

DOI: 10.3969/j.issn.1003-0972.2017.03.028

# 基质吸力作用下非饱和粉土强度特性研究

李新明<sup>1\*</sup> 张昊<sup>2</sup> 孙玉周<sup>1</sup>

(1. 中原工学院 建筑工程学院 河南 郑州 450007; 2. 信阳师范学院 建筑与土木工程学院 河南 信阳 464000)

**摘要:** 为研究豫东高速公路路基填筑粉土的非饱和力学特性,采用四联非饱和土直剪仪进行控制吸力条件下的强度特性试验,着重分析吸力对非饱和粉土强度的贡献,并对其干密度效应进行了探讨。结果表明,豫东黄河冲积粉土颗粒级配较为集中在0.005~0.075 mm的粉粒组,击实曲线出现了不对称的“双驼峰”现象,但两个干密度峰值相差较大,工程应用中需注意最大干密度的准确获得。非饱和粉土的抗剪强度与固结应力呈线性相关关系,干密度和吸力对粉土的黏聚力 $c$ 均有影响,但影响规律不同。黏聚力 $c$ 随吸力的减小呈抛物线变化,在最佳含水率附近黏聚力达到峰值。粉土干密度越大,其黏聚力越大。粉土内摩擦角随吸力增加呈增大趋势,吸力大于100 kPa后基本趋于稳定,影响幅度在 $5^\circ$ 以内。基质吸力对抗剪强度的影响呈非线性关系。粉土的内摩擦角 $\varphi'$ 与吸力相关, $\varphi^b$ 则受吸力与固结应力共同影响, $\varphi'$ 与 $\varphi^b$ 均非常数,在 $\tau_f-(u_a-u_w)-( \sigma_n-u_a)$ 空间中,摩尔库伦破坏面呈双向弯曲形态。

**关键词:** 粉土; 吸力; 非饱和直剪试验; 强度

中图分类号: TU443 文献标志码: A 文章编号: 1003-0972(2017)03-0478-06

## Strength Characteristics of Unsaturated Silt under Suction Control

LI Xinming<sup>1\*</sup>, ZHANG Hao<sup>2</sup>, SUN Yuzhou<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

**Abstract:** In order to study the mechanics characteristic of silt using in highway embankment in eastern Henan Province, the unsaturated direct shear test was conducted using unsaturated direct shear apparatus with controlling suction. The contribution of the suction to the unsaturated strength for silt was mainly analyzed. The effects of dry density to strength were also discussed. The results showed that the particle size of eastern Yellow River alluvial silt was concentrated on 0.005 ~ 0.075 mm. The compaction curve appeared asymmetrical “double hump” phenomenon, but the peak values were different obviously. Attention should be given to the accuracy of the maximum dry density in construction. Dry density and suction had different influences on the cohesive force  $c$ . The cohesive force changed with the decrease of the suction, which was like parabola. The maximum cohesive force appeared near the optimum moisture content. The cohesive force increased with the increasing of dry density. The effect of suction to the angle of internal friction was small within the range of  $5^\circ$ . In general, with the increase of dry density, the angle of internal friction increased slightly. For the silt, the effective angle of shearing resistance ( $\varphi'$ ) and the angle of shearing resistance with respect to matric suction ( $\varphi^b$ ) was not constant, where  $\varphi'$  was influenced by the matric suction and  $\varphi^b$  was influenced by matric suction and vertical stress together. That is to say, the Mohr-Coulomb failure surface was bidirectional bending in the space of  $\tau_f-(u_a-u_w)-( \sigma_n-u_a)$ .

**Key words:** silt; suction; unsaturated direct shear test; shear strength

## 0 引言

粉土是指粒径大于0.075 mm的颗粒含量不超过全部

质量50%且塑性指数 $\leq 10$ 的土,一般具有塑性指数低、黏结性小及强度低等特点。在我国豫东黄河冲积平原地区广

收稿日期: 2016-05-27; 修订日期: 2016-11-13; \*通信联系人, E-mail: 304188424@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509274); 河南省科技创新人才计划(164200510020); 河南省高等学校重点科研项目计划(15A560013); 中原工学院青年骨干教师资助计划

作者简介: 李新明(1987—),男,河南修武人,讲师,博士,主要从事特殊土力学的教学与科研工作。

泛分布。黄河冲积平原地区粉土多为水成粉土,属于第四系全新冲积物,主要由黄土高原的黄土经河流再搬运形成,以低液限粉土为主。工程实践表明,低液限粉土特殊的工程特性,导致粉土填筑路基病害时有发生<sup>[1,2]</sup>。如京九铁路穿越鲁西南黄泛平原区段,其路基填料为黄河冲积粉土。通车后由于压实不足等原因,加上雨水等的破坏,多处出现路基下沉、冲刷及溜塌病害,严重影响行车安全。作为沿黄公路工程及基础建设的最主要填料,对其力学特性进行深入研究十分必要。

非饱和土力学与传统土力学的主要区别在于引入土壤学中基质吸力的概念。BISHOP<sup>[3]</sup>、FREDLUND<sup>[4]</sup>、VANA-PALLI<sup>[5]</sup>等对非饱和土抗剪强度进行了系统深入的研究,并提出了基于基质吸力的非饱和土抗剪强度计算方法。研究发现,基质吸力对非饱和土抗剪参数的影响与土性密切相关,且变化规律不尽相同。路基填筑粉土属于典型的非饱和土,对其工程特性已得到越来越多学者的重视。肖军华等<sup>[6]</sup>、谈云志等<sup>[7]</sup>、马晓谦<sup>[8]</sup>等针对不同粉土的压实特性及强度与变形性状进行了较为系统的研究;针对粉土的非饱和力学特性,贾磊等<sup>[9]</sup>、张爱明等<sup>[10]</sup>分别对在控制吸力条件下对非饱和粉土的动力变形特性与现场大型直剪特性进行试验研究,取得了有益的结论。上述研究成果对于粉土的压实特性及强度特性有了较为深刻的认识,有力地推动了粉土特性的研究与工程应用。但目前对于非饱和粉土的研究多以含水率来进行间接表达,采用直接控制吸力方式进行非饱和黄河冲积粉土强度特性的研究尚需加强。此外,粉土具有较强的区域特性,进行区域性粉土特性的研究十分必要。

本文以豫东低液限粉土为研究对象,通过控制吸力的非饱和直剪试验,探讨干密度与吸力对非饱和粉土强度参数的影响规律,重点分析吸力对非饱和剪切强度的贡献,为粉土地区路基填筑施工与设计等提供参考。

## 1 粉土特性及试验方案

### 1.1 粉土的基本性质

试验用土样取自豫东某高速公路取土场,依据《公路土工试验规程》(JTG E40-2007),其基本物性指标如表1所示。

表1 粉土物性参数

Tab. 1 Basic physical properties of silt

天然含水率/%	土粒相对密度	塑限	液限/%	塑性指数
20.8	2.68	20.5	28.9	8.4

粉土颗粒级配曲线如图1可以看出,与一般黏性土相比,颗粒分布较为均匀,小于0.005 mm的黏粒含量很少,仅占5.4%。砂粒组(大于0.075 mm)约占15%;颗粒分布主要集中在粉粒组,约占79.6%。基本无大于0.25 mm颗粒。砂粒组与粉粒组间的空隙缺少更多的黏粒来填充,形成了“搭积

木”式的骨架结构。孔隙结构较一般黏性土更为特殊,这对其持水性能及其非饱和强度将产生重要影响。

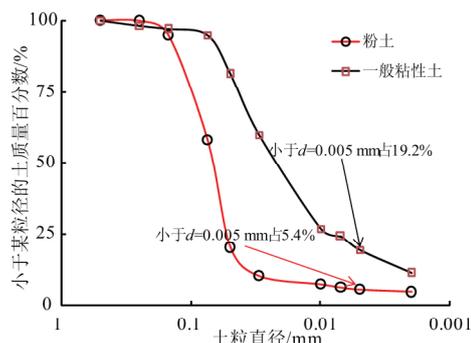


图1 粉土颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve

### 1.2 压实特性

采用湿土法重型击实试验所得干密度与含水率的相关关系如图2。其中,图2中的粉土1和粉土2为平行试样,每组平行试样由3个试样组成,对试验结果取平均值。可以看出,粉土击实曲线出现不对称的“双驼峰”现象;第一个峰值为 $1.66 \text{ g/cm}^3$ ,第二个峰值为 $1.76 \text{ g/cm}^3$ ,在实际施工过程中应选择第二个峰值作为最大干密度。已有研究成果表明<sup>[8]</sup>黏性土最优含水率与塑限相当,而试验用粉土的最优含水率为13.9%,远小于其塑限20.5%。

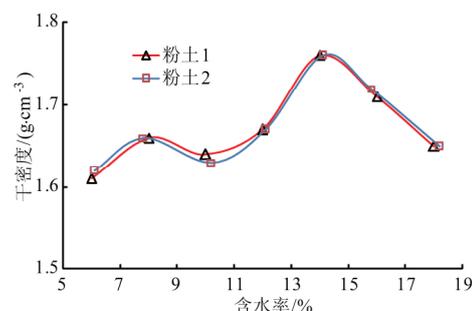


图2 粉土击实曲线

Fig. 2 Compaction curves of silt

### 1.3 试验方案

考虑到吸力与含水率的相关关系以及高速公路施工中常用压实度,本文采用5个基质吸力(0、50、100、200、400 kPa)作用下的2种干密度( $1.58 \text{ g/cm}^3$ 和 $1.64 \text{ g/cm}^3$ )粉土样进行非饱和直剪试验。其中,以吸力为0 kPa(饱和状态)粉土试样作为对比进行剪切试验。

非饱和直剪试验在基于轴平移技术的4FDJ-20型非饱和土直剪仪<sup>[11]</sup>上进行。试验的主要步骤为:在制备特定干密度粉土土样后进行抽真空饱和,将试样放入剪切盒中,在轴向压力为50、100、150、200 kPa下进行固结;固结完成后,根据试验方案施加基质吸力,吸力平衡后进行剪切过程;剪切破坏以试样剪切变形达到6 mm后停止。

为量化分析下吸力与含水率的相关关系,进行两种干密度粉土在脱湿状态的土水特征曲线研究,结果如图3所示。可以看出,两种干密度粉土样的土水特征曲线形态类

似,含水率均随基质吸力的增大而逐渐减小。

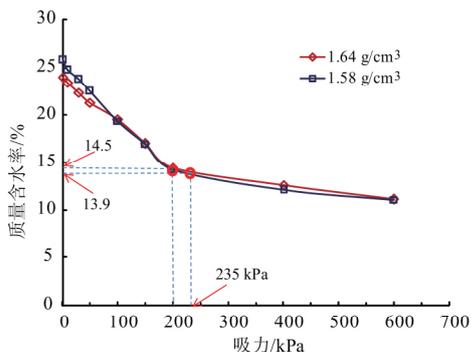


图 3 粉土土水特征曲线

Fig. 3 The soil water characteristic curve of silt

## 2 非饱和直剪试验结果与分析

### 2.1 应力-应变特性分析

不同吸力作用下的粉土试样应力-应变关系曲线形态类似.限于篇幅,仅列出干密度  $1.64 \text{ g/cm}^3$ ,吸力为  $200 \text{ kPa}$  的应力-应变关系曲线见图 4,抗剪强度与固结应力关系曲线如图 5.

从图 4 可以看出,非饱和粉土应力-应变关系曲线呈硬化型.随着剪切位移的增大,剪切应力呈单调增大趋势.但相同剪切位移下,剪切应力随固结应力呈非单调变化规律.在剪切位移小于  $2.5 \text{ mm}$  时,剪切应力与固结应力的关系并不明确;在剪切位移大于  $2.5 \text{ mm}$  后,固结应力越大,剪切应力越大.可以认为,在剪切位移较小时,粉土样随着剪切作用其结构开始进行调整;在剪切位移较大时,其剪切结构面结构定向调整完成,此时,剪切应力与固结应力呈单调变化规律.

剪切应力随剪切位移增加无明确的峰值,取剪切位移

达到  $6 \text{ mm}$  时的剪切应力为抗剪强度.从图 5 可以看出,  $200 \text{ kPa}$  吸力作用下,粉土抗剪强度随竖向应力仍符合摩尔库伦定律,呈线性相关关系,相关系数达  $0.995$ .从表 2 也可看出,不同干密度粉土样在不同基质吸力作用下,其线性拟合相关系数均在  $0.98$  以上,线性相关性较好.

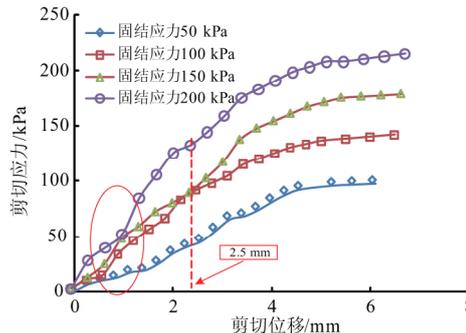


图 4 剪应力与剪切位移关系曲线

Fig. 4 Relation curves between shear stress and shear displacement

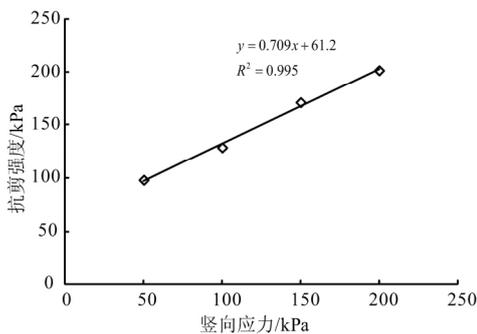


图 5 抗剪强度与竖向固结应力关系曲线

Fig. 5 Relationship between shear strength and vertical consolidation stress

表 2 不同基质吸力粉土抗剪强度与固结应力拟合方程

Tab. 2 Fitting equation of shear strength and consolidation stress with different matrix suctions of silt

干密度 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	基质吸力 / kPa	拟合方程	$R^2$
1.58	0	$y = 0.595x + 12.65$	0.989
	50	$y = 0.617x + 31.85$	0.999
	100	$y = 0.684x + 32.90$	0.985
	200	$y = 0.703x + 42.45$	0.998
	400	$y = 0.707x + 37.30$	0.997
1.64	0	$y = 0.599x + 28.00$	0.994
	50	$y = 0.668x + 43.05$	0.998
	100	$y = 0.709x + 50.95$	0.986
	200	$y = 0.709x + 61.20$	0.995
	400	$y = 0.714x + 52.15$	0.980

注 “y”为抗剪强度,“x”为固结应力

## 2.2 黏聚力 $c$

压实干密度与吸力(含水率)均对粉土的黏聚力  $c$  有较大影响. 黏聚力  $c$  与吸力的相关关系如图 6 所示. 可以看出, 黏聚力随着吸力的变化基本呈抛物线状, 在吸力为 200 kPa 时存在最大黏聚力. 此时, 质量含水率约为 13.9% 和 14.5% (图 3). 在粉土最佳击实含水率附近. 对于干密度为  $1.58 \text{ g/cm}^3$  和  $1.64 \text{ g/cm}^3$  粉土样, 其最大黏聚力  $c_{\max}$  分别为 41.5 kPa 和 61.2 kPa. 可以预测, 随着基质吸力的增大, 黏聚力会进一步减小; 因此, 对于粉土路基设计时采用饱和粉土的黏聚力不一定偏于安全, 需根据实际含水率情况具体分析.

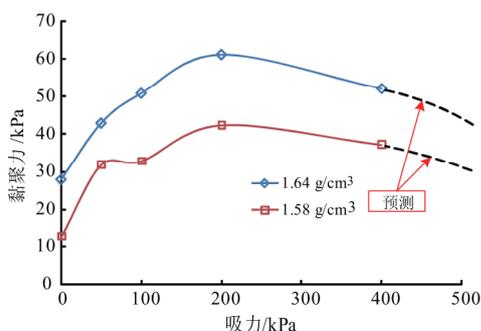


图 6 黏聚力与吸力的关系曲线

Fig. 6 Relationship between cohesion and suction

究其原因, 土颗粒之间的联结模式在一定程度上决定土体黏聚力  $c$  的大小. 一般认为, 土颗粒之间的黏聚力包括胶结及静电引力等引起的真黏聚力和毛细管应力与表观机械咬合力产生的假黏聚力两部分组成. 粉土中的矿物含量以石英 ( $\text{SiO}_2$ ) 为主<sup>[3]</sup>, 而黏粒含量(如蒙脱石、云母等)含量较低. 石英颗粒不能像  $\text{Ca}^{2+}$  等阳离子一样, 可以与极性水分子紧密结合而体现出较强的水胶结作用力, 故粉土颗粒间联结强度较低. 而对于黏性土, 随着基质吸力的增加, 黏性土颗粒结合水逐渐减少, 扩散层弱结合水逐渐变薄, 产生干燥凝结核现象. 宏观上表现为黏聚力的单调大幅增加. 对于粉土而言, 黏粒含量非常低(约 5.4%), 真黏聚力的作用很小, 产生黏聚力的主要是毛细管水联结作用. 当基质吸力增加至某一临界值时, 毛细管水联结作用基本消失, 土样黏聚力仅依靠机械咬合作用, 此时土样呈趋松散状, 强度降低; 而当基质吸力很小(如土样处于饱和状态时), 毛细管作用产生的黏结作用也很小, 机械咬合作用力由于颗粒间的水“润滑”作用而减弱. 故粉土样的黏聚力与基质吸力的关系曲线呈类抛物线状.

## 2.3 内摩擦角 $\varphi'$

内摩擦角  $\varphi'$  与吸力的相关关系见图 7. 可以看出, 在基质吸力小于 100 kPa 时, 内摩擦角随基质吸力的增大而增大, 随后内摩擦角趋于稳定. 对于工程设计而言, 采用饱和粉土的内摩擦角是偏于安全的.

内摩擦角是土体颗粒结构、排列、大小及形状的外在表现. 粉土颗粒粒径主要集中于 0.005 ~ 0.075 mm 之间, 粒径

相对比较均匀. 基质吸力所引起的含水率的变化会对内摩擦角产生一定的影响, 但其作为外在因素影响范围有限. 对于粉土, 在基质吸力较小时, 水分在颗粒之间的“润滑”作用较强, 颗粒之间的移动更加容易, 使得土样的内摩阻力逐渐减小. 而当基质吸力增大至一定程度后, 含水率的进一步减小也不能提供更多的机械咬合作用. 这也解释了由饱和状态变为基质吸力为 100 kPa 的非饱和状态时内摩擦角发生变化, 而基质吸力继续增加内摩擦角趋于稳定的原因.

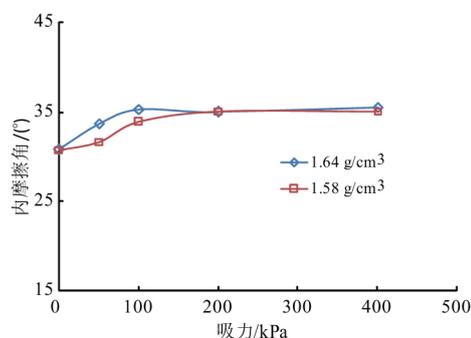


图 7 内摩擦角与吸力的关系曲线

Fig. 7 Relationship between internal friction angle and suction

## 2.4 吸力对抗剪强度的贡献率为 $\tan \varphi^b$

目前, 确定土体非饱和抗剪强度的方法有 Bishop 法<sup>[3]</sup> 和 Fredlund 法<sup>[12]</sup>. 为分析基质吸力对非饱和粉土强度的贡献, 采用 Fredlund 法建议的双独立状态变量非饱和抗剪强度公式:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b,$$

式中:  $\sigma_n - u_a$  为净法向应力(对于非饱和直剪试验, 其等于竖向固结应力);  $\varphi^b$  为与基质吸力相关的内摩擦角, 一般通过可以控制吸力的非饱和三轴或直剪试验获得.

粉土在不同吸力及干密度下的强度参数见表 3. 由表 3 可知, 不同基质吸力下  $\varphi'$  并非常数, 即固结应力对抗剪强度的影响幅度随基质吸力而变化. 但在数据处理过程中, 近似认为  $\varphi'$  为定值, 即饱和状态下的内摩擦角, 将其影响统一归结为基质吸力对抗剪强度的影响.

基质吸力  $u_a - u_w$  对抗剪强度  $\tau_f$  的贡献可以通过  $\varphi^b$  来进行描述. 从表 3 中可以看出, 相同竖向固结应力作用下,  $\varphi^b$  随  $u_a - u_w$  的增大而单调减小. 究其原因, 随着基质吸力  $u_a - u_w$  的增大, 土样含水率降低, 相应  $u_a - u_w$  的作用面积变小, 从而导致  $u_a - u_w$  对抗剪强度的贡献率在减小. 需特别注意的是, 在基质吸力大于 200 kPa 后, 粉土抗剪强度反而出现了减小. 可以认为, 对于粉土, 基质吸力存在一个临界的阈值, 基质吸力大于该阈值后, 其对土样抗剪强度的影响可能很微弱或忽略不计<sup>[13, 14]</sup>. 这可由图 2 与图 3 得到解释. 对比图 2 和图 3 可以看出, 在最佳含水率(13.9%)处, 基质吸力为 235 kPa. 随着基质吸力的进一步增加, 土样裂隙增多且趋松散状, 土样内部结构出现了劣化, 抗剪强度的变化规律是基质吸力与土样内部结构耦合作用的结果.

表 3 粉土的抗剪强度参数  
Tab. 3 Shear strength parameters of silt

干密度 $\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	吸力 $u_a / \text{kPa}$	内摩擦 角 $\varphi' / (^\circ)$	黏聚力 $c$ $/\text{kPa}$	50 kPa		100 kPa		150 kPa		200 kPa	
				$\tau_f / \text{kPa}$	$\varphi^b / (^\circ)$						
	0	30.8	12.7	40.6	-	77.1	-	97.8	-	133.0	-
	50	31.7	24.9	62.6	21.9	94.3	23.7	123.6	23.3	155.8	25.5
1.58	100	33.9	34.9	69.6	15.2	101.5	16.3	128.0	14.5	174.9	23.3
	200	35.1	41.5	74.9	9.2	114.8	12.0	146.0	12.4	183.7	14.5
	400	35.1	37.3	70.4	-	110.6	-	144.9	-	176.8	-
	0	30.9	28.0	56.2	-	88.7	-	121.7	-	145.1	-
	50	33.7	36.8	77.3	21.2	109.8	23.7	141.0	24.9	178.3	31.5
1.64	100	35.3	42.5	89.6	17.6	114.7	15.0	162.1	23.9	196.0	25.8
	200	35.3	61.2	97.8	11.3	128.6	11.5	171.2	16.2	201.8	15.7
	400	35.5	52.5	88.3	-	118.4	-	168.2	-	190.7	-

注 “-”代表在基质吸力为 0 kPa 时  $\varphi^b$  不存在; 在基质吸力为 400 kPa 时  $\varphi^b$  为负值.

在相同基质吸力时  $\varphi^b$  随着固结应力的增加呈增大趋势, 即基质吸力对于抗剪强度的贡献与应力状态相关. 对于压实粉土, 固结应力越大, 基质吸力对抗剪强度的贡献越大. 在三维坐标  $\tau_f - (u_a - u_w) - (\sigma_n - u_a)$  中, 摩尔库伦破坏面与固结应力  $\sigma_n - u_a$  轴之间的夹角为  $\varphi'$ , 与  $u_a - u_w$  轴之间的夹角为  $\varphi^b$ .  $\varphi'$  与  $\varphi^b$  随干密度与基质吸力的变化而变化, 其均非常数, 故摩尔库伦面是双向弯曲的(图 8).

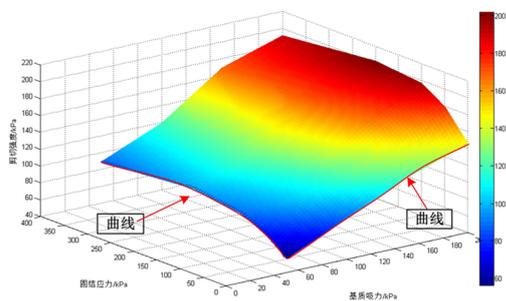


图 8 摩尔库伦三维破坏曲面  
Fig. 8 Mohr Coulomb 3D failure surface

### 3 结果与讨论

(1) 粉土颗粒大小均匀, 颗粒级配主要集中在 0.005 mm~0.075 mm 的粉粒组. 重型击实曲线上出现了不对称的“双驼峰”现象, 在施工中需注意最大干密度的准确获得.

(2) 粉土的黏聚力  $c$  受干密度和基质吸力影响较大, 但其影响规律不尽相同. 黏聚力随含水率的增加(基质吸力的减小)呈抛物线变化, 在最佳含水率附近黏聚力达到峰值. 但黏聚力随干密度的增大而增大. 需要注意的是, 由于试验土样数量有限, 基质吸力和干密度对抗剪强度参数的影响规律尚需进一步研究.

(3) 内摩擦角与土体颗粒的结构、大小、形状及密实度相关. 粉土内摩擦角受基质吸力的影响主要集中于小基质吸力段(基质吸力 < 100 kPa), 影响幅度在  $5^\circ$  以内.

(4) 非饱和粉土抗剪强度与基质吸力关系呈非线性关系, 且存在转折点, 这在工程应用中需特别注意; 粉土的内摩擦角  $\varphi'$  与  $\varphi^b$  均非常数,  $\varphi^b$  受基质吸力与固结应力协同作用影响, 在  $\tau_f - (u_a - u_w) - (\sigma_n - u_a)$  空间中, 摩尔-库伦破坏面是双向弯曲的.

#### 参考文献:

[1] 申爱琴, 郑南翔, 苏毅, 等. 含砂低液限粉土填筑路基压实机理及施工技术[J]. 中国公路学报, 2000, 13(4): 12-15.  
SHEN Aiqin, ZHENG Nanxiang, SU Yi, et al. Study of compacting mechanism and construction technology of filling road bed with bearing sand silt of low liquid limit[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(4): 12-15.

[2] 曹卫东. 低液限粉土填筑路基压实性能的研究[D]. 济南: 山东大学, 2002.  
CAO Weidong. Study on compaction property of filling subgrade with silt of low liquid limit [D]. Jinan: Shandong University, 2002.

[3] BISHOP A W, ALPAN I, BLIGHT G E, et al. Factors controlling the shear strength of partly saturated cohesive soils[C]//ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils Boulder: University of Colorado, 1960: 503-532.

[4] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.

- [5] VANAPALLI S K , FREDLUND D G , PUF AHL D E , et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction [J]. Canadian Geotechnical Journal , 1996 , 33( 3) : 379-392.
- [6] 肖军华 , 刘建坤 , 彭丽云 , 等. 黄河冲积粉土的密实度及含水率对力学性质影响 [J]. 岩土力学 , 2008 , 29( 2) : 409-414.  
XIAO Junhua , LIU Jiankun , PENG Liyun , et al. Effects of compactness and water Yellow-River alluvial silt content on its mechanical behaviors [J]. Rock and Soil Mechanics , 2008 , 29( 2) : 409-414.
- [7] 谈云志 , 郑爱 , 吴翩 , 等. 初始状态对粉土强度的影响试验研究 [J]. 公路 , 2012( 10) : 148-150.  
TAN Yunzhi , ZHENG Ai , WU Pian , et al. Experimental study on the influence of initial state on silt strength [J]. Highway , 2012( 10) : 148-150.
- [8] 马晓谦. 沙漠—黄土过渡区低液限粉土特性及压实性研究 [D]. 西安: 长安大学 , 2008.  
MA Xiaoqian. Research on characteristic and compaction mechanism of low liquid limit silty soil in loess-desert intergradation [D]. Xi'an: Chang'an University , 2008.
- [9] 贾磊 , 孙德安 , 郝飞. 吸力控制下非饱和粉土的动力变形特性 [J]. 上海大学学报( 自然科学版) , 2015 , 21( 1) : 117-127.  
JIA Lei , SUN Dean , HAO Fei. Dynamic deformation characteristics of unsaturated silt under suction control [J]. Journal of Shanghai University ( Natural Science Edition) , 2015 , 21( 1) : 117-127.
- [10] 张海明 , 姚爱军 , 王兆辉 , 等. 非饱和粉土力学特性的大型直剪试验 [J]. 辽宁工程技术大学学报( 自然科学版) , 2014 , 33( 10) : 1352-1356.  
ZHANG Haiming , YAO Aijun , WANG Zhaohui , et al. Mechanical properties of unsaturated silt with large scale shear test [J]. Journal of Liaoning Technical University( Natural Science) , 2014 , 33( 10) : 1352-1356.
- [11] 陈正汉 , 扈胜霞 , 孙树国 , 等. 非饱和土固结仪和直剪仪的研制及应用 [J]. 岩土工程学报 , 2004 , 26( 2) : 161-166.  
CHEN Zhenghan , HU Shengxia , SUN Shuguo , et al. Development & application of consolidation apparatus and direct shear apparatus for unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2004 , 26( 2) : 161-166.
- [12] FREDLUND D G , MORGENSTERN N R , WIDGER R A. Shear strength of unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal , 1978 , 15( 3) : 313-321.
- [13] 彭忠瑛 , 时红莲 , 蔡华炜. 基质吸力对非饱和黏土抗剪强度的影响 [J]. 人民黄河 , 2012 , 34( 4) : 133-134 , 137.  
PENG Zhongying , SHI Honglian , CAI Huahui. Experimental study on effect of matric suction on shear strength behavior of unsaturated clay Soil [J]. Yellow River , 2012 , 34( 4) : 133-134 , 137.
- [14] 林鸿州 , 李广信 , 于玉贞 , 等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响 [J]. 岩土力学 , 2007 , 28( 9) : 1931-1936.  
LIN Hongzhou , LI Guangxin , YU Yuzhen , et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics , 2007 , 28( 9) : 1931-1936.

责任编辑: 郭红建