文章编号:1674-2974(2017)09-0092-08

DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2017.09.011

纳米再生骨料混凝土的动态力学性能试验研究

李文贵1,27,罗智予1,龙初1,黄靓1

(1.湖南大学 土木工程学院 湖南长沙 410082;

2. 澳大利亚蒙纳士大学(Monash University) 土木工程系 澳大利亚 墨尔本 3800)

摘 要:对再生混凝土以及经过1%~2%的纳米 SiO2 或纳米 CaCO3 改性的再生混凝 土进行了霍普金森压杆(SHPB)的冲击对比试验研究.试验研究不同纳米颗粒及其不同掺量 对再生混凝土高应变率作用下动态强度,动态增长因子(DIF),峰值应变,冲击韧性等力学 性能的影响.试验结果表明,动态冲击荷载下纳米改性再生混凝土普遍具有比未添加纳米颗 粒的再生混凝土更高的冲击强度,然而当纳米颗粒含量从1%增加到2%时,纳米 SiO2 及纳 米 CaCO3 改性的再生混凝土受冲击强度均有所降低.相同掺量时,纳米 SiO2 对受冲击强度 的提高效果比纳米 CaCO3 更为明显,掺入1%纳米 SiO2 的再生混凝土具有最高的受冲击 强度.纳米 CaCO3 则表现为更有效地提高了再生混凝土的冲击韧性和变形能力.纳米改性 再生混凝土均呈现出比未添加纳米材料的再生混凝土低的应变率敏感性. 关键词:冲击实验;纳米 SiO2;纳米 CaCO3;再生混凝土;霍普金森压杆

中图分类号:TU502.6

Experimental Study on the Dynamical Mechanical Performance of Nanomodified Recycled Aggregate Concrete

文献标志码:A

LI Wengui^{1,2†}, LUO Zhiyu¹, LONG Chu¹, HUANG Liang¹

(1.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;2.Department of Civil Engineering, Monash University, VIC 3800, Australia)

Abstract: The dynamic mechanical performances of recycled aggregate concrete (RAC) incorporating with 1% to 2% nano-SiO₂ or nano-CaCO₃ were tested by Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB). The effects of different kind is of nanoparticles and different dosages on the mechanical performances of RAC were investigated. The results revealed that RACs with nano-SiO₂ and nano-CaCO₃ all zhowed higher dynamic compressive strength than the control RAC, and the nano-SiO₂ was more effectire than nano-CaCO₃ in enhancing the dynamic compressive strength of RAC. But RACs with high dosage of nano-SiO₂ or nano-CaCO₃ usually showed lower dynamic compressive strength than that of low dosage one, and the RAC incorporating with 1% nano-SiO₂ achieved the highest dynamic compressive strength. Nano-CaCO₃ exhibited more advantage in improving the deformation performance and energy absorption capacity of RAC. Both nano-SiO₂ modified RAC and nano-CaCO₃ modified RAC showed lower dynamic increase factor than control RAC.

^{*} **收稿日期:**2016-07-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408210), National Natural Science Foundation of China(51408210);中央高校基本科研业务 费专项资金项目(531107040800), The Fundamental Research Funds for the Central Universities(531107040800) 作者简介:李文贵(1982—), 男, 湖南安仁人, 湖南大学助理教授, 博士, 博士生导师

[†]通讯联系人,E-mail:wengui li1021@126.com

Key words: impact testing; nano-SiO₂; nano-CaCO₃; recycled aggregate concrete; Split Hopkinson pressure bar (SHPB)

在城市建造过程中,不断有旧建筑的拆除,拆 除过程中产生的废弃混凝土是一种总量巨大的建 筑垃圾.对废弃混凝土处理不当将导致环境污染.将 废弃的混凝土经回收,破碎,分级等处理加工成骨 料,再用来配置混凝土即所谓的再生混凝土.此举可 以实现建筑垃圾的再次利用,既解决了垃圾问题又 节约了骨料资源,可谓一举两得.然而,研究^[1-2]普 遍表明,由于老砂浆及多界面过渡区等的影响,再 生混凝土的性能较差,再生混凝土较差的性能大大 制约了其推广运用.

不少学者曾尝试对再生混凝土进行改性处理 以期改善再生混凝土的性能,推广再生骨料混凝土 这一绿色材料的运用.如李文贵等[3]提出颗粒整形 强化法,即通过再生骨料的高速自击与摩擦来去除 再生骨料表面附着的砂浆. Tam 等^[4]利用 HCl、 H₂S0₄、H₃P0₄溶液预浸泡骨料来进行改性处理. Zhan^[5]和 Zhang 等^[6]采用 CO₂ 强化再生骨料.但是 每一种处理都有不足之处,例如机械研磨类的方法 常会造成骨料损伤,化学浸泡类则可能会对骨料的 某些成分造成破坏.至今仍没有哪一种方法的满足 工序简单,成本合理,结果良好等要求,更多的研究 需要被投入.近些年纳米材料的发展给土木工程领 域带来了新的发展思路,已有的研究表明纳米 SiO_2 及纳米 CaCO₃ 具有填充效应以及晶核效应,同时纳 米SiO2还具备火山灰活性,故纳米SiO2及纳米 CaCO₃ 能改善水泥砂浆及混凝土的微观结构,强化 界面区,提高强度并改善耐久性[7-9].虽然纳米材料 对再生混凝土的改性研究并不多见,但是易于推知 纳米材料对水泥基和界面区的改善作用依然会存 在于再生混凝土中,从现有的研究结果来看,纳米 材料对改善再生混凝土的性能有很大的潜力.Hosseini 等^[10]及 Mukharjee 等^[11-12]的研究表明,掺 3%的纳米 SiO2 的再生混凝土能达到与普通混凝土 相似的强度.随着生产工艺的改善纳米材料高成本 的劣势将逐步减小,这也暗示着纳米材料在推广再 生混凝土的运用上有着广阔前景.

现如今冲击现象日益频繁,特别是天津大爆炸 的爆发,使得建筑物承受冲击爆炸作用的现象受到 更广泛的关注.鉴于纳米材料对推广使用再生混凝 土的巨大潜力,有必要对纳米改性再生混凝土的动 态性能进行研究,本文采用湖南大学直径 100 mm 的分离式霍普金森压杆对再生混凝土掺入纳米颗 粒后的受冲击力学性能进行了初步研究,探索不同 纳米颗粒的改性效果以及相应的适宜掺量以完备 相关理论并探索实际运用的可行性.

1 试验概况

1.1 材料

水泥采用湖南宁乡南方水泥有限公司产的 P•O42.5 普通硅酸盐水泥,砂为普通河沙(中砂),再生 粗骨料由地面废弃混凝土破碎而来,骨料具体性能 见表 1,水采用自来水.青岛虹厦产的 HSN 萘系高 效减水剂用作减水剂并兼用作纳米材料的分散剂. 试验用纳米材料为纳米 SiO₂ 分散液及纳米 CaCO₃ 粉末,购自杭州万景新材料公司.其主要性能指标如 表 2 及表 3 所示.

表 1 再生骨料的物理性质

Tab.1 Physical properties of recycled coarse aggregate

抽米	级配	堆积密度	表观密度	吸水率
种尖	/mm	$/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$/(kg \cdot m^{-3})$	/ %
回收骨料	$5 \sim 20$	1 235	2 637	8.54

表 2 纳米 SiO₂ 性能指标

Tab.2Properties of nano-SiO2

种类	外观	固含量/%	粒径/nm	pН
纳米 SiO ₂ 分散液	透明液体	30	15 ± 5	$9 \sim 11$

表 3 纳米 CaCO₃ 性能指标 Tab.3 Properties of nano-CaCO₃

	-		-	
种类	外观	纯度/%	粒径/nm	pН
纳米 CaCO3 粉末	白色粉末	98.5	$15 \sim 40$	$8 \sim 9$

1.2 试件制作

为了制作 SHPB 冲击试件及相应的静压试件, 购买了内径 94 mm 长度约 500 mm 的 PVC 管,管 的一端用 AB 胶与小木板固定密实防止漏浆,以此 作为浇筑试件的模具.

考虑到再生混凝土的吸水率大于普通混凝土, 所以在配置再生混凝土时添加再生骨料 10 Min 吸 水量作为配制再生混凝土时的附加用水量,以确保 配制的再生混凝土与普通混凝土能获得相同的有 效水灰比.为了试验方便,附加用水量在搅拌时一起 添加.共设置5组试件:再生混凝土,以及添加了纳 米 SiO₂或纳米 CaCO₃的再生混凝土.其中纳米材 料掺量为水泥质量的1%或2%.再生混凝土设计强 度等级为C30.各组试件配合比如表4所示,其中纳 米材料以取代水泥的方式掺入.

表 4 纳米改性再生混凝土配合比

Tab.4 Mix proportions of nanomodified

recycled	aggregate	concretes
----------	-----------	-----------

讨件	水泥/	砂/	骨料/	水/	减水剂/	NS/NC
MIT	$(kg \cdot m^3)$					
RAC	287.4	682.1	$1\ 266.7$	224.6	2.2	0
RNS-1	284.5	682.1	1 266.7	217.9	2.2	9.6
RNS-2	281.7	682.1	1 266.7	211.2	2.2	19.2
RNC-1	284.5	682.1	1 266.7	224.6	2.2	2.9
RNC-2	281.7	682.1	1 266.7	224.6	2.2	5.8

注:RNS和RNC分别代表添加纳米SiO2和纳米CaCO3的再 生混凝土.RNS与RNC后的1或2代表纳米材料的掺量为水泥质量 的1%或2%.NS为分散液质量.

由于纳米材料易因高范德华力而聚团,因此在 添加纳米材料前先将减水剂与水混合,再在减水剂 混合液中加入纳米材料并高速搅拌1min以使纳米 材料能够分散均匀.将水泥,砂,骨料放入搅拌机搅 拌2min后将混合液倒入,再搅拌2min.搅拌均匀 后将混凝土倒入模具中,置于振动台振动密实,并 在20℃温度,相对湿度95%的标准条件下养护.

将养护完的试件送到机械切割厂进行切割,并 剥去外层 PVC 管.切割成直径为 94 mm 长度为 47 mm,长径比 0.5 的试件,将试件两端面用双面磨石 机打磨平整用于冲击试验;切割成直径为 94 mm 长 度为 188 mm,长径比为 2 的试件,将试件两端面打 磨平整用于进行静压试验.试验于大约 28 d 时进行.

1.3 试验方法

冲击试验在湖南大学建筑安全与节能教育部 重点实验室,工程结构综合防护中心的 100 mm 直 径分离式霍普金森压杆装置上进行.如图 1 所示,霍 普金森杆主要由压杆系统,数据测量与采集系统及 数据处理系统组成.试验时,将冲击试件夹在入射杆 与透射杆之间,并在试件与两端杆件接触面间涂有 凡士林以减小端部摩擦.试验过程中,通过指定不同 气压值来实现不同的冲击速度,此次试验采用气压 分别为 0.8 MPa,1.0 MPa 及 1.2 MPa,光电测速仪 测取对应冲击速度分别约为 7.7 m/s,9.8 m/s 以及 11.6 m/s.当加载气压达到指定的气压时,压缩的氮 气被释放推动撞击杆撞击入射杆,并产生入射波 ε_i,由于压杆与试件的波阻抗不同,当入射波到达入 射杆与试件交界面时部分波反射回入射杆形成反 射波 ε_r,另一部分则进入透射杆形成透射波 ε_i.入射 波,反射波及透射波信号由布置于入射杆及透射杆上 的应变片测得,将动态应变仪采集的脉冲信号通过数 据处理系统按基于一维弹性波理论以及应力沿试件 轴向均匀分布假定的二波法^[13]计算即可获取冲击过 程试件的应力,应变以及应变率等时程曲线.



图 1 霍普金森杆装置 Fig.1 Splitting Hopkinson pressure bar system

2 试验结果

2.1 失效模型

各组试件破坏形态如图 2 所示,此次试验中,冲 击速度分别为 7.7 m/s,9.8 m/s 和 11.6 m/s.5 组试 件在同一冲击速度下的破坏形态并无明显差异,相 对于试验中极大的冲击荷载,纳米颗粒对试件的改 性作用过于微小,不足以对破坏模式造成影响.由于 大直径霍普金森杆对应大的杆件质量,即使冲击速 度不大,其巨大的动能仍使得各组试件在 3 种冲击 速度下均被撞碎,且随冲击速度的增大,试件破坏 越发严重.在冲击速度为 7.7 m/s 时,大多数水泥砂 浆以及少量的骨料被撞碎,破坏后的试件呈现很多 颗粒状的碎块.而在冲击速度为 11.6 m/s 时有大量 的骨料被撞碎,试件破坏后大部分呈粉末状.

2.2 应力应变曲线

冲击荷载作用下纳米改性再生混凝土的应力-应变曲线如图 3 所示,从图中可知,除了在冲击速度 为 7.7 m/s 时掺了 2%纳米 CaCO₃ 的再生混凝土





外,再生混凝土与添加不同纳米材料的再生混凝土 的各冲击速度下的应力-应变曲线外形上无明显差 异,均呈现出明显的上升段,峰值与快速下降段.在 7.7 m/s 这一相对较低的冲击速度时,2%的纳米 CaCO₃ 改性再生混凝土的应力应变曲线表现出了 比其他组试件明显要高的延性.在各个冲击速度下, 纳米 CaCO₃ 改性再生混凝土普遍有较大的峰值应 变,且在峰值点附近,应力应变曲线比纳米 SiO₂ 改 性再生混凝土以及未加纳米材料的再生混凝土更 为圆润平滑.即纳米 CaCO₃ 能改善再生混凝土冲击 荷载下的变形性能和延性.李文贵等^[14]关于纳米 CaCO₃ 改性普通混凝土的冲击试验,以及 Yeilmen 等^[15]关于纳米 CaCO₃ 改性水泥基的准静态试验中 均得出了相似的研究结论.在同一冲击速度下,各组 试件的上升段的初始部分基本重合,这表明加入不 同纳米颗粒并不会显著改变再生混凝土的冲击下 的弹性模量.纳米改性再生混凝土普遍表现出了比 未添加纳米材料的再生混凝土更高的峰值应力,然 而这种差距随冲击速度的增大而减小.



3 结果讨论

3.1 准静态受压强度

RAC标准养护 28 d 150 mm × 150 mm×150 mm 立方体受压强度为 31.9 MPa.94 mm×188 mm 试件所测得的 5 组准静态受压强度如图 4 所示,由 图可知,掺入纳米颗粒的再生混凝土试件均表现出 了比未掺纳米颗粒的再生混凝土试件更高的强度.纳米 SiO₂ 比纳米 CaCO₃ 提高强度的效果更为显 著.随着纳米颗粒含量的增加,掺纳米 SiO₂ 的再生 混凝土的受压强度依然呈上升趋势,2% 的纳米 SiO₂ 表现出了最高的受压强度,而纳米 CaCO₃ 随着剂量增加其受压强度有稍微的下降,这可能是由于纳米 CaCO₃ 颗粒发生了聚团.由于纳米材料是以 取代水泥的方式加入,当纳米 CaCO₃ 超过一定剂量 后新添加的纳米颗粒没有充分发挥其对微结构的 改善作用,不能弥补水泥含量减少带来的对强度的 不利影响,故随纳米颗粒增多试件强度反而降低.



3.2 动态受压强度与动态增长因子

取试件的动态峰值应力作为其动态受压强度. 纳米改性再生混凝土的动态受压强度随应变率变 化的情况如图 5 所示.图中应变率可分为 3 组,3 组 平均值分别约为 136/s,178/s 和 213/s,对应冲击速 度分别为 7.7 m/s,9.8 m/s 和 11.6 m/s.考虑到试验 误差,由图中可得知,掺入纳米颗粒并不会明显改 变试件受冲击下的应变率.

从图中可知,再生混凝土掺入纳米 CaCO₃ 和纳 米 SiO₂ 后普遍呈现出更高的动态受压强度.然而再 生混凝土的动态受压强度随着纳米颗粒含量的增 多呈下降趋势.这与 Wang 等^[16]关于纳米 CaCO₃ 改 性普通混凝土及纳米 SiO₂ 改性普通混凝土受冲击 下的研究结论相一致.



随着冲击速度的增加,掺入不同纳米颗粒改性 的再生混凝土与未掺纳米材料的再生混凝土的受 压强度的差异越来越小.从图2可以看出,随着冲击 速度的增加,越来越多的再生骨料被压碎,骨料具 有远高于砂浆的强度,然而骨料的强度基本不会被 纳米颗粒所改变,所以纳米颗粒对试件强度的影响 被削弱.

图 6 展示了试件的动态增长因子(DIF),即动态强度与相应准静态强度的比值.由图可知,所有的纳米改性再生混凝土的 DIF 值均低于未添加纳米颗粒的再生混凝土的 DIF 值,但在不同组应变率下不同纳米材料改性的再生混凝土其相对 DIF 值呈现出了不同的规律.



在第一组应变率,即冲击强度为 7.7 m/s 时,试 件中仅少量骨料开裂,破坏主要起源于砂浆.该组 DIF 能反映出纳米材料对砂浆的影响.在第一组中, 由图可知,纳米 SiO₂ 和纳米 CaCO₃ 改性的再生混 凝土均表现出比未添加纳米材料的再生混凝土更 低的 DIF,且随着纳米颗粒数量的增多,下降程度更 加明显.这表明加入纳米 SiO₂ 和纳米 CaCO₃ 均将 降低再生混凝土内砂浆的应变率敏感性.其中纳米 CaCO₃ 降低应变率的作用更加显著.

混凝土的应变率敏感性可归结为3个方 面^[17-18]:黏性效应,裂纹演变效应和惯性效应.纳米 SiO₂和纳米 CaCO₃减小率敏感性可能部分因为纳 米颗粒的高吸水性.小尺寸的纳米颗粒具有较大的 比表面积,这会吸附较多的水从而减小砂浆中的自 由水的含量.由于冲击下裂纹中的自由水会引发较 大的黏聚力,所以自由水含量越多,黏性效应越显 著^[19-20],孔隙里面的自由水会延缓高应变率下裂纹 的发展^[21],同时水分还有放大惯性效应的倾向^[22]. 故随着纳米颗粒的掺入,自由水含量下降,再生混 凝土中砂浆的应变率敏感性也随之下降.但是,高吸 水性可能并非是纳米颗粒减小应变率敏感性的唯 一原因.诸如随纳米颗粒增多,水泥含量有所减小, 以及纳米颗粒的其他特殊性质等的影响值得进一 步研究.

在第三组应变率下,裂纹演变效应变得更加明 显,此时试件的破坏穿过了大量的骨料,因为纳米 颗粒并不会明显改变骨料的强度,各组试件呈现出 相似的动态强度.在准静态下,试件破坏主要沿着新 旧界面区域以及砂浆.由于纳米颗粒可以改善新界 面区并增加砂浆强度,故在适量范围内,纳米颗粒 可以提高再生混凝土的准静态强度.由于具有相似 的动态强度,故在第三组应变率下试件的 DIF 更多 的取决于试件的准静态强度,试件的准静态强度被 纳米颗粒提高得越多,其 DIF 值相对就越小.第二组 应变率下的 DIF 值即受纳米颗粒减小砂浆应变率 效应的影响,又受纳米颗粒无法提高骨料强度导致 DIF 随静压强度增大而降低的影响,兼具第一组 DIF 与第三组 DIF 的特征.研究表明[18,23],混凝土类 材料的 DIF 与 log10 的应变率间呈线性关系,在本次 试验应变率范围内,纳米改性再生混凝土的 DIF 与 应变率间的拟合关系如表 5 所示.

表 5 拟合公式参数 Tab.5 Parameter of fitting formula

参数	RAC	RNS-1	RNS-2	RNC-1	RNC-2
а	2.697	1.981	1.828	2.465	4.221
b	-3.292	-1.793	1.741	-2.932	-6.938

注:拟合公式为 DIF= $a \times \log_{10}() + b$

纳米 SiO₂ 和纳米 CaCO₃ 掺入再生混凝土后, 一方面它们将改善再生混凝土中砂浆的微结构并 强化新界面区^[9],另一方面它们将降低再生混凝土 砂浆的应变率敏感性.纳米改性再生混凝土的动态 受压强度同时受这两个方面的影响.当纳米颗粒超 过一定掺量时,随掺量的增多,其对再生混凝土微 结构的改善作用将减弱,从图 4 可以看出,纳米 SiO₂ 含量从1%增加到2%时,其准静态强度的增 长小于其含量从0%增加到1%时的增长.纳米 CaCO₃从1%增加到2%时,其准静态受压强度甚至 稍微有所下降.新增的纳米颗粒对砂浆的和界面区 的改善作用无法抵消其对应变率的降低作用,故掺 2%的纳米 SiO₂ 和纳米 CaCO₃ 的再生混凝土均呈 现出了相比1%掺量时更低的动态受压强度.

3.3 动态峰值应变

关于冲击下再生混凝土峰值应变随应变率变 化的研究并未取得一致的结论.Lu 等[24] 对再生混 凝土进行 SHPB 冲击试验得出峰值应变随应变率 增加而变大的结论.然而 Xiao 等[17,25] 与 Li 等[26] 研 究表明,再生混凝土峰值应变随应变率上升没有表 现出明显的规律性.如图7所示,就纳米改性再生混 凝土而言,其峰值应变随应变率的增加呈现上升趋 势.其中掺入纳米 CaCO₃ 的再生混凝土表现出了明 显要大的峰值应变.即再生混凝土中掺入纳米 CaCO3 能改善其变形性能.对于掺入纳米 SiO2 的试 件而言,掺入1%的纳米 SiO2 时表现出略大于未添 加纳米材料的再生混凝土的峰值应变值.而掺入 2%的纳米 SiO₂ 后,峰值应变时常会略小于未添加 纳米材料的再生混凝土.掺入纳米 SiO2 的再生混凝 土与未添加纳米材料的再生混凝土的峰值应变的 差异并不显著.

3.4 冲击韧性

冲击韧性是混凝土受到动荷载吸收能量的能力,是混凝土强度和延性的综合^[27].可用全应力应 变曲线下的面积一比吸能来反映^[24].如图 8 所示, 随着冲击速度的增加各组试件的比吸能均呈上升 趋势.由于混凝土类材料的应变率效应,试件的强度 有所提升,同时高应变率下试件的极限应变亦有所 增加,故试件高应变率下表现出更大的吸能能力.对 比各组试件可知,掺入纳米 CaCO₃ 的再生混凝土均 表现出了比未添加纳米颗粒的再生混凝土更高的 冲击韧性,且大多情况下高掺量纳米 CaCO₃ 的再生 混凝土对应着更高的冲击韧性.虽然掺入 2%的纳 米 CaCO₃ 相比掺入 1%的纳米 CaCO₃ 时的冲击强



度有所下降,但是由于掺入 2%的纳米 CaCO₃ 时试 件有更好的延性,故掺入 2%的纳米 CaCO₃ 时试件 仍具有更高的吸能能力.对于掺入纳米 SiO₂ 的再生 混凝土,掺量为 1%时,此时的试件具有最高的动态 冲击强度,试件的延性并未有显著降低,因此其具 有较好的吸能能力,吸能能力介于 1%与 2%的掺量 的纳米 CaCO₃ 之间.当纳米 SiO₂ 掺量为 2%时,由 于过多的纳米颗粒明显减小了应变率效应,其动态 强度并不是很高,同时从图 3 可看出,试件延性相对 其他组试件而言明显要差,故其吸能能力较差,甚 至低于未添加纳米材料的再生混凝土的吸能能力. 这与李文贵等^[14]关于纳米 SiO₂ 和纳米 CaCO₃ 改 性普通混凝土的研究结论相类似,其研究结果表 明,纳米 CaCO₃ 能提高再生混凝土的冲击韧性,而 纳米 SiO₂ 在改善冲击韧性方面并不具备优势.



4 结 论

1)再生混凝土掺入不同剂量的纳米 SiO₂ 和纳 米 CaCO₃ 后其准静态受压强度均有不同程度的提 高.其中掺入 2%纳米 SiO₂的再生混凝土达到了最 大的准静态受压强度.相同掺量时,较之纳米 CaCO₃,纳米 SiO₂ 能更有效的提高再生混凝土准静 态下的受压强度.

2)纳米 SiO₂ 和纳米 CaCO₃ 均能有效的提高再 生混凝土的动态受压强度,其中纳米 SiO₂ 对动态强 度的提高效果比纳米 CaCO₃ 更加明显.当纳米颗粒 从 1%上升到 2%时,纳米 SiO₂ 和纳米 CaCO₃ 改性 再生混凝土的动态强度均随着纳米颗粒掺量的增 多而降低.随着应变率的增大,掺不同纳米颗粒的再 生混凝土与未添加纳米颗粒的再生混凝土间的受 压强度差异变小.

3) 掺入纳米 SiO₂ 和纳米 CaCO₃ 后的再生混凝 土均具有比未添加纳米颗粒的再生混凝土要低的 DIF 值.纳米 SiO₂ 和纳米 CaCO₃ 均会减小再生混 凝土的应变率敏感性.在较低应变率下可能是由于 纳米颗粒的大吸水性减少了砂浆的应变率敏感性; 在较高应变率下,则更主要是由于纳米颗粒无法有 效提高骨料强度因而对冲击强度提高有限,而纳米 颗粒会明显提高准静态强度,因而导致了纳米改性 再生混凝土应变率敏感性降低的现象.

4) 掺入不同纳米颗粒的再生混凝土的峰值应 变均随着应变率的增加而提高, 掺入纳米 CaCO₃ 后 的再生混凝土表现出了比其他组更高的峰值应变, 即纳米 CaCO₃ 能改善再生混凝土的变形能力. 而掺 入纳米 SiO₂ 的再生混凝土与未掺纳米颗粒的再生 混凝土的动态峰值应变没有很显著的差异.

5)随应变率的增加,各组试件均呈现出更大的 冲击韧性值.其中掺入纳米 CaCO₃ 的试件的吸能能 力强于未掺纳米颗粒的试件,而对于纳米 SiO₂,1% 的掺量时能提高试件的冲击韧性,其比吸能介于 1%和 2%的纳米 CaCO₃ 再生混凝土间.当纳米颗粒 掺量上升到 2%时,其吸能能力反而下降,甚至低于 了未掺纳米颗粒的再生混凝土的吸能能力.

6)综合本文对 C30 设计强度等级的再生混凝 土的研究表明,再生混凝土的受压强度,冲击下变 形能力及冲击韧性等性能均可由相应的纳米材料 进行改善.纳米材料推广的不利因素在于其过高的 成本,但是由于较小的使用量以及纳米技术的不断 进步,成本的劣势将会日益削弱,纳米材料将会在 水泥基材料领域得到更好的运用.

参考文献

- XIAO J Z, LI W G, POON C S. Recent studies on mechanical properties of recycled aggregate concrete in China-A review
 [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(6): 1463 -1480.
- [2] LI W G, XIAO J, SHI C J, et al. Structural behaviour of composite members with recycled Aggregate concrete-an overview
 [J]. Advances in Structural Engineering, 2015, 18(6), 919 938.
- [3] 李文贵,龙初,罗智予,等.再生骨料混凝土破坏机理与改性研究综述[J].建筑科学与工程学报,2016,33(6):60-72.
 LI Wengui, LONG Chu, LUO Zhiyu, et al. Review of failure mechanism and modification research of recycled aggregate
 [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33 (6):60-72. (In Chinese)
- [4] TAM V, TAM C M, LE K N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches
 [J]. Resources Conservation & Recycling, 2007, 50 (1): 82 -101.
- [5] ZHAN B, CHI S P, LIU Q, et al. Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties [J]. Construction & Building Materials, 2013, 67:3-7.
- [6] ZHANG J, SHI C, LI Y, et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregates through carbonation [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(11):04015029.
- [7] JI T.Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂[J].Cement and Concrete Research,2005,35(10):1943-1947.
- [8] GARCA N M,ZAPATA L E,SUREZ O M, et al. Effect of fly ash and nanosilica on compressive strength of concrete at early age [J]. Advances in Applied Ceramics, 2015, 114(2):99-106.
- [9] LI W G, HUANG Z, CAO F, et al. Effects of nano-silica and nano-limestone on flowability and mechanical properties of ultra-high-performance concrete matrix [J]. Construction &. Building Materials, 2015, 95(1): 366-374.
- [10] HOSSEINI P, BOOSHEHRIAN A, MADARI A. Developing concrete recycling strategies by utilization of Nano-SiO₂ particles [J].Waste & Biomass Valorization, 2011, 2(3): 347-355.
- [11] MUKHARJEE B B, BARAI S V. Influence of Nano-Silica on the properties of recycled aggregate concrete [J]. Construction & Building Materials, 2014, 55(2):29-37.
- [12] MUKHARJEE B B, BARAI S V. Influence of incorporation of nano-silica and recycled aggregates on compressive strength and microstructure of concrete [J]. Construction & Building Materials, 2014, 71:570-578.
- [13] HUO J, HE Y, CHEN B. Experimental study on impact behaviour of concrete-filled steel tubes at elevated temperatures up to 800°C [J]. Materials and Structures, 2014, 47(1):263-283.
- [14] 李文贵,肖建庄,黄靓,等.再生混凝土界面过渡区纳观力学性 能试验研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2014,41(12):31 -39.

LI Wengui, XIAO Jianzhuang, HUANG Liang, *et al.* Experimental study on mechanical properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete [J].Journal of Hunan U-niversity :Natural Sciences, 2014, 41(12): 31 - 39. (In Chinese)

- [15] YE ILMEN S, AL-NAJJAR Y, BALAV M H, et al. Nanomodification to improve the ductility of cementitious composites [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 76: 170 -179.
- [16] WANG K S, DAI G L, KONG F C, et al. Study on dynamics performance of nano-concrete [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 217/219(3):199-202.
- [17] XIAO J Z,LI L,SHEN L, *et al*.Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading [J].Cement and Concrete Research,2015,71:46-55.
- [18] 李文贵,罗智予,龙初,等.钢管混凝土与钢管再生骨料混凝土 抗冲击性能研究综述[J].建筑科学与工程学报,2016,33(4): 25-35.
 LI Wengui,LUO Zhiyu,LONG Chu, et al. Review of impact

resistance of CFST and RACFST [J].Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(4):25-35. (In Chinese)

- [19] YAN D, LIN G. Dynamic properties of concrete in direct tension [J].Cement and Concrete Research, 2006, 40(3):1371 -1378.
- [20] ZHENG D, LI Q. An explanation for rate effect of concrete strength based on fracture toughness including free water viscosity [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71(16):2319 -2327.
- [21] KAPLAN S A.Factors affecting the relationship between rate of loading and measured compressive strength of concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1980, 32(111):79-88.
- [22] ROSS C A, JEROME D M, TEDESCO J W, et al. Moisture and strain rate effects on concrete strength [J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(3):293-300.
- [23] TEDESCO J W, POWELL J C, ROSS C A, *et al*. A strain-ratedependent concrete material model for ADINA [J]. Computers and Structures, 1997, 64 (5/6):1053-1067.
- [24] LU Y, CHEN X, TENG X, et al .Dynamic compressive behavior of recycled aggregate concrete based on split Hopkinson pressure bar tests [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2014, 11(1):131-141.
- [25] XIAO J, LI L, SHEN L, et al. Effects of strain rate on mechanical behavior of modeled recycled aggregate concrete under uniaxial compression [J]. Construction & Building Materials, 2015,93:214-222.
- [26] LI L, XIAO J, POON C S. Dynamic compressive behavior of recycled aggregate concrete [J]. Materials & Structures, 2016, 49 (11):4451-4462.
- [27] 杨涛,王社良,刘伟.性能增强再生混凝土框架中节点抗震性能 试验[J].湖南大学学报:自然科学版,2016,43(11):68-77. YANG Tao,WANG Sheliang,LIU Wei.Experimental study on seismic behavior of interior joints in enhancements recycled aggregate concrete frame [J].Journal of Hunan University:Natural Sciences,2016,43(11):68-77.(In Chinese)