

蔡小玲,俞莉.制样方法对非饱和压实黄土强度变化影响的试验研究[J].地震工程学报,2019,41(1):86-93.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.086

CAI Xiaoling, YU Li. Experimental Research on the Effect of the Sample Preparation Methods on the Strength Change of the Unsaturated Compacted Loess[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1): 86-93. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.086

制样方法对非饱和压实黄土强度变化影响的试验研究

蔡小玲¹, 俞莉²

(1. 无锡城市职业技术学院 建筑与环境工程学院, 江苏 无锡 214153;

2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为研究不同制样方法对非饱和压实黄土抗剪强度指标的影响规律,进行不同干密度压实土在预湿及加湿两种制样方法下的剪切试验研究。结果表明:预湿制样试验中,存在一个临界含水率影响着试验黄土的黏聚力、摩擦角,当试样的含水率低于临界含水率时,抗剪强度随含水率增加而提高,而当含水率高于临界含水率时,抗剪强度随含水率的增加而降低;抗剪强度指标总体随试样干密度的增大而增大。加湿制样试验中,随着试样含水率的增加,黏聚力连续降低,摩擦角随含水率的增加先提高后降低,对比预湿试样而言,含水率对摩擦角的折减程度降低。可以看出制样方法对非饱和压实黄土黏聚力的影响特征比较突出,当含水率低于临界含水率时加湿试样的黏聚力比预湿试样大,而当含水率高于临界含水率时预湿试样的黏聚力较高,认为加湿试样存在类似“木桶效应”,而预湿试样则与试样整体水平有关。研究结果对于进一步加深非饱和黄土抗剪强度指标的适用性研究具有一定参考价值。

关键词: 非饱和黄土; 制样方法; 含水率; 黏聚力; 摩擦角

中图分类号: TU448

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)01-0086-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.086

Experimental Research on the Effect of the Sample Preparation Methods on the Strength Change of the Unsaturated Compacted Loess

CAI Xiaoling¹, YU Li²

(1. School of Architecture and Environmental Engineering, Wuxi City College of Vocational Technology, Wuxi 214153, Jiangsu, China;

2. College of Civil Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: The shear tests of compacted loess with different dry densities were conducted using two different sample preparation methods (pre-humidification and humidification) to study their influence on the shear strength index of the unsaturated compacted loess. The results of this study exhibit the presence of critical moisture content that affects the cohesion and friction angle of the loess in the pre-wetting sample preparation test. When the moisture content of the sample

收稿日期: 2018-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(71774078); 江苏省社科基金项目(18TQB009)

第一作者简介: 蔡小玲(1970-),女,副教授,主要从事岩土工程和结构工程方面的教学和研究。E-mail:caixl123456@126.com。

was lower than the critical moisture content, the shear strength increased with increasing moisture content; however, when the moisture content of the sample was higher than the critical moisture content, the shear strength decreased with increasing moisture content. Further, the shear strength index generally increased with the increasing dry density of the sample. During the wetting sample preparation test, the cohesion continuously decreased with increasing moisture content, and the friction angle initially increased and subsequently decreased with increasing moisture content. When compared with the pre-wetting sample, the reduction degree of the moisture content to the friction angle decreased. It can be observed that the sample preparation method significantly influences the cohesion of the unsaturated compacted loess. When the moisture content of the sample was lower than the critical moisture content, the cohesion of the wetting sample was larger than that of the pre-wetting sample; however, when the moisture content of the sample is higher than the critical moisture content, the cohesion of the pre-wetting sample is larger. It can be considered that the wetting sample exhibits a similar “barrel effect”; the pre-wetting sample is related to the overall level of the sample. The research results exhibit a certain reference value for further applicability of the shear strength index of the unsaturated loess.

Keywords: unsaturated soil; sample preparation method; water content; cohesion; friction angle

0 引言

黄土在我国分布广泛,由于其特定的生成环境,使其具有以粉粒为主,欠压密,大孔隙,垂直节理发育,富含可溶盐等一系列内部物质成分和外部形态特征,结构特性非常独特。由于黄土所处的

地域环境和水文条件影响,黄土较多以非饱和土状态存在^[1]。非饱和黄土的力学及工程特性复杂多变,其中抗剪强度是其力学性质的一个重要指标。近年来,诸多学者^[2-9]对非饱和黄土的抗剪强度进行了大量的试验研究,对包括孔隙比、压实度及含水率等因素与黄土抗剪强度的关系做出了评价。由于黄土具有鲜明的结构特征,各类试验开展方法的差异,都会得到认识以及结果上的不同,诸如郑剑锋等^[10]通过不同制样方法对兰州等地黄土进行重塑土样的制备,分析了不同制样方法所得试样干密度及含水量分层分布状况,结果表明,两头压实法比分层击实法及泥浆法更容易控制试样的均匀性,能得到初始损伤较小的试样。胡海军等^[11]研究了重塑非饱和黄土制样方法对其单轴抗拉强度的影响,结果表明,层面会对其抗拉强度产生影响。吕海波等^[12]探讨了成样方式对非饱和黄土抗剪强度与含水率的关系,结果表明,由于制样方式的影响,因含水率增加导致非饱和黄土的密实度降低以及颗粒间隙增大的程度均不同,在工程实践中应对土的形成过程加以考虑。与此同时,借助于非饱和土理论的试验研究也不断增多^[13-14],如闫芙蓉等^[13]为了研究黄土滑坡的发生机理及剪切破坏特征,进行了 10 组室内控制

吸力的固结排水剪切试验,试验结果表明,抗剪强度参数会随着试验过程中基质吸力的变化而改变,黏聚力随着基质吸力的提高而增加,而内摩擦角的变化较小,几乎不随吸力的改变而改变。但是非饱和土理论及试验结果在实际工程应用中尚存在一定距离,或者说传统抗剪强度参数对于现阶段工程应用而言仍具有较大的现实意义,因而基于传统土力学理论的试验研究对当下一般工程的应用而言具有直接指导价值。

综上所述,非饱和土的试验研究对黄土地区的工程实践具有重要意义,然而不断涌现的黄土工程事故却增加着人们对于试验研究及其结果可靠性的疑虑。究其原因,工程事故的发生很大程度上因为试验方法的设计和选择不尽合理。本文以非饱和压实黄土为试验土样,通过开展不同试验方法(制样方法)的非饱和黄土抗剪强度试验研究,探讨试验含水率实现路径的差异化对非饱和黄土抗剪强度指标的影响特征,并对工程应用提出建议,以期为黄土地区的工程实践和理论研究提供参考。

1 试验方法

1.1 试验土样及物理力学参数

本文试样土来源兰州某基坑边坡工程,通过在现场地基采集取样,得到试验黄土,其呈褐色,土质较均匀。在实验室内,根据土工试验相关标准得到了黄土样基本物理参数指标,结果如表 1 所列。

1.2 试验方案

本次试验为研究预湿以及加湿达到同一试验含

水率下进行剪切试验对非饱和土抗剪强度(指标参数)的变化特征影响规律,对比分析不同试验方法对抗剪强度参数的差异化影响,进而为相关黄土工程的强度取值提供理论及试验指标参考,设计了两组试验。

表 1 试验土基本物理参数

Table 1 Physical parameters of test soil				
塑限 /%	液限 /%	最优含水率 /%	塑性指数	最大干密度 /(g·cm ⁻³)
13.4	35.2	13.5	21.8	1.92

(1) 第一组试验为预湿方案:

通过对所取土样进行烘干、碾碎、过筛及配水,配置得到不同初始含水率 w (14%, 15.5%, 17.5%, 19.5%) 的土样,待土样湿润均匀(约需 72 h),取土样按设计干密度 ρ_d (1.4 g/cm³, 1.6 g/cm³, 1.8 g/cm³, 1.9 g/cm³) 称取对应质量的湿土在专用静压制样设备上分别制备每级干密度试样 5 个,所有试样在保湿器密闭保湿 48 h,以保证试样的水分扩散均匀。其中 4 个试样用于剪切试验,剩余 1 个试样用于对保湿试样的含水率进行复核测定。

(2) 第二组试验为加湿方案:

同第一组试验相关所述,通过对所取土样进行烘干、碾碎、过筛及配水,配置得到初始湿度 w 为 14% 的土样,待土样湿润均匀(约需 72 h),取土样按设计干密度 ρ_d (1.4 g/cm³, 1.6 g/cm³, 1.8 g/cm³, 1.9 g/cm³) 分别制备每级干密度试样 16 个,所有试样先在保湿内密闭保湿 48 h,以保证试样的初始湿度状态相同。48 h 后取其中 1 个试样测定其含水率进行复核测定,然后每级干密度取 5 个试样分别按照加湿目标试验含水率 w 值 15.5%, 17.5% 及 19.5% 三组梯度计算所需添加水量(表 2),并通过医用小型注射器添加,如图 1 所示。注水完成后通过保鲜膜封闭包裹注水试样,并放置保湿器内进行保湿养护 48 h,使其水分扩散均匀,形成所需试验含水率试样。注水试样每个含水率下随机取 1 个试样进行加湿后试样实际含水率复核测定,每级干密度下的每组含水率的其余 4 个试样用于剪切试验。



图 1 加湿土样制备情况及土样
Fig.1 Preparation of wetting soil samples

经试验复测,第一组试验和第二组试验的试样在保湿器内保湿、加湿注水后,其含水率与试样制备土样初始湿度或者目标控制试验含水率相差无几,说明试样制备工作合理,符合试验控制要求。故依照取设计含水率作为试验含水率进行试验及分析。本次试验共计 80 个试样。

所有保湿保养结束的试样,在剪切时分别施加 100、200、300、400 kPa 的法向压力进行直接剪切试验,其中本次试验剪切速率统一控制为 0.8~1.2 mm/min。试样剪切结束的标准以相关规范为准。

2 预湿试样剪切试验结果及分析

如图 2 所示,预湿试样剪切试验结果表明:

(1) 如图 2(a)所示,每级干密度下,随着试样初始含水率,即制样含水率的增加,非饱和压实土的黏聚力先增大后减小,存在一个临界含水率,本次试验约为 15.5%,其变化特征关系可由多项式表达。相同初始制样含水率下,非饱和土的黏聚力随干密度的增大而提高,表现为正相关。其中这种提高作用具体表现在,相同含水率下的黏聚力对比差值以及黏聚力随含水率变化过程中始终压实度较大土样的黏聚力就大,不存在转折变化特征,即黏聚力与压实度为严格的正相关。

(2) 如图 2(b)所示,与黏聚力随含水率的变化特征类似。每级干密度下,随着试样初始含水率,即制样含水率的增加,非饱和压实土的摩擦角先增大后减小,存在一个临界含水率,本次试验约为 15.5%。但是就增加及降低的幅值来看,随着含水率的增加,摩擦角降低幅值较大,说明水分的润滑对试样内部颗粒间的摩擦作用具有较大抑制。相同初始制样含水率下,非饱和土的摩擦角随干密度的增

表 2 第二组试验不同干密度试样注射加水量

Table 2 Amount of water addition of samples with different dry density in the second group				
目标含水率 w /%	不同干密度(ρ_d)试样加水量/g			
	1.4 g/cm ³	1.6 g/cm ³	1.8 g/cm ³	1.9 g/cm ³
15.5	1.26	1.44	1.62	1.71
17.5	2.94	3.36	3.78	3.99
19.5	4.62	5.28	5.94	6.27

注:加湿试样的初始含水率 w 均为 14%。

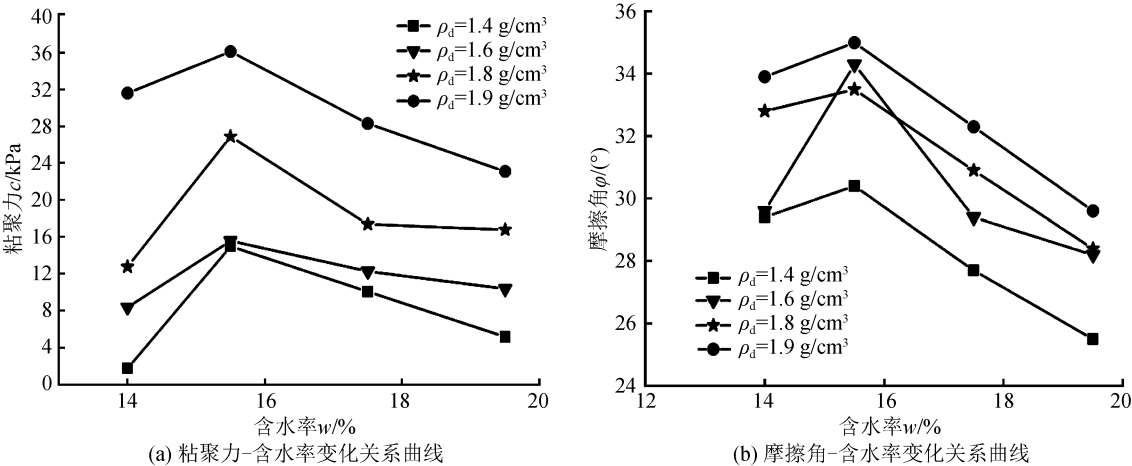


图 2 预湿土样抗剪强度指标随含水率变化关系曲线

Fig.2 Relationship curves of shear strength indexes and moisture content of pre-wetting soil samples

大而提高,体现为贡献特征,即试样的干密度越大,在同等的体积内所形成的土颗粒接触更加紧密,大孔隙减少,颗粒相互作用的面积和数量增多。

(3) 综合分析认为,以控制初始湿度的非饱和土抗剪强度随含水率变化规律相对较为明显。含水率对黏聚力和摩擦角的影响方面均存在一个临界含水率,试验含水率低于临界含水率以前,抗剪强度随含水率增加而提高,而当高于临界含水率以后,抗剪强度随含水率增加而降低。与此同时,干密度总体对抗剪强度指标存在贡献特征。

3 加湿试样剪切试验结果及分析

如图 3 所示,加湿试样剪切试验结果表明:

(1) 如图 3(a)所示,由于受加湿方法的影响,对于含水率从 14%~15.5%的过程未能进行观察分析。从已有的试验结果可以看出,每级干密度下,随

着试样加湿后试验含水率的增加,非饱和压实土的黏聚力连续降低。相同试验含水率下,非饱和土的黏聚力随干密度的增大而提高,表现为正相关。但与预湿试样剪切结果不同,在试验含水率较大情况下,试样的黏聚力较低,如预湿试样在试验含水率 19.5%时,干密度为 1.4、1.6、1.8 及 1.9 g/cm^3 的试样黏聚力分别为 5.2、10.4、16.8 及 23.1 kPa ,而经注水加湿以后得到的试样黏聚力为 2.5、4.8、8.2 及 11.7 kPa ,普遍较低。即在同一试验含水率(19.5%)条件下,经加湿所得试样的黏聚力与预湿试样相比,黏聚力约为后者的 1/2,抗剪强度大幅度降低。但低于此试验含水率的试样黏聚力变化特征相反。

(2) 如图 3(b)所示,每级干密度下,随着加湿后试样试验含水率的增加,非饱和压实土的摩擦角先增大后减小,存在一个临界含水率,本次试验约为 17.5%。但是就增加及降低的幅值来看,随着试验

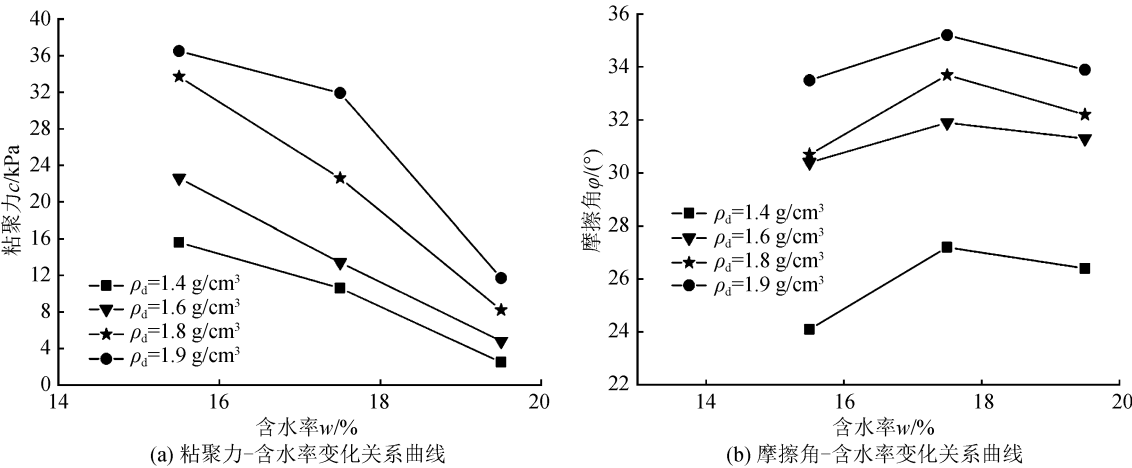


图 3 加湿土样抗剪强度指标-含水率变化关系曲线

Fig.3 Relationship curves of shear strength indexes and moisture content of wetting soil samples

含水率的增加,摩擦角增加幅值较大。这与预湿试验的试样剪切结果不同:第一,摩擦角随着含水率增加从增加转为降低的临界含水率增大,即增加对应含水率范围扩大,而降低对应范围缩减;第二,预湿试样在含水率增加到 19.5% 时,相较临界含水率点处的摩擦角值相比更低,即折减程度大于贡献程度,而对于注水加湿试样而言,在试验含水率增加到 19.5% 以后,其摩擦角值虽低于临界含水率(摩擦角随含水率增加而增加的终点,17.5%)处的摩擦角,却高于含水率 15.5% 的摩擦角,表明前期的贡献提高程度大于后期折减幅度。与预湿试样摩擦角随含水率变化特征类似,在相同试验含水率下,非饱和土的摩擦角随干密度的增大而提高,体现为贡献特征,即试样的干密度越大,机理在于同等体积内所形成的土颗粒接触更加紧密,大孔隙减少,颗粒相互作用

的面积和数量增多。

综合分析认为,在同一试验含水率前提下,试样的制备方法不同,对非饱和土的抗剪强度存在影响,主要表现在黏聚力随试验含水率高低程度不同,增加或折减规律不同。同时摩擦角随含水率变化的临界含水率推后,相较预湿试样而言,含水率对摩擦角的折减程度降低。

4 预湿及加湿试验结果对比分析

从以上分析可以看出,制样方法的不同对非饱和土的抗剪强度指标存在影响,为进一步从定量角度对上述规律现象进行对比认识,可从相关抗剪强度指标的差值方面予以分析。本文以加湿方案试验抗剪强度指标减预湿方案试验结果为参考分析研究,其结果分别如图 4(a)、(b) 所示。

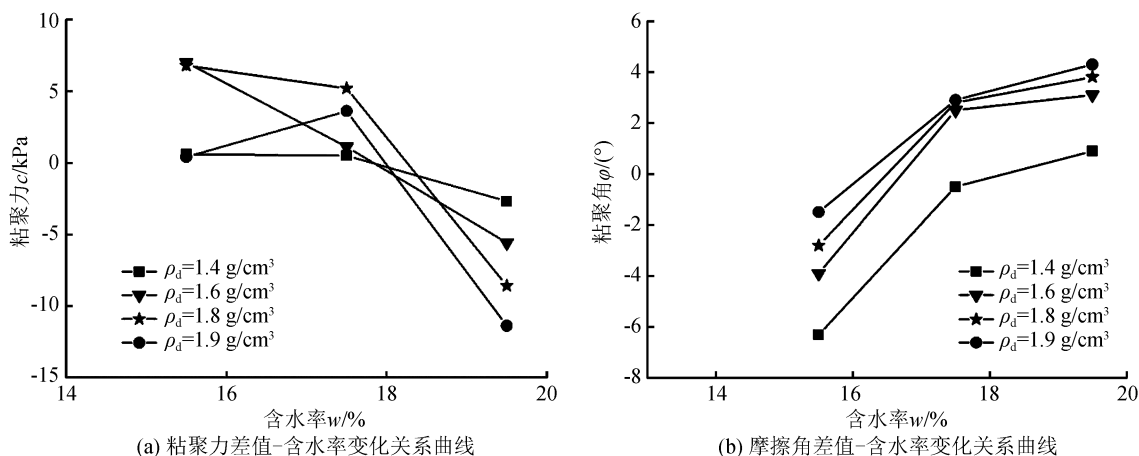


图4 加湿及预湿土样抗剪强度指标差值-含水率变化关系曲线

Fig.4 Relationship curves of difference of shear strength indexes and moisture content of wetting and pre-wetting soil samples

(1) 从图 4(a) 可以看出,制样方法对非饱和土黏聚力的影响特征比较突出。其中在预湿和加湿两种制样方案对黏聚力的差值(以下简称黏聚力差)关系上,干密度以及试验含水率对其有明显的耦合特征。首先就试验含水率而言,在试验含水率增大的过程中,加湿试样较预湿试样的黏聚力差值从正演变为负,即在临界含水率以前,加湿试样的黏聚力相对较高,而当试验含水率高于临界含水率以后,预湿试样的黏聚力较高。说明临界含水率以前,预湿试样内水分扩散均匀,粒间的自由水较多,形成的粒间结构联结较低;而加湿试样是从一个相对较低的含水率下注射加水而得,在初期制样含水率(本试验为 14%)较低前提下,土颗粒间的有效联结较强,这其中包括吸力(张力膜)、盐分浓度等。并且一旦从土样经压实制得试样以后,试样内部即形成次生结构,

试样内部的流相状态形成,孔隙气联通、半联通交织存在,而这些次生结构性都对后期注射加水在试样内部的水分渗流和扩散存在影响,使得所注射水分并未能均匀分布于土颗粒间,进而经注射加湿所得试样为初始结构性试样在浸水条件下发生一定折减损伤试样^[15-16],但是相较预湿试样水分均匀化分布所形成的结构性而言,其强度相对更大。只有注射加湿水量超过一定值,使试样含水率超过临界含水率以后,这种结构性损伤作用更加突出。相对大量的水分渗入初始含水率试样,水分沿联通孔隙快速渗流,进而不断扩展浸水的“前沿”以及孔隙尺度,当水分在多条孔隙中渗流相通以后,极易在土体内形成连通性的结构损伤面,此面上的粒间联结作用、吸力张力膜作用力降低,盐分溶解,使损伤面成为力学软弱面,进而在剪切作用下,试样会以其作为剪切破

坏的主要发生面,亦或者此损伤面成为制约试样抗剪强度发挥的劣化面,类似形成“木桶效应”,严重影响非饱和和加湿试样的强度水平。而预湿试样水分在土样制备时已扩散均匀,所得试样可视为均匀体,其抗剪强度的大小受试样整体均匀水平的发挥。

(2) 与此同时,在试验含水率对预湿和加湿两种制样方案所得试验黏聚力的差值关系影响上,干密度对其存在耦合特征。从图 4(a)可以看出,在临界含水率以前,除干密度为 1.4 g/cm^3 试样以外,随着干密度增大,黏聚力差随试验含水率增大从降低状态(干密度为 1.6 g/cm^3 、 1.8 g/cm^3 时)演变为增加状态(干密度为 1.9 g/cm^3 时),整体黏聚力差为正。表明随着非饱和土试样干密度的增大,试样在初始含水率(本试验为 14%)下经压实所形成的次生结构性越强,其对注射加湿的结构损伤抵抗性更强,因而在同等的试验含水率下相较水分均匀化分布的预湿试样而言具备更大的黏聚力。而当试验含水率高于临界含水率以后,上述现象逆转,干密度较大的试样其在较大试验含水率下黏聚力损失更大,四级干密度试样黏聚力差形成较为明显的差值序列,干密度 1.4 g/cm^3 试样黏聚力差最小。表明预湿和加湿两种制样或试验方法下,黏聚力(抗剪强度)随试验含水率的变化特征复杂多变,这与试样的土类、颗粒成分及级配和盐分等内因以及制样含水率、干密度等均存在关联。

(3) 从图 4(b)可以看出,整体上预湿和加湿两种制样方案所得试验内摩擦角差值范围在 $-6^\circ \sim 4^\circ$ 之间,相较黏聚力差变化幅度较小。说明试验含水率对两种试验方案下的非饱和土试样的黏聚力的相对影响要比对内摩擦角的相对影响要大。其中试验含水率对预湿和加湿两种制样方案所得试验摩擦角差值关系的影响特征主要表现在,在试验含水率低于 17.5% 时,预湿试样的摩擦角大于加湿试样摩擦角,而当试验含水率高于 17.5% 以后,相反。表明在试验含水率较低时,预湿制样所得的均匀化试样粒间摩擦接触较少、摩擦力较低,注水加湿试样虽经加水达到同等试验含水率,但是并不能形成预湿试样水分的绝对均匀化。只有当试验含水率较高,也即注射加湿量增大,所加水分才会充分均匀化渗入颗粒接触位置,此时所浸润的劣化面自由水较多,盐分溶解,粒间接触面润滑,摩擦作用自然降低,因而表现为上述特征。

5 探讨

本文基于预湿和注水加湿两种制样方案的试验

结果分析研究了由于制样方法的差异性对非饱和压实黄土抗剪强度指标的变化影响,为了充分探讨相关问题,本文特引述文献[6]相关研究内容及结果。黄琨等[6]为了研究制样方法对重塑土(压实土)的抗剪强度影响,对压实土开展了两种试验:

其中第 1 种方案(以下简称加湿试验)通过添加水量的方法制取含水率 w 分布为 3.0%、6.0%、9.0%、12.0%、15.0%、18.0%、21.0%、24.0%、25.0%、26.0%、27.5% 等 11 组土样,每组样 4 个;

第 2 种试验方法(以下简称脱湿试验),是先根据原状土的干密度制得含水率 w 为 25.0% 的试样,放置烘箱中,通过控制烘烤的时间实现不同含水率试样的制备,并最终得到含水率 w 为 5.5%、12.2%、16.9%、19.5%、22.5%、25.0% 及烘干土等 7 组试样。上述试样分别施加 100、200、300 和 400 kPa 的法向压力进行剪切试验,剪切速率控制为 $0.8 \sim 1.2 \text{ mm/min}$ 。

第 1 种方案和第 2 种试验方法的黏聚力试验结果分别如图 5(a)、(b)。从图可以看出,两种试验方法下,试样黏聚力随试验含水率的变化特征不同。加湿试验,试样黏聚力随含水率变化曲线分为 3 个阶段:当含水率 w 低于 12% 时,黏聚力随着试验含水率的增加而增大;当试验含水率在 $12.0\% < w < 24.0\%$ 之间,黏聚力随试验含水率增加而近似呈直线降低;当试验含水率 $w > 24.0\%$ 时,黏聚力随试验含水率增加而急剧下降。脱湿试验压实土剪切试验结果表明,黏聚力随着含水率的增加而不断降低,并且含水率与黏聚力的关系曲线可分为两个直线段,在试验含水率较大时,直线段斜率较大,表明在接近饱和含水率时,压实土的黏聚力急剧下降。

本文与文献[6]所开展的试验及结果对比,可以发现,不同制样方法下,非饱和压实土的抗剪强度(黏聚力)随试验含水率变化特征均有差异。但共性的是,加湿试样在同等试验含水率条件下,当试验含水率相对较低时,其黏聚力随试验含水率的增加衰减较弱,而一旦含水率较高,黏聚力降低较大,表明对于加湿类试验,压实土的抗剪强度与加湿量级有关,当然加湿前的湿度状态影响不可避免与忽视。

综上所述,有以下几点认识:

(1) 不同制样(预湿、加湿、脱湿)或试验方法下,非饱和土抗剪强度随试验含水率的变化特征复杂多变,这与制样含水率、干密度、加湿或脱湿前试样的初始湿度等均存在关联,可以肯定的是试样的土类、颗粒成分及级配、盐分等也对其存在影响^[17]。

为在研究上方便,可以将上述因素统一采用结构性(或结构势、构度等)予以分区域表示^[18-19]。

(2) 常规类的非饱和和抗剪强度试验,对于工程应用而言具有便利性,但是未能充分揭示不同试验

方法对非饱和土内部结构特征的影响机理,因而应加强和提高微宏观非饱和土抗剪强度研究的内容及水平,进而更加深入地认识试验方法所表现结果差异化的机理、历史及发展。

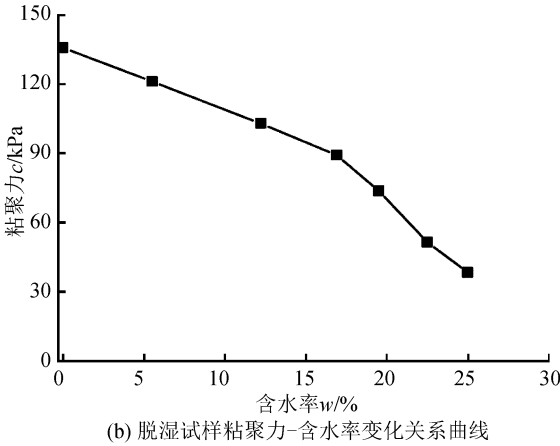
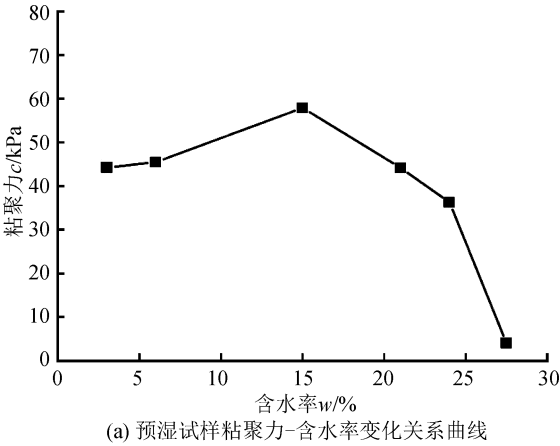


图 5 不同制样方法试样黏聚力随含水率变化关系曲线(本图试验数据来源于文献[6])
Fig.5 Relationship between cohesive force and moisture content of samples with different preparation methods

(3) 对于非饱和(压实土)抗剪强度指标的工程应用而言,以室内土工试验为基础所获得的抗剪强度指标应注意试验方法的合理性及适用性。如:
①对于浸湿条件的地基、边坡等工程而言,应在尽可能全面掌握工程地质土体浸湿前湿度条件的基础上进行加湿型试验;
②对于新近期回填地基、填方等工程而言,应以预湿类试验确定其抗剪强度指标,而干密度应是其关键考虑试验控制指标;
③对于处于干湿循环复杂、循环周期短及次数多的地基、边坡等工程而言,应考虑干湿循环对土体内部孔隙结构、骨架结构等的影响^[20-22],开展具有模拟自然变化条件的干湿循环非饱和剪切试验,确定关键抗剪强度指标。综合而言土体的抗剪强度如何选取应考察调研土体具体的历史及性状,诸如原状或新近填土、湿度变化以及应力历史等。

6 结论与建议

(1) 预湿方案试验结果表明,试验含水率对黏聚力和摩擦角的影响方面均存在一个临界含水率,试验含水率低于临界含水率以前,抗剪强度随含水率增加而提高,而当超越临界含水率以后结果相反;抗剪强度指标总体随干密度增加而提高。

(2) 随着试样加湿后试验含水率的增加,非饱和土的黏聚力连续降低。与预湿试验剪切结果不

同,摩擦角随着含水率增加从增加转为降低的临界含水率增大,增加对应含水率范围扩大,降低对应范围缩减。相较预湿试样而言,含水率对摩擦角的折减程度降低。

(3) 制样方法对非饱和土黏聚力的影响特征比较突出。在临界含水率以前,加湿试样的黏聚力相对较高。加湿试样加湿量增大极易在土体内形成联通性的结构损伤面,是剪切破坏的主要发生面。认为加湿试样存在类似“木桶效应”,而预湿试样抗剪强度受试样整体均匀水平的发挥。

(4) 不同制样或试验方法下,非饱和土抗剪强度随试验含水率的变化特征复杂多变,与制样含水率、干密度、加湿或脱湿前试样的初始湿度等均存在关联。可将上述因素统一采用结构性等指标予以分区域表示。加强和提高微宏观非饱和土抗剪强度研究的内容及水平,进而更加深入的认识试验方法所表现的差异化的机理、历史及发展。

(5) 对于非饱和土抗剪强度指标的工程应用而言,非饱和土抗剪强度与制样含水率、干密度、加湿以及脱湿前试样的初始湿度等均存在关联,在应用以室内土工试验为基础获得的数据指标时,要判断其的合理性及适用性。土体抗剪强度选取应考察调研土体历史及性状,诸如原状或新近填土、湿度变化以及应力历史等。

参考文献(References)

- [1] 刘祖典.黄土力学与工程[M].西安:陕西科学技术出版社,1997.
LIU Zudian. Loess Mechanics and Engineering [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press,1997.
- [2] 郭江涛.新疆伊犁非饱和黄土的直剪性能试验研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(4):129-132.
GUO Jiangtao. The Experimental Research of Xinjiang Yili Unsaturated Loess' Direct Shear Strength[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(4): 129-132.
- [3] 杨磊.黄土抗剪强度特性分析[J].水利与建筑工程学报,2010,8(3):163-165.
YANG Lei. Analysis of Characteristics about Shear Strength of Loess[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010, 8(3): 163-165.
- [4] 朱彦鹏,栗慧珺,杨校辉,等.黄土改良红砂岩的试验及路用性能研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):12-15.
ZHU Yanpeng, LI Huijun, YANG Xiaohui, et al. Experimental Study on Mixing Red Sandstone with Loess and Its Performance[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(6): 12-15.
- [5] 冀慧.含水量及剪切速率对黄土抗剪强度特性的影响[J].电力学报,2016,31(3):259-265.
JI Hui. The Influence on Shear Strength Characteristics of Loess by Water Content and Shear Rate[J]. Journal of Electric Power, 2016, 31(3): 259-265.
- [6] 黄琨,万军伟,陈刚,等.非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2600-2604.
HUANG Kun, WAN Junwei, CHEN Gang, et al. Testing Study of Relationship between Water Content and Shear Strength of Unsaturated Soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2600-2604.
- [7] 李文.含水量对甘肃黄土边坡抗剪强度的影响研究[D].西安:长安大学,2010.
LI Wen. Study of the Water Content Effect on Shear Strength of Loess Slope in Gansu Area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [8] 黄泽,张沛然,肖丁,等.重塑黄土抗剪强度试验研究[J].四川建筑科学研究,2015,41(4):36-39.
HUANG Ze, ZHANG Peiran, XIAO Ding, et al. Experimental Study on Shear Strength of Remolded Loess[J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(4): 36-39.
- [9] 李振,邢义川,周俊.膨胀土两种不同条件下抗剪强度比较[J].水力发电学报,2009,28(1):165-170.
LI Zhen, XING Yichuan, ZHOU Jun. Comparison with Shear Strength of the Expansive Soil under Two Different Conditions [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(1): 165-170.
- [10] 郑剑锋,马巍,赵淑萍,等.重塑土室内制样技术对比研究[J].冰川冻土,2008,30(3):494-500.
ZHENG Jianfeng, MA Wei, ZHAO Shuping, et al. Development of the Specimen-preparing Technique for Remoulded Soil Samples [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(3): 494-500.
- [11] 胡海军,蒋明镜,赵涛,等.制样方法对重塑黄土单轴抗拉强度影响的初探[J].岩土力学,2009,30(增刊2):205-208.
HU Haijun, JIANG Mingjing, ZHAO Tao, et al. Effects of Specimen-preparing Methods on Tensile Strength of Remolded Loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Sup2): 205-208.
- [12] 吕海波,董均贵,吴畏.不同成样方式下含水率与非饱和膨胀土抗剪强度的关系[J].河南理工大学学报(自然科学版),2018,37(4):123-129.
LÜ Haibo, DONG Jungui, WU Wei. Relations between Water Content and Shear Strength of Unsaturated Expansive Soils Based on Different Sample-preparing Method[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2018, 37(4): 123-129.
- [13] 闫芙蓉,胡雪源,崔芳.非饱和黄土抗剪强度特性试验研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(5):100-104.
YAN Furong, HU Xueyuan, CUI Fang. Experimental Study on Shear Strength Characteristics of Unsaturated Loess[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(5): 100-104.
- [14] 申春妮,方祥位,陈正汉.Q₂黄土的非饱和直剪试验研究[J].地下空间与工程学报,2010,6(4):724-728.
SHEN Chunni, FANG Xiangwei, CHEN Zhenghan. The Unsaturated Direct Shear Tests of Q₂ Loess[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4): 724-728.
- [15] 梁庆国,房军,张晋东,等.兰州轨道交通扰动场地黄土浸水试验研究[J].地质力学学报,2018,24(6):803-812.
LIANG Qingguo, FANG Jun, ZHANG Jindong, et al. In-situ Soaking Test on the Disturbed Loess Site at Lanzhou Metro, Gansu Province, China[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(6): 803-812.
- [16] 赵志强.含水量对黄土强度特性影响的研究[D].郑州:华北水利水电大学,2016.
ZHAO Zhiqiang. Influence of Moisture Content on Shear Strength of Loess[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2016.
- [17] 张志权,井彦林,孔德泉.压实黄土直剪强度试验研究[J].铁道建筑,2016(12):69-71.
ZHANG Zhiqian, JING Yanlin, KONG Dequan. Experimental Study on Direct Shear Strength of Compacted Loess[J]. Railway Engineering, 2016(12): 69-71.
- [18] 谢定义.试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J].岩土工程学报,2001,23(1):3-13.
XIE Dingyi. Exploration of Some New Tendencies in Research of Loess Soil Mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-13.
- [19] 谢定义.黄土力学特性与应用研究的过去,现在与未来[J].地下空间与工程学报,1999,19(4):273-284.

[7] AHMAD S, GHANI F, RAGHIB ADIL M. Seismic Friction Base Isolation Performance Using Demolished Waste in Masonry Housing[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1):146-152.

[8] AHMAD S, MASOOD A, HUSAIN A. Seismic Pure Friction Base Isolation Performance Using Demolished Waste in Two-storey Masonry Building[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering Division, 2011, 91(2):10-17.

[9] 窦远明, 刘晓立, 赵少伟, 等. 砂垫层隔震性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(1):125-128.

DOU Yuanming, LIU Xiaoli, ZHAO Shaowei, et al. An Experimental Study of Isolation Performance of Sand Cushion[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26 (1):125-128.

[10] 岁小溪. 橡胶颗粒-砂混合物的隔震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.

SUI Xiaoxi. The Study on Seismic Isolation Performance of Granulated Rubber-Sand Mixture[D]. Changsha: Hunan University, 2009.

(上接第 93 页)

XEI Dingyi. Past, Present and Future of Loess Mechanical Properties and Application Research[J]. Underground Space, 1999, 19(4):273-284.

[20] 姚志华, 陈正汉. 膨胀土增湿和干燥过程中的细观结构变化研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(3):1-4.

YAO Zhihua, CHEN Zhenghan. Study on Meso-structure Changes of Expansive Soils during Wetting-Drying Cycles[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2009, 7(3):1-4.

[21] 李丽, 张坤, 张青龙, 等. 干湿和冻融循环作用下黄土强度劣化特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4):1142-1149.

LI Li, ZHANG Kun, ZHANG Qinglong, et al. Experimental Study on the Loess Strength Degradation Characteristics under the Action of Dry-Wet and Freeze-Thaw Cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4):1142-1149.

[22] 袁志辉. 干湿循环下黄土的强度及微结构变化机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.

YUAN Zhihui. Research on Change Mechanism of Strength and Microstructure of Loess under Wetting-Drying Cycle[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.