

## 裂隙岩体三维渗流网络饱和/非饱和、非恒定渗流分析

李海枫, 张国新, 杨波

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 采用离散裂隙网络模型研究裂隙岩体非饱和渗流问题, 能够比较真实地反映裂隙网络中的实际渗流状态。目前, 三维裂隙网络研究非饱和渗流存在2个关键问题, 即渗流网络构建问题和渗流网络网格剖分问题。针对这些问题, 通过改进现有三维块体切割算法、增加渗流面阻水特性判断等模块, 形成裂隙岩体三维渗流网络搜索算法, 为构建三维渗流网络奠定基础; 将这些裂隙面片视为限定条件, 利用限定Delaunay三角剖分技术就可解决因形态复杂而导致的网格难以剖分问题; 根据非饱和和渗透参数和饱和和渗透参数的关系函数, 利用伽辽金法建立裂隙网络饱和/非饱和非恒定渗流分析的有限元方程。经典型算例验证, 裂隙网络中水流流动方向符合实际的流动方向, 各测点达到稳态时水头计算值与实测水头值基本吻合, 误差最大不超过1.07%。这表明, 该方法不仅能够产生客观正确的渗流网络, 还能够产生合理的计算网格; 另外, 计算结果所反映的水流变化规律能够比较准确地再现裂隙网络中实际水流的流动趋势和运动规律。

**关键词:** 饱和/非饱和; 非恒定渗流; 渗流网络; 网格剖分

**中图分类号:** TU452

**文献标识码:** A

## 1 研究背景

近年来随着孔隙介质非饱和渗流和裂隙岩体饱和渗流理论的发展, 已越来越清楚地认识到雨季的岩坡滑坡、地下洞室巷道的塌方以及泄洪雾化雨导致岩质边坡的失稳等均与裂隙岩体非饱和渗流密切相关<sup>[1]</sup>。因此, 国内外已有不少学者相继从20世纪80年代中期开始对裂隙岩体非饱和渗流进行试验和理论研究, 主要工作有<sup>[2]</sup>: 对单裂隙非饱和渗流进行试验和理论研究, 主要集中在单裂隙非饱和和水力参数的测定和确定方面; 提出各种求解裂隙岩体非饱和渗流的数学模型并进行相应的数值分析。

目前, 用于求解裂隙岩体非饱和渗流场的数学模型<sup>[2]</sup>有4种: (1)等效连续介质模型; (2)离散裂隙网络模型; (3)双重介质模型; (4)离散介质连续介质耦合模型。其中, 裂隙网络渗流模型假定水只在裂隙(结构面)网络内流动, 体现了裂隙岩体渗流主要由裂隙发育控制的本质特性, 能比较真实地反映裂隙网络中的实际渗流状态<sup>[3]</sup>。采用裂隙网络研究裂隙岩体非饱和渗流问题存在两个关键问题<sup>[4]</sup>, 一是如何根据裂隙网络构建裂隙岩体的渗流通道; 二是对于裂隙面上的二维面状流, 如何计算任意性态区域的渗流问题。

针对这些问题, 作者通过改进现有三维块体切割算法、增加渗流面阻水特性判断等模块, 形成裂隙岩体三维渗流网络搜索算法, 为构建三维渗流网络奠定基础; 将这些裂隙面片视为限定条件, 利用限定Delaunay三角剖分技术就可解决因形态复杂而导致的网格难以剖分问题; 在此基础上根据张有天<sup>[5]</sup>等给出的非饱和和渗透参数和饱和和渗透参数的关系, 利用有限元方法来研究三维渗流网络的非饱和渗流问题。最后结合Grenoble<sup>[6]</sup>试验资料拟定的典型算例, 对裂隙岩体非恒定渗流分析的正确性

收稿日期: 2013-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(51109035, 51209235); 水利部公益性行业专项(201201050)

作者简介: 李海枫(1979-), 男, 河南杞县人, 工程师, 主要从事三维数值流形方法、岩体三维渗流网络及一般块体理论等方面的研究。E-mail: li\_hf@iwhr.com

进行验证。

## 2 岩体三维渗流网络建立及网格剖分

**2.1 渗流网络建立** 岩体渗流决定于结构面状态,但并非岩体中所有结构面都对岩体渗流起到作用,岩体中的裂隙网络并不能代替其渗流网络。每一个裂隙至少与一个其它裂隙或者边界相交割,或者至少与源汇项(如钻孔、排水管道等)相勾通,并且必须通过相互交割最终连通到边界或源汇项,才能够形成流路径<sup>[7]</sup>。因此,岩体渗流网络是由那些具有导水特性且处于裂隙网络连通位置上的裂隙组合而成的。

在二维渗流网络建立问题上,王恩志<sup>[8]</sup>将 Walter Wittke<sup>[9]</sup>的线素法发展成为图论法,莫海鸿等<sup>[10]</sup>采用拓扑学原理来解决这个问题,这些方法从块体识别角度来看,均属于二维块体切割问题,即裂隙相互交割形成裂隙段,能够形成完整块体的裂隙段集合便构成了渗流网络。这个研究思路可以推广至三维渗流网络问题上,对于三维问题,块体切割技术已经发展比较成熟<sup>[11]</sup>。空间上,结构面相互切割形成三种类型裂隙面片,即块体边界型裂隙面片、终端型裂隙面片及孤立型裂隙面片。其中,后两种裂隙面片分别对应于渗流网络中的死水末端和孤立裂隙,经进一步块体搜索便生成三维块体,同时也产生了渗流网络。需要说明的是,现有三维块体切割技术不允许具有复连通域性质块体存在,因此,逾渗理论中的孤立网络簇在块体搜索中是直接删除的。

在形成渗流网络之后,必须检查每个渗流面的导水特性。这是由于在天然条件下,渗流网络是由导水裂隙和阻水裂隙的交错配置所构成,阻水裂隙的存在,造成地下水流的不连续性。虽然阻水结构面的出现,没有改变结构面间的几何连接关系,但是改变了相关结构面间和块体间的水力联系。因此,有必要对形成的渗流网络进行相应调整。目前,二维领域处理这个问题比较成熟办法是王恩志提出的分离法<sup>[8]</sup>,这里可以将其扩展到三维领域,即对于导水裂隙按单向面处理,而阻水裂隙按双向面处理,并根据上下盘的关系,搜索其连接的渗流面。

根据以上分析,提出岩体三维渗流网络搜索算法<sup>[12]</sup>,具体流程见图1。

**2.2 三维裂隙网络的网格剖分** 由前面可知,经搜索形成的裂隙岩体三维渗流网络是由裂隙面片组成的空间结构体。这些裂隙面片可能为凸形或凹形、单连通或复连通,形态比较复杂,给有限元网格划分带来非常大的困难。如果将这些裂隙面片视为限定条件,利用限定 Delaunay 三角剖分技术<sup>[13]</sup>就可解决因形态复杂而导致的网格难以剖分问题。

若采用二维限定 Delaunay 三角剖分技术进行网格剖分,就是对裂隙面片逐个进行限定 Delaunay 三角剖分,并不断地更新交叉线段的几何和拓扑信息,确保交叉线段上节点的协调。具体实现过程如下:(1)将形成的裂隙网络以每个裂隙面片为单位,输出成 PSLG 格式;(2)选取其中任意一裂隙面片,建立其局部坐标系并进行坐标转换,将限定点和限定线段的坐标由三维转换为二维,而后利用二维限定 Delaunay 剖分技术进行网格剖分,形成有限元网格;同时需更新此裂隙面片边界线段的几何和拓扑信息;(3)根据裂隙面片之间的交叉线段,确定下一个裂隙面片,重复步骤(2)的过程,进行网格剖分,直至所有裂隙面片均被剖分。

若采用三维限定 Delaunay 三角剖分技术进行网格剖分,就是将形成的裂隙网络视为一个结构体,所有面片(包括边界面)及其棱边和顶点视为限定面、限定线段和限定点,直接采用三维限定 Delaunay 三角剖分技术进行剖分,经检索即可得到所需的网格。具体实现过程如下:(1)将三维裂隙网络输出成分段线性复合形 PLC 格式;(2)利用三维限定 Delaunay 三角剖分技术进行网格剖分;(3)从形成网格中提取隶属于裂隙面片的网格,便可形成渗流分析所需要的有限元网格。

采用二维限定 Delaunay 三角剖分需不断地更新相交棱边的几何和拓扑信息,并且初始裂隙面片选取对最终的裂隙网络影响比较大,单元形态难以控制;而采用三维限定 Delaunay 剖分是将所有裂隙面片统一进行处理,单元形态较易控制并且实现起来比较容易。因此,采用三维限定 Delaunay 三角剖分技术来进行三维渗流网络的网格剖分。

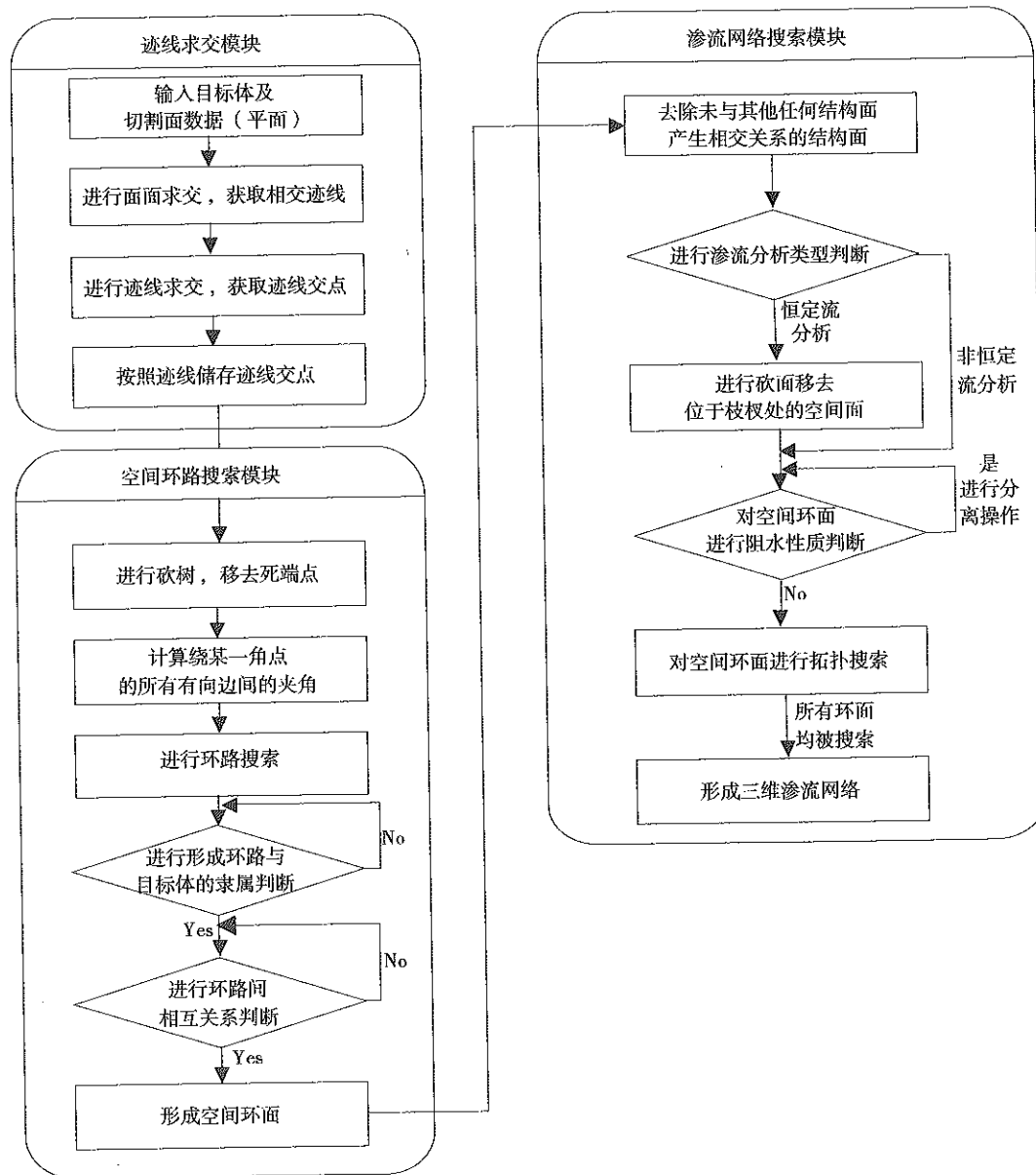


图1 三维渗流网络搜索流程图

Tetgen<sup>[4]</sup>是德国科学家 Hang Si 博士开发的一款基于三维限定 Delaunay 三角剖分技术的网格剖分程序，可用于任意多面体的四面体网格生成，输入文件为 PLC 格式并且是开源代码。为此，本文编制裂隙岩体三维渗流网络搜索程序与 Tetgen 的数据接口来生成 PLC 格式文件，通过调用 Tetgen 来形成三维裂隙网络有限元网格，对形成的 \*.face 文件进行检索，搜索出隶属裂隙面片的有限元网格，即可得到计算所需的网格。

### 3 裂隙网络饱和/非饱和、非恒定水力学有限元法<sup>[5]</sup>

假设水流在裂隙面所在的局部坐标系统中为平面二维非稳定流，裂隙壁是隔水的，裂隙通过与其它裂隙的交叉实现相互间的水量交换，各个裂隙面的平面二维流在研究域裂隙网络的空间坐标系下组合成三维裂隙网络渗流体。根据达西定律与水量平衡方程可推导出控制方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left( k_v \frac{\partial h}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y_1} \left( k_v \frac{\partial h}{\partial y_1} \right) \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中： $\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial h_c} \frac{\partial h}{\partial t}$ ；对非饱和流而言， $\frac{\partial S}{\partial h} = \frac{\partial S}{\partial h_c} = \eta \alpha h_c^{(\alpha-1)} e^{-\eta h_c}$ 。

式(1)为裂隙网络饱和/非饱和、非恒定水力学控制方程。

引入权函数  $w_i$ , 由伽辽金法可建立裂隙网络饱和/非饱和非恒定水力学有限元方法。可得如下代数方程组:

$$\sum_e \left\{ [A]^e \{h\}^e - [B]^e \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\}^e \right\} - \sum_e \{q\}^e = 0 \quad (2)$$

式中:  $A_{ij}^e = k_{ue} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left( \frac{\partial N_j}{\partial x_1} \frac{\partial N_i}{\partial x_1} + \frac{\partial N_j}{\partial y_1} \frac{\partial N_i}{\partial y_1} \right) J d\zeta d\eta$ ;  $B_{ij}^e = \gamma f_2 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 N_j N_i J d\zeta d\eta$ , 其中,  $f_2 = \frac{\partial s}{\partial h_c} = \eta \alpha h_c^{(\alpha-1)} e^{-\eta h_c^\alpha}$ ,  $k_{ue}$  为非饱和渗透系数;  $\gamma$  为水压;  $\eta$ 、 $\alpha$  为参数;  $h_c$  为水头。

#### 4 算例

根据以上提出的算法, 利用 Fortran90 语言编制裂隙岩体三维渗流网络搜索及饱和/非饱和、非恒定流分析程序 3D-Network-Seepage.f90, 用于裂隙岩体三维渗流网络构建与饱和/非饱和、非恒定渗流计算分析。本文采用 Y. I. Kim 等<sup>[15-16]</sup>拟定的典型算例, 验证该程序的正确性。Grenoble 建立一个物理试验模型来模拟裂隙内水的流动问题, 即通过在 60.96cm×45.72cm×2.54cm (长×高×厚) 树脂玻璃板上锯出 19 条深 12.7mm、宽 0.508mm 的槽沟形成裂隙网络, 并在玻璃板两侧施加不同水头值, 以获取系统达到平衡后各测点水头值来研究裂隙网络渗流问题<sup>[5]</sup>。树脂玻璃单位重度为 11.7kN/m<sup>3</sup>, 杨氏模量为 3.1 GPa, 泊松比为 0.35。同时, 假定沟槽的内摩擦力或黏聚力为 0, 水的动力黏滞系数为 1.005×10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s。Grenoble 试验示意图如图 2 所示, 试验工况见表 1。

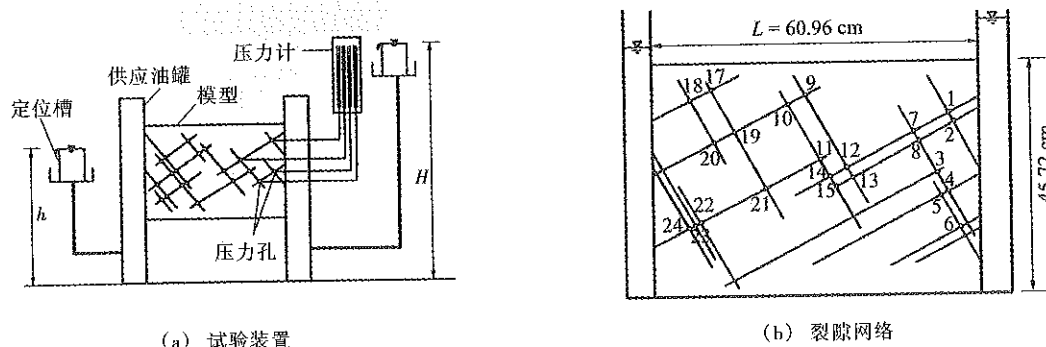


图 2 Grenoble 试验示意图

表 1 试验工况

| 试验序号  | H/cm   | h/cm  | Δh/cm  | L/cm  | Δh/L |
|-------|--------|-------|--------|-------|------|
| T1-5  | 80.52  | 71.76 | 8.76   | 60.96 | 0.14 |
| T1-6  | 97.28  | 71.37 | 25.91  | 60.96 | 0.42 |
| T1-7  | 115.70 | 71.37 | 44.33  | 60.96 | 0.73 |
| T1-8  | 134.37 | 71.37 | 63.00  | 60.96 | 1.03 |
| T1-9  | 151.38 | 72.01 | 79.37  | 60.96 | 1.30 |
| T1-10 | 227.20 | 54.36 | 172.84 | 60.96 | 2.84 |

**4.1 渗流网络分析及网格剖分** 经过块体切割, 这 19 条裂隙共形成裂隙面片 79 个, 具体见图 3。其中, 边界型裂隙面片 53 个(绿色标记), 终端型裂隙面片 26 个(红色标记), 不存在孤立型裂隙面片。删除孤立型裂隙面片并对形成的渗流面片进行阻水特性判断后, 便形成非恒定流分析所需的渗流网络。采用三维限制 Delauney 三角形剖分技术进行网格剖分, 便形成非恒定流分析所需的有限元模型, 见图 4。其中形成单元 693 个, 节点 646 个。

**4.2 饱和/非饱和、非恒定流分析** 本文选取 T1-5 组试验结果进行验证, 即边界条件为  $h=71.76$ cm,

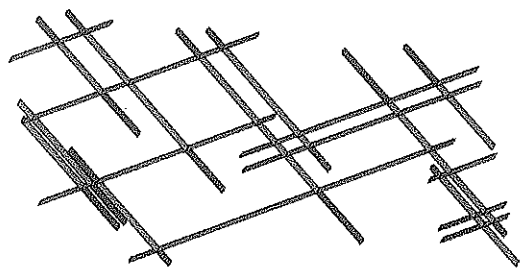


图3 切割后形成的裂隙面片

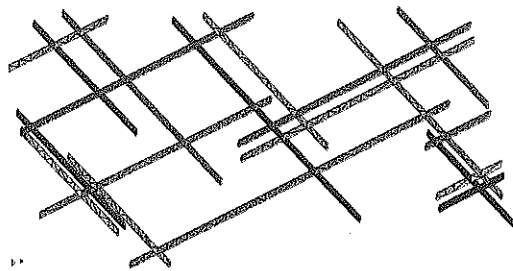


图4 渗流网络有限元模型

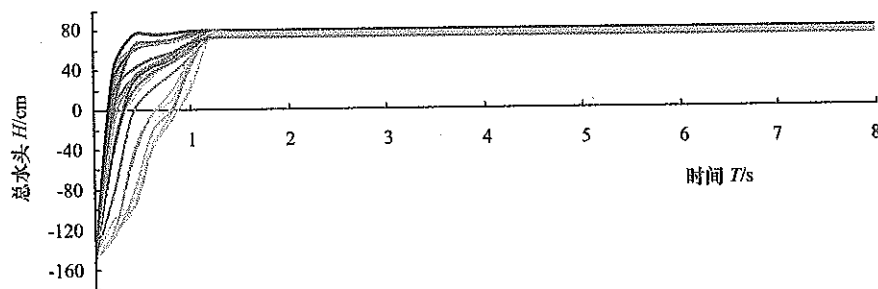


图5 各测点总水头变化时间历程曲线

$H=80.52\text{cm}$ ; 初始条件为裂隙网络内无水, 可取一负压值表示, 现取  $p/\gamma = -1.5\text{m}$ ; 时间步长  $\Delta t$  取  $0.2\text{s}$ , 共计算 40 个时步。具体分析结果如下:

(1) 总水头分析。由各测点总水头变化时间历程曲线(图5)可知, 各测点的总水头由负压值逐渐变化为正压值, 在  $t=1.2\text{s}$  以后达到稳定状态, 不再变化。达到恒定状态时的总水头分布情况可参见图6。

由表2可知, 在达到恒定状态时计算水头值与实测值是基本吻合的, 且两者之间的误差最大不超过  $1.07\%$ , 这表明此程序能够产生客观正确的渗流网络, 并且能够准确地反映裂隙网络中实际水流的运动规律。

(2) 压力水头分析。图7—10为裂隙网络中各时步的压力水头分布云图, 裂隙网络中无彩色云图区域为负压区, 即无水区。由图7—10可知, 裂隙网络各节点的渗流状态由非饱和状态逐步转变为饱和状态, 即由无水区变成有水区; 并且在  $t=1.2\text{s}$  时全部达到饱和状态; 水流的流动方向由左右两侧分别向网络中心区域行进, 通过交叉型节点依次流向各无水区域、死水末端等, 最终充填整个裂隙网络, 使其达到饱和状态。云图所反映的水流变化规律能够比较准确地再现裂隙网络中实际水流的流动趋势和运动规律。

## 5 结论

本文系统研究了离散裂隙网络模型研究裂隙岩体非饱和渗流的几个关键问题。对于渗流网络构建问题, 通过改进现有三维块体切割算法、增加渗流面阻水特性判断等模块, 形成裂隙岩体三维渗流网络搜索算法, 为构建三维渗流网络奠定基础; 将这些裂隙面片视为限定条件, 利用限定 Delaunay 三角剖分技术就可解决因形态复杂而导致的网格难以剖分问题; 根据张有天<sup>[4]</sup>提出的非饱和渗透参数和饱和渗透参数的关系, 利用伽辽金法建立裂隙网络饱和/非饱和、非恒定渗流分析的有限元方程。

经典型算例验证, 裂隙网络中水流流动方向符合实际的流动方向, 流向通过交叉点依次流向各

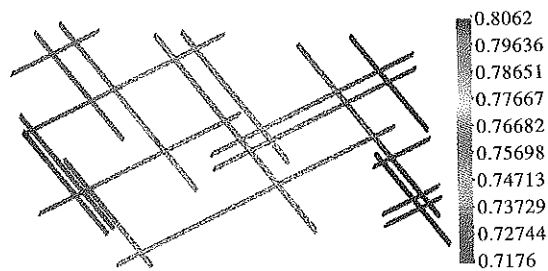


图6 裂隙网络中总水头分布云图(达到稳态时)

表2 恒定实验结果与非恒定计算结果对比表

| 测点号 | 第1步( $t=0.2s$ , 非恒定) | 第5步( $t=1.0s$ , 非恒定) | 第6步( $t=1.2s$ , 恒定) |         | 误差/%  |
|-----|----------------------|----------------------|---------------------|---------|-------|
|     | 计算结果/cm              | 计算结果/cm              | 恒定状态结果(实验)/cm       | 计算结果/cm |       |
| 1   | 28.85                | 75.79                | 79.88               | 80.04   | 0.20  |
| 2   | 40.14                | 76.36                | 79.88               | 80.11   | 0.29  |
| 3   | -31.98               | 71.56                | 79.25               | 79.39   | 0.18  |
| 4   | 16.13                | 76.77                | 79.88               | 80.10   | 0.28  |
| 5   | 0.79                 | 77.26                | 80.01               | 80.16   | 0.19  |
| 6   | 40.23                | 79.48                | 80.26               | 80.46   | 0.25  |
| 7   | -39.02               | 67.81                | 78.99               | 79.10   | 0.14  |
| 8   | -35.91               | 68.44                | 78.99               | 79.15   | 0.20  |
| 9   | -110.68              | 22.27                | 74.8                | 75.60   | 1.07  |
| 10  | -111.32              | 28.77                | 75.31               | 75.23   | -0.11 |
| 11  | -122.22              | 43.30                | 75.95               | 75.92   | -0.04 |
| 12  | -118.84              | 49.52                | 76.96               | 77.10   | 0.18  |
| 13  | -119.50              | 51.77                | 76.96               | 77.23   | 0.35  |
| 14  | -123.76              | 48.52                | 76.45               | 76.69   | 0.31  |
| 15  | -125.26              | 51.10                | 76.58               | 76.91   | 0.43  |
| 17  | -35.36               | 60.12                | 72.77               | 72.89   | 0.16  |
| 18  | 0.75                 | 63.20                | 72.39               | 72.59   | 0.28  |
| 19  | -83.10               | 53.31                | 73.53               | 73.53   | 0.00  |
| 20  | -37.93               | 59.35                | 72.9                | 72.96   | 0.08  |
| 21  | -118.13              | 53.27                | 74.04               | 74.21   | 0.23  |
| 22  | -31.34               | 65.86                | 72.52               | 72.83   | 0.43  |
| 23  | -10.92               | 67.00                | 72.26               | 72.62   | 0.50  |
| 24  | 16.85                | 68.13                | 71.88               | 72.41   | 0.74  |

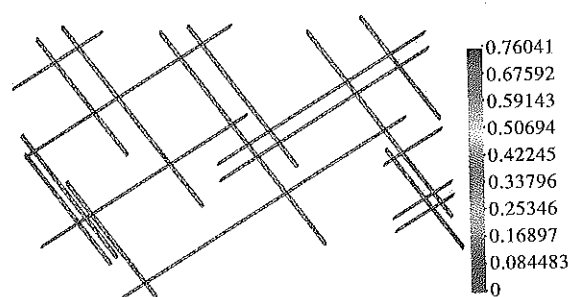


图7  $T=0.2s$ 时的压力水头分布云图

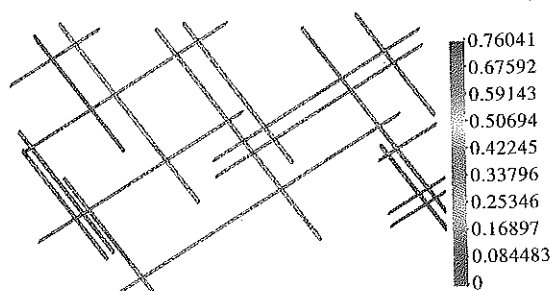


图8  $T=0.6s$ 时的压力水头分布云图

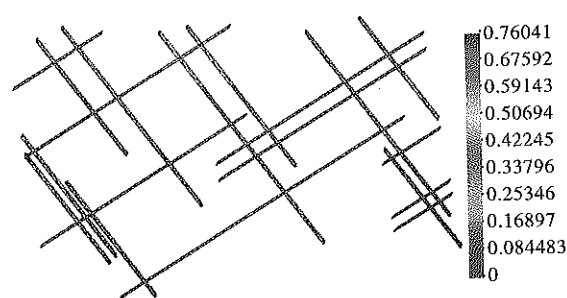


图9  $T=1.0s$ 时的压力水头分布云图

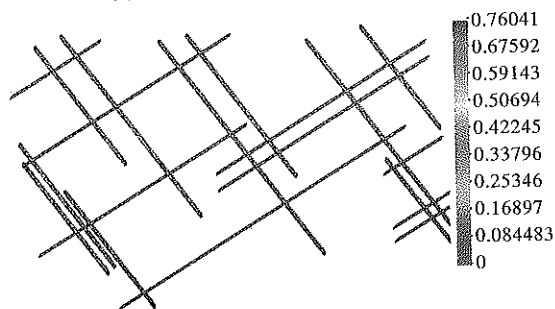


图10  $T=1.2s$ 时的压力水头分布云图

无水区域、死水末端等，最终充填整个裂隙网络，状态由非饱和转变为饱和；各测点达到稳态时水头计算值与实测值基本吻合，误差最大不超过1.07%。这说明，该方法不仅能够产生客观正确的渗流网络，还能够产生合理的计算网络；另外，计算结果反映的水流变化规律能够比较准确地再现裂隙网络中实际水流的流动趋势和运动规律。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 张有天, 刘中. 降雨过程裂隙网络饱和/非饱和、非恒定渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 103-111.
- [ 2 ] 胡云进, 速宝玉, 詹美礼. 裂隙岩体非饱和渗流研究综述[J]. 河海大学学报, 2000, 28(1): 40-46.
- [ 3 ] 谭春, 陈剑平, 等. 基于三维裂隙网络模拟和灰色理论的岩体表征单元体研究[J]. 水利学报, 2012, 43(6): 709-716.
- [ 4 ] 张奇华, 邬爱清. 三维任意裂隙网络渗流模型及其解法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 720-730.
- [ 5 ] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [ 6 ] Grenoble B A. Influence of geology on seepage and uplift in concrete gravity dam foundations[D]. Boulder, USA: University of Colorado, 1989.
- [ 7 ] 王洪涛, 王恩志. 岩体主干裂隙系统三维非稳定渗流分析模型[J]. 水动力学研究与进展, 1998, 13(2): 206-213.
- [ 8 ] 王恩志. 裂隙网络地下水数值模型及非连通裂隙网络水流的研究[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(1): 12-14.
- [ 9 ] 韦德卡. 岩石力学[M]. 曾国熙译. 杭州: 浙江大学出版社, 1994.
- [ 10 ] 莫海鸿, 林德璋. 裂隙介质网络水流模型的拓扑研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 97-103.
- [ 11 ] Jing L, Stephansson O. Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory and Application. Development in Geotechnical Engineering, 85[M]. Oxford, Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2007.
- [ 12 ] 李海枫, 张国新, 朱银邦. 裂隙岩体三维渗流网络搜索及稳定渗流场分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增2): 3447-3454.
- [ 13 ] 杨钦. 限定Delaunay三角网格剖分技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [ 14 ] H Si. TetGen. <http://tetgen.berlios.de>, 2007.
- [ 15 ] Kim Y I, Amadei B, Pen E. Modeling the effect of water, excavation sequence and rock reinforcement with discontinuous deformation analysis[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abs. 1999, 36: 949-970.
- [ 16 ] 张国新, 武晓峰. 裂隙渗流对岩石边坡稳定的影响—渗流、变形耦合的DDA法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1269-1275.

### Saturated/unsaturated, unsteady seepage analysis of three dimensional network in the fractured rock mass

LI Hai-feng, ZHANG Guo-xin, YANG Bo

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Unsaturated seepage in fractured rock is common in nature, which can be studied by a discrete fracture network model, reflecting the actual flow state in fracture network. Currently, there are two key issues in the research on unsaturated seepage in fractured rock, namely, the generation of seepage network and mesh generation of seepage network. To these problems, three-dimensional fractured rock flow network search algorithm was formed by improving the existing three-dimensional block cutting algorithm and increasing the judgment of waterproof properties of fracture, etc. The problem of mesh generation caused by irregular fracture was solved by constraining Delaunay triangulation technique, in which these fractures are seen as restrained conditions. Then based on the relationship function between unsaturated seepage parameter and unsaturated seepage by Prof. Zhang, the finite element equation was established by Galerkin method on saturated/unsaturated unsteady seepage analysis of fractured rock network. It was proved that the direction of water flow in fracture network was in accordance with realistic flow direction, and the calculated values of measuring point head water was in well keeping with measured values in steady state, with the maximum error less than 1.07%, which shows that the method could not only produce objective and accurate percolation network, but also could generate a reasonable computational mesh; and the calculations reflecting the changes of water flow could accurately reproduce the actual fracture network trends in water flow and movement rules.

**Key words:** Saturated/unsaturated; unsteady seepage; seepage network; mesh generation

(责任编辑: 李琳)