混凝土强度等级对全珊瑚海水钢筋混凝土梁抗剪性能的影响

达波^{*}, 余红发^{*}, 麻海燕, 朱海威, 吴彰钰, 梅其泉

南京航空航天大学土木工程系, 南京 210016

^{*} E-mail: dabo@nuaa.edu.cn; yuhongfa@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2018-08-07; 接受日期: 2018-11-26; 网络版发表日期: 2018-12-29

国家自然科学基金(批准号: 51678304, 51508272, 51878350, 11832013)、江苏省自然科学基金(编号: BK20180433)和中国博士后科学基金(编号: 2018M630558)资助项目

摘要 通过对全珊瑚海水钢筋混凝土梁(coral aggregate reinforced concrete beam, CARCB)和普通钢筋混凝土梁(ordinary aggregate reinforced concrete beam, OARCB)进行斜截面抗剪性能试验, 研究了混凝土强度等级对CARCB的裂缝发展、破坏形态、跨中变形及抗剪承载能力的影响, 建立了弯矩-跨中挠度、挠度-梁长、荷载-最大裂缝宽度的关系, 探讨了CARCB抗剪承载力(V_{cs})的计算模型. 结果表明: 随着混凝土强度等级的提高, CARCB正截面开裂荷载(V_{cr})、斜截面 V_{cr} 和 V_{cs} 均逐渐增大. 不同混凝土强度等级的CARCB, 其裂缝宽度均随着荷载的增大而增长, 加载初期, 在梁跨中附近出现正截面弯曲裂缝, 裂缝宽度开展非常缓慢, 随着荷载的增加, 在支座向集中力作用点处出现斜裂缝, 斜裂缝宽度迅速增大, 最终导致梁破坏. 在C60的CARCB中采用有机新涂层钢筋能有效抑制钢筋锈蚀. 最后, 综合考虑箍筋锈蚀和高强珊瑚混凝土(coral aggregate concrete, CAC)的影响, 提出了更加合理的CARCB抗剪承载力计算模型.

关键词 全珊瑚海水钢筋混凝土梁, 抗剪性能, 混凝土强度等级, 有机新涂层钢筋, 计算模型

1 引言

我国南海岛礁中珊瑚资源丰富, 其主要化学成分为 CaCO_3 , 这些特殊的岛礁堆积物为岛礁工程建设提供了一种新型建筑材料——珊瑚骨料^[1,2]. 为了降低造价、保证工期和解决原材料来源等问题, 以珊瑚、珊瑚砂、海水为主要原材料制备全珊瑚海水钢筋混凝土梁(coral aggregate reinforced concrete beam, CARCB),

大量应用于岛礁工程建设, 具有重要的国防意义和工程实用价值. 众所周知, 钢筋混凝土梁的剪切破坏为脆性破坏, 一旦发生剪切破坏, 其后果比弯曲破坏严重的多^[3,4]. 此外, 研究表明^[5~7], 珊瑚混凝土(coral aggregate concrete, CAC)在海洋环境的 Cl^- 扩散行为具有高初始氯离子含量(C_0)、高表面自由氯离子含量(C_s)和高表观氯离子扩散系数(D_a)的“三高”特征, 极易导致其内部钢筋发生锈蚀, 从而使得钢筋截面减小、屈

引用格式: 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 混凝土强度等级对全珊瑚海水钢筋混凝土梁抗剪性能的影响. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 212–222
Da B, Yu H F, Ma H Y, et al. Influence of concrete strength grade to the shear behavior of coral aggregate reinforced concrete beam (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 212–222, doi: [10.1360/N092018-00267](https://doi.org/10.1360/N092018-00267)

服强度降低和混凝土截面发生损伤, 大大降低CARCB的抗剪承载力(V_{cs}). 因此, 对CARCB的抗剪性能进行深入研究, 对保证岛礁工程的结构安全具有重要的理论意义和较高的实用价值.

1974年, 美国学者Howdyshe^[8]发表了CAC的调研报告, 鉴于CAC极易腐蚀钢筋, 认为必须采用淡水拌合与养护, 同时需要严格控制珊瑚骨料的氯盐含量和钢筋保护层厚度. 2009年, 日本学者Wattanachai等人^[9]研究了CAC的钢筋锈蚀行为, 发现由于珊瑚骨料中含有一定数量的氯盐, CAC的钢筋锈蚀速率均明显高于相同配合比的普通混凝土(ordinary portland cement concrete, OPC). 2012年, 马来西亚学者Kakooei等人^[10]利用线性极化电阻法, 进一步研究了CAC的钢筋锈蚀行为, 发现CAC(W/C=0.48, 28 d立方体抗压强度为16 MPa)中的钢筋锈蚀速率是相同配合比OPC(W/C=0.48, 28 d立方体抗压强度为25 MPa)的2倍以上. 1995年, 张文^[11]系统地研究了CARCB的抗剪性能, 但是采用的是普通钢筋, 在实际力学性能测试时已经发生了锈蚀, 而且这种锈蚀作用没有进行定量的数据分析. 2012年, 王磊等人^[12]系统研究了CAC的基本力学性能和弯曲疲劳特性, 发现CAC在强度发展、破坏机理及破坏特征等方面与轻骨料混凝土(lightweight aggregate concrete, LAC)基本相似. 2016年, 达波等人^[13,14]对CAC的应力-应变全曲线进行研究, 发现CAC具有迅速破坏的脆性性质, 破坏状态主要为劈裂破坏, 且相同强度等级的CAC比OPC和LAC的脆性更强. 2017年, 余红发等人^[15,16]基于文献调研和实地考察, 研究了热带岛礁环境下CAC结构的宏观耐久性破坏现状、内在钢筋锈蚀与氯离子含量分布. 综上所述, 目前, 国内外关于CAC的研究主要集中在其基本物理力学性能和耐久性等方面, 因此, 针对珊瑚天然多孔的结构“缺陷”^[13,14]和CAC具有高 C_0 、高 C_s 和高 D_a 的氯离子扩散特征^[5,17], 本文综合考虑箍筋锈蚀和高强CAC的影响, 对CARCB的抗剪性能进行了试验研究.

本文通过对6根CARCB和2根普通钢筋混凝土梁(ordinary aggregate reinforced concrete beam, OARCB)进行斜截面抗剪性能试验, 研究了不同混凝土强度等级CARCB的裂缝发展及破坏形态、承载力、纵筋和箍筋的应变, 建立了弯矩-跨中挠度、挠度-梁长、荷载-最大裂缝宽度的关系, 提出了更加合理的CARCB抗剪承载力计算模型, 为CAC在岛礁工程中的应用提

供基础数据和理论支持.

2 实验

2.1 原材料

采用南海海域某岛的珊瑚^[17], Cl^- 含量为0.074%, 5~20 mm连续级配, 表观密度为2300 kg/m³, 堆积密度为1000 kg/m³, 筒压强度为5.2 MPa; 南海海域某岛的珊瑚砂^[17], Cl^- 含量为0.112%, 含泥量为0.5%, 表观密度为2500 kg/m³, 堆积密度为1115 kg/m³, 细度模数为3.5, I区级配, 属于中砂; 南京市江南小野田水泥厂生产的P·II 52.5型硅酸盐水泥; 镇江市生产的风选I级粉煤灰; 江苏江南粉磨公司生产的S95级磨细矿渣; 江苏省建筑科学研究院生产的PCA-I聚羧酸高性能减水剂(含固量为30%)和亚硝酸钙阻锈剂; 模拟海水按照ASTM D1141-2003的规定配制, 单位体积各材料含量比为NaCl:Na₂SO₄:MgCl₂·6H₂O:KCl:CaCl₂=24.5:4.1:11.1:0.7:1.2; 钢筋采用南京航空航天大学研发的有机新涂层钢筋(涂层厚度为40 μm).

2.2 构件设计

为了研究CARCB的抗剪性能, 共浇筑了8根矩形截面试验梁, 其中, 2根OARCB和6根CARCB, 构件的设计尺寸为150 mm×200 mm×1500 mm, 剪跨比(λ)为1.23. 其混凝土配合比见表1, 其中, C35 OPC与C25 CAC的配合比一致(利用天然砂石替代珊瑚骨料), 各构件的基本参数见表2. 由于珊瑚天然多孔的结构“缺陷”以及海水和珊瑚中含有大量的 Cl^- , 容易导致钢筋锈蚀, 所以, 本次试验采用耐腐蚀性较好的有机新涂层钢筋, 其纵向钢筋屈服强度(f_y)和箍筋屈服强度(f_{yv})分别为457和440 MPa. 为了使构件发生剪切破坏, 梁底部配置2根Φ16的抗弯钢筋, 架立筋采用2根Φ10的螺纹钢筋, 箍筋采用Φ6的光圆钢筋(双肢箍), 箍筋间距为100 mm. 试验梁尺寸和配筋如图1所示.

2.3 构件制作和养护

混凝土浇筑前, 在模具表面涂一层脱模剂, 将水泥、珊瑚、珊瑚砂、矿渣、粉煤灰等原材料置于搅拌机中干拌1 min, 再加入海水、减水剂和阻锈剂的混合液湿拌3 min. 出料后, 测定其坍落度, 再浇注、振动成型. 本试验采用500 L自落式搅拌机, 一次浇筑2根试验

表 1 CARCB的配合比与拌合物性能

强度等级	单位体积材料用量(kg·m ⁻³)									净水 胶比	总水 胶比	坍落度 (mm)	表观密度 (kg·m ⁻³)
	胶凝材料	水泥	矿渣	粉煤灰	珊瑚砂	珊瑚	总用水量	减水剂 含固量	亚硝酸钙				
C25	500	275	150	75	873	582	250	0.0	15.0	0.30	0.50	130	2170
C50	550	429	83	38	1020	680	200	3.3	16.5	0.25	0.36	70	2188
C60	1000	780	150	70	700	300	264	6.0	30.0	0.20	0.26	255	2267

注: 总水胶比=总用水量/胶凝材料用量; 净水胶比=净用水量/胶凝材料用量; 总用水量=预吸水量+净用水量.

表 2 CARCB的基本参数

No.	构件种类	混凝土强度	f_{cu}	f_c	f_t
BJ1-1	OARCB	C35	51.9	43.8	5.0
BJ1-2		C35	51.3	43.4	5.0
BJ2-1		C25	42.7	37.1	4.3
BJ2-2		C25	42.4	36.9	4.3
BJ3-1	CARCB	C50	66.7	54.6	6.2
BJ3-2		C50	66.6	54.5	6.2
BJ4-1		C60	75.9	61.3	6.9
BJ4-2		C60	76.4	61.6	7.0

注: f_{cu} 、 f_c 和 f_t 分别为混凝土立方体抗压强度、轴心抗压强度和轴心抗拉强度实测值, 单位均为MPa.

图 1 CARCB的尺寸与截面配筋详图. (a) 实物图; (b) 示意图

梁和6个立方体试块. 构件和立方体试块分别采用振捣棒和振动台振动密实. 试件与构件制作完成之后, 带模养护24 h, 之后拆模, 以稻草覆盖并浇洒人工海水养护90 d后进行相关力学性能试验.

2.4 构件制作和养护

试验在南京航空航天大学结构实验室进行. 采用4

点加载, 试验装置示意图如图2所示. 加载过程中, 采用50 t的荷载传感器测量荷载变化, 钢筋、混凝土应变片和位移传感器的示数均通过连接DH3818-2型静态应变仪采集, 采用SW-LW-201型裂缝观测仪观察裂缝的出现与发展以及测量裂缝宽度. 5个YWC-50型位移传感器分别安装在试验梁两端支座、两个加载点处以及跨中位置, 用以测量两支座处的沉降位移及跨中位置处的挠度, 以得到试验梁整体的变形情况.

为测量加载过程中钢筋的受力情况, 在两侧剪弯区的4个箍筋分别粘贴1片应变片, 同时, 在梁底纵筋跨中和加载点区域分别粘贴1片应变片, 共6片应变片. 在受拉区和受压区各粘贴1片应变片, 探索CARCB斜截面抗剪破坏时, 受拉区和受压区混凝土的应变发展情况. 同时, 在加载点与支座点连线的中点处粘贴应变花, 分析梁剪弯段主应力的分布情况. 应变花由3片应变片构成, 相互之间的夹角为45°. 试验梁应变片布置如图1所示.

正式加载前先预压10 kN, 使加载系统各部分之间接触良好并检查各仪表是否工作正常. 正式加载时, 所有试验梁开裂前按照每级1 kN加载; 开裂后至裂缝全部出现, 以每级5 kN加载; 裂缝全部出现至试验结束, 以每级2 kN加载.

图 2 加载装置示意图

3 结果与分析

3.1 裂缝发展及破坏形态

图3为CARCB和OARCB的裂缝发展图, 由图可知: (1) 无论是OARCB, 还是CARCB均发生斜截面破坏, 且破坏形态基本相同. 但对于相同配合比的CARCB和OARCB(见图3(a)和(b)), CARCB的裂缝数量多于OARCB, 这主要是因为: 珊瑚骨料属于天然多孔结构材料^[13,14], 具有吸水返水的特性, 这种“微泵”作用使得珊瑚骨料周边的水灰比降低, 改善增强了界面区水泥石的密实度和粘结强度, 提高了界面机械咬合力. 因此, 珊瑚的这种特性能有效抑制斜裂缝的开展. (2) CARCB在受剪开裂时, 所有裂缝上的珊瑚骨料本身都被剪断, 未能保持颗粒的完整性. 与文献[14]发现的现象一致, 即受拉裂缝断面上的珊瑚骨料全都被拉裂, 且表面比较平整. (3) 有些梁破坏前先出现腹剪裂缝, 然后随着荷载加大腹剪裂缝向上下发展, 一直到梁的破坏. 这种腹剪裂缝在OPC试验中, 只有薄腹梁中才出现. 这种现象说明CAC抗剪强度较低的力学性能, 与文献[11]发现的规律一致.

3.2 承载力分析

CARCB和OARCB的测试结果见表3, 图4为CARCB和OARCB的开裂荷载和抗剪承载力. 由表3和图4可知, 随着混凝土强度等级的提高, CARCB的正截面 V_{cr} 、斜截面 V_{cr} 和 V_{cs} 均逐渐增大, 说明混凝土强度等级对CARCB的 V_{cr} 和 V_{cs} 影响较大. 其主要原因是: (1) CARCB开裂之前, 拉应力主要由混凝土承担, 随着混凝土强度等级的提高, CAC的轴心抗拉强度(f_t)呈增大的趋势, 故 V_{cr} 增大; (2) 混凝土强度等级越高, CAC的 f_t 越大, 故 V_{cs} 增大.

据统计, 当外荷载达到 V_{cs} 的5%~17%时, 开始出现正截面裂缝. 裂缝往往在梁跨中附近出现, 裂缝长度一般仅为0.01~0.02 mm. 在整个加载过程中构件的弯曲裂缝开展非常缓慢, 直到构件破坏, 弯曲裂缝的宽度均小于0.4 mm, 说明试验设计时构件的抗弯能力是足够的. 而斜裂缝一般在外荷载达到 V_{cs} 的76%~89%时出现, 往往出现得比较突然, 大多数都是从离支座20 mm处向集中力作用点延伸, 随着荷载的增加, 斜裂缝的宽度逐渐变大. 而且, 表面的斜裂缝一经出现, 其长度就

图3 CARCB和OARCB的裂缝发展图. (a) BJ1-2; (b) BJ2-2; (c) BJ3-2; (d) BJ4-2

表 3 CARCB和OARCB的测试结果

NO.	构件类型	混凝土等级	正截面 V_{cr} (kN)	斜截面 V_{cr} (kN)	V_{cs} (kN)	跨中最大挠度 (mm)	弯曲裂缝最大宽度(mm)	斜裂缝最大宽度(mm)
BJ1-1	OARCB	C35	13	70	140	3.17	0.24	—
BJ1-2		C35	11	75	168	3.59	0.24	1.86
BJ2-1		C25	11	65	184	3.34	0.30	1.8
BJ2-2		C25	10	70	214	2.95	0.35	1.2
BJ3-1	CARCB	C50	17	85	220	4.11	0.24	1.7
BJ3-2		C50	16	85	233	2.65	0.20	1.45
BJ4-1		C60	15	100	278	3.42	0.26	1.5
BJ4-2		C60	20	95	329	3.35	0.44	—

图 4 CARCB和OARCB的开裂荷载和抗剪承载力

在40~120 mm. 构件破坏时, 斜裂缝的最大宽度与箍筋的钢筋种类关系不大, 这主要是由混凝土材料的不均匀性所致.

3.3 荷载-挠度曲线

3.3.1 弯矩-跨中挠度曲线

图5为CARCB和OARCB的弯矩-跨中挠度曲线. 由图可知: (1) 无论是CARCB, 还是OARCB, 其弯矩-跨中挠度曲线大致分为2个阶段, 即: 混凝土正截面开裂前以及混凝土开裂后至破坏阶段. 正截面开裂后, 曲线显示出比较明显的线性特征, 构件破坏前挠度都较小, 达到 V_{cs} 后, 承载力突然降低, 属于明显的脆性破坏. (2) 相同荷载作用下, CARCB的挠度比OARCB大, 这是由于CARCB的延性优于OARCB, 有利于CARCB带裂缝工作, 说明CAC的延性优于OPC. (3) 相同配筋率下, BJ2-1、BJ2-2的 V_{cs} 高于BJ1-1、BJ1-2, 故可以判断C25 CARCB比C35 OARCB的抗剪能力更强. 同时, BJ2-1比相同配筋率BJ1-2的跨中挠度大, 可能是由于

图 5 (网络版彩图)CARCB和OARCB的弯矩-跨中挠度曲线

CAC中含有大量 Cl^- , 加速了钢筋的腐蚀, 使得BJ2-1的抗弯刚度有不同程度的降低, 从而跨中挠度增大. (4) 随着混凝土强度等级的提高, CARCB的 V_{cs} 呈增大的趋势, 这是因为CARCB的 V_{cs} 由混凝土承载力(V_c)与箍筋承载力(V_s)两部分组成, V_s 一定时, V_c 增大, 故CARCB的 V_{cs} 增大, 这与OARCB的规律一致.

3.3.2 挠度-梁长曲线

图6为CARCB的挠度-梁长曲线. 由图可知, CARCB的整体变形是对称的, 当斜裂缝出现后, 梁的最大挠度位置开始从跨中向加载点偏移. 在荷载未达到 V_{cs} 之前, 梁的挠度增加幅度大致相同, 接近 V_{cs} 时, 梁的整体挠度突然增大.

3.4 钢筋应变

图7为CARCB的荷载-钢筋应变曲线. 由图7(a)可知: CARCB(BJ2、BJ3、BJ4)的纵筋应变在梁发生剪

图 6 CARCB的挠度-梁长曲线. (a) BJ2-2; (b) BJ4-1

图 7 CARCB的荷载-钢筋应变曲线. (a) 纵向钢筋; (b) 箍筋

切破坏时均未达到其屈服应变, CARCB均为剪压破坏. 由图7(b)可知: 随着荷载的增加, 箍筋的应变逐渐增大, 在加载初期, 箍筋的应变值都较小, 随着斜裂缝的出现, 箍筋的应变值开始迅速增大. 根据箍筋的力学试验结果, 有机新涂层钢筋屈服时, 其应变估算值约为: $\varepsilon = f_y / E_s = 440 \times 10^6 / (2.1 \times 10^5) = 2095 \mu\epsilon$. 表明CARCB达到 V_{cs} 时, 各试验梁的箍筋均未屈服. 主要原因可能是箍筋的间距太小, 箍筋作为桁架腹部拉杆的作用不明显. 同时, 比较不同混凝土强度等级BJ2-2、BJ3-2和BJ4-2的荷载-箍筋应变曲线可知: 3根CARCB的箍筋应变开始快速增大的荷载分别为75、85与90 kN, 与表3统计的各CARCB斜裂缝出现时的荷载基本一致, 即: 混凝土强度等级越高, 箍筋应变开始突变的应变值越大. 表明混凝土分担了箍筋承受的部分剪力, 使得箍筋开始发挥作用时所需要的外荷载值增大.

3.5 裂缝宽度

图8为CARCB的荷载-最大裂缝宽度曲线. 由图可见, 不同混凝土强度等级的CARCB, 其裂缝宽度均随着荷载的增加而增大, 加载初期, 在梁跨中附近出现正

图 8 CARCB的荷载-最大裂缝宽度曲线

截面弯曲裂缝, 裂缝宽度开展非常缓慢, 随着荷载的增加, 在支座向集中力作用点处出现斜裂缝, 斜裂缝宽度迅速增大, 最终导致梁破坏. 此外, 由图可见, 在裂缝宽度相等的条件下, 不同混凝土强度等级CARCB的承载力规律为: BJ2-1 > BJ3-1 > BJ4-2, 即: 裂缝的开展与混凝土强度等级有关, 这是因为CARCB的 V_{cs} 由 V_s 与 V_c 两部分承担, V_s 一定时, V_c 增大, 故CARCB的 V_{cs} 增大, 即裂缝宽度越小.

3.6 承载力计算模型

3.6.1 不同模型比较

《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)^[18]建议OARCB的 V_{cs} 计算公式为

$$V_{cs} = \frac{1.75}{\lambda+1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (1)$$

式中, V_{cs} 为抗剪承载力设计值, kN; λ 为剪跨比, 当 $\lambda < 1.5$ 时, 取 $\lambda=1.5$, 当 $\lambda > 3$ 时, 取 $\lambda=3$; f_t 为混凝土轴心抗拉强度, MPa; b 为矩形截面宽度, mm; h_0 为截面有效高度, mm; f_{yv} 为箍筋抗拉强度设计值, MPa; A_{sv} 为同一截面内箍筋的全部截面面积, mm²; $A_{sv}=nA_{sv1}$, A_{sv1} 为单肢箍筋的截面面积, mm²; $n=2$; s 为沿构件长度方向上箍筋的间距, mm.

《轻骨料混凝土结构设计规程》(JGJ 12-2006)^[19]建议LARCB的 V_{cs} 计算公式为

$$V_{cs} = \frac{0.175}{\lambda+1.5} f_c b h_0 + 1.25 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (2)$$

式中, λ 为剪跨比, 当 $\lambda < 1.4$ 时, 取 $\lambda=1.4$, 当 $\lambda > 3$ 时, 取 $\lambda=3$; f_c 为混凝土轴心抗压强度, MPa; 其他参数的含义同公式(1).

张文^[11]建议CARCB的 V_{cs} 计算公式为

$$V_{cs} = \frac{0.1}{2.4(\lambda-0.7)} f_c b h_0 + 1.25 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (3)$$

式中, 参数的含义同公式(2).

根据公式(1)~(3)计算23根CARCB的 V_{cs} , V_{cs}^t/V_{cs}^c 的平均值分别为1.664、1.447和1.407, 标准差分别为0.257、0.597和0.468, 变异系数分别为0.154、0.412和0.333, 拟合结果见表4和图9. 由图9可知, 公式(1)~(3)的拟合值与实测值符合均不好. 即: GB 50010-2010^[18]、JGJ 12-2006^[19]和张文^[11]建议的 V_{cs} 计算公式不适用于CARCB. 这主要是由于: (1) 传统意义上LAC的强度较低, 而本次试验CAC的强度等级较高; (2) 珊瑚天然多孔的结构“缺陷”和海水、珊瑚中含有大量的Cl⁻, 容易导致钢筋发生锈蚀, 从而使箍筋的截面减小, 屈服强度降低, 严重影响CARCB的 V_{cs} ^[20], 而式(1)~(3)中均未考虑钢筋锈蚀的问题. 因此, 需要综合考虑 V_c 和 V_s 的影响, 提出适用于CARCB的 V_{cs} 计算模型.

3.6.2 模型优化

(1) V_s 系数修正

大量研究表明^[5,15~17]: CAC具有高 C_0 、高 C_s 和高 D_a 的“三高”Cl⁻扩散特征, 其 C_0 高达0.11%~0.21%, 远大于普通钢筋发生脱钝的临界氯离子含量(C_{cr} , 约为0.05%), 表明CAC中钢筋极易发生锈蚀. 因此, 本文选用脱钝 C_{cr} 值较高的有机新涂层钢筋, 其可涂可刷, 方便施工, 能有效地抑制CAC中钢筋发生锈蚀. 图10为不同混凝土强度等级CARCB中有机新涂层钢筋的表面状态, 其中, 测试龄期为90 d. 图11为不同混凝土强度等级CAC中钢筋的电化学测试结果, 其中, R_p 为极化电阻, kΩ·cm². 钢筋腐蚀本身是一个电化学反应, 而 R_p 能反映试件的导电能力, R_p 越大表明试件的导电能力越差, 即构件中钢筋发生腐蚀的危险性越小. 由图可见, 当混凝土等级为C60时, 有机新涂层钢筋表面只发生局部锈蚀, 表明有机新涂层钢筋具有较强的防腐性能; 而当混凝土强度等级为C25时, 有机新涂层钢筋发生明显锈蚀(见图10, 11). 因此, 本文考虑箍筋锈蚀对CARCB抗剪性能的影响, 对已有模型进行修正.

参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GBJ82-1985)计算钢筋质量损失率, 结果见表4. 张伟平等人^[22]研究表明: 箍筋锈蚀对OARCB的 V_{cs} 影响主要是箍筋截面的减小和箍筋屈服强度的降低. 对于箍筋截面的减小, 可以直接考虑其与箍筋锈蚀率之间的关系. 而钢筋屈服强度随钢筋锈蚀的关系, 袁迎曙等人^[23]对其进行详细研究, 可以直接参考.

因此, 考虑箍筋的锈蚀, CARCB的 V_{cs} 计算模型为

$$V_{cs} = V_c + V_s = \frac{0.175}{\lambda+1.5} f_c b h_0 + 1.25 \alpha f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (4)$$

$$\alpha = \begin{cases} (1-\omega_s)(1-1.608\omega_s), & 0 < \omega_s \leq 5\%, \\ (1-\omega_s)(0.962-0.848\omega_s), & \omega_s > 5\%, \end{cases} \quad (5)$$

式中, α 为考虑箍筋锈蚀引起箍筋截面损失和箍筋屈服强度降低的综合折减系数; ω_s 为箍筋平均截面损失率, %; 其他参数的含义同公式(1)和(2).

在氯盐侵蚀环境中, 钢筋发生不同程度的“坑蚀”, 因此, 对于钢筋而言, 钢筋截面最小处最容易被拉断, 即最大截面损失率(ω_{sm})处最容易被拉断, 所以, 用 ω_{sm} 来计算考虑钢筋锈蚀引起钢筋截面损失和钢筋屈服强度降低的综合折减系数更加准确. 图12为 ω_{sm} 与钢筋质量损失率(ω)的关系曲线, 由图可知, ω_{sm} 与 ω 两者之间符合线性关系:

$$\omega_{sm} = 1.301\omega, \quad (6)$$

表 4 不同计算模型下CARCB抗剪承载力的拟合结果与实测结果

No.	混凝土强度	λ	h_0 (mm)	ω (%)	V_{cs}^t	公式(1) ^[18]		公式(2) ^[19]		公式(3) ^[11]		公式(8)	
						V_{cs}^c	比值	V_{cs}^c	比值	V_{cs}^c	比值	V_{cs}^c	比值
BJ2-1	C25	1.23	162	0.66	184	122	1.508	108	1.701	121	1.517	166	1.110
BJ2-2	C25	1.23	162	0.66	214	122	1.760	108	1.985	121	1.770	165	1.296
BJ3-1	C50	1.23	162	0.35	220	158	1.391	135	1.626	155	1.423	221	0.996
BJ3-2	C50	1.23	162	0.35	233	158	1.475	135	1.723	155	1.508	220	1.056
BJ4-1	C60	1.23	162	0.33	278	172	1.617	146	1.908	167	1.661	242	1.149
BJ4-2	C60	1.23	162	0.33	329	173	1.905	146	2.250	168	1.958	243	1.354
BJ5-1 ^[21]	C60	1.23	162	0.94	311	172	1.805	146	2.130	168	1.854	241	1.288
BJ5-2 ^[21]	C60	1.23	162	0.94	333	172	1.932	146	2.281	168	1.985	241	1.379
BJ6-1 ^[21]	C60	1.23	162	0.11	336	171	1.963	145	2.316	167	2.016	240	1.397
BJ7-1 ^[21]	C60	1.23	162	0.05	204	186	1.096	163	1.251	185	1.103	260	0.786
BJ8-1 ^[21]	C60	1.23	162	0.04	354	205	1.725	187	1.889	209	1.693	283	1.251
BJ8-2 ^[21]	C60	1.23	162	0.04	368	206	1.787	188	1.958	210	1.755	284	1.295
BV1-2 ^[11]	C25	1.40	179	—	98	—	—	73	1.355	61	1.603	79	0.805
BV1-3 ^[11]	C25	1.97	178	—	48	—	—	60	0.796	62	0.779	45	0.933
BV1-4 ^[11]	C25	2.53	178	—	36	—	—	55	0.647	44	0.807	36	1.021
BV1-5 ^[11]	C25	3.07	179	—	30	—	—	51	0.587	34	0.880	33	1.083
BV2-1 ^[11]	C20	1.12	179	—	134	—	—	91	1.478	—	—	168	1.254
BV2-2 ^[11]	C20	1.67	180	—	100	—	—	80	1.243	68	1.461	71	0.717
BV2-3 ^[11]	C20	2.22	180	—	65	—	—	73	0.890	57	1.149	55	0.848
BV3-1 ^[11]	C20	1.12	178	—	87	—	—	67	1.298	45	1.916	127	1.456
BV3-2 ^[11]	C20	1.69	178	—	47	—	—	58	0.812	75	0.627	50	1.057
BV3-3 ^[11]	C20	2.23	179	—	34	—	—	53	0.651	43	0.790	38	1.097
BV3-4 ^[11]	C20	2.79	179	—	25	—	—	48	0.512	35	0.706	32	1.301

注: 比值表示 V_{cs}^t/V_{cs}^c ; 公式(1)^[18]: V_{cs}^t/V_{cs}^c 的平均值为1.664, 标准差为0.257, 变异系数为0.154; 公式(2)^[19]: V_{cs}^t/V_{cs}^c 的平均值为1.447, 标准差为0.597, 变异系数为0.412; 公式(3)^[11]: V_{cs}^t/V_{cs}^c 的平均值为1.407, 标准差为0.468, 变异系数为0.332; 公式(8): V_{cs}^t/V_{cs}^c 的平均值为1.128, 标准差为0.212, 变异系数为0.188.

图 9 不同计算模型下CARCB抗剪承载力的拟合结果与实测结果比较

图 10 (网络版彩图)不同混凝土强度等级CARCB中有机新涂层钢筋的表面状态

图 11 不同混凝土强度等级CAC中钢筋的电化学测试结果. (a) 线性极化电阻法; (b) 交流阻抗谱法. 试验中钢筋直径为1 cm, 保护层厚度为2.5 cm; 图11(b)中暴露时间为90 d

图 12 最大截面损失率与钢筋质量损失率的关系曲线^[24]

式中, ω_{sm} 为箍筋最大截面损失率, %; ω 为箍筋平均截面损失率, %.

此外, 大量研究表明^[22~24], ω 和 ω_s 大致相等. 因此, 基于合理性和实用性, α 表示为

$$\alpha = \begin{cases} (1 - 1.301\omega)(1 - 1.608\omega), & 0 < \omega \leq 5\%, \\ (1 - 1.301\omega)(0.962 - 0.848\omega), & \omega > 5\%, \end{cases} \quad (7)$$

式中, 参数的含义同公式(6).

(2) V_c 系数修正

图13为不同CARCB的 $V_c/(f_c b h_0)$ 与 λ 关系曲线. 从图13可知, 在23根集中荷载作用下的CARCB中, 有4根CARCB的 V_c^t 小于公式(4)的计算结果. 因此, 可以认为 $0.175/(\lambda + 1.5)$ 的取值偏高, 即: 用JGJ 12-2006中给出的公式设计CARCB的 V_c 是不够安全的, 这与试验观察到的情况一致. 同时, 考虑到OARCB在计算 V_{cs} 时, 其 V_c 的系数确定原则为: 在剪压破坏区段($\lambda = 1 \sim 3$)范围内, 该系数表示所有试验点的“下包线”, 本次试验中CARCB

图 13 不同CARCB的 $V_c/(f_c b h_0)$ 与 λ 关系曲线

的 V_{cs} $\lambda = 1.23$, 张文^[11]试验的CARCB, 其 λ 介于0.84~2.60之间. 根据图13分析, $\lambda \leq 1.3$ 时, V_c 的系数可取0.104, 而 $\lambda \geq 2.8$ 时, V_c 的系数只能取0.022. 因此, 根据以上条件可求出 V_c 的系数为 $0.1/2.4(\lambda - 0.9)$, 即 $0.042/(\lambda - 0.9)$.

此外, JGJ 12-2006中关于 V_{cs} 计算公式是根据试验数据经统计分析后取的下限值, 而要较为准确计算试验梁的 V_{cs} , 计算时应取试验材料的实测值. 因此, 综合考虑箍筋锈蚀和高强CAC的影响, CARCB的 V_{cs} 计算模型为

$$V_{cs} = \frac{0.042}{\lambda - 0.9} f_c b h_0 + 1.25 \alpha f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0, \quad (8)$$

式中, 参数的含义同公式(1)、(2)和(4).

根据式(8)计算23根CARCB的 V_{cs} , 计算结果见表4和图9, 由表4和图9可知, V_{cs}^t/V_{cs}^c 的平均值为1.128, 标准差为0.212, 变异系数为0.188. 与GB 50010-2010^[18]、JGJ 12-2006^[19]和张文^[11]的计算结果相比, 其 V_{cs}^t/V_{cs}^c 的平均值更加接近于1, 其标准差分别降低了21.3%、181.6%和121.0%. 基于各模型的拟合精度、合理性和

实用性, 确定公式(8)为最优模型.

4 结论

(1) 对于相同配合比的CARCB和OARCB, CARCB的裂缝数量明显多于OARCB, 说明CAC能有效地抑制斜裂缝开展. 此外, CARCB在受剪开裂时, 所有裂缝上的珊瑚骨料本身都被剪断, 未能保持颗粒的完整性.

(2) 在剪跨比(λ)一定的情况下, 无论是OARCB, 还是CARCB, 混凝土强度等级对试验梁破坏形态影响较小, 所有试验梁均发生剪压破坏. 随着混凝土强度等级的提高, CARCB的正截面开裂荷载(V_{cr})、斜截面 V_{cr} 和抗剪承载力(V_{cs})均逐渐增大.

(3) CARCB的整体变形是对称的, 当斜裂缝出现后, 梁的最大挠度位置开始从跨中向加载点偏移. 在荷载未达到极限荷载之前, 梁的挠度增加幅度大致相同; 接近极限荷载时, 梁的整体挠度突然增大.

(4) 不同混凝土强度等级的CARCB, 其裂缝宽度均随着荷载的增加而增大, 在加载初期, 在梁跨中附近出现正截面弯曲裂缝, 裂缝宽度开展非常缓慢; 随着荷载的增加, 在支座向集中力作用点处出现斜裂缝, 斜裂缝宽度迅速增大, 最终导致梁破坏.

(5) 在岛礁CAC结构工程中, 建议采用有机新涂层钢筋, 同时混凝土强度等级至少为C60, 这样能有效地抑制钢筋发生锈蚀, 从而延长CAC结构的有效服役寿命. 此外, 综合考虑箍筋锈蚀和高强CAC的影响, 提出了更加合理的CARCB抗剪承载力的计算模型.

参考文献

- Arumugam R A, Ramamurthy K. Study of compressive strength characteristics of coral aggregate concrete. *Mag Concrete Res*, 1996, 48: 141–148
- 陈兆林, 陈天月, 曲助明. 珊瑚礁砂混凝土的应用可行性研究. *海洋工程*, 1991, 9: 67–80
- Chen M L, Ma J. Experimental study on shear behavior of the interface between new and old concrete with reinforced. *KSCE J Civ Eng*, 2018, 22: 1882–1888
- Frangopol D M, Lin K Y, Estes A C. Reliability of reinforced concrete girders under corrosion attack. *J Struct Eng*, 1997, 123: 286–297
- Da B, Yu H, Ma H, et al. Chloride diffusion study of coral concrete in a marine environment. *Construction Building Mater*, 2016, 123: 47–58
- Guzmán S, Gálvez J C, Sancho J M. Cover cracking of reinforced concrete due to rebar corrosion induced by chloride penetration. *Cem Concr Res*, 2011, 41: 893–902
- Chernin L, Val D V. Prediction of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures. *Construction Building Mater*, 2011, 25: 1854–1869
- Howdyshell P A. The Use of Coral As An Aggregate for Portland Cement Concrete Structures. Springfield: U.S. Department of Commerce, 1974. 8–24
- Wattanachai P. A study on chloride ion diffusivity of porous aggregate concretes and improvement method. *Adv Mater Res*, 2009, 65: 30–44
- Kakooei S, Akil H M, Dolati A, et al. The corrosion investigation of rebar embedded in the fibers reinforced concrete. *Construction Building Mater*, 2012, 35: 564–570
- 张文. 配筋珊瑚混凝土构件试验研究. 硕士学位论文. 南京: 河海大学, 1995. 43–56
- Wang L, Zhao Y L. The comparison of coral concrete and other light weight aggregate concrete on mechanics performance. *AMR*, 2012, 446–449: 3369–3372
- Da B, Yu H, Ma H, et al. Experimental investigation of whole stress-strain curves of coral concrete. *Construction Building Mater*, 2016, 122: 81–89
- 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 全珊瑚海水混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究. *建筑结构学报*, 2017, 38: 144–151
- Yu H, Da B, Ma H, et al. Durability of concrete structures in tropical atoll environment. *Ocean Eng*, 2017, 135: 1–10
- 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 南海海域珊瑚混凝土结构的耐久性影响因素. *硅酸盐学报*, 2016, 44: 253–260
- 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 全珊瑚海水混凝土的表面自由氯离子浓度和表观氯离子扩散系数. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46: 1093–1097
- GB 50010-2010. 混凝土结构设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010

- 19 JGJ 12-2006. 轻骨料混凝土结构技术规程. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006
- 20 Bhargava K, Ghosh A K, Mori Y, et al. Model for cover cracking due to rebar corrosion in RC structures. Eng Struct, 2006, 28: 1093–1109
- 21 达波. 高强全珊瑚海水混凝土的制备技术、耐久性 & 构件力学性能研究. 博士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2017. 137–145
- 22 张伟平, 张誉. 锈胀开裂后钢筋混凝土粘结滑移本构关系研究. 土木工程学报, 2001, 34: 39–44
- 23 袁迎曙, 贾福萍. 锈蚀钢筋的力学性能退化研究. 工业建筑, 2000, 30: 43–46
- 24 王雪慧, 钟铁毅. 混凝土中锈蚀钢筋截面损失率与重量损失率的关系. 建筑技术与应用, 2005, 12: 4–6

Influence of concrete strength grade to the shear behavior of coral aggregate reinforced concrete beam

DA Bo, YU HongFa, MA HaiYan, ZHU HaiWei, WU ZhangYu & MEI QiQuan

Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautic and Astronautic, Nanjing 210016, China

The shear behavior of CARCB and OARCB were tested, the concrete strength grades were selected as parameters, the crack development, failure mode, midspan deflection and V_{cs} were studied, the relationships of bending moment-midspan deflection, deflection-beam length and load-maximum crack width were established, a calculation model for the V_{cs} of CARCB was suggested. The test results showed that the normal section V_{cr} , inclined section V_{cr} and V_{cs} increased with the increase of concrete strength grade. The CARCB crack width increased with the increase of load for different concrete strength grades. In the initial loading stage, flexural cracks occurred at the midspan of the beam with slow development. However, as the load increased, inclined cracks were formed from the support to the concentrated force point, which widened rapidly, leading to beam failure. The application of organic new coated steel in the C60 CAC structure was suggested to effectively inhibit steel corrosion. Therefore, comprehensive consideration on the effects of stirrup corrosion and high-strength concrete on V_{cs} of CARCB, a calculation model for the V_{cs} of CARCB was proposed.

coral aggregate reinforced concrete beam, shear behavior, concrete strength grade, organic new coated steel, calculation model

doi: [10.1360/N092018-00267](https://doi.org/10.1360/N092018-00267)