

# 内置工字形 CFRP 的高强圆钢管高强混凝土 纯弯构件抗弯刚度研究

李帼昌,张雪芳

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究内置工字形 CFRP 型材高强圆钢管高强混凝土纯弯构件的抗弯刚度,为该类构件的设计和工程应用提供参考。方法 设计 3 个 CHCFHST-CFRP 构件,对其进行纯弯试验;应用 ABAQUS 有限元软件建立了纯弯构件数值模型,在数值模拟结果与试验结果吻合的基础上,分析各参数对构件抗弯刚度的影响;并且推导了适用于纯弯构件的抗弯刚度和挠度计算公式。结果 试件均未出现断裂,钢管也未产生局部鼓曲,卸载后纯弯段有明显回弹;随着混凝土强度、钢管壁厚和型材尺寸的增长,构件抗弯刚度略有增长;与未配置 CFRP 型材的构件相比,配置 CFRP 型材后构件的抗弯刚度有了明显的增长。结论 试件整体呈弯曲破坏模态,具有良好的变形能力,具有较强的耗能能力及刚度退化能力;利用笔者推导的公式得到的计算值与试验结果吻合较好,公式可用来计算此类构件的抗弯刚度与挠度。

**关键词** 工字形 CFRP 型材;高强圆钢管高强混凝土;抗弯刚度;计算公式

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

**引用格式:**李帼昌,张雪芳.内置工字形 CFRP 的高强圆钢管高强混凝土纯弯构件抗弯刚度研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(3):385-394. (LI Guochang,ZHANG Xuefang. Study on flexural stiffness of high-strength concrete-filled high-strength circular steel encased with I-shaped CFRP [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(3):385-394.)

## Study on Flexural Stiffness of High-strength Concrete-filled High-strength Circular Steel Encased with I-shaped CFRP

LI Guochang, ZHANG Xuefang

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to provide references for the design and engineering application of high-strength concrete-filled high-strength circular steel encased with I-shaped CFRP (CHCFHST-CFRP), the bending stiffness of this kind of member was studied. Three CHCFHST-CFRP members were

收稿日期:2023-02-28

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51938009);国家自然科学基金面上项目(51878419)

作者简介:李帼昌(1964—),女,教授,博士,主要从事钢结构、组合结构等方面研究。

designed and tested under pure bending. The finite element software ABAQUS was used to establish the numerical analysis model of these pure bending members. Based on the agreement between the numerical simulation and the experimental results, the influence of each parameter on the bending stiffness of the members was analyzed. The calculation formulas of bending stiffness and deflection suitable for pure bending members were derived. There was no fracture occurred in the test specimens, and there was no local bulging occurred in the steel tube. After unloading, there was obvious rebound in the pure bending section. With the increase of concrete strength, steel tube wall thickness and profile size, the bending stiffness of the component increases slightly. Compared with the components without CFRP profiles, the bending stiffness of the components with CFRP profiles has increased significantly. The whole specimen was in bending failure mode, with good deformation ability, strong energy dissipation ability and stiffness degradation ability. The calculated values obtained by the formula derived by the author are in good agreement with the experimental results, and the formula can be used to calculate the bending stiffness and deflection of such components.

**Key words:** I-shaped CFRP profile; high-strength concrete-filled high-strength circular steel tube; flexural stiffness; calculation formula

钢管混凝土(CFST)构件具有强度高、自重轻、施工方便和抗震性能好等优点,已经被广泛应用于建筑结构。近几十年来,国内外对CFST构件的受力性能进行了系统的研究,但对受弯构件的研究主要集中于承载力方面,抗弯刚度的研究内容较少<sup>[1]</sup>。

目前,诸多学者对CFST构件的弯曲性能进行了研究。蔡绍怀等<sup>[2]</sup>通过CFST构件的抗弯试验,探讨了极限强度的取值和计算方法。韩林海<sup>[3]</sup>通过对纯弯CFST构件荷载变形曲线的分析,提出了抗弯刚度和弹性模量的确定方法。钟善桐<sup>[4]</sup>比较了CFST构件组合刚度和换算刚度在计算结构内力及位移时带来的误差。杨有福等<sup>[5]</sup>通过试验研究了矩形截面CFST构件的力学性能,得出受弯构件具有较高的承载力和刚度,曲率延性良好。李黎明等<sup>[6]</sup>通过数值分析,提出了矩形截面CFST构件弹性阶段抗弯刚度的计算公式。李洁等<sup>[7]</sup>根据方形截面CFST构件受力的一般叠加法,分析了矩形CFST受弯构件的内力分配规律,推导出了其在正常使用状态下的刚度计算公式,并利用方截面CFST试验对分析结果进行了验证。武斌等<sup>[8]</sup>进行了圆截面CFST受弯构件的试验,

结果表明抗弯刚度随弯矩的变化分为3个阶段,构件具有较强的耗能能力及刚度退化能力。A. H. Varma等<sup>[9]</sup>通过试验研究,提出分别以 $M=0.2M_u$ 和 $M=0.6M_u$ 的刚度作为初始和使用阶段抗弯刚度,并对二者进行了对比。A. Elremaily等<sup>[10]</sup>通过圆截面CFST构件的试验,提出了截面换算刚度 $K=E_cI_c+E_sI_s$ ,结果表明,圆截面CFST构件的滞回曲线饱满,没有明显的下降段,同时给出了在不同延性水平下的刚度退化情况。

纤维增强复合材料(FRP)凭借自身强度大、质量轻等性能最早应用在航空与军工领域,近几年,FRP被大量应用在建筑组合结构中,形成了FRP-钢-混凝土组合结构。FRP包括碳纤维增强复合材料(CFRP)和玻璃纤维增强复合材料(GFRP)等。在此基础上,李幅昌等<sup>[11]</sup>提出内置工字形CFRP型材的钢管混凝土(CFST-CFRP)组合形式,并对该种方形截面构件的轴压<sup>[12-13]</sup>、偏压<sup>[14]</sup>、纯弯<sup>[15]</sup>力学性能进行了一系列研究。结果表明,三种材料在组合结构中表现出合理的荷载分担机制,工字形CFRP型材的使用提高了组合结构的极限承载力,延缓了钢管的屈曲。

为了确定内置工字形 CFRP 型材的高强圆钢管高强混凝土 (CHCFHST-CFRP) 纯弯构件的抗弯刚度,笔者通过试验研究并结合数值模拟,分析了各参数对其抗弯刚度的影响,推导了构件的抗弯刚度和挠度计算公式,并用试验结果与模拟结果对公式的准确性进行了验证,计算结果可为 CHCFHST-CFRP 构件抗弯刚度和挠度的计算提供借鉴。

1 试 验

1.1 试件制作与加载

笔者设计了 3 个 CHCFHST-CFRP 构件,截面形式如图 1 所示。钢管外径  $d$  为 183 mm,实际长度  $L$  为 1 700 mm,计算长度  $l$  为 1 500 mm,钢管壁厚  $T$  为 5 mm,两端盖板长  $\times$  宽为 233 mm  $\times$  233 mm,盖板厚度为

30 mm,工字形型材的翼缘宽度  $B$  为 60 mm,腹板高度  $W$  为 70 mm,厚度  $t$  为 6 mm,试件参数见表 1。钢管采用名义屈服强度为 690 MPa、770 MPa 和 890 MPa 的高强钢材,内填商用标号为 C100 的高强混凝土。

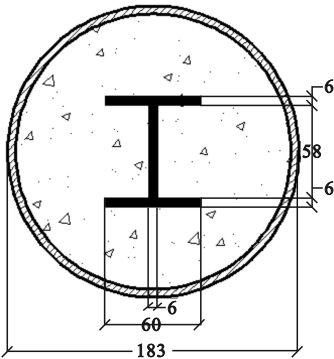


图 1 试件截面  
Fig. 1 Section of specimen

表 1 试件参数

Table 1 Specimen parameters

试件编号	$d/\text{mm}$	$T/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	$f_y/\text{MPa}$	$f_u/\text{MPa}$	$E_s/\text{GPa}$
CPB1	183.64	5.24	1702	1500	490.11	573.56	201.75
CPB2	185.21	5.35	1706	1500	782.18	836.85	231.44
CPB3	183.52	5.32	1706	1500	842.68	916.81	223.82

注: $d$ 、 $T$  和  $L$  分别表示钢管的实测外径、壁厚和长度; $f_y$ 、 $f_u$  和  $E_s$  分别表示钢材的实测屈服强度、极限强度和弹性模量。

钢材拉伸试验按照文献 [16] 进行。CFRP 的力学性能指标参考文献 [13]。采用文献 [17] 中提供的方法进行材性试验,测得混凝土立方体抗压强度  $f_{cu}$  平均值为 103.15 MPa。

试验加载装置如图 2 所示。采用三分点加载方式,分级加载制度,弹性范围内每级荷载为极限荷载的 1/10,钢材屈服后每级荷载为极限荷载的 1/15,每级荷载持载 2 min。

当试件接近极限荷载时,采用慢速连续加载至试件挠度接近 1/30 时快速卸载。通过试件纯弯段内布置的三个位移计测得试件的整体变形和挠度,用粘贴的应变片采集钢管跨中截面不同高度处的瞬时应变值。

1.2 结果分析

试件破坏形态如图 3 所示。从图中可以看出,试件均未出现断裂破坏的现象,钢管也未产生局部鼓曲,卸载后纯弯段有明显回弹,试件呈弯曲破坏形态。

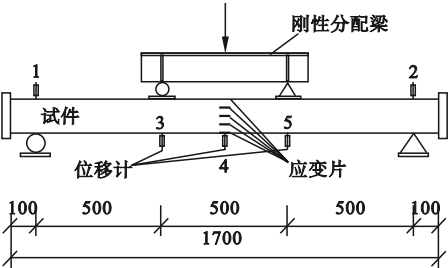


图 2 加载示意图  
Fig. 2 Loading diagram

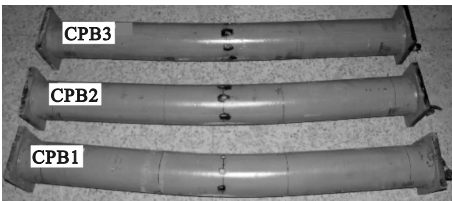


图 3 试件破坏形态  
Fig. 3 Failure mode of the specimens

试件跨中截面弯矩-曲率曲线如图4所示。从图中可以看出,曲线可分为三个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段和强化阶段。加载初期,曲线增长呈线性关系;钢管屈服后,构件的挠曲变形逐渐明显,曲率增长加快;加载后期,挠度发展迅速,承载力基本不再上升。分析表明,随着抗弯刚度的增加,试件变形能力提高显著。

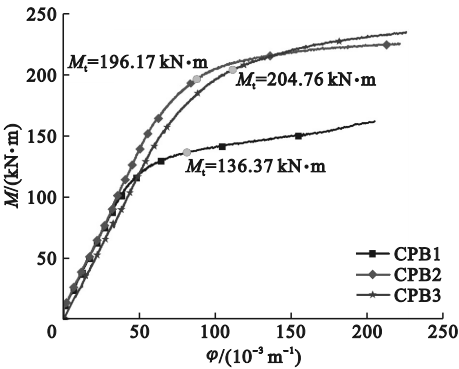


图4 跨中截面弯矩-曲率曲线  
Fig. 4 Moment-curvature curves of span section

2 有限元模拟

2.1 有限元模型建立

高强钢材采用双折线模型<sup>[18]</sup>,混凝土采用考虑约束效应系数 $\xi$ 的修正简化模型<sup>[19]</sup>,工字形CFRP型材视为由单向板和层合板组合而成,各层视为均质、线弹性的正交各向异性材料<sup>[20]</sup>。模型中圆钢管、混凝土以及左右两端的盖板均采用C3D8R建模,CFRP型材采用SC8R建模。钢管和混凝土界面法向采用硬接触,界面的切向采用库伦摩擦模型,摩擦系数取0.6<sup>[20]</sup>。盖板和混凝土、盖板和型材、混凝土和型材间采用硬接触,钢管与盖板间采用绑定Tie。各组分具体接触方式见图5。

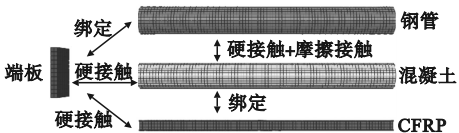


图5 接触关系  
Fig. 5 Contact relationships

在构件上表面三分点处分别建立参考点,采用位移控制的加载方式。在构件一端支座处约束Y和Z方向自由度,另一端支座仅约束Y方向自由度来模拟试验中的滑动铰支座和滚动铰支座。边界条件见图6。

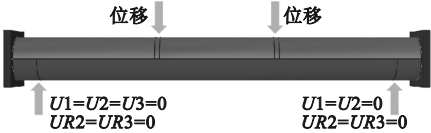
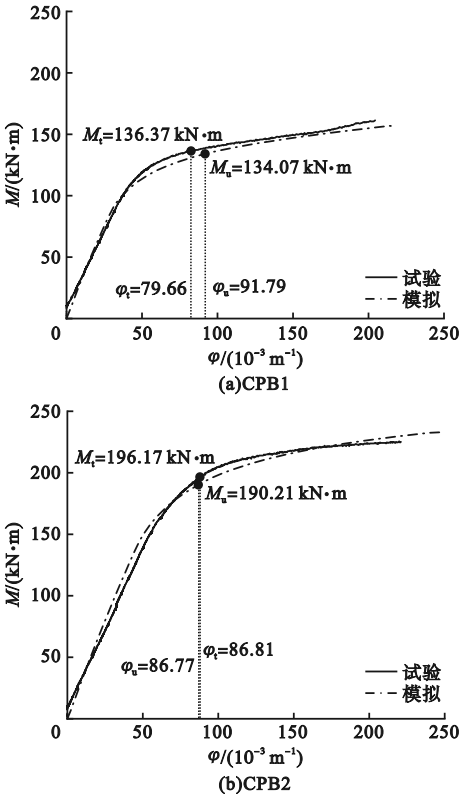


图6 边界条件  
Fig. 6 Boundary conditions

2.2 模型验证

采用上述方法进行建模,试验所得弯矩-曲率曲线与有限元模拟所得曲线对比如图7所示,结果见表2。从图7和表2可以得出,有限元模拟结果与试验结果具有高度一致性,极限弯矩最大误差仅为3.57%,初始阶段与使用阶段抗弯刚度最大误差不超过1%,证明建模方法可靠,可对CHCFHST-CFRP纯弯构件进行准确地模拟分析。



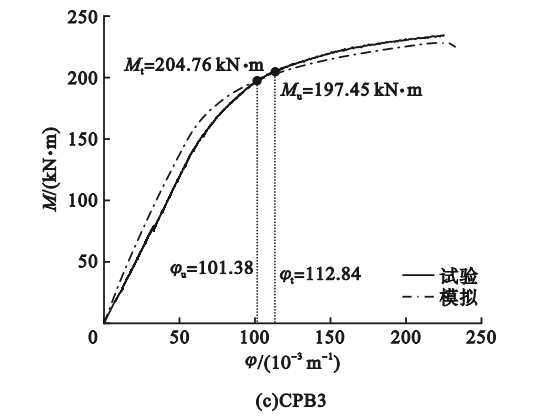


图7 试验弯矩曲率曲线与模拟曲线对比

Fig. 7 Comparison of test curves of moment-curvature and simulation curves

2.3 参数分析

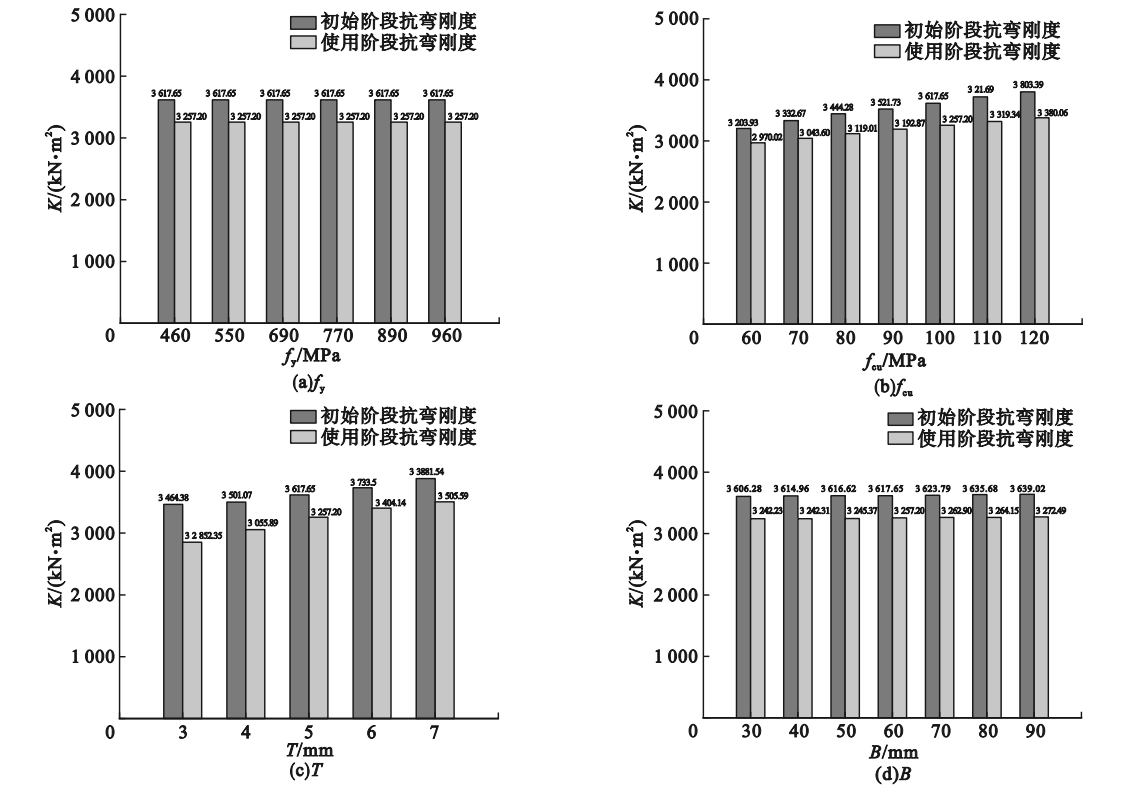
为明确三种材料对构件抗弯刚度的影响,以 $f_y$ 、 $f_{cu}$ 、 $T$ 和型材尺寸为参数对构件的抗弯刚度进行研究,图8为不同参数下的构件抗弯刚度 $K$ 变化柱状图,图9为CFRP型材与其他组分组合效应影响下的 $K$ 变化曲线。

由图8(a)可知,随着 $f_y$ 的增加,构件的 $K$ 没有变化,表明 $f_y$ 对构件的 $K$ 没有影响。由图8(b)可知,随着 $f_{cu}$ 的提高,构件的 $K$ 有小幅度的提升, $f_{cu}$ 每增加10 MPa,初始抗弯刚度 $K_{0.2}$ 增长百分比分别为4.02%、3.35%、2.25%、2.72%、2.88%和2.20%;使用阶段抗弯刚度 $K_{0.6}$ 增长百分比分别为2.48%、

表2 试验结果与模拟结果对比

Table 2 Comparison of test results and simulation results									
试件 编号	$M_t$ / (kN·m)	$K_{t0.2}$ / (kN·m <sup>2</sup> )	$K_{t0.6}$ / (kN·m <sup>2</sup> )	$M_u$ / (kN·m)	$K_{u0.2}$ / (kN·m <sup>2</sup> )	$K_{u0.6}$ / (kN·m <sup>2</sup> )	$M_u/M_t$	$K_{u0.2}/$ $K_{t0.2}$	$K_{u0.6}/$ $K_{t0.6}$
CPB1	136.37	3 624.98	3 087.36	134.07	3 644.32	3 158.66	0.983 1	1.005 3	1.023 1
CPB2	196.17	3 671.17	3 094.27	190.21	3 674.44	3 199.42	0.969 6	1.000 9	1.034 0
CPB3	204.76	3 625.48	3 081.65	197.45	3 649.17	3 104.91	0.964 3	1.006 5	1.007 5

注: $M_t$ 和 $M_u$ 分别为试验弯矩和模拟弯矩; $K_{t0.2}$ 、 $K_{t0.6}$ 、 $K_{u0.2}$ 和 $K_{u0.6}$ 分别为试验初始抗弯刚度、试验使用阶段抗弯刚度、模拟初始抗弯刚度和模拟使用阶段抗弯刚度。





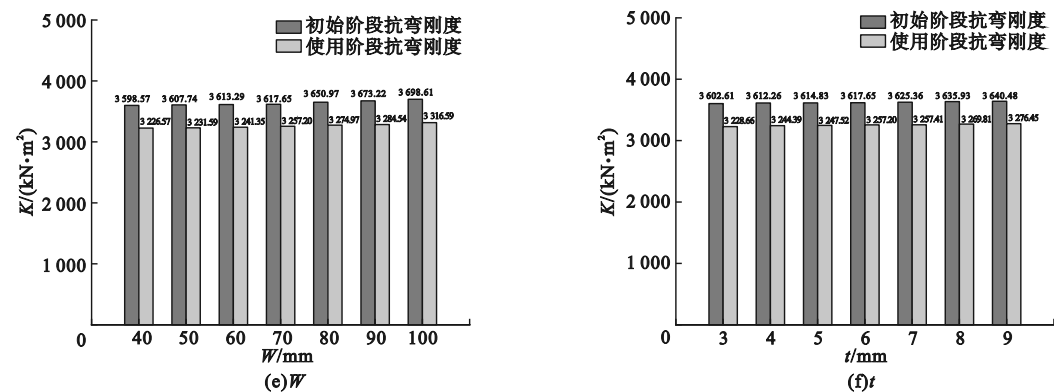


图8 不同参数对刚度的影响

Fig. 8 Effect of the different parameters on the stiffness

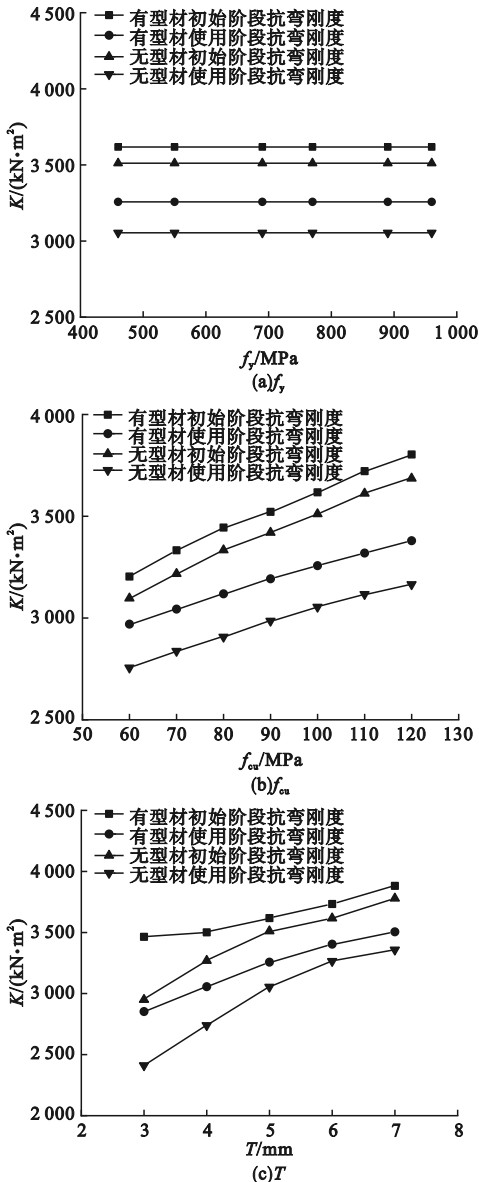


图9 型材与各组分组合效应对刚度的影响

Fig. 9 The influence of the combination effect of the profile and each component on the stiffness

2.48%、2.37%、2.01%、1.91%、1.83%，表明 $f_{cu}$ 对构件 $K$ 的影响在初始阶段略大于使用阶段，但总体影响较小。构件截面形式不变，而单纯改变构件的材料强度，并没有使得构件截面形式和组分比例发生变化，因此构件的 $K$ 变化不明显。由图8(c)可知，随着 $T$ 的增加，构件的初始阶段与使用阶段抗弯刚度接近线性增长， $T$ 增加1mm， $K_{0.2}$ 增长百分比最大为3.97%， $K_{0.6}$ 增长百分比最大为7.14%，表明 $T$ 对使用阶段抗弯刚度的影响比初始阶段大。

结合图8(d)、图8(e)、图8(f)与图9可知，型材的增加使构件抗弯刚度有了不同程度增长，然而随着 $B$ 、 $W$ 和 $t$ 的增加，构件的抗弯刚度几乎没有变化，型材尺寸每增长一级刚度的变化幅度均未超过1%。结果表明，配置型材使钢管混凝土构件的刚度提高，但工字形CFRP型材尺寸对CHCFHST-CFRP构件刚度影响很小。

上述结果表明，不同参数下使用阶段构件的抗弯刚度均发生了明显的退化，混凝土强度越高刚度退化越明显，而壁厚越薄使用阶段刚度退化越明显，有无型材的构件在刚度退化方面的表现是一致的。

### 3 公式推导

对于弹性材料而言，弹性模量 $E$ 为常数，与弹性材料不同的是CHCFHST-CFRP

是弹塑性构件,随着荷载的变化,如果能求解 CHCFHST-CFRP 构件的刚度值  $K$ ,则可采用力学方法求构件的变形与位移。因此,确定 CHCFHST-CFRP 构件的变形,可以归结为如何计算构件的刚度问题。

3.1 基本假设

为了计算 CHCFHST-CFRP 构件的刚度与挠度,笔者在分析中做如下假设<sup>[3]</sup>:

- (1) 构件变形符合平截面假定;
- (2) 钢管始终为弹性受力且能达到屈服强度;
- (3) 忽略混凝土的受拉能力;
- (4) 各组分接触面之间完全黏结,无相对滑移;
- (5) 钢管在受力过程中不发生局部屈曲。

3.2 刚度计算

构件截面应变如图 10 所示。

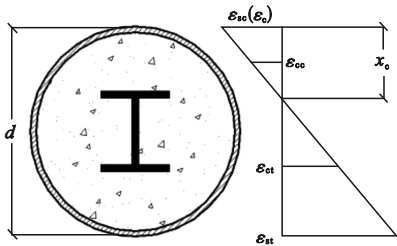


图 10 构件截面应变图

Fig. 10 Strain diagram of the member cross-section

在满足上述基本假设的条件下,构件中各组分应力应变关系见式(1)和式(2):

$$\left\{\begin{aligned} \varepsilon_{sc} &= \varepsilon_c; \\ \varepsilon_{cc} &= \frac{\varepsilon_{sc}}{2} = \frac{\varepsilon_c}{2}; \\ \varepsilon_{st} &= \frac{d-x_c}{x_c} \cdot \varepsilon_c; \\ \varepsilon_{ct} &= \frac{d-x_c}{2x_c} \cdot \varepsilon_c. \end{aligned}\right. \quad (1)$$

$$\left\{\begin{aligned} \sigma_{sc} &= E_s \varepsilon_{sc}; \\ \sigma_{cc} &= E_{CFRP} \varepsilon_{cc}; \\ \sigma_{st} &= E_s \varepsilon_{st}; \\ \sigma_{ct} &= E_{CFRP} \varepsilon_{ct}. \end{aligned}\right. \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_c$ 、 $\varepsilon_{sc}$ 、 $\varepsilon_{cc}$ 、 $\varepsilon_{st}$ 、 $\varepsilon_{ct}$  分别为混凝土应变、钢管受压应变、型材受压应变、钢管受拉应变、型材受拉应变; $d$  为钢管外径; $x_c$  为截面受压高度; $E_s$ 、 $E_{CFRP}$  分别为钢管和型材弹性模量。

由裂缝截面的受力平衡条件  $\Sigma N = 0$ ,可得式(3)和式(4):

$$F_c + F_{sc} + F_{cc} - F_{st} - F_{ct} = 0. \quad (3)$$

$$A_c \sigma_c + A_{sc} \sigma_{sc} + A_{cc} \sigma_{cc} - A_{st} \sigma_{st} - A_{ct} \sigma_{ct} = 0. \quad (4)$$

式中: $F_c$ 、 $F_{sc}$ 、 $F_{cc}$ 、 $F_{st}$ 、 $F_{ct}$  分别为混凝土受压区、钢管受压区、型材受压区、钢管受拉区、型材受拉区受到的外力; $A_c$ 、 $A_{sc}$ 、 $A_{cc}$ 、 $A_{st}$ 、 $A_{ct}$  分别为混凝土受压面积、钢管受压面积、型材受压面积、钢管受拉面积、型材受拉面积。

把式(2)代入式(4)可得式(5)和式(6):

$$A_c E_c \varepsilon_c + A_{sc} E_s \varepsilon_{sc} + A_{cc} E_{CFRP} \varepsilon_{cc} - A_{st} E_s \varepsilon_{st} - A_{ct} E_{CFRP} \varepsilon_{ct} = 0. \quad (5)$$

$$A_c \varepsilon_c + \frac{E_{CFRP}}{E_c} (A_{cc} \varepsilon_{cc} - A_{ct} \varepsilon_{ct}) + \frac{E_s}{E_c} (A_{sc} \varepsilon_{sc} - A_{st} \varepsilon_{st}) = 0. \quad (6)$$

把式(1)代入式(6)可得式(7)和式(8):

$$A_c \varepsilon_c + \frac{E_{CFRP}}{E_c} \left( A_{cc} \frac{\varepsilon_c}{2} - A_{ct} \frac{d-x_c}{2x_c} \cdot \varepsilon_c \right) + \frac{E_s}{E_c} \left( A_{sc} \varepsilon_c - A_{st} \frac{d-x_c}{x_c} \cdot \varepsilon_c \right) = 0. \quad (7)$$

$$A_c + \frac{E_{CFRP}}{E_c} \left( A_{cc} \frac{1}{2} - A_{ct} \frac{d-x_c}{2x_c} \right) + \frac{E_s}{E_c} \left( A_{sc} - A_{st} \frac{d-x_c}{x_c} \right) = 0. \quad (8)$$

令  $\frac{E_{CFRP}}{E_c} = \gamma_1$ ,  $\frac{E_s}{E_c} = \gamma_2$ , 则有式(9) ~ (11):

$$A_c + \gamma_1 \left( A_{cc} \frac{1}{2} - A_{ct} \frac{d-x_c}{2x_c} \right) + \gamma_2 \left( A_{sc} - A_{st} \frac{d-x_c}{x_c} \right) = 0. \quad (9)$$
$$2x_c A_c + \gamma_1 [A_{cc} x_c - A_{ct} (d-x_c)] +$$

$$2\gamma_2[A_{sc}x_c - A_{st}(d - x_c)] = 0. \tag{10}$$

$$\pi x_c^2 + x_c(\gamma_1 A_{cc} - \gamma_1 A_{ct} + 2\gamma_2 A_{sc} + 2\gamma_2 A_{st}) - d(\gamma_1 A_{ct} + 2\gamma_2 A_{st}) = 0. \tag{11}$$

求解式(11)即可得出裂缝截面受压区高度  $x_c$ 。

由于裂缝的存在,应力重分布,纯弯段内不同截面各组分的内力略有区别,因此,不同截面中性轴高度不完全相同,即中性轴沿着构件长度方向并非直线。假定构件中裂缝区段内中性轴高度变化接近三角函数的波形曲线<sup>[7]</sup>(见图 11)。

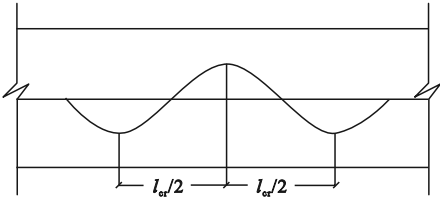


图 11 中性轴位置示意图

Fig. 11 Schematic representation of the neutral axis

因此,构件受压区高度计算见式(12):

$$x = x_c + 0.5(x_{max} - x_c)\left(1 - \cos \frac{2\pi z}{l_{cr}}\right). \tag{12}$$

式中: $z$  为所求截面到裂缝面的距离。

混凝土平均受压区高度计算见式(13):

$$\bar{x} = \frac{1}{l_{cr}} \int_0^{l_{cr}} x dz = 0.5(x_c + x_{max}). \tag{13}$$

式中: $x_{max}$  为两裂缝面区间内混凝土受压区高度,一般取  $x_{max} = 0.5 d$ <sup>[7]</sup>。

不考虑受拉区裂缝的作用,则 CHCFHST-CFRP 构件的抗弯刚度可由 CFRP 型材、混凝土和钢管三部分叠加而成。构件刚度计算见式(14):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{P}{K} \frac{1}{6} x_1^3 + C_1 x_1 + D_1, & 0 \leq x_1 \leq a; \\ \frac{Pa}{K} \frac{1}{2} x_2^2 + C_2 x_2 + D_2, & a \leq x_2 \leq l - a; \\ \frac{P}{K} \left( \frac{1}{2} l x_3^2 - \frac{1}{6} x_3^3 \right) + C_3 x_3 + D_3, & l - a \leq x_3 \leq l. \end{cases} \tag{21}$$

将位移边界条件和变形连续条件代入式(20)和式(21),求得纯弯构件的跨中截面挠度计算式为

$$K = K_{CFRP} + K_c + K_s. \tag{14}$$

$$K_s = E_s \frac{\pi d^4}{64} (1 - \alpha^4). \tag{15}$$

$$K_c = E_c \frac{\pi (2\bar{x})^2}{64}. \tag{16}$$

$$K_{CFRP} = E_{CFRP} I_{CFRP}. \tag{17}$$

式中: $\alpha$  为钢管内外径的比值; $E_s$ 、 $E_c$ 、 $E_{CFRP}$  分别为钢管、混凝土和 CFRP 的弹性模量。

3.3 挠度计算

工程结构必须满足正常使用极限状态的相关规定。在受弯结构允许的最大挠度条件下,试验中构件未发生断裂,荷载挠度曲线呈线性关系,可视为线弹性构件进行挠度计算。因此,正常使用极限状态条件下构件的挠度可以根据材料力学中挠曲线微分方程式进行推导:

$$\ddot{y} = \frac{M(x)}{K}. \tag{18}$$

构件弯矩方程:

$$M(x) = \begin{cases} P x_1, & 0 \leq x_1 \leq a; \\ Pa, & a \leq x_2 \leq l - a; \\ P(l - x_3), & l - a \leq x_3 \leq l. \end{cases} \tag{19}$$

对式(18)进行一次、二次积分,得出各弯矩方程下的转角方程式(20)和挠度方程式(21):

$$\theta(x) = \begin{cases} \frac{P}{K} \frac{1}{2} x_1^2 + C_1, & 0 \leq x_1 \leq a; \\ \frac{P}{K} a x_2 + C_2, & a \leq x_2 \leq l - a; \\ \frac{P}{K} \left( l x_3 - \frac{1}{2} x_3^2 \right) + C_3; & l - a \leq x_3 \leq l. \end{cases} \tag{20}$$

$$f(x) = \frac{Pal^2}{24K} (3 - 4\alpha^2). \tag{22}$$

式中: $P$  为构件三分点处荷载; $K$  为构件抗弯



刚度; $l$ 为构件计算长度; $a=l/3$ , $\alpha=a/l$ 。

3.4 公式验证

按照上述计算方法,计算试件的抗弯刚度和挠度,并与试验结果进行对比。试验试件的抗弯刚度值根据文献[7]的定义计算,结果见表3。

表3 试验结果与计算结果对比  
Table 3 Comparison of test results and calculation results

试件 编号	$F_t/$ (kN·m)	$K_{0.2}/$ (kN·m <sup>2</sup> )	$K_{0.6}/$ (kN·m <sup>2</sup> )	$U_t/$ mm	$K/$ (kN·m <sup>2</sup> )	$U/$ mm	$K/K_{0.2}$	$K/K_{0.6}$	$U/U_t$
CPB1	545.49	3 624.98	3 087.36	18.18	3 518.29	18.29	0.970 6	1.139 6	1.006 1
CPB2	784.68	3 671.17	3 094.27	19.81	3 993.22	20.77	1.087 7	1.290 5	1.048 5
CPB3	819.04	3 625.48	3 081.65	25.75	3 754.95	23.06	1.035 7	1.218 5	0.895 5

注: $F_t$ 和 $U_t$ 分别为试验极限承载力和极限挠度; $K$ 和 $U$ 为抗弯刚度和挠度的计算值。

试验抗弯刚度值、模拟抗弯刚度值与利用笔者公式计算得到的抗弯刚度值对比结果见图12。图中斜直线 $y=x$ 上的点表示实际刚度值的大小正好等于理论计算值。由图可知,初始阶段抗弯刚度的理论计算值几乎都比试验结果和模拟结果低;由于受力过程中

构件出现了刚度退化现象,使用阶段抗弯刚度的理论计算值都略高于试验值和模拟值,但差值均在5%左右,说明式(14)和式(22)适用于CHCFHST-CFRP纯弯构件的刚度和挠度计算。

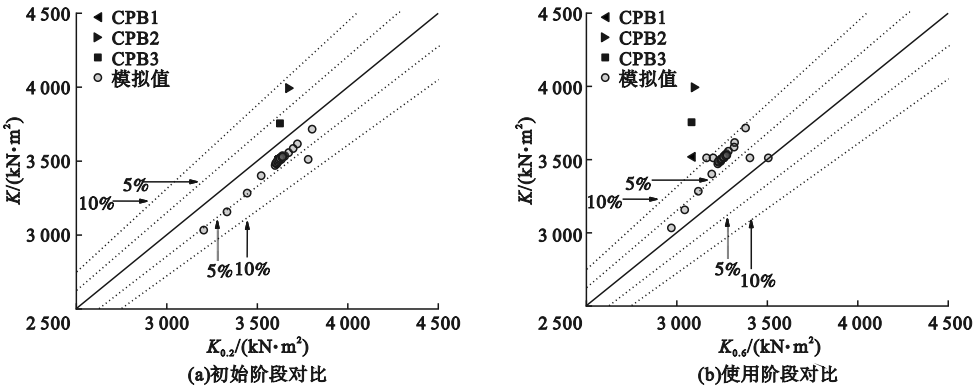


图12 理论计算公式结果对比  
Fig. 12 Comparison of the theoretical calculation formula results

4 结 论

- (1) CHCFHST-CFRP 纯弯试件整体呈弯曲破坏形态,随着抗弯刚度的增加,变形能力提高显著,具有较强的耗能能力及刚度退化能力。
- (2) 对构件抗弯刚度影响最大的参数是钢管壁厚;型材的存在提高了构件的抗弯刚度,配置型材后的构件与钢管混凝土构件在刚度退化方面的表现是一致的。
- (3) 笔者提出的计算方法适用于正常使

用极限状态前的构件,推导的纯弯构件刚度计算式与挠度计算式可以求解构件受力全过程的抗弯刚度与挠度,是一种动态的求解方法。

参考文献

[1] HAN Linhai. Flexural behaviour of concrete-filled steel tubes [J]. Journal of constructional steel research, 2004, 60(2): 313–337.  
[2] 蔡绍怀,顾万黎. 钢管混凝土抗弯强度的试验研究[J]. 建筑结构, 1985(3): 28–29.  
(CAI Shaohuai, GU Wanli. Experimental study of flexural strength of concrete filled steel tube [J]. Building structure, 1985(3): 28–29.)  
[3] HAN Linhai, LI Wei, BJORHOVDE R.

- Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures; Members [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 100: 211 – 228.
- [4] 钟善桐. 钢管混凝土刚度的分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999(3): 13 – 18.  
(ZHONG Shantong. Analysis of the stiffness of concrete-filled steel tube [J]. Journal of Harbin university of civil engineering and architecture, 1999(3): 13 – 18.)
  - [5] 杨有福, 韩林海. 矩形钢管混凝土构件抗弯力学性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001(3): 41 – 48.  
(YANG Youfu, HAN Linhai. Experimental studies on behavior of concrete-filled RHS members subjected to pure bending [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2001(3): 41 – 48.)
  - [6] 李黎明, 姜忻良, 陈志华, 等. 矩形钢管混凝土抗弯性能数值分析与简化计算[J]. 天津大学学报, 2007(8): 990 – 994.  
(LI Liming, JIANG Xinliang, CHEN Zhihua, et al. Numerical analysis of CFRT under bending load and its simplified calculating method [J]. Journal of Tianjin university, 2007(8): 990 – 994.)
  - [7] 李洁, 刘惹梅. 矩形钢管混凝土抗弯刚度计算方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(2): 61 – 63.  
(LI Jie, LIU Remei. Study on calculation methods for flexural stiffness of rectangular steel tube concrete [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2009, 7(2): 61 – 63.)
  - [8] 武斌, 谭卓英, 车媛. 圆钢管混凝土抗弯刚度研究[J]. 混凝土, 2018(12): 34 – 39.  
(WU Bin, TAN Zhuoying, CHE Yuan. Study on flexural stiffness of concrete-filled steel tubes with circular sections [J]. Concrete, 2018(12): 34 – 39.)
  - [9] VARMA A H, RICLES J M, SAUSE R, et al. Seismic behavior and modeling of high-strength composite concrete-filled steel tube (CFT) beam-columns [J]. Journal of constructional steel research, 2002, 58(5 – 8): 725 – 758.
  - [10] ELREMAILY A, AZIZINAMINI A. Behavior and strength of circular concrete-filled tube columns [J]. Journal of constructional steel research, 2002, 58(12): 1567 – 1591.
  - [11] LI G C, ZHANG R R, YANG Z J, et al. Finite element analysis on mechanical performance of middle long CFST column with inner I-shaped CFRP profile under axial loading [J]. Structures, 2017, 9: 63 – 69.
  - [12] LI G C, YU Y, YANG Z J, et al. Mechanical behavior of high-strength concrete filled high-strength steel tubular stub columns stiffened with encased I-shaped CFRP profile under axial compression [J]. Composite structures, 2021, 275: 114504.
  - [13] LI G C, SUN X, YANG Z J, et al. Structural performance of concrete-filled square steel tubular columns encased with I-shaped CFRP under eccentric compression [J]. Engineering structures, 2021, 248: 113254.
  - [14] LI G C, ZHAN Z C, YANG Z J, et al. Behavior of concrete-filled square steel tubular stub columns stiffened with encased I-section CFRP profile under biaxial bending [J]. Journal of constructional steel research, 2020, 169: 106065.
  - [15] LI G C, ZHANG M R, FANG C, et al. Numerical investigations on flexural behavior of I-shaped CFRP-encased high-strength square concrete filled steel tubes [J]. Structures, 2023, 48: 681 – 693.
  - [16] 中国钢铁工业协会. 金属材料拉伸试验第1部分: 室温试验方法; GB/T 228. 12010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
(China Iron & Steel Association. Metallic materials tensile testing—part 1: method of test at room temperature; GB/T 228. 12010 [S]. Beijing: China Standards Press, 2011.)
  - [17] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土力学性能试验方法标准; GB/T 50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.  
(China Academy of Building Research. Metallic materials tensile testing—Part 1: method of test at room temperature; GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2002.)
  - [18] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.  
(LIU Wei. Working mechanism of concrete-filled with steel tube under local pressure [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.)
  - [19] LI G C, CHEN B W, ZHU B W, et al. Axially loaded square concrete-filled steel tubular long columns made of high-strength materials: experimental investigation, analytical behavior and design [J]. Journal of building engineering, 2022, 58: 104994.
  - [20] LI G C, SUN X, YANG Z J, et al. Buckling behavior of slender square concrete filled steel tubular columns strengthened with CFRP profile under combined compression and bending [J]. Journal of building engineering, 2022, 53: 104563.

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)