

基于改进 GSI 体系确定三峡地下厂房围岩等效变形模量及强度

黄 达¹, 黄润秋², 张永兴¹

1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045

2. 成都理工大学地质灾害防治与环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059

摘要: 基于地质强度指标 GSI 体系和 Hoek-Brown 强度准则, 研究岩体强度及变形模量时没有考虑到结构面产状对工程岩体参数的影响. 结合三峡工程地下厂房, 根据围岩开挖面与结构面分布的空间位置关系, 确定了结构面分布对围岩结构等级 SR 的影响系数, 改进了 GSI 体系中围岩 SR 的统计方法, 确定了围岩的等效变形模量和强度参数. 研究表明, 改进后的 GSI 体系求解的围岩弹性区等效弹性模量、扰动区等效变形模量和粘聚力分别减小了约 15%、8% 和 28% 的误差.

关键词: 地质强度指标; 变形模量; 强度参数; 结构面产状; 地下厂房; 工程地质.

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2009)06-1030-07

收稿日期: 2009-04-23

Equivalent Deformation Modulus and Strength Parameters of Surrounding Rock for the Underground Powerhouse of Three Gorges Project Based on the Modified GSI System

HUANG Da¹, HUANG Run-qi², ZHANG Yong-xing¹

1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract The influence of orientation of structure plane on parameters of rock mass is neglected in the study on the strength and deformation modulus based on geological strength index (GSI) system and Hoek-Brown strength rule. In this paper, as a case of underground powerhouse in the Three Gorges Project, the influence coefficient between the distribution of structure plane and structure rating (SR) of surrounding rock is calculated based on the space distribution character of excavated surface and structure plane; the statistical method of SR in the GSI system applied for large underground caverns is modified; and the experiential estimates of equivalent deformation modulus and strength parameters of surrounding rock are acquired. The investigations show that the calculative errors of the equivalent elastic modulus in elastic zone, deformation modulus and cohesive strength in disturbed zone of surrounding rock based on modified GSI system decreased by about 15%, 8%, 28% respectively.

Key words: geological strength index (GSI); deformation modulus; strength parameters; orientation of structure plane; underground powerhouse; engineering geology.

在任何岩体工程稳定性分析或支护设计中岩体力学参数准确取值都非常关键, 通过现场试验确定岩体力学参数需要耗费大量的时间和费用, 而且其结果离散性大, 尺寸效应明显(李建林和王乐华,

2003), 因此国内外较多学者提出岩体参数有限元反演分析(张乐文等, 2005)及基于非线性理论的智能评估方法(伍振志和王泉, 2006)等. 也有一些学者提出了岩体质量分类及相应的岩体力学参数经验取值

基金项目: 教育部博士点新教师基金项目(No. 200806111012); 中国博士后科学基金项目(No. 20080440703); 地质灾害防治与环境保护国家重点实验室(成都理工大学)开放基金项目(No. GZ2007-13).

作者简介: 黄达(1976-), 男, 博士, 讲师, 重庆大学土木工程博士后流动站在站博士后, 主要从事岩体稳定性评价及其灾害防治方面的教学和科研工作. E-mail: hdaqy@yahoo.com.cn 或 hdaqy@126.com

方法,如: RMR(rock mass rating)分类、Q (tunneling quality index) 指标、RMI(rock mass index) 指标(Palmström, 1996)、GSI(geological strength index)指标(Hoek and Brown, 1997). 岩石力学参数可通过室内试验较准确地确定, 而岩体由于结构面切割, 其力学参数具有明显的各向异性, 上述几种方法通过建立岩体质量指标与岩体参数间的定量关系来求解岩体参数, 均考虑了岩体结构效应。

GSI 体系在边坡岩体强度及变形模量估计方面应用相对较多(Sonmez and Ulusay, 1999), 并编入了中华人民共和国电力行业标准——水电水利工程边坡设计规范(DL/T5353-2006), 但现今的 GSI 体系中并没有考虑结构面产状对边坡岩体强度及变形参数的影响. 对于具体的岩体工程, 不同产状和性状的结构面对工程稳定性影响不一样, 当然对工程岩体力学参数的影响也就存在差异。

GSI 体系在大型地下洞室围岩强度及变形模量估计方面的应用至今还未曾发现. 长江三峡工程地

下电站主厂房共安装 6 台 700 MW 水轮发电机组, 厂房断面为直墙曲顶拱型, 厂房最大高度 87.3 m, 全长 311.3 m, 跨度为 31 m, 轴线方位角为 43.5°, 为世界第一高度、第二跨度(仅次于溪洛渡). 本文基于三峡工程地下电站主厂房岩体结构特征的精细描述, 对 GSI 指标体系中的特征参量(岩体结构等级 SR(structure rating)和结构面表面条件 SCR(surface condition rating), 在大型地下洞室中的统计方法中进行探讨, 如: 考虑开挖效应的等效体积节理数的统计计算方法等, 并求解围岩的 Hoek-Brown 强度公式参数、等效变形模量及抗剪强度参数, 为主厂房开挖稳定性分析和支护设计提供可靠的基础参数, 同时也可供其他类似工程参考。

1 GSI 及与 Hoek-Brown 准则的关系

地质强度指标(geological strength index, GSI) 由 Hoek(1994)提出, 通过对岩体结构特征及结构

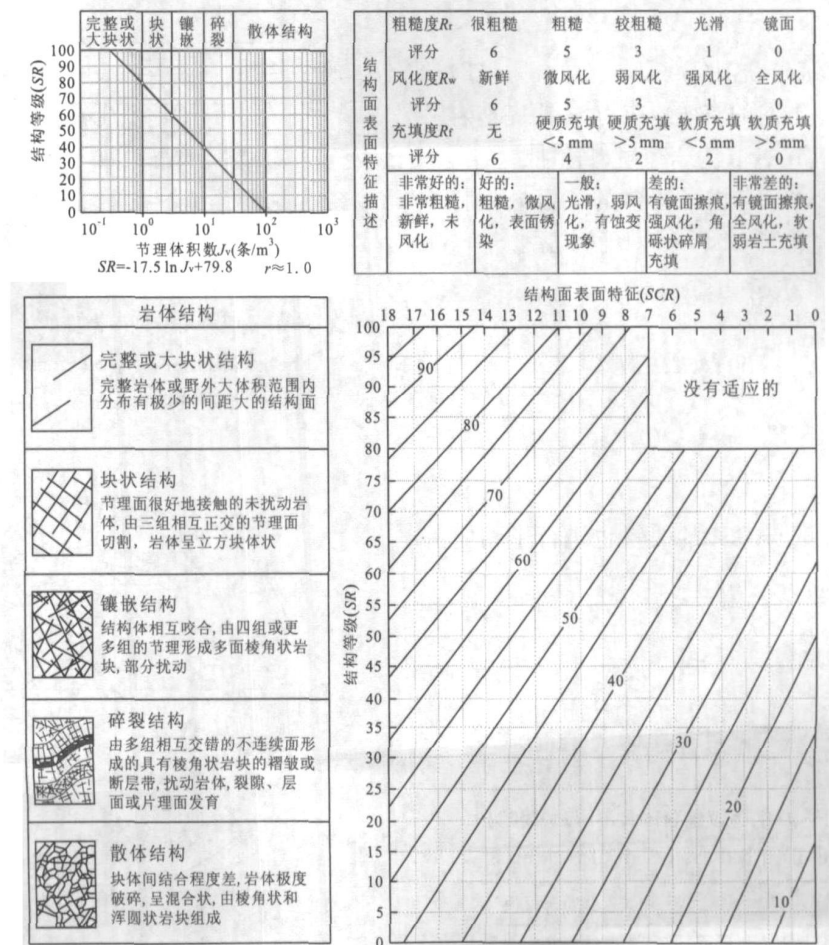


图 1 修正的定量 GSI 体系(Sonmez et al., 2004)

Fig. 1 Modified quantitative GSI system

面特性(粗糙度、充填物、风化强度等)的描述,从而对岩体质量进行评价.在 GSI 体系中(Hoek *et al.*, 1998),将岩体结构分成 4 个等级,将结构面表面条件分为 5 个等级.这是一个定性半定量的描述,没有一个定量判断标准,使得 GSI 准确取值较困难.

Sonmez *et al.* (2004)提出了通过体积节理数 J_v (条/ m^3)对 GSI 体系中的岩体结构等级 SR 进行定量描述.同时也提出了结构面表面特性的定量描述方法,其修正的定量的 GSI 体系见图 1 所示.图中将岩体结构分为 5 个等级:①完整或大块状结构, $SR \geq 80, J_v \geq 1$; ②块状结构, $80 > SR \geq 60, 3 \geq J_v > 1$; ③镶嵌结构, $60 > SR \geq 40, 10 \geq J_v > 3$; ④碎裂结构, $40 > SR \geq 20, 30 \geq J_v > 10$; ⑤散体结构, $SR < 30, J_v > 30$.并且回归了 SR 和 J_v 的定量关系:

$$SR = -17.5 \ln J_v + 79.8, \quad r \approx 1.0. \quad (1)$$

将结构面的表面条件 SCR 分为 3 个部分:粗糙度 (R_r)、风化度 (R_w)和充填度 (R_f), $SCR = R_r + R_w + R_f$, 满分为 18, 具体打分标准见图 1 所示.

Hoek-Brown 强度准则是确定岩体强度的常用方法.其公式为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} (m_b \sigma_3 / \sigma_{ci} + s)^a, \quad (2)$$

式(2)中, σ_1, σ_3 为主方向的有效主应力, σ_{ci} 为完整岩块的单轴抗压强度, m_b, s, a 为岩体材料特性参数.

Hoek *et al.* (2002)考虑了岩体的应力松弛和开挖扰动等因素,完善了 GSI 与 H-B 间关系:

$$\begin{cases} m_b = m_i \exp \left[(GSI - 100) / (28 - 14D) \right], \\ s = \exp \left[(GSI - 100) / (9 - 3D) \right], \\ a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}). \end{cases} \quad (3)$$

同时对岩体变形模量与 GSI 的关系也进行了相应的补充:

$$\begin{cases} E_m = (1 - \frac{D}{2}) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \times 10^{[(GSI-100)/40]}, & \sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa} \\ E_m = (1 - \frac{D}{2}) 10^{[(GSI-100)/40]}, & \sigma_{ci} > 100 \text{ MPa} \end{cases} \quad (4)$$

表 1 岩体扰动因子 D 的建议值(Hoek *et al.*, 2002)

Table 1 Proposed disturbed coefficient of rock mass

岩体描述	D 的建议值
小规模爆破导致岩体引起中等程度破坏	$D = 0.7$ (爆破良好)
应力释放引起某种岩体扰动	$D = 1.0$ (爆破效果差)
由于大型生产爆破或者移去上覆岩体而导致大型矿山边坡扰动严重	$D = 1.0$ (生产爆破)

(3)和(4)式中 D 为扰动因子,取值如表 1 所示,不考虑开挖扰动时 D 取 0.

2 围岩 GSI 体系改进及计算

2.1 J_v 及 SR 值计算

体积节理数 J_v (volumetric joint count)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)推荐用来定量评价岩体节理化程度和单元岩体块度的一个指标.求解 J_v 较困难, Sonmez and Ulusay. (1999)提出了 3 种计算方法,但其计算方法有的精度不高,有的难于测量,实用性不强.

Palmström (1996)通过大量的实测统计,得出节理面密度和体积节理数间存在很好的线性相关性(图 2),即:

$$J_v = Ka \cdot Na. \quad (5)$$

式(5)中, Na 为面密度, Ka 为相关系数,其值主要在 1 ~ 2.5 之间变化, Ka 平均值为 1.5. 当观测平面

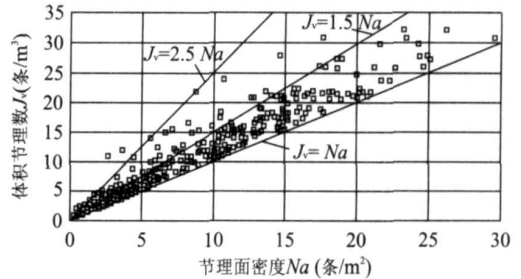


图 2 体积节理数与节理面密度的关系(Palmström, 1996)
Fig. 2 The connection between joint density in a surface and volumetric joint count

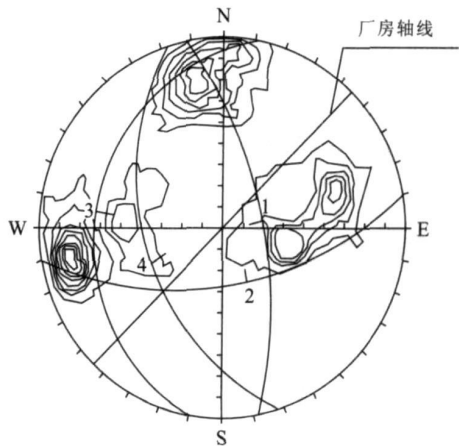


图 3 结构面极点密度等值线
Fig. 3 Polar density contour of structure planes

表 2 SR 修正参数及结构面统计

Table 2 Modified parameters of SR and statistics of structure plane quantity

参数	结构面统计值														
	$\beta > 60^\circ$			$30^\circ \sim 60^\circ$				$\beta < 30^\circ$							
走向 β	$> 75^\circ$		$30^\circ \sim 75^\circ$	$< 30^\circ$		$> 75^\circ$		$30^\circ \sim 75^\circ$		$< 30^\circ$					
倾角 α	$> 75^\circ$		$30^\circ \sim 75^\circ$	$< 30^\circ$		$> 75^\circ$		$30^\circ \sim 75^\circ$		$< 30^\circ$					
倾向	—		—	外		内		外		内		外			
影响系数 a_i	0.8	0.9	1	1.05	1	1.15	1.1	1.25	1.2	1.3	1.25	1.4	1.35	1.25	1.2
结构面条数	89	393	16	128	17	247	119	1	8	65	2	121	97	6	33

平行于主要节理组时, Ka 值最高。

为了测量 J_v , 在三峡地下电站主厂房下游边墙选取一个岩体结构具有代表性的部位: E. L75 m ~ 95 m、桩号 0+170 ~ 0+270 处。布置一个 20 m × 100 m 的大型测量窗口, 对窗口内的 1 200 余条结构面进行精细测量和描述, 由于主厂房基体裂隙的平均迹长约 2 m, 故测量网格单元为 2 m × 2 m, 在进行面密度统计时, 只计数网格区间内长度大于 0.5 m 的结构面。结构面迹长对岩体质量的影响明显, 长的结构面肯定比短小的结构面对厂房稳定性影响大, 因此, 这种网格布置方法, 可使得长大裂隙多次计数, 而短少裂隙只计数一次。

由图 3 可知, 结构面产状按走向可以分为 3 个优势组, 其分布量从多到少依次为: NNW、NEE 和 NNE。由于测量平面为边墙开挖面, 故结构面走向与厂房轴线夹角愈大, 式(5)中的 Ka 取值越小, 按结构面走向与厂房轴线夹角 (β) 大小将其分为 3 组: ① $\beta > 60^\circ$, 走向为 N17°W ~ N77°W; ② $30^\circ \geq \beta \geq 60^\circ$, 走向为 N13°E ~ N17°W 或 N73°E ~ N77°W; ③ $\beta < 30^\circ$, 走向为 N13°E ~ N73°E。以上 3 组结构面的 Ka 分别为: ①组 $Ka_1 = 1.1$; ②组 $Ka_2 = 1.5$; ③组 $Ka_3 = 2.2$ 。

基于分组统计 J_v 的思路, 式(5)可改进为:

$$J_v = \sum_{i=1}^3 J_{vi} = \sum_{i=1}^3 Ka_i \cdot Na_i, \quad (6)$$

式中, Na_i 为第 i 组结构面的面密度; 计算的 J_v 为 0.90 条/m³, 将 J_v 代入式(1)可得 SR 为 81.64。

2.2 SR 值计算的改进

显然, 传统的求解 SR 方法没有考虑岩体开挖面和工程建筑物间的空间效应。就大型水电工程地下厂房而言, 不同走向、倾向及倾角的结构面, 对围岩变形及强度参数的影响显著不同。

在结构面走向分组的基础上, 按倾向及倾角进一步细化分组, 参照工程岩体分级标准(GB50218-94)对主要软弱结构面产状影响修正的相关规定, 确定结构

面产状对 SR 的影响系数 a_i , a_i 越大表示此组结构面对围岩参数的影响越大, 结构面倾向考虑相对开挖面倾外或倾内两种情况(与洞室轴向大角度相交的结构面不考虑倾向), 约定倾向外或内指结构面与边墙开挖面的倾向夹角大于 90°为内倾, 少于 90°为外倾, 共分为 15 个分组, 详见表 2。按照结构面与厂房轴线夹角愈小, 相对开挖面倾外, 中缓倾角结构面对围岩参数影响较大的思路, 从而通过影响系数 a_i 修正节理体积数 J_v (即影响系数越大, 此组结构面修正的 J_v 越大), 继而确定一个等效的 SR :

$$\begin{cases} J'_v = \sum_{i=1}^{15} a_i J_{vi}, \\ SR = -17.5 \ln J'_v + 79.8. \end{cases} \quad (7)$$

测量窗口内各分组结构面的统计条数见表 2, 与主厂房轴线呈大角度相交的 NNW 向结构面基本以中陡倾角闭合裂隙型分布为主; NEE 向结构面以中陡倾角为主, 与厂房轴线夹角较小且结构面性状相对较差, 同时还存在少量与厂房轴线近平行的 NE 向中缓倾角且性状较差的结构面; 与厂房呈中等夹角相交的 NNE 向结构面以中陡倾角闭合裂隙型分布为主。基于统计分析, 由式(7)计算的 J_v 为 1.15 条/m³, SR 为 77.30。

2.3 SCR 值计算

根据测窗内结构面性状的精细描述及厂房区其他的地质编录资料统计分析, 各组结构面相应的性状描述如表 3 所示, 确定的各组结构面的 SCR 的取值如表 4 所示。为了求取一个反映结构面综合条件的 SCR 值, 笔者认为可通过下式进行求解:

$$SCR = \sum_{i=1}^n b_i SCR_i, \quad \sum_{i=1}^n b_i = 1. \quad (8)$$

SCR_i 为第 i 组结构面的 SCR 值, b_i 为第 i 组结构面所占的百分数。由式(8)可得 $SCR = 12.96$ 。

2.4 GSI 值的确定

由图 1 可以得 GSI 值: ① SR 未改进, $GSI = 73.70$; ② SR 改进后, $GSI = 70.80$ 。

表 3 结构面性状描述

Table 3 Description for character of structure planes

走向分组	裂隙性状描述
①	平直稍粗面为主, 少量较光滑至光滑, 多呈新鲜—微风化, 裂隙闭合为主, 少量充填绿帘石或钙质
②	平直稍粗面为主, 少量较光滑至光滑, 多呈弱风化, 多充填绿帘石或钙质, 充填物一般小于 5 mm
③	多呈张性, 平直稍粗面并见倾向或斜向擦痕, 少量波状粗糙闭合面, 多呈强风化, 充填风化碎屑及铁锰质, 充填物一般小于 5 mm

表 4 结构面表面特征 SCR 值统计

Table 4 Statistic result of surface condition rating (SCR) of structure planes

走向分组	①	②	③
R_r	5	5	3
R_w	6	3	1
R_f	6	4	2
SCR	17	12	6

3 围岩等效变形模量及强度

3.1 基于改进的 GSI 计算结果

三峡地下电站主厂房区岩性主要分为: 闪云斜长花岗岩、细粒闪长岩及两者的混熔接触带(混合岩), 以混合岩为主, 平均单轴抗压强度 $\sigma_i = 79.74 \text{ MPa}$, 主厂房开挖爆破效果良好, 岩体扰动因子 D 取 0.7, m_i 为岩石材料属性参数, 可以通过查找水电水利工程边坡设计规范(DL/T 5353-2006)相关表格得到, 取 29. 由式(4)计算出围岩的变形模量如表 5 所示, 由式(3)计算出围岩的 H-B 强度参数如表 6 所示, H-B 强度准则曲线如图 4 所示.

将 H-B 强度准则回归为直线形式 $\sigma_1 = k\sigma_3 + b$,

表 5 变形模量及抗剪强度

Table 5 Deformation modulus and resisting shear strength

计算工况	SR 未改进			SR 改进后		
	E_m (GPa)	c (MPa)	φ ($^\circ$)	E_m (GPa)	c (MPa)	φ ($^\circ$)
不计扰动	34.94	2.97	58.76	29.57	2.33	55.87
扰动	22.71	2.45	58.45	19.22	1.95	55.11

表 6 HB 强度参数

Table 6 Strength parameters of H-B yield rule

计算工况	SR 未改进			SR 改进后		
	m_b	s	a	m_b	s	a
不计扰动	11.37	0.054	0.50	10.22	0.039	0.50
扰动	6.84	0.022	0.50	5.83	0.015	0.50

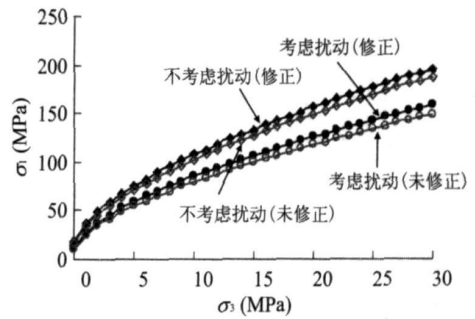


图 4 围岩 H-B 强度准则曲线

Fig. 4 The curve of H-B strength rule of surrounding rock

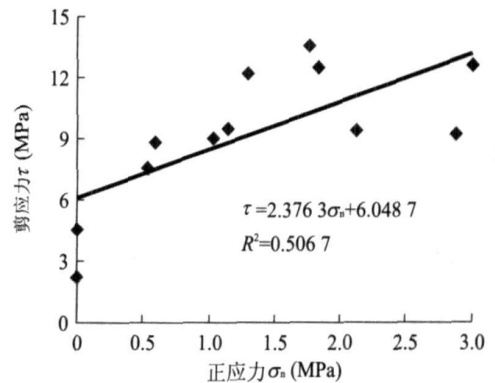


图 5 现场岩体剪切试验结果

Fig. 5 Result of shear test on the site

结合 Mohr-Coulomb 强度准则, 可求解围岩的等效抗剪强度参数. 由于在高围压下利用直线型的 M-C 强度准则求解抗剪切强度参数误差相对较大, 故仅在 $\sigma_3 = 0 \sim 3 \text{ MPa}$ 范围内进行回归, 得到的围岩抗剪强度参数 c, φ 如表 5 所示.

3.2 现场试验及有限元反演

主厂房区各类新鲜—微风化岩体现场变形试验(长江科学院, 1998. 三峡工程右岸地下电站 3012 平洞现场岩体力学性质试验研究报告)表明: ①整体结构岩体, $J_v \leq 1, E_m = 40 \sim 60 \text{ GPa}$, 平均为 49.96 GPa; ②块状—一次块状结构岩体, $1 < J_v \leq 1.5, E_m = 20 \sim 40 \text{ GPa}$, 平均为 27.40 GPa; ③镶嵌结构岩体, $J_v > 1.5, E_m = 10 \sim 20 \text{ GPa}$, 平均为 15.11 GPa; ④裂隙切割方向对岩体变形模量影响很大, 当缓倾角裂隙切割时, 变形模量较相邻点降低 60%~75%.

由现场新鲜块状岩体大剪试验得出其抗剪强度参数为: $c \approx 2.6 \sim 9.7 \text{ MPa}$, $\varphi \approx 55 \sim 67^\circ$, c 综合值约为 6.05 MPa, φ 综合值约为 64.08° . 图 5 为剪切试验结果, 从图中可以看出, 试验数据非常离散, 这是由于试验岩体中的裂隙或微裂隙方向与剪切方向存在着不同的交切角度, 当剪切面上的裂隙或微裂隙

方向近平行于剪切方向时, 岩体抗剪强度相对较小. 这也说明岩体的剪切强度与岩体结构特征和工程开挖特征密切相关.

另外, 笔者根据施工监测位移资料进行了岩体参数有限元弹塑性数值计算反演分析. 弹塑性有限元反演思路及方法: 选取顶拱第 1 层中导洞开挖时本文测试范围内的 3 号机组断面作为分析断面; 将掌子面穿过分析断面之前, 其上部现场预埋的多点位移计测得的位移 U^E 认为是弹性变形, 此时没有产生松动区, 可以进行弹性反演围岩的弹性参数; 当掌子面穿过分析断面时, 由爆破前后测得的瞬时位移增量 U^e 可认为是松动区的弹性变形, 这时可将围岩视为两种介质 (预先基于多点位移计及弹性波测试确定围岩松动范围, 并在模型中加以区分), 进而可对松动和非松动区进行弹性反演; 当掌子面穿过分析断面后, 掌子面停滞时仍可测到的位移增量 U^p 可认为是由于围岩应力调整产生的塑性位移, 利用该位移即可进行松动区的强度参数反演. 这一思路是基于这样一个公理: 对于没有流变的围岩, 弹性变形大都是瞬时的, 塑性变形大都需要一定的时间进行应力调整 (李宁等, 2006). 反演得到的围岩参数如表 7 所示.

3.3 比较分析及合理取值探讨

3.3.1 比较分析 根据《水利水电工程地质勘察规范》(GB50287-99) 围岩分类标准, 对地下电站勘探平硐及主厂房开挖围岩类型进行划分和统计: I 类围岩约占 36.7%; II 类围岩约占 48.2%; III 类围岩约占 14.6%; IV ~ V 类围岩只分布在张性断层 (如 F84) 的破碎带部位, 所占比例小于 0.5%.

现场试验的岩体结构分类为水电部门分类, 与前面的 GSI 体系的 SR 等级存有一定差异, 为了将现场变形试验成果与基于 GSI 体系的计算结果进行比较, 笔者认为可按下式统计现场变形试验测试的围岩等效平均变形模量 E_m :

$$E_m = \sum_{i=1}^n k_i E_{m_i}, \quad (9)$$

式(9)中, i 为围岩分类编号, k_i 表示第 i 类围岩所占百分量, E_{m_i} 表示第 i 类围岩测试的变形模量.

根据试验结果、围岩分类统计和式(9)可求得 $E_m = 32.65$.

比较上述 3 种方法得到的变形模量大小, 可以发现结果比较接近, 如果以现场试验结果为基准, 改进的 GSI 体系 (不考虑开挖扰动时) 求得的等效变形模量约减小 9.4%, 有限元反演的等效变形模量

表 7 围岩参数反演结果

Table 7 Back analysis result of surrounding rock parameters

围岩范围	E_m (GPa)	c (MPa)	φ (°)
松动区	20.20	1.80	58
弹性区	30.00	—	—

约减小 8%. 现场测试的围岩抗剪强度参数较大, 这是由于现场仅仅只对岩体质量较好的新鲜块状岩体进行了剪切试验, 并不能很好地代表围岩的平均等效强度. 有限元反演结果与改进的 GSI 体系的计算结果基本一致.

比较分析表 5 和表 7 的数据可以明显发现: 未改进 SR 时的模量及粘聚力计算结果明显偏大, 而 φ 值却较一致. 由表 2 中的结构面统计不难发现, 围岩内存在着较多的与厂房轴线夹角较小, 相对开挖面倾外, 中缓倾角结构面, 而这些结构面对围岩的变形模量及粘聚力影响明显.

有限元反演的 c 值较未改进的 GSI 体系计算 c 值约减小了 26.5%, 而较改进后计算 c 值约减小了 7.6%. 水电水利工程边坡设计规范 (DL/T5353-2006) 中提出了按 Hoek 提供的 GSI 方法拟合强度参数时, c 值应折减 25%, 而经过改进后明显得到了弥补.

开挖扰动明显弱化了围岩力学参数, 改进的 GSI 体系计算结果表明: 相对于不考虑开挖扰动时的计算结果, 考虑开挖扰动时围岩的平均等效变形模量减小约 35%, c 值减小约 12%, 而 φ 值变化很小. 由于开挖卸荷而引起的岩体参数弱化规律, 在很多的岩体卸荷试验研究中已得到验证 (黄润秋和黄达, 2008).

3.3.2 围岩参数合理取值探讨 现场试验成果比较离散性, 是试验岩体差异造成的, 可参考本文提出的式(7)取值; GSI 体系及有限元反演得到的是宏观的等效围岩变形模量及强度参数. 本文结合具体工程研究了裂隙的产状影响, 相当于考虑了裂隙对岩体强度参数影响的各相异性及开挖效应. 由于岩体的各向异性是一个非常复杂的问题, 因此, 笔者认为在实际工程中应该对 3 种取值方法进行综合考虑. 如果是对围岩整体稳定性的宏观评价, 采用本文改进的 GSI 方法和有限元反演结果较好, 如果是局部 (块体、局部坍塌等) 稳定性问题可采用现场相应试验成果.

由于开挖扰动的影 响, 卸荷松动岩体的力学参数明显弱化, 故在围岩稳定性分析中应加强对围岩

松动圈范围及参数测试和研究,并与弹性圈的参数加以区分,松动圈的参数同样可采用有限元反演和本文改进的 GSI 方法取值。

4 结论

(1)考虑到地下工程开挖影响, GSI 体系中的岩体结构等级应考虑结构面产状及与工程开挖面之间的空间关系,与洞室轴线小角度相交,相对开挖面倾角的中缓倾角结构面将会大大弱化围岩变形及强度参数,对围岩稳定不利。

(2)若以有限元反演结果为参照,本文考虑结构面产状影响的 GSI 体系求解的围岩变形模量及粘聚力精度提高了许多,改进后弹性区弹性模量、扰动区变形模量和粘聚力分别减小了约 15%、8% 和 28% 的误差,但摩擦角精度有少量降低。

(3)围岩松动圈的粘聚力和变形模量明显减小。因此,在大型地下洞室围岩稳定性分析及加固设计时,应加强对围岩松动圈范围及力学特性的研究。

References

- Hoek E., 1994. Strength of rock and rock masses. *ISRM News Journal*, 2(2): 4—16.
- Hoek E., Brown E. T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 34(8): 1165—1186.
- Hoek E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion—2002 edition. In: Hammah, R., Bawden, W., Curran, J., et al., eds., *Proceedings of NARMS-TAC 2002 Mining innovation and technology*. University of Toronto, Toronto, 267—273.
- Hoek E., Marinos, P., Benissi M., 1998. Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: The case of the Athens schist formation. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 57(2): 151—160.
- Huang R. Q., Huang, D., 2008. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(11): 2205—2213 (in Chinese with English abstract).

- Li J. L., Wang L. H., 2003. Study on size effect of unloaded rock mass. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 22(12): 2032—2036 (in Chinese with English abstract).
- Li N., Duan, X. Q., Chen, F. F., et al., 2006. A back analysis method for elastoplastic displacement of broken rock zone around tunnel. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(7): 1304—1308 (in Chinese with English abstract).
- Palmström, A., 1996. Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering—Part 1: The development of the rock mass index (RMI). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(2): 175—188.
- Sonmez H., Gokceoglu, C., Ulusay, R., 2004. Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses based on the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 41: 849—857.
- Sonmez H., Ulusay, R., 1999. Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 36: 743—760.
- Wu Z. Z., Wang, Q., 2006. Back analysis of viscoelastic rock mass parameters based on improved genetic algorithm. *Coal Geology & Exploration*, 34(3): 44—46 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L. W., Ding, W. T., Li, S. C., 2005. A displacement-based inverse analysis of rock mass parameters for rock stability evaluation. *China Civil Engineering Journal*, 38(5): 82—86 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 黄润秋, 黄达, 2008. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究. *岩石力学与工程学报*, 27(11): 2205—2213.
- 李建林, 王乐华, 2003. 卸荷岩体的尺寸效应研究. *岩石力学与工程学报*, 22(12): 2032—2036.
- 李宁, 段小强, 陈方方, 等, 2006. 围岩松动圈的弹塑性位移反分析方法探索. *岩石力学与工程学报*, 25(7): 1304—1308.
- 伍振志, 王泉, 2006. 基于改进遗传算法的粘弹性岩体力学参数反演. *煤田地质与勘探*, 34(3): 44—46.
- 张乐文, 丁万涛, 李术才, 2005. 岩体参数反演计算的稳定性研究. *土木工程学报*, 38(5): 82—86.