

陈莎莎,陈晗,黄海健,等.干密度对非饱和黏土土-水特性及强度特征的影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(4):447-454.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240250

CHEN Shasha, CHEN Han, HUANG Haijian, et al. The influence of dry density on the soil water characteristics and strength characteristics of unsaturated clay soil[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(4): 447-454. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240250

干密度对非饱和黏土土-水特性及强度特征的影响

陈莎莎¹, 陈 晗^{2*}, 黄海健³, 程 功¹, 赵立财⁴

(1. 郑州工商学院 工学院, 河南 郑州 451450; 2. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017; 3. 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 陕西 西安 710311; 4. 中铁十九局集团第三工程有限公司, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要: 为揭示川东北地区非饱和黏土的土-水特性、强度特征及其关联作用, 分别制备原状和重塑样, 开展扫描电镜试验, 并进行不同干密度控制条件下的土-水特征曲线(SWCC)试验及不同干密度和体积含水率下的直剪试验。研究表明: 随着干密度的增大, 原状、重塑土的进气值和残余含水率均呈线性递增趋势; 相同干密度条件下, 原状土进气值和残余含水率均高于重塑土, 原状土的脱水速率慢于重塑土; Fredlund & Xing1 和 Fredlund & Xing2 模型模拟 SWCC 效果较好, 平均拟合优度均大于 0.99; 在相同干密度下, 原状、重塑土的抗剪强度指标与基质吸力均呈近线性正相关关系。研究结论为非饱和黏土在原状、重塑状态下的土-水特性与强度特征及其互馈关联研究提供参考。

关键词: 非饱和黏土; 原状土; 重塑土; 干密度; 强度特征; 土-水特征曲线

中图分类号: TU41

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)04-0447-08

The influence of dry density on the soil water characteristics and strength characteristics of unsaturated clay soil

CHEN Shasha¹, CHEN Han^{2*}, HUANG Haijian³, CHENG Gong¹, ZHAO Licai⁴

(1. College of Engineering, Zhengzhou Technology and Business College, Zhengzhou 451450, China; 2. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Limited Company, Chengdu 610017, China; 3. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710311, China; 4. China Railway 19th Bureau Group Third Engineering Limited Company, Shenyang 110136, China)

Abstract: In order to reveal the soil-water characteristics, strength characteristics and their correlation of unsaturated clay in northeastern Sichuan, the undisturbed and remolded samples were prepared respectively, and the scanning electron microscope test was carried out. The soil-water characteristic curve (SWCC) test under different dry density control conditions and the direct shear test under different dry density and volumetric water content were carried out. The results show that with the increase of dry density, the air entry value and residual water content of undisturbed and remolded soils show a linear increasing trend. Under the same dry density, the air entry value and residual water content of undisturbed soil are higher than those of remolded soil, and the dehydration rate of undisturbed soil is slower than that of remolded soil. Fredlund & Xing1 and Fredlund & Xing2 models simulated SWCC well, and the average goodness of fit was greater than 0.99. Under the same dry density, the shear strength indexes of undisturbed and remolded soils are nearly linearly positively correlated with matrix suction. The research conclusions provide a reference for the study of soil-water characteristics and strength characteristics of unsaturated clay in undisturbed and remolded states and their mutual feedback correlation.

Keywords: unsaturated clay; undisturbed soil; reshaped soil; dry density; strength characteristics; soil water characteristic curve

收稿日期: 2024-08-11 修回日期: 2024-11-05 接受日期: 2024-11-17 责任编辑: 张雯

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才资助项目(XLYC2007146)

作者简介: 陈莎莎(1990-), 女, 河南 郑州人, 硕士, 讲师, 主要从事非饱和土力学及土木工程方面的研究。E-mail: hanchen588544@163.com

通信作者: 陈 晗(1988-), 男, 四川 乐山人, 高级工程师, 主要从事道路与桥梁工程方面的研究。E-mail: 22271738@qq.com

0 引言

川东北地区地质灾害频发,地震、降雨导致大量的滑坡变形体产生。由于地下水及地表水径流作用,其浅表层土体多处于非饱和状态,若不查明其非饱和特性,会给边坡稳定性判定及防护设计带来错误反馈,因此开展非饱和黏土土-水特性及强度特征的研究具有一定的现实意义。

非饱和土土-水特性研究已取得较多成果,邵玉娴等^[1]、IYER等^[2]、陈嘉伟等^[3]、张建辉等^[4]和徐伟皓^[5]研究了温度、初始含水率、孔隙比、干密度、水力路径等不同控制因素对土-水特征曲线(SWCC)的影响规律。SCHNELLMANN等^[6]、AQTASH等^[7]、徐筱^[8]、崔宏环等^[9]和牛庚等^[10]探究了非饱和土的强度特征变化规律。上述研究都是针对原状土或重塑土,未研究原状土和重塑土之间的差异。张亚国等^[11]、何芳婵等^[12]、WEI等^[13]分析了原状土和重塑土之间土水特性差异。CHU等^[14]、赵煜鑫等^[15]、钱建固等^[16]、ZHANG等^[17]研究了非饱和膨胀土、黄土在原状和重塑状态之间的强度特性差异。非饱和土的强度特征受基质吸力影响,土体含水率变化会导致基质吸力变化,从而影响土体强度及边坡稳定性。

目前关于非饱和黏土在原状、重塑两种状态的土-水特性及强度特征对比研究较少,更鲜有研究非饱和黏土土-水特性与强度特征的关联。本文以川东北地区典型非饱和黏土为试验对象,制备原状及重塑样,开展扫描电镜试验,进行不同干

密度控制条件下的SWCC试验,以及不同干密度、体积含水率控制条件下的直剪试验,探明原状及重塑样在不同工况下的土-水特性及强度特征,量化分析土-水特性与强度特征的关联。

1 试验方案

1.1 试验取样及基本物理参数

以川东北地区某边坡为研究背景,以典型非饱和黏土为研究对象,取样分原状和重塑土。其中,原状土通过薄壁取土器重锤击入地面,取土深度为2.5~5.5 m,其干密度 ρ_s 范围为1.23~1.66 g/cm³;重塑土通过开挖探坑取土,取土深度与原状土保持一致,所取原状土样基本物理参数见表1。土体级配曲线见图1,另经击实试验得到最大干密度为1.64 g/cm³,最佳含水率(质量分数)为18.3%。

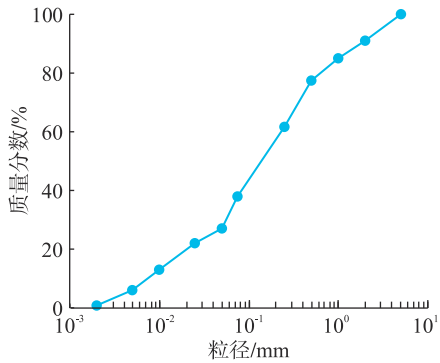


图1 级配曲线

Fig.1 grading curves

表1 土样基本物理参数

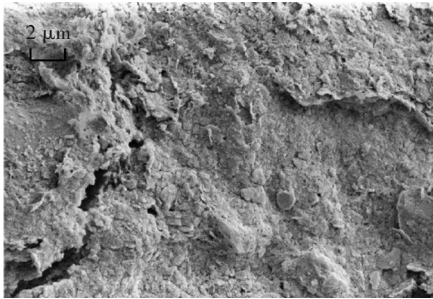
Tab.1 basic physical parameters of soil sample

天然密度/(g·cm ⁻³)	干密度/(g·cm ⁻³)	天然含水率/%	孔隙比	相对密度	渗透系数/(10 ⁻⁷ ·cm·s ⁻¹)	液限/%	塑限/%	塑性指数
1.65~1.68	1.23~1.66	17.3~17.9	0.35~0.46	2.55~2.61	3.58~4.49	36.2~37.9	18.3~19.4	18.4~19.0

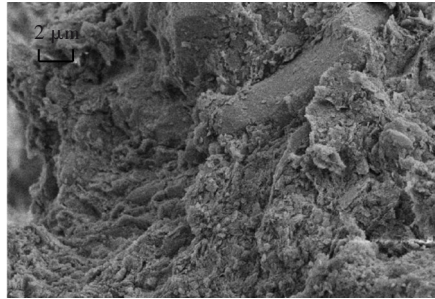
1.2 扫描电镜试验

利用KYKY-EM6900扫描电镜(SEM)对原状

土和重塑土放大500倍进行观测,得到SEM图像,见图2。



(a) 原状土



(b) 重塑土

图2 原状土和重塑土的SEM图像

Fig.2 SEM images of undisturbed and remolded soil

孔径 $r < 2 \text{ nm}$ 的孔隙为微孔, $r > 50 \text{ nm}$ 的孔隙为大孔, $2 \text{ nm} \leq r \leq 50 \text{ nm}$ 的孔隙为介孔。由图2可看出,原状土的孔隙呈“狭缝型”,在重塑过程中,其内团粒发生破坏后填充部分微孔和大孔,导致重塑土孔隙类型发生变化。重塑土孔隙以介孔为主,微孔不多,鲜有大孔。

1.3 SWCC 试验

不同干密度下的 SWCC 试验分原状样、重塑样开展。取干密度 ψ 为 1.23 g/cm^3 、 1.35 g/cm^3 、 1.47 g/cm^3 和 1.56 g/cm^3 的原状土,通过削土器直接削样成型。重塑样制备过程如下:充分拌匀土样,风干后利用粉碎机碾散(不能压碎颗粒),过 2 mm 筛,得到重塑土样后再以最佳含水率 18.3% 控制 ψ 与原状样一致。试样尺寸为 $\Phi 90 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,制样后真空饱和,每种干密度下的原状样及重塑样均设 2 组平行样,原状样及重塑样均为 12 组。通过 SDSWCC 压力板系统(图3)进行 SWCC 试验,试验过程中施加 0 kPa 、 50 kPa 、 100 kPa 、 150 kPa 、 200 kPa 、 300 kPa 、 400 kPa 、 500 kPa 、 600 kPa 、 700 kPa 、 750 kPa 、 800 kPa 、 850 kPa 、 900 kPa 的基质吸力。SWCC 示意^[2]见图4,脱湿是指基质吸力 s 增大导致的水分(用体积含水率或饱和度表示)损失过程,本文主要研究脱湿曲线。

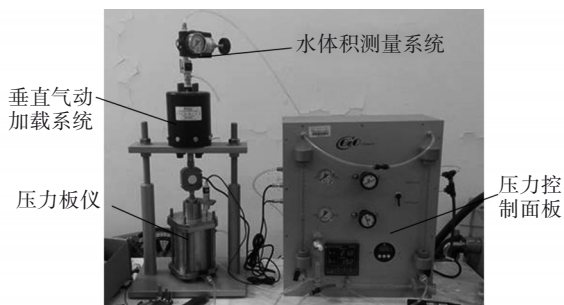


图3 SDSWCC 压力板系统

Fig.3 SDSWCC pressure plate system

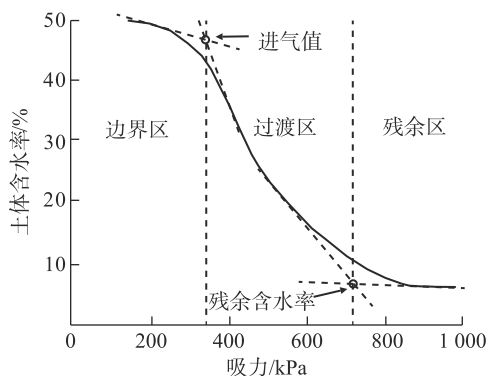


图4 SWCC 示意

Fig.4 schematic of SWCC

图4给出了进气值和残余含水率的确定方法,分别取 SWCC “初始”和“结尾”部分切线,并使它与过渡区近线性曲线的切线相交,所得交点即为进气值和残余含水率。基于此进行分区表征 SWCC 的组成和含义。

1.4 直剪试验

采用非饱和土四联直剪仪,开展不同体积含水率和干密度下的直剪试验。采用尺寸为 $\Phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的环刀切取制样,原状样和重塑样的干密度设置与 SWCC 试验保持一致。体积含水率分别设为 11% 、 15% 、 19% 、 23% 、 28% 、 38% 和 48% ,每种体积含水率的原状样及重塑样均设 2 组平行样,原状样及重塑样均为 21 组,直剪完成后进行实际体积含水率测定。测得平均体积含水率为 10.6% 、 14.5% 、 18.1% 、 21.3% 、 26.7% 、 35.8% 和 45.2% 。试验采用快剪方式,剪切速率为 0.5 mm/min ,当测力计读数稳定或明显后退时表明试样发生剪切破坏,通常到 4 mm 变形即可,若读数一直增加则多剪切 2 mm 。将与试样土样同样体积含水率的纱布团包裹至剪切盒外围,降低试样含水率蒸发损失。

2 SWCC 试验结果分析

2.1 试验结果及分析

试验得到不同干密度下的 SWCC,见图5,每种干密度条件下的结果取标准样和 2 组平行样的平均值。图5中, s_{a1} 、 s_{a2} 、 θ_{r1} 、 θ_{r2} 分别为原状土进气值、重塑土进气值、原状土残余含水率、重塑土残余含水率。由图5可看出,原状土及重塑土的 SWCC 总体形态相似,在 4 种干密度条件下,原状土的体积含水率始终高于重塑土,表明原状土的脱水速率慢于重塑土。

将图5中不同干密度 ψ 下的进气值 s_a 和残余含水率 θ_r 绘制成曲线,见图6。由图6(a)可看出,随着干密度的增长,进气值呈线性递增趋势。重塑土的进气值低于原状土,表明原状土在临界排水状态所对应的吸力值更大,原状土比重塑土脱水相对滞后。由图6(b)可看出,随着干密度的增长,残余含水率呈线性递增趋势。重塑土的残余含水率低于原状土,而重塑、原状土的初始饱和和含水率相差不大,表明原状土比重塑土持水能力更强。

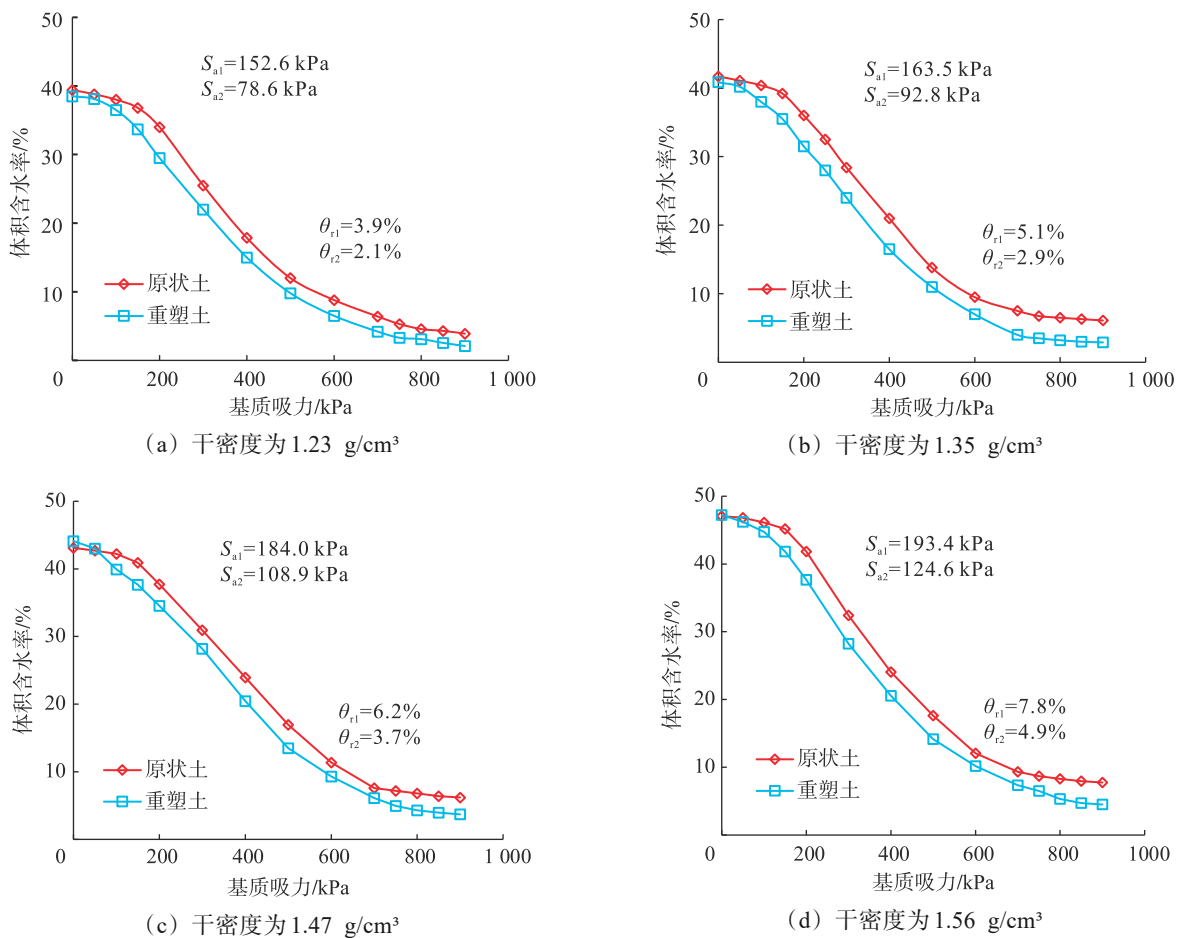


图5 不同干密度下非饱和黏土SWCC

Fig.5 unsaturated clay SWCC under different dry density

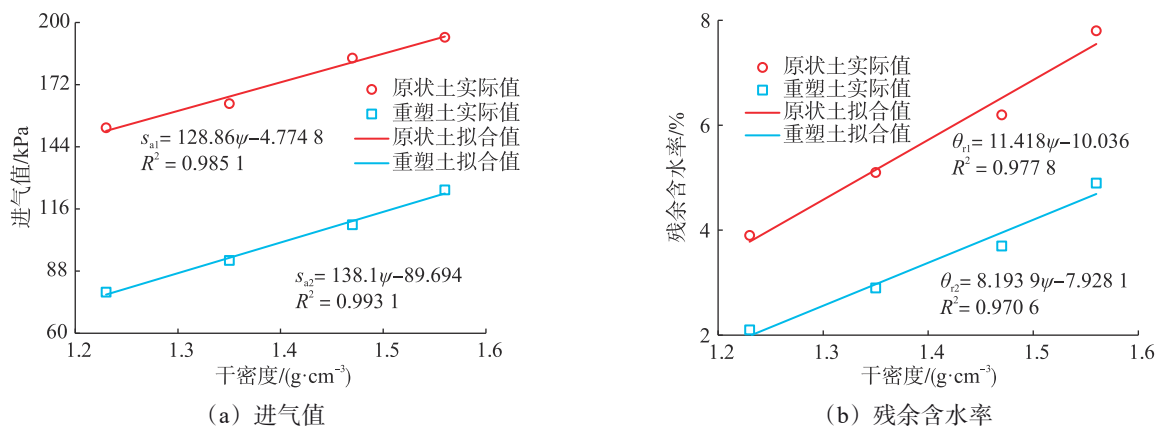


图6 不同干密度下进气值和残余含水率

Fig.6 intake values and residual moisture content under different dry densities

2.2 SWCC 模拟

实际工程存在条件受限的情形，导致无法及时获取非饱和土的体积含水率（饱和度），采用SWCC模型绘制模拟曲线是一种有效的方法。常用的SWCC模型如下。

Gardner^[18-20]模型为

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + a_1 s^{b_1}} \quad (1)$$

Van Genuchten（简称“VG”）模型^[18-20]为

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(s/a_2\right)^{b_2}\right]^{c_2}} \quad (2)$$

Fredlund & Xing1 (简称“FX1”)模型^[18-20]为

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{ \ln \left[e + \left(s/a_3 \right)^{b_3} \right] \right\}^{C_3}} \quad (3)$$

Fredlund & Xing2 (简称“FX2”)模型^[18-20]为

$$\theta = \left[1 - \frac{\ln(1 + s/s_r)}{\ln(1 + 10^6/s_r)} \right] \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(s/a_4 \right)^{b_4} \right] \right\}^{C_4}} \quad (4)$$

式(1)~式(4)中: θ 、 θ_r 和 θ_s 分别为体积含水率、残余含水率和饱和含水率; s 、 s_r 分别为基质吸力和残余基质吸力; a_i ($i=1,2,3,4$)、 b_i ($i=1,2,3,4$)、 C_i ($i=1,2,3,4$)为拟合参数。

由式(1)~式(4)可以看出, 4个模型参数不同。Gardner模型在饱和状态时误差较大, VG

模型在土体较干燥时存在误差, FX1、FX2模型适用于砂土、粉土、黏土吸力范围较大 ($0 \sim 10^6$ kPa) 的情况^[8]。用式(1)~式(4)对本文SWCC进行模拟, 拟合优度为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^I (M_i - M_f)^2}{\sum M_i^2}, \quad (5)$$

式中: M_i 为 θ 的第 i 个实测值; M_f 为 θ 模拟值。

根据式(1)~式(4), 采用Origin软件, 基于Levenberg-Marquardt算法, 得到模拟结果, 见表2。由表2可看出, FX2模型和FX1模型的平均 R^2 均大于0.99, 拟合能力较强。鉴于此, 将FX1、FX2模型作为非饱和黏土的SWCC模型。

表2 SWCC模拟结果

Tab.2 SWCC simulation results

土样类别	干密度 /(g·cm ⁻³)	Gardner模型		VG模型		FX1模型		FX2模型	
		R^2	均方差/ 10^{-3}	R^2	均方差/ 10^{-3}	R^2	均方差/ 10^{-3}	R^2	均方差/ 10^{-3}
原状土	1.23	0.963 5	8.859 0	0.991 3	2.204 1	0.994 5	1.406 4	0.996 4	1.346 2
	1.35	0.951 8	16.512 7	0.990 7	2.252 4	0.996 4	1.344 5	0.997 2	1.246 5
	1.47	0.956 7	15.424 3	0.988 8	3.191 3	0.995 3	1.376 3	0.995 5	1.371 1
	1.56	0.965 1	8.205 9	0.985 4	3.601 4	0.991 6	2.064 7	0.997 5	1.238 5
重塑土	1.23	0.956 9	15.268 0	0.987 2	3.207 6	0.984 4	4.034 8	0.996 6	1.338 2
	1.35	—	—	0.973 4	6.762 5	0.987 5	3.491 4	0.989 2	3.022 8
	1.47	0.991 2	2.210 4	0.984 1	4.045 8	0.982 0	3.811 4	0.984 3	4.041 4
	1.56	0.976 6	5.691 7	0.987 6	3.192 2	0.994 3	1.416 0	0.995 7	1.364 0
平均值		0.966 0	10.310 3	0.986 1	3.557 2	0.990 8	2.368 2	0.9441	1.871 1

注:“—”表示模拟失败。

3 直剪试验成果分析

抗剪强度指标(黏聚力 c 和内摩擦角 φ)是边坡设计的重要参考指标, 不同干密度条件下原状土、重塑土的抗剪强度指标变化见图7, ψ_1 为原状土干密度, ψ_2 为重塑土干密度。 c 、 φ 结果取标准样及两组平行样的平均值。由图7可以看出, 当干

密度相同时, 随着体积含水率增加, 原状土、重塑土的黏聚力、内摩擦角均减小。当体积含水率相同时, 原状土、重塑土的黏聚力、内摩擦角均随着干密度的增大而增大。当干密度、体积含水率相同时, 与重塑土相比, 原状土的黏聚力、内摩擦角更大, 可见结构性对川东北地区非饱和黏土强度特征影响明显。

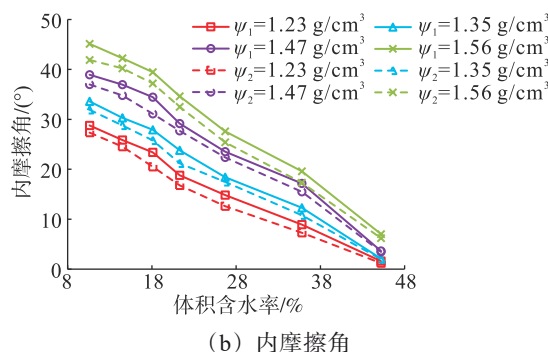
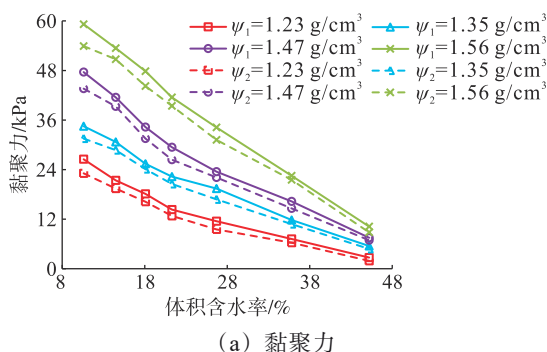


图7 抗剪强度指标变化

Fig.7 shear strength index changes

4 土-水特性和强度特征关联作用

以体积含水率作为媒介,探索基质吸力与抗剪强度指标之间的关联。由于图5、图7中体积含

水率无法一一对应,采用FX1模型拟合图5中SWCC,将图7中体积含水率代入FX1模型,得到对应的基质吸力,由此得到体积含水率、基质吸力和抗剪强度指标的关系曲线,见图8、图9。

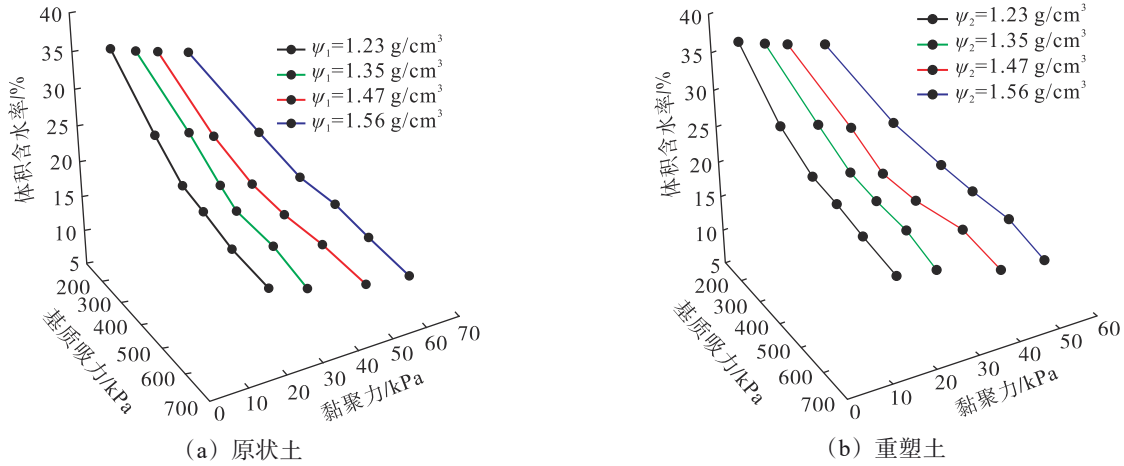


图8 体积含水率、基质吸力和黏聚力关系曲线

Fig.8 relationship curves between volumetric moisture content, matric suction and cohesive force

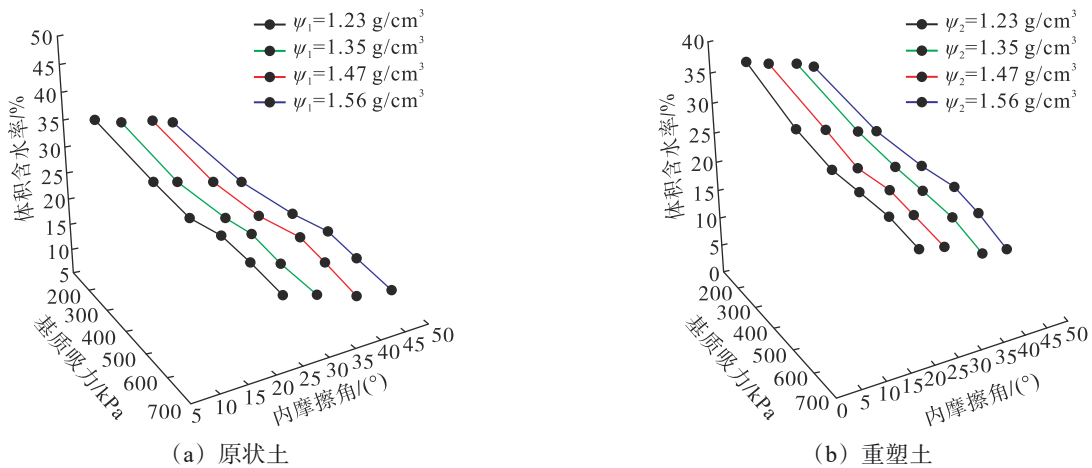


图9 体积含水率、基质吸力和内摩擦角关系

Fig.9 relationship between volumetric moisture content, matric suction, and internal friction angle

由图8、图9可知,原状土、重塑土在4种干密度条件下, c 、 ϕ 均与 s 正相关。由图8、图9得

到黏聚力和内摩擦角与基质吸力的关系表达式,绘制拟合关系曲线,见图10、图11。

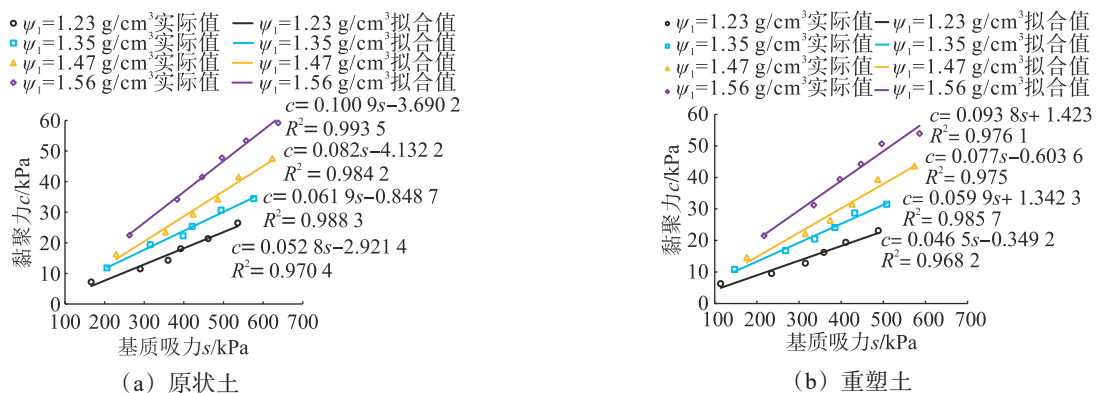


图10 黏聚力和基质吸力关系曲线

Fig.10 relationship curves between cohesion and matric suction

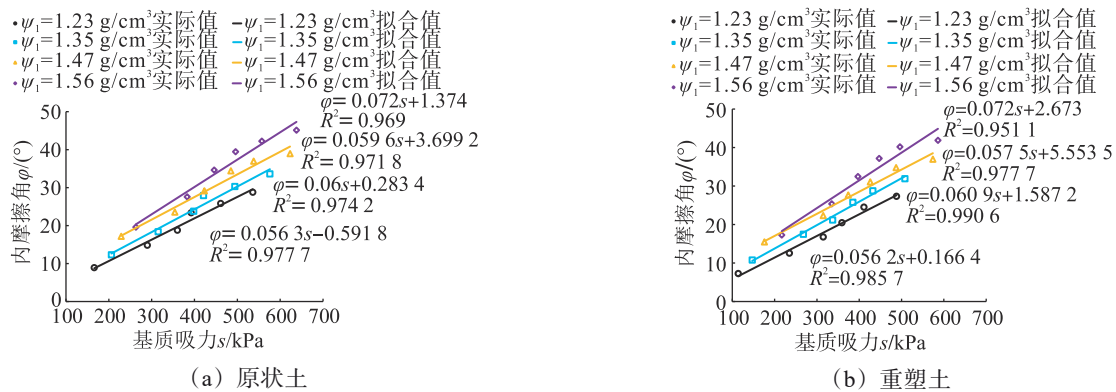


图11 内摩擦角和基质吸力关系

Fig.11 relationship between internal friction angle and matric suction

由图10、图11可见, s 不变时, 随着干密度的增大, c 、 φ 增大。不同干密度条件下, 随着 s 增大, 原状土、重塑土的 c 、 φ 均增大。原因是土体在初始饱和状态具有较高的含水率, 此时 s 较小, 土体间颗粒孔隙被水充满, 颗粒间摩擦作用小, φ 较小, c 此时主要来源于颗粒之间的胶结和化学键的作用, 此时 c 也很小; 随着 s 的增大, 土体进入非饱和状态, 体积含水率持续降低, 水分的流失使得土体颗粒间润滑作用减弱, 增强了土体颗粒间的咬合作用, 摩擦性能增加, 因此 φ 相应地增大。土体颗粒间咬合作用增强, 颗粒间胶结和化学键作用也逐渐增强, 颗粒骨架的密实程度得到提升, c 增大。

5 结论

(1) 随着干密度的增大, 原状土、重塑土的进气值、残余含水率均呈线性递增趋势。相同干密度条件下, 原状土进气值和残余含水率均高于重塑土, 原状土的脱水速率小于重塑土。

(2) 针对川东北地区典型非饱和黏土的土-水特性, Fredlund & Xing1 和 Fredlund & Xing2 模型拟合效果较好, 平均 R^2 均超过 0.99, 可作为 SWCC 推荐模型。

(3) 不同干密度条件下, 原状土、重塑土的黏聚力、内摩擦角均随着基质吸力的增大而线性增长。同样基质吸力下, 黏聚力、内摩擦角随着干密度增大而增大。

本文得出的抗剪强度指标与基质吸力的经验关系仅适用于川东北地区部分干密度条件下的非饱和黏土, 且本次 SWCC 仅研究了脱湿过程, 下一步工作将研究吸湿过程, 以更全面地探索川东北地区非饱和黏土的土-水特性和强度特征之间的互馈机制。

参考文献(References):

- [1] 邵玉娟, 施斌, 高磊, 等. 温度对非饱和土抗剪强度影响的试验研究[J]. 高校地质学报, 2009, 15(2): 213-217.
SHAO Yuxian, SHI Bin, GAO Lei, et al. Laboratory study on influence of temperature on shear strength of unsaturated clayey soil [J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 15(2): 213-217.
- [2] IYER K, JAYANTH S, GURNANI S, et al. Influence of initial water content and specimen thickness on the SWCC of fine-grained soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2013, 13(6): 894-899.
- [3] 陈嘉伟, 李泽, 韩哲, 等. 初始孔隙比对高吸力下非饱和土土水特性的影响[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49 (4): 47-54.
CHEN Jiawei, LI Ze, HAN Zhe, et al. Effect of initial void ratio on the soil water characteristics of unsaturated soil at high suctions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49 (4): 47-54.
- [4] 张建辉, 丁子凯, 陈宝泽, 等. 滨海盐渍土土-水特征曲线试验研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(4): 106-110, 115.
ZHANG Jianhui, DING Zikai, CHEN Baoze, et al. Experimental study on soil-water characteristic curve of coastal saline soil[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(4): 106-110, 115.
- [5] 徐伟皓. 团粒尺寸对红黏土水力和力学特性的影响及微观机理研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2023: 33-38.
- [6] SCHNELLMANN R, RAHARDJO H, SCHNEIDER H R. Controlling parameter for unsaturated soil property functions: validated on the unsaturated shear strength[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(3): 374-381.
- [7] AL AQTASH U, BANDINI P. Prediction of unsaturated shear strength of an adobe soil from the soil-water characteristic curve[J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 892-899.
- [8] 徐筱. 高吸力及低应力下非饱和土的强度和变形特性[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 26-31.
- [9] 崔宏环, 杨兴然, 孙利成, 等. 冀西北地区非饱和土试验研究及强度预测[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 1-6.
CUI Honghuan, YANG Xingran, SUN Licheng, et al. Experimental study and strength prediction of unsaturated soil in northwest Hebei province[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural

- Science), 2022, 41(1): 1-6.
- [10] 牛庚, 朱晓凤, 李俊星, 等. 宽广吸力范围非饱和土剪切强度试验研究及其预测[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3349-3359.
- NIU Geng, ZHU Xiaofeng, LI Junxing, et al. Experimental study on shear strength of unsaturated soil over a wide suction range and its prediction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3349-3359.
- [11] 张亚国, 梁伟, 郭松峰, 等. 黄土孔隙结构演化对其土-水特性影响分析[J]. 工程地质学报, 2022, 30(6): 1998-2005.
- ZHANG Yaguo, LIANG Wei, GUO Songfeng, et al. Analysis for effects of loess pore structure evolution on soil-water characteristics[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(6): 1998-2005.
- [12] 何芳婵, 张俊然. 原状膨胀土干湿过程中持水特性及孔隙结构分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(3): 736-747.
- HE Fangchan, ZHANG Junran. Water retention behavior and pore structure analysis of undisturbed expansive soil during drying and wetting[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022, 30(3): 736-747.
- [13] WEI Y Z, YAO Z H, CHONG X L, et al. Microstructure of unsaturated loess and its influence on strength characteristics[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 1502.
- [14] CHU F, YANG W P, SHAO S J. Study on preparation of saturated unstructured loess and its strength and deformation characteristics [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 719(3): 032027.
- [15] 赵煜鑫, 李旭, 赵红芬, 等. 宽饱和度范围非饱和土抗剪强度指标的演化模型[J]. 岩土力学, 2023, 44(10): 2809-2820.
- ZHAO Yuxin, LI Xu, ZHAO Hongfen, et al. Evolution model of unsaturated shear strength indices over a wide range of saturation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(10): 2809-2820.
- [16] 钱建固, 林志强. 双孔隙结构重塑非饱和膨胀土的抗剪强度特性[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(3): 486-494.
- QIAN Jiangu, LIN Zhiqiang. Shear strength behaviors of unsaturated expansive soils with dual-porosity structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(3): 486-494.
- [17] ZHANG J, LI X, ZHOU B Q, et al. Experimental study on the shear strength influencing factors and shear surface characteristics of Malan loess[J]. Environmental Earth Sciences, 2024, 83(5): 141.
- [18] DAI Z J, GUO J H, CHI Z C, et al. Three-dimensional soil-water characteristics model of expansive soil considering swelling effect [J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(8): 04023119.
- [19] ZHANG L, LI T L, LI J H, et al. Water infiltration and soil-water characteristics of compacted loess under applied vertical stress[J]. Journal of Mountain Science, 2023, 20(3): 873-885.
- [20] 叶云雪, 易博文, 刘小文, 等. 脱湿路径下土体水分变化路径及体积变形对滤纸法测定土-水特征曲线的影响[J]. 岩土力学, 2024, 45(8): 2351-2361.
- YE Yunxue, YI Bowen, LIU Xiaowen, et al. Influence of water change path and volume change in soil on soil-water characteristic curve measured by filter paper method under drying path[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(8): 2351-2361.