

部分充填周期性裂隙岩体渗流理论分析与试验*

舒付军^{1,2}, 符文熹^{1,2†}, 魏玉峰^{1,2,3,4}, 夏伟^{1,2}

(1. 四川大学 水力学与山区河流保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065;

3. 成都理工大学 地质灾害与环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

4. 成都理工大学 环境与土木学院, 四川 成都 610059)

摘要:为研究部分充填周期性裂隙岩体的渗流特性,建立了岩体渗流分析模型.基于无充填裂隙中流体满足 Navier-Stokes 方程和多孔介质中渗流满足 Brinkman-extended Darcy 方程,采用不同介质交界面流速相等且剪应力连续的边界条件,推求出部分充填周期性裂隙岩体中流体的流速分布,并给出了岩体等效渗透率的理论表达式.研制渗透试验装置,选用混凝土模拟岩石基质,混凝土间的缝隙模拟岩体裂隙,砂岩模拟充填物,进行部分填充裂隙岩体的等效渗透试验.试验测得的结果与理论计算值相比,二者差值很小,试验很好地验证了等效渗透率表达式的有效性.

关键词:部分充填周期性裂隙;渗流;流速分布;等效渗透率;渗透试验

中图分类号:TU42

文献标志码:A

Theoretical Analysis and Experiment on Seepage of Rock Mass Containing Periodic Fractures with Partial Filling

SHU Fujun^{1,2}, FU Wenxi^{1,2†}, WEI Yufeng^{1,2,3,4}, XIA Wei^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

4. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In order to study the seepage characteristics of rock mass containing periodic fractures with partial filling, an analysis model for the seepage of rock mass was built. Two boundary conditions were given for the interfaces between different medium in the model: 1) equal velocity; and 2) continuous shear stress. According to the given conditions, the velocity distribution in the fractures was deduced by using the Navier-Stokes equation and that in porous medium was deduced by using the Brinkman-extended Darcy equation. The equivalent permeability of rock mass containing periodic fractures without partial filling was also derived. A test equipment was made to carry out the equivalent permeability tests. In the tests, concrete and sandstone were used to simulate rock and filling fractures between two pieces of concrete. The difference of the results measured by tests and the equivalent permeability calculated from the theoretical

* 收稿日期:2016-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41772321), National Natural Science Foundation of China(41772321); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2015CB057903), National Program on Key Basic Research Project of China (2015CB057903); 四川省科技计划专项(2014SS027), Science and Technology Project of Sichuan Province (2014SS027); 中国博士后科学基金资助项目(2016M590890), Chinese Postdoctoral Science Foundation (2016M590890)

作者简介:舒付军(1991—),男,山东德州人,四川大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: wxf_lee@scu.edu.cn

expression was very small. The test result validates well the derived expression.

Key words: periodic fracture with partial filling; seepage; velocity distribution; equivalent permeability; seepage test

裂隙岩体的渗透特性及其渗流极大地影响了水利水电、矿山和交通等工程的施工安全和正常运行,其研究受到了工程界和学术界的广泛关注.文献[1-4]分别研究了隙宽、隙面粗糙度、充填物和应力对单裂隙渗流的影响.文献[5]和文献[6]对非饱和渗流进行了研究,前者自制单裂隙渗流实验装置,并进行了一系列渗流实验,建立了隙宽与负压、饱和度与负压、隙宽与饱和度以及负压与非饱和渗透系数之间的实验关系;后者为了研究单裂隙非饱和渗流的水力特性,根据隙面的分形维数、位错值和面积接触率,提出了采用随机布朗函数生成裂隙开度分布的方法.

但实际上岩石基质可视为多孔介质,而多孔介质具有非线性渗流规律^[7],且应该考虑不同介质交界面的边界影响.文献[8]简要介绍了几种边界条件,并采用 Ochoa-Tapia 和 Whitaker 提出的 stress-jumped 边界条件进行求解,得出了二维流体在裂隙和多孔介质中的流速分布.文献[9]采用 Beavers-Joseph-Saffman (BJS)边界条件推导出了裂隙岩体等效渗透系数的表达式,并对表达式中的几个组成部分进行了分析.文献[10]基于均匀化理论对离散缝洞网络宏观流动数学模型进行了尺度升级分析,推导得到了大尺度上的等效 Darcy 流动方程,并给出了裂隙介质等效渗透率的表达式.也有部分学者对完全充填裂隙岩体的渗透特性进行了试验研究^[11-12],试验研究了高围压和充填物粒度等因素对充填裂隙岩体渗流特性的影响.

虽然目前对裂隙岩体的渗流研究比较多,但是对部分充填裂隙岩体的渗流鲜有研究.因此,对部分充填周期性裂隙岩体的渗流问题,开展理论分析与试验有一定的研究意义.本文将岩体中的微裂隙、不连通空隙视为组成岩石基质的一部分,应用连续性方程、Navier-Stokes 方程和 Brinkman-extended Darcy 方程,对岩石基质、充填物和无充填裂隙中流体的流速进行理论分析,并根据不同介质交界面流速相等且剪应力连续的边界条件,推求出了部分充填周期性裂隙岩体等效渗透率的理论表达式.最后研制渗透试验装置,对部分充填裂隙岩体

进行了物理模型试验,试验很好地验证了所推求等效渗透率表达式的有效性.

1 流体运动基本理论与边界条件

1.1 流体运动基本理论

不管是无充填裂隙中的流体还是多孔介质中的渗流均满足连续性方程^[8]:

$$\nabla \cdot v = 0. \quad (1)$$

式中: v 为裂隙中流体的真实流速或多孔介质中的 Darcy 流速, m/s.

裂隙中的流体运动满足 Navier-Stokes 方程^[8]:

$$-\nabla P + \eta \nabla^2 v = \rho(v \cdot \nabla) \cdot v. \quad (2)$$

式中: P 为流体压强, FL^{-2} ; η 为动力黏度, FLT^{-2} ; ρ 为流体密度, ML^{-3} .

岩石基质和充填物中的渗流考虑了固体颗粒对流体的阻碍作用,其运动满足 Brinkman-extended Darcy 方程^[8]:

$$-n \nabla P + \eta \nabla^2 u - n \frac{\eta}{K} u = \frac{\rho}{n} (u \cdot \nabla) \cdot u. \quad (3)$$

式中: n 为岩石基质或充填物的孔隙率,无量纲; u 为岩石基质或充填物中流体的 Darcy 流速, LT^{-1} ; K 为岩石基质或充填物的渗透率, L^2 .

1.2 边界条件

为研究多孔介质的渗流特性,国外学者提出了 3 种边界条件.

Beavers 和 Joseph^[13]提出了流速不连续的 BJS 边界条件,他们认为不同介质交界面流速满足以下条件:

$$v^* - u^* = \frac{\sqrt{K}}{\alpha} \frac{dv^*}{dy}. \quad (4)$$

式中: v^* 是裂隙中流体的真实流速, LT^{-1} ; u^* 是多孔介质中渗流的 Darcy 流速, LT^{-1} ; α 为系数,由试验确定,取值在 0.1~4 之间.

Neal 和 Nader^[14]提出了质疑,认为不同介质交界面流速相等且剪应力连续,因此提出:

$$u_x^* = v_x^*, \quad (5)$$

$$\eta_e \frac{du_x^*}{dy} = \eta \frac{dv_x^*}{dy}. \quad (6)$$

式中: η_e 为有效动力黏度, $\text{FL}^{-2} \cdot \text{T}$, $\eta_e = \eta/n$.

Ochoa-Tapia 和 Whitaker^[15] 提出了流速连续, 但剪应力发生跳跃的边界条件, 其表达式为:

$$u_x^* = v_x^*, \quad (7)$$

$$\frac{1}{n} \frac{du_x^*}{dy} - \frac{dv_x^*}{dy} = \frac{\beta}{\sqrt{K}} u_x^*. \quad (8)$$

式中: β 为应力跳跃系数, 由试验确定.

因系数 α 和 β 只能通过试验测得, 且目前还没有系统的测试方法, 所以本文选用 Neal 和 Nader 提出的不同介质交界面流速相等且剪应力连续的边界条件进行计算.

2 理论分析

2.1 分析模型

假设岩体中的裂隙部分充填且周期性分布. 选取岩体中周期性分布的部分建立分析模型, 如图 1 所示.

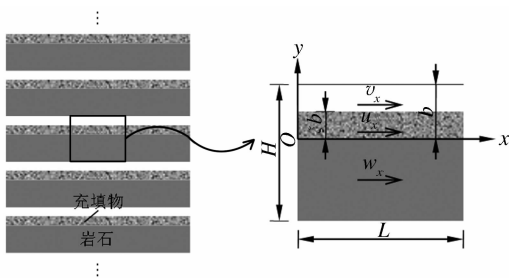


图 1 岩体渗流分析模型

Fig.1 An analysis model for seepage of rock mass

如图 1 所示, 在分析模型中建立平面直角坐标系 xOy . 分析模型沿 x 方向长度为 L , 沿 y 方向厚度为 H , 其中裂隙开度为 b , 充填物厚度为 ξb (ξ 为充填物厚度与裂隙开度之比). 沿 x 方向, 无充填裂隙中流体的局部平均流速为 v_x , 充填物中流体的局部平均流速为 u_x , 岩石基质中流体的局部平均流速为 w_x . 充填物孔隙率为 n_1 , 渗透率为 K_1 . 岩石基质孔隙率为 n_2 , 渗透率为 K_2 .

为了便于分析, 做出以下假设:

a) 岩体沿 x 方向无限延伸, 沿 y 方向周期性分布;

b) 无充填裂隙中的流体为 Newton 流体, 且为充分发展的层流;

c) 只考虑裂隙延伸方向(图 1 中 x 方向)的一维流动, 即沿 y 和 z 方向的流速为 0;

d) 无充填裂隙、充填物和岩石基质中的流体不可压缩, 即均满足连续性方程;

e) 无充填裂隙中的流体满足 Navier-Stokes 方程, 充填物和岩石基质中的渗流满足 Brinkman-extended Darcy 方程;

f) 不同介质交界面流速相等且剪应力连续.

2.2 流速分布

本文主要研究裂隙延伸方向即 x 方向的流速.

无充填裂隙中的流体满足连续性方程和 Navier-Stokes 方程, 即式(9)和式(10):

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

式中: v_x, v_y, v_z 是无充填裂隙中流体分别沿 x, y, z 方向的真实流速, LT^{-1} .

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) = \rho \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right). \quad (10)$$

由 $v_y = v_z = 0$, 得 $\partial v_y / \partial y = \partial v_z / \partial z = 0$, 代入式(9)得 $\partial v_x / \partial x = 0$; 由 v_x 在 z 方向不发生变化, 得 $\partial v_x / \partial z = 0$; 沿 x 方向, $dP / dx = -\Delta P / L$. 将以上各值代入式(10)得:

$$\eta \frac{d^2 v_x}{dy^2} + \frac{\Delta P}{L} = 0. \quad (11)$$

求解式(11)得无充填裂隙中流体的流速 v_x 为:

$$v_x = -\frac{\Delta P}{2\eta L} y^2 + A_1 y + A_2. \quad (12)$$

式中: A_1, A_2 为定常数, 可根据边界条件求出.

充填物中的渗流满足连续性方程和 Brinkman-extended Darcy 方程, 即式(13)和式(14):

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0. \quad (13)$$

式中: u_x, u_y, u_z 是充填物中的渗流分别沿 x, y, z 方向的 Darcy 流速, LT^{-1} .

$$-n_1 \frac{\partial P}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) - n_1 \frac{\eta}{K_1} u_x =$$

$$\frac{\rho}{n_1} \left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right). \quad (14)$$

与无充填裂隙中流体的分析相同, 式(14)可化简为:

$$\frac{d^2 u_x}{dy^2} - n_1 \frac{u_x}{K_1} + n_1 \frac{\Delta P}{\eta L} = 0. \quad (15)$$

求解式(15)得充填物中流体的流速 u_x 为:

$$u_x = B_1 e^{y\sqrt{n_1/K_1}} + B_2 e^{-y\sqrt{n_1/K_1}} + \frac{\Delta P K_1}{\eta L}. \quad (16)$$

式中: B_1 、 B_2 为定常数, 可根据边界条件求出.

岩石基质中的渗流满足连续性方程和 Brinkman-extended Darcy 方程, 即式 (17) 和式 (18).

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0. \quad (17)$$

式中: w_x 、 w_y 、 w_z 是岩石基质中的流体分别沿 x 、 y 、 z 方向的 Darcy 流速, LT^{-1} .

$$-n_2 \frac{\partial P}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) - n_2 \frac{\eta}{K_2} w_x = \frac{\rho}{n_2} \left(w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} \right). \quad (18)$$

式(18)也可简化为:

$$\frac{d^2 w_x}{dy^2} - n_2 \frac{w_x}{K_2} + n_2 \frac{\Delta P}{\eta L} = 0. \quad (19)$$

求解式(19)得岩石基质中流体的流速 w_x 为:

$$w_x = C_1 e^{y\sqrt{n_2/K_2}} + C_2 e^{-y\sqrt{n_2/K_2}} + \frac{\Delta P K_2}{\eta L}. \quad (20)$$

式中: C_1 、 C_2 为定常数, 可根据边界条件求出.

分析模型满足不同介质交界面流速相等且剪应力连续的边界条件, 即式(21):

$$\begin{cases} w_x[-(H-b)] = v_x(b), \frac{dw_x}{dy} \Big|_{y=b} = \frac{1}{n_2} \frac{dw_x}{dy} \Big|_{y=-(H-b)}; \\ u_x(0) = w_x(0), \frac{1}{n_1} \frac{du_x}{dy} \Big|_{y=0} = \frac{1}{n_2} \frac{dw_x}{dy} \Big|_{y=0}; \\ u_x(\xi b) = v_x(\xi b), \frac{1}{n_1} \frac{du_x}{dy} \Big|_{y=\xi b} = \frac{dw_x}{dy} \Big|_{y=\xi b}. \end{cases} \quad (21)$$

将式(21)代入式(12)(16)(20)得到矩阵式(22), 系数 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 、 C_1 和 C_2 可由其求得. 因各系数的表达式较为复杂, 故未一一列出. 将各系数代入式(12)(16)(20)可得岩体的流速分布.

$$\begin{bmatrix} b & 1 & 0 & 0 & -e^{-(b-H)\sqrt{n_2/K_2}} & -e^{-(b-H)\sqrt{n_2/K_2}} \\ \sqrt{n_2 K_2} & 0 & 0 & 0 & -e^{-(b-H)\sqrt{n_2/K_2}} & e^{-(b-H)\sqrt{n_2/K_2}} \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \sqrt{n_2 K_2} & -\sqrt{n_2 K_2} & -\sqrt{n_1 K_1} & \sqrt{n_1 K_1} \\ \xi b & 1 & -e^{\xi b \sqrt{n_1/K_1}} & -e^{-\xi b \sqrt{n_1/K_1}} & 0 & 0 \\ \sqrt{n_1 K_1} & 0 & -e^{\xi b \sqrt{n_1/K_1}} & e^{-\xi b \sqrt{n_1/K_1}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ B_1 \\ B_2 \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta P}{2\eta L} (b^2 + 2K_2) \\ \frac{\Delta P}{\eta L} b \sqrt{n_2 K_2} \\ \frac{\Delta P}{\eta L} (K_1 - K_2) \\ 0 \\ \frac{\Delta P}{2\eta L} [(\xi b)^2 + 2K_1] \\ \frac{\Delta P}{\eta L} \xi b \sqrt{n_1 K_1} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

2.3 等效渗透率

本文主要研究裂隙延伸方向即 x 方向的等效渗透率, y 方向的等效渗透率可通过 y 方向的流量相等简单求得.

岩体沿 x 方向的平均流速 v_A 为:

$$v_A = \left(\int_{-(H-b)}^0 w_x dy + \int_0^{\xi b} u_x dy + \int_{\xi b}^b v_x dy \right) / H. \quad (23)$$

由 Darcy 定律有:

$$v_A = k_x J_x. \quad (24)$$

式中: k_x 为岩体沿 x 方向的渗透系数, LT^{-1} , $k_x = \gamma K_x / \eta$; J_x 为岩体沿 x 方向的水力梯度, 无量纲, $J_x = \Delta h / L$, 且 Δh 可由 $\Delta P = \gamma \Delta h$ 求得.

由以上各式可求得岩体等效渗透率 K_x 为:

$$K_x = \frac{\eta L}{\Delta P H} \left(\int_{-(H-b)}^0 w_x dy + \int_0^{\xi b} u_x dy + \int_{\xi b}^b v_x dy \right). \quad (25)$$

将 u_x 、 v_x 、 w_x 代入式(25)可化简写出部分充填周期性裂隙岩体等效渗透率 K_x 的表达式, 即式

(26):

$$K_x = \frac{1}{H} \left[\frac{(1-\xi)^3 b^3}{12} + \xi b K_1 + (H-b) K_2 + \frac{(1-\xi)b}{2} (K_1 + K_2) - \frac{2(K_1 - K_2)^2}{\sqrt{n_1 K_1} + \sqrt{n_2 K_2}} \right]. \quad (26)$$

对式(26)进行分析可知: 等效渗透率 K_x 主要受裂隙开度 b 、岩体厚度 H 和充填物厚度 ξb 的影响. 且等效渗透率 K_x 随裂隙开度 b 的增大而变大, 随岩体厚度 H 和充填物厚度 ξb 的增大而减小. 另外, 充填物、岩石基质的孔隙率 n 和渗透率 K 对等效渗透率 K_x 也有一定影响. 但是渗透率 K 的量级很小, 因此充填物、岩石基质的孔隙率 n 和渗透率 K 对等效渗透率 K_x 的影响很小.

当裂隙无填充 ($\xi = 0$) 且岩石基质不透水时, 岩体的等效渗透率 K_x 为:

$$K_x = \frac{b^3}{12H}. \quad (27)$$

由 $q = v_A H$, $v_A = k_x J_x$, $k_x = \gamma K_x / \eta$ 和式

(27)求得的裂隙岩体单宽流量与立方定律相同^[16], 其表达式为:

$$q = \frac{gb^3}{12\nu} J_x \quad (28)$$

当裂隙无填充($\xi = 0$)时,岩体的等效渗透率 K_x 为:

$$K_x = \frac{1}{H} \left[\frac{b^3}{12} + \left(H - \frac{b}{2} \right) K_2 - 2\sqrt{\frac{K_2^3}{n_2}} \right] \quad (29)$$

当裂隙全充填($\xi = 1$)时,岩体的等效渗透率 K_x 为:

$$K_x = \frac{1}{H} \left[bK_1 + (H-b)K_2 - \frac{2(K_1 - K_2)^2}{\sqrt{n_1 K_1} + \sqrt{n_2 K_2}} \right] \quad (30)$$

3 试验验证

为验证所推求等效渗透率表达式的有效性,选用混凝土模拟岩石基质,混凝土间的缝隙模拟岩体裂隙,砂岩模拟充填物,进行部分填充裂隙岩体的等效渗透试验.

3.1 模拟岩石基质的等效渗透试验

试验装置由进水装置、渗透装置和集水装置三

部分组成,如图 2 所示.

渗透装置外框由有机玻璃板制成,内部尺寸为长、宽、高分别为 300 mm、200 mm、200 mm. 为防止渗透装置漏水,在左右盖子内加入止水垫. 在渗透装置上表面左右侧各打 2 个孔,一个孔用来进出水,另一个孔用来安装测压管.

试验选用粒径为 1 mm 的粗砂浇筑混凝土模拟岩石基质. 浇筑混凝土时,在中间水平放置一块泡沫板,其长、宽、高分别为 200 mm、200 mm、8 mm,并在其与外框接触界面涂上胶水进行防渗处理. 泡沫板为不透水介质,去除后留下的缝隙用来模拟岩体裂隙. 浇筑混凝土的尺寸如图 2(a)所示. 待混凝土彻底凝固后,按图 2(b)连接好渗透装置,根据文献^[17]进行渗透试验. 试验可测得混凝土的渗透系数 k ,再由式(31)换算得到渗透率 K . 最终得到混凝土的平均渗透率 K_2 为 $4.84 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$,试验结果见表 1.

$$K = \frac{\eta k}{\rho_w g} \quad (31)$$

式中: η 为动力黏度, FLT^{-2} ,可由公式 $\eta = \rho_w \nu$ (式中 ν 为运动黏度,可根据相应温度由相关文献查得)计算得到; ρ_w 为水的密度, ML^{-3} .

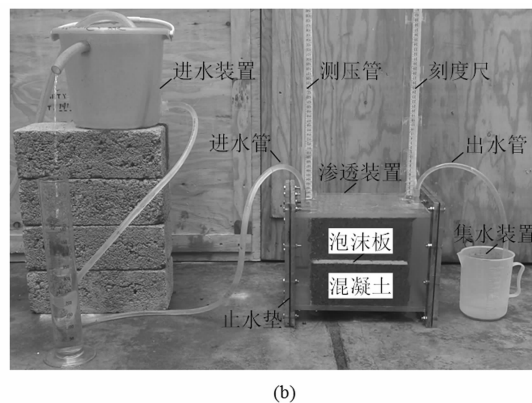
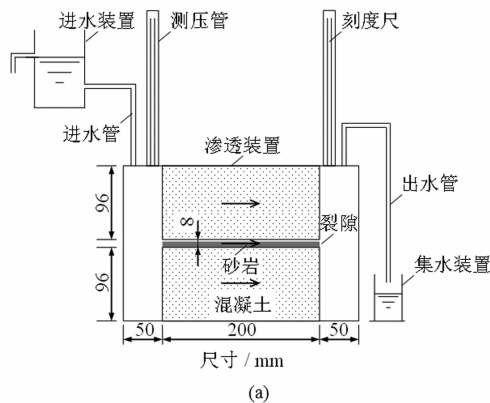


图 2 试验装置

Fig.2 Test equipment

表 1 混凝土的试验结果

Tab.1 Test results of concrete

渗径 L/cm	过流面积 A/cm^2	水头差 H/cm	时间 t/s	体积 V/cm^3	渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	渗透率 K/cm^2	平均值 K_2/cm^2
20	384	21	2 960	600	0.000 503	5.18×10^{-9}	4.84×10^{-9}
20	384	22	3 105	650	0.000 496	5.11×10^{-9}	
20	384	20	3 062	500	0.000 425	4.38×10^{-9}	
20	384	23	3 153	600	0.000 431	4.44×10^{-9}	
20	384	20	3 144	550	0.000 456	4.70×10^{-9}	
20	384	25	3 266	800	0.000 510	5.26×10^{-9}	

3.2 模拟部分充填裂隙岩体的等效渗透试验

试验选用砂岩模拟充填物. 砂岩的长、宽、高分别为 200 mm、200 mm、7.2 mm(即 $\xi = 0.9$). 预先对砂岩进行渗透试验, 最终得到砂岩的平均渗透率 K_1 为 $6.42 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$.

在测得混凝土的平均渗透率 K_2 后, 将混凝土

中的泡沫板去除, 形成的缝隙模拟裂隙. 然后如图 2(a)所示, 将砂岩放入缝隙中进行部分充填, 并用铁架固定混凝土块. 最后按图 2(b)连接好试验装置, 再次进行渗透试验, 得到平均渗透率 K_e 为 $2.35 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$, 试验结果见表 2.

表 2 模拟岩体的试验结果

Tab.2 Test results of simulated rock mass

渗径 L/cm	过流面积 A/cm^2	水头差 H/cm	时间 t/s	体积 V/cm^3	渗透系数 $k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	渗透率 K/cm^2	平均值 K_e/cm^2
20	400	9	73	3 200	0.244	2.51×10^{-6}	2.35×10^{-6}
20	400	12	58	3 000	0.216	2.22×10^{-6}	
20	400	10	69	3 500	0.254	2.61×10^{-6}	
20	400	11	67	3 000	0.204	2.10×10^{-6}	
20	400	9	74	3 000	0.225	2.32×10^{-6}	
20	400	10	66	3 000	0.227	2.34×10^{-6}	

3.3 混凝土和砂岩的孔隙率

孔隙率 n 可先通过试验测得比重 G_s 和干密度 ρ_d , 再由式(32)换算得到. 最终得到混凝土的孔隙率 n_2 为 3%, 砂岩的孔隙率 n_1 为 14%.

$$n = \frac{G_s \rho_w - \rho_d}{G_s \rho_w} \quad (32)$$

式中: G_s 为比重, 无量纲; ρ_d 为干密度, ML^{-3} .

3.4 结果比较

将 $n_1 = 14\%$, $K_1 = 6.42 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$, $n_2 = 3\%$, $K_2 = 4.84 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$, $H = 20 \text{ cm}$, $b = 0.8 \text{ cm}$ 和 $\xi = 0.9$ 代入式(26)计算得到的等效渗透率 K_x 为 $2.14 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$.

通过试验测得的平均渗透率 K_e 为 $2.35 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$. 可见等效渗透率 K_x 和平均渗透率 K_e 之间还存在一定的差值. 分析试验条件, 存在差值的原因可能包括浇筑的混凝土不均匀和表面不够光滑平整等.

虽然试验测得的平均渗透率 K_e 比计算得到的等效渗透率 K_x 略大, 但是两者在同一量级, 且差值并不大. 试验很好地验证了所推求等效渗透率表达式的有效性.

4 结 论

1) 推求获得的部分充填周期性裂隙岩体等效渗透率理论表达式揭示, 等效渗透率主要受裂隙开度、岩体厚度和充填物厚度的影响. 等效渗透率随裂隙开度的增大而增大, 随岩体厚度和充填物厚度的增大而减小.

2) 给出的等效渗透率表达式不仅能用于计算部

分充填周期性裂隙岩体的渗透率, 而且也能用于计算无充填或全充填周期性裂隙岩体的渗透率.

3) 验证试验结果表明, 试验测得的平均渗透率比理论表达式计算值略大, 但二者相差很小. 试验很好地验证了所推求等效渗透率表达式的有效性.

参考文献

- [1] BAGHBANAN A, JING L. Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, 44(5): 704-719.
- [2] 王志良, 申林方, 徐则民, 等. 岩体裂隙面粗糙度对其渗流特性的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1262-1268. WANG Z L, SHEN L F, XU Z M, et al. Influence of roughness of rock fracture on seepage characteristics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7): 1262-1268. (In Chinese)
- [3] 速宝玉, 詹美礼, 赵坚. 仿天然岩体裂隙渗流的实验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 27(5): 19-24. SU B Y, ZHAN M L, ZHAO J. Study on fracture seepage in the imitative nature rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 27(5): 19-24. (In Chinese)
- [4] 李新平, 米健, 张成良, 等. 三维应力作用下岩体单个裂隙的渗流特性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(S1): 13-16. LI X P, MI J, ZHANG C L, et al. Analysis of seepage characteristics of rock masses with a single joint under 3D stresses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S1): 13-16. (In Chinese)
- [5] 孙役, 王恩志, 陈兴华. 降雨条件下的单裂隙非饱和和渗流实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(11): 14-17. SUN Y, WANG E Z, CHEN X H. Experiment studies for unsaturated flow in a single fracture under rainfall[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 1999, 39(11): 14-17. (In Chinese)
- [6] 钟振, 胡云进, 刘国华. 考虑裂隙-岩块间水交换的单裂隙非饱

- 和渗流数值模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(4): 51—56.
- ZHONG Z, HU Y J, LIU G H. Numerical simulation of unsaturated flow in single fracture considering the water exchange between fracture and matrix[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(4): 51—56. (In Chinese)
- [7] 刘硕, 胡亚非, 王启立. 石墨多孔介质非线性渗流规律研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(7): 79—83.
- LIU X, HU Y F, WANG Q L. Study on nonlinear seepage law in graphite porous materials[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, 39(7): 79—83. (In Chinese)
- [8] DENG C, MARTINEZ D M. Viscous flow in a channel partially filled with a porous medium and with wall suction[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(2): 329—336.
- [9] ARBOGAST T, LEHR H L. Homogenization of a Darcy-Stokes system modeling vuggy porous media[J]. Computational Geosciences, 2006, 10(3): 291—302.
- [10] HUANG Z Q, YAO J, LI Y J, *et al.* Permeability analysis of fractured vuggy porous media based on homogenization theory [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(3): 839—847.
- [11] 刘欣宇, 刘爱华, 李夕兵. 高围压条件下含充填裂隙类岩石水渗流试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1390—1398.
- LIU X Y, LIU A H, LI X B. Experimental study of permeability of rock-like material with filling fractures under high confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1390—1398. (In Chinese)
- [12] 刘杰, 李建林, 王瑞红, 等. 含密实原岩充填物的宜昌砂岩裂隙渗流试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 366—374.
- LIU J, LI J L, WANG R H, *et al.* Experimental study of seepage in Yichang fractured sandstone with tight original rock fillings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 366—374. (In Chinese)
- [13] BEAVERS G S, JOSEPH D D. Boundary conditions at a naturally permeable wall[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1967, 30(1): 197—207.
- [14] NEAL E G, NADER W. Practical significance of Brinkman's extension of Darcy's law: coupled parallel flows within a channel and a bounding porous medium [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1974, 52(4): 475—478.
- [15] OCHOA-TAPIA J A, WHITAKER S. Momentum transfer at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid—I. theoretical development[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1995, 38(38): 2635—2646.
- [16] 林建忠, 阮晓东, 陈邦国, 等. 流体力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 262—264.
- LIN J Z, RUAN X D, CHEN B G, *et al.* Fluid mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 262—264. (In Chinese)
- [17] 杨进良. 土力学[M]. 4版. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 357—358.
- YANG J L. Soil mechanics[M]. 4th ed. Beijing: China Water & Power Press, 2009: 357—358. (In Chinese)