

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2721

考虑砂土抗剪强度空间变异性的盾构开挖面稳定性分析

程红战^{1,2}, 陈 健^{1,2}, 胡之锋^{1,2}, 黄珏皓^{1,2}

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 采用传统研究方法对盾构开挖面稳定性的分析多基于土体是均质、各向同性材料的假设, 显然与其本身的非均质性相违背。为此, 开展了考虑土体抗剪强度参数的空间变异性对盾构开挖面稳定性的影响研究。在随机场理论的基础上, 采用协方差矩阵分解法建立了描述砂土内摩擦角空间变异性的三维随机场模型, 借助于数值分析软件平台研究了内摩擦角的变异系数、自相关距离对开挖面失稳模式、极限支护应力的影响规律, 并采用概率分析法探讨了极限支护应力特征值的选取。结果表明: 砂土内摩擦角的空间变异性对开挖面稳定性有重要的影响; 随内摩擦角的变异系数的增大, 极限支护应力的概率分布离散性越大; 开挖面失稳模式与自相关距离的大小密切相关, 当自相关距离与隧道直径比较接近时, 开挖面可能出现局部失稳; 提出了开挖面极限支护应力特征值的概念, 并结合失稳概率给出了其初步确定方法。

关 键 词: 隧道; 开挖面稳定性; 空间变异性; 破坏模式; 支护应力

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)08-0000-08

Face stability analysis for a shield tunnel considering spatial variability of shear strength in sand

CHENG Hong-zhan^{1,2}, CHEN Jian^{1,2}, HU Zhi-feng^{1,2}, HUANG Jue-hao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The conventional analysis methods for face stability of shield tunnels almost are based on the assumption that the soil is homogeneous, isotropic medium, which is against its heterogeneity. Therefore, the influence of spatial variability of shear strength on face stability in sand is investigated in this paper. Based on random field theory, three dimensional random fields of friction angle are generated using the covariance matrix decomposition method. With the aid of the numerical code, the performance of the coefficient of variation and the auto-correlation distance of friction angle is analyzed to explore the influence of that on the failure mechanism and the critical support pressure. Meantime, the selection of the characteristics value of critical support stress is discussed by probabilistic analysis approach. Results show that the spatial variability of friction angle does have significant influence on the stability of tunnel face; the more scatter of the critical support stress as the coefficient of variation of friction angle increases; the failure mechanism is closely related to the auto-correlation distance; when the auto-correlation distance is close to the tunnel diameter, the local failure may happen; the concept of characteristics value of critical support stress is proposed and defined preliminary based on the probability of failure.

Keywords: tunnel; face stability; spatial variability; failure mechanism; supporting stress

1 引 言

在盾构隧道施工过程中, 为了平衡刀盘前方的水土压力, 需要提供一个临时支护力以维持开挖面

的稳定性。支护力过大、过小都会对开挖面附近岩土体产生一定的扰动, 甚至可能会影响到隧道上方地表建筑物以及周围管线的正常使用, 因此, 选取合理的支护力对维持开挖面的稳定性和保证盾构隧

收稿日期: 2016-11-23

基金项目: 中国科学院重点部署项目、百人计划项目 (No. KZZD-EW-TZ-12); 中国科学院科技服务网络计划 (STS) (No. KFJ-EW-STS-122)。

This work was supported by the Key Development Project Supported by One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences (KZZD-EW-TZ-12) and the Science and Technology Service Network Initiative Supported Chinese Academy of Sciences (KFJ-EW-STS-122).

第一作者简介: 程红战, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事随机场理论及其在盾构隧道变形和开挖面稳定性方面的研究工作。

E-mail: cheng2217@126.com

道的正常施工有着重要的现实意义。

Broms 等^[1]最早提出了以稳定系数描述不排水条件下黏性土中开挖面稳定性的分析方法。Davis 等^[2]基于极限分析方法,推导了平面应变条件下的稳定系数的上、下限解范围。在 Davis 研究成果的基础上,Domieux 等^[3]拓展至三维条件下,对于开挖面可能出现的主动破坏和被动破坏,分别研究了 3 种失稳模型下的开挖面支护应力的上、下限解,与砂土中浅埋隧道离心机试验结果相比较具有较好的一致性。Horn^[4]基于极限平衡方法提出了描述开挖面失稳的楔形体模型,模型中假设失稳区域由开挖面前方的楔形体和上方的棱柱体两部分构成。楔形体模型对于砂土地层较适用,对于黏土地层计算误差较大,因此,Janecsecz^[5]、Broere^[6]、Hu^[7]、张子新^[8]等在该模型的基础上又做了适当的改进。在模型试验方面,Mair^[9]、Chambon^[10]、陈仁朋^[11]等也开展了相关研究,揭示了开挖面失稳模式以及支护应力与地表变形之间的关系。同时伴随着计算机技术的快速发展,数值分析方法也逐渐成为一个重要的研究手段,不少学者在盾构开挖面稳定性分析方面也开展了相关研究^[12-15]。毫无疑问,目前在盾构开挖面稳定性方面已经取得了丰硕的研究成果。但上述研究中所采用的大多数分析方法将土体视为均质、各向同性材料,与其本身的非均质性不符^[16]。

近年来,随着对土体非均质性认识的不断深入,Mollon 等^[17-21]首先基于随机响应面等方法,研究了土性参数黏聚力和内摩擦角的不确定性对盾构开挖面极限支护应力的影响。分析结果表明,黏聚力和内摩擦角的不确定性对盾构开挖面极限支护应力的影响大小都有着一定程度的影响,并且相对于黏聚力,内摩擦角的影响更显著。Eshraghi 等^[22]采用概率分析法研究了采用土压平衡盾构施工的德黑兰地铁 3 号线 9 个断面处开挖面极限支护应力的影响,并与数值分析结果进行了对比分析。可以肯定的是,以上研究结论在一定程度上揭示了土性参数的不确定性对盾构开挖面稳定性的影响规律,然而上述研究中多采用将土性参数看作随机变量的方法,不能全面地反映参数的空间变异性特征。同时,考虑土性参数空间变异性对隧道开挖面的影响分析多是在二维条件下进行的,相应的计算结果不能真实、全面地反映开挖面的稳定程度和失稳模式。

基于土体的非均质性的这一特征,本文采用随机场理论和数值分析相结合的方法,研究了砂土内摩擦角的空间变异性对盾构开挖面稳定性的影响效应,重点分析了内摩擦角的变异系数和自相关距离

对开挖面失稳模式和极限支护应力的影响规律,并结合概率分析法探讨了极限支护应力特征值的确定方法。

2 基于随机场理论的盾构开挖面稳定性分析方法

对土性参数的试验结果进行统计分析可以得到,土性参数的空间变异性特征并不是完全随机的,而是表现出随机性和相关性并存的特点^[23-24]。Vanmarcke^[25]最先引入随机场理论,建立了描述土体参数空间变异性的随机场模型。在其研究成果的基础上,本文采用随机场与数值分析相结合的方法,研究盾构开挖面稳定性问题,主要包括以下 5 个步骤:

(1) 首先采用有限差分软件 FLAC^{3D} 建立盾构隧道的三维数值计算模型,如图 1 所示,并输出模型中所有单元的中心点坐标,用于随机场模型的生成。

(2) 基于协方差矩阵分解法^[26]生成随机场模型。将输出的单元中心点坐标代入到自相关函数中组成协方差矩阵 $C_{n \times n}$,其中 n 代表模型中单元个数。矩阵 $C_{n \times n}$ 为正定对称矩阵,进行 Cholesky 分解得到上三角、下三角矩阵:

$$C = LU = LL^T \quad (1)$$

式中: L 、 U 分别为下、上三角矩阵; L^T 为矩阵 L 的转置。假设 Y 为由 n 个相互独立且服从标准正态分布的随机数所组成的列向量,则标准正态随机场 Z 可以表示为

$$Z = LY \quad (2)$$

随机生成列向量 Y ,就可以实现随机场的多次生成。

(3) 对标准正态随机场矩阵 Z 进行数学变换,得到服从不同分布特征的随机场模型。例如均值为 μ ,方差为 σ^2 的正态随机场 \bar{Z} 可以表示为

$$\bar{Z} = \sigma Z + \mu \quad (3)$$

(4) 利用 FLAC^{3D} 中内嵌 FISH 编程语言,将随机场模型中参数一对一映射到有限差分网格中,实现随机场模型到数值分析模型的转换,进而针对盾构隧道开挖面稳定性的这一问题开展数值计算。

(5) 借助于 Monte-Carlo 策略,多次重复步骤 (2) ~ (4) 即可以实现对盾构开挖面稳定性的随机性分析。

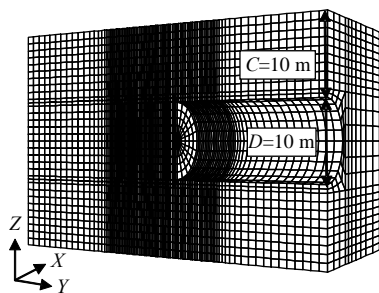


图 1 数值模型示意图
Fig.1 Geometry of the analyzed tunnel

3 数值计算模型

参考 Kirsch^[27]中的模型，本文所采用的数值模型隧道直径 D 为 10 m，埋深 C 为 10 m，尺寸为 $35\text{ m} \times 20\text{ m} \times 30\text{ m}$ （长 \times 宽 \times 高）。模型在顶部（地表）为自由边界，四周为法向位移约束边界，底部为固定边界。隧道衬砌结构采用 Shell 单元模拟。砂土和衬砌结构材料的物理、力学参数取值如表 1 中所示。模型中仅考虑砂土内摩擦角的空间变异性对盾构开挖面稳定性的影响，其他参数均为常量。内摩擦角服从均值为 μ_ϕ 、标准差为 σ_ϕ 的对数正态分布^[20]。采用第 2 部分中介绍的随机场生成方法生成服从对数正态分布的三维随机场模型，首先需要建立均值为 $\mu_{\ln\phi}$ 和标准差为 $\sigma_{\ln\phi}$ 的正态分布随机场：

$$\sigma_{\ln\phi}^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma_\phi^2}{\mu_\phi^2}\right) \quad (4)$$

$$\mu_{\ln\phi} = \ln(\mu_\phi) - \frac{1}{2}\sigma_{\ln\phi}^2 \quad (5)$$

内摩擦角的变异系数可以表示为

$$COV = \frac{\sigma_\phi}{\mu_\phi} \quad (6)$$

要建立描述内摩擦角随机场模型，还要给出内摩擦角的自相关函数形式，文中选择 Markov 相关函数^[28]：

$$\rho(\tau) = \exp\left\{-\frac{2|\tau|}{\theta}\right\} \quad (7)$$

式中： $\rho(\tau)$ 为自相关函数，是关于随机场中任意两点相对距离 τ 的函数； θ 为自相关距离，用来刻画随机场内相关性的强弱。需要说明的是，本文中针对各向同性随机场进行研究，在后续研究工作中会开展各向异性随机场的分析。取自相关距离 $\theta = 10\text{ m}$ ，图 2 给出了内摩擦角的三维随机场模型图，红色网格表示隧道管片。图中灰度越深表示该处单元内摩擦角越大，强度越高；灰度越浅代表该处单元内摩擦角越小，强度越低。显然，考虑内摩擦角的空间变异性之后，随机场模型中各单元处的内摩擦角取值不尽相同。

表 1 模型中材料参数
Table 1 Material properties used in the model

材料	材料性质	重度 γ / (kN/m ³)	内摩擦角 ϕ / (°)	黏聚力 c / kPa	泊松比 ν	弹性模量 E / MPa	厚度 d / m
土体	理想弹塑性材料	18	$30(\mu_\phi)$	0	0.3	24	
管片结构	线弹性材料	24			0.2	15	0.3

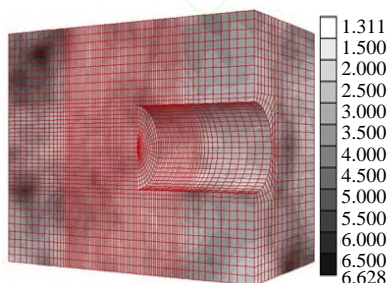


图 2 内摩擦角的三维随机场 (单位: (°))
Fig.2 There dimensional random field of friction angle(unit: (°))

4 确定性分析

根据第 3 部分确定的三维数值模型，首先分析不考虑内摩擦角空间变异性的盾构开挖面极限支护

应力和失稳模式。在进行数值分析过程中，逐步减小作用于盾构隧道开挖面上的支护应力值，并记录开挖面中心点沿隧道轴线方向 (Y) 水平位移的变化情况，计算结果如图 3 所示。在图中水平位移和支护应力的变化曲线中出现明显的拐点，在曲线到达拐点之前水平位移与支护应力近似呈线性关系，且随支护应力变化不显著；在曲线经过拐点以后当支护应力变化很小的范围时位移会显著增大，说明水平位移对支护应力变化非常敏感。如果继续减小支护应力，开挖面将会出现失稳坍塌破坏，因此，可以认为，拐点处所对应的支护应力即为开挖面极限支护应力值 ($\sigma_{cr} = 23.6\text{ kPa}$)。在另一方面，通过对楔形体模型^[4]进行受力计算得到的开挖面极限支护应力值为 24.0 kPa ，与数值计算结果非常接近。

图 4 给出了沿隧道轴线剖面上基于最大剪应变增量得到的开挖面失稳模式，图中红色虚线为基于极限平衡方法的楔形体模型的分析结果。楔形体模型假设开挖面前方失稳区为楔形体+棱柱体的组合形式，其中楔形体倾角约为 $\alpha = 45^\circ + \varphi/2 = 60^\circ$ 。从图上可以看出，数值分析结果在隧道上方失稳区域表现为烟囱状，与楔形体模型中的棱柱体基本吻合；在隧道前方失稳区域表现为光滑曲线包括的范围，与楔形体有所差异，但差异性较小。因此可以认为，本文中所采用的开挖面极限支护应力和失稳模式确定方法是真实、可靠的。

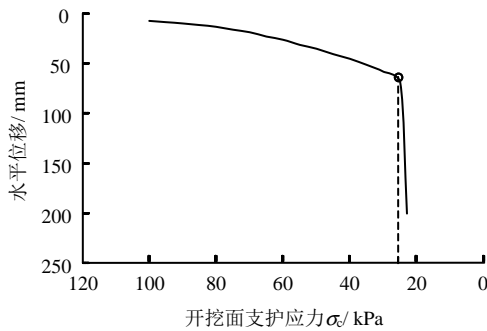


图 3 支护应力与开挖面中心点水平位移关系
Fig.3 The relationship between support stress and horizontal displacement of the center of tunnel face

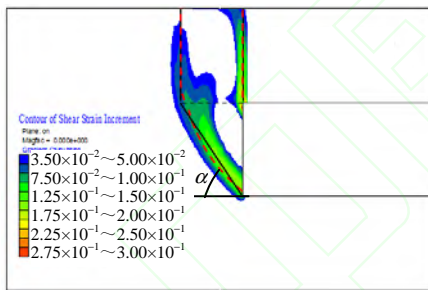


图 4 开挖面失稳模式对比图
Fig.4 Comparison of the failure mechanisms

5 随机性分析

采用第 2 部分介绍的基于随机场理论的盾构开挖面稳定性分析方法，本部分开展随机性分析，保持内摩擦角均值不变，重点研究内摩擦角的变异系数、自相关距离对开挖面失稳模式、极限支护应力的影响。采用与第 4 部分相同的开挖面极限支护应力和失稳模式确定方法，分别选取变异系数 COV_φ 为 0.1, 0.2 和 0.3, 自相关距离 θ 为 1、10、100 m, 组合得到 9 种工况进行计算分析。首先针对开挖面失稳模式进行分析。

5.1 开挖面失稳模式

从图 4 可以看出，开挖面失稳区域主要包括两

部分：开挖面前方的楔形体以及其上方的棱柱体。很显然，上部棱柱体的范围主要取决于楔形体的形状，因此，本部分统计了每一次随机计算得到的沿隧道轴线剖面上开挖面前方失稳区域的面积 S 。图 5 中给出了几种典型的随机计算结果，并给出了相应的失稳区域的面积 S 和极限支护应力 σ_{cr} 。可以看出，考虑了内摩擦角的空间变异性，随机计算得到的开挖面失稳模式也不尽相同，失稳区域的大小和形式也都有一定的区别。同时还可以发现 S 与 σ_{cr} 并无直接的相关关系，失稳面积越大所对应的极限支护应力并不一定越高。开挖面失稳模式主要受到随机计算模型中开挖面附近高强度和低强度单元集中区域分布的影响。图 5 中灰度越深表示该区域的内

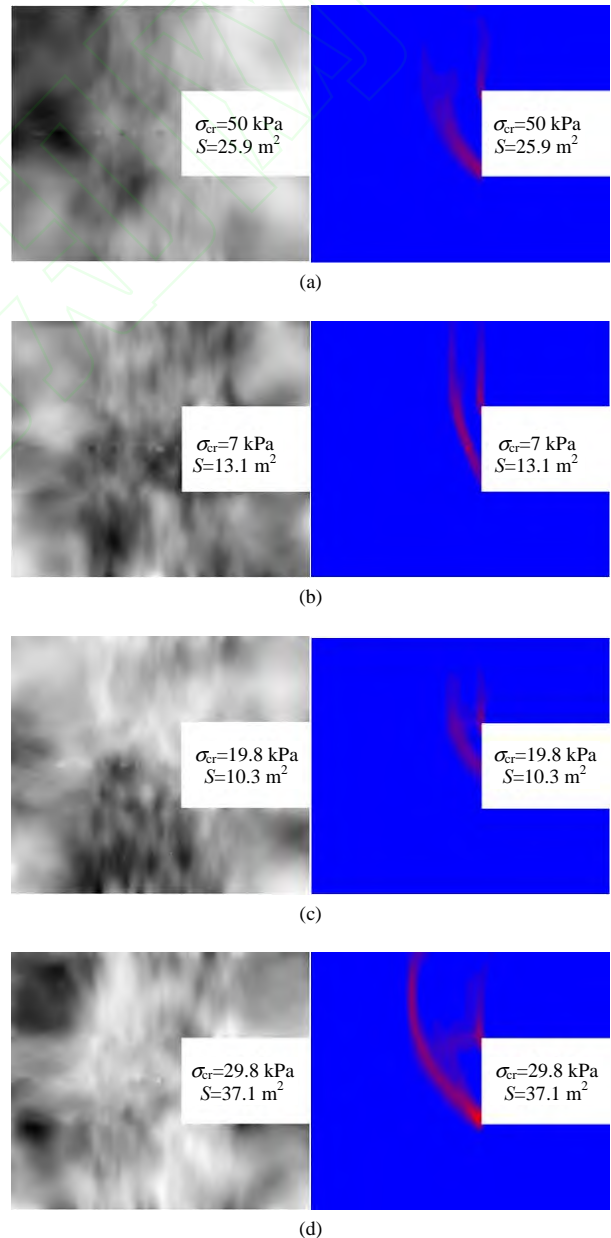


图 5 开挖面失稳模式 (X=0 剖面)
Fig.5 The tunnel face failure mechanisms (X=0 section)

摩擦角越大，所对应的单元强度越高，反之灰度越浅单元强度越低。很显然，随着开挖面支护应力地不断减小，开挖面前方土体会最先沿着平均单元强度较弱的路线出现较大的变形，变形逐渐扩展、传递，最终导致开挖面出现失稳。图 5(a)、5(b)和图 5(d)中开挖面均是发生整体失稳，图 5(c)显示的开挖面发生局部失稳。图 5(c)中由于开挖面前方上部土体强度明显低于下部土体的强度，随着支护应力的降低上部土体最先发生失稳破坏。

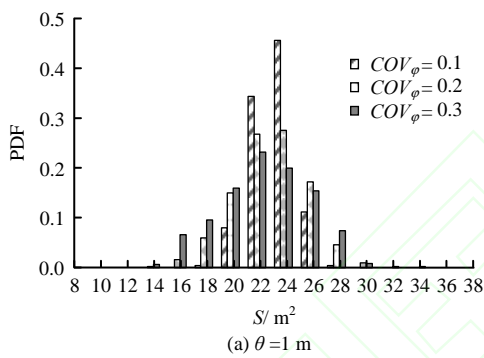
5.1.1 变异系数的影响

对于每一工况各进行 500 次随机计算，记录开挖面失稳区域的大小，并统计其概率分布特征，如图 6 所示。可以看出，保持自相关距离 θ 不变，随着变异系数 COV_ϕ 的增大，开挖面前方失稳区域面积 S 的概率分布离散性越大，但总体在确定值 ($S_{det} = 23.1 \text{ m}^2$) 附近分布比较集中。如 $\theta = 0.1$ ， COV_ϕ 由

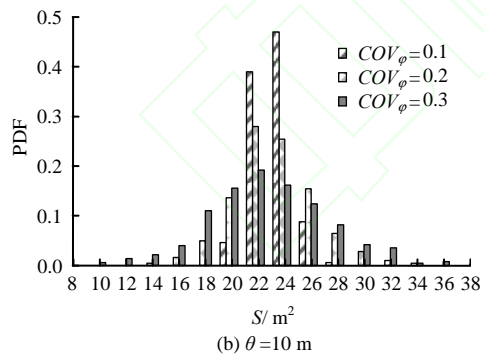
0.1 增大到 0.3 时，多次随机计算中开挖面失稳区域的面积最大值 S_{max} 由 27.4 m^2 增大到 33.3 m^2 ，失稳区域的面积最小值 S_{min} 由 18.5 m^2 减小到 13.0 m^2 。 COV_ϕ 越大，土性参数的变异性程度越高，模型中单元强度差异越明显，导致开挖面发生失稳模式不同，因而计算得到 S 表现出一定的离散型。

5.1.2 自相关距离的影响

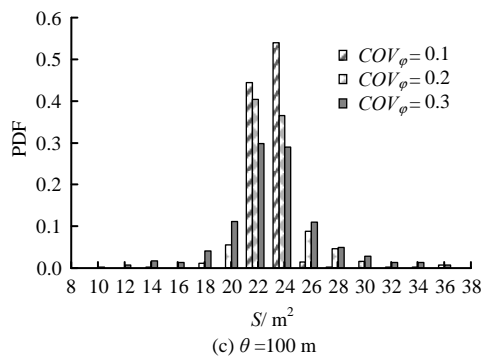
与图 6 类似，图 7 中给出了 COV_ϕ 分别为 0.1, 0.2 和 0.3 时不同 θ 下的 S 的概率分布图。比较图 7(a)~7(c)可以看出，随着 COV_ϕ 的增大， S 的概率分布离散程度增大，这与图 6 中的显示结果一致。在 θ 由 1 m 增长到 100 m 过程中， S 的极值分布范围越来越大，如 $COV_\phi = 0.2$ ，当 θ 由 1 m 增大到 100 m 时， S_{max} 由 30.0 m^2 增大到 36.1 m^2 。但是，统计 S 的方差（见图 8）可以看出，方差是先增大



(a) $\theta = 1 \text{ m}$



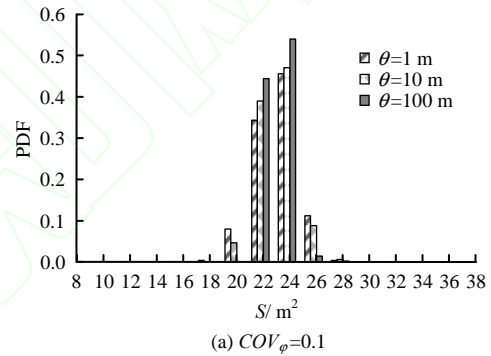
(b) $\theta = 10 \text{ m}$



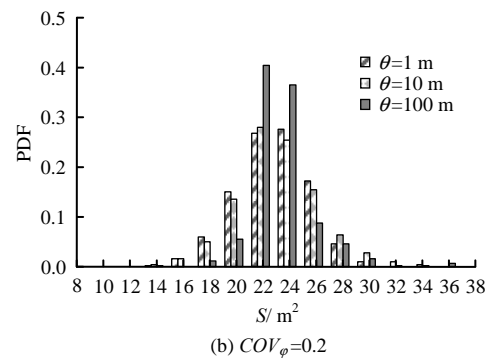
(c) $\theta = 100 \text{ m}$

图 6 开挖面失稳面积概率分布图

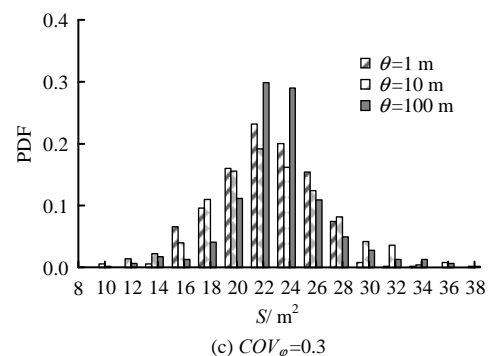
Fig.6 PDFs of the instability area of the tunnel face



(a) $COV_\phi = 0.1$



(b) $COV_\phi = 0.2$



(c) $COV_\phi = 0.3$

图 7 开挖面失稳面积概率分布图

Fig.7 PDFs of the instability area of the tunnel face

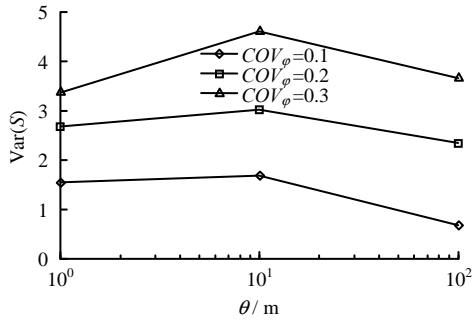


图8 自相关距离 θ 对失稳面积 S 的方差的影响
Fig.8 Effect of θ on the variance of the instability area S

后减小的,当 $\theta = 10\text{ m}$ 时方差最大。当 $\theta = 10\text{ m}$ 时,随机场内形成的低强度或高强度单元集中区域的尺寸与 θ 比较接近,该尺寸在量值上与隧道直径 D 在同一数量级。由图5可知,强度集中的区域与隧道开挖面之间的位置关系,会对开挖面的失稳模式产生较为重要的影响。当 θ 与 D 接近时,开挖面失稳模式较为丰富,同时出现如图5(c)中所示的开挖面局部失稳的概率也较高。而 $\theta = 1\text{ m}$ 时,随机场内形成低强度或者高强度单元集中区域的范围较小,一般小于 1 m ,相对于隧道直径较小,因此,对开挖面失稳模式的影响也就较弱。当 $\theta = 100\text{ m}$ 时, θ 相对于隧道直径 D 较大,在单次随机场实现中单元之间强度差异性不明显,因此,开挖面失稳模式主要表现为整体性失稳。可以预见的是,当 θ 趋于无穷大时,模型中单元强度趋于一致,开挖面失稳模式同样也表现为整体性破坏。

5.2 开挖面极限支护应力的影响因素分析

图9为任意几次随机计算中支护应力与开挖面中心点水平位移的关系曲线,其中虚线代表确定性分析的结果。可以看出,每一次的水平位移曲线都略有差异,因此,所对应的开挖面极限支护应力 σ_{cr} 也不尽相同。对 σ_{cr} 的计算结果统计分析,得到 COV_ϕ 和 θ 对 σ_{cr} 的影响规律与 S 基本一致,本部分就不再重复说明。

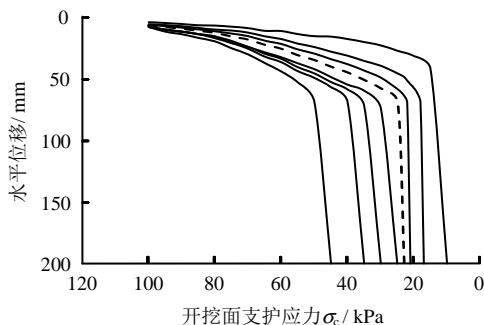


图9 支护应力与开挖面中心点水平位移关系
Fig.9 Relationship between support stress and horizontal displacement of the center of tunnel face

5.3 开挖面极限支护应力特征值的选取

由于每一次随机计算得到的开挖面极限支护应力都不相同,因此,需要针对不同变异程度的土性参数确定一个支护应力特征值作为此时条件下的开挖面极限支护应力。如果选取随机计算结果中的支护应力极大值作为特征值,显然是不恰当的,因为该值在多次随机计算中出现的概率非常低,选取方式显然偏于保守。

借助于概率统计的方法,参考欧洲岩土设计规范^[29]中关于土性参数特征值的选取方法,开挖面极限支护应力特征值 σ_k 的定义应与开挖面失稳概率结合起来。多次随机计算中开挖面极限支护应力超过 σ_k 的概率可以表示为

$$P_f = \frac{N_f}{N} \times 100\% \quad (8)$$

式中: N 为随机计算的总次数, $N = 500$; N_f 为 N 次随机计算中极限支护应力值超过特征值 σ_k 的次数; P_f 为在该支护应力特征值 σ_k 下开挖面的失稳概率。

图10中给出了不同工况下的开挖面支护应力特征值 σ_k 与失稳概率 P_f 的关系曲线。很显然,随着 σ_k 的增大, P_f 逐渐减小。但不同曲线之间的变化规律略有差异,其中工况 $\theta = 100\text{ m}$ 和 $COV_\phi = 0.3$ 所对应的曲线减小最为缓慢, $P_f = 5\%$ 时所对应的 $\sigma_k = 40.4\text{ kPa}$,较确定性分析结果($\sigma_{cr} = 23.6\text{ kPa}$)增加了71%;工况 $\theta = 1\text{ m}$ 和 $COV_\phi = 0.1$ 时 P_f 减小的速度最快, $P_f = 5\%$ 时所对应的 $\sigma_k = 24.8\text{ kPa}$,较确定性分析结果增加了5%。可以看出,考虑内摩擦角的空间变异性,取 $P_f = 5\%$,计算得到的 σ_k 均比确定性分析结果高,且随着变异系数和自相关距离的增大, σ_k 的取值越大。同时也说明了,表征土性参数空间变异性的统计量的合理选取,对一定支护应力水平下隧道开挖面稳定性的评估有着重要影响。

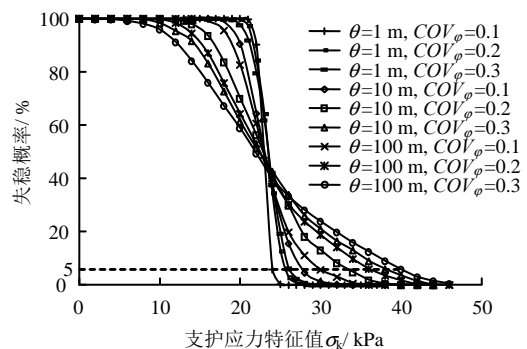


图10 开挖面支护应力特征值与失稳概率关系
Fig.10 Relationship between the characteristics value of support stress σ_k and probabilities of failure R

6 结 论

提出了基于随机场理论和数值分析相结合的盾构开挖面稳定性分析方法, 考虑了砂土内摩擦角的空间变异性, 研究了其对盾构隧道开挖面稳定性的影响, 得出以下结论:

(1) 砂土内摩擦角的空间变异性对盾构隧道开挖面稳定性有着重要的影响, 随内摩擦角变异程度的增大影响性逐渐增强。

(2) 开挖面失稳模式与内摩擦角自相关距离的大小密切相关, 当自相关距离与隧道直径比较接近时, 开挖面可能会出现局部失稳。

(3) 内摩擦角变异系数对开挖面极限支护应力的影响规律表现为, 随着变异系数的增大, 极限支护应力的概率分布越离散。

(4) 提出了开挖面极限支护应力特征值的概念, 结合开挖面失稳概率给出了支护应力特征值的初步确定方法。

参 考 文 献

- [1] BROMS B B, BENNERMARK H. Stability of clay at vertical openings[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, 1967, 93(1): 71—94.
- [2] DAVIS E H, GUNN M J, MAIR R J, et al. The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material[J]. *Géotechnique*, 1980, 30(30): 397—416.
- [3] DORMIEUX L, DORMIEUX L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material[J]. *Géotechnique*, 1990, 40(4): 581—606.
- [4] HORN M. Horizontal earth pressure on perpendicular tunnel face[C]//Hungarian National Conference of the Foundation Engineer Industry. Budapest: [s. n.], 1961: 7—16.
- [5] JANCSEK S, STEINER W. Face support for a large Mix-Shield in heterogeneous ground conditions[M]. [S. l.]: Springer US, 1994.
- [6] BROERE W. Face stability calculation for a slurry shield in heterogeneous soft soils[J]. *Tunnels and Metropolises*, 1998, 23: 215—218.
- [7] HU X, ZHANG Z, KIEFFER S. A real-life stability model for a large shield-driven tunnel in heterogeneous soft soils[J]. *Frontiers of Structural & Civil Engineering*, 2012, 6(2): 176—187.
- [8] 张子新, 胡文. 黏性土地层中盾构隧道开挖面支护压力计算方法探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(3): 606—614.
- [9] ZHANG Zi-xin, HU Wen. Investigation on excavation face support pressure calculation methods of shield tunnelling in clayey soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(3): 606—614.
- [9] MAIR R J. Centrifugal modelling of tunnel construction in soft clay[D]. Cambridge: Cambridge University, 1969.
- [10] CHAMBON P, CORTÉ J. Shallow tunnels in cohesionless soil: Stability of tunnel face[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(7): 1148—1165.
- [11] 陈仁朋, 李君, 陈云敏, 等. 干砂盾构开挖面稳定性模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(1): 117—122.
- [11] CHEN Ren-peng, LI Jun, CHEN Yun-min, et al. Largescale tests on face stability of shield tunnelling in dry cohesionless soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(1): 117—122.
- [12] VERMEER P A, RUSE N, MARCHER T. Tunnel heading stability in drained ground[J]. *Felsbau*, 2002, 20(6): 8—18.
- [13] IN-MO LEE J H A. Effect of seepage forces on tunnel face stability[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40(2): 342—350.
- [14] 朱伟, 秦建设, 卢廷浩. 砂土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(8): 897—902.
- [14] ZHU Wei, QIN Jian-she, LU Ting-hao. Numerical study on face movement and collapse around shield tunnels in sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(8): 897—902.
- [15] 黄正荣, 朱伟, 梁精华, 等. 浅埋砂土中盾构法隧道开挖面极限支护压力及稳定研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 39(10): 112—116.
- [15] HUANG Zheng-rong, ZHU Wei, LIANG Jing-hua, et al. A study on the limit support pressure at excavation face of shield tunneling[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(10): 112—116.
- [16] LUMB P. Spatial variability of soil properties[C]//Proceedings of the International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering. Aachen: [s. n.], 1975: 397—421.
- [17] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Probabilistic analysis and design of circular tunnels against face stability[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2009, 9(6): 237—249.
- [18] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Probabilistic

- analysis of circular tunnels in homogeneous soil using response surface methodology[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2009, 135(9): 1314—1325.
- [19] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Probabilistic analysis of pressurized tunnels against face stability using collocation-based stochastic response surface method[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2010, 137(4): 385—397.
- [20] MOLLON G, PHOON K K, DIAS D, et al. Validation of a new 2D failure mechanism for the stability analysis of a pressurized tunnel face in a spatially varying sand[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2010, 137(1): 8—21.
- [21] MOLLON G, DIAS D, SOUBRA A H. Range of the safe retaining pressures of a pressurized tunnel face by a probabilistic approach[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2013, 139(11): 1954—1967.
- [22] ESHRAGHI A, ZARE S. Face stability evaluation of a TBM-driven tunnel in heterogeneous soil using a probabilistic approach[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2014: 04014095.
- [23] 张征, 刘淑春, 鞠硕华. 岩土参数空间变异性分析原理与最优估计模型[J]. **岩土工程学报**, 1996, 18(4): 40—47.
- ZHANG Zheng, LIU Shu-chun, JU Shuo-hua. The optimal estimation model and the principle of spatial variability analysis of rock and soil parameters[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(4): 40—47.
- [24] 赵红亮, 冯夏庭, 张东晓, 等. 岩土力学参数空间变异性的集合卡尔曼滤波估值[J]. **岩土力学**, 2007, 28(10): 2219—2224.
- ZHAO Hong-liang, FENG Xia-ting, ZHANG Dong-xiao, et al. Spatial variability of geomechanical parameter estimation via ensemble Kalman filter[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2219—2224.
- [25] VANMARCKE E H. Probabilistic modeling of soil profiles[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1977, 103(11): 1227—1246.
- [26] DAVIS M W. Production of conditional simulations via the LU triangular decomposition of the covariance matrix[J]. **Mathematical Geology**, 1987, 19(2): 91—98.
- [27] KIRSCH A. Experimental investigation of face stability of shallow tunnels in sand[J]. **Acta Geotechnica**, 2010, 5(1): 43—62.
- [28] FENTON G A, GRIFFITHS D V. Risk assessment in geotechnical engineering[M]. [S. l.]: Wiley, 2008.
- [29] SCHUPPENER B. Eurocode 7: Geotechnical design—Part 1: general rules[M]. Brussels: European Committee for Standardisation (CEN), 1997.