

DOI: 10.11779/CJGE2024S20011

# 基于间隙参数法的软土盾构隧道施工不确定性表征

杨文钰<sup>1,3</sup>, 郑俊杰<sup>\*1,2</sup>, 仇文岗<sup>3</sup>, 章荣军<sup>2</sup>, 梁正斌<sup>4</sup>, 陶应建<sup>4</sup>

(1. 华中科技大学土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 4. 中铁八局集团第一工程有限公司, 重庆 400053)

**摘要:** 为防御软土盾构隧道施工引发过大地层位移的风险, 有必要对盾构隧道地层位移进行概率分析。间隙参数法通过将地层损失分为三个分量, 详尽地解释了盾构隧道掘进过程中地层损失的来源, 基于间隙参数法对盾构隧道掘进过程中众多参数不确定性进行表征, 为实现概率分析提供重要前提。基本思路为分别确定三个分量, 即等效三维间隙、盾构姿态相关间隙与物理间隙的统计特征。等效三维间隙与盾构姿态相关间隙相对复杂, 根据文献给出了与之相关的地层参数与掘进参数的统计特征。物理间隙与注浆效果有直接关系, 通过搜集到的地质雷达数据确定注浆填充率, 给出了物理间隙的统计特征。

**关键词:** 软土; 盾构隧道; 间隙参数; 地层变形; 不确定性

**中图分类号:** TU432      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2024)S2-0107-07

**作者简介:** 杨文钰(1996—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事软土盾构隧道方面的研究工作。E-mail: yangwy@cqu.edu.cn。

## Characterization of uncertainty in shield tunneling excavated in soft soils based on gap parameter

YANG Wenyu<sup>1,3</sup>, ZHENG Junjie<sup>1,2</sup>, ZHANG Wengang<sup>3</sup>, ZHANG Rongjun<sup>2</sup>, LIANG Zhengbin<sup>4</sup>, TAO Yingjian<sup>4</sup>

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Civil

Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

4. China Railway Eighth Engineering Group First Engineering Co., Ltd., Chongqing 400053, China)

**Abstract:** To prevent the risk of displacement induced by shield tunneling, it is necessary to conduct probabilistic analysis. Gap parameter explains the source of ground loss in detail by dividing the ground loss into three parts. Based on it, the uncertainty of many parameters in the shield tunneling process is characterized, which provides an important prerequisite for probability analysis. The main idea is to obtain the statistics of three components of the gap parameter: three-dimensional equivalent gap  $u^{*3D}$ , gap due to workmanship  $\omega$  and physical gap  $g$ . The three-dimensional equivalent gap  $u^{*3D}$  and the gap due to workmanship  $\omega$  are relatively complicated, and the statistics of the relevant geological and tunneling parameters are given according to the literatures. The physical gap  $g$  is directly related to the grouting effects. The filling rate of grouting is determined by the geological radar data, and the statistics of the physical gap are given.

**Key words:** soft soil; shield tunnel; gap parameter; construction deformation; uncertainty

## 0 引言

我国城市地下空间规划和建设需求趋向系统化、多样化、深度化、复杂化, 在人口集中、地上地下建筑密度高的城区采用盾构法开挖隧道面临巨大挑战。为防御盾构隧道施工引发过大地层位移的风险, 有必要开展概率分析。Camós 等<sup>[1]</sup>利用 Peck 公式研究了地层损失与沉降槽宽度系数不确定性对隧道开挖引发房屋破坏失效概率的影响。Mollon 等<sup>[2]</sup>通过数值模型分析了施工参数不确定性对六种失效模式下失效概率的影响。Miro 等<sup>[3]</sup>基于硬化土本构模型, 考虑了土体参数的不确定性, 同时引入贝叶斯更新的方法减小参数

不确定性。类似地, 通过建立三维数值模型与代理模型, Franco<sup>[4]</sup>考虑了 11 个地层参数不确定性对最大沉降的影响。地层损失直接决定地层位移的大小。间隙参数法<sup>[5]</sup>详尽地解释了盾构隧道掘进过程中地层损失的来源, 其概念明确、计算简单, 是计算地层损失的

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078236, 52338007, 52122806); 国家资助博士后研究人员计划(GZC20242129); 广州地铁集团公司科研委托项目(JT204-10011-23001); 中铁八局集团有限公司科研委托项目(H20240979)

收稿日期: 2024-06-21

\*通信作者(E-mail: zhengjunjie@whu.edu.cn)

基本输入参数。本文基于间隙参数法对盾构隧道掘进过程中众多参数进行不确定性表征, 为实现在间隙参数框架下概率分析提供重要的理论与实践基础。

## 1 间隙参数法

间隙参数法将图 1 右侧的地层损失等效至左侧的二维等效横剖面上的间隙。地层损失可分为: 隧道开挖后掌子面前方土体发生变形产生的地层损失即等效三维间隙  $u^*_{3D}$ ; 盾构机行进时轻微上抬或上下摆动引起的盾构姿态相关间隙  $\omega$ ; 盾构机壳离开盾尾, 衬砌架设时盾壳与衬砌之间空隙为物理间隙  $G_p$ 。 $u^*_{3D}$  与  $\omega$  相对复杂, 统计特征无法直接确定, 本文根据大量文献给出了与之相关的地层参数与掘进参数的统计特征。 $G_p$  与注浆效果有直接关系, 故通过地质雷达数据给出了  $G_p$  的统计特征。

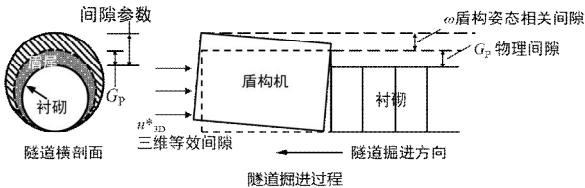


图 1 间隙参数定义的示意图

Fig. 1 Definition of gap parameter

## 2 地层参数的不确定性

### 2.1 单参数统计特征

按地区与成因<sup>[6]</sup>可将软土分成 I, II 与 III 区的不

同沉积相, 如表 1, 2 所示。分析参数均值可得:  $\rho$  均在  $1.60 \sim 1.75 (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$  的范围;  $e$  均大于 1;  $E_{s1-2}$  小于 3 MPa;  $\varphi_{\text{快剪}}$  小于  $10^\circ$ ;  $\varphi_{\text{固快}}$  在  $15^\circ$  左右;  $c_{\text{快剪}}$  与  $c_{\text{固快}}$  较为接近, 在 15 kPa 以内。分析地层参数变异性可得: 软土变异性因地而异, 其中 III 区滨海相变异性最强; 刻画软土变形与强度的参数如  $E_{s1-2}$ ,  $\varphi$ ,  $c$  变异性较大, COV 超过 0.2; 与重度相关的参数  $\rho$ ,  $S_r$  变异性较小, COV 小于 0.05。表 3 汇总了数据库 CLAY/10/7490 与 SH-CLAY/11/4051 中的软土土性参数统计特征<sup>[7-9]</sup>。结果显示, 后者中  $c_u/\sigma_v'$  变异性均远小于前者中  $c_{u(\text{mob})}/\sigma_v'$  的变异性。进一步地, 将表 1 中  $c_{\text{快剪}}$  近似视作  $c_u$  与表 2, 3 比较。结果显示, 表 1, 3 中 COV 为 0.4 左右, 表 2 中 COV 为前者的两倍以上。可见软土性质在不同区域间差异较大, 因此做概率分析时, 应尽量参考与本场地工程性质相同数据库。

概率分布模型的选择将直接影响概率分析结果。正态分布意义明确, 运用简单, 被广泛应用在概率分析中。为体现岩土参数的非负性, 对数正态分布与截尾分布<sup>[10]</sup>也常被应用于概率分析。有些学者也应用 Beta 分布、极值 I 型分布、Weibull 分布、广义伽马分布<sup>[11]</sup>刻画岩土参数的不确定性。

土性参数的空间变异性是岩土工程不确定性的主要来源。通常采用相关函数、变异系数与概率分布模型这三者来刻画土性参数的空间变异性。常见的相关函数有指数型、三角型、二阶自回归型、高斯型等。相关函数中的  $\theta$  为相关距离。相关距离为度量相关性

表 1 我国软土土性参数均值

Table 1 Mean values for parameters of soft soils in China

分布地区与成因	天津		上海、武汉、江浙		广州、深圳	
	I区滨海相	II区滨海相	II区三角洲相	III区滨海相	III区三角洲相	
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.750	1.720	1.720	1.630	1.620	
$e$	1.309	1.397	1.328	1.709	1.768	
$S_r$	97.700	96.100	—	97.400	97.000	
$E_{s1-2}/(\text{MPa})$	2.650	2.430	2.900	2.100	1.890	
$a_{v1-2}/(\text{MPa}^{-1})$	0.970	1.030	1.000	1.600	1.610	
$\varphi_{\text{快剪}}/(\text{°})$	3.800	4.200	10.200	5.900	6.100	
$c_{\text{快剪}}/\text{kPa}$	10.700	10.800	13.400	9.300	11.200	
$\varphi_{\text{固快}}/(\text{°})$	11.700	11.500	14.100	16.700	—	
$c_{\text{固快}}/\text{kPa}$	15.100	14.400	11.800	10.400	—	

表 2 我国软土土性参数变异系数

Table 2 COVs for parameters of soft soils in China

分布地区与成因	天津		上海、武汉、江浙		广州、深圳	
	I区滨海相	II区滨海相	II区三角洲相	III区滨海相	III区三角洲相	
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	0.042	0.048	0.048	0.058	0.052	
$e$	0.196	0.225	0.226	0.238	0.179	
$S_r$	0.020	0.068	—	0.031	0.026	
$E_{s1-2}/(\text{MPa})$	0.285	0.244	0.325	0.367	0.255	
$a_{v1-2}/(\text{MPa}^{-1})$	0.328	0.370	0.436	0.463	0.36	
$\varphi_{\text{快剪}}/(\text{°})$	0.629	0.648	0.607	0.617	0.415	
$c_{\text{快剪}}/\text{kPa}$	0.430	0.319	0.436	0.474	0.421	
$\varphi_{\text{固快}}/(\text{°})$	0.480	0.284	0.326	0.285	—	
$c_{\text{固快}}/\text{kPa}$	0.345	0.268	0.535	0.518	—	

的重要指标。Cami 等<sup>[12]</sup>从已发表的案例中收集了不同地点和不同材料的水平与竖直相关距离, 其中有关软土的结果汇总于表 4。

表 3 数据库中软土土性参数统计特征

Table 3 Statistics for parameters of soft soils

来源	参数	均值	变异系数
CLAY/10/7490	$c_u(\text{mob})/\sigma'_v$	0.51	1.25
SH-CLAY/11/4051	$e$	1.24	0.14
SH-CLAY/11/4051	$c_u/\sigma'_v(\text{UCST})$	0.21	0.43
SH-CLAY/11/4051	$c_u/\sigma'_v(\text{VST})$	0.34	0.38

注:  $c_u(\text{mob})/\sigma'_v$  为汇总多种试验的归一化可变  $c_u$ , UCST 为无侧限抗压试验、VST 十字板剪切试验。

表 4 软土的相关距离汇总

Table 4 Correlation lengths for soft soils

序号	$\theta_x$			$\theta_z$		
	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
①	1.07	49	14.2	0.07	1.1	0.36
②	—	—	—	1	6.2	3.63
③	—	—	—	0.79	1.25	0.91
④	0.14	163.8	31.9	0.05	3.62	1.29
⑤	1.2	1000	201.5	0.06	21	1.58
⑥	40.4	45.4	42.9	0.49	0.77	0.63
⑦	8.37	66	30.9	0.11	6.1	1.55
⑧	24.6	66.5	45.6	0.48	1.62	1.04
⑨	—	—	—	1.1	2.0	1.55
⑩	12.7	45.5	33.2	0.14	7.19	2.08
⑪	9.65	45.4	29.8	0.095	6.47	1.40
⑫	22.2	80	47.6	0.14	6.2	1.70
⑬	—	—	—	0.3	2.7	1.42

注: ①冲积土, ②Ankara 黏土, ③Chicago 黏土, ④黏土, ⑤黏土, 砂土与淤泥混合物, ⑥杭州黏土, ⑦海洋黏土, ⑧近海土, ⑨敏感黏土, ⑩淤泥, ⑪淤泥质黏土, ⑫软黏土, ⑬不排水土

## 2.2 多参数统计特征

许多学者研究了软土土性参数之间存在特定的关系, 对于低灵敏度的黏土, 重塑土的不排水抗剪强度  $c_u^{\text{re}}$  与液性指数  $I_L$  存在以下关系:

$$c_u^{\text{re}} = c_{u,L}^{\text{re}} \text{Exp}[-I_L \times \lg(R)] \quad (1)$$

式中:  $c_{u,L}^{\text{re}}$  约为  $1.7 \text{ kN/m}^2$ , 为  $c_u^{\text{re}}$  在液限时的值;  $R$  约为 100, 为  $c_u^{\text{re}}$  在液塑限的比值。根据挪威海洋黏土的试验结果, 灵敏度  $S_t$  与  $I_L$  之间的关系为:

$$S_t = \exp(k \times I_L) \quad (2)$$

式中:  $k$  为模型常数, 对于挪威海洋黏土, 建议  $k$  取 2; 对于渥太华地区的 Leda 黏土, 则有以下关系:

$$c_u = c_{u,L}^{\text{re}} R \exp\{[k - \lg(R)] \times I_L\} \quad (3)$$

参数通常具有应力历史相关性, OCR 随着  $I_L$  增大而减小。 $c_u$  与 OCR 之间的关系为

$$c_u / \sigma'_v = \alpha \text{OCR}^m \quad , \quad (4)$$

式中,  $\alpha$  为正常固结黏土的  $c_u/\sigma'_v$ , 通常推荐  $\alpha=0.23$ ,  $m=0.8$ 。类似的转换模型还有很多, 详细内容可以参考文献[13]。

为表征多元岩土体参数的不确定性, 可采用联合概率分布模型。以多维高斯分布为核心的建模方法, 理论明确, 应用广泛。Ching 等<sup>[14-15]</sup>收集了各地黏土的土性参数形成数据库, 依据数据库建立了多元联合概率分布模型, 其中最具代表性的是 CLAY/10/7490 数据库与 SH-CLAY/11/4051 数据库。因限于篇幅, 对于数据库中协方差矩阵不做详细介绍, 仅展示分析得到的结论:  $c_u$  与竖向有效应力  $\sigma'_v$  联系紧密, 呈负相关关系,  $c_u$  与液塑性指标的关系具有地域性, 在全球数据库中,  $c_u$  与  $I_L$ ,  $I_P$  关系不大, 在上海数据库中,  $c_u$  与  $I_L$ ,  $I_P$  联系紧密。

## 3 掘进参数的不确定性

### 3.1 单参数统计特征

相比土性参数, 掘进参数统计特征方面的研究较少, 并无统一的结论。

表 5~7 记录了五种软土: 上海软土、北京粉质黏土、佛山淤泥质粉土、昆明软土与广州软土。对比均值前三者的总推力与刀盘扭矩较大, 分别约为  $(2.5 \sim 3.5) \times 10^4 \text{ kN}$  与  $4000 \sim 7000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 后两者则较小分别约为  $1.0 \times 10^4 \text{ kN}$  与  $1000 \sim 2000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。昆明软土中 COV<sub>(总推力)</sub> 较大为 0.24; 上海软土中 COV<sub>(刀盘扭矩)</sub> 变异性较大为 0.3, 除此之外, 其他 COV<sub>(总推力)</sub> 均为 0.10 左右, COV<sub>(刀盘扭矩)</sub> 介于 0.14~0.25, 说明在昆明软土与上海软土掘进过程中地层变化较大。软土掘进速度快, 均值为  $31.63 \sim 47 \text{ mm/min}$ , 变异性较小, COV 为 0.07~0.19, 说明软土中推进难度小, 推进情况较稳定。土舱压力均值较小, 为  $1.67 \sim 1.72 \text{ bar}$ , 变异性较小, 变异系数为 0.10~0.12, 这与不同地区软土重度较统一密切相关。

表 5 总推力统计矩与变异系数

Table 5 Statistical moments and COVs of total force

地区, 土质	均值( $10^4 \text{ kN}$ )	标准差( $10^4 \text{ kN}$ )	变异系数
①	3.33		
②	2.47	0.21	0.09
③	1.09	0.26	0.24
④	3.44	0.37	0.11
⑤	1.05	0.10	0.10

注: ①北京, 粉质黏土; ②佛山, 淤泥质粉土层; ③昆明, 软土层; ④上海, 软土; ⑤广州, 软弱地层。(表 6, 7 中同)

表 6 刀盘扭矩统计矩与变异系数

Table 6 Statistical moments and COVs of cutter torque

地区, 土质	均值( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )	标准差( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )	变异系数
①	5750	790	0.14
②	7612.12	1204.28	0.16
③	2082	390	0.19
④	4540	1380	0.30
⑤	981	240.5	0.25

表 7 掘进速度统计矩与变异系数

Table 7 Statistical moments and COVs of advance rate

地区, 土质	均值(mm/min)	标准差(mm/min)	变异系数
②	37.52	7.05	0.19
③	47	5.8	0.12
④	31.63	4.28	0.14
⑤	42.99	2.82	0.07

掘进参数的概率分布模型并无统一结论。王凯等<sup>[16]</sup>分析了实测扭矩和贯入阻力的概率密度分布特点, 认为其服从  $t$  分布。Zhou 等<sup>[17]</sup>认为不同掘进参数的概率分布形式各不相同, 注浆量符合正态分布, 刀盘扭矩符合泊松分布。丁小彬等<sup>[18]</sup>则认为掘进速度、刀盘扭矩与总推力的数据分布与正态分布相近。

### 3.2 多参数统计特征

许多学者研究了掘进参数之间的相关关系。为简便起见, 下文记推进速度  $v$ 、总推力  $F$ 、刀盘扭矩  $T$ 、刀盘转速  $n$ 、贯入度  $r_c$ 、土舱压力  $p_c$ 、注浆压力  $p_g$ 。有关总推力与刀盘扭矩的转换模型较多, 相关关系模型列举如下。

#### (1) 总推力

对于总推力的计算, 目前采用较广泛的是基于施工经验的估算公式:

$$F = \beta D \quad , \quad (5)$$

式中,  $D$  为盾构直径,  $\beta$  为经验系数, 可看作单位面积上的等效作用力, 取值为  $500\sim 1200 \text{ kN/m}^2$ 。根据经验系数确定的推进力具有较大随机性, 相比之下理论方法更具解释性, 理论法将阻力分为正面阻力( $F_1$ )、盾壳摩擦力( $F_2$ )、切口环贯入阻力( $F_3$ )、管片摩擦力( $F_4$ )、后配套牵引阻力( $F_5$ )和变向阻力( $F_6$ )。通常,  $F_1$  与  $F_2$  占比较大;  $F_3\sim F_5$  可视为次要影响因素;  $F_6$  为不确定性因素, 因此通常以  $(F_1+F_2)$  乘以安全储备系数  $S$  作为总推力, 总推力的计算式可简化为

$$F = S \cdot (F_1 + F_2) \quad . \quad (6)$$

施虎等<sup>[19]</sup>对黏土提出的理论模型式(7), (8); 陈仁朋等<sup>[20]</sup>将挤土效应考虑进刀盘正面阻力( $F_1$ )中, 将作用在盾壳的土压力采用有效重度进行计算, 提出了理论模型式(9), (10); 旷斌<sup>[21]</sup>将土舱内壁与土体的摩擦阻力考虑进刀盘正面阻力( $F_1$ )中, 提出了理论模型式(11), (12)。限于篇幅, 式中符号意义见文献[19~21]。

$$F_1 = \frac{\pi D^2}{4} [(K\gamma' H + Kp_q + \rho g H')(1-\eta) + p_c \eta], \quad (7)$$

$$F_2 = \pi L c \quad , \quad (8)$$

$$F_3 = \frac{\pi D^2}{4} [(p_0 + \Delta p_2)(1-\eta) + p_c e^{Al} \eta] \quad , \quad (9)$$

$$F_2 = fL\gamma'D[2(1+K_a)H - \frac{1}{4}D(\pi+2K_a)] + fW \quad , \quad (10)$$

$$F_1 = \frac{\pi D^2}{4} [p_c(e^{AlK^2} - 1) + p_c(1-\eta)] \quad , \quad (11)$$

$$F_2 = fL \left[ \left( \frac{p_c}{2K_0} + \gamma D \right) - \frac{\pi D^2}{4} \gamma + 2p_c D \right] \quad . \quad (12)$$

#### (2) 刀盘扭矩

类似地, 基于大量数据, 刀盘扭矩可表示为

$$T = \kappa D^3 \quad , \quad (13)$$

式中,  $\kappa$  为与地层条件和盾构类型相关的系数, 通常取 18.9, 海瑞克公司对土压盾构统计分析, 得出该系数的取值应为 15~30。与总推力类似, 理论法将扭矩分为刀盘正面、侧面与土体之间的摩阻力扭矩( $T_1$ )、刀盘切削土体时的地层抗力扭矩( $T_2$ )、刀盘和搅拌叶片的搅拌扭矩( $T_3$ )、刀具受到的摩阻力扭矩( $T_4$ )、密封引起的摩阻力扭矩( $T_5$ )、轴承引起的摩阻力扭矩( $T_6$ )和为减速装置摩擦损失的扭矩( $T_7$ )。其中,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  为主要因素, 与总推力的计算同理, 刀盘扭矩的计算式可简化为

$$T = S \cdot (T_1 + T_2 + T_3) \quad . \quad (14)$$

吕强等<sup>[22]</sup>通过比对理论模型与试验及现场的数据, 提出简化的理论模型式(15), (16); 王洪新<sup>[23]</sup>考虑刀盘面板的挤土效应与刀背阻力, 提出基于理论的拟合模型式(17)~(19), 陈仁朋等<sup>[20]</sup>考虑刀盘面板的挤土效应与开挖面地层渗透性, 提出了理论模型式(20); 旷斌<sup>[21]</sup>考虑刀盘背面需要克服的土舱内部摩擦阻力, 提出了理论模型式(21)。

$$T = 1.2T_1 \quad , \quad (15)$$

$$T_1 = \frac{\pi D^3}{12} K_f \gamma H (1-\eta^2) + \frac{\pi D^3}{4} (1+K_a) f \gamma H d \quad , \quad (16)$$

$$T_1 = \frac{\pi D^3}{12} f (2K_0 \gamma H + \Delta p_2) (1-\eta) \quad , \quad (17)$$

$$T_2 = \left[ K_0 \gamma H \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right] \frac{D^2}{8} r_c \quad , \quad (18)$$

$$T_3 = \gamma H_0 D_b L_b R_b f \quad , \quad (19)$$

$$T_1 = \frac{\pi D^3}{12} f (K_0 \gamma' H + \Delta p_2) (1-\eta) + \frac{\pi D^2}{4} (1+K_0) f \gamma' H d \quad , \quad (20)$$

$$T_1 = 1.2 \left( \frac{\pi D^3}{12} f p_c (1-\eta) + \frac{\pi D^3}{12} f' p_c (1-\eta) + \frac{\pi D^3}{48} \eta p_c \tan \varphi \right) \quad . \quad (21)$$

式中:  $d$  为刀盘外沿的宽度;  $f'$  为土舱板与土体之间的摩擦系数;  $H_0$  为搅拌叶片覆土深度;  $D_b$  为搅拌叶片直径;  $L_b$  为搅拌叶片长度;  $R_b$  为搅拌叶片到刀盘中心距离。

## 4 物理间隙的不确定性

$G_p$  与盾尾间隙及注浆效果密切相关。盾尾间隙由盾壳厚度及盾尾操作空间确定, 一般为 8~16 cm, 大直径隧道盾尾间隙可达 20 cm<sup>[24]</sup>。注浆效果则取决于盾尾填充率, 采用无损物探法可识别浆液扩散范围, 确定实际的盾尾填充率, 本节以隧道探地雷达实测数据来揭示  $G_p$  的不确定性。图 2 (a)~(e) 分别为延安东路隧道北线江中段 590 环~990 环<sup>[25]</sup> (案例 1), 延安东路隧道南线两条测线为 500~1500 m<sup>[25]</sup> (案例 2), 延安东隧道北线 0~1200 m<sup>[26]</sup> (案例 3), 成都地铁 1 号线 40~80 环<sup>[27]</sup> (案例 4) 以及翔殷路 50 m 里程的数据<sup>[28]</sup> (案例 5)。图 2 (a), (d) 虽为同一隧道, 但并非同一方向测线。从注浆填充率的值上来看, 案例 1~3 中一半以上的环数注浆填充率小于 100%, 而案例 4~5 注浆填充率几乎大于 100%, 很明显前者较后者注浆效果差。主要的原因如下: 案例 1~3 中延安东路隧道 1988 年底建成, 测线数据在 2015 年后隧道结构劣化后得到, 管片的湿迹、错台、破损等情况较多。后两个案例, 测量时间与贯通时间接近, 且测线较短, 注浆效果仍保持在较好的水平。图 2 同时展示了五个案例概率分布拟合的结果。对峰值明显、变异性大的案例 1 采用了对数逻辑分布拟合; 而对案例 2~5 则采用正态分布进行拟合, 进行 K-S 检验测试拟合优度,  $h$  均为 0,  $p$  均大于 0.05, 说明在 5% 显著性水平上都能够接受样本符合该分布的原假设。可认为, 在注浆效果尚可的情况下, 注浆填充率服从正态分布, 均值为 0.81~1.40, 变异系数为 0.05~0.30, 若注浆效果较差, 注浆填充率的分布可能服从对数逻辑分布, 参考案例 1。

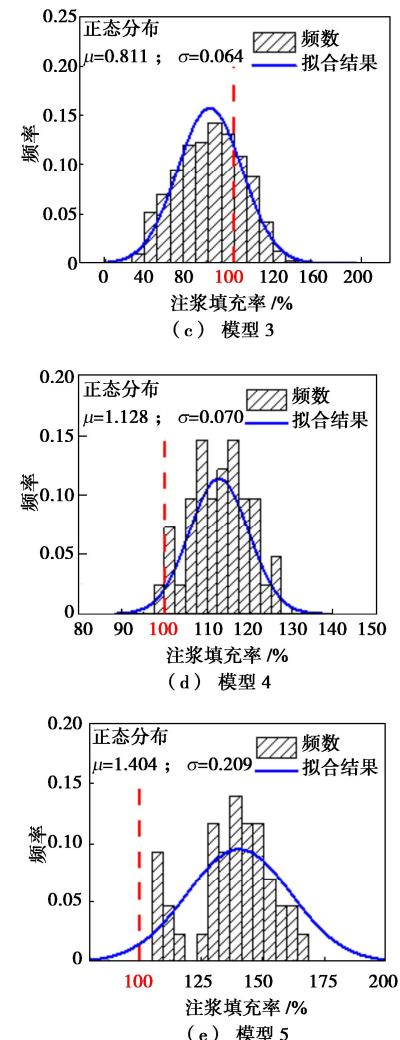
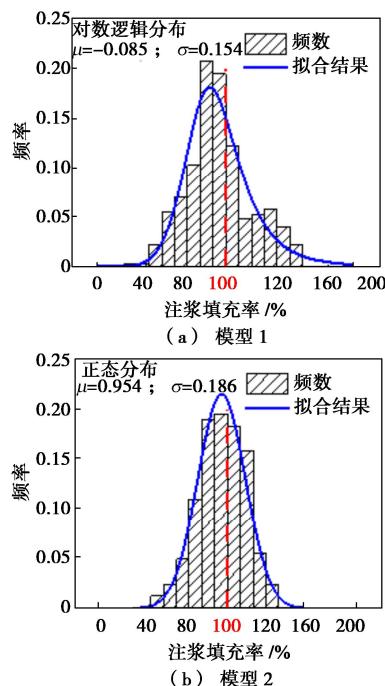


图 2 注浆填充率的分布

Fig. 2 Distribution of filling rate of grouting

为检验以上概率分布模型的实际可用性, 选取某一特定软土盾构隧道工程中  $u^*_{3D}$  接近于 0,  $\omega$  已知的 21 环实测数据来反演注浆填充率。位移反演分析模型参考了文献[29], 绘制 21 环注浆填充率的 Q-Q 图 (如图 3 所示), 来判断 5 个概率模型的适用性。理论上, Q-Q 图中的数据越接近 1:1 线, 代表该组数据近似服从这一分布的可能性越大。模型 1~3 对应的散点相

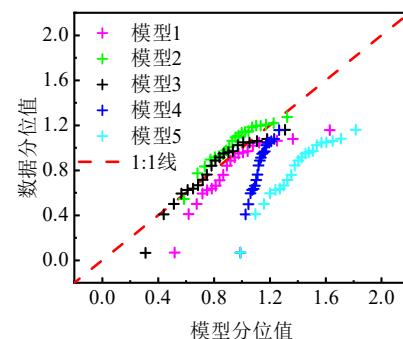


图 3 注浆填充率的 Q-Q 图

Fig. 3 Q-Q graph of filling rate of grouting

比模型 4~5 更加贴近 1:1 线, 其中模型 3 刻画散点的分布最为准确, 证明了本节建立的注浆填充率概率模型的实际适用性。而在有充分证据证明注浆情况良好时, 也可使用模型 4 与模型 5 对注浆填充率进行评估。

## 5 结 论

本文从间隙参数分量  $u^*_{3D}$ 、 $\omega$  与  $G_p$  出发, 分析其影响因素, 从文献中搜集影响因素的统计特征, 建立有关间隙参数不确定性的基本认知, 得到的主要结论如下:

(1) 对地层参数的统计特征进行文献调研, 得到表 1~3 为软土土性参数的统计特征, 统计结果表明我国软土密度较为统一, 孔隙比均值大于 1, 压缩模量均值小于 3 MPa, 内摩擦角小于 10°。深广等地滨海相软土变异性大, 软土变形与强度参数变异性较大。地层参数的概率分布模型建议采用正态分布与对数正态分布模型。表征软土空间变异性相关距离汇总于表 4; 确定性转换模型为式 (1) ~ (4); 多元联合概率分布可参考 CLAY/10/7490 与 SH-CLAY/11/4051。

(2) 对掘进参数的统计特征进行文献调研, 得到掘进参数统计特征见表 5~7, 结果表明, 在软土中盾构隧道掘进速度较快, 掘进速度与土舱压力变异性小, 推进情况稳定; 常用的概率分布模型以正态分布居多; 确定性转换模型见式 (5) ~ (21)。这些统计结果将会应用于后续对  $u^*_{3D}$  与  $\omega$  不确定性的表征中。

(3)  $G_p$  与注浆效果有直接关系, 通过文献报道过地质雷达数据, 建立了五个描述注浆填充率的概率分布模型。应用实测数据反演的注浆填充率证明了所建模型的适用性。结合盾尾间隙值, 该概率分布模型能直接表征  $G_p$  的不确定性。

## 参 考 文 献:

- [1] CAMÓS C, ŠPAČKOVÁ O, STRAUB D, et al. Probabilistic approach to assessing and monitoring settlements caused by tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **51**: 313-325.
- [2] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Probabilistic analyses of tunneling-induced ground movements[J]. Acta Geotechnica, 2013, **8**(2): 181-199.
- [3] MIRO S, HARTMANN D, SCHANZ T. Global sensitivity analysis for subsoil parameter estimation in mechanized tunneling[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **56**: 80-88.
- [4] FRANCO V H, DE F N GITIRANA G, DE ASSIS A P. Probabilistic assessment of tunneling-induced building damage[J]. Computers and Geotechnics, 2019, **113**: 103097.
- [5] LEE K M, ROWE R K, LO K Y. Subsidence owing to tunneling: I Estimating the gap parameter[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, **29**(6): 929-940.
- [6] 孟德强. 中国软土分区讨论及其参数统计特征研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020. (MENG Deqiang. Discussion on Soft Soil Zoning in China and Study on Its Parameter Statistical Characteristics[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020. (Chinese))
- [7] BJERRUM L. Embankments on soft ground[C]// Performance of Earth and Earth-Supported Structures (ASCE), Lafayette, Indian, 1972: 1-54.
- [8] KULHAWY F H, MAYNE P W. Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design (Report EL-6800)[R]. Palo Alto, Calif: Electric Power Research Institute, 1990.
- [9] MESRI G, HUVAJ N. Shear strength mobilized in undrained failure of soft clay and silt deposits[C]// Advances in Measurement and Modeling of Soil Behaviour. Denver, Colorado, USA Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2007: 1-22.
- [10] FENTON G A, GRIFFITHS D V. Bearing capacity prediction of spatially random  $c-\phi$  soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, **40**(1): 54-65.
- [11] 陈立宏, 陈祖煜, 刘金梅. 土体抗剪强度指标的概率分布类型研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(1): 37-40, 45. (CHEN Lihong, CHEN Zuyu, LIU Jinmei. Probability distribution of soil strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(1): 37-40, 45. (in Chinese))
- [12] CAMI B S, PHOON Javankhoshdel K K, CHING J. Scale of fluctuation for spatially varying soils: estimation methods and values[J]. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2020, **6**(4): 03120002.
- [13] CHING J, PHOON K K. Modeling parameters of structured clays as a multivariate normal distribution[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, **49**(5): 522-545.
- [14] CHING J, PHOON K K, CHEN C H. Modeling piezocene cone penetration (CPTU) parameters of clays as a multivariate normal distribution[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(1): 77-91.
- [15] CHING J, PHOON K K. Reducing the transformation uncertainty for the mobilized undrained shear strength of clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, **141**(2): 04014103.
- [16] 王凯, 盛永清, 王国安, 等. 海域复杂地层超大直径泥水盾构掘进参数分析研究[J]. 施工技术(中英文), 2021,

- [50(19): 37-41. (WANG Kai, SHENG Yongqing, WANG Guoan, et al. Analysis of parameters about extra-large diameter slurry shield tunneling through submarine complex strata[J]. Construction Technology, 2021, 50(19): 37-41. (in Chinese))]
- [17] ZHOU C, DING L Y, SKIBNIEWSKI M J, et al. Data based complex network modeling and analysis of shield tunneling performance in metro construction[J]. Advanced Engineering Informatics, 2018, 38: 168-186
- [18] 丁小彬, 董耀俊. 基于正态分布理论的盾构掘进参数预警值的分析与计算[J]. 科技通报, 2021, 37(10): 106-111. (DING Xiaobin, DONG Yaojun. Analysis and calculation of alarm value for shield machine parameters based on the normal distribution theory[J]. Bulletin of Science and Technology, 2021, 37(10): 106-111. (in Chinese))
- [19] 施虎, 龚国芳, 杨华勇, 等. 盾构掘进机推进力计算模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(1): 126-131. (SHI Hu, GONG Guofang, YANG Huayong, et al. Determination of thrust force for shield tunneling machine[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(1): 126-131. (in Chinese))
- [20] 陈仁朋, 刘源, 汤旅军, 等. 复杂地层土压平衡盾构推力和刀盘扭矩计算研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 26-32. (CHEN Renpeng, LIU Yuan, TANG Lüjun, et al. Research on calculation of thrust and cutter head torque on shield in complex strata[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 26-32. (in Chinese))
- [21] 旷斌. 土压平衡式盾构掘进顶推力和刀盘扭矩理论研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(36): 331-336. (KUANG Bin. Theoretical study on top pressure and cutter torque of earth pressure balanced shield tunneling[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(36): 331-336. (in Chinese))
- [22] 吕强, 傅德明. 土压平衡盾构掘进机刀盘扭矩模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 3137-3143. (LÜ Qiang, FU Deming. Research on torque of cutterhead for earth pressure balance shield with simulating experimental[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3137-3143. (in Chinese))
- [23] 王洪新. 土压平衡盾构刀盘扭矩计算及其与盾构施工参数关系研究. 土木工程学报, 2009, 42(9): 109-113. (WANG Hongxin. Calculation of cutterhead torque for EPB shield and the relationship between cutterhead torque and shield driving parameters[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 109-113. (in Chinese))
- [24] 颜静, 王飞, 付春青, 等. 地铁盾构隧道同步注浆地表沉降控制效果影响因素的现场试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 48-53. (YAN Jing, WANG Fei, FU Chunqing, et al. Field experiment on influencing factors of surface settlement control effect induced by shield tunnel synchronous grouting[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(10): 48-53. (in Chinese))
- [25] 李鸿. 壁后注浆对大直径盾构隧道劣化的影响[J]. 地下工程与隧道, 2017(2): 27-30, 77. (LI Hong. Backfill grouting influence on deterioration of large diameter shield tunnel[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2017(2): 27-30, 77. (in Chinese))
- [26] 羌培. 盾构施工对大直径隧道劣化的影响分析[J]. 施工技术, 2017, 46(7): 107-110. (QIANG Pei. Influence of shield construction on deterioration of large diameter tunnel[J]. Construction Technology, 2017, 46(7): 107-110. (in Chinese))
- [27] 张铭. 上海延安东路隧道壁后注浆探地雷达检测及结果分析[J]. 地下工程与隧道, 2016(1): 15-17, 21. (ZHANG Ming. Inspection and results analysis of grouting behind lining in Shanghai East Yan'an Road tunnel by ground penetrating radar[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2016(1): 15-17, 21. (in Chinese))
- [28] 田海洋. 越江公路盾构隧道壁后注浆探地雷达探测试验及应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2008. (TIAN Haiyang. Test and Application of Ground Penetrating Radar for Grouting Behind the wall of Shield Tunnel on River-Crossing Highway[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese))
- [29] LOGANATHAN N, Poulos H G. Analytical prediction for tunnelling-induced ground movements in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846-856.

(编校: 明经平)