

DOI: 10.11779/CJGE202201013

考虑参数空间变异性的隧道结构变形分析简化方法

张晋彰^{1,2}, 黄宏伟^{*1}, 张东明¹, 方国光², 唐 冲²

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 新加坡国立大学土木及环境工程系, 新加坡 117576)

摘要: 土体参数具有空间变异性是被广泛接受的, 而这种变异性对岩土中结构性能有着重要的影响。随机场理论是一种常用的用来模拟土体参数空间变异性的一种方法。基于随机场理论, 以土体弹性模量的空间变异性为切入点, 采用蒙特卡罗方法和有限差分模拟计算相结合的方法, 开展隧道水平收敛的随机分析。在大量蒙特卡罗计算基础上, 提出了3种简单易用的简化考虑空间变异性的方法, 分别为参数折减法、放大系数法和可靠度分项系数标定法。经过对计算结果的统计分析, 给出了在土体弹性模量的水平、竖向相关距离及其变异系数的不同组合下3种简化考虑方法的建议值。提出的简化方法可以为空间变异性研究应用到实际工程提供一定的参考。

关键词: 隧道; 空间变异性; 随机场; 相关距离; 简化方法

中图分类号: TU43; U45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)01-0134-10

作者简介: 张晋彰(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事地层变异和参数空间变异对隧道结构变形的影响方面的研究工作。E-mail: zhangjz@tongji.edu.cn。

Simplified methods for deformation analysis of tunnel structures considering spatial variability of soil properties

ZHANG Jin-zhang^{1,2}, HUANG Hong-wei¹, ZHANG Dong-ming¹, PHOON Kok-kwang², TANG Chong²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, 117576, Singapore)

Abstract: The spatial variability of soil properties is widely accepted, and the response of a geo-structure can be significantly affected by the spatial variability of the surrounding soil mass. The random field theory is a popularly used method to simulate the spatial variability of soil properties. The stochastic analysis of horizontal convergence of tunnel is carried out using the random field difference method considering the spatial variability of Young's modulus. The random field difference method is combined with the Monte Carlo method and finite difference simulation based on random field theory. A large number of Monte Carlo simulations are adopted in the proposed random field difference method. Meanwhile, three simple and easy-to-use methods for the spatial variability of soil are proposed: reduction factor method, amplification factor method and reliability partial factor calibration method. Based on the statistical analysis of the calculated results, the suggested values of three simplified analysis methods under different combinations of the horizontal scale of fluctuation, the vertical scale of fluctuation and the coefficient of variation are given. This study may provide references for the application of spatial variability research to practical geotechnical engineering.

Key words: tunnel; spatial variability; random field; scale of fluctuation; simplified method

0 引言

随着城市化的进一步发展, 城市隧道建设如火如荼, 隧道的变形对于隧道的正常运营至关重要。隧道水平收敛 ΔD_h 作为一个重要的评价指标, 常常被用来衡量隧道的运营安全状况^[1]。目前针对隧道开挖造成周边环境的影响及隧道自身形变已经展开了广泛的研究, 然而这些研究大多集中在均质土体中, 在均质土中得到的隧道变形只是一个平均响应, 确定性分析结果可能无法反映真正的破坏机制^[2]。岩土体的形成过

程有着复杂的历史沉积作用, 因此岩土参数具有空间变异性特征^[3-5]。同时, 土体参数空间变异性对岩土体中结构性能有着不可忽略的影响^[6]。因此, 研究土体参数空间变异性对隧道结构变形响应是很有必要的。

为了更好地反映岩土体参数的空间变异性, Vanmarcke^[7]通过引入相关距离和自相关函数来构建

基金项目: 国家自然科学基金项目(52130805, 52022070)

收稿日期: 2021-06-30

*通信作者(E-mail: huanghw@tongji.edu.cn)

了描述岩土体参数空间变异性的随机场模型。近年来, 国内外学者利用随机场方法对空间变异性对岩土结构的影响进行了大量的研究^[6]。随机有限元 (random finite element method, RFEM) 和随机有限差分方法 (random finite difference method, RFDM) 是两种常用的随机场分析方法。使用随机场方法进行的岩土工程问题分析主要集中在边坡的稳定性^[8-9]、地基沉降^[10-11]、基坑开挖^[6, 12]和隧道^[13-14]等领域。对于空间变异性土体中隧道结构的变形而言, 弹性模量和泊松比是两个重要的影响参数。而泊松比的变异性相对较小, 弹性模量的变异性相对较大^[2], 因此更多的学者在研究弹性模量的变异性对隧道结构变形的影响。Huang 等^[2]研究了软土地区土体弹性模量的空间变异性对隧道收敛的影响, 表明忽略弹性模量的空间变异性会低估隧道的收敛变形; 程红战等^[15]利用随机场方法考虑土体参数空间变异性, 构建了隧道下穿建筑物安全性概率评价方法; 王长虹等^[16]分析了岩土体参数空间变异性对盾构隧道开挖下地表沉降的影响。

尽管上述的研究取得了一定的成果, 然而复杂的理论及多次的蒙特卡罗计算对工程师是极不友好的, 这也是空间变异性研究在岩土工程中合理应用的一大障碍。在岩土工程设计中, 工程师更倾向于采用简单的、均质化的土体参数特征值进行隧道变形计算和设计。然而, 如何快速合理地确定土体参数特征值还没有得到很好的研究, 是一个亟待解决的问题。

本文旨在提出合理简化的考虑土体弹性模量参数空间变异性对隧道变形影响的方法, 以便在岩土工程中更好地考虑岩土体参数的空间变异性。通过建立合理有效的隧道开挖数值模拟模型, 较为全面地分析了土体弹性模量的竖向、水平相关距离以及变异系数对隧道水平收敛的影响。本文提出了参数折减法、放大系数法和可靠度分项系数标定法 3 种简化考虑土体参数空间变异性的方法。并在大量随机有限差分计算的基础上, 给出了 3 种简化方法在不同空间变异性条件下对应的参考值。

1 随机有限差分分析

1.1 随机有限差分分析

如上所述, 土体的弹性模量具有显著的空间变异性且对隧道收敛有着重要影响, 因此本文主要对土体的弹性模量进行随机场模拟。根据 Huang 等^[2]建议, 在本文中弹性模量的均值 μ_E 设为 20 MPa, 变异系数 (coefficient of variation, COV) 取 0.1, 0.3 和 0.5, 弹性模量 E 假设服从对数正态分布, 即 $\ln E$ 为正态分布。

$\ln E$ 的标准差以及均值分别为

$$\zeta_{\ln E} = \sqrt{\ln(1 + \text{COV}_E^2)} \quad , \quad (1)$$

$$\lambda_{\ln E} = \ln \mu_E - \frac{1}{2} \zeta_{\ln E}^2 \quad . \quad (2)$$

波动范围 (scale of fluctuation, SOF) 又称相关距离 (correlation distance, CD) 是岩土参数随机场模型的一个重要概念。空间内两点间的土体参数之间的相关性随着两点之间距离的增大而逐渐减小, 当间距大于某临界距离后, 相关性可以忽略不计, 该临界距离称为相关距离。本文中, 自相关模型采用可分离的指数组自相关模型:

$$\rho(\tau_x, \tau_y) = \exp \left[-2 \left(\frac{|\tau_x|}{\delta_h} + \frac{|\tau_y|}{\delta_v} \right) \right] \quad . \quad (3)$$

式中 δ_h 和 δ_v 分别为水平和竖向相关距离; τ_x 和 τ_y 分别为空间中两点水平坐标差和竖向坐标差; $\rho(\tau_x, \tau_y)$ 为两点的相关系数。

为了更好地适用随机有限元或随机有限差分模型的计算, 随机场需要先进行离散化处理。本文随机场采用 Karhunen – Loève (K-L) 展开方法进行离散^[17], K-L 展开法是一种常用的随机场离散方法, 同时随机场精度高, 对各向异性适应性好。土体数值模型参数赋值采用中心法, 即每个单元的参数值等于随机场变量在该单元的几何中心点的取值^[18]。

1.2 有限差分数值模型

本文采用的数值模拟模型如图 1 所示, 采用有限差分程序 FLAC^{3D} 软件进行模拟。如图 1 (a) 所示, 此数值模型含有 5312 单元和 10842 个节点, 为避免边界对计算变形的影响, 此模型的长为 9.68D, 宽度设为 7.27D (D 为上海隧道外径)。本文中考虑的盾构隧道外径 $D = 6.2$ m, 衬砌厚度 $t = 0.35$ m, 覆盖深度 $H = 16$ m, 这样的参数设置在上海地铁隧道中是常见的^[2]。如图 1 (b) 所示, 每环衬砌由 6 块混凝土管片组成, 分别为一块封底块 D、两块标准块 B、两块邻接块 L 以及一块封顶块 F 组成。

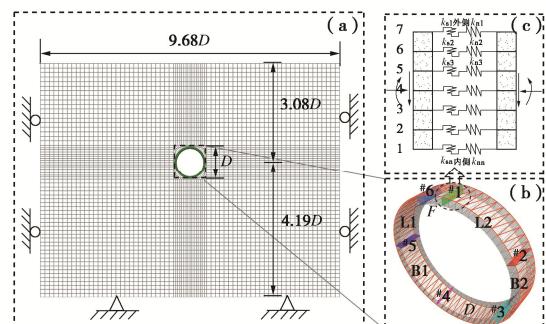


图 1 隧道开挖有限差分模型

Fig. 1 Finite difference model of tunnel

为了更好地对隧道接头进行模拟, 本文采用如图

1 (c) 所示的接头力学模型进行模拟。该接头力学模型在 FLAC^{3D} 中基于接触面单元来实现，接触面单元依附在接头两侧的管片单元上，每一个接触面节点均对应一个上述接头力学模型中的组合弹簧^[19]。本文中将纵缝接头离散具有为 7 个节点的接触面单元。根据节点的径向坐标和接头构件的位置，螺栓由第 2、3 层接触面节点模拟；传力衬垫由第 6 层接触面节点模拟；弹性密封垫由第 7 层节点模拟；剩余节点用以模拟管片混凝土间的接触情况。每一行接触面单元节点可视为一个弹簧，分配不同的法向刚度 k_n 和剪切刚度 k_s 来表示不同的节点。接触面节点弹簧法向参数设置如表 1 所示，此模型在前人的研究中已得到了验证^[19]，可以很好地反映隧道接头的力学响应。

表 1 数值模型中接触面参数表

Table 1 Parameters of interface in numerical model

对应节点层	抗拉刚度	抗压刚度	剪切刚度
	$/(GPa \cdot m^{-1})$	$/(GPa \cdot m^{-1})$	$(GPa \cdot m^{-1})$
2, 3	5.40	0	0
6, 7	5.40	120	10000
1, 4, 5	0.08	0	0

1.3 工况设置

本文中模拟隧道的衬砌材料的重度为 25 kN/m^3 ，弹性模量为 34.5 GPa ，泊松比为 0.2。土体的重度 γ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、泊松比 ν 和弹性模量 E 分别为 18 kN/m^3 , 25 kPa , 15° , 0.33 和 20 MPa 。本文模拟中，除弹性模量之外的其它参数在随机有限差分分析中保持不变。表征土体参数空间变异性 3 个重要参数分别为竖向相关距离 δ_v 、水平相关距离 δ_h 和变异系数 COV。为了更全面地分析弹性模量空间变异性参数对隧道收敛的影响，本文进行了如表 2 所示的工况设计。COV 分 3 个级别，分别为 0.1, 0.3, 0.5，即表 2 中 12 个工况分别和 3 个不同的 COV 值组合一次。工况 ANI 1~6 水平相关距离均为 60 m ，竖向相关距离从 1.5 m 到 60 m 变化，反映竖向相关距离的影响^[2]；各向异性系数 δ_h/δ_v 表示土体的各向异性情况。工况 ANI 7~12 和 ANI 1 竖向相关距离均为 1.5 m ，水平相关距离从 1.5 m 到 90 m 变化，同时各向异性系数与工况 ANI 1~6 保持一致，反映了水平相关距离的影响。

在概率分析中，首先要确定蒙特卡罗模拟的运行次数，以便产生稳定的隧道收敛变形的概率特征值。如果蒙特卡洛模拟次数过少，则概率较小的事件可能不会发生。相反，如果运行次数过大，过大的计算量也是不可接受的。图 2 展示了隧道收敛的均值和标准差（standard deviation, STD）随蒙特卡罗模拟次数的变化关系。可以看出，当模拟次数超过 300 次时，隧道收敛的均值和标准差都趋于稳定。因此，本文中蒙

特卡罗模拟次数可设定为 300 次。

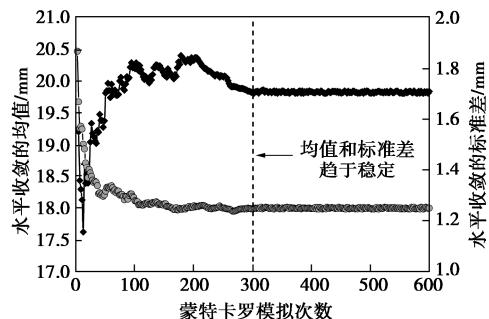


图 2 隧道水平收敛的收敛趋势统计

Fig. 2 Converging trend of ΔD_h statistics

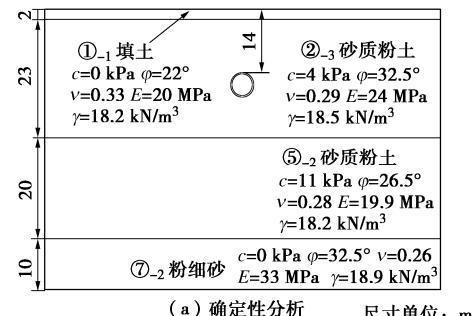
表 2 模拟工况设置

Table 2 Case design of random field

工况	δ_h/m	δ_v/m	δ_h/δ_v	δ_h/D	δ_v/D
ANI-1	60	1.5	40.00	9.68	0.24
ANI-2	60	3.1	19.35	9.68	0.50
ANI-3	60	6.2	9.68	9.68	1.00
ANI-4	60	15	4.00	9.68	2.42
ANI-5	60	30	2.00	9.68	4.84
ANI-6	60	60	1.00	9.68	9.68
ANI-7	90	1.5	60.00	14.52	0.24
ANI-8	29.03	1.5	19.35	4.68	0.24
ANI-9	14.52	1.5	9.68	2.34	0.24
ANI-10	6	1.5	4.00	0.97	0.24
ANI-11	3	1.5	2.00	0.48	0.24
ANI-12	1.5	1.5	1.00	0.24	0.24

2 模型验证及确定性结果分析

为了验证本文模型的有效性，本节将基于实际工程案例进行对比分析。以上海地铁 10 号线海伦路站到四川北路站区间部分隧道为原型建立有限差分模型，隧道埋深和各土层参数如图 3 (a) 所示。衬砌材料属性和 1.3 节介绍的参数保持一致。图 3 (b) 表示的是随机有限差分模拟中的一次实现。在不确定分析中，由于隧道所在粉质砂土层②₃ 较厚，只考虑该层的空间变异性，其他土层简化成均质土层^[2]。根据 Gong 等^[20]的研究，影响隧道结构变形的土体主要位于隧道周边 1~2 倍隧道直径，图中隧道所在土层的上下边线距离隧道接近或大于 1 倍隧道直径，因此该简化合理。本次验证模型有效性过程中，弹性模量的水平和竖向相关距离分别为 18, 1.5 m，变异系数 COV 根据岩土工程勘查报告取 0.26^[2]。



(a) 确定性分析 尺寸单位：m

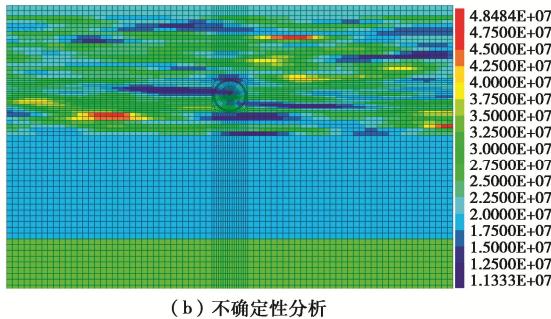


图 3 场地分层土弹性模量云图
Fig. 3 E for site-specific case

图 4 统计了本文不确定分析模拟得到的隧道水平收敛 ΔD_h 结果和实际监测以及文献计算结果的对比分析。由图 4 可知, 实际监测的 ΔD_h 均值为 10.70 mm, 本文确定性结果为 10.22 mm, 结果基本保持一致。本文确定性结果 (10.22 mm) 与 Huang 等^[2]的分析结果 (10.00 mm) 相差约 2%, 差异较小。本文确定性计算结果与文献及实测数据的误差均在 5% 以内, 良好的一致性验证了所提出的有限差分模型在确定性分析中的可行性。

如图 4 所示, 水平收敛实测数据由灰色直方表示, 实测数据的 COV = 0.76。本文计算的均值为 11.46 mm 与实测数据的均值 11.70 mm 比较接近。本文不确定分析 300 次计算结果的 COV 为 0.36, 比实测数据的 0.76 相对较小, 这是因为在数值模拟中无法考虑现场施工和测量过程的不确定性。此外, 借助 Mann-Whitney 检验将本文计算分布与实测数据分布与 Huang 等^[2]模拟结果进行了比对, 得到的假设两组数据差别无显著意义的可能性, 即概率 P 值分别为 0.121 和 0.094, P 值均大于 0.05, 表明样本分布可看作同一分布, 可信度为 95%, 这进一步证明了本文隧道随机有限差分模型的有效性和正确性。

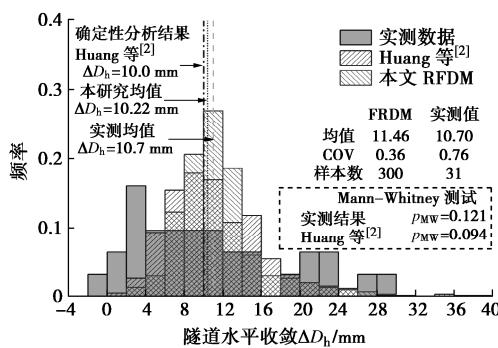


图 4 隧道收敛工程实测数据计算结果直方图对比

Fig. 4 Comparison of histogram of ΔD_h

3 空间变异简化考虑方法

岩土工程设计过程中, 上述如此复杂的不确定性

计算过程显然是不容易被工程师所接受的, 工程师更倾向于使用简单的均质化的参数特征。本文基于随机场理论, 在较全面地分析不同空间变异性参数 (δ_h , δ_v 和 COV) 的各种组合影响下隧道的变形规律之后, 提出了 3 种简单易用的简化考虑空间变异性的方法, 分别为参数折减法、放大系数法和可靠度分项系数标定法。

3.1 参数折减法

参数折减法即将变异性土体等效为均质的土层, 而这时土体弹性模量就相对应的有一个折减系数。在本文系统分析的基础上, 根据不同的水平、竖向相关距离组合下, 确定弹性模量的折减系数来简化的考虑土体的空间变异性。

本文首先建立了均质土体条件下弹性模量和隧道变形的相互关系。在弹性模量均质 20 MPa 的前后进行了从 2.5~130 MPa 共 22 组均质模型的计算, 工况的设置和计算结果如表 3 所示。

表 3 均质模型工况的设置和计算结果

Table 3 Case design and results of deterministic analysis

E/MPa	2.5	5	7.5	10	15	20
$\Delta D_h/\text{mm}$	86.18	52.82	38.49	30.43	21.75	17.24
E/MPa	25	30	35	40	45	50
$\Delta D_h/\text{mm}$	14.31	12.17	10.76	9.71	8.73	7.97
E/MPa	55	60	65	70	80	90
$\Delta D_h/\text{mm}$	7.31	6.76	6.25	5.80	5.09	4.49
E/MPa	100	110	120	130		
$\Delta D_h/\text{mm}$	4.03	3.63	3.29	3.01		

图 5 给出了弹性模量和隧道水平收敛的关系曲线, 由图 5 可知, 弹性模量和隧道水平收敛呈现非线性关系。随着弹性模量的增大, 隧道的水平收敛逐渐减少, 尤其在 20 MPa 之前, 隧道的水平收敛快速下降。采用乘幂函数拟合有着很好的拟合效果, 拟合函数的相关系数 R^2 达到 0.9965, 两者的拟合关系表达式为

$$\Delta D_h = 213.61 \times E^{-0.853} \quad (4)$$

通过式 (4) 可以根据水平收敛快速得出相对应的等效弹性模量 E_{eff} 。

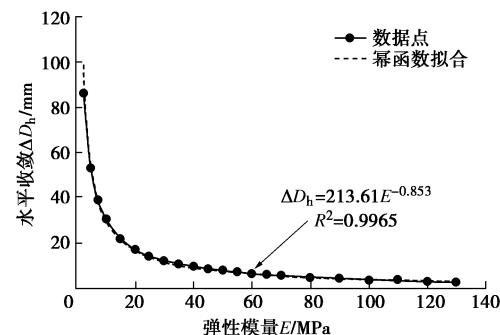


图 5 弹性模量和隧道水平收敛关系

Fig. 5 Relationship between Young's modulus and ΔD_h

本文将等效弹性模量与确定性弹性模量的比值定义为折减系数 α :

$$E_{\text{eff}} = \alpha E_{\text{de}} \quad (5)$$

一般情况下, 谨慎的估计 j 设计值要保证 95% 情况下安全^[21], 对于一些重要的结构, 可以将其设置为 99%。在本节中, 将通过大量计算结果, 统计分析各种不确定分析情况下的 95% 和 99% 置信区间上限, 这里没有选用均值的原因在于均值并不能很好地反映不确定性结果, 均值只是不确定条件下的一个平均反映^[2]。在得到置信区间上限之后, 根据式(4)可以得到相对应的等效弹性模量, 进而根据式(5)可以得到此变异条件下相对应的弹性模量的折减系数, 结果如表 4、5 所示。

表 4 坚向相关距离变化下的弹性模量折减系数 ($\delta_h=60 \text{ m}$)

Table 4 Reduction factors of E with δ_h ($\delta_h=60 \text{ m}$)

置信区间	COV	坚向相关距离 δ_h/m					
		1.5	3.1	6.2	15	30	60
95%	0.1	0.88	0.86	0.85	0.83	0.79	0.80
	0.3	0.73	0.68	0.65	0.59	0.53	0.55
	0.5	0.60	0.55	0.54	0.42	0.36	0.34
99%	0.1	0.86	0.84	0.84	0.80	0.75	0.77
	0.3	0.69	0.62	0.55	0.52	0.48	0.46
	0.5	0.54	0.49	0.45	0.36	0.31	0.29

表 5 水平相关距离变化下的弹性模量折减系数 ($\delta_l=1.5 \text{ m}$)

Table 5 Reduction factors of E with δ_l ($\delta_l=1.5 \text{ m}$)

置信区间	COV	水平相关距离 δ_l/m					
		1.5	3	6	14.52	29.03	60
95%	0.1	0.91	0.89	0.89	0.88	0.87	0.88
	0.3	0.81	0.77	0.74	0.75	0.74	0.73
	0.5	0.72	0.68	0.62	0.59	0.58	0.60
99%	0.1	0.90	0.89	0.87	0.86	0.86	0.87
	0.3	0.79	0.72	0.66	0.72	0.70	0.69
	0.5	0.69	0.62	0.58	0.53	0.46	0.54

为了更加形象而细致地表示在不同水平和坚向相关距离组合下弹性模量的折减系数的取值, 根据现有折减系数的计算结果, 绘制了不同组合下的弹性模量的折减系数云图, 如图 6 所示。图 6(a), (c) 和 (e) 表示的是在 95% 置信区间下弹性模量 COV 分别为 0.1, 0.3, 0.5 的折减系数云图, 图 6(b), (d), (f) 为 99% 置信区间下的折减系数云图。由图 6 可知, 弹性模量 COV 对折减系数有显著的影响。COV 为 0.1 时, 折减系数最大约为 0.75; COV 为 0.3 和 0.5 时, 折减系数最大值分别为 0.5 和 0.3。相对于置信区间的影响而, COV 的影响要更大一点。同时, 本文得到的弹性模量的折减系数分布图对于实际工程有一定的借鉴作用, 可以方便工程师简化的考虑参数空间变异性的影响。

3.2 放大系数法

参数折减法是通过弹性模量的折减系数来考虑参数空间变异性的影响, 而放大系数法是通过对计算结

果(隧道的水平收敛值)进行不同程度的放大来达到简化考虑空间变异性效果。在以往相关的研究中可以看到, 考虑空间变异性的情况下, 计算结果的均值在一定程度比确定性结果要大^[2, 12], 本文提出的放大系数法可以很好地反映这个放大效应。因此, 本文在大量计算的基础上, 同样采用 95% 和 99% 置信区间上限作为评估指标, 对放大系数进行定义:

$$L_{\text{up}} = \beta L_{\text{de}} \quad , \quad (6)$$

式中, L_{up} 为隧道水平收敛计算得到的置信区间上限, L_{de} 为隧道收敛的确定性分析结果。两者的比值即为此不确定性条件下放大系数的取值, 在传统确定性设计基础上, 通过对计算结果进行不同程度的放大来实现对空间变性的简化考虑。

表 6, 7 分别给出了考虑坚向和水平相关距离变化下的隧道收敛放大系数。图 7 给出了不同空间变异性条件下放大系数分布图。图 7(a), (b) 是 COV 为 0.1 情况下选用 95% 和 99% 置信区间上限情况下得到的水平收敛放大系数。由图 7 可知, 放大系数最大取值只有 1.25 左右, 即在 COV 比较小的情况下, 隧道收敛的放大系数相对也较小, COV 对放大系数的结果有较大的影响。

表 6 坚向相关距离变化下的隧道收敛放大系数 ($\delta_h=60 \text{ m}$)

Table 6 Amplification factors of ΔD_h with δ_h ($\delta_h=60 \text{ m}$)

置信区间	COV	坚向相关距离 δ_h/m					
		1.5	3.1	6.2	15	30	60
95%	0.1	1.07	1.09	1.10	1.13	1.18	1.16
	0.3	1.26	1.34	1.38	1.52	1.64	1.59
	0.5	1.50	1.61	1.64	2.00	2.31	2.41
99%	0.1	1.09	1.11	1.12	1.17	1.23	1.20
	0.3	1.32	1.44	1.61	1.67	1.81	1.88
	0.5	1.64	1.76	1.89	2.30	2.65	2.77

表 7 水平相关距离变化下的隧道收敛放大系数 ($\delta_l=1.5 \text{ m}$)

Table 7 Amplification factor of ΔD_l with δ_l ($\delta_l=1.5 \text{ m}$)

置信区间	COV	水平相关距离 δ_l/m					
		1.5	3	6	14.52	29.03	60
95%	0.1	1.04	1.06	1.06	1.08	1.08	1.07
	0.3	1.15	1.20	1.24	1.23	1.25	1.26
	0.5	1.28	1.34	1.45	1.50	1.53	1.50
99%	0.1	1.05	1.07	1.08	1.09	1.09	1.09
	0.3	1.18	1.27	1.37	1.27	1.30	1.32
	0.5	1.32	1.44	1.54	1.64	1.85	1.64

图 7(c), (e) 为 COV 取 0.3 和 0.5 情况下选用 95% 置信区间上限得到的结果。由图可知, 随着 COV 的增大, 放大系数的取值也在明显增大。在 COV

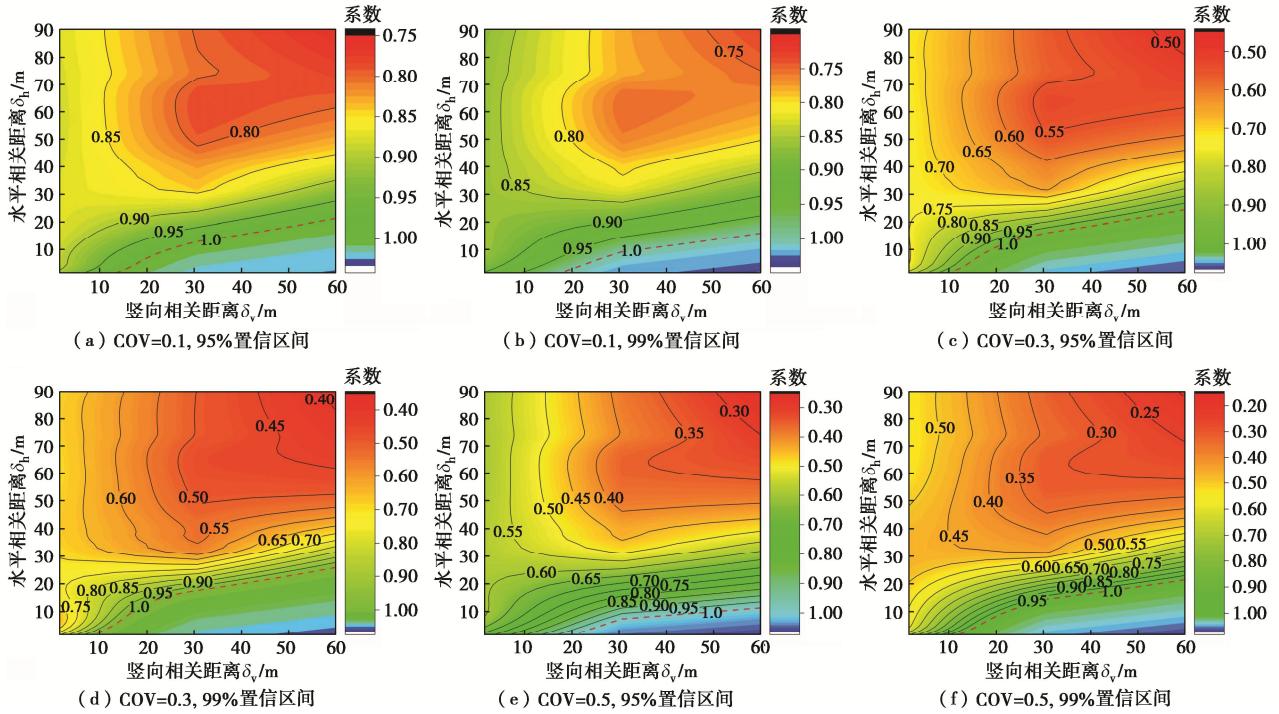


图 6 不同空间变异性条件下弹性模量折减系数分布图

Fig. 6 Reduction factors incorporating different randomness levels

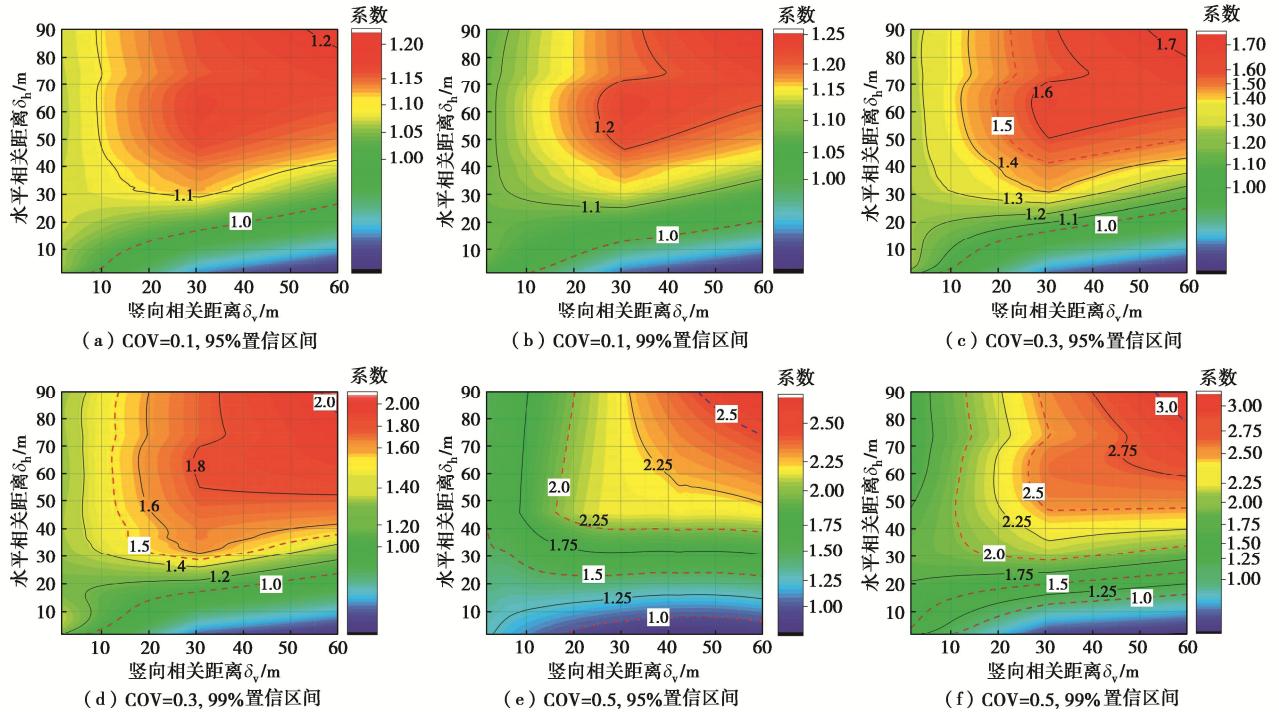


图 7 不同空间变异性条件下隧道收敛放大系数分布图

Fig. 7 Amplification factors incorporating different randomness levels

为 0.5 的情况下, 放大系数的取值达到了 2.5 左右。而由图 7 (f), 选用 99%置信区间上限, 放大系数的取值为 3.0 左右。总体而言, 随着水平和竖向相关距离的增大, 放大系数也有一定程度的增大。图 7 可在实际工程中考虑空间变异性做参考, 只需在原有设

计计算的基础上, 增加一个放大系数, 方便工程师使用。

3.3 可靠度分项系数标定法

为考虑岩土参数不确定性给工程安全带来的影响, 可靠度设计方法被引入到岩土工程中来, 根据经

典概率统计理论,采用可靠度指标或失效(超越)概率来反映工程结构的安全性。对于隧道水平收敛,假设影响隧道水平收敛的随机变量参数向量为 θ ,其可靠度极限状态方程可表示为

$$g(\theta)=s-[s] \quad , \quad (7)$$

式中, s 为隧道水平收敛,[s]为水平收敛容许值。

根据可靠度理论,考虑到满足隧道水平收敛控制的性能要求时,常关注水平收敛的超越概率,即极限状态方程对应的失效概率。失效概率与可靠度指标之间的关系为

$$p_f = p(g(\theta) < 0) = \phi(-\beta) \quad , \quad (8)$$

式中, p_f 为失效概率, β 为可靠度指标。

对于隧道水平收敛而言,采用极限状态方程的全概率设计方法,概念复杂计算繁多,不利于工程人员使用,故一般采用半概率的分项系数设计法。分项系数法将复杂的概率分析简化为对设计参数赋予一定的设计余量,其设计公式可表示为

$$\gamma s \leq s^* \quad , \quad (9)$$

式中, γ 为计算分项系数, s 为确定性分析的隧道水平收敛值, s^* 为特定可靠度指标下的设计验算点。通过式(9),可得到分项系数的计算公式:

$$\gamma = s^*/s \quad . \quad (10)$$

使用分项系数设计法,可以降低工程设计人员的理解难度,并减少设计计算的工作量。基于可靠度理论对分项系数进行标定,使之满足对应设计可靠度目标要求,可以更方便地应用于工程设计。

表8,9分别给出了是竖向及水平相关距离和COV变化情况下的可靠度分项系数标定值。由表8,9可知,最小的标定值为1.11,最大为5,可靠度指标越大,

COV越大,相对应的分项系数标定值也越大。同时,对比表8,9可以看到,水平相关距离变化过程中最小值和最大值分别为1.06和2.04。由此可见,竖向相关距离对隧道水平收敛可靠度分项系数标定值的影响显著大于水平相关距离的影响。

综合考虑可靠度指标,不同空间变异性条件下隧道收敛可靠度分项系数分布图如图8所示。图8(a)~(c)给出了COV为0.3情况下可靠度指标为2.7,3.2,3.7的分项系数标定结果,图8(d)~(f)为COV为0.5时的结果。COV为0.1时,可靠度分项系数介于1.0~1.4,变化相对较小,因此在图8中没有展示COV=0.1的结果。在图8基础上,工程师可以根据不同的可靠度指标及不同的变异性条件,选择适当的分项系数来简化考虑参数空间变异性的影响。

4 隧道埋深的影响

为了验证上述方法的适用性,本节将分别考虑隧道埋深(拱顶到地表距离)浅埋、中埋和深埋3种情况,对提出的3种简化方法进行考虑。根据Huang等^[22]研究,浅埋取隧道覆土厚度7 m,中埋为前面章节介绍的埋深16 m,深埋取25 m,相对应的3种埋深情况下与隧道直径的比值分别为1.13,2.58,4.03。同时上海隧道埋深范围在3~30 m^[23],3种埋深条件的选取也满足上海隧道埋深实际情况。

3种埋深确定性分析条件下,模型边界、土体参数、隧道参数都与前文介绍的参数保持一致,仅隧道埋深不同。在确定性分析结果中,隧道的埋深对收敛有着显著的影响,浅埋隧道水平收敛为13.60 mm,深埋为35.93 mm。由计算结果可求得,浅埋和深埋情况下隧道水平收敛结果的95%置信区间上限分别为17.14,

表8 坚向相关距离变化下可靠度分项系数标定 ($\delta_h=60$ m)

Table 8 Partial factors of reliability with δ_h ($\delta_h=60$ m)

坚向相关 距离/m	COV=0.1			COV=0.3			COV=0.5		
	$\beta = 2.7$	$\beta = 3.2$	$\beta = 3.7$	$\beta = 2.7$	$\beta = 3.2$	$\beta = 3.7$	$\beta = 2.7$	$\beta = 3.2$	$\beta = 3.7$
1.5	1.11	1.13	1.15	1.34	1.41	1.47	1.69	1.82	1.97
3.1	1.13	1.15	1.18	1.50	1.60	1.72	1.88	2.07	2.29
6.2	1.14	1.17	1.20	1.62	1.76	1.92	2.03	2.28	2.56
15	1.19	1.23	1.26	1.76	1.94	2.14	2.52	2.94	3.43
30	1.26	1.31	1.36	1.99	2.24	2.53	3.02	3.64	4.40
60	1.27	1.32	1.38	2.01	2.27	2.57	3.32	4.08	5.00

表9 水平相关距离变化下可靠度分项系数标定 ($\delta_h=1.5$ m)

Table 9 Partial factors of reliability with δ_h ($\delta_h=1.5$ m)

坚向相关 距离/m	COV=0.1			COV=0.3			COV=0.5		
	$\beta = 2.7$	$\beta = 3.2$	$\beta = 3.7$	$\beta = 2.7$	$\beta = 3.2$	$\beta = 3.7$	$\beta = 2.7$	$\beta = 3.2$	$\beta = 3.7$
1.5	1.06	1.07	1.08	1.19	1.22	1.26	1.37	1.43	1.49
3	1.08	1.09	1.10	1.28	1.33	1.38	1.45	1.53	1.61
6	1.09	1.11	1.12	1.34	1.40	1.46	1.59	1.70	1.82
14.5	1.10	1.12	1.14	1.35	1.41	1.48	1.70	1.85	2.00
29	1.11	1.13	1.15	1.34	1.41	1.47	1.73	1.88	2.04
60	1.11	1.13	1.15	1.34	1.41	1.47	1.69	1.82	1.97
90	1.11	1.13	1.15	1.36	1.42	1.50	1.67	1.81	1.95

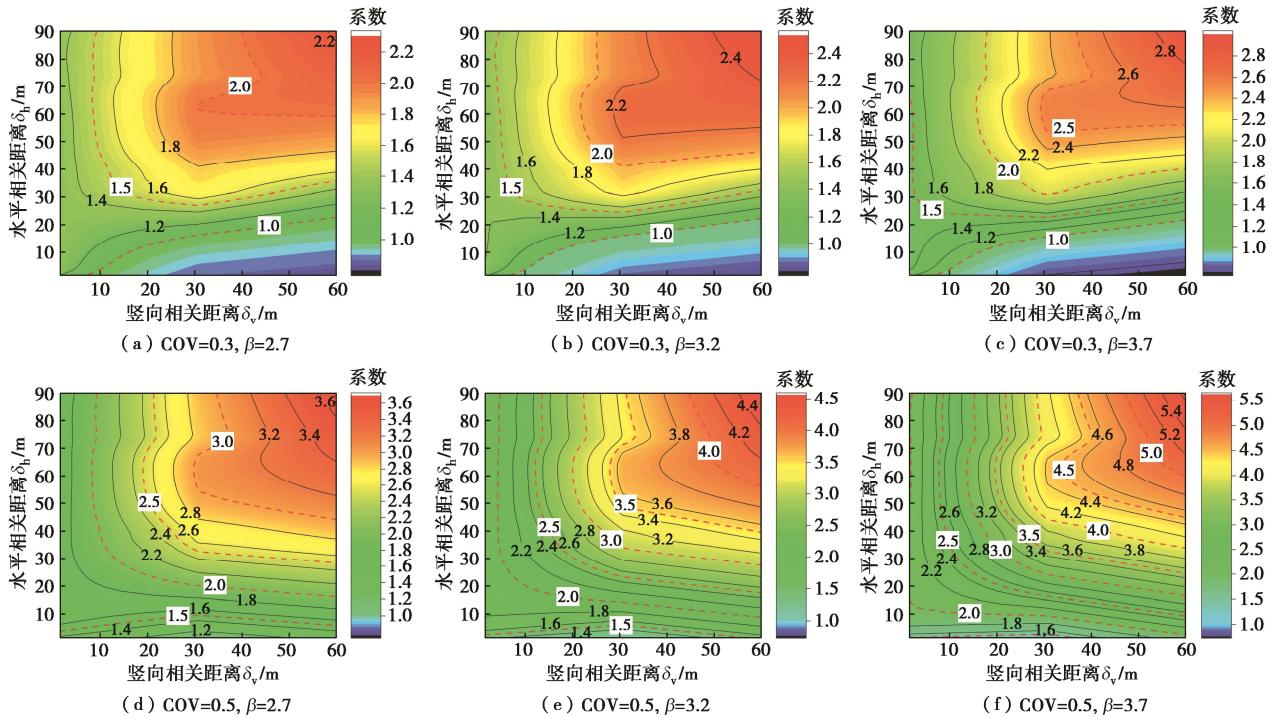


图8 不同空间变异性条件下隧道收敛可靠度分项系数分布图

Fig. 8 Values of partial factors of reliability incorporating different randomness levels

44.89 mm。

图9 (a) 为在浅埋、中埋和深埋条件下隧道收敛实际数据频率分布直方图, 深埋情况下隧道收敛值显著大于中埋、浅埋, 分布范围也更广。由于数据相对差值较大, 本文采用最大最小法对不同埋深条件下隧道收敛进行归一化比较, 如图9 (b) 所示, 可以看出归一化之后的3种埋深条件下的分布曲线差异不大, 埋深越大, 分布范围越大, 同时均值相对越小。从归一化的结果分析可知, 埋深对隧道收敛的分布类型影响不大。埋深对3种简化方法标定的具体结果分析如下。

对于参数折减法, 需要通过置信区间上限的隧道收敛结果反求对应的等效弹性模量值, 本节中采用前文介绍的方法对等效模量进行了标定, 浅埋和深埋对应的值分别为15.32, 15.41 MPa。相应的, 可以计算得到浅埋和深埋条件下对应的折减系数分别为0.76和0.77。中埋隧道的折减系数为0.73, 前深埋误差分别为4.10%和5.48%, 如表10所示。绝对误差值为0.03和0.04, 误差较小, 因此对于参数折减法, 不同埋深的影响相对较小。对于放大系数法, 如表10所示, 浅埋、中埋和深埋的放大系数分别为1.26, 1.26和1.25。浅埋和深埋结果相对于中埋隧道结果的误差为均小于1%, 误差可忽略。对于可靠度分项系数, 这里选用了和前文介绍一样的3个可靠度指标进行比较, 浅埋和

深埋情况下误差都在2%以内, 绝对误差最大也只有0.03, 误差可接受。综上所述, 可认为隧道埋深对本文提出的3种简化考虑空间变异性方法影响较小, 本文得到的结果对不同隧道埋深有一定的适用性。

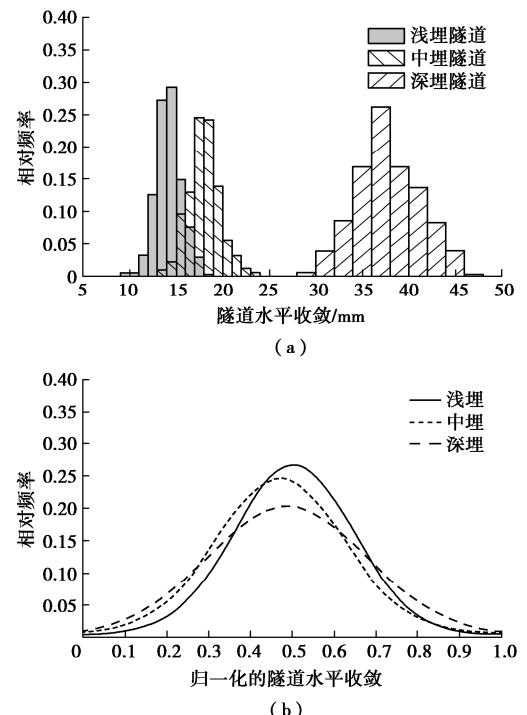


图9 不同埋深对隧道收敛的影响

Fig. 9 Effects of tunnel depth on horizontal convergence

表 10 不同埋深下 3 种方法结果对比($\delta_h=60$ m, $\delta_d=1.5$ m)Table 10 Comparison of results of three methods at different depths ($\delta_h=60$ m, $\delta_d=1.5$ m)

置信区间	方法	浅埋	中埋	深埋	浅埋误差/%	深埋误差/%
	参数折减法	0.76	0.73	0.77	4.10	5.48
	放大系数法	1.26	1.26	1.25	0	0.79
95%	可靠度分项系数法 $\beta=2.7$	1.36	1.34	1.33	1.49	0.75
	可靠度分项系数法 $\beta=3.2$	1.43	1.41	1.40	1.42	0.71
	可靠度分项系数法 $\beta=3.7$	1.50	1.47	1.46	2.04	0.68

5 结 论

本文以土体弹性模量空间变异性对隧道的影响为切入点, 利用随机有限差分分析方法对隧道水平收敛进行了随机分析, 同时提出了 3 种简化考虑参数空间变异性方法, 分别为参数折减法、放大系数法和可靠度分项系数标定法。在大量计算的基础上, 对 3 种方法下不同变异性条件的系数进行了标定, 以方便工程应用, 得到以下 4 点结论。

(1) 土体弹性模量的空间变异性对隧道收敛有着重要的影响, COV 的影响相对于相关距离的影响要大。使用 95% 或 99% 置信区间上限作为衡量此空间变异性条件下对隧道影响大小的指标, 相较于均值可以较好的反映隧道收敛的分布情况。

(2) 参数折减法即将变异性土体等效为均质的土层, 确定隧道收敛和弹性模量的关系, 统计各变异性条件下置信区间上限, 反求等效弹性模量值, 等效弹性模量与确定性条件下弹性模量值的比值即为折减系数。COV 为 0.1, 0.3 和 0.5 情况下, 折减系数最小可取到 0.75, 0.4 和 0.2。

(3) 放大系数法是通过对确定性分析结果进行不同程度的放大来达到简化考虑空间变异性效果。置信区间上限结果与确定性分析的隧道收敛值的比值作为放大系数。COV 为 0.5 时, 最大的放大系数取值约为 3.0。

(4) 可靠度分项系数标定法通过对各变异性条件下的计算结果进行统计分析得到不同可靠度指标下的隧道收敛特征值, 特征值与确定性结果的比值即为分项系数标定值。在 COV 为 0.5, 可靠度指标 3.7 的情况下, 分项系数标定值最大为 5.5 左右。

本文 3 种简化方法的标定值是通过计算隧道收敛得到的, 因此仅适用于变异地层中的隧道收敛问题。但简化方法的概念是可以适用于其他岩土工程的, 只需要对相应问题进行对应标定即可。

参考文献:

- [1] HUANG H W, SHAO H, ZHANG D M, et al. Deformational responses of operated shield tunnel to extreme surcharge: a case study[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2017, 13(3): 345 – 360.
- [2] HUANG H W, XIAO L, ZHANG D M, et al. Influence of spatial variability of soil Young's modulus on tunnel convergence in soft soils[J]. Engineering Geology, 2017, 228: 357 – 370.
- [3] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(4): 612 – 624.
- [4] ZHANG J Z, HUANG H W, ZHANG D M, et al. Quantitative evaluation of geological uncertainty and its influence on tunnel structural performance using improved coupled Markov chain[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16: 3709 – 3724.
- [5] 陶袁钦, 孙宏磊, 蔡袁强. 考虑约束的贝叶斯概率反演方法[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(1): 1878 – 1886. (TAO Yuan-qin, SUN Hong-lei, CAI Yuan-qiang. Bayesian back analysis considering constraints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 43(1): 1878 – 1886. (in Chinese))
- [6] ZHANG W G, HAN L, GU X, et al. Tunneling and deep excavations in spatially variable soil and rock masses: a short review[J/OL]. Underground Space, 2020: [2020-12-07]. <http://doi.org/10.1016/j.undsp.2020.03.003>.
- [7] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(11): 1227 – 1246.
- [8] LI D Q, JIANG S H, CAO Z J, et al. A multiple response-surface method for slope reliability analysis considering spatial variability of soil properties[J]. Engineering Geology, 2015, 187: 60 – 72.
- [9] 蒋水华, 刘贤, 黄发明, 等. 考虑多参数空间变异性的降雨入渗边坡失稳机理及可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(5): 900 – 907. (JIANG Shui-hua, LIU Xian, HUANG Fa-ming, et al. Failure mechanism and reliability analysis of soil slopes under rainfall infiltration considering spatial variability of multiple soil parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(5): 900 – 907. (in Chinese))
- [10] CHING J, HU Y G, PHOON K K. Effective Young's modulus of a spatially variable soil mass under a footing[J]. Structural

- Safety, 2018, **73**: 99 – 113.
- [11] LI J H, ZHOU Y, ZHANG L L, et al. Random finite element method for spudcan foundations in spatially variable soils[J]. Engineering Geology, 2016, **205**: 146 – 155.
- [12] LUO Z, LI Y X, ZHOU S H, et al. Effects of vertical spatial variability on supported excavations in sands considering multiple geotechnical and structural failure modes[J]. Computers and Geotechnics, 2018, **95**: 16 – 29.
- [13] CHEN F Y, WANG L, ZHANG W G. Reliability assessment on stability of tunnelling perpendicularly beneath an existing tunnel considering spatial variabilities of rock mass properties[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **88**: 276 – 289.
- [14] ZHANG J Z, HUANG H W, ZHANG D M, et al. Effect of ground surface surcharge on deformational performance of tunnel in spatially variable soil[J]. Computers and Geotechnics, 2021, **136**: 104229.
- [15] 程红战, 陈 健, 胡之锋, 等. 考虑参数空间变异性隧道下穿建筑物安全性评价[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(增刊 2): 75 – 78. (CHENG Hong-zhan, CHEN Jian, HU Zhi-feng, et al. Evaluation of safety of buildings above tunnels accounting for spatial variability of soil properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S2): 75 – 78. (in Chinese))
- [16] 王长虹, 朱合华, 徐子川, 等. 考虑岩土参数空间变异性盾构隧道地表沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(2): 270 – 277. (WANG Chang-hong, ZHU He-hua, XU Zi-chuan, et al. Ground surface settlement of shield tunnels considering spatial variability of multiple geotechnical parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(2): 270 – 277. (in Chinese))
- [17] 谭晓慧, 董小乐, 费锁柱, 等. 基于 KL 展开的可靠度分析方法及其应用[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(5): 808 – 816. (TAN Xiao-hui, DONG Xiao-le, FEI Suo-zhu, et al. Reliability analysis method based on KL expansion and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(5): 808 – 816. (in Chinese))
- [18] CHING J, HU Y G. Effect of element size in random finite element analysis for effective Young's modulus[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, **2016**: 1 – 10.
- [19] ZHANG D M, LIU Z S, WANG R L, et al. Influence of grouting on rehabilitation of an over-deformed operating shield tunnel lining in soft clay[J]. Acta Geotechnica, 2019, **14**(4): 1227 – 1247.
- [20] GONG W P, LUO Z, JUANG C H, et al. Optimization of site exploration program for improved prediction of tunneling-induced ground settlement in clays[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **56**: 69 – 79.
- [21] JIN D L, SHEN Z C, YUAN D J. Effect of spatial variability on disc cutters failure during TBM tunneling in hard rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, **53**(10): 4609 – 4621.
- [22] HUANG Z K, PITILAKIS K, TSINIDIS G, et al. Seismic vulnerability of circular tunnels in soft soil deposits: The case of Shanghai metropolitan system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **98**: 103341.
- [23] 邵 华. 上海地铁盾构隧道变形机理及无线传感方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2018. (SHAO Hua. Analysis of Deformation Mechanism and Wireless Sensing Method of Shield Tunnel for Shanghai Metro[D]. Shanghai: Tongji University, 2018. (in Chinese))