DOI: 10.11779/CJGE202009011

胶--砂粒径比对橡胶砂小应变动力特性的影响

刘方成¹,姚玉文¹,补国斌^{*1},景立平²,宾 佳¹

(1. 湖南工业大学土木工程学院,湖南 株洲 412007; 2. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要:利用 GDS-RCA 共振柱系统,开展不同橡胶含量、粒径比和围压条件下橡胶砂(RSM)的动力特性试验,深入探究 3 种影响因素对橡胶砂动力特性的耦合影响规律和机理。首先,通过试验得到了 4 种橡胶含量和 4 种粒径比的橡胶砂在 3 种围压下的动剪模量和阻尼比曲线,然后探讨了粒径比对橡胶砂动剪模量曲线、最大动剪模量、参考剪应变和阻尼比曲线的影响规律,并分析了其与橡胶含量、围压等因素对橡胶砂动力特性的耦合影响规律及机理,最后通过与已有文献的对比,进一步验证了现象和结论。分析结果表明:粒径比对橡胶砂动力特性的影响较为显著,其改变时最大动剪模量的变化甚至达到 3~4 倍,并且粒径比与橡胶含量对橡胶砂的动力特性的影响无明显耦合效应。当将橡胶颗粒体积视为孔隙的一部分时,常规土最大动剪模量的 Hardin 经验公式可适用于橡胶砂。 关键词:橡胶砂;共振柱;粒径比;动剪模量;阻尼比

中图分类号: TU441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2020)09 - 1669 - 10 **作者简介:** 刘方成(1978—),男,湖南常宁人,博士,教授,主要从事土-结构动力相互作用、结构隔震与减震方面 的研究。E-mail: fcliu@hut.edu.cn。

Effect of particle size ratio of rubber to sand on small strain dynamic characteristics of rubber-sand mixtures

LIU Fang-cheng¹, YAO Yu-wen¹, BU Guo-bin¹, JING Li-ping², BIN Jia¹

(1. Civil Engineering College, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering

and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: By using the GDS-RCA resonant column system, the dynamic characteristics of rubber-sand mixtures (RSMs) under different rubber contents, particle size ratios and confining pressures are tested, and the coupling effect law and mechanism of three factors on the dynamic characteristics of RSM are explored. First of all, the dynamic shear modulus and damping ratio curves of RSMs with four types of rubber contents and particle size ratios under three confining pressures are obtained through experiments. Then, the influences of particle size ratio on the dynamic shear modulus, the maximum dynamic shear modulus, the reference shear strain and the damping ratio curve of RSMs are discussed, and the coupling effects of particle size ratio, rubber content and confining pressure on the dynamic characteristics of RSMs are also analyzed. Finally, the phenomenon and conclusion are further verified by comparing with the existing literatures. The results show that the particle size ratio has a significant effect on the dynamic characteristics of RSMs, and the maximum dynamic shear modulus changes even 3 to 4 times when it changes. There is a coupling effect between the particle size ratio and the rubber content on the dynamic characteristics of RSMs. The effects of the particle size ratio under low rubber content are significantly different from those under high rubber content, but the influences of confining pressure and particle size ratio on the dynamic characteristics of RSMs have no obvious coupling effect. The maximum shear modulus of RSMs can be estimated by treating the volume of rubber as voids with the empirical equations proposed by Hardin et al.

Key words: rubber-sand mixture; torsional resonant column; particle size ratio; dynamic shear modulus; damping ratio

0 引 言

由废旧轮胎破碎颗粒与天然砂按特定比例配合得 到的混合物简称橡胶砂(RSM, rubber sand mixture)。 相比于常规土,橡胶砂具有重度小、模量低、阻尼大、

弹性好等特点,可应用于特殊土木工程领域,如用作

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(2020JJ2237,2020JJ0150) 收稿日期:2019-12-25 *通信作者(E-mail:guobinbu@hut.edu.cn) 桥台、挡墙、边坡的轻质填料^[1]和保温隔热填料^[2],用 于膨胀土和软土治理^[3],作为生命线管道回填保护^[4], 以及作为村镇房屋廉价隔震垫层等^[5-8]。由于橡胶砂在 土木工程中的应用可大量消耗废旧轮胎,且不会对地 下水产生二次污染^[9],是废旧轮胎资源化再利用的典 范途径。对橡胶砂的力学特性展开研究,为其在土木 工程中的应用奠定基础,具有重要的意义。

相比于母材砂,橡胶砂宏观力学特性的改变主要 是由于橡胶颗粒的掺入改变了颗粒之间的接触状态。 因此,橡胶颗粒的掺量(RC,rubber content)是影响 橡胶砂力学特性的主要因素,已有文献对其展开了深 入的研究^[10-16]。但显而易见,橡胶–砂混合物中颗粒 之间的接触状态除受橡胶颗粒质量掺量的影响外,还 与橡胶颗粒与砂颗粒的粒径比(PSR,particle size ratio)有关,甚至还受两种因素的耦合影响。图1给 出了在橡胶含量一定的情况下,不同胶砂颗粒粒径比 时橡胶砂的颗粒组分构成示意图,可见,随着粒径比 的变化,砂颗粒的接触状态、粒间空隙的填充状态均 发生改变,因而其力学性能必将受到影响。





Fig.1 Diagrams of particle composition of rubber sand with

different particle size ratios

已有关于胶-砂粒径比对橡胶砂动力特性影响的 研究报道甚少。Lee 等^[17]通过有侧限固结和弯曲元试 验研究了粒径比对橡胶砂受压变形和初始剪切模量的 影响,但未能揭示粒径比对橡胶砂动剪模量和阻尼比随 动应变幅值非线性变化特性的影响规律;Ehsani等^[18]、 Li 等^[19]分别在通过扭转共振柱-动三轴联合试验研究 橡胶含量和砂的矿物特性对橡胶砂动剪模量的影响, 以及橡胶砂的抗液化性能研究中,考虑了粒径比因素, 给出了定性的试验现象,但由于所考虑粒径比工况较 少,难以总结定量规律。

基于以上研究现状,本文利用 GDS-RCA 共振柱 系统,研究 4 种橡胶含量、4 种粒径比橡胶砂在 3 种 围压下的动力特性,探讨粒径比对橡胶砂动剪模量和 阻尼比的影响规律,分析其与橡胶含量(RC, rubber content)、围压(σ_0)等因素对橡胶砂动力特性的耦 合影响规律及机理,以期为后续研究和相关应用提供 参考。

1 试验介绍

1.1 试验材料

试验砂为厦门艾思欧(ISO)标准砂,颗粒粒径 0.05~2 mm,平均粒径为 0.64 mm,颗粒相对密度 2.67;橡胶颗粒为废旧轮胎胶粒,筛取 4 种颗粒集, 平均粒径分别为 0.3,0.6,1.9 和 3.7 mm,相应的胶 砂粒径比分别为 0.5,0.9,3.0,5.8。颗粒材料的级配 曲线如图 2 所示。橡胶颗粒相对密度为 1.1。



Fig. 2 Particle-size distribution curves of rubber and sand

1.2 试验工况与试样制备

每种粒径比的橡胶砂考虑4种质量配比,每种质 量-粒径比工况及母材砂考虑3种围压(50,100,200 kPa),共51种试验工况,每种工况下进行3个试样测 试。试样制备前实测不同质量比及粒径比橡胶砂的最 大、最小干密度,根据相同的初始相对密度计算该工 况下橡胶砂试样的质量。试样搅拌均匀后采用砂雨法 装样,每个试样土料分5次均匀落入试模,分层压实, 尽量保证试样均匀。不同配比橡胶砂的装样控制密度、 试样质量及初始孔隙比如表1所示。部分配比工况下 的橡胶砂混合料照片如图3所示。

1.3 试验设备和试验方法

试验在湖南工业大学岩土实验室 GDS 共振柱测 试系统上进行,振动方式为扭转剪切振动。

试验步骤如下:①装样完成后施加-20 kPa 的负 压,保持试样稳定;②用游标卡尺量测试样初始高度 和直径(量3次取平均值);③依次装上驱动装置、位 移传感器、压力室,对竖向位移进行调零处理;④分 四次进行加围压、卸负压,每次加5kPa围压、卸-5kPa 负压,确保试样稳定;⑤保持反压为0,施加目标围 压,固结至试样竖向位移稳定;⑥进行共振柱试验。

表 1 不同配合比橡胶砂试样制备控制参数

Table 1 Properties of rubber-sand mixtures with different mass

ratios

粒径 比 PSR	橡胶含 量 RC /%	最小干 密度 <i>r</i> d,min /(g:cm ⁻³)	最大干 密度 <i>r</i> d,max	控制密) 度 r _d /(g·cm ⁻³)	相对密 实度 <i>D</i> r	装样 质量 /mg	初始孔 隙比 eo
纯砂	0	1.70	1.96	1.88	0.7	368.4	0.423
0.5	5	1.46	1.79	1.65	0.7	323.9	0.511
	10	1.29	1.70	1.55	0.7	304.5	0.507
	15	1.18	1.53	1.41	0.7	276.0	0.565
	30	0.82	1.13	1.01	0.7	198.6	0.848
	5	1.49	1.75	1.66	0.7	326.2	0.500
0.0	10	1.32	1.55	1.47	0.7	288.9	0.588
0.9	15	1.16	1.43	1.33	0.7	262.0	0.648
	30	0.82	1.07	0.98	0.7	193.2	0.900
2.0	5	1.59	1.83	1.75	0.7	343.5	0.425
	10	1.50	1.74	1.66	0.7	326.6	0.405
5.0	15	1.41	1.65	1.57	0.7	308.2	0.401
	30	1.14	1.31	1.25	0.7	246.4	0.490
5.8	5	1.61	1.83	1.76	0.7	345.8	0.415
	10	1.55	1.77	1.70	0.7	334.1	0.373
	15	1.43	1.69	1.61	0.7	315.4	0.369
	30	1.23	1.43	1.36	0.7	266.9	0.375

RC=15%, PSR=0.5 RC=15%, PSR=0.9

RC=15%, PSR=3.0 RC=15%, PSR=5.8





图 3 不同橡胶含量和胶砂粒径比橡胶砂混合物

Fig. 3 Photos of RSMs with different rubber contents and particle size ratios

2 结果分析

2.1 动剪模量曲线

试验发现,在相同的围压和质量配比情况下,不 同粒径比橡胶砂的动剪模量曲线存在显著的差异,且 不同橡胶含量时,粒径比的影响规律不同,即橡胶砂 动剪模量明显受橡胶含量与粒径比两者的耦合影响:

(1)当橡胶含量较小(RC=5%)时,橡胶砂动 剪模量衰减曲线 $G_{\rm d}$ - $\gamma_{\rm d}$ 随粒径比增大而单调降低。

(2)当橡胶含量较大(RC≥10%)时, G_d - γ_d
 曲线随粒径比的增大而表现先减小后增大的现象,且
 临界粒径比较一致地为 0.9。

(3)对于橡胶含量不小于 10%的橡胶砂,当粒 径比超过临界值后继续增大时,动剪模量曲线回升, 但其回升规律随橡胶含量不同而各异。当 RC =10% 时,粒径比 3.0 和 5.8 的动剪模量曲线依次增大,且 均低于粒径比 0.5 时的动剪模量曲线。当 RC =15%时, 粒径比 3.0 和 5.8 的动剪模量曲线依次增大,且均高 于粒径比 0.5 时的动剪模量曲线。当 RC =30%时,粒 径比 3.0 的动剪模量曲线显著高于粒径比 0.5 时的动 剪模量曲线,而粒径比 5.8 的动剪模量曲线复又相对 粒径比 3.0 时降低,当仍然远高于粒径比 0.5 时的动 剪模量曲线。

不同围压下粒径比对橡胶砂动剪模量曲线的影响 规律相似。限于篇幅,本文仅给出围压 σ_0 =100 kPa 时的橡胶砂动剪模量随动应变幅值的衰减规律,如图 4 所示。







2.2 粒径比对橡胶砂最大动剪模量的影响

最大动剪模量是土动力特性的重要表征,也是岩 土体动力响应分析的必需参数。采用经典的 H-D 公式 对动剪模量 - 动剪应变试验曲线进行拟合,可得到各 配比工况下的最大动剪模量。

$$G_{\rm d} = \frac{G_{\rm dmax}}{1 + \gamma_{\rm d} / \gamma_{\rm ref}} \quad . \tag{1}$$

式中 G_{dmax} 为最大动剪模量; γ_{d} 为动剪应变, G_{d} 为 对应于动剪应变 γ_{d} 的动剪模量, γ_{ref} 为参考剪应变, 其对应的动剪模量为 $0.5 G_{\text{dmax}}$ 。可知, γ_{ref} 越大, 动剪 模量的衰减速率越慢。

各试验工况下动剪模量曲线的拟合曲线以细实线 绘制于图 4,可见拟合曲线与试验散点规律吻合较好, 相应的拟合参数值列如表 2 所示。

图 5 给出了不同橡胶含量、不同围压下,橡胶砂 最大动剪模量 G_{dmax} 随粒径比 PSR 的变化规律。可见, 在橡胶含量相同的情况下,不同围压下最大动剪模量 随粒径比的变化曲线近似平行,说明粒径比与围压对 动剪模量的耦合影响效应较小。而橡胶含量与粒径比 对橡胶砂最大动剪模量的影响存在较明显的耦合影 响。当橡胶含量为 5%时,G_{dmax} 随粒径比增大而近似 单调减小。当橡胶含量在 10%~15%时,G_{dmax} 随粒径 比增大先减小而后增大,粒径比 0.9 时达到最小值。 当橡胶含量达到 30%时,G_{dmax} 随粒径比增大出现反 S 形变化,先减小并在粒径比 0.9 时达到最小值,而后 在粒径比 3.0 时达到最大值,然后随着粒径比增大至 5.8 再次缓慢下降。

以粒径比 0.9 (接近 1.0)时的工况为参照,可 分析不同橡胶含量下粒径比对橡胶砂 G_{dmax} 的影响程 度,如图 6 所示。可见,当橡胶含量小于 15%时,不

表 2	$G_{\rm d}$ - $\gamma_{\rm d}$ 试验曲线拟	合参数
Table 2 Fitting	parameters of tested	$G_1 - \gamma_1$ curves

					u ; u		
Ċ	σ_0	50 kl	Pa	100 k	Ра	200 k	Ра
PSR	RC	$G_{ m dmax}$ /MPa	$\gamma_{ m ref}$ /%	$G_{\rm dmax}$ /MPa	$\gamma_{ m ref}$ /%	$G_{\rm dmax}$ /MPa	$\gamma_{ m ref}$ /%
_	0%	83.27	0.02039	122.27	0.02826	180.90	0.03991
0.5	5%	64.29	0.02950	112.26	0.02687	153.51	0.03752
	10%	45.34	0.02947	72.60	0.03879	113.57	0.04766
	15%	24.03	0.09993	43.57	0.06420	63.82	0.09913
	30%	6.49	0.09960	8.97	0.28200	16.22	0.21900
0.9	5%	64.67	0.02915	89.00	0.03805	142.21	0.04431
	10%	32.68	0.04994	50.45	0.05680	73.06	0.07777
	15%	18.99	0.09165	30.65	0.08097	47.95	0.09669
	30%	3.74	0.33000	5.99	0.24900	10.09	0.28700
3.0	5%	60.16	0.03119	84.43	0.03773	122.28	0.04588
	10%	42.88	0.03583	60.24	0.04407	86.22	0.05868
	15%	30.32	0.03836	43.39	0.05078	65.01	0.06049
	30%	14.59	0.05607	17.85	0.08775	26.71	0.07472
5.8	5%	57.43	0.02244	83.92	0.03000	128.09	0.04353
	10%	46.27	0.03382	65.02	0.03875	92.49	0.04964
	15%	34.53	0.03496	48.58	0.04771	71.33	0.06941
	30%	13.01	0.05787	17.75	0.09621	24.95	0.14200

同围压下的 $G_{\text{dmax}}/G_{\text{dmax},PSR=0.9}$ - PSR 试验散点较为接近,说明粒径比与围压对最大动剪模量的耦合影响效应较小; 当橡胶含量为 30%时,不同围压下的 $G_{\text{dmax}}/G_{\text{dmax},PSR=0.9}$ - PSR 试验点离散性稍大,但变化趋势相同。

由不同围压下的G_{dmax}/G_{dmax,PSR=0.9} - PSR 平均趋势 线对比可见,随着橡胶含量的增大,粒径比对G_{dmax} 的影响程度亦越大。当橡胶含量为 5%时,粒径比从 0.5 变化至 5.8,所引起的最大动剪模量变化在 0.2 倍 以内,当橡胶含量为 30%时,同样的粒径比变化所引 起的最大动剪模量变化可达到 3~4 倍。可见,粒径 比对橡胶砂动剪模量的影响不能忽略。由上述分析可 知,胶砂粒径比与橡胶含量、围压一样,是影响橡胶 砂最大动剪模量的主要因素。下面,将研究如何在已 知上述条件的情况下,对橡胶砂的最大动剪模进行预 测。



Fig. 5 Maximum dynamic shear moduli of RSMs



Fig. 6 Relationship between
$$G_{dmax}/G_{dmax PSR=0.9}$$
 and PSR

2.3 橡胶砂最大动剪模量经验公式

在土动力学领域,Hardin 等^[20]建议的常规土最大 动剪模量经验公式得到了大量实践验证与广泛应用:

$$G_{\rm dmax} = AF(e) {\rm OCR}^k p_{\rm a}^{1-n} \sigma_0^n \quad , \qquad (2)$$

式中, A 为无量纲模量参数, F(e) 为孔隙比函数, OCR 为超固结比, p_a 为标准大气压力, σ_0 为围压, k, n 为指数参数。对于重塑非黏性土试样 OCR 可取 1, 故指数 k 可暂不研究。

大量研究表明, n可取 0.5。图 7 给出了不同橡胶 含量、不同粒径比时,用 OCR^k ($p_a\sigma_0$)⁰⁵ 对 G_{dmax} 进行 归一化,得到的无量纲系数 AF(e) 与围压 σ_0 的关系 曲线。可见,当 n 取 0.5 时,不同橡胶含量、不同粒 径比橡胶砂的无量纲模量系数 AF(e) 与围压 σ_0 的关 系曲线均大致呈水平状,说明其与围压无关,亦即用 OCR^k ($p_a\sigma_0$)⁰⁵ 可对 G_{dmax} 进行良好的归一化。



无量纲模量系数 *AF*(*e*) 为仅与孔隙比 *e* 相关的函数。Hardin 给出了常规土的经验式^[20]

$$AF(e) = 123(2.973 - e)^2 / (1 + e)$$
 。 (3)
Feng 等^[21]给出了橡胶砂的经验式:

$$AF(e) = A/(0.3 + 0.7e^2)$$
 (4)

上两式所对应的 *AF*(*e*) - *e* 关系曲线绘制于图 8 (a),可见,两个经验公式所给出的无量纲模量系数 *AF*(*e*)均随着 *e* 的增大而单调减小。

关于橡胶砂孔隙比的确定存在两种观点。第一种 观点,将橡胶颗粒当作混合土的一部分,孔隙比等于 孔隙体积与砂颗粒体积和橡胶颗粒体积之和的比值, 即

$$e = V_{\rm viod} / (V_{\rm sand} + V_{\rm rubber}) \quad , \tag{5}$$

式中, e为孔隙比, V_{viod}, V_{sand}, V_{rubber}分别为孔隙体积、砂颗粒体积和橡胶颗粒体积。

第二种观点认为,由于橡胶颗粒模量远小于砂颗粒 模量,且橡胶体积不可压缩(橡胶材料的泊松比近似为 0.5),因此橡胶颗粒本身应视为孔隙的一部分^[21-22]。 相应的孔隙比为

$$e = (V_{\text{viol}} + V_{\text{rubber}}) / V_{\text{sand}} , \qquad (6)$$

式中各符号的意义与式(5)相同。

本文试验发现,当按常规方法确定橡胶砂孔隙比 (即按式(5)计算孔隙比)时,不同粒径比橡胶砂 *AF(e) - e*关系表现出明显差异且无规律性,与图 8 (a)所示常规土*AF(e)*随 *e*单调减小的己知认识不 符,如图 8(b)所示。而当将橡胶颗粒体积计入孔隙 (即按式(6)计算孔隙比)时,不同粒径比橡胶砂的 *AF(e) - e*关系曲线高度集中,且表现出明显的与常 规土类似的规律性,如图 8(c)所示。可知,本文试 验表明,当将橡胶颗粒体积视为孔隙体积的一部分 时,则 Hardin 针对常规土所提出的最大动剪模量经 验公式仍然可适用于橡胶砂这种人工混合土。此结论 也再次验证了 Feng 等^[21]的研究发现。

经对比,经验公式(4)能更好地模拟橡胶砂无量 纲模量系数 *AF*(*e*)与孔隙比 *e*(按式(6)计算,后同) 的关系,且拟合得到系数 *A*=530,拟合曲线与试验点 的对比关系示于图 8(d)。

图 9 给出了不同质量配比及粒径比对橡胶砂孔隙 比的影响曲线。可见,随着橡胶含量的增加,孔隙比 呈加速增大趋势。不同粒径比时,孔隙比增大速率不 同。粒径比接近 1 时, *e* - RC 关系曲线最高,粒径 比越远离 1, *e* - RC 关系曲线越低。设橡胶砂*e* -RC 关系可用下式进行描述:

e = e_s[1 + p · RC + q · RC²] , (7)
 式中, e_s 为橡胶含量为零时(即母材纯砂)的孔隙
 比,取 0.423; p, q 为无量纲拟合参数。式(7)的拟

合曲线一同绘于图 9 中,可见与试验散点规律吻合良 好。相应的拟合参数 p, q 值列于表 3 所示。



图 8 最大动剪模量的围压归一化

Fig. 8 Normalization of G_{dmax} with confining pressure

表 3 e - RC 关系曲线拟合参数

Table 3 Parameters values of e - RC relationships

			-
PSR	р	q	R^2
0.5	10.52	25	0.995
0.9	11.64	25	0.999
3.0	5.37	25	0.998
5.8	3.83	25	0.989

由表 3 可见,参数 q 为与粒径比 PSR 无关的定 值,参数 p 则表现出类似以粒径比 PSR=1 为中心的正 态分布的形式,即 PSR 值越靠近 1, p 值越大, PSR 值越远离 1, p 值越小。因此,设参数 p 与粒径比 PSR 之间的关系可用 Gauss 函数表达:

$$p = p_0 + \frac{B}{\omega\sqrt{\pi/2}} \exp\left[-2\left(\frac{x-c}{\omega}\right)^2\right]$$
$$x = \begin{cases} PSR & PSR \ge 1\\ 1/PSR & PSR < 1 \end{cases},$$
(8)

式中, *x* 为 Gauss 函数自变量。当 PSR \geq 1 时, *x*=PSR,当 PSR <1 时, *x*=1/PSR。 p_0 , *B*, ω , *c* 均为 Gauss 函数参数,其中*c*=1。



图 9 橡胶砂孔隙比随橡胶含量和粒径比的变化规律

Fig. 9 Variation of void ratio of RSMs with rubber content and particle size ratio

用上式对表 3 中参数 p 与粒径比 PSR 之间的关系 进行拟合,如图 10 所示。图中,实心散点为真实试 验点,空心散点为试验点以 PSR=1 为镜像轴的虚拟 约束点,实线为用上述两种点按式(8) 拟合得到的曲 线,拟合得到的 Gauss 函数参数分别 $p_0 = 3.65$, B = 26, $\omega = 2.46$ 。



图 10 参数 *p* 与粒径比 PSR 之间的关系 Fig. 10 Relationship between *p* and *PSR*

图 11 给出了根据式 (2) ~ (8) 预测的橡胶砂最 大动剪模量与实测值的对比。可见本文所提公式能较 好地预测橡胶砂最大动剪模量随橡胶砂质量配比、粒 径比以及围压的变化规律。

2.4 阻尼比

图 12 给出了橡胶砂的阻尼比试验曲线,其中各子 图分别将相同橡胶含量和围压、不同粒径比工况的阻 尼比曲线绘制在同一坐标系,以便观察粒径比对阻尼 比曲线的影响。由图可见:

(1)当橡胶含量较低(RC=5%)时,橡胶砂阻 尼比较小,与纯砂接近,不同粒径比橡胶砂阻尼比曲 线亦较为接近。

(2)随着橡胶含量的增大(RC≥10%),橡胶 砂阻尼比明显高于纯砂,不同粒径比橡胶砂阻尼比曲 线之间的差异也逐渐增大。

(3) 在试验所涉及 12 种橡胶含量和围压组合工 况中,有 10 种工况下,橡胶砂阻尼比曲线随粒径比的 增大表现出先降低后升高的规律,临界粒径比为 0.9, 亦即当粒径比接近 1 时,橡胶砂阻尼比最小。

(4)随着围压增大,相同橡胶含量的橡胶砂阻尼 比逐渐减小,但随着橡胶含量增加,围压对阻尼比的 影响减弱。

(5)不同围压下,阻尼比曲线随粒径比变化的规 律相似,说明围压与粒径比对橡胶砂阻尼比特性的影 响无明显耦合效应。

2.5 机理分析

橡胶砂中主要存在 3 种接触形式: 砂-砂接触、 胶-砂接触和胶-胶接触。橡胶砂力学特性变化的微观 机制就是由于这 3 种接触所组成的力链分布改变所 致。由图1的示意图可知,橡胶含量和胶砂粒径比均 会改变混合物中橡胶颗粒和砂颗粒的分布状态和颗粒 接触状态,因此两者对橡胶砂动力特性存在耦合影响 效应。

当橡胶含量较小(如 RC=5%)时,橡胶颗粒数量 少而离散分布于砂颗粒中。此时,粒径比越小,橡胶 颗粒越分散,且分布于砂颗粒间的空隙,基本不参与 整体受力,力链主要由砂-砂接触所组成,故橡胶砂 表现出较大的动剪模量;随着粒径比增大,橡胶颗粒 数量减小但尺寸增大,超出砂颗粒间空隙尺寸后则参 与受力,使得部分力链上的砂-砂接触被胶-砂接触所 代替,因而动剪模量降低。

随着橡胶含量增多,混合物中橡胶组分增大。当 粒径比远小于1时,橡胶组分的分布弥散,相当部分 小橡胶颗粒填充于砂颗粒间的空隙未能参与整体受 力,削弱了其对混合物抵抗变形能力衰减作用,故动 剪模量仍较大。当粒径比接近1时,橡胶颗粒与砂颗







粒尺寸相近,两者的接触最为充分,原力链中的砂-砂接触最大限度地被砂-胶接触所替代,故动剪模量 达到最小值。当粒径比超过1继续增大时,橡胶组分 的分布更加集中而形成少数大的橡胶颗粒悬浮于砂颗 粒中。由于橡胶材料的不可压缩性,这些大的橡胶颗 粒被砂颗粒包围而不可被嵌入,从而形成拱效应,使 得力链能绕过它而继续通过砂-砂接触传递。这解释 了当粒径比超过 0.9 后,动剪模量回升的原因。粒径 比越大,橡胶组分的集中程度越大,力链所需绕过的 "不可压缩空腔"的数量也就越少,因而动剪模量回 升越多。但当橡胶含量足够多时,可能形成连续相邻 的"空腔",进而削弱力链拱的侧向约束,从而使橡 胶颗粒参与力链的传导。这解释了橡胶含量为 30% 时,当粒径比从 3.0 增加至 5.8 时,橡胶砂动剪模量 再次降低的试验现象。



图 13 不同粒径比时颗粒细观分布及接触示意图

Fig. 13 Description of particle distribution and contact diagram of RSMs with different particle size ratios

橡胶砂的阻尼主要由振动过程中颗粒间的摩擦、 砂颗粒去棱角化破碎、橡胶颗粒的变形发热等能量耗 散所组成。粒径比接近1时,橡胶颗粒与砂颗粒接触 最为充分,砂-砂刚性接触减少,砂颗粒间的去棱角 化破碎耗能得到最大程度减小。这解释了在绝大多数 工况下,粒径比 0.9 时橡胶砂阻尼比最小的原因。但 即便如此,由于橡胶颗粒的摩擦、变形耗能以及振动 发热效应,仍然比纯砂的阻尼比大。

3 结 论

(1)橡胶含量和胶砂粒径比均会改变混合物中橡 胶颗粒和砂颗粒的分布状态和颗粒接触状态,并共同 影响混合土孔隙比,因此橡胶含量和粒径比对橡胶砂 的动力特性存在耦合效应。

(2)当橡胶含量较小(RC=5%)时,随着粒径 比的增大,由于试样内部力链中部分砂-砂接触逐渐转 变为胶-砂接触,橡胶砂动剪模量衰减曲线 $G_d - \gamma_d$ 会 有所降低;当橡胶含量较大(RC \geq 10%)时,试样内 部橡胶颗粒增多,在粒径比为 0.5 时相当部分橡胶颗 粒处于砂颗粒间隙间,未参与受力,在粒径比接近 1 时胶-砂接触最为充分,而在粒径比继续增大时由于橡 胶颗粒增大且不可压缩而产生拱效应,因此 $G_d - \gamma_d$ 曲 线随粒径比的增大而表现先减小后增大的现象,临界 粒径比约为 1。

(3)随着橡胶含量的增多,参考剪应变增大,橡 胶砂动剪模量随动应变的衰减变缓;当橡胶含量小于 10%时,粒径比对参考剪应变的影响较小,当橡胶含量大于 10%时,粒径比对参考剪应变的影响较为明显,后者随着前者的粒径比减小而增大。

(4)当橡胶含量较低(RC=5%)时,橡胶砂阻 尼比较小,与纯砂接近,不同粒径比橡胶砂阻尼比曲 线亦较为接近;随着橡胶含量的增大(RC≥10%), 橡胶砂阻尼比明显高于纯砂,不同粒径比橡胶砂阻尼 比曲线之间的差异也逐渐增大;橡胶砂阻尼比曲线随 粒径比的增大表现出先降低后升高的规律,临界粒径 比为 0.9,亦即当粒径比接近 1 时,橡胶砂阻尼比最 小。

(5)当将橡胶颗粒视作孔隙时,Hardin 常规土 最大动剪模量经验公式仍可适用于橡胶砂,结合本文 所提橡胶砂孔隙比试验拟合式,可对不同质量配比和 粒径比橡胶砂的最大动剪模量进行合理预测。

参考文献:

- LEE J, SALGADO R, BERNAL A, et al. Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1999, 125(2): 132 - 141.
- [2] XIAO Y, NAN B, MCCARTNEY J S. Thermal conductivity of sand-tire shred mixtures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(11): 06019012.
- [3] 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.
- [4] MEHRJARDIAAB G T. Combined use of geocell reinforcement and rubber–soil mixtures to improve performance of buried pipes[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2012, 34: 116 - 130.
- [5] PITILAKIS K, KARAPETROU S, TSAGDI K. Numerical investigation of the seismic response of RC buildings on soil replaced with rubber-sand mixtures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, **79**: 237 – 252.
- [6] BRUNET S, DE LA LLERA J C, KAUSEL E. Non-linear modeling of seismic isolation systems made of recycled tire-rubber[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016(85): 134 – 145.
- [7] 刘方成,张永富,周亚栋. 土工格室加筋橡胶砂垫层隔震试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增刊 1): 93 100.
 (LIU Fang-cheng, ZHANG Yong-fu, ZHOU Ya-dong, et al. Experimental study on isolating performance of geo-cell reinforced rubber-sand mixture cushion[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S1): 93 100. (in Chinese))

- [8] TSANG H H, PITILAKIS K. Mechanism of geotechnical seismic isolation system: analytical modeling[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 122: 171 – 184.
- [9] MAEDA R, FINNEY B. Water quality assessment of submerged tire-derived aggregate fills[J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 2018, 144(2): 04017105.
- [10] YOUWAI S, BERGADO D T. Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire-sand mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(2): 254 - 264. doi: 10.1139/T02-104
- [11] ZORNBERG J G, CABRAL A R, VIRATJANDR C.
 Behaviour of tire shred sand mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(2): 227 - 241.
- [12] SENETAKIS K, ANASTASIADIS A, PITILAKIS 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: 38 - 53.
- [13] 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. (in Chinese))
- [14] FU R, COOP M R, LI X Q. Influence of particle type on the mechanics of sand-rubber mixtures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2017, 143(9): 1 - 15.
- [15] FONSECA J, RIAZ A, Bernal-Sanchez J, et al. Particle–scale interactions and energy dissipation mechanisms in

sand-rubber mixtures[J]. Géotechnique, 2019, 9(4): 263 - 268.

- [16] LI W, KWOK C Y, SANDEEP C S, et al. Sand type effect on the behaviour of sand-granulated rubber mixtures: Integrated study from micro- to macro-scales[J]. Powder Technology, 2019, 342: 907 - 916.
- [17] LEE C, TRUONG Q H, LEE W, et al. Characteristics of rubber-sand particle mixtures according to size ratio[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(4): 323 – 331.
- [18] EHSANI M, SHARIATMADARI N, MIRHOSSEINI S M. Shear modulus and damping ratio of sand-granulated rubber mixtures[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(8): 3159 - 3167.
- [19] LI B, HUANG M, ZENG X. Dynamic behavior and liquefaction analysis of recycled-rubber sand mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(11): 04016122.
- [20] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soil: II design equations and curves[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1972, SM7, 667 - 692.
- [21] FENG Z Y, SUTTER K G. Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, 23(3): 338 - 344.
- [22] SENETAKIS K, ANASTASIADIS A, PITILAKIS K, et al. Dynamic behavior of sand rubber mixtures: part I effect of rubber content and duration of confinement on small-strain shear modulus and damping ratio[J]. Journal of Astm International, 2012, 9(2): 103711.