

文章编号: 0451-0712(2005)09-0106-05

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

考虑降雨对土体强度影响的公路高边坡稳定分析

张国炳¹, 袁俊平², 张立伟²

(1. 广东粤赣高速公路有限公司 河源市 517000; 2. 河海大学岩土所 南京市 210098)

摘要: 边坡工程中, 土体一般处于非饱和状态, 将非饱和土力学理论应用于边坡稳定分析, 已成为当今岩土工程研究中的一个热点。总结了非饱和土力学理论, 特别是土水特征曲线的研究现状, 利用土水特征曲线, 建立了一个非饱和土含水量与强度的关系式, 并用该关系式对粤赣高速公路残积土高边坡进行了稳定分析。揭示了土体含水量在高边坡稳定分析中的重要作用, 提出把含水量作为边坡稳定分析的一个重要参数, 该计算分析思想在高速公路高边坡设计和施工中具有广泛的参考价值。

关键词: 非饱和土; 土水特征曲线; 抗剪强度; 边坡稳定

粤赣高速公路是由内蒙古自治区阿荣旗至深圳市盐田港公路的组成部分, 也是联接粤赣 2 个省的大通道, 全长为 135.1 km, 属国家重点工程。路线处于罗浮山北缘及北东走向的南岭山系东侧, 路线总走向为 S15°~30°W, 沿线地形总趋势为北高南低; 路线主要穿越丘陵区, 地面高程一般为 50~230 m, 相对高差一般为 50~150 m; 沿线地形起伏较大, 山区河谷支流、冲沟发育, 自然坡呈上缓下陡的形状。路基切坡形成多处深挖高填路段, 高度超过 30 m 的高边坡有 59 处。

公路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 月~8 月份降雨量占全年降雨量的 70%, 5、6 月份降雨量占全年的 37%。

沿线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。鉴于沿线所处区域的气候条件, 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, 因此可能导致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。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而引起的。土、水和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^[1]。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, 应用中更应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, 近年来被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 4 类。

(1) 1994 年, Fredlund 等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^[2]:

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

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)}$$

式中: a, b, c 为拟合参数, 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, 土中水流出率的土性参数, c 为残余含水量函数的土性参数; ψ 为基质吸力, 取值范围为 $[0, \psi_{\max}]$, ψ_{\max} 为 $\theta=0$ 时的最大基质吸力; θ 为体积含水率, 取值范围为 $(0, \theta_s]$; θ_s 为饱和体积含水率; ψ_r 为残余含水量 θ_r 所对应的基质吸力。

式(1)形式较为复杂, 给实际应用带来诸多不便。

(2) Van Genuchten 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^[3]:

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

式中: a, b 为拟合参数, 意义同式(1); 体积含水量 θ 的取值范围为 $(\theta_r, \theta_s]$; 基质吸力 ψ 的取值范围为 $[0, \psi_r]$ 。

式(2)适用于描述基质吸力变化范围为 $[0, \psi_r]$ 的土水特征曲线。

(3) 包承纲等通过对非饱和土气相形态的研究和划分, 认为在实际的应用中, 只有部分连通和内部连通 2 种气相形态需要重点研究^[4], 发现该曲线在 (θ_r, θ_s) 之间近乎一个直线, 建议以对数方程来表征土水特征曲线, 并将其简化为^[5]:

$$\theta = \begin{cases} \theta_s & 0 \leq (u_a - u_w) < (u_a - u_w)_b \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times [p - q \lg(u_a - u_w)] & (u_a - u_w)_b \leq (u_a - u_w) < (u_a - u_w)_r \end{cases} \quad (3)$$

(4) 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, 以及孔隙数目与孔径之间具有分形关系的认识。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^[6]:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = F(\psi) = \left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)^{D_0-3} \quad (4)$$

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, 式(4)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, 本文提出采用土水特征曲线间接估算强度的方法^[7]。Vanapalli 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, 他提出了用土水特征曲线来预测基质吸力引起的抗剪强度 τ_u 的经验性分析公式^[8], 即:

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

式中: c, φ 分别为常规三轴试验得到的饱和土的凝聚力和内摩擦角。

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

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

把式(6)代入式(5)可得到非饱和土的抗剪强度表达式:

$$\begin{aligned} \tau_f &= \hat{c} + (\sigma_n - u_a) \tan \hat{\varphi} \\ &= c + S_r (10^{(A+B S_r)}) \tan \varphi + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $S_r = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$, 为相对饱和度; 参数 A, B 分别为土水特征曲线的截距和斜率。

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实验, 确定凝聚力 c 和内摩擦角 φ ;

(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 θ_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, B ;

(4) 利用式(7)计算一定应力状态下的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

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

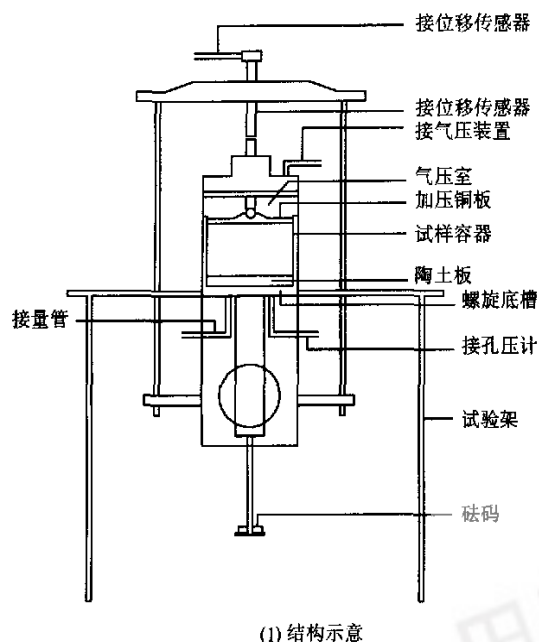
气压力以上的一个预先规定的值,作用于土上的气压力使孔隙水排出。在平衡时土的含水量就相应于某一基质吸力,土的基质吸力等于压力室内气压力的值与陶土板下水压力之差,仪器可测量最大基质吸力小于陶土板的进气值。

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时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,可以推求包含了浸水和脱湿过程的土水特征曲线。

本文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组成(图1)。



(1) 结构示意图



(2) 试样容器

图1 非饱和土固结仪

(1)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。

(2)试样容器,如图1(2)所示,由底座、定位环组成,在底座内嵌有高进气值陶土板。饱和的陶土板透水不透气,试样的水可以通过陶土板排出。

利用非饱和固结仪可以测试不同上覆压力作用下土体脱湿过程曲线。文中仪器可测量最大基质吸力为 400 kPa。试验采用原状土样,直径为 61.8 mm,

高为 40 mm。具体试验步骤为:

(1)将高进气值陶土板饱和,将饱和后的土样称量装入试验容器后,从仪器中排除多余的水,安装好顶板并上紧螺杆;

(2)施加气压,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重,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

本文以粤赣高速公路K100+740 右侧边坡为对象,分析含水量变化引起的安全系数变化。该边坡为

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。

土水特征曲线是一条反 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。边坡土体强度试验所取得参数见表 1。

表 1 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			由式(7)计算所得土体强度参数		
	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
强风化花岗岩	18.5	17.3	37.0	14.5	38.9	41.0	14.5	46.3	37.0
全风化花岗岩	19.0	19.1	38.0	16.0	33.0	40.0	16.0	31.7	38.0
残积土	18.3	18.0	39.0	15.5	33.7	40.0	15.5	30.1	39.0

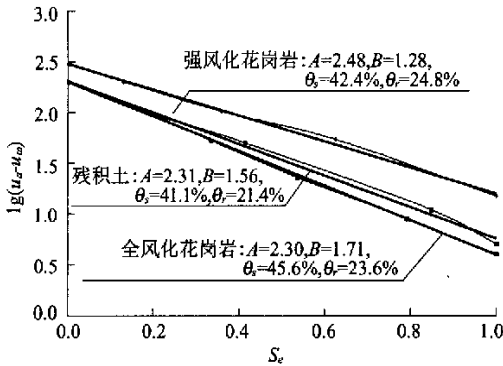


图 2 土水特征曲线拟合结果

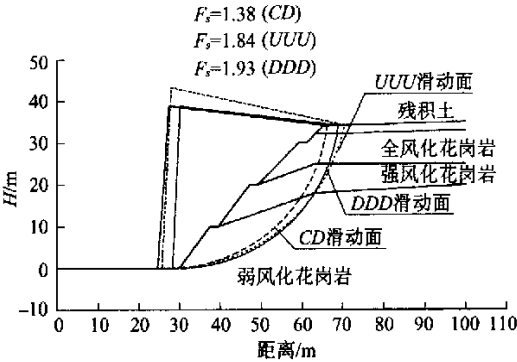


图 4 残积土边坡稳定分析(毕肖普条分法)

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、图 4 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。

可以看出,采用不同强度参数计算所得边坡稳定系数差别较大:采用饱和土强度参数时,边坡稳定安全系数最小;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,边坡稳定安全系数并不相同,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。

由式(7)可以看出,当土体含水量变化时,其强度也随之变化。根据式(7)可以计算出不同含水量情况下土体的强度,从而得到边坡的稳定安全系数。图 5 显示了计算所得边坡稳定安全系数随土体含水量变化的情况。可以看出,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 D. G 的研究成果相一致[7]。图 3、图 4 中 CD 表示由固结排水三轴试验

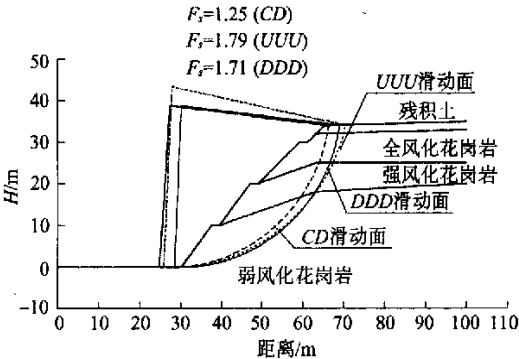


图 3 残积土边坡稳定分析(瑞典条分法)

所得数据的计算结果;UUU 表示由非饱和土不排水不排气三轴试验所得数据的计算结果;DDD 表示按土体天然含水量考虑,采用本文提出的非饱和土强度计算方法所得的计算结果。

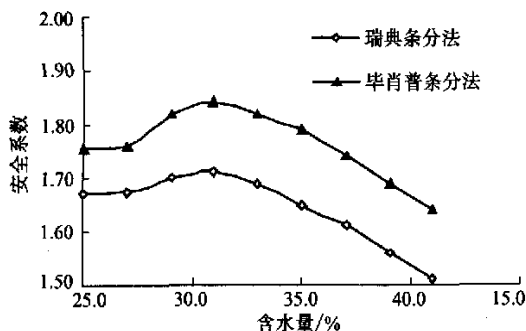


图 5 边坡稳定安全系数随土体含水量的变化

作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的安全系数为设计标准,而采用常规三轴试验所得饱和土强度计算所得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 结语

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,将非饱和土的理论和方法加以简化和实用。

本文提出一个非饱和土含水量与强度的关系式,揭示了土体含水量在边坡稳定分析中的重要作用,提出把含水量作为边坡稳定分析的一个重要参数,该计算分析思想在高速公路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[A]. 非饱和土理论与实践学术研讨会文集[C]. 1992.
- [2] Fredlund D G, Xing. A Equations for the soil-water characteristic curve[Z]. Can Geotech. J., 1994.
- [3] Van Genuchten, M Th. Predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Proc. SSSA, 1980, 44(5).
- [4] 包承纲. 非饱和压实土的多相形态及孔压消散问题[A]. 第三届全国土力学和基础工程会议论文集[C]. 1979.
- [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[A]. 第二届国际非饱和土学术会议主题报告[C]. 1998.
- [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).
- [7] Fredlund D G, Raharjo H. 陈仲颐,等译. 非饱和土力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1997.
- [8] D G Fredlund, S K Vanapalli, A Xing, D E Pufahl. Predicting the shear strength function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve[Z]. Proc 1995 1 Int Conf Unsaturated Soils, 1995.

Stability Analysis of Highway High Slope of Soil Strength Affected by Rain

ZHANG Guo-bing¹, YUAN Jun-ping², ZHANG Li-wei²

(1. Guangdong Provincial Yue-Gan Expressway Co. Ltd., Heyuan 517000, China;

2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Soils in slope engineering are commonly at unsaturated state. The applications of unsaturated soil mechanics in slope stabilities analysis becomes a hotspot in geotechnical researches. The states of arts on unsaturated soil mechanics especially on the soil-water characteristics curve (SWCC) are summarized. A formula is put forward to describe the relationship between water content and strength of unsaturated soils. The formula is applied in the stability analysis of a residual soil slope in Yue-Gan Expressway. The water content of the soil is verified to be very important for slope stability and it is suggested to be a necessary parameter for slope stabilities analysis. The caculation and analysis methods may be widely refered in the design and construction of highway slope.

Key words: unsaturated soil; SWCC; shear strength; slope stability