

热带海洋环境下钢筋混凝土构件承载力退化研究

朱海威^{1,2}, 余红发², 麻海燕², 达波², 范志宏¹, 杨海成¹, 杨礼明³

(1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 2. 南京航空航天大学 土木与机场工程系, 江苏 南京 211106;
3. 广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530029)

摘要: 为研究热带海洋严酷环境下钢筋混凝土结构的承载力退化规律, 通过对南海现场暴露 3.5a 后的 C50、C80 钢筋混凝土梁柱构件进行混凝土回弹值与超声波、钢筋锈蚀率与拉伸、梁受弯与柱大偏心受压测试, 系统分析混凝土抗压强度、钢筋失重率、梁受弯承载力与柱大偏心受压承载力等物理力学性能的变化特征, 并与既有承载力退化模型进行验证。结果表明: 经现场暴露试验后, C50、C80 构件的混凝土抗压强度与相对动弹性模量下降, 且 C50 构件中混凝土损伤较 C80 构件的严重; C50 构件已发生钢筋锈蚀, 而 C80 构件中钢筋仍处于钝化状态; C50、C80 梁在受弯条件下的抗裂性能与极限受弯承载力下降, 且 C50 梁较 C80 梁下降明显; C50、C80 柱在大偏心受压条件下的抗裂性能与极限受压承载力小幅下降。

关键词: 热带海洋环境; 现场暴露; 钢筋混凝土构件; 混凝土劣化; 钢筋锈蚀; 承载力退化

中图分类号: TU654

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)04-0512-13

Load-bearing capacity degradation of reinforced concrete members in tropical marine environment

ZHU Haiwei^{1,2}, YU Hongfa², MA Haiyan², DA Bo²,
FAN Zhihong¹, YANG Haicheng¹, YANG Liming³

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 2. Department of
Civil and Airport Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
3. Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: In order to investigate the deterioration laws of load-bearing capacity of reinforced concrete structures in tropical marine environment, changes in the compressive strength of concrete, relative dynamic elastic modulus of concrete, reinforcement weight loss, bending capacity of beams and eccentric compression capacity of columns were analyzed by testing the rebound value, ultrasound wave velocity, beam bending resistance and column resistance of the reinforced concrete members exposed in the South China Sea for 3.5 years, and the data was verified with the theoretical formulas. The results show that after the field exposure, the concrete compressive strength and relative dynamic elastic modulus of C50 and C80 members decrease, and the concrete damage in C50 members was more serious than that in C80 members. The reinforcement in the C50 members has been corroded, while the reinforcement in the C80 members is still in the passivation state. The crack resistance and ultimate bending capacity of C50 and C80 beams under bending conditions decrease, and the decrease of C50 beams is more obvious than that of C80 beams. The crack resistance and ultimate bearing capacity of C50 and C80 columns under large eccentric compression decrease slightly.

Key words: tropical marine environment; field exposure; reinforced concrete members; concrete deterioration; reinforcement corrosion; load-bearing capacity degradation

收稿日期: 2022-10-13

修回日期: 2024-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(11832013, 51878350); 2021 年交通运输行业重点科技项目(2021-MS1-002)

第一作者: 朱海威(1990—), 男, 博士, 工程师, 主要从事海洋环境下钢筋混凝土结构耐久性研究。E-mail: zhuhaiwei@nuaa.edu.cn

通信作者: 余红发(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事混凝土结构耐久性研究。E-mail: yuhongfa@nuaa.edu.cn

钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)结构在海洋严酷环境下长期经受海水冻融、干湿交替、海浪冲刷、大气碳化等环境及其耦合作用影响,结构内部材料发生劣化并引起承载力退化,最终导致结构失效^[1-2]。对于 RC 结构在海洋环境下面临的承载力退化问题,常用的研究方法包括室内试验^[3-7]、现场暴露试验^[8-12]和实际工程回访^[13-16]。其中,室内试验因难以模拟实际自然环境,其研究成果存在一定的局限性。而 RC 构件现场暴露试验能真实反映结构的承载力退化规律,是研究由混凝土劣化与钢筋锈蚀导致 RC 结构承载力退化的重要手段,能够在室内试验与实际工程之间起到桥梁连接作用。通过对 RC 构件的长期观测,可以获取与实际工程所处侵蚀环境相一致的混凝土劣化与钢筋锈蚀后物理力学性能参数,从而建立 RC 结构承载力退化模型,以及确定或调整模型中的相关参数。现场暴露试验不仅是对室内试验成果的有效验证,更是海洋工程中必不可少的基础性研究工作。因此,通过开展 RC 构件的海洋长期现场暴露试验来研究其承载力退化规律具有十分重要的意义。

由于开展 RC 构件海洋现场暴露试验需要满足选址、运输和测试等条件,实现难度较高。国外虽已从 19 世纪初就开始了现场暴露试验^[17],但目前大部分现场暴露试验的关注点在混凝土和钢筋的材料性能劣化,如 Poupard 等^[11]在英法边界的 Rance's 大坝附近与 Sainte Anne de Portzie 进行了预应力钢筋混凝土梁 40a 的现场暴露试验、Tang 等^[12]在瑞典西海岸 Träslövsläge 进行了 RC 板 21a 现场暴露试验,均未测试 RC 构件承载力劣化情况。我国也开展了 RC 构件在海洋环境下的现场暴露试验,如冷发光等^[18]在天津大港进行了 RC 桩现场暴露试验,范志宏等^[19-20]在广东湛江港进行了 RC 梁现场暴露试验,李震等^[21]在海南八所港

进行了 RC 试件现场暴露试验,研究人员关注点同样在材料劣化方面。而在南海高温、高湿、高盐且天气恶劣的气候条件下,RC 结构面临严峻耐久性劣化问题^[12],相关结构承载力退化研究报道较少。

为研究热带海洋严酷环境下 RC 结构承载力退化规律,本课题组在南海某岛进行了现场暴露试验,将 C50、C80 强度等级的 RC 构件分别置于水下区、潮汐区、浪溅区与大气区进行现场暴露。通过对水下区暴露 3.5a 后 RC 构件进行材料物理力学性能与构件承载力测试,系统分析了 RC 构件受海水长期侵蚀后混凝土劣化和钢筋锈蚀后物理力学性能变化,包括总氯离子含量分布、混凝土抗压强度(f_{cu})、混凝土相对动弹性模量(E_r)、钢筋失重率(η_s),并通过加载破坏试验得到了梁受弯极限承载力(M_u)与柱大偏心受压极限承载力(N_u),对构件的混凝土损伤、钢筋锈蚀状态、抗裂与承载力性能进行评估,为热带海洋环境下 RC 结构的耐久性设计与施工验收规范提供可靠的验证依据。

1 试验概况

1.1 原材料

采用 P·I 52.5 水泥(比表面积 $360\text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,化学成分见表 1,物理力学性能见表 2)、河沙(细度模数 2.55)、石灰岩碎石与玄武岩碎石(C50 混凝土采用石灰岩碎石,C80 混凝土采用玄武岩碎石,5~20 mm 连续级配)、S95 级矿粉(比表面积 $450\text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)、硅灰(比表面积 $20\ 000\text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)、PCA-(I)聚羧酸高性能减水剂(含固量 30%)与自来水。混凝土的基础设计强度为 C50 与 C80,详细配合比与基础力学性能见表 3。本试验所采用的钢筋型号、直径,及钢筋的实测屈服强度(f_y)、极限抗拉强度(f_u)与伸长率(τ)见表 4。

表 1 水泥化学成分

Tab. 1 Chemical composition of cement

化学成分	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
质量占比/%	0.77	20.87	4.87	3.59	64.47	2.13	2.52	0.65	0.11

表 2 水泥物理力学性能

Tab. 2 Physical and mechanical property of cement

初凝时间 / min	终凝时间 / min	比表面积 / $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	标准稠度 用水量/%	安定性	抗压强度		抗折强度	
					/ MPa		/ MPa	
					3 d	28 d	3 d	28 d
127	182	368.9	27.4	合格	26.4	57.1	4.4	7.8

表 3 混凝土配合比与基础力学性能

Tab. 3 Mix ratio and foundation mechanical property of concrete

强度等级	原材料/kg·m ⁻³							W/B	塌落度/mm	28 d 标准抗压强度/MPa
	水泥	矿粉	硅灰	水	砂	碎石	减水剂			
C50	342	157	0	156.1	675	1 122	9.98	0.32	175	66.1
C80	408	157	79	141.6	683	1 025	16.10	0.23	190	94.9

表 4 钢筋拉伸力学性能

Tab. 4 Tensile mechanical properties of steel bars

钢筋型号	直径/mm	f_y /MPa	f_u /MPa	$\sigma/\%$
HPB300	8	353.8	486.6	14.7
HRB400	16	479.1	598.4	18.3
HRB400	20	469.8	612.2	23.4

1.2 RC 构件设计与制作

RC 梁横截面为矩形,长×宽×高=1 500 mm×150 mm×200 mm,受拉主筋为 2 根直径 16 mm 的 HRB400 螺纹钢筋,配筋率为 2.23%,详细配筋见图 1(a). RC 柱横截面为矩形,长×宽×高=1 500 mm×200 mm×240 mm,按对称配筋,主筋和架立筋均采用 2 根直径 20 mm 的 HRB400 螺纹钢筋,配筋率为 2.62%,详细配筋见图 1(b). RC 构件的混凝土保护层厚度为 25 mm.

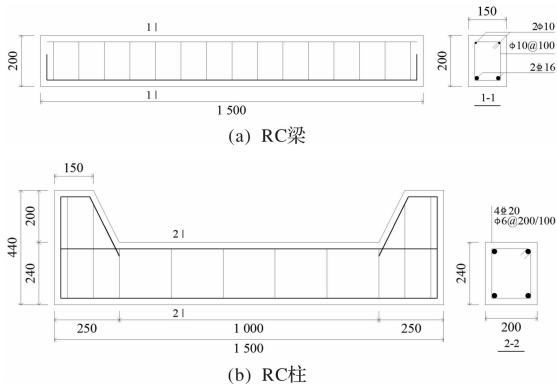


图 1 RC 构件配筋图(mm)

Fig. 1 Reinforcement diagram of the RC members/mm

先按 RC 构件配筋设计制作钢筋笼,并加工木模具.将粗骨料、水泥、矿渣、粉煤灰与细骨料依次加入混凝土强制式搅拌机,干拌 1 min,再加入搅拌均匀的减水剂与自来水的混合溶液湿拌 3 min,最后出料、浇筑与振动,构件成型. RC 构件覆膜养护 24 h 后脱模,再自然养护至 28 d. RC 构件的制作在位于广东省湛江市的一间预制混凝土构件厂房内完成,自然养护期间气温 26 ℃,空气相对湿度 74%.完成养护的 RC 构件分成 2 批,一批作为基准组,另一批经货轮运输至暴露试验的南海某岛屿,并完成现场投放.

1.3 试验与测试方法

本课题组在中国南海某岛建立了热带海洋混凝土暴露站,试验环境包括水下区、潮汐区、浪溅区与大气区.试验地年平均表层水温 28.6 ℃,年平均气温 28.1 ℃,年平均空气相对湿度 80.8%.将 RC 构件分别于 4 个试验环境进行现场暴露,其中水下区位于低潮位时水深 0.5 m 处,如图 2 所示.

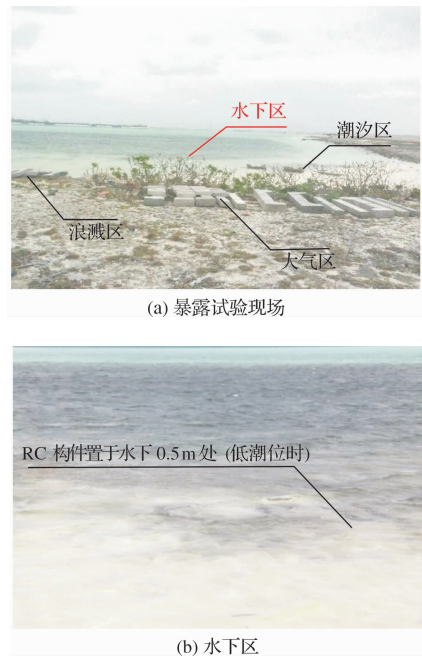


图 2 热带海洋混凝土暴露站

Fig. 2 Tropical marine concrete exposure site

经现场暴露 3.5a 后,对于水下区 RC 构件,按每个强度等级 RC 梁 1 根、RC 柱 1 根,进行回收.回收后 RC 构件在实验室进行各项耐久性与力学性能测试,包括混凝土回弹值与超声波波速测试、钢筋锈蚀率与拉伸测试、RC 梁受弯与 RC 柱大偏心受压测试,以获取材料耐久性与结构力学性能劣化特征与规律.基准组 C50 与 C80 梁编号为 B1 与 B2,经暴露后 C50 与 C80 梁编号为 B3 与 B4;基准组 C50 与 C80 柱编号为 C1 与 C2,经暴露后 C50 与 C80 柱编号为 C3 与 C4.

图 3 为 RC 构件经暴露试验后,回收时外观.可见,RC 构件受海水长期侵蚀过程中,其表面附

着一层 2 mm 左右厚度白色致密珊瑚粉。该珊瑚粉层的形成可能会阻碍海水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等有害离子渗透进入混凝土,从而削弱海水对 RC 构件侵蚀。对 RC 构件进行表面清理后,发现 B3 与 C3 表面虽未发生混凝土剥落,其他面外观良好,但在底面受拉筋处已出现因钢筋锈蚀而引起的锈斑,并伴随较细纵向裂缝,如图 3(c)所示,而 B4 与 C4 并未出现受海水侵蚀而发生损伤的明显特征。由此初步判断,C50 构件中钢筋已发生锈蚀,而 C80 构件中钢筋锈蚀状态需要进一步测试与评估。

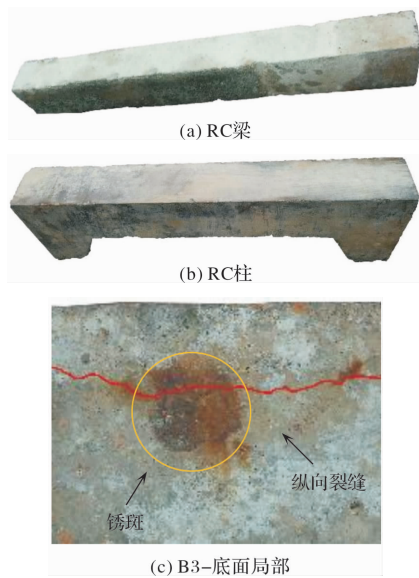


图 3 RC 构件经暴露试验后外观

Fig. 3 Appearance of the RC members after exposure

1.3.1 氯离子含量测试

在 RC 构件底面中部 900 mm 区域,沿渗透面垂直方向逐层钻取混凝土粉末样品,分层取样深度 5 mm,RC 梁与 RC 柱的取样总深度分别为 75 与 100 mm。混凝土粉末样品按《水运工程混凝土试验检测技术规范》^[22]进行总氯离子含量($C_{\text{cl}}/\%$,混凝土质量占比)测试,得到 RC 构件中 C_{cl} 随扩散深度分布。

1.3.2 回弹值与超声波测试

按《超声回弹法检测混凝土缺陷技术规程》^[23]对 RC 构件分区进行混凝土超声波测试与回弹值测试,并依据式(1)^[23]计算混凝土的相对动弹性模量 E_r 为

$$E_r = \left(\frac{v_t}{v_0} \right) = \left(\frac{t_0 - t_c}{t_n - t_c} \right)^2 \quad (1)$$

式中: t_0 为暴露试验前超声波在 RC 构件与耦合剂中的总传播时间, μs ; v_0 为暴露试验前超声波

在 RC 构件中的波速, $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; t_c 为超声波在耦合剂中的传播时间, μs ; t_n 为暴露试验后超声波在 RC 构件与耦合剂中的总传播时间, μs ; v_t 为暴露试验后超声波在 RC 构件中的波速, $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由回弹值与超声法测试得到的混凝土 v_t , 依据式(2)^[22]计算混凝土抗压强度 f_{cu} (MPa)为

$$f_{\text{cu}} = 0.016 2 v_t^{1.656} R_t^{1.410} \quad (2)$$

式中: R_t 为 RC 构件经暴露试验后的混凝土回弹值。再依据《混凝土结构设计规范》^[24]中的式(3)与式(4)分别计算混凝土轴心抗压强度 f_c (MPa)与轴心抗拉强度 f_t (MPa)为

$$f_c = 0.88 \alpha_1 \alpha_2 f_{\text{cu}} \quad (3)$$

$$f_t = 0.347 6 \alpha_2 f_{\text{cu}}^{0.55} (1 - 1.645 \delta)^{0.45} \quad (4)$$

式中: α_1 为混凝土棱柱体强度与立方体强度比值; α_2 为 C40 以上混凝土的脆性折减系数; δ 为混凝土立方体强度变异系数。

1.3.3 RC 梁受弯测试

RC 梁加载过程按《混凝土结构试验方法标准》^[25]要求执行。试验梁计算跨度 1 200 mm, 支座两端各留 150 mm, 通过分配梁在计算跨度的 1/3 处施加 2 个集中荷载, 具体测试装置如图 4(a)所示。加载过程中, 采用荷载传感器控制与监测试验梁的应力变化; 混凝土应变片和位移传感器的电信号值则通过 DH3818 静态应变仪采集; 采用 SW-B-201 裂缝观测仪观察裂缝的出现、发展, 并测量垂直裂缝在试验梁侧面相应于受拉主筋处的宽度 w/mm 。5 个 YWC-50 位移传感器分别安装在试验梁的支座、左右加载点与跨中位置, 以测量支座处的沉降位移、加载点与跨中的挠度 f/mm , 得到试验梁整体的受弯变形曲线。在试验梁的跨中沿截面高度方向布置了 5 个等距的混凝土应变片, 以验证截面应变在加载过程中是否满足平截面假定。正式加载前, 预压 10 kN; 正式加载时, 试验梁开裂前, 每级 1 kN 加载, 待出现可见裂缝, 测量其宽度并记录相应开裂荷载; 开裂后至裂缝全部出现, 每级 5 kN 加载; 裂缝全部出现至试验梁破坏, 每级 2 kN 加载; 每级荷载持荷 10 min, 待荷载及裂缝稳定后进行应变片与位移计的电信号采集, 以得到混凝土应变值与试验梁挠度, 同时测量裂缝的宽度并绘制裂缝分布图。

根据《水工混凝土结构设计规范》^[26]中的理论模型, 通过实测值来验证 RC 梁开裂弯矩 M_K (kN · m)、极限弯矩 M_u (kN · m) 与最大裂缝宽度

w_{\max}/mm ;

(1) M_{cr} 验证模型^[26]

$$M_{cr} \leq \gamma_m \alpha_{ct} f_t W_0 \quad (5)$$

式中: γ_m 为截面抵抗矩塑性系数(取 1.35); α_{ct} 为混凝土拉应力限制系数(取 0.85); f_t 为混凝土轴心抗拉强度, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$; W_0 为换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩。

(2) M_u 验证模型^[26]

$$M_u \leq f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y A_y' (h_0 - a_s') \quad (6)$$

式中: f_c 为混凝土轴心抗压强度, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$; b 为构件截面宽度, mm; x 为受压区高度, mm; h_0 为截面的有效高度, mm; f_y' 为架立筋抗拉强度, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$; A_s' 为架立筋截面面积 mm^2 ; a_s' 为架立筋合力点至混凝土受压区边缘距离, mm。

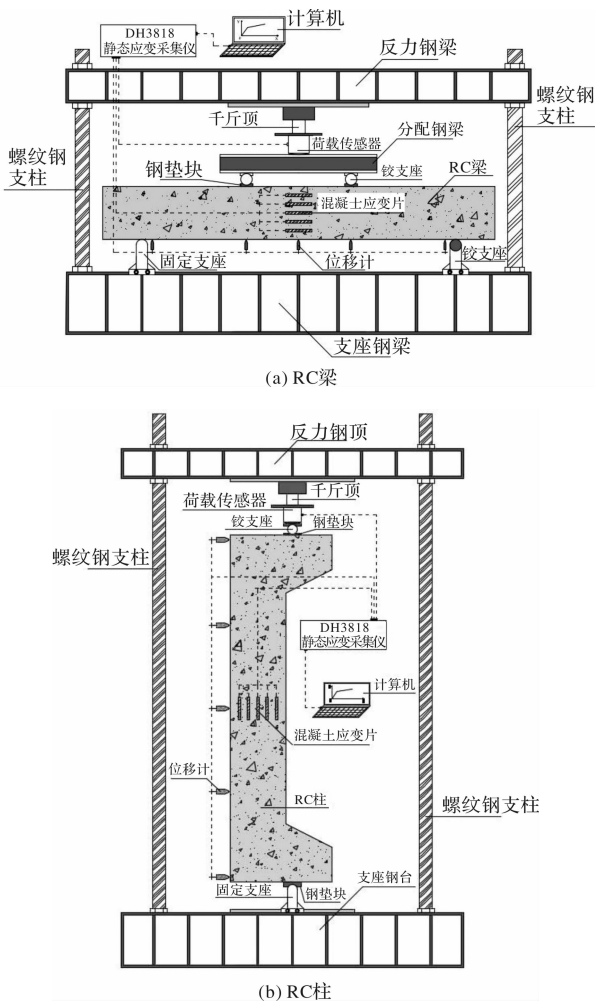


图4 RC构件加载测试装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of RC members loading test

1.3.4 RC柱大偏心受压测试

RC柱的大偏心受压加载过程按照《混凝土结构试验方法标准》^[24]要求执行, 加载测试装置如图4(b)所示. 将试验柱置于测试台, 上端为铰支

座, 下端为固定支座, 偏心距 e 设置为 160 mm. 在试验柱上端固定 1 个 YWC-50 位移传感器, 用于测量构件轴向伸缩. 在试验柱的受拉面设置 5 个 YWC-50 位移传感器, 用于测量侧向弯曲变形曲线. 并在试验柱侧面中部沿截面高度方向布置 5 个等距的混凝土应变片, 以验证截面应变在加载过程中是否满足平截面假定. 数据采集、裂缝观测的工作与试验梁的测试过程相同. 正式加载前, 预压 50 kN; 正式加载时, 试验柱开裂前, 以每级 10 kN 加载, 待出现可见裂缝时, 测量其宽度并记录相应开裂荷载; 开裂后至裂缝全部出现, 以每级 20 kN 加载; 裂缝全部出现至试验柱破坏, 以每级 10 kN 加载; 每级荷载持荷 10 min, 待荷载及裂缝稳定后进行应变片与位移计的电信号采集, 以得到混凝土应变值与试验柱挠度, 同时测量裂缝的宽度并绘制裂缝分布图。

根据《水工混凝土结构设计规范》^[26]中的理论模型, 通过实测值来验证试验柱的开裂荷载 N_{cr} (kN) 与极限荷载 N_u (kN):

(1) N_{cr} 验证模型^[26]

$$N_{cr} \leq \frac{\gamma_m \alpha_{ct} f_t A_0 W_0}{e_0 A_0 - W_0} \quad (7)$$

式中: e_0 为轴向力对截面重心的偏心距, mm; A_0 为换算截面面积, mm^2 。

(2) N_u 验证模型^[26]

$$\begin{cases} N_u \leq f_c b x + f_y A_s' - \sigma_s A_s \\ N_u e \leq f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y A_s' (h_0 - a_s') \end{cases} \quad (8)$$

式中: σ_s 为受拉筋应力, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$; A_s 为受拉筋截面面积, mm^2 。

2 结果与讨论

2.1 混凝土中氯离子扩散行为

图5为RC构件经现场暴露后, 实测混凝土中 C_l 随扩散深度分布. C50 构件与 C80 构件混凝土中氯离子扩散深度分别达到 40 与 35 mm, 两者相差较小, 但在同一扩散深度下, C50 构件混凝土中 C_l 均明显高于 C80 构件. 这是由于 C80 混凝土较 C50 混凝土具有更高密实度, 孔隙率低, 且 C80 混凝土配合比中掺入的硅灰物理填充混凝土结构内部孔隙, 进一步降低混凝土孔隙率, 对氯离子在混凝土中渗透传输形成更大阻碍. 在 RC 构件中受拉钢筋表面, C50 构件 B3 与 C3 的 C_l 分别为 0.106% 与 0.092%; C80 构件 B4 与 C4 的 C_l 分别为 0.175% 与 0.046%. 一般认为, RC 构

件中钢筋发生腐蚀的临界氯离子含量为 0.05%, 即当钢筋表面处 $C_t > 0.05\%$ 时, 钢筋钝化膜被击穿, 钢筋发生腐蚀。C50 构件中钢筋表面 C_t 均高于 0.05%, 钢筋大概率已发生腐蚀; C80 梁中钢筋表面 $C_t < 0.05\%$, 可能未发生腐蚀; 而 C80 柱中钢筋表面 $C_t > 0.05\%$, 钢筋发生腐蚀概率较大。

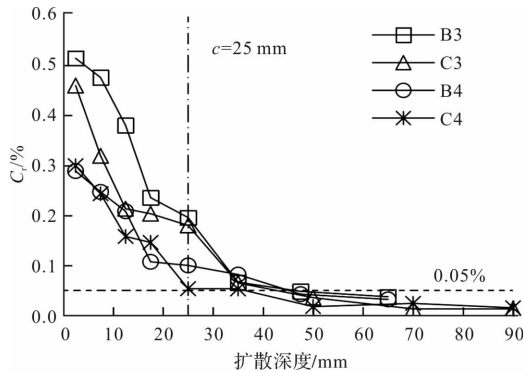


图5 RC构件中氯离子含量分布

Fig. 5 Distribution of chloride content in RC members

2.2 混凝土相对动弹性模量与抗压强度衰减

图6为RC构件经暴露后, 通过超声波测试数据, 并根据式(1)计算得到的混凝土相对动弹性模量变化。

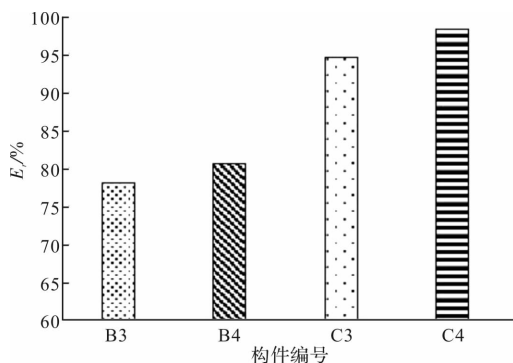


图6 RC构件中混凝土 E_r 值变化

Fig. 6 E_r change of concrete in RC members

可见, 所有RC构件的 E_r 值均出现了不同程度的下降, 这说明构件在热带环境下受海水长期侵蚀, 混凝土结构已出现不同程度损伤。虽然从C80构件的外观判断构件状态良好, 但混凝土内部有较大可能已出现微裂纹。B3与C3中混凝土的 E_r 值分别为 78.2% 与 94.7%, 即C50梁与C50柱中混凝土的动弹性模量分别减小了 21.8% 与 5.3%, 年均降幅 1.5% ~ 6.2%; B4与C4的 E_r 值分别为 80.8% 与 98.6%, 即C80梁与C80柱中混凝土的动弹性模量分别减小了 19.2% 与 1.4%, 年均降幅 0.4% ~ 5.5%。相

同混凝土强度等级的RC梁与RC柱所表现出混凝土损伤程度的差异, 这是由于采用“超声波对测法”得到的 v_t 是测距内的平均波速, 即对混凝土损伤层与未损伤层平均化处理, 因此, 在损伤层厚度与损伤程度相同的条件下, 该测试方法会造成测距较大的柱 v_t 高于梁 v_t 。不论是RC梁或是RC柱, C50构件中混凝土的 E_r 值均较C80构件小, 说明C80混凝土较C50混凝土能够更有效抵抗海水侵蚀, 减少损伤。另外, 通过“超声回弹综合法”, 并由式(2)计算得到B3、C3、B4与C4的 f_{cu} 分别为 60.7、62.3、92.1与93.4MPa, 分别较基准值下降了 8.2%、5.7%、3.0%与 1.6%, 即C50与C80混凝土 f_{cu} 的年均降幅分别为 1.6% ~ 2.3% 与 0.5% ~ 0.9%, 如图7所示。以上分析说明混凝土强度等级越高, RC构件受海水长期侵蚀后混凝土的 E_r 值与 f_{cu} 下降的速度越小, 即构件中混凝土的劣化速度降低。

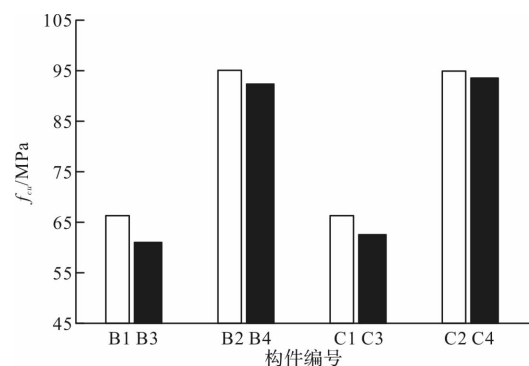


图7 RC构件中混凝土 f_{cu} 变化

Fig. 7 f_{cu} change of concrete in RC members

2.3 RC构件中钢筋拉伸性能退化

图8为RC构件经力学破坏试验后, 通过混凝土破碎而取出的部分钢筋。可见, 从C50强度等级的B3与C3中取出的受拉筋表面已附着大量深褐色锈迹, 并出现多处坑蚀(红圈标记), 呈典型的RC构件受环境侵蚀而发生的钢筋不均匀锈蚀特征。

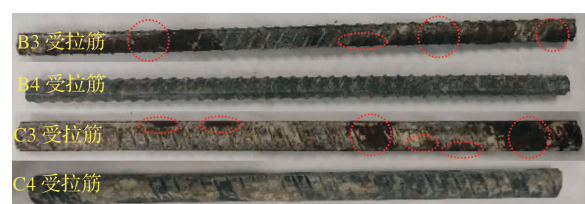


图8 RC构件中钢筋

Fig. 8 Steel bars in RC members

表5 RC构件中钢筋的失重率与拉伸力学性能

Tab. 5 Weightlessness rate and tensile mechanical properties of steel bars in RC members

RC构件编号	受拉筋				架立筋			
	$\eta_s/\%$	$f_y/$	$f_u/$	$\tau/\%$	$\eta_s/\%$	$f_y/$	$f_u/$	$\tau/\%$
		$N \cdot mm^{-2}$	$N \cdot mm^{-2}$			$N \cdot mm^{-2}$	$N \cdot mm^{-2}$	
B3	0.54	462.4	586.1	18.1	0.71	347.1	481.0	14.4
B4	0.00	480.9	601.7	18.3	0.00	353.6	486.2	14.6
C3	0.43	463.5	605.0	23.2	0.43	463.5	605.0	23.2
C4	0.00	470.3	612.6	23.5	0.00	470.3	612.6	23.5

对 RC 构件中取出的钢筋进行锈蚀率与拉伸测试, 得到 η_s 值、 f_y 、 f_u 与 τ 值, 如表 5 所示. 根据《混凝土中钢筋检测技术规程》^[27] 中钢筋失重率 (η_s) 的计算公式: $\eta_s = (m_0 - m_t)/m_0$ (m_0 、 m_t 分别为暴露试验前后钢筋质量) 得到 B3 中受拉筋与架立筋的 η_s 分别为 0.71% 与 0.54%, C3 中受拉筋的 η_s 为 0.43%. 而从 C80 强度等级的 B4 与 C4 中取出的受拉筋表面完好, 甚至未出现点蚀现象, 说明钝化膜未被破坏. 通过与表 4 比较, 对于经现场暴露试验后的 C50 构件, B3 中受拉筋、架立筋与 C3 中受拉筋的 f_y 分别较现场暴露试验前下降了 3.49%、1.89% 与 1.34%, f_u 分别下降了 2.06%、1.15% 与 1.18%, τ 值分别下降了 1.09%、2.04% 与 0.85%, 钢筋的物理延展性与拉伸力学性能均出现小幅下降. 由于 B3 与 C3 中钢筋锈蚀水平较低, 钢筋直径与型号的差异对其耐蚀性影响尚无法明确, 需对构件进行后续的跟踪测试. 而由 C80 强度等级 B4 与 C4 中钢筋的拉伸测试结果可知, 其受拉筋与架立筋的物理力学性能与现场暴露试验前的状态基本相同.

2.4 RC 梁受弯正截面承载力退化

2.4.1 平截面假定验证

通过混凝土应变片测得各级弯矩作用下, B1、B2、B3 与 B4 跨中混凝土 ϵ 随截面高度的分布情况, 如图 9 所示.

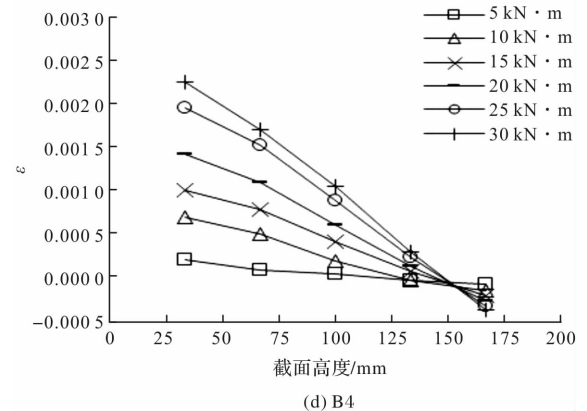
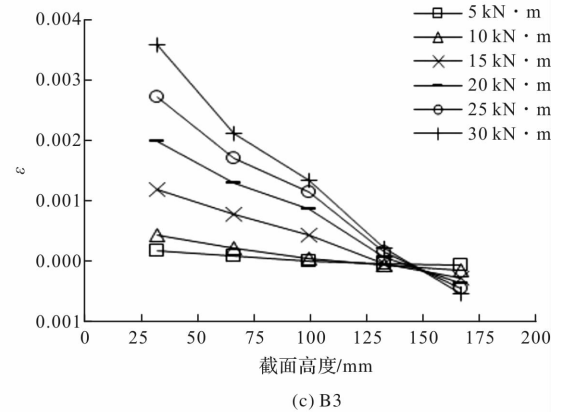
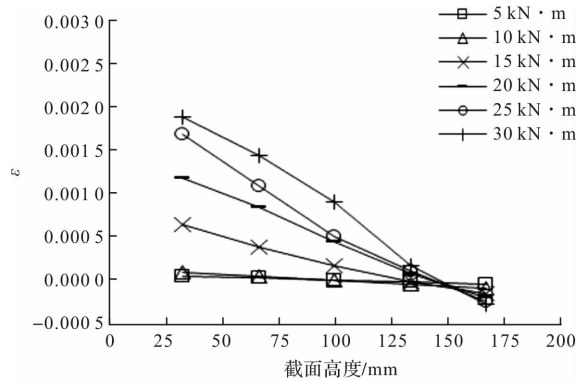
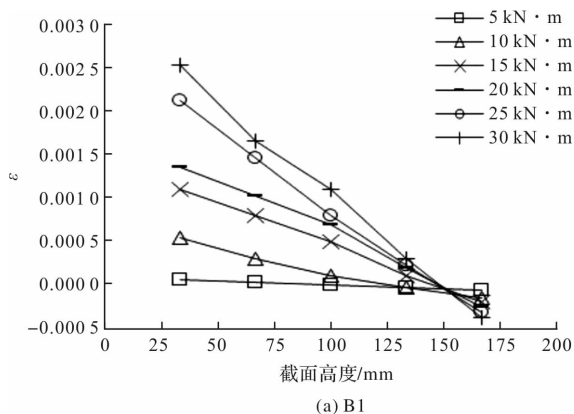


图9 混凝土应变沿 RC 梁截面高度变化
Fig. 9 Concrete strain changes along section height of the RC beams

可见, 随着弯矩的增加, RC 梁横截面的中性轴逐渐向受压区移动. 且在各级弯矩作用下, 混凝土 ϵ 与截面高度基本呈线性关系, 说明 RC 梁横截面保持平面, 只发生转动, 满足平截面假定.

2.4.2 挠度与裂缝

图10为RC梁的弯矩与跨中挠度变化曲线。4根RC梁均为适筋破坏,受拉筋屈服,混凝土被压碎,破坏前有明显预兆。所有RC梁在加载过程中的挠度变化过程相似,具有2个明显差异性的弹性阶段与强化阶段。在弹性阶段,RC梁挠度随弯矩增大而逐渐增大,且两者呈较好线性关系,此时构件中受拉筋未屈服,由架立筋与受压区混凝土在受拉筋的合力点形成的弯矩(M_e 与 M_c)与外荷载形成的弯矩(M)形成构件内部应力平衡。

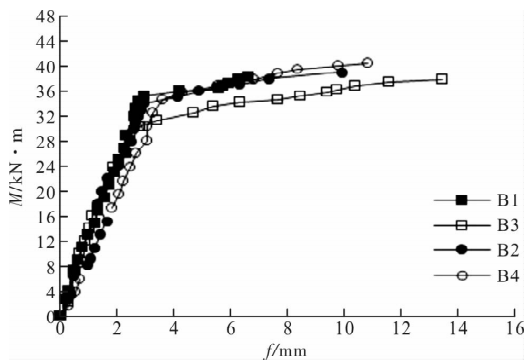


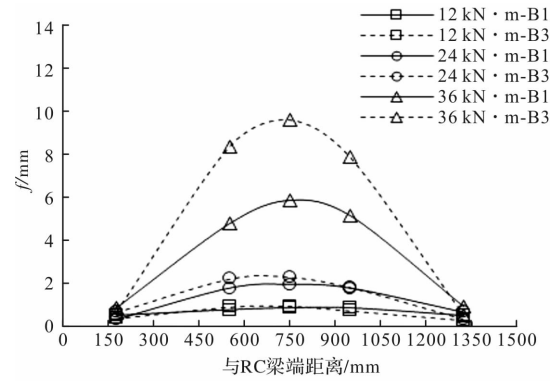
图10 RC梁弯矩-挠度变化曲线

Fig. 10 Bending moment-deflection curves of RC beams

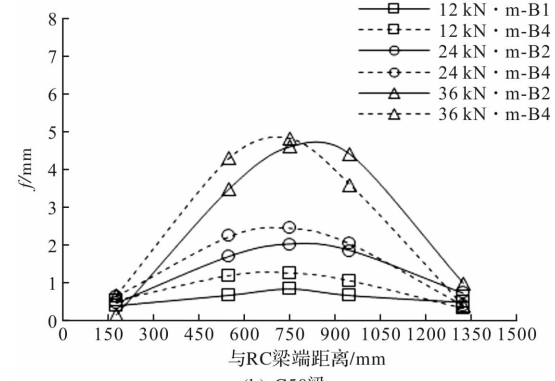
当RC梁中受拉筋达到屈服后,随着外荷载继续增大,受拉筋进入强化阶段,构件应力发展也进入强化阶段。此时受拉筋拉伸变形快速增大,构件挠度也快速发展,但 M_e 、 M_c 与 M 仍然能形成构件内部应力平衡。而当 M 超过RC梁极限弯矩 M_u 后,架立筋受压屈服、混凝土被压碎,构件内部应力释放。此时 M_e 与 M_c 之和小于 M ,构件内部应力平衡被打破,最终发生结构性破坏。B1、B2、B3与B4在 M_u 状态下的跨中挠度分别为6.59、9.92、13.50与10.85 mm, B3较B1增大了104.9%, B4较B2增大了9.4%。这说明经暴露试验后,RC梁受海水长期侵蚀导致其刚度出现下降,进而表现为受弯极限状态下挠度增大,且C50梁较C80梁刚度下降明显。这源于C50梁中混凝土损伤相对严重,混凝土弹性模量 E_c 降幅较大,且钢筋发生锈蚀(受拉筋与架立筋横截面积减小),而C80梁仅发生了相对轻微的混凝土损伤, E_c 小幅下降。

图11为RC梁在各级相对弯矩作用下构件整体弯曲变形曲线。在各级弯矩作用下, B3弯曲程度均较B1大, B4弯曲程度均较B2大,这也说明经现场暴露后C50、C80梁整体刚度出现下降。

图12为RC梁裂缝分布情况,图13为RC梁跨中弯矩-最大裂缝宽度变化曲线。在受弯极限状



(a) C50梁



(b) C50梁

图11 RC梁在各级相对弯矩作用下整体弯曲变形

Fig. 11 Overall deformation curves of RC beams under various relative bending moments

态下, B1、B2、B3与B4平均裂缝间距分别为83.3、78.3、92.5与79.9 mm, B3较B1增大了11.1%, B4较B2增大了2.0%,即经现场暴露试验后,RC梁平均裂缝间距出现不同程度增大。并且,在相同弯矩作用下, B3最大裂缝宽度较B1大, B4较B2无明显变化。

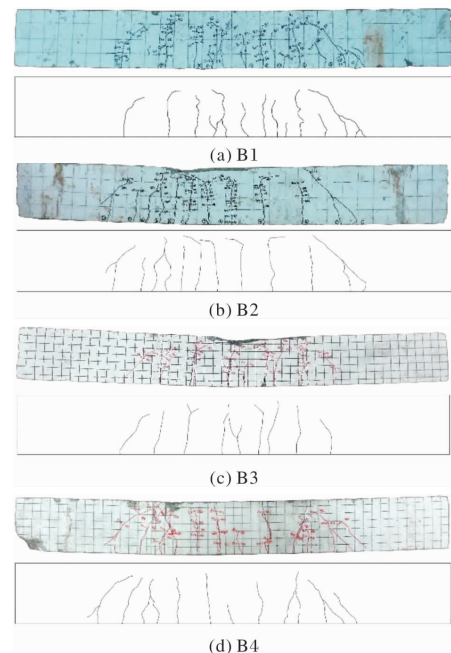


图12 RC梁裂缝分布

Fig. 12 Cracks distribution of RC beams

2.4.3 正截面受弯承载力退化

RC 梁实测开裂弯矩 M_{cr1} ($\text{kN} \cdot \text{m}$)、计算开裂弯矩 M_{cr2} ($\text{kN} \cdot \text{m}$)、实测极限弯矩 M_{u1} ($\text{kN} \cdot \text{m}$) 与计算极限弯矩 M_{u2} ($\text{kN} \cdot \text{m}$) 列于表 6。其中, M_{k2} 与 M_{u2} 通过混凝土 f_{cu} 、表 5 中受拉筋 f_y 与架立筋 f_y' , 分别根据式(5)与式(6)计算。B1、B2、B3 与 B4 的 M_{k1} 分别为 8.2、9.6、7.4 与 9.2 $\text{kN} \cdot \text{m}$, M_{u1} 分别为 38.4、39.8、36.2 与 38.6 $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。经现场暴露后 C50 梁 M_{k1} 、 M_{u1} 与 w_{max1} 分别下降了 9.8%、6.3% 与 6.8%, C80 梁 M_{k1} 与 M_{u1} 分别下降了 4.2% 与 3.0%。经验证, 4 根 RC 梁 M_{k1} 与 M_{k2} 、 M_{u1} 与 M_{u2} 均符合良好, M_{k1}/M_{k2} 与 M_{u1}/M_{u2} 平均值分别为 1.628 与 1.315, 变异系数分别为 0.009 与 0.001。经现场暴露试验后, C50、C80 梁 M_{cr1} 与 M_{u1} 虽然都出现下降, 但混凝土强度等级的

提高能够使 RC 梁在海洋水下区环境中的抗裂性能与受弯承载力退化速度有效降低。

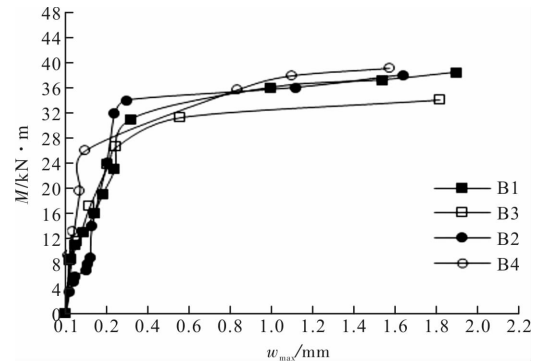


图 13 RC 梁弯矩-最大裂缝宽度变化曲线

Fig. 13 Bending moment-maximum crack width curves of RC beams

表 6 RC 梁正截面受弯承载力分析

Tab. 6 Analysis of normal section bending capacity of RC beams

RC 梁编号	$M_{k1}/\text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{k2}/\text{kN} \cdot \text{m}$	M_{k1}/M_{k2}	$M_{u1}/\text{kN} \cdot \text{m}$	$M_{u2}/\text{kN} \cdot \text{m}$	M_{u1}/M_{u2}
B1	8.2	5.0	1.65	38.4	29.0	1.32
B3	7.4	4.8	1.53	36.2	27.9	1.30
B2	9.6	5.7	1.69	39.8	29.6	1.34
B4	9.2	5.6	1.64	38.6	29.8	1.30

2.5 RC 柱大偏心受压正截面承载力退化

2.5.1 平截面假定验证

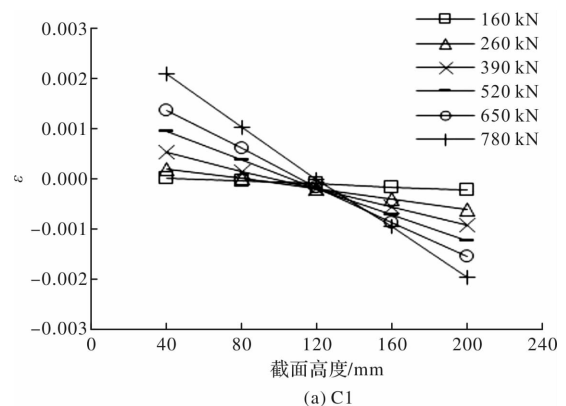
在各级竖向荷载作用下, 通过混凝土应变片测得 B1、B2、B3 与 B4 跨中混凝土 ϵ 随截面高度分布情况, 如图 14 所示。随着竖向荷载增加, RC 柱横截面中性轴逐渐向受压区移动。且在竖向荷载作用下, 混凝土 ϵ 与截面高度基本呈线性关系, 说明 RC 柱横截面在大偏心受压过程中基本满足平截面假定。

2.5.2 挠度与裂缝

图 15 为 RC 柱竖向荷载与中部侧向挠度曲线。C80 柱荷载-挠度曲线明显呈 3 个发展阶段: 从加载开始到开裂前的弹性阶段, 即 $0 < N < N_k$ 时, 受拉区混凝土处于工作状态, 随着竖向荷载增大, 挠度增长缓慢, $N-f$ 曲线的斜率较大; 开裂后到受拉筋开始屈服的弹性阶段, 受拉区混凝土逐渐退出工作, 随着竖向荷载增大, 挠度增长加快, $N-f$ 曲线斜率较小; 受拉筋开始屈服到 RC 柱发生破坏的强化阶段, 随着竖向荷载继续增大, 挠度快速增长, 最终受拉筋屈服、混凝土被压碎。而 C50 柱的荷载-挠度曲线受开裂弯矩影响较小, 仅呈 2 个发展阶段, 即加载开始到受拉筋开始屈服的弹性阶段与受拉筋开始屈服到 RC 柱发生破坏的强化阶段。C1、C2、C3

与 C4 在大偏心受压极限状态下的 f 分别为 6.92、5.81、8.89 与 7.03 mm, C3 较 C1 增大了 28.5%, C4 较 C2 增大了 21.0%。这说明经暴露试验后, RC 柱刚度也出现下降, 且 C50 柱刚度较 C80 柱下降明显, 其原因与 RC 梁相同。

图 16 为 RC 柱在各级竖向荷载作用下构件整体侧向弯曲变形曲线, 图 17 为 RC 柱上端部荷载-位移曲线。在 200、400、600 与 800 kN 竖向荷载分别作用下, RC 柱弯曲程度: $C3 > C1$ 、 $C4 > C2$ 。同样, 在相同竖向荷载作用下, RC 柱上端部位移: $C3 > C1$ 、 $C4 > C2$ 。这也说明经现场暴露后, RC 柱受混凝土损伤与钢筋锈蚀影响, C50 柱与 C80 柱刚度均出现不同程度下降, 表现为在相同竖向荷载作用下弯曲程度与端部位移增大。



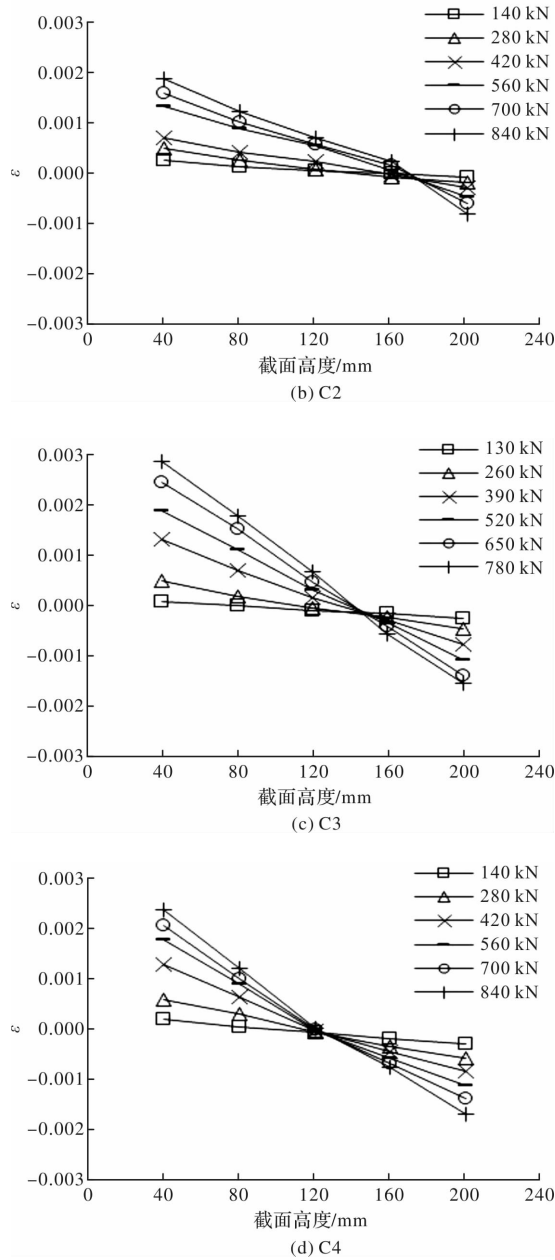


图 14 混凝土应变沿 RC 柱截面高度变化
Fig. 14 Concrete strain changes along section height of the RC columns

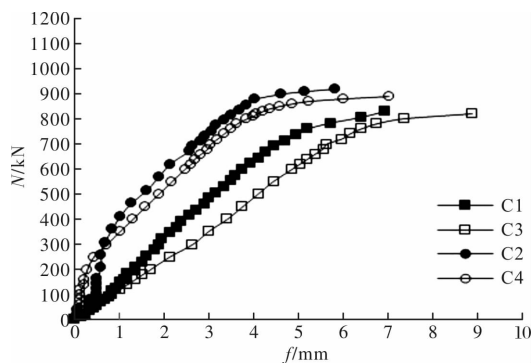


图 15 RC 柱荷载-挠度变化曲线
Fig. 15 Load-deflection curves of RC columns

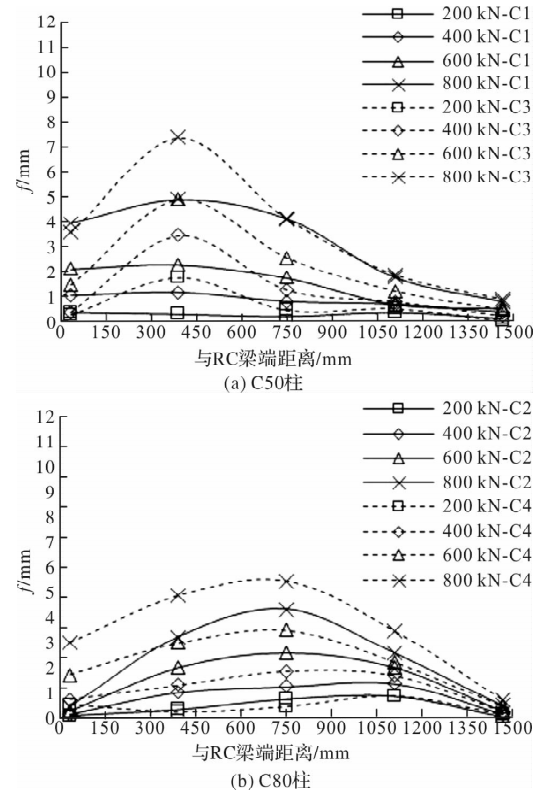


图 16 RC 柱在各级弯矩作用下整体弯曲变形
Fig. 16 Overall deformation curves of RC columns under various relative bending moments

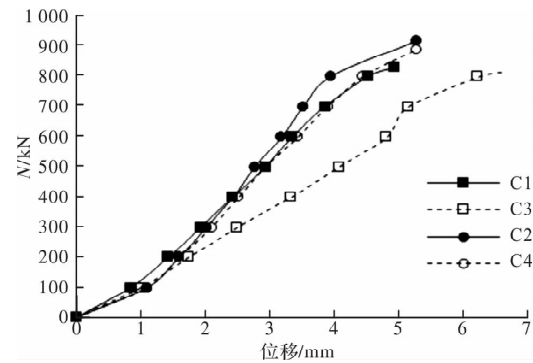


图 17 RC 柱上部荷载-位移曲线
Fig. 17 Load-displacement curves at the upper end of RC columns

图 18 为 RC 柱的裂缝分布情况, 图 19 为 RC 柱侧面受拉钢筋重心处的荷载-最大裂缝宽度变化曲线. 在大偏心受压极限状态下, C1、C2、C3 与 C4 平均裂缝间距分别为 83.4、82.3、85.3 与 83.1 mm, C3 较 C1 增大了 2.3%, C4 较 C2 增大了 1.1%. 这说明经现场暴露后, 与 RC 梁测试结果相似, RC 柱平均裂缝间距也出现不同程度增大. 并且, 在相同竖向荷载作用下, C3 最大裂缝宽度较 C1 的大, 而 C4 较 C2 无明显变化. 由图 19 可见, 从 RC 柱开裂到受拉钢筋发生屈服前, 4 根 RC 柱 w_{\max} 与竖向荷载均呈较好线性增长关系, 但差异性较小; 随着竖向荷载继续增大, RC 柱进入强化阶段, 此

时受拉筋在屈服状态下塑性变形快速增大,致使 w_{\max} 也迅速增大,在强化阶段下4根RC柱 w_{\max} 大小顺序: C2>C4>C1>C3.

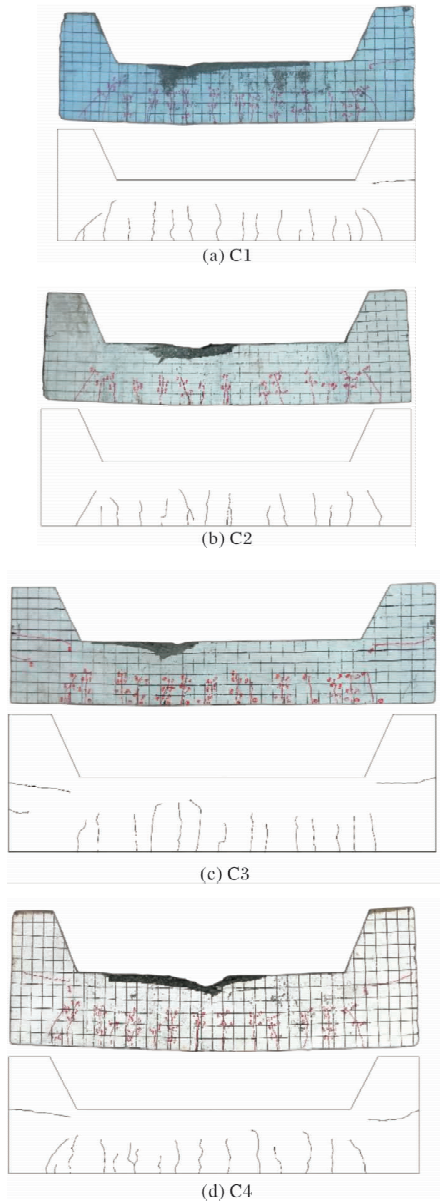


图 18 RC 柱裂缝分布

Fig. 18 Cracks distribution of RC columns

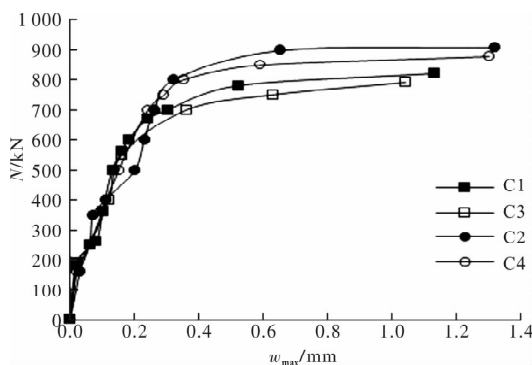


图 19 RC 柱荷载-最大裂缝宽度变化曲线

Fig. 19 Load-maximum crack width curves of RC columns

2.5.3 正截面受压承载力退化

RC 柱实测开裂荷载 N_{cr1} (kN)、计算开裂荷载 N_{cr2} (kN)、实测极限荷载 N_{u1} (kN) 与计算极限荷载 N_{u2} (kN) 列于表 7. 其中, N_{cr2} 与 N_{u2} 通过实测混凝土 f_{cu} 、受拉筋 f_y 与架立筋 f_y' , 分别根据式(8)与式(9)计算. C1、C2、C3 与 C4 的 N_{cr1} 分别为 140、160、130 与 160 kN, N_{u1} 分别为 830、920、820 与 890 kN. 经现场暴露试验后 C50 柱 N_{cr1} 与 N_{u1} 分别减小了 1.2% 与 7.1%, C80 柱 N_{cr} 与 N_u 分别下降了 0.0% 与 3.3%. 经验证, 4 根 RC 柱 N_{cr1} 与 N_{cr2} 、 N_{u1} 与 N_{u2} 均符合良好, N_{cr1}/N_{cr2} 与 N_{u1}/N_{u2} 平均值分别为 1.177 与 1.134, 变异系数分别为 0.001 与 0.013. 这说明经暴露试验后, RC 柱与 RC 梁情况相似, 其在大偏心受压条件下正截面抗裂性能与极限受压承载力均出现小幅退化, 但 C80 柱抗裂性能与极限受压承载力退化速度明显较 C50 柱慢.

表 7 RC 柱正截面受压承载力分析

Tab. 7 Analysis of normal section compressive bearing capacity of RC columns

RC 柱 编号	N_{cr1}/kN	N_{cr2}/kN	N_{cr1}/N_{cr2}	N_{u1}/kN	N_{u2}/kN	N_{u1}/N_{u2}
C1	140	117	1.20	830	717	1.16
C3	130	109	1.19	820	694	1.18
C2	160	150	1.07	920	766	1.20
C4	160	148	1.08	890	763	1.17

通过以上 RC 梁、柱构件正截面承载力退化分析可知, 在热带海洋水下区环境侵蚀过程中, 钢筋尚未发生锈蚀前, RC 构件中混凝土损伤劣化引起抗压强度下降、构件整体刚度下降, 导致构件承载力下降. 而在钢筋发生锈蚀后, 由混凝土抗压强度下降、构件整体刚度下降和钢筋截面积减少, 三者共同导致构件承载力下降.

3 结论

(1) 经南海水下区现场暴露 3.5a 后, RC 构件中混凝土的动弹性模量与 f_{cu} 出现下降, C50 混凝土年均降幅分别为 1.5%~6.2% 和 1.6%~2.3%, C80 混凝土年均降幅分别为 0.4%~5.5% 和 0.5%~0.9%, C80 混凝土的劣化速度明显低于 C50 混凝土;

(2) 保护层厚度为 25 mm 时, C50 构件中钢筋已发生锈蚀, 受拉筋与架立筋的 τ 值、 f_y 与 f_u 均出现下降, 而 C80 构件具备较好的抗海水侵蚀性能, 其内部钢筋未发生锈蚀;

(3)受海水长期侵蚀,在受弯条件下,RC梁的 M_k 与 M_u 均出现不同程度下降,且C50梁的抗裂性能与极限受弯承载力退化速度明显较C80梁快;

(4)受海水长期侵蚀,在大偏心受压条件下,C50柱的 N_{cr} 与 N_u 出现一定程度下降,而C80柱仅 N_u 出现轻微下降,C50柱的抗裂性能与极限抗压承载力退化趋势较C80柱明显。

参考文献 References

- [1] 金祖权,于泳,王鹏刚,等.氯盐-硫酸盐环境下钢筋混凝土腐蚀损伤[M].北京:科学出版社,2021.
JIN Zuquan, YU Yong, WANG Penggang, et al. Corrosion damage of reinforced concrete in chloride and sulfate environment [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [2] BOHNI H, HUNKELER H, SCHIEGG Y, et al. Corrosion in reinforced concrete structures[M]. London: Woodhead Publishing Limited, 2005.
- [3] HE Z, HE C, MA G, et al. Experimental investigation on the deterioration process and spatial variation of corrosion damage of RC segmental specimens under sustained load[J]. Construction and Building Materials, 2022, 349:128731.
- [4] DONG Z, GU X, JIN Z, et al. Experimental and numerical investigations on the rate-limiting step for macrocell corrosion of reinforcing steel in concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 34(1): 04021407.
- [5] 李迎珠,张勤,李文杰,等.氯盐环境下钢筋连接件受拉破坏特性研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2023,55(4):546-554.
LI Yingzhu, ZHANG Qin, LI Wenjie, et al. Study on longitudinal corrosion behavior of internal reinforcement in repaired concrete[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2023, 55(4):546-554.
- [6] 朱海威,余红发,麻海燕.阻锈剂对海洋环境下混凝土中钢筋腐蚀影响的电化学研究[J].东南大学学报(自然科学版),2020,50(1):109-119.
ZHU Haiwei, YU Hongfa, MA Haiyan. Electrochemical study on effect of rust inhibitors on corrosion of reinforcing bar in concrete in marine environment [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(1):109-119.
- [7] 陶琦.高、低浓度硫酸盐侵蚀下不同水灰比混凝土抗剪性能的受损劣化规律[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(5):630-635.
TAO Qi. Damage and deterioration of shear properties of concrete with different water cement ratio under high and low concentration sulfate attack[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(5): 630-635.
- [8] MOHAMMED T, HAMADA H, YAMAJI T. Concrete after 30 years of exposure-part II: Chloride ingress and corrosion of steel bars[J]. ACI Materials Journal, 2004, 101: 13-18.
- [9] MOHAMMED T, HAMADA H, YAMAJI T. Long-term durability of concrete made with slag cements under marine environment[J]. ACI Materials Journal, 2019, 116(5):5-16.
- [10] 张宏,朱海威,杨海成,等.冰冻海水环境下混凝土表面涂层长期暴露试验研究[J].硅酸盐通报,2022,41(4):1301-1307.
ZHANG Hong, ZHU Haiwei, YANG Haicheng, et al. Long-term exposure test of concrete surface coating in frozen seawater environment [J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2022, 41(4):1301-1307.
- [11] POUPARD O, HOSTIS V, CATINAUD S, et al. Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(3): 504-520.
- [12] TANG L, UTGENANNT P, BOUBITSAS D. Durability and service life prediction of reinforced concrete structures[J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2015, 43: 1408-1419.
- [13] YU H, DA B, MA H, et al. Durability of concrete structures in tropical atoll environment[J]. Ocean Engineering, 2017, 135:1-10.
- [14] OSLAKOVIC S, BJEGOVIC D, MIKULIC D. Evaluation of service life design models on concrete structures exposed to marine environment [J]. Materials and Structures, 2010, 43(10):1397-1412.
- [15] TANG Y, BAO Y, ZHENG Z, et al. Performance assessment of deteriorating reinforced concrete drainage culverts: A case study[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 131:105845.
- [16] SNIGDHA R, BALAJI K, NAIDU G. Reliability assessment of structures subjected to chloride ingress in marine environment[J]. International Journal of Engineering and Technical Research, 2014, 2(12):86-88.
- [17] ZHU H, YU H, MA H, et al. Advances in chloride diffusion of concrete exposed to marine field environment[C]//4th International RILEM Conferences on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 2021.
- [18] 冷发光,马孝轩,丁威,等.滨海盐渍土环境中暴露

- 17年的钢筋混凝土桩耐久性分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(11): 148-151, 144.
- LENG Faguang, MA Xiaoxuan, DING Wei, et al. Durability analysis of RC piles exposed naturally in coastal saline soil environment for 17 years[J]. Building Structure, 2011, 41(11): 148-151, 144.
- [19] 范志宏, 潘峻, 王胜年. 华南地区工程材料暴露试验研究——中长期试验[J]. 华南港工, 2008(11): 13-18.
- FAN Zhihong, PAN Jun, WANG Shengnian. Long term and medium term exposition test and research for materials in South China region[J]. South China Harbour Engineering, 2008(11): 13-18.
- [20] 王胜年, 田俊峰, 范志宏. 基于暴露试验和实体工程调查的海工混凝土结构耐久性寿命预测理论和方法[J]. 中国港湾建设, 2010(169): 68-74.
- WANG Shengnian, TIAN Junfeng, FAN Zhihong. Research on theory and method of service life prediction of marine concrete structures based on exposure test and field investigation[J]. China Harbour Engineering, 2010 (169): 68-74.
- [21] 李震, 朱雅仙, 蔡伟成, 等. 钢筋混凝土腐蚀实海暴露试验[J]. 混凝土, 2010(2): 25-28.
- LI Zhen, ZHU Yaxian, CAI Weicheng, et al. Coastal exposure test of corrosion of rebar in concrete[J]. Concrete, 2010(2): 25-28.
- [22] 中华人民共和国交通运输部. 水运工程混凝土试验检测技术规范: JTS/T 236—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Specification for concrete testing of port and waterway engineering: JGJ/T 236—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [23] 中国工程建设标准化协会. 超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程: CECS 02: 2005[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- China Engineering Construction Standardization Association. Technical specification for detecting strength of concrete by ultrasonic-rebound combined method: CECS 02: 2005[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Test method for long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: Architecture & Building, 2010.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete structures: GB/T 50152—2012[S]. Beijing: Architecture & Building, 2012.
- [27] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土结构设计规范: SL 191-2008[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for design of hydraulic concrete structures: SL 191—2008[S]. Beijing: China Water Power Press, 2008.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土中钢筋检测技术规程: JGJ/T 152—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical regulations for testing reinforcement in concrete: JGJ/T 152—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

(编辑 李睿奇)