Journal of Engineering Geology 工程地质学报 1004-9665/2010/18(6)-0956-07

基于 GSI的锦屏地下厂房岩体参数研究*

范永波① 任爱武② 熊 峥③
(①中国科学院力学研究所环境力学重点实验室 北京 100190)
(②中国水利水电科学研究院 北京 100038)
(③中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室 北京 100029)

摘 要 工程开挖卸荷后岩体参数研究一直是工程界关注的焦点,是稳定性评价的基础性工作。本文以锦屏地下厂房开挖工程为背景,通过对上下游边墙不同桩号段开挖揭露的岩体进行工程地质岩组划分,进行了开挖后岩体质量评价并对其进行分类,通过在 GSI(Geological Strength Index)评价体系中引入 J_v (节理数 /m^3),使评价体系相对合理化,经回归分析,对不同风化程度的岩体进行了力学参数求解,发现内聚力及内摩擦角的计算值与建议值吻合较好。

关键词 岩体力学参数 GSI 高地应力 锦屏 地下厂房
中图分类号: TV223 文献标识码: A

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX METHOD FOR ROCK MASS PARAMETERS ABOUT JINPING UNDERGROUND CAVERNS

FAN Yongbo① REN Aiwu② XIONG Zheng③
(①*Institute of Mechanics (IMECH), Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)
(②*China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038)
(③*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

Abstract The study on rock mass parameters after the excavation is always the focus of the engineering. It is the basic work of the rock stability evaluation. This paper is based on the engineering of JinPing Underground Caverns. It classifies the engineering geological rock group about different stake Nos, re-classify the rock mass and evaluation of its quality. It uses the Geological Strength Index (GIS) method and introduces the the number of joint per cubic meter. It can make the evaluation system reasonable. At last the rock mass parameters can be found by regression method. It is found that the calculated values of the cohesion and Internal friction angle are similar to the recommended values. This method is relatively easy. It can provide reference for the selection of mechanical parameters of other underground excavation engineering with similar geological conditions.

Key words Mechanical parameters of rock mass; GSI; High geostress; Jingping; Underground cavern

* 收稿日期: 2010-01-08; 收到修改稿日期: 2010-07-20
基金项目: 国家自然科学基金(10702072); 国家自然科学基金(40772188); 中国科学院工程地质力学重点实验室开放式基金项目.
第一作者简介: 范永波,主要从事岩体力学与工程地质相关的科研工作. Email: ybfan@imech.ac.cn
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引 言

工程开挖卸荷后岩体力学参数的确定是岩石力学界讨论的热点之一。岩体卸荷参数主要受岩体岩性、各项异性、非均质性、地下水状态、所处地应力环境以及工程开挖速度等多种因素影响。获得岩体力学参数又是工程设计和施工的基础, 对此, 前人已开展了大量工作。谭文辉[1]将地质强度指标法和 Hoek-Brown方法相结合, 对某矿山的岩体力学参数进行了估计, 并与其它岩体参数估计方法进行了对比, 研究结果表明, GSI和广义 Hoek-Brown法是进行节理岩体宏观力学参数估计的一种较好方法。韩凤山[2, 3]采用地质强度指标法 GSI对岩体力学参数进行求解, 之后又在此基础上对 GSI进行了修正。本文针对锦屏的岩体结构特点, 采用基于地质强度指标 GSI的 Hoek-Brown的方法, 并采用现场开挖中统计得到的体积节理数 J_v (节理数 /m^3), 在对地下洞室区的岩体质量做出基本评分的基础上, 得到锦屏地下厂房不同类别围岩的岩体力学参数。

2 工程地质条件及高地应力特点

锦屏地下厂房的主厂房主要出露第 2、3、4层大理岩, 局部有绿泥石片岩和煌斑岩脉。开挖揭露出的 3大断层, 均与主厂房轴线近于正交发育; 主要发育 3组优势节理, 分别为: ①N15° ~ 80°E, NW∠25° ~ 45°, 层面裂隙, 走向随层面起伏变化较大, 多闭合紧密。②N50° ~ 70°E, SE∠50° ~ 80°, 一般间距 0.3 ~ 1.0m, 延伸长 3 ~ 5m, 部分大于 10m, 在浅表卸荷带中有不同程度的张开松弛现象。③N60°W ~ EW, NE(SW)或 S(N)∠60° ~ 80°, 其走向大致与主厂房轴线平行, 总体上具有发育稀少, 间距大, 多卸荷张开, 一般延伸长几米至十余米。

厂房区断层及周边岩体较破碎, 局部岩体由于受该区高地应力条件影响, 破坏形式有劈裂剥落、内鼓弯折、卸荷开裂等, 致使局部洞段成型较差, 岩体卸荷松弛, 影响围岩稳定。

锦屏地下厂房在开挖时遇到的各种比较严重的岩体破坏现象主要集中在顶拱上下游侧及岩锚梁位置附近。厂房轴线方向为 N65°W, 厂区最大主应力 σ_1 = 18 ~ 35.65MPa, 方向 N24°W ~ N68°W, 平均 N45.7°W; 最大主应力 σ_1 与厂房轴线在水平面上小角度相交, 在垂直面上中等角度相交。由于主地应力与厂房轴线夹角的存在, 使得垂直于最大主地应力方向的洞壁围岩压应力集中, 平行于最大主应力方向的洞壁围岩拉应力集中, 即在下游侧拱座附近、上游侧边墙形成压应力集中区, 在上游侧拱座附近形成拉应力集中区; 压应力集中造成下游侧拱座部位、上游边墙部位围岩劈裂破坏现象集中发育 (图 1)。基于上述偏压特点, 并且厂房规模巨大, 厂房上游侧岩锚梁附近开挖时, 围岩劈裂破坏较下游强烈得多 (图 2), 大部分走向与厂方洞轴向方向接近的第四组短小裂隙已经普遍张开; 下游壁拱座 0 + 20 ~ 0 + 40桩号位置混凝土喷层脱落、肋拱弯折 (图 3)。这些独特的现象都是在高应力条件下, 开挖造成的壁面附近应力集中, 并在应力持续作用下劈裂的岩板向临空面弯曲变形所致, 对洞室稳定影

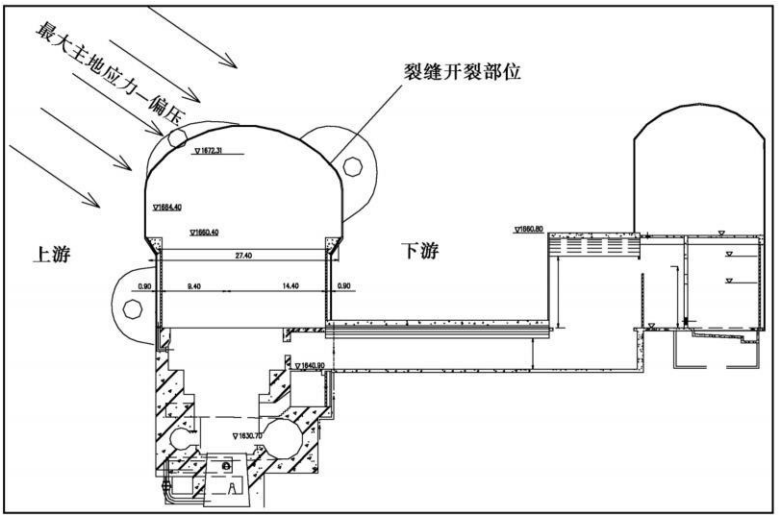


图 1 地下厂房偏压应力下洞室断面应力集中推测示意图

Fig 1 Stress concentration of the underground cavern under bias stress

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 2 厂房上游侧边墙岩体劈裂

Fig. 2 Rock fracturing at upstream side of the wall of the cavern

图 3 厂房下游拱混凝土剥落、肋拱弯折

Fig. 3 Concrete splitting at downstream side of the arch, Arch rib bending

响较大。

鉴于锦屏地下厂房开挖遇到的高地应力及偏压等众多难题,采用室内试验得到的力学参数已无法较真实地反映岩体实际的受力状态,因此本文基于现场开挖后岩体的 RMR 统计值和体积节理数 J_v 的计算,进行岩体力学参数的求取。

3 地下厂房岩体结构及节理裂隙统计分析

地下厂房区的节理裂隙按成因可分为原生型结构面和构造型结构面两类。原生结构面主要是薄至中厚层大理岩中的层面,以及绿片岩中的片理面。构造型结构面,以陡倾角为主,其发育程度与岩性、层厚和构造部位密切相关,具一定区段性。

通过对地下厂房顶拱及 2~5层开挖揭露节理裂隙编录资料 563组数据(层面裂隙 257组,第 2组裂隙 171组,第 4组裂隙 139组)的统计分析,可以绘制得到地下厂房结构面极点等密图、走向玫瑰花图、裂隙组合示意图及倾向统计直方图 (图 4~图 7),通过图件可以得出如下结论:

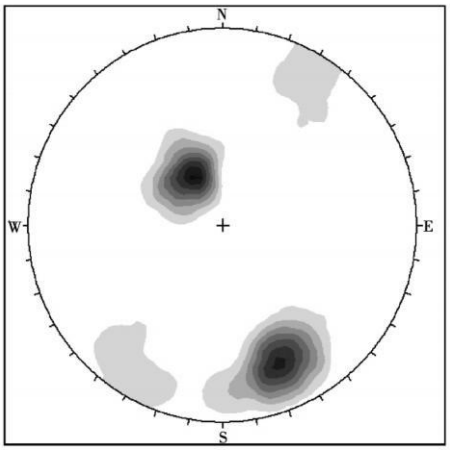


图 4 结构面极点等密度图

Fig. 4 Pole density map of the structural surface

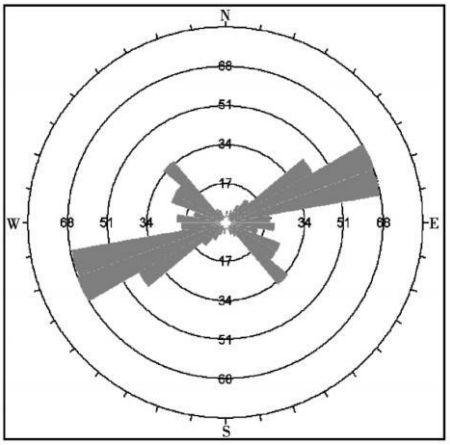


图 5 结构面走向玫瑰花图

Fig. 5 Rose diagram of the structure surface

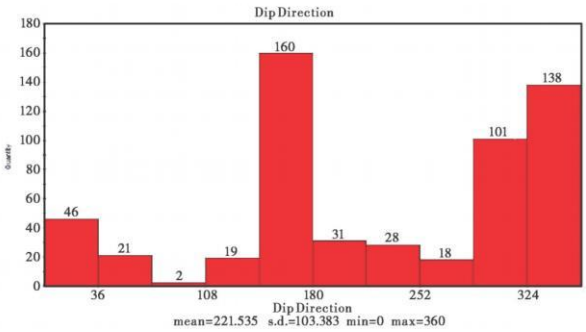


图 6 结构面倾向统计直方图

Fig. 6 Histogram about dip direction of the structural surface

(1)由结构面极点密度图 (图 4)可以发现,落在第四象限偏 N方向的层面裂隙为缓倾~中倾角

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

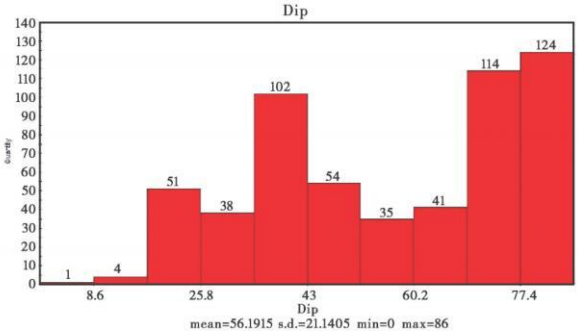


图 7 结构面倾角统计直方图

Fig. 7 Histogram about inclination direction of the structural surface

度,落在第二象限偏 S方向的第 2组裂隙和落在第一、三象限的第 4组裂隙均为大角度近乎直立的。

(2)由结构面倾向统计直方图 (图 6),地下厂房裂隙发育优势产状主要集中在 3个方向,其中走向 NE,倾 NW 组层面裂隙和走向 NE,倾向 SE的第 2组裂隙较发育,而走向 NWW,倾向 NE或 SW 的第 4组裂隙发育相对较少。由结构面倾角统计直方图 (图 7), 35°~ 45°集中体现的是层面裂隙, 60°~ 80°集中体现的是第 2组裂隙,倾角 80°及其以上集中体现的是第 4组裂隙。

4 基于地质强度指标法 GSI的地下厂房强度及变形参数估算

由于岩体强度的可靠资料难于取得,要求对岩体进行综合定量分级是相当困难的。为对岩体强度的合理变化趋势提供某种指导, Hoek-Brown[4, 5]建议采用宾尼亚斯基和巴顿提出的分级指标来估计材料常数 m和 s,并为工程界所采用。

为使节理化岩体结构的描述定量化,引入体积节理数 J_v (节理数 /m^3),体积节理数与岩体结构的对应关系见表 1。引入体积节理数优越性体现在: (1)体积节理数是从立体空间对节理切割的岩体进行定量的评价,更接近于实际情况; (2)依据《工程岩体分级标准》(GB50218-94)的表 3.4.3,体积节理数与岩体完整性可建立对应的关系,使得岩体结构评价更加准确。本文通过引入该参数,并结合现场体积节理数的统计数据,进行了不同风化程度的卸荷岩体的强度及变形参数的求取。

考虑岩体的地质环境, Hoek-Brown提出了地质强度指标 Geological Strength Index (GSI)[6~8],该指标与岩体的结构特性和表面风化程度、表面粗糙性

表 1 岩体地质强度指标 GSI定量描述修正表

Table 1 Revised table of quantitative description about GSI

		非常好的 非常粗糙的新鲜的无风化的表面	好的 粗糙的轻微风化的暗铁色的表面	比较好的 光滑的中等风化的表面	差的 有擦痕面高度风化的具有密实或角状块状充填覆盖的表面	非常差的 有擦痕面具有粘土质的软岩覆盖或充填的高度分化的表面
岩体结构	块状 由三个正交的不连续面形成的相互连接很好的未扰动的立方块岩块 J_v<=3	80 J_v=1 70 J_v=2 J_v=3				
	非常块状 由四个或更多的不连续面形成的具有多面角状部分扰动相互连接的块状岩体 3<J_v<=10	J_v=4 J_v=5 J_v=6 J_v=7 J_v=8 J_v=9 J_v=10	60 GSI=50			
	块状/褶曲 由许多相互交错的不连续面形成的具有角状块体的褶曲和(或)断层 10<J_v<=30	J_v=14 J_v=18 J_v=22 J_v=26 J_v=30		40	30	20
	碎块状结构 具有角状或圆形岩块的非常破碎的相互连接差的岩体 J_v>30					10

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

等特性有关。推广修正后的 Hoek-Brown 准则为:

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

$$m_b = m_i \exp\left[\left(GSI - 100\right)/28\right] \quad (2)$$

式中, σ_1 为岩体破坏时的最大主应力; σ_3 为岩体破坏时的最小主应力; σ_c 为完整岩块的单轴抗压强度; m_b 为岩体的 Hoek-Brown 常量; m_i 为完整岩块的 Hoek-Brown 常数; s、α 为取决于岩体特性的常数。

对于 $GSI > 25$ 的岩体:

$$s = \exp\left[\left(GSI - 100\right)/9\right] \quad \alpha = 0.5 \quad (3)$$

对于 $GSI < 25$ 的岩体:

$$s = 0 \quad \alpha = 0.65 - GSI/200 \quad (4)$$

由摩尔库仑强度准则, 设 φ 为岩体的内摩擦角, c 为内聚力, 则有:

$$\sin\varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c\,\mathrm{ctg}\varphi}$$

即

$$\sigma_1 = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}\sigma_3 + \frac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi} \quad (5)$$

当 σ_3 在下式的取值范围内时, 我们才可以采用方程 (1) 估计节理化岩体强度与力学参数。

$$\sigma_3 \in \left(0, \frac{\sigma_c}{4}\right) \quad (6)$$

σ_c 为完整岩块的单轴抗压强度;

当方程 (1) 中的 σ_3 在 (6) 的范围内取值时, 岩体所遵循的 Hoek-Brown 准则的直线表示形式:

$$\sigma_1 = \sigma_3 k + b \quad (7)$$

由 (5) 与 (7) 比, 可得斜率及截距表达式如下式 (8)

$$\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} = k, \quad \frac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi} = b \quad (8)$$

岩体的变形模量可由下式 (9) 估计:

$$E_m(\mathrm{GPa}) = \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}}\,10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (9)$$

5 工程实例

根据《锦屏水电站地下厂房洞室围岩稳定性分析专题报告》[9], 地下厂房主要出现条纹条带细晶大理岩、杂色角砾状大理岩、粗晶大理岩, 其岩块物理力学参数如下 (表 2):

根据计算公式 (1) ~ (9) 和表 2, 依托地下厂房第 2 层上游边墙 0+ 77~ 0+ 90m、0+ 90~ 0+ 110m, 第 2 层下游边墙 0+ 80~ 0+ 108m、0+ 108~ 0+ 120m, 第 5 层上游边墙 0+ 25~ 0+ 75m, 第 5 层下游边墙 0- 15~ 0+ 5m、0+ 30~ 0+ 45m、0+ 50~ 0+ 65m 共 8 个工作区间进行了现场实测体积节理数 J_v 统计资料 (表 3), 为锦屏地下厂房岩体进行强度参数估算。

表 2 岩块物理力学参数

Table 2 Mechanical parameters of rock

岩性	组数	弹性模量 E/GPa	抗压强度/MPa	泊松比
条纹条带细晶大理岩	42	29	97	0.24
杂色角砾状大理岩	20	31	87.4	0.24
粗晶大理岩	4	20	52	0.24

表 3 实测体积节理数 J_v

Table 3 Number of joint per cubic meter

统计区间	J_v
第 2 层上游边墙 0+77 ~0+90m	6.85
第 2 层上游边墙 0+90 ~0+110m	4.93
第 2 层下游边墙 0+80 ~0+108m	6.9
第 2 层下游边墙 0+108 ~0+120m	4.69
第 5 层上游边墙 0+25 ~0+75m	6.66
第 5 层下游边墙 0-15 ~0+5m	4.5
第 5 层下游边墙 0+30 ~0+45m	4.18
第 5 层下游边墙 0+50 ~0+65m	2.4

由表 3 可看出, 实测体积节理数基本上介于 $3 < J_v < 10$ 区间, 可认为现场岩体为非常块状结构。根据表 1, 岩体风化程度不同, 分别计算新鲜、微风化、中等风化、高度风化各类岩体力学参数, 它们所对应的地质强度指标分别为 65、55、45、40。下面以占比最大的微风化岩体为例进行力学参数计算, 其 GSI 值为 55, 由 Hoek-Brown 常量 m_i 表可知, 大理岩的 m_i 为 9, 由公式 (2)、(3) 可知,

$$m_b = 1.8 \quad s = 0.00248 \quad \alpha = 0.5$$

对于条纹条带细晶大理岩, 由式 (1) 得

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c\left(1.8\frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 0.00248\right)^{0.5}$$

$$= \sigma_3 + 97(0.01856\sigma_3 + 0.00248)^{0.5}$$

对于等式中

$$\sigma_{3\max} = \frac{\sigma_c}{4} = 24.25\mathrm{MPa}$$

在 σ_3 取 0~ 24 之间值时, 有下式 10、11 成立。

$$\sigma_1 = \sigma_3 k + b \quad (10)$$

$$k = \frac{\sum\sigma_1\sigma_3 - \frac{\sum\sigma_1\sum\sigma_3}{n}}{\sum\sigma_3^2 - \frac{\left[\sum\sigma_3\right]^2}{n}}$$

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$b = \frac{\sum \sigma_1 - k\sum \sigma_3}{n} \tag{11}$$

回归分析 (表 4)则得到

$$k = 3.3906、b = 13.0285$$

将其带入

$$\sigma_1 = \sigma_3 k + b$$

则有

$$\sigma_1 = 3.3906\sigma_3 + 13.0285$$

由式 8得知

$$\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} = 3.3906, \quad \frac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi} = 13.0285$$

从而求得

$$c = 1.72\text{MPa}, \ \varphi = 41.62°$$

并由式 9知岩体的变形模量

$$E_m = 13.134\text{GPa}。$$

对于杂色角砾状大理岩、粗晶大理岩, 按照上面同样的方法, 可分别求出。

表 4 回归分析表

Table 4 Regression analysis table

σ_3	σ_1	$\sigma_1\sigma_3$	σ_3^2
0	0	0	0
3	26.393	79.179	9
6	38.728	232.368	36
9	48.938	440.442	81
12	58.032	696.384	144
15	66.408	996.12	225
18	74.273	1336.914	324
21	81.750	1716.75	441
24	88.919	2134.057	576
$\sum\sigma_3 = 108$	$\sum\sigma_1 = 483.441$	$\sum\sigma_1\sigma_3 = 7632.214$	$\sum\sigma_3^2 = 1836$

统计结果列入表 5。

表 5 微风化岩体物理力学参数经验值

Table 5 Mechanical parameters about slightly weathered rock mass

岩性	变形模量 E/GPa	内聚力/MPa	内摩擦角
条纹条带细晶大理岩	13.134	1.72	41.62
杂色角砾状大理岩	12.4668	1.70	41.88
粗晶大理岩	9.616	1.59	37.29

按照上述整个过程对新鲜、中等风化、高度风化各类岩体力学参数进行经验公式分析计算, 获得最终结果 (表 6)。

表 6 不同风化程度的各岩体物理力学参数经验值

Table 6 Mechanical parameters about different weathered rock mass

岩性	风化程度	变形模量 E /GPa	内聚力 /MPa	内摩擦角
条纹条带细晶大理岩	新鲜岩体	23.35532	1.78	43.99
	微风化岩体	13.13366	1.72	41.62
	中等风化岩体	7.385601	0.92	36.15
	高度风化岩体	5.53842	0.71	30.94
杂色角砾状大理岩	新鲜岩体	22.16949	1.75	43.23
	微风化岩体	12.46682	1.70	41.88
	中等风化岩体	7.010609	0.93	36.33
	高度风化岩体	5.257215	0.58	29.06
粗晶大理岩	新鲜岩体	17.10022	1.65	39.36
	微风化岩体	9.61616	1.59	37.29
	中等风化岩体	5.407564	0.89	34.42
	高度风化岩体	4.055101	0.49	29.08

6 结 论

(1)无需对节理化岩体做现场及室内强度试验, 只需对完整岩块进行单轴抗压强度测试, 通过查表求取完整岩块的 Hoek-Brown常数 m_i及岩体的地质强度指标 GSI, 便可依据经验公式求取岩体强度与力学参数。

(2)通过引入体积节理数 J_v, 能较准确地进行节理化岩体强度参数及变形模量求取, 通过表 6与表 7对比可看出, 计算值与建议值较为接近。

表 7 地下洞室力学参数建议值

Table 7 Suggested value of mechanical parameters about the underground cavern

围岩类别	抗剪断强度	
	C'/MPa	f
高度风化岩体	0.6	0.7
中等风化岩体	0.9	1.02
微风化岩体	1.5	1.07
新鲜岩体	2.0	1.35

参 考 文 献

[1] 谭文辉, 周汝弟, 王鹏. 岩体宏观力学参数取值的 GSI和广义 Hoek-Brown法 [J]. 有色金属, 2002, **54**(4): 16~17.
Tan Wenhui, Zhou Rudi, Wang Peng. Method of Geological Strength Index(GSI) and Hoek-Brown for the value of mechanical parameters of jointed rock mass. Non-ferrous Metals, 2002, **54**(4): 16~17.

[2] 韩凤山. 节理化岩体强度与力学参数估计的地质强度指标

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

GSI法[J]. 大连大学学报, 2007, **28**(6): 49~51.
Han Fengshan. Method of Geological Strength Index (GSI) for the estimation of strength and mechanical parameters of jointed rock mass. Journal of Dalian University, 2007, **28**(6): 49~51.

[3] 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. Mechanical parameters of jointed rock mass. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(5): 777~780.

[4] Hoek E. and Brown E. T. Underground Excavations in Rock. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980, 527 pp.

[5] Hoek, E. and Brown, E. T. Empirical strength criterion for rock masses. J. Geotech. Engng. Div., ASCE, 1980, **106**(GT9), 1013~1035.

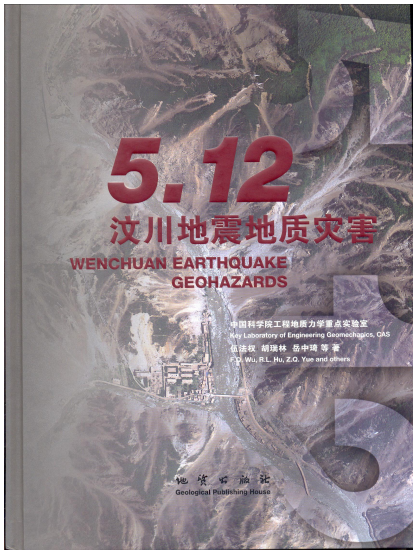
[6] Hoek, E. Strength of jointed rock masses[J]. 23rd. Rankine Lecture. Géotechnique, 1983, **33**(3): 187~223.

[7] Hoek E. and Brown E. T. The Hoek-Brown failure criterion-a 1988 update. Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. (ed. J. H. Curran), 31~38. Toronto: Civil Engineering Dept., University of Toronto, 1988.

[8] Hoek E. Brown E. T. Practical estimates of rock mass strength[J]. Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 1997, **34**(8): 1165~1187.

[9] 中国科学院地质与地球物理研究所. 锦屏水电站地下厂房洞室围岩稳定性分析专题报告[R]. 2008.
Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences. Stability Analysis Report about Jinping Underground Hydropower Station, 2008.

新书介绍



5.12汶川地震地质灾害

作 者: 伍法权, 胡瑞林, 岳中琦等, 地质出版社出版

本图集着重反映此次地震的次生地质灾害状况, 主要内容包括汶川地震地质背景、滑坡、崩塌、泥石流、堰塞湖等地质灾害的特点, 以及这些次生地质灾害对建筑物、路面、桥梁等造成的破坏背景。本图集科学、系统地反映了汶川地震地质灾害的形成、发育规律, 既有直观表述, 又有一定深度的分析, 可供地震、地理、地质、地质工程、岩土工程等地球科学的科研、教学人员参考使用, 也可供减灾、防灾及相关业务人员使用。

全书定价: 150元, 邮费 20元。

有需要的读者, 请与工程地质专业委员会、工程地质学报编辑部联系购买事宜。

汇款邮寄地址: 100029, 北京 9825信箱《工程地质学报》编辑部

联系电话及邮箱: 010-82998121

gcdz@mail.igcas.ac.cn

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net