

裂隙非饱和渗流试验中毛细隔栅的选择及率定

胡云进 速宝玉 仲济刚

(淮海大学水利水电工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 针对进气值较低的材料提出了一种量测进气值的新方法 ,并用该法和常规的常水头渗透试验测定了 6 种不同砂粒径、不同配合比的多孔砂浆块的进气值和渗透系数。率定试验结果表明 ,多孔砂浆块比高进气值陶土板更适宜于作为裂隙非饱和渗流试验和驱替试验中的毛细隔栅。率定结果也为裂隙非饱和渗流试验选取合适的多孔砂浆块作为毛细隔栅提供了依据。通过对上述多孔砂浆块进气值的测定可看出 ,本文量测进气值的方法用于测定低进气值材料的进气值是简单易行的。

关键词 毛细隔栅 率定试验 进气值 渗透系数 多孔砂浆块

中图分类号 :TV233.4

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2000)06-0103-04

在水利水电、石油二次开采以及核废料深埋处理等工程领域中存在许多裂隙岩体非饱和渗流问题^[1-3]。研究裂隙岩体非饱和渗流的关键参数是单裂隙毛细压力—饱和度以及相对渗透率—饱和度(或毛细压力)的函数关系。这种关系必须通过试验来建立,而毛细隔栅是测定上述关系的拟稳态驱替试验和非饱和渗流试验中的一个关键部件^[2,4,5]。若所选毛细隔栅的进气值过低,则不能保证在试验所采用的毛细压力范围内阻止非湿润相穿过它的流动,从而导致试验失败。若渗透系数过小,则会加大达到平衡所需的时间,从而延长了整个试验时间,不但工作效率低,而且会带来其他问题,影响成果精度。故需选择合适的材料和配比,使构造的毛细隔栅有较高的进气值和良好的导水性(而这一对要求是相互矛盾的),才能保证驱替试验或非饱和渗流试验的顺利进行。在多孔介质非饱和渗流试验中常采用高进气值陶土板(至今还部分进口)作为毛细隔栅^[6]。但由于裂隙驱替试验和非饱和渗流试验中所用到的最大毛细压力值小于多孔介质非饱和渗流试验中所用到的最大毛细压力值,故为了在试验所采用的毛细压力范围内,水相能顺畅通过,同时又能对非湿润相起阻挡作用,一般选用导水性较好(相对于陶土板)进气值适宜的多孔砂浆块作为毛细隔栅^[2,4]。

由于不同砂粒径、不同配合比构造的多孔砂浆块具有不同的进气值和渗透系数,故为选取合适粒径和配比的多孔砂浆块作为毛细隔栅,需对不同砂粒径、不同配合比的多孔砂浆块进行率定试验,测其进气值和渗透系数。渗透系数可用常规的常水头渗透试验来测定,率定试验的关键是进气值的测定。已有的做法是用“吹气”(施加正压)或“抽气”(施加负压)试验来测进气值^[7]。用“吹气”或“抽气”法测定进气值不仅需要的设备多(如需要稳压气源(或真空泵),气压表以及量测排水量的精密仪器等),而且操作也不方便。鉴于以上几点,本文针对诸如多孔砂浆块这样的进气值较低材料,提出了一种新的量测进气值的试验方法,并用该法测定了 6 种不同砂粒径、不同配合比的多孔砂浆块的进气值,同时用常水头渗透试验测得了多孔砂浆块的渗透系数。率定试验结果为选取合适粒径和配比的多孔砂浆块作为裂隙驱替试验和非饱和渗流试验中的关键部件——毛细隔栅提供了依据。

1 试验装置和试验材料

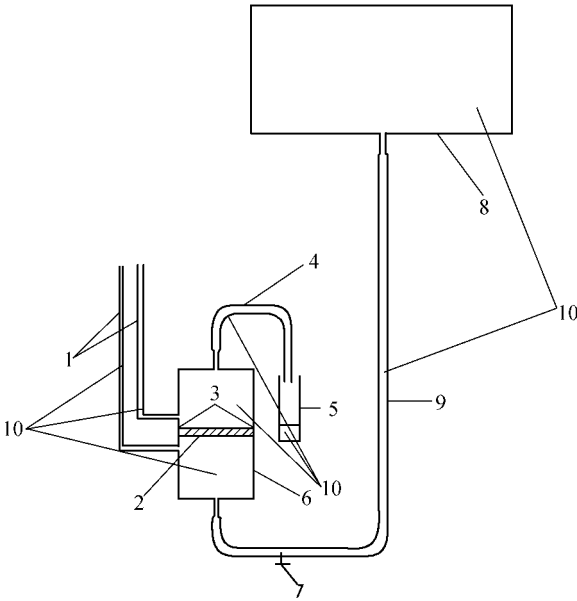
1.1 试验装置

本次率定试验分测渗透系数和测进气值两部分。量测渗透系数的试验装置如图 1 所示,量测进气值的试验装置如图 2 所示。

收稿日期 :1999-08-28

基金项目 :国家自然科学基金资助项目(59879004);国家教委博士点基金资助项目(98029408);水利部水利技术开发基金资助项目(97472603)

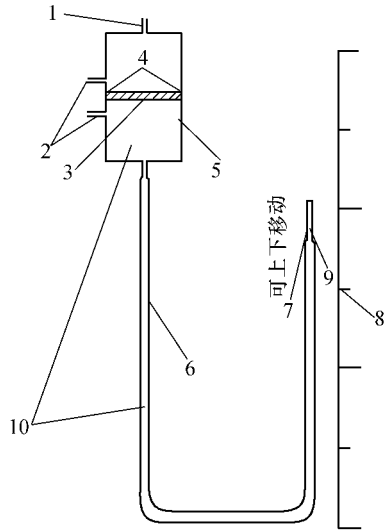
作者简介 :胡云进(1974—),男,浙江东阳人,博士研究生,水力学及河流动力学专业,主要从事裂隙岩体非饱和渗流研究。



1—测压管 2—多孔砂浆块 3—涂 703 胶止水止气 ,
4—出水管 5—集水量筒 6—有机玻璃筒 ,
7—流量控制阀 8—稳压水箱 9—进水管 10—水 .

图 1 测渗透系数的试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental provision for measuring permeability coefficient



1—通大气 2—填 703 胶止气 3—多孔砂浆块 ,
4—涂 703 胶止水止气 5—有机玻璃筒 6—进水管 ,
7—玻璃管 8—标尺 9—玻璃管中的水面 10—水 .

图 2 测进气值的试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental provision for measuring bubbling pressure

1.2 试验材料

用作毛细隔栅的多孔砂浆块应具有良好的导水性和较高的进气值.一般而言,进气值高,导水性就差.为确保较高的进气值和良好的导水性,应尽量使多孔砂浆块的孔隙孔径均匀,这就要求制备多孔砂浆块所用的砂粒径要均匀.为此,特筛分出两种粒径范围的砂,它们是 0.63~0.315 mm 和 0.315~0.25 mm.对第一种粒径范围的砂,选用 4 种不同的水、水泥和砂的配合比,分别是 1.00:1:4.50,1.33:1:5.00,1.67:1:6.00 和 2.00:1:6.50;对第 2 种粒径范围的砂,选用两种不同的水、水泥和砂的配合比,分别是 1.50:1:5.00 和 2.00:1:6.00.对上述 6 种不同砂粒径、不同配合比的情况各制备 5 个直径为 9.6 cm,厚度为 2.0 cm 的圆柱形有效试件,共计 30 个.

2 试验原理和试验步骤

2.1 试验原理

常水头渗透试验测渗透系数的试验原理在很多书中都有叙述,这里不再赘述.本次试验计算渗透系数的公式为

$$K_{20} = \frac{4Ql}{\pi d^2 \Delta h t} \times \frac{\eta_r}{\eta_{20}} \tag{1}$$

式中: K_{20} ——水温 20℃时试件的渗透系数,cm/s; Q —— t 秒内通过试件的渗水量,cm³; l ——试件的厚度,cm; d ——试件的直径,cm; Δh ——两测压管中的水位差,cm; t ——渗流时段,s; η_r/η_{20} ——温度修正系数,根据试验时的水温查表确定.

量测进气值的试验原理叙述如下:试验装置如图 2 所示,试件上表面和玻璃管中水面均与大气接触.开始时,玻璃管中水面与试件中面齐平.由于测进气值前刚测完渗透系数,故此时试件被水饱和,毛细压力(气压力与水压力的差值)为零.根据连通器原理,降低玻璃管使其内水面低于试件中面,可使试件中的水压力低于大气压,产生用以驱替试件中水的毛细压力(根据连通器原理,该毛细压力值等于试件中面与玻璃管中水面的高差).由毛细吸持理论的 Laplace 方程:

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \tag{2}$$

式中： P_c ——毛细压力； σ ——水—气表面张力； θ ——水与孔壁的接触角； r ——孔隙半径。可知，随着毛细压力 P_c 的增大（即玻璃管的逐步降低），试件中的水将被逐级（孔径从大到小）驱替出来。由于试件孔隙孔径很均匀，故在玻璃管下降至某一位置前，玻璃管中水面位置变化不明显。而当玻璃管下降至某一位置时，玻璃管中水面将急剧上升，此时均匀孔隙中的水同时被驱替。此前一步玻璃管中水面与试件中面的高差即为所要测的进气值。

2.2 试验步骤

本次率定试验先测多孔砂浆块的渗透系数，再测其进气值。具体步骤如下：（a）把待率定的试件放入有机玻璃筒中，试件侧面与筒壁间涂以 703 胶来止水止气（如图 1 所示）；（b）通过稳压水箱和进水管给整个试件加压力水（维持 24 h），使试件充分饱和（或抽气饱和）；（c）待出水管口出流稳定后，用集水量筒和秒表测记渗水量，同时读取紧靠试件上下面的两测压管中的水位，并用温度计测量水温，查表确定温度修正系数，最后用式（1）计算出该水力坡降下的渗透系数；（d）调节流量控制阀，以改变水力坡降（水力坡降不应过大，以保证最大的水力坡降下仍为层流状态），重复步骤（c），对每个试件测算出 5 个不同水力坡降下的渗透系数；（e）取上述 5 个渗透系数的平均值作为该试件的渗透系数；（f）停止供水，密封住有机玻璃筒上的两测压管口，让进水管与稳压水箱脱开，并在进水管上插一段玻璃管（见图 2），再倒空试件上部之水，使试件上表面与大气相接触；（g）先使玻璃管中的水面与试件中面齐平，并在玻璃管上水面位置处作一标记；（h）检测试件与筒壁间止水可靠后，开始以 10 cm 的步长降低玻璃管，每下降一步，固定玻璃管至少 15 min，并观察其水面位置的变化，当玻璃管中水面低于试件中面 1.5 m 后，水面位置仍无明显变化时，再以 5 cm 的步长降低玻璃管，同上，每下降一步固定玻璃管至少 15 min，同时观察其水面位置的变化；（i）一旦玻璃管中水面开始急剧上升，就停止试验，取此前一步玻璃管中水面与试件中面的高差，作为该试件的进气值；（j）最后，取相同砂粒径和配合比的 5 个试件的渗透系数和进气值的平均值作为该种砂粒径和配合比的多孔砂浆块的渗透系数和进气值。

3 试验结果及分析

用本文的量测进气值方法和常规的常水头渗透试验对 6 种不同砂粒径、不同配合比的多孔砂浆块的进气值和渗透系数进行了测定，率定试验结果见表 1。

表 1 不同砂粒径、不同配合比的多孔砂浆块的渗透系数和进气值

Table 1 Permeability coefficient and bubbling pressure of different kinds of porous mortar			
砂粒径 /mm	配合比 (水:水泥:砂)	渗透系数 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	进气值 (cm 水头)
0.315~0.63	1.00 1 4.50	2.6×10^{-5}	200
	1.33 1 5.00	8.2×10^{-5}	180
	1.67 1 6.00	9.8×10^{-5}	145
	2.00 1 6.50	1.25×10^{-4}	120
0.25~0.315	1.50 1 5.00	2.8×10^{-5}	> 250
	2.00 1 6.00	3.6×10^{-5}	220

从表 1 可看出，用相同粒径范围的砂，砂、水用量越多，渗透系数就越大，进气值就越低；相近的配合比，砂粒径小，渗透系数就小，进气值就高；即一般而言，渗透系数大，进气值就低。综合考虑毛细隔栅的要求（良好的导水性和较高的进气值），在上述 6 种不同砂粒径、不同配合比的多孔砂浆块中选取粒径范围为 0.315~0.63 mm，配合比为 1.33:1:5.00 的多孔砂浆块作为裂隙驱替试验和非饱和渗流试验中的毛细隔栅最合适。理由是该粒径范围和配合比的多孔砂浆块不仅具有较高的进气值，同时渗透系数也较大。对具体的裂隙驱替试验或非饱和渗流试验而言，最好应根据试验拟采用的最大毛细压力值和一定的安全储备定出所需的临界进气值，再在进气值大于该临界值的多孔砂浆块中选取渗透系数最大者作为毛细隔栅。

对比高进气值陶土板的渗透系数和进气值^[6]可知，多孔砂浆块的进气值低于陶土板，但渗透系数至少比陶土板大 1~2 个数量级。根据已有的裂隙驱替试验和非饱和渗流试验来看，所用到的最大毛细压力值为 $46.0\text{ cm}^{\text{f}[5]}$ ，考虑一定的安全储备，用进气值高于 1.5 m 的多孔砂浆块作为毛细隔栅就已足够了，而它的导水性好于高进气值陶土板。故多孔砂浆块比陶土板更适合于作为裂隙驱替试验和非饱和渗流试验中的毛细隔栅。

通过对 30 个多孔砂浆块试件进气值的测定来看,使用本文方法,只需上下移动玻璃管,同时观察玻璃管中水面位置的变化即可较准确地测得进气值。故用本文所提出的量测进气值方法测定进气值比传统的“吹气”或“抽气”法更简单易行,而且不需要稳压气源(或真空泵)和气压表等设备。

本次试验仅对 6 种不同砂粒径、不同配合比的多孔砂浆块进行了率定,难免会遗漏更合适的砂粒径和配合比。为了找出更适宜于作为毛细隔栅的多孔砂浆块,可用本文方法对其他砂粒径和配合比的多孔砂浆块进行率定,累积这方面的率定结果,为选取最合适的毛细隔栅创造条件。

此外,根据本文量测进气值方法的试验原理可知,若在图 2 所示的进水管中加一段密度较大的水银柱,依靠它来形成较大负压,可以在不需要把有机玻璃筒提升很高的情况下测定高进气值材料的进气值。即本文方法极易推广用于量测细密多孔介质材料的进气值。

4 结 束 语

率定试验结果表明,多孔砂浆块比高进气值陶土板更适合于作为裂隙驱替试验和非饱和渗流试验中的毛细隔栅。同时率定结果也为裂隙非饱和渗流试验选取合适的多孔砂浆块作为毛细隔栅提供了依据。本文所提出的量测进气值方法用于测定低进气值材料的进气值是简单易行的,且所需设备比传统的“吹气”或“抽气”法少。用本文方法还可对其他砂粒径和配合比的多孔砂浆块进行测定,以找出更适宜于作为毛细隔栅的多孔砂浆块的砂粒径和配合比。在图 2 所示的进水管中加一段水银柱,还可用本文量测进气值的方法测定进气值较高材料的进气值。

参考文献:

- [1] 张有天,刘中. 降雨过程裂隙网络饱和/非饱和、非恒定渗流分析[J]. 岩石力学与工程学报,1997,16(2):104~111.
- [2] 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.
- [3] Wang J S Y, Narasimhan T N. Hydrologic mechanisms governing fluid flow in a partially saturated, fractured, porous medium[J]. Water Resour Res, 1985, 21(12):1861~1874.
- [4] 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.
- [5] Persoff P, Pruess K. Two-phase flow visualization and relative permeability measurement in natural rough-walled rock fracture[J]. Water Resour Res, 1995, 31(5):1175~1186.
- [6] 弗雷德隆德 R G, 拉哈尔佐 H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐等译. 北京:中国建筑工业出版社,1997.97~100.
- [7] Rahardjo H. The study of undrained and drained behavior of unsaturated soil[D][Ph.D. dissertation]. Univ of Saskatchewan, Saskatoon, Sask, Canada, 1990.

Selection and Calibration of Capillary Barrier in Unsaturated Seepage Experiment of Fracture

HU Yun-jin, SU Bao-yu, ZHONG Ji-gang

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

Abstract: In view of low bubbling pressure material, a new method for measuring bubbling pressure is presented in this paper. By use of this method and routine constant head permeability test, the bubbling pressure and permeability coefficient of six kinds of porous mortar of different sand fraction and mix proportion are measured. The calibration test results show that porous mortar is more appropriate than ceramic plate when used as capillary barrier in unsaturated seepage experiment and displacement experiment of fracture. The calibration results also provide a basis for selecting appropriate porous mortar as capillary barrier for unsaturated seepage experiment of fracture. Through the measurement of bubbling pressure of the above mentioned porous mortar, it can be seen that the present method for measuring bubbling pressure is simple and feasible for low bubbling pressure material.

Key words: capillary barrier; calibration test; bubbling pressure; permeability coefficient; porous mortar