

基于饱和土总应力强度指标的非饱和土强度理论及其应用

马少坤^{1, 2, 3}, 黄茂松^{2, 3}, 范秋雁¹

(1. 广西大学, 广西 南宁 530004; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 实际工程中求解和测定吸力比较困难, 特别在不排水条件下, 吸力并非常量, 从而难以确定。而饱和度相对容易确定, 选择饱和度代替吸力, 建立关于饱和度的非饱和土的抗剪强度公式有着重要的实用价值。提出不排水(等含水量)条件下的基于饱和土总应力强度指标的抗剪强度公式, 克服了以往相关模型只适合于较小范围的缺陷, 能够实现从非饱和土状态到饱和状态的平稳过渡, 同时更能反映土体的工程特性; 结合非饱和土的土水特征曲线试验及常含水量三轴剪切试验成果, 确定适用于云南红黏土的相关拟合参数; 将所得抗剪强度公式应用于地基承载力分析中, 得到地基承载力随饱和度的减少接近线性增加的结论。

关键词: 土力学; 地基极限承载力; 非饱和土; 抗剪强度; 刚性基础

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)03 - 0635 - 06

UNSATURATED SOIL STRENGTH THEORY BASED ON TOTAL STRESS STRENGTH INDEXES OF SATURATED SOIL AND ITS APPLICATION

MA Shaokun^{1, 2, 3}, HUANG Maosong^{2, 3}, FAN Qiuyan¹

(1. Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: It is very difficult to resolve or measure matric suction in engineering practice, because the matric suction is not constant especially under undrained condition. The degree of saturation is relatively easy to be measured, so the shear strength formula about saturation degree instead of suction has valuable significance in practical engineering. A new formula based on strength indexes of saturated soil is proposed, which can be used in whole engineering practice range including unsaturated soil and saturated soil. More intrinsic characteristics of engineering can be reflected. Proper parameters for Yunnan red clay in the above-mentioned formula are determined based on the results of soil-water characteristics and constant water content triaxial tests. Finally, the undrained shear strength formula is utilized to analyze the bearing capacity of foundation; and the conclusion that the bearing capacity increases with the reduction of degree of saturation linearly is drawn.

Key words: soil mechanics; ultimate bearing capacity of foundation; unsaturated soil; shear strength; rigid foundation

1 引言

在研究非饱和土的抗剪强度时, 有许多引入吸

力强度来预测非饱和土抗剪强度的实用方法, 如通过土-水特征曲线预测非饱和土的强度^[1~3]。这些方法没考虑土-水特征曲线的诸多影响因素, 特别是土体的应力状态和滞回特性^[4~7]; 或者直接根据

收稿日期: 2008 - 09 - 18; **修回日期:** 2009 - 01 - 13

基金项目: 西部交通建设科技项目(200431822311); 广西大学博士启动项目(x091006); 广西大学科研基金项目(x071069)

作者简介: 马少坤(1972 -), 男, 博士, 1994年毕业于湖南大学土木工程学院工业与民用建筑专业, 现任副教授, 主要从事地基承载力方面的教学与研究工作。E-mail: mashaokun@sina.com

吸力而得到抗剪强度经验公式^[8~10]，这些公式中都含有吸力项，以反映吸力对强度的贡献。但是吸力的现场量测非常困难，特别是在不排水条件下吸力并非非常量，难以确定，故此将吸力作为变量的非饱和土强度公式也未能得到广泛的实际运用。而在实际工程中，含水量(或饱和度)数值非常容易确定，可以把吸力对抗剪强度的影响考虑到总应力中去，选择含水量(饱和度)代替吸力，直接研究非饱和土的强度随含水量(饱和度)变化的强度公式^[11, 12]。这种方法虽然是近似的和经验性的，但由土体含水量(饱和度)分布就可方便地确定强度，非常实用。文中将通过标准非饱和土三轴试验，同样采用总应力的方法，拟合出同时适用于饱和土和非饱和土的关于饱和度的抗剪强度公式。

2 常含水量三轴剪切试验

2.1 试验目的

为了得到总应力强度指标 c 和 φ ，拟进行 3 组三轴剪切试验：第 1 组为常规的饱和土固结不排水剪切试验，围压分别为 100, 200 和 400 kPa。第 2, 3 组首先进行控制吸力固结，主要是保证每组试样在剪切前有相同的饱和度。根据笔者前期获得的云南红黏土土 - 水特征曲线试验成果(如图 1 所示)，对应 75%, 60% 的饱和度的吸力分别为 50, 210 kPa。然后进行常含水量剪切试验，围压分别为 100, 200 和 400 kPa。第 1 组试验的主要目的是获得饱和土力学参数及非饱和土特性研究的参照零点，第 2, 3 组试验主要目的是获得不同饱和度时非饱和土的总应力强度指标。

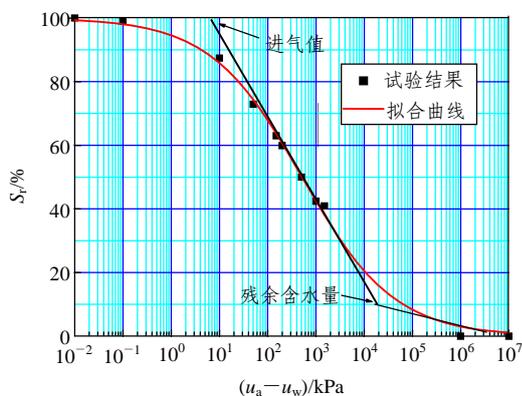


图 1 云南红黏土土 - 水特征曲线

Fig.1 Soil-water characteristic curve of Yunnan red clay

2.2 试验设备

本次试验采用的仪器为英国 GDS 仪器设备有

限公司生产的标准非饱和土三轴试验系统^[13]，其型号为 STDTTS_UNSAT，主要由 3 部分组成：压力室、加压系统和量测与采集系统，如图 2 所示。该系统的控制软件可实现四维控制，即独立、任意地控制 4 个参变量(围压、轴压、孔隙气压力和孔隙水压力)，量测与采集系统包括内置式水下荷重传感器和线性位移传感器等各类传感器、数据采集板和转换器、用于数据采集和试验控制的 GDSLAB 模块软件等，所有测量数据均由计算机采集。

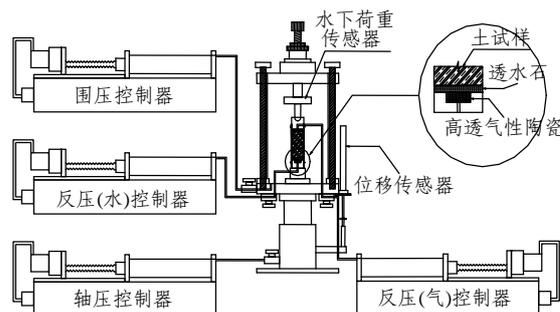


图 2 GDS 非饱和土三轴剪切试验系统^[13]

Fig.2 GDS system for triaxial shear test of unsaturated soil^[13]

本套系统采用轴平移技术控制吸力，使试样顶端与可用以提供气压(u_a)的压力生成装置相连，底端与孔隙水压力生成装置相接，用以通过高透气值陶瓷板提供孔隙水压力(u_w)。高透气值陶瓷板的特点是允许水自由进出，而气则需在压强超过陶瓷板的最大吸力值后才能通过，据此控制试样内部的吸力。当试样两端控制的孔气(水)压与土样内部孔气(水)压平衡时，试样中的吸力就等于所控制的吸力^[13~15]。

2.3 试验结果及分析

本次试验红黏土取自云南省昆明—安宁段高速公路 K0+592 标段，是一种具有黏粒含量高(55%~70%)、液限高的特殊土类，在天然状态下饱和度大，孔隙比大，相对密度大，渗透系数小。其物理力学指标如表 1 所示。

表 1 红黏土的物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical indexes of red clay

相对密度 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	自由膨胀率 δ_{ef}	干密度 ρ_d $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	湿密度 ρ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙比 e	含水率 $w/\%$	饱和度 $S_r/\%$
2.87	43	24	19	30	1 550	1 832	0.95	25.1	75

图 3 为偏应力随轴向应变的变化曲线，可以看

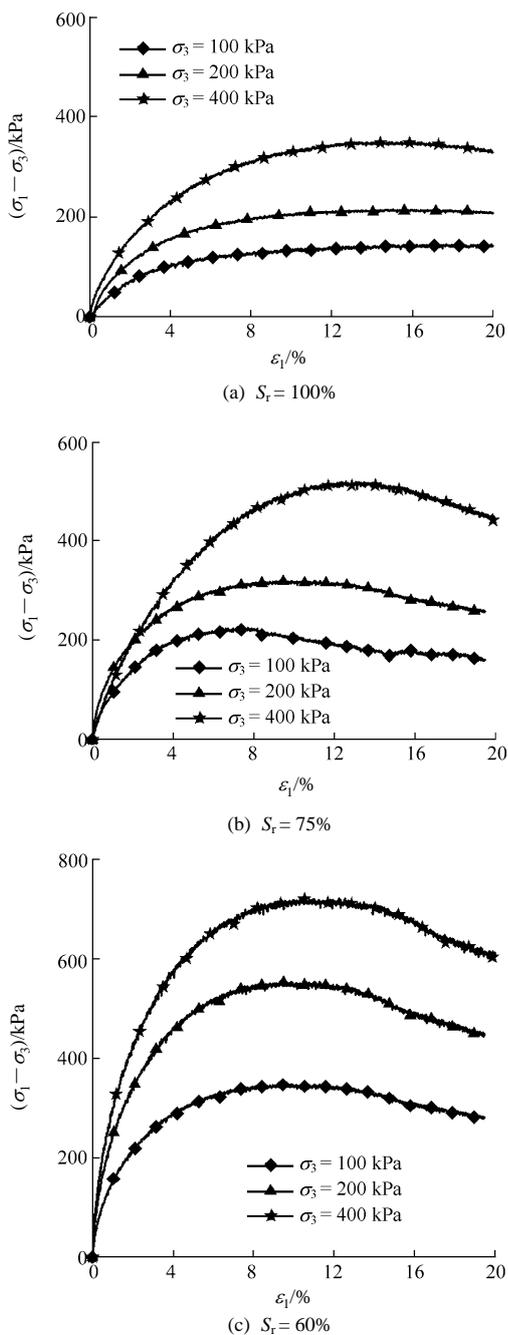


图 3 偏应力与轴向应变的关系

Fig.3 Relationships between deviator stress and axial strain

出, 在相同围压下破坏时偏应力明显随着饱和度的减少而增加, 也就是说随着饱和度的减少, 吸力增加, 抗剪强度也相应增加。同时, 围压越大, 破坏时的偏应力也越大。

图 4 为吸力随轴向应变的变化曲线, 可以看出, 吸力在剪切初期随着轴向应变增加而快速减少, 这主要是超孔隙水压力没来得及消散而引起的, 但随着孔隙水压力稳定后也趋于稳定。由此可以看出直接采用排水条件下(等吸力)的抗剪强度来进行短期荷载作用下的稳定和承载力计算偏于危险。

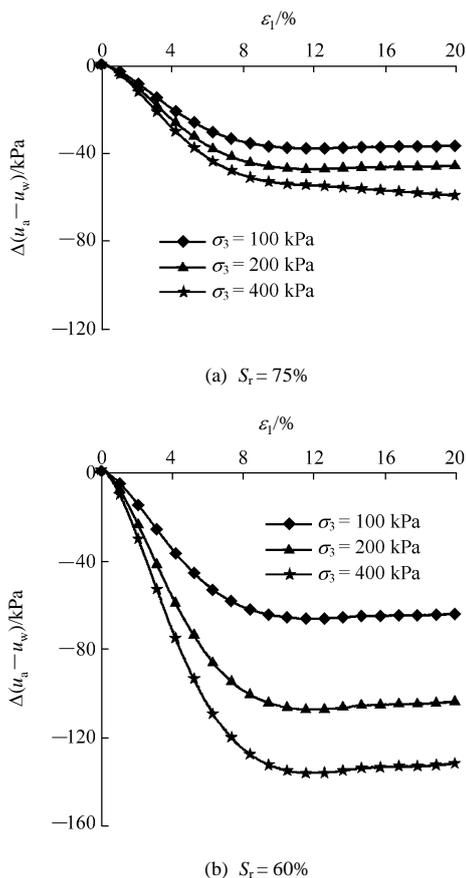


图 4 吸力随轴向应变的变化曲线

Fig.4 Variable curves of matric suction with axial strain

3 非饱和土的强度公式

图 5 为不同饱和度时的强度包线, 可以看出, 随着饱和度的减少, c 和 ϕ 均明显增加, 这与凌华等^[11, 12]的试验结果规律相似: 含水量越大, 抗剪强度越小; 含水量对黏聚力 c 的影响比对内摩擦角 ϕ 的影响更为明显。

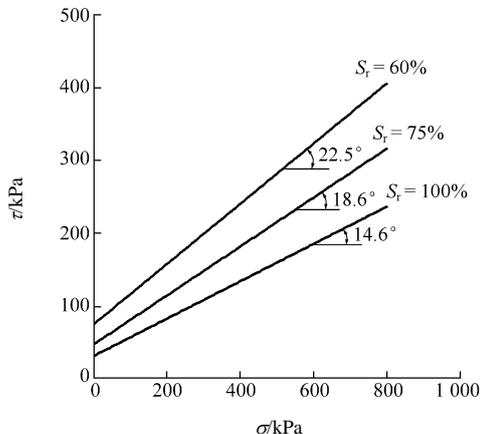


图 5 三轴试验总应力强度包线

Fig.5 Total stress strength envelopes of triaxial tests

凌 华等^[11, 12]均根据试验结果较好地拟合出非饱和土总应力强度公式。但这些公式均只适合于某段饱和度的范畴，难以平稳拓延到饱和土领域，与饱和土的抗剪强度参数不相关，故此在应用时受到一定的限制。笔者拟通过引入饱和土抗剪强度参数建立起与饱和度有关的非饱和土抗剪强度公式，从而建立起饱和土与非饱和土抗剪强度之间的联系。相关公式如下：

$$c = me^{a(1-S_r^b)} \tag{1}$$

$$\varphi = n + d \ln\left(\frac{S_r^2 + 1}{2}\right) \tag{2}$$

式中： m, n, a, b, d 均为拟合参数。

由 $S_r=100\%$ 时，土体处于饱和状态，可得： $m=c_0$ (c_0 为完全饱和时的黏聚力)， $n=\varphi_0$ (φ_0 为完全饱和时的内摩擦角)。

故式(1)，(2)可简化为

$$c = c_0 e^{a(1-S_r^b)} \tag{3}$$

$$\varphi = \varphi_0 + d \ln\left(\frac{S_r^2 + 1}{2}\right) \tag{4}$$

从式(3)，(4)可以看出，当 $S_r \rightarrow 0$ 时， c 和 φ 均无限逼近某一值。

利用笔者提出的公式及凌 华和殷宗泽^[11]的拟合公式，对其所得试验数据进行拟合，结果如图 6，7 所示。由于凌 华和殷宗泽^[11]没有提供 c_0, φ_0 ，故仍采用式(1)，(2)进行拟合。

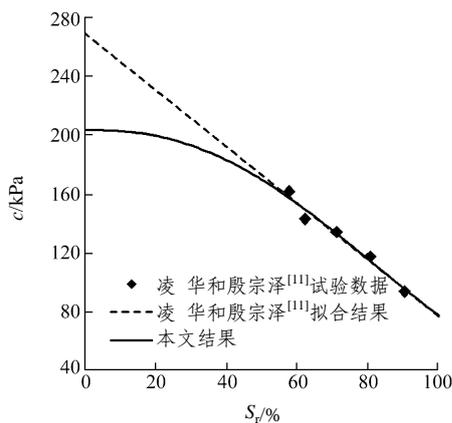


图 6 不同饱和度时黏聚力的计算值与试验数据比较
Fig.6 Comparison of calculated and experimental data of cohesion with different degrees of saturation

可以看出，笔者提出的拟合曲线有着非常理想的拟合效果，在较高饱和度时与凌 华和殷宗泽^[11]

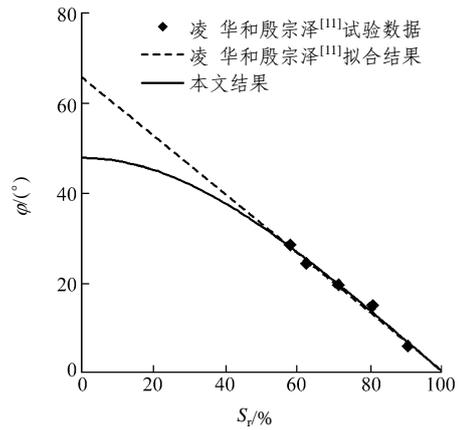


图 7 不同饱和度时内摩擦角的计算值和试验数据比较
Fig.7 Comparison of calculated and experimental data of inner friction angle with different degrees of saturation

的拟合曲线基本重合。但是凌 华和殷宗泽^[11]的拟合方程属线性方程，只适合某段饱和度范围，不能延至饱和阶段，因为很可能会造成 φ 等于 0 甚至小于 0，这显然与工程实际不符。同时在饱和度较小时，可能会使 φ 和 c 变得非常大，也是不合适的。而本文中提出的公式由于通过引入 c_0, φ_0 ，故能较好地克服上述问题，可以较为理想地模拟饱和土和非饱和土，从而建立了饱和土和非饱和土之间的不排水抗剪强度关系。同时曲线的变化趋势也满足吸力(对应饱和度)对内摩擦角的影响不如对黏聚力影响明显，以及在低饱和度时黏聚力和内摩擦角趋于稳定等土体的工程特性。

图 8，9 为利用笔者提出的公式对节 2 中常含水量试验结果进行拟合的结果，得出云南非饱和和红黏土抗剪强度公式的具体形式如下：

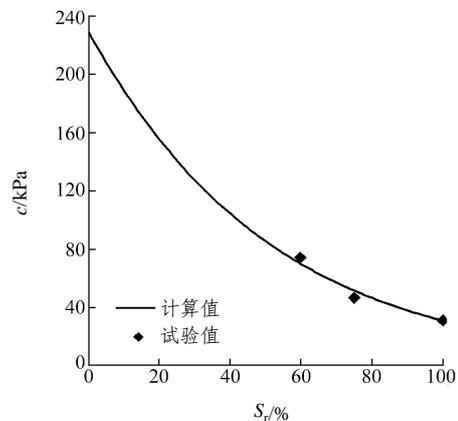


图 8 不同饱和度时黏聚力的计算值和试验值
Fig.8 Calculated and experimental cohesion with different degrees of saturation

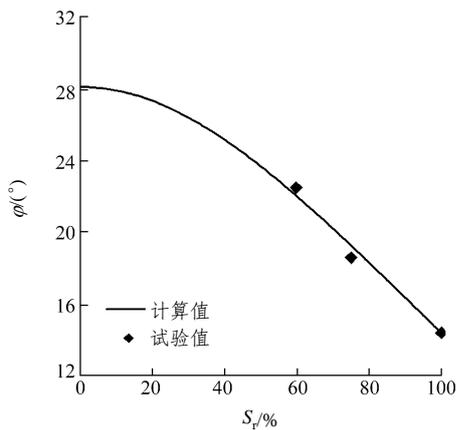


图 9 不同饱和度时内摩擦角的计算值和实验值

Fig.9 Calculated and experimental inner friction angle with different degrees of saturation

$$c = c_0 e^{a(1-S_r^b)} = 31e^{2(1-S_r^{1.02})} \quad (5)$$

$$\varphi = \varphi_0 + d \ln\left(\frac{S_r^2 + 1}{2}\right) = 14.4 - 19.8 \ln\left(\frac{S_r^2 + 1}{2}\right) \quad (6)$$

根据式(5), (6), 就可以近似得到任一饱和度的不排水抗剪强度参数。

4 非饱和土地基承载力

根据前文所得到的云南非饱和红黏土抗剪强度参数计算公式, 拟对基底粗糙的条形刚性基础地基土(无超载)在不同饱和度的极限承载力进行分析, 共取 7 种情况, 即 $S_r = 15\%$, 30% , 45% , 60% , 75% , 90% , 100% 。其他参数为: 基底宽度 $b = 5\text{ m}$, $\gamma = 18.32\text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, $E_s = 2.88\text{ MPa}$ 。

本文直接用总应力强度指标 c, φ , 按单相介质(泊松比取 $\nu = 0.49$)处理, 利用有限元商业软件 ANSYS 进行分析。考虑其对称性, 计算区域水平向取 $9b$, 竖向取 $6b$ 。在有限元分析模型中, 边界条件为: 底部采用位移边界条件, 即水平和垂直方向的位移均约束; 侧面仅水平方向位移约束。采用四边形八节点二次单元, 有限元网格如图 10 所示。

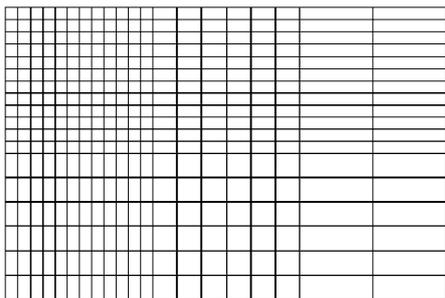


图 10 有限元网格

Fig.10 Finite element meshes

首先应用拟合公式(5), (6)计算出不同饱和度对应的不排水抗剪强度参数, 如图 11, 12 所示。

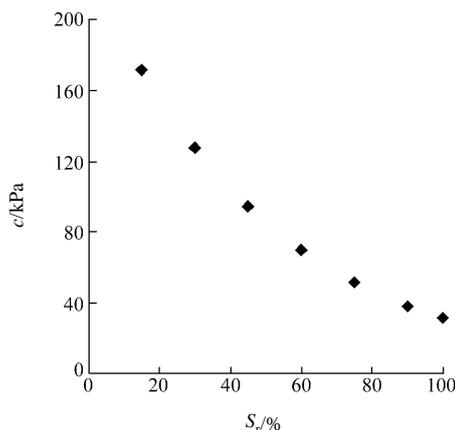


图 11 黏聚力与饱和度的关系图

Fig.11 Relationship between cohesion and degree of saturation

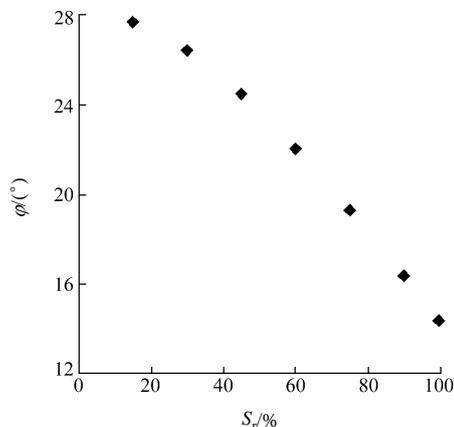


图 12 内摩擦角与饱和度的关系

Fig.12 Relationship between inner friction angle and degree of saturation

图 13 为不同饱和度时的地基极限承载力提高系数, 其中 p_{u0} 为饱和土的地基承载力, 可以看出,

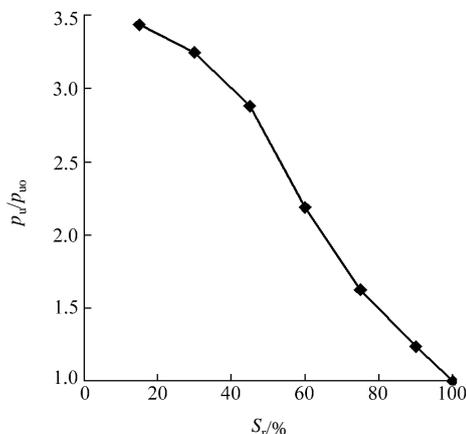


图 13 不同饱和度时的地基极限承载力提高系数

Fig.13 Magnification coefficient of ultimate bearing capacity of foundation with different degrees of saturation

随着饱和度的减少, 极限承载力接近线性增加。

5 结 论

(1) 本文提出了不排水(等含水量)条件下的基于饱和土总应力强度指标的抗剪强度公式, 能够把饱和土和非饱和土很好地联系起来, 实现平稳的过渡。同时由于引入饱和土强度参数, 可以克服以往相关模型只适合于较小范围的缺陷, 从而避免当饱和度为两种极端情况(100%或 0%)时黏聚力和内摩擦角出现负值或非常大的不切实际的结果。方程曲线的变化趋势也满足吸力(对应饱和度)对内摩擦角的影响不如对黏聚力影响明显以及在低饱和度时黏聚力和内摩擦角趋于稳定等土体工程特性。

(2) 结合非饱和土的土-水特征曲线及常含水量三轴剪切试验成果, 确定了适用于云南红黏土的相关拟合参数。

(3) 将所得抗剪强度公式应用于地基承载力分析中, 得出地基承载力随饱和度减少接近线性增加的结论。

由于高吸力试验的控制难度比较大, 同时考虑到岩土工程实际中所关心的吸力范围为 0~1 500 kPa, 故此没有进行低饱和度范围内的相关试验, 文中所提出的公式是否同样适应于低饱和度范围, 还需要进一步研究。

参考文献(References):

- [1] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUF AHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 379 - 392.
- [2] KHALILI N, KHABBAZ M H. A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils[J]. Geotechnique, 1998, 48(5): 681 - 687.
- [3] FREDLUND D G, XING A, FREDLUND M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 440 - 448.
- [4] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUF AHL D E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till[J]. Geotechnique, 1999, 49(2): 143 - 159.
- [5] 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 Chenggang, ZHAN Liangtong. Relationship between unsaturated soil behavior and engineering problems[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 129 - 136.(in Chinese))
- [6] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 结构性黄土的变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4 142 - 4 146.(HU Zaiqiang, SHEN Zhujiang, XIE Dingyi. Deformation properties of structural loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4 142 - 4 146.(in Chinese))
- [7] 黄质宏, 朱立军, 廖义玲, 等. 不同应力路径下红黏土的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2 599 - 2 603.(HUANG Zhihong, ZHU Lijun, LIAO Yiling, et al. Mechanical properties of red clay under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 599 - 2 603.(in Chinese))
- [8] ESCARIO V, JUCA J. Strength and deformation of partly saturated soils[C]// Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio De Janeiro, Brazil: [s. n.], 1989: 43 - 46.
- [9] TEKINSOY M A, KAYADELEN C, KESKIN M S, et al. An equation for predicting shear strength envelope with respect to matric suction[J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(7): 589 - 593.
- [10] 沈珠江. 当前非饱和土力学研究的若干问题[C]// 区域性土的岩土工程问题学术讨论会论文集. 南京: 原子能出版社, 1996: 1 - 9.(SHEN Zhujiang. The problems in the present studies on mechanics for unsaturated soils[C]// Proceedings of the Symposium on Geotechnical Aspects of Regional Soils. Nanjing: Atomic Energy Press, 1996: 1 - 9.(in Chinese))
- [11] 凌 华, 殷宗泽. 非饱和土强度随含水量的变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1 499 - 1 503.(LING Hua, YIN Zongze. Variation of unsaturated soil strength with water contents[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1 499 - 1 503.(in Chinese))
- [12] 杨 庆, 贺 洁, 栾茂田. 非饱和红黏土和膨胀土抗剪强度的比较研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 13 - 16.(YANG Qing, HE Jie, LUAN Maotian. Comparative study on shear strength of unsaturated red clay and expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 13 - 16.(in Chinese))
- [13] 叶为民, 陈 宝, 卞祚麻, 等. 上海软土的非饱和三轴强度[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 317 - 321.(YE Weimin, CHEN Bao, BIAN Zuoxiu, et al. Triaxial shear strength of Shanghai unsaturated soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 317 - 321.(in Chinese))
- [14] 詹良通, 吴宏伟. 非饱和膨胀土变形和强度特性的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 196 - 201.(ZHAN Liangtong, NG C W W. Experimental study on mechanical behavior of recompacted unsaturated expansive clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 196 - 201.(in Chinese))
- [15] 吴宏伟, 陈 锐. 非饱和土试验中的先进吸力控制技术[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 123 - 128.(NG C W W, CHEN Rui. Advanced suction control techniques for testing unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 123 - 128.(in Chinese))