

# 双层地层盾构隧道开挖面稳定性及影响因素分析

张亚敏<sup>1,3</sup>, 沈笑秋<sup>1,2</sup>, 李丰伟<sup>1,2</sup>, 郑元勋<sup>1,2</sup>, Grzegorz Ludwik Golewski<sup>4</sup>

(1. 郑州大学 隧道掘进机及智能运维全国重点实验室, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 3. 郑州大学 科技查新站, 河南 郑州 450001; 4. Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 40 Str., Lublin 20-618, Poland)

**摘要:** 为了探究渗流作用下双层地层隧道开挖面失稳机理及其对盾构施工安全性的影响, 针对渗流-地层耦合环境中开挖面稳定性问题展开系统研究。首先, 基于 FLAC3D 有限差分软件建立了两种典型地层工况的精细化数值模型: 上硬下软地层和上软下硬地层; 其次, 基于数值模型分析了埋深比、土体内摩擦角、黏聚力、地下水水位差及地层分界面位置对盾构开挖面极限支护应力的影响机制; 最后, 通过引入灰色关联分析法对上述 5 种影响因素进行敏感性评价与排序, 从而定量揭示各因素对盾构开挖面稳定性的影响程度及其差异性。研究结果表明: 在复合地层条件下, 开挖面稳定性主要受下部地层强度控制, 上部地层影响程度仅为下部的 40.1% (上硬下软地层) 和 32.5% (上软下硬地层); 各影响因素敏感性排序依次为: 水位 > 土体强度 > 埋深比 > 地层分界面位置。

**关键词:** 盾构隧道; 双层地层; 开挖面稳定性; 数值模拟; 敏感度分析

中图分类号: U451; TU91

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2025.05.022

随着城市化进程加快, 地铁作为高效利用地下空间的交通方式成为缓解城市交通压力的重要选择。在地面下暗挖隧道的施工方法中, 盾构法被广泛应用。然而, 支护应力设置不当引发的隧道坍塌事故占比高达 40%, 其中复合地层事故占事故总量的 22.2%<sup>[1]</sup>, 造成严重的人员伤亡和经济损失。因此, 在施工过程中需特别关注开挖面稳定性, 特别是复合地层中支护应力设置不当导致的开挖面主动失稳问题<sup>[2-3]</sup>。

目前对渗流条件下复合地层盾构施工开挖面失稳机理及风险控制已有大量研究。李晓龙等<sup>[4]</sup>基于郑州地铁 12 号线, 建立了“地层-主隧道-内支撑-联络通道”耦合作用数值模型, 系统揭示了顶管掘进过程中地表沉降的时空演化规律。Vermeer 等<sup>[5]</sup>基于 PLAXIS3D 有限元分析, 研究了软弱饱和地层中隧道开挖问题, 综合考虑内摩擦角及排水条件等因素, 提出了适用于软土地层的极限支护应力计算公式。在试验测试方面, 米博等<sup>[6]</sup>通过自制的试验

设备进行开挖渗流模型试验, 研究地下水随盾构隧道开挖渗流模型。裴浩东等<sup>[7]</sup>依托佛山地铁 3 号线某区间隧道工程, 结合现场数据, 分析了盾构机穿越软土地层时掘进参数内在变化规律, 并建立了掘进速度预测模型。

在富水复合地层盾构隧道施工中, 开挖面稳定性受多因素耦合影响。主要涉及: 复杂地层分布对开挖面应力分布的影响; 地下水以及渗流对开挖面有效应力的影响; 土体参数对极限支护应力的影响。现有研究多关注单一因素, 对渗流-应力耦合作用下的失稳机理缺乏系统分析。为此, 本研究采用数值模拟方法, 基于开挖面中心点位移-支护应力曲线的突变特征确定失稳临界点, 探究隧道埋深、土体特性及地下水状态对极限支护应力的影响规律。结合灰色关联理论与敏感性分析, 量化各因素敏感性并建立重要性排序, 为多因素耦合作用下的开挖面稳定性研究提供理论依据。

收稿日期: 2025-04-12; 修订日期: 2025-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51878623; 52279144)

通信作者: 郑元勋 (1978—), 男, 河南驻马店人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事基础设施检测与加固方面的研究, E-mail: yxzheng@zzu.edu.cn。

# 1 双层地层盾构隧道数值模拟

## 1.1 盾构掘进数值模型的构建

本文基于天津地铁东北角-金纬路区间工程,采用 FLAC3D 有限差分法建立数值模型,研究盾构隧道开挖面稳定性。综合考虑工程地质条件与施工参数,系统分析开挖面失稳机理。分析模型如图 1 所示。

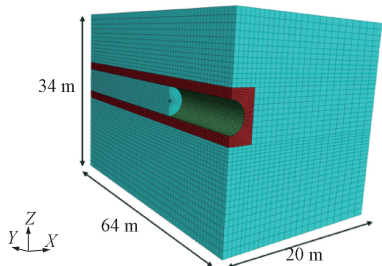


图 1 隧道开挖面稳定性数值分析模型

Figure 1 Analysis model of tunnel excavation face stability

(1) 基于对称性,选取隧道右半部分建立三维数值模型。模型尺寸为 20 m( $X$  向) $\times$ 64 m( $Y$  向) $\times$ 34 m( $Z$  向),隧道直径  $D=6$  m,开挖面中心埋深 25 m。参照文献[8],边界范围取  $3D\sim 5D$  以消除边界效应。在隧道中心  $0.5D$  范围内实施网格加密。边界条件设置为:顶面自由,底面固定,四周法向约束;衬砌为不透水边界。

(2) 模型采用六面体 Zone 单元模拟土体及开挖区域,Shell 单元模拟衬砌结构。网格划分遵循以下准则:①土体单元:远场区域采用较粗网格( $X/Z$  向 2.0~3.0 m, $Y$  向 2.0 m),隧道近场  $0.5D$  (3 m) 范围内加密至  $X/Z$  向 0.5 m, $Y$  向 0.5~1.0 m;②衬砌单元:采用 0.3~0.5 m 的 Shell 单元,与管片实际尺寸(环宽 1.5 m,厚 0.3 m)匹配。

(3) 土体本构采用 Mohr-Coulomb 模型[8]。水头差  $H_w$  为 6 m,密度为  $1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,饱和度为 1,体积模量为  $2\times 10^9\ \text{Pa}$ ,渗流时间为  $3\ 600\times 5\ \text{s}$ 。

## 1.2 初始应力场平衡

初始应力场通过调整土体应力状态,使其与边界条件及环境荷载相协调。其中,水平向初始地应力由侧压力系数确定,根据 Vermeer 等[5]对隧道支护应力的研究,隧道初始地应力为

$$\sigma_0 = \begin{Bmatrix} \sigma_x^0 \\ \sigma_y^0 \\ \sigma_{xz}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_0 \gamma_d p \\ \gamma_d p \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\sigma_0$  为初始地应力,MPa; $p$  为地面到计算点的深度,m; $K_0$  为土的侧压力系数; $\gamma_d$  为岩土体的容重, $\text{kN}/\text{m}^3$ 。

在竖向上,当考虑渗流力时,若土体处于静力水压力平衡状态,则有:

$$du_w/dz = -\gamma_w \quad (2)$$

式中: $u_w$  为静水压力,MPa; $\gamma_w$  为孔隙水容重, $\text{kg}/\text{m}^3$ ,其中  $u_w$  可通过下式计算:

$$u_w = \gamma_w(z_w^0 - z) \quad (3)$$

式中: $z_w$  为渗流面的高程,m。

在考虑地下水作用时的初始地应力平衡方程为

$$\frac{d\sigma_{zz}}{dz} = -\gamma_d + sn_0\gamma_w \quad (4)$$

式中: $s$  为饱和度; $n_0$  为初始孔隙度。

基于有效应力原理,当考虑渗流作用时,岩土变形由有效应力控制,其与总应力的关系可表示为

$$\sigma' = \sigma + su_w \mathbf{I} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{I}$  为单位矩阵。

考虑  $f$  方向及静水孔隙水平衡,将上式求导,可得

$$\begin{cases} \frac{d\sigma'_{zz}}{dz} = \gamma_d - \gamma_w \left( s(1 - n_0) - \frac{ds}{dz}(z_w^0 - z) \right); \\ \frac{d\sigma'_{zz}}{dz} = \gamma_d \end{cases} \quad (6)$$

## 1.3 盾构隧道开挖模拟

首先建立半断面轴对称地层模型,设置地层参数如密度、弹性模量等,启动流体模型并设置流体密度、黏度,并在模型中施加边界条件[9]。本研究采用渐进支护应力折减法分析开挖面稳定性[10]。建立包含 20 m 隧道开挖段及 0.3 m 厚不透水衬砌的数值模型,完成初始地应力平衡后,在掌子面施加等效支护应力;设置各向同性渗流条件后,以 0.1 的步长逐步折减支护应力比  $n$ ,每个工况下模拟 5 h 渗流并监测开挖面中心点位移,当出现位移突变时在临界区间( $n1\pm\Delta n$ )采用 0.01 加密步长精确定位极限支护应力,当支护应力下降到某一点导致位移发生突变时,认为该点为开挖面的极限支护应力,即结构开始失稳的临界点。

## 1.4 模型验证

基于吕玺琳等[11]的离心试验结果建立 FLAC3D 数值模型(900 mm $\times$ 700 mm)模拟干砂地层中隧道开挖( $D=15\ \text{mm}$ , $C/D=1$ )。采用 M-C 准则(材料参数见表 1),数值模拟与理论计算的极限支护应力结果(表 2)与离心试验数据吻合良好,验证了模型的可靠性。

表 1 土体材料参数

Table 1 Parameters of soil materials

参数	干重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	饱和重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )
取值	17	21	4.5	35
参数	变形模量/ MPa	渗透系数/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	孔隙率	泊松比
取值	20	$1\times 10^{-5}$	0.7	0.35

表 2 极限支护应力结果对比

Table 2 Comparison of limit support stress results

试验组号	埋深比 (C/D)	含水情况	极限支护应力/kPa		
			离心试验	理论计算	数值模拟
1	0.5	干燥	22	26	23
2	1.0	干燥	29	33	32
3	1.0	饱和	114	108	120

### 1.5 土体材料选择

本研究土体参数依据天津某地铁区段土工试验确定,采用 FLAC3D 建立数值模型。通过内置命令计算初始地应力场,其梯度由隧道顶部与底部应力差确定。主要参数如表 3 所示。

表 3 复合地层土体参数

Table 3 Soil parameters of composite formation

	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性 模量/ MPa	泊松 比	黏聚 力/ kPa	内摩 擦角/ ( $^{\circ}$ )	渗透 系数/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	孔隙 率
粉质黏土	2 000	10	0.3	10	30	$2\text{e}-4$	0.4
硬质地层	2 200	50	0.3	12	40	$1\text{e}-5$	0.1
管片	2 450	3 450	0.2				

## 2 隧道开挖面稳定性影响因素分析

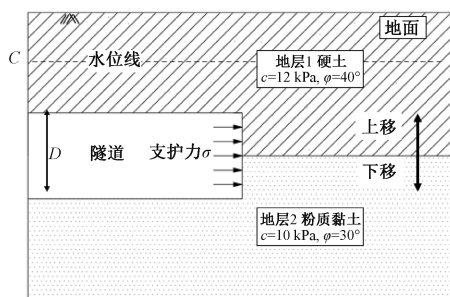
本研究分析了上硬下软和上软下硬两种复合地层下开挖面稳定性,重点研究黏土层高度(0~6 m)变化对失稳模式及极限支护应力的影响规律。

### 2.1 埋深对开挖面稳定性的影响

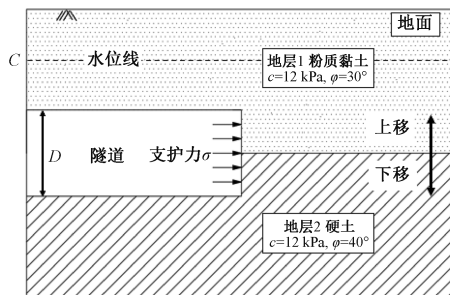
本研究针对复合地层(上硬下软/上软下硬)中  $D=6\text{ m}$  的隧道,分析不同埋深( $C=6, 9, 12\text{ m}$ )对开挖面失稳模式及极限支护应力的影响规律。

图 3 为不同埋深黏土层厚度对极限支护应力的影响。图 3 结果表明,在埋深比  $C/D=1$  的上硬下软地层中,全断面硬质地层的极限支护应力(33.02 kPa)较全断面黏土地层极限支护应力(25.66 kPa)提高 28.6%,表明硬质地层需要更大的支护力维持开挖面稳定。当开挖面完全处于黏土层时,受上部硬地层影响,其极限支护应力(34.16 kPa)仍低于单一黏土地层工况。黏土层厚度从 0 m 增至 3 m 时,支护应力增量(5.06 kPa)显著大于 3~6 m 区间的增量(2.03 kPa,仅为前者的 40.1%),证明开挖面稳定性主要受下部地层特性控制。

对于上软下硬地层,随着黏土层厚度减小(分界面上移),极限支护应力呈现递减趋势且降幅逐渐趋缓。当黏土层厚度为 6 m(全断面黏土)时,极限支护应力为 32.64 kPa;当过渡至全断面硬质地层(0 m 黏土)时,应力值显著降低。参数敏感性分析表明:黏土厚度在 0~3 m 区间极限应力增量



(a) 上硬下软地层工况



(b) 上软下硬地层工况

图 2 双层地层分布情况

Figure 2 Double strata distribution

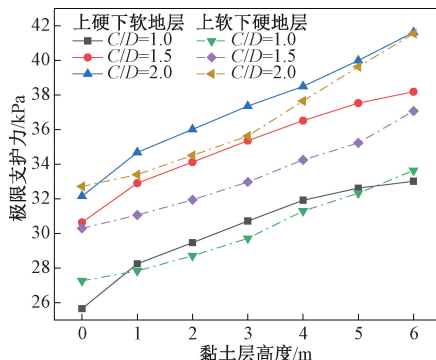


图 3 不同埋深条件下黏土层厚度对极限支护应力的影响

Figure 3 Influence of clay layer thickness on ultimate support stress under different burial depths

(1.32 kPa) 为 3~6 m 区间增加值(4.05 kPa)的 32.5%,进一步验证了开挖面稳定性主要受下部地层力学特性控制的规律。

上述研究结果表明,复合地层中隧道开挖面极限支护应力随埋深增加呈现非线性增长<sup>[12]</sup>。同时根据两类复合地层的数据分析显示,两类地层条件下极限支护应力均与黏土层厚度呈显著线性关系<sup>[13]</sup>,且上硬下软地层的应力增幅系数较上软下硬地层高出 15%~23%,这一差异主要源于下部地层对开挖面稳定性的主导作用。

利用 Origin 软件对曲面进行拟合,选取 Polynomial function 函数来分析不同埋深比下硬土比例对上限支护力的影响。自变量  $x$  和  $y_1$  分别代表黏土层高度和埋深比,应变量  $f$  代表极限支护应力。得到拟合公式:

其中上硬下软地层的拟合公式为

$$f(x, y_1) = -0.161 + 3.905x + 2.969y_1 + 0.101x^2 + 0.683xy_1 + 1.188y_1^2 + 0.024x^3 - 0.217x^2y_1 + 0.240xy_1^2 - 0.305y_1^3; \quad (7)$$

上软下硬地层的拟合公式为

$$f^*(x, y_1) = 19.411 + 2.197x + 7.361y_1 + 0.055x^2 - 2.389xy_1 + 1.151y_1^2 - 0.008x^3 + 0.079x^2y_1 + 0.772xy_1^2 - 0.758y_1^3. \quad (8)$$

拟合结果曲面如图 4 所示, 残差  $R^2$  分别为 0.950, 0.997。

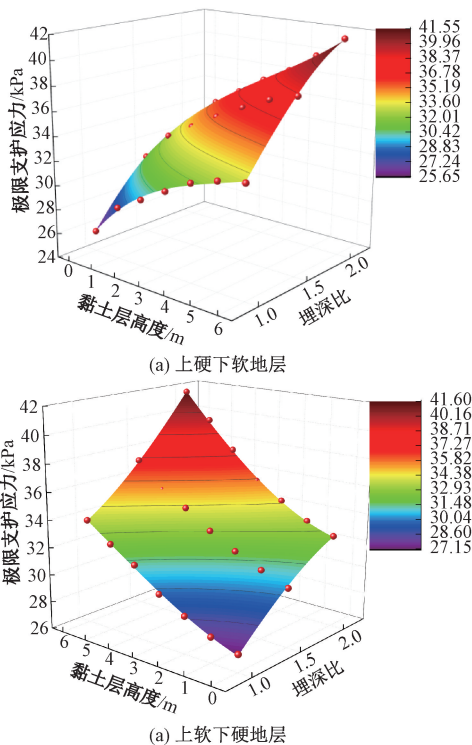


图 4 不同地层分布下双层地层埋深比与极限支护应力的拟合曲面  
Figure 4 The fitting surface of buried depth ratio and ultimate support stress of double-layer strata under different strata distribution

### 2.2 地层内摩擦角对开挖面稳定性的影响

通过选取内摩擦角分别为  $20^\circ, 25^\circ$  和  $30^\circ$  的粉质黏土层, 分析复合地层中内摩擦角变化对隧道开挖面失稳模式及极限支护应力的影响规律。

图 5 为不同内摩擦角条件下黏土层高度对极限支护应力的影响。图 5 研究表明, 在上硬下软地层中, 全断面硬土(黏土厚 0 m)时极限支护应力为 25.80 kPa, 与黏土层内摩擦角  $\varphi$  无关; 随着黏土厚度增至 6 m,  $\varphi = 20^\circ, 25^\circ$  和  $30^\circ$  工况的应力分别增加为 16.41, 11.32 和 7.36 kPa, 其中  $\varphi = 20^\circ$  工况的应力变化是  $\varphi = 30^\circ$  工况的 2.23 倍。这一现象源于黏土占比增加导致其成为主导地层材料, 使得支护应力呈现显著的  $\varphi$  依赖性特征。

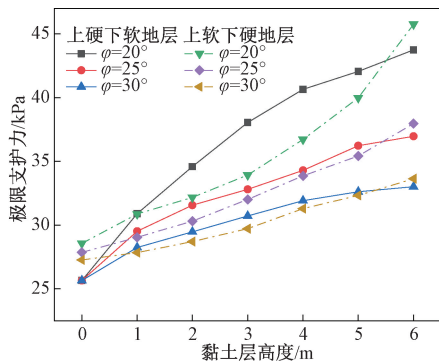


图 5 不同内摩擦角条件下黏土层高度对极限支护应力的影响

Figure 5 Influence of clay layer height on ultimate support stress under different internal friction angles

如图 5 所示, 在上软下硬地层中, 极限支护应力同样随着内摩擦角的增大而增大。在上软下硬地层中, 内摩擦角分别为  $20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$  的条件下黏土层高度从 0 m 到 6 m 的极限支护应力分别上升 17.20, 10.11, 6.38 kPa。不同内摩擦角条件下, 随着开挖面分界面的上升, 黏土层占比减小, 开挖面极限支护应力受黏土层内摩擦角的影响减小。

利用 Origin 曲线拟合工具对不同内摩擦角下黏土比例对极限支护力进行分析, 其中自变量  $x, y_2$  分别为黏土层高度、内摩擦角, 应变变量  $f$  代表极限支护应力, 得到拟合公式如下:

对于上硬下软地层, 拟合公式为

$$f(x, y_2) = 25.912 + 18.351x + 0.077y_2 - 1.027x^2 - 0.861xy_2 - 0.007y_2^2 + 0.030x^3 + 0.020x^2y_2 + 0.011xy_2^2; \quad (9)$$

对于上软下硬地层, 拟合公式为

$$f^*(x, y_2) = 28.221 + 6.113x + 0.174y_2 + 0.624x^2 - 0.406xy_2 - 0.006y_2^2 + 0.027x^3 - 0.028x^2y_2 + 0.08xy_2^2. \quad (10)$$

拟合结果曲面如图 6 所示, 残差  $R^2$  分别为 0.950, 0.967。

### 2.3 地层黏聚力对开挖面稳定性的影响

选取隧道直径  $D = 6$  m、埋深  $C = 6$  m 为基本参数, 通过对比分析粉质黏土黏聚力 (0, 5, 10 kPa) 在两种地层条件下的变化情况, 揭示黏聚力对开挖面破坏形态及极限支护力的影响规律。

图 7 为不同黏土层高度下内摩擦角影响拟合曲线。分析图 7 可知, 当黏土层厚度为 0 m 时, 两种地层中的极限支护应力均趋近于全断面硬土地层值。随着黏土比例增加, 相同黏聚力条件下的极限支护应力显著增大, 且其增长幅度与黏聚力呈线性正相关, 该规律在不同黏土比例下均成立。黏土层占比越高,

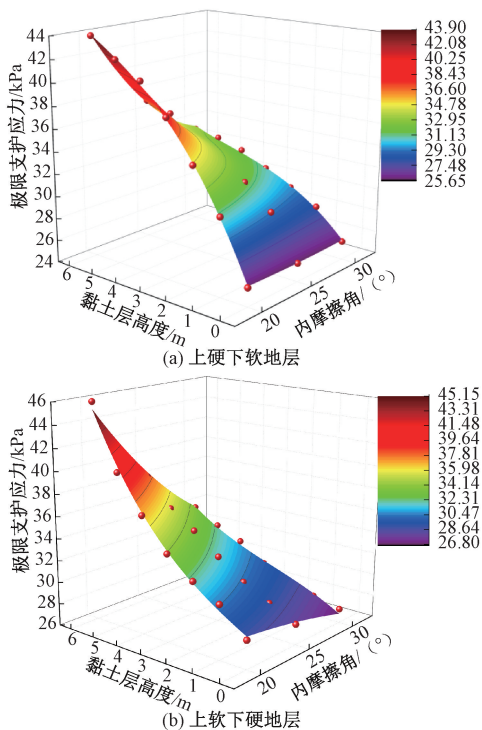


图6 不同地层分布下双层地层内摩擦角与极限支护应力的拟合曲面

Figure 6 The fitting surface of internal friction angle and ultimate support stress of double-layer strata under different strata distribution

黏聚力对开挖面稳定性的影响越显著。具体而言,在上硬下软地层中,黏聚力为0,5,10 kPa时,黏土层高度由0增至6 m,对应的极限支护应力分别增加25.56,16.34,9.46 kPa;而在上软下硬地层中,相应工况下的支护应力分别增加21.78,13.71,6.38 kPa。

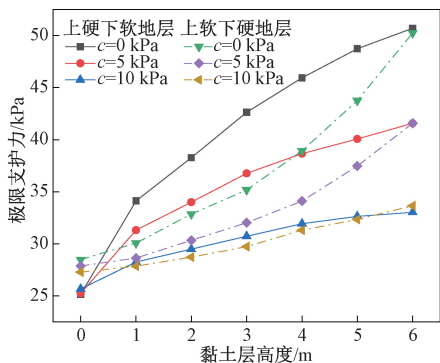


图7 不同黏聚力条件下黏土层高度对极限支护应力的影响  
Figure 7 Influence of clay layer height on ultimate support stress under different cohesion conditions

利用 Origin 曲线拟合工具对不同内摩擦角下黏土比例对上界支护力进行分析,其中自变量  $x, y_3$  分别为黏土层高度、黏聚力,应变变量  $f$  表示极限支护应力,得到拟合公式如下:

对于上硬下软地层,拟合公式为

$$f(x, y_3) = 25.776 + 5.614x - 0.026y_3 - 0.616x^2 - 0.411xy_3 + 0.030x^3 + 0.020x^2y_3 + 0.011xy_3^2; \quad (11)$$

对于上软下硬地层,拟合公式为

$$f^*(x, y_3) = 28.668 + 1.192x - 0.205y_3 + 0.263x^2 - 0.045xy_3 - 0.002y_3^2 + 0.022x^3 - 0.038x^2y_3 + 0.03xy_3^2. \quad (12)$$

拟合结果曲面如图8所示,残差  $R^2$  分别为0.994,0.996。

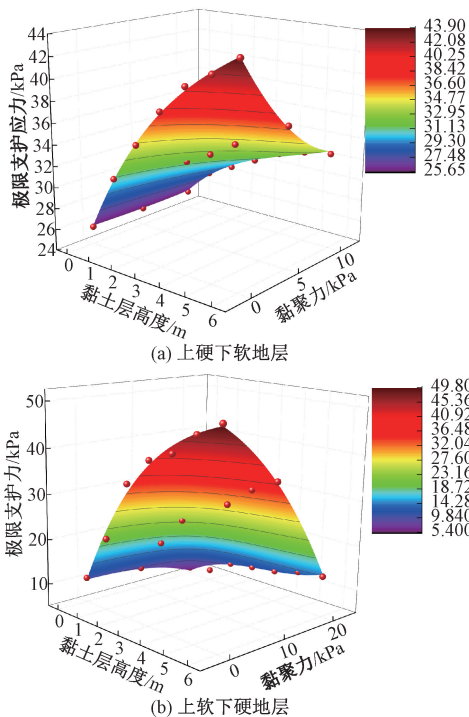


图8 不同地层分布下双层地层黏聚力与极限支护应力的拟合曲面

Figure 8 The fitting surface of cohesion and ultimate support stress of double-layer strata under different strata distribution

## 2.4 水位对开挖面稳定性的影响

选取隧道直径  $D=6$  m,埋深  $C=6$  m,水头差分别为3.0,4.5,6 m,揭示两种地层在不同工况下的破坏形式以及极限支护受水位的影响规律。

图9为不同水头压差下黏土层高度对极限支护应力的影响。分析图9可得,在复合地层条件下,掌子面极限支护应力随黏土层厚度的增加呈显著增长趋势,但上硬下软和上软下硬地层的规律存在明显差异。当水头差分别为3.0,4.5和6 m时,上硬下软地层中黏土层高度从0增至6 m对应的支护应力分别增加2.4,6.2和6.3 kPa,而上软下硬地层中对应的支护应力相应增加2.3,4.3,7.3 kPa。在相同地层分布条件下,极限支护应力与水头差呈线性正相关关系,且不同水头差工况下的黏土层高度-

支护应力曲线呈现平行分布特征。

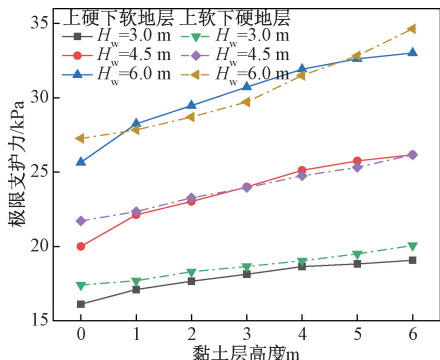


图9 不同水头差下黏土层高度对极限支护应力的影响

Figure 9 Influence of clay layer height on ultimate support stress under different head difference conditions

利用 Origin 曲线拟合工具对不同水头差下黏土比例对上限支护力进行分析,其中自变量  $x, y_4$  分别为黏土层厚度、水头差,应变变量  $f$  表示极限支护应力,得到拟合公式如下:

对于上硬下软地层,拟合公式为

$$f(x, y_4) = 11.467 - 1.507x - 1.067y_4 - 0.070x^2 + 1.086xy_4 + 0.100y_4^2 + 0.011x^3 - 0.032x^2y_4 - 0.073xy_4^2 + 0.020y_4^3; \quad (13)$$

对于上软下硬地层,拟合公式为

$$f^*(x, y_4) = 10.053 + 1.136x + 1.892y_4 - 0.101x^2 - 0.355xy_4 + 0.187y_4^2 - 0.003x^3 - 0.004x^2y_4 + 0.045xy_4^2 - 0.05y_4^3。 \quad (14)$$

拟合结果如图 10 所示,残差  $R^2$  分别为 0.991, 0.998。

### 2.5 与既有研究成果的对比分析

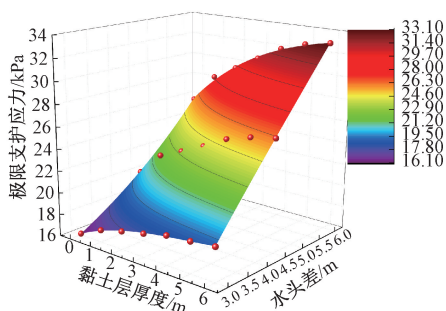
模型地层土体参数采用表 4 数据,保证上层土体参数恒定的情况下,分别改变下层土的黏聚力和内摩擦角各 5 组进行对比分析,分析上下地层不同土体性质差异对极限支护应力的影响。

土体极限分析模型的土层分布如图 11 所示,计算层分界线位于隧道的拱顶位置,埋深  $C=9$  m,隧道直径  $D=6$  m 时隧道的极限支护应力。

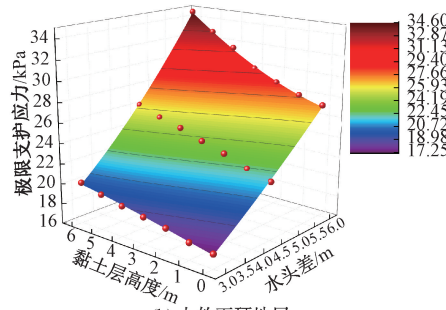
图 12 为本文模型与现文模型计算结果对比。同一工况下,本文数值模型计算结果与现有文献所提出的模型计算结果在趋势及数值方面吻合度均较好,验证了本文所建立模型的适用性和有效性。

### 3 影响因素敏感度分析

为揭示多参数耦合作用机制,采用灰色关联分析法通过无量纲化处理建立关联度模型。基于数值模拟结果,结合灰色关联分析与单因素敏感性分析,系统阐明了各参数对开挖面极限支护应力的影响规律及其耦合机制。



(a) 上硬下软地层



(b) 上软下硬地层

图 10 不同地层分布下双层地层水头差与极限支护应力的拟合曲面

Figure 10 Fitting surface of water head difference and ultimate support stress in double-layer strata under different strata distribution

表 4 模型土体参数

Table 4 Model soil parameter

	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^\circ$ )
地层 1	2 000	2.5	20
地层 2	2 450	0.5~4.5	15~35

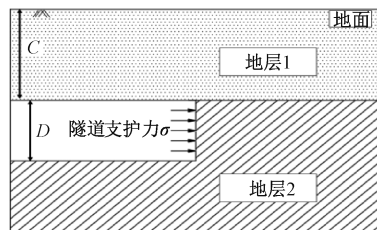
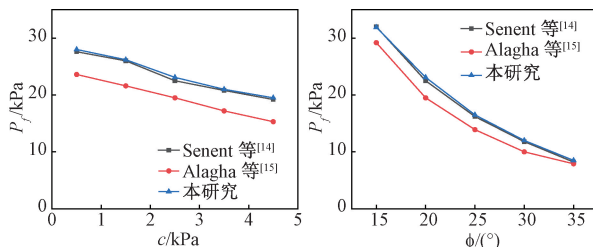


图 11 地层分析模型

Figure 11 Strata analysis model



(a)  $\phi=20^\circ$  不同黏聚力下极限支护应力 (b)  $c=25$  kPa 不同内摩擦角下极限支护应力

图 12 分析模型结果对比

Figure 12 Comparison of analysis model results

### 3.1 灰色关联敏感度分析方法

邓聚龙<sup>[16]</sup>阐述了灰色系统理论。该方法通过比较参考数列与比较数列曲线的几何相似性,来定

量分析两者之间的关联程度。曲线的相似度越高,数列间的关联性越强,对系统行为的敏感性越显著<sup>[17]</sup>。灰色系统方法适用于各类过程类问题,且适用于小样本、贫信息、不准确性问题的研究<sup>[18]</sup>。

构建灰色关联模型的具体步骤如下<sup>[16]</sup>:

**步骤1** 确定比较矩阵与参考矩阵。将不同影响开挖面的因素(埋深、内摩擦角、黏聚力、水头差等)作为灰色关联法的比较矩阵  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ , 与之相对应的开挖面极限支护应力比为参考矩阵, 记为  $\mathbf{Y}$ ,  $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T$ 。

**步骤2** 针对数据进行无量纲化处理。采用初值化方法对数据进行标准化处理, 该方法适用于具有稳定变化趋势的参数分析, 能够有效消除量纲影响, 确保后续关联分析的合理性。

**步骤3** 灰关联差异信息空间。记  $\mathbf{X}$  矩阵为联系因子空间, 记  $\mathbf{Y}$  为参考序列, 且  $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$  均为经过无量纲化的等阶矩阵, 计算可得参考序列与比较序列的差值绝对值: 提取  $R_i(j)$  最大值与最小值, 得到最小值矩阵  $\mathbf{R}_{\min}$  和最大值矩阵  $\mathbf{R}_{\max}$ 。

**步骤4** 求解参考序列与特征序列之间的关联系数。

$$s_i = \frac{R_{\min} + \rho R_{\max}}{R_i(j) + \rho R_{\max}} \quad (15)$$

式中:  $\rho$  为分辨系数, 一般为 0.5,  $\rho$  值越小, 分辨率越大。

**步骤5** 计算关联度并进行排序。通过关联度分析可确定各因子的敏感性排序, 从而揭示其对系统行为的相对贡献程度。关联度  $A_i$  越接近 1 说明相关性越好, 其中:

$$A_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n s_i(j) \quad (16)$$

### 3.2 单因素影响和敏感度分析

章光等<sup>[19]</sup>通过引入无量纲化技术, 为多个因素的敏感度比较提供了一种有效的计算方法。在隧道工程领域, 王辉等<sup>[20]</sup>基于嘎隆拉隧道案例, 系统分析了弹性模量、泊松比及侧压力系数等关键地质参数对隧道变形的敏感性影响, 为工程参数优化提供了重要依据。

本研究将隧道开挖面视为受多因素影响的力学系统, 其稳定性由极限支护应力表征。该应力参数受埋深、内摩擦角及水头差等关键因素  $\alpha$  共同作用。

设定基准状态下, 系统特性等于  $P^*$ 。通过改变元素  $\alpha$  的参数, 引起系统特性  $P$  的变化, 分析该元素  $\alpha$  导致系统特性  $P$  偏离基准状态系统特性  $P^*$  的偏离趋势和程度。  $P$  的表达式为<sup>[21]</sup>

$$P = \int (\alpha_1^*, \dots, \alpha_k^*, \dots, \alpha_n^*) d\alpha = \varphi_k(\alpha_k) \quad (17)$$

在研究中, 需对这些元素进行无量纲化处理, 使得不同参数之间的比较和分析变得更加直接和有效。通过对系统特性  $P$  的相对误差  $\delta_{\alpha P} = |\Delta P|/P$  与不同元素  $\alpha_k$  的相对误差  $\delta_{\alpha k} = \Delta \alpha_k / \alpha_k$  进行无量纲处理, 得到敏感函数  $S_k(\alpha_k)$  的计算公式<sup>[21]</sup>:

$$S_k(\alpha_k) \triangleq \frac{\left( \frac{|\Delta P|}{P} \right)}{\left( \frac{\Delta \alpha_k}{\alpha_k} \right)} = \left| \frac{\Delta P}{\Delta \alpha_k} \right| \frac{\alpha_k}{P} \quad (18)$$

当  $\Delta \alpha_k / \alpha_k$  较小时, 可以近似为

$$S_k(\alpha_k) \triangleq \left| \frac{d\varphi_k(\alpha_k)}{d\alpha_k} \right| \frac{\alpha_k}{P} \quad (19)$$

归一化处理结果如表 5 与表 6 所示。由表 5、表 6 的融合分析结果可知, 各个影响因素对上硬下软和上软下硬地层极限支护应力的影响大小接近。可近似取平均值作为敏感性因子。分别为埋深比(0.154)、内摩擦角(0.227)、黏聚力(0.209)、水头差(0.283)、分界面位置(0.127)。

表 5 上硬下软地层关联度归一化处理

Table 5 Normalization of correlation degree of upper hard and lower soft strata

方法	埋深比	内摩擦角	黏聚力	水位	分界面位置
关联度系数归一化处理	0.201	0.209	0.187	0.232	0.172
敏感度因子归一化处理	0.099	0.254	0.229	0.332	0.087
融合分析结果	0.150	0.231	0.208	0.282	0.129

表 6 上软下硬地层关联度归一化处理

Table 6 Normalization of correlation degree of upper soft and lower hard strata

方法	埋深比	内摩擦角	黏聚力	水位	分界面位置
关联度系数归一化处理	0.202	0.208	0.187	0.230	0.172
敏感度因子归一化处理	0.113	0.240	0.233	0.337	0.077
融合分析结果	0.158	0.224	0.210	0.284	0.125

### 3.3 参数优化建议

基于敏感性分析, 提出以下优化措施。

(1) 水位控制。地下水位控制在开挖面以下 2~3 倍洞径(水头差  $\leq 0.3$  MPa), 高渗透地层采用超前注浆(渗透系数  $< 1 \times 10^{-6}$  cm/s), 敏感系数  $> 0.25$  时启动应急排水。

(2) 支护优化。 $\phi > 25^\circ$  区域采用分级支护, 软土压力取 1.2~1.5 倍静止土压力, 硬岩取 0.8~1.0 倍主动土压力;  $c < 30$  kPa 地层同步注浆加固至 50 kPa 以上, 掘进速度  $\leq 20$  mm/min。

(3)埋深与界面控制。埋深比( $C/D$ ) $>3$ 时动态修正支护压力,分界面调整量 $\pm 0.2D$ ;突变段(敏感系数 $>0.15$ )设置 $\geq 3D$ 过渡支护区并布设应力释放孔。

#### 4 结论

(1)在复合地层中,地层分界面的空间分布对极限支护应力及开挖面稳定性具有显著影响。在上硬下软地层条件下,当地层分界面从隧道底部上升至顶部时,极限支护应力增大了 28.6%,黏土层厚度 3~6 m 的极限支护应力变化幅度为 0~3 m 的 40.1%,开挖面稳定性主要由开挖部下部的弱地层决定;而在上软下硬地层条件下,黏土层 0~3 m 为 3~6 m 的 32.5%,开挖面稳定性主要由开挖部下部的强地层决定。

(2)在上硬下软和上软下硬复合地层中,隧道极限支护压力随埋深和水头差的增加呈显著增长趋势,且对黏土层力学参数的敏感性呈现明显差异:当掌子面为全断面硬土时,黏土层黏聚力和内摩擦角对极限支护应力的影响较小;而当掌子面为全断面软土时,黏土层力学参数的影响显著增强,其中黏聚力敏感性受地层分布特征的影响尤为突出。

(3)在上软下硬和上硬下软地层的双层地层中,敏感性排序为水位(0.283) $>$ 内摩擦角(0.227) $>$ 黏聚力(0.209) $>$ 埋深比(0.154) $>$ 分界面位置(0.127)。

(本文受到中国建筑第七工程局有限公司科技研发课题(JTZB-TJDT-D005/2021)的支持)

#### 参考文献:

[1] 秦新春. 隧道盾构开挖事故统计与开挖过程数值模拟[D]. 廊坊: 防灾科技学院, 2020.  
QIN X C. Statistics of tunnel shield excavation accidents and numerical simulation of excavation process [D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention, 2020.

[2] ANAGNOSTOU G, KOVÁRI K. The face stability of slurry-shield-driven tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 165-174.

[3] KIM S H, TONON F. Face stability and required support pressure for TBM driven tunnels with ideal face membrane-drained case [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(5): 526-542.

[4] 李晓龙, 栗鹏超, 刘小锋, 等. 富水粉细砂层联络通道顶管法施工地表沉降分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(1): 67-74.  
LI X L, LI P C, LIU X F, et al. Analysis on surface settlement of pipe jacking method for construction of contact

channel in water-rich silty fine sand layer[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(1): 67-74.

[5] VERMEER P A, RUSE N, MARCHER T. Tunnel heading stability in drained ground[J]. Felsbau, 2002, 20(6): 8-18.

[6] 米博, 项彦勇. 砂土地层浅埋盾构隧道开挖渗流稳定性的模型试验和计算研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 837-848.  
MI B, XIANG Y Y. Model experiment and calculation analysis of excavation-seepage stability for shallow shield tunneling in sandy ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 837-848.

[7] 裴浩东, 叶社保, 杨平, 等. 软土地层盾构掘进参数分析及掘进速度预测[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(1): 107-113.  
PEI H D, YE S B, YANG P, et al. Analysis of boring parameters of shield in soft soil strata and prediction of driving speed[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(1): 107-113.

[8] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.  
CHEN Y M, XU D P. FLAC/FLAC3D foundation and engineering example[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2013.

[9] 王俊. 土压平衡盾构掘进对上软下硬地层扰动研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.  
WANG J. Study on disturbance of EPB shield tunneling to upper soft and lower hard strata[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[10] 赵明华, 毛韬, 牛浩懿, 等. 上硬下软地层盾构隧道开挖面极限支护力分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 103-109.  
ZHAO M H, MAO T, NIU H Y, et al. Analysis of limit supporting force of tunnel excavation face for shield machine in upper-hard lower-soft ground[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(1): 103-109.

[11] 吕玺琳, 周运才, 李冯缔. 粉砂地层盾构隧道开挖面稳定性离心试验及数值模拟[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3324-3328, 3335.  
LÜ X L, ZHOU Y C, LI F D. Centrifuge model test and numerical simulation of stability of excavation face of shield tunnel in silty sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3324-3328, 3335.

[12] 孔德森, 滕森, 赵明凯, 等. 盾构隧道开挖面改进三维模型和临界支护压力研究[J]. 隧道建设, 2023, 43(9): 1463-1472.  
KONG D S, TENG S, ZHAO M K, et al. An improved

- three-dimensional model of shield tunnel face and its stability study [J]. *Tunnel Construction*, 2023, 43 (9): 1463–1472.
- [13] 钟久强. 富水砂层-泥质粉砂岩复合地层盾构隧道掌子面稳定性研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2022.  
ZHONG J Q. Study on stability of shield tunnel face in water-rich sand layer-argillaceous siltstone composite stratum [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.
- [14] SENENT S, JIMENEZ R. A tunnel face failure mechanism for layered ground, considering the possibility of partial collapse [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 47: 182–192.
- [15] ALAGHA A S N, CHAPMAN D N. Numerical modelling of tunnel face stability in homogeneous and layered soft ground [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 94: 103096.
- [16] 邓聚龙. 灰色系统基本方法 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.  
DENG J L. The primary methods of grey system theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2005.
- [17] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用 [M]. 5 版. 北京: 科学出版社, 2010.  
LIU S F, DANG Y G, FANG Z G, et al. Grey system theory and its application [M]. 5th ed. Beijing: Science Press, 2010.
- [18] 朱丹. 隧道施工扰动结合地下水对临近管线影响分析及防治措施研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.  
ZHU D. Analysis of the influence of tunnel construction disturbance combined with groundwater on adjacent pipelines and prevention measures [D] Mianyang: Southwest University Of Science And Technology, 2023.
- [19] 章光, 朱维申. 参数敏感性分析与试验方案优化 [J]. *岩土力学*, 1993, 14(1): 51–58.  
ZHANG G, ZHU W S. Parameter sensitivity analysis and optimizing for test programs [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1993, 14(1): 51–58.
- [20] 王辉, 陈卫忠. 嘎隆拉隧道围岩力学参数对变形的敏感性分析 [J]. *岩土工程学报*, 2012, 34 (8): 1548–1553.  
WANG H, CHEN W Z. Sensitivity analysis of mechanical parameters to deformation of surrounding rock in Galongla tunnel [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(8): 1548–1553.
- [21] LEE I M, NAM S W. The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, 16(1): 31–40.

## Analysis of Excavation Face Stability and Influencing Factors of Shield Tunnel in Double-layer Strata

ZHANG Yamin<sup>1,3</sup>, SHEN Xiaoqiu<sup>1,2</sup>, LI Fengwei<sup>1,2</sup>, ZHENG Yuanxun<sup>1,2</sup>, Grzegorz Ludwik Golewski<sup>4</sup>

(1. National Key Laboratory of Tunnel Boring Machine and Intelligent Operation and Maintenance, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Technology Patent Search Station, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 4. Department of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 40 Str., Lublin 20-618, Poland)

**Abstract:** To investigate the instability mechanism of tunnel excavation faces in double-layer strata under seepage conditions and its impact on the safety of shield construction, a systematic study was conducted on the stability of excavation faces in a seepage-stratum coupled environment. First, refined numerical models of two typical stratum conditions—upper-hard and lower-soft strata and upper-soft and lower-hard strata—were established based on the FLAC3D finite difference software. Next, the influence mechanisms of the burial depth ratio, soil internal friction angle, cohesion, groundwater level difference, and stratum interface position on the ultimate support pressure of the shield excavation face were analyzed using the numerical models. Finally, the gray correlation analysis method was introduced to evaluate and rank the sensitivity of these five influencing factors, thereby quantitatively revealing the degree and differences of their impacts on the stability of the shield excavation face. The research results indicated that under composite stratum conditions, the stability of the excavation face was primarily controlled by the strength of the lower stratum, with the influence of the upper strata being only 40.1% (upper-hard and lower-soft strata) and 32.5% (upper-soft and lower-hard strata) of that of the lower stratum. The sensitivity ranking of the influencing factors was as follows: groundwater level > soil strength > burial depth ratio > stratum interface position.

**Keywords:** shield tunnel; double-layer strata; excavation face stability; numerical simulation; sensitivity analysis