DOI：10.16285/j.rsm.2015.02.008

浅埋隧道开挖引起的土体水平位移分析

夏元友[1]，陈春舒[1]，BAKRI Mudthir[1, 2]，王智德[1]，周 雄[1]

（1.武汉理工大学 土木工程与建筑学院，湖北 武汉 430070；2.苏丹科技大学 土木工程学院，苏丹 喀土穆 12998）

摘 要：对于浅埋隧道开挖引起的土体位移规律很多学者进行了研究，但对于其水平位移规律的研究却不多。在总结比较现有 3 种地层沉降公式的基础上，结合其中一种地层沉降理论以及土体不可压缩的假设推导出了浅埋隧道上方土体的水平位移公式，使用该公式对相关文献中的实测数据以及有限元模拟结果进行了拟合对比，证明提出的公式能够较好地预测和描述浅埋隧道开挖引起的土体水平位移规律；另外，基于所推导的地层水平位移公式以及地层沉降理论公式，得出了该方法下的土体位移矢量角公式，并与 O'Reilly 和 New 提出的方法进行了比较，所得结果与相关学者的研究结论一致，证明了该土体位移矢量公式的适用性。此研究成果可为相关实际工程中土体水平位移的计算和控制提供理论参考。

关 键 词：浅埋隧道；水平位移；位移模型；地层沉降理论；位移矢量

中图分类号：TU 45 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2015) 02－0354－07

Analysis of horizontal displacement of soil induced by shallow tunnel excavation

XIA Yuan-you[1], CHEN Chun-shu[1], BAKRI Mudthir[1, 2], WANG Zhi-de[1], ZHOU Xiong[1]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;
2. School of Civil Engineering, Sudan University of Science and Technology, Khartoum, Sudan 12998, Sudan)

Abstract: Soil movement laws induced by shallow tunnel excavation had been covered by many researchers, but the research on the horizontal displacement induced by tunnel excavation is insufficient. Based on the summary and comparison of three formulas of soil layer's settlement, a formula for calculating the horizontal displacements in the soil above the tunnel is derived by combining one of the soil settlement theories and the assumption that soil is incompressibility. Results of the formula are compared with the published data in relevant papers and verified by the finite-element simulation results. It is shown that the derived formula is capable enough for forecasting and describing the horizontal displacements of the soil induced by shallow tunnel. In addition, the vector angle's formula of soil's displacement is obtained based on the formulas of soil settlement and horizontal displacement; and it's also compared with O'Reilly and New's method. The comparison shows the agreement with some researchers' published relevant conclusions, which verifies the applicability of this formula for soil displacement. The research results will provide theoretical references for calculating and controlling the horizontal displacements of soil in relevant practical projects.

Key words: shallow tunnel; horizontal displacement; displacement model; soil settlement theory; displacement vector

1 引 言

隧道开挖引起的沉降危害已经被人们所熟知，但其水平位移规律现在研究的相对较少。传统的解析解往往是针对深埋隧道而言，假定隧道侧向的压力为均匀分布。而对于浅埋隧道而言，侧向的土压力为梯形分布，且相较于地层应力水平而言这种侧向土压力的变化幅度不能够简单忽略成均匀分布。因此，对于浅埋隧道开挖引起的水平位移，需要从其他角度来研究。

对于隧道开挖引起的土体水平位移，国外学者已有一定研究：O'Reilly 等[1]在相关沉降理论的基础上通过假定在隧道开挖过程中土体位移矢量趋向隧道中心得出了地层水平位移的计算公式；Chapman 等[2]分析了不同土体位移矢量计算所得结果对土体水平位移大小的影响；Pinto 等[3]则将浅埋隧道的断面变形形态进行了分解，结合相关变形阶段的断面收敛值推导了相关水平位移的计算公式。国内对此

收稿日期：2013-10-23
第一作者简介：夏元友，男，1965 年生，博士，教授，博士生导师，主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。E-mail：xiayy1965@126.com

方面的研究相对较少，阳军生等[4]介绍了随机介质理论在预测隧道开挖引起的地表水平位移的方法，并给出了工程实例；孙玉永等[5]和姜忻良等[6]通过在现场埋设测斜管收集水平位移数据，总结了隧道开挖引起的土体水平位移规律；王占生等[7]在间隙参数概念的基础上，提出了一种简单的水平位移的估算方法，使用效果较好，但这种方法的 GAP 参数取值较为复杂。本文基于地层沉降理论和土体不可压缩的假设，推导了单孔浅埋隧道开挖引起的土层水平位移公式，并通过相关文献中的工程实测数据和有限元模拟结果进行了拟合分析，验证了该公式的工程适用性，并从位移矢量的角度与其他学者的理论进行了比较。

2　常用位移模型简介

2.1　Peck 公式法

Peck 公式最早是由 Peck[8]提出，认为隧道开挖引起的地表沉降表现为高斯曲线的形式，并假定地层变形过程中是不排水的，且地层开挖所损失的体积 V_L 和地表沉降槽体积 V_S 相等，具体见图 1，提出地表沉降公式为

$$S(x)=S_{\max}\exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)=\frac{V_S}{\sqrt{2\pi}i}\exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

式中：$S_{\max}$ 为断面中心最大沉降值；x 为点到地表隧道轴线的距离；i 为沉降槽宽度系数，为曲线的拐点到中心点的距离；V_S 为沉降槽体积。

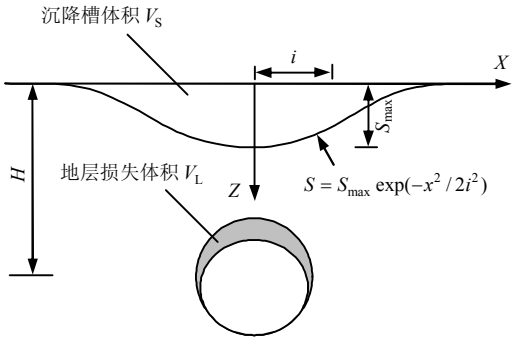


图 1　Peck 公式原理示意图

Fig.1　Principle of Peck formula

2.2　随机介质理论

随机介质理论是由 Litwinszyn[9]在研究煤矿开挖引起的地表沉降时所提出的，对于埋深为 H 的隧道，通过假定一定的收敛边界可计算出隧道开挖引起的地表沉降和水平位移规律，见图 2，其计算公式分别为

$$S(X)=\iint_{\Omega-\omega}\frac{\tan\beta}{\eta}\exp\left[-\frac{\pi\tan^2\beta}{\eta^2}(X-\xi)^2\right]\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta \quad (2)$$

$$U(X)=\iint_{\Omega-\omega}\frac{(X-\xi)\tan\beta}{\eta^2}\cdot\exp\left[-\frac{\pi\tan^2\beta}{\eta^2}(X-\xi)^2\right]\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta \quad (3)$$

式中：X 为点到地表隧道轴线的距离；β 为地层的主要影响角；ξ、η 分别为积分微元位置距离隧道中心的距离和距地表埋深；Ω 和 ω 分别为收敛前后的隧道边界。

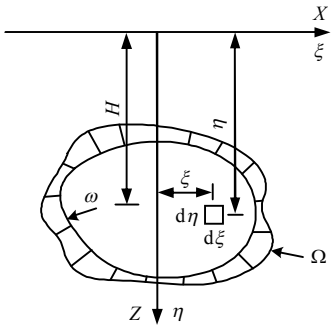


图 2　断面收敛变形

Fig.2　Contraction deformation of section

3　地层沉降理论

对于单孔隧道开挖引起的地层沉降规律，Mair 等[10]认为，地面以下各深度处也满足高斯沉降曲线规律，即可写成 Peck 公式的形式，只是各个深度处的沉降槽宽度系数 i_Z 不一样，并认为各地层的 i_Z 满足以下关系：

$$i_Z=K_Z(H-Z) \quad (4)$$

式中：H 为隧道的埋深；Z 为该地层的埋深；K_Z 为该深度处的系数。

这种理论已被众多学者接受，对于系数 K_Z，Mair 等[10]通过离心试验和有关测试数据总结出：

$$K_Z=\frac{0.5-0.325(Z/H)}{1-Z/H} \quad (5)$$

但该公式也存在着明显的弊端，考虑地表情况时（$Z=0$），通过（5）式可得 $K_Z=0.5$，这明显不够准确。为解决这一问题，很多学者对式（5）提出了很多的修正式，总的来说可以归纳为以下 3 类，见表 1。其中，n，a，m 均为相关参数，且可以发现，通过修正后的公式在地表时均为 K。

表 1 3 种类型 K_Z 表达通式

Table 1 Three types of expressions for K_Z

修正公式种类	公式来源	表达通式
第 1 类	孙玉永等[5] 姜忻良等[11]	$K_Z=(1-Z/H)^{n-1}K$
第 2 类	韩煊[12]	$K_Z=\dfrac{1-a(Z/H)}{1-Z/H}K$ (0<a<1)
第 3 类	魏纲[13]	$K_Z=\dfrac{K}{1-mZ/H}$ (m≤1)

注：K 为地表处的参数 K_Z 值。

为了比较这 3 类公式，分别使用该 3 类公式拟合文献[14－15]中的数据，以 Z/H 为纵坐标、K_Z/K 为横坐标并将拟合结果绘于图 3。从图中曲线来看，3 类公式的变化趋势所反映的规律一致，且对于数据的拟合效果均较好，作为经验公式，可认为均有适用价值。3 类公式的拟合最优解时参数分别为：（1）$n=0.31$，（2）$a=0.31$，（3）$m=0.83$。

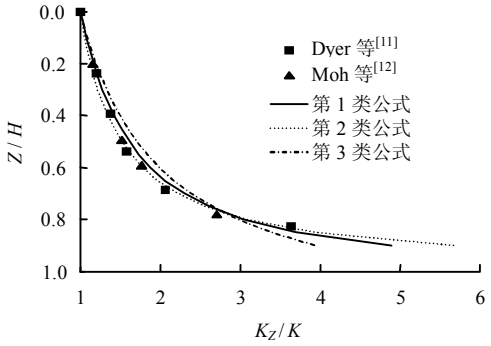


图 3 3 类公式拟合曲线

Fig.3 Fitting curves of the three expressions

4 地层水平位移推导

3 节中介绍到地层沉降理论认为各地层的沉降规律依旧满足 Peck 高斯曲线，根据 Peck 公式不排水固结的前提，可以认为在土体变形的过程中土体是不可压缩的，根据平面应变原理，则有

$$\frac{\partial U(X,Z)}{\partial X}+\frac{\partial S(X,Z)}{\partial Z}=0 \tag{6}$$

$S(X,Y)$ 可以通过表 1 中的修正公式代入 Peck 公式中得到，从推导结果形式的简单性考虑，这里选择表 1 中第 2 类修正公式，则有

$$i_Z=K_Z(H-Z)=(H-aZ)K \tag{7}$$

将式（7）代入 Peck 公式的高斯曲线形式，则有

$$S(X,Z)=\frac{V_S}{\sqrt{2\pi}i_Z}\exp\left(-\frac{X^2}{2{i_Z}^2}\right) \tag{8}$$

将式（8）代入式（6）可以解得：

$$U(X,Z)=\frac{-aKV_S}{\sqrt{2\pi}{i_Z}^2}\int\left(1-\frac{X^2}{{i_Z}^2}\right)\exp\left(-\frac{X^2}{2{i_Z}^2}\right)\mathrm{d}X=\frac{-aKV_S}{\sqrt{2\pi}i_Z^2}\left[X\exp\left(-\frac{X^2}{2i_Z^2}\right)+C\right] \tag{9}$$

根据对称性，考虑到在隧道轴线处的土体水平位移应该为 0，即 $X=0$ 时，$U(X,Z)=0$，代入（9）式求得 $C=0$。因此，得到隧道上方地层的水平位移公式为

$$U(X,Z)=\frac{-aKV_SX}{\sqrt{2\pi}i_Z^2}\exp\left(-\frac{X^2}{2i_Z^2}\right) \tag{10}$$

考虑地表的情况，即 $Z=0$，则地表水平位移为

$$U(X)=\frac{-aKV_SX}{\sqrt{2\pi}i^2}\exp\left(-\frac{X^2}{2i^2}\right) \tag{11}$$

式（11）的意义在于建立了与 Peck 地表沉降公式（1）相同的参数体系（V_S、i）的地表水平位移公式，只是增加了一个用以描述地层沉降规律的参数 a。与随机介质理论的两个地表位移公式（2）、（3）类似，式（11）可以与 Peck 公式构成一个体系，分别用来描述隧道开挖引起的地表沉降和地表水平位移公式。与随机介质理论地表水平公式（3）相比，式（11）的形式较为简单，计算实现过程避免了复杂的积分。

5 工程适用性分析

地层的水平位移在一般工程中测得较少，通常的做法是在土层中埋设测斜管，如图 4 所示，这种情况测量的是特定位置处土层水平位移随深度方向上的变化。即对于指定的 X_0，其深度方向上的水平位移的变化规律为

$$U(Z)=\frac{-aKV_SX_0}{\sqrt{2\pi}i_Z^2}\exp\left(-\frac{{X_0}^2}{2i_Z^2}\right) \tag{12}$$

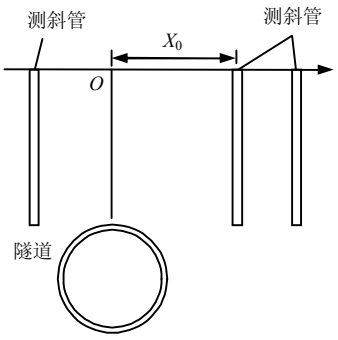


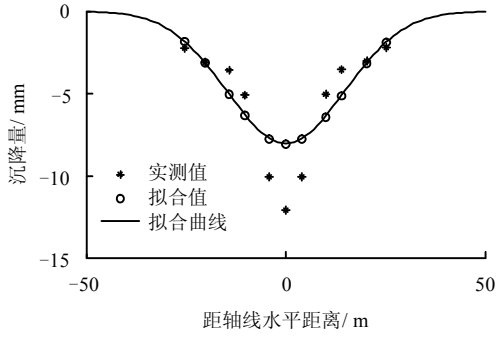
图 4 测斜孔布置图

Fig.4 Layout of inclinometer pipes

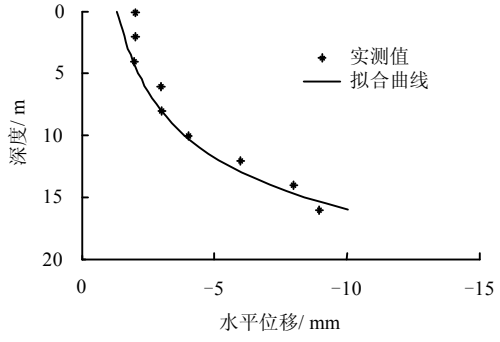
为了验证式（12）的工程适用性，可使用式（12）对测斜的数据进行拟合，同时得到相应的参数 a 的取值。由于式（12）中含有参数 K，需要同时有地表沉降数据和地层水平位移数据，将地表沉降数据通过 Peck 公式拟合得出参数 K，并代入水平位移公式进行计算。同时给出地表沉降和地层水平位移数据的文献比较少，以下列工程为例说明。

（1）泰国 Bangkok 污水隧道工程[16]

工程实测地表沉降值 Peck 公式拟合曲线以及水平位移拟合结果见图 5。其中埋深 $H=18$ m，断面半径 $R=1.335$ m，测点距隧道轴线距离 $X_0=4$ m。图 5(a)中 Peck 公式拟合结果为：$V_S=0.297\ 6\ \text{m}^2$，$i=14.78$ m，根据深度换算得 $K=0.82$。将参数代入式（12）对水平位移拟合结果见 5(b)，由图可知，拟合值与实测值一致性较好，从而也证明了模型的正确性，且拟合得到最优解时，参数 $a=0.78$。



(a) 沉降拟合结果



(b) 水平位移拟合结果

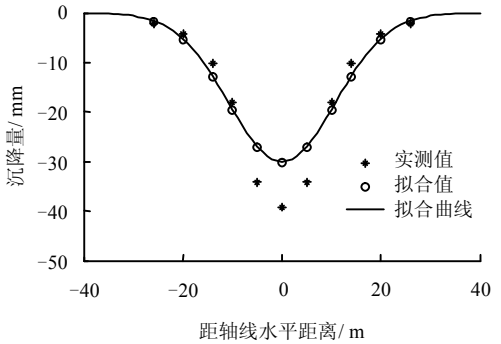
图 5　Bangkok 污水隧道数据拟合结果

Fig.5　Fitting results of Bangkok sewer tunnel's data

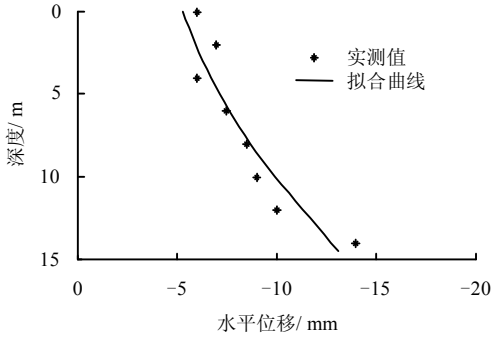
（2）英国伦敦 Heathrow Express 试验隧道[17]

工程实测地表沉降值 Peck 公式拟合曲线以及水平位移拟合结果见图 6。其中埋深 $H=19$ m，断面半径 $R=4.25$ m，测点距隧道轴线距离 $X_0=6$ m。图 6(a)中 Peck 公式拟合结果为：$V_S=0.807\ 4\ \text{m}^2$，$i=10.71$ m，根据深度换算得 $K=0.56$。将参数代入式（12）对水平位移拟合结果见图 6(b)，由图可知，拟合值与实测值一致性依然较好，且拟合得到最优解时，参数 $a=0.65$。

从这两个实例结果可看出，推导结果的式（12）能够较理想地反映出地层中的水平位移的变化规律。另外，韩煊[12]在提出第 2 类 K_Z 修正公式时，提出参数 a 的取值与土层相关，一般情况下在 0～1 之间，并指出，根据经验黏性土可取 0.65，对于砂土，可取 0.5。但工程实际中的土层不可能是单一的均质土，如本节第 1 个实例中隧道上方土层主要为黏性土和部分砂性土，第 2 个实例中隧道上方土层主要为填土、阶地砾石以及典型的伦敦黏土，仅仅根据土层情况给出 a 的经验值是不可取的，而应该根据监测数据反分析求解，两例中的土层的主要成分均为黏性土，反分析得到的 a 值也与经验值 0.65 很接近。水平位移的拟合曲线从图中看效果较好，所绘曲线符合实测值的变化规律，也证明了此公式的适用性。



(a) 沉降拟合结果



(b) 水平位移拟合结果

图 6　Heathrow Express 试验隧道数据拟合结果

Fig.6　Fitting results of Heathrow Express trial tunnel's data

6　有限元分析

采用 Plaxis2D 有限元软件对单孔隧道开挖引起的地层水平位移进行模拟，为了避免左右边界离隧道太近而影响水平位移的分布，将模型左右尺寸定义的较宽，模型尺寸为 80 m×25 m，见图 7。隧道

断面为圆形，半径为 3 m，埋深为 15 m，由于模拟的目的是探究其变形规律，而不是模拟特定工程，可简化土层结构，设定土层为 2 层，其土层参数见表 2。隧道管片采用板单元模拟，其具体参数为：抗拉刚度 $EA=1.4\times10^7$ kN，抗弯刚度 $EI=1.43\times10^5$ kN·m^2，平面重度为 8.4 kN/m，泊松比 $\nu=0.15$，性质为弹性。

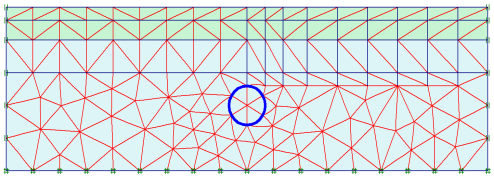


图 7 有限元模型
Fig.7 Finite element model

表 2 土层参数
Table 2 Soil properties

土名	层厚 / m	重度 / (kN/m^3)	弹性模量 / MPa	泊松比	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	剪胀角 / (°)
填土	5	16	8	0.30	1	30	0
黏性土	20	16	10	0.35	5	25	0

施工模拟过程中，通过软件内置的断面收缩功能来实现均匀收敛，以近似模拟实际的隧道断面收敛情况。

考虑地层中（以 $Z=2$ m，$Z=5$ m 为例）的水平位移，并使用式（10）进行拟合，见图 8。从图中可发现式（10）的曲线满足水平位移的规律，对地层水平位移的拟合效果较好，拟合所得到的 a 值分别为 0.69、0.60，也十分接近。

考虑第 5 节工程实例的类似情况，对于给定的 X_0 值，查看在此位置处水平位移随深度的变化规律，考虑模型中 $X_0=3$ m，$X_0=6$ m 处其深度方向且位于隧道上方的水平位移值，并使用式（12）进行拟合，见图 9。从拟合结果来看，2 组数据较符合式（12）的曲线结果，且两组数据的拟合 a 值也十分接近。本模型土层主要为黏性土，两组数据的拟合所得 a 值也十分接近韩煊[12]所建议的黏性土中 a 的经验取值 0.65。

7 位移矢量对比分析

前面所介绍的国外相关水平位移的成果很多是建立在一定的位移矢量假设基础上的。关于隧道开挖引起的土体位移矢量问题，很多国外学者也进行了研究，除了 O'Reilly 等[1]的矢量假设，Cording[18]

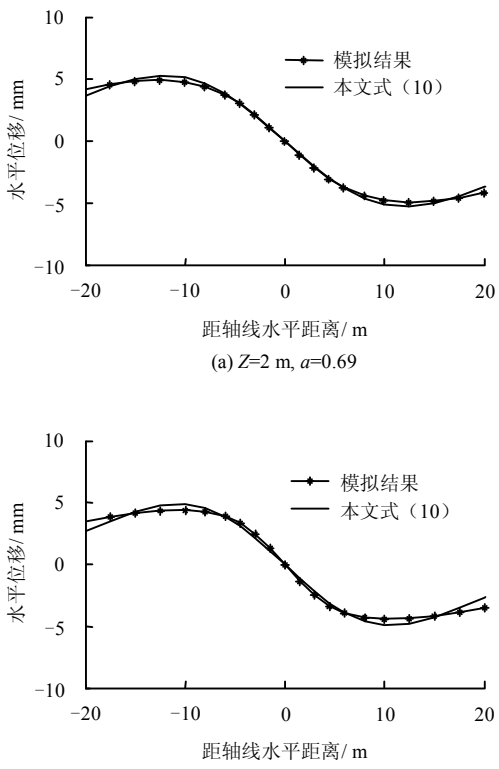


图 8 地下各深度处水平位移及其拟合曲线
Fig.8 Fitting curves of horizontal displacement of in-depth soil body

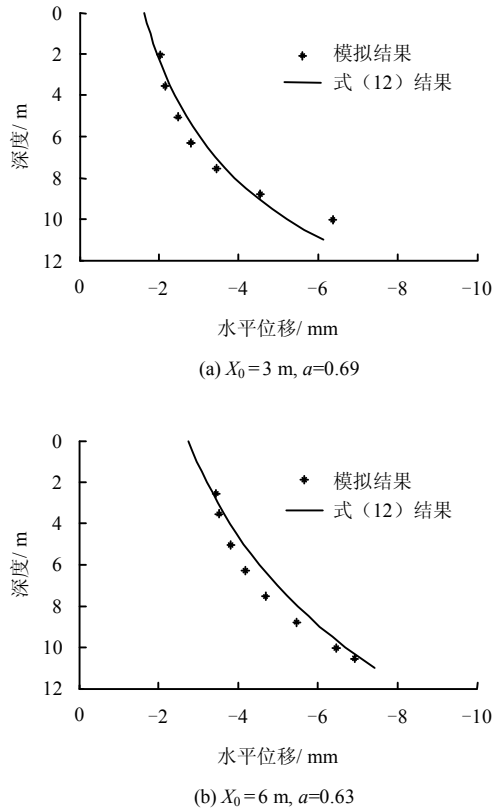


图 9 水平位移与深度关系拟合曲线
Fig.9 Fitting curves of relationship between horizontal displacement and depth

提出，若假设土体位移矢量指向隧道中心可能会导致算得地表沉降值较实测值偏小，水平位移值偏大；而 Ahmed 等[19]则通过透明土模型模拟了隧道开挖过程，并认为对于 $H \leqslant 3D$（D 为隧道直径或跨度）的隧道，土体位移矢量趋向隧道轴线下方仰拱附近，而对于 $H \geqslant 4D$ 的隧道，土体位移矢量趋向隧道中心轴线。为方便分析，将位移矢量角 α 定义为如图 10 所示的情况。

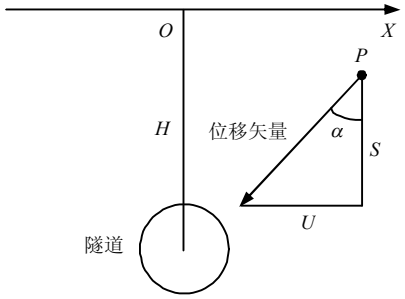


图 10 位移矢量角示意图
Fig.10　Vector angle of displacement

根据本文推导的地层水平位移公式（10）与地层沉降公式（8）可得出本文理论的矢量角 α_1，其正切值为

$$\tan\alpha_1 = \frac{U(X,Z)}{S(X,Z)} = \frac{aKX}{i_Z} = \frac{aX}{H - aZ} \qquad (13)$$

考虑 O'Reilly 等[1]的假设，即土体位移趋向隧道中心，此时矢量角 α_2 的正切值为

$$\tan\alpha_2 = \frac{X}{H - Z} \qquad (14)$$

由于参数 a 的范围在 0～1 之间，可以得出 $\tan\alpha_1 < \tan\alpha_2$。这一结果表明，本文所推导的地层位移公式所得出的矢量角 α_1 较 O'Reilly 等[1]的假设的矢量角 α_2 偏小，表现为矢量指向隧道中心轴线下方附近，因此，使用矢量指向隧道中心假设时所得结果与实测相比出现一定的差异，表现为算得沉降值过小而水平位移偏大，这也验证了前述 Cording[18] 的结论，在一定程度上与 Ahmed 等[19]结论一致。

8　结　论

（1）总结归纳了浅埋隧道开挖引起的地层沉降规律中参数 K_Z 的 3 种类型表达式，发现 3 类公式的变化趋势所反映的规律一致，且对于数据的拟合效果均较好，作为经验公式，均有一定的适用价值。

（2）在地层沉降理论的基础上，基于土层不排水压缩的假设，选择第 2 类 K_Z 表达通式，推导出了浅埋隧道上方土体水平位移公式。并通过相关文献中的实测数据和有限元模拟结果进行了拟合分析，结果发现，该公式模型拟合精度较高，得出的参数 a 也较为接近，可为相关隧道工程中土体水平位移计算提供参考。

（3）推导出的地表水平位移公式（11）与 Peck 地表沉降公式（1）有着相同的参数体系（V_S、i），只是增加了一个用以描述地层沉降规律的参数 a。它可以与 Peck 地表沉降公式一起构成一个公式体系，用以描述隧道开挖引起的地表沉降和地表水平位移规律，且比随机介质理论所构成的公式体系式（2）、（3）计算更为简单。

（4）将本文理论所得出的土体位移矢量角与假设矢量指向隧道轴线中心所得矢量角进行了对比，表明本文所得位移矢量指向隧道中心轴线下方附近，与国外相关学者的研究结论相符。

参 考 文 献

[1] O'REILLY M P, NEW B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom－Their magnitude and prediction[C]// Proceedings Tunnelling 82. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1982: 173－181.

[2] CHAPMAN D N, ROGERS C D F, HUNT D V L. Predicting the settlements above twin tunnels constructed in soft ground[J]. **Tunneling and Underground Space Technology,** 2004, 19(4/5): 378－380.

[3] PINTO F, WHITTLE A J. Ground movements due to shallow tunnels in soft ground: Analytical solutions[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2013:

[4] 阳军生, 刘宝琛. 城市隧道施工引起的地步移动及变形[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.

[5] 孙玉永, 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.

[6] 姜忻良, 李林, 袁杰, 等. 深层地铁盾构施工地层水平位移动态分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1186－1192.
JIANG Xin-liang, LI Lin, YUAN Jie, et al. Dynamic analysis of strata horizontal displacements induced by

shield construction of deep tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(4): 1186－1192.

[7] 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 Zhan-sheng, WANG Meng-shu, ZHANG Mi. Methods for estimating subsurface ground movements induced by shield tunneling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(6): 1699－1704.

[8] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: Balkema A A, 1969: 225－290.

[9] LITWINISZYN J. Fundamental principles of the mechanics of stochastic medium[C]//Proceedings of the 3rd Conference on Theoretical Applied Mechanics. Bangalore, India: [s. n.], 1957: 18－26.

[10] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays[J]. **Geotechnique**, 1993, 43(2): 315－320.

[11] 姜忻良, 赵志民, 李园. 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.

[12] 韩煊. 隧道施工引起地层位移及建筑物变形预测的实用方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.

[13] 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.

[14] DYER M R, HUTCHINSON M T, EVANS N. Sudden valley sewer: A case history[C]//Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. London: Balkema A A, 1996: 671－676.

[15] MOH Z C, JU D H, HWANG R N. Ground movements around tunnels in soft ground[C]//Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. London: Balkema A A, 1996: 725－730.

[16] 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.

[17] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1998, 124(9): 846－856.

[18] CORDING E J. Control of ground movements around tunnels in soil[C]//Proceedings of 9th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Chile: [s. n.], 1991: 2195－2244.

[19] AHMED M, ISKANDER M. Analysis of tunneling-induced ground movements using transparent soil models[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 137(5): 525－535.

LDHs-MK 复合改性混凝土及其机理研究

著译者：马军涛，16 开本，平装，108 页，定价：26 元，出版单位：中国水利水电出版社，版次：第 1 版，出版时间：2014 年 12 月，标准书号：ISBN 978-7-5170-2809-3。

内容介绍：本书主要针对 LDHs（无机插层）与 MK（偏高岭土）材料在混凝土中应用的复合叠加效应开展研究，表征分析了 LDHs 材料的化学组成、分子结构和颗粒形貌等材料特性，测试论证了其固化各类阴离子的能力，并研究探讨了 LDHs 改性混凝土的耐久性能。在以上研究基础上，复合偏高岭土（MK）发展了一种 LDHs-MK 基混凝土复合改性剂，构建了 LDHs-MK 复合防御体系，对其性能和应用技术进行了系统研究。

摘自：中国水利水电出版社