



掘进参数调控稳定性对软土盾构隧道诱发 地表沉降的影响

何海妮^{1a}, 章荣军^{1a,1b,1c}, 阳栋², 陶凤娟^{1a}, 郑俊杰^{1a}

(1. 武汉大学 a. 土木建筑工程学院; b. 水资源工程与调度全国重点实验室; c. 水工岩石力学教育部重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国建筑第五工程局有限公司, 长沙 410004)

摘要: 盾构隧道开挖诱发地表沉降的研究多将掘进参数视为确定值, 忽略了其在调控过程中变异性的影响。为研究盾构掘进参数调控稳定性与地表沉降的关系, 以武汉地铁 12 号线某盾构隧道区间工程为依托, 建立盾构隧道开挖全过程的三维数值模型, 探究土仓压力、超挖间隙和注浆压力的变异水平对地表沉降的影响规律, 重点分析不同掘进参数变异性的敏感性和风险值。结果表明: 盾构施工过程中掘进参数的调控稳定性对地表沉降有重要影响, 地表沉降的离散程度与掘进参数变异水平呈正相关; 地表沉降受主要影响区域内掘进参数调控稳定性的影响; 土仓压力和超挖间隙变异性对地表沉降的敏感性较大; 基于数值模拟结果得到土仓压力、超挖间隙和注浆压力变异系数控制指标分别为 0.22、0.14 和 0.35。

关键词: 软土; 盾构隧道; 掘进参数; 变异性; 地表沉降

中图分类号: U455.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-13

Influence of control stability of construction parameters on surface settlement induced by shield tunneling in soft soil

HE Haini^{1a}, ZHANG Rongjun^{1a,1b,1c}, YANG Dong², TAO Fengjuan^{1a}, ZHENG Junjie^{1a}

(1a. School of Civil Engineering; 1b. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management; 1c. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of the Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China; 2. China Construction Fifth Engineering Division Co., Ltd., Changsha 410004, P. R. China)

Abstract: In the researches on surface settlement induced by shield tunneling, most of the construction parameters are regarded as deterministic values, ignoring their variability during the control process. This paper aims to investigate the relationship between the control stability of construction parameters control and the surface settlement caused by shield tunneling. Based on the shield tunneling project of a certain section of Wuhan Metro Line 12, a three-dimensional numerical model is established to simulate the whole process of shield tunneling. The influence of the variation level of chamber earth pressure, over-excavation gap, and grouting pressure on the surface settlement is investigated. An effort is also made to gain insight into the

收稿日期: 2025-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(52122806, 52308372)

作者简介: 何海妮(2001-), 女, 主要从事岩土工程与隧道研究, E-mail: haini_he@whu.edu.cn。

章荣军(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: ce_zhangrj@whu.edu.cn。

Received: 2025-03-07

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52122806, 52308372)

Author brief: HE Haini (2001-), main research interests: geotechnical engineering and tunnelling, E-mail: haini_he@whu.edu.cn.

ZHANG Rongjun (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: ce_zhangrj@whu.edu.cn.

sensitivity and risk values of the variability of different construction parameters. The results show that the control stability of construction parameters control during the shield tunneling process has a great influence on the surface settlement, and the dispersion degree of surface settlement is positively correlated with the variation level of construction parameters. Moreover, the uncertain surface settlement is affected by the control stability of construction parameters within the primary impact area. The sensitivity of surface settlement to the variability of chamber earth pressure and over-excavation gap is relatively high. According to the numerical analyses, the control thresholds for the coefficients of variation of chamber earth pressure, over-excavation gap, and grouting pressure were determined as 0.22, 0.14, and 0.35 respectively.

Keywords: soft soil; shield tunnel; construction parameters; variability; surface settlement

随着城市化进程的加快,地铁等地下工程建设规模不断扩大。盾构隧道施工不可避免地会引起地层扰动和地面沉降,过大的沉降可能会危害邻近建筑物等的安全^[1]。特别是在软土地区,由于土体具有承载能力弱、压缩性高等特点,隧道施工难度加大,地层扰动及地表沉降难以控制^[2]。因此,准确、及时和有效地评估和控制软土盾构隧道施工对地表环境的影响具有重要意义。

地表环境的稳定与盾构施工过程的控制紧密相关,大量研究人员围绕盾构掘进参数对地表沉降的影响展开了探讨。相关研究多采用将分步开挖模型中各环的掘进参数视为不同水平恒定值^[3-4],或在单点单模型中考虑开挖面掘进参数的变化^[5]等确定性分析方法。然而,掘进参数在盾构推进过程中并非一成不变,受盾构行进路线、地层条件、盾构设备状态以及工作人员操作水平等影响,掘进参数需要不断地动态控制和调整优化,具有显著的变异性。主要包括:地层性质不均、掘进速度变化等,需要不断调整土仓内的切削土量和排土量,导致土仓压力发生变动;受刀盘受力不均和盾构姿态难以控制的影响,盾构机体发生左右摆动、上下俯仰等偏心掘进现象而导致的超挖间隙不均匀;复杂地层中存在的裂隙、大孔隙等,使注浆过程中发生浆液出漏和流失而引起注浆压力不稳定。参数的变异水平可以表征掘进参数的调控稳定程度。

盾构隧道掘进参数的稳定调控对地表沉降具有显著影响。一方面,盾构隧道开挖诱发地表沉降的过程是逐步发展的,地表沉降不仅与测点断面位置的单点掘进参数有关,还受盾构抵达前后多点施工工艺的影响,具有显著的时变性和时滞性^[6];另一方面,地表沉降与盾构掘进参数的控制情况直接相关,土仓压力设置不当、盾构过切和偏心超挖、盾尾注浆量和注浆压力不足,均会导致地表发生沉降^[7]。大量隧道工程现场监测数据表明,地表沉降与掘进参数大小密切相关,且不同掘进参数的敏感性和影响程度存在差异^[8-10],因此,针对各掘进参数采取不

同的调控措施以维持其稳定性,对控制地表沉降尤为重要。

相比于采用单点掘进参数计算的确定性方法,不确定性方法能够反映盾构期间多点掘进参数变异与地表沉降间的关系,从而体现掘进参数动态调控过程的影响,更加科学地指导盾构隧道地表沉降风险评估实践。周健等^[11]基于盾构隧道试验段监测数据建立“施工参数-地层损失率经验模型”,并提出了盾构隧道施工预测和动态调控的方法;Zhang等^[12]、Guo等^[13]、陈仁朋等^[14]基于机器学习算法分析盾构关键掘进参数等与地表沉降之间的非线性关系,并对最大地表沉降进行预测。但上述研究没有考虑掘进参数稳定性的不同调控水平对地表沉降产生的影响。李玉秋^[15]研究了软土隧道盾构过程中盾尾间隙等掘进参数的变异对地表沉降和水平位移的影响,除此之外,鲜有研究聚焦掘进参数变化下的地表沉降响应展开探讨。

鉴于上述问题,笔者以武汉地铁12号线某区间盾构掘进工程为依托,建立三维数值模型,对土仓压力、超挖间隙和注浆压力3个关键掘进参数影响下的地表变形进行模拟;结合地表沉降监测结果,对考虑盾构施工过程中掘进参数调控稳定性的不确定性方法进行验证;通过改变掘进参数变异系数大小,研究不同掘进参数稳定调控水平对地表沉降的影响;根据最大地表沉降上限与掘进参数区域变异系数的关系,探讨掘进参数的变异系数控制标准,并对其敏感度和风险等级进行详细分析,进一步提出了盾构隧道施工掘进参数稳定性调控方法。

1 数值模型的建立

1.1 工程背景

研究对象为武汉地铁12号线富安街站—江楚大道站区间的部分区段。隧道采用土压平衡盾构机进行掘进施工,选取左线始发而右线尚未掘进的阶段进行模拟研究。左线长约688 m,隧道外径 D 为6.4 m,隧道中心线埋深约为15 m。场地地表较

为平坦空旷,取区间第48环作为监测点位。场地监测点布置和简化后的地层剖面如图1所示,隧道主要穿越地层为(10-2)黏土,地下水位埋深约为3.5 m。监测断面共设置了8个监测点(DBC48-1~

DBC48-8),垂直于盾构掘进方向分布在隧道两侧,测点间距为3.2 m,其中监测点 DBC48-3 位于隧道轴线正上方。

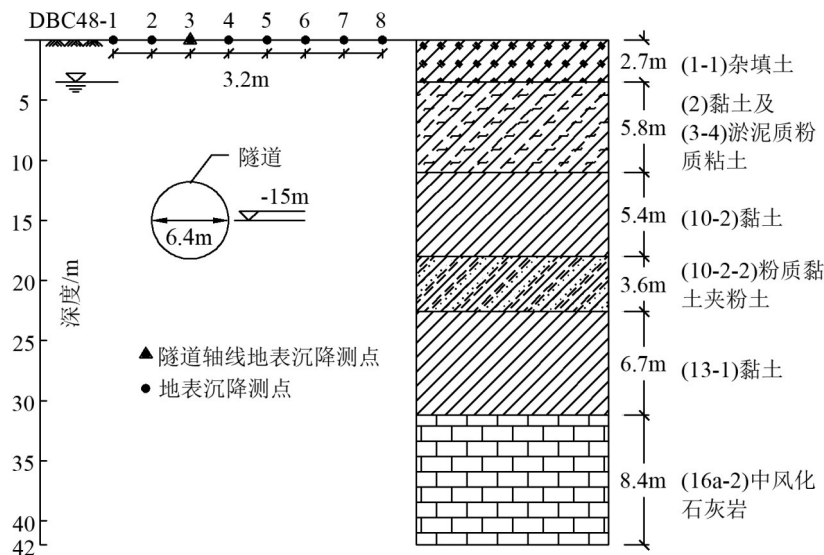


图1 测点布置及简化地层剖面图

Fig.1 Layout of monitoring points and simplified strati-graphic profile

对该区间盾构机调度参数的实时监测数据进行统计整理,得到土仓压力、超挖间隙和注浆压力的频率分布直方图以及统计特征如图2所示,三者近似服从正态分布。其中,参数的变异系数 C_v 为参

数均值与标准差的比值,如式(1)所示,超挖间隙根据盾构机盾头和盾尾的偏移距离计算得到^[7]。

$$C_v = \frac{\mu}{\sigma} \quad (1)$$

式中: μ 为参数均值; σ 为标准差。

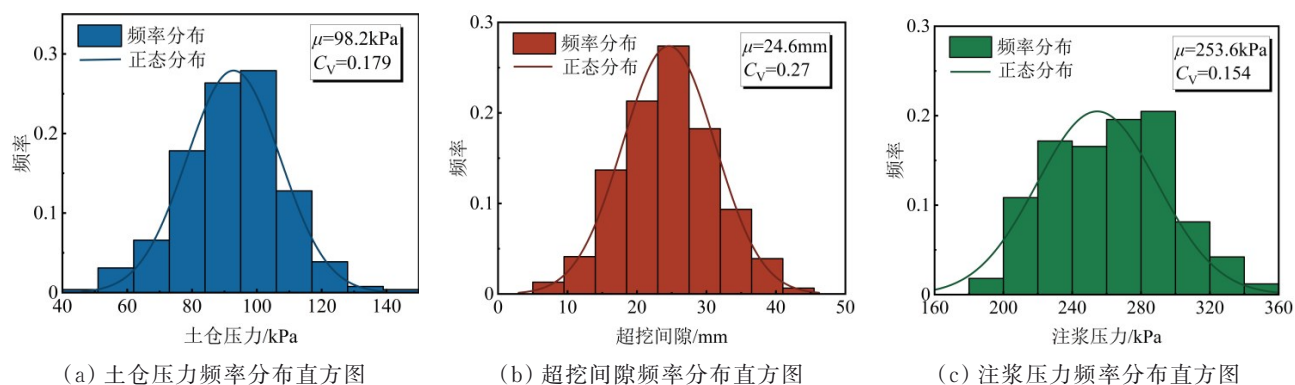


图2 盾构掘进参数分布

Fig.2 Shield tunneling parameter distribution

1.2 计算模型

1.2.1 几何模型

利用有限差分软件FLAC3D建立描述盾构与土体之间相互作用(土仓压力、超挖间隙和注浆压力)的三维数值模型,并模拟盾构隧道施工全过程。由于隧道物理模型满足对称关系,为提高计算效率,截取模型横向方向上的一半进行分析,图3为模型计算域和网格划分情况。当模型总长度(Y方向)为78 m($>5H$),总宽度(X方向)为35 m($>H+$

3D),总高度(Z方向)为42 m($>H+4D$)时,基本可消除边界影响^[16]。模型上表面为自由边界,下表面各方向完全固定,其余四周边界均约束法向位移。重点研究盾构隧道施工对地表沉降的短期影响,故给定无渗流条件并采用不排水分析方法进行模拟计算。

盾构机主机长9 m,外径6.4 m。超挖间隙、衬砌管片和注浆层采用实体单元和线弹性本构模型模拟,其中刀盘开挖直径为6.44 m,管片外径6.2

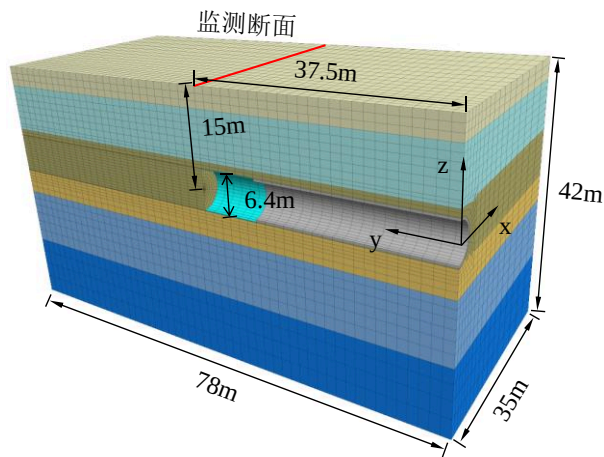


图3 数值模型网格划分

Fig.3 Numerical model and mesh generation

m,环宽 1.5 m,具体尺寸参数如表 1 所示。地表沉降监测点位于 Y 方向 37.5 m 的断面位置对应。

1.2.2 本构模型及材料参数

硬化土小应变模型(Hardening Soil with Small Strain)考虑了土体应力的历史影响以及土体的剪

表 1 模型相关尺寸参数

Table 1 Dimension parameters in model

盾壳		衬砌		超挖间隙	未凝固注浆体	
外径/m	长度/m	厚度/m	环宽/m	厚度/m	厚度/m	长度/m
6.41	9	0.35	1.5	0.02	0.12	10.5

表 2 各土层勘察参数及本构模型参数取值

Table 2 Investigation parameters and constitutive model parameters for soil layer

土层编号	本构模型	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	K_0	E/MPa	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	G_0/MPa	E_0/MPa	$\gamma_{0.7}$	m	R_f
(1-1)	MC	19.2	8	15	0.45	12								
(2)(3-4)		17.5	14	17.9	0.69		2.8	3.5	14	35	84	3.2	0.65	0.66
(10-2)	HSS	19.7	31.1	19.4	0.69		8	10	40	100	240	3.2	0.65	0.95
(10-2-2)		20.1	16	21.5	0.63		6	7.5	30	75	180	3.2	0.65	0.95
(13-1)		20.4	29.9	19.1	0.69		8.8	11	44	110	264	3.2	0.65	0.95
(16a-2)	MC	26.5	35	26.5	0.45	44								

表 3 盾构材料参数取值

Table 3 Parameters for shield materials

材料	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	厚度/cm	长度/m
盾壳	78.6	206	0.3	10	9
衬砌	25	25	0.2	35	
未凝固注浆层	13	0.000 25	0.2	12	10.5
凝固后注浆层	24	0.4	0.25	12	

1.3 开挖模拟

重点讨论土仓压力、超挖间隙和注浆压力对盾构施工的影响。土仓压力 P 简化为沿深度线性变化的面力,施加在隧道掌子面上以平衡前方土体压力。将隧道轴线处的水平地应力作为参考压力,单位深度地层的水平地应力作为梯度。

切硬化、压缩硬化的特性,能反映土体在小应变阶段的刚度非线性、应力相关等特征,在基坑和隧道施工模拟中具有良好的适用性^[17-19]。采用硬化土小应变(HSS)模型对软土地层进行模拟,隧道上方杂填土和底部岩层则设为摩尔-库仑本构模型。HSS模型的模量参数较多,在实际工程中往往难以直接测定,常用经验法获取,即根据工程地质勘察报告提供的压缩模量 E_{s1-2} 和一定范围的经验系数来计算各模量值。HSS本构模型参数根据武汉、上海地区软土 HSS 参数相关研究来确定^[17,20],各土层的具体参数取值如表 2 所示。

盾壳、衬砌管片和注浆层均采用线弹性实体模型进行模拟,表 3 中给出了各材料详细参数指标。其中管片视为没有错缝拼接的完整结构,并取其 75% 的弹性模量以等效反映接缝的存在^[21]。忽略盾尾未充填间隙的影响,令注浆层厚度等于盾尾间隙厚度。为准确模拟注浆材料随时间推移而硬化的过程,将注浆层划分为两个不同力学性质的阶段:1)未凝固注浆层,设为有内压的低刚度材料,弹性模量数值上等于注浆压力^[22]。在研究对象中,注浆层浆液材料的终凝时间为 18 h,根据施工掘进速度,设置未凝固注浆层长度为 7 环,即 10.5 m;2)凝固后注浆层,其弹性模量取 400 MPa^[21]。

为简化模型,忽略盾构机下沉和盾壳锥度的影响,超挖间隙 g 取为刀盘半径与盾构机尾盾半径的差值。当土层条件不变时,超挖边界的地应力保持恒定,因此可采用低弹性模量单元的形变量来模拟超挖间隙。通过不断调整间隙单元弹性模量来控制开挖边界土体收敛大小,直至收敛值与超挖间隙一致,这种方法使得超挖间隙在盾构隧道模拟过程中能成为一个可控的变量^[16]。在模型中,超挖间隙单元弹性模量为 0.1 MPa,泊松比为 0.42。

通过模拟注浆压力能够反映盾尾注浆效果对地表沉降的影响,符合工程实际的同时兼顾了模型的可行性。注浆压力 F 设置为沿土体和管片表面法向方向的面力,并沿掘进方向均匀分布,大小取隧道顶部竖向土压力的 1.2 倍^[23],即 0.25 MPa。注浆

压力加载在未凝固注浆层段的7环土体表面,凝固注浆层段的注浆压力视为消散。

为保证隧道开挖面的稳定,实际工程中盾构掘进是一个动态且持续的过程。在进行数值模拟时,为简化计算模型,通常将掘进过程近似处理为分步进行的非连续过程。采用刚度迁移法模拟盾构的分步推进过程,如图4所示,具体计算步骤如下:

1) 设置初始条件和边界条件,进行地应力平衡;

2) 盾构机向前掘进一环,将该环位置土体单元设置为空模型,激活该环处的盾壳单元并赋予相应的参数值。降低超挖间隙单元的弹性模量,同时向工作面施加土仓压力;

3) 重复步骤2),并移除上一环土仓压力。当盾构机全部进入土体后,盾构机每向前掘进一环,移除盾壳单元的最后一环,并将该环位置处的盾壳单元与超挖间隙单元合并形成注浆层,赋予其注浆体未凝固时的相关参数。同时激活该环位置处的衬砌单元,向衬砌和土层表面施加注浆压力;

4) 当同步注浆压力施加至第7环时,盾构机每向前掘进一环,移除最后一环的同步注浆压力,并将该环位置处的注浆层单元赋予注浆体凝固后的相关参数;

5) 重复步骤2)~4)直至开挖结束。

1.4 分析方法与验证

为体现掘进参数调控稳定性对地表沉降的影响,分别采用确定性与不确定性两种方法进行计算。确定性分析方法中掘进参数为恒定值,不确定性分析方法则考虑掘进参数在盾构过程中的变化,更符合实际情况。参考工程区间掘进参数监测数据的分布类型与变异系数,利用Matlab数值软件分别生成一系列正态分布随机变量,再将其依次读取到盾构隧道模型中作为每一环掘进参数的输入值,

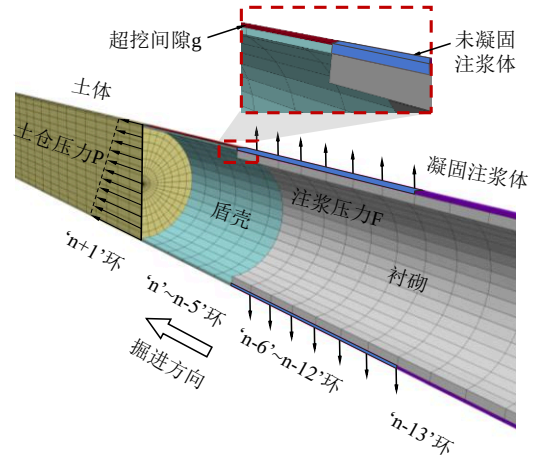


图4 盾构掘进过程与掘进参数施加示意图

Fig.4 Schematic diagram of shield driving process and tunneling parameter application

从而实现对掘进参数变异的批量随机模拟。其中,土仓压力与注浆压力的随机性可直接改变输入值来实现,但超挖间隙变异性的准确取值较为困难。当超挖间隙服从正态分布且变异系数较小时,超挖间隙与间隙单元弹性模量的变异系数近似相等,因此超挖间隙的变异可通过改变间隙单元的弹性模量来近似等效实现。

利用上述方法对隧道模型进行开挖模拟,得到测点地表沉降的确定性结果、不确定性结果与监测结果对比如图5所示。确定性结果与监测结果的最大地表沉降分别为10.86 mm和9.63 mm,误差达到13.1%,因此采用确定性分析方法不能准确反映盾构过程中地表沉降的真实变化。图5(c)中的不确定性结果最大地表沉降的95%置信区间范围为9.47~14.86 mm,监测结果位于该分布范围内,对应某一掘进参数随机变量实现的计算结果。上述结果验证了不确定性数值模拟方法与模型参数的适用性与可靠性,可以在此基础上开展掘进参数调控稳定性对地表沉降的影响分析。

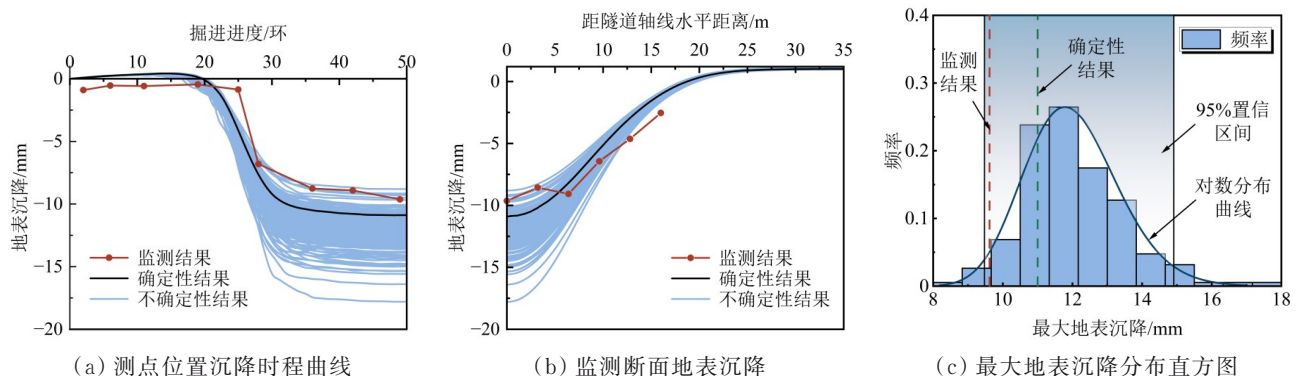


图5 盾构掘进引起的地表沉降结果对比

Fig.5 Comparison of surface settlement induced by shield tunneling

由图5可知,确定性地表沉降值位于不确定结果的21.2%分位点,说明采用确定性方法大概率低估了盾构施工对地表环境产生的危害,这会高估隧道工程的稳定性和安全储备,增加实际施工风险。因此有必要考虑掘进参数的调控稳定性,采用不确定性方法展开分析。

2 掘进参数调控稳定性的影响分析

为探究不同掘进参数调控稳定性对地表沉降影响的差异与敏感性,通过改变参数的变异系数反映掘进参数调控时的稳定程度。基于上述工程盾构掘进参数的统计结果,取土仓压力、超挖间隙和注浆压力变异系数 $C_V(P)$ 、 $C_V(g)$ 、 $C_V(F)$ 分别为0.1、0.2、0.3,共设置9种单因子不确定性工况进行模拟计算。分析单一掘进参数变异水平的影响时,将其余掘进参数视为确定值。在开展不同工况下的批

量随机模拟计算前,对计算次数的选取进行了充分论证,从计算精度与计算效率等方面考虑,认为500次计算足够满足计算要求,选取500次作为每个工况的计算次数。

2.1 土仓压力调控稳定性的影响

图6给出了土仓压力变异系数 $C_V(P)$ 分别为0.1、0.2和0.3时计算得到的测点地表沉降时程曲线和断面地表沉降曲线(蓝色曲线),并与标准工况的确定性计算结果(黑色曲线)进行对比。从图中可以看出,当土仓压力变异性较小时,地表沉降曲线相对集中在确定性计算曲线下方。随着土仓压力变异性的增大,不确定性计算曲线的包络范围、离散程度也相应增加。在图6(b)、(d)、(f)中,断面地表沉降曲线形态基本保持一致,且沉降槽宽度无明显变化,这是因为沉降槽宽度主要取决于地层性质,而受掘进参数变化的影响较小^[24]。

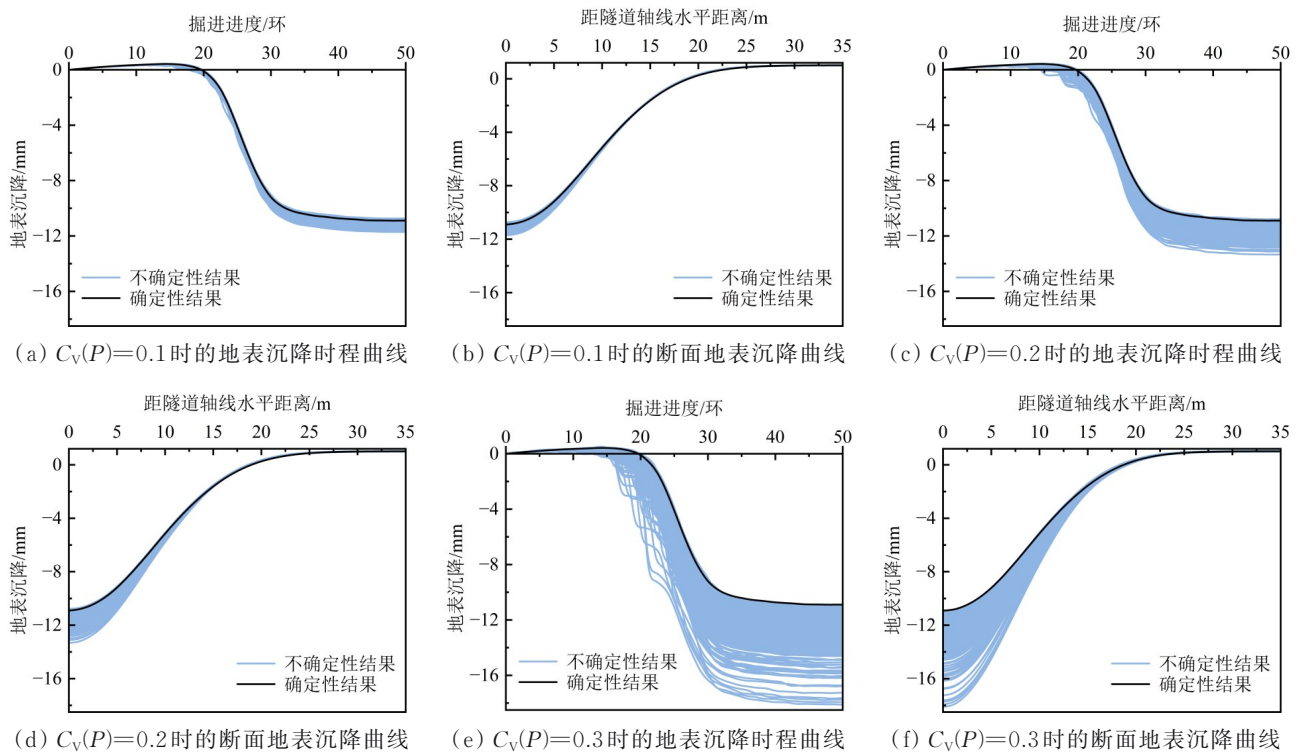


图6 不同土仓压力变异系数下的地表沉降曲线

Fig.6 Surface settlement curve under different coefficient of variation of the chamber earth pressure

对于图6(a)、(c)、(e)中的地表沉降时程曲线,当土仓压力发生变化时,相比于确定性计算得到的光滑曲线,不确定性沉降曲线形态存在明显差异,出现了较大突变和波动,规律性显著降低。 $C_V(P)$ 越大,沉降曲线的突变性和杂乱程度越强。从开挖面到达测点前一定位置开始,不确定性结果与确定性结果曲线出现明显偏差,直至掘进至测点后一段距离,沉降偏差才保持基本不变,表明地表沉降受该范围内掘进参数调控稳定性的影响,而与该范围外

掘进参数的变异几乎无关。将上述范围定义为掘进参数调控稳定性的主要影响区域 Ω ,即不确定性地表沉降与确定性地表沉降差值增长所对应的区段。土仓压力调控稳定性的主要影响区域为测点前 $2D$ 至后 $1.5D$ 的范围。

2.2 超挖间隙调控稳定性的影响

图7给出了超挖间隙变异系数 $C_V(g)$ 分别为0.1、0.2、0.3时的不确定性计算结果。从图中可以看出,随着 $C_V(g)$ 的变化,不确定性计算曲线不尽相

同,且超挖间隙的变异水平越大,地表沉降分布范围越大。图 7(a)、(c)、(e)显示,超挖间隙变异计算得到的地表沉降时程曲线在形态上出现了轻微波动,且超挖间隙变异系数越大,波动程度越显著。图 7(b)、(d)、(f)的断面地表沉降曲线形态无明显变化,且沉降槽宽度基本不变,表明超挖间隙变异性对地表沉降的发生范围影响较小。

从图 7(a)、(c)、(e)中还可以看出,从掘进面到达测点前一定距离开始,不确定性地表沉降时程曲线开始偏离确定性结果曲线。计算结果表明,超挖间隙调控稳定性的主要影响区域为测点前 $1.5D$ 至后 $1.5D$ 的范围。地表沉降与该范围内超挖间隙的变异性有关,即与盾构姿态的调控稳定性密切相关。

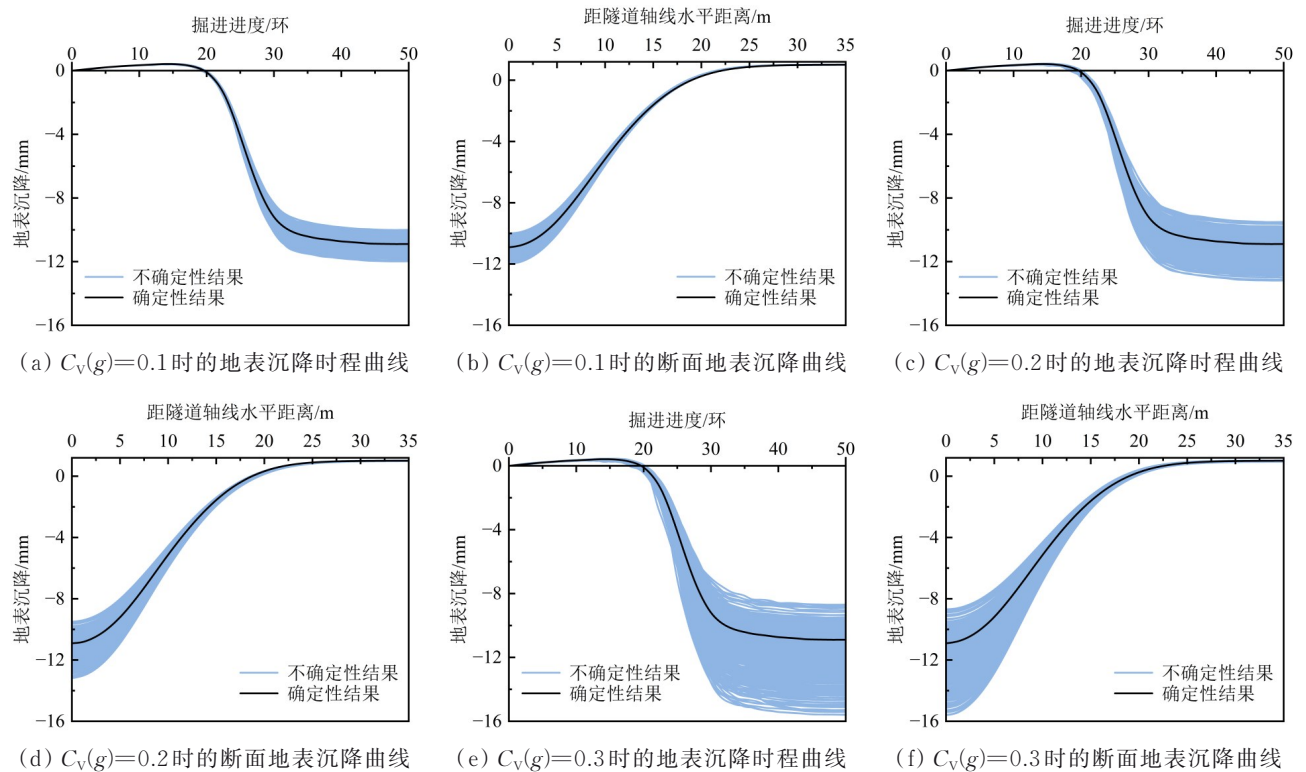


图 7 不同超挖间隙变异系数下地表沉降曲线

Fig.7 Surface settlement curve under different coefficient of variation of the over-excavation gap

2.3 注浆压力调控稳定性的影响

图 8 分别给出了注浆压力变异系数 $C_v(F)$ 为 0.1、0.2 和 0.3 时的计算结果。可以看出,随着 $C_v(F)$ 的增大,注浆压力的差异程度不断增强,使不确定性计算沉降曲线愈发离散,包络范围越来越大。图 8(a)、(c)、(e) 中的地表沉降时程曲线形态随注浆压力的变异出现了明显波动,但断面地表沉降曲线(见图 8(b)、(d)、(f))形态无明显变化,沉降槽宽度保持不变。

相比于确定性计算结果,不确定性计算的地表沉降时程曲线大致在第 27 环处(即测点开始注浆前 $1D$ 的位置)出现了明显的偏差。计算结果表明,注浆压力调控稳定性的主要影响区域为测点开始注浆的前 $1D$ 与后 $1D$ 的范围。且在该区域内注浆压力变异性越强,沉降曲线抖动程度越大,甚至出现了沉降曲线反向变化,即地表抬升的情况。

2.4 地表沉降统计

为从整体上掌握地表沉降受掘进参数调控稳

定性和变异水平的影响程度,图 9 和图 10 分别给出了不同工况下最大地表沉降的最大值 $S_{\max}$ 、95% 分位数 $S_{95\%}$ 、均值 S_{μ} 、增幅 ΔS 以及变异系数 $C_v(S)$ 等统计值与各掘进参数变异系数之间的变化曲线。可以看出,上述统计值均随掘进参数变异系数的增大呈现出显著的非线性增长趋势,表明随着掘进参数变异水平的增强,其极值相对于均值的差异越大,最大地表沉降的变化范围、离散程度也相应增加。图 10 为不同掘进参数下的最大地表沉降变异系数 $C_v(S)$ 变化曲线,在同一掘进参数变异系数下,超挖间隙变异对应的最大地表沉降变异系数 $C_v(S)$ 最大,其次是土仓压力,最后是注浆压力。例如当 $C_v(P)$ 、 $C_v(g)$ 、 $C_v(F)$ 均为 0.3 时,对应的 $C_v(S)$ 分别为 0.08、0.11 和 0.06,说明地表沉降变异程度对掘进参数调控稳定性的敏感顺序为超挖间隙、土仓压力、注浆压力。对地表沉降整体分布的稳定性要求较高时,施工过程中应关注盾构行进角度的变化,严格控制盾构机姿态,及时进行纠偏。

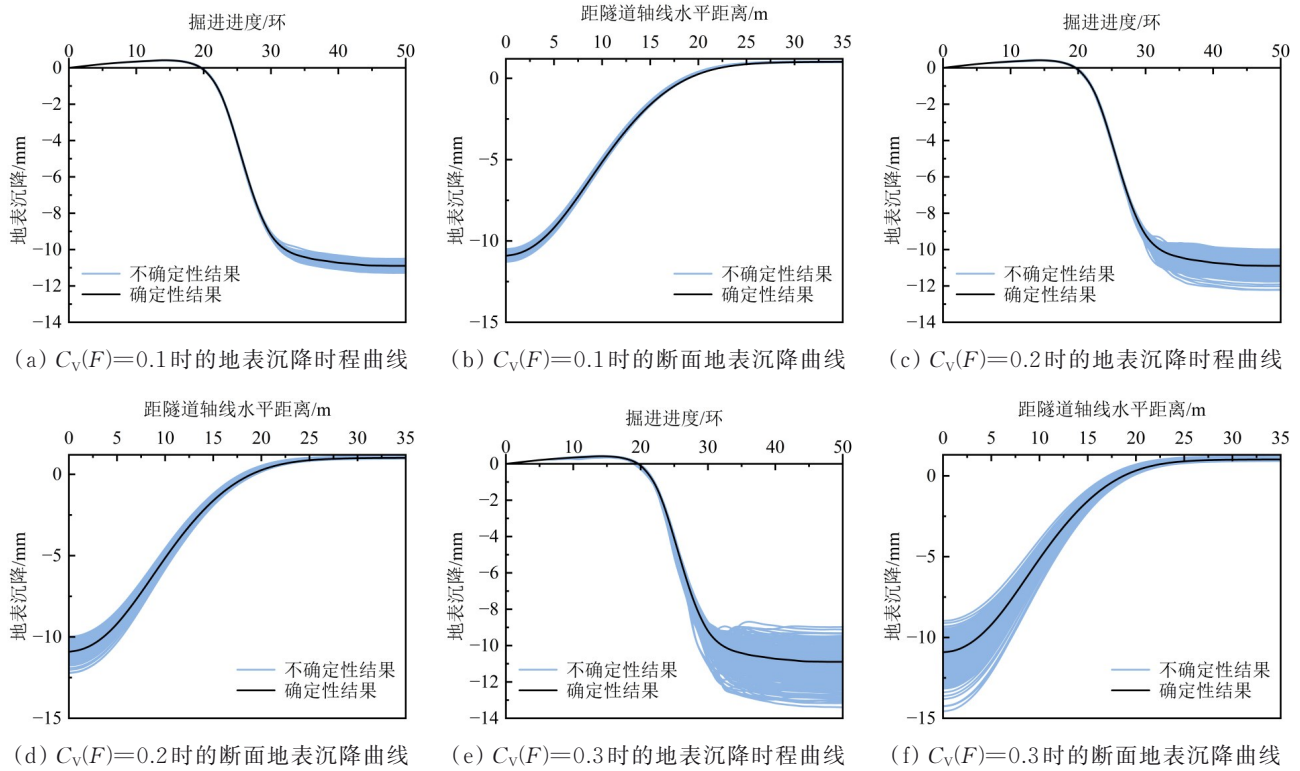


图8 不同注浆压力变异系数下地表沉降曲线

Fig.8 Surface settlement curve under different coefficient of the grouting pressure

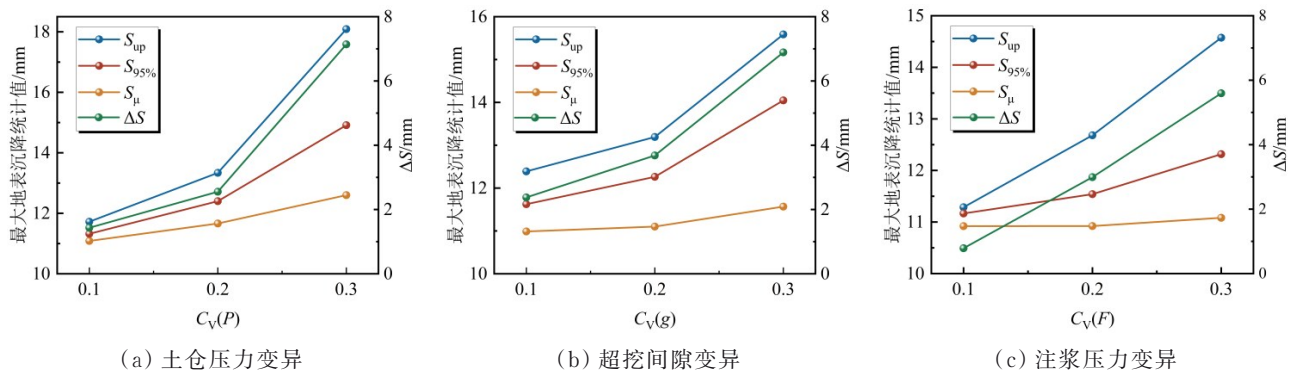


图9 不同工况下地表沉降统计结果

Fig.9 Statistical results of surface settlement under different cases

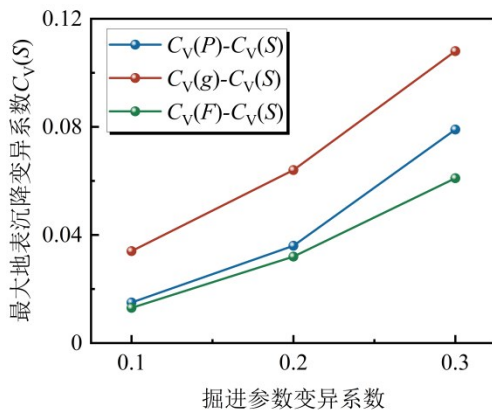
图10 最大地表沉降变异系数 $C_v(S)$ 变化曲线Fig.10 Curve of coefficient of variation of maximum surface settlement $C_v(S)$

图11为不同掘进参数变异工况下的最大地表沉降频率分布直方图以及对数分布拟合曲线。除了 $C_v(P)$ 为 0.3 时,由KS检验得到的 P 值仅有 0.002 外,其余工况的 P 值均大于显著水平 0.05,最大地表沉降均符合对数正态分布。

图11还给出了基于对数正态分布的最大地表沉降峰度 K_s 和偏度 S_s 分析结果。随着掘进参数变异系数的增大,对数分布曲线越扁平,地表沉降向极值两端分散发展。以图11(a)为例,随着 $C_v(P)$ 的增大,沉降分布整体右移,分布曲线偏度增大;当 $C_v(P)$ 增大到 0.3 时,沉降偏度大于 1,属于高度右偏态分布。结果表明:当 $C_v(P)$ 较小时,确定性计算结果的可信度较高;而当 $C_v(P)$ 为 0.3 时,不确定地表沉

降均大于确定性计算值,此时确定性结果的实际意义变得很小。此外,超挖间隙和注浆压力变异下的沉降分布偏度均小于 0.7,分布中心变化不大,均保

持在确定性结果附近,地表沉降由中心向极值两端发展。

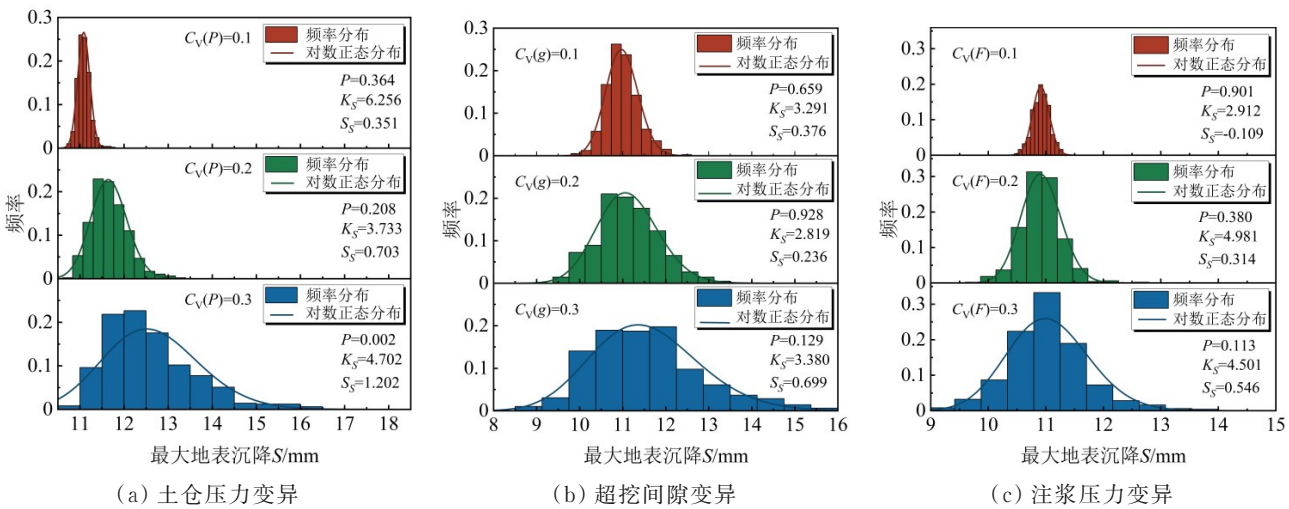


图 11 不同工况下最大地表沉降频率分布直方图

Fig.11 The frequency histogram of the maximum surface settlement under different cases

当 $C_v(P)$ 、 $C_v(g)$ 、 $C_v(F)$ 均为 0.3 时,确定性地表沉降值分别位于不确定结果的 0%、33.2% 和 41.8% 分位点,可见采用确定性方法大概率会低估盾构掘进对地表沉降的影响,低估概率由大到小的顺序为土仓压力、超挖间隙、注浆压力。

综上所述,掘进参数稳定调控对地表沉降有重要影响。随着掘进参数变异水平的增强,其极值相对于均值的差异程度增大,同时出现的概率更高,导致盾构施工对地层的扰动加剧,因此不确定性最大地表沉降量值变化范围、离散程度也相应增加。

2.5 掘进参数调控稳定性的风险分析

针对土仓压力 P 、超挖间隙 g 和注浆压力 F 的变异性进行风险评估,从而优化对盾构掘进参数的调控。通过简化计算敏感度 M 以及风险损失值 L 、风险失效概率 p 、风险值 V 等风险指标定量分析掘进参数变异系数的风险等级^[25],计算结果如表 4 所示。

1) 敏感度 M

通过不确定性最大地表沉降增幅 ΔS 反映地表沉降幅度对不同掘进参数变异性的敏感程度。地表沉降幅度变化越大,说明地表沉降越容易受到该

掘进参数变异性的影响。

$$M = \Delta S / \sum \Delta S = (S_{up} - S_{low}) / \sum (S_{up} - S_{low}) \quad (2)$$

2) 风险损失值 L

风险损失值反映了最大地表沉降超过控制标准 S_{lim} ,占用地表沉降安全储备的程度,即

$$L = M(S_{up} - S_{lim}) \quad (3)$$

3) 风险失效概率 p

地表沉降上限 S_{up} 越大,事故发生的概率越高。当地表沉降超过 S_{lim} 时,事故发生,因此失效概率表达式为:

$$p = p_i(S_{up}/S_{lim}) \quad (4)$$

其中

$$p_i = N_i / N \quad (5)$$

式中: N_i 为单一掘进参数不确定性计算中地表沉降达到 S_{lim} 的数据点个数, N 为全部数据点个数,即 1 500 个。

4) 风险值 V

风险值综合考虑了风险损失值和失效概率,能够衡量并量化掘进参数的潜在风险大小,其表达式为

$$V = Lp \quad (6)$$

表 4 掘进参数变异性的敏感度及失效概率

Table 4 Sensitivity and failure probability of variability of the construction parameters

掘进参数	沉降 S/mm	敏感度 M	风险损失值 L	p_i	风险失效概率 $p/\%$	风险值 $V/\%$
P	10.29 ~ 18.09	0.38	1.93	142/1 500	13.10	25.27
g	8.70 ~ 15.59	0.34	0.86	68/1 500	5.41	4.63
F	8.98 ~ 14.57	0.28	0.41	8/1 500	0.59	0.25

由表4可知,地表沉降幅度对 P 变异性的响应最敏感,其次是 g 和 F 。按照规范^[26],由 P 、 g 和 F 变异性引起的失效概率等级分别为1(频繁的)、2(可能的)和3(偶尔的),而 P 变异性的风险损失等级为C(严重的),其余为D(需考虑的)。

图12为各掘进参数调控稳定性的风险指标比较,其中土仓压力 P 变异性的风险值最大,远超超挖间隙 g 和注浆压力 F 。同时结合风险矩阵和接受准则, P 变异性的风险等级为Ⅱ级(不愿接受),其余为Ⅲ级(可接受)。综合上述分析结果,在盾构掘进过程中应重点加强对土仓压力的监测,特别是对地表沉降控制要求较高时,例如盾构施工下穿地表建筑物,应严格调控土仓压力以维持稳定性,并制定相应的地表沉降预警措施。

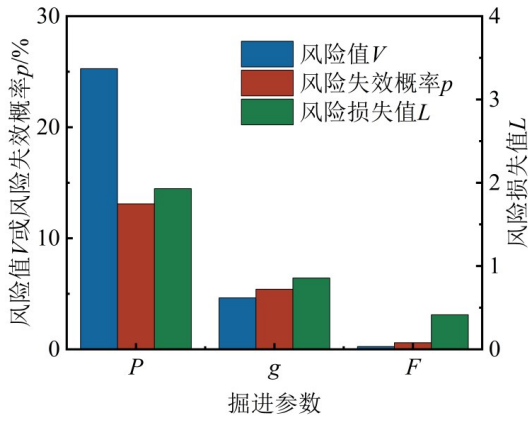


图12 掘进参数风险指标比较

Fig.12 Comparison of risk value for construction parameters

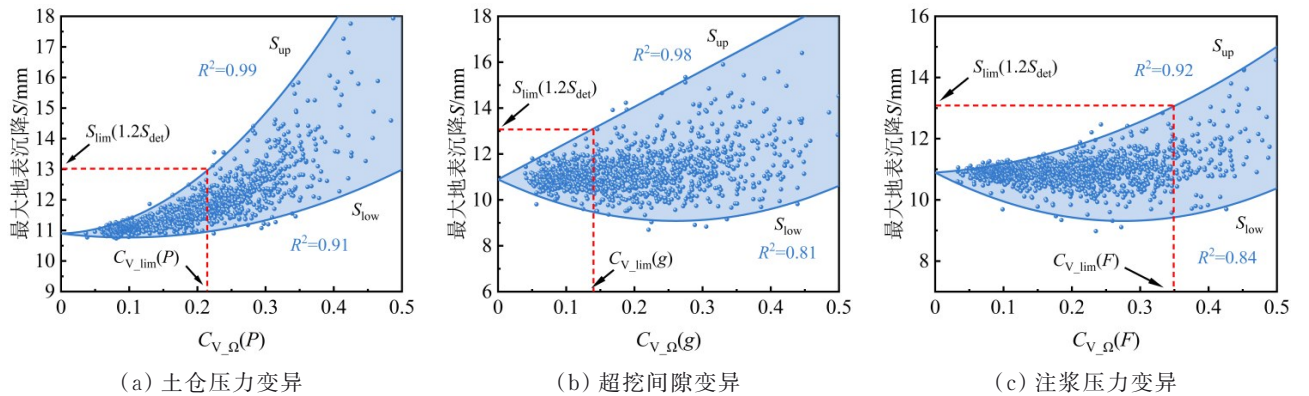


图13 最大地表沉降与掘进参数的区域变异系数的关系

Fig.13 Relationship between maximum surface settlement and coefficient of regional variation of construction parameters

土仓压力:

$$S_{up} = a_1 C_{V,\Omega}(P)^2 + a_2 C_{V,\Omega}(P) + S_{det} \quad (7)$$

$$S_{low} = a_3 C_{V,\Omega}(P)^2 + a_4 C_{V,\Omega}(P) + S_{det} \quad (8)$$

超挖间隙:

$$S_{up} = b_1 C_{V,\Omega}(g) + S_{det} \quad (9)$$

$$S_{low} = b_2 C_{V,\Omega}(g)^2 + b_3 C_{V,\Omega}(g) + S_{det} \quad (10)$$

注浆压力:

掘进参数的敏感度和风险值排序是基于依托工程分析得出的结果,对于不同的盾构隧道开挖工程,掘进参数的敏感性排序不尽相同。部分研究表明,土仓压力对地表沉降的影响大于注浆压力^[27-28],且当掘进参数偏差超过正常范围时,对地表沉降最敏感的参数为土仓压力^[3]。

3 掘进参数稳定调控

根据上述不确定性分析结果,盾构隧道地表沉降是主要影响区域 Ω 内多点掘进参数变化综合影响的结果。为更直观地掌握最大地表沉降 S 与掘进参数在主要影响区域 Ω 内的变异系数(简称“区域变异系数”)之间的关系,对同一掘进参数下3个变异工况的1500个不确定性计算结果进行分析,提取土仓压力、超挖间隙和注浆压力的区域变异系数 $C_{V,\Omega}(P)$ 、 $C_{V,\Omega}(g)$ 、 $C_{V,\Omega}(F)$,分别绘制其与最大地表沉降值 S 的映射关系如图13所示。当掘进参数区域变异系数为0时,对应的最大地表沉降为确定性计算结果。可以看出,随着掘进参数区域变异系数的增大,最大地表沉降的分布范围不断扩大。

为进一步确定掘进参数区域变异系数与最大地表沉降的关系规律,将最大地表沉降不确定性结果分布范围中95%置信区间的上限 S_{up} 和下限 S_{low} 进行曲线拟合,得到上下限曲线函数表达式(7~12)。如图13所示,各曲线的拟合优度 R^2 均达到了0.8,上限曲线的 R^2 超过了0.9,拟合效果良好。

$$S_{up} = c_1 C_{V,\Omega}(F)^2 + c_2 C_{V,\Omega}(F) + S_{det} \quad (11)$$

$$S_{low} = c_3 C_{V,\Omega}(F)^2 + c_4 C_{V,\Omega}(F) + S_{det} \quad (12)$$

根据不确定性分析结果,常量 $a_1=41.1$ 、 $a_2=0.8$ 、 $a_3=13.6$ 、 $a_4=-2.6$; $b_1=15.8$ 、 $b_2=26.1$ 、 $b_3=-13.8$; $c_1=13.5$ 、 $c_2=1.5$ 、 $c_3=21.0$ 、 $c_4=-11.5$ 、 $S_{det}=10.86$ mm。

由沉降上限拟合曲线可知,最大地表沉降上限

随掘进参数区域变异系数的增大而增大。为使盾构施工引起的地表沉降满足控制要求,基于沉降上限拟合曲线函数,分析各个掘进参数区域变异系数的最大限值,具体方法为:

1)制定沉降控制指标值 S_{lim} 。暂将单个掘进参数变异影响下最大地表沉降的控制指标值 S_{lim} 设定为最大地表沉降确定性结果的1.2倍,即 $S_{lim}=1.2S_{det}$ 。在实际工程中,也可根据需要对 S_{lim} 进行相应调整。

2)计算掘进参数变异系数最大限值。将 S_{lim} 分别代入上限曲线函数式反算土仓压力、超挖间隙和注浆压力变异系数最大限值 $C_{V_lim}(P)$ 、 $C_{V_lim}(g)$ 、 $C_{V_lim}(F)$ 。在依托工程中, $C_{V_lim}(P)=0.22$ 、 $C_{V_lim}(g)=0.14$ 、 $C_{V_lim}(F)=0.35$ 。因此在地铁12号线工程盾构施工中,需要调控的关键掘进参数应满足控制标准: $C_V(P)<0.22$ 、 $C_V(g)<0.14$ 、 $C_V(F)<0.35$ 。在该条件下对盾构掘进参数进行合理调控,使盾构隧道开挖引起的地表沉降满足控制要求。

各掘进参数的变异性调控标准等结果均是基于依托工程所分析得到的,可为与本工程地质条件、工程规模以及掘进参数大小相似的盾构隧道工程提供直接参考。对于差异较大的隧道工程,还需另行计算。根据上述结果制定盾构隧道施工掘进参数稳定性调控方法,如图14所示。在盾构施工过

程中采集和统计主要影响区域内的各个掘进参数的变异水平并不断更新,根据掘进参数的变异系数限值这一稳定性调控标准及其风险值排序,针对性地调整和维持掘进参数的稳定,以保证盾构隧道施工过程中地表环境的安全稳定。

4 结论

以武汉地铁12号线某盾构区间盾构机及监测点的实测数据为工程背景,建立三维数值分析模型,对盾构施工全过程进行模拟。研究土仓压力、超挖间隙和注浆压力3个关键掘进参数的调控稳定性对地表沉降的影响,得出以下结论:

1)盾构过程中掘进参数的调控稳定性对地表沉降具有重要影响。不确定性地表沉降的离散程度和变化范围与掘进参数变异水平呈显著正相关。其中,地表沉降时程曲线形态随掘进参数变异发生波动,而断面地表沉降曲线形态受掘进参数变异影响较小,沉降槽宽度基本不变。

2)不确定性地表沉降主要受测点前后主要影响区域内掘进参数调控稳定性的影响。不同掘进参数调控稳定性的主要影响区域大小存在差异,大致为测点前后12倍隧道直径范围内的区域。

3)以地表沉降变异系数为控制指标时,超挖间隙变异的敏感性最大,其次是土仓压力和注浆压力。因此在对地表沉降整体分布的稳定性要求较高的盾构区段,需对盾构姿态进行严格把控,及时进行纠偏处理。

4)以地表沉降发生幅度为控制指标时,掘进参数变异性的敏感度和风险值排序为土仓压力、超挖间隙和注浆压力。在盾构施工下穿地表建筑物等对地表沉降控制要求较高的掘进地段,应重点关注土仓压力的调控稳定性,并制定针对性的地表沉降控制和风险预警措施。

5)通过相关性拟合得到不同掘进参数调控稳定性水平下的最大地表沉降上限计算式,拟合优度均超过0.9,该计算式可为盾构掘进参数调控稳定性提供控制标准。

相比于传统的确定性分析方法,不确定性方法能更准确地反映盾构过程中掘进参数调控对稳定性的影响,为盾构掘进动态调控提供量化依据,在实际工程中更具指导意义。

参考文献

- [1] 黄辉,吴晔晖,谢文达,等.淤泥地层盾构下穿密集房屋沉降控制技术研究[J].土木工程学报,2024,57(增刊1):154-162.

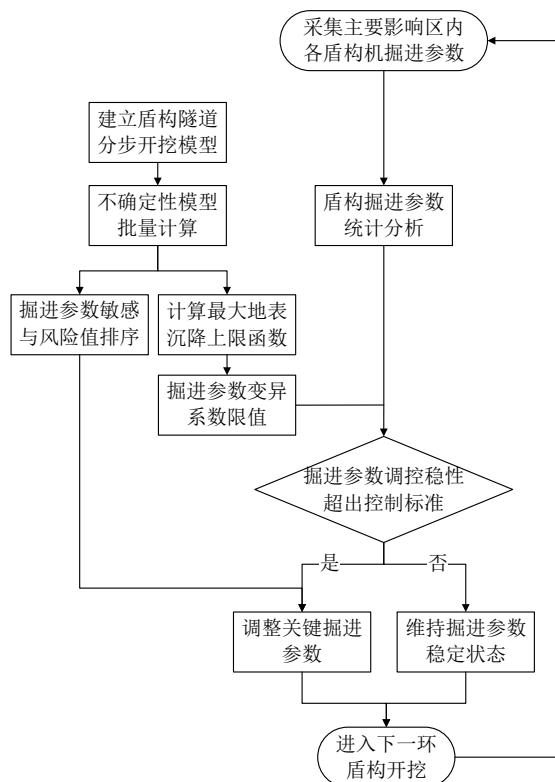


图14 盾构隧道施工掘进参数稳定性调控方法

Fig.14 Control method of driving parameter stability in shield tunneling

- HUANG H, WU Y H, XIE W D, et al. Settlement control analysis for large-diameter shield tunneling through residential buildings in silt strata [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2024, 57(Sup 1): 154-162. (in Chinese)
- [2] 葛双双, 高玮, 汪义伟, 等. 我国交通盾构隧道病害、评价及治理研究综述[J]. *土木工程学报*, 2023, 56(1): 119-128.
- GE S S, GAO W, WANG Y W, et al. Review on evaluation and treatment of traffic shield tunnel defects in China [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56(1): 119-128. (in Chinese)
- [3] 郑刚, 路平, 曹剑然. 基于盾构机掘进参数对地表沉降影响敏感度的风险分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊1): 3604-3612.
- ZHENG G, LU P, CAO J R. Risk analysis based on the parameters sensitivity analysis for ground settlement induced by shield tunneling [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Sup 1): 3604-3612. (in Chinese)
- [4] 李琳, 崔惟超, 董光辉, 等. 盾构施工引起周围土体位移的数值研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(5): 755-763.
- LI L, CUI W C, DONG G H, et al. Numerical study on ground displacement induced by shield tunneling [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(5): 755-763. (in Chinese)
- [5] 邓皇适, 傅鹤林, 史越, 等. 注浆压力非均匀分布引发的地表沉降计算及其影响因素分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(10): 3550-3558.
- DENG H S, FU H L, SHI Y, et al. Calculation and influence factors analysis of surface subsidence caused by non-uniform distribution of grouting pressure [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(10): 3550-3558. (in Chinese)
- [6] 陈仁朋, 邹聂, 吴怀娜, 等. 盾构掘进地表沉降机器学习预测与控制研究综述[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(8): 56-65.
- CHEN R P, ZOU N, WU H N, et al. Review of prediction and control for surface settlement caused by shield tunneling based on machine learning [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(8): 56-65. (in Chinese)
- [7] 朱才辉, 李宁, 柳厚祥, 等. 盾构施工工艺诱发地表沉降规律浅析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(1): 158-164.
- ZHU C H, LI N, LIU H X, et al. Analysis of ground settlement induced by workmanship of shield tunnelling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 158-164. (in Chinese)
- [8] 张恒, 陈寿根, 邓稀肥. 盾构掘进参数对地表沉降的影响分析[J]. *现代隧道技术*, 2010, 47(5): 48-53.
- ZHANG H, CHEN S G, DENG X F. Analysis of the influence of shield driving parameters on ground settlements [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2010, 47(5): 48-53. (in Chinese)
- [9] 魏新江, 周洋, 魏纲. 土压平衡盾构掘进参数关系及其对地层位移影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(1): 73-79.
- WEI X J, ZHOU Y, WEI G. Research of EPB shield tunneling parameter relations and their influence on stratum displacement [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(1): 73-79. (in Chinese)
- [10] 李忠超, 陈仁朋, 孟凡衍, 等. 软黏土中盾构掘进地层变形与掘进参数关系[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(7): 1268-1275.
- LI Z C, CHEN R P, MENG F Y, et al. Tunnel boring machine tunneling-induced ground settlements in soft clay and influence of excavation parameters [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(7): 1268-1275. (in Chinese)
- [11] 周健, 柴嘉辉, 丁修恒, 等. 盾构隧道施工预测与动态调控方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(5): 821-828.
- ZHOU J, CHAI J H, DING X H, et al. Construction prediction and dynamic control of shield tunnel [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(5): 821-828. (in Chinese)
- [12] ZHANG P, WU H N, CHEN R P, et al. A critical evaluation of machine learning and deep learning in shield-ground interaction prediction [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 106: 103593.
- [13] GUO S F, WANG B K, ZHANG P, et al. Influence analysis and relationship evolution between construction parameters and ground settlements induced by shield tunneling under soil-rock mixed-face conditions [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 134: 105020.
- [14] 陈仁朋, 戴田, 张品, 等. 基于机器学习算法的盾构掘进地表沉降预测方法[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(7): 111-118.
- CHEN R P, DAI T, ZHANG P, et al. Prediction method of tunneling-induced ground settlement using machine learning algorithms [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2021, 48(7): 111-118. (in Chinese)
- [15] 李玉秋. 软土盾构隧道施工安全风险定量定性综合评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- LI Y Q. Quantitative and qualitative comprehensive risk assessment for construction safety of shield tunnel in soft soil [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [16] LAMBRUGH A, MEDINA RODRÍGUEZ L,

- CASTELLANZA R. Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanised excavations [J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 40: 97-113.
- [17] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. *岩土力学*, 2021, 42(3): 833-845.
- GU X Q, WU R T, LIANG F Y, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(3): 833-845. (in Chinese)
- [18] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(8): 2283-2290.
- WANG W D, WANG H R, XU Z H. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(8): 2283-2290. (in Chinese)
- [19] 张培森, 施建勇, 颜伟. 小应变条件下隧道开挖引起的横向沉降槽分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(2): 411-416.
- ZHANG P S, SHI J Y, YAN W. Analysis of tunneling-induced traverse settler under small strain [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(2): 411-416. (in Chinese)
- [20] 徐伟, 刘超, 胡科, 等. 武汉软土小应变硬化模型参数试验研究[J]. *安全与环境工程*, 2024, 31(2): 88-99.
- XU W, LIU C, HU K, et al. Experimental study on parameters of hardening soil small-strain model for soft soil in Wuhan [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2024, 31(2): 88-99. (in Chinese)
- [21] WANG H B, ZHANG R J, TAO F J, et al. Study on long-term surface settlement induced by shield tunneling in under-consolidated soft ground [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 148: 105772.
- [22] 徐干成, 李成学, 王后裕, 等. 地铁盾构隧道下穿京津城际高速铁路影响分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(增刊 2): 269-272, 276.
- XU G C, LI C X, WANG H Y, et al. Analysis of influence of metro shield tunneling crossing underneath high speed railway [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(Sup 2): 269-272, 276. (in Chinese)
- [23] DO N A, DIAS D, ORESTE P, et al. Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunnelling in soft ground: the influence of the joint pattern [J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(4): 673-694.
- [24] 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 H Z, CHEN J, LI J B, et al. Study on surface deformation induced by shield tunneling based on random field theory [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(Sup 2): 4256-4264. (in Chinese)
- [25] 路平, 郑刚, 张稳军, 等. 天津地铁盾构施工对地表沉降影响的风险评估及精细化控制研究[J]. *隧道建设*, 2016, 36(2): 170-178.
- LU P, ZHENG G, ZHANG W J, et al. Study on risk assessment and fined control of influence of shield tunneling on ground surface settlement: a case study on Tianjin metro [J]. *Tunnel Construction*, 2016, 36(2): 170-178. (in Chinese)
- [26] 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范: GB 50652—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Code for risk management of underground works in urban rail transit: GB 50652—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [27] LUO M H, WANG D, WANG X C, et al. Analysis of surface settlement induced by shield tunnelling: grey relational analysis and numerical simulation study on critical construction parameters [J]. *Sustainability*, 2023, 15(19): 14315.
- [28] FORSAT M, TAGHIPOOR M, PALASSI M. 3D FEM model on the parameters' influence of EPB-TBM on settlements of single and twin metro tunnels during construction [J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2022, 15(3): 525-538.

(编辑 XXX)