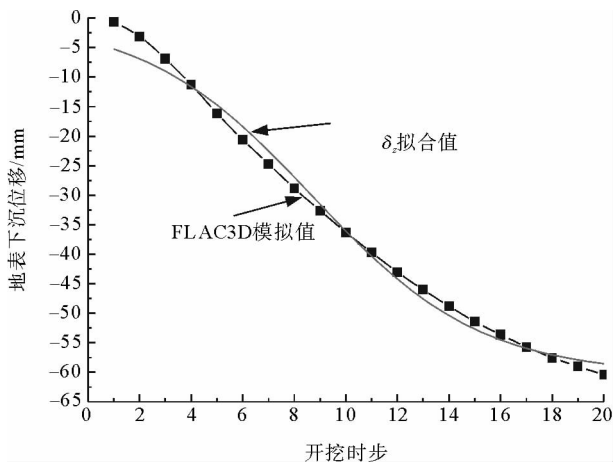


图4 地表下沉位移与开挖时步关系曲线图

Fig. 4 The relational curve between ground surface subsidence displacement and excavation steps

时在横向平面内地表位移沉降槽也随之变窄;当  $K_0 < 1$  时,两种变化都随  $K_0$  增加而减小,且减小幅度相对都较小,但当  $K_0 > 1$  时,两种变化出现跳跃式变化。

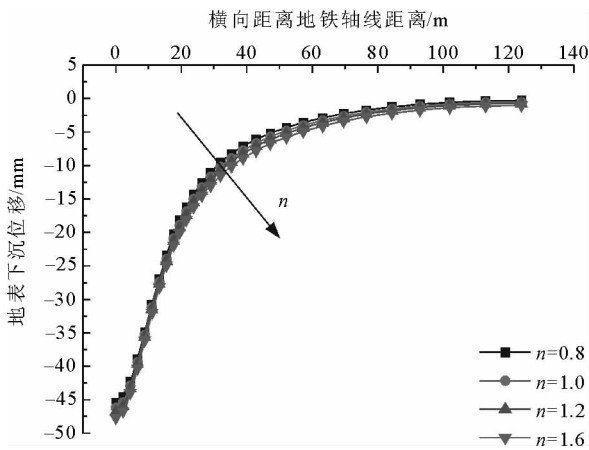


图5 各向异性模量比值不同对地表下沉位移的影响图

Fig. 5 The influence of anisotropic modulus ratio on ground displacement

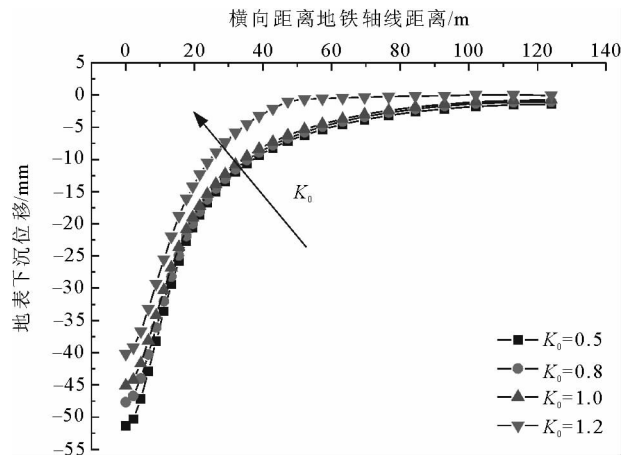


图6 静止侧压力系数不同对地表下沉位移的影响图

Fig. 6 The influence of lateral pressure coefficient on ground displacement

### 3 结语

通过采用三维数值分析方法针对静止侧压力系数  $K_0$  及各向异性模量比值  $n$  对隧道施工引起地表下沉位移的影响展开研究,得出如下结论。

1) 盾构施工引起的地表和地层位移具有空间性及历时性,在计算分析时采用三维数值分析方法才能得到更加合理的结果。

2) Peck 公式及修正 Peck 公式能够很好地反映因隧道施工引起的横向地表位移沉降曲线,但与 FLAC3D 的预测值相比,采用 Peck 公式预测得到的最大下沉位移值较大,且横向沉降槽的宽度较窄。

3) 在其他参数不变的条件下,地表下沉位移随各向异性模量比值的增大而增大,且横向地表位移沉降槽也随之变宽;地表下沉位移随静止侧压力系数  $K_0$  的增大而减小,同时横向地表位移沉降槽也随之变窄。

#### 参考文献:

[1] 赵德安,蔡小林,陈志敏,等. 侧压力系数对隧道衬砌力学行为的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(增2):2857-2860.  
ZHAO Dean, CAI Xiaolin, CHEN Zhimin, et al. Influence of side-pressure coefficient on mechanical behavior of tunnel lining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(s2): 2857-2860.

[2] 张海波,殷宗泽,朱俊高. 地铁隧道盾构法施工过程中地层变形的三维有限元模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(5): 755-760.  
ZHANG Haibo, YIN Zongze, ZHU Jungao. 3D finite element simulation on deformation of soil mass during shield tunneling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 755-760.

[3] 朱维申,刘建华,杨法玉. 小浪底水利枢纽地下厂房岩体支护效果数值分析研究[J]. 岩土力学,2006,27(7):1087-1091.  
ZHU Weishen, LIU Jianhua, YANG Fayu. Numerical analysis of supporting effect of underground caverns surrounding rock-mass of Xiaolangdi key water control project [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1087-1091.

[4] NG C W, LEUNG E H Y, LAU C K. Inherent anisotropic stiffness of weathered geomaterial and its influence on ground deformations around deep excavations [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41: 12-24.

[5] LEE K M, ROWE R K. Deformations caused by surface loading and tunnelling: The role of elastic anisotropy [J]. Geotechnique, 1989, 39(1): 125-140.

[6] FIORAVANTE V. Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands from seismic wave propagation measured in triaxial testing [J]. Soils and Foundations, 2000, 40(4): 129-142.

- [7]唐世栋,吕建春,傅纵.扁铲侧胀试验求解初始水平应力和静止侧压力系数[J].岩土工程学报,2006,28(12):2144-2148.  
TANG Shidong, LV Jianchun, FU Zong. Solution to initial horizontal stress and lateral earth pressure coefficient at rest by flat dilatometer tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2144-2148.
- [8]BURLAND J B. Small is beautiful; The stiffness of soils at small strains[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26: 499-516.
- [9]PUZRIN A M, BURLAND J B. Non-linear model of small-strain behavior of soils[J]. Geotechnique, 1998, 48(2): 217-233.
- [10]MAIR R J. Developments in geotechnical engineering research: Application to tunnels and deep excavations[J]. Proceedings of Institution of Civil Engineers: Civil Engineering, 1993, 93(1): 27-41.
- [11]CLAYTON C R, KHATRUSH S A. A new device for measuring local axial strains on triaxial specimens[J]. Geotechnique, 1986, 36(4): 593-597.
- [12]PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico, 1969: 225-281.
- [13]ATKINSON J H, POTTS D M. Subsidence above shallow tunnels in soft ground[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(4): 307-325.
- [14]CLOUGH G W, SCHMIDT B. Design and performance of excavation and tunnels in soft clay[C]// Soft Clay Engineering, Chapter 8. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1981: 569-634.
- [15]吴张中,李丽平,陈少华.地铁隧道盾构施工地表沉降的预测分析[J].路基工程,2007(4):46-48.
- [16]韩焯,李宁.隧道施工引起地层位移预测模型的对比分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(3):594-600.  
HAN Xuan, LI Ning. Comparative analysis of strata prediction models for ground movement induced by tunnel construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 594-600.
- [17]张书丰,孙树林,吴凯.南京地铁盾构施工引起的地表沉降分析[J].城市轨道交通研究,2006(5):30-32.  
ZHANG Shufeng, SUN Shulin, WU Kai. Analysis on ground settlement by shielding method in Nanjing metro[J]. Urban Mass Transit, 2006(5): 30-32.
- [18]刘招伟,王梦恕,董新平.地铁隧道盾构法施工引起的地表沉降分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(8):1297-1301.  
LIU Zhaowei, WANG Mengshu, DONG Xinping. Analysis of ground surface settlement of metro tunnel induced by shield construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1297-1301.
- [19]姚宣德,王梦恕.地铁浅埋暗挖法施工引起的地表沉降控制标准的统计分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(10): 2030-2035.  
YAO Xuande, WANG Mengshu. Statistic analysis of guideposts for ground settlement induced by shallow tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2030-2035.