

文章编号:1671-8879(2018)03-0026-08

橡胶轻骨料混凝土阻尼性能试验

白文琦, 吕 晶

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要:为了定量描述橡胶颗粒对轻集料混凝土阻尼性能的影响规律,以橡胶颗粒替代率为主要参数,自行设计了悬臂梁试件,分析不同龄期时橡胶轻骨料混凝土立方体抗压强度随橡胶颗粒替代率的变化规律。考虑到混凝土在服役过程中普遍存在损伤的实际情况,采用自由衰减法分别测试橡胶轻骨料混凝土悬臂梁在不同橡胶颗粒替代率和不同损伤程度时的基本频率和阻尼比演化规律,分析橡胶颗粒对橡胶轻骨料混凝土阻尼性能的影响规律和作用机理,建立橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比、损伤指数和橡胶颗粒替代率间的相关关系。研究表明:随着橡胶颗粒替代率的增大,橡胶轻骨料混凝土立方体抗压强度不断降低;相同损伤程度时,随着橡胶颗粒替代率的增大,橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比不断增大;相同橡胶颗粒替代率时,随着损伤控制位移的增大,橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比先增大后减小,损伤控制位移达到 30 mm 时,各橡胶颗粒替代率下的橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比均达到最大值;随着位移角增大,橡胶轻骨料混凝土悬臂梁弯曲刚度损伤指数不断增大;随着损伤指数的增大,不同橡胶颗粒替代率的橡胶轻骨料混凝土阻尼比均呈现先增大后减小趋势,峰值阻尼比对应的损伤指数为 0.60~0.75,掺橡胶颗粒试样的峰值阻尼比均大于未掺橡胶颗粒试样。研究成果可为橡胶轻骨料混凝土结构设计及动力性能分析提供理论基础。

关键词:道路工程;废旧橡胶轮胎;试验研究;轻骨料混凝土;悬臂梁;阻尼性能

中图分类号:U414.2

文献标志码:A

Experimental on damping capacity of rubber lightweight aggregate concrete

BAI Wen-qi, LU Jing

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to quantitatively describe the influence of rubber particles on the damping capacities of lightweight aggregate concrete, cantilever beam specimens were designed by ourselves and the replacement ratio of rubber particles were set as main parameters. The change law of cubic compressive strength of rubber lightweight aggregate concrete with rubber particles replacement rate at different ages were tested. In practice, damage was widely existed in concrete during service process. The evolutionary law of basic frequency and damping ratio of rubber lightweight aggregate concrete cantilever beam at different rubber particles replacement ratio and different damage degree were detected respectively by free decay method. The influence law and

收稿日期:2017-11-03

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2016JM5044);延安市科学技术研究发展计划项目(2015KG-03);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102238632)

作者简介:白文琦(1985-),女,陕西西安人,工程师,工学博士研究生,E-mail:wenqib@hotmail.com。

通讯作者:吕 晶(1985-),男,陕西延安人,工程师,工学博士,E-mail:lvjing21@chd.edu.cn。

mechanism of rubber particles on the damping capacities of rubber lightweight aggregate concrete were analyzed. The relationship between damping ratio, damage index and rubber particles replacement ratio of rubber lightweight aggregate concrete cantilever beam were established. The results show that the compressive strength of rubber lightweight aggregate concrete cube decreases with the increase of the replacement rate of rubber particles. The damping ratio of rubber lightweight aggregate concrete cantilever beam increases with rubber particles replacement ratio at the same damage degree. For the same rubber particles replacement ratio, the damping ratio of rubber lightweight aggregate concrete cantilever beam first increases and then decreases with increase of damage control displacement. When the damage control displacement reaches to 30 mm, the damping ratio of rubber lightweight aggregate concrete cantilever beams at each rubber particles replacement ratio reaches the maximum. The flexural dynamic stiffness damage index of rubber lightweight aggregate concrete cantilever beam augments with the increase of displacement angle. With the increase of damage index, the damping ratio of rubber lightweight aggregate concrete cantilever beam at different rubber particles replacement ratio firstly increases and then decreases. The corresponding damage index of peak damping ratio is 0.6 to 0.75. The peak damping ratio of specimens containing rubber particles is larger than that of specimens containing no rubber particles. The results can provide theoretical basis for structural design and dynamic performance analysis of rubber lightweight aggregate concrete. 3 tabs, 11 figs, 26 refs.

Key words: road engineering; waste rubber tire; experimental study; lightweight aggregate concrete; cantilever beam; damping capacity

0 引言

随着汽车工业的飞速发展,废旧汽车轮胎的数量日益增多,其有效处置迫在眉睫。近年来,国内外学者相继尝试将废旧橡胶轮胎破碎制成橡胶颗粒并将其应用于普通混凝土中,其不仅可以提高废旧橡胶轮胎的综合利用水平,促进环境保护,而且可以借助橡胶颗粒的特性改善了普通混凝土的某些工程性能,给混凝土带来了新的技术革新,具有显著的现实意义^[1-5]。轻集料混凝土作为一种具有质轻、隔热、保温、耐火、抗震等优异性能的新型建筑材料^[6-7],用量仅次于普通混凝土。为了进一步拓宽废旧橡胶颗粒的回收利用途径,改善轻集料混凝土脆性大的缺点,国内外学者亦将橡胶颗粒应用于轻集料混凝土中,并对其性能展开了较为系统的研究,结果表明,橡胶颗粒的掺入会显著降低轻集料混凝土的表观密度、抗压强度、抗拉强度、抗折强度和弹性模量等性能,然而其单轴受压的峰值应变增大,轻集料混凝土的破坏形态趋于延性破坏^[8-15]。

在橡胶混凝土中,橡胶颗粒作为细小的料群起着类似弹性纤维的作用,不仅能减小体系的各种应力和微观裂纹,减少裂纹产生阻止或减缓微裂纹发展而导致的混凝土断裂,同时橡胶颗粒良好的能量

吸收能力和韧性性能使其对普通混凝土的动力性能起到改善作用^[16-18]。为了深入研究橡胶混凝土的动力性能,许静等采用自由衰减法测试了橡胶混凝土悬臂梁的阻尼性能,研究结果表明,橡胶混凝土的阻尼比明显高于普通混凝土,随着橡胶颗粒掺量的提高,橡胶混凝土阻尼比不断增大^[19-20]。作为一种新型的混凝土材料,橡胶轻骨料混凝土亦具有广泛的应用前景,然而目前的研究大多集中在橡胶轻集料混凝土力学性能方面,鲜有关于橡胶轻骨料混凝土耗能方面的研究报道。

本文拟从橡胶轻骨料混凝土耗能性能评价指标之一——阻尼性能着手,考虑混凝土在服役过程中存在损伤的实际情况,采用自由衰减法测试了橡胶轻骨料混凝土悬臂梁在不同橡胶颗粒替代率和不同损伤程度时的基本频率和阻尼比,分析了橡胶颗粒对橡胶轻骨料混凝土阻尼性能的影响规律和作用机理,建立了橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比、损伤指数和橡胶颗粒替代率间的关系,为橡胶轻骨料混凝土推广应用奠定了基础。

1 试验概况

1.1 试验原材料

试验采用陕西礼泉海螺水泥有限责任公司产

PO42.5 水泥,主要性能指标见表 1;粉煤灰采用陕西渭河电厂产Ⅱ级粉煤灰,细度(45 μm 方孔筛筛余量)为 13.5%,需水比为 97%;轻骨料采用湖北宜昌宝珠陶粒开发有限责任公司生产的 800 级碎石形页岩陶粒,粒径为 5~16 mm,吸水率为 2.3%,筒压强度为 4.8 MPa,堆积密度为 830 kg/m³。砂子为普通河砂,细度模数为 2.7,表观密度为 2.62 g/cm³。橡胶颗粒为人工破碎的废旧汽车轮胎颗粒,颗粒级配与河砂接近,颗粒粒径为 0.15~4.75 mm,细度模数为 2.6,表观密度为 1.16 g/cm³,堆积密度为 365 kg/m³。减水剂采用聚羧酸高效减水剂,固含量为 45%,减水率为 20%~25%。水采用普通自来水。

表 1 水泥性能指标
Tab. 1 Properties indexes of cement

参数	凝结时间/ min		安定 性	细度/ %	不同养护龄期 (d)下的抗折 强度/MPa		不同养护龄期 (d)下的抗压 强度/MPa	
	初凝	终凝			3	28	3	28
参数值	115	360	良好	8.9	4.8	7.8	34.1	45.6

1.2 试验配合比

试验配合比设计依据《轻骨料混凝土技术规程》(JGJ 51—2002)^[21]中的有关规定进行,设计强度等级 LC40。橡胶颗粒等体积替代相同粒径的河砂,其替代率(体积分数,下同)分别为 10%、20%、30%、40%和 50%。试验配合比见表 2。

表 2 试验配合比
Tab. 2 Experimental mix proportion kg/m³

编号	水泥	粉煤灰	河砂	橡胶颗粒	页岩陶粒	减水剂	水
LC	425	85	700	0	610	5.1	179
RLC10	425	85	630	31	610	5.1	179
RLC20	425	85	560	62	610	5.1	179
RLC30	425	85	490	93	610	5.1	179
RLC40	425	85	420	124	610	5.1	179
RLC50	425	85	350	155	610	5.1	179

1.3 试验设计

试验共设计橡胶轻骨料混凝土梁 12 根,每个配合比成型 2 根试验梁,取 2 根梁的平均值作为其最终试验结果。考虑试验过程中试件能够较容易发生振动,在文献[22]的基础上,将试件尺寸确定为 80 mm(长)×80 mm(宽)×1 040 mm(高)。为了防止试件在试验过程中发生断裂破坏,在试件的 4 个角分别布置 1 根直径 8 mm 的 HRB335 级纵筋,纵筋长度 1 000 mm,每隔 200 mm 设置 1 个箍筋,箍筋采用直径为 3 mm 的铁丝,纵筋和箍筋布置如图

1 所示。

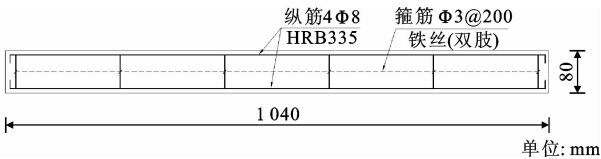


图 1 阻尼试件
Fig. 1 Damping specimen

1.4 测试装置及试验方案

已有研究表明,采用 T 形试件所测试的混凝土前三阶固有频率之比与理论值(1:6.27:17.6)较为接近^[23-25]。因此,采用 T 形试件测试混凝土阻尼比是合适的。为了便于混凝土阻尼比测试,本文设计与文献[23]中试件尺寸较为接近,与理论计算模型基本一致的等截面悬臂梁试件,以研究橡胶轻骨料混凝土阻尼性能随橡胶颗粒替代率的变化规律及作用机理。

悬臂梁一端固定在固定装置上,固定装置通过地脚螺栓与实验室地槽连接,形成固定端。试件深入固定装置内 190 mm,悬臂长度 850 mm。加速度传感器固定于距悬臂端 50 mm 的试件上表面中轴线位置,自由衰减振动波测试采用 DH5923 型动态信号测试分析系统。

试验在长安大学建筑结构与抗震实验室完成。为了控制每次的冲击荷载基本相同,试验时在距悬臂端 100 mm 处悬挂 10 kg 砝码,通过突然卸荷的方式使悬臂端产生振动,如图 2 所示,采用加速度传感器测得悬臂梁振动时程曲线,进而计算出基本频率和一阶振型阻尼比。悬臂梁损伤程度控制采用在悬臂端施加荷载来实现,如图 3 所示,施加荷载时在梁端架设 1 块百分表,采用千斤顶对梁端进行加载,加载时采用位移控制,控制梁端位移 y_i ($i=0,1,\dots,5$)分别为 0(无损伤)、5、10、20、30、40 mm。对悬臂梁进行损伤加载时,首先采用千斤顶将悬臂端向上缓慢加载至设定位移,保持荷载 3 min 后卸载并将试件旋转 180°,再次加载至设定位移,如此反复循环 3 次即完成该损伤级别加载,最后 1 次加载时记录千斤顶显示的荷载值。至此,本次损伤加载结束,每级损伤加载均采用上述方法,每级损伤加载结束后观察并记录试件表面的裂纹发展情况。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

加载过程中试件表面裂纹发展情况如图 4 所示。由图 4 可知:当梁端位移为 5 mm 时,梁根部首

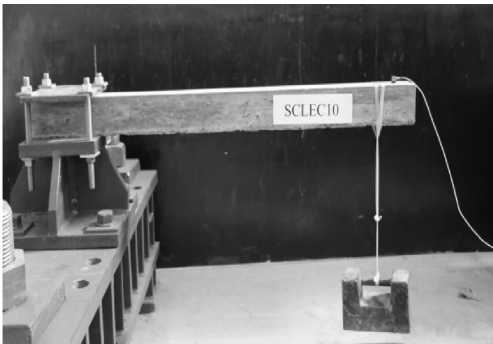


图 2 加载全貌
Fig. 2 Full view of loading



图 3 损伤加载
Fig. 3 Damage loading

先出现细微裂纹,肉眼基本观察不到,卸荷后裂纹重新闭合,此阶段梁尚属于弹性阶段,不同橡胶颗粒替代率下的试件间几乎没有差异;位移达到 10 mm 后,梁根部出现可见裂纹,卸荷后部分裂缝还可以重新闭合,但已经开始出现不可恢复的裂纹,悬臂部分也出现了细微裂纹,橡胶颗粒替代率越高,其试件表面的不可恢复裂纹越少;位移达到 20 mm 后,梁根部裂纹宽度增大,试件表面的裂纹开始进一步延伸,卸荷后不可恢复裂纹明显增多;当位移达到 30 mm 后,梁根部出现大量的贯通裂纹,试件表面裂纹进一步延伸,局部混凝土发生脱落,大部分裂纹在卸荷后不可恢复,不同橡胶颗粒替代率试件之间的破坏形态差异不显著;当位移达到 40 mm 后,梁根部发生严重破坏,混凝土脱落现象加重,卸荷后试件表面裂纹宽度基本没有变化,贯通裂纹的数量显著增多。

采用自由衰减法测得不同橡胶颗粒替代率和不同损伤程度橡胶轻骨料混凝土悬臂梁振动时程曲线,典型时程曲线如图 5 所示。

2.2 立方体抗压强度

试验测得的橡胶轻骨料混凝土 7、28、90 d 的立方体抗压强度如表 3 所示。

由表 3 可知,随着橡胶颗粒替代率的提高,混凝

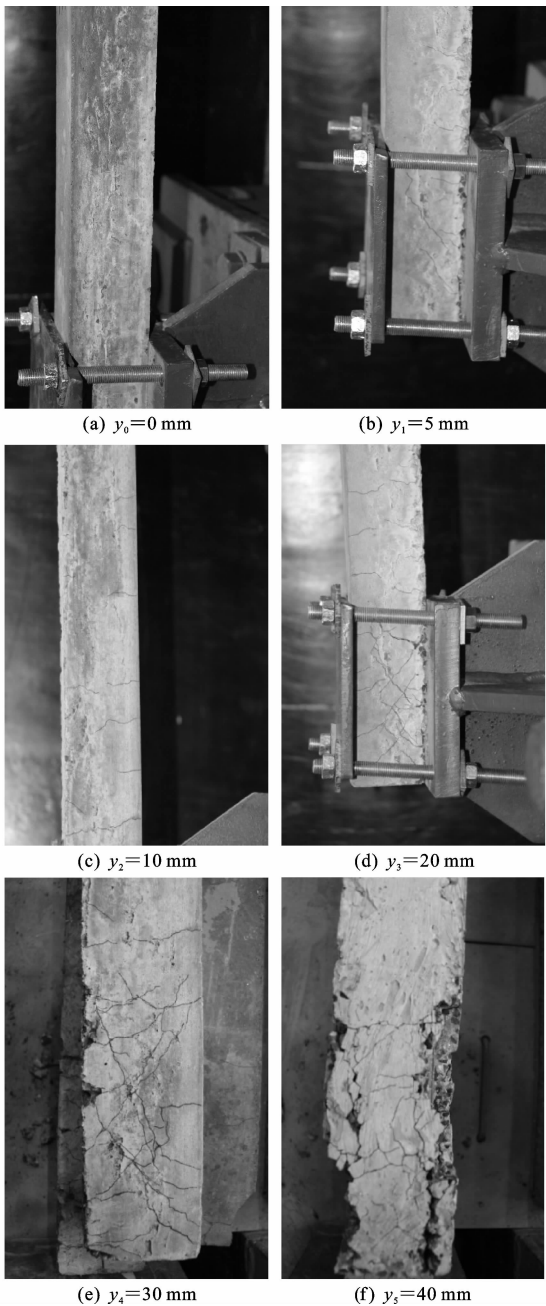


图 4 试件表面裂纹发展
Fig. 4 Cracks development of specimens surface

土的抗压强度值不断降低。与未掺入混凝土相比,7 d 龄期时,不同橡胶颗粒替代率下的混凝土的抗压强度降幅分别为 5.5%、13.4%、26.1%、36.8%、49.5%;28 d 龄期时分别为 5.0%、13.6%、25.9%、44.5%、54.4%;90 d 龄期时分别为 5.8%、12.6%、24.4%、38.7%、48.9%。不同龄期下的抗压强度降低率表明,当橡胶颗粒替代率大于 30% 后,抗压强度降低率明显增大,橡胶颗粒对橡胶轻骨料混凝土抗压强度的负效应显著增大。这主要是由于橡胶颗粒的强度较低,其抵抗荷载破坏的能力明显弱于砂

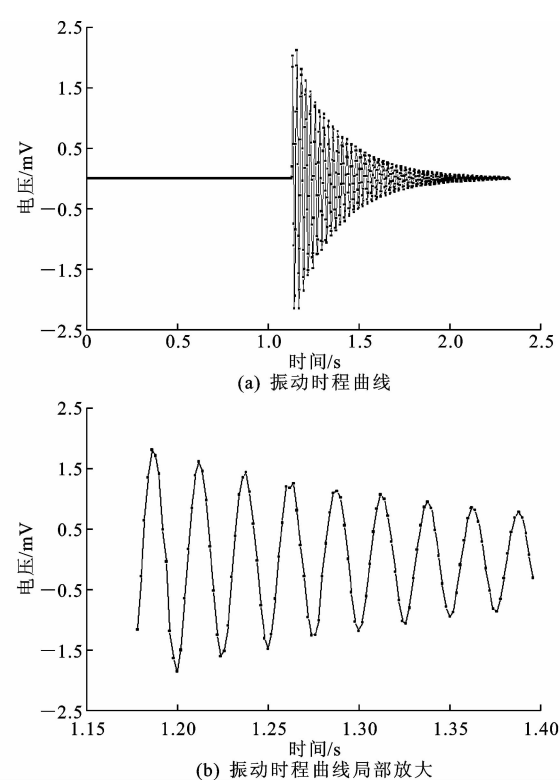


图 5 橡胶颗粒替代率为 30% 时的无损伤橡胶轻骨料混凝土悬臂梁振动时程曲线

Fig. 5 Vibration history curve of non-damage rubber lightweight aggregate concrete cantilever beam with 30% rubber particles replacement ratio

表 3 立方体抗压强度

Tab. 3 Cube compressive strength

编号	不同养护龄期(d)下的抗压强度/MPa		
	7	28	90
LC	29.1	45.6	50.1
RLC10	27.5	43.3	47.2
RLC20	25.2	39.4	43.8
RLC30	21.5	33.8	37.9
RLC40	18.4	25.3	30.7
RLC50	14.7	20.8	25.6

子,且橡胶颗粒为有机材料,其与水泥浆的黏结能力也比砂子与水泥浆间的黏结能力差,所以橡胶颗粒的掺入会降低轻集料混凝土的抗压强度。

2.3 基本频率和阻尼比

不同损伤程度时橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比随橡胶颗粒替代率 C 的变化如图 6 所示。由图 6 可知:损伤控制位移 y_i 为 0 时(无损伤),随着橡胶颗粒替代率的增大,橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比不断增大;橡胶颗粒替代率由 0% 增大至 50% 时,悬臂梁阻尼比由 1.13% 增大至 2.39%,增幅达 112%,表明橡胶颗粒的掺入显著提高了轻骨料混

土的阻尼性能,使其耗能性能得到大幅度改善。不同损伤控制位移时,悬臂梁阻尼比也随着橡胶颗粒替代率的提高而增大。相比于损伤控制位移为 0 时,当损伤控制位移由 5 mm 增大至 40 mm 时,各橡胶颗粒替代率下的橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比增幅分别为 83.3%、61.8%、51.5%、62.3%、45.2%;损伤控制位移的增大降低了橡胶颗粒替代率对其阻尼比影响的显著性。

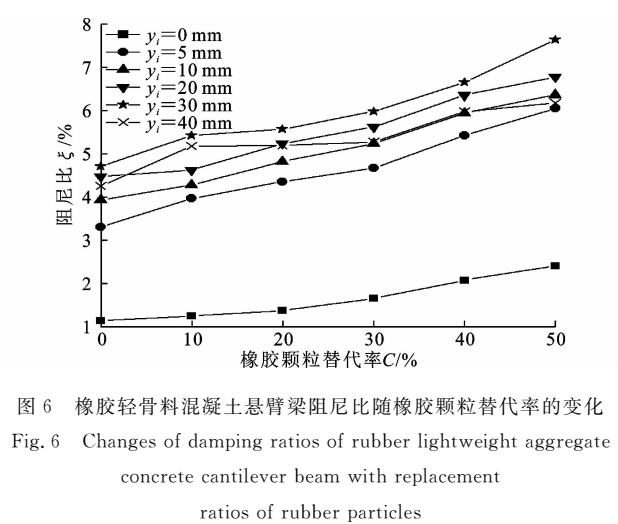


图 6 橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比随橡胶颗粒替代率的变化

Fig. 6 Changes of damping ratios of rubber lightweight aggregate concrete cantilever beam with replacement ratios of rubber particles

不同橡胶颗粒替代率 C 时橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比 ξ 、基本频率 f_0 随损伤控制位移 y_i 的变化如图 7、图 8 所示。由图 7 可知:相同橡胶颗粒替代率时,橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比随着损伤控制位移的增加先增大后减小;不同橡胶颗粒替代率时阻尼比的最大增幅均发生在损伤控制位移由 0 增大至 5 mm 时;损伤控制位移达到 30 mm 时,各橡胶颗粒替代率下的橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比均达到最大值,相比于损伤控制位移为 0 时,阻尼比普遍增大了 3~4 倍。由图 8 可知,随着损伤控制位移的增大,不同橡胶颗粒替代率的橡胶轻骨料混凝土悬臂梁基本频率 f_0 均减小。分析可知,橡胶轻骨料混凝土阻尼比与橡胶颗粒含量和混凝土内部裂纹发展情况密切相关,当混凝土内部发生损伤破坏时,骨料与水泥石之间的界面极易发生破坏,尤其是橡胶颗粒与水泥石之间的界面,界面裂纹的产生使得界面摩擦作用增强,造成其阻尼比增大。当骨料与水泥石之间界面的破坏以及混凝土内部裂纹宽度在一定范围内时,随着裂纹宽度的增大,橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比不断增大,当混凝土内部裂纹形成贯通裂缝后,大部分裂缝在卸荷后不可恢复,此时骨料与水泥石之间界面以及混凝土内部裂缝的界面面积均减小,界面摩擦力降低,阻尼比值开始

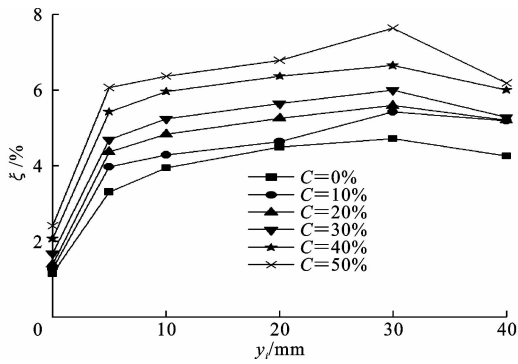


图7 橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比随损伤控制位移的变化

Fig. 7 Changes of damping ratios of rubber lightweight aggregate concrete cantilever beam with damage control displacement

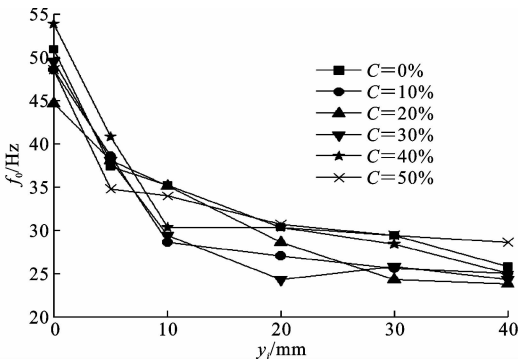


图8 橡胶轻骨料混凝土悬臂梁基本频率随损伤控制位移变化

Fig. 8 Changes of basic frequencies of rubber lightweight aggregate concrete cantilever beam with damage control displacement

变小。

2.4 截面弯曲动刚度

试验选用的悬臂梁悬臂端有效长度 850 mm, 其剪跨比为 10.625。由文献[24]可知, 当剪跨比大于 10 时, 悬臂梁的主要变形为弯曲变形, 在低频振动时可以忽略剪切变形以及截面绕中性轴转动惯量的影响, 悬臂梁以弯曲振动为主, 此时等截面悬臂梁弹性阶段截面弯曲动刚度 EI_{d_0} 计算式为

$$EI_{d_0} = \frac{(2\pi f_0)^2}{12.36} \bar{m}_0 l^4 \quad (1)$$

式中: \bar{m}_0 为悬臂梁线质量 (kg/m^2); l 为悬臂长度 (m); E 为弹性模量; I_{d_0} 为未损伤时截面惯性矩。

当悬臂梁受到损伤荷载作用后, 混凝土内部出现裂纹, 随着损伤控制位移的增大, 混凝土逐渐进入弹塑性阶段。尽管随着损伤控制位移的增大, 悬臂梁根部出现混凝土脱落现象, 但相比于整个梁试件, 脱落块的质量较少, 为了简化计算, 在计算同一橡胶颗粒替代率的橡胶轻骨料混凝土在不同损伤控制位移的弯曲动刚度 EI_{d_i} 时, 假设其质量恒定不变, 其计算式为

$$EI_{d_i} = \frac{(2\pi f_i)^2}{12.36} \bar{m}_0 l^4 \quad (2)$$

式中: f_i 为悬臂梁第 i 个损伤控制位移时的基本频率 (Hz); I_{d_i} 为第 i 个损伤位移下的截面惯性矩。

不同橡胶颗粒替代率时, 橡胶轻骨料混凝土的表观密度差异较大, 因此在计算不同橡胶颗粒替代率的弯曲动刚度时, 必须考虑其质量的影响。同一橡胶颗粒替代率悬臂梁在不同损伤控制位移时的量纲一化截面弯曲动刚度 $EI_{d_0}^*$ 为

$$EI_{d_0}^* = \frac{EI_{d_i}}{EI_{d_0}} = \frac{f_i^2}{f_0^2} \quad (3)$$

式中: $I_{d_0}^*$ 为量纲一化截面惯性矩。

橡胶轻骨料混凝土悬臂梁量纲一化截面弯曲动刚度与损伤控制位移关系如图 9 所示。不同橡胶颗粒替代率的橡胶轻骨料混凝土弯曲动刚度随着损伤控制位移的变化规律基本相似, 随着损伤控制位移的增大, 弯曲动刚度不断减小, 其中损伤控制位移在 20 mm 之前, 弯曲动刚度值下降较快, 之后下降率明显降低。当损伤控制位移大于 20 mm 后, 掺橡胶颗粒试样的弯曲动刚度退化率大于未掺橡胶颗粒试样, 其主要是由于橡胶颗粒与水泥石界面更易于发生破坏造成的。

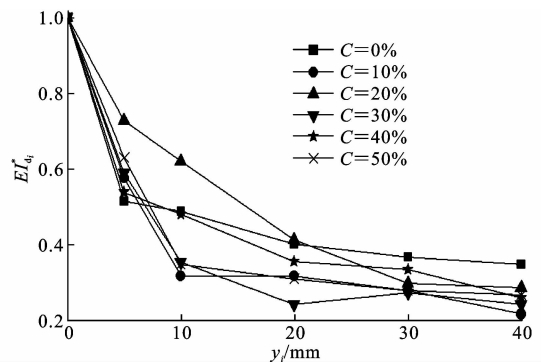


图9 弯曲动刚度随损伤控制位移的变化

Fig. 9 Changes of flexural dynamic stiffness with damage control displacement

2.5 损伤指数

橡胶轻骨料混凝土悬臂梁在不同损伤控制位移时, 其阻尼比、振动基本频率均会发生显著变化, 本文在参考文献[26]基础上, 将损伤指数 D_1 定义为

$$D_1 = 1 - \left(\frac{T_0}{T_i} \right)^2 = 1 - \left(\frac{f_i}{f_0} \right)^2 \quad (4)$$

式中: T_0 为初始弹性阶段的基本周期 (s); T_i 为第 i 损伤阶段的基本周期 (s)。

由式(3)、式(4)可知, 损伤指数 D_1 实际为弯曲动刚度损伤指数。由于本文采用损伤控制位移描述

损伤的大小,可定义损伤控制位移与悬臂梁悬臂长度比值为位移角 θ_i ,即 $\theta_i = y_i/l$,采用位移角 θ_i 的变化来描述弯曲动刚度损伤指数的变化,如图 10 所示。

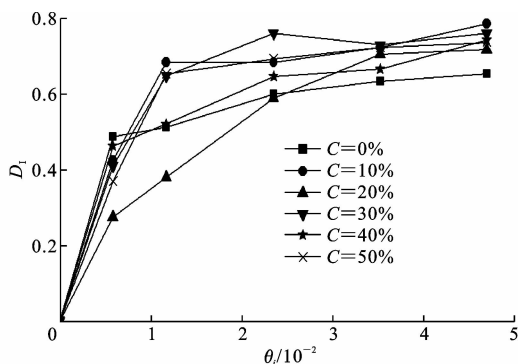


图 10 损伤指数随位移角的变化

Fig. 10 Changes of damage indexes with displacement angles

由图 10 可知:随着橡胶轻骨料混凝土悬臂梁位移角增大,弯曲动刚度损伤指数不断增大;当位移角小于 0.023 5 时,不同橡胶颗粒替代率的橡胶轻骨料混凝土悬臂梁弯曲动刚度损伤指数均增长较快,之后增长率明显降低,且逐渐趋于平缓。

2.6 损伤指数与阻尼比关系

橡胶轻骨料混凝土阻尼比随损伤指数的变化如图 11 所示。由图 11 可知:随着橡胶颗粒替代率的提高,相同损伤指数的橡胶轻骨料混凝土阻尼比均增大;随着损伤指数的增大,不同橡胶颗粒替代率的橡胶轻骨料混凝土阻尼比均呈先增大后减小趋势,峰值阻尼比对应的损伤指数为 0.60~0.75,且掺橡胶颗粒试样的峰值阻尼均大于未掺橡胶颗粒试样。

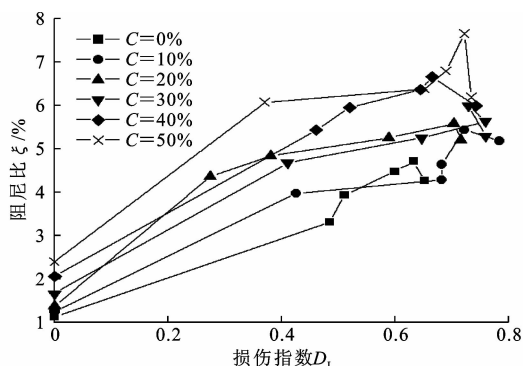


图 11 阻尼比随损伤指数的变化

Fig. 11 Changes of damping ratios with damage indexes

3 结 语

(1)随着橡胶颗粒替代率的提高,不同龄期的橡胶轻骨料混凝土立方体抗压强度均不断降低;当橡胶颗粒替代率大于 30%后,抗压强度降低率明显增

大,橡胶颗粒对橡胶轻骨料混凝土抗压强度的负面效应显著增大。

(2)采用自行设计的装置和试件试验获得不同损伤程度橡胶轻骨料混凝土悬臂梁振动时程曲线。相同损伤程度时,随着橡胶颗粒替代率的增大,橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比不断增大,表明橡胶颗粒的掺入显著提高了轻骨料混凝土的阻尼性能,使其耗能性能得到大幅度改善;相同橡胶颗粒替代率时,随着损伤控制位移的增大,橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比先增大后减小,损伤控制位移达到 30 mm 时,各橡胶颗粒替代率的橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比均达到最大值;相同橡胶颗粒替代率时,随着损伤控制位移的增大,橡胶轻骨料混凝土悬臂梁基本频率不断减小。

(3)随着橡胶轻骨料混凝土悬臂梁位移角的增大,弯曲动刚度损伤指数不断增大,当位移角小于 0.023 5 时,不同橡胶颗粒替代率橡胶轻骨料混凝土悬臂梁弯曲动刚度损伤指数均增长较快,之后增长率明显降低,且逐渐趋于平缓。

(4)随着橡胶颗粒替代率的提高,相同损伤指数的橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比增大;随着损伤指数的增大,各橡胶颗粒替代率下的橡胶轻骨料混凝土悬臂梁阻尼比均呈先增大后减小趋势,峰值阻尼比对应的损伤指数为 0.60~0.75,且掺橡胶颗粒试样的峰值阻尼均大于未掺橡胶颗粒试样。

(5)本文主要采用自由衰减法测试了不同橡胶颗粒替代率时橡胶轻骨料混凝土悬臂梁基本频率和阻尼比的变化规律,研究结果对于定量描述橡胶颗粒掺入对轻骨料混凝土阻尼性能的影响具有一定的意义。然而考虑到试件尺寸、测试方法等因素的影响,所测试的阻尼比和基本频率可能并不是该材料真实的阻尼比和基本频率,对于如何测试混凝土类材料的阻尼比和基本频率,目前尚无统一的测试方法。下一步需要对混凝土类材料的阻尼性能试验方法展开系统研究,为混凝土结构构件的动力性能分析提供基本参数。

参考文献:

References:

- [1] LING T C, NOR H M, LIM S K. Using recycled waste tyres in concrete paving blocks[J]. Proceedings of the ICE—Waste Resource Management, 2010, 163 (1): 37-45.
- [2] SON K S, HAJIRASOULIHA I, PILAKOUTAS K.

- Strength and deformability of waste tyre rubber-filled reinforced concrete columns [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(1): 218-226.
- [3] GUPTA T, CHAUDHARY S, SHARMA R K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 562-574.
- [4] RICHARDSON A, COVENTRY K, EDMONDSON V, et al. Crumb rubber used in concrete to provide freeze-thaw protection (optimal particle size) [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 599-606.
- [5] 张海波, 尚海涛, 管学茂. 橡胶混凝土性能及界面改善研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(12): 2495-2501.
- ZHANG Hai-bo, SHANG Hai-tao, GUAN Xue-mao. Research progress on properties of rubberized concrete and the improvement of interface between rubber and concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(12): 2495-2501.
- [6] 胡曙光, 王发洲. 轻集料混凝土[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- HU Shu-guang, WANG Fa-zhou. Lightweight aggregate concrete [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [7] 袁大伟, 杨萃娜. 轻骨料混凝土的研究现状分析及定义探讨[J]. 混凝土, 2011(6): 26-28.
- YUAN Da-wei, YANG Cui-na. Discussion on status and the definition of lightweight aggregate concrete [J]. Concrete, 2011(6): 26-28.
- [8] 静 行, 庞 瑞. 橡胶改性轻骨料混凝土材料性能试验研究[J]. 混凝土, 2013(5): 107-109.
- JING Hang, PANG Rui. Experimental study on performance of rubberized lightweight aggregate concrete with polymer[J]. Concrete, 2013(5): 107-109.
- [9] 胡玉保, 雷 达. 橡胶改性轻集料混凝土的试验研究[J]. 混凝土, 2013(6): 70-72, 78.
- HU Yu-bao, LEI Da. Study on rubber powder modified lightweight aggregate concrete [J]. Concrete, 2013(6): 70-72, 78.
- [10] LU J, ZHOU T H, DU Q, et al. Effects of rubber particles on mechanical properties of lightweight aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 91: 145-149.
- [11] 袁海庆, 静 行, 汤道义, 等. 掺废橡胶粉页岩陶粒混凝土的受压性能[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(3): 369-373.
- YUAN Hai-qing, JING Hang, TANG Dao-yi, et al. Mechanical properties of shale ceramsite concrete with recycled rubber powder under compression[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(3): 369-373.
- [12] 吕 晶, 周天华, 杜 强, 等. 掺橡胶颗粒轻集料混凝土力学性能的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(8): 2077-2082.
- LU Jing, ZHOU Tian-hua, DU Qiang, et al. Mechanical properties of lightweight aggregate concrete contained rubber particles[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(8): 2077-2082.
- [13] 王海龙, 张 克, 额日德木. 改性橡胶对轻骨料混凝土改性作用分析[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(5): 780-786.
- WANG Hai-long, ZHANG Ke, ER Ridemu. Modification effect analysis of modified rubber crumb on lightweight aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(5): 780-786.
- [14] 王海龙, 申向东, 王萧萧, 等. 橡胶轻骨料混凝土的物理力学性能[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(8): 2267-2273, 2280.
- WANG Hai-long, SHEN Xiang-dong, WANG Xiaoxiao, et al. Physical and mechanical properties of rubber lightweight aggregate concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(8): 2267-2273, 2280.
- [15] 崔 磊, 陈艳华. 胶粉表面改性对 LC50 高强轻质混凝土力学性能的影响及机理研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2017, 41(6): 949-953.
- CUI Lei, CHEN Yan-hua. The effect and mechanism research of power surface modification on mechanical properties of LC50 high-strength lightweight concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2017, 41(6): 949-953.
- [16] KHALOO A R, DEHESTANI M, RAHMATABADI P. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles[J]. Waste Management, 2008, 28(12): 2472-2482.
- [17] 范 昆. 橡胶混凝土抗冲磨性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- FAN Kun. Abrasion resistance of rubberized concrete [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [18] 郑万虎. 橡胶混凝土疲劳性能的试验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
- ZHENG Wan-hu. Experimental study on flexural fatigue performance of rubberized concrete[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011.