

文章编号:1673-9469(2025)03-0032-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.03.005

## 考虑土体参数条件随机场的矩形顶管施工地表沉降分析

阮晨成<sup>1,2</sup>,周宇清<sup>3</sup>,王萌<sup>1,2</sup>,史培新<sup>1,2</sup>,贾鹏蛟<sup>1,2\*</sup>

(1. 苏州大学 轨道交通学院,江苏 苏州 215000;2. 江苏省智慧城轨工程研究中心,江苏 苏州 215000;  
3. 中亿丰隧道工程股份有限公司,江苏 苏州 215000)

**摘要:** 针对运用随机场理论描述土体参数空间变异性时地勘数据使用效能不足的问题,结合 Kriging 理论和基于贝叶斯压缩感知与 KL 级数展开法相结合的数据驱动随机场理论,提出了数据驱动的三维条件随机场生成方法,并将该方法应用于苏州市某矩形顶管工程场地的土体参数空间变异性表征,建立了考虑土体参数空间变异性的三维数值模型,分析了顶管施工引起地表沉降规律,并与现场实测结果进行对比验证,最大误差低于 10%。研究表明:生成的数据驱动条件随机场可以充分利用实际工程场地内的勘察数据,实现土体参数空间变异性条件随机场的优化模拟,完成勘察数据对已知取样点的约束,降低不确定性;相较于确定性计算,不确定计算能够充分表征矩形顶管施工引起地表沉降的趋势和波动范围,为复杂岩土工程设计和施工提供参考依据。

**关键词:** 矩形顶管;数据驱动;条件随机场;空间变异性;地表沉降

中图分类号:U452.1

文献标识码:A

## Ground Settlement Analysis of Rectangular Pipe Jacking Construction Considering Conditions Random Field of Soil Parameter

RUAN Chencheng<sup>1,2</sup>, ZHOU Yuqing<sup>3</sup>, WANG Meng<sup>1,2</sup>, SHI Peixin<sup>1,2</sup>, JIA Pengjiao<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215000, China;  
2. Intelligent Urban Rail Engineering Research Center of Jiangsu Province, Suzhou, Jiangsu 215000, China;  
3. Zhongyifeng Construction Group Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215000, China)

**Abstract:** Considering the insufficient utilization efficiency of geotechnical data when using the random field theory to describe the variability of soil parameter space, by combining the Kriging theory and the data-driven random field theory based on Bayesian compressive sensing and Karhunen-Loeve (KL) series expansion method, a data-driven three-dimensional conditional random field generation method was proposed. This method was applied to characterize the variability of soil parameter space in a certain rectangular pipe-jacking project site in Suzhou City. A three-dimensional numerical model considering the variability of soil parameter space was established, and the settlement law caused by pipe-jacking construction was analyzed. The results were compared and verified with the on-site measured data, with the maximum error being less than 10%. The research results show that the generated data-driven conditional random field can fully utilize the survey data in the actual engineering site, achieve the optimization simulation of the conditional random field of soil parameter space variability, complete the constraint of the survey data on the known sampling points, and reduce the uncertainty. Compared with deterministic calculation, uncertain calculation can fully represent the trend and fluctuation range of surface settlement caused by the rectangular pipe-jacking construction, providing a reference basis for the design and construction of complex geotechnical engineering.

收稿日期:2024-01-30

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20210721);教育部岩土钻掘与防护教育部工程研究中心开放研究基金资助项目(202310)

第一作者:阮晨成(1999—),男,安徽合肥人,硕士研究生,从事隧道与地下工程方面的研究。

\* 通信作者:贾鹏蛟(1989—),男,河南周口人,博士,副教授,从事隧道与地下工程方面的研究。

**Key words:** rectangular pipe jacking; data-driven; conditional random field; spatial variability; ground settlement

顶管法因其空间利用率高、施工扰动小等优点广泛应用于地下交通建设中。但顶管顶进时会周围土体产生扰动,导致应力变化传递至地表引起沉降变形<sup>[1-2]</sup>。而顶管工程的主要工程介质是天然土体,学者们在工程设计施工中多采用确定性分析方法<sup>[3-5]</sup>,忽略了土体参数的空间变异特征,增加了设计施工环节的不确定性因素。针对这一问题,随机场理论被众多学者用于描述岩土体的空间变异性,进而开展了边坡、基坑和隧道等方面的研究。赵炼恒等<sup>[6]</sup>建立二维随机场模型,分析了土体的空间变异性对分层边坡可靠度的影响;易顺等<sup>[7]</sup>针对土体参数的空间变异性对基坑变形影响的问题,基于随机场理论建立了平面数值模型;王长虹等<sup>[8]</sup>将随机场理论引入盾构隧道地表沉降可靠指标分析中,结果表明,基于随机场理论得到的可靠指标更加精确,提升了近40%;张轩煜等<sup>[9]</sup>发现与确定性数值模拟相比,随机模拟方法在分析顶管施工地表变形时具有更好的适用性。

基于传统随机场理论生成的随机场,在勘察取样的位置无法吻合已知的地质信息<sup>[10]</sup>,这既与实际情况相违背,又高估了取样点土体参数的不确定性。部分学者针对这一现象,将已知信息作为约束条件,在所有勘察取样点之间表征土体参数的空间变异性,生成与之对应的场地参数约束随机场,也称为条件随机场<sup>[11]</sup>。Gong等<sup>[12-13]</sup>基于现场钻孔数据,利用二维条件随机场分析了隧道衬砌的随机力学响应;陈福勇等<sup>[14]</sup>研究了三维大尺度工程场地的条件随机场对隧道工程可靠度的影响。然而基于已有的勘察数据反演生成的条件随机场与传统随机场一样涉及大量的先验信息,如相关长度、自相关函数等,目前这些参数的选择需要根据文献调研和现场数据进行估计得到,忽略了实际工程中可用勘察数据有限且稀疏的现象,对输入参数的估计同样会产生较大影响。

基于此,本文使用Kriging理论并引入了贝叶斯压缩感知(Bayesian Compressive Sense, BCS)与Karhunen-Loève(KL)级数展开法相结合的数据驱动随机场理论,建立了数据驱动的三维条件随机场生成方法。依托苏州市某矩形顶管工程,首先基于BCS对场地勘察数据进行不确定性表征,然后采用数据驱动的三维条件随机场生成方法得到

基于勘察数据的场地随机场,将生成的条件随机场与三维数值模型相耦合,揭示顶管隧道施工引起的地表随机变形特性,并与现场实测结果进行对比分析,验证本文所提方法的可靠性。

## 1 数据驱动条件随机场基本理论

### 1.1 数据驱动随机场

数据驱动随机场理论的核心是利用工程场地勘察数据的稀疏性以减少描述土体参数空间分布所需的测量次数,重建该场地完整的参数分布进而生成符合场地情况的随机场样本。BCS利用了许多自然界的信号(如土体参数)可以被“压缩”的原理,即土体参数的空间分布可以利用有限个基函数乘以对应的权重系数得到<sup>[15]</sup>。在数学上,土体参数随空间变化时可以用一个维度为 $N_1 \times N_2 \times N_3$ 的三维数组 $E$ 表示,并将总数为 $N = N_1 \times N_2 \times N_3$ 的离散点近似为

$$E = B\omega = \sum_{i=1}^N B_i \omega_i \quad (1)$$

式中: $B_i$ 为第 $i$ 个基函数,维度和 $E$ 相同; $\omega_i$ 为对应的权重系数,存储着长度为 $N$ 的列向量 $\omega$ 中。

基函数是需要预先指定的,它的构建独立于 $E$ ,本文通过使用MATLAB中的内置函数“detmtx”进行构建。考虑到 $E$ 的可压缩性,绝大多数 $\omega_i$ 的量级非常小或几乎为0,可以使用稀疏勘察数据 $Y$ 对 $\omega$ 中非平凡系数进行识别与估计,从而重构 $E$ 。然而在实际工程中,可用的场地勘察数据通常是稀疏且有限的,假设 $Y$ 中包含了 $M$ 个取样点数据,这些数据作为已知点存在于 $E$ 中,因此两者存在如下关系:

$$Y = \Psi E = \Psi B \omega = A \omega \quad (2)$$

式中: $\Psi$ 为测量矩阵,记录了取样点数据在 $E$ 中的空间位置; $A = \Psi B$ 为感知矩阵。

考虑到实际情况下 $M \ll N$ ,需要在贝叶斯框架下求解 $Y = A\omega$ ,估计得到 $\omega'$ 。研究发现<sup>[16-17]</sup>, $\omega'$ 服从多元t分布,利用其均值向量和协方差矩阵重构 $E$ 的均值和协方差,并将重构后的参数分布定义为 $E'$ ,如下所示:

$$\begin{aligned} \mu_{E'} &= E(E') = E(B\omega') = BE(\omega') = B\mu_{\omega'} \quad (3) \\ \text{COV}_{E'} &= E[(E' - \mu_{E'})(E' - \mu_{E'})^T] = B\text{COV}_{\omega'} B^T \quad (4) \end{aligned}$$

式中:  $\mu_{\omega'}$  和  $\text{COV}_{\omega'}$  分别为  $\omega'$  的均值向量和协方差矩阵。

土体弹性模量具有显著的空间变异性<sup>[18-19]</sup>, 且对矩形顶管施工引起的地层响应有着重要影响, 因此利用 KL 级数展开法生成工程场地内土体弹性模量的数据驱动随机场。在 KL 展开的情况下, 给定参数分布  $E'$  的均值和协方差即可得到:

$$E' = \mu_{E'} + V\sqrt{\text{COV}_{\omega'}}Z = \mu_{E'} + \sum_{k=1}^S \sqrt{\lambda_k} V_k Z_k \quad (5)$$

式中:  $V$  为  $\text{COV}_{E'}$  的特征向量矩阵;  $\text{COV}_{\omega'}$  是记录  $\text{COV}_{E'}$  特征值的对角矩阵;  $Z$  是一组不相关的、均值为 0 且方差为 1 的标准随机变量;  $V_k$ 、 $Z_k$  和  $\lambda_k$  分别是矩阵  $V$  的第  $k$  列、随机向量  $Z$  的第  $k$  个元素以及矩阵  $\text{COV}_{\omega'}$  的第  $k$  个对角元素。

### 1.2 Kriging 理论

Kriging 理论又被称为空间局部插值法, 是基于取样数据所反映的区域化变量的结构信息, 进而对待估点进行最优线性无偏估计的一种方法。该方法可以避免传统空间确定性插值方法无法考虑取样点之间的空间分布特征的缺点, 给出更加贴合工程实际的估计, 在  $x_0$  处的估计值可以表示为

$$K(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i K(x_i) \quad (6)$$

式中:  $K(x_i)$  为第  $i$  个取样点的观测值;  $\lambda_i$  为观测值对应的权重, 权重可由 Kriging 方程组给出:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i, x_j) - \mu = C(x_i, x) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & \cdots & C_{nn} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{01} \\ \vdots \\ C_{0n} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中:  $C(x_i, x_j)$  为取样点之间的协方差,  $C(x_i, x)$  为取样点与待估点之间的协方差,  $\mu$  为拉格朗日乘数。

由于 Kriging 理论具有不偏的特性, 这些权重满足式(8)。通过计算式(9)得到权重值和拉格朗日乘数, 待估点的估计值可以得到:

$$K(x) = \mu + \sum_{i=1}^n \lambda_i [K_i - \lambda(x_i)] \quad (10)$$

### 1.3 建模方法和流程

基于实际工程场地的  $n$  个取样点, 每个取样点的空间位置为  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ , 经过现场试验和室内试验, 测得对应的参数为  $e(x_i)$ , 利用这些稀疏测量数据生成数据驱动条件随机场, 且假定取样点的土体参数能在一定程度上反映土体物理力学性质的空间分布特征, 其他待估点的空间位置为  $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_m$ , 其中  $m$  为条件随机场中点的总个数。流程图见图 1, 具体如下:

(1) 首先利用数据驱动随机场理论分析工程场地的勘察数据, 直接生成对应场地的参数随机场  $E_d(x)$ , 避免输入参数和自相关函数的选取。

(2) 同样基于取样点  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  的勘察数据, 建立指数函数的变异函数模型, 利用 Kriging 理论计算得到待估点  $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_m$  的最佳线性无偏估计, 并将结果记为 Kriging 随机场  $E_k(x)$ , 在已知取样点处等于该点的测量值。

(3) 提取  $E_d(x)$  在已知取样点位置处的数值  $E_d(x_1), E_d(x_2), \dots, E_d(x_n)$ , 并将其作为已知数据, 再次利用 Kriging 理论计算得到其余待估点的最佳线性无偏估计, 与步骤(2)相同, 得到基于数据驱动随机场的最佳线性无偏估计随机场  $E_s(x)$ 。

(4) 将  $E_d(x)$ 、 $E_k(x)$  与  $E_s(x)$  按式(11)叠加, 过程中需要注意空间中所有点, 包括取样点和待估点处参数的一一对应, 最后得到数据驱动条件随机场  $E_c(x)$ :

$$E_c(x) = E_d(x) + [E_k(x) - E_s(x)] \quad (11)$$

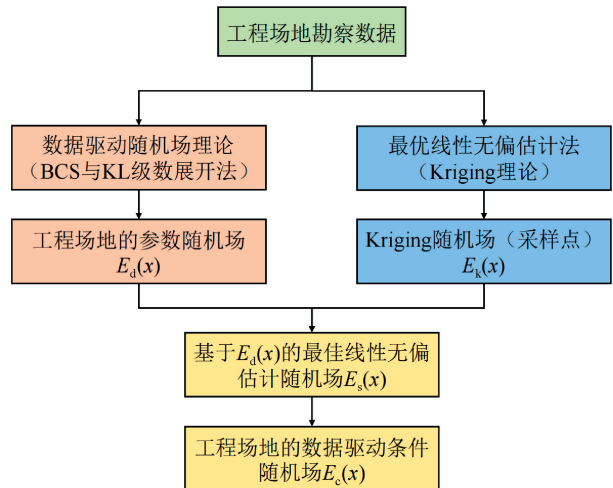


图 1 数据驱动条件随机场生成流程

Fig. 1 Generation process of data-driven conditional random fields

在式(11)中, 已知取样点  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  的位置满足  $E_s(x_i) = E_d(x_i)$  和  $E_k(x_i) = e(x_i)$ , 因此

可以推导出每一个取样点处:

$$E_c(x_i) = E_d(x_i) + [E_k(x_i) - E_s(x_i)]$$

$$= E_d(x_i) + [e(x_i) - E_d(x_i)] = e(x_i)$$

(12)

## 2 工程实例

本文基于苏州市轨道交通 5 号线某车站过街通道顶管工程场地的勘察数据,采用 BCS 理论对场地勘察数据进行不确定性表征,结合 Kriging 理论和 BCS-KL 数据驱动理论生成 5 号线顶管工程场地中弹性模量的三维条件随机场,并通过实际钻孔数据验证该方法的合理性和有效性。

### 2.1 工程背景

苏州市轨道交通 5 号线某车站过街通道工程采用矩形顶管法施工,该出入口通道地处主干道交叉路口,需穿越金鸡湖大道且道路下市政管线众多且密集,见图 2。顶管顶进长度 62.8 m,顶管始发内底标高为-5.576 m,接收内底标高为-5.37 m,以 0.5%的坡度上坡顶进。顶管外包横断面尺寸为 6.9 m×4.2 m,最小覆土深度约 4.42 m,小于 1.5 倍的顶管高度,属于浅覆土顶进,且矩形顶管断面大,穿越苏州典型软土地层的施工过程中容易引起较大地层扰动,施工难度大。

根据场地钻孔及设计资料,矩形顶管所在区域地层自上而下依次为①<sub>1</sub> 填土层、③<sub>1</sub> 粉质黏土层、③<sub>3</sub> 粉土夹粉砂层、④<sub>2</sub> 粉砂层和⑤<sub>1</sub> 粉质黏土层,其中③<sub>3</sub> 粉土夹粉砂层为微承压水层。根据工程场地的勘察报告,主要地层物理力学参数设计建议值如表 1 所示。地下水埋深一般为地面下 1.40~4.10 m 左右。

表 1 地层物理力学参数设计建议值

Tab. 1 Recommended values for physical and mechanical parameters of the strata

土层名称	重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力 $c$ /(kPa)	内摩擦角 $\varphi$ /( $^\circ$ )	泊松比
① <sub>1</sub> 填土	18.5	10.0	8.0	0.30
③ <sub>1</sub> 粉质黏土	19.0	40.0	16.0	0.28
③ <sub>3</sub> 粉土夹粉砂	18.6	11.0	22.5	0.33
④ <sub>2</sub> 粉砂	19.1	1.0	31.0	0.29
⑤ <sub>1</sub> 粉质黏土	18.6	22.0	21.0	0.34

### 2.2 数据驱动条件随机场实现

在场地勘察过程中,共对 22 个钻孔兼取土孔进行了取样并进行室内试验,图 3(a)中只呈现了进行室内试验测试物理力学参数钻孔的空间分布,勘探点主要沿车站两侧边线外侧布置,孔距一般约 20~40 m。基于上一节中的数据驱动条件随机场生成方法,通过自编程序生成目标场地三维数据驱动弹性模量条件随机场,见图 3(b)。为了验证生成的条件随机场是否符合实际勘察结果,我们选取 3 号和 16 号钻孔进行验证并与非条件随机场进行对比。

图 4 呈现了不同钻孔处的室内试验数据、经数据驱动随机场理论生成的非条件随机场以及在勘察数据约束下的条件随机场随深度变化的情况。可以看出,本文提出模型生成的数据驱动条件随机场相较于非条件随机场,在沿深度方向的空间分布上高度吻合钻孔取样的勘察数据,符合实际情况中已知数据分布的情况,证实了勘察数据的约束作用并初步解决了过高估计土体参数空间变异性的问题。在取样点之外的深度位置,弹性模量的分布则具有一定的随机性,这同样符合条件

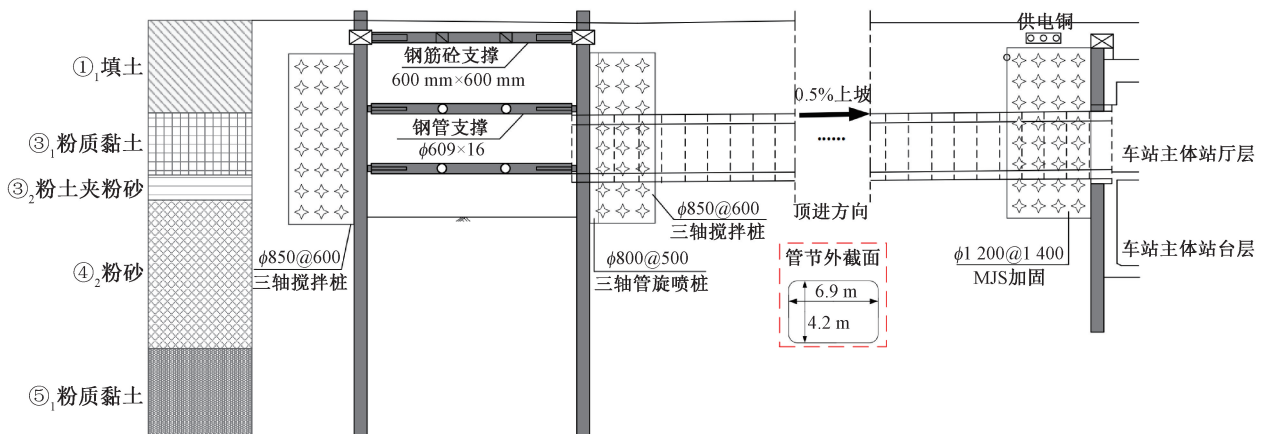


图 2 出入口地质剖面图

Fig. 2 Sectional view of the entrance and exit geology

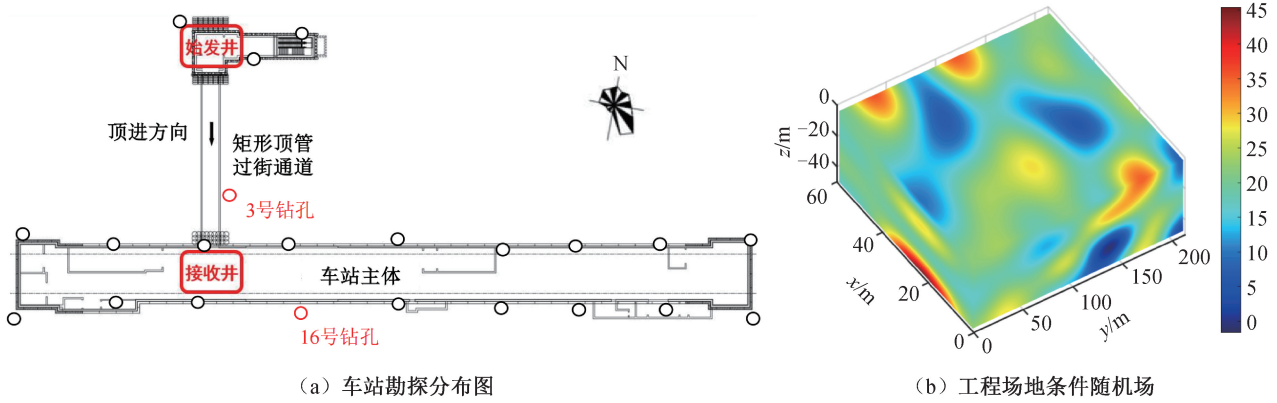


图3 数据驱动条件随机场实现

Fig. 3 Implementation of data-driven conditional random fields

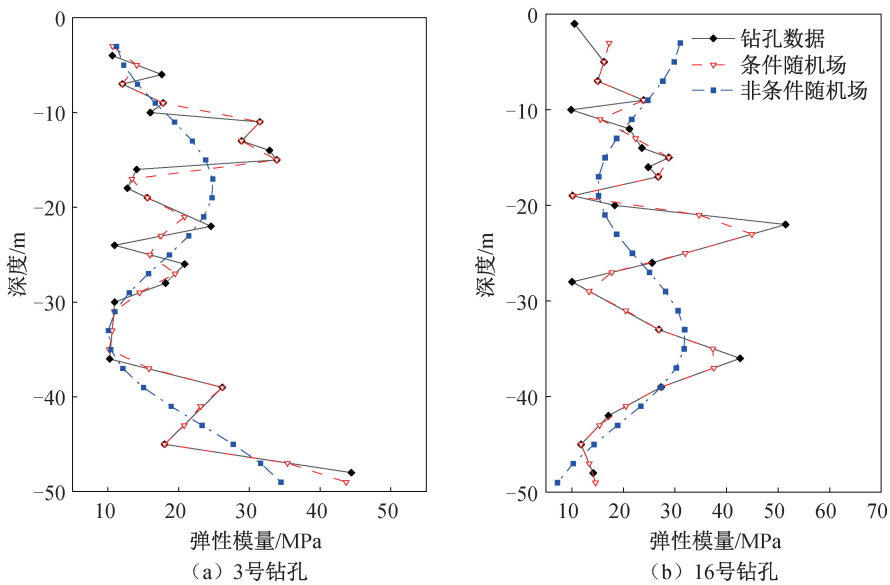


图4 验证钻孔的对比

Fig. 4 Comparison of verification borehole

随机场的定义。通过对所有钻孔及条件随机场数据的统计,见表2,可以发现数据驱动下的条件随机场与非条件随机场的平均值较实际情况的相对误差分别为2.3%和4.5%,条件随机场更加接近实际情况,其标准差和变异系数均略小于非条件随机场,反映了条件随机场可以降低结果的变异性和不确定性,为复杂工程土体参数空间变异性的精细化分析提供借鉴和参考。

表2 基于钻孔数据的随机场统计参数

Tab. 2 Statistical parameters of random fields

based on borehole data			
统计参数	平均值	标准差	变异系数
钻孔数据	19.24	7.70	0.40
条件随机场	19.69	6.39	0.32
非条件随机场	18.37	6.74	0.37

### 3 随机有限元分析

本文采用 ABAQUS 软件,首先建立确定性有限元计算模型,将确定性计算结果与实际监测中的数据进行对比,验证有限元模型的准确性;随后将所有生成的随机场样本通过耦合网格单元中心点的方式导入 ABAQUS 软件中,建立随机有限元模型,研究不同条件随机场样本下矩形顶管顶进引起的地表沉降值;最后依据统计结果计算超出变形控制值的失效概率。

#### 3.1 有限元模型的建立

有限元模型尺寸为 60 m×40 m×60 m ( $X \times Y \times Z$ ),共划分为 43 875 个节点,39 477 个单元;边界位移条件:模型底部限制全方向位移,顶部表面无限制,其余表面仅限制法向位移,见图5。土体、顶

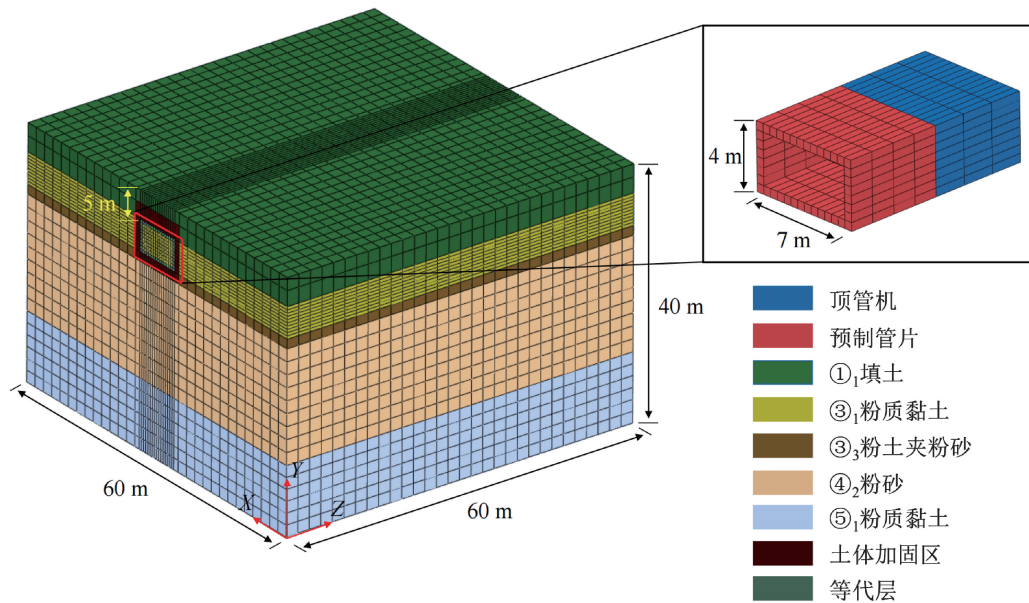


图5 三维有限元模型

Fig. 5 3D finite element model

管机及预制管节均采用实体单元(C3D8)模拟,顶管机和管节将简化为线弹性材料,材料属性详见表3。在随机场分析中,Mohr-Coulomb理想弹塑性本构模型是模拟土体最广泛的模型<sup>[20]</sup>,土体弹性模量将根据场地勘察数据和数据驱动随机场理论进行随机化,其他物理力学参数,见表1。

表3 材料属性  
Tab. 3 Material properties

材料名称	密度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	弹性模量 $E/\text{MPa}$
顶管机	7 800	0.2	$3.54 \times 10^4$
预制管片	2 700	0.2	$2.10 \times 10^5$

实际工程中,顶管机与土体之间形成的空隙会造成土体损失,通常会采用注浆填充的方式加固土体,减小对地表变形的影响,因此将隧道周围土层与浆液的混合物通过等代层<sup>[21-22]</sup>模拟地层损失,并通过增加弹性模量实现土体加固区的模拟,加固区土体弹性模量为100 MPa。模拟中将矩形顶管工作面顶进力和管节环向注浆压力等效为均布荷载分别作用在工作面和顶管隧道管节外部。顶管的顶进过程采用位移控制法依次顶进,每次1.5 m,共40次顶进,顶进过程包括:利用生死单元法将待开挖区域杀死,在管节断面处施加Z方向位移,并建立管节与周围土体的联系,即法向设置硬接触,切向设置罚函数,摩擦系数取0.3<sup>[23]</sup>,依次循环直至全线贯通。

### 3.2 分析流程

为了考虑弹性模量空间变异性对数值计算结果的影响,本文将生成的条件随机场通过ABAQUS、MATLAB和Python的有效交互,使有限元软件具备考虑土体参数空间变异性的能力,避免了计算资源的浪费,具体实现流程,见图6:

(1)数据驱动条件随机场生成:基于室内试验测得的勘察数据,通过MATLAB自编程序生成300组数据驱动条件随机场样本,并输出至样本文件中,用于记录参数随机分布信息;

(2)确定性有限元模型建立:利用ABAQUS对矩形顶管顶进施工进行数值模拟,并导出作业文件(".inp文件"),用于记录有限元模型的几何形状、材料特性和网格信息等;

(3)在Python中编写脚本,通过检查有限元模型网格中心点坐标和条件随机场样本的空间坐标,确保两者一一对应,以保证条件随机场中包含的参数信息可以赋予至每个网格单元中,并分别记录在各自的.inp文件里,生成参数随机场样本的作业文件;

(4)同时编写Python脚本完成所有.inp文件的导入并提交ABAQUS求解器计算,对输出的不确定性计算结果进行统计,完成概率分析。

### 3.3 模型验证及确定性结果分析

顶管施工段地表沉降现场监测点布置见图7,考虑到顶进工程需要穿越城市主干道,对道路

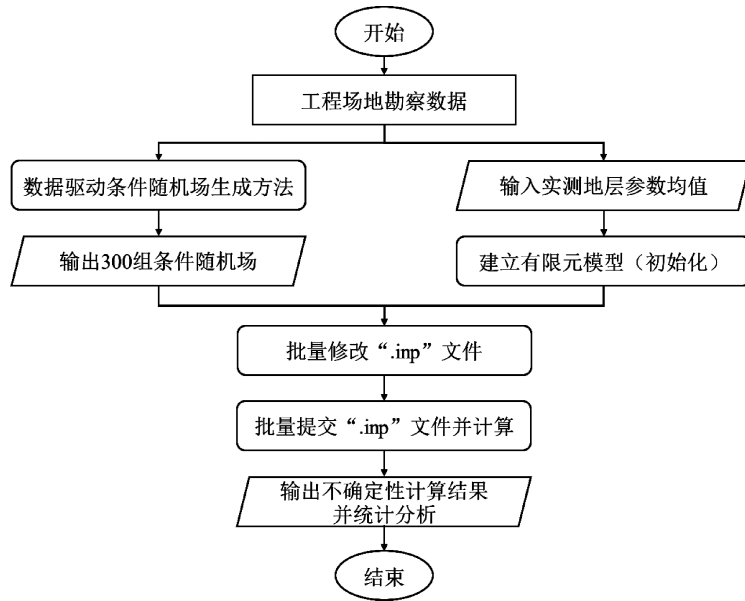


图6 数据驱动条件随机场生成流程

Fig. 6 Generation process of data-driven conditional random fields

中线断面 A 进行全面系统的检测,并在离隧道轴线 4 m 和 10 m 位置布设监测点。通过数值模拟得到确定性分析沉降,其沉降示意图,见图 8。由图 8(a)中可以看出,顶管施工完成后,地表呈现整体沉降趋势。由于顶管与土层摩擦持续对始发井位置作用,因此最大沉降出现在顶管始发井位置,地表沉降朝着接收井位置越来越小。取顶管施工完成后观察断面 A 处地表变形,见图 8(b),各监测沉降点与确定性计算结果较为吻合,监测的最大地表沉降为 10.45 mm,确定计算结果为 11.32 mm,相对误差仅 8.3%。受到顶管施工过程中管-土摩擦作用的影响,总体表现为沉降变形并呈现关于顶管中轴线对称分布的变形规律,良好的一致性验证了所提出的有限元模型在确定性计算中的可行性。

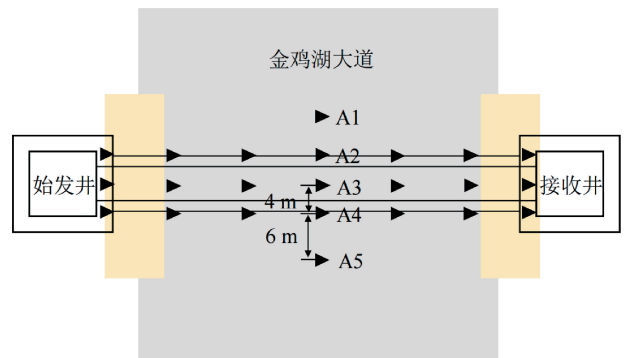
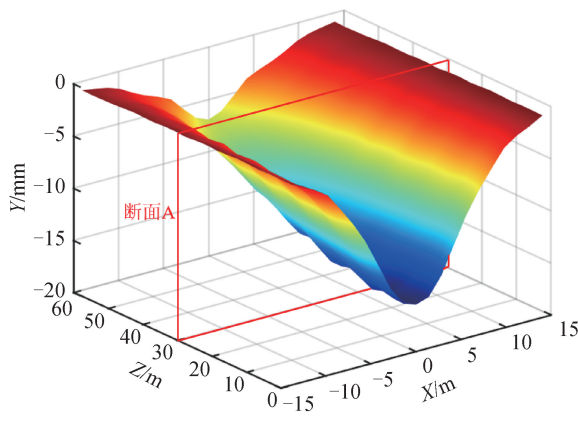


图7 顶管施工段监测点布置图

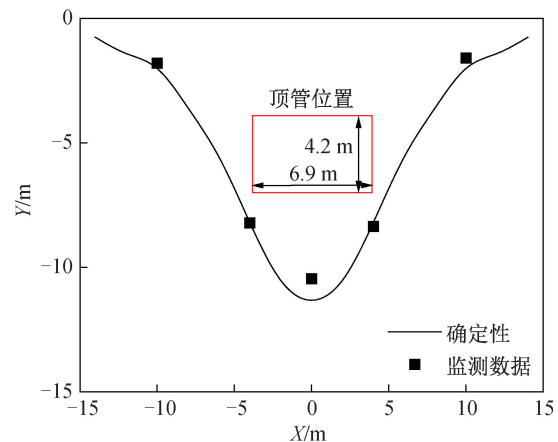
Fig. 7 Layout diagram of monitoring points for the pipe-jacking construction section

### 3.4 不确定性结果及失效概率分析

为进一步验证本文提出有限元模拟方法的合



(a) 三维沉降图



(b) 断面A

图8 确定性分析地表沉降及分析截面

Fig. 8 Deterministic analysis of surface subsidence and analysis of cross-sections

理性和有效性,对经 300 次不确定性计算得到的地表沉降进行分析,监测点的不确定性计算的统计结果见图 9。由图可知,确定性计算结果与不确定性计算结果的变化规律基本一致,不确定性计算结果围绕着确定性计算结果并呈现出一定的离散性,这是因为生成随机场样本的过程是随机的,可以将确定性计算结果视为某次特殊的不确定计算。进一步观察发现,随着顶管的不断顶进,不确定性计算结果的包络范围在不断增加,这意味着,不确定性也在相应的增加。由此可见,地层参数的空间变异性会使施工引发的地表沉降存在很大的不确定性,同时也说明建立勘察数据约束下的条件随机场的必要性。此外,不确定性计算结果

与实际监测的沉降趋势基本相同,监测到的沉降值绝大多数落入了不确定性计算结果的 95% 置信区间中。与确定结果相比较,不确定结果给出了地表沉降的变形范围,并可以将实际监测值包络起来,以达到对地表变形的预测;同时结合公式 (13),可计算出超出变形控制值的失效概率  $P$ :

$$P = (N_f/N) \times 100\% \quad (13)$$

式中: $N$  为不确定计算的总次数 ( $N=300$ );  $N_f$  为不确定计算结果中最大沉降超过控制值的次数。

以断面 A 为例,当控制值为  $-10 \text{ mm}$  时,其失效概率达到 63%,当控制值为  $-12 \text{ mm}$  时,失效概率为 14%。由此可在施工设计阶段,利用条件随机场预测关键断面地表沉降超出控制值的概率。

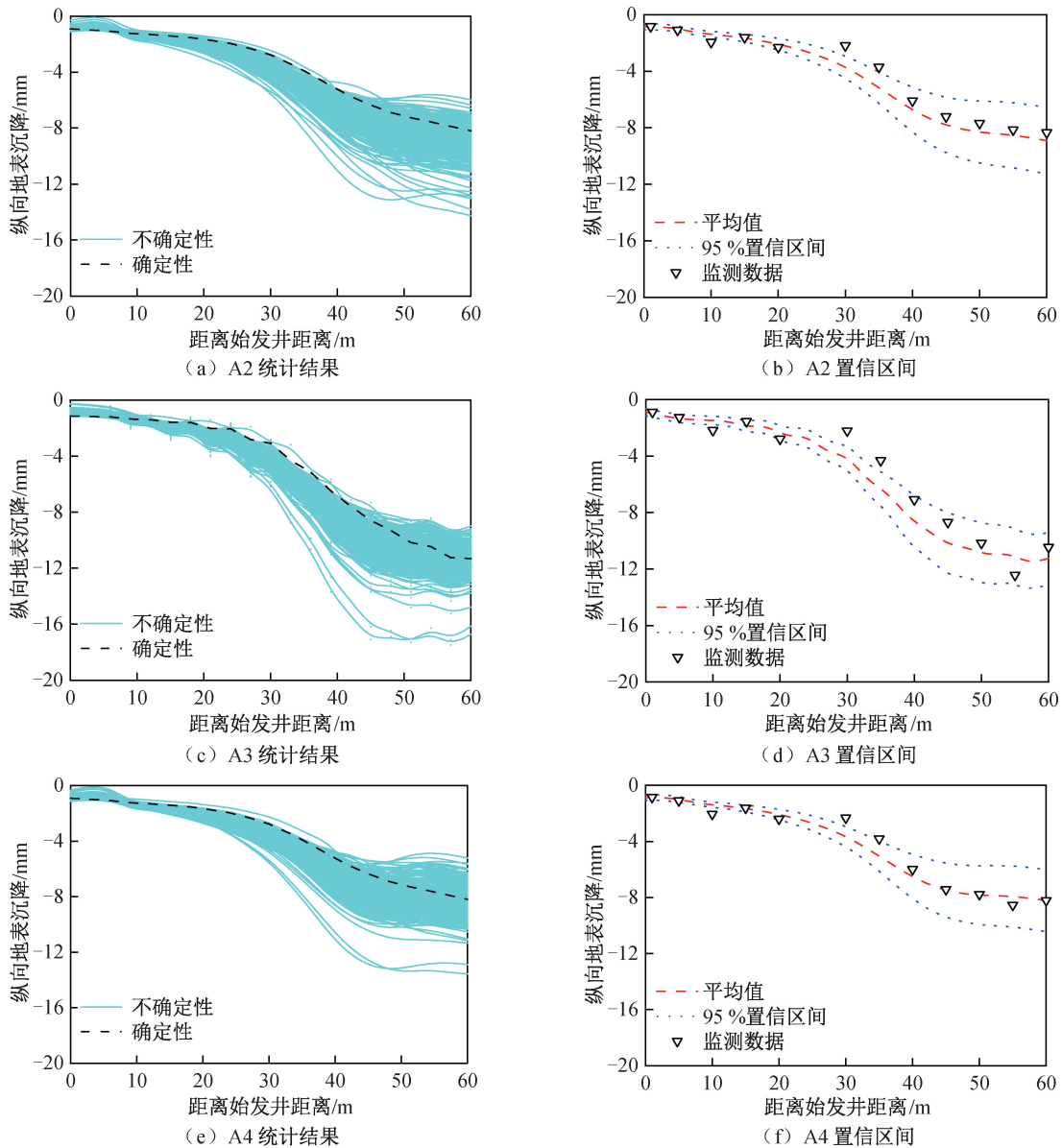


图 9 不确定性分析地表沉降

Fig. 9 Uncertainty analysis of ground settlement

## 4 结论

1) 基于 Kriging 和数据驱动随机场理论, 提出了三维数据驱动下条件随机场生成方法, 可充分利用实际工程场地内的勘察数据, 减少了传统随机场理论中对输入参数的估计工作, 高效地描述特定工程场地的土体参数空间变异性。

2) 实现了土体参数空间变异性条件随机场的优化模拟, 降低了在已知取样点处土体参数的不确定性, 该方法拓展了在复杂岩土工程中考虑土体参数空间变异性的应用。

3) 相较于确定性计算结果, 不确定性计算能充分表征矩形顶管施工引起地表沉降的趋势和波动范围, 实现了关键断面的沉降预测和失效概率计算。

### 参考文献:

- [1] JIA P J, ZHAO W, KHOSHGHALB A, et al. A new model to predict ground surface settlement induced by jacked pipes with flanges [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 98: 103330.
- [2] CHEN X, MA B, NAJAFI M, et al. Long rectangular box jacking project: A case study [J]. *Underground Space*, 2021, 6(2): 101-125.
- [3] MA P, SHIMADA H, SASAOKA T, et al. A new method for predicting the friction resistance in rectangular pipe-jacking [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 123: 104338.
- [4] MA P, SHIMADA H, SASAOKA T, et al. Investigation on the engineering effects of the geometrical configuration of the jacking rectangular pipe [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 119: 104239.
- [5] 章莘苒, 王超, 张宇轩, 等. 软土地层大断面矩形顶管施工诱发既有结构变形特性研究 [J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2024, 41(4): 1-8.
- [6] 赵炼恒, 董潇阳, 胡世红, 等. 考虑空间变异性的分层边坡可靠度分析 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(12): 3180-3187.
- [7] 易顺, 林伟宁, 张东, 等. 基于随机场理论的基坑开挖地表及围护墙变形分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(S2): 3389-3398.
- [8] 王长虹, 朱合华, 徐子川, 等. 考虑岩土参数空间变异性的盾构隧道地表沉降分析 [J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(2): 270-277.
- [9] 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.
- [10] 文明. 高速铁路隧道围岩空间变异性的力学响应分析及应用 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [11] 张仁铎. 空间变异理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [12] GONG W, JUANG C, MARTIN J, et al. Probabilistic analysis of tunnel longitudinal performance based upon conditional random field simulation of soil properties [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 73(3): 1-14.
- [13] YU X, CHENG J, CAO C, et al. Probabilistic analysis of tunnel liner performance using random field theory [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019: 1348767.
- [14] 陈福勇, 仇文岗. 基于条件随机场的重庆李家坪地铁隧道可靠度分析 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2022, 30(01): 166-182.
- [15] ZHAO T, WANG Y. Statistical interpolation of spatially varying but sparsely measured 3d geo-data using compressive sensing and variational bayesian inference [J]. *Mathematical Geosciences*, 2021, 53(6): 1171-1199.
- [16] TIAN H, WANG Y. Data-driven and physics-informed Bayesian learning of spatiotemporally varying consolidation settlement from sparse site investigation and settlement monitoring data [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 157: 105328.
- [17] WANG Y, ZHAO T. Statistical interpretation of soil property profiles from sparse data using Bayesian compressive sampling [J]. *Geotechnique*, 2017, 67(6): 523-536.
- [18] 程红战, 陈健, 胡之锋, 等. 考虑参数空间变异性的隧道下穿建筑物安全性评价 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(S2): 75-78.
- [19] 王锦华. 盾构隧道下穿对机场跑道影响的随机有限元数值模拟分析 [J]. *施工技术(中英文)*, 2022, 51(21): 23-29.
- [20] 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.
- [21] YIN M, JIANG H, JIANG Y, et al. Effect of the excavation clearance of an under-crossing shield tunnel on existing shield tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 78: 245-258.
- [22] 张文瀚, 谢雄耀, 李攀. 浅层顶管隧道施工对路基变形影响数值分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2011, 7(S2): 1619-1624+1652.
- [23] MA W J, WANG B L, WANG X, et al. Soil layer disturbance caused by pipe jacking: Measurement and simulation of a case study [J]. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25(4): 1467-1478.

(责任编辑 周雪梅)