

考虑不利结构面影响的深埋隧道围岩坍塌破坏机理研究

黄阜, 谭鑫, 张敏, 陈璐, 凌同华

(长沙理工大学土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 目前, 节理裂隙发育岩体中考虑不利结构面影响的隧道围岩坍塌破坏发生机理和破坏模式研究尚不透彻。为了研究不利结构面对深埋隧道围岩稳定性的影响, 采用空间离散技术构建隧道拱顶与拱肩处存在不利结构面的隧道围岩塌落破坏机制。基于 Hoek-Brown 破坏准则与极限分析上限定理推导出考虑不利结构面影响的围岩安全系数目标函数, 通过优化计算得到极限状态下的围岩安全系数上限解与塌落面形状。依托肇庆虎山隧道工程, 构建隧道拱肩处存在不利结构面的数值模型, 获得施工扰动诱发隧道围岩安全系数和塌落面数值解并将其与本文理论解进行对比, 验证理论计算结果的有效性。参数分析表明: 顶部与拱肩存在不利结构面的围岩安全系数随地质强度指标 GSI 和岩石材料常数 m_i 的增大而增大。围岩坍塌范围随着 GSI 的增大而增大, 随着 m_i 的增大而减小。

关键词: 围岩稳定性; Hoek-Brown 破坏准则; 不利结构面; 空间离散技术; 上限定理

中图分类号: U45

文献标志码: A

Study on the failure mechanism of rock mass for deep-buried tunnels with the consideration of unfavorable structural planes

Huang Fu, Tan Xin, Zhang Min, Chen Lu, Ling Tonghua

(School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: Presently, the studies of collapse mechanism and failure mode of tunnel surrounding rock considering the influence of unfavorable structural planes in jointed fractured rock mass are not well understood. To investigate the effect of the unfavorable structural planes on the stability of deep-buried tunnel rock mass, failure mechanisms of the rock mass with unfavorable structural planes existing at roof and spandrel of the tunnel are constructed by using the spatial discrete technology. Based on the Hoek-Brown failure criterion and the upper bound theorem of limit analysis, the objective function of the rock mass safety factor with the consideration of unfavorable structural planes is derived. The upper bound solution of the rock mass safety factor and the collapse range under the limit state are obtained through optimization calculation. Taking Hushan Tunnel as engineering background, a numerical model of the rock mass with unfavorable structural planes is constructed and numerical results of the rock mass safety factor and the collapse range of the rock mass is obtained. By comparing the theoretical results with the numerical results, the validity of the theoretical method proposed in this paper is verified. Parameter analysis indicates that the safety factor of the rock mass with unfavorable structural planes at roof and spandrel increases with the increase of geological strength index GSI and rock material constant m_i . The collapse range of rock mass increases with the increase of GSI while decrease with the increase of m_i .

Key words: rock mass stability; Hoek-Brown failure criterion; Unfavorable structural planes ; Spatial discretization technique; Upper bound theorem;

我国幅员辽阔, 地质条件复杂, 在地质构造活动的作用下, 岩层中广泛存在断层、节理、层理及溶蚀裂隙等各种结构面。当采用钻爆法施工的隧道开挖范围内上述结构面发育时, 爆炸应力波在裂隙网络中的传播产生的反射、折射与能量耗散效应, 促使原生裂隙尖端应力集中并扩展贯通, 形成次生破裂面。同时, 爆炸气体在节理面内的高压楔裂作用显著降低结构面抗剪强度, 加速岩体沿弱面的剪切滑

收稿日期: 2025-5-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278395)

移。上述动力损伤机制与岩体结构面的几何非连续性特征协同作用，有可能诱发围岩坍塌失稳，从而导致严重的工程事故。

针对这一问题，许多学者采用不同方法对考虑不利结构面与倾斜岩层作用的隧道围岩稳定性问题开展了研究。崔芳^[1]以大华岭隧道为背景，利用有限元软件模拟了断层影响下的隧道围岩稳定性，探讨了断层产状与隧道轴线夹角对围岩稳定性的影响。董志明^[2]以某隧道工程为背景，利用 MIDAS 构建数值模型，研究了结构面产状对于隧道施工的不利影响。马继等^[3]针对交叉裂隙隧道围岩的稳定性问题，采用单轴压缩试验与数值模拟技术研究了围岩主裂隙相关参数对模型抗压强度的影响规律。索超峰等^[4]针对围岩节理特征对隧道围岩稳定性的不利影响，采用模型实验研究了节理在不同倾角、间距和节理组数情况下的隧道围岩的塌落及松动范围。林聪波等^[5]针对贯通节理对大跨隧道围岩的稳定性问题，基于离散元强度折减理论，运用 3DEC 软件分析了三维空间节理的走向、倾角、间距与力学参数对围岩稳定性的影响。杨忠民等^[6]以晋红高速公路蔡官营隧道为背景，采用 3DEC 软件构建了双连拱隧道三维数值模型，研究了该工况下单洞开挖对邻洞拱顶沉降及围岩破坏范围的影响机理。还有一些学者^[7-11]也采用数值模拟技术对节理裂隙发育岩层中隧道的稳定性开展了研究。

上述研究大多是利用数值模拟技术和模型试验开展的，一些学者也采用理论方法研究了隧道施工诱发围岩塌方失稳机理和破坏模式。Fraldi 与 Guarracino^[12]基于 Hoek-Brown 破坏准则，利用极限分析上限定理与变分法求推导得到深埋隧道拱顶围岩塌落面的解析表达式。在此基础上，Huang 等^[13]针对邻近基坑开挖引起的既有隧道围岩变形问题，推导出基坑开挖诱发既有隧道围岩松动变形面的解析解并讨论了各参数对隧道围岩松动变形的影响。Man 等^[14]针对存在软弱夹层情况下隧道掌子面的稳定性问题，利用 Hoek-Brown 非线性破坏准则与极限分析上限定理计算了隧道掌子面支护力的解析表达式，讨论了各参数对隧道掌子面的稳定性影响并利用遗传算法对计算结果进行了验证。此外，还有一些学者^[15-19]也采用各种理论对隧道施工诱发的围岩稳定性问题开展了研究。

目前，考虑不利结构面影响的隧道围岩变形和破坏机理研究大多是采用数值模拟技术和模型试验开展的。部分基于理论方法开展的施工诱发隧道围岩坍塌变形研究又没有考虑不利结构面的影响。考虑不利结构面影响的隧道围岩在极限状态下的坍塌机理和坍塌模式研究还不够透彻。因此，有必要利用空间离散技术结合极限分析理论对考虑不利结构面影响的隧道在施工扰动作用下围岩稳定性开展研究，为节理裂隙岩体中隧道施工与支护方案优化提供理论支持。

本文基于空间离散技术和极限分析上限定理，根据存在不利结构面情况下隧道围岩在极限状态下的破坏特征，构建了任意角度下存在不利结构面的隧道围岩的二维离散型破坏机制。计算得到存在不利结构面情况下隧道围岩极限状态下的安全系数及其对应的塌落面形状。本文研究成果可以对存在不利结构面情况下隧道围岩的稳定性评估提供理论依据，对于降低复杂地质条件下隧道施工诱发围岩坍塌发生风险、保障隧道施工安全具有一定的科学意义和工程应用价值。

1 Hoek-Brown 破坏准则

Hoek-Brown 非线性破坏准则通过引入地质强度指标(*GSI*)量化岩体结构面发育程度及粗糙特征，结合完整岩石强度参数与扰动因子，能够较好地评估节理裂隙等不利结构对岩体强度的弱化效应。相较于传统线性强度准则，其非线性特征可更精准地描述复杂应力路径下岩体的渐进破坏行为，更加适用于节理

裂隙岩体的强度评估。在 Hoek-Brown 破坏准则中，岩体强度特征可以通过岩土力学相关参数、最大主应力和最小主应力之间的非线性关系表示，具体表达式如下：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

上式中： σ_1 为最大主应力； σ_3 为最小主应力； m_b 为岩体软硬系数； σ_{ci} 为岩体单轴抗压强度。

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right)} \quad (2)$$

m_b 是一个无量纲常数， m_i 为材料常数。常数 a 和 s 的计算公式为：

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{GSI}{15}} - e^{\frac{20}{3}} \right) \quad (3)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right)} \quad (4)$$

上式中： GSI 为地质强度指标，取值范围为 5~100； D 为岩石扰动因子，取值范围为 0~1，其中 0 代表岩体未受到任何干扰，1 代表岩体受到极大干扰。

2 考虑不利结构面影响的隧道围岩坍塌破坏机制

2.1 拱顶存在不利结构面的隧道围岩破坏机制构建

Park D et al^[20]采用极限分析定理与空间离散技术，根据矩形硐室与圆形隧道拱顶围岩的破坏特征构建了二维离散型破坏机制，研究极限状态下隧道拱顶围岩的坍塌破坏模式，与实际工况检测得到的围岩塌落面具有较高的吻合度。鉴于该方法的有效性，本文根据隧道顶部存在不利结构面情况下围岩的破坏特征，采用空间离散技术建立了顶部存在不利结构面的隧道拱顶围岩二维破坏机制，如图 1 所示。在图 1 中，以隧道中心 O 点为坐标原点建立坐标系，假设 A_1 点为不利结构面交汇点，将该点作为围岩塌落面的生成起点， A_1 到隧道圆心的距离为 H 。通过空间离散技术， A_2 点被确定为速度间断线上生成的下一个点，通过将 OA_1 旋转一个预设离散角度 δ ，使其与 A_1A_2 线段形成与竖直方向夹角为 α_1 的交点，从而确定 A_2 点。其中，离散角度 δ 的物理意义为速度间断面的离散化分段角度， δ 越小，速度间断面被分割的线段越多，理论破坏面曲线更加接近真实破坏面，计算精度越高。为保证研究结果的准确性，本研究选取 $\delta = 0.1^\circ$ 。依此类推， A_3 点通过将 OA_2 旋转角度 δ ，使其与 A_2A_3 线段形成与竖直方向夹角为 α_2 的交点来确定，最后直至离散点 A_n 距离隧道中心距离小于或等于半径 R 停止。由于整个破坏机制关于 y 轴对称， $A_j(1 \leq j \leq n)$ 与 $B_j(1 \leq j \leq n)$ 相互对称，将所有生成的离散点依次连接，构成隧道拱顶围岩塌落面的速度间断面 $A_1A_nB_n$ 。

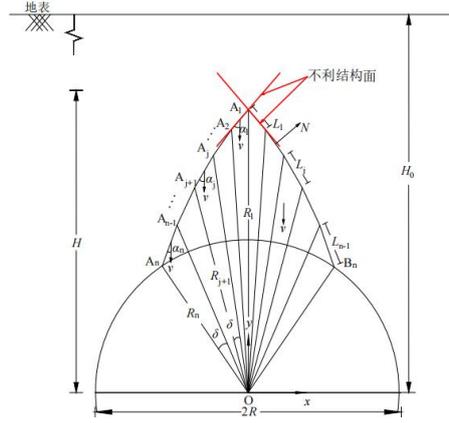


图 1 顶部存在不利结构面的隧道围岩破坏机制

Fig.1 Failure mechanism of surrounding rock with unfavorable structural plane above a tunnel roof

基于极限分析上限定理与 Hoek-Brown 破坏准则，利用该破坏机制可以计算得到破坏机制的外力功率与内能耗散功率，通过虚功原理推导得到围岩安全系数的目标函数。通过对目标函数的优化计算，得到极限状态下的隧道围岩安全系数上限解与对应的几何参数。最后利用数值软件 MATLAB 绘制出极限状态下存在不利结构面的隧道围岩塌落面。

O 点的坐标为(0,0)，其中 A₁ 点的坐标可以根据隧道半径 R 和不利结构面交汇点净距 H 来确定：

$$\begin{cases} x_1 = 0 \\ y_1 = R + H \end{cases} \quad (5)$$

利用 A₁A₂ 线段向量与破裂面法向量的垂直关系可以得到 OA₂ 的长度并递推得到 OA_j 的长度：

$$\begin{cases} |\vec{N}|=1 \\ \vec{A_1A_2} \cdot \vec{N}=0 \end{cases} \quad (6)$$

$$l_{OA_j} = \frac{l_{OA_{j-1}} \cdot \cos[\frac{\pi}{2} + \alpha_{i-1} + (j-2) \cdot \delta]}{\cos[\frac{\pi}{2} + \alpha_{i-1} + (j-1) \cdot \delta]} \quad (7)$$

从而得到 A_j 点的具体坐标值：

$$\begin{cases} x_j = -l_{OA_j} \cdot \cos[\frac{\pi}{2} - (j-1)\delta] \\ y_j = l_{OA_j} \cdot \sin[\frac{\pi}{2} - (j-1)\delta] \end{cases} \quad (8)$$

直到该破坏面延伸到隧道边界，即 OA_j 的长度小于或等于隧道半径时停止计算。

2.2 拱肩存在不利结构面的隧道围岩破坏机制构建

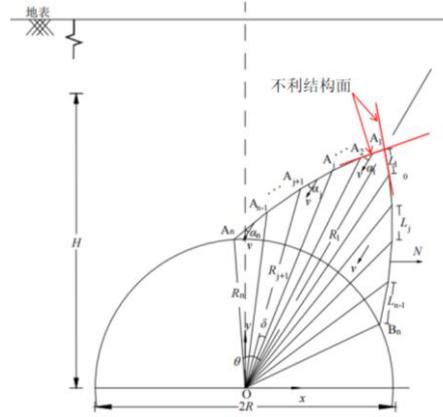


图 2 拱肩存在不利结构面的隧道围岩破坏机制

Fig.2 Failure mechanism of surrounding rock in with unfavorable structural planes in the tunnel shoulder

根据 2.1 节的顶部存在不利结构面的隧道围岩破坏机制构建过程，假设不利结构面交汇点与隧道原点的连线与隧道 y 轴之间存在夹角 θ ，建立隧道拱肩存在不利结构面情况下爆破扰动诱发围岩坍塌的二维破坏机制，如图 2 所示。

此时，起始点 A_1 点的坐标表达式为：

$$\begin{cases} x_1 = -(R+H) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \\ y_1 = -(R+H) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \end{cases} \quad (9)$$

依照 2.1 节的递推步骤可以计算得到 OA_i 的长度计算公式：

$$l_{OA_j} = \frac{l_{OA_{j-1}} \cdot \cos\left[\frac{\pi}{2} + \alpha_{j-1} - \theta + (j-2) \cdot \delta\right]}{\cos\left[\frac{\pi}{2} + \alpha_{j-1} - \theta + (j-1) \cdot \delta\right]} \quad (10)$$

推导计算得出点 A_i 的坐标：

$$\begin{cases} x_i = -(R+H) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta - (i-1) \cdot \delta\right) \\ y_i = (R+H) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta - (i-1) \cdot \delta\right) \end{cases} \quad (11)$$

3 考虑不利结构面影响的隧道围岩能耗计算

基于构建的拱顶和拱肩存在不利结构面的隧道围岩破坏机制和极限分析上限定理，可以计算得到该破坏机制中的内外能耗功率并推导出围岩安全系数目标函数。隧道围岩在施工扰动影响下发生坍塌，由于岩土体具有黏聚力，破坏面内的岩体在滑移过程中与周围岩体之间产生摩擦，从而发生能量耗散。根据极限分析上限定理，该耗散功率为牵引矢量与速度矢量的乘积，其计算公式为：

$$D = v \sum_{j=1}^{n-2} (\tau_j \cos \alpha_j - \sigma_{nj} \sin \alpha_j) L_j \quad (12)$$

上式中, v 为离散塌落面单元的速度; 牵引力矢量的法向分量 σ_{nj} 和切向分量 τ_j 为可根据 Kumar^[21]给出的公式计算得到:

$$\sigma_n = \sigma_{ci} \left\{ \left(\frac{1}{m_b} + \frac{\sin \alpha}{m_b} \right) \left[\frac{m_b a (1 - \sin \alpha)}{2 \sin \alpha} \right]^{\frac{1}{1-a}} - \frac{s}{m_b} \right\} \quad (13)$$

$$\tau = \sigma_{ci} \left\{ \frac{\cos \alpha}{2} \left[\frac{m_b a (1 - \sin \alpha)}{2 \sin \alpha} \right]^{\frac{a}{1-a}} \right\} \quad (14)$$

每个塌落面单元对应的重力功率为:

$$W_\gamma = \gamma v \left(\sum_{j=1}^n S_j - K_1 \right) \quad (15)$$

上式中, γ 为岩体重度; S_j 为图 1 中第 j 个三角形 $OA_j A_{j+1}$ 的面积, 可由海伦公式计算得到:

$$S_j = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} \quad (16)$$

K_1 为图 1 中围岩塌落面 $OA_j A_{j+1}$ 被隧道断面截取的不规则图形, 其面积计算公式可以表示为:

$$K_1 = S_j - \frac{\pi R^2}{360} \cdot \delta \quad (17)$$

根据极限分析上限定理, 在机动许可速度场中, 利于滑动力的外力功率小于或等于阻碍滑动力的内能耗散功率时, 破坏机制才能保持稳定。因此, 隧道拱顶围岩的安全系数可以定义为外力功率与内能耗散功率的比值, 其表达式为:

$$F_s = \frac{W_D}{W_\gamma} \quad (18)$$

本文将计算得到的重力功率与内能耗散功率代入上式, 得到了考虑不利结构面影响的隧道围岩安全系数上限目标函数。由于该目标函数为复杂的非线性函数, 难以通过解析方法直接计算该函数的最优值。因此本文利用非线性规划算法优化参数 α_j , 最终获得隧道周围存在不利结构面影响的围岩在极限状态下的安全系数上限解, 并根据优化计算得到的几何参数绘制出极限状态下围岩的塌落破坏面。

4 参数分析

4.1 围岩安全系数分析

为了分析各个参数对考虑不利结构面情况下围岩安全系数与塌落范围的影响, 利用围岩安全系数计算公式计算了岩体软硬系数 $m_i=5\sim 20$ 、地质强度指标 $GSI=10\sim 60$ 、围岩重度 $\gamma=16\sim 22\text{kN/m}^3$ 、不利结构面交汇点位置 $H=1.5\sim 3.0\text{m}$ 、不利结构面倾斜角度 $\theta=0\sim 15^\circ$ 、隧道半径 $R=4.0\sim 5.5\text{m}$ 时, 围岩的安全系数值并绘制了安全系数随上述参数变化的曲线。

图 3(a)~(d)为隧道拱顶正上方存在不利结构面的情况下, 围岩安全系数随相关参数的变化规律。从图

中可以看出，顶部存在不利结构面的隧道围岩安全系数随着 γ 、 H 、 R 的增大而减小， γ 和 H 对围岩安全系数有着显著影响。围岩安全系数随 GSI 、 m_i 的增大而增大。

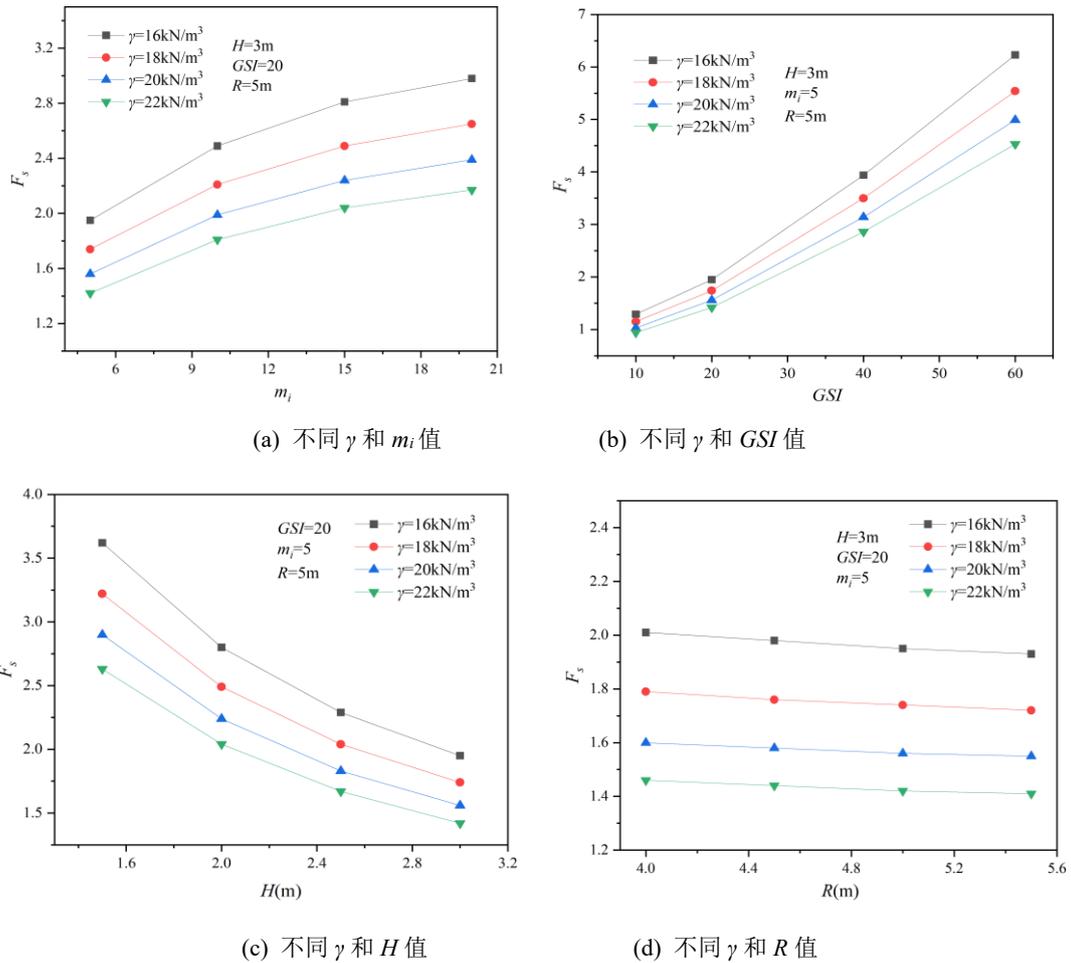
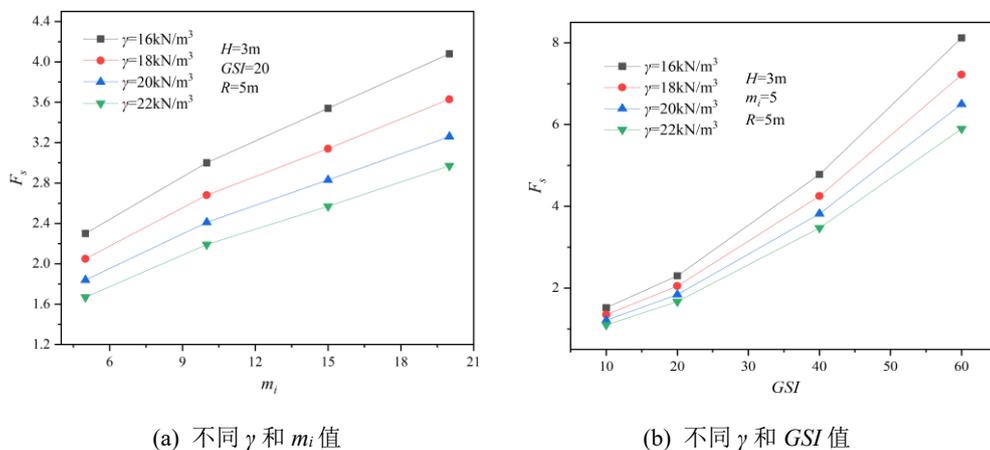
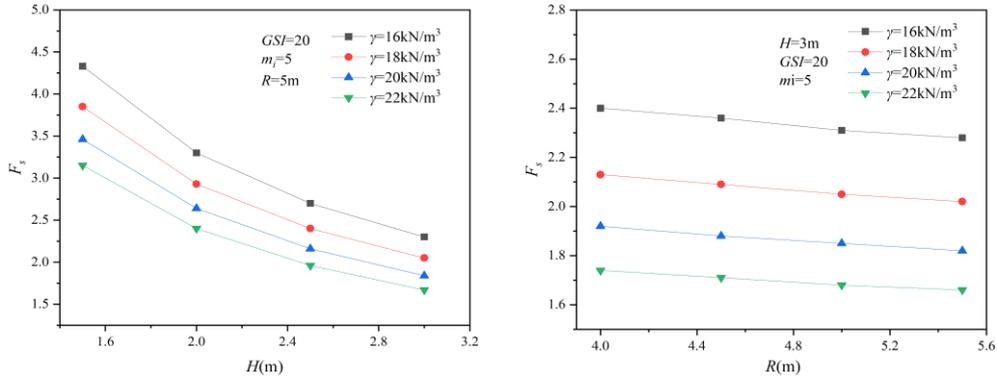


图 3 顶部存在不利结构面的隧道围岩 F_s 随不同参数的变化规律

Fig.3 The variation law of F_s of rock mass in tunnel with unfavorable structural plane above a tunnel under different parameters

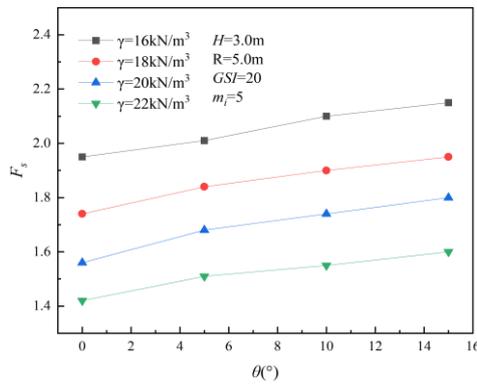
图 4(a)~(d)为隧道拱肩上方存在不利结构面的情况下，围岩安全系数随相关参数的变化规律。从图中可以看出，拱肩存在不利结构面的隧道围岩安全系数与拱顶存在不利结构面的隧道围岩安全系数变化规律一致。此外，围岩安全系数随着不利结构面倾斜角度 θ 的增大而增大。





(c) 不同 γ 和 H 值

(d) 不同 γ 和 R 值



(e) 不同 γ 和 θ 值

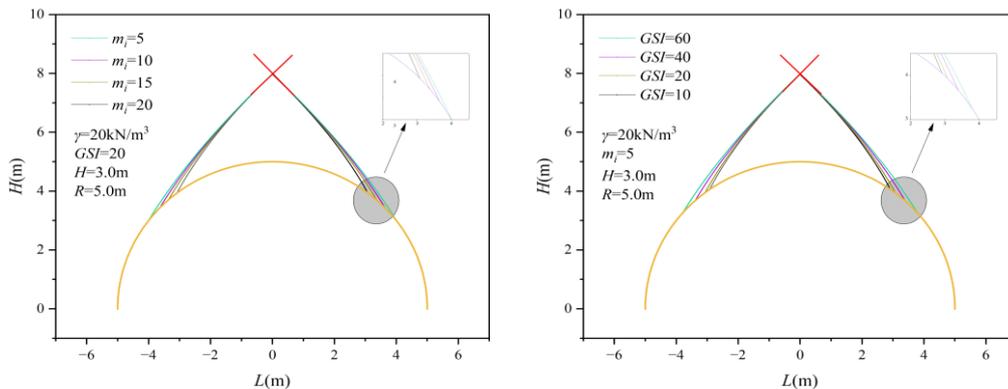
图 4 拱肩存在不利结构面的隧道围岩 F_s 随不同参数的变化规律

Fig.4 The variation law of F_s of rock mass in tunnel with unfavorable structural plane at the tunnel shoulder under different parameters

4.2 围岩塌落面分析

当隧道围岩和几何参数 $m_i=5\sim 20$ 、 $GSI=10\sim 60$ 、 $\theta=0\sim 15^\circ$ 、 $H=1.5\sim 3.5$ m、 $R=4.0\sim 5.5$ m 时，绘制了不同岩体参数对应的坍塌面形状。

图 5(a)~(d)为隧道拱顶正上方存在不利结构面的情况下，围岩塌落面随相关参数的变化规律。从图中可以看出，当其他参数固定不变时，极限状态下顶部存在不利结构面的隧道围岩坍塌范围随 GSI 和 H 的增大而增大，随 m_i 和 R 的增大而减小。



(a) 不同 m_i 值

(b) 不同 GSI 值

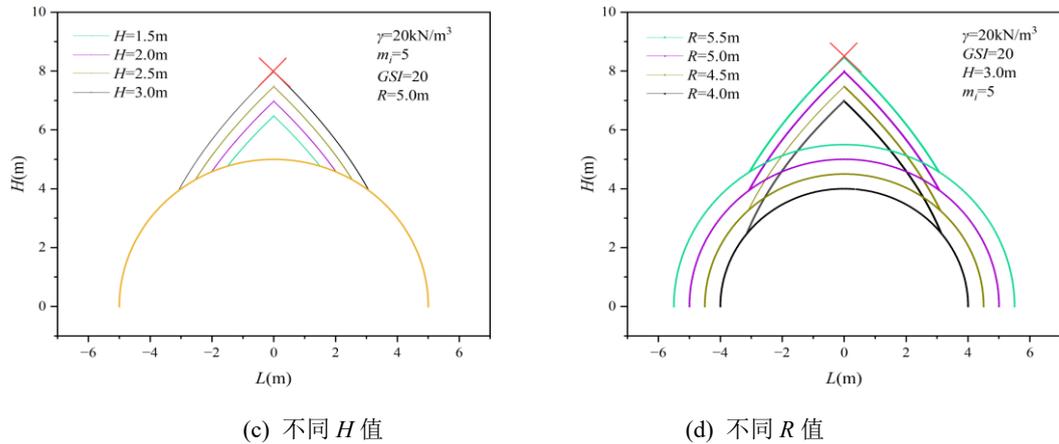
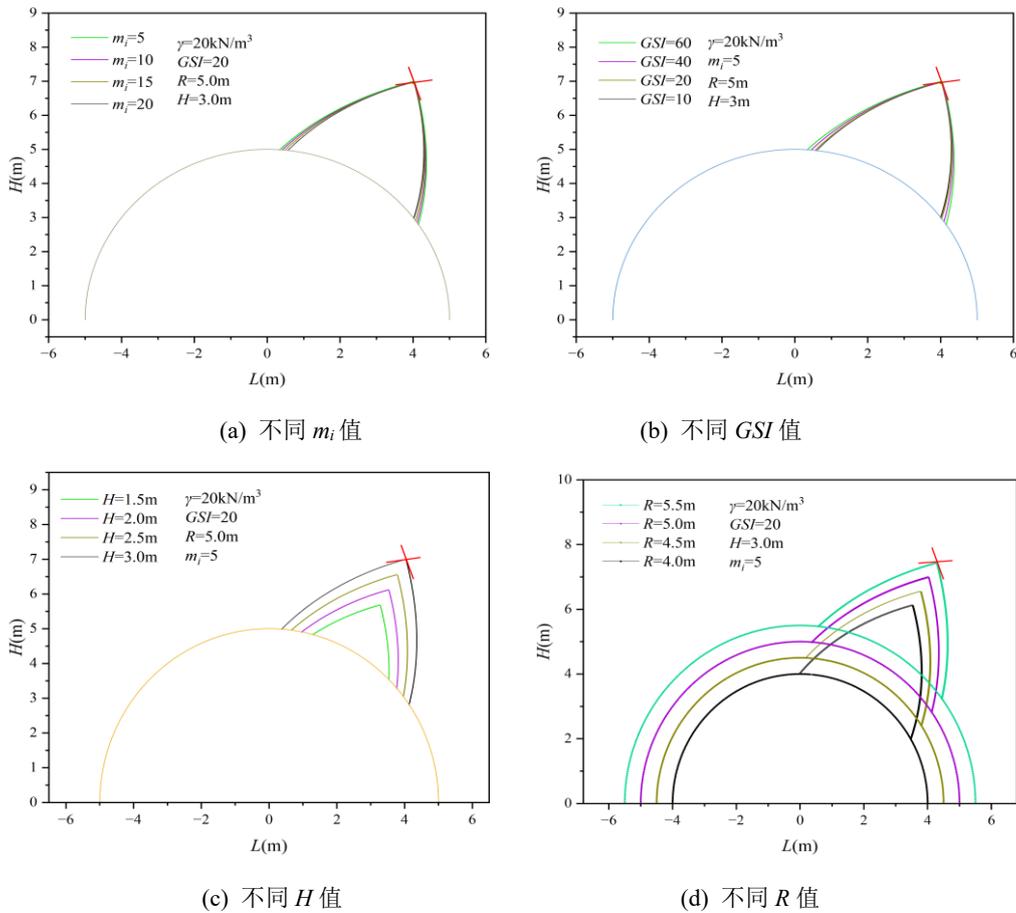
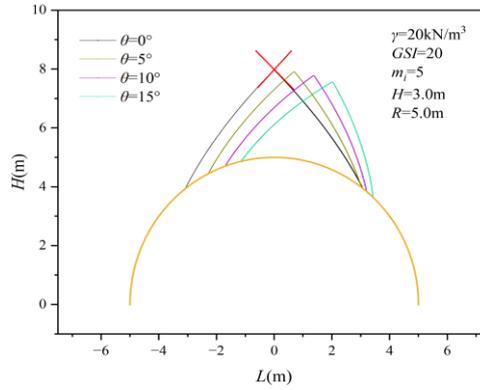


图 5 不同参数对应的顶部存在不利结构面的隧道围岩塌落面

Fig.5 The collapse surface of the surrounding rock of the tunnel with unfavorable structural planes above a tunnel under different parameters

图 6(a)~(d)为隧道拱肩上方存在不利结构面的情况下，围岩塌落面随相关参数的变化规律。从图中可以看出，当其他参数固定不变时，极限状态下拱肩存在不利结构面的隧道围岩坍塌范围与顶部存在不利结构面的隧道围岩塌落范围的变化规律一致。此外，围岩塌落范围随着不利结构面倾斜角度 θ 的增大而减小。





(e) 不同 θ 值

图 6 不同参数对应的拱肩存在不利结构面的隧道围岩塌落面

Fig.6 The collapse surface of the surrounding rock of the tunnel with unfavorable structural planes at the tunnel shoulder under different parameters

5 工程实例分析

虎山隧道位于汕湛高速清云段，采用分离式设计，洞室净空 $11.00 \times 5.0\text{m}$ ，全长 1780m。隧道最大埋深约为 280m，属深长隧道^[21]。隧道衬砌结构方式采用复合式衬砌，应用新奥法原理对其进行设计与施工，以锚杆、喷射砼或钢筋网喷砼、钢架作为初期支护结构，模筑砼或钢筋砼作为二次支护结构，两者共同组成永久性承载结构。隧址区地下水主要以基岩裂隙水为主，其赋存与运移主要受控于岩体空隙率、裂隙发育密度及季节降雨变化等因素，补给来源主要来自于大气降水下渗补给，整体富水性较强且动态稳定。

虎山隧道在 ZK111+701 段采用新奥法施工后发生坍塌。调查报告中指出，隧道事故段围岩等级为 IV 级围岩。隧道坍塌发生的直接原因是掌子面附近优势裂隙组的节理产状与隧道走向夹角较小，多组节理相互切割与岩层面形成不利结构面组合，贯通性节理与开挖掌子面形成了临空的楔形体。隧道开挖后原岩应力场发生应力重分布，围岩逐步松弛，裂隙面的抗剪强度降低，在岩体重力的作用下原闭合贯通性隐伏节理发生错动，同时也受到施工开挖的爆破扰动作用、地下水渗流浸润软化作用及隧道开挖形成临空面的综合影响。



图 7 虎山隧道掌子面节理示意图

Fig.7 Schematic diagram of joints at the the Hushan tunnel face

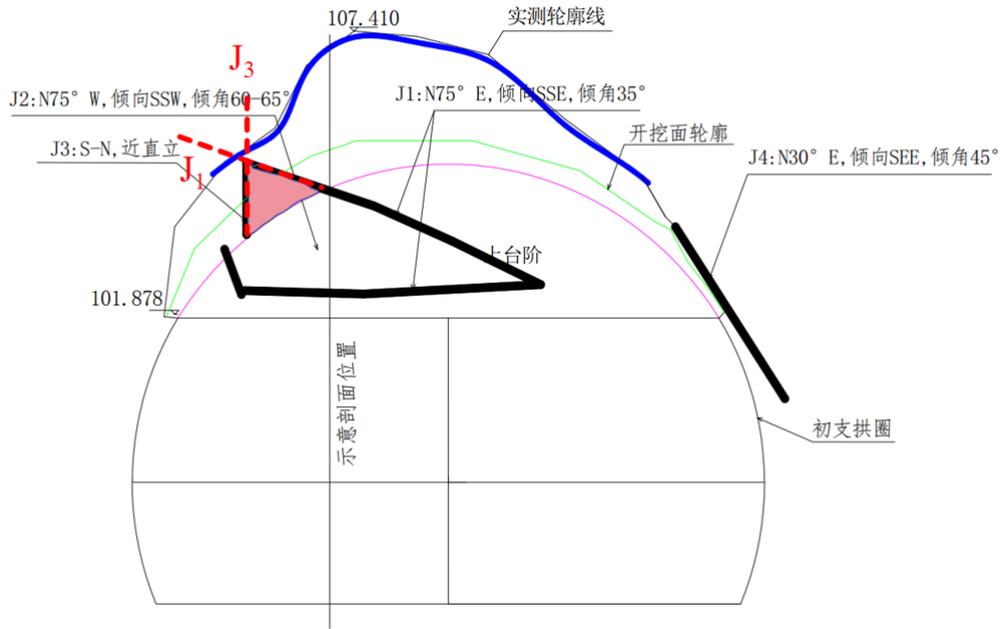


图8 虎山隧道掌子面不利结构面位置推测

Fig.8 Inference of the location of unfavorable structural planes at the Hushan tunnel face

为了验证本文方法的有效性，基于广东肇庆虎山隧道工程实例，采用 FLAC^{3D} 数值软件对拱肩存在不利结构面的隧道围岩稳定性进行施工过程模拟。数值模拟模型尺寸为：50m(X 方向)×1m(Y 方向)×50m(Z 方向)，隧道圆心坐标为(25,0,25)，隧道开挖半径为 6m，隧道断面为三心圆形状，不利结构面交叉点净距取 2.4m，倾斜角度约为 35°，无支护结构。本文重点研究隧道围岩的整体变形趋势，忽略节理面的细观力学机制，如摩擦滑移。采用倾角 35°，长 5m，宽 0.1m 的矩形空洞与倾角 86°，长 4m，宽 0.1m 的矩形空洞来近似代替不利结构面 J₁、J₃，其中两个矩形空洞的交汇点坐标为(-4.818,6.881)。设定模型的边界条件为：X 方向上固定模型左右两侧边界的位移，Y 方向上固定前后两侧边界的位移，Z 方向上固定下侧边界的位移，上侧边界为自由表面。如图 9 所示。根据工程勘察资料，隧道数值模型围岩选取参数如表 1 所示。

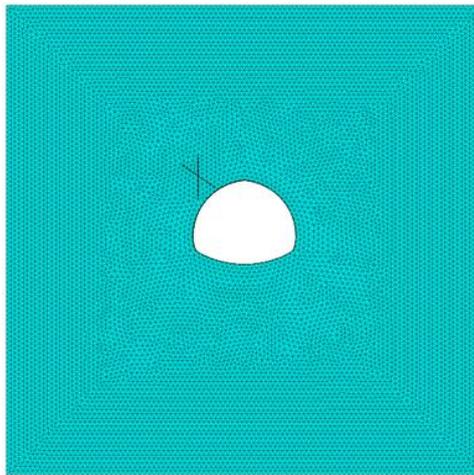


图9 广东肇庆虎山隧道数值模型

Fig.9 Numerical model of Hushan tunnel in Zhaoqing, Guangdong

表 1 数值模拟围岩参数

Table.1 Numerical simulation of surrounding rock parameters

参数	单位	取值
围岩重度 γ	kN/m ³	24
剪切模量 G	GPa	10
体积模量 K	GPa	3
抗拉强度 σ_t	kPa	50
GSI		20
m_i		10

利用构建的虎山隧道数值模型，施加重力场使其达到初始应力平衡状态，通过移除隧道断面单元模拟隧道全断面开挖，得到极限状态下该隧道拱肩处围岩的位移云图，如图 10 所示。同时基于如图 11 流程图所示的强度折减理论，编制了衡量隧道围岩稳定性的安全系数计算程序，计算得出极限状态下该隧道在开挖扰动作用下安全系数为 0.88。

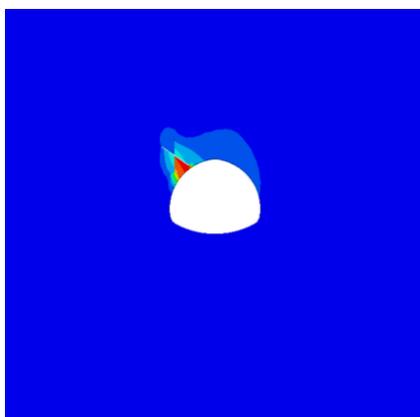


图 10 极限状态下拱肩存在不利结构面的隧道围岩位移云图

Fig.10 Displacement contour maps of tunnel rock mass with adverse structural planes at the tunnel shoulder under limit state

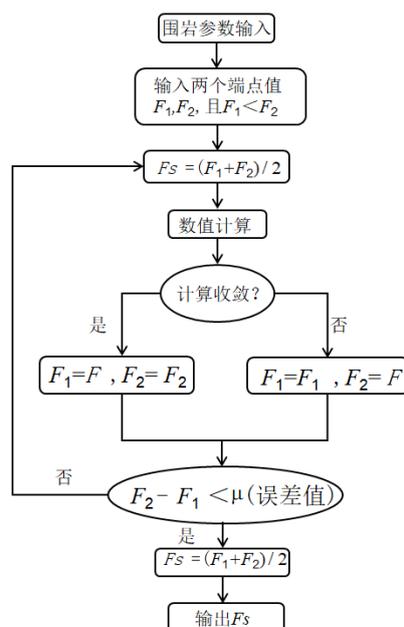


图 11 强度折减理论流程图

Fig.11 Flow chart of strength reduction theory

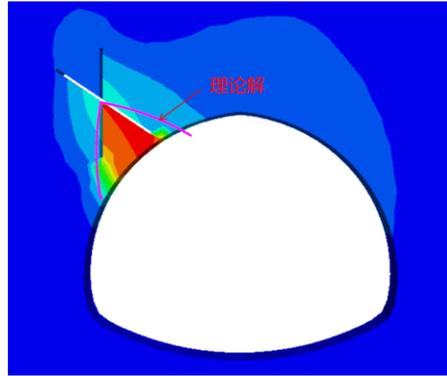


图 12 围岩塌落面理论解与数值解对比

Fig.12 Comparative analysis of theoretical and numerical solutions for rock mass collapse range

本文利用 2.2 节提出的方法和虎山隧道地质资料，构建了广东肇庆虎山隧道掌子面存在不利结构面的理论计算模型，通过计算该理论模型中的内外能耗功率，得到了在极限状态下围岩安全系数理论解为 0.96，与数值解的差值为 9.09%，表明本文理论方法是可靠的。此外，为了对比塌落面的理论解和数值解，将理论计算得到的塌落面绘制在了数值模拟得到的隧道围岩位移云图中，如图 12 所示。从图中可以看出，理论计算得到的塌落面形状与塌落范围与数值模拟结果基本一致。因此，本文提出的理论计算方法可以应用于实际工程中考虑不利结构面影响的隧道施工诱发围岩坍塌失稳研究。

6 结论

本文基于空间离散技术、极限分析上限定理和 Hoek-Brown 破坏准则对考虑不利结构面影响的隧道围岩坍塌稳定性评估开展研究，主要研究结论如下：

(1) 隧道拱顶和拱肩处存在不利结构面的围岩安全系数随着围岩容重 γ 、不利结构面交汇点净距 H 、隧道半径 R 的增大而减小，随地质强度指标 GSI 、岩体软硬系数 m_i 和不利结构面倾斜角度 θ 的增大而增大。在相同参数的情况下，拱顶围岩安全系数普遍小于拱肩处的围岩安全系数。

(2) 在极限状态下，拱顶或拱肩存在不利结构面的隧道围岩坍塌范围都随着地质强度指标 GSI 、不利结构面交汇点净距 H 的增大而增大，随着不利结构面倾斜角度 θ 、岩体软硬系数 m_i 、隧道半径 R 的增大而减小。

(3) 依托虎山隧道工程，运用本文提出的理论方法与数值模拟方法计算了不利结构面诱发隧道顶部围岩塌方破坏的破坏面形状与围岩安全系数数值解，通过与理论结果进行对比，证明本文方法可以用于实际工程中考虑不利结构面情况下隧道围岩的稳定性评估。

(4) 本研究未考虑地下水对不利结构面影响下的隧道稳定性影响。实际工程中地下水会显著降低不利结构面的抗剪强度，考虑地下水和不利结构面耦合作用的深埋隧道围岩坍塌破坏机理需要进一步探索。

参考文献：

- [1] 崔芳, 高永涛, 吴顺川. 断层影响下隧道喷锚支护效果的数值模拟[J]. 金属矿山, 2011, (06): 25-28.
Cui F, Gao Y T, Wu S C. Numerical simulation on the bolt-shotcrete support effect of cave tunnel affected by fault[J]. Metal Mine, 2011, (06): 25-28.

-
- [2] 董志明, 袁茜, 金建伟,等. 软弱围岩结构面产状对隧道施工的影响分析及处理措施[J]. 公路, 2018, 63(09): 296-300.
Dong Z M, Yuan Q, Jin J W, et al. Analysis of the influence of weak surrounding rock joint surface attitude on tunnel construction and countermeasures[J]. Highway, 2018, 63(09): 296-300.
- [3] 马继, 杜强, 熊良宵. 含交叉裂隙的隧道围岩稳定性的试验和数值模拟研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2024, 35(03): 75-80.
Ma J, Du Q, Xiong L X. Experimental and numerical simulation on the stability of tunnel surrounding rock with intersecting cracks[J]. Geological Hazards and Environmental Protection, 2024, 35(03): 75-80.
- [4] 索超峰, 石益东, 李军. 节理特征对破碎围岩稳定性影响的模型试验[J]. 公路交通科技, 2013, 30(04): 82-87.
Suo C F, Shi Y D, Li J. Model test of the effect of joint characteristics on stability of broken rock mass[J]. Journal of Highway and Transportation Science, 2013, 30(04): 82-87.
- [5] 林聪波, 俞缙, 常方强,等. 三维贯通节理对大跨隧道围岩稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(03): 1141-1152.
Lin C B, Yu J, Chang F Q, et al. Influence of three-dimensional persistent joints on surrounding rock stability of large-span tunnel[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2023, 54(3): 1141-1152.
- [6] 杨忠民, 高永涛, 吴顺川,等. 节理岩体中纵向间距对连拱隧道稳定性的影响[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 167-176.
Yang Z M, Gao Y T, Wu S C, et al. Influence of longitudinal spacing in jointed rock mass on the stability of double-arch tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 167-176.
- [7] Shen B, Barton N. The disturbed zone around tunnels in jointed rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(1): 117-126.
- [8] 潘文韬, 何川, 吴枋胤,等. 不同大变形等级下层理角度对层状软岩隧道的影晌[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(05): 94-105.
Pan W T, He C, Wu F Y, et al. Effect of bedding angle of layered soft rock tunnels with different large deformation grades[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(5): 94-105.
- [9] 黄志鹏, 周洪波, 周江平. 复杂地质条件下导流洞塌方的离散元法模拟研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(S1): 58-61.
Huang Z P, Zhou H B, Zhou J P. Effect of bedding angle of layered soft rock tunnels with different large deformation grades[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2012, 34(S1): 58-61.
- [10] 赵瑜, 卢义玉, 黄诚,等. 隧道开挖过程中复杂裂隙围岩的固流耦合分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(02): 35-39.
Zhao Y, Lu Y Y, Huang C, et al. Analysis of solid - fluid coupling for tunnel excavation in complicated fractured rock masses [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2010, 32(2): 35-39.
- [11] 邹弈, 朱碧堂, 吴颖彪, 等. 断层破碎带黏性夹泥岩体与基岩接触界面大型直剪试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(01): 45-51.
Zou Y, Zhu B T, Wu Y B, et al. Large-scale direct shear test study on the contact interface between fault breccia clayey rock mass and bedrock[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(01): 45-51.
- [12] Fraldi M, Guarracino F. Limit analysis of collapse mechanisms in cavities and tunnels according to the Hoek - Brown failure criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(4): 665-673.
- [13] Huang F, Zhang M, Wang F, et al. The failure mechanism of surrounding rock around an existing shield tunnel induced by an adjacent excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 117: 103236.
- [14] Jianhong M ,Hongwei H , Zhiyong A , et al. Analytical model for tunnel face stability in longitudinally inclined layered rock masses with weak interlayer[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 143: 104608
- [15] Liu G ,Zhou C ,Feng K , et al. Probabilistic evaluation method for the stability of large underground cavern considering the uncertainty of rock mass mechanical parameters: A case study of Baihetan underground powerhouse project[J]. Engineering Geology, 2024, 340: 107660.
- [16] Li A ,Xu N ,Dai F , et al. Stability analysis and failure mechanism of the steeply inclined bedded rock masses surrounding a large underground opening[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research,

2018, 77: 45-58.

- [17] Tu H, Zhou H, Qiao C, et al. Excavation and kinematic analysis of a shallow large-span tunnel in an up-soft/low-hard rock stratum[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 97(3): 103245.
- [18] 刘翔, 房倩等. 变坡面浅埋偏压隧道松动围岩压力计算方法 [J]. *中国铁道科学*, 2017, 38 (02): 64-70.
Liu X, Fang Q, et al. Calculation method for loosened surrounding rock pressure of shallow-buried eccentrically loaded tunnels with slope change faces [J]. *China Railway Science*, 2017, 38(02): 64-70.
- [19] Yang Z H, Zhang J H. Minimum safe thickness of rock plug in karst tunnel according to upper bound theorem[J]. *Journal of Central South University*, 2016, 23(09): 2346-2353.
- [20] Park D, Michalowski R L. Roof stability in deep rock tunnels[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 124(05): 104-139.
- [21] 徐树. 虎山隧道裂缝处治设计[J]. *中国水运(下半月)*, 2020, 20(08): 188-189.
Xu S. Design for crack treatment of Hushan Tunnel [J]. *China Water Transport (Second Half of the Month)*, 2020, 20(08): 188-189.



通信作者: 黄卓(1983—), 男, 博士, 长沙理工大学土木与环境工程学院教授, 博士生导师, 研究方向为隧道与地下工程,
Email: hfcsu0001@163.com。