

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.241



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 非饱和橡胶粉土土水特征曲线及颗粒接触状态

周恩全<sup>1</sup>, 崔磊<sup>1</sup>, 姚缘<sup>1</sup>, 左熹<sup>2</sup>

(1. 江苏大学土木工程与力学学院, 江苏镇江 212013; 2. 金陵科技学院建筑工程学院, 南京 210000)

**摘要:**将废旧轮胎与土混合作为建筑材料应用于土木工程领域是处理废旧轮胎最有前景的措施之一。为了研究废旧轮胎橡胶颗粒改良粉土的效果,以橡胶颗粒与粉土的混合土为研究对象,采用滤纸法测定橡胶粉土的土水特征曲线,分析含水率、橡胶含量对土水特征曲线的影响。结果表明:同一橡胶含量下,混合土的基质吸力随含水率增大非线性减少,呈现出典型的3阶段特征;在同一含水率下,基质吸力随橡胶颗粒含量呈先增大后减少的趋势,当橡胶含量为20%时,混合土的基质吸力最大;基于Van Genuchten模型建立混合土的土水特征曲线模式;基于颗粒接触理论,考虑颗粒比重不同,建立混合土的接触状态模式,构建骨架孔隙比描述混合土的非饱和特性,混合土的基质吸力随着骨架孔隙比的增加呈先增加后减小的趋势。

**关键词:**橡胶粉土;土水特征曲线;滤纸法;基质吸力;骨架孔隙比

**中图分类号:** TU411.91 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)06-0104-09

## Soil-water characteristic curve and particle contact state of unsaturated rubber silt

ZHOU Enquan<sup>1</sup>, CUI Lei<sup>1</sup>, YAO Yuan<sup>1</sup>, ZUO Xi<sup>2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, P. R. China;

2. Institute of Architectural Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjin 210000, P. R. China)

**Abstract:** Using the mixture of waste tires and soil as building materials in the field of civil engineering is one of the most promising measures to deal with waste tires. In order to study the effect of waste tire rubber particles on improving silt, taking the mixed soil of rubber particles and silt as the research object, the soil-water characteristic curve of rubber silt was measured by filter paper method, and the effect of different moisture content and rubber content on the soil-water characteristic curve was analyzed. The results show that at the same rubber content, the matrix suction of the mixed soil decreases nonlinearly with the increase of moisture content, showing a typical three-stage characteristic; at the same moisture content, the matrix suction increases at first and then decreases with the rubber particle content. When the rubber content is 20%, the matrix suction of the mixed soil is the largest. The soil-water characteristic curve model of mixed soil is established based on the Van Genuchten model. Based on the particle contact theory and considering the different specific gravity of particles, the contact state model of mixed soil is established, and the skeleton void ratio is constructed to describe the unsaturated characteristics of mixed soil. the matrix suction of mixed soil increase at first and then

**收稿日期:** 2021-07-27

**基金项目:** 国家自然科学基金(51508236); 江苏高校“青蓝工程”资助项目(2021)

**作者简介:** 周恩全(1986-), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境岩土工程及土动力学研究, E-mail: enquan1986@126.com。

**Received:** 2021-07-27

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51508236); "Blue Project" of Jiangsu(2021)

**Author brief:** ZHOU Enquan (1986-), PhD, associate professor, main research interests: environmental geotechnical engineering and soil dynamics, E-mail: enquan1986@126.com.

decrease with the increase of the skeleton void ratio.

**Keywords:** rubber powder soil; soil-water characteristic curve; filter paper method; matrix suction; skeleton void ratio

随着汽车工业的迅速发展,废旧轮胎已成为污染环境的重要固体废物之一。中国废旧轮胎产生量早在2008年已居世界第一,2019年废旧轮胎年产生量达到1 480多万t,且每年以8%~10%的速度递增,但对废旧轮胎的有效利用率却不高,由此产生的“黑色污染”越来越严重<sup>[1]</sup>。粉土广泛分布于中国长江三角洲和黄河流域等地,且在《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610—2019)<sup>[2]</sup>中明确指出:粉土不宜直接填筑路基,必须使用时,应采取必要技术措施,并经试验论证后才可进行。研究表明,橡胶混合土具有体积密度低、耐久性好、减震性能好等优点,可应用于道路路基、挡墙回填、隔震垫层、管道回填等工程<sup>[3-4]</sup>中。但目前的研究应用主要针对橡胶与砂的混合物,且主要研究饱和状态下混合物的力学性质。但实际工程中,挡墙、道路等填料,均为非饱和土。非饱和土与饱和土不同的根本不同之处在于非饱和土对水分存在吸力,而吸力又与土的持水性、渗透性、强度和变形等力学特性息息相关<sup>[5]</sup>。通过测定非饱和土的土的吸力,可预测非饱和土强度,但吸力是非饱和土研究中最难测量的参数之一<sup>[6]</sup>。目前,吸力测量的方法有压力板法、轴平移法、湿度计法、滤纸法、张力计法等,其中滤纸法具有操作简易、量程大、成本低廉、同时能测量基质吸力及总吸力等优点,得到广大学者的认可。David Suits等<sup>[7]</sup>用滤纸法和其他方法测量吸力,表明滤纸法具有较高的精度;Sutejo等<sup>[8]</sup>、Durukan等<sup>[9]</sup>、谭志祥等<sup>[10]</sup>、张爱军等<sup>[11]</sup>、堪文武等<sup>[12]</sup>、吴珺华等<sup>[13]</sup>通过滤纸法测得不同土体的吸力,并进行土水特征曲线分析;美国材料与试验协会为了规范试验操作,也将滤纸法技术写进标准<sup>[14]</sup>。

实际上,混合土的细观接触状态对其力学特性有着显著影响,对于粗细粒混合土,Thevanayagam等<sup>[15-16]</sup>提出了混合土颗粒接触状态的概念,不同的接触状态对混合土力学特性有影响;吴琪等<sup>[17]</sup>基于颗粒接触理论,提出骨架孔隙比 $e_{sk}$ 是合理表现粗细混合料液化强度的物理状态指标;朱雨萌等<sup>[18]</sup>通过一系列弯曲元试验,基于颗粒基础理论,提出等效骨架孔隙比 $e_{sk}$ ,可以有效表征砂-粉混合土的物理特性;吴琪等<sup>[19]</sup>基于颗粒基础理论探讨了细粒含量、孔隙比、有效围压对饱和砂类土小应变剪切模量的影响。

当前对非饱和土吸力有着较多的研究,但大多

是从宏观角度研究非饱和土的吸力特征,未从细观角度做深入研究,对非饱和橡胶粉土的研究仍存在空白。笔者利用滤纸法测定不同含水率、橡胶颗粒含量对吸力的影响,建立适用该类土的土水特征曲线模型(SWCC模型),进一步基于颗粒接触理论,从细观层面用橡胶颗粒与粉土颗粒之间的接触状态来描述吸力的特征。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

试验所用粉土取自于江苏省苏州市某基坑开挖工地,如图1(a)所示。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[20]</sup>测得粉土液限为27.1,塑限18.3,塑性指数8.8,最大干密度 $1.44 \text{ g/cm}^3$ ,粉土级配曲线如图2所示,基本物理特性指标见表1。

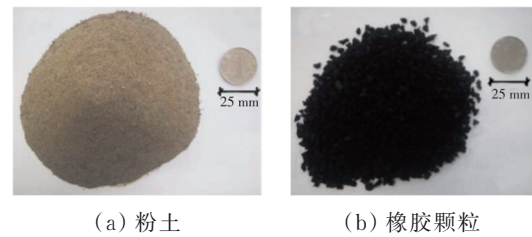


图1 试验材料

Fig. 1 Test materials

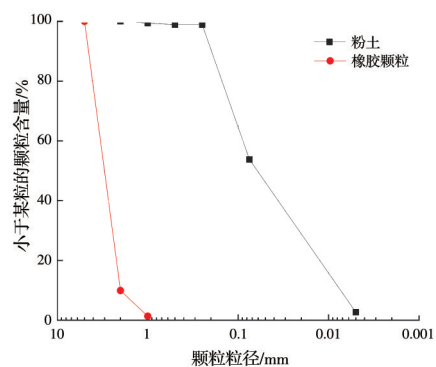


图2 试验材料颗粒级配曲线图

Fig. 2 Particle gradation curve of test materials

表1 试验材料物理特性指标

Table 1 Physical property index of test materials

试验材料	特征颗粒 $d_{50}$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	最大孔隙比 $e_{max}$	最小孔隙比 $e_{min}$	颗粒比重 $G_s$
粉土	0.07	6.65	1.20	1.35	0.89	2.71
橡胶颗粒	3.33	1.84	0.97	1.32	0.74	1.21

试验所用橡胶颗粒为废弃汽车轮胎经过机械切圈、切条、切块、破碎并去除钢绞线所得,试验的橡胶颗粒粒径大小为1~3 mm,如图1(b)所示。橡胶颗粒级配曲线如图2所示,基本物理特性指标见表1。

### 1.2 滤纸法基本原理

滤纸法测吸力的基本依据是热力学平衡原理:在恒温条件下,让土-滤纸之间水分在密闭空间内自由流动,经过一段时间后,所测试样与滤纸会达到

吸力平衡的状态,然后通过滤纸测得含水率来反映所测试样的吸力。

滤纸法包括接触式与非接触式两种方法。接触式滤纸法是滤纸与土体直接接触,吸收土体中的孔隙水,此过程受到毛细及表面吸附作用的影响,由此测得土体的基质吸力;非接触式滤纸法是滤纸吸收土体中孔隙水蒸发到空气的量,测得土体的总吸力。图3为滤纸法测得吸力示意图。

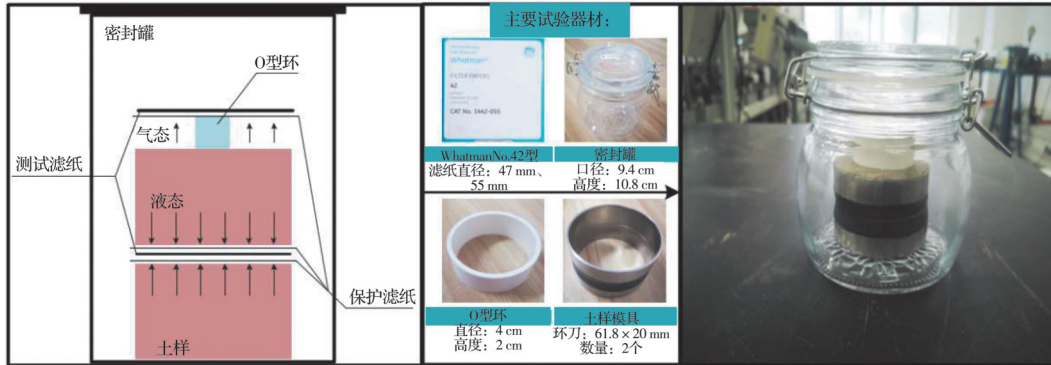


图3 滤纸法测得吸力示意图

Fig. 3 Schematic diagram of filter method

### 1.3 试验过程与试验工况

试验考虑含水率、橡胶颗粒含量两个因素,采用滤纸法对橡胶混合土进行基质吸力测量,橡胶颗粒体积含量分为0%、10%、20%、30%共4组,每组试样的质量含水率分为3.64%、6.64%、9.64%、

12.64%、14.64%、16.64%、18.64%、20.64%、22.64%、24.62%、26.64%、30.64%共12个目标含水率,为试验准确性,采用2组平行试验,共计96个试样。试验采用“等体积置换”原则配置混合土,压实度为95%,表2为吸力测定试样配比方案。

表2 吸力测定试样配比方案

Table 2 Sample ratio scheme for suction measurement

试验编号	橡胶颗粒含量/%	颗粒质量/g		颗粒体积/cm <sup>3</sup>		质量含水率/%	体积含水率/%
		粉土	橡胶颗粒	粉土	橡胶颗粒		
B1	0	164.13	0	60.57	0	3.64、6.64、9.64、12.64、	4.98、9.08、13.19、17.29、
B2	10	147.72	7.33	54.51	6.06	14.64、16.64、18.64、20.64、	20.03、22.76、25.50、28.24、
B3	20	131.33	14.65	48.46	12.11	22.64、24.64、26.64、30.64	30.97、33.71、36.44、41.92
B4	30	114.90	21.99	42.40	18.17		

按照 ASTM D5298-10<sup>[14]</sup>,采用滤纸法测试非饱和和橡胶混合土的吸力,具体操作步骤如下。

- 1) 准备粉土,将取得的原土烘干后进行碾碎,除去土中的石块、树根、草叶等杂物,土样过2 mm筛。
- 2) 配制干燥混合土,按照表2试验方案,称取相应的粉土和橡胶颗粒,经充分搅拌混合后置于干燥器中备用。
- 3) 配制目标含水率土样,按照表2试验方案,从干燥器中称取适量的干燥土样,与适量的蒸馏水充分搅拌混合后装进密封袋,于保湿缸中静置3 d。
- 4) 制作土样模具,取标准环刀(直径为61.8 mm,高度为20 mm)两个,上下对齐,使用电工胶布于缝

- 隙处粘紧,如图4(a)。
- 5) 击实试样,取出步骤(3)制备的土样,使用击实器分4层在模具中击实制备试样,每层高10 mm,如图4(b)。
- 6) 准备滤纸,将选定的 Whatman No. 42 型滤纸放入烘箱干燥16 h,然后取出置于干燥器中。
- 7) 放置基质吸力测试滤纸,使用裁纸刀沿模具中间即两个环刀缝隙处切开,使用镊子将3张 Whatman No. 42 型滤纸呈夹心状置于试样中间,中间测试滤纸直径为47 mm,上部与下部的保护滤纸直径为55 mm,用以保护中间的测试滤纸,防止测试滤纸粘上土粒而影响试验结果,如图4(c)、(d)。

8)放置总吸力测试滤纸,将上下试样用土工胶带密封固定,随后放入密封罐中,并在试样顶部放置 O 型环及 2 张 WhatmanNo. 42 型滤纸,上部测试滤纸直径为 47 mm,下部的保护滤纸直径为 55 mm,用以保护上部的测试滤纸,防止测试滤纸粘上土粒而影响试验结果,随后将密封罐密封后放入恒温箱((20±1) °C)中静置平衡时间为 14 d<sup>[14]</sup>,如图 4 (g)、(h)。

9)确定测试滤纸平衡含水率,静置平衡 14 d 后将测试滤纸取出,依据规范分别称量得到湿滤纸的

质量  $m_w$  和干滤纸的质量  $m_d$ ,精度要求 0.000 1 g,并依据式(1)确定测试滤纸的平衡含水率  $\omega_1$ 。

$$\omega_1 = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (1)$$

10)确定基质吸力,根据 WhatmanNo. 42 型滤纸率定曲线确定吸力<sup>[14]</sup>。

$$\lg h_m = \begin{cases} 5.327 - 0.0779\omega_i, & \omega_i < 45.3\% \\ 2.412 - 0.0135\omega_i, & \omega_i \geq 45.3\% \end{cases} \quad (2)$$

式中: $h_m$ 为基质吸力值,kPa。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 含水率及饱和度与基质吸力关系

根据式(2),计算出不同条件下混合土的基质吸力,并绘制含水率与基质吸力的关系曲线,见图 5。从图中可以看出,同一橡胶含量下,试样的基质吸力受含水率的影响较为明显,随着试样含水率的增加,滤纸法测得的基质吸力呈现非线性减少的趋势,可明显分为 3 个发展阶段:1)吸力骤降段,当含水率小于 9.08% 时,基质吸力受含水率影响非常明显,表现出随含水率升高基质吸力骤降的趋势;2)吸力稳定降低段,当含水率介于 9.08%~20.03% 之间时,基质吸力受含水率影响较明显,表现出随含水率升高基质吸力缓慢稳定降低的趋势;3)吸力缓慢降低段,当含水率大于 20.03% 时,基质吸力受含水率一定影响,表现出随含水率升高基质吸力缓慢降低的趋势。相应地,在干密度一定时,含水率增加,意味着试样的饱和度也随之增加,因此,如图 6 所示,基质吸力随饱和度的变化表现出与基质吸力随含水率的变化一致的规律性。

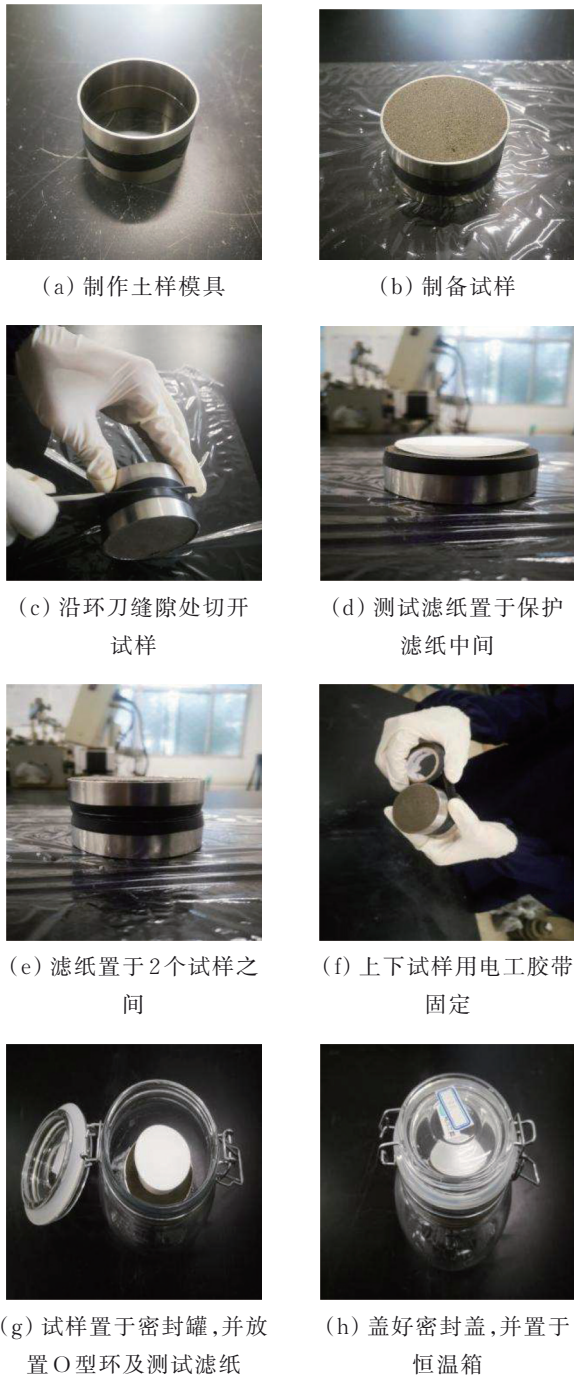


图 4 滤纸法试验过程

Fig. 4 Filter paper test process

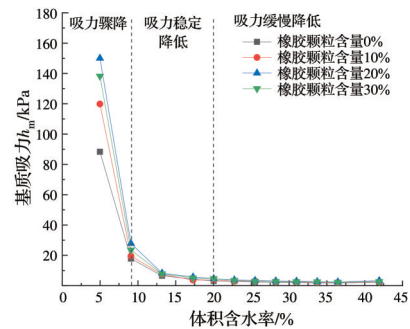


图 5 基质吸力与体积含水率关系曲线

Fig. 5 Curves of relationship between matrix suction and volumetric moisture content

### 2.2 橡胶含量与基质吸力关系

由图 7 可知,橡胶含量对基质吸力有一定的影响,具体表现为:在同一含水率下,随着橡胶含量的增加基质吸力呈先增大后减小的趋势,峰值橡胶颗

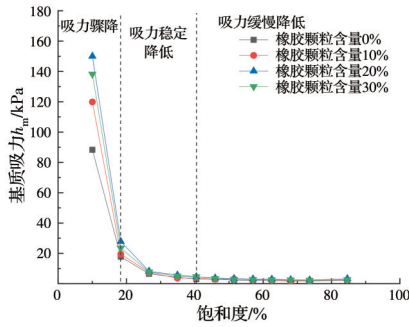


图 6 基质吸力与饱和度关系曲线

Fig. 6 Relationship between matrix suction and saturation

粒含量为 20%。实际上,基质吸力较小(0~10<sup>2</sup> kPa)时,试样含水率较大,试样的孔隙比及孔隙尺寸特征决定了试样的持水能力或基质吸力特性<sup>[21]</sup>。采用“等体积置换”方法制样,即所有试样的孔隙比均为一致,因此,随着橡胶含量的增加,试样孔隙尺寸的变化是造成其基质吸力不一致的重要原因,后文将结合“骨架孔隙比”进行阐述。

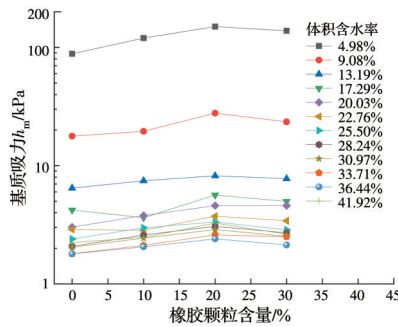


图 7 基质吸力与橡胶颗粒含量关系曲线

Fig. 7 Relationship between matrix suction and rubber particle content

### 2.3 橡胶混合土的土水特征曲线

SWCC 可以通过特定的数学模型表示,常用的模型有 Van Genuchten(VG)模型<sup>[22]</sup>、Gardner(GD)模型<sup>[23]</sup>、Fredlund-Xing(FX)模型<sup>[24]</sup>,模型表达式分别为:

VG 模型

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^b\right]^c} \quad (3)$$

GD 模型

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^b} \quad (4)$$

FX 模型

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^b\right]\right\}^c} \quad (5)$$

式中: $\theta_w$ 为体积含水率,%; $\theta_r$ 为残积体积含水率,%; $\theta_s$ 为饱和体积含水率,%; $\psi$ 为基质吸力,kPa; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为拟合参数。通过对试验的土水特征曲线进行拟合,发现FX模型拟合不收敛,VG模型和GD模型能较好地表达橡胶混合土的土水特征曲线,而VG模型相关系数更好,且计算与试验所得残余体积含水率相符,因此,选择VG模型对橡胶混合土进行讨论。图8为不同橡胶颗粒含量下橡胶混合土的SWCC拟合结果,具体参数如表3所示。

表 3 土水特征曲线模型拟合基质吸力参数

Table 3 Soil-water characteristic curve model fitting matrix suction parameters

橡胶颗粒含量/%	典型模型	$a$	$b$	$c$	$\theta_r$	$R^2$
0	GD	2.22	2.14		7.71	0.97
	VG	2.09	1.97	0.92	7.16	0.97
10	GD	2.56	2.74		8.00	0.97
	VG	2.05	3.28	0.61	7.57	0.98
20	GD	3.17	2.24		7.15	0.99
	VG	1.93	4.38	0.30	6.17	0.99
30	GD	2.86	2.05		7.11	0.98
	VG	1.97	2.80	0.51	6.62	0.99

## 3 橡胶混合土颗粒接触状态

### 3.1 考虑不同颗粒比重的混合土接触状态

对于粗细粒混合土,Thevanayagam等<sup>[15-16]</sup>提出了混合土颗粒接触状态的概念:不同粒径的粗、细颗粒组成的混合土,其接触状态决定了混合土的力学特征。对于粒径差异明显的粗细颗粒混合土,必然存在着一个阈值含量 $F_{cth}$ ,当 $F_c < F_{cth}$ 时,混合土的主体骨架主要由粗粒组成,当 $F_c > F_{cth}$ 时,混合土的主体骨架主要由细粒组成<sup>[15]</sup>。

橡胶颗粒与粉土颗粒的粒径差异明显,因此引入混合土颗粒接触状态概念进行研究,基于粗细粒混合土颗粒接触状态理论,橡胶粉土满足以下假设:1)该混合土仅有橡胶颗粒和粉土组成;2)橡胶颗粒与粉土的粒径相差较大;3)橡胶颗粒的聚集不受粉土颗粒的影响,且粉土颗粒的聚集也不受橡胶颗粒的影响。对于橡胶粉土混合土,也同样存在一个阈值含量 $R_{cth}$ (橡胶颗粒占混合土的质量比),当 $R_c < R_{cth}$ 时,混合土的主体骨架由粉土组成,当 $R_c > R_{cth}$ ,混合土的主体骨架由橡胶颗粒组成。接触状态模式可简单分为两类,如图9所示。1)接触

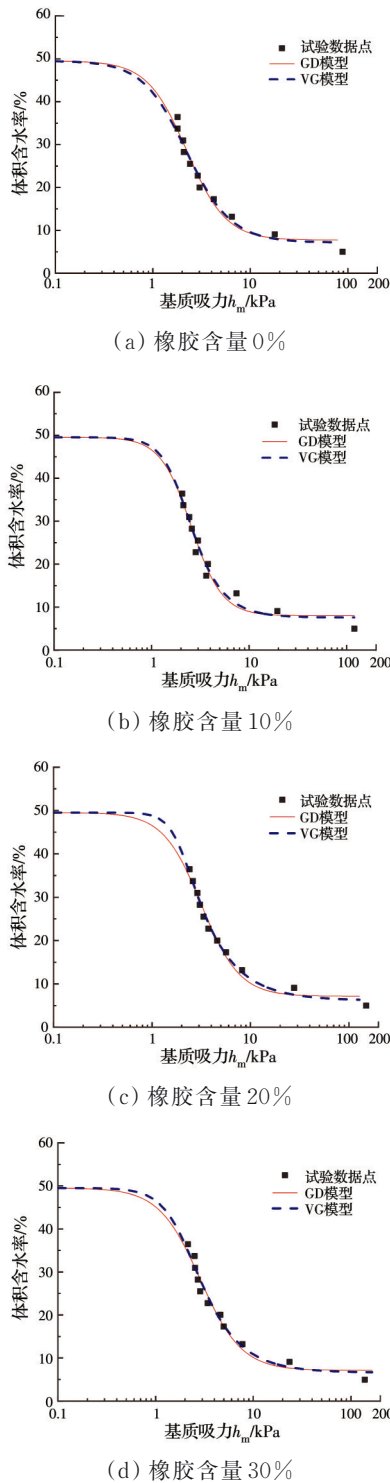


图 8 不同橡胶颗粒含量下橡胶粉土的 SWCC

Fig. 8 SWCC of rubber silt with different rubber particle content

状态 I:粉土颗粒之间接触,橡胶颗粒部分占据粉土粒间的孔隙,与粉土颗粒接触;2)接触状态 II:粉土颗粒悬浮在橡胶颗粒之间,但橡胶颗粒粒间的接触受粉土颗粒的影响,且随着橡胶颗粒含量的增加而减小。

根据颗粒接触状态的概念<sup>[15-16]</sup>,用骨架孔隙比  $e_{sk}$  来描述橡胶粉土混合土骨架颗粒的接触状态,  $e_{sk}$

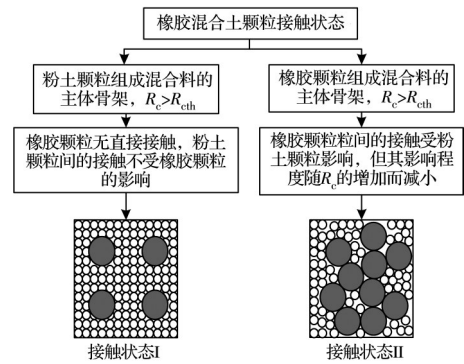


图 9 橡胶混合土颗粒接触状态模式示意图

Fig. 9 Schematic diagram of contact state model of rubber mixed soil particles

定义为组成橡胶粉土混合土骨架颗粒间的孔隙体积与混合土骨架颗粒体积之比。根据接触状态的不同,其计算公式如下所示<sup>[25]</sup>。

1) 接触状态 I

$$e_{sk} = \frac{V_v}{V_s} \tag{6}$$

式中:  $V_v$ 、 $V_r$ 、 $V_s$  分别为孔隙体积、橡胶颗粒体积及粉土颗粒体积。将橡胶颗粒比重  $G_r$ 、粉土颗粒比重  $G_s$ 、橡胶颗粒含量  $R_c$  和混合土总孔隙比  $e$  代入式(6)得式(7)。

$$e_{sk} = \frac{e(G_r - G_r R_c + G_s R_c)}{G_r(1 - R_c)} \tag{7}$$

2) 接触状态 II

$$e_{sk} = \frac{(V_v + V_s)}{V_r} \tag{8}$$

将橡胶颗粒比重  $G_r$ 、粉土颗粒比重  $G_s$ 、橡胶颗粒含量  $R_c$  和混合土总孔隙比  $e$  代入式(8)得式(9)。

$$e_{sk} = \frac{e(G_r - G_r R_c + G_s R_c) + G_r(1 - R_c)}{G_s R_c} \tag{9}$$

参考 Thevanayagam 等<sup>[15-16]</sup>的研究,当接触状态 I 粉土颗粒为骨架颗粒体积时,进一步考虑颗粒比重的不同,即阈值橡胶颗粒含量  $R_{cth}$  可通过式(10)计算。

$$\frac{e(G_r - G_r R_{cth} + G_s R_{cth})}{G_r(1 - R_{cth})} = e_{\max(s)} \tag{10}$$

式中:  $e_{\max(s)}$  为粉土最大孔隙比。当接触状态 II 橡胶颗粒为骨架颗粒体积,进一步考虑颗粒比重的不同,即阈值橡胶颗粒含量  $R_{cth}$  可通过式(11)计算。

$$\frac{e(G_r - G_r R_{cth} + G_s R_{cth}) + G_r(1 - R_{cth})}{G_s R_{cth}} = e_{\max(r)} \tag{11}$$

式中:  $e_{\max(r)}$  为橡胶最大孔隙比。式(10)、式(11)中阈值橡胶颗粒含量  $R_{cth}$  不为常数,其数值取决于混合土总孔隙比。总孔隙比  $e$  为定值,且橡胶颗粒与

粉土的颗粒比重及孔隙比特性均已知,则阈值  $R_{Cth}$  应为定值,即应满足式(10)、式(11),阈值橡胶颗粒含量  $R_{Cth}$  定义为式(12)。

$$R_{Cth} = \frac{G_r(1 + e_{\max(s)})}{G_s e_{\max(r)} + G_r(1 + e_{\max(s)})} \quad (12)$$

3.2 基质吸力与骨架孔隙比关系

根据式(12)可得橡胶粉土阈值  $R_{Cth}$  为 44.29%。根据表 2 可知橡胶颗粒体积含量 0%、10%、20%、30% 所对应的  $R_C$  分别为 0%、0.473%、10.04%、16.06%。不难看出,试验  $R_C < R_{Cth}$ , 属于接触状态 I,即橡胶混合土中,粉土是主体骨架。表 4 为橡胶混合土颗粒接触物理指标。

表 4 橡胶混合土颗粒接触物理指标

试验编号	$R_{Cth}/\%$	$R_C/\%$	$e$	$e_{sk}$
B1		0	0.495 2	0.495 2
B2	44.29	4.73	0.495 2	0.550 3
B3		10.04	0.495 2	0.619 0
B4		16.06	0.495 2	0.707 4

骨架孔隙比  $e_{sk}$  随着橡胶颗粒含量  $R_C$  的增加而逐渐增加。采用“等体积置换”方法制样,即所有试样的孔隙体积  $V_v$  均为一致,而随着橡胶含量的增

大,粉土颗粒的体积  $V_s$  逐渐降低,根据式(7),不难发现  $e_{sk}$  逐渐增大。

综合图 7、表 4 可以发现,随着骨架孔隙比的增加,基质吸力呈现先增加后减小的趋势,当橡胶含量 20% 时,试样的基质吸力最大。所有试样的总孔隙比均为一致,因此,随着橡胶含量的增加,试样孔隙尺寸的变化是造成持水特性不一致的重要原因。

1)橡胶含量小于 20%,随着橡胶含量的增加,试样骨架孔隙比增加,此时,少量橡胶颗粒完全被粉土所包裹,橡胶颗粒之间未能形成有效的接触,未能产生较大的孔隙,但橡胶颗粒的存在使孔隙更为集中,形成了更小的孔隙区域,从而导致试样的持水能力持续增加,即基质吸力升高。

2)橡胶含量大于 20%,随着橡胶含量的增加,试样骨架孔隙比继续增加,此时一定量的橡胶颗粒之间形成了有效的接触,产生了一定量的较大的孔隙,显然较大孔隙的产生导致试样的持水能力降低,即基质吸力降低。

换言之,在接触状态 I 中,随着橡胶颗粒含量的增加,粉土颗粒之间的接触必定会受到橡胶颗粒的影响,即橡胶颗粒与粉土接触状态不能简单地用状态 I 描述,因此对橡胶混合土接触状态模式进行修正,如图 10 所示。

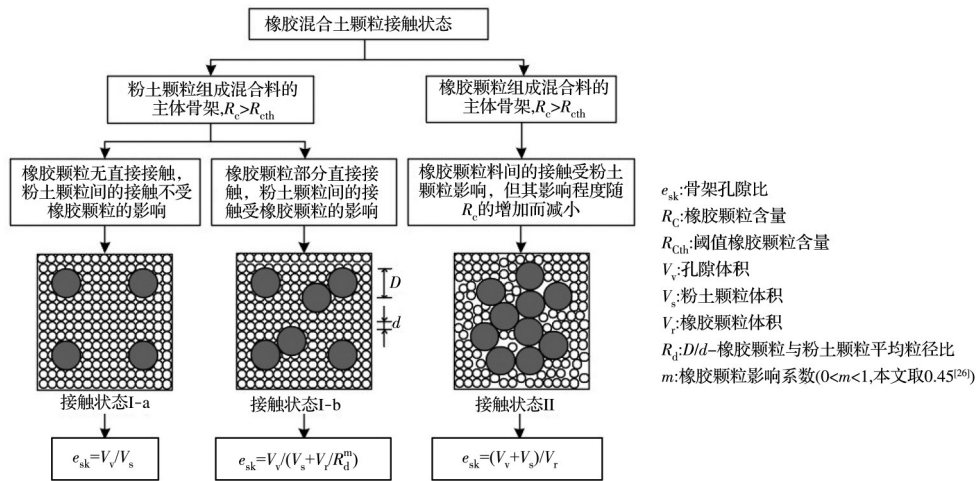


图 10 修正后橡胶混合土接触状态模式示意图

Fig. 10 Schematic diagram of contact state model of modified rubber mixed soil

接触状态 I -a: 粉土颗粒之间接触,橡胶颗粒部分占据粉土粒间的孔隙,与粉土颗粒接触,橡胶颗粒的存在不会影响粉土颗粒之间的接触。

接触状态 I -b: 粉土颗粒之间接触,橡胶颗粒部分占据粉土粒间的孔隙,且橡胶颗粒之间存在少量接触,粉土颗粒之间的接触受到橡胶颗粒存在的影响。

接触状态 I -a 与状态 I 计算方法一致,接触状

态 I -b 计算式为

$$e_{sk} = \frac{V_v}{V_s + V_r / R_d^m} \quad (13)$$

将橡胶颗粒比重  $G_r$ 、粉土颗粒比重  $G_s$ 、橡胶颗粒含量  $R_C$  和混合土总孔隙比  $e$  代入式(13)得式(14)。

$$e_{sk} = \frac{e(G_r - G_r R_C + G_s R_C)}{G_r(1 - R_C) + G_s R_C / R_d^m} \quad (14)$$

式中: $m$ 为橡胶颗粒影响系数, $0 < m < 1$ ,根据混合土接触研究结果,取 $0.45^{[26]}$ 。根据试验数值,将橡胶颗粒含量 $20\%$ ( $R_c$ 为 $10.04\%$ )作为接触状态 I -a 与接触状态 I -b 临界值。图 11,修正前后骨架孔隙比与橡胶颗粒含量关系曲线。

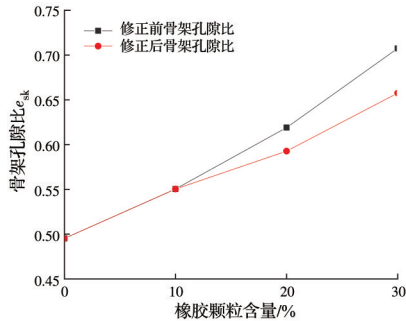


图 11 修正前后骨架孔隙比与橡胶颗粒含量关系曲线  
Fig. 11 Relationship between skeleton void ratio and rubber particle content before and after correction

从图 11 可知,橡胶含量大于 $20\%$ ,当考虑粉土颗粒间接触受橡胶颗粒影响,骨架孔隙比有所降低。在接触状态 I -b 中,将部分橡胶颗粒作为骨架颗粒体积,更加符合当橡胶颗粒超过一定含量时,颗粒实际的接触状态。

图 12 表明橡胶混合土的基质吸力随着骨架孔隙比的增大表现出先增大后降低的趋势。当骨架孔隙比为 $0.5927$ ,橡胶含量 $20\%$ 时,基质吸力达到峰值,这也是接触状态 I -a 与接触状态 I -b 临界的接触状态。

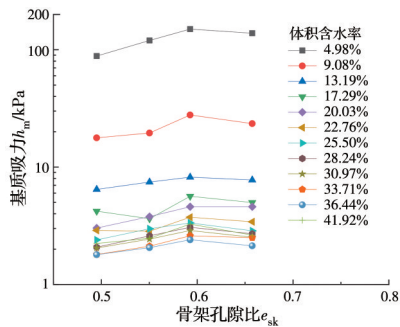


图 12 基质吸力与骨架孔隙比关系曲线

Fig. 12 Relationship between matrix suction and skeleton pore ratio

### 4 结论

以橡胶粉土为研究对象,考虑含水率、橡胶含量的影响,建立其 SWCC 模型,并建立橡胶粉土的颗粒细观接触状态模式,得出以下结论:

1)同一橡胶含量下,混合土的基质吸力受含水率影响明显,随着含水率的增加,基质吸力非线性

减小,呈现典型的三阶段特征。橡胶含量对基质吸力有一定的影响,基质吸力随着橡胶含量增大呈现先增大后减小的趋势,峰值橡胶颗粒含量为 $20\%$ 。

2)采用 FX 模型、GD 模型、VG 模型分别进行拟合,结果表明,VG 模型拟合系数更优,适用于橡胶混合土的 SWCC 模型。

3)考虑橡胶颗粒与粉土颗粒的不同颗粒比重,基于基质吸力的发展特性,将混合土的细观接触状态模式划分为 I -a、I -b、II 三类,构建了骨架孔隙比  $e_{sk}$  描述混合土的颗粒接触状态。

4)骨架孔隙比能够合理表征混合土的非饱和特性,混合土基质吸力随骨架孔隙比的增大表现出先增大后降低的趋势。

### 参考文献

[1] ZHOU E Q, WANG Q. Experimental investigation on shear strength and liquefaction potential of rubber-sand mixtures [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1-11.

[2] 公路路基施工技术规范: JTG/T 3610—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019. Specifications for design of highway subgrades: JTG/T 3610—2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019. (in Chinese)

[3] YOON S, PREZZI M, SIDDIKI N Z, et al. Construction of a test embankment using a sand-tire shred mixture as fill material [J]. Waste Management, 2006, 26(9): 1033-1044.

[4] YOUWAI S, BERGADO D T. Numerical analysis of reinforced wall using rubber tire chips-sand mixtures as backfill material [J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(2): 103-114.

[5] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1993.

[6] PINCUS H J, HOUSTON S L, HOUSTON W N, et al. Laboratory filter paper suction measurements [J]. Geotechnical Testing Journal, 1994, 17(2): 185.

[7] DAVID SUITS L, SHEAHAN T C, FEUERHARMEL C, et al. The use of filter-paper and suction-plate methods for determining the soil-water characteristic curve of undisturbed colluvium soils [J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, 29(5): 14004.

[8] SUTEJO Y, SAGGAFF A, RAHAYU W, et al. Characteristics of soil suction with filter paper test method [J]. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 2018, 8(5): 2128.

[9] DURUKAN S, AKINCI G. Assessment and statistical



- evaluation of suction characteristics obtained via filter paper technique on zeolite-bentonite mixtures [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(20): 1-13.
- [10] 谭志翔, 王正中, 葛建锐, 等. 北疆白砂岩与泥岩的土水特征曲线及渗透曲线实验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(Sup1): 229-233.  
TAN Z X, WANG Z Z, GE J R, et al. Experimental study on soil-water characteristic curve and permeability curve of white sandstone and mudstone in northern Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(Sup 1): 229-233. (in Chinese)
- [11] 张爱军, 王毓国, 邢义川, 等. 伊犁黄土总吸力和基质吸力土水特征曲线拟合模型[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(6): 1040-1049.  
ZHANG A J, WANG Y G, XING Y C, et al. Fitting models for soil-water characteristic curve of total and matrix suctions of Yili loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(6): 1040-1049. (in Chinese)
- [12] 谌文武, 刘鹏, 刘伟, 等. 接触面滑坡滑带土吸力的滤纸法测试[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(Sup1): 112-117.  
CHEN W W, LIU P, LIU W, et al. Suction tests on sliding soil in interface landslide based on filter paper method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(Sup1): 112-117. (in Chinese)
- [13] 吴珺华, 彭东豹, 袁俊平, 等. 滤纸法测定膨胀土总吸力试验及基质吸力预测研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(3): 570-574.  
WU J H, PENG D B, YUAN J P, et al. Tests on total suction measurement of expansive soil using filter paper method and prediction of matrix suction [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(3): 570-574. (in Chinese)
- [14] Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper: ASTM-D5298-10 [S]. 2010.
- [15] THEVANAYAGAM S, SHENTHAN T, MOHAN S, et al. Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(10): 849-859.
- [16] THEVANAYAGAM S, MOHAN S. Intergranular state variables and stress - strain behaviour of silty sands [J]. *Géotechnique*, 2000, 50(1): 1-23.
- [17] 吴琪, 陈国兴, 周正龙, 等. 基于颗粒接触状态理论的粗细粒混合料液化强度试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(3): 475-485.  
WU Q, CHEN G X, ZHOU Z L, et al. Experimental investigation on liquefaction resistance of fine-coarse-grained soil mixtures based on theory of intergrain contact state [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(3): 475-485. (in Chinese)
- [18] 朱雨萌, 吴琪, 陈国兴. 基于颗粒接触状态理论的砂-粉混合料剪切波速试验[J]. *岩土力学*, 2019, 40(4): 1457-1464, 1473.  
ZHU Y M, WU Q, CHEN G X. Experimental investigation on shear wave velocity of sand-silt mixtures based on the theory of inter-grain contact state [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(4): 1457-1464, 1473. (in Chinese)
- [19] 吴琪, 刘抗, 郭启洲, 等. 基于二元介质模型的砂类土小应变剪切模量评价方法[J]. *岩土力学*, 2020, 41(11): 3641-3650.  
WU Q, LIU K, GUO Q Z, et al. A new method for evaluating small-strain shear modulus of sandy soils based on binary medium model [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3641-3650. (in Chinese)
- [20] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.  
Standard for soil test method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [21] 谌文武, 贾全全, 童艳梅. 莫高窟壁画地仗土-水特征曲线的测定与拟合[J]. *岩土力学*, 2020, 41(5): 1483-1491.  
CHEN W W, JIA Q Q, TONG Y M. Measurement and curve fitting for soil-waterer characteristic curve of mural plaster at Mogao Grottoes [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(5): 1483-1491. (in Chinese)
- [22] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44 (5): 892-898.
- [23] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table [J]. *Soil Science*, 1958, 85(4): 228-232.
- [24] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, 31(4): 521-532.
- [25] ZUO L, BAUDET B A. Determination of the transitional fines content of sand-non plastic fines mixtures [J]. *Soils and Foundations*, 2015, 55(1): 213-219.
- [26] THEVANAYAGAM S. Liquefaction potential and undrained fragility of silty soils [C]//Proc. 12th World Conf. Earthquake Engineering, 2000: 2383.