

基于弹性应变能三维 Hoek-Brown 准则修正

郭建强, 卢雪峰, 陈建行, 蒋建国, 杨前冬, 蒋磊, 伍安杰

(贵州大学 土木工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 基于能量转化是物质物理过程本质属性,从能量角度对 H-B 准则进行了研究。首先阐明了 H-B 准则在判断材料破坏时的能量机制,揭示其既是经验型强度准则,更是弹性应变能表示的能量型强度准则,据此得出提高 H-B 强度准则计算精度的关键所在;然后根据三维 H-B 准则与弹性应变能数学表达式之间关系,引入材料变形参数,建立仅有 3 个参数的修正后三维 H-B 准则;进一步理论分析表明该准则是一族以变形参数为参数的强度准则集合,变形参数等于 0.5 时蜕化为三维 H-B 准则;最后的真三轴试验计算表明,修正后三维 H-B 准则可较好地描述岩石的破坏特性,计算结果较为精确。

关键词: 岩石力学; 三维 H-B 强度准则; 弹性应变能; 泊松比
中图分类号: TU 443 **文献标志码:** A

Modification of Three Dimension Hoek-Brown Criterion Based on Elastic Strain Energy

GUO Jianqiang, LU Xuefeng, CHEN Jianhang, JIANG

Jianguo, YANG Qiantong, JIANG Lei, WU Anjie

(College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The H-B strength criterion was revised from the energy point of view to improve its accuracy and applicability, which was different from the previous methods of improving rock mass characteristic parameters. Based on the fact that elastic strain energy release was the intrinsic mechanism of rock failure, researches were carried out: The general expression of existing H-B criterion was summarized and its energy mechanism in determining material failure was clarified, revealing that the H-B criterion was both an empirical strength criterion and an energy-type strength criterion expressed by elastic strain energy, which led to the key to

improving the calculation accuracy of the H-B strength criterion. The H-B criterion was obtained based on the best fit of the strength data the relationship between the criterion and the theoretical expression of elastic strain energy, introducing material deformation parameters to replace Poisson's ratio in elastic strain energy to establish a modified three-dimension H-B criterion including only three parameters. The further theoretical analysis shows that the modified three-dimension H-B criterion is a set of strength criteria with deformation parameters as parameters, when the deformation parameter is equal to 0.5, it degenerates into the existing three-dimensional H-B criterion; Finally, the true triaxial test calculations show that the modified three-dimension H-B criterion can better describe the failure characteristics of the rock, the calculation results are more accurate, and the internal mechanism that produces the above results is analyzed.

Key words: rock mechanic; three-dimension Hoek-Brown criterion; elastic strain energy; Poisson's ratio

经过 40 多年发展, Hoek-Brown(H-B) 准则已广泛地应用于基础工程、边坡工程、采矿工程及地下工程等,也是迄今为止应用最为广泛、影响最大的岩石强度准则^[1]。为考虑中间主应力影响, Pan 等^[2]与 Singh 等^[3]分别提出了三维 H-B 强度准则; Zhang 等^[4-5]提出了一个真正的三维 H-B 强度准则,并对其进行了修正;姜华^[6]建立了一种简便的岩石三维 H-B 强度准则。同时,为使选取的岩石和岩体参数尽可能地反映工程现场的实际情况, Hoek 等^[7-10]结合岩体评分系统(RMR)与地质强度指标(GSI),引入反映爆破影响和应力释放的扰动参数 D 来确定岩体参数;巫德斌等^[11-14]给出了 GSI 不同的定量确定方法; Sonmez 等^[15]考虑了开挖方式的扰动系数 d_t , 并给出

收稿日期: 2021-02-02

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAK05B00); 自然科学基金(41372356)

第一作者: 郭建强(1980—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为岩石力学试验、理论、数值分析与工程安全性分析方面的教学与研究工作。E-mail: dianxiyou@163.com



论文
拓展
介绍

了岩体参数确定公式;闫长斌等^[16]基于岩体完整性系数 K_v ,建立了一个修正的岩体参数确定方法。尽管这些方法从不同程度上提高了H-B准则的计算精度,但由于需考虑的因素相对较多,因此在难以精准获得每个影响因子条件下,这可能导致计算结果与实际差别较大。

针对这种情况,基于能量转化是物质物理过程本质属性,首先阐明已有H-B准则能量机制;进而在此基础上,引入一个能够反映岩体变形特性参数;然后以三维H-B准则^[4]为基础,建立修正后三维H-B准则。

1 基于弹性应变能的H-B准则分析

1.1 H-B准则

Hoek和Brown^[17-18]提出的H-B岩石强度准则,如下所示:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{m_i (\sigma_3 / \sigma_c) + 1} \quad (1)$$

式中: σ_1, σ_3 分别为岩石破坏时最大、最小主应力; σ_c 为单轴抗压强度; m_i 为岩石量纲为一的经验参数,反映了岩石的软硬程度,取值范围为0.001~25。

1992年Hoek等^[19]对H-B岩石强度准则进行了改进,提出适用于岩石和岩体的广义H-B岩体强度准则,表达式如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c (m_b (\sigma_3 / \sigma_c) + s)^a \quad (2)$$

式中: m_b, s, a 为反映岩体特征经验参数; s 反映了岩体破碎程度,取值范围为0~1.0,对于完整岩体(岩石), $s=1.0, a=0.5$ 。

为了体现中间主应力对岩石强度影响,国内外学者提出了三维H-B准则。Pan和Hudson三维H-B准则^[2]、Singh三维H-B准则^[3]、Zhang和Zhu三维H-B准则^[4]及Zhang三维H-B准则^[5],依次为

$$\frac{3J_2}{\sigma_c} + m_b \left(\frac{\sqrt{3J_2}}{2} - \frac{I_1}{3} \right) - s\sigma_c = 0 \quad (3)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left[\frac{m_b (\sigma_2 + \sigma_3)}{2\sigma_c} + s \right]^a \quad (4)$$

$$\frac{3J_2}{\sigma_c} + m_i \left(\frac{\sqrt{3J_2}}{2} + \frac{\sin \theta_\sigma \sqrt{J_2}}{\sqrt{3}} - \frac{I_1}{3} \right) - s\sigma_c = 0 \quad (5)$$

$$\sqrt{J_2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (6)$$

$$A = 3/\sigma_c \quad (7)$$

$$B = (\sqrt{3}/2 + \sin \theta_\sigma / \sqrt{3}) m_i \quad (8)$$

$$C = -(s\sigma_c + I_1 m_i / 3) \quad (9)$$

$$\frac{1}{\sigma_c^{(1/a-1)}} (\sqrt{3J_2})^{1/a} + m_b \left(\frac{\sqrt{3J_2}}{2} + \frac{\sin \theta_\sigma \sqrt{J_2}}{\sqrt{3}} - \frac{I_1}{3} \right) - s\sigma_c = 0 \quad (10)$$

通过数学变换,已有H-B准则式(1)~(10),均可用式(11)~(14)中任意公式进行表示,即剪切面的广义剪应力 q 不小于广义抗剪强度的 $\sqrt{3}$ 时,材料就会发生破坏。比如,Zhang和Zhu三维H-B准则式(5),可用式(6)表示。

$$\sqrt{J_2} = f(I_1, I_2, \theta_\sigma, m_b, s, a) \quad (11)$$

$$J_2 = f^2(I_1, I_2, \theta_\sigma, m_b, s, a) \quad (12)$$

$$q = \sqrt{3J_2} = \sqrt{3} f(I_1, I_2, \theta_\sigma, m_b, s, a) \quad (13)$$

$$q^2 = 3f^2(I_1, I_2, \theta_\sigma, m_b, s, a) \quad (14)$$

式中: J_2 为应力偏量第二不变量; I_1 为应力张量第一不变量; I_2 为应力张量第二不变量; θ_σ 为罗德角; q 称为广义剪应力或应力强度;函数 f 称为与材料的应力状态相对应的广义抗剪强度。

1.2 弹性应变能

弹性应变能表达式如下:

$$U^e = \frac{1}{2E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)) = \frac{3}{2E} J_2 - \frac{3}{2E} \frac{1-2\nu}{3} I_2 = U^{eJ_2} + U^{eI_2} \quad (15)$$

$$U^{eI_2} = -\frac{1-2\nu}{2E} I_2 \quad (16)$$

$$U^{eJ_2} = \frac{3}{2E} J_2 \quad (17)$$

式中: ν 为泊松比; E 为弹性模量; U^{eJ_2}, U^{eI_2} 分别为偏量弹性应变能与张量弹性应变能^[20-22]。

由式(15)可知: $\nu=0.5$ 时, $U^{eI_2}=0, U^e=U^{eJ_2}$,此时弹性应变能与 E 及 J_2 有关,与 I_2 无关; $\nu \neq 0.5$,则 $U^{eI_2} \neq 0, U^e = U^{eJ_2} + U^{eI_2}$,这种情况下 U^e 与 ν, E, I_2 及 J_2 有关。基于弹性应变能是岩石破坏的内在机理^[20-23], $\nu \neq 0.5$ 时仅考虑 J_2 与 E ,而不考虑 ν 及 I_2 ,将会导致计算结果出现较大误差。

1.3 基于弹性应变能H-B准则分析

根据热力学第一定律,任何物质任何物理过程(岩石破坏过程也属于物质物理过程)均应满足能量守恒,则

$$U = U^e + U^d = (U^{eJ_2} + U^{eI_2}) + U^d \quad (18)$$

式中: U^d 为耗散能,满足熵增原理^[23]。

式(11)左右两边同时乘以 $\sqrt{3/2E}$,可得弹性应变能表示的已有H-B准则一般表达式,即

$$\sqrt{\frac{3}{2E}} \sqrt{J_2} = \sqrt{U^{eJ_2}} = \sqrt{\frac{3}{2E}} \sqrt{J_2 - \frac{1-2 \times 0.5}{3} I_2} = \sqrt{U^e} \Big|_{\nu=0.5} = \sqrt{\frac{3}{2E}} f(I_1, I_2, \theta_\sigma, m_b, s, a) \quad (19)$$

基于弹性应变能是岩石破坏的内在机理^[20-23],显然弹性应变能(U^e)释放时不会仅释放偏量弹性应变能(U^{eJ_2})或仅释放张量弹性应变能(U^{eI_2}),且 U^{eJ_2} 与 U^{eI_2} 同时释放时满足能量守恒(考虑耗散能 U^d 计算准确)。基于此,由式(19)可得已有H-B准则特点:

(1)从弹性应变能角度揭示了已有H-B准则既是经验型强度准则,又是能量型强度准则。

(2)已有H-B准则将岩石在任意应力状态下破坏时泊松比均看作0.5,这也正是提高已有H-B准则精度的关键所在。

同理,式(6)左右两边同时乘以 $\sqrt{3/2E}$,可得弹性应变能表示的三维H-B准则^[7],见式(20)。

$$\sqrt{\frac{3}{2E}} \sqrt{J_2} = \sqrt{\frac{3}{2E}} \sqrt{J_2 - \frac{1-2 \times 0.5}{3} I_2} = \sqrt{\frac{3}{2E}} \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (20)$$

2 基于弹性应变能三维H-B准则

2.1 三维H-B准则建立

为了进一步提高Zhang-Zhu三维H-B准则^[4]的计算精度,从广义抗剪强度与弹性应变能两个角度对三维H-B准则分别进行修正。

2.1.1 基于广义抗剪强度三维H-B准则修正

为了提高三维H-B准则精度,对广义抗剪强度进行修正,修正后广义抗剪强度(H)如下:

$$H(I_1, I_2, \theta_\sigma, m_b, s, a) = f^2(I_1, I_2, \theta_\sigma, m_b, s, a) + g \quad (21)$$

联立式(11)与式(21),可得

$$J_2 = f^2(I_1, I_2, \theta_\sigma, m_b, s, a) + g \quad (22)$$

式中: g 称为广义抗剪强度的修正函数。显然,通过不同的修正函数 g ,可得不同的修正后三维H-B准则。参考弹性应变能表达式,本文中选择的修正函数 g 如下:

$$g = \frac{1-2\nu_{\text{hb}}}{3} I_2 \quad (23)$$

式中: ν_{hb} 是由试验数据拟合而得的材料参数。考虑到 g 源于材料的弹性应变能,参考理想弹塑性材料泊松比 $\nu = -1.0 \sim 0.5$,初步提出 $\nu_{\text{hb}} = -1.0 \sim 1.0$,并通过真三轴试验验证 ν_{hb} 取值可行性。

联立式(5)、式(22)及式(23),从广义抗剪强度

方面进行修正,得修正后三维H-B准则如下:

$$\frac{3J_2^{g/}}{\sigma_c} + m_i \left(\frac{\sqrt{3J_2^{g/}}}{2} + \frac{\sin \theta_\sigma \sqrt{J_2^{g/}}}{\sqrt{3}} - \frac{I_1}{3} \right) - s\sigma_c = 0 \quad (24)$$

其中,

$$\sqrt{J_2^{g/}} = \sqrt{J_2 - \frac{1-2\nu_{\text{hb}}}{3} I_2} \quad (25)$$

2.1.2 基于弹性应变能H-B准则修正

基于弹性应变能是岩石破坏的内在机理^[20-23],以Zhang-Zhu三维H-B准则^[4]为基础(由2.3理论分析可知该准则也是能量型强度准则),提出当储存的弹性应变能(U^e)达到某一临界值岩石就开始破坏,并据此建立弹性应变能表示的修正后三维H-B准则,见式(26),其左右两边同时除以 $\sqrt{3/2E}$,可得应以力不变量表示的修正后三维H-B准则,见式(27)。

$$\sqrt{U^e} = \sqrt{\frac{3}{2E}} \sqrt{J_2 - \frac{1-2\nu}{3} I_2} = \sqrt{\frac{3}{2E}} \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (26)$$

$$\sqrt{J_2 - \frac{1-2\nu}{3} I_2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (27)$$

一方面,岩石单轴试验确定泊松比能否适用于复杂的应力状态尚无明确结论^[24],这表明岩石的泊松比将随应力水平改变而变化,即非理想弹塑性材料岩石的泊松比确定较为复杂;另一方面,若根据试验数据确定的泊松比大于0.5,则修正后三维H-B准则在应用过程中将存在一定理论问题。考虑到H-B准则是由 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 空间中的强度数据的最佳拟合得到的经验型强度准则,其材料参数均由拟合而得。因此,为克服式(26)~式(27)中存在的理论问题,参考弹性应变能与三维H-B准则的数学表达式,给出一个拟合方程,从而得到可完全看作是经验型强度准则的修正后三维H-B准则。为了以示区分,用式(25)中 ν_{hb} 替代式(26)或(27)中由试验数据而得 ν ,则修正后三维H-B准则如下:

$$\sqrt{J_2 - \frac{1-2\nu_{\text{hb}}}{3} I_2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (28)$$

$$\frac{3J_2^{g/}}{\sigma_c} + m_i \left(\frac{\sqrt{3J_2^{g/}}}{2} + \frac{\sin \theta_\sigma \sqrt{J_2^{g/}}}{\sqrt{3}} - \frac{I_1}{3} \right) - s\sigma_c = 0 \quad (29)$$

由于式(28)或式(29)中材料参数 ν_{hb} 源于弹性应变能,提出 ν_{hb} 反映了材料侧向变形与轴向变形比值,其取值与式(25)中 ν_{hb} 相同。

由式(15)、式(26)~式(29)可看出,修正后三维H-B准则具有如下几个特点:

(1)已有三维 H-B 准则在估计岩体强度时需测定多个参数,而修正后三维 H-B 准则仅需 3 个参数 m_i 、 s 及 ν_{hb} 就能对岩体强度进行估计。比如,已有三维 H-B 准则虽仅有 3 个参数 m_b 、 s 及 a ,但为了确定 m_b 需要测定岩石单轴抗压强度、 RQD 、非连续面间距与条件及地下水等。因此,已有三维 H-B 准则需要实际测定的参数远多于 3 个。

(2) $\nu_{hb}=0.5$ 时,修正后三维 H-B 准则蜕化为 Zhang-Zhu 提出的三维 H-B 准则^[4],因此,该准则仅是修正后三维 H-B 准则的特例。可见,从某种程度上来说, ν_{hb} 无论大于 0.5,还是小于 0.5,修正后三维 H-B 准则从一定程度上也反映了弹性应变能是岩石破坏的内在机理。

综上所述,修正后三维 H-B 准则既避免了将岩石破坏时泊松比恒看作 0.5,又可完全利用 H-B 准则(包括三维 H-B 准则)已有研究成果,便于其工程应用(与其他新建立的强度准则相比)。

2.2 H-B 准则理论分析

图 1 为修正后三维 H-B 准则在 π 平面屈服轨迹。其中,括号外与括号内变形参数 ν_{hb} 分别对应于 $I_2 < 0$ 及 $I_2 > 0$ 。以 $I_2 < 0$ 为例,由图 1 修正后三维 H-B 准则屈服轨迹,可以看出:

(1)不同材料变形参数 ν_{hb} 对应的 π 平面上屈服轨迹较为相似,因此修正后三维 H-B 准则可看作是一族以 ν_{hb} 为参数的强度准则集合,而非单一强度准则。文献[4]提出的三维 H-B 准则仅是修正后三维 H-B 准则 $\nu_{hb}=0.5$ 时的特例。

(2) $I_2 < 0$ 时,变形参数 ν_{hb} 越小计算结果越安全;反之, $I_2 > 0$ 时,变形参数 ν_{hb} 越大计算结果越安全。

(3)与文献[4]提出的三维 H-B 准则相比,修正后三维 H-B 准则结果如下:① $0 < \nu_{hb} < 0.5$ 、 $I_2 < 0$,或 $\nu_{hb} > 0.5$ 、 $I_2 > 0$ 时,修正后三维 H-B 准则计算结

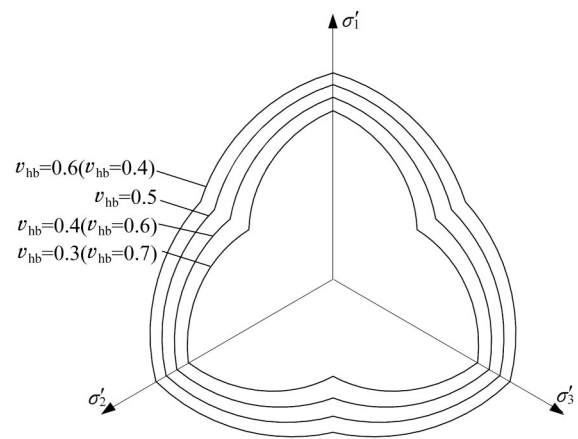


图 1 修正后三维 H-B 准则 π 平面屈服轨迹

Fig.1 Trace of yield surfaces on π plane of revised three-dimensional H-B strength criterion

果偏小。② $0 < \nu_{hb} < 0.5$ 、 $I_2 > 0$,或 $\nu_{hb} > 0.5$ 、 $I_2 < 0$ 时,修正后三维 H-B 准则计算结果偏大。

2.3 三维 H-B 准则验证

由于文献[4]已对三维 H-B 准则进行了研究,且其仅为修正后三维 H-B 准则的特例。因此,本文仅采用修正后三维 H-B 强度准则对闪长岩、花岗岩、白云岩及粗面岩真三轴强度进行计算,结果见表 1~3 及图 2~5。

表 1 修正后三维 H-B 准则计算参数

Tab. 1 Parameters in generalized H-B strength criterion

岩石	文献[4]			修正后三维 H-B 准则	
	σ_c/MPa	s	最优 m_i	材料变形参数 ν_{hb}	
				单个变形参数	两个变形参数
闪长岩	165	1	31	0.45	0.55 & 0.45
花岗岩	201	1	35	0.42	0.53 & 0.38
白云岩	257	1	10	0.49	0.53 & 0.48
粗面岩	100	1	11	0.49	0.50 & 0.48

根据文献[4],最优 m_i 由式(5)对八面体剪应力试验值与理论值最佳数值拟合所得。

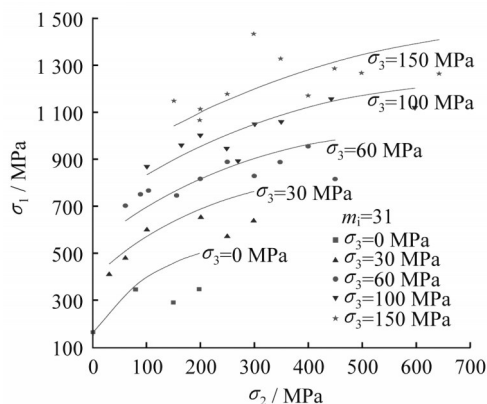
表 2 变形参数分组拟合

Tab. 2 Group fitting of deformation parameters

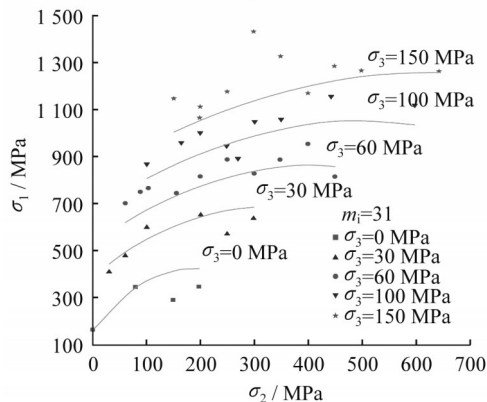
σ_3 /MPa	σ_2 /MPa		σ_3 /MPa	σ_2 /MPa		σ_3 /MPa	σ_2 /MPa		σ_3 /MPa	σ_2 /MPa	
	闪长岩			花岗岩			粗面岩			白云岩	
	$\nu_{\text{hb}1}=$ 0.55	$\nu_{\text{hb}2}=$ 0.45		$\nu_{\text{hb}1}=$ 0.53	$\nu_{\text{hb}2}=$ 0.38		$\nu_{\text{hb}1}=$ 0.50	$\nu_{\text{hb}2}=$ 0.48		$\nu_{\text{hb}1}=$ 0.53	$\nu_{\text{hb}2}=$ 0.48
0	0~79	149~229	0	—	0~100	45	45~281	—	25	25~229	272
30	30~100	200~298	2	2~18	40~100	60	60~83	133~306	45	45~266	294
60	60~199	249~449	20	20~61	79~202	75	75~108	147~363	65	65~208	262~393
100	100~199	248~597	38	38~103	119~198	100	100~126	171~384	85	85~153	233~445
150	150~348	399~642	60	60~114	180~249	/	/	/	105	105~205	268~415
/	/	/	77	77~142	214~310	/	/	/	125	125~239	293~516
/	/	/	100	100~259	312	/	/	/	145	—	253~455

表3 不同准则计算平均误差
Tab.3 Average error error of σ_1 calculation by criterion

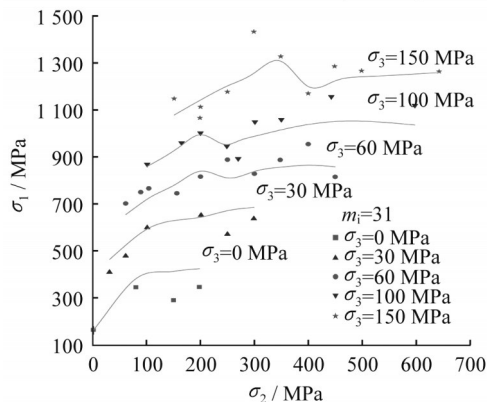
岩石	平均误差 $\Delta\chi/\%$		
	三维H-B 准则 ^[4]	修正后三维H-B准则	
		单个变形参数	两个变形参数
闪长岩	9.30	7.92	6.67
花岗岩	9.88	8.40	5.13
粗面岩	4.65	3.70	3.32
白云岩	3.70	3.67	2.39



a 文献[4]准则($v_{hb}=0.5$)



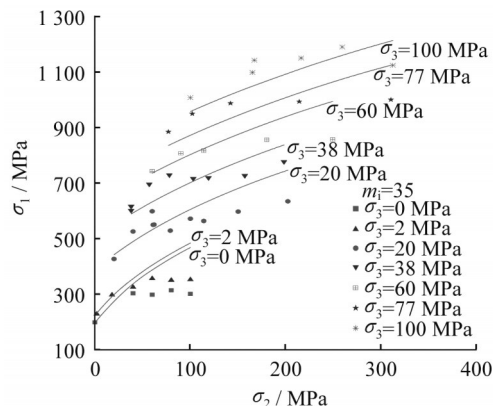
b 修正后三维H-B准则($v_{hb}=0.45$)



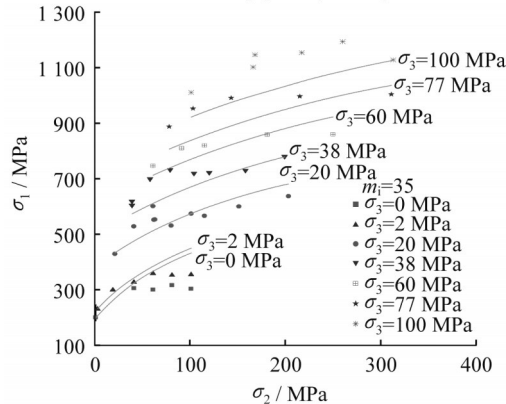
c 修正后三维H-B准则($v_{hb}=0.55, 0.45$)

图2 三维H-B准则计算结果(闪长岩)

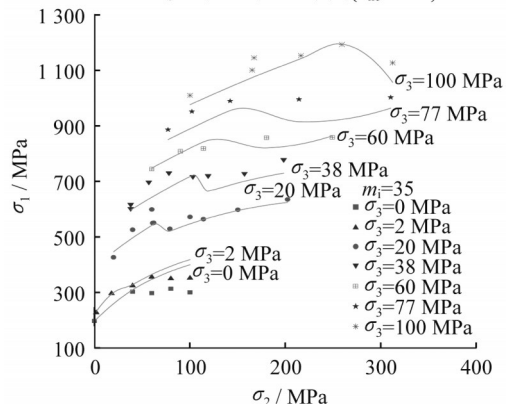
Fig.2 3D H-B criterion calculation results(KTB amphibolite)



a 文献[4]准则($v_{hb}=0.5$)



b 修正后三维H-B准则($v_{hb}=0.42$)



c 修正后三维H-B准则($v_{hb}=0.53, 0.38$)

图3 三维H-B准则计算结果(花岗岩)

Fig.3 3D H-B criterion calculation results(Westerly granite)

采用平均误差评价修正后三维H-B准则计算误差(见表3)。

$$\Delta\chi_i = \frac{\sigma_{syi} - \sigma_{li}}{\sigma_{syi}} \times 100\% \quad (30)$$

$$\overline{\Delta\chi} = \frac{\sum_i |\Delta\chi_i|}{n} \quad (31)$$

式中: n 为试样数量; σ_{syi} 为第 i 试样试验值; $\Delta\chi_i$ 为第 i 试样误差; $\overline{\Delta\chi}$ 为全部试验值与理论值的平均误差。

修正后三维H-B强度准则材料变形参数拟合方法:依据 σ_c 、 s 、 m_i 及最小主应力与中间主应力计算 σ_{li} ,取与平均误差 $\overline{\Delta\chi}$ 最小值对应 ν_{hb} 为拟合值。

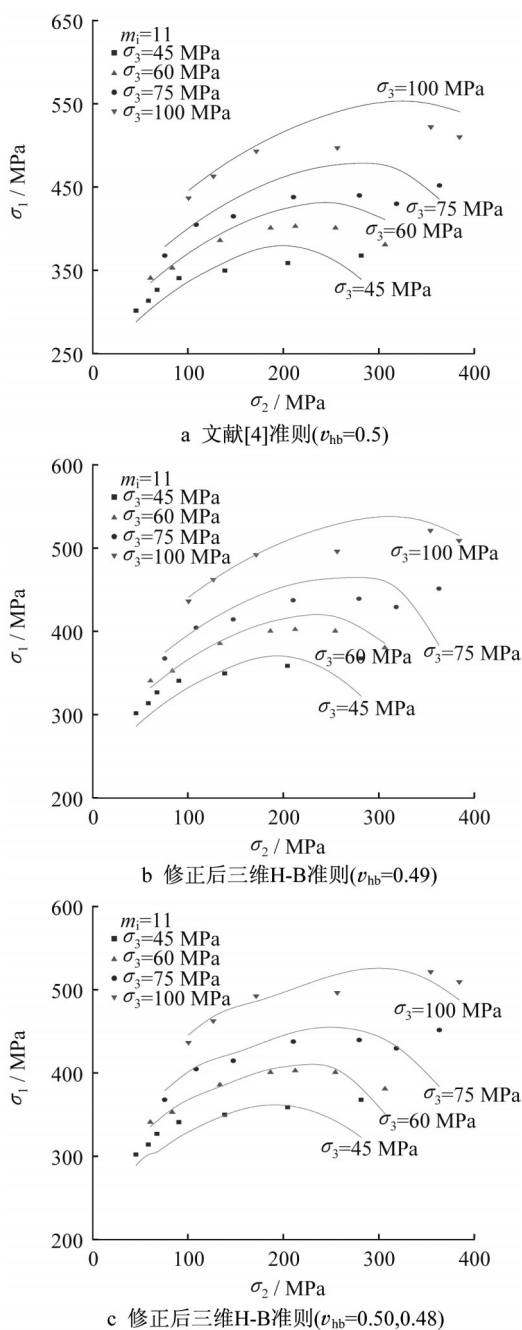


图4 修正后三维H-B准则计算结果(粗面岩)

Fig.4 3D H-B criterion calculation results(Mizuo trachyte)

修正后三维H-B准则材料参数 ν_{hb} 可采用1个或多个取值原因:材料参数 ν_{hb} 可能与应力水平有关,而真三轴试验时的应力范围相对较广,比如闪长岩最小主应力0~150MPa、中间主应力0~642MPa。相对而言,实际工程的应力变化幅度相对较小,因此

可根据应力水平取1个材料参数 ν_{hb} 即可。由计算结果可以看出,即使采用1个 ν_{hb} ,修正后三维H-B准则精度也高于三维H-B强度准则。另外,材料参数 ν_{hb} 取值还需根据试验数据作进一步深入研究。

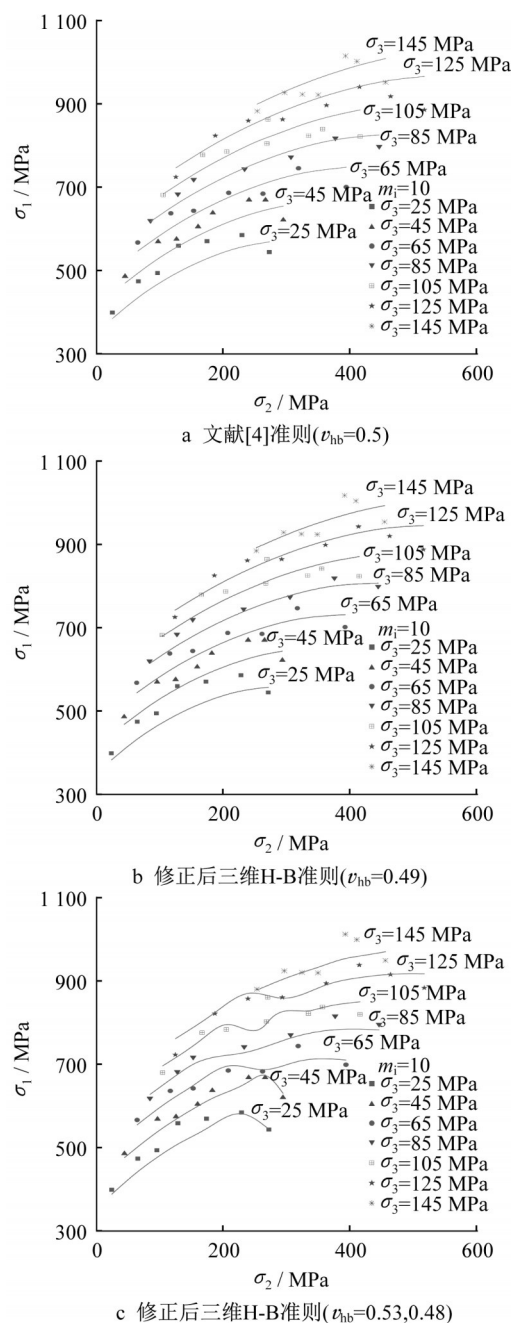


图5 修正后三维H-B准则计算结果(白云岩)

Fig.5 3D H-B criterion calculation results(Dunham dolomite)

由表1~表3及图2~图5可以看出:

(1)无论采用单个变形参数,还是两个变形参数修正后三维H-B准则计算的闪长岩、花岗岩、粗面岩及白云岩破坏强度的平均误差分别为7.92%、

8.40%、3.70%及3.67%,均低于三维H-B准则计算的相应平均误差9.30%、9.88%、4.65%及3.70%。

(2)对闪长岩、花岗岩、粗面岩及白云岩采用两个变形参数 ν_{hb} 进行拟合,计算误差缩小为6.67%、5.13%、3.32%及2.39%。如若采用三个或者更多个变形参数 ν_{hb} 进行拟合,显然计算精度会更高。

(3)修正后三维H-B准则 $\nu_{hb}=0.38\sim0.55$,介于前述给出的建议值 $\nu_{hb}=-1.0\sim1.0$ 之间,且围压恒定条件下 ν_{hb} 随中间主应力增加表现为逐渐减小趋势。因此,根据真三轴试验数据拟合结果,提出变形参数建议取值 $\nu_{hb}=0\sim1.0$ 。

3 修正后三维H-B准则讨论

尽管修正后三维H-B准则的计算精度有所提高,为了能够利用H-B准则在岩体工程中积累的研究成果,还需从以下几方面进行研究:

(1)考虑到问题复杂性,为了能精细化的确定变形参数 ν_{hb} ,尝试在 ν_{hb} 、 σ_2 、 σ_3 及 ν_{hb0} (由 $\sigma_2=\sigma_3$ 时的试验值确定)建立如下关系式。

$$\nu_{hb}=f(\sigma_2, \sigma_3)\nu_{hb0} \quad (32)$$

(2)为了使修正后三维H-B准则也能应用于岩体的数值计算,吸收H-B准则在岩体参数方面的研究成果,提出基于地质强度指标(G_{SI})与可考虑爆破影响和应力释放的扰动参数 D 表征的 ν_{hb} 确定方法。

$$\nu_{hb}=f(G_{SI}, D)\nu_{hb0} \quad (33)$$

(3)修正后三维H-B准则屈服轨迹并非完全非凸性,可采用椭圆型、双曲线型和空间滑动面(SMP)的罗德角函数对其修正^[1]。

4 结论

(1)基于弹性应变能是岩石破坏内在机理,阐明已有H-B准则既是经验型强度准则,更是能量型强度准则,但已有H-B准则将材料任意应力状态下破坏时泊松比均看作0.5,这也正是提高其计算精度关键所在。

(2)以文献[4]中Zhang-Zhu三维H-B准则为基础,从广义抗剪强度与弹性应变能两个角度,建立了经验型的修正后三维H-B准则。该准则仅需3个参数 m_i 、 s 及 ν_{hb} 就能对岩体强度进行估计,并参考理想弹塑性材料的泊松比取值,初步给出了材料变形参数建议取值 $\nu_{hb}=-1.0\sim1.0$ 。

(3)理论分析表明修正后三维H-B准则是一族以 ν_{hb} 为参数强度准则集合,而非单一强度准则, $\nu_{hb}=0.5$ 时该准则蜕化为Zhang-Zhu三维H-B准则,即Zhang-Zhu三维H-B准则仅是修正后三维H-B准则特例。

(4)闪长岩、花岗岩、粗面岩及白云岩的计算结果表明:修正后三维H-B准则可较好地描述岩石的破坏特性,计算结果较为精确,并根据验证结果提出材料变形参数取值 $\nu_{hb}=0\sim1.0$ 。

(5)为了利用H-B准则在岩体工程中积累的研究成果,需要建立参数 ν_{hb} 与地质强度指标及考虑爆破影响和应力释放的扰动参数之间的函数关系。

作者贡献声明:

郭建强:主要负责本文框架结构、理论公式推导、分析及验证等。

卢雪峰、陈建行和蒋建国:主要负责试验数据收集与计算。

杨前冬、蒋磊和伍安杰:主要负责图表绘制及文本校对。

参考文献:

- [1] 朱合华,张琦,章连洋. Hoek-Brown强度准则研究进展与应用综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1945.
ZHU Hehua, ZHANG Qi, ZHANG Lianyang. Review of research progresses and applications of Hoek-Brown strength criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 1945.
- [2] PAN X, HUDSON J A. A simplified three dimensional Hoek-Brown yield criterion[C]// ROMANA M, ed. Rock Mechanics and Power Plants. Rotterdam; A.A. Balkema, 1988: 95-103.
- [3] SINGH B, GOEL R K, MEHROTRA V K, *et al.* Effect of intermediate principal stress on strength of anisotropic rock mass [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(1): 71.
- [4] ZHANG L Y, ZHU H H. Three-dimensional Hoek-Brown strength criterion for rocks [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, 133(9): 1128.
- [5] ZHANG L Y. A generalized three-dimensional Hock-Brown strength criterion [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, 41(6): 893.
- [6] 姜华. 一种简便的岩石三维 Hoek-Brown 强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 2996.
JIANG Hua. A simple, convenient three-dimensional Hoek-Brown criterion for rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 2996.
- [7] HOEK E, BROWN E T. The Hoek-Brown criterion—a 1988 update [C]//Proceedings of the 15th Canada Rock Mechanics Symposium. Toronto: University of Toronto, 1988: 31-38.
- [8] HOEK E. Strength of rock and rock masses [J]. International

- Society for Rock Mechanics News Journal, 1994, 2(2):4.
- [9] HOEK E, KAISER P K, BAWDEN W F. Support of underground excavations in hard rock [M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995.
- [10] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion—2002 edition [C]//Proceedings of the North American Rock Mechanics Society NARMS-TAC 2002. Toronto: University of Toronto Press, 2002:267-273.
- [11] 巫德斌,徐卫亚. 基于Hoek-Brown准则的边坡开挖岩体力学参数研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(1):89.
WU Debin, XU Weiya. Hoek-Brown criterion-based study on mechanical parameters of excavated slope rock masses [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(1):89.
- [12] 孙金山,卢文波. Hoek-Brown经验强度准则的修正及应用[J]. 武汉大学学报:工学版, 2008, 41(1):63.
SUN Jinshan, LU Wenbo. Modification of Hoek-Brown criterion and its application [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(1):63.
- [13] 苏永华,封立志,李志勇,等. Hoek-Brown准则中确定地质强度指标因素的量化[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4):679.
SU Yonghua, FENG Lizhi, LI Zhiyong, *et al.* Quantification of elements for geological strength index in Hoek-Brown criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4):679.
- [14] 夏开宗,陈从新,刘秀敏,等. 基于岩体波速的Hoek-Brown准则预测岩体力学参数方法及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7):1458.
XIA Kaizong, CHEN Congxin, LIU Xiumin, *et al.* Estimation of rock mass mechanical parameters based on ultrasonic velocity of rock mass and Hoek-Brown criterion and its application to engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7):1458.
- [15] SONMEZ H, ULUSAY R. Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(6):743.
- [16] 闫长斌,徐国元. 对Hoek-Brown公式的改进及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22):4030.
YAN Changbin, XU Guoyuan. Modification of Hoek-Brown expressions and its application to engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22):4030.
- [17] HOEK, BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1980, 106(9):1013.
- [18] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rocks [M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980:527.
- [19] HOEK E, WOOD D, SHAH S. A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses [C]// HUDSON J A ed. Proceedings of the Rock Characterization, Symposium of ISRM. London: British Geotechnical Society, 1992:209-214.
- [20] 郭建强,刘新荣,黄武峰,等. 基于弹性应变能的Mohr-Coulomb强度准则讨论[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(9):1168.
GUO Jianqiang, LIU Xinrong, HUANG Wufeng, *et al.* Mohr-Coulomb strength criterion based on elastic strain energy [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(9):1168.
- [21] 郭建强,刘新荣. 强度准则与岩爆判据统一的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1):3340.
GUO Jianqiang, LIU Xinrong. Study on the uniformity between strength criterion and rock burst criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1):3340.
- [22] 郭建强,黄武峰,刘新荣,等. 基于可释放应变能的岩石扩容准则[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7):2094.
GUO Jianqiang, HUANG Wufeng, LIU Xinrong, *et al.* Rock dilation criteria development based on releasable strain energy [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7):2094.
- [23] 谢和平,彭瑞东,鞠杨,等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15):2603.
XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang, *et al.* On energy analysis of rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15):2603.
- [24] 尤明庆. 岩石的力学性质[M]. 北京:地质出版社, 2007.
YOU Mingqing. Rock mechanics properties [M]. Beijing: Geology Publishing House, 2007.