

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.06.20

初始含水率与竖向应力对弱膨胀土残余强度的影响

蒋晓庆¹, 丁三宝², 黄益顺², 李永彪²

(1. 安徽广播电视大学开放学院, 安徽 合肥 230022;

2. 安徽建筑大学建筑结构与地下工程重点实验室, 安徽 合肥 230601)

摘要: 通过残余强度试验仪对合肥地区弱膨胀土进行四次反复剪切, 可以证明弱膨胀土残余强度受初始含水率和竖向应力的影响。试验结果显示: 初始含水率越高, 竖向应力越大, 残余强度下降幅度越大, 高达 60.4%。竖向应力为 100 kPa、200 kPa 作用下, 初始含水率与弱膨胀土残余强度呈线性关系; 竖向应力为 300 kPa、400 kPa 作用下, 初始含水率与弱膨胀土残余强度呈指数关系。研究发现, 初始含水率较低时, 通过反复剪切试验可以得到弱膨胀土稳定的残余强度; 初始含水率较高时, 通过反复剪切试验不能得到稳定的残余强度, 建议采用环剪试验。合肥地区弱膨胀土初始含水率分布范围主要集中在 18% ~ 21%, 可采用反复直剪试验测得弱膨胀土残余强度。该试验结果对合肥地区膨胀土边坡稳定性分析以及滑坡防治等具有重要意义。

关键词: 初始含水率; 竖向应力; 残余强度; 剪切位移; 弱膨胀土

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)06-0142-08

Influence of initial moisture content and vertical stress on the residual strength of weak expansive soil

JIANG Xiaqing¹, DING Sanbao², HUANG Yishun², LI Yongbiao²

(1. School of Open Education, Anhui Radio and TV University, Hefei, Anhui 230022, China;

2. Key Laboratory of Architecture and Underground Engineering of Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: The residual strength tester was adopted to carry out four repeated shear tests on the weak expansive soil in Hefei, the testing results show that the residual strength of weak expansive soil is affected by the initial water content and vertical stress. the higher the initial water content is, the greater the vertical stress is, and the larger the decent degree of the residual strength is, the highest decent degree of the residual strength is 60.4%. When the vertical stress is 100 kPa and 200 kPa, the initial moisture content has a linear relationship with the residual strength of the weak expansive soil. Under the vertical stress of 300 kPa and 400 kPa, the initial water content exponentially relates to the residual strength of the weak expansive soil. It is found that when the initial moisture content is low, a stable residual strength of the weak expansive soil can be obtained through repeated shear tests. While the initial moisture content is high, a stable residual strength cannot be obtained by repeated shear test, and the ring shear test is recommended. The initial moisture content of weak expansive soil in Hefei region ranges from 18% to 21%. The residual strength of weak expansive soil can be measured by repeated direct shear tests. This test result is of great significance to the stability analysis of expansive soil slope in Hefei area and to the prevention and control of landslides.

Keywords: initial moisture content; vertical stress; residual strength; shear displacement; weak expansive soil

收稿日期: 2018-04-16; 修订日期: 2018-05-25

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2017A944)

第一作者: 蒋晓庆(1985-), 女, 安徽亳州人, 讲师, 硕士, 从事非饱和膨胀土强度力学研究。E-mail: 458913459@qq.com

0 引言

膨胀土边坡的变形破坏演变是指边坡土体的抗剪强度由峰值向残余值强度逐渐衰减的过程。因此,在进行膨胀土边坡稳定分析时,应采用残余强度而不是峰值强度^[1]。残余强度反映的是土体内部发生剪损后剪切面上残留的剪应力值,研究残余强度的目的便是探求土体遭受破坏后强度衰减的变化规律,也就是研究大应变条件下强度降低的问题^[2]。

土残余强度的室内试验测定方法,目前主要有三轴压缩试验、环剪仪做环形剪切试验和反复剪切试验。反复剪切试验简单易行,对多数土均能测得较好的结果。

反复直剪试验是应变控制式直剪仪在慢速(排水)条件下,对试样反复剪切至剪应力达到稳定值,以测得土样的残余强度。BISHOP 等^[3]认为当有效法向应力小于 150 kPa 时,黏土残余强度与有效法向应力之间具有较强的非线性关系。孙涛等^[4]采用环形剪切试验认为超固结黏土残余强度的增加依赖于竖向应力的增加。闫芙蓉等^[5]通过对黄土进行反复剪切试验测出稳定的残余强度,提出非饱和状态下的残余强度是高于饱和状态下的,竖向应力的增加使得残余强度在升高。吴迪等^[2]利用环剪仪对残积土进行残余强度的测定,认为残积土含水量的增加,会使得残余黏聚力升高,残余内摩擦角降低,但是残余内摩擦角是残余强度最大的影响因素,因此,整体上残积土残余强度还是降低的。张晓丽^[6]通过直剪仪对膨胀土进行反复剪切四次,提出膨胀土残余强度和土颗粒含量相关,非饱和状态的残余强度值高于饱和状态的残余强度值。

目前多数学者对于膨胀土残余强度的研究集中在不同竖向应力作用下,非饱和状态和饱和状态残余强度的变化,得出的结论是膨胀土在非饱和状态的残余强度是高于饱和状态的。那么膨胀土达到饱和状态时,不同的初始含水率,不同的竖向应力作用,对残余强度的影响会呈现哪些特点,这是笔者本次试验目的。本次试验采取反复剪切试验。左巍然等^[1]、肖杰等^[7]提出反复直剪试验测定膨胀土残余强度是可行的,但是有些试验组会出现残余强度的不稳定。分析原因如下,一是剪切位移不够大,不能在同一方向连续剪切使土体颗粒完成重新定向排列;二是剪切面暴露导致土体受到竖向应力不均匀。鉴于反复剪切试验的缺点,本次试验装置进行了一些改进,采用全自动残余强度试验仪进行试验,每次剪切位移最大可达 10 mm。

1 试验方案

1.1 试验土样

试样为原状土。为了使本次试验结果应用范围更广,土样分别来自合肥瑶海区、包河区、蜀山区、庐阳区,这四个区处于合肥的东南西北四个方向。四区弱膨胀土属性基本相同(表 1)。为了保证试验结果的准确性,在不同区有相同或近似初始含水率时,均进行残余强度试验。

通过京探高速 100 型钻机,结合不同区域的埋置深度和厚度^[8],每个区选择 5 个代表性钻孔点,每个孔取四个土样,共计 80 个土样,每个土样高度 20 cm。土样以灰黄色、褐黄色为主,硬塑-坚硬状态,光滑,干强度及韧性较高。含直径 1~3 mm 的球形铁锰质结核,其膨胀性矿物主要为伊利石,比重较高,但由于其中所含杂质(指非膨胀性矿物)含量高,降低了其膨胀势,因此,合肥膨胀土绝大多数为弱膨胀土^[9-10]。土样初始含水率分布范围在 16.4%~25.6%。以初始含水率为 17.8%,20.5%,22.6%,25.6% 的土样作为研究对象,分别来自庐阳区、包河区、瑶海区、蜀山区。不同区相近初始含水率也一起做残余强度,作为研究对象的四组初始含水率的参考。选择土样密封,并放入恒温保湿箱进行保存,以待备用。土样的基本属性见表 1 和表 2。

表 1 弱膨胀土土样基本属性

Table 1 Basic properties of weak expansive soil samples

取样 区域	取样深 度/m	取样 数量	容重/ (g·cm ⁻³)	平均 液限 W _L /%	平均塑 性指数 Ip/%	平均含 水率 ω/%	自由膨 胀率 δ _{ef} /%
瑶海区	2~6	20	2.12	40.5	20.1	19.1	42
包河区	2~6	20	2.09	40.7	20.6	19.4	39
蜀山区	2~6	20	2.15	42.4	21.2	20.6	41
庐阳区	5~8	20	2.16	40.2	18.1	17.3	43

表 2 弱膨胀土土样颗粒分析

Table 2 Particle size analysis of weak expansive soil samples

土样	不同颗粒粒径/mm 所占比例/%				
	>0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.002	<0.002
瑶海区	3.02	42.38	14.76	9.89	32.97
包河区	2.87	36.83	15.71	10.11	37.35
蜀山区	3.39	40.1	16.24	10.03	30.24
庐阳区	3.14	31.98	15.69	9.98	39.21

1.2 方案设计

《土工试验方法标准》(GB T50123-1999)提出黏质土需剪切 3~4 次,总剪切位移达 30~40 mm;

SKEMPTON^[11]认为过峰值强度后继续剪切位移至 25 ~ 50 mm,可达到土体的残余强度;H L NOBLE 用内径 4.8 cm 试样,以 0.004 mm/min 的速率进行反复剪切 10 ~ 15 次,每次剪切位移 2.5 mm,总剪切位移在 50 ~ 75 mm,可达到土体的残余强度。长江科学院在对软弱夹层的试验中,用直径为 6.4 cm 试验,以 0.024 4 mm/min 的速率进行反复剪切试验;提出不同颗粒组成的试样,需要的剪切位移是不一样的。黏土一般需要 24 ~ 32 mm^[12]。左巍然等用直径 6.18 cm 试样,以 0.02 mm/min 的速率进行反复剪切三次,每次正向剪切位移控制在 7 mm,膨胀土可达到稳定残余值;并通过对原状土、静压土和击实土三种不同制样方式试验进行比较分析,残余强度接近。张晓丽^[6]用直径 6.18 cm 试样,以 0.02 mm/min 的速率进行反复剪切四次,每次正向剪切位移控制在 6 mm,膨胀土可达到残余强度。通过以上文献的调研,本次试验方案设计如下。

首先对土样进行抽气真空饱和,《土工试验规范》提出细粒土的饱和时间宜为 10 h,一些相关文献提出饱和时间为 24 h^[1,6-7]。笔者通过大量土样的饱和过程观察,弱膨胀土饱和时间控制在 12 ~ 14 h,饱和度均能达到 95% 以上。时间过长,膨胀土内部结构过于松散,进行反复剪切时试样容易成稀泥状而导致试验不能进行。真空抽气时间为 1 h。

试验采用全自动残余强度试验仪(图 1),土样直径为 61.8 mm,高度为 20 mm,竖向应力为 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 400 kPa。以 0.02 mm/min 的剪切速率进行剪切,最大剪切位移达到 8 ~ 10 mm;反推速率为 0.4 mm/min,第一次剪切完成需停留半个小时再进行第二次剪切,需进行反复剪切,直至最后两次剪切时强度峰值接近为止。本试验膨胀土土样剪切次数为四次,总位移在 32 ~ 40 mm,每个土样试验持续时间为四天。第一次的剪切峰值为慢剪抗剪强度,第四次剪应力的峰值为残余强度。土样剪切结果见图 2。



图 1 全自动残余强度试验仪

Fig. 1 Automatic residual strength tester



图 2 反复四次剪切的土样

Fig. 2 Soil samples experience four repeated shear tests

2 试验结果分析

不同初始含水率、不同竖向应力的试验结果见表 3。从表 3 容易看出,在相同竖向应力作用下,随着初始含水率的增加,抗剪强度和残余强度均呈现降低的趋势;在相同含水率下,随着竖向应力的增加,抗剪强度和残余强度均呈现升高的趋势。这点和吴迪等^[2],孙涛等^[4],许业顺等^[13]利用环剪仪对饱和黏土残余强度的结论是一致的,即随着竖向应力的增加而增大。这是由于竖向应力的增加可以增大土颗粒间的摩擦力,从而提高强度。为了寻求初始含水率与竖向应力对饱和弱膨胀土残余强度的共同影响,表 2 中引入 $\Delta_{\max}$,表达式如(1)所示。

$$\Delta_{\max} = \max\left(1 - \frac{\tau_{qi}}{\tau_{fi}}\right), i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

式中: τ_{fi} ——第一次剪切对应的峰值强度,称为慢剪条件下膨胀土的抗剪强度;

τ_{qi} ——第四次剪切对应的峰值强度,即残余强度;

1 对应初始含水率为 17.8%, 2 对应初始含水率为 20.5%, 3 对应初始含水率为 22.6%, 4 对应初始含水率为 25.6%。

$\Delta_{\max}$ 表示同一竖向应力作用下,不同初始含水率的峰值强度与残余强度降幅的最大值。

根据 $\Delta_{\max}$ 的统计结果发现,竖向应力在 300 kPa、400 kPa 作用时, $\Delta_{\max}$ 已超过 50%,虽然试验结果证明了竖向应力的增加使得残余强度值在增大,但是残余强度相对于抗剪强度值的下降幅度最大达到 60.4%,笔者发现 $\Delta_{\max} = 60.4\%$ 和 $\Delta_{\max} = 56.6\%$ 时,均是在初始含水率为 25.6% 的情况下。初始含水率为 17.8%, 300 kPa 作用下的 $\Delta_{\max}$ 为 31.7%, 400 kPa 作用下的 $\Delta_{\max}$ 为 36.6%;初始含水率为 20.5%, 300 kPa 作用下的 $\Delta_{\max}$ 为 35.2%, 400 kPa 作用下的

$\Delta_{\max}$ 为 50.4% ;初始含水率为 22.6% ,300 kPa 作用下的 $\Delta_{\max}$ 为 47.6% ,400 kPa 作用下的 $\Delta_{\max}$ 为 56.4% 。因此,试验结果显示,初始含水率越高,竖向应力越大,残余强度相对于抗剪强度的降低幅度也就越大(表 3)。

表 3 抗剪强度与残余强度试验结果

Table.3 Test results of shear strength and residual strength

竖向 应力 σ/kPa	抗剪强度 τ_f/kPa				残余强度 τ_q/kPa				$\Delta_{\max}/\%$
	17.8%	20.5%	22.6%	25.6%	17.8%	20.5%	22.6%	25.6%	
100	105.4	96.3	87.3	60.7	61.7	54.9	53.9	35.7	43
200	154.9	154.5	139.5	108.2	107.9	91.7	69.6	43.1	49.9
300	200.9	166.2	159.7	152.4	137.3	107.7	83.7	60.3	60.4
400	230.8	225.9	206.3	176.6	146.3	112.1	89.9	76.7	56.6

2.1 残余强度参数分析

根据 Mohr-Coulomb 准则,膨胀土强度参数如表 4 所示。随着初始含水率的增加,抗剪强度和残余强度都呈降低趋势。其中抗剪强度指标内摩擦角 φ 值下降幅度不大,由 22.9°下降到 20.7°,差值 2.2°;黏聚力 c 值下降幅度较大,由 67.5 kPa 下降到 53.9 kPa,差值 13.6 kPa。残余强度指标 φ 值下降幅度较大,下降了 8.4°; c 值下降不大, c 值下降了 1.7 kPa。表 3 中显示,残余强度是低于抗剪强度,通过表 4 的计算结果显示,主要是表现为 φ 值显著降低, c 值变化不大。如初始含水率为 22.6% 时, φ 值由 20.7°降低至 7°,降幅达 66.2% ,而 φ 值越小,越容易引起弱膨胀土边坡浅表层的坍塌。因此考虑不同初始含水率下饱和弱膨胀土的残余强度是具有重要的意义。试验结果中,初始含水率为 25.6% 时,残余内摩擦角 φ 为 8°,反而出现了上升,这是因为残余强度直剪仪反复四次剪切没有达到其残余强度,具体原因在本文后面有重点分析。

表 5 残余强度数值分析结果

Table.5 Numerical analysis of residual strength

竖向应力 σ/kPa	线性拟合	对数拟合	指数拟合
100	$\tau_q = -3.1643\omega + 119.98$ $R = 0.9387$	$\tau_q = -66.7\ln(\omega) + 255.98$ $R = 0.9217$	$\tau_q = 213.44e^{-0.067\omega}$ $R = 0.9189$
200	$\tau_q = -8.4753\omega + 261.35$ $R = 0.9947$	$\tau_q = -180.8\ln(\omega) + 632.19$ $R = 0.9884$	$\tau_q = 972.28e^{-0.119\omega}$ $R = 0.9790$
300	$\tau_q = -9.9559\omega + 312.55$ $R = 0.996$	$\tau_q = -214.3\ln(\omega) + 754.22$ $R = 0.9989$	$\tau_q = 931.88e^{-0.107\omega}$ $R = 0.9984$
400	$\tau_q = -8.98\omega + 300.44$ $R = 0.9733$	$\tau_q = -195\ln(\omega) + 703.92$ $R = 0.9846$	$\tau_q = 632.91e^{-0.084\omega}$ $R^2 = 0.9885$

表 4 强度参数

Table.4 Strength parameters

初始含水率/%	抗剪强度		残余强度	
	c/kPa	$\varphi/(\circ)$	c/kPa	$\varphi/(\circ)$
17.8	67.5	22.9	45.5	15.4
20.5	60.6	21.8	44.7	10.6
22.6	53.9	20.7	43.8	7

吴迪等^[2]提出残积土的含水率与残余黏聚力呈正线性关系,含水率与残余内摩擦角呈负线性关系。笔者通过对本次试验,在竖向应力为 100 kPa ,200 kPa,300 kPa,400 kPa 作用下,利用线性拟合、对数拟合、指数拟合,对初始含水率与残余强度之间的关系进行比较,拟合结果如表 5 所示。由表 5 可看出,竖向应力为 100 kPa ,200 kPa 作用下,初始含水率与残余强度的线性相关系数最高,分别是 $R = 0.9387$ 、 $R = 0.9947$;竖向应力为 300 kPa 时,对数相关系数 $R = 0.9989$,指数相关系数 $R = 0.9984$,两者拟合效果都较高,因此采用两种函数拟合均可;竖向应力为 400 kPa 作用下,初始含水率与残余强度的指数相关系数最高, $R = 0.9885$ 。针对本地区本次试验数据结果来看,建议在竖向应力为 300 kPa,400 kPa 作用下,初始含水率与残余强度呈指数关系。拟合关系曲线如图 3 所示。因此,合肥地区弱膨胀土残余强度与初始含水率之间的关系方程可参考指数方程,即

$$\tau_q = \alpha\omega + b \tag{2}$$

$$\tau_q = ce^{-d\omega} \tag{3}$$

式中: τ_q ——弱膨胀土的残余强度,kPa;

ω ——弱膨胀土初始含水率,%;

α, b ——竖向应力为 100 kPa ,200 kPa 作用下膨胀土相关参数;

c, d ——竖向应力为 300 kPa ,400 kPa 作用下膨胀土相关参数。

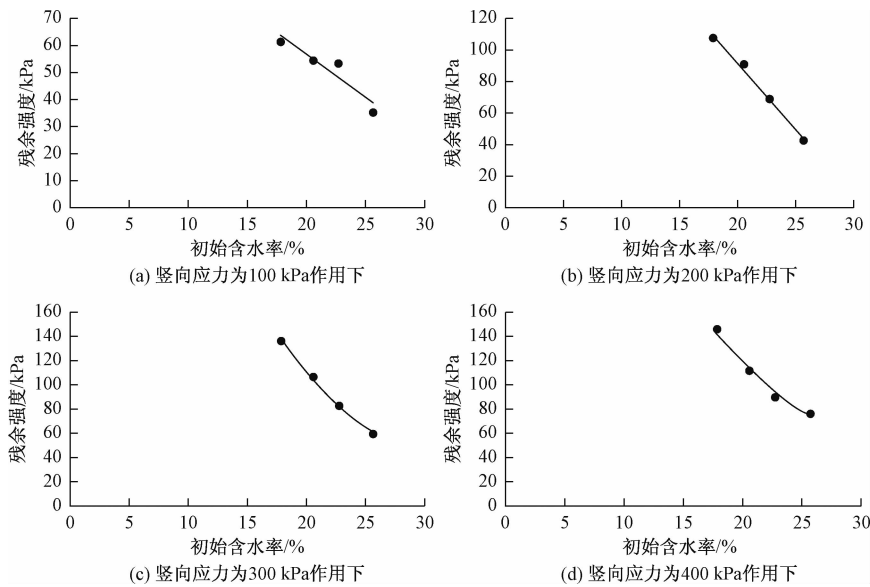


图3 不同竖向应力作用下初始含水率与膨胀土残余强度关系曲线

Fig.3 The relationship between initial water content and residual strength of expansive soil under different vertical stress

2.2 剪应力-剪位移曲线分析

由图4(a)、(b)、(c)、(d)可以看出,随着初始含水率的增加,膨胀土的抗剪强度在下降,剪应力-剪位移曲线由应变软化型-软化不明显-应变硬化型。初始含水率为17.8%和20.5%时,第一次剪切曲线均呈现应变软化型,初始含水率为22.6%时,应变软化现

象并不明显,当初始含水率增加至25.6%时,第一次剪切曲线呈现应变硬化型。主要是因为初始含水率越高,膨胀土吸力越小,强度贡献越低,在吸水饱和后,吸力更显著降低,土体受到竖向应力作用后,强度下降不明显,因此剪切曲线呈现出不同程度的软化现象和硬化现象。

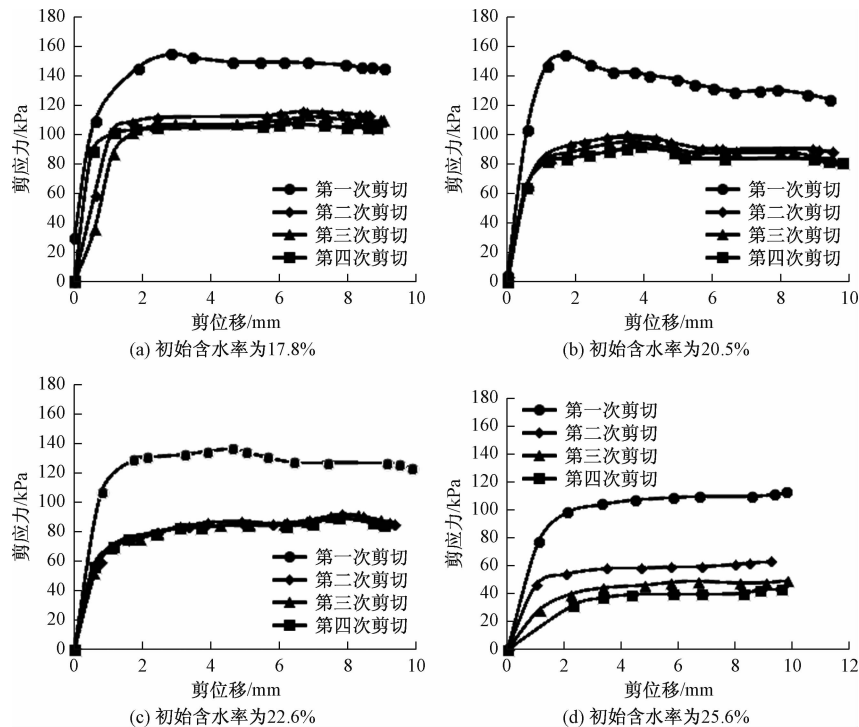


图4 不同初始含水率的试样在200 kPa作用下的剪应力-剪位移关系曲线

Fig.4 Shear stress-shear displacement curve of soil samples with different initial moisture content under the vertical stress of 200 kPa

由图5~6可以看出,初始含水率为17.8%、20.5%时,第二次剪切相对于第一次剪切强度下降幅度较大,可高达35.7%。第三次和第四次剪切峰值比较接近,差值幅度均值在3%左右,最小在0.07%。因此以第四次剪切峰值为残余强度。因为第一次剪切后,膨胀土出现剪切错动面,黏聚力下降,抗剪强度主要有内摩擦角提供;随着剪切次数的增加,剪切面颗粒不断发生定向排列现象,直至剪切面趋于光滑,最终达到膨胀土的残余强度。

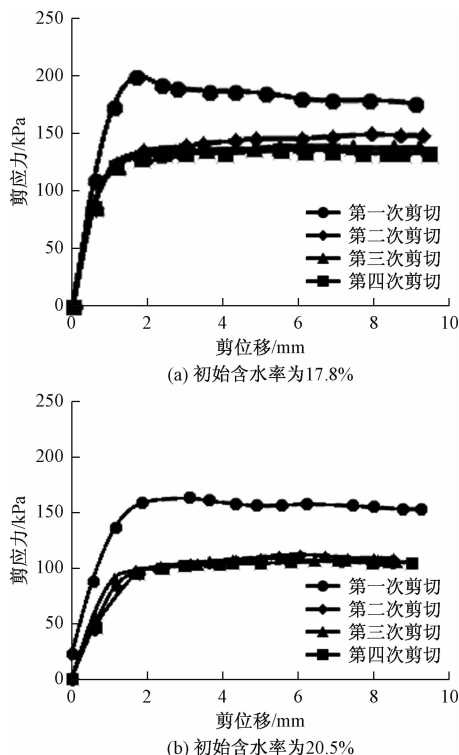


图5 不同初始含水率的试样在竖向应力为300 kPa作用下的剪应力-剪位移关系曲线

Fig.5 Shear stress-shear displacement curve of soil samples with different initial moisture content in vertical stress of 300 kPa.

由图7~8可以看出,在300 kPa、400 kPa作用下,初始含水率为22.6%和25.6%的剪应力-剪位移曲线呈应变硬化型。第三次和第四次剪切曲线没有达到稳定状态,如果以第四次剪切峰值作为残余强度是不准确的。换言之采用残余强度剪切仪作较高含水率膨胀土的残余强度是不合适的,试验发现,较高初始含水率膨胀土要达到稳定的残余强度,需要更大的剪切位移,这也是残余强度试验仪的缺点,直剪的剪切位移是有限的,最大剪切位移为10 mm,不能完全满足黏粒成分的重新定向排列。测定较高初始含水率的膨胀土残余强度,可借助环剪仪进行研究^[14-16]。这也是后续课题研究的一大重点。但是在200 kPa作用下,初始含

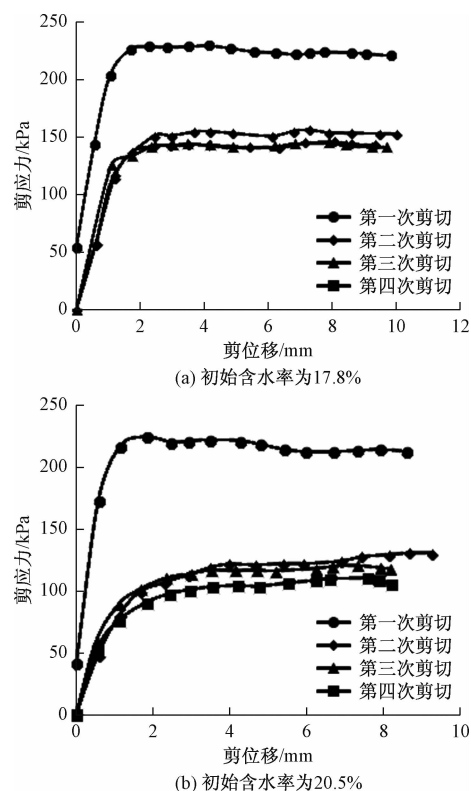


图6 不同初始含水率的土样在竖向应力为400 kPa作用下的剪应力-剪位移关系曲线

Fig.6 Shear stress-shear displacement curve of soil samples with different initial moisture content under the vertical stress of 400 kPa.

水率为22.6%试样却达到了稳定的残余强度,主要是因为试样受到较小的竖向应力,膨胀性相对较大,使得土粒间的水膜变厚,同时反复剪切过程中剪切面水膜继续增厚,土粒的排列更整齐且易滑动,导致强度进一步降低,并随剪切位移不断增大最终趋于稳定。

2.3 剪切位移的分析

表6显示,在较低初始含水率(17.8%、20.5%)下,第一次剪切峰值(抗剪强度)对应的剪切位移在4 mm以内。第二次剪切位移明显大于第一次剪切位移,进行第三次、第四次剪切后,剪切位移并没有呈现持续增加或者持续减少的规律。同时竖向应力的增加,也没有发生剪切位移的规律性。较高初始含水率(22.6%、25.6%)下,第一次剪切峰值(抗剪强度)对应的剪切位移都超过了4 mm,除了初始含水率为22.6%,在300 kPa竖向应力作用下,剪切位移为2.89 mm。虽然剪切位移与初始含水率、竖向应力没有准确的规律性变化,但是从表5中可以得出,初始含水率为17.8%和20.5%时,其残余强度所对应的剪切位移不超过8 mm。因此,采用反复剪切试验测定较低初始含水率残余强度时,最大剪切位移可以8 mm作为参考值。

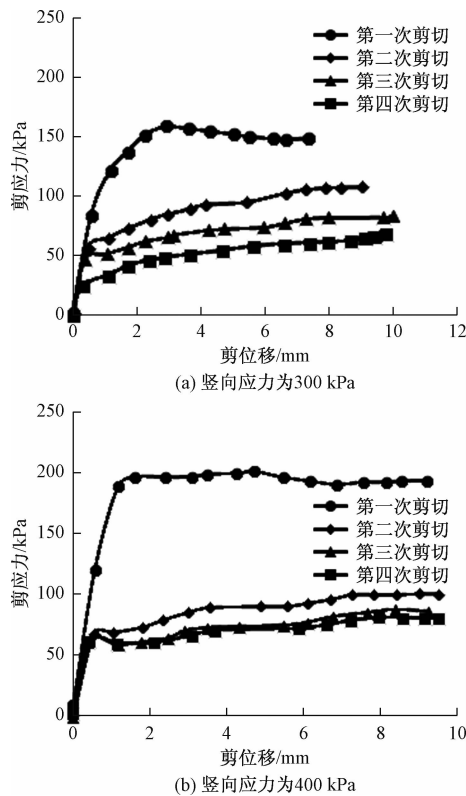


图 7 初始含水率为 22.6% 的土样在不同竖向应力作用下的剪应力 - 剪位移关系曲线

Fig. 7 The shear stress-shear displacement relation curve of soil samples with the initial moisture content of 22.6% under different vertical stresses

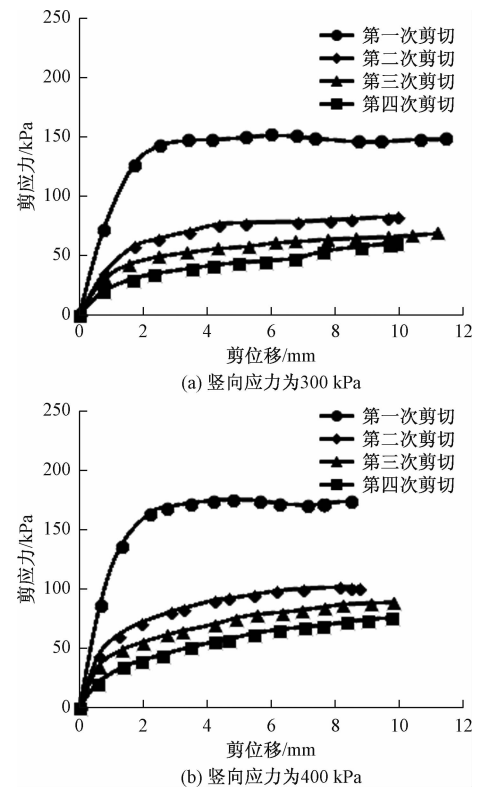


图 8 初始含水率为 25.6% 的土样在不同竖向应力作用下的剪应力 - 剪位移关系曲线

Fig. 8 The shear stress-shear displacement relation curve of soil samples with the initial moisture content of 25.6% under different vertical stresses

表 6 不同竖向应力作用下的剪切位移表

Table 6 Shear displacements under different vertical stresses

初始含水率/%	200 kPa 下剪切位移/mm				300 kPa 下剪切位移/mm				400 kPa 下剪切位移/mm			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
17.8	2.812	6.822	6.626	6.485	1.79	8.758	6.345	5.881	3.94	7.481	8.043	7.295
20.5	1.676	3.443	3.603	3.875	2.543	6.042	6.577	5.781	1.593	9.926	7.131	7.224
22.6	4.583	7.785	7.973	7.789	2.89	7.722	9.986	9.97	4.555	9.818	8.531	9.926
25.6	9.604	8.569	9.994	9.267	5.241	8.027	9.898	8.324	9.176	8.387	9.922	9.993

3 小结

(1) 初始含水率对弱膨胀土的抗剪强度和残余强度都有影响,呈现逐渐减小的趋势。残余强度时低于抗剪强度的,降低的原因主要是内摩擦角的降低。初始含水率越高,竖向应力越大,残余强度相对于抗剪强度的降低幅度也就越大。

(2) 研究初始含水率与残余强度的关系,通过线性拟合、对数拟合和指数拟合比较,得出竖向应力为 100 kPa、200 kPa 作用下,初始含水率与弱膨胀土残余强度呈线性关系;竖向应力为 300 kPa、400 kPa 作

用下,初始含水率与弱膨胀土残余强度呈指数关系,为合肥地区弱膨胀土残余强度的计算提供理论依据。

(3) 随着初始含水率的增大,竖向应力的增加,弱膨胀土的剪应力 - 剪位移曲线由应变软化型 - 软化不明显型 - 应变硬化型,主要是由于吸水饱和,吸力下降的原因。在四次反复剪切过程中,不管初始含水率及竖向应力的变化,四次剪切位移并没有呈现规律性的变化。

(4) 初始含水率较低时,采用残余强度直剪仪可以确定弱膨胀土稳定的残余强度;初始含水率较高时,可考虑环剪仪进行残余强度的测定。合肥地区膨胀土的初始含水率主要分布在 18% ~ 21%,采用反复直剪

试验是可以得出稳定的残余强度,残余强度的最大剪切位移可以8 mm作为参考。

参考文献:

- [1] 左巍然,杨和平,刘平. 确定膨胀土残余强度的试验研究[J]. 长沙交通学院学报,2007,23(1):23-27.
ZUO Weiran, YANG Heping, LIU Ping. Study on the determination of residual strength for expansive soil [J]. Journal of Changsha Jiaotong University, 2007, 23(1):23-27.
- [2] 吴迪,简文斌,徐超. 残积土抗剪强度的环剪试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(7):2045-2050.
WU Di, JIAN Wenbin, XU Chao. Research on shear strength of residual soils by ring shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7):2045-2050.
- [3] BISHOP A W, et al. A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength [J]. Geotechnique, 1971, 21(4): 273-328.
- [4] 孙涛,洪勇,栾茂田,等. 采用环剪仪对超固结黏土抗剪强度特性的研究[J]. 岩土力学,2009,32(7):2016,32(7):2000-2010.
SUN Tao, HONG Yong, LUAN Maotian et al. Shear strength behavior of overconsolidated clay in ring shear tests[J], Rock and Soil Mechanics, 2009, 32(7): 2000-2010.
- [5] 闫芙蓉,胡雪源. 黄土大剪切位移下的强度特性研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版),2016,26(3):18-21.
YAN Furong, HU Xueyuan. Strength characteristics research of loess under large shear displacement[J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2006, 26(3):18-21.
- [6] 张晓丽. 膨胀土残余强度研究[D]. 华北水利水电大学,2013.
ZHANG Xiaoli. Experimental study on expansive soil residual strength [D]. North China Water Resources and Hydropower University, 2013.
- [7] 肖杰,杨和平,王兴正,等. 南宁外环膨胀土抗剪强度非线性特征及影响因素分析[J]. 中国公路学报,2014,27(10):1-7.
XIAO Jie, YANG Heping, WANG Xingzheng, et al. Analysis of nonlinear characteristics of shear strength of Nanning expansive soil and its influencing factors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(10):1-7.
- [8] 余飞,陈善熊,许锡昌,等. 合肥地区膨胀土路基处置深度问题探讨[J]. 岩土力学,2006(11):1963-1966,1973.
YU Fei, CHEN Shanxiong, XU Xichang, et al. Study on determination of treatment depth for expansive soil subgrade in Hefei[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006 (11):1963-1966,1973.
- [9] 谭晓慧,辛志宇,沈梦芬,等. 湿胀条件下合肥膨胀土土-水特征研究[J]. 岩土力学,2014,35(12):3352-3360,3369.
TAN Xiaohui, XIN Zhiyu, SHEN Mengfen, et al. Study of soil-water characteristics of Hefei expansive soil under moisture-expansion condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12):3352-3360,3369.
- [10] 孙凤贤,阮传贵,马作明. 安徽省中部膨胀土的胀缩特性研究[J]. 安徽地质,2004,14(1):33-39.
SUN Fengxian, YUAN Chuangui, MA Zuoming. Study on expansion-shrinkage characteristics of soil in the middle of Anhui[J]. Geology of Anhui, 2004, 14(1):33-39.
- [11] SKEMPTON A W. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory [J]. Geotechnique, 1985, 35(1):3-18.
- [12] 公路土工试验规程:JTG E40-2007[S].
Test Methods of Soil for Highway Engineering: JTG E40-2007[S].
- [13] 许业顺,尹占巧,杜修力,等. 黏性土的抗剪强度特性试验研究[J]. 水利学报,2013,44(12):1433-1438.
XU Yeshun, YIN Zhanqiao, DU Xiuli, et al. Experimental study of shear strength of clay[J]. Shuili Xuebao, 2013, 44(12):1433-1438.
- [14] 戴福初,王思敬,李焯芬. 香港大屿山残坡积土的残余强度试验研究[J]. 工程地质学报,1998,6(3):223-229.
DAI Fuchu, WANG Sijing, LI Chaofen. The drained residual strength of volcanics-derived soil sampled on Lantau island, Hongkong[J]. Journal of Engineering Geology, 1998, 6(3):223-229.
- [15] 杨有莲,朱俊高,余挺,等. 土与结构接触面力学特性环剪试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(11):3256-3260.
YANG Youlian, ZHU Jungao, YU Ting, et al. Experimental study of mechanical behaviour of soil-structure interface by ring shear test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11):3256-3260.
- [16] 洪勇,孙涛,栾茂田,等. 土工环剪仪的开发及其应用研究现状[J]. 岩土力学,2009,30(3):628-634.
HONG Yong, SUN Tao, LUAN Maotian, et al. Development and application of geotechnical ring shear apparatus: an overview [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3):628-634.