

裂隙岩体在工程中的流固耦合分析

李磊

重庆工贸职业技术学院，重庆，408000；

摘要：讨论了涉及岩体-流体相互作用的地下流固耦合理论的进展概况。重点讨论了在裂隙岩体介质中渗流现象的主要影响因素运用岩体重构理论对裂隙岩体进行三维重构，包括岩体渗流尺度设置、孔隙单元和非孔隙单元的赋值。以及不同孔隙率条件下的渗流效应。

关键词：流固耦合；重构岩体；孔隙率；微观渗流

DOI：10.69979/3029-2727.25.03.040

近年来，随着施工技术的快速发展，岩土工程在隧道工程中的应用日益广泛，岩土工程的应用规模和深度不断增长，但与之相伴的是岩体工程中的流固耦合^[1]问题也日益凸显。岩体裂隙在地层中，存在着由地应力场、渗流场^[2]、地温场等多个部位构成的环境，上述环境在人类施工过程中对工程又产生了一定的干扰和制约。而施工过程中面临的主要问题是岩体在上述环境中，特别是动态变形和破坏。

在目前的裂隙岩体中，裂隙分布比较广泛，裂隙的种类也很多，比如微裂纹、孔隙和节理裂隙等宏观的非连续性面，它们的存在使得地下水的储藏提供了场所，而地下水的渗流形式又为岩体提供了渗透应力，从而影响岩体中应力场的分布，因此，在岩体中，裂隙的分布也就更加广泛。岩石本身是一种天然的带孔介质，内部蕴藏着大量的孔隙，其走向呈现出跨尺度、不规则的状态，研究岩体的孔隙构成对渗流场的渗流特性影响深远，对岩体的破坏及破坏行为的宏观机理意义重大。

目前，研究者正在进行的建立岩体三维数值模型的重构，Lock 在二维层面分析了岩体孔隙结构及其特征，并在此基础上提出了立方体网络的孔隙管模型，以此进行沉积岩内部渗透率预测；H. Okabe 和 M. Blunt^[3]在岩体孔隙二维切片的基础上，采用多点统计的方法建立了三维孔隙模型，模拟研究得出了多孔隙岩体的多相流体问题；我国王金波在改进随机堆积球法的基础上，提出了岩石孔隙结构的三维重构，以及气体在岩体内部的渗流行为，并在此基础上对沉积岩内部的孔隙结构进行了深入的分析。基于以上几种不同的岩体三维重构分析，我们主要对岩体孔隙在微观力学层面进行了研究：孔隙结构对多孔岩体介质的渗流作用。

1 随机岩石孔隙结构三维重构

1.1 岩体渗流研究尺度

以往，对于岩体渗流^[4]的研究，主要是研究岩体内部渗液的流动规律、流固耦合的响应速率等，从宏观尺度上把岩体作为研究对象。在计算渗流场的过程中，计算尺度大多在千米量级，业界把这种计算过程称为宏观水平计算，它是渗流力学服务于岩体工程的尺度，一般宏观条件下的计算是不考虑多孔岩体孔隙的形态、分布规律等微观特性的。力学渗透参数如：裂隙的流量，岩体裂隙的渗透系数，岩体裂隙分析等，更是被重视。而微观层面的渗流体研究更多的是多孔结构内部流体的流动走向和细节，考虑的更多的是多流体之间的相互作用，流体与多孔结构表面的相互作用，这一层面的流体研究主要计算尺度发生在微米级，我们把这种称为微观孔隙，微观孔隙是研究渗流力学的基础，在多孔结构内部流体的流动方向和细节之间的相互作用是很重要的。

1.2 重构岩体的随机孔隙结构

孔隙节理较为发育的岩体，其孔隙结构分布相对来说是比较随机的，我们假定岩体中的孔隙是均匀分布的情况下，在 FLAC3D 下的三维孔隙结构重构可以进行如下操作来实现。

多孔岩体^[5]建模。首先需要确定重构的岩体尺寸，设定孔隙结构的平均孔径，并在此基础上设定模型网格划分精度，以确保孔隙结构的平均孔径大小与划分的单元大小相匹配。

在 FLAC3D 的基础上基于 FISH 语言编写，编写主要是 1, n 的随机均匀整数序列，生成 x 个 1 到 n 之间均

匀分布的随机整数序列， n 为计算模型的网格数量。把网格单元进行编号。

(3) 将网格单元编号 (ID) 以上述所有生成的随机整数序列确定，视为孔隙结构单元，统计所有单元的体积 V_x ，则可以有下式得到计算模型的孔隙率。

$$n = \frac{V_x}{V} \quad (1-1)$$

式中， V 代表需要被计算的模型单元总体积。

非孔隙单元以及孔隙单元的赋值^[6]。在进行裂隙岩体应力场分析时，一般将非孔隙单元设置为 model moh r，将孔隙单元设置为 model null，在进行渗流场分析时将非孔隙单元看做不透水边界设置为 model null，而将孔隙单元设为 model fl-iso。实验室里测试的岩体多采用 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的柱体，与重构的多孔岩体数值一致，所以我们将多孔岩体构件设置成尺寸 $50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的柱体，通过设置不同的 M 值，从而得到不同孔隙率的试件，在不同孔隙率下，通过 3D 重构技术，随机分布岩体孔隙结构。下图给出的孔隙结构体积为 3% 的孔隙率， 1.35mm 的岩体结构形式为 19%。

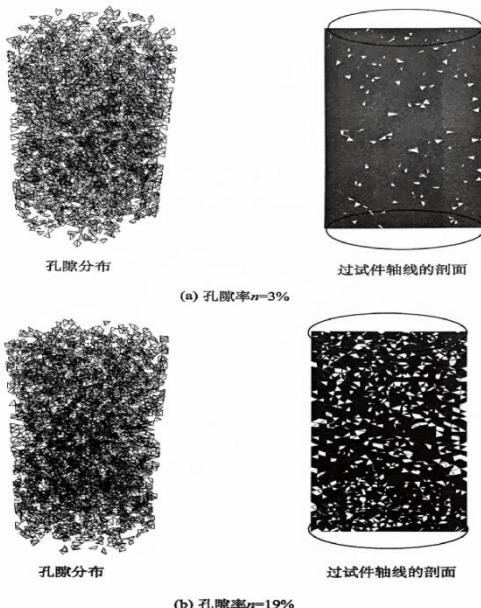


图 1-1 不同孔隙率下试件的孔隙分布

2 多孔岩体介质微观渗流分析

在进行微观渗流^[7]分析时，需要设置长度为 L ，断面面积为 A 的长方体多孔隙岩体介质，视其孔隙率为 N_i ，将其所有孔隙内部空间等效的看成 N 个长度为 L ，直径为 d_i 的平行等径微管，假定岩体中的渗流通过上述等

径的微管流动，渗流半径为试件的长度，微管的水力梯度为 J_i ，随渗透压力的变化而变化，因此在稳定渗流状态下微管中的流体渗流速度 V_i 可用下式表示，如岩体内部空间等效的大小，则应采用下式表示。

$$V_i = \frac{d_i^2 \rho g}{32 \mu} J_i \quad (1-2)$$

式中， μ 为动力粘滞系数， ρ 为谁的密度， g 为重力加速度。

微管的表观渗透系数 k 值用下式表示

$$k = \frac{d_i^2 \rho g}{32 \mu} \quad (1-3)$$

仵颜卿等利用 CT 扫描岩渗流与应力关系试验得出结果分析可知：表观直径为 $10^{-6}\sim 10^{-7}\text{m}$ 是微观的尺寸，如果取表观直径 $d=6.2 \times 10^{-7}\text{m}$ 那么由上式可得微管渗透系数为

$$k = \frac{d_i^2 \rho g}{32 \mu} = \frac{(6.2 \times 10^{-7})^2 \times 10^4}{32 \times 1.002 \times 10^{-3}} = 1.377 \times 10^{-7} \text{ m/s} \quad (1-4)$$

2.1 多孔隙岩体介质的渗流系数受孔隙率的影响

(1) 孔隙率对岩体渗透性^[8]的影响需要探讨渗流系数与不同孔隙率之间的关系，因此需要在不同孔隙率状态下构建岩体试件，进行渗流数值模拟，并使用 FLAC3 D 的渗流模型进行分析。

(2) 计算模型

三维随机孔隙微观渗流计算模型尺寸为 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的圆柱体，孔隙结构微观单元体积为 1.35mm^3 ，上表面水压值为 1MPa ，下表面水压值为 0.1MPa ，结构单元渗透系数与微管表面渗透系数相同，均为 k ，通过记录上下表面孔隙单元流量 Q ，结合试件尺寸，可得不同孔隙率下岩体介质宏观渗透系数 k 值。

$$k = \frac{QL\rho g}{(p_1 - p_2)A} \quad (1-5)$$

上式中， Q 为上下表面孔隙内部流量； L —试件长度； p_1, p_2 为试件上下表面固定水压； A 为试件上下表面积。

(3) 结果分析

孔隙率在 $3\% \sim 25\%$ 之间时，取若干不同孔隙率的试件进行过渗流分析，计算发现， $n = 3\%$ 时，时间内

部孔隙结构无连通，流体无法实现横向贯通穿越，即孔隙率为3%时，岩体介质不具有渗透性，下图为孔隙率n=3%时试件孔隙压力分布情况。由于岩体上、下表面无连通，流体无渗流路径，因而无法实现渗透试件，因此，在孔隙结构观测单元体积为1.35mm的情况下，可以认为岩体不具有渗透性质，因为孔隙结构的接通性随着孔隙率的减小而变差。

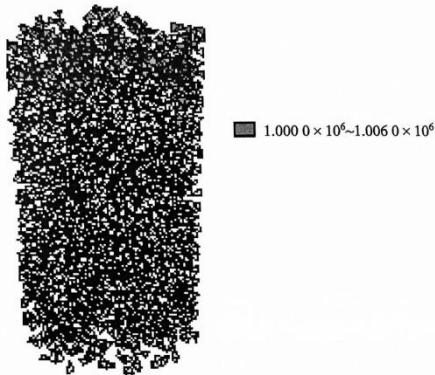


图 1-2 孔隙率为3%时试件的孔隙压力分布

而当孔隙率n=5%时，岩体内部的流体可以通过连通的孔隙从试件的上表面渗流到下表面，孔隙连通团可以将高低水压区域相互沟通，从而形成稳定的多孔介质渗流^[9]。随着试件孔隙率的不断增加，试件内部得到的连通团体积也逐渐增大，流量随之相应增大，下图为多孔试件在不同孔隙率条件下，随着时间的推移，流量的变化曲线。

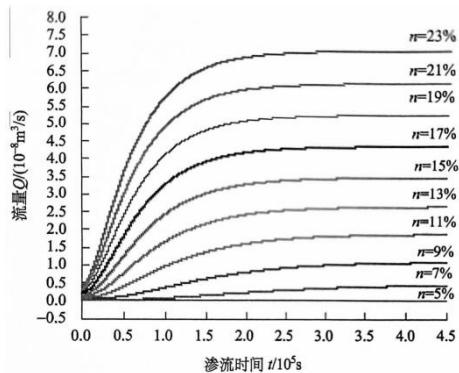


图 1-3 不同孔隙率下多孔岩体试件渗流随时间变化曲线

由上图可知，孔隙率越大，试件内部由不稳定流向稳定流过渡的时间越短，通过试件断面的流量也越大，这个结论对掌握地下水的开发和抽采时间有一定的指导作用，对地下油气储量的预测也有一定的指导作用。将不同孔隙率试件的流量代入上式(1-5)，可以得到不同孔隙率下试件的渗透系数，我们可以得到多孔岩体介质孔隙率n与渗透系数k值之间的关系曲线，如图所示。

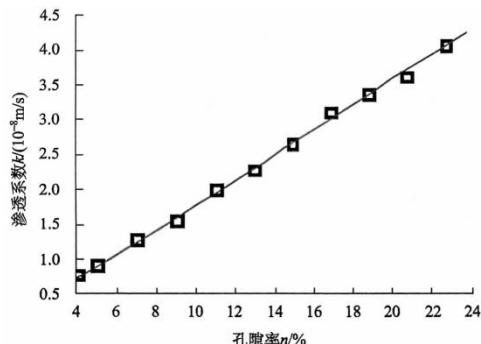


图 1-4 渗流系数随孔隙率变化曲线

通过曲线绘制可以知道，在有效孔隙率的范围内，渗透系数和孔隙率之间是高精度的线性关系，具体关系式如下

$$k = 1.78 \times 10^{-7} n \quad (n \geq 0.04) \quad (1-6)$$

综上所述，对于岩体介质存在孔隙结构的重构和研究渗透性的微观特性，可以保证其渗流数值的稳定性，本研究方法验证了多孔结构在数值和理论上的流固耦合特性，为研究岩体多孔结构的微观行为提供了新的研究方向，同时也为研究岩体多孔结构的微观行为提供了力学响应的新方法。

参考文献

- [1] 全兴华, 宋惠珍, 岳伯谦, 董波, 薛世峰. 2018 地下流固耦合理论的研究进展及应用 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版) 28 (1) : 6-11.
- [2] 柴军瑞. 2020. 大坝及其周围地质体中渗流场与应力耦合分析 [D]. 西安: 西安理工大学博士学位论文.
- [3] H. Okabe 和 M. Blunt. 2018. 孔隙结构特征及其对岩石力学性能的影响 [J]. 北京: 中国矿业大学学报.
- [4] 陈平, 2014. 裂隙岩体渗流与应力耦合分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 13 (4) : 299-308.
- [5] 杜广林, 周维垣, 2020. 裂隙介质中的多重裂隙网络渗流模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 19 (6) : 1014-1018.
- [6] 吉小明, 白世伟. 2013. 裂隙岩体流固耦合双重介质模型的有限元计算 [J]. 岩土力学, 24 (5) : 748-754.
- [7] 江涛. 2016, 基于细观力学的脆性岩石损伤-渗流耦合本构模型研究 [D]. 南京: 河海大学.
- [8] 曹广祝. 2015. 砂岩渗透参数随渗透水压力变化的 CT 试验 [J], 岩土工程学报, 27 (7) : 780-785.
- [9] 肖裕行. 2019, 裂隙岩体水力等连续介质存在的评价 [J]. 岩石力学与工程学报, 18 (1) : 76-81.