

文章编号:1000-582x(2000)04-0068-04

68-71

# Hoek-Brown 强度准则参数的改进算法

徐 健

(重庆市建筑科学研究院,重庆 400015)

**摘要:** 基于溪落渡及二滩水电站的大量测试数据,提出了岩体 Hoek-Brown 经验强度准则参数  $m, s$  的改进算法并对随机特征进行了分析。研究发现  $m, s$  是一对具有较大变异性的相关变量,且  $s$  的变异性比  $m$  的变异性大;当岩体强度一定时,  $m, s$  为一对负相关的变量,且这种变异性与岩体性质、岩体地点都有关系。同时指出  $m, s$  参数的相关性是一个不可忽视的重要因素,对它们的变异性和相关性进行分析具有工程意义。

**关键词:** 岩体; 强度准则; 参数计算方法; 概率分布; 统计检验

**中图分类号:** TU 457

**文献标识码:** A

由于岩体赋存环境的变异性,人们不能期望得到岩土参数的精确值,也不能期望通过输入一个数学模型就能确定岩体的强度和变形。虽然全面阐述岩体全部特征和组成成分之间相互作用的理论没有建立起来,而且进行大比例原位试验也不现实,但是可以通过对岩体宏观特征的随机概括来预测岩体强度和变形可能范围出现的概率。根据出现概率的大小,就可以做出判断,来指导工程设计。这就是笔者研究岩体随机特性的指导思想。因为岩体的随机特性体现在岩体参数的概率分布及其数字特征方面,所以参数概率特征的研究是研究岩体随机特性的最重要基础,参数选取的正确与否直接影响计算结果和判断。

1980年, Hoek 和 Brown<sup>[1]</sup> 根据自己的在岩石性态方面的理论和实践经验,通过对几百组岩石三轴试验资料和大量岩体现场试验成果的统计分析,得到了岩体和岩体破坏时极限主应力之间的关系式如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_c + s\sigma_c^2} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_1$ —破坏时的最大主应力(压力为正);  $\sigma_3$ —作用在岩体试样上岩体的最小主应力;  $\sigma_c$ —岩块单轴抗压强度;  $m, s$ —参数,取决于岩石性质,以及在达到  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  之前岩石的破坏程度。 $m$  的取值范围为 0.001 ~ 25, 对严重扰动岩体取 0.001, 对坚硬完整岩块取 25,  $s$  的取值范围为 0 ~ 1, 对破碎岩石取 0, 完整岩块取 1。

将  $\sigma_3 = 0$  代入方程(1), 可得岩体的单轴抗压强度

$\sigma'_c$ :

$$\sigma'_c = \sqrt{s\sigma_c} \quad (2)$$

对于完整岩石,  $s = 1$ , 对于有破损的岩石,  $s < 1$ 。

当  $\sigma_1 = 0$  时, 得到岩体的单轴抗拉强度  $\sigma'_t$ :

$$\sigma'_t = \frac{\sigma_c}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (3)$$

完全破碎岩石,  $s = 0$ , 则  $\sigma'_c = 0$ 。

J. Bray<sup>[2]</sup> 1985 利用 Hoek-Brown 强度准则推导了岩体中节理面强度:

$$\tau = (c \tan \varphi', - \cos \varphi')^{m\sigma_1 / h} \quad (4)$$

式中:  $\tau$ —破坏时剪应力

$$\varphi'_t = \arctan \left\{ 4h \cos^2 \left[ 30 + \frac{1}{3} \operatorname{arcsinh}^{-\frac{3}{2}} \right] - 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$h = 1 + 16(m\sigma'_t + s\sigma_c) / 3m^2\sigma_c \quad (6)$$

$$\text{有: } c'_t = r - \sigma'_t \tan \varphi'_t \quad (7)$$

$$\beta = 45^\circ - \frac{1}{2} \varphi'_t \quad (8)$$

## 2 统计及检验方法

考虑具有密度函数  $f_r(x_1, 0_1, \dots, 0_n)$  的随机变量  $X$ ; 其中  $0_i (i = 1, 2, \dots, n)$  是参数。假定某特定子样值

· 收稿日期:1999-10-23

作者简介:徐健(1954-),男,重庆人,高级工程师,重庆市建筑科学研究院地基基础工程研究所所长。从事地基基础和岩石力学领域的研究工作。

$x_j$  的似然值与  $x_j$  处的概率密度函数值成正比,那么在假定随机取样下,所得  $n$  个独立观察值  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的似然值为<sup>[3]</sup>。

$$L(x_1, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_m) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \theta_1, \dots, \theta_m) \quad (9)$$

最大似然估计应有下面方程解得:

$$\frac{\partial L(x_1, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_m)}{\partial \theta_j} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

最大似然法同矩阵法相比,提供了直接获得参数点的估计值。对于大容量子样,最大似然法常常是最好的估计法,它给出了最小的偏差。

在用 K-S 等方法进行小子样检验时,经常遇到同样接受多种不同假设的情况。在这种情况下,按经典的概率理论,只能通过加大子样数目来降低取伪错误率,从而唯一的确定原分布假设。然而,根据经常接触到的实际工程问题的某些特点,人们一般可以通过对某一类具体问题的分析和经验,大体确定出几种可能的分布模型,从而转为对几种可能概率型的检验判别<sup>[4,5]</sup>。

通过分析概率的母体分布与样本之间的关系可知,统计检验的结果应该是对原分布假设的拟合度最优。因此,笔者推断,在一定的子样范围内,虽然可能出现一组样本同时接受多种假设的情况,但其接受的水平即拟合优度不可能一样,而且应该是对符合原分布的假设接受水平最高,拟合度最优。可以认为,检验的极差——检验统计量越小,拟合度越优,检验的接受水平越好。

以 K-S 检验法为例,笔者定义:检验统计量  $D_n$  与标准临界值  $D_{n,\alpha}$  之比为接受水平,对分布假设  $H_0$ , 记为:

$$k_{H_0} = D_n / D_{n,\alpha} \quad (11)$$

按照这种定义,可以看出,常规 K-S 检验法接受检验的标准是  $K_{H_0} < 1$ 。但当子样数目很少时,由于近似误差加大了取伪错误率,必然会有多个  $K_{H_0} < 1$  的情况出现。这时根据检验偏差最小、拟合度最优的原则,取  $K_{H_0} < M|K_{H_0}|$  为接受检验,而对其它的  $K_{H_0}$ , 虽然可能小于 1,但认为是子样数过少造成的取伪误差所致。所以仍视为不能接受假设。这便形成了一种以常规检验为基础的、能够唯一确定小子样问题检验结果的拟合优度检验法——有限比较检验法。

### 3 经验强度参数 $m, s$ 的确定方法

Hoek-Brown 准则是一种在工程界被广泛应用的强度准则。它能在工程现场查表直接估算  $m, s$ , 可便

利地应用它来快速推算岩体的强度。

由于现场大型三轴试验的困难性,可以由现场大剪试验的多个点来近似推求岩体的  $m, s$  样本值,具体做法如下:在一组多个大剪试验的  $\sigma-\tau$  散点图中,按照应力大小排列,找出如图 1 满足如下关系的 3 个点:(1)  $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ ; (2) 每两点形成一条莫尔包线,与剪应力坐标轴的截距  $0 < c_{12} < c_{13} < c_{23}$ ; (3) 1 点和 2 点, 2 点和 3 点各自连成一条莫尔包线,其与应力轴的夹角  $90^\circ > \varphi_{12} > \varphi_{23} > 0$ 。根据这 3 个点  $(\sigma_i, \tau_i, \varphi_i)$ ,  $i = 1, 2, 3$ 。由正应力和主应力之间的转化关系<sup>[5]</sup>:

$$\sigma_1 = \sigma + \tau \frac{1 - \cos(90 + \varphi_i)}{\sin(90 + \varphi_i)} \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

$$\sigma_3 = \sigma - \tau \frac{1 + \cos(90 + \varphi_i)}{\sin(90 + \varphi_i)} \quad i = 1, 2, 3 \quad (13)$$

组成  $(\sigma_i, \sigma_j)$ ,  $i = 1, 2, 3$  的 3 对数据,代入 Hoek-Brown 准则,组成 3 个方程,含有 3 个未知数  $m, s, \sigma_c$ 。考察准则可以看出,  $s\sigma_c$  是作为一个独立的系数,不随  $\sigma_1, \sigma_3$  的变化而变化。同理,  $m\sigma_c$  也是如此。也就是说,不能同时求出  $m, s, \sigma_c$  3 个参数。此处利用实验最可能的  $\sigma_c$  值(即密度函数极值点)作为常数确定  $m, s$  样本。根据 Hoek-Brown 准则的变化形式:

$$\left[ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} \right]^2 = m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s$$

在坐标系  $\left[ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c}, \frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right]$  中形成 3 个点

(  $\left[ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} \right]^2$  用  $T_1$  表示,  $\frac{\sigma_3}{\sigma_c}$  用  $T_2$  表示 ), 如图 1, 对某一点,必有一对  $m, s$  对应,只要定出各点的  $m, s$ , 由许多点就可分析  $m, s$  的统计特性。由于上述是不定方程,无法唯一确定  $m, s$ , 可以根据 3 个点中每 2 个点连线的斜率和截距求得。这样在一组大剪试验中可形成一组岩体  $m, s$  样本,并直接进行统计分析。

对大剪试验,笔者分析了 3 组数据,得到岩体的  $m, s$  参数样本进行了统计,并分析了  $m, s$  的相关性,相关系数为:

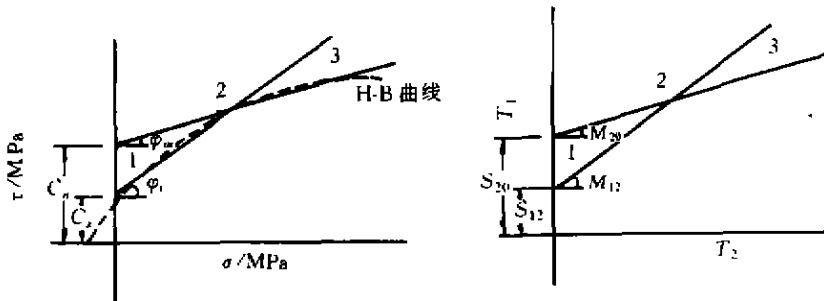
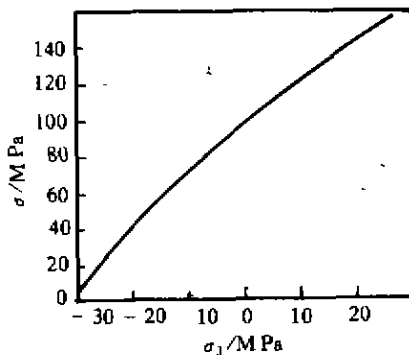
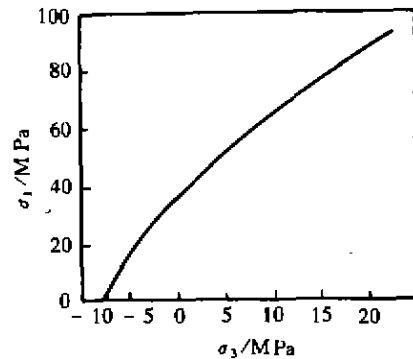
$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})(s_i - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}} \quad (15)$$

### 4 $m, s$ 统计成果分析

笔者基于二滩和溪落渡的两种类型岩体的大剪试验的 52 组数据,统计 Hoek-Brown 经验强度参数  $m, s$  值如表 1 示,并得到如下结论。

表1  $m, s$  统计成果表

地点	岩性	$m$ 值			$s$ 值			相关系数
		均值	标准差	差异系数	均值	标准差	差异系数	
二滩	正长岩	0.873	0.474	0.543	0.0312	0.0252	0.807	-0.614
	玄武岩 <sub>a</sub>	0.808	0.477	0.590	0.0323	0.0370	1.150	-0.385
	玄武岩 <sub>b</sub>	0.521	0.275	0.527	0.0215	0.0248	1.150	-0.511
溪落渡	裂隙玄武岩	1.430	0.062	0.043	0.26000	0.2800	1.080	-0.530

图1  $m, s$  参数方法计算示意图图2 二滩正长岩岩体的  $m, s$  的  $\sigma_1$  与  $\sigma_3$  关系图3 溪落渡带裂隙岩体的  $m, s$  的  $\sigma_1$  与  $\sigma_3$  关系

1)  $m$  的变化范围为 0.474 ~ 1.43,  $s$  变化范围在 0.0215 ~ 0.26, 岩体属于岩块强度较高、但受节理裂隙切割较严重的岩体。这与试样取样地点或做大剪试验岩体的状态相吻合, 从侧面正确反映了笔者统计工作的正确性。二滩岩体的  $m, s$  的变异系数分别在 0.549 和 1 左右。从概率角度讲, 它们的变化范围是较大的。 $m, s$  的剧烈波动势必在工程应用中造成分析失当。因此, 进行  $m, s$  的波动对 H-B 测试则影响的敏感程度的分析十分必要。

2)  $m, s$  的相关系数均在 -0.5 附近, 这也说明  $m, s$  是显著负相关的, 正如  $c, \varphi$  负相关一样。这种相关性对 H-B 准则的影响程度的分析就显得十分必要。

由上面分析可知:  $m, s$  是一对具有较大变异性的相关变量, 且  $s$  的变异性较  $m$  的变异性大,  $m, s$  为一对具有负相关的变量。由表中溪落渡节理岩体、二滩正长岩节理岩体  $m, s$  值和单轴抗压强度  $\sigma_c$  而得到  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  的关系, 如图 2 和图 3 所示。

## 5 结论

由上面分析可知:  $m, s$  是一对具有较大变异性相关变量, 且  $s$  的变异性比  $m$  的变异性大一些; 当岩体的强度一定时, Hoek-Brown 为一对具有负相关的变量。由统计成果表可以看出  $m, s$  的变异系数一般比较大, 这种变异性与岩体性质、岩体地点都有关系。另外  $m, s$  参数的相关性也是不可忽视的一种重要因素, 如果忽视它们的变异性和相关性, 将带来很大误差, 对它们的变异性和相关性进行分析具有重要的工程意义。

## 参考文献:

- [1] HOEK E, BROWN E. Underground Excavation in Rock [M]. England Hertford, Stephen Austin and Sond Ltd, 1980.
- [2] HOEK E, BROWN E. The Hoek-Brown Failure Criterion [J]. Update, ISRM, 1988, (10):6-9
- [3] 浙江大学数学系高等数学教研室. 概率论与数理统计 [M]. 北京:北京高等教育出版社, 1979.

[4] YAN C, ZHANG J. The Use of Bayes Method to Infer Distribution of Rock Mechanical Parameters[A]. Proceedings of Rock Mechanics and Environment Geotech No. logy [C]. Chongqing, China, RMEG, 1997. 16-18.  
 [5] 陈彦峰. 岩体强度准则可靠度研究和参数敏感度分析[D]. 重庆: 重庆建筑大学, 1998.

## The Improvement Algorithm of the Hoek-Brown Strength Criterion Parameters for Rockbody

XU Jian

(Institute of Architectural Research in Chongqing, Chongqing 400015, China)

**Abstract:** Based on a lot of testing data from Xiluodu Hydropower power station and ertan hydropower staton, the parameters such as  $m$  and  $s$  of the Hoek-Brown strength criterion are analyzed in this paper. It is found that  $m$  and  $s$  are a couple of variables with great corelativity. While the strength of rockbody is a constant, there is negative corelativity between  $m$  and  $s$  determined by the property and location of rockbody, it is suggested in the paper that the corelativity between  $m$  and  $s$  is very important parameter which can not be neglected

**Key words:** rockbody; strength criterion; probability distribution; estimation; statistic test

(责任编辑 钟学恒)

\* \* \* \* \*

(上接 59 页)

## Kinetics Characteristics of Resolving of Rock Salt of Changshan in Dynamic State

LIU Cheng-lun<sup>1</sup>, XU Long-jun<sup>2</sup>, XIAN Xue-fu<sup>2</sup>

- (1. Department of Applied Chemistry, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
- 2. Institute of Mine Engineering Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Kinetics characteristics of resolving of rock salt of Changshan in dynamic state have been studied by using conductance method and equipment made by ourself. The results show that the quantitative relationship between conductance(L) or concentration (c) of resolving solution in the process of resolving of rock salt and time t ( kinetics equation ) is analogous to Langmuir equation for different flows in ambient temperature. Constant  $E$  or  $a$  increases with the increase of the flow (  $V$  ), whereas constant  $F$  or  $b$  constant decreases. The above 4 constants in dynamic state are smaller than those in static state.

**Key words:** rock salt; resolving in dynamic state; kinetics

(责任编辑 钟学恒)