

裂隙概化模型的非饱和渗流试验研究

詹美礼, 胡云进, 速宝玉

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 借鉴多孔介质非饱和渗流试验的研究成果, 研制出一套可同时测定单裂隙毛细压力-饱和度以及非饱和渗透系数-毛细压力关系的试验装置。为检验试验装置的可信度和试验原理的正确性, 并初步探讨单裂隙非饱和渗流的机理, 特制作了一阶梯开度的裂隙概化模型(本文称之为S-H裂隙模型), 并在上述试验装置上进行了“S-H”裂隙模型的非饱和渗流试验, 初步阐明了单裂隙非饱和渗流的一些基本水力特性, 同时试验结果也表明本文试验装置和试验原理合理可靠。

关键词: 裂隙; 概化模型; 非饱和渗流; 试验研究

中图分类号: O 357.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2002)02-0172-07

由于模拟裂隙岩体非饱和渗流一般多借鉴多孔介质非饱和渗流的分析方法, 其控制方程相同于(或类似于)多孔介质非饱和渗流的控制方程——Richards方程。因此在进行裂隙岩体非饱和渗流数值分析时, 不论是采用等效连续介质模型还是离散裂隙网络模型或是双重介质模型, 最为关键的是单裂隙毛细压力-饱和度以及非饱和渗透系数-毛细压力关系的建立。

综合国内外现有的研究成果, 目前在测定单裂隙非饱和水力参数时, 主要还是水-油拟稳态驱替试验^[1, 2]和水-油(或水-气)二相流试验^[3, 4], 因而运用现有试验方法所测出的单裂隙非饱和水力参数不能用于裂隙岩体非饱和渗流的分析^[5]。为此, 本文首先借鉴多孔介质非饱和渗流的试验方法^[6], 基于动力法原理^[7]研制出了一套测定单裂隙非饱和水力参数的非饱和渗流试验装置, 并在该试验装置上进行裂隙概化模型的非饱和渗流试验, 以检验试验装置和试验原理的可靠性, 并初步探讨单裂隙非饱和渗流的机理。

1 裂隙概化模型

为更好地进行试验装置可信度和试验原理正确性的检验和便于研究单裂隙非饱和渗流的机理, 特设计了一阶梯开度的裂隙概化模型, 本文称之为“S-H”裂隙模型。本文没有选用常用的玻璃平板模型, 是因为此类模型过于简化, 但石块、混凝土块叠合而成的裂隙模型又过于复杂, 难以实现裂隙非饱和渗流机理规律性的基础研究, 也不能用于检验试验装置的可信度和试验原理等的正确性。

收稿日期: 2001-10-11; 修订日期: 2001-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(59879004); 高等学校博士点学科专项基金项目(98029408)资助

作者简介: 詹美礼(1960-), 男, 江西都昌人, 河海大学教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程渗流及其控制研究。

“S-H”裂隙模型由两块钢板叠合而成, 其中下板为一平整光滑的钢板, 而在上板开了 5 级不同深度不同宽度的阶梯面以近似模拟天然裂隙的变开度 (图 1)。“S-H”裂隙模型的各项开度值, 根据南京晨光集团质量检验所的检测, 从左到右, 5 级开度值依次为 0.104、0.076、0.024、0.047、0.198 mm。“S-H”裂隙模型的长度 $l=15.0$ cm, 宽度 $a=12.0$ cm, 水力等效平均开度 $b=0.00596$ cm。模型的总含水量为 1.073 cm³, 从左到右, 5 级开度的含水量依次为 0.156、0.228、0.180、0.212、0.297 cm³。

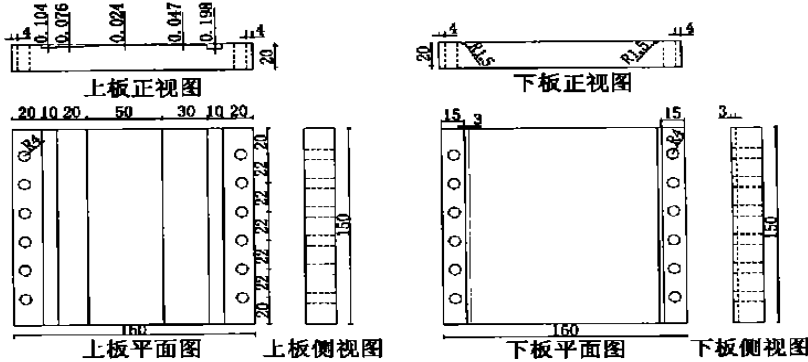


图 1 S-H 裂隙模型详图/mm

Fig. 1 Sketch of the S-H fracture model

2 “S-H”裂隙模型非饱和渗流试验

2.1 试验装置

试验装置如图 2 所示。由以下四部分组成: ①常水头供水系统, 包括马氏瓶 (Mariotte) 和高精度电子天平; ②主体部分, 包括“S-H”裂隙模型、毛细栅、进水和出水端的端帽以及张力计等; ③用于上下移动模型位置的升降系统; ④定水头集水系统, 包括两个有机玻璃筒和高精度电子天平。上述各个部件的工作原理及其在本试验装置中的功用详见文献[8]。

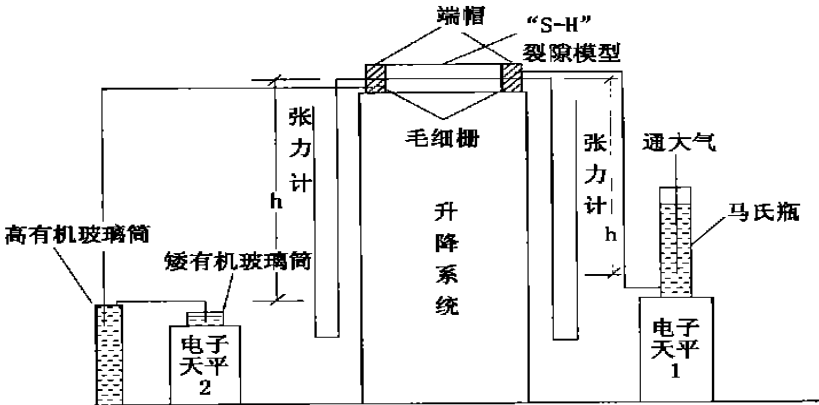


图 2 “S-H”裂隙模型非饱和渗流试验装置示意

Fig. 2 Installation of the S-H fracture model for unsaturated seepage test

2.2 试验原理

试验基于动力法原理(即逐次建立水相和气相间的稳定流动状态)来测定“S-H”裂隙模型的毛细压力-饱和度以及非饱和渗透系数-毛细压力的关系。基本原理如图2所示,“S-H”裂隙模型的某个位置对应的毛细压力水头 h_c 为

$$h_c = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (1)$$

式中 h_1 为进水侧的毛细压力水头; h_2 为出水侧的毛细压力水头。

当裂隙模型由位置1(毛细压力水头 h_{c1})抬升(或降低)至位置2(毛细压力水头 h_{c2})时,由毛细吸持理论可知,裂隙模型将排水(或吸水),水流需经过一段时间后才能达到新的稳定流动状态。记 gw_1, gw_2, \dots, gw_n 为抬升(或降低)开始时至水流达到新的稳定流动状态, n 个相邻时段内的供水水量(由电子天平1读数的差值换算而得); ju_1, ju_2, \dots, ju_n 为抬升(或降低)开始时至水流达到新的稳定流动状态, n 个相邻时段内的集水水量(由电子天平2读数的差值换算而得); zw_1, zw_2, \dots, zw_n 为抬升(或降低)开始时至水流达到新的稳定流动状态, n 个相邻时段内张力计中水量的变化量(由张力计中水位的变化值求得,增大为正)。根据水量平衡原理,毛细压力由 h_{c1} 变为 h_{c2} 后,即对应于毛细压力 h_{c2} 的排水量(或吸水量) $\Delta\theta$ 为

$$\Delta\theta = | (ju + zw) - gw | \quad (2)$$

式中 $ju = ju_1 + ju_2 + \dots + ju_n$, $zw = zw_1 + zw_2 + \dots + zw_n$, $gw = gw_1 + gw_2 + \dots + gw_n$ 。

根据“S-H”裂隙模型的总含水量和上述排水量(或吸水量)的平衡,可求得对应于毛细高度 h_{c2} 的饱和度。同上,改变裂隙模型位置高程可测求得一系列毛细压力与饱和度的关系数据点。

每级毛细压力下,待流动稳定后,测得给定时段内通过裂隙模型的水量,即可求得一系列排水(或吸水)时的非饱和渗透系数与毛细压力的关系数据点。

饱和(或非饱和)渗透系数 k 的计算公式如下:

$$\text{饱和状态} \quad k = \frac{wl}{tab(h_1 - h_2)}, \quad (h_1 > h_2 > 0) \quad (3)$$

$$\text{非饱和状态} \quad k(h_c) = \frac{wl}{tab(h_1 - h_2)}, \quad (h_2 < h_1 < 0) \quad (4)$$

式中 w 为时段 t 内通过裂隙的水量 (cm^3); l 为裂隙长度 (cm); a 为裂隙宽度 (cm); b 为裂隙的平均开度 (cm); h_1, h_2 意义同式(1)。

2.3 试验步骤

“S-H”裂隙模型非饱和渗流的整个试验过程均在恒温(20°C)下进行。试验步骤如下:

(1) 按图2组装好试验装置,并做好试验装置的密封工作。

(2) 抽气并注水饱和和毛细隔栅、“S-H”裂隙模型和过水管道等,同时仔细检查装置是否漏水,直至确信装置密封完好后,开始试验。

(3) 固定供水水位和集水水位,通过升降系统调整“S-H”裂隙模型的位置,使之低于进、出水侧张力计中的水位。待水流稳定后,测算出6个给定时段内通过裂隙模型的水量,同时记录进、出水侧张力计中的水位,由式(3)、(4)计算出渗透系数值。取上述6个渗透系数计算值的算术平均值作为“S-H”裂隙模型的饱和渗透系数。

(4) 根据毛细吸持理论的Laplace方程、钢-水-空气界面前进和后退接触角以及“S-H”

裂隙模型的各级开度值求出各级开度开始排水和吸水的毛细压力值(下称毛细压力预测值)。

(5) 参考最大一级开度开始排水的毛细压力预测值来抬升“S-H”裂隙模型的位置(使裂隙模型内的水相压力等于某个负值,该负值的绝对值比毛细压力预测值小 2.0 cm),并从抬升裂隙模型时刻开始,每隔 30 min 读取一次供水水量、集水水量和进、出水侧张力计中的水位(为保证精度,用读数显微镜来读取张力计中的水位),同时计算供水水量与集水水量和张力计中水量变化量之和的差值,累计 3 次差值(即抬升裂隙模型后 90 min 内的累计排水量),若差值未达到 0.01 g,则说明未开始排水,继续微升裂隙模型位置(微升步长为 0.1 cm),直至累计 3 次差值等于或大于 0.01 g 为止,记录下此时的 h_1 和 h_2 ,根据式(1)求得毛细压力 h_c 。

(6) 继续每隔 30 min 读取一次供水水量、集水水量和进出水侧张力计中的水位,直至达到稳定流动状态,计算出供水水量与集水水量和张力计中水量变化量之和的累计差值(从开始抬升到稳定流动状态)得该级毛细压力下的排水量 $\Delta\theta$ 。根据“S-H”裂隙模型的总含水量,求得该级毛细压力对应的饱和度。

(7) 流动稳定后,测得 6 个给定时段内通过“S-H”裂隙模型的水量,并根据式(3)、(4)求出渗透系数值。取上述 6 个渗透系数计算值的算术平均值作为该级毛细压力对应的非饱和渗透系数。

(8) 依次参考后续开度开始排水的毛细压力预测值,继续抬升“S-H”裂隙模型的位置,即逐级增大毛细压力,重复步骤(6)~(8),测求得 8 个排水时的毛细压力-饱和度以及非饱和渗透系数-毛细压力的关系数据点。

(9) 同理,从“S-H”裂隙模型的最高位置开始,参考各级开度开始吸水的毛细压力预测值,逐步降低裂隙模型的位置,即逐级减小毛细压力,测求得 8 个吸水时的毛细压力-饱和度以及非饱和渗透系数-毛细压力的关系数据点。

2.4 试验结果及分析

为说明上述试验装置、试验原理以及试验方法的合理可行性,特对“S-H”裂隙模型各级开度排(吸)水后的饱和度进行了理论预测。各级开度排空(吸满)水的排(吸)水量等于各级开度所含的水量,各级开度排(吸)水后的饱和度根据总含水量和累计排(吸)水量来计算。“S-H”裂隙模型各级开度排(吸)水后的饱和度预测值见表 1。为便于和预测值相比较,将实测值和预测值一并列于表 1 中。

表 1 “S-H”裂隙模型饱和度实测值与预测值的比较

Table 1 Contrast between tested values and calculated values of saturability of the SH fracture model

序号	排 水			吸 水		
	实测值	预测值	相对差值/%	实测值	预测值	相对差值/%
1	1.000	1.000	0	0.180	0.168	6.67
2	0.729	0.723	0.82	0.366	0.365	0.27
3	0.589	0.578	1.87	0.571	0.578	-1.23
4	0.384	0.365	4.95	0.711	0.723	-1.69
5	0.189	0.168	11.11	0.999	1.000	-1.01

由表 1 可以看出,饱和度的实测值与预测值相当接近,相对差值大多在 5% 以内。排水过程中,饱和度实测值与预测值的差异主要由以下两个原因造成:①理论预测值没有考虑吸湿水和薄膜水的影响,导致预测值偏大;②“S-H”裂隙模型各级开度的量测值与实际值存在偏差。吸水过程中,饱和度实测值与预测值的差异主要由以下两个原因造成:①理论预测值没有

考虑排水结束后的束缚水以及吸水过程中空气“圈闭”的影响(由于“S-H”裂隙模型的下板面和上板的各个阶梯面并非绝对平整和光滑,下板的平面度为0.009 mm,上板各个阶梯面的平面度介于0.003 mm~0.008 mm,粗糙度也只达到8级,由它们拼合而成的裂隙模型难免会存在被小开度包围的大开度,故存在圈闭空气也是难以避免的),导致开始吸水时预测值偏小,以后预测值又将偏大;②“S-H”裂隙模型各级开度的量测值与实际值存在偏差。

据以上分析可以判断,本文所研制的试验装置是可靠的,试验原理是正确的,试验方法也是合理可行的。

为进一步阐述“S-H”裂隙模型非饱和和渗流的机理,并对天然裂隙非饱和和渗流的基本水力特性有更深的感性认识,根据试验数据绘出了“S-H”裂隙模型排水和吸水时的毛细压力-饱和度以及非饱和和渗透系数-毛细压力的关系曲线,如图3和图4所示。“S-H”裂隙模型的开度不是连续变化的,而是阶梯变化的,故毛细压力-饱和度以及非饱和和渗透系数-毛细压力的关系曲线实际上是阶梯状的。为了更清楚地表示出裂隙非饱和和渗流的基本水力特性,同时也便于阐述非饱和和渗流的机理,特将上述两条曲线平滑化。从图3可看出:

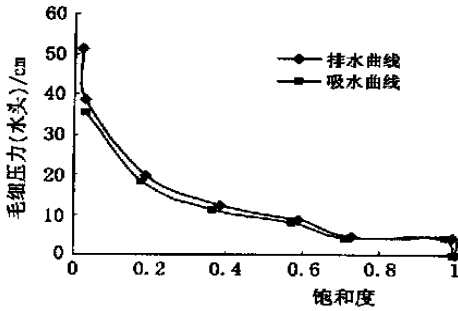


图3 排水和吸水过程中的毛细力-饱和度关系

Fig 3 Relationship between capillary pressure and saturation of drainage and imbibition processor

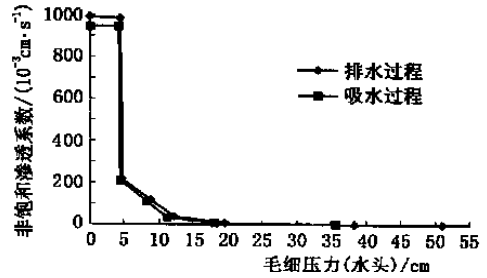


图4 排水和吸水过程非饱和和渗透系数-毛细压力关系

Fig 4 Relationship between unsaturated permeability and capillary pressure of drainage and imbibition processor

(1) 裂隙非饱和和渗流宏观上具有与孔隙介质相似的特点,如同孔隙介质持水特性一样,不仅具有吸-排水滞后现象,同样存在“进气值”和“束缚水饱和度”,与孔隙介质非饱和和渗流的“进气值”和“束缚水含水量”相对应。“S-H”裂隙模型排水时存在进气值(进气值是指最大开度开始排水时对应的毛细压力值),大约为4.0 cm水头。由于天然裂隙的最大开度一般大于“S-H”裂隙模型的最大开度,故天然裂隙的进气值较“S-H”裂隙模型的小。当毛细压力达到51.1 cm水头时,“S-H”裂隙模型仍具有一定的饱和度(约为0.02),该饱和度称为束缚水饱和度。

(2) 裂隙非饱和和渗流毛细压力与饱和度之间的变化率,与孔隙介质间有较大差距,其滞后性相对孔隙介质较弱。总体上表现为,裂隙非饱和和渗流,较孔隙介质易吸水、排水。在这里,束缚水饱和度对应的水主要是吸湿水和薄膜水,因为当毛细压力 $h_c = 38.44$ cm时,“S-H”裂隙模型的最小一级开度都已排水,这说明吸湿水和薄膜水对束缚水饱和度有较大的贡献。对天然裂隙来说,束缚水饱和度对应的水除了吸湿水和薄膜水之外,还包括很小的开度中所含的水以及被圈闭的水^[1],故天然裂隙的束缚水饱和度一般比“S-H”裂隙模型的大。“S-H”裂隙

模型吸水时, 存在残余气饱和度 (约为 0.01), 即毛细压力变为 0 后, 裂隙模型仍不能完全饱和, 在吸水过程中“圈闭”了一些空气。图 3 中即表现为在饱和度接近于 1 时, 吸、排水过程不严格重合 (理论上应当重合)。由于天然裂隙的开度是连续变化的, 且开度分布远较“S-H”裂隙模型的复杂, 可以预见, 天然裂隙的残余气饱和度比“S-H”裂隙模型的要大。

(3) 图 3 毛细压力与饱和度之间的变化过程, 宏观上可分为三部分: ①非饱和渗流束缚区, 即饱和度小于束缚水饱和度, 此区间内, 裂隙水几乎不可移动, 吸-排水毛吸压力-饱和度曲线近于重合。②非饱和渗流主导区, 即介于束缚区与毛吸压力达进气值之间部分, 该区间内吸-排水过程滞后较为明显。③饱和-非饱和渗流过渡区, 该区间的特征是, 饱和度相对较大, 渗流运动以饱和为主, 非饱和特征较弱, 吸-排水过程极为相近。图 3 曲线过程较为全面的描述了以上三个区间。由图 4 可看出, 即使最小一级开度已排水或还未开始吸水, “S-H”裂隙模型的非饱和渗透系数也不为 0, 这主要是由于薄膜水参与了流动。这表明在饱和度很小时, 薄膜水对非饱和渗透系数有不可忽视的贡献, 这与文献[9]的试验结果相一致。此外, 由图 3 和图 4 可看出, 排水过程与吸水过程间存在滞后现象。即: 同一毛细压力下, 排水时的饱和度和非饱和渗透系数大于吸水时的饱和度和非饱和渗透系数。造成滞后的一个原因是雨点效应 (即接触角滞后), 另一个原因是笔胆效应^[10]。由于“S-H”裂隙模型的上下板均具有相当高的平面度和光洁度, 由它们叠合而成的裂隙模型几乎不存在瓶颈形的空隙空间, 即笔胆效应造成的滞后可忽略, 故“S-H”裂隙模型持水曲线的滞后现象主要是由接触角滞后造成的。这也从另一个侧面说明, 由于天然裂隙存在许多瓶颈形的空隙空间, 其持水曲线的滞后性必然比“S-H”裂隙模型的显著。由于饱和度越大, 过水断面的面积越大, 相应的非饱和渗透系数也越大, 故在同一毛细压力下, 排水时的非饱和渗透系数要大于吸水时的非饱和渗透系数。由于天然裂隙持水曲线的滞后性较“S-H”裂隙模型显著, 故其非饱和渗透系数-毛细压力关系曲线的滞后性也将表现得更显著些。值得指出的是, 吸、排水的滞后性是客观存在的, 尤其在饱和度为 25%~75% 范围最为显著。一般来说, 饱和度大于 85% 时, 吸、排水滞后性将十分微弱, 对于实验测量的要求更严格。

3 结 语

综上所述可知, 本文为单裂隙非饱和水力参数的测定提供了一套合理可行的试验装置和试验方法。在该装置上能同时测定单裂隙排水和吸水时的毛细压力-饱和度以及非饱和渗透系数-毛细压力的关系。通过对“S-H”裂隙模型非饱和渗流试验结果的分析, 可得出下述结论:

(1) “S-H”裂隙模型排水时, 存在进气值和束缚水饱和度; 吸水时, 存在残余气饱和度和。天然裂隙的空隙空间远比“S-H”裂隙模型的复杂, 故天然裂隙的进气值比裂隙模型的小, 其束缚水饱和度和残余气饱和度比裂隙模型的大。

(2) “S-H”裂隙模型排水过程和吸水过程间存在滞后现象。即在同一毛细压力下, 排水时的饱和度和非饱和渗透系数均大于吸水时的饱和度和非饱和渗透系数。由于天然裂隙的空隙空间比“S-H”裂隙模型的复杂, 故天然裂隙排水过程和吸水过程间的滞后性比“S-H”裂隙模型的显著。

(3) 吸湿水和薄膜水对持水曲线的影响较大。薄膜水对非饱和渗透系数有一定的贡献, 尤其是在饱和度很低时。而目前的数值试验法均没有考虑吸湿水和薄膜水的作用, 故数值试验法

的结果有待于根据物模试验来修正。

(4) 数值试验法的理论基础—毛细吸持理论是正确的, 只不过在形成裂隙充水域时, 还应考虑水和气的“圈闭”影响, 在具备试验资料的情况下, 最好应考虑吸湿水和薄膜水对饱和度以及薄膜水对非饱和和渗透系数的贡献。

本文只是通过“S—H”裂隙模型非饱和和渗流试验介绍了如何运用上述试验装置来测定裂隙的非饱和水力参数, 而未做天然裂隙的非饱和和渗流试验, 故暂时还不具备足够的实测资料来确定裂隙的毛细压力—饱和度以及非饱和和渗透系数—毛细压力关系的拟合模型。

参考文献:

- [1] Reitsma S, Kueper B H. Laboratory measurement of capillary pressure saturation relationships in a rock fracture[J]. *Water Resour Res*, 1994, 30(4): 865– 878.
- [2] 叶自桐, 韩冰, 杨金忠, 等. 岩石裂隙毛管压力—饱和度关系曲线的试验研究[J]. *水科学进展*, 1998, 9(2): 112– 117.
- [3] Persoff P, Pruess K. Two phase flow visualization and relative permeability measurement in natural rough walled rock fractures[J]. *Water Resour Res*, 1995, 31(5): 1175– 1186.
- [4] 赵阳升, 等. 气液二相流体裂缝渗流规律的模拟实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(3): 354– 356.
- [5] 胡云进, 速宝玉, 詹美礼. 裂隙岩体非饱和和渗流研究综述[J]. *河海大学学报*, 2000, 28(1): 45– 51.
- [6] 弗雷德隆德 R G, 拉哈尔佐 H. 陈仲颐等译. 非饱和土土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [7] J 贝尔, 张朝琛等译. 多孔介质流体动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [8] 胡云进. 裂隙非饱和和渗流试验研究及有地表入渗的裂隙岩体渗流数值分析[D]. 南京: 河海大学, 2001.
- [9] Tokunaga T K, *et al.* Transient film flow on rough fracture surfaces[J]. *Water Resour Res*, 2000, 36(7): 1737– 1746.
- [10] Dullien F A L, 杨富民, 黎用启译. 多孔介质—流体渗移与孔隙结构[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.

Experimental study on unsaturated seepage flow in simplified fracture model^{*}

ZHAN Mei li, HU Yur jin, SU Bao yu

(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China*)

Abstract: A test method of unsaturated seepage flow of single fracture is presented and an experimental equipment for testing the relationship of capillary pressure, saturation and unsaturated permeability of fracture is developed. In order to examine the reliability of experimental provision and the validity of experimental principle, and to expound the mechanisms of unsaturated seepage flow in fracture, a simplified fracture model with flight aperture is developed and an experiment of unsaturated seepage flow in this fracture model is done. Mechanisms of unsaturated seepage flow in fracture are expounded initially. At the same time, the experimental results show that the experimental provision and the experimental principle in this paper are reasonable and reliable.

Key words: fracture; simplified model; unsaturated seepage flow; experimental study

^{*} The project is supported by National Natural Science Fund of China(No. 59879004) .