

剪切荷载对裂隙渗透性影响研究现状

孔 亮,王 媛

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要 综述了剪切荷载对裂隙岩体渗流特性影响的研究现状,认为:目前这方面的研究主要采用室内试验和数值模拟 2 种方法.室内试验方法可以准确地得到剪应力和裂隙渗透系数的关系,但对试验仪器精度的要求比较高,试样的制作比较复杂,试验的可重复性差;数值模拟方法能够定性地模拟出剪应力对裂隙渗透性的影响,但裂隙的宽度、走向、密度和长度等参数较难确定.总结了剪切过程中裂隙岩体渗透系数的变化规律,即:剪胀发生前,裂隙渗透系数随剪切位移的增加而减小,剪胀发生后,裂隙渗透系数随剪切位移的增加急剧增大,达到峰值位移后裂隙渗透系数趋于稳定甚至会减小.指出了需要进一步研究的问题:剪切荷载作用下裂隙变形和破坏规律;不同法向荷载作用下剪切荷载对裂隙渗透性的影响;裂隙岩体本构关系;等等.

关键词 剪切荷载;裂隙渗透性;室内试验;数值模拟

中图分类号 :TU452 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2007)01-0042-05

裂隙岩体由岩块和裂隙组成,后者是导水的主要通道.由于岩石基质比较坚硬,大部分变形以法向和切向位移的形式发生在节理或裂隙上,而裂隙的渗流量和隙宽的立方成正比^[1],因此应力对裂隙岩体的渗透性有很大影响.

1980 年,Witherspoon 等^[2]对裂隙岩体渗流进行了研究,认为立方定律对可变形裂隙也是适用的. Raven 等^[3-6]在此基础上进行了法向应力作用下裂隙水力性质的研究.文献[7]认为,岩石裂隙的剪切也会增加或减小裂隙的导水性. Olsson 等^[8-17]研究了剪切荷载对裂隙渗透性的影响.本文在前人研究工作的基础上总结了单调剪应力和循环剪应力作用下裂隙岩体渗透系数的变化规律,并指出了室内试验和数值模拟方法的优缺点以及一些需要进一步研究的问题.

1 剪切位移对岩石裂隙渗流影响的试验研究

目前,剪切位移对岩石裂隙渗流性能影响的室内试验绝大部分是针对单裂隙岩体进行的,试验中采用的裂隙岩体包括板岩、片麻岩、花岗岩、大理岩、砂岩等类型的岩体,试件大多是圆柱形和方形的.由于剪切时密封比较困难,所进行的试验大多为径向流试验.

第 1 次剪切荷载对渗流影响的试验^[9]采用的是板岩裂隙,试验过程中没有施加法向荷载,裂隙可以自由剪胀,当剪切位移达到 0.7 mm 时,裂隙的渗透系数增加了 2 个量级. Makurat^[10]采用片麻岩裂隙进行了具有法向荷载的剪切试验.试验结果表明,当剪切位移达到 1 mm 左右时,裂隙的渗透系数增加了 2~3 个量级. Zhang 等^[11]研究了高应力作用下剪切变形过程中裂隙的滑动和平均有效应力对合成石英、长石、白云母和花岗岩断层泥渗透性和各向异性渗透性的影响.刘才华等^[12]对充填砂裂隙进行了控制位移的剪切渗流试验,探讨了剪切位移与隙宽、剪切位移与流量、隙宽与流量的关系,指出砂粒的微小扰动与孔隙比的增加是影响裂隙渗流的主要因素.

1.1 单调剪应力作用下的水力特性

Yeo 等^[13]利用硅树脂橡胶复制的砂岩裂隙进行了室内试验.试验结果表明:随着剪切位移的增加,裂隙间接触点和接触部分的面积逐渐减小,裂隙的平均隙宽逐渐增加,裂隙的非均质和各向异性变得更加明显;

与剪切位移垂直的方向上的渗透性的增加要比与剪切位移平行的方向上的渗透性的增加明显得多。

刘才华等^[14]通过对规则、均匀、粗糙裂隙的渗流剪切试验,研究了岩体裂隙在剪切荷载作用下的渗流特性。结果表明,在裂隙面受剪后至剪动前的这一阶段中,渗透性随剪应力的增加而降低,且渗透系数与剪应力有较明显的线性关系

$$k' = k - ad \tag{1}$$

式中: a ——与裂隙面形态有关的常量; d ——隙宽的变化量; k' ——荷载作用下的渗透系数; k ——初始渗透系数。式(1)假设裂隙粗糙度系数为常数,只适用于弹性阶段。

Lee 等^[15]研究了花岗岩裂隙和大理岩裂隙在 3 种不同法向应力水平下的岩石裂隙的剪切水力特性。结果表明:当剪切位移为 8 mm 时,裂隙的渗透系数增加量达到 1.5~2 个量级,当剪切位移大于 8 mm 时,尽管裂隙呈继续剪胀趋势,但所有裂隙的渗透系数将保持不变,即裂隙的渗透系数在剪切位移 8 mm 时达到最大值。法向荷载较小时,在加载剪切荷载的初始阶段,裂隙渗透系数的变化很小,当裂隙出现剪胀现象时,渗透系数急剧增加,法向荷载较大时,只有出现较大剪切位移时渗透系数才会增加,主要原因是大的法向应力延阻了剪切膨胀。

对于上述现象,文献[16~18]也给出了同样的解释:生成的断层泥物质影响了裂隙的渗透性。在剪切位移达到峰值位移之前,裂隙面的粗糙性不会被破坏;当剪切位移超过峰值位移后,裂隙壁面的几何形状处在一个变化的状态中,由于粗糙度退化使裂隙表面产生的断层泥物质充填了裂隙,导致渗流通道部分被阻塞,尽管最大隙宽随剪胀继续增加,但平均裂隙隙宽将保持不变或减小,实际流体流过的裂隙宽度在剪切过程中将是一个常数。因此,当裂隙剪切位移达到一定程度后,渗透系数将保持为常数。其中裂隙粗糙度退化程度取决于裂隙凸起的强度。

1.2 循环剪应力作用下的水力学特性

剪应力前 2 个循环典型的应力-位移关系如图 1 所示^[15]。由图 1 可知,在第 1 个循环的剪应力-剪切变形曲线中出现了明显的剪胀现象,在第 2 个应力循环中,曲线变得比较平缓。因此,剪胀现象主要出现在剪应力-剪切位移的第 1 个循环中。由此可知,循环荷载作用下裂隙渗透系数随剪切位移变化的规律是:在第 1 个循环中,正方向上的剪切位移和由此产生的剪胀使渗透系数显著增大;反方向上的剪切位移使裂隙的渗透系数减小,但由于产生了不可恢复的剪胀,渗透系数不可能恢复到剪切位移为 0 时的初始渗透系数。

Indraratna 等^[19]认为,渗透系数的变化取决于循环荷载是否大到足以使裂隙达到其残余隙宽值。若在应力不能使裂隙产生新的接触点或破坏的情况下卸载,渗透系数就会恢复到其初始值;反之,渗透系数就不会恢复到其初始值。因为一旦荷载超过其临界值,就会产生不可恢复的变形,所以变化后的渗透系数也不可能恢复到初始渗透系数。

2 水力隙宽和剪切位移之间的关系

Barton 等^[4]根据试验资料(大部分来源于裂隙法向变形渗流试验,仅一小部分来源于剪切变形试验)提出了一个关于水力隙宽、力学隙宽以及裂隙粗糙度系数的指数函数

$$e = E^2/JRC^{2.5} \quad (E \geq e) \tag{2}$$

式中: e ——水力隙宽; E ——力学隙宽; JRC ——裂隙的粗糙度系数。

式(2)只适用于剪切位移较小的情况。当剪切位移较大时,其结果与 Hardin 等^[20]进行的 2 m×2 m×2 m 原位试验结果存在较大差距。

Olsson 等^[8]根据剪切试验提出了一种改进的模型

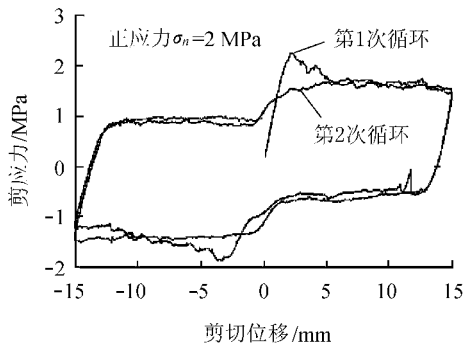


图 1 循环剪应力作用下岩体的应力-位移关系
Fig.1 Curve of shear stress versus shear displacement of fissured rock under cyclic shear loading

$$\begin{cases} e = JRC^{2.5} (E/e) & (\delta \leq 0.75 \delta_{peak}) \\ e = \sqrt{E JRC_{mob}} & (\delta \geq \delta_{peak}) \end{cases} \quad (3)$$

$$JRC_{mob} = B \cdot JRC_n \quad (4)$$

式中： JRC_{mob} ——修正的裂隙粗糙度系数，与裂隙表面的强度（ JCS ）所施加的法向荷载、剪切位移的大小和残余内摩擦角^[21]有关； δ ——裂隙的剪切位移； δ_{peak} ——裂隙的峰值剪切位移； JRC_n ——现场尺度下裂隙的粗糙系数； B ——与剪切位移有关的修正系数，其取值见表 1。

表 1 计算修正粗糙系数时 B 的取值

Table 1 Value of B for calculating modified roughness coefficient

δ/δ_{peak}	0.00	0.20	0.30	0.45	0.60	0.80	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00	6.00	8.00	10.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.0
B	$-\varphi/R$	$-0.25\varphi/R$	0.00	0.50	0.75	0.90	1.00	0.90	0.85	0.75	0.70	0.60	0.55	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.00

注： $R = JRC_n / (JCS_n / \sigma_n)$ ，其中： JCS_n 为现场尺度下裂隙壁面的抗压强度； σ_n 为法向应力； φ 为裂隙的内摩擦角。

Olsson 等^[8]认为，粗糙岩石裂隙剪切试验过程至少应包括峰值位移前和峰值位移后 2 个阶段，模型也要体现出这 2 个阶段裂隙粗糙度的差别。即：在第 1 阶段，裂隙壁面的粗糙度没有被破坏，应该采用最大粗糙度系数。在第 2 阶段，随着剪切位移的增加，裂隙壁面的几何形状会发生变化，应该采用 JRC_{mob} 。在中间阶段（介于第 1、第 2 阶段之间），当 $\delta = 0.75 \delta_{peak} \sim \delta_{peak}$ 时，是很难用模型来定义的，应采用第 1、第 2 阶段之间的过渡曲线来描述。

式（3）计算的渗透系数和试验结果吻合很好，而式（2）计算的渗透系数远远大于试验结果。这说明，式（2）只适用于法向闭合或张开和剪切初始阶段。因为在剪切初始阶段，裂隙壁面几乎没有发生破坏，产生的断层泥也较少，裂隙粗糙度是影响渗流的主要因素。

3 剪切位移对岩石裂隙渗流影响的数值模拟

在试验设备有限的情况下，数值模拟也不失为一种好方法，但数值模拟必须满足 3 点要求：（a）数值模型的尺寸满足表征单元体的需要；（b）选择合理的应力-变形本构关系；（c）能模拟出剪胀对裂隙岩体渗透性的影响。目前，大多数研究基于离散裂隙网络模型并利用二维离散元程序（UDEC）^[21]对不同荷载情况下的裂隙岩体渗透性的变化进行分析。Zhang 等^[17]的研究表明，用离散元程序（UDEC）来模拟裂隙岩体渗流和变形是非常有效的。

Indraratna 等^[22]针对裂隙网络的渗流，利用 UDEC 数值方法定性化地研究了裂隙方位和作用在理想裂隙上的外部应力对裂隙岩体渗流的影响。

Min 等^[23]用二维离散元程序（UDEC）模拟了不同荷载组合情况下裂隙非线性法向变形和剪胀对裂隙岩体渗透性的影响。模拟结果表明：当 2 个方向上的应力差不足以使裂隙产生剪胀时，等效渗透系数随着应力的增加而减小；反之，等效渗透系数随着应力的增加而增大。

数值模拟方法能够定性地模拟出剪应力对渗透性的影响，但模拟时裂隙的参数如隙宽、走向、密度和迹线长度等必须是已知的。由于实际应用中不可能准确地获得所有参数，而且本构关系比较难以确定，因此该方法只能用于定性或半定性的研究。

4 结 语

剪切荷载对岩体裂隙渗流性影响的研究是近 10 多年开展起来的，虽然取得了一些理论成果，但这些成果离实际应用还有一定距离。因此，尚需在以下几个方面做进一步研究：

- a. 目前对于剪切荷载对岩体裂隙渗流性影响的研究主要采用试验方法，需进一步加强裂隙在剪切荷载作用下的变形、破坏规律的研究。
- b. 在高地应力状态，即法向应力比较大的情况下，裂隙变形随剪切荷载变化的规律与其在较小法向应力作用下的变化规律会有所不同，因此需要进行不同法向荷载作用下剪切荷载对裂隙渗透性影响的研究。
- c. 在试验研究方面，目前进行的主要是径向流试验，但实际裂隙岩体渗流以直线流为主，而且试验的可重复性较差，因此需改进试验设计，提高试验的可重复性。

d. 在数值模拟方面,目前仅局限于二维裂隙岩体渗流,应加强三维裂隙岩体在剪切作用下渗流特性的研究.此外,数值模拟时本构关系的选取应充分考虑裂隙岩体的剪胀特性.

参考文献:

- [1] BARTON N ,QUADROS E F. Joint aperture and roughness in the prediction of flow and grout ability of rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts ,1997 34(3):700-708.
- [2] WITHERSPOON P A ,IWAI K ,GALE J E. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture[J]. Water Resource Research ,1980 ,16(6):1015-1024.
- [3] RAVEN K ,GALE J E. Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences ,1985 22(4):251-261.
- [4] BARTON N ,BANDIS S ,BAKHTAR K. Strength ,deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences ,1985 22(3):121-140.
- [5] PYRAK L J ,MYER L R ,COOK N G W ,et al. Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock[C]//BALKEMA A A. Proceedings of 6th International Congress of Rock Mechanics. Rotterdam :Elsevier Science Publisher ,1987 225-231.
- [6] ZHAO Jian ,BROWN E T. Hydro-thermo-mechanical properties of fractures in the carmenellis granite[J]. Journal of Geotechnical and Geo Environmental Engineering ,1992 25 279-290.
- [7] BARTON N. The problem of joint shearing in coupled stress-flow analyses[C]//International Symposium on Percolation through Fissured Rock. Essen :Stuttgart Press ,1972 28-40
- [8] OLSSON R ,BARTON N. An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2001 38(3):317-329.
- [9] SHARP J C ,MAINI Y N T. Fundamental considerations on the hydraulic characteristics of joints in rock[C]//International Symposium on Percolation through Fissured Rock. Essen :Stuttgart Press ,1972 1-15.
- [10] MAKURAT A. The effect of shear displacement on the permeability of natural rough joints[C]//Proceedings of the 17th International Congress on Hydrogeology. Arizona the University of Arizona Press ,1985 99-106.
- [11] ZHANG Shu-qing ,TERRY E. Permeability anisotropy and pressure dependency of permeability in experimentally sheared gouge materials [J]. Journal of Structural Geology ,1999 21(7):795-806.
- [12] 刘才华 ,陈从新 ,付少兰. 充填砂裂隙在剪切位移作用下渗流规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 ,2002 21(10):1457-1461.
- [13] YEO I W ,FRETTA R W. Effect of shear displacement on the aperture and permeability of a rock fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences ,1998 35(8):1051-1070.
- [14] 刘才华 ,陈从新 ,付少兰. 剪应力作用下岩体裂隙渗流特性研究[J]. 岩石力学与工程学报 2003 22(10):1651-1655.
- [15] LEE H S ,CHO T F. Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering 2002 35(4):299-318.
- [16] ESAKI T ,DU S ,MITANI Y ,et al. Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences ,1999 36(6):641-650.
- [17] ZHANG Xing ,SANDERSON D J. Numerical modeling and analysis of fluid flow and deformation of fractured rock masses[M]. England : Pergamon Press 2002 288-296.
- [18] AHOLA M P ,MOHANTY S ,MAKURAT A. Coupled mechanical shear and hydraulic flow behavior of natural rock fractures[C]//Coupled Thermo-hydro-mechanical Process of Fractured Media. Amsterdam :Elsevier Science Publisher ,1996 393-423.
- [19] INDRARATNA B ,RANJITH P. Deformation and permeability characteristics of rocks with interconnected fractures[C]//9th International Congress on Rock Mechanics. Paris :Paris Press ,1999 755-760.
- [20] HARDIN E L ,BARTON N. A heated flat jack test series to measure the thermo mechanical and transport properties of in situ rock masses [C]//Office of Nuclear Waste Isolation. Columbus :Columbus University Press ,1982 :193-198.
- [21] ITASCA CONSULTING GROUP. UDEC user 's guide :Version 3. 1[K]. Minnesota [s. n.].2000 50-100.
- [22] INDRARATNA B ,RANJITH P. Single phase water flow through rock fractures[J]. Geotechnical and Geological Engineering ,1999 ,17(3):211-240.
- [23] MIN K B ,RUTQVIST J. Stress-dependent permeability of fractured rock masses :a numerical study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2004 41(7):1191-1210.

Influence of shear loads on fissure permeability

KONG Liang , WANG Yuan

(*Geotechnical Research Institute of Hohai University , Nanjing 210098 , China*)

Abstract :Based on a review of the current research on fissure permeability , it is considered that there are two methods mainly adopted in the study , i. e. laboratory testing and numerical simulation. Laboratory testing can obtain the relationship between shear stress and fissure permeability accurately ; however it is of high requirement for apparatus , and it is complicated in specimen preparation. Numerical simulation can obtain qualitative result , but it is difficult to obtain some parameters , such as the width , orientation , density , and length of fissures. Moreover , the regularity of variation of the fissure permeability is summarized as follows : the permeability of fissured rock mass inversely varies with shear displacement before dilatancy , but it sharply increases with the increase of shear displacement after dilatancy , and then it tends to be invariable or even decreases when the peak displacement is reached. Finally , some problems needed for further study are put forward , including the regularity of fissure deformation and fracture under shear loads , the influences of shear loads on fissure permeability under different normal loads , constitutive relationship of fissured rock mass , etc .

Key words :shear load ; fissure permeability ; laboratory test ; numerical simulation

《河海大学学报(哲学社会科学版)》征订启事

(CN32 - 1521/C , ISSN1671 - 4970 , 季刊 , 自办发行)

《河海大学学报(哲学社会科学版)》以马列主义、毛泽东思想、邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导,坚持实事求是的思想路线,贯彻“双百”方针,弘扬时代主旋律,理论联系实际,为社会主义物质文明与精神文明建设服务。

《河海大学学报(哲学社会科学版)》为哲学与社会科学类学术期刊,主要刊登哲学、政治学、文学、语言学、法学、社会学、心理学、经济学、管理学、高等教育学等社会科学方面的研究成果、学术论文、综述等学术性文章。本刊可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考。《河海大学学报(哲学社会科学版)》为中国学术期刊(光盘版)入编期刊与中国学术期刊网入编期刊。

《河海大学学报(哲学社会科学版)》由河海大学主办,每季末出版,国内外公开发行。2007年每本定价5元,每本邮费1元,全年订费24元。欢迎广大读者直接向编辑部订阅。联系地址:南京市西康路1号《河海大学学报(哲学社会科学版)》编辑部,邮政编码210098。联系电话025-83786376。