

文章编号:1005-0523(2026)04-0011-09



不利结构面影响下的隧道围岩坍塌机理研究

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: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文章理论解进行对比,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:U456

文献标志码:A

本文引用格式:黄阜,谭鑫,张敏,等.不利结构面影响下的隧道围岩坍塌机理研究[J].华东交通大学学报,2026,43(4):11-19.

Study on the Collapse Mechanism of Tunnel Surrounding Rock Under the Influence of Unfavorable Structural Planes

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

(School of Civil and environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Currently, the 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 discretization technique. 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 are 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

收稿日期:2025-05-30

基金项目:国家自然科学基金项目(52278395)

mass increases with the increase of GSI while it decreases with the increase of m_i .

Key words: rock mass stability; Hoek-Brown failure criterion; unfavorable structural planes; spatial discretization technique; upper bound theorem

Citation format: Huang Fu, Tan Xin, Zhang Min, et al. Study on the collapse mechanism of tunnel surrounding rock under the influence of unfavorable structural planes[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(4): 11-19.

我国地质复杂,岩层中广泛存在断层、节理等结构面。钻爆法施工时,爆炸应力波和高压气体作用于裂隙,导致岩体破裂、强度降低,易诱发围岩坍塌,引发工程事故。针对这一问题,众多学者采用不同方法,围绕不利结构面和倾斜岩层赋存条件下隧道围岩的稳定性问题开展了研究。马继等^[1]针对交叉裂隙隧道围岩的稳定性问题,采用数值模拟技术研究了围岩主裂隙相关参数对围岩抗压强度的影响规律。此外亦有学者^[2-8]基于数值模拟技术,对节理裂隙发育岩层中隧道的稳定性问题进入了深入分析。

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施工诱发隧道围岩塌方失稳机理和破坏模式。Fraldi等^[9]基于Hoek-Brown破坏准则,利用极限分析上限定理与变分法,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^[10]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。此外,还有一些学者^[11-15]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,不利结构面影响下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。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并没有考虑不利结构面的影响。因此,有必要基于空间离散技术与极限分析理论,开展施工扰动作用下考虑不利结构面影响的隧道围岩稳定性研究,以期对节理裂隙岩体中隧道施工与支护方案优化提供理论依据。

本文基于空间离散技术和极限分析上限定

理,Hoek-Brown破坏准则,针对不利结构面影响下隧道围岩在极限状态的破坏特征,构建了任意角度下存在不利结构面的隧道围岩二维离散型破坏机制,进而计算得到围岩极限状态下的安全系数及其对应的塌落面形状。本文研究成果可为不利结构面条件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围岩坍塌风险、保障隧道施工安全具有重要的科学意义与工程应用价值。

1 不利结构面影响下的隧道围岩坍塌破坏机制

1.1 拱顶存在不利结构面的隧道围岩破坏机制构建

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

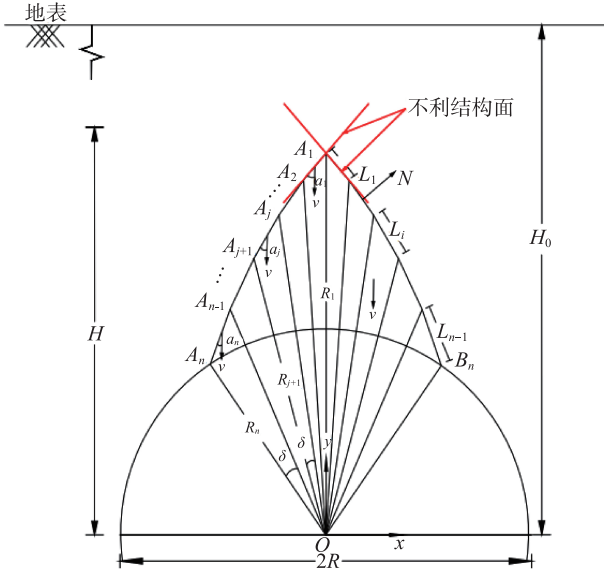


图1 顶部存在不利结构面的隧道围岩破坏机制
Fig. 1 Failure mechanism of surrounding rock with unfavorable structural planes above the tunnel roof

次连接,构成隧道拱顶围岩塌落面的速度间断面 $A_1A_nB_n$ 。

O 点的坐标为 $(0,0)$,其中 A_1 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

$$\begin{cases} x_1 = 0 \\ y_1 = R + H \end{cases} \quad (1)$$

利用 A_1A_2 线段向量与破裂面法向量的垂直关系,可以得到 OA_2 的长度并递推得到 OA_j 的长度

$$\begin{cases} |\vec{N}| = 1 \\ \vec{A_1A_2} \cdot \vec{N} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$l_{OA_j} = \frac{l_{OA_{j-1}} \cos\left[\frac{\pi}{2} + \alpha_{i-1} + (j-2)\delta\right]}{\cos\left[\frac{\pi}{2} + \alpha_{i-1} + (j-1)\delta\right]} \quad (3)$$

从而得到 A_j 点的具体坐标值

$$\begin{cases} x_j = -l_{OA_j} \cos\left[\frac{\pi}{2} - (j-1)\delta\right] \\ y_j = l_{OA_j} \sin\left[\frac{\pi}{2} - (j-1)\delta\right] \end{cases} \quad (4)$$

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。

1.2 拱肩存在不利结构面的隧道围岩破坏机制构建

基于1.1节中顶部存在不利结构面隧道围岩的破坏机制构建过程,定义不利结构面交汇点与隧道

原点连线同隧道 y 轴之间的夹角为 θ ,建立爆破扰动下拱肩含不利结构面的隧道围岩二维坍塌破坏机制,如图2所示。

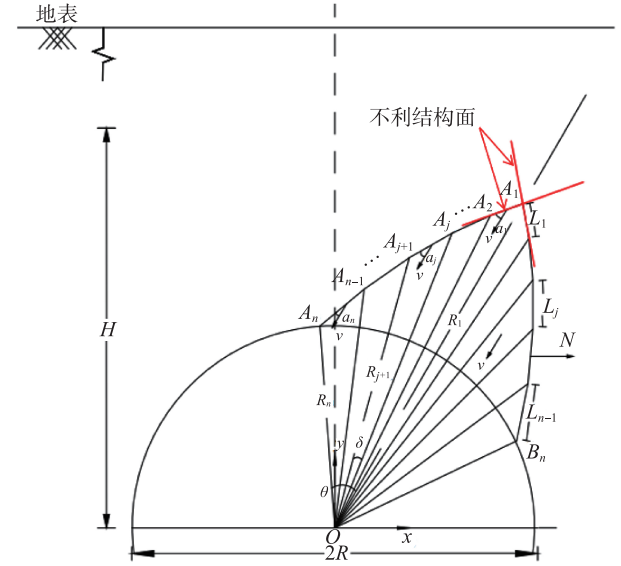


图2 拱肩存在不利结构面的隧道围岩破坏机制
Fig. 2 Failure mechanism of surrounding rock with unfavorable structural planes at the tunnel shoulder

此时,起始点 A_1 的坐标表达式为

$$\begin{cases} x_1 = -(R+H)\cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \\ y_1 = -(R+H)\sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \end{cases} \quad (5)$$

依照前面的递推步骤可以计算得到 OA_j 的长度计算公式为

$$l_{OA_j} = \frac{l_{OA_{j-1}} \cos\left[\frac{\pi}{2} + \alpha_{j-1} - \theta + (j-2)\delta\right]}{\cos\left[\frac{\pi}{2} + \alpha_{j-1} - \theta + (j-1)\delta\right]} \quad (6)$$

推导计算得出点 A_i 的坐标为

$$\begin{cases} x_i = -(R+H)\cos\left[\frac{\pi}{2} + \theta - (i-1)\delta\right] \\ y_i = (R+H)\sin\left[\frac{\pi}{2} + \theta - (i-1)\delta\right] \end{cases} \quad (7)$$

2 不利结构面影响下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。根据极限分析上限定理,破坏面

岩体滑移过程中的耗散功率为牵引矢量与速度矢量的乘积,其计算公式为

$$W_D = v \sum_{j=1}^{n-2} (\tau_j \cos \alpha_j - \sigma_{nj} \sin \alpha_j) L_j \quad (8)$$

式中: v 为速度。

每个塌落面单元对应的重力功率为

$$W_\gamma = \gamma v \left(\sum_{j=1}^n S_j - K_1 \right) \quad (9)$$

式中: γ 为围岩重度。

隧道围岩的安全系数定义为外力功率与内能耗散功率的比值,其表达式为

$$F_s = \frac{W_D}{W_\gamma} \quad (10)$$

通过式(10),可以得到不利结构面影响下隧道围岩安全系数上限目标函数。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。

3 参数分析

3.1 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 为5~20、地质强度指标 GSI 为10~60、围岩重度 γ 为16~22 kN/m³、不利结构面交汇点位置 H 为1.5~3.0 m、不利结构面倾斜角度 θ 为0~15°、隧道半径 R 为4.0~5.5 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)~图3(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 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4(a)~图4(d)为隧道拱肩上方存在不利结构面的情况下($\theta=30^\circ$),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

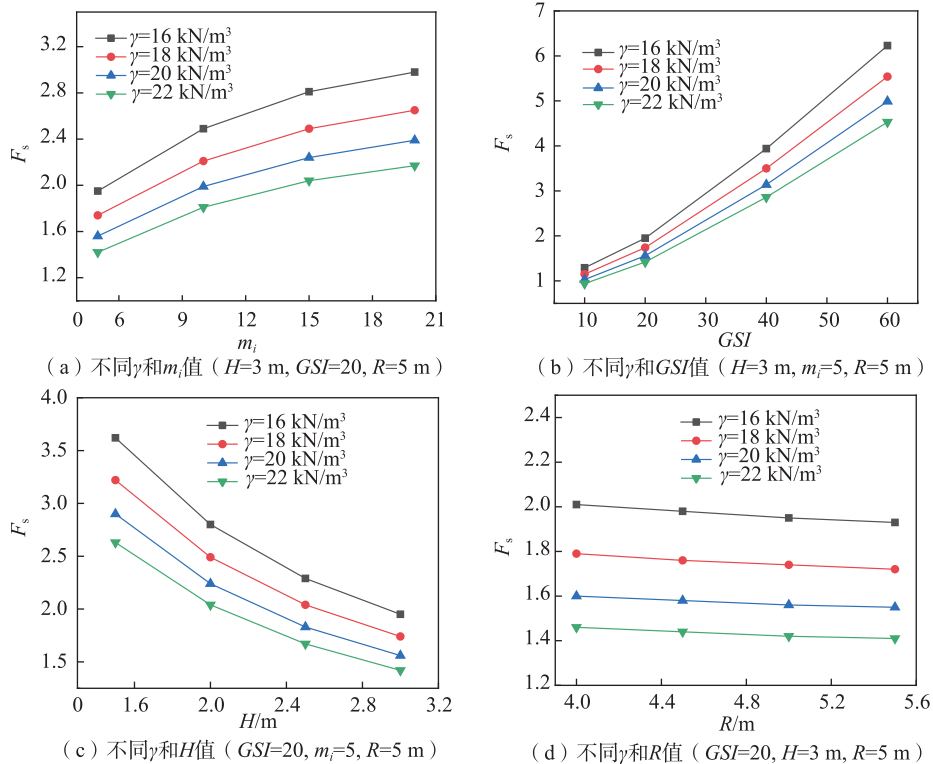
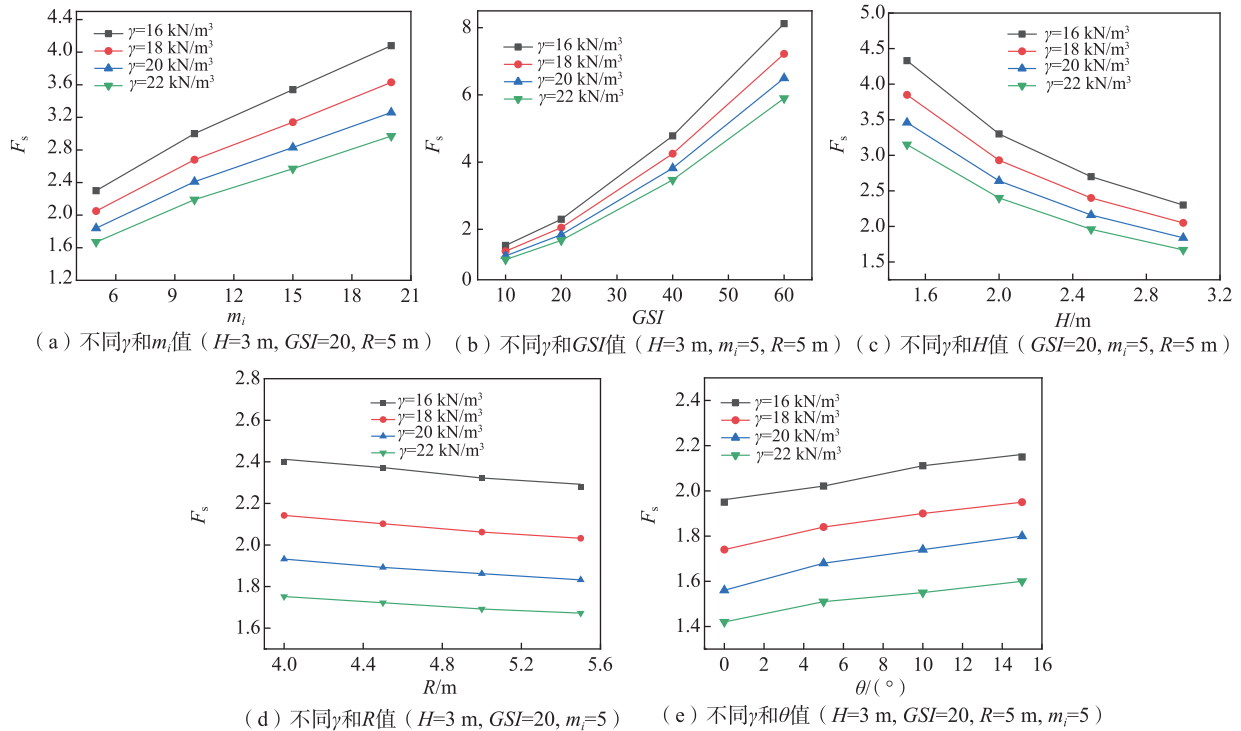


图3 顶部存在不利结构面的隧道围岩 F_s 随不同参数的变化规律

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 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

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,图4(e)表明围岩安全系数随着不利结构面倾斜角度 θ 的增大而增大。

3.2 围岩塌落面分析

当隧道围岩和几何参数 m_i 为5~20、 GSI 为10~60、 θ 为0~15°、 H 为1.5~3.0 m、 R 为4.0~5.5 m时,绘制了不同岩体参数对应的坍塌面形状,如图5所示。

图5(a)~图5(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。

图6(a)~图6(d)为隧道拱肩上方存在不利结构面的情况下($\theta=30^\circ$),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坍塌范围的变化规律一致。此外,图6(e)表明围岩塌落范围随着不利结构面倾斜角度 θ 的增大而减小。

4 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11.0 m×5.0 m,全长1 780 m。隧道最大埋深约为280 m,属深长隧道。该隧道在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。掌子面节理分布如图7所示,推测的不利结构面位置如图8所示。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。

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:50 m(X 方向)×1 m(Y 方

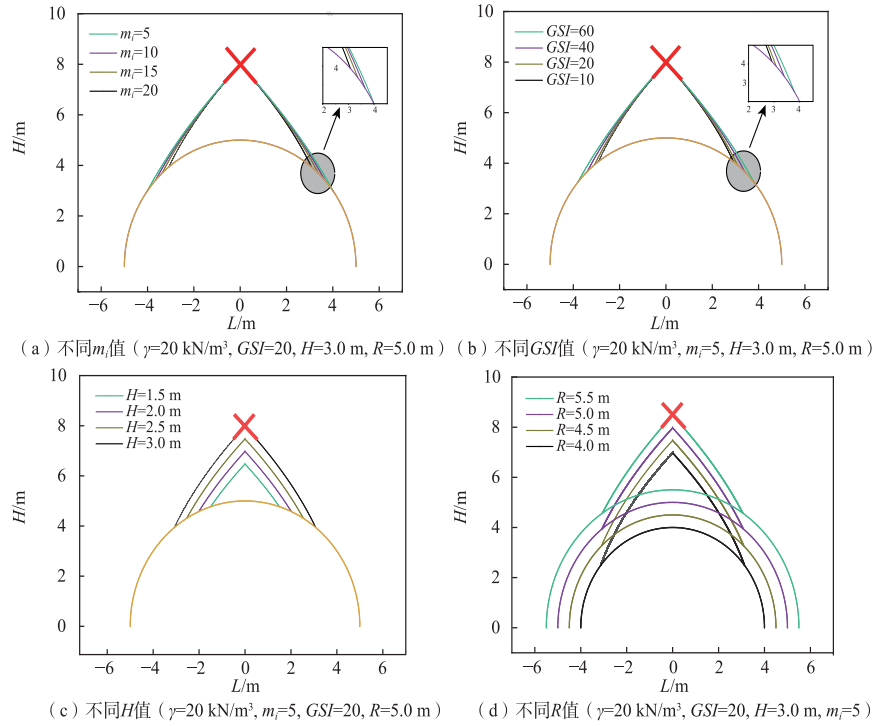


图5 不同参数对应的顶部存在不利结构面的隧道围岩塌落面

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

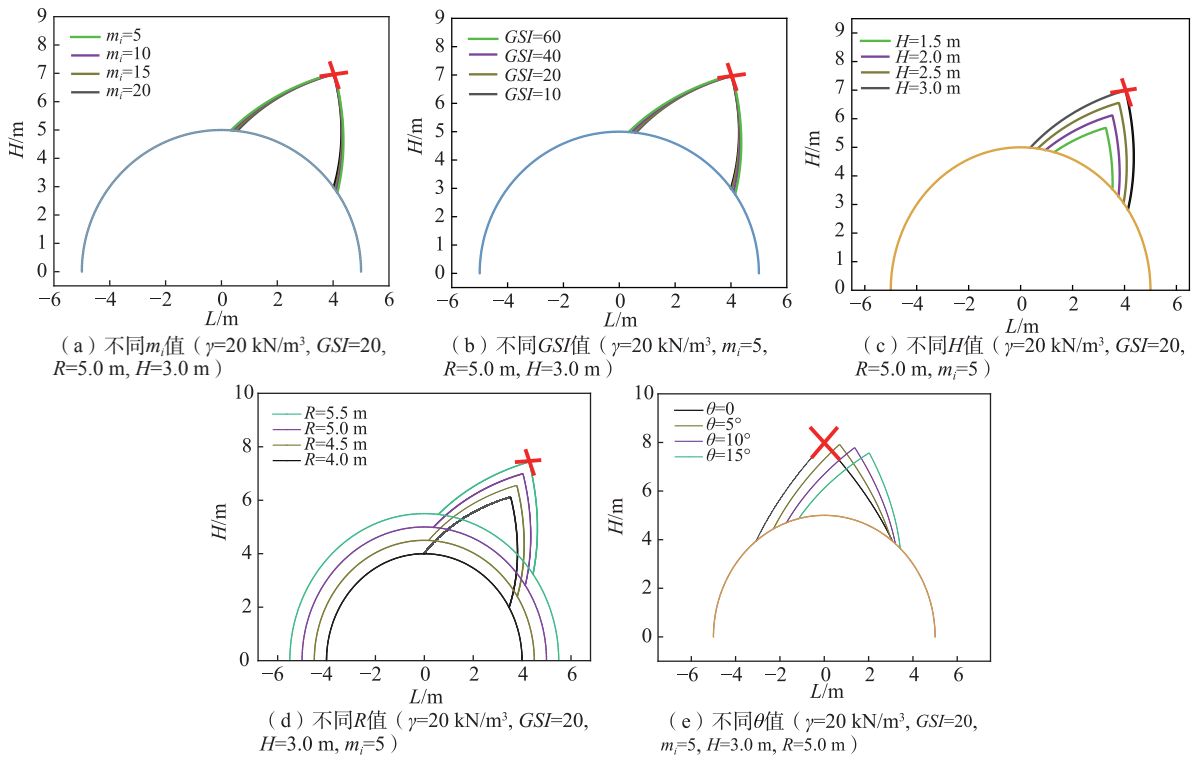


图6 不同参数对应的拱肩存在不利结构面的隧道围岩塌落面

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

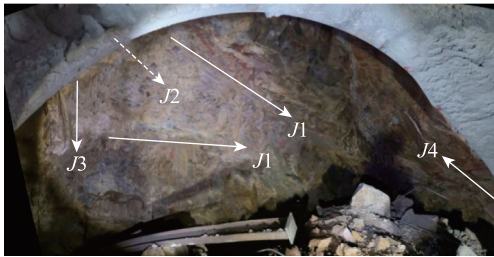


图7 虎山隧道掌子面节理示意图
Fig. 7 Schematic diagram of joints at the Hushan tunnel face

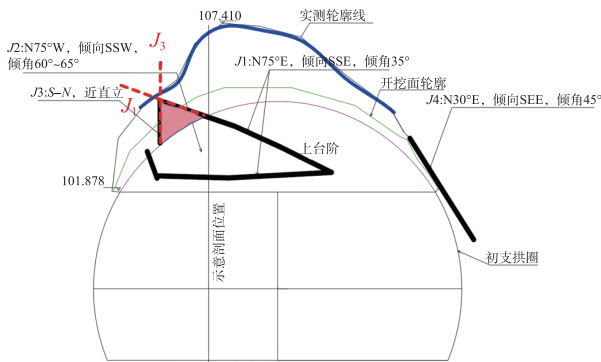


图8 虎山隧道掌子面不利结构面位置推测
Fig. 8 Inference of the location of unfavorable structural planes at the Hushan tunnel face

向) $\times 50\text{ m}$ (Z 方向),隧道圆心坐标为 $(25,0,25)$,隧道开挖半径为 6 m ,隧道断面为三心圆形状,不利结构面交叉点净距取 2.4 m ,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 5.0 m ,宽 0.1 m 的矩形空洞与倾角 86° ,长 4.0 m ,宽 0.1 m 的矩形空洞来近似代替不利结构面 J_1 、 J_3 ,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 、 Y 方向上固定模型左右、前后边界的位移, 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。

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,编制了围岩安全系数计算程序,计算出极限状态下该隧道在开挖扰动

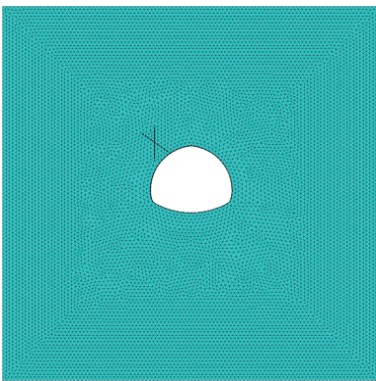


图9 广东肇庆虎山隧道数值模型
Fig. 9 Numerical model of Hushan Tunnel in Zhaoqing, Guangdong

表1 数值模拟围岩参数 Tab. 1 Numerical simulation of surrounding rock parameters	
参数	取值
围岩重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	24
剪切模量 G/GPa	10
体积模量 K/GPa	3
抗拉强度 σ/kPa	50
GSI	20
m_i	10

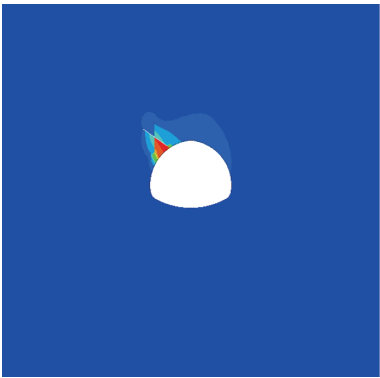


图10 极限状态下拱肩存在不利结构面的隧道围岩位移云图
Fig. 10 Displacement contour maps of tunnel rock mass with adverse structural planes at the tunnel shoulder under limit state

作用下安全系数为 0.88 。

本文利用1.2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,计算得到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

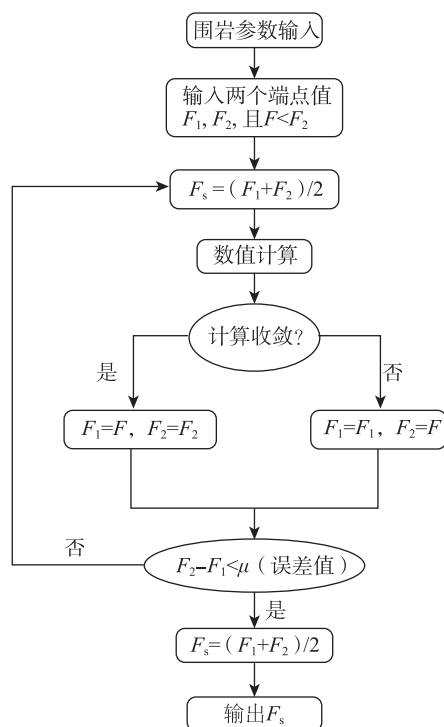


图 11 强度折减理论流程图

Fig. 11 Flow chart of strength reduction theory

的理论和数值解,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 12 中可以看出,理论计算得到的塌落面形状与塌落范围同数值模拟结果基本一致。综上所述,本文所提理论计算方法具备明确的工程实用价值,适用于分析不利结构面控制下隧道施工诱发的围岩坍塌失稳问题。

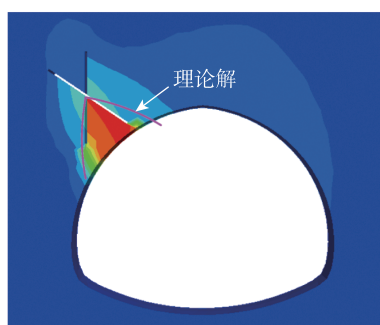


图 12 围岩塌落面理论解与数值解对比

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

5 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,对不利结构面影响下的隧道围岩坍塌稳定性开展研究,主要结论如下。

1) 隧道拱顶和拱肩围岩安全系数受多因素影响: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,但随地质强度指标 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,本文分别运用所提理论与数值模拟方法,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分析,初步证实本文方法能够有效应用于含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的影响。实际工程中地下水会显著降低不利结构面的抗剪强度,因此有必要进一步探索地下水和不利于数值解耦合作用的隧道围岩坍塌破坏机理。

参考文献:

- [1] 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(3):75-80.
Ma Ji, Du Qiang, Xiong Liangxiao. Experimental and numerical on the stability of tunnel surrounding rock with intersecting cracks [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2024, 35(3): 75-80.
- [2] 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(3):1141-1152.
Lin Congbo, Yu Jin, Chang Fangqiang, 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.
- [3] 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 Zhongmin, Gao Yongtao, Wu Shunchuan, et al. In-

- fluence of longitudinal spacing of double-arch tunnel on tunnel stability in jointed rock mass[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 167-176.
- [4] 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): 117-125.
- [5] 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响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(5): 94-105.
- Pan Wentao, He Chuan, Wu Fangyin, 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.
- [6] 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(增刊1): 58-61.
- Huang Zhipeng, Zhou Hongbo, Zhou Jiangping. Simulation of collapse by discrete element method for diversion tunnel under complex geological conditions [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2012, 34(S1): 58-61.
- [7] 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(2): 35-39, 52.
- Zhao Yu, Lu Yiyu, Huang Cheng, et al. Analysis of solid-fluid coupling for tunnel excavation in complicated fractured rock masses [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(2): 35-39, 52.
- [8] 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(1): 45-51.
- Zou Yi, Zhu Bitang, Wu Yingbiao, et al. Large-scale direct shear test study of contact interface between viscous mud-rock mass and bedrock in fault fracture zone [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(1): 45-51.
- [9] 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.
- [10] Huang Fu, Zhang Min, Wang Fen, 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.
- [11] Man Jianhong, Huang Hongwei, Ai Zhiyong, et al. Analytical model for tunnel face stability in longitudinally inclined layered rock masses with weak interlayer [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 143: 104608.
- [12] Liu Guofeng, Zhou Chi, Feng Kun, 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.
- [13] Li Ang, Xu Nuwen, Dai Feng, 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, 2018, 77: 45-58.
- [14] Tu Hongliang, Zhou Hui, Qiao Chunsheng, 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: 103245.
- [15] Yang Zihan, Zhang Jiahua. Minimum safe thickness of rock plug in Karst tunnel according to upper bound theorem [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(9): 2346-2353.



通信作者: 黄阜(1983—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为隧道与地下工程。E-mail: hfcsu0001@163.com。

(责任编辑: 吴海燕)