

DOI:10.11918/202405061

缓倾层状隧道围岩各向异性渐进破裂特征

郑传湑^{1,2}, 朱星宇^{1,2}, 张志强^{1,2}

(1. 极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室, 成都 610031;
2. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 为研究隧道缓倾层状围岩受结构面影响的宏观各向异性渐进破裂特征及破坏模式, 解析推导了层状围岩结构失稳力学响应机制; 采用离散元-有限差分耦合分析方法, 结合室内砂泥岩三轴压缩力学试验, 建立了能表征缓倾层状围岩宏观力学特性的数值力学模型, 系统研究了不同结构面倾角和间距条件下缓倾层状岩体的破裂特征与破裂演化力学行为。结果表明: 1) 基于梁-板结构的解析分析能较好反映层状围岩渐进破裂过程并判别其破坏模式; 2) 建立的离散元-有限差分耦合数值模型能较好表征层状砂泥岩在三轴应力状态下各向异性宏观力学特性; 3) 基质体破裂随结构面倾角改变发生显著变化, 裂隙主要出现在垂直结构面方向, 且随结构面倾角增加, 基质体破裂发生二次偏转, 并计算得出围岩发生滑移破坏的临界角度 $\alpha_1 = 24.43^\circ$, $\alpha_2 = 55.29^\circ$; 4) 随结构面间距减小, 围岩破碎性增加, 总裂隙数量增加, 在结构面间距小于 30 cm 时, 围岩破碎性显著提高。研究成果可为缓倾层状隧道围岩稳定性控制与支护结构优化设计提供理论依据并发挥指导作用。

关键词: 缓倾层状围岩; 渐进破裂; 破坏特征; 颗粒流; 各向异性

中图分类号: TU45 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2025)11-0134-10

Anisotropic progressive fracture characteristics of surrounding rock in gently inclined layered tunnels

ZHENG Chuantian^{1,2}, ZHU Xingyu^{1,2}, ZHANG Zhiqiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, Chengdu 610031, China;
2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To study the Macro-anisotropic progressive rupture characteristics and damage modes of gently inclined layered surrounding rock influenced by structural planes, we analytically deduced the mechanical response mechanism of the layered rock's structural instability. Using a coupled discrete-finite-difference analysis method and results from indoor triaxial compression tests on sand-mudstone, we developed a numerical mechanical model to characterize the macro-mechanical properties of the gently inclined layered surrounding rock. This model was then used to systematically investigate the mechanical behavior of the rock under varying structural plane inclination angles and spacings. The rupture characteristics and rupture evolution of gently dipping layered rock under different structural plane inclination angle and spacing are systematically studied. The results indicate that: 1) analytical analysis based on beam plate structure can better reflect the progressive fracture process of layered surrounding rock and distinguish its failure mode; 2) The established discrete element finite difference coupled numerical model can better characterize the anisotropic macroscopic mechanical properties of layered sand and mudstone under triaxial stress state; 3) The fracture of the matrix changes significantly with the change of the inclination angle of the structural plane, and the cracks mainly appear in the direction perpendicular to the structural plane, as the inclination angle of the structural plane increases, the matrix fracture will undergo secondary deflection, and the critical angle for sliding failure of the surrounding rock will be calculated $\alpha_1 = 24.43^\circ$, $\alpha_2 = 55.29^\circ$; 4) As the spacing between structural planes decreases, the fragmentation of surrounding rock increases and the total number of cracks increases. When the spacing between structural planes is less than 30 cm, the fragmentation of surrounding rock significantly increases. The research results can provide a certain theoretical basis and play a guiding role for the control of stability and optimal design of supporting structures for gently inclined layered tunnels.

Keywords: gently inclined layered surrounding rock; progressive rupture; failure characteristics; particle flow; anisotropy

收稿日期: 2024-05-25; 录用日期: 2024-06-12; 网络首发日期: 2024-11-22

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20241121.1819.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52378414); 国家高铁联合基金(U1934213)

作者简介: 郑传湑(2000—), 男, 硕士研究生; 张志强(1968—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 张志强, clark@swjtu.edu.cn

由于层状围岩结构面对外部环境及内部应力状态变化十分敏感, 在施工扰动导致围岩完整性缺失后, 由于结构面强度较弱, 极易诱导各层之间进入离层状态, 导致各层围岩成为独立且处于弯剪受力状态的梁, 使得围岩整体抗弯剪能力减弱, 极易发生连锁破裂失稳现象^[1-3]。并且结合砂泥岩的水力耦合特征分析, 在地下水充盈的情况下, 极易诱发缓倾砂泥岩层的蠕变效应, 加剧缓倾层状围岩的失稳破裂, 极大危害层状围岩隧道建设期与运营期的安全性与经济性^[4-6]。针对该问题, 学者们进行了大量的研究。

在层状岩体各向异性力学特征研究方面, 学者们基于理论推导、力学试验与数值方法, 研究了单轴应力状态具有软弱夹层岩石的失效机理^[7]; 并基于单轴压缩试验研究了软弱夹层对层状岩体非均质与各向异性的影响^[8]; 黄书岭等^[9-10]通过独立考虑母岩和层面的物理力学特性, 提出了层状岩体硬化-软化复合材料模型, 用以描述层状岩体在强度和变形方面的各向异性与渐进破裂特征; Zhang 等^[11]和 Lu 等^[12]研究了层状复合岩石在真三轴应力作用下的破坏特征与力学性质; 同时, 为研究层状围岩隧道的力学特性, 学者们基于模型实验研究了层状岩体的力学性能与破坏特征^[13], 并基于颗粒流方法, 进一步研究了层状岩体蠕变效应对衬砌结构损伤劣化的作用机制^[14]。樊纯坛等^[15]基于有限元分析, 以围岩变形为判据对层状围岩的分级方法进行了研究。刘小亮等^[16]基于模型试验对层状围岩的破坏机制进行了研究。路军富等^[17]对水平层状隧道围岩底鼓变形机制进行了研究。王旭一等^[18]基于单轴压缩试验对非均质结构面层状岩体力学特性进行了研究。Xu 等^[19]采用数值分析方法, 研究了不同地应力和支护方式下软岩隧道的变形和应力特征。李地元等^[20]采用等效应变原理与室内试验方法建立了层状岩石的横观各向同性本构模型。Chen 等^[21]对深埋层状千枚岩隧道的非对称变形特征与力学行为进行了研究。陶志刚等^[22]针对西南山区高地应力隧道软岩大变形等问题, 分析了围岩大变形破坏模式及力学机理。刘德柱等^[23]通过室内模型试验对软弱缓倾层状隧道围岩变形与破裂规律进行了研究。Chang 等^[24]通过室内试验研究了带缺陷砂岩在真三轴应力条件的破裂模式。

现有研究^[25-26]表明, 目前层状软弱围岩力学特性的研究集中于岩体的宏观各向异性与围岩塑性变形等方面, 对层状围岩细观各向异性破裂特征的研

究较少; 多数研究仅考虑结构面参数对岩体各向异性的影响, 对综合考虑岩体所处的环境和状态、层状岩体倾斜角度以及结构面间距对隧道层状围岩稳定性的影响尚待深入。

本研究针对层状围岩受离层效应诱发的渐进破裂力学响应进行了解析推导, 并基于单组结构面理论, 对层状围岩稳定性与破裂模式进行了分析; 采用离散元与有限差分耦合的数值方法, 建立了层状围岩数值力学模型对某公路隧道层状砂泥岩在不同结构面倾角、间距下受工程扰动的破裂特征与破坏模式进行了分析, 得出在结构面倾角、间距影响因素下, 围岩裂隙分布的宏观规律。本研究拟为缓倾层状隧道围岩渐进破裂作用机制、稳定性控制研究与支护结构优化设计提供理论基础。

1 缓倾层状围岩瞬态力学响应解析分析

1.1 层状岩体垂直方向力学特性分析

层状围岩结构面相较于基质体强度更弱, 当层状围岩受到工程扰动后极易发生离层效应, 各层在切向方向仅受摩擦力作用, 极易沿切向方向发生滑移; 但由于地层左右两端的约束作用, 层间除拥有临空面部分的岩层外, 难以发生大位移的层间滑移, 层间的力以法向方向的地应力以及层间的挟持摩擦力传递。

由于隧道轴向长度远大于径向宽度, 因此可将隧道层状岩体以平面问题的分析方法进行分析, 将其简化为带缺口的平板, 将复杂的三维应力状态问题转化为简单的平面应力问题, 进而构建出梁-板结构解析模型, 如图 1 所示。并在进行解析分析时, 对该类层状围岩作出以下假设: 1) 假定隧道所处平面为无限大平面; 2) 假定层状围岩基质体为各向同性均匀弹性体; 3) 假定层状围岩结构面在垂直结构面方向上黏结抗拉强度极低。

针对隧道洞周附近围岩的几何特征, 可将围岩分为两类岩梁单元。第一种为一端锚固、另一端可沿轴向移动的 I 型岩梁单元。该 I 型岩梁单元长度 l 为失去下部岩梁支持力的“悬空梁单元”如图 1(c) 所示; 另一种如图 1(b) 中所示, 一端锚固, 另一端为自由端的悬臂梁。基于微分原理, 如图 2 所示, 将岩梁高度划分为 dh , 由于工程卸荷作用, 该岩梁下层存在无支撑部分的微元长度 dl , 而每一微元又可视为一端锚固, 另一端为自由端的悬臂梁, 即 II 型岩梁单元。

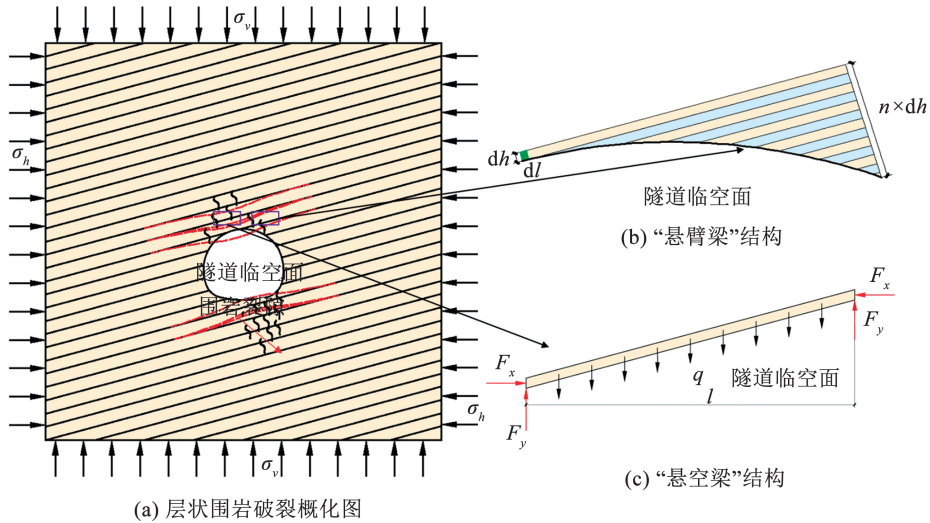


图 1 层状围岩计算简化模型

Fig. 1 Simplified calculation model of layered surrounding rock

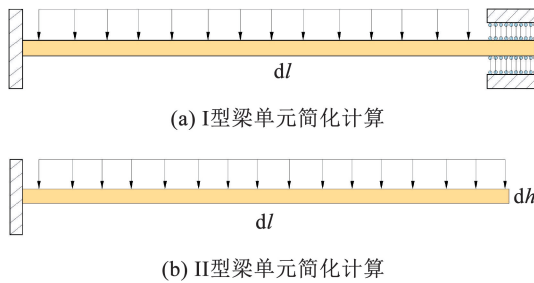


图 2 梁单元简化计算模型

Fig. 2 Simplified calculation model of beam element

在隧道未开挖时,洞周围岩处于自平衡状态,简化的岩梁单元受力处于平衡状态,每一梁单元两端均视为固端,梁单元受到垂直于梁轴线方向上的应力为

$$q = \sigma_v \cos \theta \quad (1)$$

式中: θ 为结构面倾角, σ_v 为围岩竖向地应力。

隧道开挖产生对洞周围岩的扰动后,在应力重分布的瞬间, I 型与 II 型岩梁单元所受不平衡力造成与隧道临空面相切部分的 I 型、II 型岩梁单元的最大弯矩分别为

$$M_1 = \frac{q_1 x}{2} (dl - x) - \frac{q_1 dl^2}{12} \quad (2)$$

$$M_2 = \frac{q_2 dl}{2} (dl - x) \quad (3)$$

对式(2)与式(3)求极值,在式(2)中,当 $x = 0$ 时,即在 I 型岩梁不平衡力端点处,取得最大值,在式(3)中,当 $x = dl/2$ 时,即在 II 型岩梁的固结端处,

取得弯矩最大值; I 型岩梁与 II 型岩梁弯矩最大值分别为

$$M_{1max} = q_1 dl^2 / 12 \quad (4)$$

$$M_{2max} = q_2 dl^2 / 2 \quad (5)$$

在式(4)中, q_1 为 I 型梁所受不平衡力; dl 为 I 型梁与隧道临空面相切处的微元长度。在式(5)中, q_2 为 II 型梁所受不平衡力; dl 为 II 型梁所取“悬空”部分微元长度。

由式(4)与式(5)可知,当隧道开挖时,与临空面相交的梁出现部分悬空的现象,形成不平衡力。取该段梁的力进行分解,得到在该段梁局部坐标系下的正交分解力。其中 $\sigma_v \sin \theta$ 沿梁轴向传递到层间摩擦力与该平面内的无限远处。

因为岩石抗压强度相对较高,梁轴力不会直接压碎围岩。因此在梁上存在的瞬时不平衡力为 $\sigma_v \cos \theta$,其方向始终为垂直于梁轴线方向。而作用在梁垂直方向上的力不平衡,使得梁单元在垂直于梁轴线方向上发生弯曲变形。

其中 I 型梁单元的最大挠度值 w_1 为

$$w_1 = \frac{q_1 dl^4}{384EI} \quad (6)$$

II 型梁单元的最大挠度值 w_2 为

$$w_2 = \frac{q_2 dl^4}{8EI} \quad (7)$$

因此,基于超静定结构以及静定结构的解析解,得出 I 型、II 型梁单元挠曲情况,如图 3、4 所示。

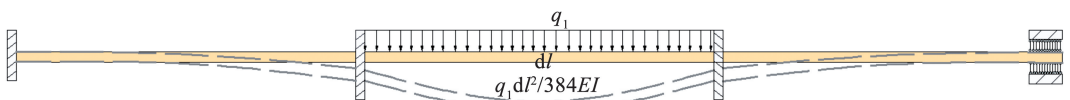


图 3 I 型梁单元结构挠度分布

Fig. 3 Bending moment distribution of I-beam element structure



图 4 II 型梁单元结构挠度分布

Fig. 4 Bending moment distribution of II-beam element structure

由于岩石具有强烈的脆性断裂特征且岩石抗拉强度极低,当梁弯曲变形最大值超过岩石胶结的极限容许变形值时,岩石发生破裂。当下部梁发生破裂后,失去对于上部梁的支持力,进而使得上部分梁“悬空”部分增加,即 dl 增加。同时,由于梁的变形与力是相互协调的,因此,在挠度 w 增加的同时,其弯矩也不断增加,最终诱发岩石破裂。直到梁的抗弯强度大于或等于梁“悬空”段所受不平衡力时,在该方向上的破裂停止。

1.2 层状岩体顺层方向力学特性分析

本文研究的缓倾层状岩体是典型的单组结构面岩体,其结构面的倾角、倾向以及结构面的内摩擦角以及黏聚力相同。因此,该种单组节理缓倾层状岩体的强度条件是与单结构面岩体的强度条件是相同的。根据 Jaeger^[25] 提出的单结构面强度理论,沿结构面发生剪切破裂的强度条件为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_s + \sigma_3 \tan \varphi_s)}{(1 - \tan \varphi_s \cot \alpha) \sin 2\alpha} \quad (8)$$

式中: σ_1 为轴向压力, σ_3 为围压, c_s 为结构面黏聚力, φ_s 为结构面内摩擦角, α 为结构面倾角。

如图 5 所示,图中 $\tau = c_s + \sigma \tan \varphi_s$ 为结构面的强度包络线; $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ 为单结构面岩体强度包络线。根据摩尔库伦强度理论分析,一点的应力状态若在包络线内,则不发生破坏;若应力在包络线以外则发生破坏。进而通过图中分析,可以得到结构面发生破坏的临界结构面倾角分别为

$$\alpha_1 = \frac{\varphi_s}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \frac{(\sigma_1 + 2c_s \cot \varphi_s) \sin \varphi_s}{\sigma_1} \quad (9)$$

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_s}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{(\sigma_1 + 2c_s \cot \varphi_s) \sin \varphi_s}{\sigma_1} \quad (10)$$

同时,式(8)可转换成为

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi_s}{1 - \sin \varphi_s} \sigma_3 + \frac{2c_s \cos \varphi_s}{1 - \sin \varphi_s} \quad (11)$$

此时设

$$B = \frac{2c_s \cos \varphi_s}{1 - \sin \varphi_s} \quad (12)$$

$$K = \frac{1 + \sin \varphi_s}{1 - \sin \varphi_s} \quad (13)$$

因此式(11)又可以写成式(14):

$$\sigma_1 = K\sigma_3 + B \quad (14)$$

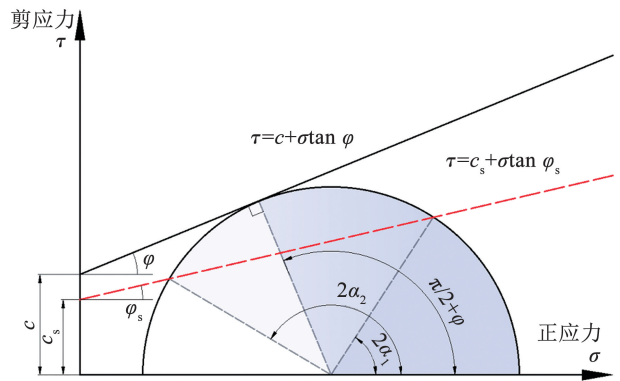


图 5 单组结构面岩体强度摩尔圆

Fig. 5 Mohr circle of rock with single structural plane

进而由式(14)可知,在判断层状围岩是否发生沿结构面滑移破坏时,可以通过室内试验得到的围压和峰值轴压(三轴压缩极限抗压强度)线性拟合曲线,求出 K 、 B 的具体数值,进而计算出结构面的内摩擦角 φ_s 以及黏聚力 c_s ,最终得到在确定应力状态与结构面强度下结构面发生滑移破坏的结构面倾角。

2 缓倾层状围岩数值力学模型建立

2.1 平节理 (flat-joint model) 与光滑节理 (smooth-joint model) 模型

2.1.1 平节理模型 (FJM)

FJM 晶粒由颗粒和名义面构成,因此 FJM 相当于把颗粒构造多边形,其可提供足够的自锁效应,抑制接触破坏后颗粒的旋转,能够模拟大压拉比的情况。晶粒间的接触实际上是名义面间的接触,接触界面位于名义面之间。在 PFC^{2D} 中, FJM 是一条线段,该线段平均分成多段,每段代表一个单元,每个单元均为独立的单元, FJM 的构造图如图 6 所示。

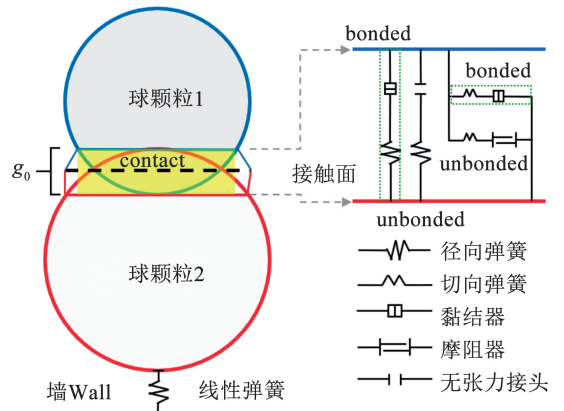


图 6 平节理接触模型

Fig. 6 Flat-joint model

2.1.2 光滑节理模型(SJM)

SJM 可模拟具有膨胀性的平面界面力学行为,即不考虑颗粒接触方向影响的结构面力学行为。通过将 SJM 分配给结构面颗粒间的所有接触,可以对摩擦连接与胶结行为进行模拟,进而表征结构面的线弹性与胶结的摩擦界面的宏观力学行为,具体接触模型如图 7 所示。SJM 胶结界面的行为是线弹性的,且满足库伦破坏准则,当超过其强度极限时,黏结断裂形成无黏结界面;无黏结界面同样为线弹性、带膨胀的摩擦界面,并通过在剪切力上施加库仑极限来调节滑移行为。

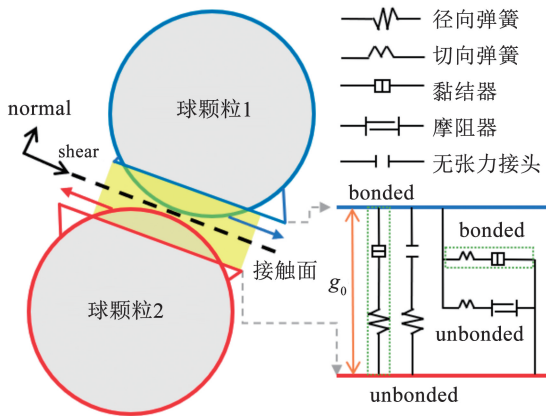


图 7 光滑节理接触模型

Fig. 7 Smooth-joint model

2.2 缓倾层状围岩各向异性力学模型建立

在现有研究中,将结构面倾角为 $0^\circ \sim 5^\circ$ 的结构

面定义为水平结构面,将结构面倾角为 $5^\circ \sim 30^\circ$ 的结构面定义为缓倾结构面。因此,为探究缓倾层状围岩各向异性力学特性,引入了 0° 与 45° 倾角的工况进行对比分析,基于离散元方法、黏结接触模型力学行为特性以及所分析的缓倾层状围岩力学响应机制,对层状岩体基质体颗粒间黏结施加平滑节理模型(FJM),对结构面颗粒间黏结施加光滑节理模型(SJM)。并结合室内三轴压缩的应力-应变曲线中的宏观力学参数(极限抗压强度、弹性模量)作为层状岩体在三向应力下力学行为特征的表征量。其中室内三轴压缩试验的试件的取样采用如图 8 所示的取样方法,分别取结构面倾角为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 的具有原生变质结构面的砂泥岩试样(直径 50 mm × 高度 100 mm),并采用 GCTS 岩石力学测试系统进行三轴压缩室内试验。

采用颗粒流数值方法,采用二维双轴压缩,设置围压为 10 MPa,进行数值试验。通过试错法,调整 SJM 与 FJM 的细观参数,使得数值力学试验计算得到的宏观参数(极限抗压强度、弹性模量)与室内三轴压缩试验得到的宏观参数相接近,进而确定 FJM 与 SJM 的细观参数。并以数值试验的裂隙热点图表征模型的宏观裂隙,与室内试验得到的宏观裂隙对比,验证数值结果在宏观表征上与实际的相似性,如图 9 所示。

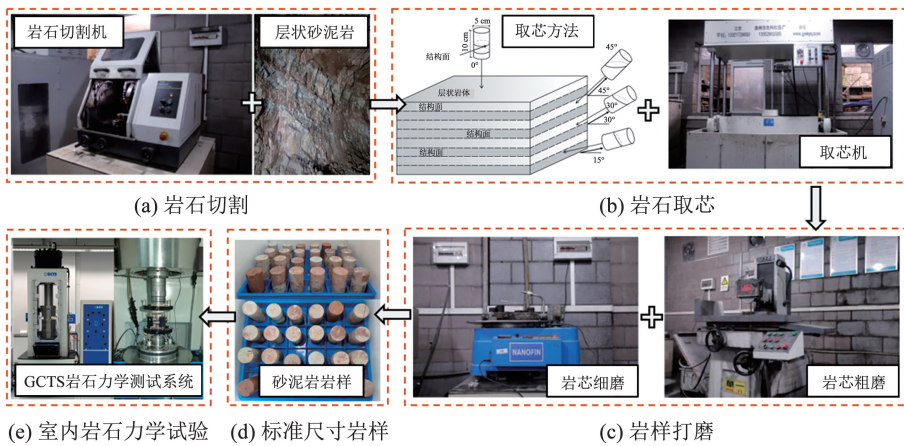


图 8 层状砂泥岩试件取样方法与 GCTS 试验仪

Fig. 8 Sampling method of layered sand-mudstone specimens

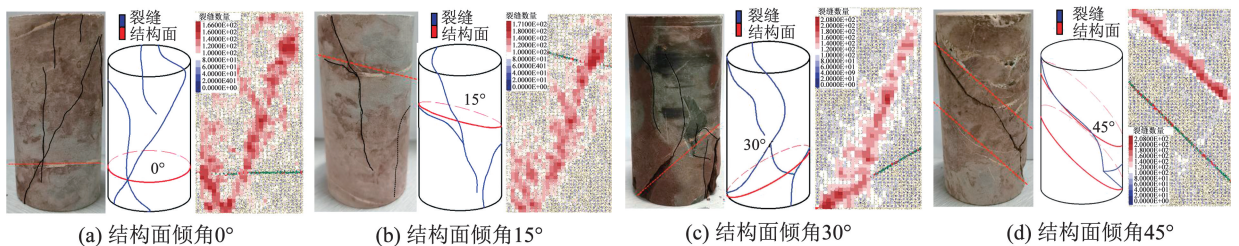


图 9 室内试验与数值力学试验宏观破裂对比^[14]

Fig. 9 Comparison of macroscopic cracks between indoor and numerical mechanical tests^[14]

如图 9 所示,室内试验与数值试验的试件破裂形态相似,宏观力学特征具有较大相似性,试件破裂均存在垂直结构面的破裂以及延结构面的破裂两种类型。在 0°至 45°结构面倾角范围内,在 0°、15°结构面角度下,垂直结构面的破裂占主导地位,岩块的破裂形态受结构面的影响较小;在结构面倾角为 30°与 45°时,延结构面破坏占主导地位,试件的裂隙主要沿结构面。同时,通过对比分析各个室内试验与数值力学试验结果也可以发现二者的宏观力学参数存在较大的相似性,具体对比如表 1 所示。

由表 1 可知,室内试验与数值模拟试验得到的岩石宏观力学参数误差较小,整体误差处于能够表征层状岩体基本各向异性力学特性的允许误差范围内。基于表 1 中的结果,确定所建立的数值力学模

型中基质体黏结 FJM 与结构面黏结 SJM 的细观参数,具体参数如表 2 所示。

基于表 2 中得到的细观参数,采用离散-有限差分的 PFC-FLAC 耦合方法,以砂泥岩公路隧道为例,建立了缓倾层状围岩数值力学模型,如图 10 所示。

表 1 室内试验与数值模拟宏观力学参数对比

Tab. 1 Comparison of macroscopic mechanical parameters between indoor experiments and numerical simulations

岩样结构面倾角/(°)	抗压强度/MPa		抗压强度相对误差/%	切线模量/GPa		切线模量相对误差/%
	室内试验	数值试验		室内试验	数值试验	
0	48.71	49.69	2.01	5.398	5.421	0.43
15	47.13	47.91	1.65	5.312	5.332	0.38
30	44.62	49.53	11.00	5.208	5.212	0.08
45	42.87	43.42	1.28	5.102	5.015	1.71

表 2 缓倾层状岩体 FJM 与 SJM 细观参数表

Tab. 2 Table of FJM and SJM mesoscopic parameters

细观参数	法向刚度 k_n/m	切向刚度 $k_s/(GPa \cdot m^{-1})$	摩擦系数 μ	抗拉强度 σ_t/MP	黏结强度 τ/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
FJM	4.94	4.94	0.53	13.50	13.50	15.00
SJM	200	200	0.53	3.95	1.96	24.00

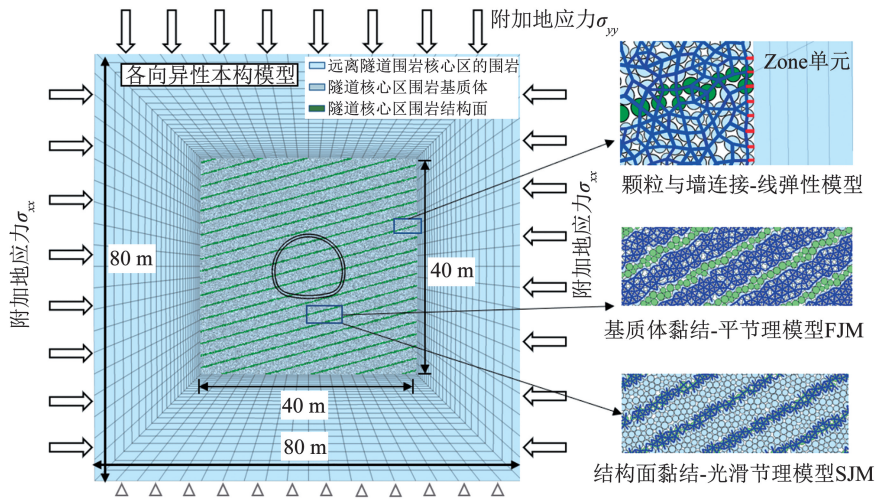


图 10 缓倾层状围岩数值力学模型

Fig. 10 Numerical mechanical model of gently layered rock

由图 10 所示,该模型由有限差分实体单元 Zone 和离散元颗粒 Ball 组成。实体单元 Zone 采用各向异性本构模型“Anisotropic”;离散元颗粒基质体黏结采用 FJM,结构面之间黏结采用 SJM。模型尺寸为“80 m × 80 m”,颗粒尺寸为“40 m × 40 m”。约束 Zone 单元下部位移,在 Zone 单元左、右边界与上边界施加 10 MPa 外力模拟地应力。颗粒最大半径为 8 cm,颗粒最大最小粒径之比为 1.66。

3 工程卸荷效应对围岩破裂的影响分析

3.1 不同层间倾角对围岩破裂的影响

基于所建立的缓倾层状岩体数值力学模型,分析层状岩体在不同结构面倾角下的力学行为与破裂特征。在不同结构面倾角下,围岩受开挖且不施加支护措施的破裂特征如图 11 所示。

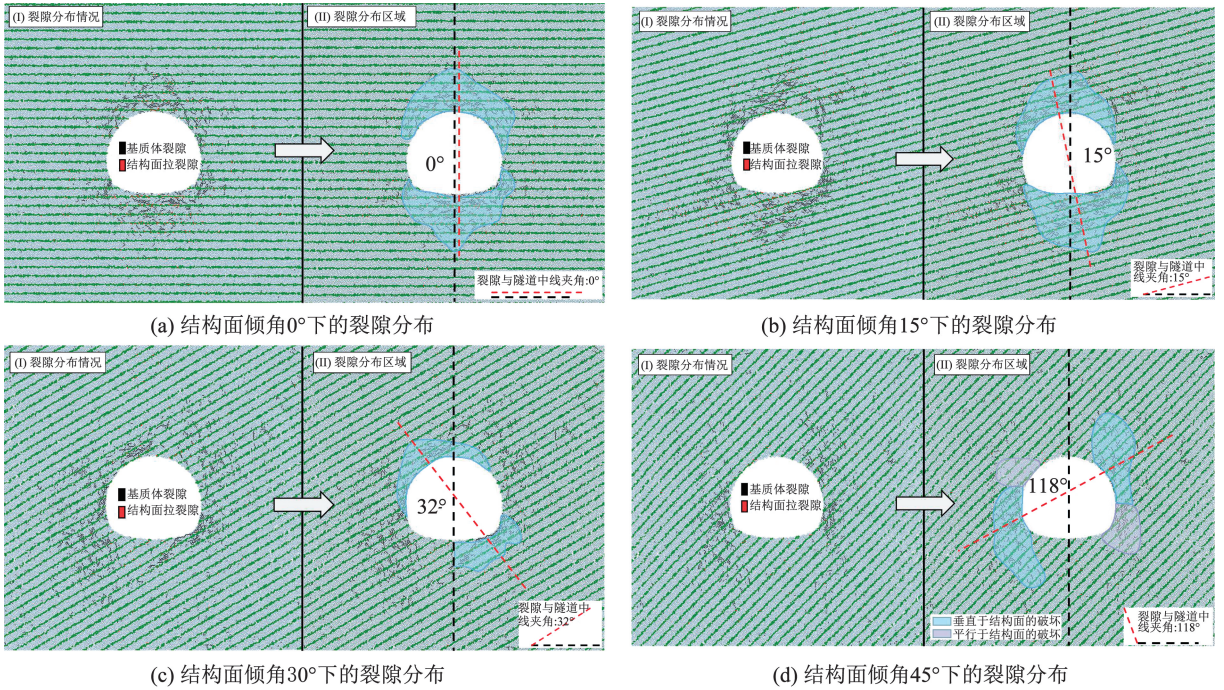


图 11 不同结构面倾角下围岩受工程效应破裂情况

Fig. 11 Surrounding rock cracks under engineering effects under different structural plane inclinations

图 11 中红色裂隙代表结构面间黏结破裂产生的裂隙,黑色裂隙代表围岩基质体间黏结破裂而产生的裂隙。总体来看,围岩破裂模式主要也可以分为延结构面方向与垂直于结构面方向。

在隧道核心土被移除后,应力发生重分布,导致临空面附近围岩发生破裂。层状围岩倾角由 0° 增至 30° 的区间内,其围岩破裂方向主要集中在与隧道临空面相切且垂直于层状围岩的方向上。随着围岩倾角的变化,围岩破裂裂隙所处角度也同样逐渐发生偏转,以隧道竖向轴为基准,偏转角度由 0° 逐渐变化至 32° 。

同时由于围岩沿结构面的破裂加剧,层状岩体发生层间滑移形成拉拽作用,导致沿结构面方向局部应力增大,从而导致破裂方向沿垂直于结构面方向再次发生偏转,如图 11(d) 所示,当围岩倾角接近 45° 时,围岩的宏观破裂形态发生显著二次偏转,宏观破裂方向与隧道中线呈 118° 夹角。各结构面倾角下基质体裂隙的分布角度图如图 12 所示。

由图 11 和图 12 可知,随结构面倾角变化,基质体破裂分布角度也发生改变。在结构面倾角为 0° 与 15° 时,基质体破裂主要沿垂直于结构面方向;在结构面倾角为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 时,基质体破裂存在垂直于结构面方向的破裂,同时也存在沿结构面方向的破裂。

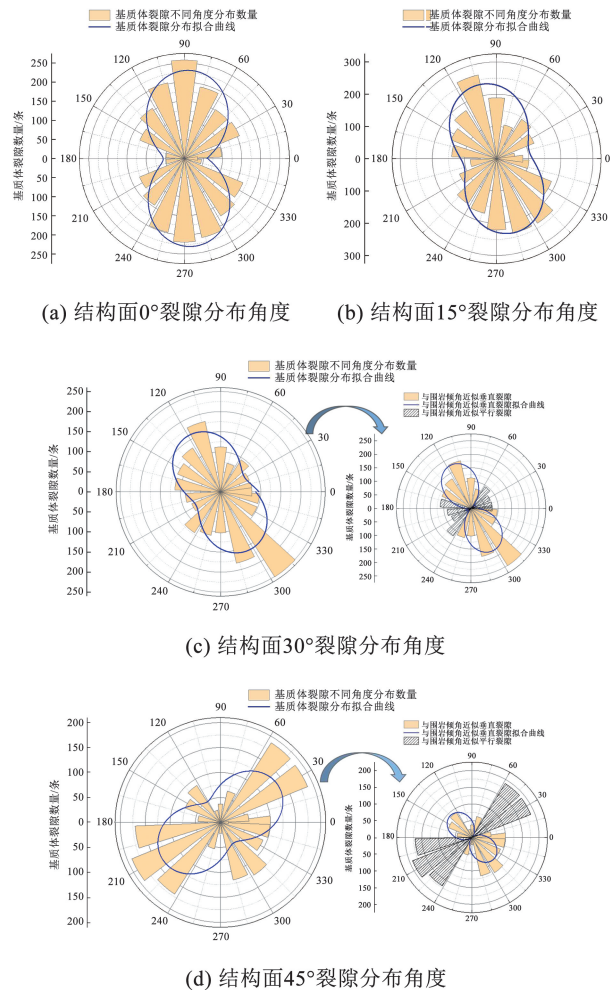


图 12 基质体裂隙分布角度玫瑰图

Fig. 12 Rose plots of matrix cracks distribution angle

将试验结果不同结构面倾角下的室内三轴压缩试验结果进行对比, 可知所建立的层状围岩数值力学模型的破裂机制、各向异性特性与室内三轴试验取得的结果相类似。在确定的结构面强度与基质体强度组合下, 随岩体结构面倾角的不断增大, 其结构面的破坏逐渐加剧, 层间的滑动效应越强, 层间效应越强烈。

同时, 围岩基质体破裂与围岩整体的各向异性受到结构面的影响逐渐加剧, 使得垂直于层状围岩结构面方向的破裂发生偏转。室内试验的破裂特征与数值模拟试验的破裂特征的相似性也说明所建立的力学模型的真实有效性。基于理论分析结果中式(14), 通过双轴压缩数值力学试验, 在结构面倾角为 15° , 试件围压分别为 0、5、10、15 MPa 下试验取得的极限抗压强度作为轴压, 并进行线性拟合, 得到如图 13 所示的拟合曲线。

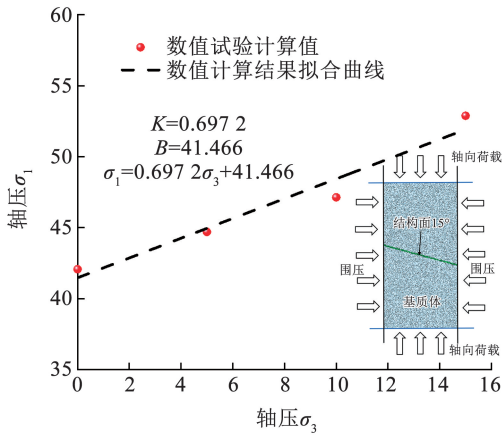


图 13 理论计算拟合曲线

Fig. 13 Theoretical calculation fit curve

如图 13 所示, 通过拟合得到 K 、 B , 进而计算得出结构面的黏聚力 c_s 与内摩擦角 φ_s , 最终通过式(9)、(10)计算得出在围压为 10 MPa, 该结构面强度的岩块发生滑移破坏的临界结构面倾角 $\alpha_1 = 24.43^\circ$, $\alpha_2 = 55.29^\circ$ 。将此结果与层状围岩数值力学模型的基质体破裂形态进行对比分析发现, 当结构面倾角增加到 30° 时, 围岩整体破坏也同样向结构面滑移破坏控制转变, 基质体破裂发生显著偏转, 进而验证了数值结果与理论解析结果的类似性。

3.2 不同结构面间距对围岩破裂的影响

以结构面倾角为 15° 为例, 对不同结构面间距下的层状围岩破裂特征进行研究分析, 在不同结构面间距下的围岩裂隙如图 14 所示。

由图 14 可知, 在不同结构面间距下, 围岩裂隙主要分布区域与隧道中线夹角均大约为 15° , 但各类型裂隙所占比例发生显著变化。不同结构面间距下的各类型裂隙分布比例, 如图 15 所示。

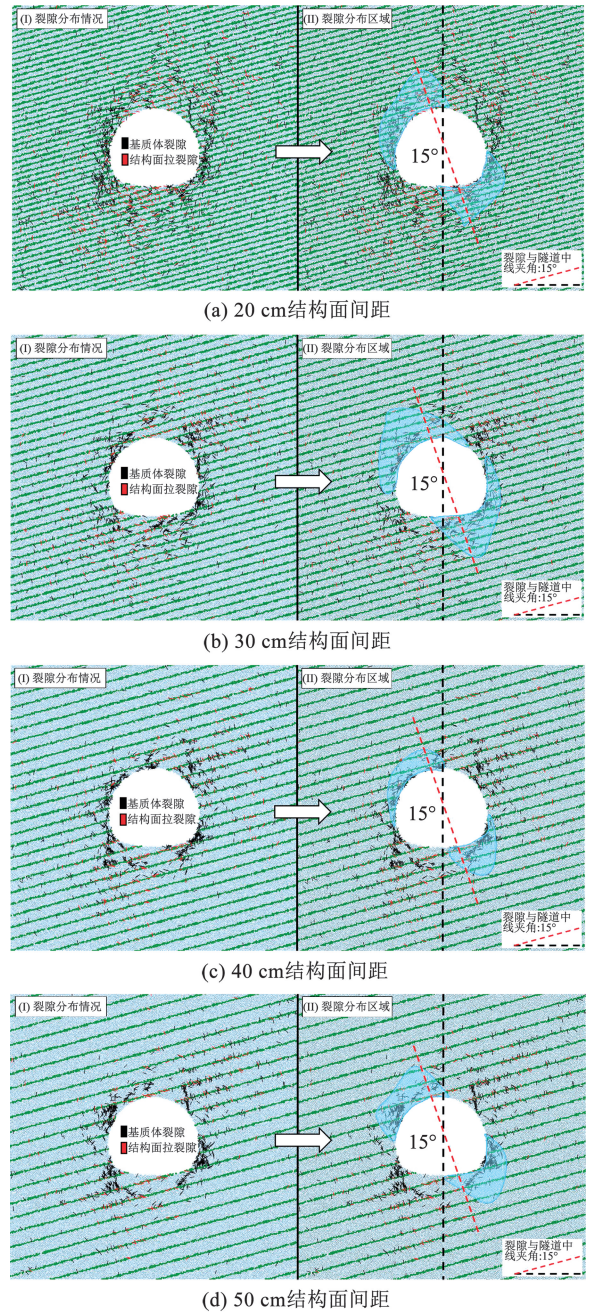


图 14 不同结构面间距下的围岩裂隙

Fig. 14 Rock cracks with different structural plane spacing

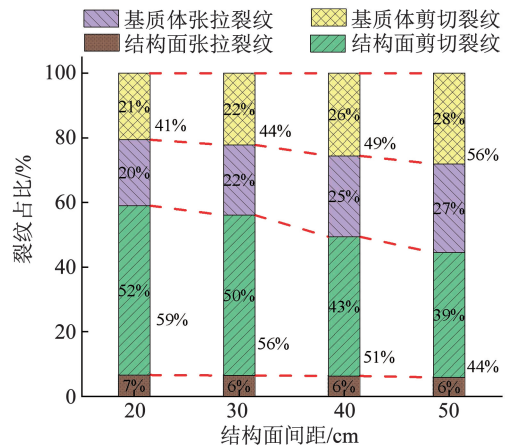


图 15 不同结构面间距下裂隙所占比例

Fig. 15 Percentage of cracks at different structural plane spacing

由图 15 可知,随结构面间距增加,基质体裂隙所占总裂隙的比例逐渐增加,结构面裂隙所占总裂隙的比例逐渐下降,但结构面张拉裂隙数量基本不变,表明层状围岩离层效应的显著程度受到结构面间距的影响相对较小。

由图 16 可知,随结构面间距减小,围岩整体的破碎程度越大,进而导致在受工程扰动时,围岩裂隙数量显著增加。在结构面间距为 30 ~ 20 cm 时,各类别裂隙数量均增加显著。因此,在该围岩强度与应力条件下,当结构面间距小于 30 cm 时,围岩破碎程度将显著提高。在工程实际中,应当特别注意 30 cm 结构面间距工况对围岩稳定性产生的影响。

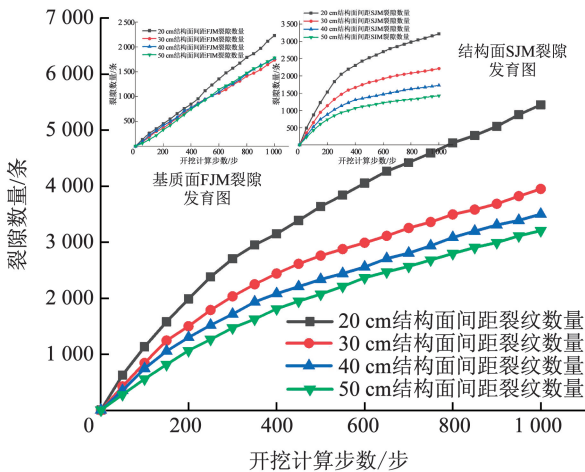


图 16 不同结构面间距下裂隙发育曲线

Fig. 16 Crack development curves under different spacing of structural planes

4 结 论

本文以某公路隧道层状砂泥岩地层围岩为研究对象,采用离散-有限差分耦合数值方法,结合三轴压缩试验,建立了能表征层状围岩工程力学特性的数值力学模型,并进行数值试验研究,现研究结论如下:

1) 基于隧道层状砂泥岩宏观力学参数,采用颗粒流方法对数值力学模型细观参数进行标定的方法是合理有效的,模拟得到的试件破裂形态与实际试件破裂形态类似。

2) 基于梁-板结构解析推导的层状围岩渐进破裂模式与数值力学试验结果相印证;该力学特性下的层状围岩在受到工程扰动后,极易产生离层效应,进而衍生 I 型、II 型岩梁单元,导致基质体在垂直于结构面方向上的渐进破坏。同时,由于层间滑移作用,将导致基质体破裂角度随结构面倾角改变发生二次偏转现象。

3) 层状围岩的破裂形态受结构面倾角影响显

著,围岩破裂模式可分为延结构面与垂直结构面方向。在结构面倾角由 0° 增至 45° 时,围岩基质体破裂方向与水平方向的夹角分别为 0° 、 15° 、 32° 、 118° 。基于围岩顺层方向的解析推导,计算得出围岩发生沿结构面滑移破坏的临界结构面倾角为 $\alpha_1 = 24.43^\circ$, $\alpha_2 = 55.29^\circ$ 。

4) 层状围岩的离层效应显著程度受结构面间距影响不显著,其破裂形态与破坏模式在不同结构面间距下均类似。但随结构面间距的减小,围岩的破碎程度将提高,在结构面间距小于 30 cm 时,围岩裂隙数量显著增加,围岩破碎程度提高显著。

参考文献

- [1] XU D, FENG X, CHEN D, et al. Constitutive representation and damage degree index for the layered rock mass excavation response in underground openings [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2017, 64(4): 133. DOI:10.1016/j.tust.2017.01.016
- [2] ZHAO J, ZHANG Y. Studies on rock failure of layered rock in underground mining-face and control techniques [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2017, 3: 405. DOI:10.1007/s40948-017-0068-0
- [3] PARK S H, ADACHI T. Laboratory model tests and FE analyses on tunneling in the unconsolidated ground with inclined layers [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2002, 17(2): 181. DOI: 10.1016/S0886-7798(02)00003-2
- [4] XU G, HE C, YANG Q, et al. Progressive failure process of secondary lining of a tunnel under creep effect of surrounding rock [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 90: 76. DOI: 10.1016/j.tust.2019.04.024
- [5] 陈子全. 高地应力层状软岩隧道围岩变形机理与支护结构体系力学行为研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019
CHEN Ziquan. Study on the deformation mechanism of surrounding rock and mechanical behavior of supporting structures for layered soft rock tunnel under high geo-stress [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019
- [6] XU G, GUTIERREZ M. Study on the damage evolution in secondary tunnel lining under the combined actions of corrosion degradation of preliminary support and creep deformation of surrounding rock [J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 27: 100501. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100501
- [7] RONG P, ZUO Y, LIN J, et al. Study of mechanical properties and failure characteristics of combined rock mass with weak interlayer [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8(3): 89. DOI: 10.1007/s40948-021-00328-4
- [8] REN M, ZHANG Q, CHEN S, et al. Experimental study on mechanical properties of anchored rock-like material with weak interlayer under uniaxial compression [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, 38: 4545. DOI: 10.1007/s10706-020-01309-2
- [9] 黄书岭, 徐劲松, 丁秀丽, 等. 考虑结构面特性的层状岩体复合材料模型与应用研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(4): 743

- HUANG Shuling, XU Jinsong, DING Xiuli, et al. Study of layered rock mass composite model based on characteristics of structural plane and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 743
- [10] 黄书岭, 丁秀丽, 邹爱清, 等. 层状岩体多节理本构模型与试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1627
HUANG Shuling, DING Xiuli, WU Aiqing, et al. Study of multi-joint constitutive model of layered rockmass and experimental verification [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1627
- [11] ZHANG T, CHEN Q, ZHANG J, et al. Influences of mechanical contrast on failure characteristics of layered composite rocks under true-triaxial stresses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56: 5363. DOI: 10.1007/s00603-023-03341-z
- [12] LU J, HUANG G, GAO H, et al. Mechanical properties of layered composite coal-rock subjected to true triaxial stress [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 4117. DOI: 10.1007/s00603-020-02148-6
- [13] ZHENG Y, ZHANG T, YANG H, et al. An experimental investigation on mechanical properties and failure characteristics of layered rock mass[J]. Applied Sciences, 2023, 13(13): 7537. DOI: 10.3390/app13137537
- [14] ZHENG C, ZHU X, ZHANG Z. Damage evolution of tunnel lining under creep action considering interlayer effect in gently inclined layered surrounding rock[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 162: 1350. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108392
- [15] 樊纯坛, 梁庆国, 岳建平, 等. 层状岩体地下洞室施工阶段围岩精细化分级[J]. 中国公路学报, 2023, 36(4): 169
FAN Chuntan, LIANG Qingguo, YUE Jianping, et al. Study on fine classification of surrounding rock during construction stage of underground caverns with layered rock mass[J]. China J. Highw. Transp, 2023, 36(4): 169. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.040015
- [16] 刘小亮, 陈新, 宋笑凡. 软硬互层岩体变形破坏机制物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊2): 3980
LIU Xiaoliang, CHEN Xin, SONG Xiaofan. Physical simulation test on deformation and failure mechanism of soft and hard interbedded rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(Sup. 2): 3980. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0815
- [17] 路军富, 王明胜, 王奎, 等. 水平层状泥岩铁路隧道底鼓机理及解析方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(5): 1761
LU Junfu, WANG Mingsheng, WANG Kui, et al. Mechanism and analytical method of bottom drum in horizontal layered mudstone railway tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(5): 1761. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20221004
- [18] 王旭一, 黄书岭, 丁秀丽, 等. 层状岩体单轴压缩力学特性的非均质层面影响效应研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 581
WANG Xuyi, HUANG Shuling, DING Xiuli, et al. Study on the effect of inhomogeneous bedding plane on the mechanical properties of uniaxial compression of layered rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 581. DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0584
- [19] XU L, WEI S. Control technology and simulation study of floor heave in high stress soft rock roadway [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(4): 4045. DOI: 10.1007/s10706-020-01276-8
- [20] 李地元, 周奥辉, 王立川, 等. 双轴压缩下缓倾层状砂岩力学特性及损伤本构模型研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 1074
LI Diyuan, ZHOU Aohui, WANG Lichuan, et al. Study on mechanical properties and damage constitutive model of gently inclined layered sandstone under biaxial compression [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(3): 1074. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.03.024
- [21] CHEN Z Q, HE C, XU G W, et al. A case study on the asymmetric deformation characteristics and mechanical behavior of deep-buried tunnel in phyllite [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(11): 4527. DOI: 10.1007/s00603-019-01836-2
- [22] 陶志刚, 李梦楠, 张博, 等. 西南地区节理化薄层软岩隧道大变形力学机理及支护控制方法[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(4): 452
TAO Zhigang, LI Mengnan, ZHANG Bo, et al. Mechanical mechanism of large deformation and support control for jointed thin soft rock tunnel in Southwest China [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(4): 452. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2023.04.002
- [23] 刘德柱, 李元海. 软弱缓倾层状隧道围岩变形破裂规律试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(5): 1527
LIU Dezhu, LI Yuanhai. Experimental investigation on the law of deformation and fracture of surrounding rock of soft and gently inclined layered tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(5): 1527. DOI: 1673-0836(2023)05-1527-09
- [24] CHANG X, ZHANG X, DANG F, et al. Failure behavior of sandstone specimens containing a single flaw under true triaxial compression [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(4): 2111. DOI: 10.1007/s00603-021-02761-z
- [25] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R. Fundamentals of rock mechanics [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. DOI: 10.1111/j.1468-8123.2009.00251.x
- [26] 周喻, 邹世卓, 高永涛, 等. 动载下层状岩体力学特性试验与数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(6): 93
ZHOU Yu, ZOU Shizhuo, GAO Yongtao, et al. Test and numerical simulation for mechanical properties of laminated rock mass under dynamic loading [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(6): 93. DOI: 10.11918/202207020