

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.01.026

基于岩体层理特性的非线性抗剪强度准则研究

阳军生^{1,2}, 张聪^{1,2}, 肖小文^{1,2}, 张学民^{1,2}

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中南大学 重载铁路工程结构教育部重点实验室, 湖南 长沙 410075)

摘要: 对湖南湘西雀儿溪隧道中的层状砂岩开展了室内三轴压缩试验. 结果表明, 因微层理面的影响, 该砂岩表现出较强的各向异性强度特性, 岩体的破坏存在沿层理面的滑移破坏和非滑移破坏(含斜穿层理面的剪切破坏、基岩破坏及二者的复合破坏)两种模式. 针对该砂岩的破坏特征, 提出了一种反映其强度特性的非线性破坏准则, 该准则对两种破坏模式采用不同的方法进行描述. 采用该破坏准则预测层状砂岩的破坏强度, 预测结果与试验数据吻合较好. 采用该准则对其他不同类型层状岩体的强度进行预测, 也获得了较好的结果.

关键词: 层状岩体; 层理构造; 三轴压缩试验; 破坏模式; 非线性强度准则

中图分类号: TU 452 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)01-0126-06

Research on Non-linear Shear Strength Criterion for Layered Rock Mass with Micro-discontinuity

YANG Jun-sheng^{1,2}, ZHANG Cong^{1,2}, XIAO Xiao-wen^{1,2}, ZHANG Xue-min^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Key Laboratory of Engineering Structure of Heavy Railway, Central South University, Changsha 410075, China. Corresponding author: ZHANG Cong, E-mail: zhangcong8023cl@csu.edu.cn)

Abstract: Tri-axial compression tests are carried out on the layered sandstone specimens taken from the QEX Tunnel located in Xiangxi of Hunan. The results show that the strength of the rock is obviously anisotropic and there are two distinct failure modes, i. e., one is the failure caused by sliding along the discontinuity and the other is non-sliding failure mode in which fracturing of rock material, fracturing across the discontinuity and the mixed mode of the above. Then a non-linear failure criterion for the layered sandstone is proposed to reflect different failure modes using different methods. Performance of the failure criterion is tested for validation against tri-axial compression tests data for the layered sandstone specimens. It shows that predicted values are in good agreement with experimental test data. The applicability of the failure criterion is also examined using the published experimental data of various types of layered rock mass.

Key words: layered rock mass; bedding structure; tri-axial compression test; failure mode; nonlinear strength criterion

受层理面的影响, 岩体往往表现出较强的各向异性特征. 对于层状岩体的研究, 目前主要通过试验和数值手段进行. 如, 高春玉等^[1]分析了细微层理面对砂质板岩力学特性的影响; 何忠明等^[2]采用单轴压缩试验和数值手段研究层面倾角与层状岩体应力-应变响应及破坏强度的关系; 周科峰等^[3]通过数值模拟研究单轴压缩条件下层状岩体破坏模式和强度特征随层面倾角变化的规律; Tien 等^[4]分析了人工合成层状岩体的力

学性质与层理面倾角的关系.

层状岩体的强度会随着层理面倾角而发生变化, 破坏模式也可能不同, 针对这一破坏特征, 提出了一些相应的破坏准则. 如, Jaeger^[5]将层状岩体的破坏分为滑移破坏和基岩破坏两种模式, 并对二者均采用 Mohr-Coulomb 准则描述. Tien 和 Kuo^[6]将层状岩体的破坏分为滑移和非滑移破坏, 对滑移破坏采用 Mohr-Coulomb 准则描述, 对非滑移破坏的描述则基于 Hoek-Brown 准则

和最大轴向主应变准则推导其描述方法. 张学民^[7]和 Asadi 等^[8]对层状岩体的滑移和非滑移破坏采用不同的描述方式, 并各自提出了破坏准则. 上述破坏准则中, 有的忽略了围压对岩体强度的非线性影响^[5-7]; 有的则是准则参数太多且参数确定过于复杂^[8].

湖南湘西雀儿溪隧道全长约 1 350 m, 最大埋深约 110 m, 开挖高度约 10 m, 跨度为 12.4 m, 洞身穿越层状砂岩, 该砂岩存在一组优势微层理面. 为分析砂岩的破坏特征, 通过现场取砂岩试样开展室内三轴压缩试验, 在此基础上, 提出一种反映其强度特性的非线性破坏准则. 采用该准则预测层状砂岩的强度并与试验对比, 以证明该准则的有效性.

1 层状砂岩的三轴试验

1.1 试样制作

在层理面倾角为 0° , 22.5° , 45° , 67.5° 和 90° 方向上分别钻取砂岩试样. 将岩样加工成直径为 50 mm, 高度 100 mm 的圆柱形.

1.2 试验过程及结果

对不同层理面倾角砂岩试样进行了围压为 0, 20, 40 和 60 MPa 的三轴试验, 岩样应力 - 应变全过程曲线如图 1 所示. 从图 1 可看出, 在低围压时, 岩样呈明显的脆性破坏, 随着围压的增加, 岩样逐渐转变为延性破坏; 同时可看出, 低围压时层理面倾角变化对砂岩强度有显著影响.

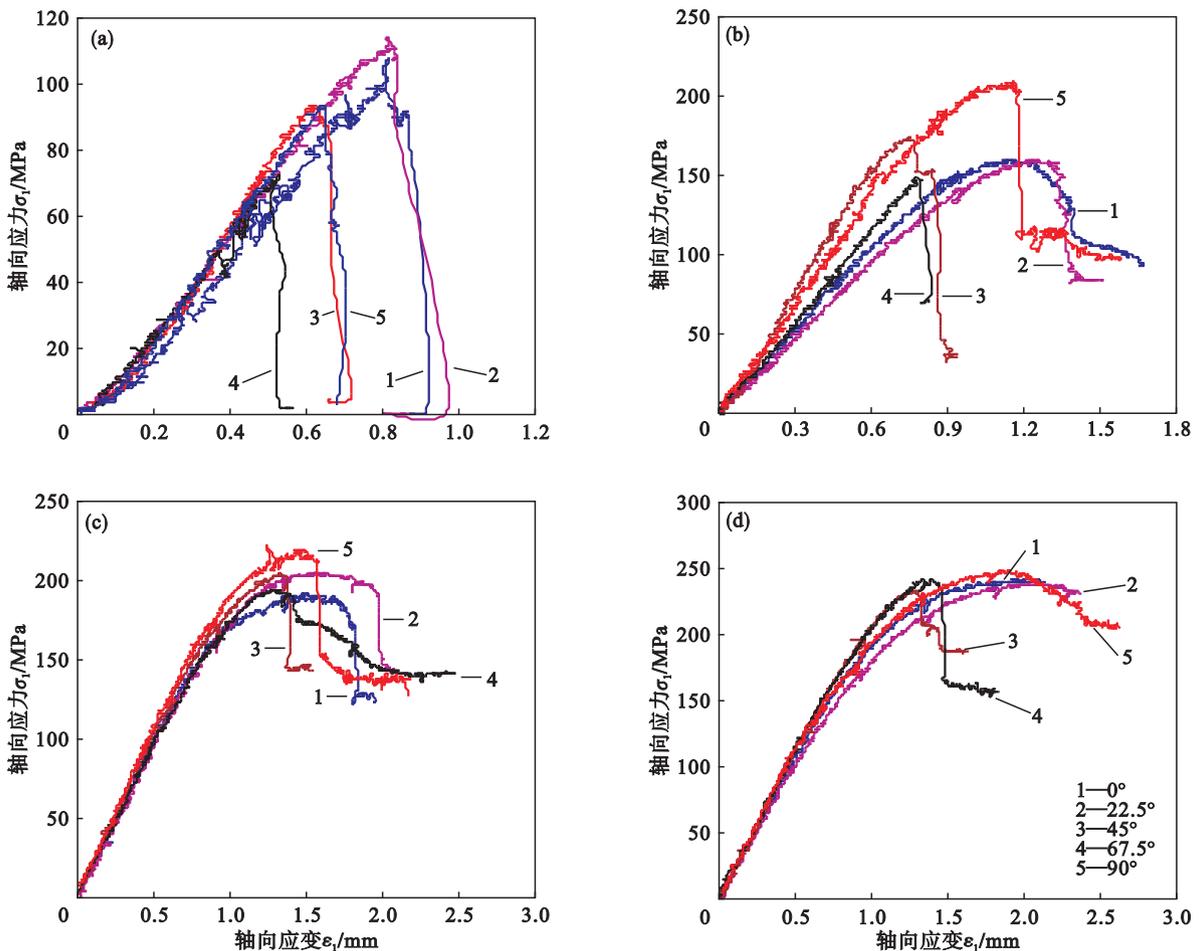


图 1 不同层理面倾角层状砂岩的应力 - 应变全过程曲线

Fig. 1 Complete stress-strain curves of layered sandstone with different bedding plane inclinations

(a)—围压 0 MPa; (b)—围压 20 MPa; (c)—围压 40 MPa; (d)—围压 60 MPa.

砂岩试样的破坏强度如表 1 所示. 从表 1 中可看出, 围压和层理面倾角对砂岩强度的影响显著, 当围压为 0, 20 和 40 MPa 时, 随着层理面倾角 α 的增加砂岩强度表现为先增加再减小然后增加, 当围压为 60 MPa 时, 随层理面倾角 α 的增加

砂岩强度总体表现为先减小后增大的趋势. 当平行层理面加载时 ($\alpha = 90^\circ$), 砂岩强度最大; 当 $\alpha = 67.5^\circ$ 时, 砂岩强度最小. 随围压增加, 层理面倾角变化对砂岩强度的影响逐渐变小, 强度逐渐呈现明显的非线性特征.

表 1 砂岩试样的峰值强度
Table 1 Peak strength of sandstone specimens
MPa

围压/MPa	层理面倾角/(°)				
	0	22.5	45.0	67.5	90.0
0	108	114	93	73	107
20	159	160	174	148	210
40	190	203	202	192	220
60	241	239	232	241	248

砂岩试样在三轴压缩试验中破坏的典型照片如图 2 所示,从图 2 可看出,砂岩的破坏与围压及

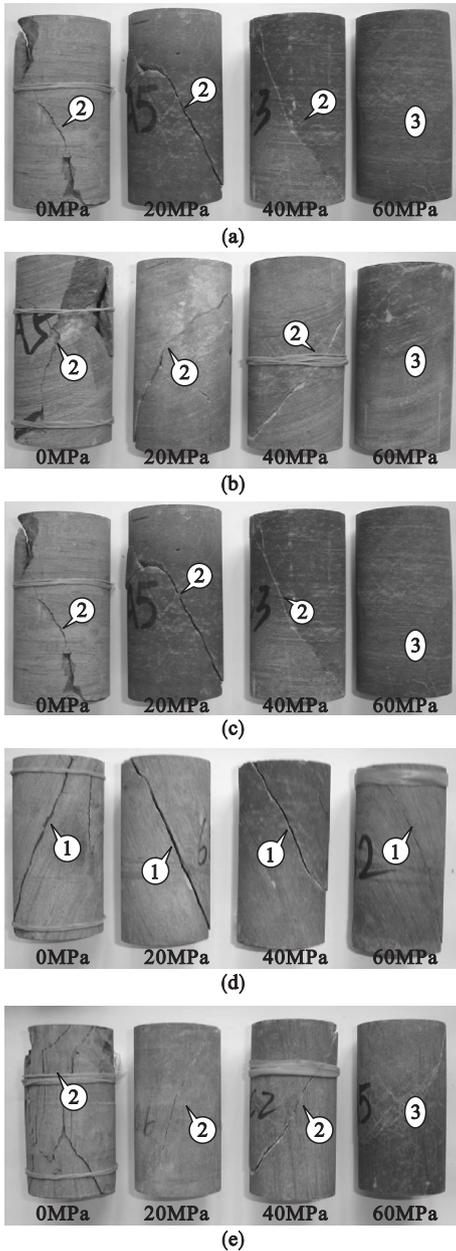


图 2 不同层理倾角砂岩试样破坏的典型照片

Fig. 2 Typical failure samples of layered sandstone with different bedding plane inclinations

(a) 一层理面倾角为 0°; (b) 一层理面倾角为 22.5°; (c) 一层理面倾角为 45°; (d) 一层理面倾角为 67.5°; (e) 一层理面倾角为 90°.

层理面倾角均有联系,具有明显的倾角效应,其破坏模式可分为三种:①沿层理面的滑移破坏;②斜穿层理面的剪切破坏;③基岩破坏及复合破坏(主要为斜穿层理面的剪切破坏和基岩破坏的复合)。

当 $\alpha = 0^\circ, 22.5^\circ$ 及 90° 时,砂岩在低围压为斜穿层理面的剪切破坏,而在高围压时则是基岩破坏或复合破坏;当 $\alpha = 67.5^\circ$ 时发生滑移破坏;当 $\alpha = 45^\circ$ 时破坏模式较复杂,围压为 0, 20 和 40 MPa 时发生斜穿层理面的剪切破坏,围压为 60 MPa 时为复合破坏。

2 非线性破坏准则的提出

从试验结果可看出,砂岩的破坏模式可分为两种:沿层理面的滑移破坏和非滑移破坏(包含斜穿层理面的剪切破坏、基岩破坏和复合破坏),不同破坏模式下,岩体强度明显不同.因此,本文提出对滑移破坏采用非线性 Mohr - Coulomb 准则描述,对非滑移破坏则基于一个简化的破坏准则和最大轴向应变准则推导其描述方法。

2.1 沿层理面的滑移破坏

对于滑移破坏,Jaeger 等采用 Mohr - Coulomb 准则描述^[5],如图 3 所示(坐标转换见文献[7]),有

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2(c_j + \sigma_3 \tan \varphi_j)}{(1 - \tan \varphi_j \cot \alpha) \sin 2\alpha} \quad (1)$$

式中, c_j 和 φ_j 分别为层理面上的黏聚力和内摩擦角.显然,式(1)中破坏强度是围压(σ_3)的线性函数,若在式(1)中引入一个围压(σ_3)的二次方量,如图 4 所示,可得非线性 Mohr - Coulomb 准则:

$$S_{\text{lastiding}} = \sigma_{\text{lastiding}} - \sigma_3 = \frac{2(c_j + \sigma_3 \tan \varphi_j)}{(1 - \tan \varphi_j \cot \alpha) \sin 2\alpha} - A\sigma_3^2 \quad (2)$$

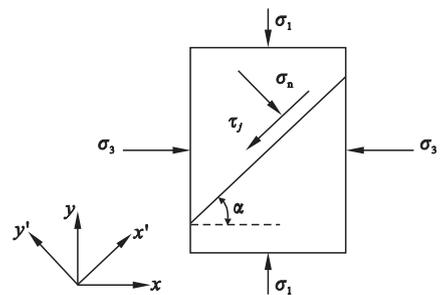


图 3 层理面上的正应力和切应力示意图

Fig. 3 Normal stress and shear stress on the discontinuity

式中, $S_{\text{lastiding}}$ 和 $\sigma_{\text{lastiding}}$ 表示滑移破坏时的偏应力和第一主应力.根据 Barton^[9]的论述,当围压达到某一临界值(σ_{crit})时,岩体达到最大剪切破坏强

度,即岩体发生破坏时的偏应力不再随着围压的增长而增长,而是保持为某一定值,故当 $\sigma_3 = \sigma_{\text{crit}}$ 时, $S_{\text{lastsliding}}$ 对 σ_3 的增长率为0,因此有

$$\frac{\partial S_{\text{lastsliding}}}{\partial \sigma_3} = \frac{2 \tan \varphi_j}{(1 - \tan \varphi_j \cot \alpha) \sin 2\alpha} - 2A\sigma_3 = 0. \quad (3)$$

由式(3)可求得A的表达式,并代入式(2)可得

$$\sigma_{\text{lastsliding}} - \sigma_3 = \frac{2(c_j + \sigma_3 \tan \varphi_j) - \sigma_3^2 \tan \varphi_j / \sigma_{\text{crit}}}{(1 - \tan \varphi_j \cot \alpha) \sin 2\alpha}. \quad (4)$$

式(4)即为滑移破坏时的非线性破坏准则.根据Singh等^[10]的研究,层状岩体的临界围压(σ_{crit})可按式确定:

$$\sigma_{\text{crit}} = 1.25 \sigma_{\text{cmax}}. \quad (5)$$

式中, σ_{cmax} 为岩体的最大单轴抗压强度,通常发生在 $\alpha = 0^\circ$ 或 90° 时.

对式(4)中 σ_3 取0,可得岩体单轴抗压强度:

$$\sigma_{\text{ca}} = 2c_j / [(1 - \tan \varphi_j \cot \alpha) \sin 2\alpha]. \quad (6)$$

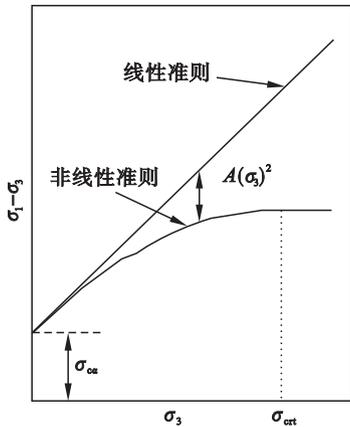


图4 层状岩体滑移破坏的非线性强度准则

Fig. 4 Nonlinear strength criterion for sliding failure of layered rock mass

2.2 非滑移破坏

Shen等^[11]针对均质岩石提出了一个简化的非线性破坏准则,该准则将岩石破坏时的最大主应力(σ_1)表示为围压(σ_3)和单轴抗压强度(σ_{ci})的函数:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} + B\sigma_{ci}(\sigma_3/\sigma_{ci})^{0.5}. \quad (7)$$

从式(7)可看出,岩石强度是围压的非线性函数,且该准则仅包含一个需要计算确定的无量纲参数.

虽然该准则是针对岩石提出的,但本文尝试将其应用于描述 α 为 0° 和 90° 时的砂岩强度:

$$S_{1(0)} = \sigma_{1(0)} - \sigma_3 = \sigma_{c(0)} + B_0\sigma_{c(0)}(\sigma_3/\sigma_{c(0)})^{0.5}, \quad (8)$$

$$S_{1(90)} = \sigma_{1(90)} - \sigma_3 = \sigma_{c(90)} + B_{90}\sigma_{c(90)}(\sigma_3/\sigma_{c(90)})^{0.5}. \quad (9)$$

式中: $\sigma_{c(0)}$ 和 $\sigma_{c(90)}$ 表示 $\alpha = 0^\circ$ 和 90° 时的岩体单轴抗压强度,可由试验获得; B_0 和 B_{90} 为 $\alpha = 0^\circ$ 和 90° 时的无量纲参数B.当存在N组数据可用时,B值为

$$B = \left[\sum_{l=1}^N \left(\frac{\sigma_{1,l} - \sigma_{3,l} - \sigma_{c\alpha}}{\sigma_{c\alpha}} \right) \right] / \left[\sum_{l=1}^N \left(\frac{\sigma_{3,l}}{\sigma_{c\alpha}} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

式中: $\sigma_{1,l}$ 和 $\sigma_{3,l}$ 表示第l组试验数据的轴压和围压; $\sigma_{c(0)}$ 和 $\sigma_{c(90)}$ 为 $\alpha = 0^\circ$ 或 90° 时的单轴抗压强度.

根据式(10)及表1所示 $\alpha = 0^\circ$ 和 90° 时试验数据可得 $B_0 = 0.76$ 及 $B_{90} = 1.23$.将其代入式(8)和式(9)可计算出砂岩在 $\alpha = 0^\circ$ 和 90° 时的强度,并与试验数据对比,如图5所示,二者吻合较好,因此,采用该准则描述砂岩在 $\alpha = 0^\circ$ 和 90° 时的强度是合适的.

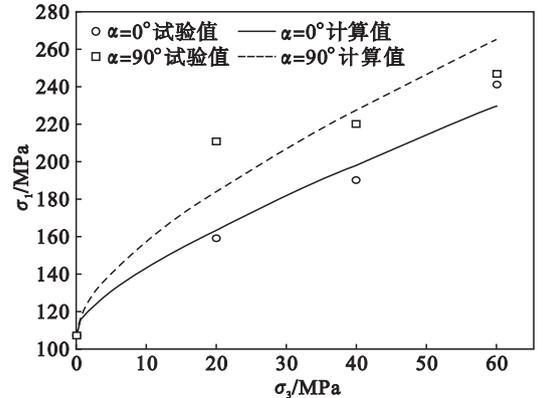


图5 α 为 0° 和 90° 时砂岩强度计算值与试验数据对比

Fig. 5 Comparison of experimental data and computational value when $\alpha = 0^\circ$ and 90°

最大轴向应变准则可简述为:岩体沿着轴向(y方向)累计延性应变达到临界值时,将发生破坏.根据横观各向同性弹性理论,轴向主应变(ε_y)为

$$\varepsilon_y = \left[\frac{\sin^4 \alpha}{E} + \frac{\cos^4 \alpha}{E'} + \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha \left(\frac{1}{G'} - \frac{2\nu'}{E} \right) \right] (\sigma_1 - \sigma_3). \quad (11)$$

式中: E 和 E' 为平行和垂直层理面方向的弹性模量; G' 和 ν' 为垂直层理面方向的剪切模量和泊松比.根据最大轴向应变准则,当 ε_y 达到临界值(ε_{yf})时岩体破坏, ε_{yf} 仅取决于围压大小,与层理面倾角无关,当岩体破坏时,有

$$S_{1\alpha} = \sigma_{1\alpha} - \sigma_3 = E_y \varepsilon_{yf}, \quad (12)$$

$$S_{1(0)} = \sigma_{1(0)} - \sigma_3 = E_{(0)} \varepsilon_{yf}. \quad (13)$$

其中, $S_{1\alpha}$ 和 $S_{1(0)}$ 表示偏应力, E_y 表示弹性模量,根据横观各向同性理论可知:

$$\frac{1}{E_y} = \frac{\sin^4 \alpha}{E} + \frac{\cos^4 \alpha}{E'} + \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha \left(\frac{1}{G'} - \frac{2\nu'}{E} \right). \quad (14)$$

若令

$$k = E_{(90)}/E_{(0)} = S_{1(90)}/S_{1(0)}, \quad (15)$$

$$n = E_{(90)}/2G' - \nu'. \quad (16)$$

k定义为强度比.结合式(12)~式(16)可得

$$\frac{S_{1\alpha}}{S_{1(0)}} = \frac{\sigma_{1\alpha} - \sigma_3}{\sigma_{1(0)} - \sigma_3} = \frac{k}{\sin^4 \alpha + k \cos^4 \alpha + 2n \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}. \quad (17)$$

将式(8)代入式(17),可得

$$\sigma_{1\alpha} - \sigma_3 = \frac{k[\sigma_{c0} + B_0\sigma_{c0}(\sigma_3/\sigma_{c0})^{0.5}]}{\sin^4\alpha + k\cos^4\alpha + 2n\sin^2\alpha\cos^2\alpha} \quad (18)$$

式(18)即为岩体非滑移破坏的非线性准则,其中参数 k 可结合式(8),式(9)和式(15)确定:

$$k = \frac{S_{1(90)}}{S_{1(0)}} = [\sigma_{c(90)} + B_{90}\sigma_{c(90)}(\frac{\sigma_3}{\sigma_{c(90)}})^{0.5}] / [\sigma_{c(0)} + B_0\sigma_{c(0)}(\frac{\sigma_3}{\sigma_{c(0)}})^{0.5}] \quad (19)$$

2.3 非线性破坏准则的讨论

2.3.1 准则的优越性

所提出的破坏准则考虑了围压对岩体强度的非线性影响,需计算确定的准则参数个数较少($\sigma_{c(0)}, \sigma_{c(90)}$ 可由试验直接获得),分别是 c_j, φ_j, n, B_0 和 B_{90} , B_0 和 B_{90} 可在试验数据基础上结合式(10)确定,下面简要叙述 c_j, φ_j 和 n 的确定方法.

2.3.2 参数 n 的确定

当层层面倾角 α 趋向于 0° 时, $\sin^4\alpha$ 的值可

$$\varphi_j = \arctan\left[\frac{1}{N} \sum_N \frac{\sigma_1 - \sigma_{ca} - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_{ca} - \sigma_3) \cot\alpha + (2\sigma_3 - \sigma_{ca}^2/1.25\sigma_{cmax})/\sin 2\alpha}\right] \quad (24)$$

获得 φ_j 的值后,将其代入式(6),即可确定 c_j 的值:

$$c_j = [\sigma_{ca}(1 - \tan\varphi_j \cot\alpha) \sin 2\alpha] / 2 \quad (25)$$

3 非线性破坏准则的验证

为验证本文提出非线性破坏准则的合理性,采用该准则对湖南湘西雀儿溪隧道层状砂岩的破坏强度进行预测,并与试验结果进行对比,预测值与试验结果的对比见图6.由图可知,试验数据与预测值的偏差较小,说明本文提出的破坏准则可较好地反映层状砂岩的强度特性,该准则是合理的.

为探讨该非线性破坏准则的适用性,采用该准则对不同层状岩体^[12-13]在不同围压和层面倾角下的强度进行预测,并与实验值进行对比.准

忽略不计,此时,式(17)可写成

$$S_{1\alpha}/S_{1(0)} \approx 1/[\cos^2\alpha(\cos^2\alpha + (2n/k)\sin^2\alpha)] \quad (20)$$

从式(20)可看出, $S_{1\alpha}/S_{1(0)}$ 可视为 n/k 的函数,而认为与 k 值无关.若令 $k=1$,则式(17)可写成

$$S_{1\alpha}/S_{1(0)} \approx 1/\{1 + 2[(n/k) - 1]\sin^2\alpha\cos^2\alpha\} \quad (21)$$

当 $\alpha = 22.5^\circ$ 时,式(21)可写成

$$S_{1(22.5)}/S_{1(0)} = 1/\{1 + 0.25[(n/k) - 1]\} \quad (22)$$

因此,结合表1中 $\alpha = 0^\circ$ 和 22.5° 时的室内三轴试验数据就可获得 n/k 的值,从而确定参数 n .当存在多组不同围压条件下的数据时,则可取均值.

2.3.3 参数 c_j, φ_j 的确定

将式(5)和式(6)代入式(4),则有

$$\sigma_{1sliding} - \sigma_3 = \sigma_{ca} + \frac{2\sigma_3 \tan\varphi_j - \sigma_3^2 \tan\varphi_j / (1.25\sigma_{cmax})}{(1 - \tan\varphi_j \cot\alpha) \sin 2\alpha} \quad (23)$$

式中,参数 σ_{ca} 和 σ_{cmax} 均可通过试验直接测定,此时,式(23)中仅包含待定参数 φ_j .假定存在 N 组数据可用,根据每一组数据均可对应求得 $\tan\varphi_j$ 值,取平均值后求反函数就可对应获得 φ_j 的值.

$$\sigma_1 - \sigma_{ca} - \sigma_3$$

则参数计算方法如上文所述,各类型岩体的参数值均列于表2.预测值与试验值对比见图7,由图

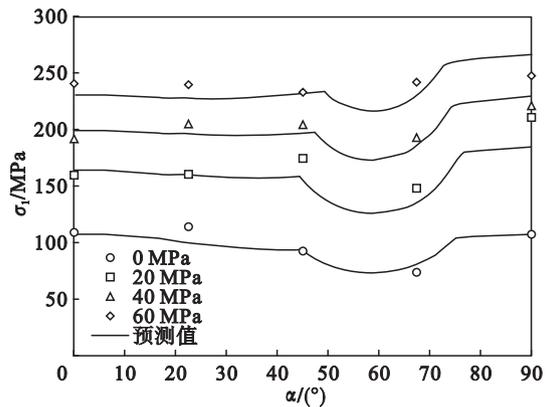


图6 砂岩试验数据与预测值对比
Fig. 6 Comparison of experimental data and predicted failure strength of sandstone

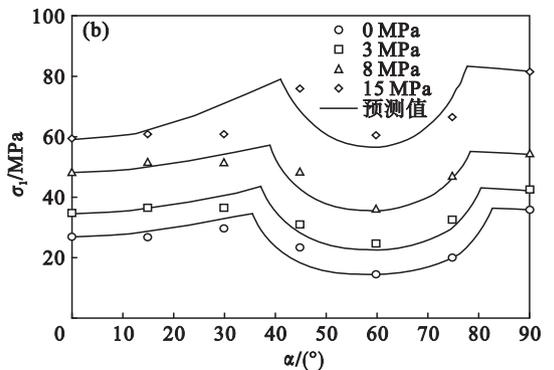
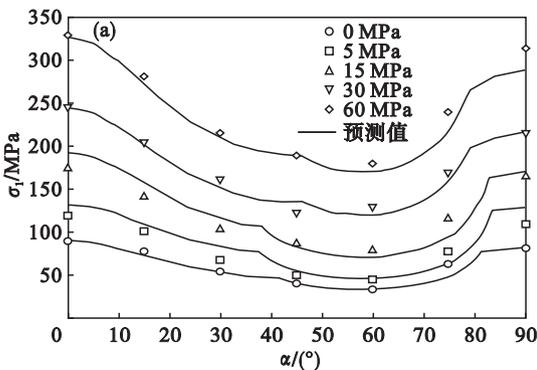


图7 试验数据与预测值对比

Fig. 7 Comparison of experimental data and predicted failure strength

(a) —千枚岩^[12]; (b) —人工合成岩^[13].

表 2 不同类型层状岩体的非线性破坏准则参数
Table 2 Parameters of the proposed nonlinear criterion for different rock types

层状岩体类型	σ/MPa	$\sigma_{c(90)}/\text{MPa}$	B_0	B_{90}	$\varphi_f/(\text{°})$	c_f/MPa	n
本文砂岩	107.00	108.00	0.76	1.23	32.86	18.90	1.08
千枚岩 ^[12]	89.00	81.00	2.41	2.08	26.01	10.26	2.60
人工合成岩 ^[13]	26.70	35.80	0.80	0.89	28.10	4.25	0.75

可知,对于上述岩体,预测值与试验结果吻合较好,说明本文所提出的破坏准则具有较好的适用性。

4 结 论

1) 试验表明,层理面倾角、围压对砂岩强度及其破坏模式具有显著影响:低围压时,砂岩强度具有明显的倾角效应,即层理面倾角对岩体强度影响显著;高围压时,层理面倾角变化的影响不再明显,但强度呈现较显著的非线性特征。

2) 提出了一个非线性破坏准则,对岩体的滑移破坏采用非线性 Mohr – Coulomb 准则描述,对非滑移破坏则基于一个简化的破坏准则及最大轴向应变准则推导其描述方法。该准则考虑了围压对岩体强度的非线性影响,且具有参数简单、无需数值拟合、易于确定的优点。

3) 采用本文提出的强度准则预测层状砂岩的强度并与试验结果进行对比,二者吻合较好,同时该准则可以有效预测不同围压和不同层理面倾角条件下其他类型的层状岩体强度。

参考文献:

[1] 高春玉,徐进,李忠洪,等.雪峰山隧道砂板岩各向异性力学特性的试验研究[J].岩土力学,2011,32(5):1360 – 1364.
(Gao Chun-yu, Xu Jin, Li Zhong-hong, et al. Experimental study of anisotropically mechanical characteristics of sandy slate in Xuefeng mountain tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5): 1360 – 1364.)

[2] 何忠明,彭振斌,曹平,等.层状岩体单轴压缩室内试验分析与数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(5):1906 – 1912.
(He Zhong-ming, Peng Zhen-bin, Cao Ping, et al. Test and numerical simulation for stratified rock mass under uniaxial compression [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, 41(5): 1906 – 1912.)

[3] 周科峰,李宇峙,柳群义.层状岩体强度结构面特征的数值

分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(4):1424 – 1428.

(Zhou Ke-feng, Li Yu-zhi, Liu Qun-yi. Numerical analysis of structure plane characteristic for strength of stratified rock mass [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(4): 1424 – 1428.)

- [4] Tien Y M, Kuo M C, Juang C H. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2006, 43: 1163 – 1181.
- [5] Jaeger J C. Shear failure of anisotropic rocks [J]. *Geological Magazine*, 1960, 97: 65 – 72.
- [6] Tien Y M, Kuo M C. A failure criterion for transversely isotropic rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2001, 38: 399 – 412.
- [7] 张学民.岩石材料各向异性特征及其对隧道围岩稳定性影响研究[D].长沙:中南大学,2007.
(Zhang Xue-min. Anisotropic characteristic of rock material and its effect on stability of tunnel surrounding rock [D]. Changsha: Central South University, 2007.)
- [8] Asadi M, Bagheripour M H. Modified criteria for sliding and non-sliding failure of anisotropic jointed rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2015, 73: 95 – 101.
- [9] Barton N. The shear strength of rock and rock joints [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences and Geomechanics Abstract*, 1976, 13(9): 255 – 279.
- [10] Singh M, Samadhiya N K, Kumar A, et al. A nonlinear criterion for triaxial strength of inherently anisotropic rocks [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(4): 1387 – 1405.
- [11] Shen J Y, Jimenez R, Karakus M, et al. A simplified failure criterion for intact rocks based on rock type and uniaxial compressive strength [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(2): 357 – 369.
- [12] Kumar A. Engineering behavior of anisotropic rocks [D]. Rooker: IIT Rooker, 2006.
- [13] Tien Y M, Tsao P F. Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2000, 37: 1001 – 1012.