

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.01.007

原状非饱和风积土的结构参数与强度指标关系的试验研究

张向东¹, 李庆文¹, 李广华², 苏剑³

(1. 辽宁工程技术大学 土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 北京城建七建设工程有限公司, 北京 100029;
3. 辽宁天信工程设计咨询有限公司, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 利用 TSW-40 型土壤真三轴仪对不同干密度与不同含水率的原状非饱和风积土、重塑性非饱和风积土和原状饱和风积土试样进行三轴剪切试验, 探讨了原状非饱和风积土的结构参数与强度指标的关系。研究表明: 非饱和风积土结构参数比 m_e/m_{e0} 与 w 呈现负相关性函数关系, 与 ρ_d 呈现线性正相关性函数关系, 非饱和风积土强度指标比 $(\tan \varphi/\tan \varphi_0, c/c_0)$ 与结构参数比 m_e/m_{e0} 均满足二次抛物线函数关系; 构造出能综合反映非饱和风积土结构性影响因素的定量指标——综合结构状态变量 P_{cs} , 结合原状风积土天然含水率下的强度指标, 可在较大范围求解给定结构状态下非饱和风积土的强度指标。

关键词: 道路工程; 原状非饱和风积土; 试验研究; 结构性强度指标; 应变综合结构势; 干密度; 含水率

中图分类号: U416.212

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2016)01-0041-08

Experimental Research on Relationship of Structural Parameters with Structural Strength Indexes of Intact Unsaturated Aeolian Soil

ZHANG Xiang-dong¹, LI Qing-wen¹, LI Guang-hua², SU Jian³

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China;
2. Beijing Seventh Urban Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100029, China;
3. Liaoning Tianxin Engineering Design Consulting Co., Ltd., Fuxin Liaoning 123000, China)

Abstract: Triaxial shear experimental research on intact unsaturated aeolian soil, remolded unsaturated aeolian soil and intact saturated aeolian soil with different dry densities and moisture contents is conducted by using TSW-40 soil true triaxial apparatus, and the relationship of structural parameters with structural strength indexes of intact unsaturated aeolian soil is explored. The test result shows that (1) the functional relationship between structural parameter ratio m_e/m_{e0} and moisture content w is negative correlation; (2) the functional relationship between m_e/m_{e0} and dry density ρ_d is the linear positive correlation; (3) the functional relationship of the ratio of structural strength indexes $\tan \varphi/\tan \varphi_0$ and c/c_0 with structural parameter ratio m_e/m_{e0} are all the quadratic parabolic function. The quantitative index which reflects the structural influencing factors on characteristics of intact unsaturated aeolian soil, named synthetical structural state variable P_{cs} , is put forward. Considering the strength indexes of intact aeolian soil with natural moisture content, the shear strength indexes of intact unsaturated aeolian soil with discretional structural state can be calculated.

Key words: road engineering; intact unsaturated aeolian soil; experimental research; structural strength

收稿日期: 2014-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978131); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20112121110004)

作者简介: 张向东(1962-), 男, 吉林榆树人, 教授, 博士生导师. (jwd101@126.com)

index; strain-CSP; dry density; moisture content

0 引言

风积土主要是在风力的搬运作用下,将松散的碎屑物从风力较大的地方搬运到风力相对较小的地方慢慢沉积下来的土^[1]。我国风积土主要分布在沙漠边缘的干旱与半干旱气候带,其广泛存在于东北、内蒙古、西北等地区,尤其是辽西阜新地区^[2-3]。因风积土大多数分布在地球表面,位于地下水位以上,且房屋地基、路基填土等均属于非饱和状态的风积土,非饱和风积土与东北地区的公共基础设施建设(已建成的哈大高铁、在建的京沈高铁、高速公路及国家重点建设工程项目等)之间的联系密不可分。辽西地区非饱和风积土的土质比较致密,具有明显的结构性,在季节性冻胀、应力和渗流等外部影响因素作用下,会产生冻胀和融沉的特殊变形破坏现象,造成道路大量翻浆冒泥、柔性路面鼓包或开裂、刚性路面断裂和错缝等,给国家现代化交通枢纽工程带来巨大的经济损失,故对非饱和风积土的研究有一定的理论与工程实用价值。

到目前为止,已有较多的学者就土体结构性进行了研究。较多的学者对黄土的结构性参数或考虑结构性影响的黄土本构关系进行了分析和探讨^[4-9],主要研究分析黄土的大孔隙比、欠固结状态、具有很强胶结的结构、对水的特殊敏感性等影响因素。骆亚生和谢定义^[10-11]等提出一种新的度量黄土结构性的参数,即应变综合结构势 m_e ,利用所提出的应变综合结构势的概念,进而研究和构建非饱和黄土在三轴应力环境中具有结构性的本构关系,以此作为复杂应力环境中对土体结构性本构关系的一种尝试。骆亚生与胡仲有^[12]等利用前人对非饱和黄土结构性研究成果,初步研究结构性参数与强度指标之间的联系规律,以及如何利用结构性参数来求解出黄土处于不同结构状态中的强度指标。褚峰^[13]等利用非饱和土固结仪对原状非饱和黄土进行常含水率固结试验,重点研究天然干密度和竖向应力对原状非饱和黄土土水特征的影响。然而目前主要都是关于软土与黄土的结构性研究,对风积土的结构性研究比较少。

本研究通过对原状非饱和风积土、重塑性非饱和风积土和饱和风积土进行三轴剪切试验,获得不同围压环境中不同结构状态风积土的应力-应变关系曲线,结合风积土的工程特性与应变综合结构势

概念,分析研究非饱和风积土结构性影响因素(干密度 ρ_d 和含水率 w)、结构性参数比 m_e/m_{e0} 、强度指标(c, φ)之间的内在联系规律,从而构造出一个能综合反映非饱和风积土结构性影响因素的综合结构状态量 P_{cs} ,利用原状风积土天然含水率下的强度指标,在较大范围内求解出给定结构状态下非饱和风积土的强度指标。

1 应变综合结构势 m_e 的确定^[10,12]

在特定的围压环境中,分别对原状风积土、饱和风积土和扰动状态风积土(重塑性风积土)进行常规三轴剪切试验,进而获得3种不同结构状态下风积土的应力-应变关系曲线,如图1所示。

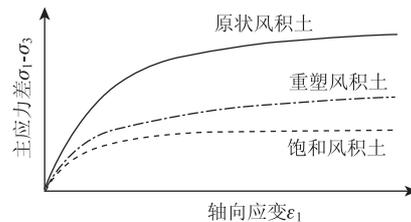


图1 三轴试验原状、饱和及重塑性风积土的应力-应变曲线
Fig. 1 Stress-strain curves of intact, saturated and remolded aeolian soil in triaxial test

结合图1确定出应变综合结构势参数 m_e 的概念,假设在同一给定应变水平条件下原状风积土的剪切应力为 q_0 ,饱和风积土的剪切应力为 q_s ,重塑性风积土剪切应力为 q_r ,原状与饱和风积土之间的差异就是加水使风积土处于饱和状态,致使原状风积土结构破坏后其结构性强度降低,主要体现在风积土的微观颗粒排列特性,用 m_1 来表示;原状与重塑性风积土之间的区别就是扰动致使风积土的联结结构发生破坏所导致强度损失,主要表征风积土的联结特征,用 m_2 来表示。给出针对不同应变水平结构性参数的应变综合结构势为:

$$m_e = \frac{m_1}{m_2} = \frac{q_0/q_s}{q_r/q_0} = \frac{q_0^2}{q_s q_r} \quad (1)$$

从上述定义公式可看出,风积土的联结强度越强,因风积土的扰动导致的强度损失就越高,风积土的颗粒排列结构就越不稳定,同时在浸水作用下风积土结构发生破坏所导致的强度损失也就越大。风积土微观颗粒的排列越不稳定, m_1 就越大, m_e 也就越大;风积土联结强度越强, m_2 就越小, m_e 也就越大。故 m_1 和 m_2 的变化都能通过风积土结构性参数

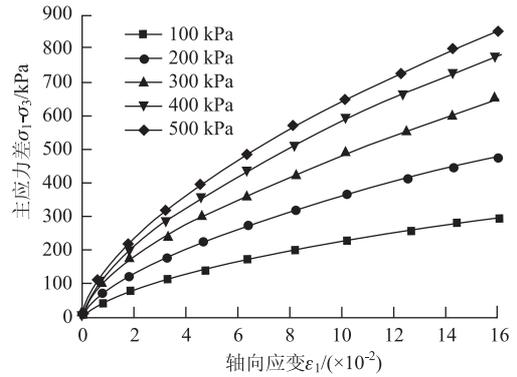
的变化敏感地体现出来。

2 非饱和风积土三轴剪切试验

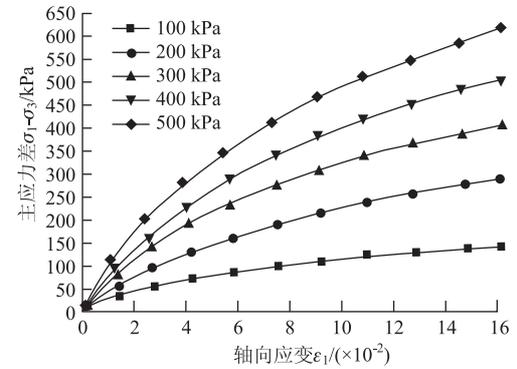
试验用土来源于阜新市辽宁工程技术大学北校区附近的原状风积土, 为保证试验所采用土的代表性、完整性和均匀性, 取土深度为距地面 2 ~ 3 m 处, 即从同一地点、相同的埋深处进行取土样。经过前期准备测算出, 所制备原状风积土试样的干密度 ρ_d 为 1.42 ~ 1.68 g/cm³, 含水率 w 为 8.4% ~ 26.0%。为了研究干密度 ρ_d 与含水率 w 对原状非饱和风积土结构性强度指标的影响, 从已经制备出的大量风积土试件中挑选出 1.42, 1.54, 1.68 g/cm³, 3 种干密度的试件进行若干个试验, 所取得的风积土试样 ρ_d 误差范围都在 0.01 g/cm³ 以内。对含水率小于天然含水率的风积土土样采用自然风干法, 并实时监测其含水率, 达到目标含水率后, 将其放入养护缸中养护 72 h, 待试样内部水分均匀后即可进行试验。对于含水率大于天然含水率的风积土土样, 试样制备采用增水饱和办法进行操作^[14]。对于 $\rho_d = 1.42$ g/cm³ 的试样, 分别增水配制成 8.4%, 15.0%, 20.8%, 26.0% 共 4 种不同含水率情况下的未扰动和重塑性风积土试样; 对于 $\rho_d = 1.54$ g/cm³ 的试样, 分别增水配制成 20.8% 含水率情况下的未扰动和重塑性风积土试样; 对于 $\rho_d = 1.68$ g/cm³ 的试样, 分别增水配制成 20.8% 含水率情况下的未扰动和重塑性风积土试样。同时配备与 3 种干密度相对应的饱和状态含水率试样分别为 42.5%, 36.4%, 28.2%。对于需增水的风积土试样主要采用水膜转移法, 用胶头滴管将试样滴定至所要求的含水率状态, 再将增水完毕的试样在保湿缸中静置 72 h, 以确保增加水分能够均匀转移。此次试验中共计 15 个不同状态的风积土试样, 其天然含水率为 20.8%。

本文采用辽宁工程技术大学岩土工程实验室 TSW-40 型土壤真三轴仪进行风积土固结排水方式的三轴剪切试验研究, 轴向加载最大值为 40 kN, 试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体。试验获得不同结构状态不同围压 (100, 200, 300, 400, 500 kPa) 环境下风积土应力 - 应变曲线如图 2 ~ 图 10 所示。

通过对比上述图中各曲线分析可知, 在给定同一应变、同一结构性影响因素 (w, ρ_d)、同一围压条件的情况下, 不同结构状态风积土所能承载主应力差量值, 原状非饱和风积土高于重塑性非饱和风积土, 而重塑性非饱和风积土高于原状饱和风积土。



(a)原状土



(b)重塑性土

图 2 不同状态风积土三轴试验曲线 ($\rho_d = 1.42$ g/cm³, $w = 8.4\%$)

Fig. 2 Triaxial test curves of aeolian soil with $\rho_d = 1.42$ g/cm³ and $w = 8.4\%$ in different states

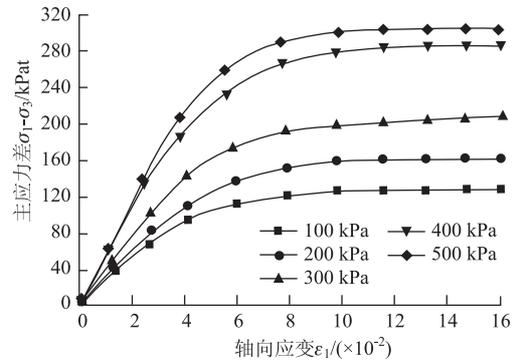


图 3 饱和状态风积土三轴试验曲线 ($\rho_d = 1.42$ g/cm³)

Fig. 3 Triaxial test curves of aeolian soil with $\rho_d = 1.42$ g/cm³ in saturated state

当风积土试样处于较低围压环境中时 ($\sigma_3 = 100, 200$ kPa), 不同结构状态风积土的应力 - 应变曲线关系呈现硬化型, 没有峰值应力点。曲线大致走向分两个阶段, 第一段是弹塑性变形非线性增加阶段, 没有显著线性与非线性变形界限的过渡状态, 表明这一阶段风积土试样的土颗粒之间已经产生相对滑移现象, 土体结构出现累计损伤变形, 大孔隙土体结

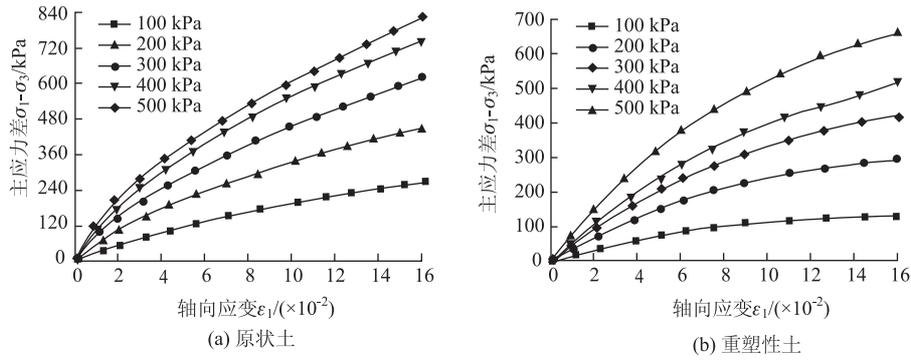


图4 不同状态风积土三轴试验曲线 ($\rho_d = 1.42 \text{ g/cm}^3$, $w = 15.0\%$)

Fig. 4 Triaxial test curves of aeolian soil with $\rho_d = 1.42 \text{ g/cm}^3$ and $w = 15.0\%$ in different states

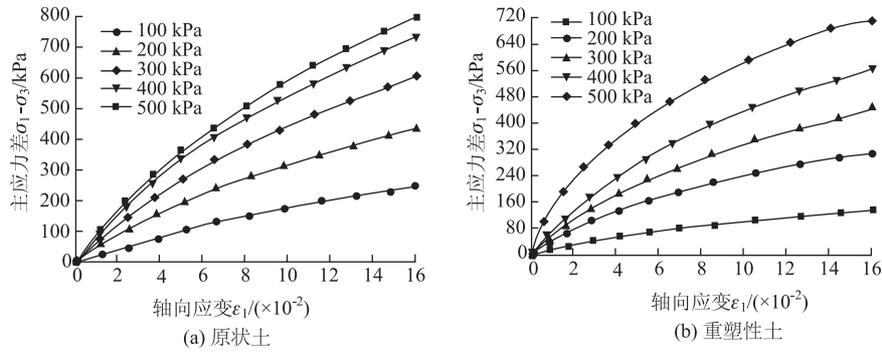


图5 不同状态风积土三轴试验曲线 ($\rho_d = 1.42 \text{ g/cm}^3$, $w = 20.8\%$)

Fig. 5 Triaxial test curves of aeolian soil with $\rho_d = 1.42 \text{ g/cm}^3$ and $w = 20.8\%$ in different states

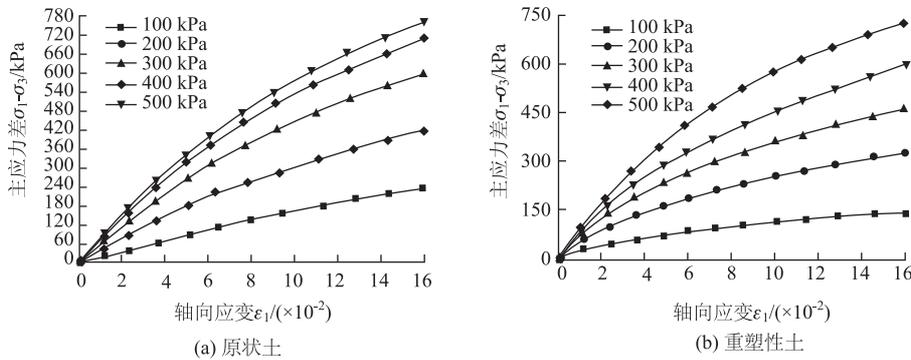


图6 不同状态风积土三轴试验曲线 ($\rho_d = 1.42 \text{ g/cm}^3$, $w = 26.0\%$)

Fig. 6 Triaxial test curves of aeolian soil with $\rho_d = 1.42 \text{ g/cm}^3$ and $w = 26.0\%$ in different states

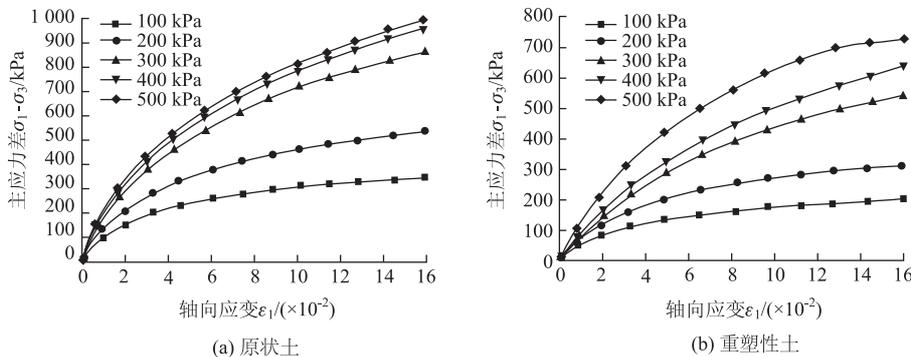


图7 不同状态风积土三轴试验曲线 ($\rho_d = 1.54 \text{ g/cm}^3$, $w = 20.8\%$)

Fig. 7 Triaxial test curves of aeolian soil with $\rho_d = 1.54 \text{ g/cm}^3$ and $w = 20.8\%$ in different states

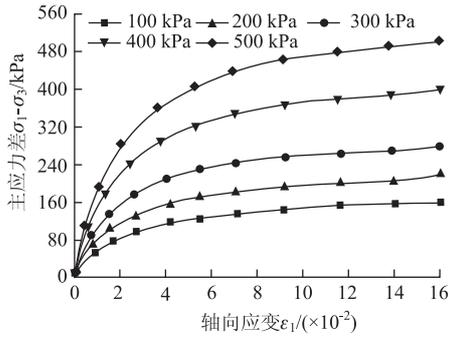
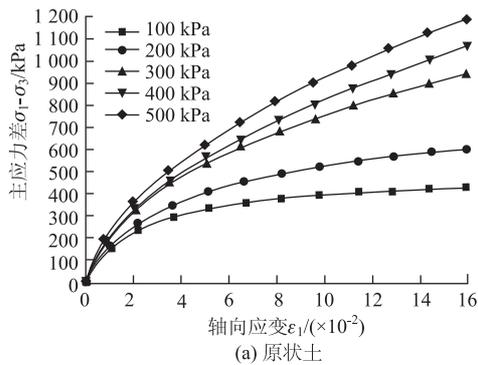
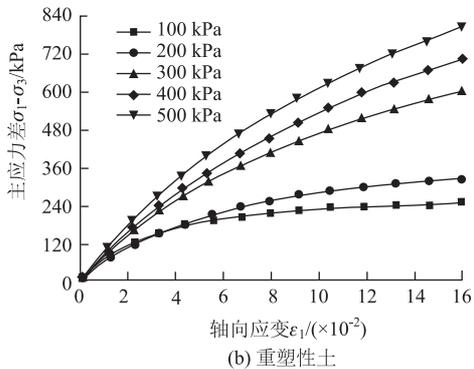


图 8 饱和状态风积土三轴试验曲线 ($\rho_d = 1.54 \text{ g/cm}^3$)

Fig. 8 Triaxial test curves of aeolian soil with $\rho_d = 1.54 \text{ g/cm}^3$ in saturated state



(a) 原状土



(b) 重塑性土

图 9 不同状态风积土三轴试验曲线 ($\rho_d = 1.68 \text{ g/cm}^3$, $w = 20.8\%$)

Fig. 9 Triaxial test curves of aeolian soil with $\rho_d = 1.68 \text{ g/cm}^3$ and $w = 20.8\%$ in different states

构开始破坏, 剪切变形破裂带正逐渐形成, 呈现剪胀变形; 第二阶段主要表现为剪切变形破裂带基本上已经形成, 有一定程度上的增加倾向, 但总体上表现为趋于稳定状态的衰减曲线, 存在一条水平渐近线上限的衰减曲线形式^[15]。当风积土试样处于较高围压环境中时 ($\sigma_3 = 300, 400, 500 \text{ kPa}$), 原状非饱和风积土与重塑性非饱和风积土的应力 - 应变关系曲线均呈现塑性、弱或强硬化型, 所承担的剪切应力伴随着剪切变形增加也逐渐增大, 处于均匀固结围压环境中非饱和风积土的结构性发生部分破

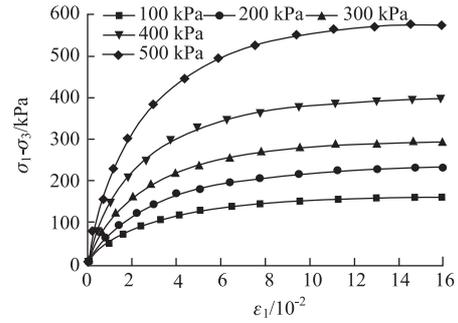


图 10 饱和状态风积土三轴试验曲线 ($\rho_d = 1.68 \text{ g/cm}^3$)

Fig. 10 Triaxial test curves of aeolian soil with $\rho_d = 1.68 \text{ g/cm}^3$ in saturated state

坏或者有完全破坏的发展走向, 风积土的基本结构属性已丧失其功能。

3 非饱和风积土结构性与强度指标关系分析

3.1 干密度和含水率与结构性参数 m_e 关系

依据上述原状非饱和风积土、重塑性风积土和饱和风积土三轴剪切试验的应力 - 应变曲线, 通过第一节应变综合结构势的定义可确定出不同围压条件下的风积土结构性参数数值, 结果如表 1 所示。不同结构性影响因素 (干密度 ρ_d 与含水率 w) 的 3 种不同结构状态下的风积土结构性参数比值均是以干密度 $\rho_d = 1.42 \text{ g/cm}^3$, 天然含水率为 $w = 20.8\%$ 的结构性参数作为基础, 最终采用不同围压条件下结构性参数比值的平均量值作为应变综合结构势的指标^[12]。

结合表 1 中非饱和风积土三轴剪切试验的结构性参数比值, 将干密度 ρ_d 和含水率 w 看作为函数关系的自变量, 用非饱和风积土结构性参数比的平均量值作为因变量函数。利用 Origin 软件对两对函数关系式的试验数据进行线性拟合分析, 确定出 $m_e/m_{e0} - w$ 和 $m_e/m_{e0} - \rho_d$ 之间的函数关系式, 如式 (2) 和式 (3) 所示, 线性相关系数为 $R^2 = 0.99975$ 和 0.99798 , 结构性参数比分别与干密度、含水率的函数关系相关程度显著, 拟合数据散点图如图 11 与图 12 所示。从所得到的函数关系式可知, 风积土结构性参数比与含水率 w 呈现负相关的关系, 与干密度 ρ_d 呈现线性正相关的函数关系:

$$\frac{m_e}{m_{e0}} = -0.0222w + 1.46465, \quad (2)$$

$$\frac{m_e}{m_{e0}} = 0.72375\rho_d - 0.03036. \quad (3)$$

表 1 非饱和风积土破坏应变下结构性参数及其参数比值

Tab. 1 Structural parameters and their ratios of unsaturated aeolian soil in failure strain state

土体类型	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	含水率/%	不同围压 σ_3 应变下结构性参数及其结构性参数比										平均参数 比值	
			100 kPa		200 kPa		300 kPa		400 kPa		500 kPa			
			m_ε	$m_\varepsilon/m_{\varepsilon 0}$	m_ε	$m_\varepsilon/m_{\varepsilon 0}$	m_ε	$m_\varepsilon/m_{\varepsilon 0}$	m_ε	$m_\varepsilon/m_{\varepsilon 0}$	m_ε	$m_\varepsilon/m_{\varepsilon 0}$		
阜新地区 风积土	1.42	8.4	4.66	1.28	4.84	1.27	4.98	1.26	4.15	1.25	3.89	1.32	1.28	
		15.0	4.17	1.14	4.24	1.12	4.35	1.10	3.81	1.15	3.42	1.16	1.13	
		20.8	3.65	1.00	3.81	1.00	3.96	1.00	3.32	1.00	2.94	1.00	1.00	
		26.0	3.13	0.86	3.37	0.88	3.63	0.92	2.96	0.89	2.62	0.89	0.89	
		1.54	20.8	3.79	1.04	4.25	1.12	4.87	1.23	3.64	1.10	2.69	0.91	1.08
		1.68	20.8	4.39	1.20	4.70	1.23	5.01	1.27	4.03	1.21	3.00	1.02	1.19

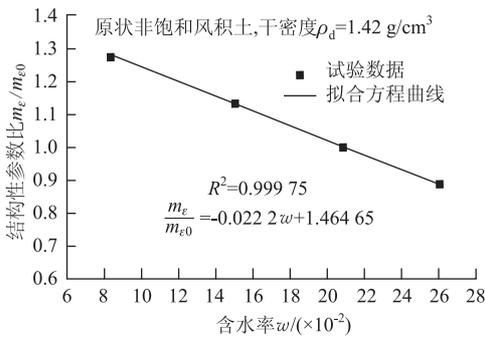


图 11 结构性参数比 $m_\varepsilon/m_{\varepsilon 0}$ 与含水率 w 的关系
Fig. 11 Relation between structural parameter ratio $m_\varepsilon/m_{\varepsilon 0}$ and moisture content w

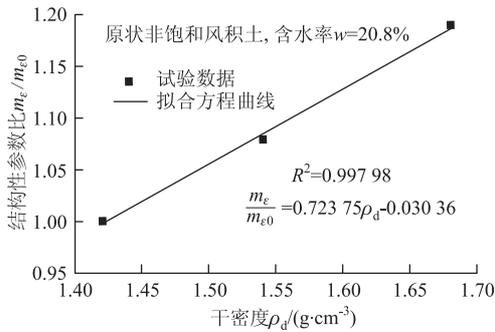


图 12 结构性参数比 $m_\varepsilon/m_{\varepsilon 0}$ 与干密度 ρ_d 的关系
Fig. 12 Relation between structural parameter ratio $m_\varepsilon/m_{\varepsilon 0}$ and dry density ρ_d

3.2 结构性参数 m_ε 与强度指标的关系

根据文献 [16] 中采用 Excel 非线性规划求解三轴试验强度包线的数学模型, 对上述不同结构状态 (原状非饱和、重塑性及饱和) 的风积土剪切三轴试验的结果进行处理分析, 从而获得非饱和风积土三轴剪切试验结构性强度指标 (c, φ) 的具体量值。同时确定出以 $\rho_d = 1.42 g/cm^3, w = 20.8\%$ 原状

非饱和风积土的强度指标作为其他含水率与干密度条件下剪切强度指标比值的基准, 具体详见表 2。

表 2 非饱和风积土强度指标试验结果及其比值

Tab. 2 Test result of Strength indexes and their ratio of unsaturated aeolian soil

土体类型	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	含水率/ %	强度指标 (试验值)		强度指标比值 (试验值)		
			c/kPa	$\varphi/^\circ$	c/c_0	$\tan \varphi / \tan \varphi_0$	
阜新地区 风积土	1.42	8.4	57.35	32.73	1.275	1.338	
		15.0	57.19	27.52	1.272	1.084	
		20.8	44.95	25.66	1.000	1.000	
		26.0	44.05	25.05	0.980	0.973	
		1.54	20.8	55.98	27.75	1.245	1.095
		1.68	20.8	55.81	30.31	1.241	1.217

通过对表 2 分析可知, 经过试验直接得到风积土抗剪强度指标 (c, φ), 就其在数理统计理论上的意义而言, 只是得到前人已得到的一般常识性认识。但是将表 1 和表 2 进行比较分析可知, 非饱和风积土的结构性参数比值与强度指标中内摩擦角正切比值比较相似, 从某种发展趋势上看吻合度较高。将表 1 中的非饱和风积土结构性参数比平均量值作为函数关系的自变量, 表 2 中风积土强度指标比值作为函数关系的因变量, 应用 Origin 软件对上述函数关系所确定的风积土剪切试验数据进行非线性拟合分析, 从而得到 $\tan \varphi / \tan \varphi_0 - m_\varepsilon/m_{\varepsilon 0}$ 和 $c/c_0 - m_\varepsilon/m_{\varepsilon 0}$ 的二次非线性函数关系式 (4) 与式 (5) 所示, 拟合试验数据方程曲线如图 13 和图 14 所示。

$$\frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_0} = 2.32053 \left(\frac{m_\varepsilon}{m_{\varepsilon 0}} \right)^2 - 4.07066 \frac{m_\varepsilon}{m_{\varepsilon 0}} + 2.75718, \tag{4}$$

$$\frac{c}{c_0} = -1.92045 \left(\frac{m_\varepsilon}{m_{\varepsilon 0}}\right)^2 + 5.0334 \frac{m_\varepsilon}{m_{\varepsilon 0}} - 2.00874 \quad (5)$$

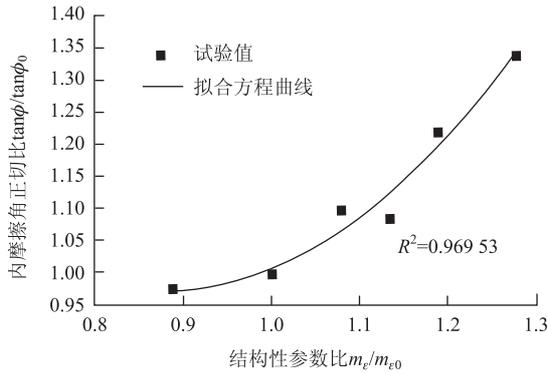


图 13 内摩擦角正切比 $\tan \varphi / \tan \varphi_0$ 与结构参数比 $m_\varepsilon / m_{\varepsilon 0}$ 关系

Fig. 13 Relation between ratio of tangent internal friction angles $\tan \varphi / \tan \varphi_0$ and structural parameter ratio $m_\varepsilon / m_{\varepsilon 0}$

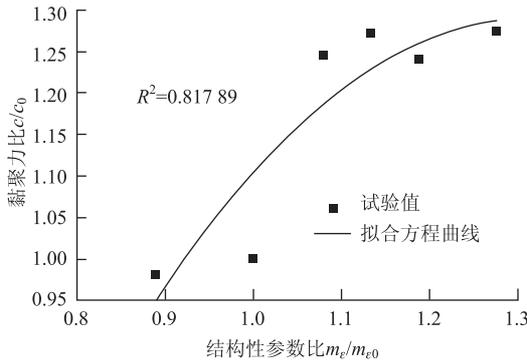


图 14 黏聚力比 c / c_0 与结构性参数比 $m_\varepsilon / m_{\varepsilon 0}$ 关系

Fig. 14 Relation between cohesive force ratio c / c_0 and structural parameter ratio $m_\varepsilon / m_{\varepsilon 0}$

将上述非线性拟合结果进行分析可知, 非饱和风积土强度指标比 ($\tan \varphi / \tan \varphi_0$, c / c_0) 与其结构性参数比平均量值 ($m_\varepsilon / m_{\varepsilon 0}$) 之间均满足二次抛物线函数关系, 其非线性相关系数 R^2 分别为 0.96953 和 0.81789, 拟合效果良好。

4 构建综合结构状态变量及其应用

经过上述试验与分析可知, 得到的关于风积土结构性参数的函数关系式对非饱和状态、重塑性状态及饱和状态风积土都能使用, 即原状风积土, 含水率 w 的应用范围在 8.4% ~ 26.0% 之间, 干密度 ρ_d 应用区间为 1.42 ~ 1.68 g/cm^3 之间。为能更好研究非饱和风积土不同结构状态与其结构性参数比的函数关系, 假设非饱和风积土的含水率、干密度已经确定, 风积土的结构性参数比和含水率、干密度函

数关系仍采用式 (2) 和式 (3), 从而得到一个综合影响力结构性参数, 即关于含水率 w 及干密度 ρ_d 的二元函数关系式, 将综合影响力结构性参数称之为非饱和风积土的综合结构状态变量, 用 P_{cs} 来表示^[12]。由式 (2) 可知风积土结构性参数比与其含水率呈现负相关, 由式 (3) 可知风积土结构性参数比与其干密度呈现正相关, 同时也要考虑到非饱和原状风积土的影响, 故可构造出 P_{cs} 的函数表达式为:

$$P_{cs} = \frac{\rho_d}{100} \cdot \frac{1}{w} \quad (6)$$

将表 1 中非饱和原状风积土三轴剪切试验所用的试样基本信息代入到式 (6) 中, 可获得综合结构状态变量的试验数据点, 利用 Origin 软件对结构性参数比与综合结构状态变量的函数关系进行非线性拟合分析, 非线性拟合相关系数 $R^2 = 0.89234$, 得到良好的拟合函数关系如图 15 所示。

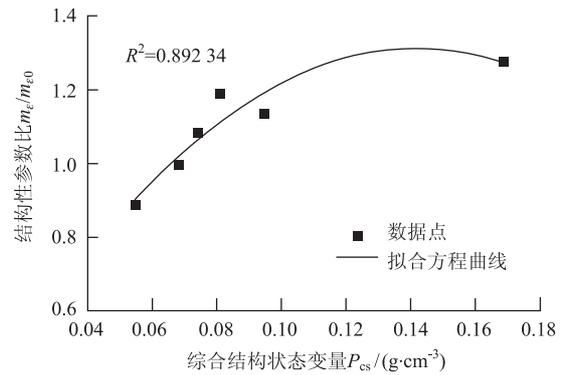


图 15 结构性参数比与综合结构状态量关系

Fig. 15 Relation between structural parameter ratio $m_\varepsilon / m_{\varepsilon 0}$ and comprehensive structural state P_{cs}

非饱和风积土结构性参数比与综合结构状态变量的函数关系式如式 (7) 所示:

$$m_\varepsilon / m_{\varepsilon 0} = -53.6082 P_{cs}^2 + 15.21957 P_{cs} + 0.23169 \quad (7)$$

结合式 (6) 和式 (7) 可知, 由任意给定干密度和含水率的条件下可得到与之相对应的风积土结构性参数比, 结合式 (4)、式 (5) 及非饱和原状风积土天然含水率与其相应的三轴剪切强度指标值, 即可求解出任意给定不同结构状态环境中非饱和风积土的剪切强度指标。

5 结论

本文通过对非饱和风积土、重塑性风积土和饱和风积土进行剪切试验, 结合风积土的工程特性与

确定的应变综合结构势概念,分析研究非饱和风积土结构性影响因素(干密度 ρ_d 和含水率 w)、结构性参数比 m_e/m_{e0} 、强度指标(c, φ)三者之间的内在联系规律。得到如下结论:

(1) 通过拟合分析非饱和风积土结构性影响因素、结构性参数比、强度指标三者间内在关联性可知,其结构性参数比 m_e/m_{e0} 与含水率 w 呈现负相关性函数关系,与干密度 ρ_d 呈现线性正相关性函数关系,非饱和风积土结构性强度指标比($\tan \varphi/\tan \varphi_0, c/c_0$)与其结构性参数比量值(m_e/m_{e0})之间均满足二次抛物线函数关系。利用拟合得到的内在函数关系,获得一个能综合反映非饱和风积土结构性影响因素的结构性参数函数关系式——综合结构状态变量 P_{cs} 。

(2) 基于Origin软件对结构性参数比与综合结构状态变量间函数关系进行非线性拟合,可很好反映风积土各结构性影响因素(ρ_d, w)的综合影响,在给定 ρ_d 与 w 的综合结构状态变量 P_{cs} 可求解出其结构性参数比,进而可以计算出任意给定不同结构性状态下非饱和风积土的强度指标。

参考文献:

References:

- [1] 于崇. 冻融作用下辽西风积土结构性研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.
YU Chong. Study on Structural Characteristic of Aeolian Soil in West of Liaoning Province under Freezing and Thawing Function [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2006.
- [2] 荚颖. 辽西风积土特性及冻融后结构性演变试验研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.
JIA Ying. Test Study of Characteristic of Liaoxi Aeolian Soil and Its Structural Change after Freezing and Thawing [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2006.
- [3] 张向东, 刘家顺. 循环荷载作用下风积土累积塑性变形试验研究 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (3): 18-25.
ZHANG Xiang-dong, LIU Jia-shun. Experimental Study on Cumulative Plastic Deformation of Aeolian Soil under Cyclic Loading [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (3): 18-25.
- [4] 熊传祥, 龚晓南. 一种改进的软土结构性弹塑性损伤模型 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (3): 395-397, 403.
XIONG Chuan-xiang, GONG Xiao-nan. An Updated Elastoplastic Damage Model for Structural Soft-clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (3): 395-397, 403.
- [5] 陈存礼, 何军芳, 杨鹏. 考虑结构性影响的原状黄土本构关系 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (11): 2284-2290.
CHEN Cun-li, HE Jun-fang, YANG Peng. Constitutive Relationship of Intact Loess Considering Structural Effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (11): 2284-2290.
- [6] 沈珠江. 结构性粘土的堆砌体模型 [J]. 岩土力学, 2000, 21 (1): 1-4.
SHEN Zhu-jiang. A Masonry Model for Structured Clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21 (1): 1-4.
- [7] 陈存礼, 胡再强, 高鹏. 原状黄土的结构性及其与变形特性关系研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (11): 1891-1896.
CHEN Cun-li, HU Zai-qiang, GAO Peng. Research on Relationship between Structure and Deformation Property of Intact Loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (11): 1891-1896.
- [8] 王立忠, 赵志远, 李玲玲. 考虑土体结构性的修正邓肯-张模型 [J]. 水利学报, 2004, (1): 83-89.
WANG Li-zhong, ZHAO Zhi-yuan, LI Ling-ling. Non-linear Elastic Model Considering Soil Structural Damage [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (1): 83-89.
- [9] FREEDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土土力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
FREEDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.
- [10] 骆亚生, 谢定义, 邵生俊, 等. 复杂应力状态下的土结构性参数 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (24): 4248-4251.
LUO Ya-sheng, XIE Ding-yi, SHAO Sheng-jun, et al. Structural Parameter of Soil under Complex Stress Conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 23 (24): 4248-4251.
- [11] 骆亚生, 谢定义. 复杂应力条件下土的结构本构关系 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2005, 37 (5): 14-18.
LUO Ya-sheng, XIE Ding-yi. Structural Constitutive Relation of Soils under Complex Stress Conditions [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2005, 37 (5): 14-18.

- Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (8): 18 - 21.
- [11] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 113 - 120.
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat Transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 113 - 120.
- [12] 张洪才, 何波. 有限元分析: ANSYS13.0 从入门到实战 [M]. 1 版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 353 - 357.
ZHANG Hong-cai, HE Bo. Finite Element Analysis: ANSYS13.0 From Entry to Combat [M]. 1st ed. Beijing: China Machine Press, 2011: 353 - 357.
- [13] 武海琴. 发热电缆用于路面融雪化冰的技术研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2005.
WU Hai-qin. Research on Heating Cables for Road Deicing [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005.
- [14] RAMSEY J W, HEWETT M J, et al. Updated Design Guidelines for Snow-melting Systems [J]. Ashrae Transactions, 1999, 105 (2): 1055 - 1065.
- [15] 李永恒. 工业电阻炉的技术改造与节能探讨 [J]. 上海节能, 1994 (4): 10 - 13.
LI Yong-heng. Technological Innovation and Energy Exploration of Industrial Resistance Furnace [J]. Shanghai Energy Conservation, 1994 (4): 10 - 13.
- [16] OZOGUZ S, TARIM N, ZEKI A. Realization of High-Q Band Pass Filters Using CCCIs [C] // Proceedings of the 44th IEEE 2001 Midwest Symposium on Circuits and Systems. Dayton, OH: IEEE, 2001: 134 - 137.
- [17] 邓洪超, 马文星, 荆宝德. 道路冰雪清除技术及发展趋势 [J]. 工程机械, 2005 (12): 41 - 44.
DENG Hong-chao, MA Wen-xing, JING Bao-de. Technology of Removing Snow and Ice on Roads and Its Developing Trend [J]. Construction Machinery and Equipment, 2005 (12): 41 - 44.

(上接第 48 页)

- [12] 骆亚生, 胡仲有, 张爱军. 非饱和黄土结构性参数与其强度指标关系初探 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (4): 943 - 948.
LUO Ya-sheng, HU Zhong-you, ZHANG Ai-jun. Regularity of Relation between Structural Parameter and Strength Indexes of Unsaturated Loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (4): 943 - 948.
- [13] 褚峰, 邵生俊, 陈存礼. 干密度和竖向应力对原状非饱和黄土土水特征影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (2): 413 - 420.
CHU Feng, SHAO Sheng-jun, CHEN Cun-li. Experimental Research on Influences of Dry Density and Vertical Stress on Soil-water Characteristic Curves of Intact Unsaturated Loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (2): 413 - 420.
- [14] 蔡东艳. 非饱和黄土结构性、吸力与抗剪强度特性的试验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
CAI Dong-yan. Experimental Study on Structure, Suction and Shear Strength of Unsaturated Loess [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- [15] 郑颖人. 岩土塑性力学原理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
ZHENG Ying-ren. Principle of Geotechnical Plastic Mechanics [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.
- [16] 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 Xiang-jing, 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.