

非饱和土的抗剪强度理论研究

王志玲, 丰土根

(河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:从孔隙水的存在状态出发, 围绕 Bishop 抗剪强度公式中存在的几个疑点展开讨论. 认为非饱和土中支配强度和变形的应力之所以不同, 是因为非饱和土中存在一种性质与有效应力不同的应力——内部应力, 它不传递, 仅影响土的塑性变形. 同时还对 Bishop, Fredlund 和卢肇钧提出的抗剪强度公式中的参数测试方法进行分析, 指出: 各种抗剪强度理论在概念上都是相同的, 其区别仅在于确定由吸力产生的那部分有效应力时采用的参数和测试方法不同.

关键词:非饱和土; 有效应力; 内部应力; 抗剪强度

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2002)04-0026-04

在非饱和土中, 因为吸力的存在, 使其力学性质远比饱和土复杂, 饱和土的有关理论不能直接应用; 因为对吸力作用效果的认识不清及吸力本身测试的困难, 使其理论研究仅停留在探索阶段. 如强度理论中最具代表性的 Bishop 抗剪强度公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + \chi s \tan \varphi' \quad (1)$$

$$s = u_a - u_w \quad (2)$$

式中: c' 为有效凝聚力; σ 为总应力; u_a 为孔隙气压力; φ' 为有效内摩擦角; χ 为参数 (对于饱和土, $\chi = 1$, 对于干土, $\chi = 0$); s 为吸力; u_w 为孔隙水压力. 该公式存在以下几个疑点: ① χ 值与饱和和路径有关, 脱水和吸水求得的 χ 值不同, 式 (1) 没有预测能力. ② χ 值与研究问题的性质有关, 对强度问题和变形问题 χ 值不同, 非饱和土中未必存在有效应力这一状态变量. ③ 浸水湿陷时, χ 为负值, 无法用有效应力原理解释. ④ 净应力 ($\sigma - u_a$) 与吸力 s 对土骨格构造所起的作用不同, 通过 χ 叠加两者在本质上是错误的, 即从微观上看吸力有吸引土粒子保持土骨格稳定的作用, 与此相反, 净应力即使是各向相等, 在土骨格中传递时有些土粒子接触点也会因受剪产生滑动. 其结果是: 在饱和土中有荷载作用时, 很容易塑性化, 在非饱和土中吸力大时, 反而土的弹性范围大. 因此, 比较两者的特性不能用有效应力. 本文的研究主要是为了弄清这些问题而展开的.

1 孔隙水存在状态与吸力的不同作用效果

在非饱和土中, 孔隙水有三种存在方式: ① 吸附

在土粒子表面的结合水, 因所占的含水量一般不变, 可视为土粒子的一部分; ② 包围在土粒子接触点周围形成弯液面的自由水 (以下称毛细水), 因在土孔隙内不是连续存在, 所以只影响两土粒子接触点间的作用力; ③ 充满土孔隙的自由水 (以下称重力水), 因在土孔隙内连续存在, 所以与土骨格、孔隙气一起分担传递作用于土界面上的垂直总应力. 向后雄二^[1]根据上述土中水分的存在方式将非饱和土分为三种不同的非饱和形态: ① 封闭非饱和形态. 孔隙水以结合水和重力水两种形式存在, 空气仅以气泡的形式存在于水中, 孔隙内只有水相通, 这时土的饱和度非常高. ② 悬垂水非饱和形态. 孔隙内的自由水已充分排出, 仅极少一部分以毛细水的形式保留下来, 孔隙内只有空气相通, 这时土的吸力非常大. ③ 过渡非饱和形态. 实际中的土孔隙有大有小, 大孔隙因吸力小而处于悬垂水非饱和形态, 小孔隙因吸力大而处于封闭非饱和形态.

在不同的非饱和形态中, 吸力有不同的作用效果. 为弄清它们的关系, 考察图 1 所示的三粒子土模型. 当孔隙内弯液面水相互独立 (即处于悬垂水非饱和形态) 时 (图 1(a)), 对 1 号土粒子, 由吸力引起的粒间压力 p_2, p_3 分别作用于该土粒子与其他两粒子接触面的垂直方向, 不传递, 所以仅有抑制土粒子滑动的作用 (土粒子的滑动遵从摩擦准则), 塑性变形是由土粒子间的滑动产生的, 因此这种情况下吸力有抑制塑性变形提高土骨格刚性的作用. 当孔隙内被水充满 (即处于封闭非饱和形态) 时 (如图 1(b)),

作者简介: 王志玲 (1962—), 女, 河南泌阳人, 工程师, 博士研究生, 主要从事土工织物研究.

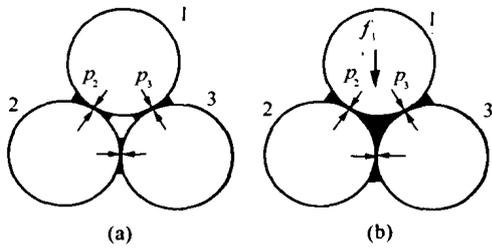


图1 吸力的不同作用效果(三粒子土模型)

由吸力引起的压缩力 f_1 作用于连接该土粒子左右弯面连线的垂直方向,该力能传递(p_2, p_3 就是作为 f_1 的分力而存在的),所以与有效应力有相同的作用:一方面引起土体的压缩;另一方面抵抗土体的变形提高土骨骼的刚性.毛细水作用面积上的吸力和重力水作用面积上的吸力分别被 Kohgo 称为内部应力和有效应力.内部应力任何情况下都有保持土骨骼稳定的作用,有效应力则不同,如图2所示的四粒子土模型,当孔隙内只含毛细水时,同三粒子土模型一样,吸力(内部应力)有抑制土粒子滑动保持土骨骼稳定的作用,当孔隙内充满重力水时,吸力(有效应力)使模型受剪处于不稳定的状态,这时会发生变形急剧增加的现象(即湿陷).

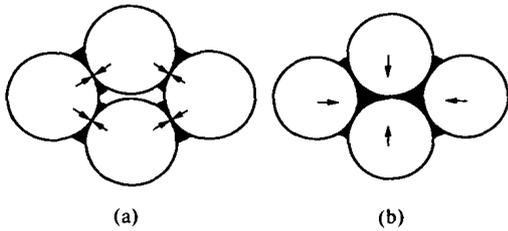


图2 吸力的不同作用效果(四粒子土模型)

根据上述分析可知,在悬垂水非饱和形态中,吸力的增加只引起内部应力的增加,有效应力不变.在封闭非饱和形态中,吸力的增加等于平均有效应力的增加,太沙基有效应力原理基本适用.在过渡非饱和形态中,吸力的增加既使有效应力增加,又使内部应力增加.研究非饱和土的强度和变形,实质上是研究如何定量确定由吸力产生的有效应力和内部应力.

2 非饱和土的有效应力原理

为了探明非饱和土中的有效应力原理,考察图3所示的处于过渡状态的假想的非饱和土块模型(设土粒子是半径相等的圆柱或圆球).图3(a)为土骨骼单元,土骨骼间的传递力 P' 的作用线(通过土粒子接触点)与相邻两土粒子中心连线组成的倾角为 θ ,如果 θ 小于土粒子间摩擦角 φ_u 则认为这个土骨骼单元对于 P' 是稳定的,即土粒子若是刚性的 P' 无论多大,土骨骼也不会发生滑移,土粒子若是弹性的, θ 随 P' 的增加而增加,当 $\theta > \varphi_u$ 时,土粒子发生

滑移,土骨骼屈服.图3(b)为并列4排图3(a)而成的非饱和土块模型,单元的第二列两侧均为空气,土粒子接触点存在毛细水,第四列两侧均为重力水,土粒子接触点不存在毛细水;第一、三列在空气一侧的土粒子接触点存在毛细水.定义

$$p = \frac{\sum P}{A} = p_T - u_a \quad (3)$$

式中: A 为土块模型的面积; p_T 为作用于土体界面上的平均总应力.

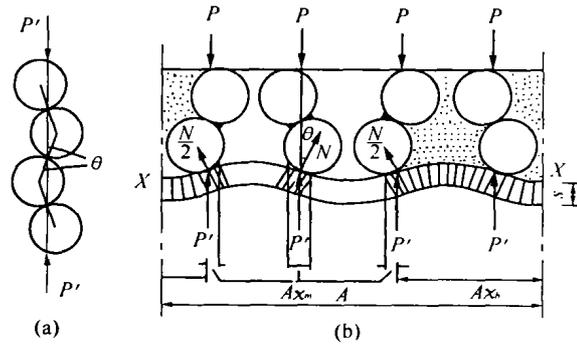


图3 假想的非饱和土块模型

取波形断面 $X-X$, 由于 $u_a \neq u_w$, 所以在毛细水和重力水作用的面积上存在吸力 $s = u_a - u_w$, 另外在断面 $X-X$ 上还有 P' 和 N (N 是为平衡孔隙气与毛细水的压力差而产生的). 根据图3(b)中各力的平衡关系可得

$$\sum P = \sum P' + \sum N' - A\chi_b s - A\chi_m s$$

$$\text{即} \quad \frac{\sum P' + \sum N'}{A} = p + \chi_b s + \chi_m s \quad (4)$$

这里 $N' = N \cos \theta$, $A\chi_b$ 及 $A\chi_m$ 分别为重力水和毛细水在波形断面 $X-X$ 中所占的面积向水平面上的投影. 由于 $\sum N' - A\chi_m s = 0$, 代入式(4)可得

$$p' = \frac{\sum P'}{A} = p + \chi_b s \quad (5)$$

式(4)表示抵抗土体变形的断面力,式(5)表示引起土体压缩的原动力,两式有时必须分开使用. 由于 p 和 u_a 是作用于整个土块面积 A 上的应力,吸力是作用于局部面积上的应力,所以在力学计算中必须将其换算成整个土块面积 A 上的平均应力, χ_b, χ_m 其实是一个换算系数,物理意义分别为单位面积土模型中重力水和毛细水所占的面积. 虽然式(4)是土模型断面上的平均应力,但非饱和土的抗剪强度一般不受式(4)控制而受式(5)控制,因为实际的非饱和土很多土粒子接触点不存在毛细水,土体往往会从这些点开始破坏,进而使破坏区逐渐扩大. 非饱和土一般与饱和土有不同的破坏形式,即容易发生渐进性破坏(像撕裂一张纸一样使破坏区由一点而逐渐

扩大),其主要原因之一就是内部应力的存在使土体内的抗剪强度分布不均匀.式(4)和式(5)是对 Bishop 有效应力公式的发展和完善,用它们可以很好地说明非饱和土的强度和变形特性.

3 非饱和土抗剪强度理论及参数测试方法

在非饱和土的抗剪强度理论中,有代表性的除 Bishop 的单变量强度理论(表达式为式(1))外,还有 Fredlund 的双变量强度理论和卢肇钧^[3]的吸附强度理论(由吸力产生的抗剪强度称吸附强度).后两者的强度表达式分别为

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\varphi' + s\tan\varphi_b \quad (6)$$

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\varphi' + mP_s\tan\varphi' \quad (7)$$

式中: φ_b 为与吸力有关的参数, P_s 为膨胀力; m 为试验参数.

比较式(1)、(6)、(7)可知: $\chi = \tan\varphi_b / \tan\varphi' = mP_s/s$,因此,各种非饱和土抗剪强度理论在概念上都是相同的,其不同仅在于确定由吸力产生的那部分有效应力(包括内部应力)时所采用的参数和试验方法不同.

在式(1)中, χ 是通过三轴压缩试验测出试样在饱和与非饱和状态下的抗剪强度反求出来的:

$$\chi = \frac{(\sigma - u_w)_F - (\sigma - u_a)_P}{(u_a - u_w)_P} \quad (8)$$

式中: $(\sigma - u_w)_F$ 为试样在饱和状态下剪坏时的平均有效应力; $(\sigma - u_a)_P$ 、 $(u_a - u_w)_P$ 分别为试样在非饱和状态下剪坏时的平均净应力和吸力.对不同的饱和度的非饱和试样,可求出不同的 χ ,再根据试样在破坏时的饱和度 S_r ,可绘制出 $\chi \sim S_r$ 的关系曲线. $\chi \sim S_r$ 关系曲线不是惟一的,非饱和试样获得的方法不同(脱水或吸水),得到的 $\chi \sim S_r$ 关系曲线也不同.

在式(6)中, φ_b 也是根据三轴压缩试验测定试样在饱和及非饱和状态下的抗剪强度求出的,本质上与确定 χ 的方法一致.由于吸力测试困难,Fredlund(1995)提出了用水分特征曲线(即饱和度或含水量与吸力的关系曲线)估算非饱和土的抗剪强度.为了求得 χ_b 和 χ_m ,轻部大藏^[2]提出了“最干燥水分曲线”的概念.所谓最干燥水分曲线是描述试样失去重力水状态时的水分特征曲线,它可以通过实测的脱水和吸水曲线获得.将饱和试样装入非饱和土试验用的三轴仪上,逐级施加空气压力,测定体积变化和排水量,即可得脱水曲线.再逐级减小空气压力测定吸水量和体积变化即可得吸水曲线.土在饱和状态下,因表面被水覆盖,当从外部作用的空气压力小于水的表面张力时,空气不能进入土孔隙内部,这时等

于进行饱和土的固结试验.空气开始进入土孔隙,内部使重力水排出需要的吸力叫空气入侵值 s_A ,重力水排出后,一部分自由水在土粒子接触点周围形成弯液面残留下来(结合水仍按原状保留),再增加空气压力毛细水被排出,弯液面逐渐缩小.要将毛细水全部排除空气压力需增至非常大,但试验中只能增至陶土板的进气值,外延 $s \sim S_r$ 曲线得渐近线 $S_r = S_{r0}$, S_{r0} 可认为是结合水所占的饱和度.相反地减小空气压力试样吸水,弯液面逐渐扩大,当孔隙内相邻的弯液面都扩大至相连时,毛细水即转为重力水.土孔隙具有由内径决定的毛管力,当空气压力小于这个值时,水会急剧地侵入土孔隙,毛细水转为重力水,这时对应的吸力叫水入侵值 s_w (这与向后雄二提出的空气入侵值和水入侵值的概念不同).从理论上讲,最干燥水分曲线,可用吸力从无穷大开始的实测吸水曲线表示.当吸力小于空气入侵值时,孔隙内的毛细水相连转为重力水的机会增加,最干燥的水分曲线由实测的脱水曲线向下偏离,轻部大藏提出在吸力介于空气入侵值和水入侵值之间时,最干燥水分曲线用吸水曲线在空气入侵值处的切线表示.有了最干燥水分曲线和 S_{r0} 可求得饱和度为 S_r (对应的吸力为 s)的试样毛细水和重力水各占的饱和度 S_{rb} 和 S_{rm} .原理很简单:由于 $S_r = S_{r0} + S_{rb} + S_{rm}$, S_{r0} 为土粒子的一部分,假定含重力水的孔隙不含毛细水, s 对应在最干燥水分曲线上的纵坐标 S_{rd} 即为饱和度为 S_r 的试样毛细水和结合水所占的饱和度,若将试样饱和度为 100% 时重力水所占的饱和度看作 1,则饱和度是 S_r 时重力水所占的饱和度为 $\frac{S_r - S_{rd}}{1 - S_{rd}}$,实际上饱和度为 100% 时重力水所占的饱和度为 $1 - S_{r0}$,所以可定义

$$S_{rb} = \frac{(1 - S_{r0})(S_r - S_{rd})}{1 - S_{rd}} \quad (9)$$

有了 S_{rb} 可求得

$$\begin{aligned} S_{rm} &= S_r - S_{r0} - S_{rb} \\ &= \frac{(1 - S_r)(S_{rd} - S_{r0})}{1 - S_{rd}} \end{aligned} \quad (10)$$

故

$$\chi_b = \frac{S_{rd}}{1 - S_{r0}} = \frac{S_r - S_{rd}}{1 - S_{rd}} \quad (11)$$

$$\chi_m = \frac{S_{rm}}{1 - S_{r0}} = \frac{(1 - S_r)(S_{rd} - S_{r0})}{(1 - S_{r0})(1 - S_{rd})} \quad (12)$$

图 4 为轻部大藏根据实测的脱水曲线和吸水曲线(人工制备的粒土试样)推求出的最干燥水分曲线.

在式(7)中,参数的测试避开了吸力这一测试繁杂的变量,通过测定土体膨胀力直接确定由吸力产生的那部分应力^[4].依据本文的理论观点,这种方

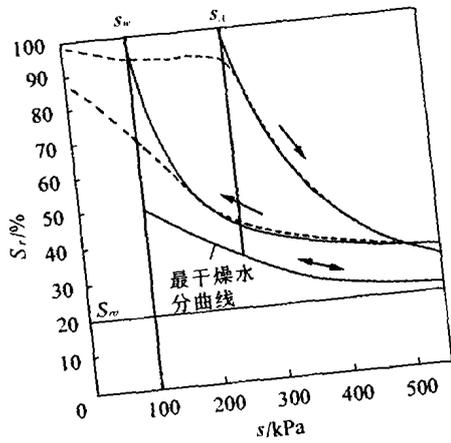


图4 最干燥水分曲线

法的概念非常清晰:非饱和土浸水饱和,吸力使有效应力减小,土体发生膨胀,为保持土体体积不变所要施加给土体的应力(即膨胀力 P_s)与由吸力产生的有效应力成比例,比例系数可根据试样在饱和及非饱和状态下的抗剪强度反求出。膨胀力的测定方法简便易行,能为现场工程师所接受。虽然这种方法的适用范围是有一定局限性的,首先是土类,只限于膨胀土;其次是饱和度,如前所述,当饱和度很高(即处于封闭非饱和形态)时,吸力的增加等于平均有效应力的增加,所以吸附强度与膨胀力成直线关系;当饱和度较高(即处于过渡非饱和形态)时吸力的增加一部分引起有效应力的增加,吸附强度与膨胀力的关系可用某种函数拟合(指数或双曲线等);当饱和度很低(即处于悬垂水非饱和形态)时,从理论上讲这种方法是不适用的。但我们从中可得到启迪:避开吸力,结合具体研究土体的性质找出合适的方法确定由吸力产生的有效应力,是使非饱和土的研究能为实际工程服务的一条有效发展途径。

4 总结与讨论

在非饱和土中,非结合水有两种不同的保存形式,所以吸力有两种不同的作用效果,应分为两种成分:有效应力与内部应力。对 Bishop 公式的质疑,多是因 Bishop 未将两者分开而致。如浸水湿陷是因

为非饱和土吸水后大量的毛细水转为重力水,内部应力消失、土的刚性变小而引起的;对于强度问题和变形问题, χ 值不同是因为内部应力是局部力,不传递,它只影响塑性变形,不影响抗剪强度(这一结论已被日本学者向后雄二^[1]用非饱和粉土和粘土与砂组成的混合土通过三轴压缩试验和吸力压缩试验所证明)。但从理论上讲,渐近性破坏不可能在较短的时间内发生,内部应力不影响工程实际中非饱和土开始破坏时的强度,但影响试验得出的非饱和土的强度峰值。以往根据失稳边坡反算出的非饱和土抗剪强度总是介于试验得出的强度峰值与残余强度之间就是一个很好的实例。两者似乎矛盾,笔者认为试验得出的非饱和土抗剪强度究竟是否受内部应力的影响,还需视试验条件而定。当剪切速率很慢时,内部应力可能不影响抗剪强度,当剪切速率较大而饱和度和又较低时,内部应力肯定会影响抗剪强度。剪切速率对非饱和土抗剪强度的影响比对饱和土的影响大。另外向后雄二的三轴压缩试验结果还表明,不同饱和度的试样,应力应变关系呈硬化型时,软化后的强度有向同一值收敛的倾向,应力应变关系呈软化型时,应变达 15% 后强度也有向同一值收敛的倾向。对非饱和试样的三轴压缩试验来说,若采用排气不排水或不排气不排水的试验方法,剪前和剪后的含水量是不变的,但饱和度可能会发生很大的变化,因此用含水量来反映吸力强度有时是不妥的。

参考文献:

- [1] 向后雄二. 不飽和土の三軸应力条件での力学的挙動に対する弾塑性論的解釋[J]. 农业土木学会论文集, 1996(12): 47~57.
- [2] 轻部大藏. 不飽和土の间隙水と土塊力学的挙動の关系について[J]. 土木学会论文集, 1996(3): 83~92.
- [3] 卢肇钧. 非饱和土抗剪强度的探索研究[J]. 中国铁道科学, 1999, 20(2): 10~25.
- [4] 向后雄二. 不飽和シルトおよび砂粘土混合土の三軸应力条件での体積变化およびせん断挙動[J]. 农业土木学会论文集, 1998(2): 35~47.

(收稿日期: 2001-05-24 编辑: 熊水斌)

(上接第 25 页)瞬变电磁法对导电层的分辨能力优于对高阻层的分辨能力。基岩地区含水层及污染后的地下水均呈低阻反映,因此,与其他电探方法相比,利用瞬变电磁法进行地下水勘查具有明显的优势。

参考文献:

- [1] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1992. 19.

- [2] 张保祥. 瞬变电磁法在地下水勘查中的应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2000.
- [3] 张保祥, 李福林. 海水入侵动态指标研究[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(1): 33~35.
- [4] David V, Mark T. Transient electromagnetic sounding groundwater[J]. Geophysics, 1986, 51(4): 995~1005.

(收稿日期: 2001-04-06 编辑: 张志)