

盾构下穿高铁隧道力学解析模型及 随机分析方法

费瑞振^{1,2}, 彭立敏², 施成华², 王祖贤², 张继清¹, 张天奇³, 李凤涛¹

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142; 2. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075; 3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350)

摘要:为分析盾构下穿引起高铁隧道纵向附加响应的随机性,构建了一种可考虑地层变异性的盾构隧道下穿高铁隧道力学模型。依托工程案例,验证了模型准确性,研究结果表明:随机分析不仅可以捕捉盾构隧道下穿引起的既有高铁隧道纵向响应特征,还能给出高铁隧道附加响应的包络范围,能更为客观的评价新建盾构下穿施工的影响;盾构下穿引起高铁隧道纵向弯矩和剪力极值的统计特征,满足“确定性分析结果<随机分析均值<随机分析 95%分位数”的关系,基本服从正态分布,与地基刚度的概率分布类型一致;随机分析结果不仅可以反映高铁隧道附加响应的分布规律,还能提供最大变形等关键评价指标的分布范围及其概率特征,有利于提高评价结果可靠性。

关键词:隧道工程;盾构下穿;力学解析模型;随机分析方法

中图分类号:U455.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)03-0734-12

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240720

Mechanical analysis model and stochastic analysis method for shield tunneling under high-speed railway tunnel

FEI Rui-zhen^{1,2}, PENG Li-min², SHI Cheng-hua², WANG Zu-xian², ZHANG Ji-qing¹,
ZHANG Tian-qi³, LI Feng-tao¹

(1. China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: A mechanical model for shield tunneling underpassing high-speed railway tunnels that considers ground variability is developed, which can be used to analyze the randomness of longitudinal additional responses in high-speed railway tunnels induced by shield underpassing. The model accuracy was verified based on an engineering case study. The results indicate that: the longitudinal response characteristics of existing high-speed railway tunnels caused by shield tunnel underpassing can be captured by stochastic analysis, and the envelope range of additional responses in high-speed railway tunnels can also be provided, enabling a more objective evaluation of the impact of new shield underpassing construction to be

收稿日期: 2024-06-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778636); 中国铁路设计集团有限公司科研课题项目(2024CJ0102).

作者简介: 费瑞振(1988-), 男, 高级工程师, 博士. 研究方向: 隧道及地下工程. E-mail: ruizhenfei@yeah.net

通信作者: 彭立敏(1956-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 隧道及地下工程. E-mail: lmpeng@mail.csu.edu.cn

made; the relationship of "deterministic result < stochastic calculation mean < stochastic calculation 95th percentile" is satisfied by the statistical characteristics of extreme values of longitudinal bending moment and shear force in high-speed railway tunnels induced by shield underpassing, and a normal distribution consistent with the probability distribution type of foundation stiffness is basically followed; the distribution patterns of additional responses in high-speed railway tunnels can be reflected by stochastic analysis results, and the distribution range and probability characteristics of key evaluation indicators such as maximum deformation can also be provided, by which the reliability of evaluation results is improved.

Key words: tunnel engineering; shield tunneling; mechanical analytical model; random analysis method

0 引言

针对新建盾构隧道施工对邻近既有隧道的扰动问题,国内外学者采用理论计算^[1,2]、数值模拟^[3,4]、模型试验^[5-8]、现场实测^[9,10]和机器学习^[9,10]等方法开展了较为广泛的研究,并取得了较为丰富的研究成果。

既有理论分析方法普遍采用“两阶段法”进行盾构下穿既有隧道问题的解析求解,即在第一阶段忽略既有隧道的存在,得到新建隧道施工引起的附加荷载(力荷载或位移荷载),然后在第二阶段将此自由场荷载施加在既有隧道的围岩-结构相互作用模型上,从而求得既有隧道的附加响应(变形和内力)。现阶段,不同理论分析方法的差异也主要体现在第二阶段构建的既有隧道的结构力学分析模型上。如Liang等^[11,12]分别采用Winkler地基-EB梁(Euler-Bernoulli梁)模型和Winkler地基-T梁(Timoshenko梁)模型分析了新建盾构隧道下穿和双跨施工引起的既有盾构隧道的纵向变形问题;甘晓露等^[13]基于Pasternak地基-EB梁模型研究了双线盾构隧道下穿对既有盾构隧道的影响。刘维正等^[14]、张志伟等^[15]将既有盾构管片视为一系列位于Pasternak基础上由拉伸弹簧、压缩弹簧和剪切弹簧连接的弹性地基短梁,建立了地铁盾构隧道近距离上穿既有线路纵向变形计算方法。

对既有研究的调查表明,目前采用理论分析法开展的新建隧道施工引起的既有隧道附加响应研究中,研究对象普遍聚焦于盾构隧道,而较少涉及新建隧道下穿高铁隧道这类特殊情况。这主要是由于高铁隧道的特殊性,一般情况下新建隧道线路一般会尽量避开高铁隧道。但当前针对新建隧道下穿既有盾构隧道问题建立的求解方法对新建隧道邻近高铁隧道施工仍具有一定的适用性。

因此,可借鉴其基本思路建立新建隧道下穿既有高铁隧道工程特点的力学模型。

对于超长线状结构型式的盾构隧道,沿纵向将不可避免地穿越多种地层;且即使在名义上的均质地层中,由于岩土体形成过程中复杂的历史沉积作用,各项物理力学参数必然会呈现一定程度的空间变异性^[16,17]。研究表明,岩土参数的空间变异性对岩土结构力学性能的影响不可忽略^[18]。基于岩土空间变异性的随机分析方法已成功应用到基坑开挖^[19]、边坡施工^[20]、顶管掘进^[21]等领域,然而针对盾构下穿施工引起既有隧道纵向附加响应的随机分析相对很少。

基于定参数的确定性分析方法可能无法反映新建隧道施工扰动下既有隧道的失效机制,从而高估既有隧道结构的承灾能力,造成较大的施工风险。尤其对于高铁隧道这类结构安全等级和重要性等级极高的工程结构,对工程风险评价的可靠性要求更高。因此,对于盾构下穿高铁隧道施工扰动问题,本文建立了一种考虑地基参数变异性影响的盾构下穿高铁隧道随机分析方法。

1 新建盾构隧道下穿既有高铁隧道力学模型

1.1 基本假定

考虑盾构隧道的施工过程及既有高铁隧道的结构特点,建立如图1所示的新建盾构隧道下穿既有高铁隧道力学模型,图1中, $q(x)$ 为新建隧道施工引起的作用在既有高铁隧道轴线处的附加荷载。为简化研究,突出重点,做如下基本假定:

(1)考虑既有高铁隧道衬砌的横向剪切效应,将其简化为两端自由的均质Timoshenko梁。

(2)采用Pasternak模型描述隧道及围岩之间的相互作用,并采用变刚度地基模型进一步考虑地基参数的固有变异性。

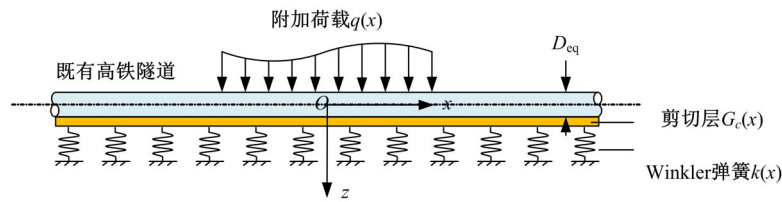


图1 新建盾构隧道下穿既有高铁隧道力学模型

Fig. 1 Mechanical model for new shield tunnel crossing beneath existing high-speed rail tunnel

(3)既有高铁隧道与土体变形协调,不考虑地层的时变效应,如固结和蠕变。

1.2 解析模型的控制方程

对于 Pasternak 地基模型,地基反力与变形之间的关系为:

$$p(x) = kw(x) - G_c \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \quad (1)$$

式中: p 为地基反力; x 为距隧道中心线水平距离; k 和 G_c 分别为弹性地基的压缩模量和剪切模量; w 为地基计算点的竖向变形,由于假定隧道变形与地基变形协调, w 也表示既有隧道的竖向变形。

根据 Timoshenko 梁理论,梁变形与梁内力的关系通过式(1)进行计算:

$$\begin{cases} M = -D\chi, Q = C\gamma \\ \chi = \frac{d\varphi}{dx}, \gamma = \frac{dw}{dx} - \varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中: M 为梁截面弯矩和剪力; D 为梁截面抗弯刚度; χ 为截面曲率; Q 为梁截面剪力; C 为梁截面剪切刚度; γ 为截面剪切角; φ 为梁截面转角

对图1中长为 dx 的梁微段进行受力分析,如图2所示。建立梁微段的平衡方程:

$$\begin{cases} Q + dQ + qD_{eq} dx = Q + pD_{eq} dx \\ M + Qdx + pD_{eq} \frac{(dx)^2}{2} = M + dM + qD_{eq} \frac{(dx)^2}{2} \end{cases} \quad (3)$$

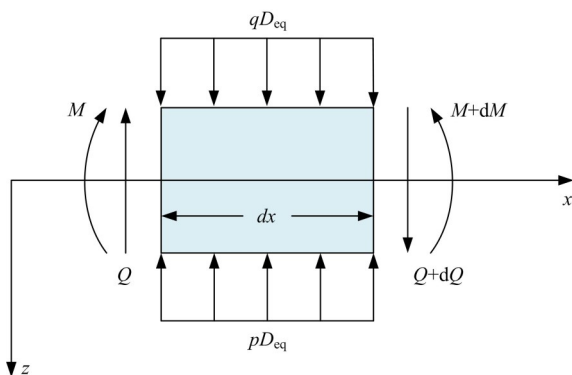


图2 梁微段受力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of forces acting on beam micro-segment

结合式(2)(3),可得到附加荷载 $q(x)$ 作用下 Pasternak 地基上 Timoshenko 梁转角 φ 和挠度 w 的平衡微分方程:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} \left[C \left(\frac{dw}{dx} - \varphi \right) \right] = Kw(x) - T \frac{d^2 w}{dx^2} - qD_{eq} \\ -D \frac{d^2 \varphi}{dx^2} = C \left(\frac{dw}{dx} - \varphi \right) \end{cases} \quad (4)$$

求解式(4),可得盾构下穿高铁隧道纵向变形控制微分方程:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} - \frac{TC + KD}{D(C + T)} \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{KC}{D(C + T)} w = \frac{CD_{eq}}{D(C + T)} q - \frac{D_{eq}}{C + T} \frac{d^2 q}{dx^2} \quad (5)$$

1.3 解析模型控制方程的求解

本文采用有限单元法求解解析模型。在求得新建盾构施工引起的地层自由场位移后,作用在既有高铁隧道上的竖向附加荷载 $q(x)$ 计算如下:

$$q(x) = kU_z(x) - G_c \frac{d^2 U_z(x)}{dx^2} \quad (6)$$

式中: $U_z(x)$ 为新建盾构隧道施工引起的既有高铁隧道轴线处的地层竖向位移。

Pasternak 地基模型的关键参数 k 和 G_c 一般可按式计算:

$$\begin{cases} k = \frac{1.3E_s}{D_t(1 - \mu_s^2)} \sqrt{\frac{E_s D_t^4}{EI}} \\ G_c = \frac{E_s h_t}{6(1 + \mu_s)} \end{cases} \quad (7)$$

式中: E_s 和 μ_s 分别为地基的弹性模量和泊松比; EI 为地基梁的抗弯刚度,此处即为既有高铁隧道的抗弯刚度; D_t 为地基梁宽度,本文为既有隧道外径; h_t 为地基剪切层厚度, $h_t = 2.5D_t^{[22]}$ 。

$U_z(x)$ 可根据 Loganathan 等^[23]提出的盾构施工引发周围自由土体竖向位移的半解析计算方法进行计算。

$$U_z(x) = \frac{1}{4} D_N^2 \epsilon_0 \left\{ -\frac{2H_0 B}{A^2} + (3-4\nu) \frac{a}{A} - \frac{b}{x^2 + b^2} \right\} \exp \left(-\left[\frac{1.38x^2}{(H_N + 0.5D_N)^2} + \frac{0.69H_0^2}{H_N^2} \right] \right) \quad (8)$$

式中: $a = H_0 + H_N$; $b = H_0 - H_N$; $A = x^2 + a^2$; $B = x^2 - a^2$; ϵ_0 为地层损失率; H_0 为既有高铁隧道轴线埋深; H_N 为新建盾构隧道埋深; D_N 为新建盾构隧道外径^[24]。

2 既有隧道纵向力学响应的随机分析方法

2.1 地基刚度空间变异性的随机场模型

本文用于计算沿隧道纵向任意两点间的自相关系数为指数型。对于一维问题,该指数型自相关函数可表示为^[24]:

$$\rho(x_i, x_j) = \exp \left(-\frac{2|x_i - x_j|}{l_x} \right) \quad (9)$$

式中: $\rho(x_i, x_j)$ 为既有隧道轴线处任意两点 x_i 和 x_j 的相关系数; $|x_i - x_j|$ 表示两点的相对距离; l_x 为目标参数水平自相关距离。

在构建的新建盾构隧道下穿既有高铁隧道力学模型中,通过引入变刚度 Pasternak 地基模型考虑了隧道下卧地基参数的固有空间变异性。由式(7)可见, Pasternak 地基模型的关键参数 k 和 G_c 主要由地基土的弹性模量和泊松比决定。而相关研究表明,泊松比的变异性相对较小、弹性模量的变异性相对较大^[18],因此本文通过建立地基弹性模量的随机场模型以实现既有隧道下卧地基参数沿隧道纵向的空间变异性。

均值为 μ_E 、标准差为 σ_E 的地基弹性模量的对数正态随机场 $H_E(x)$ 可表示为^[24]:

$$H_E(x) = \exp[\mu_{\ln E} + \sigma_{\ln E} \cdot H_E^D(x)] \quad (10)$$

式中: $H_E^D(x)$ 为地基弹性模量 E_s 的标准高斯随机场; $\mu_{\ln E}$ 和 $\sigma_{\ln E}$ 分别为正态随机变量 $\ln E_s$ 的均值和标准差,可由对数正态随机变量 E_s 的均值和标准差变换求出。

$$\begin{cases} \sigma_{\ln E}^2 = \ln \left(1 + \frac{\mu_E^2}{\sigma_E^2} \right) = \ln(1 + \text{cov}_E^2) \\ \mu_{\ln E} = \ln \mu_E - \frac{1}{2} \sigma_{\ln E}^2 \end{cases} \quad (11)$$

式中: cov_E 为对数正态随机变量 E_s 的变异系数。

由于中心点法计算过程简单且便于编程实现,因此本文采用 Cholesky 中心点法对地基刚度离散。

$$K = S^T S \quad (12)$$

土体弹性模量 E_s 的标准高斯随机场为^[24]:

$$H_E^D(x) = S^T X \quad (13)$$

式中: X 为一组服从标准正态分布的随机变量所组成的向量。

由此,结合式(9)~(13)可生成地基土弹性模量的正态随机场,进而根据式(7)得到地基反力参数 $k(x)$ 和剪切参数 $G_c(x)$ 。

2.2 既有高铁隧道纵向力学响应的随机分析流程

考虑地层变异的盾构下穿施工引起既有高铁隧道附加响应分析流程如图3所示。

与代理模型、子集模拟、神经网络等分析方法相比,蒙特卡洛模拟可以有效处理高度非线性和复杂的可靠性问题,计算结果具有较高准确性。

2.3 既有高铁隧道纵向变形的超标概率

基于上述随机分析方法得到的盾构下穿引起的既有高铁隧道附加响应随机计算结果,可进一步进行新建盾构下穿施工的风险分析。以高铁隧道最大变形为评价指标,定义新建盾构隧道下穿施工引起的高铁隧道变形超标概率 P_f 为:

$$P_f = \frac{N_f}{N} \times 100\% \quad (14)$$

式中: N 为随机计算有效模拟次数; N_f 为 N 次随机计算分析中高铁隧道最大变形超过变形控制值 (w_{lim}) 的次数。

根据《高速铁路无砟轨道线路维修规则(试行)》(TG/GW 115-2012)及铁路部门相关要求,高铁隧道整体沉降不得超过 5 mm,即 $w_{\text{lim}} = 5 \text{ mm}$ 。

3 工程案例分析

3.1 案例概况

长沙地铁3号线湘龙站~星沙站区间盾构隧道在 DK34+856 里程处下穿京广高铁浏阳河隧道,新建盾构隧道轴线与浏阳河隧道轴线平面夹角为 90° ,属正交下穿情况,地铁3号线区间盾构隧道与既有高铁隧道位置关系如图4所示。新建地铁3号线区间隧道采用盾构法施工,左右线隧道均采用 C50 钢筋混凝土管片衬砌,衬砌管片外径为 6.0 m,内径为 5.4 m,管片厚度为 0.3 m,幅

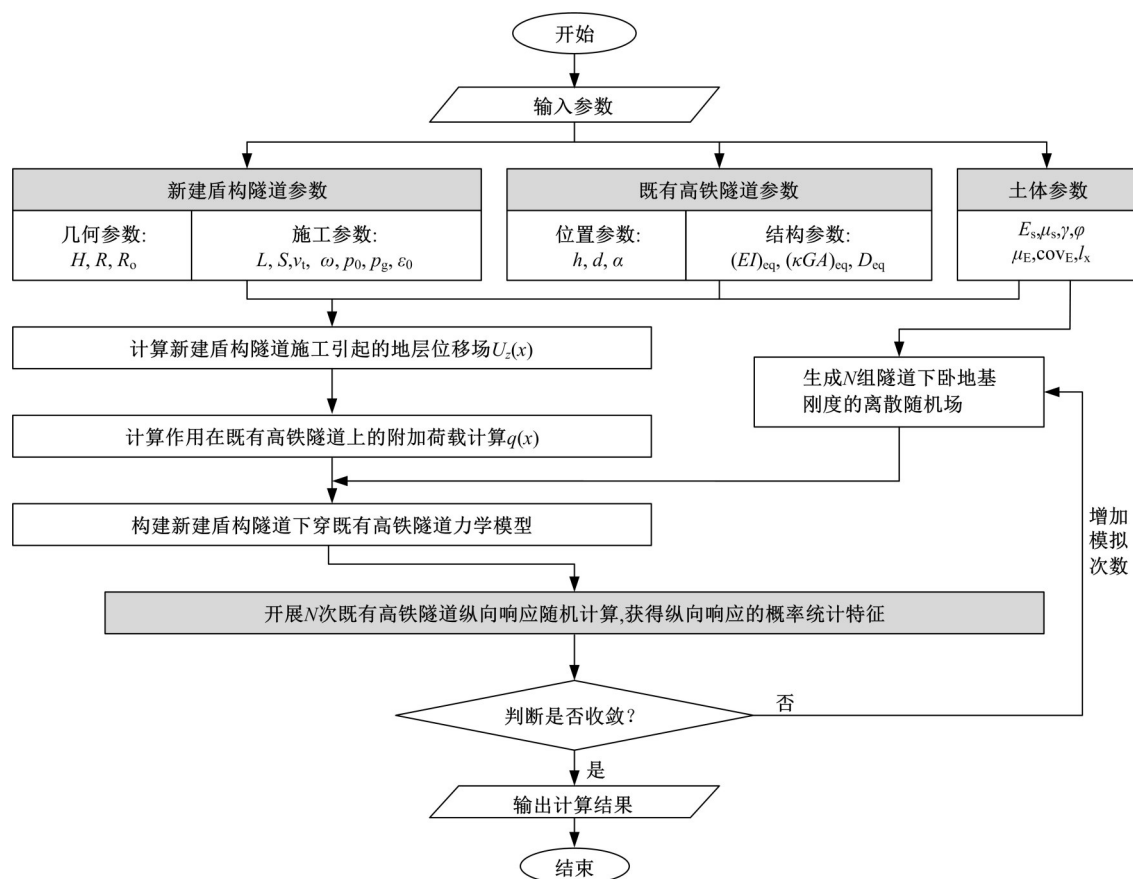


图3 考虑地层变异的盾构下穿施工引起既有高铁隧道附加响应分析流程

Fig. 3 Analysis procedure for additional responses in existing high-speed rail tunnels caused by shield tunneling construction considering stratigraphic variability

宽为 1.5 m; 下穿段新建盾构隧道轴线埋深为 32.61 m, 与既有隧道衬砌竖向净距为 12.48 m, 左右线隧道中心距为 15.0 m。

如图 4 所示, 地铁 3 号线区间隧道下穿段地层主要为①₂₋₂素填土、⑦₃₋₂强风化砾岩和⑦₂₋₂中风化泥质粉砂岩。浏阳河高铁隧道断面内地层主要为强风化砾岩和 中风化泥质粉砂岩, 新建地铁 3 号线左右线盾构隧道主要在中风化泥质粉砂岩地层掘进。

3.2 基本计算参数的确定

如图 4(a) 所示, 既有浏阳河高铁隧道断面为马蹄形断面, 为便于计算, 将其断面按截面积等效为一圆形断面, 马蹄形断面内轮廓面积约 120 m², 因此等效截面直径取 12.36 m, 衬砌厚度按拱顶厚度计算, 取 0.8 m。隧道衬砌采用 C35 钢筋混凝土管片, 因此弹性模量按规范^[25]取 3.15×10^4 MPa, 泊松比取为 0.2, 考虑到衬砌施工质量及节段构造缝的影响, 实际计算时对衬砌刚度进行一定的折减, 本文折减系数按 0.8 考虑, 最终得到既有高铁隧道纵向等效抗弯刚度和抗剪刚度分

别为 1.23×10^{10} kN·m² 和 1.62×10^8 kN/m。

根据地勘资料, 下穿段计算断面内主要地层的基本物理力学参数见表 1。

计算时地层参数根据计算断面内给地层的厚度占比取加权平均值, 采用的岩土体计算参数为: 弹性模量为 900 MPa, 泊松比为 0.25, 重度为 22.9 kN/m³, 内摩擦角为 31°。结合地质钻孔资料, 根据变异系数计算公式 $C \cdot V = (\text{标准差 } \sigma / \text{平均值 } \bar{u}) \times 100\%$, 计算得出既有高铁隧道下卧地基刚度的变异系数约为 0.3。Phoon 等^[26]研究表明, 天然土体的水平波动距离一般为 10~80 m, 因此, 采用随机分析方法分析时取地基刚度的水平波动距离为 5D (D 为新建盾构隧道外径) 作为基础工况进行研究。

根据现场施工计划, 地铁 3 号线湘龙站~星沙站区间隧道采用 2 台土压平衡盾构施工, 盾构开挖直径为 6.25 m, 盾体长度约为 8.0 m, 刀盘采用 4 主梁+4 面板构造, 开口率为 37%。根据试验段掘进施工确定的盾构下穿京广高铁浏阳河隧道施工参数见表 2, 计算时各参数取其均值。

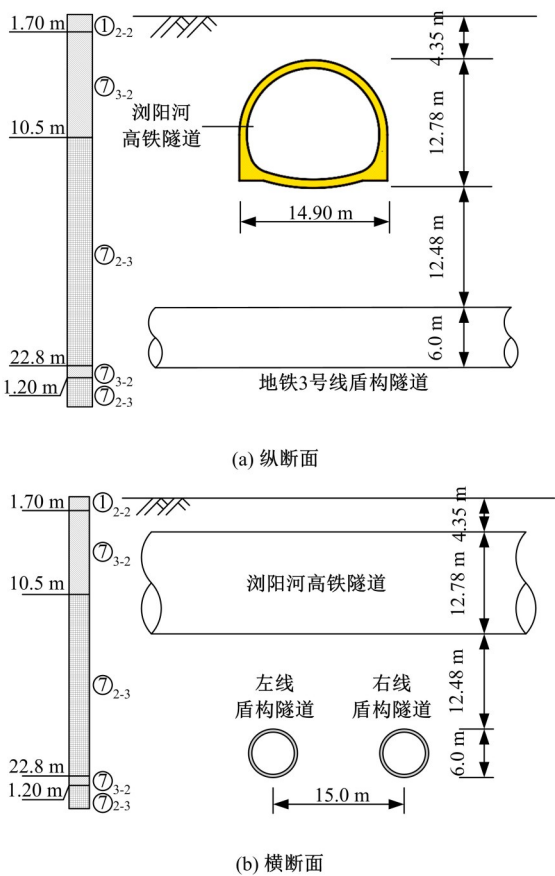


图 4 盾构隧道与高铁隧道相对位置关系

Fig. 4 Relative positional relationship between shield tunnel and high-speed rail tunnel

表 1 地层物理力学参数

Table 1 Geotechnical physical and mechanical parameters					
地层编号	地层名称	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	内摩擦角/($^{\circ}$)	弹性模量/MPa	泊松比
① ₂₋₂	素填土	19.7	15.6	13	0.30
⑦ ₃₋₂	强风化砾岩	22.9	30.0	150	0.25
⑦ ₂₋₃	中风化泥质粉砂岩	23.1	32.0	1 300	0.22

地层损失率是盾构施工时的关键控制参数,其大小直接影响了盾构施工对周围环境的扰动控制效果。蒋彪等^[27]对长沙典型地层土压盾构施工引起的地表沉降结果进行了统计分析,指出土压平衡盾构在长沙地区的泥质粉砂岩地层施工时的地层损失率大部分介于0.5%~1.25%之间。但值得指出的是,盾构下穿高铁隧道施工时,其控制要求要远高于一般情况下的掘进施工。根据本工程地质情况、试验段和正式下穿过程中引起的地表位移监测数据的反演结果(采用Peck公式对地表变形数据进行拟合)进行监控,实际施工时,

表 2 盾构下穿高铁隧道施工参数

Table 2 Construction parameters for shield tunneling beneath high-speed railway tunnel

参数	数值
土仓压力/ 10^5Pa	0.8~1.2
总推力/MN	11.5~12.5
刀盘扭矩/($\text{MN}\cdot\text{m}$)	2.6~2.9
刀盘转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	1.4~1.6
掘进速度/($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	20~25
同步注浆量/ m^3	6.9~7.1
同步注浆压力/MPa	0.24~0.28
出土量/ m^3	60~62
二次注浆压力/MPa	0.3~0.5
二次注浆量/ m^3	1.0~1.4

土体损失率基本控制在0.12%左右。

依托本案例,林志军^[28]采用数值模拟方法分析了盾构下穿对既有高铁隧道的影响,其分别计算了有、无高铁隧道情况下盾构开挖后的地层位移场分布。图5为无高铁隧道情况下采用解析计

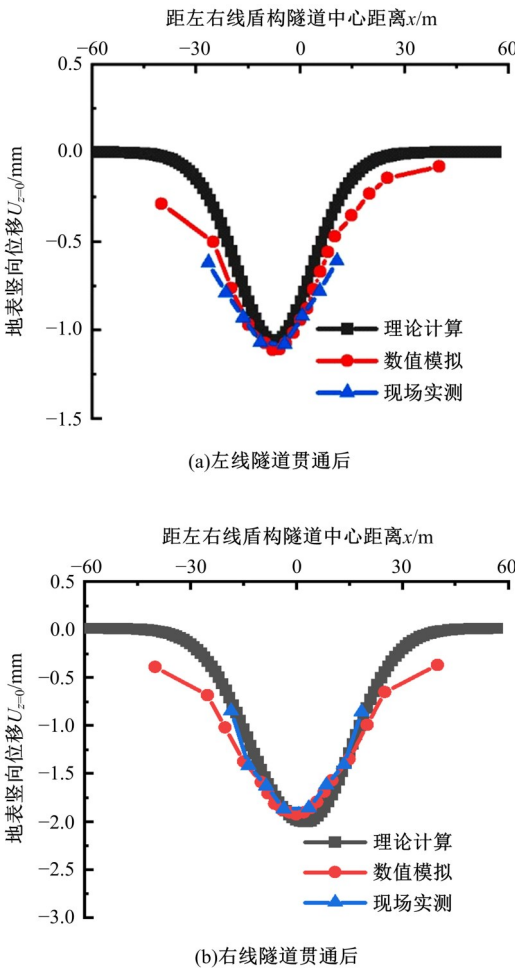


图 5 盾构施工引起的地表竖向位移曲线

Fig. 5 Vertical displacement curve caused by shield tunneling construction

算方法得到的地表沉降与数值模拟结果的对比,理论计算时地层损失率取0.12%。

由图5可见:①由于理论计算时可以充分考虑计算域的范围,因此就单线隧道施工而言,理论计算得到的地表沉降槽具有良好的对称性,而在数值模拟中由于计算边界的影响,地表沉降槽曲线并不完全对称;②相比于理论计算结果,数值模拟得到的地表沉降槽宽度略大,这主要是由于数值模拟中考虑了土体的塑性行为,因此盾构施工引起的扰动范围略大于基于弹性假设的理论计算结果;③整体上,在当前地层损失率条件下,左、右线盾构隧道施工完成后,理论计算得到的地表沉降曲线与数值模拟及现场实测结果基本一致,表明采用本文解析方法计算的地层自由场位移结果是可靠的。

3.3 既有高铁隧道纵向响应随机分析

为保证随机分析结果概率统计特征的可靠性和稳定性,在开展批量随机分析前需讨论随机模拟次数的选取。图6给出了采用随机分析方法进行既有高铁隧道纵向响应分析时隧道最大变形均值和标准差随模拟次数的变化曲线。

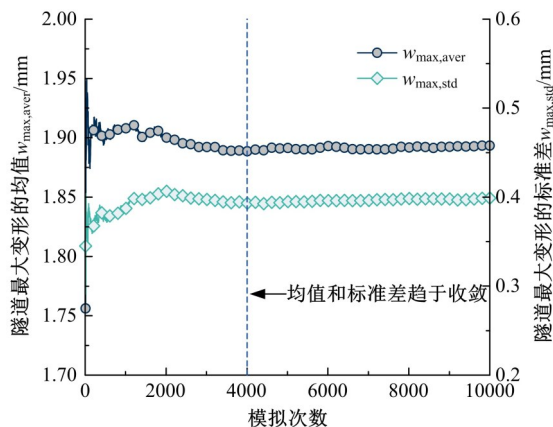


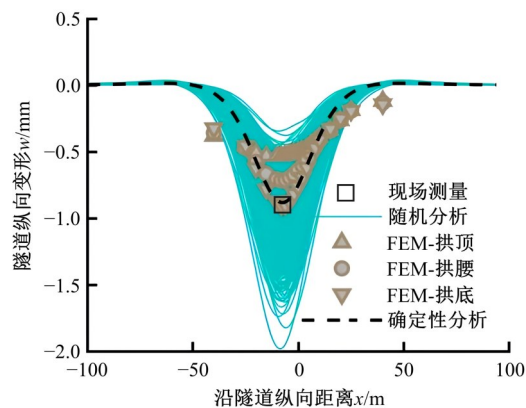
图6 既有高铁隧道纵向最大变形的收敛特征

Fig. 6 Convergence characteristics of maximum longitudinal deformation of existing high-speed rail tunnel

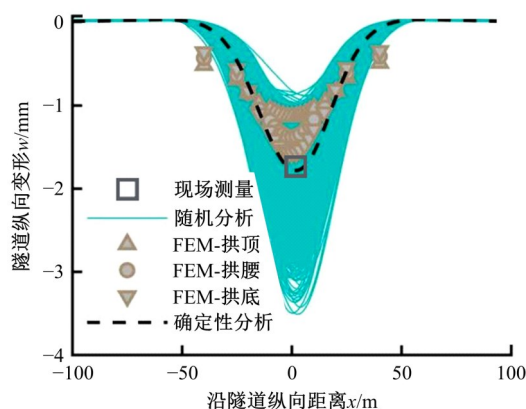
由图6可见,随着模拟次数的增大,随机计算结果的概率特征逐渐趋于稳定,当随机模拟次数达到约4 000次时,隧道最大变形的均值和标准差已趋于收敛。因此,在后续随机计算分析中,随机模拟次数设定为4 000次。

将随机计算得到的既有高铁隧道纵向变形与数值模拟结果^[15]进行对比,如图7所示,图中负值表示沉降,正值表示隆起。同时,为对比随机计算

结果与确定性计算结果的差异,图中同样给出了新建盾构隧道下穿既有高铁隧道力学模型的确定性分析结果,确定性计算时只需取地基刚度的变异系数为0即可,即 $\text{cov}_E = 0$ 。



(a) 左线盾构隧道贯通后



(b) 右线盾构隧道贯通后

图7 高铁隧道纵向变形

Fig. 7 Longitudinal deformation of the high-speed railway tunnel

由图7可见:①采用考虑地基刚度变异性的随机分析方法进行新建盾构隧道下穿既有高铁隧道影响分析时,在每一次随机计算中隧道下卧地基刚度都是沿隧道纵向变化的,因此由随机计算得到的隧道纵向变形为一系列的曲线簇;②随机分析时,尽管每次计算结果得到的既有高铁隧道纵向变形形态有一定的差异,但随机结果得到的曲线簇形态可以反映既有高铁隧道的整体变形特征;③相比于确定性分析结果,随机分析结果不仅可以捕捉盾构隧道下穿引起的既有高铁隧道纵向响应特征,还能给出高铁隧道附加响应的包络范围,能更为客观地评价新建盾构下穿施工的影响。

图8进一步给出了新建盾构隧道左右线分别施工完成后既有高铁隧道纵向最大变形(沉降)的

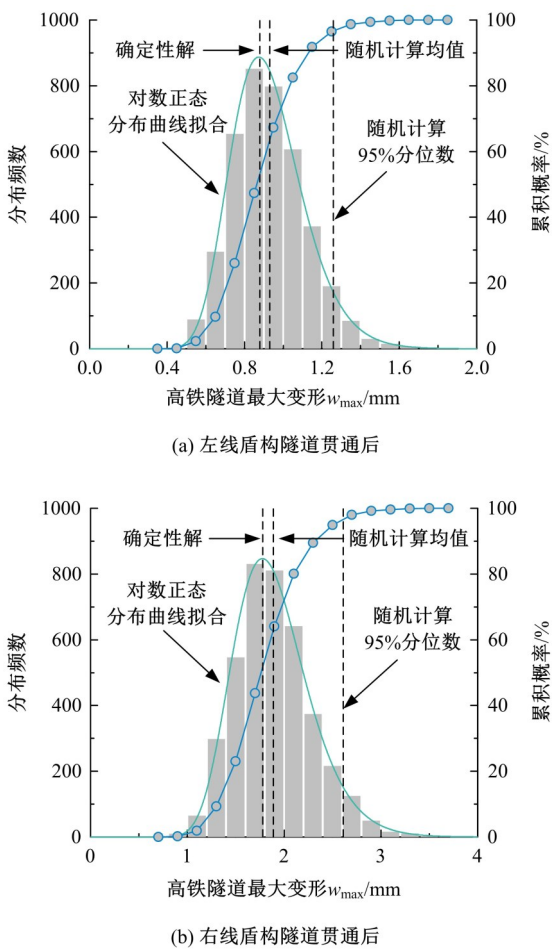


图 8 高铁隧道纵向最大变形的概率特征

Fig. 8 Probability characteristics of maximum longitudinal deformation of high-speed railway tunnel

频率分布直方图。由随机计算获得高铁隧道最大变形的概率统计值与确定性分析和数值模拟结果的对比见表 3。

表 3 高铁隧道变形的随机分析、确定性分析、数值模拟计算结果对比

Table 3 Comparison of random analysis, deterministic analysis, and numerical simulation results of high-speed railway tunnel deformation mm

计算工况	随机分析		确定性分析	数值模拟		
	均值	95%分位数		拱顶	拱腰	拱底
左线贯通后	0.93	1.26	0.88	0.53	0.72	0.91
右线贯通后	1.89	2.61	1.78	1.14	1.38	1.57

由计算结果可知：

(1)左、右线盾构隧道分别施工完成后由随机分析方法得到的高铁隧道最大变形的均值分别为 0.93 mm 和 1.89 mm，其 95% 分位数分别为 1.26 mm 和 2.61 mm。

(2)相比于确定性计算结果(高铁隧道最大变形分别为 0.88 mm 和 1.78 mm)，随机分析得到的均值略大。

(3)确定性分析结果和随机分析均值与数值模拟得到的高铁隧道拱底变形较为接近，但前两者大于数值模拟得到的高铁隧道拱顶和拱腰变形，整体上理论计算结果略大于数值模拟结果，造成这一差异的原因主要为：数值模拟基于“地层-结构”框架开展计算分析，可以发挥地层的承载能力，因此实际作用在高铁隧道上的附加荷载较小，而理论计算基于“荷载-结构”框架开展计算分析，忽略了地层的承载特性。

(4)采用对数正态分布对随机分析得到的既有隧道最大纵向变形进行概率分布拟合，发现拟合情况良好，表明其近似服从对数正态分布，与地基刚度的概率分布一致。

图 9~图 12 进一步给出了新建隧道左、右线分别贯通后既有贯通隧道纵向弯矩和剪力沿隧道纵向的分布形态及其极值的概率分布特征。

由图 9~图 12 中的结果可见，由随机计算得

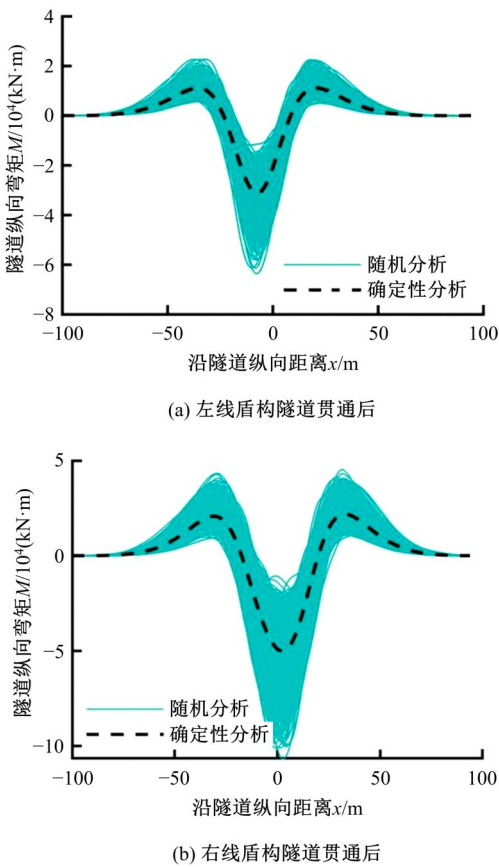
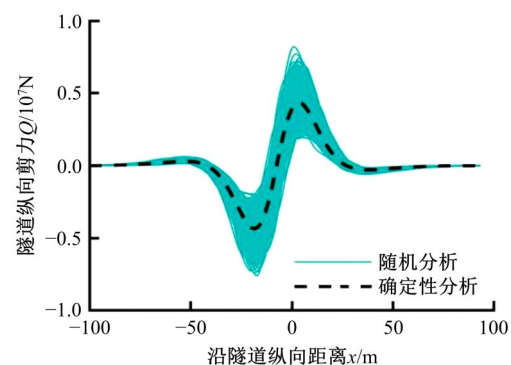
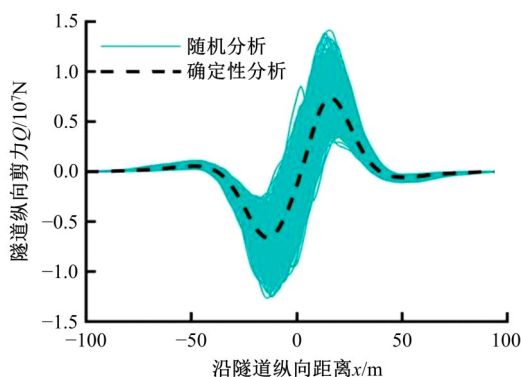


图 9 高铁隧道纵向弯矩

Fig. 9 Longitudinal bending moment of high-speed railway tunnel



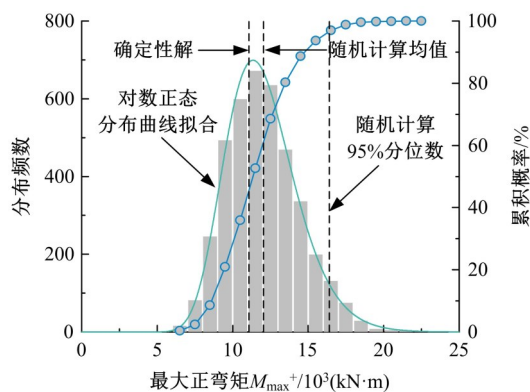
(a) 左线盾构隧道贯通后



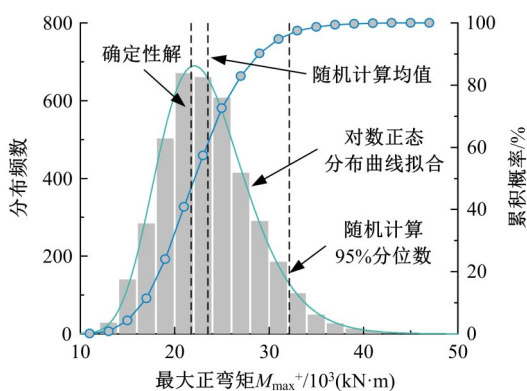
(b) 右线盾构隧道贯通后

图 10 高铁隧道纵向剪力

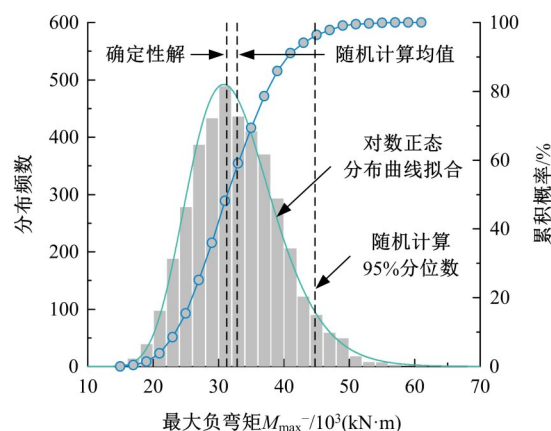
Fig. 10 Longitudinal shear force of high-speed railway tunnel



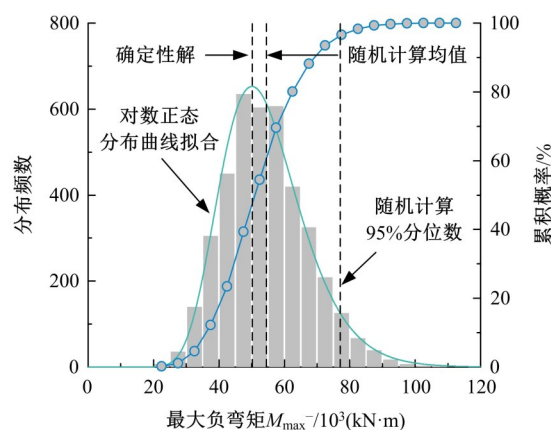
(a) 最大正弯矩-左线盾构隧道贯通后



(b) 最大正弯矩-右线盾构隧道贯通后



(c) 最大负弯矩-左线盾构隧道贯通后

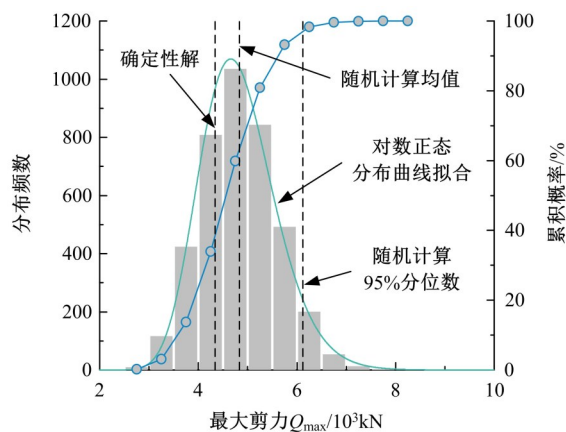


(d) 最大负弯矩-右线盾构隧道贯通后

图 11 高铁隧道纵向弯矩极值的概率特征

Fig. 11 Probability characteristics of extreme values of longitudinal bending moment of high-speed railway tunnel

到的高铁隧道弯矩和剪力沿隧道纵向的整体分布形态与确定性计算结果类似;隧道纵向弯矩和剪力极值的统计特征满足“确定性分析结果<随机分析均值<随机分析 95%分位数”的关系,其基本服从正态分布,与地基刚度的概率分布类型一致。



(a) 左线盾构隧道贯通后

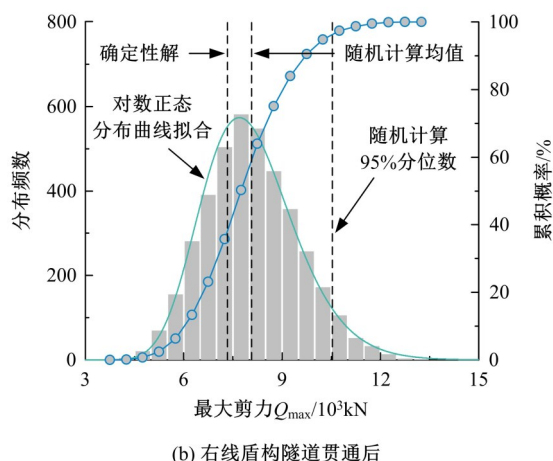


图12 高铁隧道纵向最大剪力的概率特征

Fig. 12 Probability characteristics of maximum longitudinal shear force of high-speed railway tunnel

4 结 论

(1)通过与数值模拟及现场实测结果对比,验证了本文所建立的盾构隧道下穿既有高铁隧道力学模型及随机分析方法的可靠性。

(2)依托工程案例,盾构下穿高铁隧道,左、右线盾构隧道分别施工完成后由随机分析方法得到的高铁隧道最大变形大于确定性分析结果,随机分析不仅可以捕捉盾构隧道下穿引起的既有高铁隧道纵向响应特征,还能给出高铁隧道附加响应的包络范围,能更为客观地评价新建盾构下穿施工的影响。

(3)盾构下穿高铁隧道,引起高铁隧道纵向弯矩和剪力极值的统计特征满足“确定性结果<随机计算均值<随机计算95%分位数”的关系,其基本服从正态分布,与地基刚度的概率分布类型一致。

(4)盾构下穿高铁隧道,引起高铁隧道纵向变形的确定性分析结果和随机分析均值与数值模拟得到的高铁隧道拱底变形较为接近,但前两者大于数值模拟得到的高铁隧道拱顶和拱腰变形,整体上理论计算结果略大于数值模拟结果。

参考文献:

- [1] Liang Rong-zhu. Simplified analytical method for evaluating the effects of overcrossing tunnelling on existing shield tunnels using the nonlinear Pasternak foundation model[J]. Soils and Foundations, 2019, 59(6):1711-1727.
- [2] 宫亚峰,王博,魏海斌,等. 基于Peck公式的双线

盾构隧道地表沉降规律[J]. 吉林大学学报:工学版, 2018, 48(5): 1411-1417.

Gong Ya-feng, Wang Bo, Wei Hai-bin, et al. Surface subsidence law of double-line shield tunnel based on Peck formula[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2018, 48(5): 1411-1417.

- [3] Avgerinos V, Potts D M, Standing J R. Numerical investigation of the effects of tunnelling on existing tunnels[J]. Geotechnique, 2017, 67(9):808-822.
- [4] 王磊,杜佐龙,何绍利,等. 基于受力控制和位移控制有限元法的隧道开挖对土体自由位移场的影响[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, 38(3): 647-651.
- Wang Lei, Du Zuo-long, He Shao-li, et al. Displacement field in clay due to tunneling with force-controlled and displacement-controlled FEM[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2008, 38(3): 647-651.
- [5] Fei Rui-zhen, Peng Li-min, Zhang Chun-lei, et al. Centrifuge model test of parallel shield underneath high-speed railway tunnel[J]. Archives of Civil Engineering, 2022, 68(3): 661-677.
- [6] Fei Rui-zhen, Peng Li-min, Zhang Chun-lei, et al. Experimental and Numerical studies of a shield twin tunnel undercrossing the existing high-speed railway tunnel[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2024, 42(3): 1871-1886.
- [7] 张孟喜,张靖,吴应明,等. 全风化岩层中双线盾构上穿近邻地铁隧道影响分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(9): 100-108.
- Zhang Meng-xi, Zhang Jing, Wu Ying-ming, et al. Analysis of double-line shield tunnel over-crossing subway tunnel in completely weathered rock formation [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(9): 100-108.
- [8] 刘柳,冯卫星. 基于NNBR模型的隧道盾构施工地表沉降实测与计算分析[J]. 吉林大学学报:工学版, 2021, 51(1): 245-251.
- Liu Liu, Feng Wei-xing. Field measurement and calculation analysis of tunnel shield tunnel construction based on NNBR model[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(1): 245-251.
- [9] Fei Rui-zhen, Wu Hong-tao, Peng Li-min. Prediction and control of existing high-speed railway tunnel deformation induced by shield undercrossing based on

- BO-XGboost[J]. Sustainability, 2024, 16(23): No. 10563.
- [10] 陈城, 史培新, 贾鹏蛟, 等. 基于MK-LSTM算法的盾构掘进参数相关性分析及结构变形预测[J]. 吉林大学学报:工学版, 2024, 54(6): 1624-1633.
- Chen Cheng, Shi Pei-xin, Jia Peng-jiao, et al. Correlation analysis of shield driving parameters and structural deformation prediction based on MK-LSTM algorithm[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2024, 54(6): 1624-1633.
- [11] Liang R Z, Xia T D, Hong Y, et al. Effects of above-crossing tunnelling on the existing shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58: 159-176.
- [12] 梁荣柱, 宗梦繁, 康成, 等. 考虑隧道剪切效应的隧道下穿对既有盾构隧道的纵向影响[J]. 浙江大学学报:工学版, 2018, 52(3): 420-430.
- Liang Rong-zhu, Zong Meng-fan, Kang Cheng, et al. Longitudinal impacts of existing shield tunnel due to down-crossing tunnelling considering shield tunnel shearing effect[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2018, 52(3): 420-430.
- [13] 甘晓露, 俞建霖, 龚晓南, 等. 新建双线隧道下穿对既有盾构隧道影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊2): 3586-3594.
- Gan Xiao-lu, Yu Jian-lin, Gong Xiao-nan, et al. Effects of twin tunneling underneath on existing shield tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Sup. 2): 3586-3594.
- [14] 刘维正, 戴晓亚, 孙康, 等. 地铁盾构隧道近距离上穿既有线路纵向变形计算方法[J]. 岩土力学, 2022, 43(3): 831-842.
- Liu Wei-zheng, Dai Xiao-ya, Sun Kang, et al. Calculation method of longitudinal deformation of metro shield tunnel overpassing existing line at short distance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(3): 831-842.
- [15] 张志伟, 梁荣柱, 高坤, 等. 考虑管片环间接头弱化的新建隧道上穿引起既有盾构隧道纵向变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊1): 2956-2969.
- Zhang Zhi-wei, Liang Rong-zhu, Gao Kun, et al. Analysis of longitudinal displacement of existing shield tunnel due to construction of above-crossing new tunnel considering the weakening of circumferential joint[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Sup. 1): 2956-2969.
- [16] 李健斌, 陈健, 罗红星, 等. 基于随机场理论的双线盾构隧道地层变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1748-1765.
- Li Jian-bin, Chen Jian, Luo Hong-xing, et al. Study on surrounding soil deformation induced by twin shield tunneling based on random field theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(7): 1748-1765.
- [17] 李健斌, 陈健, 程红战, 等. 考虑空间变异性的盾构隧道地层力学响应敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(8): 1667-1676.
- LI Jian-bin, Chen Jian, Cheng Hong-zhan, et al. Sensitivity analysis of mechanical parameters to surrounding-soil response induced by shield tunneling considering spatial variability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(8): 1667-1676.
- [18] 张晋彰, 黄宏伟, 张东明, 等. 考虑参数空间变异性的隧道结构变形分析简化方法[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 134-145.
- Zhang Jin-zhang, Huang Hong-wei, Zhang Dong-ming, et al. Simplified methods for deformation analysis of tunnel structures considering spatial variability of soil properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 134-145.
- [19] 陈扬, 袁宗义, 梁禹. 考虑土体空间变异性的管廊基坑开挖过程中变形及能量演化特征分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(17): 7127-7134.
- Chen Yang, Yuan Zong-yi, Liang Yu. Analysis on deformation and energy evolution characteristics during pipeline gallery foundation pit excavation considering soil spatial variability[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(17): 7127-7134.
- [20] 蒋水华, 李剑平, 黄劲松, 等. 结构面力学参数空间变异性表征及边坡可靠性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增刊1): 2834-2845.
- Jiang Shui-hua, Li Jian-ping, Huang Jin-song, et al. Spatial variability characterization of the mechanical parameters of structural planes and reliability analysis of rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Sup. 1): 2834-2845.
- [21] 张轩煜, 施成华, 孙晓贺, 等. 基于随机场理论的顶管隧道施工地表变形特性分析[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2023, 54(6): 2174-2189.
- Zhang Xuan-yu, Shi Cheng-hua, Sun Xiao-he, et al. Analysis of surface deformation characteristics of pipejacking construction based on random field theory[J]. Journal of Central South University(Science

- and Technology), 2023, 54(6): 2174-2189.
- [22] Liang R Z, Xia T D, Huang M S, et al. Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 81: 167-187.
- [23] 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.
- [24] 施成华, 郑晓悦, 王祖贤, 等. 考虑地层变异性的新建隧道下穿引起既有盾构隧道纵向变形的随机分析方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2024, 55(2): 500-512.
- Shi Cheng-hua, Zheng Xiao-yue, Wang Zu-xian, et al. Random analysis method for longitudinal deformation of existing shield tunnels induced by new tunnelling underpass considering geological uncertainty [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2024, 55(2): 500-512.
- [25] GB 50010—2010. 混凝土结构设计规范[M].
- [26] Phoon K K, Kulhawy F H. Characterization of geotechnical variability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 612-624.
- [27] 蒋彪, 皮圣, 阳军生, 等. 长沙地铁典型地层盾构施工地表沉降分析与预测[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(1): 181-187.
- Jiang Biao, Pi Sheng, Yang Jun-sheng, et al. Analysis and prediction of ground surface settlements due to EPB shield tunneling of changsha metro[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(1): 181-187.
- [28] 林志军. 地铁盾构隧道下穿既有高铁隧道施工影响及控制技术研究[D]. 长沙: 中南大学土木工程学院, 2013.
- Lin Zhi-jun. Study on the effect of construction of undercrossing shield tunnel on the existing high-speed railway tunnel and its control technology[D]. Changsha: School of Civil Engineering, Central South University, 2013.