

新型活性矿物海水海砂珊瑚混凝土 制备与性能研究

王超¹, 孙丽¹, 沙鑫², 张春巍³, 乔丕忠¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 华能国际电力股份有限公司营口电厂, 辽宁 营口 115007; 3. 沈阳工业大学建筑与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要 目的 选择以海砂和珊瑚作为骨料, 海水作为拌合水, 采用先预湿珊瑚, 再与水泥砂浆拌合的方法, 制备一种新型活性矿物海水海砂珊瑚混凝土 (Mineral Sea Rock Concrete, MSRC), 解决建筑工程中砂石短缺等问题。方法 通过坍落度和抗压强度试验, 分别分析净水灰比、骨料含水率和砂率对 MSRC 的和易性与抗压强度的影响。结果 砂率在 45%~58% 内, 坍落度随着砂率的增大而增大; 砂率在 58%~60% 内, 坍落度随着砂率的增大而减小; 骨料含水率为 12% 时, 混凝土拌合物和易性最优, 立方体抗压强度最高; 净水灰比为 0.43、砂率为 47%, 骨料含水率 12% 的立方体抗压强度比骨料含水率 9% 和 15% 分别高 3.9% 和 10.6%; 强度等级相同时, 随着砂率的增大, 立方体抗压强度先增大后减小; 对于强度等级为 MSRC20、MSRC25 和 MSRC30 的混凝土配合比, 净水灰比分别为 0.43、0.41 和 0.30 时, 立方体抗压强度取得最大值; MSRC 前期抗压强度发展较快, 超过 15d 时, 抗压强度增长速度逐渐缓慢; 基于试验结果, 提出了立方体抗压强度计算公式, 通过试验结果及公式计算结果对比可得, 提出的计算公式与试验结果吻合良好。结论 笔者制备的 MSRC 具有良好的和易性与力学性能, 研究成果可以为 MSRC 的配合比设计和工程应用提供重要依据。

关键词 活性矿物海砂珊瑚混凝土; 抗压强度; 净水灰比; 砂率; 珊瑚骨料含水率

中图分类号 TU528

文献标志码 A

引用格式: 王超, 孙丽, 沙鑫, 等. 新型活性矿物海水海砂珊瑚混凝土制备与性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(6): 1068-1078. (WANG Chao, SUN Li, SHA Xin, et al. Preparation and performance study of novel mineral searock concrete[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(6): 1068-1078.)

Preparation and Performance Study of Novel Mineral Sea Rock Concrete

WANG Chao¹, SUN Li¹, SHA Xin², ZHANG Chunwei³, QIAO Pizhong¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Yingkou Power Plant of

收稿日期: 2023-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378253, 52078310)

作者简介: 王超(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事装配式复材海砂珊瑚混凝土等方面研究。

Hua'eng International Power Co. Ltd., Yingkou, China, 115007; 3. School of Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, China, 110870)

Abstract: In order to solve the shortage of fresh water, river sand and gravel in marine engineering, Mineral Sea Rock Concrete (MSRC) was prepared using sea sand and coral as aggregate and seawater as mixing water, and pre-wetting the coral first, and then mixing it with cement mortar. The effects of net water-cement ratio, aggregate water content and sand rate on the compatibility and compressive strength of MSRC were analyzed by slump and compressive strength tests, respectively. The results showed that the slump increased with increasing sand ratio in the interval of 45% ~ 58%, and decreased with increasing sand ratio in the interval of 58% ~ 60%. When the water content of coral aggregate is 12%, the mixed concrete has the best workability and the highest cube compressive strength. The cube compressive strength with a net water-cement ratio of 0.43, a sand rate of 47%, and an aggregate moisture content of 12% is 3.9% and 10.6% higher than that of aggregates with a moisture content of 9% and 15%, respectively. When the strength grades are the same, the cube compressive strength increases first and then decreases as the sand ratio increases. For the mix proportions with strength grades of MSRC20, MSRC25 and MSRC30, the maximum cube compressive strength was achieved when the net water-cement ratio at 0.43, 0.41 and 0.30, respectively. The compressive strength of MSRC develops rapidly in the early stage, and the growth rate gradually slows down after 15 d. Based on the test results, the formula for calculating the cube compressive strength of MSRC is proposed, and the comparison of the test results and the formula calculation results shows that the proposed formula matches well with the test results. The MSRC prepared by the author has good workability and mechanical properties. The research results can provide important basis for the mix proportions design and engineering application of MSRC.

Key words: mineral sea rock concrete; compressive strength; net water-cement ratio; sand ratio; water content of coral aggregate

随着我国经济的发展,越来越多的海岸以及岛礁建筑物的修建,导致对砂石和淡水的需求量不断增大^[1-5]。然而,海岸以及岛礁上缺乏拌制混凝土的砂石和淡水,使用大型船舶从内陆运输这些材料时,会大幅增加建设成本。因此,在海洋上进行工程建设时,使用海洋现有资源制备出适应于海洋工程使用的混凝土是很有必要的。

我国海洋资源丰富,使用海砂和珊瑚作为骨料、海水作为拌合水,可以解决工程建设成本过高等问题。苏晨等^[6]研究了不同珊瑚骨料对混凝土力学性能的影响,研究表明,相同条件下,鹿角状珊瑚混凝土强度大于重质和轻质珊瑚混凝土强度。J. Z. Xiao等^[7]对比了湿珊瑚骨料和自然干燥珊瑚骨料对抗压强度的影响,发现湿珊瑚骨料混凝土的抗压强度低于自然干燥骨料混凝土的抗压强度。余红发

等^[8]对珊瑚混凝土力学性能进行研究,结果表明,相同强度等级的珊瑚混凝土比普通混凝土和轻骨料混凝土脆性更强,且随着珊瑚混凝土强度的增大而逐渐增强^[9-10]。L. L. Zhou等^[11]通过试验发现随着珊瑚骨料含量的增加,海砂混凝土的强度先增大后减小,预湿的珊瑚骨料还可以提高海砂珊瑚混凝土的水化程度,使骨料与水泥界面过渡区结合更密实。B. Liu等^[12]和孙丽等^[13]研究发现,在混凝土中掺加纤维可以提高混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度,但对泊松比和弹性模量影响较小。此外,珊瑚骨料和海水中含有大量的腐蚀性离子,使用其制备的混凝土中含有大量的氯离子,同时,氯离子在珊瑚混凝土中的扩散速率为普通混凝土骨料的2倍以上^[14-15]。H. F. Yu等^[16]对珊瑚混凝土结构耐久性进行了研究,研究表明,珊瑚混凝土强度等级较低时,

腐蚀性离子对珊瑚混凝土结构耐久性影响较大。相关研究表明,活性矿物掺合料也是珊瑚混凝土力学性能和耐久性能的重要影响因素, S. K. Cheng 等^[17]和 A. A. Ramezani-pour 等^[18]研究了活性矿物珊瑚混凝土的力学性能,发现珊瑚混凝土具有更快的早期强度,且活性矿物可以改变珊瑚混凝土的微观结构,使其具有良好的耐久性能。L. H. Yu 等^[19]和 Q. L. Qing 等^[20]研究活性矿物对混凝土力学性能的影响,证明活性矿物可以显著降低水泥的水化热和孔隙率,有助于提高混凝土的耐久性和强度。但是,随着矿物掺合料用量的增加,混凝土的收缩率也随之增大^[21]。B. Zhang 等^[22-23]研究了矿渣碱基活性材料对珊瑚混凝土力学性能和耐久性的影响,结果表明,矿渣碱基活性材料珊瑚混凝土的破坏特征与普通珊瑚混凝土相同,都是裂缝贯穿骨料后,试件被压碎为两块或者多块,但矿渣碱基活性材料珊瑚混凝土具有更宽的界面过渡区,在相同强度下,比普通珊瑚混凝土有更好的延展性和耐久性。武永焱等^[24]研究了不同的粉煤灰/矿渣比和海砂的替换对海砂混凝土力学性能的

影响,发现混凝土抗压强度随着矿渣掺量的增加而增加,海砂对混凝土抗压强度没有影响,同时,在珊瑚混凝土中参加减水剂可以提高混凝土强度,改善珊瑚混凝土拌合物和易性^[25]。

目前,国内外专家对海砂和珊瑚混凝土已有一些研究,但对海水海砂珊瑚混凝土的制备和性能研究还较少。为了更好地利用海水、海砂和珊瑚替代传统的建设工程材料,笔者共设计112个立方体抗压强度试件,用以研究净水灰比、砂率,骨料含水率对混凝土拌合物的和易性和立方体抗压强度的影响,以期为建筑结构和工程应用提供重要的科学依据。

1 试验设计

1.1 试验材料

水泥采用沈阳正达水泥厂生产的P·F32.5级粉煤灰水泥,各项物理性能及矿物组成如表1、表2所示,性能符合《通用硅酸盐水泥》(GB175—2007)的规定。珊瑚骨料取自南海,类型为树枝状、未风化的珊瑚,形状如图1所示。珊瑚骨料的主要成分为碳酸钙(CaCO_3),堆积密度为 950 kg/m^3 ,表观密度

表1 水泥的主要参数

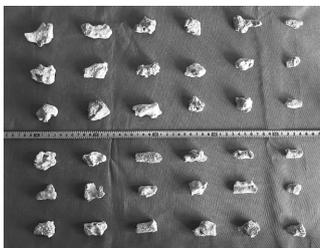
Table 1 The main parameters of cement

水泥型号	细度/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	初凝时间/min	终凝时间/min	标准稠度用水量/%	烧失量/%
P·F32.5	4130	185	209	25.9	3.0

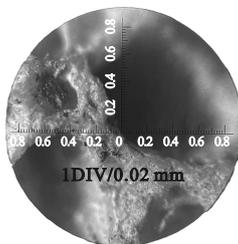
表2 水泥的主要矿物组成

Table 2 The main mineral composition of cement

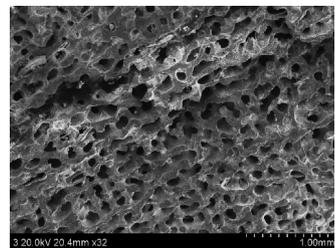
水泥型号	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{C}_3\text{S})$	$w(\text{C}_2\text{S})$	$w(\text{C}_3\text{A})$	$w(\text{C}_4\text{AF})$
P·F32.5	3	9	1.2	38.5	13.3	5.6	7



(a)珊瑚粗骨料



(b)珊瑚外部孔隙



(c)珊瑚内部孔隙

图1 珊瑚骨料

Fig. 1 The coral aggregates

为 2 000 kg/m³, 孔隙率为 51.5%, 1 小时吸水率为 15%, 性能符合《轻集料及其试验方法》(GB/T17431.1) 第 1 部分: 轻集料的规定。海砂骨料为南海天然海砂(见图 2), 海砂的特性如表 3 所示, 符合《建筑用砂》(GB/T14684—2011) 的规定。海砂和珊瑚的级配曲线如图 3 所示。减水剂选择山东省莱阳市宏祥建筑外加剂公司生产的聚羧酸减水剂, 其减水率为 20%。海水按照南海海水

实际情况进行配制。

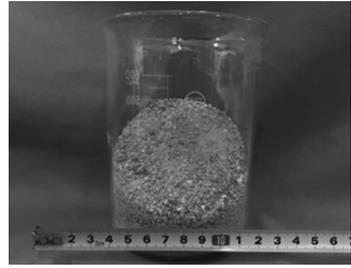


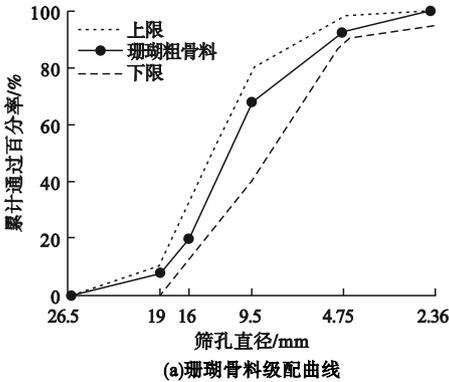
图 2 海砂

Fig. 2 The sea sand

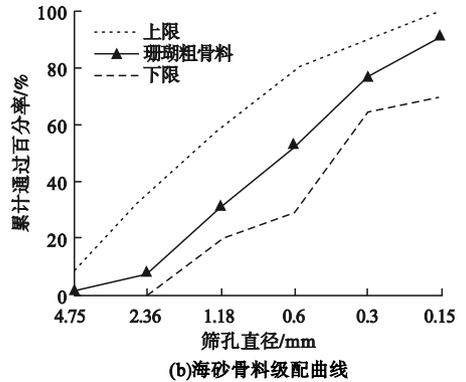
表 3 海砂的基本物理性能

Table 3 The basic physical properties of sea sand

海砂直径/mm	试验前质量/g	试验后质量/g	损失百分率/%	精确至 1% 的损失百分率/%
2.36 ~ 4.75	100	97.7	2.3	2
1.25 ~ 2.36	100	98.0	2.0	2
0.63 ~ 1.25	100	98.3	1.7	2
0.315 ~ 0.63	100	98.3	1.7	2



(a)珊瑚骨料级配曲线



(b)海砂骨料级配曲线

图 3 骨料级配曲线

Fig. 3 The grading curves of aggregates

1.2 混凝土配合比设计

依据《轻骨料混凝土应用技术标准》(JGJ/T12—2019) 松散体积法进行配合比设计。考虑体积砂率、净水灰比和珊瑚骨料含水率对混凝土强度的影响, 确定 MSRC 配合比, 试件参数如表 4 所示。

1.3 MSRC 试件制备过程

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2019) 的规定, 设计 112 个宽 × 高 × 厚为 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体试件, 进行混凝土立方体抗压试验, 用于确定 MSRC 配合比。MSRC 拌制过程主要分为 5 个步骤: 1) 分别用海水浸

表 4 正交因素水平

Table 4 Factor level of orthogonal design

试件分组	砂率/%	净水灰比	珊瑚骨料含水率/%
MSRC20 - A - B - C	45	0.43	9
	47	0.46	12
	50	0.49	15
MSRC25 - A - B - C	50	0.36	9
	52	0.39	12
	55	0.41	15
MSRC30 - A - B - C	55	0.24	9
	58	0.27	12
	60	0.30	15

注: 试件编号分为四个部分, 第一部分表示混凝土强度, 第二部分 A 表示砂率, 第三部分 B 表示净水灰比, 第四部分 C 表示珊瑚骨料含水率。

泡珊瑚 6 min、9 min 和 60 min,使珊瑚骨料的含水率分别达到 9%、12% 和 15%;2) 将粉煤灰水泥、海砂、海水、减水剂进行搅拌,将拌合物拌合均匀;3) 加入珊瑚进行拌合,将拌合物拌合均匀后,依据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080—2016)规定,测定混凝土拌合物的坍落度;4) 装入模具放到振动台振动密实;5) 送入养护室养护。将试件分别标准养护 3 d、5 d、7 d、14 d、21 d、28 d 后,从养护室取出进行抗压强度试验。试验加载设备为沈阳建筑大学 HYE-2000 型压力机,如图 4 所示。

在试验过程中,连续而均匀地加载,加载速率为 0.3~0.5 MPa/s,当试件接近破坏而开始迅速变形时,停止加载,记录破坏荷载 F 。MSRC 立方体抗压强度根据式(1)进行计算:

$$f_c = \frac{F}{A}. \quad (1)$$

表 5 MSRC 抗压强度试验值

Table 5 The test values of MSRC compressive strength

试件分组	砂率/%	净水灰比	珊瑚骨料含水率/%	减水剂质量/kg	28 d 抗压强度/MPa	坍落度/mm
MSRC20-47%-0.43-12%	47	0.43	12	0.814	24.48	121
MSRC20-47%-0.46-12%	47	0.46	12	0.814	24.03	146
MSRC20-47%-0.49-12%	47	0.49	12	0.814	22.15	151
MSRC25-52%-0.36-12%	52	0.36	12	0.887	28.22	146
MSRC25-52%-0.36-12%	52	0.39	12	0.887	27.66	178
MSRC25-52%-0.36-12%	52	0.41	12	0.887	29.13	182
MSRC30-52%-0.36-12%	52	0.24	12	1.190	33.05	112
MSRC30-52%-0.36-12%	52	0.27	12	1.190	32.19	146
MSRC30-52%-0.36-12%	52	0.30	12	1.190	33.42	159
MSRC20-45%-0.43-12%	45	0.43	12	0.814	22.42	161
MSRC20-47%-0.43-12%	47	0.43	12	0.814	24.48	185
MSRC20-50%-0.43-12%	50	0.43	12	0.814	23.56	202
MSRC25-50%-0.41-12%	50	0.41	12	0.887	27.18	164
MSRC25-52%-0.41-12%	52	0.41	12	0.887	29.13	172
MSRC25-55%-0.41-12%	55	0.41	12	0.887	28.45	185
MSRC30-55%-0.30-12%	55	0.30	12	1.190	32.24	156
MSRC30-58%-0.30-12%	58	0.30	12	1.190	33.42	185
MSRC30-60%-0.30-12%	60	0.30	12	1.190	31.29	203
MSRC20-47%-0.43-9%	47	0.43	9	0.814	23.55	151
MSRC20-47%-0.43-12%	47	0.43	12	0.814	24.48	172
MSRC20-47%-0.43-15%	47	0.43	15	0.814	22.14	168
MSRC25-52%-0.41-9%	52	0.41	9	0.887	28.88	145
MSRC25-52%-0.41-12%	52	0.41	12	0.887	29.13	165
MSRC25-52%-0.41-15%	52	0.41	15	0.887	27.22	172
MSRC30-58%-0.30-9%	58	0.30	9	1.190	31.46	143
MSRC30-58%-0.30-12%	58	0.30	12	1.190	33.42	172
MSRC30-58%-0.30-15%	58	0.30	15	1.190	33.22	201



图 4 电液伺服加载压力机

Fig. 4 The electro-hydraulic servo loading press machine. f_c is the compressive strength of concrete cubic specimen, MPa; F is the failure load, N; A is the bearing area, mm^2 .

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏模式与机理分析

试验结果如表 5 所示。

MSRC 破坏形态分为两种,一种为倒锥状破坏形态,如图 5(a)所示;另一种是立方体试件被压碎为局部劈裂破坏形态,如图 5(b)所示。

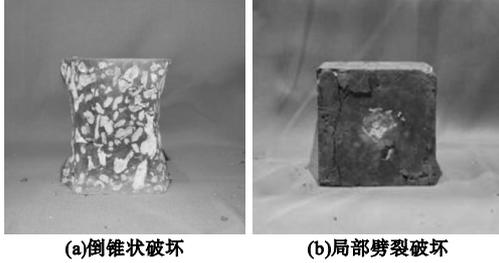


图 5 MSRC 试件的破坏形态

Fig. 5 The damage patterns of MSRC specimens

MSRC 的破坏形态主要受净水灰比的影响,当净水灰比在 0.24 ~ 0.43 内,水泥砂浆的强度高于珊瑚骨料的强度,试件在发生破坏时,裂缝贯穿珊瑚,形状为倒锥状,呈现出明显的脆性性质;当净水灰比在 0.43 ~ 0.49 内,水泥砂浆的强度较低,骨料强度高于水泥 - 骨料界面强度,在施加作用荷载后,在骨

料界面首先产生裂缝,随着荷载的增大,微小的裂缝不断发展并逐渐汇集、相互连接时,混凝土承载力降低,最终试块发生局部批裂破坏。

2.2 MSRC 和易性影响分析

通过坍落度试验研究砂率对 MSRC 拌合物坍落度的影响,结果如图 6 所示。由图 6 可知,当 MSRC 强度等级为 C20 和 C25 时,混凝土拌合物坍落度随着砂率的增大而增大,强度等级为 C30 时,随着砂率的增大,混凝土拌合物坍落度先增大后减小。砂率为 45%、47% 和 50% 的 MSRC 拌合物坍落度分别为 121 mm、146 mm 和 151 mm;砂率分别为 55%、58% 和 60% 的 MSRC 拌合物坍落度分别为 151 mm、172 mm 和 168 mm。这主要是由于在拌合混凝土时,细骨料可以减小粗骨料之间的摩擦,增大混凝土拌合物的坍落度,随着砂率的增大,细骨料的比表面积增大,需要更多的水泥浆对其包裹,使混凝土拌合物的黏度增加,坍落度减小。

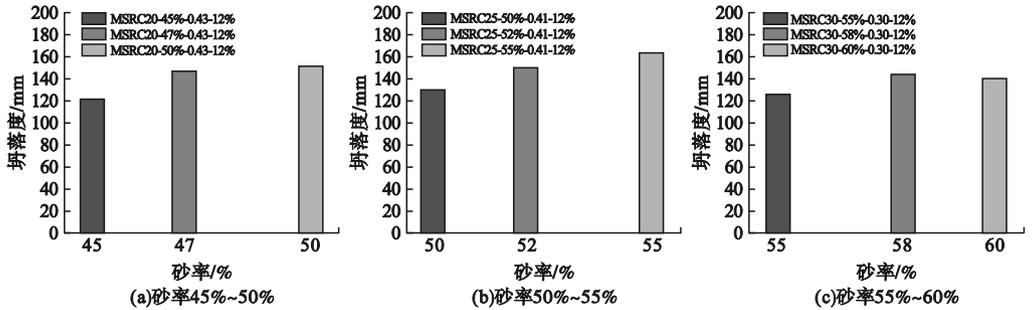


图 6 砂率对 MSRC 坍落度的影响

Fig. 6 The influence of sand rate on MSRC slump

通过坍落度试验研究净水灰比对 MSRC 拌合物坍落度影响,结果如图 7 所示。

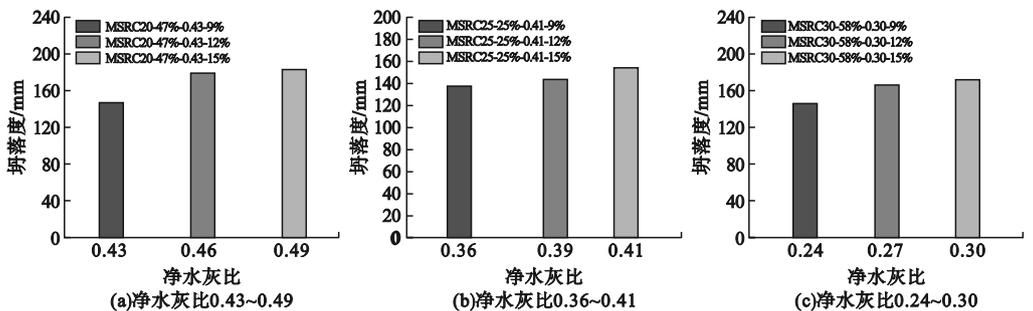


图 7 净水灰比对 MSRC 坍落度的影响

Fig. 7 The influence of net water-cement ratio on MSRC slump

由图7可知,MSRC拌合物坍落度随着净水灰比的增大而增大。当MSRC强度等级为C20时,净水灰比由0.43增加到0.46和0.49,混凝土拌合物坍落度增大了22%和25%。主要是胶凝材料的用量一定时,随着拌合水用量的增加,水泥浆与骨料之间的黏聚性变小,从而拌合物的坍落度增大。

2.3 MSRC立方体抗压强度影响因素分析

2.3.1 砂率

通过立方体抗压强度试验研究砂率对MSRC立方体抗压强度影响,结果如图8所示。由图8可知,随着砂率的增大,MSRC的抗压强度先增大后减小。当MSRC强度等

级为C30时,砂率为55%、58%和60%的抗压强度分别为32.24 MPa、33.42 MPa和31.29 MPa。砂率为58%的立方体抗压强度分别比砂率为55%和60%的立方体抗压强度分别提高3.7%和6.8%。主要原因是当砂率减小时,细骨料的填充性降低,同时减小了混凝土骨料的比表面积,所以混凝土拌合物的和易性较差,强度降低;当砂率增大时,会增加骨料的比表面积,这样会需要更多的水泥浆体包裹骨料,会使混凝土的坍落度减小,所以在用水量和水泥用量一定的情况下,选择合理的砂率可以保证MSRC具有较高的强度,同时又具有较好的和易性。

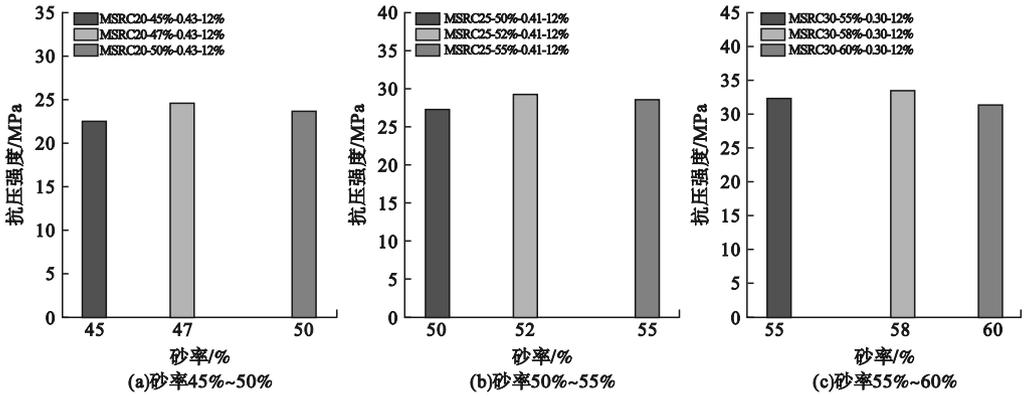


图8 砂率对MRSC的抗压强度影响

Fig. 8 The influence of sand ratio on compressive strength

2.3.2 珊瑚骨料含水率

通过立方体抗压强度试验研究珊瑚骨料

含水率对MSRC抗压强度的影响,结果如图9所示。

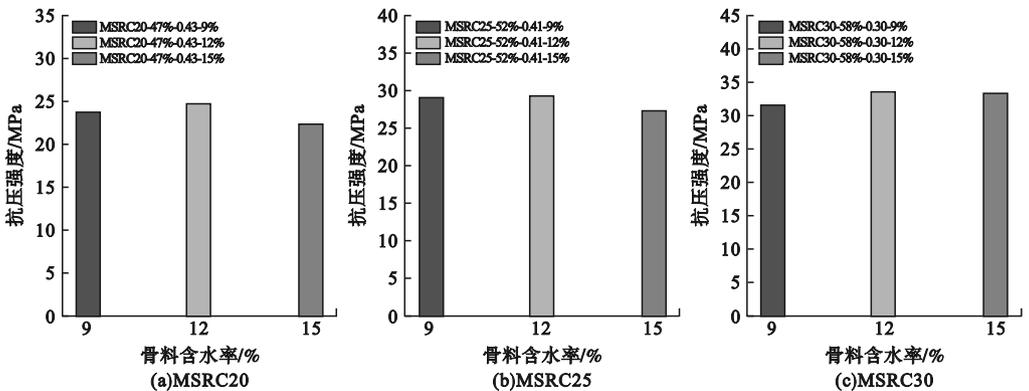


图9 珊瑚骨料含水率对抗压强度的影响

Fig. 9 The influence of water content of coral aggregate on compressive strength

由图9可知,不同强度等级的海洋混凝土,均在珊瑚骨料含水率为12%时,立方体

抗压强度取得最大值。这是由于珊瑚骨料的饱和含水率在15%左右,当骨料达到含水饱和状态时,由于水与珊瑚的吸附性较强,在拌合过程中会引入额外的水,从而增加水灰比,使混凝土强度降低;珊瑚的含水率9%时,在拌合过程中,珊瑚会吸收水泥砂浆中的水,使混凝土拌合物的流动性变差,导致混凝土的强度降低;珊瑚的含水率12%时,混凝土的拌合物流动性较好,易于捣实、成型,在拌合过程中不产生分层、离析。混凝土凝结硬化过程中,珊瑚内部孔隙较多,水泥砂浆会进入孔隙内部,使珊瑚骨料的强度增加。同时,骨料与水泥基体界面过渡区的水灰比减小,所以混凝土的强度提高。

2.3.3 净水灰比

通过立方体抗压强度试验研究净水灰比对MSRC抗压强度的影响,结果如图10所示。

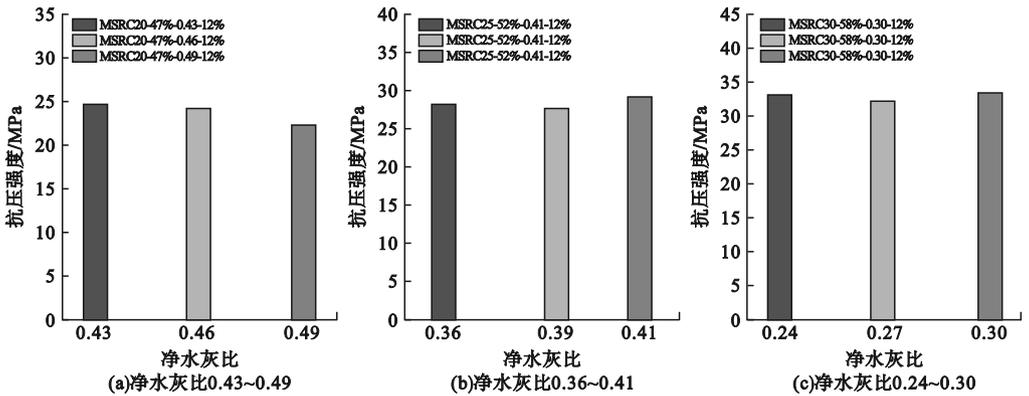


图10 净水灰比对抗压强度的影响

Fig. 10 The influence of net water-cement ratio on compressive strength

2.3.4 不同龄期下MSRC的抗压强度

养护龄期为3 d、5 d、7 d、14 d、21 d和28 d的MSRC立方体抗压强度试验结果如图11所示。MSRC的抗压强度早期发展较快,后期较为缓慢。3d时的混凝土强度可以达到28d时强度的40%,5d时可以达到28d时强度的66%以上,14d时可以达到28d时强度的90%以上,21d时可以达到28d时强度的95%以上,后期的强度增长幅度较小。

由图可知,对于强度等级为C30的MSRC,净水灰比为0.24、0.27和0.30的立方体抗压强度值分别为33.05 MPa、32.19 MPa和33.42 MPa。当净水灰比从0.30降低到0.27和0.24时,立方体抗压强度分别降低3.7%和1.1%。对于强度等级为C25的MSRC,净水灰比为0.36、0.39和0.41的立方体抗压强度分别为28.22 MPa、27.66 MPa和29.13 MPa。当净水灰比从0.41降低到0.39和0.36时,立方体抗压强度分别降低5.1%和3.1%。主要原因是净水灰比较小时,混凝土拌合物的和易性较差,试件内部孔隙较多,使混凝土强度降低,增大净水灰比,能够改善混凝土和易性,提高混凝土强度;净水灰比在0.43~0.49内,混凝土拌合物和易性较好,减小净水灰比,水泥砂浆的强度增大,混凝土的抗压强度明显提高。

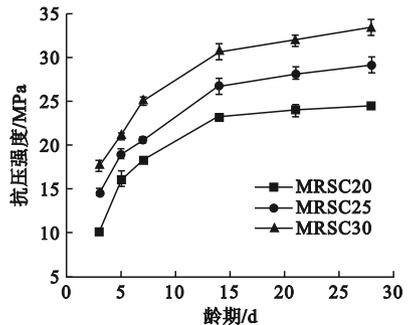


图11 不同龄期MSRC的抗压强度曲线
Fig. 11 The compressive strength curves of MSRC at different ages

2.3.5 试验数据分析

珊瑚骨料含水率的关系如图 12 所示。

MSRC 的抗压强度与净水灰比、砂率和

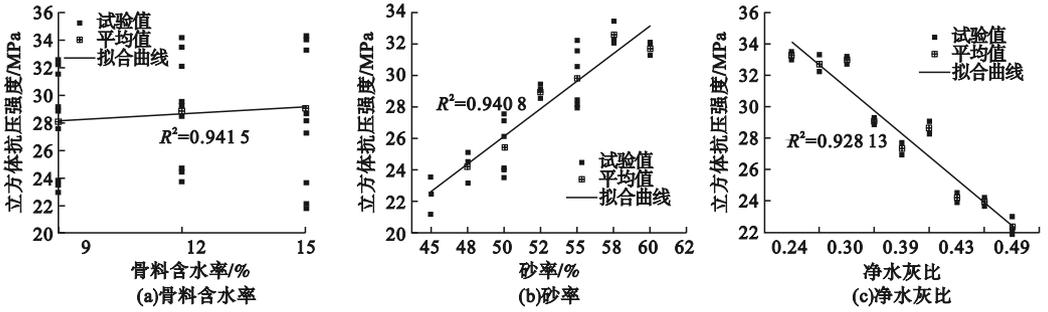


图 12 各因素对 MSRC 抗压强度的影响

Fig. 12 The influence of various factors on the compressive strength of MSRC

图 12(a) 可知,在骨料含水率在 9% ~ 15% 变化范围内,珊瑚骨料含水率几乎不影响 MSRC 抗压强度,但影响混凝土拌合物坍落度及和易性。由图 12(b) 和图 12(c) 可知,砂率的变化范围为 45% ~ 60%,净水灰比的变化范围为 0.30 ~ 0.49。在相同变化幅度内,净水灰比对抗压强度影响显著。此外,MSRC 抗压强度随着净水灰比的增大而减小,随着砂率的增大而增大。笔者基于试验数据进行多元拟合,以获得抗压强度与各因素的关系。通过拟合形成回归曲线对变量进行相关分析,得到如下公式:

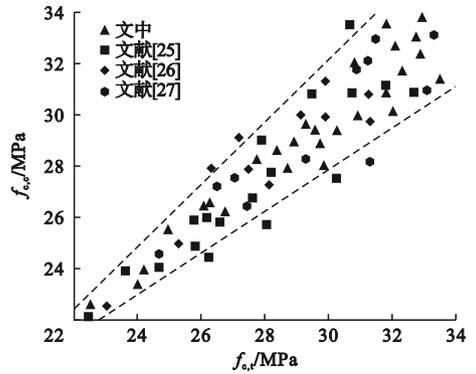


图 13 计算结果与试验结果比较

Fig. 13 Comparison between calculation and test results

$$f_c = (2.12S_p - 0.35) \times (-2.06 \frac{W}{C} + 0.88). \quad (2)$$

式中: f_c 为立方体抗压强度; S_p 为砂率; W/C 为净水灰比。结合文中试验结果与文献 [26-28] 的试验结果,验证提出计算公式的准确性。将式(2)计算结果 $f_{c,c}$ 与试验结果 $f_{c,t}$ 进行对比(见图 13)。

由图 13 可知,计算结果与试验值之比的平均值为 1.045,标准差为 0.097,表明计算值与试验数据吻合良好。所以,式(2)能够较好地预测 MSRC 的抗压强度,可用于后续 MSRC 力学性能的相关研究。表 9 总结了不同强度等级 MSRC 的优化配合比设计。

表 9 活性矿物海水海砂珊瑚混凝土最优配合比

Table 9 The optimal mix proportions of MSRC

MSRC 强度等级	配合比/kg					28 d 抗压强度/MPa
	水泥	海砂	珊瑚骨料	净用水量	减水剂	
C20	400	733	643	174	0.814	24.48
C25	440	811	582	182	0.887	29.13
C30	550	904	509	154	1.190	33.42

3 结 论

(1) 净水灰比在 0.43 ~ 0.49 内, MSRC 的立方体抗压强度随着净水灰比降低而增加。当净水灰比在 0.27 ~ 0.41 内, 混凝土拌合物的抗压强度随着净水灰比的增大而增大。珊瑚骨料含水率为 12% 时, 混凝土拌合物和易性最好, 且立方体抗压强度最高。对于强度等级为 C20、C25 和 C30 的 MSRC, 砂率分别为 47%、52% 和 58% 时, 抗压强度达到最大值。

(2) MSRC 试件的破坏形态受净水灰比影响较大。净水灰比在 0.24 ~ 0.41 内, 混凝土的破坏形态为倒锥状; 净水灰在 0.43 ~ 0.49 内, 混凝土试件为局部劈裂破坏。

(3) MSRC 立方体抗压强度前期发展较快, 5 d 可以达到 28 d 抗压强度的 66% 以上, 后期强度发展较慢, 21 d 的混凝土强度可以达到 28 d 抗压强度 95% 以上。

(4) 考虑净水灰比和砂率对 MSRC 立方体抗压强度的影响, 提出了 MSRC 立方体抗压强度计算公式, 计算结果与试验结果吻合较好, 可以用于计算 MSRC 的立方体抗压强度值。

参考文献

- [1] 李伟峰, 管娟, 马素花, 等. 海砂、珊瑚礁在海洋海砂混凝土生产中的应用[J]. 混凝土, 2016(5):148-152.
(LI Weifeng, GUAN Juan, MA Suhua. Application of sea sand and coral reefs in the production of concrete mixed with seawater [J]. Concrete, 2016, 319(5): 148-152.)
- [2] 王芳. 新时代海洋强国建设必须走陆海统筹之路[J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(2):1.
(WANG Fang. The construction of a maritime power in the new era must take the road of land and sea coordination [J]. Natural resource economics of China, 2021, 34(2):1.)
- [3] FU Q, ZHANG Z R, ZHAO X, et al. Water saturation effect on the dynamic mechanical behaviour and scaling law effect on the dynamic strength of coral aggregate concrete [J]. Cement and concrete composites, 2021, 120(9):104034.
- [4] WANG G F, WEI Y, MIAO K T, et al. Axial compressive behavior of seawater sea-sand coral aggregate concrete-filled circular FRP-steel composite tube columns [J]. Construction and building materials, 2021, 315 (23): 125737.
- [5] 陈爽, 梁淑嘉, 关纪文. FRP 筋/珊瑚混凝土柱轴心受压承载力[J]. 复合材料学报, 2021, 38(10):3519-3530.
(CHEN Shuang, LIANG Shujia, GUAN Jiwen. Compression behavior of FRP bars/coral concrete columns under axial compression loading [J]. Acta materiae compositae sinica, 2021, 38(10):3519-3530.)
- [6] 苏晨, 麻海燕, 余红发, 等. 不同珊瑚骨料对珊瑚混凝土力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(11):1771-1780.
(SU Chen, MA Haiyan, YU Hongfa, et al. Effect of different coral aggregates on mechanical properties of coral concrete [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2020, 48(11):1771-1780.)
- [7] XIAO J Z, LI L, SHEN L M, et al. Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading [J]. Cement & concrete research, 2015, 71:46-55.
- [8] 余红发, 达波, 麻海燕, 等. 全珊瑚海水混凝土及其梁柱构件的力学性能与耐久性[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(6):993-998.
(YU Hongfa, DA Bo, MA Haiyan, et al. Mechanical behavior and durability of coral aggregate seawater concrete and its beam-column member [J]. Journal of building materials, 2019, 22(6):993-998.)
- [9] DA B, YU H F, MA H Y, et al. Experimental investigation of whole stress-strain curves of coral concrete [J]. Construction and building materials, 2016, 122:81-89.
- [10] 达波, 冯基恒, 倪雷, 等. 岛礁全珊瑚混凝土的力学性能及提升措施[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(2):204-210.
(DA Bo, FENG Jiheng, NI Lei, et al. Mechanical properties and improvement measures of all coral aggregate concrete in island engineering [J]. Journal of Harbin engineering university, 2023, 44 (2): 204 - 210.)
- [11] ZHOU L L, GOU S C, MA W B, et al. Internal curing effect of saturated coral coarse aggregate in high-strength seawater sea sand concrete [J]. Construction and building materials, 2022, 331:127280.
- [12] LIU B, GUO J H, ZHOU J H, et al. The

- mechanical properties and microstructure of carbon fibers reinforced coral concrete [J]. Construction and building materials, 2020, 249: 118771.
- [13] 孙丽, 杨泽宇, 朱春阳, 等. GFRP 碳纤维混凝土黏结滑移性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊2): 259 - 264. (SUN Li, YANG Zeyu, ZHU Chunyang, et al. Study on bonding properties of reinforced composite concrete structure with fiber materials [J]. China civil engineering journal, 2020, 53(S2): 1 - 6.)
- [14] ZHANG L, NIU D T, WEN B, et al. Corrosion behavior of low alloy steel bars containing Cr and Al in coral concrete for ocean construction [J]. Construction and building materials, 2020, 258: 119564.
- [15] ZHOU J K, HE X, ZHANG L C. CT characteristic analysis of sea-sand concrete exposure in simulated marine environment [J]. Construction and building materials, 2021, 268: 121170.
- [16] YU H F, DA B, MA H Y, et al. Durability of concrete structures in tropical atoll environment [J]. Ocean engineering, 2017, 135: 1 - 10.
- [17] CHENG S K, SHUI Z H, SUN T, et al. Durability and microstructure of coral sand concrete incorporating supplementary cementitious materials [J]. Construction and building materials, 2018, 171: 44 - 53.
- [18] RAMEZANIANPOUR A A, KAREIN S S M, VOSOUGHI P, et al. Effects of calcined perlite powder as a SCM on the strength and permeability of concrete [J]. Construction and building materials, 2014, 66(5): 222 - 228.
- [19] YU L H, OU H, ZHOU S X. Influence of perlite admixture on pore structure of cement paste [J]. Advanced materials research, 2010, 97(101): 552 - 555.
- [20] QING Q L, MENG Q S, YANG H M, et al. Study of the anti-abrasion performance and mechanism of coral reef sand concrete [J]. Construction and building materials, 2021, 291: 1 - 14.
- [21] LEE N K, JANG J G. Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages [J]. Cement concrete composites, 2014, 53(21): 239 - 248.
- [22] ZHANG B, ZHU H, LI F, et al. Compressive stress-strain behavior of seawater coral aggregate concrete incorporating eco-efficient alkali-activated slag materials [J]. Construction and building materials, 2021, 299: 123886.
- [23] ZHANG B, ZHU H. Compressive stress - strain behavior of slag-based alkali-activated seawater coral aggregate concrete after exposure to seawater environments [J]. Construction and building materials, 2023, 367: 130294.
- [24] 武永焱, 明鑫, 范小春. 无机聚合物海砂混凝土基本力学性能试验研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2019, 41(5): 71 - 78. (WU Yongyan, MING Xin, FAN Xiaochun, et al. Experimental study on basic mechanical properties of inorganic polymer sea sand concrete [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2019, 41(5): 71 - 78.)
- [25] LI L G, CHEN X Q, CHU S H, et al. Seawater cement paste: effects of seawater and roles of water film thickness and superplasticizer dosage [J]. Construction and building materials, 2019, 229: 116862.
- [26] 李晓禹. 海砂珊瑚混凝土配合比设计与粘结滑移性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020. (LI Xiaoyu. Mix design and bond-slip performance of sea sand coral concrete [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.)
- [27] SUN L, WANG C, ZHANG C W, et al. Experimental investigation on the bond performance of sea sand coral concrete with FRP bars reinforcement for marine environments [J]. Advances in structural engineering, 2022, 26(3): 533 - 546.
- [28] SUN L, YANG Z Y, QIN R Y, et al. Mix design optimization of seawater sea sand coral aggregate concrete [J]. Science China technological sciences, 2022, 66(2): 378 - 389.

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)