

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20181222002

http://www.ykxjz.cn/

史佰佰, 公丕海, 关长涛, 赵荣荣, 李娇. 海湾扇贝骨料不同替代率对人工鱼礁物理性能影响及碳汇作用分析. 渔业科学进展, 2019, 40(6): 01-08

Shi BB, Gong PH, Guan CT, Zhao RR, Li J. Influence of different replacement rates of *Argopecten irradians* aggregate on physical properties of artificial reefs and carbon sequestration. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(6): 01-08

海湾扇贝骨料不同替代率对人工鱼礁 物理性能影响及碳汇作用分析*

史佰佰^{1,3} 公丕海^{2,3} 关长涛^{2,3} 赵荣荣^{3,4} 李娇^{2,3①}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院 上海 201306; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 青岛 266071; 3. 中国水产科学研究院黄海水产研究所农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 青岛市海水鱼类种子工程与生物技术重点实验室 青岛 266071; 4. 浙江海洋大学 国家海洋设施养殖工程技术研究中心 舟山 316000)

摘要 本研究在抗压强度为 C25 的普通混凝土配合比的基础上, 采用粗、细扇贝壳对混凝土中的天然骨料部分替代, 并对扇贝壳混凝土配合比进行了研究, 比较了粗、细扇贝壳替代天然骨料混凝土的工作性能和基本力学性能, 并根据山东省 2016~2020 年的投礁计划, 对利用扇贝壳替换人工鱼礁混凝土中天然骨料的固碳潜能及可清理的废弃扇贝壳堆积面积进行估算。结果显示, 随着扇贝壳替换天然骨料比例的增加, 混凝土的塌落度呈降低趋势。粗扇贝壳替换天然粗骨料混凝土较细扇贝壳替换天然细骨料混凝土的塌落度降幅大; 粗扇贝壳替代混凝土中的天然石时, 扇贝壳混凝土的抗压性能与基准混凝土基本接近, 粗扇贝壳的最佳替代率为 40%, 28 d 抗压强度较基准混凝土提高了 7.3%。用细扇贝壳替代混凝土中的天然砂时, 可使混凝土的抗压性能较基准混凝土提高幅度较大, 最佳替代率为 60%, 28 d 抗压强度较基准混凝土提高了 33.5%; 以细扇贝壳替换混凝土天然细骨料替换率为 50%~70%估算, 山东省 2016~2020 年计划新建的 2043 万空方人工鱼礁均用此种混凝土制作, 可实现礁体固碳量 27.54~38.56 万 t, 可减少废弃贝壳陆地堆积面积 5.89~8.24 km², 具有很高的生态潜能。

关键词 人工鱼礁; 海湾扇贝壳; 抗压强度; 塌落度; 固碳潜能

中图分类号 X835 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2019)06-0001-08

人工鱼礁投放是海洋牧场建设的一项基础工程, 具有海洋生态调控、海洋生境修复和增殖渔业资源等功能。自 20 世纪 50 年代以来, 全球沿海国家陆续将人工鱼礁作为渔业资源养护的重要措施, 开始人工鱼礁的建设, 并在人工鱼礁材料、结构、布局等方

面开展了一系列研究(朱燮昌等, 1987; 郑延璇, 2014; 周艳波等, 2012)。相关研究和应用实践表明, 不同材料人工鱼礁所产生的生态效益和经济效益具有明显差异。据不完全统计, 已经用于建造人工鱼礁的材料超过 249 种(Baine *et al.*, 2001), 主要有天然材料、废

* 山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0501)资助 [This work was supported by the Marine Science and Technology Fund of Shandong Province for Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao) (2018SDKJ0501)]. 史佰佰, E-mail:853767306@qq.com

① 通讯作者: 李 娇, 高级工程师, E-mail:lijiao@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2018-12-22, 收修改稿日期: 2019-03-05

弃物材料、建筑材料、综合材料等几大类。混凝土作为人工鱼礁的基础材料,具有耐久性、可塑性、无毒性等优点而被广泛应用。通过利用废弃材料,如建筑垃圾(Behera *et al*, 2014)、钢铁废料(Shi *et al*, 2008)、农业废料(Prusty *et al*, 2015)对混凝土中的传统材料进行替换,可实现废物利用并节约自然资源的目的。近年来,国内学者对人工鱼礁的研究从礁型优化设计和人工鱼礁的环境功能向礁体混凝土材料添加物方向延伸。李琳琳等(2012)以钢尾渣为主要原料开发出了C50以上的较高强度的混凝土,用以制备大体积、大孔洞率和形状复杂的人工鱼礁。于森等(2012)以石英岩型齐大山铁尾矿为主要原料,进行了鱼礁混凝土制备的研究,通过强度测试和强度效应机理分析,评估了齐大山铁尾矿制作人工鱼礁材料的可行性。除能实现废物利用,礁体材料还能实现碳封存。李娇等(2016)通过利用在混凝土礁体材料中添加农渔生产中废弃物秸秆和贝壳,探讨增加礁体自身碳封存作用的可行性和潜能。中国是贝类养殖大国,2017年贝类产量高达1528.09万t(农业农村部渔业局,2018),但对于贝类利用多局限于可食用部分,而对壳体部分利用的比较少。贝类壳体的形成是钙化作用的结果,贝类通过钙化作用可以将海水中的碳酸氢根转换成碳酸钙贝壳,从而能固定大量的C。沈新强等(2011)研究表明,长江口人工牡蛎礁通过牡蛎(*Ostrea gigas*)的钙化过程,单位面积年固碳量为 2.70 kg/m^2 ,年平均固碳量达 $3.33 \times 10^4 \text{ t}$ 。公丕海等(2014)研究表明,2009~2013年山东莱州金城湾海域 64.25 hm^2 海洋牧场圆管形礁体上附着的牡蛎总固碳量约为297.5 t,将贝壳作为人工鱼礁混凝土的原料,来实现礁体材料的碳汇功能对废弃物资源利用具有重要生态意义。本研究以海湾扇贝(*Argopecten irradians*)壳体为骨料,进行了制备鱼礁混凝土的研究,通过抗压强度测试和抗压强度效应机理分析,评估了扇贝壳作为人工鱼礁混凝土材料的可行性,对比了扇贝壳分别替换混凝土天然粗、细骨料的工作性能和抗压性能,并利用2016~2020年山东省计划投礁量对扇贝壳作为混凝土骨料的人工鱼礁固碳潜能进行了估算。

1 材料与方法

1.1 原材料

水泥:青岛山水创新水泥有限公司生产P·O 42.5级水泥;细骨料:青岛市胶南产的中砂,细度模数为2.7,含泥量为2.9%;粗骨料:青岛兴华建筑集团有限公司石场,5~20 mm连续级配碎石;扇贝壳:2018年山东莱州湾新产扇贝经去壳深加工所得的扇贝壳。扇

贝壳经破碎后由振动分筛机筛选出不同的粒径组。替换天然细骨料的扇贝壳粒径为1~5 mm连续级配(图1),替换天然粗骨料的扇贝壳粒径为5~20 mm连续级配(图2);水:青岛市黄岛区自来水。



图1 扇贝壳细骨料

Fig.1 Fine aggregate of scallop shell



图2 扇贝壳粗骨料

Fig.2 Coarse aggregate of scallop shell

1.2 实验内容与方法

1.2.1 配合比 人工鱼礁混凝土的强度不应低于C20。本研究基准混凝土强度设计为C25,在不添加任何活性掺合料的前提下,使用粗、细扇贝壳分别替代天然粗、细骨料。粗扇贝壳替代天然粗骨料的替代率分别为20%、40%、60%,细扇贝壳替代天然细骨料的替代率分别为20%、40%、60%、80%、100%。具体配合比见表1。其中,P为基准混凝土,C为扇贝壳粗骨料混凝土,X为扇贝壳细骨料混凝土,下同。
1.2.2 混凝土塌落度测量、试块的制备与抗压性能测试 混凝土试块的制作应符合相关标准(中华人民共和国建设部等,2010),按照表1的配合比采用强制式搅拌机搅拌物料,搅拌充分后,用混凝土塌落度仪测出塌落度,之后入模成型,模具尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,然后放置于振实台振实,每个配合比制作

表 1 混凝土配合比
Tab.1 Mix proportions of concrete

编号 Number	水灰比 Water cement ratio	细骨料替代率 Fine aggregate substitution rate (%)	粗骨料替代率 Coarse aggregate substitution rate (%)	每立方米扇贝壳混凝土材料用量 Amount of concrete per cubic meter of scallop shell (kg)					
				水泥 Cement	水 Water	砂 Sand	石 Stone	细扇贝壳 Fine scallop shell	粗扇贝壳 Coarse scallop shell
P	0.54	0	0	371	200	697.0	887.0	0	0
C-1	0.54	0	20	371	200	697.0	709.6	0	177.4
C-2	0.54	0	40	371	200	697.0	532.2	0	354.8
C-3	0.54	0	60	371	200	697.0	354.8	0	532.2
X-1	0.54	20	0	371	200	557.6	887.0	139.4	0
X-2	0.54	40	0	371	200	418.2	887.0	278.8	0
X-3	0.54	60	0	371	200	278.8	887.0	418.2	0
X-4	0.54	80	0	371	200	139.4	887.0	557.6	0
X-5	0.54	100	0	371	200	0	887.0	697.0	0

3 组试块, 分别用于 3、7、28 d 抗压强度检测。振实放入温度为(20±1)℃、相对湿度不低于 90% 的标准养护条件下进行养护, 成型 24 h 后拆模, 继续在标准养护条件下进行养护至一定龄期。采用 WES-1000B 万能材料试验机对各龄期试块进行抗压强度测试。根据上述标准, 当采用非标准尺寸试件时, 应将其抗压强度乘以尺寸换算系数, 折算成边长为 150 mm 的标准尺寸试件抗压强度, 当试件边长为 100 mm 时, 折算系数为 0.95。本研究试件边长为 100 mm, 需将抗压强度结果乘以 95% 算成标准尺寸试件抗压强度。

1.2.3 扇贝壳礁体材料固碳潜能估算 贝类外壳的形成是钙化作用的结果。贝类通过钙化作用可以将海水中的碳酸氢根转换成碳酸钙, 从而能固定大量的 C。利用扇贝壳对礁体材料中天然的粗、细骨料进行替换, 可以增强人工鱼礁的固碳潜能。参考李娇等(2016)对人工鱼礁材料添加物固碳量的计算公式, 可以对利用扇贝壳替换天然骨料的人工鱼礁固碳量进行估算, 计算公式如下:

$$C_T = M \times C_R$$

将扇贝壳用于人工鱼礁材料, 可有效提高废弃贝壳的利用率, 减少了由贝壳大量堆积和老化分解所产生的环境问题。参考王莲莲等(2015)对贝壳礁生态效应的估算方法, 对利用扇贝壳替换人工鱼礁天然骨料可清理的废弃贝壳堆积填埋面积进行估算, 计算公式如下:

$$S = M / (\rho \times h)$$

式中, C_T 为礁体总固碳量, C_R 为礁体添加物碳含量, S 为可清理的贝壳陆地堆积面积, M 为扇贝壳骨料重量, ρ 为扇贝壳的堆积密度, 取 404.4 kg/m³ (王洪瑞等, 2006), h 为扇贝壳的堆积高度, 取 $h=1$ m

(王莲莲等, 2015)。

1.2.4 数据处理与分析 采用 SPSS 22.0 软件的单因素方差(One-way ANOVA)对海湾扇贝壳混凝土各个养护龄期的抗压强度进行显著性差异分析, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 工作性能

塌落度常用来判定新拌混凝土的和易性, 又称工作性能。不同掺量扇贝壳对混凝土塌落度的影响见表 2。从表 2 可以看出, 在拌合用水量相同的前提下, 随着扇贝壳的掺量增加, 混凝土的塌落度呈降低的趋势。当粗骨料替代率分别为 20%、40%、60% 时, 塌落度较基准混凝土分别降低了 43.3%、50.7%、82.1%, 混凝土塌落度迅速下降; 当细骨料替代率为 20%、40%、60%、80%、100% 时, 塌落度较基准混凝土分别降低了 16.4%、23.1%、33.6%、67.1%、87.3%。当细扇贝壳替换率 $< 60\%$ 时, 混凝土的塌落度降幅较小, 当替换率 $> 60\%$ 时, 混凝土的塌落度降幅较大。

2.2 扇贝壳的掺量对混凝土抗压性能的影响

从图 3、图 4 可以看出, 粗、细扇贝壳对基准混凝土粗、细骨料替代后, 随着对天然骨料替换率的增加, 其各龄期抗压强度均呈先增大后减小趋势。使用粗扇贝壳替代基准混凝土中的粗骨料, 当替代率分别为 20%、40% 时, 其 3、7、28 d 抗压强度与基准混凝土接近, 呈略微上升趋势。当替代率为 40% 时, 扇贝壳混凝土各龄期抗压强度达到最大值, 28 d 抗压强度较基准混凝土提高 7.3%。当替代率为 60% 时, 扇贝

表2 塌落度值
Tab.2 Slump value

项目 Items	编号 Number								
	P	C-1	C-2	C-3	X-1	X-2	X-3	X-4	X-5
塌落度 Slump (mm)	134	76	66	24	112	103	89	43	17
塌落度降幅 Decrease ratio of slump (%)	—	43.3	50.7	82.1	16.4	23.1	33.6	67.1	87.3

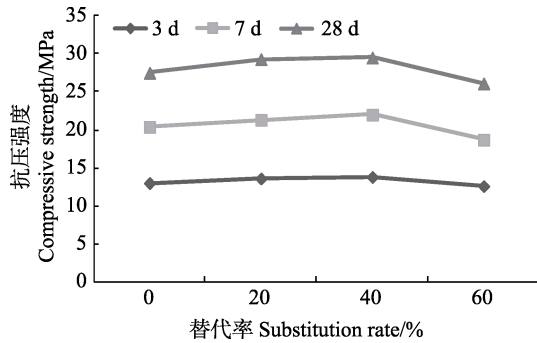


图3 粗扇贝壳不同替代率对抗压强度的影响

Fig.3 Effect of different replacement rates of coarse scallop shells on compressive strength

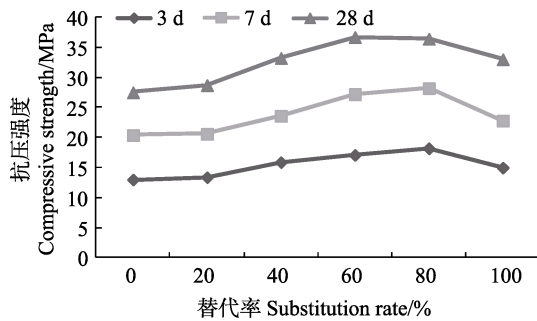


图4 细扇贝壳不同替代率对抗压强度的影响

Fig.4 Effect of different substitution rates of fine-shell on compressive strength

壳混凝土各龄期抗压强度均低于基准混凝土。总体来说,当用扇贝壳替代粗骨料替代率 $< 60\%$,对混凝土抗压性能影响不明显,但当替代率 $> 40\%$ 时,混凝土的抗压性能呈下降趋势;用细扇贝壳替代基准混凝土中的细骨料,当替代率为 20% 时,其 3 、 7 d抗压强度与基准混凝土接近, 28 d抗压强度大于基准混凝土。当替代率分别为 40% 、 60% 时,其各龄期抗压强度较基准混凝土提高很多,且增速较快。当替代率为 60% 时, 28 d抗压强度达到最大值,较基准混凝土提高 33.5% 。当替代率为 80% 时, 3 、 7 d抗压强度达到最大值,但 28 d抗压强度较替代率为 60% 时有所下降。当替代率为 100% 时,各龄期抗压强度下降迅速,其 3 、 7 d抗压强度与基准混凝土接近, 28 d抗压强度仍略高于基准混凝土。

2.3 扇贝壳骨料人工鱼礁固碳能力估算

通过对比扇贝壳替代天然骨料混凝土的工作性

能和抗压性能,扇贝壳替代细骨料混凝土的效果明显,均优于扇贝壳替代粗骨料的混凝土,当细骨料替代率为 60% 时,混凝土 28 d抗压性能最优,且工作性能良好。在保证较强抗压性能和较优工作性能的前提下,选取扇贝壳对细骨料的替代率为 50% ~ 70% 时,对人工鱼礁的固碳潜能进行估算。

2014年山东省海洋与渔业厅发布的《山东省人工鱼礁建设规划》计划在2016~2020年间新建礁群31个,新建人工鱼礁2043万空方,其中,以混凝土构件礁为主。郑延璇等(2014)对山东省常用的4种混凝土构件礁的流体效应和物理稳定性进行了研究,结果显示,其物理稳定性良好,适宜推广应用。通过计算可知,建造礁型为这4种的人工鱼礁每空方所利用混凝土体积的平均值为 0.334 m^3 (表3)(以 10 m 水深投放为例),那么建造2043万空方的人工鱼礁大概需要混凝土 683 万 m^3 。

如果2016~2020年计划投放2043万空方的人工鱼礁均采用扇贝壳部分替换细骨料的混凝土,可对人工鱼礁的总固碳量和可清理的陆地贝壳总堆积面积进行估算(表4)。李娇等(2016)利用元素分析仪测得海湾扇贝壳体C含量平均值为 11.57% 。当细扇贝壳的细骨料替换率为 50% 时,单位体积(m^3)混凝土所利用扇贝壳的重量为 0.349 t ,总利用重量为 238.37 万 t ,单位体积(m^3)礁体混凝土的平均固碳量为 $4.03 \times 10^{-2} \text{ t}$,总固碳量为 27.54 万 t ,可清理的废弃贝壳落地堆积面积为 5.89 km^2 。当细扇贝壳的细骨料替换率为 70% 时,每立方米混凝土所利用扇贝壳的重量为 0.488 t ,总利用重量为 333.30 万 t ,单位体积(m^3)的礁体混凝土的平均固碳量为 $5.65 \times 10^{-2} \text{ t}$,总固碳量为 33.56 万 t ,可清理的废弃贝壳落地堆积面积为 8.24 km^2 。

3 讨论与分析

本研究中,塌落度是评价新拌扇贝壳混凝土工作性能的主要指标。本研究结果表明,新拌扇贝壳混凝土的工作性能随替代率的增加而降低。Bentz等(1999)研究表明,贝壳砂的吸水率大约是天然砂的 3.2 倍,是由贝壳表面的不规则性和其表面存在大量的气孔造成的,在制备混凝土的过程中,这些内部气孔吸收了水分,降低了混凝土的流动性,流动时的内应力

表 3 山东省常用礁型参数
Tab.3 Reef type parameters commonly used in Shandong Province

礁型 Reef type	空方体积 Empty the volume (m ³ ·空)	混凝土体积 Volume of concrete (m ³)	每空方混凝土体积 Volume of concrete per empty square meter (m ³)	每空方混凝土体积平均值 Average volume of concrete used per cubic meter (m ³)
圆管型 Circular tube type	0.196	0.070	0.357	
等边三角形型 Equilateral triangle type	5.716	2.781	0.487	
镂空方型 Hollow square type	0.256	0.069	0.270	0.334
中空立方体型 Hollow cube type	3.375	0.692	0.205	

表 4 利用 2016~2020 年山东省计划投礁量对扇贝壳作为骨料的人工鱼礁的效益预测
Tab.4 The evaluation ecological effects of scallop shells as aggregates on artificial reefs by using
the planned amount of reefs in Shandong Province from 2016 to 2020

替换率 Substitution rate (%)	每立方米混凝土 扇贝壳质量 Concrete scallop shell mass per cubic meter (t)	扇贝壳总利用质量 Total utilization mass of scallop shell (× 10 ⁴ t)	每立方米混凝土固碳量 Carbon sequestration per cubic meter of concrete (t)	总固碳量 Total amount of carbon sequestration (× 10 ⁴ t)	陆地堆积面积 Land accumulation area (km ²)
50	0.349	238.37	4.03×10 ⁻²	27.54	5.89
70	0.488	333.30	5.65×10 ⁻²	38.56	8.24

增加,从而影响了混凝土的和易性。扇贝壳作为骨料替代天然骨料后,使得粗、细骨料的总表面积增大,在水泥浆用量一定的情况下,骨料表面包裹的浆量减薄,润滑作用下降,使混凝土流动性降低(Adeyuyi *et al.*, 2008)。新拌扇贝壳混凝土的工作性能还受扇贝壳粒径大小的影响(Uchechi *et al.*, 2018)。通过对比可知,使用细扇贝壳替代的混凝土工作性能优于粗扇贝壳替代的混凝土,因为粗扇贝壳为粒径较大、形状不规则、程度高的薄片状,且表面粗糙的纹理比较多,增大了骨料之间的摩擦力,从而不利于混凝土的流动,而细扇贝壳粒径较小,且形状规则,与河砂能形成良好的级配,对混凝土的流动性影响小于粗骨料扇贝壳替代天然骨料。

混凝土的抗压强度影响因素有很多,诸如水胶比、水泥的强度、集料的优劣等(刘艳辉等, 2015)。用扇贝壳替代混凝土中的天然骨料,混凝土的抗压性能有所增加,说明扇贝壳具有一定的硬度,能够作为骨料起到支撑作用。用扇贝壳替代基准混凝土中的粗骨料时,由于粗扇贝壳呈粒径较大的片状且密度小于天然石,使得粗骨料的比表面积增大,需要更多的水泥来包裹粗骨料,否则就会离析,Nguyen 等(2013)研究表明,在实际生产中可适当提高水泥的使用量,来提高贝壳混凝土的抗压性能。当替代率 < 40%时,混凝土的各龄期抗压强度有所提高但差异不显著

($P>0.05$) (图 5), 当替代率 > 40%时, 混凝土 7、28 d 抗压强度显著下降($P<0.05$), 因此, 建议扇贝壳作为粗骨料时替代率不应超过 40%; 用细扇贝替代混凝土中的天然细骨料, 当替代率为 40%~60%时, 混凝土各龄期抗压强度较基准混凝土均有提高, 差异显著($P<0.05$) (图 6), 这是因为细扇贝壳形状规则且与天然砂形成良好的级配, 能更好地填充粗骨料之间的孔隙, 这与 Wang 等(2013)的研究结果相似。同时, 在制备细扇贝壳骨料时, 有大量的扇贝粉被保留了下来, 可以作为胶凝材料的一部分, 在用水量不变的前提下, 水胶比变小, 也使得混凝土的抗压强度增加。但当替代率 > 60%时, 由于细骨料的比表面积进一步增大, 没有足够水泥对其包裹, 所以, 抗压强度呈下降趋势。当替代率分别为 80%、100%时, 虽抗压强度较基准混凝土仍有一定的提高, 但差异不显著($P>0.05$)且工作性能非常差, 所以, 扇贝壳作为细骨料时的最佳替代率为 60%。

本研究以山东省为例, 对利用扇贝壳作替代部分天然骨料建造人工鱼礁的固碳潜能以及可清理的废弃贝壳堆积面积进行了估算, 估算出可实现礁体固碳量 27.54~38.56 万 t, 可减少废弃贝壳陆地堆积面积 5.89~8.24 km²。可见, 利用废弃贝壳作为骨料建造人工鱼礁, 无论是在解决废弃贝壳老化、分解污染环境 and 堆积占地等方面, 还是在提高人工鱼礁礁体

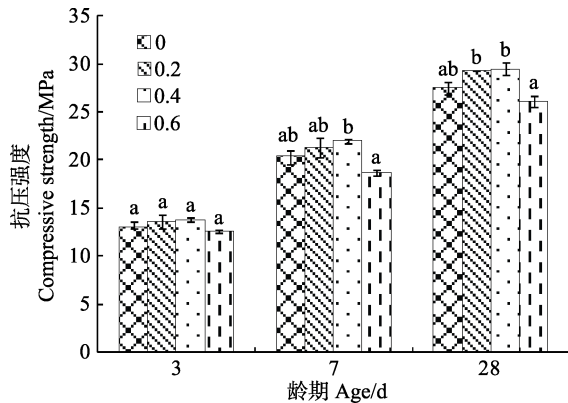


图5 各龄期粗扇贝壳不同替代率对抗压强度的影响

Fig.5 Effect of different replacement rates of coarse scallop on the compressive strength at different ages

图柱不同字母表示各龄期内差异显著, 下同
Significant difference at different ages are indicated by different letters above bars, the same as below

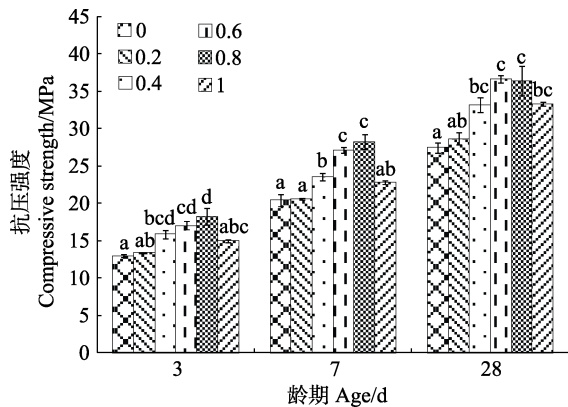


图6 各龄期细扇贝壳不同替代率对抗压强度的影响

Fig.6 Effect of different replacement rates of fine-shell on the compressive strength at different ages

固碳潜能方面作用都是巨大的。王莲莲等(2015)估算出利用 2012 年我国所产生的废弃贝壳可建造单体贝壳礁 338.9 万个, 可实现平均生态系统服务价值达 1653 万元/(km²·a), 可清理陆地废弃贝壳堆积面积 803.1 km²。李娇等(2016)通过将废弃扇贝以扇贝粉的形式添加到圆管型礁中, 估算出单位实验礁可实现最大固碳量为 260.33 kg。与以上 2 个研究不同的是本研究将扇贝壳以骨料的形式添加到人工鱼礁中, 满足了不同构型礁体的建设要求, 也丰富了建造人工鱼礁利用废弃贝壳的方式。

4 小结

本研究结果显示, 用海湾扇贝壳替换部分骨料的混凝土的抗压强度能够达到人工鱼礁建设标准(山东省质量技术监督局, 2014), 可用于人工鱼礁建设。随

着扇贝壳替换天然骨料的比例增加, 混凝土的拌合性降低, 但用细扇贝壳替代混凝土的塌落度下降速度低于粗扇贝壳替代, 工作性能相对于粗扇贝壳较好; 用粗扇贝壳替代混凝土中的天然石时, 扇贝壳混凝土的抗压性能与基准混凝土基本接近, 扇贝壳作为粗骨料的最佳替代率为 40%, 28 d 抗压强度较基准混凝土提高 7.3%。而用细扇贝壳替代天然砂时, 可使混凝土的抗压性能较基准混凝土提高很多, 最佳替代率为 60%, 28 d 抗压强度较基准混凝土提高 33.5%。由实验结果可以看出, 扇贝壳作为细骨料替代对混凝土强度的影响大于扇贝壳作为粗骨料替代。

山东省 2016~2020 年计划新建礁群 31 个, 新建人工鱼礁 2043 万空方。如果这些礁体均采用扇贝壳替代部分天然骨料的混凝土, 可实现礁体材料固碳量 27.54~38.56 万 t, 可减少废弃贝壳陆地堆积面积 5.89~8.24 km²。本研究验证了扇贝壳替代混凝土骨料的可行性, 为生态型人工鱼礁材料的开发提供了依据, 为通过将废弃扇贝壳添加到人工鱼礁中来实现对废弃物资源中 C 的封存提供了有效的方法。同时, 将扇贝壳以骨料的形式添加到人工鱼礁中实现了废物再利用, 降低了制礁成本, 减少了因开采天然骨料对环境造成的破坏, 既具有生态价值也有经济价值。

参 考 文 献

- Adeyuyi AP, Adegoké T. Exploratory study of periwinkle shells as coarse aggregates in concrete works. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2008, 3(6): 1-5
- Baine M. Artificial reefs: A review of their design, application, management and performance. *Ocean and Coastal Management*, 2001, 44(3): 241-259
- Behera M, Bhattacharyya SK, Minocha AK, *et al.* Recycled aggregate from C and D waste and its use in concrete—a breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 2014, 68: 501-516
- Bentz D, Psuyder KA. Protected paste volume in concrete extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate. *Cement and Concrete Research*, 1999, 2(11): 1863-1867
- Department of Oceanography and Fisheries of Shandong Province. Construction planning of artificial reef in Shandong Province. (2016-2020). *Shandong Fisheries*, 2014, 34(10): 1-7 [山东省海洋与渔业厅. 山东省海洋牧场建设规划(2016-2020). *齐鲁渔业*, 2014, 34(10): 1-7]
- Fisheries Bureau of the Ministry of Agriculture. Chinese fishery yearbook. Beijing: China Agricultural Press, 2018 [农业农村部渔业局. 中国渔业年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2018]
- Gong PH, Li J, Guan CT, *et al.* Estimation and experiment of carbon sequestration by oysters attached to the enhancement

- artificial reefs in Laizhou Bay. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(10): 3032–3038 [公丕海, 李娇, 关长涛, 等. 莱州湾增殖礁附着牡蛎的固碳量试验与估算. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 3032–3038]
- Li J, Gong PH, Guan CT, *et al.* Carbon sequestration of additives of artificial reefs and its effect on carbon fixation of *Ostrea plicatula* gmelin. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(6): 100–104 [李娇, 公丕海, 关长涛, 等. 人工鱼礁材料添加物碳封存能力及其对褶牡蛎(*Ostrea plicatula*)固碳量的影响. *渔业科学进展*, 2016, 37(6): 100–104]
- Li LL, Li XY, Su XW, *et al.* High strength artificial reef concrete with steel slag. *Metal Mine*, 2012, 41(3): 158–162 [李琳琳, 李晓阳, 苏兴文, 等. 钢渣制备高强度人工鱼礁混凝土. *金属矿山*, 2012, 41(3): 158–162]
- Liu YH. Factors analysis of concrete compressive strength. *Journal of Hunan City University(Natural Science)*, 2015, 24(3): 39–40 [刘艳辉. 混凝土抗压强度的影响因素研究. *湖南城市学院学报(自然科学版)*, 2015, 24(3): 39–40]
- Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. *Standards for Testing and Assessing Concrete Strength (GB50107-2010)*. Beijing: China Construction Industry Press, 2010 [中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. *混凝土强度检验评定标准(GB50107-2010)*. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010]
- Nguyen DH, Sebaibi N, Boutouil M, *et al.* The use of seashell by-products in pervious concrete pavers. *Engineering and Technology International Journal of Civil*, 2013, 7(11): 850–857
- Prusty JK, Patro SK. Properties of fresh and hardened concrete using agrowaste as partial replacement of coarse aggregate—a review. *Construction and Building Materials*, 2015, 82(6): 101–113
- Shandong Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision. *Artificial reef construction technical specifications*, 2014 [山东省质量技术监督局. *人工鱼礁家设计书规范*, 2014]
- Shen XQ, Quan WM, Yuan Q. Restoration and assessment of carbon sink potential for aintertidal oyster reef in the Yangtze River estuary, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2119–2123 [沈新强, 全为民, 袁琪. 长江口牡蛎礁恢复及碳汇潜力评估. *农业环境科学学报*, 2011, 30(10): 2119–2123]
- Shi CJ, Meyer C, Behnood A. Utilization of copper slag in cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, 52(10): 1115–1120
- Uchechi G, Eziefula, John C, *et al.* Properties of seashell aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 2018, 192(3): 287–300
- Wang HR, Wu MY, Ma KW, *et al.* Technology of culturing sea cucumber with scallop shell bagged reef. *Shandong Fisheries*, 2006, 23(12): 26 [王洪瑞, 吴明月, 马克武, 等. 扇贝壳装袋筑礁养殖刺参技术. *齐鲁渔业*, 2006, 23(12): 26]
- Wang HY, Kuo WT, Lin C, *et al.* Study of the material properties of fly ash added to oyster cement mortar. *Construction and Building Materials*, 2013, 41(1): 532–537
- Wang LL, Chen PM, Chen Y, *et al.* A review: Research progress of construction and ecological effects of artificial shell reef. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2015, 30(4): 449–454 [王莲莲, 陈丕茂, 陈勇, 等. 贝壳礁构建和生态效应研究进展. *大连海洋大学学报*, 2015, 30(4): 449–454]
- Yu M, Ni W, Chen Y, *et al.* Study on making artificial reef material from Qidashan iron tailings. *Metal Mine*, 2012, 41(11): 163–166 [于淼, 倪文, 陈勇, 等. 齐大山铁尾矿制作人工鱼礁材料的研究. *金属矿山*, 2012, 41(11): 163–166]
- Zheng YX. Flow field effect and physical stability of artificial reefs. Master's Thesis of Ocean University of China, 2014 [郑延璇. *人工鱼礁流场效应与物理稳定性研究*. 中国海洋大学硕士研究生学位论文, 2014]
- Zheng YX, Liang ZL, Guan CT, *et al.* Structure design and stability of the equilateral triangle artificial reef. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 35(3): 117–125 [郑延璇, 梁振林, 关长涛, 等. 等边三角型人工鱼礁礁体结构设计及其稳定性. *渔业科学进展*, 2014, 35(3): 117–125]
- Zhou YB, Cai WG, Chen HG, *et al.* Attractive effect of combination of artificial reef models on young *Lutjanus argentimaculatus* in experimental tank. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2012, 31(2): 231–237 [周艳波, 蔡文贵, 陈海刚, 等. 试验水槽中多种人工鱼礁模型组合对紫红笛鲷幼鱼的诱集效果. *台湾海峡*, 2012, 31(2): 231–237]
- Zhu XC, Cui SQ, Dai HL, *et al.* Research on the coal-waste artificial fishing reef I: Formation, technology and leaching test in seawater. *Marine Science Bulletin*, 1987, 6(4): 58–65 [朱燮昌, 崔淑琴, 戴洪亮, 等. 用粉煤灰制作人工鱼礁的研究 I: 粉煤灰人工鱼礁礁块的配比、工艺及海水浸泡溶出试验. *海洋通报*, 1987, 6(4): 58–65]

Influence of Different Replacement Rates of *Argopecten irradians* Aggregate on Physical Properties of Artificial Reefs and Carbon Sequestration

SHI Baibai^{1,3}, GONG Pihai^{2,3}, GUAN Changtao^{2,3}, ZHAO Rongrong^{3,4}, LI Jiao^{2,3①}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 2. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071; 3. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao Key Laboratory for Marine Fish Breeding and Biotechnology, Qingdao 266071; 4. College of National Marine Facilities Culture Engineering Technology Research Center, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000)

Abstract This research was conducted based on the mix ratio of ordinary concrete with compressive strength of C25, with the aim to use scallop shells to partly replace coarse and fine aggregates in concrete. Experiments were conducted on the mix ratio of scallop shell concrete, and the working performance and basic mechanical properties of coarse and fine scallop shells instead of natural aggregate concrete was compared. According to the reef plan of Shandong Province from 2016 to 2020, the carbon sequestration potential of the natural aggregate in the artificial reef concrete replaced by the scallop shells and the accumulation area of the cleanable waste scallop shells could be estimated. The results showed that as the proportion of scallop shells replacing natural aggregate increases, the collapse of concrete tends to decrease, and the slump of natural coarse aggregate concrete replaced by coarse scallop shells is larger than that of natural fine aggregate concrete replaced by fine scallop shells. When scallop shells replaced natural stone in concrete, the compressive performance of scallop shell concrete was similar to that of the base concrete. The optimum replacement rate of scallop shells as coarse aggregate was 40%, and the 28-day compressive strength of scallop shell concrete was 7.3% higher than that of the reference concrete. When the natural fine aggregate in concrete was replaced by scallop shells, the compressive performance of concrete was greatly improved relative to that of the reference concrete. The best replacement rate was 60%, and the 28-day compressive strength of scallop shell concrete was 33.5% higher than that of the reference concrete. Estimation replacement rate of fine aggregate with scallop shells for concrete was 50%~70%. For example, 20.43 million empty artificial reefs planned for 2016~2020 in Shandong Province are all made of this kind of concrete, reef materials can achieve carbon sequestration of 275.4~385.6 thousand tons and reduce the land accumulation area of abandoned shells by 5.89~8.24 square kilometers, which has high ecological value.

Key words Artificial reef; Bay scallop shell; Compressive strength; Slump; Carbon sequestration potential

① Corresponding author: LI Jiao, E-mail: lijiao@ysfri.ac.cn