

基于强度测试结果的压实膨胀土有效应力参数

周葆春*, 霍冠旭, 马全国

(信阳师范大学 河南省非饱和土与特殊土工程技术研究中心/建筑与土木工程学院, 河南 信阳 464000)

摘要: 有效应力参数 χ 表达的是吸力转化为有效应力的效率,其变化规律与测试方法的研究是非饱和土力学的核心问题之一。然而,由于直接测定 χ 相当困难,因此实测结果非常少。基于系统完整的压实荆门黄褐色膨胀土抗剪强度与吸力实测结果,获得了有效应力参数-净应力-吸力-孔隙比 e -重力含水率 w 间的依赖关系,结果表明:①相同密度下, χ 随 w 增加而增大,即基质吸力转化为有效应力的效率随持水程度增大而增加;②相同湿度下, χ 随 e 的降低而显著增大,意味着 χ 强烈依赖于密度,随密度增大,基质吸力转化为有效应力的效率显著增加,表现出强烈的“密度效应”;③相同 e 和 w 条件下, χ 随竖向净应力的增大而增大,意味着外部应力状态亦会对 χ 产生影响;增大竖向净应力会导致试样有压密趋势,其机制类似于密度对 χ 的影响;④非饱和抗剪强度呈现出“山峰效应”,原因在于: χ 随湿度增加而增大,基质吸力随湿度增加而降低。湿度低时, χ 值小而基质吸力值大;湿度高时, χ 值大而基质吸力值小;导致从饱和到风干整个湿度变化过程中,吸附强度存在峰值,进而导致非饱和抗剪强度呈现“山峰效应”;⑤ χ 与密度、湿度、应力状态均密切相关,如何进行更为合理的定量描述,是非常值得进一步研究的问题。

关键词: 有效应力参数;非饱和土;吸力;非饱和抗剪强度;山峰效应

中图分类号: TU431

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effective stress parameters of compacted expansive soil based on strength test results

ZHOU Baochun*, HUO Guanxu, MA Quanguo

(Henan Unsaturated Soil and Special Soil Engineering Technology Research Center/ College of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: The effective stress parameter χ quantifies the efficiency with which suction was converted into effective stress; clarifying its variation pattern and reliable test methods remains one of the core challenges in unsaturated soil mechanics. Because χ was extremely difficult to measure directly, experimental data were scarce. Using a complete set of measured shear strength and suction data obtained for a compacted yellow-brown expansive soil from Jingmen, the dependencies were established among χ , net stress, suction, void ratio e , and gravimetric water content w . The results showed that: ① Moisture effect: At a given density, χ increased with w , indicating that the efficiency of converting suction into effective stress rises with increasing water content. ② Density effect: At a fixed moisture level, χ rised markedly as e decreased, demonstrating strong density dependence-higher density significantly enhances the suction-to-stress conversion efficiency. ③ Stress effect: Under constant e and w , χ increased with vertical net stress, implying that the external stress state also influences χ ; the mechanism was analogous to the density effect because greater vertical stress induces specimen compaction. ④ Peak (“mountain”) effect: Unsaturated shear strength exhibited a “peak phenomenon” because χ increased whereas matric suction decreased with rising moisture. At low moisture, χ was small and suction was large; at high moisture, χ was large

收稿日期:2024-06-23;修回日期:2025-09-15;*.通信联系人,E-mail:zhoubc@xynu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(52578435;11772290;51009118);河南省自然科学基金项目(252300421342)

作者简介:周葆春(1978—),男,河南信阳人,教授,博士,主要从事非饱和土与特殊土力学及工程研究。

引用格式:周葆春,霍冠旭,马全国.基于强度测试结果的压实膨胀土有效应力参数[J].信阳师范大学学报(自然科学版),2026,39(1):1-9.

ZHOU Baochun, HUO Guanxu, MA Quanguo. Effective stress parameters of compacted expansive soil based on strength test results[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(1):1-9.

and suction was small. Consequently, suction-induced strength reached a maximum over the full transition from saturation to air-drying, producing a corresponding peak in unsaturated shear strength. ⑤ Research outlook: Because χ was closely linked to density, moisture and stress state, developing more rational quantitative descriptions of these interrelations warranted further investigation.

Key words: effective stress parameter; unsaturated soils; matric suction; unsaturated shear strength; peak effect

0 引言

有效应力是指由土骨架承担、由土骨架传递、并对土的强度与变形起控制作用的应力^[1-2]。TERZAGHI 于 1923 年提出饱和土的有效应力原理,其表达式为:

$$\sigma' = \sigma - u_w, \quad (1)$$

式中: σ' 为有效应力, σ 为总应力, u_w 为孔隙水压力。TERZAGHI 有效应力原理作为土力学的拱心石,成功指导了近百年来土体工程建设。

BISHOP 于 1959 年提出非饱和土的有效应力公式:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w), \quad (2)$$

式中: σ' 为非饱和土有效应力; u_a 为孔隙气压力; $\sigma - u_a$ 为净应力; $u_a - u_w$ 为基质吸力; χ 为有效应力参数,表征吸力对有效应力的贡献率。

鉴于 χ 表达的是吸力转化为有效应力的效率,其变化规律与测试方法的研究是非饱和土力学的核心问题之一。

一方面, χ 与土的持水程度相关, OBERG 等^[3]采用饱和度表征有效应力参数, FREDLUND 等^[4]采用归一化体积含水率与土性参数 κ 的表达, KHALILI 等^[5]采用当前吸力与进气值比值的幂函数表达, VANAPALLI^[6]、LU^[7]、ALONSO^[8-9]和 PARK^[10]等采用有效饱和度。KONRAD^[11]和 ZHOU^[12]等采用毛细饱和度, GHORBANI 与 KODIKARA^[13]采用饱和度的幂函数形式,主要表达的是 χ 随持水程度增加而逐渐增大的变化规律。

另一方面, χ 还与土的成分与结构等土质学特征相关^[14-15],但由于直接测定 χ 相当困难,因此实测结果非常少。

为此,本文基于河南省非饱和土与特殊土工程技术研究中心前期对于压实荆门黄褐色膨胀土系统的饱和抗剪强度^[16]、吸力-密度-湿度关系^[17]、非饱和抗剪强度^[18]实测结果,获得了压实荆门黄褐色膨胀土的有效应力参数-净应力-吸力-孔隙比-重力含水率间的依赖关系,在此基础上探索有效

应力参数分别与湿度(持水程度,用重力含水率表达)、密度(用孔隙比表达)、应力状态间的相关性,目的是加深对非饱和土有效应力参数内涵外延的认知。

值得指出的是, χ 的深入研究不仅对非饱和土力学理论的完善具有重要意义,也为岩土工程实践提供关键参考。在边坡工程、路基填筑和地下结构等广泛涉及非饱和土状态的工程中,如何科学评估吸力对土体强度的影响,始终是设计与分析中的核心问题。 χ 作为吸力转化为有效应力的量化指标,是构建统一强度模型、进行安全评估与本构模拟的关键纽带。本文通过系统的强度试验与吸力测试,在多种湿度与密度组合条件下获得了 χ 实测值,揭示了“密度效应”与“山峰效应”的机制,可为非饱和抗剪强度模型的修正与工程参数的合理选取提供理论基础与数据支持。

1 研究方案

本研究试图获得压实荆门黄褐色膨胀土的有效应力参数-净应力-吸力-孔隙比-重力含水率间的依赖关系。为此,采用 6 种压实度与 8 种 w 组合的制样方案,制样指标共 38 种,见图 1^[17]。试验工作分 3 方面展开:

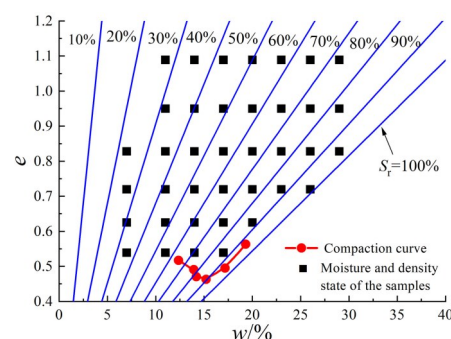


图 1 制样控制指标

Fig. 1 Controlling index of sample preparation

1.1 饱和固结慢剪试验

在直剪仪上进行浸水饱和后的固结慢剪试验,测定 6 种压实度下的饱和抗剪强度,以获得 6

种压实度下的有效黏聚力 c' 与有效内摩擦角 φ' 。试验过程参见文献[16]。

1.2 滤纸法测基质吸力

采用 Whatman No.42 型滤纸测定 38 种湿度与密度组合状态下的基质吸力以获得吸力-孔隙比-重力含水率关系, 试验过程参见文献[17]。

1.3 非饱和直剪试验

采用直剪仪, 对 38 组不同湿度-密度组合条件下的试样进行非饱和抗剪强度测试, 以获得相应非饱和抗剪强度 τ_f 与竖向总应力 σ_v 关系, 试验过程参见文献[18]。

1.4 基于强度测试结果的有效应力参数求取

在研究与应用中, 通常用单变量有效应力或双应力状态变量来表达土的非饱和抗剪强度^[19-21]。

若用单变量有效应力, 非饱和抗剪强度通常用 BISHOP^[22] 的表达式:

$$\tau_f = c' + [(\sigma_v - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi', \quad (3)$$

式中: τ_f 为非饱和抗剪强度; c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; $\sigma_v - u_a$ 为剪切破坏时的竖向净应力; $u_a - u_w$ 为剪切破坏时的基质吸力; χ 为有效应力参数; $\chi(u_a - u_w) \tan \varphi'$ 常被称作吸附强度^[21] 或毛细凝聚力^[20], 表征基质吸力对非饱和抗剪强度的贡献。

若用双应力状态变量, 非饱和抗剪强度通常用 FREDLUND^[19] 的表达式:

$$\tau_f = c' + (\sigma_v - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b, \quad (4)$$

式中: φ^b 为与基质吸力相应的内摩擦角, $(u_a - u_w) \tan \varphi^b$ 为吸附强度。

由式(3)与式(4)可得 $\chi \tan \varphi' = \tan \varphi^b$, 所以, 仅从非饱和抗剪强度而言, 采用单变量有效应力或两个独立应力变量的区别仅在于: 采用 χ 还是 φ^b 来表征吸力对有效应力的贡献率。

快剪试验中, 试样剪切前未经历固结过程, 且在 3~5 min 内完成剪切破坏, 试样破坏时孔隙比 e_f 、重力含水率 w_f 与制样控制指标相差不大, 破坏时的基质吸力 $(u_a - u_w)_f$ 可用滤纸法测定的相同湿度与密度状态下的基质吸力近似表达。据此建立 38 组不同湿度与密度组合条件下的 τ_f - σ_v - $(u_a - u_w)$ 之间的关系。

非饱和快剪试验在室内开展, 试样暴露在大气中, 假定土样中气相连通, 孔隙气压力 u_a 等于大气压力, 则 $u_a = 0$ ^[23], 竖向净应力 $\sigma_v - u_a$ 等于竖向总应力 σ_v 。

由式(3)可得:

$$\chi = \frac{\tau_f - c' - (\sigma_v - u_a) \tan \varphi'}{(u_a - u_w) \tan \varphi'}. \quad (5)$$

将饱和固结慢剪试验获得的有效黏聚力 c' 与有效内摩擦角 φ' 、滤纸法获得的 38 种湿度与密度组合状态下的基质吸力 $u_a - u_w$ 、非饱和直剪试验获得的非饱和抗剪强度 τ_f 与竖向总应力 σ_v 关系分别代入式(5), 即可得到 38 种湿度与密度组合状态下压实荆门黄褐色膨胀土的有效应力参数 χ 。

2 试验结果分析

荆门黄褐色膨胀土的物理化学性质指标测试结果、矿物成分参见文献[24], 38 种湿度与密度组合状态下的压实试样照片见图 2^[17]。

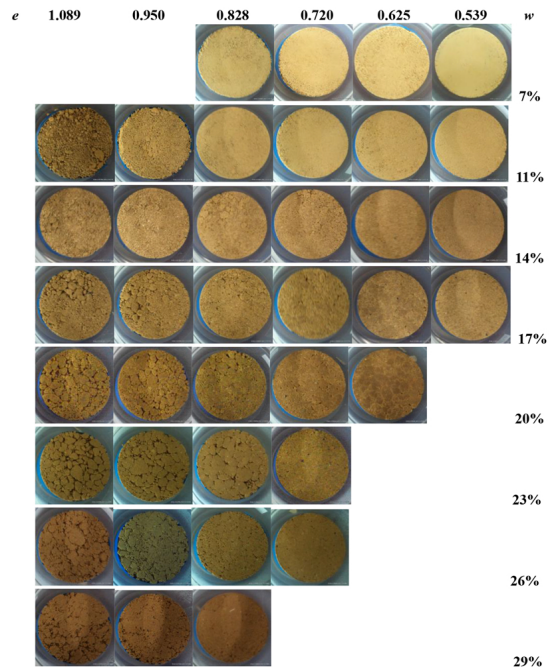


图 2 试样照片

Fig. 2 Photos of test samples

2.1 饱和固结慢剪试验结果

饱和固结慢剪试验结果见文献[16], 主要结论为: ① 压实膨胀土饱和抗剪强度对密度有依赖性, 表现为相同应力状态下密度(此处用制样压实度表征)大的试样具有更高的抗剪强度。试样固结前为浸水膨胀稳定后的饱和状态时, c' 随密度降低而规律性降低, φ' 对密度并不敏感, 可视为稳定值, 见表 1。

② 在非饱和抗剪强度公式(式(3)与式(4))的应用中, 宜认识到密度对 c' 、 φ' 的影响。本文处理

方法是:采用浸水膨胀稳定后的饱和抗剪强度参数,6种制样压实度下 φ' 取均值 20.1° ; c' 与密度相关,根据6种制样压实度分别取值(见表1^[16])。

2.2 滤纸法测基质吸力结果

滤纸法测基质吸力结果见文献[17],38种湿度与密度组合状态下的基质吸力列于表2的第4列,土样吸力变动范围为483~84 640 kPa,其 $(u_a - u_w)-e-w$ 关系绘制在图3中。

由图3可判断出,试验结果位于土水特征曲线的过渡段上,即位于进气值与残余含水率之间;该区段的土体力学行为是非饱和土力学研究的重点。

表 1 不同制样压实度下膨胀土的饱和抗剪强度

Tab. 1 Parameters of the saturated shear strength

制样 压实度/%	c' /kPa	φ' /($^\circ$)	R^2	$\varphi'=20.1^\circ$ 相应 c' /kPa	R^2
95	20.9	18.9	0.997	18.6	0.993
90	19.4	19.8	0.998	18.8	0.998
85	13.5	20.2	0.999	13.6	0.999
80	8.0	21.5	0.995	10.6	0.992
75	9.4	20.1	1.000	9.3	1.000
70	8.8	20.2	0.999	9.1	0.999
均值		20.1			

表 2 38种湿度与密度组合状态下荆门压实膨胀土的基质吸力、非饱和抗剪强度、有效应力参数

Tab. 2 Matric suction, unsaturated shear strength, and effective stress parameters of compacted Jingmen expansive soil under 38 moisture-density combinations

试样状态				非饱和抗剪强度 ^[18] τ_t /kPa				有效应力参数 χ			
w /%	e	S_r /%	基质吸力 ^[17] /kPa	$\sigma_v=25$ kPa	$\sigma_v=50$ kPa	$\sigma_v=75$ kPa	$\sigma_v=100$ kPa	$\sigma_v=25$ kPa	$\sigma_v=50$ kPa	$\sigma_v=75$ kPa	$\sigma_v=100$ kPa
7	0.539	35.3	63 439	327.4	377.4	445.7	563.6	0.012 9	0.014 7	0.017 2	0.021 9
11	0.539	55.5	44 844	497.5	548.2	623.3	651.5	0.028 6	0.031 2	0.035 2	0.036 3
14	0.539	70.6	22 499	553.2	634.1	684.2	770.4	0.063 8	0.072 5	0.077 5	0.086 9
17	0.539	85.7	7 447	308.1	382.3	475.0	559.7	0.102 9	0.126 8	0.157 4	0.185 1
7	0.625	30.5	75 682	172.6	231.5	265.3	304.1	0.005 2	0.007 0	0.007 9	0.009 0
11	0.625	47.9	38 132	304.5	330.5	375.2	417.4	0.019 8	0.021 0	0.023 6	0.025 9
14	0.625	60.9	24 475	459.1	475.2	524.6	551.8	0.048 1	0.048 9	0.053 4	0.055 4
17	0.625	74.0	4 871	256.5	301.6	329.1	368.6	0.128 2	0.148 4	0.158 7	0.175 7
20	0.625	87.1	4 490	199.9	244.5	268.1	340.5	0.104 6	0.126 2	0.135 0	0.173 5
7	0.720	26.4	61 754	138.1	161.0	205.2	222.9	0.005 1	0.005 7	0.007 3	0.007 6
11	0.720	41.5	41 762	171.1	196.5	219.9	247.9	0.009 7	0.010 8	0.011 7	0.012 9
14	0.720	52.9	25 723	304.5	336.6	352.9	370.2	0.029 9	0.032 4	0.033 1	0.034 0
17	0.720	64.2	6 198	196.8	208.9	240.3	264.5	0.076 7	0.078 0	0.087 8	0.094 5
20	0.720	75.5	5 841	169.2	211.1	245.3	265.7	0.068 5	0.083 8	0.095 6	0.100 8
23	0.720	86.8	1 336	134.7	164.9	203.2	228.9	0.228 9	0.272 0	0.331 6	0.365 4
26	0.720	98.2	783	96.9	115.3	124.5	138.9	0.258 7	0.290 9	0.291 1	0.309 4
7	0.828	23.0	84 640	74.5	94.2	114.5	130.7	0.001 8	0.002 1	0.002 5	0.002 7
11	0.828	36.1	57 175	112.9	144.8	165.8	196.6	0.004 5	0.005 5	0.006 1	0.007 1
14	0.828	46.0	24 516	219.5	242.1	266.0	292.3	0.022 3	0.023 8	0.025 4	0.027 3
17	0.828	55.8	5 904	130.3	154.7	177.4	204.0	0.051 2	0.058 2	0.064 5	0.072 6
20	0.828	65.7	6 722	140.7	152.9	158.9	177.4	0.049 2	0.050 4	0.049 1	0.052 9
23	0.828	75.6	1 423	104.7	123.9	142.3	170.8	0.163 2	0.182 5	0.200 3	0.237 4
26	0.828	85.4	801	82.6	98.1	112.6	119.7	0.214 5	0.236 2	0.254 5	0.247 5
29	0.828	95.3	517	66.3	84.0	87.6	107.3	0.246 1	0.291 3	0.262 0	0.317 7
11	0.950	31.5	36 809	46.8	70.0	96.8	121.0	0.002 1	0.003 1	0.004 5	0.005 6
14	0.950	40.1	25 538	131.0	153.1	181.6	199.4	0.012 0	0.013 4	0.015 5	0.016 4
17	0.950	48.7	5 247	87.4	105.2	125.8	148.2	0.035 9	0.040 4	0.046 4	0.053 3

(续表2)

试样状态		非饱和抗剪强度 ^[18] τ_r /kPa				有效应力参数 χ					
w /%	e	S_r /%	基质吸力 ^[17] /kPa	$\sigma_v=25$ kPa	$\sigma_v=50$ kPa	$\sigma_v=75$ kPa	$\sigma_v=100$ kPa	$\sigma_v=25$ kPa	$\sigma_v=50$ kPa	$\sigma_v=75$ kPa	$\sigma_v=100$ kPa
20	0.950	57.3	4 317	95.5	119.8	130.7	138.4	0.048 8	0.058 4	0.059 5	0.058 6
23	0.950	65.9	1 523	84.2	95.3	109.4	117.9	0.118 0	0.121 5	0.130 4	0.129 2
26	0.950	74.5	717	68.6	78.7	85.2	89.7	0.191 2	0.194 9	0.184 8	0.167 0
29	0.950	83.0	529	51.6	59.4	65.2	79.4	0.171 4	0.164 4	0.147 1	0.173 2
11	1.089	27.5	36 730	42.3	66.9	90.2	102.4	0.001 8	0.002 9	0.004 0	0.004 2
14	1.089	35.0	25 167	90.0	100.3	121.5	146.3	0.007 8	0.007 9	0.009 2	0.010 9
17	1.089	42.5	4 024	68.6	87.3	103.2	123.9	0.034 2	0.040 7	0.045 3	0.053 1
20	1.089	49.9	5 764	79.4	97.1	103.4	111.0	0.029 0	0.033 0	0.031 7	0.031 0
23	1.089	57.4	1 058	58.4	66.0	80.0	88.7	0.103 7	0.099 7	0.112 2	0.111 0
26	1.089	64.9	679	50.2	61.0	69.4	80.3	0.128 5	0.135 2	0.132 2	0.139 2
29	1.089	72.4	483	43.6	54.8	62.9	64.5	0.143 3	0.154 9	0.149 0	0.106 3

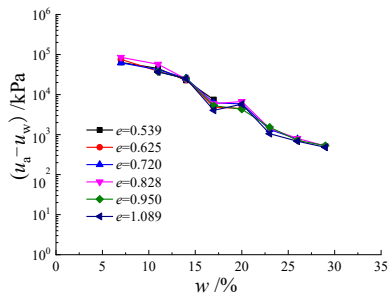


图3 基质吸力-孔隙比-重力含水率关系

Fig. 3 Matric suction-void ratio-water content relationship

2.3 非饱和直剪试验结果

非饱和直剪试验结果见表2,其中第5至第8列列出了38种湿度与密度组合条件下的非饱和抗剪强度实测值^[18]。基于这些试验数据,分别在4种不同竖向压力条件下绘制了 τ_r - e - w 的三维曲面,如图4所示,全面展现了压实荆门黄褐色膨胀土在不同含水率和孔隙比条件下的非饱和抗剪强度变化规律。

结合表2与图4可知:①在不同竖向压力水平下,非饱和抗剪强度随孔隙比增大而规律性下降,表明密度对非饱和抗剪强度影响显著,呈现出明

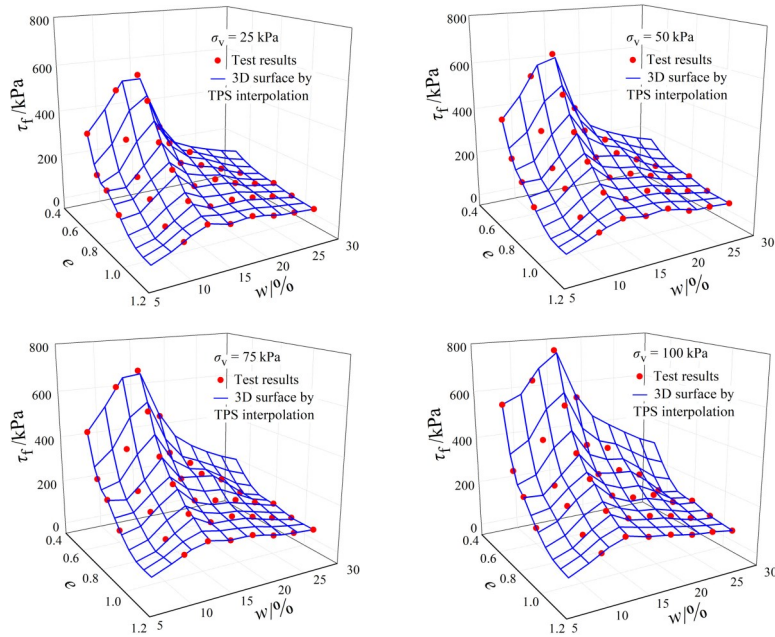


图4 非饱和抗剪强度-孔隙比-重力含水率关系

Fig. 4 Unsaturated shear strength-void ratio-water content relationship

显的“密度效应”;②当含水率处于7%~29%范围内时,非饱和抗剪强度随含水率的增加先升高后降低,呈现出典型的“山峰效应”,其中非饱和抗剪强度在含水率增大到14%时达到峰值,随后随着含水率的进一步增加而减小。

2.4 有效应力参数-净应力-吸力-孔隙比-重力含水率关系

有效应力参数 χ 表达的是吸力转化为有效应力的效率,其变化规律与测试方法的研究是非饱和和土力学的核心问题之一。本节通过式(5)计算38种湿度与密度组合状态下的 χ ,过程如下:

(1)基于饱和固结慢剪试验结果^[16],6种制样压实度下 φ' 均取20.1°; c' 与密度相关,根据6种制样压实度在表1中分别取值。

(2)滤纸法测基质吸力^[17]得到了表2所示的38种湿度与密度组合状态下的 $u_a - u_w$ 。

(3)非饱和快剪试验^[18]得到表2所示的38种湿度与密度组合状态下的 $\tau_f - \sigma_v$ 关系。

(4)1.4节分析表明:非饱和快剪试验过程中,试样破坏时的基质吸力 $(u_a - u_w)_f$ 可用滤纸法测定的相同密实与持水状态下的基质吸力值近似;室内非饱和快剪试验过程中, $u_a = 0$,竖向净应力 $\sigma_v - u_a$ 等于竖向总应力 σ_v 。由此得到38种湿度与密度组合状态下的 $\tau_f - (\sigma_v - u_a) - (u_a - u_w)$ 关系。

(5)将相应 $\tau_f - (\sigma_v - u_a) - (u_a - u_w)$ 值与 c', φ' 值代入式(5),获得38种湿度与密度组合状态下的 χ 值列在表2的第9—12列。

需要说明的是, c' 和 φ' 由固结慢剪试验获得,而非饱和直剪试验是快剪试验,二者固结状况、排水条件和剪切速率存在差异。但为更方便地处理问题,在式(5)中求解 χ 时,还是采用固结慢剪试验所获得的 c' 与 φ' 值。

基于表2显示的 χ ,采用TPS插值获得4种竖向压力下的 $\chi - e - w$ 三维曲面见图5;此外,为探讨应力状态对 χ 的影响,将8种重力含水率下的 $\chi - e$ 关系绘制在图6中。

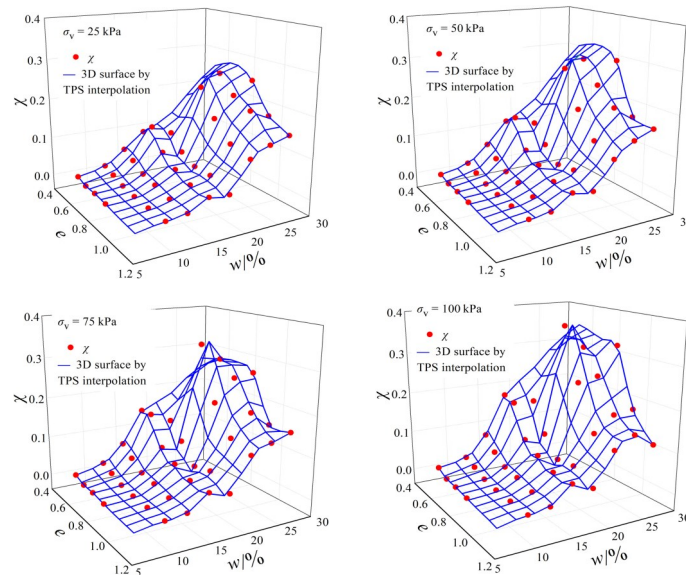


图5 有效应力参数-孔隙比-重力含水率关系

Fig. 5 Effective stress parameter-void ratio-water content relationship

综合表2、图5与图6可见:

(1)相同密度下, χ 随 w 增加而增大,即基质吸力转化为有效应力的效率随持水程度增大而增加。

(2)相同湿度下, χ 随 e 的降低而显著增大,意味着 χ 强烈依赖于密度,随密度增大,基质吸力转化为有效应力的效率显著增加。表现出强烈的“密度效应”。

(3)相同 e 和 w 条件下, χ 随竖向净应力的增大

而增大(见图6),意味着外部应力状态亦会对有效应力参数产生影响;增大竖向净应力会导致试样有压密的趋势,因此其机制类似于密度对有效应力参数的影响。

3 “山峰效应”讨论

非饱和抗剪强度试验结果^[18]表明:在密度相同的条件下,随着湿度由风干逐步升高至近饱和,非饱和抗剪强度先增后减,呈现显著的“山峰效

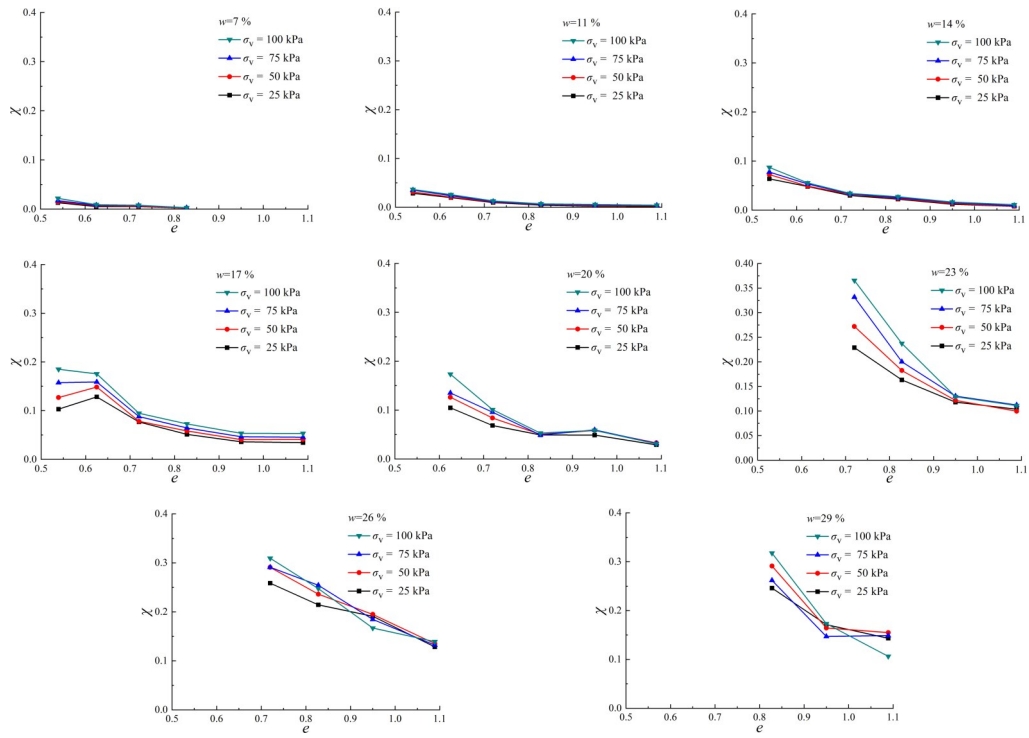


图6 相同重力含水率下的有效应力参数-孔隙比关系

Fig. 6 Effective stress parameter-void ratio relationship under the same water content

应”。其原因为：

$\chi(u_a - u_w) \tan \varphi'$ 常被称作吸附强度^[21]或毛细凝聚力^[20], 用来表征吸力对非饱和抗剪强度的贡献。试验结果表明: χ 随湿度增加而增大, 见图5; $u_a - u_w$ 随湿度增加而降低, 见图3; $\tan \varphi'$ 为常数

(文中取 $\varphi' = 20.1^\circ$)。湿度低时, χ 值小而 $u_a - u_w$ 值大; 湿度高时, χ 值大而 $u_a - u_w$ 值小。将湿度与密度变化范围内的 $\chi(u_a - u_w) \tan \varphi'$ 绘制在图7中。可见: 在湿度由低而高的过程中, 吸附强度 $\chi(u_a - u_w) \tan \varphi'$ 亦存在峰值。

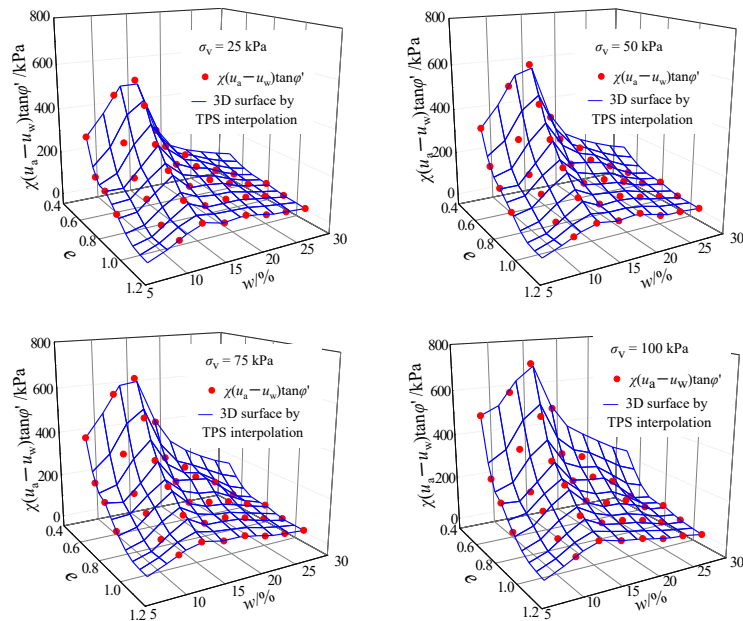


图7 吸附强度-孔隙比-重力含水率关系

Fig. 7 Capillary cohesion-void ratio-water content relationship

从图 7 与图 4 的对比可见:在压实膨胀土的湿度与密度变化范围内,吸附强度在非饱和抗剪强度中占据显著比重,其本身的“山峰效应”直接导致了非饱和抗剪强度亦呈现相同的“山峰效应”。

4 结论

(1)相同密度下, χ 随 w 增加而增大,即基质吸力转化为有效应力的效率随持水程度增大而增加。

(2)相同湿度下, χ 随 e 的降低而显著增大,意味着 χ 强烈依赖于密度,随密度增大,基质吸力转化为有效应力的效率显著增加。表现出强烈的“密度效应”。

(3)相同 e 和 w 条件下, χ 随竖向净应力的增大

而增大,意味着外部应力状态亦会对有效应力参数产生影响;增大竖向净应力会导致试样有压密的趋势,因此其机制类似于密度对有效应力参数的影响。

(4)非饱和抗剪强度呈现出“山峰效应”的原因在于:有效应力参数随湿度增加而增大,基质吸力随湿度增加而降低。湿度低时,有效应力参数值小而基质吸力值大;湿度高时,有效应力参数值大而基质吸力值小;导致在从饱和到风干含水率的整个湿度变化过程中,吸附强度存在峰值,进而导致非饱和抗剪强度呈现出“山峰效应”。

(5)有效应力参数 χ 与密度、湿度、应力状态均密切相关,如何进行更为合理的定量描述,是非常值得进一步研究的问题。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K, PECK R B, MESRI G. Soil mechanics in engineering practice[M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. , 1996.
 - [2] KNAPPETT J A, CRAIG R F. Craig's soil mechanics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2019.
 - [3] OBERG A L, SÄLLFORS G. Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curve[J]. Geotechnical Testing Journal, 1997, 20(1): 40-48.
 - [4] FREDLUND D G, XING Anqing, FREDLUND M D, et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 440-448.
 - [5] KHALILI N, KHABBAZ M H. A unique relationship for χ for the determination of the shear strength of unsaturated soils[J]. Geotechnique, 1998, 48(5): 681-687.
 - [6] 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.
 - [7] LU Ning, GODT J W, WU D T. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil[J]. Water Resources Research, 2010, 46(5): W05515.
 - [8] ALONSO E E, PEREIRA J M, VAUNAT J, et al. A microstructurally based effective stress for unsaturated soils [J]. Geotechnique, 2010, 60(12): 913-925.
 - [9] ALONSO E E, PINYOL N M, GENS A. Compacted soil behaviour: Initial state, structure and constitutive modelling[J]. Geotechnique, 2013, 63(6): 463-478.
 - [10] PARK H S, KIM B S, PARK S W. Influence of suction stress on the resilient modulus model for unsaturated aggregate base[J]. Transportation Engineering, 2025, 20: 100336.
 - [11] KONRAD J M, LEBEAU M. Capillary-based effective stress formulation for predicting shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(12): 2067-2076.
 - [12] ZHOU Annan, HUANG Ruiqiu, SHENG Daichao. Capillary water retention curve and shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(6): 974-987.
 - [13] GHORBANI J, KODIKARA J. Thermodynamically consistent effective stress formulation for unsaturated soils across a wide range of soil saturation[J]. Computational Mechanics, 2024, 73(5): 1077-1094.
 - [14] LU Ning. Unsaturated soil mechanics: Fundamental challenges, breakthroughs, and opportunities [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(5): 02520001.
 - [15] LU Ning, LUO Shengmin, ZHOU Baochun. Water adsorption-induced pore-water pressure in soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 148(6): 04022042.
 - [16] 马全国, 张彦钧, 汤致松, 等. 压实膨胀土饱和抗剪强度的变动性[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2016, 29(4): 629-635.
- MA Quanguo, ZHANG Yanjun, TANG Zhisong, et al. Variation of saturated shear strength of compacted expansive soil[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2016, 29(4): 629-635.

- [17] 周葆春,张彦钧,冯冬冬,等.荆门非饱和压实膨胀土的吸力特征及其本构方程[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):385-392.
ZHOU Baochun, ZHANG Yanjun, FENG Dongdong, et al. Suction characteristics of Jingmen unsaturated compacted expansive soil and its constitutive formula [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 385-392.
- [18] 周葆春,孔令伟,马全国,等.压实膨胀土非饱和抗剪强度的湿度与密度效应[J].岩土力学,2017(S1):240-246.
ZHOU Baochun, KONG Lingwei, MA Quanguo, et al. Effects of moisture and density states on unsaturated shear strength of compacted expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017(S1): 240-246.
- [19] FREDLUND D G. Unsaturated soil mechanics in engineering practice [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(3): 286-321.
- [20] LU Ning, LIKOS W J. 非饱和土力学[M]. 韦昌富,侯龙,简文星,译.北京:高等教育出版社,2012.
LU Ning, LIKOS W J. Unsaturated soil mechanics [M]. WEI Changfu, HOU Long, JIAN Wenxing, translated. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [21] 谢定义. 非饱和土力学[M]. 北京:高等教育出版社,2015.
XIE Dingyi. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [22] BISHOP A W, BLIGHT G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils [J]. Geotechnique, 1963, 13(3): 177-197.
- [23] 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 Zhenghan. On basic theories of unsaturated soils and special soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201-272.
- [24] 周葆春,江星澐,马全国,等.低应力和湿化路径下膨胀土的力学行为与本构模拟[J].岩土工程学报,2025,47(4):695-704.
ZHOU Baochun, JIANG Xingyun, MA Quanguo, et al. Mechanical behavior and constitutive modelling of expansive soils under conditions of wetting and low confining stress [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(4): 695-704.

责任编辑:张伟博 申晓伟