

文章编号:1007-9629(2026)01-0121-08

## 橡胶颗粒形状及掺量对橡胶砂剪切特性的影响

王培<sup>1,2,\*</sup>, 吴盛辉<sup>2</sup>, 程安<sup>2</sup>, 庄海洋<sup>1,2</sup>, 徐长节<sup>1,2</sup>

(1. 华东交通大学 山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 江西南昌 330013;

2. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西南昌 330013)

**摘要:**通过室内直剪试验,研究方形、扁平橡胶颗粒掺量对橡胶砂剪切特性的影响,并建立离散元 (DEM) 模型,采用真实河砂扫描数据文件、颗粒簇方法分别对砂粒、橡胶颗粒进行模拟,揭示橡胶砂的宏微观力学响应。结果表明:两种橡胶砂内摩擦角均随橡胶颗粒掺量增加而减小,5% 掺量时达最大值;相同橡胶颗粒掺量下,方形橡胶砂抗剪强度更高,扁平橡胶砂剪胀抑制效果更显著;橡胶砂力链网络以“砂-砂”接触为主,其承担主要应力;与扁平橡胶砂相比,方形橡胶砂“砂-砂”接触比例更高,宏观表现为剪切强度更高。

**关键词:**橡胶砂;橡胶颗粒形状;离散元;颗粒接触;力链网络

中图分类号:TU411

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2026.01.013

## Effect of Rubber Particle Shape and Content on Shear Characteristics of Rubber-Sand Mixtures

WANG Pei<sup>1,2,\*</sup>, WU Shenghui<sup>2</sup>, CHENG An<sup>2</sup>, ZHUANG Haiyang<sup>1,2</sup>, XU Changjie<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** The effects of the content of square and flat rubber particles on the shear characteristics of rubber-sand mixtures were investigated through indoor direct shear tests. A discrete element method (DEM) model was established to reveal the macro-meso mechanical responses of rubber-sand mixtures, in which real river sand scanning data files and a particle clustering method were used to simulate sand particles and rubber particles, respectively. The results indicate that the internal friction angles of both types of rubber-sand mixtures decrease with the increase of rubber particle content, reaching a maximum value when the rubber particle content is 5%. Under the same rubber particle content, square rubber-sand mixture has higher shear strength, while flat rubber-sand mixture has a more significant dilatancy inhibition effect. The force chain network of rubber-sand mixture is dominated by “sand-sand” contacts, which bear the main stress. Compared to flat rubber-sand mixture, the square rubber-sand mixture has a higher proportion of “sand-sand” contacts, which is macroscopically manifested as higher shear strength.

**Key words:** rubber-sand mixture; rubber particle shape; discrete element method; particle contact; force chain network

中国废旧轮胎年产量已达 3 500 万 t,但回收率仅为 20%。传统焚烧处理会释放 SO<sub>2</sub> 等有害气体,而机械破碎制备的橡胶颗粒因密度低、弹性强以及变形能力优异,可与砂土复合成轻质环保型橡胶砂

材料,并应用于路基填筑、地基改良和隔振等工程领域<sup>[1-7]</sup>。然而,橡胶颗粒作为橡胶砂的核心组分,其形状参数对橡胶砂力学性能的调控机制尚未明晰,制约着工程应用的发展。

收稿日期:2025-03-28;修订日期:2025-05-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42207210);江西省自然科学基金资助项目(20242BAB26079)

第一作者(通讯作者):王培(1988—),男,河北石家庄人,华东交通大学教授,博士生导师,博士。E-mail:wangpeicivil@126.com

现有研究表明,颗粒形状参数是影响内摩擦角的关键因素<sup>[8]</sup>。其中,长宽比<sup>[9-10]</sup>对颗粒材料剪切行为起主导作用,而细观与微观参数的影响相对较小。Ari等<sup>[11]</sup>发现橡胶颗粒的不规则度与其抗剪强度呈正相关,峰值摩擦角随形状复杂度提升而增大<sup>[12]</sup>。庄海洋等<sup>[13]</sup>通过固结不排水剪切试验揭示,当胶-砂粒径趋近时,力链网络破坏效应最显著;Abdelrazek等<sup>[14]</sup>通过排水三轴试验发现偏应力与割线摩擦角随橡胶粒径增大而递增。在掺量影响方面,Shariatmadari等<sup>[15-17]</sup>的研究均表明,橡胶颗粒掺量增加会导致橡胶砂的抗剪强度降低,但可提升其延性变形能力。尽管已有研究涉及颗粒粒径、掺量等因素,但对橡胶颗粒形状效应的系统性研究仍存在明显不足,制约着材料细观力学机制的深入解析。

作为橡胶砂的关键组分,橡胶颗粒的形状参数对其物理力学性质具有显著影响。本文采用室内直剪试验,系统研究了橡胶颗粒形状及掺量对橡胶砂剪切特性的影响,并通过构建离散元(DEM)模型,揭示了颗粒接触状态的演化过程,阐明了橡胶颗粒形状影响材料剪切特性的细观力学机制,为橡胶砂的工程应用提供理论支撑。

## 1 试验

### 1.1 原材料及配合比

纯砂为取自江西省南昌市赣江新区的河砂。根据长宽比选取 $8\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的扁平橡胶颗粒和 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 的方形橡胶颗粒,且2种橡胶颗粒具有相同的单颗粒体积。设置橡胶颗粒的掺

量 $w_r$ (质量分数)分别为0%(纯砂)、5%、10%、20%、30%,方形橡胶颗粒和扁平橡胶颗粒制备的橡胶砂分别记为方形橡胶砂(SRSM)和扁平橡胶砂(FRSM)。试样命名规则为:SRSM-5为方形橡胶颗粒掺量为5%的橡胶砂;FRSM-5为扁平橡胶颗粒掺量为5%的橡胶砂;其他类推。为进行对比,制备了 $w_r=30\%$ 的方形橡胶颗粒和扁平橡胶颗粒混配的橡胶砂(S+FRSM-30),其中方形橡胶和扁形橡胶的掺量各为15%。

将纯砂、橡胶和橡胶砂按照筛析法依次通过孔径为4.00、3.00、2.00、1.25、1.00 mm的土工筛,得到纯砂、橡胶和橡胶砂的颗粒级配,其中橡胶颗粒的等效粒径为4 mm。为了更直观地了解纯砂、橡胶、橡胶砂的级配和粗细程度,绘制了其级配曲线,结果见图1。由图1可知,根据细度模数,本试验的材料应划分为粗砂。纯砂和橡胶的物理性能指标见表1。

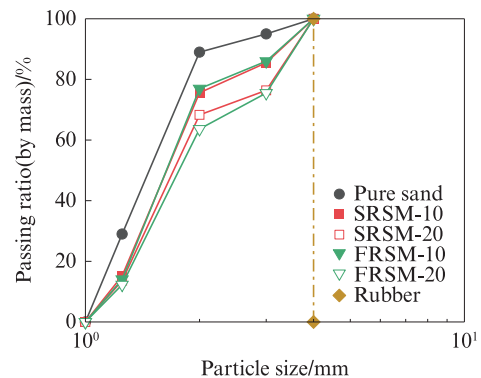


图1 纯砂、橡胶和橡胶砂的级配曲线  
Fig. 1 Grading curves of pure sand, rubber and rubber-sand mixtures

表1 纯砂和橡胶的物理性能指标

Table 1 Physical property indexes of rubber and pure sand

Material	Density/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	Effective particle size/mm	Median particle size/mm	Coefficient of uniformity	Coefficient of curvature
Pure sand	2.65	1.20	1.70	1.50	0.78
Rubber	1.40	4.00	4.00	1.00	1.00

### 1.2 试验方案

采用电动直剪仪对试样进行剪切实验,剪切盒直径为70.0 mm、高为20.0 mm,最大剪切速率为18.0 mm/min,最大可施加10 kN的竖向荷载。试样为橡胶颗粒与砂混合制成,直径为70.0 mm,高为20.0 mm。根据GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,测试过程为:将河砂放入105℃烘箱进行烘干处理,冷却备用;称取一定量的河砂和橡胶颗粒,将河砂放入干燥的托盘内,分次加入橡胶颗粒,搅拌均匀后备用;将橡胶砂均匀压入剪切盒内,此过程要保证每层压实功一致,每层压实后需要对试验表面进

行刨毛处理;将剪切盒放入直剪仪中,设定剪切速率为0.8 mm/min,竖向应力 $\sigma$ 为50、100、150、200 kPa。

## 2 结果与讨论

### 2.1 纯砂的剪切特性

不同竖向应力下纯砂的剪切特性曲线见图2。由图2可见:随着剪切位移的增大,纯砂的剪切应力先增大,达到峰值后再减小,即表现出应变软化特性;纯砂的峰值应力随着竖向应力的增大而增大,这是因为随着竖向应力的增大,砂颗粒之间咬合得更加紧密,抵抗剪切的能力增大;纯砂的竖向位移在4

种不同竖向应力下变化趋势相似,均呈现出先轻度剪缩后剪胀的过程,且随着竖向应力的增大,剪缩量增大,剪胀量减小;与竖向应力 50 kPa 时的最终剪胀

量相比,其他 3 种竖向应力下的最终剪胀量分别降低了 5.5%、10.0%、33.3%。上述试验结果与刘小丽等<sup>[18]</sup>的试验结果一致。

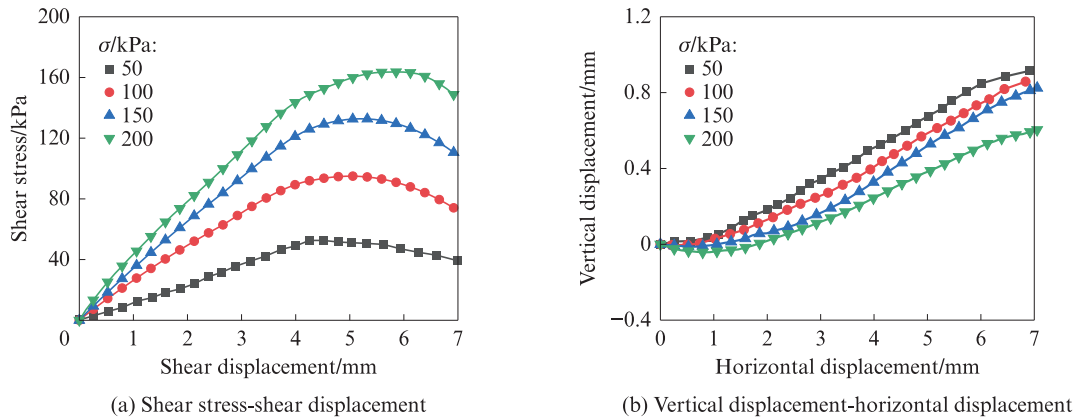


图2 不同竖向应力下纯砂的剪切特性曲线  
Fig. 2 Shear characteristic curves of pure sand under different vertical stresses

### 2.2 不同橡胶颗粒形状橡胶砂的剪切特性

4 种竖向应力下不同橡胶颗粒掺量的橡胶砂剪切特性演化规律相近,限于篇幅,仅给出  $w_r=5\%$  的橡胶砂在不同竖向应力下的剪切特性曲线,结果见图 3。由图 3 可见:与纯砂相比,当竖向应力从 50 kPa 增加至 200 kPa 时,方形橡胶砂的峰值应力分别降低

了 4.9%、3.7%、1.3% 和 2.2%,扁平橡胶砂的峰值应力降幅更为显著,分别达到 10.6%、10.3%、14.1% 和 14.4%;对比两种橡胶砂的力学性能,当竖向应力从 50 kPa 增加至 200 kPa 时,方形橡胶砂的峰值剪切应力较扁平橡胶砂分别高出 4.3、7.2、15.6 和 17.1 kPa,对应的提升率分别为 9.6%、8.6%、13.6% 和 11.9%。

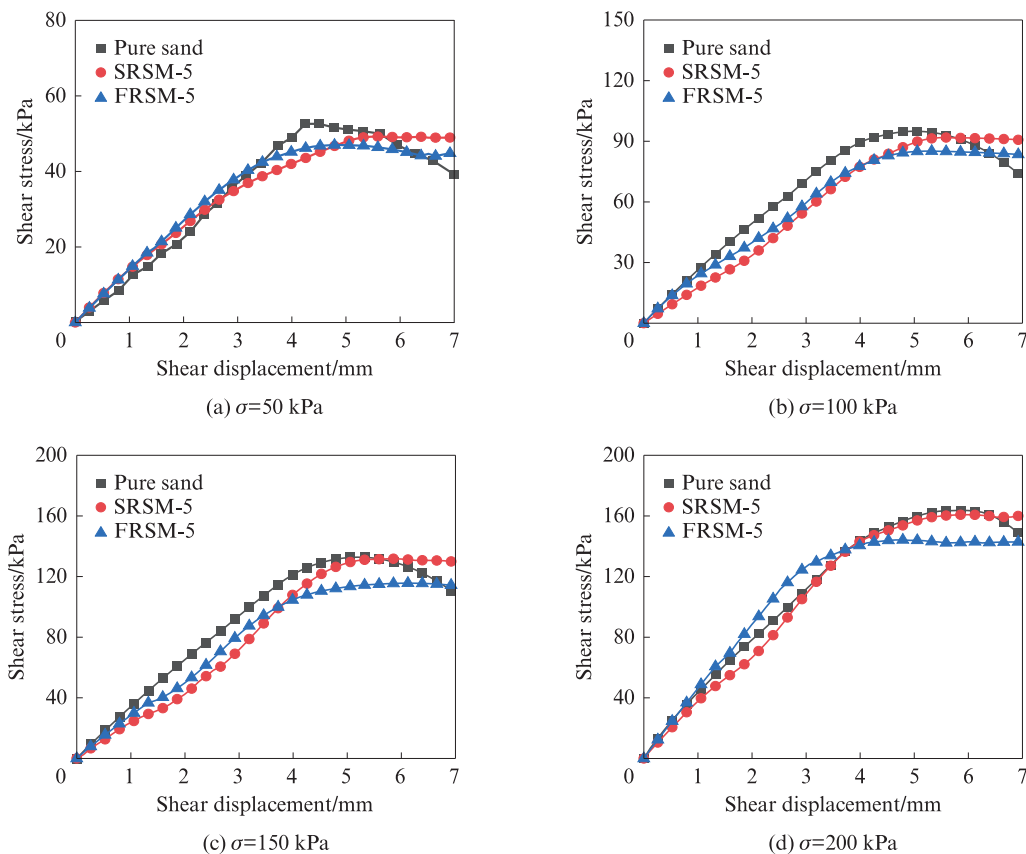


图3 不同竖向应力下  $w_r=5\%$  的橡胶砂剪切特性曲线  
Fig. 3 Shear characteristic curves of rubber-sand mixtures with  $w_r=5\%$  under different vertical stresses

方形橡胶砂峰值剪切应力较高的原因将在下文离散元模拟中从微观机理进行解释。

$\omega_r=5\%$  的橡胶砂竖向位移-水平位移关系曲线见图4。由图4可见:与扁平橡胶砂相比,4种竖向应力下方形橡胶砂的最终剪胀量均有显著提升,当竖向应力从50 kPa增至200 kPa时,其最终剪胀量分

别增加了30.8%、24.5%、37.1%和60.0%,表明扁平橡胶颗粒在抑制橡胶砂剪胀方面表现更为突出;方形橡胶砂和扁平橡胶砂均表现出先剪缩再剪胀的力学特征,随着竖向应力的增加,橡胶砂的剪胀行为特征减弱,剪缩增大。由此可见,橡胶砂的竖向位移变化与橡胶颗粒形状有关。

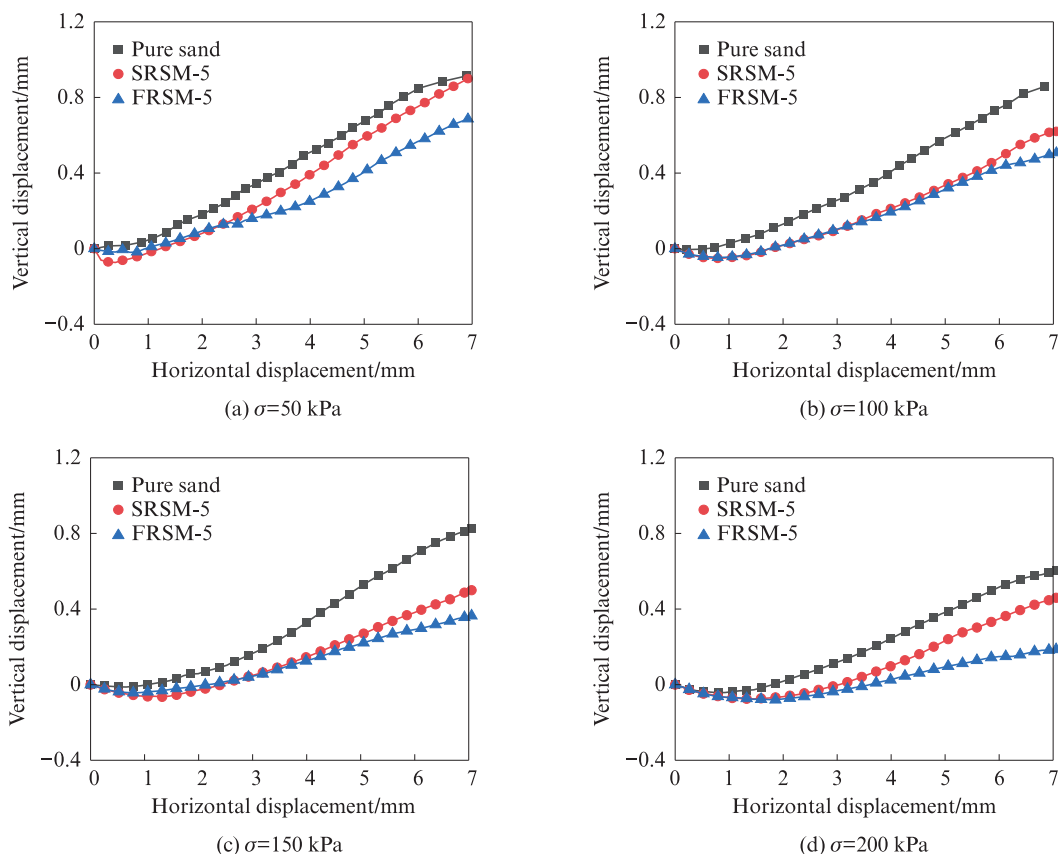


图4  $\omega_r=5\%$  的橡胶砂竖向位移-水平位移关系曲线

Fig. 4 Vertical displacement-horizontal displacement relationship curves of rubber-sand mixtures with  $\omega_r=5\%$

$\omega_r=30\%$  的橡胶砂在竖向应力150 kPa下竖向位移-水平位移关系曲线见图5。由图5可见,方形橡胶砂的剪胀量最大,其次是方扁混配橡胶砂,扁平橡胶砂最小。这一结果为方形、扁平两种橡胶砂对比提供了可靠的依据。

### 2.3 橡胶颗粒形状对橡胶砂内摩擦角的影响

橡胶砂抗剪强度与竖向应力的关系见图6。由图6可见:橡胶砂的抗剪强度随着竖向应力的增大而线性增大;在相同竖向应力下,较高橡胶颗粒掺量的橡胶砂具有较低的抗剪强度。

利用摩尔-库伦准则进行描述,得到橡胶砂的内摩擦角 $\phi$ 为:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

式中: $\tau$ 为剪切应力,kPa; $c$ 为黏聚力,kPa。

橡胶砂颗粒间的胶结性能较弱,抗剪强度取决

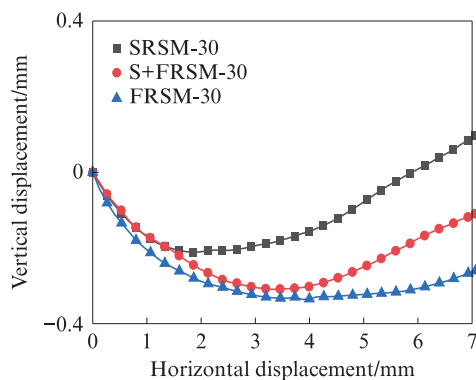


图5  $\omega_r=30\%$  的橡胶砂在竖向应力150 kPa下竖向位移-水平位移关系曲线

Fig. 5 Vertical displacement-horizontal displacement relationship curves of rubber-sand mixtures with  $\omega_r=30\%$  under  $\sigma=150$  kPa

于其内摩擦角。不同橡胶颗粒掺量下橡胶砂的内摩擦角见图7。由图7可见:随着橡胶颗粒掺量的增大,

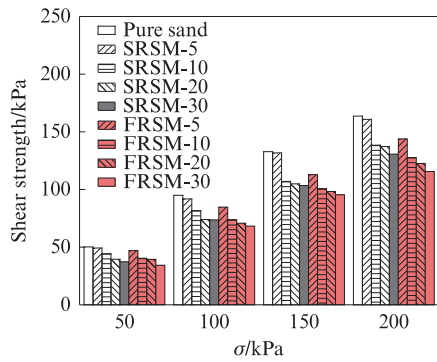


图6 橡胶砂抗剪强度与竖向应力的关系

Fig. 6 Relationship between shear strength and vertical stress of rubber-sand mixtures

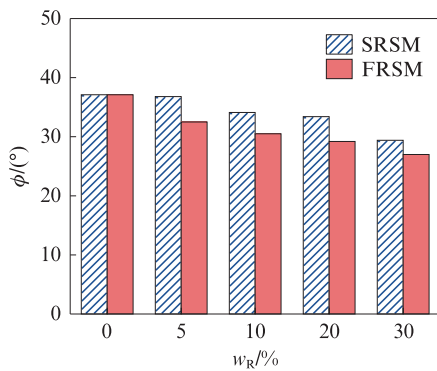


图7 不同橡胶颗粒掺量下橡胶砂的内摩擦角

Fig. 7 Internal friction angle of rubber-sand mixtures with different rubber particle contents

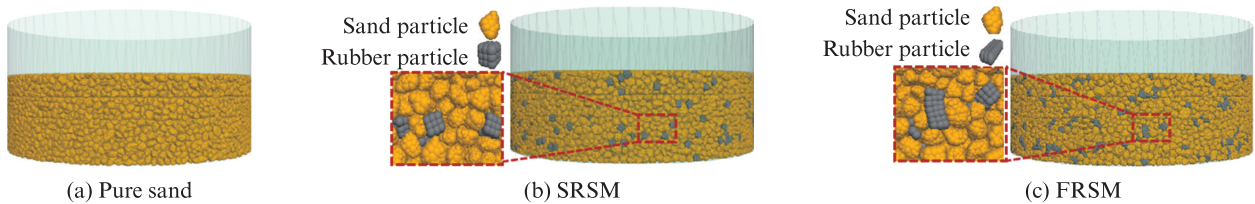


图8 试样数值模拟模型

Fig. 8 Numerical model of samples

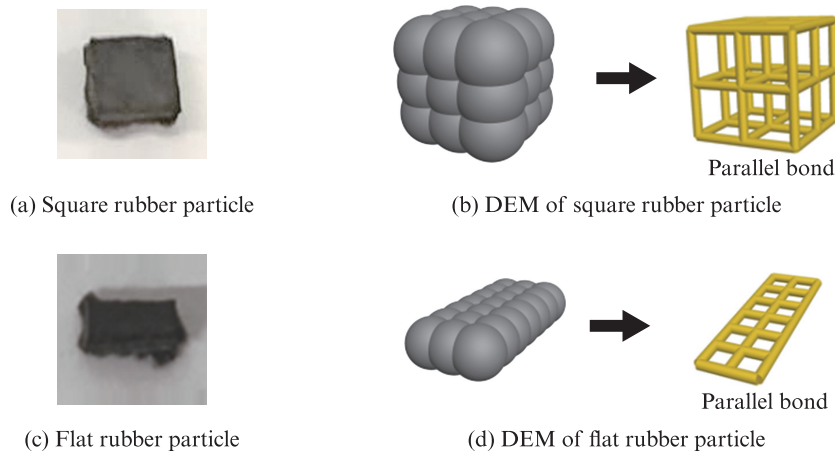


图9 DEM模型中橡胶颗粒建模

Fig. 9 Modeling of rubber particles in DEM models

橡胶砂的内摩擦角呈现逐渐减小的趋势;扁平橡胶砂比方形橡胶砂的内摩擦角降低幅度更显著;随着橡胶掺量从5%增至30%,方形和扁平橡胶砂的内摩擦角相较于纯砂分别下降了0.8%~20.8%、12.6%~27.3%,且方形橡胶砂内摩擦角始终高于相同橡胶颗粒掺量的扁平橡胶砂。

### 3 数值模拟

室内直剪试验从宏观层面揭示了橡胶砂的剪切特性,且发现方形橡胶砂的抗剪强度高于扁平橡胶砂。为探究其原因,基于室内直剪试验,通过离散元(DEM)数值仿真模型,进一步探究橡胶砂剪切过程中的细观结构变化,揭示橡胶颗粒形状影响橡胶砂力学特性的细观机理。

#### 3.1 模型的建立

为真实模拟橡胶砂在DEM中的力学行为,采用与室内直剪试验相同的剪切盒尺寸、橡胶及砂颗粒级配建立数值模型,试样数值模拟模型如图8所示。为构建更为精确的数值模型,采用真实砂颗粒的三维扫描图像数据进行砂粒模拟,同时采用颗粒簇方法对橡胶颗粒进行模拟(见图9),以确保模型中橡胶、砂颗粒的尺寸和形状与室内直剪试验材料保持一致。

“砂-橡胶”和“橡胶-橡胶”接触采用线性接触模型<sup>[19]</sup>。由于剪切盒的边界墙体刚度远大于颗粒刚度,故将模拟剪切盒的圆形边界墙体视为刚性体并设置较大的有效模量。试样采用与室内直剪试验一致的分层制备方法,先对试样进行预压处理,待试样

预压达到稳定状态后,施加恒定竖向荷载,再调整墙体的剪切速率,以模拟室内直剪试验的剪切过程。橡胶砂的有效模量和摩擦系数是通过一系列实验室试验确定的,包括直接剪切试验、拉伸试验<sup>[20]</sup>和滑动试验<sup>[21]</sup>。橡胶砂的离散元微观参数见表2。

表2 橡胶砂的离散元微观参数  
Table 2 Micro-parameters of rubber-sand mixtures in DEM

Parameter	Value
Sand particle density/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 650
Rubber particle density/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 400
Effective modulus of sand/MPa	300
Effective modulus of rubber/MPa	1. 10
Effective modulus of sand-rubber/MPa	2. 19
Friction coefficient of sand	0. 55
Friction coefficient of rubber	0. 70
Friction coefficient of sand-rubber	0. 50
Initial porosity	0. 25

将橡胶砂和纯砂的剪切特性曲线数值模拟与试验结果进行对比,结果见图10。由图10可见,数值模拟所得到的剪切应力-剪切应变曲线的峰值剪切应力及其变化趋势与试验结果保持了较高的一致性,验证了模型的准确性。

3.2 不同橡胶颗粒形状橡胶砂的颗粒位移

由图4可知,橡胶砂的竖向位移变化与橡胶颗粒形状有关,本节将从颗粒位移场的变化对这种相关性进行解释。 $\sigma=50$  kPa下剪切结束时 $w_R=5\%$ 橡胶砂的位移场见图11。图中,负值表示剪缩,正值表示剪胀。由图11可见:竖向位移较大的颗粒主要集中在剪切盒上部,方形橡胶砂的向上位移较扁平橡胶砂突出;基于竖向位移变化,发现方形橡胶砂较扁平橡胶砂剪胀量更大,这与宏观发现的扁平橡胶砂在抑制剪胀性方面表现得更为突出一致。

3.3 不同橡胶颗粒形状橡胶砂的颗粒接触分析

橡胶颗粒与砂颗粒的接触类型有3种:砂粒与砂粒接触(“砂-砂”接触)、砂粒与橡胶颗粒接触(“砂-橡胶”接触)、橡胶颗粒与橡胶颗粒接触(“橡胶-橡胶”接触)。不同颗粒接触类型对试样宏观力学性能的影响各异, $w_R=5\%$ 的橡胶砂中不同颗粒接触类型占比见图12。由图12可知:随着橡胶颗粒的掺入,纯砂试样中的传力骨架由“砂-砂”接触逐渐转变为由“砂-砂”、“砂-橡胶”和“橡胶-橡胶”接触组成的混合传力骨架;随着剪切过程的进行,“砂-砂”接触的占比逐渐降低,而“砂-橡胶”接触占比增加,“橡胶-橡胶”接触占比比较小且保持相对稳定。这一现象也解释了传力骨架机理变化的原因。

橡胶砂中的力链网络可分为强力链网络与弱力链网络,强力链网络对试样的宏观力学特性产生显著影响。鉴于橡胶砂中强力链网络承担了大部分荷

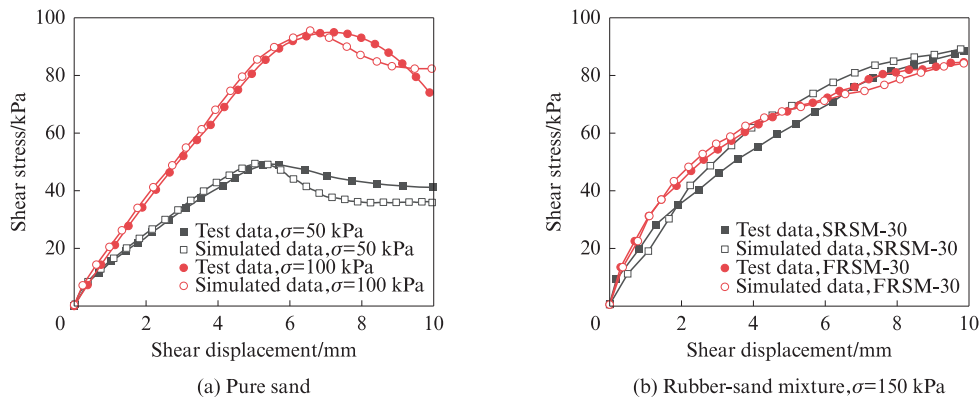


图10 纯砂和橡胶砂剪切特征曲线数值模拟与试验结果对比

Fig. 10 Comparison of numerical simulation and test results of pure sand and rubber-sand mixtures

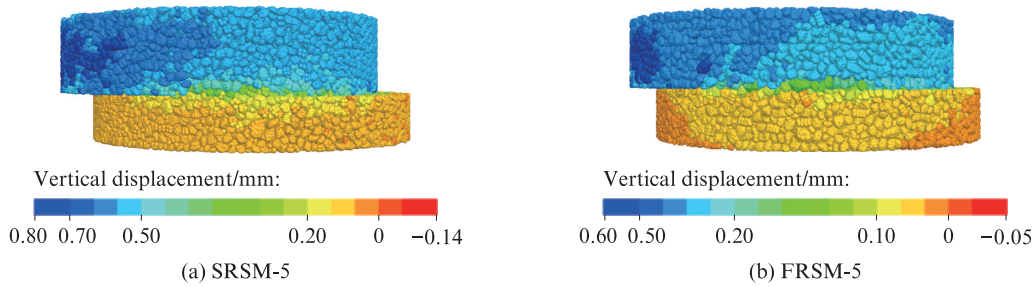


图 11  $\sigma=50$  kPa 下剪切结束时  $w_R=5\%$  橡胶砂的位移场

Fig. 11 Displacement field of rubber-sand mixtures with  $w_R=5\%$  after shearing under  $\sigma=50$  kPa

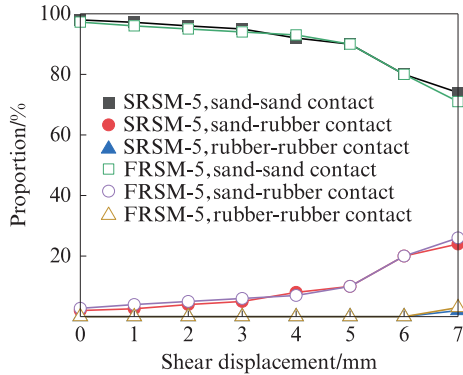


图 12  $w_R=5\%$  的橡胶砂中不同颗粒接触类型占比  
Fig. 12 Proportion of different particle contact types of rubber-sand mixtures with  $w_R=5\%$

载<sup>[22]</sup>,本文将强力链网络定义为接触力大于平均接触力的力链网络<sup>[23]</sup>,并重点分析橡胶砂中的强力链网络。图 13 为 50 kPa 竖向应力下不同橡胶含量橡胶砂剪切结束时的强力链网络占比。由图 13 可见,在强力链网络中,随着橡胶颗粒掺量的增加,方形橡胶砂中“砂-橡胶”力链占比始终低于扁平橡胶砂,而“砂-砂”力链占比相对较高,“橡胶-橡胶”力链占比与扁平橡胶砂相比无显著差异。由此可推断,“砂-砂”力链在承受主要外部应力方面发挥着主导作用。

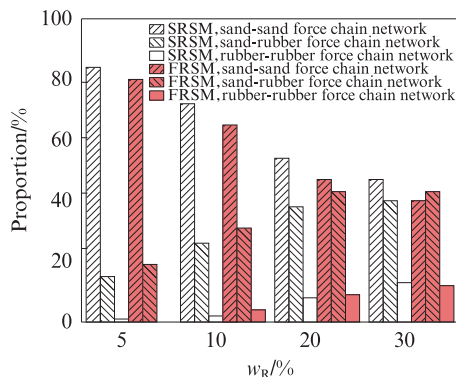


图 13 50 kPa 竖向应力下不同橡胶含量橡胶砂剪切结束时的强力链网络占比

Fig. 13 Proportion of strong force chain networks of rubber-sand mixtures with different rubber contents after shearing under  $\sigma=50$  kPa

该结果与田宇等<sup>[24-25]</sup>结果相似,可以对方形橡胶砂展现出较高宏观剪切强度的原因进行阐释。

### 3.4 不同形状橡胶颗粒在橡胶砂中受力机制

不同橡胶颗粒形状橡胶砂颗粒接触示意图见图 14。由图 14 可知,在单颗粒橡胶体积相同的条件下,扁平橡胶颗粒表面积(112 mm<sup>2</sup>)大于方形橡胶颗粒(96 mm<sup>2</sup>),导致扁平橡胶砂中砂粒与橡胶颗粒之间的接触数量相较于方形橡胶砂更多,而砂粒与砂粒间的接触数量则相对较少。上述分析与图 12 的结果相吻合。由此可见,方形橡胶砂相较于扁平橡胶砂,具有更高的抗剪强度,并与试验结果相符。

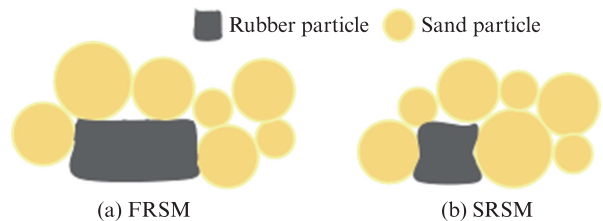


图 14 不同橡胶颗粒形状橡胶砂的颗粒接触示意图  
Fig. 14 Particle contact diagram of rubber-sand mixtures with different rubber particle shapes

## 4 结论

(1) 方形橡胶砂的内摩擦角和抗剪强度均高于扁平橡胶砂;扁平橡胶砂剪胀抑制效果更显著。纯砂呈应变软化特征,且其峰值剪切应力高于橡胶砂;橡胶砂表现为应变硬化特征。

(2) 与扁平橡胶砂相比,方形橡胶砂竖向位移场分布更广、剪胀效应更显著,其强力链网络中“砂-砂”接触占比更高,宏观上具有更高的剪切强度。

(3) 单颗粒橡胶体积相同的条件下,相较于扁平橡胶砂,方形橡胶砂具有更小的表面积,其“砂-砂”接触占比较高,进而增强了剪切强度。

### 参考文献:

[ 1 ] 张季,汪顺敏,庄海洋,等.聚丙烯纤维增强橡胶砂固结不排

- 水剪切试验[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(5):471-478.  
ZHANG Ji, WANG Shunmin, ZHUANG Haiyang, et al. Consolidated undrained shear test of polypropylene fiber reinforced rubber sand[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(5):471-478. (in Chinese)
- [ 2 ] 邓安, 冯金荣. 砂-轮胎橡胶颗粒轻质土工填料试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1):116-120.  
DENG An, FENG Jinrong. Experimental study on sand-shredded tire lightweight fills[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1):116-120. (in Chinese)
- [ 3 ] 周恩全, 张蒋浩, 崔磊, 等. 橡胶-粉土轻质混合土击实及动变形特性研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1242-1247.  
ZHOU Enquan, ZHANG Jianghao, CUI Lei, et al. Compaction and dynamic deformation characteristics of rubber-powdered lightweight hybrid soil[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1242-1247. (in Chinese)
- [ 4 ] 温学钧, 杨群. 粗废轮胎橡胶粒SMA混合料减振降噪路面研究[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(2):230-234.  
WEN Xuejun, YANG Qun. Research on vibration and noise reduction pavement with coarse waste tire rubber granule SMA mixture[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(2):230-234. (in Chinese)
- [ 5 ] SUN Q Q, HOU S L, CAO X L, et al. Direct shear tests on the effects of displacement rate and particle size ratio on the shear behavior of fine gravel-rubber mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2025, 476:141263.
- [ 6 ] SUN Q Q, XUE Y, HOU M H. Geotechnical seismic isolation system to protect cut-and-cover utility tunnels using tire-derived aggregates [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 176:108354.
- [ 7 ] WANG P, GAN J W, HUANG S, et al. Micro-mechanical analysis of sand-rubber mixtures with discrete element method [J]. Acta Geotechnica, 2025, 20(8):1-21.
- [ 8 ] YANG X, LEI H L, EVANS M T, et al. Effect of particle shape on stress-dilatancy responses of medium-dense sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(5):07020007.
- [ 9 ] JIANG H R, DEBANATH C O, CHEN F, et al. Analyzing the mechanical behavior of granular materials: A multi-morphological approach using spherical harmonics and LS-DEM[J]. Powder Technology, 2024, 445:120078.
- [ 10 ] MENG F, SU D, CHEN X S. Systematic investigation into the role of particle multi-level morphology in determining the shear behavior of granular materials via DEM simulation[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 170:106298.
- [ 11 ] ARI A, AKBULUT S. Effect of particle size and shape on shear strength of sand-rubber granule mixtures[J]. Granular Matter, 2022, 24(4):1381-1398.
- [ 12 ] ARI A, AKBULUT S. Investigation of micro-scale shear response of sand-rubber granule mixture in terms of particle shape and grain scale deformability effects[J]. Particuology, 2024, 90:452-469.
- [ 13 ] 庄海洋, 刘启菲, 吴琪, 等. 饱和橡胶颗粒-砂混合料的动力学特性[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3):597-605.  
ZHUANG Haiyang, LIU Qifei, WU Qi, et al. Kinetic properties of saturated rubber particle-sand mixtures[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3):597-605. (in Chinese)
- [ 14 ] ABDELRAZEK A, ELSHERBINY R M, LOTFI H A. Mechanical properties and time-dependent behaviour of sand-granulated rubber mixtures [J]. Geomechanics and Geoenvironment, 2018, 13(4):288-300.
- [ 15 ] SHARIATMADARI N, KARIMPOURFARD M, SHARGH A. An experimental investigation of liquefaction resistance of sand-ground rubber mixtures[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2018, 42(3):217-230.
- [ 16 ] EHSANI M, SHARIATMADARIA N, MIRHOSSEINI S M. Experimental study on behavior of soil-waste tire mixtures[J]. Scientia Iranica Transaction A, Civil Engineering, 2017, 24(1):65.
- [ 17 ] BANDYOPADHYAY S, SENGUPTA A, REDDY G R. Performance of sand and shredded rubber tire mixture as a natural base isolator for earthquake protection [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 14(4):683-693.
- [ 18 ] 刘小丽, 罗锦添, 闵弘, 等. 大型现场室内两用直剪仪研制(II): 试验测试[J]. 岩土力学, 2006(2):336-340.  
LIU Xiaoli, LUO Jintian, MIN Hong, et al. A new large direct shear apparatus for field and laboratory test ( II ):Proof-testing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006(2):336-340. (in Chinese)
- [ 19 ] PANG L, JIANG C, DING X, et al. A parameter calibration method in two-surface elastoplastic model for sand-structure interface under monotonic shear loading [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 134:104115.
- [ 20 ] FU R, YANG B, HU X L, et al. A micromechanical investigation of sand-rubber mixtures using the discrete element method[J]. Engineering Geology, 2023, 318:107106.
- [ 21 ] ZHANG J Q, WANG X, YIN Z Y, et al. DEM modeling of large-scale triaxial test of rock clasts considering realistic particle shapes and flexible membrane boundary [J]. Engineering Geology, 2020, 279:105871.
- [ 22 ] CHENG Z, WANG J F, ZHOU B, et al. The micro-mechanical behaviour of sand-rubber mixtures under shear: A numerical study based on X-ray micro-tomography [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 163:105714.
- [ 23 ] CHEW K, CHIARO G, VINOD J S, et al. Direct shear behavior of gravel-rubber mixtures: Discrete element modeling and microscopic investigations[J]. Soils Found, 2022, 62:101156.
- [ 24 ] TIAN Y, HE H, SENETAKIS K, et al. DEM analysis of the load transfer mechanism of sand-rubber mixtures subjected to constrained compression[J]. Powder Technology, 2024, 446:120133.
- [ 25 ] HU Z, SHI Y H, GUO N, et al. Micromechanical investigation of the shear behaviors of sand-rubber mixtures using a multibody meshfree method[J]. Granular Matter, 2022, 24(3):1019-1034.