

文章编号: 1000-7598-(2009) 增 1-0053-05

岩体裂隙网络非线性非立方渗流研究与应用

徐维生¹, 柴军瑞^{1, 2}, 陈兴周^{1, 3}, 孙旭曙¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048; 2. 三峡大学 土木水电学院, 宜昌 443002;
3. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 西安 710065)

摘 要: 裂隙岩体渗流与岩体其他分析密切相关。岩体裂隙网络渗流理论最初主要是建立在线性立方定律的基础上的, 当裂隙水头较大或者流速较大时, 裂隙水流不再满足线性立方定律, 此时如仍用线性立方水流分析, 无疑将会给渗流分析带来较大的误差, 甚至引起工程事故。当裂隙水流不满足线性立方定律时, 研究这种渗流自身的规律则是非常重要的, 也是必要的。通过研究裂隙网络稳定和非稳定情况下的非线性渗流、非立方渗流规律, 得出以下结论: ①当渗流规律偏离线性渗流较远时, 按非线性渗流计算出的水头分布和流量与线性渗流相差较大; 当偏离不远时, 计算出的水头分布和流量与线性渗流相差较小, 可近似简化为线性渗流分析; ②当渗流偏离立方渗流较远时, 按非立方渗流计算出的水头分布和流量与立方渗流相差较大; 当偏离不远时, 计算出的水头分布和流量与立方渗流相差较小, 可近似简化为立方渗流分析; ③对于非线性非立方渗流, 应综合考虑非线性与非立方两种因素对渗流的影响。

关 键 词: 裂隙网络岩体; 非线性; 非立方; 非稳定; 渗流

中图分类号: O 357

文献标识码: A

Study of nonlinear noncubic seepage in network rock and its application

XU Wei-sheng¹, CHAI Jun-rui^{1, 2}, CHEN Xing-zhou^{1, 3}, SUN Xu-shu¹

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. College of Civil & Hydroelectric Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. Northwest Investigation and Design Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract: Seepage analysis fractural rock mass has very close relation with other analyses of rock mass. Seepage theory of fractural network rock mass is based on linear cubic law. When the water head is very high or the fracture flux is very large, fracture stream doesn't abide by linear cubic law; if such seepage is still analyzed by using linear cubic law, it will bring great errors, even make engineering disaster. If the fluid in the fractures doesn't abide by the linear cubic law, the study for themselves' rules is very important and essential. The rules of nonlinear seepage and non-cubic seepage are reaeached; it is concluded that (1) if the seepage rule deflected the linear cubic law very much, there would exist great differences in water head and flux; if the seepage rule deflected the linear cubic law very little, the differences would also be very little, it can be simplified to linear cubic seepage; (2) if the seepage rule deflected the cubic-law very much, there would exist great differences in water head and flux; if the seepage rule deflected the cubic-law very little, the differences would also be very little, it can be simplified to cubic seepage; (3) for the nonlinear non-cubic seepage, both the nonlinear effect and the non-cubic effect should be taken into account.

Key words: rock mass of fracture network; nonlinearity; non-cube; unsteadiness; seepage

1 引 言

岩土体渗流一直是工程中的重点问题之一。渗

流力学是在多孔介质线性达西定律和裂隙线性立方定律基础上发展起来的, 但工程中很多渗流并不满足线性定律。文献[1]将渗流本构非线性问题分为

收稿日期: 2009-04-20

基金项目: 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目 (No.NCET-05-0679); 湖北省青年杰出人才基金项目 (No.2004ABB012); 三峡大学湖北省“楚天学者计划”特聘教授资助项目 (No.603108); 三峡大学科技创新团队资助项目 (No.603402)。

第一作者简介: 徐维生, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程、渗流力学方面研究。E-mail: wsxu1982@126.com

3 类: 多孔介质达西定律应用上限外的渗流、多孔介质达西定律应用下限外的渗流(低渗透介质非达西渗流), 岩体中单裂隙不满足线性立方定律的渗流(裂隙非线性渗流)。

多孔介质达西定律应用上限外的渗流研究得相对比较成熟。文献[2-9]分别研究了此种渗流判定方法、渗流本构关系以及计算方法: 渗流流态主要用临界雷诺数来判断, 渗流本构关系主要存在着指数型公式和多项式公式(Forchheimer 公式), 计算方法主要采用数值迭代计算方法。

多孔介质达西定律应用下限外的渗流, 主要是指存在着启动压力梯度的低渗透介质非达西渗流。对于黏土类低渗透多孔介质的水流问题, 不同的研究者曾得到不同的曲线^[10-11]。刘建军通过研究低渗透储层的规律给出了出现低渗透非达西渗流的临界条件^[12]。

目前, 对于连续介质渗流理论理论研究得比较成熟, 应用也比较广泛。但对于存在着大量裂隙, 水主要沿着裂隙流动的裂隙岩体渗流研究起步较晚, 对于裂隙非线性渗流则刚刚起步, 需要继续深入。

岩体裂隙网络渗流理论主要是建立在线性立方定律基础之上的。线性立方定律是指裂隙单宽流量与裂隙的宽度的立方成正比(立方流)、与水力坡降成正比(线性流)。然而工程中岩体裂隙网络渗流很多并不满足线性立方定律。因此, 研究岩体裂隙网络的渗流本构关系则显得非常重要且必要, 直接关系到渗流分析准确性。本文综合文献资料给出岩体裂隙网络非线性渗流和非立方渗流的概念: 岩体裂隙网络非线性渗流是指裂隙网络中单裂隙水流流速与水力坡降不成线性关系的渗流, 而非立方渗流是指裂隙网络单裂隙单宽流量与裂隙宽度的立方不成正比的渗流。分析这两种渗流的规律, 在此基础上, 结合实际坝基岩体裂隙网络分别研究岩体裂隙网络稳定、非稳定情况下的非线性渗流、非立方渗流的规律, 并与线性流、立方流做比较, 以求能为实际工程提供参考。

2 单裂隙非线性非立方渗流

岩石中实际裂隙的壁面是粗糙的, 若将由光滑平行板缝隙层流导出的立方定律用于实际裂隙, 则需对立方定律进行修正^[13-22]。有研究者通过试验得出单宽流量与平均隙宽的关系: 单宽流量 q 与水力

比降的 J^m 比值 q/J^m 与平均隙宽 $\bar{e}$ 一般存在如下幂函数关系^[23]:

$$\frac{q}{J^m} = C_q \bar{e}^n \quad (1)$$

式中: C_q 为拟合指数; n 大于 3 为超立方渗流, n 小于 3 为次立方渗流^[21, 24-25]。

综合单裂隙水流的公式, 可用下式表达^[1]:

$$q = \frac{g(b)^n}{12\nu\nabla} J^a \quad (2)$$

式中: q 为单宽流量; b 为平均隙宽; n 为试验参数; a 为裂隙渗流非线性系数, $1/2 \leq a \leq 1$; ν 为运动黏滞系数; ∇ 为修正系数。

2.1 非线性立方型单裂隙水流

非线性立方型单裂隙水流是指满足下式的水流:

$$q = \frac{g(b)^3}{12\nu\nabla} J^a \quad (3)$$

分析式(3)可得: 当单裂隙两端水头已知时, 非线性立方型单裂隙水流水头分布和线性立方水流水头分布相同; 但单宽流量明显不同, 当 $J > 1$, 非线性立方型水流单宽流量小于线性立方型水流单宽流量; 当 $J < 1$ 时, 非线性立方型水流单宽流量大于线性立方型水流单宽流量。

2.2 线性非立方型单裂隙水流

线性非立方型水流是指满足下式的水流:

$$q = \frac{\gamma(b)^n}{12\mu} J \quad (4)$$

分析式(4)可得: 当单裂隙两端水头已知时, 线性立方型水流和线性非立方型水流的水头分布相同; 但单宽流量明显不同, 线性超立方型水流单宽流量小于线性立方型单宽流量, 而线性次立方型水流单宽流量则大于线性立方型单宽流量^[1]。

3 二维裂隙网络非线性非立方渗流

3.1 二维裂隙网络稳定非线性非立方渗流分析

若渗流区域内有 N 个节点, 则裂隙网络水流程可写为

$$Aq + Q = 0 \quad (5)$$

式中: Q 为源汇项列阵, $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_N)^T$; $q = (q_1, q_2, \dots, q_M)^T$; $A = \{a_{ij}\}_{N \times M}$, 称为裂隙网络的

$N \times M$ 阶衔接矩阵, 它描述了裂隙网络系统中线元与节点的衔接关系, 该矩阵中的元素 a_{ij} 可表述为

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & j \text{ 线元不衔接于 } i \text{ 节点} \\ -1, & j \text{ 线元衔接于 } i \text{ 节点, 且指向离开 } i \text{ 点方向} \\ 1, & j \text{ 线元衔接于 } i \text{ 节点, 且指向 } i \text{ 点方向} \end{cases} \quad (6)$$

由裂隙渗流公式知, 第 j 线元的流量为

$$q_j = (K_f)_j h_j \left(\frac{\Delta H}{l_j} \right)^a = Tl_j (\Delta H)_j \quad (7)$$

$$\text{式中: } Tl_j = \frac{\gamma b_j^n}{12\mu} \left(\frac{\Delta H}{l_j} \right)^a h_j / l_j。$$

式 (7) 可写成矩阵形式:

$$q = TL \cdot \Delta H \quad (8)$$

式中: $q = (q_1, q_2, \dots, q_M)^T$; $\Delta H = (\Delta H_1, \Delta H_2, \dots, \Delta H_M)^T$; $TL = \text{diag}(Tl_1, Tl_2, \dots, Tl_M)$

式 (5) 是一个非线性方程组, 不能获得解析解, 必须通过迭代获得近似解^[1]。

3.2 二维裂隙网络非稳定非线性非立方渗流分析

非稳定非线性非立方渗流渗流方程式的矩阵形式为

$$Aq - A^*W + Q = -D \frac{dH}{dt} \quad (9)$$

式中: W 为裂隙线单元上垂直补给量的向量; D 为裂隙内贮水矩阵; A^* 为 A 的关联矩阵。

此方程组是非线性方程组, 对时间向量采取有限差分法离散向前推进求解。对某一时间段水头值, 则采取稳定渗流的迭代求解方法, 前一时间段水头值为后一时间段迭代求解的初始条件^[1]。

4 工程算例

某水利工程是混凝土重力坝, 坝高 100 m, 上游水位为 180 m, 下游为 100 m, 坝基为裂隙岩体地基, 有两组正交裂隙, 裂隙隙宽为 0.001 m, 动力黏滞系数为 0.001 568 kg·m/s。大坝坝身与地基裂隙网络图如图 1 所示。假定坝身不透水, 岩体也不透水, 水沿裂隙渗透, 图 1 中边界上只有 AB 、 EF 上的裂隙透水。取大坝坝基长度和深度为 240 m×80 m 为研究区域, 宽度取 1 m 进行分析。图 1 中数字代表裂隙网络的节点标号, 带下划线数字代表裂隙单元的标号。图中共有 61 个节点、80 个裂隙单元。

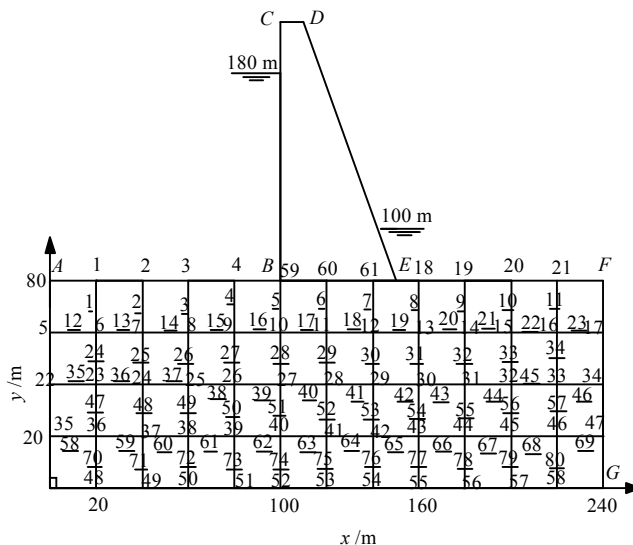


图 1 坝基裂隙网络图

Fig.1 Fractural network in dam base

4.1 稳定非线性立方渗流分析

由表 1 可以看出: 裂隙渗流非线性系数 a 越小, 最大相对水头差与相对总流量差与 $a=1$ 时相差越大; 当裂隙渗流非线性系数 a 接近 1 时, 可简化为线性渗流处理。

表 1 与 $a=1$ 相比, 不同 a 时最大相对水头差、总流量相对差

Table 1 Maximal relative water head difference and relative total flux difference between different values of a and $a=1$

a 值	与 $a=1$ 相比最大相对水头差	与 $a=1$ 相比相对总流量差
	/%	/%
0.5	10.45	82.97
0.7	5.01	32.73
0.9	1.15	10.74

4.2 稳定线性非立方渗流分析

表 2 可看出: n 越小, 裂隙的渗透系数越大, 总流量越大; n 越大, 裂隙渗透系数越小, 总流量越小。

4.3 非稳定线性非立方渗流分析

表 3、4 分别分析了 $n=3$ 时不同 t 、且裂隙渗流非线性系数 a 取不同值时与 $a=1$ 相比最大相对水头差、总流量相对差。

当上游水头下降时, 由表 3、4 可知:

(1) 对于裂隙非稳定非线性非立方渗流, 上下游水头差变小时, 按线性渗流计算和按非线性渗流计算的流量都下降, 同一时刻 a 取值不同, 水头分布和总流量相差较大。

表 2 不同 n 时单裂隙渗透系数与总流量Table 2 Single fracture hydraulic conductivity and total flux for different values of n

参数	$a=1$, n 取不同值时单裂隙渗透系数与总流量列表								
	2.5	2.7	2.9	2.95	3	3.05	3.1	3.3	3.5
单裂隙渗透系数 $/(\text{m/s})$	0.000 823 5	0.000 206 9	0.000 052	0.000 036 8	0.000 026	0.000 018 4	0.000 013 1	0.000 003 3	0.000 000 8
总流量 $/(\text{m}^3/\text{s})$	0.020 154 6	0.005 026 1	0.001 271 67	0.000 900 3	0.000 637 35	0.000 451 21	0.000 319 43	0.000 080 2	0.000 020 2

表 3 与 $a=1$ 相比不同 a 值不同时刻最大相对水头差 (单位: %)Table 3 Maximal relative water head difference between different values of a and $a=1$ at different times (unit: %)

a 值	t/h						
	0	1	10	20	30	40	50
0.50	5.80	6.16	6.16	4.20	3.74	3.31	2.54
0.60	4.33	4.54	4.54	2.89	2.39	1.67	1.62
0.90	0.74	0.89	0.89	0.71	0.59	0.34	0.26
0.95	0.35	0.41	0.41	0.34	0.29	0.24	0.13

表 4 与 $a=1$ 相比不同 a 值不同时刻总流量相对差 (单位: %)Table 4 Total flux relative difference between different values of a and $a=1$ at different times (unit: %)

a 值	t/h						
	0	1	10	20	30	40	50
0.50	86	93.14	99.26	93.14	154.60	208.30	322.70
0.60	64.21	66.21	75.03	90.92	113.70	150	226.70
0.90	12.94	14.83	15.47	18.15	21.68	26.94	37.07
0.95	6.17	6.53	7.53	8.79	10.43	12.88	17.56

(2) 上下游水位差越大, 按线性渗流和按非线性渗流计算的最大相对水头差越大。当 $J < 1$ 时, 按非线性流计算的流量大于按线性流计算的流量, 总流量相对差当水头差越小时反而越大。由此可见, 当水力坡降 J 很小时按非线性渗流计算不合理。

(3) 当 a 接近于 1 时, 水头分布与 $a=1$ 计算的水头分布接近, 流量相差稍大; 当 a 接近 0.5 时, 水头值与按线性渗流计算的水头值最大相对差较大, 总流量相差很大。

5 结 论

(1) 当渗流规律偏离线性渗流较远时, 按非线性渗流计算出的水头分布和流量与线性渗流相差较大; 当偏离不远时, 计算出的水头分布和流量与线性渗流相差较小, 可近似简化为线性渗流来分析。

(2) 当渗流渗流偏离立方渗流较远时, 按非立方渗流计算出的水头分布和流量与立方渗流相差较大; 当偏离不远时, 计算出的水头分布和流量与立方渗流相差较小, 可近似简化为立方渗流分析。

(3) 对于非线性非立方渗流, 应综合考虑非线性与非立方两种因素对渗流的影响。本文系统研究

了大坝坝基裂隙网络渗流的规律, 这对于准确分析大坝应力场、地震作用下的大坝稳定都很有作用。

参 考 文 献

- [1] 徐维生. 水利工程非达西渗流数值分析[硕士学位论文 D]. 宜昌: 三峡大学, 2008.
- [2] MOUTSOPOULOS K N. Approximate analytical solutions of the forchheimer equation[J]. *Journal of Hydrology*, 2005: 93—103.
- [3] 李顺才, 缪协兴, 陈占清. 破碎岩体非达西渗流的非线性动力学分析[J]. *煤炭学报*, 2005, 30(5): 557—561.
- [4] CHENG C Y. Non-Darcy natural convection heat and mass transfer from a vertical wavy surface in saturated porous media[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 182: 1488—1500.
- [5] HADIM H. Non-Darcy natural convection of a non-Newtonian fluid in a porous cavity[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2006, 33: 1179—1189.

- [6] ZENG Z W, GRIGG R. A criterion for non-darcy flow in porous media[J]. **Transport in Porous Media**, 2006, 63: 57—69.
- [7] RUDRAIAH N, VINAY C V. Frontogenesis in turbulent flow through porous media using non-linear Forchheimer equation[J]. **Internatinal Journal of Non-linear Mechanics**, 2007, 42: 422—431.
- [8] JAYANTHI S, KUMARI M. Effect of variable viscosity on non-Darcy free or mixed convection flow on a vertical surface in a non-Newtonian fluid saturated porous medium[J]. **Applied Mathematics and Computation**, 2007, 186: 1643—1659.
- [9] SULTANA Z, HYDER M N. Non-Darcy free convection inside a wavy enclosure[J]. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2007, 34: 136—146.
- [10] 田开铭. 开展对低渗透介质的水文地质学研究[J]. 水文地质与工程地质, 2000, 27(2): 27—28.
- [11] 徐维生, 柴军瑞, 王如宾, 等. 低渗透介质非达西渗流研究进展[J]. 勘查科学技术, 2007, (3): 20—23.
- [12] 刘建军, 刘先贵, 胡雅祯. 低渗透岩石非线性渗流规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 556—561.
- [13] LOMIZE G M. Flow in fractured rock (in Russian)[M]. Moscow: Gosemergoizdat, 1951: 127—129.
- [14] LOUIS C, MAINI Y N T. Determination of in situ hydraulic parameters in jointed rock[C]//Proceedings of 2nd Congress on International Society of Rock Mechanics. [S. l.]: [s. n.], 1970.
- [15] AMADEI B, ILLANGASEKARE T A. Mathematical model for flow and solute transport in nonhomogeneous rock fracture[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.**, 1994, 18: 719—731.
- [16] 王媛, 速宝玉. 单裂隙面渗流特性及等效水力隙宽[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 61—67.
- [17] 速宝玉, 詹美礼, 赵坚. 仿天然岩体裂隙渗流的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 19—24.
- [18] BARTON N, BANDIS S, BAKHTAR K. Strength deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.**, 1985, 22(3): 121—140.
- [19] 杜守继, 职洪涛, 周枝华. 岩石节理剪切过程中应力与渗流特性的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2473—2480.
- [20] DERSHOWITZ W S, FIDELIBUS C. Derivation of equivalent pipe network analogus for three-dimensional discrete fracture networks by the boundary element method[J]. **Water Resources Research**, 1999, 35(9): 2685—2691.
- [21] 许光祥, 张永兴, 哈秋龄. 粗糙裂隙渗流的超立方和次立方定律及其试验研究[J]. 水利学报, 2007, (3): 74—79.
- [22] 张有天. 岩体水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 41—43.
- [23] 许光祥, 哈秋龄, 杨斌. 裂隙岩体渗流与卸荷力学耦合作用及裂隙排水研究[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003: 76—78.
- [24] NEUZIL C E, TRACY J V. Flow through fractures[J]. **Water Resources Research**, 1981, 19: 185—193.
- [25] TSANG Y W. The effect of tortuosity on fluidflow through a single fracture[J]. **Water Resources Research**, 1984, 20(9): 1209—1221.