

橡胶颗粒掺量对砂土抗剪强度的影响

董超^{1,2}, 李大勇^{1,2}, 张磊², 李珊珊²

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 将废旧轮胎加工为橡胶颗粒, 并与砂土混合成为混合土, 使之更适合作为路堤、挡墙、桥台等填筑工程的填料。通过直剪试验研究了不同废旧轮胎橡胶颗粒掺量(如10%、20%、30%、40%及50%)对细海砂以及中粗砂抗剪强度的影响, 探讨了剪切位移与剪应力的关系, 分析并比较细砂、中粗砂改良后的抗剪强度变化特征。试验结果表明: 当橡胶颗粒掺量小于20%时, 细海砂-橡胶颗粒混合土和中粗砂-橡胶颗粒混合土的抗剪强度随废旧轮胎橡胶颗粒掺量增加而增大; 反之, 细海砂-橡胶颗粒混合土和中粗砂-橡胶颗粒混合土的抗剪强度随着废旧轮胎橡胶颗粒掺量的增加而减小。

关键词: 直剪试验; 废旧轮胎橡胶颗粒; 中粗砂; 细砂; 抗剪强度

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)06-0056-06

Effects of Small-sized Scrap Tire Crumb Contents on Shear Strength of Sand

DONG Chao^{1,2}, LI Dayong^{1,2}, ZHANG Lei², LI Shanshan²

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Rubber crumbs made from scrap tires were mixed with sand evenly to form the scrap tire crumb-sand mixture, which was more suitable to be used as fill for embankments, retaining walls and bridge abutment. Direct shear tests were conducted to study the effects of different scrap tire crumb contents (10%, 20%, 30%, 40% and 50%) on the shear strength of fine sand and medium-coarse sand. The relationship between shear displacement and the corresponding shear stress was explored and the shear strength changes of the improved fine sand and medium-coarse sand were analyzed. Test results show that the shear strength of both the fine sand-scrap tire crumb mixture and medium-coarse sand-scrap tire crumb mixture increases with the increase of scrap tire crumb content when the content is less than 20%, while the shear strength of both mixtures decreases with the increase of the scrap tire crumb content when the content is more than 20%.

Key words: direct shear test; scrap tire crumbs; medium-coarse sand; fine sand; shear strength

橡胶颗粒(直径小于12 mm)、条状(尺寸介于12~50 mm)或碎片(尺寸大于50 mm)-砂混合土是一种新型土工材料, 具有重量轻、强度高、变形协调性好、减少地震液化等优点^[1], 因此可广泛用于路堤、码头、储油库等填筑工程^[2]。也可以采用废旧轮胎橡胶碎片(50~100 mm)与碎石土混合作为垃圾填埋场滤液的排水填料使用^[3]。

收稿日期: 2015-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379118); 山东科技大学创新团队资助项目(2012KYTD104)

作者简介: 董超(1989—), 男, 山东肥城人, 硕士研究生, 主要从事海洋土力学研究。

李大勇(1971—), 男, 山东泰安人, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋土力学研究, 本文通信作者。

E-mail: ldy@sdust.edu.cn

国外学者进行了废旧轮胎橡胶颗粒-砂土混合土的动力特性试验以及数值模拟与计算、本构关系分析等方面的研究^[4-6]; Tatlisoz^[7]、Lee 等^[8]对废旧轮胎碎片-砂土混合材料的工程性能进行了试验研究,结果表明轮胎碎片砂土的剪应力峰值明显提高; 皱维列等^[9]对废旧橡胶颗粒膨胀土进行室内试验,研究了改性膨胀土的物理特性、胀缩特性、强度特性; 李朝晖等^[10]对废旧轮胎橡胶颗粒与黄土混合物的岩土工程特性进行了研究,重点分析了废旧轮胎橡胶颗粒掺量对黄土力学性能的影响; 辛凌等^[11]通过三轴试验研究了不同掺量条件下废旧轮胎颗粒对轻质混合土体抗剪强度指标的影响规律; 邓安等^[12]分别采用直剪与三轴压缩试验分析了砂土类填料中掺入废旧轮胎颗粒后的力学性质,探讨了橡胶颗粒掺量及围压对混合土剪切特性的影响。

将废旧轮胎加工成碎片状、颗粒状或粉状掺入砂土、膨胀土及黄土中,可改良土工材料的工程性质,但以往研究考察的废旧轮胎橡胶团粒或碎块粒径较粗,混合料中土料是砂土或卵石等粗颗粒,而由粒径较小的橡胶颗粒组成的混合土的剪切特性也值得深入研究,特别是在海洋工程中,由粒径较小的橡胶颗粒和细海砂、中粗砂组成的混合土的剪切特性具有深层的研究意义。因此,通过大量直剪试验,研究不同配合比及不同竖向压力条件下细海砂、中粗砂与废旧轮胎橡胶颗粒混合土的剪切特性。

1 试验器材

1.1 试验仪器

试验采用 ShearTrac-II 型直剪仪固结剪切试验,该直剪仪能保证试样剪切过程中预设的固结压力在剪切过程中始终保持不变,与传统直剪仪相比具有操作简便、稳定、可靠等优势。

1.2 试验材料

试验所用土样取自青岛地区的细海砂及中粗砂,其基本物理力学参量如表 1 所示。细海砂、中粗砂颗粒级配曲线见图 1。所用橡胶颗粒为废旧橡胶轮胎切割成形,颗粒粒径介于 0.5~1.0 mm。

表 1 试验用砂相关物理参数

Tab. 1 Physical parameters of sand

试验用砂	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	有效粒径 D_{10}/mm	中位径 D_{50}/mm
细海砂	2.57	1.140	0.09	0.25
中粗砂	1.78	0.997	0.16	0.40

2 试验过程

2.1 试样制备

将试验用砂放入烘箱内进行烘干处理,并将干砂过 2 mm 孔径筛,根据试验要求将不同掺量(10%、20%、30%、40%和 50%)的废旧轮胎橡胶颗粒与砂混合,充分搅拌使其掺合均匀。其中,掺量为废旧轮胎橡胶颗粒占混合土干土质量的百分比,忽略轮胎颗粒自身的含水率,掺和比为

$$\chi = \frac{m_t}{m} \quad (1)$$

式中: m_t —橡胶颗粒质量; m —干砂及橡胶颗粒总质量。

2.2 试验步骤

针对不同掺量条件下废旧轮胎橡胶颗粒对细海砂及中粗砂抗剪强度影响的研究,进行了 108 组试验。如图 2 所示,试验步骤如下:

1) 剪切盒内依次放入透水石和干滤纸,将掺合物倒入剪切盒内,至装样预定高度(27.7 mm),依次放入干滤纸、透水石和加压上盖,将剪切盒放置到直剪仪上。

2) 装样结束后,根据试验需要施加竖向固结压力(50、100、200 kPa),通过数据采集系统读取数据,在固

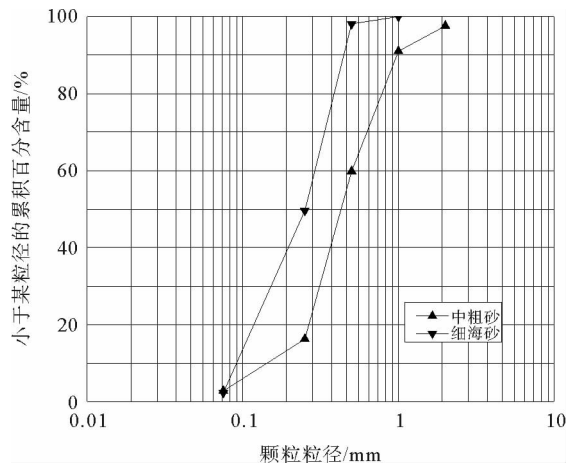


图 1 砂土颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curves of fine and medium-coarse sands

结过程中当竖向位移低于 0.005 mm/h 时,拔去剪切盒上面的固定销,通过电脑控制剪切仪进行剪切试验(设定剪切速度为 0.8 mm/min)^[13]。

3) 当剪切位移达到 10 mm 处停止试验,每种掺量条件下的试样至少进行 3 组试验进行对比分析,试验结果的误差需小于 3%,否则重新补做一组,并取平均值作为试验结果。

3 试验结果分析与讨论

3.1 剪切位移与抗剪强度的关系

图 3 为橡胶颗粒掺量分别为 10%、20%、30%、40% 和 50% 细海砂混合土和中粗砂混合土的剪应力与剪切位移关系曲线。由图 3 可知,在研究的竖向压力范围内,对于细海砂,当掺量小于等于 20% 时,在较高竖向压力条件下(200 kPa),细海砂混合土的剪应力随着剪切位移的增加而增大,且当剪切位移达到 6.5 mm 后出现软化现象;当掺量大于 20% 时,在研究的竖向压力范围内,细海砂混合土均呈现硬化现象。对于中粗砂,随着橡胶颗粒掺量的增加均呈现硬化现象。



(a) 固结过程 (b) 剪切过程

图 2 试验加载过程

Fig. 2 Loading process

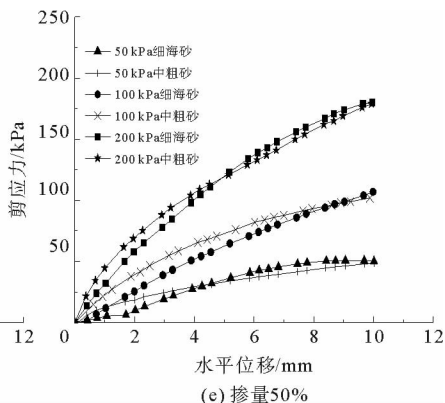
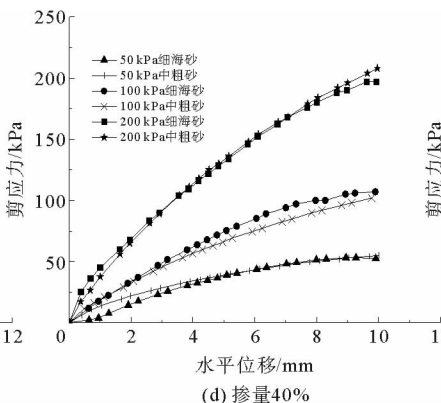
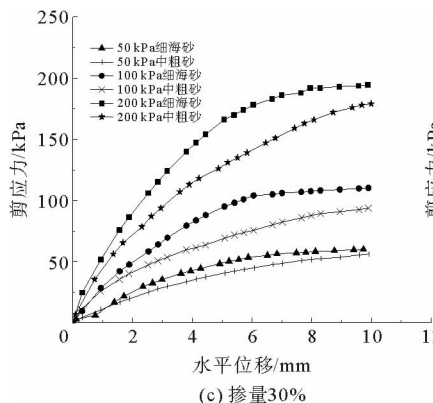
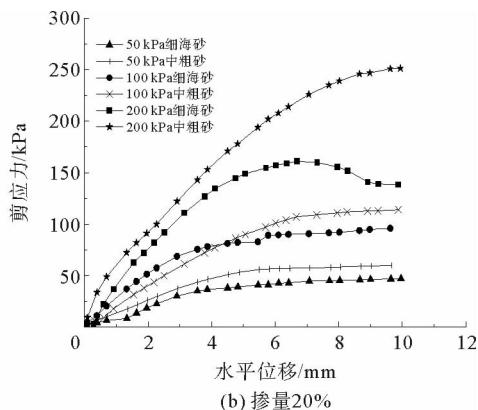
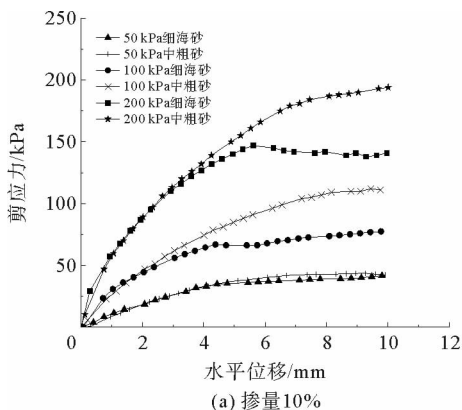


图 3 不同掺量细砂及中粗砂的剪切位移剪应力关系曲线

Fig. 3 Shear stress versus horizontal displacement response for sand with various scrap tire crumb contents

3.2 剪切位移与竖向位移关系

图 4 为橡胶颗粒掺量依次为 10%、20%、30%、40% 和 50%,分别在 50、100、200 kPa 竖向压力作用下,细海砂混合土和中粗砂混合土的剪切位移与竖向位移关系曲线。由图可知,随着竖向压力的增大,细海砂混

合土与中粗砂混合土的竖向位移均相应增加;在相同竖向压力和橡胶颗粒掺量条件下,中粗砂混合土的竖向位移大于细海砂混合土。对于细海砂,在 50 kPa 竖向压力条件下,随着橡胶颗粒掺量的增加,水平位移达到 4 mm 以后,均出现剪缩减弱的趋势,当橡胶颗粒掺量为 20% 时,甚至出现了先剪缩后剪胀现象。对于中粗砂,在 50 kPa 竖向压力条件下,当橡胶颗粒掺量小于等于 30% 时,随着水平位移的增大,明显出现了剪缩减弱的趋势;反之,均没有发生剪缩减弱的现象。

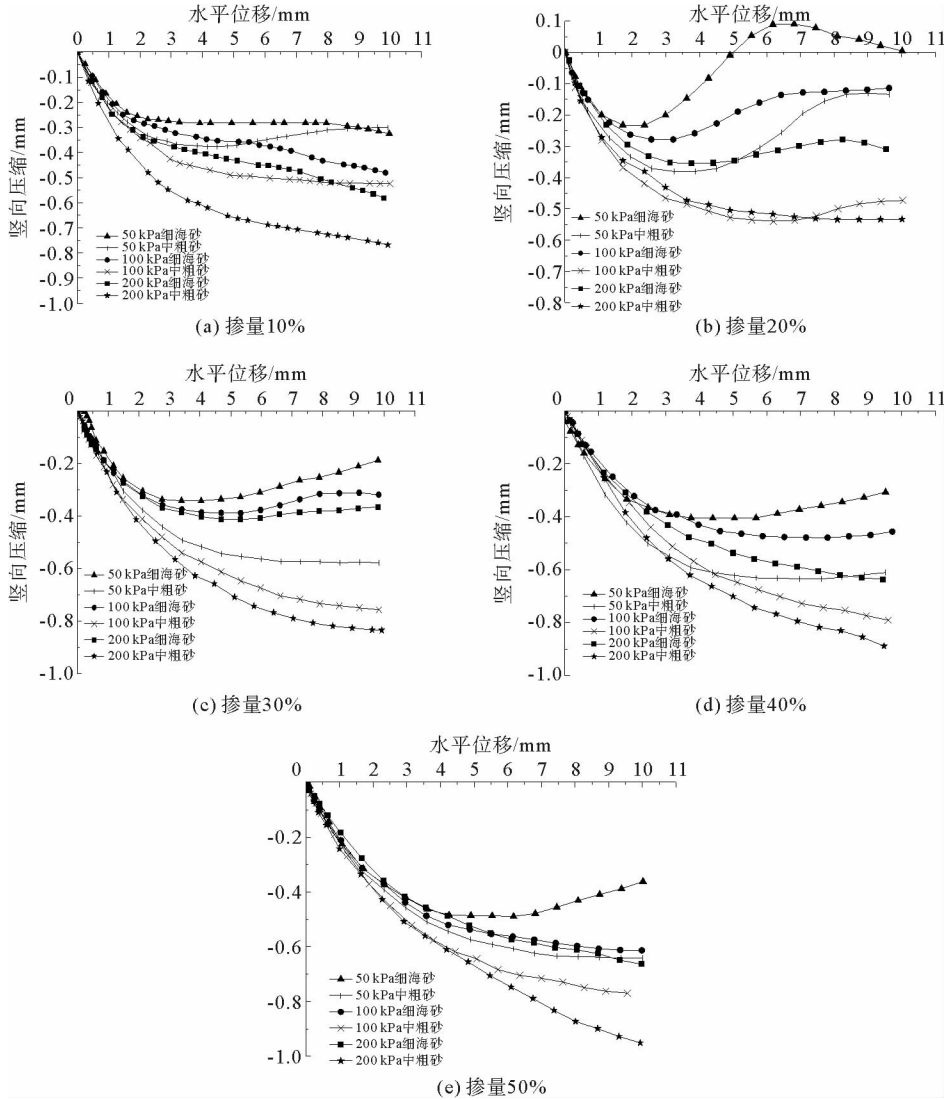


图 4 不同掺量下细砂及中粗砂的水平位移—竖向位移关系曲线

Fig. 4 Vertical displacement versus horizontal displacement under various scrap tire crumb contents

3.3 砂土抗剪强度与橡胶颗粒掺量的关系

绘制抗剪强度与剪切位移关系曲线,取剪切位移 4 mm 所对应的剪应力为抗剪强度^[13]。由图 5 可知,橡胶颗粒掺量和竖向压力会显著影响砂土的抗剪强度。由图 5(a)可知,在相同竖向压力条件下,纯细海砂的抗剪强度小于纯中粗砂的抗剪强度;由图 5(b)~(f)可知,当橡胶颗粒掺量小于等于 30% 时,中粗砂混合土的抗剪强度大于细海砂混合土抗剪强度;橡胶颗粒掺量大于 30% 时,中粗砂混合土的抗剪强度小于细海砂混合土抗剪强度。由图 5 分析可知,细海砂混合土和中粗砂混合土的抗剪强度均呈现出随橡胶颗粒掺量增加先增大后减小现象,当掺入 20% 橡胶颗粒时,细海砂混合土和中粗砂混合土的抗剪强度达到最大值。

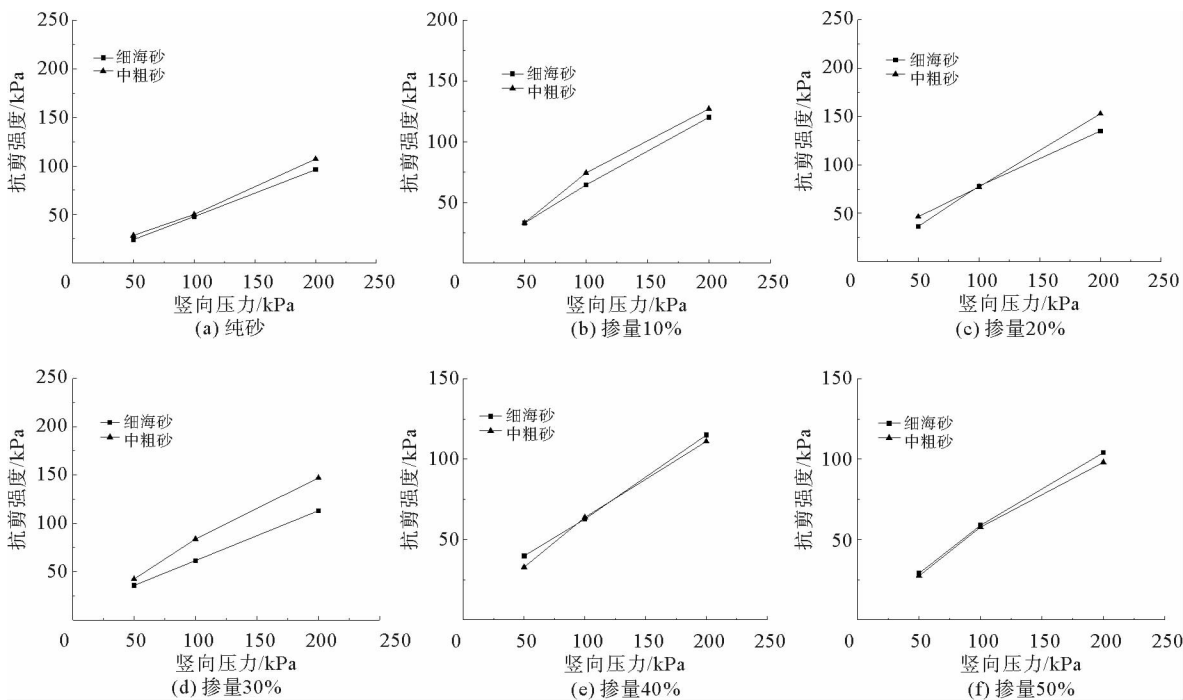


图 5 砂土抗剪强度与橡胶颗粒掺量关系图

Fig. 5 Relation between shear stress of sand and various scrap tire crumb contents

将 0~50% 橡胶颗粒掺量混合土的内摩擦角与粘聚力值汇总于表 2。可以看出,橡胶颗粒的掺量对砂土内摩擦角和粘聚力的影响较小,橡胶颗粒掺量由 0 增加到 50% 时,细海砂混合土和中粗砂混合土的内摩擦角与粘聚力均呈先增大后减小的趋势。从表 2 还可以看出,加入废旧轮胎橡胶颗粒后,细海砂和中粗砂都会表现出一定的“黏性”,并且随橡胶颗粒掺量的增加,与纯砂相比较,均表现出黏性增强的趋势。

表 2 砂土内摩擦角和粘聚力与废旧轮胎橡胶颗粒含量
Tab. 2 Angle and cohesion under scrap tire crumb contents

橡胶颗粒掺量		纯砂	10%	20%	30%	40%	50%
中粗砂	c/kPa	0	6.9	8.5	10.7	9.2	7.3
	$\varphi/(\circ)$	27.9	31.4	35.7	34.6	27.2	24.7
细海砂	c/kPa	0	5.2	8.1	9.9	7.7	6.3
	$\varphi/(\circ)$	25.7	29.9	32.8	27.3	26.8	25.2

图 6 为废旧轮胎橡胶颗粒掺量与细海砂和中粗砂内摩擦角的关系曲线,由图可知:混合土的内摩擦角均随橡胶颗粒掺量增加呈先增大后逐渐减小的发展趋势。废旧轮胎橡胶颗粒掺量与细海砂及中粗砂粘聚力的影响如图 7 所示。由图可知,橡胶颗粒掺量的增加导致细海砂混合土和中粗砂混合土的粘聚力均呈现先增大后减小的趋势。

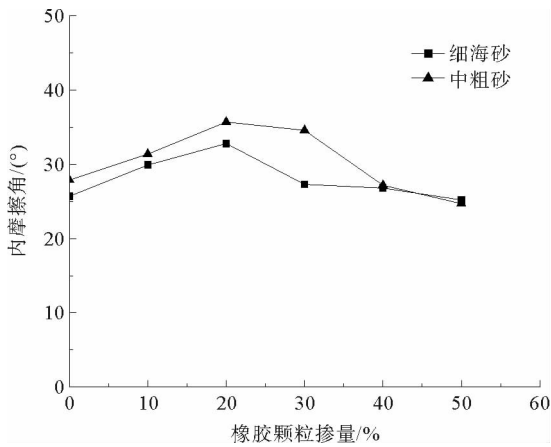


图6 内摩擦角-掺量关系曲线

Fig. 6 Internal friction angle versus contents

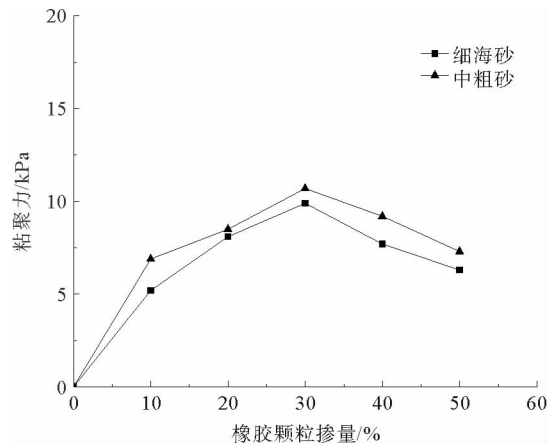


图7 粘聚力-掺量关系曲线

Fig. 7 Cohesion versus contents

4 结论

通过细砂、中粗砂与不同掺量废旧轮胎橡胶颗粒混合物的直剪试验,得出以下结论:

1) 加入废旧轮胎橡胶颗粒后,细海砂和中粗砂都会表现出一定的“黏性”,并且随橡胶颗粒掺量的增加,与纯砂相比较,均表现出黏性增强的趋势。

2) 随着橡胶颗粒掺量的增加,细海砂混合土和中粗砂混合土的抗剪强度均呈先增大后减小的趋势,细海砂混合土和中粗砂混合土的内摩擦角与粘聚力均呈先增大后减小的趋势,当橡胶颗粒掺量为20%时,细海砂混合土和中粗砂混合土的抗剪强度达到最大值。

3) 细小粒径的橡胶颗粒对提高砂土抗剪强度的效果并不显著,特别是对于细海砂的抗剪强度改良效果更不明显。由于废旧橡胶颗粒破碎为细小粒径的橡胶颗粒所需成本较高,因此细小粒径橡胶颗粒在实际工程应用中的意义不大。

参考文献:

- [1] HORACE M Y, KASSAHUN S, DANIEL Z, et al. Physical and chemical properties of recycled tire shreds for use in construction[J]. Journal of Environmental Engineering, 2003, 129(10): 921-929.
- [2] YOUWAI S, BERGADO D. Numerical analysis of reinforced wall using rubber tire chips-sand mixtures as backfill material [J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31: 103-114.
- [3] WARITH M A, RAO S M. Predicting the compressibility behavior of tire shred samples for landfill applications[J]. Waste Management, 2006, 26: 268-276.
- [4] ZORNBERG J G, CABRAL A R, VIRAT J ANDR C. Behaviour of tire shred-sand mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(2): 227-241.
- [5] FENG Z Y, SUTTER K G. Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(3): 338-344.
- [6] KIM H K, SANTAMARINA J C. Sand-rubber mixtures (large rubber chips)[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(10): 1457-1466.
- [7] TATLISOZ N, BENSON C, EDIL T. Effect of fines on mechanical properties of soil-tire chip mixtures[C]// West Conshohocken: ASTM International, 1997: 93-98.
- [8] LEE J H, SAIGADO R, BERNAL A. Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(2): 132-141.