

DOI: 10.11779/CJGE20231121

基于随机介质理论的偏压隧道地表沉降预测方法

周鹏远^{1,2}, 宋战平^{*1,2,3}, 王军保^{1,2}, 张玉伟^{1,2,3}, 田小旭^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055;

3. 西安建筑科技大学基础设施智能建造研究院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 隧道开挖引起地表沉降的各种预测方法均假定隧道收敛模式为对称形式, 忽略了隧道非对称收敛的影响。为对偏压隧道引起地表沉降进行预测, 提出了一种新的隧道偏压收敛模式, 定义了相应的偏压参数 θ , γ_1 , γ_3 , 基于随机介质理论, 利用坐标变换和二重积分的数值化处理, 得到了偏压隧道引起地表沉降的预测模型; 通过实际工程案例, 验证了该方法的适用性, 并分析了相关参数对地表沉降的影响规律。提出的预测模型将传统对称收敛模式拓展至非对称情况, 能很好预测地表沉降的非对称趋势, 且更接近实际案例的监测数值。

关键词: 偏压隧道; 地表沉降预测; 隧道收敛模式; 随机介质理论

中图分类号: TU91

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)03-0589-10

作者简介: 周鹏远(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事城市地下空间及岩土工程方面的研究工作。E-mail: zhoupengyuan@xauat.edu.cn。

Prediction method for ground surface settlement induced by bias tunnel based on stochastic medium theory

ZHOU Pengyuan^{1,2}, SONG Zhanping^{1,2,3}, WANG Junbao^{1,2}, ZHANG Yuwei^{1,2,3}, TIAN Xiaoxu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of

Geotechnical and Underground Space, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Infrastructure Intelligent

Construction Research Institute, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The disturbance of the surrounding soil by tunnel excavation will inevitably lead to surface settlement. When calculating the surface settlement caused by tunnel excavation, various prediction methods have assumed that the tunnel convergence mode is bilaterally symmetrical. This assumption ignores the influences of asymmetric convergence of the tunnel, and the resulting surface settlement is also symmetrically distributed. In order to predict the surface settlement caused by a bias tunnel, a new tunnel bias convergence mode is proposed, and the corresponding bias parameters θ , γ_1 and γ_3 are defined. Based on the stochastic medium theory, a prediction model for the surface settlement caused by the bias tunnel is obtained using the coordinate transformation and double-integral numerical processing. Through actual engineering cases, the applicability of this method is verified, and the influences of the relevant parameters on the surface settlement are analyzed. The proposed model extends the traditional symmetric convergence mode to asymmetric situations, can well predict the asymmetric trend of surface settlement, and it is closer to the monitoring values of actual cases.

Key words: bias tunnel; surface settlement prediction; tunnel convergence mode; stochastic medium theory

0 引 言

隧道开挖会对围岩造成扰动, 导致岩土体移动与变形、地表沉降, 进而影响近接即有建(构)筑物的使用安全^[1-3]。因上部建筑物、地质情况的非对称性及施工工法差异, 隧道往往发生偏压变形, 其引起地表沉降也是非对称的, 因此分析隧道的非对称变形收敛模式, 对研究地表沉降规律具有重要工程意义。

分析隧道开挖引起地表沉降的方法有经验公式法^[4-6]、理论解析法^[7-8]、数值模拟法^[9-10]、模型试验

法^[11-12]、神经网络法^[13-14]和随机介质理论法^[15-17]等, 其中, 随机介质理论适用于各类断面形状的隧道, 且无需进行复杂的力学计算, 所以被广泛应用于实际工程中。为研究采煤岩层与地层移动关系, Litwiniszyn^[18]将岩土体视为随机介质, 建立了随机介质理论。刘宝

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178393); 陕西省科技创新团队项目(2020TD-005)

收稿日期: 2023-11-21

***通信作者** (E-mail: songzhpyt@xauat.edu.cn)

琛等^[15, 19]将其推广应用到隧道建设领域。施成华等^[20]推导了均匀收敛条件下圆形及直墙拱隧道的地层移动计算公式。姬永红^[21]对隧道地层影响范围角 β 和均匀收敛值 ΔA 的确定进行了讨论。Song 等^[22]将随机介质理论引入到 Peck 公式中, 拓宽了随机介质理论的应用范围。江帅等^[23]将随机介质理论和 Peck 公式结合, 建立了地表沉降动态预测模型。徐强等^[24]将隧道看作等效开挖单元, 对随机介质理论进行了积分简化。韩焯等^[25]给出了不同断面隧道的均匀与不均匀收敛模式。朱洪高等^[26]提出了双圆盾构 (DOT) 隧道的收敛模式。刘波等^[16]基于最优化理论给出了影响范围角 β 和均匀收敛值 ΔA 的反分析参数确定方法, 提出了圆形隧道经典不均匀收敛模式。

以上研究均假定隧道收敛为左右对称形式, 基于此计算的地表沉降也呈现为对称性。而实际工程中隧道往往存在偏压现象, 其地表沉降也常常呈现出非对称性特点, 因此, 现有收敛模式下所得地表沉降曲线与监测数据不能较好吻合^[27-28]。本文通过提出隧道偏压收敛模式, 定义了偏压角、椭圆化偏压参数及偏压下沉参数, 基于随机介质理论建立了偏压隧道地表沉降预测模型, 通过工程实例验证了模型的适用性, 并进行了相应参数讨论。

1 随机介质理论计算地表沉降原理

在隧道开挖过程中, 如果地层性质、隧道截面及开挖方法等一致情况下, 可以将工程问题视为平面应变问题进行分析。如图 1 所示坐标系, 随机介质理论认为, 如果地表下位于点 (ξ, η) 处有一微元体完全坍塌, 地表 x 处的沉降 $W_e(x)$ 为^[15]

$$W_e(x) = \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\pi \tan^2 \beta \frac{(x-\xi)^2}{\eta^2} \right] d\xi d\eta \quad (1)$$

式中: (ξ, η) 为所开挖微元体形心坐标; β 为取决于上覆岩土层性质的主要影响角。

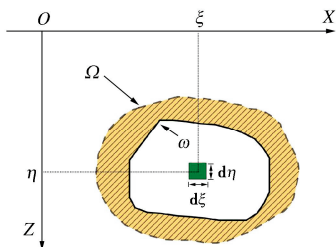


图 1 二维断面开挖收敛示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2D section convergence

施工完成后, 如果隧道初始断面 Ω 收缩为 ω , 根据叠加原理, 地表坐标为 x 处下沉量 $W(x)$ 为

$$W(x) = W_{\Omega}(x) - W_{\omega}(x)$$

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

式中: $W_{\Omega}(x)$ 为断面 Ω 完全坍塌引起地表沉降; $W_{\omega}(x)$ 为断面 ω 完全坍塌引起地表沉降。

2 圆形隧道经典不均匀收敛模式

对于圆形隧道, 重点在于获取隧道收缩后断面 ω 的形状及位置, 即确定隧道收敛模式。目前主要采用经典不均匀收敛模式^[16], 如图 2 所示。该收敛模式认为隧道变形由 3 部分组成: ①地层损失引起的径向均匀收敛 u_0 ; ②围压差异引起的椭圆化变形导致半径在竖向减小 u_1 , 水平向增加 u_2 ; ③受重力场影响引起的截面整体下沉 u_3 。

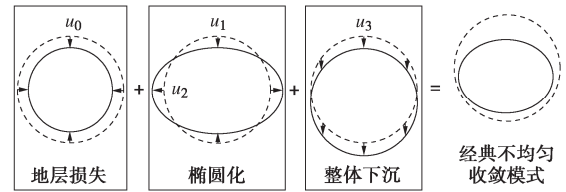


图 2 圆形隧道经典不均匀收敛模式

Fig. 2 Classical convergence mode for circular tunnel

经典不均匀收敛模式下, 地表沉降计算时可将式 (2) 改写成如式 (3) 所示二重积分形式。若隧道半径为 R , 隧道中心埋深为 H , 则有

$$W(x) = \iint_{\Omega-\omega} \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\pi \tan^2 \beta \frac{(x-\xi)^2}{\eta^2} \right] d\xi d\eta = \int_a^b \int_c^d \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\pi \tan^2 \beta \frac{(x-\xi)^2}{\eta^2} \right] d\xi d\eta - \int_e^f \int_g^h \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\pi \tan^2 \beta \frac{(x-\xi)^2}{\eta^2} \right] d\xi d\eta \quad (3)$$

式中: a, b, c, d, e, f, g, h 分别代表各二重积分上下限,

$$\left. \begin{aligned} a &= H - R, \\ b &= H + R, \\ c &= -\sqrt{R^2 - (\eta - H)^2}, \\ d &= -c, \\ e &= H + u_3 - (R - u_0 - u_2), \\ f &= H + u_3 + (R - u_0 - u_2), \\ g &= -(R - u_0 + u_1) \sqrt{1 - \frac{(\eta - H - u_3)^2}{(R - u_0 - u_2)^2}}, \\ h &= -g. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

3 偏压隧道引起地表沉降的计算方法

3.1 考虑偏压影响的隧道收敛模式

实际工程中, 隧道常常存在偏压现象, 本文认为, 偏压隧道的收敛模式也由地层损失、椭圆化及整体下沉 3 部分组成, 但偏压隧道椭圆化和整体下沉均沿着与竖直方向成 θ 角的方向 \vec{n} 进行, 此角度 θ 记为偏压角, 定义当 Z 轴正向顺时针旋转到偏压方向 \vec{n} 时 θ 为正, 则 $90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, $\theta > 0^\circ$ 时, 为右偏压, $\theta < 0^\circ$ 时则为左偏压, 图 3 示出了右偏压隧道的收敛模式。

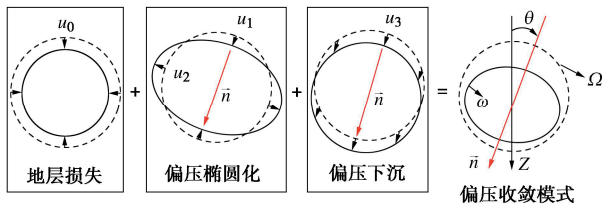


图 3 圆形隧道偏压收敛模式

Fig. 3 Convergence mode for bias tunnel

定义 $\gamma_1 = u_1/R$ 和 $\gamma_2 = u_2/R$ 为隧道椭圆化偏压参数, $\gamma_3 = u_3/R$ 为隧道偏压下沉参数。在偏压收敛模式中, 假定隧道面积大小的改变均来自于地层损失, 椭圆化变形过程不引起地层损失, 则 γ_2 与 γ_1 为非独立变量, 设地层损失率为 V_l , 有

$$\gamma_2 = \frac{u_2}{R} = \sqrt{1-V_l} - \frac{1-V_l}{\sqrt{1-V_l} + \gamma_1}, \quad (5)$$

$$V_l = \frac{\pi R^2 - \pi(R-u_0)^2}{\pi R^2} = \frac{2Ru_0 - u_0^2}{R^2}. \quad (6)$$

3.2 偏压收敛模式下地表沉降计算

如图 4 所示, 以偏压隧道椭圆化后形心为原点 O' , 长轴及短轴为横、纵坐标, 建立局部坐标系 $X'O'Z'$ 。设任意点 B 在整体坐标系 XOZ 与局部坐标系 $X'O'Z'$ 中的坐标分别为 (ξ, η) 和 (ξ', η') , 则有

$$[\eta, -\xi] = [H, 0] + [\eta', \xi'] \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

开挖任意微小单元土体, 有 $dA = d\eta d\xi = d\eta' d\xi'$, 若忽略偏压下沉影响, 隧道开挖引起地表沉降为

$$\begin{aligned} W(x) &= \iint_{\Omega-\omega} \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\pi \tan^2 \beta \frac{(x-\xi)^2}{\eta^2} \right] d\xi d\eta \\ &= \iint_{a,c}^b \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\pi \tan^2 \beta \frac{(x-\xi)^2}{\eta^2} \right] d\xi d\eta - \\ &\quad \iint_{e,g}^f \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\pi \tan^2 \beta \frac{(x-\xi)^2}{\eta^2} \right] d\xi d\eta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \iint_{a,c}^b \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\pi \tan^2 \beta \frac{(x-\xi)^2}{\eta^2} \right] d\xi d\eta - \\ &\quad \iint_{e',g'}^{f',h'} \frac{\tan \beta}{H + \eta' \cos \theta + \xi' \sin \theta} \cdot \\ &\quad \exp \left[-\pi \tan^2 \beta \frac{(x + \eta' \sin \theta - \xi' \cos \theta)^2}{(H + \eta' \cos \theta + \xi' \sin \theta)^2} \right] d\eta' d\xi'. \quad (8) \end{aligned}$$

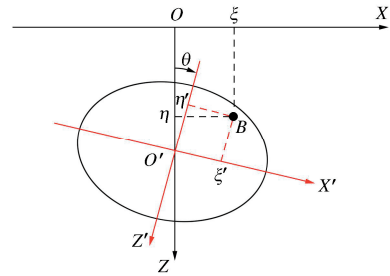


图 4 偏压隧道积分坐标变换示意图

Fig. 4 Schematic diagram of coordinate transformation

考虑偏压下沉影响, 最终隧道开挖引起地表沉降由式 (9) 得到, 式中各积分上下限见表 1。

$$\begin{aligned} W(x) &= \iint_{a,c}^b \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\pi \tan^2 \beta \frac{(x-\xi)^2}{\eta^2} \right] d\xi d\eta - \\ &\quad \iint_{e',g'}^{f',h'} \frac{\tan \beta}{H + u_3 \cos \theta + \eta' \cos \theta + \xi' \sin \theta} \cdot \\ &\quad \exp \left[-\pi \tan^2 \beta \frac{(x + u_3 \sin \theta + \eta' \sin \theta - \xi' \cos \theta)^2}{(H + u_3 \cos \theta + \eta' \cos \theta + \xi' \sin \theta)^2} \right] d\eta' d\xi'. \quad (9) \end{aligned}$$

表 1 偏压隧道收敛模式积分界限表

Table 1 Integral limits of convergence mode of bias tunnel

Ω -整体坐标系		ω -局部坐标系	
a	$H-R$	e'	$-(R-u_0-u_1)$
b	$H+R$	f'	$R-u_0-u_1$
c	$-\sqrt{R^2-(\eta-H)^2}$	g'	$-(R-u_0+u_2) \cdot \sqrt{1-[\eta'/(R-u_0-u_1)]^2}$
d	$\sqrt{R^2-(\eta-H)^2}$	h'	$(R-u_0+u_2) \cdot \sqrt{1-[\eta'/(R-u_0-u_1)]^2}$

3.3 积分的数值化处理

式 (9) 中被积函数均为不可积函数, 为了获得这些积分值, 对其进行数值化处理, 分别记为

$$W_{\Omega}(x) = \iint_{a,c}^b \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[-\pi \tan^2 \beta \frac{(x-\xi)^2}{\eta^2} \right] d\xi d\eta, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} W_{\omega}(x) &= \iint_{e',g'}^{f',h'} \frac{\tan \beta}{H + u_3 \cos \theta + \eta' \cos \theta + \xi' \sin \theta} \cdot \\ &\quad \exp \left[-\pi \tan^2 \beta \frac{(x + u_3 \sin \theta + \eta' \sin \theta - \xi' \cos \theta)^2}{(H + u_3 \cos \theta + \eta' \cos \theta + \xi' \sin \theta)^2} \right] d\eta' d\xi'. \quad (11) \end{aligned}$$

现以较为复杂的 $W_{\omega}(x)$ 为例说明积分的计算方法。令 $\eta'=f'\cdot t_1$ ， $\xi'=h'\cdot t_2$ ，对式 (11) 换元，并采用 Legendre-Gauss 求积法对其进行数值化处理，便可通过式 (12) 得到 $W_{\omega}(x)$ 。对 $W_{\Omega}(x)$ 进行相同的数值化处理，便可得到偏压隧道开挖引起地表沉降曲线

$$W(x)=W_{\Omega}(x)-W_{\omega}(x)。$$
$$W_{\omega}(x)\xrightarrow[\xi'=h'\cdot t_2]{\eta'=f'\cdot t_1}\rightarrow\int_{-1}^1\int_{-1}^1\varphi(t_1,t_2)\mathrm{d}t_1\mathrm{d}t_2$$
$$=\int_{-1}^1\sum_{i=1}^nA_i\varphi(\lambda_i,t_2)\mathrm{d}t_2=\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^nA_iA_j\varphi(\lambda_i,\lambda_j)。(12)$$

式中： λ_i 和 λ_j 分别为两次分步积分下 Legendre 多项式 $L_n(\lambda)=\frac{1}{2^n\cdot n!}\cdot\frac{\mathrm{d}^n[(\lambda^2-1)^n]}{\mathrm{d}\lambda^n}$ 的根； A_i 和 A_j 为对应的 Gauss 加权系数： $A_k=\frac{2}{(1-\lambda_k^2)[L_n'(\lambda_k)]^2}$ ， $(k=i,j)$ ； n 为插值点数； $\varphi(t_1,t_2)$ 为换元后的被积函数，其表达式见下式：

$$\varphi(t_1,t_2)=\frac{f'\cdot h'\cdot\tan\beta}{H+u_3\cos\theta+f'\cdot t_1\cos\theta+h'\cdot t_2\sin\theta}\cdot$$
$$\exp\left[-\pi\tan^2\beta\frac{(x+u_3\sin\theta+f'\cdot t_1\sin\theta-h'\cdot t_2\cos\theta)^2}{(H+u_3\cos\theta+f'\cdot t_1\cos\theta+h'\cdot t_2\sin\theta)^2}\right]。$$

(13)

4 偏压隧道地表沉降预测方法的验证

4.1 工程实例验证

成都地铁 5 号线福宁路—五块石工程区间里程为 DK15+449.34—DK16+160.04，隧道标准段半径 3 m，拱顶埋深在 16.03~31.75 m。区间采用盾构法施工，各地层基本呈水平分布。工程平面图及地质剖面图分别如图 5，6 所示，各土层相关参数见表 2。



图 5 福宁路—五块石区间工程平面图

Fig. 5 Layout plan of Funinglu Station-Wukuaishi Station project

利用里程为 DK15+620、DK15+770 和 DK15+830 处 3 个横断面进行本文所提出方法的验证，各断面隧道收敛参数均由现场变形监测所得，偏压计算参数见表 3 所示， β 按下式进行取值^[24]：

$$\tan\beta=\frac{H}{\sqrt{2\pi}\cdot(1-0.02\phi)(H-kz)}。$$

(14)

式中： ϕ 为隧道拱顶以上各层土体的内摩擦角按厚度计算的加权平均值； k 为考虑地层土质情况的参数，本工程中取 $k=0.45$ ； z 为上覆地层的埋深。

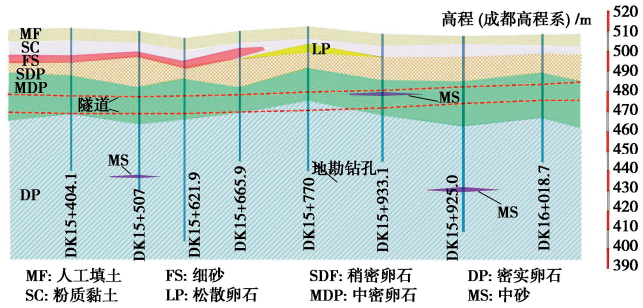


图 6 工程区间地质剖面图

Fig. 6 Geological profile map of project

表 2 土体物理力学参数表

Table 2 Physical and mechanical parameters of soils

土层名称	重度 $\gamma /$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/MPa	泊松 比 ν	黏聚 力 c/kPa	内摩 擦角 $\varphi/(^{\circ})$
人工填土	18	7	0.3	8	10
粉质黏土	19.5	15	0.3	20	16.5
细砂	18.5	4	0.27	0	20
松散卵石	20	20	0.26	0	30
稍密卵石	21	23	0.28	0	35
中密卵石	22	32	0.25	0	40
密实卵石	23	43	0.22	0	45
中砂	19	5.5	0.26	0	22

以隧道中轴线为横坐标原点，图 7 给出了 DK1、DK2 和 DK3 三个断面地表沉降监测值和偏压随机介质理论预测曲线。从监测数据可以看出，3 个断面右侧沉降均大于左侧沉降，沉降分布不对称，为右偏压隧道。偏压收敛预测模型显示，断面 DK1、DK2、DK3 最大沉降分别为 19.52，11.35，17.37 mm，最大沉降点并不发生于隧道正上方，各最大沉降点相对于隧道中心的偏移量分别为 $\Delta X=0.58\text{ m}$ 、 $\Delta X=0.66\text{ m}$ 和 $\Delta X=0.02\text{ m}$ 。可见，该偏压预测模型从趋势上和数值上都很好的反映了地表沉降的分布规律。

4.2 与传统对称收敛模式的比较

以往文献中均是按照传统对称收敛模式进行预测分析，并无部分偏压参数，采用反分析法^[16]对相关隧道参数进行反演分析，定义目标函数：

$$F(X)=\sum_{i=1}^n[W_i-W_i(X)]^2。$$

(15)

式中： W_i 为地表第 i 个沉降监测点监测值； $W_i(X)$ 为地表第 i 个沉降监测点预测值； $X=\{\theta,\gamma_1,\gamma_3\}$ 为隧道偏压参数矩阵。

通过求解使得 $F(X)$ 取得最小值时的一组参数 X_{\min} 即可，各隧道偏压参数见表 4 所示。

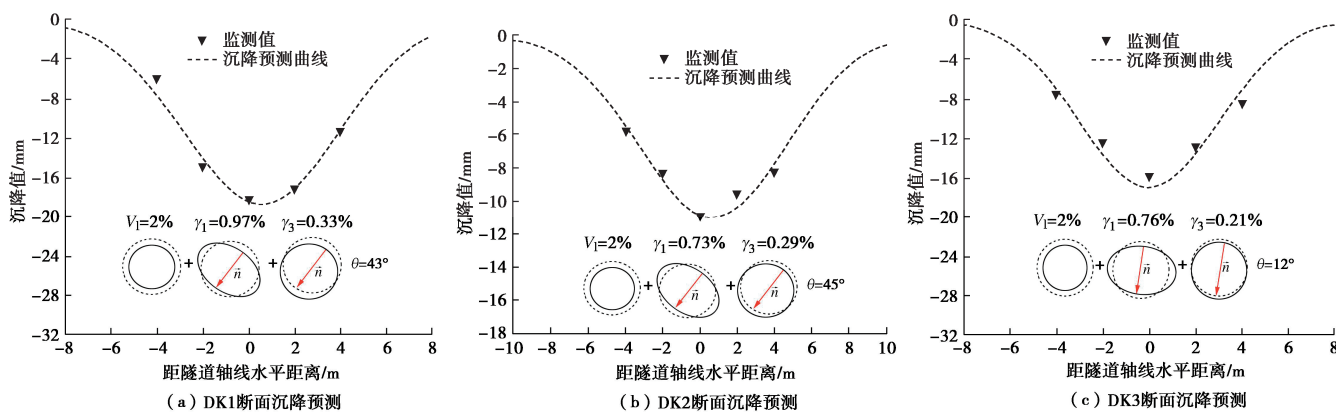


图 7 各断面偏压隧道地表沉降预测

Fig. 7 Prediction of surface settlement of bias tunnel at each section

表 3 成都地铁五号线典型偏压断面计算参数表

Table 3 Parameters of typical section of Chengdu Metro Line 5

断面	里程	H/m	R/m	$\beta/(\text{^\circ})$	$V_1/\%$	$\theta/(\text{^\circ})$	$\gamma_1/\%$	$\gamma_3/\%$
DK1	DK15+620	19.5	3	34.5	2	43	0.97	0.33
DK2	DK15+770	26.5	3	34.7	2	45	0.73	0.29
DK3	DK15+830	21.4	3	35.0	2	12	0.76	0.21

表 4 研究隧道计算参数表

Table 4 Parameters of tunnels

隧道	H/m	R/m	$\beta/(\text{^\circ})$	$V_1/\%$	$\theta/(\text{^\circ})$	$\gamma_1/\%$	$\gamma_3/\%$
巴西快速交通隧道	14.0	4.8	37.60	8.52	38	0.36	0.17
台湾三义一号隧道	23.5	5.5	41.67	1.77	-29	0.56	0.14
某 215 工程隧道	19.5	3.0	51.11	0.28	23	0.33	0.09

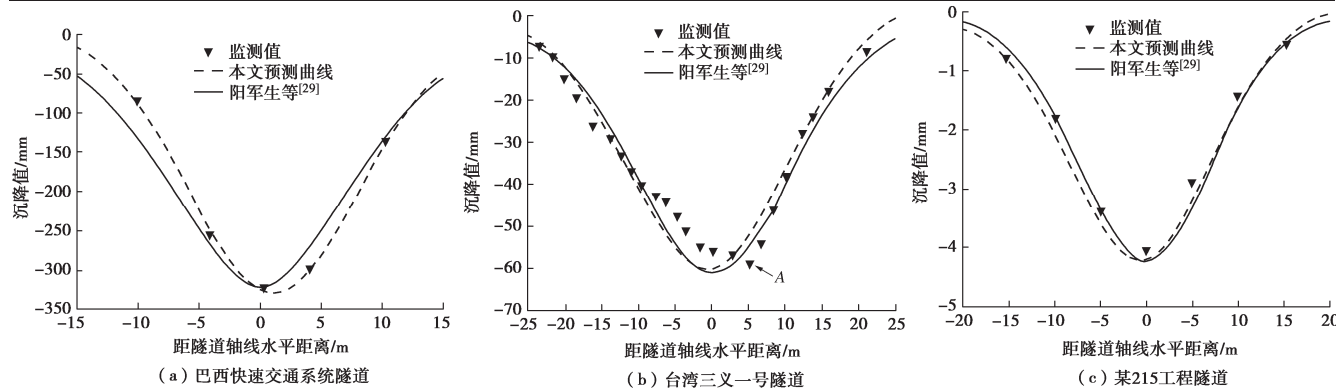


图 8 本文方法与传统对称收敛模型的比较

Fig. 8 Comparison between proposed method and traditional symmetric convergence model

图 8 为巴西快速交通隧道、某 215 工程隧道和台湾三义隧道的地表沉降监测数据,同时用传统对称收敛模式^[29]和本文所提出偏压收敛模式对各隧道引起地表沉降进行预测。采用本文预测方法,得到巴西快速交通隧道为右偏压隧道,最大沉降值为 342 mm,最大沉降点相对隧道中心的水平偏移量为 $\Delta X=1.03$ m。215 工程隧道地表最大沉降值为 4.21 mm,出现在 $\Delta X=-0.52$ m 处,为左偏压隧道。

对于台湾三义隧道,偏压收敛模式预测最大沉降值为 62.56 mm,出现在 $\Delta X=-0.48$ m 处,为左偏压隧道。虽然监测数据显示其最大沉降点在右侧 $\Delta X=5.24$

m 位置,但除最大沉降点 A 附近受特殊因素影响,致使其沉降较大外,对于大部分对称监测点,左侧沉降要大于右侧,本隧道明显为左偏压隧道,偏压收敛模式对于地表整体沉降预测较为合理。

比较可知,传统收敛模式所得沉降曲线均为左右对称,虽整体上能反映地表沉降大小,但最大沉降点始终位于隧道轴线正上方,不能体现地表沉降的非对称特性。相反,本文提出的方法能较好反映地表沉降的非对称性,且预测值和监测数据也更为贴近。

4.3 偏压参数对最大沉降值及其位置的影响

由偏压隧道收敛模式可知,当 H , R , β 和地层

损失率 V_1 一定时,地表沉降主要受 θ , γ_1 和 γ_3 3 个参数影响。同时考虑到埋深与隧道半径比 H/R 对地表沉降的影响^[22, 27], 本节以成都地铁 5 号线 DK1 (DK15+620) 断面隧道基本偏压参数为基准, 分别分析各偏压参数 θ , γ_1 , γ_3 以及 H/R 对地表最大沉降值 S_{\max} 和最大沉降点偏移量 ΔX 的影响规律。

(1) 偏压角 θ 的影响

θ 是区分对称收敛和偏压收敛的关键参数, 从式 (13) 看, θ 的改变会引起被积函数 $\varphi(t_1, t_2)$ 的变化, 从而影响到最终地表沉降预测曲线。左右偏压互为对称, 本节以 $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$ 右偏压情况为例进行分析。

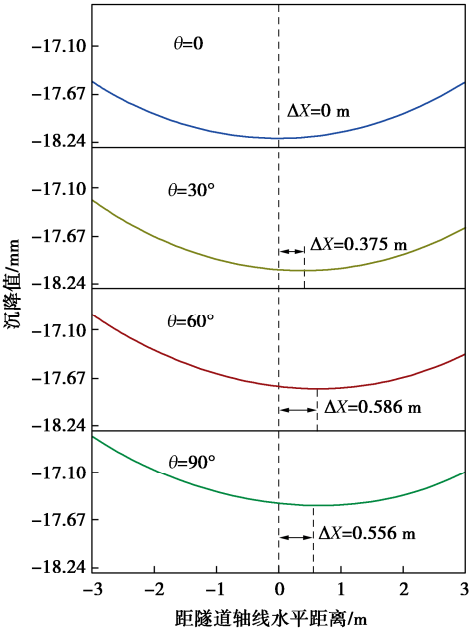


图 9 不同 θ 下地表沉降曲线

Fig. 9 Curves of surface settlement under different values of θ

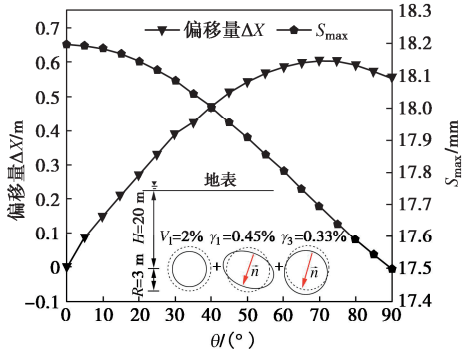


图 10 ΔX 及 S_{\max} 随 θ 变化规律

Fig. 10 Variation trends in ΔX and S_{\max} with θ

不同 θ 下地表沉降曲线见图 9, 结合图 10 可知, θ 的增加使得隧道左侧部分形心相对右侧上升, 地表左右两侧沉降差异增加, 最大沉降点逐渐向右侧移动,

从而 ΔX 随着 θ 的增加而增大。当 $\theta > 45^\circ$ 后, 随着 θ 的增加, ΔX 增速减缓, 当 $\theta = 75^\circ$ 时, 最大沉降点偏移量 ΔX 达到最大值 0.610 m。而 S_{\max} 随着 θ 的增加而减小, 相比于最大沉降量, 当 θ 从 0° 增加到 90° , S_{\max} 的变化量仅为 3.1%~3.4%, θ 对 S_{\max} 的影响较小。

(2) 椭圆化偏压参数 γ_1 的影响

从图 11, 12 可以看出, 因为偏压角 θ 的存在, γ_1 的增加引起隧道左右两侧形心纵坐标差异增大, 从而最大沉降点向右侧移动。当 γ_1 由 0.1% 增加到 0.9% 时, ΔX 从 0.423 m 逐渐增大到 0.700 m。随着 γ_1 从 0.1% 增至 1%, S_{\max} 虽逐渐变大, 但变化量不到 0.03 mm, 仅占总沉降量的 0.13%~0.14%, γ_1 主要影响最大沉降点偏移量 ΔX , 而对 S_{\max} 的影响可以忽略。

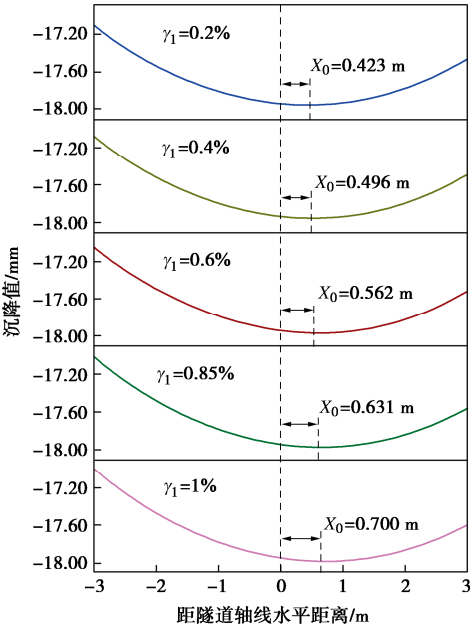


图 11 不同 γ_1 下地表沉降曲线

Fig. 11 Curves of surface settlement under different values of γ_1

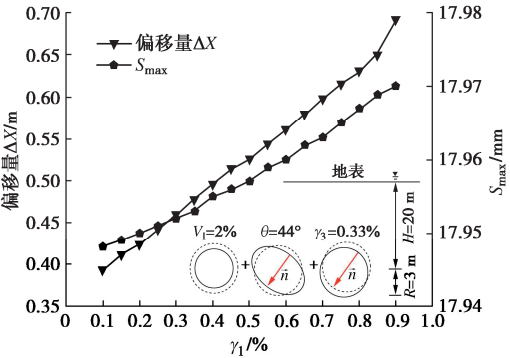


图 12 ΔX 及 S_{\max} 随 γ_1 变化规律

Fig. 12 Variation trends in ΔX and S_{\max} with γ_1

(3) 偏压下沉参数 γ_3 的影响

不同 γ_3 下的地表沉降曲线如图 13 所示。从图 14 可见, 随着 γ_3 的增大, ΔX 和 S_{\max} 均呈线性增加, 当从 γ_3 从 0.2% 增加到 1% 时, S_{\max} 增大约 6.4%, ΔX 从 0.273 m 增大至 1.108 m, 增加 191%, γ_3 的变化主要影响 ΔX 的大小。尽管相同变化量下, γ_3 对 ΔX 和 S_{\max} 的影响要比 γ_1 大, 但根据成都地铁 5 号线监测数据, 可知 γ_3 取值一般在 $(0.1 \sim 0.65) \gamma_1$, 这 and 对称收敛^[27] 中 γ_3 和 γ_1 的关系基本一致, 所以实际工程中 γ_3 的变化范围远小于 γ_1 , 其对地表沉降影响较 γ_1 小。

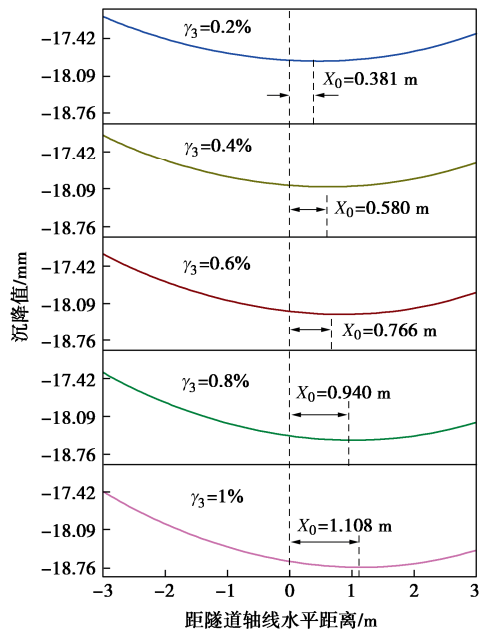


图 13 不同 γ_3 下地表沉降曲线

Fig. 13 Curves of surface settlement under different values of γ_3

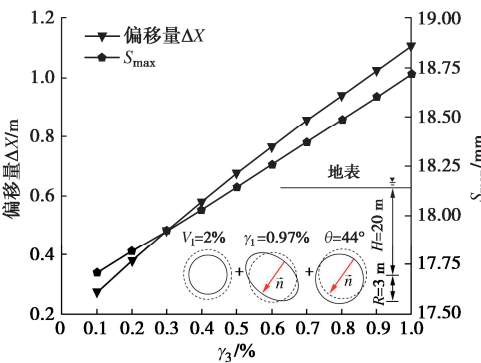


图 14 ΔX 及 S_{\max} 随 γ_3 变化规律

Fig. 14 Variation trends in ΔX and S_{\max} with γ_3

(4) 埋深与隧道半径比 H/R 的影响

由图 15 可知, $R=3$ m 时, 尽管 H 从 9 m 增大到 27 m, 最大沉降位置相对于隧道中心偏移量 ΔX 仅相差 0.151 m, 但最大沉降量 S_{\max} 却从 40.02 mm 减小到 13.27 mm, 沉降量减小 66.84%。可见其余参数不变情况下, 随着隧道埋深的增加, 沉降影响范围变大, 而地层损失率不变, 必然导致上部地表沉降变小。

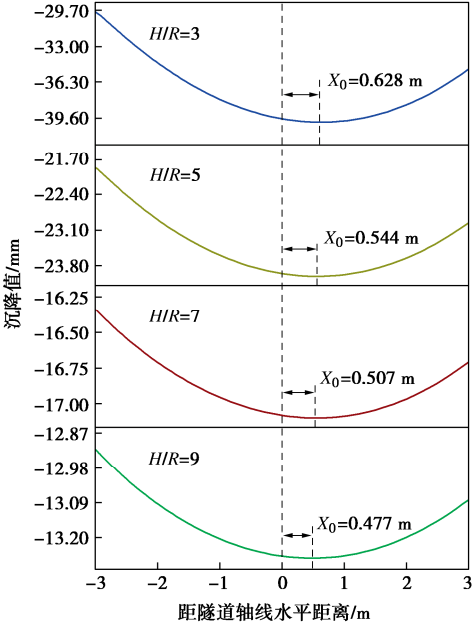


图 15 不同 H/R 下地表沉降曲线

Fig. 15 Curves of surface settlement under different values of H/R

同时从图 16 可知, 不同 R 下, ΔX 和 S_{\max} 都随着 H/R 的增大而减小, 相同 H/R 下, R 越大 ΔX 和 S_{\max} 越大。且不同 R 下, 随着 H/R 的变化, 各曲线基本平行, 说明在不同隧道半径下, 随着埋深与隧道半径比的增加, ΔX 及 S_{\max} 均呈减小趋势, 且减小速率基本相同。

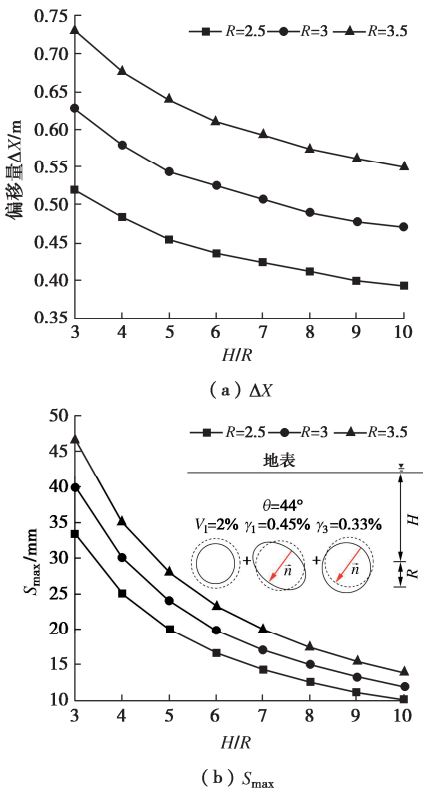


图 16 ΔX 及 S_{\max} 随 H/R 变化规律

Fig. 16 Variation trends in ΔX and S_{\max} with H/R

5 结 论

本文提出了一种隧道的偏压收敛模式,并建立了偏压隧道地表沉降预测模型。主要得到以下 4 点结论。

(1) 为计算偏压隧道引起的地表沉降,提出了隧道的一种偏压收敛模式,该收敛模式由地层损失引起的均匀收敛、非对称压力下的椭圆化变形及偏压压力下的整体沉降 3 部分组成。

(2) 定义了偏压角 θ 、椭圆化偏压参数 γ_1 及偏压下沉参数 γ_3 ,采用坐标变换和数值化处理,得到基于随机介质理论的偏压隧道地表沉降预测方法。

(3) 偏压参数 θ , γ_1 , γ_3 主要影响地表最大沉降点偏移量 ΔX ,对最大沉降量 S_{\max} 影响范围仅为 0.13%~6.4%。本参数分析案例中, $\theta=75^\circ$ 时, ΔX 达到最大值 0.61 m,同时 ΔX 随着 γ_1 和 γ_3 的增大而增加。而较小的 H/R 会明显增加最大沉降值 S_{\max} ,施工中,应特别注意浅埋隧道的偏压角与椭圆化变形。

(4) 实际工程应用表明,相对于传统对称收敛模式,偏压收敛模式所得预测曲线更能体现地表沉降的非对称性,也能准确预测最大沉降值及其出现位置。

本文提出的隧道偏压收敛模式中,假定隧道面积大小的改变均来自于地层损失,未考虑开挖土体回弹及再固结影响,同时在富水地质条件下还应考虑地下水影响,这也是笔者今后的重点研究方向。

参考文献:

- [1] 张治国,黄茂松,杨 轩. 基于衬砌长期渗漏水影响的隧道施工扰动诱发超孔隙水压消散及地层固结沉降解[J]. 岩土力学, 2019, **40**(8): 3135-3144. (ZHANG Zhiguo, HUANG Maosong, YANG Xuan. Analytical solution for dissipation of excess pore water pressure and soil consolidation settlement induced by tunneling under the influence of long-term leakage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(8): 3135-3144. (in Chinese))
- [2] 李 辉,杨贵阳,宋战平,等. 矩形顶管施工引起土体分层变形计算方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, **15**(5): 1482-1489. (LI Hui, YANG Guiyang, SONG Zhanping, et al. Study on calculation method of soil delamination deformation caused by rectangular pipe jacking construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, **15**(5): 1482-1489. (in Chinese))
- [3] 张治国,毛敏东, PANY T, 等. 隧道-滑坡相互作用影响及控制防护技术研究现状与展望[J]. 岩土力学, 2021, **42**(11): 3101-3125. (ZHANG Zhiguo, MAO Mindong, PANY T, et al.

Research status and prospect of tunnel-landslide interaction and control protection technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(11): 3101-3125. (in Chinese))

- [4] 李世豪,宋战平. 地铁隧道施工地表沉降槽宽度系数取值研究[J]. 公路, 2018, **63**(5): 302-308. (LI Shihao, SONG Zhanping. Research on the calculation of the settlement width through influenced by shield tunneling[J]. Highway, 2018, **63**(5): 302-308. (in Chinese))
- [5] WANG J B, ZHOU P Y, SONG Z P, et al. A new calculation method for tunneling-caused stratum settlement[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, **26**(6): 2624-2640.
- [6] 宋战平,李世豪,张学钢,等. 基于修正 Peck 法的隧道施工全地层变形规律研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, **50**(2): 190-195. (SONG Zhanping, LI Shihao, ZHANG Xuegang, et al. Study on strata settlement regular pattern induced by tunnel construction based on Peck formula[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2018, **50**(2): 190-195. (in Chinese))
- [7] 魏 纲,杨 波,吴华君,等. 盾构穿越引起的既有盾构隧道纵向变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, **16**(6): 1754-1762, 1808. (WEI Gang, YANG Bo, WU Huajun, et al. Research on longitudinal deformation of existing shield tunnel caused by shield tunneling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, **16**(6): 1754-1762, 1808. (in Chinese))
- [8] 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.
- [9] 邓 婷,黄茂松,时振昊,等. 软黏土深埋矩形顶管施工地层变形分析[J]. 土木工程学报, 2023, **56**(增刊 2): 157-162. (DENG Ting, HUANG Maosong, SHI Zhenhao, et al. Ground deformation response induced by jacking process of deep rectangular tunnel in soft clay[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, **56**(S2): 157-162. (in Chinese))
- [10] 袁 冉,熊维林,何 毅,等. 复合成层地层浅埋隧道开挖地表沉降规律分析[J]. 西南交通大学学报, 2022, **57**(5): 1063-1069. (YUAN Ran, XIONG Weilin, HE Yi, et al. Analysis of ground settlement induced by shallow tunnel excavation in composite layered strata[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, **57**(5): 1063-1069. (in Chinese))
- [11] 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[J]. 岩土力学, 2002, **23**(6): 821-824. (WANG Mingnian, LI Zhiye, GUAN Baoshu. 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. (in Chinese))
- [12] 张宇亭, 安晓宇, 晋亚斐. 隧道开挖引起上部建筑物沉降的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(增刊 2): 54-57. (ZHANG Yuting, AN Xiaoyu, JIN Yafei. Centrifugal model tests on settlement of structures caused by tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(S2): 54-57. (in Chinese))
- [13] 李洛宾, 龚晓南, 甘晓露, 等. 基于循环神经网络的盾构隧道引发地面最大沉降预测[J]. 土木工程学报, 2020, **53**(增刊 1): 13-19. (LI Luobin, GONG Xiaonan, GAN Xiaolu, et al. Prediction of maximum ground settlement induced by shield tunneling based on recurrent neural network[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, **53**(S1): 13-19. (in Chinese))
- [14] 潘秋景, 吴洪涛, 张子龙, 等. 基于多域物理信息神经网络的复合地层隧道掘进地表沉降预测[J]. 岩土力学, 2024, **45**(2): 539-551. (PAN Qiujing, WU Hongtao, ZHANG Zilong, et al. Prediction of tunneling-induced ground surface settlement within composite strata using multi-physics-informed neural network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, **45**(2): 539-551. (in Chinese))
- [15] 阳军生, 刘宝琛. 挤压式盾构隧道施工引起的地表移动及变形[J]. 岩土力学, 1998, **19**(3): 10-13. (YANG Junsheng, LIU Baochen. Ground surface movement and deformation due to tunnel construction by squeezing shield[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, **19**(3): 10-13. (in Chinese))
- [16] 刘 波, 杨伟红, 张 功, 等. 基于隧道不均匀变形的地表沉降随机介质理论预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(8): 1943-1952. (LIU Bo, YANG Weihong, ZHANG Gong, et al. A prediction model based on stochastic medium theory for ground surface settlement induced by non-uniform tunnel deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(8): 1943-1952. (in Chinese))
- [17] 魏 纲, 朱 奎, 陈伟军. 不同施工工况下双圆盾构引起的土体沉降研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 477-482. (WEI Gang, ZHU Kui, CHEN Weijun. Ground settlement induced by double-O-tube shield tunneling under different construction conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 477-482. (in Chinese))
- [18] LITWINISZYN J. Fundamental principles of the mechanics of stochastic medium[C]//Proceedings of the 3rd Conference on Theoretical Applied Mechanics, Bangalore, 1957.
- [19] 刘宝琛, 廖国华. 煤矿地表移动的基本规律[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965. (LIU Baochen, LIAO Guohua. Basic Law of Coal Mine Surface Movement[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1965. (in Chinese))
- [20] 施成华, 彭立敏, 刘宝琛. 盾构法施工隧道纵向地层移动与变形预计[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(5): 585-589. (SHI Chenghua, PENG Limin, LIU Baochen. Prediction of longitudinal movement and deformation of stratum in longitudinal section due to tunnel construction by shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(5): 585-589. (in Chinese))
- [21] 姬永红. 隧道施工引起横向地层沉降的随机预测[J]. 岩土工程技术, 2004, **18**(1): 16-18, 34. (JI Yonghong. Stochastic theory for predicting latitudinal stratum settlement due to the tunnel construction[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, **18**(1): 16-18, 34. (in Chinese))
- [22] SONG Z P, TIAN X X, ZHANG Y W. A new modified Peck formula for predicting the surface settlement based on stochastic medium theory[J]. Advances in Civil Engineering, 2019(2): 1-14.
- [23] 江 帅, 朱 勇, 栗 青, 等. 隧道开挖地表沉降动态预测及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2022, **43**(1): 195-204. (JIANG Shuai, ZHU Yong, LI Qing, et al. Dynamic prediction and influence factors analysis of ground surface settlement during tunnel excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(1): 195-204. (in Chinese))
- [24] 徐 强, 朱永全, 雷升祥, 等. 隧道下穿施工引起既有隧道及地层变形预测的改进随机介质理论模型[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(2): 301-309. (XU Qiang, ZHU Yongquan, LEI Shengxiang, et al. Improved stochastic medium theoretical model for predicting deformation of existing tunnels and strata caused by excavation of new undercrossing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(2): 301-309. (in Chinese))
- [25] 韩 焯, 李 宁. 隧道开挖不均匀收敛引起地层位移的预测模型[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(3): 347-352. (HAN Xuan, LI Ning. A predicting model for ground movement induced by non-uniform convergence of tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(3): 347-352. (in Chinese))
- [26] 朱洪高, 郑宜枫, 杨 滨. 双圆盾构(DOT)隧道的地表沉降分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, **35**(2): 191-196. (ZHU Honggao, ZHENG Yifeng, YANG Bin.

- Analysis of surface settlement induced by DOT shield tunnel[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, **35**(2): 191-196. (in Chinese))
- [27] 魏 纲, 周杨侃. 随机介质理论预测近距离平行盾构引起的地表沉降[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊 2): 113-119. (WEI Gang, ZHOU Yangkan. A simplified method for predicting ground settlement caused by adjacent parallel twin shield tunnel construction based on stochastic medium theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S2): 113-119. (in Chinese))
- [28] 孟 丹, 臧晓光, 于广明, 等. 地铁车站开挖引起地表沉降分析方法的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(6): 1169-1177. (MENG Dan, ZANG Xiaoguang, YU Guangming, et al. Comparative study of analytical methods for ground surface settlement induced by subway station construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(6): 1169-1177. (in Chinese))
- [29] 阳军生, 刘宝琛. 城市隧道施工引起的地表移动及变形[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002. (YANG Junsheng, LIU Baochen. Ground Movement and Deformation Caused by Urban Tunnel Construction[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002. (in Chinese))

第九届全国水工岩石力学大会（第 1 号通知）

第九届全国水工岩石力学大会拟定于 2025 年 5 月 9 日—11 日在成都召开, 会议由中国岩石力学与工程学会岩体物理数学模拟专业委员会、四川大学和清华大学主办。

会议主题: 重大水利水电工程中的岩石力学研究进展与实践。

会议议题: ①重大水电工程中的岩石力学问题; ②长距离引调水工程中的岩石力学问题; ③抽水蓄能工程中的岩石力学问题; ④水利水电工程防灾减灾中的岩石力学问题; ⑤高坝坝基岩石力学与工程; ⑥高边坡岩石力学与工程; ⑦超大/超长/深埋地下洞室(群)岩石力学与工程; ⑧数字孪生水工岩石力学; ⑨人工智能、大数据等在水工岩石力学中的应用; ⑩水工岩石力学新方法、新技术、新材料、新装备; ⑪水工岩石力学

人才培养与教育教学改革; ⑫其他。

主办单位: 中国岩石力学与工程学会岩体物理数学模拟专业委员会; 四川大学; 清华大学。

论文征集与出版: 本次会议以期刊专刊、专栏/专题的形式发表论文, 诚邀水工岩石力学相关领域从事科研、勘察、设计、施工和运维的科技工作者及研究生踊跃投稿。论文格式见相关期刊投稿要求, 首轮投稿截止日期为 2024 年 12 月 31 日, 最终投稿截止日期为 2025 年 5 月 31 日。

联系方式: 肖明砾(xiaomingli@scu.edu.cn, 13880653644); 李海波(hbli@scu.edu.cn, 13679034245); 章治海(会务事宜, 18200364687); 大会网址 www.hrmc2025.com; 会议邮箱 hrmc2025@163.com。