

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0142-07

# 方 CFRP-钢管混凝土(S-CFRP-CFST) 受弯性能分析

李 佳, 王庆利

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁, 沈阳 110168)

**摘 要:** 应用 ABAQUS 软件建立有限元模型并模拟了方 CFRP-钢管混凝土(S-CFRP-CFST)受弯构件的挠度曲线和钢管应变, 验证了该模型的有效性。分析了此类受弯构件的受力全过程, 研究了各组成材料的应力、应变和变形等的发展规律, 探讨了钢管与混凝土的相互作用力, 得到的相应结论与试验现象吻合良好。给出了 S-CFRP-CFST 抗弯承载力指标及其表达式, 应用该式可以合理计算其承载力。

**关键词:** 方 CFRP-钢管; 内填混凝土; 受弯性能; 有限元模拟; 机理分析; 承载力

中图分类号: TU398.9 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.04.S020

## ANALYSIS ON FLEXURAL PERFORMANCE OF THE CONCRETE FILLED SQUARE CFRP-STEEL TUBE (S-CFRP-CFST)

LI Jia, WANG Qing-li

(College of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

**Abstract:** The FE model is established by using ABAQUS software and the deflection curve and steel tube stress of concrete filled square CFRP-steel tubular (S-CFRP-CFST) beams are simulated, and it shows that this model is effective. The whole loading process of these kinds of flexural specimens is analyzed, the development of stress, strain and deformation of the materials are studied, and also, the interaction forces between the steel tube and the concrete are discussed. Corresponding conclusions coincide with the test results very well. The index of flexural strength and the equation for calculating the index of the composite members are proposed, which can predict the strength reasonably.

**Key words:** square CFRP-steel tube; in-filled concrete; flexural behavior; FE simulation; mechanic analysis; index of flexural strength

一般认为, CFRP-钢管混凝土(CFRP-CFST)有两种含义, 一是在预制的 CFRP-钢复合管内浇筑混凝土<sup>[1]</sup>, 再就是用 CFRP 加固受损(火灾、腐蚀等)后的既有钢管混凝土<sup>[2]</sup>, 本文的研究对象是前者。目前关于 CFRP-CFST 的研究以圆 CFRP-钢管混凝土(C-CFRP-CFST)的研究<sup>[3-13]</sup>和方 CFRP-钢管混凝土(S-CFRP-CFST)的研究<sup>[14-18]</sup>为主。上述研究在受力性能方面以轴压性能和受弯性能为主, 研究手段以试验为主, 而关于其力学性能理论分析方面的研

究还不多, 还有, CFRP-CFST 的承载力问题尚未完全解决。

基于此, 本文以 S-CFRP-CFST 受弯构件的试验研究<sup>[16]</sup>为基础, 应用 ABAQUS 软件建立模型, 模拟了钢管应变和试件的挠度曲线, 验证了模型的可靠性; 通过研究试件各组成材料的应力、应变和变形的发展规律, 分析了其受力全过程; 探讨了钢管与混凝土的相互作用力对构件静力性能的影响等。相关结论与试验现象<sup>[16]</sup>吻合良好。给出了

收稿日期: 2012-04-29; 修改日期: 2013-03-05

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0865)

通讯作者: 王庆利(1972-), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 主要从事结构工程研究(E-mail: ceqlwang@sjzu.edu.cn).

作者简介: 李 佳(1988-), 女, 辽宁人, 硕士生, 主要从事结构工程研究(E-mail: hao15841814299@126.com).

S-CFRP-CFST 的抗弯承载力指标及其计算表达式,应用该式的计算结果与试验结果<sup>[16]</sup>吻合良好。

## 1 有限元模拟

### 1.1 材料的应力-应变关系

钢材的应力-应变关系采用 ABAQUS 提供的等弹塑性模型,满足 Von Mises 屈服准则。对于钢管角部存在的冷弯强化效应,按照文献[19]处理。受压混凝土的应力-应变关系采用文献[15]给出的方 CFRP-钢管约束混凝土的本构模型,采用能量准则<sup>[15]</sup>处理受拉混凝土。CFRP 在断裂前为线弹性(满足胡克定律),认为其只承受沿纤维方向的拉应力。横向 CFRP 达到其断裂应变后失去约束作用,纵向 CFRP 达到其断裂应变后失去增强作用。

### 1.2 有限元计算模型

采用 C3D8R 单元模拟钢材和混凝土;采用 M3D4 单元模拟 CFRP。采用细化网格方法进行网格收敛性分析,考虑到弯角效应的影响,弯角处需进一步网格细化。钢管与混凝土、钢管与端板、端板与混凝土和 CFRP 与钢管之间的的界面模型按文献[12]处理。根据构件几何形状和边界条件的对称性,选用四分之一模型计算。边界条件如图 1 所示,其模拟了试验过程中的三分点加载方式,在计算模型的对称面上施加对称的约束条件,在支座位置约束竖直方向的位移,采用位移控制加载方式。

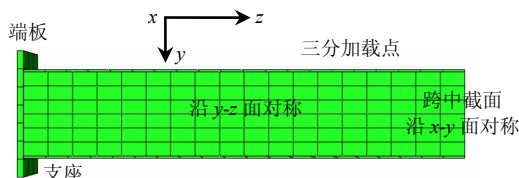


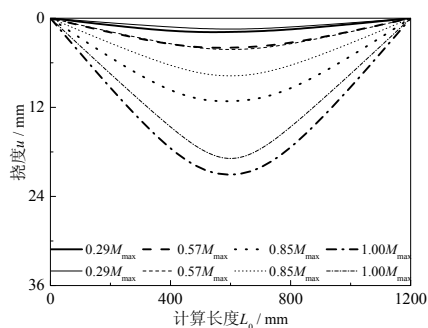
图 1 边界条件

Fig.1 Boundary conditions

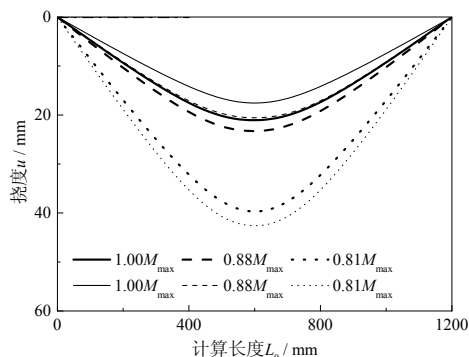
### 1.3 计算结果

#### 1.3.1 挠曲线形状

图 2 为 A-2 试件(试件编号见文献[16])的挠度( $u$ )曲线,细线为试验结果,粗线为模拟结果,



(a) 最大弯矩  $M_{max}$  之前



(b) 最大弯矩  $M_{max}$  之后  
图 2 A-2 试件挠曲线

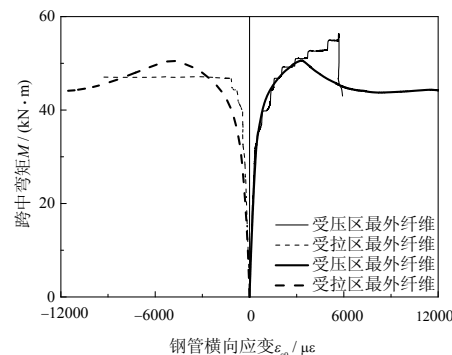
Fig.2 Deflection curves of specimen A-2

$L_0$  为试件计算长度,本文为 1200mm。

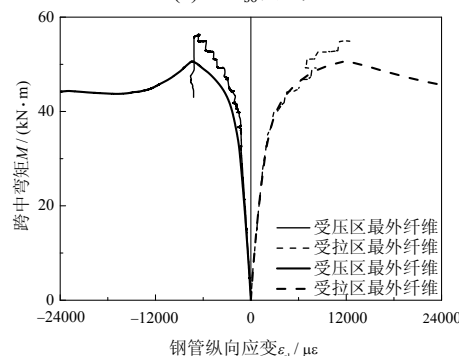
从图 2 可见,试件挠度曲线的模拟结果与试验结果吻合良好。

#### 1.3.2 钢管应变

图 3 为 C-3 试件钢管应变比较,细线为试验结果,粗线为模拟结果。在图 3 中,  $\epsilon_{s0}$  为钢管横向应变,  $\epsilon_{s1}$  为钢管纵向应变,  $M$  为跨中弯矩。



(a)  $M-\epsilon_{s0}$  曲线



(b)  $M-\epsilon_{s1}$  曲线

图 3 C-2 试件钢管的应变

Fig.3 Steel strains of specimen C-2

从图 3 可见,钢管应变的模拟结果与试验结果吻合良好。

## 2 受力全过程分析

选取四个特征点:最外边缘受拉钢管达到比例极限取为 1 点;试件达到最大承载力(大致相当于纵

向受拉区的纵向 CFRP 被拉断)取为 2 点; 试件跨中挠度达到  $L_0/50$ (大致相当于纵向受压区的横向 CFRP 被拉断)取为 3 点; 试件跨中挠度达到  $L_0/25$  取为 4 点, 以分析构件在整个受力过程中的工作机理。典型算例的计算条件为: 钢管外边长  $B=140\text{mm}$ , 钢管壁厚  $t_s=3.5\text{mm}$ ,  $L_0=1200\text{mm}$ , 钢管屈服强度  $f_y=300\text{MPa}$ , 混凝土立方试块抗压强度  $f_{cu}=40\text{MPa}$ , 钢管约束效应系数<sup>[19]</sup> $\xi_s=1.23$ , 横向 CFRP 约束效应系数<sup>[15]</sup> $\xi_{cf}=0.18$ , 纵向 CFRP 增强系数<sup>[16]</sup> $\eta=0.985$ 。

2.1 应力分析

2.1.1 钢管的纵向应力

图 4 为钢管的纵向应力沿构件长度的分布。

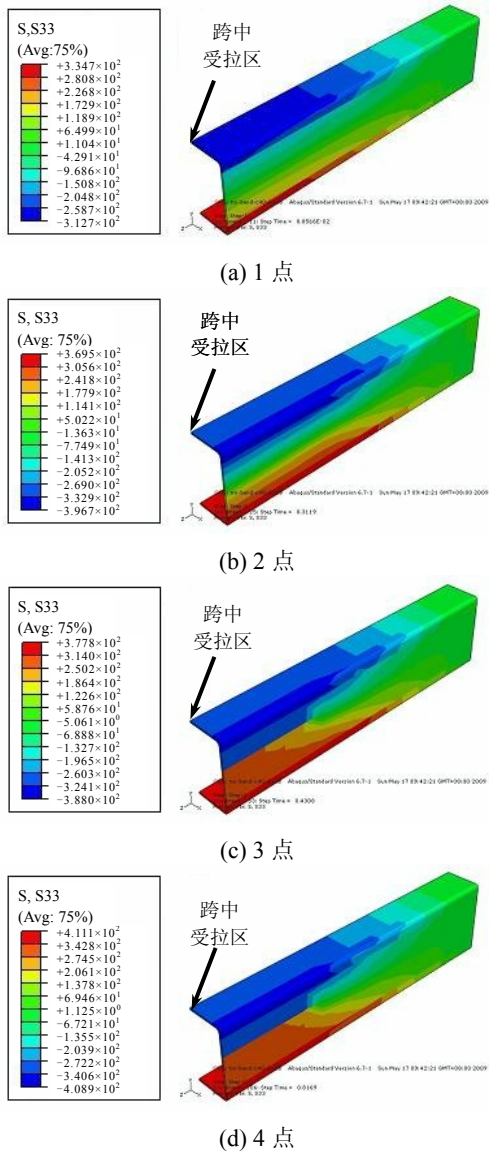


图 4 钢管的纵向应力沿构件长度的分布

Fig.4 Longitudinal stress distribution of the steel tube along axial direction

从图 4 可见, 钢管纵向应力沿截面高度由压应力区逐渐过渡到拉应力区, 表现为数值由负到正; 构件的最大压应力与最大拉应力分别在最上外边缘和最下外边缘, 即距离中和轴最远的地方; 纯弯段的纵向应力分布更均匀。以上计算结果与试验现象一致<sup>[16]</sup>, C-CFRP-CFST 受弯试件的静力试验也有类似结果<sup>[5-6]</sup>。

2.1.2 混凝土的纵向应力

图 5 为混凝土的纵向应力沿构件长度的分布。

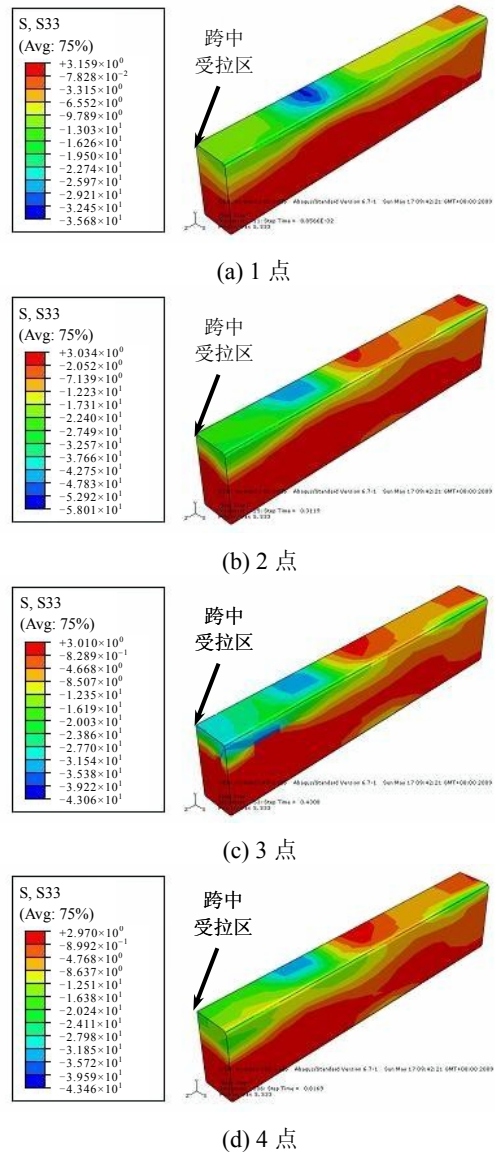


图 5 混凝土的纵向应力沿构件长度的分布

Fig.5 Longitudinal stress distribution of the concrete along axial direction

从图 5 可见, 类似于钢管, 也存在沿截面高度由压应力区向拉应力区的显著过渡; 最大压应力与最大拉应力仍分布在截面的最上和最下外边缘。与钢管不同的是, 纯弯段内混凝土压应力分布不够均

匀,且当构件进入破坏阶段(2点)后,压应力分布更加不均匀,表现为跨中受压区混凝土压力高于其他部位,这与试验现象<sup>[16]</sup>相符合:试验结束后剖开外管发现跨中受压区混凝土被压溃。

### 2.1.3 CFRP 的应力

图 6 为横向 CFRP 的应力分布。

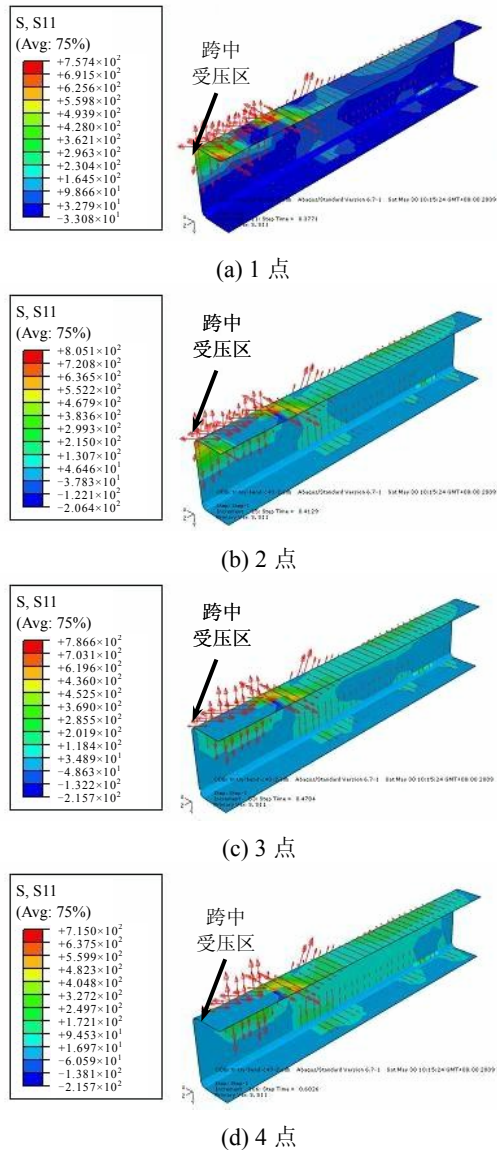


图 6 横向 CFRP 的应力分布

Fig.6 Stress distribution of the transverse CFRP

从图 6 可见,横向 CFRP 在横向为混凝土提供约束力,且在纯弯段最大;拉应力值在 2 点出现极值,然后逐渐减小,最终从角部开始断裂,这也与试验现象<sup>[16]</sup>一致。

计算还发现,纵向 CFRP 在试件的长度方向限制试件的变形,且在纯弯段发挥着最大的效能;在试件达到最大承载力时,跨中 CFRP 纵向应力达到最大值,随着变形的继续增加,跨中 CFRP 逐渐断

裂、失效,并向三分点延伸,这也与试验现象<sup>[16]</sup>一致。

## 2.2 跨中截面的应变与变形

### 2.2.1 混凝土的应力

图 7 为跨中截面混凝土的纵向应力分布。

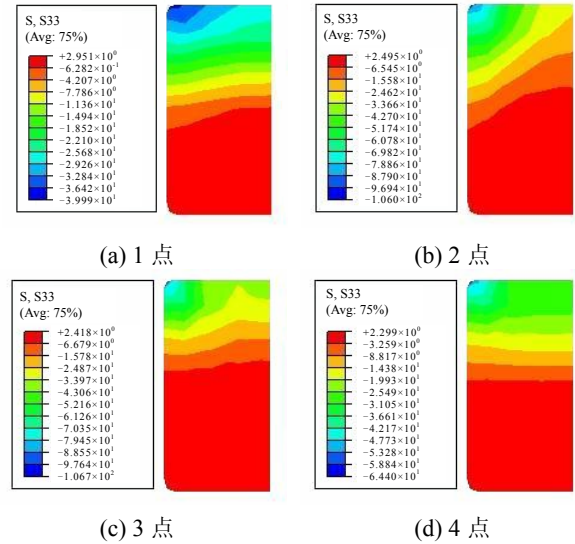


图 7 跨中截面混凝土的纵向应力分布

Fig.7 Longitudinal stress distribution of the concrete at mid-span cross-section

从图 7 可见,相对于压应力的变化( $2.1f_c \sim 5.1f_c$ ,  $f_c$  为混凝土抗压强度设计值),拉应力的变化并不显著( $1.34f_t \sim 1.73f_t$ ,  $f_t$  为混凝土抗拉强度设计值)。

### 2.2.2 横向变形

图 8 为中截面横向变形( $\Delta$ )图,负值代表凹进,正值代表凸出。

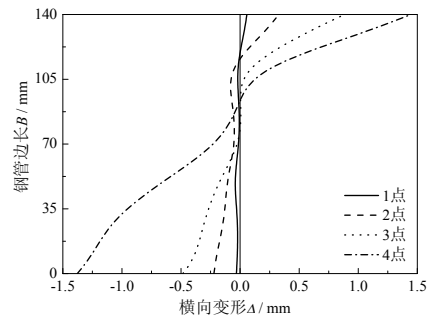


图 8 跨中截面横向变形

Fig.8 Transverse deformation at mid-span cross-section

从图 8 可见,随着荷载的不断增大,纵向受压区的凸出和纵向受拉区的凹进持续增大。从受荷初始至 3 点时,横向变形还不大,4 点后横向变形显著增加。

## 2.3 钢管和混凝土的相互作用力

图 9 为纯弯曲段钢管和混凝土之间作用力( $p$ )沿试件截面高度的分布,0mm 处为受拉区下截面边

缘, 140mm 处为受压区上截面边缘。

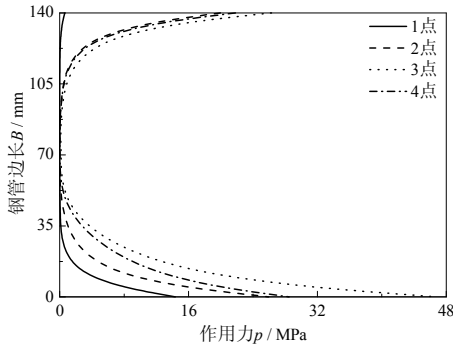


图 9 纯弯曲线段钢管和混凝土之间作用力沿截面高度分布  
Fig.9 Interaction force between the steel tube and the concrete along depth of cross-section at pure bending region

从图 9 可见, 在各特征点处, 受压区和受拉区的作用力集中分布在试件的最外边缘, 且向中点处沿截面高度迅速减小, 在截面中部向两端  $B/4$  的范围内基本没有作用力。研究还发现, 与纯弯曲线段相比, 弯-剪段受压区作用力有所增大而受拉区的作用力很小。

图 10 为纯弯段最外边缘钢管和混凝土之间作用力  $p$  沿试件截面边长的分布。

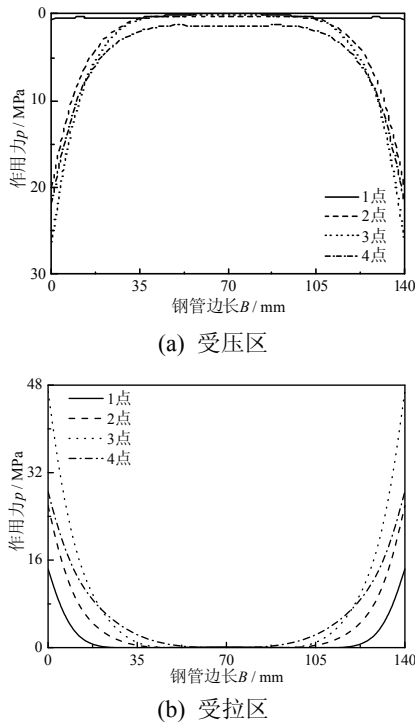


图 10 纯弯段最外边缘钢管和混凝土之间作用力沿边长分布

Fig.10 Interaction force between the steel tube and the concrete of the extreme fiber along side width at pure bending region

从图 10 可见, 受压区角部作用力最大, 向平板区逐渐减小, 这也解释了实验现象<sup>[16]</sup>之一: 横向

CFRP 总是在角部被拉断。3 点的作用力最大, 4 点试件的变形很大, 作用力降低。受拉区的作用力稍大于受压区, 分布规律与变化趋势与受压区的也基本相同, 不同之处在于边长中部基本没有作用力。

### 3 抗弯承载力

#### 3.1 抗弯承载力指标

通过大量的计算(计算参数:  $B=120\text{mm}\sim 400\text{mm}$ 、 $f_y=200\text{MPa}\sim 400\text{MPa}$ 、 $f_{cu}=30\text{MPa}\sim 120\text{MPa}$ 、 $\xi_s=0.5\sim 4$ 、 $\xi_{cf}=0\sim 0.6$  和  $\eta=0\sim 1$ ), 确定 S-CFRP-CFST 受弯构件受拉最外纤维应变达到  $\epsilon_{\max}$  时对应的弯矩为抗弯承载力指标:

$$\epsilon_{\max}=2180+224000/B \quad (1)$$

受拉最外纤维应变达到  $\epsilon_{\max}$  时对应的弯矩-曲率( $M-\phi$ )曲线处于弹性阶段与最大弯矩之间的强化段, 并且钢管达到屈服强度, 而纵向 CFRP 尚未断裂, 挠度约为  $L_0/100$ 。

首先确定仅有横向 CFRP 构件的抗弯承载力  $M_0$ 。通过分析可知,  $M_0$  主要和构件截面抗弯模量  $W_{cfscm}(=B^3/6)$ 、总约束效应系数  $\xi^{[15]}(=\xi_s+\xi_{cf})$  和 S-CFRP-CFST 轴压承载力指标  $f_{cfscy}^{[17]}$  有关。通过大量计算可得  $\gamma=M_0/(W_{cfscm}f_{cfscy})$  与  $\xi$  之间的关系如图 11 所示。

表达式为:

$$\gamma=1.05+0.524\ln(\xi+0.32) \quad (2)$$

这样, 可得仅有横向 CFRP 试件的抗弯承载力:

$$M_0=\gamma W_{cfscm} f_{cfscy} \quad (3)$$

$$f_{cfscy}=(1.18+0.85\xi)f_{ck} \quad (4)$$

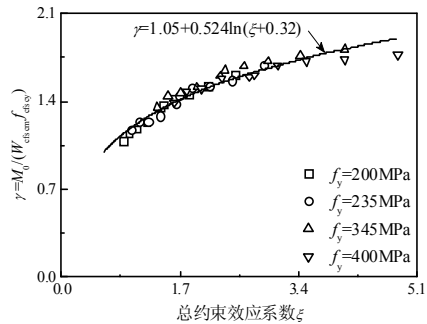


Fig.11  $\gamma-\xi$ 关系

Fig.11  $\gamma-\xi$  relationship

当试件有纵向 CFRP 时, 通过计算可得  $\gamma_m=M_u/(W_{cfscm} f_{cfscy})$  与  $\eta$  之间的关系:

$$\gamma_m=\gamma+(0.1+0.2\xi)\eta \quad (5)$$

则 S-CFRP-CFST 抗弯承载力  $M_u$  计算式为:

$$M_u=\gamma_m W_{cfscm} f_{cfscy} \quad (6)$$

### 3.2 表达式验证

图 12 为所有试件<sup>[16]</sup>的抗弯承载力计算值  $M_u^c$  与试验值  $M_u^t$  的比较, 分组情况见文献<sup>[16]</sup>。

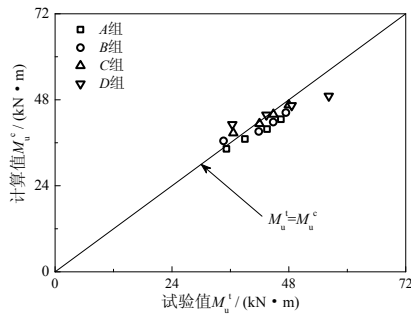


图 12  $M_u^c$  与  $M_u^t$  比较

Fig.12 Comparisons between  $M_u^c$  and  $M_u^t$

从图 12 可见,  $M_u^c$  与  $M_u^t$  总体吻合较好,  $M_u^c/M_u^t$  的平均值为 0.974, 均方差为 0.064, 总体偏于安全。

### 3.3 弯矩提高率

定义  $r$  为试件的抗弯承载力提高率, 图 13 为  $r$ - $m'$  曲线。可见,  $r$  随着  $m'$  的增大而增大, 说明增加纵向 CFRP 可以有效提高试件的抗弯承载力。

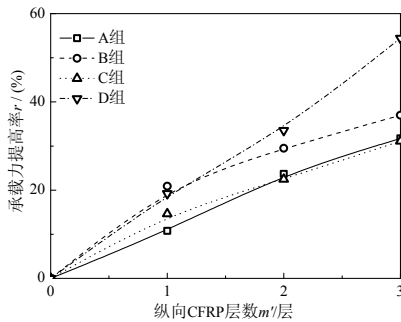


图 13  $r$ - $m'$  曲线

Fig.13  $r$ - $m'$  curves

### 3.4 刚度

根据文献<sup>[16]</sup>的  $M$ - $\phi$  曲线定义试件的初始刚度  $K_{ie}$ <sup>[19]</sup> 和使用阶段刚度  $K_{se}$ <sup>[19]</sup>, 则  $K_{ie}$  与  $m'$  的关系如图 14 所示,  $K_{se}$  与  $m'$  的关系如图 15 所示。可见,  $K_{ie}$  和  $K_{se}$  均随着  $f_{cu}$  和  $m'$  的增加而增大, 说明纵向 CFRP 的增加可以有效提高试件的刚度。

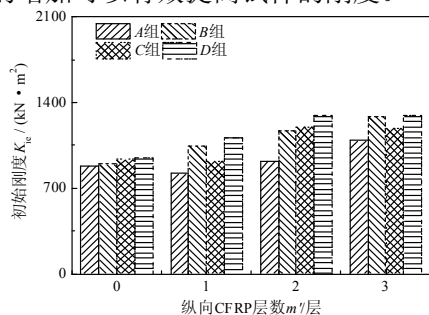


图 14  $K_{ie}$ - $m'$  曲线

Fig.14  $K_{ie}$ - $m'$  curves

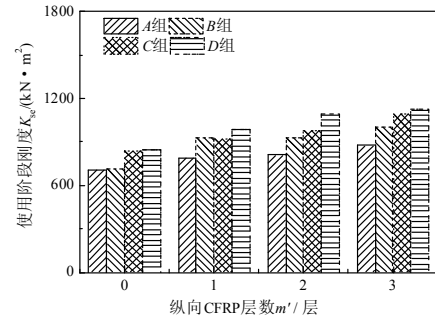


图 15  $K_{se}$ - $m'$  曲线

Fig.15  $K_{se}$ - $m'$  curves

## 4 结论

由对方 CFRP-钢管混凝土受弯构件的理论分析和抗弯承载力的计算, 在本文研究的参数范围内, 可以初步得到以下结论:

- (1) 对钢管、混凝土和 CFRP 的应力和应变等的分析结果均能解释实验现象。
- (2) 钢管与混凝土的相互作用力集中分布在角部, 平板区域的数值相对很小。
- (3) 定义了 S-CFRP-CFST 受弯构件的抗弯承载力指标, 给出了计算表达式, 可以合理计算试件的抗弯承载力。

### 参考文献:

- [1] 王庆利, 赵颖华, 顾威. 圆截面 CFRP-钢复合管混凝土结构的研究[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 2003, 19 (4): 272-274.  
Wang Qingli, Zhao Yinghua, Gu Wei. A presumption on the concrete filled circular CFRP-steel composite tube structures [J]. Journal of Shenyang Architecture and Civil Engineering Institute, 2003, 19 (4): 272 - 274. (in Chinese)
- [2] Tao Zhong, Han Linhai, Zhuang Jinping. Axial loading behavior of CFRP strengthened concrete-filled steel tubular stub columns [J]. Advances in Structural Engineering, 2007, 10 (1): 37-46.
- [3] Xiao Y, He W H, Choi K K. Confined concrete-filled tubular columns [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2005, 131 (3): 488-497.
- [4] 王庆利, 王金鱼, 张永丹. CFRP-钢管砼轴压短柱受力性能分析[J]. 工程力学, 2006, 23 (8): 102-105.  
Wang Qingli, Wang Jinyu, Zhang Yongdan. Mechanical property analysis on the concentrically compressed concrete filled circular CFRP-steel tubular stub columns [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23 (8): 102-105. (in Chinese)
- [5] 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 Qingli, Ye Mao, Zhou Lin. Study on flexural behaviour of the concrete filled circular CFRP-steel tubular members [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41 (10): 30—38. (in Chinese)
- [6] 孙涛, 王庆利, 邵永波, 等. 圆 CFRP-钢管混凝土受弯性能研究[J]. 建筑结构学报. 2009, 30 (增 2): 255—260. Sun Tao, Wang Qingli, Shao Yongbo, et al. Study on flexural performances of the concrete filled circular CFRP-steel tubes [J]. Journal of Building Structures. 2009, 30 (suppl. 2): 255—260. (in Chinese)
- [7] 王庆利, 车媛, 谭鹏宇, 邵永波. CFRP-钢管混凝土结构研究的进展与展望[J]. 工程力学, 2010, 27 (增 2): 48—60. Wang Qingli, Che Yuan, Tan Pengyu, Shao Yongbo. Progress and prospect in rearch on concrete filled CFRP-steel tubular structures [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27 (Suppl. 2): 48—60. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] Park J W, Hong Y K, Hong G, et al. Design formulas of concrete filled circular steel tubes reinforced by carbon fiber reinforced plastic sheets [J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 2916—2922.
- [10] 王庆利, 周博, 谭鹏宇, 邵永波. 圆 CFRP-钢管混凝土压弯构件静力性能研究[J]. 工程力学, 2012, 29 (增 2): 154—158. Wang Qingli, Zhou Bo, Tan Pengyu, Shao Yongbo. Static performance of the concrete filled circular CFRP-steel tubular (C-CFRP-CFST) beam-column [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29 (Suppl 2): 154—158. (in Chinese)
- [11] Li S Q, Chen J F, Bisby L A, Hu Y M, Teng J G. Strain efficiency of FRP jackets in FRP-confined concrete-filled circular steel tubes [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2012, 12 (1): 75—94.
- [12] Che Y, Wang Q L, Shao Y B. Compressive performances of the concrete filled circular CFRP-steel tube (C-CFRP-CFST) [J]. International Journal of Advanced Steel Construction, 2012, 8 (4), 311—338.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 王庆利, 薛阳, 邵永波, 等. CFRP 约束方钢管混凝土轴压短柱的静力性能研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44 (3): 24—31. Wang Qingli, Xue Yang, Shao Yongbo, et al. Study on stetic performances of concentrically compressed concrete filled square steel tubular stub columns confined by CFRP [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44 (3): 24—31. (in Chinese)
- [16] 王庆利, 车媛, 叶茂. CFRP 增强方截面钢管混凝土受弯性能研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44 (增): 17—23. Wang Qingli, Che Yuan, Ye Mao. Research on flexural performances on the CFRP confined concrete filled steel tube with square cross-section [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44 (Suppl): 17—23. (in Chinese)
- [17] 王庆利, 车媛, 叶茂. CFRP 约束方钢管混凝土轴压性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44 (增 1): 43—50. Wang Qingli, Che Yuan, Ye Mao. Analysis on axial compressive performance of the concrete filled square CFRP-steel tubes (S-CFRP-CFST) [J]. Journal of Harbin institute of Technology, 2012, 44 (Suppl 1): 43—50. (in Chinese)
- [18] Sundarraja M C, Ganesh Prabhu G. Experimental study on CFST members strengthened by CFRP composite under compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 72: 75—83.
- [19] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2007: 70, 28, 180. Han Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007: 70, 28, 180. (in Chinese)