增湿条件下膨胀土路堑边坡稳定性数值分析

刘义高[1]，周玉峰[2]，郑健龙[1]
（1．长沙理工大学，湖南 长沙 410076；2．广州市公路开发公司，广东 广州 510080）

摘 要：针对膨胀土路堑边坡增湿破坏现象，以含水率为主要参数来开展其稳定性的研究。首先开展膨胀土膨胀变形试验与抗剪强度试验研究，得到了膨胀土土性参数随含水率的变化规律，然后在正确考虑到地质构造影响的基础上运用有限差分法对坡体进行数值建模和计算分析，并对膨胀土路堑边坡的各种增湿状态进行仿真模拟，编制的分析程序自动实现膨胀土各种土性参数随含水率的同步变化，最后利用强度折减法计算得到了膨胀土路堑边坡稳定性安全系数的变化规律。分析发现，膨胀土路堑边坡稳定性主要是由地质构造和含水率因素共同控制的，在不同的增湿状态下二者对边坡的稳定性有着不同的影响程度。

关键词：道路工程；膨胀土路堑边坡；数值分析；稳定性
中图分类号：U416.14 文献标识码：A 文章编号：1000－4548(2007)12－1870－06

作者简介：刘义高(1980－)，男，湖南邵东人，硕士，从事路基路面方面的研究。E-mail: lyg1002@tom.com。

Numerical analysis of cutting slope stability in expensive soils considering water-increased state

LIU Yi-gao[1]，ZHOU Yu-feng[2]，ZHENG Jian-long[1]
(1. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China; 2. Guangzhou Highway Development Corporation, Guangzhou 510080, China)

Abstract: As for landslides of cutting slopes in expansive soils owing to increasing water, the water content was taken into consideration to solve the problems. At first, two kinds of soil experiments were made, that is, expansive deformation experiment and shear strength experiment, and the variations of parameters of expansive soil property with the water content were generated. Then considering the proper geologic factors, a numerical model of cutting slopes was established by means of finite difference method, and the slope stability under different water-increased conditions was analyzed while all kinds of soil property parameters and water content varied synchronously. Finally, the safety factors of cutting slopes in expansive soil were gained by strength reduction method. According to the above analysis, it was shown that the stability of the slope was controlled by geology and water content.

Key words: road engineering; expansive soil cutting slope; numerical analysis; stability

0 引 言

膨胀土问题错综复杂，造成诸多特殊现象背后的诱发因素便是土体中水分的变化。因为膨胀土具有强烈的水敏性，一旦膨胀土所处的环境促使它的含水率发生较大的变化，膨胀土的各种复杂特性也随之显现出来。含水率的变化导致了土体的胀缩和裂隙的出现，而裂隙又促使了水分的扩散，这种反复的恶性循环使得土体的连续性遭到破坏，从而大大降低了土体的抗剪强度，在大气影响比较剧烈的浅表层范围内受含水率变化影响尤其剧烈，并最终导致边坡的各种破坏事故的发生，这也是膨胀土边坡大部分呈现浅层失稳的原因。

虽然目前对膨胀土边坡稳定性的研究已取得了许多成果[1-6]，但由于种种原因这些方法难以被工程实用采纳[7]。因此，笔者试图探讨一种适应于工程需要的分析方法，此方法既有一定的精度又简便易用，可应用于实践。

众所周知，水分因素在膨胀土问题当中起着重要作用，而当前大多数膨胀土边坡稳定性分析方法并未系统地将膨胀变形和强度随含水率的变化规律综合地吸纳到膨胀土边坡稳定性的数值分析当中。本文围绕含水率这一导致膨胀土边坡破坏的主要因素，运用现

基金项目：交通部西部交通建设科技资助项目（2002318000）
收稿日期：2006－10－30

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

有的比较成熟的试验方法，在膨胀土膨胀变形试验和抗剪强度试验的基础上得到了一系列土体增湿条件下的吸水膨胀和强度软化规律，同时兼顾到地质条件和裂隙对坡体的影响，运用有限差分法对广西宁明膨胀土路堑边坡的稳定性进行了数值模拟，最后通过计算分析得到了各种不同增湿状态下的路堑边坡稳定性的变化规律。

1　膨胀土的变形和强度试验

试验用的原状土样取自南宁—友谊关高速公路K134+040，为灰白色黏土并夹有黄褐色斑状团粒，有红褐色铁锰结核，表面成蜡状光泽，且有微小裂缝，天然状态时可塑，其基本物理性质指标见表 1。

1.1　浸水变形试验

膨胀土吸水产生膨胀，为了得到不同含水率条件下的膨胀变形规律，对广西宁明膨胀土进行了不同上覆压力和不同初始含水率状态下的有荷膨胀量试验。试验的开展依据《公路土工试验规程》(JTJ051—93)，于轴承式单杠杆固结仪上进行，试验数据如表 2 所示。

由于有荷膨胀量 ε_{sp} 与吸水率 w_x 之间具有良好的线性关系，故与吸水率 w 和上覆压力 P 相关的膨胀系数 $\alpha(w,P)$可表征为

$$\alpha(w,P)=\frac{\varepsilon_{sp}}{w_x}=\frac{\varepsilon_{sp}}{w_t - w_0}\quad , \tag{1}$$

式中，w_t 为终了含水率，w_0 为初始含水率。

注意到膨胀土受初始含水率和压力抑制的影响较明显，在高压力和高含水率下的有荷膨胀量是微弱的，这无形导致了试验仪器本身的精度和环境干扰等因素会相对容易地加大试验误差的产生。基于此，笔者在对数据拟合时忽略了部分高压力和高初始含水率下的相关性，由此得到的膨胀系数 α 和吸水率 w_x 及上覆压力 P 的表达式为

$$\alpha(w,P)=(-0.0437P-4.807)w_x-0.0043P+1.8027\text{。} \tag{2}$$

由于平均应力张量更能表征土体的应力状态，因此根据试验模型，由弹性力学轴对称问题的基本方程，可以将上覆压力 P 用平均应力张量 σ_m 来表达，则有

$$P=-\frac{3(1-v)}{1+v}\sigma_m\quad , \tag{3}$$

式中，v 为泊松比。

这样，结合式（2）和（3），得到了与应力状态和吸水率两因素关联起来的膨胀系数表达式 $\alpha(w,\sigma)$，该式较确切和全面地反映了膨胀土的膨胀变形性质。

制备各种不同含水率的土样，依据《公路土工试验规程》(JTJ051—93) 可方便的测得土体的杨氏模量 E_o，又根据土样的上覆压力和平均应力，运用公式(3)则可推出土体的泊松比 v 大小。膨胀土的杨氏模量 E 和泊松比 v 会随土体含水率的变化而变化，一般可以用数学函数式来表征，即

$$v=f(w)=a\times w^b\quad (v<0.5)\quad , \tag{4}$$

$$E=g(w)=c\times e^{-dw}\quad , \tag{5}$$

式中：a，b，c，d 为与膨胀土体本身性质相关的回归参数。本项目中广西灰白膨胀土（地表 0～4 m）根据试验结果得到的拟合参数为 a=0.8337，b=0.524，c=85.0，d=7.8329；灰黑膨胀土（地表 4 m 以下）的参数为 a=0.7816，b=0.5236，c =78.051，d=5.8638。

1.2　抗剪强度试验

大量的研究表明，膨胀土的抗剪强度受含水率的影响非常明显，因此必须建立起土体抗剪强度和含水率的关系，才能保证边坡稳定性数值模拟结果的正确性。膨胀土抗剪强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ 随土体含水率的变化关系一般可以用数学函数式来表征，

$$c=\zeta(w)=k\times e^{-tw}\quad , \tag{6}$$

$$\varphi=\chi(w)=m\times e^{-nw}\quad , \tag{7}$$

式中，k，t，m，n 为与膨胀土体本身性质相关的回归参数。

表 1 宁明膨胀土基本性质测试结果

Table 1 Basic properties of Ningming expansive soil

液限/%	塑限/%	塑性指数	天然含水量/%	有效蒙脱石含量/%	自由膨胀率/%	比重	颗粒分析/%	
							<0.005 mm	<0.002 mm
55.9	28.2	27.7	27.1	20.1	68	2.71	61.5	52.13

表 2 有荷膨胀量试验结果

Table 2 Results of the swelling test under load

上覆压力/kPa	初始含水率/%							
	17.6		18.9		21.2		23.0	
	有荷膨胀量/%	终了含水率/%	有荷膨胀量/%	终了含水率/%	有荷膨胀量/%	终了含水率/%	有荷膨胀量/%	终了含水率/%
12.5	15.8	32.8	14.0	31.6	10.9	29.9	8.0	28.3
25	11.7	30.4	11.0	29.7	7.7	28.3	6.2	27.0
50	9.0	29.0	8.0	27.8	6.0	26.9	4.0	25.8
100	5.9	27.3	5.5	26.3	4.1	25.1	1.9	24.4
200	3.2	25.4	3.1	24.8	2.1	24.1	1.0	23.3

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

在土体抗剪强度试验过程中，首先将削好的原状土样放入抽真空饱和容器中进行饱和，然后让每组试件在自然状态下风干脱水分别达到不同含水率，分别对每组四个试件进行固结排水剪，从而获取不同含水率下的抗剪强度，分析整理后即可得到抗剪强度与含水率的关系[8-10]。其中土样的固结和剪切过程均按照《公路土工试验规程》(JTJ 051—93）规定方法进行。本项目中广西灰白膨胀土根据试验结果得到的拟合参数为 k=900.0，t=8.51，m=154.76，n=9.13；灰黑膨胀土的参数为 k=610.0，t=7.05，m=424.22，n=10.5。

2 快速拉格朗日有限差分法

连续介质快速拉格朗日法是基于显式差分法来求解偏微分方程，将计算区域划分为差分网格后，对某一节点施加荷载，该节点的运动方程可以写成时间步长 Δt 的有限差分形式，在某一个微小的时段内，作用在该节点的荷载只对周围的若干节点有影响。根据单元节点的速度变化和时段 Δt 可以求出单元之间的相对位移，进而可以求出单元应变；再由单元材料的本构方程求单元应力，随着时段的增长，这一过程将扩展到整个计算范围，直到边界；计算得到单元之间的不平衡力，将此不平衡力重新加到各节点上，再进行下一步的迭代运算，直到不平衡力足够小或者各节点的位移趋于平衡为止[11]。求解过程中若某一时刻各个节点的速度已知，则根据高斯定理可求得单元的应变率，然后根据材料的本构方程就可求得单元的新的应力。

对于平面问题，将具体的计算对象用四边形单元划分成有限差分网格，每个单元可以再划成两个常应变三角形单元。三角形单元的有限差分公式用高斯发散量定理的广义形式推导得出，

$$\int_s n_i f \mathrm{d}s = \int_A \frac{\partial f}{\partial x_i} \mathrm{d}A \quad , \tag{8}$$

式中，$\int_s$ 是指绕闭合面积边界积分，n_i 是对应表面 s 的单位法向量，f 是标量、矢量或张量，x_i 是位置矢量，ds 是微量弧长，$\int_A$ 指对整个面积 A 积分。

平面问题有限差分法基于物体运动与平衡的基本规律，根据连续介质的运动微分方程式，

$$\rho \frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad , \tag{9}$$

式中，ρ指物体的质量密度，t 是时间，g_i 是重力加速度（体力）分量，σ_{ij} 是应力张量分量，下标 i 表示笛卡尔坐标系中的分量。

将式（8）中的 f 替换成单元每边平均速度矢量，这样，单元的应变速率 $\dot{e}_{ij}$ 可以用结点速度的形式表述：

$$\dot{e}_{ij} = \frac{1}{2}\left[\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i}\right] \quad , \tag{10}$$

$$\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} \cong \frac{1}{2A}\sum_s (\dot{u}_i^{(a)} + \dot{u}_i^{(b)}) n_j \Delta s \quad , \tag{11}$$

式中，（a）和（b）是三角形边界上两个连续的结点。通过式（10）和（11），可求出应变张量的所有分量。

根据应力－应变本构方程 $\sigma_{ij} := f(\sigma_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, k)$，可以由应变速率张量得到新的应力张量（$k$ 指历史参数，取决于特殊本构关系；:=表示“由…替换”）

在一个时步内，单元的有限转动对单元应力张量有一定的影响。对于固定参照系，此转动使应力分量有如下变化：

$$\sigma_{ij} := \sigma_{ij} + (\omega_{ik}\sigma_{kj} - \sigma_{ik}\omega_{kj})\Delta t \quad , \tag{12}$$

式中，$\omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i}\right)$。

计算出单元应力后，可以确定作用到每个结点上的等价力。在每个结点处，对所有围绕该结点四边形的力求和$\sum F_i$，得到作用于该结点的纯粹结点力矢量。

按照以上思路，通过迭代求解，可求出各个时步各单元（或节点）的应力、变形值，进而可以模拟出边坡变形破坏的全过程。

3 膨胀土路堑边坡稳定性分析

3.1 数值建模

广西南—友高速公路宁明段距原地面 0～4 m 深度范围内为灰白膨胀土，再往下为灰黑膨胀土，其中土岩交界面处有软弱面存在。利用有限差分法建立数值计算模型如图 1 所示。

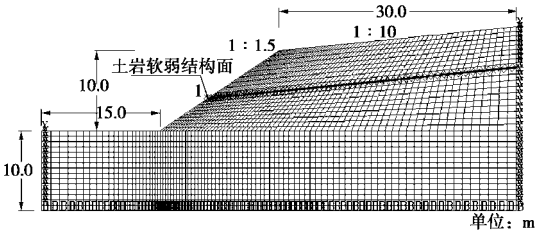


图 1 膨胀土路堑边坡的数值建模

Fig. 1 Numerical model for roadcut slope of expansive soil

3.2 膨胀土的弹塑性模型

现有的膨胀土本构模型有许多种[12]，但大多数因其表达形式过于复杂而不适于进行工程应用。本文在实用的基础上采用弹塑性的土体模型，破坏准则的形式采用目前岩土工程中应用最为广泛的莫尔－库仑强度准则，如图 2 所示。其中对非饱和土体本构特性的考虑则是通过土体各特性参数随含水率的伺服变化关系来间接实现。很明显，由土水特性曲线的关系可知，

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

这种处理亦间接考虑了非饱和土吸力的影响。

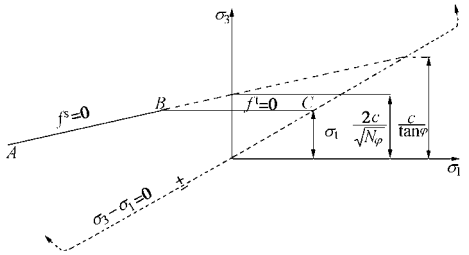


图 2 Mohr-Coulomb 破坏准则

Fig. 2 Mohr-Coulomb failure criterion

由 Mohr-Coulomb 屈服函数可以得到点 A 到点 B 的破坏包络线为

$$f^{s}=\sigma_1-\sigma_3 N_{\varphi'}+2c_{w}\sqrt{N_{\varphi'}}\quad , \tag{13}$$

式中，$N_{\varphi'}=\dfrac{1+\sin\varphi_{w}}{1-\sin\varphi_{w}}$，$\varphi_{w}$ 为内摩擦角；c_{w} 为黏聚力。

采用非关联的流动法则，其塑性势函数与屈服函数具有相似的形式。注意到本文分析程序中，由于 c_{w}，φ_{w} 均是含水率的变化函数，因此，本数值分析中的 Mohr-Coulomb 破坏准则实际上是随含水率变化的，式（13）亦可写为

$$f^{s}(w)=\sigma_1-\sigma_3 N_{\varphi'}+2C_{w}\sqrt{N_{\varphi'}}\quad 。 \tag{14}$$

3.3　坡体增湿的影响范围

增湿可以考虑为大气降雨或者其它气候影响导致的膨胀土边坡的含水率的增大变化。膨胀土本身的渗透系数非常小，但是由于浅表层受气候作用下裂隙发育相对成熟，导致水分容易入渗。

裂隙的出现是杂乱无章的，因而对其位置准确的建模非常困难，现有研究大多将其简化为一条或几条，这又远远脱离了实际情况。由于裂隙对膨胀土边坡的影响主要表现在强度降低和水分入渗两个方面。考虑裂隙对强度的减弱影响，主要导致了土体黏聚力的下降，结合现场的大直剪试验，现场土体的黏聚力为室内试验值的 1/5 左右，泥岩的外表层风化严重，强度降低至原来的 1/16 左右，而坡体内部增湿较弱的岩体被认为是完整的，强度不变。针对裂隙影响水分的入渗，本文通过控制坡体增湿时的吸水率在浅层一定深度范围内迅速减弱至坡面最大吸水率的 5%来间接考虑，并称此深度范围为增湿活动带，用符号 H_{w} 表示，在有坡度的情况下，坡面上的增湿影响范围设为与竖直角度相关的函数形式（图 3 所示），即

$$D_{w}=\frac{\alpha}{\pi/2}\cdot H_{w}\quad , \tag{15}$$

式中，D_{w} 是垂直于坡面的法向增湿影响深度（m），α 是坡面与竖直线的的夹角（弧度）。H_{w} 为地面增湿活动带影响深度（m）。

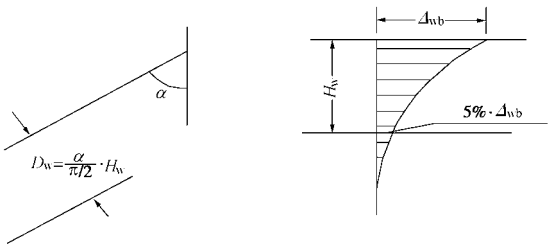


图 3 坡体增湿范围影响图

Fig. 3 Influence of water increased region in slope

3.4　路堑边坡稳定性数值分析

稳定性分析的各种计算参数如前所述，并编制相应的程序使其自动实现各种参数随不同状态的伺服变化。图 4 为初始含水率为 20%、坡面最大增湿量为 10%时膨胀潜势系数在坡体的分布，由程序根据试验回归式（2）以及转换式（3）自动判别相应的含水率和应力状态伺服控制实现。注意到此时土体的膨胀性能实际上是一种潜在的趋势，因此称为膨胀潜势系数。其它各种增湿状态以及参数的变化情况就不一一列出，由此可见，编制的程序能较好地吻合试验规律。图 5 为此时边坡的位移场等值线，可见对于土岩混合的膨胀土边坡出现的破坏是一种沿界面的滑出破坏，在对边坡进行支护加固时应充分重视到这一点。

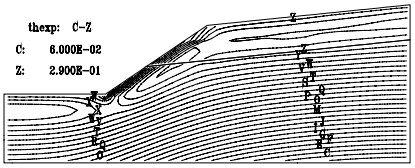


图 4 膨胀潜势系数在边坡内部的分布图

Fig. 4 Distribution of potential expansion coefficient in slope

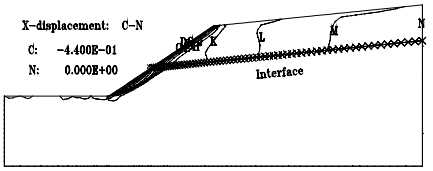


图 5 坡体的水平位移等值线图

Fig. 5 Contours of horizontal displacement in slope

4　边坡稳定性的安全系数

4.1　强度折减法

在工程设计中，判断边坡稳定性的大小习惯上采用边坡稳定性安全系数来衡量。1955 年，A.W. Bishop 明确了土坡稳定安全系数的定义：

$$F_{S}=\frac{\tau_{f}}{\tau}\quad , \tag{16}$$

式中，τ_{f} 是指沿整个滑裂面上的平均抗剪强度，τ 是

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

指沿整个滑裂面上的平均剪应力，F_S是指边坡稳定安全系数。

将式（16）两边同除以 F_S，则可得

$$1=\frac{\int_0^l(\frac{c}{F_S}+\sigma\frac{\tan\varphi}{F_S})\mathrm{d}l}{\int_0^l\tau\mathrm{d}l}=\frac{\int_0^l(c'+\sigma\tan\varphi')\mathrm{d}l}{\int_0^l\tau\mathrm{d}l}\quad 。\quad (17)$$

式（17）左边等于 1，表明当强度折减后，坡体达到极限状态。由此，在非线性弹塑性边坡稳定分析中，引入了强度折减法求边坡稳定性安全系数的概念，当坡体通过强度折减达到极限状态后，土体将进入稳定的塑性流动阶段，计算程序变得不收敛。这种方法的优点是不需要对滑动面的形状和位置作假定，而是由程序自动求出，可以看出，强度折减法在本质上与传统方法是一致的[13-14]。

鉴于膨胀土边坡在外界影响下会处于各种不同的增湿状态，本文针对坡体的初始湿度场、增湿强度以及增湿活动带的变化情况，在基于前文所述的基础上利用强度折减法对其稳定性安全系数进行了敏感性计算分析。

4.2 初始湿度场和增湿强度的影响

膨胀土路堑边坡不同的初始含水率状态和不同增湿强度对安全系数的影响见图 6 所示。

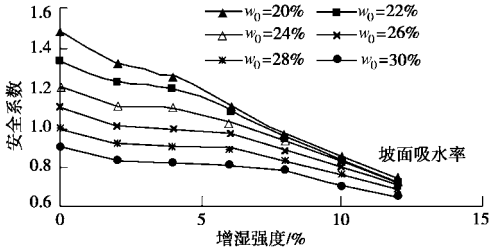


图 6 初始湿度场和增湿强度对安全系数的影响

Fig. 6 Influence of initial water content and water-increased strength on safety factor

4.3 增湿强度和增湿活动带的影响

膨胀土路堑边坡不同的增湿强度和不同的增湿活动带范围对安全系数的影响见图 7 所示。

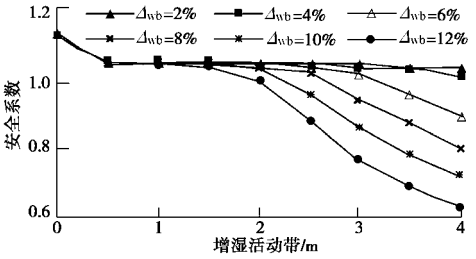


图 7 增湿强度和增湿活动带对安全系数的影响

Fig. 7 Influence of water-increased strength and region on safety factor

4.4 增湿活动带和初始湿度场的影响

膨胀土路堑边坡不同的增湿活动带范围和不同的初始含水率状态对安全系数的影响见图 8 所示。

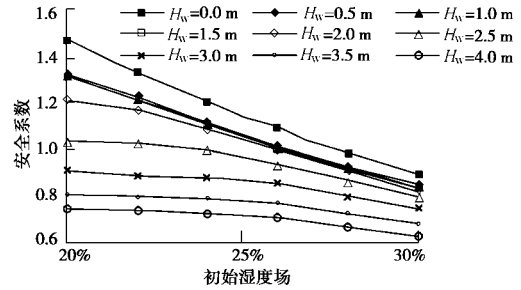


图 8 增湿活动带和初始湿度场对安全系数的影响

Fig. 8 Influence of water-increased region and initial water content on safety factor

4.5 安全系数变化讨论

通过分析初始湿度场、增湿强度以及增湿活动带等不同增湿状态对膨胀土边坡安全系数的影响，综合图 6～8 可以得到以下几点：

（1）从整体变化趋势来看，路堑边坡的稳定安全系数随增湿作用的加大而减小。

（2）路堑边坡的初始湿度场状态对安全系数影响很大，尤其在增湿强度较弱时，此时边坡的稳定性主要受初始含水率状态控制。

（3）随着增湿强度的加大，坡体的初始湿度场对安全系数的影响逐渐减小，增湿强度和深度成为安全系数的主导因素。

（4）上述图 6～8 中，安全系数随增湿状态变化的某个阶段普遍存在一个非敏感区，即增湿状态的变化并不引发安全系数的明显改变；这说明边坡的稳定性除了受湿度场影响外，地质结构面亦有相当影响，二者对稳定性的制约达到势均力敌的时候便表现出安全系数的相对稳定。

5 结 论

以膨胀土的变形和强度试验为依据，运用有限差分法编制相应的程序实现了各种参数规律伺服变化，并采用强度折减法计算了膨胀土路堑边坡在各种增湿条件下的安全系数，研究结果表明：

（1）对试验数据回归时，需要认真分析数据的可信价值，并根据回归规律的应用推广性来选择相应的数学回归函数，以便保证稳定性分析程序的顺利编制和运行。

（2）对数值分析而言，参数的选取是分析成败的关键，而膨胀土的水敏特性又决定了对其进行相关分析必须考虑参数随含水率的变化规律，因此，膨胀土模型参数中必须体现含水率因素的影响。

（3）对非饱和膨胀土边坡稳定性的数值分析方法，一方面避开了复杂繁琐的非饱和土理论体系，另

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

一方面通过相关参数的变化间接体现了非饱和膨胀土边坡的特征，为目前此类问题的工程实用化提供了一定的借鉴意义。

（4）从数值分析的结果来看，上土下岩形式的膨胀土路堑边坡的破坏是一种沿界面的滑出破坏，在对边坡进行支护加固时应充分重视到这一点。

（5）膨胀土路堑边坡稳定性的影响因素非常复杂，初始的湿度场状态、增湿的强度及范围、地质结构面的存在等复杂因素综合制衡控制了坡体的安全性。

（6）膨胀土边坡表层土体增湿后导致膨胀软化、强度降低，严重削弱了边坡稳定性，因此单纯放缓边坡坡度并不是防治这种破坏的最有效措施，重要的是做好隔水防水等处治工作。

参考文献：

[1] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 1－15. (BAO Cheng-gang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 1－15. (in Chinese))

[2] GASMO J M, RAHARDJO H, LEONG E C. Infiltration effects on stability of a residual soil slope[J]. Computers and Geotechnics, 2000, **26**: 145－165.

[3] ZHAN Liang-tong. Field and laboratory study of an unsaturated expansive soil associated with rain-induced slope instability[D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2003.

[4] 谢　云, 李　刚, 陈正汉, 等. 复杂条件下膨胀土边坡渗流和稳定性分析[J]. 后勤工程学院学报, 2006(2): 6－11. (XIE Yun, LI Gang, CHEN Zheng-han. The analysis of seepage and stability for expansive soils slope under complicated environments[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2006(2): 6－11. (in Chinese))

[5] 林鲁生, 蒋　刚. 考虑降雨入渗影响的边坡稳定分析方法探讨[J]. 武汉大学学报(工学版), 2001, **34**(1): 42－44. (LIN Lu-sheng, JIANG Gang. Research on slope stability method under rainfall infiltration[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2001, **34**(1): 42－44. (in Chinese))

[6] 陈善雄, 陈守义. 考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 2001, **22**(4): 447－450. (CHEN Shan-xiong, CHEN Shou-yi. Analysis of stability of unsaturated soil slope due to permeation of rainwater[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(4): 447－450. (in Chinese))

[7] 包承纲, 詹良通. 非饱和土性状及其与工程问题的联系[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 129－136. (BAO Cheng-gang, ZHAN Liang-tong. Relationship between unsaturated soil behavior and engineering problems[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 129－136. (in Chinese))

[8] 杨和平, 曲永新, 郑健龙. 宁明膨胀土研究的新进展[J]. 岩土工程学报, 2005, **9**(27): 981－987. (YANG He-ping, QU Yong-xin, ZHENG Jian-long. New development in studies on Ningming expansive soils[J]. Chinese Jounal of Geotechnical Engineering, 2005, **9**(27): 981－987. (in Chinese))

[9] 张　锐, 杨和平. 宁明非饱和膨胀土的抗剪强度[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2006, **3**(1): 1－5. (ZHANG Rui, YANG He-ping. The shear strength of Ningming unsaturated expansive soil[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2006, **3**(1): 1－5. (in Chinese))

[10] 杨和平, 张　锐, 郑健龙. 非饱和膨胀土总强度指标随饱和度变化规律[J]. 土木工程学报, 2006, **4**(39): 58－62. (YANG He-ping, ZHANG Rui, ZHENG Jian-long. Variation of the total shear strength of unsaturated expansive soils with degree of saturation[J]. China Clvil Engineering Journal, 2006, **4**(39): 58－62. (in Chinese))

[11] 王泳嘉, 邢纪波. 离散单元法同拉格朗日元法及其在岩土力学中的应用[J]. 岩土力学, 1995, **16**(2): 1－14. (WANG Yong-jia, XING Ji-bo. Discrete element method and lagrangian element method and their applications in geomechanics[J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, **16**(2): 1－14. (in Chinese))

[12] 殷宗泽, 周　建, 赵仲辉, 等. 非饱和土本构关系及变形计算[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 137－145. (YIN Zong-ze, ZHOU Jian, ZHAO Zhong-hui. Constitutive relations and deformation calculation for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 137－145. (in Chinese))

[13] DAWSON E M, ROTH W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999, **49**(6): 835－840.

[14] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(3): 343－346. (ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-min. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Jounal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(3): 343－346. (in Chinese))

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