

大区域裂隙岩体渗流水电比拟实验技术的研究^①

⑧

36-40

赵 坚 速宝玉 杨晓文

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098)

TU452
0357

摘要 介绍利用水电比拟模型研究大区域裂隙岩体渗流问题的实验方法,对实验中遇到的如区域交形过分、分离变界面连接等问题,提出了看法和解决途径。与水力学网络模型实验结果比较表明,用水电比拟模型研究大区域裂隙岩体渗流问题是可行和简便的。

关键词 渗流 水电比拟模型 水力学网络模型 裂隙 岩体 连续介质

水电比拟模型作为研究连续多孔介质渗流问题的实验手段,早已为工程技术人员所熟悉、掌握,并且解决了大量的工程实际问题^[1,2]。若能将其应用于对裂隙岩体渗流问题的实验研究中,不仅可以避免用水力学模型实验而要求建立复杂的裂隙网络结构的困难,从容适应大区域的复杂地形、地质及各类建筑物边界条件,而且能充分利用研究连续介质渗流问题所形成的系统理论和先进实验手段,来实现对大区域复杂裂隙岩体渗流问题的研究。

1 等效连续介质水电比拟模型的建立

对于分布于岩体内的裂隙,通过对其产状(如方位、倾角、隙宽、隙距等)的统计分析^[3],可以用渗透张量来描述它的渗透特性,用具有渗透张量的连续介质岩体来等效替代裂隙分布纵横交错、宽窄不一的非连续介质岩体。由于一般情况下,所得到的岩体渗透张量主向与大地坐标不重合,因此,必须对原型区域进行一定形式的变换后,方能进行水电比拟模型的制作。变换的主要步骤为(以二维问题为例,三维问题类似):

a. 设所研究的岩体由 m 个渗透性不同的子区域组成,每个子区域含有数量不等的裂隙组。用水头函数 $h(x, y)$ 表示的各子区域水流运动方程用下式表示:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_{xx,i} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{xy,i} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_{yx,i} \frac{\partial h}{\partial x} + k_{yy,i} \frac{\partial h}{\partial y}) = 0 \quad (1)$$

式中, $k_{xx}, k_{xy}, k_{yx}, k_{yy}$ 为四个渗透张量分量, $i = 1, 2, \dots, m$ 为子区域编号。

b. 将 $x \sim y$ 坐标系旋转 θ 角,与渗透张量主向重合,有:

$$\left. \begin{aligned} x' &= x \cos \theta + y \sin \theta \\ y' &= -x \sin \theta + y \cos \theta \\ \tan 2\theta &= \frac{2k_{xy}}{k_{xx} - k_{yy}} \\ k_{x'} &= \frac{k_{xx} + k_{yy}}{2} + (k_{xx} - k_{yy}) \cdot \frac{\cos 2\theta}{2} + k_{xy} \sin 2\theta \\ k_{y'} &= \frac{k_{xx} + k_{yy}}{2} - (k_{xx} - k_{yy}) \cdot \frac{\cos 2\theta}{2} - k_{xy} \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

①电力科学技术发展基金资助项目(BJ911090)。

第一作者简介:赵坚,男,硕士,高级工程师,从事水工渗流计算与试验研究,曾发表《裂隙网络水流特性实验研究初探》等论文。

式中 x', y' 为对 x, y 旋转 θ 角产生的新坐标; $k_{x', i}, k_{y', i}$ 为新坐标系 $x' \sim y'$ 中 i 子区域的渗透张量主值。

c. 按式(2)关系, 对式(1)进行坐标旋转变换, 得到渗透张量主向上的运动方程

$$k_{x', i} \frac{\partial^2 h}{\partial x'^2} + k_{y', i} \frac{\partial^2 h}{\partial y'^2} = 0 \quad (3)$$

d. 令

$$\left. \begin{aligned} y'' &= y' \sqrt{k_{x', i} / k_{y', i}}, \quad x'' = x' \\ \text{或} \quad x'' &= x' \sqrt{k_{y', i} / k_{x', i}}, \quad y'' = y' \\ k_i &= \sqrt{k_{x', i} k_{y', i}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

据式(4)关系, 对式(3)进行坐标非对称压缩(或放大)变换, 得:

$$k_i \frac{\partial^2 h}{\partial x''^2} + k_i \frac{\partial^2 h}{\partial y''^2} = 0 \quad (5)$$

式中 x'', y'' 为 x', y' 经非对称压缩(或放大)变换后, 产生的新坐标; k_i 为 $x'' \sim y''$ 坐标系中 i 子区域的渗透系数。

e. 经旋转、压缩(或放大)后, 原有的岩体非均匀各向异性渗透区域被转换为非均匀各向同性的渗透区域。根据旋转、压缩(或放大)系数 $\theta, \sqrt{k_{x', i} / k_{y', i}}$ (或 $\sqrt{k_{y', i} / k_{x', i}}$), 可以形成水电比拟模型的边界形状、大小等。

2 水电比拟模型的制作

水电比拟模型是基于在连续介质中的渗流场服从达西定律和在连续导电介质中的电流场服从欧姆定律所具有的相似性, 以及两个物理场可用同一数学形式(即拉普拉斯方程)来表示而建立起来的^[4]。两场之间的物理量存在一一对应关系, 如渗流速度 ~ 电流

密度、水位 ~ 电位、渗透系数 ~ 电导系数等。对经旋转、压缩(或放大)形成的非均匀各向同性渗透区域, 其几何尺寸只需按一定比例, 即可进行水电比拟模型的制作。

在水电比拟模型中, 可用绝缘材料模拟不透水边界, 用导电性能强的金属片作区域的进出水边界, 用细康铜丝制成具有不同距离和尺寸的排水孔幕等。通过在不同子区域中注入电导系数不同的溶液反映原区域渗透系数的非均匀性。图 1(b)是一个按图 1(a)变换形成的水电比拟模型形式, 其中 1, 2 区分别代表了不同渗透张量的渗透区域。

对具有不同渗透张量的原型区域, 特别是渗透张量各向异性很明显的区域, 进行区域变换时, 以下两个问题值得注意。

2.1 渗流区域过分变形问题

所谓渗流区域过分变形是指经压缩(或放大)、旋转变换后的渗透区域严重畸形或超出实验所能承受的规模(如场地等)。现以表 1 所列 3 组渗透张量对图 2(a)区域进行变换。由图 2(b)和图 2(c)可见, 当渗透张量各向异性程度较小时, 原型区域变形较小, 形成的变换模型区域长宽比例适中, 便于水电比拟模型的制作和测试。而当渗透张量各向异性程度较大时, 如表 1 第 3 组, 所得到的变换模型区域与原型相比, 变形过分(图 2(d))。从水电比拟模型实验要求看, 变形过分的区域有以下两个缺陷: ①模型区域若过于狭长, 不仅会增加模型制作难度, 而且也不利于测试, 如在尖角区的电量测定困难, 浸润线修正不易等; ②模型区域若过分放大, 既会增加模型中导电液用量, 也扩大了导电液与外界

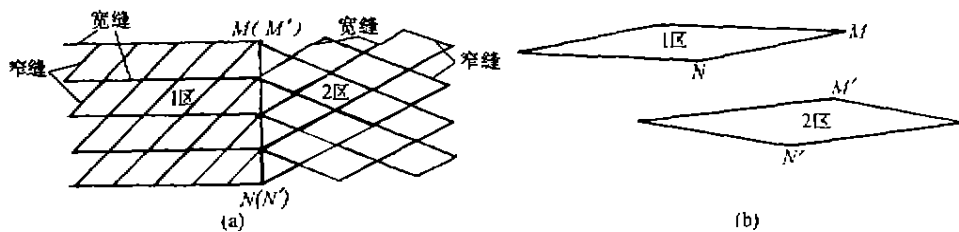


图 1 水力学网络模型和水电比拟模型示意图

(a)水力学网络模型; (b)水电比拟模型

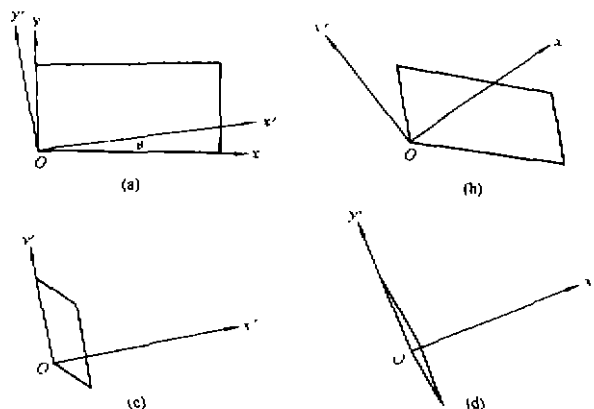


图2 对应不同渗透张量的水电比拟模型区域

(a)原型;(b)第1组;(c)第2组;(d)第3组

接触面,会增强外部感应电场对模型中电场的干扰,使测试精度降低。

表1 不同渗透特性的3组渗透张量 10^{-4}cm/s

组号	k_{xx}	k_{xy}	k_{yx}	k_{yy}	k_x	k_y	k_i	θ	k_x/k_y
1	6.37	1.74	1.74	5.22	7.63	3.960	5.50	35.78	1.92
2	7.87	1.38	1.38	0.52	8.12	0.270	4.20	10.28	30.4
3	2.40	0.88	0.88	0.33	27.21	0.005	0.37	20.27	533.0

2.2 不同渗透张量介质区交界面非对称连接问题

由图1可见,原型的1,2区交界面 MN 在水电比拟模型中已不再重合,成为长度完全不等的两个独立边界 $MN, M'N'$ 。相邻两区的渗透张量相差越大,这种交界面长度之差越明显。

在进行多孔介质水电比拟模型实验时,由于不存在坐标旋转变形,因此,不同渗透性介质交界面不会出现分离现象。而对于各向异型非均匀裂隙岩体,具有不同渗透张量的渗透区域交界面,经变换,在水电比拟模型中,会发生分离,需用2块长度不等的导电板分别模拟,并用足够的导线相连。实际制模时,连接导线的密度按等效连接要求做。等效连接是指在不改变模型中流场流网形态和满足过流量不变的条件下,用较少的导线连接分离边界。为了对等效连接有一个量的认识,笔者进行了一系列对比实验,结果表明,随着交界面上每根导线间距(称导线密度,单位:cm/根)的逐渐降低,原型流网形状受到

歪曲的程度增大,靠近交界面附近区域尤为明显。从变化规律看,等势线先以平行交界面的方向向交界面收缩,并逐渐发展成从不透水边界开始向交界面弯曲。当两个区域的渗透系数比值不同时,渗透性大的区域内流网变化幅度较大。从各实验组的结果看,导线密度取小于 0.5cm/根 ,基本可以保证流网不变形。实际制模时应根据较长的变形交界面或者渗透系数较大的区域的交界面确定导线连接密度。

3 实验实例及结论

据图1(a)所示水力学网络模型(其裂隙系统特征参数见表2第1组),可以变换形成图1(b)所示水电比拟模型。经旋转、压缩变换,1,2两区具有不同裂隙分布特征的渗透区交界面不再重合,长度比为 $MN/M'N' = 1.22$ 。在 MN 和 $M'N'$ 边界上分别取 0.5cm/根 和 0.4cm/根 导线连接密度,1,2两区按 $k_1\rho_1/k_2\rho_2$ 关系配制导电液(ρ 为溶液电阻系数)。实验结果表明:

a. 水电比拟模型实验能够反映出复杂裂隙岩体各向异型渗流场的基本特征,所测出的水头分布在层流区与水力学网络模型实验结果相一致,见图3。从图3可见,诸如等势线与流线非正交,渗流区域存在明显的高坡降区和低坡降区,等势线与宽裂隙基本平行等在裂隙网络系统中表现出的现象^[5],均

能在水电比拟模型中反映出。

b. 由于渗透流量与隙宽成三次方关系, 因此, 在构成渗透张量的多个参数中(如隙宽、隙间距、隙倾角等), 隙宽的改变对裂隙岩体的渗透性大小影响最明显。这一特征通过水电比拟模型实验亦能得到, 如表 2, 图 4 所示。从图 4 中不难看出, 在隙宽比相同条件下, 隙宽越大, 流量越大, 水头变化趋缓。

表 2 隙宽、隙宽比对流场的影响

组号	1 区			2 区			电流量 /mA	流场分布
	宽缝 /mm	窄缝 /mm	隙宽比	宽缝 /mm	窄缝 /mm	隙宽比		
1	0.55	0.185	3:1	0.55	0.185	3:1	0.54	见图 3(b)
2	0.80	0.400	2:1	0.55	0.185	3:1	3.38	见图 4(a)
3	0.40	0.200	2:1	0.55	0.185	3:1	1.33	见图 4(b)
4	0.60	0.600	1:1	0.55	0.185	3:1	5.35	见图 4(c)
5	0.20	0.200	1:1	0.55	0.185	3:1	2.44	见图 4(d)

c. 水力学网络模型图 1(a) 实验结果表明, 当上下游水头差较小时, 裂隙网络中水流

均处于层流状态, 此时水电比拟模型与水力学网络模型两个实验结果基本一致。而随着上下游水头差增大, 在裂隙网络局部区域会出现程度不等的紊流现象, 显然, 这一现象引起的水头损失变化在水电比拟模型中无法得到。但从实验值的变化趋势看, 在紊流区, 尽管水电比拟模型实验结果与原型相比, 有一定误差, 但整体仍能符合原型流场水头分布特征, 不会产生大的歪曲。

d. 如果研究裂隙岩体区域边界形状复杂, 且内部有大量的排水设施和构造物时, 用水电比拟模型进行实验, 具有突出的优点。在水电比拟模型中, 可精细地模拟任何形状的边界, 十分方便地布置各类建筑物和排水设施^[6]。由于水电比拟模型比尺可随意放大或缩小, 所以当需对一个大面积的裂隙岩体渗流问题进行实验研究时, 用水电比拟模型不仅简单易做, 而且可以达到较高的模拟精度。

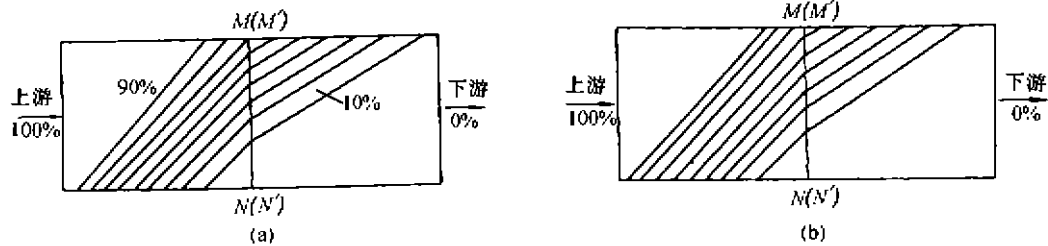


图 3 水力学网络模型和水电比拟模型等势线分布(上下游水头差 $\Delta h = 35.59 \text{ mm}$)

(a) 网络模型等水头连线; (b) 水电比拟模型等位势线(为便于比较, 绘在原型区域上)

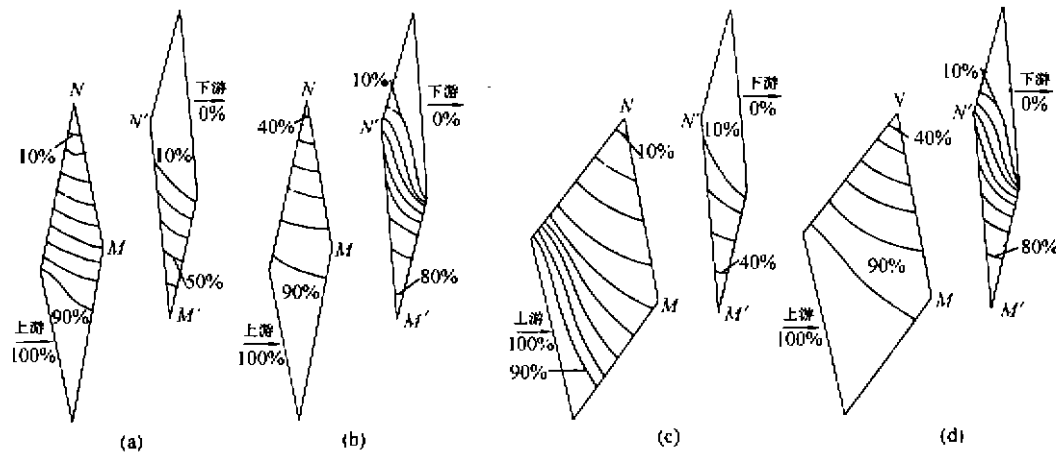


图 4 不同渗透张量对流场变化的影响(原型区域与图 3 同)

综上所述,水电比拟模型在成功地解决了大量的多孔介质复杂渗流问题之后,在研究大区域裂隙岩体介质渗流问题上也具有极大的潜力和优势。当然,在发挥水电比拟模型的长处之时,还应看到水电比拟模型存在的不足,如试验周期长,投入大,制作要求高等。这些问题,相信随着测试自动化技术的提高,以及对制模工艺的改进,会得到很好的解决。

参考文献

- 1 速宝玉,赵坚,伍怡祥等.渗流测试自动化和模-数混合系统的探讨.河海大学学报,1989(增刊): 65~69

- 2 速宝玉,张祝添,赵坚等.三维渗流水电模拟测试技术的研究.河海大学科技情报,1990,10(4):46~52
- 3 切尔内绍夫.水在裂隙网络中的流动.北京:地质出版社,1975
- 4 毛昶熙.电模拟试验渗流研究.北京:水利出版社,1981
- 5 赵坚,杨智敏,詹美礼等.裂隙网络水流特性实验研究初探.河海大学学报,1997,25(水利水电工程专辑):90~94
- 6 速宝玉,赵坚,张祝添.正置模型在尾矿坝空间渗流场模拟试验中的应用.金属矿山,1994(3):27~29

(收稿日期:1998-02-20 编辑:熊水斌)

(上接第27页)

式中 θ 等于 $(\theta - \theta_0)$, $\ln \theta$ 等于 $(\ln \theta - \ln \theta_0)$, 其中 θ 从 2002 年 10 月 1 日开始每增加一天 θ 值增加 0.01, $\theta_0 = 0.01$. y 等于测点高程(泄洪 2# 坝段坝底高程 10 m)。

利用计算得到的时效分量 $\delta_{\theta 1}$ 及式(14), 经最小二乘法拟合,得到第一时段即 2002 年 10 月 1 日至 2003 年 5 月 31 日的时效分量表达式:

$$\begin{aligned} \delta_{\theta} = & 4.262 \times 10^{-3} + 0.01207\theta + \\ & 0.01057\ln\theta - 5.969 \times 10^{-5}\theta + \\ & 3.3023 \times 10^{-5}y\ln\theta - 3.161 \times 10^{-7}y^2\theta - \\ & 4.867 \times 10^{-7}y^2\ln\theta + 4.723 \times 10^{-5}y + \\ & 8.432 \times 10^{-8}y^2 \end{aligned} \quad (15)$$

2.4.4 三峡泄洪 2# 坝段的确定性时空分布模型

将式(11), (13)和(15)代入式(10),就得到泄洪 2# 坝段确定性时空分布模型。

利用式(10)的确定性时空分析模型,监控泄洪 2# 坝段的梁挠曲线的变化规律,以此分析和评价大坝变形性态。这里应指出的是,由于三峡大坝目前还在建设之中,在建立式(10)的确定性时空分布模型时,一些主要物理力学参数参照设计采用值。因而,等三峡大坝运行一段时间,并积累部分实测资料后,应对式(10)的确定性时空分布模型进行

修正,由此进一步提高模型的精度。

参考文献

- 1 吴中如,顾冲时.混凝土坝空间位移场的时空分布模型.三峡水利枢纽工程应用基础研究(第一卷),北京:科学技术出版社,1996
- 2 吴中如.水工建筑物安全监控理论及其应用.南京:河海大学出版社,1990

(收稿日期:1998-02-24 编辑:熊水斌)

·简讯·

混凝土试验新设备两则

▲和易性测定仪 一种新式的具有数字显示的手持式 CWM 仪可以用来测定新搅拌混凝土的和易性。将该测量仪的探头压入混凝土以后,操作者按住把柄上的触发器,使探头在混凝土中旋转 8 秒钟,重复这一过程约 10 次左右,然后只需按一下按钮即可显示出混凝土的坍落度值(用 mm 表示)。利用这一仪器的另外一个探头还可测量混凝土的温度。测量出的坍落度和温度可以传输给计算机,以便作进一步的分析或用于报告。

▲空隙仪 利用该空隙仪可以在现场或试验室检测新拌混凝土或硬化混凝土中所含气泡的直径、间隔和空隙率。该系统由一台计算机、VGA 彩色监视器、特殊滤光片、图像处理软件和摄像机等组成。使用时操作人员只需记录一个或几个混凝土表面的影像并传送到计算机进行分析。整个过程可以在几分钟内完成,摄像机镜头可以达到 130 倍的放大率,对混凝土表面作精确的目测分析。该系统还可以为用户打印出混凝土的分析结果或相片。

(摘自 1998 年 2 月 5 日《水信息报》)