

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.02.008

单轴压力下 RST 轻质土变形特性及其细观机理分析

辛 凌^{1,2}, 沈 扬^{1,2}, 刘汉龙^{1,2}, 何 稼^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098 ;
2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 :通过无侧限抗压强度试验和细观试验,研究了废弃轮胎橡胶颗粒轻质混合土(RST 轻质土)在单轴压力作用下的变形特性及其细观成因,得到了应力-应变曲线与材料配合比的关系以及有代表性的细观图片.无侧限抗压强度试验结果表明 :RST 轻质土的应力-应变曲线为软化型,可以被概括为压密、弹性变形、塑性变形、软化 4 个特征阶段.细观试验结果表明 :在处于加载初期的压密阶段,最先发生变化的是试样内部的孔洞,这些孔洞在外荷的作用下有闭合的趋势,但不会完全消失 ;由外荷造成的裂缝的出现标志着塑性变形阶段的开始,外荷引发的裂缝最初会从试样内部原有的孔洞以及橡胶颗粒和水泥土的结合面上开展.试验结果还表明,土体的宏观现象是其细观结构变化的体现,废弃轮胎橡胶颗粒轻质混合土的细观孔隙裂缝发展情况可以解释其宏观应力-应变曲线的形态特征.

关键词 :轻质混合土 ;废弃轮胎 ;橡胶颗粒 ;细观试验 ;变形特性

中图分类号 : TU411 **文献标识码 :** A **文章编号 :** 1000-1980(2010)02-0160-05

随着机动车辆的普及,废弃轮胎造成的污染问题日益严重,国内外学者已经开展了将其应用于岩土工程领域的研究. Bosscher 等^[1-2]将废弃轮胎碎片与土的混合物用作路基填筑材料 ;Pierce 等^[3]用废弃轮胎生产流动性填料 ;Rowe 等^[4]对废弃轮胎粉碎物用作垃圾填埋场过滤层进行了试验研究. 之前已有学者将发泡聚苯乙烯(expanded poly-styrene, EPS)颗粒应用到岩土工程领域^[5-7]. 肖衡林等^[8]用废弃轮胎制作加筋挡土墙和加筋堤 ;傅大放等^[9]开展了废弃轮胎胶粉干法改性热拌沥青混合料的研究 ;汪金忠等^[10]介绍了国外将废弃轮胎碎片作为高速公路轻质填料的设计方法.

废弃轮胎橡胶颗粒轻质混合土(lightweight soil mixed with rubber chips of scrap tires, RST 轻质土)是由废弃轮胎颗粒、原料土、水泥和水混合而成的一种新型土工材料. 它不仅解决了废弃轮胎造成的环境问题,并且具有轻质高强的特点,特别可以适用于我国长三角地区的软土地基处理. 为将 RST 轻质土应用到工程领域,本文研究了其应力-应变曲线性态和其细观结构在荷载作用下的变化规律,并找出它们的内在联系,为进一步研究该新型轻质环保材料的力学性质和本构关系提供依据.

1 试验仪器

试验使用的仪器 : (a) 应变控制式无侧限抗压强度仪 ; (b) 河海大学岩土工程科学研究所自主研制开发的,集加载、观测和图像数值处理为一体的岩土微细结构光学测试系统.

图 1 是岩土微细结构光学测试系统的原理图. 系统由 3 部分组成 : 加载系统、图像采集系统和图像处理系统. 其工作原理简述如下 : 由 CCD 摄像头拍摄、光学显微镜放大的微细图像和由传感器测得的压力位移数据,通过光缆传输到计算机中,然后经图像分析软件 GEOIMAGE 对图像和数据进行分析处理^[11]. 在现有的岩土微细

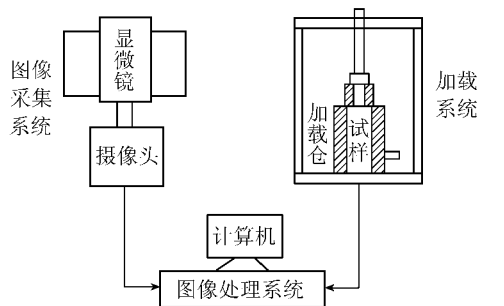


图 1 岩土微细结构光学测试系统原理示意图
Fig. 1 Principles of fabric-observation optical system for geomaterials

结构图像分析系统中,岩土微细结构光学测试系统有其自身的特点和优势.本文选用岩土微细结构光学测试系统有 3 点原因:(a)可以实时采集加载过程中的微细结构图像.(b)试样制备方法相对简便易行,而且对材料的原始扰动较小.(c)橡胶颗粒粒径大,平均粒径为 4.5 mm,不需要使用电镜扫描等放大倍数较高的试验仪器.

2 原材料性质及试验方法

2.1 原材料性质

试验所用的橡胶颗粒由废弃轮胎粉碎而成.颗粒粒径分布范围为 4.3 ~ 4.8 mm,平均粒径为 4.5 mm,相对密度(以 4℃ 水的密度为参考密度)为 1.25,形状为有棱角的不规则形状.原料土取自宁波绕城高速公路西段、深度为 2 ~ 2.5 m 的工程弃土.水泥采用标号 325 普通硅酸盐水泥.

2.2 试验方法

先烘干原料土,将混合物的各种原料按照一定配比混合均匀,之后将制备好的混合物按照分层压实的方法分 3 次压入直径为 61.8 mm、高为 125 mm 三开模内,放入标准养护箱内养护.养护 1 d 后,试样已经形成一定强度,拆模,再放回养护箱,继续养护至规定龄期.由于岩土微细结构光学测试系统的加载舱是半圆柱形^[12],其制样方法与无侧限抗压强度试验的制样方法有一些区别,在拆模后需将圆柱形试样的对称面用钢丝锯在其表面切割一定深度,并用手掰成 2 个半圆柱形,再将分割后的试样放回养护箱,继续养护至规定龄期(28 d).

无侧限抗压强度试验操作参照 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》进行,每 0.1 mm 变形量读 1 次数据.细观试验操作参考文献^[11-12].

3 RST 轻质土应力-应变关系

RST 轻质土在单轴压缩试验中表现出的应力-应变关系是其最基本的力学性质之一,是研究其强度、变形、裂缝开展的依据.图 2 是 RST 轻质土在不同灰土比 $w(C)$ (水泥和干原料土(简称干土)的质量比)、胶粒土比 $w(R)$ (橡胶颗粒和干土的质量比)和水土比 $w(W)$ (水和干土的质量比)下的应力-应变曲线.需要指出的是,本文的水土比 $w(W)$ 与通常定义的含水率 ω 是不同的概念,RST 轻质土中添加了橡胶颗粒,其含水率是水与所有固体材料质量之比.

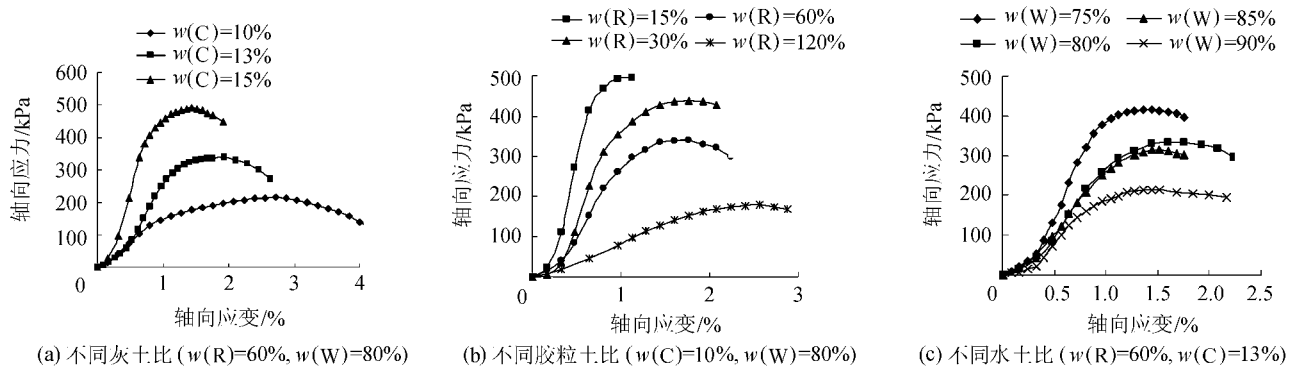


图 2 不同灰土比、胶粒土比、水土比下的应力-应变关系

Fig. 2 Stress-strain curves under different rubber chip contents

增加灰土比可以增加 RST 轻质土的刚度,如图 2(a)所示,随着灰土比的增大,应力-应变曲线的斜率和强度峰值相应增大,强度峰值对应的应变减小.灰土比为 10% 时,曲线形态接近于重塑土,应力峰值较不明显,延性较大.灰土比为 15% 时,曲线形态类似于素混凝土,试样表现出一定的脆性,在试验过程中,当应变达到 2% 后,试样迅速破坏,使得记录试验数据有一定的难度.

增加胶粒土比和水土比会降低应力-应变曲线的斜率和峰值强度,如图 2(b), (c) 所示.其中胶粒土比对 RST 轻质土刚度的影响更显著.这是因为橡胶颗粒与土颗粒以及水泥胶结结构相比刚度要小得多.如果将 RST 轻质土看作由橡胶颗粒和水泥土组成的两相体^[13],增加胶粒土比相当于置换了同体积的水泥土,所以胶粒土比越高,RST 轻质土的刚度越低.由于水土比与胶粒土比相比,其变化幅度要小得多,而且水泥在成样

过程中会发生水化反应,所以对刚度的影响没有胶粒土比明显.

虽然 RST 轻质土的应力-应变曲线形态随材料配合比的改变有所变化,但其基本性态是一致的. RST 轻质土的应力-应变曲线为随应变软化型曲线. 在曲线的初始阶段应变发展的速率比应力快,有初始反弯段;之后曲线开始呈近似线性变化. 在线弹性段之后,应力-应变曲线进入塑性变形阶段,曲线的斜率开始随着应变的增加而降低,直到应力达到峰值,预示着应力增长段的结束. 最后试样的承载力随着应变的增长而逐渐降低,应力进入下降阶段. 图 3 是胶粒土比为 60%、灰土比为 13%、水土比为 80% 试样的应力-应变曲线(此配比具有代表性).

4 RST 轻质土应力-应变关系的细观成因

物体的细观特征可以用来确定材料的宏观性能^[14]. RST 轻质土的应力-应变曲线性态是其细观结构变化的宏观体现,试样内部孔洞、裂缝的发展变化则是其应力-应变曲线性态形成的内部原因. 因此本文采用岩土微细结构光学测试系统观测配合比与图 3 中相同的试样在单轴压缩条件下的细观特征图像,并将图像表现出的细观结构变化和图 3 所示的宏观应力-应变曲线特征相对照,指出两者的关系.

图 4 和图 5 为试样的渐进破坏过程. 图 4 是 RST 轻质土在压密阶段即图 3 中 OA 段的细观渐进变化图片组. 细观试验可以揭示,在加荷初期最先发生变化的是试样内部的孔洞. 如图 4 所示,在 OA 段这些孔洞在外荷作用下体积逐渐变小,试样逐渐被压密,此时应变发展的速度比应力快,与应力-应变曲线压密阶段的特征相符. 这些孔洞产生的主要原因有 2 个:(a)虽然使用了分层压实等方法尽量减少孔洞,但是在制样过程中孔洞的产生仍无法避免.(b)水泥的水化过程会发生收缩,这也会造成孔洞. 在压密阶段试样内部孔洞逐渐变小,但不会完全闭合.

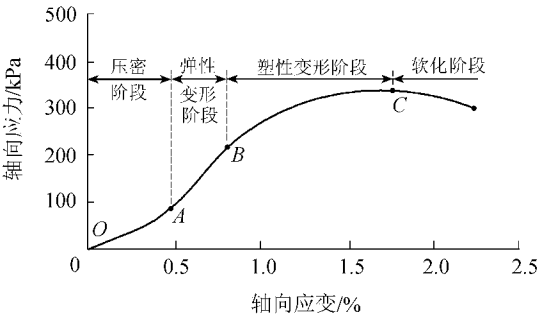


图 3 RST 轻质土应力-应变关系
($w(R) = 60\%$, $w(C) = 13\%$, $w(W) = 80\%$)
Fig. 3 Stress-strain curves of lightweight soil mixed with rubber chips of scrap tires
($w(R) = 60\%$, $w(C) = 13\%$, $w(W) = 80\%$)

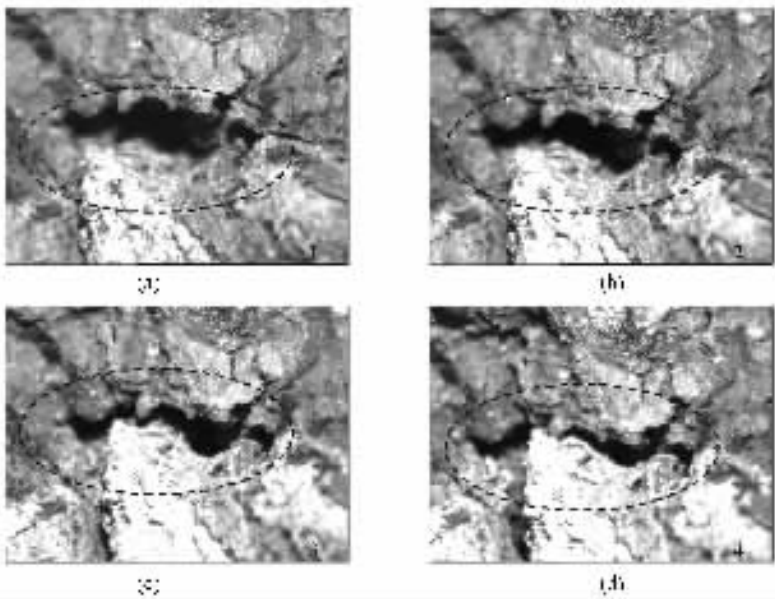


图 4 试样在压密阶段 OA 的细观渐进变化图像 (比例尺 1:28.3)

Fig. 4 Progressive images of samples (OA) at compression phase (scale of 1:28.3)

当应力-应变关系发展到弹性阶段即图 3 中的 AB 段,试样的裂缝和孔洞没有发生变化,相应其微观图片停留在图 4(d)的状态,没有明显的特征变化. 此时试样内部的孔洞不再减小,同时外荷还不足以产生新的裂缝,试样表现出理想弹性性质,应力、应变之间呈线性关系.

当应力-应变关系发展到塑性阶段即图 3 中的 BC 段,外荷造成的微裂缝开始在试样内部的孔洞及橡胶颗粒和水泥土的结合面这些薄弱部位发展,如图 5 所示. 姬凤玲^[15]曾对 EPS 轻质混合土的细观进行研究,认

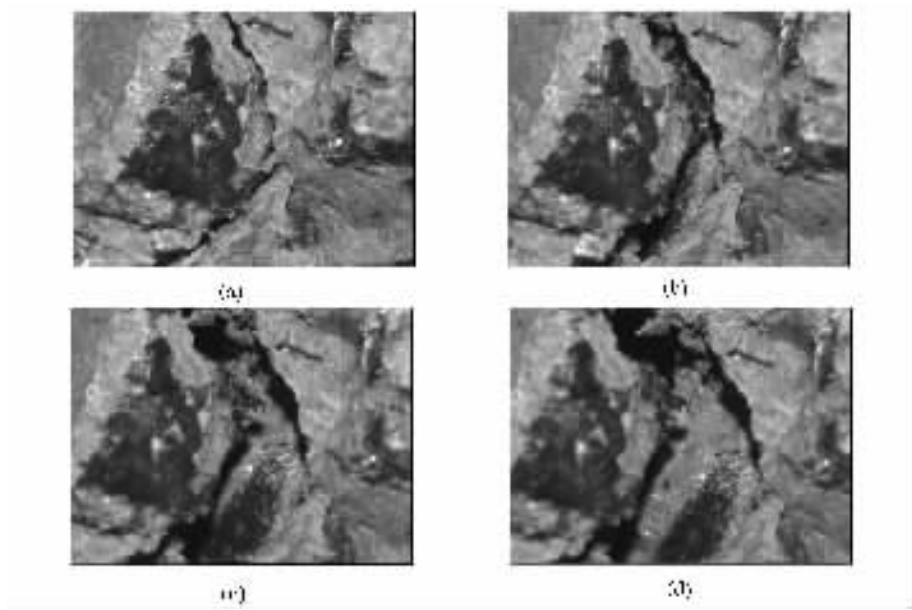


图 5 试样在塑性变形阶段 BC 的细观渐进变化图像(比例尺 1:10.6)

Fig. 5 Progressive images of samples (BC) at plastic deformation phase (scale of 1:10.6)

为EPS轻质混合土的微裂缝是在试样内部的孔洞及 EPS 颗粒和固化土的结合处产生的.图 5 所示的观测点其实既是橡胶颗粒和水泥土的结合处,也是试样断面原有的较大微裂缝的部位,此处橡胶颗粒和水泥之间有一条较大的微裂缝,如图 5(a)所示.在外荷的作用下,由于该部位是试样的薄弱部位,所以会发生应力集中.当应力达到其强度极限时,产生了由外荷造成的微裂缝.随着外荷的继续增加,裂缝向次一级的薄弱部位发展,所以裂缝一般是沿着孔洞及橡胶颗粒和水泥土的结合面发展的.这一过程循环往复,裂缝沿着试样内部的薄弱部位不断发展.当外荷达到某个值时,孔洞和结合面处裂缝端部的平均应力达到该局部水泥土区域内的平均强度极限,裂缝开始向水泥土区域延伸,并不断发展.由于不可逆的裂缝已经产生,所以这个阶段的应力-应变曲线不再是直线,而是一条斜率不断减小的曲线,与应力-应变曲线塑性变形阶段的特征相符.

当应力应变关系发展到软化阶段即图 3 中的 C 点之后,试样内部开始产生局部贯通性裂缝(用现有的细观仪器还很难取得良好的成像效果),应力达到峰值,并开始下降,此阶段随着应变的增加应力不断减小,此后承载力主要来自裂缝处滑移面上的摩擦咬合作用.

5 结 论

- a. RST 轻质土的应力-应变关系随着配合比的变化而有规律地变化.但其应力-应变曲线皆为软化型,并可以概括为 4 个特征阶段:压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段和软化阶段.
- b. RST 轻质土的应力-应变曲线性态是其细观结构变化的宏观体现.应力-应变曲线的每个特征阶段都可以通过其细观孔隙、裂隙的发展过程找到宏观现象的细观成因.宏观现象和细观变化是统一的.
- c. 在处于加载初期的压密阶段,最先发生变形的是 RST 轻质土内部的孔洞.在外荷的作用下,孔洞有闭合的趋势,但不会完全消失.孔洞产生的原因有 2 个:一是制样时无法将试样完全压实;二是水泥的水化作用.
- d. 由外荷造成的裂缝的出现标志着塑性变形阶段的开始,这些裂缝最先在橡胶颗粒和水泥土的结合面以及试样内部的孔洞处发生.随着外荷的增加,裂缝会向次一级的薄弱部位发展,这一过程循环往复,直到试样破坏.

参考文献:

[1] BOSSCHER P J, EDIL T B, KURAOKA S. Design of highway embankments using tire chips [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(4): 295-304.

[2] MASAD E, TAHA R, HO C, et al. Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill material [J]. Geotechnical Testing Journal, 1996, 19(3): 297-304.

- [3] PIERCE C E, BLACKWELL M C. Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill[J]. Waste Management, 2003, 23: 197-208.
- [4] ROWE R K, MCISAAC R. Clogging of tire shreds and gravel permeated with landfill leachate[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(6): 682-693.
- [5] 李明东, 朱伟, 张春雷, 等. 击实参数对砂土 EPS 颗粒混合轻质土的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 814-817. (LI Ming-Dong, ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, et al. Effect of compaction parameters on lightweight sand-EPS beads soil[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(6): 814-817. (in Chinese))
- [6] 周云东, 何奇宝, 丰土根, 等. EPS 颗粒混合轻质土动强度特性对比研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 810-813. (ZHOU Yun-dong, HE Qi-bao, FENG Tu-gen, et al. Comparative researches on dynamic strength properties of lightweight clay-EPS beads soil[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(6): 810-813. (in Chinese))
- [7] 王庶懋, 高玉峰, 张益纯. 动荷载下砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土(LSES)的强度标准及破坏机理研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 197-201. (WANG Shu-mao, GAO Yu-feng, ZHANG Yi-chun. Study on strength criteria and failure mechanism of lightweight sand-EPS beads soil(LSES) under dynamic loads[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(2): 197-201. (in Chinese))
- [8] 肖衡林, 王钊, 张训祥. 处理废弃轮胎的一种有效方法——轮胎加筋土结构[J]. 环境工程, 2002, 20(3): 51-54. (XIAO Heng-lin, WANG Zhao, ZHANG Xun-xiang. An effective disposal method of scrape tire-tire reinforced soil structure[J]. Environmental Engineering, 2002, 20(3): 51-54. (in Chinese))
- [9] 傅大放, 惠先宝, 符冠华, 等. 废弃轮胎胶粉干法改性热拌沥青混合料(RUMAC)试验研究[J]. 公路交通科技, 2001, 18(5): 4-7. (FU Da-fang, HUI Xian-bao, FU Guan-hua, et al. Studies on waste tire rubber modified hot mix asphalt concrete[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18(5): 4-7. (in Chinese))
- [10] 王金忠, 王钊. 废弃轮胎碎片做路堤轻质填料[J]. 岩土工程界, 2005, 9(1): 77-78. (WANG Jin-zhong, WANG Zhao. Scrap tire chips used as lightweight filling material of embankment[J]. Geotechnical Engineering World, 2005, 9(1): 77-78. (in Chinese))
- [11] 胡昕. 结构性土局部化变形的微观机理和损伤模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [12] 孙秋. 连续荷载及化学溶蚀作用下生态土的微细结构试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [13] 汤峻. EPS 颗粒混合轻质土物理力学特性的两相体模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [14] 张研, 张子明. 材料细观力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [15] 姬凤玲. 淤泥泡沫塑料颗粒轻质混合土力学特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.

Deformation behavior and its meso-mechanism analysis of lightweight soil mixed with rubber chips of scrap tires based on unconfined compressive test

XIN Ling^{1, 2}, SHEN Yang^{1, 2}, LIU Han-long^{1, 2}, HE Jia^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the unconfined compressive strength tests and the mesoscale experiments, the deformation properties and meso-structure mechanism of lightweight soil mixed with rubber chips of scrap tires (RST for short) under uniaxial pressure were studied. The relationship between the stress-strain curves and ingredient proportions as well as the representative meso-images were obtained. The results of the unconfined compressive strength experiments indicate that the soil has softening stress-strain curves with 4 characteristic phases: compression phase, elastic deformation phase, plastic deformation phase and softening phase. The results of the mesoscale experiments indicate that at the compression phase with the initial stage of loading, the cavities inside the samples changes first and tend to be close under the action of external loads and do not completely disappear. The cracks caused by the external loads stand for the starting of the plastic deformation phase. The cracks start from the cavities and the joint surfaces between rubber chips and cement soil. The macroscopic phenomenon of the soil is the representation of change of meso-structure. The development of the meso-cracks of the lightweight soil mixed with RST can explain the shape characteristics of macro stress-strain curves.

Key words: lightweight soil; scrap tires; rubber chip; mesoscale experiment; deformation property