

冯恣, 诸兆益, 钱振豪. 橡胶颗粒掺量对橡胶黏土剪切特性的影响[J]. 华南地震, 2023, 43(1): 29-36. [FENG Wen, ZHU Zhaoyi, QIAN Zhenhao. Influence of Rubber Particle Content on Shear Properties of Rubber-clay Mixtures [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(1): 29-36]

橡胶颗粒掺量对橡胶黏土剪切特性的影响

冯 恣¹, 诸兆益¹, 钱振豪²

(1. 上海浦东建筑设计研究院有限公司, 上海 201206; 2. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444)

摘要: 废旧轮胎制成的橡胶颗粒与黏土混合形成的混合土能利用于路基、填土等工程领域, 能够改善黏土的力学性能。通过气动直剪仪对不同橡胶掺量(0、5%、10%和20%)下混合土的剪切特性进行一系列的研究, 同时考虑不同剪切速率(0.5、1.0、2.0 mm/min)和竖向应力(30、60、90 kPa)的影响, 探讨混合土的强度变化规律。试验结果表明: 混合土的抗剪强度随着橡胶掺量的增加先增大后减少, 在橡胶掺量为5%时取最大值; 混合土的抗剪强度随着剪切速率的增大而减小, 剪切速率对混合土抗剪强度的影响随着竖向应力的增加而减小; 在竖向应力为30 kPa作用下, 混合土呈先剪缩后剪胀的特性, 其余条件下混合土均呈剪缩特性; 加入橡胶颗粒会降低混合土的黏聚力, 橡胶掺量越大, 黏聚力下降越大, 黏土中掺入橡胶颗粒会增加混合土的界面摩擦角, 5%掺量下提高最明显。

关键词: 混合土; 橡胶颗粒掺量; 剪切速率; 剪切特性

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)01-0029-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.01.04

Influence of Rubber Particle Content on Shear Properties of Rubber-clay Mixtures

FENG Wen¹, ZHU Zhaoyi¹, QIAN Zhenhao²

(1. Shanghai Pudong Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201206, China;

2. College of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The rubber particles made from waste tires and clay form a mixture that can be utilized in roadbed, filling and other engineering fields, which can improve the mechanical properties of the clay mixture. A series of studies on the shear properties of the soil mixture with different rubber content (0, 5%, 10% and 20%) were conducted by pneumatic direct shear apparatus, and the influence of different shear rates (0.5, 1.0, 2.0 mm/min) and vertical stresses (30, 60, 90 kPa) were also considered to explore the strength change law of the soil mixture. The test results show that the shear strength of the soil mixture increases first and then decreases with the increase of the rubber content, and the maximum value is reached at 5% of the rubber content. The shear strength of the soil mixture decreases with the increase of the shear rate, and the influence of the shear rate on the shear strength of the soil mixture decreases with the increase of the vertical stress. Under the vertical stress of 30 kPa, the soil

收稿日期: 2022-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678352)

作者简介: 冯恣(1985-), 女, 高级工程师, 主要从事道路与交通工程专业工作。

E-mail: 272418264@qq.com

mixture shows the characteristic of shear contraction and then shear dilation, and under the other conditions, the soil mixture shows the characteristic of shear contraction. The addition of rubber particles will reduce the cohesion of the soil mixture. The greater the rubber content, the greater the decrease of cohesion. The mixture of rubber particles in clay will increase the interfacial friction angle, and the increase is most obvious at 5%.

Keywords: Mixed soil; Rubber particle content; Shear rate; Shear properties

0 引言

近年来,世界范围内工业、农业、采矿等经济活动的增长导致了自然资源的消耗和大量固体废料的生产。每年有近10亿条轮胎达到使用寿命,超过50%的轮胎未经过任何处理而被丢弃^[1],废旧轮胎是橡胶废料主要来源之一。处理废旧橡胶对节约资源以及可持续发展有着重大意义。用废旧轮胎加工处理后得到的橡胶颗粒已经有着广泛的应用前景^[2-3],国内外对橡胶颗粒和不同材料混合后的影响已有许多研究。

在混凝土与橡胶颗粒的研究中,李阳等^[4]进行了橡胶颗粒代替混凝土部分骨料的试验,发现了荷载施加到橡胶骨料中时会在周围形成应力集中,能够减少裂缝的形成和提高混凝土的耐久性;刘路路等^[5]研究了砂与土混合后的力学性能,发现砂—橡胶混合后可获得更好的弹性变形、更高的抗剪强度、增加透气性和更好的动力特性;Prabhakara等^[6]研究了橡胶颗粒与粉煤灰混合而成的新型复合材料作为填充材料,得到橡胶颗粒含量约为60%混合材料总重时,复合材料有最大剪切强度;杨忠年等^[7]、Signes等^[8]研究了在膨胀土中加入橡胶颗粒,在橡胶掺量为15%到20%时可以有效改善膨胀土的收缩和固结特性,在3%橡胶掺量下可以提高混合土的强度;Centin^[9]、侯恒军等^[10]研究了黏土与橡胶混合体的力学性能,发现加入橡胶颗粒可以提高黏土的抗剪强度和渗透性能。

Akbarimehr^[11]向黏土中加入三种不同形式的橡胶,发现增大橡胶粒径可以提高混合料的强度和剪切应变,在不同的侧限应力作用下,含橡胶粉的混合料的强度提高了10%~25%;魏子扬等^[12]研究了不同胶粉掺量和不同含水量对混合土的击实特性、抗剪强度特性的影响,认为橡胶粉掺量不超过15%时,随着胶粉掺量增大,混合土的抗剪强度增大,内摩擦角增大,且出现应变硬化现象;Tabrizi^[13]研究了橡胶颗粒作为添加剂对黏土剪切特

性的影响,得到随着橡胶颗粒掺量的增加,内摩擦角先增大后略有减小,但黏聚力不断减小;李珊珊等^[14]对废旧轮胎橡胶颗粒与黏土混合土的剪切特性进行了研究,黏土的剪切强度随竖向压力、橡胶颗粒掺量增加而增大,但随剪切速率增大而减小。

综上所述,国内外专家学者在橡胶与砂土、黏土、膨胀土、混凝土等混合后的力学特性有着卓越的研究,但目前不同竖向应力下,剪切速率对于橡胶黏土混合土的抗剪强度变化研究较少,与不同橡胶掺量的混合土抗剪特定研究不足。因此本文利用气动直剪仪,对橡胶颗粒和黏土混合体进行直剪试验,探究不同橡胶掺量对土体的抗剪强度、剪切特性曲线、剪缩剪胀等性质的影响。

1 试验材料及试验方案

1.1 试验材料

试验黏土取样自为广州沿海地区花岗岩风化残积土。试样土样参数指标如表1所示。

表1 土样物理指标
Table 1 Physical index of soil sample

土样	干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比重	塑限/(%)	液限/(%)
残积土	1.48	2.75	24.91	46.80

试验中橡胶材料为废旧轮胎经过不同程度的粉碎切削后得粉末状颗粒,颗粒粒径为0.5~2 mm,相对密度为1.0,橡胶颗粒级配曲线如下图1所示。其中橡胶掺量为橡胶颗粒占混合土总体积的百分比。

1.2 试样制备

将试验土样烘干挑出大石块、树根后,摊铺在铁盆中放入烘干机24 h取出。经碾碎压实后过

孔径为 2 mm 的筛, 除去杂质; 试样制备前计算不同掺量占比的土样和橡胶质量, 称取过筛土, 按照土样的最佳含水率配比黏土-橡胶颗粒混合土土样, 用喷壶分层洒水, 搅拌过程中避免出现大颗粒结团, 搅拌完成后用保鲜膜包裹静置 24 h。将调配完成的混合土样按照计算得到的重量放入压样器中, 分层压实后压制成试样。

1.3 试验设备与方法

试验设备采用气动直剪仪, 如图 2 所示。试样尺寸直径×高=200×50 mm。试样在施加的竖向压力下固结至稳定, 保持竖向压力不变进行直剪试验。竖向压力分别为 30、60、90 kPa, 剪切速率分别为 0.5 mm/min、1.0 mm/min、2.0 mm/min, 橡胶颗粒掺量为 0、5 %、10 %、20 %。表 2 为具体试验方案。

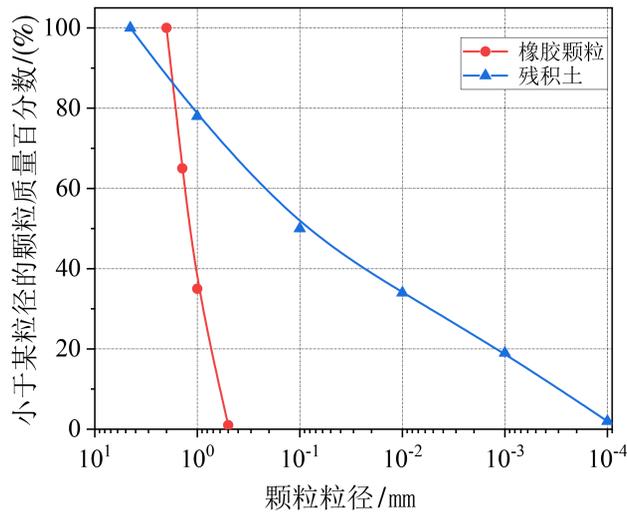


图 1 橡胶颗粒级配曲线

Fig.1 Grading curve of rubber particles

表 2 试验方案
Table 2 Test plan

类型	橡胶掺量/(%)	剪切速率/ (mm·min ⁻¹)	竖向应力/ kPa
界面	0、5、10、20	0.5、1.0、2.0	30/60/90

2 试验结果与讨论

2.1 橡胶掺量对混合土抗剪强度的影响

图 3 为不同竖向应力(30、60、90 kPa)下混合土的剪应力-剪切位移关系曲线。可以看到不同橡胶掺量下的混合土均呈剪切硬化趋势, 未出现应力峰值。根据国家标准^[21]选取图中剪切位移为 4 mm 时的剪应力作为抗剪强度。与不掺入橡胶颗粒的原土体相比较, 加入少量橡胶颗粒有利于提高混合土的抗剪强度, 橡胶颗粒掺量为 5% 时, 在 30、60、90 kPa 的竖向压力下, 混合土抗剪强度分别提高了 10.2%、6.4%、5.9%。之后随着橡胶颗粒掺量的增

加, 混合土的剪应力不断下降。对于橡胶颗粒掺量对黏土抗剪强度的影响, Soltani^[15]认为主要表现在两个方面, 一是土与橡胶接触产生的摩擦阻力, 二是橡胶与土颗粒之间的机械连锁。橡胶颗粒的压缩性大, 相对密度小于土颗粒, 小粒径的橡胶粉能够填充土体之间的空隙, 增大橡胶与土之间的接触面, 从而提高了摩擦阻力。

2.2 橡胶掺量对混合土竖向位移的影响

图 4 反应了混合土在不同竖向应力下竖向位移-剪切位移的关系。规定剪胀为正。在 30 kPa 作用下, 所有混合土均呈现出先剪缩后剪胀的特性, 其中 20% 的橡胶掺量的混合土转折前后变化幅度最大。当应力增加到 60、90 kPa 时, 土样均表现为剪缩特性, 混合土剪缩效应明显, 剪缩幅度随橡胶掺量增加而增大。土样在高竖向应力下, 混合土竖向位移变化曲线接近(图 4(c))。该变化主要是由于橡胶压缩性大, 土体在剪切过程中, 颗粒之间发生相对滑动, 橡胶颗粒填充土体之间的空隙, 导致土体体积减小, 竖向应力越大, 其剪缩效应约明显。



图2 气动直剪仪

Fig.2 Pneumatic direct shear apparatus

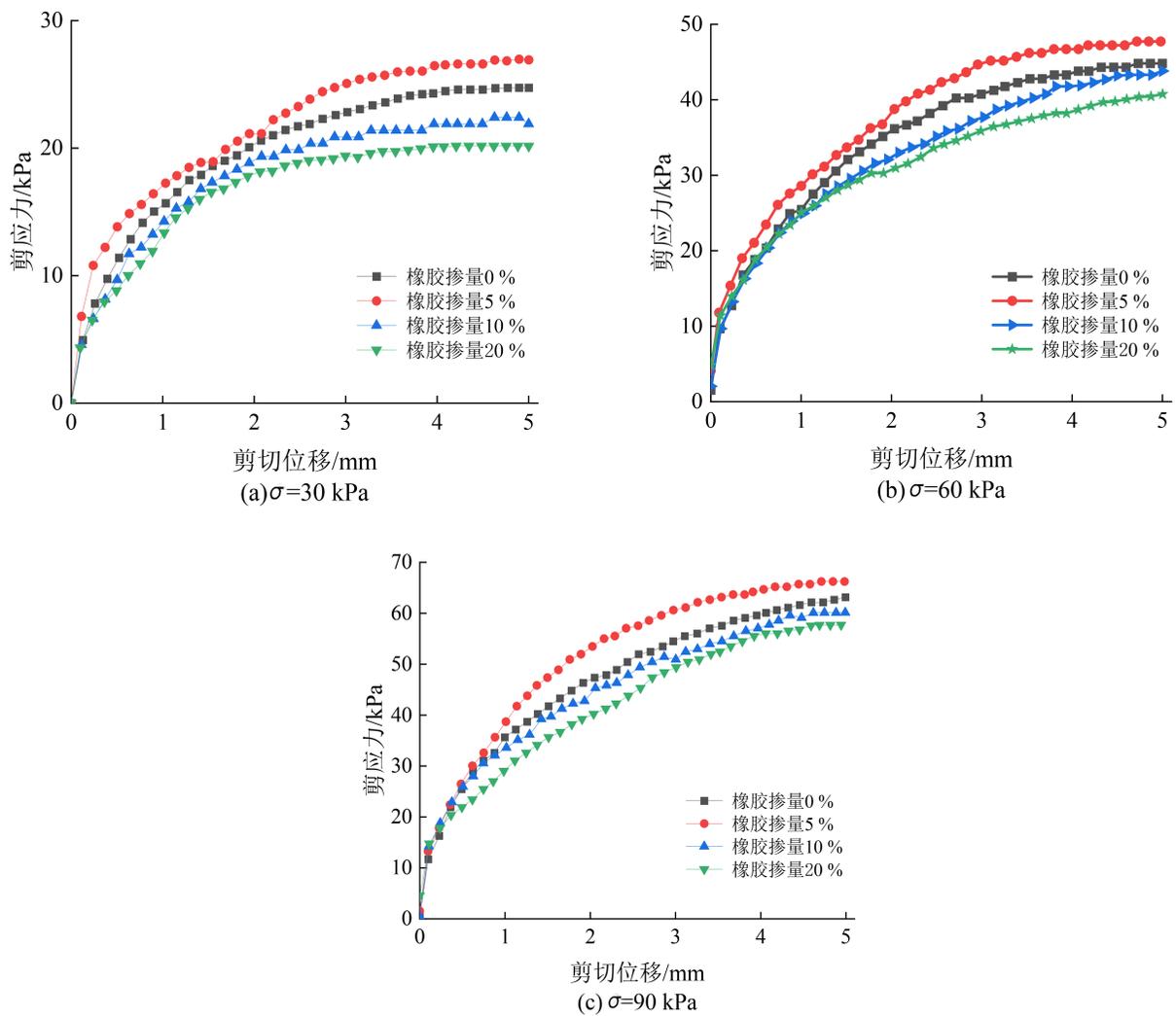


图3 $\sigma=60$ kPa 下, 混凝土与橡胶掺入比的关系

Fig.3 The relationship between the soil mixture and rubber incorporation ratio under $\sigma=60$ kPa

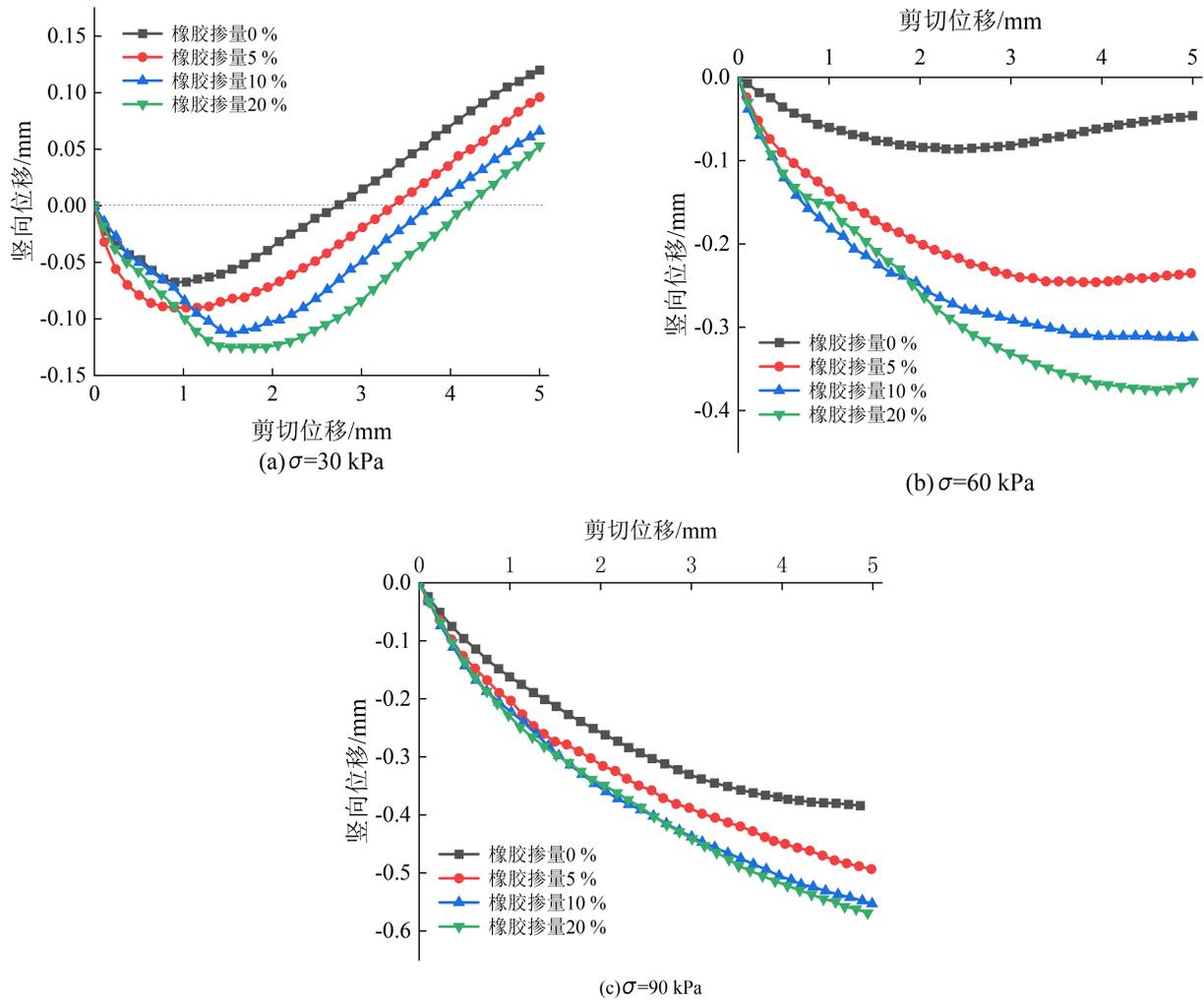


图4 竖向应力对于混合土竖向位移影响曲线

Fig.4 Influence curve of vertical stress on vertical displacement of soil mixture

2.3 混合土抗剪强度指标分析

通过2.1中土体抗剪强度的取值,将不同剪切速率、竖向应力、橡胶掺量下的土体抗剪强度进行

线性拟合后得到图5。为分析不同橡胶掺量下黏聚力和界面摩擦角的变化规律,将图5中的斜率和截距进行转化得到混合土的抗剪强度指标,汇总于下表3。

表3 抗剪强度指标

Table 3 Shear strength index

橡胶掺量/(%)	剪切速率/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
0	0.5	11.96	28.65
	1.0	8.38	29.87
	2.0	5.75	30.38
5	0.5	12.39	30.27
	1.0	7.73	32.21
	2.0	7.11	31.38
10	0.5	7.86	31.34
	1.0	5.43	30.33
	2.0	3.52	31.23
20	0.5	4.40	30.32
	1.0	2.20	30.90
	2.0	0.11	31.56

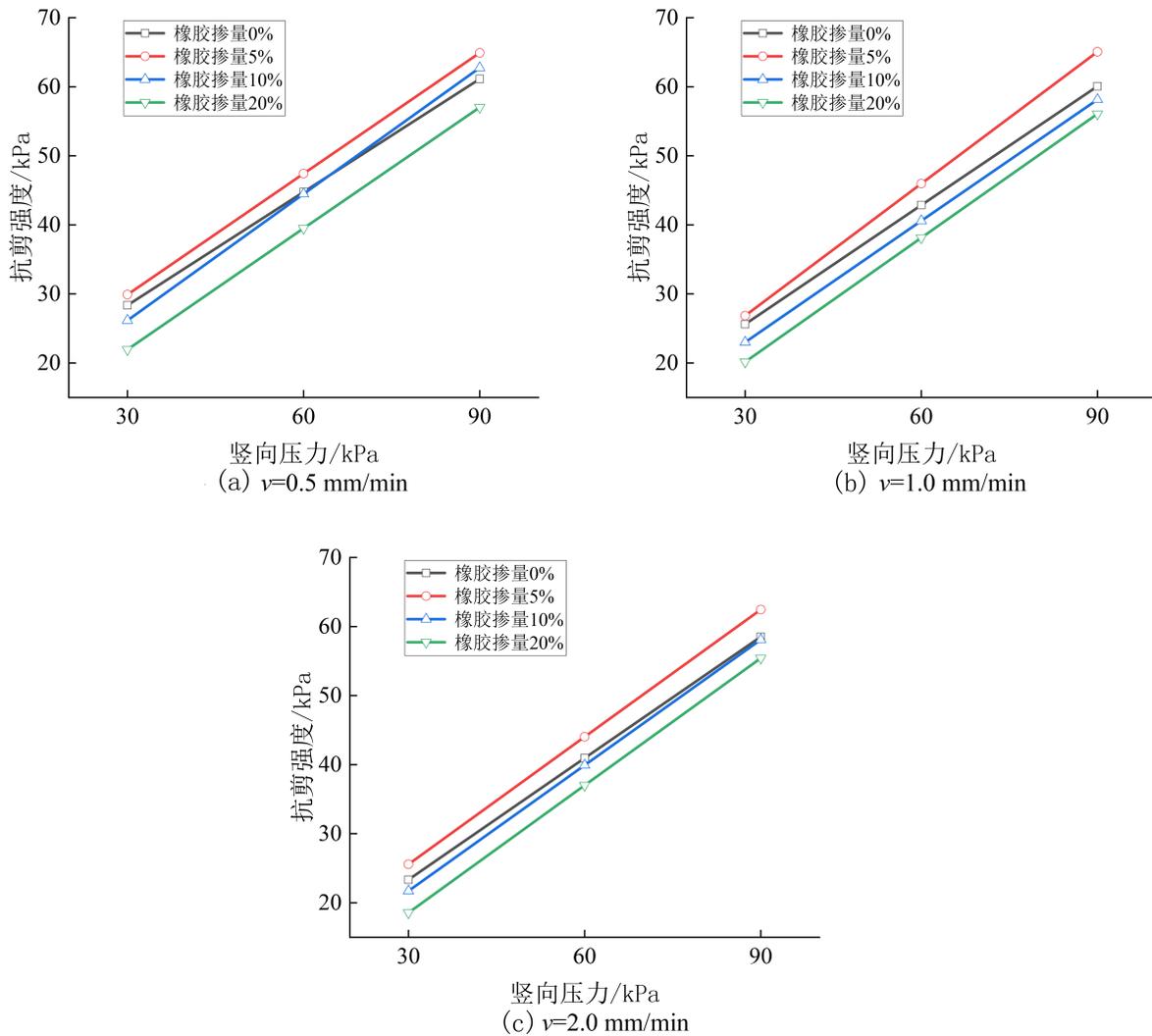


图5 不同橡胶掺量下的抗剪强度包线

Fig.5 Shear strength envelopes with different rubber content

图6为表3中 $\sigma=60$ kPa, $v=1.0$ mm/min的工况下所作黏聚力、界面摩擦角与橡胶掺量的折线图。可知混合土黏聚力随着橡胶颗粒掺量先增大后减小,在较高橡胶掺量下下降较大,10%、20%掺量的混合土下比原土样分别下降35%、73%。橡胶颗粒没有黏聚力,其压缩性较大,有憎水效应,加入橡胶颗粒,减少了土体之间的直接接触,橡胶表面不包裹水分,混合土胶结作用减弱,导致混合土颗粒出现结团现象,使其黏聚力下降;界面摩擦角在黏土掺入橡胶颗粒后有所增大,在橡胶掺量为5%为最大值,随着掺量增加之后,界面摩擦角有小幅下降,其因由橡胶掺量的增大,增加了橡胶颗粒与土体的接触面积,导致土体界面摩擦角增大。当橡胶掺量过大时,土体与橡胶颗粒的接触一部分转变为橡胶与橡胶的接触,与土

体的咬合作用降低,导致后续界面摩擦角下降。

2.4 剪切速率对混合土抗剪强度的影响

图7所示为抗剪强度与剪切速率、橡胶掺量以及竖向应力的关系,其中图6(a)竖向应力 $\sigma=60$ kPa,图6(b)橡胶掺量为5%。竖向压力为 $\sigma=60$ kPa时,剪应力与随着剪切速率的增大而下降。当剪切速率为0.5 mm/min和1.0 mm/min时,混合土的剪应力变化幅度不大,当速率达到2.0 mm/min时,混合土剪应力下降了11%~14%。同时,当剪切速率从0.5 mm/min增加到2.0 mm/min,不同竖向应力下,混合土抗剪强度分别下降了15%、13%、7%。可见剪切速率对土体抗剪强度的影响随着竖向应力的增加而减小。在低剪切速率条件下,试样颗粒之间相互错动较缓慢,土样变形整

体性较好,颗粒间传力完整,当剪切速率增大时,力链未发育完整,从而导致试样抗剪强度降低。试验时间短,在剪切面上的孔隙较多,颗粒间的

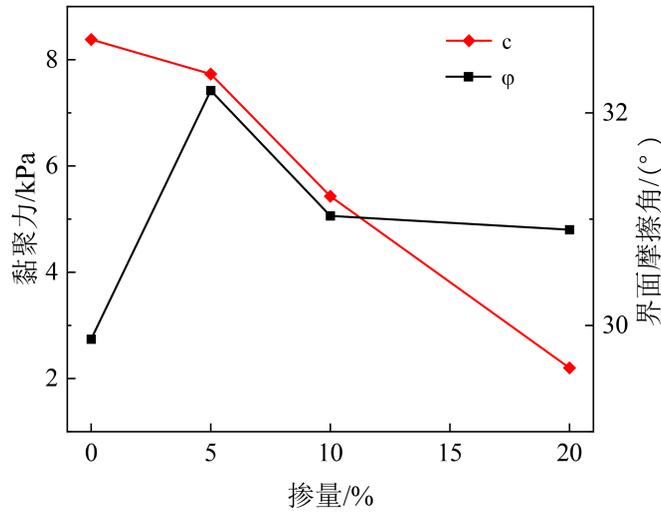
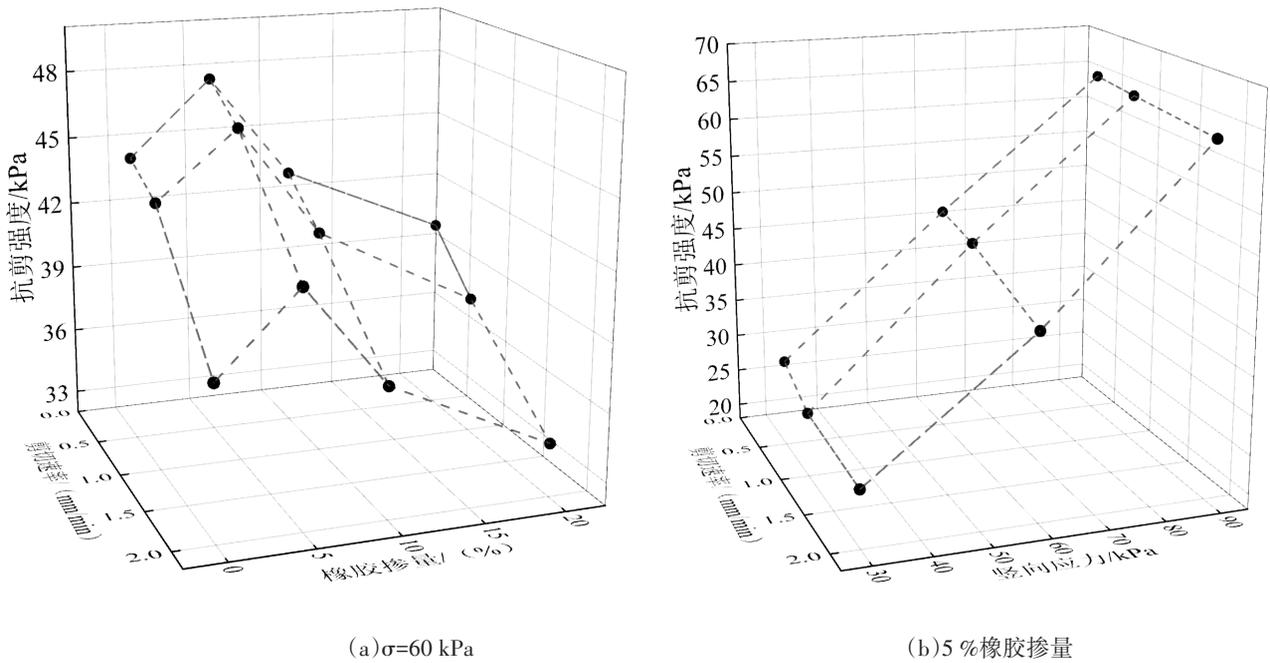


图6 黏聚力、界面摩擦角与橡胶掺量曲线图

Fig.6 Curves of cohesion and interfacial friction angle changing with rubber content



(a) $\sigma=60$ kPa

(b) 5%橡胶掺量

图7 抗剪强度与剪切速率、橡胶掺量和竖向应力的关系

Fig.7 The relationship of shear strength and shear rate with rubber content and vertical stress respectively

3 结论

(1)黏土中掺入5%橡胶颗粒可以有效提高土体的抗剪强度,橡胶掺入比在20%以下,混合土的抗剪强度随着橡胶掺入比的增加先增大后减小。

(2)混合土的抗剪强度随着剪切速率的增大而减小。竖向应力越大,剪切速率对混合土抗剪强度的影响越小。

(3)混合土在30 kPa竖向应力的作用下,呈现出先剪缩后剪胀的特点,在其余条件下,土样表现为剪缩特性。

(4)黏土中加入橡胶颗粒会降低土体的黏聚力,橡胶掺量越大,黏聚力下降幅度越大,界面摩擦角在黏土掺入橡胶颗粒后有所增大。

参考文献

- [1] Thomas B S, Gupta R C. Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015(102):78-87.
- [2] Morales E, Filiatrault A, Aref A. Seismic floor isolation using recycled tires for essential buildings in developing countries [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018, 16 (12) : 6299-6333.
- [3] Tafreshi S, Mehrjardi G T, Dawson A R. Buried pipes in rubber-soil backfilled trenches under cyclic loading[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(11): 1346-1356.
- [4] Li Y, Zhang X, Wang R J, et al. Performance enhancement of rubberised concrete via surface modification of rubber: a review[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227: 116691. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116691
- [5] Liu L L, Cai G Q, Zhang J, et al. Evaluation of engineering properties and environmental effect of recycled waste tire-sand/soil in geotechnical engineering: a compressive review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020(12): 109831
- [6] Prabhakara B K K, Balunaini U, Guda P V. Optimum mixing ratio and shear strength of granulated rubber-fly ash mixtures [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(7) : 07020005.
- [7] Yang Z N, Qi Z, Wei S, et al. Advances in properties of rubber reinforced soil[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020(10):1-16. DOI: 10.1155/2020/6629757
- [8] Signes C H, Garzón-Roca J, Fernández P M, et al. Swelling potential reduction of Spanish argillaceous marlstone Facies Tap soil through the addition of crumb rubber particles from scrap tyres[J]. *Applied Clay Science*, 2016(132/133): 768-773.
- [9] Cetin H, Fener M, Gunaydin O. Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material[J]. *Engineering Geology*, 2006, 88(1): 110-120.
- [10] 侯恒军, 薛凯喜, 胡艳香, 等. 橡胶粉改良非饱和黏土体直剪试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(03):293-297.
- [11] Akbarimehr A, Eslami A, Aflaki E. Geotechnical behaviour of clay soil mixed with rubber waste[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 271(1):122362. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122632
- [12] 魏子扬, 黄质宏, 穆锐, 等. 利用废旧胶粉改善红黏土工程性质试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(08):95-100+112.
- [13] Tabrizi M K, Abrishami S, Hosseininia E S, et al. Experimental investigation on the behavior of fine-grained soils containing waste rubber tires under repeated and static loading using direct shear apparatus[J]. *Construction and Building Materials*, 2019(223): 106-119.
- [14] 李珊珊, 李大勇. 橡胶颗粒-黏土的剪切及固结试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(01): 95-102.
- [15] Soltani A, Deng A, Taheri A, et al. Interfacial shear strength of rubber-reinforced clays: a dimensional analysis perspective[J]. *Geosynthetics International*, 2018, 26(2): 1-50.
- [16] 何俊, 李勇, 阮晓晨. 废旧轮胎胶粉-黏土混合土的强度性质[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S2): 4366-4372.
- [17] 刘飞禹, 朱晨, 王军. 剪切速率和法向加载频率对筋土界面剪切特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(05): 832-840.
- [18] Madhusudhan B R, Boominathan A, Banerjee S. Static and large-strain dynamic properties of sand-rubber tire shred mixtures[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(10): 04017165. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000-2016
- [19] 熊甜甜, 廖红建, 杨博, 等. 加筋土筋土界面抗剪强度影响因素试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2018, 14(03):629-634.
- [20] 卢震, 陈开圣. 橡胶黏土混合土动剪切模量及阻尼比试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(02):250-257.
- [21] 中华人民共和国建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.