

雾雨作用下大岩淌滑坡非饱和渗流场数值模拟

王世梅, 田东方

(三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 宜昌 443002)

摘要: 泄洪雾雨对滑坡渗流场的影响涉及到雾雨强度的确定、雾雨产生坡面径流及坡体饱和 - 非饱和渗流分析等一系列复杂问题。文章利用模糊综合评判方法确定了水布垭大岩淌滑坡的雾雨强度;通过试验确定了滑坡土体的土水特征曲线;利用坡面径流 - 非饱和和渗流耦合数值模拟方法计算了在雾雨作用下滑坡体内渗流场变化规律。研究结果为雾雨作用下大岩淌滑坡的稳定性预测提供了渗流场条件,研究方法为雾雨或降雨作用下滑坡的非饱和和渗流场数值模拟提供了一条新途径。

关键词: 泄洪雾雨;模糊综合评判;大岩淌滑坡;土水特征曲线;非饱和和渗流

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2009)04-0032-05

清江水布垭水利枢纽大岩淌滑坡位于坝后左岸,距坝轴线仅 800 余米,其稳定性受溢洪道泄洪雾雨的直接影 响。为了确定泄洪雾雨对滑坡渗流场的影响,必须解决 2 个难题:(1)确定雾雨强度;(2)进行雾雨产生坡面径流及坡体饱和 - 非饱和和渗流的耦合分析。对于挑流消能形式的泄洪而言,要确定水电站在泄洪时所产生的雾雨强度及其分布,需要对泄洪雾化机理、水舌运动轨迹、水舌空中掺气、扩散、水舌空中碰撞、泄洪雾化雾源等做充分研究。在现阶段要弄清这些问题还存在很大的困难^[1]。对于坡体饱和 - 非饱和和渗流与坡面径流的耦合问题,传统做法是把坡面径流与坡体饱和 - 非饱和和渗流分开研究,假设入渗率函数或坡面产流函数采用迭代计算来完成,但这种做法不仅理论上不够严密,而且误差较大^[2~3]。

针对以上问题,本文采用模糊综合评判法^[1]确定滑坡区的雾雨强度及其分布;采用将坡面径流与坡体非饱和和渗流作为统一体来考虑的耦合方法^[4]对雾雨作用下滑坡体内渗流场进行数值模拟和分析。

1 滑坡体雾雨强度的确定

1.1 泄洪雾雨强度模糊综合评判方法

1.1.1 影响因子集

泄洪雾雨与泄洪水力条件和出流边界条件有关。

收稿日期: 2008-01-05; 修订日期: 2008-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50839004)

作者简介: 王世梅(1965-),女,博士,教授,主要从事岩土工程、地质灾害领域的教学及研究。

E-mail: wws3044@yahoo.com.cn

一般而言,水头越高,流量越大,泄洪雾化的降雨强度与影响范围也越大。对某一具体点来说,泄洪雾雨强度还与该点的位置有关。因此,雾化降雨区域内任一点处的雨强表示为:

$$S = f(Q, H, k, \dots) \tag{1}$$

式中: Q ——泄洪流量(m^3/h);

H ——上、下游水位差(m);

$k = \dots/H$

——挑坎末端至下游水面高差(m);

$= x/H, \dots = y/H, \dots = z/H$

x, y, z ——以水舌入水点为参照点的被预测点的位置坐标,其中 x 沿水舌出流方向, z 沿铅垂方向。

由此看出,滑坡体上任一点的雾雨强度不仅与溢洪道设计参数 $\{Q, H, k\}$ 有关,还与预测点的位置参数 $\{ \dots, \dots \}$ 有关,因此,需要采用两级评判方法:首先,评判的是与溢洪道设计参数 $\{Q, H, k\}$ 有关而与预测点位置参数 $\{ \dots, \dots \}$ 无关的泄洪雾雨量值,这个量值用“雾化特征雨强”来表示。雾化特征雨强定义为在给定的 $\{Q, H, k\}$ 条件下,与特征点($\dots = 0.5, \dots = 0.3, \dots = 0.1$)处降雨量相等的雨量值,其影响因子集为 $\{Q, H, k\}$;然后,对预测点的雾雨强度进行综合评判,影响因子集为 $\{ \dots, \dots \}$ 。

1.1.2 特征雨强量级的模糊综合评判

根据文献[1],特征雨强 $S_0 = f(Q, H, k)$ 及其影响因子 Q, H, k 均划分为 7 级(表 1)。 Q, H, k 的隶属函数和权重分配见表 2。

表1 S_0, Q, H, k 分级表

Table 1 Classification of S_0, Q, H and k

级别	1	2	3	4	5	6	7
S_0 (mm/h)	1 100	950	800	650	500	350	200
Q (m ³ /h)	18 000	16 000	13 000	10 000	6 000	2 000	500
H (m)	270	230	190	150	110	70	30
k	0.6	0.55	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

表2 Q, H, k 的隶属函数和权重分配

Table 2 Membership function and weight distribution of Q, H and k

因子	权重	隶属函数	备注
Q	0.39	$\mu(Q) = \exp(-2.8e^{-7}(Q - Q_i)^2), (i = 1, 2, \dots, 7)$	Q_i 为 Q 的分级指标
H	0.36	$\mu(H) = \exp(-3.7e^{-4}(H - H_i)^2), (i = 1, 2, \dots, 7)$	H_i 为 H 的分级指标
k	0.25	$\mu(k) = \exp(-50(k - k_i)^2), (i = 1, 2, \dots, 7)$	k_i 为 k 的分级指标

表3 S, S_0, S 的分级表

Table 3 Classification of S, S_0 and S

级别	1	2	3	4	5	6	7
S (mm/h)	$S < S_0$	$S_0 > S > \frac{1}{2} S_0$	$\frac{1}{2} S_0 > S > \frac{1}{10} S_0$	$\frac{1}{10} S_0 > S > \frac{1}{50} S_0$	$\frac{1}{50} S_0 > S > \frac{1}{100} S_0$	$\frac{1}{100} S_0 > S > \frac{1}{500} S_0$	$\frac{1}{500} S_0 > S$
	0.5	0.7	1.0	1.5	2.2	3.2	4.5
	0.3	0.5	0.75	1.05	1.4	1.85	2.35
	0.1	0.15	0.25	0.35	0.5	0.7	1.0

表4 S, S_0, S 隶属函数和权重

Table 4 Membership function and factors weight of S, S_0 and S

因子	权重	隶属函数	备注
	0.32	$\mu(S) = \exp(-4.5(S - S_i)^2), (i = 1, 2, \dots, 7)$	为 S 的分级指标
	0.35	$\mu(S_0) = \exp(-7.0(S_0 - S_{0i})^2), (i = 1, 2, \dots, 7)$	为 S_0 的分级指标
	0.33	$\mu(S) = \exp(-50(S - S_i)^2), (i = 1, 2, \dots, 7)$	为 S 的分级指标

们与水舌入水点的位置关系如图1所示,位置参数 $\{x, y, z\}$ 分别为 $\{0.68, 0.54, 0.00\}$ 、 $\{0.92, 0.50, 0.30\}$ 、 $\{1.21, 0.43, 0.603\}$ 和 $\{1.73, 0.31, 1.00\}$ 。溢洪道泄洪参数 $\{Q, H, k\}$ 为 $\{18440, 202, 0.272\}$,按前述方法确定四点雾雨强度分别为1100, 800, 200, 11mm/h。

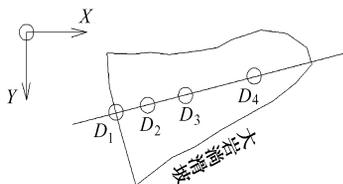


图1 计算点与水舌入水点位置分布图

Fig. 1 Distribution of the calculating points and water tongue

对特征雨强进行评判时,先根据 Q, H, k 的数值按表2所列的隶属函数求出单因素评判矩阵 R ;然后按模糊评判法则对 A 和 R 进行合成运算,得出特征雨强量级的综合评判集 $B = A \circ R$;最后按最大隶属原则确定特征雨强 S_0 。

1.1.3 预测点雾雨强度综合评判

在一定的 $\{Q, H, k\}$ 条件下,雾化特征雨强的量级 S_0 已在第一级评判中得出,雾化降雨影响区域内某点雨强与该点位置有关,因此,滑坡区内任一点雨强可表示为 $S = f(x, y, z)$ 。 $S = f(x, y, z)$ 及其影响因子 x, y, z 也划分为7级(表3)。 x, y, z 的隶属函数和权重分配见表4。

对 S 进行综合评判的方法与特征雨强的评判方法相同。

1.2 大岩淌滑坡雾雨强度确定

在滑坡主剖面上选取代表性点 D_1, D_2, D_3, D_4 ,它

2 坡面径流 - 非饱和渗流耦合方法

降雨条件下会产生坡面径流与坡体非饱和渗流两种作用过程,这两个过程分别都有各自的控制方程及边界条件,在二者的边界条件中,对坡面流而言,须给定坡面下渗分布情况,对坡体渗流而言,须给定坡面入渗分布情况。两者分别计算时,需要解决二者间流量交换大小相等且两者分别所得坡面处水头应相等的问题。

根据文献[4]提出的将两个问题合二为一的思路,即:将坡面边界作为内部域,不再是边界条件范畴,将径流和渗流方程联合求解。其做法是将渗流控制方程

转化为关于水头 ϕ 和 $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ 的线性方程,同时将坡面径流问题也转化为关于水头 ϕ 和 $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ 的线性问题,利用坡面径流入渗流量和渗流时入渗边界流量相等的关系,联立这些方程求解。其耦合模型为:

$$[M]\{\phi\} + [N]\left\{\frac{\partial \phi}{\partial t}\right\} = \{R\} \quad (2)$$

式中: $[M]$ 、 $[N]$ 、 $\{R\}$ ——系数矩阵,限于篇幅,其具体表达式略。

利用该方法对雾雨作用下坡体渗流场进行数值模拟时,不仅需要确定雾雨强度,还需要确定滑坡土体渗透性函数或土水特征曲线。本文通过试验获得大岩淌滑坡土体土水特征曲线。

3 土水特征曲线试验

3.1 试验仪器和试验原理

试验仪器为美国产 LAB523 型 Tempe 压力膜仪,由空气压力室及置于其内的高进气值陶土板组成。

试验基本原理:通过空压机提供气源,由调压阀控制气压,对装有湿土样的容器分级施加不同的吸力,迫使土样水分渗出并达到平衡,然后取出试样称重,用连续称重法计算试样在每级基质吸力下的含水量,据此可以绘制出土水特征曲线。含水量的计算公式如下:

$$i = \left[\frac{m_i}{m_n} (1 + n) - 1 \right] \times 100\% \quad (3)$$

式中: i , m_i ——某级吸力下试样含水量与质量(g);
 n , m_n ——最后一级吸力下试样含水量与质量(g)。

表5 试样颗粒组成及物性指标

Table 5 Grain component and physical property index of samples

方法	筛析法					密度计法					
	20	10	5	2	1	0.5	0.25	0.075	0.046	0.021	0.008 8
颗粒百分含量 (%)	98.58	97.69	95.44	89.26	85.75	81.52	77.74	71.13	69.21	65.34	59.95
原状土特征	黄绿色,粉砂质泥岩夹少量碎石,滑带土体定向度和密度很高,有明显的滑动擦痕。					重塑土	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数	比重	
						物性指标	30.4	13.4	17.0	2.76	

注:筛分 2mm 以下颗粒混合制样,制样含水量 23.8%,密度 2.03g/cm³,初始饱和度 97.8%。

利用式(4)对表6的试验数据进行函数拟合(表7),结果表明拟合效果很好,其相关系数达到 98.8%~99.5%,从而得到土水特征曲线函数表达式:

$$= 11.2 + 9.3 e^{-u/159.5} \quad (5)$$

4 雾雨作用下非饱和渗流场数值模拟

4.1 计算模型

3.2 试验土样及试验结果

试验土样取自大岩淌滑坡滑体土,试验时剔除直径 > 2mm 的粗颗粒后,制作重塑样。试样基本物理性质指标见表5。取3个相同试样进行平行测试。基质吸力分8级施加,分别为:20,40,80,150,300,500,800kPa。试验数据整理结果见表6,绘制出三个试样土水特征曲线(图2),三条曲线基本重合。

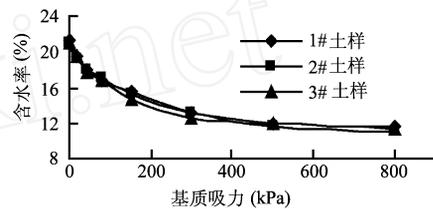


图2 试验测得土水特征曲线

Fig. 2 Soil-water characteristic curve without consolidation stress

3.3 土水特征曲线函数拟合

试验所得土水特征曲线上含水量与基质吸力之间关系曲线与指数衰减函数形状接近。故选用如下指数衰减函数对土水特征曲线进行拟合^[5]:

$$= B_0 + B_1 e^{-u/t} \quad (4)$$

式中: u ——重力含水量和基质吸力;

B_0 ——土样残余含水量,仅与土性有关,与吸力无关;

B_1 ——可变含水量,表示在整个吸力变化过程中含水量的变化范围;

t ——增长模量,反映含水量随吸力变化的度量指标。

大岩淌滑坡由滑体、滑带及滑床三部分组成,计算剖面网格模型如图3。

4.2 非饱和渗透性参数

采用3.3节的土水特征曲线函数。

4.3 初始条件及边界条件

左、右侧按水头边界,水头分别为 388.77m 和

表6 3个试样基质吸力与对应含水量

Table 6 Matric suction of 3 samples and the corresponding water content

基质吸力 (kPa)	0	20	40	80	150	300	500	800
1# 试样含水量 (%)	21.16	19.32	18.06	16.68	15.45	13.15	11.83	11.53
2# 试样含水量 (%)	20.88	19.28	17.91	16.93	15.35	13.07	11.68	10.94
3# 试样含水量 (%)	20.87	19.39	17.69	16.62	14.63	12.52	11.89	11.22

表7 公式拟合参数

Table 7 Parameters of fitting function

试样	B_0	B_1	t	R^2
1	11.598	9.018	154.535	0.989
2	11.014	9.341	183.328	0.991
3	11.462	9.141	135.251	0.994
平均值	11.212	9.296	159.51	0.993

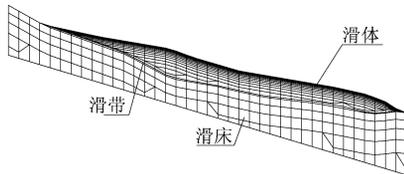


图3 计算模型网格图

Fig.3 Mesh of calculating model

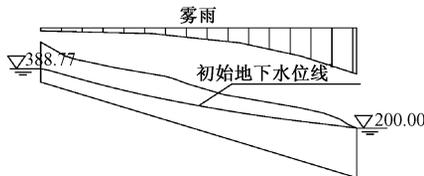


图4 初时条件及边界条件示意图

Fig.4 Initial conditions and boundary conditions

200m,保持恒定。上方为流量边界,即按计算的雾雨强度不断入渗;底部为不透水边界(图4)。

4.4 计算方案

计算在雾雨持续作用60h,及停止后30h整个时间段内,坡体内的渗流场变化情况,以分析雾雨对滑坡稳定性的影响。

4.5 计算结果及分析

计算结果表明,在雾雨作用下,滑坡体孔隙水压力、基质吸力分布及地下水位等渗流场发生明显改变。在雾雨作用前的初始时刻,坡体地下水位线大部分在滑带以下,只在滑体前缘局部超过滑带,滑体基本处于非饱和状态(图5);雾雨作用初期,坡体表层含水量有所增大,基质吸力有所减小,但雾雨只渗入到坡体浅部,未能影响到地下水位,故坡体内地下水位无变化;

雾雨作用30h时刻,雨水不断向坡体深部入渗并达到地下水,坡体内部基质吸力大大减小,坡体地下水位明显抬升;在雾雨作用60h停止时刻,随着雨水下渗并不断积累,滑体大部分被地下水淹没,基质吸力基本消失,只有表层有少量分布(图6);雾雨停止作用30h后,坡体中水分仍逐渐下移,含水量逐渐下降,上部基质吸力也相应得到回升,随着地下水向坡外渗流,地下水位也有所下降(图7)。

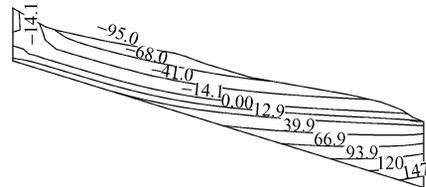


图5 初始时刻坡体渗流场水头等值线(m)

Fig.5 Hydraulic head isoline of the slope seepage field at the initial time

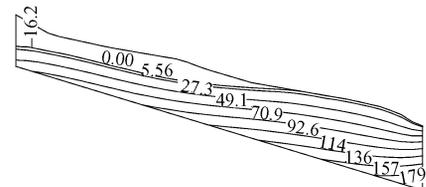


图6 t=60h时刻坡体渗流场水头等值线(m)

Fig.6 Hydraulic head isoline of the slope seepage field at the time of the 60th hours

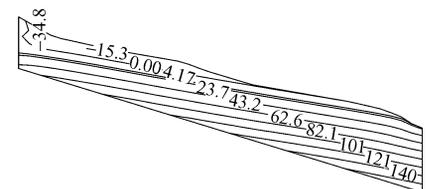


图7 雾雨作用停止后30h坡体渗流场水头等值线(m)

Fig.7 Hydraulic head isoline of the slope seepage field at the time of 30 hours after the fog rain

由此可见,在雾雨作用下滑坡体中渗流场随雾雨作用时间的延长逐渐发生改变,同时基质吸力大小、分布及地下水位也随之发生变化,并且雾雨作用对滑坡体的影响是从浅部向深部逐渐缓慢发展的。在雾雨作

用初期只有滑坡体浅部基质吸力分布受到影响,滑体深部的基质吸力及地下水位并没有变化,只有当雾雨作用到一定时间(本文计算为30h以后),才会影响到滑体深部直至滑带,并使滑体中地下水位升高,进而导致滑坡稳定性降低(图8)。

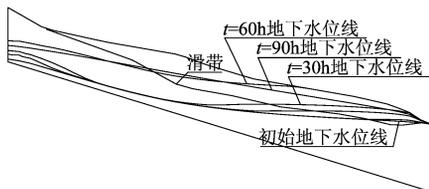


图8 坡体内各时刻地下水位线变化图

Fig.8 Change in groundwater level in the slope at different time

5 结论

采用模糊综合评判方法确定了大岩淌滑坡的泄洪雾雨强度,通过土水特征曲线试验确定了大岩淌滑坡土体的土水特征曲线及其参数,应用基于坡面径流与饱和-非饱和渗流耦合数值方法计算了雾雨作用下大岩淌滑坡体的渗流场及基质吸力分布变化情况,计算结果不仅为进一步进行滑坡稳定性计算和分析提供了

渗流场条件,也为滑坡地表及地下排水治理措施的选择提供了理论依据。由于雾雨的影响是从滑体浅部向深部逐渐缓慢发展的,因此,建议排水治理措施应以坡面及坡体浅层排水措施为主,尽量减少雾雨渗入量,并将雨水控制在滑体浅部,从而保证滑坡整体稳定不受影响。

参考文献:

- [1] 王环玲.高坝泄洪雾雨作用下饱和非饱和裂隙岩质边坡稳定性研究[D].南京:河海大学,2006.
- [2] 张书函,康绍忠,蔡焕杰.天然降雨条件下坡地水量转化的动力学模式及其应用[J].水利学报,1998(4):55-61.
- [3] 陈力,刘青泉,李家春.坡面降雨入渗产流规律的数值模拟研究[J].泥沙研究,2001(4):61-67.
- [4] 童富果.降雨条件下坡面径流与饱和-非饱和渗流耦合计算模型研究[D].宜昌:三峡大学,2004.
- [5] 谈云志,王世梅.某滑坡滑带土的土水特征曲线试验研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2007,30(3):298-300.

Numerical simulation of the unsaturated seepage field in the Dayantang landslide under the condition of fog rain

WANG Shi-mei, TIAN Dong-fang

(Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of the Ministry of Education, China, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The fog rain has an effect on the seepage field of landslides. The effect involves a series of complex problems, such as intensity decision of the fog rain, surface flow and saturated-unsaturated seepage analysis of the landslides, etc. The fog rain's intensity of the Dayantang landslide, which is located at the Shuibuya project, is obtained with the fuzzy comprehensive evaluation method. The soil-water characteristic curve is determined with tests, and the variable regulations of the seepage field in the landslide is gained with sloping surface run off-unsaturated seepage coupled numerical method. The results provide a seepage field condition used to forecast the stability of the Dayantang landslide. The research methods offer a new way for simulating unsaturated seepage field of the landslide under the condition of fog rain or rainfall.

Key words: fog rain; fuzzy comprehensive evaluation method; Dayantang landslide; the soil-water characteristic curve; unsaturated seepage

责任编辑:汪美华