

膨胀土的强度和变形特性研究

A study on strength and deformation of expansive soils

韩华强, 陈生水
(南京水利科学研究所 岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

关键词: 非饱和和膨胀土; 强度; 变形; 干湿循环; 饱和度

中图分类号: TU 471 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2004)03-0422-03

作者简介: 韩华强(1978-), 男, 河南郾城人, 岩土工程专业硕士。

0 前言*

膨胀土是以蒙脱石或蒙脱石-伊利石为主要矿物成分的高塑性黏土, 黏粒含量高, 自由膨胀率大于等于 40%; 主要由蒙脱石、伊利石类强亲水矿物组成; 土体含水量增加, 其体积发生膨胀并产生膨胀力, 土体失水时, 其体积收缩并形成收缩裂缝; 土体胀缩变形可随环境湿热变化往复发生, 导致其强度衰减; 属于液限高于 40% 的高液限黏土。多年来, 由于人们对膨胀土上述特性特别是干湿循环导致强度衰减^[8]的认识不足或处理不当, 导致了大量以膨胀土作为基础的构筑物或由膨胀土组成的构筑物发生破坏, 损失巨大^[1]。为此, 国内外许多科研工作者基于 Mohr-Coulomb 准则对膨胀土的强度特性进行研究, 取得了许多重要成果^[4,5]。但这些研究大多要借助于较为复杂的专门仪器进行, 特别是非饱和和膨胀土吸力测定技术要求较高, 尽管这些研究工作对进一步认识非饱和和膨胀土的强度和变形机理十分必要, 但由于目前国内大多数科研和设计单位尚不具备相应的研究条件, 从而使得这些研究成果还难以在实际工程中推广应用。本文试图借助常规土工试验仪器, 以饱和度和干湿循环次数以及外力约束作为变量来研究非饱和和膨胀土的强度和变形特性, 特别是非饱和和膨胀土在干湿循环情况下强度和变形特性的变化规律, 以期使其研究更符合实际, 更易于推广应用。

1 膨胀土的直接剪切试验

本试验所用膨胀土的基本物理力学性质见表 1。

表 1 试样的基本物理力学性质

Table 1 Basic physico-mechanical properties of expansive soils

液限	塑限	塑性指数 I_p	自由膨胀率 F_s	矿物成分
63%	33.2%	27.2	69%~73%	蒙脱石

试验按《土工试验规程》进行, 为不排水直剪试验。为便于制样, 试样干密度采用 1.4 g/cm^3 , 分别制成初始饱和度为 80%, 85%, 90% 和 95% 的击实试样。试样制

备后, 采用抽气法使试样饱和, 然后将试样置于恒温恒湿环境中风干脱水至试验要求的饱和度。为使试样表里水分尽可能一致, 还需将试样置于密封容器内静置 24 小时以上, 以使试样水分平衡。试样风干达到要求的饱和度即为一次干湿循环, 对一次干湿循环后的试样再抽气饱和和再风干脱水即为二次干湿循环。为控制试样在干湿循环过程中干密度尽可能保持不变, 制备试样的体积为 97.6 cm^3 (直径 7.05 cm、高 2.5 cm), 抽气饱和过程中, 用试样夹将试样夹紧, 当试样完成干湿循环后, 用体积为 60 cm^3 的环刀切取标准试样进行试验。需要说明的是, 试样失水时体积将发生收缩, 但从试样干密度和体积变化的关系式 $\Delta\rho_d = -0.014\Delta V$ 可看出, 试样体积的较小变化对其干密度影响很小。本试验中, 我们发现, 当试样的饱和度大于 85% 时, 试样失水收缩对其干密度几乎没影响, 当试样的饱和度为 80% 时, 试样失水收缩后, 干密度从 1.40 g/cm^3 增加到 1.42 g/cm^3 。

试验分别得出了无干湿循环、一次干湿循环和二次干湿循环情况下非饱和和膨胀土抗剪强度和饱和度的关系, 如图 1 所示。需要说明的是, 二次循环试验一组试样在切取过程中扰动较大, 测出的强度值明显偏低, 未予采用。为了便于比较, 我们将无干湿循环、一次干湿循环和二次干湿循环情况下非饱和和膨胀土黏聚力 c 和内摩擦角 φ 与饱和度的关系综合绘于图 2 中。

从图中可以看出: ①非饱和和膨胀土随着饱和度的提高, 其抗剪强度相应减小, 这与基质吸力与含水量成反比的规律一致; ②试验得出的干湿循环对非饱和和膨胀土抗剪强度的影响与其起始饱和度相关, 当起始饱和度和度较高时, 经干湿循环后, 非饱和和膨胀土的抗剪强度将明显降低, 其中黏聚力 c 的降低要明显大于内摩擦角 φ 的降低; 当起始饱和度较低时, 一次干湿循环后, 非饱和和膨胀土的抗剪强度将反而有所提高。

我们认为, 一次干湿循环后, 试验得出的起始饱和度和度较低的非饱和和膨胀土的抗剪强度将反而有所提高的

* 收稿日期: 2004-01-31

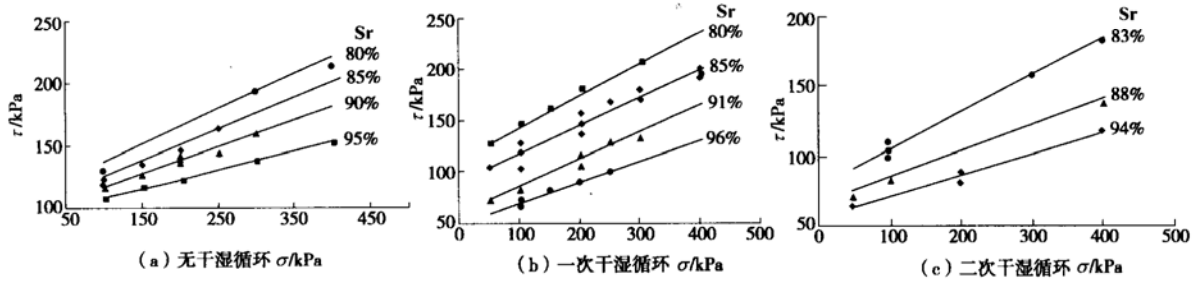


图 1 抗剪强度和饱和度的关系曲线

Fig. 1 Variation of shear strength of soils with different saturation levels and different saturation degrees

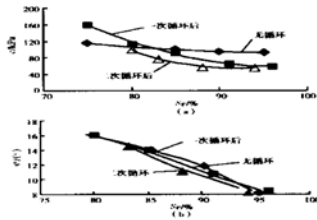


图 2 干湿循环下凝聚力和内摩擦角与饱和度的关系曲线

Fig. 2 Relation between c , φ and S_r under different cycles

主要原因是: ①起始饱和度较低的非饱和和膨胀土抽气饱和时膨胀性强, 所产生的膨胀力大, 由于环刀的限制, 试样不能自由膨胀, 这相当于给试样施加了一个与膨胀力大小相等的约束力, 而以有的研究资料表明, 限制膨胀土自由膨胀的约束力对其抗剪强度具有明显的影响。表 2 所示的数据充分说明了外力约束能明显提高膨胀土的抗剪强度; ②起始饱和度较低时膨胀土试样的收缩也较大, 试样的干密度相应有所提高, 从而使得其抗剪强度也增大。

因此, 非饱和膨胀土的抗剪强度应由以下几部分组成: ①黏聚力; ②土粒间的摩擦力; ③吸力; ④约束外力的贡献, 后两部分应属于广义吸力的范畴。如果用饱和度来代替吸力, 那么考虑在外力和干湿循环作用下非饱和膨胀土抗剪强度的总应力表达式应为:

$$\tau_f = c(S_r, i, F) + \sigma \cdot \tan \varphi(S_r, i, F), \quad (1)$$

式中 S_r 为土体的起始饱和度; i 为干湿循环次数; F 为约束外力。显然, 上式中包含若干试验常数, 但均可由一组常规直剪试验确定。

表 2 外力约束对抗剪强度指标的影响

Table 2 Effect of force on shear strength

强度指标	饱和和快剪	约束应力/kPa					
		0	50	100	200	300	400
$\varphi/^\circ$	12	4.2	8.5	12.3	18	20	20.7
c/kPa	28	31	97	108	109	109	109

2 膨胀土的三轴试验

本次试验共制成起始饱和度为 80% 的试样 9 个,

试验分别得出的无干湿循环、一次干湿循环和二次干湿循环情况下饱和和膨胀土应力应变关系曲线和固结不排水强度包线如图 3 所示, 其有效应力强度指标和杨氏模量系数、指数的变化如表 3 和表 4 所示。

表 3 有效应力强度指标变化规律

Table 3 Index of effective stress under different cycles

干湿循环次数 i	c' / kPa	$\varphi / (^\circ)$
0	59.64	15.45
1	30.1	15.43
2	19.47	15.40

从表 3 可以看出, 干湿循环对非饱和膨胀土有效应力强度的影响表现为有效黏聚力 c' 明显降低, 有效内摩擦角 φ 几乎不变。这也进一步证实无论饱和或非饱和黏土, 其有效内摩擦角 φ 受外力和吸力的影响都较小, 主要取决于其矿物成分和受力历史这一结论^[2]。干湿循环可导致非饱和膨胀土有效黏聚力 c' 明显降低这一结论很好地解释了为什么膨胀土边坡往往是在开挖后几个月甚至若干年才发生破坏这一现象。

表 4 杨氏模量系数、指数的变化规律

Table 4 K, n under different cycles

干湿循环次数 i	K	n
0	122.2	0.68
1	101.5	0.81
2	78.4	0.82

从表 4 可以看出, 干湿循环导致非饱和膨胀土的杨氏模量系数明显降低, 杨氏模量指数有所增加, 主要原因是随着干湿循环次数的增加, 土体结构破坏, 土体变得越来越疏松, 相应地, 土体的杨氏模量降低。

3 干湿循环对膨胀土路基变形和边坡稳定的影响

本节将依据上述试验结果, 结合两个算例来分析干湿循环对膨胀土路基^[6]变形和边坡稳定^[7]的影响。

路基变形采用沈珠江院士编制的 CONDEP 有限元程序进行, 并用南水双曲膜面本构模型来模拟土体的应力应变关系。边坡稳定计算采用简化的 Bishop 法进

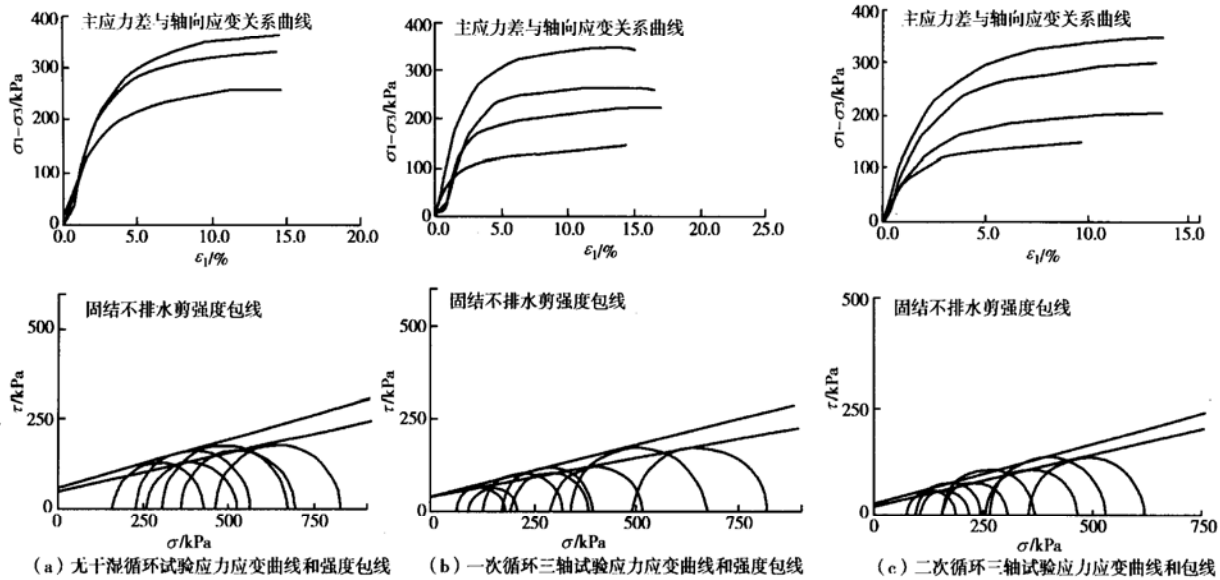


图3 应力应变关系曲线和固结不排水强度包线

Fig. 3 Stress-strain curves and strength envelopes obtained by UC tests

行。计算所采用的膨胀土的强度和变形参数及计算结果见表5。

从表5可以看出,由于干湿循环导致了非饱和膨胀土的杨氏模量系数明显降低,地基的沉降量从26 mm增大至45 mm,增大量达73%;边坡的稳定安全系数从1.65下降至1.00。这进一步说明,在膨胀土工程设计中应考虑干湿循环对其强度和变形特性的影响,否则,将危及膨胀土构筑物的安全。

表5 膨胀土路基变形和边坡稳定计算结果

Table 5 Calculated results of subgrade settlement and slope stability of expansive soils

干湿循环 次数	c' /kPa	ϕ /(°)	K	n	沉降量 /mm	稳定 安全系数
0	59.64	15.45	122.2	0.68	26	1.65
1	30.1	15.43	101.5	0.81	32	1.17
2	19.47	15.40	78.4	0.82	45	1.00

4 结 语

本文利用常规土工试验仪器对非饱和膨胀土的强度和变形特性研究工作进行了有益的尝试,通过上述试验研究和计算分析,我们可以得出以下几点结论和建议:

(1) 吸力是非饱和土的强度理论中非常重要的强度参数,但很难准确测定。而饱和度是一个可以较为准确测定的参数,而且它和吸力之间有着较好的双曲线^[3]关系。因此,完全可以用其代替吸力来研究非饱和膨胀土的强度和变形特性。

(2) 非饱和膨胀土在膨胀过程中,外力约束可显著

提高其抗剪强度。因此,在研究非饱和膨胀土构筑物的工程性状时,应充分考虑外力约束的作用,否则将偏于保守。

(3) 干湿循环将引起非饱和膨胀土土体结构的改变,从而导致其长期强度和变形模量明显降低。干湿循环对非饱和膨胀土强度指标中凝聚力的影响明显大于内摩擦角。在设计膨胀土构筑物时,应认真考虑干湿循环对其强度和变形特性的影响,否则将危及其安全。

参考文献:

- [1] 仲晓晨. 非饱和膨胀土的强度与变形试验研究[M]. 河海大学, 1999.
- [2] 刘祖典, 刘武农. 非饱和土的强度特性[J]. 工程勘察, 1999(1): 7-9.
- [3] 韩华强. 非饱和膨胀土的强度和变形特性研究[D]. 南京水利科学研究院, 2003.
- [4] Bishop A W, Alpan I, Blight G E et al. Factors Controlling the shear strength of partly saturated cohesive soils[A]. In: ASCE Research Conference on the Shear Strength of Cohesive Soils [C]. Univ. of Colorado, 1960, 503-532.
- [5] Fredlund D G, Morgenstem N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15: 313-321.
- [6] 沈珠江. 软土地基弹塑性固结变形计算机程序——CONDEP[R]. 南京水利科学研究所报告, 1981.
- [7] 交通部第二公路勘察设计院, 公路设计手册(路基)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [8] 刘松玉, 季鹏, 方磊. 击实膨胀土的循环膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1), 9-13.