

文章编号: 1000-7598 (2011) 08-2446-07

# 基于地质强度指标与区间理论的 岩体抗剪强度确定方法

张永杰<sup>1,2</sup>, 曹文贵<sup>2</sup>, 赵明华<sup>2</sup>, 翟友成<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 土木与建筑学院, 长沙 410014; 2.湖南大学 岩土工程研究所, 长沙 410082)

**摘 要:** 针对采用结构面表面特征与岩体结构的定性描述确定岩体地质强度指标 (*GSI*) 时存在主观性较强的特点, 首先, 以结构面表面等级 (*SCR*)、节理特征系数 ( $J_c$ )、岩体结构等级 (*SR*) 与岩块体积 ( $V_b$ ) 分别对其进行取值量化, 并根据量化指标取值过程中所具有的不确定性, 采用区间数表示参数取值, 在探讨各量化指标取值方法基础上建立岩体 *GSI* 区间数确定方法; 其次, 根据 Hoek-Brown 准则等效岩体抗剪强度参数转换关系, 采用区间组合法进行求解, 进而建立出基于区间理论与 *GSI* 的岩体抗剪强度确定方法; 最后, 将其用于湖南省某水电站进水口隧道岩体抗剪强度确定, 与现有分析方法对比表明, 该方法具有一定的合理性与可行性。在试验资料不足的情况下, 该方法为岩体抗剪强度参数确定提供了一条新途径。

**关 键 词:** 岩体力学; 抗剪强度; 地质强度指标; Hoek-Brown 准则; 区间理论

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

## Method for determining rock mass shear strength based on interval theory and geological strength index

ZHANG Yong-jie<sup>1,2</sup>, CAO Wen-gui<sup>2</sup>, ZHAO Ming-hua<sup>2</sup>, ZHAI You-cheng<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410014, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The method for determining the geological strength index (*GSI*) with the surface condition and structure of rock mass mainly depends on their qualitative descriptions. There is much more subjectivity because the value is hard to get through the qualitative description. So, the quantitative indices are firstly used to determine *GSI*, such as process surface condition rate (*SCR*), joint condition coefficient ( $J_c$ ), surface rate (*SR*) and quantitative block volume ( $V_b$ ). *SCR* and  $J_c$  are used to reflect the surface condition. *SR* and  $V_b$  are used to reflect the structure of rock mass. In order to reflect the uncertainty of the quantitative indices, interval values are used to express them. Then the method for determining the interval values of *GSI* can be presented through the study of the determination of quantitative index values. Secondly, the interval combination method is presented to calculate the rock mass shear strength parameters according to the Hoek-Brown strength criterion. And the method for determining rock mass shear strength parameters based on interval theory and *GSI* is suggested. Finally, the method is used to determine the shear strength parameters of a hydropower station water intake tunnel in Hunan province. Compared with the existing analysis method, the results show that the method is reasonable and feasible. It provides a new approach to determine the shear strength parameters of rock mass, when the test data are less.

**Key words:** rock mass mechanics; shear strength; geological strength index; Hoek-Brown criterion; interval theory

## 1 引 言

岩体抗剪强度参数取值是岩体工程设计与计算的基础。考虑到岩体材料的非均质性, 有必要在现有岩体抗剪强度确定方法的基础上进一步探讨其不确定性取值方法, 为实际工程稳定可靠性分析提

供参数取值依据。

目前常用的确定方法主要有试验法、经验公式估算法、数值法以及参数反演分析法等。相比昂贵且数量有限的现场试验以及复杂的数值法与参数反演分析法, 经验公式估算法因其能综合反映岩石力学特性、结构面尺寸效应、充填情况以及风化情况

收稿日期: 2010-05-11

基金项目: 西部交通科技项目 (No. 2009318000048); 国家自然科学基金 (No. 50908024); 湖南省研究生创新基金项目 (No. CX2009B076); 长沙理工大学人才引进基金; 湖南省交通科技项目 (No. 200904)。

第一作者简介: 张永杰, 男, 1981 年生, 博士, 主要从事岩土工程稳定性分析与风险评价研究。E-mail: yjiezhang309@sohu.com

等因素的影响而在工程实践中获得广泛应用,其中,以基于地质强度指标  $GSI$  的 Hoek-Brown 准则岩体抗剪强度参数确定方法应用较为广泛。

Marinos 和 Hoek<sup>[1]</sup>、Hoek 和 Carranza 等<sup>[2]</sup>分别采用基于  $GSI$  的 Hoek-Brown 准则及其修正公式提出了岩体抗剪强度参数确定方法;武雄和贾志欣等<sup>[3]</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确定综合方法 (GMEM)。上述研究促进了岩体抗剪强度参数经验公式估算法的发展,但其未对所采用  $GSI$  的岩体结构和结构面表面特征进行取值量化,可操作性降低,人为因素增强。为此, Sonmez 等<sup>[4-5]</sup>、Cai 和 Kaiser 等<sup>[6]</sup>、韩凤山<sup>[7]</sup>、苏永华和封立志等<sup>[8]</sup>分别采用不同量化指标进行  $GSI$  取值,使岩体抗剪强度确定方法更趋合理性。但上述方法均未考虑量化指标及其影响因素取值过程中所具有的不确定性与全面性,且在多数情况下均难以采用定值表示<sup>[9-11]</sup>,因此,有必要在现有研究基础上对量化指标的选取与取值方法进行深入研究。

本文将采用结构面表面等级 (SCR) 与节理特征系数 ( $J_c$ ) 对结构面表面特征进行取值量化,采用岩体结构等级 (SR) 与岩块体积 ( $V_b$ ) 对岩体结构进行取值量化,并用区间数表示量化指标取值不确定性,进而建立出  $GSI$  区间数的确定方法。然后,根据 Hoek-Brown 准则与 Mohr-Coulomb 准则的等效关系,利用区间数运算方法建立出基于区间理论与  $GSI$  的岩体抗剪强度确定方法,以期使岩体抗剪强度参数取值方法更具合理性与可操作性。

## 2 岩体抗剪强度确定方法

### 2.1 基于 $GSI$ 的岩体抗剪强度确定方法

Hoek 等<sup>[2]</sup>在试验基础上建立了基于  $GSI$  的岩体非线性破坏 Hoek-Brown 经验强度准则,即

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (1)$$

$$m_b = m_i \exp \left( \frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (2)$$

$$s = \exp \left( \frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (4)$$

式中:  $\sigma_1$  为岩体最大主应力;  $\sigma_3$  为岩体最小主应力;  $\sigma_c$  为岩体单轴抗压强度;  $D$  为岩体扰动参数;  $m_i$  为

岩石材料常数;  $D$  与  $m_i$  的取值方法可参见文献[2, 12]。

对 Hoek-Brown 经验强度准则,与之等效的岩体抗剪强度参数  $c$  与  $\varphi$  计算公式为<sup>[2]</sup>

$$\varphi = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (5)$$

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

$$\sigma_{3n} = \sigma_{3\max} / \sigma_c \quad (7)$$

侧限应力上限值  $\sigma_{3\max}$  可由式 (8)、(9) 确定<sup>[2]</sup>

$$\text{边坡: } \sigma_{3\max} / \sigma_{cm} = 0.72 (\sigma_{cm} / \gamma H)^{-0.91} \quad (8)$$

$$\text{隧洞: } \sigma_{3\max} / \sigma_{cm} = 0.47 (\sigma_{cm} / \gamma H)^{-0.94} \quad (9)$$

式中:  $\gamma$  为岩体重度;  $H$  为岩质边坡高度或隧洞埋深;  $\sigma_{cm}$  为岩体抗压强度,可通过 Mohr-Coulomb 准则确定,即<sup>[2]</sup>

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (10)$$

当分析范围内围岩最小主应力  $\sigma_3$  满足  $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_3 < \sigma_c / 4$  时,  $\sigma_{cm}$  也可由下式确定<sup>[2]</sup>

$$\sigma_{cm} = \sigma_c \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)](m_b / 4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (11)$$

由上述分析可知,岩体抗剪强度确定的关键在于参数  $GSI$  的确定,而 Hoek 等在建立其取值方法时已经指出“从岩性、岩体结构和结构面表面特征确定  $GSI$  平均值,不必试图太精确,引用范围值  $GSI = 33 \sim 37$  比取  $GSI = 35$  更切实际”<sup>[1-2]</sup>。这说明由于地质条件的复杂性、岩体结构面特征的随机性以及认识的局限性,采用定值表示  $GSI$  取值必然不够合理,难以反映其在分析断面内所具有的取值区间不确定性,此时若采用区间数  $[GSI^L, GSI^R]$  表示则必然更具合理性 (上标 L、R 分别表示取值的下限、上限),但如何由此根据区间理论确定岩体抗剪强度仍需进行深入研究。

### 2.2 基于区间理论的岩体抗剪强度确定方法

采用区间数  $[GSI^L, GSI^R]$  确定岩体抗剪强度  $c$  与  $\varphi$  时所需其它参数主要为  $D$ 、 $m_i$ 、 $\gamma$ 、 $H$  以及  $\sigma_c$ ,其中,岩体重度  $\gamma$  与边坡高度或隧洞埋深  $H$  对于特定分析断面其变异性较小,本文采用定值表示;而  $D$ 、 $m_i$  与  $\sigma_c$  则在取值过程中考虑其所具有的区间

不确定性,  $[D^L, D^R]$  与  $[m_i^L, m_i^R]$  可根据取值标准<sup>[1]</sup>、工程施工情况与地质勘察资料分别取其可能的上、下限构成,  $[\sigma_c^L, \sigma_c^R]$  可采用岩块室内试验数据 95% 置信度对应的取值区间, 工程可行性研究阶段也可按文献[1]中的表格估计得到。

此时, 若直接根据区间数运算规则<sup>[13]</sup>进行计算, 由于变量  $GSI$ 、 $D$ 、 $m_i$  与  $\sigma_c$  的区间值在式(2)~(11)中出现两次以上, 其计算值域区间将超过真实区间, 存在一定的误差, 计算的关键在于减小误差对结果的影响。根据区间函数计算方法可知, 当功能函数与参变量呈明显单调性时可采用区间组合法进行计算, 而文献[1]给出了反映  $GSI$ 、 $m_i$  与  $c/\sigma_c$  的关系曲线以及  $GSI$ 、 $m_i$  与  $\varphi$  的关系曲线, 通过分析可知, 岩体抗剪强度值  $c$ 、 $\varphi$  在其它参数不变的情况下分别与变量  $GSI$ 、 $m_i$  及  $\sigma_c$  呈现单调递增性, 此外, 通过计算可知,  $c$ 、 $\varphi$  与  $D$  呈单调递减性, 限于篇幅, 在此暂不列出相应的分析结果。因此, 岩体抗剪强度值  $c$  与  $\varphi$  可采用区间组合法<sup>[10, 13]</sup>进行求解, 具体分析过程为:

(1) 分别取区间数  $[GSI^L, GSI^R]$ 、 $[m_i^L, m_i^R]$  与  $[\sigma_c^L, \sigma_c^R]$  的上限和  $[D^L, D^R]$  的下限得到定值变量参数组合  $\{GSI^R, D^L, m_i^R, \sigma_c^R\}$ , 代入式(2)~(11)联立求解得岩体抗剪强度参数区间数上限  $c^R$  与  $\varphi^R$ 。

(2) 分别取区间数  $[GSI^L, GSI^R]$ 、 $[m_i^L, m_i^R]$  与  $[\sigma_c^L, \sigma_c^R]$  的下限和  $[D^L, D^R]$  的上限得到定值变量参数组合  $\{GSI^L, D^R, m_i^L, \sigma_c^L\}$ , 代入式(2)~(11)联立求解得岩体抗剪强度参数区间数下限  $c^L$  与  $\varphi^L$ 。

(3) 由取值上、下限得岩体抗剪强度参数  $c$  与  $\varphi$  的区间数分别为  $[c^L, c^R]$  与  $[\varphi^L, \varphi^R]$ 。

针对所得岩体抗剪强度区间数  $[c^L, c^R]$  与  $[\varphi^L, \varphi^R]$ , 如何将其应用于工程稳定性分析成为评价该方法实用性的关键。对于以区间理论为基础的非概率可靠性分析方法<sup>[10]</sup>, 可将参数区间值直接用于工程计算; 对于定值分析方法, 可将区间数中心值  $c^r = (c^L + c^R)/2$  与  $\varphi^r = (\varphi^L + \varphi^R)/2$  作为参数  $c$  与  $\varphi$  的均值进行计算; 对于概率可靠性分析方法, 根据已有研究<sup>[11, 14]</sup>, 可将偏差  $c^p = c^R - c^r$  与  $\varphi^p = \varphi^R - \varphi^r$  作为参数  $c$  与  $\varphi$  的 3 倍标准差, 即“3 $\sigma$  原则”, 并采用  $\beta$  分布<sup>[15]</sup>表示参数  $c$  与  $\varphi$  在区间内的概率分布, 即可合理地反映了参数可能的取值分布与取值界限, 进而使所得岩体抗剪强度能应用于实际工程的定值、非概率以及概率可靠性分析。

至此, 建立出基于区间理论与  $GSI$  的岩体抗剪强度确定方法, 为工程稳定性评价提供了参数取值依据。但将上述方法用于工程实践尚需进一步探讨

岩体地质强度指标  $GSI$  区间数  $[GSI^L, GSI^R]$  的确定方法。

### 3 岩体 $GSI$ 区间数确定方法

岩体地质强度指标  $GSI$  初期仅根据结构面表面特征与岩体结构的定性描述性语言进行取值, 缺少具体的量化指标, 随机性较大, 为此, 文献[4~8]分别采用不同量化指标对其进行取值, 使  $GSI$  取值方法更趋合理性, 但上述方法所得  $GSI$  均为定值, 难以反映工程实际中的不确定性, 根据前述分析其采用区间数  $[GSI^L, GSI^R]$  表示则更具合理性, 但如何在现有研究基础上确定结构面表面特征与岩体结构的合理量化指标及其取值方法仍需深入探讨。

#### 3.1 结构面表面特征量化指标确定方法

针对  $GSI$  取值中的结构面表面特征已分别提出了结构面表面等级 ( $SCR$ )<sup>[4-5]</sup>、节理特征系数 ( $J_c$ )<sup>[6]</sup> 和绝对风化指数 ( $AWI$ )<sup>[8]</sup> 等指标进行量化取值, 其中,  $SCR$  与  $J_c$  已包含  $AWI$  的影响因素。此外, 根据文献[16-17]的研究,  $SCR$  与  $J_c$  从不同方面反映了其对  $GSI$  取值的影响, 两者间既存在联系又有不同, 因此, 本文将同时采用指标  $SCR$  与  $J_c$  对结构面表面特征进行量化取值, 以便从不同角度体现各种因素的影响, 增加取值合理性。

结构面表面等级 ( $SCR$ ) 可通过结构面粗糙度系数 ( $R_f$ )、风化系数 ( $R_w$ ) 与充填系数 ( $R_f$ ) 之和来确定<sup>[4-5]</sup>, 各参数值如表 1 所示。对实际工程, 难以根据现场描述性语言得到与表 1 完全吻合的参数值, 即难以采用定值反映参数描述性语言的定量化过程, 此时, 若采用区间数表示则更能体现思维判断过程中的不确定性以及分析范围内参数取值的不确定性<sup>[9-10]</sup>。本文基于此提出了  $R_f$ 、 $R_w$  和  $R_f$  的区间数确定方法, 即根据现场描述性语言对照表 1 中各参数 0~6 的取值范围分别取其可能的最大值与最小值, 进而得区间数  $[R_f^L, R_f^R]$ 、 $[R_w^L, R_w^R]$  与  $[R_f^L, R_f^R]$ , 则结构面表面等级区间数  $[SCR^L, SCR^R]$  为

表 1 结构面表面等级参数值  
Table 1 Surface rate values of structural surface

| 粗糙度系数( $R_f$ ) |      | 风化系数( $R_w$ ) |      | 充填系数( $R_f$ ) |        | 结构面表面<br>系数             |
|----------------|------|---------------|------|---------------|--------|-------------------------|
| 取值             | 粗糙程度 | 取值            | 风化程度 | 取值            | 充填程度   |                         |
| 6              | 很粗糙  | 6             | 未风化  | 6             | 无      | $SCR = R_f + R_w + R_f$ |
| 5              | 粗糙   | 5             | 微风化  | 4             | 硬<5 mm |                         |
| 3              | 较粗糙  | 3             | 弱风化  | 2             | 硬>5 mm |                         |
| 1              | 光滑   | 1             | 强风化  | 2             | 软<5 mm |                         |
| 0              | 擦痕   | 0             | 全风化  | 0             | 软>5 mm |                         |

$$[SCR^L, SCR^R] = [R_r^L, R_r^R] + [R_w^L, R_w^R] + [R_f^L, R_f^R] \quad (12)$$

节理特征系数 ( $J_c$ ) 可通过节理面起伏系数 ( $J_w$ )、节理面粗糙度系数 ( $J_s$ ) 和节理蚀变系数 ( $J_a$ ) 来确定, 关系式为<sup>[6]</sup>

$$J_c = \frac{J_w J_s}{J_a} \quad (13)$$

式中:  $J_w$  的分析范围为 1~10 m;  $J_s$  的分析范围为 1~20 cm; 各参数值如表 2~4 所示。

表 2 节理起伏系数  $J_w$  取值  
Table 2 Values of joint waviness coefficient  $J_w$

| 节理起伏程度 | 咬合状 | 锯齿状 | 大波动 | 中波动 | 平坦状 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| $J_w$  | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 1.0 |

表 3 节理粗糙度系数  $J_s$  取值  
Table 3 Values of joint roughness coefficient  $J_s$

| 节理粗糙程度 | 很粗糙  | 粗糙   | 较粗糙  | 光滑   | 擦痕   |
|--------|------|------|------|------|------|
| $J_s$  | 3.00 | 2.00 | 1.50 | 1.00 | 0.75 |

表 4 节理风化蚀变系数  $J_a$  取值  
Table 4 Values of joint weathering alteration coefficient  $J_a$

| 节理风化蚀变情况                               |                           | 残余摩擦角 / (°) | $J_a$      |
|----------------------------------------|---------------------------|-------------|------------|
| 节理壁直接接<br>触 (无矿物充<br>填, 或只有薄膜<br>覆盖)   | 紧密闭合, 坚硬、不软化、<br>不透水填充物   |             | 0.75       |
|                                        | 节理壁未变质, 仅表面有<br>斑染        | 25~35       | 1.00       |
|                                        | 节理壁轻微变质, 无软化<br>盖层, 砂粒等充填 | 25~30       | 2.00       |
|                                        | 粉质或砂土质薄膜覆盖,<br>有少量黏土成分    | 20~25       | 3.00       |
|                                        | 软化的或低摩擦的黏土<br>矿物覆盖层       | 8~16        | 4.00       |
| 错动 10 cm 前<br>节理壁直接接<br>触 (薄层矿物充<br>填) | 裂隙中含有砂粒、松散黏<br>土等         | 25~30       | 4.00       |
|                                        | 强烈超固结的、非软化黏<br>土矿物充填      | 16~24       | 6.00       |
|                                        | 中等或稍微超固结的软<br>化矿物充填       | 8~12        | 8.00       |
|                                        | 膨胀性黏土充填物                  | 6~12        | 8.00~12.00 |

采用描述性语言确定参数值时与  $SCR$  存在同样的问题, 因此可采用类似的方法得区间数  $[J_w^L, J_w^R]$ 、 $[J_s^L, J_s^R]$  和  $[J_a^L, J_a^R]$  表示的参数值, 则节理特征系数区间数  $[J_c^L, J_c^R]$  为

$$[J_c^L, J_c^R] = \frac{[J_w^L, J_w^R][J_s^L, J_s^R]}{[J_a^L, J_a^R]} \quad (14)$$

### 3.2 岩体结构量化指标确定方法

根据已有研究<sup>[4-8]</sup>, 岩体结构可采用岩体结构等级 ( $SR$ )、岩块体积 ( $V_b$ ) 和体积节理数 ( $J_v$ ) 等进行量化取值。根据文献<sup>[16-17]</sup>的研究, 本文采用指标  $SR$  和  $V_b$  对岩体结构进行量化取值, 以便从不同方面反映其对岩体结构的影响, 而  $J_v$  则可通过  $SR$  来反映, 即<sup>[4]</sup>

$$SR = -1.75 \ln(J_v) + 79.8 \quad (15)$$

体积节理数  $J_v$  可根据统计窗法量测并由下式计算确定, 即

$$J_v = \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i} + \frac{N_r}{5\sqrt{A}} \quad (16)$$

式中:  $S_i$  为第  $i$  组节理间平均距离;  $N_r$  为统计范围内非成组随机节理数;  $A$  为间隔 5 m 的统计窗面积。

对于 3 组或大于 3 组连续节理所切割成的岩块, 如图 1 所示, 体积  $V_b$  计算公式为<sup>[6, 18]</sup>

$$V_b = \frac{S_1 S_2 S_3}{\sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \sin \gamma_3} \quad (17)$$

式中:  $\gamma_i$  为节理组间夹角。

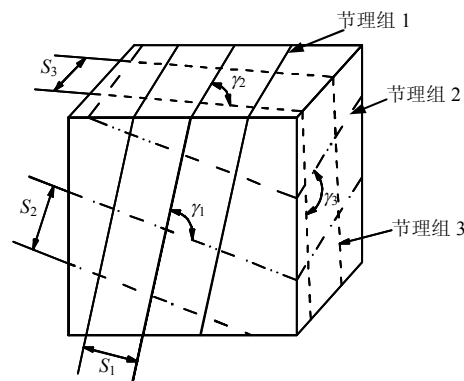


图 1 3 组节理分割形成的岩块  
Fig.1 Rock blocks divided by three joints

当岩体中存在岩桥时, 可通过节理连续性系数  $p_i$  对节理间距与岩块体积进行修正, 具体为<sup>[6, 18]</sup>

$$p_i = \begin{cases} l_i/L, & l_i < L \\ 1, & l_i \geq L \end{cases} \quad (18)$$

$$S'_i = S_i / \sqrt[3]{p_i} \quad (19)$$

$$V'_b = \frac{S'_1 S'_2 S'_3}{\sqrt[3]{p_1 p_2 p_3} \sin \gamma_1 \sin \gamma_2 \sin \gamma_3} \quad (20)$$

式中:  $l_i$  为某一方向断续节理长度之和;  $L$  为分析

断面的岩体特征长度;  $S'_i$  为节理间距修正值;  $V'_b$  为岩块体积修正值。

确定量化指标  $SR$  与  $V_b$  所需节理组间距  $S_i$  与夹角  $\gamma_i$  在分析范围内并非完全相等, 岩体节理组间也并非完全平行, 还可能部分存在岩桥, 此时  $J_v$  与  $V_b$  必然难以采用定值表示整个分析范围内的取值情况, 结合前述分析同样可采用区间数  $[S_i^L, S_i^R]$  与  $[\gamma_i^L, \gamma_i^R]$  表示  $S_i$  与  $\gamma_i$  的取值, 进而根据区间数运算规则及式 (15) ~ (20) 计算可得  $SR$  和  $V_b$  的区间数  $[SR^L, SR^R]$  和  $[V_b^L, V_b^R]$ , 其中, 参数  $N_r$ 、 $A$ 、 $l_i$  与  $L$  等采用定值表示。

根据上述方法即可建立出结构面表面特征与

岩体结构的量化指标区间数取值方法, 此时, 仍需探讨区间数  $[GSI^L, GSI^R]$  的确定方法。

### 3.3 $GSI$ 区间数确定方法

为同时反映不同量化指标体系对取值结果的影响, 首先, 采用结构面表面等级区间数  $[SCR^L, SCR^R]$  与岩体结构等级区间数  $[SR^L, SR^R]$  确定地质强度指标区间数  $[GSI_1^L, GSI_1^R]$ ; 然后, 采用节理特征系数区间数  $[J_c^L, J_c^R]$  与岩块体积区间数  $[V_b^L, V_b^R]$  确定地质强度指标区间数  $[GSI_2^L, GSI_2^R]$ ; 最后, 对两个地质强度指标区间数取交集即可得到能综合反映各量化指标影响的  $GSI$  区间数  $[GSI^L, GSI^R]$ , 具体如图 2 所示。

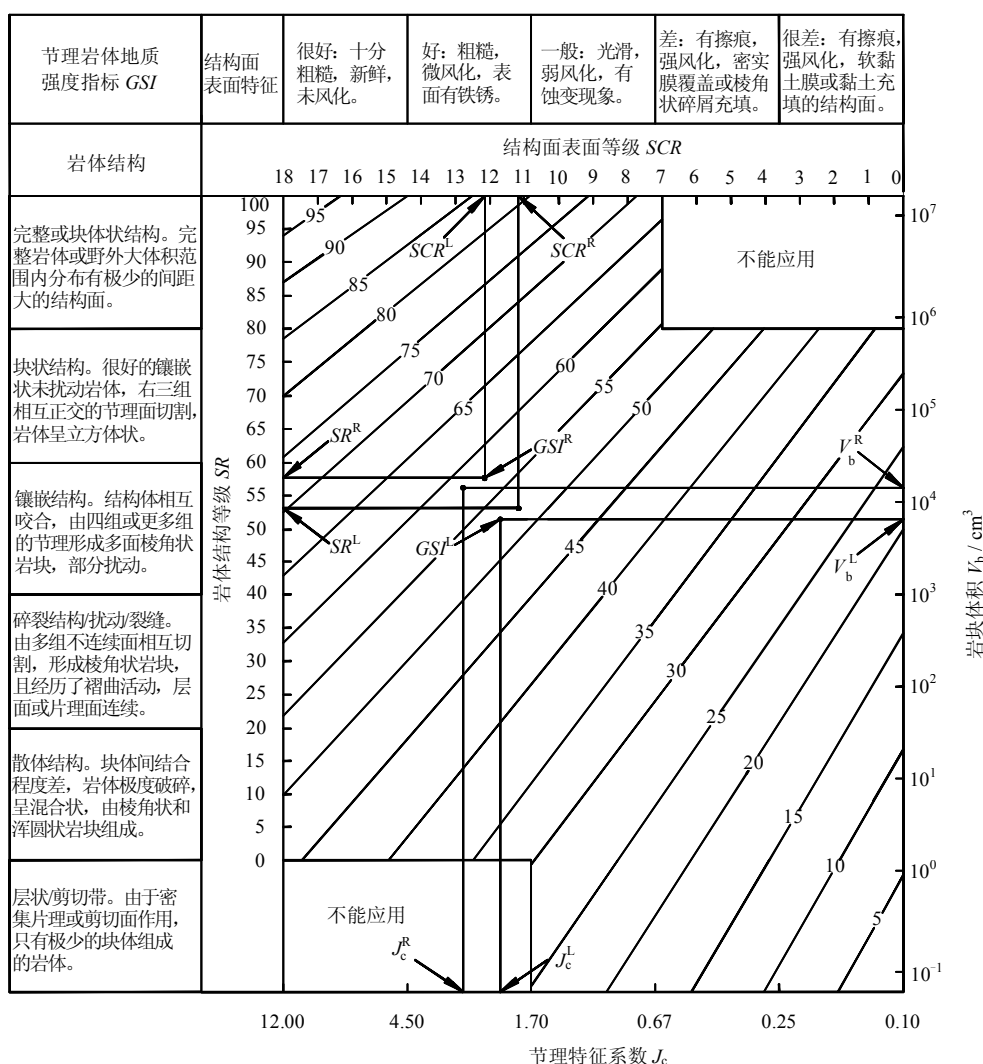


图 2 岩体地质强度指标  $GSI$  区间量化描述

Fig.2 Interval quantitative description of geological strength index  $GSI$

上述方法即为本文所建立的岩体  $GSI$  区间数确定方法, 其能反映  $GSI$  取值过程中所具有的区间不确定性, 而各量化指标的引入及其区间数表示方法则使参数确定方法更具合理性与可操作性。

至此, 建立起基于区间理论与  $GSI$  的岩体抗剪强度确定方法, 在现场试验资料不足的情况下, 其为岩体抗剪强度参数确定开辟了一条新途径, 并能反映分析范围内岩体抗剪强度参数  $c$  与  $\phi$  取值的区

间不确定性, 而各量化指标的采用则较全面地反映了各因素对取值结果影响, 同时增加了取值过程的合理性与可操作性, 使参数取值更能反映工程实际。

## 4 工程实例分析

### 4.1 工程概况

湖南省某水电站扩机工程进水口位于右坝头上游 60~120 m 段, 引水系统由 2 条引水隧洞组成, 洞径为 12.4 m, 沿线无低矮垭口, 宏观地形较整齐, 最大埋深为 190 m。本文针对右侧隧洞进行分析, 其开挖断面岩性主要为长石石英砂岩, 坚硬致密; 主要有 4 组节理切割, ①组为反倾向节理, 多呈闭合状, 节理面粗糙, 起伏程度较小, 风化程度较弱, 基本无充填, 单条延伸长度 4.5~6.2 m, 发育密度为 2.3~3.6 条/m, 间距为 0.25~0.42 m; ②组为反倾向缓倾角节理, 面平整, 多呈闭合状, 节理面较粗糙, 风化程度稍强, 单条延伸长度 3.8~5.6 m, 发育密度无规律, 一般为 2.2~3.6 条/m, 间距为 0.15~0.34 m; ③组为顺河向节理, 面平整, 多呈闭合状, 局部有方解石脉或碳酸钙粉末填充, 节理面稍光滑, 单条延伸长度 4.5~6.3 m, 发育密度为 2.5~3.8 条/m; ④组节理面多呈闭合状, 单条延伸长度 2.8~3.9 m, 发育密度为 3.2~4.5 条/m。该洞室采用光面爆破施工, 岩体重度为 27 kN/m<sup>3</sup>, 长石石英砂岩饱和单轴抗压强度取值范围为 105~115 MPa。

### 4.2 分析过程与结果

本文分析过程中各量化指标计算参数考虑 4 组节理情况综合确定, 岩块体积确定时不考节理组夹角的影响, 岩体扰动参数  $D$  的区间值取为 [0.65, 0.75], 岩石参数  $m_i$  的区间值取为 [16, 18], 右侧隧洞进尺 50 m 时的埋深为 150 m, 则通过上述地质勘测资料并结合本文方法可得岩体抗剪强度参数确定过程为:

(1) 根据地质资料确定量化指标计算参数区间值, 并按式 (12)~(20) 与图 2 计算可得右侧隧洞进尺 50 m 时的  $GSI$  区间值为 [53, 58]。

(2) 采用  $GSI$ 、 $D$  与  $m_i$  的区间数 [53, 58]、[0.7, 0.8] 与 [16, 18] 由式 (2)~(11) 及区间组合法计算可得长石石英砂岩岩体抗剪强度参数  $c$  与  $\varphi$  的区间值分别为 [0.892 MPa, 1.157 MPa] 与 [46.95°, 51.63°]。

为便于对分析结果进行比较, 采用文献 [5~8] 的方法进行该开挖断面岩体抗剪强度参数确定, 具

体结果如表 5 所示。可知各方法分析结果虽存在一定的差异性, 但其间偏差不大, 各种方法取值结果的平均值  $c$  为 1.002 MPa、 $\varphi$  为 49.02° 与本文取值区间的中心值 1.025 MPa、49.29° 基本接近, 进而说明本文方法的合理性, 并为基于区间理论的非概率可靠性分析方法提供了参数取值依据。

此外, 对于定值分析, 可直接采用抗剪强度区间数中心值 1.025 MPa 与 49.29° 进行计算, 对于概率可靠性分析, 可假定岩体抗剪强度  $c$  与  $\varphi$  在区间数 [0.892 MPa, 1.157 MPa] 与 [46.95°, 51.63°] 上服从文献 [15] 中的  $\beta$  分布, 进而根据概率可靠性理论进行计算。

表 5 不同方法分析结果  
Table 5 Results of different methods

| 岩体抗剪强度          | 本文方法           | 文献[5]   | 文献[6]   | 文献[7] | 文献[8]   |
|-----------------|----------------|---------|---------|-------|---------|
| $c$ / MPa       | [0.892, 1.157] | 0.967 2 | 0.912 5 | 1.194 | 0.932 1 |
| $\varphi$ / (°) | [46.95, 51.63] | 47.83   | 48.73   | 52.17 | 47.35   |

## 5 结 论

(1) 采用基于  $GSI$  的 Hoek-Brown 准则与区间理论求解岩体抗剪强度, 在试验资料不足的情况下为参数取值开辟了一条新途径, 使其更能反映工程实际, 并便于工程稳定可靠性分析。

(2) 采用结构面表面等级 ( $SCR$ )、节理特征系数 ( $J_c$ )、岩体结构等级 ( $SR$ ) 与岩块体积 ( $V_b$ ) 分别对结构面表面特征与岩体结构进行量化取值, 能从不同角度综合反映各种因素对  $GSI$  取值的影响, 使其取值方法更具合理性。

(3) 采用区间数表示量化指标与  $GSI$  取值, 不仅能减小取值过程中主观因素的影响, 而且能充分反映分析范围内参数取值所具有的区间不确定性, 使  $GSI$  取值方法更具操作性。

## 参 考 文 献

- [1] MARINOS P, HOEK E. 2000.  $GSI$ —A geologically friendly tool for rock mass strength estimation[C]// Proceedings of the 2000 International Conference on Geotechnical and Geological Engineering. Melbourne, Australian: [s. n.], 2000.
- [2] HOEK E, CARRANZA T C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition[C]// Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium. Toronto, Canada: [s. n.], 2002.

- [3] 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 Zhi-xin, CHEN Zu-yu, et al. Research of 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.
- [4] SONMEZ H, ULUSAY R. Modifications to the geological strength index (*GSI*) and their applicability to stability of slopes[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1999, 36(6): 743—760.
- [5] SONMEZ H, GOKCEOGLU C, ULUSAY R. An application of fuzzy sets to the geological strength index (*GSI*) system used in rock engineering[J]. **Engineering Applications Artificial Intelligence**, 2003, 16(3): 251—269.
- [6] 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 & Mining Sciences**, 2004, 41(1): 3—19.
- [7] 韩凤山. 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.
- [8] 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—686.
- SU Yong-hua, FENG Li-zhi, LI Zhi-yong, 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—686.
- [9] 曹文贵, 张永杰, 杨期君. 岩体质量分类的区间非线性模糊评判方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 620—625.
- CAO Wen-gui, ZHANG Yong-jie, YANG Qi-jun. Study of interval nonlinear fuzzy judgment method of rock mass classification[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(3): 620—625.
- [10] 曹文贵, 张永杰. 基于区间组合法的边坡稳定非概率模糊可靠性分析方法[J]. 土木工程学报, 2007, 40(11): 64—69.
- CAO Wen-gui, ZHANG Yong-jie. Non-probabilistic fuzzy reliability analysis method of slope stability based on interval interconnected method[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2007, 40(11): 64—69.
- [11] TONON F, BERNARDINI A, MAMMINO A. Determination of parameters range in rock engineering by means of random set theory[J]. **Reliability Engineering and System Safety**, 2000, 70(3): 241—261.
- [12] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(8): 1165—1186.
- [13] ALEFELDA G, MAYER G. Interval analysis: Theory and applications[J]. **Computation Application Mathematics**, 2000, 121(1—2): 421—464.
- [14] LOW B K. Efficient probabilistic algorithm illustrated for a rock slope[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2008, 41(5): 715—734.
- [15] ANG A H S, TANG W H. Probability concepts in engineering: Emphasis on applications to civil and environmental engineering (2nd edition)[M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 2007.
- [16] TZAMOS S, SOFIANOS A I. A correlation of four rock mass classification systems through their fabric indices[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2007, 44(4): 477—495.
- [17] RUSSO G. A new rational method for calculating the *GSI*[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2009, 24(1): 102—111.
- [18] PALMSTROM A. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation(RQD)[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2005, 20(4): 362—377.