

DOI: 10.11779/CJGE2024S20015

# 基于随机场理论的盾构隧道地层扰动分析

易顺<sup>1</sup>, 潘家军<sup>1</sup>, 王艳丽<sup>1</sup>, 景峰<sup>2</sup>, 张宇<sup>3</sup>

(1. 长江水利委员会长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010; 2. 长江科学院武汉长江科创科技发展有限公司, 湖北 武汉 430010; 3. 中国长江三峡集团有限公司中国三峡武汉科创园, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 盾构开挖不可避免会造成周围地层扰动, 引起地表及深部地层发生变形, 变形过大时会威胁到周围建构筑物的安全, 因而有必要开展隧道施工地表及地层变形扰动方面的研究。首先在土体均质条件下, 开展二维数值计算, 并分别利用 Peck 公式拟合优度和多项式拟合优度来评价水平向地层和竖向地层的变形扰动程度; 继而考虑土体参数空间变异性, 借助 Monte Carlo 策略, 开展盾构施工对地层扰动规律影响研究的随机性分析。研究结果表明: Peck 公式拟合优度可以较好地反映施工引起水平地层沉降变形程度; 多项式拟合优度可以较好地反映竖向地层水平变形受到施工的影响程度; 土体模量空间变异性会对盾构隧道施工地层扰动产生较大的影响, 模量较大时会对盾构施工地层扰动有一定的“抑制”作用, 但总体上越靠近盾构隧道, 地层受到扰动越大。研究可以为类似工程的设计和施工提供有益的参考。

**关键词:** 盾构隧道; 深部地层; 变形扰动; 拟合优度; 空间变异性; 随机场

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S2-0124-06

作者简介: 易顺(1993—), 男, 博士, 主要从事地下工程方面的研究。E-mail: sunyee\_123@163.com.

## Stratum disturbance induced by shield tunnels based on random field theory

YI Shun<sup>1</sup>, PAN Jiajun<sup>1</sup>, WANG Yanli<sup>1</sup>, JING Feng<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Wuhan Changjiang Engineering Technology Company, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. CTG Wuhan Science and Technology Innovation Park, China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The shield tunnel will inevitably cause the disturbance of the surrounding stratum and lead to the deformation of the surface and deep strata. Too large deformation of the surface and strata will threaten the safety of the surrounding construction. Therefore, it is necessary to carry out the studies on the disturbance of the surface and strata in tunnel construction. Firstly, under homogeneous soil conditions, two-dimensional numerical calculation is conducted, and the goodnesses of fit of the Peck's formula and polynomials are used to evaluate the degree of deformation disturbance of the horizontal and vertical strata, respectively. Then, considering the spatial variability of soil parameters, within the Monte Carlo framework, the random analysis is performed for the influences of shield construction on stratum disturbance. The results show that the goodness of fit of the Peck's formula can well reflect the degree of settlement of the horizontal strata induced by tunnels. The goodness of fit of the polynomials can well reflect the degree of horizontal deformation of the vertical strata affected by the construction. The spatial variability of soil modulus has a great impact on the stratum disturbance induced by the shield tunnel, and the larger modulus will restrain the disturbance induced by the shield tunnel, but on the whole, the greater stratum disturbance will occur when it is closer to the shield tunnel. The results can provide a useful reference for the design and construction of similar projects.

**Key words:** shield tunnel; deep stratum; deformation and disturbance; goodness of fit; spatial variability; random field

## 0 引言

随着中国隧道工程大量建设, 其中不可避免地会出现地层扰动等位移变形的影响, 因此有必要开展隧道施工地层扰动变形研究。

目前关于这方面的研究, 主要有数值模拟法、实

测数据法、理论解析法等, 如彭沉彬等<sup>[1]</sup>利用数值模拟的方法对盾构隧道施工过程不同位置的变形和应力展开了研究; 赵宗智等<sup>[2]</sup>基于离散方法提出了考虑隧

基金项目: 中央级科研院所基本科研业务费项目 (CKSF2023318/YT)  
收稿日期: 2024-06-21

道轴线倾角的地表沉降计算公式, 并利用工程实测数据对该公式进行了验证; Peck 公式<sup>[3]</sup>作为一种预测地表沉降的经验公式, 也被广泛应用到众多的工程实践中。由此可见, 关于隧道施工地层和地表位移变形的研究成果较为丰富, 但以上研究都是在岩土体为“均质材料”的条件下, 并未考虑到岩土体非均质特性。

事实上, 岩土体材料具有高度不连续, 非均质和各向异性的特点, 与之对应的岩土物理力学参数也会存在空间变异性特征<sup>[4]</sup>。随机场理论能较好地描述岩土体参数空间变异性特点<sup>[5]</sup>, 并应用在盾构施工地层变形研究中<sup>[6]</sup>, 但鲜有利用明确的数学表达式来描述地层变形规律, 尤其是针对考虑参数空间变异性条件下的隧道施工地层变形扰动评价研究也未见报道。

针对目前研究的不足之处, 本文开展考虑参数空间变异性下的盾构施工地层变形扰动研究, 分别利用 Peck 公式拟合优度和多项式拟合优度来定量评估水平向地层和竖向地层的变形扰动程度, 继而研究土体参数空间变异性对盾构隧道地层扰动的影响规律。本文的研究成果可以为相关工程设计及施工提供有益的参考。

## 1 基于随机场理论的盾构隧道地层变形分析方法

随机场理论能同时表征岩土体参数的随机性特征和相关性特征。对数正态分布是严格非负的, 可以用来描述岩土体形成过程中的不确定性因素。基于此, 本文分别利用对数正态分布和指数型相关函数来描述土体模量参数的随机性特征和相关性特征。

本文研究盾构隧道施工地层扰动的问题, 分为 4 个步骤: ①建立盾构隧道施工数值模型; ②根据数值计算模型尺寸以及随机分析次数, 借助编程平台, 利用协方差矩阵分解法<sup>[7]</sup>, 生成土体模量参数随机场; ③提取数值模型网格单元中心坐标。根据数值模型网格坐标与参数随机场单元坐标的就近原则, 识别单元位置, 实现独立生成参数随机场模型到数值模型的映射; ④开展盾构隧道施工数值计算, 记录并保存每次随机计算的地层沉降及水平变形等结果, 并开展随机性分析。

## 2 盾构隧道地层扰动的确定性分析

### 2.1 数值模型的建立

本文建立盾构隧道施工的二维数值计算模型, 开展盾构施工地层变形分析。数值计算模型如图 1, 其尺寸为 74 m×50 m(长×宽), 隧道埋深大致为 12 m,

盾构隧道半径为 3 m。除了地表外, 其它均施加法向约束。土体利用实体单元来模拟, 管片利用 shell 单元来模拟, 表 1 给出了相关材料参数。

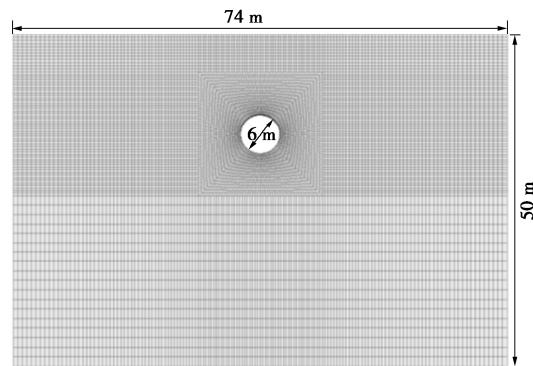


图 1 数值计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of numerical model

表 1 土体及管片物理力学参数

Table 1 Parameters of soils and segments

材料	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ MPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	泊松比
土体	1800	24.0	20	13.0	0.35
管片	2450	24.44×10 <sup>3</sup>	—	—	0.20

### 2.2 地层变形扰动分析

对盾构隧道地层变形扰动规律展开分析。图 2 给出了地层位移分析剖面位置示意图, 其中地表、地层剖面 1、地层剖面 2 和地层剖面 3 为水平地层剖面, 地层剖面 a~地层剖面 i 是竖向地层剖面, 本文对这些深部地层的位移变形展开分析。

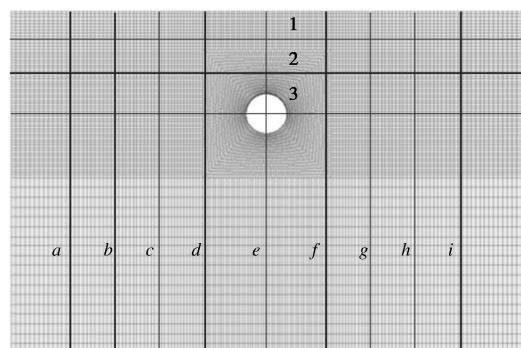


图 2 地层位移分析剖面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of analysis section for stratum displacement

分别对水平地层剖面的竖向沉降规律和竖向地层的水平变形规律展开分析。图 3(a), (b) 分别给出水平地层剖面和竖向地层剖面的位移变形情况(考虑到地层剖面 3 和 e 穿越隧道, 故不单独列出)。可以看出, 水平向地层剖面沉降规律均呈现典型的 Peck 曲线规律; 竖向地层剖面的位移变形沿着隧道中央呈对称的分布, 其中靠近隧道的地层表现为水平变形更大(如

*d* 和 *f*), 远离隧道的地层表现为水平变形稍小 (如 *a* 和 *i*), 这说明了隧道开挖引起周围应力释放, 这种应力释放随着远离开挖区域逐渐减弱。

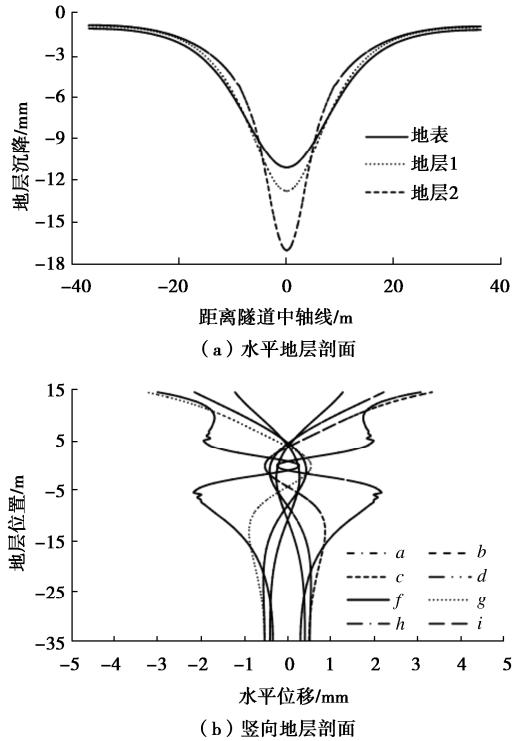


图 3 地层剖面变形曲线

Fig. 3 Deformation curves of stratum profile

### 3 地层扰动的定量化评价方法

#### 3.1 水平地层剖面变形扰动的评价方法

基于最小二乘法, 利用 Peck 公式对水平地层沉降变形曲线进行回归分析<sup>[8]</sup>, 并从拟合优度出发提出水平地层沉降的扰动评价方法。图 4 分别给出了地表和地层 1 的地层沉降曲线及其回归结果对比情况; 随着地层埋深的增加,  $R^2$  逐渐减小, 这说明 Peck 公式更适用于地表等浅部地层的沉降变形; 另一方面从经验上看, 距离隧道施工区域越近, 地层扰动越大, 因此可以将基于 Peck 公式回归分析的拟合优度值作为水平地层受到盾构施工扰动的评价指标, 即水平地层的  $R^2$  越大, 受到施工扰动的影响最小, 如地表的  $R^2$  最大, 在监测的水平地层中受到施工扰动的影响最小。

#### 3.2 坚向地层剖面变形扰动的评价方法

坚向地层剖面变形曲线形式多样, 其曲线形式可以利用多项式进行描述, 因此利用多项式对坚向地层剖面展开回归分析, 继而提出以多项式拟合优度作为考量标准的盾构隧道坚向地层扰动度评价方法。考虑到隧道两侧剖面水平变形曲线呈现完全对称的分布规律, 因此本文仅对 *a*, *b*, *c*, *d* 这 4 个坚向地层水平变

形曲线展开回归分析。

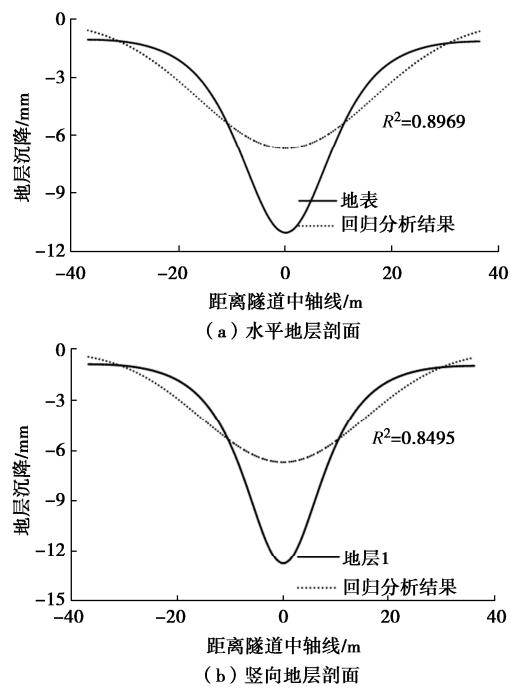
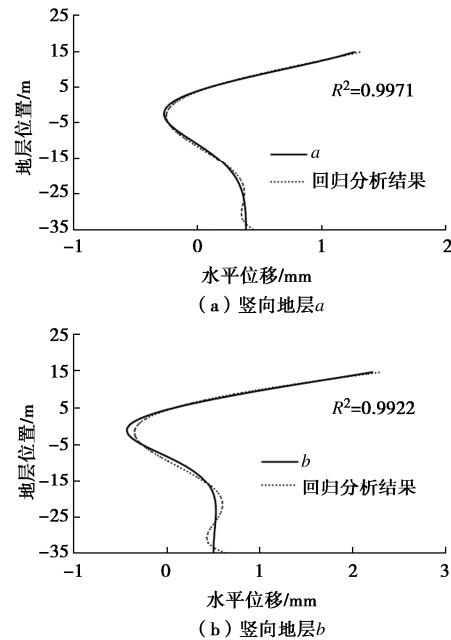


图 4 水平地层沉降曲线及其回归结果对比

Fig. 4 Comparison of settlement curves and regression results of horizontal strata

为了进行对比, 本文首先对这 4 个地层水平变形曲线利用五次多项式展开拟合分析, 图 5 给出了坚向地层水平变形曲线及其回归结果的对比情况。可以看出, 利用五次多项式拟合分析时, 坚向地层的回归效果均较好。此外, 本文再分别利用三次、四次、六次和七次多项式对坚向地层剖面变形曲线展开回归分析, 并将拟合优度计算结果列于表 2 中。



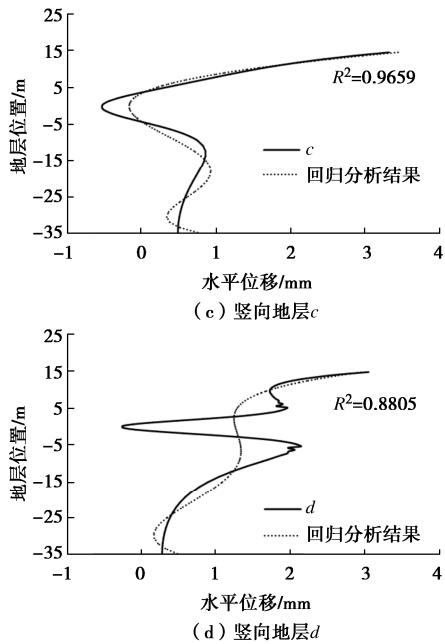


图 5 竖向地层水平变形曲线及其回归结果对比

Fig. 5 Comparison of horizontal deformation curves and regression results of vertical strata

表 2 地层竖向变形曲线回归分析

Table 2 Regression analysis of vertical deformation curves

多项式 回归分析	竖向 地层 a	竖向 地层 b	竖向 地层 c	竖向 地层 d
三次多项式	0.9801	0.9577	0.8904	0.8520
四次多项式	0.9812	0.9778	0.9556	0.8805
五次多项式	0.9971	0.9922	0.9659	0.8805
六次多项式	0.9998	0.9989	0.9860	0.8951
七次多项式	0.9999	0.9990	0.9862	0.8951

图 6 给出了盾构隧道施工周围竖向地层变形曲线多项式拟合优度对比, 可以看出越远离隧道的竖向地层, 其水平变形曲线可以利用较低次数的多项式拟合即可; 而越靠近隧道的竖向地层, 其水平变形曲线则需要利用较高次数的多项式拟合, 这也进一步地说明了隧道开挖对周围地层的影响较大, 并随着远离隧道其影响逐渐减弱, 这个结论也与前述保持一致, 这也进一步说明了利用多项式拟合优度来描述盾构隧道施工地层扰动度的合理性和适用性。同时注意到, 地层 a 和地层 b 利用不同多项式开展回归分析时的拟合优度很接近, 这说明远离盾构隧道施工的一定距离后, 地层受到施工的扰动程度趋于稳定。

#### 4 盾构隧道地层扰动的随机性分析

基于随机场理论, 结合 Monte-Carlo 策略, 对盾构隧道施工开展 500 次随机性计算, 研究参数空间变异性条件下的盾构隧道施工地层变形及其扰动规律。其中, 参照文献[9, 10],  $\theta_z=2 \text{ m}$ ,  $\theta_x=40 \text{ m}$ 。另外取 COV=0.3。

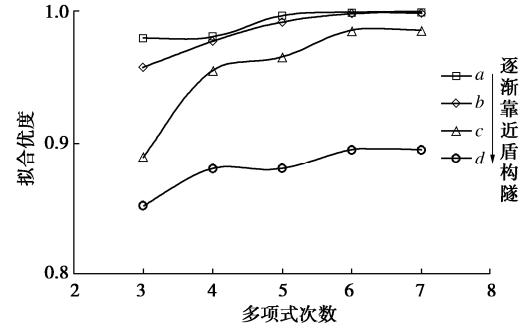


图 6 竖向地层变形曲线多项式拟合优度对比

Fig. 6 Comparison of goodnesses of fit polynomials of deformation curves of vertical strata

#### 4.1 水平地层剖面变形扰动的随机性分析

以地表沉降作为研究对象, 图 7 分别给出了 500 次 Monte-Carlo 计算所得的地表沉降的结果, 其中浅色曲线是随机性计算结果, 深色曲线是确定性计算结果。可以看出, 随机性计算结果基本围绕确定性结果随机波动, 沉降曲线均呈现一定的离散型特征。

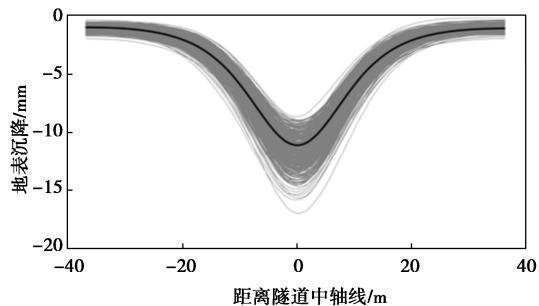


图 7 随机计算结果与确定性计算结果对比 (地表沉降)

Fig. 7 Comparison between random and deterministic results (surface settlement)

本文从地层扰动的角度出发, 对空间变异性条件下的盾构隧道施工地层变形展开分析。利用 Peck 公式对每次随机计算得到的水平地层沉降曲线开展回归分析, 以回归分析的拟合度作为地层扰动的评价指标, 可以得到如图 8 所示的水平地层沉降 Peck 公式拟合优度对比结果。总体来看, 拟合优度大小排列: 地表沉降 > 地层剖面 1 > 地层剖面 2, 这些都与确定性计算结果相一致。从地层扰动的角度来看, 每次计算得到的拟合优度不尽相同, 这说明土体模量空间变异性会对盾构隧道施工地层沉降扰动产生较大的影响。

#### 4.2 竖向地层剖面变形扰动的随机性分析

图 9 分别给出了竖向地层的水平变形随机计算的部分结果(以地层 c 和 g 为例), 其中浅色曲线是随机性计算结果, 深色曲线是确定性计算结果。可以看出, 竖向地层水平变形随机计算结果基本上在确定性计算结果周围波动, 这一点与水平地层沉降规律保持一致。

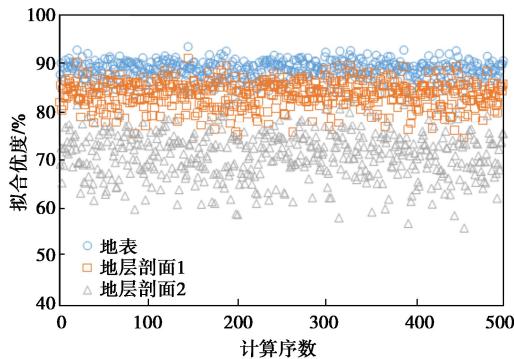


图 8 水平地层沉降 Peck 公式拟合优度对比结果

Fig. 8 Comparison of goodnesses of fit of Peck formula for settlement of horizontal stratum

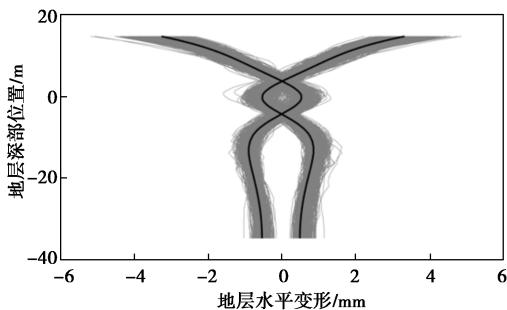


图 9 坚向地层的水平变形随机计算结果（地层 c 和 g）

从地层扰动的角度出发, 对深部坚向地层水平变形随机计算结果展开分析。利用五次多项式分别对坚向地层剖面 *a*, *b*, *c*, *d* 开展回归分析, 以回归分析的拟合度作为盾构施工地层扰动的评价指标。图 10 给出了每次随机计算得出的坚向地层剖面 *a*, *b*, *c*, *d* 水平变形拟合优度对比结果。可以看出, 地层剖面 *a* 和地层剖面 *b* 的拟合优度非常接近, 说明两者受到盾构隧道施工扰动程度接近, 这一点与确定性计算结果相吻合; 地层剖面 *c* 的拟合优度整体上要比地层剖面 *a* 和地层剖面 *b* 的拟合优度要小, 但是整体上比地层剖面 *d* 的拟合优度要大些, 这说明在整体上, 受到盾构隧道施工地层扰动程度排序为地层剖面 *d* > 地层剖面 *c* > 地层剖面 *a* (地层剖面 *b*), 也就是说距离隧道开挖区域越近的地层, 受到盾构施工扰动越大。

值得注意的是, 地层剖面 *d* 拟合优度的离散程度明显大于其他地层, 这说明该地层剖面受到盾构施工扰动的影响最为敏感。以第 315 次和第 499 次随机计算结果展开分析, 地层剖面 *d* 在两次随机计算中的拟合优度分别为 0.6946, 0.9721, 可见不同随机计算结果下有较大的地层扰动差异。图 11 分别给出了数值模型在第 315 次和第 499 次计算时的模量参数分布情况, 可以看出第 315 次计算时隧道偏左上位置分布有大范

围的较小模量参数, 受到盾构施工扰动稍大些, 而第 499 次计算时隧道偏左上位置分布有大范围的较大模量参数, 受到盾构施工扰动较小些, 这说明了盾构施工地层扰动受到土体模量的影响(尤其是在隧道偏上处的模量更为显著), 模量较大时地层受到扰动程度会小些, 即模量较大时会对盾构施工地层扰动有一定的“抑制”作用。

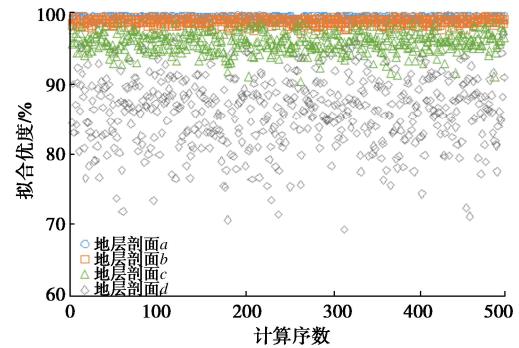
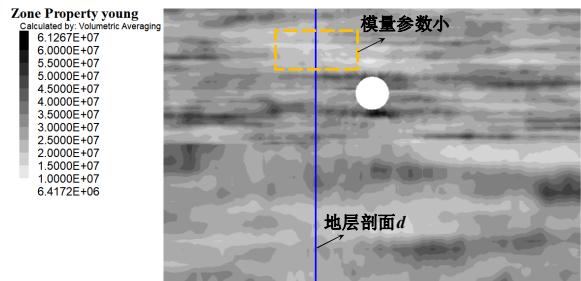
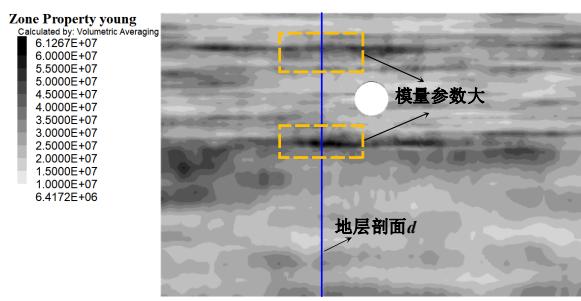


图 10 坚向地层剖面的水平变形拟合优度对比结果

Fig. 10 Comparison results for goodness of fit of horizontal deformation of vertical stratum profile



(a) 第 315 次随机计算



(b) 第 499 次随机计算

图 11 不同模拟时的模量参数分布情况

Fig. 11 Distribution of modulus parameters in different simulations

## 5 结 论

针对目前在土体参数空间变异性条件下的盾构隧道地层变形扰动研究方面的不足之处, 本文开展盾构施工对地层扰动规律影响研究的随机性分析, 并分别利用 Peck 公式和多项式描述水平地层沉降和坚

向地层水平变形规律, 并提出利用回归分析拟合优度作为评价地层扰动的依据, 继而研究土体参数空间变异性对盾构隧道地层扰动变形的影响规律, 主要得到 2 点结论。

(1) Peck 公式拟合优度可以较好地描述盾构施工引起水平地层沉降扰动程度; 多项式拟合优度可以较好地反映竖向地层水平变形受到盾构施工扰动的影响程度。

(2) 土体模量空间变异性会对盾构隧道施工地层扰动产生较大的影响, 模量较大时会对盾构施工地层扰动有一定的“抑制”作用, 但总体上越靠近盾构隧道, 地层受到扰动越大。

### 参考文献:

- [1] 彭沉彬, 郭郅威, 姜瑜, 等. 高压富水砂层超大直径盾构隧道下穿既有地铁影响分析和控制措施[J]. 铁道建筑, 2022, 62(2): 127-130. (PENG Chenbin, GUO Zhiwei, JIANG Yu, et al. Influence analysis and control measures of super-large diameter shield tunnel under high pressure and water-rich sand stratum underpass existing subway[J]. Railway Engineering, 2022, 62(2): 127-130. (in Chinese))
- [2] 赵宗智, 孙建平, 崔明, 等. 考虑盾构隧道轴线倾角的施工地表变形评价[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊 1): 46-53. (ZHAO Zongzhi, SUN Jianping, CUI Ming, et al. Evaluation of construction surface deformation considering axis inclination angle of shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S1): 46-53. (in Chinese))
- [3] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]// Proceeding of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City, 1969: 255-290.
- [4] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(11): 1227-1246.
- [5] 易顺, 岳克栋, 陈健, 等. 考虑抗剪强度空间变异性的双层黏土边坡风险分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 2): 112-116. (YI Shun, YUE Kedong, CHEN Jian, et al. Risk analysis of double-layer clay slope considering spatial variability of shear strength[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 112-116. (in Chinese))
- [6] 程红战, 陈健, 李健斌, 等. 基于随机场理论的盾构隧道地表变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 2): 4256-4264. (CHENG Hongzhan, CHEN Jian, LI Jianbin, et al. Surface deformation analysis of shield tunnel based on random field theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 4256-4264. (in Chinese))
- [7] DAVIS M W. Production of conditional simulations via the LU triangular decomposition of the covariance matrix[J]. Mathematical Geology, 1987, 19(2): 91-98.
- [8] 王润钰, 易顺, 黄珏皓. 基于最小二乘法的隧道地表沉降拟合研究[J]. 科技和产业, 2022, 22(4): 389-393. (WANG Runyu, YI Shun, HUANG Juehao. Study on surface settlement induced by tunnel based on least square method[J]. Science Technology and Industry, 2022, 22(4): 389-393. (in Chinese))
- [9] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 612-624.
- [10] EL-RAMLY H, MORGENSTERN N R, CRUDEN D M. Probabilistic stability analysis of a tailings dyke on presheared clay shale[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(1): 192-208.

(编校: 胡海霞)