

GFRP管约束钢骨混凝土组合短柱轴压试验

杨文伟,李顺涛,杨霞

(宁夏大学土木与水利工程学院,宁夏银川750021)

摘要 目的 研究 GFRP 管约束钢骨混凝土组合短柱在轴压荷载作用下的破坏模式和轴压力学性能,以指导工程实际. 方法 对 7 根 GFRP 管约束钢骨混凝土组合短柱进行轴压试验,研究混凝土强度等级、截面含钢率和截面组合形式对组合短柱的破坏模式和轴压力学性能的影响,得到其荷载位移曲线;采用纤维模型法预测荷载轴向应变曲线. 结果 短柱内部混凝土均呈 45° 斜剪切破坏,柱脚钢管发生鼓曲;相同含钢率下,内置工字钢短柱比内置钢管短柱破坏更严重,极限承载力更低;短柱的荷载-位移曲线都呈双线性上升,内置钢管使短柱极限承载能力提升 1.44~1.96 倍,增大钢管截面尺寸对短柱极限承载力的提升效果最明显. 结论 内置钢管能更有效提高短柱的极限承载力,采用纤维模型法预测荷载轴向应变曲线时,引入环向极限约束面积比系数 ξ ,使极限承载力预测误差在 5% 以内,可为 GFRP 管约束钢骨混凝土组合构件的非线性分析提供参考.

关键词 GFRP 管混凝土柱;钢骨;轴压力学性能;纤维模型法;非线性分析

中图分类号 TU352 文献标志码 A

Experimental Study on Axial Compression of Steel-encased Concrete Filled GFRP Tubular Short Column

YANG Wenwei, LI Shuntao, YANG Xia

(College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, China, 750021)

Abstract: In order to study the failure mode and mechanical properties of steel-encased concrete filled GFRP tubular short columns under axial load, seven combined short column axial compression tests are carried out. The effects of concrete strength grade, section steel content and section form on the axial compression properties of steel-encased concrete filled GFRP tubular short columns were studied. The load-displacement curve is obtained, and the load-axial strain curve is predicted by the fiber model method. The results show that the concrete inside the short column shows 45° shear failure, and the steel tube at the column base is deformed. Under the

收稿日期:2019-07-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51468054);宁夏回族自治区自然科学基金项目(2019AAC03004)

作者简介:杨文伟(1967—),男,教授,博士,主要从事钢结构方面研究.

section steel ratio, the built-in I-steel short column is more severely damaged than the built-in steel tube short column, and the ultimate bearing capacity is lower. The load-displacement curve of the short column increases bi-linearly. The built-in steel pipe increases the ultimate bearing capacity of the short column by 1.44 ~ 1.96 times. The increase of the cross-section of the steel tube has the most obvious effect on the ultimate bearing capacity of the short column. When the fiber model method is used to predict the load axial strain curve, the introduction of the hoop limit constraint area ratio coefficient ξ can make the ultimate bearing capacity prediction error within 5%, which can provide reference for the nonlinear analysis of steel-encased concrete filled GFRP tubular members.

Key words: concrete filled GFRP tubular columns; steel; axial compression performance; fiber model method; nonlinear analysis

GFRP 约束钢骨混凝土实心组合短柱是一种新型组合构件,与 FRP 约束素混凝土柱相比,该组合柱中内置型钢可以很好承担轴向荷载,对混凝土起到加劲作用。同时,混凝土也能防止型钢局部屈曲,能显著提高短柱的承载能力和抗震性能。这种结构形式的短柱应用前景广阔,可用于海洋平台、桥墩、码头桩等恶劣工况^[1-3]。

目前,FRP-混凝土-钢管双壁空心组合柱的相关研究有很多^[4-7],而 FRP-混凝土-钢管混凝土实心柱的研究起步较晚,且多是作为空心组合柱的对照组出现^[8-10]。B. ZHANG 等^[11]进行了 FRP-混凝土-钢管双壁空心组合柱的水平力往复试验,发现作为对照组的实心组合柱中钢管并未发生明显的局部屈曲,荷载-位移曲线的第二段由平台变为近似的直线上升段。任慧韬^[12]进行了 3 个 FRP 管-混凝土-钢管组合短柱轴压试验,研究了 FRP 管厚度、钢管厚度和强度、核心混凝土强度等参数对实心组合短柱轴压性能的影响,发现核心混凝土强度对组合柱的极限承载力影响很大。侯玉林^[13]考虑核心混凝土受到的双重约束,采用统一强度理论,推导得到 FRP-混凝土-钢管组合实心方形短柱的轴压承载力计算式。T. Yu 等^[14]采用大极限应变的 FRP 材料,通过 FRP-混凝土-钢管双壁空心组合柱和 FRP-混凝土-钢管

混凝土实心组合柱的对比试验发现,改变钢管径厚比对空心组合柱承载力的影响更为显著,实心组合柱的荷载-位移曲线呈双线性上升。

可见,以上实心组合柱的研究多是作为空心组合柱的对照组出现,且多数集中于 FRP 和混凝土的参数研究,而对内置钢骨类型及截面含钢率的系统性研究并不多见。基于此,笔者对 7 根 GFRP 管约束钢骨混凝土组合短柱进行轴压试验,探讨截面含钢率、混凝土强度等级、截面组合形式对组合柱轴压承载力的影响,得到荷载-位移曲线。采用纤维模型法计算试件的荷载-轴向应变曲线,通过引入环向极限约束面积比系数 ξ 来区分夹层混凝土与核心混凝土受到的不同约束效应,提高了极限承载力的计算精度,研究成果可为此类型短柱的非线性分析提供参考。

1 试验方案

1.1 试件设计

试验共设计了三种截面形式的 7 个组合短柱试件,包括 1 个 GFRP 管-素混凝土实心柱,5 个 GFRP 管-钢管-混凝土实心组合柱,1 个 GFRP 管-工字钢-混凝土实心组合柱,柱高均为 300 mm,直径均为 150 mm,截面组合形式如图 1 所示,具体试件参数见表 1 所示。

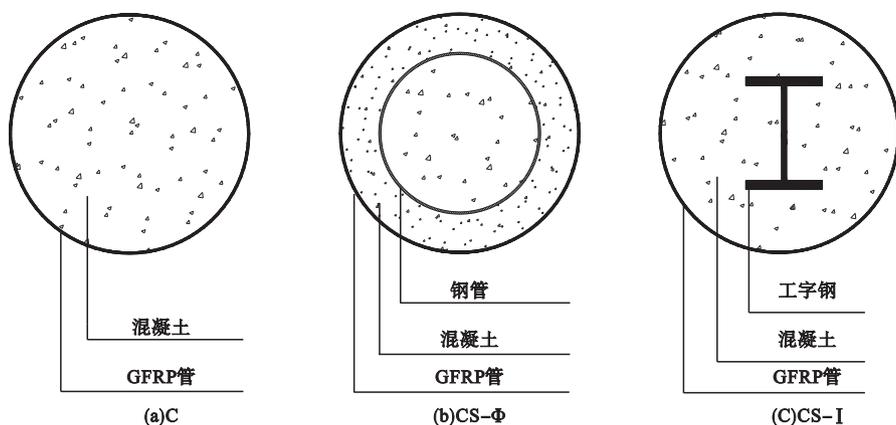


图1 试件截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the specimens

表1 试件参数表

Table 1 Test parameters of the specimens

试件编号	截面形式	含钢率 φ /%	混凝土等级
C - C30	素混凝土	—	C30
CS - Φ 89 - C30	内置钢管	6.05	C30
CS - Φ 89 - C40	内置钢管	6.05	C40
CS - Φ 89 - C50	内置钢管	6.05	C50
CS - Φ 108 - C30	内置钢管	9.15	C30
CS - Φ 115 - C30	内置钢管	11.62	C30
CS - I 100 - C30	内置工字钢	9.03	C30

注:C、CS- Φ 、CS-I分别表示截面形式为填充素混凝土、内置钢管、内置工字钢试件。

三种钢管的外径 \times 壁厚分别为89 mm \times 4 mm、108 mm \times 5 mm、115 mm \times 6 mm,工

字钢的腰高 \times 腿宽 \times 腰厚为100 mm \times 68 mm \times 7 mm,钢材均采用与文献[15-16]研究同一批Q235钢,依据《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228—2010)进行钢材的单向拉伸试验,单向拉伸试验结果如表2所示。

GFRP管采用山东浩宇管业公司生产的预制缠绕型GFRP管,其外径均为150 mm,壁厚为4 mm,纤维缠绕方向为55°。根据公司提供的产品检验报告显示,弹性模量 $E_{\text{frp}}=21.93$ GPa,环向抗拉强度为265.12 MPa,断裂应变 $\varepsilon_{\text{h,rupt}}=0.012$ 。

表2 钢材力学参数表

Table 2 Mechanical parameters of steel

材料	σ_y /MPa	σ_u /MPa	ε_y /%	ε_u /%	δ /%	E /GPa
钢管	268.6	430.1	0.15	16.32	42.87	207.1
工字钢	268.1	429.7	0.15	16.40	44.57	195.7

注: σ_y 、 σ_u 、 ε_y 、 ε_u 、 δ 、 E 分别为屈服强度、极限强度、屈服应变、极限应变、伸长率及弹性模量。

混凝土按照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)设计,浇筑柱子的同时制作三个标准立方体试块(150 mm \times 150 mm \times 150 mm)用于测定混凝土抗压强度,实测C30、C40、C50混凝土立方体抗压强度分别为39.87 MPa、51.65 MPa、68.61 MPa。

1.2 测量方案及加载

在GFRP管的中部截面布置4个各呈

90°直角关系的测点,测点处分别粘贴环向和轴向的电阻应变片(型号:BFH120-10AA,栅长 \times 栅宽:10 mm \times 4 mm);在钢管中部截面外侧及工字钢中部截面位置的上下翼缘中部分别粘贴轴向应变片(型号:BFH120-3AA,栅长 \times 栅宽:3 mm \times 2 mm);在柱高方向对称布置两个位移计用来测量短柱轴压过程中的轴向位移。

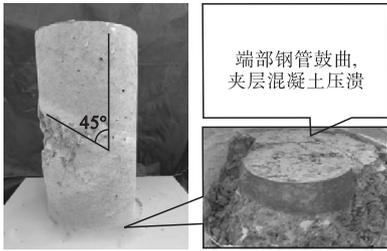
试验加载装置为3 000 kN MTS多功能

电液伺服万能试验机.采用力控方式控制加载速度,在达到预估荷载的70%之前加载速度为3 kN/s,达到预估荷载的70%以后加载速度减为1.5 kN/s,试验过程中持续观测记录试件的破坏情况.

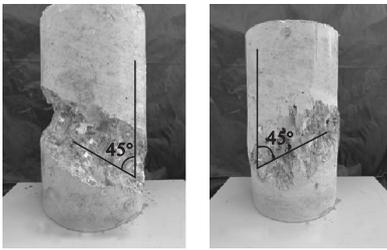
2 试验结果分析

2.1 破坏模式

截面形式为内置钢管的短柱试件,达到最大承载力后,其外层纤维被拉断失效,柱脚夹层混凝土有少量压碎脱落,但内置钢管对核心混凝土仍然有约束力,核心混凝土没有脱落,柱端部钢管发生鼓曲如图2(a)所示.与试件C-C30、CS-I100-C30相比,CS-Φ系列试件夹层混凝土破坏后依然有一定承载能力,而C-C30、CS-I100-C30外层纤维被拉断后,混凝土大面积破坏,立即失去继续承载的能力.柱内混凝土基本呈如图2(b)、2(c)所示的斜向45°剪切破坏,破坏区域较大.



(a)CS-Φ系列试件



(b)C-C30试件

(c)CS-I100-C30试件

图2 破坏模式

Fig.2 Failure mode

2.2 荷载-位移曲线

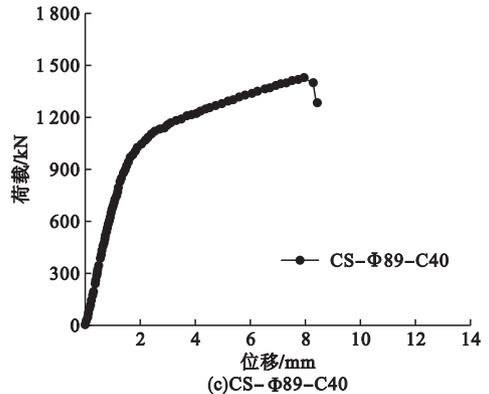
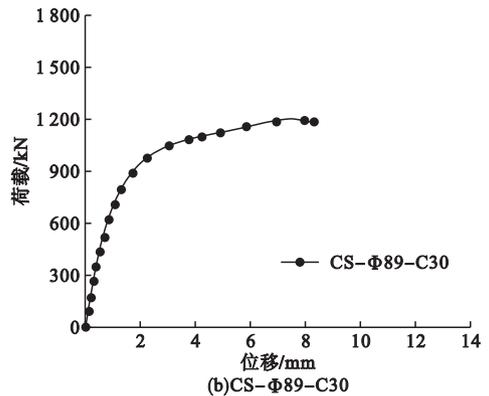
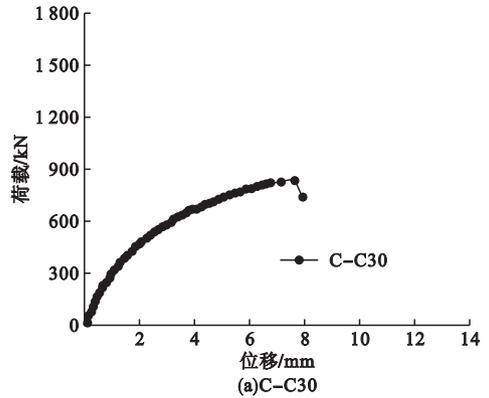
试验结果如表3所示(β 为相较于试件C-C30承载力的提升比例),试验得到的荷

载-位移曲线如图3所示.

表3 试验结果

Table 3 Test results

试件编号	极限承载力/kN	极限变形/mm	$\beta/\%$
C-C30	836.96	7.56	—
CS-Φ89-C30	1 201.30	7.95	144.2
CS-Φ89-C40	1 429.31	7.97	171.1
CS-Φ89-C50	1 525.74	9.29	182.9
CS-Φ108-C30	1 522.81	11.05	181.2
CS-Φ115-C30	1 641.50	11.82	196.4
CS-I100-C30	1 142.04	9.26	136.5



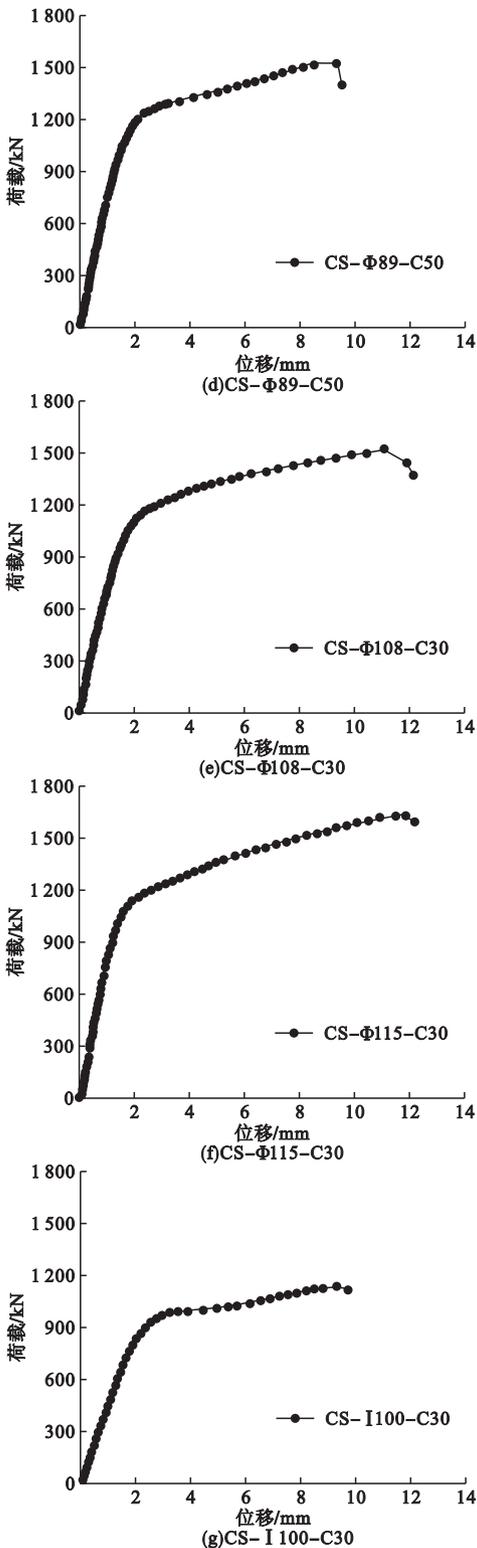


图3 荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curve

由图3可知,7个轴压短柱的荷载-位移曲线都有明显的转折点,基本呈双线性上

升.加载初期,混凝土和钢材均处于弹性变形阶段,变形很小,GFRP管对混凝土的约束作用不明显;加载至极限荷载的70%左右时,短柱进入弹塑性阶段,此时GFRP管对混凝土产生很大的环向约束力;加载至极限荷载的95%左右时环向纤维被拉断,混凝土被压碎,试件承载能力急剧下降,表现出脆性破坏特性.

2.3 参数分析

通过表3试验结果分析混凝土强度等级、截面含钢率和截面形式对短柱承载力的影响,可以得到以下结论:

(1)内置钢管的CS-Φ系列试件的初始刚度大致相同,并且大于试件CS-I100-C30,试件C-C30的初始刚度最小.说明在GFRP管约束的素混凝土柱中内置钢管能有效提升短柱的初始刚度,并且在截面含钢率相同时(CS-Φ108-C30试件的截面含钢率为9.15%、CS-I100-C30试件的截面含钢率为9.03%),内置钢管比内置工字钢的提升效果要明显.

(2)对比试件CS-Φ89-C30、CS-Φ89-C40、CS-Φ89-C50发现,后两者相较于前者其极限承载力分别提升1.191、1.275倍,极限位移分别提升1.002、1.168倍.随着混凝土强度等级的提高短柱极限承载力变大,但由于混凝土的脆性随着强度等级的提升而增大,所以短柱极限变形能力提升很小.

(3)对比试件CS-Φ89-C30、CS-Φ108-C30、CS-Φ115-C30发现,后两者的极限承载力相比前者分别增加了1.252倍、1.433倍,极限位移分别提升了1.390倍、1.487倍.随着截面含钢率的增大,CS-Φ系列短柱试件核心混凝土占比更多,所以荷载-位移曲线的二次刚度明显增大.同时,夹层混凝土破坏后,钢管内的核心混凝土可以继续承载,所以含钢率大的试件其延性也明显提升.

(4) 对比试件 CS - Φ108 - C30、CS - I 100 - C30 发现,前者的极限承载力相比后者增加 1.333 倍、极限变形增加 1.193 倍。相同含钢率下内置钢管短柱与内置工字钢短柱相比,前者对核心混凝土有更好的约束作用,即使 GFRP 管破坏后夹层混凝土被压碎,核心混凝土由于受到钢管的约束仍可以继续承受部分荷载,所以其承载能力和变形能力相比内置工字钢短柱更优。

3 非线性全过程分析

采用纤维模型法计算组合短柱在轴压荷载作用下的荷载 - 轴向应变曲线,进行非线性全过程分析。纤维模型法是由材料的应力 - 应变关系,根据内外力平衡方程和变形协调方程计算出构件在每一加载步下的应力 - 应变状态^[17-20]。

3.1 材料的应力 - 应变模型

(1) 约束混凝土的应力 - 应变模型

选取滕锦光教授提出的 FRP 约束混凝土本构模型,如图 4 所示。该模型应力应变曲线由抛物线线段和直线段组成,抛物线形状与外层 FRP 约束程度有关,抛物线与直线相交处两者斜率相等,且混凝土极限强度 f_{cc} 与混凝土极限应变 ε_{cu} 同时到达一点。

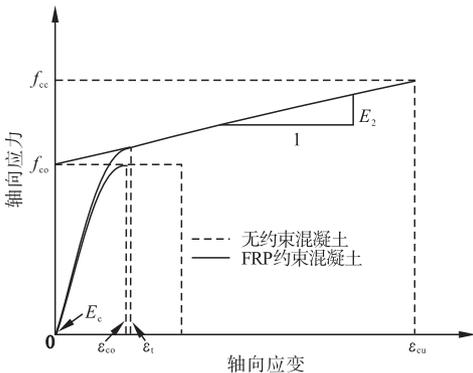


图 4 约束混凝土本构关系

Fig. 4 Constitutive relation of confined concrete

该模型表达式如下:

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f_{co}} \varepsilon_c^2, 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t. \quad (1)$$

$$\sigma_c = f_{co} + E_2 \varepsilon_c, \varepsilon_t \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}. \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = \frac{2f_{co}}{E_c - E_2}. \quad (3)$$

$$E_2 = \frac{f_{cc} - f_{co}}{\varepsilon_{cu}}. \quad (4)$$

式中:当 $\frac{\sigma_{Ru}}{f_{co}} \geq 0.07$ 时, $\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 3.3 \frac{\sigma_{Ru}}{f_{co}}$; 当

$\frac{\sigma_{Ru}}{f_{co}} < 0.07$ 时, $\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1$; $\sigma_{Ru} = \frac{E_c t_{frp}}{R} \varepsilon_{h, rup}$, $\frac{f_{cc}}{f_{co}} =$

$1.75 + 12 \left(\frac{\sigma_{Ru}}{f_{co}} \right) \left(\frac{\varepsilon_{h, rup}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0.45}$. σ_c 为轴向应力; ε_c

为轴向应变; E_c 为混凝土初始弹性模量; E_2 为直线段斜率; ε_t 为抛物线段与直线段分界点处的应变; t_{frp} , $\varepsilon_{h, rup}$ 分别为 GFRP 的计算厚度和断裂应变; σ_{Ru} 为极限环向约束力; R 为混凝土圆柱体半径; f_{co} 为素混凝土圆柱体的峰值应力; ε_{co} , ε_{cc} 分别为素混凝土圆柱体与约束混凝土圆柱体的峰值应变,本模型中,混凝土峰值应变也即混凝土极限应变。

(2) 钢材的应力 - 应变模型

钢管和工字钢的本构关系选用双线性强化模型。本构关系表达式如下:

$$\sigma = E_s \varepsilon, \varepsilon \leq \varepsilon_{sy}. \quad (5)$$

$$\sigma = f_{sy} + 0.01E_s (\varepsilon - \varepsilon_{sy}), \varepsilon > \varepsilon_{sy}. \quad (6)$$

式中: f_{sy} 为钢材的屈服强度; ε_{sy} 为钢材的屈服应变; E_s 为钢材的弹性模量。

3.2 计算模型

用纤维模型法计算短柱荷载 - 应变全过程曲线时,为计算方便,不考虑 GFRP 管、钢材与混凝土之间的滑移;不考虑钢材的局部屈曲影响,具体计算流程如图 5 所示。

在加载过程中,短柱构件需要满足内外力平衡条件 $N = \sigma_c A_c + \sigma_f A_f + \sigma_s A_s$,考虑到 GFRP 管几乎不能承担轴向荷载,主要对混凝土起环向约束作用(在计算 σ_c 时体现),所以在计算荷载 N 时忽略掉 $\sigma_f A_f$ 。同时,短柱构件还需满足轴向变形协调条件 $\varepsilon = \varepsilon_f = \varepsilon_s = \varepsilon_c$ 。计算时,先给定一个应变初始值 ε ,由上节材料本构模型求出相应的应力,再根据内外力平衡条件求出轴向荷载 N ;然后逐渐增加 $\Delta\varepsilon$,直至满足混凝土达到其极限应变或

GFRP 管达到其环向断裂应变时,计算停止。

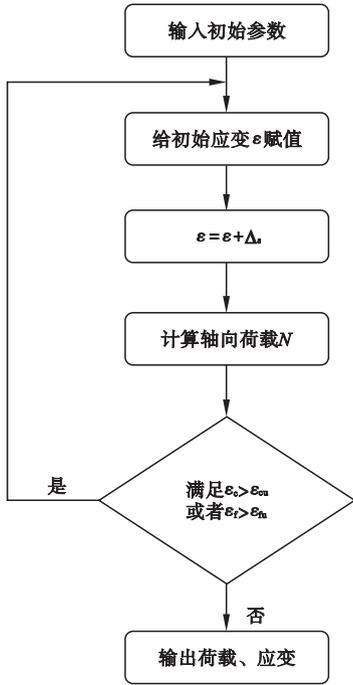


图5 模型计算流程

Fig. 5 Model calculation process

3.3 CS - Φ 系列试件计算

对于 C - C30 试件和 CS - Φ115 - C30 试件其管内混凝土只受到 GFRP 管的环向约束力,如图 6(a)所示. r_{frp} 为 GFRP 管的直径. 对于内置钢管的 CS - Φ 系列试件,由于内置钢管的存在,其核心混凝土不仅受到钢管的环向约束力 $\sigma_{Ru,s} = f(t_s, E_s, r_s)$,还受到通过夹层混凝土传递来的 GFRP 管的约束力 $\sigma_{Ru,frp}$,如图 6(b)所示. 即核心混凝土受到的双重环向约束力为 $\sigma_{Ru,(frp,s)} = \sigma_{Ru,frp} + f(t_s, E_s, r_s)$,其中 t_s 为钢管厚度, r_s 为钢管的直径^[4,12-13].

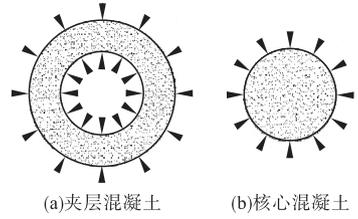


图6 混凝土受力分析

Fig. 6 Stress analysis of concrete

当 $0 \leq \varepsilon < \varepsilon_t$ 时,夹层混凝土和核心混凝土变形很小,基本处于弹性阶段,受到的约束作用几乎一致;当 $\varepsilon_t \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu}$ 时,混凝土进入塑性变形阶段,发生很大的横向膨胀,笔者引入环向极限约束面积比系数 ξ 用于区分夹层混凝土与核心混凝土受到的不同约束效应, ξ 定义如下:

$$\xi = \frac{\sigma_{Ru,frp} A_{all}}{\sigma_{Ru,s} A_{nounc}} \quad (7)$$

$$\sigma_{Ru,frp} = \frac{E_{frp} t_{frp}}{R} \varepsilon_{h,rup} \quad (8)$$

$$\sigma_{Ru,s} = \frac{E_s t_s}{R_{nounc}} \varepsilon_{sy} \quad (9)$$

式中: A_{all} 为 GFRP 管约束混凝土面积; A_{nounc} 为钢管约束核心混凝土面积; R_{nounc} 为核心混凝土圆柱体半径.

在计算承载力 N 时,将 $\sigma_c A_c$ 中的 A_c 区分为夹层混凝土面积 A_{in} 和核心混凝土面积 A_{nounc} 来考虑,荷载 N 可以表示为

$$N = \sigma_c A_c + \sigma_s A_s, 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_t \quad (10)$$

$$N = \sigma_c A_{in} + \sigma_c (1 + \xi) A_{nounc} + \sigma_s A_s, \varepsilon_t \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \quad (11)$$

根据上节材料本构模型计算得 7 个试件基本参数如表 4 所示.

表4 基本参数

Table 4 Basic parameters

试件编号	f_{co}/MPa	$\varepsilon_{co}/\%$	f_{cc}/MPa	$\varepsilon_{h,frp}/\%$	ξ	$\varepsilon_t/\%$
C - C30	31.5	0.214	48.766	1.131	—	1.453
CS - Φ89 - C30	31.5	0.214	48.766	1.207	0.368	0.874
CS - Φ89 - C40	40.8	0.227	58.066	1.516	0.368	0.874
CS - Φ89 - C50	54.2	0.242	71.467	0.978	0.368	1.161
CS - Φ108 - C30	31.5	0.214	48.766	1.247	0.471	0.874
CS - Φ115 - C30	31.5	0.214	48.766	1.261	0.531	0.675
CS - I 100 - C30	31.5	0.214	48.766	1.082	—	1.891

3.4 计算结果分析

利用上述计算程序,将计算的改进前和改进后的荷载-应变曲线与试验进行对比,对比结果如图7和表5所示.

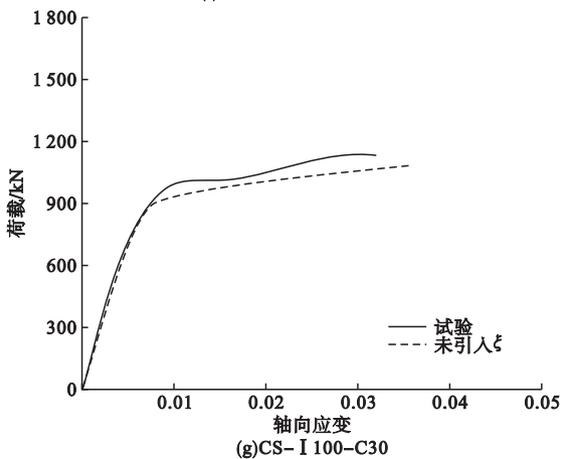
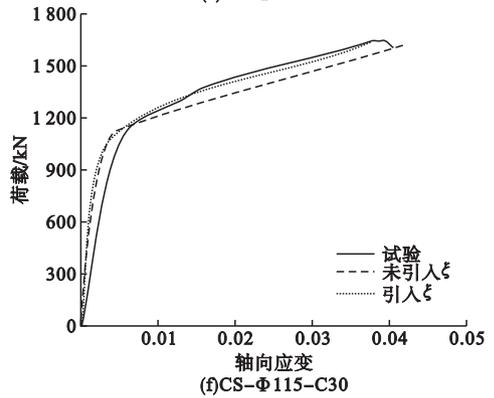
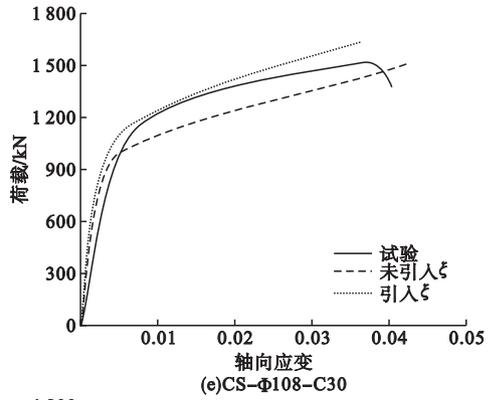
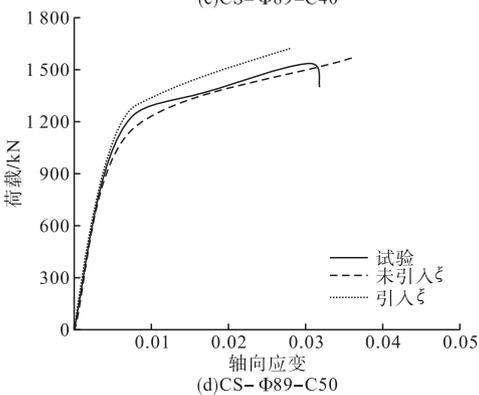
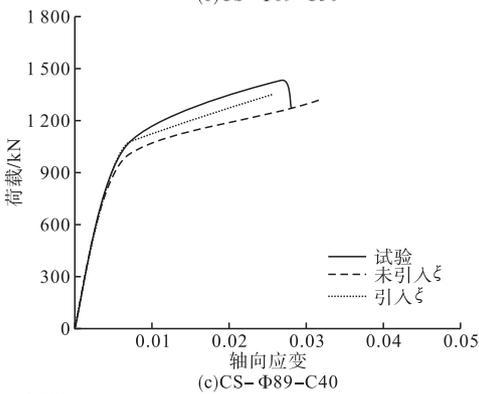
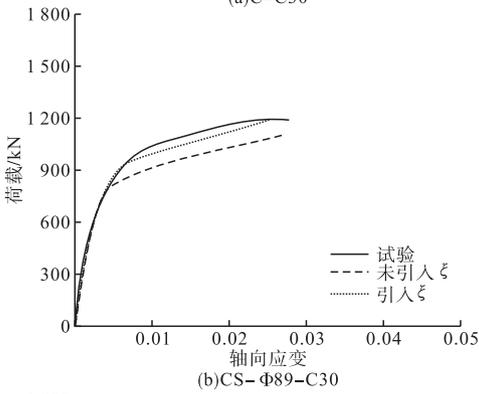
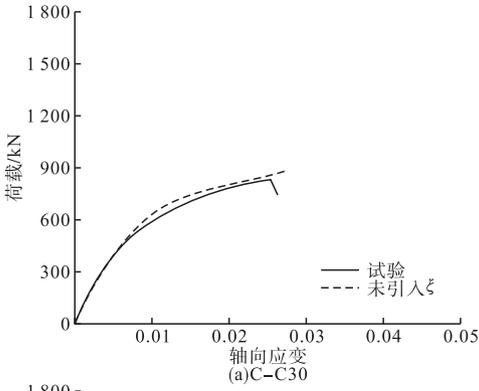


图7 荷载-轴向应变图

Fig. 7 Load-axial strain curves

未引入 ξ 时,纤维模型法对试件C-C30荷载-应变曲线预测很准确,误差为4.8%,但对于CS- Φ 系列试件的二次刚度预测结果偏低,极限承载力误差达到-7.31%.因为滕锦光教授的本构模型主要是针对FRP约束素混凝土提出,而对于内置钢管的试件,其核心混凝土受到的约束力来自于GFRP管和钢管的叠加,应力状态更为复杂.所以笔者引入的环向极限约束面积比系数 ξ 来简化区分

夹层混凝土与核心混凝土受到的不同环向约束力,使计算的荷载-轴向应变曲线二次刚

度更准确,预测极限的承载力与试验值误差范围在5%以内。

表5 对比结果

Table 5 Comparison results

试件编号	极限承载力/kN	未引入 ξ		引入 ξ	
		极限承载力/kN	误差/%	极限承载力/kN	误差/%
C - C30	836.96	877.16	4.80	—	—
CS - Φ 89 - C30	1 201.30	1 121.43	-6.65	1 202.43	0.09
CS - Φ 89 - C40	1 429.31	1 324.83	-7.31	1 362.35	-4.68
CS - Φ 89 - C50	1 535.74	1 570.42	2.26	1 601.23	4.26
CS - Φ 108 - C30	1 532.81	1 520.56	-0.80	1 603.08	4.58
CS - Φ 115 - C30	1 641.50	1 627.07	-0.88	1 647.12	0.34
CS - I 100 - C30	1 142.04	1 080.17	-5.40	—	—

4 结 论

(1)短柱内部混凝土均呈大约45°斜剪切破坏;C - C30短柱破坏最严重,CS - I 100 - C30短柱次之,CS - Φ 系列短柱的破坏程度最轻,柱脚夹层混凝土有小面积压溃破坏,核心混凝土未破坏,柱脚钢管鼓曲严重,工程中可考虑在柱脚加固。

(2)试件荷载-位移曲线基本呈双线性;内置钢管组合柱极限承载力是GFRP管素混凝土组合柱的1.44~1.96倍,内置工字钢组合柱的极限承载力是GFRP管素混凝土组合柱的1.36倍;且在相同的截面含钢率下,内置钢管对短柱的承载力提升效果更好。

(3)引入环向极限约束面积比系数 ξ 来简化区分夹层混凝土与核心混凝土受到的不同约束效应,使极限承载力的计算误差在5%以内,预测结果与试验结果吻合很好,可用于GFRP管-混凝土-钢管混凝土组合构件的非线性分析。

参考文献

[1] 陈尚能,申明霞,曾少华,等.玻璃纤维增强环氧复合材料耐海水性能研究进展[J].玻璃钢/复合材料,2019(2):108-114.
(CHEN Shangneng, SHEN Mingxia, ZENG Shaohua, et al. Development of seawater resistant of FRP epoxy composites[J]. Fiber

reinforced plastics/composites, 2019 (2): 108-114.)

[2] ABDELKARIM O I, ELGAWADY M A. Performance of hollow-core FRP-concrete-steel bridge columns subjected to vehicle collision [J]. Engineering structures, 2016, 123: 517-531.

[3] 刘昌永,孙士鹏,胡清,等. FRP-钢夹层复合管混凝土桥墩轴压承载力试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,50(12):31-37.

(LIU Changyong, SUN Shipeng, HU Qing, et al. FRP-interlayer-steel tube concrete column piers under axial compression [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2018, 50(12): 31-37.)

[4] 高丹盈,王代. FRP-混凝土-钢管组合方柱轴压性能及承载力计算模型[J]. 中国公路学报,2015,28(2):43-52.

(GAO Danying, WANG Dai. Behavior and bearing capacity computing model of FRP-concrete-steel tube composite square column under axial compression [J]. China journal of highway and transport, 2015, 28(2): 43-52.)

[5] 钱稼茹,刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管短柱轴心抗压试验研究[J]. 建筑结构学报,2008,29(2):104-113.

(QIAN Jiaru, LIU Mingxue. Experimental investigation of FRP-concrete-steel double-skin tubular stubs under axial compressive loading [J]. Journal of building structures, 2008, 29(2):104-113.)

[6] 王娟,赵均海,李楠,等. FRP-混凝土-钢双壁空心管轴压短柱力学性能分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2013,45(5):633-639.

(WANG Juan, ZHAO Junhai, LI Nan, et al. Analysis of mechanics properties on FRP-concrete-steel double-skin tubular short columns [J]. Journal of Xi'an university of architecture & technology (natural science), 2013, 45(5):633-639.)

- [7] 张冰,黄涛. FRP管-混凝土-钢管组合双壁空心柱抗震性能的研究进展[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2017,39(5):140-145.
(ZHANG Bing, HUANG Tao. Advances in seismic behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns [J]. Journal of Nanjing technology university (natural science),2017,39(5):140-145.)
- [8] FANGGI B A L, OZBAKKALOGLU T. Compressive behavior of aramid FRP-HSC-steel double-skin tubular columns [J]. Construction and building materials,2013,48:554-565.
- [9] ALBITAR M, OZBAKKALOGLU T, LOUK FANGGI B A. Behavior of FRP-HSC-steel double-skin tubular columns under cyclic axial compression [J]. Journal of composites for construction,2014,19(2):04014041.
- [10] OZBAKKALOGLU T, FANGGI B A L. FRP-HSC-steel composite columns: behavior under monotonic and cyclic axial compression [J]. Materials and structures,2015,48(4):1075-1093.
- [11] ZHANG B, TENG J G, YU T. Experimental behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns under combined axial compression and cyclic lateral loading [J]. Engineering structures,2015,99:214-231.
- [12] 任慧韬,郭星,王苏岩. FRP管-混凝土-钢管组合短柱轴压性能试验及有限元分析[J]. 大连理工大学学报,2015,55(6):612-617.
(REN Huitao, GUO Xing, WANG Suyan. Experiment and finite element analyses for axial compression behavior of FRP-concrete-steel short composite columns [J]. Journal of Dalian university of technology,2015,55(6):612-617.)
- [13] 侯玉林,赵均海,曹雪叶. 纤维增强复材-混凝土-钢管组合实心方形短柱轴压承载力分析[J]. 工业建筑,2016,46(12):163-167.
(HOU Yulin, ZHAO Junhai, CAO Xueye. Analysis of axial bearing capacity of FRP-concrete-steel composite solid square column [J]. Industrial construction,2016,46(12):163-167.)
- [14] YU T, ZHANG S, HUANG L, et al. Compressive behavior of hybrid double-skin tubular columns with a large rupture strain FRP tube [J]. Composite structures,2017,171:10-18.
- [15] 索雅琪,杨文伟. 基于焊缝模拟的圆钢管K型、T型节点承载力分析[J]. 工业建筑,2018,48(1):157-165.
(SUO Yaqi, YANG Wenwei. Analysis of bearing capacity of K-joint and T-joint based on welding simulation [J]. Industrial construction,2018,48(1):157-165.)
- [16] YANG W, YAN R, SUO Y, et al. Experimental study on hysteretic behavior of the overlapped K-joints with concrete filled in chord [J]. Applied sciences,2019,9(7):1456.
- [17] 姜桂兰,王庆利,周博. 圆CFRP-钢管混凝土偏压构件荷载-变形关系分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2008,24(1):81-85.
(JIANG Guilian, WANG Qingli, ZHOU Bo. Analysis about load-deformation relationship on the eccentrically compressed concrete filled circular CFRP-steel tubular members [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2008,24(1):81-85.)
- [18] 张霓,王连广,温建萍. GFRP管高强混凝土空心柱轴压试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2013,34(7):1049-1052.
(ZHANG Ni, WANG Lianguang, WEN Jianping. Experiment research on high strength concrete-filled double skin hollow composite columns under axially loading [J]. Journal of northeastern university (natural science),2013,34(7):1049-1052.)
- [19] 杨绿峰,解威威,戎艳,等. 矩形钢管混凝土受弯构件材料本构关系与失效判据研究[J]. 土木工程学报,2019,52(1):60-70.
(YANG Lufeng, XIE Weiwei, RONG Yan, et al. Constitutive relations and failure criterion for rectangular concrete-filled steel tube members under pure bending [J]. China civil engineering journal,2019,52(1):60-70.)
- [20] 左志亮,蔡健,朱昌宏. 带约束拉杆L形钢管混凝土短柱的偏压承载力[J]. 工程力学,2010,27(7):161-167.
(ZUO Zhiliang, CAI Jian, ZHU Changhong. Bearing capacity of L-shape CFT stub columns with binding bars subjected to eccentric compression load [J]. Engineering mechanics,2010,27(7):161-167.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)