

# 某水电站坝基岩体结构面直剪试验研究

张 晓 超

(成都理工大学 地质灾害与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都 610059)

**摘要:**  $c$ 、 $\varphi$  值是衡量岩体结构抗剪强度的主要参数,一般通过岩体结构面直剪试验获取。岩体结构面直剪试验分为多点法和单点法,工程设计中通常采用多点法,而忽视单点法的重要作用。为了对两种试验方法进行比较,结合具体的试验项目,运用携带式剪切仪,分别采用上述两种试验方法,对某水电站坝基岩体结构面的抗剪强度参数进行了试验测试。试验结果表明两种方法各有所长,并指出只有二者相结合才能客观反映岩体结构面的抗剪强度,从而提高工程设计的科学性、准确性和可靠性。

**关键词:** 单点法; 多点法; 岩体结构; 直剪试验

**中图分类号:** P55      **文献标志码:** A

西南某水电站拟建双曲拱坝,坝区出露的岩石主要为中深成侵入的花岗岩和浅成侵入的辉绿岩脉,以及少量由这些岩石经热液和构造作用改造而形成的热液蚀变岩和动力变质岩。为了验算坝基的抗滑稳定性,为工程设计提供参数,需要做大量室内外岩体结构面直剪强度试验。岩体结构面直剪试验分为“多点试验法”与“单点试验法”。

“多点试验法”采用多个试样,即在同一地质体中同时加工个 4 个以上的试件,分别施加不同的法向荷载和水平荷载,根据试验资料,绘制出应力-应变曲线,根据库伦公式  $\tau = \sigma \tan \varphi + c$ ,确定剪切面的抗剪强度参数,即内聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ 。

“单点法试验法”采用单个试样,即对一个试件分别施加多级正应力,在第一级正应力恒定下,施加剪应力到比例极限值后,减慢剪切速率,同时观察应力-应变曲线,当曲线开始转弯勾头,说明此时已十分接近峰值,停止施加剪力,并卸载,进入下一级正应力下的剪切试验,直至最后一级正应力下完成剪断,根据库仑定律求出  $c$ 、 $\varphi$  值<sup>[1-3]</sup>。

多点试验法能较好地反映岩体综合抗剪强度,根据岩石试验规程要求,工程设计中一般使用“多点试验法”。然而该方法存在以下缺点:多块试件差异大、试验数据较分散,试验成果精度差;野外取样困难,

加工试件多,试验历时长,且不够经济,因此多点法的利用受到一定限制。本文结合某水电站坝基岩体结构面的抗剪强度试验,在结构面直剪试验中采用了单点法与多点法结合的试验方法,并对此进行分析、总结和探讨。

## 1 试验方法

### 1.1 结构面产状及及试验点布置

由于篇幅所限,仅选取两组结构面直剪试验成果进行分析,试样编号分别为:YJ1 和 YJ2,试样为饱水状态,两组结构面均为硬性结构面,进行对比试验的结构面为同一结构面。

(1) 试样 YJ1 产状为  $N10^\circ W/SW \angle 65^\circ$ ,为倾坡内的陡倾结构面,构成抗力体上、下游两侧切割面,结构面表面起伏粗糙,有钠黝帘石化蚀变,结构面闭合,无充填,干燥,可见迹长大于 10 m。

(2) 试样 YJ2 产状为  $N20^\circ W/NE \angle 48^\circ$ ,为倾坡外的中倾结构面,构成右岸抗力体的底滑面,结构面表面有绿帘石化蚀变,较平整光滑,结构面闭合,无充填,干燥,可见迹长 3~5 m,同组裂隙间距 30~50 cm。

试验点布置如下:YJ1 结构面多点法布置 8 个点,单点法布置 2 个点。YJ2 结构面多点法布置 6 个点,单点法布置 2 个点。

## 1.2 试验方法与步骤

试验仪器采用便携式剪切仪,该仪器可测定岩体结构面、软弱岩石、特殊土的峰值与残余抗剪强度参数,试样可采用常规的规则试样,也可以对不规则试样进行测试。试验步骤如下:

(1) 制样。野外取样后当场用油漆标出拟剪方向,用红油漆圈出拟剪面,用细铁丝将试样交叉捆紧,然后立即在试样表面涂抹1~2遍油漆,以保持试样天然含水率,也防止试样浇筑时混凝土中水渗入试样。

(2) 试件浇筑。应先粗测剪切面面积,再进行制样,把试样用水泥砂浆(水泥、砂、水比例为1:2:0.5)浇筑在与仪器相配套的试样盒中。

(3) 试样养护。试件浇筑24 h后,拆去试样盒,将试样静置于水中,常温下养护3 d。

(4) 安装。将制成的试样置于剪切盒中,轻盖上剪切盒。微加垂向荷载,读取初值 $I_{\sigma 0}$ 。然后剪断捆扎试样的细铁丝,微加水平剪切荷载,读取压力表初值 $I_{\tau 0}$ ,安装测剪切位移的百分表,将表调零。

(5) 剪切试验。垂向荷载加至预定正应力,记录百分表初始读数,然后采用快剪法,分8~10级逐级施加剪切荷载,同时测记剪切位移。对于多点法,在设定好的正应力下施加剪切荷载直至试样破坏,然后做下一个试样的剪切;对于单点法,设定好第一级正应力后,水平荷载的施加应根据各位移测表的变化随时进行调整,以便准确捕捉到特征点,然后改变正应力,做下一级剪切<sup>[3-6]</sup>。

剪损标志:水平压力表值不再上升,甚至下降;或者剪切位移呈加速(或匀速)进行。每级剪应力的的大小,弱岩可按正应力的5%~10%计算,软弱结构面可按正应力的2%~5%计算,以避免剪应力过大突然剪损试样<sup>[5]</sup>。施加每级剪应力之后应测记剪切位移。

## 2 试验结果

### 2.1 试验结果统计

试样YJ1破坏时基本沿结构面破坏,破坏面起伏粗糙,起伏差约1 cm;YJ2试样破坏时沿着石英脉或者结构面剪切破坏,破坏面较平整、光滑,起伏差0.5 cm,破坏面有绿帘石化蚀变。图1为剪切后的试样。

试验完成后,使用求积仪求出剪切结构面面积,按下式计算正应力和剪应力<sup>[5-8]</sup>:

$$\sigma = \frac{(I_{\sigma} - I_{\sigma 0})S_v + G}{S_j} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{(I_{\tau} - I_{\tau 0})S_h}{S_j} \quad (2)$$

式中, $\sigma$ 为正应力,MPa; $I_{\sigma}$ 为垂向压力表读数,MPa; $I_{\sigma 0}$ 为垂向压力表读数初值,MPa; $S_v$ 为垂向千斤顶活活塞面积,m<sup>2</sup>或cm<sup>2</sup>; $G$ 为上剪切盒、垂向千斤顶和上半部分混凝土试件的总重,kg; $S_j$ 为详测剪切面面积,m<sup>2</sup>或cm<sup>2</sup>; $\tau$ 为剪应力,MPa; $I_{\tau}$ 为剪切荷载压力表读数,MPa; $I_{\tau 0}$ 为剪切荷载压力表初值,MPa; $S_h$ 为水平加荷千斤顶活活塞面积,m<sup>2</sup>或cm<sup>2</sup>。



(1) YJ1



(2) YJ2

图1 便携式剪切试验试样(剪完后)

### 2.2 试验结果分析

图2,3及表1为本次岩体结构面直剪试验的结果。图中峰值强度取剪应力-位移曲线上的最高点,屈服强度为剪应力-位移曲线上曲率变化最大的点(简称曲率点)。

对于试样YJ1,结构面胶结良好,且不同试件差异较大,两种试验方法相比较,单点法结果偏低,多点法更能综合代表实际的岩体质量,本次采用多点法试验结果,抗剪强度参数峰值 $c$ 取0.255 MPa, $\varphi$ 取37.3°,抗剪强度参数屈服值 $c$ 取0.204 MPa, $\varphi$ 取31.3°。对于试样YJ2,结构面表面有绿帘石化蚀变,岩体结构强度稍低,由于不同点岩体蚀变程度有差异,多点法数据分散,结果偏高,而单点法不受局部岩体蚀变差异及爬坡角的影响,更能代表蚀变岩体结构面的强度,故采用单点法试验结果,抗剪强度参数屈服值 $c$ 为0.129

MPa,  $\varphi$  为  $26.8^\circ$ , 多点法仅为供抗剪强度参数峰值提供参考。如表 2 所示。

方向所致。

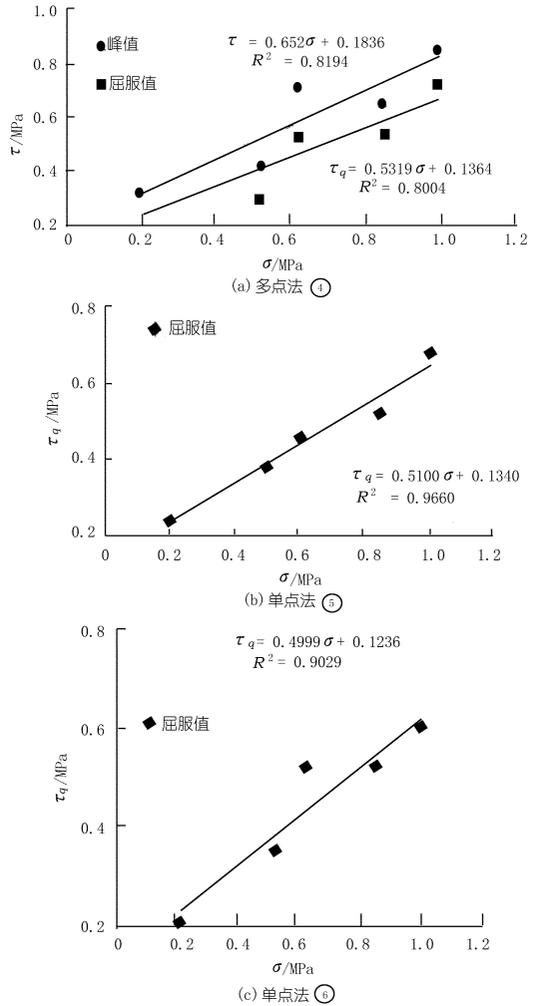
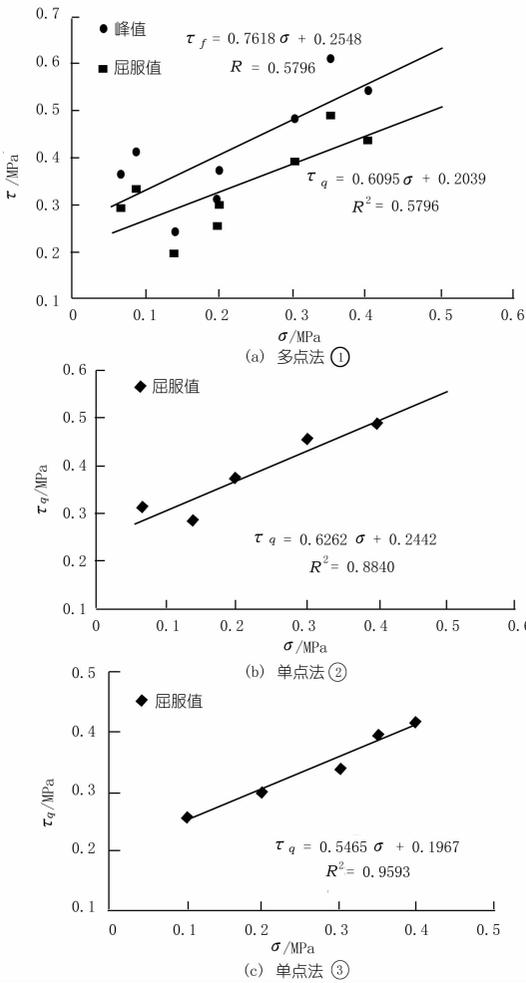


图 2 YJ1 结构面直剪试验剪应力 - 正应力关系曲线

图 3 YJ2 结构面直剪试验剪应力 - 正应力关系曲线

表 1 岩体结构面直剪试验成果

表 2 岩体结构面直剪强度参数取值

组号/ 结构面	试验 方法	抗剪参数(峰值)				抗剪参数(屈服值)			
		c/ MPa	$\varphi$ / ( $^\circ$ )	试样 个数	相关 系数	c/ MPa	$\varphi$ / ( $^\circ$ )	试样 个数	相关 系数 R
①/YJ1	多点法	0.255	37.3	10	0.760	0.204	31.3	8	0.76
②/YJ1	单点法					0.197	28.7	1	0.98
③/YJ1						0.244	32.1	1	0.94
④/YJ2	多点法	0.184	33.1	6	0.90	0.136	28.0	5	0.90
⑤/YJ2	单点法					0.134	27.0	1	0.98
⑥/YJ2						0.124	26.6	1	0.95

试样编号	抗剪参数(峰值)		抗剪参数(屈服值)	
	c /MPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )	c /MPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )
YJ1	0.255	37.3	0.204	31.3
YJ2	0.184	33.1	0.129	26.8

### 3 结构面直剪强度影响因素及分析

(1) 两种方法所采用的计算特征参数不一样, 多点法为抗剪强度峰值和抗剪强度屈服值两种参数; 单点法仅求取抗剪强度屈服值参数。

(2) 总体来看, 单点法试验结果值较多点法结果偏低, 相关系数提高。单点法中个别试验结果较多点法偏高, 主要是因为凸起部分的应力集中和应力作用

(3) 试样 YJ1 结构面胶结良好, 且不同试件差异较大, 多点法更能综合代表实际的岩体质量, 本次采用多点法试验结果; 试样 YJ2 结构面表面有绿帘石化蚀变, 岩体结构强度稍低, 由于不同点岩体蚀变程度有差异, 多点法数据分散, 而单点法不受局部岩体蚀变差异及爬坡角的影响, 更能代表蚀变岩体结构面的强度, 本次采用两组单点法试验结果平均值。

(4) 岩体结构面尤其是硬性结构面, 其剪切破坏机理较为复杂, 既有沿结构的滑动摩擦, 又有剪断、压碎、滚动现象。同时, 在凸起部分的应力集中、应力作用方向以及有效剪切面积等都会影响到试验成果。采用单点法与多点法相结合, 才能客观反映结构面的抗

剪强度,从而为工程设计提供有效依据。

#### 参考文献:

- [1] 周翠云,王良之.单点法抗剪断强度的试验研究[J].湖南水利,1999,(1):21-35.
- [2] 贺猛.单点法岩体结构面直剪试验[J].山西建筑,2009,35(1):138-139.
- [3] 刘培泰,张景德,王乃光,等.裂隙岩体强度试验单点法及其前景[J].工程地质学报,1994,2(3):54-61.
- [4] 张天祥.结构面直剪试验中单点法与多点法的比较和研究[J].甘

肃水利水电技术,2003,39(2):124-125.

- [5] 苏道刚.工程地质勘察试验教程[M].成都:西南交通大学出版社,2008.
- [6] 岩土工程勘察规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [7] GB/T50266-99 工程岩体试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,1999.
- [8] 徐志伟,张景德,李裕中,等.岩体抗剪断强度单点法的依据与判据[J].岩石力学与工程学报,1998,17(6):655-661.

(编辑:赵凤超)

## Experimental study on direct shear test of rock mass structure for a dam foundation

ZHANG Xiaochao

(State Key Laboratory of Geo-hazards Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** Value  $c$  and  $\Phi$  are main parameters for measuring the shear-strength of rock mass structure and are generally obtained through direct shear test of rock mass structure. The direct shear test method of rock mass structure includes multi-point method and single point method, but multi-point method is generally adopted in engineering design while the importance of single point method is neglected. In order to compare the two test methods, in the combination of concrete test program and using portable shear apparatus, the test on shear-strength parameter of rock mass structure for dam foundation of a hydropower station was conducted with the two methods. The test result shows that each method has its merits and only their combined use can objectively reflect the shear-strength of rock mass structure, and improve the correctness and reliability of engineering design.

**Key words:** single point method; multi-point method; rock mass structure; direct shear test

(上接第53页)

## Inverse analysis for thermal parameters of mass concrete based on fiber temperature monitoring

JIANG Kai<sup>1</sup>, HUANG Yaoying<sup>1</sup>, ZHOU Yihong<sup>1</sup>, CHEN Chi<sup>1</sup>, ZHOU Shaowu<sup>2</sup>

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. China Three Gorges Corporation, Yichang 443002, China)

**Abstract:** High density automatic temperature monitoring on inner concrete is realized by distributed fiber. In order to determine the thermal parameters of mass concrete, based on the record of distributed fiber buried in the concrete of a being-constructed dam, by using 3-D FEM simulation analysis technology and simplex algorithm of the inverse analysis optimization method, we conduct inverse analysis to obtain the thermal parameters and then to forecast the temperature field of new pouring concrete. It shows that inversion results are reliable and the predicted temperature field is in conformity well with the measured values. It provides a specific reference to temperature forecast and temperature field simulation calculation.

**Key words:** fiber temperature monitoring; thermal parameter; mass concrete; inverse analysis; temperature forecast

维护健康长江 促进人水和谐