

文章编号: 1000-7598(2012)01-0273-07

# 盾构隧道掘进全过程三维模拟方法 及重叠段近接分区研究

王明年<sup>1</sup>, 张晓军<sup>2</sup>, 苟明中<sup>3</sup>, 崔光耀<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 地下工程系, 成都 610031; 2. 广东省公路勘察规划设计院股份有限公司, 广州 510507;  
3. 铁道部第二勘察设计院, 成都 610031)

**摘要:**合理地模拟盾构隧道掘进的全过程及盾构隧道重叠段近接分区是一个难点。依托深圳地铁3号线红岭中路一老街一晒布段区间重叠隧道工程进行研究,建立了能全面反映盾构隧道掘进全过程的三维模拟方法,并采用摩尔-库仑屈服准则对盾构隧道重叠段进行了横向近接分区,同时采用位移变化速率准则对盾构隧道重叠段进行了纵向近接分区。研究结果表明,盾构隧道重叠段横向近接分区为: $F \leq F_a$ 时为无影响区, $F_a < F < 0$ 时为弱影响区,当 $F \geq 0$ 时为强影响区;纵向近接分区为:小于0.3 mm/d为无影响区,0.3~1.5 mm/d为弱影响区,大于1.5 mm/d为强影响区。研究成果应用于红岭中路一老街一晒布段区间重叠隧道取得了良好的效果,并为盾构隧道掘进全过程的数值模拟以及盾构隧道重叠段区间隧道的设计与施工提供了理论支撑,同时亦可为相似工程提供参考。

**关键词:**盾构掘进; 三维模拟; 重叠隧道; 近接分区

中图分类号: U 459.3

文献标识码: A

## Method of three-dimensional simulation for shield tunneling process and study of adjacent partition of overlapped segment

WANG Ming-nian<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-jun<sup>2</sup>, GOU Ming-zhong<sup>3</sup>, CUI Guang-yao<sup>1</sup>

(1. Department of Underground and Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;  
2. Guangdong Highway Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510507; 3. The Second Railway Survey and Design Institute, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** It is difficult to simulate the whole process of shield tunneling and divide the overlapped shield tunnel. Combined with overlapped tunnel in Shenzhen Metro Hongling Zhonglu-Laojie-Shaibu interval to establish a more comprehensively 3D numerical simulation method, reflecting the characteristic of the whole tunneling process and divide shield tunnel from its horizontal direction on the basis of the index of Mohr-coulomb, longitudinal partition according to displacement rate of change. The results show that: the horizontal adjacent partition is: no-effect area when  $F \leq F_a$ , weak-effect area when  $F_a < F < 0$ , intensive-effect area when  $F \geq 0$ ; longitudinal partition is: Less than 0.3 mm/d for the non-effect zone, 0.3-1.5 mm/d for the low impact zone, greater than 1.5 mm/d for the high-impact zone. The results applied to the Shenzhen Metro Hongling Zhonglu-Laojie-Shaibu intervals overlap tunnel, and achieved good results, and provide theoretical supports for the numerical simulation of the whole tunneling process and the design and construction of shield overlapped tunnel, and it also provides a reference for similar projects.

**Key words:** shield tunnelling; three-dimensional simulation; overlapped tunnel; adjacent partition

## 1 引言

随着我国国民经济的持续快速发展,地铁工程在各大城市蓬勃发展起来。由于城市交通走廊的限制,地铁盾构区间隧道往往只能采用重叠隧道的方式,这就造成了大量近接既有隧道施工的出现,给设计和施工带了困难。

近年来,一些专家学者对盾构隧道掘进全过程

三维模拟方法及重叠段近接分区进行了研究<sup>[1-18]</sup>,主要内容有:盾构法地铁隧道施工数值模拟,盾构法隧道下穿既有结构三维数值模拟分析,广州地铁西村站近接高架桥桩基影响分区及应用研究,单洞双层地铁隧道施工力学行为研究等等。但以往的研究主要考虑了开挖方式、推进力、同步注浆、开挖面土压力、盾尾空隙闭合、盾尾注浆等因素,没有考虑盾壳摩擦力、刀盘扭矩、盾尾脱空引起建筑空

收稿日期: 2010-04-06

第一作者简介:王明年,男,1965年生,博士,教授,博士生导师,主要从事隧道与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: 19910622@163.com  
通讯作者:崔光耀,男,1983年生,博士研究生,主要从事隧道与地下工程研究。E-mail: cyao456@163.com

隙、盾构自重以及千斤顶推力的影响<sup>[1-4]</sup>，文献[5]虽考虑了千斤顶推力、开挖面土压力、刀盘超挖、盾尾空隙闭合、盾尾注浆、自重等因素，但忽略了掌子面刀盘扭矩和壁后注浆浆液逐渐硬化的过程；国内外对隧道近接影响有一定的研究<sup>[6-17]</sup>，对于浅埋暗挖地铁重叠隧道近接分区也有详尽的研究<sup>[18]</sup>，但对于近接盾构隧道横纵向影响分区却并没有系统的研究。

本文依托深圳地铁 3 号线重叠盾构隧道工程，综合考虑盾构隧道开挖过程的各影响因素，主要对盾构隧道掘进全过程三维模拟方法及重叠段近接分区进行了研究，这对完善盾构隧道掘进过程数值模拟方法以及保证城市盾构重叠隧道安全施工及运营都有着重要的意义。

## 2 盾构隧道掘进过程三维模拟方法

盾构隧道施工过程中土体受力主要由推进机构荷载和驱动机构扭矩组成。推进机构荷载主要是由盾壳与周围地层摩阻力  $F_1$  以及盾构机正面推进摩阻力  $F_2$  构成，二者占到整个推进机构荷载的 90%。驱动机构荷载主要为刀盘外围的摩擦阻力扭矩  $T_5$ ，其所占比例最大，约为 24%；其次是刀盘正面与土体之间的摩阻力扭矩  $T_2$ ，约为 20%；刀盘切削地层时的地层抗力扭矩  $T_1$  所占比例为 12%<sup>[19]</sup>，同时还应考虑盾构自重的作用。

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \pi D L c_{ms} + \frac{DL}{4} \tan \varphi \cdot \gamma \pi \left( h_0 + \frac{D}{2} \right) (1 + K_{h0}) \\ F_2 &= \frac{\pi D_c^2}{4} (1 - \alpha_0) K H_c \gamma \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $D$  为盾构外径； $L$  为盾壳长度； $h_0$  为土的松动高度； $D_c$  为刀盘外径； $c_{ms}$  为渣土黏聚力； $\varphi$  为土地内摩擦角； $\alpha_0$  为刀盘开口率； $H_c$  为地面到盾构机轴线距离； $K$  为侧向土压力系数； $K_{h0}$  为静止土压力系数； $\gamma$  为土体重度。

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= m F_R R_q + m F_{li} R_m \\ T_2 &= \frac{\pi D_c^3}{12} (1 - \alpha_0) (K \mu_{ms} H_c \gamma + c_{ms}) \\ T_5 &= \frac{D_c^2}{4} t_c \int_0^{2\pi} (\mu_{ms} \sigma_{noj} + c_{ms}) d\theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： $F_R$  为滚刀滚动动力； $R_q$  为滚刀平均回转半径； $F_{li}$  为第  $i$  把刀具切削土体时所受地层抗力； $R_m$  为切削刀平均半径； $\mu_{ms}$  为刀盘与土体摩擦系数； $t_c$  为刀盘轴向宽度； $\theta$  为刀盘圆心角； $\sigma_{noj}$  为刀盘外围法向土压力。

根据深圳地铁实际情况以及理论计算结果，本

次计算中各施工荷载（见图 1）取值见表 1 所示。

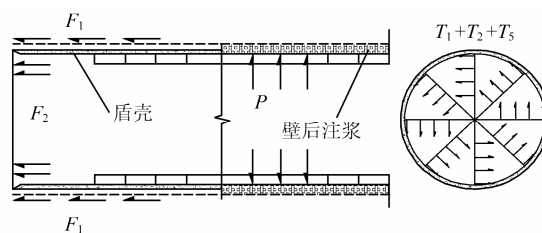


图 1 盾构施工荷载示意图

Fig.1 Shield construction load diagram

表 1 盾构模拟施加荷载表

Table 1 Shield simulation applied load table

| 荷载 | $F_1$ | $F_2$ | $T_1$   | $T_2$   | $T_5$   | 注浆压力  |
|----|-------|-------|---------|---------|---------|-------|
|    | /kN   | /kN   | /(kN·m) | /(kN·m) | /(kN·m) | P/MPa |
| 数值 | 5700  | 4400  | 200     | 510     | 720     | 0.15  |

结合盾构隧道施工 4 阶段（挖土阶段、盾尾注浆阶段、盾尾脱开阶段、固结沉降阶段）的主要特点以及施工过程中土层的受力，将盾构隧道数值模拟掘进全过程分为开挖过程、管片拼装、注浆层凝固以及固结沉降过程。

假设盾构为一步一步跳跃式前进，每次推进长度为一环管片宽度，土体采用实体单元，管片采用壳单元(shell)，数值模拟掘进全过程具体步骤如下：

(1) 开挖过程 开挖面处设置一环大刚度壳单元模拟盾壳承担的开挖荷载，并在掌子面上施加顶进力  $F_2$ ，平衡掌子面的土压力，环向施加  $F_1$  模拟盾构推进过程中土层受到的摩擦力，掌子面正面施加刀盘驱动力  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_5$ ，按照 30% 的释放荷载迭代计算。

(2) 管片拼装过程 替换临时壳单元为管片壳单元，同时删除掌子面上各种荷载，将管片外薄层强度降低到极小值模拟盾壳空隙。

(3) 注浆及凝固过程 在管片周围的土层上施加注浆压力  $P$ ，模拟同步注浆，随着开挖推进，逐渐增加注浆层材料属性，模拟注浆硬化过程。

(4) 固结沉降过程 停止注浆，删除注浆压力，待注浆土层达到强度值后，释放所有荷载，并计算至平衡，模拟固结沉降。隧道盾构数值模拟示意图如图 2 所示。

## 3 盾构隧道重叠段近接分区

### 3.1 横向分区

将一隧道埋深固定为 10 m，另一隧道在其周围取不同角度和不同净距，分别考虑水平平行、竖直重叠、斜交 45°、垂直交叉 4 种情况（见图 3）时不同净距的影响。利用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 进行计

算, 盾构机直径为 5.4 m, 长度简化为开挖进尺长度 1.5 m (盾构机荷载也作用在 1.5 m 范围内)。根据两隧道的位置关系以及施工先后顺序的不同, 本文通过计算 34 种工况 (施工顺序为先上后下和先下后上两种) 研究盾构隧道重叠段近接分区。

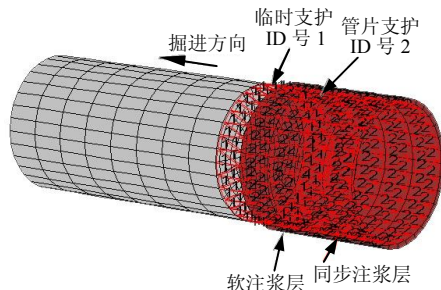


图 2 数值模拟示意图

Fig.2 Sketch of numerical simulation

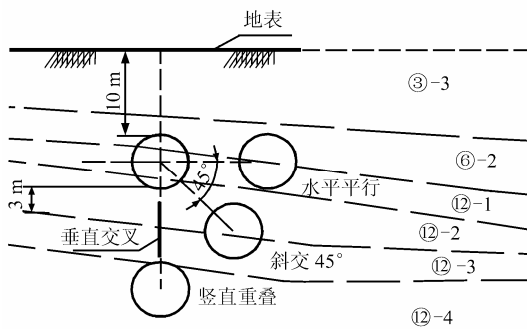


图 3 两隧道位置分布示意图

Fig.3 Distribution of two tunnels locations

计算模型物理力学参数如表 2 所示, 浆液硬化参数是在原参数基础上随着开挖面距注浆面距离的增加而逐渐提高的, 每 3 环提高 20%, 到 10 环后几乎不再变化。计算工况如表 3 所示。

表 2 模型物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of the model

| 土层名称    | 土层号 | $E/\text{GPa}$ | $\nu$ | $\gamma/(\text{kN/m}^3)$ | $c/\text{MPa}$ | $\varphi/(^\circ)$ | 厚度/m |
|---------|-----|----------------|-------|--------------------------|----------------|--------------------|------|
| 砂层      | ③-3 | 0.020          | 0.22  | 19.5                     | 0.015          | 23.0               | 8    |
| 残积土层    | ⑥-2 | 0.042          | 0.25  | 18.8                     | 0.015          | 23.7               | 5    |
| 全风化     | ⑫-1 | 0.070          | 0.28  | 19.2                     | 0.018          | 23.0               | 4    |
| 强风化     | ⑫-2 | 0.106          | 0.25  | 25.5                     | 0.018          | 22.0               | 4    |
| 中等风化    | ⑫-3 | 0.150          | 0.17  | 25.8                     | 0.022          | 23.0               | 5    |
| 微风化     | ⑫-4 | 0.250          | 0.20  | 26.0                     | 0.022          | 22.0               | 24   |
| 花岗岩     |     |                |       |                          |                |                    |      |
| 同步及二次注浆 |     | 0.200          | 0.20  | 22.0                     | 0.020          | 30.0               |      |
| 盾构管片衬砌  |     | 26.250         | 0.18  | 25.0                     |                |                    |      |

表 3 横向分区计算工况

Table 3 Horizontal partition calculation cases

| 计算工况 | 两隧道位置  | 两隧道净距                          |
|------|--------|--------------------------------|
| 工况 1 | 水平平行   | 0.5D、1.0D、1.5D、2.0D            |
| 工况 2 | 斜交 45° | 0.5D、1.0D、2.0D                 |
| 工况 3 | 竖直重叠   | 0.25D、0.5D、1.0D、1.5D、2.0D、2.5D |
| 工况 4 | 垂直交叉   | 0.5D、1.0D、2.0D、2.5D            |

试验表明, 摩尔-库仑屈服准则较为符合岩土和混凝土的屈服和破坏特性<sup>[20]</sup>, 本次研究即采用摩尔-库仑屈服准则作为盾构隧道重叠段横向近接分区的划分准则。摩尔-库仑屈服准则屈服面在主应力空间为一不规则的六角锥面, 其加载面方程可用表示为

$$F = p \sin \varphi + \frac{q}{\sqrt{3}} \left( \cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \varphi \right) - c \cos \theta \quad (3)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \\ q &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:  $F$  为加载面;  $\theta$  为罗德角,  $\tan \theta = \frac{1}{\sqrt{3}} \mu_\sigma$ ,

$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1$ ;  $c$  为黏聚力;  $\varphi$  为内摩擦角;  $p$  为平均应力;  $\sigma_1$  为第一主应力;  $\sigma_2$  为第二主应力;  $\sigma_3$  为第三主应力;  $q$  为等效应力。

隧道开挖前, 将各计算工况中围岩主应力值代入式 (3), 可得  $F_0$ ; 两隧道均开挖完成后, 根据摩尔-库仑屈服准则, 当  $F \geq 0$  时, 表示围岩发生屈服, 则盾构隧道重叠段横向近接分区按如下规则进行划分: 当  $F \leq F_a$  时, 为无影响区; 当  $F_a < F < 0$  时, 为弱影响区; 当  $F \geq 0$  时, 为强影响区。各计算工况所在横向近接分区的区域如表 4 所示。

由表 4 绘出盾构隧道重叠段横向近接分区影响范围 (见图 4)。图 4 中中心实线圆表示先建隧道轮廓, 虚线圆表示后建隧道轮廓, 先建隧道轮廓线与虚线之间的范围为强影响区, 虚线与实线之间的范围为弱影响区, 实线以外的范围为无影响区。

表 4 各工况横向近接影响分区

Table 4 Horizontal adjacent partition table of each case

| 施工顺序     | 两隧道位置  | 强影响区域          | 弱影响区域                 | 无影响区域       |
|----------|--------|----------------|-----------------------|-------------|
| 先上<br>后下 | 水平平行   | $L \leq 1.0D$  | $1.0D < L \leq 1.75D$ | $L > 1.75D$ |
|          | 斜交 45° | $L \leq 1.25D$ | $1.25D < L \leq 2.0D$ | $L > 2.0D$  |
|          | 竖直重叠   | $L \leq 1.5D$  | $1.5D < L \leq 2.5D$  | $L > 2.5D$  |
|          | 垂直交叉   | $L \leq 1.5D$  | $1.5D < L \leq 2.5D$  | $L > 2.5D$  |
| 先下<br>后上 | 水平平行   | $L \leq 1.0D$  | $1.0D < L \leq 1.75D$ | $L > 1.75D$ |
|          | 斜交 45° | $L \leq 1.0D$  | $1.0D < L \leq 1.5D$  | $L > 1.5D$  |
|          | 竖直重叠   | $L \leq 1.25D$ | $1.25D < L \leq 2.0D$ | $L > 2.0D$  |
|          | 垂直交叉   | $L \leq 1.0D$  | $1.0D < L \leq 2.0D$  | $L > 2.0D$  |

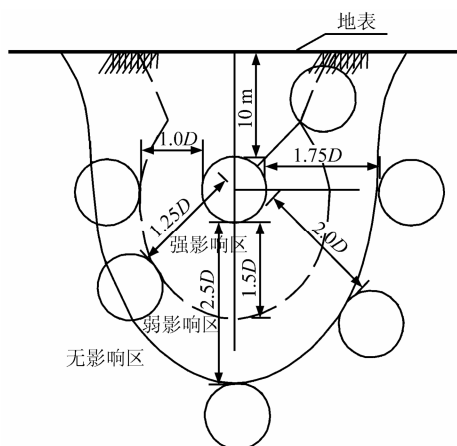


图4 盾构重叠隧道近接分区图

Fig.4 Adjacent partition map of overlapped shield tunnel

### 3.2 纵向分区

根据横向分区研究成果,分别从横向强影响区和弱影响区来考虑盾构隧道重叠段的纵向影响范围。纵向影响范围判定准则按照位移变化速率来划分。进行位移分析时,绘制后洞开挖过程的位移曲线和位移变化速率曲线,以此作为纵向分区的依据。由城市地铁盾构隧道施工监控量测标准可知,量测频率初步可定为:位移变化速率为 3 mm/d 时,频率为 1~2 次/d;位移变化速率为 1~3mm/d 时,频率为 1 次/d;位移变化速率为 0.5~1 mm/d 时,频率为 1 次/2 d;位移变化速率为 0.1~0.5 mm/d 时,频率为 1 次/5 d;位移变化速率为小于 0.1 mm/d 时,频率为 1 次/10 d。因此,纵向影响范围根据位移变化速率判定如表 5 所示。

表5 纵向分区强弱判定标准  
Table 5 Criteria for judging strength of longitudinal partition

| 纵向影响程度        | 强    | 弱       | 无    |
|---------------|------|---------|------|
| 位移变化速率/(mm/d) | >1.5 | 0.3~1.5 | <0.3 |

进行数值计算时,分别以横向分区计算结果中强弱影响程度最不利情况下的净距作为纵向分区的计算工况。具体开挖过程为:先将前洞挖通,再以前洞模型的中间处管片位移作为研究对象,同时将前洞开挖引起的位移清零,分析后洞开挖对前洞的影响程度。隧道掘进速度为 3 m/d,即每天两个施工步,以此绘出位移变化速率图,4 种工况下其位移变化速率图如图 5~8 所示。根据计算结果划分盾构隧道重叠段纵向近接分区,如表 6 所示。

## 4 应用实例

深圳地铁 3 号线红岭中路站—老街站和老街站

一晒布站段(以下简称“红老段”和“老晒段”)左右线为两条单修的区间盾构隧道。红老段左右两线先以平行净距 8.4 m 出发,为了满足老街站重叠段车站要求,逐渐过渡到上下重叠,(上线隧道)在老街站西端的轨面埋深为 14.8 m,隧道拱顶埋深为 9.8 m,

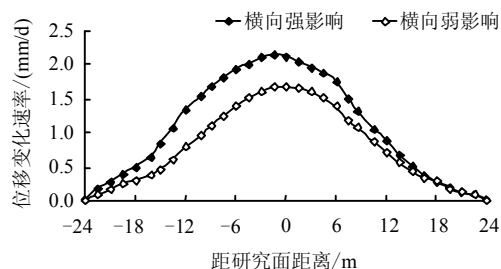


图5 水平平行位移变化速率图

Fig.5 Displacement rate of level parallel

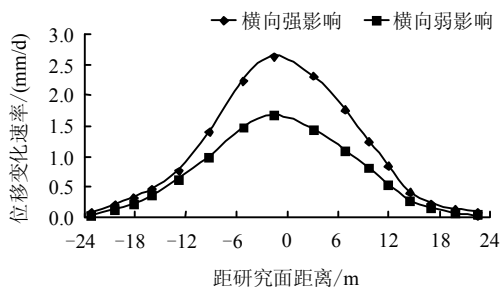


图6 斜交 45° 位移变化速率图

Fig.6 Displacement rate of bias 45 degree

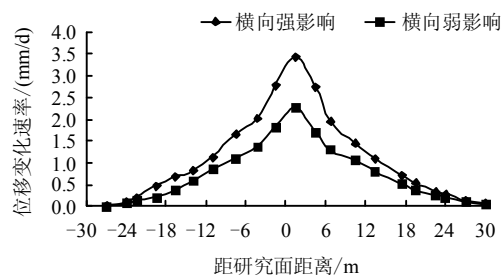


图7 竖直重叠位移变化速率图

Fig.7 Displacement rate of vertical overlap

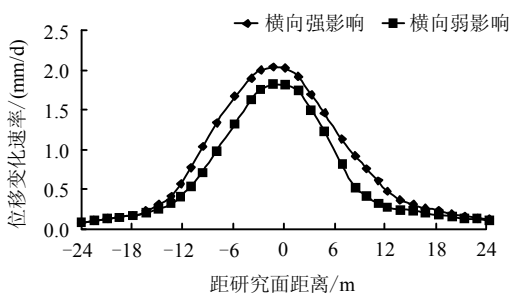


图8 垂直交叉位移变化速率图

Fig.8 Displacement rate of orthogonal cross

表 6 纵向影响分区  
Table 6 Partition of longitudinal strength

| 两隧道位置关系       | 横向影响区域 | 纵向对前方影响范围      |                       | 纵向对后方影响范围      |                        |
|---------------|--------|----------------|-----------------------|----------------|------------------------|
|               |        | 强影响区           | 弱影响区                  | 强影响区           | 弱影响区                   |
| 水平平行          | 横向强    | $H \leq 2.0D$  | $2.0D < H \leq 3.0D$  | $H \leq 1.25D$ | $1.25D < H \leq 2.25D$ |
|               | 横向弱    | $H \leq 1.0D$  | $1.0D < H \leq 2.0D$  | $H \leq 1.0D$  | $1.0D < H \leq 2.0D$   |
| 斜交 $45^\circ$ | 横向强    | $H \leq 1.5D$  | $1.5D < H \leq 3.0D$  | $H \leq 1.5D$  | $1.5D < H \leq 2.5D$   |
|               | 横向弱    | $H \leq 1.0D$  | $1.0D < H \leq 2.0D$  | $H \leq 1.0D$  | $1.0D < H \leq 2.0D$   |
| 竖直重叠          | 横向强    | $H \leq 2.25D$ | $2.25D < H \leq 3.5D$ | $H \leq 2.0D$  | $2.0D < H \leq 3.0D$   |
|               | 横向弱    | $H \leq 1.5D$  | $1.5D < H \leq 3.0D$  | $H \leq 1.5D$  | $1.5D < H \leq 2.5D$   |
| 垂直交叉          | 横向强    | $H \leq 1.25D$ | $1.25D < H \leq 2.5D$ | $H \leq 1.25D$ | $1.25D < H \leq 2.5D$  |
|               | 横向弱    | $H \leq 1.0D$  | $1.0D < H \leq 1.5D$  | $H \leq 1.0D$  | $1.0D < H \leq 1.5D$   |

上下重叠段的最小净距为 1.6 m(老街站西端头处), 隧道拱顶最小埋深约为 6.0 m; 老晒段以上下重叠的形式出发, 逐渐拉开上下隧道净距, 最后又过渡到左右线平行的形式到达晒布站(见图 9)。两段区间隧道重叠段达到 1 210 m, 最小重叠净距仅为 1.6 m。整个区间线路变化形式为: 左右线隧道净距由  $0.25D$  逐渐增大至  $3.0D$  ( $D=6.0$  m,  $D$  为隧道洞径)。因此, 对于不同净距区段, 设计和施工应该采用相应的工程对策。

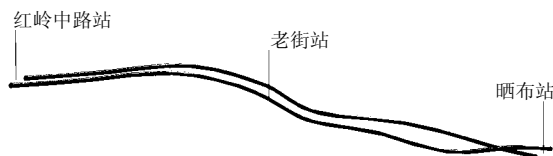


图 9 红岭中路-老街-晒布区间隧道示意图  
Fig.9 Sketch of Hongling Zhonglu-Laojie-Shaibu intervals tunnel

#### 4.1 红岭中路-老街-晒布区间地质概况

红岭中路-老街-晒布站区间主要位于花岗岩、花岗片麻岩、凝灰岩风化层以及残积土层, 地下水丰富, 主要分布在第四系砂层中, 大部分区段围岩“上软下硬”。红岭中路-老街-晒布站区间原为第四系冲积平原, 地势较为平坦, 上覆人工堆积层、海冲积层及第四系残积层, 下伏强、弱、微风化花岗片麻岩。区间隧道主要穿越⑪-1-2(花岗片麻岩全风化层)地层, 部分区段有⑥-2(残积层)、⑪-2(花岗片麻岩强风化层)地层。

#### 4.2 应用结果

深圳地铁 3 号线红岭中路-老街-晒布站间重叠隧道左右线净距及位置不断变化, 按照近接分区将重叠隧道沿线路纵向进行分段, 其结果见表 7 所示。

表 7 深圳地铁红岭中路-老街-晒布站间近接隧道影响分段结果

Table 7 Results of partition in Hongling Zhonglu-Laojie-Shaibu intervals tunnel of Shenzhen Metro

| 隧道里程                | 两隧道近接情况              | 位置关系          | 横向分区 | 纵向影响范围            |
|---------------------|----------------------|---------------|------|-------------------|
| K6+751.80~K7+405.80 | 净距 $1.0D \sim 1.5D$  | 水平平行          | 弱影响  | $-2.0D \sim 2.0D$ |
| K7+405.80~K7+648.03 | 净距 $0.5D \sim 2.0D$  | 斜交 $45^\circ$ | 强弱影响 | $-3.0D \sim 2.5D$ |
| K7+648.03~K7+923.89 | 净距 $0.25D \sim 1.0D$ | 竖直重叠          | 强影响  | $-3.5D \sim 3.0D$ |
| K7+923.89~K8+670.70 | 净距 $0.25D \sim 1.0D$ | 竖直重叠          | 强影响  | $-3.5D \sim 3.0D$ |
| K8+670.70~K8+896.45 | 净距 $1.0D \sim 2.0D$  | 斜交 $45^\circ$ | 弱影响  | $-2.0D \sim 2.0D$ |

由表可知, 深圳地铁 3 号线红岭中路-老街-晒布站间都在强、弱影响范围内, 区间隧道设计不能按照单一盾构隧道设计, 应考虑其所在近接影响区域的强弱程度对管片配筋进行适当增加。根据盾构隧道重叠段近接分区研究成果, 该段盾构重叠隧道设计和施工时应注意以下几点:

- (1) 当两线隧道位置间距位于弱影响区时, 管片设计可增加约 5%配筋量。
- (2) 在超小净距重叠段, 除增加管片配筋外, 管片间的连接螺栓也可适当增强, 可调高至公称直径为 M27 的螺栓。
- (3) 后洞施工时, 前洞应做好提前和延后的临时支护措施, 可选用十字撑或液压轮式支护。
- (4) 若两洞同时施工, 应至少保证两洞开挖面距离在  $7D$  (考虑纵向前后的影响) 之外, 考虑到盾构机本身长度及自重, 两洞开挖面距离应更远一些。

## 5 结 论

- (1) 采用摩尔-库仑屈服准则对盾构隧道重叠段进行了横向近接分区,  $F \leq F_a$  时为无影响区,  $F_a < F < 0$  时为弱影响区,  $F \geq 0$  时为强影响区。

(2) 根据位移变化速率以及横向分区研究成果对盾构隧道重叠段进行了纵向近接分区, 位移变化速率小于 0.3 mm/d 为无影响区, 0.3~1.5 mm/d 为弱影响区, 大于 1.5 mm/d 为强影响区。

(3) 深圳地质条件下盾构施工, 横向近接影响范围几乎在 2.5D 范围内, 更远则可忽略不计; 纵向近接影响范围在盾构到达前后 3.5D 范围内。

(4) 将盾构隧道重叠段近接分区研究成果应用于深圳地铁 3 号线红岭中路—老街—晒布段区间重叠隧道, 该段重叠隧道几乎都在强、弱影响范围内, 该段隧道设计及施工应注意: 管片配筋可按一般单洞增加约 5%; 超小净距重叠段还可将连接螺栓调高至 M27; 后洞施工时, 前洞应做好提前和延后的临时支护措施; 两洞同时施工时, 两开挖面应至少相距 7D 以上。

### 参考文献

- [1] 李曙光, 冯小玲, 方理刚. 盾构法地铁隧道施工数值模拟[J]. 铁道标准设计, 2009, (3): 86—87.
- [2] 杨广武, 关龙, 刘军, 等. 盾构法隧道下穿既有结构三维数值模拟分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(6): 54—60.  
YANG Guang-wu, GUAN Long, LIU Jun, et al. Three-dimensional numerical simulation analysis of the shield-driven tunnel crossing under the existing structure[J]. *China Railway Science*, 2009, 30(6): 54—60.
- [3] 方勇, 何川. 盾构法修建正交下穿地铁隧道对上覆隧道的影响分析[J]. 铁道学报, 2007, 29(2): 83—88.  
FANG Yong, HE Chuan. Analysis of influence of undercrossing subway shield tunneling construction on the overlying tunnel[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2007, 29(2): 83—88.
- [4] LIN D G, TSENG C T, PHIENWEJ N, et al. 3D deformation analysis of earth pressure balance shield tunnelling in Bangkok subsoil[J]. *Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society*, 2002, (1): 13—27.
- [5] 张海波, 殷宗泽, 朱俊高. 地铁隧道盾构法施工过程中地层变位的三维有限元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 755—760.  
ZHANG Hai-bo, YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao. 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.
- [6] 王明年, 崔光耀, 喻波. 广州地铁西村站近接高架桥桩基影响分区及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1396—1404.  
WANG Ming-nian, CUI Guang-yao, YU Bo. Research on influential partition and application of adjacent viaduct pile foundations in Xicun station of Guangzhou metro[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(7): 1396—1404.
- [7] 王明年, 李志业, 关宝树. 3 孔小间距浅埋暗挖隧道地表沉降控制技术研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 821—824.  
WANG Ming-nian, LI Zhi-ye, GUAN Bao-shu. Research on controlling measures for ground surface settlement of three little distance parallel shallow embedded tunnels[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(6): 821—824.
- [8] 王明年, 潘晓马, 张成满, 等. 邻近隧道爆破振动响应研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 412—414.  
WANG Ming-nian, PAN Xiao-ma, ZHANG Cheng-man, et al. Study of blasting vibration influence on close-spaced tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(3): 412—414.
- [9] 赵东平, 王明年, 贾玲利. 路堑边坡开挖对邻近既有隧道影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1399—1403.  
ZHAO Dong-ping, WANG Ming-nian, JIA Ling-li. Research on influence of excavating road trench slope on adjacent existing tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1399—1403.
- [10] 刘大刚, 陶德敬, 王明年. 地铁双隧道施工引起地表沉降及变形的随机预测方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3422—3426.  
LIU Da-gang, TAO De-jing, WANG Ming-nian. Stochastic method for predicting ground surface settlement and deformation induced by metro double tube tunneling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(12): 3422—3426.
- [11] 贾永刚, 王明年, 任世林. 地铁区间下穿既有地铁车站结构安全力学分析[J]. 铁道学报, 2007, 29(6): 89—94.  
JIA Yong-gang, WANG Ming-nian, REN Shi-lin. Mechanical and security evaluation of the existing metro station structure under construction of through tunnel of new metro line[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2007, 29(6): 89—94.
- [12] 宋南涛, 陈炜韬, 王明年, 等. 煤系地层采空区对隧道施工安全性的影响[J]. 铁道建筑技术, 2007, (3): 48—51.  
SONG Nan-tao, CHEN Wei-tao, WANG Ming-nian, et al.

- Safety analysis of tunnelling in coal-mined area[J]. **Railway Construction Technology**, 2007, (3): 48—51.
- [13] 赵东平, 王明年. 小净距交叉隧道爆破振动响应研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 116—119.
- ZHAO Dong-ping, WANG Ming-nian. Study of influence of blasting vibration on cross tunnels with small clearance[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(1): 116—119.
- [14] 时亚昕, 王明年, 李强. 单洞双层地铁隧道施工力学行为[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 2985—2990.
- SHI Ya-xin, WANG Ming-nian, LI Qiang. Construction mechanical behavior of metro tunnel with single cavern and double-layer[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp. 1): 2985—2990.
- [15] 李强, 王明年, 李德才, 等. 地铁车站暗挖隧道施工对既有桩基的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 184—190.
- LI Qiang, WANG Ming-nian, LI De-cai, et al. Effects of subsurface construction of metro station tunnel on existing pile foundation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(1): 184—190.
- [16] 李德才, 扈森, 王明年. 深圳地铁重叠隧道设计与施工技术要点[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(4): 21—26.
- LI De-cai, HU Sen, WANG Ming-nian. Key techniques of design and construction for the overlapped tunnel in Shenzhen metro[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2006, 43(4): 21—26.
- [17] 赵东平, 王明年. 水库蓄水后对既有傍山铁路隧道运营安全的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(6): 30—35.
- ZHAO Dong-ping, WANG Ming-nian. Study on the influence of the water-storing in a reservoir on the safety operation of an existing mountainside railway tunnel[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2005, 42(6): 30—35.
- [18] 赵东平, 王明年, 宋南涛. 浅埋暗挖地铁重叠隧道近接分区[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(6): 65—69.
- ZHAO Dong-ping, WANG Ming-nian, SONG Nan-tao. Adjacent partition of a shallow embedded and mining subway overlapped tunnel[J]. **China Railway Science**, 2007, 28(6): 65—69.
- [19] 管会生. 土压平衡盾构机关键参数与力学行为的计算机模型研究[博士学位论文 D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [20] 潘昌实. 隧道力学数值方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995: 72—73.

#### 上接第 272 页

- [11] 王祥秋, 杨林德, 高文华. 软弱围岩蠕变损伤机理及合理支护时间的反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 793—796.
- WANG Xiang-qiu, YANG Lin-de, GAO Wen-hua. Creep damage mechanism and back analysis of optimum support time for soft rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(5): 793—796.
- [12] 黄宏伟, 徐凌. 大风垭口岩石公路隧道围岩及初期支护变形与内力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 44—52.
- HUANG Hong-wei, XU Ling. Study on deformation and internal force of surrounding rocks and initial support in Dafengyakou rock road tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(1): 44—52.
- [13] 周德培. 流变力学原理及其在土木工程中的应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995.
- [14] 傅鹤林. 隧道衬砌荷载计算理论及岩溶处治技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
- [15] 蒋青青. 基于 Hoek-Brown 准则点安全系数的边坡稳定性分析[J]. 中南大学学报, 2009, 40(3): 786—790.
- JIANG Qing-qing. Stability of point safety factor of slope based on Hoek-Brown criterion[J]. **Journal of Central South University**, 2009, 40(3): 786—790.
- [16] 周辉, 张传庆, 冯夏庭, 等. 隧道及地下工程围岩的屈服接近度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3083—3087.
- ZHOU Hui, ZHANG Chuan-qing, FENG Xia-ting, et al. Analysis of rock mass stability in tunnel and underground engineering based on yield approach index[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3083—3087.
- [17] 柳群义, 朱自强, 钟正强, 等. 基于 Hoek-Brown 准则的隧道围岩屈服接近度分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2447—2451.
- LIU Qun-yi, ZHU Zi-qiang, ZHONG Zheng-qiang, et al. Yielding approach index for surrounding rock mass of tunnel based on Hoek-Brown criterion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2447—2451.