

## 交通循环荷载下橡胶混凝土阻尼耗能特性试验研究

张玲<sup>1,2†</sup>,陈智超<sup>1,2</sup>,彭芯钰<sup>1,2</sup>,周蓉<sup>1,2</sup>

[1. 湖南大学土木工程学院,湖南长沙 410082;  
2. 建筑安全与节能教育部重点实验室(湖南大学),湖南长沙 410082]

**摘要:**橡胶混凝土是以橡胶颗粒为附加集料形成的混凝土,其独特的物理特性和强化效果使其在土木工程中日益推广应用。为了研究橡胶混凝土作为桩承式低路堤体系中桩帽的可行性,制备了不同橡胶颗粒粒径和体积掺量的橡胶混凝土试件,开展了系列静力抗压试验和循环荷载下滞回特性试验,获得了橡胶混凝土的抗压强度、滞回耗能、阻尼损耗因子、动弹性模量等力学性能指标及其随橡胶颗粒粒径、体积掺量的变化规律。研究发现,随着橡胶颗粒体积掺量的增加,橡胶混凝土试件抗压强度和动弹性模量逐渐呈指数形式降低至某一临界值,该临界值大小与橡胶颗粒粒径大小有关,粒径越小,强度越小,动弹性模量越小;而滞回耗能、损耗因子随橡胶颗粒掺量呈现二次函数变化趋势,先增长后略微下降,且在橡胶颗粒掺量 8%~10% 左右达到峰值,相较于加载幅值水平,颗粒粒径对能耗的影响较小。

**关键词:**橡胶混凝土;滞回试验;滞回耗能;损耗因子

中图分类号:TU473

文献标志码:A

## Experimental Study on Energy Dissipation Characteristics of Rubberized Concrete Damping under Traffic Cyclic Loading

ZHANG Ling<sup>1,2†</sup>, CHEN Zhichao<sup>1,2</sup>, PENG Xinyu<sup>1,2</sup>, ZHOU Rong<sup>1,2</sup>

[1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of the Ministry of Education (Hunan University), Changsha 410082, China]

**Abstract:** Rubber concrete is concrete formed by using rubber particles as additional aggregates, and its unique physical properties and strengthening effects have led to its increasing popularity and application in civil engineering. To study the feasibility of rubber concrete as a pile cap in the pile-bearing low embankment system, this paper prepared rubber concrete specimens with different rubber particle sizes and volume content, carried out a series of static compressive tests and hysteresis test under cyclic loading, and obtained mechanical property indexes such as compressive strength, hysteresis dissipation, damping loss factor, dynamic modulus of elasticity etc., and their changing rules with rubber particle size and volume content. It is found that with the increase of the volume content of rubber particles, the compressive strength and dynamic elastic modulus of rubber concrete specimens gradually decrease exponentially to a critical value, which is related to the size of rubber particles. The smaller the

\* 收稿日期:2024-02-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52378340), National Natural Science Foundation of China(52378340); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ3013), Natural Science Foundation of Hunan Province(2020JJ3013)

作者简介:张玲(1982—),女,浙江临海人,湖南大学教授,博士生导师,博士

† 通信联系人,E-mail: zhanglhd@163.com

particle size, the lower the strength and dynamic elastic modulus. The hysteresis energy consumption and loss factor show a quadratic trend with the rubber particle content, increasing first and then slightly decreasing, and reaching a peak at around 8% to 10% of the rubber particle content. Compared with the loading amplitude level, the influence of particle size on energy consumption is relatively small.

**Key words:** rubberized concrete; hysteresis test; hysteresis energy dissipation; loss factor

橡胶混凝土是以废旧橡胶颗粒为附加集料制成的绿色混凝土。其因具备高延性<sup>[1-2]</sup>、吸声减振<sup>[3]</sup>、高阻尼比<sup>[4]</sup>以及高能量耗散<sup>[5]</sup>的性能而逐渐在土木工程中得以推广应用。橡胶混凝土在高铁<sup>[6-7]</sup>与地铁整体道床<sup>[8-9]</sup>、地下隧道衬砌结构<sup>[10-12]</sup>等领域的应用研究表明:橡胶混凝土具有良好的耗散振动能量的作用。Moustafa等<sup>[13]</sup>研究发现,在橡胶混凝土与普通混凝土具有相同抗压强度的情况下,橡胶混凝土的阻尼耗散性能更为突出。具体而言,当橡胶掺量10%,橡胶混凝土与普通混凝土的抗压强度均为65 MPa左右时,橡胶混凝土的累积耗散能量比普通混凝土约高20%,且其阻尼比大约是普通混凝土的1.19倍。

此外,受土地资源制约等因素影响,填土高度小于路基工作区深度的低路堤日益增多。低路堤路基无法有效地将交通荷载扩散,从而导致传递给路堤下方复合地基的动应力较大。例如,文献[14]中的模型试验结果表明,对于桩承式2 m高的低路堤,汽车荷载传至桩帽时仍有58%的动应力;文献[15]的现场试验结果显示,对于3 m高的低路堤,因土拱效应等影响,列车荷载传至桩帽时,动应力甚至比路基表面还要大。这种动应力经桩土相互作用向桩端传递的过程中极易造成桩、土塑性应变不断累积,产生过大工后沉降或不均匀沉降等问题<sup>[16-17]</sup>。

鉴于此,课题组提出将橡胶混凝土应用于桩承式低路堤桩帽设计中,以期通过橡胶混凝土桩帽有效吸收交通动载产生的动力波,进而降低桩身动力响应,从而实现增强桩体复合地基承载及控制路基沉降目的。在对带橡胶混凝土桩帽桩承式低路堤工作体系进行系统深入研究之前,亟须开展交通循环荷载下橡胶混凝土耗能特性研究。

目前橡胶混凝土动力特性研究可归结为两个方面。一是材料性能方面,研究表明:橡胶的掺量及粒径对橡胶混凝土的动力特性有较大影响,橡胶混凝土耗能性、阻尼比随橡胶掺量、橡胶颗粒粒径的增加而增大,强度反之<sup>[18-23]</sup>,但暂未同时考虑橡胶掺量及

粒径对能耗的影响,且未建立橡胶颗粒掺量、粒径与橡胶混凝土强度、能耗之间的定量关系。二是橡胶混凝土构件的抗冲击、抗震性能方面,例如:在桥墩防撞方面,橡胶混凝土的抗冲击性能、阻尼耗能特性可得到充分发挥<sup>[24]</sup>;在地下隧道抗震隔振层应用方面<sup>[25]</sup>,橡胶混凝土的强度低、地震动能量耗散强的特性,可很好提升结构的抗震性能<sup>[26-27]</sup>。而交通荷载不同于冲击荷载或地震荷载,具有显著的周期性,但目前鲜有交通循环荷载下橡胶混凝土阻尼耗能特性研究的报道。

此外,桩承式低路堤桩帽设计时有一定的强度要求<sup>[28]</sup>,故桩承式低路堤中采用橡胶混凝土桩帽,需兼顾橡胶混凝土的强度和能耗特性。为此,本文拟对不同颗粒和掺量下的橡胶混凝土的强度和阻尼耗能特性进行试验研究,重点分析交通循环荷载下橡胶混凝土的阻尼耗能特性,以期为下一步橡胶混凝土桩帽桩承式低路堤工作体系的相关研究打好基础。

## 1 试验设计

### 1.1 试验材料

考虑与后期计划要完成的橡胶混凝土桩帽-刚性桩复合地基室内模型试验的匹配(根据相似比,室内模型试验设计的桩帽尺寸为100 mm×100 mm×30 mm,强度为15±5 MPa),故本次橡胶混凝土配合比设计时粗颗粒有适当的缩尺。试验主要材料为水泥、石子、砂、橡胶颗粒和水。其中水泥使用P·O42.5普通硅酸盐水泥,产自湖南宁乡南方水泥有限公司;石子采用细石,粒径5~10 mm连续级配,堆积密度1 640 kg/m<sup>3</sup>,压碎指标9%,空隙率38%,针、片状颗粒含量4%;砂使用Ⅱ区中砂,粒径均小于5 mm,松散堆积密度为1 440 kg/m<sup>3</sup>,紧密堆积密度为1 660 kg/m<sup>3</sup>,表观密度为2 650 kg/m<sup>3</sup>,含泥量为0.2%,含水率为

2.7%, 细度模数为 3; 参考文献[22]关于橡胶粒径大小对橡胶混凝土动力特性的影响, 橡胶颗粒采用 8 目(2~4 mm)和 20 目(0.85 mm)两种粒径, 产自都江

堰市某橡胶有限公司, 堆积密度为  $314 \text{ kg/m}^3$ , 表观密度为  $1250 \text{ kg/m}^3$ , 其他技术指标见表 1; 水为普通自来水.

表 1 橡胶颗粒的技术指标

Tab.1 Technical specifications of rubber particles

橡胶品种	与橡胶颗粒质量比/%				密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%
	水分	灰分含量	钢含量	纤维含量			
8 目/20 目	0.01	4.3	0	0	1.25	15	500

## 1.2 配合比设计及标本制作

以橡胶颗粒取代集料制备橡胶混凝土时, 可采用等质量法和等体积法, 但考虑到橡胶颗粒与砂的密度相差较大, 若采用等质量法制备, 可能导致试样体积超出《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)中规定的标准模具体积, 故现有文献大多采用橡胶颗粒等体积取代集料的方式制备橡胶混凝土<sup>[18-23]</sup>. 此外, 已有文献研究发现<sup>[22]</sup>: 橡胶颗粒掺量增加会导致橡胶混凝土的强度下降, 但能耗并非随之一直增加, 而是在某一橡胶掺量达到峰值后开始逐渐降低, 这一特点与普通低强混凝土能耗随强度的变化规律不同<sup>[29]</sup>. 同时, 当橡胶混凝土和普通混凝土强度相同时, 前者的累积耗散能量高于后者, 且前者的阻尼比约为后者的 1.2 倍<sup>[13]</sup>. 因此, 本文在配合比设计中仅考虑橡胶颗粒对混凝土能耗的影响, 不探究掺入橡胶颗粒导致混凝土强度改变而产生的耗能变化. 橡胶颗粒掺量参考已有文献拟采用 5%、10% 和 15%.

综上, 本次试验在 C25 普通混凝土的基础上, 采用橡胶颗粒等体积取代砂的方式设计橡胶混凝土配合比. 根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011), 水灰比取 0.63, 砂率取 0.40, 不添加其他外加剂, 配合比设计如表 2 所示. 共制作 30 个棱柱体和 18 个立方体橡胶混凝土试件, 根据橡胶颗粒的大小分 8 目和 20 目两大组, 每组橡胶体积掺量分别为 5%、10%、15%, 此外还浇筑了 5 个棱柱体和 3 个立方体普通混凝土试件作为对比. 棱柱体和立方体试件尺寸分别为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  和  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ .

按照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)将搅拌好的混凝土灌入试模, 之后采用振动台振捣, 振捣过程中为避免橡胶颗粒上浮, 振捣 5 s 后停止, 再振捣 5 s. 在常温下静置 24 h 后拆模、编号, 在温度为  $20 \pm 0.2^\circ\text{C}$  和相对湿度 95% 的条件下养护 28 d.

表 2 每立方米橡胶混凝土配合比设计

Tab.2 Rubberized concrete mix ratio design

编号	per cubic meter					kg
	$m_{\text{水}}$	$m_{\text{水泥}}$	$m_{\text{砂}}$	$m_{\text{碎石}}$	$m_{\text{橡胶粉}}$	
CC	210	333.33	742.67	1114.00	0	
RC-5%-RA	210	333.33	705.53	1114.00	17.52	
RC-10%-RA	210	333.33	668.40	1114.00	35.03	
RC-15%-RA	210	333.33	631.27	1114.00	52.55	
RC-5%-RB	210	333.33	705.53	1114.00	17.52	
RC-10%-RB	210	333.33	668.40	1114.00	35.03	
RC-15%-RB	210	333.33	631.27	1114.00	52.55	

注: CC 表示 C25 混凝土, RC 代表橡胶混凝土; RA 代表橡胶粒径为 0.85 mm, RB 代表橡胶粒径为 2~4 mm; 5% 代表橡胶体积掺量为 5%, 以此类推.

## 1.3 静力抗压试验

按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)在 TYA-600E 型微机控制恒加载压力试验机上进行静力力学试验, 如图 1 所示. 测量范围为 0~600 kN, 示值相对误差为  $\pm 1\%$ , 测定 21 个立方体试件(包括 3 个普通混凝土试件)和 21 个棱柱体试件(包括 3 个普通混凝土试件)的抗压强度. 试验过程中连续均匀加载, 加速度为 0.5 MPa/s, 当试件破坏时, 计算机自动记录最大破坏荷载, 此时活塞停止下降.



图 1 微机控制压力试验机测控系统

Fig.1 Microcomputer control pressure testing machine measurement and control system

#### 1.4 滞回试验

开展14个棱柱体试件(包括普通混凝土试件)的滞回试验,每次试件仅加载一个工况。

滞回试验在计算机控制的电液伺服材料试验机上进行,最大载荷为 $\pm 500$  kN,位移精度为优先满量程的 $\pm 0.5\%$ ,最大加载频率为100 Hz,加载端实现力的正弦式加载,采用位移传感器记录混凝土试件的位移,可实现位移与力的同步输出。滞回试验装置如图2所示。将位移传感器固定,并与加载端接触,压力值由加载端的压力传感器测得,并且与位移值同步输出到计算机中,形成滞回曲线。在正式加载前,先将混凝土试件预加载至2 kN,以消除试件和加载系统间的空隙。



图2 电液伺服测试

Fig.2 Electrohydraulic servo testing

公路交通荷载频率通常较低,不超过6 Hz<sup>[30]</sup>,车辆荷载的脉冲特性及周期性等可通过正弦波模拟<sup>[31]</sup>,故本次试验采用如图3所示正弦加载波模拟交通荷载,频率为5 Hz,循环次数为30次。

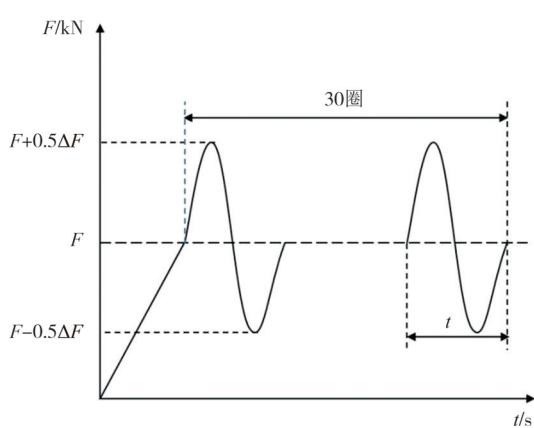


图3 加载力示意图

Fig.3 Schematic diagram of loading force

图3中,正弦波加载力的输出公式为:

$$F_{\text{output}} = F + 0.5\Delta F \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

式中: $F$ 为加载力均值(kN),可取橡胶混凝土棱柱体抗压试验中每组三个试块中的最小破坏力的20%<sup>[32]</sup>; $\Delta F$ 为加载力变化幅值(kN); $f$ 为加载频率(Hz); $t$ 为加载周期(s)。

定义加载力幅值水平 $\lambda$ 为加载力幅值 $\Delta F$ 与橡胶混凝土棱柱体强度试验最小破坏力的比值。为忽略塑性变形对材料阻尼耗能的影响,分别取 $\lambda=0.1$ ,0.2,此时各试块混凝土应力水平小于其极限强度的30%,可视为线弹性材料。具体加载工况如表3所示。

表3 滞回试验加载制度

Tab.3 Hysteresis test loading regime

试块编号	最小破坏力值/kN	幅值水平	$F/kN$	$\Delta F/kN$	$F+0.5\Delta F/kN$	$F-0.5\Delta F/kN$
CC	201	0.1	40	20	50	30
		0.2	40	40	60	20
RC-8-5%	168	0.1	34	17	42	25
		0.2	34	34	51	17
RC-8-10%	139	0.1	28	14	35	21
		0.2	28	28	42	14
RC-8-15%	143	0.1	29	14	36	21
		0.2	29	29	44	14
RC-20-5%	147	0.1	29	15	37	22
		0.2	29	29	44	14
RC-20-10%	95	0.1	19	10	24	14
		0.2	19	19	29	9
RC-20-15%	88	0.1	18	9	22	13
		0.2	18	18	27	9

定义每个滞回周期耗散的能量与最大存储能量的比值为损耗因子 $\eta$ ,参考文献[33]的方法表征混凝土材料的耗能性:

$$\eta = \frac{2\Delta U}{\pi U} = \frac{2S_{ABCD}}{\pi S_{ACE}} = \frac{4S_{ABCD}}{\pi \cdot \Delta F \cdot \Delta v} \quad (2)$$

式中: $\Delta U$ 是每个振动周期消耗的能量,即滞回曲线的面积; $U$ 是同一周期的峰值力处测得的存储能量; $S_{ABCD}$ 为图4中ABCD围成的面积; $S_{ACE}$ 为ACE围成的面积; $\Delta F$ 为一个周期内最大力值与最小力值的变化幅值; $\Delta v$ 为一个周期内最大位移与最小位移的变化幅值。

混凝土抵抗动荷载的变形能力可用混凝土动弹性模量表征,应力相关阻尼模型定义的动弹性模量 $E_d$ 可由式(3)确定<sup>[34]</sup>:

$$E_d = (\sigma_{d\max} - \sigma_{d\min}) / (\varepsilon_{d\max} - \varepsilon_{d\min}) \quad (3)$$

式中: $\sigma_{d\max}$ 、 $\sigma_{d\min}$  分别为滞回曲线每个循环中应力的最大值、最小值;  $\varepsilon_{d\max}$ 、 $\varepsilon_{d\min}$  分别为滞回曲线每个循环中应变的最大值、最小值,如图4所示.

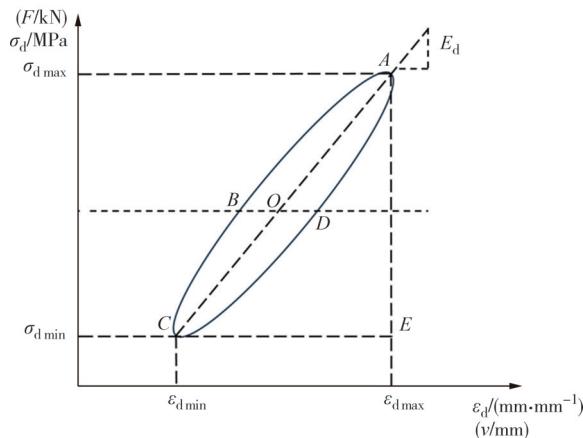


图4 滞回曲线图

Fig.4 Hysteresis plot

## 2 抗压试验结果分析

### 2.1 立方体抗压强度

不同橡胶颗粒体积掺量及粒径的橡胶混凝土立方体 28 d 抗压强度  $f_{cu}$  见表 4.

表4 不同粒径、体积掺量的橡胶混凝土立方体抗压强度

Tab.4 Cube compressive strength of rubberized concrete with different particle sizes and volume content MPa

粒径	掺量			
	0	5%	10%	15%
8目	25.51	20.59	18.13	17.34
20目	25.51	16.71	13.74	12.40

由表 4 可见,对于 8 目(2~4 mm)的橡胶颗粒,体积掺量为 5%、10%、15% 时,立方体抗压强度  $f_{cu}$  从普通混凝土的 25.51 MPa 降低至 20.59 MPa、18.13 MPa 和 17.34 MPa,分别降低了 19.3%、28.93% 和 32.03%. 其原因是橡胶颗粒等体积取代砂后,相同体积范围内,起承载作用的砂的数量减少,导致强度降低;另一方面,橡胶颗粒光滑的表面会降低橡胶颗粒与水泥浆界面之间的黏附力,从而增加最弱相和界面过渡区的体积,亦导致强度降低.

以普通混凝土的强度(橡胶粉掺量为 0)为基准,分别对不同掺量的橡胶混凝土强度进行归一化处理,并对曲线进行拟合分析. 由图 5 可知,归一化橡

胶混凝土的抗压强度  $\bar{f}_{cu}$  随着橡胶颗粒掺量的增加而呈指数函数下降的趋势:

$$\bar{f}_{cu} = \frac{f_{cu}^x}{f_{cu}^0} = A_f + B_f C_f^x \quad (4)$$

其中: $f_{cu}^0$ 、 $f_{cu}^x$  分别为不掺橡胶粉的普通混凝土和橡胶掺量为  $x\%$  的橡胶混凝土立方体抗压强度; $A_f$ 、 $B_f$ 、 $C_f$  为跟橡胶颗粒大小相关的量,对于 8 目橡胶颗粒,  $A_f=0.645$ ,  $B_f=0.36$ ,  $C_f=0.85$ , 对于 20 目橡胶颗粒,  $A_f=0.463$ ,  $B_f=0.54$ ,  $C_f=0.82$ .

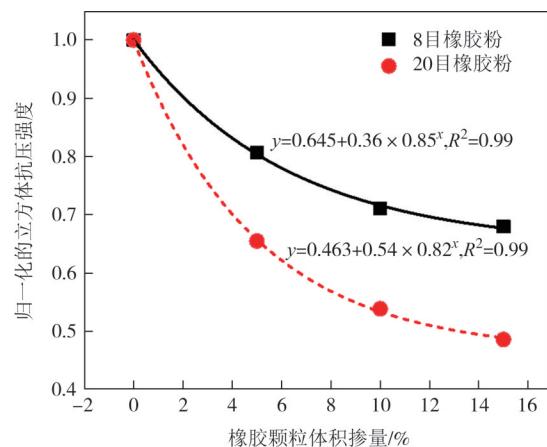


图5 橡胶混凝土 28 d 归一化的立方体抗压强度随橡胶颗粒体积掺量的变化

Fig.5 Variation of 28 day normalized cube compressive strength of rubberized concrete with volume content of rubber particles

分析式(4)指数函数可知,  $0 < C_f < 1$ ,  $\bar{f}_{cu}$  随  $x$  的增加呈递减趋势, 而  $x \leq 100$ , 可得 8 目及 20 目橡胶颗粒的橡胶混凝土对应的  $\bar{f}_{cu}$  临界值分别为 0.645 和 0.463.

此外,由图 5 两条曲线显见,橡胶颗粒小的橡胶混凝土表现出更低的抗压强度. 对于 20 目(0.85 mm)的橡胶颗粒,橡胶颗粒体积掺量为 5%、10% 和 15% 时,立方体抗压强度分别降低了 34.5%、46.1% 和 51.4%. 相同橡胶掺量下,较 8 目橡胶混凝土立方体抗压强度降低了 18.8%~28.5%. 即粒径较小的橡胶颗粒制成的橡胶混凝土会有较低的抗压强度,其原因是橡胶颗粒越细,比表面积越大,最弱相和界面过渡区体积越大,对应强度越低.

### 2.2 棱柱体抗压强度

不同橡胶颗粒体积掺量及粒径的橡胶混凝土棱柱体 28 d 抗压强度  $f_c$  如表 5 所示.

以普通混凝土为基准,对不同橡胶粒径、掺量的棱柱体抗压强度进行归一化处理,如图 6 所示. 由

表5 不同粒径、体积掺量的橡胶混凝土棱柱体抗压强度

Tab.5 Prismatic compressive strength of rubberized concrete with different particle sizes and volume content

粒径	掺量				MPa
	0	5%	10%	15%	
8目	19.3	16.23	14.51	13.74	
20目	19.3	15.13	9.91	8.75	

图6可见,归一化橡胶混凝土棱柱体轴心抗压强度 $\bar{f}_c$ 随橡胶颗粒掺量及粒径的变化规律与立方体抗压强度 $f_{cu}$ 的变化规律一致,即抗压强度 $\bar{f}_c$ 随橡胶掺量的增加也呈现近似指数下降的趋势,橡胶颗粒小的橡胶混凝土棱柱体表现出更低的轴心抗压强度.同样,橡胶混凝土棱柱体轴心抗压强度随橡胶粒径、掺量的变化也可用式(4)进行表示.对于8目橡胶颗粒: $A_f=0.66$ , $B_f=0.34$ , $C_f=0.88$ ;对于20目橡胶颗粒: $A_f=0.136$ , $B_f=0.87$ , $C_f=0.93$ .根据式(4)及指数函数的性质,8目及20目的橡胶混凝土归一化轴心抗压强度临界值分别为0.66和0.136.

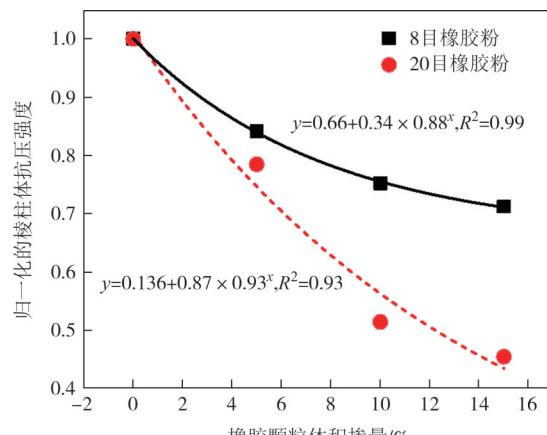


图6 橡胶混凝土 28 d 归一化的棱柱体抗压强度  
随橡胶颗粒体积掺量的变化

Fig.6 Variation of 28 day normalized prismatic compressive strength of rubberized concrete with rubber volume content

### 2.3 强度指标的换算关系

将上述不同橡胶粒径(8目、20目)橡胶混凝土立方体与棱柱体抗压强度试验数据进行回归分析(图7),拟合曲线相关系数为0.98,可得橡胶混凝土 $f_c$ 和 $f_{cu}$ 的换算关系如下:

$$f_c = 0.76f_{cu} \quad (5)$$

这与我国现行规范《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中普通混凝土立方体与棱柱体抗压强

度之间的换算关系一致,表明橡胶颗粒的掺入并不改变立方体和棱柱体抗压强度关系.

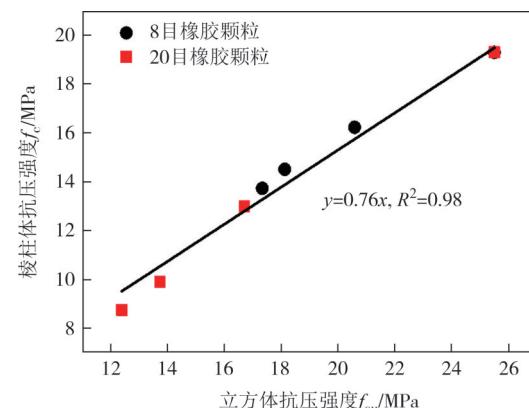


图7 橡胶混凝土的 $f_c$ 和 $f_{cu}$ 换算关系曲线

Fig.7  $f_c$  and  $f_{cu}$  conversion relationship curves for rubberized concrete

## 3 滞回试验结果及分析

### 3.1 滞回耗能

滞回试验后,分别以轴向位移值和轴向压力值为横、纵坐标绘制滞回曲线.图8、图9是不同掺量下8目橡胶混凝土在加载力幅值水平 $\lambda=0.1$ 和 $0.2$ 时的滞回曲线.20目橡胶混凝土也有类似滞回曲线,限于篇幅,文中未呈现.

对比图8、图9可见,当加载力幅值水平 $\lambda=0.1$ 时,随着橡胶体积掺量的增加,滞回曲线未发生较大变化,接近线性变化,滞回曲线干瘪;当 $\lambda=0.2$ 时,滞回曲线的面积随橡胶掺量的增加而增大,滞回曲线越来越外鼓,滞回环饱满,第一个滞回曲线残余变形最大,且从第二圈开始仍能观察到残余变形.此外,图8、图9不同试样下的滞回试验里的起始位移和终止位移存在较大差距,其原因是根据本试验加载计划,在循环加载施加前,会先加载到设定好的加载力均值 $F$ (图3),不同试样棱柱体抗压强度不同,其 $F$ 值亦不同,到达 $F$ 值时试件的变形也不同,且在滞回曲线(图8、图9)中剔除了试件的弹性变形阶段,仅展示了循环阶段的荷载-位移曲线,故不同试样的起始位移存在较大差距.不同试样、不同加载力幅值条件下对应的塑性变形亦存在差距,故其终止位移也不同.

通过Matlab利用极值点切割各个滞回曲线,并用积分法计算不同规格的橡胶混凝土试件滞回曲线

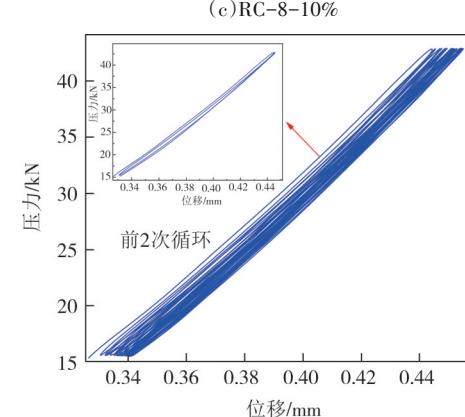
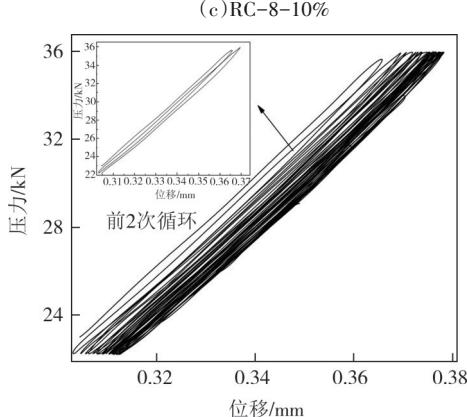
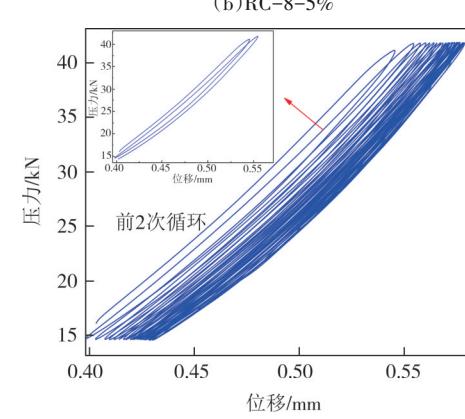
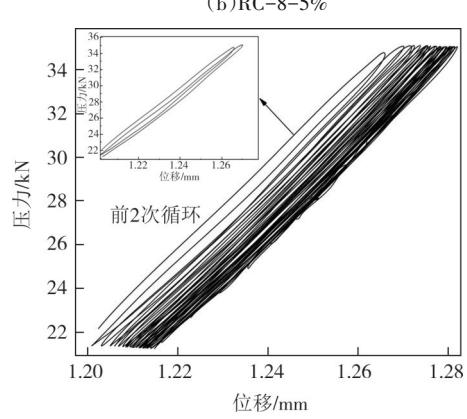
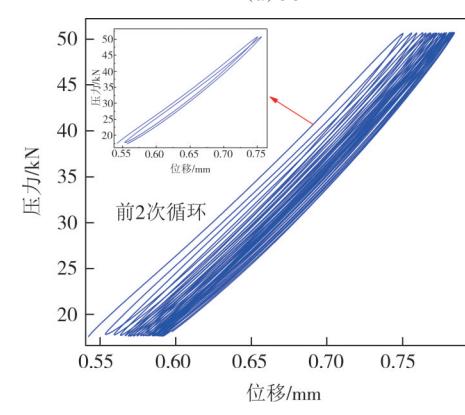
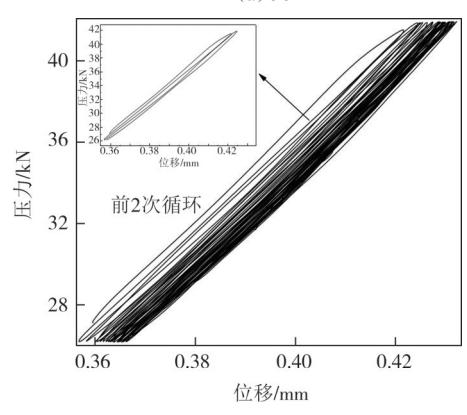
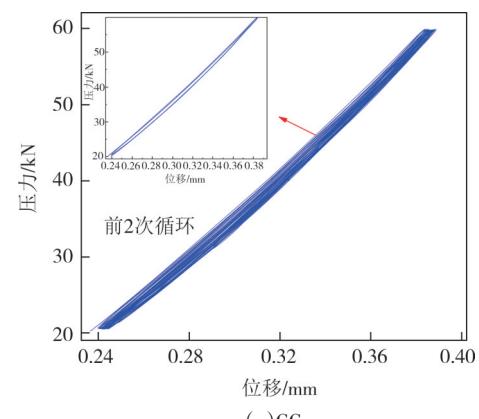
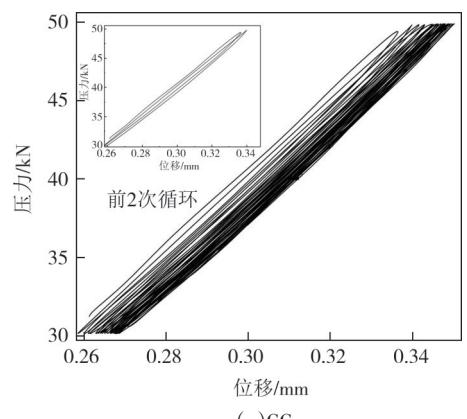
图 8 橡胶混凝土的滞回曲线( $\lambda=0.1$ )

Fig.8 Hysteresis curve of rubberized concrete  
(Loading force amplitude level of 0.1)

图 9 橡胶混凝土的滞回曲线( $\lambda=0.2$ )

Fig.9 Hysteresis curve of rubberized concrete  
(Loading force amplitude level of 0.2)

面积及滞回过程总耗能,结果见表6。由表6可见,当 $\lambda=0.1$ ,8目橡胶混凝土颗粒体积掺量分别为5%、10%和15%时,滞回总耗能从普通混凝土的3.68 J增长到4.39 J、5.12 J、4.23 J,分别增长19.3%、39.1%和14.9%。而20目橡胶混凝土在相同 $\lambda$ 和橡胶颗粒体积掺量情况下,对应的滞回总耗能分别增长28.3%、54.1%和22.2%。当 $\lambda=0.2$ 时,8目橡胶混凝土较普通混凝土分别增长179.6%、184.2%、59.1%,20目则分别增加160.9%、182.8%、38.7%。即加载力幅值越大,橡胶粒径越大,总耗能则越大,但是总能耗随橡胶颗粒掺量先增加后减小。

表6 不同橡胶混凝土的滞回过程总耗能

Tab.6 Total energy consumption of hysteresis process for different rubberized concrete

粒径	掺量				J
	0	5%	10%	15%	
8目( $\lambda=0.1$ )	3.68	4.39	5.12	4.23	
8目( $\lambda=0.2$ )	5.58	15.60	15.86	8.88	
20目( $\lambda=0.1$ )	3.68	4.72	5.67	4.50	
20目( $\lambda=0.2$ )	5.58	14.56	15.78	7.74	

为进一步说明滞回耗能随橡胶粒径、掺量的变化情况,以普通混凝土的滞回耗能为基准,进行归一化处理,结果如图10所示。归一化总能耗 $\bar{W}$ 随橡胶掺量 $x$ 的变化呈现二次函数形式:

$$\bar{W} = \frac{W_i^x}{W_i^0} = A_j + B_j x - C_j x^2 \quad (6)$$

式中: $W_i^0$ 、 $W_i^x$ 分别为普通混凝土和橡胶掺量为 $x\%$ 的橡胶混凝土的总能耗,试验点对应的 $x=5$ 、10和15; $A_j$ 、 $B_j$ 、 $C_j$ 为与橡胶颗粒大小相关的量。

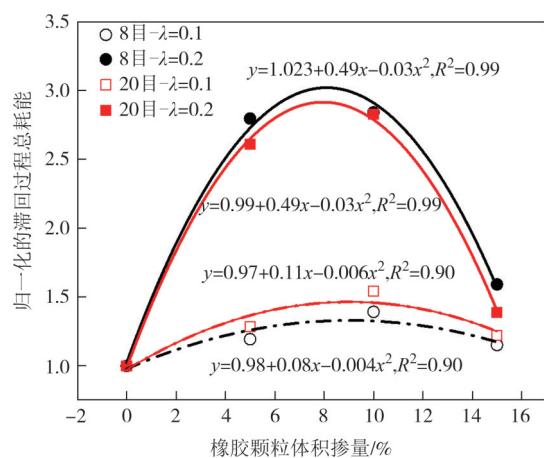


图10 归一化的滞回过程总耗能

Fig.10 Total energy consumption of the normalized hysteresis process

由图10可见,橡胶混凝土的归一化滞回耗能随着橡胶掺量的增加,呈现出先增加后减小的趋势。结合式(6)二次函数的特点,图10中4条拟合曲线在 $x=B_j/(2C_j)$ (分别为8.17、8.17、9.17、10),即在橡胶掺量8%~10%左右时,对应的归一化滞回耗能达到峰值,分别为3.02、2.99、1.47、1.38,这表明在一定范围内,增加橡胶掺量可以提高混凝土的耗能能力。进一步分析显示,橡胶粒径对归一化滞回耗能的影响相对较小。当 $\lambda=0.1$ 时,8目橡胶混凝土总能耗峰值点较20目仅减少了约6.1%;当 $\lambda=0.2$ 时,8目橡胶混凝土总能耗峰值点较20目仅增加了约1%。换言之,虽然粒径对耗能有一定影响,但这种影响在不同的加载力幅值水平和橡胶体积掺量条件下并不是决定性的。此外,加载力幅值水平 $\lambda$ 对橡胶混凝土滞回耗能的影响较为明显。以8目橡胶颗粒为例,当体积掺量分别为5%、10%和15%时, $\lambda=0.2$ 对应的橡胶混凝土滞回耗能较 $\lambda=0.1$ 时分别增加了2.55倍、2.09倍和1.09倍。对于20目橡胶颗粒,滞回耗能的增长分别为2.08倍、1.78倍和0.72倍。综上,相较于加载力幅值水平和橡胶体积掺量,橡胶粒径对归一化总能耗的影响显然更小。

混凝土中掺入橡胶颗粒能增强其耗散能量的能力,主要有以下几个方面原因<sup>[32]</sup>:橡胶颗粒的表面为非极性,与水泥砂的极性表面结合后两者之间的吸附力下降,进而导致两者的黏结能力降低,橡胶掺量的增加,会导致混凝土内部缺陷增多;当循环荷载作用在混凝土上时,界面结合薄弱处会发生摩擦作用,从而消耗一部分能量,而随橡胶掺量的增加,耗散的能量就越多;橡胶颗粒还是一种黏弹性材料,在振动过程中高分子链段会发生运动,这种运动会增强链段间的摩擦作用,在这个过程中机械能转化为热能并耗散在周围,这会导致橡胶混凝土在循环荷载作用下能增强耗散能量;橡胶颗粒掺入混凝土中能起到填充和弹性的作用,混凝土内部的孔隙结构也会得到改善,橡胶掺量增加,混凝土内部的弹性部分也会增加,耗能能力得到提升。

此外,橡胶混凝土滞回过程总耗能受橡胶体积掺量和加载力幅值水平影响较大,且在橡胶体积掺量为10%时,耗能能力增强最明显,而15%的橡胶掺量较10%掺量的耗能能力有所下降。文献[22,35]中也观察到了橡胶混凝土的总耗能随着橡胶颗粒掺量的增加先上升至峰值后下降的趋势。这一现象的形成机制较为复杂,与橡胶颗粒和水泥、集料的均匀拌合密切相关。文献[22]提出,橡胶颗粒掺量过高,导

致橡胶颗粒与混凝土中的其他组分难以充分均匀拌合,从而在混凝土内部形成局部的橡胶颗粒高浓度和低浓度区域.这种不均匀分布影响了橡胶颗粒阻尼特性的发挥,并在高浓度区域引起混凝土强度下降或界面粘结力减弱,增加了裂缝的产生.这些因素的共同作用导致了混凝土整体耗能能力的降低.为了进一步探究这一现象的原因,需要通过适当的设备对橡胶混凝土的微观结构进行详细分析.在相同的橡胶体积掺量与加载力幅值水平时,橡胶颗粒的粒径大小与滞回曲线耗能面积没有明显的关系.

### 3.2 损耗因子

采用损耗因子 $\eta$ 进一步探讨橡胶混凝土的阻尼耗能特性.如图11所示,当 $\lambda=0.1$ 时,对于8目橡胶混凝土,橡胶颗粒体积掺量为5%、10%和15%时, $\eta$ 从0.04增长到0.10、0.16、0.12,分别增长了1.5、3和2倍,其他条件相同时,20目橡胶混凝土对应的 $\eta$ 值则分别增长了1.7、3.3、2.1倍.

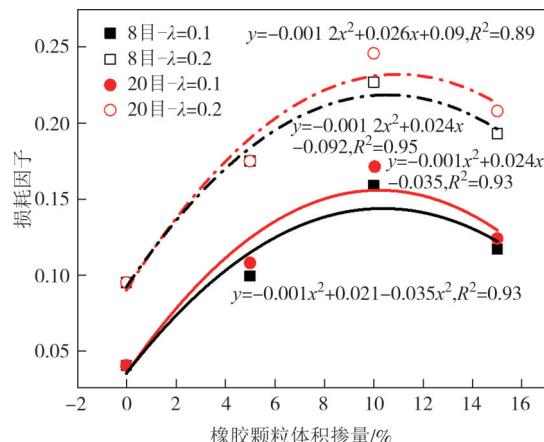


图11 橡胶混凝土的损耗因子

Fig.11 Loss factor of rubberized concrete

此外,加载力幅值水平 $\lambda$ 对橡胶混凝土损耗因子 $\eta$ 的影响较大.其他条件相同时,相较于 $\lambda=0.1$ , $\lambda=0.2$ 时的8目橡胶混凝土的 $\eta$ 值分别增长了75%、43%、65%倍,20目橡胶混凝土则分别增长了38%、43%、68%.

综上,当粒径相同时,损耗因子随着橡胶掺量和应力幅值水平的增加总体增加,但橡胶掺量从10%增至15%时,损耗因子略有下降,另外,在橡胶掺量和应力幅值水平相同时,橡胶颗粒的粒径尺寸对损耗因子影响较小,可基本忽略尺寸效应.因此,橡胶掺量和应力幅值水平对损耗因子的影响更为明显.

### 3.3 动弹性模量

在初始加载阶段,橡胶混凝土易出现应力集中与裂纹扩展.为消除初期不稳定因素对分析的影响,参考文献[34],本文在评估动态弹性模量时未纳入前5次加载循环的数据,采用后25个滞回曲线计算动弹性模量,并取平均值.不同种类的橡胶混凝土动弹性模量见表7.由表7可知,对于20目的橡胶颗粒,橡胶体积掺量为5%、10%、15%时,动弹性模量 $E_d$ 从普通混凝土的17.2 GPa降低至11.11 GPa、8.26 GPa和6.05 GPa,分别降低35.4%、51.9%和64.8%.其原因是橡胶颗粒光滑的表面会降低橡胶颗粒与水泥浆界面之间的黏附力,从而增加最弱相和界面过渡区的体积,而过渡区不利于混凝土应力传递,会导致弹性模量降低.此外,根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010),C25普通混凝土的静弹性模量为28 GPa,动弹性模量通常高于静弹性模量<sup>[36]</sup>,而本文未掺橡胶颗粒混凝土的动弹性模量 $E_d=17.2$  GPa,低于C25混凝土的动弹性模量值,其原因主要有以下两个方面:①本文动弹性模量的计算是在较高的应力幅值下进行的(加载力幅值与棱柱体抗压强度之比为0.3),而研究表明,随着应力水平的增加,动弹性模量会降低.例如,文献[37]显示,当加载力幅值与棱柱体抗压强度之比从0.2增至0.4时,动弹性模量下降了约10%.②为满足后续室内模型试验的要求,本文在粗集料的选择上进行了缩尺,粒径范围定为5~10 mm,这比常规混凝土中5~31.5 mm的粒径要小.已有研究指出,粗集料粒径的减小亦会导致动弹性模量的降低.文献[38]中,当粗集料最大尺寸从31.5 mm降至16 mm时,动弹性模量减小了约14%.因此,上述两个原因导致本文未掺橡胶颗粒混凝土的动弹性模量偏小.

表7 不同粒径、体积掺量的橡胶混凝土的动弹性模量

Tab.7 Dynamic modulus of elasticity of rubberized concrete with different particle sizes and volume content

粒径	掺量				GPa
	0	5%	10%	15%	
8目	17.2	11.44	8.51	7.41	
20目	17.2	11.11	8.26	6.05	

而对于8目(2~4 mm)的橡胶颗粒,橡胶颗粒体积掺量为5%、10%、15%时,动弹性模量分别降低33.5%、50.5%、56.9%.在相同的橡胶颗粒掺量下,较

20目橡胶混凝土的动弹性模量增加了3.02%~22.48%.由此可见,橡胶颗粒大的橡胶混凝土表现出更高的动弹性模量.

为进一步研究橡胶颗粒对混凝土动弹性模量的影响,对试验所得橡胶混凝土动弹性模量进行归一化处理,并对曲线进行拟合分析,如图12所示.由图12可知,橡胶混凝土的动弹性模量随着橡胶颗粒掺量的增加的变化趋势与立方体抗压强度相似,呈现近似指数函数下降的趋势,形式见式(7):

$$\overline{E}_d = \frac{E_d^x}{E_d^0} = A_E + B_E C_E^x \quad (7)$$

式中: $\overline{E}_d$ 、 $E_d^0$ 、 $E_d^x$ 分别为归一化橡胶混凝土动弹性模量、普通混凝土和橡胶掺量为x%的橡胶混凝土的动弹性模量; $A_E$ 、 $B_E$ 、 $C_E$ 分别为与橡胶颗粒粒径大小相关的量,对于8目橡胶颗粒 $A_E=0.36$ , $B_E=0.64$ , $C_E=0.86$ ,对于20目橡胶颗粒 $A_E=0.22$ , $B_E=0.78$ , $C_E=0.89$ .

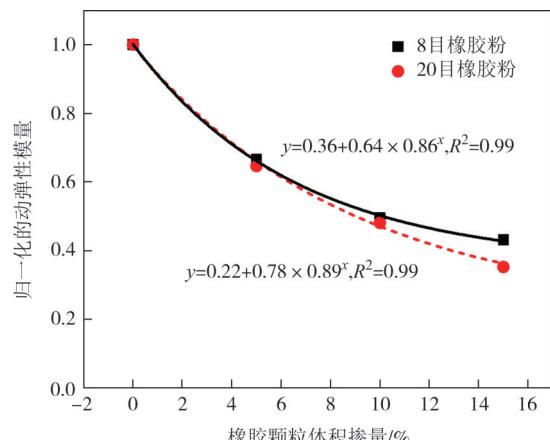


图12 橡胶混凝土归一化动弹性模量随橡胶颗粒体积掺量的变化

Fig.12 Variation of normalized dynamic modulus of elasticity of rubberized concrete with volume content of rubber

同样地分析式(7)指数函数,可得8目及20目的橡胶混凝土归一化动弹性模量的临界值分别为0.36、0.22.

为说明橡胶混凝土动弹性模量与立方体抗压强度之间的关系,将上述不同橡胶粒径(8目、20目)橡胶混凝土立方体抗压强度与动弹性模量进行拟合分析,结果如图13所示,得到橡胶混凝土动弹性模量与立方体抗压强度的换算公式.

#### 8目橡胶颗粒的橡胶混凝土:

$$y = \frac{10^5}{-8.72 + \frac{369.74}{x}} \quad (8)$$

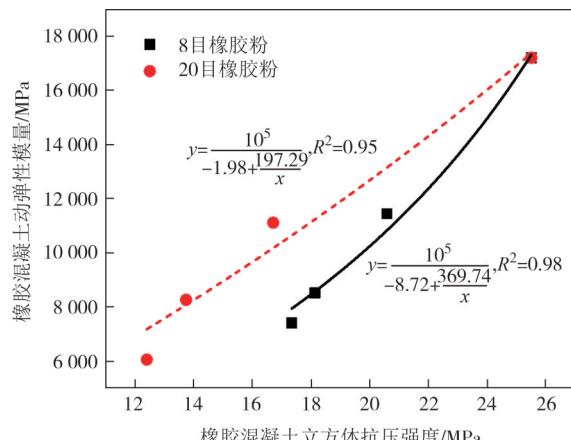


图13 橡胶混凝土的 $E_d$ 与 $f_{cu}$ 的换算关系曲线

Fig.13 Conversion curve of  $E_d$  to  $f_{cu}$  for rubberized concrete

20目橡胶颗粒的橡胶混凝土:

$$y = \frac{10^5}{-1.98 + \frac{197.29}{x}} \quad (9)$$

由此可见,橡胶颗粒的掺入会对混凝土动弹性模量与立方体抗压之间的关系产生影响,且橡胶颗粒粒径不同,两者之间的关系亦不同.

## 4 结论

本文通过橡胶混凝土试件静力抗压试验,得到了不同橡胶颗粒粒径和体积掺量下的橡胶混凝土抗压强度、轴心抗压强度,并在此基础上,通过循环荷载下滞回特性试验研究分析了相应橡胶混凝土的阻尼耗能特性.得到如下结论:

1)橡胶混凝土的立方体抗压强度、棱柱体抗压强度及动弹性模量随着橡胶颗粒掺量的增加而近似呈指数衰减至一定值,其中小橡胶颗粒粒径下的混凝土表现出更低的抗压强度,动弹性模量也表现出类似的规律.相较于普通混凝土,8目(2~4 mm)橡胶混凝土归一化立方体抗压强度和动弹性模量可降至0.645、0.36,20目(0.85 mm)则可分别降至0.463、0.22.

2)橡胶颗粒的掺入量不影响混凝土立方体抗压强度与棱柱体抗压强度间的换算公式,但将改变立方体抗压强度与动弹性模量间的公式,且橡胶颗粒粒径不同,两者之间的公式亦有区别.

3)橡胶混凝土滞回总耗能远大于普通混凝土,且受加载幅值水平和橡胶颗粒体积掺量影响较大.其中:随着橡胶颗粒掺量的增加,滞回总耗能呈现先增长后略有下降的趋势,在橡胶颗粒掺量在8%~

10% 之间达到最大值,但与加载幅值水平正相关。此外,橡胶颗粒粒径大小对总耗能影响不大,8 目和 20 目总耗能峰值在 10% 以内。

4) 橡胶混凝土阻尼损耗因子  $\eta$  受橡胶颗粒的粒径尺寸影响较小,但受橡胶颗粒掺量和加载幅值水平影响显著。其中损耗因子随橡胶颗粒掺量的增加而先增加后减小,在橡胶颗粒掺量 10% 时达到最大值,随加载幅值水平增加而较大幅增加。

## 参考文献

- [1] SU J Y, CHEN G, PAN H S, et al. Rubber modified high strength-high ductility concrete: effect of rubber replacement ratio and fiber length [J]. Construction and Building Materials, 2023, 404:133243.
- [2] GHONIEM A, ABOUL N L. Experimental investigation into the properties of crumb rubberized concrete incorporating corrugated round steel fibers [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2024, 24(2):100.
- [3] BALA A, GUPTA S. Thermal resistivity, sound absorption and vibration damping of concrete composite doped with waste tire rubber: a review [J]. Construction and Building Materials, 2021, 299:123939.
- [4] HASSANLI R, YOUSSEF O, MILLS J E. Experimental investigations of reinforced rubberized concrete structural members [J]. Journal of Building Engineering, 2017, 10:149–165.
- [5] XUE J, SHINOZUKA M. Rubberized concrete: a green structural material with enhanced energy-dissipation capability [J]. Construction and Building Materials, 2013, 42:196–204.
- [6] 张家荣. 季冻区高铁路基基床表层掺橡胶粉水泥稳定碎石力学特性研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2023.
- ZHANG J R. Study on dynamic characteristics of cement stabilized macadam mixed with rubber powder on the surface layer of subgrade bed of high-speed railway in seasonally frozen area [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023. (in Chinese)
- [7] 金浩,赵晨. 面支撑橡胶混凝土浮置板轨道动力特性的细观分析[J]. 铁道科学与工程学报,2023, 20(6): 2057–2064.
- JIN H, ZHAO C. Mesoscale investigation of the dynamic performance of a full-surface supporting floating slab track made of rubberized concrete [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(6): 2057–2064. (in Chinese)
- [8] 金浩,田清荣,李政. 橡胶混凝土道床动力特性的足尺试验分析[J]. 振动与冲击,2022,41(16):249–254.
- JIN H, TIAN Q R, LI Z. Full-scale experiment on dynamic characteristics of tunnel invert using rubberized concrete [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41 (16) : 249–254. (in Chinese)
- [9] 金浩,李政,殷东昊. 基于细-宏观尺度参数映射的橡胶混凝土道床动力特性分析[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(2): 545–553.
- JIN H, LI Z, YIN D H. Dynamic characteristics analysis of CRC invert-filling of tunnel based on the method of parameter mapping by macro-meso scale model [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(2): 545–553. (in Chinese)
- [10] 张建宇. 改良橡胶混凝土隧道韧性层及其减震性能研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2023.
- ZHANG J Y. Study on tunnel toughness layer of improved rubberized concrete and its shock absorption performance [D]. Shijiazhuang:Shijiazhuang Tiedao University ,2023. (in Chinese)
- [11] 邓钊. 地震作用下橡胶水泥基隧道减震材料的初步研究[D]. 广州:广州大学,2022.
- DENG Z. Preliminary study on rubber-cement tunnel damping material under earthquake [D]. Guangzhou:Guangzhou University, 2022. (in Chinese)
- [12] 郭豪仁. 盾构隧道橡胶水泥基注浆材料工程性能研究[D]. 广州:广州大学,2022.
- GUO H R. Research on engineering properties of rubber cement-based grouting materials for shield tunnels [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022. (in Chinese)
- [13] MOUSTAFA A, ELGAWADY M A. Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93:249–256.
- [14] 徐传堡,贾亚飞,郑俊杰,等. 循环荷载下筋材对桩承式低路堤荷载传递机制的影响试验[J]. 中国公路学报,2024,37(6): 66–75.
- XU C B, JIA Y F, ZHENG J J, et al. Effect of geosynthetic reinforcements on load transfer mechanism of pile-supported low embankments under cyclic loading [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024,37(6):66–75. (in Chinese)
- [15] 陈仁朋,汪焱卫,陈金苗,等. 大振次列车动荷载作用下桩网加筋路堤拱效应模型试验研究[J]. 铁道学报,2015,37(9): 107–113.
- CHEN R P, WANG Y W, CHEN J M, et al. Experimental study on soil arching effect in pile-supported reinforced embankment under dynamic train loads with large number of vibration cycles [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37 (9) : 107–113. (in Chinese)
- [16] 张承富. 桩承式路堤荷载传递机理及其沉降计算方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2021.
- ZHANG C F. The research on load transfer mechanism and settlement calculation method of pile-supported embankment [D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese)
- [17] 朱斌,任宇,陈仁朋,等. 竖向下压循环荷载作用下单桩承载力及累积沉降特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 186–193.
- ZHU B, REN Y, CHEN R P, et al. Model test on bearing capacity and accumulated settlement of single pile subjected to axial cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2):186–193. (in Chinese)
- [18] LUHAR S, CHAUDHARY S, LUHAR I. Development of rubberized geopolymers concrete: strength and durability studies

- [J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 740–753.
- [19] LIANG C F, FU Y Y, WANG C H, et al. Damping of rubberized recycled aggregate concrete and damping estimation of its elements by finite element analysis [J]. Composite Structures, 2022, 281: 114967.
- [20] CHEN J H, ZENG X H, UMAR H A, et al. Study of the vibration reduction performance of rubberized self-compacting concrete filling layer in prefabricated slab track [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(6): 04023150.
- [21] HABIB A, YILDIRIM U, EREN O. Mechanical and dynamic properties of high strength concrete with well graded coarse and fine tire rubber [J]. Construction and Building Materials, 2020, 246: 118502.
- [22] ZHENG L, SHARON H X, YUAN Y. Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(5): 939–947.
- [23] ELTAYEB E, MA X, ZHUGE Y, et al. Dynamic performance of rubberised concrete and its structural applications: an overview [J]. Engineering Structures, 2021, 234: 111990.
- [24] LIU B D, YANG S Z, LI W L, et al. Damping dissipation properties of rubberized concrete and its application in anti-collision of bridge piers [J]. Construction and Building Materials, 2020, 236: 117286.
- [25] MEI X C, SHENG Q, CUI Z, et al. Experimental investigation on the mechanical and damping properties of rubber-sand-concrete prepared with recycled waste tires for aseismic isolation layer [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 165: 107718.
- [26] MOUSTAFA A, GHENI A, ELGAWADY M A. Shaking-table testing of high energy-dissipating rubberized concrete columns [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(8): 04017042.
- [27] HABIB A, YILDIRIM U, EREN O. Seismic behavior and damping efficiency of reinforced rubberized concrete jacketing [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(5): 4825–4839.
- [28] 复合地基技术规范: GB/T 50783—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.  
Technical code for composite foundation: GB/T 50783—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)
- [29] 文捷. 钢筋混凝土及钢管混凝土材料阻尼研究[D]. 北京: 京交通大学, 2006.
- [30] 彭雄志, 赵善锐, 罗书学, 等. 高速铁路桥梁基础单桩动力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 218–221.
- [31] CHEN R P, GU M, KONG L G, et al. Large-scale model tests on high-rise platform pile groups under cyclic lateral loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2): 218–221. (in Chinese)
- [32] 陈仁朋, 顾明, 孔令刚, 等. 水平循环荷载下高桩基础受力性状模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 1990–1996.
- [33] XUE G, ZHANG X F, CAO M L. Tests for damping energy-dissipation performance of rubber concrete considering temperature effect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(19): 94–100. (in Chinese)
- [34] LAZAN B B J. Damping of materials and members in structural mechanics[M]. Oxford: Pergamon Press, 1968.
- [35] LIANG C F, XIAO J Z, WANG C H, et al. Hysteretic energy and damping variation of recycled aggregate concrete with different cyclic compression loading levels [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 102936.
- [36] LIN C Y, YAO G C, LIN C H. A study on the damping ratio of rubber concrete [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2010, 9(2): 423–429.
- [37] LYDON F D, BALENDRAN R V. Some observations on elastic properties of plain concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1986, 16(3): 314–324.
- [38] ZHANG P Y, WANG Y F, MEI S Q, et al. Nonlinear damping properties of recycled aggregate concrete short columns under cyclic uniaxial compression [J]. Construction and Building Materials, 2020, 246: 118445.
- [39] ZHOU Y, GAO J, SUN Z H, et al. A fundamental study on compressive strength, static and dynamic elastic moduli of young concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 137–145.