

复合地层盾构隧道掘进面稳定性与敏感性分析

吴思远¹, 陈光辉^{2,3}

(1. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安, 710054; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州, 450001;

3. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 现有文献极少有对盾构隧道开挖面特别是针对复合地层敏感性的研究。在极限分析上限法框架下, 借助单纯形优化算法建立了复合地层盾构掘进面稳定性理论分析模型。通过将所提出理论模型与数值仿真结果对比验证了其有效性。随后, 依托某盾构隧道工程穿越上软下硬两层土案例, 分析了两层土摩擦角对盾构掘进面稳定性的影响; 最后, 基于Sobol序列构建了复合地层盾构掘进面全局敏感性分析模型, 计算了两层土抗剪强度参数对盾构隧道掘进面极限支护压力的影响力指数。研究成果可为依托工程盾构隧道支护力设计提供参考。

关键词: 盾构隧道; 复合地层; 掘进面; 稳定性分析; 敏感性分析

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0049-06

Analysis on Stability and Sensitivity of Tunneling Face of Shield Tunnel in Composite Stratum

WU Siyuan¹, CHEN Guanghui^{2,3}

(1. China Railway First Group Co., Ltd., Xian 710054, China; 2. Zhengzhou University, School of Civil Engineering, Zhengzhou

450001, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Few studies have been conducted on the sensitivity of shield tunneling face, especially for the composite stratum. In the framework of the upper limit method in limit analysis, a theoretical analysis model for the stability of shield tunneling face in composite stratum is established by using the simplex optimization algorithm. The effectiveness of the proposed theoretical model is verified by comparing with the numerical simulation results. Subsequently, based on a case study of a shield tunnel project crossing the upper-soft and lower-hard soil layers, the influence of the friction angles of the two layers on the stability of the shield tunneling face is analyzed. Finally, based on the Sobol sequence, a global sensitivity analysis model for shield tunneling faces in composite stratum is constructed to calculate the influence index of the shear strength parameters of the two layers on the ultimate support pressure of the shield tunneling face. The research findings can provide a reference for the design of supporting pressure of the tunnel project.

Keywords: shield tunnel; composite stratum; tunneling face; stability analysis; sensitivity analysis

0 引言

伴随我国城市地下交通发展, 地铁隧道盾构隧道施工穿越复合地层已不可避免^[1]。在复合地层盾构隧道施工中, 当施加在掘进面上的支护力无法平衡掘进面后方水土压力时, 将导致掘进面发生失稳

破坏, 严重影响盾构隧道施工效率和施工安全^[2]。因此, 为了保证盾构隧道施工安全, 需精准评估掘进面极限支护压力值。

国内外学者已采用模型试验和数值模拟方法对复杂地质条件下盾构隧道掘进面稳定性开展了大量研究^[3-7]。虽然以上模型试验和数值模拟方法能够实现掘进面稳定性的精准分析, 但上述方法耗时长, 计算效率低, 存在一定缺陷^[8]。此外, 近年来, 已有学者通过构建理论分析模型对复杂地质条件下盾构掘进面稳定性开展了研究^[9-13]。例如叶友林等^[9]基于数值模拟分析的盾构掘进面失稳特性, 构建了二维对螺旋线模型开展了复合地层盾构掘进面稳定性的研究。肖红菊和孙玉永^[11]在数值模拟观测结果

收稿日期: 2025-08-20

基金项目: 2025年国家资助博士后研究人员计划(GZC20252112); 河南省重点研发专项(231111322100); 河南省青年科学基金项目(262300420357)

作者简介: 吴思远(1986—), 男, 本科, 工程师, 从事盾构隧道施工工法研究工作。

通信作者: 陈光辉(1993—), 男, 博士, 讲师, 从事交通岩土工程极限分析与可靠性评估工作。电子信箱: 15700731178@163.com

基础上,构建了梯形楔形体三维简化模型,开展了上软下硬地层盾构掘进面稳定性的研究。需要说明的是,以上理论分析模型多局限于二维失稳模型或简化的三维失稳模型,此外,极少有文献对复合地层盾构隧道掘进面敏感性分析。

基于此,本文依托某地铁隧道工程,首先考虑改进复合地层特性对 Mollon 等^[14]所构建三维旋转失稳模型,提出了复合地层盾构隧道掘进面三维失稳模型。随后,在极限分析上限法框架下,借助单纯形优化算法建立了盾构掘进面稳定性理论分析模型。通过与值模拟结果对比,验证了本文理论模型的有效性。最后,本文基于 Sobol 序列,构建了复合地层盾构隧道掘进面全局敏感性分析模型,开展了掘进面稳定性和敏感性分析。研究成果可为依托工程盾构支护力设计提供参考。

1 工程概况

本文依托某穿越复合地层地铁隧道工程。该地铁隧道为圆形,直径为 6 m,隧道全长约 1 073 m,采用盾构法施工。图 1 所示为该隧道工程示意图。从图 1 可以看出,在该区间段盾构隧道穿越复合地层。本文依托该区间地铁盾构隧道工程,对穿越复合地层的盾构隧道掘进面稳定性和敏感性进行研究。图 1 所示隧道截面地层参数见表 1。从图 1 中可以看出,本文所依托工程穿越两层土。考虑到复合地层盾构隧道掘进面敏感性分析需要进行大量计算,本文仅分析两层土工况下盾构隧道掘进面的敏感性。其他复合地层工况下可基于本文研究成果进一步进行拓展研究。

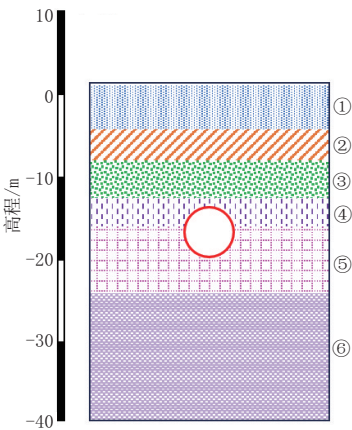


图 1 某隧道工程示意图

2 盾构隧道掘进面稳定性分析模型

由于本文所依托项目隧道开挖穿越多层土,为

表 1 地层参数

土层	土名	摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	单位土重/(kN·m ⁻³)
①	素填土	10.0	10.0	18.0
②	粉质黏土	17.4	29.3	18.0
③	中砂	28.0	0	19.0
④	粗砂	31.0	0	19.8
⑤	砾砂	30.0	0	20.0
⑥	圆砾	36.0	0	20.0

了本文研究需要。本文对 Mollon 等^[14]所提出旋转失稳模型进行了改进,改进的失稳模型见图 2。图 2 所示以隧道穿越两层土为例,其他多层土可以此进行拓展。从图 2 所示可以看出,不同于传统的旋转失稳模型,改进的旋转失稳模型在两层土交界面存在明显的过度,这是由于改进的三维旋转破坏模型是分段生成的。参考 Mollon 等^[14],本文所改进失稳模型生成过程概括如下。

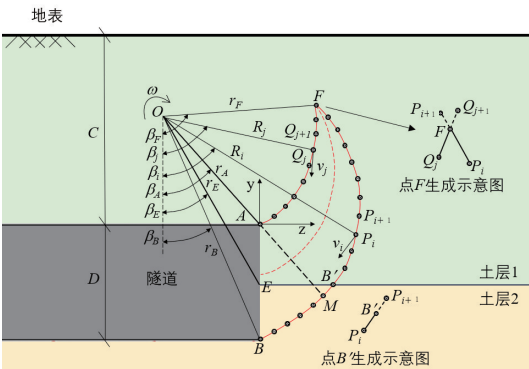


图 2 改进的旋转失稳模型

- (1)以图 2 中点 B 为起点,基于式(1)所示的对数螺旋线公式生成失稳模型外边界上一系列点 P_i ,直至所生成点纵坐标超出两层土交界面,采用线性插值方法确定点 B' (见图 2);
- (2)以点 B' 为起点,基于式(1)所示的对数螺旋线公式生成失稳模型外边界上一系列点 P_i (见图 2);
- (3)以图 2 中点 A 为起点,基于式(2)所示的对数螺旋线公式生成失稳模型外边界上一系列点 Q_j (见图 2);
- (4)基于线性插值方法取线 $B'P_i$ 和线 AQ_j 的交点为 F (见图 2);
- (5)采用 Mollon 等^[14]所提出“点生点”方法并考虑两层土影响,生成隧道掘进面三维失稳面。

$$r_{i+1} = r_i e^{(\beta_i - \beta_{i+1}) \tan \varphi_i} \tag{1}$$

$$r'_{j+1} = r'_j e^{(\beta'_j - \beta'_{j+1}) \tan \varphi'_j} \tag{2}$$

式中: r_i 和 r_{i+1} 为点 P_i 和点 P_{i+1} 的旋转半径; β_i 和 β_{i+1} 为点 P_i 和点 P_{i+1} 的旋转角; r'_j 和 r'_{j+1} 为点 Q_j 和点 Q_{j+1} 的旋转半径; β'_j 和 β'_{j+1} 为点 Q_j 和点 Q_{j+1} 的旋转角; φ_i 和 φ'_j

为点 P_i 和点 Q_j 处的摩擦角。

本文基于极限分析上限理论,对盾构掘进面极限支护压力 σ_T 进行求解,以实现隧道掘进面稳定性的分析。基于极限分析上限法,可得到式(3):

$$W_\gamma = W_d + W_{\sigma_T} \quad (3)$$

式中: W_γ 为重力功率; W_d 为内能耗散; W_{σ_T} 为掘进面支护压力功率。

W_γ 可表示为:

$$W_{\gamma 1} = \omega \gamma \sum_{i,j} (R_{i,j} V_{i,j} \sin \beta_{i,j}) \quad (4)$$

式中: γ 为土容重; $V_{i,j}$ 为失稳模型离散块体积; $R_{i,j}$ 为离散块中心点到旋转轴 $O'O''$ 的距离(见图3)。

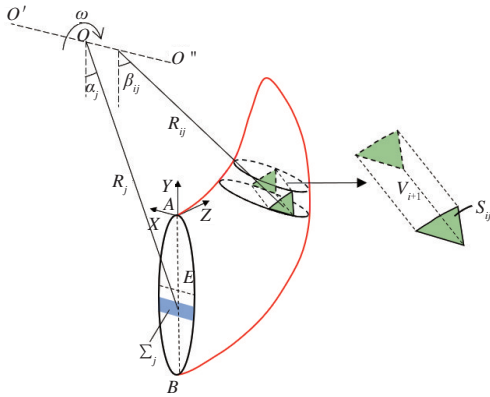


图3 极限支护压力计算图示

W_d 可通过下式计算获得:

$$W_d = \omega \sum_{i,j} (c_{i,j} \cos \varphi_{i,j} R_{i,j} S_{i,j}) \quad (5)$$

式中: $S_{i,j}$ 为由点 $P_{i,j}$ 、 $P_{i+1,j}$ 和 $P_{i,j+1}$ 组成的失稳模型速度不连续面上的任一离散面; $R_{i,j}$ 为离散面 $S_{i,j}$ 的中心点到旋转轴 $O'O''$ 的距离(见图4); $c_{i,j}$ 和 $\varphi_{i,j}$ 为 $S_{i,j}$ 的中心点处所对应的黏聚力和摩擦角。

W_{σ_T} 可通过下式计算获得:

$$W_{\sigma_T} = \omega \sigma_T \sum_j (R_j \Sigma_j \cos \alpha_j) \quad (6)$$

式中: Σ_j 为隧道掘进面离散面面积, R_j 和 α_j 为表示离散面 Σ_j 中心所对应的旋转半径和旋转角(见图4)。

结合式(3)至式(6),可得 σ_T 的表达式,如下:

$$\sigma_T = \gamma DN_\gamma - N_c \quad (7)$$

其中,

$$N_\gamma = \frac{\sum_{i,j} (R_{i,j} V_{i,j} \sin \beta_{i,j})}{D \cdot \sum_j (R_j \Sigma_j \cos \beta_j)} \quad (8)$$

$$N_c = \frac{\sum_{i,j} (c_{i,j} \cos \varphi_{i,j} R_{i,j} S_{i,j})}{\sum_j (R_j \Sigma_j \cos \beta_j)} \quad (9)$$

本文采用单纯形优化算法 fminsearch 将所有可

能的 $(r_e/D, \beta_e)$ 组合代入式(7)计算所得最大值即为极限支护压力值 σ_T 。

3 盾构隧道掘进面敏感性分析模型

随后,为了分析两层土抗剪强度参数对盾构掘进面稳定性的贡献度,本节构建了盾构掘进面敏感性理论分析模型。由于使用Sobol序列生成的点具有等分布特征,因此基于Sobol序列的全局敏感性分析的准确性高于蒙特卡洛模拟^[15]。Sobol序列已成功应用于边坡和掘进面被动稳定性的全局敏感性分析^[16-17]。因此,本文采用了Sobol序列构建全局敏感性分析模型,计算隧道开挖面极限支护压力的影响力指数,影响力指数指的是各参数对极限支护压力值大小的贡献度。使用Sobol序列对盾构隧道掘进面稳定性进行全局敏感性分析可分为以下6个步骤。

(1)设置目标函数 Y 。将式(7)中获得的极限支护压力 σ_T 设置为目标函数,即 $Y = \sigma_T$;

(2)选择变量 X_i ($i=1, 2, 3$ 和4)并设置这些变量的上限和下限。敏感性分析中选择了五个变量,分别为 φ_1 、 c_1 、 φ_2 和 c_2 ,这5个变量的范围如式(10)所示:

$$\begin{cases} 5^\circ \leq \varphi_1 \leq 35^\circ \\ 5^\circ \leq \varphi_2 \leq 35^\circ \\ 0 \text{ kPa} \leq c_1 \leq 35 \text{ kPa} \\ 0 \text{ kPa} \leq c_2 \leq 35 \text{ kPa} \end{cases} \quad (10)$$

(3)生成分析样本。使用Matlab中的sobolset生成具有4行和8列的样本矩阵 P 。

(4)样本划分和转换。样本矩阵 P 被分为2部分:前4列被定义为矩阵 P_1 ,后4列定义为矩阵 P_2 。然后通过用矩阵 P_2 的第 i 列替换矩阵 P_1 的第 i 行来构造新的矩阵 $(P_1 P_2)_i$ ($i=1 \sim 4$)。

(5)计算所有样本的目标函数 Y 。

(6)计算一阶影响力指数 S_i 和总影响力指数 S_{Ti} 。

一阶影响力指数 S_i 表达式见式(11):

$$S_i = \frac{\text{Var}(E(Y|X_i))}{\text{Var}(Y)} \quad (11)$$

总影响力指数 S_{Ti} 的表达式如下:

$$S_{Ti} = \frac{E\text{Var}(Y|X_i)}{\text{Var}(Y)} \quad (12)$$

其中,

$$\text{Var}(E(Y|X_i)) \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ Y(P_2)_j \cdot Y[(P_1 P_2)_i]_j - Y(P_1)_j \right\} \quad (13)$$

$$E\text{Var}(Y|X_i) \approx \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N \left\{ \left[Y(P_1)_j - Y((P_1 P_2)_i)_j \right]^2 \right\} \quad (14)$$

$$\text{Var}(Y) = \text{Var}[Y(P_1) + Y(P_2)] \quad (15)$$

需要注意的是,由于 $\sigma_r < 0$ kPa时隧道掘进面能够维持自稳,因此当 $\sigma_r < 0$ kPa,令 $\sigma_r = 0$ kPa。

为了更好说明本文研究思路,图4给出了本文研究所采用的流程图。

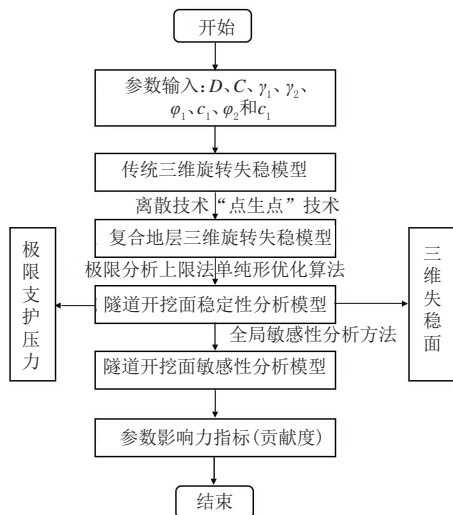


图4 本文研究所采用流程图

4 模型验证

本节采用OptumG3数值分析软件构建盾构隧道穿越两层土工况下掘进面稳定性数值分析模型,选择两层土案例对本文所提出理论分析模型进行验证。图5所示为假定的盾构隧道穿越两层土示意图。图6所示为基于OptumG3数值分析软件构建的数值分析模型。图7对比了数值分析模型和本文理论分析方法计算所得极限支护压力值与相应失稳面。图7所采用参数: $D=10$ m、 $C=10$ m、 $\varphi_1=20^\circ$ 、 $c_1=5$ kPa、 $\varphi_2=30^\circ$ 、 $c_2=15$ kPa、 $m=0.5$ 和 $n=1$ 。

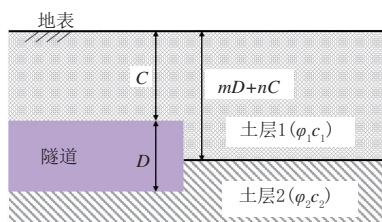


图5 隧道穿越两层土示意图

从图7中可以看出,本文所提出理论模型计算所得极限支护压力值略小于数值模拟结果,差异小于7.5%;本文所提出理论模型计算所得掘进面失稳面略大于数值模拟结果。以上讨论说明了本文所提出

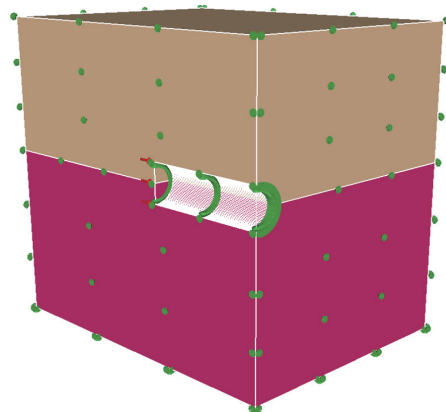


图6 数值分析模型

理论模型可实现对复合地层盾构隧道掘进面稳定性的准确评估。

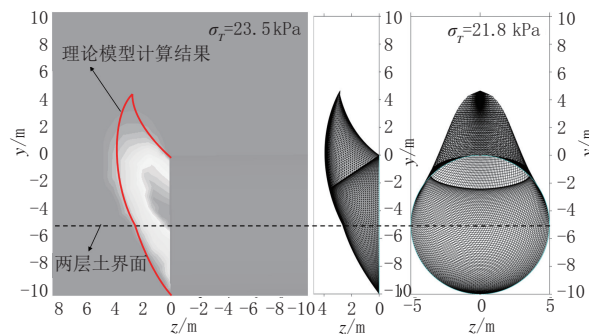


图7 本文所构建理论分析模型对比验证

5 结果分析

本文采用图5所示的两层土分析各参数对隧道掘进面稳定性和敏感性的影响。

5.1 稳定性分析结果

图8所示为基于本文所依托工程几何条件对两层土工况下盾构隧道掘进面稳定性分析结果。在图8中,隧道覆土厚度是保持恒定不变的。如图8(a)所示, $m=0$ 和 $n=0.5$ 表示隧道穿越土层2,覆盖层为两层土;图8(b)所示 $m=0$ 和 $n=1$ 表示隧道穿越土层2,覆盖层仅为土层1;图8(c)所示 $m=0.5$ 和 $n=1$ 表示隧道穿越两层土,覆盖层为土层1。注意,由于 $\sigma_r < 0$ kPa时隧道掘进面能够维持自稳,因此,当 $\sigma_r < 0$ kPa,令 $\sigma_r = 0$ kPa。

从图8中可以看出,对于案例 $m=0$ 和 $n=0.5$,当 $\varphi_2=10^\circ$ 时, φ_1 对隧道掘进面影响可忽略不计,这是由于该工况下隧道掘进面失稳模型完全在土层2之内。对于案例 $m=0$ 和 $n=1$, φ_2 对隧道掘进面影响程度远大于 φ_1 ,说明该工况下土层2对隧道开挖面稳定性影响更为显著。对于案例 $m=0.5$ 和 $n=1$, φ_1 对隧道掘进面影响程度要大于 φ_2 ,说明该工况下土层1对隧道

开挖面稳定性影响更为显著。为更清晰分析两土层强度参数对隧道掘进面稳定性影响强弱,下文对两层土抗剪强度参数对隧道掘进面稳定性影响的敏感性进行了分析。

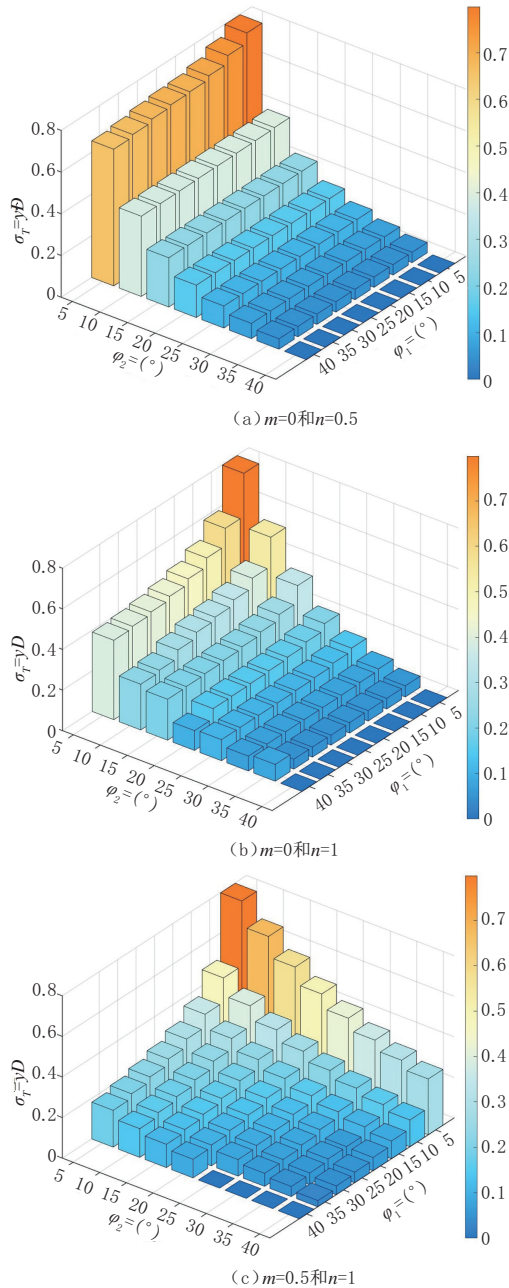


图8 掘进面分析结果

5.2 敏感性分析结果

图9所示为基于本文所依托工程的两层土工况下($m=0.5$ 和 $n=1$)抗剪强度参数对掘进面稳定性的敏感性分析结果。从图9中可以看出,对于本文所选择案例,下层土摩擦角对盾构隧道掘进面稳定性影响最大,上层土摩擦角次之,上层土黏聚力对掘进面稳定性影响最小。从图9中还可得出结论,相比于上层土抗剪强度参数,下层土抗剪强度参数对掘

进面稳定性影响更为显著。

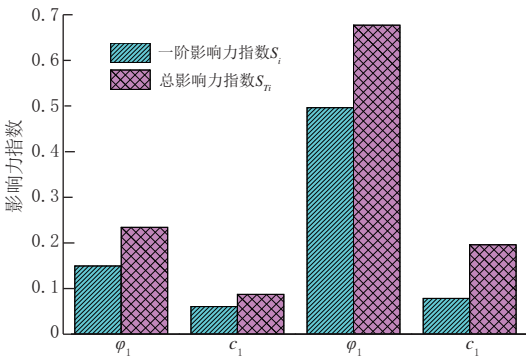


图9 全局敏感性分析结果

6 结 论

本文在极限分析上限法框架下,借助单纯形优化算法和Sobol序列,分别构建了复合地层盾构隧道掘进面稳定性和敏感性理论分析模型。本文结论可概括如下。

(1)通过对Mollon等^[14]所构建三维旋转失稳模型的改建,构建了复合地层盾构隧道掘进面稳定性和敏感性理论分析模型。通过与数值模拟结果对比验证了对本文所构建复合地层稳定性理论分析模型的有效性。

(2)掘进面稳定性分析结果表明:对于所选择案例,相比于下层土摩擦角,上层土摩擦角对掘进面稳定性影响更为显著。

(3)掘进面敏感性分析结果表明:对于本文所选择参数,影响盾构掘进面稳定性的重要性程度为 $\varphi_2 > \varphi_1 > c_2 > c_1$ 。

参考文献:

[1] 竺维彬,米晋生,王晖,等.复合地层盾构隧道修建技术创新与展望[J].现代隧道技术,2024,61(2):90-104.

[2] Huo M, Chen W, Wu G, et al. Probabilistic analysis of tunnel face stability in spatially variable soil[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 141: 105327.

[3] 宋洋,王韦颐,杜春生.砂-砾复合地层盾构隧道开挖面稳定模型试验与极限支护压力研究[J].岩土工程学报,2020(12):42.

[4] 宁茂权,唐再兴,刘顺水,等.复合地地下穿高铁超大矩形盾构隧道开挖面的极限支护力[J].高压物理学报,2023,37(1):180-188.

[5] Chen G H, Zou J F. Three-dimensional stability analysis of tunnel face considering the upper partial failure in layered rock masses[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(4): 1-23.

[6] Ibrahim E, Soubra A H, Mollon G, et al. Three-dimensional face stability analysis of pressurized tunnels driven in a multilayered purely frictional medium[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49: 18-34.

[7] 张付军.考虑全地压状态的深埋隧道开挖面前方松动范围解析解[J].公路工程,2023,48(4):52-57.

(下转第74页)

