考虑降雨入渗条件下泥岩边坡稳定性研究

黄海龙[1]，赵新涛[2]

（1. 广西水文地质工程地质勘察院，广西 柳州 545005；2. 重庆大学 土木工程系，重庆 400044）

摘要：本文利用 ANSYS 有限元软件进行降雨入渗条件下泥岩边坡开挖模拟，并结合了工程实例研究泥岩边坡在不同降雨强度、持时的工况下边坡土体位移、应力的变化，从而分析泥岩边坡在考虑降雨入渗条件下的稳定性。

关键词：泥岩；边坡；降雨入渗；稳定性分析

中国分类号：TV223.6 **文献标识码**：A

Abstraet：The paper uses the ANSYS finite element software to simulate rainfall infiltration under the condition of a mudstone hill slope to be excavated and studies the variation of deformation and stress under different rainfall intensities by considering a case project. The mudstone slope stability analysis under different rainfall infiltrations is also conducted in the paper.

Key words：mudstone；slope；rainfall infiltration；stability analysis

0 引言

地处西南的广西以第三系泥岩为主的软岩在南宁盆地、百色盆地和明江盆地等地广泛分布。在工程建设中常常遇到泥岩边坡的稳定性这一问题，由于泥岩具有失水干缩和遇水膨胀的土力学特性，导致了开挖泥岩边坡在干湿循环的自然气候作用下，发生反复胀缩，特别是在雨季，降雨使泥岩边坡土体含水量增加，土体的黏聚力、内摩擦角及基质吸力降低，从而引发泥岩边坡失稳。因此，对考虑降雨入渗条件下泥岩边坡稳定性的研究具有现实意义和工程应用价值。

1 泥岩边坡降雨入渗模型及解法

降雨入渗是一个非常复杂的相互耦合问题，其影响因素众多，要建立全面考虑全部的因素的控制方程并求出各种边值问题的解是一项艰巨的任务。因此要对研究的问题进行如下假设：

(1) 假定边坡为理想化的可归结为平面应变问题进行求解的问题，对复杂的降雨过程进行理想处理，考虑土体的各向同性；

(2) 模型主要研究降雨入渗引起的土体含水率的再分布，因此，假定土体中初始含水率处处相等；

(3) 泥岩边坡地下水位埋藏较深，所以认为降雨对地下水位影响不大。在计算中，假定地下水位保持不变。

1.1 垂直降雨入渗模型

对于泥岩边坡入渗问题，用 Richards 方程作为水分运动方程，即：

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[D(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}\right]-\frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \tag{1}$$

式中，$D(\theta)$ 为水力扩散系数，θ 为体积含水率，$k(\theta)$ 为土的导水率，t 为时间，z 为距离，向下为正。对于不同的实际问题可用不同的初始边界条件与基本方程组成定解问题。

1.2 边界条件

(1) 初始边界条件

边坡土体在降雨前的水分分布情况在求解降雨入渗水分运动方程时必须先给定，初始的水分分布可以通过实测得到，在土坡上沿竖直方向每隔一定的深度取土样，测定其含水率。

$$\theta(z,t)=\theta_i(z)，\ z>0，\ t=0 \tag{2}$$

当初始体积含水率均匀时，$\theta=\theta_i$。

(2) 上边界条件

1) 地表保持湿润或极薄水层，相当于第一类边界条件：

$$\theta(z,t)_{z=0}\approx\theta_s \tag{3}$$

式中，θ_s 为土体的饱和体积含水率。

2) 降雨强度已知，但未超过土壤的入渗强度，不形成积水或表面径流，相当于第二边界条件：

$$D_z(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}-K_z(\theta)=-R(t)，\ z=0，\ t>0 \tag{4}$$

式中，$R(t)$ 为降雨强度，cm/min。

3) 降雨强度已知，但经过一定时间后超过土壤的入渗强度，此时假定形成表面径流或积水，地面

收稿日期：2007-06-01；**修订日期**：2007-09-12

作者简介：黄海龙(1980 -)，男(壮族)，广西田阳人，硕士.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

含水率可接近饱和含水率θ_s的值，此时可按第一类边界条件：

$$\begin{cases} D_z(\theta)\dfrac{\partial\theta}{\partial z}-K_z(\theta)=-R(t) & z=0,0<t<t_a \\ \theta=\theta_s & z=0,t>t_a \end{cases} \quad (5)$$

(3)下边界条件

地下水位埋藏很深，土壤演算体积含水率均匀分布且恒定。即：

$$\theta(z,t)_{z=\infty}=\theta_i,t>0 \quad (6)$$

1.3 模型的数值解

水分子运动方程是二阶非线性的偏微分方程，用有限差分法来解。首先将研究区域划分为较小单元，将问题进行时间变量的离散化，把时间划分为若干时段，每个时段的时间称为时间步长k，沿 t 轴方向结点号为 i=0，1，2，…，m，沿 z 轴方向的结点号为 j=0，1，2，…，n，步长为 h。用隐式差分格式离散化式(1)，得：

$$\frac{\theta_n^{m+1}-\theta_n^m}{k}=\frac{1}{h}\Big[D(\theta_{n+1/2}^{m+1})\frac{\theta_{n+1}^{m+1}-\theta_n^{m+1}}{h}-D(\theta_{n-1/2}^{m+1})\cdot \frac{\theta_n^{m+1}-\theta_{n-1}^{m+1}}{h}\Big]-\frac{K(\theta_{n+1/2}^{m+1})-K(\theta_{n-1/2}^{m+1})}{h} \quad (7)$$

令

$$D(\theta_{n+1/2}^{m+1})=D(\frac{\theta_{n+1}^m+\theta_n^m}{2})=D_1 \quad (8)$$

$$D(\theta_{n-1/2}^{m+1})=D(\frac{\theta_n^m+\theta_{n-1}^m}{2})=D_2 \quad (9)$$

$$K(\theta_{n+1/2}^{m+1})=K(\frac{\theta_{n+1}^m+\theta_n^m}{2})=K_1 \quad (10)$$

$$K(\theta_{n-1/2}^{m+1})=K(\frac{\theta_n^m+\theta_{n-1}^m}{2})=K_2 \quad (11)$$

于是(7)式可改写为

$$-\frac{k}{h^2}D_2\theta_{n-1}^{m+1}+(1+\frac{k}{h^2}D_1+\frac{k}{h^2}D_2)\theta_n^{m+1}-\frac{k}{h^2}D_1\theta_{n+1}^{m+1}=\theta_m^m-\frac{k}{h}K_1+\frac{k}{h}K_2 \quad (12)$$

再令

$$A_n^m=-\frac{k}{h^2}D_2 \quad (13)$$

$$B_n^m=1+\frac{k}{h_2}D_1+\frac{k}{h^2}D_2 \quad (14)$$

$$C_n^m=-\frac{k}{h^2}D_1 \quad (15)$$

$$F_n^m=\theta_n^m-\frac{k}{h}K_1+\frac{h}{k}K_2 \quad (16)$$

则式(12)可写成：

$$A_n^m\theta_{n-1}^{m+1}+B_n^m\theta_n^{m+1}+C_n^m\theta_{n+1}^{m+1}=F_n^m \quad (17)$$

式(17)对于某一层时间(m+1)来说，系数 A_n^m，B_n^m，C_n^m 及常数项 F_n^m 均已在前一时间层(m)计算出来，所以，在同一时间层(m+1)上，对 Z 轴方向诸节点(n)都能写出一个线性方程组：

$$\begin{Bmatrix} B_1 & C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_2 & B_2 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_3 & B_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{n-2} & B_{n-2} & C_{n-2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_{n-1} & B_{n-1} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \vdots \\ \theta_{n-2} \\ \theta_{n-1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_{n-2} \\ F_{n-1} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

这是一个带形三对角阵，可用追赶法求解[1]。

2 降雨入渗条件下泥岩边坡开挖稳定性模拟分析

本文采用有限元软件 ANSYS[2]来模拟降雨入渗条件下泥岩边坡稳定性。

边坡在开挖以后由于降雨入渗，边坡土体含水量会升高，含水量的升高具有增加边坡负荷，降低边坡体的物理力学指标，从而影响边坡的稳定性。由泥岩边坡降雨入渗模型及解法，可以得出各降雨强度下，不同时间不同深度边坡土体瞬态含水量的分布，再根据泥岩强度参数与含水量关系研究[3, 4]，计算出泥岩边坡在各降雨强度下，不同时间泥岩边坡的平均黏聚力、内摩擦角和密度。然后结合 ANSYS 有限元软件可对降雨入渗条件下泥岩边坡开挖稳定性模拟分析，根据位移的大小和重分布的应力结果，对边坡稳定性进行定性的评价。

3 算例

南宁某泥岩边坡工程如图 1 所示，mn 为中轴线，开挖深度为 6m，竖直边坡，暂不考虑支护措施，边坡土体为膨胀性泥岩，密度为 1.9g/cm^3，含水量 ω =13.7%，颗粒比重为 2.7，地下水位埋深 10m，研究的边坡都在地下水位以上。

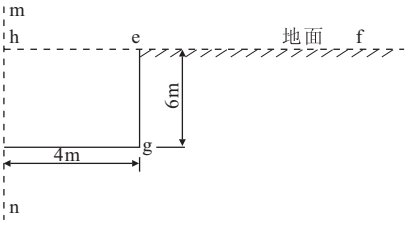


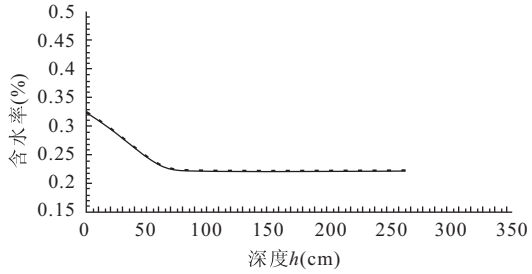
图 1 边坡断面

3.1 计算降雨条件下边坡含水量的分布

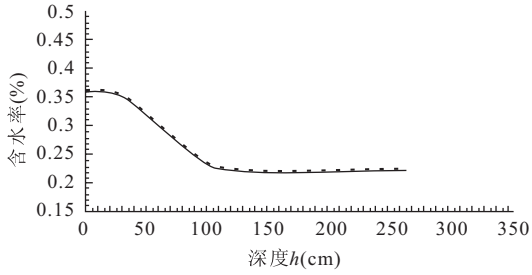
根据计算模型和边界条件，再以南宁市年降雨量为依据，选取降雨持时和降雨强度。取降雨强度为 300mm/d 降雨持时为 240min、降雨强度为 400mm/d 降雨持时为 480min 的工况。初始含水率为 0.22，为了便于研究，假定土中的初始含水率均匀分布。饱和含水率为 0.41，土壤水分运动参数用经验公式[5, 6] $K(\theta)=\alpha_1(\theta/\theta_s)^{b_1}$，$D(\theta)=\alpha_2(\theta/\theta_s)^{b_2}$，依据地区经验，

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本文取 $\alpha_1=0.0378, b_1=3.487, \alpha_2=12.435, b_2=3.6$，基于上一节的算法，用数学软件 MATLAB 编制计算程序[7]，计算过程中，取时间步长为 1min，z 轴方向的步长为 5cm，迭代误差为 0.01。经过计算，在上述的工况下边坡土体瞬态含水率分布如图 2 所示。



(a) 降雨强度 300mm/d 降雨 4h 时含水率分布



(b) 降雨强度 400mm/d 降雨 8h 时含水率分布

图 2 边坡土体瞬态含水率分布

3.2 边坡稳定性模拟分析

(1) 建立模型

根据工程概况，研究对象具有空间轴对称性质，根据影响范围，确定研究的区域，长 12m，深 12m。模拟计算模型图如图 3 所示，分析的本构模型选用岩土工程中常用的 Drucker-Prager 弹塑性模型，在 ANSYS 中通过 DP 材料来实现，需要输入泥岩边坡的黏聚力、内摩擦角及膨胀角三个参数，保守分析时，取膨胀角为 0。单元类型选用 Plane42 单元，Plane42 单元是一种 4 节点的结构实体平面单元。模型网格划分选用自由网格划分，划分前调整网格大小，网格划分结果如图 4 所示。

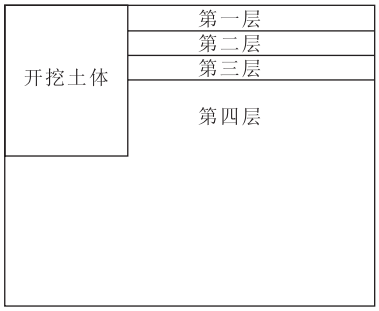


图 3 模拟计算模型

(2) 计算参数的确定

如前所述，影响边坡含水量变化的深度是在 3m 深左右，所以把边坡分为 4 层，第 1、2、3 层厚度各为 1m，再根据泥岩强度参数与含水量关系研究，即含水量与黏聚力，含水量与内摩擦角的关系，计算确定各层的参数见表 1。

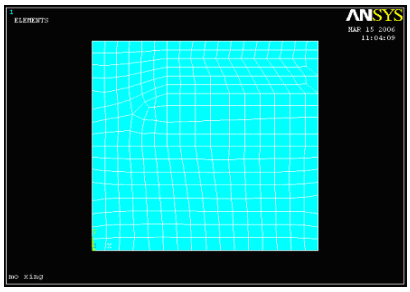


图 4 模型网格划分示意

计算参数 表 1

参数工况		密度 (kg/m^3)	黏聚力 (Kpa)	内摩擦角 (°)	变形模量 (Mpa)	泊松比
初始状态		1900	108.78	36	53	0.25
	第 1 层土	2200	91.13	27		
300mm/d、4h	第 2 层土	1900	108.78	36		
	第 3 层土	1900	108.78	36		
	第 1 层土	2267	68.56	18		
400mm/d、8h	第 2 层土	1934	103.34	33		
	第 3 层土	1900	108.78	36		

(3) 计算结果及分析

1) 降雨强度 300mm/d 降雨持时 4 小时条件下边坡应力、位移分布的结果如图 5 所示：

通过模拟计算，得出了泥岩边坡在各种工况下的水平和竖直方向位移图、应力图和剪应力图，对这些图进行分析可以得出以下观点：

a 边坡开挖后，边坡内应力场重新分布，大部分泥岩边坡出现明显的应力释放降低的现象，在开挖面附近尤为突出，最大的剪应力出现在边坡脚，开挖导致土体向临空面产生位移。

b 泥岩边坡在降雨入渗条件下，随着降雨强度、降雨持时的增加，边坡土体位移、应力在不断的增加。从上面的结果图得出不同工况下位移的增加量和应力增加量见表 2、3 所示。

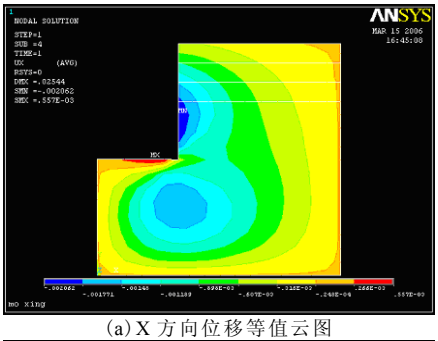
各工况下位移增量 表 2

工况	UX (mm)	UY (mm)
300mm/d、4h	2.062	25.443
400mm/d、8h	2.277	26.785

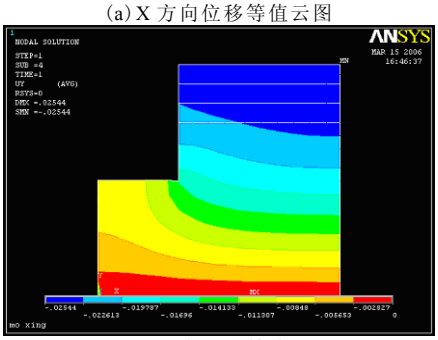
各工况下应力、剪应力增量 表 3

工况	SX (Pa)	SY (Pa)	SXY (Pa)
300mm/d、4h	5325	5887	2193
400mm/d、8h	5847	7157	2614

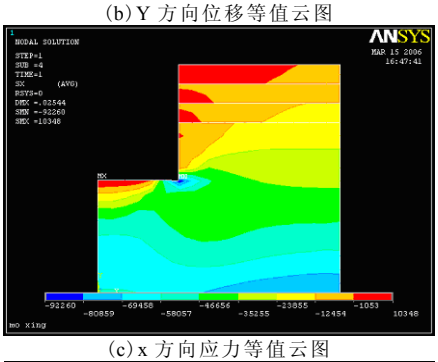
© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



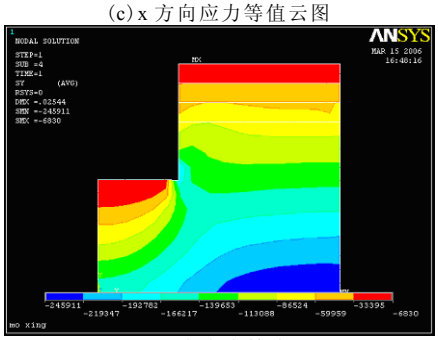
(a) X 方向位移等值云图



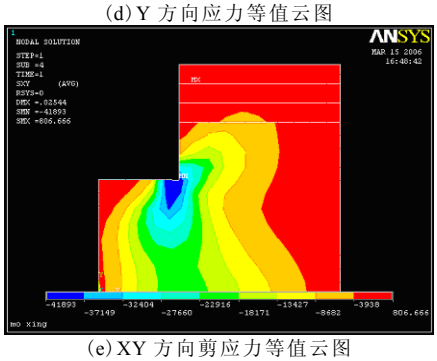
(b) Y 方向位移等值云图



(c) x 方向应力等值云图



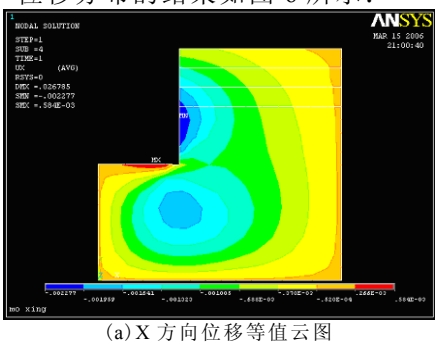
(d) Y 方向应力等值云图



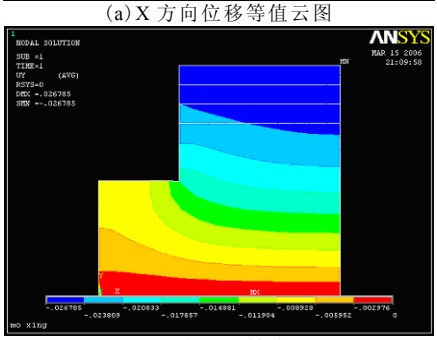
(e) XY 方向剪应力等值云图

图 5　边坡应力、位移分布

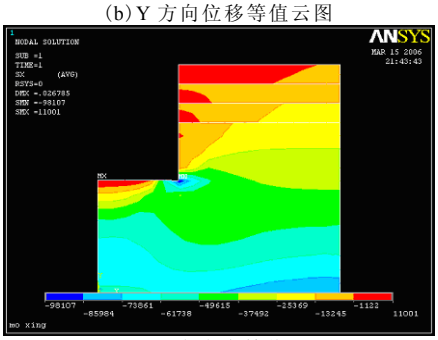
2) 降雨强度 400mm/d 降雨持时 8 小时条件下边坡应力、位移分布的结果如图 6 所示：



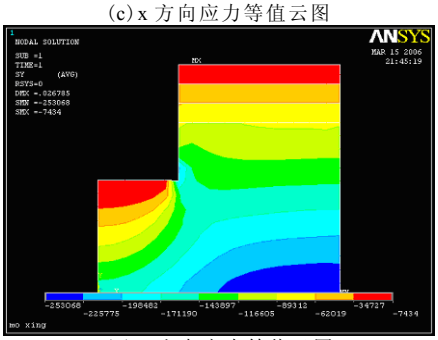
(a) X 方向位移等值云图



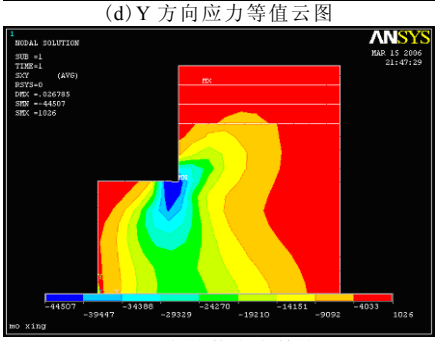
(b) Y 方向位移等值云图



(c) x 方向应力等值云图



(d) Y 方向应力等值云图



(e) XY 方向的剪应力等值云图

图 6　边坡应力、位移分布

（下转第 46 页）

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

实测抽水降深资料　　表 2

观测时间 t(d)	4.313	4.865	5.198	5.865	6.198	6.865	7.198	7.865	8.198	8.865
水位降深 s(m)	4.021	3.809	3.451	2.870	2.657	2.326	2.106	1.916	1.797	1.686

根据上述已知参数，采用本文方法即可完成如下计算：

(1) 进行线性回归计算

利用文献[5]中给出的回归计算方法，通过编制 BASIC 语言由计算机完成计算，计算结果为：a=44.23，b=-79.99。

(2) 进行水文地质参数计算

将 a=44.23，b=-79.99 代入式(8)可求得 b_1 为：

$$b_1=\left(\frac{-31.370\times 44.23}{18.109\times(-79.99)}\right)^{10.417}=0.638$$

将 $b_1=0.637$ 代入式(9)即可求得 b_0 为：

$$b_0=\frac{44.23}{0.6387^{0.256}\times 18.109}=2.739$$

将 $b_0=2.739$ 代入式(10)即可求得 T 为：

$$T=\frac{77.45}{4\times 3.1416\times 2.739}=2.250\mathrm{m^2/h}=54.0\mathrm{m^2/d}$$

将 $T=54.0\mathrm{m^2/d}$ 代入式(11)即可求得 S 为：

$$S=\frac{4\times 0.6387\times 54.0}{1450^2}=6.56\times 10^{-5}$$

文献[2]采用降深-时间(s-lg$t$)量板法所得成果为：$T=56.4\mathrm{m^3/d}$，$S=6.14\times 10^{-5}$，可见，本文方法与文献[2]的计算成果比较接近，本文方法是可靠的。

5 结语

(1) 本文采用优化拟合的方法，在适用范围内对井函数进行了优化拟合，即当 $0.0003\leqslant u\leqslant 1.7$ 时，获得了具有较高替代精度的井函数替代式，为进一步简化求解水文地质参数创造了基本条件。

(2) 根据抽水试验资料采用线性回归的方法通过对待定系数的求解完成了水文地质参数的计算，有效提高了计算成果的精度，也使求解过程大大简化。

参 考 文 献

[1] 薛禹群等. 地下水动力学[M]. 北京：地质出版社，1986.

[2] 《供水水文地质手册》编写组. 供水水文地质手册[M]. 北京：地质出版社，1990.

[3] 刘兆昌，朱昆. 供水水文地质[M]. 北京：地质出版社，1979.

[4] 滕凯，胡秀华. 利用水位恢复期的降深比值求解水文地质参数的解析法[J]. 工程勘察，1996，(4).

[5] 阎凤文. 测量数据处理方法[M]. 北京：原子能出版社，1990.

(上接第 39 页)

4 结语

(1) 本文利用 ANSYS 有限元软件对降雨入渗条件下泥岩边坡稳定性模拟分析，得出了泥岩边坡在降雨入渗条件下的稳定性规律。

(2) 本文对降雨入渗条件下泥岩边坡稳定性模拟分析的方法只是一种尝试，其目的是为工程的应用提供一定的理论依据，所以还有待于进一步研究。

(3) ANSYS 软件将有限元分析、计算机图形学和优化技术相结合，具备了完善的分析功能，同时拥有良好的用户界面和二次开发功能，为边坡稳定非线性分析提供了丰富的选项，因此 ANSYS 软件在边坡稳定分析中是个很好的工具。

参 考 文 献

[1] 南京大学数学系计算数学组. 偏微分方程数值解法[M]. 北京：科学出版社，1979，96~119.

[2] 王国强. 实用工程数值模拟技术其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安：西北工业大学出版社，1999.

[3] 张信贵. 南宁第三系湖相沉积泥岩承载力研究[O]. 南宁：广西大学，1995.

[4] 吴起星. 广西第三系泥岩桩端承载力研究[O]. 南宁：广西大学，2002.

[5] 清华大学农田水利教研组. 非饱和土壤水分运动参数的测定[J]. 水文地质与工程地质，1982，(1)：10~15.

[6] 扬诗秀，雷志栋. 水平土柱入渗法测定土壤导水率. 水利学报，1991，(5)：1~7.

[7] 姜健飞，胡良剑等. 数值分析及 MATLAB 实验[M]. 北京：科学出版社，2004.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net