

硅灰强化再生混凝土抗压强度尺寸效应

苏捷^{1,2,3†}, 朱君¹, 史才军^{1,2,3}, 方志¹

1. 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082;
2. 湖南省绿色先进土木工程材料国际科技创新合作基地(湖南大学), 湖南长沙 410082;
3. 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:为研究水泥外掺硅灰浆液强化再生骨料对再生混凝土立方体抗压强度尺寸效应的影响,以水泥外掺硅灰浆液水胶比、再生骨料取代率和试件几何尺寸为试验参数,完成了240个再生混凝土立方体试件的抗压试验。结果表明:采用水胶比为1.0的水泥外掺硅灰浆液强化处理再生骨料对再生混凝土立方体抗压强度的提升和尺寸效应的降低幅度均最大。随着再生骨料取代率的增加,立方体抗压强度尺寸效应呈增强趋势,100%再生骨料取代率下尺寸效应度约为普通混凝土的1.4倍;采用水泥外掺硅灰浆液强化处理再生骨料可降低尺寸效应,强化处理后再生混凝土立方体抗压强度尺寸效应度较未处理试件降低了约19.2%。建立了尺寸效应律计算公式,可用于再生混凝土立方体抗压强度的分析计算。

关键词:再生混凝土;立方体抗压强度;尺寸效应;水泥外掺硅灰浆液强化;取代率

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A

Scale Effect of Cubic Compressive Strength for Recycled Concrete with Silica-fume Modification

SU Jie^{1,2,3†}, ZHU Jun¹, SHI Caijun^{1,2,3}, FANG Zhi¹

1. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province (Hunan University), Changsha 410082, China;
2. International Science Innovation Collaboration Base for Green & Advanced Civil Engineering Materials of Hunan Province (Hunan University), Changsha 410082, China;
3. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education (Hunan University), Changsha 410082, China)

Abstract: In order to study the influence of the aggregate silica-fume modification on the scale effect of cubic compressive strength of recycled concrete, 240 recycled concrete cube specimens were conducted under the compression tests, taking the water-binder ratio of silica-fume paste, the recycled aggregate replacement ratio and the dimension of specimens as test parameters. The test results show that the improvement of the cubic compressive strength of recycled concrete with silica-fume modification ($w/b=1.0$) reaches the maximum value, while the reduction in scale effect is also the most significant. The scale effect of cubic compressive strength becomes more obvious

* 收稿日期:2021-05-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408213), National Natural Science Foundation of China(51408213); 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2042), Natural Science Foundation of Hunan Province of China(2018JJ2042)

作者简介:苏捷(1979—),男,湖南长沙人,湖南大学副教授,工学博士

† 通信联系人, E-mail: iamsujie@163.com

with the increase of recycled aggregate replacement ratio, and the scale effect of recycled concrete with the recycled aggregate replacement ratio of 100% is about 1.4 times that of ordinary concrete. Silica-fume modification can reduce the scale effect of recycled concrete. When the recycled aggregate replacement ratio is 100%, the scale effect of recycled concrete with silica-fume modification is about 19.2% lower than that of recycled concrete without modification. The calculation equations of scale effect law are proposed, which can be used to analyze the cubic compressive of recycled concrete.

Key words: recycled concrete; cubic compressive strength; scale effect; silica-fume modification; replacement ratio

混凝土是一种多相复合材料,通常由粗骨料、水泥砂浆基体和界面过渡区组成.再生混凝土采用再生骨料为粗骨料制备,其组成、结构较普通混凝土更复杂.再生骨料通常残留有陈旧砂浆且内部存在大量微裂纹,影响骨料和界面过渡区的性能,导致再生混凝土和普通混凝土在受压性能上存在较大差异^[1-2].肖建庄等^[3-4]、朋改非等^[5]和王占锋等^[6]的研究表明,再生混凝土的抗压强度约为普通混凝土的80%.粗骨料与界面过渡区的性能是混凝土抗压强度的主要影响因素^[7-12],有效提高再生混凝土受压性能的关键在于改善再生骨料和界面过渡区的物理力学性能.Kim等^[13]和Saravanakumar等^[2]提出采用水泥外掺硅灰浆液强化可以改善再生骨料和界面过渡区的部分性能,由此将再生混凝土的强度提高约15%.白雷雷^[14]测得了界面过渡区的孔隙和水化产物,发现未强化处理再生混凝土界面过渡区中孔隙多于普通混凝土和强化再生混凝土.强化再生混凝土界面过渡区中大量Ca(OH)₂转化为C-S-H凝胶,界面过渡区较致密,孔隙含量明显减少,改善了界面过渡区的性能,提高了混凝土的抗压强度.

统计尺寸效应理论认为尺寸效应由材料内部低强度单元引发.苏捷等^[8-9]对混凝土尺寸效应的研究表明,界面过渡区的强度较低,是引发尺寸效应的主导因素.根据文献^[14]研究成果,再生混凝土中界面过渡区性能低于普通混凝土,抗压强度的尺寸效应将显著增强.张莹等^[15]、张丽等^[16]和杨海涛等^[17]测得了不同尺寸和再生骨料取代率下再生混凝土立方体和棱柱体试件的抗压强度,提出强度尺寸换算系数可取为1.16,大于规范^[18]中给出的普通混凝土换算系数1.05.采用强化处理可改善再生骨料和界面过渡区的性能^[14],影响再生混凝土抗压强度的尺寸效应,但迄今强化处理对再生混凝土抗压强度尺寸效应影响的研究尚未见文献报道.

目前国内外对再生骨料强化处理后再生混凝土尺寸效应的研究尚不充分,不足以作为再生混凝土的结构设计分析和工程应用提供有效依据.在我国混凝土结构设计规范体系中,立方体抗压强度是各项抗压性能指标的基本代表值,具有重要地位.因此,本文对水泥外掺硅灰浆液强化处理再生混凝土立方体抗压强度尺寸效应进行较系统的试验研究,分析强化处理及再生骨料取代率对抗压强度尺寸效应的影响,建立再生混凝土立方体抗压强度的尺寸效应律,为再生混凝土的推广应用提供可靠依据.

1 试验概况

1.1 试件设计

设计了5组再生骨料取代率,分别为0%、25%、50%、75%和100%.在100%再生骨料取代率下,采用水胶比分别为0、0.8、1.0和1.2的水泥外掺硅灰浆液强化处理再生骨料,以分析强化处理对尺寸效应的影响.再生骨料取代率为0%的试件为使用天然骨料的普通混凝土,为配合比设计的基准组,强度等级C30.每一再生骨料取代率和水泥外掺硅灰浆液水胶比的立方体试件制备3个尺寸,边长分别为100 mm、150 mm和200 mm,共计24个规格.每一规格试件制备10个,总计成型240个试件.

1.2 原材料

混凝土主要材料:水泥为P.O 42.5级普通硅酸盐水泥.硅灰中SiO₂质量分数为95.6%,平均粒径为0.1 μm,密度为2.37 g/cm³,比表面积为18 730 m²/kg.细骨料为最大粒径5 mm、细度模数为2.4的天然河砂.粗骨料分别采用天然骨料和再生骨料,天然骨料为粒径范围5~20 mm的连续级配卵石;再生骨料,按表1混凝土配合比,采用C30混凝土构件破碎后过20 mm筛得到.拌和水为自来水.

表1 混凝土配合比

Tab.1 Mix Proportion of concrete

$\rho_{\text{水泥}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho_{\text{细骨料}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho_{\text{粗骨料}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho_{\text{水}}/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水胶比
415	704	1 057	224	0.54

按照我国砂石材料规范^[19],测得天然骨料和再生骨料的性能指标列于表2.由表2可知,再生骨料的表观密度、堆积密度较天然骨料分别降低了6.1%和7.3%,含水率、吸水率和压碎指标分别为天然骨料的7.3倍、7.1倍和3.7倍.

表2 粗骨料性能指标

Tab.2 Properties of coarse aggregate

骨料	粒径/ mm	表观密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水 率/%	吸水 率/%	压碎 指标/%
天然 骨料	5~20	2 790	1 480	0.32	0.76	4.63
再生 骨料	5~20	2 620	1 372	2.33	5.38	17.25

1.3 再生骨料强化处理

采用水泥外掺硅灰浆液对再生骨料浸泡处理,使浆液中的超细活性颗粒对再生骨料的微裂纹进行填充、黏合,改善再生骨料性能.水泥外掺硅灰浆液中水泥采用P.O 42.5级普通硅酸盐水泥,硅灰掺量为水泥质量的10%.再生骨料的强化处理步骤如下:首先将再生骨料完全浸没于水泥外掺硅灰浆液中,持续翻动骨料,使浆液充分渗入骨料.在浆液即将初凝前取出骨料,滤去多余浆液后在室温下晾干,养护28 d后进行性能测试和制备再生混凝土.

实测不同水胶比下水泥外掺硅灰浆液强化处理后再生骨料的各项性能指标见表3.因具有水化活性的超细颗粒有效填补了再生骨料中的微裂缝,使得处理后再生骨料各项性能指标有所提高.由表2和表3可知,经过水泥外掺硅灰浆液强化处理后,再生骨料的堆积密度和表观密度较未处理的再生骨料分别提高了3.5%和2.6%,吸水率和压碎指标分别降低了6.6%和40.5%.

1.4 配合比设计及加载装置

由于再生骨料的含水率和吸水率明显高于天然骨料(见表2),在确定拌和用水量时采用附加水法进行调整,附加水量由再生骨料质量、吸水率和含水率综合确定.再生混凝土所采用的基准配合比如表1

所示,表中所列粗骨料配合比为再生骨料与天然骨料的之和.

表3 强化后再生骨料性能指标

Tab.3 Properties of recycled coarse aggregate with silica-fume modification

水胶比	表观密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水 率/%	吸水 率/%	压碎指 标/%
0.8	2 657	1 405	2.49	5.30	13.41
1.0	2 689	1 420	2.53	5.01	10.25
1.2	2 635	1 398	2.51	5.26	13.12

所有试件均在成型24 h后脱模,采用标准养护,养护龄期28 d.本试验采用YA-2000型电液伺服式压力试验机,按我国现行规范^[18]对立方体抗压强度进行测试.

2 抗压强度

2.1 再生骨料取代率对抗压强度的影响

将实测各再生骨料取代率下再生混凝土试件立方体抗压强度绘于图1,图中抗压强度值为同规格10个试件强度的平均值.实测各规格试件立方体抗压强度标准差范围为0.63~1.02 MPa,变异系数范围为0.72%~2.81%,表明强度测试结果稳定,离散性较小.

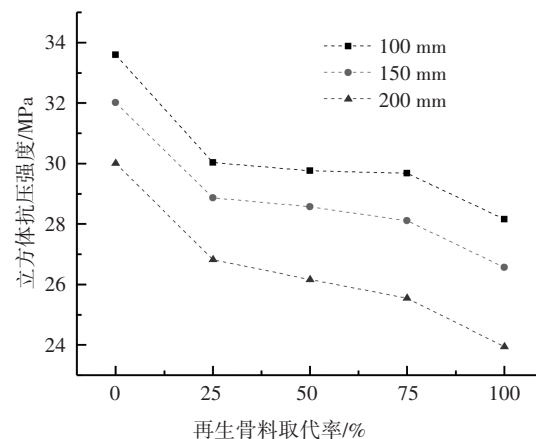


图1 再生混凝土立方体抗压强度

Fig.1 Cubic compressive strength of recycled concrete

根据我国混凝土规范^[18],以边长150 mm试件作为抗压强度试验标准试件.分析图1数据可知:各再生骨料取代率下再生混凝土立方体抗压强度均低于普通混凝土.再生骨料取代率为25%、50%、75%和100%下,边长150 mm标准立方体试件的抗压强度

值较同尺寸普通混凝土试件(取代率为0)分别降低了9.8%、10.7%、12.2%和17%,变化规律与肖建庄等^[3-4]和朋改非等^[5]的研究成果一致。

2.2 再生骨料强化对抗压强度的影响

将实测100%再生骨料取代率下各水胶比水泥外掺硅灰浆液强化处理再生混凝土试件立方体抗压强度绘于图2,图中抗压强度值为同规格10个试件强度的平均值.实测各规格试件立方体抗压强度标准差范围为0.54~1.05 MPa,变异系数范围为0.68%~2.95%,表明测试结果稳定,离散性较小。

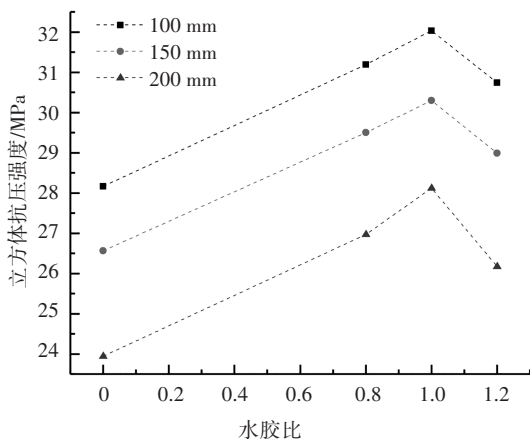


图2 硅灰强化再生混凝土立方体抗压强度

Fig.2 Cubic compressive strength of recycled concrete with silica-fume modification

分析图2数据可知:100%再生骨料取代率下,经过水胶比分别为0.8、1.0和1.2的水泥外掺硅灰浆液强化处理后,边长150 mm标准再生混凝土试件立方体抗压强度值较未强化处理试件(水胶比为0)分别提高了11.1%、12.7%和8%,变化规律与Kim等^[13]和白雷雷^[14]的研究成果一致。

3 尺寸效应

3.1 再生骨料取代率对抗压强度尺寸效应的影响

参照文献^[10],引入尺寸效应度 γ 对再生混凝土立方体抗压强度尺寸效应进行定量分析.以边长100 mm试件为基准试件,定义立方体抗压强度尺寸效应度 γ_{150} 和 γ_{200} 分别如下:

$$\gamma_{150} = \frac{f_{cu,100} - f_{cu,150}}{f_{cu,100}} \times 100\%, \quad (1)$$

$$\gamma_{200} = \frac{f_{cu,100} - f_{cu,200}}{f_{cu,100}} \times 100\%. \quad (2)$$

式中: $f_{cu,100}$ 、 $f_{cu,150}$ 和 $f_{cu,200}$ 分别为截面边长为100 mm、

150 mm和200 mm再生混凝土试件的立方体抗压强度值,MPa.

由尺寸效应度定义可知,尺寸效应度值越大,代表不同尺寸试件立方体抗压强度间差值所占基准试件强度比例越高,表明抗压强度尺寸效应趋于显著.根据试验结果,计算得到各规格再生混凝土立方体试件抗压强度尺寸效应度,并将尺寸效应度 γ_{150} 和 γ_{200} 随再生骨料取代率变化规律绘于图3.

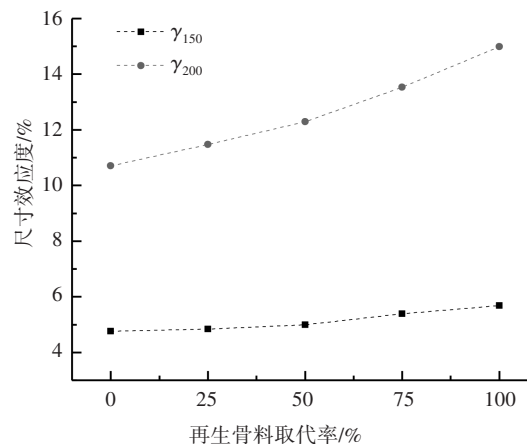


图3 再生混凝土尺寸效应度

Fig.3 Scale effect parameters of recycled concrete

从图3可知:再生混凝土立方体试件抗压强度尺寸效应度随再生骨料取代率提高而增大,表明尺寸效应随再生骨料取代率的提高呈增强趋势.再生骨料取代率为25%、50%、75%和100%时,尺寸效应度 γ_{150} 比普通混凝土(取代率为0)分别提高了1.8%、4.9%、13.1%和18.8%,尺寸效应度 γ_{200} 分别提高了7.1%、14.7%、26.4%和40.9%,此规律与张丽等^[16]和杨海涛等^[17]的研究成果一致。

根据统计尺寸效应理论,试件强度的尺寸效应由内部低强度单元引发,与材料组成结构密切相关.因再生骨料取代率的不同导致混凝土的组成结构具有差异,普通混凝土由天然骨料、新水泥砂浆基体和骨料-新砂浆界面过渡区三部分组成,再生混凝土中除上述三个部分外,还包含再生骨料和再生骨料-新砂浆界面、骨料-陈旧砂浆-新砂浆界面等多种界面过渡区.已有关于混凝土的研究成果表明^[8-9],界面过渡区强度较骨料和砂浆更低且离散性较大,是产生尺寸效应的主导因素.白雷雷^[14]提出未强化处理再生混凝土的界面过渡区含有较多空隙,性能显著低于普通混凝土中的界面过渡区.因此,包含多种界面过渡区的再生混凝土中各相材料离散性比普通混凝土更为显著,且这种离散性随再生骨料取代率的

增大呈增强的趋势,使得抗压强度尺寸效应更显著.此外,与普通混凝土所采用均质性较高的天然骨料不同,再生混凝土中的再生骨料性能离散性更显著,导致低强度单元出现概率更高,增强了试件抗压强度的尺寸效应.

3.2 强化处理对立方体抗压强度尺寸效应的影响

根据实测 100% 再生骨料取代率下经不同水胶比水泥外掺硅灰浆液强化处理后再生混凝土立方体试件的抗压强度,计算得到尺寸效应度 γ_{150} 和 γ_{200} 值,并将其随浆液水胶比变化规律绘于图 4.

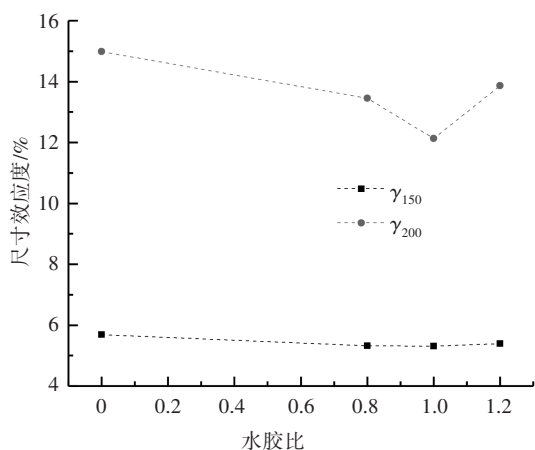


图4 强化再生混凝土尺寸效应度

Fig.4 Scale effect parameters of recycled concrete with silica-fume modification

分析图 4 可知:强化处理使得再生混凝土的尺寸效应度有所降低.经过水胶比为 0.8、1.0 和 1.2 的水泥外掺硅灰浆液强化处理后,尺寸效应度 γ_{150} 较未强化的再生混凝土(水胶比为 0)分别降低了 6.2%、6.8% 和 5.1%,尺寸效应度 γ_{200} 分别降低了 10.3%、19.2% 和 7.5%.由表 2 和表 3 可知,经强化处理后,再生骨料的强度和各项性能指标明显改善,其压碎指标和吸水率较未处理的骨料降低了 40.5% 和 6.6%,表明浆液中活性颗粒可以渗入并填充再生骨料并修复骨料表面陈旧砂浆中的微裂纹,减少了界面过渡区中的孔隙,具有明显的修补增强作用.由于浆液的修补增强作用,减少了再生骨料及界面过渡区的缺陷,提高了再生骨料和界面过渡区的均质性,使得再生混凝土中各相材料性能的离散性减小,降低了尺寸效应.此外,硅灰中的 SiO_2 质量分数较高,能与陈旧砂浆中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 C-S-H 胶体,改善了再生混凝土界面过渡区的力学性能^[14],从而延缓了在荷载作用下的试件中微裂缝的开展.在上述因素共同作用下,强化处理后再生混凝土的立方体抗压

强度尺寸效应较未处理的再生混凝土明显减小.当水胶比为 1.0 时,因为浆液兼具较好的流动性和强度,所以其对再生骨料及界面过渡区综合性能的提升幅度最大,尺寸效应下降的幅度也最大.结合浆液水胶比对再生混凝土立方体抗压强度和尺寸效应的影响进行分析,可知采用 1.0 水胶比水泥外掺硅灰浆液对再生骨料进行强化处理可获得最优的抗压强度和最低的尺寸效应.因此,可以认为水胶比 1.0 为再生骨料强化处理的最优水胶比.

3.3 强化处理对立方体抗压强度尺寸换算系数的影响

我国混凝土规范^[18]以尺寸换算系数为尺寸效应指标,将边长 100 mm 和 200 mm 试件立方体抗压强度折算为标准 150 mm 试件立方体抗压强度.根据本文立方体抗压强度实测结果,计算得到普通混凝土、未经强化处理再生混凝土和最优水胶比下强化再生混凝土立方体抗压强度尺寸换算系数 $f_{\text{cu},150}/f_{\text{cu},100}$ 分别为 0.953、0.935 和 0.946;尺寸换算系数 $f'_{\text{cu},150}/f'_{\text{cu},200}$ 分别为 1.067、1.103 和 1.077,表明采用最优水胶比强化再生混凝土立方体抗压强度的尺寸效应与普通混凝土较为接近,相应尺寸换算系数可近似取为混凝土规范^[18]中所给出的 0.95 和 1.05.未经强化处理再生混凝土尺寸效应显著强于普通混凝土和强化处理再生混凝土,采用混凝土规范^[18]中换算系数 0.95 和 1.05 将偏于不安全.

4 尺寸效应律

基于经典统计尺寸效应理论和非局部理论^[20],Bazant 提出了受压条件下与试件尺寸 D 和抗压强度 σ_N 有关的计算公式^[21]:

$$\sigma_N = \frac{Bf_1}{\sqrt{\left(\frac{D}{D_0}\right)^m + D/D_0}} \quad (3)$$

式中: m 、 Bf_1 和 D_0 为常数,通过试验数据的拟合来确定; D 为试件尺寸.

为验证式(3)对再生混凝土立方体抗压强度尺寸效应分析的适用性,以本文试验数据以及文献[3-6]和文献[14-17]中的立方体抗压强度 σ_N 值和对应的试件尺寸 D 为依据,以尺寸效应律系数 m 、 Bf_1 和 D_0 为参数,采用最小二乘法进行参数拟合.拟合所采用的数据来自 63 组再生混凝土立方体试件,试件抗压强度范围为 23.5~33.8 MPa,再生骨料取代率范围为 0~100%,水泥外掺硅灰浆液水胶比为 0 和 1.0,涵盖

试件尺寸范围为100~200 mm,具有较好的代表性.将得到的再生混凝土立方体抗压强度尺寸效应律中参数 m 、 Bf_i 和 D_0 的取值列于表4.

表4 不同取代率下再生混凝土尺寸效应公式参数值

Tab.4 Parameters in the scale effect equation with various replacement ratio

取代率/%	水胶比	Bf_i /MPa	D_0 /mm	m
0	0	47.28	95.98	-1.21
25	0	42.38	93.20	-1.25
50	0	41.87	89.86	-1.35
75	0	41.18	84.30	-1.71
100	0	38.20	82.06	-2.33
	1.0	39.03	86.68	-3.57

各规格试件拟合结果的相关系数范围为0.774~0.992,表明试验实测值与公式结果吻合较好,式(3)可较好地预测再生混凝土的立方体抗压强度.

通过整理表4的数据,建立再生骨料取代率和水泥外掺硅灰浆液水胶比与尺寸效应律系数 m 、 Bf_i 和 D_0 的关系,如式(4)~(6).采用式(4)~(6)可对再生混凝土立方体抗压强度尺寸效应律参数进行计算.

$$Bf_i = -0.08R + 0.72w + 46.05, \quad (4)$$

$$D_0 = -0.15R + 4.95w + 96.43, \quad (5)$$

$$m = -0.01R - 1.46w - 1.03. \quad (6)$$

式中: R 和 w 分别为再生骨料取代率和水泥外掺硅灰浆液水胶比.

5 结论

1)再生混凝土抗压强度明显低于普通混凝土,随再生骨料取代率的提高,再生混凝土立方体抗压强度呈降低趋势.100%取代率下200 mm再生混凝土立方体抗压强度较普通混凝土低17%.

2)采用水泥外掺硅灰浆液强化处理可有效提高再生混凝土的抗压强度,经强化后再生混凝土立方体抗压强度较未处理时提高约12.7%.

3)再生骨料取代率对混凝土立方体抗压强度的尺寸效应有较大的影响,尺寸效应随着再生骨料取代率的提高而增大.再生骨料取代率100%下再生混凝土抗压强度尺寸效应度较普通混凝土提高约40.9%.

4)再生骨料经强化处理后,再生混凝土抗压强度的尺寸效应明显下降.当水泥外掺硅灰浆液的水胶比为1.0时下降的幅度最大,尺寸效应度较未经处理试件下降约19.2%.

5)不同再生骨料取代率和水泥外掺硅灰浆液水胶比下,基于能量释放的Bazant尺寸效应理论与实测结果吻合良好.根据拟合结果,提出了Bazant理论参数的经验计算公式,拟合结果吻合良好.

参考文献

- [1] PURUSHOTHAMAN R, AMIRTHAVALLI R R, KARAN L. Influence of treatment methods on the strength and performance characteristics of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(5): 04014168.
- [2] SARAVANAKUMAR P, ABHIRAM K, MANOJ B. Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics [J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 611-617.
- [3] 肖建庄, 李佳彬, 孙振平, 等. 再生混凝土的抗压强度研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 1558-1561.
XIAO J Z, LI J B, SUN Z P, et al. Study on compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(12): 1558-1561. (In Chinese)
- [4] 肖建庄, 林壮斌, 朱军. 再生骨料级配对混凝土抗压强度的影响[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(4): 154-160.
XIAO J Z, LIN Z B, ZHU J. Effects of recycled aggregates' gradation on compressive strength of concrete [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(4): 154-160. (In Chinese)
- [5] 朋改非, 黄艳竹, 张九峰. 骨料缺陷对再生混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(1): 80-84.
PENG G F, HUANG Y Z, ZHANG J F. Influence of defects in recycled aggregate on mechanical properties of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(1): 80-84. (In Chinese)
- [6] 王占锋, 王社良, 翁光远. 不同粗骨料取代率再生混凝土力学性能试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(4): 32-35.
WANG Z F, WANG S L, WENG G Y. Experimental study on mechanical properties of concrete prepared with different recycled coarse aggregates replacement rate [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, 33(4): 32-35. (In Chinese)
- [7] 陈宗平, 占东辉, 徐金俊. 再生粗骨料含量对再生混凝土力学性能的影响分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(1): 130-135.
CHEN Z P, ZHAN D H, XU J J. Research on mechanical properties of recycled concrete using different recycled coarse aggregate replacement [J]. Industrial Construction, 2015, 45(1): 130-135. (In Chinese)
- [8] 苏捷, 方志. 不同骨料组分混凝土立方体抗压强度尺寸效应试

- 验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(2): 152-157.
- SU J, FANG Z. Experimental study on impact of aggregate mixture on dimensional effect of concrete cubic compressive strength[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(2): 152-157. (In Chinese)
- [9] 苏捷, 方志, 杨钻. 骨料组分和强度等级对混凝土单轴受压性能尺寸效应的影响[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 120-127.
- SU J, FANG Z, YANG Z. Influence of aggregate mixture and strength grade on dimensional effect of concrete uniaxial compressive behavior[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(5): 120-127. (In Chinese)
- [10] 苏捷, 方志. 普通混凝土与高强混凝土抗压强度的尺寸效应[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(6): 1078-1081.
- SU J, FANG Z. Scale effect on cubic compressive strength of ordinary concrete and high-strength concrete[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(6): 1078-1081. (In Chinese)
- [11] 杨伟军, 袁帅, 杨春侠. 砂浆单轴抗压强度尺寸效应律研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 79-86.
- YANG W J, YUAN S, YANG C X. Study on size effect law of compressive strength of building mortar under uniaxial compression[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(11): 79-86. (In Chinese)
- [12] 陈庆军, 黎哲, 蒙何彬, 等. 钢套管再生混凝土加固钢筋混凝土柱偏压性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(3): 29-38.
- CHEN Q J, LI Z, MENG H B, *et al.* Behavior of steel-jacket retrofitted column with recycled aggregate concrete under eccentric loading[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(3): 29-38. (In Chinese)
- [13] KIM J J, YOUN S H, CHO M J, *et al.* The recycled aggregates with surface treatment by pozzolanic[J]. Key Engineering Materials, 2005, 287: 63-68.
- [14] 白雷雷. 粗骨料强化的再生混凝土抗压强度及微观性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019: 55-60.
- BAI L L. Experimental study on compressive strength and microscopic properties of recycled concrete with reinforced coarse aggregate[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019: 55-60. (In Chinese)
- [15] 张莹, 杨秋伟, 赵靖芸, 等. 再生混凝土抗压强度尺寸效应试验研究[J]. 混凝土, 2018(2): 29-31.
- ZHANG Y, YANG Q W, ZHAO J Y, *et al.* Experimental study on size effect of compressive strength of recycled concrete[J]. Concrete, 2018(2): 29-31. (In Chinese)
- [16] 张丽, 余振鹏, 沈丽, 等. 不同取代率再生混凝土抗压强度尺寸效应研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(3): 18-21.
- ZHANG L, YU Z P, SHEN L, *et al.* Study on size effect of compressive strength of recycled concrete with different substitution rates[J]. New Building Materials, 2019, 46(3): 18-21. (In Chinese)
- [17] 杨海涛, 田石柱. 尺寸效应对再生混凝土性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(11): 3818-3823.
- YANG H T, TIAN S Z. Influence of size effect on properties of recycled concrete[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(11): 3818-3823. (In Chinese)
- [18] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 12-14.
- Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019: 12-14. (In Chinese)
- [19] 建设用卵石、碎石: GB/T 14685—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 28-39.
- Pebble and crushed stone for construction: GB/T 14685—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012: 28-39. (In Chinese)
- [20] BAZANT Z P. Size effect[J]. International Journal of Solids and Structures, 2000, 37(1/2): 69-80.
- [21] BAZANT Z P, XI Y P. Statistical size effect in quasi-brittle structures: II. nonlocal theory[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(11): 2623-2640.