

引用本文:张剑瑞,何泽朝,马恺泽. FRP-钢复合管约束高强混凝土轴压短柱试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(6): 113-121.  
ZHANG Jian-rui, HE Ze-zhao, MA Kai-ze. Experimental Research on FRP-steel Composite Tube Confined High-strength Concrete Short Column Under Axial Compression[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(6): 113-121.

DOI:10.19815/j.jace.2021.11019

# FRP-钢复合管约束高强混凝土轴压短柱试验研究

张剑瑞<sup>1</sup>, 何泽朝<sup>2</sup>, 马恺泽<sup>2</sup>

- (1. 西安长安大学工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710061;
2. 长安大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:**为研究纤维增强复合材料(FRP)-钢复合管约束高强混凝土短柱的轴压性能,以混凝土强度、钢管厚度、FRP层数和种类为参数开展了轴压试验研究,分析了试件的约束机制、破坏机理、轴向荷载-应变曲线和环向荷载-应变曲线。结果表明:所有试件表现出相似的破坏特征,即FRP发生断裂、钢管鼓曲变形明显,增加钢管厚度和混凝土强度均可有效提高短柱的极限承载力,但增加混凝土强度会降低短柱的变形能力,加快其承载力下降速率;增加FRP层数可以明显提高短柱的承载能力和塑性变形能力,并延缓承载力下降速率,但对短柱弹性段和下降段的刚度以及强化平台段影响较小;碳纤维增强复合材料(CFRP)对短柱极限承载力的提高要优于玻璃纤维增强复合材料(GFRP),但CFRP约束的短柱承载力下降速率更快;与CFRP相比,GFRP对短柱刚度退化的延缓作用要更明显;FRP断裂时,测点位置CFRP、GFRP的应变仅为极限应变的0.54倍、0.56倍;提出的短柱轴压承载力和峰值应变计算方法的计算结果与试验结果吻合良好。

**关键词:**FRP-钢复合管;轴心受压;极限承载力;变形能力;峰值应变

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)06-0113-09

## Experimental Research on FRP-steel Composite Tube Confined High-strength Concrete Short Column Under Axial Compression

ZHANG Jian-rui<sup>1</sup>, HE Ze-zhao<sup>2</sup>, MA Kai-ze<sup>2</sup>

- (1. The Engineering Design Academy of Chang'an University Co., Ltd., Xi'an, Xi'an 710061, Shaanxi, China;
2. College of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** An experimental study on high-strength concrete short columns confined by FRP-steel composite tube was carried out to study the axial compression performance, and the variables included the strength of concrete, the thickness of steel tube, the layer and type of FRP. The restraint mechanism, failure mechanism, axial and circumferential load-vertical strain curves of the specimens were investigated. The results show that all specimens show similar failure modes, FRP is broken and the steel is buckled and deformed obviously. The increases in the thickness of steel tube and strength of concrete can effectively improve the ultimate bearing capacity of the short columns, but the increase of concrete strength weakens the deformation capacity and

收稿日期:2021-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51578077);陕西省自然科学基金研究计划项目(2017JM5037)

作者简介:张剑瑞(1982-),女,陕西咸阳市人,高级工程师,工学硕士,E-mail:zjr-snow@163.com.

通信作者:马恺泽(1981-),男,内蒙古包头人,副教授,工学博士,E-mail:makaize@chd.edu.cn.

increases the degradation rate of the bearing capacity. The increase in the layer number of FRP improves the bearing and plastic deformation capacities of the short columns, and decreases the degradation rate of the bearing capacity, but it has little effect on the stiffness in the elastic and decline stages and the strengthening platform stage. The improvement of CFRP on the bearing capacity is more obvious than that of GFRP, but the short columns confined by CFPR shows a faster degradation rate in the bearing capacity. Compared with CFRP, GFRP delays the stiffness degradation of short columns more obviously. When FRP breaks, the strains of CFRP and GFRP at the measured point are only 0.54 times and 0.56 times of the limit strain. The calculated results of the proposed calculation methods of axial bearing capacity and peak strain of short columns are in good agreement with the experimental results.

**Key words:** FRP-steel composite tube; axial compression; ultimate bearing capacity; deformation capacity; peak strain

## 0 引言

高强混凝土由于其优越的力学性能常被应用于高层结构当中,但其脆性破坏的特征较为明显<sup>[1-3]</sup>。FRP-钢复合管约束高强混凝土柱是在钢管高强混凝土柱的外表面粘贴纤维增强复合材料(FRP)。这种新型的组合柱在保留钢管高强混凝土柱高承载力及高延性的同时,采用 FRP 对钢管混凝土进行约束,使其承载力得到了进一步的提升,减小了构件的截面尺寸及用钢量,并有效减轻了钢管锈蚀的问题<sup>[4-6]</sup>。

顾维平等<sup>[7]</sup>进行了不同混凝土强度等级、不同套箍系数的钢管混凝土轴压试验,结果表明随着钢管变形增加,钢管的约束减小。Jin 等<sup>[8]</sup>对钢管混凝土短柱进行了模拟研究,结果表明当轴压比小于 0.4 时,轴压比越大,短柱的抗剪强度越大、延性越好;当轴压比大于 0.4 时,轴压比越大,短柱的抗剪强度越低、脆性越明显。吴炎海等<sup>[9]</sup>进行了活性粉末混凝土(RPC)轴压短柱试验,结果表明,RPC 强度和套箍系数的增大均会提高构件的承载力,但钢管对 RPC 的约束效果弱于其对普通混凝土的约束效果。韦建刚等<sup>[10]</sup>开展了含钢率为 0.14~0.38 的高强钢管超高性能混凝土(UHPC)短柱轴压性能试验,结果表明,高强钢管的局部鼓曲和 UHPC 的脆性特征都有所改善。夏松等<sup>[11]</sup>开展了带拉筋方中空夹层钢管混凝土轴压短柱受力性能试验,结果表明,拉筋能有效缓解方钢管的局部屈曲,对短柱承载力、刚度、延性的提高效果明显。李斌等<sup>[12]</sup>对 26 个薄壁方钢管混凝土短柱进行了试验研究,结果表明,试件宽厚比越大,鼓曲越早发生,试件宽厚比为 60、80 时,加劲肋宽度对试件承载力影响最明显,试件宽厚

比为 100 时,必须增加加劲肋的个数以满足管壁局部屈曲的抗弯刚度要求。邓宗才等<sup>[13]</sup>对层间混杂纤维增强复合材料(HFRP)布约束长龄期混凝土柱进行了轴压试验,发现养护龄期为 730 d 时,HFRP 约束可显著提高混凝土柱的抗压强度和变形性能。马高等<sup>[14]</sup>对不同长细比下玄武岩纤维增强复合材料(BFRP)约束的损伤混凝土柱进行了轴压试验,结果表明,随着 BFRP 约束层数的增加,长细比效应逐渐减弱。Shayanfar 等<sup>[15]</sup>提出了一个适用于预测 FRP 约束混凝土柱及部分 FRP 约束混凝土柱在轴压荷载作用下剪胀性能的模型,该模型具有较高的准确度。魏洋等<sup>[16]</sup>进行了 8 根 FRP-钢复合管混凝土柱的轴压试验,结果表明,在 FRP 布断裂前,钢管被有效地约束,无局部屈曲发生;随着钢管壁厚比改变,FRP 布断裂后,构件承载力发生了不同程度的改变。郭莹等<sup>[17]</sup>进行了 6 个碳纤维增强复合材料(CFRP)-钢复合管约束高强混凝土柱、2 个 CFRP 约束高强混凝土柱、1 个钢管约束高强混凝土柱对比试件的试验研究,结果表明,约束模式对前期刚度影响较小,且随 CFRP 层数增多,短柱承载能力和变形能力均得到提高。王吉忠等<sup>[18]</sup>对 8 根 CFRP-圆/方钢复合管约束型钢高强混凝土短柱和 4 根 CFRP 约束圆钢管型钢高强混凝土短柱进行了轴压试验,结果表明短柱承载力随约束效应系数增加呈指数形式增长。

综上所述,已有研究对 FRP 和钢管复合约束下的高强混凝土短柱的研究仍较少,且相关的轴压承载力计算公式尚不完善。为此,本文对 FRP-钢复合管约束高强混凝土短柱进行了轴压试验研究,分析了钢管厚度、混凝土强度、FRP 层数和种类对其轴压受力性能的影响,并在试验研究和理论分析的基

础上,建立了FRP-钢复合管约束高强混凝土短柱的轴压承载力计算公式。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

依据实际工程需求,选取钢管厚度、混凝土强度、FRP层数和FRP种类4个变量。试验设计制作了28个试件,包括24根FRP-钢复合管约束高强混凝土短柱以及4根钢管高强混凝土短柱轴压性能试件。试件的设计、制作和测试参考现有研究<sup>[17-20]</sup>及相关规范<sup>[21-22]</sup>,尽量减小误差对试验结果的影响。试件尺寸均为100 mm×200 mm,长径比为2,参数如表1所示,表中A、B分别代表混凝土强度等级为C60、C80,C、G分别代表碳、玻璃纤维布,“-”前后数字分别为FRP层数和钢管厚度, $N_u$ 为试件的极限承载力。FRP通过湿法缠绕工艺缠绕在钢管上。

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of Specimen

序号	试件编号	FRP层数	钢管厚度/mm	$N_u$ /kN
1	A0-2.5	0	2.5	1 031.86
2	A0-3.5	0	3.5	1 225.11
3	B0-2.5	0	2.5	1 267.84
4	B0-3.5	0	3.5	1 440.74
5	CA1-2.5	1	2.5	1 412.57
6	CA2-2.5	2	2.5	1 660.79
7	CA3-2.5	3	2.5	1 803.32
8	CA1-3.5	1	3.5	1 571.81
9	CA2-3.5	2	3.5	1 830.95
10	CA3-3.5	3	3.5	2 032.21
11	CB1-2.5	1	2.5	1 504.66
12	CB2-2.5	2	2.5	1 731.37
13	CB3-2.5	3	2.5	1 899.19
14	CB1-3.5	1	3.5	1 621.20
15	CB2-3.5	2	3.5	1 890.34
16	CB3-3.5	3	3.5	2 129.56
17	GA1-2.5	1	2.5	1 201.53
18	GA2-2.5	2	2.5	1 343.79
19	GA3-2.5	3	2.5	1 478.60
20	GA1-3.5	1	3.5	1 314.50
21	GA2-3.5	2	3.5	1 505.89
22	GA3-3.5	3	3.5	1 618.61
23	GB1-2.5	1	2.5	1 338.46
24	GB2-2.5	2	2.5	1 401.69
25	GB3-2.5	3	2.5	1 496.38
26	GB1-3.5	1	3.5	1 503.89
27	GB2-3.5	2	3.5	1 580.24
28	GB3-3.5	3	3.5	1 693.37

### 1.2 材料性能

分别对混凝土和钢管进行力学性能测试,得到尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的C60、C80混凝土立方体抗压强度分别为64.1、84.3 MPa;钢管为Q235钢,屈服强度为386 MPa。纤维布的力学性能如表2所示。

表 2 FRP 力学性能指标

Table 2 FRP Mechanical Performance Index

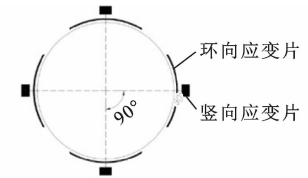
FRP 种类	厚度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	极限应变/%
CFRP	0.167	3 961	240	1.8
GFRP	0.169	2 200	100	2.5

### 1.3 加载方案和测点布置

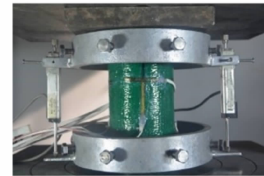
试验在2 000 kN电液伺服压力试验机上进行加载。试验采用荷载控制加载,开始时加载速率为 $2 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ ,加载至极限荷载的1/2时调整加载速率为 $1 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ ,接近极限荷载时,加载速率减至 $0.5 \text{ kN} \cdot \text{s}^{-1}$ 。为测试试件的竖向和环向应变值,在试件中部沿沿竖向、环向布置8个应变片;为测量竖向变形,在试件左右布置了2个位移计。试验装置及应变片详细布置如图1所示。



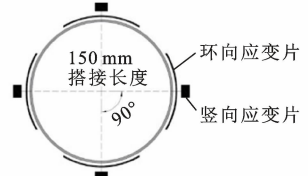
(a) 钢管混凝土短柱加载装置



(b) 钢管混凝土短柱应变片布置



(c) FRP-钢复合管高强混凝土短柱加载装置



(d) FRP-钢复合管高强混凝土短柱应变片装置

图 1 试验装置及应变片布置

Fig. 1 Test Device and Strain Gauge Arrangement

## 2 试验现象与结果分析

### 2.1 试件破坏特征

钢管高强混凝土短柱的破坏特征见图2(a)。试验前期,试件受力较小,无明显形变;荷载达到 $0.85N_u$ 时,试件进入弹塑性阶段;达到极限荷载时,高强混凝土急速开裂,变形急剧增大,钢管开始向外鼓出,荷载逐渐降低;当荷载降低到极限荷载的65%~68%时,试件的承载力逐步趋于稳定,内部高强混凝土大量碎裂,钢管鼓曲变形明显。

FRP-钢复合管约束高强混凝土短柱的破坏特

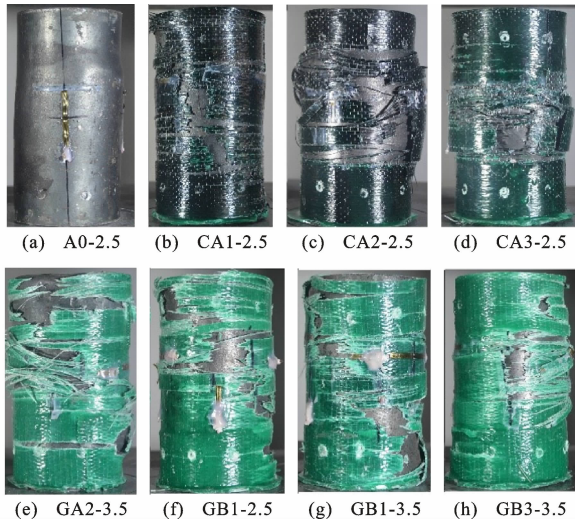


图2 试件破坏特征

Fig. 2 Failure Characteristics of Specimen

征见图2(b)~(h)。随着FRP层数的增加,FRP断裂面积逐渐减小,1层CFRP与2层以下玻璃纤维增强复合材料(GFRP)约束时,FRP断裂由顶端斜向贯穿至底部,呈明显的剪切破坏,剪切角约为 $60^\circ$ ;2层以上CFRP与3层GFRP约束时,仅中部的FRP断裂,且断裂方向竖直向下。加载初期,试

件外形无明显变化,其竖向与环向应变均很小;当荷载增至 $0.9N_0$ 后,高强混凝土内部出现细微裂缝并持续发展,钢管无明显变形,试件不断发出纤维布拉伸断裂的噼啪声;达到极限荷载后,纤维布发生断裂,断裂处钢管表面暴露且逐渐向外膨胀;继续加载,剩余的纤维布完全断裂,钢管内高强混凝土逐渐碎裂,钢管大面积向外鼓出且变形增大;当荷载降至极限荷载的 $50\% \sim 60\%$ 时,试件的承载力逐渐趋于稳定,应变及钢管变形持续增大。

## 2.2 荷载-竖向应变曲线

试件荷载-竖向应变曲线见图3。由图3可知,所有试件的曲线都经历了弹性段、弹塑性段、下降段、强化平台段。在弹性段,试件的横向变形较小,在弹塑性段,试件横向变形明显增大,FRP逐渐发挥约束作用,因此FRP-钢复合管约束高强混凝土短柱表现出更长的弹塑性段,且其极限荷载和竖向应变得到显著的提高。在下降段,由于大部分FRP已经断裂,约束效果被极大地削弱,因此两种试件间的下降速率无明显差异。在强化平台段,两种试件的承载能力相近,说明FRP大量断裂后,剩余的FRP对构件不再产生明显的约束效果。钢管厚度和混凝

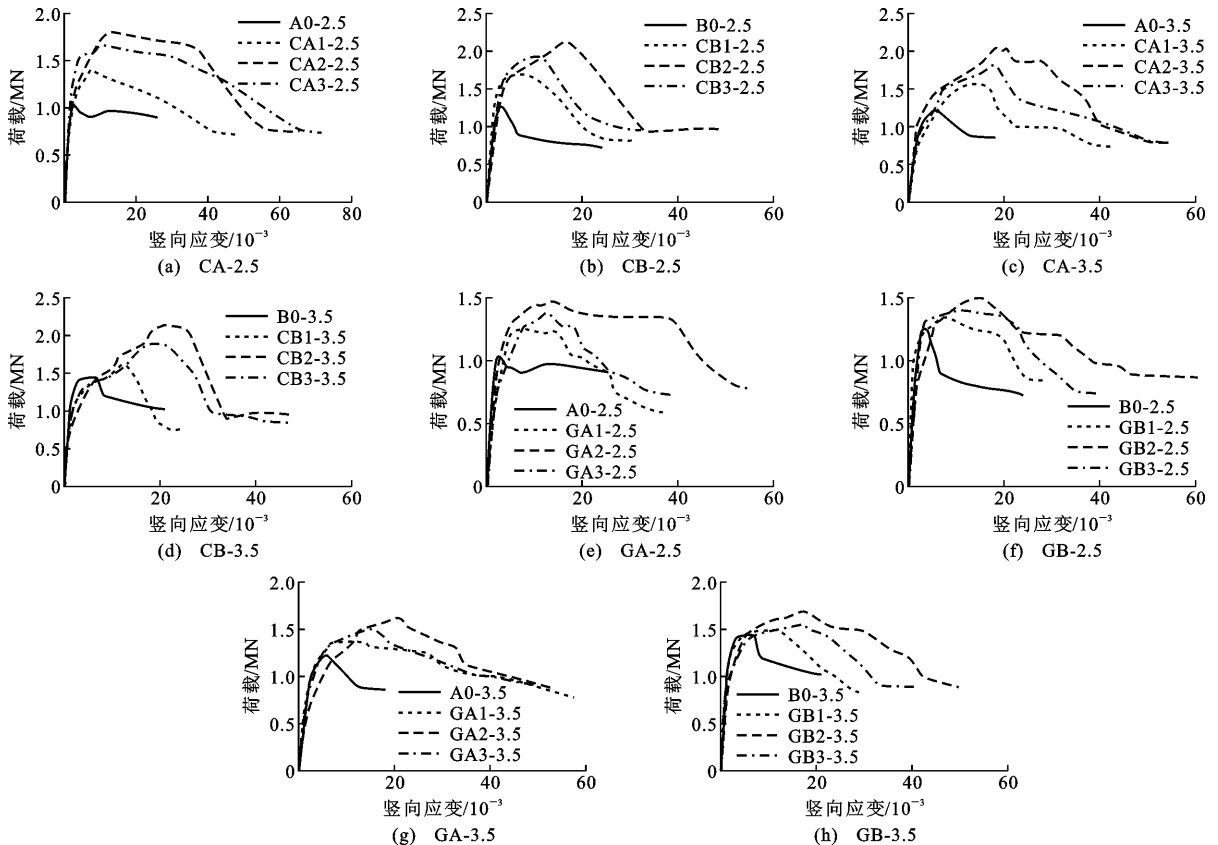


图3 荷载-竖向应变曲线

Fig. 3 Load-vertical Strain Curves

土强度的增加可以提高试件的极限承载力。试件 CA3-3.5 的极限承载力比 CA3-2.5 提高了 12.7%，试件 GB3-3.5 的极限承载力比试件 GB3-2.5 提高了 13.2%。与试件 CA3-2.5 和 CA3-3.5 相比，试件 CB3-2.5 和 CB3-3.5 进入强化平台阶段时的竖向应变分别减小了 40.4% 和 21.3%。

FRP 层数的增加可以显著提高试件的极限承载力和极限竖向应变。1 层 CFRP 布约束下，试件在弹性段后的承载力和竖向应变短暂增长即达到峰值荷载，之后荷载迅速下降至强化平台段；2 层 CFRP 布约束下，试件在弹性段后呈现一段较长的弹塑性段，抵达峰值后荷载迅速下降直至强化平台段；3 层 CFRP 布约束下，试件在弹性段后同样呈现一段较长的弹塑性段，但达到峰值后，由于仅少许 CFRP 布被拉断，荷载并未迅速下降，而是缓慢下降一段时间，直至大部分 CFRP 布断裂后，荷载迅速下降直至强化平台段。1 层 GFRP 布约束下，试件的曲线在荷载抵达峰值前与钢管高强混凝土短柱相似，但荷载达到峰值后，试件的承载力以较慢的速度下降直至强化平台段；2 层与 3 层 GFRP 布约束下，试件曲线发展相似，在弹性段后呈现短暂的弹塑性段，在荷载达到峰值后，试件承载力以较慢速度下降直至强化平台段。与采用 GFRP 约束的试件相比，采用 CFRP 约束的试件在极限荷载下竖向应变提高了 74.1%。GFRP-钢复合管约束高强混凝土短柱在荷载达到峰值后，承载力下降较为缓慢，在极限强度下可以继续维持一段时间的约束，而 CFRP 约束时，承载力达到峰值后便迅速下降。

### 2.3 荷载-环向应变曲线

试件荷载-环向应变曲线见图 4。由图 4 可知，FRP-钢复合管约束高强混凝土短柱与钢管高强混凝土短柱的荷载-环向应变曲线总体趋势一致。

试验初期，试件的环向应变较小，两种试件的曲线相近；临近峰值荷载时，试件的横向变形逐步增大，FRP 的约束效果随之被激活；荷载增加，试件的横向变形显著增大，FRP 的约束效果达到极限，试件的荷载基本保持不变。结合前述试验现象，FRP 断裂时，测点位置的 FRP 布应变未达到其极限应变；CFRP 布断裂时的平均应变为 0.98%，为其极限应变的 0.54 倍；GFRP 布断裂时的平均应变为 1.40%，为其极限应变的 0.56 倍。

## 3 受力机理与承载力计算公式

### 3.1 钢管混凝土环向应变

钢管混凝土短柱受力状态见图 5。令钢管混凝土

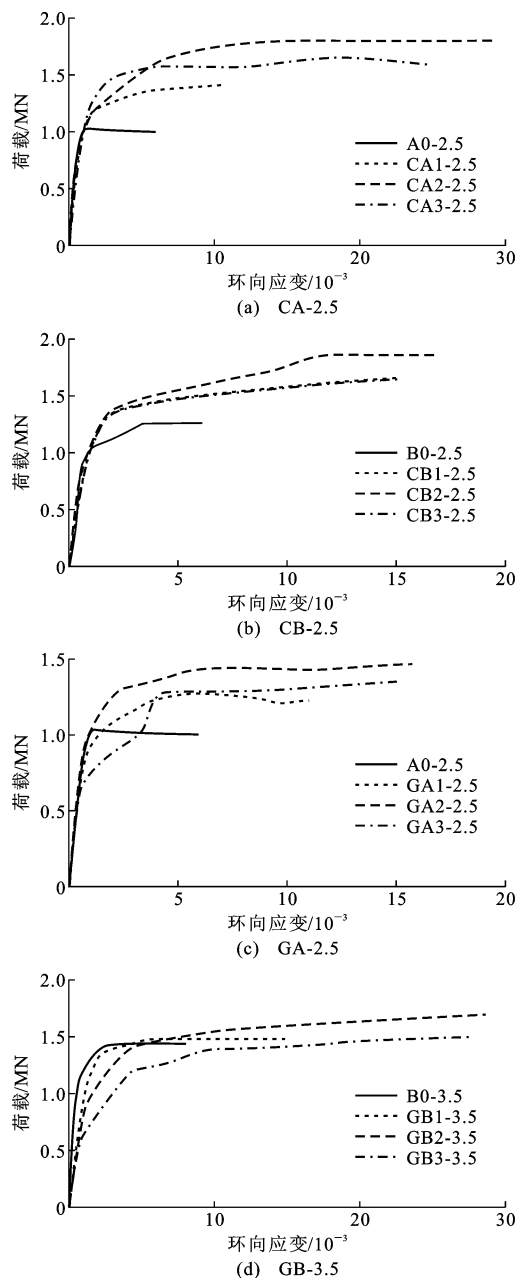


图 4 荷载-环向应变曲线

Fig. 4 Load-circumferential Strain Curves

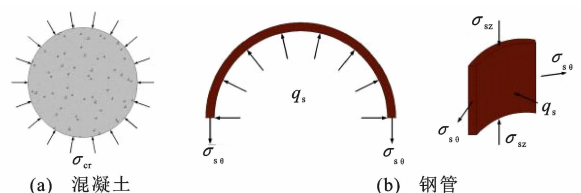


图 5 钢管混凝土柱受力

Fig. 5 Stress of Concrete Filled Steel Tube Column

土短柱受到的初始轴向荷载大小为  $N_{sc}$ ，混凝土受到的初始轴向荷载大小为  $N_{zc}$ ，钢管受到的初始轴向荷载大小为  $N_{zs}$ ；钢管与混凝土的挤压应力为  $q_s$ ；钢管所受混凝土膨胀导致的应力为  $\sigma_{s0}$ ；钢管所受轴

向应力为  $\sigma_{sz}$ ; 混凝土截面面积为  $A_c$ , 钢管截面面积为  $A_s$ ; 钢管弹性模量为  $E_s$ , 混凝土弹性模量为  $E_c$ , 直径为  $d$ , 钢管厚度为  $t_s$ 。

对极限状态下钢管混凝土纵向进行静力平衡分析得到

$$N_{sc} = N_{zc} + N_{zs} = \sigma_{zc} A_c + \sigma_{zs} A_s \quad (1)$$

由钢管的静力平衡得到

$$\int_{a/2}^{a/2+t_s} \sigma_{\theta c} d\rho = \frac{q_s d}{2} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_{\theta c}$  为混凝土膨胀产生的应力;  $\alpha$  为钢管直径;  $t_s$  为钢管厚度变化。

钢管和混凝土的纵向应变  $\epsilon_{zs}$ 、 $\epsilon_{zc}$  可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{zs} &= \frac{1}{E_s} [\sigma_{zs} - \mu_s (\sigma_{\theta s} + \sigma_{rs})] \\ \epsilon_{zc} &= \frac{1}{E_c} [\sigma_{zc} - \mu_c (\sigma_{\theta c} + \sigma_{rc})] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $\mu_s$ 、 $\mu_c$  分别为钢管和混凝土的摩擦因数;  $\sigma_{\theta s}$  为钢管所受混凝土膨胀导致的应力;  $\sigma_{rs}$  为钢管所受径向应力;  $\sigma_{rc}$  为混凝土所受径向应力。

由钢管和混凝土的纵向变形协调(即  $\epsilon_{zs} = \epsilon_{zc}$ ), 联立公式(2)和(3), 有

$$\frac{\sigma_{zc} - \sigma_{zs}}{E_c} = \left[ \frac{2\mu_c}{E_c} + \frac{\mu_s}{E_s} \left( \frac{d}{2t_s} - 1 \right) \right] \sigma_{rc} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{zs}$  为钢管纵向应力;  $\sigma_{zc}$  为混凝土纵向应力。

钢管和混凝土的径向应变  $\epsilon_{rs}$ 、 $\epsilon_{rc}$  分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{rs} &= \frac{1}{E_s} [\sigma_{rs} - \mu_s (\sigma_{\theta s} + \sigma_{zs})] \\ \epsilon_{rc} &= \frac{1}{E_c} [\sigma_{rc} - \mu_c (\sigma_{\theta c} + \sigma_{zc})] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由钢管和混凝土的径向变形协调(即  $\epsilon_{rs} = \epsilon_{rc}$ ), 联立公式(2)和(5), 有

$$\frac{\mu_s \sigma_{zs}}{E_s} - \frac{\mu_c \sigma_{zc}}{E_c} = \left( \frac{\mu_c - 1}{E_c} + \frac{\mu_s d + 2t_s}{2E_s t_s} \right) \sigma_{rc} \quad (6)$$

联立公式(1)、(5)、(8), 得到

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{zc} &= \frac{(C\mu_s + D)E_c A_c}{(D + C\mu_c)E_s A_s + (C\mu_s + D)E_c A_c} \frac{N_0}{A_c} \\ \sigma_{zs} &= \frac{(C\mu_c + D)E_s A_s}{(D + C\mu_c)E_s A_s + (C\mu_s + D)E_c A_c} \frac{N_0}{A_s} \\ \sigma_{rc} &= \frac{(\mu_s - \mu_c)E_c E_s A_s}{(D + C\mu_c)E_c E_s A_s + (C\mu_s + D)E_c^2 A_c A_s} \frac{N_0}{A_s} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} C &= 2\mu_c \frac{E_s}{E_c} + \mu_s \left( \frac{d}{2t_s} - 1 \right) \\ D &= (1 - \mu_c) \frac{E_s}{E_c} + \frac{\mu_s d}{2t_s} + 1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将钢管径向应力近似为 0, 则钢管的环向应变  $\epsilon_{\theta s}$  为

$$\epsilon_{\theta s} = \frac{1}{E_s} (\sigma_{\theta s} - \mu_s \sigma_{zs}) \quad (9)$$

联立公式(1)、(2)、(7)、(8)、(9), 得到极限荷载下钢管的环向应变计算式为

$$\epsilon_{\theta s} = \alpha \frac{N_{sc}}{E_s A_s} \quad (10)$$

$$\alpha = \left[ (\mu_s - \mu_c) \left( \frac{d}{2t_s} + \mu_s \right) + (D + C\mu_c) \mu_s \right] E_s A_s / \left[ (D + C\mu_s) E_s A_s + (D + C\mu_s) E_c A_c \right] \quad (11)$$

### 3.2 FRP-钢复合管的轴压承载力公式

在轴压荷载的作用下, FRP-钢复合管约束高强混凝土短柱中的钢管及内部高强混凝土直接承担轴向荷载的作用, 外部包裹的纤维布主要以环向的抗拉能力来约束构件, 对轴向抗压的贡献微乎其微, 可以忽略不计。

加载初期, 试件所受轴向压力由混凝土与钢管共同承担, 但此时混凝土横向变形较小, 钢管与混凝土之间不产生挤压力, 钢管以轴向受压为主要受力状态。随着荷载提高, 试件竖向变形增大, 混凝土内部产生裂缝从而使体积变大, 导致混凝土与钢管之间发生挤压, 钢管开始受到环向拉应力。由于钢管发生横向变形, 钢管与纤维之间也发生挤压, 纤维开始受到环向拉应力。此时, 混凝土处于轴压、径向受压的应力状态, 钢管处于轴压、径向受压和环拉的三向应力状态, 纤维处于环拉的应力状态, 如图 6 所示, 图中  $p$  为混凝土受到的侧向应力,  $q_t$  为钢管与 FRP 的挤压应力,  $\sigma_{\theta t}$  为 FRP 所受钢管混凝土膨胀导致的应力,  $\sigma_{zt}$  为 FRP 所受纵向应力。随着荷载达极限强度, 钢管处于弹性极限状态, 纤维拉应力达极限抗拉强度, 此时, 可以求出 FRP-钢复合管高强混凝土短柱极限承载力。

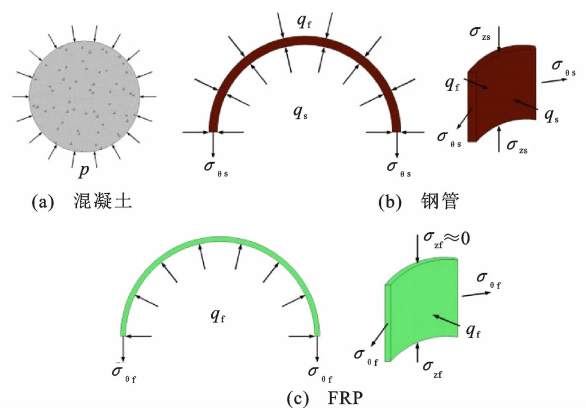


图 6 FRP-钢复合柱受力图

Fig. 6 Stress Diagram of FRP-steel Composite Column

与钢管高强混凝土柱相比, FRP-钢复合管高强混凝土短柱由于纤维约束力的存在, 变形明显减小, 且承载力获得大幅度提高。与纤维约束混凝土相

比,FRP-钢复合管混凝土利用钢管的延性避免了在纤维断裂时发生脆性破坏,弥补了纤维约束混凝土脆性的缺点。

FRP-钢复合管约束高强混凝土短柱的轴压承载力  $N_u$  可表示为

$$N_u = N_{u,s} + N_{u,frp} \quad (12)$$

式中: $N_{u,s}$ 为钢管高强混凝土短柱的极限承载力; $N_{u,frp}$ 为FRP约束钢管高强混凝土极限承载力的提高值。

三向受压状态下混凝土的轴向抗压强度  $f_c$  与侧向应力之间的关系为<sup>[19]</sup>

$$f_c = f_{ck} \left(1 + \frac{k_1 p}{f_{ck}}\right) \quad (13)$$

式中: $k_1$ 为试验确定的增大系数;混凝土受到的侧向压应力  $p = q_s + q_t$ 。

混凝土单轴抗压强度  $f_{ck}$  与立方体抗压强度  $f_{cu}$  的关系为<sup>[19]</sup>

$$f_{ck} = 0.4 f_{cu}^{7/6} \quad (14)$$

由图 6(b)可建立钢管的静力平衡方程,即

$$\int_{d/2}^{d/2+t_s} \sigma_{\theta s} d\rho = \frac{(p - q_t)d}{2} \quad (15)$$

钢管的套箍系数  $\xi_s$  为

$$\xi_s = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} \quad (16)$$

式中: $f_y$ 为钢管屈服强度。

联立公式(14)、(15)得到

$$\sigma_{\theta s} = \frac{2q_s f_y}{\xi_s f_{ck}} \quad (17)$$

联立公式(10)、(16)、(17)得到

$$q_s = \alpha \frac{N_{sc}}{2A_c} \quad (18)$$

由于FRP在构件破坏时对轴心抗压的贡献很小,故忽略不计,仅考虑FRP的环向作用。因此,FRP在回归分析时不采用套箍系数,而采用实际约束强度,将公式(13)进行分解得到的钢管混凝土强度计算公式为

$$N_{u,s} = A_{sc} f_{ck} \left(1 + \frac{k_1 q_s}{f_{ck}}\right) \quad (19)$$

根据试验结果分析得出  $k_1 = 12$ 。

FRP的实际约束强度  $f_r$  计算公式为

$$f_r = \frac{2k_2 \epsilon_{frp} E_{frp} t_{frp}}{d} \quad (20)$$

式中: $\epsilon_{frp}$ 为FRP的极限应变; $E_{frp}$ 为FRP的弹性模量; $t_{frp}$ 为FRP的厚度; $k_2$ 为FRP断裂时的实际平均应变与其极限应变之比,分析试验所得数据得到,CFRP-钢复合管约束高强混凝土短柱的  $k_2$  为 0.56,

GFRP-钢复合管约束高强混凝土短柱的  $k_2$  为 0.52。

对试验数据进行线性回归分析,得到单层FRP对钢管高强混凝土承载力提高值  $N_{u1,frp}$  为<sup>[23]</sup>

$$N_{u1,frp} = 109 f_{sc} A_{sc} \left(\frac{f_r}{f_{sc}}\right)^{2.06} \quad (21)$$

式中: $f_{sc}$ 和  $A_{sc}$ 为钢管混凝土的轴压强度和横截面积。

通过对试验数据分析可以发现,承载力提高值与FRP层数不呈线性关系,当FRP层数为  $c$  时,对应的承载力提高值  $N_{u,frp}$  为

$$N_{u,frp} = c^{0.9} N_{u1,frp} \quad (22)$$

FRP-钢复合管约束高强混凝土短柱的承载力  $N$  计算公式为

$$N = A_{sc} f_{ck} \left(1 + \frac{12q_s}{f_{ck}}\right) + 109 c^{0.9} f_{sc} A_{sc} \left(\frac{f_r}{f_{sc}}\right)^{2.06} \quad (23)$$

图 7 为承载力试验值和计算值的对比,图中  $\pm 10\%$  代表误差线。由图 7 可以看出,本文的承载力计算值与试验值吻合较好。承载力试验值的平均值为 1 558.23 kN,标准差为 248.57 kN,变异系数为 0.160;承载力计算值的平均值为 1 519.28 kN,标准差为 260.33 kN,变异系数为 0.171。

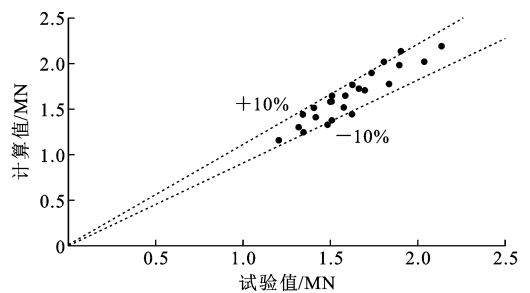


图 7 承载力结果对比

Fig. 7 Comparison of Bearing Capacity Results

FRP-钢复合管约束高强混凝土短柱峰值荷载时的轴向压应变  $\epsilon_{cc}$  按照预测式(24)进行计算。

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = \alpha' + \beta \left(\frac{f_r}{f_c}\right) \left(\frac{\epsilon_u}{\epsilon_{co}}\right)^\gamma \quad (24)$$

$$f_r' = \frac{2k \epsilon_{frp} E_{frp} t_{frp} + 2f_y t_s}{d} \quad (25)$$

式中: $\epsilon_{co}$ 为未约束试件的峰值荷载所对应的轴向应变值; $\epsilon_u$ 为FRP的极限拉应变值; $f_r'$ 为FRP和钢管的总约束强度; $k$ 为FRP断裂应变与极限应变的比值; $\alpha'$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 为待定系数。

将式(24)与试验值进行回归拟合,得到的轴向压应变预测式为

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 2.15 + 0.15 \frac{f_r'}{f_c} \left(\frac{\epsilon_u}{\epsilon_{co}}\right)^{1.12} \quad (26)$$

峰值应变试验值和计算值对比结果见图 8。可

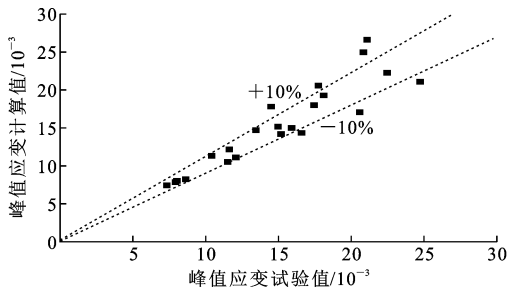


图8 峰值应变结果对比

Fig. 8 Comparison of Peak Strain Results

可以看出,该峰值应变预测模型得到的计算值与试验值较为吻合。

## 4 结语

(1)FRP可以有效提高钢管高强混凝土短柱的极限承载力和轴向变形能力,但对其弹性段以及下降段刚度和强化平台段影响较小。

(2)FRP层数的增加可以明显提高FRP-钢复合管约束高强混凝土短柱的极限承载力、极限竖向应变和进入强化段所对应的竖向应变;CFRP对短柱极限承载力及变形能力的增强要明显优于GFRP,而GFRP对延缓短柱下降段刚度的退化效果要明显优于CFRP。

(3)增加钢管厚度和混凝土强度均可提高FRP-钢复合管约束高强混凝土短柱的极限承载力,但提高混凝土强度会削弱短柱的变形能力,加快其承载力下降速率。

(4)考虑FRP和钢管对高强混凝土的复合约束作用,建立了构件的轴压承载力和竖向峰值应变计算方法,计算结果与试验结果吻合良好。

## 参考文献:

### References:

[1] 黄煜焜,钱觉时.龄期和养护方式对高强混凝土力学性能的影响[J].硅酸盐通报,2007,26(3):427-430.  
HUANG Yu-bin, QIAN Jue-shi. The Influence on High Strength Concrete Mechanical Properties by Age and Curing Condition[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2007, 26(3): 427-430.

[2] 祖坤,熊二刚,宋良英,等.高强混凝土构件力学性能研究综述[J].硅酸盐通报,2019,38(10):3178-3192.  
ZU Kun, XIONG Er-gang, SONG Liang-ying, et al. Review on Mechanical Properties of High-strength Concrete Members[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(10): 3178-3192.

[3] HUNG C C, HSIEH P L. Comparative Study on Shear Failure Behavior of Squat High-strength Steel Reinforced Concrete Shear Walls with Various High-strength Concrete Materials[J]. Structures, 2020, 23: 56-68.

[4] 史亚涛,胡忠君,谈明睿,等. CFRP布约束方钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 混凝土, 2021(1): 1-5.  
SHI Ya-tao, HU Zhong-jun, TAN Ming-rui, et al. Experimental Study on Axial Compression Performance of CFRP-confined Square Concrete-filled Steel Tube Short Columns[J]. Concrete, 2021(1): 1-5.

[5] 张倚天,肖岩. FRP约束方钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 50-56.  
ZHANG Yi-tian, XIAO Yan. Study on Behaviors of FRP Confined Stub Concrete Filled Square Steel Tubes Under Axial Load[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(11): 50-56.

[6] 张昆昆,廖飞宇,黄志伟. CFRP加固带球形冠形脱空缺陷的钢管混凝土短柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(增1): 220-225.  
ZHANG Kun-kun, LIAO Fei-yu, HUANG Zhi-wei. Axial Compression Behavior of CFRP Reinforced Concrete Filled Steel Tubes with Spherical-cap Gap [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40 (S1): 220-225.

[7] 顾维平,蔡绍怀,冯文林. 钢管高强混凝土的性能与极限强度[J]. 建筑科学, 1991, 7(1): 23-27.  
GU Wei-ping, CAI Shao-huai, FENG Wen-lin. Behavior and Ultimate Strength of Steel Tubes Filled with High-strength Concrete [J]. Building Science, 1991, 7(1): 23-27.

[8] JIN L, FAN L L, LI D, et al. Size Effect of Square Concrete-filled Steel Tubular Columns Subjected to Lateral Shear and Axial Compression; Modelling and Formulation [J]. Thin-walled Structures, 2020, 157: 107158.

[9] 吴炎海,林震宇. 钢管活性粉末混凝土轴压短柱受力性能试验研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 57-62.  
WU Yan-hai, LIN Zhen-yu. Experimental Study of Behavior on RPC Filled Steel Tubular Stub Columns Under Axial Compression [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 57-62.

[10] 韦建刚,罗震,欧智菁,等. 圆高强钢管超高性能混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(11): 16-28.



- WEI Jian-gang, LUO Xia, OU Zhi-jing, et al. Experimental Study on Axial Compressive Behavior of Circular UHPC Filled High-strength Steel Tube Short Columns[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(11):16-28.
- [11] 夏松, 卢得仁, 丁发兴. 带拉筋方中空夹层钢管混凝土轴压短柱受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(增1):204-209.
- XIA Song, LU De-ren, DING Fa-xing. Experiment Study of Stirrup-confined Concrete-filled Square Double-skin Steel Tubular Stub Columns Under Axial Loading[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(S1):204-209.
- [12] 李斌, 郭世壮, 高春彦. 带肋薄壁方钢管混凝土轴压短柱受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(增1):218-225.
- LI Bin, GUO Shi-zhuang, GAO Chun-yan. Experimental Research on Mechanical Behavior of Concrete-filled Thin-walled Stiffened Square Steel Tubular Short Column Under Axial Load[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(S1):218-225.
- [13] 邓宗才, 阚德新, 王力, 等. HFRP约束长龄期混凝土柱轴压性能的试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(9):1367-1371.
- DENG Zong-cai, KAN De-xin, WANG Li, et al. Experimental Study on Mechanical Property of Long-age Concrete Columns Confined by HFRP Under Axial Compression[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(9):1367-1371.
- [14] 马高, 陈晓煌. BFRP约束损伤混凝土圆柱体长细比较效应[J]. 建筑结构, 2020, 50(24):91-98.
- MA Gao, CHEN Xiao-huang. Slenderness Ratio Effect of BFRP-confined Damaged Concrete Cylinders[J]. Building Structure, 2020, 50(24):91-98.
- [15] SHAYANFAR J, REZAZADEH M, BARROS J A. Analytical Model to Predict Dilation Behavior of FRP Confined Circular Concrete Columns Subjected to Axial Compressive Loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2020, 24(6):91-98.
- [16] 魏洋, 李国芬, 曹兴. 不同径厚比下纤维-钢复合管混凝土柱轴压性能[J]. 建筑结构, 2014, 44(21):32-35, 6.
- WEI Yang, LI Guo-fen, CAO Xing. Axial Compressive Behavior of Concrete-filled FRP-steel Composite Tubular Columns with Different Diameter-thickness Ratios[J]. Building Structure, 2014, 44(21):32-35, 6.
- [17] 郭莹, 许天祥, 刘界鹏. 圆CFRP-钢复合管约束高强混凝土短柱轴压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(5):124-131.
- GUO Ying, XU Tian-xiang, LIU Jie-peng. Experimental Study on Axial Behavior of Circular CFRP-steel Composite Tubed High-strength Concrete Stub Columns[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(5):124-131.
- [18] 王吉忠, 刘建伟, 杨柳. CFRP-钢复合管约束型钢高强混凝土短柱的轴压力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(2):48-55.
- WANG Ji-zhong, LIU Jian-wei, YANG Liu. Mechanical Behavior of CFRP-steel Composite Tube Confined Steel High Strength Reinforced Concrete Stub Columns Under Axial Compression[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(2):48-55.
- [19] XIAO Y, HE W H, CHOI K K. Confined Concrete-filled Tubular Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(3):488-497.
- [20] PARK J W, HONG Y, CHOI S M. Behaviors of Concrete Filled Square Steel Tubes Confined by Carbon Fiber Sheets (CFS) Under Compression and Cyclic Loads[J]. Steel and Composite Structures, 2010, 10:187-205.
- [21] 碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程:CECS 146:2003[S]. 北京:中国计划出版社, 2003.
- Technical Specification for Strengthening Concrete Structures with Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminate:CECS 146:2003[S]. Beijing:China Planning Press, 2003.
- [22] 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.
- Standard for Test Method of Concrete Structures:GB/T 50152—2012[S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2012.
- [23] 邓宗才, 孙彤, 张亚宁. CFRP-钢复合管约束UHPC轴压短柱试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(11):1695-1702.
- DENG Zong-cai, SUN Tong, ZHANG Ya-ning. Experimental Study of the Axial Behavior of Carbon Fiber-reinforced Polymer-steel Composite Tubes-confined UHPC Stub Columns[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(11):1695-1702.