

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230526002

## 隧道开挖地层位移计算方法及工程应用\*

史磊磊<sup>1,2</sup>, 何海琦<sup>2</sup>, 林庆涛<sup>1,3</sup>

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 北京市政建设集团有限责任公司, 北京 100089; 3. 清华大学土木水利学院, 北京 100084)

**摘要:** 经验方法是计算隧道开挖引起地层位移的重要方法, 尤其是当地层的非线性塑性变形显著时, 经验方法可更为合理地描述地层的位移分布规律, 但是可实现地层竖向位移和水平位移统一计算的方法尚未建立。基于隧道上方土体单元的运动特征, 提出了隧道开挖引起的地层位移的经验计算模型, 建立了地层水平位移和竖向位移之间的关系。通过分析 25 组现场工程数据, 优化了隧道上方地层最大沉降  $S_{v,max}(z)$  的公式, 结合已有的沉降槽宽度系数  $i(z)$  的公式, 发展了 Peck-Mair 公式, 实现了隧道上方地层竖向位移场的合理计算。根据地层水平位移和竖向位移之间的关系, 基于发展的 Peck-Mair 公式, 推导了地层水平位移的计算公式, 实现了地层竖向位移和水平位移的统一计算。在地层水平位移计算公式中, 变量  $H(z)$  表示土体运动定向点位置随深度的变化规律, 基于工程实测结果提出了一个对数函数实现了  $H(z)$  的定量描述。利用伦敦 HEX 隧道工程中实测的 2 组地层位移数据, 验证了所提地层位移计算方法的合理性。最后, 将提出的地层位移计算方法应用在北京地铁 12 号线安-安区间渡线段隧道开挖工程, 实现了该工程中隧道开挖引起的地层位移场的反演。

**关键词:** 隧道开挖; 地层变形; 竖向位移; 水平位移; 经验方法; Peck-Mair 公式

**中图分类号:** U452   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1224-10

## A Method for Calculating the Ground Displacements Induced by Tunnel Excavation and Its Application in Field Engineering

SHI Leilei<sup>1,2</sup>, HE Haiqi<sup>2</sup>, LIN Qingtao<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Municipal Construction Group Co. Ltd, Beijing 100089, China; 3. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The empirical method is very important to calculate the ground displacement caused by tunnel excavation, especially when the non-linear plastic deformation of stratum is significant. However, a unified method for calculating the vertical and horizontal displacements of the ground has not been established. An empirical model for calculating the ground displacement induced by tunnelling is proposed by assuming the movement vector of the soil. Then, the mathematical relationship between the horizontal displacement and the vertical displacement of the soil is established. By analyzing 25 sets of

\* 收稿日期: 2023-05-26; 修回日期: 2023-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(52025084; 52208396; 52278385)、中国博士后科学基金面上项目(2021M701934)、北京市教委科技一般项目(KM202210005019)资助

作者简介: 史磊磊(1982—), 男, 正高级工程师, 硕士。主要从事隧道及地下工程方面的研究。

E-mail: sichuan120@163.com

通讯作者: 林庆涛(1987—), 男, 博士后。主要从事城市地下工程方面的研究。E-mail: linqingtao3310@163.com

data from field engineering, the formula for the maximum settlement,  $S_{v,max}(z)$ , is optimized. A developed Gaussian function is obtained by combining the existing width coefficient of the settlement trough,  $i(z)$ , and the optimized maximum settlement,  $S_{v,max}(z)$ , to describe the vertical displacement of the ground. Then the formula for the horizontal displacement is presented based on the developed Gaussian function.  $H(z)$ , representing the position of the oriented point of the soil movement is a variable in the horizontal displacement formula. Based on the measured results, a logarithmic function is proposed to describe the variation of  $H(z)$  with depth in a clay stratum. Then, the rationality of the proposed method is validated using 2 sets of data from the field project. Finally, the proposed method is applied to the tunnel from Anzhen Bridge to Anhua Bridge on Beijing Metro Line 12, and the ground displacement field caused by the tunnel excavation in the project is successfully inverted.

**Keywords:** tunnel excavation; vertical displacement; horizontal displacement; empirical method; Peck-Mair formula

## 0 引言

隧道开挖过程中不可避免引起地层位移,包括竖向位移和水平位移。建立隧道开挖地层位移的计算方法,对于确保地表建筑和地下管线的安全十分重要<sup>[1-3]</sup>。隧道开挖引起地层位移的预测方法可分为分析解析方法和经验方法<sup>[4-6]</sup>。解析方法有合理的理论支持,且计算模型清晰,已在实际工程项目中广泛应用<sup>[7-8]</sup>。然而,解析方法大多基于弹性本构模型建立,隧道开挖引起的地层体积损失较大或地层黏聚力较小时,地层非线性塑性变形显著<sup>[9-11]</sup>,解析方法的适用性变弱。经验方法通过分析现场工程实测数据建立<sup>[12-13]</sup>,公式简单易懂,公式参数可以反映多种因素的影响,包括地层条件、隧道几何条件(埋深、隧道结构形式)、施工方法和施工质量等<sup>[4,6,13]</sup>。地层的非线性塑性变形显著时,经验方法也可以合理地描述地层位移<sup>[14-17]</sup>。然而,可以同时计算地层竖向位移和水平位移的经验方法尚未建立。

R.B.Peck<sup>[12]</sup>分析了80组隧道工程的实测数据,发现隧道横截面内地表沉降可以用高斯函数来合理描述,基于此提出了著名的Peck公式描述地表沉降。R.J.Mair等<sup>[13]</sup>发展了Peck的方法,使其适用于计算隧道上方地层的沉降。已有研究证明,Peck-Mair公式可以很好地描述大多数隧道项目的地层沉降的实测结果<sup>[13,18-19]</sup>。Peck-Mair公式包括两个变量,即 $S_{v,max}(z)$ (深度 $z$ 处的最大沉降)和 $i(z)$ (深度 $z$ 处沉降槽宽度系数)<sup>[4,6,13,18-19]</sup>。已有研究表明, $i(z)$ 随深度的变化可以用线性函数来描

述<sup>[13,19-21]</sup>, $S_{v,max}(z)$ 随着深度的增加非线性增加<sup>[22-25]</sup>,D.C.Lu等<sup>[6]</sup>提出了一个幂函数来描述 $S_{v,max}(z)$ 。

与地层竖向位移计算方法相比,对地面水平位移预测方法的研究较少。对于饱和不排水黏土地层,M.P.O'Reilly和B.M.New<sup>[26]</sup>假设隧道上方土体的位移矢量朝向隧道中心,然后以此为基础建立了水平位移和竖向位移之间的函数关系。实测结果表明,对于砂土<sup>[27]</sup>和黏土<sup>[18]</sup>,土体位移的矢量指向隧道中心以下的位置。R.N.Taylor<sup>[28]</sup>的研究表明,对于饱和不排水黏土地层,位移矢量应指向隧道中心以下的 $0.175z_i/0.325$ 点,即 $i(z)$ 函数与隧道纵轴的交点, $z_i$ 为隧道轴线埋深。R.J.Grant和R.N.Taylor<sup>[14]</sup>通过对隧道开挖进行离心试验,在一定程度上证明了Mair和Taylor研究的合理性。实际上,隧道上方土体的位移矢量随深度发生显著变化点<sup>[1]</sup>,假设土体向一个定向点移动将导致水平位移的计算误差。

本文通过假设土体的位移矢量方向,建立了隧道开挖地层位移的经验计算模型,获得了土体水平位移和竖向位移之间的关系。通过发展 $S_{v,max}(z)$ 公式来描述垂直位移的公式,修正了现有的Peck-Mair公式,基于所获得的土体水平位移和竖向位移间的关系建立了地层水平位移的公式。最后,利用工程实测数据验证了提出方法的合理性。

## 1 地层位移计算模型

在隧道开挖过程中,对于其上方土体单元,总位移 $S(x,z)$ 可以用矢量 $(S_v(x,z), S_h(x,z))$ 表示,其中 $x$ 和 $z$ 分别是土体单元在水平和垂直方向上的坐

标,  $S_v(x, z)$ 、 $S_h(x, z)$  分别是土体位移的竖向和水平分量。土体单元的位移矢量指向隧道垂直对称轴上的一点。如图 1 所示, 深度  $z$  处的土体单元向点 C 移动, 水平位移分量与总位移之间的角度为  $\theta$ 。土体单元的水平位移分量和竖向位移分量之间的关系可以表示为:

$$\frac{S_h(x, z)}{S_v(x, z)} = \cot \theta \quad (1)$$

从式(1)可以看出, 当  $S_v(x, z)$  的公式确定后, 可以获得  $S_h(x, z)$  的公式。

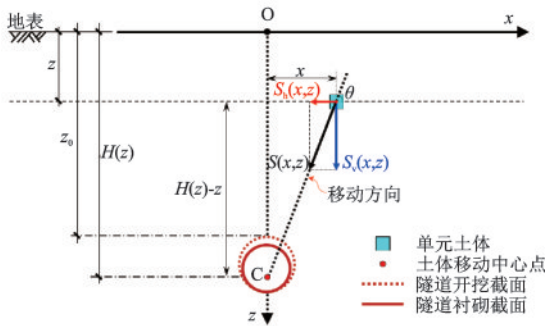


图 1 隧道上方土体单元移动示意

Fig.1 Schematic diagram of the displacement of the soil

## 1.1 竖向位移计算公式

实测结果表明, Peck-Mair 公式能够合理地描述大多数隧道情况下的沉降分布规律。Peck-Mair 公式可以呈现为:

$$S_v(x, z) = S_{v, \max}(z) \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2i(z)^2}\right) \quad (2)$$

式中,  $i(z)$  和  $S_{v, \max}(z)$  是公式(2)中的两个变量, 确定它们随深度的变化规律是计算水平位移的基础。

### 1.1.1 沉降槽宽度系数 $i(z)$

基于现场工程的实测数据, R.J.Mair 等<sup>[13]</sup>提出了适用于不排水黏土地层的  $i(z)$  的经验计算公式。A.M.Marshall 等<sup>[19]</sup>发展了 Mair 提出的公式, 使其适用于不同的地层条件。基于 Marshall 的研究  $i(z)$  的公式可表示为:

$$i(z) = i(0) - k \cdot z \quad (3)$$

式中,  $i(0)$  为地表沉降槽的宽度系数;  $k$  为  $i(z)$  的斜率。对于不排水黏土地层, R.J.Mair 等<sup>[13]</sup>发现  $i(0) = 0.5z_0$ ,  $k = 0.325$ ,  $z_0$  为隧道拱顶埋深。对于砂土和卵石地层,  $i(0)$  的值通常在  $0.25z_0 \sim 0.45z_0$ <sup>[18]</sup>,  $k$  的值随着开挖断面地层损失的增大而减小<sup>[1]</sup>。实际上,  $i(0)$  和  $k$  的值受多种因素影响, 如隧

道的几何条件、地层条件以及开挖断面地层损失等。

### 1.1.2 地层最大沉降 $S_{v, \max}(z)$

图 2 显示了  $S_{v, \max}(z)$  随着深度非线性增加, 其分布规律可采用如下幂函数来描述:

$$S_{v, \max}(z) = [S_{v, \max}(0) - S_{v, \max}(z_0)] \left(1 - \frac{z}{z_0}\right)^{\frac{1}{n}} + S_{v, \max}(z_0) \quad (4)$$

式中,  $S_{v, \max}(0)$  和  $S_{v, \max}(z_0)$  分别为地表和隧道顶部最大沉降;  $n$  为参数, 综合反映了多种因素对  $S_{v, \max}(z)$  的影响, 包括地层条件、隧道几何条件和隧道施工过程中等。确定参数  $n$  是将公式(4)进行工程应用的关键。

图 2 中收集整理了  $S_{v, \max}(z)$  随深度的变化规律, 通过使用公式(4)拟合测量数据获得  $n$  值, 并将得到的  $n$  和  $S_{v, \max}(0)/S_{v, \max}(z_0)$  的关系呈现在图 3 中, 可以看出  $n$  随  $S_{v, \max}(0)/S_{v, \max}(z_0)$  的增加而非线性减少, 可通过以下公式描述:

$$n = (S_{v, \max}(0)/S_{v, \max}(z_0))^{-0.97} \quad (5)$$

当隧道开挖造成的地层损失较小, 或地层中出现土拱时, 隧道开挖的影响不会延伸到地表,  $S_{v, \max}(0)/S_{v, \max}(z_0)$  接近 0, 此时  $n$  值非常大。当塌陷延伸到曲地表时,  $n$  的值应小于 1。针对这些情况, 需要收集更多的案例来提出  $n$  的公式。

## 1.2 地层水平位移计算公式

获得地层竖向位移的计算公式后, 需要确定土体单元的运动矢量, 以建立水平位移的计算公式。假设相同深度  $z$  处的土体位移矢量指向隧道竖向轴上的点 C, 如图 1 所示。定向点 C 的坐标为  $(0, H(z))$ , 因此角度  $\theta$  可以表示为:

$$\cot \theta = \frac{x}{H(z) - z} \quad (6)$$

将公式(6)代入公式(1), 可得:

$$S_h(x, z) = \frac{x}{H(z) - z} S_v(x, z) \quad (7)$$

将公式(2)代入公式(7), 获得水平位移的公式:

$$S_h(x, z) = \frac{x \cdot S_{v, \max}(z)}{H(z) - z} \cdot \exp\left\{-\frac{x^2}{2i(z)^2}\right\} \quad (8)$$

确定  $H(z)$  随深度的变化是使公式(8)适用于现场工程的关键。针对伦敦 Hyde Park 隧道, M.S.P. Wan 等<sup>[41]</sup>给出了隧道施工时的地层位移。利用

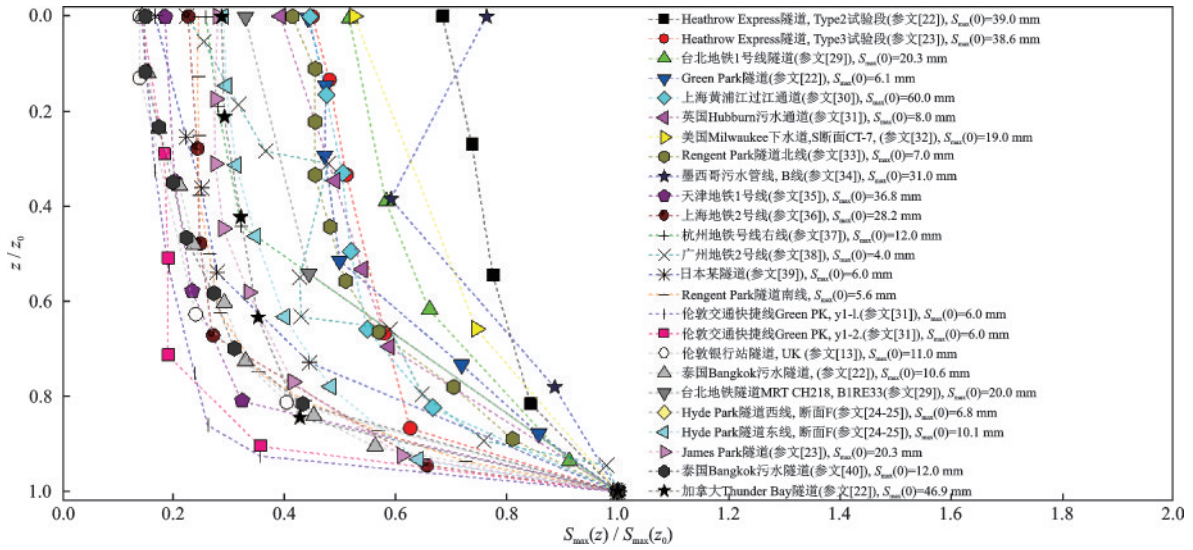


图2 最大地层沉降随深度变化规律

Fig.2 Variation of the maximum settlement with depth

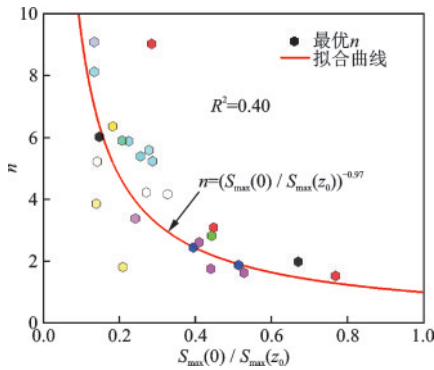


图3 参数  $n$  随  $S_{v,max}(0)/S_{v,max}(z_0)$  的变化规律  
Fig.3 Distribution of  $n$  with  $S_{v,max}(0)/S_{v,max}(z_0)$

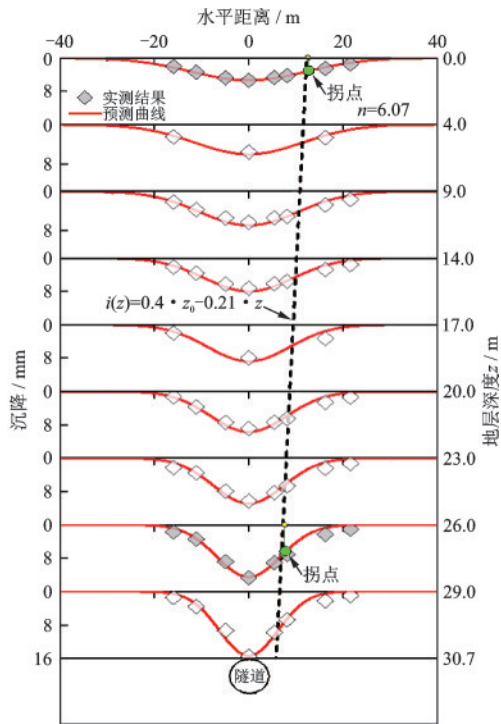
Hyde Park 隧道工程西线隧道开挖引起的地层沉降和水平位移标定了  $S_h(x, z)$  的公式。西线隧道轴线深度为 34.5 m, 地层条件为人工填土层和砾石层 (4.6 m 厚)、黏土层 (57.0 m 厚)<sup>[42]</sup>。图 4(a) 为隧道开挖至监测断面后 19.5 m 时的地层沉降, 以及使用公式 (2)、(3) 和 (4) 计算的相应高斯曲线。在该工况中, 通过将  $i(0)$  和  $i(26)$  代入公式 (3) 可确定参数  $k = 4.0$ , 其中  $i(0)$  和  $i(26)$  通过使用高斯函数拟合  $z = 0.0$  m 和 26.0 m 处的测量沉降而获得; 使用公式 (5) 计算参数  $n = 6.07$ 。从图 4(a) 可以看出, 公式 (2) 可以合理地描述实测的沉降。图 4(b) 为实测的不同深度的地层水平位移。通过用公式 (9) 拟合实测结果获得这些深度处的  $H(z)$  的值, 如图 5 所示。可以看出,  $H(z)$  随深度非线性增加, 并且在表面附近增长速率较大, 且随深度逐渐减小。 $H(z)$  随深度的变化可用以下函数描述:

$$\frac{H(z)}{z_0} = -C_1 \cdot \ln\left(-\frac{z/z_0 - B_1}{A_1}\right) \quad (9)$$

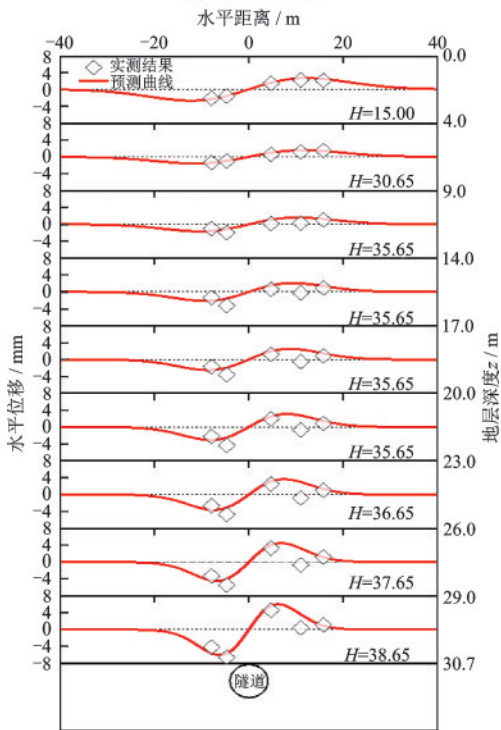
式中,  $A_1$ 、 $B_1$  和  $C_1$  是系数, 其值与地层条件、施工方法、隧道埋深等因素有关。

### 1.3 参数影响分析

根据 Green Park 隧道的信息, 分析了参数  $k$  和  $n$  以及变量  $H(z)$  的值对竖向和水平位移曲线的影响。在该工况中  $i(0) = 0.5z_0$ 、 $z_0 = 29.3$  m、 $S_{v,max}(0) = 6.0$  mm、 $S_{v,max}(z_0) = 44.4$  mm。图 6(a) 为参数  $n$  对竖向位移水平位移曲线的影响, 其中  $k = 0.325$ 、深度  $z = 8.5$  m、 $H(z) = 45.0$  m, 水平位移峰值位置不随  $n$  变化, 同时竖向位移和水平位移峰值随着  $n$  的减小而显著增加。参数  $k$  对竖向位移和水平位移曲线的影响如图 6(b) 所示, 其中  $n = 1.0$ ,  $z$  和  $H(z)$  的值与图 6(a) 中相同。可以看出参数  $k$  对竖向位移的峰值没有影响, 但沉降槽宽度随着  $k$  的增加而减小; 对于水平位移, 参数  $k$  对其曲线的宽度和峰值都影响显著,  $k$  值越大水平位移曲线的宽度越小且峰值越小, 并且峰值与隧道纵轴之间的距离越小。 $H(z)$  对竖向位移和水平位移曲线的影响如图 6(c) 所示, 其中  $k = 0.325$ 、 $n = 1.0$ 、 $z = 8.5$  m。可以看出,  $H(z)$  的值对竖向位移没有影响; 对水平位移的影响与参数  $n$  类似,  $H(z)$  只影响水平位移曲线峰值的大小, 而不影响其宽度和峰值的位置, 随着  $H(z)$  的值变大, 水平位移的峰值变小。



(a) 地层竖向位移



(b) 地层水平位移

图4 Hyde Park隧道开挖引起的地层位移及预测曲线  
Fig.4 Measured and calculated ground displacements in Hyde Park tunnel

## 2 案例验证

HEX隧道连接希思罗机场和伦敦市中心,采用

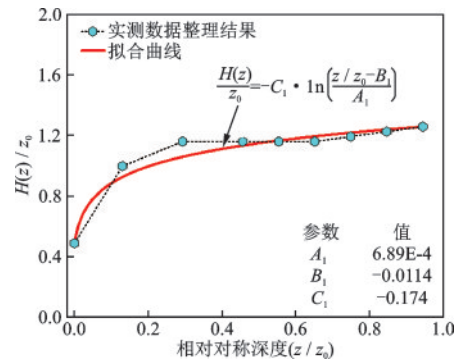
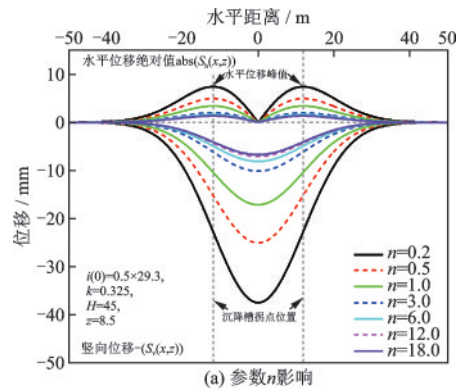
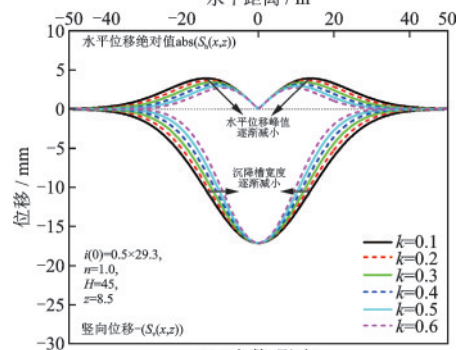


图5 Hyde Park隧道中 $H(z)$ 随深度的变化规律

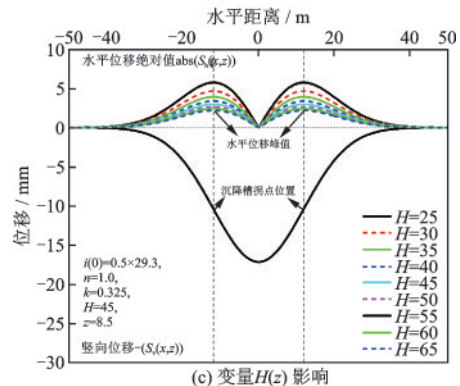
Fig.5 Variation of  $H(z)$  with depth in Hyde Park tunnel



(a) 参数 $n$ 影响



(b) 参数 $k$ 影响



(c) 变量 $H(z)$ 影响

图6 参数对地层竖向位移和水平位移曲线的影响

Fig.6 Analysis of parameters effect

NATM(新奥法)施工。在开展主要工程前,建造了100 m长的试验段隧道,研究双侧壁导坑法

(Type-1)、单侧壁导坑法(Type-2)以及拱顶、台阶法(Type-13)对地层变形的控制效果。在Type-2试验段,隧道洞室为 $9.2\text{ m}\times 7.9\text{ m}$ (宽 $\times$ 高),隧道顶部覆土厚度 $16.8\text{ m}$ <sup>[43]</sup>。隧道位于典型的伦敦黏土地层。磁力环引伸计用于测量地层的竖向位移,倾斜计用于测量地层水平位移。深度 $z=0,3,7,11\text{ m}$ 的竖向和水平位移如图7所示。在图7(a)中,参数 $k=0.23$ 是根据 $i(0)$ 和 $i(7)$ 计算的,参数 $n=1.92$ 是通过将 $S_{v,\max}(0)$ 与 $S_{v,\max}(z_0)$ 代入公式(5)获得的,其中 $S_{v,\max}(z_0)$ 来自文献[44]。如图8(a)所示,计算曲线可以合理的描述实测沉降槽,表明了参数 $k$ 和 $n$ 值的合理性。然后,使用公式(9)计算 $z=0,3,7,11\text{ m}$ 时的 $H(z)$ 值,当 $A_1=4.42\times 10^{-5}$ 、 $B_1=-0.002$ 和 $C_1=-0.25$ 时,公式(9)的预测曲线与实测水平位移结果具有较好的一致性,如图7(b)所示。

在Type-3试验段,隧道洞室尺寸为 $9.0\text{ m}\times 8.0\text{ m}$ (宽 $\times$ 高),隧道拱腰覆土层厚度 $19.0\text{ m}$ <sup>[43]</sup>。地层条件和测量方法与Type-2试验段相似。深度 $z=0,2,5,10,13,15\text{ m}$ 竖向和水平位移如图8所示。在图8(a)中,参数 $k=0.03$ 根据 $i(0)$ 和 $i(13)$ 计算,参数 $n=3.17$ 基于公式(5)获得,实测结果与预测曲线良好的一致性表明了参数 $k$ 和 $n$ 值的合理性。深度 $z=0,2,5,10,13,15\text{ m}$ 时的 $H(z)$ 值利用公式(9)计算,当 $A_1=7.15\times 10^{-4}$ 、 $B_1=-0.095$ 和 $C_1=-0.33$ 时,公式(9)的预测曲线合理地描述实测的水平位移,如图8(b)所示。

### 3 $H(z)$ 随深度变化规律的讨论

利用公式(9)对Hyde Park隧道和HEX隧道中的实测地层水平位移进行了拟合,得到了 $H(z)$ 随深度的变化规律,如图9所示。结果表明,HEX隧道中 $H(z)$ 随深度的变化与Hyde Park隧道中的变化相似,这两个工程中 $H(z)$ 随深度的变化规律可以用被公式(9)很好地描述,但是对应于3个案例的公式(9)的系数都不同,需要收集更多的隧道案例来研究公式(9)中系数的确定方法。同时可以看出,HEX隧道Type-2试验段和Type-3试验段的 $H(z)$ 结果非常接近,但Hyde Park隧道 $H(z)$ 的值远小于HEX隧道。HEX隧道和Hyde Park隧道的地层条件相似,但两个项目中隧道的施工方法和埋深不同,这可能是两个项目之间 $H(z)$ 值不同的原因。

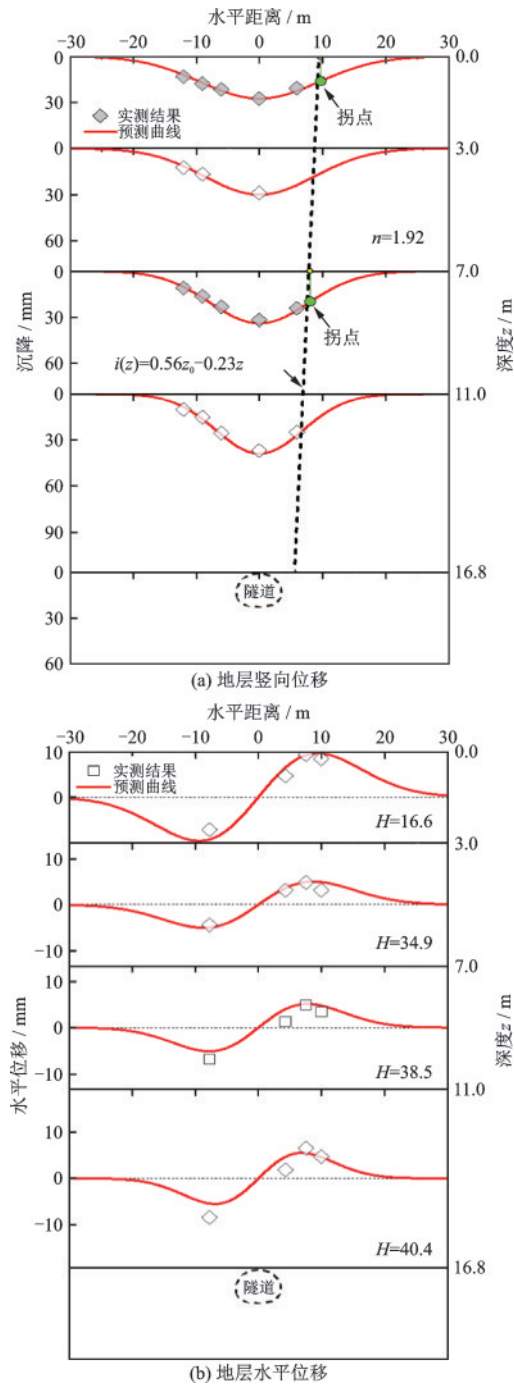
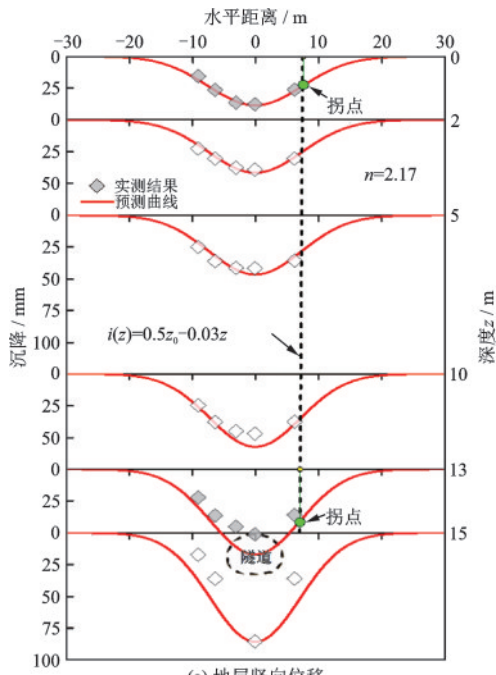


图7 HEX隧道Type-2试验段开挖地层位移及预测曲线  
Fig.7 Measured and calculated ground displacements for the test section tunnel in HEX Tunnel (Type-2)

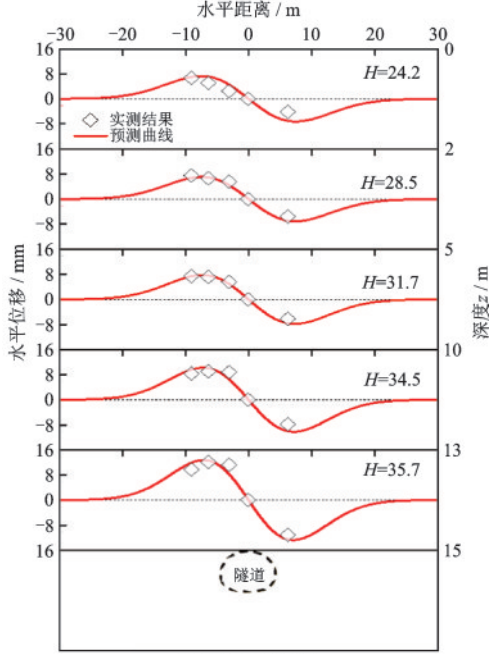
## 4 工程应用

### 4.1 安-安区间隧道工程概况

北京地铁12号线10标段安华桥站—安贞桥站列车渡线段区段由包含左右两条线路,右线为地铁列车渡线段,左线为正线隧道。该区段共有5种断



(a) 地层竖向位移



(b) 地层水平位移

图8 HEX隧道Type-3试验段开挖地层位移及预测曲线  
Fig.8 Measured and calculated ground displacements for the test section tunnel in HEX Tunnel (Type-3)

面形式,涉及3次断面转换。渡线段隧道采用浅埋暗挖法施工,正线左线为区间标准断面,采用台阶法施工,开挖共分为三段进行,分别为Z1、Z2、Z3段;右线为渡线变断面段,采用共设置QYA、QYB、QYC、QYD4个断面,QYA断面采用CRD工法施工,QYD、QYC、QYB采用双侧壁导坑法施工,左线标准断面开挖到距离安华桥站约15 m位置后,依次

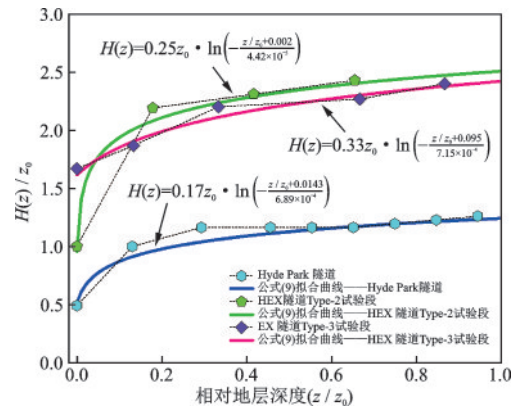
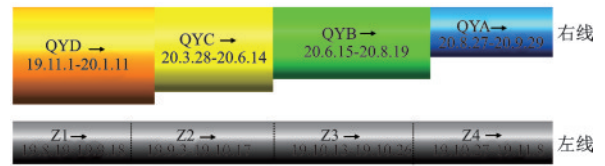


图9  $H(z)$ 随地层深度变化规律

Fig.9 Variation of  $H(z)$  with depth

右线隧道依次开挖QYD、QYC、QYB、QYA段,如图10所示。

在本区段隧道开挖过程中,对地表和隧道拱顶的沉降进行了监测,本文以Z1-QYD断面为例对其开挖施工引起的地层变形进行了分析。Z1-QYD断面中,左线隧道和右线隧道的相对位置关系、埋深,以及所处的地层条件如图11所示。



开挖顺序: Z1→Z2→Z3→Z4→QYD→QYC→QYB→QYA

图10 渡线段隧道施工顺序

Fig.10 Excavation procedure in the project

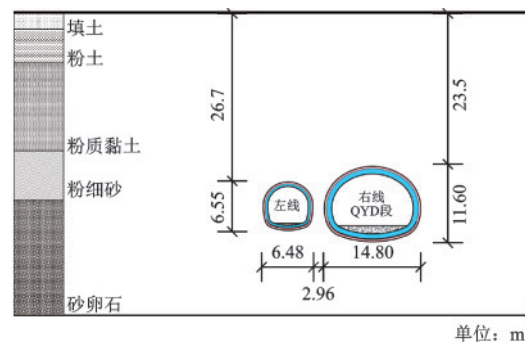


图11 Z1-QYD断面隧道相对位置和地层条件

Fig.11 Relative position of tunnel and stratum conditions

## 4.2 地层位移场计算

对于Z1-QYD断面,基于工程现场实测获得了右线、左线隧道拱顶及其正上方地表的沉降,将其

分别代入公式(5)确定了参数  $n$ 。对于其他参数和系数分别根据文献调研确定,其中:  $i(0)$  和  $k$  基于 Peck<sup>[12]</sup> 和 Mair<sup>[13]</sup> 的研究确定;因为  $H(z)$  公式的系

数与施工方法相关,因此  $A_1$ 、 $B_1$  和  $C_1$  的值选用 HEX 隧道 Type-2 试验段的系数。本节计算地层位移所用的系数和参数见表 1。

表 1 Z1-QYD 隧道断面地层位移计算参数

Table 1 Parameters used in the tunnel cross-section of Z1-QYD

开挖位置	$S_{\max}(0)/\text{mm}$	$S_{\max}(z_0)/\text{mm}$	$i(0)/z_0$	$k$	$n$	$A_1$	$B_1$	$C_1$
左线 Z1 段	16	35	0.5	0.325	2.14	$4.42 \times 10^{-5}$	-0.002	-0.25
右线 QYD 段	28	57	0.5	0.325	1.99	$4.42 \times 10^{-5}$	-0.002	-0.25

由于左线和右线隧道开挖共同影响地层的变化,本文首先计算了左线隧道 Z1 段开挖时,隧道横断面内地层竖向位移和水平位移,如图 12 所示;然后计算了右线隧道 QYD 段隧道开挖引起地层竖向位移和水平位移,通过将 QYD 段隧道开挖引起的地层位移与右线隧道 Z1 段引起的地层位移进行叠加得到了 QYD 段隧道开挖后地层的竖向位移和水平位移,如图 13 所示。基于本文提出的方法,工程中仅需要测试部分数据点即可实现地层位移场的计算。

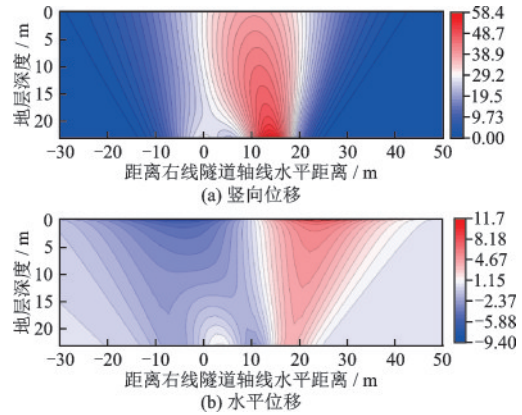


图 13 左线隧道 QYD 段开挖后地层位移

Fig.13 Ground displacement after excavation of section QYD in the left line

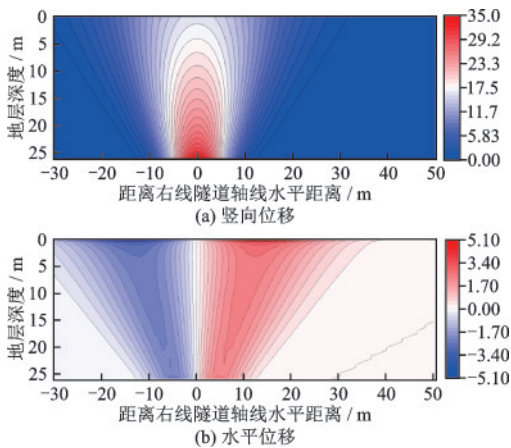


图 12 右线隧道 Z1 段开挖后地层位移

Fig.12 Ground displacement after excavation of section Z1 in the right line

## 5 结论

(1)通过假设土体的运动矢量,建立了计算隧道开挖引起的地层竖向位移和水平位移的经验模型。基于经验模型,建立了土体水平位移与垂直位移的关系。基于工程实测数据,优化了最大地层沉降  $S_{v,\max}(z)$  的计算公式,进而发展了 Peck-Mair 公式,并用其描述地层竖向位移。

(2)根据地层水平位移和垂直位移之间的数学关系,推导了水平地层位移的计算公式。与垂直位移公式相比,水平位移公式中包含了表示土体运动定向点位置的变量  $H(z)$ 。实测结果表明,  $H(z)$  随地层深度非线性增加,且增加速率逐渐变缓,提出了一个对数函数  $H(z)$  随深度的变化规律。与 2 组工程实测的结果对比表明了本文提出方法的合理性。

(3)将提出的方法在北京地铁 12 号线安华桥站-安贞桥站列车渡线段区段进行了应用,实现了该工程中隧道开挖后地层位移场的反演。

## 参考文献:

[1] Marshall A M. Tunnelling in sand and its effect on pipelines and piles [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2009.  
 [2] Lin Q T, Lu D C, Guo C X, et al. Collapse behavior and mechanical response of the cobble stratum during the shield driving [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 144: 105507.

- [3] Lu D C, Dong H Y, Lin Q T, et al. A method for characterizing the deformation localization in granular materials using the relative particle motion[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 156:105262.
- [4] Fang Y S, Wu C T, Chen S F, et al. An estimation of subsurface settlement due to shield tunneling[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 44(9): 121-129.
- [5] Lu D C, Kong F C, Du X L, et al. A unified displacement function to analytically predict ground deformation of shallow tunnel [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 88(6): 129-143.
- [6] Lu D C, Lin Q T, Tian Y, et al. Formula for predicting ground settlement induced by tunnelling based on Gaussian function [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 103: 103443.
- [7] Yu H T, Cai C, Bobet A, et al. Analytical solution for longitudinal bending stiffness of shield tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 83(1): 27-34.
- [8] Zhang Z G, Pan Y T, Zhang M X, et al. Complex variable analytical prediction for ground deformation and lining responses due to shield tunneling considering groundwater level variation in clays[J]. *Computers and Geotechnic*, 2020, 120:103443.
- [9] Miao J B, Lu D C, Lin Q T, et al. Time-dependent surrounding soil pressure and mechanical response of tunnel lining induced by surrounding soil viscosity [J]. *Science China Technological Science*, 2021, 64: 2453-2468.
- [10] Lin Q T, Tian Y, Lu D C, et al. A prediction method of ground volume loss variation with depth induced by tunnel excavation [J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(11): 3689-3707.
- [11] Lin Q T, Lu D C, Lei C M, et al. Model test study on the stability of cobble strata during shield under-crossing [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 110:103807.
- [12] Peck R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground [C]//*Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Mexico: [s.n.], 1969.
- [13] Mair R J, Taylor R N, Bracegirdle A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clay [J]. *Géotechnique*, 1993, 45(2): 361-362.
- [14] Grant R J, Taylor R N. Tunnelling-induced ground movements in clay[R]. London: Thomas Telford Services Ltd, 2000.
- [15] Celestino T B, Gomes R A M P, Bortolucci A A. Errors in ground distortions due to settlement trough adjustment[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2000, 15(1): 97-100.
- [16] Zheng G, Dai X, Diao Y, et al. Experimental and simplified model study of the development of ground settlement under hazards induced by loss of groundwater and sand[J]. *Natural Hazards*, 2016; 82(3):1869-1893.
- [17] Lin Q T, Lu D C, Lei C M, et al. Mechanical response of existing tunnels for shield under-crossing in cobble strata based on the model test [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 125: 104505.
- [18] Mair R J, Taylor R N. Bored tunnelling in the urban environment [C]//*Proceeding of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Balkema, Hamburg[s.n.], 1997.
- [19] Marshall A M, Farrell R, Klar A, et al. Tunnels in sands: The effect of size, depth and volume loss on greenfield displacements [J]. *Géotechnique*, 2012, 62(5): 385-399.
- [20] Wang F, Miao L C, Yang X M, et al. The volume of settlement trough change with depth caused by tunneling in sands [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016, 20(7):1-6.
- [21] Zhou M, Wang F, Du Y J, et al. Laboratory evaluation of buried high-density polyethylene pipes subjected to localized ground subsidence [J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(4): 1-19.
- [22] Loganathan N, Poulos H G. Analytical prediction for tunneling induced ground movement in clays[J]. *ASCE Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(9):846-856.
- [23] Zymnis D M, Chatzigiannellis Y, Whittle A J. Effect of anisotropy in ground movements caused by tunneling [J]. *Géotechnique*, 2013, 63(13):1083-1102.
- [24] Ieronymaki E S, Whittle A J, Sureda D S. Interpretation of free-field ground movements caused by mechanized tunnel construction[J]. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, 2016, 143(4): 04016114.
- [25] Ieronymaki E S, Whittle A J, Einstein H H. Comparative study of the effects of three tunneling methods on ground movements in stiff clay [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 74(4):167-177.
- [26] O'Reilly M P, New B M. Settlements above tunnels in

- the United Kingdom - Their magnitude and prediction [C]//Proceeding of Tunnelling '82 Symposium. London. UK: Institution of Mining and Metallurgy, 1982.
- [27] Attewell P B, Yeates J. Tunnelling in soil[M]. London: Surrey University Press, 1984.
- [28] Taylor R N. Geotechnical Centrifuge Technology[M]. London: Blackie Academic and Professional, 1995.
- [29] Moh Z C, Ju D H, Hwang R N. Ground movements around tunnels in soft ground[C]//Proceeding of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. London: [s. n.], 1996.
- [30] Zhang Y, Yin Z Z, Xu Y F. Analysis on three-dimensional ground surface deformations due to shield tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 388-392.
- [31] Attewell P B, Farmer I W. Ground deformations resulting from shield tunnelling in London Clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 11(3):380-395.
- [32] Iilsley R C, Hunt S H, Komurka V E, et al. Ground movements around tunnels excavated in Milwaukee, .S. A., using slurry shield and earth pressure balance methods [C]//Proceeding the 4th International Conference on Ground Movements and Structures. Cardiff, Wales: [s.n.], 1991.
- [33] Chou W I, Bobet A. Predictions of ground deformations in shallow tunnels in clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, 17(1): 3-19.
- [34] Romo M P. Soil movements induced by slurry shield tunneling [C] //Proceeding 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Hamburg, Germany: [s.n.], 1997.
- [35] 李园. 盾构施工地层变形的三维数值模拟及试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004.  
Li Y. The 3D FEM simulation and experimental research on ground deformation by shield driven [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)
- [36] 易宏伟. 盾构施工对土体扰动与地层移动影响的研究 [D]. 上海: 同济大学, 1999.  
Yi H W. Research on the disturbance of soil and ground movements induced by shield tunnelling [D]. Shanghai: Tongji University, 1999. (in Chinese)
- [37] Chen R P, Zhu J, Liu W, et al. Ground movement induced by parallel EPB tunnels in silty soils[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2011, 26(1):163-171.
- [38] 王占生,王梦恕,张弥. 盾构隧道施工引起地表下土体变位的分析评估[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1699-1704.  
Wang Z S, Wang M S, Zhang M. Methods for estimating subsurface ground movements induced by shield tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1699-1704. (in Chinese)
- [39] Toombs A F. Settlement caused by tunnelling beneath a motorway embankment [R]. London: Transport and Road Research Laboratory, Department of Transport, 1995.
- [40] Park K H. Elastic solution for tunnelling-induced ground movements in clays[J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 14(4):310-318.
- [41] Wan M S P, Standing J R, Potts D M, et al. Measured short-term ground surface response to EPBM tunnelling in London Clay [J]. Géotechnique, 2017, 67(5): 420-445.
- [42] Wan M S P, Standing J R, Potts D M, et al. Measured short-term subsurface ground displacements from EPBM tunnelling in London Clay [J]. Géotechnique, 2017, 67(9): 748-779.
- [43] Deane A P, Bassett R H. The heathrow express trial tunnel [J]. Geotechnical Engineering, 1995, 113(3): 144-156.
- [44] Karakus M, Fowell R J. Back analysis for tunnelling induced ground movements and stress redistribution [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20:514-524.

(本文编辑:赵霞)