

考虑岩体强度各向异性的非线性单弱面破坏准则

张 雷

(重庆市勘测院有限公司, 重庆市 401121)

摘 要: 提出一个新的、由节理面倾角引起的、岩体强度各向异性的、横观各向同性岩石的、非线性单弱面破坏准则。新准则建立在岩体两种不同的破坏模式基础之上: (1) 滑移模式, 即沿节理面滑移破坏; (2) 非滑移破坏, 即由岩石材料控制, 与节理面无关。采用考虑节理面粗糙度的非线性强度准则描述滑移破坏模式的强度, 确定该准则需要三个参数; 采用可考虑由节理面倾角引起的岩石强度各向异性的 Hoek-Brown 准则描述非滑移破坏模式的强度, 确定该准则需要四个参数。详细阐述各参数的取值方法, 采用文献中的试验数据验证新准则的准确性, 并与 Jaeger 单弱面理论的计算结果进行比较, 验证新准则的试验数据包括岩石的不同围压条件及不同节理倾角。节理倾角对岩石强度的影响随着围压的增加而逐步降低。

关键词: 岩石力学; 强度各向异性; 破坏准则; 单弱面理论

中图分类号: TU44

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0364-05

Nonlinear Single-weak Plane Failure Criterion Considering Anisotropy of Rock Mass Strength

ZHANG Lei

(Chongqing Surveying Institute Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: A new nonlinear single-weak plane failure criterion is proposed, caused by the inclination angle of the joint plane, and considering the anisotropic in strength and isotropic in transverse view of rock mass. The new criterion is based on two different failure modes of rock masses: (1) sliding mode, that is, sliding failure along the joint plane, and (2) non-sliding failure, that is, controlled by the rock material, has nothing to do with the joint plane. The strength of the sliding failure mode is described by using a nonlinear strength criterion considering the roughness of the joint plane. Three parameters are required to determine this criterion. The strength of the non-sliding failure mode is described by using the Hoek-Brown criterion able to consider the anisotropy of rock strength caused by the inclination angle of the joint plane. Four parameters are required to determine this criterion. The methods for taking values of each parameter are elaborated in detail. The accuracy of the new criterion is verified by using the experimental data in the literature, and is compared with the calculation results of Jaeger simple-weak plane theory. The test data of the new criterion are verified including the different confining pressure conditions of rocks and different joint inclination angles. The influence of joint inclination angle on rock strength gradually decreases with the increase of confining pressure.

Keywords: rock mechanics; strength anisotropy; failure criterion; single-weak plane theory

0 引 言

许多地下岩石工程都建造在成层状的各向异性的岩体中, 对此类岩体的稳定性分析需要考虑岩体结构的各向异性对岩体力学性质的影响^[1-3], 岩体的结构各向异性主要由层理面、页理面、纹理面及其他平面型不连续面引起。图1为在页理状岩体中修建的隧道, 将其视为各向同性岩体进行处理, 可能达不

到工程所需的精度, 在进行施工力学分析时, 必须考虑加载方向与不连续面倾角的关系^[4]。类似的天然地质体, 应采用横观各向同性模型来进行岩体力学分析。在过去的几十年中, 许多学者对此类岩石力学问题进行了大量研究, 并提出不同的破坏准则。基于问题研究的出发点与所使用的技术, 可将已有的破坏准则分为3类^[5]: 数学连续型模型、经验连续型模型与不连续弱面理论。不连续弱面理论较之其他两类模型更为适合描述横观各向同性岩体的强度。

Jaeger 是最早针对该类问题进行研究并取得创造性成果的学者。Jaeger 假定岩体的破坏包含两种

收稿日期: 2025-04-29

作者简介: 张雷(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程方面的勘察设计工作。

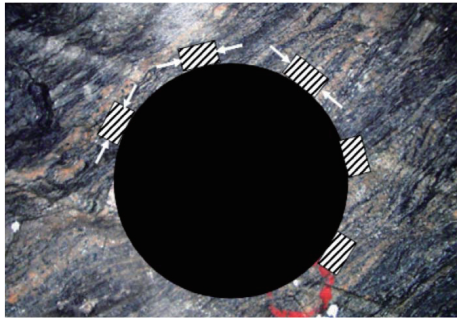


图1 隧洞周围岩体的应力方向与岩体结构关系示意图^[4]

类型,一是沿不连续弱面滑移破坏;二是岩石破坏,具体的破坏模式由应力状态与不连续面的倾角共同决定^[6]。初始的 Jaeger 强度准则将岩石视为各向同性体,认为倾角 β 对岩体的压缩强度无影响,包含四个参数,强度曲线的形式如图2(a)所示。之后的试验表明,不连续面的倾角 β 对岩体的压缩强度有着重要影响,岩体的最大压缩强度可能发生在 $\beta=0^\circ$ 处,也可能发生在 $\beta=90^\circ$ 处,修正的 Jaeger 强度准则考虑了倾角对岩体强度的影响,强度曲线如图2(b)所示。

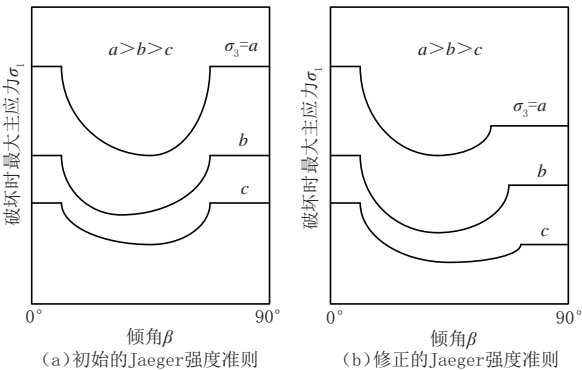


图2 Jaeger 强度准则与倾角 β 的关系

Jaeger 强度准则采用不同参数的 Mohr-Coulomb 强度准则,分别描述节理面的强度及岩石的强度,能较好地描述轻微层状岩体的强度,但不太适合描述高度层状化岩体的强度^[7]。Duveau & Shao^[7]借鉴 Barton 的节理峰值抗剪强度公式,采用类似的非线性模型描述节理面的强度,但对岩石仍采用 Mohr-Coulomb 准则,该准则包含七个参数。

上述模型均忽视了节理倾角 β 对岩石强度的影响。试验表明^[8],岩石的强度会随节理倾角的变化而有所不同。基于此,本文结合考虑岩石强度各向异性的修正 Hoek-Brown 破坏准则与节理面的非线性强度准则,共同描述高度层状化岩体的强度。

1 破坏强度准则

1.1 节理非线性剪切强度准则

如图3所示,Jaeger 基于 Mohr 应力圆理论,推导

出作用于节理面上的法向应力 σ_n 与剪切应力 τ 应满足:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta \quad (1)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为最大主应力和最小主应力。

节理面的强度曲线服从 Mohr-Coulomb 准则:

$$\tau = c_j + \sigma_n \tan \varphi_b \quad (3)$$

式中: c_j 为节理面的黏聚力; φ_b 为节理面的基本摩擦角。

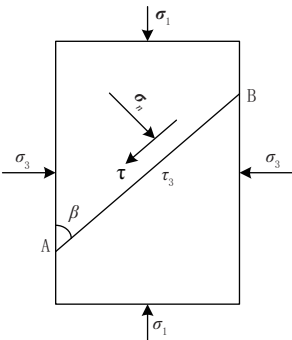


图3 节理面AB的法向应力与剪切应力

由于节理面通常是不光滑的,剪胀效应不应忽视,其抗剪强度是法向应力的非线性函数^[9],Mohr-Coulomb 准则不能准确描述节理面的抗剪强度。Barton 提出节理面的非线性抗剪强度准则:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \lg \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi_b \right] \quad (4)$$

式中:JRC 为节理粗糙度系数;JCS 为节理面壁单轴抗压强度,常取值为岩石的单轴抗压强度。

对层状岩体而言,由于测量节理面的粗糙度系数存在诸多困难,无法直接应用式(4),Duveau & Shao^[7]基于数十组试验,对不同围压条件下节理面的抗剪强度进行拟合,并吸取了 Barton 非线性强度公式的优点,提出更为一般的非线性形式的节理强度准则:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[J_c \lg \left(\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_n} \right) + \alpha \right] \quad (5)$$

式中: σ_{ci} 为加载方向垂直于节理面时岩石的单轴抗压强度; J_c 和 α 为节理面强度参数,类似于式(4)中的 JRC 和 φ_b 。

将式(1)、式(2)代入式(5),得到:

$$\begin{aligned} (\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta &= \left[(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta \right] \\ \tan \left\{ J_c \lg \left[\frac{2\sigma_{ci}}{(\sigma_1 + \sigma_3) - (\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta} \right] + \alpha \right\} & \end{aligned} \quad (6)$$

通过迭代计算,可得到考虑节理面非线性剪切效应岩体破坏时的最大主应力。若节理面的黏聚力 $c_j = 0$, $J_c = 0$, $\alpha = \varphi_b$, 则式(6)可退化为 Jaeger 强度准则。

1.2 各向异性岩体强度准则

当节理倾角 β 趋向于 0° 或处于 $[(90^\circ - \varphi_b), 90^\circ]$ 区间时,通常是以岩石的剪切破坏为主,而不会产生沿节理面的滑移破坏。在此情况下,破坏时的最大主应力 σ_1 取决于岩石的力学参数。在 Jaeger 的单弱面理论中,他认为岩石是各向同性的,破坏时的最大主应力 σ_1 不随节理倾角 β 的变化而变化。事实上, Borecki&Kwasniewski 的分析表明, $\sigma_{c(0^\circ)}/\sigma_{c(90^\circ)}$ 的范围分布为 $0.6 \sim 1.33$ ^[10]。Jaeger 的强度准则仅采用岩石的强度参数(常量)而没有考虑倾角对岩石强度的影响是过于简化的。

为正确反映不同倾角 β 对岩体强度的影响,采用改进型的 Hoek-Brown 强度准则^[8]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{c(\beta)} \left[k_\beta m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{c(\beta)}} + 1 \right]^{0.5} \quad (7)$$

式中: $\sigma_{c(\beta)}$ 为节理倾角为 β 时岩石的单轴抗压强度; k_β 为描述强度各向异性的参量; m_i 为材料常数。当最大主应力的加载方向垂直于节理面时, $k_\beta = 1$, $\sigma_{c(90^\circ)}$ 为完整岩石的单轴抗压强度。

对含有不同倾角 β 的试样进行单轴压缩试验,可确定 $\sigma_{c(\beta)}$, 或通过式(8), 对至少 3 个试样(通常 $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 90^\circ$) 的强度(通过单轴压缩试验确定)进行拟合确定:

$$\sigma_{c\beta} = A - D [\cos 2(\beta_m - \beta)] \quad (8)$$

式中: β_m 为单轴抗压强度最小值对应的倾角 β (通常为 $30^\circ \sim 45^\circ$); A 、 D 为拟合系数。

k_β 可通过下述三个步骤确定^[8]: (1) 由垂直于节理面的单轴抗压强度试验确定 σ_{ci} ; (2) 视 $k_{90} = 1$, 利用 Hoek^[11] 提供的拟合程序, 利用 4 个试样在不同围压条件下的单轴抗压试验结果拟合确定 m_i ; (3) 对于其他倾角 β , 利用已得到的 σ_{ci} 、 m_i , 通过式(7)拟合试验数据得到。围压对确定 m_i 、 k_β 有重要的影响, 根据 Hoek & Brown 的理论^[12], 用来确定参数的三轴压缩试验, 其围压范围为 $(0 \sim 0.5\sigma_{ci})$ 。

式(6)、式(7)为本文采用的强度准则, 共包含 7 个参数, 即节理面强度参数 a 、 b 、 σ_{ci} 与岩石强度参数 k_β 、 m_i 、 A 、 D 。

2 试验分析

2.1 Angers 页岩三轴试验

为研究 Angers 页岩强度的各向异性, 对不同倾角、不同围压条件下的页岩试样开展 78 组三轴抗压强度试验。倾角 β 分别为 0° 、 10° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 80° 、 90° , 围压 σ_3 分别为 0 、 5 、 10 、 20 、 30 、 40 MPa, 具体的试验数据详见文献^[5], 本文仅对其破坏时的强度进行分析。

不同倾角、不同围压条件下的页岩试样在三轴试验中的观测结果总结如下。

(1) 当 $\beta = 90^\circ$ 时, 剪切破坏带集中在岩石内且与围压无关, 剪切带的倾角基本呈 25° 。

(2) 当 $\beta = 0^\circ$ 时, 破坏模式与围压密切相关, 试样在低围压下沿节理面爆裂破坏, 试样在高围压下表现出混合破坏模式, 节理面上有爆裂破坏, 岩石有剪切破坏区。

(3) 当 $30^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$ 时, 试样基本沿节理面滑移破坏。

(4) 当 β 为其他角度时, 试样破坏模式较为复杂, 有沿节理面的滑移破坏、爆裂破坏, 也有岩石的剪切破坏。

(5) 当 $30^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$ 时, 试样均沿节理面滑移破坏。图 4 为倾角 $\beta = 30^\circ$ 时节理面的剪切强度曲线。可以看出, 采用非线性强度准则能较好地描述节理面的强度。修正的 Hoek-Brown 强度准则所需参数如图 5 所示, 确定其余强度准则所需的材料参数如表 1 所列。在不同倾角、不同围压条件下, 试样破坏时的应力试验值与准则计算值比较如图 6 所示。

相较于 Jaeger 强度准则, M-Jaeger 强度准则在计算岩石的破坏强度时更为接近试验值。因此, 本文采用的考虑岩石强度各向异性模型的计算结果最接近试验值; 而计算试样沿节理面滑移破坏的强度时, 非线性强度模型的计算结果较之 Mohr-Coulomb 准则的计算结果更接近试验值。特别是在破坏模式转换的区域, 以 Mohr-Coulomb 准则计算的结果, 偏差较大, 在低围压条件下表现得更为明显。这说明低围压下应更加注意节理面的粗糙度对其抗剪强度的影响。在破坏模式的转换区域 ($10^\circ \leq \beta \leq 25^\circ$, $65^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$), 由于破坏模式较为复杂, 不是单一的岩石破坏或沿节理面的破坏, 而是两者的结合, 而模型计算的出发点是两者分开, 因此存在一定的偏差。

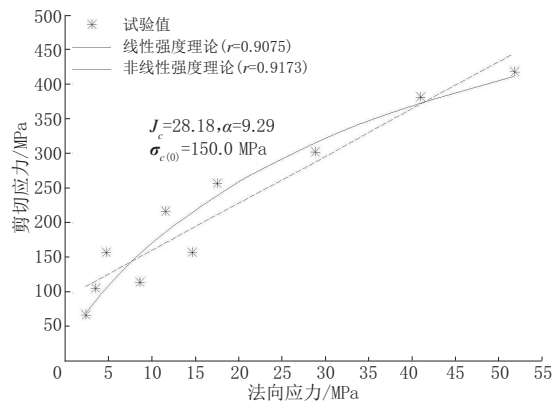


图 4 $\beta=30^\circ$ 时节理面的抗剪强度试验值与计算值

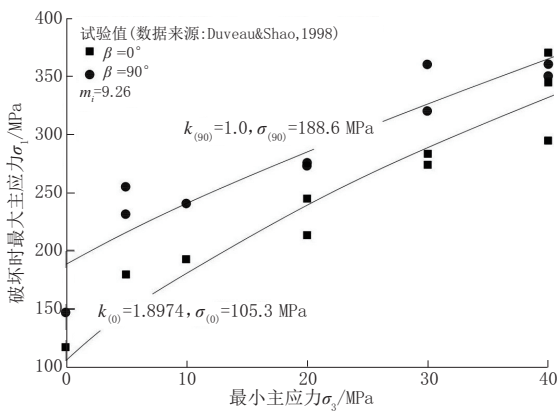


图 5 m_i 与 k_β 的取值

表 1 Angers 页岩的材料参数

准则	参数及取值
Jaeger	$c_0=26.1$ MPa, $\tan\varphi_0=0.94$, $c_f=4.01$ MPa, $\tan\varphi_f=0.30$
M-Jaeger	$c_0=26.1$ MPa, $\tan\varphi_0=0.94$, $c_{90}=26.1$ MPa, $\tan\varphi_{90}=0.86$, $c_f=4.01$ MPa, $\tan\varphi_f=0.30$
Duveau & Shao	$c_0=26.1$ MPa, $\tan\varphi_0=0.94$, $c_{90}=26.1$ MPa, $\tan\varphi_{90}=0.86$, $a=28.12$, $b=9.29$, $\sigma_{c0}=150$ MPa

2.2 Arora 类岩材料

Arora 采用砂浆制成节理岩体,在三轴试验条件下研究节理倾角、节理数量、围压与岩体破坏强度之间的关系,本文仅对含一条节理岩体的试验数据进行分析。完整材料的力学性质参数为:岩石单轴抗压强度为 11.30 MPa,抗拉强度为 1.95 MPa,基本摩擦角为 35° ;节理面的力学性质参数为:基本摩擦角 37° ,黏聚力为 0 MPa。

当 $40^\circ \leq \beta \leq 70^\circ$ 时,试样均沿节理面滑移破坏。图 7 为不同围压条件下节理面的剪切强度曲线。可以看出,采用非线性强度准则能较好地描述节理面的强度。修正的 Hoek-Brown 强度准则所需参数如图 8 所示。在不同倾角、不同围压条件下,试样破坏时的应力试验值与准则计算值比较如图 9 所示。

不考虑倾角对岩石破坏强度影响的准则,如 Jaeger、M-Jaeger、Duveau & Shao,它们的计算值与试

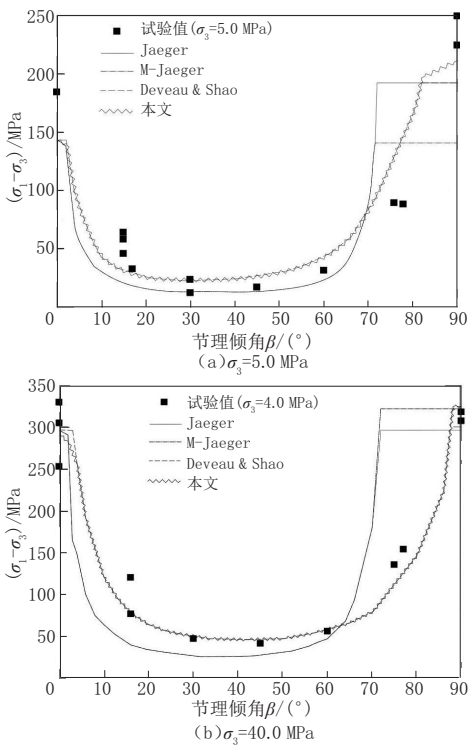


图 6 不同围压条件下试样破坏时的应力试验值与准则计算值比较
验值偏离较大,特别是在低围压条件下差异最为明显。这说明随着围压的增大,岩体趋于各向同性($\sigma_3=7.0$ MPa 时,破坏强度基本相同,表现出各向同性性质);在计算试样沿节理面滑移破坏的强度时,非线性强度模型的计算结果较之 Mohr-Coulomb 准则的计算结果更接近试验值。

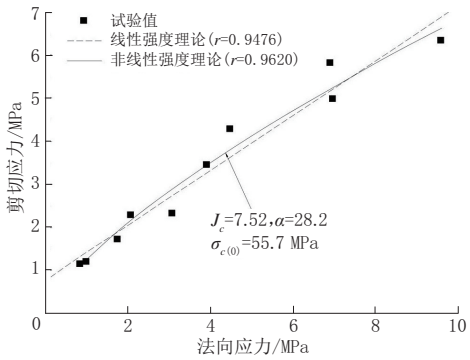


图 7 不同围压条件下节理面的抗剪强度试验值与计算值

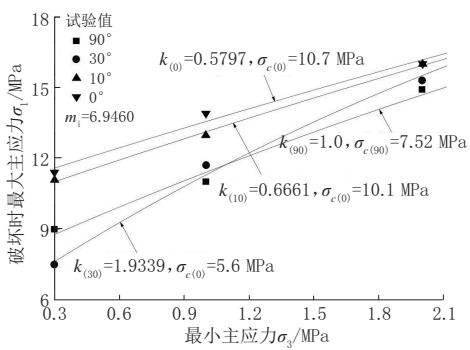


图 8 m_i 与 k_β 的取值

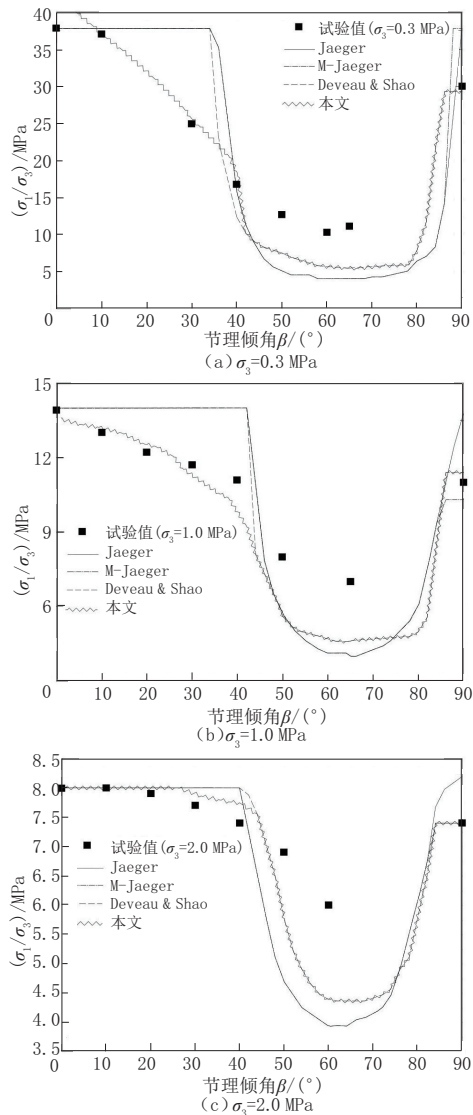


图9 不同围压条件下试样破坏应力试验值与准则计算值比较

从上述两例可以看出,描述节理面强度采用非线性强度准则更为合适,其缺陷在于需要额外的材料参数(单轴抗压强度)。对岩石而言,在低围压下,节理倾角对其强度影响较大,但在高围压下,节理对其强度影响被大大削弱。

同时可知,在破坏模式的转换区域,准则计算值与试验值的偏差较大。究其原因,在该区域内,破坏模式往往是复杂的,是节理面与岩石共同作用的结果,而所有的准则都是将岩体的破坏模式分为独立的两种(即沿节理面破坏和岩石破坏),与实际情况存在一定的差异。因此,计算值会偏离试验值。

3 结论

节理方位的不同,导致岩体的强度存在各向异性,通常 $\sigma_{c(0^\circ)} \neq \sigma_{c(90^\circ)}$,Jaeger强度准则忽视了由节理倾角引起的岩体强度各向异性,计算值与试验值存

在偏差。同样,对于滑移破坏模式而言,受到节理面粗糙度的影响,其强度特征通常呈非线性特征,而Mohr-Coulomb准则是直线形式的强度包络线。基于上述分析,采用Hoek-Brown强度准则描述非滑移破坏模式(岩石的破坏)的强度,采用非线性的强度准则描述滑移破坏模式(节理面的破坏)的强度。

采用类似Barton节理峰值抗剪强度准则的非线性强度准则来考虑节理面粗糙度造成的影响。沿节理面滑移破坏时,强度的控制因素除粗糙度、摩擦角外,还与围压有关。

采用Hoek-Brown准则描述非滑移破坏的岩体强度,引入新的参数 k_β ,考虑节理倾角造成的岩体强度各向异性,该参数通过拟合三轴试验数据获得。当加载方向与节理面垂直时, $k_\beta=1$,此时的岩石强度与完整岩石的单轴抗压强度相等,即 $\sigma_{c(90^\circ)} = \sigma_{ci}$ 。

新准则与Jaeger准则相比较,需要额外的参数,但准则计算值更为接近试验实测值。

参考文献:

- [1] 张亚君,董彤,董宏晓,等.一种适用于层状岩体的各向异性强度准则[J].岩石力学与工程学报,2024,43(10):2511-2519.
- [2] 余周武,王小威.考虑层状岩体各向异性强度的地下厂房稳定分析[J].人民长江,2018,49(11):57-63.
- [3] 贾善坡,邹臣颂,吴渤,等.考虑岩体各向异性强度的隧洞围岩稳定性分析[J].防灾减灾工程学报,2013,33(2):79-184;189.
- [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 and Mining Sciences, 2006, 43(8): 1163-1181.
- [5] DUVEAU G, SHAO J, HENRY J P. Assessment of Some Failure Criterion for Strongly Anisotropic Geo-materials[J]. Mechanics of Mohesive-Frictional Materials, 1998, 3(1): 1-26.
- [6] JAEGER J C. Shear Failure of Anisotropic Rocks[J]. Geol Mag, 1960, 97(1): 65-72.
- [7] DUVEAU G, SHAO J. A Modified Single Plane of Weakness Theory for the Failure of Highly Stratified Rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(6): 807-813.
- [8] SAROGLOU H, TSIAMBAOS G. A Modified Hoek-Brown Failure Criterion for Anisotropic Intact Rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(2): 223-234.
- [9] BARTON N, CHOUHEY V. The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1977, 10(1/2): 1-54.
- [10] BORECKI M, KWASNIEWSKI M. Experimental and Analytical Studies on Compressive Strength of Anisotropic Rocks[C]. Proceeding of the 7th Plenary Scientific Session of the International Bureau of Rock Mechanics, 1981: 23-49.
- [11] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 Edition[C]. Proceeding of the NARMS - TAC Conference, Toronto, 2002: 267-273.
- [12] HOEK E, BROWN E T. Underground Excavations in Rock[M]. Chemical & Rubber Company Press: Calabasas, 1980.