

王恩志,张东,刘晓丽,等. 裂隙岩体多结构多流态渗流模型与模拟[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 894-902.

WANG En-zhi, ZHANG Dong, LIU Xiao-li, et al. Seepage Model and Simulation of Multi-structure and Multi-flow in Fractured Rock Mass[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(6): 894-902.

DOI: 10.19814/j.jese.2022.11022

· 纪念刘国昌先生诞辰110周年专辑 ·

裂隙岩体多结构多流态渗流模型与模拟

王恩志, 张东, 刘晓丽, 吴春璐, 马前驰, 王明阳, 姚文理

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 复杂裂隙系统多结构和多流态渗流一直是裂隙岩体渗流理论研究的难点问题。基于裂隙岩体渗透空间结构和渗流特性, 按管状孔洞、面状裂缝、带状断层和块状岩体所构成的多结构渗透介质构建三维渗流数值方程, 基于单一结构的线性渗流、非线性渗流、层流-过渡流-湍流统一流态公式, 推导了多流态渗流方程, 给出多结构多流态渗流模型的求解方法。通过管道流试验和三维裂隙网络渗流试验与数值模拟分析结果对比, 探讨了模型的合理性与适用性, 并探讨了大尺度岩体离散-连续组合渗流模型的实用性, 为精细模拟裂隙岩体渗流问题提供了参考。

关键词: 裂隙岩体; 管道流; 混合流; 非线性流; 多结构; 多流态; 数学模型; 模拟

中图分类号: P641; TU457

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2022)06-0894-09

Seepage Model and Simulation of Multi-structure and Multi-flow in Fractured Rock Mass

WANG En-zhi, ZHANG Dong, LIU Xiao-li, WU Chun-lu, MA Qian-chi,

WANG Ming-yang, YAO Wen-li

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Multi-structure and multi-regime flow in complex fractured system has always been a difficult problem in the study of fracture rock mass seepage theory. Based on the spatial structure and seepage characteristics of fractured rock mass, a three-dimensional seepage numerical equation was constructed according to the multi-structure medium composed of tubular pores, planar fractures, zonal faults, and massive rock mass. Focusing on the transition and evolution of linear flow, nonlinear flow, laminar flow-transition flow-turbulent flow in single structure, the multi-regime flow equation was derived, and numerical method of multi-structure and multi-regime seepage model was given. By comparing the results of pipeline flow test and three-dimensional fractured network seepage test with the numerical simulation analysis, the rationality and applicability of the model were discussed, and the practicability of large-scale discrete and continuous combined seepage model of rock mass was discussed, which provides a reference for fine simulation of fractured rock mass seepage problem.

Key words: fractured rock mass; pipeline flow; mixed flow; nonlinear flow; multi-structure; multi-regime flow; mathematical model; simulation

0 引言

岩体中发育的裂隙和孔隙为地下水在岩体中的赋存和运移提供了空间,岩体渗流的存在不仅会导致岩石软化、岩体强度降低,而且渗压分布对岩体和建筑物稳定极为不利,甚至会产生工程事故,如水电工程中的坝基、坝肩岩体失稳,采矿工程中的矿井和交通隧洞突水等。因而裂隙岩体渗流理论与模拟模型的研究一直是学术界和工程界极为关注的问题,且因裂隙系统的复杂性而成为一个理论难题。连续介质渗流理论发展比较成熟,但却难以描述岩体裂隙所固有的水力学特性,非连续介质裂隙网络渗流模型在理论上可确切描述裂隙系统的空间结构及其渗流特征,但在对不同渗透结构的描述上却难以体现其渗透特征,特别是复杂裂隙系统,如管道、大裂缝、断层、破碎带、岩脉、溶洞等类型的地质结构,更是难以精细模拟渗流特性。对大尺度裂隙岩体渗流模拟采用离散-连续组合方法,可以从宏观和微观上描述不同类型渗透结构的空

间渗流特征。Borelli(1965)基于表征单元体的概念,指出在大区域条件下,可以将裂隙含水层等效为多孔介质,是最早的裂隙岩体渗流模型^[1,22]。Barenblatt等将岩溶含水介质分为导水性弱、贮水性强的基质系统和导水性强、贮水性弱的岩溶裂隙系统,提出了裂隙岩体双重介质模型^[2]。Atkinson研究岩溶区裂隙岩体渗流,认为岩溶含水层中不仅存在层流,还存在湍流等非线性流动状态^[3]。国内老一代学者陈崇希等在裂隙渗流领域也做了许多开拓性的研究,在裂隙水偏流、裂隙多层水位、离散裂隙网络渗流数值模型、双重裂隙系统模型、管道-裂隙-孔隙三重介质模型、达西-非达西渗流的数值模拟、岩块非线性渗流作用等,以及折算系数法计算湍流渗透系数、变渗透系数模拟非达西流等方面都极大地推进了裂隙渗流理论和计算方法的改进^[4-7]。Murad等考虑基质-裂隙-管道多结构特征,建立管道明流的多尺度裂隙岩体渗流模型^[8]。Malenica等建立构建管道-裂隙岩体耦合模型,对比地质模型试验结果,验证了方法的适用性^[9]。Zaghbi等考虑裂隙岩体中管道结构的水位涨落现象,采用离散-连续方法分别建立管道明流-满流模型与地层裂隙岩体耦合模型^[10-11]。此外,对于裂隙岩体中的非线性渗流问题也越发得到学者们的重视。Chen等提出了非线性程度因子作为达西流转变为非达西流的判据,相较于雷诺数(Re)更加简洁^[12-16]。

裂隙岩体渗流理论模型研究目前聚焦于介质多结构多尺度特性和非线性渗流特征,本文从渗流介质的结构特征和渗流机理出发,在前期裂隙岩体离散介质渗流和非线性求解方法研究的基础上,对裂隙岩体的多结构和多流态渗流模型进行深入分析,构建了多结构多流态的离散-连续裂隙岩体渗流模型,并利用已有的管道、裂隙网络渗流试验结果开展了数值模拟对比分析,讨论了理论模型的合理性以及大尺度裂隙岩体渗流模拟的实用性。

1 多结构模型

裂隙岩体存在多重渗透介质(管、洞、裂隙、断层、地层基质等)。基于裂隙岩体各类型的介质结构特征和渗流规律,默认处于层流流态,可归纳为3种类型结构面进行渗流数值方程的讨论。

1.1 管状一维渗流方程

管状渗流介质是典型的一维线状结构,其横向尺度远小于其延伸长度,如岩溶管道、火山岩洞穴、地下排水孔等,且管道的形状也不局限于圆形,可以是方形、椭圆乃至不规则形状。管状裂隙被其他结构切割后成为离散裂隙段,则管状结构可离散为空间内数条线单元的组合。沿裂隙段方向建立局部一维坐标系 x' ,则线单元的渗流连续方程^[17]为

$$\frac{\partial \left(K_{x'} \frac{\partial H}{\partial x'} \right)}{\partial x'} + Q = \mu_1 \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中: H 为水头; Q 为源汇项; $K_{x'}$ 为 x' 方向的渗透系数; μ_1 为管道结构明、满流状态的储水系数; x' 为沿裂隙方向的局部坐标; t 为时间。

管道渗流过程中储水系数与流动形式有关。明流时管道断面变化是储水能力的主导,而满流时管道断面恒定,密度改变是储水能力的主导。储水系数^[18]可表达为

$$\mu = \rho_0 k_w g A + W \quad (2)$$

式中: ρ_0 为流体参考密度; k_w 为流体压缩系数; A 为过流横截面积; $W = \frac{\partial A}{\partial h}$,为液面顶部宽度。

1.2 面状裂缝二维渗流方程

狭窄裂缝渗流介质是典型的二维面状结构,受两侧隙壁流动限定,形成形态各异的渗流空间,在隙面方向上产生二维流,如各种力学性质的裂隙、节理、层间错动以及断层中的挤压面和张裂面等。裂缝的渗透能力取决于缝隙宽度、隙面粗糙程度、有无充填、充填物的渗透性等。面状裂隙被其他裂隙切割成数个多边形单元,则面状渗流结构可在空间上

表现为多边形面单元的组合。当裂缝的渗透主轴与局部坐标方向一致时,局部坐标系下的二维渗流连续方程^[18]可表达为

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = \mu_2 \frac{dH}{dt} \quad (3)$$

式中: Oxy 为局部二维坐标系; K_y 为 y' 方向上的渗透系数; μ_2 为面状裂缝的储水系数。

1.3 带状断层三维渗流方程

带状断层渗流介质是典型的三维多孔介质结构,具有一定宽度呈条带状的破碎带,如各种断裂、断层、岩脉、破劈理带、剪切带、岩层等。通常区域渗流可划分成多个渗流特性差异大且具有各向异性特征的多孔介质渗流带,沿断层的走向和倾向都有流动,表现为空间三维流。带状断层结构可分为构造岩带和影响带,被其他裂隙切割后,每个带就成为空间中的数个扁多面体,其内结构为碎裂岩块的集合体(多孔介质)。根据带状断层的结构特征,对任意扁多面体可用连续介质方法来描述其中的渗流。当选取的局部坐标系与带状断层的3个渗透主轴一致时,其渗流连续方程^[18]为

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial H}{\partial z}) + Q = \mu_3 \frac{dH}{dt} \quad (4)$$

式中: $Oxyz$ 为局部三维坐标系; K_z 为 z' 方向上的渗透系数; μ_3 为带状断层的储水系数。

2 多流态模型

裂隙岩体不同介质结构的渗流动力特征不同,但一般都基于达西定律,默认为层流状态,但实际状况下流动的雷诺数一般远大于1,偏离达西线性定律的流动,会产生非线性流动特征。因此,基于裂隙岩体各类型介质渗流多流态演化过程,将其归纳为

$$Q = D^2 \sqrt{g D h_f / L} \left\{ \left(\frac{128 v}{\pi D \sqrt{g D h_f / L}} \right)^4 + 1.153 \left[\left(\frac{415 v}{D \sqrt{g D h_f / L}} \right)^8 - \ln \left(\frac{\epsilon}{3.7 D} + \frac{1.775 v}{D \sqrt{g D h_f / L}} \right) \right]^4 \right\}^{-0.25} \quad (5)$$

$$K = D^2 \sqrt{\frac{g D L}{|h_f|}} \left\{ \left(\frac{128 v}{\pi D \sqrt{g D |h_f| / L}} \right)^4 + 1.153 \left[\left(\frac{415 v}{D \sqrt{g D |h_f| / L}} \right)^8 - \ln \left(\frac{\epsilon}{3.7 D} + \frac{1.775 v}{D \sqrt{g D |h_f| / L}} \right) \right]^4 \right\}^{-0.25} \quad (6)$$

2.2 低速非达西流和高速非达西流

前人将渗流的全过程大致划分为3个阶段(图2),分别为:I,薄层流区;II,层流区;III,紊流区^[21-22]。其中,薄层流区属低速非达西渗流区域,层流区为达西定律所描述的线性渗流区域,紊流区为Forchheimer定律所描述的高速非达西渗流区域。

两种类型非线性流动进行渗流多流态模型的讨论。

2.1 一维管道多流态演化过程

实际管道流体运移过程中,源汇、边界条件以及管径、管壁粗糙度、充填程度等会导致流态交替转化,存在层流、过渡流以及湍流演化过程。一般选择雷诺数作为流态判断指标, $Re < 2\,000$ 为层流, $2\,000 \leq Re \leq 4\,000$ 为过渡流, $Re > 4\,000$ 为湍流。为准确描述一维管道流多流态演化过程,采用基于管道流全流态试验数据构建的斯卫姆公式^[19],其表达式为式(5),流量传导系数 K 可表达为式(6)。式(5)和(6)中, h_f 为管道水头损失; L 为管道长度; ϵ 为粗糙度; D 为管道水力直径; v 表示流体运动黏度。

需要注意的是,斯卫姆公式是基于管道满流所构建模型,但对于明流(管道部分充满),当 D 表示部分充满流动时的水力直径,仍可保证方程的适用性^[20]。

图1展示了相同水力条件下管道明流、满流不同流态条件下所计算的流量传导系数计算结果,并根据雷诺数划分了流态范围(雷诺数下、上限分别利用泊肃叶公式和曼宁公式计算)。无论明流或满流,随着水力梯度、水深的增大都会导致流动逐渐向湍流发展,产生非线性流动特征,管道流过程中必然存在层流-过渡流-湍流的变化过程。采用斯卫姆公式可以准确地刻画管道流动全流态演化过程。当 $Re < 2\,000$ 时,与泊肃叶层流模型一致;当 $Re > 4\,000$ 时,与韦伯斯湍流模型结果一致;而当 $2\,000 \leq Re \leq 4\,000$ 时,实现了层流到湍流的光滑过渡,描述了过渡流的水力特征。

面状裂隙二维渗流,与一维管道流动类似,其非线性渗透系数(流量传导系数)可通过推广延伸得到。

低速非达西流的渗流阻力项主要为复杂的外部附加阻力。其运动特征可以概括为:①渗流运动表达式中,渗流速度与压力梯度之间为非线性关系;②渗流存在不为0的启动压力梯度,只有当压力梯度大于启动压力梯度,渗流才得以发生。其可以采用分段函数的形式^[23]来表达,表达式为

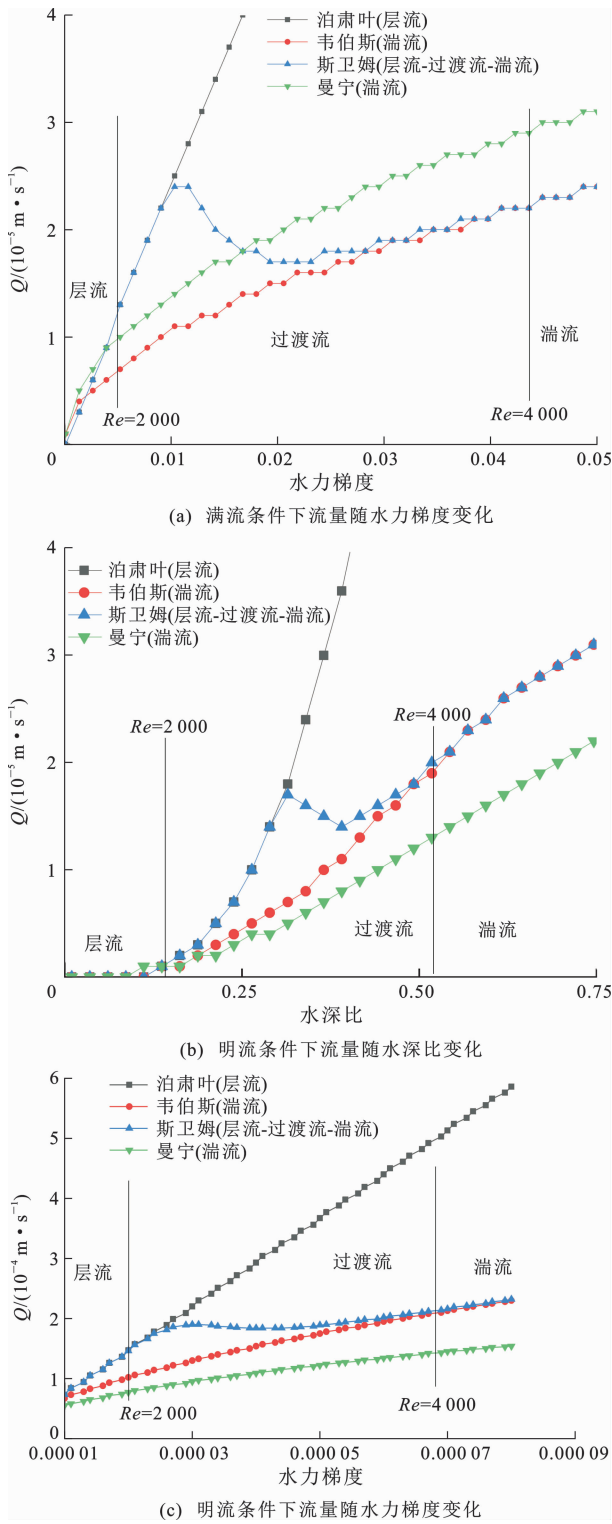


图 1 管道明流、满流流态演化过程

Fig. 1 Flow Regime Evolution Processes of Free Surface and Pressurized Flow in Pipeline

$$\begin{cases} V=0 & \left(\frac{\Delta P}{L} \leq C \right) \\ V=\frac{K}{\mu} \left(\frac{\Delta P}{L} - C \right) & \left(\frac{\Delta P}{L} \geq C \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: V 为渗流速度; C 为启动压力梯度; K 为渗透

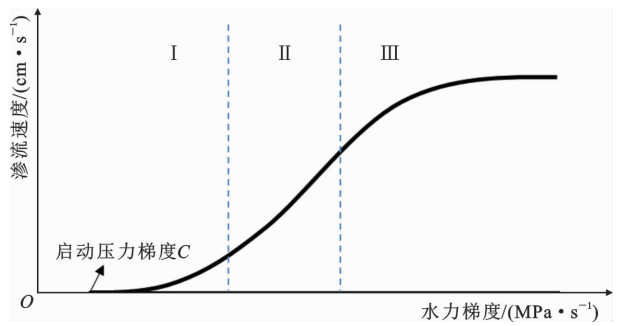


图 2 多孔介质全流态渗流曲线

Fig. 2 Full Seepage Curve of Porous Media

系数; $\frac{\Delta P}{L}$ 为压力梯度; μ 为流体黏滞系数。

该模型考虑了启动压力梯度对渗流运动的影响,但显然渗流过程中,随着流速和水力梯度的改变,渗透率也在不断改变。为描述渗流全流态演化过程,提出变渗透率方法。根据渗透系数的定义,渗流(V - J)曲线上每点的斜率代表该水力梯度点的渗透系数。在达西渗流公式中,渗透系数为常数,即渗透率是定值。对于非线性渗流曲线,在 V - J 曲线上任一点的斜率就是该点水力梯度(J)所对应的渗透系数。由于 V - J 曲线的斜率随水力梯度而变化,渗透率也是水力梯度的函数,则基于试验测定的渗流曲线,全流态水动力过程可表达为

$$V=K(J) \cdot J \quad (8)$$

在实际求解计算过程中,采用分段线性法将非达西渗流曲线近似为分段线性的折线。如图 3 所示,当分段数多时,其折线逼近曲线。因此,变渗透率数值法实质是将整体的非线性微分方程进行局部线性化处理,以可行的数值方法解决物理意义上的变渗透率困难的问题。①由原始试验资料的渗流速度和压力梯度的曲线(V - J 曲线),给出渗透率随压力梯度的变化曲线(K - J 曲线);②将曲线分为多个线性段,每个线性段渗透系数 $K(J_i)=K_{J_i}$,为常数;③将非线性的微分方程变为线性的微分方程;④利

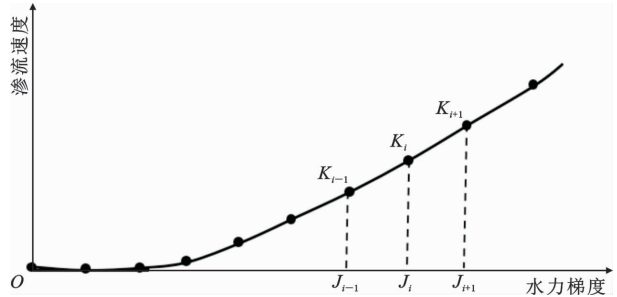


图 3 渗流曲线分段线性化处理示意图

Fig. 3 Schematic Diagram for Piecewise Linearization of Seepage Curve

用有限元法对渗流场进行离散,并进行迭代计算。

因为渗透率的非线性变化,渗流连续方程为非线性方程,需要采用迭代法求解。一般将达西渗透率作为初值,求解方程得到各单元水头值及水力梯度值,再根据渗流曲线通过分段线性法确定对应的渗透率。由此计算新的传导矩阵,迭代求解渗流方程,直至压力值趋于稳定并满足计算精度要求,即 $\max |H_{i,j,k}^{m+1}(t_n) - H_{i,j,k}^m(t_n)| \leq \epsilon$,此值即为对应时段的压力值,然后进入下一个时段的计算。

3 模拟分析

3.1 管道多流态模拟

Capart 开展了管道流试验(图 4)。试验管径为 0.145 m,长为 12.74 m,由 3 段节管道组成,其管道长度依次为 3.48、5.75 和 3.51 m,坡度依次为 1.954%、1.704% 和 1.225%。试验时控制上游和下游水箱水位,并在管道沿程测定断面水头和水深变化。试验过程和数据见文献[24]。

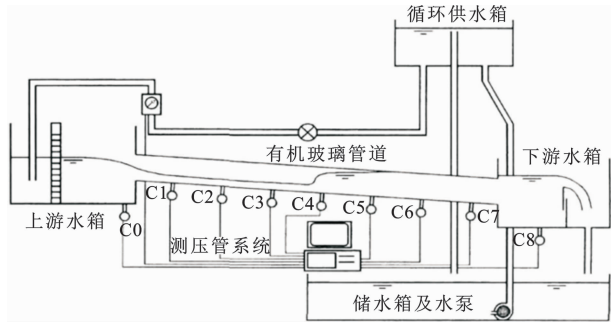


图 4 Capart 管道试验平台示意图

Fig. 4 Schematic View of Capart's Pipeline Test

本文选取其中上游流量控制的试验工况,下游水位低于管道末端水位,因此对流动无影响,上游入口流量过程曲线如图 5 所示。采用管道多流态模型对该试验进行数值模拟,并与试验结果以及 Capart 模拟结果进行比对,结果如图 6 所示。在 C3、C4、C6 不同断面位置(其余测点位置论文未明确给出),多流态模型和试验结果都非常吻合,表明多流态模型可以准确刻画管道流的水动力学过程,模拟管道内水位涨落变化情况。

3.2 三维多结构裂隙网络渗流模拟

设计三维正交裂隙网络渗流试验,装置如图 7 所示。试验模型放置在扁长实验槽内,实验槽两侧为 5 mm 厚的玻璃板,可用来对渗流浸润线进行观测[21]。用混凝土试块模拟裂隙岩块,试块尺寸为 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm,考虑到实际工程中地表裂隙较为发育的特点,在三维正交裂隙网络顶部

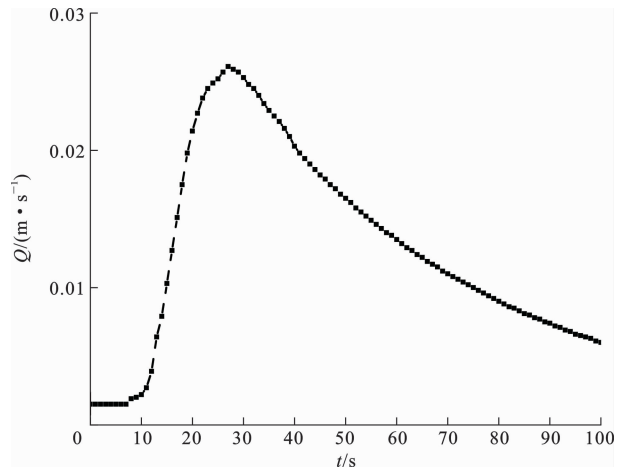


图 5 Capart 管道试验上游入口流量过程曲线

Fig. 5 Flow Process Curve at Upstream Inlet Boundary in Capart's Pipeline Test

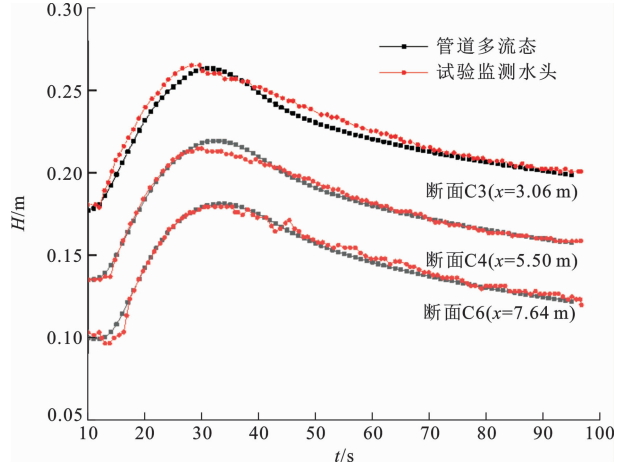


图 6 试验结果与管道数值模拟结果比较

Fig. 6 Comparison Between Numerical Simulation and Test Results

还叠放了两层 7.070 cm×7.070 cm×3.535 cm 的混凝土试块,用以模拟相对较为破碎的岩石。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。混凝土试块的堆砌沿实验槽横向布置 4 列,纵向布置 12 排,高度方向布置 11 层。总计水平缝(与 z 方向垂直)、纵向缝(与 y 方向垂直),横向缝(与 x 方向垂直)3 种裂隙单元共 1 672 个,并利用塞尺直接量测裂隙的机械隙宽。试验模型内预埋 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。试验中设计了不同的工况,上、下游侧设置为定水位边界,侧面和底面都为零通量边界。试验中,调整上、下游水位和降雨量,由压力传感器观测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。

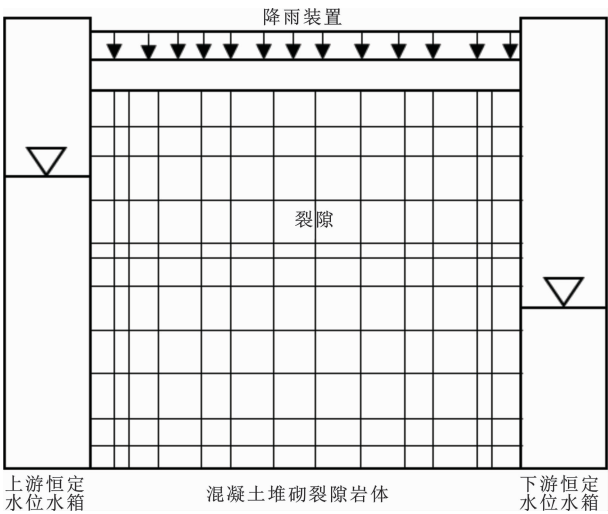


图 7 三维正交裂隙网络渗流试验装置示意图

Fig. 7 Schematic View of Seepage Experiment in Three-dimensional Orthogonal Fracture Network

表 1 列出了上、下游水位分别为 48.3 和 7.0 cm 以及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。图 8 绘出 4 种工况的纵剖面(x 方向)渗流场。从各渗流场的分布来看,等水头线疏密不均,浸润线的坡降变化也较大。各工况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。

表 1 压力传感器实测水头值与数值模拟结果对比

Table 1 Comparison Between Water Head Measured by Pressure Sensor and Numerical Simulation Results

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

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。确定依据是制作试验模型时所测定的每条裂隙机械隙宽;以这些机械隙宽为初值,对数值模型中的水力开度进行校正。从各裂隙机械隙宽的分布来看,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他部位,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分步缩小,使计算流量与试验测定流量接近、流场分布相似,再运用优化调参方法,以水头拟合误

差为目标函数,对数值模型中的各裂隙水力开度进行微量校正调整,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 8 列出了部分工况的渗流场模拟结果。

由图 8 可以明显看到,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,能较为详细地描述裂隙系统中每一裂隙的渗流状况。当然,以上结果是在试验条件下获得的,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,但试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。

3.3 大尺度岩体渗流模拟

实际工程岩体尺度大、裂隙系统复杂,难以离散化每一条裂隙。岩体地下水渗流的主要特征是:大裂隙系统在岩体渗流场中起主导控制作用,构成岩体主干裂隙系统;发育众多裂隙的大岩块在渗流场中储存和补给地下水的作用,构成岩体中的裂隙岩块系统。为此,用离散网络方法来模拟每一条主干裂隙的渗流作用,用等效连续介质方法来模拟各个裂隙岩块的渗流作用,即离散-连续组合方法。

以某抽水蓄能电站上水库工程为例来说明离散-连续组合模型的实用性。该工程上水库坝址区为花岗岩体,受断层、裂隙切割使其成为断块结构,加之地表浅部风化作用强烈,使得岩体渗透性较大,库水的渗漏成为工程建设需解决的一个重要问题。岩体中发育 9 条断层(L36、L51、L49、L50、L37、L48、L53、L15、L14),被断层分割的岩块中发育有 4 组裂隙(图 9、10)。由此构成大尺度岩体的主干裂隙系统和裂隙岩块系统,采用离散-连续组合模型来模拟不同防渗方案下的地下水渗流场和渗流量。

计算结果表明,无防渗条件下,断层是渗流主要通道,渗漏量大,地下水位线发生变化(图 11)。通过不同防渗组合方案的计算和优选,为工程推荐了断层混凝土铺盖、裂隙岩块喷混凝土的组合方案(图 12)。该工程已运行超过 10 年表明,模拟结果能较好地反映实际渗流量和特征。

4 结 语

(1)本文建立的三维裂隙网络渗流模型包含了岩体中 3 种裂隙类型(管状、面状、带状地层等)和相应的全流态过程(层流-过渡流-湍流),以及从局部

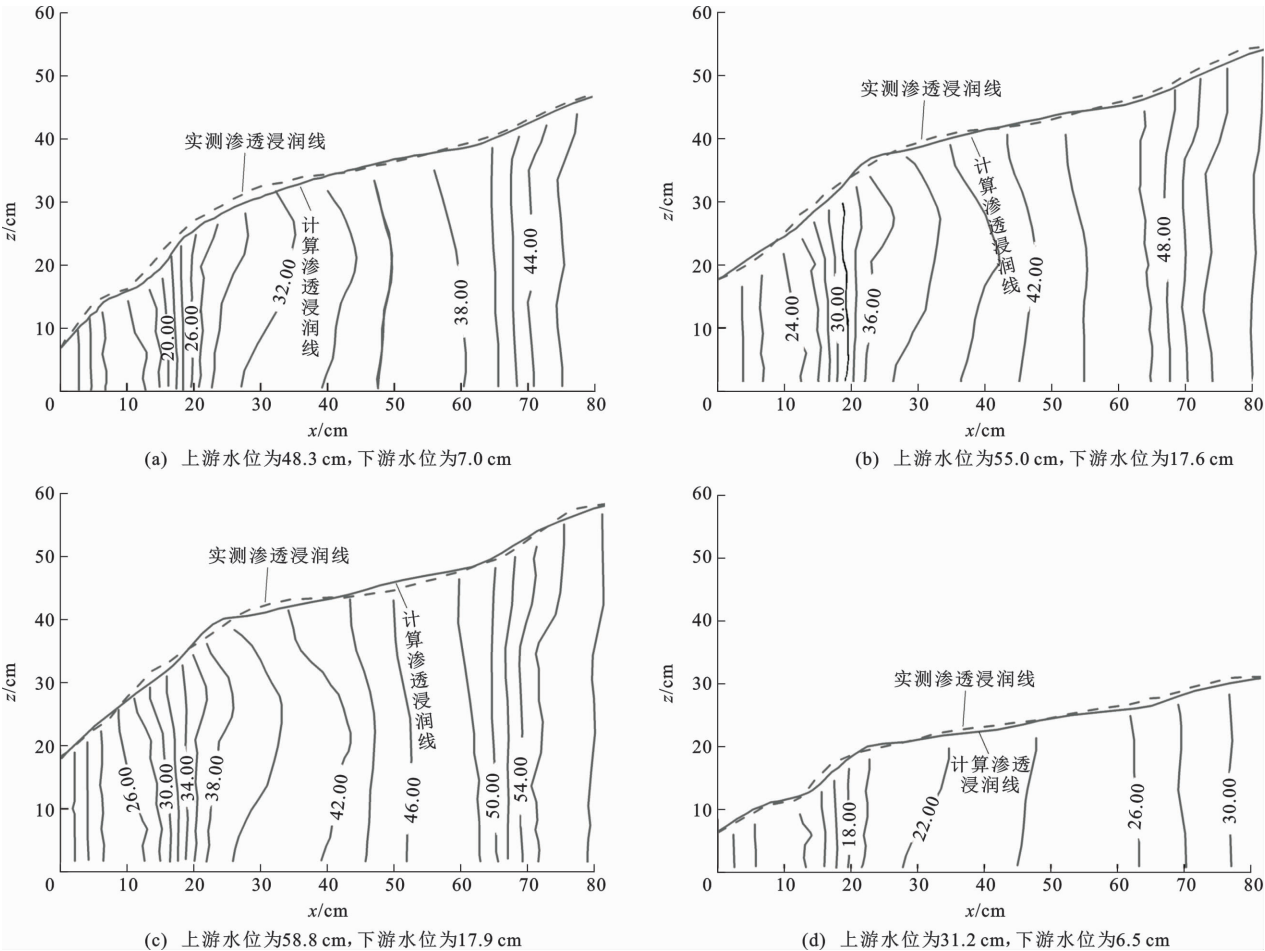


图 8 无降雨裂隙渗流水面线

Fig. 8 Water Level Lines in Crack Without Rainfall

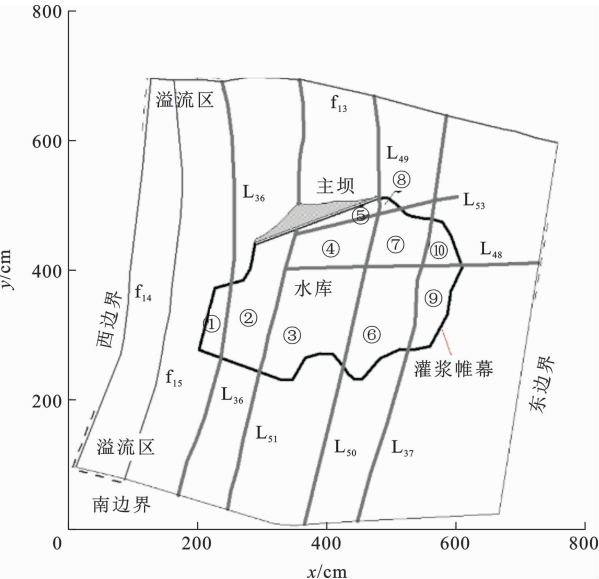


图 9 上水库枢纽布置与岩体结构平面图

Fig. 9 Layout of the Upper Reservoir Junction and Structure Plan of the Rock Mass

连续介质渗流到整体非连续介质渗流的观点。该模型全面反映了岩体中裂隙系统的空间结构和渗流特

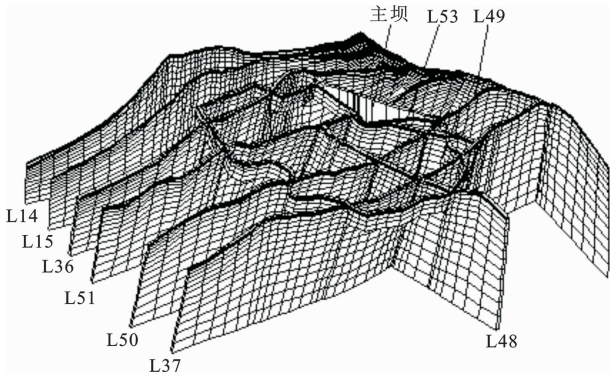


图 10 上水库岩体主干裂隙三维结构图

Fig. 10 Three-dimensional Fissure Structure View of Upper Reservoir Rock Mass

点。从理论上讲,它应是一个真实的裂隙岩体渗流数值模型,可为工程中岩体渗流研究提供理论基础。

(2)基于前人开展的管道流试验,对比分析管道多流态模型的准确性和适用性,其计算结果准确,可以反映管道流动过程中水深变化状况;基于混凝土砌块构筑裂隙网络试验模型,测定渗流场水头变化来获得不同工况的渗流场分布状况,对比试验和计

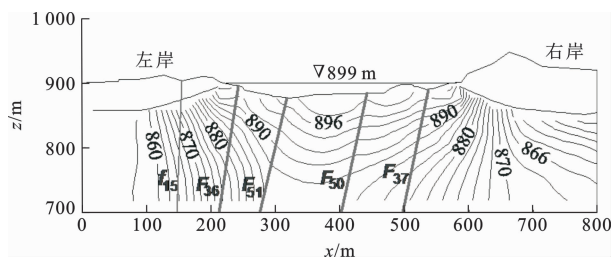
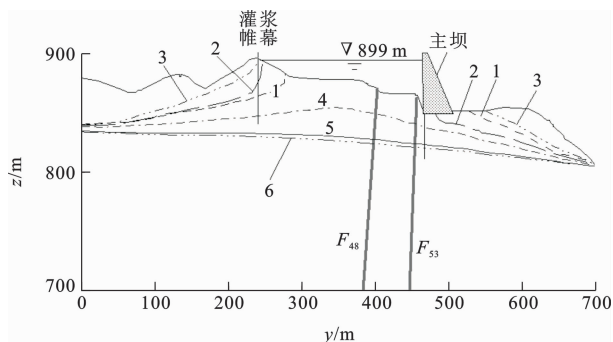


图 11 无防渗工况地下水流场剖面

Fig. 11 Profile of Groundwater Flow Field Without Seepage Control



1 为 CC₂₀ 混凝土土铺盖宽 20 m; 2 为 GC₆₅ 库盆帷幕灌浆深 65 m; 3 为 GF₃₅ 沿断层灌浆深 35 m; 4 为 SC_{S2} 喷混凝土 S2 方案; 5 为 SC_{S4} 喷混凝土 S4 铺盖方案; 6 为 CC_{S6} 混凝土 S6 铺盖方案

图 12 不同防渗方案的地下水位线分布剖面

Fig. 12 Profile of Groundwater Level Distribution in Different Control Conditions

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。因此,本文介绍的三维裂隙网络渗流数值模型作为一个离散-连续离散介质渗流理论模型,在详细描述空间裂隙系统渗流场特征方面具有明显的理论意义和作用。

(3)在实际工程应用中存在着查清岩体中每一条裂隙和渗透参数的困难。为此,在工程实际应用中需按离散-连续渗流原理,从微观上描述主干裂隙系统的结构特征和对渗流场的控制作用,从宏观上研究裂隙岩块的裂隙系统分布规律和渗透特征,使理论模型转化为能直接应用于工程实践的实用模型,这样处理的优点在于既利于实际应用,又不脱离实际。其已成功地应用于水利水电、交通、煤矿等工程的岩体渗流分析,如溪洛渡、向家坝、锦屏、其宗、观音岩、松塔、龙羊峡、拉西瓦等大型水电站,滇中调水、大瑞高铁隧道、派墨高速隧道、冬奥综合管廊、黄岛油库等交通工程,大柳塔、小纪汗、灵新、海州等大型煤矿,为工程渗控提供了支撑。

诚挚感谢彭建兵院士的约稿!值此我国工程地质学科奠基人之一、区域工程地质学理论体系的创

始人刘国昌先生诞辰 110 周年之际,为了纪念先生为我国工程地质事业做出的重要贡献,谨以此文向刘国昌先生致以崇高的敬意!也愿我们工程地质界在先生开拓进取精神的指引下,薪火相传,勇攀科技高峰,不断取得新的更大成就!

参考文献:

References:

- [1] 徐中平,周训,崔相飞,等.岩溶区地下水数值模拟研究进展[J].中国岩溶,2018,37(4):475-483.
XU Zhong-ping, ZHOU Xun, CUI Xiang-fei, et al. Research Advances of Numerical Simulation of Groundwater in Karst Areas[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37 (4): 475-483.
- [2] BARENBLATT G I, ZHELTOV I P, KOCHINA I N. Basic Concepts in the Theory of Seepage of Homogeneous Liquids in Fissured Rocks, Strata[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1960, 24 (5): 1286-1303.
- [3] ATKINSON T C. Diffuse Flow and Conduit Flow in Limestone Terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain) [J]. Journal of Hydrology, 1977, 35 (1/2): 93-110.
- [4] 陈崇希.岩溶管道-裂隙-孔隙三重空隙介质地下水流模型及模拟方法研究[J].地球科学,1995,20(4):361-366.
CHEN Chong-xi. Groundwater Flow Model and Simulation Method in Triple Media of Karstic Tube-fissure-pore[J]. Earth Science, 1995, 20(4): 361-366.
- [5] 王恩志.岩体裂隙的网络分析及渗流模型[J].岩石力学与工程学报,1993,12(3):214-221.
WANG En-zhi. Network Analysis and Seepage Flow Model of Fractured Rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12 (3): 214-221.
- [6] WANG E Z, YUE Z Q, THAM L G, et al. A Dual Fracture Model to Simulate Large-scale Flow Through Fractured Rocks[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(6): 1302-1312.
- [7] 赵坚,赖苗,沈振中.适于岩溶地区渗流场计算的改进折算渗透系数法和变渗透系数法[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):1341-1347.
ZHAO Jian, LAI Miao, SHEN Zhen-zhong. Improved Converting Permeability Coefficient Method and Variable Permeability Coefficient Method for Seepage Calculation in Karst Region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1341-1347.
- [8] MURAD M A, LOPES T V, PEREIRA P A, et al. A

Three-scale Index for Flow in Karst Conduits in Carbonate Rocks [J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 141:103613.

[9] MALENICA L, GOTOVAC H, KAMBER G, et al. Groundwater Flow Modeling in Karst Aquifers: Coupling 3D Matrix and 1D Conduit Flow via Control Volume Isogeometric Analysis: Experimental Verification with a 3D Physical Model[J]. *Water*, 2018, 10 (12):1787.

[10] ZOGHBI C, BASHA H. Simple Transport Models for Karst Systems[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 588: 125046.

[11] ZOGHBI C, BASHA H. Simplified Physically Based Models for Free-surface Flow in Karst Systems[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578:124040.

[12] CHEN Y F, LI B Y, LIU M M, et al. A Forchheimer's Law-based Analytical Model for Constant-rate Tests with Linear Flow Pattern[J]. *Advances in Water Resources*, 2019, 128:1-12.

[13] LIU M M, CHEN Y F, ZHAN H, et al. A Generalized Forchheimer Radial Flow Model for Constant-rate Tests[J]. *Advances in Water Resources*, 2017, 107: 317-325.

[14] JAVADI M, SHARIFZADEH M, SHAHRIAR K, et al. Critical Reynolds Number for Nonlinear Flow Through Rough-walled Fractures: The Role of Shear Processes[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50 (2):1789-1804.

[15] ZHANG Z, NEMCIK J. Fluid Flow Regimes and Non-linear Flow Characteristics in Deformable Rock Fractures[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 477:139-151.

[16] ZENG Z, GRIGG R. A Criterion for Non-Darcy Flow in Porous Media [J]. *Transport in Porous Media*, 2006, 63(1):57-69.

[17] CORNATON F, PERROCHET P. Analytical 1D Dual-porosity Equivalent Solutions to 3D Discrete Single-continuum Models, Application to Karstic Spring Hydrograph Modelling[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 262(1/2/3/4):165-176.

[18] DE ROOIJ R, PERROCHET P, GRAHAM W. From Rainfall to Spring Discharge: Coupling Conduit Flow, Subsurface Matrix Flow and Surface Flow in Karst Systems Using a Discrete-continuum Model[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 61:29-41.

[19] SWAMEE P K, SWAMEE N. Full-range Pipe-flow Equations[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2010, 45 (6):841-843.

[20] SHOEMAKER W B, KUNIANSKY E L, BIRK S, et al. Documentation of a Conduit Flow Process(CFP) for MODFLOW-2005[R]. Reston: USGS, 2008.

[21] 王恩志, 孙 役, 黄远智, 等. 三维离散裂隙网络渗流模型与实验模拟[J]. *水利学报*, 2002, 33(5):37-40.

WANG En-zhi, SUN Yi, HUANG Yuan-zhi, et al. 3-D Seepage Flow Model for Discrete Fracture Network and Verification Experiment[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 33(5):37-40.

[22] BORELLI M, PAVLINE B. Approach to the Problem of Underground Water Leakage from the Storages in Karst Regions[C] // AIME. *Hydrologie des Roches Fissures*, Proceedings of the Dubrovnik Symposium. Paris: AIME, 1965:32-62.

[23] 黄延章. 低渗透油层非线性渗流特征[J]. *特种油气藏*, 1997, 4(1):9-14.

HUANG Yan-zhang. Characteristics of Nonlinear Flow in Low Permeability Reservoir[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 1997, 4(1):9-14.

[24] CAPART H, SILLEN X, ZECH Y. Numerical and Experimental Water Transients in Sewer Pipes[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2010, 35(5):659-672.