

文章编号:1673-0836(2005)02-0296-04

降雨条件下膨胀土基坑边坡稳定性分析^{*}刘 洋¹, 王国强², 周 健¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 合肥工业大学 资环学院, 合肥 230009)

摘 要:应用非饱和土一维降雨入渗模型模拟膨胀土基坑边坡在降雨入渗条件下的水分运移规律。通过试验研究了合肥膨胀土抗剪强度随含水量变化的关系。在此基础上,研究了考虑降雨入渗影响的膨胀土基坑边坡稳定性问题。研究表明,随降雨历时的增加边坡的安全系数逐渐变小,边坡最危险滑动面有向浅层发展的趋势。对于膨胀土边坡的浅层滑动面,采用折线滑动面比圆弧滑动面更接近于实际情况。

关键词:膨胀土边坡; 非饱和渗流; 抗剪强度; 安全系数

中图分类号: TU441

文献标识码: A

Stability Analysis of Expansive Soil Slope of
Excavation Considering Rainfall InfiltrationLIU Yang¹, WANG Guo-qiang², ZHOU Jian¹

(1. Dept. of Geotechnical Engineering Tongji University, Shanghai 200092;

2. Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: A one - dimension model was proposed simulating the regularity of moisture flow under rainfall condition. The relationship between shear strength and water content of Hefei expansive soil was studied with two different experimental methods. The stability of expansive soil slope was studied considering the effect of rainfall. The result indicated that with the delay of rainfall the slope safety lowered accordingly and the unstable sliding plane was the shallow slide. Fold line plane was more suitable than the circular slip plane for the shallow slide.

Keywords: expansive soil slope; unsaturated seepage; shear strength; safety coefficient

1 引言

膨胀土工程问题是工程建设中遇到的重要问题之一^[1,2]。特别是在雨季,降雨使土体含水量增加,土体的粘聚力、内摩擦角及基质吸力降低,从而引发基坑边坡失稳。因此,研究降雨入渗过程中膨胀土基坑边坡的稳定性问题具有重要的实际意义。

研究膨胀土基坑边坡的稳定性问题首先要解决两个方面问题:一是膨胀土基坑边坡降雨入渗问题;一是膨胀土抗剪强度随含水量变化的关系。本文以合肥膨胀土为例研究了降雨条件下膨胀土基坑边坡稳定性问题。

2 边坡降雨入渗的数值模拟^[3,4]

2.1 基本方程

对于膨胀土基坑边坡降雨入渗问题,可以看成是非饱和渗流问题。在不考虑温度等因素影响的均质土坡中且地下水位埋藏较深,基坑深度不大时,非饱和渗流方程简化为一维方程:

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

式中: θ 为体积含水率; $D(\theta)$ 为非饱和土水分扩散率 (cm^2/min); $K(\theta)$ 为非饱和土的导水率 (cm^2/min), 均是含水率的函数, t 为时间, z 为距离。

* 收稿日期: 2004-11-10 (修改稿)

作者简介: 刘 洋 (1979-), 男, 博士生, 主要从事非饱和渗流和砂土液化方面的研究工作。

2.2 定解问题^[5]

对计算模型做如下假定:

(1) 假定土体为均质土体,因此,问题就可简化为一维问题,仅需要考虑土壤水分运动参数 D 、 K 等随含水率的变化即可。

(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,为研究方便起见,假定土体中初始含水率处处相等。

(3) 本地区膨胀土边坡地下水位埋藏较深,特别是在开挖基坑时,一般都要做降水处理,所以认为降雨对地下水位影响不大,在计算过程中,假定地下水位保持不变。

(4) 计算模型的下边界条件采用第一类边界条件,即含水率已知的边界条件。

(5) 上边界条件:当降雨强度小于土体的入渗能力时,降雨入渗的强度就等于降雨强度,边界条件为第二类边界条件;当降雨强度大于土体的入渗能力时,地表开始出现积水或地表径流,降雨入渗的强度就等于土体的入渗能力,边界条件为第一类边界条件。这样就考虑了降雨入渗能力随着土体入渗特性的变化而变化。

2.3 计算结果

给定了一定的边界条件即可求得膨胀土基坑边坡在不同降雨条件下土体不同时刻不同深度的含水率分布。基于上述算法,用 Matlab 编制了膨胀土边坡的渗流计算程序^[6]。计算结果可以用矩阵的形式表示出来,矩阵称含水率矩阵,设为 $v(i, j)$ 。即对于任意时刻 t ,任意深度 z 的土体某一点的体积含水率可以用矩阵中的一个对应的元素表示,方便于外部程序的调用。土体体积含水率随深度和时间的变化如图 1 所示。

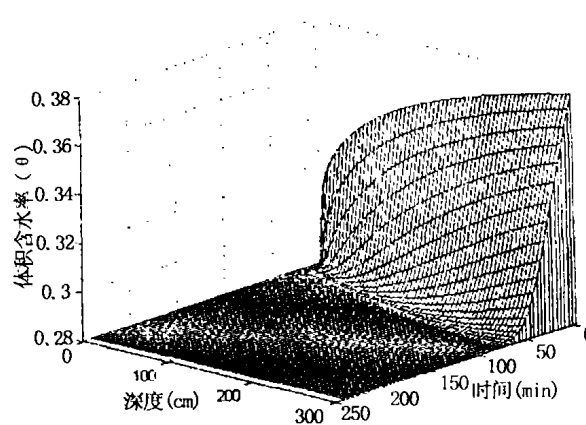


图 1 含水率分布的三维空间曲面

Fig.1 Three - dimension curve of water content

抗剪强度曲面

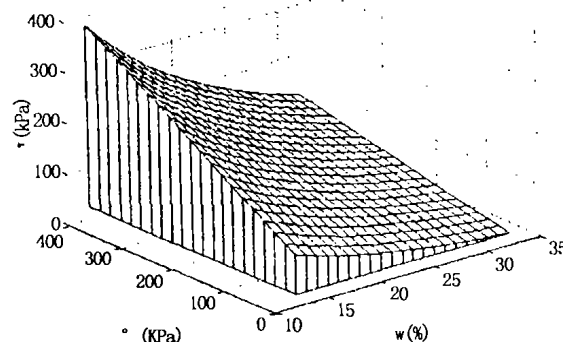


图 2 随含水量变化的抗剪强度空间曲面

Fig.2 Yield surface with the variation of water content

验结果分析表明:随着含水量的增加,内聚力和内摩擦角都呈下降趋势。相关性分析结果表明:内聚力 c 和内摩擦角 ϕ 与含水量 w 呈指数相关关系:

$$c = a_1 e^{b_1 w} \quad (2)$$

$$\phi = a_2 e^{b_2 w} \quad (3)$$

其中, a_1, b_1, a_2, b_2 是回归分析常数,定义为合肥膨胀土的强度参数,试验研究及资料统计结果表明合肥膨胀土强度参数取值如表 1。

表 1 合肥膨胀土强度参数

Table 1 Strength parameters of Hefei expansive soil

参 数	取 值
a_1	244.28 ~ 252.05
b_1	-0.0652 ~ -0.0762
a_2	60.646 ~ 67.065
b_2	-0.0476 ~ -0.0496

3 增湿条件下膨胀土的强度特性^[7]

为了研究膨胀土抗剪强度与含水量的关系,进行了两方面的工作:一是进行选择典型的土样进行室内试验研究;一是对大量的已有资料进行数理统计,找出其规律性。土样选择典型的合肥膨胀土。

3.1 室内试验概况

按设计的含水量进行预湿,两组试验平行进行,一组采用标准湿砂法;一组采用滴水法,两组都采用 UU(不固结不排水剪)试验。

3.2 试验结果

按摩尔-库仑破坏准则整理试验资料,求得每一含水量 w 下的内聚力 c 和内摩擦角 ϕ 。两组试

相应地,摩尔-库仑抗剪强度表达式也变为:

$$\tau = \sigma \tan(a_2 e^{b_2 w}) + a_1 e^{b_1 w} \quad (4)$$

抗剪强度曲面如图2所示。

4 考虑降雨影响的膨胀土基坑边坡稳定性分析

4.1 边坡安全系数计算

建立在极限平衡分析之上的边坡稳定性分析方法很多^[8],各种方法各有特点。本文选用江布(Janbu)的普遍条分法,不仅能考虑圆弧滑动的情况,还能考虑滑动面是折线的情况。

$$F_s = \frac{\sum (c_i b_i + W_i \tan \phi_i) \sec^2 \alpha_i / [1 + \tan \alpha_i \tan \phi_i / F_s]}{\sum W_i \tan \alpha_i} \quad (5)$$

式中, W_i 为土条 i 的重力, b_i 为土条 i 宽度, α_i 为

$$F_s = \frac{\sum [a_1 e^{b_1 w_i} b_i + (W_{0i} + \rho_w \times \sum_{j=1}^m (\theta_i^j - \theta_{0i}^j) V_i) \tan(a_2 e^{b_2 w_i})] \sec^2 \alpha_i / [1 + \tan \alpha_i \tan(a_2 e^{b_2 w_i}) / F_s]}{\sum [W_{0i} + \rho_w \times \sum_{j=1}^m (\theta_i - \theta_{0i}) V_i] \tan \alpha_i} \quad (7)$$

式中符号含义同上文,因其右端也包含安全系数 F_s ,故需迭代求解。

基于上述分析,用 Matlab 语言实现了上述算法,编制了考虑降雨入渗影响的膨胀土基坑边坡稳定性分析程序 JYBP,程序适用于任意土坡形状。程序能够自动搜索最危险滑动面,具有一定的通用性。

4.2 程序设计要点

(1) 土条含水率的确定:由膨胀土降雨入渗数值计算结果调入。体积含水率矩阵为 $v(i, j)$, i 为时间点, j 为深度点。

(2) 参数选择和土条重量的计算:由土条高度求得土条底部对应的含水率数值,由此确定抗剪强度参数,土条重量由式(6)求得。每一小块土条的含水率设为土条上下含水率的均值: $\theta_i^j = (\theta_{iL}^j + \theta_{iF}^j)/2$, 则式(6)变成:

$$W_i = W_{0i} + \rho_w \times \sum_{j=1}^m ((\theta_{iL}^j + \theta_{iF}^j)/2 - \theta_{0i}^j) \times V_i \quad (8)$$

4.3 算例

某基坑工程采用放坡开挖,开挖深度 6m,边坡坡角 65°。地基土基本参数为:干密度 1.4g/cm³;初始体积含水率 0.28;饱和体积含水率 0.45;土天然重度 19.7 kN/m³。

设降雨强度 300mm/d,降雨历时分别为 8h,

土条 i 滑动面水平倾角, c_i 为土条 i 内聚力, ϕ_i 为土条 i 内摩擦角。与常规的边坡稳定性分析公式不同,其中 W_i 、 c_i 均不是常数,而是含水量的函数(含水量由体积含水率换算得到)。

W_i 可以这样近似计算:设土条体积为 V_i ,在未降雨前的重量为 W_{0i} ,土条自上而下分成 m 小块,每一块初始体积含水率为 θ_{0i}^j ,降雨之后,含水率为 θ_i^j ,则土条的重量可按式计算:

$$W_i = W_{0i} + \rho_w \times \sum_{j=1}^m (\theta_i^j - \theta_{0i}^j) \times V_i \quad (6)$$

式中 ρ_w 为水的重度。将(2)、(3)、(6)代入(5)式,最终得考虑降雨入渗影响的膨胀土边坡稳定性安全系数计算公式(7):

12h, 16h, 24h。降雨前,边坡最危险滑动面安全系数 F_s 为 1.73,降雨 8h 后降低为 1.34,12h 后降低为 1.29,16h 后降低为 1.24,24h 后降低至 1.15。

此外,对于浅层的滑动面,安全系数的变化更明显。还是上述算例,取其一浅层滑动面:降雨前安全系数为 3.68,降雨历时 8h,降雨后降低至 1.62,下降了约 56%。这表明:降雨入渗对浅层潜在的滑动面上的安全系数的影响较大,这是由于表层土体由于降雨入渗,体积含水率变化大所致。而对于膨胀土边坡的浅层滑动面,研究表明^[9,10],采用折线滑动面比圆弧滑动面更接近于实际情况。本例中取折线滑动面计算降雨 12h 后的安全系数 $F_s = 1.062$ 。一系列表层滑动产生之后,随着降雨入渗,最终会导致整个膨胀土边坡的失稳。计算结果与实际中遇到膨胀土边坡经常在雨季发生连续的、浅层的滑坡现象是一致的。

5 结论

(1) 建立的非饱和膨胀土一维降雨入渗模型能够近似模拟膨胀土基坑边坡在降雨入渗条件下的水分运移规律。通过数值计算,可以求得边坡在任意时刻任意位置的体积含水率;

(2) 试验研究和统计结果表明合肥膨胀土抗剪强度参数 c 、 ϕ 随含水量 w 的增加而下降且呈指数相关关系;

(3) 考虑降雨入渗影响的膨胀土边坡稳定性

分析表明,随降雨历时的增加边坡的安全系数逐渐变小。边坡最危险滑动面有向浅层发展的趋势;

(4) 对于膨胀土边坡的浅层滑动面,采用折线滑动面比圆弧滑动面更接近于实际情况。一系列表层滑动产生之后,随着降雨入渗,最终会导致整个膨胀土边坡的失稳。

参考文献:

- [1] 王国强.安徽省江淮地区膨胀土的工程性质研究[J].岩土工程学报,1999,21(1):119~121
- [2] 廖济川,陶太江.膨胀土的工程特性对开挖边坡稳定性的影响[J].工程勘察,1994(4):18~22
- [3] 陈善雄,陈守义.非饱和土坡入渗规律的数值模拟[A].陆培炎.第六届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会[C].广州:广东科技出版社,1998:188~493
- [4] 雷志栋,杨诗秀.非饱和土壤水一维流动的数值模拟[J].土壤学报,1982,19(2):141~153
- [5] 李兆平,张弥.考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态安全系数研究[J].土木工程学报,2001,34(5):57~60
- [6] 高俊斌.MATLAB5.0语言与程序设计[M].武汉:华中理工大学出版社,1998
- [7] 刘洋,王国强,等.增湿条件下合肥膨胀土的强度特性[J].勘察科学技术,2005(1),(待刊)
- [8] 林峰,黄润秋.边坡稳定性分析的极限平衡法的探讨[J].地质灾害与环境保护,1997,8(4):9~13
- [9] 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
- [10] Evaluation of Surficial Stability for Homogeneous Slopes Considering Rainfall Characteristics [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, September 2002;756~763

(上接第290页)

(2)开展装载易燃、易爆物品车辆通过隧道的防灾对策研究,对隧道防灾等级的确定、隧道防灾设备的设计以及相关措施的制定都将产生直接的影响和指导意义。同时,通过全面权衡绕行和通过隧道两种方案的风险,可以以最小风险决定易燃易爆物品的最优运输方案,既保证隧道的安全运营,又可以保证正常的经济运行要求。

(3)借鉴世界各国对易燃易爆危险品车辆通过隧道所采取的方案,结合我国的实际情况,从经济、安全、社会等方面综合权衡装载易燃、易爆物品车辆通过隧道和绕行两种方案所带来的风险,通过统计分析,采用风险最小的方案;可按3种情况处理:允许通过,限制通过和禁止通过。

(4)通过秦岭终南山特长公路隧道和上海崇明越江通道工程的实践,可以为类似的长大公路隧道易燃易爆危险品车辆的防灾措施提供借鉴。

参考文献:

- [1] 杨其新,等.国内外隧道消防方法及火灾实例调研报告[R].成都:西南交通大学,1996,1
- [2] 郭树棠,译.公路隧道火灾事故的预防与控制[J].道路,1987
- [3] 卿光全.沉埋隧道内的车辆火灾对策[J].世界隧道,2001
- [4] PIARC. Fire & Smoke Control in Tunnels[R]. America: PIARC publication,1999
- [5] 李运才等.化学品危险性的鉴别与分类[J].化工劳动保护,1998,1
- [6] 刘北辰.化学危险品的火灾扑救须知[J].上海劳动保护技术,1999,3
- [7] 王明年等.秦岭终南山特长公路隧道防灾方案研究[J].公路,2000,11
- [8] 闫治国.长大公路隧道火灾研究[D].成都:西南交通大学,2002
- [9] 同济大学,奥雅纳工程顾问(香港),中交第四航务工程勘察设计院.崇明越江通道工程风险分析研究报告[R].同济大学,奥雅纳工程顾问(香港),中交第四航务工程勘察设计院,2003

[1] 杨其新,等.国内外隧道消防方法及火灾实例调研报告