

非饱和土力学的回顾与展望

沈珠江^①

(南京水利科学研究院 南京 210024)

摘要 本文把非饱和土力学的发展历史划分为探索期、成熟期和完成期三个阶段。第一阶段以 Bishop 的有效应力公式为标志,第二阶段以 Fredlund 的净应力和吸力双变量理论为标志,从 90 年代开始的第三阶段应重点研究非饱和土的本构模型,在此基础上建立非饱和土的变形理论和破坏理论。

关键词 土力学 非饱和土 强度理论 弹塑性模型 本构模型 述评

非饱和土的研究历史几乎与饱和土一样长久,1936 年在美国哈佛召开的第一届国际土力学及基础工程会议上就有一些这方面的论文。但是,由于问题的复杂性,进展非常缓慢。应当认为,到目前为止,严格意义上的非饱和土力学尚未建立起来,虽然 Fredlund 已出版了《非饱和土力学》一书^[1]。大家知道,在陆地上,非饱和土的覆盖面积远远大于饱和土,从这一意义出发可以认为,发展到今天的土力学仍旧不是一门完整的学科。但是,最近几年来,对非饱和土的研究有加速发展的趋势,具体表现为研究队伍扩大,发表的论文增多,而 1995 年 9 月在巴黎召开的第一届国际非饱和土会议上决定,今后每 3 年召开一次国际会议以取代从 1965 年以来每 4~5 年召开一次的国际膨胀土会议,就是这一趋势的重大标志。会上还决定,第二次国际非饱和土会议将于 1998 年在北京召开。这无疑会促进我国在非饱和土领域研究的进展。

本文首先回顾 50 多年来非饱和土研究的历史,并在分析当前研究动向的基础上,就

在 21 世纪 20 年代建成非饱和土力学的完整的框架这一发展前景提出了自己的构想。

1 发展历史回顾

对于 80 年代以前的发展历史,文献[2]中已经作了很好的总结。我们认为,到现在为止的非饱和土研究可以分为两个阶段,即 70 年代以前的探索阶段,70~90 年代的成熟阶段,而今后 20 多年则应当是完成阶段。

1.1 探索阶段

70 年代以前,人们主要从现象上研究非饱和土的强度和变形特性,并从水-气流动的特点出发,把非饱和土区别为气连通、气-水均连通和气封闭三种状态^[3,4]。但是,对于究竟是什么东西决定着非饱和土强度和变形这一力学机理,虽经过长期探索而不得要领。鉴于饱和土有效应力原理的巨大成功,人们自然联想到,对非饱和土是否也可以找到一个决定其强度和变形的有效应力来。于是,不断有人提出各种有效应力公式,其中最著名的是 Bishop 公式^[5]

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

式中 $(\sigma - u_a)$ 为净应力; $S = u_a - u_w$ 是吸力; χ 是某一系数。但是,无数试验表明, χ

^①沈珠江,教授级高工,中国科学院院士。

不是一个常数。因此,对非饱和土中究竟是否存在有效应力这样一个状态变量的问题,始终存在着争论^[6]。

1.2 成熟阶段

尽管早在 60 年代初, Coleman 就提出过双变量的建议^[7],但由于当时人们热衷于寻求有效应力这一单变量表达式,双变量理论始终没有受到重视。直至 70 年代中期 Fredlund 重新提出这一建议,并通过大量试验证明这一理论的合理性,双变量的提法才逐渐被大家接受^[8]。最近,陈正汉还从理论上论证了净应力和吸力分别作为状态变量的正确性^[9]。

如果说第一阶段的成就可以用式(1)来代表,则双变量理论可以用下列 Fredlund 建议的两个公式来代表:

$$\tau_f = c + (\sigma - u_a) \operatorname{tg} \varphi + (u_a - u_w) \operatorname{tg} \varphi_b \quad (2)$$

$$\Delta \varepsilon_v = c_1 (\Delta \sigma - \Delta u_a) + c_2 (\Delta u_a - \Delta u_w) \quad (3)$$

式中 $\operatorname{tg} \varphi$ 和 $\operatorname{tg} \varphi_b$ 是相对于净应力和吸力的两个摩擦系数(图 1); c_1 和 c_2 是相应的两个体积压缩系数(图 2)。

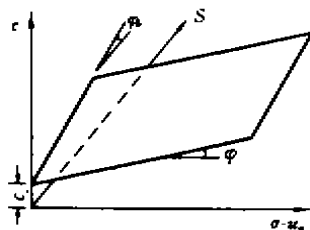


图 1 非饱和土的强度

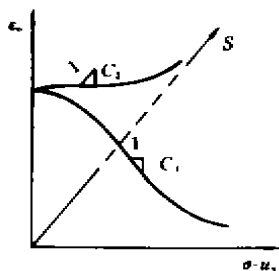


图 2 非饱和土的压缩

这一发展阶段还延续到 90 年代初,其主要成就是在下列两点上取得了共识:

a. 土中吸力可以区分为基质吸力和溶质吸力两部分,对孔隙水的流动来说,两者均有决定性意义,但对土骨架的变形而言,基质吸力(毛管吸力)是决定性因素。

b. 非饱和土的强度和变形特性必须由净应力和(基质)吸力两个变量来描述,饱和土是吸力等于零时的一个特例。大家知道,应力张量有 6 个分量,如果把吸力看作第 7 个分量,就得到了广义应力的概念以及与此相应的广义应力空间和广义应力路线的概念^[10]。双变量理论的最新成就就是把饱和土的屈服面推广到广义应力空间,试图以此为基础建立非饱和土变形的弹塑性理论。图 3 所示的 Alonso 等人建议的广义屈服面,就是这方面工作的代表^[11]。从双变量理论出发,杨代泉建议了非饱和土的广义固结理论^[12]。这一工作既是 Fredlund 一维固结理论的改进与推广,也是饱和土的 Biot 固结理论的推广。与此同时,陈正汉从混合物理理论出发在弹性骨架的假设下推导了非饱和土的固结方程^[13]。这些工作标志着非饱和土变形理论的基本框架已经形成。

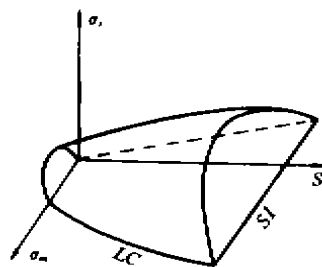


图 3 广义屈服面

2 现有理论的局限性

2.1 强度理论

大量试验表明,非饱和土的强度随吸力的变化呈强烈的非线性(图 4)^[14]。因此,式(2)中的 φ_b 并不是一个土性常数。从这一点来说,双变量的强度公式未必优于下列有效应力强度公式

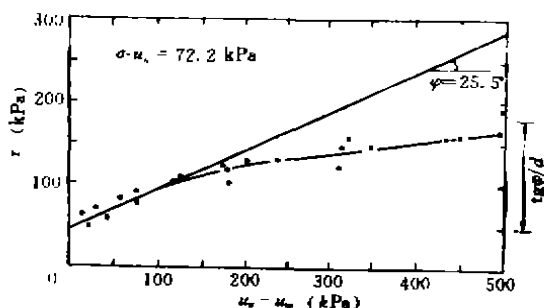


图4 强度随吸力的变化

$$\tau_f = c + [(\sigma - u_w) + \chi(u_u - u_w)] \tan \varphi \quad (4)$$

式(4)方括弧中的值即式(1)的有效应力 σ' 。比较式(4)和式(2)可见, $\tan \varphi_b = \chi \tan \varphi$ 。 χ 不是常量,而 φ_b 也不是常量,那末把 χ 换成 φ_b 岂非多此一举。看来,非饱和土的强度公式最好用非线性表达式,下式便是一个可能的形式

$$\tau_f = c + (\sigma - u_w) \tan \varphi + \frac{u_u - u_w}{1 + d(u_u - u_w)} \tan \varphi \quad (5)$$

式中 c, φ, d 是常数。如果仍写成式(4)的形式,则系数 χ 可用下式表示

$$\chi = \frac{1}{1 + d(u_u - u_w)} \quad (6)$$

即 χ 是随吸力的增大而逐渐变小的系数,可以称为折减系数^[15]。

2.2 有效应力

如果式(5)成立,则把式(6)代入式(1),即可得有效应力公式

$$\sigma' = \sigma - u_w + \frac{u_u - u_w}{1 + d(u_u - u_w)} \quad (7)$$

由此可见,对强度而言,有效应力作为状态函数仍是存在的,只是有关公式是非线性的。

但是,对变形而言,情况就不这么简单。由于土体变形的非线性,有效应力的表达式应当从增量公式出发进行推导。当初Skempton推广饱和土的有效应力公式就是用下式来表示的^[16]:

$$\Delta \sigma' = \Delta \sigma - \Delta u_w \left(1 - \frac{c_s}{c_n} \right) \quad (8)$$

式中 c_s 和 c_n 分别是土颗粒和土骨架的压缩系数。后者是变量,所以一般情况下难以从上式积分得出有效应力总量。当 c_s 与 c_n 相比很小而可以忽略不计时,才可以由上式积分得出著名的Terzaghi原理: $\sigma' = \sigma - u_w$ 。非饱和土的情况更是如此。例如,从式(3)出发,把它写为 $\Delta \epsilon_v = c_1 \Delta \sigma'$,则此时

$$\Delta \sigma' = \Delta \sigma - \Delta u_w + \frac{c_2}{c_1} (\Delta u_u - \Delta u_w) \quad (9)$$

积分后

$$\sigma' = \sigma - u_w + \int \frac{c_2}{c_1} (\Delta u_u - \Delta u_w) \quad (10)$$

一般来说,此式右边第二项是无法积分的,因此可以断言,对变形有效的有效应力一般意义上是不存在的,除非对某一特定问题作一个特定的假设,如像笔者在膨胀土折减吸力理论中所做的那样^[15]。

2.3 弹塑性模型

把适用于饱和土的弹塑性理论推广到非饱和土,这是当前非饱和土本构模型研究中最流行的一种趋势,在巴黎国际非饱和土会议上就有不少这样的论文^[17]。与60年代把饱和土的有效应力原理推广到非饱和土类似,目前这方面的研究正在掀起高潮。但是笔者认为,这类模型对于无明显胶结强度的人工制备土,可能有一定的意义,但对胶结强度较明显的原状黄土,就不一定能很好模拟其实际浸水软化的现象。大家知道,弹塑性模型原则上只能描述塑性变形过程。对于非饱和土,浸水软化有双重作用。一是毛管吸力降低的作用,这与饱和土体因围压降低而发生软化的情况相似。另一作用是引起胶结强度的丧失。后者是一种脆性破坏的过程,弹塑性模型是无法模拟的。

3 今后的研究方向

我们认为,今后非饱和土研究中应当脱离饱和土研究中惯用的思路,重点研究非饱和土的本构模型,并在此基础上建立相应的

变形理论和破坏理论。具体建议以下几个内容。

3.1 本构模型

如果说所有的原状土都具有一定的结构性,那末非饱和土的结构性更为典型。黄土的结构性自不待言。即使是人工压实土,也已有充分证据表明,在干密度和吸力相同的情况下,不同制样方法得到的试样其力学特性有很大的差异,原因只能解释为试样的结构性不同。笔者已经指出,新一代的本构模型应当是与传统的非线性模型和弹塑性模型截然不同的结构性模型^[18]。这类模型应当能描述应力和吸力改变过程中随着颗粒之间的滑移而引起的土结构的可逆和不可逆的变化过程。笔者近年来倡导的可以描述胶结强度丧失过程的土体损伤力学模型和广义吸力模型就是这方面的一些初步尝试^[19,20]。

3.2 统一性原理

各种非饱和土的力学现象尽管差异很大,但往往由共同的力学机制所控制,这就是统一性的含义。认清这种统一机制,就可以更好把握现象的本质,建立更合理的本构模型。下面举三个方面的例子。

3.2.1 非饱和土和饱和土的统一性

同一试样饱和状态与非饱和状态有较大差异,许多人往往给予两组不同的力学参数来描述饱和和非饱和试样的应力-应变特性。这样做显然不合理,因为从机理看,造成差别的原因仅仅是两者的吸力不同而已。饱和土只不过是而非饱和土的特例。因此,正确的做法应是对每一种土料给予统一的计算参数,而在有关的计算公式中引入吸力项以说明两者的不同。例如采用 Duncan 的 $E-v$ 模型时,切线杨氏模量可以写为

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3 + S}{p_a} \right)^n \left(1 - R_f \frac{\tau}{\tau_f} \right)^2 \quad (11)$$

而抗剪强度 τ_f 则可以用式(5)计算。对饱和土, $S=0$, 上式就退化为饱和土的计算公

式。因此,有关参数 K, n 等应当通过饱和试样测定。

3.2.2 湿胀和湿陷现象的统一性

前面讲过,同一试样在低压下可能湿胀,在高压下可能湿陷。因此,不宜绝对化地把一类土称为湿胀土,而把另一类土称为湿陷土。就拿式(3)来说,如果湿胀时取 $c_2 > 0$, 湿陷时取 $c_2 < 0$, 当然也是一种描述方法。但是这样做只能算作权宜之计。随着认识的深入,应当寻找更合理的描述方法。笔者最近建议的统一变形理论也可算作这方面的一个初步尝试。

3.2.3 吸力与其它粒间作用力的统一性

土颗粒之间固有的作用力与外加应力在一起,共同控制着土的强度和变形特性。从强度理论看,前者反映在凝聚力一项中,后者则反映在摩擦力上。如果令 $\sigma_c = c \cdot \cot \varphi$ 代表固有的粒间应力,则饱和土的强度公式可以写为

$$\tau_f = (\sigma_c + \sigma') \operatorname{tg} \varphi \quad (12)$$

吸力 S 的出现相当于 σ_c 中另外增加一项 $S' = \chi S$, χ 的含义同式(6)。 S' 可以称为折减吸力或有效吸力。如此,式(12)将变为

$$\tau_f = (\sigma_c + S' + \sigma') \operatorname{tg} \varphi \quad (13)$$

现在可以把 σ_c 和 S' 统一起来称为广义吸力^[20]。 σ_c 中可能包含胶结力、咬合力、粘滞力等,它们中有的破坏以后是不可恢复的,如胶结力,有的是可逆的,有的则在一定条件下是可逆的,如咬合力。吸力随饱和度的变化而变化,当然是可逆的。把这些力统一作为内在的粒间作用力考虑,对于认识非饱和土的力学特性,无疑是有益的。

3.3 固结理论

对非饱和土来说,固结一词已失去了饱和和粘土固结中“变硬”的含义,因而改称“广义固结”更为合适一些,其确切的含义在于同时考虑固体骨架和孔隙流体的耦合运动。建立非饱和土固结理论,可能有两途径。

一是建立严格的具有普遍性的理论,它应当包括 5 个自由度,即 3 个变位,1 个孔隙水压力和 1 个孔隙气压力,如杨代泉所做的工作^[12]。另一是针对某一特定问题的简化理论,具有类似饱和土固结理论的特点,如笔者曾经做过的工作^[15]。

在建立固结理论中值得注意的一个问题是,控制孔隙水流动的吸力与影响土骨架变形的吸力可能不是同一的。因此,在建立固结问题的控制方程时,必须很好协调这一点^[21]。

作为固结问题的特例,非饱和土的渗流问题已有较长的研究历史。但是这里最困难的还是与大气相连接的土面边界条件的确定,土面附近既有水量的流入和流出问题,也有吸力的变化问题,都与气候条件有密切的关系^[21]。完善的非饱和土固结理论应当能比较全面地考虑这些影响因素。

3.4 破坏理论

传统的土体破坏理论是建立在刚塑性模型的基础上的,它假定滑动面上各点剪应力同时达到抗剪强度。而非饱和土的应力应变曲线多属软化型,包括膨胀土和黄土均如此。因此,只有逐渐破坏理论才能描述非饱和土的破坏问题。尽管 50 年前 Terzaghi 就提出了逐渐破坏的概念,但是,建立这样的理论工作至今尚在探索之中。以前这方面研究工作的重点大多放在计算方法上,但是,如不与本构模型相结合,恐怕难以取得大的成功。看来,这一课题可能是土力学工作者所面临的最严峻的挑战。

4 结束语

以上回顾了非饱和土力学发展历史中前面两个阶段已经取得的主要进展,并展望了第三阶段建成非饱和土力学基本框架可能需要解决的主要问题。随着人们对非饱和土兴趣的增加和更多研究力量的投入,在今后 30 年内建成以非饱和土本构模型为基

础,以非饱和土固结理论和逐渐破坏理论为主要内容的非饱和土力学是完全可能的。希望我国青年学者积极参与这方面的工作,为在这一领域内取得国际领先的研究成果作出贡献。

参考文献

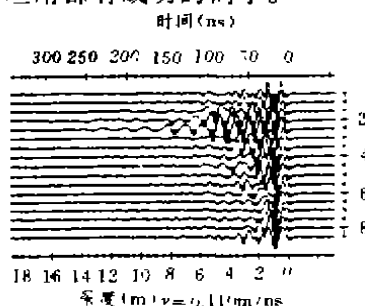
- 1 Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils. New York: John Wiley & Sons, 1993
- 2 蒋彭年. 非饱和土工程性质简论. 岩土工程学报, 1989, 11(6): 39~59
- 3 俞培基, 陈愈炯. 非饱和土的水-气形态及其与力学性质的关系. 水利学报, 1965(1): 16~23
- 4 包承纲. 非饱和压实土的气相形态及孔隙压力消散问题. 见: 第三届土力学及基础工程学术会议论文集, 杭州. 北京: 建筑工业出版社, 1979
- 5 Bishop A W, et al. Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils. Research Conf of Shear Strength of Cohesive Soils, Univ of Colorado, 1960
- 6 Jennings J E B, Burland J B. Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. Geotechnique, 1962, 12(2): 125~144
- 7 Coleman J D. Stress-strain relations for partly saturated soils. Geotechnique, 1962, 12(4): 348~350
- 8 Fredlund D G, Morgenstern N R. Stress state variable for unsaturated soils. J GED, ASCE, 1977, 103(GT5): 447~466
- 9 陈正汉. 非饱和土的应力状态与应力状态变量. 见: 第七届土力学及基础工程学术讨论会论文集, 西安. 北京: 建筑工业出版社, 1994. 186~191
- 10 沈珠江, 杨代泉. 非饱和土力学的研究途径和发展前景. 见: 首届全国岩土力学与工程青年工作者学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1992. 5~10
- 11 Alonso E E 等. 非饱和土弹塑性应力应变特性模拟. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 42~51
- 12 杨代泉. 非饱和土广义固结理论及其数值模拟与试验研究. [博士学位论文]. 南京: 南京水利科学研究所, 1990

(下转第 20 页)

因为这些部位导电率增大,导致雷达信号的衰减。

测线上打了几眼钻井,并测量了地下水的导电率。剖面图上的黑色实线表示在其之下的土壤层孔隙水导电率大于 10 ms/m 。已知该地区土壤类型基本单一,雷达资料表明污染区在测点 $40 \sim 60 \text{ m}$ 段接近地表,与钻孔资料相符合,在 $110 \sim 150 \text{ m}$ 段,污染区距地表约 6 m 深,而水文地质人员事先并未预料到此区域内已发生污染,因此他们计划在该测线上增加钻孔进行验证,并作导电率的测量。此外,雷达还可用来确定废水贮藏附近最佳监视井位。

地质雷达还在滑坡、风化、地陷勘测和隧道施工中发挥了作用。另外对于隧道围壁的地质隐患、掌子面前方的地质险情探测(见图7),以及护堤抛石层的测量中,地质雷达的应用都有成功的例子。



1-1 广西天生桥引水隧洞掌子面雷达探测图

综上所述,利用地质雷达能对地下目标形状、埋深及材料等特性,作出判断、识别和成像。而在地质雷达基础上发展起来的电磁波层析成像技术和弹性波层析成像技术(CT技术)一样,是当前处在研究前沿的方向性领域,可以预见该技术对勘探地球物理发展有着不可估量的重大价值。

参考文献

- 1 荒井郁男. 地中レーダシステム. 電子通信学会論文誌, 1983, J66-B(6): 703~714
- 2 Clemene, et al. Applicability of radar subsurface profiling in estimating sidewalk undermining.

Transp Res Rec, 1980: 102~110

- 3 方广有等. FD-TD法分析频变媒质中基带脉冲波传播和散射. 电波科学学报, 1994(4): 16~18

(收稿日期: 1995-05-18)

(上接第5页)

- 13 陈正汉. 非饱和土固结的混合物理论——数学模拟、试验研究、边值问题: [博士学位论文]. 西安: 陕西机械学院, 1991
- 14 Gan J K-M, Fredlund D G. Shear strength characteristics of two saprolitic soils from Hong Kong. In: Sino-Canadian Symposium on Unsaturated Soils, Wuhan, 1994. 81~107
- 15 Shen Z J. Reduced suction and simplified consolidation theory for expansive soils. In: Alonso E E, et al eds. First Int Conf on Unsaturated Soils, Paris, 1995, Vol 3: 1321~1328
- 16 Skempton A W. Effective stress in soils, concret and rock. Pore Pressure and Suction, Butterworths, London, 1960
- 17 Cui Y J, et al. An elasto-plastic model for compacted soils. In: Alonso E E, et al eds. First Int Conf on Unsaturated Soils, Paris, 1995, Vol 2: 763~710
- 18 沈珠江. 土体结构性的数学模拟——21世纪土力学的核心问题. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95~97
- 19 沈珠江. 土体变形特性的损伤力学模拟. 见: 第五届全国岩土力学数值分析及解析方法讨论会论文集. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1994. 1~8
- 20 沈珠江. 现代土力学和非饱和土固结理论. 见: 21世纪的岩土力学专题讨论会论文集. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995. 34~40
- 21 Wilson G W, et al. The prediction of evaporative fluxes from unsaturated soil surfaces. In: Alonso E E, et al eds. First Int Conf on Unsaturated Soils, Paris, 1995, Vol 1: 423~429

(收稿日期: 1995-12-18)