

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20181228.001

钢筋锈蚀对全珊瑚海水钢筋/混凝土柱 大偏心受压性能的影响

达波, 余红发*, 麻海燕, 朱海威, 巩位, 吴彰钰

(南京航空航天大学 土木工程系, 南京 20016)

摘 要: 通过对不同混凝土强度等级、不同种类钢筋的全珊瑚海水钢筋/混凝土柱(CA/CC)进行大偏心受压性能试验,研究了CA/CC的破坏形态、变形和承载力,建立了荷载-位移、荷载-应变等关系,探讨了CA/CC大偏心受压极限承载力(N_u)的计算模型。结果表明:CA/CC的受力破坏机制和形态与普通骨料钢筋/混凝土柱(OA/CC)基本相似。随着混凝土强度等级的提高,CA/CC纵向受拉钢筋应变开始突变所对应的荷载逐渐增大。在加载过程中,有机新涂层钢筋与珊瑚/混凝土(CA/C)之间产生较大的滑移,使在相同混凝土强度下,普钢钢筋CA/CC的 N_u 比有机新涂层钢筋CA/CC的 N_u 大约高7.1%~20.8%。建议在CA/C结构中采用有机新涂层钢筋,能有效的抑制钢筋发生锈蚀,从而延长CA/C结构的有效服役寿命。综合考虑钢筋锈蚀和涂层钢筋滑移的影响,提出了适用于满足高强、高耐久性要求的CA/CC大偏心受压 N_u 计算模型。

关键词: 全珊瑚海水钢筋/混凝土柱;大偏心受压;混凝土强度等级;钢筋种类;钢筋锈蚀;极限承载力

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2019)10-2426-13

Influence of steel corrosion to the large eccentric compression behavior of coral aggregate reinforced concrete column

DA Bo, YU Hongfa*, MA Haiyan, ZHU Haiwei, GONG Wei, WU Zhangyu

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

Abstract: The large eccentric compression behavior of coral aggregate reinforced concrete column (CA/CC) with different types of reinforcement and concrete strength grade was tested. The failure mode, deformation and bearing capacity were investigated. The relationships of load-displacement and load-strain were established. The applicable calculation model for ultimate bearing capacity (N_u) of CA/CC under large eccentric compression was suggested. The results show that the compression behavior of CA/CC is similar to the ordinary aggregate reinforced concrete column (OA/CC). With the increase of concrete strength grade, the load corresponding to the sudden change of the strain of CA/CC longitudinal tensile steel gradually increases. In the loading process, a greater slip was produced in the layer between the organic new coated steel and coral aggregate concrete(CA/C). N_u of common steel is approximately 7.1%~20.8% higher than that of organic new coated steel. The application of organic new coated steel in the CA/C structure is suggested to effectively inhibit steel corrosion and extends the effective service life of the CA/C structure. Based on the comprehensive consideration on the effects of steel corrosion and slip of the coated steel, a calculation model for N_u of CA/CC under large eccentric compression is proposed.

Keywords: coral aggregate reinforced concrete column; large eccentric compression; concrete strength grade; reinforcement type; steel corrosion; ultimate bearing capacity

收稿日期: 2018-10-22; 录用日期: 2018-12-17; 网络出版时间: 2019-01-03 10:06

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181228.001>

基金项目: 国家自然科学基金(51678304; 51508272; 51878350; 11832013); 江苏省自然科学基金(BK20180433); 中国博士后科学基金(2018M630558)

通信作者: 余红发, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为海洋混凝土耐久性 E-mail: yuhongfa@nuaa.edu.cn

引用格式: 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 钢筋锈蚀对全珊瑚海水钢筋/混凝土柱大偏心受压性能的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(10): 2426-2438.

DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Influence of steel corrosion to the large eccentric compression behavior of coral aggregate reinforced concrete column[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(10): 2426-2438 (in Chinese).

针对我国南海岛礁工程建设背景,利用珊瑚、珊瑚砂、海水和水泥为主要原材料制备全珊瑚海水钢筋/混凝土柱(Coral aggregate reinforced concrete column, CA/CC),大量应用于港口、堤坝、机场和道路等工程建设,具有重要的国防意义和工程实用价值。然而,珊瑚天然多孔的结构“缺陷”和海水、珊瑚中含有大量的 Cl^- ,极易导致珊瑚/混凝土(Coral aggregate concrete, CA/C)中钢筋发生锈蚀^[1-2],使钢筋截面减小,屈服强度降低,混凝土截面发生损伤,从而大大降低 CA/CC 受压极限承载力(N_u)^[3-4]。因此,本文考虑钢筋锈蚀对钢筋混凝土柱承载力的影响,对 CA/CC 大偏心受压性能进行深入研究,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。

周静海等^[5]和陈宗平等^[6]对再生骨料钢筋/混凝土柱(Recycled aggregate reinforced concrete column, RA/CC)的受压性能进行了研究,发现 RA/CC 受力破坏过程及形态与普通骨料钢筋/混凝土柱(Ordinary aggregate reinforced concrete column, OA/CC)基本相似,采用 OA/CC 的 N_u 计算模型计算 RA/CC 轴心受压 N_u 时,试验值比计算值小,偏于不安全,而计算偏心受压 N_u 时,试验值比计算值大,偏于保守。Ootani 等^[7]报道了冲绳宫古岛的 CA/C 结构性能,发现 CA/C 结构强度较低,耐久性较差。Tehada 等^[8]和 Wattanachai^[9]利用线性极化电阻法,对 CA/C 的钢筋锈蚀行为进行了研究,发现 CA/C 中钢筋锈蚀速率明显高于相同配合比的普通混凝土(Ordinary portland cement concrete, OPC)。张文^[10]研究了 CA/CC 的受压性能,验证了不同规范中的计算模型在 CA/CC 中的适用性问题,建立了 CA/CC 的计算模型及其参数取值规律。但是,在 CA/CC 进行力学性能测试时,其采用的普通钢筋已经发生了严重的锈蚀,而且这种锈蚀作用尚未引入定量的数据分析。余红发^[11]和达波等^[12]对南海岛礁 CA/C 结构的耐久性进行调研,发现复杂恶劣的热带岛礁海洋环境对 CA/C 结构具有很强的腐蚀破坏作用,钢筋锈蚀率较大,其主要破坏特征为混凝土保护层胀裂、剥落、垮塌、露筋和钢筋锈断。综上所述,国内外学者多偏重于对 OA/CC 和 RA/CC 进行研究,而对 CA/CC 力学性能的研究,国内外公开文献尚不多见。因此,本文对 CA/CC 大偏心受压性能进行了试验研究。

本文以混凝土强度和钢筋种类为参数,对 9 根

CA/CC 进行大偏心受压性能试验,研究了 CA/CC 的破坏形态、变形和承载力,建立了荷载-位移、荷载-应变等的关系,基于 GB 50010—2010^[13]、JGJ 12—2006^[14]、EN—1992^[15]和 ACI 318—1999^[16]对 CA/CC 大偏心受压 N_u 的计算结果进行分析,最后,综合考虑钢筋锈蚀和涂层钢筋滑移的影响,提出了适用于 CA/CC 大偏心受压 N_u 的计算模型。为 CA/C 在岛礁工程中的应用提供基础数据和理论支持。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

南海海域某岛的珊瑚和珊瑚砂^[17],其基本物理性质见表 1; P·II 52.5 型硅酸盐水泥; 风选 I 级粉煤灰; S95 级磨细矿渣,其化学成分见表 2; PCA-I 聚羧酸高性能减水剂和亚硝酸钙阻锈剂; 模拟海水按照 ASTM D1141—2003^[18] 的规定配制,单位体积各材料含量为 $\text{NaCl} : \text{Na}_2\text{SO}_4 : \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} : \text{KCl} : \text{CaCl}_2 = 24.5 : 4.1 : 11.1 : 0.7 : 1.2$; 钢筋分别采用:普通钢筋、有机新涂层钢筋(涂层厚度为 40 μm)和 316 不锈钢,其化学成分见表 3。

表 1 珊瑚骨料的物理性质

Table 1 Physical properties of coral aggregate

Physical properties	Coral	Coral sand
Apparent density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 300	2 500
Bulk density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 000	1 115
Cylindrical compressive strength/MPa	5.2	—
Chloride content/%	0.074	0.112
Mud content/%	—	0.5
Fineness modulus	—	3.5

Notes: The coral is 5—20 mm continuous gradation; The coral sand is medium sand of I district distribution.

1.2 构件设计

以混凝土强度和钢筋种类为参数,共设计了 9 根尺寸为 200 mm×240 mm×1500 mm 的矩形截面试验柱。混凝土强度等级为 C25、C50 和 C60,钢筋种类为普通钢筋、有机新涂层钢筋和 316 不锈钢,保护层厚度为 30 mm,初始偏心距(e_i)为 160 mm。混凝土配合比见表 4, CA/CC 的基本参数见表 5。在 CA/CC 上下端设计高度为 250 mm 的牛腿以承担偏心压力。同时,为了使柱端不容易发生局压破坏,在柱端 250 mm 长度范围内对箍筋加密,加密区箍筋间距为 100 mm,非加密区箍筋间距为 200 mm。构件纵筋采用 4 根 $\Phi 20$ mm 的螺

表 2 不同种类凝胶材料的化学成分

Table 2 Chemical composition of different cementitious materials

Material	SiO ₂ /wt%	Al ₂ O ₃ /wt%	CaO/wt%	MgO/wt%	SO ₃ /wt%	Fe ₂ O ₃ /wt%	I. L/wt%	K ₂ O/wt%
Cement	21.53	4.60	64.09	0.96	2.09	3.37	1.84	0.62
Fly ash	54.88	26.89	4.77	1.31	1.16	6.49	3.10	—
Slag	33.48	12.21	36.35	10.59	0.66	1.40	0.36	0.56

表 3 不同种类钢筋的化学成分

Table 3 Chemical composition of different reinforcements

Steel	C/wt%	Si/wt%	Mn/wt%	P/wt%	S/wt%	Cr/wt%	Ni/wt%	Mo/wt%	N/wt%
Common steel	0.20	0.56	1.42	0.02	0.04	—	—	—	—
316 stainless steel	0.03	0.60	0.80	0.01	0.07	17.14	12.58	2.28	—

表 4 珊瑚/混凝土(CA/C)的配合比与拌合物性能

Table 4 Mixture proportion and properties of coral aggregate concrete(CA/C)

No.	Materials consumption per unit volume/(kg·m ⁻³)									Net W/B	Total W/B	Slump/mm	Apparent density/(kg·m ⁻³)
	CM	Cement	Slag	Fly ash	Coral sand	Coral	Total water	Water reducer	Inhibitor				
C25	500	275	150	75	873	582	250	0.0	15.0	0.30	0.50	130	2 170
C50	550	429	83	38	1 020	680	200	3.3	16.5	0.25	0.36	70	2 188
C60	1 000	780	150	70	700	300	264	6.0	30.0	0.20	0.26	255	2 267

Notes: CM—Cementitious material; Total W/B=Total water/Cementitious material; Net W/B=Net water/Cementitious material; Total water=Preabsorption water+Net water.

表 5 全珊瑚海水钢筋/混凝土柱(CA/CC)的基本参数

Table 5 Basic parameters of coral aggregate reinforced concrete column(CA/CC)

No.	Concrete strength	Steel type	<i>e_i</i> /mm	<i>f_{cu}</i> /MPa	<i>f_c</i> /MPa	<i>f_{cm}</i> /MPa	<i>f_y</i> /MPa	<i>ω</i> /%	<i>N_{cr}</i> /kN	<i>N_u</i> /kN
CL2-1	C25	B	160	47.0	40.3	42.3	530	1.82	80	400
CL2-2	C25	B	160	46.5	39.9	41.9	530	1.82	60	430
CL3-1	C50	B	160	88.3	70.3	73.8	530	1.21	90	570
CL3-2	C50	B	160	88.2	70.2	73.7	530	1.21	90	580
CL4-2	C60	C	160	104.1	81.8	85.9	922	0.10	130	570
CL5-1	C60	A	160	104.9	82.4	86.5	530	2.12	90	700
CL5-2	C60	A	160	104.6	82.1	86.2	530	2.12	110	720
CL6-1	C60	B	160	104.6	82.1	86.2	530	0.53	120	650
CL6-2	C60	B	160	103.2	81.1	85.2	530	0.53	100	570

Notes: A—Common steel; B—Organic new coated steel; C—316 stainless steel; *e_i*—Initial eccentricity; *f_{cu}*—Cube compressive strength of concrete; *f_c*—Axial compressive strength of concrete; *f_{cm}*—Flexural tensile strength of concrete; *f_y*—Yield strength of reinforcement; *ω*—Mass corrosion rate of steel; *N_{cr}*—Cracking load; *N_u*—Ultimate bearing capacity.

纹钢筋，箍筋采用 Φ8 mm 的光圆钢筋。试验柱尺寸和配筋如图 1 所示。

1.3 构件制作和养护

为了保证混凝土保护层的厚度，在钢筋笼底部和侧面固定 30 mm 厚的砂浆垫块若干。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、阻锈剂和减水剂的混合液湿拌 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 1 根试验柱和 6 个立方体试块。其中，构件采用振捣

棒人工振捣，立方体试块采用振动台振动密实。试件与试验柱制作完成，带模养护 24 h 后拆模。并以稻草覆盖，浇洒人工海水养护 240 天后进行力学性能试验。

1.4 加载方法及测点布置

试验在南京航空航天大学结构实验室进行。采用 200 000 kg 双向加载实验台，试验装置如图 2 所示。将试验柱置于实验台上，在柱上下端头设置铰支座传递荷载，并在试验柱底部和顶部分别放置钢垫板，以防止发生局部破坏。同时，在 200 000 kg 液压千斤顶上固定 1 个 YWC-50 型位移传感器，用

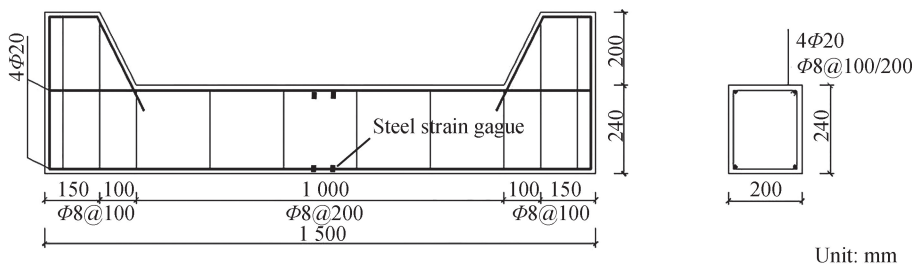


图 1 CA/CC 的配筋详图
Fig. 1 Steel details of CA/CC

于测量柱的轴向变形。在混凝土受拉侧的相应位置固定 5 个垂直于柱的 YWC-50 型位移传感器, 用于测量柱的侧向变形。此外, 为了测量钢筋应变, 混凝土浇注之前, 在每根纵向钢筋的跨中表面各贴 2 片钢筋应变片(见图 1)。为了测量混凝土应变, 在试验柱受拉侧和受压侧的中部均粘贴 1 片横向、1 片纵向混凝土应变片, 为了测量中性轴沿截面高度的变化, 在构件的跨中截面沿高度方向粘贴 5 片混凝土应变片(见图 2)。采用 200 000 kg 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(靖江, 江苏东华测试技术有限公司)采集, 用 SW-LW-201 型裂缝观测仪(廊坊, 顺泽电力设备有限公司)观察裂缝的出现与发展, 测量裂缝的宽度。

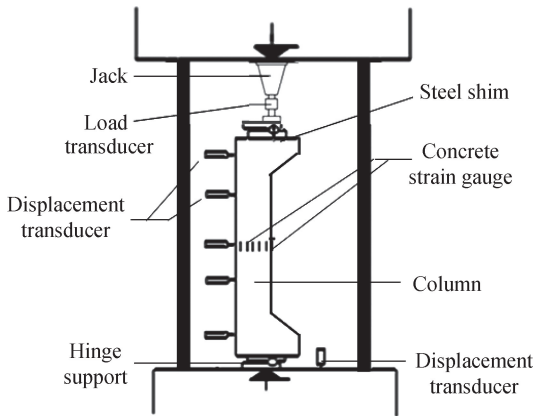


图 2 CA/CC 的加载装置示意图
Fig. 2 Loading device diagram of CA/CC

正式加载前先进行预压 50 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, 同时, 根据 3 个侧立面混凝土的应变调整作用力的轴线, 使各点应变基本相等时再进行正式加载。加载方式为: (1) 试验柱开裂前按照每级 10 kN 加载。(2) 开裂后至裂缝全部出现, 以每级 20 kN 加载。(3) 裂缝全部出现至试验结束, 以每级 10 kN

加载。

2 结果与讨论

2.1 CA/CC 破坏过程及破坏形态

图 3 为 CA/CC 的三维裂缝展开图。可知, 当荷载较小时, CA/CC 的侧向挠度变化不大, 钢筋与混凝土的应变增长缓慢, 处于弹性工作阶段。随着荷载的增大, CA/CC 受拉一侧开始出现横向裂缝, 并随着荷载的增大, 裂缝逐渐变宽并迅速向受压一侧延伸, 此时, 受压区高度不断减小, 裂缝中的拉应力全部由钢筋承担。荷载继续增大, 受拉钢筋屈服, 最后受压区混凝土被压碎, 受拉区混凝土出现一条宽度较大的主裂缝, CA/CC 破坏。属于典型的大偏心受压破坏特征, 且 CA/CC 与 OA/CC^[19-21]所表现出的特征基本相似。同时, 从 CA/CC 被压碎剥落的残渣观察, CA/C 的破坏一部分始自珊瑚骨料本身破坏, 一部分始自珊瑚骨料和水泥浆体的粘结界面破坏。

2.2 CA/CC 荷载-位移曲线

图 4 为 CA/CC 的荷载-位移曲线。可知: (1) 在加载初期, 轴向和跨中侧向位移均随荷载加大呈线性变化的规律, 处于弹性变形阶段; (2) 随着荷载的增大, CA/CC 的轴向和跨中侧向变形进入非线性阶段, 且轴向和跨中侧向变形的增长速率明显大于荷载的增长速率; (3) 当接近破坏时, 曲线基本上是水平状, 荷载基本不变, 轴向和跨中侧向变形迅速增加, CA/CC 发生破坏。

同时, 由图 4 可知, 相同荷载作用下, 随着混凝土强度等级的提高, CA/CC 的轴向和跨中侧向位移均呈减小的趋势, 临近破坏时, 随着混凝土强度等级的提高, 跨中侧向位移明显增大。表明: 随着混凝土强度等级的提高, CA/CC 的侧向变形能力逐渐增强。

此外, 由图 4 可知, 相同荷载作用下, 不同种

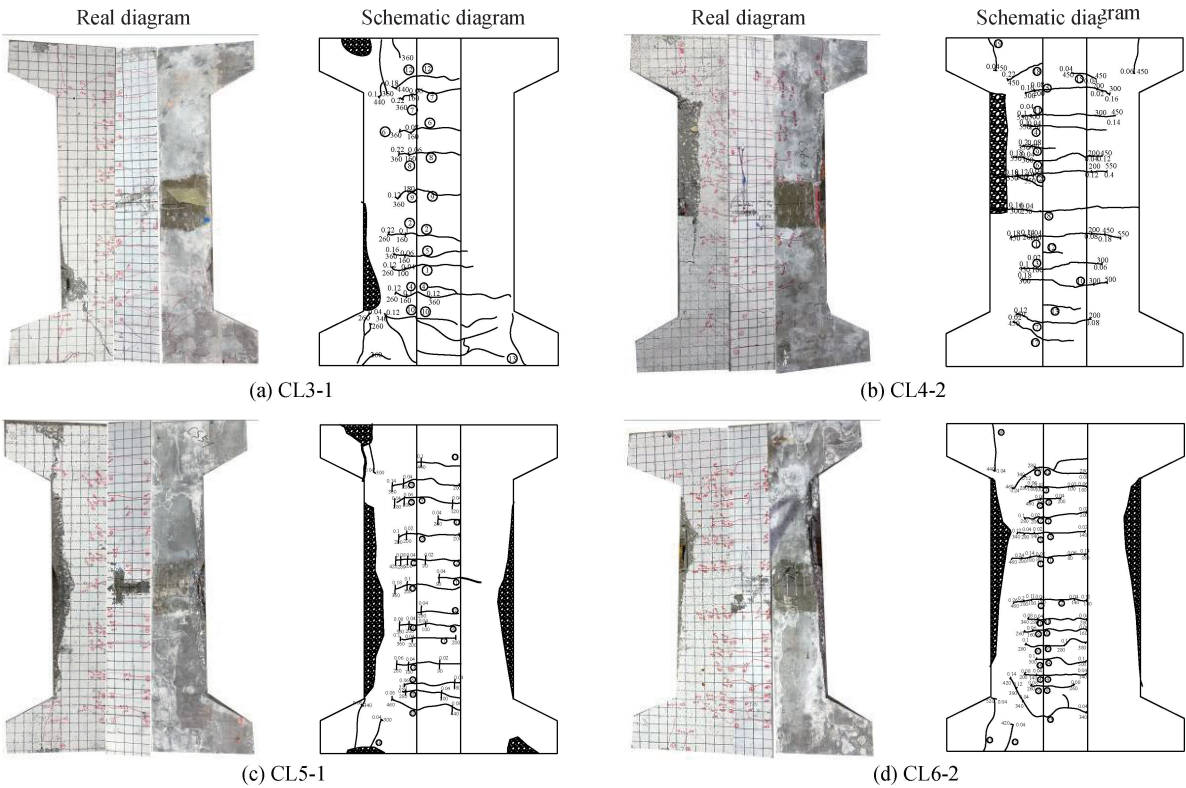


图 3 CA/CC 的三维裂缝展开图
Fig. 3 3D crack developments diagrams of CA/CC

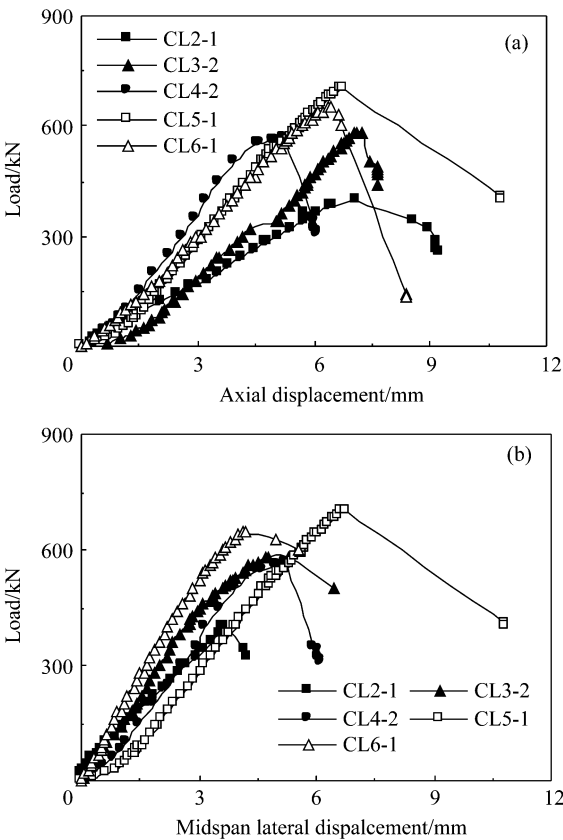


图 4 CA/CC 的荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of CA/CC

类钢筋 CA/CC 的轴向和跨中侧向位移规律均为 CL6 最大, CL5 次之, CL4 最小, 即有机新涂层钢筋>普通钢筋>316 不锈钢。表明: 随着钢筋强度的提高, CA/CC 的轴向和跨中侧向位移均逐渐减小。这主要是由于: (1) CA/CC 的 N_u 由钢筋与混凝土两部分组成, 对于混凝土强度等级相同的 CA/CC, 随着钢筋强度等级的提高, 其 N_u 逐渐增大。即抵抗变形能力逐渐增强, 因此, 316 不锈钢的轴向和跨中侧向位移最小。此外, 由于本次试验 CL4-2 的受压区混凝土过早被压碎, 使其实测 N_u 偏低, 后期的轴向和跨中侧向位移偏大; (2) 有机新涂层钢筋表面有一层保护层, 在加载过程中, 使有机新涂层钢筋与 CA/C 之间产生较大的滑移, 粘结力遭到破坏, 从而增大了 CL6-1 的轴向位移; (3) 普通钢筋(CL5-1)的轴向位移略大于有机新涂层钢筋(CL6-1), 主要是由于在 CA/C 中含有大量 Cl^- , 使普通钢筋发生了严重锈蚀, 减小了纵向受拉钢筋的有效截面, 从而降低了 CA/CC 的 N_u 。

2.3 CA/CC 荷载-应变曲线

2.3.1 荷载-轴向压应变曲线

图 5 为 CA/CC 的荷载-轴向压应变曲线。可

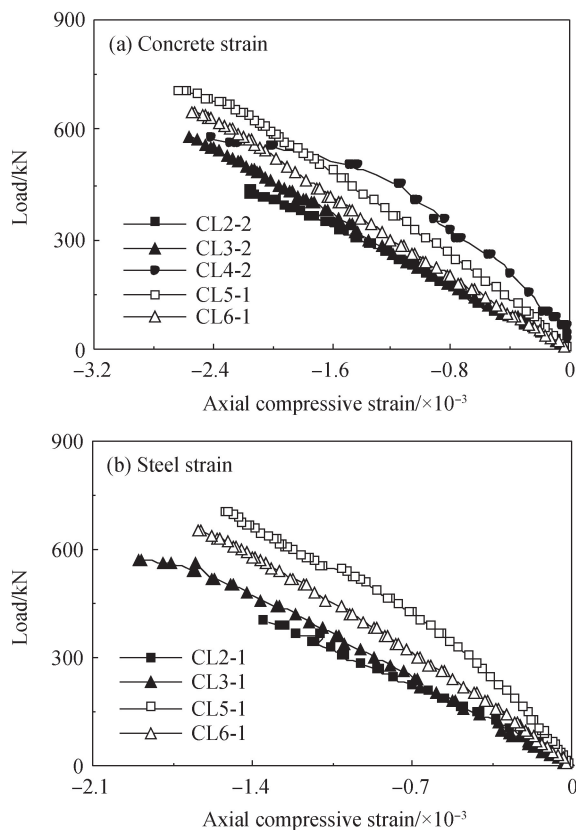


图 5 CA/CC 荷载-轴向压应变曲线

Fig. 5 Load-axial compressive strain curves of CA/CC

知, 相同荷载作用下, 随着混凝土强度等级的提高, CA/CC 的混凝土和钢筋应变均呈减小的趋势。这主要是由于: (1) 随着 CA/C 强度等级的提高, 其弹性模量有增大的趋势^[22], 即抵抗变形的能力逐渐增强, 与 OA/CC 规律一致; (2) CA/CC 的 N_u 由混凝土与钢筋两部分承担, 当荷载一定时, 随着混凝土强度等级的提高, 混凝土分担的荷载越多, 故钢筋分担的荷载越少, 即钢筋的应变减小。

由图 5 可知, 相同荷载作用下, 不同种类钢筋 CA/CC 的混凝土和钢筋应变的规律均为 CL6 最大, CL5 次之, CL4 最小。即有机新涂层钢筋 > 普通钢筋 > 316 不锈钢。主要是由于 316 不锈钢的屈服强度 ($f_y = 922$ MPa) 明显高于普通钢筋 ($f_y = 530$ MPa), 即 316 不锈钢的抗弯曲性能较强, 故在相同混凝土强度等级下, 316 不锈钢 CA/CC 的变形最小, 从而, 混凝土和钢筋应变最小。而普通钢筋 CA/CC 的钢筋和混凝土应变均略小于有机新涂层钢筋, 主要是由于有机新涂层钢筋表面有一层保护层, 降低了钢筋与 CA/C 之间的粘结

性能, 使有机新涂层钢筋与 CA/C 之间产生较大的滑移, 粘结力遭到破坏, 增大了钢筋和混凝土的应变。

2.3.2 荷载-轴向拉应变曲线

图 6 为 CA/CC 的荷载-轴向拉应变曲线。可知: (1) 随着荷载的增大, 钢筋的应变逐渐增大, 在加载初期, 钢筋的应变值都较小, 随着弯曲裂缝的出现, 钢筋的应变值开始迅速增大; (2) 可以发现 CL2-2、CL3-2、CL5-2 和 CL6-1 纵向受拉钢筋的极限应变分别为 2673×10^{-6} 、 2809×10^{-6} 、 3230×10^{-6} 和 3298×10^{-6} 。根据钢筋的力学试验结果可知, 纵向钢筋 (普通钢筋) 屈服时, 其应变估算值约为: $\epsilon = f_y/E_s = 530 \times 10^6 / (2.1 \times 10^5) = 2524 \times 10^{-6}$ 。表明: CA/CC 达到 N_u 时, 各试验柱的纵向受拉钢筋均已屈服, 与 OA/CC 大偏心受压破坏特征基本相似; (3) 比较不同混凝土强度等级 CA/CC (CL2-2、CL3-2 和 CL6-1) 的荷载-轴向拉应变曲线可知: 3 根 CA/CC 纵向受拉钢筋应变开始迅速增大对应的荷载值分别为 60、70 和 90 kN, 与表 5 统计的结果基本一致。即混凝土强度等级越高, 纵向受拉钢筋应变开始突变的荷载越大。表明混凝土分担了纵向受拉钢筋承受的部分承载力, 使纵向受拉钢筋开始发挥作用时, 所需要的外荷载值增大。

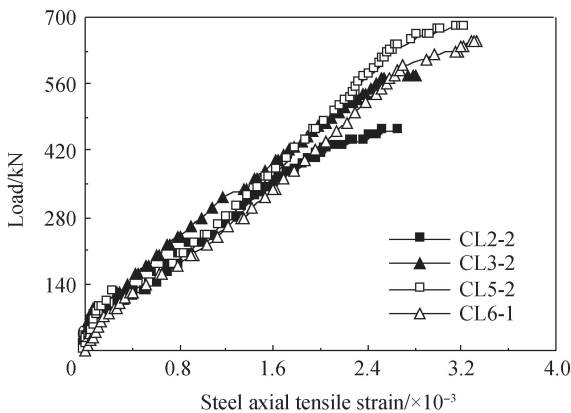


图 6 CA/CC 荷载-轴向拉应变曲线

Fig. 6 Load-axial tensile strain curves of CA/CC

2.3.3 平截面假定

图 7 为 CA/CC 的跨中截面应变分布。可知, 在外荷载不是很大的情况下, CA/CC 的跨中截面均能较好的符合平截面假定。且随着荷载增大, 裂缝逐渐变宽, CA/CC 受拉区混凝土开始退出工作, 整个截面应变不再符合平截面假定。但是除

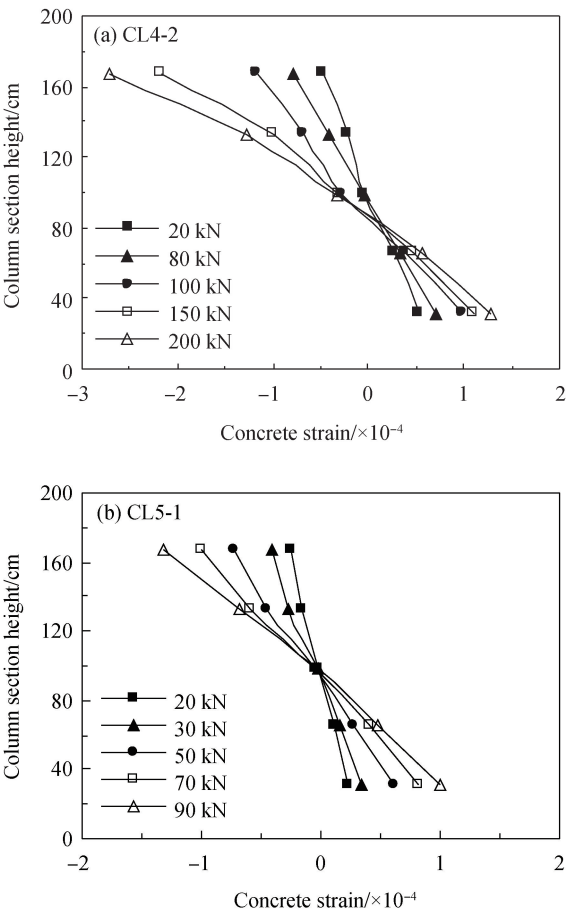


图 7 CA/CC 的跨中截面应变分布
Fig. 7 Layout of midspan strains of CA/CC

了已经退出工作的混凝土不能与试验柱共同受力，剩余部分截面的应变仍可以近似的看做符合平截面假定。

2.4 CA/CC 承载力

2.4.1 不同参数影响

图 8 为不同 CA/CC 的 N_u 。可知，CL2-1、CL2-2、CL3-1、CL3-2、CL6-1 和 CL6-2 的 N_u 分别为 400、430、570、580、650 和 570 kN，即相同 e_i 下，当混凝土强度由 C25 提高到 C50 时， N_u 增长幅度约为 27.8%。当混凝土强度由 C50 提高到 C60 时， N_u 增长幅度约为 12.3%。说明 CA/CC 的 N_u 与混凝土强度等级基本符合线性增长的关系。

此外，通过 5 根 CA/CC 的试验结果考察了钢筋种类对其 N_u 的影响，其中， $e_i=160$ mm。由图 8 可知，相同 e_i 下，不同种类钢筋 CA/CC 的 N_u 规律为普通钢筋最大，有机新涂层钢筋次之，316 不锈钢最小。主要是由于：(1) 在试验过程中，由于

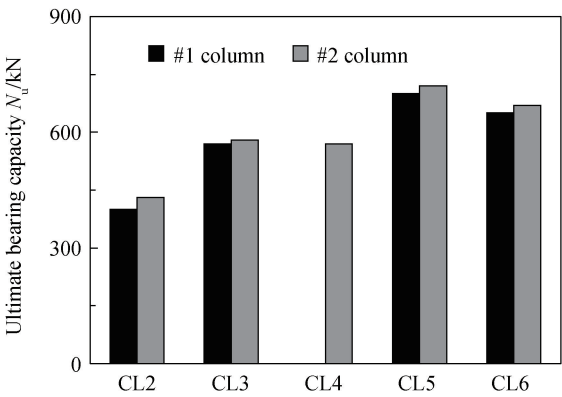


图 8 不同 CA/CC 的极限承载力 (N_u)
Fig. 8 Ultimate bearing capacity (N_u) of different CA/CC

CL4-2 的受压区混凝土过早被压碎，使其 N_u 明显偏低，故在后续研究中 CL4-2 的 N_u 不予考虑。(2) 普钢钢筋 (CL5-1、CL5-2) 比有机新涂层钢筋 (CL6-1、CL6-2) 的 N_u 高 7.1%~20.8%。主要是由于：有机新涂层钢筋表面有一层防腐保护层，在加载过程中，有机新涂层钢筋与 CA/C 之间产生较大的滑移，粘结力遭到破坏，从而 N_u 降低。说明有机新涂层钢筋的保护层对 CA/CC 的 N_u 有一定程度的影响。

2.4.2 N_u 计算模型

(1) 不同模型比较

中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[13]：

$$\begin{cases} N_u \leq \alpha_1 f_c b x + f'_y A'_s - f_y A_s \\ N_u e \leq \alpha_1 f_c b x (h_0 - x/2) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \\ e = e_i + h/2 - a_s \\ e_i = e_0 + e_a \end{cases} \quad (1)$$

式中： N_u 为极限承载力(kN)； α_1 为矩形应力图系数，按照糜人杰^[23]的研究，取 0.975； f_c 为混凝土轴心抗压强度 (MPa)； x 为混凝土受压区高度 (mm)； f_y 、 f'_y 分别为钢筋抗拉、抗压强度 (MPa)； A_s 、 A'_s 分别为纵向钢筋受拉区、受压区的截面面积 (mm²)； e 为轴向力作用点至受拉钢筋合力点之间的距离 (mm)； e_i 为初始偏心距 (mm)； e_0 为轴向力对截面重心的偏心距 (mm)； e_a 为附加偏心距 (mm)； h_0 为矩形截面的有效高度 (mm)； a_s 、 a'_s 分别为受拉、受压钢筋的合力点至截面近边缘的距离 (mm)。

中国《轻骨料混凝土结构设计规程》(JGJ 12—2006)^[14]：

$$\begin{cases} N_u \leq f_{cm}bx + f'_yA'_s - f_yA_s \\ N_ue \leq f_{cm}bx(h_0 - x/2) + f'_yA'_s(h_0 - a'_s) \\ e = \eta e_i + h/2 - a_s \\ \eta = 1 + \frac{1}{1400(e_0/h_0)} \left(\frac{l_0}{h} \right)^2 \zeta_1 \zeta_2 \\ \zeta_1 = 0.5 f_c A / N \\ \zeta_2 = 1.3 - 0.015 l_0 / h \\ e_i = e_0 + e_a \\ e_a = 0.12(0.3h_0 - e_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中： f_{cm} 为混凝土弯曲抗压强度(MPa)，取 $f_{cm} = 1.05f_{cu}$ ； η 为考虑二阶效应影响的轴向力偏心距增大系数； l_0 为构件的计算长度(mm)； ζ_1 、 ζ_2 为拟合参数，当 $l_0/h < 20$ 时， $\zeta_2 = 1$ ； e_a 为附加偏心距(mm)，当 $e_0 \geq 0.3h_0$ 时，取 $e_0 = 0$ ；其他参数的含义同式(1)。

欧洲《混凝土结构设计规范》(EN—1992)^[15]：

$$\begin{cases} N_u \leq \beta_3 f_c b (\xi_b d) \\ N_ue \leq \beta_3 f_c b (\xi_b d) (h/2 - \xi_b d/2) + f'_y A'_s (d - d_2) \\ e = e_i + h/2 - d_2 \\ \beta_3 = \begin{cases} 1.0 & f_{ck} < 50 \text{ MPa} \\ 1.0 - (f_{ck} - 50)/400 & f_{ck} \geq 50 \text{ MPa} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中： β_3 为等效混凝土应力块高度系数； ξ_b 为相对

受压区高度(mm)； d 为截面有效高度(mm)； d_2 为受压区保护层厚度(mm)；其他参数的含义同式(1)和式(2)。

美国《混凝土结构设计规范》(ACI 318—1999)^[16]：

$$\begin{cases} N_u \leq \gamma f_c bx + f'_y A'_s - f_y A_s \\ N_ue \leq \gamma f_c bx (h/2 - x/2) + f'_y A'_s (h/2 - a'_s) + f_y A_s (h_0 - h/2) \\ e = e_i + h/2 - a_s \end{cases} \quad (4)$$

式中： γ 为结构强度和试件强度的差异系数，取 0.85；其他参数的含义同式(1)和式(3)。

根据 GB 50010—2010^[13]、JGJ 12—2006^[14]、EN—1992^[15]和 ACI 318—1999^[16]计算 14 根 CA/CC 大偏心受压 N_u ， N_u^c/N_u^t 的平均值分别为 1.076、1.105、0.747 和 0.669，标准差分别为 0.110、0.093、0.101 和 0.090，变异系数分别为 0.102、0.084、0.135 和 0.135。拟合结果见表 6 和图 9。由图 9 可知，根据 GB 50010—2010^[13]、JGJ 12—2006^[14]、EN—1992^[15]和 ACI 318—1999^[16]计算的 N_u^c 与 N_u^t 符合不好。GB 50010—2010^[13]和 JGJ 12—2006^[14]计算的 N_u^c 均大于 N_u^t ，即该规程方法用于大偏心受压 CA/CC 的设计偏于不安全。

表 6 CA/CC 的 N_u 的拟合结果与实测结果

Table 6 Calculated and measured results of N_u of CA/CC

No.	N_u^t / kN	GB 50010—2010 ^[13]		JGJ 12—2006 ^[14]		EN—1992 ^[15]		ACI 318—1999 ^[16]		Eq. (8)	
		N_u^c /kN	N_u^c/N_u^t	N_u^c /kN	N_u^c/N_u^t	N_u^c /kN	N_u^c/N_u^t	N_u^c /kN	N_u^c/N_u^t	N_u^c /kN	N_u^c/N_u^t
CL2-1	400	507	1.266	508	1.270	352	0.880	333	0.832	448	1.120
CL2-2	430	526	1.223	528	1.228	360	0.837	340	0.790	466	1.084
CL3-1	570	645	1.132	651	1.142	413	0.724	396	0.695	580	1.017
CL3-2	580	652	1.124	658	1.135	416	0.717	399	0.688	586	1.011
CL4-2 *	570	883	1.549	879	1.543	647	1.135	633	1.111	878	1.540
CL5-1	700	744	1.062	753	1.075	450	0.643	438	0.626	741	1.059
CL5-2	720	757	1.052	767	1.065	455	0.633	443	0.616	755	1.049
CL6-1	650	709	1.090	716	1.102	436	0.670	424	0.653	642	0.988
CL6-2	570	651	1.142	657	1.152	412	0.723	401	0.704	588	1.032
CS-5 ^[10]	488	440	0.902	468	0.960	305	0.625	244	0.501	468	0.960
CS-6 ^[10]	367	330	0.899	350	0.953	257	0.700	205	0.560	350	0.953
CL1-4 ^[10]	295	283	0.959	300	1.016	238	0.807	190	0.642	300	1.016
CL2-3 ^[10]	400	427	1.068	453	1.134	320	0.800	255	0.639	453	1.134
CL2-4 ^[10]	251	267	1.067	283	1.128	238	0.949	189	0.754	283	1.128

GB 50010—2010^[13]：Average values of N_u^c/N_u^t is 1.076，standard deviations is 0.110，variation coefficients is 0.102；
JGJ 12—2006^[14]：Average values of N_u^c/N_u^t is 1.105，standard deviations is 0.093，variation coefficients is 0.084；
EN—1992^[15]：Average values of N_u^c/N_u^t is 0.747，standard deviations is 0.101，variation coefficients is 0.135；
ACI 318—1999^[16]：Average values of N_u^c/N_u^t is 0.669，standard deviations is 0.090，variation coefficients is 0.135；
Eq. (8)：Average values of N_u^c/N_u^t is 1.042，standard deviations is 0.061，variation coefficients is 0.058.

Notes: N_u^c —Calculated result of ultimate bearing capacity; N_u^t —Measured result of ultimate bearing capacity; In the process of the test, N_u of CL4-2 was not considered because the concrete in compression zone was crushed prematurely, which made its N_u low.

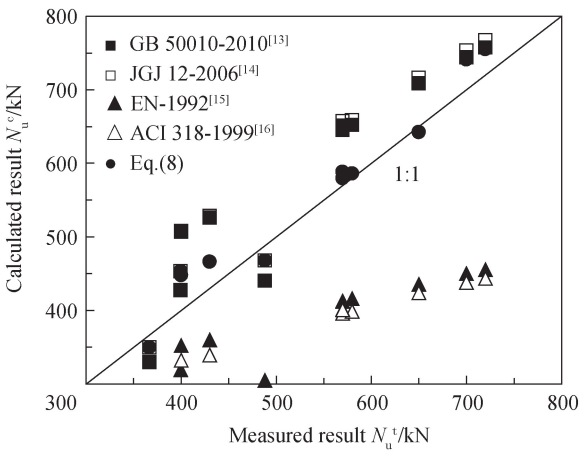


图9 CA/CC N_u 的拟合结果与实测结果比较

Fig.9 Comparison of calculated and measured results of N_u of CA/CC

而 EN—1992^[15] 和 ACI 318—1999^[16] 的 N_u^c 均小于 N_u^t ，偏于保守。

(2) 模型优化

图 10 为 CA/CC 中不同种类钢筋的锈蚀状态。其中，测试龄期为 240 天。可知，当混凝土强度等级为 C25 和 C50 时，有机新涂层钢筋发生局部锈蚀，当混凝土强度等级为 C60 时，普通钢筋发生不同程度的“坑蚀”，而有机新涂层钢筋和 316 不锈钢则未发生锈蚀，表明有机新涂层钢筋具有较好的耐腐蚀性能。此外，由表 6 和图 9 可知，GB 50010—2010^[13]、JGJ 12—2006^[14]、EN—1992^[15] 和 ACI 318—1999^[16] 的大偏心受压 N_u 计算公式不适用于 CA/CC。主要原因是：(1) 珊瑚天然多孔的结构“缺陷”和海水、珊瑚中含有大量的 Cl^- ，极易导致其内部钢筋发生锈蚀(见图 10)，从而使钢筋的截面减小，钢筋的屈服强度降低，严重影响 CA/CC 大偏心受压 N_u ，而在上述公式中均未考虑钢筋锈蚀的影响；(2) 图 11 为 CA/C 中不同种类钢筋的电化学测试结果。其中， R_p 为极化电阻 ($k\Omega \cdot cm^2$)，

R_p 越大表明试件的导电能力越差，钢筋腐蚀本身是一个电化学反应，因此， R_p 较大试件中的钢筋，其腐蚀危险性越小。可知，有机新涂层钢筋能有效地抑制 CA/CC 中钢筋的锈蚀，与图 10 的结论基本一致。但是，有机新涂层钢筋表面有一层保护层，降低了钢筋与混凝土之间的粘结性能，在受力过程中，使有机新涂层钢筋与 CA/C 之间产生了较大的滑移，粘结力遭到破坏，从而 N_u 偏低，从结构设计安全上考虑，对涂层钢筋 CA/CC 的 N_u 计算应该考虑钢筋滑移的影响。因此，本文通过综合考虑钢筋锈蚀和涂层钢筋滑移的影响，提出适用于 CA/CC 大偏心受压 N_u 的计算模型。

牛荻涛等^[24] 研究发现，钢筋锈蚀对 OA/CC 受压 N_u 的影响主要为：(1) 钢筋锈蚀后有效截面面积减小，使钢筋所能承受的拉力降低；(2) 钢筋表面锈蚀不均匀，受力后会产生应力集中的现象，使其所能承受的拉力进一步降低。此外，袁迎曙等^[25] 通过研究发现：钢筋屈服强度和伸长率随着钢筋锈蚀率的增大而减小，当钢筋锈蚀率大于 5% 时，钢筋锈蚀主要表现为“坑蚀”，其对钢筋力学性能影响较大。同时，提出了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(α)的计算公式：

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

式中： α 为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； ω_s 为钢筋平均截面损失率(%)。

在氯盐侵蚀环境中，钢筋发生不同程度的“坑蚀”^[25]，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，从而影响结构安全。因此，采用 ω_{sm} 来计算 α 更加合



图 10 CA/CC 中不同种类钢筋的锈蚀状态(测试龄期 240 天)

Fig.10 Corrosion state of different steel in CA/CC
(Exposure time is 240 d)

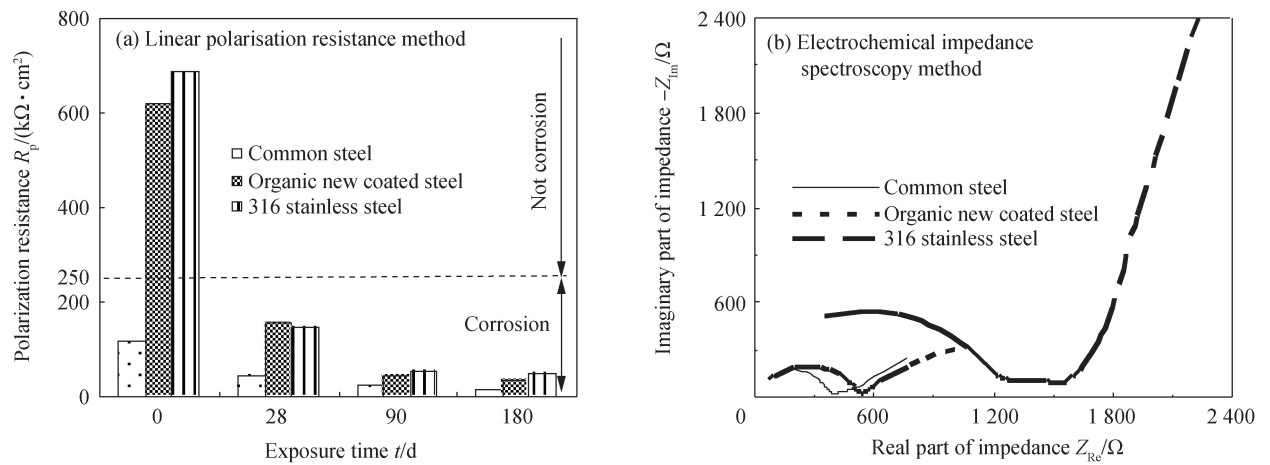


图 11 CA/C 中不同种类钢筋的电化学测试结果

Fig. 11 Electrochemical test results of different steel in CA/C

(The concrete strength is C60; the steel diameter is 1 cm, the concrete cover thickness is 2.5 cm; Exposure time of Fig. 11(b) is 180 d)

理。图 12 为 ω_{sm} 与钢筋质量损失率 (ω) 的关系曲线。可知, ω_{sm} 与 ω 两者之间很好地符合线性关系。同时, ω 和 ω_s 大致相等^[26-27]。因此, α 可以表示为

$$\omega_{sm} = 1.301\omega \tag{6}$$
$$\alpha = \begin{cases} (1 - 1.301\omega)(1 - 1.608\omega) & 0 < \omega \leq 5\% \\ (1 - 1.301\omega)(0.962 - 0.848\omega) & \omega > 5\% \end{cases} \tag{7}$$

式中, ω 为钢筋质量损失率(%)。

因此, 综合考虑钢筋锈蚀和涂层钢筋滑移的影响, CA/CC 大偏心受压 N_u 的计算模型为

$$\begin{cases} N_u \leq \alpha_1 f_c b x + \alpha (f'_y A'_s - f_y A_s) \\ N_u e \leq k(\alpha_1 f_c b x (h_0 - x/2) + \alpha f'_y A'_s (h_0 - a'_s)) \\ e = \eta e_i + h/2 - a_s \\ \eta = 1 + \frac{1}{1400(e_0/h_0)} \left(\frac{l_0}{h} \right)^2 \zeta_1 \zeta_2 \\ \zeta_1 = 0.5 f_c A/N \\ \zeta_2 = 1.3 - 0.015 l_0/h \\ e_i = e_0 + e_a \\ e_a = 0.12(0.3 h_0 - e_0) \\ \alpha = \begin{cases} (1 - 1.301\omega)(1 - 1.608\omega) & 0 < \omega \leq 5\% \\ (1 - 1.301\omega)(0.962 - 0.848\omega) & \omega > 5\% \end{cases} \end{cases} \tag{8}$$

式中: k 为考虑钢筋粘结滑移的折减系数, 涂层钢筋 k 取 0.9, 其他钢筋取 1.0; 其他参数的含义同式

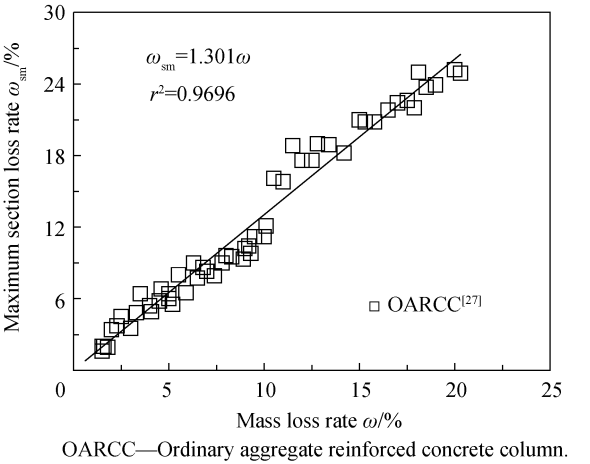


图 12 混凝土中钢筋的最大截面损失率和质量损失率

Fig. 12 Maximum section loss rate and mass loss rate of steel in concrete

(2)、式(5)和式(7)。

根据式(8)计算 14 根 CA/CC 大偏心受压 N_u , 计算结果见表 6 和图 9。由表 6 可知, N_u^e/N_u^t 的平均值为 1.042, 标准差为 0.061, 变异系数为 0.058。与 GB 50010—2010^[13]、JGJ 12—2006^[14]、EN—1992^[15] 和 ACI 318—1999^[16] 的计算结果相比, 其平均值更加接近于 1, 标准差分别降低了 44.7%、34.6%、39.9%和 32.7%, 变异系数分别降低了 42.9%、30.6%、57.0%和 56.8%。基于各模型的拟合精度、合理性和实用性, 确定式(8)为最优模型。

(3) 模型验证

根据式(8)计算文献[10]中 5 根 CA/CC 大偏

表 7 CA/CC 的 N_u 基于文献[10]公式和式(8)的计算结果

Table 7 N_u based on Zhang^[10] and Eq. (8) of CA/CC

NO.	e_i/mm	f_c/Mpa	f_{cm}/Mpa	f_y/MPa	N_u^t/kN	Zhang ^[10]		Eq. (8)	
						N_u^c/kN	N_u^t/N_u^c	N_u^c/kN	N_u^t/N_u^c
CS-5 ^[10]	80	33.1	34.8	346.6	488	464	0.951	468	0.960
CS-6 ^[10]	100	33.1	34.8	346.6	367	353	0.962	350	0.953
CL1-4 ^[10]	75	33.0	34.6	346.6	295	229	0.775	300	1.016
CL2-3 ^[10]	50	33.5	35.2	346.6	400	412	1.031	453	1.134
CL2-4 ^[10]	75	33.0	34.7	346.6	251	272	1.085	283	1.128

Zhang^[10]: Average values of N_u^c/N_u^t is 0.961, standard deviations is 0.117, variation coefficients is 0.122;

Eq. (8): Average values of N_u^c/N_u^t is 1.038, standard deviations is 0.088, variation coefficients is 0.085.

心受压 N_u ，其 CA/CC 的基本信息和计算结果见表 7 和图 13。可见，文献[10]公式和式(8)的 N_u^c 与 N_u^t 都较好符合。其中，文献[10]公式的 N_u^t/N_u^c 平均值为 0.961，标准差为 0.117，变异系数为 0.122，而式(8)的 N_u^t/N_u^c 平均值为 1.038，标准差为 0.088，变异系数为 0.085。由 N_u^t/N_u^c 的平均值对比可知，本文提出的 CA/CC 大偏心受压 N_u 计算模型的可靠性与文献[10]的计算模型相当，但是，由 N_u^t/N_u^c 的标准差和变异系数对比可知，本文提出的 CA/CC 大偏心受压 N_u 计算模型的离散性明显小于文献[10]的计算模型。此外，通过研究发现：在具有高初始 Cl^- 含量(C_0)、高表面自由 Cl^- 含量(C_s)、高表观 Cl^- 扩散系数(D_a)“三高” Cl^- 扩散特征的 CA/C 中，钢筋极易发生锈蚀，而文献[10]在其计算模型中，没有考虑钢筋锈蚀的影响。因此，基于计算模型的合理性和精确性，确定本文提出的计算模型更加合理。

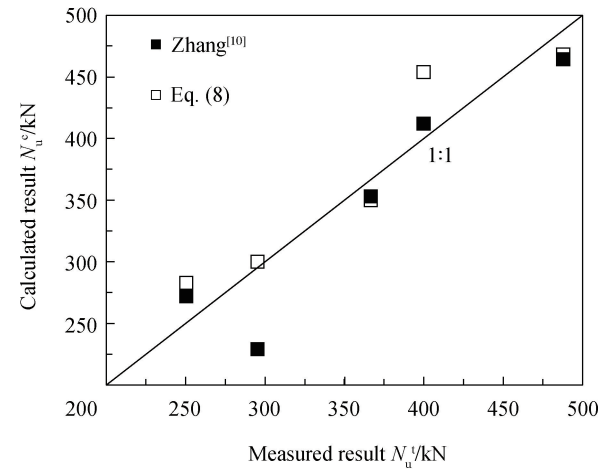


图 13 CA/CC 的 N_u 基于文献[10]公式和式(8)的计算结果比较

Fig. 13 Comparison of N_u based on Zhang^[10] and Eq. (8) of CA/CC

3 结 论

(1) 在初始偏心距(e_i)一定的情况下，混凝土强度等级和钢筋种类对全珊瑚海水钢筋/混凝土柱(CA/CC)的破坏形态影响较小，CA/CC 的受力破坏机制和形态与普通骨料钢筋/混凝土柱(OA/CC)基本相似。

(2) 随着混凝土和钢筋强度等级的提高，CA/CC 的轴向和跨中侧向位移、混凝土和钢筋应变均逐渐减小，表明其抵抗变形的能力逐渐增强。

(3) 随着荷载的增大，钢筋的应变逐渐增大，在加载初期，钢筋的应变都较小，随着弯曲裂缝的出现，钢筋的应变开始迅速增大。混凝土强度等级越高，纵向受拉钢筋应变开始突变的荷载越大。

(4) 在加载过程中，由于有机新涂层钢筋与珊瑚/混凝土(CA/C)之间产生较大的滑移，使在相同混凝土强度下，普钢钢筋 CA/CC 的极限承载力(N_u)比有机新涂层钢筋 CA/CC 的 N_u 大约高 7.1%~20.8%。此外，在岛礁 CA/C 结构中，建议采用有机新涂层钢筋，能有效地抑制钢筋发生锈蚀，从而延长 CA/C 结构的有效服役寿命。

(5) 利用 GB 50010—2010^[13] 和 JGJ 12—2006^[14] 计算 CA/CC 大偏心受压 N_u 偏于不安全，而 EN—1992^[15] 和 ACI 318—1999^[16] 计算其 N_u 偏于保守。综合考虑钢筋锈蚀和涂层钢筋滑移的影响，提出了适用于 CA/CC 大偏心受压 N_u 的计算模型。

参考文献:

[1] DA B, YU H F, MA H Y, et al. Chloride diffusion study of coral concrete in a marine environment[J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 47-58.

[2] 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[J]. 东南大学学报(自然

- 科学版), 2016, 46(5): 1093-1097.
- DA B, YU H F, MA H Y, et al. Surface free chloride concentration and apparent chloride diffusion coefficient in coral aggregate seawater concrete[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(5): 1093-1097 (in Chinese).
- [3] KAKOOEI S, AKIL H M, DOLATI A, et al. The corrosion investigation of rebar embedded in the fibers reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 564-570.
- [4] KAKOOEI S, AKIL H M, JAMSHIDI M, et al. The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1): 73-77.
- [5] 周静海, 杨永生, 焦霞. 再生混凝土柱轴心受压承载力研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 24(4): 572-576.
- ZHOU J H, YANG Y S, JIAO X. Experimental study on axial pressure bearing capacity of recycled concrete columns[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science Edition), 2008, 24(4): 572-576 (in Chinese).
- [6] 陈宗平, 郑巍, 叶培欢, 等. 钢筋再生混凝土柱受压承载力试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(4): 65-68, 72.
- CHEN Z P, ZHENG W, YE P H, et al. Experimental study on mechanical behaviour of reinforced recycled coarse aggregate concrete columns[J]. Industrial Construction, 2014, 44(4): 65-68, 72 (in Chinese).
- [7] OOTANI H, OHAKA T, TOBISAKA M. Properties of coral aggregate and coral concrete in Miyakojima[A]. Tokyo: Annual Meeting Architectural Institute of Japan, 1985.
- [8] TEHADA T, FUNAHASHI M. Cathodic protection of building reinforcing steel[A]. Orlando: NACE International, 2005.
- [9] WATTANACHAI P. A study on chloride ion diffusivity of porous aggregate concretes and improvement method[J]. Advanced Materials Research, 2013, 65: 30-44.
- [10] 张文. 配筋珊瑚混凝土构件试验研究[D]. 南京: 河海大学, 1995.
- ZHANG W. Experimental study on reinforced coral aggregate concrete component[D]. Nanjing: Hohai University, 1995 (in Chinese).
- [11] YU H F, DA B, MA H Y, et al. Durability of concrete structures in tropical atoll environment[J]. Ocean Engineering, 2017, 135: 1-7.
- [12] 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[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 253-260.
- DA B, YU H F, MA H Y, et al. Factors influencing durability of coral concrete structure in South China Sea[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(2): 253-260 (in Chinese).
- [13] 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: China Architecture & Building Press, 2010 (in Chinese).
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 轻骨料混凝土结构技术规程: JGJ 12—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for design of lightweight aggregate concrete structures: JGJ 12—2006[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006 (in Chinese).
- [15] British Standard Institution. Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for building: BS EN 1992-1-1 [S]. London: British Standards Institution, 2004.
- [16] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318M—99[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 1999.
- [17] 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.
- [18] American Society for Testing and Materials. Standard practice for the preparation of substitute ocean water: ASTM D1141—2003[S]. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, 2003.
- [19] KURT H, SANTIAGO P, JULIO R. Axial failure of reinforced concrete columns damaged by shear reversals[J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(7): 1172-1180.
- [20] XU C S, LIU J, DING Z X, et al. Size effect tests of high-strength RC columns under eccentric loading[J]. Engineering Structures, 2016, 126: 78-91.
- [21] SANTIAGO P, NOBUAKI H, TOSHIKATSU I, et al. Using mohr-coulomb criterion to estimate shear strength of reinforced concrete columns [J]. ACI Structural Journal, 2016, 113(3): 459-468.
- [22] 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[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(1):

144-151.

DA B, YU H F, MA H Y, et al. Experimental research on whole stress-strain curves of coral aggregate seawater concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(1): 144-151 (in Chinese).

[23] 糜人杰. 全珊瑚海水混凝土的材料应力-应变关系与受弯构件力学性能[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.

MI R J. Stress-strain relationship and mechanical properties of coral aggregate seawater concrete[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017 (in Chinese).

[24] 牛获涛, 卢梅, 王庆霖. 锈蚀钢筋混凝土梁正截面受弯承载力计算方法研究[J]. 建筑结构, 2002, 32(10): 14-17.

NIU D T, LU M, WANG Q L. Calculation method of flexural bearing capacity on normal section of corroded reinforced concrete beams[J]. Journal of Building Structures, 2002, 32(10): 14-17 (in Chinese).

[25] 袁迎曙, 贾福萍, 蔡跃. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 47-52, 96.

YUAN Y S, JIA F P, CAI Y. The structural behavior deterioration model for corroded reinforced concrete beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 47-52, 96 (in Chinese).

[26] 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[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 39-44.

ZHANG W P, ZHANG Y. Bond-slip relationship between corroded steel bars and concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 39-44 (in Chinese).

[27] 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[J]. 建筑技术与应用, 2005(1): 4-6.

WANG X H, ZHONG T Y. Relation between the loss coefficient of the corroded rebar's cross-section in concrete and that of its weight[J]. Research & Application of Building Materials, 2005(1): 4-6 (in Chinese).