

文章编号:1671-8879(2014)06-0091-09

# CFRP-方钢管混凝土压弯构件的滞回性能

王志滨,谢恩普,陈 靖

(福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108)

**摘 要:**以 CFRP 加固方式和轴压比为主要参数,进行了 9 个 CFRP-方钢管混凝土压弯构件的滞回试验,建议了适合有限元软件 ABAQUS 中使用的 CFRP 材料模型及 CFRP 断裂的模拟方法,并建立了双向 CFRP-方钢管混凝土压弯构件的有限元模型。研究表明:该类构件的滞回曲线饱满;轴压比越大,构件的延性越差,抗剪承载力越低;纵向布可有效提高构件的抗剪承载力,但随着轴压比的增大,纵向 CFRP 的加固效果下降;环向布可显著提高构件的耗能能力,同时环向布还可保证纵向布与钢管之间良好的粘接性能。为该类新型组合构件的工程应用建议了简化的横向荷载-位移滞回模型。

**关键词:**土木工程;CFRP-方钢管混凝土压弯构件;滞回性能;有限元模型;简化滞回模型

**中图分类号:**TU3351.1

**文献标志码:**A

## Dynamic behavior of CFRP-reinforced square concrete-filled steel tubular beam-columns

WANG Zhi-bin, XIE En-pu, CHEN Jing

(School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

**Abstract:** The dynamic tests of nine CFRP-reinforced square concrete-filled steel tubular (CFST) beam-columns with Carbon fibre reinforced polymer (CFRP) were carried out. The main parameters include the CFRP-reinforced method and the axial load level. The material model of CFRP and the modelling method of CFRP rupture used in ABAQUS were then proposed. The finite element model (FEM) for bidirectional CFRP-reinforced square CFST beam-columns was developed. Test results indicate that hysteretic curves of beam-columns are good. With the increasing of the axial load level, the ductility and the shear capacity decrease. The longitudinal CFRP can effectively improve the shear capacity, the reinforced effect however decreases with the increasing of axial load level. The lateral CFRP can significantly enhance energy dissipation capacity. Meanwhile, the lateral CFRP can be used to ensure the good adhesive performance between the steel tube and the longitudinal CFRP. Finally, for the utilization of this new composite specimen, the simplified hysteretic model of lateral force versus displacement was provided. The predicted results agree well with tested ones. 2 tabs, 12 figs, 26 refs.

**Key words:** civil engineering; CFRP-reinforced square CFST beam-columns; dynamic behavior; finite element model (FEM); simplified hysteretic model

收稿日期:2014-08-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51308124);福建省自然科学基金项目(2013J05073)

作者简介:王志滨(1979-),男,福建惠安人,讲师,工学博士,E-mail:wangzhibin@fzu.edu.cn.

0 引言

钢管混凝土具有承载力高、抗震性能好和施工方便等优点,该类结构被大量地应用于承受动力荷载的桥梁结构的立柱和桥墩中<sup>[1-2]</sup>。但在实际使用时,钢管混凝土墩柱的尺寸和用钢量均较大。FRP(纤维增强复合材料)具有抗拉强度高、耐腐蚀性好和施工方便等优点,因此有研究者建议在钢管混凝土构件外包 FRP 以减小构件的尺寸,并提高其经济性、承载力和耐久性,下文中该类结构简称为“FRP-钢管混凝土”<sup>[3]</sup>。该类新型构件于 2012 年已被成功应用于南京绕城高速路东北段的程桥枢纽和王云车行天桥中,并取得了良好的经济效益<sup>[4]</sup>。

近年来,许多研究者针对该类构件的轴压性能、纯弯性能和偏压性能进行了深入研究<sup>[2-16]</sup>。研究表明 CFRP 加固可有效地提高钢管混凝土构件的承载力或延性。此外,文献[2]、文献[3]和文献[10]研究了环向 CFRP 加固钢管混凝土压弯构件的滞回性能,研究表明环向加固可提高构件的延性。文献[17]进行了 8 个双向 CFRP 加固圆钢管混凝土压弯构件的滞回试验,研究表明该类构件的滞回曲线较为饱满,曲线无捏缩现象;双向 CFRP 可有效地提高构件的承载力。

综上,以上研究多集中于静力性能和环向 CFRP 加固钢管混凝土构件的滞回性能,仅 1 篇文献与双向 CFRP 加固圆形截面钢管混凝土压弯构件的滞回性能相关。为合理地进行 CFRP 加固方钢管混凝土压弯构件的抗震设计,在以上研究工作的基础上,笔者认为尚需进一步开展以下研究工作:①开展双向 CFRP-方钢管混凝土压弯构件的滞回试验;②建立 CFRP-方钢管混凝土压弯构件的有限元模型;③建议简化的荷载( $P$ )-位移( $\Delta$ )滞回模型。

基于以上考虑,本文以 CFRP 加固方式和轴压比为主要参数,进行 CFRP-方钢管混凝土压弯构件的滞回试验。然后建议该类构件的有限元模型,为将来进一步研究该类构件提供参考。最后还建议了简化的荷载( $P$ )-位移( $\Delta$ )滞回模型,为工程实践中该类构件的应用提供参考。

1 试验方案

本文共进行了 9 个压弯构件的滞回试验,截面形状见图 1(b)。所有试件的长度均为 1.5 m,试件截面宽度均为 149 mm,钢管厚度均为 2.63 mm,截

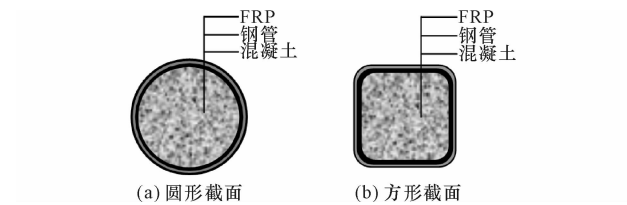


图 1 FRP-钢管混凝土构件截面  
Fig. 1 Typical sections of FRP-CFST column  
面转角外半径为 6 mm。

变化的主要参数为轴压比( $n=N_0/N_u$ ,  $N_0$ 、 $N_u$ 分别为试验中在构件上施加的轴力以及构件的轴压稳定承载力)和 CFRP 加固方式,构件参数见表 1。其中,  $P_{uc}$  和  $P_{uc}$  分别为实测平均承载力和有限元预测极限承载力;  $\mu$  和  $E_{total}$  分别为延性系数和实测总能耗。

表 1 试件参数  
Tab. 1 Parameters of beam-columns

试件 编号	CFRP 分布	$n$	$N_0/\text{kN}$	$P_{uc}/\text{kN}$	$P_{uc}/\text{kN}$	$\mu$	$E_{total}/$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )
SBC1	无	0	42.5	83.7		6.70	58.6
SBC2		0.3	255.0	88.2		3.15	69.6
SBC3		0.6	510.0	81.4		2.25	20.2
SBC2-L	环向 2 层	0.3	281.8	97.5		3.15	92.6
SBC2-A	纵向 2 层	0.3	255.0	106.7		2.85	37.0
SBC3-A	纵向 2 层	0.6	510.0	89.2		1.55	30.6
SBC1-B	纵向、环 向各 1 层	0	45.4	104.3	111.0	3.05	66.2
SBC2-B		0.3	272.6	105.0	96.5	2.90	57.7
SBC3-B		0.6	545.2	89.7	82.2	2.00	29.0

试验时,实测的混凝土立方体抗压强度为 31.1 MPa。单层 CFRP 的名义厚度为 0.17 mm;极限抗拉强度  $f_{frp, rup}$  为 4 484.6 MPa;弹性模量为 239 GPa。钢管屈服强度和极限抗拉强度分别为 293.5 MPa 和 383.4 MPa;弹性模量为 208.2 GPa,泊松比为 0.295。

2 试验装置与试验方法

试验在福州大学结构工程实验室进行,试验装置如下页图 2 所示。首先通过高强螺栓将试件与两端的铰支座固定;接着利用 100 t 千斤顶施加轴力;最后采用 MTS 伺服作动器施加往复水平荷载,作动器与试件之间通过刚性夹具连接。

试验前,首先对构件进行预压,预压力值为设计轴压力的 10%,如下页图 3 所示。其中  $\Delta$  为横向位移;  $\Delta_y=P_{uc}/K_{sec}$ ,  $P_{uc}$  和  $K_{sec}$  分别为有限元预测极限承载力和 0.7 $P_{uc}$  时荷载-变形曲线的割线刚度。加载程序按 ATC-24—1992 规定的方法进行,加载直

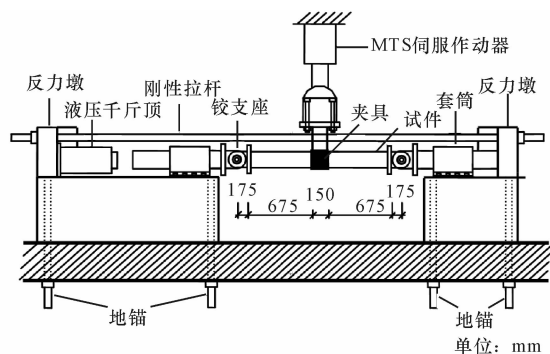


图 2 试验装置

Fig. 2 Set-up of test

至构件上作用的荷载下降到极限荷载的 85%、钢管屈曲、FRP 明显断裂或达到作动器的最大允许位移<sup>[18]</sup>。

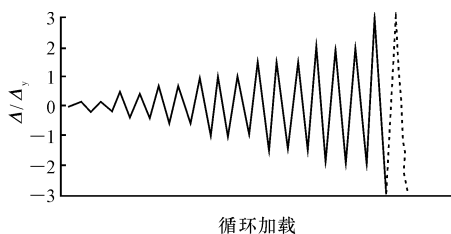


图 3 加载程序

Fig. 3 Load process

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 试件破坏形态

对于未加固的对比试件,当峰值荷载作用时,受压区边缘发生钢管局部屈曲现象。随着横向位移的增大,局部屈曲的范围逐渐扩大,最终钢管被拉裂。

图 4(a)为纵向 CFRP-方钢管混凝土压弯构件(SBC2-A)的破坏模式,可发现在夹具附近截面钢管首先发生局部屈曲现象,并导致纵向 CFRP 与钢管发生剥离。在往复荷载作用下,CFRP-钢管粘接破坏的范围逐渐扩大。

对于环向 CFRP-方钢管混凝土压弯构件,由于有环向 CFRP 的约束作用,钢管局部屈曲发生在峰值荷载作用后。随着水平位移的进一步增大,内部混凝土的膨胀导致钢管发生严重的局部屈曲,环向 CFRP 最终在构件截面附近的角部区域被拉断。

图 4(b)给出了双向 CFRP-方钢管混凝土压弯构件(SBC1-B)的破坏模式。构件在跨中截面发生钢管局部屈曲现象;轴压比较小的构件(SBC1-B)纵向 CFRP 受拉断裂;轴压比较大的构件(SBC2-B 和 SBC3-B)则表现为钢管屈曲和环向 CFRP 受拉断裂。

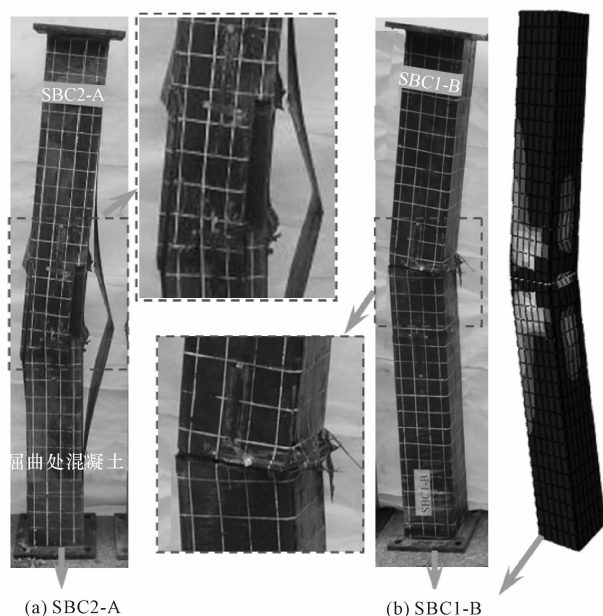


图 4 构件典型破坏模式

Fig. 4 Typical failure modes of beam-columns

#### 3.2 荷载(P)-位移(Δ)曲线

下页图 5 给出了实测  $P-\Delta$  滞回曲线。本次试验实测的峰值水平承载力( $P_{ue}$ )取正负峰值荷载绝对值的平均值, $P_{ue}$ 值均列于表 1。由图 5 可以看出,CFRP-方钢管混凝土压弯试件的滞回曲线饱满,未出现明显捏缩现象,说明该类构件具有良好的耗能能力。

#### 3.3 荷载-位移关系骨架曲线

骨架线可大体反映构件的抗剪承载力和延性特征。下页图 6 给出了加固方式对 CFRP-方钢管混凝土压弯试件骨架线的影响规律。就水平承载力而言,当轴压比为 0.3 时,采用“纵向、环向各 1 层”(SBC2-B)、“纵向 2 层”(SBC2-A)和“环向 2 层”(SBC2-L)加固后,构件的水平承载力分别提高了 19.3%、21.4%和 10.4%。这说明在 CFRP 用量和轴压比相同的情况下,就承载力而言,双向 CFRP 和纵向 CFRP 的加固效果优于环向 CFRP。值得注意的是,尽管构件 SBC2-A 的纵向 CFRP 的层数是 SBC2-B 的 2 倍,但两者的承载力较为接近。原因是 SBC2-B 的纵向纤维受到环向纤维的约束作用,纵向纤维始终和钢管紧密的粘接在一起,直至最终被拉断;而构件 SBC2-A 由于没有环向纤维的约束作用,其纵向纤维在往复荷载作用下很快与钢管发生粘接破坏,因此纵向 CFRP 的抗拉强度还未完全发挥出来。

下页图 7 给出了轴压比对构件骨架线的影响规

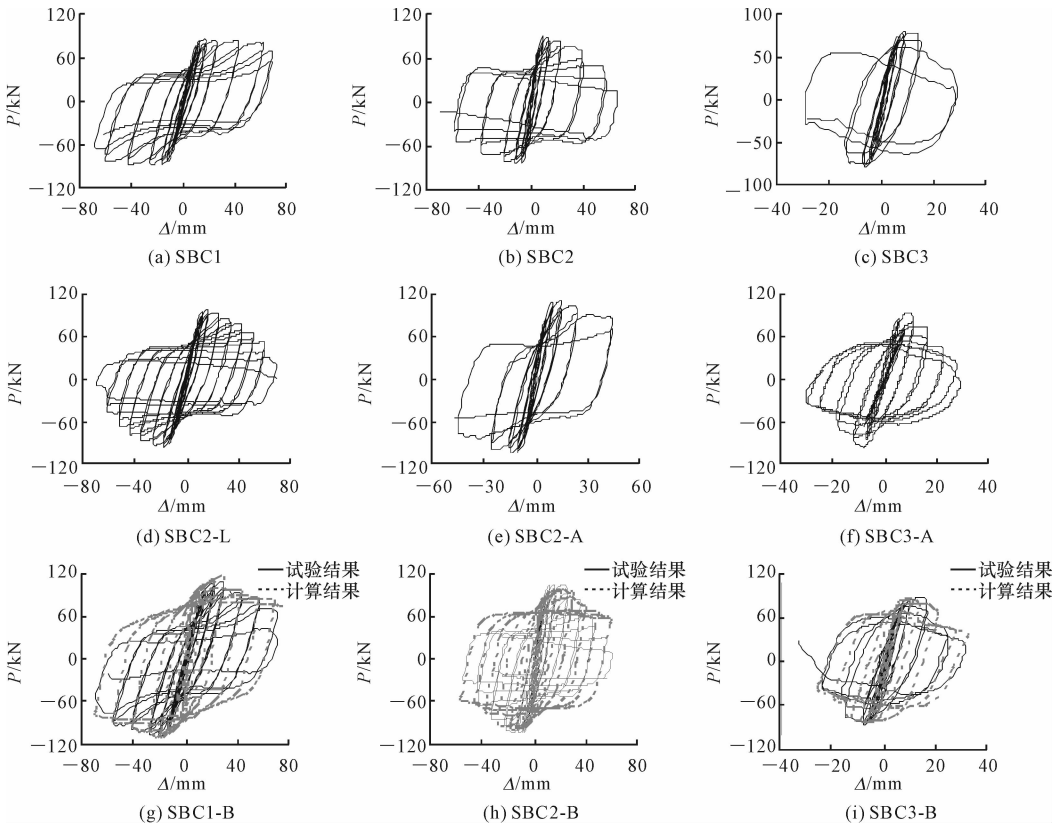


图 5 构件  $P-\Delta$  滞回曲线

Fig. 5  $P-\Delta$  hysteretic curves of beam-columns



图 6 CFRP 加固方式对  $P-\Delta$  滞回骨架线的影响(轴压比  $n=0.3$ )

Fig. 6 Influence of CFRP strengthening methods on  $P-\Delta$  skeleton curves ( $n=0.3$ )

律,具体如下:①轴压比对未加固的钢管混凝土构件的承载力影响不大,但随着轴压比的增大,CFRP-钢管混凝土构件的承载力显著下降;②随着轴压比的增大,骨架线的下降段变的更陡,构件延性下降;③随着轴压比的增加,抗剪承载力的加固效果逐渐下降,如对于轴压比分别为 0、0.3 和 0.6 的方钢管混凝土构件,采用双向 CFRP 布加固后构件的抗剪承载力分别提高 24.7%、19.3%和 10.3%。采用纵向 CFRP 加固也可得出类似的规律。原因是随着轴压比的增大,在构件截面上由轴压力所产生的压应变逐渐增大,而纵向 CFRP 仅在受拉时才能发挥加固效果,因此随着轴压比的增大纵向 CFRP 的加固效果逐渐降低。

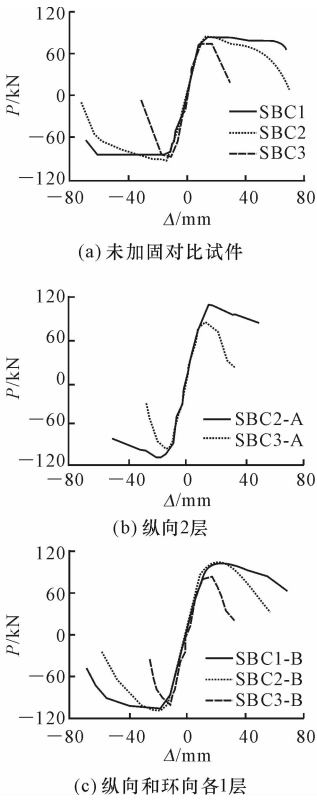


图 7 轴压比对  $P-\Delta$  骨架线的影响

Fig. 7 Influence of axial compression ratio on  $P-\Delta$  skeleton curves

延性系数  $\mu$  是结构抗震性能的一个重要指标,具体定义为

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

式中:  $\Delta_y$  为屈服位移,该值为  $P-\Delta$  骨架线弹性段延线与过峰值点的水平线交点对应的位移;  $\Delta_u$  为有效极限位移,该值为荷载下降到峰值荷载 90% 时对应的位移。

试件的平均位移延性系数  $\mu$  见表 1。图 8 为轴压比对 CFRP-方钢管混凝土压弯试件延性系数的影响规律。可发现随着轴压比的增大,构件的延性系数逐渐降低。同时可见纵向 CFRP-方钢管混凝土构件的下降幅度明显大于双向 CFRP-方钢管混凝土构件。原因是纵向 CFRP-方钢管混凝土构件的破坏模式是纵向 CFRP 布与钢管壁的粘接破坏。一旦纵向 CFRP 布剥离,其承载力加固效果迅速消失,因此延性较差。

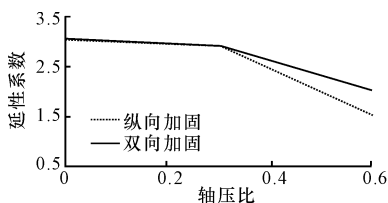


图 8 轴压比对试件延性的影响

Fig. 8 Influence of axial compression ratio on ductility coefficients of beam-columns

图 9 所示为不同 CFRP 加固方式对 CFRP-方钢管混凝土压弯构件延性系数的影响。可发现环向 CFRP 对构件的延性系数影响较小 (1%~2%); 当采用纵向 CFRP 或双向 CFRP 加固后, 构件的延性系数分别下降 10.2% 和 9.3%。原因是采用纵向 CFRP 或双向 CFRP 加固的构件在纵向 CFRP 断裂后均会发生荷载突降现象。

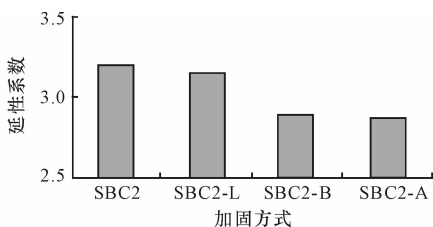


图 9 CFRP 加固方式对试件延性系数的影响

Fig. 9 Influence of CFRP strengthening methods on ductility coefficients of beam-columns

### 3.4 耗能

耗能 ( $E = \sum_{i=1}^n s_{i1}$ ) 是构件在往复荷载作用下吸收能量的能力, 是构件抗震性能的重要指标, 其中  $s_{i1}$

是试件在第  $i$  个周期内所吸收的能量 (又称耗能)。滞回环越饱满, 表明构件的耗能能力越高。表 1 列出了方形试件的总耗能  $E_{\text{total}}$  (试验结束时试件的累积耗能)。由表 1 可见, 随着轴压比的增大,  $E_{\text{total}}$  值则逐渐减小。

图 10 为不同 CFRP 加固方式下钢管混凝土压弯构件 ( $n=0.3$ ) 各级累积耗能 ( $E$ ) 的比较。在横向位移达到 30 mm 以前 4 条曲线基本重合。随着位移和承担弯矩的进一步增大, 双向布 CFRP-方钢管混凝土构件 (SBC2-B) 和环向 CFRP-方钢管混凝土构件 (SBC2-L) 的耗能明显大于未加固的对比构件 (SBC2) 和纵向 CFRP-方钢管混凝土构件 (SBC2-A)。就总耗能而言, 环向 CFRP-方钢管混凝土构件 (SBC2-L) 的总耗能值较未加固方钢管混凝土构件 (SBC2) 的总耗能高 33.1%; 纵向加固和双向加固后构件的总耗能反而下降。原因是环向 CFRP 加固后构件的延性和塑性变形能力均有一定程度的提高; 而纵向 CFRP 加固和双向 CFRP 加固后构件的延性和塑性变形能力反而下降。

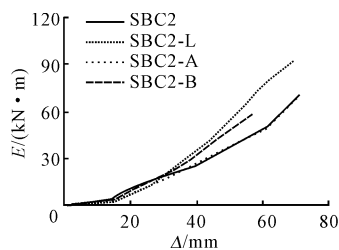


图 10 CFRP 加固方式对  $E-\Delta/\Delta_y$  曲线的影响

Fig. 10 Influence of CFRP strengthening methods on  $E-\Delta/\Delta_y$  curves

### 3.5 刚度

基于实测的弯矩  $M$ -曲率  $\varphi$  曲线, 可求得压弯构件的初始抗弯刚度  $K_{ic}$  和使用阶段抗弯刚度  $K_{se}$  ( $K_{ic}$ 、 $K_{se}$  分别为  $M-\varphi$  骨架线中荷载为  $0.2M_{uc}$  和  $0.6M_{uc}$  的点对应的割线刚度), 具体数值见下页表 2 中。目前国内大部分规程均采用式 (2) 的形式计算钢管混凝土的抗弯刚度<sup>[19-23]</sup>。由图 6 可知, CFRP-方钢管混凝土压弯构件具有和未加固钢管混凝土对比构件相似的刚度, 因此本文在计算构件刚度时不考虑 CFRP 的影响, 直接采用钢管混凝土构件简化公式, 具体为

$$K = E_s I_s + m E_c I_c \quad (2)$$

式中:  $E_s$ 、 $E_c$  分别为钢管和混凝土的弹性模量, 各规范均建议了  $E_c$  的简化计算公式;  $I_s$ 、 $I_c$  分别为钢管和混凝土的截面惯性矩;  $m$  为混凝土对抗弯刚度的影响系数, 文献<sup>[19-23]</sup>中  $m$  的取值分别为 0.8、0.6、0.2、1.0 和 0.6。

以上计算结果列于表 2 中,将  $K_c$  值与试验实测  $K_{ie}$ 、 $K_{ic}$  值进行比较后可知,采用 EC4 和 DBJ13-51-2010 建议公式求得的结果与试验实测  $K_{ie}$  值较吻合,采用 BS5400 建议公式求得的结果与试验实测  $K_{se}$  值较接近<sup>[20-23]</sup>。

通过以上研究可知,就承载力而言,纵向 CFRP 和双向 CFRP 的加固效果高于环向 CFRP。但仅采

用纵向 CFRP 加固时,纵向 CFRP 容易从钢管表面剥离,CFRP 抗拉强度高的特点尚未完全发挥。因此,对于往复荷载作用下的方钢管混凝土压弯构件,采用纵向加固为主。环向加固为辅的双向加固方式更为合理,为进一步研究其力学性能,本文采用有限元软件 ABAQUS 模拟该类双向 CFRP-方钢管混凝土压弯构件的滞回曲线。

表 2 初始抗弯刚度和使用阶段刚度的实测值和计算值的比较

Tab. 2 Comparison between experimental results and predicted results of initial sectional flexural stiffness and usage sectional flexural stiffness of the usage phase

试件 编号	$K_{ie}/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ )	$K_{se}/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ )	AISC-LRFD <sup>[19]</sup>			EC4 <sup>[20]</sup>			AJ <sup>[21]</sup>			BS5400 <sup>[22]</sup>			DBJ/T13-51-2010 <sup>[23]</sup>		
			$K_c/(\text{kN} \cdot \text{m}^2)$	$\frac{K_c}{K_{ie}}$	$\frac{K_c}{K_{se}}$	$K_c/(\text{kN} \cdot \text{m}^2)$	$\frac{K_c}{K_{ie}}$	$\frac{K_c}{K_{se}}$	$K_c/(\text{kN} \cdot \text{m}^2)$	$\frac{K_c}{K_{ie}}$	$\frac{K_c}{K_{se}}$	$K_c/(\text{kN} \cdot \text{m}^2)$	$\frac{K_c}{K_{ie}}$	$\frac{K_c}{K_{se}}$	$K_c/(\text{kN} \cdot \text{m}^2)$	$\frac{K_c}{K_{ie}}$	$\frac{K_c}{K_{se}}$
SBC1	2 143	1 474	1 764.9	0.82	1.20	1 781.9	0.83	1.21	1 299.9	0.61	0.88	1 630.9	0.76	1.11	1 776.7	0.83	1.21
SBC2	1 931	1 694	1 764.9	0.91	1.04	1 781.9	0.92	1.05	1 299.9	0.67	0.77	1 630.9	0.84	0.96	1 776.7	0.92	1.05
SBC3	1 706	1 693	1 764.9	1.03	1.04	1 781.9	1.04	1.05	1 299.9	0.76	0.77	1 630.9	0.96	0.96	1 776.7	1.04	1.05
SBC2-L	1 276	1 129	1 764.9	1.38	1.56	1 781.9	1.40	1.58	1 299.9	1.02	1.15	1 630.9	1.28	1.44	1 776.7	1.39	1.57
SBC2-A	2 077	1 852	1 764.9	0.85	0.95	1 781.9	0.86	0.96	1 299.9	0.63	0.70	1 630.9	0.79	0.88	1 776.7	0.86	0.96
SBC3-A	1 480	1 261	1 764.9	1.19	1.40	1 781.9	1.20	1.41	1 299.9	0.88	1.03	1 630.9	1.10	1.29	1 776.7	1.20	1.41
SBC1-B	2 199	1 465	1 764.9	0.80	1.20	1 781.9	0.81	1.22	1 299.9	0.59	0.89	1 630.9	0.74	1.11	1 776.7	0.81	1.21
SBC2-B	2 506	1 830	1 764.9	0.70	0.96	1 781.9	0.71	0.97	1 299.9	0.52	0.71	1 630.9	0.65	0.89	1 776.7	0.71	0.97
SBC3-B	2 112	1 783	1 764.9	0.84	0.99	1 781.9	0.84	1.00	1 299.9	0.62	0.73	1 630.9	0.77	0.91	1 776.7	0.84	1.00
$K_c/K_{ie}$ 的平均值(均方差)			0.950(0.217)			0.96(0.219)			0.700(0.160)			0.88(0.200)			0.96(0.218)		
$K_c/K_{se}$ 的平均值(均方差)			1.149(0.213)			1.16(0.215)			0.848(0.156)			1.06(0.196)			1.16(0.213)		

## 4 有限元模拟

### 4.1 材料模型

钢材采用文献[1]介绍的模型。

CFRP 为各项异性的线弹性材料,且仅承受拉力,本文采用 ABAQUS 中的弹性模型(\* ORTHO-TROPIC)进行模拟。该模型需输入 9 个独立的弹性刚度参数。CFRP 布中非纤维方向的刚度可取为环氧树脂的弹性模量( $E_{ep}$ )。沿着纤维方向的 CFRP 布的弹性模量按照试验实测来取值。

因为构件环向有转角存在,构件受弯后,其纵向外表面也可视为曲面,所以环向 CFRP 纤维和纵向 CFRP 纤维受力时均不是直线受力。同时在循环应力的作用下 CFRP 和钢管之间容易发生粘接破坏。因此构件上 CFRP 的极限拉应力( $f_{frp}$ )远小于材性试验实测的极限抗拉强度值( $f_{frp, rup}$ )。文献[24]建议对  $f_{frp, rup}$  值乘以折减系数  $k_e=0.642$  来考虑该影响。因此当 CFRP 布的应力值超过其极限拉应力( $f_{frp}$ )时,本文利用场变量子程序(\* USER DEFINED FIELD)将 CFRP 布纤维分布方向的弹性模量变为 0,从而等效模拟 CFRP 布断裂失效。

此外,通过试验观测可知,对于轴压比较大的情况,在跨中弯矩较大的截面,环向 CFRP 受拉断裂可能先于纵向 CFRP。丧失了环向 CFRP 的嵌固作用后,此处的纵向 CFRP 与钢管之间可能发生局部的粘接破坏,导致该处的纵向 CFRP 无法和钢管共同受力。因此,本文假设在环向 CFRP 断裂后,该位置处的纵向 CFRP 同时失效,该失效也采用用户自定义场变量子程序来模拟。

考虑到截面形状的影响,双向 CFRP 中环向 CFRP 的约束效果较弱。因此双向 CFRP-方钢管混凝土压弯构件中的约束混凝土模型暂不考虑环向 CFRP 的约束作用,均采用文献[1]介绍的适合有限元软件 ABAQUS 中使用的方钢管混凝土模型。对于往复荷载作用下的混凝土,文献[25-26]的研究结果均表明,混凝土在往复荷载作用下,当其发生塑性变形后如继续进行循环加载,其曲线的卸载刚度和二次加载刚度均小于初始加载刚度。二次加载刚度和卸载刚度( $E_{secu}$ )的简化计算公式为

$$E_{secu} = \begin{cases} d_c E_c & (\text{受压弹性模量}) \\ d_t E_c & (\text{受拉弹性模量}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $d_t$ 、 $d_c$  分别为混凝土受拉、受压损伤系数。

本文采用文献[25]建议的损伤系数,具体为

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\epsilon_t^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_t E_c^{-1}} \quad (4)$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\epsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}} \quad (5)$$

式中:  $\epsilon_t^{pl} = b_c \epsilon_c^{in}$ ;  $\epsilon_c^{in} = \epsilon_c - \sigma_c E_c^{-1}$ ;  $\epsilon_t^{pl} = b_t \epsilon_t^{in}$ ;  $\epsilon_t^{in} = \epsilon_t - \sigma_t E_c^{-1}$ ;  $\sigma_t$ 、 $\sigma_c$ 、 $\epsilon_t$ 、 $\epsilon_c$  分别为混凝土应力应变曲线上的受拉应力、受压应力、受拉应变和复压应变;文献[26]建议  $b_t$  的取值范围为 0.2~0.3;文献[25]建议  $b_c$  取 0.7 左右。

#### 4.2 单元种类、接触关系及边界条件

有限元模型中钢管、混凝土和 CFRP 分别采用 S4R 壳单元、C3D8R 实体单元和 M3D4 膜单元。

根据文献[1]的建议,钢管和混凝土的接触关系可通过“CONTACT”来实现。采用“硬”接触和“库仑摩擦模型”定义其法向接触行为和切向接触行为,摩擦因数取 0.6。

文献[2]通过试验实测发现在 CFRP 断裂以前,CFRP 和钢管之间的滑移基本可以忽略,因此钢管和 CFRP 之间采用无相对位移的“TIE”约束。

模型中压弯试件的边界条件为两端铰接,在构件的跨中施加横向水平位移。

#### 4.3 算例验证

图 4(b)给出了构件 SBC1-B 的预测破坏模态和试验实测破坏模态的比较,两者均表现为跨中截面附近钢管局部屈曲和纵向 CFRP 受拉断裂,图中跨中截面附近的蓝色区域为应力为 0 的纵向 CFRP 断裂区。

图 5 的(g)~(i)给出了 3 个双向 CFRP-方钢管混凝土压弯试件的有限元计算  $P$ - $\Delta$  滞回曲线与试验实测曲线的比较,预测极限承载力和实测极限承载力比值的平均值和均方差为 0.967 和 0.085,可见两者总体吻合较好。但对于轴压比较小的构件(SBC1-B 和 SBC2-B),有限元模拟  $P$ - $\Delta$  滞回曲线的后期曲线较试验曲线更为饱满,原因可能包括 2 个方面:①对于轴压比小的构件,纵向 CFRP 的应力幅值较大,因此 CFRP 和钢管之间更容易发生粘接破坏,有限元中无法充分考虑这种粘接破坏的影响;②由于本文构件的截面转角较小,环向 CFRP 的实际断裂应变小于本文假设的 0.642 倍的极限断裂应变,而纵向 CFRP 和钢管混凝土共同工作是通过环向 CFRP 来保证的,因此对于轴压比小的构件,实际上后期高估了纵向 CFRP 和环向 CFRP 的加固效果。

## 5 $P$ - $\Delta$ 滞回模型

为了方便工程应用,基于现有的方钢管混凝土  $P$ - $\Delta$  滞回模型<sup>[1]</sup>和本文的大量参数分析,本文给出了双向 CFRP-方钢管混凝土压弯构件的  $P$ - $\Delta$  滞回模型,如图 11 所示。其骨架线简化为三段式:①弹性段 OA,该段的斜率为  $K_a$ ,A 点为弹性段终点,其对应的水平荷载取为  $0.6P_{y0}$ , $P_{y0}$  为未加固方钢管混凝土构件的骨架线峰值荷载;②弹塑性段 AB,B 点为峰值点,其对应的荷载和横向位移分别为  $P_y$  和  $\Delta_p$ ;③下降段 BC,该段的斜率为  $K_T$ 。

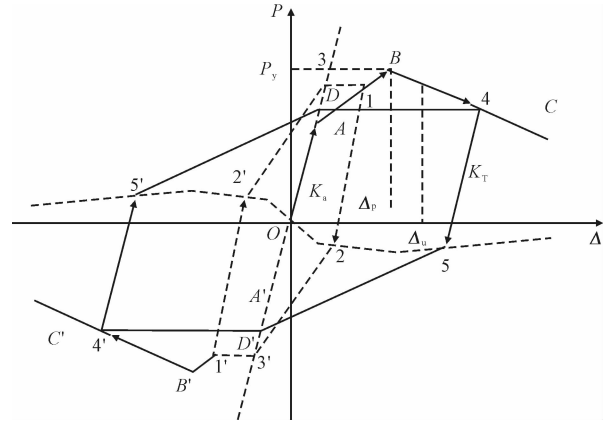


图 11  $P$ - $\Delta$  滞回模型

Fig. 11  $P$ - $\Delta$  hysteretic model

#### 5.1 弹性刚度 $K_a$

通过表 2 的分析可知,CFRP 加固方钢管混凝土压弯构件的弹性刚度  $K_a$  和未加固方钢管混凝土压弯构件基本一致,因此该值直接采用文献[1]介绍的方钢管混凝土压弯构件的简化计算公式。

#### 5.2 极限荷载 $P_y$ 及其对应的位移 $\Delta_p$

基于现有的方钢管混凝土  $P$ - $\Delta$  滞回模型和大量的参数分析,本文建议如下极限荷载( $P_y$ )的计算公式为

$$P_y = \alpha_F P_{y0} \quad (6)$$

式中: $P_{y0}$  为未加固方钢管混凝土构件的骨架线峰值荷载,可按文献[1]介绍的方法确定; $\alpha_F$  为承载力提高系数。 $\alpha_F$  可采用下式计算求得

$$\alpha_F = \begin{cases} \xi_F (-1.05n + 0.62) & 0 \leq n \leq 0.4 \\ 0.2\xi_F & 0.4 < n \end{cases} \quad (7)$$

式中: $n$  为轴压比; $\xi_F = A_{frp} f_{frp, rup} / A_{sc} f_{scy}$ ,为纵向 CFRP 加固系数; $A_{frp}$ 、 $f_{frp, rup}$  分别为纵向 CFRP 的截面面积和极限抗拉强度; $A_{sc}$ 、 $f_{scy}$  分别为方钢管混凝土的截面面积和轴心受压强度, $f_{scy}$  的计算见文献[1]。

本文还建议了极限荷载对应位移  $\Delta_p$  的计算公

式为

$$\Delta_p = \frac{(1.7 + n + 0.5\xi_s + 5\xi_F)P_y}{K_a} \quad (8)$$

式中:  $\xi_s = A_s f_y / A_c f_{ck}$ , 为钢管约束效应系数;  $A_s$ 、 $A_c$  分别为钢管和核心混凝土的截面面积;  $f_y$ 、 $f_{ck}$  分别为钢管屈服强度和核心混凝土轴心抗压强度标准值。

### 5.3 下降段刚度 $K_T$

试验表明,双向 CFRP 加固后方钢管混凝土压弯构件的延性下降,  $K_T$  的绝对值明显提高,因此本文建议  $K_T$  值的简化计算公式,即

$$K_T = \frac{-9.83(n + 0.85\xi_F)^{1.2} \lambda^{0.75} f_y K_a}{E_s \xi_s} \quad (9)$$

式中:  $\lambda$  为构件的长细比。

### 5.4 模型软化段

当双向 CFRP-方钢管混凝土压弯构件的  $P-\Delta$  滞回模型从图 11 中的点 1 或点 4 卸载时,卸载刚度为  $K_T$ ,卸载并反向加载至点 2 或点 5,点 2 和点 5 的纵坐标值分别为点 1 和点 4 纵坐标值的 20%;继续反向加载,曲线进入软化段 2'3'(或 5'D'),点 3'和点 D'均在 OA 的反向延长线上,其纵坐标值分别与点 1(或点 3)和点 4(或点 D')相同。接着沿 3'1'2'3 或 D'4'5'D 进行加载,软化段 2'3 和 5'D 的确定可参照 2'3'和 5'D'。

图 12 给出了双向 CFRP-方钢管混凝土  $P-\Delta$  滞回模型与试验实测曲线的比较,可见二者吻合较好。

## 6 结 语

(1) CFRP-方钢管混凝土压弯构件的滞回曲线饱满。就承载力而言,双向 CFRP 的加固效果要高于环向 CFRP 和纵向 CFRP。环向 CFRP 可有效提高方钢管混凝土构件耗能能力并保证纵向 CFRP 和钢管壁的可靠工作。

(2) 规范 EC4 和 DBJ13-51-2010 可较为准确的预测该类构件的初始刚度;规范 BS5400 可较为准确的预测该类构件使用阶段的刚度。

(3) 建议了双向 CFRP-方钢管混凝土压弯构件在往复荷载作用下的有限元模型,有限元计算结果与试验结果吻合较好。

(4) 建议了双向 CFRP-方钢管混凝土压弯构件的简化  $P-\Delta$  滞回模型,模型计算结果与试验结果吻合良好。

(5) 在本文研究工作的基础上,可进一步深入开展该类构件的机理分析工作。

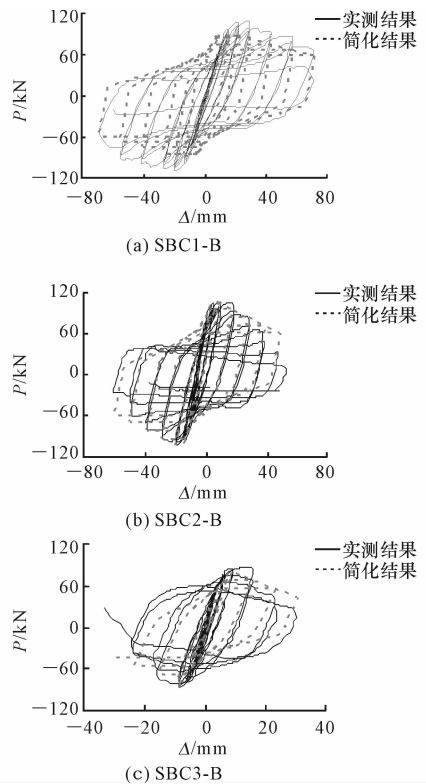


图 12 实测  $P-\Delta$  滞回曲线与简化滞回模型的比较  
Fig. 12 Comparisons between measured results and simplified model of  $P-\Delta$  hysteretic curves

### 参考文献:

#### References:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2007.  
HAN Lin-hai. Concrete filled steel tubular columns-theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 陶忠,于清. 新型组合结构柱:试验、理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2006.  
TAO Zhong, YU Qing. New types of composite columns-experiments, theory and methodology[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [3] Xiao Y, He W H, Choi K K. Confined concrete filled tubular columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(3): 488-497.
- [4] 翟存林,魏洋,李国芬,等. FRP-钢复合管混凝土桥墩设计与应用研究[J]. 公路, 2012(1): 83-87.  
ZHAI Cun-ling, WEI Yang, LI Guo-fen, et al. Study on design and application of the concrete filled circular FRP-steel composite tubular piers[J]. Highway, 2012 (1): 83-87. (in Chinese)
- [5] 王苏岩,余文华,曹怀超,等. CFRP加固高强混凝土

- 方柱的延性性能试验分析与计算[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(2): 21-29.
- WANG Su-yan, YU Wen-hua, CAO Huai-chao, et al. Experiment analysis and calculation on ductility behaviors of high-strength RC square columns strengthened with CFRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(2): 21-29. (in Chinese)
- [6] Tao Z, Han L H, Zhuang J P. Axial loading behavior of CFRP strengthened concrete-filled steel tubular stub columns[J]. Advances in Structural Engineering, 2007, 10(1): 37-46.
- [7] 王庆利, 方 言, 任庆新. 圆 CFRP-钢管混凝土轴压构件静力性能研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(10): 21-29.
- WANG Qing-li, FANG Yan, REN Qing-xin. Study on static performance of concentrically compressed concrete filled circular CFRP-steel tubular members[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(10): 21-29. (in Chinese)
- [8] Zordan T, Briseghella B, Liu T. Finite element model updating of a tied-arch bridge using douglas-reid method and rosenbrock optimization algorithm[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(4): 280-292.
- [9] Liu L, Lu Y Y. Axial bearing capacity of short FRP confined concrete-filled steel tubular columns[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater: Science Edition, 2010, 25(3): 454-458.
- [10] Park J W, Hong Y K, 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(2): 187-205.
- [11] Hu Y M, Yu T, Teng J G. FRP-confined circular concrete-filled thin steel tubes under axial compression[J]. Journal of Composites for Construction, 2011, 15(5): 850-860.
- [12] Teng J G, Hu Y M, Yu T. Stress-strain model for concrete in FRP-confined steel tubular columns[J]. Engineering Structures, 2013, 49: 156-167.
- [13] Yu T, Hu Y M, Teng J G. FRP-confined circular concrete-filled steel tubular columns under cyclic axial compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 94: 33-48.
- [14] Tao Z, Han L H. Behaviour of fire-exposed concrete-filled steel tubular beam-columns repaired with CFRP wraps[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(1): 63-76.
- [15] 王庆利, 叶 茂, 周 琳. 圆 CFRP-钢管混凝土构件受弯性能研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(10): 30-38.
- WANG Qing-li, YE Mao, ZHOU Lin. Study on the flexural behaviour of concrete filled circular CFRP-steel tubular members[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(10): 30-38. (in Chinese)
- [16] 王庆利, 谭鹏宇, 魏溯华. 圆 CFRP-钢管混凝土压弯构件静力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(5): 67-74.
- WANG Qing-li, TAN Peng-yu, WEI Su-hua. Experimental study on static performance of the eccentrically compressed concrete filled circular CFRP-steel tubular members[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(5): 67-74. (in Chinese)
- [17] 车 媛, 王庆利, 邵永波, 等. 圆 CFRP-钢管混凝土压弯构件滞回性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(7): 46-54.
- CHE Yuan, WANG Qing-li, SHAO Yong-bo, et al. Experimental study on hysteretic behaviors of concrete filled circular CFRP-steel tubular beam-columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(7): 46-54. (in Chinese)
- [18] ATC-24, Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures[S].
- [19] AISC-LRFD, Load and resistance factor design specification for structural steel buildings, 2nd ed. [S].
- [20] Eurocode 4, Design of composite steel and concrete structures, Part 1, 1: General rules and rules for buildings[S].
- [21] AIJ, Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures[S].
- [22] BS5400. Part 5, Concrete and composite bridges[S].
- [23] DBJ/T13-51-2010, 钢管混凝土结构技术规程[S]. DBJ/T13-51-2010, Technical specification for concrete-filled steel tubular structures[S]. (in Chinese)
- [24] 王志滨. CFRP-钢管混凝土构件的力学性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2011.
- WANG Zhi-bin. Behaviour of CFRP-concrete-filled steel tubular specimens[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2011. (in Chinese)
- [25] Birtel V, Mark P. Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure[C]. Proceedings of the 19th Annual International ABAQUS Users' Conference, Boston, USA, 2006. 95-108.
- [26] 曲 慧. 钢管混凝土结构节点力学性能与设计理论研究[D]. 福州: 福州大学, 2007.
- QU Hui. Behaviors and calculations on the beam-column connections of concrete-filled steel tubular column structures. [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2007. (in Chinese)