

文章编号:1007-3701(2002)02-0029-09

紫坪铺坝区砂岩渗透性空间变化规律

李远耀¹ 陈刚² 王旭生²

(1. 宜昌地质矿产研究所, 湖北 宜昌 443003; 2. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在大量单孔压水试验和野外裂隙测量资料的基础上, 运用统计分析、张量分析及线性回归等数学方法, 从深度、岩性及构造部位三方面, 探讨了坝区砂岩渗透性的空间变化规律, 发现渗透性与深度之间存在明显的负指数规律性, 与岩性及构造部位之间无明显的一致性关系。

关键词: 裂隙介质; 各向异性; 渗透性; 渗透系数

中图分类号: P588.21

文献标识码: A

紫坪铺水利枢纽工程位于四川岷江上游映秀至都江堰河段, 枢纽大坝设于都江堰市麻溪乡沙金坝附近, 岷江在此处呈近 180°弧形河曲拐弯。坝址区的面积约 30 km², 重点研究地段为坝址右岸条形山脊及龙溪河-白沙河、岷江-白沙河所夹的河间地块。

1 地质背景

坝区内出露地层包括三叠系须家河组第三段(T_{3xj}³)砂页岩系, 河谷斜坡和谷底表部的第四系松散堆积层, 以及泥盆-二叠系(D-P)的碳酸盐岩(图 1), 其中尤以三叠系须家河组砂页岩对水利枢纽工程的影响最大。

1.1 须家河组第三段地层岩性

须家河组第三段为一套海陆交互相和河湖沼泽相含煤砂页岩地层, 属典型的复理式建造沉积, 具有明显的韵律性, 横向变化大, 标志层不明显。坝区地层可划分为 15 个韵律层(左右坝肩主要为其中的第 11, 12, 13 和 14 层), 每个韵律层大体由底部含砾石的中粗粒砂岩开始往上部逐渐递变为细砂岩、粉砂岩及泥质页岩和煤质页岩, 越往上部颗粒越细。

受强烈的地质构造作用的影响, 须家河组第三段地层中规模厚度不等的煤页岩和泥质页岩均受到后期压扭性剪切变形作用, 呈现出层间剪切带的特点。各层在强烈的挤压作用下, 均出现糜棱岩化, 泥质构造岩发育, 岩性松软、破碎, 裂隙细小密集发育, 呈闭合状。由于这些层间剪切带的存在, 该段地层中砂岩被分割成具有相对独立的多个层状系统。

1.2 地质构造

坝区 NE 向断裂构造发育, 均为北川-映秀断裂和彭灌断裂所夹构造单元内的次级平行断层, 具压扭性逆冲性质, 泥质构造岩发育。因此, 垂直层面方向透水性极差。研究区在区域构造上属彭灌复背斜之南东翼的一部分, 仅见一些小规模次级的翼部褶皱, 由于受断裂构造的影响, 其形态均不甚完整。坝址区完整的褶皱构造仅见沙金坝向斜(图 1)。该向斜轴向为 NE50°~60°, 向 NE 方向倾伏, 倾伏角 25°~35°, 向斜核部转折部位地层完好, 界线清晰, 仅层间挤压错动破坏严重。

收稿日期: 2001-03-12

作者简介: 李远耀(1978—), 男(汉族), 主要从事环境地质研究。

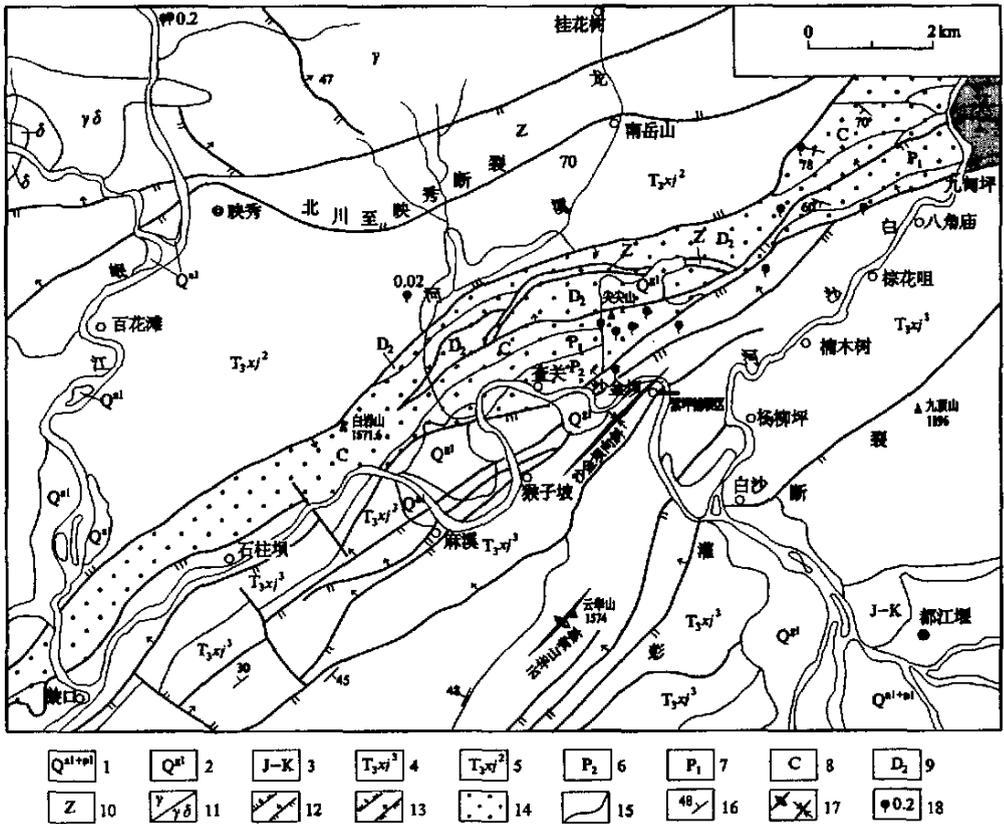


图1 紫坪铺坝区区域地质图

Fig.1 Map showing the regional geology of the Zipingpu dam area

1. 第四纪冲洪积物; 2. 第四纪崩滑堆积物; 3. 侏罗、白垩系砾岩、粉砂岩、泥岩; 4. 三叠系中细粒石英砂岩; 5. 三叠系长石石英砂岩、粉砂页岩夹薄层煤; 6. 二叠系燧石灰岩页岩、煤层; 7. 二叠系灰岩、白云质灰岩、泥质灰岩; 8. 石炭系灰岩、泥灰岩; 9. 泥盆系灰岩、白云质灰岩、泥质灰岩; 10. 震旦系安山岩、流纹岩; 11. 花岗岩及花岗闪长岩; 12. 正断层、逆断层; 13. 飞来峰边界断层; 14. 飞来峰构造范围; 15. 地层界线; 16. 地层产状; 17. 褶皱轴迹; 18. 下降泉及流量

1.3 水文地质条件

坝区地下水类型主要有第四系覆盖层的孔隙性潜水、强卸荷带的孔隙-裂隙水和基岩裂隙水。碎屑岩类裂隙水广泛分布在左右坝肩附近的中低山地区,地下水赋存于三叠系须家河组砂页岩含煤建造的构造裂隙和风化裂隙中。砂岩坚硬性脆,裂隙发育,储水性较好,由于砂岩裂隙含水层之间常有相对隔水的泥页岩存在,使得各砂岩含水层之间的水力联系较弱,地下水主要是在层间运动,普遍具有承压性。

2 裂隙发育特征

2.1 裂隙发育类型

(1)构造裂隙:坝区内坚硬厚层砂岩的构造裂隙较为发育,主要有3组:

- a. N55~75°E/NW∠50~60°,为剪切裂隙,产状基本与岩层一致,其较为密集且延伸远;
- b. N10~45°E/SE(NW)∠10~35°,属于与层面近于直交的中缓倾角裂隙;
- c. N50~80°W/SW∠60~80°,与区域构造线近于垂直,从平硐观察多有一定的张开,且具黄褐色锈面,表明地下水活动迹象明显,具张性结构面特性。

上述裂隙在风化卸荷带内多有一定程度的张开和次生夹泥充填。

(2) 风化卸荷裂隙:河谷两岸强卸荷带(弱风化上段)发育深度为 25~55 m,主要特征是裂隙发育且普遍张开 1~5 mm,沿裂隙面多具黄褐色锈面和次生泥充填。在坚硬砂岩中时见宽 1cm 以上的拉张裂缝,岩体明显松弛,稳定性差,在平硐中常有掉块和小规模塌落。弱卸荷带(弱风化下段)水平发育深度为 50~80 m,一般裂隙张开不显著,次生夹泥明显减少,但沿裂隙黄色锈面仍很普遍。

2.2 裂隙发育特征统计分析

在野外裂隙测量过程中,主要对裂隙产状(即裂隙面的倾向 β , 倾角 α)、隙宽(b)及隙间距(S)进行测量^[1]。

对不同位置裂隙产状测量值进行统计分析,均为顺层、纵切、横切三组裂隙。隙间距相差不大,其值介于 0.5~1.5 m,发育密度为 0.67~2 条/m,横切裂隙的隙间距远大于顺层和纵切裂隙的隙间距,而顺层与纵切裂隙隙间距相差不大。由于野外露头处岩体风化卸荷作用强烈,观测真实隙宽比较困难,故用反算隙宽来替代实际隙宽。按经验估计将顺层、纵切、横切三种裂隙的隙宽比例设定为 1:3:8,通过渗透张量计算得出强卸荷带砂岩综合渗透系数,依次反求出表层完整岩体裂隙的隙宽。反算的隙宽值很接近,顺层裂隙为 0.022~0.025 mm,纵切裂隙为 0.065~0.075 mm,横切裂隙为 0.172~0.200 mm,这些隙宽在野外观测经验值范围内(表 1)。

表 1 坝区砂岩裂隙发育特征

Table 1 Characteristics of the fracture of the sandstone in the dam area

位置	裂隙组数	裂隙性质	产状/(°)		平均隙间距/m	隙宽/mm	观测位置
			倾向	倾角			
金坝 向斜左翼	3	顺层	105	55	0.4	0.022	露头、 平硐
		纵切	320	50	0.6	0.066	
		横切	220	70	0.8	0.176	
坝肩右岸	3	顺层	350	40	0.4	0.025	露头
		纵切	195	45	0.5	0.075	
		横切	50	75	1.5	0.200	
沙金坝 向斜右翼	3	顺层	320	50	0.6	0.023	露头、 平硐
		纵切	120	60	1.0	0.069	
		横切	220	70	0.8	0.184	
沙金坝 向斜核部	3	顺层	50	20	0.4	0.023	平硐
		纵切	210	70	0.6	0.069	
		横切	130	75	1.0	0.184	
坝肩左岸	3	顺层	345	40	0.6	0.022	露头
		纵切	210	40	0.5	0.065	
		横切	100	65	0.8	0.172	

3 渗透性空间变化规律

3.1 研究方法概述

(1) 单孔压水试验

单孔压水试验是一种野外测量岩体渗透性的试验方法,根据水利水电勘察规范要求按下式^[2]计算:

$$Lu = \frac{Q}{p * L} \quad (1Lu \approx 10\omega)$$

式中: Q ——稳定的压入水量 $l \cdot \min^{-1}$

p ——压水试验时采用的水柱压力/MPa

L ——试验段长/m

L_u ——吕荣值

w ——单位吸水量

通过压水实验的结果,可由经验公式计算渗透系数,公式如下:

①当试段底部与下部隔水层的距离大于试段长时

$$K = 0.525w \lg 0.66L/r$$

②反之,即试段底部与下部隔水层的距离小于试段长时

$$K = 0.525w \lg 1.32L/r$$

式中: r ——试验段钻孔半径/m

K ——渗透系数/ $m \cdot d^{-1}$

(2)野外裂隙测量

通过野外裂隙测量,运用统计学的方法,计算岩体渗透系数张量。当岩体中有 n 组不同裂隙同时存在时,如果用 K_{ei} 和 K_i 分别表示第 i 组裂隙岩体的渗透系数和渗透系数张量,则有 n 组裂隙同时存在情况下整个岩体的渗透系数张量为下式^[2]:

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma b_i^3}{12\mu S_i} \begin{bmatrix} 1 - \cos\alpha_{1i} \cos\alpha_{1i} & -\cos\alpha_{1i} \cos\alpha_{2i} & -\cos\alpha_{1i} \cos\alpha_{3i} \\ -\cos\alpha_{2i} \cos\alpha_{1i} & 1 - \cos\alpha_{2i} \cos\alpha_{2i} & -\cos\alpha_{2i} \cos\alpha_{3i} \\ -\cos\alpha_{3i} \cos\alpha_{1i} & -\cos\alpha_{3i} \cos\alpha_{2i} & 1 - \cos\alpha_{3i} \cos\alpha_{3i} \end{bmatrix}$$

式中: $\cos\alpha_{1i}$ 、 $\cos\alpha_{2i}$ 、 $\cos\alpha_{3i}$ 分别表示第 i 组裂隙面法向单位矢量 n 与空间三个坐标轴正向夹角的余弦,其中 S_i 表示第 i 组裂隙的隙间距, b_i 表示第 i 组裂隙的隙宽, γ 和 μ 为水力学常数。

裂隙岩体的渗透张量是一个二阶对称张量,仅有六个独立分量。

若选定 α_1 、 α_2 、 α_3 三个坐标轴分别为正北、正东和垂直方向,则有:

$$K = \sum K_{ei} \begin{bmatrix} 1 - \cos^2\beta_i \sin^2\gamma_i & -\sin\beta_i \sin^2\gamma_i \cos^2\beta_i & -\cos\beta_i \sin\gamma_i \cos\gamma_i \\ -\sin\beta_i \sin^2\gamma_i \cos\beta_i & 1 - \sin^2\beta_i \sin^2\gamma_i & -\sin\beta_i \sin\gamma_i \cos\gamma_i \\ -\cos\beta_i \sin\gamma_i \cos\gamma_i & -\sin\beta_i \sin\gamma_i \cos\gamma_i & 1 - \cos^2\gamma_i \end{bmatrix}$$

式中: β_i 、 γ_i 分别表示岩体中第 i 组裂隙结构面的倾向和倾角。

渗透系数张量能反映局部区域内岩体的渗透性能,表明岩体各项异性特性,而单孔压水试验得出的渗透系数,仅能反映某一试验段的水力学性质,考虑到上述两种方法各有其优缺点,为扬长避短,应用单孔压水试验数据分析砂岩渗透性随深度及岩性的变化规律,应用野外裂隙测量值计算砂岩渗透系数张量分析渗透性随构造部位的变化规律。

3.2 渗透性随深度的变化规律

坝区内除表层下 10~20 m 范围内风化裂隙发育外,坚硬厚层砂岩中主要发育构造裂隙,其空间分布特征是由构造应力决定的,随着深度变化重力的不断加大,裂隙的张开度和连通程度变化很大。因此,决定了砂岩渗透性随埋深不断变化。

对坝区 80 多个单孔压水试验的数据进行统计分析,发现砂岩渗透系数大小随埋深呈明显的规律性变化(图 2)。

埋深小于 140 m 时,渗透系数随埋深的增大而显著减小;大于 140 m 时,渗透系数基本上不随埋深变化,且渗透系数一般小于 0.05 m/d(图 2)。受研究程度及通过单位吸水量(w)估算渗透系数时产生误差的影响,分别给出坝区砂岩的“平均渗透系数”和“最大渗透系数”的数理统计估值(表 2)。

进一步考察砂岩在不同卸荷深度的渗透性,将渗透系数按大小分成五个等级,各等级随深度的变化而不同(图 3):A 级微透水,渗透系数小于 0.01 m/day,质量分数低,随深度变化不大;B 级弱透水,渗透系数介于 0.01~0.05 m/day,质量分数大于 50%,随深度变化不大;C 级中等透水,渗透系数介于 0.05~0.1 m/day,质量分数 10%~30%,随深度略减少;D 级强透水,渗透系数介于 0.1~1.0 m/day,质量分数 5%~30%,随深度减少;E 级极强透水,渗透系数大于 1.0 m/day,质量分数极低。

万方数据

为定量说明砂岩的平均渗透系数与埋深之间的关系,采用回归分析的方法,来探求它们之间的相关关系。从图2中可以看出,埋深与平均渗透系数之间呈一种类似负指数的关系。不妨假设有如下模型:

$$K = K_0 e^{ah}$$

式中: K 为平均渗透系数, h 为深度, e 为数学常数, K_0 和 a 为待求的参数。

应用最小二乘法估算出 K_0 和 a , 代入(表2)数据, $B' = (1.3498, -0.018)^1$, 为了确定模型的拟合程度, 必须计算拟合系数 $R^{2[4]}$, 计算得出 $R^2 = 0.95$, 显示模型拟合程度较好, B' 求出后, 根据前面的假设, 得出 K_0 和 a 的值, 拟合方程为:

$$K = 0.3e^{-0.018h}$$

通过统计分析可以发现:

(1) 分层统计表明, 渗透系数的大小随深度的变化与野外定性观测结果相同, 存在4个垂向分带, 即强风化卸荷带(0~50 m)、弱风化卸荷带(50~80 m)、浅埋带(100~140 m)和深埋带(大于140 m)(图2, 表2)。

(2) 渗透系数分级统计表明(图3), A、B两级岩体渗透系数极小, 而E级岩体出现机率极低, 因此, 对砂岩渗透性起决定作用的是中、强透水的C、D两级岩体, 它们决定砂岩平均渗透系数的大小。

(3) 回归分析表明坝区砂岩的平均渗透系数随埋深增大呈指数规律衰减(图4)。

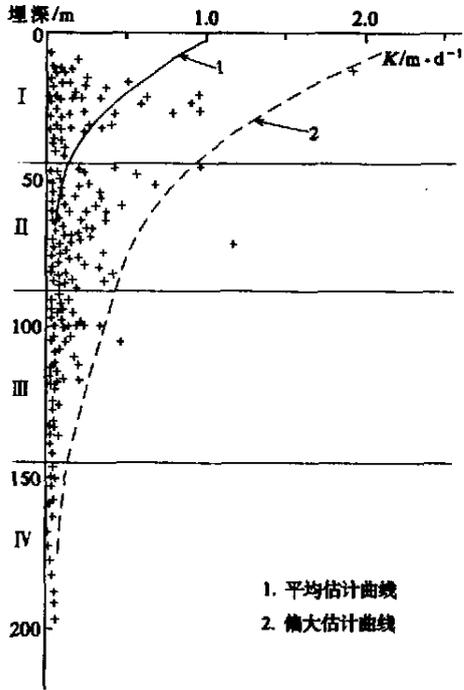


图2 砂岩渗透性随埋深变化图

Fig.2 The correlation of the sandstone's permeability with the variety of the depth

I. 强卸荷带; II. 弱卸荷带; III. 浅埋带; IV. 深埋带

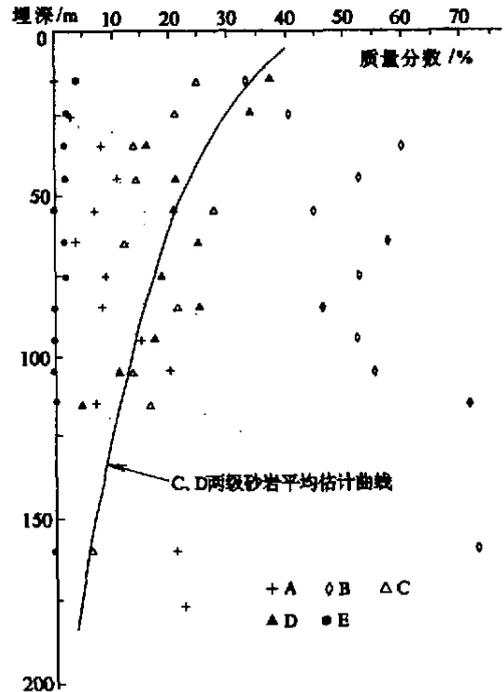


图3 砂岩渗透性等级分配图

Fig.3 Diagram showing the distribution of the grade of the sandstone's permeability

A. 微透水; B. 弱透水; C. 中等透水; D. 强透水; E. 极强透水

3.3 渗透性随岩性的变化规律

特取一些钻孔的单孔压水试验资料, 来分析不同岩性砂岩渗透系数的变化规律。这些钻孔布于坝址的不同地段, 具有一定代表性。钻孔编号为: ZK47、ZK59、ZK50、ZK63、ZK38、ZK78、ZK64、ZK07、ZK45。

通过图5及若干钻孔渗透系数图(图6)分析得到:

(1) 不同砂岩层($T_{3xj} - 12, T_{3xj} - 13, T_{3xj} - 14$)的渗透性不存在明显的差异, 大致介于0.02~0.075 m/day之间;

万方数据

表2 砂岩渗透系数随埋深变化统计

Table 2 Statistics of the sandstone's coefficient of permeability with the variety of the depth

埋深 区间 /m	平均渗透 系数 /m·day ⁻¹	最大渗透 系数 /m·day ⁻¹	样本数 /个	埋深 区间 /m	平均渗透 系数 /m·day ⁻¹	最大渗透 系数 /m·day ⁻¹	样本数 /个
10~20	0.211	1.929	24	90~100	0.055	0.333	49
20~30	0.232	2.687	47	100~110	0.066	0.109	46
30~40	0.151	2.687	51	110~120	0.055	0.068	42
40~50	0.109	1.115	44	120~130	0.033	0.041	33
50~60	0.097	0.702	65	130~140	0.022	0.059	31
60~70	0.103	1.437	64	140~150	0.018	0.046	27
70~80	0.090	1.185	64	150~160	0.017	0.047	25
80~90	0.066	0.422	54	160~180	0.017	0.075	8

(2)不同粒度的砂岩,如中粗砂岩、细砂岩、粉砂岩、甚至泥质砂岩,它们的平均渗透性也不存在实质性差别,说明坝区砂岩裂隙形式以构造裂隙为主(且在脆性岩石中的分布相对均匀),在统一的构造应力场下,不同岩性砂岩内的裂隙发育密度和张开度之间存在某种均衡:密度越大,则张开度小,反之亦然;

(3)不同粒度砂岩的渗透系数最大值存在明显不同,如中粗砂岩的渗透性上限为0.73 m/day,细砂岩为0.45 m/day,粉砂岩为0.36 m/day,泥质砂岩为0.12 m/day(图5,图6)。中粗砂岩和泥质粉砂岩相差约5倍,表明不同岩性砂岩中,极强透水的宽大裂隙的发育程度有较大差异:岩石粒度越大,则其发育宽大裂隙的概率越大。

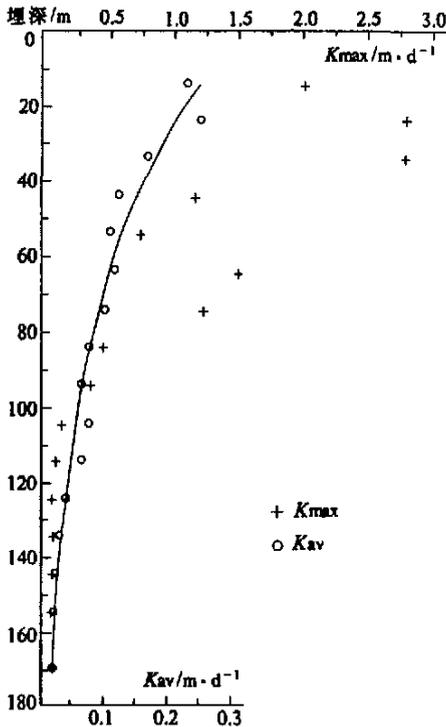


图4 不同深度段砂岩渗透系数变化图

Fig.4 The sandstone's coefficient of permeability in different depth section

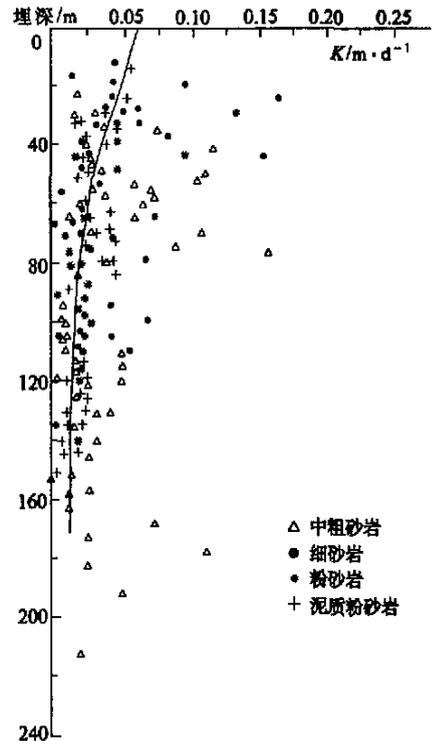


图5 不同粒度砂岩渗透性随埋深变化图

Fig.5 The correlation of the permeability with the sandstone's granularity

3.4 渗透性随构造部位的变化规律

已知不同构造部位砂岩裂隙发育特征值,可求出其渗透系数张量的分量。渗透张量为一个二秩张量,按照二秩张量的性质,可以求得渗透系数张量的主值(一般按大小将其分为 $K_1, K_2, K_3, K_1 \geq K_2 \geq K_3$)和主渗透方向。具体计算方法见参考文献[5],通过计算得出不同构造部位的渗透系数张量的主值和渗透主方向(表3)。 K_1 与 K_3 的比值为岩体渗透性的各向异性比,其介于8~25。

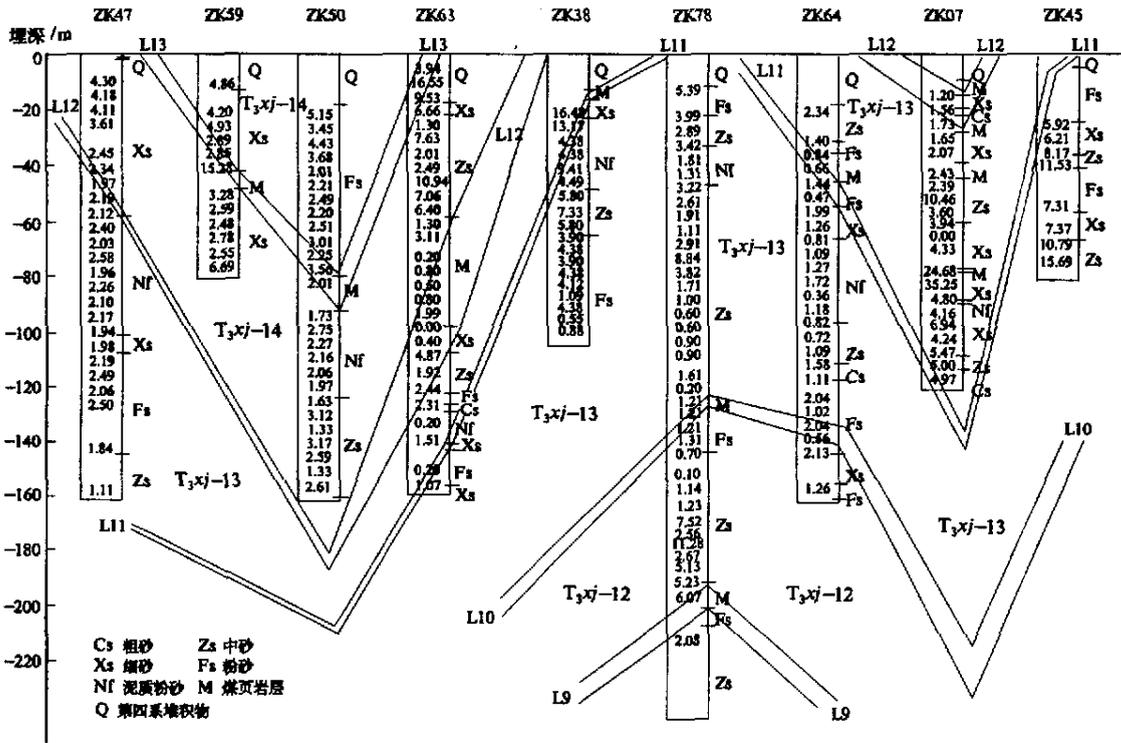


图6 若干钻孔不同岩性段渗透系数

Fig.6 The coefficient of permeability of the different lithology of several drilling holes

为了更为直观地比较不同构造部位的渗透性,根据不同构造部位的渗透系数张量的主值计算综合渗透系数,它反映岩体的综合渗透性能,是一个各向同性的数值。当知道渗透系数张量主值以后,可以根据下式来求岩体的综合渗透系数[2]:

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

不同构造部位的综合渗透系数见表3。

通过以上的计算和分析可以得出:

(1) K_1 与 K_2 相差不大(相对于 K_3), K_3 远小于 K_1, K_2 , 而 K_1, K_2 和 K_3 为渗透系数张量的主值,渗流方向与其方向一致,因此坝址区的渗流基本上可以视为平面二维流,砂岩为严重各向异性岩体;

(2) 不同构造部位综合渗透系数大致相等,表明砂岩渗透性不随构造部位不同而发生明显的变化。

4 结论

通过对紫坪铺水利枢纽坝区砂岩渗透性的分析,可以得出如下结论和认识:

表3 不同构造部位砂岩渗透张量与综合渗透系数

Table 3 The hydraulic of conductivity and the summary coefficient of permeability in different tectonic position

构造部位	渗透张量 主值	渗透系数 /m·day ⁻¹	倾向 /(°)	倾角 /(°)	K ₁	K ₃	K ₁ /K ₃	综合渗透 系数 /m·day ⁻¹
沙金坝 向斜左翼	K ₁	0.5147	108	46	0.5147	0.0353	14.9	0.2063
	K ₂	0.4830	327	37				
	K ₃	0.0353	220	20				
右坝肩	K ₁	0.4369	313	24	0.4369	0.0519	8.4	0.2065
	K ₂	0.3884	163	63				
	K ₃	0.0519	48	12				
沙金坝 向斜右翼	K ₁	0.5728	340	54	0.5728	0.0246	23.3	0.1979
	K ₂	0.5508	119	28				
	K ₃	0.0246	220	20				
沙金坝 向斜核部	K ₁	0.4784	359	67	0.4784	0.038	12.6	0.2006
	K ₂	0.4442	226	16				
	K ₃	0.038	311	15				
白沙河 右岸(左坝肩)	K ₁	0.4877	352	33	0.4877	0.0393	12.4	0.2051
	K ₂	0.4506	220	46				
	K ₃	0.0393	100	26				

(1)水利枢纽所在区域地质条件及水动力条件复杂,断裂节理构造发育。坝区砂岩渗透性的空间变化规律,主要受砂岩中发育的三组不同构造裂隙的控制。

(2)存在4个垂向分带,埋深小于140m时随埋深加大呈明显的指数规律衰减,大于140m时,平均渗透系数小于0.05m/day。对砂岩渗透性起控制作用的是中、强透水岩体。

(3)坝区砂岩中的渗流基本上可以视为平面二维流,不同构造部位的砂岩渗透性差异不明显,综合渗透系数约为0.2m/day。

(4)不同砂岩层(T_{3xj}-12, T_{3xj}-13, T_{3xj}-14)的渗透性不存在明显差异。中粗砂岩、细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩等不同粒度的砂岩,相互之间的平均渗透性也不存在显著差别,但渗透性上限明显不同。

参考文献:

- [1] 卢金凯. 基岩裂隙水的野外调查方法[M]. 北京:地质出版社,1985.
- [2] 仵颜卿. 岩体水力学基础(七)——岩体水力学参数的确定方法[J]. 水文地质工程地质,1988,(2):42—48.
- [3] 仵颜卿,张倬元. 岩体水力学导论[M]. 成都:西南交通大学出版社,1995.
- [4] 王学仁,王松桂. 实用多元统计分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1990.
- [5] 陈子萌. 张量分析[M]. 徐州:中国矿业学院出版社,1987.

SPATIAL TRANSFORMATION RULE OF SANDSTONE'S PERMEABILITY IN ZIPINGPU DAM AREA, SICHUAN PROVINCE

LI Yuan-yao¹, CHEN Gang², WANG Xu-sheng²

(1. *Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Yichang 443003, China;*

2. *China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

Abstract: Based on the abundant data of single-hole pressure testing and fracture measuring in field, with mathematical methods, including statistical, tensor analyzing and linearity-regress analyzing, the spatial transformation rule of sandstone's permeability in the aspects of depth, the lithology and tectonic position are discussed. Research shows that there is a negative relationship between permeability and depth and there is not obvious relationship between permeability and lithology or tectonic position.

Key words: sandstone; permeability; coefficient of permeability; fractured medium