

非饱和土有效应力公式验证^{*}

邵龙潭^{1,2}, 覃亚龙^{1,2}, 郭晓霞^{1,2}, 郑国锋^{1,2}, 曾立峰^{1,2}

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116024)

摘要:非饱和土有效应力原理对于非饱和土力学具有奠基性的意义。虽然现有的非饱和土有效应力公式种类很多,但是同时具有一定理论基础和明确物理意义的非饱和土有效应力公式并不多,而且其适用性有待进一步的验证。为此,笔者首先简要概述了非饱和土有效应力公式的演化历程,并对几种典型的非饱和土有效应力公式的理论依据及物理意义进行了讨论,通过比较发现,邵龙潭采用连续介质力学理论推导得到的饱和与非饱和土统一的有效应力公式与1996年Vanapalli所提出的半经验公式在形式上相似,但是前者却阐明了非饱和土有效应力的物理意义即不包含孔隙流体压强作用的土骨架应力。将该公式与四参数Van Genuchten模型进行结合分别对膨胀土、粉质粘土、粘质砂土以及灰质粘土4种不同种类的非饱和土的抗剪强度进行了预测。结果表明,在试验精度范围内,理论预测值与试验值吻合较好,从而验证了该公式在试验和工程中具有良好的适用性。

关键词:非饱和土;有效应力公式;SWCC;基质吸力;抗剪强度

中图分类号:TU43

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)06-1476-08

The Validation of the Effective Stress Principle of Unsaturated Soils

Shao Longtan^{1,2}, Qin Yalong^{1,2}, Guo Xiaoxia^{1,2}, Zheng Guofeng^{1,2}, Zeng Lifeng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, P.R. China; 2. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, P.R. China)

Abstract: The effective stress principle of unsaturated soil is significant to the development of unsaturated soil mechanics. Although there are many kinds of the existing formula of effective stress for unsaturated soil, it is difficult to find the formula which combine some theoretical basis and clear physical meaning, what's more, it is necessary to further verify its application. For the purpose, the evolution of the effective stress principle of unsaturated soils were summarized briefly in the first and then the theoretical basis and physical significance of several typical formulas about the effective stress principle of the unsaturated soils were discussed. By comparison, it is found that the effective stress formula derived from the theory of continuum mechanics by Shao L T was similar in form to the semi-empirical formula proposed by Vanapalli in 1996, but the formula raised by Shao revealed that the effective stress was the skeleton stress due to all the external forces excluding pore water pressure. Finally, the formula was aligned with the four parameters Van Genuchten model to predict the strength of expansive soil, silty clay, clay sand and adobe soil. The result indicates that there is a well agreement between the theoretical value and test result within the scope of the test accuracy. Thus it validates the feasibility of the formula used in the tests and projects.

Keywords: unsaturated soil; the formula of effective stress; matric suction; shear strength

^{*} 收稿日期:2018-04-13(修改稿)

作者简介:邵龙潭(1963-),男,吉林梨树人,博士,教授,主要从事土和孔隙介质力学基本理论研究、土工结构稳定分析、土工试验测试技术与仪器研发等方面的教学和科研。E-mail: shaolt@dlut.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(51479023)

0 引言

非饱和土力学是土力学研究的重要领域,由于 Terzaghi^[1]提出的饱和土有效应力原理的成功应用,使得许多研究人员着手于非饱和土力学的研究。但其中一个备受争议的问题是:非饱和土能否像饱和土一样存在控制强度和变形的有效应力?如果存在,其具体的形式又如何?这些问题的提出推动了非饱和土有效应力理论的进一步发展和完善。

1959年,Bishop^[2]根据饱和土有效应力原理以及土的饱和状态与干燥状态特点,最早提出了用有效应力材料参数 χ 表示的单应力变量有效应力方程:

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

式中: σ' 为有效应力; $\sigma_n - u_a$ 为净法向应力; $u_a - u_w$ 为基质吸力; χ 是与饱和度有关的材料参数。在此之前,Aitchison等^[3]及后来Jennings^[4],Blight^[5]等也推导了类似的单应力变量有效应力公式。而Khali等^[6]、包承纲^[7]、Fredlund等^[8]都认为公式(1)中饱和度与 χ 没有唯一的关系,以此推断该有效应力公式只是借鉴饱和土有效应力的概念,仅从唯象的观点出发而提出的,它是一种宏观、直觉、经验性的表达式,并未从理论和试验加以充分地验证。另外还有学者^[9]指出该有效应力公式对一些特殊的土比如膨胀土、湿陷性黄土的一些特性难以解释。但因其公式简单,又与饱和土的有效应力公式形式相同,所以很容易被工程师们所掌握而用于实际工程中。

由于单应力变量存在问题,Coleman^[10]于1962年首次提出了用2个独立变量来描述非饱和土强度和变形的观点。1977年,Fredlund等^[8]通过零位试验方法得到试验数据,验证了采用净应力和基质吸力作为独立的双应力状态变量来表示非饱和土抗剪强度公式的合理性,这样得到的有效应力公式为:

$$\sigma' = (\sigma_n - u_a) + (u_a - u_w) \tan \phi^b / \tan \phi' \quad (2)$$

式中: ϕ' 是与净应力有关的有效内摩擦角; ϕ^b 是与基质吸力有关的参数,在 $(u_a - u_w)$ 小于进气值时与有效内摩擦角 ϕ' 相等,随着基质吸力的增加而逐渐减小,直到残余状态时可能变成0或者负数,其主要取决于土颗粒中用于转化成基质吸力所剩的含水量^[11]。若将双应力变量理论与莫尔-库伦准则相结合,便得到了如图1所示的扩展莫尔-库伦

准则三维应力空间,这一理论后来被土力学界普遍接受,并成为非饱和土力学研究的基础。但是双应力变量理论也存在理论基础不够充分、不能很好地描述非饱和一些复杂现象的缺点,同时它也没有阐明非饱和土有效应力的物理意义。比如Wheeler等^[12]认为净应力和基质吸力不能唯一地确定土体的有效应力,还应该考虑饱和度对土体强度和变形的影响。Lu^[13]指出,应力状态变量的选择具有随意性和主观臆断性,主要取决于研究问题的类型。而Tarantino^[14]则认为,考虑到气相封闭状态时采用轴平移技术的局限性,应用该理论时会产生一定的误差。后来陈正汉等^[15]又分别从混合物理理论和连续介质力学出发,论证并提出了控制非饱和土变形和强度的应力状态变量。总而言之,非饱和土的变形和强度可以用应力状态变量组合来表征,但是应力状态变量的研究不能从理论上说明怎样的组合才是决定非饱和土变形和强度的应力。

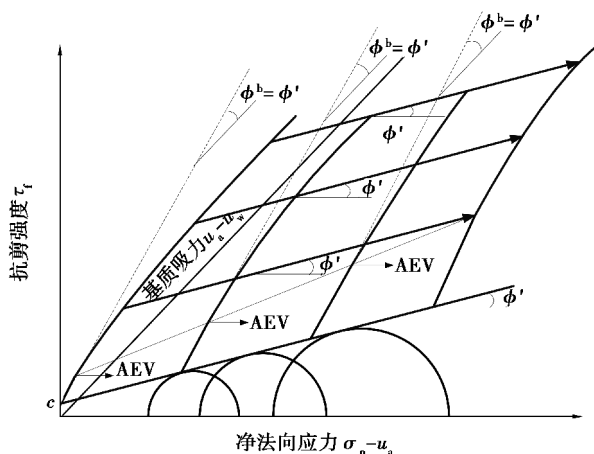


图1 非饱和土的扩展莫尔-库伦破坏面

Fig.1 The expansion Mohr-Coulomb failure surface of the unsaturated soil

也有学者探讨用热力学方法,即能量守恒的变形功来表征非饱和土的应力和变形。1979年,Houlsby^[16]从变形功角度出发,讨论了非饱和土有效应力的原则和具体表达式,认为基于变形功的非饱和土有效应力的表达式不唯一。赵成刚等^[17]、Zhao等^[18]基于连续介质理论和能量守恒原理推演得到了非饱和土变形功的表达式,给出了与固体骨架变形对偶的形式的非饱和土的有效应力公式:

$$\sigma' = \sigma - [S_r P_w + (1 - S_r) P_a] \bar{\delta} \quad (3)$$

式中: P_a 和 P_w 分别表示气相和液相压力; $\bar{\delta}$ 为单位张量,它揭示了非饱和土广义有效应力原理的实

质:土体变形和含水量变化的相互影响。但是从能量损耗上来讲,变形功理论在土体变形时的能量损耗形式有待商榷。

2 基于连续介质力学理论的非饱和土有效应力公式

1996 年,邵龙潭^[19]应用连续介质力学分析方法,以代表土单元의土骨架、孔隙水为独立的分析对象,通过内力分析得到这两相的平衡微分方程,再与土单元的总应力平衡微分方程比较得到了总应力、土骨架应力和孔隙压力之间的关系式即饱和土的有效应力方程,而该方程和 Terzaghi^[1]提出的饱和土的有效应力公式一致。其后又将这一分析方法应用于非饱和土,得到了饱和土和非饱和土统一的有效应力方程^[20-22](下文称为统一的有效应力公式):

$$\sigma' = (\sigma_n - u_a) + S_e(u_a - u_w) \tag{4}$$

其中:

$$S_e = (S - S_r)/(1 - S_r) = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r) \tag{5}$$

式中: S_e 定义为有效饱和度; S_r 定义为残余饱和度; θ_s 、 θ_r 分别表示饱和体积含水量和残余体积含水量。而用式(4)表示的非饱和土抗剪强度公式为:

$$\tau_f = c' + [(\sigma_n - u_a) + S_e(u_a - u_w)] \tan \varphi' \tag{6}$$

$$\tau_f = [c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi'] + [S_e(u_a - u_w) \tan \varphi'] \tag{7}$$

式中: τ_f 表示抗剪强度, c' 表示饱和土的有效凝聚力。

通过比较发现,公式(6)恰好与 1996 年 Vanapalli 等^[11]使用抗剪强度参数表示的非饱和土抗剪强度公式(式(7))一致,但是 Vanapalli 等在当时并没有阐述公式(6)大括号部分就是非饱和土的有效应力,而是将公式(7)中第一部分定义为饱和抗剪强度,将第二部分定义为基质吸力对抗剪强度的贡献值 τ_{us} (简称吸力强度),即:

$$\tau_{us} = S_e(u_a - u_w) \tan \varphi' \tag{8}$$

另外, Vanapalli 等的公式主要还是基于 Fredlund 提出的双应力变量公式进一步推导而来的,缺乏相应的理论基础。而统一的有效应力公式是建立在连续介质力学理论基础上的,它明确指出了非饱和土有效应力的物理意义是不包含孔隙流体压强作用的土骨架应力。公式(4)中的系数为有效饱和度,源于将与土骨架颗粒紧密结合的能够承受和传递应力的那部分孔隙水视为土骨架的组成部分。

表 1 土样的强度指标及四参数 VG 模型拟合 SWCC 所得基本参数

Table 1 The strength parameters of the soils and the basic parameters due to the SWCC fitted by the four parameters VG model

土类及名称	强度参数			VG 模型参数			数据来源
	c'/kPa	φ'	α/kPa^{-1}	n	m	$S_r/\%$	
Madrid clay sand	39.5	40.0	0.002	1.34	1.32	32.9	Escario 等(1989)
Nanyang expansive soil	32.0	21.3	0.000 84	0.96	1.44	7.95	Miao 等(2002)
Reconstituted silty clay	0	32	0.001 3	2.38	0.44	5.00	Cunningham 等(2003)
Weakly expansive soil	14.2	28.2	0.001 3	0.84	0.36	8.20	Ye 等(2010)
Adobe soil	11.7	31.4	0.08	1.32	0.24	9.30	Aqtash 等(2015)

3 公式验证

采用统一的有效应力公式表示的非饱和土抗剪强度公式在形式上与 Vanapalli 等^[11]所提出的公式相同, Vanapalli 以及后来一些研究人员使用自己的数据或引用他人试验数据也对该公式进行了验证,比如 Kim 等^[23], Sheng 等^[24], 以及 Shao 等^[25] 的文中都有相关的论述。这些验证结果也可以证明,

统一的有效应力公式可以表征非饱和土的抗剪强度。但是这些试验数据有以下特点:①所采用土样的基质吸力范围较小;②涉及特殊类型的土很少;③抗剪强度试验都是在控制基质吸力条件下进行的。

为了进一步验证统一的有效应力公式对非饱和土的抗剪强度的适用性,本文引用已经发表的关于非饱和膨胀土(文献[26-27])、非饱和粉质粘土

(文献[28])、非饱和和粘质沙土(文献[29])以及非饱和和灰质粘土(文献[30])的抗剪强度试验数据。首先按照式(4)计算有效应力,并图示试验抗剪强度与有效应力的关系,然后比较基于有效应力原理计算得到的理论抗剪强度值与强度试验得到的试验抗剪强度值,下面将对不同试验具体说明。

在计算有效应力时,需已知基质吸力和有效饱和度,下文将采用四参数 VG 模型^[31]对试验中所测定的土水特性曲线(简称 SWCC)试验数据进行拟合来确定残余含水量(或残余饱和度),进而利用式(5)来计算有效饱和度。表 1 给出了相应的强度指标和拟合得到的土水特征曲线参数。

3.1 非饱和和膨胀土试验数据分析

Miao 等^[26]在 2002 年对干密度为 1.5 g/cm^3 的预压重塑非饱和和南阳膨胀土进行了强度研究。该膨胀土主要由蒙脱土和伊利石等矿物组成,自由膨胀率高达 74%,属于中膨胀粘土。在 3 种不同围压

作用下进行了固结排水的饱和三轴剪切试验,得到其有效摩擦角为 21.3° ,有效粘聚力为 32 kPa。采用压力板仪测得了预压作用下南阳膨胀土的 SWCC 曲线,图 2(a)表示了四参数 VG 模型拟合结果。从图中可以看出该模型对试验结果拟合得很好,所得南阳膨胀土的残余饱和度为 7.95%。此外,在改进的三轴仪上进行了不同围压条件下基质吸力为 50、80、120 及 200 kPa 的三轴剪切试验,剪切速率为 0.009 mm/min 。图 3(a)是采用统一有效应力公式(式(6))对不同基质吸力作用下南阳膨胀土抗剪强度的预测值与试验抗剪强度值的比较。通过数理统计中的相关性计算,得到两者的线性相关系数 $R^2=0.97$,说明了理论值对试验值能够进行合理的预测。从图 3(a)中还能看出,饱和与非饱和的试验抗剪强度值基本都位于采用统一的有效应力原理表示的抗剪强度直线上,这进一步说明了有效应力决定土体的抗剪强度。

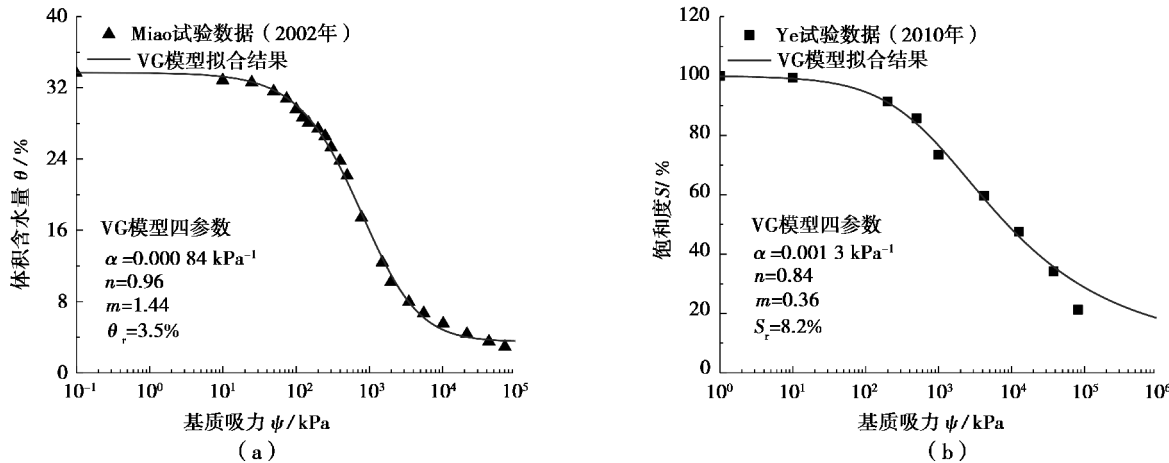


图 2 采用四参数 VG 模型拟合得到膨胀土的 SWCC 曲线

Fig.2 The SWCC of expansive soil fitted by 4 parameters VG model

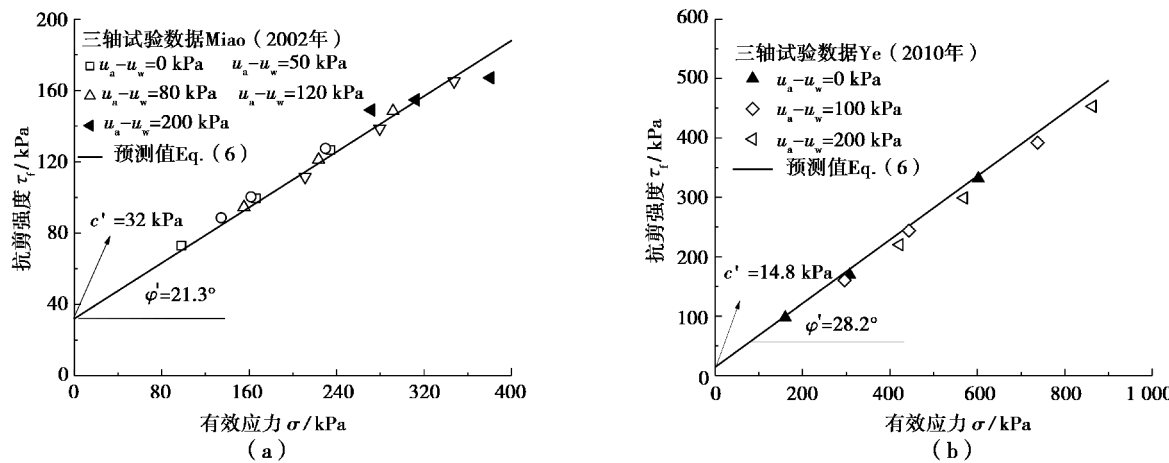


图 3 不同基质吸力作用下统一有效应力公式对膨胀土抗剪强度的预测值与试验抗剪强度值的比较

Fig.3 The comparison between the shear strength of expansive soil based on the unified shear strength criteria and the measured data under different suction

2010 年, Ye 等^[27]对取自南水北调工程武汉至十堰段某一河床底部 1~1.5 m 深处的膨胀土进行了一系列试验研究。该土样主要由第四纪更新世的冲积和沉积粘性土组成, 具有较低的自然含水率和较高的承载能力, 自然膨胀率为 58%, 属于弱膨胀土。采用饱和盐溶液的蒸汽平衡和渗透原理的方法测得了该弱膨胀土脱湿过程的 SWCC 曲线试验值, 其基质吸力范围从 0 到 10^6 kPa。从图 2(b) 可以看出, 四参数 VG 模型对其能够很好地拟合, 拟合程度接近 100%, 得到了该土样的进气值大约为 106 kPa, 残余饱和度为 8.2%。从 SWCC 曲线可以看出, 边界效应区和过渡区分界很明显, 而残余区却显得很模糊, 可能与粘性土质的含量有关。该试验结果与蒋坤等^[32]采用气相法测得粉质粘土 SWCC 曲线的趋势很相似。接着进行了一系列剪切强度试验, 其中包括通过饱和固结排水三轴剪切试验, 得到其有效摩擦角为 28.2° , 有效粘聚力为 14.2 kPa, 在改进的三轴仪上开展了控制基质吸力的非饱和土三轴试验, 即在 3 种不同围压作用下控制基质吸力为 100 kPa、200 kPa 的恒定速率的三轴剪切试验。根据式(4)可以计算得到有效应力, 有效应力与试验抗剪强度的关系如图 3(b) 中的数据点, 图中的实线是基于饱和土有效应力原理计算得到的理论抗剪强度值。强度值与理论抗剪强度值的线性相关系数为 $R^2 = 0.98$ 。通过两者的比较可以看出, 采用统一有效应力公式(式(6))计算得到的抗剪强度值在一定范围内能够对饱和土与非饱和膨胀土的抗剪强度进行有效的预测, 而且能够满足实际工程的需要。

3.2 非饱和和粉质粘土试验数据分析

2003 年, Cunningham 等^[28]为了研究非饱和重塑粉质粘土的力学行为开展了一系列试验, 其中包括饱和试样的各向同性压缩试验、三轴固结排水剪切试验以及 4 种不同围压条件下控制基质吸力为 400 kPa(近似饱和)、650 kPa、850 kPa、1 000 kPa 的三轴剪切试验。试验所用的粉质粘土样由 20% 的 Speswhite 高岭土、10% 的伦敦粘土以及 70% 的 HPF4 硅微粉混合而成, 采用泥浆预固结的方法进行制样, 最大竖向有效固结应力达到 200 kPa。其脱湿过程的 SWCC 曲线数据由滤纸法获得, 图 4 所示为利用四参数 VG 模型对数据进行拟合, 得到重塑土的进气值和残余饱和度分别为 250 kPa, 5.0%。该粉质粘土的有效内摩擦角为 32° , 有效粘聚力为 0 kPa。

为了按照统一的有效应力公式(6)对抗剪强

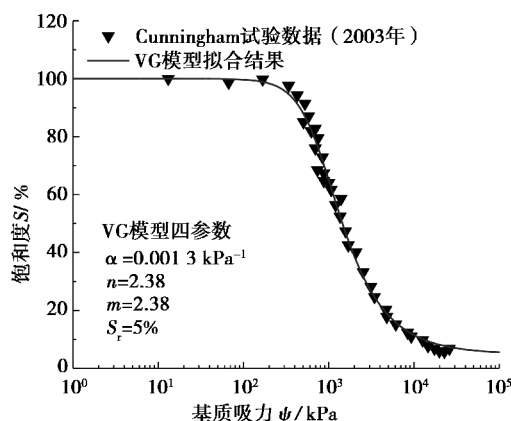


图 4 采用四参数 VG 模型拟合得到的粉质粘土的 SWCC 曲线

Fig.4 The SWCC of silty clay fitted by 4 parameters VG model

度数据进行重分析, 根据原文中绘制的最大偏应力与基质吸力之间关系的试验点以及拟合之后的 SWCC 曲线求得基质吸力所对应的有效饱和度 S_e , 进而使用有效应力公式(4)计算得到有效应力。式(9)反映了最大偏应力与破坏面上的剪切应力的关系, 根据该式可以计算破坏时的抗剪强度试验值, 从而有效应力与抗剪强度的关系如图 5 中的试验点所示, 基于饱和土有效应力原理求得的理论抗剪强度在图中用直线表示。采用数理统计中相关性分析得到了理论抗剪强度和试验抗剪强度之间的线性相关系数为 $R^2 = 0.95$, 说明理论值与试验值相关程度很高, 进一步说明了采用统一的有效应力公式能够很好地预测该粉质粘土的抗剪强度。但是从图中可看到, 部分理论预测值对试验值的预测是高估的, 尤其是基质吸力较高的时候。

$$\tau_\theta = \frac{q_{\max}}{2} \sin 2\theta \quad (9)$$

式中: θ 为破坏面与主净法向应力作用面垂直方向之间的夹角, 它与有效内摩擦角 φ' 之间的关系为 $\theta = \pi/4 + \varphi'/2$; τ_θ 表示破坏面上作用的剪应力; q_{\max} 表示破坏时最大的偏应力。

3.3 非饱和粘质砂土试验数据分析

1989 年 Escario 等^[29]在改进的直剪仪上对 3 种不同 Madrid Soils (包括 Madrid grey clay、Red silty clay、Madrid clay sand) 的抗剪强度进行了研究, 下面仅对 Madrid clay sand 的试验数据进行分析。该土样由 87% 的砂土、7% 的粉土以及 6% 的粘土组成, 其有效内摩擦角为 40° , 有效粘聚力为 39.5 kPa。图 6 是采用压力板仪测得脱湿过程的 SWCC 曲线的的数据, 其基质吸力范围从 0 到 5 000 kPa, 由四参数 VG 模型拟合得到的残余饱和度为 32.76%。

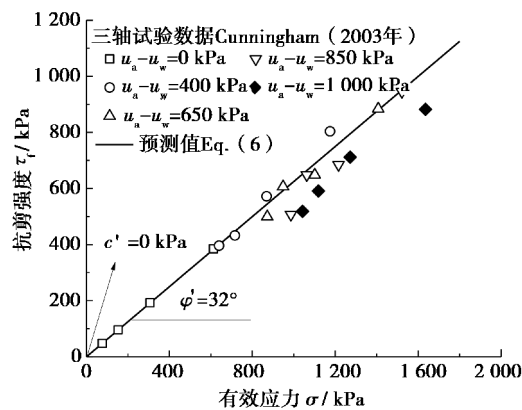


图5 不同基质吸力作用下统一有效应力公式对粉质粘土抗剪强度的预测值与试验抗剪强度值的比较

Fig.5 The comparison between the shear strength of silty clay based on the unified shear strength criteria and the measured data under different suction

在改进的直剪仪上测得了净法向应力为 120 kPa 和 600 kPa 时不同基质吸力条件下的抗剪强度。

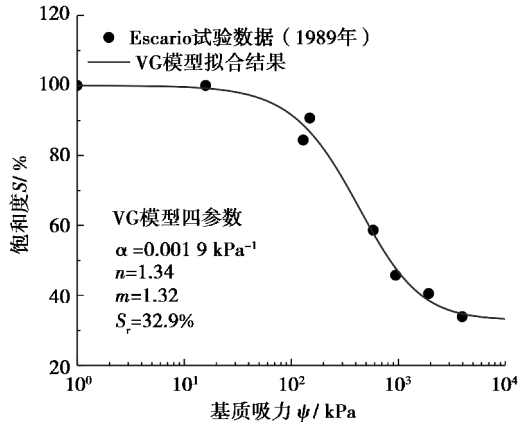


图6 采用四参数 VG 模型拟合得到的粘质砂土的 SWCC 曲线

Fig.6 The SWCC of clay sand fitted by 4 parameters VG model

按照统一的有效应力公式(6)对抗剪强度数据进行重分析,首先从原文所绘制的 Madrid clay sand 的基质吸力与试验抗剪强度关系图以及拟合之后的 SWCC 曲线中求得基质吸力对应的有效饱和度 S_e , 然后根据有效应力公式(4)计算出有效应力,从而得到有效应力与试验抗剪强度的关系如图 7 中的数据点所示。另外,基于饱和土有效应力原理计算得到的理论抗剪强度如图中直线所示。从图 7 中可以看出,抗剪强度试验数据点基本都位于理论抗剪强度预测曲线上,计算得到两者的线性相关系数为 $R^2=0.99$,那么可以认为采用统一的有效应力公式来预测该粘质砂土的抗剪强度是合理的,即有效应力决定土体的抗剪强度。

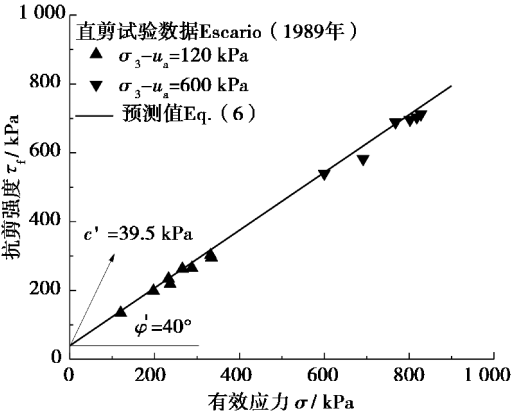


图7 不同净法向应力作用下统一有效应力公式对马德里粘质砂土抗剪强度的预测值与试验抗剪强度值的比较

Fig.7 The comparison between the shear strength of Madrid clay sand based on the unified shear strength criteria and the measured data under different net normal stress

3.4 非饱和灰质粘土试验数据分析

与前面 4 组控制基质吸力的剪切试验不同的是,Aqtash 等^[30]在 2015 年对干密度为 1.7 g/cm^3 (孔隙比为 0.55) 的灰质粘土(俗称制砖土)进行了常含水量的直剪试验。土样由 54% 的砂土、33% 的粉土、13% 的粘土以及少许草料混合而成,添加草料的目的是为了保持足够干燥的条件来减缓试样收缩开裂。完全饱和时该土样的体积含水量为 35.5%,对 3 个饱和样进行固结排水剪切试验得到了有效内摩擦角和有效粘聚力分别为 31.4° , 11.7 kPa,施加的净法向应力范围为 74.2 ~ 198.2 kPa。采用滤纸法测定了灰质粘土的 SWCC 曲线数据,体积分水量的范围从 5% 到 29%。图 8 是四参数 VG 模型对试验数据拟合的结果,可以得到灰质粘土的残余饱和度为 9.3%。为了研究含水量对结构强度的影响,在直剪仪上对 7 组(24 个)不同含水量的环刀样进行了不固结不排水的直剪试验,所施加的净法向应力范围从 66.8 kPa 到 510.7 kPa,剪切速率为 0.02 mm/s。

按照统一的有效应力公式(6)对抗剪强度数据进行重分析,首先从原文含水量剪切试验得到的含水量与试验抗剪强度对应关系以及拟合之后的 SWCC 曲线中求出不同含水量对应的基质吸力和有效饱和度 S_e ,然后利用式(4)求出各自的有效应力,得有效应力与试验抗剪强度的关系如图 9 中数据点所示,而采用饱和土有效应力原理计算得到的抗剪强度在图中用直线表示。从图中可以看出,试验值基本都落在理论预测线上,同时根据数理统

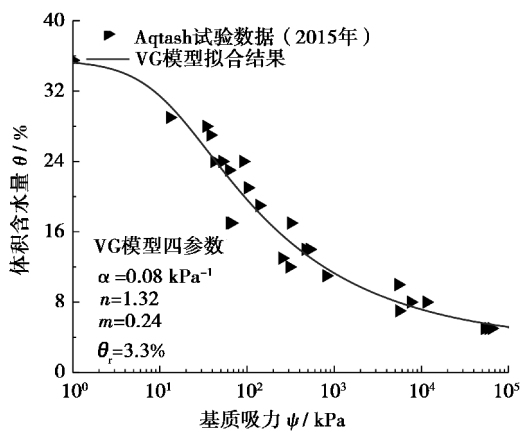


图 8 采用四参数 VG 模型拟合得到的灰质粘土的 SWCC 曲线

Fig.8 The SWCC of adobe soil fitted by 4 parameters VG model

计中相关性原理得到两者的线性相关系数为 $R^2=0.98$ 。重分析的结果表明,饱和与非饱和的灰质粘土符合相同的抗剪强度公式,抗剪强度参数 c' 和 φ' 也相同。换句话说,有效应力决定土的抗剪强度。

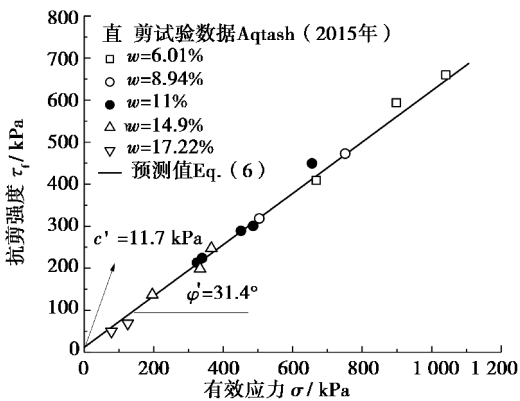


图 9 不同含水量时统一有效应力公式对灰质粘土抗剪强度的预测值与试验抗剪强度值的比较

Fig.9 The comparison between the shear strength of adobe soil based on the unified shear strength criteria and the measured data under different water content

4 结论

简要地概述了非饱和土有效应力原理的发展历程,分析比较了几种典型非饱和土有效应力公式的理论来源和适用性,最后引用了 4 种不同类型的非饱和和粘土试验数据,对采用连续介质力学分析方法得到的统一的有效应力强度公式进行了验证,得出了如下结论:

(1)采用连续介质力学理论所推导的非饱和土有效应力公式,揭示了非饱和土中有效应力的物理意义。从该公式对 4 种不同类型土样的强度进

行重分析的结果可以看出,统一的有效应力公式能够很好地将饱和土和非饱和土的有效应力公式统一起来,进而说明了有效应力决定土体的抗剪强度。

(2)对于残余含水量较小、基质吸力范围较大的特殊粘土,在残余阶段以前,统一的有效应力公式对其强度能够进行较好的预测,但是随着基质吸力的增加,理论抗剪强度预测值对试验值会有所高估。

(3)统一的有效应力公式不仅对控制基质吸力的非饱和土三轴试验结果能够进行较好的预测也能对于常含水量的三轴试验结果进行不错的预测。

(4)本文仅从强度的角度对统一的有效应力公式进行了验证,而从变形角度来分析该公式的有效性和适用性需要进一步的研究。

参考文献 (References)

[1] Terzaghi K. The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear [A]// Proceedings of the 1st international conference on soil mechanics and foundation engineering[C]. Cambridge, MA, USA: Harvard University Press Cambridge, 1936:54-56.

[2] Bishop A W. The effective stress principle[J]. Teknisk Ukeblad, 1959, 39: 859-863.

[3] Aitchison G D, Donald I B. Some preliminary studies of unsaturated soils [A]//Proc. 2nd ANZ Conf. SMFE, Technical Publications for the New Zealand Institution of Engineers[C]. Zealand: Wellington, 1956:192-199.

[4] Jennings J E. A revised effective stress law for use in the prediction of the behaviour of unsaturated soils [A]//Proceedings of Pore Pressure and Suction in Soils[C]. London: Butterworth, 1961: 26-30.

[5] Blight G E. A study of effective stresses for volume change [M]. Sydney: Butterworth &Company Limited, 1965.

[6] Khalili N, Khabbaz M H. A unique relationship of X for the determination of the shear strength of unsaturated soils[J]. Geotechnique, 1998, 48(5):681-687.

[7] 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, 7(1): 1-4. (Bao Chenggang. The stress-strain relationship and strength characteristic of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 7(1): 1-4. (in Chinese))

[8] Fredlund D G, Morgenstern N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1977, 103 (5): 447-466.

- [9] Jennings J E B, Burland J B. Limitations to the use of effective stresses in unsaturated soils [J]. *Geotechnique*, 1962, 12(2): 125-144.
- [10] Coleman J D. Stress-strain relations for partly saturated soils [J]. *Correspondence to Geotechnique*, 1962, 12(4): 348-350.
- [11] Vanapalli S K, Fredlund D G, Pufahl 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.
- [12] Wheeler S J, Sharma R S, Buisson M S R. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils [J]. *Geotechnique*, 2003, 53(1): 41-54.
- [13] Lu N. Is matric suction a stress variable? [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(7): 899-905.
- [14] Tarantino A. Direct measurement of soil water tension [A]//*Proceedings 3th International Conference on Unsaturated Soils* [C]. Brazil: Balkema Publishers, 2002: 1005-1017.
- [15] 陈正汉, 秦冰. 非饱和土的应力状态变量研究 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(1): 1-11. (Chen Zhenghan, Qin Bing. On stress state variables of unsaturated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(1): 1-11. (in Chinese))
- [16] Houlby G T. The work input to a granular material [J]. *Geotechnique*, 1979, 29(3): 354-358.
- [17] 赵成刚, 蔡国庆. 非饱和土广义有效应力原理 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(11): 3232-3236. (Zhao Cheng-gang, Cai Guoqing. Principle of generalized effective stress for unsaturated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(11): 3232-3236. (in Chinese))
- [18] Zhao C, Liu Z, Shi P, et al. Average soil skeleton stress for unsaturated soils and discussion on effective stress [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2015, 16(6): D4015006.
- [19] 邵龙潭. 孔隙介质力学分析方法及其在土力学中的应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 1996. (Shao Longtan. Fundamental theory of porous material mechanics and its application in soil mechanics [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 1996. (in Chinese))
- [20] Shao L T, Liu G, Guo X X. Uniform effective stress equation for soil mechanics [A]//*Delage P. ed. Proc. of the 18th ICSMGE* [C]. Paris: Presses des ponts, 2013: 1043-1046.
- [21] 邵龙潭, 郭晓霞. 有效应力新解 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2014. (Shao Longtan, Guo Xiaoxia. New explanation of the effective stress [M]. Beijing: China Waterpower Press, 2014. (in Chinese))
- [22] 邵龙潭. 土体有限元稳定分析与非饱和土力学基本理论研究中若干问题的探讨 [R]. 大连: 大连理工大学博士后研究报告, 2000. (Shao Longtan. Finite element stability analysis of soil and several problems in the research of the theory of unsaturated soil mechanics [R]. Dalian: Postdoctoral Research Report of Dalian University of Technology, 2000. (in Chinese))
- [23] Kim W S, Borden R H. Influence of soil type and stress state on predicting shear strength of unsaturated soils using the soil-water characteristic curve [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48(12): 1886-1900.
- [24] Sheng D, Zhou A, Fredlund D G. Shear strength criteria for unsaturated soils [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2011, 29(2): 145-159.
- [25] Shao L T, Zheng G F, Guo X X. Reanalysis on shear strength of unsaturated soils [A]//*Proceedings of the 6th ASIA-PACIFIC conference on unsaturated soils* [C]. London: Taylor & Francis Group, 2015: 467-472.
- [26] Miao L, Liu S, Lai Y. Research of soil-water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil [J]. *Engineering Geology*, 2002, 65(4): 261-267.
- [27] Ye W, Zhang Y, Chen B, et al. Shear strength of an unsaturated weakly expansive soil [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2010, 2(2): 155-161.
- [28] Cunningham M R, Ridley A M, Dineen K, et al. The mechanical behaviour of a reconstituted unsaturated silty clay [J]. *Geotechnique*, 2003, 53(2): 183-194.
- [29] Escario V, Juca J F T, Coppe M S. Strength and deformation of partly saturated soils [A]//*Proc. 12th ICSMFE* [C]. Rotterdam: A A Balkema, 1989: 43-46.
- [30] Aqtash U, Bandini P. Prediction of unsaturated shear strength of an adobe soil from the soil-water characteristic curve [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 98: 892-899.
- [31] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [32] 蒋坤, 夏才初, 丁文其, 等. 郑开下穿越工程非饱和土强度特性试验研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2009, 5(3): 485-489. (Jiang Kun, Xia Caichu, Ding Wenqi, et al. Experimental study on strength character of unsaturated soils of Zhenkai underpass project [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2009, 5(3): 485-489. (in Chinese))