文章编号:1673-0836(2006)08-1403-05

岩体抗剪强度试验成果整理及参数选取*

曾纪全，贺如平，王建洪

(中国水电顾问集团成都勘测设计研究院科学研究所,成都 610072)

摘 要:岩体抗剪强度试验成果整理及参数选取是大岗山水电站"坝区工程岩体分类及力学特性研究"专题研究中的重要部分。这部分从岩体及结构面抗剪(断)强度特性分析、强度特征点比较、整理方法选取、成果整理及标准值研究以及参数建议值选取等入手,建立起坝区工程岩体(含结构面)质量分类及配套的抗剪(断)强度参数体系,从而达到了保证复杂地质条件下工程安全性及设计合理性的目的。

关键词:岩石力学;岩体抗剪强度;结构面抗剪强度;抗剪强度试验;优定斜率法

中图分类号:TU459.2 文献标识码:A

Results Processing and Parameters Selection of Shear Strength Test on Rock

ZENG Ji-quan, HE Ru-ping, WANG Jian-hong

(*Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute of SPC, Chengdu* 610072, *P. R. China*)

Abstract: Arranging the achievement of the shear strength test of rock and choosing parameter are the most important works of the project "research of classification and mechanical character of the rock in dam site". In this part, the rock quality classification in dam site and the mating system of shear strength parameter have been set by the ways of analysing the character of shear strength of structual surface, comparing the strength characteristic points, choosing the arrangement way, arranging the achievement, studying the standard value and choosing suggested parameter to guarantee the safety of the construction and the reality of the design in complex geological conditions.

Keywords: rock mechanics; shear strength of rock; shear strength of structual surface; shear strength test; predominant slope method

1 前言

大岗山水电站位于四川省大渡河中游石棉县境内,是大渡河干流近期开发的大型水电工程之一,坝址处控制流域面积达6.27万km^2,占全流域的80%,多年平均流量约1010 m^3/s,电站正常蓄水位1130 m,最大坝高约210 m,总库容7.42亿m^3,电站装机容量2600 MW。

大岗山水电站坝区基岩以澄江期中粗粒角闪黑云二长花岗岩类为主。此外,尚有辉绿岩脉(β)、玢岩脉(μ)、花岗细晶岩脉(γ)、闪长岩脉(δ)等各类脉岩穿插发育于花岗岩中,尤以辉绿岩脉分布较多,它们与围岩的接触关系主要有焊接式接触、裂隙式接触及断层式接触三种类型。其次,坝区基岩在气液交代和构造变质作用下发生原生蚀变,其主要蚀变类型有绿泥石~绢云母化、钠黝帘石化、绿帘石化、钾长石化和硅化等五种;此外,在外营力作用下,还发生次生风化蚀变,如长石类矿物的高岭石化、绢云母化蚀变,黑云母的绿泥石化、蛭石化蚀变等。由此,对岩体的质量和结构产生了

* 收稿日期:2006-08-20(修改稿)

作者简介:曾纪全(1953-),男,重庆市人,高级工程师,科研所副总工程师,主要从事岩石力学试验研究方面的工作。
E-mail: zjiquan@sina.com

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

不利的影响。

大岗山水电站在预可行性研究、可行性研究阶段中共完成现场抗剪(断)强度试验51组,其中岩体现场抗剪(断)强度试验30组150点,结构面现场抗剪(断)强度试验17组127点,其中硬质结构面5组31点,软弱结构面12组96点,混凝土/花岗岩接触面现场抗剪(断)强度试验4组20点。试验点基本覆盖了坝区各类岩体和各类结构面,对坝区岩体和结构面强度参数的合理选取提供了基础依据。

2 抗剪(断)强度特性

研究在法向和剪切载荷作用下岩体的破坏机理和变形特性,是认识岩体强度,合理选取参数的基础。而岩体原位抗剪试验应力(τ)~位移(u_h)曲线$\tau=f(u_h)$,是分析确定岩石试件承受载荷的极限能力和阶段强度取值特征点的依据,也是区分试件缺陷程度对抗剪强度的影响,以及对试验成果作出正确评价的依据。工程设计计算可根据应力-变形曲线取值,经计算得出法向、剪切刚量等值而直接运用于工程设计计算。因此,对应力~变形曲线的分析研究,对工程实际运用或本构理论分析都是十分重要的。

根据坝区岩体抗剪(断)强度试验点剪应力~剪切位移曲线特征,大致归纳为以下3种类型。

(1) 脆性破坏型

受剪应力作用初始阶段具有弹性或准弹性特征。完整的剪应力~剪切位移关系曲线一般具有比例极限强度、屈服极限强度、峰值强度和残余强度4个特征点。

统计表明,坝区Ⅱ类岩80%(参与整理的试验点100%)、$Ⅲ_1$类岩25%属此种类型,均具有明显的峰值特征点。

(2) 塑性破坏型

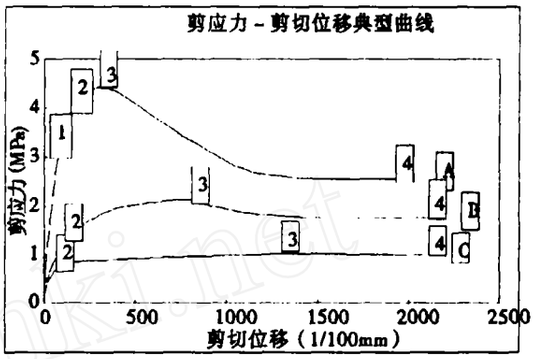
此类型比例极限强度、屈服极限强度特征点不明显。统计表明,坝区软弱结构面及部分刚性结构面为这种类型。

(3) 复合破坏型

上述两种类型的组合型,这种破坏型式在试验资料中约占试验总量的40%~50%,(裂隙有一定发育的)裂隙岩体常具此类特征。统计表明,坝区$Ⅲ_1$类岩75%、$Ⅲ_2$类岩100%、Ⅳ类岩100%及部分刚性结构面属此种类型。

3 强度特征点的比较

岩体是一种复杂的介质,是由岩桥和结构面组成的混合体,在荷载作用下,两者共同作用协调发展,破坏机理复杂,只有在深入研究现场抗剪(断)强度试验破坏机理及应力~位移关系的基础上,划分出各阶段的强度特征点进行相应的比较分析。



1. 比例极限强度 2. 屈服极限强度 3. 峰值强度 4. 残余强度
A 岩体抗剪断,B 刚性结构面,C 软弱结构面

图1 岩体抗剪断强度特征点

1. Proportional ultimate strength, 2. yield strength,
3. peak strength, 4. residual strength
A. shear surface, B. rigid surface, C. weak surface

Fig. 1 The characteristic points of shear strength

岩体在外力作用下一般表现为脆性破坏、塑性破坏及复合型破坏三种形式,其应力~位移关系曲线上所显示出的不同特征点如图1。

图1表明,无论哪种破坏形式,其破坏过程都要经历三个阶段:① 可逆的弹性变形阶段;② 不可逆的屈服变形阶段,但以软弱结构面为代表的塑性破坏型,其弹性变形阶段不明显;③ 破坏阶段。

根据不同变形阶段可划分出四个强度特征点,即比例极限强度(图1中1)、屈服极限强度(图1中2)、峰值强度(图1中3)、残余强度(图1中4),结构面比例极限特征点不明显。

我国拱坝设计规范与其分析方法配套,明确规定:"采用剪摩分析方法,强度特征点选用峰值强度;采用纯摩分析方法,强度特征点按剪切破坏形式,脆性破坏选用比例极限强度,塑性破坏选用屈服极限强度;若已剪断,则选用残余强度。"

国内外对上述前三个特征点的取值方法和相关关系作了很多研究,一般认为:

屈服强度/峰值强度=0.8~0.9(平均比值0.85);比例强度/峰值强度=0.5~0.6(平均比值0.55)。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成都院对溪洛渡水电站坝区岩体强度特征点也进行了相关性分析,其相关关系为:

岩体:比例强度/峰值强度 = 0.46 ~ 0.56(平均比值 0.50);屈服强度/峰值强度 = 0.77 ~ 0.87(平均比值 0.82)。

刚性结构面:屈服强度/峰值强度 = 0.81 ~ 0.85(平均比值 0.83)。

软弱结构面:屈服强度/峰值强度 = 0.80 ~ 0.86(平均比值 0.84)。

为研究大岗山水电站坝区岩体抗剪(断)强度各特征点的相关性,在剪应力 ~ 剪切位移关系曲线的基础上,对各类岩体和结构面抗剪(断)强度试验资料进行统计分析,分析成果如下:

岩体:比例强度/峰值强度 = 0.43 ~ 0.67(平均比值 0.55);屈服强度/峰值强度 = 0.80 ~ 0.89(平均比值 0.85);残余强度/峰值强度 = 0.42 ~ 0.80(平均比值 0.62);二次峰值/峰值强度 = 0.40 ~ 0.88(平均比值 0.61)。

刚性结构面:屈服强度/峰值强度 = 0.82 ~ 0.88(平均比值 0.85);残余强度/峰值强度 = 0.83 ~ 0.98(平均比值 0.93)。

软弱结构面:屈服强度/峰值强度 = 0.75 ~ 0.85(平均比值 0.83);残余强度/峰值强度 = 0.92 ~ 1.00(平均比值 0.95)。

以上分析成果与国内外研究成果相近,规律性较强,具有较好的代表性。

4　整理方法选取

岩体和结构面的抗剪强度参数(f、c 值)是大坝设计、两岸坝肩抗力体稳定分析、地下洞室稳定分析等的基础力学参数之一,这一力学参数的确定,是在现场试验成果的基础上,经统计整理、综合分析取得。

岩体力学参数的选取尚无一套通用的、成熟的方法,各单位、各工程取值方法也不统一。在水利水电工程中,根据测试成果确定岩体抗剪(断)强度参数 f、c 值的方法也较多,一般常用方法有:图解法、点群中心法、最小二乘法、优定斜率法等。

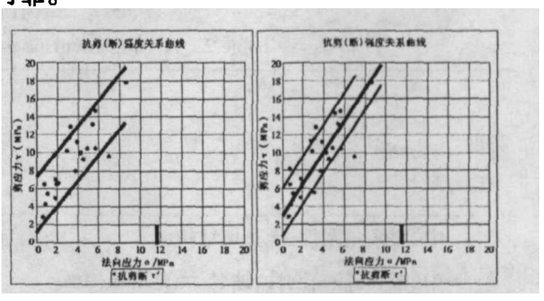
其中:图解法、点群中心法常掺杂着工程经验,取值结果可能会因人而异,为使抗剪(断)强度参数有足够的保证率,常对 f、c 值进行折减,但折减无统一标准。

最小二乘法假定岩体破坏服从莫尔 ~ 库伦准则,根据取用试验点群资料,运用最小二乘法原则计算出摩擦系数 f 及凝聚力 c 均值,标准差及变异系数,从而消除了人为误差,同时考虑了试验样本的随机性。但此法必须仔细分析样本的代表性,过滤掉无效样本。在试验样本较多时,计算所得 f、c 值规律性较好;试验样本少时,也会因岩体的非均质性而出现异常。与图解法、点群中心法相同,在参数选取时也需对 c、φ 值进行折减,且折减无统一标准。

优定斜率法则是在取得一定数量(一般不少于 4 组)的试验资料后,以岩体质量分类为基础,对试验成果按岩类进行整理。首先绘制该类岩体各试验点的 $\tau \sim \sigma$ 曲线图。从其点群分布的总体趋势和规律,在考虑岩类的前提条件下进行斜率优定,并采用此优定斜率分别求取凝聚力的上、下限值。一般取下限值作为岩体抗剪(断)强度参数建议值,此法虽考虑了影响抗剪(断)强度参数的综合因素,但对 τ、σ 相关性缺乏研究。

5　试验成果整理及标准值研究

岩体及结构面抗剪(断)强度参数整理按照岩体质量分类和结构面工程地质分类进行,整理时根据剪切面地质描述、试验原始记录,以及试验过程中的其他情况,逐点校核其代表性、合理性,舍去不具代表性、成果异常的试验点,以保证基础资料真实可靠。



a. 优定斜率法　b. 最小二乘法

图 2　Ⅱ类花岗岩抗剪(断)强度关系曲线

a. predominanct slope method,

b. least square method

Fig. 2　The curve of shear strength of class Ⅱ granite

在试验成果整理及标准值研究选取中,将以剔除不具代表性试验资料后的有效试验点为基础,分别按不同岩类、结构面类型归类进行数理统计、分析整理和标准值选取。其中,岩体抗剪断强度试验成果采用峰值强度进行整理,抗剪强度采用二次剪峰值强度;结构面抗剪断强度试验成果采用峰值强度进行整理,抗剪强度按《岩石试验规程》仍采用

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

二次剪峰值强度，但由于结构面，特别是软弱结构面二次剪峰值强度常高于一次剪峰值强度，给抗剪强度的取值带来困难。根据《拱坝设计规范》和前面第3节《强度特征点的比较》中建立的关系，结构面抗剪强度成果采用易于确定的、相对稳定的一次剪残余强度。

根据以上原则，将试验数据按分类分别点绘在相应的 $\tau \sim \sigma$ 散点图上，剔除其中不具代表性的试验点后，根据点群趋势，分别采用优定斜率法和最小二乘法取值，得出各类岩体抗剪（断）强度参数整理值（见图2、表1）。

鉴于最小二乘法需要较多样本的统计，在工程实践中，为使强度参数取值有足够的保证率，通常对该方法得出的 f' 及 c' 进行折减。而优定斜率法是从宏观上把握 $\tau \sim \sigma$ 关系的总体趋势，并可将岩体的抗剪（断）强度水平限制在组成岩体的大多数基本单元所能承担的范围内，避免因某些薄弱单元的累进性破坏而危及工程岩体的整体安全，因此建议使用优定斜率法的整理成果为试验成果标准值。

表1 岩体抗剪强度试验成果整理值

Table 1 Arrangement of the shear strength test on rock

类型	代表类型	统计组数/点数	优定斜率法				最小二乘法			
			抗剪断		抗剪		抗剪断		抗剪	
			f'	c'	f	c	f'	c'	f	c
				MPa		MPa		MPa		MPa
Ⅱ	微新灰白色、微红色中粒黑云二长花岗岩	5/21	1.36	2.00	1.00	1.10	1.66	3.73	1.02	2.06
	β21微新辉绿岩脉	1/4	1.90	5.70	1.17	3.50	2.13	6.43	1.17	5.28
$Ⅲ_1$	弱风化下段微红色、灰白色中粒黑云二长花岗岩，微新钠黝帘石化花岗岩	11/46	1.26	1.68	0.95	0.38	1.60	2.30	1.02	1.34
$Ⅲ_2$	弱风化下段，弱卸荷微红色、灰白色中粒黑云二长花岗岩	6/27	1.18	1.22	0.92	0.79	1.60	2.10	0.98	1.46
Ⅳ	弱风化上段，弱卸荷灰白色、微红色中粒黑云二长花岗岩	5/22	0.85	1.29	0.83	0.95	1.24	1.81	1.03	1.42

表2 结构面抗剪强度试验成果整理值

Table 2 Arrangement of the shear strength test of structural surface

类型	代表类型	统计组数/点数	优定斜率法				最小二乘法			
			抗剪断		抗剪		抗剪断		抗剪	
			f'	c'	f	c	f'	c'	f	c
				MPa		MPa		MPa		MPa
A_1	中、缓倾角刚性、无充填结构面	2/9	0.77	0.45	0.77	0.25	0.77	0.67	0.77	0.52
A_2	中、缓、陡倾角刚性、蚀变、无充填结构面	3/9	0.62	0.19	0.59	0.15	0.74	0.13	0.73	0.06
B_1	中、缓、陡倾角岩块岩屑型软弱结构面	9/63	0.59	0.05	0.53	0	0.64	0.12	0.61	0.10
B_2	中、缓、陡倾角岩屑夹泥型软弱结构面	2/17	0.42	0.02	0.42	0	0.51	0.07	0.49	0.05
B_3	中、缓、陡倾角泥夹岩屑型软弱结构面	1/5	0.36	0.15	0.32	0	0.36	0.17	0.32	0.15

6 抗剪（断）强度参数建议值选取

通过前面一系列的分析，在试验成果标准值的基础上，确定坝区岩体和结构面抗剪强度参数建议值选取原则如下：

（1）岩体抗剪（断）指标的选取以现场岩体抗剪（断）试验为基础，采用优定斜率法整理值为标准值。根据试验破坏类型以脆性或复合型破坏为主的特点，结合现场地质特征，按《规范》有关规定，抗剪断指标按峰值强度取整选取，抗剪指标应取比例极限。由于剪应力～剪切位移关系曲线上比例极限点不易确定，因此按第3节所列强度特征点的关系，采用二次剪峰值强度的0.9折减，并考虑不同岩类的差异，综合分析选取。参数建议值见

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3。

表 3　岩体抗剪强度参数建议值

Table 3　The suggested parameters of the shear strength of rock

岩类	抗剪断强度		抗剪强度	
	f'	c'	f	c
		MPa		MPa
Ⅱ	1.3	2.0	0.9	0
$Ⅲ_1$	1.2	1.5	0.75	0
$Ⅲ_2$	1.0	1.0	0.65	0
Ⅳ	0.8	0.7	0.6	0
Ⅴ	0.4	0.1	0.35	0

表 4　结构面抗剪强度参数建议值

Table 4　The suggested parameters of the shear strength of structural surface

类型		性状类型亚类	抗剪断强度		抗剪强度	
			f'	c'	f	c
				MPa		MPa
刚性结构面	A_1	闭合	0.7	0.2	0.6	0
	A_2	蚀变	0.6	0.1	0.5	0
	A_3	张开	0.5	0	0.4	0
软弱结构面	B_1	岩块岩屑型	0.5	0.1	0.4	0
	B_2	岩屑夹泥型	0.35	0.05	0.3	0
	B_3	泥夹岩屑型	0.3	0.02	0.25	0

（2）各类结构面亦采用优定斜率法整理值为标准值。根据其剪断类型以塑性破坏为主，按《规范》有关规定，抗剪断指标按峰值强度取整作为建议值，抗剪指标应取屈服强度。由于剪应力～剪切位移关系曲线上屈服极限点不易确定，因此按第 3 节所列强度特征点的关系，采用一次剪残余强度的 0.89 折减作为建议值。参数建议值见表 4。

7　结语

（1）优定斜率法整理成果能更客观地反映其抗剪（断）强度性质的总体趋势，推荐采用优定斜率法成果整理值作为试验成果标准值和建议参数选取的基本依据。采用优定斜率法的下限值作为凝聚力（c）的标准值。

（2）强度特征点的关系是在 51 组 297 点应力～位移关系曲线统计基础上得出的，具有很好的客观性和较高的可靠性。因此，岩体采用二次剪峰值强度的 0.9 折减，结构面采用一次剪残余强度的 0.89 折减选取抗剪强度参数建议值的根据是充分的。

（3）采用在试验成果标准值基础上分析整理选取的坝区岩体和结构面抗剪强度参数建议值，客观反映了各类岩体和各类结构面的抗剪（断）强度性质，规律性好，代表性强，为设计、施工等基础力学参数选取提供了可靠的依据。

参考文献：

[1]　原中华人民共和国电力工业部主编. 工程岩体试验方法标准（GB/T50266－99）. 北京：中国计划出版社，1999

[2]　长江水利委员会长江科学院主编. 水利水电工程岩石试验规程[S]（SL264－2001）

[3]　刘明维，何沛田，钱志雄，郑颖人. 岩体结构面抗剪强度参数试验研究[J]. 重庆建筑，2005

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net