

文章编号: 1000-7598-(2014)06-1743-08

# 基于 Hoek 建议的非线性关系求取岩体 抗剪强度的算法及工程应用

夏开宗, 陈从新, 周意超, 王永卫, 付华, 欧哲

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:** 阐述了 Hoek 建议的非线性关系原理, 以此提出了求取岩体抗剪强度的算法: 考虑了岩体抗剪破坏时总体或平均水平, 通过计算出不同正应力  $\sigma$  下对应的剪应力  $\tau$ , 线性回归确定一定应力范围内线性化后的  $c$ 、 $\varphi$  值, 解决了 Hoek-Brown 准则拟合算法不能求解一定正应力  $\sigma$  条件下岩土的抗剪强度的问题。在对中缅油气管道(国内段)澜沧江跨域工程边坡岩体应用以及进一步对比研究, 结果表明: 采用文中算法给出的第 1 种确定正应力  $\sigma$  的方法所得的  $c$ 、 $\varphi$  值与 Hoek-Brown 准则拟合算法所得的结果相差不大, 究其原因两种算法考虑的因素不太一样, 导致围压  $\sigma_3$  或正应力  $\sigma$  大小有所差别; 在实际工程正应力  $\sigma$  较低的情况下, 应采用文中算法给出的第 2 种确定正应力  $\sigma$  的方法来获取的  $c$ 、 $\varphi$  值, 这样所得的结果才与实际情况比较接近, 克服了 Hoek-Brown 准则拟合算法对围压  $\sigma_3$  依赖的问题。

**关 键 词:** 岩石力学; 抗剪强度; 非线性关系; 剪应力; 正应力; 工程应用

**中图分类号:** TU 459+.2

**文献标识码:** A

## An algorithm of obtaining shear strength of rock mass based on nonlinear relationship proposed by Hoek and its application to engineering

XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, ZHOU Yi-chao, WANG Yong-wei, FU Hua, OU Zhe

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** A principle of nonlinear relationship proposed by Hoek is elaborated, then based on that, a new algorithm of obtaining shear strength of rock mass is brought forward by considering the overall or average level when rock mass is broken. Through the new algorithm, the magnitudes of shear stress can be calculated at different given normal stresses, and a series of shear stress and normal stress are generated; then the values of cohesion and internal frictional angle are determined via linear regression analysis, which solves the determination of shear strength under certain normal stress that Hoek-Brown criterion fitting algorithm can not do. Then a research on shear strength of rock mass from China-Myanmar oil and gas pipelines (domestic section) Lancang River across domain engineering as an example and a further comparison study is taken. It is shown that the values of cohesion and internal frictional angle determined by the first method according to the new algorithm are little different to these gained through the Hoek-Brown criterion fitting algorithm. The reason is that the factors considered are not the same, while the normal stress is in considered by the two algorithms resulting in confining pressure and normal stress are varied practical engineering is low, the cohesion and internal friction angle proposed by the second method according to the new algorithm, the results obtained are close to the actual situation, which has overcome the problem that Hoek-Brown criterion fitting algorithm relies on the confining pressure.

**Key words:** rock mechanics; shear strength; nonlinear relationship; shear stress; normal stress; engineering application

### 1 引 言

岩体抗剪强度是十分重要的力学参数。常通过原位试验法、经验类比法、反演分析法等获取。目前, 大型岩体工程中, 抗剪强度指标的确定大多依

据少量试验结果和经验判断综合确定, 这一过程带有较大的主观成分<sup>[1]</sup>。如何根据试验得到的、仅仅适合于试点的岩体力学参数, 获得能代表大范围工程岩体的力学性质, 使之能为工程设计和施工所采用的工程岩体力学参数始终困扰着工程界<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2013-03-17

第一作者简介: 夏开宗, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事边坡稳定性、地下采矿稳定性等方面的研究工作。E-mail: xiakaizong1988@sina.com

寻求能为众多工程普遍接受的方法，已成为近年来人们关注的另一个目标和趋势<sup>[2]</sup>。国内外许多工程界和学术界的专家、学者在这方面进行了不懈努力，出现了许多的岩体抗剪强度力学参数的取值方法，主要有<sup>[3-4]</sup>：Georgi法、费辛格法、中国科学院地质研究所法、Hoek-Brown准则拟合算法。其中应用最广、效果最好的是Hoek-Brown准则拟合算法<sup>[5-7]</sup>，能较全面地反映了岩体结构等特征对岩体强度的影响，但该分析是针对最大主应力和最小主应力而言的，与围压密切相关，对某些应用而言，这一过程不能求解一定正应力 $\sigma$ 条件下岩石的抗剪强度，于是Hoek建立了岩体抗剪强度的非线性关系方程，廖秋林等<sup>[8]</sup>，韩现民等<sup>[9]</sup>依据该非线性关系方程，给出了岩体抗剪强度的算法。该算法取非线性摩尔强度包络线 $\tau$ 上的截距作为岩体破坏时的凝聚力 $c$ 值，此 $c$ 值为任一 $\sigma$ 时的最小值，不能很好地反映岩体破坏时的总体或平均 $c$ 值水平，所得结果偏小；而在计算总体或平均 $\varphi$ 值时，由于引入了偏小的 $c$ 值而导致了 $\varphi$ 值计算结果稍偏大。

于是，本文基于Hoek给出的非线性关系方程，重新给出了岩体抗剪强度的算法：计算出不同正应力 $\sigma$ 下对应的剪应力 $\tau$ ，线性回归确定一定应力范围内线性化后的 $c$ 、 $\varphi$ 值。以中缅油气管道（国内段）澜沧江跨域工程边坡岩石力学参数和文献<sup>[8]</sup>中的数据为基础，将本文算法给出的第1种确定正应力 $\sigma$ 的方法所得的 $c$ 、 $\varphi$ 值与Hoek-Brown准则拟合算法所得的结果进行了对比研究。并分析了两种算法在计算岩体抗剪强度参数时的差别和适用条件，其成果对工程设计和施工有重要指导意义。

## 2 本文提出的岩体抗剪强度的算法

### 2.1 Hoek 建议的非线性关系原理

由于岩体的抗剪强度，尤其是扰动岩体的抗剪强度参数多为非线性关系，故Hoek建议的抗剪强度非线性关系为<sup>[10]</sup>

$$\tau = A\sigma_c \left( \frac{\sigma}{\sigma_c} - T \right)^B \quad (1)$$

式中： $\tau$ 为岩体的剪切强度； $\sigma$ 为岩体法向应力； $\sigma_c$ 为岩块单轴抗压强度； $A$ 、 $B$ 均为待定常数，由岩体质量与经验常数之间的关系表求得； $T$ 按下式估算：

$$T = \left( m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right) / 2 \quad (2)$$

式中： $m_b$ 、 $s$ 为岩体的材料参数，与其岩性与结构面情况有关，均可表示为地质强度指标 $GSI$ （geo-

logical strength index）<sup>[11-12]</sup>的函数，按修正后Hoek-Brown准则可表示为<sup>[13]</sup>

$$\left. \begin{aligned} m_b &= m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \\ s &= \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $D$ 为岩体扰动参数，主要考虑爆破破坏和应力松弛对节理岩体的扰动程度，其取值按公式（4）估算<sup>[14]</sup>； $m_i$ 为完整岩块的Hoek-Brown常数，反映岩石的软硬程度； $GSI$ 为地质强度指标，与岩体所处的地质环境、岩体结构特性和表面特性有关，其取值按公式（5）估算<sup>[15]</sup>。

$$D = 1 - K_v = 1 - \left( \frac{V_p}{V_r} \right)^2 \quad (4)$$

式中： $K_v$ 为岩体完整性指数； $V_p$ 为岩体中声波传播速度； $V_r$ 为岩块中声波传播速度。

$$GSI = RMR_{99} - 5 \quad (RMR_{99} > 23) \quad (5)$$

式中： $RMR_{99}$ （rock mass rating）为由南非科学和工业研究委员会（Council for Scientific and Industrial Research）提出的CSIR分类指标值，即为Bieniawski于1989年作了进一步修改后所建立起来的一套岩体分级系统<sup>[16]</sup>。

### 2.2 岩体抗剪强度

摩尔包络线按照如下方法确定，破裂面上的正应力 $\sigma$ 和剪应力 $\tau$ 为<sup>[15]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_3 + \frac{\tau_m^2}{\tau_m + \frac{m_b \sigma_c}{8}} \\ \tau &= (\sigma - \sigma_3) \sqrt{1 + \frac{m_b \sigma_c}{4\tau_m}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： $\tau_m = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ 。

改写式（1），则变换为

$$y = ax + b \quad (7)$$

式中： $y = \ln(\tau / \sigma_c)$ ， $x = \ln(\sigma / \sigma_c - T)$ ， $a = B$ ， $b = \ln A$ 。

将式（6）求得的一系列 $\sigma$ 和 $\tau$ 代入式（7），可求得常数 $A$ 和 $B$ 值：

$$\left. \begin{aligned} \ln A &= \sum y / n - B \left( \sum x / n \right) \\ B &= \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

拟合相关系数为

$$r^2 = \frac{[\sum xy - (\sum x \sum y) / n]^2}{[\sum x^2 - (\sum x)^2 / n][\sum y^2 - (\sum y)^2 / n]} \quad (9)$$

式中：n 为回归分析所用的数据组数。

在求出待定常数A和B值之后，通过给定的一系列正应力σ之后，借助式(1)求取不同法向应力σ下对应的剪应力τ，采用线性回归的方法确定给定应力范围内线性化后c值和φ值来反映岩体破坏时总体或平均水平，解决了Hoek-Brown准则拟合算法不能求解一定正应力σ条件下岩土抗剪强度的问题，如图1所示。

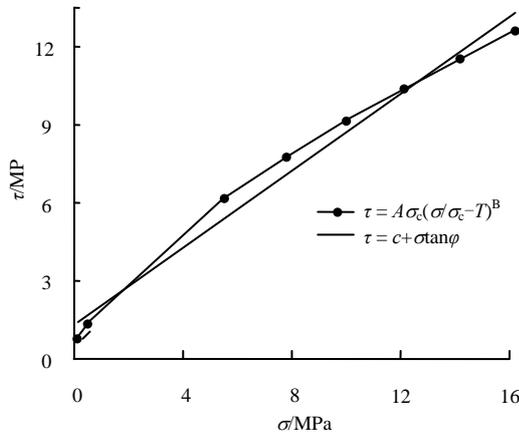


图 1 强度指标的拟合  
Fig.1 Strength index fitting

从图1可知，Hoek建议的非线性关系曲线随着正应力σ的增大，斜率逐渐减小，也就是内摩擦角φ逐渐减小；而在τ轴上的截距逐渐增大，即凝聚力c逐渐增大，可见，当σ=0时对应的凝聚力c值是最小的，廖秋林等<sup>[8]</sup>，韩现民等<sup>[9]</sup>直接取此c值作为岩体破坏时的凝聚力c值，显然此种做法没有考虑岩体破坏时的总体或平均c值水平，所得结果是不足的。所以，用本文提出的算法求在取c、φ值过程中关键是确定一定范围内的正应力σ，主要有下面两种方法。

(1) 按Hoek的建议σ<sub>3</sub>的范围来求取正应力σ。选取σ<sub>3</sub>的范围：0<σ<sub>3</sub><0.25σ<sub>c</sub>，在σ<sub>3</sub>的取值区间内从0逐渐增大到0.25σ<sub>c</sub>取8组等间距分布的σ<sub>3</sub>，用Hoek-Brown准则求取一系列的相应的σ<sub>1</sub>，再依据式(6)即可求取不同的正应力σ。

此种方法所得的c、φ值对围压σ<sub>3</sub>有较大的依赖，即与最小主应力σ<sub>3</sub>的取值区间有较大关系，图2、3为(假设岩块轴抗压强度σ<sub>c</sub>=48.6 MPa, GSI=47,

m<sub>i</sub>=7, 岩体完整性指数K<sub>v</sub>=0.60)最小主应力σ<sub>3max</sub>与c、φ值之间的关系。

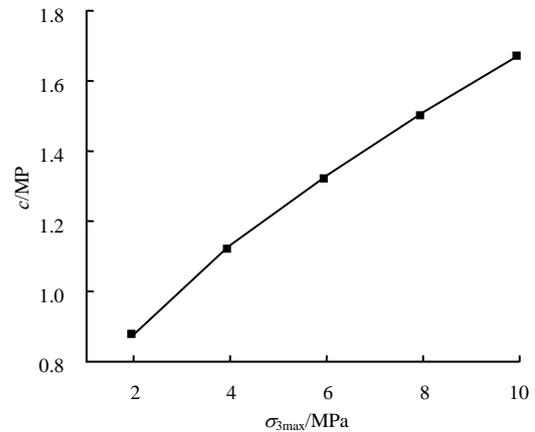


图 2 最小主应力最大值与凝聚力的关系图  
Fig.2 Relationship between the maximum value of minimum principal stress and cohesive force

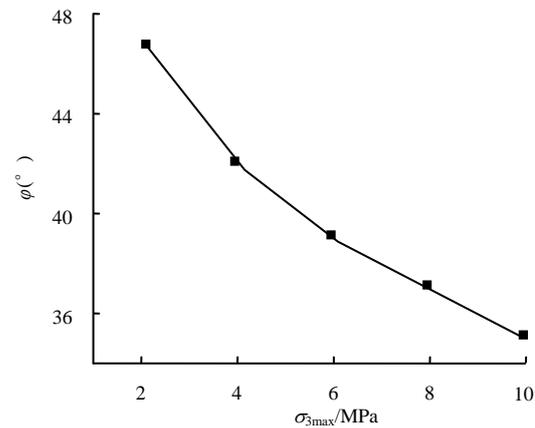


图 3 最小主应力最大值与内摩擦角的关系  
Fig.3 Relationship between the maximum value of minimum principal stress and internal frictional angle

从图2、3中可以看出，在σ<sub>3max</sub>较低时，岩体中岩块的凝聚力c值较小，岩块之间互相锁定，内摩擦角φ较高；而在最小主应力σ<sub>3max</sub>较高时，岩体中岩块的凝聚力c值也较高，岩块间剪切错动，内摩擦角较低。另外，由公式(6)可以看出，围压σ<sub>3</sub>越大，σ也越大。所以岩体凝聚力c值随着围压σ<sub>3</sub>或正应力σ的增大而呈增大趋势；内摩擦角φ值随着围压σ<sub>3</sub>或正应力σ的增大而呈减小趋势。故在建议的σ<sub>3</sub>取值区间求取岩体抗剪强度参数时，当实际应用范围内正应力σ较低的情况下，估算的c值偏大，而φ值偏小。宋彦辉等<sup>[1]</sup>在研究玛尔挡水电站坝址的岩体抗剪强度参数时，发现依据最小主应力最大值σ<sub>3max</sub>为0.25σ<sub>c</sub>换算出来的正应力σ是现场大型剪切试验施加最大法向应力σ的10倍左右，与实际情况明显不符合。此时，在最小主应力区间

( $0 < \sigma_3 < 0.25\sigma_c$ ) 内采用本文提出的算法和 Hoek-Brown 准则拟合算法所得的  $c$  值是试验值的 4 倍, 而内摩擦角比试验值大接近  $30^\circ$ , 所得的结果与试验值误差较大。

(2) 在实际应用范围内确定正应力  $\sigma$ 。当正应力  $\sigma$  较低时用此种方法求得的  $c$ 、 $\varphi$  值与实际情况比较接近, 克服了本文算法给出的第 1 种确定正应力  $\sigma$  的方法和 Hoek-Brown 准则拟合算法在求取岩体抗剪强度力学参数时对围压的依赖性问题。对于大型和比较重要的工程, 宜采用此种方法来确定岩体的抗剪强度力学参数。

应当指出的是, 由于 Hoek 建议的抗剪强度关系是非线性的, 为方便工程使用, 本文提出的算法只能在一定的应力水平( $0 < \sigma_3 < 0.25\sigma_c$ ) 范围内, 才可以按线性关系进行拟合, 在该范围内, Hoek 建议的非线性关系曲线与 Mohr-Coulomb 强度准则曲线比较吻合。另外, Hoek 和 Brown 等研究表明<sup>[14-15]</sup>:  $0 < \sigma_3 < 0.25\sigma_c$  属于大部分工程的应用范围, 因此, 本文提出的算法所得的岩体抗剪强度力学参数能满足大部分工程计算的要求。

### 3 工程应用研究

#### 3.1 工程概况

澜沧江跨域工程位于大瑞铁路澜沧江特大桥上游约 200 m, 采用悬索一跨过河, 拟建跨越长度约 400 m。跨域工程位于澜沧江深大断裂带内, 夹持在近南北向的平坡断层、燕子窝断层之间, 拟建场区属于次不稳定区, 场地复杂程度为一级, 地基复杂程度为一级。

场区出露的地层主要为三叠系上统大水塘上段第二岩组( $T_3d^{2-2}$ )白云质灰岩层, 大理岸在边坡上部还存在约 15 m 厚的泥晶灰岩破碎岩体。

由室内岩石力学试验所得的场区岩块物理力学参数如表 1 所示。通过对场区 20 个钻孔进行岩体和岩块纵波波速统计和计算, 获取了岩体完整指数, 其结果见表 2。根据现场地质调查结果, 按照 CSIR 分类评价方法, 对场区不同岩性和风化程度的 5 种岩体质量进行了评价, 其评价结果 RMR 值

如表 3 所示。

表 1 室内岩块物理力学参数

Table 1 physico-mechanical parameters of indoor rocks

位置	岩体名称 (风化程度)	平均重量/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	单轴抗压强度/ MPa	饱和抗压强度/ MPa	变形模量/ GPa	凝聚力/ MPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	泊松比
保山岸	白云质灰岩 (微风化)	27.11	61.78	60.01	29.67			0.224
	白云质灰岩 (中风化)	26.60	45.90	45.13		10	50	
大理岸	白云质灰岩 (微风化)	27.04	55.03	53.31	33.42			0.258
	白云质灰岩 (中风化)	26.60	44.80	50.20				
	泥晶灰岩 (中风化)	26.60	56.00	43.56				

表 2 岩体完整性指数

Table 2 Integrity indexes of rock mass

位置	岩体名称(风化程度)	岩体纵波速度 平均值/(m/s)	岩块纵波速度 平均值/(m/s)	岩体完整性 性指数
保山岸	白云质灰岩(微风化)	4 735.25	5 410	0.77
	白云质灰岩(中风化)	4 289.07	5 400	0.63
大理岸	白云质灰岩(微风化)	4 503.94	5 419	0.69
	白云质灰岩(中风化)	3 634.82	5 388	0.46
	泥晶灰岩(中风化)	3 992.57	5 400	0.55

表 3 岩体 RMR 值评价结果

Table 3 Evaluation results of rock mass RMR values

位置	岩体名称 (风化程度)	分类值						RMR 分类值	岩体分类
		抗压强度	ROD	节理间距	节理状态	地下水	节理方向		
保山岸	白云质灰岩 (微风化)	7	13	15	20	15	-5	65	II
	白云质灰岩 (中风化)	4	13	15	17	15	-5	59	III
大理岸	白云质灰岩 (微风化)	7	8	15	20	15	-5	60	III
	白云质灰岩 (中风化)	4	8	15	16	15	-5	53	III
	泥晶灰岩 (中风化)	7	3	15	15	15	-5	50	III

#### 3.2 岩体抗剪强度力学参数估算

对场区岩体抗剪强度力学参数估算时, 首先根据现场岩体的岩性情况, 由文献[12]查得的  $m_i$  值。在确定  $m_i$  值、岩体完整性指数 (见表 2) 和 RMR 分类值 (表 3) 之后, 利用式 (2) ~ (9) 计算出相应的参数。其结果见表 4。

表 4 计算参数

Table 4 Calculation parameters

位置	岩体名称 (风化程度)	$m_i$	GSI	D	$m_b$	s	T	A	B
保山岸	白云质灰岩 (微风化)	10	60	0.23	1.990 5	0.008 1	-0.004 06	0.566 2	0.697 5
	白云质灰岩 (中风化)	9	54	0.37	1.199 0	0.002 9	-0.002 41	0.475 1	0.692 6
大理岸	白云质灰岩 (微风化)	9	55	0.30	1.358 6	0.003 9	-0.002 86	0.496 2	0.693 4
	白云质灰岩 (中风化)	8	48	0.55	0.617 5	0.000 8	-0.001 29	0.371 5	0.684 3
	泥晶灰岩 (中风化)	8	45	0.45	0.634 4	0.000 8	-0.001 26	0.374 7	0.684 8

表 5 为两种算法计算场区岩体抗剪强度力学参数的结果。图 4~8 为本文提出的算法获得的场区岩体抗剪强度指标。

(1) Hoek-Brown 准则拟合算法。Hoek 等<sup>[13]</sup>研究表明：对 Hoek-Brown 准则，与之等效的岩体抗剪强度参数内摩擦角  $\varphi$  和凝聚力  $c$  计算公式分别为

$$\varphi = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (10)$$

$c =$

$$\frac{\sigma_c[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + [6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}]/[(1+a)(2+a)]}} \quad (11)$$

式中： $\sigma'_{3n}$  为最小主应力最大值  $\sigma_{3max}$  与岩块单轴抗压强度  $\sigma_c$  的比值，按文献[17]来确定。 $m_b, s, a$  为 Hoek-Brown 准则常数。

(2) 本文提出的算法。采取第 1 种方法来获取一定范围内的正应力下  $\sigma$ ，在  $\sigma_3$  的取值区间内从 0 逐渐增大到  $0.25\sigma_c$  取 8 组等间距分布的  $\sigma_3$ ，用 Hoek-Brown<sup>[13]</sup> 准则求取相应的  $\sigma_1$ 。应用式 (6) ~ (9) 计算出常数  $A, B$  之后，再借助式 (1) 计算出不同正应力下  $\sigma$  对应的剪应力  $\tau$ ，回归计算出一定应力范围内线性化后  $c, \varphi$  值。

表 5 两种算法计算的岩体抗剪强度力学参数  
Table 5 Mechanical parameters of shear strength of rock mass obtained by two methods

位置	岩体名称(风化程度)	本文提出的算法		Hoek-Brown 准则拟合算法	
		$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$
保山岸	白云质灰岩(微风化)	2.54	34	2.09	33
	白云质灰岩(中风化)	1.40	31	1.40	30
大理岸	白云质灰岩(微风化)	1.81	31	1.60	31
	白云质灰岩(中风化)	0.99	26	0.99	26
	泥晶灰岩(中风化)	1.27	26	1.09	27

从图 4~8 可以看出，在  $\sigma_3$  的取值区间为  $0 < \sigma_3 < 0.25\sigma_c$  时，保山岸微风化白云质灰岩、保山岸中风化白云质灰岩、大理岸微风化白云质灰岩、大理岸中风化白云质灰岩、大理岸中风化泥晶灰岩强度指标拟合相关系数  $R$  分别为 0.991 3、0.989 9、0.990 3、0.987 9、0.987 8。由此可知，Hoek 建议的非线性关系曲线在  $\sigma_{3max}$  为  $0.25\sigma_c$  时拟合为直线的相关性较好，能满足工程计算精度要求。所以，为方便工程使用，在依据本文算法给出的第 1 种方法

来确定正应力  $\sigma$  之后，采用线性拟合确定研究区凝聚力  $c$  值和内摩擦角  $\varphi$  值的方法是合理的。

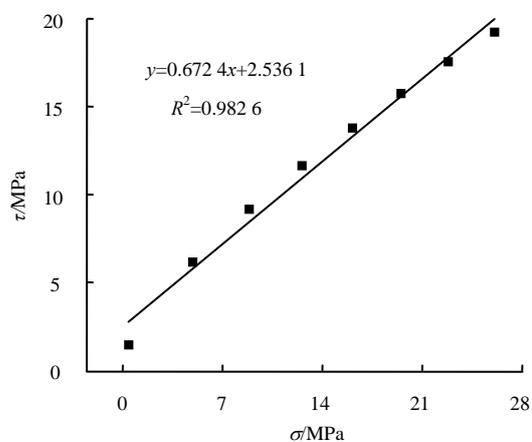


图 4 保山岸白云质灰岩（微风化）强度指标拟合  
Fig.4 Strength index fitting of Baoshan bank lightly weathered dolomitic limestone

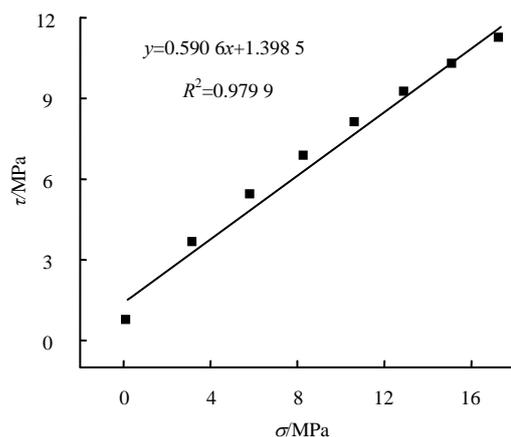


图 5 保山岸白云质灰岩（中风化）强度指标拟合  
Fig.5 Strength index fitting of Baoshan bank moderately weathered dolomitic limestone

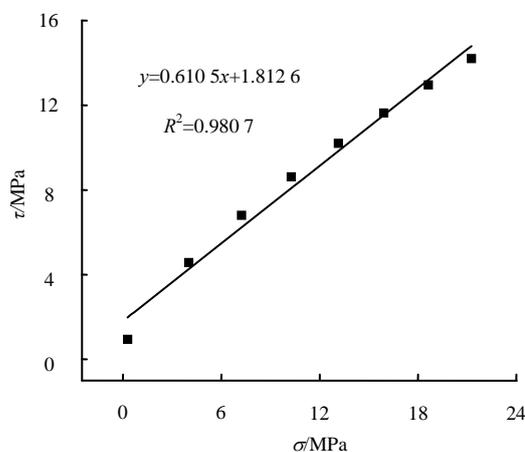


图 6 大理岸白云质灰岩（微风化）强度指标拟合  
Fig.6 Strength index fitting of Dali bank slightly weathered dolomitic limestone

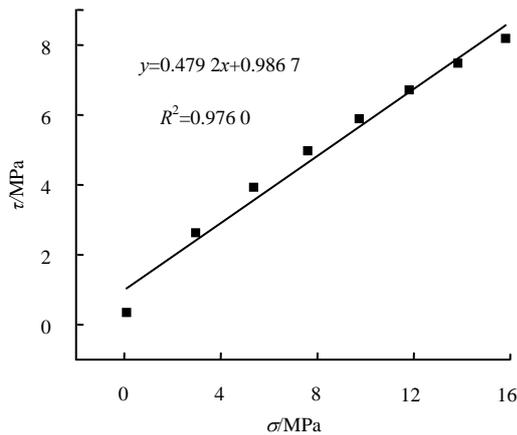


图 7 大理岸白云质灰岩（中风化）强度指标拟合  
Fig.7 Strength index fitting of Dali bank moderately weathered dolomitic limestone

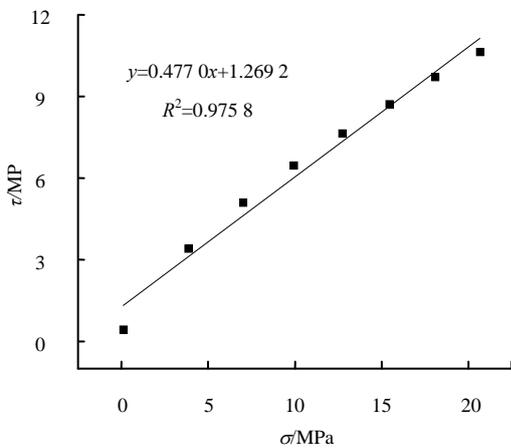


图 8 大理岸泥晶灰岩（中风化）强度指标拟合  
Fig.8 Strength index fitting of Dali bank moderately weathered micritic limestone

### 3.3 计算结果分析

图 9、10 为两种算法得出的岩体凝聚力  $c$  值和内摩擦值角  $\varphi$  比较。图中横坐标表示的是岩体名称，1 代表保山岸微风化白云质灰岩、2 代表保山岸中风化白云质灰岩、3 代表大理岸微风化白云质灰岩、4 代表大理岸中风化白云质灰岩、5 代表大理岸中风化泥晶灰岩。

(1) 通过  $c$  值的计算结果对比分析可知（见图 9），Hoek-Brown 准则拟合算法与本文提出的算法相比，两者在  $c$  值上的平均相对误差为 10.23%，差别不大。

(2) 通过  $\varphi$  值的计算结果对比分析可知（见图 10），Hoek-Brown 准则拟合算法与本文提出的算法相比，两者在  $\varphi$  值上的平均相对误差为 2.03%，差别较小，可以认为两种算法所得  $\varphi$  值基本等效。

由于受到时间的限制，没有进行现场大型原位剪切试验，无法直观地验证采用本文算法给出的第 1 种确定正应力  $\sigma$  的方法所得研究区的  $c$ 、 $\varphi$  值的

合理性，但以此种方法所得研究区岩体力学参数进行工程稳定性数值模拟，其计算结果与现场开挖区实际破坏情况基本一致，所以采用本文算法给出的第 1 种确定正应力  $\sigma$  的方法获取研究区的抗剪强度力学参数具有一定合理性，所得结果可以满足研究区工程实践所需的计算精度要求，达到低成本和实现安全的目的。

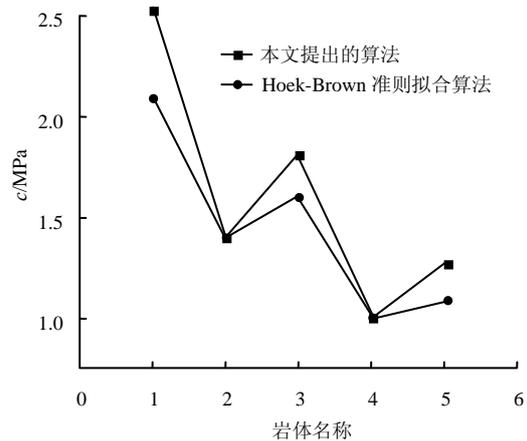


图 9 两种方法确定的岩体凝聚力比较  
Fig.9 Comparison for rock mass cohesive force from two methods

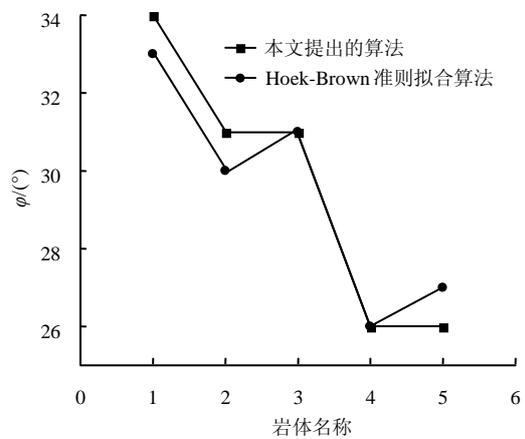


图 10 两种方法确定的岩体内摩擦角比较  
Fig.10 Comparison for rock mass internal friction angle from two methods

### 3.4 进一步对比研究

为了进一步研究本文提出算法与 Hoek-Brown 准则拟合算法所得的岩体抗剪强度力学参数的差别。以文献[9]中有关数据为例，采用本文算法给出的第 1 种确定正应力  $\sigma$  的方法和 Hoek-Brown 准则拟合算法进行计算，并将所得的结果进行对比分析。

图 11 和图 12 为两种算法计算所得凝聚力  $c$  值和内摩擦角  $\varphi$  值的比较。1 代表原岩泥灰岩、2 代表层状块裂泥灰岩、3 代表层状碎裂泥灰岩、4 代表原岩泥岩、5 代表层状块裂泥岩、6 代表层状碎裂泥岩。

由图11、12对比可知, 本文提出的算法估算的凝聚力  $c$  值比Hoek-Brown准则拟合算法所得的结果稍偏低, 平均差值约为0.22; 而  $\varphi$  值却稍偏高, 平均差值为3.48。所以, 两种算法估算的  $c$ 、 $\varphi$  值差值不大。

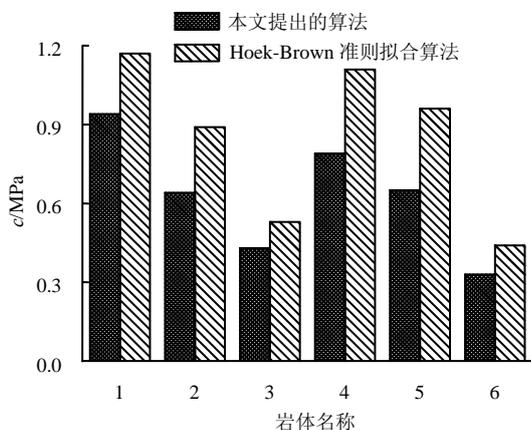


图 11 两种方法确定的岩体凝聚力比较  
Fig.11 Comparison for rock mass cohesive force from two methods

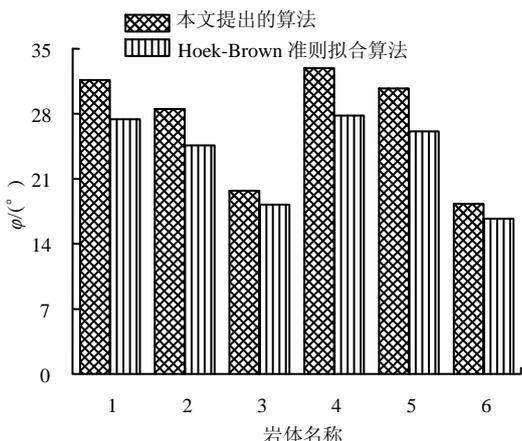


图 12 两种方法确定的岩体内摩擦角比较  
Fig.12 Comparison for rock mass internal friction angle from two methods

从上述和分析可知, 在对中缅油气管道(国内段)澜沧江跨域工程边坡岩体应用以及进一步对比研究中, 采用本文算法给出的第 1 种确定正应力  $\sigma$  的方法(依据围压  $\sigma_3$ )与 Hoek-Brown 准则拟合算法所得的  $c$ 、 $\varphi$  值差别不大, 造成差值的原因是两种算法考虑的因素不太一样, 两者除了考虑岩体完整性、节理状态、岩体的扰动程度和地下水等因素的影响外, 对于 Hoek-Brown 准则拟合算法还考虑了边坡高度的影响, 而边坡高度的取值直接影响围压  $\sigma_3$  或正应力  $\sigma$  的大小。所以, 围压  $\sigma_3$  或正应力  $\sigma$  大小不同导致两种算法求取的  $c$ 、 $\varphi$  值有所差别, 围压  $\sigma_3$  或正应力  $\sigma$  越大, 估算的  $c$  值越大, 而  $\varphi$  值

越小, 即岩体抗剪强度力学参数取值依赖围压  $\sigma_3$  或正应力  $\sigma$  的大小。可见, 采用本文提出的算法时, 一定应用范围内的正应力  $\sigma$  的确定是关键, 若实际正应力  $\sigma$  较低, 采用本文算法给出的第 1 种确定一定范围内正应力  $\sigma$  方法, 即在  $\sigma_3$  的取值区间内从 0 逐渐增大到  $0.25\sigma_c$  取 8 组等间距分布的  $\sigma_3$  来确定正应力  $\sigma$ , 这样计算出来的  $c$  值偏大, 而  $\varphi$  值偏小。此时, 应采用本文算法给出的第 2 种方法来确定一定范围内的正应力  $\sigma$ , 即在实际应用范围之内来确定正应力  $\sigma$ , 这样求取的  $c$ 、 $\varphi$  值才与实际情况较为符合, 克服了本文算法给出的第一种确定正应力  $\sigma$  的方法和 Hoek-Brown 准则拟合算法在求取岩体抗剪强度力学参数时对围压  $\sigma_3$  的依赖性问题。另外, 两种算法都主要适用于最小主应力最大值在  $0.25\sigma_c$  范围内, 属于大部分工程的应用范围, 在该范围内, Hoek 建议的非线性关系近似于直线, 拟合相关系数较好, 与 Mohr-Coulomb 强度准则曲线比较吻合, 达到工程计算精度要求。

### 4 结 论

(1) 本文提出的算法考虑了岩体抗剪破坏时总体或平均水平的算法, 通过计算出不同正应力  $\sigma$  下对应的剪应力  $\tau$ , 线性回归确定一定应力范围内线性化后的  $c$ 、 $\varphi$  值, 能较好地反映在一定应力范围内岩体破坏时的总体或平均水平, 解决了 Hoek-Brown 准则拟合算法不能求解一定正应力  $\sigma$  条件下岩土抗剪强度的问题。

(2) 在对中缅油气管道(国内段)澜沧江跨域工程边坡岩体应用以及进一步对比研究中, 结果表明: 采用本文算法给出的第 1 种确定正应力  $\sigma$  的方法所得的  $c$ 、 $\varphi$  值与 Hoek-Brown 准则拟合算法所得的结果相差不大, 究其原因是两种算法考虑的因素不太一样, 影响计算过程中的围压  $\sigma_3$  大小有所差别, 围压  $\sigma_3$  越大,  $c$  值越大,  $\varphi$  值越小。

(3) 在实际正应力  $\sigma$  较低的情况下, 应用本文算法给出的第 2 种确定正应力的  $\sigma$  的方法能使获取的  $c$ 、 $\varphi$  值与实际情况比较接近, 克服了 Hoek-Brown 准则拟合算法对围压  $\sigma_3$  依赖的问题, 其成果对工程设计和施工有重要指导意义。

(4) 本文提出的算法主要适用于最小主应力最大值在  $0.25\sigma_c$  范围内, 属于大部分工程的应用范围, 在该范围内, Hoek 建议的非线性关系近似于直线, 拟合相关系数较好, 与 Mohr-Coulomb 强度准则曲线比较吻合, 所得的结果能达到工程计算所需精度要求。

## 参 考 文 献

- [1] 宋彦辉, 巨广宏. 基于原位试验和规范的岩体抗剪强度与 Hoek-Brown 准则估值比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 1000—1006.  
SONG Yan-hui, JU Guang-hong. Determination of rock mass shear strength based on in-situ tests and codes and comparison with estimation by Hoek-Brown criterion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(5): 1000—1006.
- [2] 何满潮, 薛延河, 彭延飞. 工程岩体力学参数确定方法的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 225—229.  
HE Man-chao, XUE Yan-he, PENG Yan-fei. A new way of determining mechanical parameters of engineering rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(2): 225—229.
- [3] GERGI M. On the valuation of strength and resistance condition of the rock in natural rock mass[C]// Proceedings of the Second Congress of the International Society for Rock Mechanics. Belgrade: Yugoslavian Science Press, 1970: 365—374.
- [4] 陈志坚, 孙英学. 裂隙岩体力学参数的弱化处理[J]. 江苏地质, 2000, 24(1): 36—38.  
CHEN Zhi-jian, SUN Ying-xue. Weakening treatment to the mechanic parameters of fissured Rock Mass[J]. **Jiangsu Geology**, 2000, 24(1): 36—38.
- [5] 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—4035.  
YAN Chang-bin, XU Guo-yuan. Modification of Hoek-Brown expressions and its application to engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(22): 4030—4035.
- [6] 韩风山. 大体积节理化岩体强度与力学参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 777—780.  
HAN Feng-shan. Strength and mechanical parameters of large-volume jointed rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(5): 777—780.
- [7] 范永波, 任爱武, 熊峥. 基于 GSI 的锦屏地下厂房岩体参数研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 956—962.  
FAN Yong-bo, REN Ai-wu, XIONG Zheng. Geological strength index method for rock mass parameters about Jinping underground caverns[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010, 18(6): 956—962.
- [8] 廖秋林, 李晓, 张年学, 等. E.Hoek 法在节理化岩体力学参数评价中的应用—以长江三峡库区白衣庵滑坡为例[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1641—1644.  
LIAO Qiu-lin, LI Xiao, ZHANG Nian-xue, et al. Application of E. Hoek method to evaluating mechanical parameters of closely jointed rock mass—A case study of Baiyian Landslide in Three Gorges area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(10): 1641—1644.
- [9] 韩现民, 李晓, 孙喜书. GSI 在节理化岩体力学参数评价中的应用—以金川二矿区水平矿柱为例[J]. 金属矿山, 2009, (1): 25—29.  
HAN Xian-min, LI Xiao, SUN Xi-shu. application of GSI in evaluating the mechanical parameters of jointed rock mass—A case study of horizontal ore pillar in No. 2 mine section of Jinchuan[J]. **Metal Mine**, 2009, (1): 25—29.
- [10] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. **Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.**, 1997, 34(8): 1165—1187.
- [11] HOEK E, MARINOS P, BENISSI M. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 1988, 57(2): 151—160.
- [12] MARINOS P, HOEK E, GSI—A geologically friendly tool for rock mass strength estimation[C]//Proceedings of the 2000 International Conference on Geotechnical and Geological Engineering. Melbourne. Australia: [s. n.], 2000.
- [13] HOEK E, CARRANZA-TORRES C T, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion—2002 edition[C]//Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium. Toronto, Canada: [s.n.], 2002: 267—273.
- [14] 黄高峰. Hoek-Brown 强度准则在岩体工程中的应用研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2008.
- [15] 杨泽, 侯克鹏, 李克钢, 等. 云锡大屯锡矿岩体力学参数的确定[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1923—1928.  
YANG Ze, HOU Ke-peng, LI Ke-gang, et al. Determination of mechanical parameters of rock mass from Yunxi Datun tin mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1923—1928.
- [16] 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的方法及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 23(7): 1458—1466.  
XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, LIU Xiu-min, 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, 23(7): 1458—1466.
- [17] 胡盛明, 胡修文. 基于量化的 GSI 系统和 Hoek-Brown 准则的岩体力学参数的估计[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 861—865.  
HU Sheng-ming, HU Xiu-wen. Estimation of rock mass parameters based on quantitative GSI system and Hoek-Brown criterion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(3): 861—865.