

# 再生骨料混凝土梁的阻尼性能及其机理分析

梁超锋<sup>1,2</sup>, 何佳俊<sup>2</sup>, 肖建庄<sup>1</sup>, 李 坛<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000)

**摘要:** 混凝土构件的阻尼性能与其混凝土骨料组分的特性密切相关。以不同再生骨料取代天然砂石, 采用悬挂梁自由振动衰减法测试再生骨料混凝土梁弹性阶段一阶阻尼比, 并探讨其与混凝土强度、弹性模量间的关系; 通过氮气吸附法和扫描电镜测试再生骨料混凝土的孔隙结构与界面特征, 分析其阻尼机理。结合文献数据的对比分析表明: 相比于天然骨料混凝土梁, 再生骨料混凝土梁的阻尼比显著增大, 阻尼比随混凝土强度、弹性模量的减小而增大, 骨料特性尤其是骨料表面改性对混凝土阻尼性能影响显著。再生骨料取代天然砂石, 增大了混凝土的总孔体积、平均孔径, 增加了薄弱界面过渡区, 界面过渡区的滑移摩擦及孔隙的柔性缓冲作用, 是再生骨料混凝土梁阻尼增加的主要因素。

**关键词:** 再生骨料混凝土; 梁; 阻尼比; 阻尼机理; 孔隙结构; 界面过渡区

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

and the damping mechanism was discussed. The results show that the damping ratio of RAC beams increases significantly, when compared with that of natural aggregate concrete (NAC) beams, and the damping ratio increases with the decrease of concrete strength and elastic modulus. The effect of aggregate property, especially the aggregate surface modification, on the concrete damping property is noteworthy. The total pore volume and average pore diameter of RAC are larger than those of NAC, and the ITZs in RAC are weaker. Therefore, the sliding and friction in ITZs and the flexible cushion action of pores result in more energy dissipation in RAC beams.

**Key words:** recycled aggregate concrete; beam; damping ratio; damping mechanism; pore structure; interfacial transition zone

## Damping Property and Mechanism of Recycled Aggregate Concrete Beams

LIANG Chaofeng<sup>1,2</sup>, HE Jiajun<sup>2</sup>, XIAO Jianzhuang<sup>1</sup>, LI Tan<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

**Abstract:** The damping properties of concrete members are closely related to concrete aggregate characteristics. Replacing natural sand and crushed stone with different recycled aggregates (RA), the first damping ratio of suspension beam of recycled aggregate concrete (RAC) in elastic stage was tested by using the free vibration attenuation method, and the relationship between damping ratio and concrete strength/elastic modulus was analyzed. Moreover, the RAC pore structure and interfacial transition zone (ITZ) characteristics were investigated by using the nitrogen adsorption method and scanning electron microscopy (SEM),

废混凝土经破碎、清洗及筛分分级可得再生骨料, 作为部分或全部骨料可配制成再生骨料混凝土, 废混凝土的循环再利用, 可解决建筑垃圾日益增长而处理困难的问题, 同时缓解天然骨料日趋匮乏之势和大量砂石开采对生态环境的破坏。目前国内外学者在再生骨料的生产工艺与改性强化、再生骨料混凝土基本物理力学性能与耐久性、基本构件的静力特性等方面已开展了大量的研究工作<sup>[1-8]</sup>。而阻尼比、频率作为材料与构件的动力性能指标, 对结构动力响应、损伤及破坏有重要的影响, 但迄今为止, 针对再生骨料混凝土材料及其构件阻尼性能的研究不多, 且对混凝土阻尼机理的认识尚不统一。

梁超锋等<sup>[9-10]</sup>研究了再生粗骨料取代率和粒径对再生混凝土材料和悬臂梁构件阻尼性能的影响, 发现弹性阶段再生混凝土材料损耗因子比普通混凝土增长了 3%~8%; 而非弹性阶段再生混凝土悬臂梁的阻尼比基本随再生粗骨料取代率的增加和粒径

收稿日期: 2017-08-05

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51325802); 国家自然科学基金(51308340, 41272345)

第一作者: 梁超锋(1980—), 男, 副教授, 博士生, 主要研究方向为再生混凝土动力特性。E-mail: liangcf@tongji.edu.cn

通讯作者: 肖建庄(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为再生混凝土。E-mail: jzx@tongji.edu.cn

的减小而增大,相比于天然骨料混凝土,取代率为 100% 的再生骨料混凝土悬臂梁阻尼比增加了 28%,且再生粗骨料粒径为 5~10 mm 时的阻尼比比 5~20 mm 时增大了近 20%。马骏<sup>[11]</sup>用应力-应变相位差法研究了再生混凝土材料阻尼,发现损耗因子随再生粗骨料取代率增加而增加,随应力水平的提高而增加。文献<sup>[10]</sup>研究表明,相比于普通混凝土悬臂梁,相同位移比条件下再生混凝土悬臂梁的损伤指数明显增加,且其阻尼演变规律与宏观裂缝发展的数量、宽度与高度密切相关。可见,以往关于再生混凝土阻尼研究数据有限,且只考虑了再生粗骨料的影响。

Lee<sup>[12]</sup>在相同骨灰比与水灰比条件下,通过改变砂子粒径研究界面过渡区对水泥砂浆阻尼的影响,发现界面过渡区数量与水泥砂浆阻尼并无明显的规律性关系;但 Swamy 等<sup>[13]</sup>、Jordan<sup>[14]</sup>和柯国军等<sup>[15]</sup>学者均认为薄弱的界面过渡区是混凝土阻尼的重要机理之一。Swamy 等<sup>[13]</sup>认为孔隙对混凝土阻尼贡献甚微;而刘铁军等<sup>[16]</sup>和 Gu 等<sup>[17]</sup>试验研究表明,通过引气剂和空心粉煤灰球引入的孔隙对混凝土阻尼贡献显著,Jeary<sup>[18]</sup>认为诸如孔隙和微裂缝之类的材料缺陷是阻尼机理之一。尽管学者们对混凝土阻尼机理的认识不尽相同,但更多学者认为薄弱界面、孔隙和裂缝等缺陷是材料阻尼的重要机理。然而以往研究并未从微观孔隙结构、界面裂缝角度细致探讨再生混凝土的阻尼机理。

本文测试了再生粗骨料、再生细骨料、碎砖取代天然砂石的再生骨料混凝土梁在弹性阶段的阻尼性能,并统计分析骨料特性对混凝土阻尼性能的影响,以及阻尼性能与混凝土强度、弹性模量间的关系,进一步采用电镜扫描和氮气吸附法测试再生骨料混凝土的微观结构特性,探讨其阻尼机理。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

采用 PO 32.5R 普通硅酸盐水泥(cement, C),粒径小于 5 mm 的天然细砂(natural fine sand, NFS)和再生细骨料(recycled fine aggregate, RFA),粒径为 5~20 mm 的天然碎石(natural crushed stone, NCS)、再生粗骨料(recycled coarse aggregate, RCA)和碎砖(brick, B),及减水剂(water reducer, WR)和自来水(W)等原材料。其中,再生粗骨料分别由上海和嘉兴 2 个废混凝土处理厂生产的

再生粗骨料 I 和 II 按质量比 2:1 混合,其级配曲线如图 1 所示,满足《混凝土用再生粗骨料:GB/T25177—2010》规范要求。粗、细骨料按照《普通混凝土用砂、石质量及检查方法标准:JGJ 52—2006》测试其基本物理力学性能。再生粗骨料老砂浆含量测试方法为:取 RCA 绝干质量约 1 kg,将其浸泡于质量分数为 37% 的高浓度盐酸,持时 48 h,期间换 1 次盐酸,并适时搅拌;后水洗 RCA 并于 105 °C 烘箱烘干至恒重,对比盐酸处理前后粒径 5~20 mm RCA 的质量,计算老砂浆含量,取 2 份试样的平均值。骨料性能测试结果如表 1 所示。

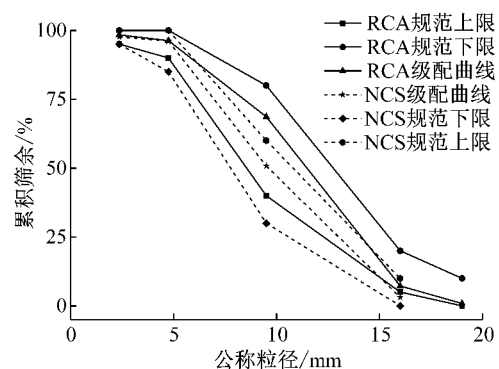


图 1 粗骨料级配曲线

Fig. 1 Coarse aggregate gradation curves

表 1 骨料的物理力学性能

Tab. 1 Physical and mechanical properties of aggregates

骨料类别	表观密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	堆积密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	含水率/ %	压碎值/ %	吸水率/ %	老砂浆质量 分数/%
NFS	2 548	1 211	6.8	—	2.90	—
RFA	2 450	1 133	5.2	—	7.50	—
NCS	2 582	1 302	0.6	10.2	1.03	—
RCA I	2 532	1 318	1.8	10.8	4.50	47.4
RCA II	2 481	1 240	2.2	19.9	6.30	42.9
B	2 413	960	—	—	11.70	—

### 1.2 试件及配合比设计

共设计 5 组试件,以再生粗骨料、再生细骨料及碎砖取代天然砂石,具体分组见表 2 所示。每组 2 根,总共 10 根混凝土梁。考虑悬挂测试和动力激励的限制,试件尺寸为 1 200 mm×100 mm×100 mm。另外每组制作标准立方体试块各 6 个,分别测试其 28 d 抗压强度和劈裂抗拉强度。

基准配合比为 1:0.46:1.02:2.07(即水泥、水、砂、粗骨料的质量比),考虑到再生骨料吸水率大,按饱和面干条件添加附加水(AW),具体配合比如表 2 所示。表中, RAC0 表示普通混凝土; RAC50、RAC100 分别表示 RCA 取代率为 50% 和 100%,细骨料为 NFS; RAC90-B10 表示 RCA、B 的取代率分别为 90% 和 10%,细骨料为 NFS; RAC100-RFA50

表示 RCA 和 RFA 的取代率分别为 100% 和 50%。试件 24 h 后拆模,并于水池中养护至 28 d。

表 2 再生骨料混凝土配合比

Tab. 2 Proportion of RAC mixture

试件编号	W	AW	C	NFS	NCS	RCA	RFA	B	WR
RAC0	227.5	0	497	505	1044	0	0	0	4.97
RAC50	227.5	23.5	497	505	522.0	522.0	0	0	0
RAC100	227.5	47.0	497	505	0	1 044.0	0	0	0
RAC90-B10	227.5	54.5	497	505	0	939.6	0	104.4	0
RAC100-RFA50	227.5	78.1	497	253	0	1 044.0	253	0	0

### 1.3 测试方法

#### 1.3.1 动态弹性模量测试

首先用尼龙绳将再生骨料混凝土梁悬挂,梁净跨 1 000 mm,如图 2 所示.采用非金属超声检测仪测试声波在梁中传播的声时和声速,超声波发射端和接收端用耦合剂贴合在梁纵向端部中心位置,且发射端和接收端保持在同一水平线上,每次记录 3 个声速,取其平均值,并用下式计算动态弹性模量<sup>[19]</sup>:

$$E_d = \rho v^2 (1 + \gamma)(1 - 2\gamma) / (1 - \gamma) \quad (1)$$

式中: $v$  为声速,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $\rho$  为密度,再生混凝土与普通混凝土密度相差不大,参照文献<sup>[20]</sup>,取  $\rho = 2\ 400\ kg \cdot m^{-3}$ ;  $\gamma$  为泊松比,弹性阶段再生混凝土泊松比为 0.2 左右,与普通混凝土差别不大<sup>[21]</sup>,取  $\gamma = 0.2$ 。

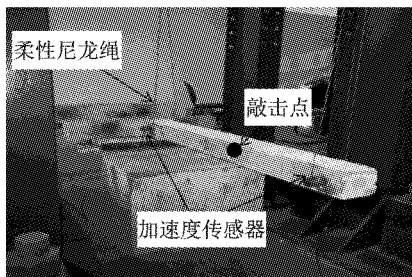


图 2 悬挂法测试

Fig. 2 Suspension test

#### 1.3.2 阻尼性能测试

采用悬挂梁自由振动衰减法测试再生骨料混凝土梁的阻尼比和固有频率,加速度传感器对称安装于距梁纵向端面 50 mm 处,并在梁跨中用力锤激励,测试布置如图 2 所示.每一试件敲击 6 次,并记录相应加速度信号(见图 3),对其进行频谱分析和半功率带宽法计算,可得悬挂再生骨料混凝土梁的一阶固有频率和阻尼比。

#### 1.3.3 细微观测试

待 28 d 立方体试块受压破坏后,在其上取试样,并在烘箱中 60 °C 烘干至恒重,取出并对其表面喷金处理后,用 SEM(扫描电子显微镜)观察其表面形貌;对界面过渡区的砂浆,用氮气吸附法测试其孔隙

特征。

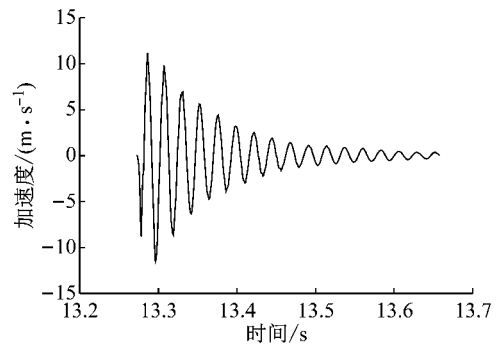


图 3 加速度历程

Fig. 3 Acceleration history

## 2 试验结果及分析

### 2.1 抗压强度和劈裂抗拉强度

28 d 立方体试块强度平均值如表 3 所示.相比于 RAC0, RAC50 和 RAC100 的抗压强度分别下降了 4.0% 和 29.4%, RAC50 和 RAC100 的劈裂抗拉强度分别下降了 14.8% 和 17.3%.一方面,这是由于废混凝土的二次破碎,使再生粗骨料产生了初始损伤,同时再生粗骨料表层附着老砂浆强度往往小于天然碎石,使再生粗骨料强度小于天然碎石(见表 1 压碎值);另一方面,考虑再生粗骨料孔隙率较高,其吸水率大(见表 1),配合比设计中添加了附加水,其表层老砂浆易形成水膜,降低了再生粗骨料与新砂浆界面的有效水灰比,使该界面过渡区成为薄弱区域<sup>[22]</sup>.因此,再生粗骨料取代率越大,再生骨料混凝土强度越低。

相比于 RAC100, RAC100-RFA50 的抗压强度、劈裂抗拉强度分别下降了 10.2%、5.1%。这是由于再生细骨料主要由老砂浆颗粒组成,其吸水率为天然细砂的 2.5 倍,其强度低于天然细砂,当再生细骨料取代率不低于 50% 时,对再生骨料混凝土强度起不利作用<sup>[23]</sup>.而 RAC90-B10 比 RAC100 的抗压强度和劈裂抗拉强度分别下降了 7.0% 和 0.5%。这是由于碎砖孔隙率大(其吸水率是再生粗骨料 I 的 2.6

倍),其强度小于再生混凝土粗骨料强度。

表 3 28 d 立方体强度及动态弹性模量

Tab. 3 28 d cube strength and dynamic modulus of elasticity

试件编号	抗压强度   标准差/MPa	劈裂抗拉强度   标准差/MPa	动态弹性模量   标准差/ $10^4$ MPa
RAC0	34.90 2.5	2.37 0.50	3.93 0.37
RAC50	33.51 2.4	2.02 0.37	3.56 0.03
RAC100	24.63 2.1	1.96 0.47	3.52 0.45
RAC90-B10	22.90 2.0	1.95 0.44	3.25 0.74
RAC100-RFA50	22.12 2.2	1.86 0.10	3.19 0.01

## 2.2 动态弹性模量

动态弹性模量测试结果如表 3 所示. 表中,动态弹性模量为 2 个试样共 6 次测试的平均值. 相比于 RAC0, RAC50 和 RAC100 的动态弹性模量分别下降了 9.4% 和 10.7%; 相比于 RAC100, RAC90-B10 和 RAC100-RFA50 的动态弹性模量分别下降了 7.7% 和 9.4%, 因此,再生骨料混凝土的动态弹性模量比相应基准混凝土 RAC0 有不同程度的降低. 这是因为,相比于天然砂石,再生混凝土骨料、碎砖含有更多的孔隙和裂隙,其密度更小(见表 1). 故相比于 RAC0,超声波在再生骨料混凝土中传播时会产生更多的折射、反射,或者遇到更多的空气介质,传播途径更长,波速越小,故动态弹性模量越小.

## 2.3 固有频率

悬挂梁一阶固有频率如图 4 所示. 由图 4 可知,再生混凝土骨料、碎砖取代天然砂石,导致再生骨料混凝土悬挂梁频率降低. 相比于梁 RAC0,梁 RAC50、RAC100、RAC90-B10、RAC100-RFA50 的一阶频率分别减小了 2.3%、7.4%、8.2%、15.6%. 由结构动力学可知,在梁的边界约束、跨度、截面尺寸相同的情况下,其固有频率主要与梁线密度和材料弹性模量有关;在梁线密度相差不大时(见表 2),悬挂梁的固有频率主要与混凝土材料弹性模量有

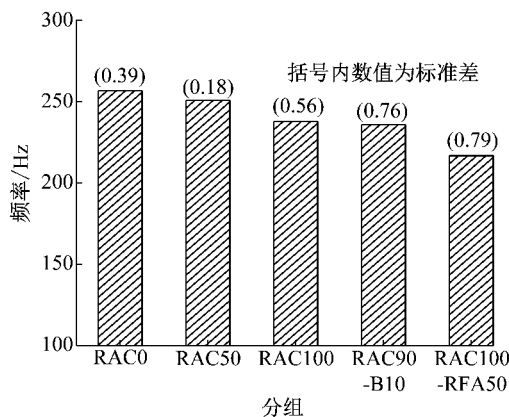


图 4 一阶固有频率

Fig. 4 First natural frequency

关,且随弹性模量的减小而降低,其趋势与表 3 动态弹性模量及文献[24]的结果一致.

## 2.4 阻尼比

再生骨料混凝土悬挂梁弹性阶段一阶阻尼比如图 5 所示. 图中,阻尼比为 12 个数据的平均值. 由图 5 可知,相比于梁 RAC0,梁 RAC50 和 RAC100 的阻尼比分别增大了 10.8% 和 10.7%. 这表明用含更多孔隙和裂隙的再生粗骨料取代天然碎石,可增大混凝土梁的阻尼比,这与文献[9-11]的结论一致. 相比于梁 RAC100,梁 RAC100-RFA50 和 RAC90-B10 的阻尼比分别增大了 11.8% 和 77.5%. 这表明再生细骨料和碎砖的加入,显著增大了再生骨料混凝土梁的阻尼比,这可能是由于再生细骨料和碎砖比再生粗骨料含有更多的孔隙和裂隙(表 2 中 RFA 和 B 的吸水率明显高于 RCA),从而使梁 RAC100-RFA50 和 RAC90-B10 内部含有更多的缺陷,提高了其阻尼耗能能力[18].

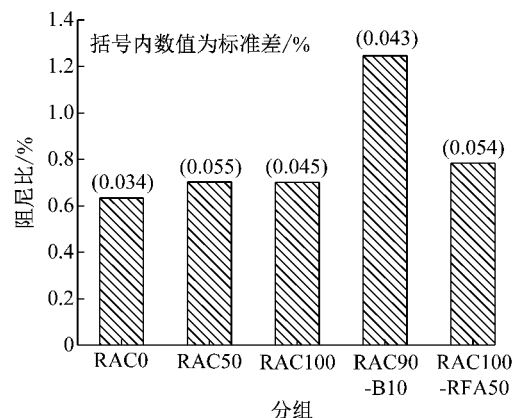


图 5 一阶阻尼比

Fig. 5 First damping ratio

## 2.5 阻尼比与强度、弹性模量及频率间的关系

为反映骨料(含再生混凝土骨料、碎石、卵石、轻骨料及其表面改性)特性对混凝土材料及其构件阻尼性能的影响,并清晰表达混凝土阻尼性能与混凝土力学参数间的规律性关系,将文献[10-11, 15, 24-28]中弹性小变形阶段的各参数(即阻尼比、立方体抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量或动弹模量、一阶固有频率)量纲一化,定义同一文献中其他试件参数与基准试件相应参数的比值为相对值  $\lambda_{ji}$ , 并假设基准试件各参数为 1.0, 则  $\lambda_{ji}$  值为

$$\lambda_{ji} = S_{ji} / S_{j1} \quad (2)$$

式中:  $S_{ji}$  为同一文献中第  $i$  组试件参数  $j$  的数值;  $S_{j1}$  为基准试件参数  $j$  的数值.

混凝土梁弹性阶段的相对阻尼比与相对立方体

抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量及一阶频率间的关系如图 6 所示。由图 6 可知,混凝土梁的相对阻尼比随各参数的减小而增大,且随相对立方体抗压强度的减小,阻尼比增大幅度先慢后快(见箭头 B);对非结构构件而言,在强度要求不高时,可通过骨料表面的黏弹性处理(涂沥青)来显著提高混凝土的阻尼性能<sup>[15]</sup>;对结构构件而言,材料的轻质高强、高阻尼,有利于结构抗震,如通过页岩轻集料预浸苯乙烯丙烯酸酯共聚物乳液来满足混凝土材料轻质高强、高阻尼的要求(箭头 A)<sup>[28]</sup>。

从有限的试验数据分析,相对阻尼比与劈裂抗拉强度和梁一阶频率的相关性更小,与弹性模量的相关性更高(见图 6c)。由文献[29]可得,素混凝土梁弹性小变形阶段的一阶阻尼比  $\xi_1$  如式(3)所示,由结构动力学理论知悬挂梁的一阶自振频率  $\omega_1$  如式(4)所示<sup>[30]</sup>:

$$\xi_1 = \frac{1}{2} \frac{\mu_c}{E_c} \omega_1 \quad (3)$$

$$\omega_1 = 22.37 \sqrt{\frac{E_c I_c}{m L^4}} \quad (4)$$

式中: $\mu_c$ 、 $E_c$  分别为混凝土材料的黏滞系数和弹性模

量; $\bar{m}$ 、 $L$  和  $I_c$  分别为混凝土梁的线密度、跨长和横截面惯性矩。

因此, $\xi_1$  可表达为式(5),故在混凝土梁参数  $\bar{m}$ 、 $L$  和  $I_c$  基本一致条件下,其阻尼比与混凝土材料弹性模量和黏滞系数相关,这可解释图 6 中阻尼比与弹性模量相关性更好的现象。

$$\xi_1 = 10.19 \sqrt{\frac{I_c}{m L^4}} \sqrt{\frac{\mu_c}{E_c}} \quad (5)$$

但总体而言,因为影响混凝土构件阻尼性能的因素众多,除了骨料特性,还有混凝土材料的水灰比、含湿率、成型工艺、养护条件和龄期,以及构件的边界条件、试件尺寸、荷载形式和作用位置、荷载大小等<sup>[31]</sup>。因此,混凝土阻尼性能的离散性甚至比强度的离散性更大,建立混凝土材料或构件阻尼性能与混凝土强度、弹性模量的统一表达式是困难而不现实的。但对特定的混凝土配合比和阻尼测试方法而言,建立混凝土阻尼参数与强度、弹性模量间的关系是可行的(由图 6 中文献[28]数据可见)。这表明研发阻尼功能甚至兼具强度、变形和耐久性要求的混凝土具有可行性。

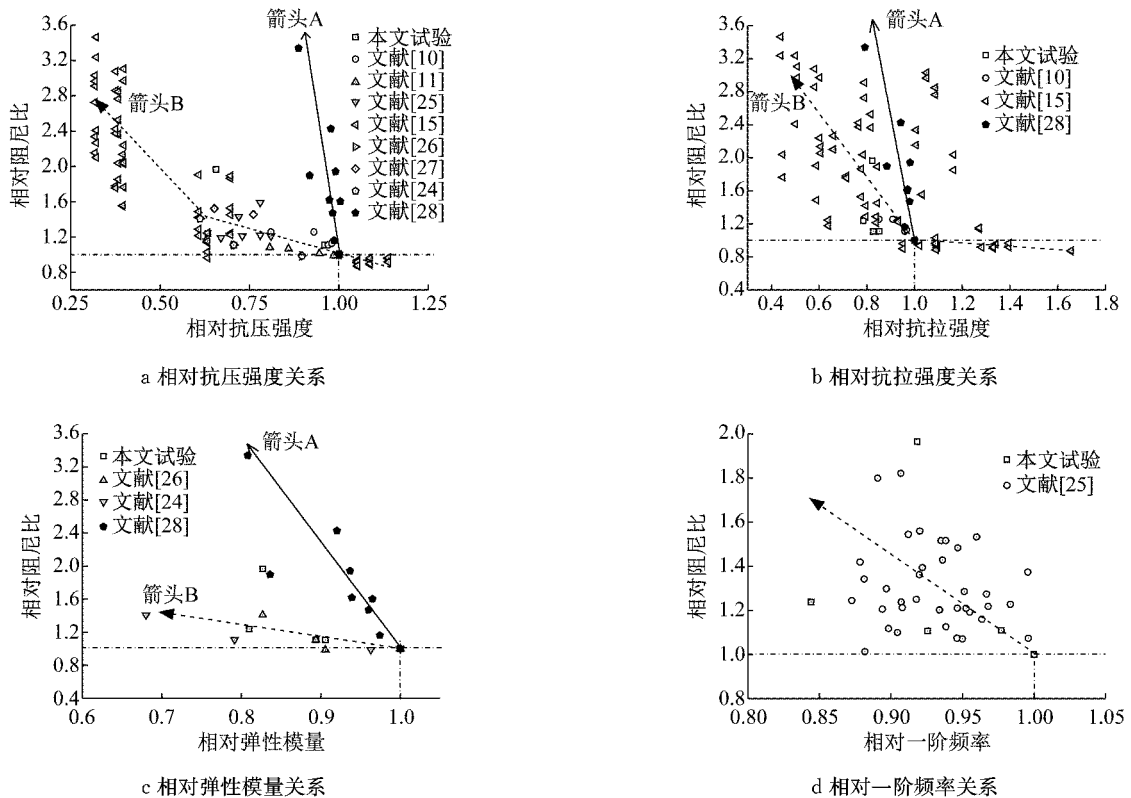


图 6 相对阻尼比与各力学参数间的关系

Fig. 6 Relative damping ratio versus mechanical parameters

## 2.6 阻尼机理分析

氮气吸附法测得再生骨料混凝土中界面砂浆的总孔体积和平均孔径如表 4 所示. 表中每组数据为 2 个试样的平均值. SEM 测得界面过渡区的裂隙和孔隙形貌如图 7 所示. 由表 4 可知, 相比于 RAC0, RAC50 和 RAC100 的总孔体积和平均孔径都明显增大. 对比分析图 7a 和 b 可见, 再生骨料混凝土粗骨料附近的界面砂浆含大量疏松结构和微孔隙, 而普通混凝土中的界面砂浆相对密实.

相比于 RAC100, RAC100-RFA50 在总孔体积基本一致的情况下, 其平均孔径更大, 表明再生细骨料取代部分天然细砂增大了再生骨料混凝土的孔径, 图 7c 存在大孔和界面裂隙. RAC90-B10 的总孔体积最大, 同时其平均孔径也大于 RAC100. 图 7d 存在大量的孔隙, 这可能是由碎砖的疏松多孔特性所致.

表 4 界面砂浆总孔体积和平均孔径

Tab. 4 Total pore volume and average pore diameter of ITZ mortar

试样名称	总孔体积/( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	平均孔径/nm
RAC0	0.042	16.993
RAC50	0.056	21.491
RAC100	0.068	18.151
RAC90-B10	0.086	19.840
RAC100-RFA50	0.067	22.278

表 4 和图 7 均表明, 再生骨料混凝土相比于普通混凝土, 显著增大了孔体积, 在梁振动过程中封闭孔隙内空气的缩胀运动及其柔性缓冲作用, 产生热能, 消耗振动能量<sup>[16-17]</sup>; 再生骨料混凝土内部孔隙往往是不规则的, 如图 7 所示, 而不规则孔隙周边存在应力集中, 易产生塑性变形及微裂缝<sup>[32]</sup>, 在梁振动过程中, 由不规则孔隙周边的塑性应变消耗了部分振动能量. 这可能是再生骨料混凝土梁阻尼比大于普通混凝土梁的原因之一; 同时, 这可能是梁 RAC90-B10 的阻尼比显著大于其他梁的主要原因, RAC90-B10 的总孔体积最大, 是 RAC0 的 2 倍.

再生骨料由于生产过程中的破碎损伤, 存在一定的微裂缝, 如图 7c 所示; 同时, 再生骨料混凝土相比于普通混凝土, 存在老石子与老砂浆的老界面过渡区(OITZ), 以及老砂浆和新砂浆的新界面过渡区(NITZ). 此两界面过渡区比普通混凝土中新石子与新砂浆的界面过渡区(ITZ)多孔隙、裂隙, 结构更加疏松(见图 7). Vicker 微观硬度测试表明, OITZ 微观硬度值比普通混凝土中的 ITZ 和再生骨料混凝土中 NITZ 的硬度值都小<sup>[33]</sup>; 纳米压痕试验结果表

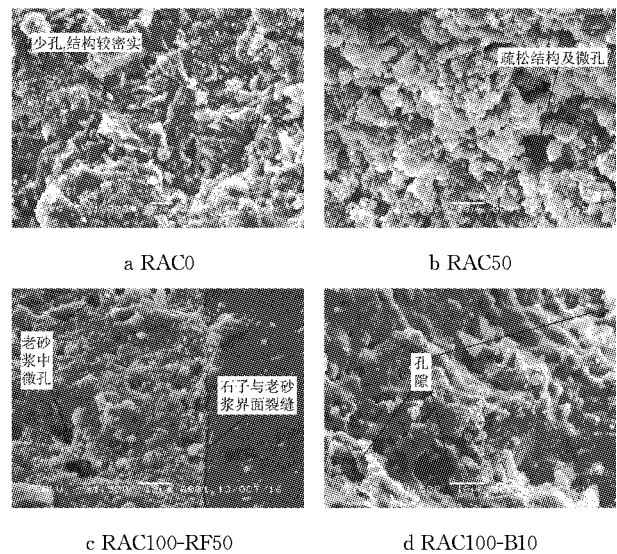


图 7 界面砂浆孔隙形貌

Fig. 7 Pore morphology of ITZ mortar

明, OITZ 的纳米压痕模量是老砂浆压痕模量的 70%~80%, 而 NITZ 的纳米压痕模量是新砂浆压痕模量的 80%~90%<sup>[22]</sup>. 因此, 再生骨料混凝土梁振动过程中在 OITZ、NITZ 的相对滑动比普通混凝土梁 ITZ 的相对滑动更容易, 尤其是在 OITZ 位置. OITZ、NITZ 的相对滑动、微裂缝界面间的摩擦消耗了梁的振动能量. 当再生骨料取代天然砂石比例越高, 再生骨料混凝土中将包含更多的微裂缝、OITZ 和 NITZ, 将消耗更多能量. 这可能是再生骨料混凝土阻尼耗能比普通混凝土大, 且基本随再生骨料取代率增大而增大的原因<sup>[9-11]</sup>.

## 3 结论

通过再生骨料混凝土悬挂梁的动力测试及微观试验分析, 得到如下结论:

(1) 随着再生粗、细骨料及碎砖的加入, 再生骨料混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、动态弹性模量和一阶固有频率降低, 而梁阻尼比增大; 为兼顾强度、弹性模量和阻尼性能, 建议再生粗骨料取代率不超过 50%.

(2) 结合本文试验和文献数据的统计分析表明, 骨料特性尤其是骨料表面的改性处理, 对混凝土材料及其构件的阻尼性能影响显著; 梁阻尼比与混凝土劈裂抗拉强度和梁一阶固有频率的相关性较小, 而与混凝土弹性模量的相关性更大.

(3) 再生粗、细骨料及碎砖的加入使混凝土总孔体积及平均孔径增大, 封闭孔隙内空气的缩胀运动、柔性缓冲作用及不规则孔隙周边的塑性应变是

再生骨料混凝土阻尼耗能机理之一;同时,薄弱OITZ、NITZ的相对滑动及微裂缝界面间的摩擦作用是再生骨料混凝土阻尼耗能的另一主要机理。

### 参考文献:

- [1] BEHERA M, BHATTACHARYYA S K, MINOCHA A K, *et al.* Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - a breakthrough towards sustainability in construction sector: a review [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 68: 501.
- [2] XIAO Jianzhuang, LI Wengui, FAN Yuhui, *et al.* An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996—2011) [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 31(6): 364.
- [3] ETXEBERRIA M, VÁZQUEZ E, MARÍ A, *et al.* Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(5): 735.
- [4] BRAVO M, BRITO J D, PONTES J, *et al.* Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 77: 357.
- [5] TSUJINO M, NOGUCHI T, TAMURA M, *et al.* Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2007, 5(1): 13.
- [6] XUAN D, ZHAN B, POON C S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 65: 67.
- [7] 曹万林, 张洁, 董宏英, 等. 带钢筋桁架高强再生混凝土板受弯性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(10): 31.  
CAO Wanlin, ZHANG Jie, DONG Hongying, *et al.* Experimental research on flexural performance of high strength recycled aggregate concrete slabs with steel bar truss [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(10): 31.
- [8] 杨桂新, 吴瑾, 叶强. 再生粗骨料钢筋混凝土梁短期刚度研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(2): 55.  
YANG Guixin, WU Jin, YE Qiang. Study on short term stiffness of reinforced concrete beams with recycled coarse aggregate [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(2): 55.
- [9] LIANG Chaofeng, LIU Tiejun, XIAO Jianzhuang, *et al.* The damping property of recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 102: 834.
- [10] 梁超锋, 刘铁军, 肖建庄, 等. 再生混凝土悬臂梁阻尼性能与损伤关系的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(7): 100.  
LIANG Chaofeng, LIU Tiejun, XIAO Jianzhuang, *et al.* Experimental study on the relationship between damping properties and damage of recycled concrete cantilever beam [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(7): 100.
- [11] 马俊. 再生骨料混凝土阻尼性能试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2015.  
MA Jun. Research on damping property of recycled aggregate concretes [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015.
- [12] LEE T F F. Significance of transition zones on physical and mechanical properties of Portland cement mortar [D]. West Lafayette; Purdue University, 1997.
- [13] SWAMY N, RIGBY G. Dynamic properties of hardened mortar and concrete [J]. *Matériaux Et Construction*, 1971, 4(1): 13.
- [14] JORDAN R W. The effect of stress, frequency, curing, mix and age upon the damping of concrete [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1980, 32(113): 195.
- [15] 柯国军, 代明, 彭红, 等. 粗骨料表面经黏弹性处理后的混凝土阻尼比[J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(5): 605.  
KE Guojun, DAI Ming, PENG Hong, *et al.* Damping ratio of concrete after its coarse aggregate surface is treated by viscoelastic materials [J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(5): 605.
- [16] 刘铁军, 邢锋, 隋莉莉, 等. 气泡对纤维混凝土阻尼性能的影响[J]. *功能材料*, 2010, 41(12): 2140.  
LIU Tiejun, XING Feng, SUI Lili, *et al.* Influence of bubbles on damping properties of fiber reinforced concrete [J]. *Functional Materials*, 2010, 41(12): 2140.
- [17] GU J, WU G H, ZHANG Q. Effect of porosity on the damping properties of modified epoxy composites filled with fly ash [J]. *Scripta Materialia*, 2007, 57(6): 529.
- [18] JEARY A P. Damping in structures [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 72(1): 345.
- [19] JAIN N, GARG M, MINOCHA A K. Green concrete from sustainable recycled coarse aggregates: mechanical and durability properties [J]. *Journal of Waste Management*, 2015, 2015: 1.
- [20] 孙冰, 肖苗良, 陈露辉, 等. 再生混凝土力学性能研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(2): 497.  
SUN Bing, XIAO Zhuoliang, CHEN Luhui, *et al.* Research progress on mechanical properties of recycled concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(2): 497.
- [21] 刘宏伟, 谢丽, 吴胜兴. 混凝土早龄期弹性模量无损检测初探[J]. *混凝土*, 2008(6): 36.  
LIU Hongwei, XIE Li, WU Shengxing. Tentative research on non-destructive detection of early-age elastic modulus of concrete [J]. *Concrete*, 2008(6): 36.
- [22] XIAO Jianzhuang, LI Wengui, SUN Zhihui, *et al.* Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 37(3): 276.
- [23] 肖建庄, 范玉辉, 林壮斌. 再生细骨料混凝土抗压强度试验[J]. *建筑科学与工程学报*, 2011, 28(4): 26.  
XIAO Jianzhuang, FAN Yuhui, LIN Zhuangbin. Compressive strength test of recycled fine aggregate concrete [J]. *Chinese Journal of Building Science and Engineering*, 2011, 28(4): 26.
- [24] 柯国军, 郭长青, 胡绍全, 等. 混凝土阻尼比研究[J]. *建筑材料学报*, 2004, 7(1): 35.  
KE Guojun, GUO Changqing, HU Shaoquan, *et al.* Study on damping ratio of concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2004, 7(1): 35.
- [25] 张海捷. 骨料界面弱化处理对混凝土阻尼性能影响的试验与研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2007.