

文章编号: 1004-4353(2013)03-0219-05

# CFRP-薄壁圆钢管混凝土组合短柱的 非线性有限元分析

李冉<sup>1</sup>, 姜作峰<sup>2</sup>, 马丽娜<sup>2</sup>, 张鸿梅<sup>1\*</sup>

(1. 延边大学工学院 土木工程系, 吉林 延吉 133002;

2. 延边建设工程质量检测鉴定有限公司, 吉林 延吉 133002)

**摘要:** 利用 ANSYS 软件建立了 CFRP-薄壁圆钢管混凝土组合短柱、钢管混凝土柱、素混凝土柱对比柱的三维有限元模型, 并对分析上述 3 种构件在轴压作用下的延性和极限承载力的差异. 研究表明: CFRP-薄壁圆钢管混凝土柱的极限承载力比钢管混凝土柱有较大提高(模拟的单层粘贴构件约提高 11%, 双层粘贴构件约提高 25%), 且整体刚度好, 表现为弹性阶段轴向位移小, 当 CFRP 断裂后, 钢管能继续提供塑性支持; 钢管混凝土柱的极限承载力比素混凝土柱提高约 4 倍, 延性也得到很大改善; ANSYS 模拟值与文献[1]中的试验值和计算值吻合较好.

**关键词:** CFRP-薄壁圆钢管混凝土; 非线性有限元分析; 应力应变

**中图分类号:** TU375.3

**文献标识码:** A

## CFRP-thin walled round steel tube concrete short column combination of nonlinear finite element analysis

LI Ran<sup>1</sup>, JIANG Zuofeng<sup>2</sup>, MA Lina<sup>2</sup>, ZHANG Hongmei<sup>1\*</sup>

(1. Department of Civil Engineering, College of Engineering, Yanbian University, Yanji 133002, China;

2. Yanbian Construction Engineering Quality Detection Appraisal Co. Ltd., Yanji 133002, China)

**Abstract:** We established the three-dimensional finite element model of CFRP-thin-wall round steel tube composite short column, Concrete filled steel tube column, plain concrete column by the ANSYS software, and contrastive analysis the difference of ductility and ultimate bearing capacity of the three artifacts under the axial force. The results showed that: The Ultimate bearing capacity of the CFRP-thin-wall round steel tube composite short column was largely enhanced than that of the Concrete filled steel tube column (The simulation component in this paper single-layer paste increased by 11%, double paste by 25%), and the overall stiffness is good which show up as the small axial displacement on the elastic stage, after the CFRP broke, the steel pipe could provide constant support. The Ultimate bearing capacity of the Concrete filled steel tube column can be enhanced about 4 times than that of the plain concrete column, and the ductility also had been improved greatly. The Simulation result of the ANSYS can match well with the test result and the calculation result of the literature [1].

**Key words:** CFRP-thin-wall round steel tube concrete; nonlinear finite element; stress-strain

CFRP-钢管混凝土柱属于约束混凝土柱, 是指在钢管外缠绕单层或多层碳纤维布, 管内填充

混凝土形成 3 种材料组合的圆形或矩形截面构件<sup>[1]</sup>. 在约束混凝土构件的有限元分析中, 丁发兴

收稿日期: 2013-03-24

\* 通信作者: 张鸿梅(1959—), 女, 教授, 研究方向为结构检测与加固.

等<sup>[2-3]</sup>基于给定的混凝土轴对称三轴受压应力-应变关系和钢材本构模型,采用弹塑性法对圆钢管混凝土轴压短柱进行了全过程分析,并对混凝土轴对称三轴受压应力-应变全曲线计算公式进行了修正,使其弹塑性全过程分析结果更为合理.顾威等<sup>[4]</sup>利用 ANSYS 软件对 CFRP-钢管混凝土轴压短柱的应力应变关系进行了数值模拟,并将模拟值与计算值进行比较,结果表明其吻合性良好.毛明扬等<sup>[5]</sup>基于 ABAQUS 软件对圆 CFRP-钢管混凝土轴压短柱的截面应力分布和构件破坏模态进行了模拟分析,但目前对 CFRP-薄壁圆钢管混凝土短柱的 3 种材料之间的相互作用和受力机理的对比分析相对较少,因此本文利用 ANSYS 软件建立

CFRP-薄壁圆钢管混凝土短柱的三维模型,模拟其在轴压力作用下的极限承载力和变形能力,分析 3 种构成材料的受力机理,并与等混凝土截面的圆钢管混凝土柱和素混凝土柱作对比分析.

## 1 试件模型介绍

构件的主要参数取自文献[1],编号参见表 1.混凝土的强度等级为 C30,弹性模量为  $3.0 \times 10^4$  MPa,泊松比为 0.2;钢管壁厚为 4.5 mm,外径为 133 mm,屈服强度取 310 MPa,弹性模量为  $2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比为 0.33;碳纤维布单层厚度为 0.167 mm,抗拉强度为 3 000 MPa,弹性模量为  $2.42 \times 10^5$  MPa.

表 1 构件编号及主要参数

编号	构件尺寸 ( $D \times L/\text{mm}^2$ )	钢管壁厚 ( $t/\text{mm}$ )	CFRP 层数 ( $n$ )	钢管套箍 系数( $\xi$ )	碳纤维套箍 系数( $\xi$ )	总套箍 系数( $\xi$ )	径厚比 ( $D/t$ )
PCZ	124 × 400	—	—	—	—	—	—
CFSTZ	133 × 400	4.5	—	1.278	0	1.278	29.9
CFRP-CFSTZ-1	133 × 400	4.5	1	1.278	0.238	1.516	29.9
CFRP-CFSTZ-2	133 × 400	4.5	2	1.278	0.478	1.756	29.9

注:PCZ 表示素混凝土柱,CFSTZ 表示钢管混凝土柱,CFRP-CFSTZ 表示 CFRP-圆钢管混凝土柱,一表示无或零.

## 2 有限元模型的建立

### 2.1 单元类型的选择

本文中的混凝土选用 solid 65 单元,该单元可以综合考虑由塑性和徐变引起的材料非线性、大位移引起的几何非线性、混凝土开裂(3 个正交方向)和压碎引起的非线性等多种混凝土材料特性<sup>[6]</sup>.钢管和垫板选用 solid 45 单元,该单元具有塑性、蠕变、膨胀、应力强化、大变形和大应变等功能<sup>[6-7]</sup>.由于 CFRP 筒厚度非常小,若采用实体单元,则网格划分十分困难,即使网格划分成功也会产生形状奇异,导致无法计算.因此,本文采用 shell 181 单元对表层 CFRP 建模,该单元适合于较薄的壳体单元的建模分析和非线性大变形问题

的分析.

### 2.2 材料的本构关系的选择

混凝土的本构关系采用文献[8]提出的钢管混凝土的核心混凝土的应力应变关系模型.钢管采用理想的线弹性模型(Linear elastic)和双线性随动强化本构关系(BKIN)模型.碳纤维采用双线性随动强化本构关系(BKIN)模型.本构关系曲线如图 1 所示.

### 2.3 构件模型的建立和网格化

网格化控制单元尺寸为 10 mm.为防止应力集中现象,在构件的端部设置 15 mm 厚的刚性垫板.建模时不考虑 3 种材料之间的粘接滑移模型、对节点合并和压缩编号.网格划分如图 2 所示.

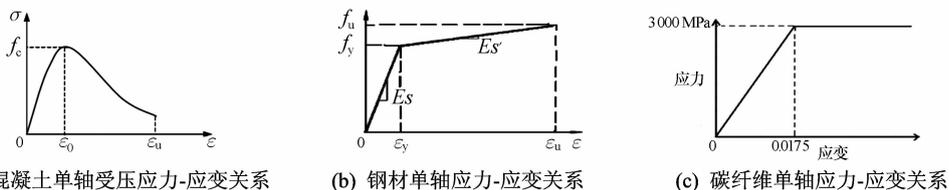


图 1 材料应力应变关系

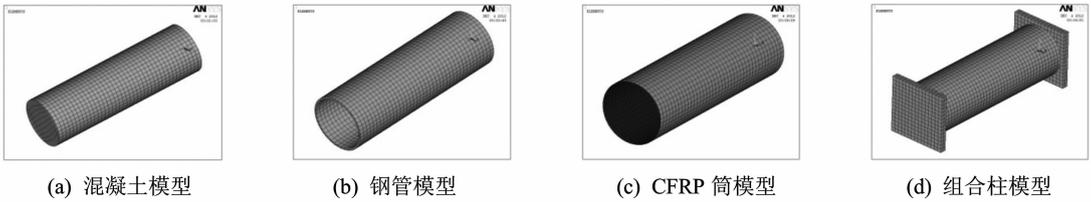
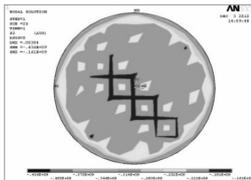


图2 网格划分示意图

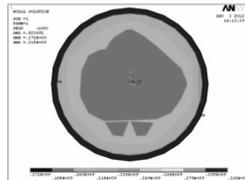
## 2.4 加载方案和相关参数的设置

加载时对构件底部施加  $x, y, z$  3 个方向的位移约束,顶部对垫板施加轴向面均布荷载.混凝土裂缝张开剪力传递系数和裂缝闭合剪力传递系数分别取 0.35 和 1.0.为使计算时收敛精度较好,关闭混凝土压碎选项.采用 ANSYS 软件自带 Willam-Warnke 五参数破坏准则.

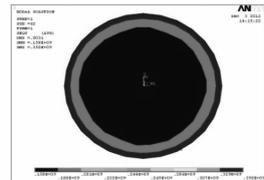
非线性选项:采用大变形静态分析,分 200 个子步骤(根据计算结果做相应调整),打开自动时间步长,每次最大迭代次数为 50,输出每步结果.非线性方程组的求解采用牛顿-拉普森迭代法(N-R法),采用残余力的二范数控制收敛,收敛容差设为 0.05.



(a) PCZ 截面应力云图



(b) CFSTZ 截面应力云图



(c) CFRP-CFSTZ-2截面应力云图

图3 端部截面 von Mises stress 应力云图

## 3.2 沿长度方向的环向应变

轴压力作用下 3 个构件各材料组成部分的 von Mises strain 应变云图如图 4 所示.对比图 4(a)、(b)和(d)可知:素混凝土柱的轴向应变分布随机性较大,呈端部小于中部;而钢管混凝土柱和 CFRP-圆钢管混凝土柱中部的应变变化较小,分布趋于均匀,从而有利于材料材性的发挥和利用率,延缓破坏.

对比图 4(c)和(e)可知,高强碳纤维会迫使钢管的高应变区沿构件中部向端部扩展延伸,分散钢管的应力集中,提高组合构件端部钢材的利用率.

从图 4(f)可以看出,在内部膨胀应力作用下,CFRP 会在构件的表面形成沿轴向的环状箍

## 3 ANSYS 软件的运行结果

### 3.1 截面应力

对比图 3(a)、(b)和(c)可以看出:素混凝土在没有外部约束的情况下,截面会产生贯穿于截面的网带状应力集中,应力分布分散,没有约束核心区域;相反,有径向约束时,混凝土截面中心区会形成约束核心区,阻碍微裂缝的扩散.对比图 3(b)和(c)可知,CFRP-CFSTZ 截面核心区应力较低( $0.158E9$ )且占截面比例明显高于 CFSTZ ( $0.172E9$ ).据以上结果可知,外部的高强碳纤维分担了截面上大部分的环向应力,因此核心混凝土低应力区较大,即提高了构件的继续承载能力.

效应,协助钢管进一步限制内部混凝土微裂缝的扩展,提高构件的承载力;同时,由于碳纤维布的断裂伸长率(约为 1.72%)远远小于钢管的伸长率(约为 26%);因此,CFRP 的存在大大限制了弹性阶段钢管的变形,提高了构件的整体刚性.当 CFRP 断裂后,钢管随之发生塑性破坏,这与文献[1]实际试验中发现的 CFRP 在组合构件中的作用相吻合.

### 3.3 构件的应力分析

从图 5(a)和(b)可以看出,PCZ 表面应力分布均匀,CFSTZ 表面应力呈中间大而端部小.由此表明,钢管的存在使构件在表面产生内力重分布现象,中部先于端部产生鼓曲破坏,这与文献[5]中对试验后构件的破坏模态的描述相吻合.

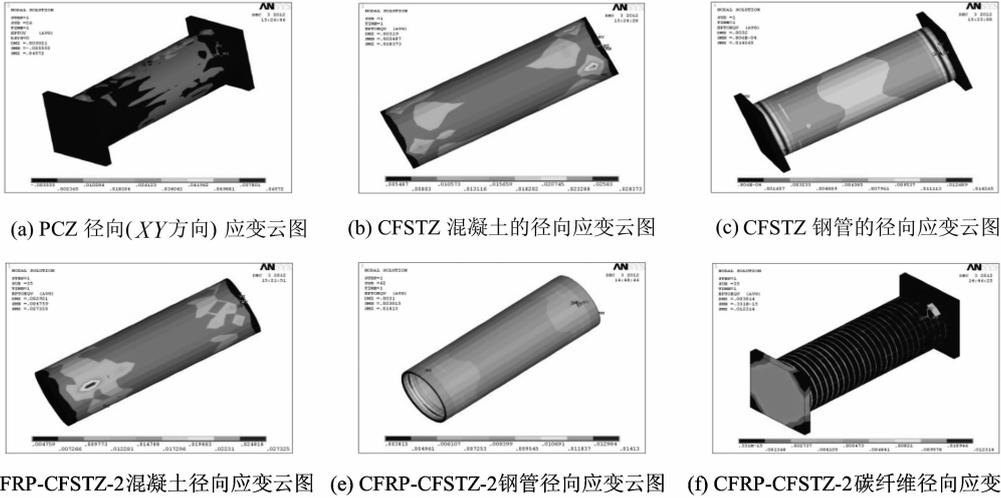


图 4 构件各组成部分沿长度方向的径向应变云图

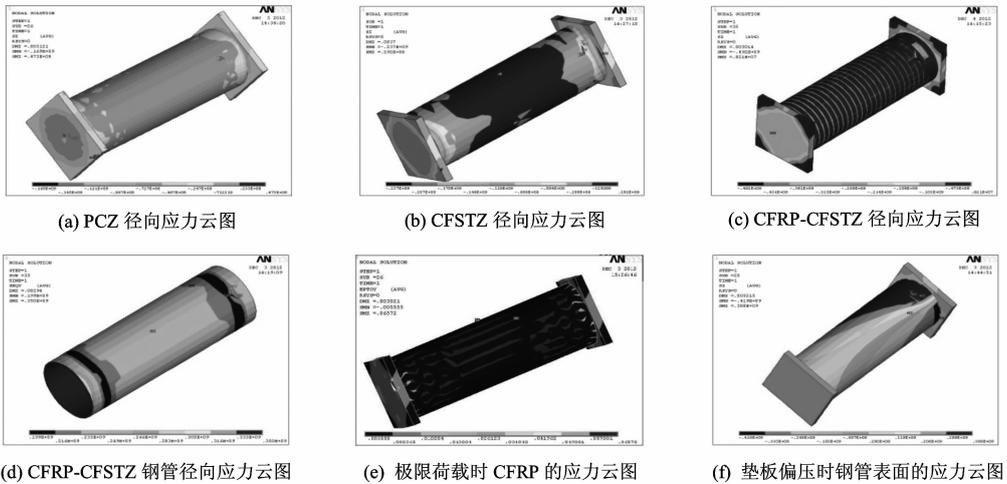


图 5 构件表面沿长度方向的径向应力云图

从图 5(c)可以看出,CFRP 在内部的膨胀应力下形成沿轴向的均匀分布的强应力环,最大应力位于中部.对比图 5(b)和(d)可知;CFRP-CFTZ 柱中钢管的应力沿轴向没有发生明显的突变,而是相对均匀地展开,最大值在中部( $0.350E9$ ),与端部( $0.199E9$ )的相差不大;而 CFTZ 则发生明显突变,中部最大为  $0.292E8$ ,端部最小为  $0.137E7$ ,甚至有受压区为  $-0.237E9$ ,与端部的相差大,这表明 CFRP 限制了钢管的变形,增强了构件在持荷段的刚性.

对比图 5(e)和(c)可知,极限荷载时构件中部区域某个应力环处 CFRP 达到其抗拉极限而断裂,附近的径向应力在此处集中释放,引起沿轴向的带状撕裂破坏,这与文献[9]试验时的破坏状

况相吻合.

### 3.4 位移分析

PCZ、CFSTZ 和 CFRP-CFSTZ 的轴向极限位移值分别为  $3.121$ ,  $3.705$  和  $3.014$  mm,极限荷载时 CFSTZ 的轴向位移比 PCZ 提高约  $18.7\%$ .碳纤维断裂时 CFRP-CFSTZ 比 CFSTZ 轴向位移低,表明其弹性阶段的刚度优于 CFSTZ;碳纤维达到极限承载力断裂后,构件的受力形式同 CFSTZ 类似,钢管继续提供构件破坏阶段的塑性支持.

### 3.5 垫板

为防止应力集中,通常在构件端部焊接刚性垫板.但是在模拟时发现,钢板直接与钢管连接,很容易造成偏压的现象(图 5(f)),这是由于焊

缝、垫板的变形和接触面的传力不均等因素所致。因此,建议在试验时将垫板直接置于构件端部(不与钢管焊接),并且在接触面铺上柔性传力介质,如细沙。

### 3.6 极限承载力

本文在构件设计时,采用了与文献[1]相同的构件尺寸,以便将模拟值与文献[1]中的实验值和

计算值进行比较。计算结果见表2。表2的结果表明,钢管能够大幅提高核心混凝土的极限承载力(约4倍);当在圆钢管混凝土柱外表粘贴碳纤维时,极限承载力的提高幅度也较大,单层粘贴构件约提高11%,双层粘贴构件约提高25%。ANSYS模拟值与文献[1]中计算值和试验值之间的吻合程度较好。

表2 ANSYS有限元值与文献[1]中的计算值和实验值的比较

编号	文献[1]中的计算值				文献[1]中的试验值				ANSYS 模拟值	ANSYS 试验值	ANSYS 计算值
	(1)	(2)	(3)	均值	(1)	(2)	(3)	均值			
PCZ	—	—	—	362.1	—	—	—	—	401.3	—	1.108
CFSTZ	1 565.1	1 402.4	1 562.9	1 501.1	1 527	1 527	1 527	1 527	1 625.1	1.064	1.083
CFRP-CFSTZ-1	1 727.8	1 594.4	1 688.4	1 670.2	1 698	1 698	1 698	1 698	1 784.8	1.051	1.069
CFRP-CFSTZ-2	1 887.4	1 786.9	1 814.2	1 829.5	1 864	1 864	1 864	1 864	2 070.0	1.110	1.130

## 4 结论

本文利用ANSYS软件模拟了素混凝土柱、径厚比均为29.9的CFRP-薄壁圆钢管混凝土组合短柱、钢管混凝土柱在轴压力作用下的破坏过程,并分析了各构件的应力应变云图和CFRP的受力机理,得出如下结论:

1) CFRP-薄壁圆钢管混凝土轴压短柱中,CFRP扩大了截面的约束核心区,提高了构件的承载力。CFSTZ的极限承载力比PCZ有约4倍的提高。CFRP-CFSTZ的极限承载力比起CFSTZ提高幅度也较大,模拟结果表明单层粘贴构件约提高11%,双层粘贴构件约提高25%。ANSYS模拟值与文献[1]中试验值和计算值的吻合程度较好。

2) CFRP-薄壁圆钢管混凝土轴压短柱中,高强CFRP在受荷时迫使钢管中部的集中应力区向端部扩散,提高了钢管的利用率。CFRP的应力效应是沿构件轴向的环箍状,能够提高构件的整体刚性。

3) 建议在试验时,将加载垫板直接置于构件端部,并在接触面上铺柔性介质,如细沙。

4) 本文在构件设计时,为了与文献[1]的试验值做对比,截面的径厚比均取为29.9,而在实际工程中径厚比的取值范围为20~80。因此,在

今后的研究中,需进一步探讨径厚比对该类构件力学性能的影响。

### 参考文献:

- [1] 孙国帅,于铁汉,董松员,等. CFRP-钢管混凝土结构的发展与研究综述[J]. 工业建筑,2007,37:575-578.
- [2] 丁发兴,周林超,余志武,等. 钢管混凝土轴压短柱非线性有限元分析[J]. 中国科技论文在线,2009(7):472-479.
- [3] 丁发兴,余志武,蒋丽忠. 圆钢管混凝土结构非线性有限元分析[J]. 建筑结构学报,2006,27(4):110-115.
- [4] 顾威,李宏男,张美娜. CFRP钢管混凝土轴压短柱混凝土本构关系[J]. 大连理工大学学报,2011.51(4):548-548.
- [5] 毛明扬,王庆利,谭鹏宇. 圆CFRP钢管混凝土轴压短柱静力性能分析[A]. 第18届全国结构工程学术会议论文集第一册[C]. 广州,2009.
- [6] 江见鲸. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [7] 张平,李佰寿,郑玉今. 带肋薄壁方钢管混凝土组合柱的非线性有限元分析[J]. 混凝土与水泥制品,2011,8:31-34.
- [8] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州大学,2005.
- [9] 顾威. CFRP钢管混凝土柱的力学性能研究[D]. 大连海事大学,2007.