

四川自一里水电站气垫式调压室围岩渗透性评价

梁 杏¹, 钟嘉高¹, 施裕兵², 孙蓉琳¹, 杨 建²

1. 中国地质大学研究生院, 湖北武汉 430074

2. 国家电力公司成都勘测设计研究院, 四川成都 610072

摘要: 结合自一里水电工程气垫式调压室设计厂区岩体渗透性研究, 提出了从定性分析到定量计算与评价, 系统刻画岩体渗透性与分区评价, 以满足气垫式调压室设计要求的实用方法。该方法以基础地质与水文地质研究为背景, 从系统全面的裂隙测量与统计分析中, 获取岩体裂隙空间发育规律和裂隙方向、隙宽、迹长、间距和裂隙率等统计特征值, 运用裂隙岩体渗透张量理论, 得出分布式岩体渗透主值和综合渗透系数; 在此基础上, 进行岩体渗透性分区与评价。评价得出: 花岗岩夹变质砂岩透镜体的厂区岩体渗透性总体随深度变化, 受接触带影响局部渗透性呈强弱交替变化; 区内裂隙岩体的渗透性分3级, 近地表浅层岩体渗透性较强, 综合渗透系数为 $n \times 10^0 \text{ m/d} \sim n \times 10^{-1} \text{ m/d}$, 调压室区为中等~弱渗透性岩体, 渗透系数为 $n \times 10^{-2} \text{ m/d} \sim n \times 10^{-4} \text{ m/d}$ 。

关键词: 水电站; 裂隙岩体; 统计特征值; 渗透性评价。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2006)03-0417-06

收稿日期: 2005-11-09

Evaluation of the Permeability of Rock Masses around the Equalized Room with Atmoseal at Ziyili Hydropower Station, Sichuan Province

LIANG Xing¹, ZHONG Jia-gao¹, SHI Yu-bing², SUN Rong-lin¹, YANG Jian²

1. Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute of State Power Company, Chengdu 610072, China

Abstract: Ziyili Hydropower Station in Sichuan Province uses an equalized room fitted with atmoseal, which needs a more precise investigation on the permeability of rock masses around the power house. This paper proposes an effective method that systematically characterizes the permeability of rock masses, from qualitative analyses to quantitative analyses. Based on a study of basic geology and hydrogeology conditions, we measured the geometric parameters of fractures (such as orientation, aperture, trace length, space and fracture frequency) and obtained their characteristic statistical values. We then calculated the main value and comprehensive value of the permeability tensor using permeability tensor theory, and finally divided the rock masses around the power house into a few permeability subareas. The general permeability of the rock masses around the power house varies with depth and the local permeability varies alternately between the higher and the lower due to the effect of the contact strip. The permeability can be divided into three grades. The permeability of rock masses near the surface is higher ($n \times 10^0 \text{ m/d} \sim n \times 10^{-1} \text{ m/d}$) and permeability of rock masses around the equalized room with atmoseal is moderate to lower ($n \times 10^{-2} \text{ m/d} \sim n \times 10^{-4} \text{ m/d}$)。

Key words: hydropower station; rock masses; characteristic statistical values; permeability evaluation; atmoseal.

在水利水电工程勘察设计中, 岩体渗透性评价是极其重要的任务, 渗透性参数的确定是其关键的技术问题, 受工程时效、勘察精度与技术、地质条件

的复杂程度等影响, 大型水电站的岩体渗透性评价一直是高难度的复杂课题(田开铭和万力, 1989; 王明玉等, 2002)。自一里引水式水电站是我国采用气

垫式设计调压室的试点水电工程,对岩体渗透性评价无论是技术要求还是工作难度,较常规设计都要高,目前还没有相关规定和技术要求。本文结合自一里水电工程厂房区岩体渗透性研究,探讨在常规勘察基础上结合专门性研究,进行系统地定量刻画岩体渗透性的方法。

1 研究区自然地理与地质条件

1.1 自然地理条件

四川省自一里水电站工程枢纽位于平武县火溪河畔,为引水式发电,在王坝楚闸引水,至下游9.5 km的自一里建厂发电,装机容量120 MW。

火溪河全长114 km,流域面积1 494 km²。河流总体流向为北西向南东,河谷深切,两侧谷坡陡峻,植被茂盛。厂区山岭海拔高度2 500~4 000 m,沟谷纵横,具中高山~高山峡谷地貌,右岸发育有打雷沟、柴呷里沟、柴呷里下沟,左岸有南一里沟等,沟谷切割相对高差达500~1 000余米,谷坡坡度一般40°~50°,沟内常年有水。

火溪河在自一里厂区水位流量的年内变化以2001年资料分析,水位变化较小,变幅约1 m,流量变化在60.0~77.2 m³/s之间,水位和流量在5~6月和9~10月呈双峰特点。王坝楚气象站2001年资料表明,厂区年降水量为723.3 mm,其中5月、8~9月雨量较大;月均气温变化为-2.0~18.2 °C,年均气温为8.6 °C。

1.2 厂区地质与水文地质概述

火溪河梯级电站区隶属于扬子准地台的二级大地构造单元摩天岭台隆的东部——摩天岭台穹上。自一里厂区出露与平硐揭露的地层主要为印支期二云母花岗岩体夹上震旦统变质砂岩捕虏体,两者呈焊熔接触。据地表调查和探硐揭露情况,捕虏体分布的长轴方向基本上与地层走向一致,且呈眼球状、10余米大小透镜状。

二云母花岗岩呈灰白色,岩石致密坚硬,在硐室浅部为次块状结构,总体呈块状结构,个别风化锈染;上震旦统变质石英砂岩(板岩)捕虏体呈灰色,岩石致密坚硬,总体新鲜,局部风化锈染。砂岩小捕虏体与花岗岩呈完全焊熔接触。

根据厂区出露的地层岩性与平硐揭露分析,厂区地下水可以划分为:崩积冲积碎块砂卵石层孔隙水、花岗岩和变质砂岩裂隙水。孔隙水受其分布位

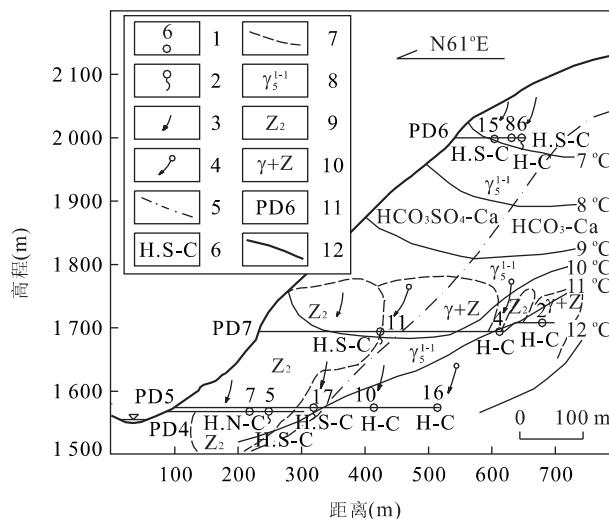


图1 自一里水电站厂区综合水文地质图

Fig. 1 Comprehensive hydrogeology sketch of power house site area in Ziyili Hydropower Station

1. 主要出水点及编号;2. 线状出水点;3. 地下水流线;4. 来源较高处地下水水流线;5. 水型分区界线;6. 岩性分界线;8. 花岗岩(含变质砂岩捕虏体);9. 变质砂岩;10. 花岗岩变质砂岩交替;11. 平硐编号;12. 地温及等温线

置的限制,对厂房工程影响不大。

花岗岩和变质砂岩裂隙水:从厂区平硐内见,岩体含水不丰,硐内主要出水点多以滴水和线状流水为主,此外,硐壁有渗水和潮湿现象。右岸厂房4个平硐中,均出现个别集中涌水点,如PD4—No5、PD5—No17、PD6平硐0+105 m(No6)、PD7平硐0+595 m(No3)。多数滴水和线状流水点开始涌水量较大,随开挖时间的延长,水量有明显减小特点。

厂区平硐出水点分布极不均匀,水量大小的差异性反映出脉状裂隙水的特点;较大的出水点多在花岗岩与砂岩的接触带和砂岩分布段,反映出砂岩与接触带附近的裂隙比花岗岩体发育,且富水性好。图1反映了厂区平硐出水点的分布及水化学特征。

2 裂隙测量研究

2.1 裂隙测量统计法

裂隙发育特征指标主要包括裂隙发育的空间分布和裂隙的几何参数,即裂隙与裂隙组的倾向(走向)、倾角、间距(密度)、迹长及隙宽等。

由于裂隙发育的不均匀性,有效的研究分析方法仍为实地测量统计。经多项研究实践(袁绍国和王震,1998;赵文和唐春安,1998;潘欢迎等,2002),中

表1 厂址区平硐裂隙产状分组

Table 1 Groups of fracture orientation in adits at power-house site area

分组	第一组	第二组	第三组	第四组
总体	NE5~70°∠45~80°	SE120~170°∠35~80°	SW215~250°∠15~30° SW215~250°∠70~85°	NW289~340°∠55~80°
PD4	NE5~45°∠58~80° NE40~70°∠35~45°		SW245~255°∠40~55°	NW290~330°∠50~60°
PD5	NE0~80°∠40~80°		SE160~SW230°∠15~50°	NW275~305°∠18~50° NW305~340°∠55~80°
PD6	NE5~20°∠55~85° NE50~60°∠60~72°	SE145~160°∠28~32°		
PD7	NE5~80°∠15~85°	SE120~170°∠35~60°	SE150~SW250∠10°~30° SW215~260°∠45~80°	NW285~355∠50~85°

小型裂隙在勘察平硐中适宜采用统计窗方法,本次统计窗为5 m×2 m,其中横向(水平)为5 m测线,纵向(垂向)为2 m测线;大或特大型裂隙宜采用单条裂隙等距测量,即沿裂隙走向每隔一定间距测量一次产状与隙宽。

对测量结果的统计按空间分布状况统计,定量得出裂隙的组数、迹长、隙宽和密度等特征值。我们在自一里厂区共进行统计窗点测量50个,测量裂隙900余条(不包括大型裂隙的等距测量点)。

2.2 裂隙特征值统计分析

(1)裂隙发育的空间展布:主要用裂隙发育组数与产状表征。通过实测裂隙产状统计得出自一里厂房区总体4组裂隙发育,不同高程平硐裂隙发育组数与方向受岩性影响明显,花岗岩裂隙发育方向优势不是很明显,裂隙组数较多;平硐内变质砂岩裂隙受砂岩产状控制,优势裂隙发育方向明显。裂隙方向与组数结果列入表1。

(2)裂隙发育的几何特征:主要用裂隙迹长、隙宽变化来表征。迹长表征裂隙的延伸和切穿程度。通过绘制平硐可见迹长的概率分布图(图2),得出研究区迹长呈负指数分布,裂隙发育规模(赵文和唐春安,1998)以极短~短裂隙为主,即迹长小于3 m为主。

隙宽是描述裂隙开启性的指标。量测的最小隙宽为0.02 mm(塞尺的最小值),最大可达到25 mm。硐内裂隙测量以构造裂隙为主(显裂隙,成岩的闭合或隐性裂隙不测量)。经统计研究区隙宽分为3个发育区:小于0.5 mm的小隙宽很发育,占全部裂隙的78.8%左右;1~3 mm的中隙宽不发育,约占15%;大于3 mm的大隙宽极不发育,占6%。研究区隙宽随埋深增加整体呈减小的趋势,从整体隙宽与埋深关系(图3)曲线得出隙宽随深度变化特点:隙宽总体

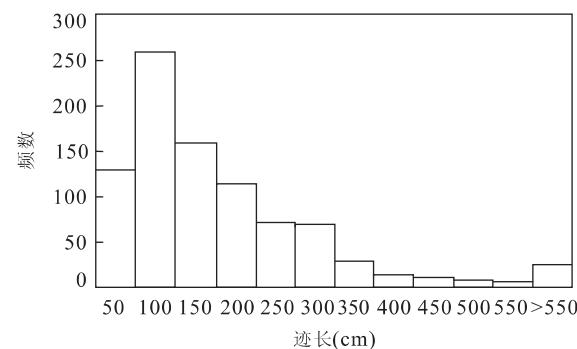


图2 迹长统计直方图

Fig. 2 Frequency histogram of trace length distribution

上随埋深增加而减少,局部出现微振荡;随埋深的增加最大隙宽的外包络线(图3a中实线)呈指数减小;小隙宽(小于0.5 mm)分布不随埋深增加而变化。

(3)裂隙发育程度:通常用裂隙密度与裂隙率表征。裂隙发育密度用裂隙间距来测量,隙间距定义为同一组裂隙法线上两相邻裂隙间的垂直距离。若间距以d表示,则密度(F_d)为间距的倒数,即 $F_d=1/d$,常用单位为条/m。测区统计表明隙间距呈正对数分布,隙间距基本分布在0.2~2.2 m,密度约为0.5~3.5条/m。

裂隙率是反映裂隙发育程度的定量指标之一。依据本次测量采用的统计窗法,可以用线裂隙率进行计算,即在测线总长度l上统计裂隙的条数n和对应平均隙宽b,用下式计算线裂隙率 F_r :

$$F_r = \sum_{i=1}^n b_i / l.$$

通过计算与统计分析(表2),线裂隙率整体较小,其中小于1‰的测点约为50%,大于3‰的测点为10%。研究区横向与纵向线裂隙率随测点埋深和硐深的增加呈负指数减少,测点面裂隙率与测点线

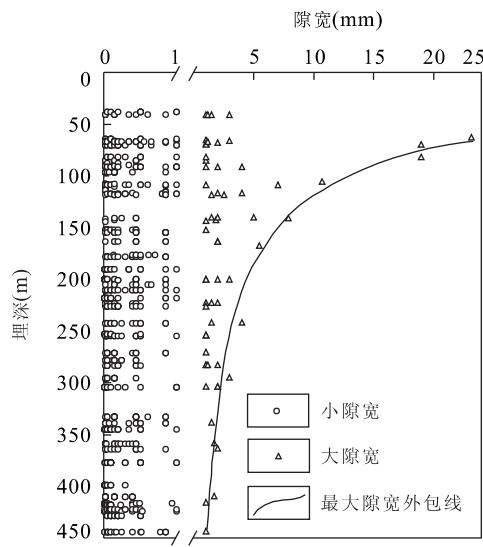


图 3 隙宽与埋深关系

Fig. 3 Relation between aperture and buried depth

表 2 平硐测点线、面裂隙率统计

Table 2 Statistics of line fracture frequency and surface fracture frequency in adits

f_1	f_2	$\sum f$	f_3	f_4	$\sum f$
<0.5	12.5	25.0	<1	18	36.7
0.5~1	12	49.0	1~2	13	63.3
1~1.5	9.5	68.0	2~3	8	79.6
1.5~2	6	80.0	3~4	2	83.7
2~2.5	2.5	85.0	4~5	2	87.8
2.5~3	2	89.0	5~6	2	91.8
3~3.5	1.5	92.0	6~7	0	91.8
3.5~4	0.5	93.0	7~8	1	93.9
4~4.5	1.5	96.0	8~9	1	95.9
>4.5	2	100.0	>9	2	100.0

f_1 . 线裂隙率%; f_2 . 平均频率%; $\sum f$. 累积频率%; f_3 . 面裂隙率%; f_4 . 出现频率%.

裂隙率变化规律一致.

3 渗透性参数的确定

3.1 测点渗透张量的计算

从研究区裂隙发育特征可以看出, 厂区岩体的各向异性特征明显, 为此根据测量统计参数, 选用测点渗透张量计算分析来描述和评价区内裂隙岩体系统的渗透性能.

计算采用“平行板流动模型”, 设岩体由多组裂隙组成, 裂隙组在裂隙网络中互相连通, 并且某一个方向裂隙组的水流不受另一个方向裂隙组的水流干扰, 测点岩体裂隙的等效渗透张量(田开铭和万力,

1989; 仵彦卿和张倬元, 1995)为:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^m \frac{\gamma b_i^3}{12S_i} \begin{bmatrix} 1 - a_{xi}^2 & -a_{xi}a_{yi} & -a_{xi}a_{zi} \\ -a_{yi}a_{xi} & 1 - a_{yi}^2 & -a_{yi}a_{zi} \\ -a_{zi}a_{xi} & -a_{zi}a_{yi} & 1 - a_{zi}^2 \end{bmatrix}.$$

式中, $a_{xi} = \sin\beta_i \cos\alpha_i$, $a_{yi} = \sin\alpha_i \sin\beta_i$, $a_{zi} = \cos\beta_i$; α_i 为第 i 组裂隙的倾向; β_i 为第 i 组裂隙的倾角; S_i 为第 i 组裂隙的间距; m 为岩体中裂隙的组数.

利用张量的旋转变换, 求得渗透张量的主值和主渗透方向:

$$K^* = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix}.$$

式中, K_1 、 K_2 、 K_3 为渗透张量的主值, 等于张量的特征值. 求出 K_1 、 K_2 、 K_3 后, 按下式求得综合渗透系数 K_m :

$$K_m = \sqrt[3]{K_1 K_2 K_3}.$$

K_m 是一个各向同性化的数值, 表征该岩体裂隙系统的综合渗透能力, 在实际运用中意义重大. 同时, 定义最大渗透主值(K_1)与最小渗透主值(K_3)之比为测点渗透各向异性系数.

3.2 渗透张量分析与取值

在裂隙测量和统计分析中, 根据平硐裂隙发育特点, 考虑研究目的, 对裂隙分组和等效隙宽选取计算时, 进行了平均取值和偏大取值计算, 对应的渗透张量计算分别获得平均取值与偏大取值 2 个结果, 表 3 列出部分测点计算的平均渗透主值(K_1 、 K_2 、 K_3)、偏大渗透主值($K_{1,max}$ 、 $K_{2,max}$ 、 $K_{3,max}$)和平均综合渗透系数 $K_{m,avg}$ 以及平均取值下的各向异性系数.

由表 3 可见, 平均最大渗透主值 K_1 和偏大最大渗透主值 $K_{1,max}$ 随埋深加大而减小, 当埋深大于 100 m 后, 最大渗透主值 K_1 平均为 0.5 m/d, 埋深 100~300 m 平均 K_1 为 0.3 m/d, 埋深大于 300 m 平均 K_1 小于 0.2 m/d. 相应偏大取值 $K_{1,max}$ 比平均取值的 K_1 大 3~4 倍.

平均综合渗透系数 $K_{m,avg}$ 反映测点岩体的渗透性. 其埋深变化规律与平均渗透主值 K_1 变化基本相同, 偏大取值与平均取值的差异随埋深加大而减小, 当埋深大于 250 m 后, 两者差异甚微.

平均取值下的各向异性系数是测点最大渗透主

表3 厂区平硐岩体渗透张量平均值与偏大值部分结果

Table 3 Statistics of average value and higher value of permeability tensor of fractured rock in adits at power-house site area

测点号	埋深(m)	K_1 (m/d)	$K_{1,max}$ (m/d)	K_2 (m/d)	$K_{2,max}$ (m/d)	K_3 (m/d)	$K_{3,max}$ (m/d)	$K_{m,avg}$ (m/d)	K_1/K_3
PD4-80	65.5	0.860	3.517	0.790	3.442	0.079	0.090	0.860	10.9
PD4-160	140.5	1.321	2.646	1.211	1.566	0.118	1.096	1.321	11.2
PD4-210	200.5	0.309	0.817	0.267	0.767	0.042	0.050	0.309	7.4
PD5-74.5	91.0	0.150	4.341	0.134	4.270	0.076	0.135	0.150	2.0
PD5-230	226.0	0.090	0.090	0.072	0.072	0.019	0.020	0.050	4.7
PD5-220+150	333.0	0.013	0.020	0.010	0.016	0.003	0.005	0.013	4.0
PD6-102.6	82.0	0.123	28.883	0.111	28.530	0.013	0.355	0.056	9.6
PD7-95	96.0	0.001	0.002	0.001	0.002	0.000	0.000	0.001	13.0
PD7-220	205.0	0.028	0.101	0.026	0.095	0.003	0.011	0.028	11.0
PD7-360	339.0	0.057	0.089	0.056	0.075	0.002	0.019	0.057	38.1
PD7-支2	422.0	0.020	0.022	0.019	0.020	0.001	0.004	0.008	16.0

表4 厂址区岩体渗透性分区说明

Table 4 Permeability zoning explanation of fractured rocks at power-house site area

分区	K_m (m/d)	K_1 (m/d)	主要岩性与特征	埋深下限(m)
I	1~0.05	2~0.1	变质砂岩和接触带、部分花岗岩。中等透水性岩体,裂隙短迹,间距0.9 m,密度2条/m,平均隙宽0.68 mm。硐内湿润—滴水,裂隙线状流水发育	60~180
II	0.1~0.008	0.5~0.01	花岗岩变质砂岩接触带、花岗岩。弱透水性岩体,裂隙短迹,间距为1.0 m,密度1.75条/m,隙宽1~0.05 mm,平均0.57 mm。硐内湿润—滴水,局部硐段沿裂隙面线状流水	80~250
III	0.1~0.0005	0.05~0.001	主要花岗岩、部分变质砂岩。微透水性岩体,裂隙极短—短迹,间距0.7 m,密度2.0条/m,隙宽0.35~0.03 mm。硐内干燥,局部湿润—滴水,仅PD7平硐内见隙状流水	200~400
IV	<0.001	0.005~0.0001	主要花岗岩基本为不透水岩体,岩层完整,裂隙闭合	>400

I. 中等透水性; II. 弱透水性; III. 微透水性; IV. 基本不透水。

值 K_1 与最小渗透主值 K_3 之比。由表 3 可见(仅列部分):各向异性比值小于 10 的测点占 50%,比值为 10~100 的占 38%,大于 100 的占 12%.

吻合较好(Han et al., 2003; 韩冬梅等, 2004)(表 5)。平硐主要出水点均分布在中等~弱透水性区渗透性相对较强带。

4 渗透性分区评价

厂区岩体的渗透性分区(表 4),主要依据上述裂隙实测资料统计分析,定量计算得出综合渗透系数 K_m 和渗透主值 K_1 结果,结合基础地质条件与平硐水文地质条件,即出水点的分布、水量和水化学特征进行划分;其中调压室附近岩体渗透性分区还考虑了专门常压压水试验和高压压水试验的结果。

总体来看,厂区岩体砂岩的渗透性比花岗岩要高。受变质砂岩分布的影响,PD7 的中等透水性区域分布范围较大,而 PD6 的范围最小;在微透水性区域(III 区),如果砂岩分布范围较大,接触带处的岩体渗透性相对较大,局部出现中等透水性区。厂区岩体渗透性分区结果,与区内常压压水试验分析结果和平硐出水点水化学(含同位素)场、温度场特征

(1) 在地质条件复杂与资料不足地区,采用实地裂隙测量统计方法进行岩体渗透性定量研究,仍然是非常实用和有效的方法;岩体渗透性评价不单是裂隙测量问题,必须将裂隙测量结果与裂隙发育规律、地下水水流状况(化学的、温度的)特征等进行综合分析来完成,多方法分析与印证,可以提高成果的可信度。(2)以花岗岩岩体为主,夹有较多大小不一的变质砂岩透镜体的厂区岩体,受反复出现的接触带影响,构成岩体渗透性在总体随深度变小的规律,还呈现局部渗透性强弱交替的复杂状况。(3)由渗透张量主值和测点综合渗透系数计算得出,区内花岗岩和变质砂岩裂隙介质的渗透性分 3 级,即:近地表的浅层渗透性较强的岩体,渗透系数为 $n \times 10^0$ m/d~

5 结论

表 5 厂址区岩体渗透性分区与其他指标分区比较

Table 5 Comparison of permeability zoning and other indexes zoning of fractured rock at power-house site area

分区	埋深下限 (m)	K_m (m/d)	水化学类型	地下水水温 (℃)	压水试验渗透系数 K (m/d)
I	60~180	1~0.05	H-S-C	7~8	
II	80~250	0.1~0.008	H-S-C 及 H-C	8~10	
III	200~400	0.1~0.0005	H-C	9~11	0.1~0.001
IV	>400	<0.001	H-C	10~12	0.04~0.001

$n \times 10^{-1}$ m/d; 分布范围较广的中等渗透性岩体, 渗透系数为 $n \times 10^{-2}$ m/d~ $n \times 10^{-3}$ m/d; 埋深较大区的弱渗透性岩块, 渗透系数小于 $n \times 10^{-3}$ m/d; 调压室区为中等~弱渗透性岩体。

References

- Han, D. M., Liang, X., Zhang, X. L., 2004. Application of hydrochemistry components analysis to engineering survey. *China Rural Water and Hydropower*, (12): 110~113 (in Chinese with English abstract).
- Han, D. M., Liang, X., Zhang, X. L., 2003. Application of hydrochemistry components analysis to engineering hydrogeology: A case study of hydrogeological condition analysis at Ziyili Hydroplant in Sichuan. In: Wang, Y. X., ed., Proceedings of the International Symposium on Water Resources and the Urban Environment. China Environmental Science Press, Beijing, 68~72.
- Pan, H. Y., Liang, X., Wan, J. W., et al., 2002. Method of constructing fracture network system by the pump-in tests: A case study on the basalt around the dam area of Xiluodu Hydroelectric Station. *Geological Science and Technology Information*, 21(1): 22~26 (in Chinese with English abstract).
- Tian, K. M., Wan, L., 1989. Study and evaluation on anisotropic fractured rock permeability. Xueyuan Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, M. Y., Chen, J. S., Wan, L., 2002. Groundwater (fluid) flow modeling in fractured rocks via discrete fracture fluid flow approach. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(1): 90~96 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. Q., Zhang, Z. Y., 1995. An introduction to rock mass hydraulics. Southwest Jiaotong University Press, Chengdu (in Chinese).
- Yuan, S. G., Wang, Z., 1998. Source and analysis of biases in joint surveys. *Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology*, 17(4): 253~257 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W., Tang, C. A., 1998. The measure theory of discontinuities spacing and trace length. *China Mining Magazine*, 7(3): 36~38 (in Chinese with English abstract).
- 韩冬梅, 梁杏, 张晓伦, 2004. 水化学分析方法在水电工程勘探中的应用. 中国农村水利水电, (12): 110~113.
- 潘欢迎, 梁杏, 万军伟, 等, 2002. 利用压水试验构建裂隙网络系统的方法探讨——以溪洛渡水电站坝区玄武岩为例. 地质科技情报, 21(1): 22~26.
- 田开铭, 万力, 1989. 各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价. 北京: 学苑出版社.
- 王明玉, 陈劲松, 万力, 2002. 离散裂隙渗流方法与裂隙化渗透介质建模. 地球科学——中国地质大学学报, 27(1): 90~96.
- 仵彦卿, 张倬元, 1995. 岩体水力学导论. 成都: 西南交通大学出版社.
- 袁绍国, 王震, 1998. 节理测量误差的来源及其分析. 包头钢铁学院学报, 17(4): 253~257.
- 赵文, 唐春安, 1998. 结构面间距和迹长的测量理论. 中国矿业, 7(3): 36~38.