

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.S1.029

压实膨胀土非饱和抗剪强度的湿度与密度效应

周葆春¹, 孔令伟², 马全国¹, 罗正涛¹, 张彦钧¹

(1. 信阳师范学院 建筑与土木工程学院, 河南 信阳 464000;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 为获得压实膨胀土在湿度与密度变化范围内的抗剪强度全貌, 采用非饱和直剪试验测定 38 种湿度与密度组合状态下荆门弱膨胀土的抗剪强度, 获得了湿度从风干到饱和、密度在孔隙比 0.539~1.089 范围内的抗剪强度的分布规律。结果表明, (1) 剪切过程中试样大多呈应变软化, 仅在低密度与高湿度组合下产生应变强化。高密度与低湿度组合下易出现“应力跌落”。相同密度下, 随湿度增大, 土体塑性变形能力增强。相同湿度下, 随密度降低, 土体塑性变形能力增强; (2) 非饱和抗剪强度与总黏聚力均随湿度增加先增大后减小而呈现出显著的“山峰效应”; (3) 非饱和抗剪强度、总黏聚力、总内摩擦角均随密度减小而显著降低, 呈现出显著的“密度效应”。

关键词: 非饱和土; 压实土; 抗剪强度; 应力跌落; 山峰效应; 密度效应

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 增 1 - 0240 - 07

Effects of moisture and density states on unsaturated shear strength of compacted expansive soil

ZHOU Bao-chun¹, KONG Ling-wei², MA Quan-guo¹, LUO Zheng-tao¹, ZHANG Yan-jun¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: To investigate unsaturated shear strength of compacted expansive soil within the entire range of moisture and density state, the unsaturated direct shear tests are conducted on Jingmen expansive soil associated with 38 types of moisture and density state combinations. The distribution of shear strength are obtained with respect to moisture state varying from air-dry to saturation and density represented by void ratio ranging from 0.539 to 1.089. Conclusions are as follows: (1) Strain-softening phenomenon is observed in shear for most samples. In contrast, strain-hardening phenomenon is observed in shear only for the lower-density and higher-moisture state combination. Stress plummeting phenomenon is observed in shear for the higher-density and lower-moisture state combination. Plastic deformation capacity of the soil samples is improved by increasing moisture under the same density or improved by decreasing density under the same moisture. (2) With the moisture increasing from air-dry to saturation, the unsaturated shear strength and total cohesion increase and then decrease, which can be called the peak effect. (3) Unsaturated shear strength, total cohesion, and total friction angle all decrease with decreasing density, which can be called the density effect.

Keywords: unsaturated soils; compacted soils; shear strength; stress plummeting; peak effect; density effect

1 引 言

土的抗剪强度是土压力、地基承载力、土坡稳定等工程稳定分析的核心指标。由于地下水位以上土体均处于非饱和状态, 土的非饱和抗剪强度是土力学及岩土工程领域的基本问题之一。

理论上讲, 土的非饱和抗剪强度与土的粒度

(颗粒大小及分布)、湿度(持水程度, 用含水率 w 或饱和度 S_r 表达)、密度(密实程度, 用孔隙比 e 表达)、构度(结构性)均相关^[1-6]。既往的研究主要集中在“湿度”对抗剪强度的影响, 如凌华等^[7]、林鸿州等^[8]、孔令伟等^[9]、Schnellmann 等^[10]、Rosone 等^[11]、Gallage 等^[12]、张俊然等^[13]的研究。此外, 由于控制吸力的非饱和抗剪强度试验设备条件要求

收稿日期: 2017-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51009118); 河南省高等学校重点科研项目 (No.17A560008)。

This work was supported by the National Nature Science Foundation of China (51009118) and the Key Research Program of Higher Education of Henan Province (17A560008).

第一作者简介: 周葆春, 男, 1978 年生, 博士, 教授, 主要从事非饱和土与特殊土力学性质与本构模拟方面的研究工作。E-mail: zhoubc@xynu.edu.cn

高、吸力平衡历时漫长，通常较难控制 1 500 kPa 以上的吸力（对黏性土而言，这意味着“湿度”的控制范围较窄），导致涵盖了全吸力范围的黏性土非饱和抗剪强度试验结果有限^[13]。非饱和土在“粒度、湿度、密度、构度”及应力等多种状态组合变化下抗剪强度的变化规律有待深入研究^[6]。

本文以荆门弱膨胀土为研究对象，采用非饱和直剪试验测定了 38 种湿度与密度组合状态下的非饱和抗剪强度，获得了湿度从风干到饱和、密度从压实度 70 % ~ 95 % ($e = 0.539 \sim 1.089$) 范围内的非饱和抗剪强度的分布规律与表现特征，结果表明压实膨胀土的非饱和抗剪强度呈现显著的“山峰效应”与“密度效应”。

2 试验方案

2.1 试验土样

试验用土取自湖北荆门，为弱膨胀土，呈黄褐色、硬塑状态，含黑色铁锰结核，局部有白色填充物，其物理性质指标见表 1^[9]，矿物成分与颗粒组成见表 2，土样风干含水率为 7.0 %，最优含水率为 15.5 %，最大干密度为 1.86 g/cm³。

表 1 试验用土的物理性质指标^[9]
Table 1 Physical property index of tested soil^[9]

天然含水率 /%	天然密度 / (g/cm ³)	土粒相对密度	天然干密度 / (g/cm ³)	液限 /%	塑限 /%	自由膨胀率 /%
21.1 ~ 22.3	2.03	2.72	1.68	42.1	20.9	42

表 2 矿物成分与颗粒组成^[9]
Table 2 Mineral compositions and particle component^[9]

矿物组成 /%				不同颗粒 (mm) 颗粒组成 /%			
伊利石	蒙-伊混层	高岭石	石英	> 0.075	0.075 ~ 0.005	0.002 ~ 0.005	< 0.002
35	5	40	20	13.2	57.3	14.5	15.0

2.2 试样制备

为了获得压实膨胀土在湿度与密度变化范围内的非饱和抗剪强度全貌，采用 6 种压实度与 8 种含水率 (w (7 %、11 %、14 %、17 %、20 %、23 %、26 %、29 %)) 组合的制样方案，制样指标共 38 种如图 1 所示。图中， e 分别为 1.089、0.950、0.828、0.720、0.625、0.539，依次对应压实度 70 %、75 %、80 %、85 %、90 %、95 %，蓝线为等饱和度线。

为文章简洁性，文中湿度状态均用含水率表达，表 3 的第 3 列为 38 种湿度与密度组合状态下的饱和度。图 1 表明，试样 S_r 变化范围为 23.0 % ~ 98.2 % (从风干到接近饱和)， e 变化范围为 0.539 ~ 1.089

(从密实到非常疏松)，表明制样方案基本覆盖了该膨胀土湿度与密度的变动范围。

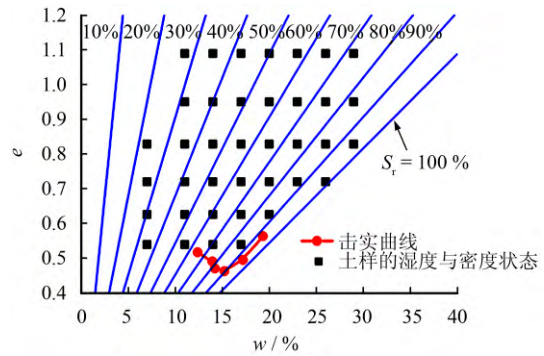


图 1 制样控制指标 (38 种)

Fig.1 Control indexes of sample preparation (38 types)

针对图 1 中的 38 种制样指标，采用环刀样，制样控制直径为 61.8 mm、控制高度为 20 mm。试样制备过程：首先测定风干含水率，根据制样含水率计算加水量，每次取过 2 mm 筛的风干土 2 kg，平铺在不吸水的盘内，用喷雾器喷洒预计的水量，静置 30 min，装入密封袋中，置于保湿缸内湿润 7 d。根据制样压实度计算各土样所需湿土质量，将相应质量的湿土倒入预先装好制样模具（内置环刀）的压样器内，拂平土样表面，以静压力将土压入制样模具（内置环刀）内。

2.3 非饱和直剪试验

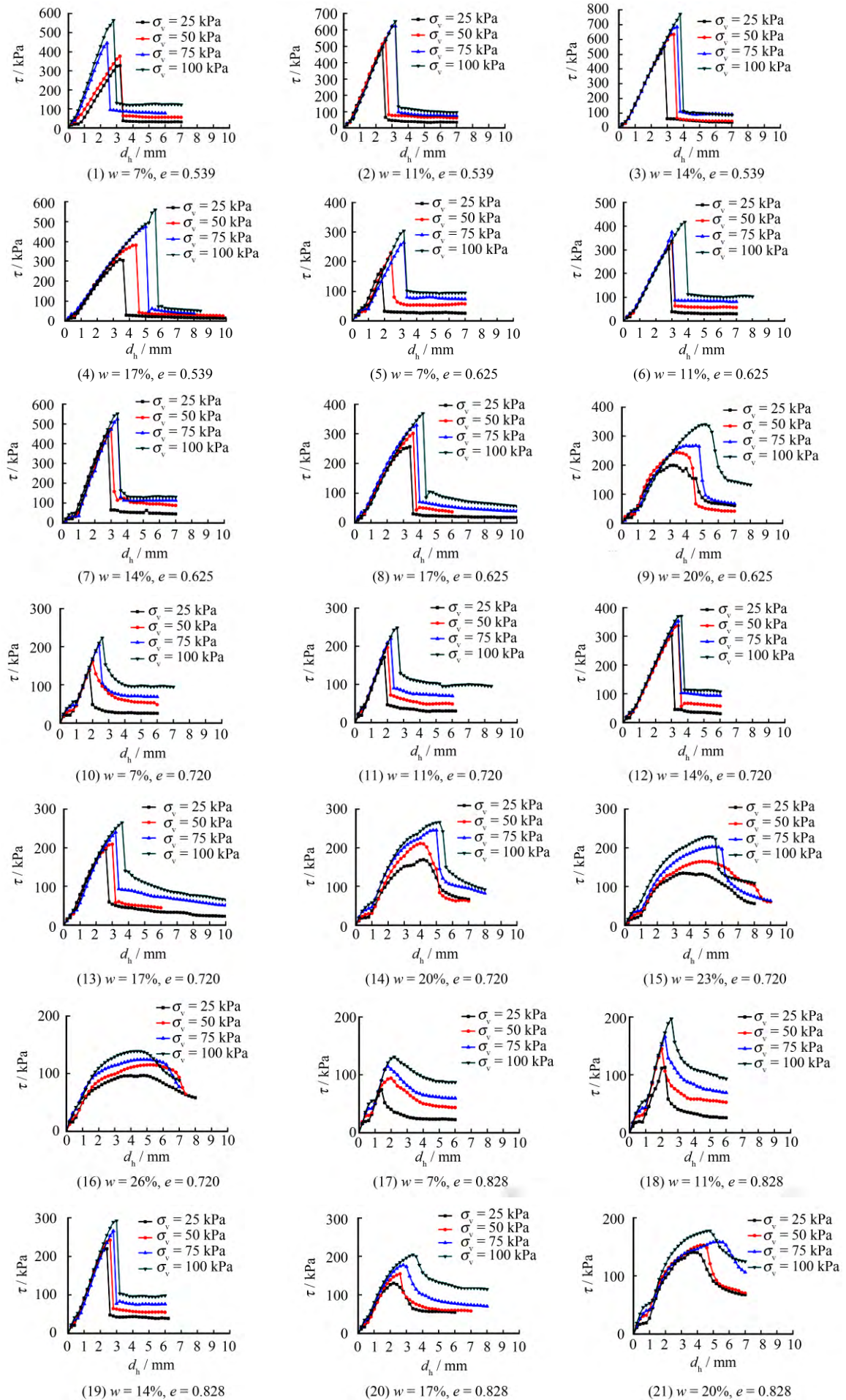
在南京土壤仪器厂有限公司生产的 ZJ 型单联应变控制式直剪仪上进行非饱和快剪试验，测定 38 种湿度与密度组合状态下的非饱和抗剪强度 τ_f 。

对每一制样指标，4 个试样分别施加 25、50、75、100 kPa 的竖向压力 σ_v 后立即快速施加水平剪切力，剪切速率为 0.8 mm/min。试验过程中监测试样垂直位移、水平位移（剪切位移）与剪切力，至水平位移达到 6 mm 后停机。剪切结束后，取出试样，复测剪切面附近土的含水率。

3 试验结果及分析

3.1 剪应力-水平位移关系

图 2 为 38 种湿度与密度组合状态下非饱和压实膨胀土的剪应力-水平位移关系。从图中可以看出，(1) 压实度为 95 % ($e = 0.539$) w 为 7 %、11 %、14 %、17 % 的试样均呈应变软化，即剪切过程中随水平位移增大，剪应力先增高达峰值，然后下降，且试样均出现“应力跌落(stress plummet)”现象，剪应力达到峰值后急剧降低犹如“跌落”，破坏无先兆，可归为脆性破坏范畴。



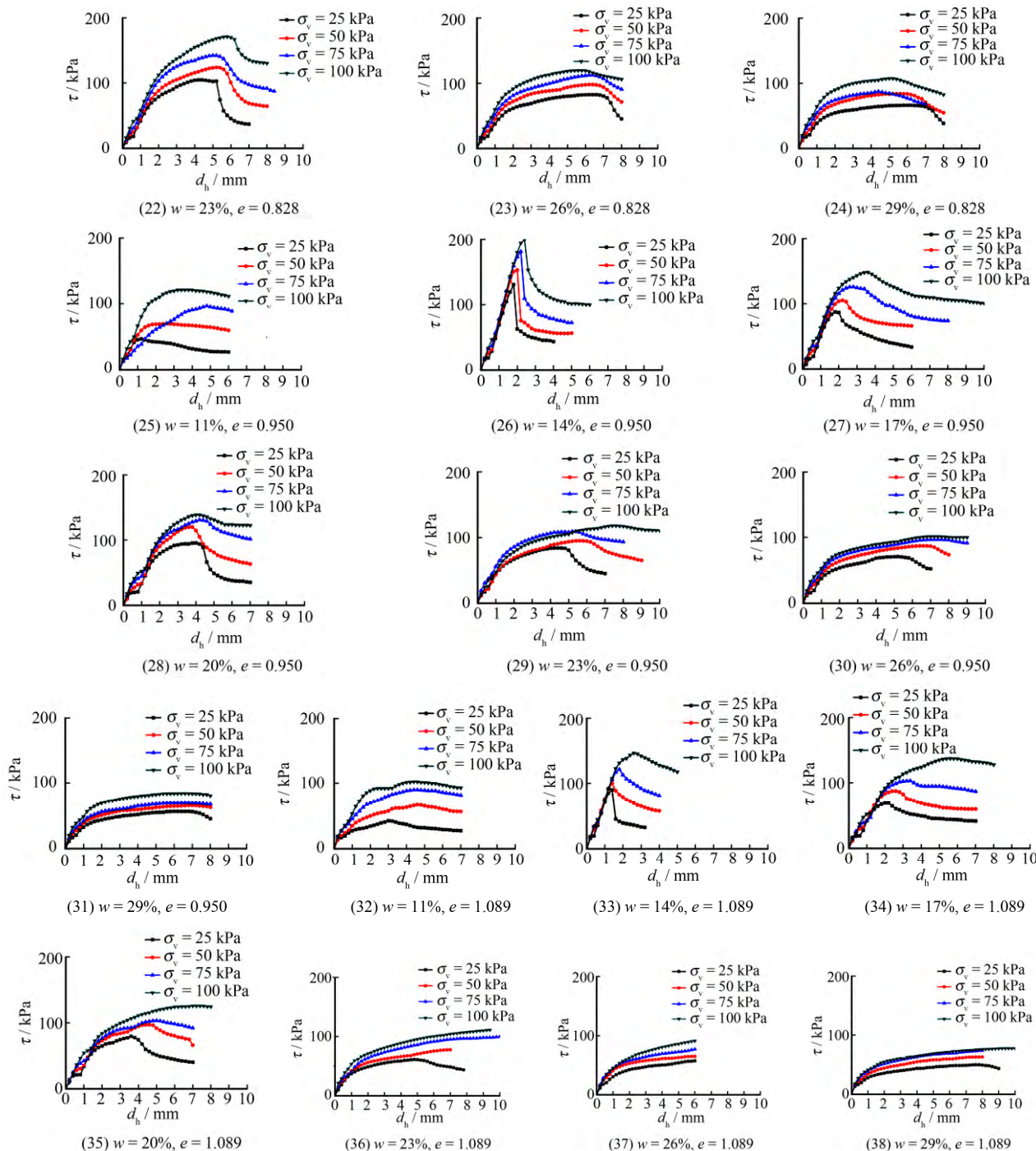


图 2 38 种湿度和密度组合状态下的剪应力与水平位移关系曲线

Fig.2 Relationships between shear stress-horizontal displacement of humidity and density of 38 kind

随着 w 增大，峰值剪应力对应的水平位移增大，表明剪切过程中土体塑性变形能力随 w 增大而增强；(2) 压实度为 90 % ($e = 0.625$) 的试样均呈应变软化， $w = 7\%$ 、 11% 、 14% 、 17% 的试样亦出现“应力跌落”， $w = 20\%$ 的试样未出现“应力跌落”，其剪应力达到峰值后较为平缓地下降。总体上看，峰值剪应力对应的水平位移亦随 w 的增加而增大；(3) 压实度为 85 % ($e = 0.720$) 的试样均呈应变软化。 $w = 7\%$ 、 11% 、 14% 、 17% 的试样亦出现“应力跌落”， $w = 20\%$ 、 23% 、 26% 的试样未出现“应力跌

落”，随 w 的增大，剪应力达峰值后降幅趋缓。峰值剪应力对应的水平位移亦随 w 增加而增大；(4) 压实度为 80 % ($e = 0.828$) 的试样均呈应变软化，大体未出现“应力跌落”。峰值剪应力对应的水平位移随 w 增大亦增大，峰值剪应力后的降幅亦随 w 的增大而趋缓；(5) 压实度为 75 % ($e = 0.950$)， $w = 11\%$ 、 14% 、 17% 、 20% 、 23% 的试样呈应变软化，未出现“应力跌落”。 $w = 26\%$ 、 29% 的试样呈应变强化，即剪切过程中剪应力随水平位移增大而逐渐增大；(6) 压实度为 70 % ($e = 1.089$)， w 为 11% 、

14%、17%、20%的试样呈应变软化，未出现“应力跌落”， $w = 23\%$ 、 26% 、 29% 的试样呈应变强化；(7)同一含水率条件下，随压实度的降低， $w = 7\%$ 、 11% 、 14% 、 17% 的试样“应力跌落”现象趋缓直至消失， $w = 20\%$ 的试样应变软化趋缓； $w = 23\%$ 、 26% 、 29% 的试样应变软化趋缓直至转变为应变强化。这些现象表明，土体塑性变形能力随压实度(密度)降低而增大。

非饱和状态下压实膨胀土剪切变形行为与湿度/密度的关系为(1)38种湿度与密度组合状态下试样大多呈应变软化，即存在剪应力峰值，只有压实度75%、 $w = 26\%$ 、 29% 和压实度70%、 $w = 23\%$ 、 26% 、 29% 的5种试样呈应变强化，即低密度与高湿度组合条件下产生应变强化。(2)压实度95%、 $w = 7\%$ 、 11% 、 14% 、 17% ，压实度为90%、 $w = 7\%$ 、 11% 、 14% 、 17% ，压实度为85%、 $w = 7\%$ 、 11% 、 14% 、 17% 的12种试样出现“应力跌落”，即高密度与低湿度组合条件下易出现“应力跌落”，表明该条件下易产生脆性破坏。(3)相同密度下，随 w 的增大，土体塑性变形能力增强。(4)相同 w 条件下，随密度降低，土体塑性变形能力增强。

3.2 非饱和抗剪强度

对应变软化的试样取剪应力峰值作为抗剪强度，对应变强化的试样取剪切位移等于4mm对应的剪应力作为抗剪强度，38种湿度与密度组合状态下的非饱和抗剪强度 τ_f 见表3的4~7列。

基于 τ_f 实测结果，采用thin plate spline(TPS)插值获得4种竖向压力下 τ_f - e - w 三维曲面(见图3)，图3为该压实膨胀土在湿度与密度变化范围内的非饱和抗剪强度全貌。综合表3与图3可得，(1)每一竖向压力下 τ_f 随 e 增大而规律性降低，表明密实程度对 τ_f 影响显著，表现出强烈的“密度效应”；(2)在 $w = 7\% \sim 29\%$ 范围内，随 w 增大， τ_f 先增大后降低，呈现出“山峰效应”^[2, 5, 14]，在 $w = 14\%$ 时 τ_f 达到峰值。

3.3 总应力抗剪强度参数

基于 τ_f 实测结果，采用Mohr-Coulomb强度公式($\tau_f = c + \sigma_v \tan \varphi$)对38种湿度与密度组合状态下的 τ_f - σ_v 关系进行一元线性回归，获得总应力强度参数(总黏聚力 c 与总内摩擦角 φ)见表3的8、9列。

图4为采用TPS插值获得的 c - e - w 三维曲面。从图中可以看出，总黏聚力 c 随密实与持水程度的变化规律与 τ_f 一致：随 e 增大而规律性降低，呈现出“密度效应”；随湿度增加先增大后减小，呈现出

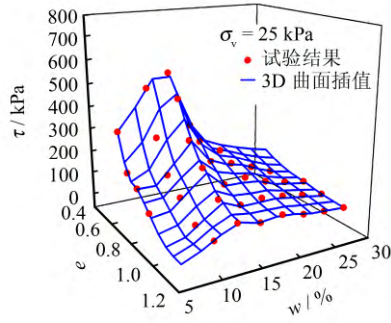
表3 38种湿度和密度组合状态下荆门压实膨胀土参数
Table 3 Jingmen compaction expansion parameters of humidity and density of 38 kind samples

试样状态			不同竖向应力 σ_v (kPa)时 非饱和抗剪强度 τ_f /kPa				总应力抗剪 强度参数	
w /%	e	S_r /%	25	50	75	100	c /kPa	φ /($^\circ$)
7	0.539	35.3	327.4	377.4	445.7	563.6	234.3	72.2
11	0.539	55.5	497.5	548.2	623.3	651.5	445.8	65.0
14	0.539	70.6	553.2	634.1	684.2	770.4	485.1	70.4
17	0.539	85.7	308.1	382.3	475.0	559.7	219.4	73.6
7	0.625	30.5	172.6	231.5	265.3	304.1	136.3	59.7
11	0.625	47.9	304.5	330.5	375.2	417.4	261.1	56.9
14	0.625	60.9	459.1	475.2	524.6	551.8	420.8	52.7
17	0.625	74.0	256.5	301.6	329.1	368.6	223.0	55.5
20	0.625	87.1	199.9	244.5	268.1	340.5	151.9	60.7
7	0.720	26.4	138.1	161.0	205.2	222.9	107.1	50.1
11	0.720	41.5	171.1	196.5	219.9	247.9	145.4	45.4
14	0.720	52.9	304.5	336.6	352.9	370.2	287.7	40.5
17	0.720	64.2	196.8	208.9	240.3	264.5	169.0	43.2
20	0.720	75.5	169.2	211.1	245.3	265.7	141.9	52.3
23	0.720	86.8	134.7	164.9	203.2	228.9	102.7	52.1
26	0.720	98.2	96.9	115.3	124.5	138.9	85.2	28.4
7	0.828	23.0	74.5	94.2	114.5	130.7	56.3	37.0
11	0.828	36.1	112.9	144.8	165.8	196.6	87.0	47.4
14	0.828	46.0	219.5	242.1	266.0	292.3	194.4	44.1
17	0.828	55.8	130.3	154.7	177.4	204.0	105.7	44.3
20	0.828	65.7	140.7	152.9	158.9	177.4	128.4	24.9
23	0.828	75.6	104.7	123.9	142.3	170.8	81.3	40.9
26	0.828	85.4	82.6	98.1	112.6	119.7	71.8	26.7
29	0.828	95.3	66.3	84.0	87.6	107.3	54.7	26.8
11	0.950	31.5	46.8	70.0	96.8	121.0	21.3	44.9
14	0.950	40.1	131.0	153.1	181.6	199.4	107.9	43.1
17	0.950	48.7	87.4	105.2	125.8	148.2	65.9	39.1
20	0.950	57.3	95.5	119.8	130.7	138.4	86.2	29.2
23	0.950	65.9	84.2	95.3	109.4	117.9	72.9	24.7
26	0.950	74.5	68.6	78.7	85.2	89.7	63.1	15.6
29	0.950	83.0	51.6	59.4	65.2	79.4	41.6	19.6
11	1.089	27.5	42.3	66.9	90.2	102.4	24.5	39.2
14	1.089	35.0	90.0	100.3	121.5	146.3	67.0	37.2
17	1.089	42.5	68.6	87.3	103.2	123.9	50.2	36.0
20	1.089	49.9	79.4	97.1	103.4	111.0	72.4	22.0
23	1.089	57.4	58.4	66.0	80.0	88.7	47.1	22.8
26	1.089	64.9	50.2	61.0	69.4	80.3	40.5	21.6
29	1.089	72.4	43.6	54.8	62.9	64.5	38.8	15.8

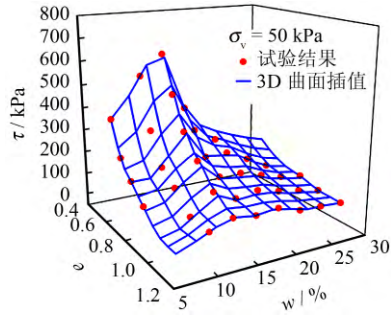
“山峰效应”。

图5为采用TPS插值获得的 φ - e - w 三维曲面。从图中可以看出，总内摩擦角 φ 大体随孔隙比增大而规律性降低、呈现出“密度效应”，随湿度增加 φ 变化较为平缓，并未呈现出“山峰效应”。

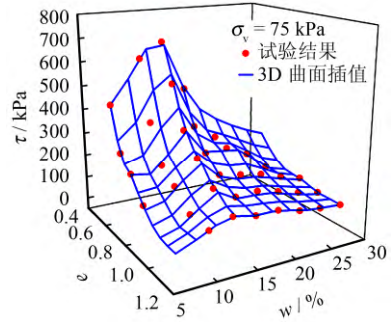
综上所述，(1)相同密度下湿度从风干到接近饱和范围内， τ_f 与 c 随湿度增加先增大后减小而呈现出显著的“山峰效应”。 φ 随湿度增加的变化较为平缓，未呈现“山峰效应”，较密实试样 φ 大体维持稳定，较疏松试样 φ 大体随湿度增加而降低。(2)相同持水程度下 τ_f 、 c 、 φ 均随密度减小而显著降低；即密度对压实膨胀土 τ_f 影响显著。



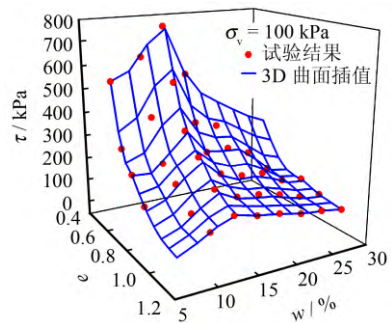
(a) $\sigma_v = 25 \text{ kPa}$



(b) $\sigma_v = 50 \text{ kPa}$



(c) $\sigma_v = 75 \text{ kPa}$



(d) $\sigma_v = 100 \text{ kPa}$

图3 非饱和抗剪强度-孔隙比-含水率-竖向应力关系
Fig.3 Relationships among unsaturated shear strength, void ratio, water content and vertical total stress

3.4 “山峰效应”初步探讨

本文试验结果表明，相同密度下湿度从风干到接近饱和范围内，非饱和抗剪强度与总黏聚力随湿度增加先增大后减小而呈现出显著的“山峰效应”。一般情况下黏性土非饱和抗剪强度试验结果未呈现“山峰效应”的原因可能在于吸力控制范围较窄（通

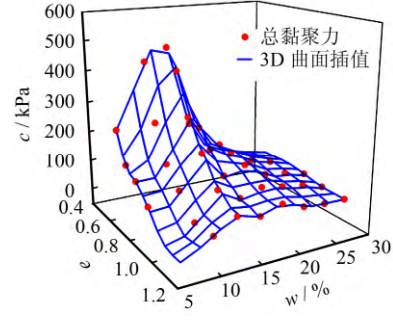


图4 总黏聚力-孔隙比-含水率关系

Fig.4 Relationships among total cohesion, void ratio and water content

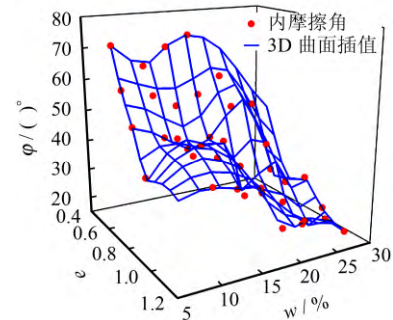


图5 总内摩擦角-孔隙比-含水率关系

Fig.5 Relationships among total angle of internal friction, void ratio, water content

常在 1500 kPa 以内)，试验结果集中于高湿度范围，即图 3“山峰”右侧，所以，仅能观察到非饱和抗剪强度随含水率降低而增大。本文试验覆盖了较大的湿度范围，能够观察到从饱和到风干含水率的整个湿度变化过程中存在非饱和抗剪强度峰值以及变化曲线随含水率降低的下降段，即图 3“山峰”的左侧。

从形式上看，非饱和抗剪强度呈现出的“山峰效应”与黏土击实曲线的“峰值”现象有异曲同工之处，而且非饱和抗剪强度峰值对应的含水率(14%)接近其最优含水率(15.5%)，表明湿度对非饱和抗剪强度的影响规律与湿度对干密度的影响规律类似，其土水间的物理化学机制与微观机制对非饱和抗剪强度的影响是需要进一步研究的问题。

4 结论

(1) 38 种湿度与密度组合状态下剪切过程中试样大多呈应变软化，仅在低密度与高湿度组合下产生应变强化。高密度与低湿度组合下易出现“应力跌落”，表明该条件下易产生脆性破坏。相同密度下，随湿度增大，土体塑性变形能力增强。相同湿度下，随密度降低，土体塑性变形能力增强。

(2) 相同密度下非饱和抗剪强度与总黏聚力随湿度增加先增大后减小而呈现出显著的“山峰效

应”。

(3) 相同密度下总内摩擦角随持水程度增加的变化较为平缓,未呈现“山峰效应”,较密实试样总内摩擦角大体维持稳定。较疏松试样总内摩擦角大体随持水程度增加而降低。

(4) 相同湿度下非饱和抗剪强度、总黏聚力、总内摩擦角均随密度减小而显著降低,即非饱和抗剪强度存在显著的“密度效应”。

以上结论基于38种密实与持水组合控制状态下压实膨胀土的抗剪强度试验结果,脱/吸湿过程(水力路径/水力滞回)对其抗剪强度的影响尚待进一步研究,本文结论对其他土类的适用性亦待研究。

参 考 文 献

- [1] 陈正汉,王永胜,谢定义. 非饱和土的有效应力探讨[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 62 - 69.
CHEN Zheng-han, WANG Yong-sheng, XIE Ding-yi. Effective stress in unsaturated soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(3): 62 - 69.
- [2] 汤连生. 从粒间吸力特性再认识非饱和土抗剪强度理论[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 412 - 417.
TANG Lian-sheng. New suggestion on shear strength in unsaturated soil based on suction between grains[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 412 - 417.
- [3] LU N, LIKOS W J. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(2): 131 - 142.
- [4] 盛岱超, 杨超. 关于非饱和土本构研究的几个基本规律的探讨[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 438 - 456.
SHENG Dai-chao, YANG Chao. Discussion of fundamental principles in unsaturated soil mechanics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(3): 438 - 456.
- [5] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201 - 272.
CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(2): 201 - 272.
- [6] 谢定义. 非饱和土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
XIE Ding-yi. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [7] 凌华, 殷宗泽. 非饱和土强度随含水量的变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1499 - 1503.
LING Hua, YIN Zong-ze. Variation of unsaturated soil strength with water contents[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(7): 1499 - 1503.
- [8] 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 Hong-zhou, LI Guang-xin, YU Yu-zhen, et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(9): 1931 - 1936.
- [9] 孔令伟, 周葆春, 白颢, 等. 荆门非饱和膨胀土的变形与强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3036 - 3042.
KONG Ling-wei, ZHOU Bao-chun, BAI Hao, et al. Experimental study of deformation and strength characteristics of Jingmen unsaturated expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3036 - 3042.
- [10] SCHNELLMANN R, RAHARDJO H, SCHNEIDER H R. Unsaturated shear strength of a silty sand[J]. **Engineering Geology**, 2013, 162: 88 - 96.
- [11] ROSONE M, FARULLA C A, FERRARI A. Shear strength of a compacted scaly clay in variable saturation conditions[J]. **Acta Geotechnica**, 2016, 11(1): 37 - 50.
- [12] GALLAGE C, UCHIMURA T. Direct shear testing on unsaturated silty soils to investigate the effects of drying and wetting on shear strength parameters at low suction[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2016, 142(3): 04015081.
- [13] 张俊然, 孙德安, 姜彤, 等. 宽广吸力范围内弱膨胀土的抗剪强度及其预测[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1064 - 1070.
ZHANG Jun-ran, SUN De-an, JIANG Tong, et al. Shear strength of weakly expansive soils and its prediction in a wide range of suction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(6): 1064 - 1070.
- [14] 张鹏程, 汤连生, 邓钟尉, 等. 非饱和土湿吸力与含水率的定量关系研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1453 - 1457.
ZHANG Peng-cheng, TANG Lian-sheng, DENG Zhong-wei, et al. Quantitative relationship between wet suction and water content of unsaturated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(8): 1453 - 1457.