

是正确的),从而得到 s_a' , 然后原文中将 s_d' 和 s_a' 都考虑到非饱和土的抗剪强度公式中去。但这两个分量与 T_s 之间不满足力的平行四边形分解法则, 从一个矢量中产生的两个分量不能满足平行四边形法则, 这样做的力学根据是什么?

(2) 关于土体的固体边界

原文认为: 土体只要存在固体边界, 由于与固体边界紧靠的第一层颗粒会同时受到来自于固体边界和来自于第二层颗粒的两个相反方向上的基质吸力 F_c 和收缩膜张力 T_s 的作用, 达到平衡, 从而在一二层颗粒间将不引起压应力, 依次类推, 土体内部的颗粒之间也就不会存在由此原因而引起的压应力, 所以原文中观点是: 存在固体边界时 F_c 和 T_s 对土颗粒间的有效应力无贡献。这种考虑实际上是不全面的, 下面进行详细的说明:

例如如图 1(a), 非饱和土装在一个方形铁箱中并填满箱中的所有体积, 此土体符合原文中的上述看法。我们对铁箱的每一面箱壁来进行受力分析, 存在于箱壁和与之紧靠的第一层颗粒间的环状水对箱壁的作用力 F_c 和 T_s , 将被与此箱壁垂直的四面箱壁对此箱壁的支持力平衡掉, 所以在箱壁和第一层颗粒之间将不会因为 F_c 和 T_s 而产生压应力, 依次类推, 土体内部颗粒之间也不会因为 F_c 和 T_s 而产生压应力, 可见 F_c 和 T_s 对土颗粒间的有效应力无贡献。再例如如图 1(b), 一块非饱和土体上覆一固体边界, 但此固体边界同时有绳索悬于更高处某些支点上, 则这样的土体在竖向向上也有可能符合原文的看法。我们同样对这块上覆的固体边界来进行受力分析, 存在于固体边界和第一层颗粒之间的环状水对固体边界的作用力 F_c 和 T_s , 可以被与此固体边界相连接的绳索对此固体边界的拉力平衡掉, 所以在箱壁和第一层颗粒之间也可以不会因为 F_c 和 T_s 而产生竖向的压应力, 依次类推, 土体内部颗粒之间也就不会因为 F_c 和 T_s 而产生竖向的压应力, 可见 F_c 和 T_s 对土颗粒之间竖向上的有效应力无贡献。但是对于图 1(c), 一块非饱和土夹在上下两个固体边界之间而放置, 且土体上面的固体边界是直接放在土体的顶面上的, 这块固体边界再无如图 1(a) 或图 1(b) 那样与之相连的垂直方向上的固体边界或起悬挂作用的绳索。这时候, 我们再来对这块上覆的固体边界进行受力分析, 存在于固体边界和第一层颗粒之间的环状水对固体边界的作用力 F_c 和 T_s , 只能由第一层颗粒对固体边界的支持力来平衡, 所以在固体边界和第一层颗粒之间就存在因为 F_c 和 T_s 而产生的竖向压应力, 依次类推, 土体内部颗粒之间也会因为 F_c 和 T_s 而产生竖向的

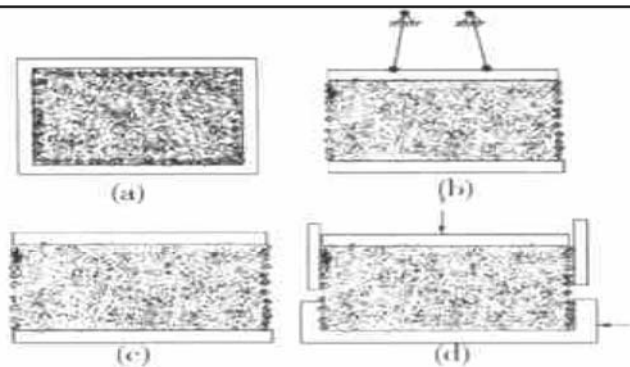


图1 分析简图

Fig. 1 Analysis sketch

压应力, 可见 F_c 和 T_s 对颗粒间竖向上的有效应力是有贡献的。而简单的直剪试验(应力控制式、应变控制式等直剪仪)的示意如图 1(d), 土体上覆固体边界是活塞, 通过活塞上面的钢珠和加压框架等设施向土体施加竖向应力 σ , 并在可动的下匣上作用一水平力, 来完成剪切试验。其实, 一般地来考虑, 在直剪试验装置的设计中, 设计人不会在上面固体边界(活塞)和下垫固体边界之间置入硬性支持物或将上面的固体边界(活塞等)用绳索等东西悬挂起来, 因为那样做的话, 试验时加于上覆固体边界上的竖向应力 σ 就会被支持物对上覆固体边界的支持力或绳索的拉力平衡掉而不会传递到土样上。可见, 直剪试验中的固体边界类似于图 1(c) 的情形, 所以 F_c 和 T_s 对土颗粒间的竖向有效应力是有贡献的。那么, 原文在用其建立的抗剪强度公式解释由直剪试验得到的粘土和砂性土的抗剪强度和基质吸力之间的关系时, 不计 s_m' (由 F_c 得来) 和 s_a' (由 T_s 得来) 之作用的做法, 如何理解?

以上愚见, 万望回执, 谢谢!

参考文献:

- [1] 温特科恩 H F, 方晓阳. 基础工程手册[M]. 钱鸿缙, 叶书麟. 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [2] 中华人民共和国水利部. 土工实验操作规程[M]. 北京: 中国工业出版社, 1962.
- [3] 弗雷德隆德 D G, 拉哈尔佐 H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [4] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.

对“从粒间吸力特性再认识非饱和土抗剪强度理论”讨论的答复 及关于“低含水率非饱和土的有效应力及抗剪强度”的讨论

汤连生

(中山大学地球与环境科学学院地球科学系, 岩土工程研究所, 广东 广州 510275)

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)01-0125-02

作者简介: 汤连生(1963-), 男, 江西萍乡人, 博士, 副教授, 毕业于中国科学院地质与地球物理研究所地质工程专业。中山大学地球与环境科学学院岩土工程研究所所长。主要从事地质工程、岩土工程、水-岩土相互作用力学方面的教研工作。

非常感谢慕青松博士对“从粒间吸力特性再认识非饱和土抗剪强度理论”(以下简称文A)的讨论和关注, 通过此讨论

收稿日期: 2001-09-29

以及进一步的深入分析,笔者更加清晰地认识了一些问题及概念,也更正了一些错误。现答复如下:

(1) 关于力的矢量运算法则

正如讨论指出的那样,在文A图2(a)中A、B两颗粒间的水体与B颗粒(或A颗粒)的接触线(以下简称接触线)上的每一点上的力的方向都不一样,按矢量来看,是一个圆形线上的分布力,这是对的。但这与原文A及其分析并不矛盾。

因为,该矢量表面张力 T_s 是单位线长度的力,其单位为N/m。现先将文A图2(a)中A、B两土颗粒球心的连线简称为连线。文A中主要要运用到的或要分析的正是 T_s 。在连线(相当于图2的水平线)方向的分量的合力(此力相当于颗粒间接触平面上的正应力)和垂直此连线(相当于图2的铅垂线)方向的分量的合力。(至于在收缩膜与土颗粒接触点的切线方向上的分量,后面讨论)。求取这两个合力(单位为N)有两种等效的方法:①首先将 T_s (N/m)分解为水平分量(N/m)和垂直分量(N/m),然后,将分量乘以接触线长度(m)而得到。②首先将 T_s (N/m)乘以接触线长度(m)得到一个 T_s (N),然后再分解为水平分量(N)和垂直分量(N),这两个分量即为所要求的两个合力(N)。文A做法也可以这样理解,图2实际上是沿过A、B两颗粒球心连线(以下简称连线)的任意断面图,在此断面上进行力的分析,而后对所有断面面积分累计。

(2) 关于在收缩膜与土颗粒接触点的切线方向上的分量 s_d'

按讨论的分析,应当采用土颗粒间接触点的(而不是收缩膜与土颗粒接触点的)切线方向上的分量作为 s_d' ,如此才服从力的运算法则。然而,根据分析,笔者有了新的认识:在如文A图2(a)A、B两颗粒连线上、下两部分均存在(若不考虑重力)大小相等、方向相反的 s_d' ,这样在A、B颗粒间并不需要考虑所谓的牵引力 s_d' 了,即在粒间吸力(对颗粒间相互作用有贡献的吸力)中并不存在文A中的牵引力 s_d' 。

(3) 关于非饱和土体边界效应、基质吸力的力学作用

很感谢讨论中对非饱和土体边界效应进行的详尽分析,分析在逻辑上是正确的。

但是,正如文献[1~2]所阐述的那样,文A中的基质吸力 F_s 仍仅仅是表示土吸水的能力(水势),但此吸力并不表示土颗粒之间的吸力,在粒间吸力中并不存在文A中这个所谓的有效基质吸力 s_m' ,因此在非饱和土抗剪强度中也就不存在吸力 s_m' 的作用了。对此的认识,笔者原先一会儿似清晰,一会又感困惑,此次通过慕博士讨论的启示,笔者很清晰了。

文A中存在几处需更正的错误(文A的基本结论及思想仍是正确的),现更正如下:①文A中P414页中第一栏倒数第11~12行的“有固体边界时,收缩膜对土吸力的贡献只有牵引力 s_d' , s_d' 与 $(u_a - u_w)$ 的关系如图3,4所示。”应改为“无固体边界时,收缩膜对土吸力有贡献的湿吸力 s_a' 与 $(u_a - u_w)$ 的关系如图3,4所示。”②文A中P414页图3,4中及图名中所出现的牵引力(s_d')均一一改为湿吸力(s_a')。③文A中P416页中公式(32)等号右边最后一项“ s_d' ”改为“ s_a' ”。④文A中原有的牵引力 s_d' 和有效基质吸力 s_m' 均当它不存在。

笔者同时学习了发表于《岩土工程学报》2001年第4期的

“低含水率非饱和土的有效应力及抗剪强度”一文(以下简称文B),觉得文B中有几个相关问题值得讨论。

非饱和土中的吸力问题引起了各界学者的关注并有了新的认识,笔者感到非常高兴,也很有感触,并觉得对非饱和土中吸力的认识是非饱和土有效应力原理及强度理论研究的基础,这其中还有很长的路要走,应该受到岩土力学界的全面重视。但是长期以来对非饱和土中的粒间吸力与基质吸力的关系存在着错误的理解。显然,将基质吸力(或毛细压力)作为土颗粒之间(除真内聚力)所有吸力的总和,直接套用饱和土的有效应力公式来获得非饱和土的有效应力公式是错误的^[1,2]。因此,在理论上,对非饱和土中颗粒之间所有的吸力进行深入细致的研究对非饱和土土力学的发展具有重要意义。

(1) 关于毛细(负)压力的力学意义

文B中公式(3)的表面张力 F_1 和公式(4)附加内压力 F_2 ,实际上是两个平衡力, $F_1 = F_2$ 的等式实际就是求取毛细水负压或基质吸力的基本公式^[3~5],即由公式(3),(4)有 $u_a - u_w = 2\sigma/r_2$,式中的符号同文B。

那么,将两个相平衡的力 F_1 、 F_2 相加而得到的粒间总吸力或粒间压力 F 是否有什么物理意义?这如何理解?本人认为文B的这种做法与Bishop、Fredlund等以往研究将毛细压力完全当成粒间吸力的基本思路是完全相同的,也与文A中将所谓的牵引力 s_d' 和有效基质吸力 s_m' 当成土颗粒粒间吸力的一部分的做法是雷同的。但是,笔者通过深入的思考和分析,认为这种做法是不正确的。

(2) 关于几个假定

①对接触角 $\theta = 0$ 的假定既不合理也没必要。笔者认为,既然文B中叙述到“即使 θ 不为零,也不影响主要结论的得到”,那又为什么要假定 $\theta = 0$ 呢?更何况 θ 一般来说是一锐角,其大小与固体和液体的性质是有关的^[4]。如何理解在原文B中一定要假定 $\theta = 0$?②文B中近似地假定 s (由文B中的 F 或 N 引起的单位面积上的压应力)是孔隙率 n 的线性函数是不合理的。否则,不就由孔隙率 n 可以很简单地得到 s (当然真是这样就好了)。实际上, s 与孔隙率 n 的关系应是一个复杂的非线性函数关系,它与孔隙中的水与颗粒间的接触状态(接触角 θ 和饱和角 φ)和水的化学性质直接相关^[1,2]。请问,这个假定对文B最后结论的影响如何?

参考文献:

- [1] 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, 19(1): 83~88.
- [2] 汤连生. 结构吸力及非饱和土的总有效应力原理探讨[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39(6): 95~100.
- [3] 罗戴 A A. 土壤水[M]. 巴逢辰,等译. 北京: 科学出版社, 1964. 41~43.
- [4] 姚贤良,程云生. 土壤物理学[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 148~157.
- [5] 贝尔 J. 毛细压力和滞留水曲线[A]. 埃弗雷特 L G,等. 包气带水勘察和研究方法[M]. 曲焕林,译. 北京: 地质出版社, 1986. 24~33.