

碳纤维布加固钢管轴压短柱有限元分析

李兆阳,高小育,陈沿辰

(长安大学公路学院,西安 710064)

摘 要:以碳纤维布加固圆形钢管短柱轴压试验为依托,综合考虑纤维布的力学性能,提出一种新的轴压 CFRP 钢管的数值模拟方法。对纤维束沿环向和双向粘贴的加固试件进行有限元模拟,进而针对试验及有限元结果,对 CFRP 钢管的加固机理进行力学分析。结果表明,环向纤维通过拉力提供环向约束以限制钢管屈曲变形的发展;轴向纤维在加载之初为受压状态,并可承担部分压力,随着屈曲变形发展,部分轴向纤维转变为受拉状态,进而对试件变形起到限制作用,提高了构件的延性。

关键词:碳纤维布加固圆形钢管;轴压稳定性;有限元;纤维方向

中图分类号:TB115

文献标志码:A

引 言

近年来,钢管结构因其具有自重轻、强度高、良好的延性以及抗震性能等诸多优势在工民用建筑以及桥梁结构领域得到越来越多的应用。然而,钢管结构也同样面临着易腐蚀、疲劳性能差以及易发生局部失稳等问题。因此,为保证结构的安全运营,随着使用年限的增加,往往需对其进行加固。传统的加固方法往往采用粘结剂、焊接等方法将钢板固定于钢管表面来提高截面强度,但其不可避免地存在残余应力、增加自重、影响美观等诸多问题。碳纤维增强复合材料(CFRP)因具有刚度大、耐腐蚀以及施工简便等诸多优势,能够较好地弥补传统加固方法的不足^[1],目前,碳纤维材料加固修复混凝土结构已得到了较为成熟的研究及应用^[2]。但国内外对碳纤维加固修复钢结构领域却涉足相对较少,现有的关于纤维材料加固钢结构的研究大多集中在梁、板的抗弯加固^[3]、抗拉加固^[4]以及界面性能研究^[5]等,而较少涉及碳纤维加固钢管的轴压稳定性研究。

目前,碳纤维加固钢管的研究大多处于试验分析阶段^[6-7],有关此类加固构件的受力机理以及有限元分析

的研究还相对较少。CFRP 钢管中纤维材料的受力较为复杂,需同时考虑纤维材料的正交异性、本构关系的非对称性以及纤维的脆性断裂、损伤演化等问题,都给有限元分析带来了一定的障碍。Teng J G 和 Hu Y M^[8]曾采用 ABAQUS 梁单元对 CFRP 钢管中的纤维进行模拟,将纤维布沿其纤维方向分成一系列条状,进而简化为若干矩形截面的梁单元,得到与试验较为接近的计算结果;Shaah A 和 Fam A^[9]采用同样的简化方法,运用 ANSYS 的桁架单元对 CFRP 钢管中的纤维进行了模拟,而得到的计算结果较试验偏低;Mohammad Z^[10]综合考虑了纤维材料正交方向的强度,采用正交异性壳单元建立 ABAQUS 有限元模型,对存在材料缺陷的 CFRP 钢管进行了模拟,且考虑了碳纤维材料基于 hashin 准则的渐进损伤过程,得到的结果精度较高。

但现有的有限元分析方法中,往往对纤维材料的受力状态考虑不够完善,过度简化的线单元无法对纤维布的正交方向的力学性能做具体分析,同时壳单元又存在对纤维布抗弯刚度过高估计等问题,以及碳纤维加固钢管的受力机理未做具体探讨。因此本文依托 Sundararaja M C^[11]和 Haedir J^[12]关于 CFRP 圆形钢管轴压试验结

收稿日期:2015-08-29

作者简介:李兆阳(1990-),男,吉林长春人,硕士生,主要从事碳纤维加固方面的研究,(E-mail)695133472@qq.com;

高小育(1973-),男,陕西西安人,讲师,博士,主要从事碳纤维加固方面的研究,(E-mail)xygao@chd.edu.cn

果,提出一种新的有限元分析方法,并对环向及纵向纤维的加固机理以及受力状态进行了分析。

1 试验概况

1.1 试验样品

CFRP 钢管按纤维束的粘贴方向可分为按钢管环向粘贴,轴向粘贴或同时按环向、轴向粘贴几种方式。在粘贴碳纤维布之前,钢管表面需预先粘贴一层玻璃纤维(GFRP)以防止碳纤维与钢管直接接触发生电化学腐蚀。各层纤维布以及纤维布与钢管之间均采用环氧树脂粘结。本文钢管试件外径为 139.7 mm,长度为 600 mm,管壁厚度为 4.8 mm 的短柱,并通过拉伸试验测得钢材的平均屈服强度为 303.15 MPa。碳纤维布采用 MBrace CF240,其抗拉弹性模量为 240 GPa,抗拉极限强度为 3800 MPa,单层纤维布厚度为 0.234 mm。本次试验纤维束采用按钢管环向粘贴,分别对未加固钢管以及加固 1 层(C-T1)和 2 层(C-T2) CFRP 的试件进行轴压试验。

1.2 试验设备

CFRP 钢管的轴压试验在 2000 kN 的液压设备上进行。在加载之前要精确设置试件的位置,以保证试件尽量接近轴压状态,采用液压千斤顶进行加载。加固构件的轴向压缩位移由固定在加载端的位移传感器记录,加载模块和位移传感器均与数据采集系统相连接,以记录各项数据。试验过程缓慢进行加载,直至试件发生破坏失效,同时观察试件的加载变形过程并记录其稳定承载力。

1.3 试验结果

通过试验观察发现,所有试件均表现为局部屈曲破坏,较为典型的失稳模态为象脚屈曲,在试件端部产生环状向外的局部屈曲,如图 1 所示,当轴压试件受力比较均匀且加载误差较小时易发生此类失稳破坏。外层纤维布的破坏发生在钢管向外局部屈曲的端部,如图 2 所示。纤维布由于屈曲变形受到环向拉力而断裂,这说明纤维布与钢管之间存在可靠的粘结,界面间未发生滑移和剥离破坏。加固 2 层试件产生了内凹屈曲的失稳形式,这主要是由于纤维布对钢管向外屈曲起到一定的约束作用导致的,且纤维布的存在明显推迟了钢管失稳的发生,对试件变形的发展起到了有效控制。试验得到了各个试件的稳定承载力,见表 1。并得到如图 3 所示的名义应力-应变曲线。由此可知,随着加固层数的增加,试件的承载力随之升高,并具有较好的延性。



图 1 象脚屈曲



图 2 CFRP 钢管的屈曲变形

表 1 试验结果

试件编号	稳定承载力/kN	轴向变形
C-T1	1190	5.32
C-T2	1230	4.57

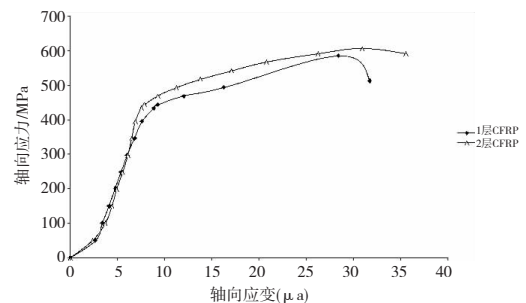


图 3 CFRP 钢管名义应力-应变曲线

2 有限元分析

本文采用通用有限元软件 ABAQUS 对 CFRP 钢管进行数值模拟,本次数值分析对应轴压试验分别建立三组有限元模型,各向材料参数均按试验参数取值。

2.1 模型建立

由于试验钢管属于薄壁结构,因此采用连续均质壳

单元 S4R 进行模拟, 钢材本构关系采用理想的弹塑性关系, 钢管几何尺寸以及材料参数按试验参数取值。

碳纤维布做为柔软的纤维织物, 可忽略其抗弯刚度, 因此, 本文采用膜单元 M3D4R 对其进行模拟。材料本构关系设置为线弹性, 同时为考虑其正交异性的特点, 将其材料的弹性属性定义为复合材料单层板, 各项参数定义见表 2, 其中 E1 为纤维方向的抗拉弹性模量, 按试验给定材料参数设置; E2 为垂直于纤维方向的弹性模量, 由于该方向没有纤维强度, 因此可按基体树脂弹模取值, 本文参考环氧树脂 Tyfo S 的材料参数; Nu12 为材料泊松比; G12、G13、G23 分别为材料各平面内剪切模量, 由于试验未对此项参数进行测试, 故参考文献 [10] 进行设置, 计算结果表明该项参数对结果无显著影响, 可将三者取值相同。根据试验中纤维按钢管环向粘贴, 故材料 1、材料 2 方向分别为钢管环向和轴向。

表 2 CFRP 有限元参数取值

E1/GPa	E2/GPa	Nu	G12/GPa	G13/GPa	G23/GPa
240	3.18	0.3	3.387	3.387	3.387

由试验可知, 钢管与纤维布之间粘结良好, 因此, 钢管与纤维以及各层纤维之间均设置为 tie 约束。同时, 根据试验条件, 模型边界条件固定端限制六个自由度, 加载端释放加载位移方向, 固定其余自由度。采用位移加载, 同时为了便于加载, 在构件两端建立解析刚体作为加载载体, 刚体与钢管之间采用 tie 约束。有限元模型以及网格划分情况如图 4 所示。

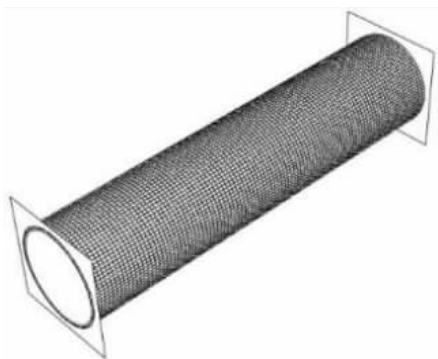


图 4 CFRP 钢管有限元模型

2.2 分析方法

在实际情况下, 由于试验构件本身存在材料和几何初始缺陷, 以及试验加载时存在仪器和操作等误差, 导致试件在加载过程中不是处于纯轴心受压状态, 这些试验设计之外的因素通常是诱发试件发生屈曲的主要原因。因此, 在对模型加载前需对计算模型加入初始缺陷来考虑试验中不可避免的偏差。

在 ABAQUS 中, 对于求解稳定问题, 往往采用模型

特征值屈曲的一阶屈曲模态来引入几何缺陷, 以此作为构件的初始缺陷。因此, 本文事先对钢管进行特征值屈曲分析, 采用 buckle 求解器。Buckle 求解器旨在利用特征值方法求解结构的屈曲模态以及相应的临界荷载, 基本原理如下式所示:

$$(K_0^{MN} + \lambda_i K_{\Delta}^{MN}) v_i^M = 0$$

其中: K_0^{MN} 为初始刚度矩阵, K_{Δ}^{MN} 为增量荷载刚度矩阵, v_i^M 为节点位移, λ_i 为特征值。

求解后, 得到钢管的特征值屈曲一阶模态如图 5 所示。通过手动修改模型关键字引入钢管的初始几何缺陷。

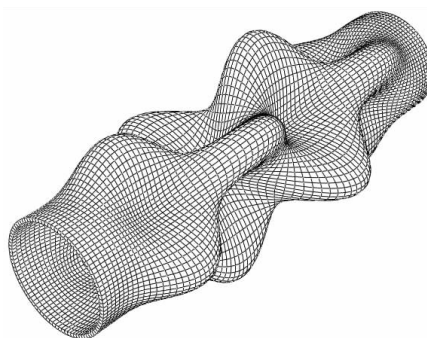


图 5 钢管一阶屈曲模态

试件屈曲全过程的模拟采用 riks 求解器求解, riks 求解器主要利用弧长法实现对应力 - 应变曲线极值区域及下降段的追踪。在 riks 分析中, 荷载被定义成比例的形式:

$$P_{total} = P_0 + \lambda(P_{ref} - P_0)$$

其中, P_0 为初始状态荷载, P_{ref} 为参考荷载, λ 为荷载比例系数。以参考荷载 P_{ref} 为基准, riks 分析步求出每一增量步的荷载比例系数, 进而得到每一增量对应的荷载值。

在进行非线性屈曲分析之前, 参考试验钢管稳定承载力, 根据特征值分析得到的屈曲模态对构件节点数据进行修改, 调试模态比例因子, 使模型计算的稳定承载力与试验值接近, 则认为模型的初始缺陷接近试件的试验状态。

2.3 有限元分析结果

求解得到钢管在轴压荷载作用下的屈曲变形以及与试验钢管变形对比, 如图 6 所示。运用同样的方法分别对加固 CFRP 的试件进行计算, 得到计算模型的屈曲变形以及与试验构件变形对比, 如图 7 所示。由图 6、图 7 可知, 由于纤维对钢管的约束作用, 致使试件的屈曲模态发生了变化。

提取计算结果, 得到如图 8 所示的名义应力 - 应变曲线, 并与相应的试验结果进行对比。通过曲线可以看



图 6 钢管的失稳变形



图 7 CFRP 钢管的失稳变形

出数值曲线与试验曲线趋势吻合较好。由于数值计算中钢管与纤维布的界面关系采用了 tie 约束,以及未考虑试件在加载过程中纤维布的损伤和断裂,导致数值计算刚度略高于试验。但整体趋势满足计算分析要求,说明本文采用的有限元模拟方法可靠。

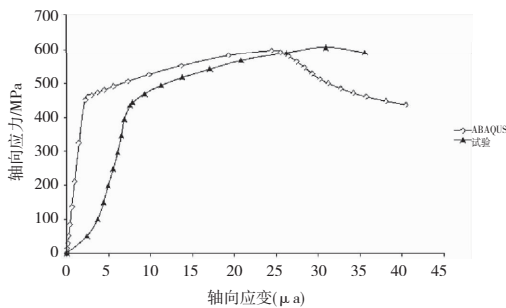


图 8 应力 - 应变曲线

3 环向粘贴碳纤维布钢管受力机理分析

根据有限元结果对 CFRP 钢管在轴压作用下的受力机理进行分析,为研究碳纤维在加载过程中的受力状态,提取在试件达到稳定承载力时刻外层纤维布的环向和轴向应力云图(图 9)。由图 9 可以看出,在极限承载

力时刻,纤维环向主要受拉应力,只有小部分区域因局部变形而进入了受压状态,因此,沿模型环向设置纤维的抗拉模量是合理的。同时由轴向应力云图可知,在极限承载力之前,纤维在沿试件轴向全部处于受压状态。

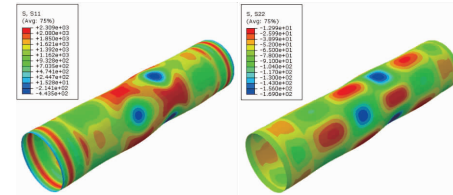


图 9 应力云图

为研究模型中纤维因局部变形而发生受力转换的区域在加载全过程的受力变化,根据数值结果的失稳模态,对其进行简化,得到如图 10 所示的截面变形。并提取典型受力节点 S1、S2 的荷载 - 应变曲线,如图 11 所示。由图 11 可以看出,在加载之初,纤维处于环向受拉状态,随着荷载的增加,在接近极限承载力时,环向纤维局部区域因构件发生屈曲变形而开始进入受压状态,但在稳定承载力之前,整体仍以环向受拉为主,因此,可忽略环向纤维受力转换对承载力的影响。综上分析,粘贴环向纤维的轴压钢管,纤维主要通过环向受拉而产生环向约束,进而限制钢管屈曲变形的发展,提高构件的稳定承载力以及构件的延性。

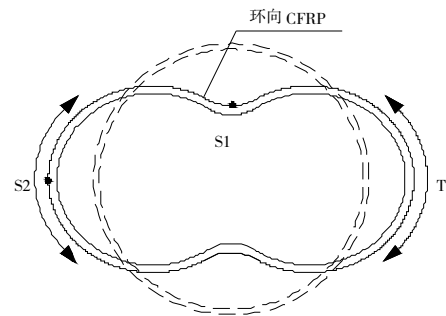


图 10 加固试件的横截面屈曲变形

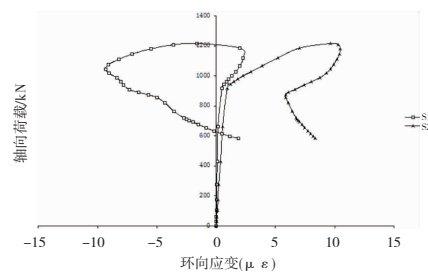


图 11 荷载 - 环向应变曲线

4 双向粘贴 CFRP 钢管力学分析

对于双向粘贴碳纤维的轴压钢管,由以上分析可

知,纵向纤维在加固试件失稳之前均处于受压状态,因此,为研究纵向纤维对加固试件力学性能的影响,基于以上有限元分析方法,并依托 Jimmy Haedir 的试验结果,对双向粘贴碳纤维试件的受力机理进行分析。

4.1 试验参数及结果

对为未加固钢管,环向、纵向分别各粘贴一层与两层钢管三组试件进行试验。试验钢管屈服强度和抗拉

极限强度分别为 455 MPa、507 MPa,弹性模量为 209.571 GPa。加固碳纤维布采用 MBbraceCF130,单向高强度碳纤维,单层厚度 0.176 mm,弹性模量为 230 GPa。环氧树脂采用 Araldite 420,其弹性模量为 1900 MPa,抗拉极限强度为 32 MPa。具体试件尺寸以及材料参数见表 3。

表 3 试验样品参数

试件编号	外径/mm	管壁厚度/mm	长度/mm	屈服强度/MPa	钢管弹性模量/GPa	碳纤维布弹性模量/GPa	加固形式
C-1	87.25	2.36	275	455	209.571		
CF-1A	87.23	2.32	275	455	209.571	230	2H2L
CF-1B	87.21	2.32	275	455	209.571	230	

试验过程与环向粘贴相同。加载后,得到加固的承载力(表 4)以及荷载-位移曲线(图 12)。

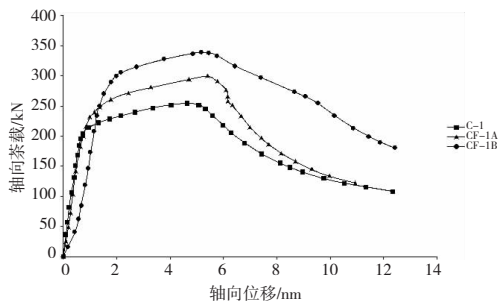


图 12 CFRP 钢管荷载-位移曲线

表 4 试验结果

试件编号	CF-1A	CF-1B
承载力/kN	299	341

4.2 有限元分析

轴向纤维在试件达到稳定承载力之前全部处于受压状态,因此,试件稳定承载力的一部分是源于轴向粘贴纤维的抗压贡献,而目前未见关于纤维布粘贴于构件表面承受压应力的研究,因此,本文将采用有限元分析方法进行探讨。经分析研究,碳纤维材料有限元参数按表 5 取值。其中纤维抗拉模量与环氧树脂模量均取试验参数,轴向纤维抗压模量取 100 GPa,其余参数环向粘贴相同。

表 5 CFRP 材料参数取值

纤维粘贴方向	E1/GPa	E2/GPa	Nu	G12/GPa	G13/GPa	G23/GPa
环向	230	1.9	0.3	3.387	3.387	3.387
轴向	1.9	100	0.3	3.387	3.387	3.387

建立有限元模型,求解得到各个试件的局部屈曲变形,并与试验构件进行对比,如图 13 所示。可以看出,纤维布的存在改变了构件的屈曲模态。

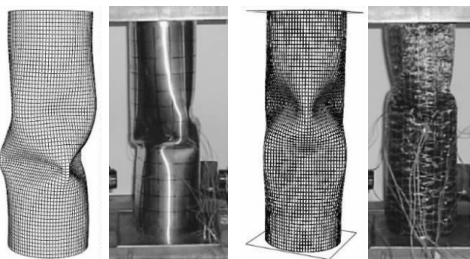


图 13 屈曲变形

图 14 为数值计算结果与试验结果对比。由图 14 知,有限元结果与试验结果稳定承载力较为接近,说明本文提出的轴向纤维抗压模量取值是合理的。而有限元计算结果相对于试验结果试件的后屈曲性能估计较为保守。

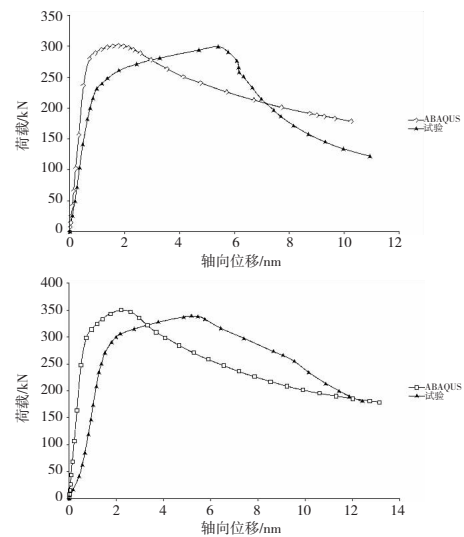


图 14 荷载-位移曲线

4.3 双向粘贴碳纤维布钢管受力机理分析

为分析加固钢管环向纤维与轴向纤维在加载过程

中的受力状态,利用有限元计算结果,分别提取环向纤维与轴向纤维在试件稳定承载力时刻的应力云图(图 15)。由图 15 可以看出,环向纤维仅部分纤维因屈曲变形而进入受压状态,大部分仍受环向拉力,而轴向纤维则全部处于受压状态。这与前文的分析结果一致。

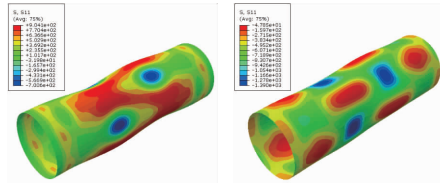


图 15 CFRP 应力云图

根据加固试件轴向局部屈曲模态,对其进行简化,得到如图 16 所示的试件的轴向屈曲变形,提取典型受力节点 S1、S2 的荷载-应变曲线(图 17),由图 17 可以看出,轴向纤维局部区域在试件失稳之后因过大的局部变形而进入受拉状态,这也说明了数值结果相对于试验后屈曲性能估计较低的原因,由于对轴向纤维有限元参数设置时仅考虑了试件失稳之前的受压状态,将其抗压模量相对于抗拉模量进行了折减,因此,对于后屈曲过程中轴向纤维的抗拉性能存在较低估计,进而导致有限元模型的延性性能低于试验结果。

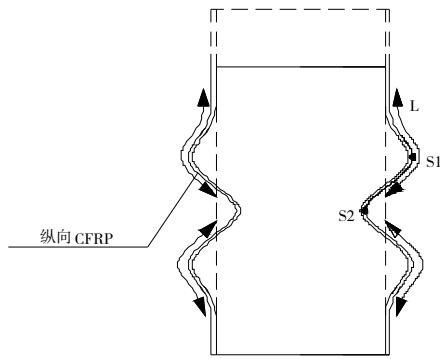


图 16 加固试件的轴向屈曲变形

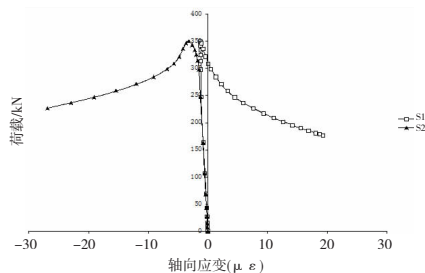


图 17 荷载-轴向应变曲线

综上所述,对于双向加固 CFRP 钢管,环向纤维的加固机理与前文分析类似。而轴向纤维在试件达到稳定承载力之前全部处于受压状态,由于加载初始阶段试件

变形较小,轴向纤维形成依附于钢管表面的筒状结构,这使其可以承担部分压力。碳纤维的抗压模量相对于抗压模量较低,需进行折减,本文取 100 GPa。随着失稳的产生,部分轴向纤维由于钢管的屈曲变形逐渐转换为受拉状态,进而起到限制试件变形发展的作用,提高试件的后屈曲性能。

5 结 论

分别以环向以及双向加固 CFRP 钢管轴压试验为依托,提出一种综合考虑碳纤维布材料性质的有限元分析方法,采用 ABAQUS 对两类加固构件进行数值模拟,并根据有限元计算结果,对 CFRP 钢管的受力机理进行分析,得到以下结论:

(1) 采用膜单元对碳纤维布进行有限元模拟,并根据纤维的实际受力状态采用复合材料单层板属性赋予材料方向,有限元计算结果与试验结果吻合较好,说明本文提出的数值分析方法可以作为碳纤维布加固结构数值模拟的一种研究方法。

(2) 对于环向粘贴碳纤维的钢管,纤维在加载过程中主要受环向拉力,通过对钢管的屈曲变形产生环向约束,限制变形的发展,进而提高构件的稳定承载力和延性。

(3) 对于双向粘贴碳纤维的钢管,环向纤维的受力状态与仅采用环向加固纤维钢管相似。而对于轴向纤维,在试件加载之初,纤维均处于受压状态,且由于纤维形成依附于钢管表面的筒状结构而可以承担部分压力。随着失稳的发生,部分纤维由于屈曲变形而逐渐转变为受拉状态,从而限制试件变形的发展以提高其后屈曲性能。

(4) 双向加固 CFRP 试件轴向纤维抗压弹性模量的取值仅以本文试验提出参考值,由于试验样品有限,未考虑加固构件长细比以及截面形状的变化对纤维布抗压模量的影响,关于更多影响因素的分析需要借助更多的试验研究。

(5) 本文提出的有限元分析方法对于采用轴向粘贴纤维布的 CFRP 钢管的后屈曲性能存在保守估计,未考虑纤维受力转换弹性模量的变化,同时忽略了纤维在加载后期发生断裂对结果的影响,这些因素需在未来研究中对有限元软件的材料子程序进行二次开发进行考虑。

参 考 文 献:

- [1] 季园园,韩庆华,芦艳,等.CFRP 在土木工程中的应用研究[J].结构工程师,2014,30(5):210-219.
- [2] 卢亦焱,黄银桑,张号军,等.FRP 加固技术研究新进

- 展[J].中国铁道科学,2006,27(3):34-42.
- [3] Hmidan A, Kim Y. CFRP Repair of Steel Beams with Various Initial Crack Configurations[J]. J. Compos. Constr., 2011, 15(6):952-962.
- [4] Alemdar F, Gange I R. Use of CFRP Overlays to Repair Fatigue Damage in Steel Plates under Tension Loading [J]. J. Compos. Constr., 2014, 18(4):04013052.
- [5] Fernando D T, Yu J G. Behavior of CFRP Laminates Bonded to a Steel Substrate Using a Ductile Adhesive [J]. J. Compos. Constr., 2014, 18(2):04013040.
- [6] Bambach M R, Jama H H, Elchalakani M. Axial capacity and design of thin-walled steel SHS strengthened with CFRP[J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47 (10): 1112-1121.
- [7] Ashvini A. Study on the Performance of CFRP Strengthened Circular Hollow Steel Sections[J]. International Journal of Research in Engineering and Technology 2015, 6(4):2319-1163.
- [8] Teng J G, Hu Y M. Behaviour of FRP-jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under axial compression [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(4):827-838.
- [9] Shaat A, Fam A. Finite Element Analysis of Slender HSS Columns Strengthened with High Modulus Composites [J]. Steel & Composite Structures, 2009, 7(1):19-34.
- [10] Kabir M Z, Nazari A. Enhancing Ultimate Compressive Strength of Notch Embedded Steel Cylinders Using Overwrap CFRP Patch[J]. Applied Composite Materials, 2012, 19(3-4):723-738.
- [11] Sundarraja M C. Experimental Investigation on the Behaviour of CHS Short Columns Strengthened Using FRP Composites under Compression[J]. International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering ISSN, 2014, 3(2):2319-5347.
- [12] Haedir J, Zhao X. Design of short CFRP-reinforced steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(3):497-509.

Finite Element Analysis of CFRP Strengthened Steel Tubular Short Columns Under Axial Compression

LI Zhaoyang, GAO Xiaoyu, CHEN Yanchen

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Based on the test of CFRP strengthened round steel tubular short columns under axial compression, a new numerical simulation method of CFRP steel tube under axial compression is carried out by overall consideration of mechanical properties of fiber cloth. The finite element modelling is conducted for the test specimens pasted along loop and bothway of fibre bundle. According to the test and the finite element results, the mechanical behavior of the reinforcement mechanism of CFRP is analysed. The results show that the hoop fiber layers restrict the development of buckling deformation of steel tube by providing the circumferential tensile force. The longitudinal fiber layers are in compression state at the beginning of loading and can undertake partial pressure. With the development of buckling deformation, some of the longitudinal fiber turn into tension state. Accordingly, the development of deformation is restricted, so the ductility of the test specimens is improved.

Key words: CFRP strengthened round steel tube; axial compression stability; the finite element; fiber direction