

岩体裂隙率典型单元体确定方法探讨

潘欢迎, 万军伟, 梁 杏

(中国地质大学环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 基于溪洛渡水电站坝区裂隙发育特点, 建立了双重介质模型, 通过类比多孔介质和裂隙介质的特征, 提出了裂隙率典型单元体的概念, 介绍了裂隙率典型单元体体积的确定方法, 即通过野外裂隙测量和统计分析, 得出裂隙发育的统计规律, 假设结构面为薄圆盘状、光滑平直, 裂隙的空间位置采用泊松模型确定, 应用 Monte-Carlo 原理构建随机裂隙网络模型, 进一步分析裂隙率随体积变化的关系, 得出研究区裂隙率典型单元体体积为 4913m^3 ($17\text{m} \times 17\text{m} \times 17\text{m}$)。该体积与研究区的范围相比小得多, 能很好也反映出研究区的总体裂隙渗流规律。

关键词 裂隙岩体; 裂隙率典型单元体; 双重介质模型; Monte-Carlo 原理; 溪洛渡水电站

中图分类号 :TU452 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2006)05-0018-04

Method for determination of representative elementary volume of fractured rate of rock mass//PAN Huan-ying, WAN Jun-wei, LIANG Xing / School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract : A dual media model reflecting the fissure development in the dam area of the Xiluodu Hydropower Station is developed. The concept of the representative elementary volume of fractured rate is proposed by comparison of the characteristics of porous media and fissured media, and the method for its determination is given. Then, the regularity of fissure development is studied by field fissure detection and statistical analysis. On the assumption that the structural plane of fissures is filmy-disciform and smooth, the spatial locations of fissures are determined by the Poisson model, and a random fissure network model is constructed by use of the Monte-Carlo principle. The analysis of the relationship between the fractured rate and the elementary volume shows that the representative elementary volume in the studied area is $17\text{m} \times 17\text{m} \times 17\text{m}$, which is much small as compared with the studied area and can reflect the overall seepage regularity of fissures in the studied area.

Key words fissured rock; representative elementary volume of fractured rate; dual media model; Monte-Carlo principle; Xiluodu Hydropower Station

金沙江溪洛渡水电站是仅次于三峡水利枢纽的巨型水利水电工程, 其坝基岩体为二叠系上统峨眉山组玄武岩, 该岩体中裂隙成因类型众多, 不仅有玄武岩冷凝过程中形成的成岩裂隙, 还有后期多期构造运动形成的不同期次和方向的多组构造裂隙以及发育于层内或层间的错动带。这些裂隙构造在空间上相互交切构成极为复杂的裂隙网络系统, 天然情况下, 这些裂隙网络构成了地下水储存和运移的场所, 在水库蓄水条件下则又构成库水外渗的主要通道。由于溪洛渡水电站坝高 273 m, 在水库蓄水条件下, 坝区裂隙岩体中的渗流场会发生巨大变化, 因此开展坝区裂隙发育规律和裂隙岩体渗流场研究, 对水库防渗帷幕设计、基坑和地下厂房施工过程中涌水量的预测等都具有重大的实际意义。

通过研究区的水文地质调查发现该区裂隙介质具有以下特点: ①裂隙类型多, 有风化卸荷裂隙、成

岩裂隙和构造裂隙, 其中构造裂隙又可以分为层间错动带、层内错动带和一般构造裂隙; ②玄武岩受后期多期次构造运动的作用, 构造裂隙组数多, 密度大; ③根据现场的连通试验、示踪试验以及地下水位观测发现该区玄武岩存在着统一的地下水流动场和地下水水位; ④通过对平硐的调查发现, 突水或涌水点一般都位于层间错动带上, 层内错动带附近一般有渗水现象, 由此可见坝区玄武岩具有相对集中的运移通道——层间错动带。

根据研究区裂隙发育特点, 如果采用非连续裂隙网络模型, 工作量巨大, 目前难以实现。如果采用等效连续介质模型, 又不能反映坝区裂隙岩体非均质各向异性的特点, 因此只有采用双重介质模型来刻画坝区的裂隙岩体, 它既克服了获取众多裂隙参数的困难, 以及由于构建庞大的非连续裂隙网络所带来的计算上的困难, 又能刻画层间错动带在水流

运动过程中起到的主导作用,同时也能满足工程的实际需要。双重介质模型是在裂隙岩体中发育有不同规模的裂隙时,将发育有小型裂隙的岩块视为等效连续介质,而将规模较大的巨型裂隙视为独立的储(导)水介质,将这两种介质耦合在同一个渗流模型当中,并研究其渗流运动规律^[1]。因此将一般构造裂隙、成岩裂隙、风化卸荷裂隙以及小型层内错动带这些储(导)水介质视为连续介质,而将层间错动带视为非连续裂隙介质,建立双重介质模型。在双重介质模型中如何确定其等效典型单元体体积是该模型建立的关键之一。

1 裂隙率典型单元体

裂隙岩体中的水流运动是沿着一些形状不一、大小各异、弯弯曲曲的通道进行的,由于岩块边界的几何形状十分复杂,使得裂隙中地下水的运动要素(如流速、流量等)的分布变化无常,若从这个微观角度来研究地下水运动规律是十分困难的。因此,裂隙岩体中地下水运动规律的研究通常引用孔隙介质中地下水渗流的概念,即假想水流是充满了整个裂隙介质(包括裂隙和岩块)的连续体,假设水流的阻力与实际水流所受的阻力相同,任意点上的水头 H 和流速矢量 v 等运动要素与实际水流在该点周围的平均值相等。

运动要素在多大的空间尺度上进行平均,即典型单元体的体积如何选取,是双重介质模型概化的关键之一。裂隙介质的典型单元体是包含一个小体积在内的大量裂隙的集合体,它要比单个裂隙大得多,但和所考虑的研究区域相比又足够小,典型单元体的渗透特性反映了众多小裂隙特性的统计平均规律。这样,裂隙介质研究区域就可以看成由这种典型单元体组成的连续体,其渗透特性由典型单元体来宏观表示,而不是由每条裂隙来直接表示。因此所谓典型单元体是指能够宏观地平均反映研究区域渗透特性的最小区域。

裂隙率就是单位岩体裂隙所占有的体积百分比,裂隙率的大小可以反映裂隙岩体渗流能力的强弱,在多孔介质中,通常利用有效孔隙度随体积变化的关系来确定典型单元体的大小^[2],同理,在裂隙岩体中可以采用有效裂隙率随体积变化的关系来确定裂隙岩体的典型单元体体积,这样得出的典型单元体就叫裂隙率典型单元体。

因此可将研究区域看成是由这种裂隙率典型单元体组成的连续介质体,其渗透特性由裂隙率典型单元体来宏观表示,而不是由每条裂隙来直接表示。这样处理忽略了单条裂隙的结构,而研究典型单元体

中的平均分布特征,进而研究整个裂隙含水层系统的结构特征。这一处理的方法也叫宏观平均化方法。

然而裂隙水渗流的主要特征是具有明显的方向性,所以表示众多裂隙渗流特性统计规律的典型单元体也表现为渗透特性的各向异性。因此必须把裂隙介质看成由这些典型单元体组成的各向异性的等效连续介质,采用反映渗透特性各向异性的渗透系数张量(或渗透率张量)理论来进行渗流分析。和达西定律一样,渗透系数张量(或渗透率张量)理论包含有等效连续介质渗流的假定,即认为具有方向性的渗透流体充满了整个渗流区域,而实际上渗流只在裂隙中定向流动,渗透流体并不连续。

总之,双重介质方法的关键之一在于典型单元体的大小求取,要确定裂隙率典型单元体的大小,首先要确定岩体裂隙的几何参数及其裂隙网络的特点。

2 典型单元体体积的确定

2.1 裂隙几何参数的确定

在实际工作中,由于各种条件的限制,很难利用实际资料求出裂隙率典型单元体体积 V_0 。为了得到裂隙率典型单元体体积,首先必须利用统计学方法对裂隙进行取点实地测量,获得测点的裂隙产状、隙宽、隙间距等参数,通过分析所测得的数据并进行分组统计分析,得出各组裂隙的分布规律,然后利用 Monte-Carlo 原理,生成三维随机裂隙网络,即求取不同体积大小的裂隙率,通过分析孔隙率随体积的变化关系图,看是否有裂隙率典型单元体体积 V_0 存在。

裂隙网络生成的流程见图 1,具体操作步骤如下^[3-4]:

a. 野外的裂隙测量。选取测量点,测量出导线的走向和起点位置,测量与导线相交裂隙的位置、倾角、倾向、隙宽和上下迹长。

b. 绘制裂隙方位等密度图。结构面表示方法很多,如结构面方位玫瑰花图、等角度图或等面积图,在一般情况下采用等密度图,因为它不需要转动,投影方便,直观清晰,它的中心点代表一组裂隙的平均方位。因此绘制各个类别的裂隙面方位等密度图,然后根据裂隙面方位等密度图得出裂隙分组。

c. 求出各组裂隙几何参数的分布规律。在步骤 b 的基础上,利用统计的方法求出各组裂隙几何参数的分布规律,一般包括分布形式、最大最小值、均值、方差及裂隙的法向线密度等参数。

d. 假定裂隙面在空间上为薄圆饼状,隙面光滑平直,各处产状一致,隙宽不变。利用 Monte-Carlo 模拟原理生成各个裂隙面的参数:Monte-Carlo 模拟通过计算机产生随机数,进而产生符合上述结构面

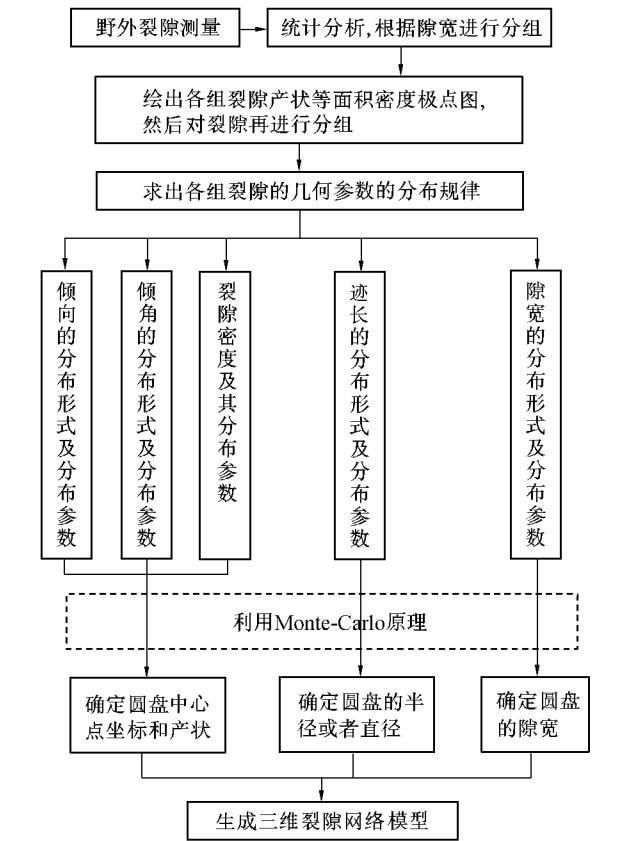


图1 裂隙网络生成流程

分布概率模型的随机变量,来模拟各组结构面各要素及分布,组合各分组形成岩体的裂隙网络系统。利用各组裂隙的产状和裂隙的法向密度的统计特征随机生成圆盘中心点坐标和产状,利用迹长(或半迹长)的统计特征随机生成圆盘的直径或半径,利用裂隙的隙宽统计特征随机生成圆盘的隙宽。利用随机生成的各个裂隙圆盘的中心点坐标、倾向、倾角和圆盘直径或半径确定各个裂隙圆盘的位置,通过各个裂隙圆盘的相互交叉形成裂隙网络。

2.2 坝区玄武岩裂隙几何参数的统计特征

为了弄清楚坝区玄武岩裂隙发育的特点,对坝区主要平硐采用统计窗法进行裂隙几何参数的测量。共布置5 m×2 m的测点(统计窗)82个,共测量裂隙4000多条,基本反映了坝基两岸及厂房不同高程的裂隙发育的特点。在这些资料的基础上,对坝区裂隙(不包括层间错动带)分组进行几何参数(包

括倾向、倾角、隙宽、迹长和法向密度)统计分析,找出其分布规律。

对裂隙分组是在野外地质调查的基础上,根据裂隙的观测值来确定。绘制裂隙等密度图并结合野外实际情况分组,具体分组情况见表1。对各裂隙组进行统计分析,结果见表2。

表1 裂隙分组

组号	倾向/(°)	倾角/(°)
1	21~40	1~30
2	61~80	61~90
3	171~190	11~41
4	201~225	11~35
5	306~335	71~90

2.3 三维裂隙网络的生成

用Monte-Carlo原理生成三维裂隙网络模型的假定条件有:①假设结构面为薄圆盘状,裂隙直径的分布可参照迹长的分布;②假设结构面光滑平直,各处产状一致;③定义裂隙的空间位置采用泊松模型,裂隙在研究区内各处出现的概率相等,结构面中心点的空间坐标通过一个均匀分布产生。

三维裂隙网络的生成步骤如下:

a. 求取结构面的体密度。为确定在一个特定岩体体积内产生多少条裂隙,裂隙密度是一个不可缺少的参数。结构面的密度定义有法向(线)密度 d_1 ,面密度 d_2 ,体密度 d_3 。结构面的体密度是岩体单元体积范围内裂隙中心个数的平均数,本模拟中单组裂隙体密度采用公式(1):

$$d_3 = \frac{4d_1}{\pi E(D^2)} \quad (1)$$

式中: $E(D^2)$ 为裂隙圆盘直径平方的均值。

在一个泊松模型中,令模拟区岩体的体积为 V ,裂隙组 i 的体密度为 d_{i3} ,则

$$N_i = Vd_{i3} \quad (2)$$

$$N = \sum N_i = V \sum_{i=1}^n d_{i3} \quad (3)$$

式中: N_i 为模拟区内第 i 组裂隙的条数; N 为模拟区内裂隙的总条数; n 为裂隙组数。

b. 结构面中心点坐标。根据步骤a计算出的体密度,可以确定出模拟区内第 i 组裂隙的数目。

表2 各组裂隙特征值

组号	倾向/(°)				倾角/(°)				隙宽/mm				迹长/cm				法向密度/(条·m ⁻¹)
	均值	方差	最大	最小	均值	方差	最大	最小	均值	方差	最大	最小	均值	方差	最大	最小	
1	29.00	29.66	40	21	16.87	60.41	30	1	0.05	0.001	0.15	0.02	72.25	6417.08	600	9	1
2	69.79	47.10	80	61	78.00	69.71	90	61	0.07	0.008	0.50	0.02	69.87	3228.79	250	10	2
3	180.72	31.98	190	171	27.76	62.86	40	11	0.10	0.110	3.00	0.02	90.42	5843.88	400	11	1.5
4	212.63	53.49	225	201	23.42	44.04	35	11	0.16	0.210	3.00	0.02	160.90	35490.1	700	10	1.25
5	321.07	76.50	335	306	81.54	28.93	90	71	0.08	0.030	1.10	0.02	82.97	5025.51	320	12	0.75

注:倾向和倾角服从正态分布,隙宽服从负指数分布,迹长服从对数正态分布。

令模拟区起始点坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,模拟区边界为 a_x, a_y, a_z ,采用均匀分布随机数生成器分别独立生成3个随机数,记为 r_{1i}, r_{2i}, r_{3i} ,则结构面坐标为

$$\begin{cases} x = x_0 + r_{1i}a_x \\ y = y_0 + r_{2i}a_y \\ z = z_0 + r_{3i}a_z \end{cases} \quad (4)$$

循环 N_i 次,就会产生 N_i 条结构面的中心点坐标。

c. 结构面产状模拟。在确定了结构面中心点坐标之后,应对每一条结构面模拟其产状,产状由倾向、倾角两个元素组成,根据它们的具体分布形态,用相应的随机数生成器生成服从该分布的随机数,经过处理,得到结构面的模拟产状,对每一条结构面都可独立生成一组产状,共 N_i 组。

d. 结构面直径与隙宽模拟。按照与模拟结构面产状类似的方法,同样可以模拟出每一条结构面的直径和隙宽,使它们分别服从各自相应的分布形式,这通过选择适当的随机数生成器即可做到。

e. 模拟结果的合理性检验。检验方法为上述步骤的逆过程,即统计模型区内各结构面的形态参数值,检验它们的分布形式及数字特征是否与原定的概率模型一致,如一致,则认为模拟成功;如不一致,应重新进行模拟。

f. 重复上述步骤,直到 n 组结构面都模拟完成。这样可得到模拟区内每一条结构面的坐标、倾向、倾角、直径和隙宽,裂隙在空间中被唯一地界定下来。 N 条结构面就组成了一个完整的岩体结构面网络。

g. 剔除不连通的裂隙。通过上述过程生成的裂隙网络可能有非连通的情况,通过裂隙连通搜索,将那些都能与其他裂隙或边界交割,且通过相互交割并沟通到边界的裂隙保留,将不满足条件的孤立裂隙删除。

h. 三维结构面网络的可视化。对结构面网络图像的可视化可通过在近几年发展起来的三维图形标准 OpenGL 进行二次开发的软件来实现。

通过对坝区裂隙的各种参数进行分组统计,得出了倾向、倾角、迹长、隙宽和法向密度的分布形式、方差、平均值、最大值、最小值,生成了一个 $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的坝区综合裂隙网络模型(图2)。

2.4 裂隙率典型单元体体积的确定

随机裂隙网络模型生成后,就可以通过计算不同大小裂隙岩体的裂隙率来确定该区典型单元体的大小。

由于生成的裂隙网络模型是随机的,因此从理论上来说,以任一点为中心进行搜索最后求得的裂隙典型单元体体积应该是一样的。为了计算方便,

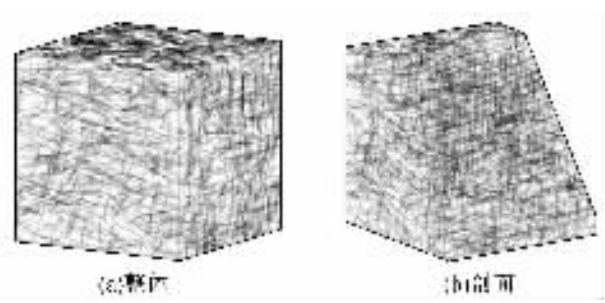


图2 三维裂隙网络模型

以生成的裂隙体的中心为起点,逐渐扩大搜索立方体的边长,计算出不同体积大小的立方体裂隙率的大小,最后通过分析裂隙率随搜索立方体体积的变化图,确定裂隙率典型单元体体积(图3)。

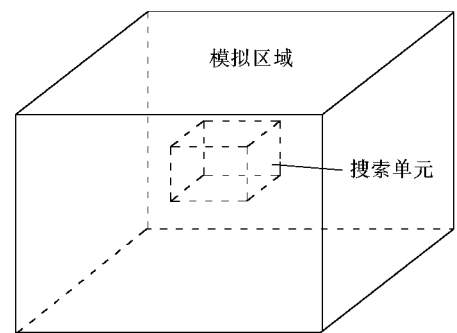


图3 裂隙率计算示意图

同样,为了确定研究区的裂隙典型单元体体积,对生成的坝区综合裂隙网络模型进行裂隙率的计算,其裂隙率变化随搜索立方体的体积变化见图4。由图4可以看出在搜索立方体体积较小时,其裂隙率变化很明显,当搜索体的边长增大到 17 m 时,裂隙率趋于一稳定值 0.0375% 。也就是说在研究区内,如果不考虑层间错动带,其典型单元体的体积是 4913 m^3 ($17\text{ m} \times 17\text{ m} \times 17\text{ m}$),相对研究区的范围来说小得多,因此使用双重介质理论进行模拟研究是完全可行的。

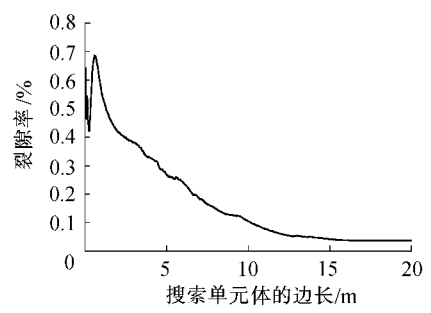


图4 裂隙率随搜索立方体体积的变化

3 结 论

本文以溪洛渡水电站坝区玄武岩为例,通过建立随机裂隙网络模型,分析裂隙率随体积变化的关系,得出研究区的裂隙率典型单元体体积,可以得出以下结论:

(下转第40页)

值 故本文取 0.05 进行计算。

规范^[7]给出的设计反应谱特征周期只反映了场地对地震卓越周期的影响,没有考虑远震是由面波引起的长周期分量的影响,原因主要是远震和近震的影响无法区分。文献[6]进行统计分析的结果表明,边坡的坡高、坡度以及边坡的弹性模量在一定程度上都会对边坡的地震响应产生影响,因此,边坡数值模型的建立、模型物理力学参数的取值都应尽可能地体现边坡的真实面貌。

3 结 语

崩塌堆积体边坡在地震作用下的破坏机理十分复杂,寻找一种合理的计算方法将是一个重要的课题。拟静力法使用简单,但无法考虑地震作用的动力特性,时程分析法虽然能够更准确地反映地震的动力特性以及崩塌堆积体边坡随时间的变形变化,但需要测定场地的地震波输入,计算以及实现相对繁琐;反应谱法根据长年科研工作积累的反应谱曲线确定地震参数,计算相对简单,又能反映地震作用边坡的最大反应。但由于地震作用条件下地面运动行为十分复杂,由此所用的振型组合公式,包括 SRSS 法都是不严格的,只能是某种意义上的平均统

(上接第 21 页)

a. 研究发育有不同规模的裂隙网络,将一般构造裂隙、成岩裂隙、风化卸荷裂隙以及小型层内错动带这些(储)水介质视为连续介质,而将层间错动带视为非连续裂隙介质,建立双重介质模型。因此,如何确定其等效单元体体积是该模型建立的关键之一。

b. 通过野外裂隙测量和统计分析,得出裂隙发育的统计规律,在假设结构面为薄圆盘状、结构面光滑平直和裂隙的空间位置采用泊松模型的前提下,利用 Monte-Carlo 原理构建随机裂隙网络模型,分析裂隙率随体积变化的关系,得出的研究区裂隙率典型单元体体积能很好地反映出研究区的总体裂隙渗

(上接第 36 页)

[2] 郑莉玲,李光勉.某排涝泵站工程水泵比选分析[J].黄河规划设计,2005(2):30-33.
[3] 贾玉爱.浪店水源泵站工程应用大型潜水轴流泵的可行性[J].山西水利科技,1999(增刊):82-83.
[4] 周雨农.潜水轴流泵的应用实践[J].水利科技,2001(2):51-54.
[5] 贾效亮.潜水轴流泵在高店水库泵站工程中的应用[J].水利科技与经济,2001(4):132-133.
[6] 夏坚远.新型潜水轴流泵在排涝工程中的应用[J].江苏

计结果,最终导致反应谱理论不够严格。本文采用加速度反应谱曲线进行取值,而加速度反应谱曲线与阻尼比的取值有密切的关系,因此,对于不同岩土体性质的崩塌堆积体边坡,阻尼比的取值也是一个需要研究的问题。

参考文献:

[1] 刘力平,雷尊宇,周富春.地震边坡稳定分析方法综述[J].重庆交通学院学报,2001,20(3):83-88.
[2] 顾淦臣.土石坝地震工程[M].南京:河海大学出版社,1988.
[3] STEVEN L K. Geotechnical earthquake engineering[M]. Upper Saddle River NJ :Prentice-Hall Inc ,1996 :423-462.
[4] NEWMARK N M. Effective of earthquake on dams and embankment[J]. Geotechnique ,1965 ,15(20):139-159.
[5] 胡定,潘亨永,杜建成.小湾左岸坝前堆积体边坡稳定性分析研究[J].云南水力发电,2000,16(1):31-36.
[6] 何蕴龙,陆述远,段亚辉.岩石边坡地震作用计算方法研究[J].长江科学院院报,1998,15(4):35-38.
[7] DL 5073—2000 水工建筑物抗震设计规范[S].
[8] 王良琛.混凝土坝地震动力分析[M].北京:地震出版社,1981.

(收稿日期 2005-06-20 编辑 高建群)

流规律。这为建立双重介质模型或等效连续介质模型中裂隙率典型单元体体积大小的确定,提供了一个新的途径。

参考文献:

[1] 仵彦卿,张倬元.岩体力学导论[M].成都:西南交通大学出版社,1995.
[2] 陈崇希,林敏.地下水动力学[M].武汉:中国地质大学出版社,1999.
[3] 刘佑荣.岩体力学[M].武汉:中国地质大学出版社,1996.
[4] 徐光黎,潘别桐,唐辉明,等.岩体结构模型与应用[M].武汉:中国地质大学出版社,1993.

(收稿日期 2006-03-16 编辑 骆超)

水利,2001(10):24-25.
[7] SL140—97 水泵模型验收试验规程[S].
[8] GB3216—89 离心泵、混流泵、轴流泵和旋涡泵试验方法[S].
[9] 关醒凡.现代泵技术手册[M].北京:宇航出版社,1995:65-78.
[10] 葛强,陈松山,严登丰,等.上海浦东薛家泓泵站泵装置模型试验研究报告[R].扬州:江苏机电排灌工程研究所,2004.

(收稿日期 2005-10-28 编辑 骆超)