

控制吸力下低应力条件的合肥膨胀土抗剪强度试验

侯超群,张荣健,李永鑫

(合肥工业大学 汽车与交通工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要:膨胀土边坡在变饱和条件下可能发生浅层滑塌失稳。为了研究非饱和膨胀土在低应力条件下的强度特性,采用非饱和三轴仪设置多组不同基质吸力和应力条件,进行合肥膨胀土的三轴剪切试验,对试验数据进行分析。试验结果表明:当膨胀土所受净围压应力不断降低时,其应力-应变曲线会由应变硬化向应变软化过渡;非饱和膨胀土强度随基质吸力增大而增大;浅层膨胀土的抗剪强度会呈现明显降低,具有非线性特点;非饱和膨胀土的黏聚力对抗剪强度影响显著,低应力条件下黏聚力会显著降低,内摩擦角明显增大;净围压应力对低应力段土体强度影响明显,而基质吸力对低应力段土体强度影响较弱。

关键词:合肥膨胀土;抗剪强度;非饱和三轴试验;低应力条件;基质吸力;非线性

中图分类号:U414

文献标志码:A

Shear Strength Test of Hefei Expansive Soil under Low Stress Conditions with Controlled Suction

HOU Chaoqun, ZHANG Rongjian, LI Yongxin

(School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: Topsoil slide and instability of expansive soil slopes may occur under variable saturation conditions. In order to study the strength characteristics of unsaturated expansive soil under low stress conditions, several different matrix suction and stress conditions were set by unsaturated triaxial apparatus. The triaxial shear test of Hefei expansive soil was carried out, and the test data were analyzed. The test results show that when the net confining stress on the expansive soil continues to weaken, the stress-strain curve transitions from strain hardening to strain softening. The strength of unsaturated expansive soil increases with increasing matrix suction. The shear strength of shallow expansive soil shows a significant reduction with non-linear characteristics. The cohesion of unsaturated expansive soils has a significant effect on the shear strength. The cohesion decreases significantly under low stress conditions, and the internal friction angle increases significantly. The net confining stress significantly affects the strength of the soil at the low stress level, but matrix suction has a weak effect on the strength of the soil at the low stress level.

Keywords: Hefei expansive soil; shear strength; unsaturated triaxial test; low stress conditions; matrix suction; non-linear

0 引言

膨胀土因富含伊利石和蒙脱石等亲水性矿物成分,具有明显的胀缩性、超固结性和裂隙性特点,使得膨胀土在工程建设中成为一种特殊性土,不能直

接用作建筑物基础或者作为道路路基。对于膨胀土边坡,在大气急剧影响深度内,土体的湿度、温度等受外部环境影响显著,呈现明显的非饱和特征。已有文献表明,膨胀土地区的边坡容易出现浅层失稳破坏,其破坏深度一般在2.5 m内^[1]。边坡浅层滑动

收稿日期:2022-09-22(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(编号:5210081105);安徽省自然科学基金青年基金资助项目(编号:2108085QE250)

作者简介:侯超群,男,博士,副教授.E-mail:houcq@hfut.edu.cn

破裂面上所受上部土体应力作用,处于低应力条件,土体强度的非线性、应变软化是其典型表现,同时也影响到其稳定状态^[2]。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[3]进行常规直剪或三轴试验而获取的抗剪强度参数,难以反映实际边坡浅层滑动破裂面上的土体强度特性。

为获取非饱和膨胀土浅层边坡滑面上土体的抗剪强度,探索膨胀土边坡的浅层失稳破坏机理,国内外诸多学者从试验方法、强度理论等多方面开展了较为系统的研究,取得了一系列的科研成果。包承纲^[4]指出膨胀土边坡坍塌具有浅层性、渐进性和长期性等特点;肖杰等^[5-6]利用直剪仪对南宁膨胀土进行研究,指出干密度、干湿循环等因素对低应力条件下土的抗剪强度的影响,发现抗剪强度包线在低应力段呈现明显的非线性特征;杨和平等^[7]利用高应力段、低应力段的不同直剪试验结果,得出黏聚力的显著衰减是边坡浅层坍塌的主要原因;徐筱等^[8]发现处于低应力条件下的试样,在含水率低于塑限时,对试样进行剪切将会发生应变软化和剪切膨胀现象;蔡树生^[9]指出膨胀土因增湿而膨胀的同时,会引起浅层边坡土体干密度减小,抗剪强度参数降低,最终导致边坡失稳破坏;高小云等^[10]发现浅层土体在多次经历干湿循环、冻融循环和干湿-冻融循环后,土体颗粒的原有结构被多次破坏,粒间联结弱化,使土体黏聚力呈指数衰减,破坏强度会发生明显衰减;殷宗泽等^[11-12]详细阐述裂隙和边坡稳定性的联系,裂隙的出现会明显降低边坡土体的抗剪强度,削弱其抗滑能力,同时强调裂隙因素是边坡稳定性分析的关键部分。

目前,在对低应力条件下膨胀土的强度特性研究中,多以直剪设备上覆压力代替竖向压力,土体水平向受力不能得到较好模拟;或者利用三轴仪器主要围绕干密度、干湿循环、含水率、冻融循环和裂隙等进行分析,对控制基质吸力情况下的浅层非饱和膨胀土强度特性的研究较少。

综上所述,本文以合肥膨胀土为研究对象,利用非饱和三轴仪,在控制基质吸力的条件下,以净围压为试样提供应力环境,分别开展含低应力条件(15 kPa、30 kPa、40 kPa、50 kPa)、常应力条件(100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa),共8组应力条件下重塑样的三轴固结排水剪切试验,通过对低应力条件与

常应力条件的试验结果、强度参数的比较,研究在低应力条件下合肥膨胀土的非饱和强度特性,对于非饱和合肥膨胀土地区浅层边坡防护具有重要的参考意义和工程实际价值。

1 试验方案

1.1 土样的基本物理指标

试验土样取于合肥市永和路与宁西路交叉口,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[3]测得土样的基本物理性质指标如表1所示。根据《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112—2013)^[13],该土分类为弱膨胀性膨胀土。

表1 土样的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical property indexes of soil samples

天然干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	天然含水 率/%	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	自由膨胀 率/%
1.59~1.67	22.06~23.67	51.57	30.86	20.71	50.6

1.2 试样制备和试验方案

因取土现场很难采集均匀的原状土样,为避免原状土样不均匀性影响试验结果,本次试验控制试样为干密度 1.6 g/cm^3 的重塑样,制备时保证试样均匀^[14]。

(1) 试验制备

① 原状土风干后进行碾碎过筛,配制初始含水率为20%的土样,并密封养护24 h,根据击实法操作要求,分5层进行试样制备,制成试样要求重量为184.43 g,干密度为 1.6 g/cm^3 ,允许误差小于 0.02 g/cm^3 ;② 制好的试样置于真空装置中进行真空抽气饱和,在维持负压1 h后,用水浸没至少24 h,得到三轴试验所需饱和试样;③ 利用非饱和三轴仪进行控制吸力的固结排水以及剪切操作,剪切时试样的轴向应变至15%时停止剪切。

(2) 试验方案

本次试验的具体方案如表2所示。相同基质吸力情况下做8组不同应力条件的剪切试验,本次试验共32组。基质吸力50~400 kPa 占据土样土水特征中的主要过渡区间,该吸力范围内,随着试样含水率的降低,基质吸力将显著增大。破坏点选取根据《土工室内试验教程》^[15]规定:当应力-应变关系曲线存在峰值时,破坏点取在峰值点处;当不存在峰值时,

破坏点取在轴向应变 15% 对应处。

表 2 三轴试验剪切方案

Table 2 Triaxial test shear scheme

干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	基质吸力/ kPa	净围压/ kPa
1.6	50、100、200、400	15、30、40、50、100、200、300、400

2 试验结果与分析

2.1 应力-应变特征

合肥膨胀土试样在低应力、常应力条件下进行三轴固结排水剪切试验, 试验后试样大多数最终呈现鼓胀型破坏, 只有在低应力 15 kPa 条件下, 试样呈现明显的破坏截面。通过试验结果整理, 得到应力-应变关系曲线, 如图 1 所示。同时所得到的破坏点数据如图 2 所示。

由图 1 可以得出: 在控制基质吸力相同的情况下, 抗剪强度随着所受应力的增加而增大, 除低应力 15 kPa 试验组出现明显峰值和应变软化现象外, 其

余应力情况均呈现明显的应变硬化特征, 同时偏应力增长速率也在不断变小, 趋于平稳^[16]。这是因为吸力相同条件下, 随着试样所受净围压应力越大其试样自身的抗剪强度也会得到明显增强。处于低应力段的试样在轴向应变达到 15% 之前, 偏应力均达到破坏峰值, 同时在达到峰值后, 应力-应变曲线趋于平缓或略微降低, 表现为应变软化; 处于常应力段的试样在达到轴向应变 15% 时, 却仍有着明显的增长趋势, 并且随着应力增大, 增长趋势越强表现为应变硬化。

由图 2 可以得出: 在相同基质吸力的情况下, 随着净围压的增大, 合肥膨胀土的破坏点偏应力也明显增大, 低应力条件下的膨胀土破坏点偏应力偏小且曲线斜率更陡, 在常应力条件下曲线较为平缓, 说明在低应力条件下膨胀土破坏点应力会有明显的衰减, 这也是导致处于浅层边坡发生坍塌失稳的重要原因。同时在相同净围压的情况下, 破坏点偏应力随着基质吸力的增大呈现明显增大, 抗剪强度得到明显提高, 即抗剪强度随基质吸力的增大而增大, 这

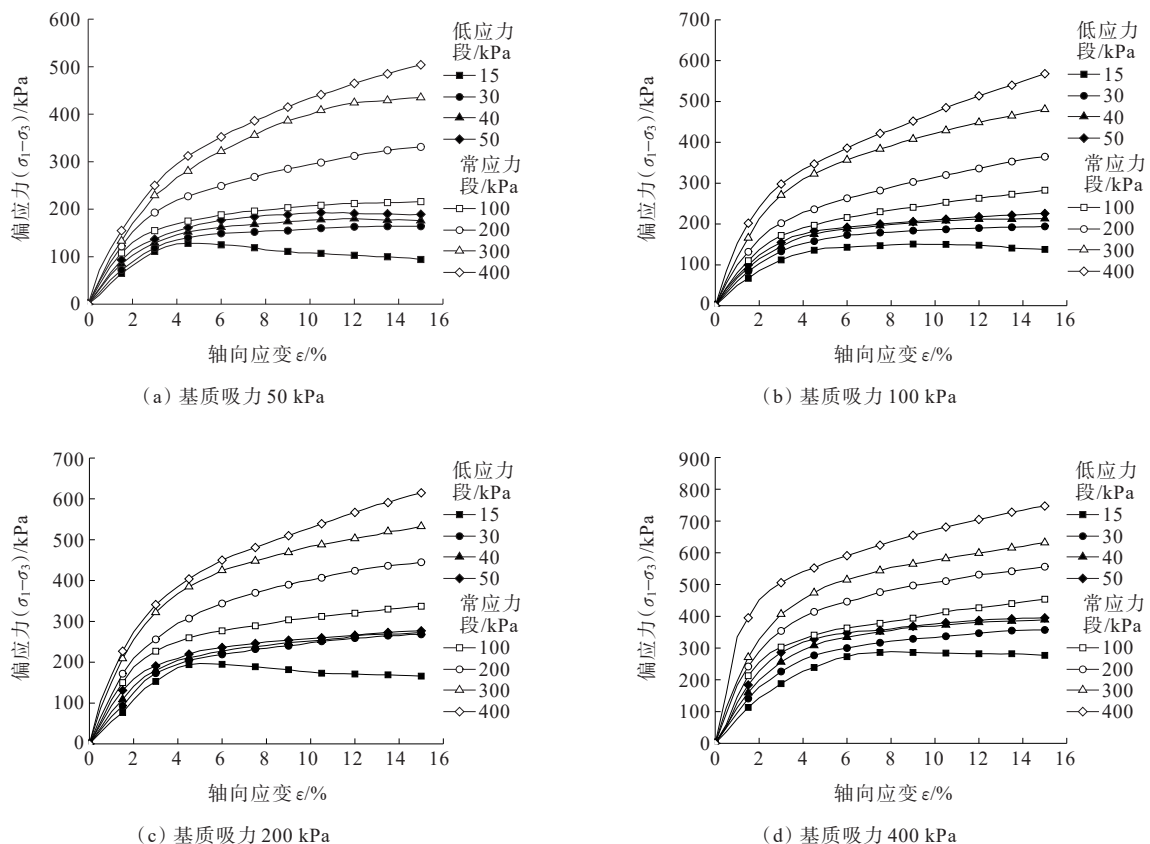


图 1 不同应力下试样应力-应变关系图

Figure 1 Stress-strain relationship of soil samples under different stress levels

是因为基质吸力与试样含水率紧密相关,土中的含水率降低,导致土粒间的水膜变薄,基质吸力增大时,结合水膜的胶结作用将得到提高,膨胀土的抗剪强度也会增强。

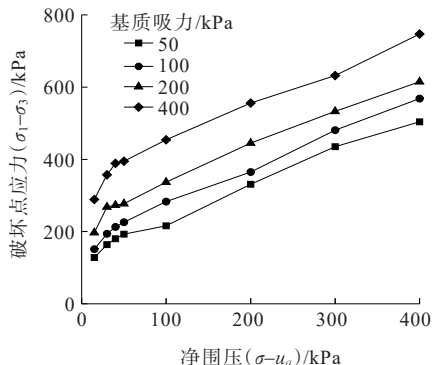


图2 不同吸力下试样破坏点应力-净围压关系图

Figure 2 Stress-net confining stress curve at damage point of soil sample under different suction conditions

2.2 抗剪强度参数校正

本次求解抗剪强度参数,需要将控制不同基质吸力和应力状态的非饱和土等效为饱和土进行处理^[17]。根据太沙基的有效应力原理结合库仑公式,可将饱和土抗剪强度 τ 表示为:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi' = c' + (\sigma - u_w) \tan \varphi' \quad (1)$$

式中: σ 为土体总应力; σ' 为有效法向应力; u_w 为孔隙水压力; c' 和 φ' 分别为饱和土的有效黏聚力和有效内摩擦角。

Fredlund在采用双应力状态变量的基础上,基于莫尔-库仑强度理论,提出的非饱和土双应力状态变量抗剪强度公式为:

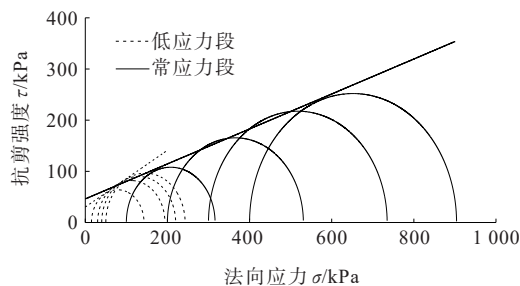
$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi^b + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (2)$$

式中: u_a 为孔隙气压力; φ^b 为基质吸力所对应的内摩擦角。

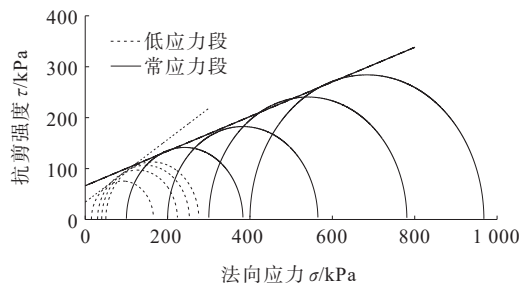
将式(2)中的 $c' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b$ 等效为饱和土强度公式中的有效黏聚力,即可作为非饱和土在该吸力条件下的“等效黏聚力 c ”。

以非线性规划求解^[18]的方式确定非饱和土样在不同应力状态下的莫尔圆公切线,即校正前抗剪强度包络线,如图3所示。公切线的截距代表非饱和土在该吸力条件下的“等效黏聚力”,斜率代表非饱和土在该吸力条件下的有效内摩擦角的正切值。已有研究指出^[19],土体在低应力状态下,其抗剪强度通常体现为非线性变化,所以本文将低应力段的强度包

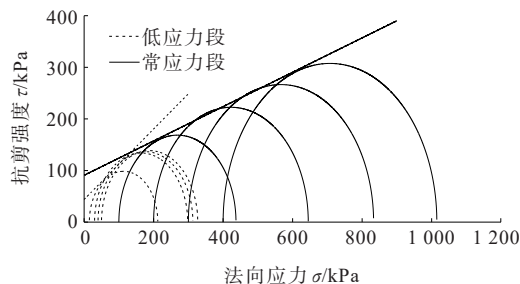
线与常应力段的强度包线进行分段绘制,能更好地符合实际强度情况。



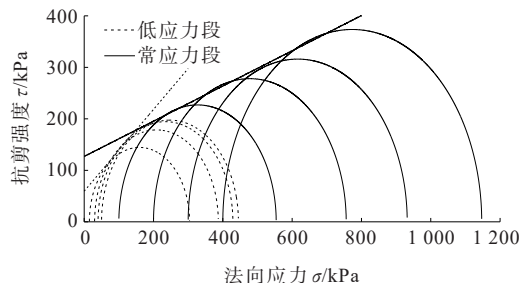
(a) 基质吸力 50 kPa



(b) 基质吸力 100 kPa



(c) 基质吸力 200 kPa



(d) 基质吸力 400 kPa

图3 校正前不同吸力下土样抗剪强度包线

Figure 3 Shear strength envelope of soil sample before correction under different suction conditions

由图3可以得出:在控制基质吸力相同的情况下,合肥膨胀土的全应力段强度将呈现明显的非线性增加,低应力段时强度增速明显较快,在常应力段时强度增速而言较为稳定平缓。

不同应力段的试样所受橡皮膜的约束影响程度不同,根据文献[20]对橡皮膜约束处理为等效围压,得到校正前后不同土样抗剪强度参数见表3。

表 3 校正前后土样抗剪强度指标
Table 3 Shear strength indexes of soil sample before and after correction

项目	基质吸力 ($u_a - u_w$)/ kPa	等效黏聚力 c /kPa		有效内摩擦角 φ' /($^\circ$)	
		低应力段	常应力段	低应力段	常应力段
校正前	50	30.24	46.13	29.01	18.87
	100	34.10	66.28	31.55	18.77
	200	43.99	90.74	34.31	18.41
	400	59.52	127.01	38.44	18.88
校正后	50	25.43	42.39	28.73	19.08
	100	28.79	61.10	31.27	19.09
	200	38.20	87.48	33.99	18.41
	400	52.83	124.64	38.14	18.88

由表3可以看出:对橡皮膜进行校正前后对比发现,橡皮膜校正前后试样的等效黏聚力变化明显,对有效内摩擦角影响几乎可以忽略,对低应力段试样,橡皮膜的径向约束会使得土体等效黏聚力提高12%~19%,对常应力段试样,橡皮膜的径向约束会使得土体等效黏聚力提高2%~9%,所以橡皮膜对低应力段的结果影响更显著。采用校正后的抗剪强度参数分析更为合理准确。

3 抗剪强度参数的影响分析

3.1 等效黏聚力的影响分析

不同应力段下等效黏聚力与基质吸力的关系如图4所示。

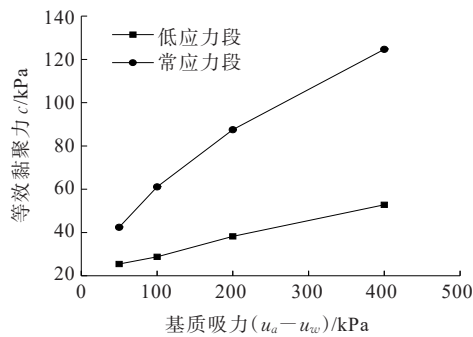


图 4 不同应力段试样等效黏聚力与吸力的关系

Figure 4 Relationship between equivalent cohesion and suction of soil sample at different stress levels

由图4可以得出:随着基质吸力的增大,相同应力条件下的土体黏聚力呈现明显增大,但低应力段增速明显比常应力段缓慢。在相同基质吸力的情况下,处于低应力状态的非饱和膨胀土的黏聚力都比处于常应力状态时小得多,在基质吸力分别为50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa时,其低应力状态下的黏聚力较常应力状态分别减小40.01%、52.88%、56.33%、57.61%。土体中的黏聚力由各种土粒间的物理化学作用力组成,其中包括库仑力、范德华力、胶结作用等,黏聚力可以区分成原始黏聚力和固化黏聚力,原始黏聚力来源于静电力和范德华力,固化黏聚力主要为土粒间胶结物质的胶结作用^[21]。随着基质吸力的增大,非饱和土含水率将会降低,其土粒间水膜变薄,胶结作用得到提高,固化黏聚力会增大;膨胀土具有胀缩性的特点,在相同基质吸力的情况下,膨胀土所受净围压应力越小,则土体的体积压缩量越小,土颗粒的间距就越大,其原始黏聚力和固化黏聚力就会越小。已有研究说明^[22],抗剪强度中的黏聚力指标对于膨胀土边坡的浅层破坏具有重要作用,在进行边坡稳定性分析时,若土体自身的黏聚力越小,则边坡的最危险滑面深度越浅,导致边坡浅层坍塌失稳。

不同应力段等效黏聚力与吸力的函数关系见表4。

表 4 不同应力段等效黏聚力与吸力的函数关系

Table 4 Function relationship between equivalent cohesion and suction at different stress levels

应力段	函数关系	R^2
低应力段	$c = 0.08(u_a - u_w) + 21.47$	0.99
	$c = 13.22 \ln(u_a - u_w) - 29.13$	0.89
常应力段	$c = 0.23(u_a - u_w) + 36.11$	0.96
	$c = 39.40 \ln(u_a - u_w) - 116.22$	0.96

由表4的拟合结果分析可得:不同应力段下的等效黏聚力与基质吸力之间的关系采用线性拟合、对数拟合,均具有良好拟合效果。

3.2 有效内摩擦角的影响分析

不同应力段下有效内摩擦角与基质吸力的关系如图5所示。

由图5可以得出:低应力状态下的非饱和膨胀土有效内摩擦角均比常应力状态的大。因为在低应力条件下,膨胀土的抗剪强度将会发生明显的降低,在

强度包线上体现为斜率更大,即有效内摩擦角要偏大。若将处在低应力范围内的浅层边坡膨胀土有效内摩擦角取为常应力段时,则会严重高估其土体黏聚力和边坡最危险滑面深度。而常应力段有效内摩擦角处在 18° 左右,即土体非饱和时临界状态内摩擦角变化不大^[23]。

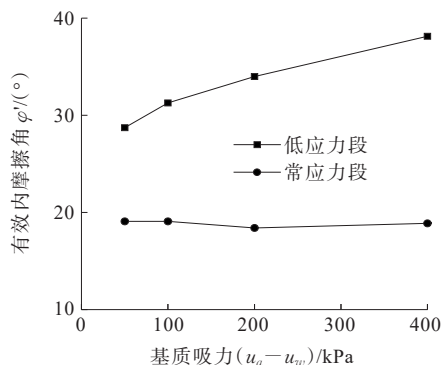


图5 不同应力段试样有效内摩擦角与吸力的关系

Figure 5 Relationship between effective internal friction angle and suction of soil sample at different stress levels

对低应力段下的有效内摩擦角与基质吸力之间的关系进行线性拟合,常应力段下有效内摩擦角变化不大,故取有效内摩擦角结果平均值,结果如表5所示。

表5 不同应力段有效内摩擦角与吸力的函数关系

Table 5 Function relationship between effective internal friction angle and suction at different stress levels

应力段	函数关系	R^2
低应力段	$\varphi' = 0.03s + 28.22$	0.96
常应力段	$\varphi' = 18.87$	

注:表中数值 s 与基质吸力相同,但无单位。

3.3 非饱和抗剪强度公式

以基质吸力为自变量,对表4中函数关系式进行求导,可以得出 $\tan \varphi^b$ 关于基质吸力的表达式,在表4线性函数拟合中,将强度包线的截距认为是饱和土的有效黏聚力,结合表5中有效内摩擦角与基质吸力的函数关系,可以得出不同应力条件下非饱和膨胀土关于基质吸力、净围压应力的抗剪强度公式,如表6所示。

由表6表达式中不同应力条件的净围压应力、基质吸力系数对比分析可得:基质吸力对低应力段非饱和土强度影响更小,而净围压应力对低应力段非饱和土强度影响更大。因为处于低应力段的非饱和

膨胀土,土粒间距大,基质吸力对胶结作用影响不显著,则基质吸力对强度影响更小;而净围压应力的增大,能有效缩小其土粒间距,使得土粒间胶结作用得到显著增强,则净围压应力对强度影响更大。

表6 不同应力条件的合肥膨胀土抗剪强度表达式

Table 6 Expressions of shear strength of Hefei expansive soil under different stress conditions

应力段	表达式
低应力段	$\tau = 21.47 + (\sigma - u_a) \tan (0.03s + 28.22)^\circ + 0.08(u_a - u_w)$
常应力段	$\tau = 21.47 + (\sigma - u_a) \tan (0.03s + 28.22)^\circ + \frac{13.22}{s}(u_a - u_w)$
低应力段	$\tau = 36.11 + (\sigma - u_a) \tan 18.87^\circ + 0.23(u_a - u_w)$
常应力段	$\tau = 36.11 + (\sigma - u_a) \tan 18.87^\circ + \frac{39.40}{s}(u_a - u_w)$

4 结论

(1) 当膨胀土所受净围压应力不断减弱时,土体体积压缩量将减小,其相对密度会减小,且破坏点的偏应力会明显降低,应力-应变曲线会由明显应变硬化向应变软化过渡。在相同净围压应力下,非饱和膨胀土的抗剪强度会随着基质吸力的增大而增大。

(2) 不同应力条件对非饱和膨胀土的抗剪强度影响显著,低应力段抗剪强度呈现明显降低,具有非线性特点,常应力段保持良好的线性增长趋势,对低应力段、常应力段的强度包线应进行分段绘制。

(3) 低应力段的抗剪强度参数与常应力段相比,其黏聚力显著减小,内摩擦角明显增大,反映出膨胀土边坡浅层坍塌失稳的原因。

(4) 开展控制吸力下不同应力条件的合肥膨胀土三轴试验,有利于分析非饱和合肥膨胀土的浅层破坏特性,合理选取膨胀土的抗剪强度参数,对合肥地区膨胀土边坡防护具有重要参考意义和工程实用价值。

参考文献:

References:

- [1] POUL V L D. The mechanics of surficial failure in soil slopes[J]. Engineering Geology, 2010, 114(1/2): 57-64.
- [2] 林京松, 黄岩峰, 杨和平, 等. 干湿循环含低应力条件下百色膨胀土抗剪强度试验研究[J]. 西部交通科技, 2017(4): 32-36.

- LIN Jingsong, HUANG Yanfeng, YANG Heping, et al. Experimental study on shear strength of Baise expansive soil under low stress and dry-wet cycle[J]. Western China Communications Science & Technology, 2017(4):32-36.
- [3] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [4] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1-15.
- BAO Chenggang. Behavior of unsaturated soil and stability of expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 1-15.
- [5] 肖杰, 杨和平, 李晗峰, 等. 低应力条件下不同密度的南宁膨胀土抗剪强度试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(6): 15-21, 37.
- XIAO Jie, YANG Heping, LI Hanfeng, et al. Shear strength test of Nanning expansive soil with various dry densities and low stresses[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6): 15-21, 37.
- [6] 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): 1-8.
- 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): 1-8.
- [7] 杨和平, 唐咸远, 王兴正, 等. 有荷干湿循环条件下不同膨胀土抗剪强度基本特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2311-2317.
- YANG Heping, TANG Xianyuan, WANG Xingzheng, et al. Shear strength of expansive soils under wet-dry cycles with loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2311-2317.
- [8] 徐筱, 蔡国庆, 李舰, 等. 低应力及拉应力条件下非饱和土强度及剪胀特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1933-1942.
- XU Xiao, CAI Guoqing, LI Jian, et al. The strength and dilatancy characteristics of unsaturated soil at low and tensile stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(8): 1933-1942.
- [9] 蔡树生. 增湿膨胀对膨胀土抗剪强度指标的影响试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020.
- CAI Shusheng. Experimental study on the influence of humidification and expansion on shear strength index of expansive soil[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020.
- [10] 高小云, 刘家国, 赵贵涛, 等. 低应力状态下干湿-冻融循环对季冻区膨胀土强度的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(2): 24-28.
- GAO Xiaoyun, LIU Jianguo, ZHAO Guitao, et al. Effects of wetting-drying and freezing-thawing cycles on the strength of expansive soil in seasonal frozen area[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(2): 24-28.
- [11] 殷宗泽, 韦杰, 袁俊平, 等. 膨胀土边坡的失稳机理及其加固[J]. 水利学报, 2010, 41(1): 1-6.
- YIN Zongze, WEI Jie, YUAN Junping, et al. Mechanism of slope slide of expansive soil and reinforcement for the slope[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(1): 1-6.
- [12] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2155-2161.
- YIN Zongze, YUAN Junping, WEI Jie, et al. Influences of fissures on slope stability of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2155-2161.
- [13] 中国建筑科学研究院. 膨胀土地区建筑技术规范 GB 50112—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- China Academy of Building Research. Technical code for buildings in expansive soil regions: GB 50112—2013[S]. Beijing: China Architecture & Industry Press, 2012.
- [14] 邹洪宝. 土样的不同制备方法对其性质的影响分析[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 253-257.
- ZOU Hongbao. Analysis of influence of different preparation methods of soil samples on their properties[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(2): 253-257.
- [15] 高华东. 土工室内试验教程[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2010.
- GAO Huadong. Geotechnical indoor test course[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2010.
- [16] 潘明, 全飞. 基于不同含水率下重塑黄土强度特性试验研究[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 208-211.
- PAN Ming, TONG Fei. Experimental study on strength characteristics of remolded loess under different moisture content[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(3): 208-211.
- [17] 席瑶. 控制吸力下的合肥膨胀土非饱和强度特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.

- 2020,26:3449-3457.
- [10] REN X C, HU K. Effect of nanosilica on the physical and mechanical properties of silty clay[J]. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 2014, 6(11):1010-1013.
- [11] 周斌,高磊,余湘娟. 纳米 Al_2O_3 改性粘土试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(2):74-78.
- ZHOU Bin, GAO Lei, YU Xiangjuan. Experimental research on nanometer alumina modified clay[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(2):74-78.
- [12] 肖继强. 公路路基纳米复合材料固化土试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.
- XIAO Jiqiang. Highway subgrade nano composites solidified soil experimental study[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [13] 王文军,朱向荣. 纳米硅粉水泥土的强度特性及固化机理研究[J]. *岩土力学*, 2004, 25(6):922-926.
- WANG Wenjun, ZHU Xiangrong. Study on strength property of nanometer silica fume reinforced cemented soil and reinforcement mechanism[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(6):922-926.
- [14] TABARSA A, LATIFI N, MEEHAN C L, et al. Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay: A sustainable material for construction[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 158:454-463.
- [15] 张建伟,亢飞翔,边汉亮,等. 冻融循环下木质素改良黄泛区粉土无侧限抗压强度试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(S2):1-6.
- ZHANG Jianwei, KANG Feixiang, BIAN Hanliang, et al. Experiments on unconfined compressive strength of lignin modified silt in Yellow River flood area under freezing-thawing cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(S2):1-6.
- [16] 高英力,何倍,邹超. 纳米颗粒对道路粉煤灰混凝土耐磨性能的影响及作用机理[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(2):441-448.
- GAO Yingli, HE Bei, ZOU Chao. Effect and mechanism of nano-particles on wear resistance of road fly ash concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(2):441-448.
- [17] 孙嘉兴,谷天峰,孔嘉旭,等. 滑带土与原状土的显微结构对比分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(3):126-133.
- SUN Jiaying, GU Tianfeng, KONG Jiaxu et al. Comparative analysis of microstructure of slip zone soil and undisturbed soil[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(3):126-133.
- [18] 陆海通,许乾慰. 环境扫描电镜工作原理及应用[J]. *上海塑料*, 2019(3):1-7.
- LU Haitong, XU Qianwei. Working principle and application of environmental scanning electron microscope [J]. *Shanghai Plastics*, 2019(3):1-7.

(上接第54页)

- XI Yao. Study on unsaturated strength characteristics of Hefei expansive soil under controlled suction[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [18] 阮波,张向京,彭意. Excel规划求解三轴试验抗剪强度指标[J]. *铁道科学与工程学报*, 2009, 6(5):57-60.
- RUAN Bo, ZHANG Xiangjing, PENG Yi. Programming solver tools of Excel evaluate shear strength parameters from results of triaxial tests[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2009, 6(5):57-60.
- [19] 程展林,李青云,郭熙灵,等. 膨胀土边坡稳定性研究[J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(10):102-111.
- CHENG Zhanlin, LI Qingyun, GUO Xiling, et al. Study on the stability of expansive soil slope[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011, 28(10):102-111.
- [20] 郭爱国,茜平一. 三轴压缩试验中橡皮膜约束影响的校正[J]. *岩土力学*, 2002, 23(4):442-445.
- GUO Aiguo, QIAN Pingyi. Corrections for influence of membrane restraint in triaxial test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(4):442-445.
- [21] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- LI Guangxin. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [22] FREDLUND D G, KRAHN J. Comparison of slope stability methods of analysis[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1977, 14(3):429-439.
- [23] MAKSIMOVIC M. A family of nonlinear failure envelopes for non-cemented soils and rock discontinuities [J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 1996.