

# 交叉隧道盾构施工与邻近不同位置 建筑物的相互影响研究\*

房明<sup>1</sup>, 刘镇<sup>1</sup>, 周翠英<sup>1</sup>, 史海欧<sup>2</sup>

(1. 中山大学工学院//岩土工程与信息技术研究中心, 广东 广州 510275;  
2. 广州市地下铁道设计研究院, 广东 广州 510010)

**摘要:** 交叉隧道盾构施工及其与周围环境的相互影响已成为地下工程研究中的前沿课题之一。城市地铁隧道掘进会引起邻近建筑物的变形, 甚至造成灾害。随着城市交叉隧道邻近建筑物施工的现象明显增多, 如何确保上部建筑物与隧道结构的安全成为施工中的难题。采用三维有限元方法, 对邻近不同位置建筑物工况下的新建隧道盾构下穿既有隧道施工进行了模拟和分析。研究表明, 忽略邻近建筑物的存在将低估交叉隧道盾构下穿施工的影响; 建筑物与交叉隧道盾构之间的相互影响存在一定范围, 当新建隧道轴线与建筑物中心线的水平距离与隧道外径之比  $L/D=0\sim 2$  时, 交叉隧道盾构施工对建筑物的影响较大, 特别是当  $L/D=1.5$  时, 建筑物处于危险状态;  $L/D=0\sim 3$  时, 建筑物的存在会增大新、旧隧道的内力和变形, 在该区域以外对隧道影响较小。研究成果对交叉隧道的安全施工有一定的指导意义。

**关键词:** 交叉隧道; 盾构; 建筑物; 数值模拟; 沉降

**中图分类号:** TD853.34 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2011)01-0064-06

## Study on Interaction Between Undercrossing Shield Tunneling and Adjacent Structure in Different Distance

FANG Ming<sup>1</sup>, LIU Zhen<sup>1</sup>, ZHOU Cuiying<sup>1</sup>, SHI Haiou<sup>2</sup>

(1. School of Engineering//Research Center for Geotechnical Engineering and Information Technology,  
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Design institute of Guangzhou Metro Corporation, Guangzhou 510010, China)

**Abstract:** The influence of undercrossing shield tunneling and its interaction with surrounding environment is one of the hot issues in the underground engineering field. The urban tunnel construction will cause the deformation or even damage of the nearby buildings. With the construction of undercrossing tunnels, more and more undercrossing tunnels are adjacent buildings. It is a crucial problem to ensure the safety for stabilizing the superstructure and undercrossing tunnels. By means of 3D-FEM, the undercrossing shield tunneling construction of adjacent structures is simulated and studied. The results show that the influence of adjacent structure on the undercrossing shield tunneling construction cannot be neglected, and the influence scope can be expressed by  $L/D$ , which  $L$  is defined as level distance from the new tunnel axis to building axis and  $D$  is defined as outer diameter of tunnel. When  $L/D=0$  to 2, undercrossing shield tunnel construction has great influence on building, especially, the building is in dan-

\* 收稿日期: 2010-03-25

**基金项目:** 国家自然科学基金重点资助项目/面上资助项目(41030747, 40672194); 国家863高技术计划资助项目(2007AA11Z112); 教育部博士学科点基金资助项目(20060558060, 20090171110044); 广东省自然科学基金重点资助项目(06104932, 013188); 广东省科技计划资助项目(2010A030200007); 广东省高层次人才计划项目; 广州市科技支撑计划项目; 中山大学后备重点课题(1132169)

**作者简介:** 房明(1981年生), 女, 博士生, 通讯作者: 周翠英; E-mail: ueit@mail.sysu.edu.cn

ger when  $L/D = 1.5$ . When  $L/D = 0$  to 3, the value of the existing tunnel deformation and the new tunnel lining force increases obviously. Out of the region, the influence on the buildings is ignored.

**Key words:** undercrossing tunnel; shield tunneling; structure; numerical simulation; settlement

由于隧道开挖施工引起地层的位移可能会引起附近建筑物或其他各类结构的变形,甚至造成灾害。长期以来地层位移与结构变形预测、结构损坏风险评估等问题引起了广泛的关注,相关研究成果大量涌现<sup>[1]</sup>。而随着城市交叉隧道的修建,交叉隧道邻近建筑物施工的现象明显增多,如何确保上部建筑与隧道结构安全是施工中的难题。因此,交叉隧道盾构施工与周围环境特别是相邻建筑物的相互影响是一个值得深入研究的重要课题。

隧道开挖引起的建筑物沉降预测是一个极为复杂的隧道-土-结构相互作用问题<sup>[1]</sup>。目前这一课题的主要研究方法有有限元方法<sup>[2-9]</sup>、随机介质理论和解析方法<sup>[1, 10-13]</sup>。其中,三维有限元法由于能够模拟隧道掘进过程及掘进过程产生的三维效应,如盾尾注浆、隧道开挖面土体的扰动等,而被广泛运用于盾构隧道施工环境影响模拟中。其中,大部分研究成果都是关注于隧道对地表及建筑物的影响而对于建筑物的存在对隧道开挖的影响问题很少有论述。事实上,当地铁隧道开挖引起周围建筑物沉降的同时,建筑物的存在对隧道的影响问题已经变得同等重要。此外,研究对象多为单个隧道开挖影响问题,而针对交叉隧道的施工影响问题论述较少。

本文结合广州市交叉隧道工程实例,采用三维有限元方法,对邻近建筑物工况的交叉隧道盾构施工进行模拟,对交叉隧道盾构施工引起的地面沉降、建筑物的变形及新、旧隧道衬砌的内力与变形进行了研究,从而分析交叉隧道施工与邻近不同位置处建筑物之间的相互影响。

## 1 盾构施工三维有限元模拟方法

对于新建隧道盾构施工过程的动态模拟,用改变单元材料的方法来反映盾构的向前推进,被开挖的单元用刚度极小的单元代替,而对应于盾壳、管片及注浆材料的位置分别将单元刚度用钢、管片和浆液的刚度替换。为计算简便,可假定盾构机每步推进3 m(2倍管片宽度)。

盾构掘进过程数值模拟的关键是刀盘、盾壳和盾尾这三部分与土体间的相互作用关系的模拟。目前,对于盾尾注浆的模拟方法主要有两种,一种是不考虑盾尾注浆的影响,另一种将注浆层概化为一

均质、等厚的等代层。而在实际施工过程中,盾构施工一般采用同步的壁后注浆,这种注浆是带有压力的,可以迅速地充填土体的孔隙,使土体不致在盾尾脱离时产生较大的变形。因而,注浆及其压力的影响不可忽略且注浆体随着施工的进行逐渐硬化。为此,本文采用注浆材料的变刚度等效法来模拟注浆材料的硬化同时采用等效的均布注浆压力来模拟盾尾同步注浆。

同时,盾构掘进三维模型的建立还应模拟:①采用在盾构作业开挖面上施加大小不等的表面压力来模拟刀盘对土体的压力;②采用均布力模拟作用于隧道管片上的千斤顶推力;③采用地层应力释放来模拟盾尾脱环在管片衬砌上产生的变形和内力;④采用在盾壳外表面上施加表面压力来模拟由于刀盘超挖或盾尾建筑空隙等引起的地层损失而在土体中产生的附加力,如图1所示。

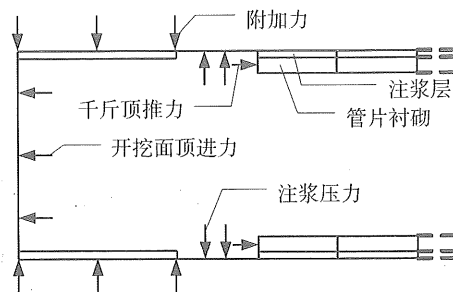


图1 模拟盾构推进示意图

Fig. 1 Sketch of shield driving

## 2 邻近建筑物工况的交叉隧道盾构施工三维有限元模拟

结合广州市珠江新城集运系统盾构穿越地铁一号线区间隧道工程,对邻近不同位置建筑物工况下的新建隧道盾构下穿既有隧道施工进行模拟。

### 2.1 工程概况

该工程位于天河区珠江新城核心规划区天河南一路附近。新、旧隧道正交。既有隧道在交叉段为矿山法施工的三心圆形断面隧道。新建隧道埋深为17.7 m,隧道左、右两线间隔13.0 m。此外,新建隧道与既有隧道之间覆土厚度较小,仅为2.275 m,且主要为<5-2>硬塑性残积土(见图2),其地层性状为较软弱地层,遇水极易软化。

考虑到以上因素影响, 如何避免对周围土体、地面建(构)筑物及既有隧道产生较大的扰动进而确保安全穿越, 成为施工中的重点和难点。为此, 穿越前对隧道间地层进行了注浆加固并加强了对地面及既有隧道衬砌的位移监测。

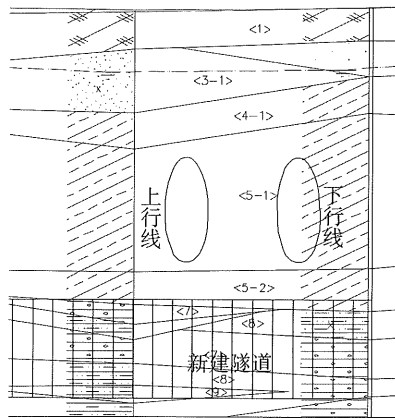


图 2 交叉隧道相对位置剖面与地质结构图<sup>[14]</sup>

Fig. 2 Profile of relative position of undercrossing tunnels and geological structure

<1>人工填土层; <3-1>粉细砂层; <3-2>中粗砂层; <4-1>粉质粘土层; <5-1>可塑性残积土层; <5-2>硬塑形残积土层

## 2.2 三维有限元模拟

2.2.1 有限元模型 隧道和建筑物相对位置, 如图 3 所示, 建筑物与新建隧道的走向方向一致。基础埋深 2 m, 基础上方建筑物为中低层框架结构, 柱基中心之间的距离为 7.5 m, 参考《建筑结构荷载规范》(GB 50009-2001) 和该建筑物结构形式<sup>[15]</sup>, 该建筑物对地基附加荷载按矩形均布荷载  $p = 100 \text{ kPa}$  进行简化计算, 建筑荷载按基础平面尺寸范围施加。即: 垂直于新建隧道轴线方向宽度 15 m, 沿新建隧道轴线方向的宽度 48 m。图中  $L$  为建筑物轴线到相邻新建隧道轴线的水平距离 (m);  $D$  为新建隧道盾构外径 (m)。

采用三维有限元软件 MIDAS/GTS 对新建隧道盾构下穿施工进行三维有限元模拟。有限元模型如图 4 所示。地下隧道开挖后的应力应变, 仅在隧道周围距离隧道中心点 3~5 倍隧道开挖直径的范围内存在实际影响<sup>[16]</sup>, 最终确定模型沿新建隧道纵向长 130 m, 宽 120 m, 高 35 m, 共 8 323 个节点, 47 933 个单元。边界条件: 模型两侧边界限制水平方向位移; 底部限制垂直方向位移; 地表为水平自由面。

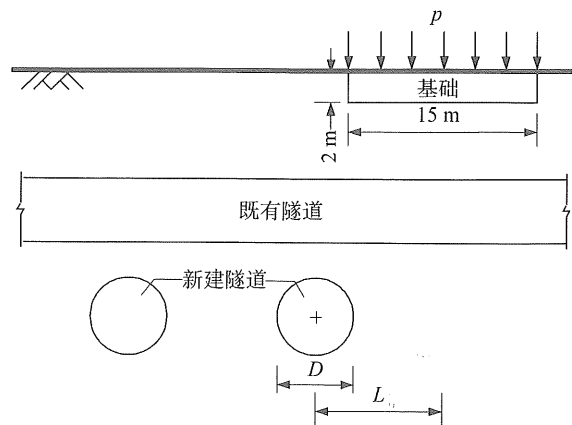


图 3 建筑物和交叉隧道几何关系图

Fig. 3 Chart of geometry relations between buildings and undercrossing tunnels

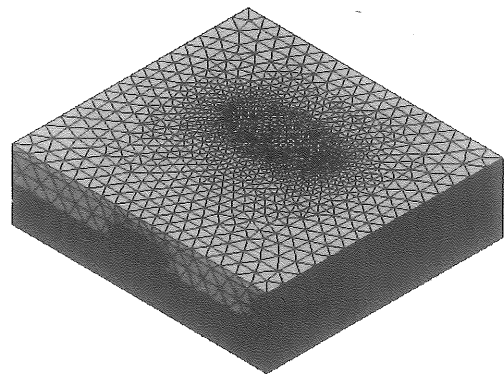


图 4 网格划分图

Fig. 4 Division of the grid

2.2.2 材料参数 土体采用莫尔-库仑模型, 土层参数根据该工程的地勘资料选取, 见表 1。采用实体单元来模拟建筑物基础, 基础采用 C20 混凝土。盾壳与管片所对应的单元均采用弹性模型, 其中管片力学参数按《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002) 选取<sup>[17]</sup>, 考虑到管片衬砌结构是通过螺栓将单个管片连接在一起的整体结构, 具有横观各向同性性质, 采用均质体等效管片衬砌时, 需乘以刚度折减系数 0.8<sup>[18]</sup>, 折减后的管片材料参数见表 1。

## 3 有限元计算结果分析

### 3.1 地表变形分析

当新建隧道衬砌脱离盾尾后, 在盾尾衬砌管片外围形成建筑空隙, 使得周围土体由于填充盾尾空隙而产生趋向新建隧道的位移, 从而引起地面沉降, 进而引起建筑物的沉降。

表 1 土层和材料参数

Table 1 Parameters of soils and construction materials

名称	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$E/\text{MPa}$	$\mu$
填土	17.3	9	21.0	5.94	0.32
粉质粘土	17.7	18	28.5	5.12	0.33
可塑性残积土	18.8	21	28	6.00	0.35
硬塑性残积土	19.2	45	33	12.27	0.30
注浆材料 硬化前	18.0	—	—	207	0.25
注浆材料 硬化后	18.0	—	—	1000	0.2
管片	25.0	—	—	$2.86 \times 10^4$	0.25
盾壳	70.0	—	—	$2.50 \times 10^4$	0.25
基础	25.0	—	—	$3.0 \times 10^4$	0.2

分别取  $L/D = 0、0.5、1、1.5、2、3、5$  及建筑物位于两新建隧道中间的情况进行计算，计算结果见图 5。在建筑物基础处的地面沉降曲线有明显变化，由于建筑物基础刚度远远大于周围土体，建筑物表现为明显的整体倾斜沉降，这是不同于地层沉降槽曲线的一个显著特征。当建筑物位于两新建隧道中间时，从横坐标  $-8\text{ m}$  到  $8\text{ m}$  范围内的地面沉降大小几乎一致，最大沉降量为  $29.4\text{ mm}$ ，比无建筑物时沉降要大。表明当两新建隧道中心线正好穿越建筑物轴线时，会使建筑物产生整体下沉，但交叉隧道盾构施工对建筑物的破坏相对较小。

当  $L/D = 0$  时，交叉隧道盾构施工引起的地面沉降最大，最大沉降量达  $32.5\text{ mm}$ ，建筑物产生朝向隧道一侧的倾斜；当  $L/D = 0.5$  时，地面沉降略小于  $L/D = 0$  时的沉降值，建筑物基础首尾沉降差为  $8.7\text{ mm}$ ；当  $L/D = 1$  时，引起的地面沉降减小，最大地面沉降量为  $28\text{ mm}$ ，而建筑物基础首位的沉降差增大至  $12.0\text{ mm}$ ；当  $L/D = 1.5$  时，地面沉降与  $L/D = 0$  相比减少  $7\text{ mm}$ ，但此时建筑物基础首尾的沉降差最大，约为  $16.1\text{ mm}$ ；当  $L/D = 2$  时，最大地面沉降量和建筑物基础首尾沉降继续减小；当  $L/D = 3$  时，最大地面沉降量为  $16.9\text{ mm}$ ，与无建筑物相比较为接近，建筑物倾斜程度较低；当  $L/D = 5$  时，此时的地面沉降与无建筑物时的相比几乎相同，且建筑物首尾的沉降差很小，表明此时建筑物的存在对交叉隧道盾构施工影响不大。

此外，由图 5 可知当建筑物位于两新建隧道中间及  $L/D = 0$  时，虽然建筑物沉降较大，但由于首尾沉降差较小，因此建筑物相对安全；当  $L/D = 0.5 \sim 2$  时，建筑物首尾的沉降差较大，建筑物较危险；当  $L/D = 3 \sim 5$  时，隧道穿越施工对建筑物

的影响较小；当  $L/D \geq 5$  时，隧道穿越施工对建筑物的影响可以忽略不计。

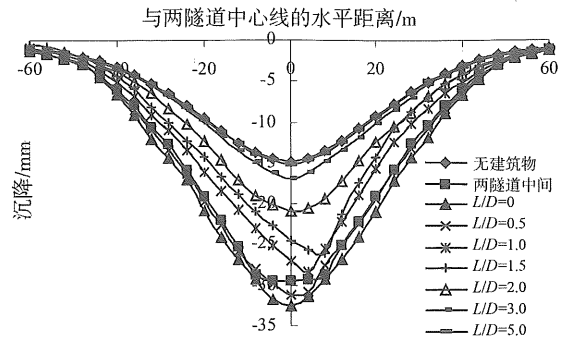


图 5 交叉隧道盾构施工引起的地面变形

Fig. 5 Ground settlement caused by undercrossing shield tunneling

### 3.2 建筑物变形分析

由于该模型土层属于中、低压缩土，根据《建筑地基基础设计规范》<sup>[19]</sup>，中、低压缩土沉降差允许值为  $0.002 L_0$ ，其中， $L_0$  为两柱基中心之间的距离。计算得到沉降差允许值  $[\Delta] = 0.002 \times 7.5 = 0.015\text{ m}$ ，则倾斜率允许值为

$$[\eta] = \arctan \frac{0.015}{7.5} = 0.115\%$$

分别计算不同位置处建筑物最大沉降差  $\Delta$  和倾斜率  $\eta$ ，如图 6、7 所示。随着  $L/D$  增大， $\Delta$  和  $\eta$  先增大，在  $L/D$  约等于  $1.5$  时达到峰值，随后逐渐减小。当  $L/D = 1.5$  时，建筑物柱基沉降差  $\Delta$  为  $16.1\text{ mm} > [\Delta]$ ，此时建筑物的倾斜率约为  $0.123\% > [\eta]$ ，超出规范要求，建筑物处于危险状态。此时建筑物上部结构容易产生开裂，尤其是在墙体窗口门洞的角位处，在施工时需采取一定的加固措施。在  $L/D \leq 2$  区域内，建筑物受隧道下穿施工的影响较大，需加强对建筑物的监测。

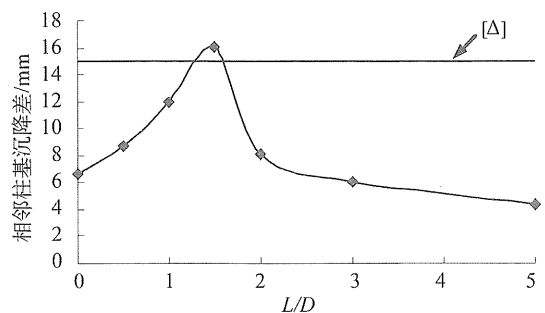


图 6 建筑物相邻柱基沉降差

Fig. 6 Settlement difference of neighboring plinth of building

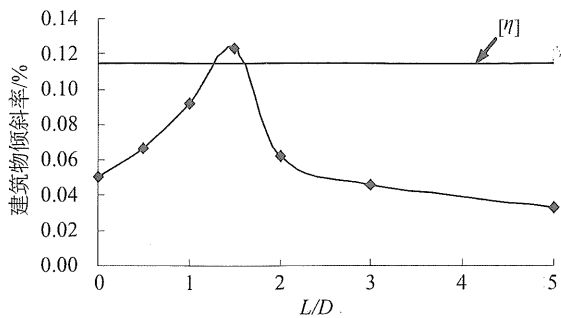


图 7 建筑物倾斜率

Fig. 7 Inclination of building

### 3.3 新建隧道衬砌受力分析

图 8 为有、无建筑物情况下的新建隧道上行线衬砌的最大轴力、剪力和弯矩变化图。可知与无建筑物工况相比,衬砌所受的最大轴力、剪力和弯矩均发生变化,随着  $L/D$  的增大,最大轴力、剪力和弯矩的增加量均呈减小的趋势。在  $L/D = 0 \sim 3$  范围内,衬砌的最大轴力、剪力和弯矩的变化时较大,特别是当  $L/D = 0 \sim 1.5$  范围内,建筑物的存在使衬砌内力值明显增大,计算得到最大的轴力增加量为 15.54%,最大的剪力增加量为 22.17%,最大的弯矩增加量为 25.12%。当  $L/D \geq 5$  时,衬砌内力值增大较小,表明此时建筑物的存在对新建隧道衬砌的影响较小。

从而可知建筑物的存在使得新建隧道衬砌要承受更大的内力,所以应注意衬砌的强度问题。需要对衬砌强度进行验算,以判断是否能满足设计要求。

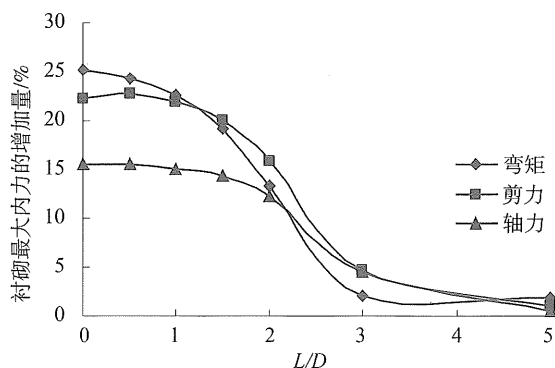


图 8 新建隧道衬砌最大轴力、剪力和弯矩的变化图

Fig. 8 Chart of variety of maximum of axle strength, shearing force and bending moment of new tunnel lining

### 3.4 既有隧道衬砌变形分析

由于建筑物的存在,新建隧道盾构下穿施工引起的既有隧道衬砌沉降比无建筑物时的沉降值大,

如图 9 所示。当建筑物位于两新建隧道中间时,既有隧道上行线衬砌的沉降最大,为 33.7 mm,比无建筑物时的沉降值 28.8 mm 增加了约 17%,随着  $L/D$  的增大,既有隧道衬砌沉降的增加呈减小的趋势,不断接近无建筑物时的沉降值,下降曲线近似线性分布,如图 8 所示,  $L/D = 0 \sim 3$  时,衬砌的沉降变化较大;  $L/D = 5$  时,衬砌沉降值与无建筑物时的沉降值非常接近,表明此时建筑物的存在对既有隧道影响很小。

以上分析可知,由于邻近建筑物的存在,使得新建隧道盾构下穿施工引起的既有隧道衬砌的变形增大,所以应提前进行注浆等加固措施,并加强对既有隧道衬砌的位移监测。

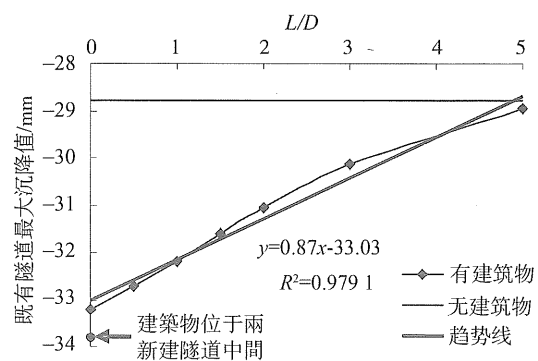


图 9 既有隧道沉降值

Fig. 9 Settlement of the existing tunnel

## 4 结论

本文采用三维有限元方法,分析了交叉隧道盾构施工与邻近不同位置建筑物之间的相互影响,得到以下结论:

1) 新建隧道下穿既有隧道的施工影响与邻近建筑物的存在密切相关,忽略建筑物荷载将低估隧道穿越施工引起的地面变形及新、旧隧道衬砌变形和内力值,从而使得安全性降低。

2) 建筑物与盾构隧道下穿施工的相互影响存在一定范围,当新建隧道轴线与建筑物中心线的水平距离与隧道外径之比  $L/D = 0 \sim 2$  时,建筑物受隧道下穿施工的影响较大,需加强对建筑物的监测。尤其是当  $L/D = 1.5$  附近时,建筑物处于危险状态,此时建筑物上部结构易产生开裂,需采取加固措施。

3)  $L/D = 0 \sim 3$  时,建筑物的存在会增大新、旧隧道的内力和变形,特别是在  $L/D = 0 \sim 1.5$  时变化较大。当  $L/D \geq 5$  时,则可以忽略建筑物对交叉隧道盾构施工的影响。

## 参考文献:

- [1] 韩焯, STANDING J R, 李宁. 隧道施工引起建筑物变形预测的刚度修正法[J]. 岩土工程学报, 2009, 4(31): 539-545.
- [2] 魏新江, 魏纲, 丁智. 盾构施工与邻近不同位置建筑物相互影响分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 1277-1282.
- [3] 姜忻良, 贾勇, 赵保建, 等. 地铁隧道施工对邻近建筑物影响的研究[J]. 岩土力学, 2008, 11(29): 3047-3052.
- [4] CHUNGSIK Yoo, DONGYEON Lee. Deep excavation-induced ground surface movement characteristics - A numerical investigation [J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35: 231-252.
- [5] RICHARD J, FINNO, FRANK T, et al. Evaluating damage potential in buildings affected by excavations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(10): 1199-1210.
- [6] JENCK O, DIAS D. 3D-finite difference analysis of the interaction between concrete building and shallow tunneling [J]. Geotechnique, 2004, 54(8): 519-528.
- [7] SHIN H S, KIM C Y, KIM K Y, et al. A new strategy for monitoring of adjacent structures to tunnel construction in urban area [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21: 461-462.
- [8] ERIC L, BARRY N. Leonardi. Settlements induced by tunneling in Soft Ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007 (22): 119-149
- [9] 卿伟宸, 廖红建, 钱春宇. 地下隧道施工对相邻建筑物及地表的沉降的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 960-963, 978.
- [10] 阳军生, 刘宝琛. 城市隧道施工引起的地表移动与变形[M]. 北京:中国铁道出版社, 2002.
- [11] 施成华, 彭立敏, 刘宝琛. 浅埋隧道开挖对地表建筑物的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3310-3316.
- [12] 吴贤国, 陈跃庆, 丁烈云, 等. 长江隧道盾构施工对建筑物的影响及其保护研究[J]. 铁道工程学报, 2008, 7(7): 57-60.
- [13] 葛世平, 廖少明, 陈立生, 等. 地铁隧道建设与运营对地面房屋的沉降影响与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 3(27): 550-556.
- [14] 中铁隧道集团有限公司广州市珠江新城核心区市政交通项目旅客自动输送系统土建2标项目部, 广州市珠江新城核心区市政交通项目旅客自动输送系统土建二标(JJJZ002). 市天区间盾构通过运营中地铁一号线施工方案[R], 2007.
- [15] 中华人民共和国国家标准. GB 50009-2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [16] LEE K M, ROWE R K. Finite element modeling of the three-dimensional grounded formations due to tunneling in soft cohesive soils [C]. Part-Method of Analysis, Computers and Geotechnics, 1990, 10: 87-109.
- [17] 中华人民共和国国家标准. GB50010-2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [18] 严长征. 盾构隧道近距离共同作用机理及施工技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [19] 中华人民共和国国家标准. GB50007-2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.