

非饱和土有效应力及力学特性研究浅析*

邢义川¹, 谢定义², 骆亚生³

(1 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;

3 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100)

[摘 要] 对非饱和土力学性质, 通常采用两种变量表示形式, 一种是单应力变量, 另一种是双应力变量。以此为出发点评述了非饱和土力学特性研究的现状, 同时提出了非饱和土有效应力及力学特性研究的新思路。

[关键词] 非饱和土; 有效应力; 力学特性

[中图分类号] TU 432

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2003)02-0171-06

Terzaghi 的饱和土有效应力原理成功应用以后, 人们就一直探索一种能很好反映非饱和土体的单变量有效应力原理。如果饱和土的有效应力概念能成功地延伸于非饱和土, 得到非饱和单应力变量的有效应力, 那么, 近百年来关于饱和土的研究成果就可以比较顺利地应用于非饱和土, 继承饱和土研究将是一笔巨大的财富, 这也是土工界之所以苦苦追求和探索单应力变量的有效应力的原因。鉴于此, 本研究将突出讨论非饱和土的有效应力问题。

1 单应力变量的有效应力及力学特性研究

太沙基(Terzaghi, 1936)针对饱和土提出的有效应力原理, 揭示了碎散颗粒材料与连续固体材料在应力—应变关系上的重大区别, 是使土力学成为一门独立学科的重要标志^[1, 2]。这种有效应力原理包含 2 个基本点, 一是饱和土体内任一平面上受到的总应力 σ (自重应力与附加应力), 可以分为由骨架通过颗粒之间的接触面来传递的有效应力 σ' 和由充满孔隙的液体, 即由水来传递的孔隙水压力两部分, 即

$$\sigma = \sigma' + u_w \text{ 或 } \sigma' = \sigma - u_w \quad (1)$$

二是土的变形(压缩)与强度的变化都只取决于有效应力的变化, 只有在孔隙水压力发生改变引起有效应力变化时, 土体的体积和强度才能发生变化。

1.1 早期提出的非饱和土有效应力公式

早期的研究成果较多, 主要有 Bishop 公式^[3], Aitchison 公式^[4], Jennings 公式^[4], Richards 公

式^[5], Sparks 公式^[4], Lambert W 公式^[6]等, 类似的公式还可举出许多, 总体上和上述公式大同小异, 但人们更偏爱 Bishop 公式, 因为它只有一个参数 λ , 在 $\lambda=0$ 或 $\lambda=1$ 时, 它可以顺利地由非饱和土过渡到干土或饱和土。该公式为:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \lambda(u_a - u_w) \quad (2)$$

式中, σ' , σ , u_a 和 u_w 分别为非饱和土的有效应力、总应力、孔隙气压力和孔隙水压力; λ 为非饱和土有效应力参数, $0 \leq \lambda \leq 1$ 。

1.2 对有效应力参数 λ 的研究

几十年来, 对 λ 值研究提出的方法和得到的形式五花八门, 具代表性的有 Bishop 方法^[7], 沈珠江公式^[8], Blight 方法^[9]等。其中 Bishop 将有效应力和库伦的强度公式联系起来, 即:

$$\tau = c' + [\sigma - u_a + \lambda(u_a - u_w)] \tan \varphi' \quad (3)$$

在用式(3)确定 λ 值时, 假定对某一给定的起始孔隙比来说, c 和 φ 与饱和度无关。于是从完全饱和和试样的试验中取得 c 和 φ 值, 再将非饱和土强度破坏时对应的应力状态 τ , σ 以及 u_a , u_w 代入式(3)解出 λ 。

1.3 对 Bishop 有效应力公式的若干讨论

1) Bishop 将公式中的 λ 与非饱和土的湿度状态相联系, 即土饱和时 $\lambda=1$, 土全干时 $\lambda=0$, 其他湿度状态时为 $0 < \lambda < 1$ 。但是, 后来的一系列试验都证明, λ 值除受含水量变化的影响外, 还与土类、干湿循环以及荷载和吸力的变化路径有关。同时, 按土的变形和强度所确定的 λ 值, 不仅在数值上有很大的

* [收稿日期] 2002-04-05

[基金项目] 国家“863”计划资助项目(2001AA 242071)

[作者简介] 邢义川(1956-), 男, 陕西镇安人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水利工程、岩土工程研究。

差异,而且也打破了它介于 0~1 的取值范围^[9]。这一切就使得参数的物理概念十分模糊。如果像一些文献^[10,11]中那样,将 X 视为单位面积内水所占面积的系数时,那么,这个值在土中各处是不同的,它只能理解为一个设想的平均概念。而且,这种推导没有考虑表面张力和渗析吸力。不考虑表面张力就丢失了使孔隙水压力 u_w 为负值的根本原因。

2) 按照 Bishop 的有效应力表达式,右边的两项对非饱和土应该永远是正值,吸力的存在使有效应力总是大于净应力。在将其应用于非饱和土有效应力的强度分析时,常被理解为吸力对强度的贡献,但将其应用于变形分析时,却遇到了作为使有效应力增大的吸力项不使土发生变形,反而使土抵御变形的矛盾,从而背离了有效应力原理的基本点。

3) Bishop 的有效应力公式将土孔隙中的孔隙气压力、孔隙水压力及由它们所得到的吸力均视为类似饱和土中孔隙水压力的无偏应力,它们变化时的作用使骨架只有体变而无形变。事实上,由于孔隙气和孔隙水与土颗粒只有局部而且一般为非对称的接触,它们的合力在各个方向上的差异不能不导致土颗粒发生受剪移动,引起土体的剪胀或剪缩^[12]。故吸力不是无偏的,而是有作用方向的。虽然作用的方向随土的湿密状态与孔隙结构有非常复杂的变化,但无偏性的机率非常小,在作总体作用力的设想时应该至少在定性上予以反映。

4) 对于饱和土,孔隙中流体只有水,水既不可压缩(与土骨架的压缩性相比),又不能受剪。施加应力后,水即承担全部荷载。如孔隙水压力不消散,则土骨架将不受力,没有变形。只有孔隙水压力变化引起有效应力的变化时土才有变形发生。但对非饱和土,孔隙流体为水和气,它有较明显的可压缩性。施加的应力一开始就应由骨架和孔隙流体分担,土一开始就有变形。但如果土骨架有较大的结构强度,而这个一开始由它承受的应力较小,则土骨架承受的应力仍不能引起土变形或强度的变化。此时,它虽由骨架承担,但不引起土的变形,仍不是完整意义上的有效应力(这种现象对有结构强度的饱和土也存在,只是饱和土的结构强度一般并不很大,实用上常忽略其不大的影响而已)。Bishop 的公式没有考虑到结构强度(胶结、嵌固等为主)及类似现象的影响,只顾及到吸力的作用,这对常有较大结构强度的非饱和土是一个缺陷。

5) 黄土和膨胀土是非饱和土中广泛分布的土类,它们在含水量增大时分别表现出完全相反的湿

陷与膨胀现象。仅从吸力的减少很难充分地解释这种现象的机理。而且,在 Bishop 公式中,含水量增大(即吸力减小)总导致有效应力的降低,它既无法与黄土湿陷变形的增大一致,也无法对膨胀土用卸荷回胀来解释。事实上,黄土的湿陷变形伴随有加固强度的减小,膨胀土的膨胀离不开渗析吸力作用下水由外部纯净水的补充。这些, Bishop 的公式也无能为力。

2 双应力变量的有效应力及力学特性研究

由于单变量存在的上述问题(当时认为是不可解决的问题),人们就想另辟途径建立新的体系。Fredlund 和 Morgestem^[13]1977 年根据大量研究推出了描述非饱和土强度变形的 3 组双变量,即 $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$, $(\sigma - u_w)$ 和 $(u_a - u_w)$, 以及 $(\sigma - u_a)$ 和 $(\sigma - u_w)$, 并通过比较认为第一组双变量用起来最为方便。双变量体系研究的成果主要体现在 Fredlund D G 与 Rahardj O H 合著的《非饱和土土力学》^[14]一书中。国内外其他专家学者也做过不少研究,它几乎成了当代非饱和土力学研究中的主流。

2.1 非饱和土强度的表达式

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (4)$$

式中, c' , φ' 均为饱和土的有效应力强度参数; φ^b 为基质吸力 $(u_a - u_w)$ 的参数。

2.2 非饱和土固结表示

Fredlund D G 和 Hasan J U^[15]将非饱和土视为四相系,即将收缩膜视为一相,而不计收缩膜的体积变化,又考虑土体变形的连续性,渗水的 Darcy 定律,渗气的 Fick 定律及其假定,导出一维条件下孔隙水压力和孔隙气压力消散的控制方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_w}{\partial t} = -c_w \frac{\partial u_a}{\partial t} + c_v^w \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} \\ \frac{\partial u_a}{\partial t} = -c_a \frac{\partial u_w}{\partial t} + c_v^a \frac{\partial^2 u_a}{\partial z^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中, c_w 和 c_a 为液相方程与气相方程的相互作用常数, $c_w = (1 - R_w)/R_w$, $c_a = R_a [(1 - R_a) - \frac{n_{ao}}{(u_a + p_{am})m_a^a}]^{-1}$; $R_w = m_w^w/m_w^a$, c_v^w 和 c_v^a 为液相和气

相的固结系数, $c_v^w = K_w/\rho_w g m_w^w$, $c_v^a = \frac{DRT}{w_a} \times [(1 - R_a) \times (P_{am} + u_a)m_a^a + n_{ao}]^{-1}$; $R_a = m_a^a/m_w^a$ 。

2.3 非饱和土的本构模型

2.3.1 弹性模型 Fredlund 和 Morgestem^[16]、Fredlund^[17]提出了 $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$ 的变化引起

的体应变增量关系, 研究了一维 K_0 加载条件和三向等压加载条件, 提出了在孔隙比 e , $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$ 三维空间里用状态面对体变特性描述的模型。即

$$e = e_0 - C_l \lg \frac{(\sigma - u_a)}{(\sigma - u_a)_1} - C_m \lg \frac{(\sigma - u_w)}{(\sigma - u_w)_1} \quad (6)$$

式中, C_l 为对总应力的压缩指数, C_m 为对吸力的压缩指数, 下标 1 表示加载条件。

2.3.2 弹塑性模型 A lonso 等^[18, 19]就非饱和土的弹塑性临界状态本构模型提出了一种定量公式, 之后 Wheeler 等^[20]、A lonso 等^[21]经过不断改进和发展, 使其适应膨胀土和湿陷性土。该模型以修正的剑桥模型为基础考虑了吸力对先期固结应力、抗剪强度的影响, 并假定 (q, p) 平面内的应力屈服轨迹是椭圆。

陈正汉^[22]也曾针对重塑非饱和黄土研究了变形、强度、屈服和水量变化特性, 和上述模型主要区别是通过试验证明了在净平均应力不变的条件下屈服吸力是一个常数, 但不一定等于土样在历史上曾受过的最大吸力。提出了一个新的吸力增加屈服条件, 以及一个确定三轴剪切条件下的屈服应力的新方法。

2.3.3 非线性模型 杨代泉等^[23, 24]曾提出了非饱和土的非线性模型, 陈正汉等^[25]也提出了一种较完整的非饱和土的非线性模型。后者在模型中涉及土的变形和水量变化 2 个方面, 共包含 13 个参数。在三轴条件下为:

$$\begin{cases} d\epsilon_1 = \frac{1}{E_1} d(\sigma_1 - u_a) - 2 \frac{\nu_1}{E_1} d(\sigma_3 - u_a) + \frac{1}{H_1} ds \\ d\epsilon_3 = - \frac{\nu_1}{E_1} d(\sigma_1 - u_a) + \frac{1 - \nu_1}{E_1} d(\sigma_3 - u_a) + \frac{1}{H_1} ds \\ d\epsilon_w = \frac{dp}{k_{wt}} + \frac{ds}{H_{wt}} \end{cases} \quad (7)$$

式中, E 为土的杨氏模量; ν 为泊松比; H 为与吸力相关的土的体积模量; k_w 为与吸力相关的水相体变模量; ϵ_1 , ϵ_2 和 ϵ_3 为 3 个主应变; ϵ_w 为土中水量变化; 下标 t 表示“切线”值。

若在三轴排水剪切试验同时控制吸力和净室压力为常量, 式(7)给出

$$\begin{cases} E_t = \frac{d(\sigma_1 - u_a)}{d\epsilon_1} = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\epsilon_1} \\ \nu_t = - \frac{d\epsilon_3}{d\epsilon_1} \\ k_t = \frac{E_1}{3(1 - 2\nu_t)} = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{3d\epsilon_1} \\ k_{wt} = \frac{dp}{d\epsilon_w} = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{3d\epsilon_w} \end{cases} \quad (8)$$

若三轴试验中净总应力保持常数而吸力变化 (即控制净平均应力的三轴收缩试验), 式(7)给出:

$$\begin{cases} H_t = 3ds/d\epsilon_1 \\ H_{wt} = ds/d\epsilon_w \end{cases} \quad (9)$$

式(8)、(9)是确定模型参数的理论依据。

2.4 对双应力变量的几点讨论

双应力变量思想是 Fredlund 对非饱和土力学所做的重要贡献。其优点是摆脱寻找单变量有效应力参数的困难。在表述非饱和土的强度和变形关系式中考虑了吸力的作用, 并证明了双变量表达的唯一性。但是双应力变量在应用于非饱和土一段时间后, 人们同样对其提出种种质疑:

1) 与单应力变量相比, 由于增加了一个变量, 使非饱和土的表达式相当复杂。特别是弹塑性模型的表述中, 如果总应力空间 (p, q, θ) 是三维的话, 有效应力空间将变为四维 (p, q, θ, s) 。

2) 由于采用了双应力变量, 数学模型参数的确定试验必须假定一个变量或两个变量保持相等路径, 而在实际情况中不存在这两个加载路径。

3) 强度表达式(4)实际是将非饱和土的强度表达为饱和的强度与吸力引起的吸附强度之和, 没有考虑除吸力以外其他因素的影响, 其理论基础值得推敲。

4) Fredlund 提出的状态面模型式(6)在回弹时有

$$e = e_2 - c_s \log \frac{\sigma - u_a}{(\sigma - u_a)_2} - c_{ms} \log \frac{u_a - u_w}{(u_a - u_w)_2} \quad (10)$$

“但是到目前为止, Fredlund 及其学生们的研究工作只限于两个变量中有一个保持为常量的试验工作, 两个变量同时变化时, 上式是否符合实际, 尚待检验。”^[26]

5) 在建立非饱和土理论时, 若采用双应力变量, 就须要重新摸索去建立关于非饱和土的一套全新的强度理论、变形理论和固结理论, 并给予巨大的付出, 否则会使近百年来土力学在饱和土力学理论上的一切成果无法采用。

在双变量存在无法解决的缺陷时, 人们又想起了被冷落的单变量具有的种种优点, 使这一古老的课题又活跃起来。

3 单应力变量的有效应力及力学特性的进一步研究

事物发展都是螺旋式上升的。单应力变量的有

有效应力研究重出江湖,必须要克服固有的缺陷,才能在非饱和土体系中占有一席之地。

1) 陈正汉等^[27,28]通过对非饱和土应力状态和变形的考察,借助于弹性理论,推导出的各相异性多孔介质中,有多种不溶混流体时有效应力的普遍公式,同时推导出了非饱和土的相应公式

$$\sigma' = \sigma - u_a + \frac{k^n}{k^{sn}}(u_a - u_w) \quad (11)$$

式中, k^n 和 k^{sn} 分别代表孔隙率为 n 和 sn 的土骨架的体积压缩模量,可以分别采用孔隙中不存在流体的试样或有流体存在但孔压等于零的试样试验测得。将这个有效应力原理表达式与 Bishop 对比,可得 $\chi = k^n/k^{sn}$ 。

2) Khalili 等^[29,30]根据 14 位研究者的十几种土样的试验数据,拟合得到如下方程

$$\chi = \left[\frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_b} \right]^{-0.55} \quad (u_a - u_w) > (u_a - u_w)_b \quad (12)$$

式中, $(u_a - u_w)_b$ 为土的进气压力值。该式由初始吸力曲线拟合而得,有一定局限性。

3) 沈珠江^[31]提出了广义吸力形式,即

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + s' = (\sigma - u_a) + c_s \tan \varphi_s \quad (13)$$

这里把能像吸力一样增加土颗粒之间抗滑阻力的因素,包括颗粒之间胶结力、咬合力和吸力(考虑其中能有效增加土体强度和抗变形能力的那个部分,即有效吸力)一起视为广义吸力 s' 。当颗粒之间的抗滑阻力 τ_s 可表示为库伦定律形式,即 $\tau_s = c_s + \sigma_n \tan \varphi_s$ (c_s , φ_s 为粒间抗滑阻力指标,与宏观的 c , φ 不一定相同)时,则广义吸力 s' 就是以凝聚力形式表现出来的等价粒间法向应力,即 $s' = c_s \cot \varphi_s$, 该式表示的广义有效应力唯一决定了非饱和土的抗剪强度和变形模量,即强度变形的大小。强度变形的应力路径相关决定了广义吸力要随应力路径的改变而改变。建议的广义吸力模型可以同时描述湿胀土和湿陷性土的应力应变特性,并且还可以用于结构性饱和土的分析,具有广泛的应用前景。但是广义吸力的确定十分困难。

4) 刘奉银^[32]在充分论述非饱和土、水、气存在状态以及土体结构的影响的基础上,将非饱和土有效应力表达式写为

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \chi(u_a - u_w) \quad (14)$$

考虑到应力状态的不同,以及球应变与偏应变对土结构影响的差异,最后提出了区别球应力与偏应力的影响参数 χ_p 和 χ_q , 即有

$$\begin{cases} p' = (p - u_a) - \chi_p(u_a - u_w) \\ q' = q - \chi_q(u_a - u_w) \end{cases} \quad (15)$$

并利用非饱和土三轴试验得到的 $\epsilon - p$, $\epsilon - q$ 曲线和 $(u_a - u_w) - \epsilon$ 曲线分别求出 χ_p 和 χ_q 。但参数确定时的假设对线性曲线严格成立,对非线性曲线会随相邻点取值间距不同产生一定的误差。

4 有效应力及力学特性研究的新思路与任务

由以上所述可见,单变量有效应力体系的研究,尽管起步较早,但中途停滞时间较长,所提出的成果还不够完善。20 年来,双变量有效应力体系的研究发展很快,成果很多,已形成一部由 Fredlund D G 和 Rahardj 所著的专著^[14],系统地介绍了非饱和土的力学性质和试验方法。但这些研究成果的试验工作总是假定一个变量或两个变量保持常数路径,与工程实际相差较大,且不利于继承和发展土力学已有的丰富研究成果。所以,单应力变量体系的研究仍可能是研究非饱和土力学特性时表述有效应力的最佳途径。其研究的基本思路和内容如下:

1) 以应力传递机理和力学规律为基础建立非饱和土的有效应力表达式。著名的 Bishop 有效应力公式只考虑了非饱和土中吸力的作用而忽略了非饱和土中非常重要的一面,即胶结力、嵌固力、表面张力等的影响,从而不仅使表达式中参数 χ 的物理概念模糊,“既未从理论上加以验证,又未从试验中加以充分肯定”^[33],而且不适当地给了 χ 值一个 0 到 1 的限制,在它前面正号的存在又排除了这个公式使用于像湿陷性黄土这种重要非饱和土的可能性,最后使公式受到越来越多的非议与冷遇。新建立的非饱和土有效应力的表达式在将非饱和土视为由土骨架、孔隙水和孔隙气构成的三相介质时,非饱和土的土骨架应视为由水气交界面的收缩膜与土骨架所构成的系统,以考虑表面张力以及土粒间可能出现的胶结力和嵌固力等作用;非饱和土的流体应视为由

基本上不可压缩的液体(水)和有很大压缩性的气体(空气)所组成,而且它的液体还要受渗析作用影响的系统,以使其既适应一般土又适应湿陷性土和膨胀性土;对于这样的复合系统,从数学力学原理出发,结合非饱和土的特性作出严格的推导与论证。

2)有效应力表达式中参数的确定。Bishop 公式中有效应力参数对于一种初始含水量土只是一个值,不受应力状态的影响,即 $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ 的 X 值不变,也不受试验过程的影响,因此不能正确描述复杂的应力路径和特殊土类。新建立的非饱和土有效应力公式应反映不同的应力状态下不同的参数,对于主应力状态 $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ 对应的参数是 X_1, X_2, X_3 ; 对于 q, p 应力状态,对应的参数是 X_q, X_p 。就某一个有效应力参数来说,试验过程中对应变的 ϵ 变化也应有所不同。非饱和土的各类有效应力参数均应由试验的应力应变曲线和试验过程孔隙水压力和孔隙气压力

的变化曲线确定,并且在常规三轴试验、真三轴试验和三轴湿陷试验等不同条件下探讨对剪应力和球应力的有效应力参数 X_1, X_2, X_3 , 进而确定出 1 点上 3 个主应力的有效应力参数 X_1, X_2, X_3 。

3)非饱和土有效应力表达式的试验验证。除应对一般粘性土的试验资料验证所提出表达式的正确性外,还应通过对原状黄土的三轴压缩试验、真三轴试验和三轴湿陷试验 3 种不同应力状态下的试验资料以及膨胀土的试验资料验证该有效应力新表达式的适应性。

4)非饱和土强度规律的有效应力关系的表达。以非饱和土常规三轴资料直接得到强度参数 c', φ' , 然后再以真三轴试验资料验证比较总应力和有效应力破坏条件在平面上表示的差异。

5)建立单应力变量的本构模型,并通过有限元分析将单变量有效应力本构模型应用于工程实际。

[参考文献]

- [1] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994
- [2] 太沙基. 理论土力学(中译本)[M]. 北京: 中国地质出版社, 1960
- [3] Bishop A W. Lecture delivered in Oslo, entitled the principle of effective stress, printed in Teknisk[J]. Ukeblad, 1959, 106(3): 859- 863
- [4] 蒋彭年. 非饱和土工程性质简论[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(6): 39- 59
- [5] Richards B G. The Significance of moisture flow and equilibria in unsaturated soils in relation to the design of engineering structures built on shallow foundations in Australia[J]. Symposium on Permeability and Capillarity, ASTM, 1966
- [6] Lambe T W. A Mechanistic picture of shear strength in clay[A]. Proc of ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils[C]. University of Colorado Boulder Colo, 1960: 555- 580
- [7] 比肖普 A W. 决定非饱和粘性土强度的因素[A]. 粘性土抗剪强度译文集[C]. 北京: 科学出版社, 1965 346- 376
- [8] 沈珠江. 土体强度和变形理论中的有效应力原理[A]. 水利水运专题述评第五辑[C]. 南京: 南京水利出版社, 1963
- [9] Blight G E. Effective stress evaluation for unsaturated soils[J]. Journal of the soil Mechanics and Foundations, 1967, SM 2: 125- 148
- [10] Bishop A W, Blight G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils[J]. Geotechnique, 1963, 13(3): 177- 196
- [11] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984
- [12] 汤连生, 王思敬. 湿吸力及非饱和土的有效应力原理探讨[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 83- 88
- [13] Fredlund D G, Morgenstern N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. ASCE J Geotech Eng Div GT5, 1997, 103: 447- 466
- [14] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈刚, 等译. 北京: 中国建设工业出版社, 1997
- [15] Fredlund D G, Hasan J U. One-dimensional consolidation theory: unsaturated soils[J]. Cana Geotech J, 1979, 16(3): 521- 531
- [16] Fredlund D G, Morgenstern N R. Constitutive relations for volume change in unsaturated soils[J]. Cana Geotech J, 1976, 13(3): 261- 276
- [17] Fredlund D G. Appropriate conceptions and technology for unsaturated soils[J]. Cana Geotech J, 1979, 16: 121- 129
- [18] Alonso E E, Gens A, Hight D W. Special problems soils[A]. General Report Proc 9th Eur Conf[C]. Soil Mech Dublin, 1987. 1087- 1147.
- [19] Alonso E E, Gens A, Josa A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 405- 430
- [20] Wheeler S J, Sivakumar V. An elastoplastic critical for unsaturated soil[A]. Proc 7th Int Conf Expansive Soils[C]. Dallas, 1992 167-

172

- [21] Alonso E E, Gens A, Josa A, 等. 非饱和土弹塑性应力应变特性模拟[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 42- 51.
- [22] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 82- 90.
- [23] 杨代泉. 非饱和土广义固结理论及其数值模拟与试验研究[D]. 南京: 南京水利水电科学研究院, 1990.
- [24] Yang D Q, Shen Z J. Generalized nonlinear constitutive theory of unsaturated soil[A]. Proc 7th Int Conf on Expansive Soils[C]. Dallas, 1992.
- [25] 陈正汉, 周海清, Fredlund D G. 非饱和土的非线性模型及其应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 603- 608.
- [26] 沈珠江. 当前非饱和土力学研究中的若干问题[A]. 区域性土的岩土工程问题学术讨论会论文集[C]. 南京: 原子能出版社, 1996.
- [27] 陈正汉, 王永胜, 谢定义. 非饱和土的有效应力探讨[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 62- 69.
- [28] 陈正汉. 非饱和土固结的混和物理论——数学模型、试验研究、边值问题[D]. 西安: 陕西机械学院, 1991.
- [29] Khalili N, Khabbaz M H. A unique relationship for X for the determination of the shear strength of unsaturated soil[J]. Geotechnique, 1998, 48(5): 681- 687.
- [30] Khalili N, Khabbaz M H. An effective stress based approach for shear strength determination of unsaturated soil[A]. In: 2nd Int Conf UNSAT 98 Beijing[C]. 1998: 84- 89.
- [31] 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 1- 10.
- [32] 刘奉银. 非饱和土力学基本试验设备的研制与新有效应力原理的探讨[D]. 西安: 西安理工大学, 1999.
- [33] 包承纲. 非饱和土的应力应变关系和强度特性[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(1): 26- 31.

Current situation and comment on effective stress of unsaturated soils and its mechanical characteristics research

XING Yi-chuan¹, XIE Ding-yi², LUO Ya-sheng^{1,3}

(1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;

2 Institute of Geotechnique Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

3 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The mechanical characteristics of unsaturated soils are usually expressed by using two kinds of variable (single stress variable and double stress variable). In this paper, the current situation of unsaturated soils mechanical characteristics research are commented and the new way of thinking on effective stress of unsaturated soils and its mechanical characteristics are put forward.

Key words: unsaturated soil; effective stress; mechanical characteristics