

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201806199

C60 全珊瑚海水钢筋混凝土梁的抗剪性能与计算模型

达波,余红发,麻海燕,吴彰钰

(南京航空航天大学 土木工程系,南京 210016)

摘要:为研究全珊瑚海水钢筋混凝土梁(coral aggregate reinforced concrete beam, CARCB)的抗剪性能和计算模型,设计了7根不同种类钢筋的 CARCB,通过对其进行斜截面抗剪性能试验,研究了钢筋种类对 CARCB 的变形及抗剪承载能力的影响,建立了弯矩-跨中挠度、荷载-钢筋应变、荷载-裂缝宽度的关系,提出了 CARCB 斜截面抗剪承载力的计算模型.试验结果表明:不同种类钢筋 CARCB 的正截面开裂荷载和抗剪承载力规律均为 316 不锈钢 > 普通钢筋 > 镀锌涂层钢筋 > 有机新涂层钢筋;CARCB 中普通钢筋发生了严重锈蚀,使其刚度出现了一定程度的退化;不同种类钢筋的 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;最后,综合考虑钢筋锈蚀和高强混凝土对 CARCB 抗剪承载力的影响,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;钢筋种类;钢筋锈蚀;计算模型

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)06-0025-08

Shear behavior and calculation model of C60 coral aggregate reinforced concrete beam

DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, WU Zhangyu

(Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Seven coral aggregate reinforced concrete beams (CARCBs) with different types of reinforcement were designed in this study to investigate their shear behavior and calculation model. The shear behavior of CARCB was tested, and the deformation and shear capacity were investigated. The relationships of bending moment-midspan deflection, load-steel strain, and load-crack width were established. A calculation model for the ultimate bearing capacity (V_{cs}) of CARCB was proposed. Results show that normal section cracking load (V_{cr}) and V_{cs} of CARCB followed the rule: 316 stainless steel > common steel > zinc-chromium coated steel > organic new coated steel. The common steel had serious corrosion in the CARCB, which led to the degradation of stiffness. The CARCB crack width increased with the increase of load for different reinforcement types. In the initial loading stage, flexural cracks occurred at the midspan of the beam, which developed slowly. Inclined cracks were formed from the support to the concentrated force point with increasing loads, which widened rapidly, leading to beam failure. Therefore, with comprehensive consideration on the effects of reinforcement corrosion and high-strength concrete on the V_{cs} of CARCB, a calculation model for the V_{cs} of CARCB was proposed.

Keywords: coral aggregate reinforced concrete beam; shear behavior; reinforcement type; reinforcement corrosion; calculation model

南海岛礁珊瑚资源丰富,其主要化学成分为 CaCO_3 , 这为岛礁工程建设提供一种新型建筑材料——珊瑚骨料^[1]. 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^- , 极易导致其内部钢筋发生锈蚀^[2-4]. 众所周知,钢筋锈蚀使得钢筋和混凝土之间的黏结性能降低,从而降低结构的力学性能^[5-6]. 此外,钢筋混凝土梁的抗剪破坏属于脆

性破坏,一旦发生剪切破坏,其后果比弯曲破坏严重得多. 因此,研究全珊瑚海水钢筋混凝土梁 (CARCB) 的抗剪性能对岛礁工程建设和修复具有重要意义和较高实用价值.

目前,国内外关于珊瑚混凝土 (coral aggregate concrete, CAC) 的研究主要集中在基本力学性能和耐久性等方面. Rick^[7] 对太平洋比基尼岛的 CAC 结构进行耐久性调研,认为:影响 CAC 耐久性的主要因素是盐分、混凝土保护层厚度和结构物表面裂缝宽度; Kakooei 等^[8] 对 CAC 的钢筋锈蚀行为进行了研究,发现: CAC 中钢筋锈蚀速率明显高于相同配合比的普通混凝土 (ordinary aggregate concrete, OAC); 张文^[9] 系统研究了 CARCB 的抗剪

收稿日期: 2018-06-29

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

作者简介: 达波(1988—),男,博士后;
余红发(1964—),男,教授,博士生导师

通信作者: 余红发, yuhongfa@nuaa.edu.cn

性能,建立了 CARCB 的抗剪承载力计算模型及其参数取值规律,但是采用的普通钢筋,在实际力学性能测试时已经发生了钢筋锈蚀作用,而且这种锈蚀作用尚没有引入定量的数据;达波等^[10-12]研究了 CAC 的 Cl^- 扩散行为和基本力学性能.发现:CAC 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)“三高” Cl^- 扩散特征,同时提出 CAC 的两段式本构模型;余红发等^[3,13]对南海岛礁混凝土结构的耐久性进行调研,分析了热带岛礁环境的 OAC 和 CAC 结构工程的开裂、剥落和钢筋锈蚀等耐久性状态;麻海燕等^[14]研究了不同配筋率、混凝土强度 CARCB 的抗弯性能,探讨了普通骨料钢筋混凝土梁 (ordinary aggregate reinforced concrete beam, OARCB) 与轻骨料钢筋混凝土梁 (lightweight aggregate reinforced concrete beam, LARCB) 的力学模型在 CARCB 中的适用性问题.因此,基于 CAC 的国内外研究现状,本文对 CARCB 斜截面抗剪性能进行试验研究.

本文通过对 7 根 CARCB 进行斜截面抗剪性能试验,研究了不同种类钢筋对 CARCB 抗剪性能的影响,建立了弯矩-跨中挠度、荷载-钢筋应变、荷载-裂缝宽度的关系,综合考虑钢筋锈蚀和高强混凝土对 CARCB 抗剪承载力的影响,提出了 CARCB 斜截面抗剪承载力的计算模型.为 CAC 在岛礁工程结构中的应用提供基础数据和理论支持.

1 试验

1.1 原材料

采用南海某岛礁的珊瑚^[2], Cl^- 含量为 0.074% (质量百分比),5~20 mm 连续级配,表观密度为

2 300 kg/m^3 ,堆积密度为 1 000 kg/m^3 ,筒压强度为 5.2 MPa;南海某岛礁的珊瑚砂^[2], Cl^- 含量为 0.112% (质量百分比),含泥量为 0.5%,表观密度为 2 500 kg/m^3 ,堆积密度为 1 115 kg/m^3 ,细度模数为 2.9,Ⅰ区级配,属于中砂;P·Ⅱ52.5 型硅酸盐水泥;风选Ⅰ级粉煤灰;S95 级磨细矿渣;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^[15] 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、DAC-360 型镀锌涂层钢筋(喷涂亮白型,涂层厚度为 5.8 μm)、有机新涂层钢筋(涂层厚度为 40 μm)和 316 不锈钢.

1.2 构件设计与制作

构件的尺寸为 150 mm × 200 mm × 1500 mm,剪跨比(λ)均为 1.23.其混凝土配合比见表 1,各构件的编号和基本参数见表 2.为了使得构件发生剪切破坏,梁底部配置 2 根 $\Phi 16$ 的抗弯钢筋,架立筋采用 2 根 $\Phi 10$ 的螺纹钢筋,箍筋采用 $\Phi 6$ 的光圆钢筋(双肢箍),箍筋间距为 100 mm.试验梁尺寸和配筋见图 1.

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 根梁和 6 个立方体试块.构件采用振捣棒人工振捣,立方体试块由振动台振动密实.构/试件制作完成之后,带模养护 24 h,之后拆模,并以稻草覆盖并洒人工海水养护 90 d 后进行相关力学性能试验.

表 1 CAC 的配合比与拌合物性能

Tab. 1 Mixture proportion and properties of CAC

强度等级	单位体积材料用量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$									净水胶比	总水胶比	坍落度/mm	表观密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
	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				
C60	1 000	780	150	70	700	300	264	6.0	30.0	0.20	0.26	255	2 267

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.

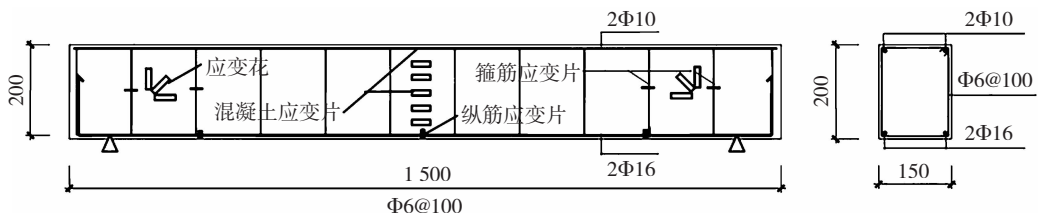


图 1 CARCB 的尺寸与截面配筋详图 (mm)

Fig. 1 Dimensions and steel details of CARCB (mm)

表 2 CARCB 的基本参数

Tab.2 Basic parameters of CARCB MPa

No.	钢筋种类	f_{cu}	f_c	f_t	f_y	f_{yv}
BJ4-1	B	75.9	61.3	6.9	457	440
BJ4-2	B	76.4	61.6	7.0	457	440
BJ5-1	A	76.2	61.4	6.9	457	440
BJ5-2	A	76.2	61.4	6.9	457	440
BJ6-1	C	75.4	60.9	6.9	457	440
BJ7-1	E	75.8	61.2	6.9	811	805
BJ7-2	E	76.2	61.5	6.9	811	805

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; f_y 和 f_{yv} 分别为纵向钢筋和箍筋的屈服强度实测值;A、B、C 和 E 分别表示普通钢筋、有机新涂层钢筋、镀锌涂层钢筋和 316 不锈钢。

1.3 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 4 点加载, 试验装置见图 2. 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, 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.

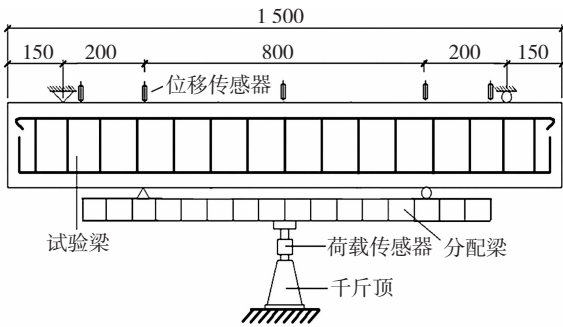


图 2 加载装置示意 (mm)

Fig.2 Schematic diagram of loading devices (mm)

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, 共 4 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, 测点位置如图 1 所示. 在受拉/压区各粘贴 1 片应变片, 探索 CARCB 斜截面抗剪破坏时, 受拉/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°. 试验梁应变片布置见图 1. 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.

2 结果及分析

2.1 裂缝发展及破坏形态

图 3 为 CARCB 的裂缝发展图. 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. 将受剪梁及受压试块的裂缝断面打开后(见图 4), 也发现情况都是如此, 即受拉裂缝断面比较平整, 珊瑚骨料本身全都拉裂, 与轻骨料混凝土 (lightweight aggregate concrete, LAC) 的规律基本一致. 因此, CARCB 在发生斜截面受剪开裂后, 斜裂缝上骨料之间的咬合力将明显降低, 箍筋将分担更多的剪力.

2.2 承载力分析

CARCB 的测试结果见表 3. 当混凝土强度相等时, 不同种类钢筋 CARCB 的正截面开裂荷载 (V_{cr}) 和抗剪承载力 (V_{cs}) 规律均为: 316 不锈钢 > 普通钢筋 > 镀锌涂层钢筋 > 有机新涂层钢筋. 这是因为: 1) 开裂之前, 箍筋会分担一部分剪应力, 而 316 不锈钢 ($f_{yv} = 805$ MPa) 的屈服强度比普通钢筋 ($f_{yv} = 440$ MPa) 高, 即 316 不锈钢箍筋的抗剪切性能强, 故 316 不锈钢 CARCB 的正截面 V_{cr} 最大; 2) CARCB 的 V_{cs} 由箍筋的抗剪承载力 (V_s) 与混凝土的抗剪承载力 (V_c) 两部分组成, 对于混凝土强度等级相同的 CARCB, 随着箍筋强度等级的提高, 其抗剪能力逐渐增强, 故 316 不锈钢 CARCB 的 V_{cs} 最大. 同时, 普通钢筋 (BJ5-1) 的 V_{cs} 略小于有机新涂层钢筋 (BJ4-2) 和镀锌涂层钢筋 (BJ6-1), 主要是由于在 CAC 中含有大量 Cl^- , 使得普通钢筋发生了严重锈蚀, 减小了箍筋的有效截面^[16], 从而降低了 BJ5-1 的 V_{cs} .

表 3 CARCB 的荷载和裂缝宽度

Tab.3 Load and crack width of CARCB

No.	正截面 V_{cr}/kN	斜截面 V_{cr}/kN	V_{cs}/kN	跨中最 大挠度/ mm	最大弯 曲裂缝 宽度/ mm	最大 斜裂缝 宽度/ mm
BJ4-1	15	100	278	3.42	0.26	1.50
BJ4-2	20	95	329	3.35	0.44	—
BJ5-1	16	100	311	3.81	—	—
BJ5-2	20	95	333	3.80	0.22	—
BJ6-1	18	90	316	3.25	0.28	1.54
BJ7-1	35	105	354	3.90	0.24	0.78
BJ7-2	40	100	368	3.51	0.22	1.68

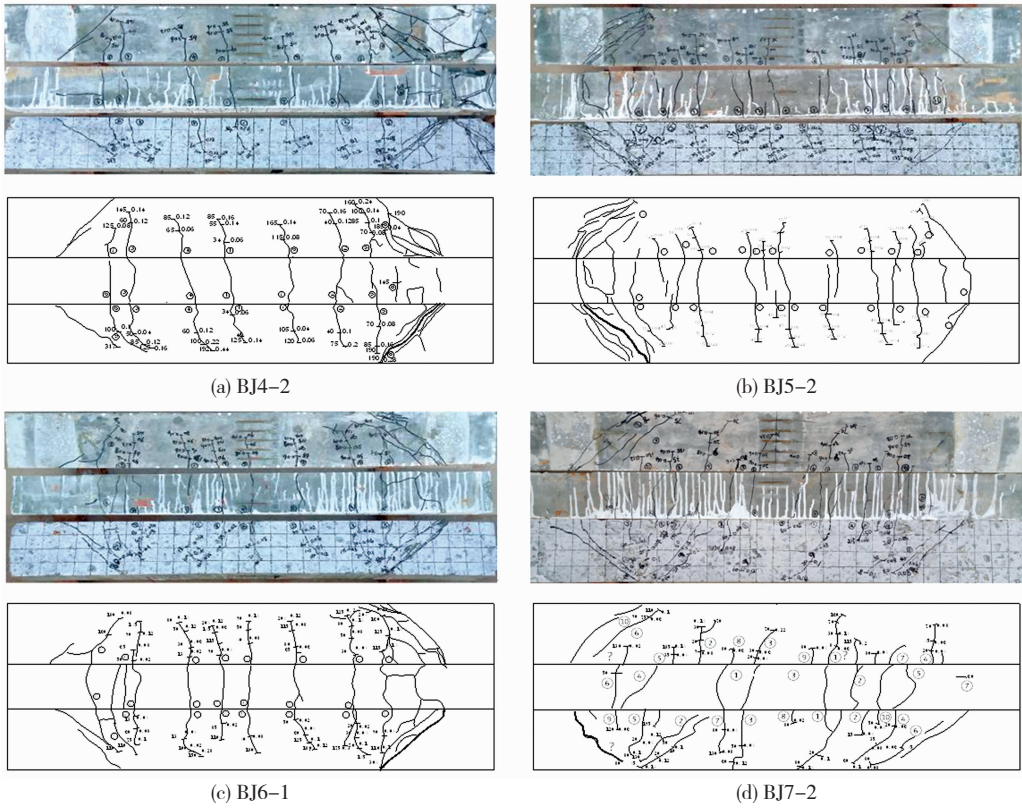
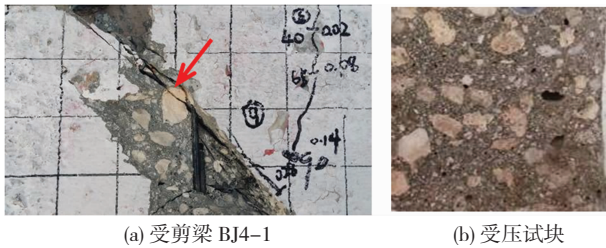


图 3 CARCB 的裂缝发展图

Fig. 3 Crack developments of CARCB



(a) 受剪梁 BJ4-1 (b) 受压试块

图 4 珊瑚骨料破坏图

Fig. 4 Failure diagram of the coral aggregate

由 BJ4 ~ BJ7 的结果可知, 钢筋种类对 CARCB 的斜截面 V_{cr} 影响较小, 主要是因为斜裂缝出现之前, 斜截面上的剪应力基本上由斜截面混凝土承担, 此时, 箍筋应力很低, 箍筋对混凝土的约束还没有发挥作用。

2.3 弯矩 - 跨中挠度曲线

图 5 为 CARCB 的弯矩 - 跨中挠度曲线。BJ4 - 2、BJ6 - 1 的刚度明显高于 BJ5 - 1, 表明在含有大量 Cl^- 的 CARCB 中, 普通钢筋 (BJ5 - 1) 已发生了严重锈蚀, 使得梁的刚度出现一定程度的退化。而有机新涂层 (BJ4 - 2) 和锌铬涂层 (BJ6 - 1) 由于其优异的防锈性能, 抑制了钢筋的锈蚀。

2.4 钢筋应变

2.4.1 纵向钢筋应变

图 6 为 CARCB 的荷载 - 纵向钢筋应变曲线。由图可知: 1) CARCB 的纵筋应变在梁发生剪切破坏时均未达到其屈服应变, CARCB 均为剪压破坏;

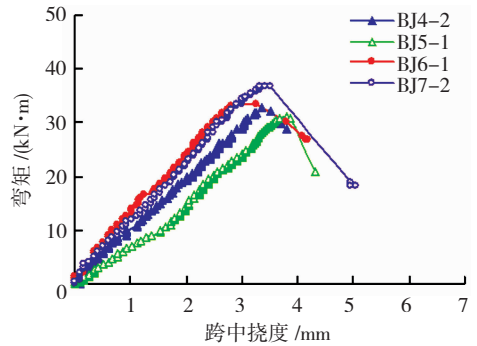


图 5 CARCB 的弯矩 - 跨中挠度曲线

Fig. 5 Bending moment-midspan deflection curves of CARCB
 2) CARCB 发生破坏时, 纵向钢筋的应变值规律为 316 不锈钢和有机新涂层钢筋较小, 锌铬涂层钢筋次之, 普通钢筋最大, 表明不锈钢和涂层钢筋能有效的抑制钢筋锈蚀, 而普通钢筋锈蚀最严重, 与图 10 观测的结果一致。这主要是由于: 1) 有机新涂层不与酸碱发生反应, 具有极高的化学稳定性, 能够有效地隔离钢筋表面, 切断 H_2O 、 O_2 、 Cl^- 等化学成分的传输通路, 延缓钢筋开始锈蚀的时间, 有效地保护钢筋^[17]; 2) 316 不锈钢 (00Cr17Ni14Mo2) 中含有 Cr 和 Mo, 在腐蚀过程中, 在钢筋表面生成一种 (Cr_2O_3) 致密的钝化膜, 而使腐蚀受阻^[18]; 3) 锌铬涂层由片状锌粉、铝粉与基体表面层层重叠而形成, 由于片状锌粉、铝粉层层重叠降低了涂层的孔隙度, 有效阻碍了 H_2O 、 O_2 和 Cl^- 等有害分子/离子的进入, 而使钢

筋腐蚀受阻^[19].

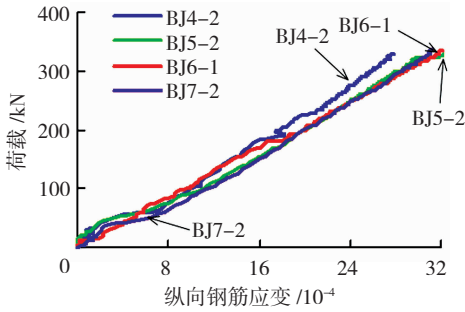


图 6 CARCB 的荷载-纵向钢筋应变曲线

Fig. 6 Load-longitudinal steel strain curves of CARCB

2.4.2 箍筋应变

图 7 为 CARCB 的荷载-箍筋应变. 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,箍筋屈服时应变估算约为:普通钢筋 $\varepsilon = f_y / E_s = 440 \times 10^6 / (2.1 \times 10^5) = 2.095 \times 10^{-6}$; 316 不锈钢 $\varepsilon = 805 \times 10^6 / (2.1 \times 10^5) = 3.833 \times 10^{-6}$. 表明:CARCB 达到 V_{cs} 时,各试验梁的箍筋均未屈服. 可能的原因主要是箍筋的间距太小,箍筋作为桁架腹部拉杆的作用不明显.

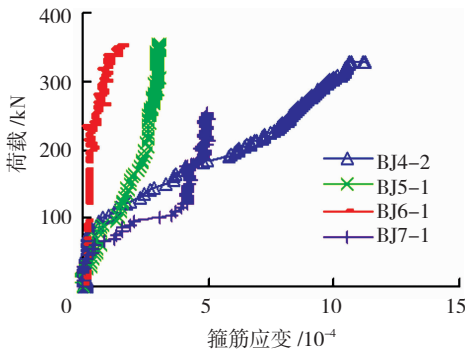


图 7 CARCB 的荷载-箍筋应变曲线

Fig. 7 Load-stirrup strain curves of CARCB

2.5 裂缝宽度

图 8 为 CARCB 的最大裂缝宽度曲线. 不同钢筋种类的 CARCB,其裂缝宽度均随着荷载的增大而增长,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. 此外,对于相同裂缝宽度的 CARCB,当裂缝宽度为 0.1 mm 时, BJ4-2、BJ5-1、BJ6-1 和 BJ7-1 的荷载分别达到 V_{cs} 的 34.7%、54.9%、23.3% 和 42.5%,可见,裂缝宽度的开展与钢筋种类有关, BJ4-2 和 BJ6-1 的值较小,主要是因为有机新涂层钢筋和镀锌涂层钢筋与 CAC 之间产生了较大的滑移,黏结力遭到破坏,导致 CARCB 的承载力降低.

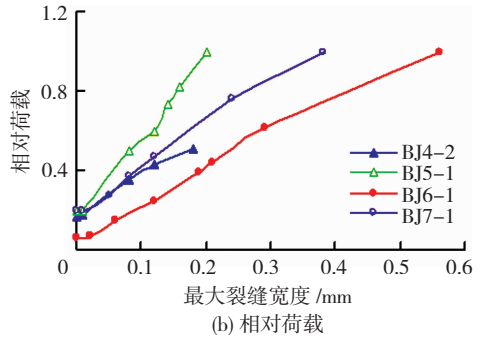
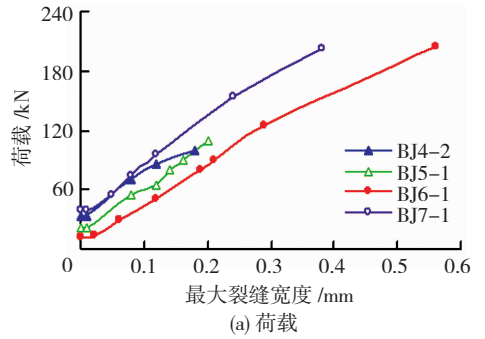


图 8 CARCB 的最大裂缝宽度曲线

Fig. 8 Maximum crack width curves of CARCB

2.6 抗剪承载力分析

按照 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[20],斜截面 V_{cs} 计算公式为

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

按照 JGJ 12—2006《轻骨料混凝土结构设计规程》^[21],斜截面 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: V_{cs} 为抗剪承载力设计值; λ 为剪跨比,可取 $\lambda = a/h_0$, a 为计算截面至支座截面或节点边缘的距离; 对于 GB 50010—2010,当 $\lambda < 1.5$ 时, $\lambda = 1.5$, 当 $\lambda > 3$ 时, $\lambda = 3$; 对于 JGJ 12—2006,当 $\lambda < 1.4$ 时, $\lambda = 1.4$, 当 $\lambda > 3$ 时, $\lambda = 3$; f_t 和 f_c 分别为混凝土轴心抗压强度和抗拉强度设计值; b 为矩形截面宽度; h_0 为截面有效高度; f_{yv} 为箍筋抗拉强度设计值; A_{sv} 为配置在同一截面内全部箍筋截面面积, $A_{sv} = n A_{sv1}$, 此处, n 为在同一个截面内箍筋的肢数, A_{sv1} 为单肢箍筋的截面面积; s 为沿构件长度方向上箍筋的间距.

根据式(1)和式(2)计算本试验 7 根 CARCB 的 V_{cs} , V_{cs}^1 与 V_{cs}^c 比值的平均值分别为 1.819 和 2.072, 标准差分别为 0.124 和 0.449, 变异系数分别为 0.068 和 0.217. 拟合结果见表 4 和图 9, 式(1)和式(2)的拟合值与实测值符合不好. 因此, GB 50010—2010 和 JGJ 12—2006 的斜截面 V_{cs} 计算公式不适用于 CARCB. 主要原因是: 1) 传统意义上的 LAC 强度较低, 而本次试验的 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^- , 容易导致钢筋锈蚀, 从而使箍筋的截面减小, 箍筋的屈服强度降低, 严重影响 CARCB 的抗剪承

载力^[22], 而在式(1)和式(2)中均未考虑到钢筋锈蚀的问题. 因此, 需要综合考虑斜截面 V_c 和 V_s , 提出适用于 CARCB 的 V_{cs} 计算模型.

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

Tab. 4 V_{cs}^c and V_{cs}^t of CARCB under different calculation models

No.	λ	h_0/mm	$\eta/\%$	V_{cs}^t/kN	式(1) ^[20]		式(2) ^[21]		式(5)	
					V_{cs}^c/kN	V_{cs}^t/V_{cs}^c	V_{cs}^c/kN	V_{cs}^t/V_{cs}^c	V_{cs}^c/kN	V_{cs}^t/V_{cs}^c
BJ4-1	1.23	162	0.19	278	172	1.617	146	1.908	242	1.150
BJ4-2	1.23	162	0.19	329	173	1.905	146	2.250	243	1.355
BJ5-1	1.23	162	0.80	354	172	1.805	146	2.425	241	1.466
BJ5-2	1.23	162	0.80	368	172	1.932	146	2.521	241	1.524
BJ6-1	1.23	162	0.18	350	171	1.963	145	2.412	240	1.455
BJ7-1	1.23	162	0.04	254	205	1.725	187	1.356	283	0.897
BJ7-2	1.23	162	0.04	306	206	1.787	188	1.629	284	1.077

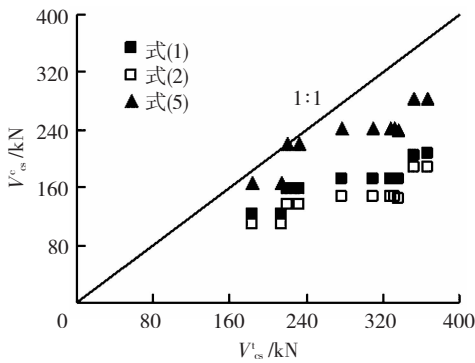


图 9 不同计算模型下 CARCB 抗剪承载力的拟合结果与实测结果比较

Fig. 9 Comparison of V_{cs}^c and V_{cs}^t of CARCB under different calculation models

2.6.1 V_s 系数的修正

不同种类钢筋的 CARCB 在 90 d 龄期进行结构试验之后, 取出钢筋的表面状态见图 10, 图中 A、B、C、D 和 E 分别表示普通钢筋、有机新涂层钢筋、镀铬涂层钢筋、2205 双相不锈钢和 316 不锈钢. 由图可知, 除了 316 不锈钢之外, 其它涂层钢筋和普通钢筋均发生了锈蚀. 其钢筋质量锈蚀率结果见表 4.

同时, 徐善华等^[23]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. 而钢筋屈服强度与钢筋锈蚀的关系, 袁迎曙等^[24]对其进行详细研究, 可以直接利用.

因此, 考虑 CARCB 的箍筋锈蚀, 其 V_{cs} 的计算模型应该为:

$$V_{cs} = \frac{0.175}{\lambda + 1.5} f_c b h_0 + 1.25 \alpha f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0, \quad (3)$$

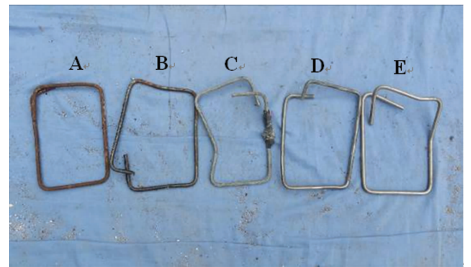
$$\alpha = \begin{cases} (1 - \eta)(1 - 1.608\eta), & 0 < \eta \leq 5\%; \\ (1 - \eta)(0.962 - 0.848\eta), & \eta > 5\%. \end{cases} \quad (4)$$

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; η 为箍筋质量损失

率; 其它参数的含义同式(1).



(a) 纵筋



(b) 箍筋

图 10 CARCB 中不同种类钢筋的锈蚀状态

Fig. 10 Corrosion state of different reinforcement types in CARCB

2.6.2 V_c 系数的修正

由于本次试验未作无腹筋梁抗剪强度试验. 所以, 参考式(3), 近似的用 $V_{cs} - 1.25\alpha f_{yv} h_0 A_{sv}/s$ 来代替 V_c . 图 11 为不同 CARCB 的 $V_c/(f_c b h_0)$ 与 λ 关系曲线. 在 17 根集中荷载作用下的 CARCB 中, 有 4 根 CARCB 实测的 V_c^t 小于式(3)计算结果. 所以, 可认为 $0.175/(\lambda + 1.5)$ 取值偏高, 即: 用 JGJ 12—2006 中给出的公式设计 CARCB 的 V_c 不够安全. 这与试验观察到的情况一致.

同时, 考虑到 OARCB 的 V_{cs} 计算时, 其 V_c 系数确定的原则为: 在剪压破坏区段 ($\lambda = 1 \sim 3$) 的范围内, 该系数表示所有试验点的“下包线”, 本次 CARCB 的 V_{cs} 试验中 $\lambda = 1.23$, 张文^[9]试验的 CARCB, 其 λ 为 $0.84 \sim 2.60$, 根据图 12 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. 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 V_{cs} , 计算时应取试验材料的实测值。因此, 综合考虑 CARCB 的箍筋锈蚀和 CAC 的特性, 其 V_{cs} 的计算模型为

$$V_{cs}^0 = V_c^0 + V_s^0 = \frac{0.042}{\lambda - 0.9} f_c^0 b h_0 + 1.25 \alpha f_{yv}^0 \frac{A_{sv}}{s} h_0, \quad (5)$$

式中: V_{cs}^0 、 V_c^0 、 V_s^0 分别为试验梁斜截面上的抗剪承载力、混凝土抗剪承载力和箍筋抗剪承载力; f_c^0 为混凝土轴心抗压强度试验值; f_{yv}^0 为箍筋抗拉强度试验值; 其它参数的含义同式(1)和式(4)。

根据式(5)计算本试验7根 CARCB 的 V_{cs} , 计算结果见表4和图9, V_{cs}^t 与 V_{cs}^c 比值的平均值为1.275, 标准差为0.236, 变异系数为0.185。与 GB 50010—2010^[20]、JGJ 12—2006^[21] 的计算结果相比, 其比值的平均值更加接近于1, 其标准差和变异系数比 JGJ 12—2006 分别降低了90.0%和16.9%, 变异系数分别降低了0.8%和7.4%。基于各模型的拟合精度、合理性和实用性, 确定式(5)为最优模型。

表5 文献[9]公式和式(5)下 CARCB 抗剪承载力的拟合结果与实测结果

Tab. 5 V_{cs}^c and V_{cs}^t of CARCB under Eq. (5) and literature[9] model

No.	λ	b/mm	h_0/mm	$f_c/$ MPa	$f_{yv}/$ MPa	s/mm	$V_{cs}^t/$ kN	文献[9]公式		式(5)	
								V_{cs}^c/kN	V_{cs}^t/V_{cs}^c	V_{cs}^c/kN	V_{cs}^t/V_{cs}^c
BV1-2	1.40	121	179	32.9	260	200	98.4	61.4	1.603	79.2	0.805
BV1-3	1.97	120	178	30.5	260	200	48.0	61.6	0.779	44.8	0.933
BV1-4	2.53	121	178	30.9	260	200	35.6	44.1	0.807	36.4	1.021
BV1-5	3.07	123	179	30.9	260	200	30.0	34.1	0.880	32.5	1.083
BV2-1	1.12	122	179	32.6	260	120	134.0	—	—	168.1	1.254
BV2-2	1.67	124	180	32.0	260	120	99.5	68.1	1.461	71.3	0.717
BV2-3	2.22	124	180	32.0	260	120	65.0	56.6	1.149	55.1	0.848
BV3-1	1.12	118	178	26.8	260	200	87.0	45.4	1.916	126.7	1.456
BV3-2	1.69	122	178	26.4	260	200	47.0	75.0	0.627	49.7	1.057
BV3-3	2.23	122	179	26.4	260	200	34.2	43.3	0.790	37.5	1.097
BV3-4	2.79	122	179	26.4	260	200	24.7	35.0	0.706	32.1	1.301

CARCB 计算模型的离散性小于文献[9]的计算模型, 其更加合理。

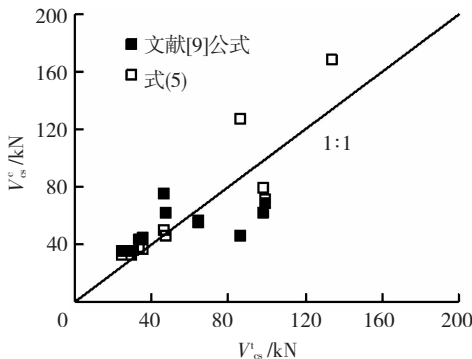


图12 文献[9]公式和式(5)下 CARCB 抗剪承载力的拟合结果与实测结果比较

Fig. 12 Comparison of V_{cs}^c and V_{cs}^t of CARCB under Eq. (5) and literature[9] model

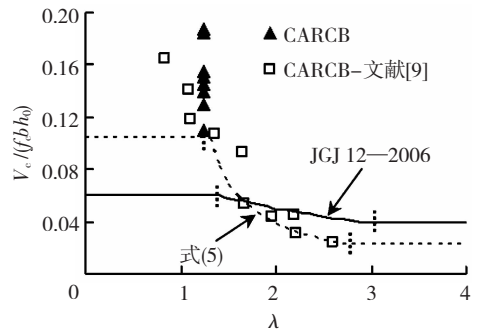


图11 不同 CARCB 的 $V_c/(f_c b h_0)$ 与 λ 关系曲线

Fig. 11 Relations between $V_c/(f_c b h_0)$ and λ of different CARCBs

2.6.3 公式验证

根据式(5)计算文献[9]中11根 CARCB 的 V_{cs} , 其 CARCB 的基本信息和计算结果见表5和图12。文献[9]公式和式(5)的 V_{cs}^c 与 V_{cs}^t 都较好符合, 其中, 文献[9]公式的 V_{cs}^t/V_{cs}^c 平均值为1.072, 标准差为0.442, 变异系数为0.412, 而式(5)的 V_{cs}^t/V_{cs}^c 平均值为1.052, 标准差为0.223, 变异系数为0.212, 由 V_{cs}^t/V_{cs}^c 的平均值对比可知, 本文提出的 CARCB 计算模型的可靠性与文献[9]的计算结果相当。由 V_{cs}^t/V_{cs}^c 的标准差和变异系数对比可知, 本文提出的

3 结论

1) 当混凝土强度等级相等时, 不同种类钢筋 CARCB 的开裂荷载 (V_{cr}) 和抗剪承载力 (V_{cs}) 规律均为: 316 不锈钢 > 普通钢筋 > 镀铬涂层钢筋 > 有机新涂层钢筋。

2) 不同种类钢筋的 CARCB, 其裂缝宽度均随着荷载的增大而增长, 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。

3) BJ4-2、BJ6-1 的刚度明显高于 BJ5-1, 表明在含有大量 Cl^- 的 CARCB 中, 普通钢筋 (BJ5-1) 发生了严重锈蚀, 使 CARCB 的刚度出现了一定程

度的退化.因此,建议在 C60 的 CARCB 中采用有机新涂层钢筋,这样能有效地抑制钢筋锈蚀,从而延长 CAC 结构的有效服役寿命.

4) 综合考虑钢筋锈蚀和高强混凝土对 CARCB 抗剪承载力的影响,提出了更加合理的 CARCB 抗剪承载力计算模型,并利用试验和文献数据对模型进行了验证.

参考文献

- [1] 陈兆林, 陈天月, 曲勋明. 珊瑚礁砂混凝土的应用可行性研究[J]. 海洋工程, 1991, 9(3): 67
CHEN Zhaolin, CHEN Tianyue, QU Xunming. A feasibility study of application of coral reef sand concrete [J]. The Ocean Engineering, 1991, 9(3): 67
- [2] DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Chloride diffusion study of coral concrete in a marine environment [J]. Construction and Building Materials, 2016, 123: 47. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.135
- [3] YU Hongfa, DA Bo, MA Haiyan, et al. Durability of concrete structures in tropical atoll environment [J]. Ocean Engineering, 2017, 135: 1. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.02.020
- [4] TANG Luping. Engineering expression of the ClinConc model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38: 1092. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.03.008
- [5] GUZMÁN S, GÁLVEZ J, JOSÉ S. Cover cracking of reinforced concrete due to rebar corrosion induced by chloride penetration [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(8): 893. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.04.008
- [6] 何世钦, 贡金鑫. 钢筋混凝土梁中锈蚀钢筋粘结性能的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(12): 2167
HE Shiqin, GONG Jinxin. Experimental studies on bond characteristics of corroded steel bar in reinforced concrete beams [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(12): 2167. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2006.12.037
- [7] RICK A E. Coral concrete at bikini atoll [J]. Concrete International, 1991, 1: 19
- [8] KAKOOEI S, AKIL H, DOLATI A, et al. The corrosion investigation of rebar embedded in the fibers reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 564. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.051
- [9] 张文. 配筋珊瑚混凝土构件试验研究[D]. 南京: 河海大学, 1995
ZHANG Wen. Experimental study on reinforced coral aggregate concrete component [D]. Nanjing: Hohai University, 1995
- [10] DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Experimental investigation of whole stress-strain curves of coral concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 81. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.064
- [11] 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
DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, 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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.01.016
- [12] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 热带岛礁环境下全珊瑚海水混凝土结构服役寿命的可靠性[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(11): 1613
DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Reliability of service life of coral aggregate seawater concrete structure in tropic island reef environment [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(11): 1613. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2018.11.16
- [13] 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
DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Factors influencing durability of coral concrete structure in South China Sea [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(2): 253. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2016.02.11
- [14] MA Haiyan, DA Bo, YU Hongfa, et al. Research on flexural behavior of coral aggregate reinforced concrete beams [J]. China Ocean Engineering, 2018, 32(5): 593. DOI: 10.1007/s13344-018-0061-6
- [15] Standard practice for the preparation of substitute ocean water: ASTM D1141—2003 [S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2003
- [16] 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
YUAN Yingshu, JIA Fuping, CAI Yue. The structural behavior deterioration model for corroded reinforced concrete beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 47. DOI: 10.3321/j.issn.1000-131X.2001.03.009
- [17] DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Reinforcement corrosion research based on the linear polarization resistance method for coral aggregate seawater concrete in a marine environment [J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2018, 65(5): 458. DOI: 10.1108/ACMM-03-2018-1911
- [18] 曾初升. 316L 不锈钢腐蚀性能电化学研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006
ZENG Chusheng. Electrochemical research of 316L stainless steel corrosion [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006
- [19] 赵艳丽, 高娟, 胡吉明, 等. 镀锌钢表面硅烷掺杂电泳漆涂层的腐蚀电化学行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(5): 407
ZHAO Yanli, GAO Mei, HU Jiming, et al. Electrochemical investigation of corrosion performance of electrophoretic hybrid epoxy-silane coatings on galvanized steel [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2016, 28(5): 407. DOI: 10.11903/1002.6495.2015.358
- [20] 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
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010
- [21] 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
Specification for design of lightweight aggregate concrete structures: JGJ 12—2006 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006
- [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[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 39
ZHANG Weiping, ZHANG Yu. Bond-slip relationship between corroded steel bars and concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 39. DOI: 10.3321/j.issn.1000-131X.2001.05.008
- [23] 徐善华, 牛获涛. 锈蚀钢筋混凝土简支梁斜截面抗剪性能研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(5): 98
XU Shanhua, NIU Ditao. The shear behavior of corroded simply supported reinforced concrete beam [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(5): 98. DOI: 10.3321/j.issn.1000-6869.2004.05.016
- [24] 袁迎曙, 贾福萍. 锈蚀钢筋的力学性能退化研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(1): 43
YUAN Yingshu, JIA Fuping. Deterioration of mechanical behavior of corroded steel bar [J]. Industrial Construction, 2000, 30(1): 43. DOI: 10.3321/j.issn.1000-8993.2000.01.012