

橡胶加筋膨胀土共振柱动力特性试验研究

王 勇, 时 伟*, 张 瑾

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘 要: 废弃橡胶可以较好地改良膨胀土的力学性能及胀缩特性, 本试验考虑不同初始条件对橡胶加筋膨胀土(Expansion Soil-Rubber, ESR)动剪切模量影响, 采用 NGZ-20 共振柱试验机开展不同含水率、橡胶掺量和颗粒粒径的系列研究, 得到了不同初始条件下 ESR 的最大动剪切模量、动剪切模量与剪应变的变化规律。试验结果表明: 随橡胶掺量和含水率的增加, 加筋土的最大动剪切模量降低; 在 $1 \times 10^{-6} < \gamma < 1 \times 10^{-4}$ 剪应变范围内, 动剪切模量衰退明显, 橡胶掺量变化较含水率改变对动剪切模量衰减影响更为显著; 橡胶粒径对最大动剪切模量影响明显, 但对动剪切模量衰减曲线影响不大。试验所得动力参数可以为橡胶改良膨胀土工程应用提供参考。

关键词: 膨胀土; 橡胶加筋; 共振柱试验; 动剪切模量; 剪应变

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)02-0020-08

Experimental study on the dynamic characteristics of Expansion Soil-Rubber through resonance column test

WANG Yong, SHI Wei*, ZHANG Jin

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: Waste rubber can better improve the mechanical properties and expansion and contraction characteristics of expansive soil. In this experiment, considering the influence of different initial conditions on the dynamic shear modulus of Expansion Soil-Rubber (ESR), the NGZ-20 resonance column testing machine was used to carry out a series of studies on different moisture content, rubber content and particle size. The maximum dynamic shear modulus, dynamic shear modulus and shear strain of ESR under different initial conditions were obtained. The test results show that the maximum dynamic shear modulus of reinforced soil decreases with the increase of rubber content and water content. In the strain range of $1 \times 10^{-6} < \gamma < 1 \times 10^{-4}$, the dynamic shear modulus declines obviously, and the change of rubber content has more significant effect on the dynamic shear modulus than the change of water content. The influence of rubber particle size on the maximum dynamic shear modulus is obvious, but has little effect on the attenuation curve of dynamic shear modulus. The dynamic parameters obtained from the test can provide reference for the engineering application of rubber modified expansive soil.

收稿日期: 2022-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41702320)

作者简介: 王 勇(1998-), 男, 山东临沂人。硕士, 研究方向为岩土工程。E-mail: wy134066@163.com.

* 通信作者: 时 伟(1964-), 女, 山东日照人。教授, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: susan.sw@163.com.

Key words: expansive soil; rubber reinforcement; resonance column test; dynamic shear modulus; shear strain

膨胀土作为一种特殊的工程灾害性土壤,主要由蒙脱石、伊利石与高岭土等层状硅酸盐矿物组成,其独特的胀缩性、超固结性和裂隙性会对工程建设造成持续破坏,造成路基开裂、边坡失稳、上部结构倾斜等问题,会给我国带来巨大的经济损失^[1]。

目前研究人员主要采用物理和化学方法对膨胀土进行稳定性改良。化学处理方法通常使用添加剂或电解形式对土体矿物组分进行调整,进而实现工程特性改良^[2];物理处理方法的主要思路是将加固材料与膨胀土结合,从而抑制其膨胀与收缩能力,其中纤维材料、发泡聚苯乙烯、再生橡胶是物理处理方法中常见的工程材料。在当前大力发展低碳循环经济的背景下,使用橡胶颗粒改良膨胀土壤的同时也有利于废旧轮胎的回收利用^[3],而且相关研究表明:相较原有膨胀土,添加橡胶颗粒后的橡胶加筋膨胀土(Expansion Soil-Rubber, ESR)膨胀势能显著降低,承载能力得到提高^[4];由于橡胶颗粒具有高弹性、低比重和抗阻尼特性,橡胶加筋土体较原状土在建筑隔震上有更明显的优势。

橡胶加筋膨胀土的性能优势吸引了许多学者在相关领域展开工作,何俊等^[5]研究发现随着橡胶掺量的增加,胶粉-高岭土的最优含水率增大;LU 等^[6]研究冻融循环下 ESR 渗透性与力学性能变化,结果表明冻融循环下 ESR 力学性能显著下降,随冻融循环次数的增加,渗透率逐步提高;LV 等^[7]研究发现 ESR 在不同温度场下阻尼特性存在明显差异,加入 10%橡胶后,室温下 ESR 阻尼比得到显著提高,但在 15℃时较大粒径的 ESR 阻尼比提高,而较小粒径的 ESR 阻尼比降低;路钊驰等^[8]展开冻结状态下 ESR 动力特性相关研究,通过低温动三轴试验发现橡胶掺量的增加使得 ESR 滞回曲线趋于扁平,且随橡胶掺量和剪应变增大,ESR 的剪切模量逐渐减小。

岩土材料的动剪切模量 G 作为地震反应分析必备的参数,也是许多学者研究橡胶-土混合物的重要指标,LI 等^[9]通过共振柱试验研究了橡胶掺量对橡胶-砂混合物动剪切模量和阻尼比的影响,并提出了对应的动力参数经验模型;NAKHAEI 等^[10]考虑橡胶含量与围压对橡胶-砂混合物动力特性的影响,提出了动剪切模量与动应变的归一化方程。SENETAKIS 等^[11]深入讨论了围压、橡胶含量、橡胶粒径等特征对砂/橡胶(SRM)和砾石/橡胶(GRM)动力特性的影响,并提出了适用于工程实践的归一化剪切模量、阻尼比与剪应变的曲线;CHEN 等^[12]使用动三轴试验系统研究了橡胶-红黏土在不同条件下的剪切应变关系、动剪切模量和阻尼比,结果表明橡胶粒径为 2 mm 时混合土体表现出较好的结构,并且随密实度、围压和振动频率的增加,动剪切模量增大,阻尼比减小。

从上述研究可以看出,橡胶-土混合料的研究主要集中在砂土部分,对橡胶加筋膨胀土的动力特性研究侧重外部环境变化带来的影响。另外由于不同研究者采用的橡胶粒径不同,试验土体间也存在较大差异,对橡胶加筋土体小应变动力特性的相关研究仍亟待补充。因此本试验通过共振柱仪器进行了一系列试验,分析讨论 ESR 本身含水率、橡胶掺量、颗粒粒径对小应变下动力参数的影响,为废弃橡胶改良膨胀土提供理论支撑,促进废弃橡胶循环利用。

1 试验方案确定

1.1 试验材料

1.1.1 膨胀土

本文所使用的土壤为河南重塑膨胀土,依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)测定膨胀土自由膨胀率、最大干密度等基本物理性质,并通过 XRD 测定其矿物组分占比,其物理参数及矿物组分如表 1 所示。

1.1.2 废弃橡胶

本试验所用橡胶材料为 80 目和 150 目的橡胶粉末,其原始图像与放大颗粒如图 1 所示。

废弃橡胶从原始状态到橡胶粉末需经过 2 次除杂研磨:①抽取废旧轮胎中的钢丝,并使用破碎机将橡胶块破碎成 10~20 mm 橡胶颗粒;②在常温环境下分选其尼龙纤维并使用橡胶细磨机将橡胶颗粒研磨至

所需粒径。考虑橡胶掺量对膨胀土动力特性的影响,本试验选用梯度相同的4种橡胶掺量,分别为5%、10%、15%、20%。

表1 膨胀土物理参数与矿物组分

物理参数				成分占比/%			
天然含水率/%	最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	自由膨胀率/%	最优含水率/%	石英	钠长石	方解石	蒙脱石
5.67	2.095	70	18	60.6	4.2	14.4	20.8

1.2 试验仪器

橡胶加筋膨胀土共振柱试验所用仪器为中国地震局工程力学研究所引进的NGZ-20共振柱试验机(图2),该仪器主要由围压控制系统、激振系统、数显计算系统等组成。

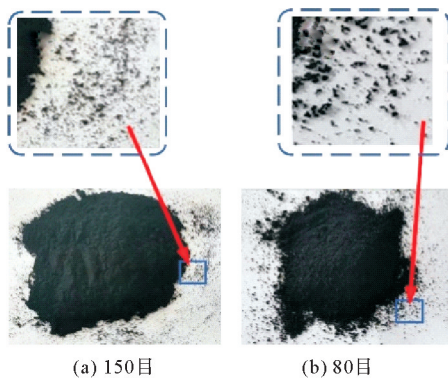


图1 研磨后的橡胶粉末

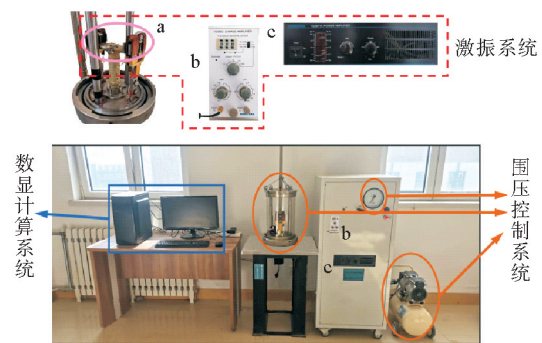


图2 共振柱试验系统

a—驱动线圈;b—电荷放大器;c—功率放大器

试验过程如图3所示,在完成样品安装后锁紧压力罩,在 t_0-t_1 阶段,空气压缩机将气体压缩进入控制柜,经精密压力表控制后输入压力罩; t_1-t_2 阶段试样在围压环境下固结稳定; t_2-t_n 阶段仪器采用稳态强波激振法施加逐渐增大、初始方向不同的扭转荷载,在 t_2-t_4 振动试验初期,程序施加较小的扭转荷载以适应较软的试样,而后以规定倍数(约1.3倍)逐次增加荷载,当试样剪应变达到 $\gamma=5 \times 10^{-4}$ 或加荷12次后试验停止。同时为保证试验过程中剪应变控制在 $1 \times 10^{-6} < \gamma < 1 \times 10^{-4}$,试验过程中激振电压小于0.2 V。

1.3 试样制备

考虑橡胶颗粒对水-土组分结合的影响,以及不同含水率下黏土的性状差异。试验依次配置含水率 ω 为20%、25%、30%的橡胶加筋膨胀土。为避免较高含水率下膨胀土与橡胶颗粒结合不均,配置土体前依照计算结果混合原始膨胀土与橡胶粉末,充分混合后再通过喷雾形式加入水得到不同含水率的橡胶加筋膨胀土,搅拌均匀后密封保存,静置24 h后取出制样。试验采用的重塑土样直径为39.1 mm、高80 mm,呈圆柱形。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)采用分层击实法分4层制取,每层20 mm且土料质量相等,每层倒入三瓣膜后平整表面并击实至对应高度,而后表面刨毛后添加下一层土料并平整击实,待最后一层击实后削平试样等待下一步试验。不同橡胶掺量的部分试样如图4所示。

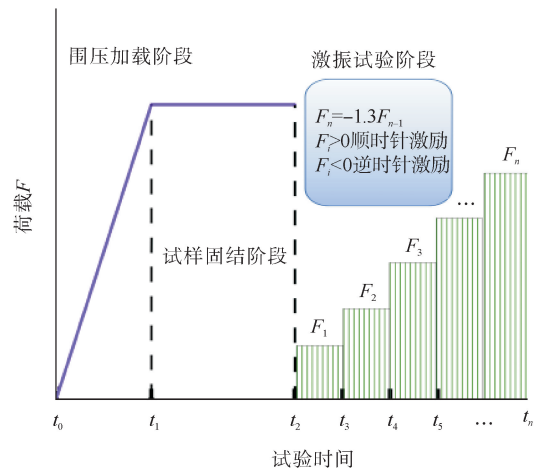


图3 试验流程

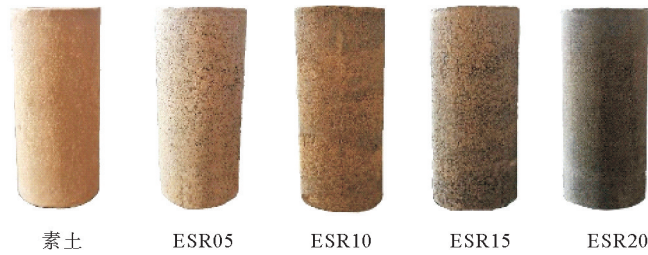


图 4 不同橡胶掺量试样

1.4 试验方案设计

考虑橡胶颗粒掺量与尺寸对试验结果的影响,试验分别选用 80 目和 150 目的橡胶粉末,5%、10%、15%、20%的橡胶掺量,并设置素土作为对照组。试验时围压稳定在 25 kPa 对试样进行固结。同时试验依次设置 20%、25%、30%的样品含水率来讨论黏土组分、水分、橡胶颗粒比例变化对土体小应变动力特性的影响。

2 数据处理与试验结果

共振柱试验通过监测样品在扭转激振下产生的共振频率,再由波动理论计算出剪切波速,进而得到动剪切模量。在无弹簧支撑时,动剪切模量的计算公式为

$$G = \left(\frac{2\pi f_n h_c}{\beta_s} \right) \rho_0 \quad (1)$$

式中: G 为动剪切模量; f_n 为试验时实测的共振频率; h_c 为试样高度; ρ_0 为土样密度; β_s 为无量纲频率因数。

而后按等效黏弹性模型对试验结果进行拟合,动荷载作用下土体骨架曲线符合双曲线规律:

$$\tau = \frac{\gamma}{a + b\gamma} \quad (2)$$

式中: τ 为剪应力; a, b 为试验参数。

则土体动剪切模量为

$$G = \frac{1}{a + b\gamma} \quad (3)$$

以 γ 为横坐标, $1/G$ 为纵坐标整理试验数据如图 5 所示,由式(3)可知二者呈直线关系,而试样的最大动剪切模量 G_{\max} 体现为截距的倒数,即 $G_{\max} = 1/a$,由此得出的试验结果如表 2 所示。

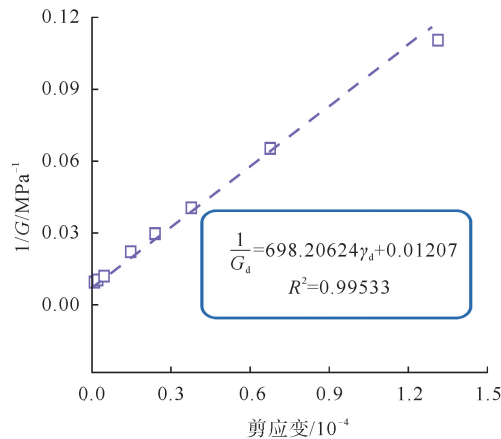


图 5 共振柱试验结果

G_d —拟合后动剪切模量; γ_d —拟合后剪应变

表2 共振柱试验结果

含水率/%	编号	试样性状	橡胶掺量/%	密度/(g·cm ⁻³)	橡胶粒径/目	G _{max} /MPa
20	素土-20	重塑	0	1.961	—	219.07
	ESR05-80-20		5	1.859	80	173.51
	ESR10-80-20		10	1.702		145.46
	ESR15-80-20		15	1.485		135.88
	ESR20-80-20		20	1.253	150	106.27
	ESR05-150-20		5	1.820		169.43
	ESR10-150-20		10	1.720		138.25
	ESR15-150-20		15	1.522		124.13
	ESR20-150-20		20	1.316		74.93
25	素土-25	重塑	0	1.954	—	197.36
	ESR05-80-25		5	1.899	80	162.74
	ESR10-80-25		10	1.683		150.33
	ESR15-80-25		15	1.465		133.15
	ESR20-80-25		20	1.319	150	126.83
	ESR05-150-25		5	1.901		167.48
	ESR10-150-25		10	1.714		135.16
	ESR15-150-25		15	1.519		122.41
	ESR20-150-25		20	1.350		119.26
30	素土-30	重塑	0	1.919	—	182.92
	ESR05-80-30		5	1.903	80	160.36
	ESR10-80-30		10	1.650		135.86
	ESR15-80-30		15	1.496		124.41
	ESR20-80-30		20	1.280	150	120.71
	ESR05-150-30		5	1.891		149.21
	ESR10-150-30		10	1.754		127.37
	ESR15-150-30		15	1.569		126.34
	ESR20-150-30		20	1.433		117.41

3 试验结果分析

3.1 不同初始条件下最大动剪切模量结果分析

橡胶作为一种具有高延展性与变形恢复能力的轻质弹性材料,当橡胶与膨胀土混合后颗粒表面发生摩擦,而土-橡胶间的界面摩擦阻力大于土颗粒间的摩擦力,使得混合后的土体黏聚力和强度产生改变^[4]。共振柱试验结果如图6所示,不同橡胶掺量与粉末粒径加筋后的膨胀土最大动剪切模量存在以下普遍规律:①随着橡胶粉末掺量增加,加筋土的最大动剪切模量降低;②橡胶掺量为10%时,动剪切模量降幅普遍较大,经济效益更为良好;③150目橡胶粉末加筋后的土体动剪切模量普遍小于80目橡胶加筋膨胀土。这与李晓雪等^[13]、EHSANI等^[14]对不同土体橡胶加筋测试动剪切模量变化趋势相同。有研究表明当橡胶掺量较高时,橡胶间的相互作用增强,同时会产生聚集效应使得部分橡胶粉末聚集,进而影响土-橡胶颗粒的充分组合^[15],使最大动剪切模量降低幅度随橡胶掺量的增加而减小。由图6可知,在不同含水率下10%橡胶掺量的加筋土体动剪切模量降幅结果较为明显,其降幅范围在25%~37%。值得注意的是,20%含水率的部分高橡胶掺量试样性状较为松散且检测结果出现明显降幅,这与橡胶颗粒、土体、水分三

者间的界面结合效果相关,随着橡胶颗粒的占比增加,能够与水结合的黏土表面积下降,这一效果在较低含水率时更为明显。同时试验结果表明随着含水率的增加,橡胶加筋膨胀土的最大动剪切模量逐渐降低,这与周跃峰等^[16]对低液限黏土动剪切模量测试结论相符。

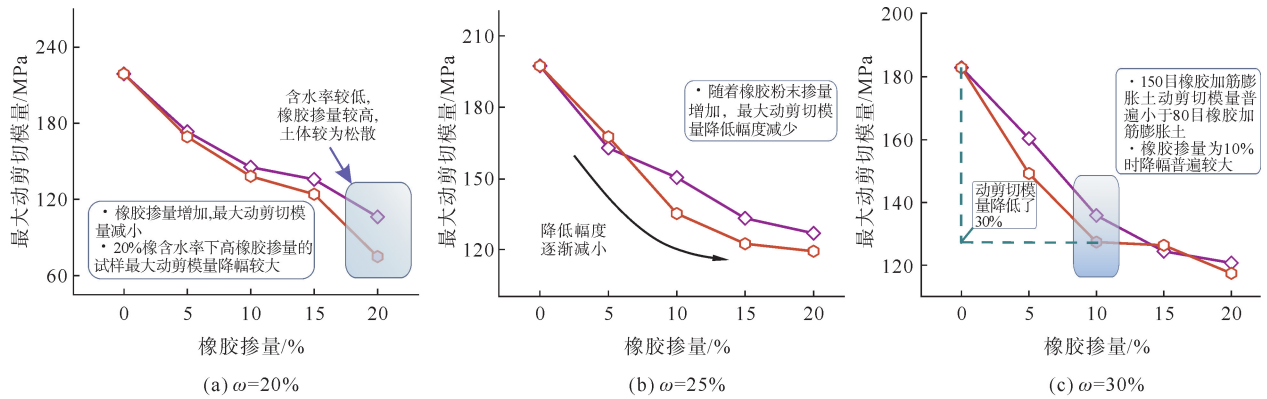


图 6 最大动剪切模量测试结果

—◇— ESR-80目; —○— ESR-150目

3.2 不同初始条件对动剪切模量的影响

动剪切模量 G 是分析土体小应变刚度特性的重要参数,图 7 展示了不同含水率和橡胶掺量下加筋膨胀土的动剪切模量测试结果。结果显示,动剪切模量随剪应变的增加快速变化,整体呈非线性降低。以素土为例,在 20%、25%、30% 含水率下,当剪应变 $\gamma = 1 \times 10^{-4}$ 时样品动剪切模量分别为 58.37、53.84、106.32 MPa,相较最大动剪切模量分别降低了 73.34%、72.72%、41.88%,随着剪应变的进一步增加,其降低幅度逐渐减少。

由图 7 可知,橡胶加筋后的土体动剪切模量变化趋势与素土相似,在 $1 \times 10^{-6} < \gamma < 1 \times 10^{-4}$,动剪切模量衰退明显,橡胶掺量对试验结果的影响较为显著。随着橡胶掺量的增加,大部分样品测试结果呈现先升高后降低的趋势,这可能与橡胶掺量增加使得混合土体性质发生变化有关。随橡胶掺量增加,混合土逐渐由黏土性质转变为类橡胶性质,当橡胶含量超过混合土体质量 15% 时土壤/橡胶的固体基质由合成部分显著控制,此时橡胶-土界面结合性状对试验结果影响较大。图 7 结果显示,在相同剪应变下大部分加筋土的动剪切模量小于素土,这与 CHEN 等^[12]测试结果大致相符。

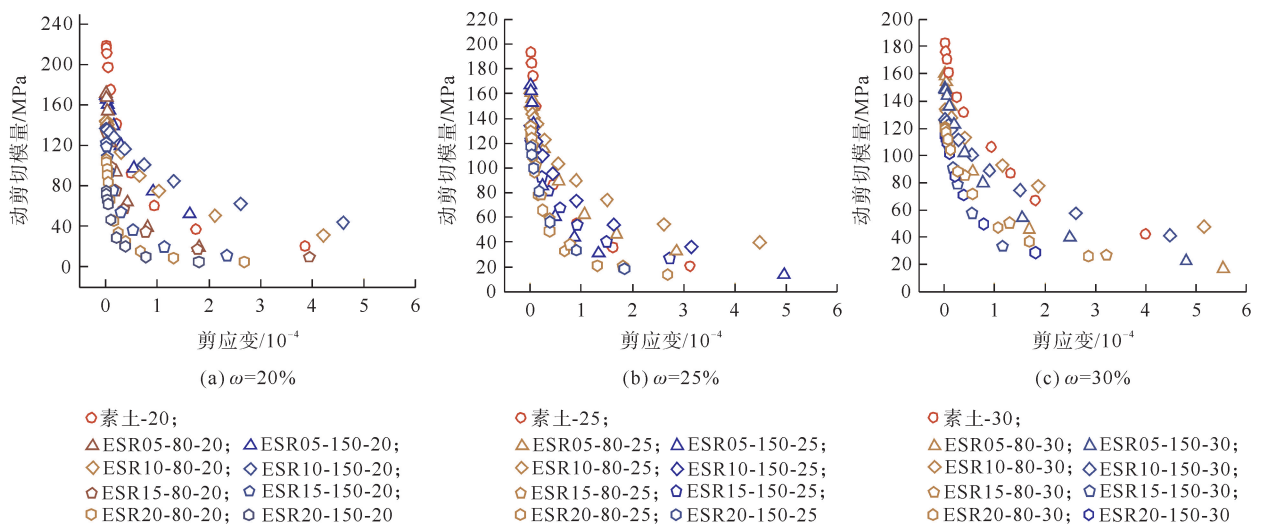


图 7 动剪切模量-剪应变衰减曲线

值得注意的是,部分 20%橡胶掺量样品的动剪切模量变化受含水率影响较大,如图 7(a)中 ESR20-80 目和 ESR20-150 目对应样品动剪切模量在剪应变 $\gamma=5 \times 10^{-5}$ 时衰减近 70%;随着含水率增加衰减幅度显著减小,其余样品试验结果表明橡胶掺量对测试结果的影响远大于含水率。同时,采用式(3)中的 Hardin-Drnevich 模型对动剪切模量测试结果进行拟合,相关参数 a 、 b 如表 3 所示,所得相关系数 R^2 皆大于 0.98,拟合效果较好。

表 3 拟合相关参数

样品编号	$a \times 10^2$	b	样品编号	$a \times 10^2$	b	样品编号	$a \times 10^2$	b
素土-20	0.447	129.011	素土-25	0.501	147.601	素土-30	0.562	47.052
ESR05-80-20	0.560	249.158	ESR05-80-25	0.609	92.810	ESR05-80-30	0.617	94.048
ESR05-150-20	0.586	82.329	ESR05-150-25	0.585	221.110	ESR05-150-30	0.660	77.159
ESR10-80-20	0.689	62.673	ESR10-80-25	0.675	46.493	ESR10-80-30	0.747	28.350
ESR10-150-20	0.728	34.196	ESR10-150-25	0.740	68.052	ESR10-150-30	0.789	36.914
ESR15-80-20	0.706	301.575	ESR15-80-25	0.730	253.303	ESR15-80-30	0.792	92.591
ESR15-150-20	0.784	377.301	ESR15-150-25	0.812	113.670	ESR15-150-30	0.793	180.744
ESR20-80-20	0.842	841.983	ESR20-80-25	0.756	332.519	ESR20-80-30	0.820	112.285
ESR20-150-20	1.225	964.090	ESR20-150-25	0.830	244.176	ESR20-150-30	0.844	149.861

为消除线性坐标和最大动剪切模量对部分试验结论的影响,使用半对数坐标空间对动剪切模量进行归一化处理,具体结果如图 8 所示。

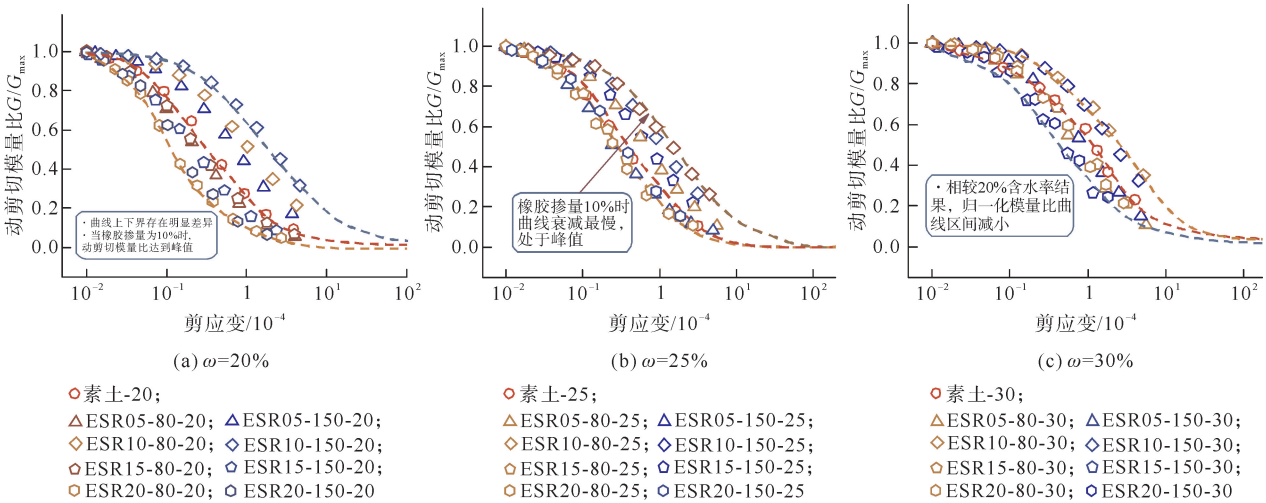


图 8 归一化动剪切模量比曲线

素土和加筋土的动剪切模量比与剪应变呈非线性关系,随着含水率的增加,归一化模量比曲线区间逐步减小,这主要体现在区间下限的上移,即 15%和 20%橡胶掺量下的样品对含水率变化更为明显。这与文献[11]提出的橡胶占比增加对混合土体行为影响结论相似。2 种橡胶粒径对模量比曲线影响较小,同时随着橡胶含量增加,归一化模量比曲线先升高后下降,当掺量为 10%时到达峰值。本试验采用 SARIDE 等^[17]提出的模型进行动剪切模量比中素土及上下限的拟合,公式为

$$\frac{G}{G_{\max}} = A \left(1 + \frac{B\gamma}{C} \right)^{(-1/B)} \quad (4)$$

式中: A 、 B 、 C 为拟合参数, $A=1$,相关参数如表 4 所示。

表 4 归一化动剪切模量比曲线相关参数

含水率 $\omega/\%$	曲线位置	试样编号	B	$C \times 10^4$	R^2
20	素土	素土-20	0.956	0.376	0.997
	区间上限	ESR20-80-20	0.628	0.159	0.998
	区间下限	ESR10-150-20	1.146	1.980	0.998
25	素土	素土-25	1.010	0.349	0.991
	区间上限	ESR10-80-25	1.415	1.172	0.996
	区间下限	ESR20-80-25	0.933	0.265	0.998
30	素土	素土-30	1.007	0.435	0.995
	区间上限	ESR10-80-30	0.937	2.872	0.996
	区间下限	ESR20-150-30	0.95	0.587	0.998

4 结论

利用共振柱试验对不同橡胶粒径、橡胶掺量和含水率的样品进行剪切模量测试试验,研究初始条件对橡胶加筋膨胀土动剪切模量的影响,并分析了不同 ESR 样品随剪应变增加动剪切模量和模量比的变化趋势,通过 Hardin-Drnevich 模型进行拟合,主要结论如下:

1) 随橡胶粉末掺量和含水率的增加,加筋土的最大动剪切模量降低,橡胶掺量在 10%左右时最大动剪切模量降低更为明显;且在 $1 \times 10^{-6} < \gamma < 1 \times 10^{-4}$ 应变范围内,动剪切模量明显降低,橡胶掺量变化较含水率改变对动剪切模量衰减的影响更为显著;较高橡胶掺量和低含水率配置后的样品颗粒接触状态与其他样品不同,使得测试结果出现更低的最大动剪切模量和更明显的动剪切模量衰减。

2) 随橡胶粒径增加,加筋膨胀土的最大动剪切模量普遍降低,其降低幅度与随橡胶掺量增加而变大;试验采用的橡胶颗粒均呈粉末状,不同粒径样品的性状较为相似,80 目和 150 目橡胶粒径对动剪切模量和模量比曲线的影响较小。

3) 随剪应变增加,试验测得动剪切模量与模量比呈非线性变化;橡胶掺量较低时,加筋膨胀土表现为土壤特性,当橡胶掺量大于 15%后表现为类橡胶特性。在相同剪应变下,随橡胶掺量增加,动剪切模量与模量比均出现先升高后降低的变化情况,当橡胶掺量为 10%时到达峰值。

参考文献 (References):

- [1] YANG Z,ZHANG L,LING X,et al. Experimental study on the dynamic behavior of expansive soil in slopes under freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science & Technology,2019,163:27-33.
- [2] LU Y,LIU S,ZHANG Y,et al. Freeze-thaw performance of a cement-treated expansive soil[J]. Cold Regions Science & Technology, 2019,170:102926.
- [3] YANG Z N,ZHANG Q,SHI W,et al. Advances in properties of rubber reinforced soil[J]. Advances in Civil Engineering, 2020(10): 1-16.
- [4] SOLTANI A,DENG A,TAHERI A,et al. Rubber powder-polymer combined stabilization of South Australian expansive soils[J]. Geosynthetics International,2018,25(3):304-321.
- [5] 何俊,李勇,阮晓晨,等. 废旧轮胎胶粉-黏土混合土的击实性能[J]. 工程地质学报,2015,23(5):1013-1019.
HE Jun,LI Yong,RUAN Xiaochen,et al. Compaction performance of ground rubber and clay mixtures[J]. Journal of Engineering Geology,2015,23(5):1013-1019.
- [6] LU Y,ZHANG Y G,LIU S H,et al. Mechanical behaviour and permeability of expansive soils mixed with scrap tire rubbers subjected to freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science & Technology,2022,199:103580.
- [7] LV J H,YANG Z N,SHI W,et al. Dynamic characteristics of rubber reinforced expansive soil (ESR) at positive and negative ambient temperatures[J]. Polymers,2022,14(19):3985.

(下转第 42 页)