CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土构件受弯性能研究

童景东，王志滨*，叶辰豪
（福州大学 土木工程学院，福州 350108）

摘 要： 文中对一根碳纤维（carbon fiber-reinforced polymer，CFRP）高强混凝土（high-strength concrete，简称HC）管约束海砂钢筋混凝土试件进行了纯弯试验。试件破坏形态主要包括：平面内弯曲、胶体被拉裂、HC管开裂。建立了该构件的有限元模型，有限元计算结果与试验结果吻合良好。典型算例表明：该类组合构件的抗弯承载力较HC管约束海砂钢筋混凝土对比构件的抗弯承载力提升了4.9%；CFRP-HC管与海砂钢筋混凝土分别承担了约65%和35%的荷载。该类组合构件的抗弯承载力随着不锈钢筋的屈服强度、HC圆柱体的抗压强度、纵筋配筋率及HC管壁厚度的增大而提高。最后提出了适用于CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土构件的抗弯承载力简化计算方法。

关键词： CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土构件；碳纤维；海砂混凝土；不锈钢筋；有限元模型；抗弯承载力；简化方法
中图分类号： TU398.9 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671－9379(2026)07－0049－07
DOI：10.13969/j.jzgjgjz.20241125002

Study on the Flexural Behavior of Reinforced Sea-Sand Concrete-Filled CFRP-HC Tubular Members

TONG Jingdong, *WANG Zhibin**, *YE Chenhao*
(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)
*Corresponding author: wangzhibin@fzu.edu.cn

Abstract: A pure bending test was conducted on one reinforced sea-sand concrete-filled carbon fiber-reinforced polymer (CFRP)-high-strength concrete (HC) tubular specimen. The failure modes of the specimen included in-plane bending, adhesive cracking, and cracking in the HC tube. A finite element (FE) model was established, and the FE results were in good agreement with the test results. The typical example showed that the flexural resistance of the composite member was 4.9% higher than that of reinforced sea-sand concrete-filled HC tubular specimen. The CFRP-HC tube and reinforced sea-sand concrete carried about 65% and 35% of the load, respectively. The flexural resistance of the reinforced sea-sand concrete-filled CFRP-high-strength concrete tubular member increased with the increase of the yield strength of stainless steel bars, HC cylinder compressive strength, longitudinal reinforcement ratio, and HC tube thickness. Finally, a simplified method for calculating the flexural resistance of the reinforced sea-sand concrete-filled CFRP-high-strength concrete tubular specimen was proposed.

Keywords: reinforced sea-sand concrete-filled carbon fiber-reinforced polymer (CFRP)-high-strength concrete (HC) tubular member; carbon fiber-reinforced polymer (CFRP); sea-sand concrete; stainless steel bar; finite element model; flexural resistance; simplified method

收稿日期：2024-11-25
基金项目：国家自然科学基金(52178122)
作者简介：
童景东(2000—)，男，博士研究生，主要从事钢-混凝土组合结构方面的研究。E-mail：627100142@qq.com。
通信作者：
王志滨(1979—)，男，博士，教授，主要从事钢-混凝土组合结构方面的研究。E-mail：wangzhibin@fzu.edu.cn。

高强混凝土(high-strength concrete，简称HC)管约束混凝土构件具有较高的承载力[1]、变形能力[2]与耗能能力[3]，将其应用于海洋工程中，可节约模板制作、安装与拆卸等费用；采用海水、海砂等廉价材料制备内填混凝土，还能降低材料成本与运输成本。但海水海砂混凝土的使用易引发钢筋腐蚀，可采用耐腐蚀性优良的不锈钢筋解决该问题[4]，也可在HC管外包裹碳纤维(carbon fiber-reinforced polymer，CFRP)，进一步提升构件的承载力、延性和耐久性。据此，本文提出一种新型CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土构件(图1)。该类组合构件的外部CFRP-HC管可在工厂预制，运输至现场后安装内部不锈钢筋笼，最后浇筑内部海砂混凝土，在海洋工程中具有良好的应用前景。

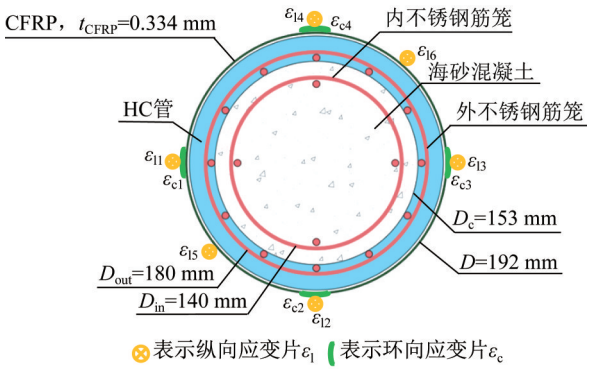


图1 CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土试件

Fig. 1 Reinforced sea-sand concrete-filled CFRP-HC tubular specimen

近年来，国内外学者对HC管约束钢筋混凝土构件、CFRP约束钢筋混凝土构件及海水海砂混凝土构件开展了大量研究。研究人员[1-3]对HC管约束钢筋混凝土柱进行了单调或低周往复荷载试验，结果表明HC管可有效提升混凝土构件的承载力与耗能能力。秦朝刚等[5]开展了预制HC-钢筋混凝土组合梁受弯性能试验研究，并提出其抗弯承载力计算方法。文献[6-8]研究了CFRP约束钢筋混凝土柱的轴压、偏压及抗震性能，发现外包CFRP可显著提高构件的承载力、延性与耗能能力。尚守平等[9]、MOHAMED等[10]对CFRP约束钢筋混凝土构件进行了纯弯试验与理论分析，结果表明环向CFRP能有效提升构件的抗弯承载力。LIAO等[11]、DONG等[12]研究了海水海砂混凝土柱的轴压与偏压力学性能，结果表明采用海水、海砂分别替代淡水、河砂对混凝土柱的承载力影响较小，但会降低构件延性。

综上，HC管或CFRP约束均可显著提升混凝土构件的承载力与耗能能力，但现有研究多集中于HC管约束钢筋混凝土、CFRP约束钢筋混凝土或海水海砂混凝土单一体系，尚未见CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土构件纯弯性能的相关报道。因此，本文对1根CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土构件开展了纯弯试验研究，建立其数值模型，开展受力机理与参数分析，最后提出该构件抗弯承载力的简化计算方法。

1 试验研究

1.1 试件概况

本研究完成了1根CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土试件的纯弯试验，试件截面如图1所示。其中D_{in}和D_{out}分别为内、外箍筋的轴线直径；D_c、D、t_H、t_{CFRP}分别为CFRP-HC管的内径、外径、HC管厚度和CFRP厚度。组合试件的实际长度L为1 510 mm；内钢筋笼的纵筋和箍筋分别采用4Φ5.51、Φ5.51@100；外钢筋笼的纵筋和箍筋分别采用12Φ5.51、Φ5.51@40；试件全长包裹2层厚度为0.167 mm的环向CFRP。

CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土试件的加工过程如下：(1) 制作内钢筋笼，并将其焊接于280 mm×16 mm方形下端板；(2) 安装核心海砂混凝土模板，并将其固定于下端板；(3) 浇筑并振捣核心海砂混凝土，养护14 d后脱模；(4) 制作外钢筋笼，并将其与下端板焊接牢固；(5) 安装外模板，并将模板固定于下端板；(6) 浇筑外部高强混凝土，养护14 d后脱模；(7) 将试件内、外钢筋笼与280 mm×16 mm方形上端板焊接牢固，采用高强混凝土补平试件上端部；(8) 包裹环向CFRP布。

1.2 实测材性

不锈钢筋的实测力学性能指标：名义屈服强度$\sigma_{0.2}$为440.5 MPa；0.01%残余应变对应应力$\sigma_{0.01}$为279.9 MPa；极限抗拉强度σ_u、弹性模量E_s、延伸率δ_s、泊松比μ_s分别为801.7 MPa、1.89×10^5 MPa、52.7%、0.30；应变强化指数n=ln(20)/ln($\sigma_{0.2}/\sigma_{0.01}$)=6.61。

CFRP的实测抗拉强度f_{CFRP}、弹性模量E_{CFRP}、极限拉应变ε_{CFRP}和伸长率δ_{CFRP}分别为3 652.4 MPa、2.38×10^5 MPa、0.015 6、1.8%。

核心海砂混凝土采用未淡化的原状海砂与人工海水制备，本文采用NaCl试剂配制质量分数为3.5%的人工海水[13]。混凝土配合比均为：水泥∶水∶砂∶石=1∶0.42∶1.38∶2.25。HC管采用福州正德建材科技有限公司生产的ZD-100型高强无收缩灌浆料制备，配合比为：灌浆料∶水=100∶11。

海砂混凝土圆柱体抗压强度f'_c、高强混凝土圆柱体抗压强度f'_{HC}、海砂混凝土弹性模量E_c、高强混凝土弹性模量E_{HC}、海砂混凝土泊松比μ_c和高强混凝土泊松比μ_{HC}的实测值均见表1。

表1　混凝土实测材性

Table 1　Measured material properties of concrete

混凝土类型	$f_c'(f_{HC}')$/MPa	$E_c(E_{HC})$/MPa	$\mu_c(\mu_{HC})$
海砂混凝土	48.5	33 403.8	0.22
高强混凝土	94.9	40 326.6	0.21

1.3　试验方案

如图2所示，在试件下部等间距布置5个位移计，用于监测试件挠曲线；在支座处各布置1个位移计，用于测量支座沉降量；同时在试件跨中CFRP表面布置6个纵向应变片与4个横向应变片。

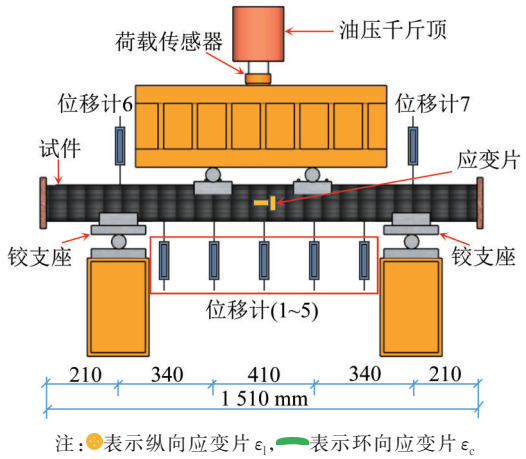


图2　试验装置（单位：mm）

Fig. 2　Test setup (unit: mm)

试验采用四分点加载方式，通过液压泵与反力梁施加荷载，由压力传感器记录荷载值。加载初期采用荷载分级加载，每级荷载取有限元预估抗弯承载力(M_{uFE})的10%，每级持荷2 min；加载7级后连续加载，直至试件挠度达到$L/30$或试件出现不适宜继续承载的局部破坏时停止加载。

1.4　试验结果及分析

试件的破坏形态如图3所示，主要表现为：(1) 平面内弯曲破坏；(2) 中部受拉区胶体开裂，CFRP未发生拉断；(3) HC管受拉区出现多条横向裂缝；(4) 纵筋发生弯曲，但未出现局部屈曲。

图4为试件实测弯矩(M)-曲率(Φ)曲线，由图可知：当试件曲率接近0.1 m^{-1}时，曲线出现小幅波动，该现象由HC管高强混凝土受拉开裂、钢筋与混凝土间产生滑移所致。

图5为试件中截面实测应变分布，x_0为纵向应变片至形心轴的距离，拉应变为正。其中，M_{ue}为受拉钢筋应变为0.01时对应的实测弯矩。加载初期，受拉区与受压区应变同步增大，此时中和轴与形心轴重合，截面形心轴附近应变接近零，试件中截面符合平面假定；受拉区混凝土与胶体开裂后，拉应变发展速率降低，试件中截面不再保持平面。

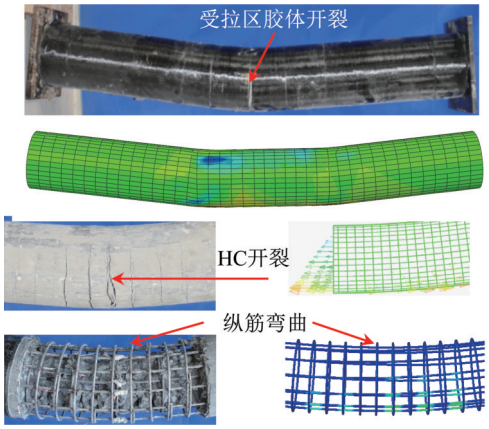


图3　试件破坏形态

Fig. 3　Failure modes of specimen

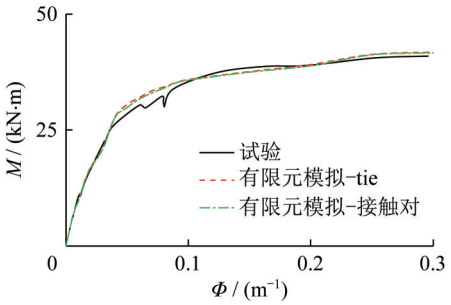


图4　试件M-Φ曲线

Fig. 4　M-Φ curves of specimen

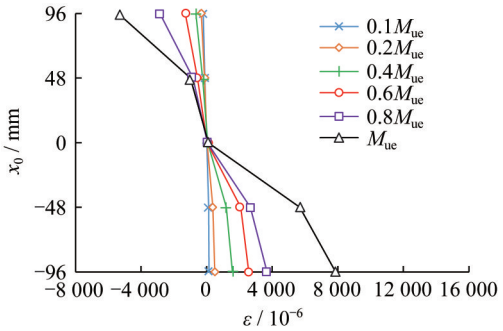


图5　试件实测中截面应变分布

Fig. 5　Measured cross-section strain distribution of specimen

图6为试件实测挠度曲线，其中虚线为对应的正弦半波曲线，纵坐标为实测挠度u，横坐标为各测点至左支座的距离L_x。由图可知：荷载达到$0.6M_{ue}$前，挠度发展与正弦半波曲线基本吻合；$0.6M_{ue}$后，由于试件中截面形成塑性铰，二者不再吻合。

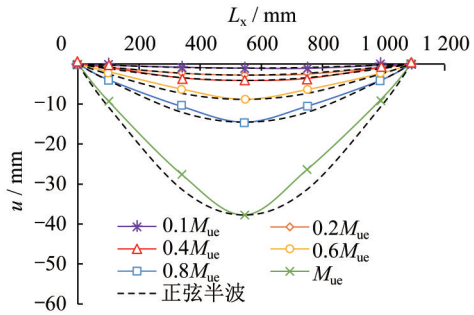


图6 试件挠度曲线

Fig. 6 Deflection curves of specimen

2 数值模拟

为进一步开展受力机理分析与参数分析，本文采用有限元软件ABAQUS建立CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土构件的数值模型。

2.1 材料本构

不锈钢采用文献[14]建议的奥氏体不锈钢本构模型，CFRP与不锈钢箍筋间的约束混凝土采用文献[6]建议的约束混凝土受压本构模型，见式(1)：

$$\sigma=\begin{cases}\left[\dfrac{AX+BX^2}{1+(A-2)X+(B+1)X^2}\right]f_c' & 0<\varepsilon\leqslant\varepsilon_{c0}\\ f_c' & \varepsilon_{c0}<\varepsilon<\varepsilon_{cc}\\ f_r+(f_c'-f_r)\exp\left[-\left(\dfrac{\varepsilon-\varepsilon_{cc}}{\alpha}\right)^{\beta}\right] & \varepsilon\geqslant\varepsilon_{cc}\end{cases}\quad(1)$$

式中：应变比$X=\varepsilon/\varepsilon_{c0}$；$A=E_c\varepsilon_{c0}/f_c'$；$B=(A-1)^2/0.55-1$；混凝土软化系数$\beta=1$；混凝土剩余承载力$f_r=Rf_c'$。约束混凝土峰值应变$\varepsilon_{cc}$、非约束混凝土峰值应变$\varepsilon_{c0}$、混凝土峰值应变参数$\eta$、混凝土软化系数$\alpha$、混凝土强度剩余系数$R$及箍筋约束效应系数$\xi_r$按式(2)～(7)计算：

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}}=0.85\eta\left\{\left[1+0.75\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{co}}\right)\right]^{0.7}-\exp\left[\left(-7\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{co}}\right)\right]\right\}\quad(2)$$

$$\varepsilon_{c0}=0.000\,76+\sqrt{(0.626f_c'-4.33)\times10^{-7}}\quad(3)$$

$$\eta=\alpha+\frac{16f_{CFRP}t_{CFRP}}{Df_c'}\quad(4)$$

$$\alpha=0.04-0.036/\left[1+\exp(24.32\xi_r-3.49)\right]\quad(5)$$

$$R=0.7-0.7\exp(-5.52\xi_r)\quad(6)$$

$$\xi_r=\frac{A_{se}f_y}{A_cf_c'}=\frac{4A_s\sigma_{0.2}}{D_cSf_c'}\quad(7)$$

式中：A_{se}和A_c分别为箍筋和混凝土的截面面积。

HC管中箍筋内部的高强混凝土与海砂混凝土，受到CFRP与不锈钢箍筋的双重约束，需对式(4)进行修正，修正公式见式(8)：

$$\eta'=\alpha+\frac{16f_{CFRP}t_{CFRP}}{Df_c'}+\beta'\frac{2A_s\sigma_{0.2}}{D_cSf_c'}\quad(8)$$

式中：$\beta'=23.5/\sqrt{R_s}$；刚度比$R_s=E_sA_{se}D_c/(E_{CFRP}t_{CFRP}Sd)$。

本文采用ABAQUS中的Lamina材料模型定义CFRP各向异性属性，并采用Hashin damage损伤模型模拟CFRP失效行为[15]。

2.2 模型建立

CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土构件的有限元模型如图7所示。CFRP采用S4R单元模拟；HC管与海砂混凝土采用C3D8R单元模拟；钢筋笼采用T3D2单元模拟；上下加载板采用离散刚体单元模拟。构件截面单元尺寸取$D/36$，纵向单元尺寸取$L/40$。

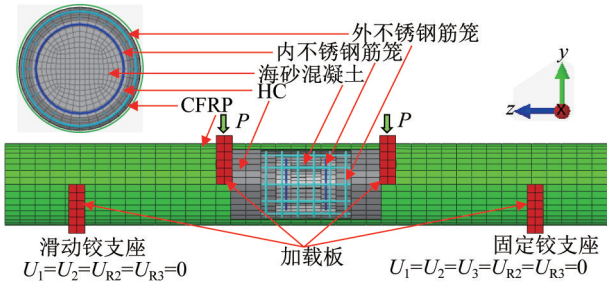


图7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

内、外不锈钢筋笼分别通过Embedded region嵌入海砂混凝土与HC管内部；海砂混凝土与HC管之间分别尝试Tie约束与接触对(法向采用硬接触、切向采用库伦摩擦模型)；HC管与CFRP、加载板与CFRP之间均采用Tie约束。

在下加载板底面设置边界条件：一端约束x、y、z向的平动自由度及绕y、z轴的转动自由度；另一端约束x、y向的平动自由度及绕y、z轴的转动自由度。在上加载板顶面中心施加竖向位移，模拟试验加载过程。

2.3 模型验证

图4对比了实测弯矩-曲率曲线与有限元模拟结果，结果表明：海砂混凝土与HC管之间采用Tie约束与接触对的模拟效果相近，均能较好模拟该类构件的弯矩-曲率关系，因此本文选取计算效率更高的Tie约束。图3还对比了实测破坏形态与有限元模拟结果，二者吻合良好。综上，该有限元模型可用于后续受力机理分析。

3 受力机理

基于上述有限元模型，建立了典型CFRP-HC管约

束海砂钢筋混凝土构件，计算参数如下：D 为 500 mm，t_{CFRP} 为 0.334 mm，f_{CFRP} 为 2 700 MPa，E_{CFRP} 为 230 GPa；内钢筋笼和外钢筋笼的纵筋布置分别采用6Φ12、12Φ12；外钢筋笼箍筋间距 S_{out} 为 80 mm，R_{out} 为 450 mm；内钢筋笼箍筋间距 S_{in} 为 100 mm，R_{in} 为 350 mm；不锈钢体积配箍率 ρ_s 为 $\pi d_s^2/(D_e S_{in})+\pi d_s^2/(DS_{out})=2.26\%$，纵向配筋率 ρ_e 为 $18d_s^2/D_c^2=1.62\%$，$\sigma_{0.2}$ 为 350 MPa，E_s 为 2.00×10^5 MPa；f'_{HC} 为 110 MPa，t_H 为 50 mm；f_c' 为 42 MPa，D_c 为 400 mm。

图 8 为 CFRP-HC 管约束海砂钢筋混凝土构件、HC 管约束钢筋海砂混凝土构件及各组件的弯矩(M)-曲率(Φ)关系曲线。曲线包含 3 个特征点：A 点为构件弹性极限点；B 点处构件最大拉应变达 0.01，对应弯矩为设计抗弯承载力 M_{ud}；C 点为构件曲率达 0.3 的对应点。由图可知：(1) 设置环向 CFRP 可提高组合构件与 HC 管的抗弯承载力，典型构件与 HC 管的抗弯承载力分别提升了 4.9%、6.7%；(2) B 点处，HC 管与核心海砂钢筋混凝土分别承担了约 65% 与 35% 的荷载。

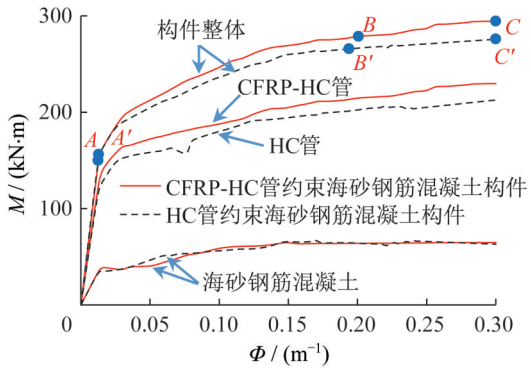


图 8　典型构件及各组件的 M–Φ 曲线

Fig. 8　M–Φ curves for typical members and components

图 9 给出了 CFRP-HC 管约束海砂钢筋混凝土构件中各组件的中截面纵向应力分布图(拉应力为正、压应力为负)，受力过程可分为 3 个阶段：

(1) 弹性阶段(OA)：各组件处于弹性工作阶段，弯矩与曲率呈线性关系。A 点处，HC 管与海砂混凝的纵向压应力最大值分别为 $0.36f'_{HC}$、$0.24f_c'$，出现在受压区边缘；此时纵筋仍处于弹性阶段。

(2) 弹塑性阶段(AB)：随着弯矩的增大，海砂混凝土承担的荷载比例降低，HC 管承担更多荷载，其截面中和轴向受压区移动。B 点处，海砂混凝土的纵向压应力基本为零；HC 管的最大纵向压应力达 $0.92f_{HC}'$；外纵筋的最大纵向拉应力超过屈服强度 $\sigma_{0.2}$，最大纵向压应力仅为 $0.98\sigma_{0.2}$。

(3) 强化阶段(BC)：B 点后，构件承担的弯矩随着曲率增加继续增大，但海砂混凝土基本处于受拉区，承担的荷载比例较小。C 点处，HC 管的最大压应力达 f'_{HC}；外纵筋的最大纵向拉应力、压应力进一步增大，最大压应力达 $1.01\sigma_{0.2}$。

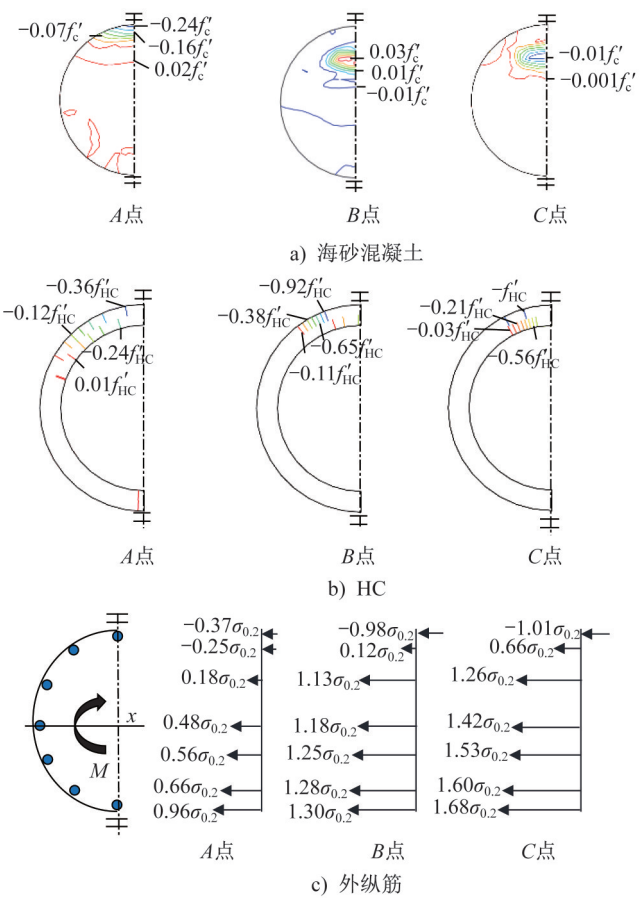


图 9　CFRP-HC 管约束海砂钢筋混凝土构件中各组件的中截面纵向应力分布

Fig. 9　Mid-sectional longitudinal stress distribution of components in reinforced sea-sand concrete-filled CFRP-HC tubular member

图 10 给出了 CFRP-HC 管约束海砂钢筋混凝土构件的环向应力比(p)-曲率(Φ)曲线(对于 CFRP，$p=\sigma_{CFRP}/f_{CFRP}$；对于不锈钢箍筋 $p=\sigma_b/\sigma_{0.2}$)，由图可知：(1) A 点前，CFRP 与不锈钢箍筋的约束作用不明显；(2) B 点时，约束力主要由箍筋提供，箍筋环向应力 σ_b 达到 $0.66\sigma_{0.2}$，CFRP 环向拉应力 σ_{CFRP} 小于 $0.2f_{CFRP}$；(3) C 点时，受压区边缘 CFRP 最大拉应力 σ_{CFRP} 增幅达 52.7%，箍筋环向拉应力 σ_b 仅增大了 25.4%，表明该阶段约束力增长主要由 CFRP 提供。

4　参数分析

基于上述典型算例开展参数分析，图 11 给出了 f_{CFRP}、$\sigma_{0.2}$、f'_{HC}、f_c'、t_H 及 ρ_e 对典型构件弯矩(M)-曲率(Φ)曲

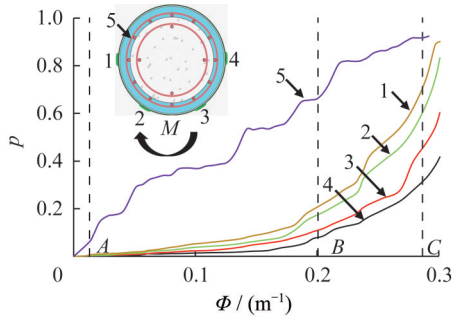


图10 CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土构件的p–Φ曲线

Fig. 10 p–Φ curves of reinforced sea-sand concrete-filled CFRP-HC tubular member

线的影响。结果表明：(1) f_{CFRP}与f_c'对CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土构件的M–Φ曲线影响较小。(2) $\sigma_{0.2}$、f_{HC}'、ρ_e及t_H对构件抗弯承载力与抗弯刚度影响显著，其抗弯承载力随上述参数增大而提高。(3) $\sigma_{0.2}$由165 MPa提高至650 MPa时，其M_{ud}提高了103.7%；f_{HC}'由90 MPa提高至150 MPa时，其M_{ud}提高了51.9%；原因是HC管承担了大部分荷载，其材料强度影响显著；ρ_e由0.72%提高至2.21%时，其M_{ud}提高了65.1%，原因是外纵向钢筋距中和轴较远；t_H由50 mm提高至80 mm时，其M_{ud}提高了41.2%，原因是主要受力组件的截面抗弯模量随t_H的增大显著提高。

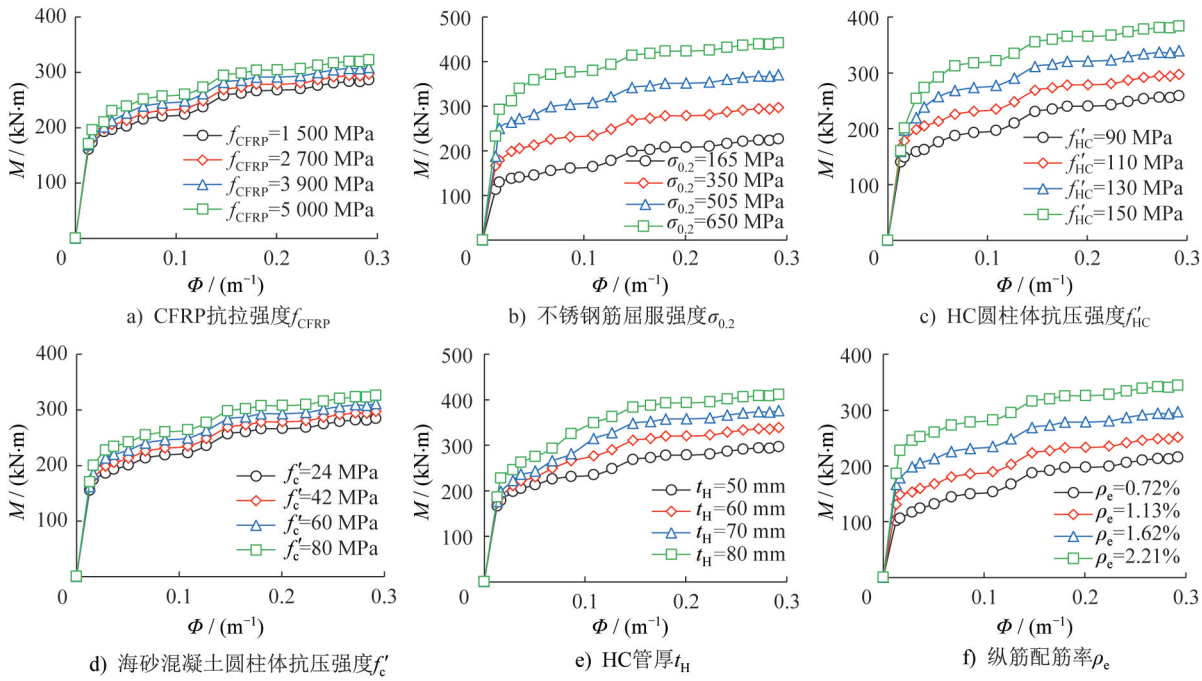


图11 各参数对典型构件M–Φ曲线的影响

Fig. 11 The effect of various parameters on the M–Φ curves of typical member

5 简化计算方法

为便于CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土构件的工程应用，本文提出其抗弯承载力简化计算方法。以上试验结果表明，该类构件受弯时基本符合平截面假定，截面应力可简化为如图12所示的形式。

基于平截面假定，截面上任意一点的应变ε与该点至中和轴的距离y成正比，即：

$$\frac{\varepsilon}{y}=\frac{\varepsilon_{t1}}{y_1}=\frac{\varepsilon_{t2}}{y_2}=\frac{\varepsilon_c}{x_n} \tag{9}$$

式中：ε_{t1}、ε_{t2}为等效钢环受压区、受拉区形心对应的应变；ε_c为受压区边缘混凝土的应变；y_0、y_1、y_2分别为受压区混凝土合力点、等效钢环受压区的形心和等效钢环受拉区形心至截面中和轴的距离；x_n为受压区高度。

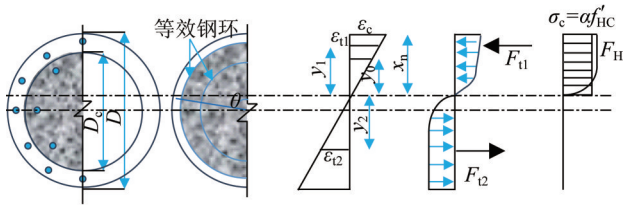


图12 CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土构件等效应力图

Fig. 12 Equivalent stress graph of reinforced sea-sand concrete-filled CFRP-HC tubular member

CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土构件的抗弯承载力M_{uc}可由以下平衡条件求得，即：

$$M_{uc}=\sigma_{0.2}A_{s1}(y_1-y_0)+\frac{y_2}{y_1}\sigma_{0.2}A_{s2}(y_2+y_0) \tag{10}$$

式中：A_{s1}和A_{s2}为受压区和受拉区纵筋总截面面积。

由图9分析可知，B点时受拉区纵筋基本屈服，假定等效钢环受拉区形心处应变也达到屈服应变（即$\varepsilon_{t2}=\sigma_{0.2}/E_s$）；典型构件中核心海砂混凝土的纵向应力近似为零，计算时忽略其对抗弯承载力的贡献。

受压区高度x_n可由以下轴力平衡条件求得，即：

$$\alpha f'_{HC}A_{HC}+\sigma_{0.2}A_{s1}=\frac{y_2}{y_1}\sigma_{0.2}A_{s2} \tag{11}$$

式中：HC管受压区面积$A_{HC}=0.25(D^2-D_c^2)(\theta-\sin\theta\cos\theta)$。

文献[10]提出了α（混凝土强度系数）、y_0、y_1和y_2的计算方法：

$$\alpha=0.85-0.001\,5f'_c\geqslant 0.6 \tag{12}$$

$$y_0=\frac{D\sin\theta^3}{3(\theta-\sin\theta\cos\theta)}+x_n-\frac{D}{2} \tag{13}$$

$$y_1=\frac{\sum A_{s1i}y_{1i}}{\sum A_{s1i}} \tag{14}$$

$$y_2=\frac{\sum A_{s2i}y_{2i}}{\sum A_{s2i}} \tag{15}$$

式中：$\theta=\arccos[1-4(x_n-y_0)/D]$；$A_{s1i}$和$A_{s2i}$为受压区和受拉区第$i$根钢筋的面积；$y_{1i}$和$y_{2i}$为受压区和受拉区的第$i$根钢筋中心至截面中和轴的距离。

将简化计算方法得到的该类构件的抗弯承载力M_{uc}与图11中19个有限元算例的抗弯承载力M_{ud}及实测抗弯承载力M_{ue}进行对比，M_{uc}/M_{ud}平均值和标准差分别为0.993、0.019；M_{uc}/M_{ue}平均值为0.968，表明该简化计算方法具有较高的预测精度。

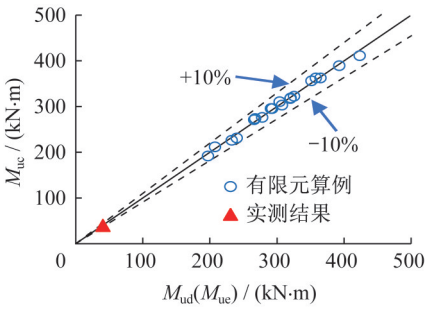


图13　M_{uc}与M_{ud}、M_{ue}的比较

Fig. 13　Comparison of M_{uc} with M_{ud} and M_{ue}

6　结论

本文对CFRP-HC管约束海砂钢筋混凝土构件的受弯性能进行系统研究，主要结论如下：

（1）试验结果表明，试件破坏形态为平面内弯曲，受拉区胶体与HC管被拉裂，HC管出现多条横向裂缝。

（2）建立了该类构件的有限元模型，有限元结果与试验数据吻合良好。典型算例表明，设置环向CFRP可使该类构件的极限抗弯承载力提升4.9%；CFRP-HC管与核心海砂钢筋混凝土分别承担了约65%与35%的荷载。

（3）参数分析表明，CFRP强度与海砂混凝土强度对该类构件的M-Φ曲线影响较小；工程常用范围内，该类构件的抗弯承载力随不锈钢筋屈服强度（由165 MPa提高至650 MPa）、HC圆柱体抗压强度（由90 MPa提高至150 MPa）、纵筋配筋率（由0.72%提高至2.21%）、HC管壁厚度（由50 mm提高至80 mm）增大，分别提升了103.7%、51.9%、65.1%、41.2%。

（4）本文提出了适用于该类组合构件的抗弯承载力简化计算方法，简化计算结果与有限元模拟结果、试验实测结果吻合良好。

参考文献：

[1] 单波，刘志，肖岩，等.RPC预制管混凝土组合柱组合效应试验研究[J].湖南大学学报（自然科学版），2017，44(3)：88-96.DOI：10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2017.03.011.
SHAN Bo，LIU Zhi，XIAO Yan，et al.Experimental research on composite action of concrete-filled RPC tube under axial load [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences)，2017，44(3)：88-96.DOI：10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2017.03.011.(in Chinese)

[2] FARZAD M，SADEGHNEJAD A，RASTKAR S，et al. A theoretical analysis of mechanical and durability enhancement of circular reinforced concrete columns repaired with UHPC[J]. Engineering Structures，2020，209：109928. DOI：10.1016/j.engstruct.2019.109928.

[3] 田会文.UHPC管混凝土组合柱轴压与抗震性能研究[D].南京：东南大学，2022.
TIAN Huiwen. Behavior of composite columns of concrete-filled UHPC tube (CFUT) under axial compression and seismic loading[D]. Nanjing：Southeast University，2022.(in Chinese)

[4] 黄卿维，王思睿，黄伟，等.RU-NC组合短柱轴压受力性能研究[J].湖南大学学报（自然科学版），2022，49(11)：137-149. DOI：10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2022124.
HUANG Qingwei，WANG Sirui，HUANG Wei，et al. Mechanical behavior of RU-NC composite short columns under axial compressive loads [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences)，2022，49(11)：137-149.DOI：10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2022124.(in Chinese)

[5] 秦朝刚，吴涛，刘伯权，等.预制UHPC-RAC组合梁受弯性能试验与理论计算[J].复合材料学报，2024，41(3)：1420-1435.DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20230704.001.
QIN Chaogang，WU Tao，LIU Boquan，et al.Experimental and theoretical study on flexural behavior of precast UHPC-RAC composite beams[J].Acta Materiae Compositae Sinica，2024，41 (3)：1420-1435. DOI：10.13801/j. cnki. fhclxb. 20230704.001.(in Chinese)

（下转第111页）