

碎粒型结构面特征及物理力学参数优化分析^{*}

刘云鹏,李辉,李崇标,李华

(中国电建集团 成都勘测设计研究院有限公司,成都 610072)

摘要:某水电站坝区两岸的勘探平洞揭示了百余条挤压破碎带,兼具挤压错动和风化蚀变双重特征,其组成以碎粒岩为主,空间分布不均。作为一种软弱结构面,其工程地质特征及物理力学参数对坝区岩体利用和枢纽建筑物布置具有重要影响。通过现场调查及物理试验,分析统计了其发育分布特征、物理性质;结合现场碎粒型结构面的抗剪强度试验,获得了抗剪强度参数,根据点群趋势,分别按优定斜率法和最小二乘法取值。为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,建议使用优定斜率法成果的下限值作为试验成果标准值。

关键词:碎粒型结构面,挤压破碎带,物理性质,抗剪强度,优定斜率法

中图分类号:P642

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)05-1276-08

Characteristics and Optimization Analysis on Physico-mechanical Parameters of Structural Plane Containing Particles

Liu Yunpeng, Li Hui, Li Chongbiao, Li Hua

(Chengdu Engineering Co. Ltd., PowerChina, Chengdu 610072, P.R. China)

Abstract: More than 100 compresso-crushed zones have been revealed in the exploratory adits on both sides of the dam area of a hydropower station. These zones composed mainly of particles have the double characteristics of extrusion dislocation and weathering alteration, and the spatial distribution is uneven. As a kind of weak structural plane, their engineering geological characteristics and physical and mechanical parameters have great influence on the utilization of rock mass and the layout of pivotal structures in dam area. Through the field investigation and physical experiment, their distribution and physical properties were analyzed statistically. Combining with the shear strength test of structural plane containing particle, the shear strength parameters are obtained. According to the group trend, specific parameters are acquired, respectively according to the optimal slope method and least square method; In order to avoid endangering the overall safety of the engineering rock mass caused by progressive failure of some weak units, the lower limit value of the optimal slope method is recommended as the standard value of the experimental results.

Keywords: structural plane containing particles; compresso-crushed zones; physical properties; shear strength; optimal slope method

0 前言

由于构成岩体的岩石在矿物成分、胶结物质的性质存在着显著差异,加上前期分割面空间位置、

交切组合关系和受外界影响因素的不同,在工程可利用岩体内部存在多种类型的具有不同物理力学参数的软弱结构面^[1-3],主要归结为组成岩土的原岩组成、风化程度、颗粒形状、孔隙结构、含水量、应

^{*} 收稿日期:2018-04-13(修改稿)

作者简介:刘云鹏(1982-),男,内蒙古通辽人,高级工程师,主要从事水电勘察设计工作。E-mail:464276817@139.com

力状态等因素的直接影响^[4-7],这给工程建筑(构筑)物布置和稳定安全带来诸多问题。在有效掌握其工程地质特征的基础上,如何获取其真实有效的物理力学参数取值,对于工程设计至关重要。

根据现场有效信息进行反演求解不失为一种岩体力学综合参数获取的有效方法,很多学者在这方面做了研究并取得了较好结果^[8-13]。但这些研究大多建立在变形实测数值的基础上,算法优化程度也趋于合理,有些目标函数相当复杂,计算量过大,显然并不适合工程前期设计阶段的参数选取。还有学者采用力学参数综合估算的方法对待评区围岩进行参数估算^[14-15],对于隧洞围岩力学参数的快速准确估算具有一定参考和借鉴意义。然而通过现场试验并适当考虑室内试验仍是工程设计参数取值的最直接、最重要的手段和方法。

目前,在岩体软弱结构面试验参数统计特征的研究方面,主要对岩体结构参数的统计特征和岩体抗剪(断)强度 τ 及其参数 c 、 φ 的统计特征进行研究^[16-17],并取得了大量成果。但针对具有不同工程背景的含有特殊结构面类型的岩体物理力学参数取值,并没有统一的试验统计分析方法,需要根据具体情况具体分析。

叶巴滩水电站位于四川白玉县与西藏贡觉县境内的金沙江干流上,电站枢纽建筑物由混凝土双曲拱坝、泄洪消能建筑物及引水发电三大系统组成。混凝土双曲拱坝高217 m,引水发电系统采用右岸首部式厂房接长尾水的布置方案。坝区出露基岩地层单一,为华力西期中酸性侵入石英闪长岩与花岗闪长岩组成的简单复式岩株。前期勘察过程中,在勘探平洞内普遍揭露一类具有类似结构构造特征、以NNE走向和中缓倾角为主、最大延伸可达几十米的软弱结构面,以碎粒岩为主,表面呈疏松“砂糖状”结构^[18-19],表现为具有明显挤压错动和风化蚀变双重的特征的挤压破碎带。

这类软弱结构面(带)模量低,在建基面附近发育时,可构成坝基重要地质缺陷,影响坝基局部变形。倾角多中~缓,可构成拱坝坝肩滑移块体底滑面,在工程边坡中出露时,可构成影响边坡块体稳定的重要地质边界。因此,有必要对其工程地质特征进行梳理分析,并对涉及到岩体抵抗变形能力的抗剪强度进行试验分析,以便为工程建设提供重要参数和依据。

1 主要工程地质特征

坝区的挤压破碎带表现为碎粒型软弱结构面,

一般厚0.1~0.3 m,个别达0.3~0.6 m,主要由碎粒岩组成,呈疏松砂糖状,无或少见角砾,粘粒含量低或无,颗粒级配粒组以0.1~5 mm为主,如g23-4等。根据后期加剧风化程度和物质组成差异,又可细分为碎粒型(B2-1)和碎粒夹泥型(B2-2)。B2-1亚型中粉粒含量很低,无粘粒,由碎粒岩组成,疏松呈砂糖状;颗粒以0.5~5 mm为主,粘粒含量无或很少,无胶结,如g23-4等。B2-2亚型粉粒含量较多,粘粒含量为3%~10%,主要由碎粒岩组成,疏松呈砂糖状;颗粒以0.005~2 mm为主,无胶结,主要以g7-2、g13-1、g25-7等为代表。

1.1 发育特征

挤压破碎带主带一般由碎粒岩组成,局部可见残留原岩结构的初角砾岩、角砾岩,泥质成分含量低或无,大多没有明显的影响带。根据取样试验成果,颗粒级配粒组以0.1~5 mm为主,级配良好。部分带内可见密集发育的破劈理,显示压剪特征。岩石磨片显示,长石、云母、石英皆碎裂,并有波状消光。错动距离小,与围岩呈突变接触。加剧风化,长石蚀变,黑云母绢云化,受地下水活动影响,部分可见矿物淋滤流失。部分挤压破碎带受后期地下水改造并加剧风化,局部细颗粒集中,带内发育宽0.1~1 cm的条纹状细粒集中带。

挤压破碎带经后期改造,受地下水活动影响,发生物理、化学风化,破碎带物质多呈疏松“砂糖状”。空间展布不稳定,两盘起伏,带宽、倾角等变化大,常被EW、NE向断层限制,有时多条成带发育,空间上错列展布。

坝区平洞共揭示170余条,其中宽度大于0.1 m的Ⅲ级结构面有13条,宽度小于0.1 m的Ⅳ级结构面的有158条。Ⅲ级结构面挤压破碎带一般延伸100~200 m,带宽0.1~0.4 m,部分宽0.4~0.6 m。Ⅳ级结构面挤压破碎带一般延伸10~100 m,带宽0.01~0.1 m,局部呈透镜状宽0.1~0.3 m。挤压破碎带的带宽空间变化大,局部呈透镜状放大特征。常被EW、NE向的中陡倾断层限制,说明挤压破碎带形成于坝区主要断层体系之后。一般无明显的错距,个别可见错断岩脉数厘米,反映出挤压破碎带遭受的错动作用相对较弱。

对坝区平洞揭示的170余条挤压破碎带统计分析,产状以 $N0^{\circ}\sim 45^{\circ}E/NW\angle 10^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 为主(图1),又可细分为缓倾的 $N0^{\circ}\sim 45^{\circ}E/NW\angle 10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 和中倾的 $N0^{\circ}\sim 45^{\circ}E/NW\angle 30^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 两个方向。此

外,零星发育 $N40^{\circ} \sim 50^{\circ} E/NW \angle 60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 、 $EW/S \angle 50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 、 $SN/E \angle 30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 等方向,具代表性的如 g23-4、g31-6 等(如图2、图3)。

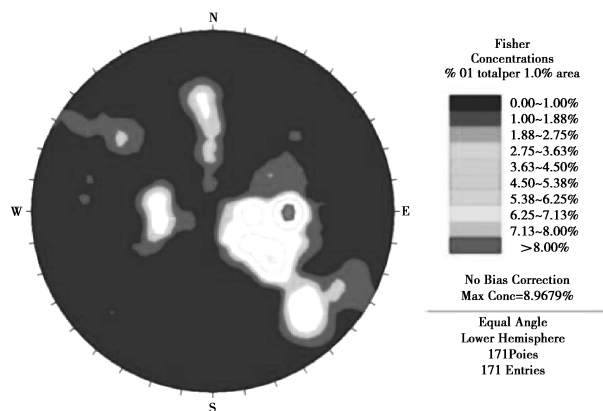


图1 坝区挤压破碎带极点等密图

Fig. 1 Pole map of compresso-crushed zones in dam area

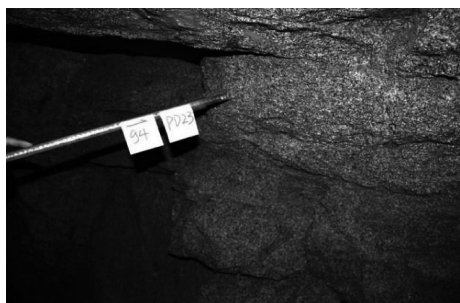


图2 挤压破碎带(g23-4)

Fig. 2 Compresso-crushed zone (numbered g23-4)



图3 挤压破碎带(g31-6)

Fig. 3 Compresso-crushed zone (numbered g31-6)

1.2 分布特征

根据平洞勘探揭示,挤压破碎带在坝区两岸均发育,但空间分布具有不均一性。左岸低高程主要在 PD7、PD1、PD5、PD43、PD13、PD31 等平洞内揭示,中高程主要在 PD23、PD45、PD25、PD33 等平洞内揭示,高高程主要在 PD9、PD47 等平洞内揭示。右岸低高程主要在 PD6、PD22、PD6、PD26 等平洞内揭示,中高程主要在 PD18、PD48 等平洞内揭示,高高程未揭示。

在勘探控制范围内,左岸自上游Ⅱ线至下游Ⅴ线之间的不同高程均发育;分高程统计,低高程在Ⅶ~Ⅴ线发育,中高程在Ⅱ~Ⅴ线发育,高高程在Ⅳ~Ⅴ线发育。右岸主要分布在低高程和中高程,高高程不发育;低高程主要分布于Ⅶ~Ⅰ'线之间发育,中高程主要分布于Ⅳ~Ⅴ线之间发育。从平面分布的集中程度分析,左岸Ⅳ~Ⅴ线的低~高高程挤压破碎带数量多、发育程度更高。不同高程是指:底高程 2 733~2 756 m、中高程 2 800~2 843 m、高高程 2 888~2 908 m,另外坝址枯水期河水位高程为 2 721 m。

1.3 结构面物性及渗透试验

根据坝区 g5-5、g23-4、g25-8、g31-6 等代表性挤压破碎带取样试验成果(图4),其物质组成颗粒粒径主要集中在 0.1~5 mm 之间,级配连续。少量挤压破碎带受后期风化影响,存在细粒集中带,含少量粘粒。根据 g23-4 试验成果,干密度为 1.70 g/cm³,孔隙比为 0.606。

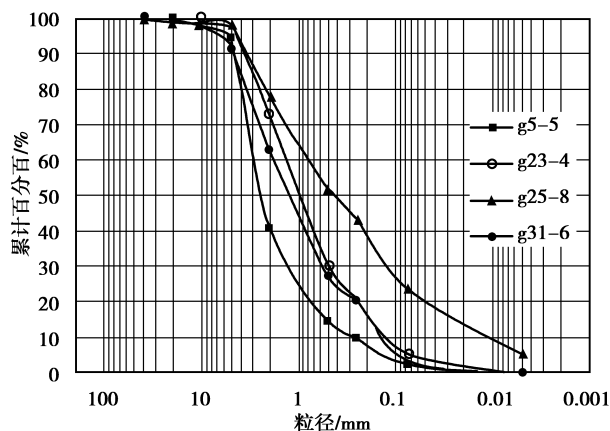


图4 挤压破碎带颗粒级配曲线图

Fig. 4 Grain gradation curves of compresso-crushed zones

为查明坝区主要断层和挤压破碎带的物理力学和渗透特性,对 g23-4 等构造软弱物质进行室内物性、渗透试验。这些断层及挤压破碎带主要是构成影响拱坝抗滑稳定、坝基变形及边坡稳定的关键结构面。

g5-5、g23-4、g31-6 的颗粒组成以 0.5~5 mm 为主,>5 mm 和<0.5 mm 的颗粒含量较低,<5 mm 颗粒含量占 91.3%~98.2%,0.5~5 mm 粒径含量占 61.9%~79.2%,粉粒含量很低,无粘粒;干密度为 1.70 g/cm³,孔隙比 0.606;分类定名为含细粒土砂(SF)、级配良好砂(SW)或级配良好砾(GW)。g25-8 的颗粒组成以 2~0.005 mm 为主,<5 mm 颗粒含量占 96.6%,粉、粘粒含量占 23.3%,粘粒占

5.3%,分类定名为黏土质砂(SC)。

为了掌握大坝蓄水后软弱层带的渗透性变化情况,对位于两岸坝肩部位的挤压破碎带,在现场专门取试样在室内进行了常规渗透试验,结果如表 1。

表 1 常规渗透试验成果表
Table 1 Results of conventional osmosis test

软弱带编号	控制条件		渗透试验				备注
	干密度	含水率	临界坡降	破坏坡降	渗透系数	破坏类型	
	$\rho_d/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$W/\%$	i_k	i_f	$k_{20}/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	—	
g23-4 挤压 破碎 带主带	1.70	4.0	—	1.31	3.83×10^{-4}	过渡	土样 TY23-1

g23-4 代表了坝区典型的挤压破碎带碎粒型结构面。根据 g23-4 渗透性室内试验成果,其颗粒以 0.1~2 mm 为主,渗透系数为 $3.83 \times 10^{-4} \text{cm/s}$,破坏坡降 1.31,属于中等透水,渗透破坏类型为过渡型。

根据试验成果结合物质组成特征综合分析,坝区挤压破碎带以中等透水为主,渗透破坏类型以过渡型为主,抗渗坡降较低,在高水头长期作用下存在渗透破坏可能。这些软弱带抗渗能力较差,施工中应做必要的防渗处理。

2 碎粒型结构面强度试验

结构面的抗剪强度参数,是岩体抵抗剪切破坏能力的体现,是岩体的重要力学性质之一,也是水工建筑物设计的重要基础参数之一,一般通过现场试验(大尺寸直剪试验)来获取。

2.1 试验方法

强度试验采用平推法,试体尺寸为 50 cm×50 cm×25 cm。千斤顶加载,模拟水工建筑物对基岩的作用力,加载方向分为垂直于剪切面和平行于剪切面。结构面强度试验最大法向压力根据其承载能力进行了不同程度的调整。每个试体在第一次试验剪断后,再沿剪切面进行抗剪(摩擦)试验。试验在天然状态下进行。

2.2 试验成果

通过强度试验,测定结构面的抗剪(断)强度和变形特征,研究结构面的变形和破坏规律,并为验算坝基、坝肩、地下洞室围岩、岩质边坡等的抗滑稳定计算提供抗剪强度参数。碎粒型结构面(带)直剪试验 4 组。成果表中所列抗剪断强度 τ' 为峰值强度,抗剪强度 τ 为二次剪峰值强度。

(1) τ j23-1 位于 PD23 平洞内 0+70.0 m,代表类型为 B_2 (碎粒型结构面)。该结构面为 g23-4 挤压破碎带(局部具有断层性质),带宽 0.3~0.5 m,碎粒组成,局部残留原岩结构并密集发育破裂节理,绢云母化。试体剪断后剪切面较平直,粗糙,局部起伏差 1~2 cm,下剪切面残留大量碎粒和岩粉。强度试验成果曲线如图 5,试验成果为:

$$\tau' = 0.73\sigma + 0.01$$

$$\tau = 0.68\sigma$$

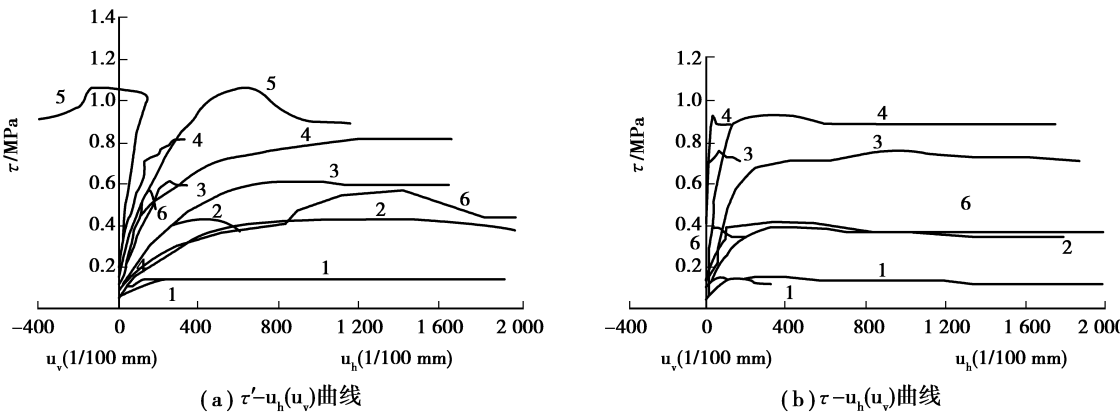


图 5 τ j23-1 强度试验成果曲线

Fig. 5 Strength test curves of τ j23-1

(2) τ j25-1 位于 PD25 平洞内 0+114.0 ~ 117.0 m, 代表类型为 B_2 (碎粒夹泥型结构面)。该结构面为 g25-7 挤压破碎带, 带宽 0.2~0.3 m, 碎粒岩, 局部夹黄褐色泥膜, 局部发育厚 0.5~2 cm 的不连续细颗粒集中带。试体沿下盘顶面剪切, 剪断后

剪切面较平直, 试体多沿泥膜剪断, 局部起伏差 2~3 cm, 下剪切面残留大量碎粒和细沙。强度试验成果曲线如图 6, 试验成果为:

$$\tau' = 0.43\sigma + 0.06$$

$$\tau = 0.39\sigma + 0.04$$

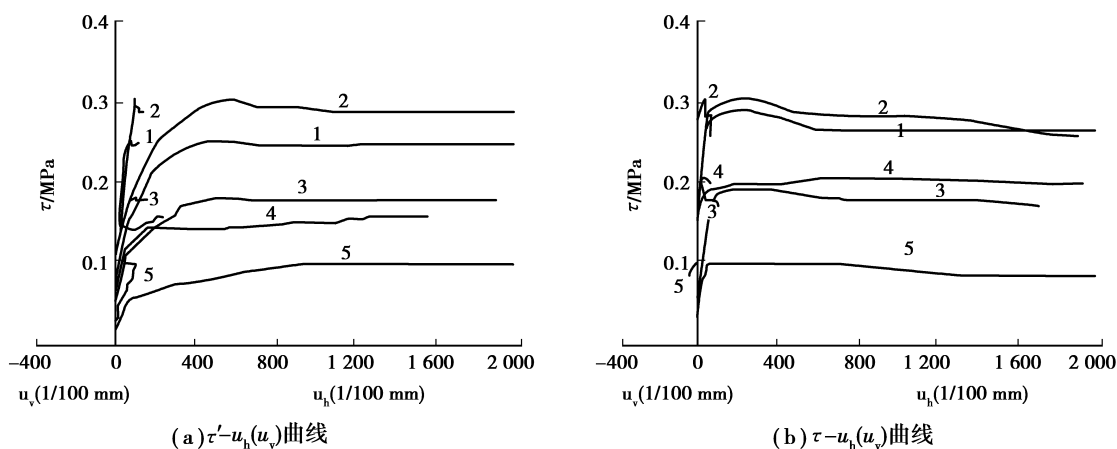


图 6 τ j25-1 强度试验成果曲线

Fig. 6 Strength test curves of τ j25-1

(3) τ j31-2 位于 PD31 平洞内 0+105.0 ~ 108.0 m, 代表类型为 B_2 (碎粒型结构面)。该结构面是 g31-6 挤压破碎带, 带宽 0.2~0.3 m, 碎粒岩, 局部发育厚 0.5~2 cm 的不连续细颗粒集中带, 部分残留原岩结构。试体剪断后剪切面较平直, 个别

试体沿原岩结构剪断, 下剪切面残留大量碎粒和细沙。强度试验成果曲线如图 7, 试验成果为:

$$\tau' = 0.57\sigma + 0.07 \text{ MPa}$$

$$\tau = 0.48\sigma + 0.01 \text{ MPa}$$

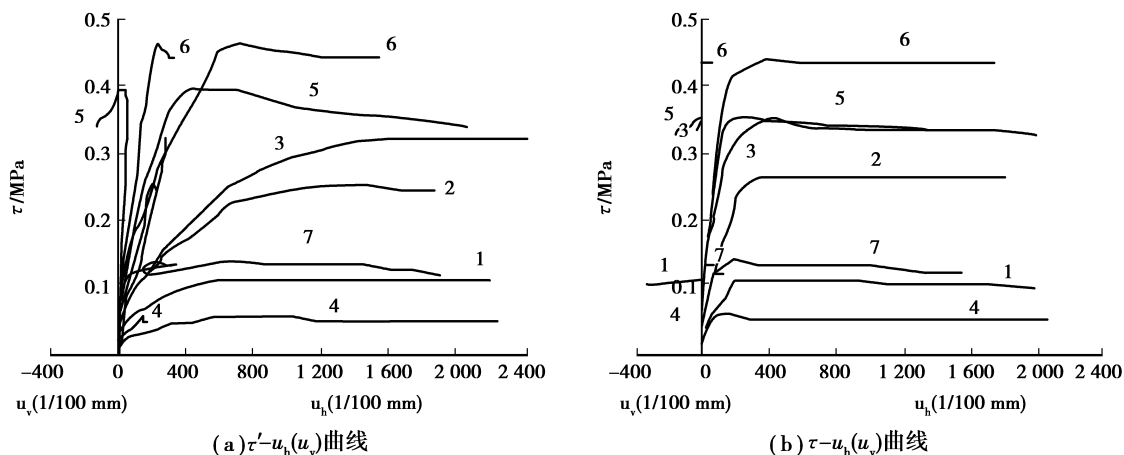


图 7 τ j31-2 强度试验成果曲线

Fig. 7 Strength test curves of τ j31-2

2.3 成果整理及优化分析

碎粒型结构面直剪试验共完成 25 点, 又分两种类型。

(1) 普通碎粒型, 共完成 20 点, 依据试验点的数据, 绘制 $\tau \sim \sigma$ 散点图, 如图 8、图 9 所示。根据点群趋势, 分别按优定斜率法和最小二乘法取值, 得

出碎粒型结构面抗剪(断)强度参数整理值为:

优定斜率法:

抗剪断: $f' = 0.50$ $c' = 0.05 \sim 0.40$ MPa

抗剪: $f = 0.40$ $c = 0.02 \sim 0.38$ MPa

最小二乘法:

抗剪断: $f' = 0.63$ $c' = 0.10$ MPa

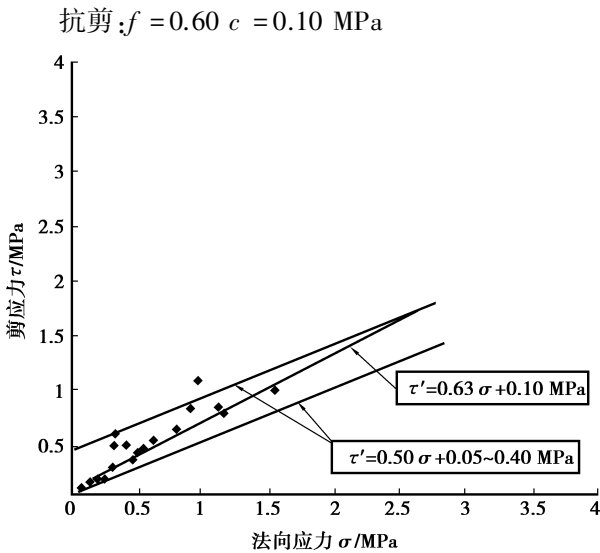


图 8 B₂ 型普通碎粒型结构面
抗剪断强度 $\tau \sim \sigma$ 关系曲线

Fig. 8 $\tau \sim \sigma$ relation curves of shear-cutting strength of B₂ common structural plane containing particles.

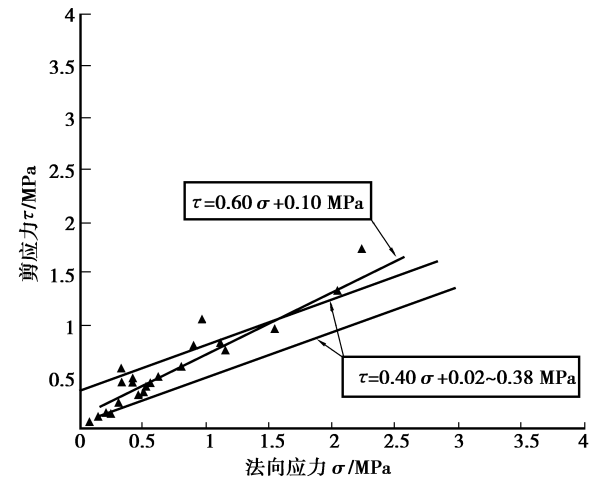


图 9 B₂ 型普通碎粒型结构面
抗剪强度 $\tau \sim \sigma$ 关系曲线

Fig. 9 $\tau \sim \sigma$ relation curve of shear strength of B₂ common structural plane containing particles.

(2) 碎粒夹泥型,共完成 5 点,依据试验点的数据,绘制 $\tau \sim \sigma$ 散点图,如图 10。由于数据较少,根据点群趋势,仅采用最小二乘法得出碎粒夹泥型结构面抗剪(断)强度参数整理值为:

最小二乘法:

抗剪断: $f' = 0.43$ $c' = 0.06$ MPa

抗剪: $f = 0.39$ $c = 0.04$ MPa

碎粒型结构面直剪试验得到的抗剪(断)强度参数整理取值时,分别采用了优定斜率法、最小二乘法和图解法,得到的成果作为整理值。整理值汇

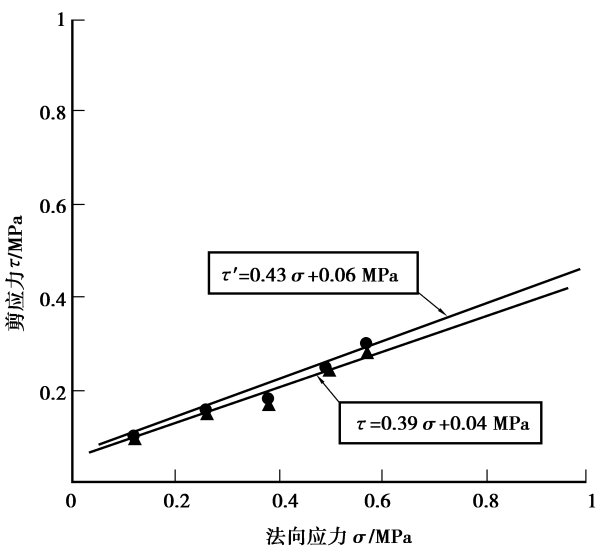


图 10 B₂ 型碎粒夹泥型结构面抗剪强度
 $\tau \sim \sigma$ 关系曲线

Fig. 10 $\tau \sim \sigma$ relation curves of shear strength of B₂ structural plane containing particles, in which mud is distributed.

总如表 2。

表 2 坝区碎粒型结构面强度试验的整理值

Table 2 Finishing values of strength test of structural plane containing particles in the dam area

试验对象		优定斜率法/图解法/最小二乘法				备注
		抗剪断强度		抗剪强度		
		f'	c'/MPa	f	c/MPa	
结构面 B_2	B_{2-1}	0.50	0.05 ~ 0.40	0.40	0.02 ~ 0.38	碎粒型
	B_{2-2}	0.43	0.06	0.39	0.04	碎粒夹泥型

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,其下限值考虑了最薄弱环节可能引起的破坏,并将结构面的抗剪(断)强度能力限制在组成结构面的大多数基本单元所能承担的范围,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成果的下限值作为试验成果标准值,岩体强度成果标准值如表 3。

表3 坝区碎粒型结构面强度试验的标准值
Table 3 Standard values of strength test of structural plane containing particles in the dam area

试验对象		优定斜率法				备注
		抗剪断强度		抗剪强度		
		f'	c'/MPa	f	c/MPa	
结构面	B ₂₋₁	0.50	0.05	0.40	0.02	碎粒型
	B ₂					
	B ₂₋₂	0.43	0.06	0.39	0.04	碎粒夹泥型

注:优定斜率法比较论证后优定出各类岩体和结构面强度的斜率 f ,然后根据点群范围,在 $\tau \sim \sigma$ 曲线图上找出其上、下限值确定凝聚力 c 值范围,最后选用下限值作为标准值。

以往工程实践表明,软弱结构面(带)对坝基、地下洞室的局部稳定性有影响,不利条件下也会对斜坡稳定有重要影响。因此,按照规程规范规定和要求,根据坝址区已完成的碎粒型结构面强度试验及室内物理力学试验,结合坝区工程地质特点,参考类似工程,提出坝区碎粒型结构面力学参数建议值:即抗剪断强度 f' 为0.43~0.50, c' 为0.05~0.06 MPa;抗剪强度 f 为0.39~0.40, c 为0.02~0.04 MPa。

3 结论

(1)坝区的挤压破碎带表现为碎粒型软弱结构面,一般厚0.1~0.3 m,个别达0.3~0.6 m,主要由碎粒岩组成,呈疏松“砂糖状”,无或少见角砾,粘粒含量低或无,颗粒级配粒组以0.1~5 mm为主。根据后期加剧风化程度和物质组成差异,又可细分为碎粒型(B_{2-1})和碎粒夹泥型(B_{2-2})。据试验并结合物质组成特征综合分析,坝区典型的挤压破碎带碎粒型结构面以中等透水为主,渗透破坏类型以过渡型为主,抗渗坡降较低,在高水头长期作用下存在渗透破坏可能,施工中应做必要的防渗处理。

(2)优定斜率法是从宏观上把握 $\tau \sim \sigma$ 关系的总体趋势,其下限值考虑了最薄弱环节可能引起的破坏,并将结构面的抗剪(断)强度能力限制在组成结构面的大多数基本单元所能承担的范围,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。结合坝区工程地质特点,参考类似工程,提出坝区碎粒型结构面力学参数建议值:即抗剪断强度 f' 为0.43~0.50, c' 为0.05~0.06 MPa;抗

剪强度 f 为0.39~0.40, c 为0.02~0.04 MPa。

参考文献(References)

- [1] 孔德坊.工程岩土学[M].北京:地质出版社,1992.(Kong Defang. Engineering geotechnics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992. (in Chinese))
- [2] 中国电力企业联合会.水力发电工程地质勘察规范(GB 50287-2016)[S].北京:中国计划出版社,2008.(China Electricity Council. Code for hydropower engineering geological investigation (GB 50287-2016) [S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese))
- [3] 中华人民共和国国家能源局.水电水利工程坝址工程地质勘察技术规程(DL/T 5414-2009)[S].北京:中国电力出版社,2009.(National Energy Administration. Code for dam-site project geological investigation of hydropower and water resources (DL/T 5414-2009) [S]. Beijing: China Power Publishing House, 2009. (in Chinese))
- [4] 唐良琴,聂德新,任光明.软弱结构面粒度成分与抗剪强度参数的关系探讨[J].工程地质学报,2003,11(2):143-147.(Tang Liangqin, Nie Dexin, Ren Guangming. Discussion on the relational between granulometric composition and shear strength parameter of weak structural plane [J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11(2): 143-147. (in Chinese))
- [5] 杨永明,鞠杨,刘红彬,等.孔隙结构特征及其对岩石力学性能的影响[J].岩石力学与工程学报,2009,28(10):2031-2038.(Yang Yongming, Ju Yang, Liu Hongbin, et al. Influence of porous structure properties on mechanical performances of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2031-2038. (in Chinese))
- [6] 刘清秉,项伟, Budhu M, 等.砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J].岩土力学,2011,32(增1):190-197.(Liu Qingbing, Xiang Wei, Budhu M, et al. Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (Supp. 1): 190-197. (in Chinese))
- [7] 丰正伟,刘新荣,傅晏,等.软弱结构面对隧道围岩稳定性的影响研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(4):745-749.(Feng Zhenwei, Liu Xinrong, Fu Yan, et al. Influence of interface on stability of tunnel openings in the connection of different lithology [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(4): 745-749 (in Chinese))
- [8] 郝哲,万明富,刘斌,等.韩家岭隧道围岩物理力学参

- 数反分析[J].东北大学学报(自然科学版),2005,26(3):300-303.(Hao Zhe, Wang Mingfu, Liu Bing, et al. Backward analysis of physical and mechanical parameters of surrounding rock of Hanjialing tunnel[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005,26(3):300-303(in Chinese))
- [9] 朱合华,张晨明,王建秀,等.龙山双连拱隧道动态位移反分析与预测[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):67-73.(Zhu Hehua, Zhang Chenming, Wang Jiangxiu, et al. Dynamic; displacement back analysis and prediction of Longshan two-arcade twin tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(1):67-73.(in Chinese))
- [10] 梁桂兰,徐卫亚,韦杰,等.位移反分析的 APSO-WNN 模型研究及应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(6):1251-1257.(Liang Guilán, Xu Weiya, Wei Jie, et al. Displacement back analysis of APSO-WNN model research and application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6):1251-1257. (in Chinese))
- [11] 曹文贵,卢山,胡坚丽.基于自适应退火算法的非线性位移反分析方法研究[J].岩土力学,2008,29(7):1753-1758.(Cao Wengui, Lu Shan, Hu Jianli. Research on method of nonlinear displacement back analysis based on adaptive annealing algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7):1753-1758. (in Chinese))
- [12] 陈卫兵,宋丰波,高鹏.京珠高速 K108 边坡软弱夹层流变参数的智能反演[J].地下空间与工程学报,2011,7(3):485-490.(Chen Weibin, Song Fengbo, Gao Peng. Intelligent back analysis on rheological parameters of weak intercalation in k108 slope of Jingzhu expressway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(3):485-490. (in Chinese))
- [13] 杨蒙,谭跃虎,李二兵,等.基于敏感性分析的围岩力学参数反演方法研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(5):1030-1038.(Yang Meng, Tan Yuehu, Li Erbing, et al. Study on inversion method of mechanical parameter of surrounding rock based on sensitivity analysis[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5):1030-1038. (in Chinese))
- [14] 彭斌,梅涛,阎瑞敏.隧洞围岩力学参数综合估算方法的应用研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(3):498-503.(Peng Bin, Mei Tao, Yan Ruimin. Research on application of systematic estimation method for rock mechanical parameters of the tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3):498-503. (in Chinese))
- [15] 尹帅,徐清华,丁文龙,等.致密砂岩抗剪参数与 H-B 参数间关系研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(2):407-411.(Yin Shuai, Xu Qinghua, Ding Wenlong, et al. Research on relationship between shear strength parameters and H-B criterion parameters of the tight sandstone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(2):407-411. (in Chinese))
- [16] 徐建平,胡厚田,张安松,等.边坡岩体物理力学参数的统计特征研究[J].岩石力学与工程学报,1999,18(4):382-386.(Xu Jianping, Hu Houtian, Zhang Ansong, et al. On statistical characteristics of physical and mechanical parameters in slope rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999,18(4):382-386.(in Chinese))
- [17] 沈明荣,张清照.岩体结构面的剪切试验研究[J].地下空间与工程学报,2010,6(1):38-43.(Shen Mingrong, Zhang Qingzhao. Study on shearing test of rock mass discontinuity[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1):38-43. (in Chinese))
- [18] 李华,李崇标,李辉,等.金沙江上游叶巴滩水电站可行性研究报告(工程地质)[R].成都:中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,2016.(Li Hua, Li Chongbiao, Li Hui, et al. Feasibility study report of Yebatan hydropower station in the upper reaches of Jinsha River (Engineering Geology)[R]. Chengdu: Chengdu Engineering Co. Ltd., Power Construction Corporation of China, 2016. (in Chinese))
- [19] 赵其华,韩刚.金沙江上游叶巴滩水电站坝区卸荷岩体工程特性专题研究[R].成都:成都理工大学,2014.(Zhao Qihua, Han Gang. Special study on engineering characteristics of unloading rock mass in the dam area of Yebatan hydropower station in the upper reaches of Jinsha River[R]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese))