

# 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

宋彦辉<sup>1</sup>, 巨广宏<sup>2</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 中国水电工程顾问集团 西北勘测设计研究院工程勘察分院, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 简要论述目前岩体抗剪强度确定方法, 以黄河上游玛尔挡水电站坝基岩体为例, 在岩体质量分级基础上, 引入规范建议值及现场原位大型剪切试验结果, 建立岩体抗剪强度指标与  $BQ$  岩体质量分级的相关关系。同时利用实测资料建立  $BQ$  与  $GSI$  的相关关系, 运用 Hoek-Brown 准则估算各试验点岩体的抗剪强度指标。结果表明, 采用该研究成果较符合工程实际, 而采用 Hoek-Brown 准则估算的等效内摩擦因数偏小, 黏聚力则偏大很多。误差分析表明, 这一结果主要是由 Hoek-Brown 准则中最小主应力的取值范围引起的, 据此提出公式应用中需注意的问题及相应解决方法。

**关键词:** 岩石力学; 岩体抗剪强度; 岩体质量分级; 大型剪切试验; Hoek-Brown 准则

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2012)05 - 1000 - 07

## DETERMINATION OF ROCK MASS SHEAR STRENGTH BASED ON IN-SITU TESTS AND CODES AND COMPARISON WITH ESTIMATION BY HOEK-BROWN CRITERION

SONG Yanhui<sup>1</sup>, JU Guanghong<sup>2</sup>

(1. School of Geology Engineering and Geometrics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Engineering Investigation Branch, HydroChina Xibei Engineering Corporation, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

**Abstract:** Approach of determining shear strength of rock mass at present is briefly reviewed. Taking Maerdang hydropower station located in the upstream of the Yellow River for example, the relationship between shear strength and  $BQ$  rating is built up on the basis of rock mass classification, suggested shear strength by codes and in-situ large scale shearing test; and the relationship between  $BQ$  rating and  $GSI$  is also created according to field survey and measurement. Based on these, shear strength of rock mass at in-situ test point is estimated by Hoek-Brown criterion. The result shows that rock mass shear strength derived from this paper's method is coincident with practical situation; while equivalent fraction coefficient from Hoek-Brown criterion is lower than test value and cohesion force is far greater than that from shearing test. It is shown by error analysis that the difference between experiment values and estimated ones is mostly induced by the span of minimum principal stress used in Hoek-Brown criterion. For this situation, some cautions and corresponding resolve methods while using Hoek-Brown criterion are reminded.

**Key words:** rock mechanics; shear strength of rock mass; rock mass classification; large-scale shearing test; Hoek-Brown criterion

**收稿日期:** 2011 - 12 - 20; **修回日期:** 2012 - 03 - 03

**作者简介:** 宋彦辉(1968 -), 男, 博士, 1991年毕业于桂林冶金地质学院水文地质与工程地质专业, 现任副教授, 主要从事地质工程方面的教学与研究工作。E-mail: dcdgx30@chd.edu.cn

## 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。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。为解决这一问题,国内外众多工程界和学术界的专家、学者进行了不懈努力,从而出现了以岩体质量分级(RMR)或地质强度指数(GSI)为基础的Hoek-Brown经验方法等一些代表性取值方法。之后, M. Cai等<sup>[1-6]</sup>对这一方法进行了不断探索,如 M. Cai等<sup>[1]</sup>为运用Hoek-Brown准则发展了GSI的半定量确定方法; X. L. Yang和J. H. Yin<sup>[2]</sup>基于非线性Hoek-Brown准则提出了斜坡岩体等效抗剪强度估算方法; J. C. Justo等<sup>[3-6]</sup>也从不同方面对Hoek-Brown准则进行了研究和运用。此外,武雄等<sup>[7]</sup>综合运用经验类比、GSI、连通率与宏观地质条件等建立了工程岩体抗剪强度综合方法(GMEM)等。上述研究促进了岩体抗剪强度参数取值方法的发展。然而,由于经验估算方法主要基于工程师对岩体质量的判断和认知,主观成分较大,在重要工程或大型工程中不能单独用来确定岩体抗剪强度指标,因此有必要发展一种结合现场试验、规范并与经验强度准则相比较的综合确定方法,从而使岩体力学参数取值更可靠,进而保证岩石工程的安全性。

基于上述思路,本文在简要阐述已有岩体抗剪强度取值方法基础上,以黄河上游玛尔挡水电站为例,提出了基于原位试验和规范推荐的岩体抗剪强度确定方法,该方法注重宏观岩体力学参数取值,将岩体质量分级、原位试验结果及现行规范融合在一起,建立了BQ值与岩体抗剪参数 $c$ ,  $\varphi$ 值之间的关系。这一方法由于采用了具体工程的原位试验结果,也参照了规范提供的有效数据,使得建立的关系能够较好地应用于实际工程。同时,比较了玛尔挡水电站工程岩体抗剪强度试验值和利用Hoek-Brown经验强度准则得到的估算值。详细分析了两者之间误差的原因,并提出了相应解决方法和应注

意的问题。

## 2 岩体抗剪强度参数取值方法概述

### 2.1 基于原位大剪试验的确定方法

原位大剪试验是确定岩体抗剪强度最直接、最可靠的方法,它是其他所有取值方法的基础。尽管该方法受到试验尺寸、试点代表性等问题的影响,但目前尚无可替代。因此,对大型岩石工程,仍以采用试验值为主,其他方法进行补充和相互论证。通常对所得试验数据经过回归统计分析求得抗剪强度参数指标,常用的处理方法主要有最小二乘法、点群中心法、优定斜率法及可靠度分析法等<sup>[8]</sup>。

### 2.2 基于经验强度准则的确定方法

经验公式法是根据各种试验及野外地质参数建立起来的抗剪强度指标与相关地质参数之间的经验公式,由于该方法能够根据有关地质参数较易获得不同工程部位的抗剪强度指标,故在工程中得到广泛运用,尤其是工程设计的初始阶段。代表性的有巴顿的抗剪强度经验公式和Hoek-Brown准则。N. Barton<sup>[9]</sup>基于Q岩体质量分级,提出了岩体抗剪强度的经验公式:

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{J_r J_w}{J_a} \right) \quad (1)$$

$$c = \frac{RQD}{J_n} \frac{1}{SRF} \frac{\sigma_c}{100} \quad (2)$$

式中: $\varphi$ 为岩体内摩擦角( $^\circ$ ); $c$ 为岩体黏聚力(MPa); $J_r$ ,  $J_a$ ,  $J_w$ ,  $J_n$ 分别为节理粗糙度系数、节理蚀变系数、节理水折减系数和节理组数; $RQD$ 为岩石质量指标(%); $SRF$ 为应力折减系数; $\sigma_c$ 为岩石单轴抗压强度(MPa)。

E. Hoek等<sup>[10]</sup>在大量岩体试验成果统计分析的基础上,用试错法提出裂隙岩体狭义的Hoek-Brown准则之后,针对该强度准则的不足,提出了修正后的经验公式:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (3)$$

式中: $m_b$ 为经验参数值; $s$ ,  $a$ 均为与岩体特征有关的常数; $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ 分别为岩体破坏时的最大和最小主应力(MPa)。与式(1), (2)相对应的等效岩体抗剪强度参数 $\varphi$ 与 $c$ 计算公式<sup>[11]</sup>分别为

$$\varphi = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (4)$$

$$c = \frac{\sigma_c(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \quad (5)$$

式中： $\sigma_{3n}$ 为侧限应力上限值与岩块单轴抗压强度的比值。应说明的是，Hoek-Brown 准则中的有关参数是基于岩体质量分级  $GSI$  获得的，目前已有开发出的软件 RocLab(www.roscience.com)可直接计算岩体的抗剪强度等参数。

### 2.3 基于计算机模拟试验的确定方法

由于计算机模拟技术的不断进步，一些学者开始了岩体力学参数取值的计算机模拟试验研究。该方法主要是在野外调查和室内岩块力学试验成果的基础上，通过建立大尺度工程岩体概化模型，进行不同尺寸数值模拟试验，从而确定岩体力学参数。何满潮等<sup>[12-13]</sup>在这方面进行了研究。

除上述工程岩体抗剪强度确定方法外，还有岩体质量分级法、工程类比法(包括人工智能分析法)、反演分析法等。

## 3 基于试验及规范的岩体抗剪强度确定方法及实例研究

### 3.1 方法概述

对于大型岩石工程，为确保工程安全，原位大型剪切试验是必不可少的，但由于现场条件、时间、工程费用等的限制，试验数量往往受到很大限制，不同地质单元(不同风化带、不同岩性等)的试验数量往往较少，这样就给参数取值带来一定困难。为解决这一问题，首先要在大量野外调查、统计及相关测试基础上，对工程岩体进行分级，如  $BQ$ ， $RMR$  分级等，并得到相关分级的量化评分值，把此分级值与试验得到的岩体抗剪强度指标  $c$ ， $\varphi$  值及现行规范建议值建立经验关系，由此可以通过岩体质量分级得到工程区所有岩体的抗剪强度指标。由于建立经验关系时，不仅采用了具体岩石工程的原位测试结果，而且应用了规范的建议值，因此该取值方法具有较高的可靠度。

### 3.2 实例研究

玛尔挡水电站坝址位于青海省玛沁县拉军镇上游约 5 km 的黄河干流上，最初设计坝型为双曲拱

坝，坝高 215 m，工程规模为 I 等大(1)型工程，主要建筑物为 1 级，次要建筑物为 3 级，是一座以发电为主的大型水电枢纽工程。

坝址区出露的地层主要为三叠系中~上统 ( $T_{2,3}$ -Ss) 变质砂岩及中生代侵入二长岩( $\pi\gamma_5$ )，两者呈侵入接触关系，接触面工程性状较好。

为获得坝基岩体抗剪强度指标，共进行岩体抗剪(断)强度试验 10 组，其中二长岩中 6 组，变质砂岩中 4 组。考虑到建基岩体主要为微新岩体，故抗剪强度试验主要在这类岩体中进行，表 1 给出了岩体抗剪强度试验结果特征。

表 1 岩体原位抗剪强度试验结果

Table 1 Results of in-situ shear strength test of rock mass

试验 编号	岩性	风化 程度	纵波 速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$BQ$ 值	抗剪断				抗剪	
					峰值		屈服值		比例 极限 值 $f$	屈服 值 $f$
					$f'$	$c'/MPa$	$f'$	$c'/MPa$		
$\tau 18-1$	二长岩	微新	5 515	671	1.90	1.93	1.82	1.83	1.16	1.34
$\tau 18-2$	二长岩	微新	5 360	657	1.80	2.06	1.73	2.00	1.14	1.52
$\tau 21-1$	二长岩	弱风化	3 930	443	1.40	2.15	1.32	2.10	0.85	1.09
$\tau 21-2$	二长岩	微新	5 225	644	1.49	2.61	1.46	2.47	1.05	1.43
$\tau 32-1$	二长岩	微新	4 725	564	1.61	2.55	1.56	2.48	1.20	1.34
$\tau 35-1$	二长岩	微新	4 690	558	1.70	2.08	1.68	1.97	1.09	1.32
$\tau 31-1$	变质砂岩	微新	5 090	635	1.62	1.70	1.54	1.69	0.88	1.07
$\tau 31-2$	变质砂岩	微新	5 430	666	1.64	1.81	1.60	1.74	1.04	1.32
$\tau 38-1$	变质砂岩	微新	5 280	652	1.54	1.81	1.42	1.44	1.04	1.19
$\tau 38-2$	变质砂岩	微新	4 780	590	1.47	2.07	1.39	1.84	0.90	1.15

由表 1 可知，岩体抗剪强度试验主要在微新岩体中进行，弱风化中的试验仅一组，因此，如何根据这些试验结果将岩体的抗剪强度推广至整个工程区值得进一步研究。方法之一是将试验点的有关地质参数与岩体的抗剪强度之间建立起相关关系，这样就可按照这一关系将有限的试验结果进行拓展。

在所有地质参数中，既能反映岩体强度，又能反映岩体完整程度的指标为岩体弹性波纵波波速以及岩体质量分级。其他地质参数如  $RQD$ 、节理间距、节理裂隙率等仅反映岩体的完整程度而不能体现岩体的强度特征，故利用这些指标建立与岩体抗剪强度参数之间的关系时，会受到一定限制。另一方面，由于岩体试验数量有限，二长岩中的试验有 6 组，变质砂岩中为 4 组，从统计学的角度来看，仅二长岩中的试验可进行统计分析，而变质砂岩由于试验

数量少而不能进行相关关系的建立。并且已有试验基本上都是在微新岩体中进行的，缺少在弱风化带或岩体质量相对较差岩体中的试验，这也为建立一个良好的相关关系带来了困难。为解决这一问题，可充分利用各种规范提供的岩体强度值，并结合坝址的试验结果进行拟合研究，以其得到符合实际的岩体力学参数。

国家标准<sup>[14]</sup>和规范<sup>[15]</sup>均对各类岩体的抗剪断强度指标提供了建议值(见表 2, 3)，从表 2, 3 的对比可以看出，利用BQ得到的岩体质量分级与坝基对应级别岩体的抗剪断强度参数基本一致。

由于规范提供的参数是经大量工程实践检验运用的，具有广泛代表性，因此将其与具体现场试验结果相融合不仅能够弥补现场试验不足的缺憾及由于试验点偏少可能导致的误差，而且能够很好满足规范的要求，从而达到工程实际与规范统一的良好效果。而 BQ 分级值能很好地反映 2 种规范的岩体抗剪强度参数，并且该分级不依赖于人的主观判断和经验，减少了不同地质工程师对岩体质量评判的误差，故利用 BQ 分级值进行岩体抗剪强度拟合分析较为适宜。

研究时将规范取值与现场试验相融合，利用最小二乘法进行拟合分析，得到坝址岩体 BQ 分级与岩体抗剪(断)强度之间的相关关系(见图 1~3)。

由图 1~3 可见，其相关系数均较高，说明均具有较好的拟合关系，可用来推广到整个坝址区。

## 4 Hoek-Brown 经验强度准则估算值与试验值比较

### 4.1 经验强度估算值及与试验值比较

Hoek-Brown经验强度准则中众多参数都是基于GSI获得的，如果已知试验点岩体的GSI值及岩块单轴抗压强度，则较易计算岩体的抗剪强度指标 $c$ ， $\phi$ 值。根据M. Hashemi等<sup>[16]</sup>的研究，GSI的估计可通过 3 种途径：第一种是直接通过野外岩体露头的观察和测量，通过与GSI图表比较获得；第二种是由RMR值来估算，此时，有如下公式：

$$GSI = RMR_{76} \quad (RMR_{76} > 18) \quad (6)$$

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (RMR_{89} > 23) \quad (7)$$

表 2 岩体物理力学参数<sup>[14]</sup>

Table 2 Physico-mechanical parameters of rock mass<sup>[14]</sup>

岩体基本质量级别	BQ 值	容重(kN · m <sup>-3</sup> )	抗剪断峰值强度		变形模量/GPa	泊松比
			内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa		
I	>550	>26.5	>60	>2.1	>33.0	<0.20
II	451~550		60~50	2.1~1.5	33.0~20.0	0.20~0.25
III	351~450	26.5~24.5	50~39	1.5~0.7	20.0~6.0	0.25~0.30
IV	251~350	24.5~22.5	39~27	0.7~0.2	6.0~1.3	0.30~0.35
V	≤250	<22.5	<27	<0.2	<1.3	>0.35

表 3 坝基岩体力学参数<sup>[15]</sup>

Table 3 Mechanical parameters of rock mass as dam foundation<sup>[15]</sup>

岩体分类	混凝土与基岩接触面			岩 体			岩体变形模量 E/GPa
	抗剪断		抗剪 f	抗剪断		抗剪 f	
	f'	c'/MPa		f'	c'/MPa		
I	1.50~1.30	1.50~1.30	0.85~0.75	1.60~1.40	2.50~2.00	0.90~0.80	>20.0
II	1.30~1.10	1.30~1.10	0.75~0.65	1.40~1.20	2.00~1.50	0.80~0.70	20.0~10.0
III	1.10~0.90	1.10~0.70	0.65~0.55	1.20~0.80	1.50~0.70	0.70~0.60	10.0~5.0
IV	0.90~0.70	0.70~0.30	0.55~0.40	0.80~0.55	0.70~0.30	0.60~0.45	5.0~2.0
V	0.70~0.40	0.30~0.05	0.40~0.30	0.55~0.40	0.30~0.05	0.45~0.35	2.0~0.2

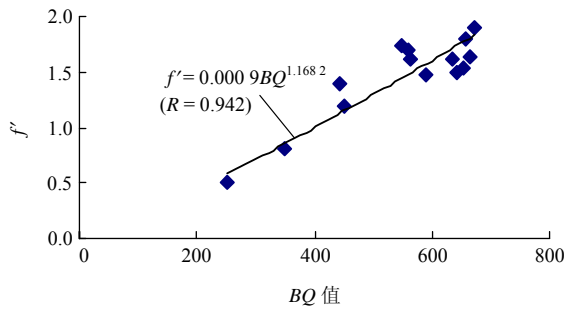


图1 BQ 值与抗剪断内摩擦因数的关系

Fig.1 Relationship between BQ and anti-cutting internal friction coefficient

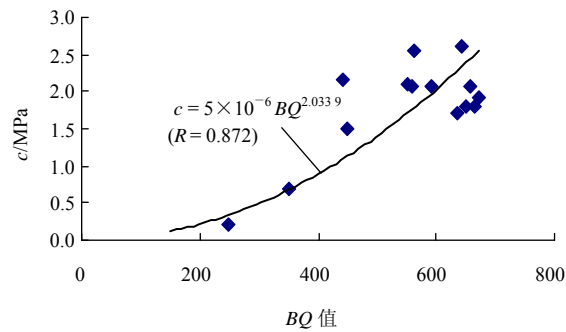


图2 BQ 值与抗剪断黏聚力的关系

Fig.2 Relationship between BQ and cohesion force

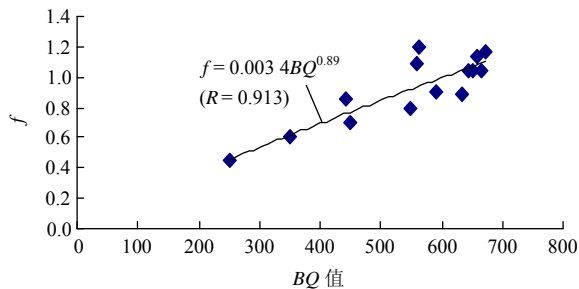


图3 BQ 值与抗剪内摩擦因数的关系

Fig.3 Relationship between BQ and anti-shearing internal friction coefficient

式(6), (7)中,  $RMR_{76}$ ,  $RMR_{89}$  分别对应于 1976 年和 1989 年 Z. T. Bieniawski 提出的岩体质量分级标准的基本值(不进行节理方位的校正)。当  $RMR_{76} < 18$  或  $RMR_{89} < 23$  时, 可采用  $Q$  分级值来获得  $GSI$ :

$$GSI = 9 \ln Q' + 44 \quad (8)$$

其中,

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \quad (9)$$

第三种获取  $GSI$  的方法是通过岩石块体体积及节理面条件因素来估算。

根据玛尔挡水电站大量实测数据的统计分析, 利用最小二乘法建立的  $BQ$  分级与  $RMR$  之间的关系(见图 4)如下:

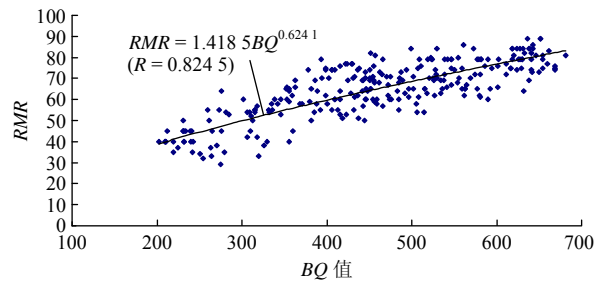


图4 RMR 与 BQ 值的关系

Fig.4 Relationship between RMR and BQ

$$RMR_{89} = 1.4185BQ^{0.6241} \quad (R = 0.8245) \quad (10)$$

根据式(7)及(10), 可得  $GSI$  和  $BQ$  的关系为

$$GSI = 1.4185BQ^{0.6241} - 5 \quad (11)$$

由此可以根据  $BQ$  值计算  $GSI$ , 然后通过 Hoek-Brown 经验强度准则估算岩体的抗剪强度指标  $c$ ,  $\phi$  值, 各试验点岩体抗剪强度估算结果见表 4。

表4 Hoek-Brown 经验强度准则估算结果

Table 4 Estimation values using Hoek-Brown criterion

试验编号	岩性	试验点 BQ 值	相应 GSI 值	Hoek-Brown 准则		
				c/MPa	$\phi(^{\circ})$	f
$\tau_{18-1}$	二长岩	671	77	11.07	47.9	1.11
$\tau_{18-2}$	二长岩	657	76	10.89	47.6	1.10
$\tau_{21-1}$	二长岩	443	59	6.62	42.7	0.92
$\tau_{21-2}$	二长岩	644	75	10.72	47.4	1.09
$\tau_{32-1}$	二长岩	564	69	9.81	45.7	1.02
$\tau_{35-1}$	二长岩	558	68	9.67	45.4	1.01
$\tau_{31-1}$	变质砂岩	635	75	9.58	43.9	0.96
$\tau_{31-2}$	变质砂岩	666	77	9.95	44.4	0.98
$\tau_{38-1}$	变质砂岩	652	76	9.76	44.2	0.97
$\tau_{38-2}$	变质砂岩	590	71	8.94	42.7	0.92

注: 采用 RocLab 程序计算, 二长岩材料常数  $m_i=30$ , 变质砂岩材料常数  $m_i=20$ , 岩石单轴抗压强度按实际取值, 扰动系数  $D=0$ 。

根据表 1, 4, 将试验值与 Hoek-Brown 准则估算值示于图 5, 6, 可以看出, Hoek-Brown 准则估算的内摩擦因数偏小, 平均差值为 0.61; 而估算的黏聚力则高出试验值很多: 试验值区间为 1.70~2.61 MPa, 而估算值则为 6.62~11.07 MPa。

#### 4.2 经验强度估算值及与试验值误差分析

岩体抗剪强度试验  $c$ ,  $\phi$  值是基于与法向应力和

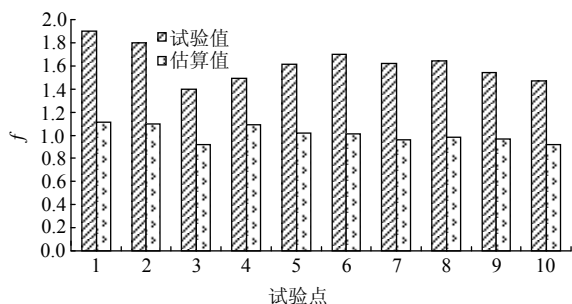


图 5 内摩擦系数试验值与 Hoek-Brown 准则估算值比较

Fig.5 Internal friction coefficients derived from in-situ shearing test and estimation value using Hoek-Brown criterion

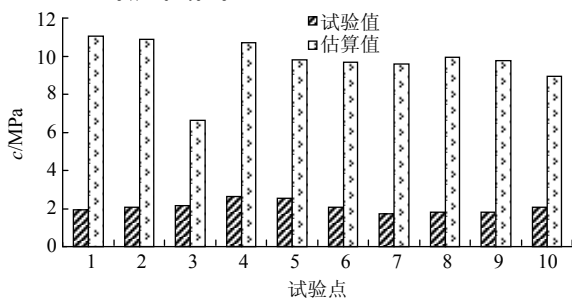


图 6 黏聚力试验值与 Hoek-Brown 准则估算值比较

Fig.6 Cohesion forces derived from in-situ shearing test and estimation values using Hoek-Brown criterion

剪切应力有关的莫尔 - 库仑破坏准则确定的，该准则中最大主应力和最小主应力的线性关系为

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \quad (12)$$

可以看出，式(12)与非线性Hoek-Brown准则(式(3))没有直接相关关系，因此通过式(3)估算岩体等效 $c$ ， $\varphi$ 值时，首先模拟产生一系列岩体三轴试验结果(假定一系列 $\sigma_3$ ，得到相应的 $\sigma_1$ )，然后通过式(12)进行线性回归分析即可求得与莫尔 - 库仑准则对应的抗剪强度指标。由于Hoek-Brown强度准则为非线性，故由此方法估算的 $c$ ， $\varphi$ 值与假定的最小主应力 $\sigma_3$ 的取值区间有较大关系(见式(4)，(5))。图 7 为假定 $\sigma_3 \leq 20$  MPa(岩块单轴抗压强度 $\sigma_c = 40$  MPa， $GSI = 50$ ， $m_i = 10$ ，岩体扰动系数 $D = 0$ )时的Hoek-Brown强度包络线及拟合的等效莫尔 - 库仑强度线，由图 7 可见，当改变 $\sigma_3$ 的取值区间时，拟合直线将随之发生变化而影响 $c$ ， $\varphi$ 值。

Hoek-Brown 建议一般情况下最小主应力的上限值可取岩块单轴抗压强度的 0.25 倍，按照这一建议，本文实例中由于二长岩、变质砂岩的单轴抗压强度较高(约 100 MPa)，则模拟时 $\sigma_3$ 的上限取值约

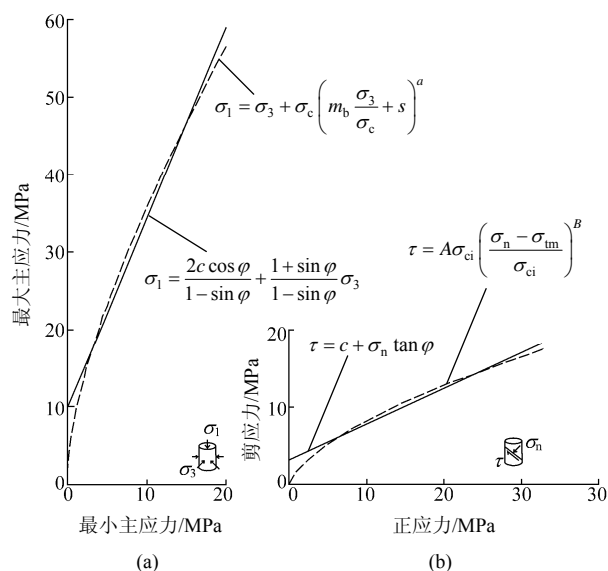


图 7 用 Hoek-Brown 准则估算等效抗剪强度

Fig.7 Estimated equivalent shear strengths using Hoek-Brown criterion

为 25 MPa，而现场大型剪切试验施加的最大法向应力一般为 2.0~3.0 MPa(以表 4 中 $\tau_{18-1}$ 试验为例，此时试算对应的 $\sigma_3$ 值小于 1 MPa)，表明此时 Hoek-Brown 准则估算条件( $\sigma_3$ 取值区间)和试验条件明显不同。从图 7(b)可以看出，在实际法向应力较低情况(如小于 5 MPa)下，用 Hoek-Brown 准则估算的结果将导致  $c$  值偏大而 $\varphi$ 值偏小，误差大小主要取决于 $\sigma_3$ 的上限。这是本文研究中实测值与估算值存在误差的主要原因，也是该估算方法本身存在的不足。鉴于此，当利用 Hoek-Brown 准则估算岩体抗剪强度时，应在实际应用范围内，使用抗剪强度曲线的切线求出  $c$ ， $\varphi$ 值，或者利用主应力和正应力的关系，试算出实际法向应力对应的 $\sigma_3$ 值，然后用该值代入式(4)，(5)进行计算。特别是当法向应力较小时更应如此，否则得到的结果误差较大。

由于式(4)，(5)中的参数多由地质强度指数 $GSI$ 及岩体扰动系数 $D$ 获取<sup>[11]</sup>，故这 2 项指标对估算结果也有直接影响，其中 $GSI$ 反映岩体的完整性及镶嵌程度，扰动系数 $D$ 反映岩体天然结构被扰动的程度，根据笔者对岩体变形模量的取值研究，表明在勘探平洞内， $D$ 值大约为 0.25。

### 5 结 论

(1) 提出了基于原位试验和规范推荐的岩体抗剪强度参数取值方法。该方法在  $BQ$  岩体质量分级基础上，利用少量原位试验成果并结合规范建立岩

体宏观抗剪强度指标  $c$ ,  $\varphi$  值与  $BQ$  分级的量化关系, 结果表明,  $c$ ,  $\varphi$  值均与  $BQ$  值呈幂函数关系, 相关程度较高, 可用来获得不同部位工程岩体的抗剪强度, 从而较好地解决大多岩石工程中试验数量偏少的问题。玛尔挡水电站坝基岩体实例研究表明, 这一方法能够取得较好效果。

(2) 通过大量实测数据的统计分析, 建立了  $BQ$  与  $RMR$  的幂函数关系, 进而获得了  $BQ$  与  $GSI$  的关系, 从而也可直接将  $BQ$  值应用于 Hoek-Brown 经验公式中。

(3) 利用 Hoek-Brown 准则估算了试验点岩体抗剪强度  $c$ ,  $\varphi$  值, 结果表明, 估算的  $c$  值远较试验值高, 而  $\varphi$  值则偏低; 误差分析表明, 其主要原因在于 Hoek-Brown 准则中最小主应力的取值范围与试验条件存在差异, 据此提出了应用 Hoek-Brown 公式估算岩体强度时应注意的问题及相应的解决方法。

(4) 本文建立的相关关系是基于玛尔挡水电站二长岩、变质砂岩的原位试验结果, 对其他坚硬岩体可作为参考。

### 参考文献(References):

- [1] CAI M, KAISER P K, UNO H, et al. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(1): 3 - 19.
- [2] YANG X L, YIN J H. Slope equivalent Mohr-Coulomb strength parameters for rock masses satisfying the Hoek-Brown criterion[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(4): 505 - 511.
- [3] JUSTO J L, JUSTO E, AZANON J M, et al. The use of rock mass classification systems to estimate the modulus and strength of jointed rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(3): 287 - 304.
- [4] 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 - 866.(HU Shengming, HU Xiuwen. Estimation of rock mass parameters based on quantitative GSI system and Hoek-Brown criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 861 - 866.(in Chinese))
- [5] 刘树新, 刘长武, 袁绍国, 等. 基于  $V.RQD$  值与 Hoek-Brown 准则的破碎岩体强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1 670 - 1 675.(LIU Shuxin, LIU Changwu, YUAN Shaoguo, et al. Study of broken rock mass strength based on  $V.RQD$  value and Hoek-Brown criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1 670 - 1 675.(in Chinese))
- [6] 任江, 余伟健. 基于 Hoek-Brown 破坏准则的岩体参数预测方法与应用[J]. 煤炭技术, 2010, 29(1): 160 - 162.(REN Jiang, YU Weijian. Method and application of rock mass parameter prediction based on Hoek-Brown criterion[J]. Coal Technology, 2010, 29(1): 160 - 162.(in Chinese))
- [7] 武雄, 贾志欣, 陈祖煜, 等. 工程岩体抗剪强度确定综合方法——GMEM 研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 246 - 251.(WU Xiong, JIA Zhixin, CHEN Zuyu, et al. Research on a synthetical method GMEM on ascertaining shear strength for engineering rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 246 - 251.(in Chinese))
- [8] 陈祖安. 中国水力发电工程(工程地质卷)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 141 - 145.(CHEN Zu'an. Hydropower engineering in china(engineering geology volume)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000: 141 - 145.(in Chinese))
- [9] BARTON N. Some new  $Q$ -value correlations to assist in site characterization and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(2): 185 - 216.
- [10] HOEK E, WOOD D, SHAH S. A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses[C]// Proceedings of Rock Characterization, Symposium of International Society of Rock Mechanics. [S.l.]: [s.n.], 1992: 209 - 213.
- [11] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion[C]// Proceedings of NARMS-TAC Conference. Toronto: [s.n.], 2002: 267 - 273.
- [12] 何满潮, 薛廷河, 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 Manchao, XUE Tinghe, PENG Yanfei. A new way of determining mechanical parameters of engineering rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 225 - 229.(in Chinese))
- [13] 杜景灿, 陈祖煜. 岩桥破坏的简化模型及在节理岩体模拟网络中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 421 - 426.(DU Jingcan, CHEN Zuyu. A simplified discontinuity propagation model and its application to mechanics of rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 421 - 426.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50218—94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995: 13.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50218—94 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1995: 13.(in Chinese))
- [15] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50487—2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009: 107.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50487—2008 Code for geological investigation of water resources and hydropower engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2009: 107.(in Chinese))
- [16] HASHEMI M, MOGHADDAS S, AJALLOEIAN R. Application of rock mass characterization for determining the mechanical properties of rock mass: a comparative study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(3): 305 - 320.