

非饱和土力学实用化之路探索

沈珠江

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 非饱和土力学的研究水平目前还停留在学院式阶段, 主要原因在于吸力量测的困难。为了促进非饱和土力学的实用化, 在分析吸力的 3 种作用机制的基础上提出了几种吸力的替代方案, 如饱和度、折减吸力和广义吸力。此外, 孔隙气压力的计算也是一件麻烦事, 为此提出了简化计算方法。最后探讨了非饱和土中表面裂缝的形成对边坡稳定和变形的影响。

关键词: 非饱和土; 吸力; 孔隙气压力; 表面裂缝

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)02-0256-04

作者简介: 沈珠江(1933-), 男, 教授, 中国科学院院士, 从事土力学基本理论及其工程应用研究。

Exploitation of practical use of unsaturated soil mechanics

SHEN Zhu-jiang

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Until now the research activities in the field of unsaturated soils have been still in the academic stage. The key point of troubles is the measurement of suction. Three possible ways to use degree of saturation, reduced suction or generalized suction instead of matrix suction were proposed. In addition, a simplified consolidation theory of unsaturated soils about pore air pressure was advanced. The influence of cracks in clay surface on the stabilization and deformation of slope was discussed.

Key words: unsaturated soils; suction; pore air pressure

0 前言

非饱和土力学的发展是围绕吸力这一基本概念而开展的。首先是 20 世纪 60 年代以 Bishop 为代表的对非饱和土有效应力的研究, 把吸力作为有效应力的一部分。后来, Fredlund 提出净应力和吸力双变量理论, 把吸力看作一个独立变量。经过 30 年的不懈努力, 确立了吸力是控制非饱和土的强度、变形和渗流过程的一个关键因素的概念, 并且提出了建立在双变量理论基础上的本构模型和非饱和土固结理论, 出版了《非饱和土力学》专著^[1]。但是, 建立在吸力概念上的非饱和土力学始终停留在学院式研究的阶段, 未能在实践中得到广泛的应用, 典型的如非饱和土弹塑性模型^[2]。究其根本原因, 在于吸力量测的困难。试想, 一个控制吸力的三轴试验需要几天甚至几十天的时间, 而这样的三轴试验机在世界范围内也没有几个单位拥有, 又如何能够普及。现场的吸力量测更是困难, 到现在世界范围内已积累的吸力实测资料也没有几个^[3]。因此, 包括笔者在内的非饱和土研究专家一直在思考, 非饱和土力学实用化究竟路在何方? 下面的讨论正是试图回答这一问题。

1 吸力的 3 种作用

总吸力包括基质吸力和溶质吸力, 但溶质吸力只涉及孔隙水的流动, 对强度和变形的影响可以忽略。除非涉及易溶盐及污染化学物的迁移问题, 溶质吸力对孔隙水流的影响也可忽略不计。因此, 本文所提到的吸力均指基质吸力。

1.1 吸力与渗流

虽然土力学中吸力的概念借用于土壤学, 但是早期土壤水的迁移问题常用含水率作为基本变量进行分析的^[4]。当用含水率作为基本变量时, 预测的结果将是水分从含水率高的地方向含水率低的地方迁移。这在均质土中是说得通的。但在非均质土中, 水分可能从含水率低的地方向含水率高的地方迁移, 例如含水率低的砂土中的孔隙水可能反而被含水率高的粘土所吸收, 因为后者孔隙中的吸力高。近年来土壤学家也改用吸力进行水分迁移计算, 就反映了他们也认识到用含水率作为基本变量的不合理性^[5]。

1.2 吸力与强度

无论是 Bishop 公式或 Fredlund 公式, 非饱和土的

强度都是通过吸力来表达的。有人曾提出过用膨胀力替代吸力,看来未必有多少优越性。这里用含水率替代吸力是最直截了当的,如杨代泉建议过下列公式^[6]:

$$\tau_f' = c + \sigma \tan \varphi + (w_s - w) \tan \varphi_w \quad (1)$$

式中, w_s 为饱和含水率, $\tan \varphi_w$ 为强度随含水率减小的系数。后者如果写为 c_w , 其因次与 c 一样, 可能更合理些。

强度只对一种土而言,其含水率愈低,强度愈高,不可能有例外。因此,在强度问题中用含水率或饱和度代替吸力是完全可能的。问题只是在于,公式中的含水率究竟是初始含水率还是破坏时的含水率。如象饱和土研究中固结排水剪和固结不排水剪那样,非饱和土的强度选用也要视实际工况的不同考虑剪切时的吸水或不吸水问题。当然,对某些土类,强度与含水率之间的关系可能不是单值的,例如湿砂的强度高,饱和和风干后强度均会降低。但这时强度与吸力之间的关系也将不是单值的^[7]。

1.3 吸力与变形

吸力与变形之间的关系更加复杂。因为吸力增加引起压缩和吸力减少引起膨胀的规律只适用于正常固结和超固结土,而对湿陷性土则吸力的减少也会引起压缩。这时采用吸力作为控制变量不一定最合适,用含水率替代可能更好。

2 含水率替代方案

这一方案中,变形模量和强度的计算公式中用含水率(或饱和度,因其变化范围为0~1,有关的表达式将更简洁)取代吸力作为控制变量,但渗流计算仍用吸力作为控制变量。

以含水率为变量的强度公式已如式(1)所示。至于式中含水率的确定,也应当象软粘土的强度区分为不排水剪、固结不排水剪和完全排水剪一样,针对不同土类和不同工况,区别对待。例如对于超固结土坡的长期稳定问题,应采用完全吸水剪,此时的含水率就是饱和含水率。暴雨下的瞬时稳定,可用固结(回弹)不吸水剪,但要考虑裂缝的影响。

下面研究变形问题。为了简单起见,以 Duncan 模型为蓝本进行分析,因为这一模型大家比较熟识,其他模型可以类似处理。如果以吸力作为控制变量,可以把该模型修改为

$$E_i = K \left(\frac{\sigma_3 + f_s}{p_a} \right)^n \quad (2)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \frac{c \cos \varphi + (\sigma_3 + f_s) \sin \varphi}{R_f} \quad (3)$$

式中, f_s 是吸力的函数。当用饱和度代替吸力时,上式可以改写为^[8]

$$E_i = K \left(\frac{\sigma_3 + f_{sr}}{p_a} \right)^n \quad (4)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \frac{c \cos \varphi + (\sigma_3 + f_{sr}) \sin \varphi}{R_f} \quad (5)$$

这样 $\sigma_3 = \text{const.}$ 条件下不同饱和度的一簇应力应变曲线将与饱和土在不同 σ_3 下的一簇曲线类似,见图 1(a)。由图可见,在 $\sigma_1 - \sigma_3 = \text{const.}$ 条件下增湿时将导致 ε_1 的增大,也即这方案可模拟湿陷。但为了同时可模拟湿胀,应将膨胀土的增湿视为卸荷,而把湿陷土的增湿视为加荷,见图 1(b)。按照此方案,可由两簇曲线在同一 $\sigma_1 - \sigma_3$ 下产生同一 ε_1 的等效原则确定某一 S_r 相当的 σ_3 即为 f_{sr} 。由此可见,采用此替代方案只需做一组 $\sigma_3 = \text{const.}$ 的饱和土三轴试验和一组 $S_r = \text{const.}$ 的非饱和土三轴试验即可,不需再做控制吸力不变的三轴试验。但为了渗流计算的需要,吸力与饱和度的关系曲线,即水土特征曲线仍需要测定。

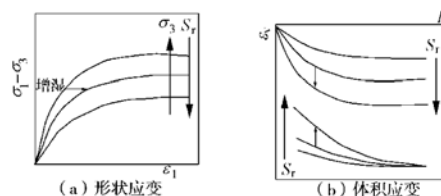


图1 增湿引起的形状应变和体积应变

Fig. 1 Deformation and volumetric strain caused by humidification

3 折减吸力替代方案

对于超固结粘土,可以证明非饱和土的有效应力原理是成立的^[9]。这时,可以把 Bishop 公式中的 $\bar{s} = \chi(u_a - u_w)$ 称为等效吸力或者折减吸力, χ 为折减系数。 $\bar{s}$ 与饱和度的关系可以通过应变等效原则确定,这样,吸力的量测就不再需要。

图 2(a)显示饱和土干缩过程中折减吸力的确定方法, c 为压缩曲线, d 为干缩曲线,只要测定不同干缩变形下的饱和度,即可根据变形等效的原则得出 $\bar{s} = p$ 。同样,湿胀条件下折减吸力可以按图 2(b)的办法确定。图中 s_s 和 s_u 分别为吸水和不吸水(等含水率)回弹曲线,吸水回弹试样一直处于饱和状态,而不吸水回弹试样中出现吸力。根据应变等效原则可得吸水回弹试样中将发展的折减吸力为

$$\bar{s} = p_s - p_u \quad (6)$$

而此时的相应饱和度为 $S_r = e_m / e$, 因此,只要 s_s 和 s_u 两条曲线已经取得,即可确定 $\bar{s}$ 与 S_r 之间的关系。如果用幂次为 m_1 的幂曲线拟合这两条曲线,可得 $\bar{s}$ 与 S_r 的关系式如下:

$$\frac{\bar{s}}{p_m} = \left(n_0 \frac{1 - S_r}{a_s S_r} \right)^{1/m_1} - \left(n_0 \frac{1 - S_r}{a_u S_r} \right)^{1/m_1} \quad (7)$$

式中, n_0 为初始孔隙率, a_s 和 a_u 分别为吸水和不吸水时的体积回弹量。

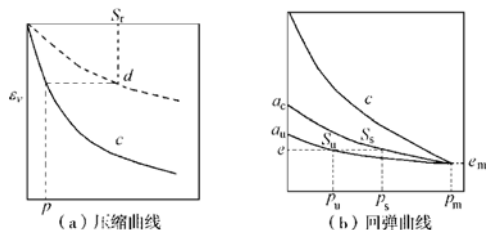


图2 压缩曲线和回弹曲线

Fig. 2 Compression curves and rebound curves

剩下的问题是, 这样求得的等效吸力对强度和渗流是否也等效。对于具有一定厚度的柔性骨架土, 吸水引起的膨胀和强度降低都是水膜变厚的结果, 两者的等效性原则上应当是相通的。但对渗流而言, 把吸力人为折减后可能造成计算结果的渗流量偏小。但这时可通过增大渗透系数的办法加以补偿。就是让试样先减压至 p_u 进行不吸水回弹, 再维持压力不变进行吸水回弹, 并通过对吸水量-时间曲线的反分析确定相应的渗透系数。不吸水回弹时减压量不同, 饱和度也不同, 因此通过此试验可同时求得渗透系数随饱和度的变化规律。应当说明的是, 渗流同时受吸力势和重力势的控制, 因此这办法对重力势为主的渗流可能有所夸大。此方案已经用于超固结粘土边坡的计算^[10]。

4 广义吸力替代方案

折减吸力方案不能用于具有湿陷性的欠固结土。广义吸力方案则可以同时适用于超固结土和欠固结土^[11]。与前面方案不同之处是, 此时式(2)、(3)中的 f_s 应同时是吸力和应变的函数, 亦即 f_s 既随饱和度的增加而减小, 也随应变增加而减小。对饱和重塑土, $f_s = 0$ 。 f_s 随饱和度的变化规律可以通过不同含水率的原状土的模量 E_i 的变化规律确定, 随应变的变化规律初步建议如下:

$$f_s = f_{s0} \left(\frac{e - e_s}{a_s S_r} \right)^{1/m_1} - \left(n_0 \frac{1 - S_r}{e_0 - e_s} \right)^m, \quad (8)$$

式中, e_s 为同一应力状态下饱和重塑土的孔隙比, 即稳定孔隙比, f_{s0} 为初始状态下 $e = e_0$ 时的广义吸力。但针对具体土类上述规律的适用性尚需要专门研究。

广义吸力理论的进一步发展是下列广义有效压力公式的建立:

$$\{\Delta\sigma\} = \{\Delta\sigma'\} + \{\Delta\sigma_w\} \quad (9)$$

其中

$$\{\Delta\sigma'\} = [D]_t \{\Delta\varepsilon\} \quad (10a)$$

$$\{\Delta\sigma_w\} = C_t \{\sigma\} \Delta u_w \quad (10b)$$

式中, $[D]_t$ 为按有效压力定义的模量矩阵, $\{\sigma\}$ 为与应力尺度类似的二阶张量, Δu_w 为孔隙水压力增量, C_t 为一系数, 其值剪胀时为正, 剪缩时为负。此式表明, 广义孔隙应力 $\{\Delta\sigma_w\}$ 已经不再是一个标量, 而且其符号也可能为负。把式(13)代入平衡方程, 可以直接算出 Δu_w 影响下湿陷或湿胀应变, 而不再需要通过初应变法间接计算^[12]。

5 简化固结理论

非饱和土力学应用中的另一个难题是孔隙气压力的计算。在气连通的情况下, 排气过程是很快的。因此, 一般情况下假定孔隙气压力等于大气压力是完全可以接受的。但是, 少数工况下会发生排气边界被堵塞的情况, 例如大雨时整个土面被雨水覆盖, 这时孔隙气压力的积累将不可避免。边坡中孔隙气压力的存在将对其稳定性产生不利的影响, 但如果把全部土面当作不透水面也不合理, 因为孔隙气可能以冒泡的方式排出一部分。为了考虑这一部分孔隙气压力, 笔者建议了排气率人为设定的简化固结理论^[13], 并且推导了下列排气率与孔隙气压力之间的关系式:

$$u_a = \left[\left(\frac{n_{a0}}{n_a} \right)^{(1-\xi)} - 1 \right] p_a \quad (11)$$

式中, n_a 和 n_{a0} 为含气率及其初始值, p_a 为大气压。完全排气时, $\xi = 1$, $u_a = 0$ 。不排气时 $\xi = 0$, 上式就退化为

$$u_a = \left(\frac{n_{a0}}{n_a} - 1 \right) p_a \quad (12)$$

排气率=1 即相当于孔隙气压力等于大气压力的一个特例。这一方案虽然带有一定的经验性, 却大大方便非饱和土固结理论的推广应用, 因为现有的适用于饱和土的固结理论只需稍作修改, 即可用于非饱和土计算。当然, 各种工况下如何设定排气率, 尚需进一步研究。这一理论已用于对某一膨胀土边坡的降雨入渗试验进行数值分析^[14]。

6 裂缝影响的考虑

非饱和土理论的一个重要应用领域是包括膨胀土在内的超固结土问题, 特别是边坡稳定问题。大量的现场调查表明, 这类土中裂缝的存在影响巨大。土中裂缝大致可分3类: ①整体变形引起的大裂缝, 例如滑坡前坡顶开裂及坡脚隆起面上的裂缝和地面不均匀沉降引起的裂缝; ②粘土表面的干缩裂缝; ③卸荷引起的不均匀膨胀或剪切破坏裂缝。后者可能与土体中存在刚度不同的硬块和软胞有关, 即内部出现局

部拉应力或剪切破坏而产生。

第一类裂缝的数量有限,分析时可以逐条跟踪。而第二和第三类裂缝数量众多,目前的分析手段只能把含裂缝的土体当作等效连续介质,相应地增大其渗透系数和降低其变形模量。至于稳定分析中强度指标的选取,深层滑动可不考虑裂缝的影响,浅层滑动则取软弱面的强度参数进行分析。

粘土表面裂缝形成过程的分析也是最近受到关注的一个课题。国外有人从线弹性断裂力学出发进行研究^[15],但我们认为这样做没有必要。我们从拉应力超过抗拉强度就会产生裂缝的观点出发进行裂缝萌生和闭合过程的模拟,取得良好的结果^[16]。至于这一结果如何应用于膨胀土边坡的稳定问题,尚有待进一步研究。

7 结 论

(1) 与饱和土相比,非饱和土中存在吸力和孔隙气压力,使问题大大复杂化。

(2) 吸力是控制非饱和土变形、强度和渗流的关键因素,但其量测的困难阻碍了非饱和土力学的实际应用。文中提出了用含水率、折减吸力和广义吸力取代真实吸力作为控制变量的方案。

(3) 文中建议了通过设定排气率计算孔隙气压力的简化理论,用于降雨入渗过程中孔隙气不能完全排出时的相关分析

(4) 裂缝的存在是非饱和土分析中必须考虑的问题,文中对此提出一些初步看法。

参考文献:

- [1] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土土力学[M].陈仲颐,等译.北京:中国建筑工业出版社,1997. (FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Chen Zhong-yi, et al, otranslator, Beijing: China Architecture and Building Press. 1997.)
- [2] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 405 - 430.
- [3] NG C W W, et al. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration[J]. Geotechnique, 2003, 53(2): 143 - 157.
- [4] PHILLIP J R. On solving the unsaturated flow equation[J]. Soil Science, 1973, 116(5): 328 - 335
- [5] 雷志栋,等.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社, 1988. (LEI Z T, et al. Hydro-dynamics of soil water[M]. Beijing: Tsinghua University, 1988.)
- [6] YANG D Q, SHEN Z J. Laboratory investigation on the strength and stress-strain relationship of an unsaturated compacted clay[C]// Proc 7th IC Expansive Soils. Texas, 1992.
- [7] LLORET A, et al. Crack initiation in drying soils[C]// Proc 2nd Int Conf on Unsaturated Soils. Beijing: Int Academic Publishers, 1998, II: 497 - 502.
- [8] 沈珠江.非饱和土力学的回顾与展望[J].水利水电科技进展, 1996(1). (SHEN Zhu-jiang. retrospect and prospect on soil mechanics for unsaturated soils[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources. 1996, (1).)
- [9] SHEN Z J. Reduced suction and simplified consolidation theory for expansive soils[C]// Proc First Int Conf on Unsaturated Soils. Paris, 1995, III: 1533 - 1540.
- [10] 沈珠江,孙大伟.超固结土变形和稳定的折减吸力算法[J].岩土工程学报, 2005, 27(1): 105 - 109. (SHEN Z J, SUN D W. Deformation and stability analysis of over-consolidated soils based on reduced suction concept[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 105 - 109.)
- [11] 沈珠江.广义吸力和非饱和土统一变形理论[J].岩土工程学报, 1996, 18(2): 1 - 9. (SHEN Z J. Generalized suction and unified deformation theory for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(2): 1 - 9.)
- [12] 沈珠江.二元介质模型在黄土增湿变形分析中的应用[J].水利学报, 2005, (1): 1 - 6. (SHEN Z J. Application of binary medium model in the deformation analysis of loess during wetting[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2005, (2): 1 - 6.)
- [13] 沈珠江.非饱和土简化固结理论及其应用[J].水利水运工程学报, 2003(4): 1 - 6. (SHEN Z J. Simplified consolidation theory for unsaturated soils and its application[J]. Hydro-Science and Engineering 2003, (4): 1 - 6.)
- [14] 沈珠江,米占宽.膨胀土渠道边坡降雨入渗和变形耦合分析[J].水利水运工程学报, 2004, (3): 7 - 11. (SHEN Z J, MI Z K. Coupled analysis of seepage and deformation of an expansive soil slope during rainfall[J]. Hydro-Science and Engineering, 2004, (3): 7 - 11.)
- [15] KONRAD J M, AYAD R. An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34: 477 - 488.
- [16] 沈珠江,邓 刚.粘土表面裂缝形成过程的数值模拟[J].岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 1 - 6. (SHEN Z J, DENG G. Numerical simulation of crack formation in the clay surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Sup 2): 1 - 6.)