

# 土工格栅加筋橡胶砂应力-应变特性试验

刘方成<sup>1</sup>, 王 将<sup>1</sup>, 吴孟桃<sup>2</sup>, 补国斌<sup>1</sup>, 何 杰<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 基于静三轴剪切试验, 分析了 5 种配比 (0%、10%、20%、30%、40%)、4 种格栅布置方式 (无筋、水平 1 层、水平 2 层、水平 3 层)、3 种围压 (50、100、200 kPa) 下土工格栅加筋橡胶砂的应力-应变关系特性和模量衰减特性。结果表明: ① 土工格栅加筋使得橡胶砂应力-应变关系曲线明显升高, 加筋后橡胶砂的硬化特性增强。② 采用扩展邓肯-张模型进行拟合, 随着橡胶颗粒含量的增加, 橡胶砂初始模量降低, 模量衰减程度可由衰减参数定量反映; 模量曲线衰减程度随加筋工况“水平 3 层加筋、无筋、水平 2 层加筋、水平 1 层加筋”依次增大。③ 土工格栅加筋使得橡胶砂的参考应变增大、应力-应变模型指数减小, 即模量归一化应力应变曲线非线性程度减弱, 随着土工格栅加筋密度和配比的增大, 土工格栅对橡胶砂应力应变特性的加筋效应更显著。

**关键词:** 岩土工程; 橡胶砂; 土工格栅加筋; 三轴试验; 应力-应变关系; 加筋效应

**中图分类号:** TU411.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)09-2542-12

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211260

## Stress-strain characteristics of geogrid reinforced rubber sand mixtures

LIU Fang-cheng<sup>1</sup>, WANG Jiang<sup>1</sup>, WU Meng-tao<sup>2</sup>, BU Guo-bin<sup>1</sup>, HE Jie<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Based on the static triaxial shear test, the stress-strain characteristics, the modulus attenuation properties, and the normalized stress-strain behavior of reinforcing rubber sand mixtures were analyzed. Five kinds of rubber content (0%, 10%, 20%, 30%, and 40%), four kinds of geogrid reinforcing patterns (lateral arrangement with no layer/one layer/two layers/three layers), and three kinds of confining pressure (50 kPa, 100 kPa, 200 kPa) were taken into account in tests. Results indicate that ① The geogrid reinforcement makes stress-strain curves of rubber sand mixture raised obviously, and the hardening characteristics of the reinforced specimens are enhanced. ② The stress-strain behavior of the rubber sand mixture could be simulated well by the extended Duncan-chang hyperbola model, and the

收稿日期: 2021-08-20.

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项项目 (2019D25); 湖南省自然科学基金项目 (2019JJ50130, 2020JJ6073, 2020JJ0150; 2020JJ4268).

作者简介: 刘方成 (1978-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 土动力特性, 土-结构动力相互作用及岩土隔震.

E-mail: fcliu@hut.edu.cn

通信作者: 补国斌 (1986-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 结构抗震, 岩土隔震. E-mail: guobinbu@hut.edu.cn

model parameters are evaluated with rubber content in the rubber sand mixture. With the increase of rubber content, the initial modulus of the rubber sand mixture decreases, and the attenuation parameters can quantitatively reflect the degree of modulus attenuation. The attenuation degree of rubber sand mixture increases for geogrid reinforcing cases lateral arrangement with three layers/no layer/two layers/one layer, but the overall difference is insignificant. ③ With the use of geogrid reinforced, the reference strain of the rubber sand is increased while the index of the stress-strain model is decreased. To illustrate, the degree of nonlinearity of the normalized stress-strain curve of the modulus is weakened. With the increase of the geogrid-reinforced density and rubber content, the reinforcement effect of geogrid on the stress-strain characteristics of rubber sand is more significant.

**Key words:** geotechnical engineering; rubber sand mixture; geogrid reinforcement; triaxial shear tests; stress-strain relationship; geo-reinforcement effects

## 0 引言

日益增多的废旧轮胎已成为全球主要的固体废弃物之一,结合工程需求研究其再生利用价值具有重要意义。废旧轮胎碎片所具有的工程特性使其可用于解决土木工程中某些特殊问题,如软基加固<sup>[1]</sup>、膨胀土治理<sup>[2]</sup>、挡墙回填<sup>[3]</sup>、桥头跳车处理、管道防护回填等<sup>[4,5]</sup>。轮胎碎片的破碎程度不同,其工程特性亦有所不同。橡胶砂(Rubber sand mixture, RSM)是由废旧轮胎橡胶颗粒(粒径小于5 mm的轮胎碎片)与砂颗粒组成的混合物。研究表明,橡胶砂具有自重轻<sup>[6,7]</sup>、弹性变形能力强<sup>[8]</sup>、剪切模量低、阻尼大等特点<sup>[9-11]</sup>,可作为轻质耗能填料<sup>[12-14]</sup>广泛应用于土木工程<sup>[15,16]</sup>。橡胶砂抗剪强度相对于基质砂有所降低<sup>[17-19]</sup>,其内摩擦角随着橡胶含量的增大而减小<sup>[20]</sup>,这使得它作为工程填料时对支挡物的土压力增大、作为地基垫层时承载能力降低,产生一定的不利影响。

土工格栅<sup>[21,22]</sup>具有强度大、模量高、稳定性好、蠕变小、延伸率低、与土体摩擦咬合好等特点,被广泛应用于土体加强<sup>[23,24]</sup>。采用土工格栅对橡胶砂进行加筋,可在保持橡胶砂轻质、高弹性工程特性的同时,改善其强度特性,使其在应用于路堤填筑、挡墙回填等岩土工程时,既能因材料轻质特性而减小对软弱地基的载荷以及对挡墙或桥台的地震动压力,还能提高其自身承载能力和整体稳定性<sup>[25,26]</sup>。

在土工格栅加筋土的应力-应变关系<sup>[27,28]</sup>、强度特性、土-筋界面特性<sup>[29]</sup>以及加筋机理等<sup>[30,31]</sup>方面已有较多研究。但目前所涉及加筋土类主要为自然界存在的常规土,如黏土、砂土、黄土、碎石

土、膨胀土等,关于土工格栅加筋橡胶砂的应力应变特性研究鲜有报道。对于由土工格栅和橡胶砂组成的复合填料而言,其应力应变关系是进行理论分析和设计计算的必需参数。

本文运用三轴试验对土工格栅加筋橡胶砂的应力-应变关系特性展开研究,分析了土工格栅加筋对橡胶砂的模量、应力应变性状参数的影响规律,以为橡胶砂的工程应用及后续研究提供参考。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验采用厦门艾思欧标准砂,平均粒径为0.64 mm,最大干密度为1.86 g/cm<sup>3</sup>,最小干密度为1.51 g/cm<sup>3</sup>,最大孔隙比为0.91,最小孔隙比为0.58。废轮胎颗粒平均粒径为1.5 mm,堆积密度为0.51 g/cm<sup>3</sup>。两种材料的颗粒特征如表1所示,级配曲线如图1所示。试验采用玻璃纤维材质的双向土工格栅作为加筋材料,其技术参数如表2所示。

表1 试验材料物理特性

Table 1 Physical properties of tested materials

试验材料	比重 $G_s$	粒径/mm	平均粒径	不均匀系
			$D_{50}$	数 $C_u$
废橡胶颗粒	1.21	0.5~5	1.5	4.77
标准砂	2.63	0.05~2	0.64	2.23

### 1.2 试验方法

在SLB-1型应力应变控制式三轴剪切试验仪上采用应变控制加载的方式进行固结不排水试验。根据文献<sup>[32]</sup>的建议,由于橡胶颗粒与砂颗粒比重相差较大,在饱和过程中易产生分层现象,

表 2 玻纤土工格栅的技术参数

Table 2 Technical parameters of glass fiber geogrid

材料	网格尺寸/ mm	延伸 率/%	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ (kN·m <sup>-1</sup> )	
				纵向	横向
玻璃纤维	12.7×12.7	≤3	67	60	60

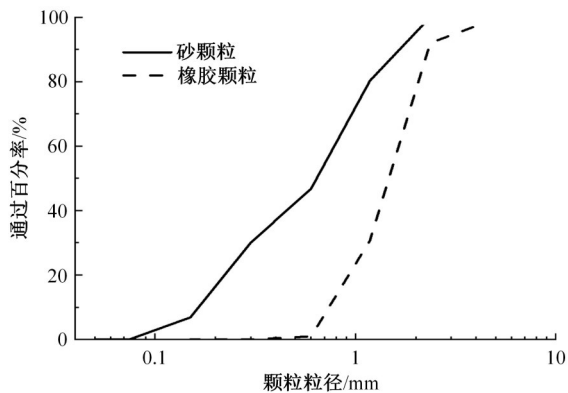


图 1 橡胶和砂的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curves of rubber and sand particles

从而影响橡胶砂的匀质性,故本文试验针对干燥试样进行研究。根据加筋层数的不同进行 6~8 次分层插捣装样,每层试样填装完后均用小棒轻击压密以确保橡胶颗粒和砂颗粒在装填过程中混合均匀,在相应高度处放入剪裁好的格栅网片后,再填装一层土样。制备好的试样依据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)在目标围压下固结 40 min,加载速率为 0.32 mm/min。

1.3 试验工况

以 RC(Rubber content)表示橡胶颗粒质量占总质量的比例,试验考虑了 0%、10%、20%、30%、40% 五种 RC 以及 50、100、200 kPa 三种围压;考虑无筋、1 层加筋、2 层加筋、3 层加筋 4 种土工格栅加筋方式。每层格栅片沿试样高度平行铺设,如图 2 所示,图中网格表示加筋格栅,试样直径为 61.8 mm、高度为 125 mm。

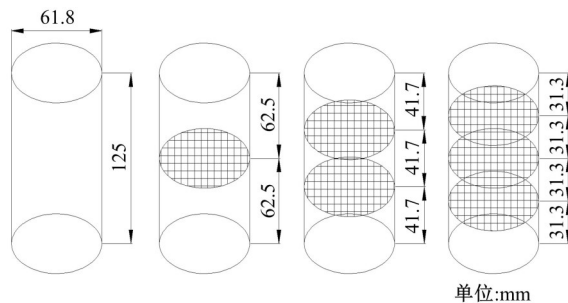


图 2 试样加筋方案

Fig. 2 Arrangement of geogrids in RSM samples

采用相同的相对密度  $D_r$  以平衡不同配合比试样在装样时可比性。本文所考察的 5 种配比橡胶砂的控制密度如表 3 所示,表中不同配比橡胶砂的最小干密度  $\rho_{dmin}$ 、最大干密度  $\rho_{dmax}$  事先根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)进行测试得到。试验所用材料如图 3 所示。

表 3 不同配比橡胶砂混合物的密度

Table 3 Mass densities of RSM with different rubber contents

配合比 RC/%	$\rho_{dmin}/$ (g·cm <sup>-3</sup> )	$\rho_{dmax}/$ (g·cm <sup>-3</sup> )	相对密度 $D_r$	装样密度 $\rho/$ (g·cm <sup>-3</sup> )
0	1.51	1.86	0.7	1.74
10	1.38	1.71	0.7	1.60
20	1.21	1.50	0.7	1.40
30	1.04	1.29	0.7	1.20
40	0.87	1.17	0.7	1.06

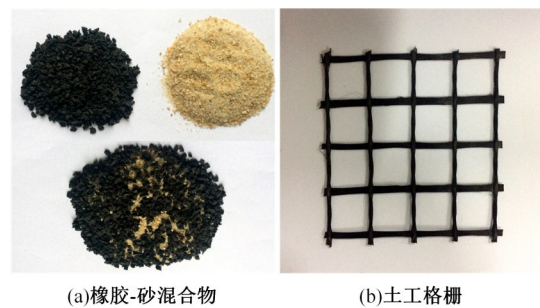


图 3 试验材料

Fig. 3 Test materials

2 试验结果及分析

2.1 应力-应变试验曲线

图 4~图 8 分别给出了配比为 0%、10%、20%、30%、40% 的橡胶砂在不同加筋方式下的偏应力-轴向应变曲线,由图可得如下结论。

(1) 无加筋情况下: ①当橡胶含量较小时 ( $RC \leq 20\%$ ),橡胶砂应力-应变曲线表现出典型的剪胀软化特性,即偏应力随着轴向应变的增大而增大,达到最大值之后逐渐降低进入下降段; ②当橡胶含量较大时 ( $RC > 20\%$ ),橡胶砂应力-应变曲线表现出应变硬化特性,即偏应力随着轴向应变的增大呈增大趋势,且曲线较为平缓,无明显下降段。

(2) 土工格栅加筋情况下: ①低配比橡胶砂的应力-应变曲线软化特性得到明显抑制,峰值强度和残余强度均有不同程度提高,当加筋层数较多时,应力-应变关系从应变软化型转变为应变硬化型; ②高配比橡胶砂的应力-应变曲线硬化特性得到进一步加强,破坏强度得到提高,非线性程度

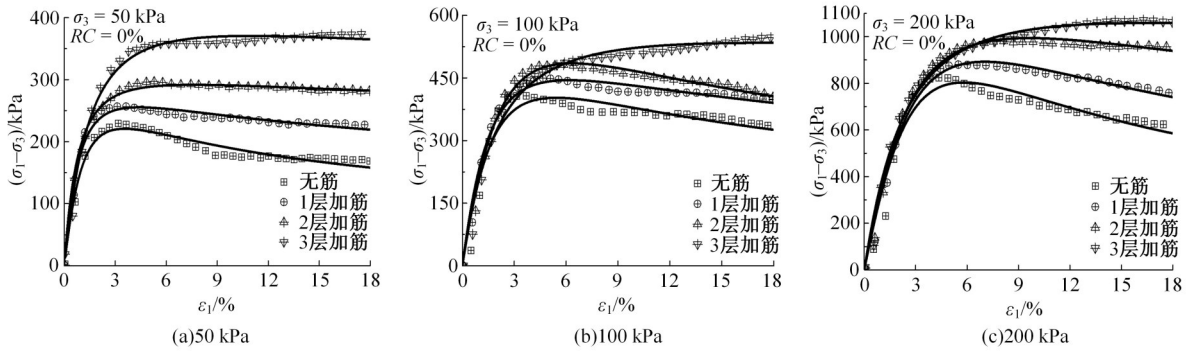


图 4 0% 橡胶砂 (纯砂) 应力-应变关系及拟合曲线

Fig. 4 Tested and fitted curves of the deviatoric stress-axial strain relations of RSM with RC=0% (Pure Sand)

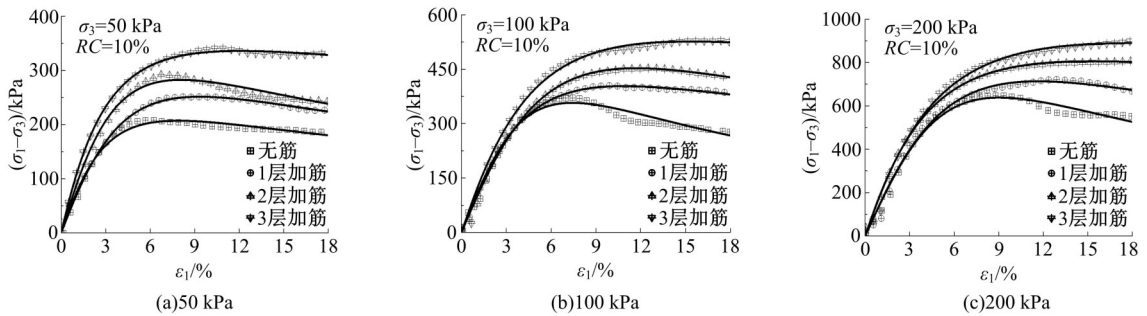


图 5 10% 橡胶砂应力-应变关系及拟合曲线

Fig. 5 Tested and fitted curves of the deviatoric stress-axial strain relations of RSM with RC=10%

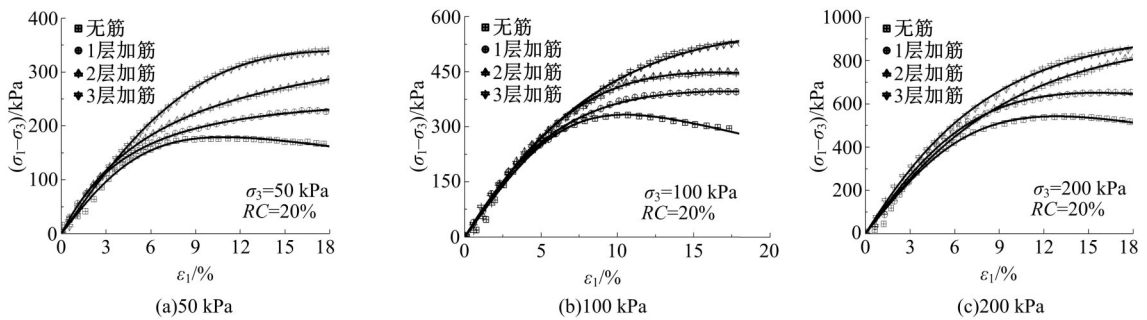


图 6 20% 橡胶砂 (纯砂) 应力-应变关系及拟合曲线

Fig. 6 Tested and fitted curves of the deviatoric stress-axial strain relations of RSM with RC=20%

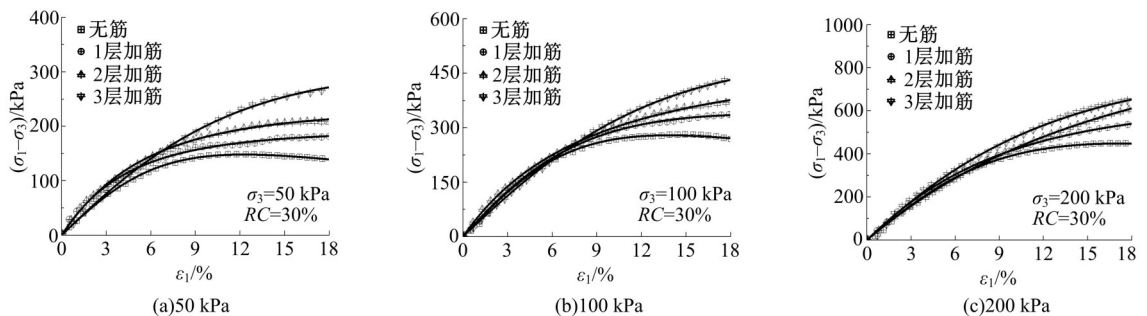


图 7 30% 橡胶砂 (纯砂) 应力-应变关系及拟合曲线

Fig. 7 Tested and fitted curves of the deviatoric stress-axial strain relations of RSM with RC=30%

降低。

(3) 配比和围压不变, 加筋效应随格栅加筋层数的增加会更加明显, 但随着围压的增大, 加筋层数对曲线影响减小。分析土工格栅对橡胶砂应

力-应变特性的加筋影响机理可知: ①土工格栅对散体材料的加筋效应主要是来自于对土体侧向变形的约束<sup>[18, 23]</sup>, 该约束源于两个方面, 其一是格栅片与颗粒之间的摩擦, 其二是格栅横肋对土颗粒

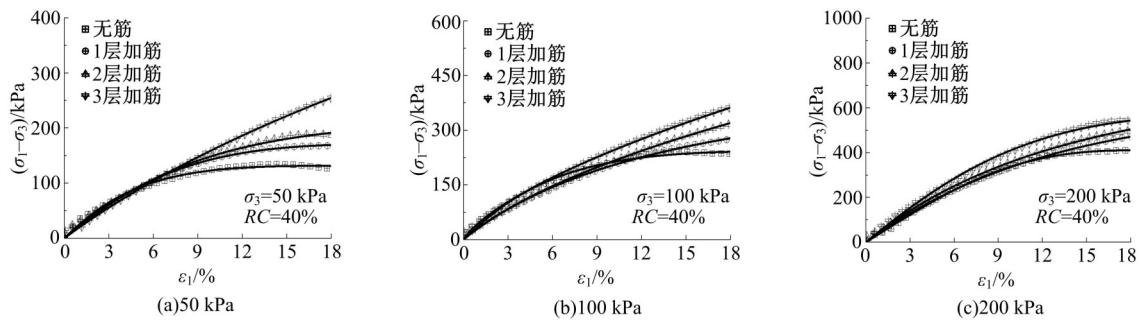


图 8 40% 橡胶砂(纯砂)应力-应变关系及拟合曲线

Fig. 8 Tested and fitted curves of the deviatoric stress-axial strain relations of RSM with RC=40%

侧向位移的阻挡。②在低配比橡胶砂中,橡胶颗粒含量较小,颗粒间的砂-砂刚性接触占主导,且初始相对密度 0.7 大于 2/3,无加筋时其变形特性类似密砂而表现出剪胀软化<sup>[33]</sup>。在土工格栅加筋后,一方面格栅直接约束颗粒的翻滚错动,使得体积膨胀减少,另一方面格栅约束间接提供附加围压,则在宏观上应力-应变特性由应变软化向应变硬化转化。③在高配比橡胶砂中,橡胶颗粒含量较大,颗粒间以胶-砂、胶-胶柔性接触占主导,可变形的橡胶颗粒相当于砂颗粒间的“等效孔隙”<sup>[34]</sup>,使得材料在偏应力作用下表现出较大的横向变形趋势。格栅加筋后,材料的横向变形受到限制,提高了其在相同轴向应变时可承受的偏应力,因此宏观上表现出应力-应变曲线升高。

由图 4~图 8 可以看出,橡胶砂的应力-应变关系在不同配比和加筋工况下表现出硬化或软化特征,均为典型的双曲线形式,因此可以使用扩展邓肯-张双曲线模型<sup>[35]</sup>对试验应力-应变曲线进行描述:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{E_0 \epsilon_1}{1 + (\epsilon_1 / \epsilon_r)^\alpha} \quad (1)$$

式中: $\sigma_1$ 为轴向应力; $\sigma_3$ 为围压; $E_0$ 为初始弹性模量; $\epsilon_1$ 为轴向应变; $\epsilon_r$ 为参考轴向应变; $\alpha$ 为扩展邓肯-张模型的参数。

用式(1)拟合试验应力-应变关系,将得到的拟合曲线(图 4~图 8 中的实线)与试验曲线进行对比,可见二者吻合较好。各加筋工况下的橡胶砂应力-应变关系参数拟合值如表 4 所示。

表 4 加筋橡胶砂破坏应力及应力-应变关系参数拟合值

Table 4 Values of failure stress and fitted parameters of stress-strain relationship of geogrid reinforced RSM

RC/%	$\sigma_3$ /kPa	无筋			1层加筋			2层加筋			3层加筋		
		$E_0$ /MPa	$\epsilon_r$ /%	$\alpha$	$E_0$ /MPa	$\epsilon_r$ /%	$\alpha$	$E_0$ /MPa	$\epsilon_r$ /%	$\alpha$	$E_0$ /MPa	$\epsilon_r$ /%	$\alpha$
0	50	22.64	1.76	1.38	31.80	1.29	1.22	37.78	1.07	1.11	26.90	2.01	1.14
	100	26.24	2.78	1.39	31.18	2.45	1.30	25.89	3.43	1.41	28.09	2.68	1.12
	200	35.86	4.36	1.63	37.09	4.57	1.52	41.23	4.24	1.34	47.55	3.28	1.15
10	50	7.97	4.89	1.49	7.09	6.88	1.61	9.12	6.02	1.62	11.88	4.87	1.31
	100	10.49	6.79	1.85	10.88	7.04	1.52	9.76	9.08	1.66	12.33	7.72	1.39
	200	14.97	8.52	1.89	15.46	9.03	1.65	20.45	6.97	1.35	20.03	7.75	1.33
20	50	3.57	10.00	1.85	5.51	6.08	1.10	5.47	7.48	1.01	3.97	17.00	1.83
	100	5.77	11.48	2.20	6.59	11.42	1.52	6.29	14.12	1.76	6.31	16.56	1.47
	200	8.53	12.73	1.99	9.59	13.47	1.77	9.16	17.42	1.38	10.91	15.06	1.38
30	50	2.58	11.44	1.88	4.20	6.65	1.16	3.98	8.69	1.18	2.64	21.50	1.61
	100	4.34	12.82	1.87	4.53	14.27	1.57	4.61	15.34	1.29	4.29	21.61	1.41
	200	5.93	15.88	1.85	6.58	15.63	1.26	5.70	25.21	1.14	6.32	22.31	1.38
40	50	2.19	11.59	1.60	2.17	15.19	1.59	2.20	17.11	1.39	2.13	23.76	0.71
	100	3.14	15.20	1.69	3.29	16.00	1.01	3.88	13.84	0.64	4.40	23.81	0.70
	200	4.13	19.70	2.27	4.62	22.19	1.26	5.18	20.70	1.14	5.28	21.33	1.71

图 9 为试验所得无筋橡胶砂的应力-应变参数与已有文献结果的对比。由图 9 可以看出,本文试验所得的橡胶砂初始弹性模量、参考应变和

指数参数  $\alpha$  随橡胶含量变化的关系与已有研究结果<sup>[36,37]</sup>吻合较好,证明了本文试验研究结果的可靠性。

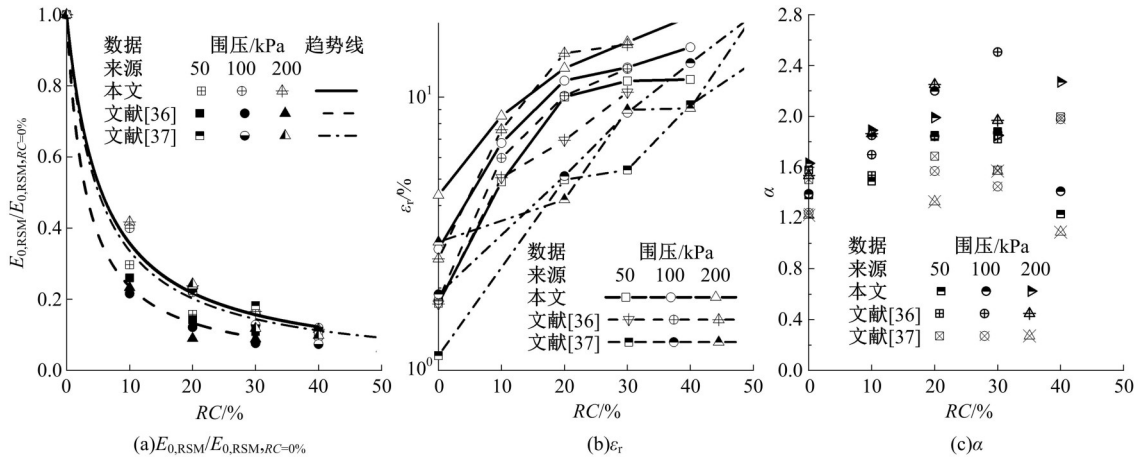


图 9 本文试验所得无筋橡胶砂应力-应变参数与已有研究对比

Fig. 9 Comparing the stress-strain parameters of RSM tested in this paper to those in published papers

2.2 应力-应变参数加筋效应分析

图 10 给出了围压分别为 50、100、200 kPa 时,不同加筋工况下橡胶砂初始弹性模量与橡胶含量的关系曲线,可见:①橡胶砂的初始弹性模量  $E_0$

随着橡胶颗粒含量  $RC$  的增大呈指数下降,土工格栅加筋对该趋势不产生影响;②随着围压和橡胶含量的增大,土工格栅加筋对橡胶砂初始弹性模量的影响减小。为比较初始弹性模量随橡胶含量的衰减情况,定义模量衰减比  $\delta_{E_0, RSM/E_0, SAND}$  为:

$$\delta_{E_0, RSM/E_0, SAND} = \frac{1}{1 + A \cdot RC} \quad (2)$$

式中:  $\delta_{E_0, RSM/E_0, SAND}$  为橡胶砂的初始模量相对于纯砂初始模量的衰减比;  $A$  为衰减参数。

图 11 给出了围压分别为 50、100、200 kPa 时,不同加筋工况下橡胶砂初始模量随橡胶含量变化的衰减情况。用式(2)对  $E_0 \sim RC$  关系进行拟合,模量衰减参数  $A$  拟合值如表 5 所示。由表 5 可见:不同加筋方式对橡胶砂模量衰减曲线有一定影响,衰减程度由弱至强依次为:水平 3 层加筋、无筋、水平 2 层加筋、水平 1 层加筋。

图 12 为橡胶砂在不同加筋方式下参考应变  $\epsilon_r$  随着橡胶含量  $RC$  的变化曲线。由图 12 可见,加筋橡胶砂与无筋橡胶砂的变化规律一致,以橡胶含量为 20% 节点分析,  $\epsilon_r$  随橡胶含量的增大呈先迅速增大再逐步放缓的趋势。图 13 为不同加筋方式对参数  $\alpha$  的影响,可见不同加筋方式下得到的  $\alpha$  表现出类似规律,即随着橡胶含量的增大,  $\alpha$  先增大后减小,临界橡胶含量约为 20%。

为定量描述水平加筋层数对橡胶砂应力应变参数的影响,引入加筋密度及加筋效应系数如下:

$$\rho_R = nB/H \quad (3)$$

$$\delta_E^R = E_{0,R}/E_{0,nonR} \quad (4)$$

$$\delta_\epsilon^R = \epsilon_{r,R}/\epsilon_{r,nonR} \quad (5)$$

$$\delta_\alpha^R = \alpha_R/\alpha_{nonR} \quad (6)$$

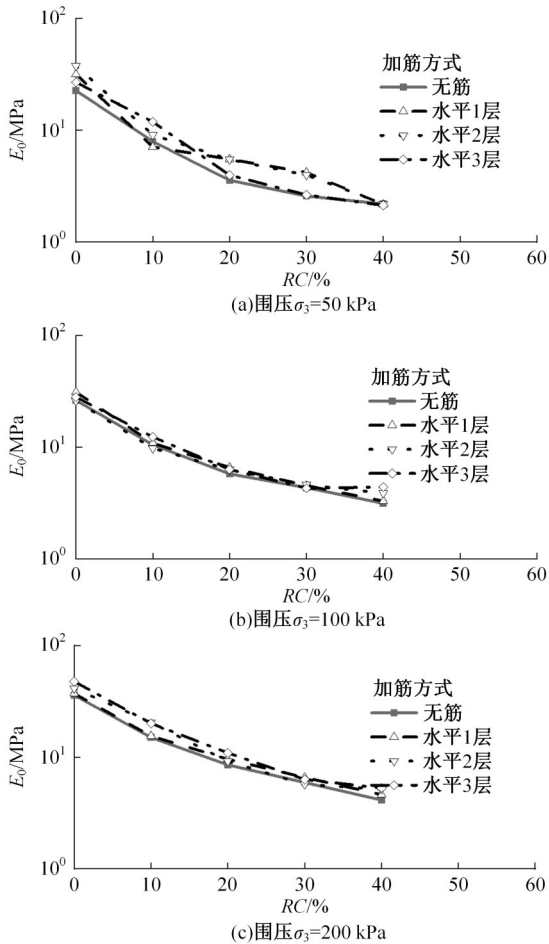


图 10 不同加筋工况对初始弹性模量的影响

Fig. 10 Variation of the initial elastic modulus of RSM with rubber mass content

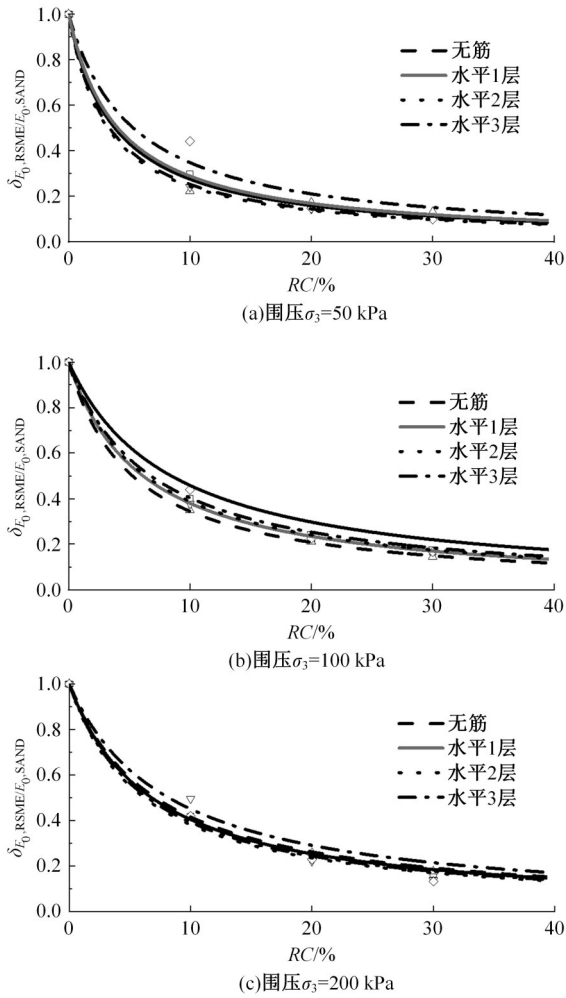


图 11 橡胶砂初始弹性模量随橡胶含量的变化曲线  
Fig. 11 Variation of the initial elastic modulus of RSM with rubber mass content

表 5 橡胶砂初始模量衰减参数拟合值

Table 5 Fitting values of attenuation parameter of initial modulus of RSM

加筋方式	衰减参数 A
无筋	0.182(本文试验)
	0.324(El-Sherbiny 等) <sup>[36]</sup>
	0.197(Youwai 等) <sup>[37]</sup>
水平 1 层加筋	0.197
水平 2 层加筋	0.184
水平 3 层加筋	0.165

式中： $\rho_R$  为加筋密度； $B$  为试样宽度（对于三轴试验为试样横截面直径）； $H$  为试样高度； $n$  为加筋层数； $\delta_E^R$  为模量加筋效应系数； $E_{0,R}$ 、 $E_{0,nonR}$  分别为加筋和无筋情况下的弹性模量； $\delta_\epsilon^R$  为参考应变的加筋效应系数； $\epsilon_{r,R}$ 、 $\epsilon_{r,nonR}$  分别为加筋和无筋的参考应变； $\delta_\alpha^R$  为参数  $\alpha$  的加筋效应系数； $\alpha_R$ 、 $\alpha_{nonR}$  分别为加筋和无筋情况下的参数  $\alpha$  值。

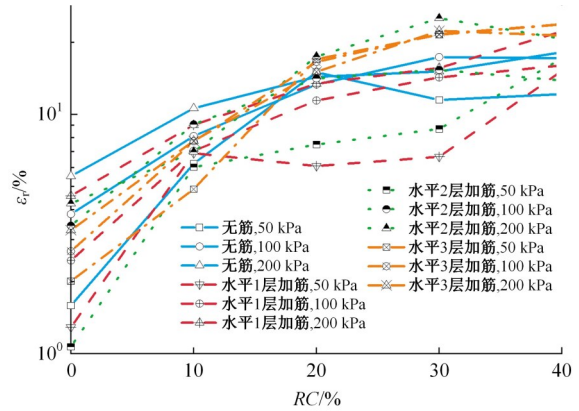


图 12 不同加筋方式对参考应变的影响

Fig. 12 Variation of reference strain and with rubber mass content

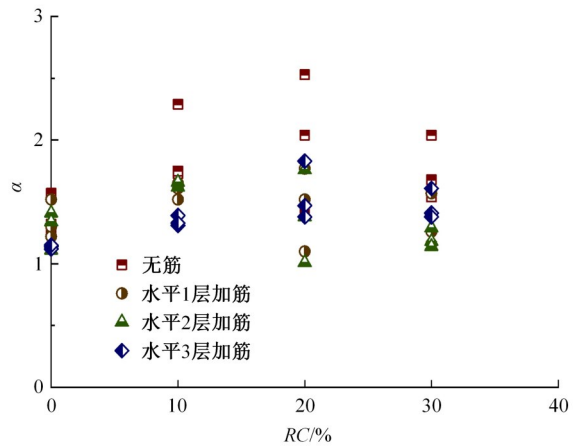


图 13 橡胶砂指数参数  $\alpha$  随橡胶含量的变化曲线

Fig. 13 Variation of  $\alpha$  with rubber mass content

图 14~图 16 分别给出了不同配比橡胶砂的弹性模量、参考应变和参数  $\alpha$  的加筋效应系数随加筋密度变化的试验结果。虽然试验点在图中表现出一定的离散性,但总体上存在一定规律:随着土工格栅加筋密度的增大,橡胶砂弹性模量  $E_0$  增大,参考应变  $\epsilon_r$  增大,指数参数  $\alpha$  减小,3 个应力应变参数  $E_0$ 、 $\epsilon_r$ 、 $\alpha$  与加筋密度  $\rho_R$  之间均近似呈线性关系。

设  $E_0$ 、 $\epsilon_r$ 、 $\alpha$  与加筋密度  $\rho_R$  之间的线性关系用下列函数表达:

$$\delta_E^R = 1 + C_E \rho_R \quad (7)$$

$$\delta_\epsilon^R = 1 + C_\epsilon \rho_R \quad (8)$$

$$\delta_\alpha^R = 1 + C_\alpha \rho_R \quad (9)$$

式中： $\delta_E^R$ 、 $\delta_\epsilon^R$ 、 $\delta_\alpha^R$  分别为模量加筋效应系数、参考应变加筋效应系数、指数参数  $\alpha$  加筋效应系数； $\rho_R$  为加筋密度； $C_E$ 、 $C_\epsilon$ 、 $C_\alpha$  分别为弹性模量、参考应变、参数  $\alpha$  加筋效应系数随加筋密度变化的斜率。

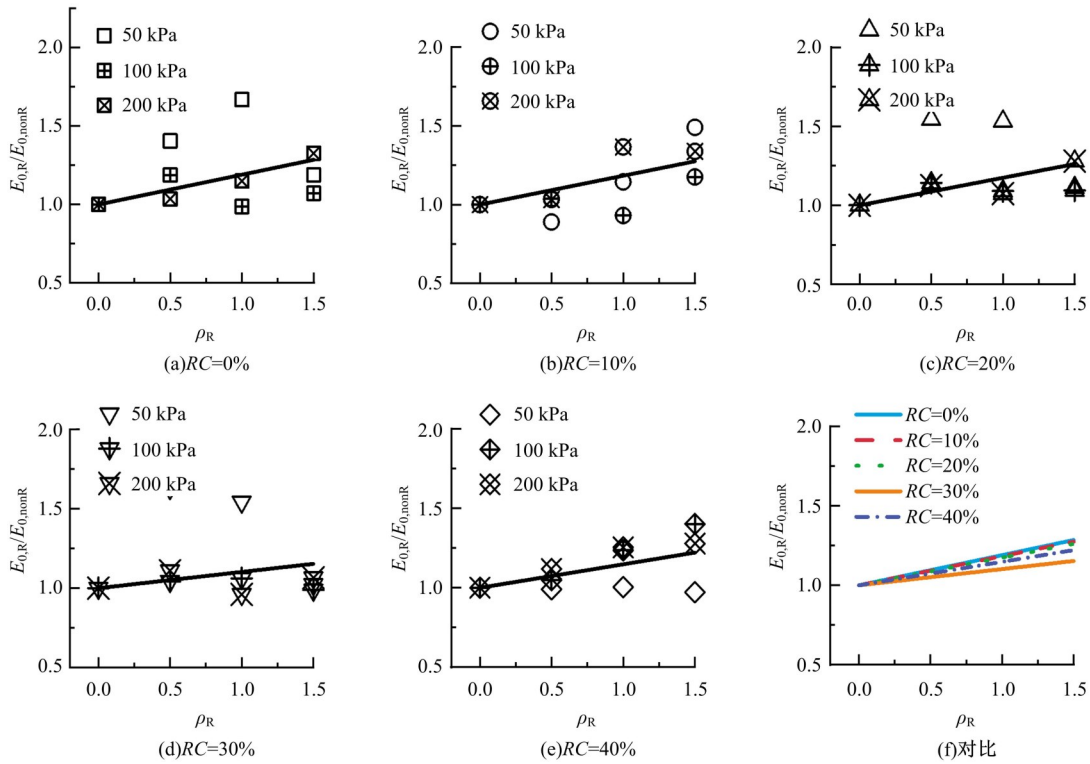


图 14 格栅加筋对橡胶砂初始弹性模量的影响

Fig. 14 Geogrid reinforcing effects on the initial elastic modulus of RSM

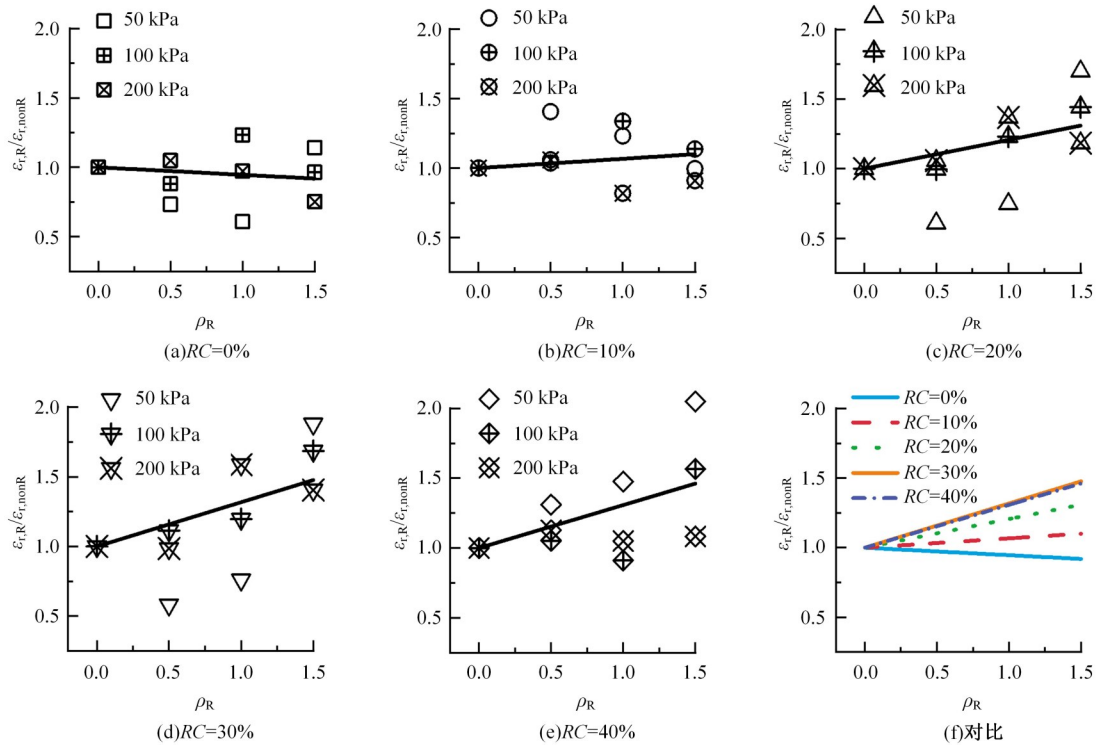


图 15 格栅加筋对橡胶砂参考应变的影响

Fig. 15 Geogrid reinforcing effects on the reference strain of RSM

用上述函数对各工况下的  $E_0 \sim \rho_R$ 、 $\epsilon_t \sim \rho_R$  与  $\alpha \sim \rho_R$  关系试验点进行拟合,得到的直线分别绘制于图 14~图 16 中,可见拟合关系较好。拟合得到

相应不同配比橡胶砂的加筋效应系数与加筋密度之间的斜率  $C_E$ 、 $C_\epsilon$ 、 $C_\alpha$  值如表 6 所示。

图 17 进一步给出了  $C_E$ 、 $C_\epsilon$ 、 $C_\alpha$  分别随橡胶砂

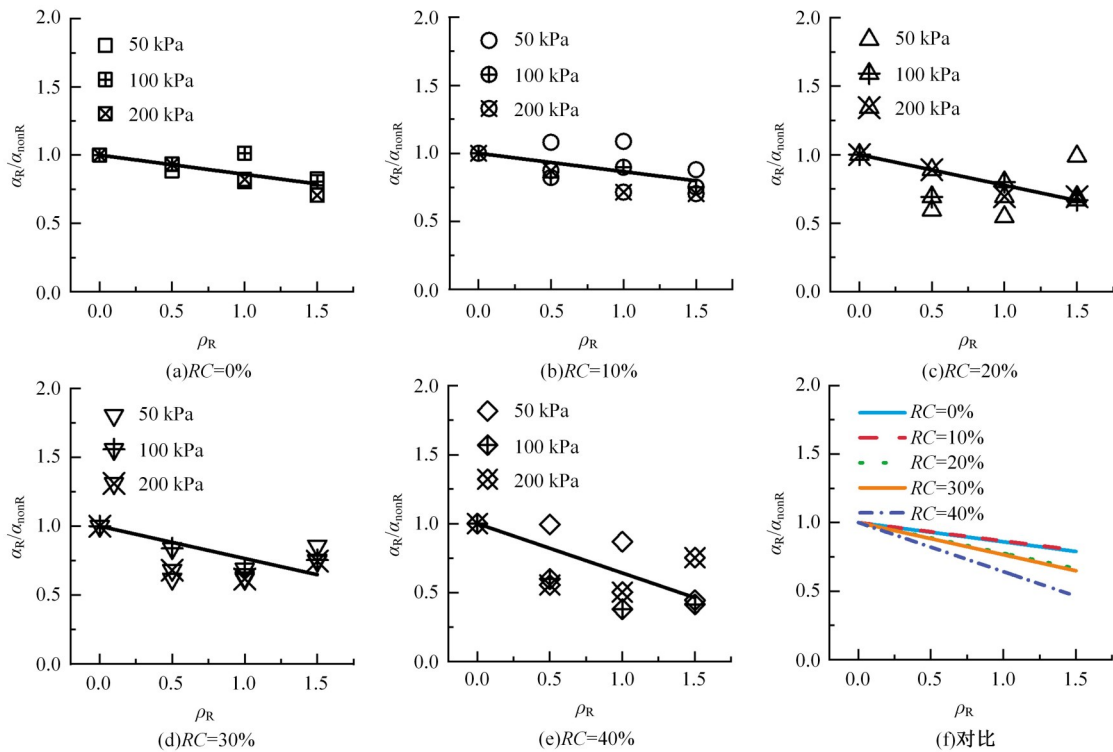


图 16 格栅加筋对橡胶砂应力应变参数  $\alpha$  的影响

Fig. 16 Geogrid reinforcing effects on the stress-strain parameter  $\alpha$  of RSM

表 6 加筋效应系数与加筋密度之间的斜率拟合值

Table 6 Fitted values of slope coefficient between reinforcement effects coefficient and reinforcement density

参数	RC/%				
	0	10	20	30	40
$C_E$	0.190	0.183	0.174	0.102	0.148
$C_\epsilon$	-0.054	0.067	0.206	0.318	0.308
$C_\alpha$	-0.141	-0.135	-0.224	-0.235	-0.358

配比 RC 的变化关系, 可见  $C_E$ 、 $C_\epsilon$ 、 $C_\alpha$  与 RC 的关系可近似用如下线性函数进行模拟:

$$C_E = 0.193 - 0.00166RC \quad (10)$$

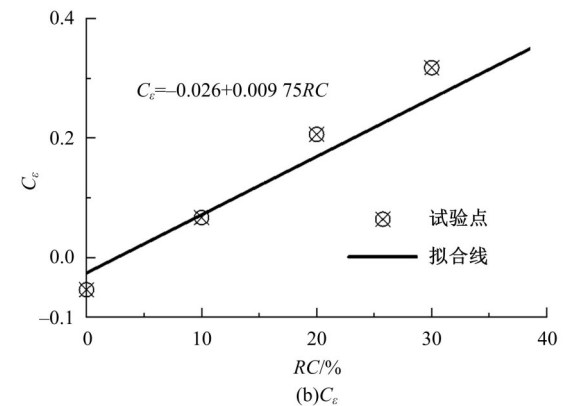
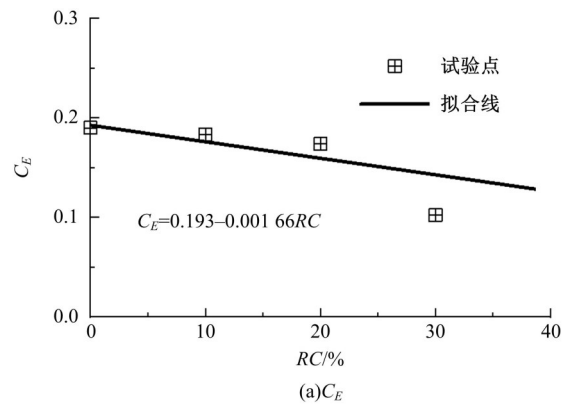
$$C_\epsilon = -0.026 + 0.00975RC \quad (11)$$

$$-C_\alpha = 0.111 + 0.00535RC \quad (12)$$

### 2.3 机理分析

图 18 为参考应变  $\epsilon_r$  和指数参数  $\alpha$  分别对模量归一化的修正邓肯-张模型应力应变曲线的影响。由图 18 可见: ①随着参考应变的增大, 应力应变曲线升高, 非线性程度减弱; ②当  $\alpha > 1$  时, 应力应变关系为应变软化型, 当  $\alpha < 1$  时, 应力应变关系转化为应变硬化型,  $\alpha$  越小, 应力应变曲线非线性越弱。而如图 15 和图 16 所示, 土工格栅加筋会使橡胶砂的参考应变增大、模型指数  $\alpha$  减小, 由此可

见, 土工格栅加筋对橡胶砂应力应变特性的影响主要是改善橡胶砂的应变软化特性、降低橡胶砂应力-应变的非线性程度。土工格栅的加筋机制



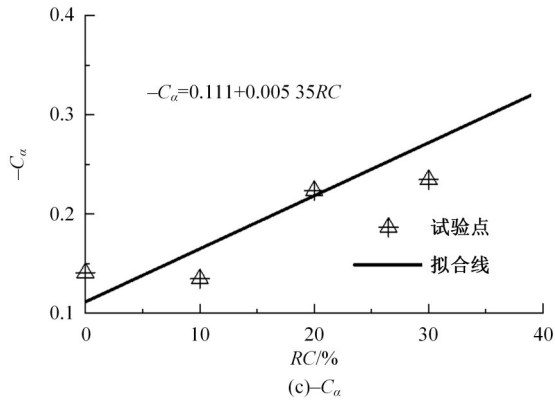


图 17 格栅加筋效应变化斜率随橡胶含量的变化  
 Fig. 17 Variation of Geogrid reinforcing effects on reference

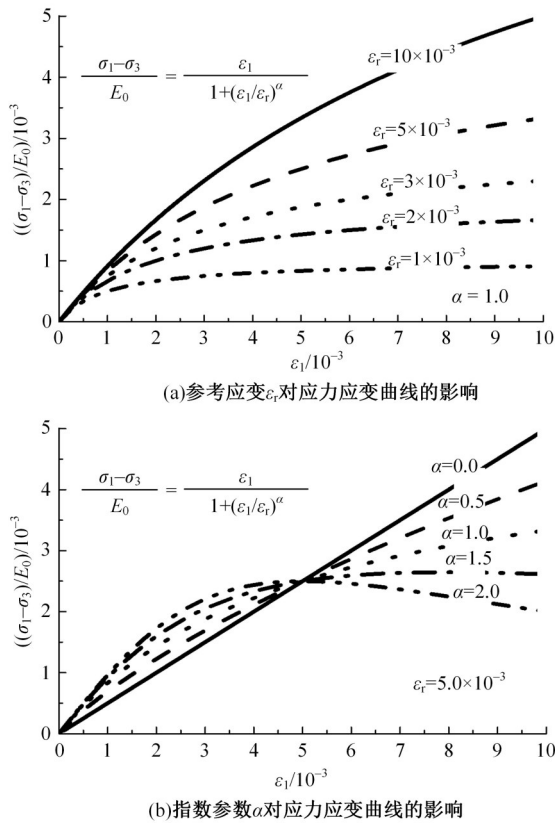


图 18 参考应变  $\epsilon_r$  和指数参数  $\alpha$  对应力应变曲线的影响  
 Fig. 18 Illustration of variation of stress-strain relationships with reference strain  $\epsilon_r$  and parameter  $\alpha$  respectively

主要是通过格栅片与散体材料之间的摩擦力和格栅肋与散体颗粒之间的咬合力限制土体的横向扩展变形。因此,加筋橡胶砂与无筋时相比,颗粒间错动、翻滚位移减小,主要是由于压缩过程中孔隙的压缩和颗粒重新排列。橡胶颗粒的优良弹性使得这种变形可通过橡胶颗粒的自适应变形得到缓冲并回弹,因此加筋后土体的应力应变特性表现为

应变硬化和线性化。橡胶含量越大,无筋橡胶砂的强度和模量越低,横向变形的趋势越大,格栅加筋的约束效应越明显,故对橡胶砂模量归一化应力应变特性的影响也越显著。

### 3 结 论

(1)土工格栅加筋提高了橡胶砂初始弹性模量,相同配比下,模量加筋增大效应系数随加筋密度的增大呈线性增强,随着配比的增大(橡胶颗粒含量增大),模量加筋效应降低。

(2)土工格栅加筋增加了橡胶砂的参考应变,在相同比例下,参考应变加筋效应系数随着土工格栅加筋密度的增大而线性增大,随着配比的增大,参考应变加筋效应进一步增大。

(3)土工格栅加筋降低了橡胶砂应力-应变模型指数  $\alpha$ ,即削弱了橡胶砂应力-应变关系的非线性,同一配比时, $\alpha$ 加筋效应系数随着土工格栅加筋密度的增大而线性增大,并且随着配比的增大,加筋对  $\alpha$  的影响更加明显。

(4)对于由橡胶砂填筑的路基、路堤等构筑物,采用土工格栅加筋既可提高强度,还可同时降低其变形模量的非线性衰减和长期交通循环荷载作用下的累积沉降变形,从而保证高速公路、高速铁路的线路平顺度。

### 参考文献:

[ 1 ] Patil U, Valdes J R, Evans T M. Swell mitigation with granulated tire rubber[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(5): 721-727.  
 [ 2 ] Soltani-jigheh H, Asadzadeh M, Marefat V. Effects of tire chips on shrinkage and cracking characteristics of cohesive soils[J]. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 2013, 37(37): 259-271.  
 [ 3 ] Xiao M, Bowen J, Graham M, et al. Comparison of seismic responses of geosynthetically reinforced walls with tire-derived aggregates and granular backfills[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(11): 1368-1377.  
 [ 4 ] Christ M, Park J B, Hong S S. Laboratory Observation of the response of a buried pipeline to freezing rubber-sand backfill[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(9): 943-950.  
 [ 5 ] Mehrjardi G T, Tafreshi S N M, Dawson A R. Numerical analysis on Buried pipes protected by combination of geocell reinforcement and rubber-soil mix-

- ture[J]. International Journal of Civil Engineering, Transaction B: Geotechnical Engineering, 2015, 13(2): 90-104.
- [6] Feng Z Y, Sutter K G. Dynamic properties of granulated rubber-sand mixtures[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(3): 338-344.
- [7] Senetakis K, Anastasiadis A, Ptilakis K. Dynamic properties of dry sand/rubber (SRM) and gravel/rubber (GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 33(1): 38-53.
- [8] 刘方成, 陈璐, 王海东. 橡胶砂动剪模量和阻尼比循环单剪试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1903-1913.  
Liu Fang-cheng, Chen Lu, Wang Hai-dong. Evaluation of dynamic shear modulus and damping ratio of rubber-sand mixture based on cyclic simple shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1903-1913.
- [9] 姚玉文, 刘方成, 补国斌, 等. 橡胶砂弹性动力学参数的弯曲-伸缩元试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2369-2379.  
Yao Yu-wen, Liu Fang-cheng, Bu Guo-bin, et al. Laboratory study on elastic dynamic mechanics of rubber-sand mixture by bender-extender element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2369-2379.
- [10] Das S, Bhowmik D. Small-strain dynamic behavior of sand and sand-crumb rubber mixture for different sizes of crumb rubber particle[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(11): No. 04020334.
- [11] Rios S, Kowalska M, da Fonseca A V. Cyclic and dynamic behavior of sand-rubber and clay-rubber mixtures[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(5): 3449-3467.
- [12] Lee J, Salgado R, Bernal A, et al. Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(2): 132-141.
- [13] Tsang H H, Lo S H, Xu X, et al. Seismic isolation for low-to-medium-rise buildings using granulated rubber-soil mixtures: numerical study[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41(14): 2009-2024.
- [14] 刘方成, 任东滨, 刘娜, 等. 土工格室加筋橡胶砂垫层隔震效果数值分析[J]. 土木工程学报, 2015, 47(增刊2): 1-7.  
Liu Fang-cheng, Ren Dong-bin, Liu Na, et al. Numerical simulation on the isolation effect of geocell reinforced rubber-sand mixture cushion as earthquake base isolator[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 47(Sup. 2): 1-7.
- [15] Tsang H H, Tran D P, Hung W Y, et al. Performance of geotechnical seismic isolation system using rubber-soil mixtures in centrifuge testing[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(5): 1271-1289.
- [16] Ptilakis D, Anastasiadis A, Vratsikidis A, et al. Large-scale field testing of geotechnical seismic isolation of structures using gravel-rubber mixtures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(10): 2712-2731.
- [17] Zornberg J G, Cabral A R, Viratjandr C. Behaviour of tire shred sand mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(2): 227-241.
- [18] 辛凌, 刘汉龙, 沈扬, 等. 废弃轮胎橡胶颗粒轻质混合土强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 428-433.  
Xin Ling, Liu Han-long, Shen Yang, et al. Consolidated undrained triaxial compression tests on lightweight soil mixed with rubber chips of scrap tires[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 428-433.
- [19] Cabalar A F. Direct shear tests on waste tires-sand mixtures[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 29(4): 411-418.
- [20] Vinod J S, Sheikh M N, Mastello D, et al. The direct shear strength of sand tyre shred mixtures[C]// Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering, Sri Lanka, 2015: 193-196.
- [21] 汪明元, 施戈亮, 丁金华, 等. 土工格栅与压实膨胀土的界面模型及其参数[J]. 吉林大学学报:工学版, 2010, 40(3): 688-693.  
Wang Ming-yuan, Shi Ge-liang, Ding Jin-hua, et al. Interface model and its parameters between geogrids and compacted expansive soil[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2010, 40(3): 688-693.
- [22] 王蔓, 李泽成, 白瑞祥. 复合材料格栅加筋板的分层扩展特性[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(1): 229-233.  
Wang Man, Li Ze-cheng, Bai Rui-xiang. Delamination growth characteristics for composite grid stiffened plates[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2007, 37(1): 229-233.
- [23] 杨广庆. 土工格栅加筋土结构理论及工程应用[M]. 北京:科学出版社, 2010.

- [24] Han J. Principles and Practice of Ground Improvement[M]. New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [25] 刘方成, 吴孟桃, 杨峻. 土工格栅加筋橡胶砂强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 580-591.  
Liu Fang-cheng, Wu Meng-tao, Yang Jun. Experimental study on strength characteristics of geogrid reinforced rubber sand mixtures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 580-591.
- [26] 刘启菲, 庄海洋, 陈佳, 等. 废旧轮胎橡胶颗粒-砂混合物抗剪强度与破坏模式试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(10): 1887-1895.  
Liu Qi-fei, Zhuang Hai-yang, Chen Jia, et al. The shear strength and failure mode of rubber particle-sand mixtures in the test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(10): 1887-1895.
- [27] 杨广庆, 李广信, 张保俭. 土工格栅界面摩擦特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 948-952.  
Yang Guang-qing, Li Guang-xin, Zhang Bao-jian. Experimental studies on interface friction characteristics of geogrids[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 948-952.
- [28] Abdi M R, Arjomand M A. Pullout tests conducted on clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(6): 588-595.
- [29] 周小凤, 张孟喜, 邱成春, 等. 不同形式土工格栅加筋砂的强度特性[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(9): 1377-1381.  
Zhou Xiao-feng, Zhang Meng-xi, Qiu Cheng-chun, et al. Strength of sand reinforced with different forms of geogrid[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(9): 1377-1381.
- [30] 胡幼常, 申俊敏, 赵建斌, 等. 土工格栅加筋掺砂黄土工程性质试验研究[J]. 岩土力学, 2013(增刊2): 74-80.  
Hu You-chang, Shen Jun-min, Zhao Jian-bin, et al. Experimental study of engineering properties of geogrid-reinforced loess mixed with sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(Sup. 2): 74-80.
- [31] 王协群, 郭敏, 胡波. 土工格栅加筋膨胀土的三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1649-1653.  
Wang Xie-qun, Guo Min, Hu Bo. Triaxial testing study of expansive soil reinforced with geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1649-1653.
- [32] Ahmed I. Laboratory Study on Properties of Rubber-soils[M]. Indiana, USA: Purdue University, 1993.
- [33] Verdugo R, Ishihara K. The steady state of sandy soils[J]. Soils and Foundations, 1996, 36(2): 81-91.
- [34] Zheng Y F, Kevin G S. Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(3): 338-344.
- [35] Duncan J M, Chang C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [36] 刘方成, 张永富, 任东滨. 橡胶砂应力-应变特性三轴-单剪联合试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2769-2779.  
Liu Fang-cheng, Zhang Yong-fu, Ren Dong-bin. Stress-strain characteristics of rubber-sand mixtures in united triaxial shear and simple shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2769-2779.
- [37] Youwai S, Bergado D T. Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire sand mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(2): 254-264.