

岩体完整性系数确定及应用中的几个问题探讨*

段世委 许仙娥

(中水北方勘测设计研究有限责任公司 天津 300222)

摘要 岩体完整性系数是一个与岩体质量和强度有关的地质参数,用于岩体完整程度划分、工程岩体质量分级等方面。然而不同的规范在岩体完整性系数的确定和应用等方面存在分歧。本文分析了岩体波速测试方法、岩体风化状态对岩体完整性系数的影响以及岩体体积节理数与岩体完整性系数的关系,并对岩体完整性系数应用中存在的问题进行了探讨。确定岩体完整性系数时,若岩块与岩体弹性波速的测试方法不同,应进行修正。所测试的岩块与岩体应处于相同的风化状态。采用岩体体积节理数确定岩体完整性系数时应考虑岩体中结构面的张开宽度和充填情况。应注意区分规范中围岩工程地质分类与岩爆判别中的围岩强度应力比的不同地质含义。

关键词 工程地质 岩体完整性系数 弹性波速 围岩强度应力比

中图分类号:P642 文献标识码:A

DISCUSSION OF PROBLEMS IN CALCULATION AND APPLICATION OF ROCK MASS INTEGRITY COEFFICIENT

DUAN Shiwei XU Xian'e

(China Water Resources Beifang Investigation Design & Research Co., Ltd., Tianjin 300222)

Abstract The integrity coefficient of rock mass presents general quality and strength of rock mass. It is an important input parameter in many analysis of rock mass behavior such as in rating of rock mass integrity and quality and rock mass classification. However, there are divergences in relevant codes on how to determinate and apply the integrity coefficient. This paper discusses the contributing factors on determination of integrity coefficient. It then suggests that the elastic wave velocity of intact rock and rock mass for calculation of integrity coefficient be measured in the similar weathered rocks with the same geophysical method. Otherwise, the measured value has to be corrected. The openness and filling conditions of discontinuities should be carefully considered when the integrity coefficient is estimated with the volumetric joint number. In rock mass classification and estimation of rock burst, the term *ratio of rock mass strength to ground stress* has different geological implications. The rock mass strength has relation with integrity coefficient of rock mass.

Key words Engineering geology, Integrity coefficient of rock mass, Elastic wave velocity, Ratio of rock mass strength to ground stress

* 收稿日期: 2012-10-20; 收到修改稿日期: 2013-01-07.

第一作者简介: 段世委, 主要从事水利水电工程地质勘察与咨询. Email: tididsw@126.com

1 引言

岩体完整性系数是表征岩体完整程度的地质术语,其物理含义是岩体相对于岩石的完整程度。岩体完整性系数是通过获取岩体和岩石的纵波速度进行计算得到的。岩体内存在的各种结构面及充填物质使得弹性波在岩体内的传播速度降低,岩体弹性纵波速度反映了由于岩体的不完整性而降低了的物理力学性质;岩块则认为基本上不包含明显的结构面,测得的岩块的弹性纵波速度反映的是完整岩石的物理力学性质^[1]。岩体完整性系数是一个与岩体质量和强度有关的参数,因此,很多工程岩体质量评价方法中,都将岩体完整性系数作为影响岩体质量的一个重要指标^[1~5]。我国现行的《工程岩体分级标准》中将岩体完整性系数作为计算岩体质量指标 BQ 的 2 个参数之一^[1];《水利水电工程地质勘察规范》中坝基和围岩工程地质分类都将岩体完整性系数作为一个重要指标^[2,6,7]。但是,不同的规范对确定岩体完整性系数的规定存在一定的分歧。实际勘察工作中,在波速测试方法、测试岩块的选择以及采用体积节理数确定岩体完整性系数等方面也存在一些问题。以上原因可能造成计算的岩体完整性系数不能真实地反映岩体的完整程度,进而影响到岩体质量的准确评价。本文对岩体完整性系数确定及应用中可能存在的几个问题进行探讨。

2 有关岩体完整性系数确定的问题

2.1 岩体和岩块纵波速度的测试方法

岩体完整性系数的定义是指岩体的纵波速度与岩块的纵波速度之比的平方,其表达式为:

$$K_v = \left(\frac{V_m}{V_r} \right)^2 \quad (1)$$

式中, K_v 为岩体完整性系数; V_m 为岩体的纵波速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); V_r 为岩块的纵波速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)^[1,8]。

岩体纵波速度是指一定空间范围内弹性波在岩体中传播的纵波速度,它的大小不仅与岩性相关,而且与岩体结构类型、岩体结构面发育状况、岩体的风化程度、地应力状态及岩体渗透性等有关。岩石纵波速度是指完整岩石试件的纵波速度,其值的大小主要与岩石的岩性、风化程度、耐水性等有关^[9]。

《水利水电工程物探规程》SL326-2005 规定,岩块波速应采用声波法进行测试^[10],实际工作中一般

采用完整的钻孔岩心进行测试,而岩体波速主要通过声波测井或平洞洞壁地震波测试获取。一般情况下,声波测井获得的岩体声波波速要大于地震波波速。原因有两个方面,一是两者的频率不同,声波的频率一般为 $n \times 10^4 \text{ Hz}$,而地震波的频率为 $n \times 10^2 \text{ Hz}$ 。相比较而言声波频率高,能量小,对岩体的作用时间短,可认为其在弹性介质中传播;而地震波频率低,能量大,对岩体的作用时间长,地震波传播过程中岩体的变形包含非弹性部分^[11]。纵波在介质中的传播速度随频率的升高而增高,对于同一种介质,声波速度是地震波速度的 1.05 ~ 1.15 倍^[12]。二是两者所测试的岩体范围不同。声波测井测点间距为 0.2m,而地震波测点间距为 1 ~ 2m。相对而言,地震波两测点之间的距离大,测试岩体所包含的结构面数目多,其纵波速度较低。

由于以上原因,在计算岩体完整性系数时,若岩块与岩体分别采用不同类型的纵波速度是不合理的,应根据不同情况对岩块或岩体波速进行修正。笔者认为,由于地震波测试范围大,能够更好的反映岩体的情况,计算岩体完整性系数时,岩体波速最好采用地震波速度。当岩体的波速采用地震波速度时,应对岩块声波速度进行修正,修正系数为 0.91^[13];对于声波测井成果,由于其测试范围小(更接近岩块),应通过建立工程区声波测井成果与地震波测试结果之间的关系,对其进行修正,然后再计算岩体完整性系数。

云南某水电站坝址地层为华里西期安山岩,根据声波测井与平洞地震波测试结果统计,微风化岩体声波速度平均值为 $5050 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,地震波速度平均值为 $4620 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,声波速度为地震波速度的 1.09 倍;弱风化岩体声波速度平均值为 $3530 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,地震波速度平均值为 $2900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,声波速度为地震波速度的 1.22 倍。测试结果表明,岩体风化程度越弱,其声波速度与地震波速度越接近。工程区声波速度与地震波速度对比见图 1。

采用地震波速度计算岩体完整性系数时,首先将岩块声波速度进行修正,修正系数为 0.91,然后计算岩体完整性系数,修正前后计算的岩体完整性系数对比见表 1。

采用声波测井成果计算岩体完整性系数时,首先根据工程区声波测井成果与地震波测试结果之间的关系,分别将测得的弱风化和微风化岩体声波速度除以 1.22 和 1.09 的修正系数,然后计算岩体完整性系数,修正前后计算的岩体完整性系数对比见

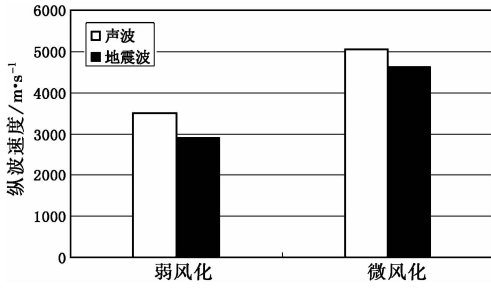


图1 声波速度与地震波速度对比图

Fig. 1 Bar chart showing relationship of sonic wave velocity and seismic wave velocity

表1 岩块波速修正前后的岩体完整性系数对比表

Table 1 Integrity coefficient from core sounding before and after correction

		岩体波速/ $m \cdot s^{-1}$	岩块波速/ $m \cdot s^{-1}$	岩体 完整性系数
弱风化	修正前	2900	4300	0.45
	修正后	2900	3910	0.55
微风化	修正前	4620	5610	0.67
	修正后	4620	5100	0.82

表2 声波测井成果修正前后的岩体完整性系数对比表

Table 2 Integrity coefficient from well-sonic logging before and after correction

		岩体波速/ $m \cdot s^{-1}$	岩块波速/ $m \cdot s^{-1}$	岩体 完整性系数
弱风化	修正前	3530	4300	0.67
	修正后	2900	3910	0.55
微风化	修正前	5050	5610	0.81
	修正后	4620	5100	0.82

表2。

由表2可以看出,对于弱风化岩体,修正前后的岩体完整性系数差别较大,而微风化岩体修正前后的岩体完整性系数差别不大,说明岩体越完整,测试方法造成的差别越小。

2.2 测试岩块与岩体的风化状态

《水利水电工程物探规程》SL326-2005 规定,计算完整系数时,岩块波速可采用本测区新鲜完整的岩样(或岩心)用声波仪测试,取一组岩样测试值的平均值作为岩块波速标准值。一个测区只有一种岩性时,应采用一个岩块波速标准值^[10]。而《工程岩体分级标准》GB50218-94 规定,应首先根据不同的岩性段或工程地质岩组,选择具有代表性的地段测

试岩体的弹性纵波速度,然后在该岩体中取样测试岩石的弹性纵波速度^[1]。也就是说,测定波速所选用的岩块应与岩体处于相同的风化状态。

由于风化作用,岩石的纵波速度将会降低。显然,对于同一岩体,由于所采用的岩块波速不同,所计算出的岩体完整性系数将会相差很大。仍以前述工程为例,该工程引水发电洞出口段为安山岩,弱风化状态,测得岩体纵波速度为 $3500 m \cdot s^{-1}$,取自该洞段的岩块纵波速度为 $4300 m \cdot s^{-1}$,而工程区新鲜安山岩岩块纵波速度为 $5610 m \cdot s^{-1}$ 。若采用弱风化岩块波速计算,该洞段岩体完整性系数为 0.66;而采用新鲜岩块波速计算的岩体完整性系数为 0.39。由此可见,对于风化岩体,依据《水利水电工程物探规程》规定所测得的岩体完整性系数偏小。那么,哪个规范的规定更合理呢?由岩体完整性系数的定义看,其反映的是岩体的完整程度,即岩体中结构面的发育程度及充填情况。因此,在计算岩体完整性系数时,不应包含岩石的风化因素,测试所选用的岩块应与岩体处于相同的风化状态。

2.3 岩体完整性系数大于1的情况

由于岩体中包含各种结构面,其纵波速度应小于岩块的纵波速度,理论上讲,岩体完整性系数不应大于1。然而,在实际工作中采用声波测井资料计算岩体完整性系数时,常常会出现大于1的情况。出现这种情况可能有以下几个方面的原因:一是测试方法造成的。前已述及,《水利水电工程物探规程》规定,在测定岩石弹性纵波速度时,取一组岩样测试值的平均值作为岩块波速标准值。而声波测井所代表的岩体块度较小(测点间距为 20cm),与岩块相当。显然,若测试岩体完整,其弹性波速就可能大于所测试岩块波速的平均值。二是由于测试环境造成的。岩块波速测试多采用钻孔岩心,在无水状态下测定,而声波测井是在饱和状态下测试,由于声波在饱和状态下的岩石中传播速度更快,因此测得的岩体波速可能大于岩块波速。三是在高地应力地区,由于岩心取出后应力释放,测得的纵波波速可能会比处于原始应力状态的岩体波速低,计算出的岩体完整性系数就可能大于1。

对上述情况应做具体分析,前两种情况与测试方法有关,解决该问题的办法一是适当扩大统计孔段的长度,取其平均值作为该段岩体的波速,尽可能地反映岩体的完整程度。二是尽可能选取有代表性的岩块,并在保持其原始含水状态下进行测试。对

于第3种情况,由于处于高地应力区的岩体中结构面挤压紧密,对岩体纵波速度影响较小,此时的岩体完整性系数并不能完全反映岩体中结构面的发育情况,需结合其他指标对岩体完整性进行评价,如RQD、 J_v 等。

2.4 采用岩体体积节理数确定岩体完整性系数

岩体体积节理数是国际岩石力学委员会推荐用来定量评价岩体节理化程度和单元岩体的块度的指标^[1]。获取方法大体有两类,一类是现场实测法,另一类是统计模拟分析法。现场实测法包括直接测量法、间距法和条数法^[14, 15]。《工程岩体分级标准》中采用的是间距法,首先在露头或平洞中选择有代表性的点进行岩体节理统计,然后根据统计结果,由下式计算岩体体积节理数:

$$J_v = S_1 + S_2 + S_3 \cdots + S_n + S_k \quad (2)$$

式中, J_v 为岩体体积节理数(条·m⁻³); S_n 为每米长测线上第 n 组节理的条数; S_k 为每立方米岩体中非成组节理的条数^[1, 8]。

国标《工程岩体分级标准》规定,在进行岩体基本质量指标计算时,岩体完整性系数应采用实测值。当无条件取得实测值时,也可采用岩体体积节理数 J_v 来确定对应的岩体完整性系数,两者之间的对应关系见表3。

表3 K_v 与 J_v 对照表^[1, 8, 16]

Table 3 Comparison of K_v and J_v

$J_v /$ 条·m ⁻³	>35	35 ~ 20	20 ~ 10	10 ~ 3	<3
K_v	<0.15	0.15 ~ 0.35	0.35 ~ 0.55	0.55 ~ 0.75	>0.75

虽然岩体体积节理数与岩体完整性系数都可以表述岩体的完整程度,但两者还是有差别的。岩体体积节理数是指单位岩体体积内的节理(结构面)数目,它仅仅表示岩体内结构面的发育程度,不能反映结构面的结合程度。而岩体完整性系数是通过岩体及岩块弹性纵波速度计算而来的,它不仅包含了结构面发育程度的因素,还包含了诸如结构面张开度、充填情况等因素。显然,同样的体积节理数,由于张开或充填情况不同,其弹性波速是不同的,所计算的岩体完整性系数也是不同的。因此岩体完整性系数与岩体体积节理数之间并无确切的对应关系,已有研究表明,由岩体体积节理数得到的岩体完整性系数,总体上大于由波速测试计算出的岩体完整

性系数^[10]。在采用岩体体积节理数确定岩体完整性系数时,应具体分析岩体中结构面张开宽度及充填情况,在所对应的岩体完整性系数范围值中选取合适的值。

3 岩体完整性系数应用中的问题

3.1 洞室围岩分类

《水利水电工程地质勘察规范》中的围岩工程地质分类标准中将岩石强度、岩体完整程度、结构面状态、地下水的活动状态以及主要结构面的产状等5项因素作为洞室围岩分类的基本判据^[2, 15]。其中结构面状态一项中包含结构面宽度、充填物及起伏粗糙状况和延伸长度等因素。而岩体完整性系数由岩块和岩体弹性纵波速度计算而来,在岩体波速中已经包含了诸如结构面发育密度、张开宽度以及充填情况等因素的影响。因此,在岩体完整性系数与结构面状态两项评分中,所考虑的因素有部分是重叠的,相当于加大了结构面因素在隧洞围岩分类中的权重。此外,运用该分类标准时还需注意以下两个方面:一是当围岩饱和单轴抗压强度小于5MPa时,围岩变形由强度控制,此时不考虑岩体完整性系数;二是当岩体完整性系数小于0.55时,围岩为岩体完整性差、较破碎或破碎岩体,此时不再进行主要结构面产状的修正^[2]。

3.2 计算围岩强度应力比

《水利水电工程地质勘察规范》在洞室围岩工程地质分类和岩爆判别中都涉及到围岩强度应力比的概念。然而两者所采用的计算公式是不同的。在洞室围岩工程地质分类中,围岩强度应力比作为限定判据,其计算公式为:

$$S = \frac{R_b \cdot K_v}{\sigma_m} \quad (3)$$

式中, S 为围岩强度应力比; R_b 为岩石饱和单轴抗压强度(MPa); K_v 为岩体完整性系数; σ_m 为围岩最大主应力(MPa)^[2, 7]。

岩爆判别中围岩强度应力比的计算公式为:

$$S = \frac{R_b}{\sigma_m} \quad (4)$$

式中符号同上。

两者的差别在于公式(3)中分子项包含了岩体完整性系数,而公式(4)不包含岩体完整性系数。

围岩分类中提出围岩强度应力比这一限定判据

的目的是控制岩体的变形破坏特性,即Ⅱ类以上岩体不应出现塑性挤出变形,Ⅲ类围岩允许局部出现塑性变形。若围岩强度应力比不满足限定条件,围岩类别要降低一个级别^[2]。岩体的完整程度是影响围岩变形破坏的一个重要因素,岩体越破碎,越易产生塑性变形。因此,在围岩强度应力比的计算公式中考虑了岩体完整性系数。

岩爆多发生在地应力高,岩石硬脆、完整性好的岩体中。即在地应力条件下,完整性好的岩体比完整性差的岩体易发生岩爆。若仍采用公式(3)计算围岩强度应力比,结果是岩体完整性越差,其围岩强度应力比越小,判断结果就可能发生更严重岩爆,这显然与实际相矛盾。因此,在岩爆判别中,计算围岩强度应力比时不应考虑岩体完整性系数。可见两个计算公式虽然不同,却都是合理的。只是在同一规范里的同一术语,所表述的地质意义不同,显然是不恰当的。

4 结 论

岩体完整性系数是岩体工程特性研究和工程岩体质量评价中的一个主要参数。合理确定和应用岩体完整性系数对准确划分岩体完整程度,正确评价工程岩体质量至关重要。在确定岩体完整性系数时,若岩块与岩体波速测试方法不同,应根据实际情况进行修正。测试所用的岩块应与岩体处于相同的风化状态和含水状态。在采用岩体体积节理数确定岩体完整系数时,应根据岩体中结构面的状态,选取合适的值。《水利水电工程地质勘察规范》隧洞围岩工程地质分类和岩爆判别中的围岩强度应力比所表述的意义是不同的,在实际应用中应具体分析。

参 考 文 献

[1] 工程岩体分级标准(GB50218-94)[S]. 北京:中国计划出版社,1994.
Standard for Engineering Classification of Rock Masses(GB50218-94). Beijing: China Planning Press, 1994.

[2] 水利水电工程地质勘察规范(GB50487-2008)[S]. 北京:中国计划出版社,2009.
Code for Engineering Geological Investigation of Water Resources and Hydropower (GB50487-2008). Beijing: China Planning Press, 2009.

[3] 邬爱清,柳赋铮. 国标《工程岩体分级标准》的应用与进展[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(8): 1513~1523.
Wu Aiqing, Liu Fuzheng. Advancement and application of the

“Standard of Engineering Classification of Rock Masses”. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(8): 1513~1523.

[4] 尹红梅,张宜虎,周火明,钟作武. 工程岩体分级研究综述[J]. 长江科学院院报,2011,28(8): 59~66.
Yin Hongmei, Zhang Yihu, Zhou Huoming, Zhong Zuowu. Review on the classification of engineering rock mass. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011,28(8): 59~66.

[5] 张勐,丁宝晶,崔建凯,贾留杰. 西南某水电站坝基岩体质量分级研究[J]. 地质灾害与环境保护,2012,23(2): 77~80.
Zhang Meng, Ding Baojing, Cui Jiankai, Jia Liujie. Rock quality rating for the dam foundation of a hydroelectric station in south-western China. Journal of Hazards and Environment Preservation, 2012,23(2): 77~80.

[6] 于立宏. 怒江马吉水电站坝基岩体质量分类[D]. 长春:吉林大学,2008.
Yu Lihong. Rock Mass Quality Classification for Dam Foundation of Maji Hydroelectric Power Station in Nujiang. Changchun: Jilin University, 2008.

[7] 王广德. 复杂条件下围岩分类研究[D]. 成都:成都理工大学,2006.
Wang Guangde. Research for the Surrounding Rock Mass Classification in the Complication Condition. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.

[8] 付海军. 数字钻孔摄像技术原理及其在海底隧道含水构造注浆效果检验中的应用[D]. 济南:山东大学,2010.
Fu Haijun. Study on Digital Borehole Camera Technique and Its Application on Grouting Effect Test in Subsea Tunnel. Ji'nan: Shandong University, 2010.

[9] 王昊,高志飞,赵国斌. 利用 K_v 值进行岩体完整性划分的研究[J]. 水利水电工程设计,2009,28(4): 48~49.
Wang Hao, Gao Zhifei, Zhao Guobin. Study on rating of rock mass integrity by K_v value. Design of Water Resources & Hydroelectric, 2009,28(4): 48~49.

[10] 水利水电工程物探规程(SL326-2005)[S]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
Code for Engineering Geophysical Exploration of Water Resources and Hydropower (SL326-2005). Beijing: China Water Power Press, 2005.

[11] 王清玉. 岩体完整性系数的确定问题[J]. 勘察科学技术,1994,(3): 63~65.
Wang Qingyu. Determination of rock mass integrity coefficient. Site investigation and technology, 1994,(3): 63~65.

[12] 周喜德. 岩体中弹性波速及其应用研究[J]. 贵州水力发电,1996,13(2): 10~13.
Zhou Xide. Study on velocity of elastic wave in rock and its application. Guizhou Water Power, 1996,13(2): 10~13.

[13] 马超锋,李晓,成国文,蒲丛林. 工程岩体完整性评价的实用方法研究[J]. 岩土力学,2010,31(11):3579~3584.
Ma Chaofeng, Li Xiao, Cheng Guowen, Pu Conglin. Study of practical approach to assess integrity of engineering rock mass. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(11): 3579~3584.

[14] 林峰, 黄润秋, 王胜, 刘明, 霍俊杰, 高正. 岩体体积节理数 (J_v) 的现场测量方法评价[J]. 工程地质学报, 2008, 16(5): 663 ~ 665.

Lin Feng, Huang Runqiu, Wang Sheng, Liu Ming, Huo Junjie, Gao Zheng. Evaluation in-situ measurement methods for counting volumetric joints of rock mass. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(5): 663 ~ 665.

[15] 李攀峰, 杨建宏, 杨建, 赵文光, 聂德新. 节理岩体体积节理数 J_v 的新计算公式[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 240 ~

243.

Li Panfeng, Yang Jianhong, Yang Jian, Zhao Wenguang, Nie Dexin. New formulate for volumetric joint count J_v of jointed rock mass. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 240 ~ 243.

[16] 李强. BP神经网络在工程岩体质量分级中的应用研究[J]. 西北地震学报, 2002, 24(3): 220 ~ 224.

Li Qiang. Study on the application of BP nervous network in classification of rock mass quality. Northwestern Seismological Journal, 2002, 24(3): 220 ~ 224.

新书推荐

《岩石高边坡稳定性工程地质分析》

黄润秋 著

内 容 简 介

本书结合我国西部特殊的地域地质环境条件、针对边坡高陡、地质环境条件复杂及工程边坡开挖规模巨大等特点, 全面阐述岩石高边坡稳定性分析的工程地质基础、变形破坏机理及稳定性分析和评价方法, 主要内容包括基本原理、岩石高边坡工程地质环境条件、高边坡工程地质现场工作方法、高边坡岩体结构分析、自燃和人工高边坡变形破坏机理、高边坡变形破坏的全过模拟理论及渗流、强震条件下的高边坡稳定性评价、高边坡稳定性的过程模拟与过程控制等, 全书共 12 章。

本书可供国土资源开发、地质灾害防治、水利水电、交通土建、矿山开采等领域以及高等院校、科研院所从事工程地质、岩土工程勘测设计的科研、教学、科技人员参考使用。

联系电话: 010-82998084, Email: engineer2003@mail.igcas.ac.cn

