

黄河某高拱坝岩体力学参数的选取

戚 炜^{1,2,3}, 王勇智^{1,2,3}, 姜伏伟⁴

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 长安大学 西部地质资源与地质工程教育部重点实验室, 西安 710054;
3. 长安大学 国土资源部岩土工程开放研究实验室, 西安 710054; 4. 东华理工大学 土木工程与环境学院, 江西 抚州 344000)

摘 要: 在对比国内外各种选取岩体力学参数方法的基础上, 对黄河某高拱坝坝址区主要岩层中生代二长岩和三叠系变质砂岩采用现场原位试验和数据统计方法获取岩体力学参数。用刚性圆形承压板法进行岩体变形试验, 建立了岩体纵波波速与变形模量的拟合关系, 用最小二乘回归法处理变形数据。用平推法直剪试验进行岩体抗剪断强度试验, 用 $\sigma-\tau$ 点群中心法处理直剪试验数据。软弱带取样后进行室内断层泥物理力学性质试验, 运用岩土工程勘察规范中参数统计经验公式来获得各软弱带的抗剪参数。点群法求得的各抗剪指标总体上与原位试验得到的结果相一致, 证明该法可用于岩体力学参数选取。

关 键 词: 高拱坝; 岩体力学; 变形模量; 抗剪强度; 最小二乘回归法; 点群中心法

中图分类号: TU 456

文献标识码: A

Determination of mechanical parameters of rock mass at a high arch dam on Yellow River

QI Wei^{1,2,3}, WANG Yong-zhi^{1,2,3}, JIANG Fu-wei⁴

(1. College of Geology Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Western Geology Resources and Geology Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

3. Open Research Laboratory of Geotechnical Engineering under the Ministry of Land and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

4. College of Civil & Environment Engineering, East China Institute of Technology, Fuzhou, Jiangxi 344000, China)

Abstract: Different determination methods of mechanical parameters of rocks at home and abroad are contrasted. In-situ tests are made on Mesozoic monzonite and Triassic metamorphic sandstone at dam site. Statistical methods are used in order to determine rock mechanical parameters. Rigid circular bearing plate is used for rock mass deformation test. Then the fitting relationships between the longitudinal wave velocity of rock masses and deformation moduli are established. Method of least square regression is used for deformation data processing. Horizontally pushing lifting jack of direct shear tests are operated on rock mass shear strength test. $\sigma-\tau$ center point group analysis is used for treating shear test data. Fault gouge samples obtained from the weak layers are brought to indoor lab physico-mechanical test. Shear parameters of weak intercalated layers gouge are obtained by means of statistical empirical formula in the *Technical Code for Investigation of Geotechnical Engineering GB50021-2001*. The shearing strength parameters obtained by point groups are generally consistent with parameters obtained by in-situ test. So it is reliable.

Key words: high arch dam; mechanics of rock mass; deformation modulus; shearing strength; method of least square regression; point group analysis

1 引 言

岩体力学的参数选取是水利建筑物研究中的主要难题之一。高拱坝坝基岩体力学参数主要包括 3 个方面^[1]: 坝基岩体变形参数、坝基岩体强度参数、坝基软弱层带强度参数。刘春^[2]、寇雪莲^[3]把除现场试验以外、便捷获得岩体力学参数的方法归纳为

3 类: 经验破坏判据与岩体分类方法、数值模拟方法、数学力学方法。何满潮^[4]提出工程岩体的连续性理论。杨泽等^[5]将最新的 Hoek-Brown 准则、室内试验、Georgi 方法和费森科方法四者相结合, 对岩石物理力学参数进行工程折减弱化处理, 计算得出其岩体力学参数。刘业科等^[6]考虑了岩块与岩体之间的差异, 采用 Singh 法、Kalamaras 法和

Hoek-Brown 等方法对由室内岩块试验获得的岩块力学参数进行了工程处理。汪亦显^[7]通过对硬岩变角度剪切试验和常规三轴压缩试验的数据回归分析,证实利用最小二乘法的抛物线回归分析结果和随机-模糊回归分析结果比较接近。王明华^[8]针对含软弱夹层岩体的力学特性,探讨如何以 BQ 分类为基础,经过适当修正以建立合适的围岩质量评价体系。岩体力学参数的取值方法还有位移反分析法、优定斜率法^[9]、模糊统计法^[10]、敏感性综合评价法、偏最小二乘回归法、分形理论、综合评判法^[11]等。

原位试验耗费巨大、测试困难、测试结果有很大的离散性。利用少量原位数据快速准确估算岩体力学参数很有研究必要。对黄河上游某高拱坝坝址区进行了详细野外调查和工程地质测绘,然后进行了原位变形试验和剪切试验,采用最小二乘法和点群中心法处理现场试验数据,对岩体力学参数进行估算。

2 坝区地质条件概述

某水电站坝址位于黄河干流上。年均流量为 $5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。规划设计该水电站为混凝土双曲拱坝,是一座以发电为主的大型水电枢纽工程。

2.1 区域地质和地形地貌

坝址区有强烈的新构造运动、地震、地热活动和新生代岩浆作用。总体地貌以高原、高山为主,间有盆地、湖盆和纵横交错的水系。研究区地势南高北低、西高东低,呈阶梯状递减。该电站坝址位于峡谷出口处,水面宽为 40~70 m,正常蓄水位处河谷宽仅 300 m。

2.2 地层岩性

根据区域地质资料和工程地质测绘,坝址区出露的地层岩性较简单,自老至新为:三叠系中~上统(T_{2-3})变质砂岩(轻度)夹砂质板岩、中生代侵入岩($\pi\gamma_5$)斑状二长岩、第三系(R)紫红色砾岩、角砾岩和紫红色泥质粉砂岩、第四系上更新统(Q_3^{al+pl})冲积、洪积砂砾层、第四系全新统(Q_4^{al+col})冲积、坡积砂卵砾石、碎石土。

2.3 地质构造

坝段范围内没有区域性断裂通过。测绘及勘探均表明,坝址区断层少,规模不大,以构造裂隙为主,较发育。

坝址两岸断层不甚发育,地表工程地质测绘共发现断层 22 条,根据其产状主要分为 4 组。其中 NNE 组断层 8 条: F1、F2、F3、F4、F5、F7、F10、F15; NW 组 4 条: F9、F11、F13、F16; 倾角小于

35°的缓倾角组 4 条: F6、F8、F19、F20; 层间错动带 6 条。两岸坝肩各平洞揭露的层间错动带、小断层等共 163 条。

坝址区二长岩、变质砂岩中分布有数量较多的节理、裂隙。在现场的勘探中,共对两岸 22 个平洞(主要为垂直岸坡方向的平洞)进行了详细调查测量,调查结构面数量总计约 3 000 条。

表 1 坝址区岩体节理主要分组
Table 1 Main joints groupings in dam site rock mass

岩性及分组		产状		
		走向/(°)	倾向/(°)	倾角/(°)
二长岩	①组	341	71	1
	②组	22	112	66
	③组	325	235	78
变质砂岩	①组	330	240	81
	②组	74	164	65
	③组	69	339	16

3 坝址岩体变形参数

3.1 岩体变形试验和变形模量确定

在坝址三叠系变质砂岩平洞(编号分别为 PD01、PD03、PD09)、中生代二长岩平洞(编号分别为 PD02、PD04、PD12)和第三系砾岩平洞(编号为 PD53)不同深度(风化程度)处,分别进行岩体变形原位试验(7 组、7 组和 2 组),试验方法为刚性圆形承压板法。

试验点加工均为手工刻凿,岩体无扰动,起伏差<5 mm,加荷方式为逐级一次循环法,共进行 5 级加、卸荷循环,最小载荷为 1.280 MPa,最大载荷为 9.088 MPa,加压速率以时间控制,当测表相邻两次变形值之差 ΔW 与同级压力下第一次变形读数与前一级压力下最后一次变形读数差<5%时,认为变形稳定。按均匀、连续各向同性的半无限弹性体表面受局部荷载的公式^[12]进行计算。

$$E_m = \pi / 4(1 - \mu_m^2)pD / W \quad (1)$$

式中: E_m 为岩体的变形模量; D 为承压板直径,变形试验中 $D = 40 \text{ cm}$; μ_m 为岩体泊松比; p 为承压板单位面积上的压力(MPa)。

根据试验结果,变形曲线的类型大致分为 4 类:直线型、上凹型、下凹型及 S 型。分别对应弹性、弹-塑性、塑-弹性及弹-塑-弹性岩体。本坝址变质砂岩多为近似直线型弹性岩体,反映了试点处岩体完整、裂隙相对稀少的变形特征。而二长岩 7 组试验中 3 组水平方向施力的试验出现 S 型曲线,推测与河谷大角度相交的陡倾裂隙较发育有关。

3.2 岩体变形参数研究

试验获得的地质参数包括裂隙率、纵波波速、RQD、岩体质量 BQ、变形模量等。理论上岩体变形模量的大小主要受控于岩石的坚硬程度和完整性,而弹性波纵波波速综合反映了岩体的强度和完整程度,故最能体现变形模量的大小。因此,本文主要建立纵波波速与岩体变形模量之间的关系。

从二长岩岩体纵波波速与变形模量关系图中(见图 1)可见,无论水平方向还是垂直方向,岩体纵波波速与变形模量之间都存在较好的相关关系,变形模量的各向异性并不显著,故采用最小二乘法综合拟合关系对二长岩进行赋值。即

$$E = 0.2503 e^{0.001V_p} \quad (2)$$

由式(2),可以得到二长岩不同风化带岩体的综合变形模量如表 2 所示。

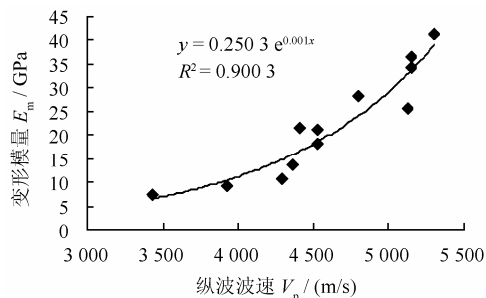


图 1 二长岩变形模量与纵波波速关系

Fig.1 Relation between deformation modulus and longitudinal wave velocity in monzonite

表 2 二长岩不同风化带变形模量

Table 2 Deformation moduli of monzonite with different weathering degrees

参数	风化带			
	强风化带	弱上风化带	弱下风化带	微新岩体
波速界限/(m/s)	<3 320	3 320~4 170	4 170~4 530	>4 530
变形模量/GPa	2.4~7.3	7.3~12.8	12.8~22.4	>22.4

对于变质砂岩,本次试验采用垂直方向变形模量与岩体纵波波速之间的拟合关系如图 2,拟合公式为式(3)。由该公式得到不同风化界限值时变质砂岩的变形模量,如表 3 所示。

$$E = 0.0414 V_p^{0.7474} \quad (3)$$

4 坝址岩体强度参数

4.1 现场岩体/岩体抗剪断强度试验

坝址区共进行岩体/岩体抗剪断强度试验 10 组,其中二长岩中 6 组,变质砂岩中 4 组,主要在微新岩体中进行。

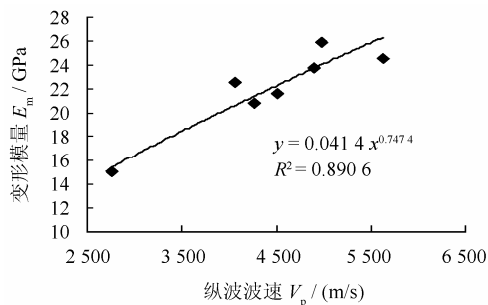


图 2 变质砂岩垂向变形模量与纵波波速关系

Fig.2 Relation between vertical deformation modulus and longitudinal wave velocity for metamorphic sandstone

表 3 变质砂岩不同风化带的变形模量

Table 3 Deformation moduli of metamorphic sandstone with different weathering degrees

参数	风化带			
	强风化带	弱上风化带	弱下风化带	微新岩体
波速界限/(m/s)	2 152~3 228	3 228~3 766	3 766~4 304	>4 304
变形模量/GPa	12.8~17.4	17.4~19.5	19.5~21.5	>21.5

现场所做的岩体/岩体抗剪(断)试验,均是按规范^[13]要求进行试点加工。先将硇底松动岩石清除后,再在新鲜完整的岩体上用手工刻凿加工成 40 cm×40 cm×33 cm 的方柱体试件,在其上浇筑好带有铁丝网的混凝土保护壳并加以养护。浇筑前,对各试件进行清洁及详细的地质描述和拍照。经过 28 d 养护后,进行现场抗剪断试验。

采用平推法直剪试验。即:在垂直荷载加到预定的数值后,再施加剪切荷载,在剪切过程中垂直荷载一直保持常数。水平荷载的施加方法以时间控制,每 5 min 加荷 1 次,每级荷载施加前后各测读变形 1 次,直至破坏。当抗剪断试验结束后,用同一方法进行抗剪(摩擦)试验。

4.2 剪切试验的 σ - τ 点群分析

点群中心法属于作图法,它与最小二乘法无本质区别。首先按式 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 对数据进行分析,求 y

(即 τ)、 x (即 σ) 的算术平均值,并绘于 y 、 x 轴上,即为点群中心法;然后把 y (即 τ)、 x (即 σ) 的原始数据绘于同一坐标系中,以中心点为准点用直尺画一条直线,使直线两边的数据点大体相等,且每一边的点到直线的距离之和也近似相等,此直线的斜率即为 $f = \tan \varphi$,在 y 轴上的截距即为 c 。

对二长岩和变质砂岩分别进行 σ - τ 点群分析,绘制点群图 3~10,将试验和通过点群法获得的抗剪强度指标见表 4、5。

从表 4 和表 5 可以看出,利用点群法求得的各项抗剪指标总体上与试验得到的结果相一致。

5 软弱层带参数取值

软弱结构面就其物质组成及微观结构而言，主要包括原生软弱夹层、构造及挤压破碎带、泥化夹层及其他夹泥层等。坝址区边坡出露及平硐揭露的断层规模较小，数量不多。根据颗粒分析结果，按

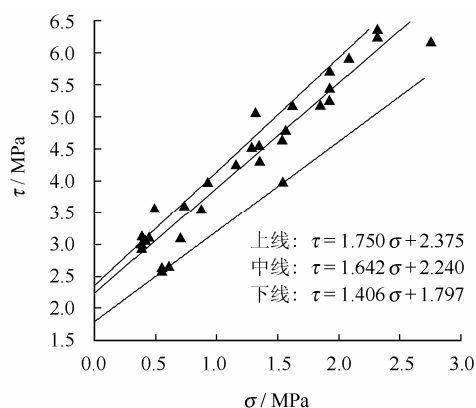


图 3 二长岩抗剪断峰值点群图
Fig.3 Point groups graph of peak shear strength of monzonite

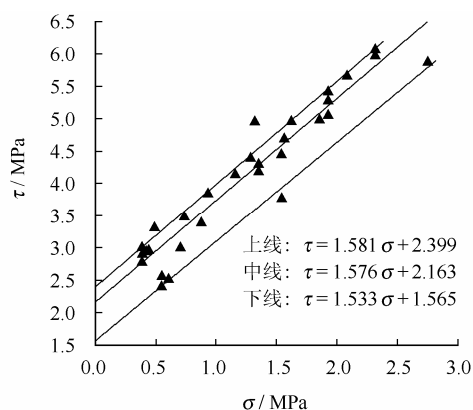


图 4 二长岩抗剪断屈服值点群图
Fig.4 Point groups graph of yield shear strength of monzonite

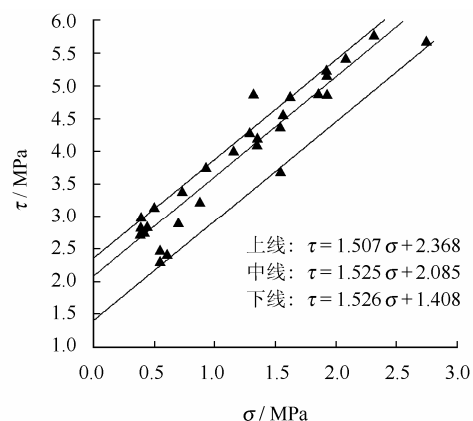


图 5 二长岩抗剪峰值点群图
Fig.5 Point groups graph of peak shear strength of monzonite

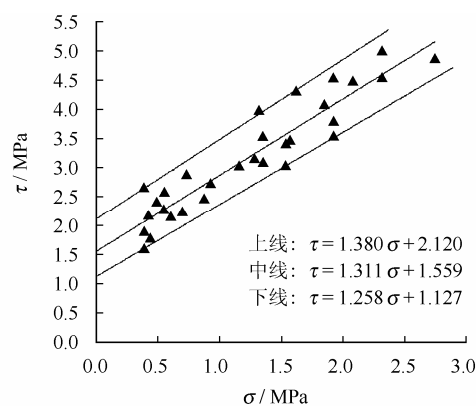


图 6 二长岩抗剪屈服值点群图
Fig.6 Point groups graph of yield shear strength of monzonite

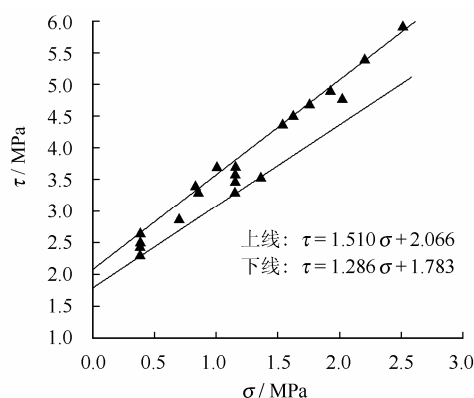


图 7 变质砂岩抗剪断峰值点群图
Fig.7 Point groups graph of peak shear strength of metamorphic sandstone

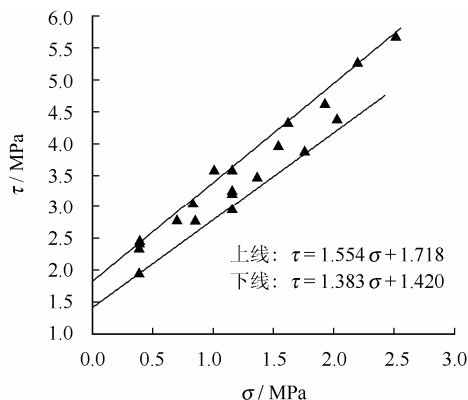


图 8 变质砂岩抗剪断屈服值点群图
Fig.8 Point groups graph of yield points of metamorphic sandstone

照黏粒含量的高低（粒径 ≤ 0.005 mm），坝址区各软弱层带土可分为 3 组：①组为岩块岩屑型，黏粒含量一般小于 2%；②组为岩屑夹泥型，黏粒含量 3.6%~9.0%；③组为泥夹岩屑型，黏粒含量 11%~25.9%。对坝址区主要软弱层带进行室内断层泥物理力学性质试验，实测其重塑样的抗剪强度指标，将不同组的抗剪强度指标列于表 6。

根据岩土工程勘察规范^[14]中岩土参数统计的经验公式计算。

$$f_k = r_s f_m \quad (4)$$

式中: f_k 为平均值; r_s 为统计修正系数; f_m 为标准值。

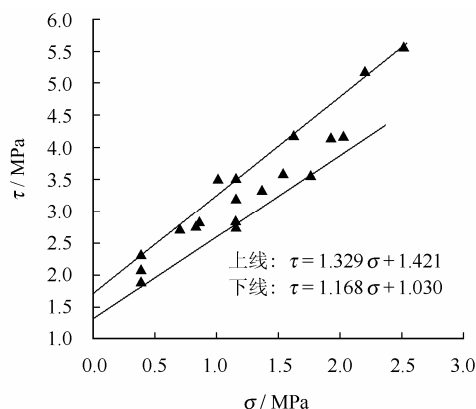


图9 变质砂岩抗剪峰值点群图

Fig.9 Point groups graph of peak shear strengths of metamorphic sandstone

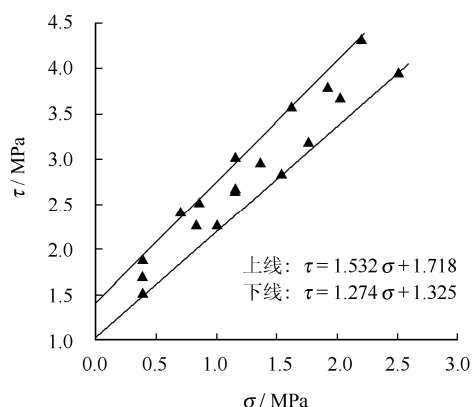


图10 变质砂岩抗剪屈服值点群图

Fig.10 Point groups graph of yield shear strengths of metamorphic sandstone

表4 试验和点群法的二长岩抗剪强度指标

Table 4 Shear strength parameters by point groups method and by in-situ tests for monzonite

试验类型	数值	强度系数	岩体质量分级		
			III1	II	I
抗剪断	峰值	f'	1.4/1.406	1.655/1.642	1.73/1.75
		c'	2.15/1.797	2.315/2.24	2.2/2.375
	屈服值	f'	1.32/1.533	1.62/1.576	1.67/1.581
		c'	2.1/1.565	2.225/2.163	2.1/2.399
抗剪	峰值	f	1.3/1.526	1.565/1.525	1.607/1.507
		c	1.97/1.408	2.175/2.085	2.027/2.368
	屈服值	f	1.09/1.258	1.33/1.311	1.43/1.38
		c	1.67/1.127	1.71/1.559	1.347/2.12

注: 其中, f' 为抗剪断摩擦系数; c' 为抗剪断黏聚力; f 为抗剪摩擦系数; c 为抗剪黏聚力。各比值为试验数值/点群法数值。

①组 $f = 0.679 \times 0.803 = 0.545$, $c = 35 \times 0.626 = 21.91$ kPa

②组 $f = 0.675 \times 0.911 = 0.615$, $c = 39 \times 0.568 = 19.88$ kPa

由于③组样本太少, 不满足统计规律, 故采用最小值作为本组的抗剪参数 $f = 0.437$, $c = 35$ kPa。

因软弱夹层本身的结构性在重塑样过程中被破坏, 另重塑样试验不能反映层(面)和软弱夹层实体共同影响试验参数的结果, 因此, 仅供参考, 实际工程中不能直接应用重塑样试验获得的强度指标。

表5 试验和点群法的变质砂岩抗剪强度指标

Table 5 Shear strength parameters by in-situ test and by point groups method for metamorphic sandstone

试验类型	数值	强度系数	岩体质量分级	
			I	II
抗剪断	峰值	f'	1.6/1.51	1.47/1.286
		c'	1.773/2.066	2.07/1.783
	屈服值	f'	1.52/1.554	1.39/1.383
		c'	1.62/1.718	1.84/1.42
抗剪	峰值	f	1.45/1.532	1.32/1.274
		c	1.6/1.718	1.54/1.325
	屈服值	f	1.19/1.329	1.15/1.168
		c	1.34/1.421	1.35/1.03

注: 试验数值/点群法数值

表6 不同类型软弱带重塑样抗剪强度指标

Table 6 Shear strength of remolded samples in different groups of weak layers

参数	岩块岩屑型		岩屑夹泥型		泥夹岩屑型	
	f	c / kPa	f	c / kPa	f	c / kPa
范围值	0.504~0.83	13~51	0.57~0.84	11~68	0.437~0.73	35~65
平均值 f_k	0.679	35	0.675	39	0.612	54
方差	0.116	13.1	0.073	17.4	0.155	16.5
变异系数	0.172	0.376	0.108	0.453		
修正系数 r_s	0.803	0.626	0.911	0.568		

6 结 论

(1) 本文采用试验方法, 现场变形试验采用刚性圆形承压板法, 现场岩体/岩体抗剪断强度试验采用千斤顶平推法直剪试验, 各软弱层带取样后进行室内断层泥物理力学性质试验。

(2) 在整理试验资料时, 现场变形试验采用最小二乘回归法, 现场岩体/岩体抗剪断强度试验中采用点群中心法。在软弱带层物理力学试验中运用岩土工程勘察规范 GB50021—2001 中岩体参数统计的经验公式。

(3) 点群法求得的各抗剪指标总体上与原位试验得到的结果相一致, 证明该法可用, 所得出的参数可折减后作为水电工程基岩稳定性分析的计算值使用。

参 考 文 献

- [1] 谭文辉, 周汝弟, 王鹏, 等. 岩体宏观力学参数取值的 GSI 和广义 Hoek-Brown 法[J]. 有色金属(矿山部分), 2002, 54(4): 16—18, 15.
- [2] 刘春, 任悦萍. 黄麦岭磷矿采场边坡岩体力学参数的确定[J]. 勘察科学技术, 2005, (5): 32—34.
LIU Chun, REN Yue-ping. Determination of mechanics parameters of slope rock mass in Huangmailing phosphates mine[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 2005, (5): 32—34.
- [3] 寇雪莲. 工程岩体力学参数研究现状评述[J]. 西部探矿工程, 2008, (9): 33—36.
- [4] 何满潮, 薛廷河, 彭延飞. 工程岩体力学参数确定方法的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 225—229.
HE Man-chao, XUE Ting-he, PENG Yan-fei. A new way of determining mechanical parameters of engineering rock masses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(2): 225—229.
- [5] 杨泽, 侯克鹏, 李克钢, 等. 云锡大屯锡矿岩体力学参数的确定[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1923—1928.
YANG Ze, HOU Ke-peng, LI Ke-gang, et al. Determination of mechanical parameters of rock mass from Yunxi Datun Tin Mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1923—1928.
- [6] 刘业科, 曹平, 汪亦显, 等. 岩体物理力学参数测定及其工程处理方法的研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2009, 23(1): 31—35.
LIU Ye-ke, CAO Ping, WANG Yi-xian, et al. Study of determination and engineering treatment method of rock mass mechanical parameters[J]. **Journal of Nanhua University (Science and Technology)**, 2009, 23(1): 31—35.
- [7] 汪亦显. 节理岩体力学参数测定及处理方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [8] 王明华, 白云, 张电吉. 含软弱夹层岩体质量评价研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 185—187.
WANG Ming-hua, BAI Yun, ZHANG Dian-ji. A study of rock mass structure feature and surrounding rock ranking for Xiluodu Hydropower Station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(1): 185—187.
- [9] 胡卸文, 黄润秋, 徐志文. 西南某电站坝区岩体强度参数选取的工程地质研究[J]. 水文地质工程地质, 1996, (1): 1—5.
- [10] 李敬海. 基于模糊统计的岩体抗剪强度参数确定方法[J]. 土工基础, 2008, 22(6): 54—56.
LI Jing-hai. The definite method of shear strength parameter on rock mass based on fuzzy statistics[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2008, 22(6): 54—56.
- [11] 王树仁, 周洪彬, 武崇福, 等. 采用综合评判方法确定工程岩体力学参数研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊1): 202—206.
WANG Shu-ren, ZHOU Hong-bin, WU Chong-fu, et al. Research on rock mechanics parameters by using comprehensive evaluation method of rock quality grade-oriented[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Sup.1): 202—206.
- [12] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999.
- [13] 原中华人民共和国电力工业部. GB/T50266—99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [14] 中华人民共和国建设部. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.