

文章编号: 0559-9350 (2002) 05-0037-04

三维离散裂隙网络渗流模型与实验模拟

王恩志¹, 孙 役², 黄远智¹, 王慧明¹

(1. 清华大学 水利水电工程系, 北京, 100084; 2. 湖北清江水电开发责任有限公司, 湖北宜昌, 443002)

摘 要: 本文根据天然裂隙系统发育规律及其渗透机制, 将复杂的裂隙系统划分成带状断层、面状裂缝和管状孔洞三大类型, 在忽略岩块渗透性的前提下, 建立了由管状线单元、缝状面单元和带状体单元组合而成的三维裂隙网络渗流数值模型, 为检验模型的合理性, 在室内利用混凝土试块制成的离散体来模拟三维裂隙网络结构, 设定不同的边界水位和降雨入渗对裂隙中渗流进行了实验, 利用数值模型对实验结果进行了模拟, 初步验证模型是合理而可靠的。

关键词: 裂隙网络; 渗流; 实验; 数值模拟

中图分类号: P641.135

文献标识码: A

自 Wittke 提出线索模型^[1,2]以来, 二维裂隙网络渗流模型有所发展^[3,4], 进入 20 世纪 80 年代后, Long 提出了圆盘裂隙网络三维渗流模型^[5], Dershowitz、万力等提出了多边形裂隙网络模型^[6,7], 这些模型可描述面状裂缝相互切割所构成的裂隙网络渗流。然而, 实际岩体中的裂隙系统并非都是由单一的面状裂缝所构成, 为此, 作者根据天然裂隙系统发育规律及其渗透机制, 将复杂的裂隙系统划分成三大类型, 在忽略岩块渗透性的前提下, 建立了由管状线单元、缝状面单元、带状体单元组合而成的三维裂隙网络渗流数值模型^[8]。为检验模型的合理性, 在室内利用混凝土试块制成的离散体来模拟三维裂隙网络结构, 设定不同的边界水位和降雨入渗对裂隙中渗流进行了实验。本文就三维裂隙网络渗流实验结果和理论模型的数值模拟对比进行了分析, 其结果初步表明理论模型是合理可行的。

1 三维裂隙网络渗流数值模型

复杂岩体中的裂隙网络可定义为由不同成因、不同力学属性、不同规模的管状、面状和带状结构体相互交错切割所构成的网络状系统^[8], 由管状结构的一维流、面状结构的二维流和带状结构的三维流在空间上组合, 形成了岩体中复杂的三维裂隙网络渗流。因此, 可按三种类型结构单元来建立三维裂隙网络渗流数值模型。

1.1 管状结构一维渗流方程 管状结构被其它裂隙切割后为一条线段, 以该线段作为线单元, 则一条管状结构可划分成数条线单元的组合。沿裂隙段方向建立局部的一维坐标系 (图 1 (a))。设裂隙段中的水流为层流, 线单元的渗流连续方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left(K_{x'} \frac{\partial H}{\partial x'} \right) + Q = \mu \frac{dH}{dt} \quad (1)$$

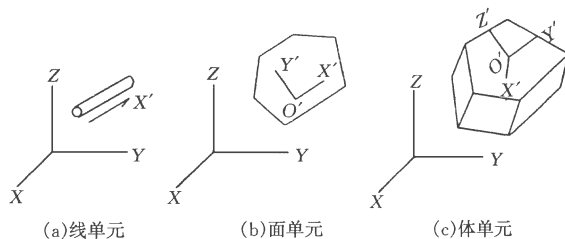


图 1 裂隙单元示意

收稿日期: 2001-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59479010; 40172084)

作者简介: 王恩志 (1958—), 男, 辽宁人, 博士, 副教授, 主要从事裂隙岩体渗流与地质工程的教学和研究工作。

1.2 面状裂隙二维渗流方程 面状裂缝类结构为典型的裂隙单元，被其它裂隙切割后，成为数个多边形裂缝（图 1 (b)），每个多边形裂缝在空间上表现为多边形面单元，按该单元所在的平面建立局部坐标系 $x'o'y'$ ，并取局部坐标轴方向与裂缝的渗透主轴方向一致，设裂隙中水流为层流时，则局部坐标系下的二维渗流连续方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x'}\left[K_x' \frac{\partial H}{\partial x'}\right] + \frac{\partial}{\partial y'}\left[K_y' \frac{\partial H}{\partial y'}\right] + Q = \mu \frac{dH}{dt} \tag{2}$$

1.3 带状结构三维渗流方程 带状断层类结构可分为构造岩带和影响带，被其它裂隙切割后，每个带就成为空间中的数个扁多面体（图 1 (c)），其内结构为碎裂岩块的集合体（挤压面属面状结构），从渗透介质的特征上属于多孔介质，则根据带状断层的结构特点，对每一个扁多面体可用连续介质方法来描述其中的渗流。因此，当选取的局部坐标系与带状断层的 3 个渗透主轴一致时，其渗流连续性方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x'}\left[K_x' \frac{\partial H}{\partial x'}\right] + \frac{\partial}{\partial y'}\left[K_y' \frac{\partial H}{\partial y'}\right] + \frac{\partial}{\partial z'}\left[K_z' \frac{\partial H}{\partial z'}\right] + Q = \mu \frac{dH}{dt} \tag{3}$$

式中： x' 、 y' 、 z' 为局部三维坐标系； K_x' 、 K_y' 、 K_z' 为 3 个主渗方向上的渗透系数； H 为水头函数； μ 为单位贮水率； Q 为源汇项； t 为时间变量。

1.4 裂隙网络三维渗流数值方程 将上述 3 种类型结构单元体进行离散化，对断层单元的任一扁多面体划分成数个四面体、五面体或六面体的组合，对裂缝单元的任一多边形划分成数个三角形或四边形的组合，对管状单元又可划分为数条线单元的组合。这样根据线单元、面单元、体单元在空间的组构关系，对各类单元统一编号，由于各种单元相交存在公共节点，则节点也实行统一编号，由上面的一维、二维和三维渗流方程，分别求得各类单元上的传导矩阵，然后，按单元的相互关系，对各节点上的单元传导矩阵进行迭加组合，形成总体传导矩阵，得到由多种裂隙单元构成的三维裂隙网络渗流数值模型：

$$\{T\}\{H\} + \{Q\} = \{E\}\left\{\frac{dH}{dt}\right\} \tag{4}$$

式中： $\{H\}$ 为节点水头列向量； $\{T\}$ 为总体传导矩阵； $\{E\}$ 为裂隙贮水矩阵； $\{Q\}$ 为补给和排泄列向量。

式（4）反映的介质结构为线单元、面单元和体单元的组合，其渗流是由一维流、二维流和三维流在空间上的组合，是由局部的连续介质渗流组合成的整体上的非连续介质渗流。

断层类结构按其性质将有不同的划分，张性断层、劈理带、岩脉等可划分成一个条带，压性断层可划分数个条带，中部挤压面则作为面状单元嵌入在体单元中。同样对于面状裂缝单元，当有管道流存在时，可将管道线单元嵌入在裂缝面单元中。阻水裂隙（如压性断层的挤压面及闭合裂隙）的存在往往会造成两侧水位相差悬殊的现象，如果仅将此类单元的渗透性置零是无法描述这种水位差现象的，而采用双重单元法则可解决这一问题，其方法是阻水裂隙分为两个侧面单元，其两侧的节点不相连，使两侧无水力联系，但在局部透水部位将两侧节点合二为一，形成水力联系。

2 三维裂隙网络渗流实验装置

三维正交裂隙网络渗流实验装置如图 2 所示，实验模型放置在扁长实验槽内，实验槽两侧为 5mm 厚的玻璃板，可用来对渗流浸润线进行观测。用混凝土试块模拟裂隙岩块，试块尺寸为 7.07cm×7.07cm×7.07 cm，考虑到实际工程中地表裂隙较为发育的特点，在顶部叠放两层 7.07cm×7.07cm×3.535 cm 的混凝土块，混凝土试块之间的裂隙互相连通，构成了三维正交裂隙网络。

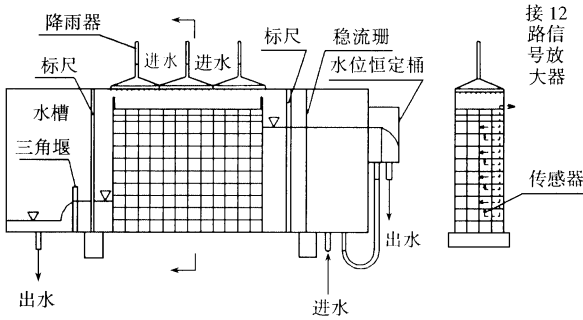


图 2 三维裂隙网络渗流实验装置

混凝土试块的堆砌沿实验槽横向布置 4 列、沿纵向布置 12 排、沿高度方向布置 11 层。这样，有水平缝（与 Z 坐标方向垂直），纵向缝（与 Y 坐标方向垂直），横向缝（与 X 坐标方向垂直），共有裂隙单元 1672 个。在堆砌混凝土试块过程中，用塞尺直接量出裂隙的机械隙宽。在实验模型内预埋了 12 支压力传感器，用以量测渗流水头值。在实验装置顶部设置了人工降雨器，用于模拟降雨入渗。实验中设计了不同的实验工况，上下游侧设置为定水位边界，其水位可根据实验要求而调整。

3 实验结果与数值模型模拟分析

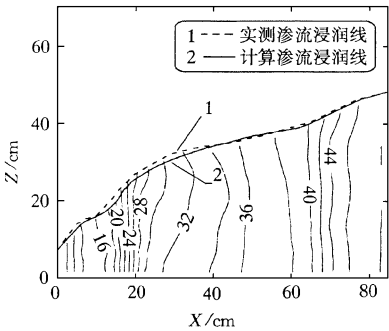
本次实验中的裂隙均为面状裂缝单元所组成，因此在三维裂隙网络渗流模型（4）中仅含有面状裂缝的多边形单元，每个多边形均为四边形。为能详细模拟渗流，将每个四边形单元再进一步划分成 4 个四边形单元，这样计算单元总数为 6688 个。

边界条件：沿纵向（ X ）上下游为定水头边界；两侧面（ Y 向）也是一条裂缝，则垂直侧面方向上的边界流量为零；底面仍为一条裂缝，也是零通量边界；顶部为降雨入渗边界。

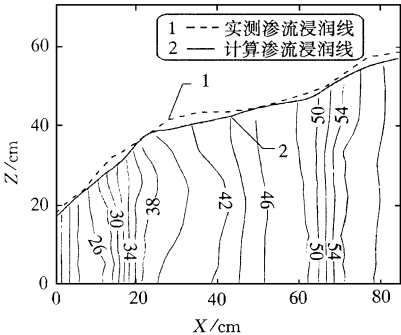
实验中，调整上、下游水位和降雨量，由压力传感器观测的内部节点水头值的变化，从实验槽两侧玻璃板可直接量测出浸润线高度。表 1 列出了上、下游水位分别为 48.30cm 和 7.0cm、无降雨情况下的水位值。改变边界水位和降雨条件，可得到相应的节点水头和浸润线（见图 3）。从渗流场的分布看，等水头线疏密不均，浸润线的坡降也变化较大，水头变化较大的部位都发生在 $X=20\text{cm}$ 和 $X=70\text{cm}$ 附近，说明这些部位的裂隙水力开度较小，造成了等水头线相对密集、水力梯度加大的现象，这也恰好反映了裂隙介质的非均匀性。在三维裂隙网络渗流数值模拟中，需确定出每条裂隙的水力开度，确定的依据是制作实验模型时所测定的每条裂缝的机械隙宽，以这些机械隙宽为初值，对数值模型中的水力开度值进行校正。从各裂隙机械隙宽的分布看，位于 $X=20\text{cm}$ 、 $X=70\text{cm}$ 附近各裂隙的机械隙宽普遍小于其它部位，校正后的水力开度也应如此，这样才能反映等水头线的疏密分布，也就是要保持机械隙宽与水力开度在分布上具有相似性。因此，对机械隙宽为初值的水力开度先进行等比例的分步缩小，使计算流量与实验测定流量接近、流场分布相似，再运用优化调参方法，以水头拟合误差最小为目标函数，对数值模型中的各裂隙水力开度值进行微量校正调整，以进一步提高渗流场的吻合程度，最后获得数值模拟的渗流场。图 4 为有降雨入渗工况的渗流场实验和模拟结果，仍具有等水头线疏密分布的特征。

表 1 压力传感器实测水头值与数值模型计算值对比

传感器编号	实测水头值 /cm	模拟水头值 /cm
1	7.07	7.07
2	15.17	15.43
3	21.21	19.88
4	28.28	27.46
5	31.56	32.16
6	33.04	33.06
7	37.06	36.84
8	38.50	37.17
9	41.00	42.29
10	43.00	42.36
11	47.48	47.57
12	18.30	48.30



($\nabla_{\text{上}}=48.3\text{cm}$, $\nabla_{\text{下}}=7.0\text{cm}$)
图 3 无降雨时渗流水头等值线剖面



($\nabla_{\text{上}}=58.8\text{cm}$, $\nabla_{\text{下}}=17.9\text{cm}$)
图 4 有降雨时渗流水头等值线剖面

通过对比, 实测渗流浸润线与数值模拟的浸润线吻合程度较好. 对于不同渗流工况, 三维裂隙网络渗流数值模型 (4) 都能够模拟出较为满意的结果, 说明该数值模型是合理的, 能较为详细描述裂隙系统中每一裂隙的渗流状况. 当然, 以上的结果是在实验条件下获得的, 实际应用中理论计算的精度不可避免地要受到天然裂隙系统的高度复杂性、裂隙水力参数以及边界条件的难以准确界定等因素的影响, 但实验结果无疑可以初步验证三维裂隙网络渗流数值模型的合理性.

4 结论

利用混凝土砌块来构筑裂隙网络, 通过压力传感器测量水头及直接观测浸润线, 来获得不同工况的渗流场分布状况, 把实验渗流场与数值模拟渗流场进行比较, 使理论模型与实验模型相统一. 经过设定不同的上下游水位、有无降雨等渗流工况, 对比实验和计算渗流场的结果, 可以说明三维裂隙网络渗流数值模型是合理的, 其计算精度令人满意.

参 考 文 献:

- [1] 切尔内绍夫. 水在裂隙网络中的运动 [M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [2] Louis C, Wittke W. Experimental study of water flow in jointed rock massif [J]. Tachien Project Formosa. Geotechnique, 1971, 21 (1): 29—35.
- [3] Wilson C R, Witherspoon P A. Steady state flow in rigid networks of fractures [J]. Water Resources Research, 1974, 10 (2): 328—339.
- [4] Wang Enzhi. A study on the models of the groundwater movement in fractured networks [C]. Modeling in Groundwater Resources, Proceedings of the International Conference on Modeling Groundwater Flow and Pollution, Nanjing University Press, China, 1991: 414—421.
- [5] Long C S, Gilmour P, Witherspoon P A. A model for steady fluid flow in random three-dimensional networks of disc-shaped fractures [J]. Water Resour. Res., 1985, 21 (8): 1105—11153.
- [6] Dershowitz W S, et al. A new three dimensional model for flow in fractured rock . Mem [J]. Int. Assoc. Hydrogeol., 1985, 17 (7): 441—448.
- [7] 万力, 李定方, 李吉庆. 三维裂隙网络的多边形单元渗流模型 [J]. 水利水运科学研究, 1993, (4): 347—353.
- [8] 王恩志, 王洪涛, 孙役. 三维裂隙网络渗流数值模型研究 [J]. 工程力学, 1997, 14 (增): 520—525.

3-D seepage flow model for discrete fracture network and verification experiment

WANG Enzhi¹, SUN Yi², HUANG Yuanzhi¹, WANG Hui-ming¹

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Hubei Qingjiang Hydroelectric Power Development Co., Ltd., Yichang 443002, China)

Abstract: The complicated fracture networks are divided into belt-shaped fault, plane-shaped fracture and pipe-shaped structure, and a 3-D seepage flow model consist of three types of fracture element is established. Experimental study is carried out in lab. to verify the reasonability of the model. The discrete rock blocks are modeled using concrete blocks. The seepage flow field obtained is in good agreement with the numerical simulation.

Key words: fracture network; seepage flow; experiment; numerical simulation