

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2009. 01. 004

# 基于含水量变化对土体强度影响的高边坡稳定分析

盛维高<sup>1</sup>,李国维<sup>2</sup>,袁俊平<sup>2</sup>

(1. 江苏省淮沭新河管理处,江苏 淮安 223005 ;2. 河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

**摘要** 利用土水特征曲线,建立了非饱和土含水量与强度的关系式,并用其对某高速公路残积土高边坡进行稳定分析。通过土体含水量在高边坡稳定分析中的应用,提出把含水量作为边坡稳定分析的重要参数,采用土体非饱和强度参数计算得到的边坡稳定安全系数比采用饱和强度参数得到的边坡稳定安全系数大,更接近边坡实际工况。

**关键词** 土水特征曲线 抗剪强度 含水量 边坡稳定

**中图分类号** :U412.36+6 ;U416.1+4 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)01-0012-04

**Stability analysis of high slopes based on the influence of water content change on soil strength**//SHENG Wei-gao<sup>1</sup>,LI Guo-wei<sup>2</sup>,YUAN Jun-ping<sup>2</sup> (1. Huaishu River Bureau of Jiangsu Province, Huai 'an 223005, China ;2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract** :The relationship between water content and strength of unsaturated soils is established using the soil-water characteristic curve. The curve is used to analyze the stability of a high residual soil slope of a highway. It reveals that the water content of soil plays an important role in high slope stability. It is therefore suggested that the water content of soil be a required parameter in high slope stability analysis. The safety factor of a slope calculated from unsaturated soil strength parameter is larger than that from saturated soil strength parameter, and the former is closer to the actual conditions.

**Key words** :soil-water characteristic curve ;shear strength ;water content ;slope stability

某高速公路全长 135.1 km,路线总走向为 S15°~30°W,地形总趋势北高南低,路线主要穿越丘陵区,地面高程在 50~230 m 之间,相对高差为 50~150 m,地形起伏较大,山区河谷支流、冲沟发育,自然坡呈上缓下陡的形状。路线切坡通过形成多处深挖高填路段,高度超过 30 m 的高边坡有 59 处。沿线地处亚热带气候区,多年平均降雨量为 1 793.2 mm,最大降雨量为 2 732 mm,最小降雨量为 1 050.9 mm,每年 5~8 月的降雨量占全年降雨量的 70%,5、6 两月的降雨量占全年降雨量的 37%。

沿线有多处土质或类土质边坡,旱季坡面无地下水出露,边坡土体处于非饱和状态。由于该区域的气候条件,降雨将影响到坡面土体的含水量,从而导致土体饱和度的变化,因此可能使土体的强度特征受到影响。而边坡设计过程中所使用的强度参数是基于饱和土的强度试验选取的,没有考虑土体强度随饱和度的变化。事实上,土体强度随着饱和度的提高会有所下降,边坡的稳定安全系数也会有所改变,因此有必要研究降雨过程边坡稳定安全系数

的变化幅度,校核边坡设计的可靠性。

## 1 土水特征曲线与土体强度

### 1.1 土水特征曲线

非饱和土工程性质的复杂性主要是由于土中气相的存在引起的,土、水 and 气三相交界面上的吸力是非饱和土研究的核心问题,它对非饱和土的力学性质有很大的影响<sup>[1]</sup>。但吸力的测定比较困难,一般通过间接方法对其进行研究,其中土水特征曲线最为常用。

土水特征曲线是指土体吸力与含水量之间的关系曲线,反映吸力作用下土体的持水能力。土壤学对此研究起步较早,但土力学中对土水特征曲线的研究与应用与土壤学中的有一定区别,即不仅要考虑土体成分及结构的影响,还要考虑应力状态的影响,应用中更关心土水特征曲线与强度等力学性质的关系。

应用土水特征曲线的数学表达式可以方便地导出非饱和土强度及本构关系的表达式,近年来广泛应用于边坡稳定性评价以及降雨型滑坡预测等。根据土的类型不同,所得出的数学模型也有所不同,目

前广泛采用的数学表达式形式可分为以下 4 类。

a. 1994 年, Fredlund 等<sup>[2]</sup>通过对土体孔径分布曲线的研究, 用统计分析理论推导出适用于全吸力范围的任何土类的土水特征曲线表达式:

$$\theta(a, b, d) = C(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e + (\psi/a)^b]\}^d}$$
$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)} \quad (1)$$

式中:  $a, b, d$  为拟合参数, 其中  $a$  为进气值函数的土性参数,  $b$  为当基质吸力超过土的进气值时土中水流出的土性参数,  $d$  为残余含水量函数的土性参数;  $\psi$  为基质吸力, 取值范围为  $[0, \psi_{\max}]$ ,  $\psi_{\max}$  为  $\theta = 0$  时最大基质吸力 ( $\theta$  为体积含水率, 取值范围为  $(0, \theta_s]$ );  $\theta_s$  为饱和体积含水率;  $\psi_r$  为残余含水量  $\theta_r$  所对应的基质吸力;  $C$  为基质吸力引用的函数关系;  $e$  为自然常数。此公式形式较为复杂, 给实际应用带来诸多不便。

b. Van Genuchten<sup>[3]</sup>通过对土水特征曲线的研究, 得出非饱和土体含水量与基质吸力之间的幂函数形式的关系式:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = F(\psi) = \frac{1}{[1 + (\psi/a)^b]^{(1-1/b)}} \quad (2)$$

式中体积含水率  $\theta$  的取值范围为  $(\theta_r, \theta_s]$ ,  $\psi$  的取值范围为  $[0, \psi_r]$ ;  $F$  为基质吸力引用的函数关系。该公式适用于描述基质吸力变化范围为  $[0, \psi_r)$  的土水特征曲线。

c. 包承纲等<sup>[4-5]</sup>通过对非饱和土气相形态的研究和划分, 认为在实际应用中只有部分连通和内部连通两种气相形态需要重点研究, 发现土水特征曲线在  $(\theta_r, \theta_s)$  之间近乎一条直线。建议以对数方程来表征土水特征曲线, 并将其简化为

$$\theta = \begin{cases} \theta_s & 0 \leq \Delta u \leq \Delta u_b \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[p - q \lg \Delta u] & \Delta u_b \leq \Delta u \leq \Delta u_r \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\Delta u = u_a - u_w$ ,  $u_a$  为孔隙气压力,  $u_w$  为孔隙水压力;  $p, q$  为试验拟合参数。

d. 由于土水特征曲线表达式在形式上具有幂函数、对数函数的特征, 不难使人联想到运用分形几何方法来描述土水特征曲线。土水特征曲线的分形模型试图在土体结构与土水特征曲线之间建立联系, 基于土体质量分布具有分形特征, 依据分形孔隙数目与孔径之间的关系和 Young-Laplace 方程得到分形模型的通用表达式<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = F(\psi) = \left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)^{D_v-3} \quad (4)$$

式中:  $D_v$  为孔隙分布的分维数;  $\psi_b$  为超过土体进气值的基质吸力。

式(4)适用于描述基质吸力变化范围为  $[\psi_b, \psi_r)$  的土水特征曲线。实际上, 该公式也是一种幂函数形式的数学模型。

### 1.2 利用土水特征曲线估算强度

为避免 Bishop 与 Fredlund 等非饱和土强度公式涉及吸力测量的复杂性, 笔者采用土水特征曲线间接估算非饱和土强度<sup>[7]</sup>。Fredlund 等<sup>[8]</sup>认为, 非饱和土由基质吸力引起的抗剪强度与含水量有密切关系, 而含水量与基质吸力的关系可以通过土水特征曲线来描述。因此, 提出了用土水特征曲线来预测基质吸力引起的抗剪强度  $\tau_{us}$  的经验性分析公式:

$$\tau_f = c + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi + (u_a - u_w) \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \varphi \quad (5)$$

式中:  $c, \varphi$  分别为常规三轴试验得到的饱和土的黏聚力和内摩擦角;  $\tau_f$  为土体抗剪强度;  $\sigma_n$  为土的总法向应力。

本文对包承纲等提出的土水特征曲线(式(3)), 进行变形, 用含水量来表达基质吸力, 推导出如下土水特征曲线公式:

$$\lg(u_a - u_w) = \begin{cases} \lg(u_a - u_w)_b & \theta_s \leq \theta \\ A + B \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} & \theta_r \leq \theta < \theta_s \end{cases} \quad (6)$$

式中  $A, B$  分别为土水特征曲线截距和斜率。

把式(6)代入式(5)可得到非饱和土的抗剪强度表达式:

$$\tau_f = c + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi = c + s_e (10^{(A+BS_e)}) \tan \varphi + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi \quad (7)$$

式中  $S_e$  为相对饱和度,  $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ 。

式(7)应用方便, 避免了基质吸力量测的难点, 只需进行饱和土的三轴试验和土水特征曲线试验就可计算一定含水量状态下的非饱和土抗剪强度值, 具体步骤如下: ①进行饱和土三轴剪切试验, 确定  $c$  和  $\varphi$ ; ②进行土水特征曲线试验, 绘出土水特征曲线; ③根据土水特征曲线形态确定进气值  $(u_a - u_w)_b$  和残余含水量  $\theta_r$  对应的  $(u_a - u_w)_r$ , 对测得的土水特征曲线进行拟合, 确定参数  $A$  和  $B$ ; ④利用式(7)计算一定应力状态下不同饱和度的非饱和土的抗剪强度值。

## 2 土水特征曲线试验

### 2.1 试验原理

室内通常用压力盒、压力板仪和渗析技术测定土样的土水特征曲线。压力盒和压力板仪试验原理都基于轴平移技术, 将土样试件置于压力室内的高

进气值陶土板上,压力室的空气压力可以加高到大气压力以上的一个预先规定的值,作用于土上的气压力使孔隙水排出。在平衡时土的含水量就相应于某一基质吸力,土的基质吸力等于压力室内气压力的值与陶土板下水压力之差,仪器可测量最大基质吸力小于陶土板的进气值。

采用渗析技术测定土样的土水特征曲线需要的基本设备有 半透膜、不同浓度的 PCG 溶液、量筒等。这种方法测定土水特征曲线是通过控制相对湿度来控制吸力为某确定值,平衡后测定试样的含水量。使用该法可以测定 3 000 kPa 以上的高吸力部分曲线。

近年来有学者建议采用现场土水特征曲线。在距地表一定深度范围内(一般不大于 4 m)不同深度处理设含水量计、张力计、吸力探头等(同一深度上同时安装含水量计和张力计或吸力探头),将探头与数据采集仪和计算机连接,自动监测系统定时采集数据。通过含水量计、张力计和吸力探头,可以对土体在不同深度的体积含水量和吸力同时进行连续监测。通过监测现场降雨入渗及蒸发过程中各深度土体的体积含水量和吸力值,可以推求包含浸水和脱湿过程的土水特征曲线。

2.2 试验仪器

笔者在非饱和土固结仪上进行了土水特征曲线试验。非饱和土固结仪结构与常规固结仪类似,其中主要部件为气压室、试样容器、气压控制与量测系统、孔隙水应力计、孔隙水体变管及加压装置等(图 1)。

a. 气压室,类似于三轴仪的压力室。气压室下半部分是筒形金属底座,借以安装试样盒。其上半部分是可以整体装卸的气压罩,气压罩的下端和顶盖是不锈钢材料,下端与气压室下半部分采用粗螺纹联结,并用 O 形圈密封。

b. 试样容器,由底座、定位环组成,在底座内嵌

有一块高进气值陶土板。饱和的陶土板透水不透气,试样水可以通过陶土板排出。

2.3 试验步骤

利用非饱和固结仪可以测试不同上覆压力作用下土体的脱湿过程曲线。所用仪器可测量的最大基质吸力为 400 kPa。试验采用原状土样,尺寸为直径 61.8 mm、高 40 mm。试验步骤如下:①将高进气值陶土板饱和,将饱和后的土样称量后装入试验容器,从容器中排除多余的水,安装好顶板并上紧螺杆。②施加气压力,土样中的孔隙水通过高进气值陶土板排出到量管,以每 2 h 量管体积变化不超过 2 mL 为达到平衡状态。读取孔隙水应力计示数,记下土样的基质吸力(气压与孔隙水压之差)。③逐级增加气压至最大值,重复步骤②。④试验结束,卸除气压,称量湿土样和烘干后土样的质量,根据量管起始和结束读数,计算各级压力下平衡时土样的含水量,绘制基质吸力与含水量关系曲线,即土水特征曲线。

3 实例分析

3.1 边坡概况

以某高速公路 K100 + 740 右侧边坡为对象,分析含水量变化引起的边坡稳定安全系数变化。边坡为类土质坡,坡体上部为残积土,下部为全风化闪长岩、花岗岩及弱风化花岗岩。由于地下水埋深较深,计算分析中不考虑地下水的影响。

土水特征曲线是 1 条反 S 形曲线,中间部分近似为直线,图 2 为试验结果的中间部分的拟合结果,拟合结果见表 1。坡土体强度试验所取得的参数见表 2。

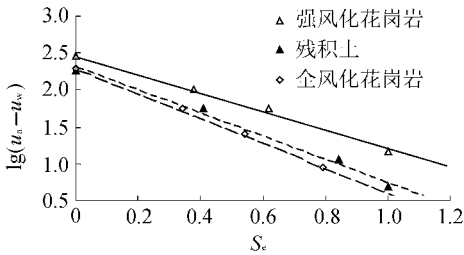


图 2 土水特征曲线拟合结果

表 1 各土层土水特征曲线拟合结果

| 土 层    | A    | B      | $\theta_s/\%$ | $\theta_r/\%$ |
|--------|------|--------|---------------|---------------|
| 强风化花岗岩 | 2.48 | - 1.28 | 42.2          | 24.8          |
| 全风化花岗岩 | 2.30 | - 1.71 | 45.6          | 23.6          |
| 残积土    | 2.31 | - 1.56 | 41.1          | 21.4          |

3.2 计算成果及分析

分别采用瑞典条分法和毕肖普条分法计算边坡的整体稳定性。图 3 为边坡稳定分析结果,图 3 所示边坡中弱风化花岗岩计算参数取值同强风化花岗岩。

从图 3 可以看出,采用不同强度参数计算所得边坡稳定安全系数  $F_s$  差别较大,采用饱和土强度参

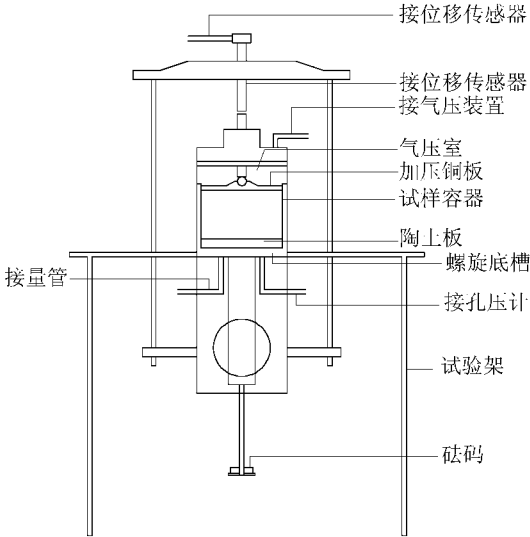


图 1 非饱和土体固结仪

表 2 边坡土体物理力学指标

| 土层     | 固结排水                                 |                |                           | 非饱和土不排水不排气                           |                |                           | 计算所得土体强度参数                           |                |                           |
|--------|--------------------------------------|----------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------|---------------------------|
|        | $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $c/\text{kPa}$ | $\varphi/(\text{^\circ})$ | $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $c/\text{kPa}$ | $\varphi/(\text{^\circ})$ | $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $c/\text{kPa}$ | $\varphi/(\text{^\circ})$ |
| 强风化花岗岩 | 1850                                 | 17.3           | 37.0                      | 1450                                 | 38.9           | 41.0                      | 1450                                 | 46.3           | 37.0                      |
| 全风化花岗岩 | 1900                                 | 19.1           | 38.0                      | 1600                                 | 33.0           | 40.0                      | 1600                                 | 31.7           | 38.0                      |
| 残积土    | 1830                                 | 18.0           | 39.0                      | 1550                                 | 33.7           | 40.0                      | 1550                                 | 30.1           | 39.0                      |

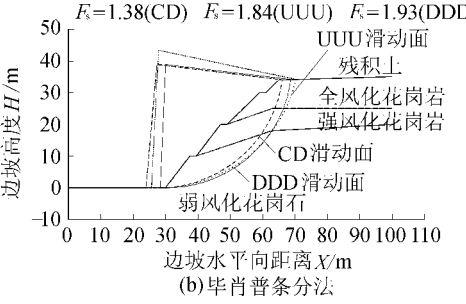
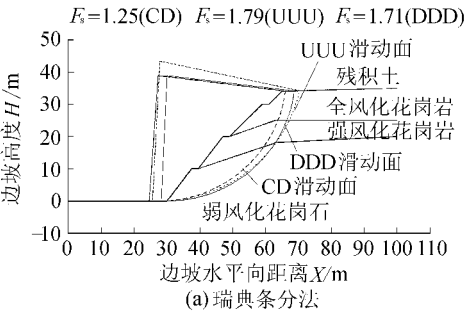


图 3 残积土边坡稳定分析结果

数时,  $F_s$  最小, 采用非饱和不排水不排气强度参数与由土体实际含水量计算得到的土体强度参数时,  $F_s$  并不相同, 但都较大。不同强度参数计算得到的边坡稳定滑弧位置也不尽相同。图中 CD 表示由固结排水三轴试验所得的数据计算结果, UUU 表示由非饱和土不排水不排气三轴试验所得的数据计算结果, DDD 表示按土体天然含水量考虑采用笔者提出的非饱和土强度计算方法所得的数据计算结果。

由式(7)可以看出, 当土体含水量变化时, 其强度也随之变化(图 4), 边坡稳定安全系数在土体含水量介于饱和含水量和残余含水量(31%)之间达到一个峰值(瑞典条分法为 1.71, 毕肖普条分法为 1.84 左右), 而后随着含水量的降低, 边坡稳定安全系数也降低到一个常量(瑞典条分法为 1.67, 毕肖普条分法为 1.755 左右), 这与 Fredlund 的研究成果相一致<sup>[7]</sup>。

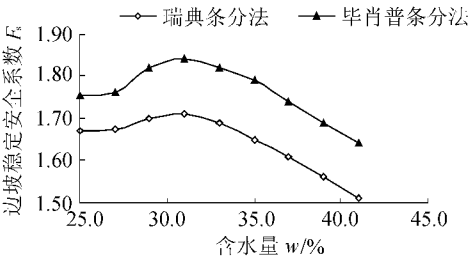


图 4 边坡稳定安全系数随土体含水量变化曲线

笔者建议在边坡稳定分析中引入工程安全度的设计思想, 即采用边坡土体处于天然含水量时对应的强度计算所得安全系数为设计标准, 以采用常规三轴试验所得到的饱和土强度计算出的安全系数为校核标准, 根据不同等级的边坡采用相应的安全系数, 而不是当前笼统的边坡设计标准。

4 小 结

传统计算方法难以满足边坡稳定分析的要求, 非饱和土力学理论应用于边坡稳定分析具有一定的应用前景。应发展饱和土力学理论, 改进试验设备和试验方法, 将非饱和土的力学理论和方法加以简化和实用。笔者建立的非饱和土含水量与强度的关系式通过土体含水量在边坡稳定分析中的应用, 提出把含水量作为边坡稳定分析的重要参数, 该计算分析思想在高边坡设计和施工中具有广泛的参考价值。

参考文献：

[1] 沈珠江, 杨代泉. 非饱和土力学的研究途径和发展前景 [C]//中国土木工程学会土力学及基础工程学会. 非饱和土理论与实践学术研讨会文集. 北京: 中国建筑业出版社, 1992: 1-10.

[2] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Can Geotech, 1994, 31(2): 521-532.

[3] Van GENUCHTEN M T. A close form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44(5): 892-898.

[4] 包承纲. 非饱和和压实土的多相形态及孔压消散问题 [C]//李承刚, 唐美树, 徐渭. 第三届全国土力学和基础工程会议论文集. 北京: 中国建筑业出版社, 1979: 12-16.

[5] 包承纲, 詹良通, 龚壁卫. 非饱和土的特性和膨胀土边坡的稳定问题 [C]//国际土力学及岩土工程协会. 第二届国际非饱和土学术会议主题报告. 北京: 中国建筑业出版社, 1998: 56-61.

[6] 徐永福, 董平. 非饱和土的水分特征曲线的分形模型 [J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 400-405.

[7] FREDLUND D G, RAHARJO H. 非饱和土力学 [M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等, 译. 北京: 中国建筑业出版社, 1997.

[8] FREDLUND D G, XING A, FREDLUND M D. The relationship of the unsaturated soil shear strength function to the soil-water characteristics[J]. Can Geotech J, 1996, 33(3): 440-448.

(收稿日期 2008-03-14 编辑 方宇彤)