

文章编号: 1008—2786(2000)01—0047—05

三峡工程永久船闸边坡岩体渗透张量

陈洪凯, 唐红梅

(重庆交通学院岩土工程研究所, 重庆 400074)

提 要: 根据三峡工程永久船闸区岩体结构面及地下水调查和观测结果, 提出了渗透结构面这一基本术语; 据此开发出求解处于施工期的岩体工程岩体渗透张量的基本方法。利用此方法所得到的永久船闸区岩体渗透张量数量级与多年来的现场测试成果相同, 而由 K_1 、 K_2 和 K_3 体现出来的渗流各向异性更为典型, 与近期开挖显现出的情况是吻合的。

关键词: 三峡工程; 永久船闸; 岩体; 渗透结构面; 渗流量; 渗透张量

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

岩体是指含有一系列软弱面及裂隙(统称岩体结构面)的天然地质体。成岩作用及成岩环境的差异造就了岩体的物质基础和宏观及微观结构上的非均质性、各向异性和不连续性。岩体结构面导致了力学性质的显著弱化及复杂的渗流特性, 进而严重地影响着岩体中地下水的排水过程及排水效果。三峡工程永久船闸区出露基岩为震旦纪结晶岩, 岩性主要为闪云斜长花岗岩, 块状岩体结构, 是主要的建基岩体。大量的地质勘探、14 条山体排水洞开挖及闸室开挖等使丰富的地质条件得以显现, 永久船闸区断裂构造十分发育, 岩体结构面按走向可以分为 NEE、NNE—NE、NNW—NE 和 NWW 等四组; 按产状分为 12 组。岩体结构面中陡倾角、中倾角和缓倾角分别占 74%、19% 和 7%。丰富的岩体结构面使岩体呈现典型的各向异性特性^[1, 2]。

永久船闸区岩体结构面明显具有张性及压性之分, 地下水主要在张性结构面中赋存和运动。存在于张性结构面中的地下水可以减小结构面的抗剪强度, 且产生的动水及静水压力均劣化了结构面的力学性质, 进而严重地影响着边坡岩体的稳定性。据 Hoek 和 Brown 的研究, 边坡饱水时的安全系数比干燥时降低 0.5~0.8^[1]。前期研究也表明, 永久船闸边坡饱水时的安全系数比干燥时降低 0.4 左右^[3], 地下水在三峡工程永久船闸边坡工程中占有十分重要的地位, 是重要的研究内容之一。

在岩体渗流研究中, 渗流分析的正确与否决定于控制方程中的各项参数, 其中最为困难、也最为重要的首推渗透系数的确定^[2]。长江水利委员会、长江科学院、水科院及清华大学等单位主要根据现场钻探, 对三峡工程永久船闸区岩体的渗透系数取得了许多有益的成果, 作者从国家“八五”重点攻关项目《三峡工程永久船闸高边坡关键技术研究》结题以来, 在国家自然科学基金项目资助下一直对此问题进行积极深入的研究, 本文是近年研究成果的总结。

收稿日期: 1998—11—16; 改回日期: 1999—05—04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59878057)成果之一

作者简介: 陈洪凯(1964—), 男(汉族), 重庆人, 博士, 教授, 岩土工程专业, 长期从事岩土工程、地质灾害及土建新材料的开发、研究和教学工作

1) 张家发. 裂隙岩体渗流参数讨论及其渗流场的有限元分析(“七五”攻关项目). 长江科学院, 1990. 1~9

2) 李思慎. 三峡船闸高边坡裂隙岩体渗流场三维有限元分析(“七五”攻关项目). 长江科学院, 1990. 1~13

3) 长江委员会. 长江三峡水利枢纽永久船闸高边坡设计基本方案专题报告, 1994

1 岩体初始渗透张量

1.1 渗透结构面的提出及渗透系数

据研究,定义岩体中渗透能力比较强、系统成组分布规律比较明显的张性结构面为渗透结构面(Water-Conduction Fracture 简写 WCF)。渗透结构面是在地质历史时期由于地应力场的作用形成并保存于岩体中渗透能力较强的岩体结构面,后期地应力场的变化使前期的渗透结构面的渗透性能发生变化,换言之,前期的渗透结构面和非渗透结构面的渗透特性将随地应力场的变化而发生变化或转变,它是一个性态术语,未含成因过程信息。一定时期岩体中的由渗透结构面组成的渗流网络与该时期的地应力场相关。永久船闸区属于中高地应力环境区,由 Scheidegger 法、地震层析分析法及大地构造分析法确定的宏观地应力场主应力方向均为 NE—SW 向,河流发育导致的宏观卸荷方向^[3]也与此相近,与船闸轴线大角度相交。宏观地应力场的两个剪切带受到地表自然卸荷及船闸开挖卸荷的影响而具有扭张性,对地下水应该是有影响的。但是,由于从地球物理方法测试的船闸边坡明显的卸荷区主要位于距坡面 5 m~10 m,远远小于几百米的渗流分析域,因此,可以认为船闸的开挖卸荷对岩体渗流网络的作用是为有限的,在施工期、边坡岩体未达到显著流变期进行渗透特性要析时可以暂不考虑渗流与应力的耦合问题(长期分析则应该考虑此耦合问题)。

0 在现场研究岩体结构面过程中,将其分为不透水、浸透和渗水三类,后二者归结为渗透结构面。在永久船闸边坡 N5、N6、N7、S5、S6、S7 共六个山体排水洞及北坡岩体中的施工支洞中共量测到 2 326 条渗透结构面,占岩体结构面总数的 70 % 左右,以 9 m~18 m 长的渗透结构面为主,平均宽度 0.5 m~0.7 m。

由于渗透结构面的开度均是在施工开挖面上进行的,结果必然隐含着受施工爆破的影响,因此,即使由修正立方定律求得的渗透系数也是偏大的。研究渗透结构面的渗透系数,首先应确定其间地下水的流态。利用在现场量测到的各渗透结构面中地下水渗流量,可计算出其流动速度,进而可求出水体流动的雷诺数,变化于 0.08~29.40。关于渗流水体的流态,Elsworth 等认为层流雷诺数流态的临界值在 100~2 300^[4];陶同康基于室内模型试验认为对非充填光滑平裂隙,当雷诺数<1 250 属于层流^[5];而 Franklin 等则认为雷诺数大于 100 便主要不属于层流范畴^[6];George 等认为当雷诺数>500 时即为非 Darcy 流^[7]。可见,对裂隙岩体渗透结构面中地下水流态划分标准尚未统一,但雷诺数<100 便主要不属于层流已是人所共识的。因此,从现场渗透结构面中地下水的观测结果可以推断,渗透结构面中地下水的渗流主要属于层流,Darcy 定律是完全适用的。本文采用极值控制法求取渗透结构面的渗透系数^[8]。首先,由于量测的开度已含有受施工爆破的影响,较实际开度为大,故由修正立方定律计算的渗透系数当为极大值,即 $K_{max} = \rho g e^2 / 12 \mu C$ 。式中: e 为平均开度; g 为重力加速度; ρ 为水的密度; μ 为水的运动粘滞系数; C 为结构面粗糙度修正系数。渗透结构面绝对开度 e' 和平均开度 e 二倍之比 $e'/2e$ 变化于 0.04~0.20 间,故根据 Lomize、Louis 和 Carlsson 的经验公式取为: $C = 1 + 7.4(\frac{e'}{2e})^2$ 。

其次,根据 Darcy 定律 $v = ki$,由于渗透结构面的水力梯度 i 难于确定,故 k 值不易确定。但是渗透结构面倾角的正弦值当是其最大梯度值 i_{max} ,故渗透系数为极小值 $K_{min} = K_{max} / K_{min}$ 变化于 1.6~30 间,数量级 10^{-2} cm/s。

1.2 渗透结构面分组^[9]

由现场观测资料,按渗透结构面的产状可以分为 11 组,其中陡倾角(>60°)、中倾角(60°~40°)和缓倾角(<40°)各 8 组、2 组和 1 组。若按渗透结构面的倾向评阅角分组,第 5~7、10~11 组属于 NE—NEE 组,第 1~3 和 8 组属于 NW—NNW 组,而第 4 组和第 9 组属于 NNE 组,可见,以 NE—NEE 组最多,渗透结构面出现频率总体上每条间隔 2.44 m,以 NE—NEE 组最密;以永久船闸二、三闸室北坡的

N5、N6、N7 排水洞和施工支洞为例, 渗透结构面的渗流量 NE—NEE 组、NW—NNW 组和 NNE 组分别占 59.0 %、22.3 %和 18.7 %。

1.3 初始渗透张量

岩体渗透张量的研究是基于渗透结构面渗透特性的研究而开展的。渗透结构面之间渗透空间中的地下水流本质上属于典型的二维流动, 而在渗透张量分析中, 把渗透结构面当作光滑、均一、无限延伸、规则排列的理想窄缝以及将裂隙水流等效为岩体内部沿个方向均有分量的渗透张量, 与实际情况是有出入的, 也就是说渗透张量在裂隙岩体网络渗流中的应用可能具有较大的误差, 但是, 渗透张量法具有简便、经济、灵活的特点, 在渗透结构面资料比较的条件下结果仍是具有很强的统计学意义, 不失一种有效的研究方法。

$$K_{fi}=\frac{Kfe}{S}\begin{bmatrix}1-n_1n_1&-n_1n_2&-n_1n_3\\-n_2n_1&1-n_2n_2&-n_2n_3\\-n_3n_1&-n_3n_2&1-n_3n_3\end{bmatrix}$$

设任一组渗透结构面的平均间距为 S_i , 平均开度为 E_i , 每渗透结构面的渗透系数为 K_o , 则该组渗透结构面的等效渗透张量为依据渗透性的可叠加假设^[10], 便可以把岩体中所具有的 N 组渗透结构面的渗透张量 $K_{fi}(i=1,2,\cdots,N)$ 进行叠加, 以求得岩体的等效渗透张量是 $[K]$ 。

$$[K]=\sum_{i=1}^N[K_{fi}]$$

由于此渗透张量为二阶对称张量, 可以将其对角化。设其特征根为 λ , 特征方程为则张量对角化为

$$|K_{ij}-\lambda\delta_{ij}|=0$$

展开后得

$$\lambda^3-A\lambda^2+B\lambda-C=0$$

式中 $A=\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3$, $B=\lambda_{12}+\lambda_{23}+\lambda_{31}$, $C=\lambda_1\lambda_2\lambda_3$, 分别为渗透张量不变量。将特征方程变为卡丹方程进行求解, 便可得到二阶渗透张量的主渗透系数值。将分组资料带入卡丹方程求解, 即可得永久船闸边坡岩体的初始渗透张量(表 1)。由于渗透结构面分组资料是从正在施工中的永久船闸边坡山体排水洞及施工支洞中量测到的, 初始渗透张量必然隐含着因岩体风化、施工爆破致使的岩体质量劣化及震力等对岩体渗透特性的影响。初始渗透张量主值之比为 $K_1:K_2:K_3=11:10:1$ 。

2 求解岩体等效渗透张量的有限元法

表 1 永久船闸边坡岩体初使渗透张量
Table.1 Initial seepage tensor in slope
rock mass at permanent shiplocks

渗透 系数	主值 (10^{-5}cm/s)	渗透张量主方向($^{\circ}$)	
		倾 向	倾 角
K_1	3.65	71.8157	75.7891
K_2	3.21	315.3024	9.8856
K_3	0.33	227.2823	10.1059

反求参数法是根据抽水试验资料或天然水位动态观测资料反求水文地质参数(如渗透系数, 入渗系数等)的基本方法, 一般分为直接法和间接法^[9]。直接法采用迭代法进行计算, 先估计参数的值后解正问题, 直到满足精度为止; 而间接法则水头为已知值, 把参数作为变量进行求解。

由于永久船闸施工已全面展开, 故用常规方法研究渗透系数已具相当的难度。作者则从山体排水洞中量测到的地下水渗流量出发, 提出了反求岩体渗透系数的三维有限元计算方法。其基本步骤如下。

2.1 计算基础

将渗流域分为全强区化区、施工影响区(据物探测试成果取 20 m ~ 25 m 为施工面)和影响微弱区。对全强风化区和影响微弱区取前人参数, 对施工影响区取初始渗透张量值。

2.2 基本假定

a. 边坡中各岩体分区渗透系数主值不变;

b. 边坡中各岩体分区主渗透系数之方向、倾角不变。

2.3 边界条件

以模拟 1995—05—06(现场主要观测期)永久船闸北坡二三闸室边坡岩体的渗透特性,选取第一类边界条件山体中 $H_1=22\text{ m}\sim 230\text{ m}$,边坡面 $H_2=180\text{ m}$;第二类边界条件则为排水洞中观测的平均地下水渗流量, $Q_{N5}=15.6\text{ cm}^3/\text{s}$, $Q_{N6}=9.72\text{ cm}^3/\text{s}$ 和 $Q_{N7}=8.64\text{ cm}^3/\text{s}$ 。

2.4 控制条件

- a. 各排水洞($N5$ 、 $N6$ 、 $N7$)结点的计算水头值与高程相近;
- b. 地下水在边坡坡面上的出溢点高程介于 $183\text{ m}\sim 185\text{ m}$ 。

2.5 计算方法

采用八结点等参有限元法。结点数 1 859 个,单元数 1 410 个。

2.6 计算结查

以微新岩体为例, K_1 、 K_2 、 K_3 分别为 $6.3321\times 10^{-6}\text{ cm/s}$ 、 $6.0812\times 10^{-6}\text{ cm/s}$ 和 $5.8269\times 10^{-7}\text{ cm/s}$, 约为初始渗透张量的 0.2 倍。多种方案反求的结果也显示:主渗透系数的比值对渗透系数的反算影响不敏感;边坡出溢点位置变化对渗透系数的反算也不敏感;而山体排水洞中的渗流量对岩体等效渗透系数之反算影响则十分敏感。

3 结 语

岩体渗透系数是裂隙岩体渗流研究的核心问题之一,是岩体工程重要的内容之一。没有可靠的岩体渗透系数,很难进行山体排水机理的研究,更不能寻找出排水洞中排水孔的优化布设方向,这已是不争的事实。在裂隙岩体区,排水孔只有穿透渗透结构面才能汇集地下水而排汇。

由于同一钻孔可能会穿越不同的渗透结构面,在不考虑地下水的承压性时钻孔中只有在渗透结构面处才有地下水,因此,钻孔中的地下水位不仅没有反映各渗透结构面的水力梯度,反而使各渗透结构面处的地下水相连而使问题变得更为复杂,增大了岩体渗流研究的难度。本文运用极值控制法则可以比较客观地解决此问题,所得成果也就能客观地代表渗透结构面的渗透系数。由于所监测的渗透结构面隐含有受施工爆破卸荷等因素的影响,因此,根据渗透结构面求解的岩体初使渗透张量也比较客观地反映了施工影响区内岩体的渗透特性,渗透系数比影响微弱区的大 1 个数量级,这与国外的资料较为相近,例如瑞士 Stippe 工程二者相差 1~2 个数量级。而把岩体受施工及风化程度影响方面分区而提出的渗透系数反求法,显示了地下水渗流量对岩体渗透系数的敏感性,解决了在岩体工程施工过程中研究岩体渗透系数的难度。所得成果通过作者于 1996 年 4 月、6 月、8 月和 1997 年 8 月、10 月的现场复查也是比较一致的。三峡工程开发总公司永久船闸监理公司的冯兴常总工程师也认为由此方法获取的参数是比较客观的。

以岩体中的渗透结构面渗透系数的研究为基础,以渗流量为控制标准的等效渗透系数有限元求解法克服了施工岩石过程中渗透系数研究的难度。利用本文提出的研究方法所获得的研究成果通过与前期大量的现场三段压水试验、交叉孔压水试验成果在数量级上相一致,尤其在裂隙岩体区,吻合程度更高,误差在 $18\%\sim 20\%$;所显示的各向异性则更为明显, $K_1:K_2:K_3=11:10:1$ (文献[2]为 $K_1:K_2:K_3=4:3:1$),与现在的实际情况较为吻合。但是所需经费则不及现场测试的 1%,如果伴随工程的平硐地质勘测、地表槽勘、地下洞室开挖等则更为经济。因此,依据区域较为详细的渗透结构面资料,采用以地下水渗流量为敏感控制变量的有限元反求方法,对求解具有各向异性的裂隙岩体区的渗透张量不失一条经济而可靠的途径。

参考文献:

- [1] Hoek, E. T. and Brown, J. W.. 卢世宗等译. 岩石边坡工程[M]. 北京: 冶金出版社, 1983. 112~113
- [2] 陈洪凯. 裂隙岩体渗流研究现状分析(I)[J]. 重庆交通学院学报, 1996, 15(1): 55~60
- [3] 陈洪凯, 唐红梅. 三峡工程永久船闸边坡岩体卸荷特性[J]. 山地学报(原《山地研究》), 1997, 15(3): 183~186.
- [4] Elsworth, D., Doe, T. W. Application of Nonlinear Flow Laws in Determining Rock Fissure Geometry from Single Borehole Pumping Tests[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1986, 23, (3): 245~254
- [5] 陶同康. 充填裂隙水流特性研究. 水利水运科学[J], 1995, (1): 23~32
- [6] Franklin, J. A. et al. Rock Engineering[M]. SmeGraw—Hill Publishing Company, 1989. 85~122
- [7] George, G. H. and Hansen D.. Conversion between Quadratic and Power Law for Non-Darcy Flow[J], *J. Hydraul. Eng.*, 1992, 118, (5): 792~797
- [8] 哈秋聆, 陈洪凯. 岩石边坡地下水渗流及排水研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997, 60~72
- [9] 田开铭, 万力. 各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价[M]. 北京: 地质出版社, 1989, 5~13

PERMEABILITY TENSOR OF SLOPE ROCK MASS AT PERMANENT SHIPLOCKS IN THE THREE-GORGES PROJECT

CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei

(Inst. of Geotechnical Engineering, Chongqing University of Communications, Chongqing 400074 PRC)

Abstract: It is well known that permeability is a key problem in the course of seepage analysis to a domain. On the basis of observations in-situ at permanent shiplocks of the Three Gorges Project the authors develop a new method to solve rock mass seepage tensor in constructing in this paper. The method includes two steps, one is to solve initial seepage tensor using WCF (Water-Conduction Fracture), the other is to solve equivalent permeability tensor using FEM taking seepage flow as control variable based on initial seepage tensor. The method is effective in rock mass engineering in constructing such as the Three Gorges Project.

The method is founded on investigations in detail in-situ. WCF can be identified reasonably through observations in geologic prospect tunnel, drain tunnel and cutting surfaces. Any WCF has certain features such as aperture, length, permeability and frequency etc. We divide WCF at permanent shiplocks of the Three Gorges Project into 11 sets. *Permeability every set WCF is near 0.01 centimeter every second.* Due to constructing blast and rock unloading impact obviously on initial permeability tensor, ratio between equivalent permeability tensor and initial permeability tensor is only 0.2. In weak weathering area and beyond blast and unloading region $K_1:K_2:K_3=11:10:1$, therefore rock mass there are anisotropy, which have been verified through rock mass after cutting of shiplocks and tunnels.

Key words: The Three Gorges Project, permanent shiplocks, rock mass, water-conduction fracture(WCF), seepage flow, permeability tensor