

基于 GSI 系统的岩体变形模量取值及应用

卢书强^{1,2}, 许 模²

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 在分析岩体的变形特性时, 岩体变形模量是一个非常重要的参数, 一般要通过现场试验来确定。但利用现场试验直接确定岩体变形模量时, 具有时间长、代价高以及试验结果可靠性差等缺点。E. Hoek 利用地质强度指标 GSI, 通过大量现场试验数据的分析研究, 建立一种新的估算岩体变形模量的公式。分析这种最新计算岩体变形模量的方法, 并通过对岩体结构特征和结构面表面特征的定量描述, 对 GSI 系统进行量化取值, 特别对岩体体积节理数 J_v 的取值进行深入分析。最后通过实际工程的运用, 研究应用这一方法的具体过程。最后通过与现场试验结果进行对比, 分析这一方法的合理性。

关键词: 岩石力学; 岩体变形模量; 地质强度指标 GSI; GSI 量化系统; 体积节理数

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 1 - 2736 - 07

DETERMINATION AND APPLICATION OF MODULUS OF DEFORMATION OF ROCK MASSES BASED ON GSI SYSTEM

LU Shuqiang^{1,2}, XU Mo²

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The deformation modulus of rock mass is an important input parameter in analyzing deformation, which should be determined by field tests. However, field tests are time consuming, expensive and the reliability is sometimes questionable. Based on data from in-situ measurements, E. Hoek proposed a new empirical formula for estimating values of deformation modulus of rock mass based on geological strength index(GSI). In order to provide more quantitative basis for evaluating GSI values, quantitative GSI system has been proposed by introducing measurable parameters with ratings or intervals which define structure and surface conditions of discontinuities. Especially, the methods to determine the parameter volumetric joint count(J_v) are studied in detail. Finally, the proposed methods have been applied to practical projects and its rationality is further verified by comparing with field tests results.

Key words: rock mechanics; deformation modulus of rock mass; geological strength index(GSI); quantitative GSI system; volumetric joint count

1 引言

在分析岩体变形特性时, 岩体变形模量是一个

非常重要的参数, 一般要通过现场试验来确定。但利用现场试验直接确定岩体的变形模量时, 存在时间长、代价高以及试验结果可靠性差等问题。为解决这一问题, 许多岩石力学专家提出了在岩体质量

收稿日期: 2007 - 10 - 31; **修回日期:** 2008 - 01 - 22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40672175); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金资助项目(GZ2009 - 07)

作者简介: 卢书强(1973 -), 男, 博士, 1997年毕业于成都理工学院水文地质与工程地质专业, 主要从事地质工程和岩土工程方面的教学与研究。E-mail: lsq2197@163.com

分级的基础上, 运用经验公式估算岩体变形模量的方法。如应用岩体质量指标 $RMR^{[1\sim4]}$ 和 $Q^{[5]}$ 值等计算岩体的变形模量。这些经验公式与野外试验数据拟合较好^[6], 但运用经验公式计算的整体块状岩体变形模量值都较低。为此, E. Hoek 等^[7~9]在多年研究岩体经验强度准则的基础上, 利用地质强度指标 GSI (geological strength index)来计算岩体的变形模量。并经过多次修正于 2006 年在大量现场试验数据分析的基础上, 建立了岩体变形模量与 GSI 之间的一种新关系^[6]。

多年来国内外许多学者都对 Hoek-Brown 岩体经验强度准则进行了修正与应用。如 H. Sonmez 等^[10~12]对强度准则中的 GSI 值进行量化、修正并应用; 陈祖煜等^[13, 14]对其发展历史及工程应用进行研究; 韩凤山等^[15~17]也都对 Hoek-Brown 岩体经验强度准则进行改进与应用。但是, 利用量化 GSI 系统和 E. Hoek 和 M. S. Diederichs^[6]的最新计算公式进行岩体变形模量取值的研究甚少。

根据上述分析, 在前人研究的基础上, 本文尝试利用量化 GSI 系统以及最新计算岩体变形模量的方法, 对澜沧江糯扎渡水电站尾水出口边坡岩体变形模量取值问题, 进行相关的现场地质调查和分析研究, 同时对该方法的具体实践及其中关键问题等进行探讨。

2 岩体模量的经验取值

在对大量现场试验数据分析的基础上, E. Hoek 和 M. S. Diederichs^[6]利用了一种 S 型函数, 即

$$y = c + \frac{a}{1 + e^{-[(x-x_0)/b]}} \quad (1)$$

式中: a , b , c 均为常量。

通过拟合(见图 1), 建立了岩体变形模量 E_{m} (MPa)和 GSI 间的关系, 即

$$E_{\text{m}} = 100\,000 \left[\frac{1 - D/2}{1 + e^{[(75+25D-GSI)/11]}} \right] \quad (2)$$

式中: D 为岩体扰动参数^[4], 主要考虑爆破破坏和应力松弛对节理岩体的扰动程度, 从非扰动岩体的 $D = 0$ 变化到扰动性很强岩体的 $D = 1$ 。

另外, 利用完整岩石单轴抗压强度 σ_{ci} 和模数

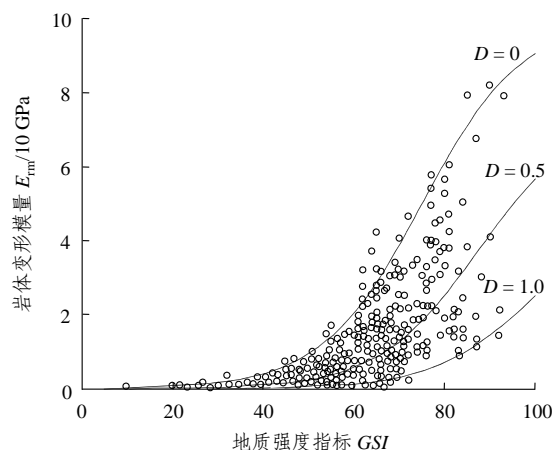


图 1 岩体变形模量和 GSI 的关系曲线

Fig.1 Relationship between E_{m} and GSI

比 MR (modulus ratio), 建立了岩体变形模量和完整岩石变形模量的关系:

$$E_{\text{m}} = E_i \left[0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{[(60+15D-GSI)/11]}} \right] \quad (3)$$

其中,

$$E_i = MR\sigma_{\text{ci}} \quad (4)$$

式中: E_i 完整岩石的变形模量, MR 为模数比, 可按表 1 确定。

3 岩体 GSI 值的量化


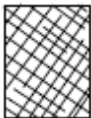



GSI 方法体系是 E. Hoek 多年来与世界各地与之合作的地质工作者共同研究发展起来的一种方法, 特别适用于风化岩体及非均质岩体^[8]。但在 GSI 取值表中, 结构面表面特征的描述缺乏可量测的典型参数, 同时也缺乏结构面间距的限定或级别, 使得每个岩体类别的 GSI 值只是一个范围值。这样不同的人对于同一岩体可能会估计出不同的 GSI 值, 特别是对于经验很少的地质工作者来说更是如此。为此, H. Sonmez 和 R. Ulusay^[10]提出了对 GSI 系统进行量化取值, 并不断对量化 GSI 系统进行修正和应用^[11]。

在 H. Sonmez 等的量化 GSI 系统中, 主要考虑了 2 个因素, 即基于体积节理数(J_v)的岩体结构等级 SR (structure rating)和结构面表面特征等级 SCR (surface condition rating), 由此来确定 GSI 值, 具体如表 2 所示。

表1 模数比 MR 的选取^[6]
Table 1 Guidelines for selection of modulus ratio(MR) values^[6]

岩石类型	岩组/构造	MR			
		粗粒	中粒	细粒	极细粒
沉积岩	碎屑岩类	300~400(砾岩)	200~350(砂岩)	350~400(粉砂岩)	200~300(黏土岩)
		230~350(角砾岩)		350(杂砂岩)	150~250(页岩)
	碳酸岩类	400~600(粗晶石灰岩)	600~800(亮晶石灰岩)	800~1 000(微晶石灰岩)	150~200(泥灰岩)
	非碎屑岩 蒸发岩类		350(石膏)	350(硬石膏)	350~500(白云岩)
	有机质类				1 000(白垩)
变质岩	无片状构造	700~1 000(大理岩)	400~700(角页岩)	300~450(石英岩)	
			200~300(变质砂岩)		
	微片状构造	350~400(混合岩)	400~500(角闪岩)	300~750(片麻岩)	
	片状构造		250~1 100(片岩)	300~800(千枚岩/云母片岩)	400~600(板岩)
火成岩	深成岩	浅色 300~550(花岗岩)、300~350(闪长岩)、400~450(花岗闪长岩)			
		黑色 400~500(辉长岩)、300~400(粗粒玄武岩)、350~400(长岩)			
	浅成岩	400(斑岩)		300~350(辉绿岩)	250~300(橄辉岩)
	喷出岩	熔岩		300~500(流纹岩)	350~450(石英安山岩)
				300~500(安山岩)	250~450(玄武岩)
	火山碎屑岩	400~600(集块岩)	500(火山角砾岩)	200~400(凝灰岩)	

表2 量化 GSI 图表^[11]
Table 2 The quantitative GSI chart^[11]

岩体结构	结构面表面特征				
	很好: 十分粗糙, 新鲜, 未风化 ($14.4 < SCR < 18$)	好: 粗糙, 微风化, 表面有铁锈 ($10.8 < SCR < 14.4$)	一般: 光滑, 弱风化, 有蚀变现象($7.2 < SCR < 10.8$)	差: 有镜面擦痕, 强风化, 有密实的膜覆盖或有棱角状碎屑充填 ($3.6 < SCR < 7.2$)	很差: 有镜面擦痕, 强风化, 有软黏土膜或黏土充填的结构面 ($0 < SCR < 3.6$)
 完整或块体状结构: 完整岩体或野外大体积范围内分布有极少的间距大的结构面($80 < SR < 100$)	90 80			N/A	N/A
 块状结构: 很好的镶嵌状未扰动岩体, 由三组相互正交的节理面切割, 岩体呈立方块状($60 < SR < 80$)	70 60				
 镶嵌结构: 结构体相互咬合, 由四组或更多组的节理形成多面棱角状岩块, 部分扰动($40 < SR < 60$)	50 40				
 碎裂结构/扰动/裂缝: 由多组不连续面相互切割, 形成棱角状岩块, 且经历了褶曲活动, 层面或片理面连续($20 < SR < 40$)	30				
 散体结构: 块体间结合程度差, 岩体极度破碎, 呈混合状, 由棱角状和浑圆状岩块组成($0 < SR < 20$)	20 10				

注: 表中斜线上的数值即为 GSI 取值; “N/A” 表示在这个范围内不适用。

3.1 结构面表面特征等级 SCR 的取值

参照岩体质量分级 RMR 系统中结构面特征的评分标准, SCR 的取值也主要考虑结构面的粗糙度 R_r (roughness ratings)、风化程度 R_w (weathering ratings) 及充填物状况 R_f (infilling ratings), 并按下式取值:

$$SCR = R_r + R_w + R_f \quad (5)$$

式中: R_r , R_w 及 R_f 的评分标准见表 3。

表 3 结构面特征评分标准

Table 3 Guidelines for surface condition rating(SCR)

粗糙度	R_r 评分值	风化程度	R_w 评分值	充填物状况	R_f 评分值
很粗糙	6	未风化	6	无	6
粗糙	5	微风化	5	硬质充填厚度 < 5 mm	4
较粗糙	3	弱风化	3	硬质充填厚度 > 5 mm	2
光滑	1	强风化	1	软弱充填厚度 < 5 mm	2
镜面擦痕	0	全风化	0	软弱充填厚度 > 5 mm	0

3.2 岩体结构等级 SR 的取值

岩体结构等级 SR 值是利用体积节理数 J_v , 通过半对数图表(见图 2)进行取值。 J_v 是指单位体积岩体内所交切的节理总数, 是国际岩石力学委员会 ISRM(International Society for Rock Mechanics)推荐用来定量评价岩体节理化程度和单位岩体块度的一个指标。SR 值分为 0~100, 半对数坐标值 J_v 参照表 3 中的岩体结构, 划分为 5 种结构类型边界。

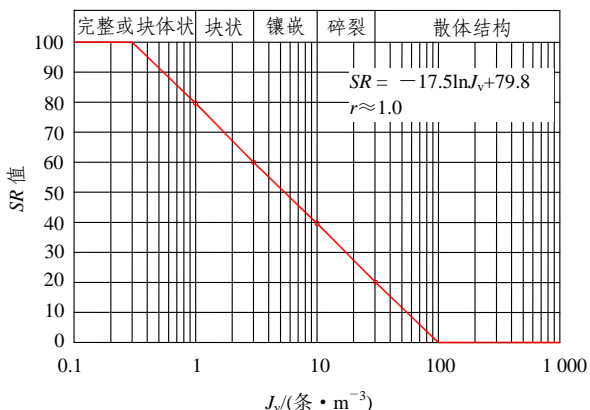


图 2 岩体结构等级 SR 的取值图
Fig.2 Chart of SR values of rock mass

3.3 体积节理数 J_v 的取值

体积节理数 J_v 可用下面的公式表示:

$$J_v = \frac{N_1}{L_1} + \frac{N_1}{L_1} + \dots + \frac{N_n}{L_n} \quad (6)$$

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n} \quad (7)$$

式中: N 为沿某一测线的节理数, L 为测线的长度 (m), S 为某一组节理的间距 (m), n 为节理的组数。

而对于发育多组节理的岩体, 节理间距的确定是相当困难的。因此, H. Sonmez 和 R. Ulusay^[10] 在假定岩体各向同性的基础上, 提出了一个更为实用的公式, 即在 1 m^3 体积的岩体中有

$$J_v = \frac{N_x N_y N_z}{L_x L_y L_z} \quad (8)$$

式中: N_x, N_y, N_z 分别为沿相互垂直方向测线上的节理数; L_x, L_y, L_z 分别为沿相互垂直方向测线的长度。

然而在现场调查中, 沿 3 个相互垂直方向测线上量测节理是很困难的。因此, 在此情况下, 通过假定岩体为各向同性, 式(8)可表示为

$$J_v = \left(\frac{N}{L}\right)^3 \quad (9)$$

此外, 体积节理数还可以通过二维节理频率的量测进行计算^[18], 岩石表面二维节理频率与体积节理数的经验关系式为

$$J_v = N_a k_a \quad (10)$$

式中: N_a 为二维节理频率, 即单位面积内的节理数; k_a 为相关系数(见图 3), k_a 一般取 1.0~2.5, k_a 平均值为 1.5, 当观测平面平行于主要节理组时, k_a 取最高值。

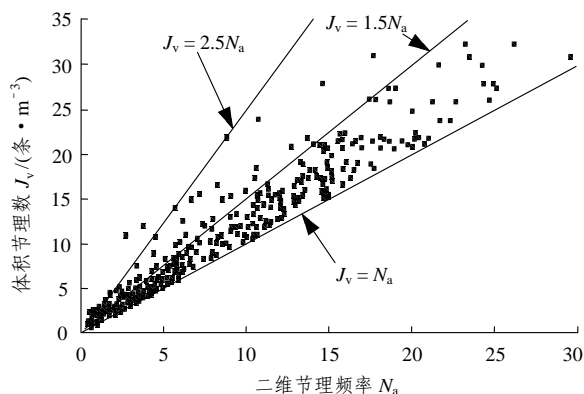


图 3 二维节理频率 N_a 与体积节理数 (J_v) 的关系
Fig.3 Relationship between 2D surface joint observations and volumetric joint count (J_v)

4 工程应用

4.1 概述

在建的糯扎渡水电站位于澜沧江上，大坝为黏土心墙堆石坝，最大坝高 261.5 m，主要枢纽建筑物有：左岸地下式厂房、左岸开敞式溢洪道以及左、右岸泄洪隧洞和导流隧洞，是一巨型规模的水力发电工程。工程区主要出露二叠系~三叠系花岗岩，发育多条断层以及大量的各类断续延伸的节理裂隙，构成复杂的岩体介质结构。

工程施工后，将在不同部位形成众多的岩石高边坡，如左岸尾水出口边坡，最大坡高约 240 m，宽约 400 m。这些开挖高边坡规模大、范围广，地质条件复杂，使得开挖边坡稳定性问题显得尤为突出。在分析边坡变形稳定性问题时，岩体变形模量参数的选取显得十分重要，而完全依靠试验来获得是很难满足需要的。由此，本文针对左岸尾水出口边坡岩体，通过勘探平硐和开挖边坡结构面的现场量测，将上述方法进行初步应用。

4.2 现场调查及参数取值

在糯扎渡水电站尾水出口边坡岩体结构特征及岩体质量分级研究的基础上，对勘探平硐和开挖边坡所揭露的结构面进行了精细量测、描述的现场工作(见图 4)。然后对各硐段和不同开挖边坡部位按风化程度和岩体结构类型的不同，进行量化 GSI 系统中各指标的取值，并参照量化 GSI 系统标准(见表 2)，进行 GSI 值的计算。最后根据 GSI 法各参数的确定因素对取值进行分析校核，并对个别数据进行取舍，按不同风化岩体进行统计平均，具体结果见表 4。

在取得 GSI 值之后，运用式(3)，(4)，计算得到不同风化岩体的变形模量指标(见表 5)。

4.3 现场岩体变形试验及结果对比

坝址区共进行了 82 组现场岩体变形试验，包括不同风化、不同结构类型的花岗岩岩体。试验主要在勘探平硐中进行，选定 2 m×2 m 范围的试验点位置，采用刚性承压板法，运用 5 级逐级一次循环法进行原位试验，试验应力范围为 3.0~10.0 MPa。

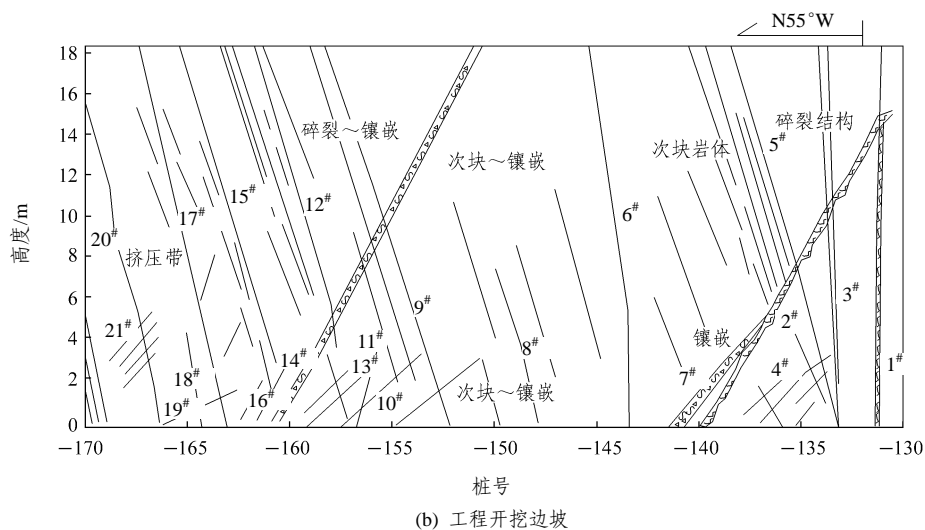
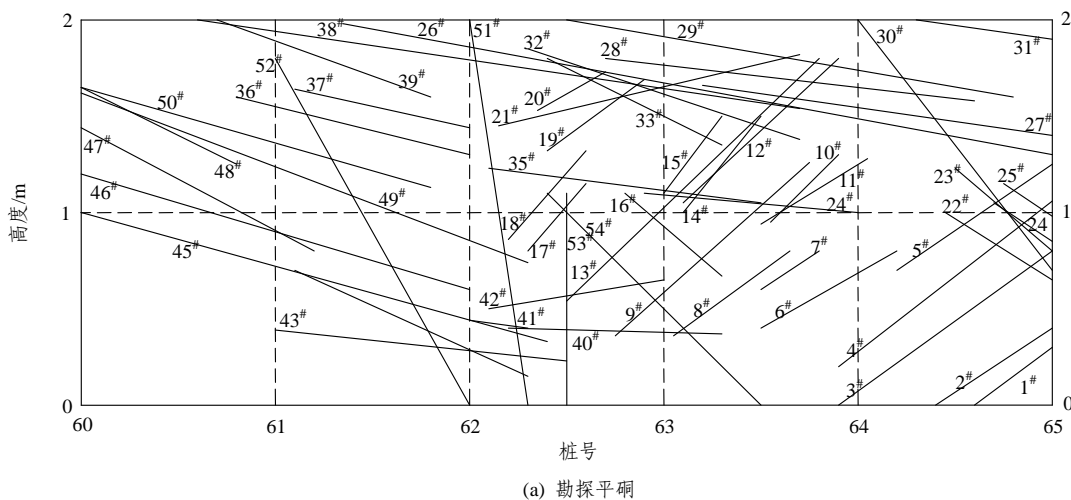


图4 现场结构面量测图

Fig.4 Map of discontinuities measured in field

表 4 边坡岩体量化 GSI 取值表
Table 4 Quantitative GSI of slopes rock mass

风化程度	岩体结构	结构面特征	J_v (/条·m ⁻³)	SR	SCR	σ_{ci} /MPa	GSI
微风化	块状结构	发育 2~3 组结构面, 起伏粗糙, 闭合	1.8	69.5	16	120.3	75
弱风化(下部)	次块状结构	发育 3~4 组结构面, 平直粗糙, 微张 1~2 mm, 局部夹岩屑	2.7	62.4	12	95.6	57
弱风化(上部)	镶嵌结构	发育 3~4 组结构面, 平直粗糙, 微张 1~2 mm, 局部夹岩屑	7.6	44.3	10	46.2	43
强风化	碎裂结构	发育 4 组以上结构面, 较平滑, 微张 2~3 mm, 局部夹黏土	18.4	28.8	4	24.5	24

注: 各岩体的单轴抗压强度 σ_{ci} 按室内试验所得, 表中风化程度的描述参照水力规范^[19], 下同。

表 5 根据 GSI 确定的变形模量指标
Table 5 Deformation modulus by GSI

风化程度	变形模量/MPa
微风化~新鲜	29 462.07
弱风化(下部)	14 240.11
弱风化(上部)	3 617.34
强风化	1 130.37

将所有试验点的变形模量值按岩体类型进行汇总, 并采用点群统计法进行统计分析, 得到不同风化程度岩体变形模量值(见表 6)。

表 6 根据现场试验确定的不同风化岩体变形指标
Table 6 Deformation modulus by field tests

风化程度	变形模量/MPa
微风化~新鲜	28 000
弱风化(下部)	13 000
弱风化(上部)	3 500
强风化	1 050

通过对比表 4, 5 可以看出, 采用 GSI 方法估算得出的岩体变形模量与试验得出的结果十分接近, 这是由于在运用 GSI 法估算岩体变形模量时, 只考虑岩体本身的变形特性, 计算结果仅与 GSI 值和岩石单轴抗压强度 σ_{ci} 有关。因此, 在现场工作中, 通过对结构面的精细量测, 可方便准确的估算出岩

体的变形模量, 为工程岩体的变形稳定性计算提供必要的变形参数。

5 结 论

(1) 节理岩体的变形模量值可运用 E. Hoek 的最新经验公式计算得到, 不必要做大量的现场变形试验, 只要知道完整岩体的单轴抗压强度 σ_{ci} 和地质力学指标 GSI 值即可。

(2) 量化 GSI 系统的建立, 使得地质力学指标 GSI 的取值不只是一个范围值, 而是通过定量的描述岩体结构特征和结构面表面特征, 用具体的量化指标进行取值。

(3) 在所有的量化参数中, 体积节理数 J_v 是一个较难确定的值, 在现场工作中应通过岩体结构面的精细量测, 运用多种方法进行统计计算, 综合取值。

(4) 基于 GSI 系统的岩体变形模量的取值在工程中得到初步应用, 效果较好, 但还需要经过多个工程的实践, 并不断总结和修正, 以便进一步推广应用。

参考文献(References):

- [1] BIENIAWSKI Z T. Determining rock mass deformability: experience from case histories[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1978, 15(5): 237 - 247.
- [2] SERAFIM J L, PEREIRA J P. Consideration of the geomechanical classification of Bieniawski[C]// Proceedings of International Symposium on Engineering Geology and Underground Construction Lisbon: Portugal, 1983: 33 - 44.
- [3] NICHOLSON G A, BIENIAWSKI Z T. A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1990, 8(3): 181 - 202.
- [4] HOEK E, CARRANZA-TORRES C T, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion [C]// Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium(2002 edition). Toronto: [s. n.], 2002: 267 - 273.
- [5] 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.

- [6] HOEK E, DIEDERICHS M S. Empirical estimation of rock mass modulus[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(2): 203 - 215.
- [7] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1997, 34(8): 1 165 - 1 186.
- [8] 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*, 1998, 57(2): 151 - 160.
- [9] MARINOS P, HOEK E. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation[C]// *Proceedings of Geoengineering 2000 Conference*. Melbourne: [s. n.], 2000: 1 422 - 1 442.
- [10] 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 - 760.
- [11] SONMEZ H, GOKCEOGLU C, ULUSAY R. Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses based on the GSI system[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(5): 849 - 857.
- [12] 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.
- [13] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 等. 岩质边坡稳定性分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.(CHEN Zuyu, WANG Xiaogang, YANG Jian, et al. *Rock slope stability analysis—theory methods and programs*[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.(in Chinese))
- [14] 宋建波, 张倬元, 于远忠, 等. 岩体经验强度准则及其在地质工程中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 2002.(SONG Jianbo, ZHANG Zhuoyuan, YU Yuanzhong, et al. *Rock mass empirical strength criterion and applying to geotechnical engineering*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.(in Chinese))
- [15] 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 Fengshan. *Strength and mechanical parameters of large-volume jointed rock mass*[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(5): 777 - 780.(in Chinese))
- [16] 李同录, 罗世毅, 何剑, 等. 节理岩体力学参数的选取与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(13): 2 182 - 2 186.(LI Tonglu, LUO Shiyi, HE Jian, et al. *Determination and application of mechanical parameters for jointed rock masses*[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(13): 2 182 - 2 186.(in Chinese))
- [17] 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): 4 030 - 4 035.(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): 4 030 - 4 035.(in Chinese))
- [18] PALMSTROM A. Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering, part 1: the development of the rock mass index(RMI)[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1996, 11(2): 175 - 188.
- [19] 中华人民共和国行业标准编写组. GB50287 - 2006 水力发电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. *GB50287 - 2006 Code for hydropower engineering geological investigation*[S]. Beijing: China Planning Press, 2006.(in Chinese))