

# 基于压水试验数据的渗透系数应力敏感性研究

刘建军<sup>1,2</sup>, 何翔<sup>1</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉工业学院 多孔介质力学研究所, 湖北 武汉 430023)

**摘要:** 岩体渗透率与应力关系是进行岩体渗流-应力耦合分析的基础。基于龙滩水电站边坡岩体渗流压水试验结果和边坡岩体岩性及物理力学性质, 对岩体渗透系数和地应力进行了分析计算, 给出了边坡岩体渗透率随应力变化的关系式, 为进行边坡岩体渗流-应力耦合分析提供了可靠数据。

**关键词:** 岩石力学; 渗透系数; 应力场; 流固耦合; 压水试验

**中图分类号:** TU 457

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)增1-4724-04

## STUDY ON STRESS SENSIBILITY OF ROCK PERMEABILITY BASED ON PRESSURE WELL TEST

LIU Jian-jun<sup>1,2</sup>, HE Xiang<sup>1</sup>, FENG Xia-ting<sup>1</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Institute of Poromechanics, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** Relationship between permeability and stress is the key foundation for coupled seepage-stress analysis of rock mass. Based on the seepage pressure well test and rock mass physical and mechanical properties, the permeability and stress in rock slope of Longtan hydroelectric station are achieved. By analyzing the data, the relation between permeability coefficient and geo-stress is presented, and a key material for fluid-solid coupling analysis is provided.

**Key words:** rock mechanics; permeability coefficient; stress field; fluid-solid coupling; pressure well test

## 1 引言

边坡岩体内地下水渗流动态变化是造成边坡岩体失稳的最重要原因之一<sup>[1, 2]</sup>。近年来, 渗流作用下岩土体的稳定性逐渐采用渗流-应力耦合理论进行研究<sup>[3-7]</sup>, 在渗流-应力耦合分析中, 渗流-应力耦合关系是耦合分析成败的关键所在。如果耦合关系不正确, 即便理论模型再准确, 都会由于参数的不准确而影响分析效果。

大多数渗流-应力耦合关系的确定是基于室内

岩土体渗流-应力耦合试验来确定的, 少量的耦合分析采用理论推导得到的耦合关系进行计算<sup>[8-11]</sup>。但是室内试验有其固有的缺点, 例如: 加载应力和现场地应力不吻合, 取样过程中应力释放, 试件的尺度效应等。因此, 能否将室内岩土体耦合试验的结果直接用于工程计算中, 或者用于工程计算中需要做哪些技术处理等仍是人们尚待解决的问题。通过公式推导得到的耦合关系是在做了大量的假设后得出的, 和实际地质情况相差很远, 离实际应用有很大的差距。

现场耦合试验由于难度大、耗资多, 所以在现

**收稿日期:** 2005-05-11; **修回日期:** 2005-06-26

**基金项目:** 中国博士后科学基金(2003033008); 湖北省教育厅重点科研项目(D200518001)

**作者简介:** 刘建军(1972-), 男, 博士, 1996年毕业于辽宁工程技术大学采矿工程系采矿工程专业, 现任教授, 主要从事渗流力学方面的教学与研究工作。E-mail: liujj0906@263.net。

场开展的试验很少。但是，重大工程地质勘查过程中，往往要做一系列的压水试验以弄清岩土体的渗透性，同时也对工程岩体的岩性、容重、强度等物理力学性质进行测试。基于压水试验结果和对应工程岩体的深度、容重等实测资料，本文分析了边坡岩体渗透系数的应力敏感性，并给出了龙滩水电站边坡岩体渗透率与地应力耦合关系。分析结果可以直接用于耦合计算，也可供相近其他水利水电工程进行耦合分析时参考。

## 2 分析方法与结果

大量的工程实践和室内试验表明，岩体的渗透系数和应力之间具有以下函数关系：

$$K = K_0 \exp(-\alpha \sigma_e) \tag{1}$$

式中： $K_0$  为初始渗透系数，也即有效应力为 0 时的渗透系数； $\sigma_e$  为有效应力； $\alpha$  为系数。

表 1, 2 分别给出了龙滩水电站透水性及风化程度、埋藏深度的关系。从表中可以看出，岩体的透水性及埋藏深度、风化程度密切相关，岩体透水性随岩体埋藏深度增加明显降低，风化程度越高，渗透系数越大。

从表中数值还可以看出：地表以下，60 m 以上岩体透水性较强，100 m 以下透水性微弱，为相对不透水层。

对于单孔压水试验，可根据巴布金公式计算岩体渗透系数<sup>[2]</sup>：

$$K = \frac{0.366Q}{\bar{L}H_0} \lg \frac{1.32\bar{L}}{\bar{r}} \tag{2}$$

式中： $K$  为渗透系数， $Q$  为压水孔耗水量， $\bar{r}$  为压水孔半径， $\bar{L}$  为压水段长度， $H_0$  为压水段水头。

一般  $\bar{L} \approx 5$  m，当用单位吸水量  $\omega(L \cdot (\min \cdot m \cdot$

表 1 岩体风化程度与透水性关系表

Table 1 Relation between weathering degree and water permeability for rock mass

| 风化分带 | $\omega(L \cdot (\min \cdot m \cdot m)^{-1})$ |       |           |       |           |       |       |       |
|------|---|-------|-----------|-------|-----------|-------|-------|-------|
|      | >0.10   |       | 0.10~0.05 |       | 0.05~0.01 |       | <0.01 |       |
|      | 试段数   | 百分比/% | 试段数       | 百分比/% | 试段数       | 百分比/% | 试段数   | 百分比/% |
| 弱风化带 | 385   | 37    | 20        | 20    | 21        | 20    | 24    | 23    |
| 微风化带 | 135   | 16    | 90        | 11    | 235       | 29    | 347   | 44    |
| 新鲜基岩 | 34  | 2     | 43        | 3     | 517       | 34    | 942   | 61    |

表 2 岩体埋藏深度与透水性关系表

Table 2 Relations between rock mass buried depth and permeability

| 深度/m | $\omega(L \cdot (\min \cdot m \cdot m)^{-1})$ |       |          |       |           |       |       |       |
|------|---|-------|----------|-------|-----------|-------|-------|-------|
|      | >0.1  |       | 0.1~0.05 |       | 0.05~0.01 |       | <0.01 |       |
|      | 试段数   | 百分比/% | 试段数      | 百分比/% | 试段数       | 百分比/% | 试段数   | 百分比/% |
| 20   | 45  | 55    | 16       | 19    | 12        | 15    | 9     | 11    |
| 40   | 68  | 27    | 40       | 16    | 76        | 30    | 69    | 27    |
| 60   | 39  | 12    | 40       | 12    | 113       | 33    | 147   | 43    |
| 80   | 15  | 4     | 33       | 9     | 114       | 31    | 202   | 56    |
| 100  | 5   | 2     | 15       | 5     | 111       | 34    | 191   | 59    |
| 120  | 3   | 1     | 8        | 3     | 70        | 23    | 221   | 73    |
| 160  | 3   | 1     | 11       | 2     | 123       | 22    | 412   | 75    |
| 200  |   |       | 3        | 1     | 76        | 24    | 236   | 75    |
| >200 |   |       | 1        | 1     |           |       | 77    | 99    |

m)<sup>-1</sup>)，计算渗透系数时，若  $K$  的单位为 m/d，则二者之间的关系为

$$K = 0.528\omega \lg \frac{6.6}{\bar{r}} \tag{3}$$

压水钻孔的直径一般在  $\phi 100$  mm 左右，因而式(3)可进一步写成：

$$K = 1.12\omega \tag{4}$$

将  $K$  的单位换算成标准单位(m/s)，则上式可表示为

$$K = \frac{1.12\omega}{24 \times 3600} = 1.296 \times 10^{-5} \omega \tag{5}$$

将表 1 中的吸水率按式(5)转化为渗透系数，可以得到岩体渗透性能与风化程度数据(见表 3)。

将表 2 中第一列的埋深按下式转化为垂直地应力为

$$\sigma = \sum \gamma_i H_i \tag{6}$$

式中： $\gamma_i$  为上覆第  $i$  岩层的容重； $H_i$  为上覆第  $i$  岩层的深度。

并将吸水率转化为渗透系数，可得到渗透系数随地应力变化表 4。

对表 4 中每行各试验段的渗透系数取加权平均，可得到不同应力状态下的渗透系数值，对式(1)进行曲线拟合，定出式中的各待定系数，可得如下指数关系式：

$$K = 1.155 \times 10^{-6} \exp(-0.00857\sigma_e) \tag{7}$$

表 3 岩体风化程度与渗透系数表

Table 3 Relationship between rock mass weathering degree and permeability coefficient

| 风化分带                 | $\omega/(L \cdot (\min \cdot m \cdot m)^{-1})$ |       |   |       |   |       |                         |       |
|----------------------|--|-------|---|-------|---|-------|-------------------------|-------|
|                      | >0.1   |       | 0.1~0.05  |       | 0.05~0.01                                       |       | <0.01                   |       |
|                      | 试段数  | 百分比/% | 试段数   | 百分比/% | 试段数   | 百分比/% | 试段数                     | 百分比/% |
| 弱风化带                 | 385  | 37    | 20  | 20    | 21  | 20    | 24                      | 23    |
| 微风化带                 | 135  | 16    | 90  | 11    | 235   | 29    | 347                     | 44    |
| 新鲜基岩                 | 34   | 2     | 43  | 3     | 517   | 34    | 942                     | 61    |
| $K/(m \cdot s^{-1})$ | $>1.296 \times 10^{-6}$                        |       | $1.296 \times 10^{-6} \sim 6.48 \times 10^{-7}$ |       | $6.48 \times 10^{-7} \sim 1.296 \times 10^{-7}$ |       | $<1.296 \times 10^{-7}$ |       |

表 4 渗透系数与地应力关系

Table 4 Relation between permeability coefficient and geo-stress

| 地应力 /MPa | $K/(10^{-6} m \cdot s^{-1})$ |       |                |       |                 |       |          |       |
|----------|------------------------------|-------|----------------|-------|-----------------|-------|----------|-------|
|          | >1.296 0                     |       | 1.296 0~6.48 0 |       | 6.480 0~0.129 6 |       | <0.129 6 |       |
|          | 试段数                          | 百分比/% | 试段数            | 百分比/% | 试段数             | 百分比/% | 试段数      | 百分比/% |
| 0.49     | 45                           | 55    | 16             | 19    | 12              | 15    | 9        | 11    |
| 0.98     | 68                           | 27    | 40             | 16    | 76              | 30    | 69       | 27    |
| 1.47     | 39                           | 12    | 40             | 12    | 113             | 33    | 147      | 43    |
| 1.96     | 15                           | 4     | 33             | 9     | 114             | 31    | 202      | 56    |
| 2.45     | 5                            | 2     | 15             | 5     | 111             | 34    | 191      | 59    |
| 2.94     | 3                            | 1     | 8              | 3     | 70              | 23    | 221      | 73    |
| 3.92     | 3                            | 1     | 11             | 2     | 123             | 22    | 412      | 75    |
| 4.90     |                              |       | 3              | 1     | 76              | 24    | 236      | 75    |
| >4.90    |                              |       | 1              | 1     |                 |       | 77       | 99    |

根据式(7)可以给出渗透系数与地应力的关系曲线。

根据曲线拟合的结果(见图 1),给出了初始渗透系数  $K_0 = 1.155 \times 10^{-6} m/s$ 。但岩体的渗透性能和风化程度直接相关,各种风化程度下,初始渗透系数  $K_0$  应为不同的值。

对每个风化带下各试验段的渗透系数取加权平均值,并根据地质报告和工程经验认为强风化带和断层的初始渗透系数为  $7.0 \times 10^{-4} m/s$ ,可得表 5 所示的各风化程度下岩性的初始渗透系数。

地质报告为提供各岩性和风化程度下渗透性与埋深的关系数据,计算各岩性及风化程度下的初始渗透系数  $K_0$  取表 5 所示数据,系数均取  $\alpha = -0.008 57$ ,也即各岩性及风化程度下的渗透系数从不同的初始渗透系数开始以相同的规律随应力增加而衰减。

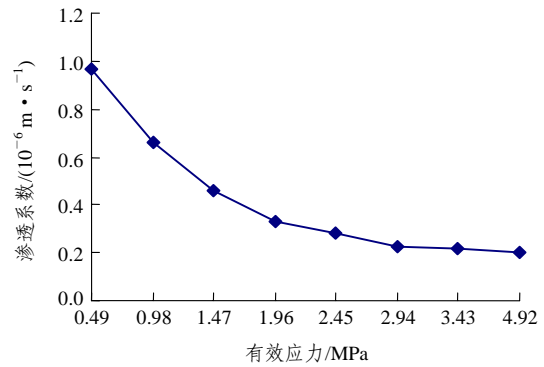


图 1 渗透系数与有效应力关系曲线

Fig.1 Relation between permeability and effective stress

表 5 不同风化程度岩石的渗透系数

Table 5 Permeability under different weathering degrees

| 风化程度  | 渗透系数/( $m \cdot s^{-1}$ ) |                       |
|-------|---------------------------|-----------------------|
|       | 砂岩                        | 泥板岩                   |
| 全、强风化 | $7.00 \times 10^{-4}$     | $7.00 \times 10^{-4}$ |
| 弱风化带  | $7.81 \times 10^{-7}$     | $7.81 \times 10^{-7}$ |
| 微风化带  | $4.84 \times 10^{-7}$     | $4.84 \times 10^{-7}$ |
| 新鲜基岩  | $2.66 \times 10^{-7}$     | $2.66 \times 10^{-7}$ |

### 3 结 语

(1) 利用压水试验数据,将吸水率转化为渗透系数,并结合工程岩体岩性分布、深度、容重等测试结果,得到地应力值,综合二者结果可以给出岩体渗透系数与地应力之间的关系;

(2) 根据现场试验得到的渗透系数与地应力关系,和室内试验得到的关系一致,渗透系数和地应力之间符合指数关系;

(3) 岩体的风化程度对渗透性影响较大,对于不同风化程度的岩石其初始渗透率和耦合关系应有所不同。

### 参考文献(References):

[1] 作彦卿,张俾元.岩体水力学导论[M].成都:西南交通大学出版社,1995.(Wu Yanqing, Zhang Zhuoyuan. Introduction to Rock Mass Hydromechanics[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995.(in Chinese))

[2] 章梦涛,潘一山,梁冰,等.煤岩流体力学[M].北京:科学出版社,1995.(Zhang Mengtao, Pan Yishan, Liang Bing, et al. Fluid Mechanics in Rock and Coal[M]. Beijing: Science Press, 1995.(in Chinese))

[3] 耿克勤,吴永平.拱坝和坝肩岩体的力学和渗流的耦合分析实例[J].

- 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 125 - 131.(Geng Keqin, Wu Yongping. Analysis of the mechanic-hydraulic interaction concerning arch dam and its abutments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(2): 125 - 131.(in Chinese))
- [4] 盛金昌, 速宝玉. 裂隙岩体渗流应力耦合研究综述[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 92 - 98.(Sheng Jinchang, Su Baoyu. Comment on the research of coupled stress and fluid flow in fractured rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998, 19(2): 92 - 98.(in Chinese))
- [5] 柴军瑞, 作颜卿. 碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合分析的数学模型[J]. 水利学报, 2000, (9): 33 - 36.(Chai Junrui, Wu Yanqing. Mathematical model for couple analysis of seepage and stress fields in RCCD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (9): 33 - 36.(in Chinese))
- [6] 柴军瑞, 李守义. 大柳树水利枢纽坝区渗流场与应力场耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2 322 - 2 325.(Chai Junrui, Li Shouyi. Analysis of coupled seepage and stress fields in rock mass around the Daliushu dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.2): 2 322 - 2 325.(in Chinese))
- [7] 陈 平, 张有天. 裂隙岩体渗流与应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(4): 299 - 308.(Chen Ping, Zhang Youtian. Coupled analysis of seepage and stress in fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13(4): 299 - 308.(in Chinese))
- [8] 梁 冰, 薛 强, 王起新. 边坡失稳系统的岩体与水固流耦合作用机理研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(1): 18 - 21.(Liang Bing, Xue Qiang, Wang Qixin. Mechanism research on rock and water oil-fluid coupling effect of slope stability failure system[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2001, 12(1): 18 - 21.(in Chinese))
- [9] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 二维应力作用下岩石单裂隙渗流规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1 194 - 1 198.(Liu Caihua, Chen Congxin, Fu Shaolan. Testing study on seepage characteristic of a single rock fracture under two-dimensional stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1 194 - 1 198.(in Chinese))
- [10] 梁 冰, 刘晓丽, 薛 强. 低渗透地下环境中水岩作用的渗流模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 745 - 750.(Liang Bing, Liu Xiaoli, Xue Qiang. Seepage model study of water rock interaction in low permeability ground water environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 745 - 750.(in Chinese))
- [11] 李培超. 多孔介质流 - 固耦合渗流数学模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2 842.(Li Peichao. Mathematical model of flow-deformation coupling for porous media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2 842.(in Chinese))