

文章编号: 1000-7598-(2014) 08-2212-07

# 基于 Peck 公式的双线盾构引起的土体沉降预测

陈春来, 赵城丽, 魏 纲, 丁 智

(浙江大学城市学院 土木工程系, 杭州 310015)

**摘 要:** 基于 Peck 公式, 对双线水平平行盾构隧道施工中土体损失引起的三维土体沉降计算方法进行研究。考虑先行隧道施工对后行隧道的影响和两条隧道开挖面的不同位置, 建立修正的三维 Peck 公式; 通过分别计算先行盾构隧道和后行盾构隧道施工引起的土体沉降, 叠加得到双线水平平行盾构施工引起的总的三维土体沉降。算例分析结果表明: 预测值与实测值比较吻合; 随着两条隧道开挖面前后距离的逼近, 地面最大沉降量会逐渐增大; 随着土体深度  $z$  的增大, 沉降略增大、沉降槽宽度则略减小; 当两条隧道轴线水平距离  $L$  较小时, 地面沉降量较大, 符合正态分布规律; 随着  $L$  的增大, 最大地面沉降量会逐渐减小, 沉降曲线形状慢慢由 V 型转变成 W 型。

**关 键 词:** 双线平行盾构隧道; Peck 公式; 土体沉降; 土体损失

中图分类号: TU 44

文献标识码: A

## Prediction of soil settlement induced by double-line shield tunnel based on Peck formula

CHEN Chun-lai, ZHAO Cheng-li, WEI Gang, DING Zhi

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China)

**Abstract:** Based on Peck formula, the calculation approaching to study the three-dimension soil settlement caused by ground loss during double-line parallel shield tunnel (DLPST) construction is proposed. Considering the influence of first tunnel construction on second tunnel and different excavation face positions of two tunnels, modified three-dimensional Peck formula is established. It was used to calculate soil settlement caused by both the first and the second shield tunnel construction and combined the results, then the total soil settlement induced by DLPST is obtained. It is indicated that this method forecast value almost satisfied the measured value. With two tunnels excavation facing before and after distance of approximation, the maximum soil settlement volume will gradually increase. With the depth of  $z$  increasing, the settlement slightly increases and the settlement slot width slightly reduces. When the two tunnel axis level distance ( $L$ ) is small, the soil settlement volume will be larger, and it is accord with normal distribution. The maximum soil settlement volume will gradually reduce and the settlement curve shape will slowly change by V type into W type as the increase of  $L$ .

**Key words:** double-line parallel shield tunnel; Peck formula; soil settlement; ground loss

## 1 引 言

近年来, 我国很多大城市都开始兴建地铁, 大多数都采用双线水平平行盾构施工。盾构法隧道施工必然会打破原有土层的应力平衡, 引起周围土体产生较大沉降, 严重的可能引起塌方<sup>[1]</sup>。而这种影响在双线水平平行盾构施工中尤为明显, 其最大沉降量和沉降槽宽度明显比单线盾构大。

目前国内外对于双线平行盾构施工引起土体

变形的研究方法主要有: ①基于 Peck 公式的经验方法<sup>[2-6]</sup>; ②理论解<sup>[7-8]</sup>; ③边界单元法<sup>[9]</sup>; ④有限单元法<sup>[10]</sup>; ⑤模型试验法<sup>[11]</sup>。由于双线平行盾构施工引起土体沉降的影响因素较多, 沉降槽变化多样, 导致研究困难。现有研究成果还不够成熟, 仅能计算二维土体沉降, 目前还无法计算三维深层土体沉降, 因此, 需作进一步研究。

本文首先参考魏纲<sup>[12]</sup>提出的土体损失率公式, 建立修正的三维 Peck 公式, 可以计算单线盾构施工

收稿日期: 2014-03-21

第一作者简介: 陈春来, 男, 1977 年生, 硕士, 副教授, 主要从事地下隧道施工与工程管理方面的研究工作。E-mail: chencl@zucc.edu.cn

通讯作者: 魏纲, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事地下隧道施工对周边环境及风险控制方面的研究工作。

E-mail: weig@zucc.edu.cn

引起的三维深层土体沉降；然后结合马克栓<sup>[5]</sup>提出的超几何方法，建立了双线水平平行盾构施工引起的三维深层土体沉降计算公式；并做了算例分析，研究了两条隧道开挖面前、后距离的逼近、深度  $z$  和两条隧道轴线之间的水平距离  $L$  改变的影响。

## 2 现有计算方法及不足之处

Peck<sup>[2]</sup>基于大量实测数据统计结果，认为土体移动由土体损失引起，假定土体不排水、沉降槽体积等于土体损失体积，提出地面沉降槽呈正态分布，单线盾构引起的横向地面沉降估算公式为

$$S(x) = S_{\max} \exp\left[-x^2/(2i^2)\right] \quad (1)$$

$$S_{\max} = \frac{V_{\text{loss}}}{i\sqrt{2\pi}} = \frac{\pi R^2 \eta}{i\sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

式中： $x$  为距隧道轴线横向水平距离； $S(x)$  为  $x$  位置处的地面沉降量； $S_{\max}$  为隧道轴线上方最大地面沉降量； $i$  为地面沉降槽宽度系数； $V_{\text{loss}}$  为单位长度土体损失量， $V_{\text{loss}} = \pi R^2 \eta$ ， $R$  为隧道开挖半径， $\eta$  为土体损失率。

之后有许多学者对 Peck 公式进行了补充研究：韩煊等<sup>[13]</sup>分析了 Peck 公式在我国的适用性；魏纲<sup>[14-15]</sup>研究了  $i$  和  $\eta$  的取值方法；姜忻良等<sup>[16]</sup>将 Peck 公式拓展到可以计算二维土体沉降，提出地面以下  $z$  深度处的深层土体沉降槽宽度系数  $i(z)$  的计算公式；孙玉永等<sup>[17]</sup>提出新的  $i(z)$  计算公式。

马克栓<sup>[5]</sup>基于 Peck 公式，提出采用超几何方法计算双线平行盾构施工引起的地面沉降。具体计算步骤：①采用 Peck 公式计算先行隧道开挖引起的地面沉降；②假定后行隧道引起的地面沉降为对称分布，考虑先行隧道开挖对后行隧道的影响，令后行隧道的  $\eta$  和  $i$  的取值与先行隧道不同。确定后行隧道轴线位置，采用 Peck 公式计算后行隧道开挖引起的地面沉降；③叠加得到总的地面沉降。计算公式以右侧先开挖为例：

$$S(x) = S_{\max, f} \exp\left[\frac{-(x-0.5L)^2}{2i_f^2}\right] + S_{\max, l} \exp\left[\frac{-(x+0.5L)^2}{2i_l^2}\right] \quad (3)$$

式中： $S_{\max, f} = \frac{\pi R^2 \eta_f}{i_f \sqrt{2\pi}}$ ； $S_{\max, l} = \frac{\pi R^2 \eta_l}{i_l \sqrt{2\pi}}$ ； $i_f$  和  $\eta_f$  分别为先行隧道的地面沉降槽宽度系数和土体损失率； $i_l$  和  $\eta_l$  分别为后行隧道的地面沉降槽宽度系数

和土体损失率。

该方法的优点是能够考虑  $L$  和先行隧道施工对后行隧道的影响，可以反映地面沉降曲线的不对称性。缺点是：只能计算稳定后的地面沉降，无法计算二维和三维深层土体沉降；没有明确  $i_l$  和  $\eta_l$  如何确定。

魏纲<sup>[18]</sup>对姜忻良等<sup>[16]</sup>与孙玉永等<sup>[17]</sup>公式进行了修正，使其使用范围更广，提出  $i(z)$  的计算公式为

$$i(z) = i(1 - z/h)^n \quad (4)$$

式中： $n$  为与隧道半径和土质条件有关的影响系数； $h$  为隧道轴线至地面距离； $z$  为离地面的竖向距离，以向下为正。

基于式 (4)，魏纲<sup>[6]</sup>对式 (3) 进行了改进，建立了修正的二维 Peck 公式，并探讨了  $i_l$  和  $\eta_l$  的取值方法，使其能够计算双线水平平行盾构施工引起的二维深层土体沉降：

$$S(x, z) = \frac{S_{\max, f}}{(1 - z/h)^n} \exp\left[\frac{-(x-0.5L)^2}{2i_f^2 (1 - z/h)^{2n}}\right] + \frac{S_{\max, l}}{(1 - z/h)^n} \exp\left[\frac{-(x+0.5L)^2}{2i_l^2 (1 - z/h)^{2n}}\right] \quad (5)$$

该方法能计算稳定后的二维土体沉降，但无法计算三维土体沉降。而实际双线平行盾构隧道施工引起的土体沉降是三维的，因此，需作进一步研究。

## 3 本文计算公式推导

笔者利用现有单线盾构施工引起的三维土体沉降计算方法，对式 (5) 进行修正，从而拓展得到双线平行盾构施工引起的三维深层土体沉降计算公式。笔者仅考虑土体损失引起的沉降，不考虑其他因素。图 1 为双线水平平行盾构相对位置及坐标示意图，图中  $y$  坐标为盾构掘进方向。

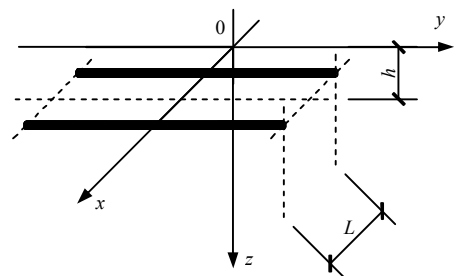


图 1 双线平行盾构相对位置示意图  
Fig.1 Relative position of the double-line parallel shield tunnel

### 3.1 现有单线盾构施工引起三维土体沉降计算方法

目前有两种较为简便的单线盾构施工引起三维土体沉降的计算方法。

方法 1: 魏纲等<sup>[19]</sup>提出计算单线盾构施工中土体损失引起的土体中任一点沉降的通用经验公式:

$$S(x, y, z) = S_{\max} \left[ \Phi \left( \frac{y - y_i}{i(z)} \right) - \Phi \left( \frac{y - y_f}{i(z)} \right) \right] \cdot \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^{-0.3} \exp \left[ -\frac{x^2}{2i(z)^2} \right] \quad (6)$$

式中:  $y_i$  为隧道开挖面推进起始点, 在  $y$  轴负方向;  $y_f$  为当前开挖面的位置;  $\Phi$  函数可由标准正态分布函数表查得;  $i(z) = i(1 - z/h)^{0.3}$ 。

式 (6) 能够计算三维土体沉降且比较简单, 但公式存在以下缺陷: ①当  $y$  在  $[y_i, y_i + 4i]$  区间时, 不符合实际规律, 随着  $y$  的减小,  $S(x, y, z)$  不会趋于一定值, 反而会不断减小; ②式中常数 0.3 并不适合所有土质, 需改进<sup>[18]</sup>。

方法 2: 在既定工况下, 参考 CT 断层扫描技术, 如果得到沿隧道掘进方向 ( $y$  方向) 的每一个纵向断面的土体损失率  $\eta(y)$ , 就可以计算出每一个纵向断面的深层土体沉降, 再将其组合起来就可以得到三维深层土体沉降<sup>[12]</sup>。

Sagaseta<sup>[20]</sup>假定土体损失为圆柱体, 沿隧道掘进方向均匀分布, 令  $x=0$ 、 $z=0$ , 则隧道轴线上方地面最大沉降量  $S_{\max}(y)$  沿掘进方向的变化为

$$S(x=0, y, z=0) = S_{\max}(y) = \frac{V_{\text{loss}}}{2\pi h} \left[ 1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + h^2}} \right] \quad (7)$$

由 Peck 公式<sup>[2]</sup>可知, 在既定工况下  $\eta$  与  $S_{\max}$  成正比。因此, 土体损失率  $\eta(y)$  与  $S_{\max}(y)$  也成正比。则:

$$\frac{\eta(y)}{S_{\max}(y)} = \frac{\eta(y=-\infty)}{S_{\max}(y=-\infty)} = \frac{\eta_{\max}}{\frac{V_{\text{loss}}}{\pi h}} \quad (8)$$

将式 (7) 代入式 (8), 得

$$\eta(y) = S_{\max}(y) \frac{\eta_{\max}}{\frac{V_{\text{loss}}}{\pi h}} = \frac{V_{\text{loss}}}{2\pi h} \left[ 1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + h^2}} \right] \frac{\eta_{\max}}{\frac{V_{\text{loss}}}{\pi h}} = \frac{\eta_{\max}}{2} \left[ 1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + h^2}} \right] \quad (9)$$

由于式 (6) 存在缺陷, 故本文采用方法 2。

### 3.2 本文计算公式推导

笔者根据式 (9), 将式 (1) 中土体损失率  $\eta$  替换为  $\eta(y)$ , 分析得出土体损失引起的隧道轴线上纵向地面沉降  $S_{\max}(y)$  为

$$S_{\max}(y) = \frac{\pi R^2}{i\sqrt{2\pi}} \eta(y) = \frac{S_{\max}}{2} \left[ 1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + h^2}} \right] \quad (10)$$

结合式 (1)、(4)、(10), 对式 (1) 进行修正, 建立修正的三维 Peck 公式, 可以计算单线盾构施工引起的三维深层土体沉降为

$$S(x, y, z) = \frac{S_{\max}}{2(1 - z/h)^n} \left[ 1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + h^2}} \right] \cdot \exp \left[ \frac{-x^2}{2i^2(1 - z/h)^{2n}} \right] \quad (11)$$

式中:  $S_{\max}$  采用式 (2) 计算。

由式 (11) 可知, 当  $z=0$ 、 $y \rightarrow -\infty$  时, 式 (11) 就退化为式 (1); 当  $x=0$ 、 $z=0$  时, 式 (11) 就变为式 (10)。

然后参考式 (5) 的方法, 将式 (11) 拓展到能够计算双线平行盾构施工引起的三维深层土体沉降。分别计算先行和后行隧道引起的三维土体沉降, 叠加得到双线水平平行盾构施工引起的总的三维深层土体沉降计算公式。以右侧先开挖为例:

$$S(x, y, z) = \frac{S_{\max, f}}{(1 - z/h)^n} \left[ 1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + h^2}} \right] \cdot \exp \left[ \frac{-(x - 0.5L)^2}{2i_f^2(1 - z/h)^{2n}} \right] + \frac{S_{\max, l}}{(1 - z/h)^n} \cdot \left[ 1 - \frac{y}{\sqrt{y^2 + h^2}} \right] \exp \left[ \frac{-(x + 0.5L)^2}{2i_l^2(1 - z/h)^{2n}} \right] \quad (12)$$

当  $y \rightarrow -\infty$  时, 式 (12) 就退为式 (5); 关于参数  $i_f$ 、 $\eta_f$ 、 $i_l$  和  $\eta_l$  的取值, 可参见文献[6]; 参数  $n$  的取值, 可参见文献[18]。

本文方法还存在一些不足: 如仅考虑土体损失, 没有考虑盾壳摩阻力、正面附加推力等因素; 计算参数多且取值困难; 难以界定两条隧道之间的相互影响范围和影响程度等, 有待进一步研究。

## 4 算例分析

### 4.1 实例验证

本文收集了国内两个双线水平平行盾构隧道的工程实例, 共 9 组地面沉降实测数据。通过式 (3) 与实测数据拟合, 文献[6]给出了  $i_f$ 、 $\eta_f$ 、 $i_l$  和  $\eta_l$  的

反分析数据，具体见表 1。取其中武汉长江隧道<sup>[5]</sup>的 HS3、HS5 断面和杭州地铁 1 号线<sup>[21]</sup>的数据，采用本文方法作具体的实例分析。

表 1 实测数据反分析结果<sup>[6]</sup>

Table 1 Analysis results of the anti-measured data<sup>[6]</sup>

| 序号 | 断面名称 | $h$<br>/ m | $L$<br>/ m | $i_t$<br>/ m | $\eta_t$<br>/ % | $i_i$<br>/ m | $\eta_i$<br>/ % |
|----|------|------------|------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| 1  | HS1  | 12.6       | 20         | 6.0          | 1.43            | 7.2          | 1.44            |
| 2  | HS2  | 17.4       | 20         | 6.0          | 1.08            | 9.0          | 1.54            |
| 3  | HS3  | 18.4       | 20         | 8.1          | 0.66            | 8.8          | 0.74            |
| 4  | HS4  | 22.9       | 20         | 11.0         | 1.60            | 11.5         | 1.55            |
| 5  | HS5  | 35.6       | 20         | 14.8         | 0.82            | 15.0         | 0.99            |
| 6  | HS6  | 37.6       | 20         | 12.0         | 0.49            | 14.5         | 0.70            |
| 7  | HS7  | 44.0       | 20         | 21.5         | 0.50            | 23.0         | 0.48            |
| 8  | HS8  | 46.5       | 20         | 20.5         | 0.39            | 21.0         | 0.33            |
| 9  | 杭州   | 19.0       | 12         | 7.6          | 0.85            | 9.2          | 0.83            |

#### 4.1.1 武汉长江隧道

武汉长江隧道双线盾构开挖直径  $D=11.38$  m，开挖土质主要为：粉质黏土、粉细砂、中粗砂、卵石地层，均为右侧先开挖<sup>[5]</sup>。由于篇幅有限，取其中两组典型断面 HS3（地面沉降呈 W 形）和 HS5（地面沉降呈 V 形）的数据进行分析。

采用式（12），取表 1 中断面 HS3 和 HS5 的参数，计算得到横向地面总的沉降曲线，与实测数据进行对比，见图 2、3，图中本文公式计算工况均为右  $y=-100$ ，左  $y=-100$ ，代表右侧先行隧道开挖面通过计算断面 100 m、左侧后行隧道开挖面通过计算断面 100 m。如图所示，本文方法计算结果与实测曲线较吻合，表明本文公式具有一定可靠性。由于 HS3 断面埋深较浅（ $h=18.4$  m），根据文献[10]的研究，不属于近距离范畴，所以地面沉降曲线不符合正态分布规律；而 HS5 断面埋深较深（ $h=35.6$  m），根据文献[10]的研究，属于近距离范畴，

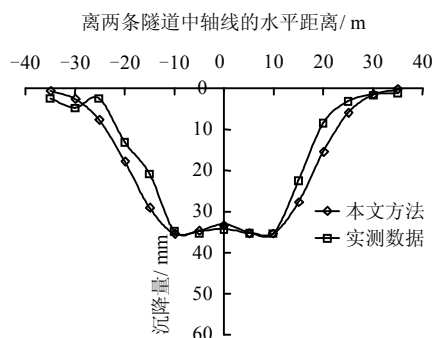


图 2 断面 HS3 总的横向地面沉降曲线

Fig.2 Curves of transverse surface total settlement caused by double-line tunnel construction in section HS3

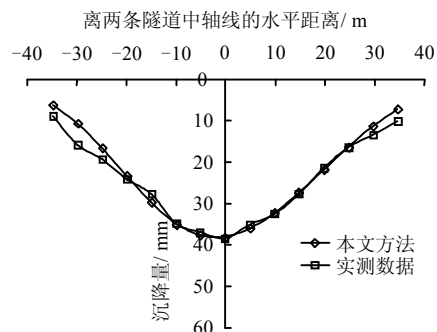


图 3 断面 HS5 总的横向地面沉降曲线

Fig.3 Curves of transverse surface total settlement caused by double-line tunnel construction in section HS5

所以地面沉降曲线符合正态分布规律。计算结果表明本文方法适用范围较广。

#### 4.1.2 杭州地铁 1 号线

杭州地铁 1 号线的盾构开挖直径  $D=6.34$  m， $h=19$  m， $L=12$  m。盾构穿越粉土和粉质砂土，右侧先开挖<sup>[21]</sup>。采用式（12），取表 1 中杭州的参数，计算得到总的横向地面沉降曲线，与实测数据进行对比，见图 4，图中本文公式计算工况为右  $y=-100$ ，左  $y=-100$ 。如图所示，本文方法计算结果与实测曲线较吻合；属于近距离范畴，实测曲线基本符合正态分布规律，总沉降的最大值偏向先行隧道一侧，与计算分析结果一致。

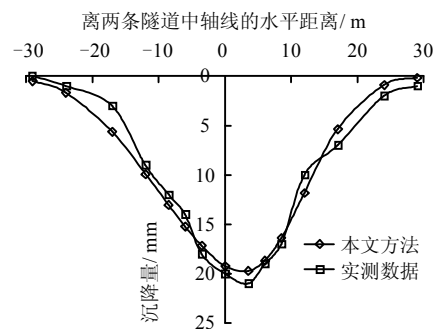


图 4 杭州地铁 1 号线的总的横向地面沉降曲线

Fig.4 Total transverse surface settlement curves of Metro Line 1 in Hangzhou

图 5 为离两条隧道中轴线的距离分别为  $x=6$  m 和  $x=0$  m 处计算得到纵向地面总的沉降曲线，与实测数据进行对比， $x=6$  m 表示位于中轴线右侧 6 m 处。分析可知：①在开挖面前方，土体损失引起的地面沉降量逐渐减小；②在开挖面后方，沉降量逐渐增加，到一定距离后趋于稳定，最大沉降量约为开挖面处的 2 倍；③计算曲线与实测曲线变化趋势一致，但计算值要大于实测值。这是因为盾构在推

进过程中由于正面附加推力和盾壳摩擦力会使土体产生隆起效应,而本文方法没有考虑该因素。但在开挖面后方,当盾壳摩擦力和正面附加推力的影响减弱后,两者的沉降数据比较接近。

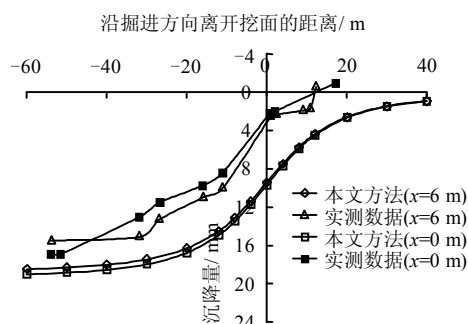


图5 杭州地铁1号线总的纵向地面沉降曲线  
Fig.5 Total longitudinal surface settlement curves of Metro Line 1 in Hangzhou

## 4.2 影响因素分析

下面以杭州地铁1号线工程为例,对3个土体沉降的影响因素进行分析。

### 4.2.1 两条隧道开挖面前后距离改变的影响

图6为双线平行隧道施工引起的横向地面总的沉降曲线,计算参数与4.1.2节相同。如图所示,先行隧道开挖完后,随着后行隧道开挖面的掘进,地面总沉降量和沉降槽宽度逐渐增加,最大沉降值位置将小幅度地向后行隧道方向靠近;由于后行隧道引起的土体损失率和最大沉降量要小于先行隧道,最终最大地面沉降值偏向先行隧道一侧。表明双线平行盾构隧道施工时前、后开挖面距离不宜太近。

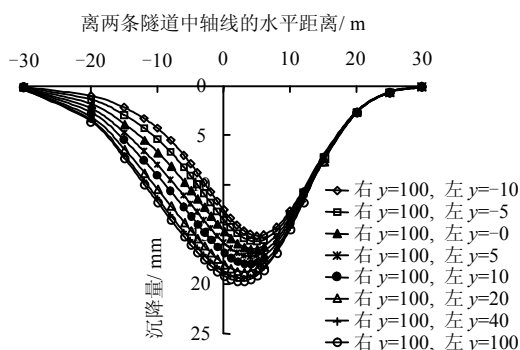


图6 双线平行隧道施工引起的横向地面沉降  
Fig.6 Curves of transverse surface settlement caused by double-line parallel tunnel construction

利用本文方法,画出三维地面沉降曲面图,见图7,图中计算工况为右 $y=-100$ ,左 $y=-10$ 。如图所示,两条隧道前、后距离的逼近会对总的地面

沉降产生影响,沉降槽呈不规则形状变化。由于 $L$ 较小,最后形成的三维地面沉降槽,其后方地面沉降曲线横截面呈正态分布。

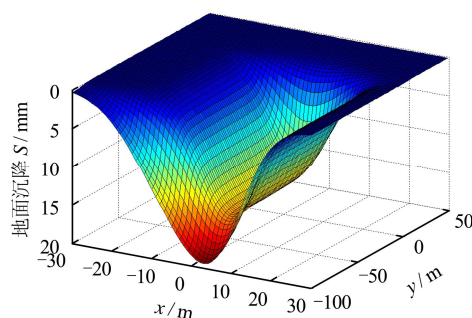


图7 先行隧道挖100 m、后行隧道挖10 m时的三维地面沉降

Fig.7 3D surface settlement with first tunnel dug into 100 m and second tunnel dug into 10 m

### 4.2.2 土体深度 $z$ 改变的影响

改变土体深度,分别令 $z$ 为0、4、8 m,取 $n=0.4$ ,其他计算参数取值同4.1.2节。采用本文方法计算得到不同深度处的土体横向沉降曲线,见图8,图中计算工况均为右 $y=-100$ ,左 $y=-100$ 。如图所示,随着土体深度的增加,土体最大沉降有所增大,沉降槽范围则略有减小。

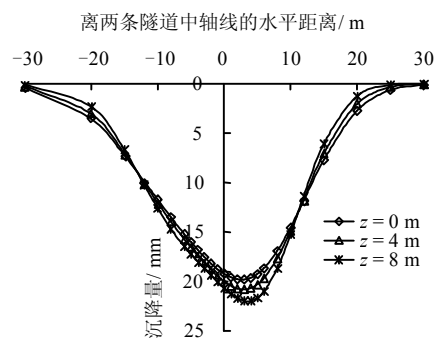


图8 不同深度处的横向土体沉降曲线  
Fig.8 Transverse settlement curves of soil in different depth

### 4.2.3 $L$ 改变的影响

改变 $L$ ,分别令 $L$ 为7、8、9、10、11、12、13、14、15、16、18和20 m。由于两条隧道之间相互影响的范围难以界定,为方便研究,文中不考虑先行隧道施工对后行隧道的影响,即取 $\eta_f = \eta_l = 0.85\%$ , $i_f = i_l = 7.6$  m,其他参数取值不变。

图9为本文方法计算得到的不同 $L$ 时的地面沉降曲线,图中计算工况均为右 $y=-100$ ,左 $y=-100$ 。如图所示,当 $L$ 较小时,双线盾构隧道施工

引起的地面沉降较大, 沉降曲线呈轴对称, 满足正态分布, 可近似地考虑成一个半径较大的盾构隧道开挖引起的土体沉降; 随着  $L$  变大, 施工产生的最大地面沉降值逐渐减小, 沉降槽范围则逐渐变大, 沉降曲线慢慢由 V 型转变成 W 型。

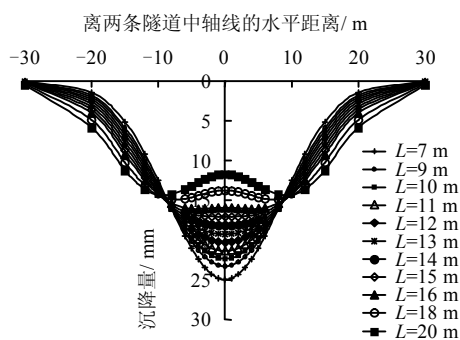


图9 不同  $L$  时的横向地面沉降曲线

Fig.9 Transverse surface settlement curves in different  $L$

采用式 (1) 对本文公式计算结果进行拟合。发现当  $L=7$  m 时, 两者十分吻合; 随着  $L$  变大, 在距离两条隧道中轴线 10 m 的位置处两者沉降差异逐渐增大, 当  $L=8、9、10、11、12$  m 时, 最大差异处的误差分别为 0.2、0.3、0.6、0.8、1.0 mm。当  $L=12$  m 时, 整个区域的地面沉降都可看到明显差异。表明随着  $L$  增大, 两者已明显不吻合。

由公式  $C=L/(h+R)^{[10]}$ , 计算 6 组数据的  $C$  值, 结果表明: 当间距  $L$  分别为 7、8、9、10、11、12 m 时,  $C$  值分别为 0.32、0.36、0.41、0.45、0.50、0.54。从拟合结果得出, 当  $L=7\sim 11$  m 时, 地面沉降曲线符合正态分布规律; 当  $L>11$  m 后, 地面沉降曲线均不符合正态分布规律。因此, 笔者提出, 令  $C=0.50$  作为近距离的界限, 当  $C\leq 0.50$  时, 适合直接采用式 (1) 进行计算。这与文献[10]的研究 ( $h=12$  m,  $R=3.1$  m) 结果  $C=0.66$  有一定差距。原因可能是两者的埋深不同以及本文分析时假定先行和后行隧道的参数相同导致的。

## 5 结 论

(1) 本文方法适用于各种工况, 且计算简便。在开挖面前、后本文方法计算值略大于实测值, 沉降稳定后计算值与实测值比较吻合。

(2) 两条隧道开挖面前后距离地逼近, 会导致土体最大沉降量增加, 表明双线平行盾构隧道施工时, 前后开挖面距离不宜太近; 随着深度  $z$  的增大, 最大沉降量略有增加、沉降槽宽度则略有减小。

(3) 若不考虑先行隧道施工对后行隧道的影响,

当  $L$  较小时地面沉降曲线符合正态分布规律, 当  $C=L/(h+R)\leq 0.50$  时, 适合直接采用 Peck 公式; 随着  $L$  的增大, 土体最大沉降量逐渐减小, 沉降槽宽度增大, 沉降曲线形状慢慢由 V 型转变成 W 型。

## 参 考 文 献

- [1] 申林方, 王志良, 谢建斌. 基于边界配点法浅埋隧道开挖引起周围土体变形的分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 2): 297—301.  
SHEN Lin-fang, WANG Zhi-liang, XIE Jian-bin. Response analysis of soil deformation induced by shallow tunnel excavation base on boundary collocation method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(Supp.2): 297—301.
- [2] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: [s. n.], 1969: 225—290.
- [3] 魏新江, 魏纲. 水平平行顶管引起的地面沉降计算方法研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1129—1132.  
WEI Xin-jiang, WEI Gang. Study of calculational method of ground settlement induced by level parallel pipe jacking[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(7): 1129—1132.
- [4] SUWANSAWAT S, EINSTEIN H H. Describing settlement troughs over twin tunnels using a superposition technique[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(4): 445—468.
- [5] 马可栓. 盾构施工引起地基移动与近邻建筑保护研究 [博士学位论文 D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [6] WEI Gang. Prediction of soil settlement caused by double-line parallel shield tunnel construction[J]. *Disaster Advances*, 2013, 6(6): 23—27.
- [7] 胡斌, 刘永林, 唐辉明, 等. 武汉地铁虎泉—名都区间隧道开挖引起的地表沉降研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 908—913.  
HU Bin, LIU Yong-lin, TANG Hui-ming, et al. Research on ground subsidence due to tunnel excavation in Huquan—Mingdu section of Wuhan subway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(5): 908—913.
- [8] WEI Gang, PANG Si-yuan, ZHANG Shi-min. Prediction of ground deformation induced by double parallel shield tunnelling[J]. *Disaster Advances*, 2013, 6(13): 91—98.
- [9] 廖少明, 余炎, 白廷辉, 等. 盾构隧道叠交施工引起的土层位移场分布规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(4): 485—490.  
LIAO Shao-ming, YU Yan, BAI Ting-hui, et al.

- Distribution of ground displacement field owing to two overlapped shield tunneling interaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(4): 485—490.
- [10] 魏纲, 庞思远. 基于有限元模拟的双线平行盾构隧道近距离界定[J]. 市政技术, 2014, 32(1): 76—80.
- WEI Gang, PANG Si-yuan. Definition of double parallel shield tunnel's close range based on numerical simulation[J]. **Municipal Engineering Technology**, 2014, 32(1): 76—80.
- [11] HE Chuan, FENG Kun, FANG Yong, et al. Surface settlement caused by twin-parallel shield tunnelling in sandy cobble strata[J]. **Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)**, 2012, 13(11): 858—869.
- [12] 魏纲. 盾构法隧道施工引起的土体变形三维解[C]// 第二届全国工程安全与防护学术会议论文集. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2010: 369—374.
- [13] 韩焯, 李宁, STANDING J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 23—28, 35.
- HAN Xuan, LI Ning, STANDING Jamie R. An adaptability study of Peck equation applied to predicting ground settlements induced by tunneling in China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 23—28, 35.
- [14] 魏纲. 盾构法隧道地面沉降槽宽度系数取值的研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(12): 74—79, 109.
- WEI Gang. Study on calculation for width parameter of surface settlement trough induced by shield tunnel[J]. **Industrial Construction**, 2009, 39(12): 74—79, 109.
- [15] 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.
- WEI Gang. Selection and distribution of ground loss ratio induced by shield tunnel construction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(9): 1354—1361.
- [16] 姜忻良, 赵志民, 李圆. 隧道开挖引起土层沉降槽曲线形态的分析与计算[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1542—1544.
- JIANG Xin-liang, ZHAO Zhi-min, LI Yuan. Analysis and calculation of surface and subsurface settlement trough profiles due to tunneling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(10): 1542—1544.
- [17] 孙永永, 周顺华, 宫全美. 软土地区盾构掘进引起的深层位移场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 500—506.
- SUN Yu-yong, ZHOU Shun-hua, GONG Quan-mei. Distribution of deep displacement field during shield tunneling in soft-soil areas[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(3): 500—506.
- [18] 魏纲. 盾构隧道深层土体沉降槽宽度系数计算方法研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(4): 110—115.
- WEI Gang. Study on calculation method of width coefficient of subsurface settlement trough in shield tunnel[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2010, 27(4): 110—115.
- [19] 魏纲, 吴华君, 陈春来. 顶管施工中土体损失引起的沉降预测[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 359—363.
- WEI Gang, WU Hua-jun, CHEN Chun-lai. Prediction of settlement induced by ground loss during pipe jacking construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(2): 359—363.
- [20] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. **Geotechnique**, 1987, 37(3): 301—320.
- [21] CHEN R P, ZHU J, LIU W, et al. Ground movement induced by parallel EPB tunnels in silty soils[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2011, 26(1): 163—171.
- anchor cable[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2011, 19(Supp.): 438—443.
- [19] HASSIOTIS S, CHAMEAU J, GUNARATNE M. Design method for stabilization of slopes with piles[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(4): 314—323.
- [20] WEI W B, CHENG Y M. Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles[J]. **Computers and Geotechnics**, 2009, 36(7): 1176—1185.
- [21] GUO W D, QIN H Y. Thrust and bending moment of rigid piles subjected to moving soil[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2010, 47(2): 180—196.

上接第 2211 页

LI Xun-chang, MEN Yu-ming, HE Guang-yu. Test research on strata resistance of pile side of anchor anti-slide pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2654—2659.

- [17] MATSII S I, DEREVENETS F N. Interaction between a slide-prone soil and piles with consideration of the configuration of the retaining structure[J]. **Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 2007, 44(2): 49—55.

- [18] 门玉明, 李寻昌, 张涛, 等. 锚索抗滑桩破坏模式探讨[J]. 工程地质学报, 2011, 19(增刊): 438—443.

MEN Yu-ming, LI Xun-chang, ZHANG Tao, et al. Discussed on the failure modes of anti-slide pile with