

# 土压平衡盾构隧道施工引起的地面沉降分析

龚旭, 慎乃齐, 李标

(中国地质大学<北京> 工程技术学院, 北京 100083)

**摘要:** 土压平衡盾构隧道施工对周围岩土体产生的扰动会引起地表下沉变形, 从而对地面建筑物, 地下管线设施等构成威胁。以广州地铁三号线某隧道工程为例, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 对盾构施工引起的地表沉降进行了数值模拟。重点讨论了隧道横、纵向沉降分布规律, 并结合实际施工过程分析了产生沉降的原因, 对隧道工程信息化施工提出具有实际意义的指导。

**关键词:** 土压平衡盾构; 隧道施工; 地面沉降; 数值模拟

**中图分类号:** U455.43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-7428 (2009) S1-0395-05

## 1 引言

地铁隧道工程主要建设于城市人口密集地区, 城市地下隧道工程的开挖不可避免地对周围岩土体产生扰动, 导致地下岩土应力重分布, 从而引起地面沉降, 对地面建筑物、地下管线等设施的安全构成威胁。因此, 地铁施工地面沉降预测是城市地铁建设中的研究热点<sup>[1-6]</sup>。目前, 对盾构法隧道施工引起的地表沉降分析及预测的方法主要有: 经验公式法、解析法、模型试验研究法、数值模拟法等。其中数值模拟法被国内外学者应用的较多<sup>[3,4]</sup>。

土压平衡盾构作为一种新型盾构有着非常广泛的应用前景。它是在局部气压及泥水加压盾构基础上发展起来的一种适用于含水饱和和软弱地层中施工的新型盾构。它通过不断调整开挖面的土舱压力来尽可能地降低对地层的扰动影响。土压平衡法施工固然有很多优点, 但其中也避免不了对原始地层的应力扰动, 并进一步导致地表沉降与变形<sup>[5]</sup>。因此, 就土压平衡盾构施工对地层变形的影响做出评价和预测是十分必要的。本文采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件对广州地铁三号线某区间隧道施工进行地面沉降数值模拟, 并结合数值模拟的结果分析各种施工因素对地面沉降的影响。

表1 盾构区段地层岩土力学参数值

土层名称	厚度/m	变形模量 /MPa	内摩擦角 /(°)	凝聚力 /kPa	静侧压力 系数 $K_0$
素填土	4.9	3.13	17.50	18.80	0.54
粉质粘土	6.1	3.81	16.10	19.25	0.43
砂土	2.0	7.22	30.00	0.00	0.39
可塑残积土	7.0	10.00	24.16	19.54	0.47
硬塑残积土	7.3	18.00	24.01	21.09	0.43
全风化层	8.0	35.00	23.30	24.40	0.43

## 2 工程概况

广州地铁三号线隧道工程由左右两线组成。左线隧道全长 4717.4m, 右线全长 4732.1m。隧道平面最小转弯半径为 800m, 埋深一般在 5~31m 之间。沿线多为建筑物密集的居民区、商业区, 要求隧道开挖不能对地表环境有较大影响。本文选择其中的一个盾构区段为数值模拟研究对象, 该区段地面高程为 6.92~9.10m, 相对高差为 2.18m, 地下水埋深为 0.10~6.00m, 标高 1.65~7.48m。地下水按赋存方式分为第四系孔隙水和基岩裂隙水二种。该区段地层岩土力学参数如表 1 所示。隧道工程主要位于含水饱和和软弱地层中, 故而采用土压平衡盾构施工比较合理。

收稿日期: 2009-08-30

**作者简介:** 龚旭 (1986-), 男, 浙江人, 中国地质大学 (北京) 硕士研究生在读, 岩土工程专业, 主要研究方向为地下建筑工程, gx1492@vt.edu; 慎乃齐 (1956-), 女, 浙江人, 中国地质大学 (北京) 教授, 主要从事岩土及地质灾害方面的研究工作, nqshen@cugb.edu.cn; 李标 (1987-), 男, 江苏人, 中国地质大学 (北京) 硕士研究生在读, 岩土工程专业, 主要研究方向为岩体力学及边坡工程, jiangbiao66@163.com。

### 3 三维地层数值模拟

用 FLAC<sup>3D</sup> 建立三维地层计算模型时, 首先根据地层岩性分层可得知整个模型可分为 6 层, 为了考虑模型底部边界效应的影响, 将整个土体单元模型 Z 方向高度设为 40m, 土体单元模型的 X 轴方向尺寸设为 40m, Y 轴方向 (隧道轴线方向) 设为 45m。隧道轴线到地表的距离为 20m, 即整个隧道开挖是在可塑残积土和硬塑残积土地层中进行。然后通过 FLAC<sup>3D</sup> 命令流来建立几何模型, 把整个模型区域分为 20640 个单元, 22103 个网格结点, 如图 1 所示。由于整个隧道以隧道轴线为对称轴, 应力、应变等力学效应, 地表、拱顶沉降等都以隧道轴线对称, 因此在进行三维数值模拟的时候以半模型为基础, 这样可以有效地加快计算速度。半模型图如图 2 所示, 其中盾壳厚度为 0.115m, 盾尾空隙为 0.075m, 管片衬砌厚度为 0.3m。

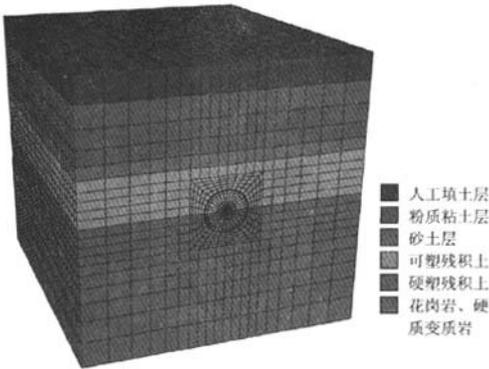


图 1 三维地层全模型图

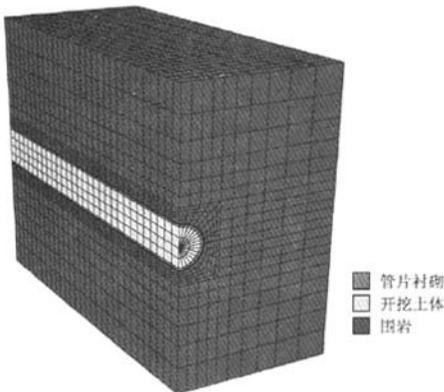


图 2 三维数值模拟半模型图

### 4 地面沉降分析

#### 4.1 盾构开挖推进模拟

用 FLAC<sup>3D</sup> 建立地层模型并进行初始地应力平衡计算后可进行盾构开挖推进模拟。第一阶段为盾构推进直到全部进入上土; 第二阶段为盾构继续推进直至通过整个隧道。整个开挖模拟流程如图 3 所示。

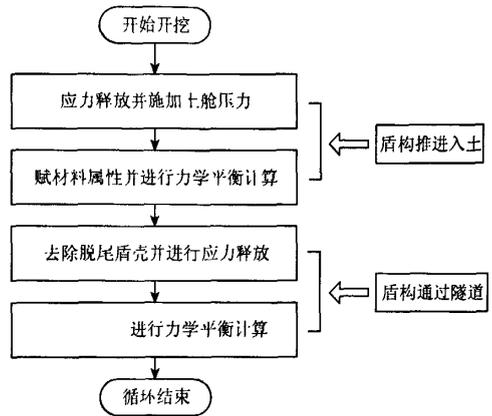


图 3 盾构开挖推进模拟流程图

#### 4.2 隧道纵向沉降分析

本文选择在盾构开挖到 22.5m 处时进行分析研究。图 4 为盾构开挖到 22.5m 处隧道轴线处水平位移云图, 从图中可以看出在开挖面前方的土体在盾构机的推动下均向前方有少量的位移, 最大位移值约为 1.71cm, 其影响范围约在开挖面前方 12m 左右。图 5 为盾构开挖到 22.5m 处隧道垂直方向沉降云图。通过分析施工过程及沉降结果可得:

(1) 隧道拱顶处有土体产生向下的位移, 隧道底部处有土体产生微量的上浮。盾构在开挖隧道时为了能够顺利地推进, 刀盘的直径要稍微大于盾壳直径, 因此产生了超挖现象, 从而导致盾壳周围产生环状空隙使周边土体挤入空隙, 导致拱顶处有土体下移; 下部土体上浮是由地层损失产生了应力释放以及盾构开挖导致的上部覆土重力减少所致。

(2) 盾构机尾部的土体沉降要大于盾构机前方土体沉降。这是因为土体的下沉是一个长期过程, 它包括开挖面前沉降、盾构通过时沉降、盾尾脱空时沉降以及蠕变, 次固结沉降等多个阶段。

(3) 离盾尾 13.5m 左右沉降趋于稳定, 这是因为盾尾脱空后采用了管片初砌加以支护, 有效地控制了土体下沉。

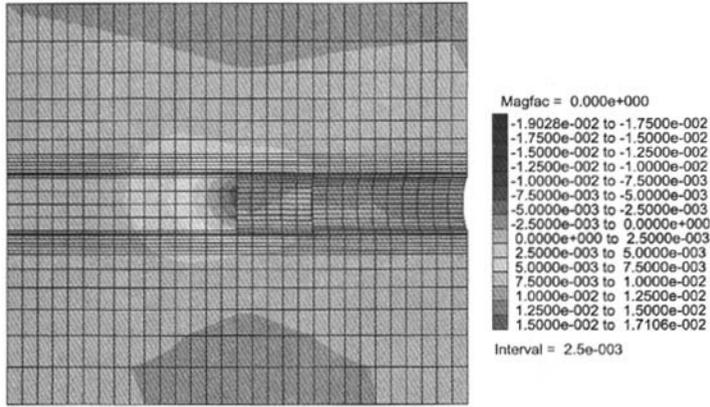


图4 盾构开挖到 22.5m 处隧道中心轴线处水平位移云图

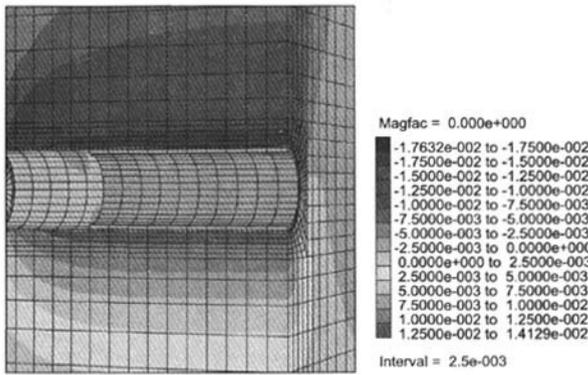


图5 盾构开挖到 22.5m 处隧道地表沉降分布图

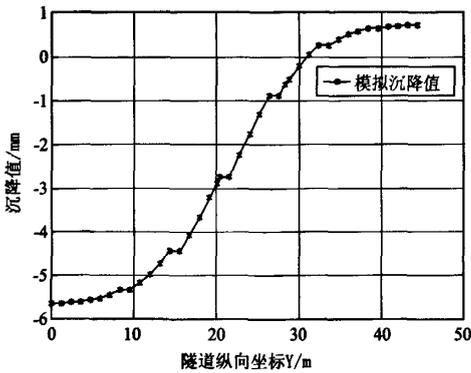


图6 盾构开挖到 22.5m 处隧道轴线  $x=0$  处地表各点沉降曲线图

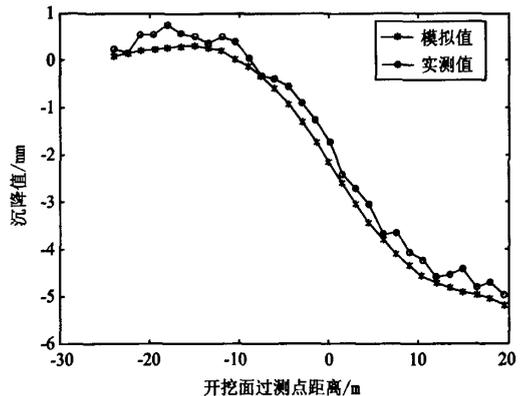


图7 监测点地表随着开挖推进沉降值分布图

图6为盾构沿轴线向前开挖到22.5m处时,轴线上各点的沉降值分布图,从图中可以看出 $y=$

32m左右处地表开始出现向上隆起现象,最大隆起值约为0.8mm。以盾构开挖轴线上 $y=25.5m$ 处为

监测点，监测模拟盾构推进时地表沉降值的变化过程，结果如图 7 所示，实测值与数值模拟计算结果基本相符合，随着盾构开挖面的推进监测点首先产生隆起现象，而后沉降值逐渐增大。

坐标值的增大，其地表沉降值逐渐减小。在  $y = 30\text{m}$  处的横断面上，距离隧道轴线  $12\text{m}$  左右出现了地表隆起，隆起值约为  $0.2\text{mm}$ 。在  $y$  为  $40\text{m}$  和  $45\text{m}$  处，地表完全处于隆起状态，最大隆起值约为

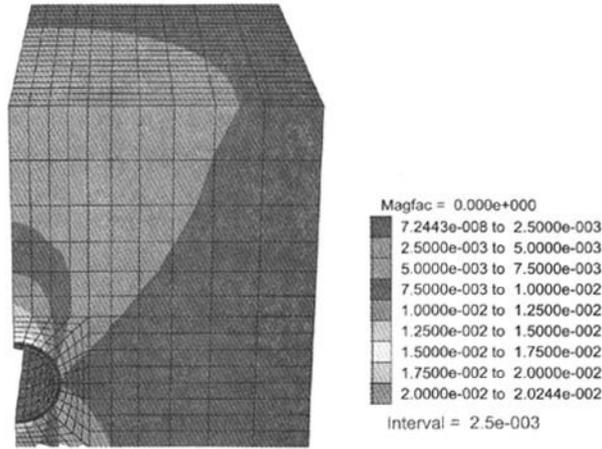


图 8 盾构开挖到 22.5m 时地面沉降分布图

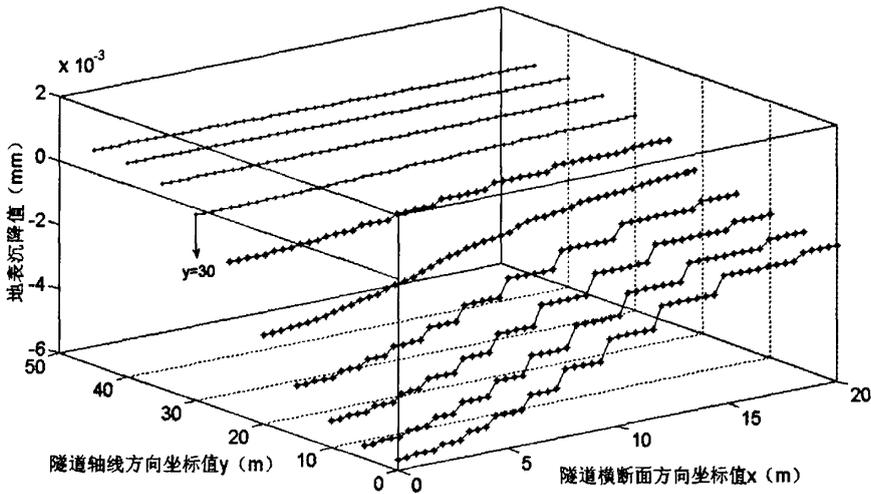


图 9 隧道轴线方向各个横剖面处地表沉降分布曲线

### 4.3 隧道横断面沉降分析

图 8 为盾构开挖到 22.5m 时地表横向断面沉降分布等色图。随着盾构不断向前推进，地表横断面沉降不断向外扩展。且以隧道轴线为对称轴，隧道轴线处地面沉降值最大。图 9 为盾构开挖到 22.5m 时沿着隧道纵向各个横剖面处地表沉降分布曲线。对比各条沉降分布曲线可得，各个剖面处地表沉降值及变化幅度相差较大。随着隧道轴线方向

0.8mm。虽然每个横断面沉降值以及变化幅度有较大差别，但其总体变化规律基本一致，大体上呈正态分布。

### 5 结论

经过对广州地铁三号线某盾构区间隧道进行数值模拟研究可以得出因盾构施工产生地面沉降的基本规律。结合实际施工过程可以从隧道轴线和横断

面两方向来分析沉降规律的机理。同时,对比监测点实际沉降结果与数值模拟计算结果发现本文所采用的 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟结果与实际情况较为符合,对隧道信息化施工有一定的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 黄俊,张顶立. 地铁暗挖隧道上覆地层大变形规律分析[J]. 岩土力学,2004,25(8):1288-1292.
- [2] 黄俊,张顶立. 地铁重叠隧道上覆地层变形的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(12):2176-2181.
- [3] 韩焯,李宁, Jamie R. STANDING. 地铁隧道施工引起地层位移规律的探讨[J]. 岩土力学,2007,28(3):609

- 613.
- [4] Villy A. Kontogianni, Stathis C. Stiros. Induced deformation during tunnel excavation: Evidence from geodetic monitoring[J]. Engineering Geology 2005;(79); 115-126.
- [5] Thomas Kasper, Gunther Meschke. A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling[J]. Computers and Geotechnics 2006;(33); 234-247.
- [6] M. Cai. Influence of stress path on tunnel excavation response-Numerical tool selection and modeling strategy[J]. Tunnelling and Underground Space Technology 2008;(23); 618-628.

(上接第 394 页)

### 3.5 不得“偷减”工序

CRD 工法工序复杂,施工繁琐,效率低,进度慢。因此,人们很容易产生以“偷减”工序来加快进度的想法,实际上,这种想法是十分错误的,因为 CRD 工法是针对极软弱围岩而采取的施工方法,它的每道工序都是十分必要的,一旦“偷减”工序,很容易发生安全事故。

反面案例:施工中采用了省略“临时仰拱”的工序,实际上就是把 CRD 工法变成了 CD 工法,结果第二天该处就出现了“侧壁起鼓”现象。

### 3.6 适时进行二次衬砌

正常情况下,通过围岩监控量测,确认围岩稳定后,便可进行二次衬砌。但对浅埋土质隧道而言,围岩的自稳能力较弱,当受外界因素(地表

水或地下水的渗入、爆破震动等)影响时,围岩的自稳能力就会大大降低,甚至可能出现围岩失稳情况。因此,要时刻做好二次衬砌的准备工作,当量测结果反映围岩不能逐步收敛时,要及时对该处进行二次衬砌,以避免塌方事故发生。

对自稳能力极差的围岩,必要时,须采取“短掘短砌”。

#### 参考文献:

- [1] 麻永华,贺善宁. 建筑物下浅埋暗挖隧道施工技术研究[J]. 隧道/地下工程,2004,(12).
- [2] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥:安徽教育出版社.
- [3] 黄成光. 公路隧道施工[M]. 北京:人民交通出版社.