

文章编号: 1000-7598 (2012) 12-3680-09

Reynolds 控制方程下粗糙节理渗流空腔模型研究

肖维民^{1,2}, 夏才初^{1,2}, 王 伟³, 卞跃威^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 上海市闵行区建设工程安全质量监督站, 上海 201100)

摘 要: 在研究节理的渗流时, 渗流控制方程对节理渗流分析结果具有显著影响。首先介绍了节理渗流分析中的控制方程: Navier-Stokes 方程、Stokes 方程、Reynolds 方程和立方定律, 并分析了各控制方程在节理渗流分析中的适用性。以 Reynolds 方程作为渗流分析控制方程, 建立了粗糙节理渗流空腔模型。然后以节理试件为研究对象, 在实测节理三维表面形貌并计算隙宽分布后, 分别进行相同渗流边界条件下的室内渗流试验和空腔模型计算, 得到节理在不同接触状态下的渗流量实测值和计算值, 并分别将计算结果与立方定律下的空腔模型、将整个节理简化为光滑平行板模型的立方定律以及速宝玉经验公式的计算结果进行比较, 结果表明, Reynolds 方程下的节理渗流空腔模型计算结果与实测值最为吻合, 可以较为准确地反映节理的渗流情况。同时, 根据 Reynolds 方程下空腔模型得到的渗流流量分布可以呈现节理渗流的曲折现象, 为从本质上研究节理渗流特性奠定了理论基础。

关 键 词: 岩石力学; 粗糙节理; 控制方程; Reynolds 方程; 空腔模型
中图分类号: TU 46+2 **文献标识码:** A

Study of void model for fluid flow through rough joints —taking Reynolds equation as governing equation

XIAO Wei-min^{1,2}, XIA Cai-chu^{1,2}, WANG Wei³, BIAN Yue-wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Minhang Sub-station, Construction Safety and Quality Supervision Station, Shanghai 201100, China)

Abstract: Governing equation has significant effects on the results of fluid flow through rough joint. In order to investigate flow through a rough joint, Navier-Stokes equation, Stokes equation, Reynolds equation and cubic law, which are commonly used in analyses of flow through a rough joint, are firstly introduced and their applicability are evaluated. And Reynolds equation is chosen as the governing equation, a void model is established to analyze fluid flow through a rough joint. Then taking artificial rock joints as objects, laboratory flow tests are first performed and the flow rates through joint derived from void model under the same boundary conditions are also predicted after obtaining the joint aperture distributions. Three other models including void model taking cubic law as governing equation, Cubic law referred to the whole joint surface and Su B.Y. empirical modified cubic law are also applied to predict the volumetric flow rates through joint samples. The predictions of four models are compared with experimental observations. It is found from the comparisons that flow rates derived from void model based on Reynolds equation agree well with experimental observations; while the predictions of other three models have large discrepancy from experimental observations. According to the comparison, Reynolds equation is able to predict flow rates through rough joint exactly. In addition, tortuosity phenomenon of flow through joints can also be derived from the distributions of volumetric flow rates vectors, which provides a theoretical basis for investigating the influences of tortuosity on flow rates in a rough joint.

Key words: rock mechanics; rough rock joint; governing equation; Reynolds equation; void model

1 引 言

在长期的地质作用过程中, 岩体中普遍存在各

种不同尺寸大小的节理, 节理是各种流体在岩体中流动的主要通道, 对地下水流动、油气和矿物颗粒的迁移起着主要的控制作用, 因而, 关于流体在节

收稿日期: 2011-08-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.40972178, No. 51278378)。

第一作者简介: 肖维民, 男, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事工程岩体节理力学、地下结构和边坡工程防治方面的研究工作。E-mail: tjxwm83@163.com

理中的渗流是近年来岩体渗流分析的热点问题之一。近 30 年以来已有许多研究人员对单节理的渗流开展了广泛的研究。

在最初的研究中,节理中的流体渗流一般都简化为光滑平行板间的流体流动,因而,节理的渗流可以按立方定理(Cubic law)进行计算^[1],即:通过节理断面的渗流体积流量与节理平均隙宽值的 3 次方成正比。但通过试验研究发现:采用立方定理计算节理的渗流体积流量在很大程度上会高估节理的过流能力。产生这种偏差的原因是天然岩石节理的表面都是粗糙的,这使得节理中的隙宽分布是变化的,与等隙宽平行板模型完全不同,因而,在此立方定理将不再适用。但由于立方定理的计算公式简单明了、物理概念清晰,在工程中具有较高的实用价值。为了使立方定理也能用于粗糙节理的渗流计算,许多研究学者诸如 Lomize^[2]、Louis^[3-4]、Amadei 等^[5]和速宝玉等^[6],从不同角度考虑节理面粗糙程度对节理过流能力的影响,在立方定理中引入粗糙度修正系数,得到了能用于粗糙节理渗流计算的立方定理修正经验公式。在上述对立方定理进行粗糙度修正的研究成果中,粗糙度修正系数是与节理平均隙宽 b 和节理表面凸起绝对高度 Δ 有关的物理量,其目的是将隙宽分布不均匀的节理简化为等隙宽的平行板模型,以满足立方定理的计算条件。由于这些修正立方定理都是基于渗流试验结果的经验公式,缺乏对粗糙节理中的渗流机制进行理论探讨,因而,它们都不具有普适性,在实际工程应用中都存在过高或过低地估计节理渗流体积流量的不足。因此,要对立方定理进行修正以消除这种计算偏差,首先就必须从理论角度分析节理的渗流情况。

从立方定理可以看出,隙宽对节理的渗流有着至关重要的影响,因此,在节理渗流的理论分析时,隙宽分布的处理就显得十分重要。分析天然节理中的复杂渗流时常用的控制方程有 Navier-Stokes 方程^[7](简称为 N-S 方程)、Stokes 方程^[8-9]、Reynolds 方程^[10-11]和立方定理,其中后 3 组控制方程都可以在 N-S 方程的基础上简化得到。在这 4 组控制方程中,N-S 方程和 Stokes 方程由于数学形式复杂,在隙宽分布十分复杂的情况下很难求解;立方定理则不考虑隙宽的变化;而 Reynolds 方程在数学形式上较为简单,且能较好地考虑隙宽分布不均匀性,因而,其在节理渗流的分析有独特的优势。许多学者如 Nicholl 等^[12]、Yeo^[13]和 Brown 等^[11, 14]等都采用 Reynolds 方程作为控制方程对粗糙节理中的渗流进行模拟。限于当时的试验条件和节理形貌量测技术,

模拟时所采用的节理形貌均假定为分形模型而不是实测形貌,这与实际的节理面有一定的差异,同时也缺乏室内试验实测数据的验证。另外,由于 Reynolds 方程是由 N-S 方程简化得到的,在简化的过程中有很多假设条件,因此,Reynolds 方程也有其自身的适用范围。

为了验证 Reynolds 方程节理渗流分析能否用于真实岩石节理的渗流分析,在分析节理渗流控制方程的基础上,以 Reynolds 方程作为粗糙节理渗流分析的控制方程,建立了粗糙节理渗流分析空腔模型。然后在实测节理试件三维表面形貌并计算隙宽分布的基础上,得到了节理在不同接触状态下的渗流流量及其在节理面上的分布情况。将计算结果与渗流试验实测值以及其他 3 种计算模型计算结果进行比较,验证了空腔模型的准确性。同时,根据 Reynolds 方程的求解结果得到了渗流体积流量在节理中的矢量分布图,直观反映了隙宽变化对渗流流量的影响,为定量研究隙宽对节理渗流的影响奠定了理论基础。

2 节理渗流控制方程分析

描述不可压缩流体的控制方程为 N-S 方程,其表达式为^[9]

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(\nabla u)u = \mu \nabla^2 u - \nabla p \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; μ 为流体动力黏滞系数; u 为流体流速矢量, $u = (u_x, u_y, u_z)$; p 为渗流总水头压力。

当流体处于恒定流状态时,式(1)中左边第 1 项为 0,此时 N-S 方程简化为

$$\rho(\nabla u)u = \mu \nabla^2 u - \nabla p \quad (2)$$

式中:等号左边 $\rho(\nabla u)u$ 为对流项;等号右边第 1 项 $\mu \nabla^2 u$ 为流体黏滞力; $-\nabla p$ 为水头压力梯度项,其中对流项 $\rho(\nabla u)u$ 的存在使得 N-S 方程为 1 组非线性偏微分方程。当采用 N-S 方程求解具有复杂边界条件的渗流问题,如粗糙节理中的渗流时,方程组很难得到闭合解。因此,在求解粗糙节理中的渗流问题时,有必要对 N-S 方程进行简化,以便得到闭合解。

在式(2)中,当 $\rho(\nabla u)u \ll \mu \nabla^2 u$ 时,对流项 $\rho(\nabla u)u$ 基本可以忽略不计,则 N-S 方程简化为 Stokes 方程,也称为蠕动流方程(Creeping flow equation),其表达式为

$$\mu \nabla^2 u - \nabla p = 0 \quad (3)$$

与 N-S 方程相比, 由于忽略反映对流的非线性项 $\rho(\nabla u)u$, Stokes 方程是一组线性偏微分方程组, 因而, 其在数学形式上已经大大简化了。尽管如此, Stokes 方程仍为非常复杂的偏微分方程组, 简单边界条件下的求解已经十分困难, 将其用于具有复杂边界条件的节理渗流分析更具难度, 因而, 到目前为止很少有人将其作为节理渗流分析的控制方程。

对于粗糙节理中的一维渗流, Stokes 方程写成分量形式为

$$\text{沿渗流方向: } \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\text{垂直渗流方向: } \frac{\partial p}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

其中, 式 (5) 表示垂直节理面方向 (z 方向) 的动量守恒, 式中各项十分小, 可以忽略不计, 故只要考虑式 (4)。

当节理中水流的雷诺数 R_e 较小、水流处于层流状态、且节理隙宽的变化相对较为平缓时, 式 (4) 中 $\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}$ 比 $\frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2}$ 小得多^[8], 此时式 (4) 可简化为

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \quad (6)$$

对于隙宽沿 x 和 y 方向都变化的二维节理面, 由式 (6) 可得

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \quad (7)$$

对式 (7) 关于 z 坐标进行两次积分得到抛物线形流速矢量分布函数后, 将其代入质量守恒方程 $\nabla u = 0$, 对 z 坐标再次积分, 得到二维 Reynolds 方程, 其表达式为

$$\nabla \left(\frac{\rho g b(x, y)^3}{12\mu} \nabla p \right) = 0 \quad (8)$$

式中: $b(x, y)$ 为节理的隙宽分布函数; g 为重力加速度。

当把粗糙岩石节理简化为隙宽为 b 的平行板模型, 根据边界条件可以对 N-S 方程进行求解得到精确的解析解, 这就是著名的立方定理^[8]:

$$Q = -\frac{\rho g b^3}{12\mu} \nabla p \quad (9)$$

式中: Q 为通过节理的单宽渗流体积流量。

在上述 4 种节理渗流控制方程中, 立方定理在节理的渗流分析中被广泛采用, 但由于其将粗糙节

理简化为具有等隙宽值 b 的光滑平行板模型, 无法考虑节理表面粗糙起伏对渗流的影响, 与粗糙节理渗流的实际情况存在一定的差异。N-S 方程和 Stokes 方程都具有十分复杂的数学表达式, 在考虑粗糙节理的复杂形貌特征时很难得到闭合解, 目前很少有人将其作为节理渗流分析的控制方程。而式 (8) 的二维 Reynolds 方程为一组线性偏微分方程, 具有较为简单的数学表达式。若节理的隙宽分布为已知量, 则式 (8) 中只有水头压力为未知量, 此时, 在复杂边界条件下也能得到很好的数值解。因此, 采用 Reynolds 方程作为粗糙节理渗流计算的控制方程, 既能提高计算效率, 也能得到较为准确的计算结果。尽管如此, 但由于 Reynolds 方程是由 N-S 方程通过一些假设条件简化而得到的, 其在节理渗流计算中的适用性有待验证。近来, 许多学者如 Zimmerman 等^[8]、Yeo^[13]、Brown^[14]通过研究发现: Reynolds 方程具有自有的适用范围, 当节理渗流条件超出适用范围之后, 其明显地高估了渗流流量。由于以上结论是根据具有周期变化的特殊节理表面形貌 (如正弦曲线) 分析得到的, 对实际粗糙节理是否同样适用, 还有待进一步的研究。

在此根据节理隙宽变化十分平缓、无突变的特点, 假设节理中的渗流满足 Reynolds 方程的适用条件, 将其作为控制方程来分析节理的渗流情况, 建立节理渗流空腔模型。

3 Reynolds 控制方程下的节理渗流空腔模型及其求解

粗糙节理渗流空腔模型是以节理上、下表面构成的空腔体为研究对象 (如图 1 所示), 根据节理上、下表面三维形貌计算空腔体的高度分布, 在此基础上采用 Reynolds 方程作为控制方程计算节理中的渗流情况。其中, 空腔体的高度即节理渗流分析中常提到的隙宽。

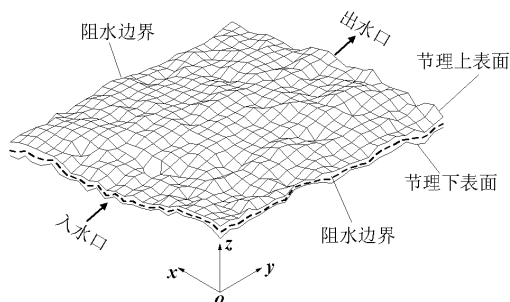


图 1 节理渗流空腔模型示意图
Fig.1 Schematic view of void model
for fluid flow through rough joint

对于二维节理平面, Reynolds 方程表达式为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0 \quad (10)$$

其中: $T_{xx} = T_{yy} = \frac{\rho g b^3(x, y)}{12\mu}$ 。

式中: T_{xx} 和 T_{yy} 分别为沿 x 和 y 方向的水力传导系数; $b(x, y)$ 为节理面上的隙宽分布。

以 Reynolds 方程作为控制方程的节理渗流分析过程, 其实就是根据给定渗流边界条件和节理隙宽分布 $b(x, y)$ 对 Reynolds 方程进行求解。尽管 Reynolds 方程为一组线性偏微分方程, 由于粗糙节理的实际隙宽分布无法用解析函数表达, 要得到其解析解也十分困难, 因而, 在此拟采用 Galerkin 有限元方法对 Reynolds 方程进行求解。Galerkin 有限元方法对 Reynolds 方程进行离散的具体过程可参考文献[15]。

节理在不同接触状态下的隙宽分布可以根据稳定接触算法^[16]计算节理在不同接触状态下的三维空腔组合形貌得到。对节理三维空腔组合形貌利用 MATLAB 程序按 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 网格进行离散, 得到节理面上网格节点对应点处的空腔组合形貌数值, 亦即此点处的隙宽值。然后以这些已知隙宽值的点作为有限元分析时的特征节点, 对节理面进行三角形单元离散后, 单元节点隙宽值根据相邻特征节点的隙宽值通过线性插值得到, 从而得到划分单元网格后整个节理面上的隙宽分布情况。在此基础上根据渗流边界条件就可以对 Reynolds 方程进行有限元求解, 得到节理面上的水头压力分布情况。根据水头压力分布情况就可以计算节理中的渗流体积流量及其分布情况。根据以上分析, 采用 Galerkin 有限元方法求解 Reynolds 方程的流程图如图 2 所示。

4 节理渗流计算结果对比

在第 3 节中以 Reynolds 方程作为控制方程建立了节理渗流空腔模型, 为了验证此模型的正确性, 下面将以人工节理试件为例, 分别进行室内渗流试验和相同渗流边界条件下的空腔模型理论计算。为了对比分析, 空腔模型分别采用 Cubic law 和 Reynolds 方程作为控制方程进行计算。同时, 还将 Reynolds 方程下的空腔模型计算结果与立方定理和速宝玉立方定理修正经验公式计算结果进行对比。为了在下面的分析中表述简便, 将 Reynolds 方程下的空腔模型简称为 R 空腔模型; 以 Cubic law 作为控制方程的空腔模型^[17]简称为 C 空腔模型; 根据节理平均隙

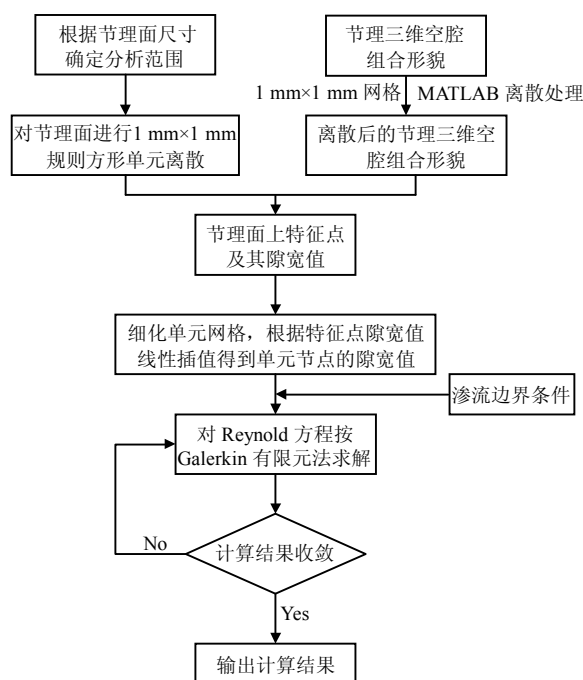


图 2 Reynolds 方程有限元求解流程图

Fig.2 Flowchart for FEM numerical solution of Reynolds equation

宽值按立方定理直接计算的方法简称为立方定理; 将速宝玉的立方定理修正经验公式简称为速宝玉经验公式。

4.1 节理试件室内渗流试验

室内渗流试验中所采用的大理岩节理试件平面尺寸为长×宽 = $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 沿节理长度方向将节理上表面相对下表面分别错开 1、2、3、4、5、6 mm 形成不同的接触状态, 然后在每一特定的接触状态下进行不同水力梯度下的渗流试验, 试验中的渗流边界条件如图 3 所示: 沿节理长度方向为渗流方向, 左侧为入水口, 右侧为出水口, 节理面上下两侧为阻水边界, 入水口的渗透水压从 40 kPa 开始, 按 20 kPa 递增直至 200 kPa, 出水口保持自然出流。在计算平均水力梯度时不考虑由于节理上、下表面错位引起的流经长度变化。

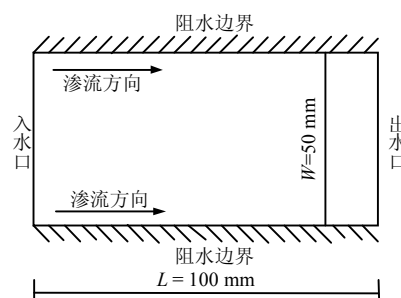


图 3 节理渗流边界条件

Fig.3 Boundary conditions of flow through joint specimens

由于节理试件的渗流试验结果在文献[17]中已经进行了详细报导,在此不再赘述,在后面的计算结果比较分析中直接引用试验实测数据。

4.2 R 空腔模型与实测值对比

利用节理表面形貌扫描仪获得节理的三维表面形貌数据后,采用稳定接触算法计算节理在不同接

触状态下的隙宽分布。在此基础上采用与室内渗流试验一致的渗流边界条件对 Reynolds 方程进行求解,得到节理的渗流体积流量及其分布情况。将其计算结果与室内渗流试验实测值进行对比,如图 4 所示。由图可知:R 空腔模型计算结果与实测值较为接近,能较为准确地估计节理中的渗流量。

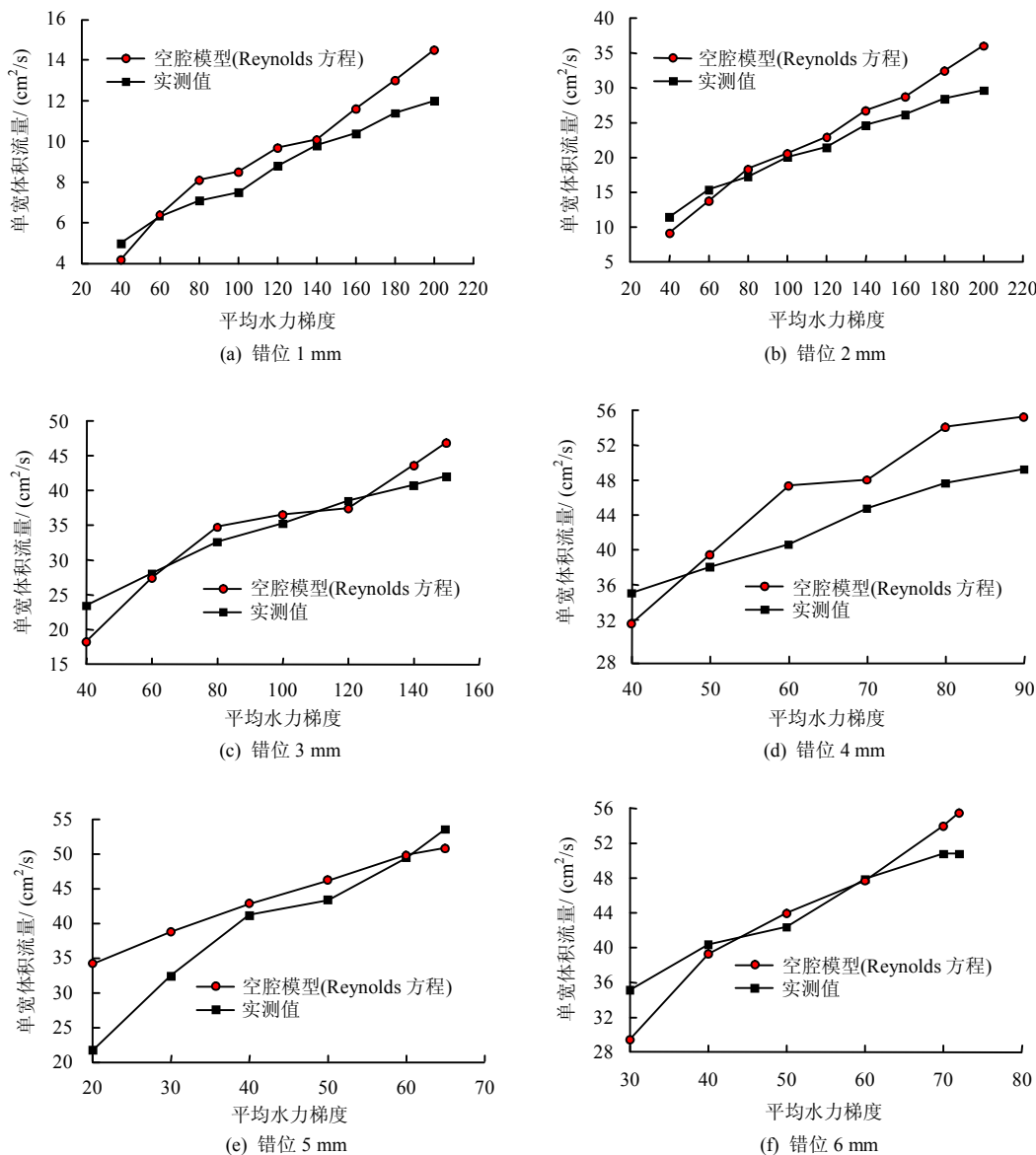


图 4 R 空腔模型计算结果和实测值对比

Fig.4 Results comparisons between void model taking Reynolds equation as governing equation and laboratory observations

4.3 R 空腔模型与速宝玉经验公式及 C 空腔模型计算结果对比

根据本文所采用节理试件的三维表面形貌参数,夏才初等^[18]计算了采用不同形式的立方定理修正公式时,节理在不同接触状态下的渗流量,并将计算结果与实测值对比,比较发现,速宝玉经验公式的计算结果与实测值最为接近。速宝玉经验公式

为^[6]

$$q = \frac{gb^3}{12\nu C} J_f \quad (11)$$

$$\text{其中: } C = 1 + 1.2 \left(\frac{\Delta}{b} \right)^{-0.75}.$$

式中: C 为粗糙性修正系数; J_f 为平均水力梯度;

ν 为运动黏滞系数。

为此, 以下仅将 R 空腔模型的计算结果与速宝玉经验公式进行比较, 同时也将其与 C 空腔模型和立方定理计算结果进行比较。空腔 C 模型和立方定理的计算在文献[17]中有详细介绍, 在此直接引用计算结果。各模型的计算结果比较如图 5 所示。由图可知, 立方定理和 C 空腔模型的计算结果和实测值的偏差较大, 而速宝玉经验公式与实测值之间的

偏差相对较小; 但与 R 空腔模型的计算结果相比, 速宝玉经验公式与实测值之间的偏差更大, 且采用速宝玉经验公式在多数情况下过高地估计节理的渗流量。

需要注意的是, 由于 C 空腔模型和立方定理的计算结果与实测值的偏差较大, 因此, 在同一坐标系中比较 5 组数据时, 显示不出 R 空腔模型计算结果和实测值之间的差异。

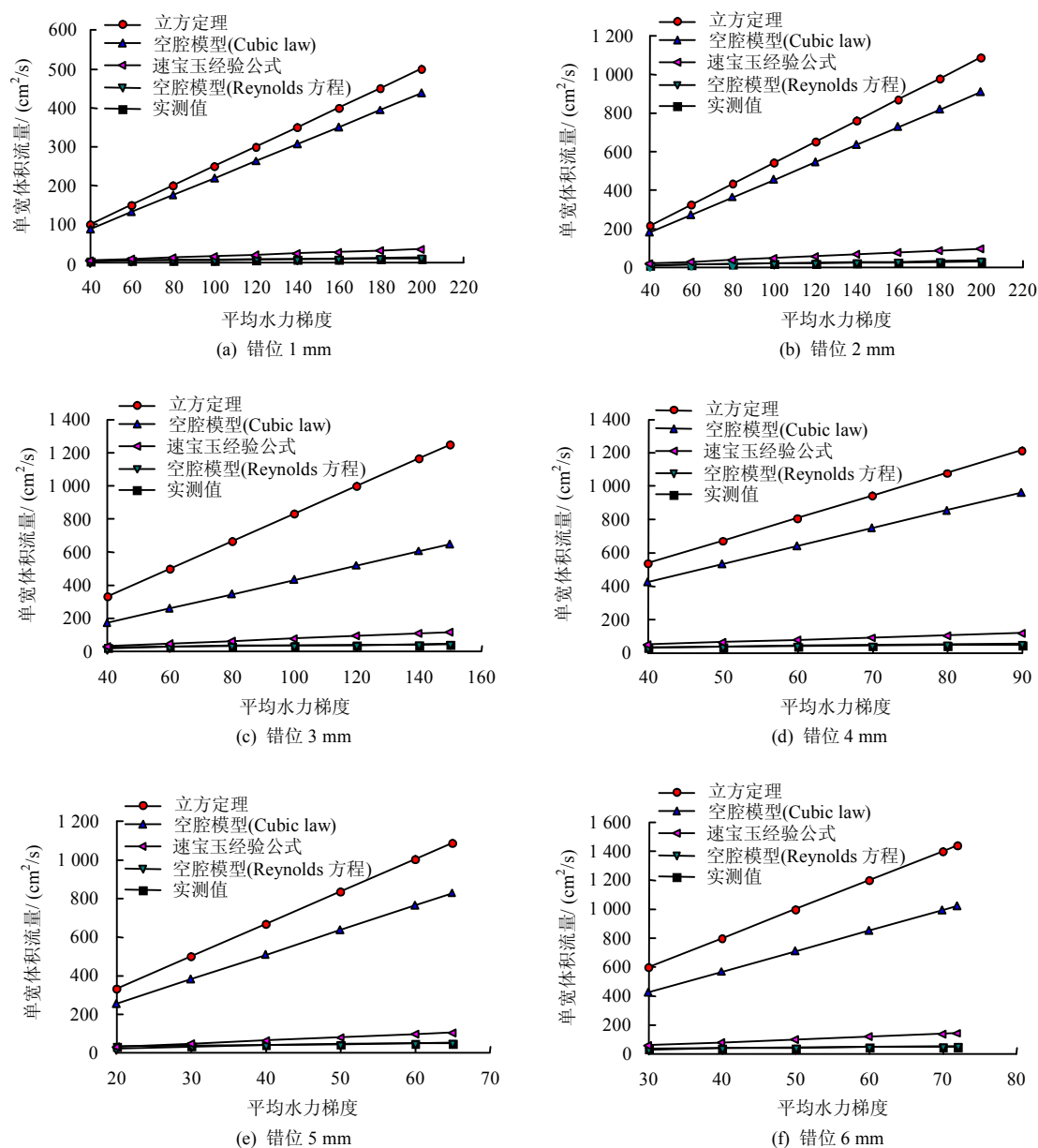


图 5 节理渗流 R 空腔模型与速宝玉经验公式和 C 空腔模型计算结果对比

Fig.5 Results comparisons among void models taking Reynolds equation and cubic law as governing equation respectively, Su B.Y. empirical equation and laboratory observation

5 对比结果分析与讨论

由图 4、5 的比较结果可知: R 空腔模型的计算结果最接近实测值, 速宝玉经验公式次之, 将粗糙

节理简化为光滑平行板模型直接按立方定理计算的结果最差, 与实测值相差很大, 而 C 空腔模型的计算结果虽然比立方定理计算结果要好, 但与实测值的差别也较大。

通过 4 种计算模型的结果与实测值比较可知,一方面,以 Reynolds 方程作为节理渗流分析控制方程,可以较好地反映节理中的真实渗流情况,这主要是由于在对 Reynolds 方程进行有限元求解时,当单元划分得足够小时,利用节理面上特征点隙宽值线性插值得到的单元节点隙宽值与实际隙宽值越接近,而且在求解时同时考虑了整个节理面上节理隙宽分布在沿渗流方向和垂直渗流方向上的变化,因而 R 空腔模型的计算结果与实测值较为吻合;另一方面,采用立方定理直接计算则是将粗糙节理简化成隙宽为节理平均隙宽的平行板模型,这样简化处理就把粗糙节理隙宽分布所具有的不均匀性消除了,忽略了节理的粗糙性对渗流的影响。而在立方定理中考虑节理的粗糙性,引入粗糙性修正系数^[2-6],其实质是对平均隙宽值进行折减修正,对于不同的立方定理修正公式,只是对平均隙宽的折减程度不同而已。立方定理修正公式从本质上而言,还是未考虑到节理细观粗糙性对渗流的影响。从图 5 也可以看出:速宝玉经验公式与实测值之间还是存在一定的偏差,且这种差异随着平均水力梯度的增加而增加。因此,尽管速宝玉经验公式比立方定理计算结果更接近实测值,但仅在立方定理中引入粗糙性修正系数远不足以真实地反映节理的渗流情况。

C 空腔模型从节理隙宽分布的不均匀性出发,考虑节理粗糙性对节理渗流的影响,将节理中的渗流区域划分成许多空腔体,每一个空腔体都视为光滑平行板模型,因此,节理间的渗流简化为由每一行的空腔体串联成渗流子系统后,再由若干子系统并联组成复杂系统,在该系统中隙宽分布的不均匀性通过平行板模型的不同隙宽值得到体现,这样处理比采用粗糙性修正系数更具合理性。但是,虽然 C 空腔模型的计算结果比立方定理计算结果稍好,但由于平行板模型过于理想化,其计算结果比速宝玉经验公式计算结果要差,这说明以 Cubic law 作为节理渗流分析的控制方程,还不能较好地反映节理中的渗流情况,其计算结果可能比经验公式计算结果还要差。

此外, C 空腔模型以 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的空腔体作为分析单元格,忽略了单元格自身的细观粗糙性,将节理面内的粗糙单元格都简化为光滑平行板模型(见图 6),因而只适用于较为光滑的节理;而采用 Reynolds 方程进行求解时通过划分足够小的单元格能较好地考虑节理的细观粗糙性,因而可以用于求解粗糙节理中的渗流情况。

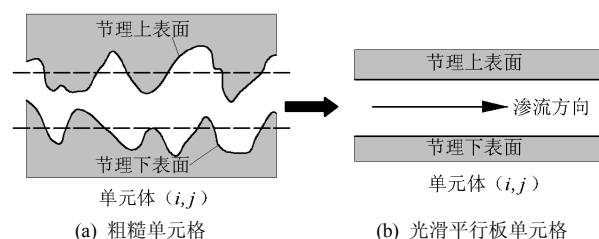


图 6 节理单元格的简化示意图

Fig.6 Schematic view of the element roughness

尽管 R 空腔模型的计算结果和实测值吻合程度较好,但是在图 4 中发现:在水力梯度较小时, R 空腔模型计算结果小于实测值,而在水力梯度较高时,其结果要大于实测值。对于 R 空腔模型高估节理渗流体积流量,可能的原因如下: R 空腔模型是采用稳定接触算法计算的节理隙宽值作为渗流分析的基础,而稳定接触算法是假设节理处于一种理想临界点接触状态;但室内渗流试验中,节理上、下两个面不可能达到这种理想接触状态,一般都会有小范围的面接触,这相当于节理上、下两个面已从临界点接触状态转换为面接触状态,在这过程中节理隙宽值将减小,另外在节理上、下两个面错位不同位移量的拼装过程中也会存在一定的误差,因而,使得渗流试验中节理实际隙宽值要小于稳定接触算法计算值,因此, R 空腔模型计算结果要稍大于渗流试验实测值。但对于低水力梯度时 R 空腔模型低估节理渗流体积流量的情况,具体的原因还不清楚,有待进一步从渗流试验和空腔模型两方面查找原因。

另外, R 空腔模型通过对 Reynolds 方程进行求解,不仅可以计算通过节理的渗流体积流量,还能得到通过每一个单元节点的流量,进而得到节理面上渗流流量分布矢量图。对本文所采用的节理试件进行求解,得到的渗流流量分布矢量图如图 7 所示,由此可以观测到节理的渗流流向及曲折现象。由于文中所采用的节理为张开节理,节理两个面仅存在点接触,因此,从流量矢量分布图上看不到明显的曲折现象。若提取节理渗流典型流线,则可以观测到流线呈现为明显的曲线,而不是直线(如图 8 所示),这说明节理渗流确实存在曲折现象。这种曲折现象对节理的渗流有很显著的影响,与节理的隙宽分布密切相关^[19]。但在现有关于节理渗流计算的公式中,很少有人考虑曲折现象因素的影响,也没有人对节理渗流的曲折效应进行定量的描述。因此,通过采用 R 空腔模型计算得到节理中的渗流曲折现象,再根据其与节理隙宽分布之间的关系,定义定量描述节理曲折现象的参数,然后将其引入到节理

渗流的计算公式中,这将会在很大程度上改进现有计算公式的不足。因此,本文所提的 R 空腔模型对于从本质上分析节理渗流具有很好的理论价值。

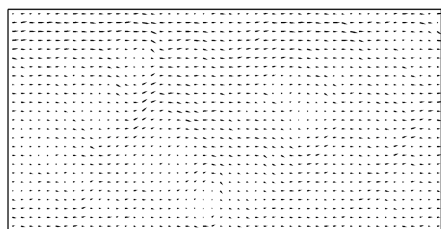


图 7 节理渗流体积流量分布矢量图
Fig.7 Simulated volumetric flow rate vectors of joint specimen

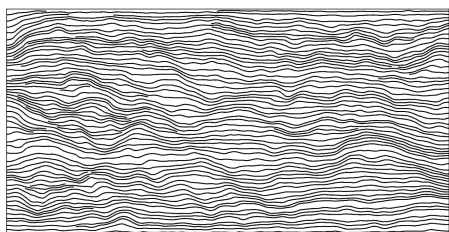


图 8 节理中的典型渗流流线分布
Fig.8 Streamlines distribution of rough joint

6 结 论

(1) 建立了以 Reynolds 方程作为控制方程的粗糙节理渗流分析空腔模型,在实测节理三维表面形貌数据并计算节理隙宽分布后,通过 Galerkin 有限元方法对 Reynolds 方程求解,可以计算得到通过节理的渗流体积流量及其在节理面上的分布。

(2) 针对节理试件,首先进行室内渗流试验,然后在与室内渗流试验相同的渗流边界条件下,分别按 R 空腔模型、C 空腔模型、立方定理、速宝玉经验公式进行渗流体积流量的预测,并将计算结果与室内渗流试验实测值进行比较,验证了 R 空腔模型在预测节理渗流情况时的正确性。

(3) Reynolds 控制方程下的空腔模型是节理渗流情况的理论解答,不仅可以计算通过节理的渗流体积流量,还可以得到节理面中的渗流体积流量分布情况,直观呈现节理渗流中的曲折现象,为研究曲折现象对节理渗流的影响奠定理论基础。

参 考 文 献

- [1] SNOW D T. Anisotropic permeability of fractured media[J]. *Water Resources Research*, 1969, 5(6): 1273—1289.
- [2] LOMIZE G M. Flow in fracture rocks[M]. Moscow: Gesenergoizdat, 1951.
- [3] LOUIS C. A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on stability of rock masses[C]//Rock Mechanics Research Report. London: Imperial College, 1969.
- [4] LOUIS C. Rock hydraulics in rock mechanics[M]. New York: Springer-Verlag, 1974, (b): 299—387.
- [5] AMADEI B, ILLANGASEKARE T A. Mathematical model for flow and solute transport in non-homogeneous rock fracture[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1994, 31(6): 719—731.
- [6] 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.
SU Bao-yu, ZHAN Mei-li, ZHAO Jian. Study of fracture seepage in the imitative nature rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(5): 19—24.
- [7] BRUSH D J, THOMSON N R. Fluid flow in synthetic rough-walled fractures: Navier-Stokes, Stokes and local cubic law simulations[J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(4): 1085—1099.
- [8] ZIMMERMAN R W, BODVARSSON G S. Hydraulic conductivity of rock fractures[J]. *Transport in Porous Media*, 1996, 23(1): 1—30.
- [9] ZIMMERMAN R W, YEO I. Fluid flow in rock fractures: from the Navier-Stokes equations to the cubic law[J]. *Dynamics of Fluids in Fractured Rock, Geophysical Monograph Series*, 2000, 122: 213—224.
- [10] MOURZENKO V V, THOVERT J F, ADLER P M. Permeability of a single fracture: Validity of the Reynolds equation[J]. *Journal of Physics II France*, 1995, 5(3): 465—482.
- [11] BROWN S R, STOCKMAN H W, REEVES S J, et al. Applicability of the Reynolds equation for modeling fluid flow between rough surfaces[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(18): 2537—2540.
- [12] NICHOLL M J, RAJARAM H, GLASS R J, et al. Saturated flow in a single fracture: evaluation of the Reynolds equation in measured aperture fields[J]. *Water*

- Resources Research**, 1999, 35(11): 3361—3373.
- [13] YEO I W. Applicable range of the Reynolds equation for fluid flow in a rock fracture[J]. **Geosciences Journal**, 2005, 9(4): 347—352.
- [14] BROWN S R. Fluid flow through rock joints: the effect of surface roughness[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1987, 92(B2): 1337—1347.
- [15] KOYAMA T. Stress, flow and particle transport in rock fractures[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2007.
- [16] 夏才初, 肖维民, 王伟. 不同接触状态下节理三维组合形貌的计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2203—2210.
- XIA Cai-chu, XIAO Wei-min, WANG Wei. Calculation method for 3D composite topography of joint under different contact conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(11): 2203—2210.
- [17] 肖维民, 夏才初, 王伟. 考虑三维形貌特征的粗糙节理渗流空腔模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 2): 1—10.
- XIAO Wei-min, XIA Cai-chu, WANG Wei. Study of void model for fluid flow through rough joint by considering 3D topography characteristics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Supp.2): 1—10.
- [18] 夏才初, 王伟, 曹诗定. 节理在不同接触状态下的渗流特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1297—1306.
- XIA Cai-chu, WANG Wei, CAO Shi-ding. Flow characteristics of joints under different contact conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 28(7): 1297—1306.
- [19] TSANG Y W. The effect of tortuosity on fluid flow through a single fracture[J]. **Water Resources Research**, 1984, 20(9): 1209—1215.
- [9] JTG E40—2007 公路土工试验规程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [10] 邴文山编译. 道路冻害与防治译文集[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1991.
- [11] 何岩. 聚丙烯纤维改良粉煤灰土动、静力学参数研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [12] 王大雁, 马巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏粘土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(33): 4314—4319.
- WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(33): 4314—4319.
- [13] 毛雪松, 侯仲杰, 王威娜. 基于含水率和冻融循环的重塑土弹性模量试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3585—3590.
- MAO Xue-song, HOU Zhong-jie, WANG Wei-na. Experimental research on resilient modulus of remolded soil based on water content and freeze-thaw cycles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.2): 3585—3590.

上接第 3668 页