

# 基于位移准则的盾构隧道施工影响分区方法研究

魏 纲<sup>1</sup>,王 霄<sup>2</sup>,张鑫海<sup>1</sup>

(1. 浙江大学城市学院 土木工程系, 浙江 杭州 310015; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

**摘 要:**盾构隧道施工会对周围环境造成影响,特别是离隧道中心点距离越近,影响程度就会越大。因此基于位移准则,以单个盾构隧道施工在周围土体中引起的竖向位移、水平位移及总位移为主线,采用盾构法统一土体移动模型解得到土体位移等值线图,然后将隧道周围土体划分为4个影响区(包括强影响区、中影响区、弱影响区、无影响区),并应用于深圳地铁3号线重叠盾构隧道工程,最后与现有方法进行了比较。研究表明:该划分方法可以考虑土质条件影响,划分的影响区范围更小,且计算过程更简单;根据隧道周边构筑物所在的影响区,可预估该位置处盾构施工所引起的土体变形,以便有效控制施工参数,保证工程顺利实施。

**关键词:**盾构;隧道;影响范围;分区;位移准则

中图分类号:U 455.43

文献标志码:B

文章编号:1009-7767(2017)02-0071-06

## On Zoning Method Impact of Shield Tunneling Based on Displacement Criterion

Wei Gang, Wang Xiao, Zhang Xinhai

盾构隧道施工会扰动周围土体,引起土体变形,导致周边建筑物、地下管线发生扭曲、开裂等问题。同时,既有地铁隧道也会受到新建地铁施工的影响而产生新的位移和变形。根据影响程度划分影响区,可对构筑物所在区域受到盾构施工的影响进行预测并采取相应措施,以减少盾构隧道施工对周边构筑物的损坏。因此,根据盾构隧道施工对周边构筑物的影响程度进行分区,具有重要研究价值。

目前关于盾构隧道施工影响分区的基本准则主要有:1)塑性区准则;2)复合准则;3)位移准则;4)强度准则;5)应力准则。文献[1]~[7]采用以上基本准则中的某一种对不同情况下的盾构隧道施工影响分区进行了研究,但相关研究的应用范围较窄,没有考虑土质条件的影响,对分区参数(如强度、位移等)并不能准确地进行测定,且基本没有出现位移等值线图这一表现形式,因此需对其作进一步研究。

笔者基于位移准则,采用盾构法隧道统一土体移动模型解,解得盾构施工引起周围土体的竖向位移、水平位移和总位移的等值线,再根据相关规范<sup>[7-9]</sup>,将盾构隧道施工条件下周围土体划分为4个影响区(分别为强影响区、中影响区、弱影响区和无影响区),然后

将其应用于深圳地铁实例中加以验证,取得了良好效果,可供同行参考。

### 1 现有划分方法及不足之处

文献[1]~[7]提出了8种盾构隧道施工影响分区方法,笔者根据每种方法的判断准则<sup>[9]</sup>和依据数据,对其进行了归类分析,见表1。

由表1可知:1)8种方法分别对应塑性区准则、复合准则、位移准则和强度准则;2)将盾构隧道施工影响区划分为3~4个比较合理。

由表1的归纳分析,笔者认为以上8种分区方法还存在如下不足:

1)应用范围较窄。序号1~5、7对应的6种方法均是针对盾构施工对周边某一类型构筑物(如建筑物、桩基)的影响提出的。相对而言,序号6、8的应用范围更广泛。

2)序号4的分区结果不明确,文献[4]中只给出处于D区的工程桩基本不受影响,而处于其他几个区的工程桩并没有作详细的分析。

3)序号6的分区只给出了接近既有铁路隧道各类施工对应的限制范围、要注意范围和无条件范围,各范围对应的具体定量分析相对匮乏。

表 1 现有分区方法的归纳分析

序号	方法作者	判断准则	依据数据	适用范围	分区及命名
1	施仲衡等 <sup>[1]</sup>	塑性区准则	地面至开挖面中心的距离及隧道外半径	盾构隧道施工对周边建筑物的影响	I 区-受影响区域; II 区-受影响区域; III 区-不受影响区域
2	王明年等 <sup>[2]</sup>	复合准则: 应力准则/位移准则	围岩主应力值、位移变化速率	盾构隧道施工过程中两近接隧道的相互影响	强影响区; 弱影响区; 无影响区
3	仇文革 <sup>[3]</sup>		各类近接施工的力学模型对应的受力特征	两并行隧道施工时的相互影响	A 区-强影响区; B 区-弱影响区; C 区-无影响区
4	伍伟林 <sup>[4]</sup>	位移准则	开挖影响角	隧道开挖对单桩变形的影响	A 区; B 区; C 区; D 区
5	王明年等 <sup>[5]</sup>	位移准则	桩基沉降允许值/警戒值/预警值	暗挖法地铁施工对近接高架桥桩基的影响	A 区; B 区; C 区; D 区
6	日本指南	强度准则	应力增加的允许值	接近既有铁路隧道的各类近接施工问题	限制范围; 要注意范围; 无条件范围
7	周斌 <sup>[6]</sup>	强度准则	后建隧道引起先建隧道结构的附加拉应力允许值	重叠盾构隧道近接影响	强影响区
8	技术规范 <sup>[7]</sup>		矿山法和盾构法外部作业隧道底板的埋深	浅埋矿山法和盾构法外部作业	A 区-强烈影响区; B 区-显著影响区; C 区-一般影响区
			矿山法和盾构法城市轨道交通隧道的毛洞跨度	深埋矿山法和盾构法外部作业	

4) 序号 8 对应的分区图案规整, 虽然方便工程应用, 但实际工程中的分区界限一般无法达到如此程度。

5) 序号 1~8 对应的分区方法均未考虑隧道周围土体的土质条件。

6) 盾构隧道施工引起的塑性区很难准确界定且无法进行实际的测量, 应力、强度对比位移而言也不易测量, 只有位移是施工时容易进行测量与统计的一项数据。同时, 针对既有隧道控制, 目前相关规范均是通过隧道位移量对其安全性进行评估的(具体见 2.1 节)。

因此, 相对以上几种判断准则, 位移准则更加合理。

## 2 新分区方法

### 2.1 思路与方法

上海市相关部门曾在较早前对既有隧道位移控制进行了相关规定<sup>[8]</sup>: 地铁结构设施竖向绝对沉降量及水平位移量  $\leq 20$  mm。其后, 文献[7]提出了隧道水平位移和竖向位移 10 mm 的预警值和 20 mm 的控制值。文献[9]则提出: 隧道结构沉降控制值为 3~10 mm, 隧道结构上浮控制值为 5 mm, 隧道结构水平位移控制值为 3~5 mm。郑刚等<sup>[10]</sup>基于以上 3 个规范, 根据位移等值线图, 选定了隧道位移 5, 10, 20 mm 作为隧道变形控制标准, 对基坑外既有隧道变形影响区进行了划分。笔者拟采用的位移准则与文献[10]对基坑影响分区的研究具有一定的相似之处, 因此在参考郑刚的分

区方法基础上, 结合以上规范提出盾构施工对周围环境的影响可以根据影响程度划分为强影响区、中影响区、弱影响区和无影响区。该方法可以将影响程度的大小通过隧道在对应区域引起的土体位移来进行量化。

针对前人分区方法的不足, 笔者作了以下创新:

1) 采用位移准则, 使标准位移控制值的取值均有合理的依据;

2) 采用位移等值线图进行了相关研究;

3) 采用盾构法隧道统一土体移动模型理论解<sup>[11]</sup>计算盾构施工引起的土体位移, 考虑了土质条件影响, 计算过程可重复且较简单;

4) 该研究结论可应用于盾构隧道施工对周边各种构筑物的影响分析。

魏纲<sup>[11]</sup>提出了盾构法统一土体移动模型二维解。规范中的位移一般是指施工稳定后的位移, 而在开挖面通过一定距离后, 正面附加推力和盾壳摩擦力、附加注浆力引起的地面位移基本为 0, 即当盾构隧道开挖面通过一定距离(3h)后, 土体位移主要受土体损失率的影响<sup>[12]</sup>。因此, 笔者仅考虑土体损失引起的土体位移, 而忽略了正面附加推力、盾壳摩擦力、附加注浆力等因素的作用。文献[11]中提出, 单线盾构施工引起的土体竖向位移计算公式为:

$$U_z = \frac{R^2}{2} \cdot \left\{ \frac{h-z}{y^2+(h-z)^2} + \frac{h+z}{y^2+(h+z)^2} - \frac{2z[y^2-(h+z)^2]}{[y^2+(h+z)^2]^2} \right\} \cdot \frac{4Rg-g^2}{4R^2} B \exp \left[ \frac{y^2 \ln \lambda}{(h+R)^2} + \frac{z^2(\ln \lambda - \ln \delta)}{(h+d)^2} \right] \quad (1)$$

其中,  $B = \frac{4h[h+d-\sqrt{(h+d)^2-\eta(R+d)^2}]}{R\eta(R+d)}$ ;

$$\lambda = \frac{1}{4} - \frac{g}{\pi R \eta} \left[ \arcsin \left( \frac{d}{R-g/2} \right) + \sqrt{1 - \left( \frac{d}{R-g/2} \right)^2} - 1 \right];$$

$$\delta = \frac{1}{2} - \frac{g}{\pi R^2 \eta} (R-g/4) \arcsin \left( \frac{d}{R-g/4} \right).$$

式中:  $R$  为隧道开挖半径;  $h$  为隧道轴线离地面的距离;

$$U_y = -\frac{R^2 y}{2} \cdot \left\{ \frac{1}{y^2+(h-z)^2} + \frac{1}{y^2+(h+z)^2} - \frac{4z(h+z)}{[y^2+(h+z)^2]^2} \right\} \cdot \frac{4Rg-g^2}{4R^2} B \exp \left[ \frac{y^2 \ln \lambda}{(h+R)^2} + \frac{z^2(\ln \lambda - \ln \delta)}{(h+d)^2} \right] \frac{h}{h+d} \quad (2)$$

盾构法隧道统一解公式的计算参数取值可参见文献[13]、[14]。根据式(1)、式(2)及勾股定理,可以对单个盾构隧道开挖引起的周边土体竖向位移、水平位移和总位移进行计算。

## 2.2 算例分析

算例的计算参数取值如下:取文献[14]中除去大直径盾构的 34 个工程实例的隧道轴线埋深平均值 16 m, 作为算例的隧道轴线埋深  $h$ ; 盾构开挖半径  $R=3$  m; 按照上海土质进行计算, 根据文献[13]取土体移动焦点到隧道中心点的距离  $d=0.35R$ 。

文献[15]结合实际工程与国内外建设管理经验, 确定了我国地铁工程施工时的地面最大沉降控制值为 30 mm, 笔者假定隧道上方地表处的沉降为 30 mm, 并据此反分析出隧道的土体损失率  $\eta$ 。新分区方法是用于在施工之前预估盾构施工的影响, 因此是按照施工引起的地面沉降警戒值 30 mm 来进行预测的。若施工期间沉降超过了 30 mm, 则应停止施工, 并采取控制措施以防工程事故的发生。因此, 按照以上假定划分出的影响区已属于最保守的分区。据该假定, 反分析出算例中隧道的  $\eta=2.1\%$ ,  $g=63.33$  mm。由文献[14]可知, 实测的  $\eta$  分布在 0.20%~3.01%, 其中 95.77% 的  $\eta$  分布在 0.20%~2.0%。因此本算例中的 2.1% 取值已经偏大, 表明与实际工程相比, 采用 30 mm 作为最大沉降控制值反分析土体损失率并不危险。根据土体位移计算结果绘制成各种等值线图, 见图 1~4。

1) 图 1 中的等值线上数字代表竖向位移值, 正值代表土体向下移动, 负值代表土体向上移动。

由图 1 可知, 隧道中心轴线上  $z=0\sim 16$  m ( $z$  为距

$d$  为土体移动焦点到隧道中心点的距离,  $d=\beta R$ , 其中  $\beta$  为与土质条件有关的计算参数, 取值范围为 (0, 1), 土质越好  $\beta$  值越大, 土质越差  $\beta$  值越小;  $y$  为距离隧道轴线的横向水平距离;  $z$  为离地面的竖向距离, 由地面向下为正;  $\eta$  为土体损失百分率;  $g$  为等效土体损失参数,  $g=2R(1-\sqrt{1-\eta})$ 。

土体水平方向位移计算公式为:

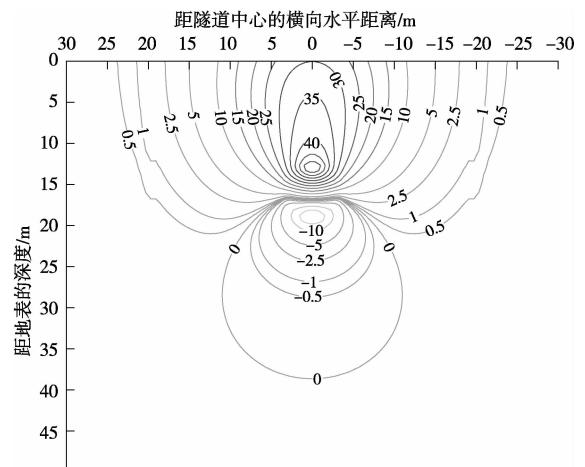


图 1 盾构隧道施工引起的竖向位移等值线图

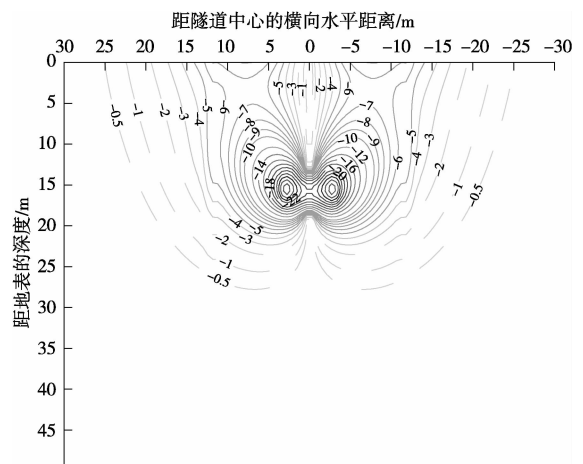


图 2 盾构隧道施工引起的水平位移等值线图

地表的深度)区域内的竖向位移, 比  $z=16\sim 40$  m 区域内的竖向位移绝对值更大, 最大竖向位移绝对值在 40 mm

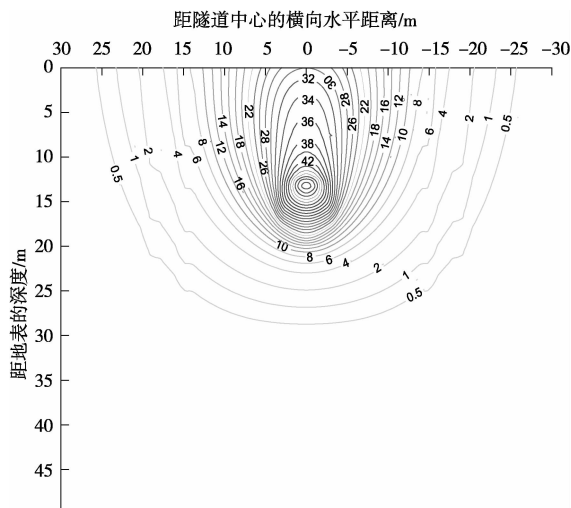


图3 盾构隧道施工引起的总位移等值线图

左右。在  $z=0\sim 16\text{ m}$  区域内,与隧道中心轴线横向水平距离越远,竖向位移越小;隧道中心轴线上  $z=16\sim 40\text{ m}$  区域内的竖向位移较小,基本上在  $10\text{ mm}$  之内,随着离隧道中心点距离的增加,竖向位移值呈辐射状减小直至为零。

2)图2中的等值线上数字代表水平位移值,负值代表土体向隧道方向移动。

由图2可知,水平位移值关于隧道中心轴线对称,且在距隧道中心点横向距离为  $3\text{ m}$ 、距地面深度为  $16\text{ m}$  处(隧道轴线处)达到最大值;随着离隧道中心距离的增加,水平位移绝对值减小;隧道轴线上方  $z=0\sim 16\text{ m}$  范围内土体受隧道施工影响而产生的水平位移相对较小。

3)图3中的等值线上数字代表总位移值,正值代表土体向隧道方向(土体移动焦点处)移动。

由图3可知,盾构隧道施工引起的总位移在隧道中心轴线上  $z=0\sim 16\text{ m}$  区域内的值相对较大,最大达到  $42\text{ mm}$  左右;随着距隧道中心点距离的增加,总位移值呈辐射状减小。

### 2.3 影响区的划分

根据图1~3,再结合文献[7-10],按照以下标准控制值划分影响区:强影响区(位移  $\geq 20\text{ mm}$ )、中影响区( $10\text{ mm} \leq \text{位移} < 20\text{ mm}$ )、弱影响区( $5\text{ mm} \leq \text{位移} < 10\text{ mm}$ )、无影响区(位移  $< 5\text{ mm}$ )。根据3个标准控制值对应的标准位移等值线位置,可以分别对竖向位移、水平位移和总位移的影响区进行划分。将划分好的竖向位移与水平位移标准等值线绘制于一张图上(见图4)。同时,按照总位移标准等值线作出按照总位移划分的影响区,见图5。

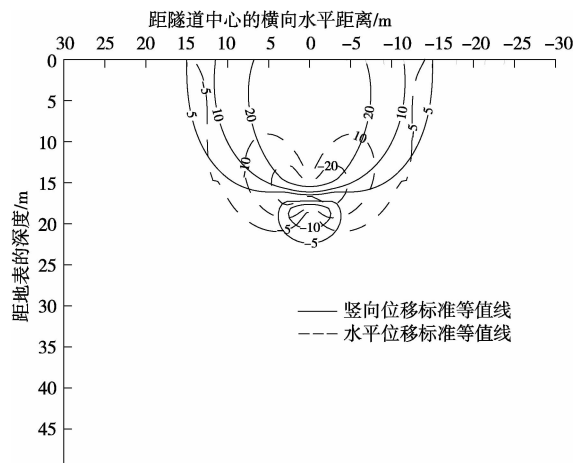


图4 竖向位移及水平位移标准等值线图

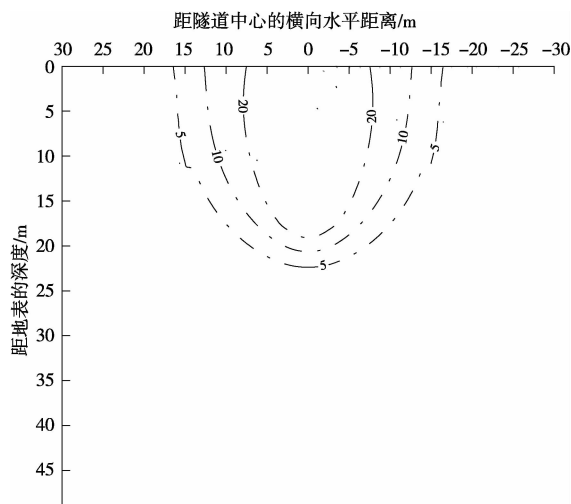


图5 总位移标准等值线图

根据图4绘制竖向位移和水平位移等值线标准控制线的步骤:将包络线简化为多段线;将影响区尖角平整化;将直角坐标无量纲化,即将横坐标化为距盾构隧道中心的水平距离/盾构隧道轴线埋深,纵坐标化为深度/盾构隧道轴线埋深;最后得到图6所示的影响区划分图。同理,将总位移标准等值线以相同形式表示,得到图7所示的影响区划分图。值得注意的是在实际工程中,应根据工程侧重点选取对应的影响区划分标准。

由图6、7可知,除无影响区外,图7对应的其他3个影响区深度均比图6深,且图7的这3个影响区地面影响范围均比图6相应的范围宽。该结果表明,根据总位移作出的影响区范围相对于竖向位移和水平向位移更偏安全。根据图6、7,可以得出具体分区界限,见表2、3,表中  $x'$  代表图6、7的横坐标,  $y'$  代表对应的纵坐标。



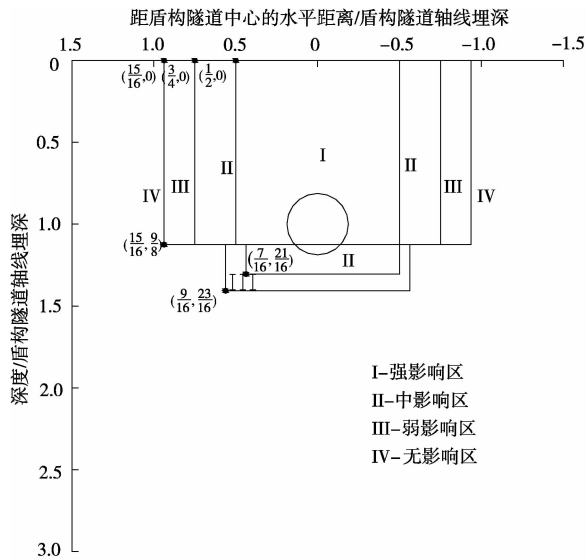


图6 根据竖向位移、水平位移标准等值线划分的影响区

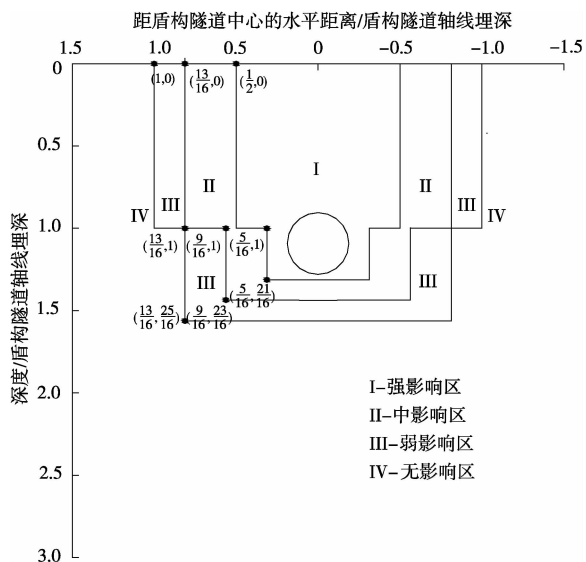


图7 根据总位移标准等值线划分的影响区

表2 图6对应的分区界限

影响区	$x'$	$y'$	$x'$	$y'$	$x'$	$y'$
I	(0, 0.44)					
II	(0.44, 0.56)	(0, 0.44)				
III	(0.56, 0.94)	(0.44, 0.56)	(0, 0.56)			
IV	(0.94, $\infty$ )	(0.56, $\infty$ )	(0.56, $\infty$ )	(0, $\infty$ )		

若选择图6作为影响区的划分标准,隧道的轴线埋深为16m,假设构筑物离隧道中心的横向水平距离绝对值为8m,构筑物距地表的深度为16m,则构筑物

表3 图7对应的分区界限

影响区	$x'$	$y'$	$x'$	$y'$	$x'$	$y'$
I	(0, 0.5)	(0, 0.31)				
II	(0.5, 0.81)	(0.31, 0.56)	(0, 0.56)			
III	(0.81, 1)	(0.56, 0.81)	(0.56, 0.81)	(0, 0.81)		
IV	(1, $\infty$ )	(0.81, $\infty$ )	(0.81, $\infty$ )	(0.81, $\infty$ )	(0, $\infty$ )	

对应的 $(x', y')$ 为 $(0.5, 1)$ 。由表2可得, $y'=1 \in (0, 1.13)$ ,对应表格的第1列, $x'=0.5 \in (0.44, 0.56)$ ,对应表格的第2行,因此可判断该构筑物处于II代表的影响区——中影响区。按上述方法,可根据工程实例中各类构筑物与盾构隧道中心的位置关系对构筑物所处的影响区进行判断。

将图6、7与其他学者的影响分区比较可知,笔者划分的影响区形状与表1中的序号2、5、8对应的分区形状有一定的相似性。与序号2、5相比,笔者的方法分区范围更加规整,应用更加方便,同时应用范围更广泛(可应用于盾构隧道施工对周边各类构筑物的影响);与序号8相比,笔者的方法分区更细致,对工程实践具有更大的指导意义。

### 3 工程应用

#### 3.1 工程概况

采用文献[2]中的深圳地铁3号线盾构隧道工程计算模型,隧道轴线埋深 $h=10\text{m}$ ,隧道开挖直径 $D=5.4\text{m}$ ,开挖土质主要为:砂层、残积土层、风化层及花岗岩等,因此根据文献[13]取 $d=0.9R$ ,按新分区方法,假定隧道上方地表处的沉降为 $30\text{mm}$ ,反分析出隧道的土体损失率 $\eta=1.35\%$ , $g=36.57\text{mm}$ 。

#### 3.2 新分区方法计算结果

将新分区与文献[2]分区结果绘于同一张图上,见图8~9。

从图8、9的结果来看,新分区方法的范围比文献[2]的分区范围更小。当新的强影响区与文献[2]的强影响区基本重合时,反算出的 $\eta$ 达到 $4.2\%$ ,远大于文献[14]关于 $\eta$ 分布的实测结果,表明文献[2]的分区结果不太合理,结果偏保守。由于文献[2]采用的是有限元模拟方法,计算方法不可重复且较繁琐,而新分区方法采用理论计算方法,计算过程简单,且计算结果具有可重复性,说明了新分区方法具有较强实用性。

软土地区的工程实践中出现的大量问题大多与工后长期沉降密切相关,因此璩继立<sup>[10]</sup>对盾构引起的地

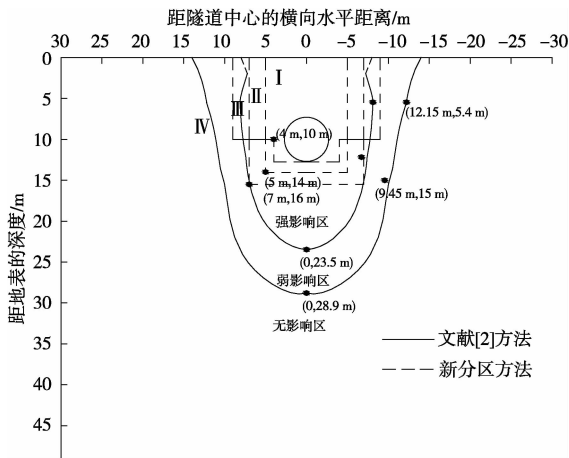


图8 新分区方法(按竖向位移和水平位移)与文献[2]方法比较结果

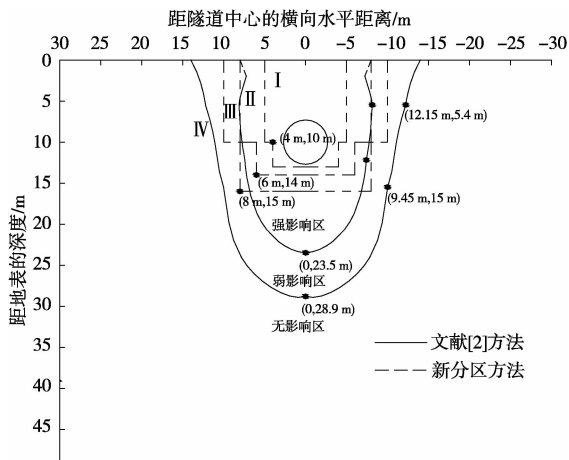


图9 新分区方法(按总位移)与文献[2]方法比较结果

表长期实测曲线变化情况进行了研究,其结果表明:盾构施工引起的地表沉降槽宽度会随时间的发展逐渐增大,但仍符合 Peck 提出的正态分布曲线规律。因此,按照笔者的统一土体移动模型解,只要取的土体损失率符合工后沉降的特征和要求,新分区方法便可用于评估工后沉降的分区,此处不再赘述。

#### 4 结语

1)笔者采用盾构法隧道统一土体移动模型理论解,基于位移准则,根据3条标准等值线(5,10,20 mm),将盾构隧道施工影响区划分为强影响区、中影响区、弱影响区和无影响区。

2)新分区方法考虑了土质条件,可重复计算且过程简单;与前人方法相比,范围更小、精度较高;可据此预估盾构隧道可能产生的土体变形。

3)笔者是采用地面最大沉降值为30 mm来进行分区的,实际施工中如果控制不当,地面沉降超过30 mm

时,会导致影响范围变大,此时应根据实际地面最大沉降值来重新计算分区。

笔者仅考虑了土体损失引起的土体位移,并未考虑正面附加推力、盾壳摩擦力、附加注浆力等因素的作用,因此还需要考虑多因素后对其进行进一步研究,以使新分区方法更加完善。MET

#### 参考文献:

- [1] 施仲衡,张弥,王新杰,等. 地下铁道设计与施工[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997:378-381.
- [2] 王明年,张晓军,苟明中,等. 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[J]. 岩土力学,2012,33(1):273-279.
- [3] 仇文革. 地下工程近接施工力学原理与对策的研究[D]. 成都:西南交通大学,2003.
- [4] 伍伟林. 盾构隧道施工对上部建筑桩基变形的影响研究[J]. 四川建筑,2015,35(5):76-79.
- [5] 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.
- [6] 周斌. 近接盾构隧道力学行为与近接分区研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [7] 广州地铁设计研究院有限公司. 城市轨道交通结构安全保护技术规范:GJJ/T 202-2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [8] 上海市市政管理局. 上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定[Z]. 沪市政法(94)第854号,1994.
- [9] 北京城建勘测设计研究院有限责任公司. 城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911-2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [10] 郑刚,杜一鸣,刁钰,等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(4):599-612.
- [11] 魏纲. 盾构法隧道施工引起的土体变形预测[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):418-424.
- [12] 魏纲,徐日庆. 软土隧道盾构法施工引起的纵向地面变形预测[J]. 岩土工程学报,2005,27(9):1077-1081.
- [13] 魏纲,刘加湾. 盾构法隧道统一土体移动模型参数取值研究[J]. 铁道建筑,2009(2):48-51.
- [14] 魏纲. 盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(9):1354-1361.
- [15] 崔玖江. 隧道与地下工程修建技术[M]. 北京:科学出版社,2005:247-255.
- [16] 璩继立. 盾构施工引起地面长期沉降研究[D]. 上海:同济大学,2002.

收稿日期:2016-10-11

基金项目:浙江省科技厅公益技术研究项目(2016C33051);住房和城乡建设部2015年科学技术项目计划(2015-K5-026)

作者简介:魏纲,男,教授,博士,主要从事地下隧道施工对周边环境影响及风险控制方面的研究工作。