

非饱和膨胀土结构性强度的研究

徐永福

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 提出了非饱和膨胀土的结构性凝聚力和结构性内摩擦角的概念 ,给出了结构性强度的确定方法 ,研究了非饱和膨胀土的结构性强度与含水量和吸力的相关公式 . 研究表明 ,非饱和膨胀土的结构性强度是结构性凝聚力与有效凝聚力的差 ,结构性强度的对数与基质吸力的对数呈直线相关 .

关键词 膨胀土 ;非饱和土 ;结构性 ;内摩擦角 ;凝聚力 ;强度

中图分类号 TU443

膨胀土的强度直接影响到膨胀土边坡的稳定性和地基的承载力 ,因此膨胀土的强度问题一直是膨胀土研究中的一个重点 . 膨胀土的强度受到许多因素的影响 ,强度公式可以表示为下列复杂的函数形式 :

$$\tau_f = F(\sigma' , c' , \sigma_c , c , \varphi' , \varphi^b , H , T , \epsilon , \dot{\epsilon} , \dot{\sigma} , S , S_t) \tag{1}$$

式中 : τ_f ——抗剪强度 ; F ——强度函数 ; σ' ——有效法向应力 ; c' ——凝聚力 ; σ_c ——固结压力 ; c ——矿物成分 ; φ' ——内摩擦角 ; φ^b ——强度随吸力变化的摩擦角 ; H ——应力历史 ; T ——温度 ; ϵ ——应变 ; $\dot{\epsilon}$ ——应变速率 ; $\dot{\sigma}$ ——应力速率 ; S ——饱和度 ; S_t ——结构参数 . 强度函数的前几项对强度的影响已有许多研究成果 ,本文主要研究膨胀土的结构模型对强度的影响 ,以提出结构性强度的计算方法 ,并研究吸力与结构性强度的相关关系 .

1 结构性凝聚力和结构性内摩擦角

饱和土的强度由凝聚力和土粒间的摩擦力两部分组成 . 在工程实践中 ,由于测试手段的限制 ,处理原状非饱和膨胀土的强度问题往往像对待饱和土的强度一样 ,根据摩尔-库仑强度理论得到类似于饱和土的凝聚力和内摩擦角 . 这个凝聚力和内摩擦角是变化的 . 对应于特定的土体结构 ,凝聚力和内摩擦角体现土体结构对强度的贡献 . 因此 ,我们把原状非饱和膨胀土的凝聚力称为结构性凝聚力 ,原状非饱和膨胀土的内摩擦角叫做结构性内摩擦角 . 根据摩尔-库仑强度理论 ,非饱和和原状膨胀土的强度公式可以写为

$$\tau_f = c_{st} + (\sigma - u_a) \tan \varphi_{st} \tag{2}$$

式中 : c_{st} ——结构性凝聚力 ; φ_{st} ——结构性内摩擦角 .

安康三类膨胀土的结构性凝聚力和结构性内摩擦角与起始含水量的相关关系如图 1 所示 ,相关公式为

$$\lg c_{st} = - a_1 w_0 + b_1 \tag{3}$$
$$\lg \varphi_{st} = - a_2 w_0 + b_2 \tag{4}$$

式中 a_1 , b_1 , a_2 , b_2 为统计常数 ,可称之为结构性系数 . 对安康三类膨胀土而言 ,参数 a_1 和 b_1 与膨胀土的矿物成分有关 ,含蒙脱石矿物的膨胀土的参数 a_1 和 b_1 较小 ,而含伊利石的膨胀土的参数 a_1 和 b_1 较大(表 1) . 对含同种膨胀矿物成分的膨胀土而言 , a_1 保持不变 , b_1 随膨胀等级的降低而减小 ; a_2 和 b_2 与膨胀矿物成分无关 ,随着膨胀等级的降低而减小 . a_2 和 b_2 随膨胀等级的降低而减小说明 ,膨胀性越强 ,膨胀土的结构对强度的贡献越大 . 因此 ,相对于普通粘性土而言 ,膨胀土是一种结构性粘土 ,膨胀土以其特定的结构区别于其他粘性土^[1] .

从表 1 和图 1 中可以看出 ,膨胀性不很强的膨胀土 ,结构性系数 a_2 较小 ,结构性内摩擦角的变化不很明

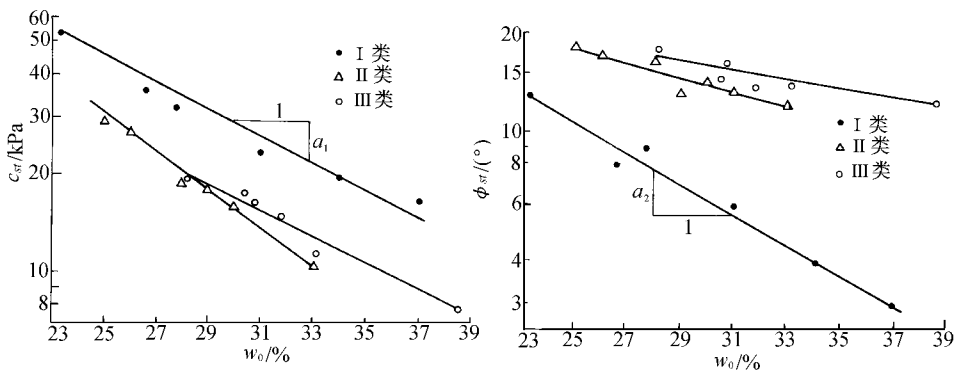


图 1 安康膨胀土结构性凝聚力和结构内摩擦角与含水量的相关关系

Fig.1 The relation of structural cohesion and structural inner frictional angle and water content
显 ,与饱和膨胀土的内摩擦角接近.因此 ,对于膨胀性不很强的膨胀土 ,可以假定下式成立 :

$$\varphi_{st} = \varphi'$$
 (5)

式中 φ' 为饱和膨胀土的有效内摩擦角.在这个假定下 ,用摩尔-库仑强度理论得到的非饱和膨胀土的结构性凝聚力包含了土体结构对内摩擦角的贡献.这时 ,非饱和膨胀土的强度公式为

$$\tau_f = c_{st} + (\sigma - u_a) \tan \varphi''$$
 (6)

宁夏膨胀土的膨胀等级是弱-中等膨胀性* .根据式(4)的假定 ,得到了宁夏膨胀土的结构性凝聚力(表 2).结构性凝聚力与含水量和吸力的相关公式(图 2)为

$$\lg c_{st} = -0.03w_0 + 2.5$$
 (7)

$$\lg c_{st} = 0.26 \lg u_s + 1.3$$
 (8)

式中 : w_0 ——初始含水量 ; u_s ——基质吸力.

表 1 膨胀等级对结构性系数的影响

Table 1 The influence of expansion degree on structural strength parameters

膨胀等级		a_1	b_1	a_2	b_2	主要矿物成分
I	强	0.04	2.71	0.040	2.02	蒙脱石
II	中	0.05	2.73	0.020	1.76	伊利石
III	弱	0.04	2.44	0.015	1.65	蒙脱石

表 2 宁夏膨胀土的结构性凝聚力

Table 2 The structural cohesion of Ningxia expansive soil

起始含水量 $w_0/\%$	基质吸力 u_s/kPa	结构性凝聚力 c_{st}/kPa	结构性强度 τ_{st}/kPa
25.7	40	54	18
24.1	83	64	28
22.2	102	66	30
20.3	208	80	44
16.1	300	92	56
15.3	396	106	70

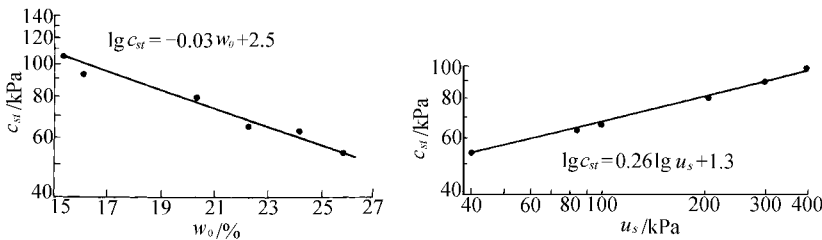


图 2 宁夏膨胀土的结构性凝聚力与含水量和吸力的相关关系

Fig.2 The relation among structural cohesion and water content and matrix suction

* 殷宗泽 ,郭志平 ,姜朴等.宁夏盐环定扬黄工程总干渠膨胀土问题的研究报告.河海大学 ,1996

2 结构性强度

非饱和土的强度由以下4部分组成 (a)凝聚力 (b)土粒间的摩擦力 (c)溶质吸力的贡献 (d)基质吸力的贡献. 非饱和土的溶质吸力与孔隙水溶液的离子浓度成正比. 普通非饱和土中的孔隙水溶液的离子浓度很小, 因此溶质吸力也很小, 可忽略不计. 膨胀土中孔隙水溶液的离子浓度很大, 溶质吸力也很大, 相对于基质吸力而言, 不能忽略. 膨胀土中孔隙水溶液的离子浓度很难测量, 要确定溶质吸力很困难. Richards* 的研究表明, 溶质吸力恒定, 围压恒定的条件下, 单独改变孔隙气压能引起黑棉土(膨胀土)的体积变化. 因此, 溶质吸力不是一个独立的应力状态变量, 要确定溶质吸力对膨胀土的强度的贡献是很难的.

土体中只有通过土粒间的接触点才能传递有效法向应力和剪应力. 也就是说, 土粒间的接触点直接影响了土体的强度. 对于饱和土而言, 土体的强度与土粒间的接触点数成正比. 非饱和膨胀土的强度除了与土粒间的接触点数有关外, 还与土粒间接触点的特性、接触点处的孔隙水面积的大小和孔隙水表面形状, 以及孔隙水溶液中的离子浓度等因素有关. 孔隙水面积的大小和孔隙水表面形状直接取决于土粒间接触点的特性, 而土粒间接触点的特性反过来又受到孔隙水面积和孔隙水溶液中的离子浓度的影响. 因此, 非饱和膨胀土的土粒间接触点的特性体现了基质吸力和溶质吸力对强度的贡献. 如果把土粒间接触点的特性对强度的贡献称为结构性强度, 那么结构性强度包含了基质吸力和溶质吸力对强度的贡献. 这样, 就把确定溶质吸力对强度的贡献转化为确定非饱和膨胀土的结构性强度了.

非饱和膨胀土的结构性强度是膨胀土的溶质吸力和基质吸力对强度贡献的总和, 因此, 非饱和膨胀土的强度公式可以表示为

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + \tau_{st} \tag{9}$$

比较式(5)和(8), 得

$$\tau_{st} = c_{st} - c' \tag{10}$$

式中: τ_{st} ——结构性强度; c_{st} ——结构性凝聚力; c' ——饱和膨胀土的凝聚力.

宁夏膨胀土的结构性强度可以用式(9)来计算, 宁夏饱和膨胀土的凝聚力 $c' = 36 \text{ kPa}$. 宁夏膨胀土的结构性强度的计算结果列于表2中. 分析结构性强度与基质吸力的相关性, 可以得到两者的相关公式(图3), 即

$$\lg \tau_{st} = 0.59 \lg u_s + 0.31 \tag{11}$$

笔者根据非饱和膨胀土微结构的分形模型导出了非饱和膨胀土的结构性强度公式^[2]

$$\tau_f = \tan \varphi' k^n u_s^{mn+1} \tag{12}$$

式中: φ' ——饱和膨胀土的内摩擦角; k ——水分特征曲线的斜率; n ——结构参数; $m = -(D+1)$, D 为孔隙分布的分维. 结构性强度的理论公式(式(12))得到了宁夏非饱和膨胀土三轴试验结果的证实. 宁夏非饱和膨胀土, $\varphi' = 25^\circ$, $k = 0.081$, $n = 0.162$, $D = 2.67$, $m = -3.65$.

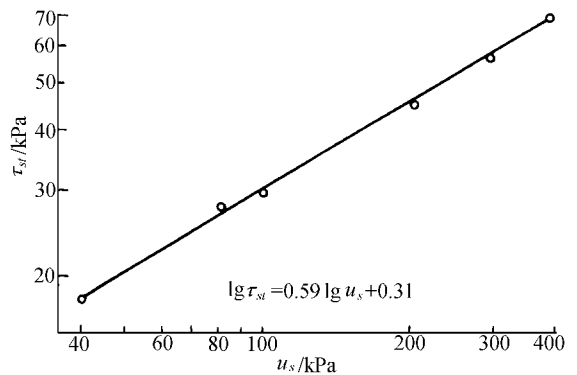


图3 结构强度与吸力的相关关系

Fig. 3 The relation of structural strength and matrix suction

3 讨论与结论

本文提出结构性凝聚力和结构性内摩擦角的概念以及结构性强度的确定方法, 是从工程实践出发而为工程实践服务的. 研究非饱和膨胀土的结构性强度有以下两种意义:

a. 区别于饱和膨胀土的凝聚力和内摩擦角, 突出膨胀土结构的重要性. 在工程实践中, 我们常发现这样一种现象, 同一地区的同种膨胀土的凝聚力和内摩擦角之间有很大的差别. 根据饱和膨胀土的凝聚力和内摩擦角的含义无法解释这种现象, 而用结构性凝聚力和结构性内摩擦角的定义就可以解释这种现象. 结构性凝

* Richards B G, Peter P, Martin R. The determination of volume change properties in expansive soil. 5th Int Conf on Exp Soils, 1984, 179 ~ 186

聚力和结构性内摩擦角与土体结构有关,并不是一个常量.因此,只有在工程实践中才能更好地理解结构性凝聚力 and 结构性内摩擦角的含义,也才能更好地认识到定义结构性凝聚力 and 结构内摩擦角的重要意义.

b. 便于确定非饱和膨胀土的结构性凝聚力 and 结构性内摩擦角及其抗剪强度.式(2)和(3)可以指导确定某地区的不同含水量的非饱和膨胀土的结构性凝聚力 and 结构性内摩擦角.对某一地区的膨胀土,我们只要得到类似于式(2)和(3)的经验公式,就可以得到该地区的各种含水量的非饱和膨胀土的结构性凝聚力 and 结构性内摩擦角,并可用式(1)得到各种含水量的土样在不同压力作用下的抗剪强度.

参 考 文 献

1 徐永福 孙婉莹 吴正根.我国膨胀土的分形结构的研究.河海大学学报,1997 25(1):18~23
2 徐永福 陈冠军 殷宗泽.非饱和膨胀土强度的分形特征.工程力学,1998(2)

Structural Strength of Unsaturated Expansive Soils

Xu Yongfu

(College of Civil Engineering ,Hohai Univ. ,Nanjing 210098)

Abstract The concept of structural cohesion and structural inner frictional angle ,and the method of determination of structural strength are put forward. The relationships between the structural strength and the initial water content and matrix suction of unsaturated expansive soils are studied as well. It is shown that the structural strength is the difference between the structural cohesion and the effective cohesion ,and there is a linear relation ship between the logarithm of structural strength and the logarithm of matrix suction.

Key words expansive soil ;unsaturated soil ;structure ;inner frictional angle ;cohesion ;strength

本刊加入万方数据(ChinaInfo)系统科技期刊群

为了实现科技期刊编辑、出版发行工作的电子化,推进科技信息交流的网络化进程,我刊现已入网“万方数据(ChinaInfo)系统科技期刊群”,所以,向本刊投稿并录用的稿件文章,将一律由编辑部统一纳入万方数据系统,进入因特网提供信息服务.凡有不同意者,请另投它刊.本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬,不再另付.

万方数据系统科技期刊群是国家“九五”重点科技攻关项目,截止 1998 年底,已有 200 种期刊全文上网(网址: <http://www.chinainfo.gov.cn/periodical>),将在近年内增至 1000 种科技期刊.本刊全文内容按照统一格式制作编入万方数据系统,读者可上因特网进入万方数据系统免费(1 年后开始酌情收费)查询检索本刊内容,也欢迎各界朋友通过万方数据系统向我刊提出宝贵意见、建议,或征订本刊.

《河海大学学报》编辑部
1999 年 3 月