

CFRP 不同布置构造措施下加固方钢管柱有限元分析

完海鹰, 金煜明, 陈安英

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: CFRP 用来加固钢结构具有施工方便、安全等优点, 为了明确 CFRP 布布置间距对加固效果的影响, 有必要开展参数化分析研究。通过有限元模拟试验的方式来验证建模方式的准确性, 在此基础上进一步研究构造措施对方钢管柱的影响。模拟结果表明, 间隔环贴 CFRP 布对试件的影响主要在延性方面, 0~20 mm 的距离对其有利, 超过 20 mm 将产生不利影响; 40 mm、60 mm 间隔距离会严重削弱 CFRP 布的作用, 特别是 60 mm 间隔距离, 其作用与 375 mm 宽 CFRP 布的效果几乎一致, 造成材料的浪费。所建立的有限元模型可以很好的模拟试验加载过程, 作为一种有效的建模方式被采用。

关键词: 结构工程; CFRP; 方钢管柱; 构造措施; 延性; ABAQUS 有限元

中图分类号: TU391

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2021)04-006-06

Finite Element Analysis of Reinforced Square Steel Tubular Columns by Construction Measures of Different CFRP Arrangements

WAN Haiying, JIN Yuming, CHEN Anying

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: CFRP used to strengthen steel structure has the advantages of convenient construction and safety. In order to clarify the influence of CFRP layout spacing on reinforcement effect, it is necessary to carry out parametric analysis and research. The accuracy of the modeling method is verified by the way of finite element simulating test. On this basis, the influence of structural measures on the square steel tubular column is further studied. The simulant results show that the influence of circular CFRP cloth on the ductility of the specimen is mainly in the aspect of the distance of 0-20 mm, which is beneficial to the specimen, and more than 20 mm will have adverse effect. 40mm and 60 mm spacing will seriously weaken the effect of CFRP cloth, especially 60 mm spacing, which is close to the effect of 375 mm wide CFRP cloth, causing material waste. The established finite element model can simulate the loading process of the test very well, and is adopted as an effective modeling method.

Keywords: structural engineering; CFRP; square steel tubular column; structural measures; ductility; ABAQUS finite element

随着我国经济建设和科学水平飞速发展, 钢结构被广泛应用在建筑行业, 带来了良好的经济效益。但钢结构由于自身材料的缺陷导致了許多安全性问题, 这时候对结构采用合适的加固补强技术显得尤为重要。鉴于钢结构加固修复技术手段众多, 然而均存在工艺要求高、施工复杂、现场施工

条件苛刻、加固周期长和加固效果受各种因素制约等缺点, 选取合适的加固方式成为需要正视的问题。碳纤维增强复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Polymers, 简称为 CFRP) 具有传统加固修复技术所欠缺的无损加固这一优良性能被运用为一种高效实用的新型加固修复技术^[1-2], 为此有必要对其深

收稿日期: 2020-06-15

基金项目: 安徽省高校协同创新项目 (GXXT-2019-005)

作者简介: 完海鹰 (1960-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 钢结构。

入研究来加快其推广。

长安大学李兆阳^[3]运用有限元方法和纤维模型法以数值分析的方式研究了不同类型的 CFRP 材料加固钢管柱试件。研究表明,环贴 CFRP 基于环向约束效应的实现对试件的稳定承载力和延性有促进作用。纵向粘贴 CFRP 可以抑制钢管的屈曲变形,几何缺陷和径厚比增大对 CFRP 的加固效率有促进作用,增大长细比则作用相反。CFRP 在加固圆钢管柱和方钢管柱时,前者的加固效果好。

沈阳大学王军伟^[4]采用试验、理论、有限元模拟三者结合的方式来研究持载加固下的轴心受压试件,参数取用为持载程度、FRP 粘贴层数和粘贴方式。研究表明,持载加固会削弱试件受压承载力。三种 FRP 粘贴方式对轴心受压短柱试件的影响排序依次为全包加固、端部加固、中部加固。当 FRP 用量不变的时候,在试件端部加固可带来更好的效果。有限元模拟表示 FRP 加固对长短柱的效果不一,在轴压长柱上的效果更好。

合肥工业大学施文林^[5]通过对受压试件间隔粘贴 CFRP 布来研究其稳定承载力的变化,再结合有限元软件作进一步的研究,得到如下研究结论:40~60 mm 粘贴间隔的试件容易发生局部臃曲,30~40 mm 之间的粘贴间隔对于试件延性提高有显著作用。

日本学者松村政秀等^[6]采用 100 mm 截面边长、4.5 mm 壁厚的 1 400 mm 高方钢管柱试件来研究纵向粘贴 CFRP 材料的加固效果。试件均是在偏心 12 mm 距离下进行加载,CFRP 的粘贴形式包括沿全长无间隔、三等分间隔、三等分 V 型间隔、七等分间隔。试验结果表明:无间隔的粘贴方式最好,加固效果随等分数目的增多或每段 CFRP 长度的减少而降低。

伊朗学者 Narmashiri K^[7]等对宽 40 mm、厚度 2.5 mm、长度为 3 000 mm 的方钢管柱的临界屈曲荷载进行研究,选取不同支撑条件、CFRP 层数、CFRP 的粘贴率这些参数(支撑条件含有两端铰接、一固定一铰接、两端固定三种形式)。试验研究表明,CFRP 的覆盖率和层数对试件极限承载力有一定的影响。2 层 CFRP 粘贴在三种支撑形式的试件上,最优覆盖率均为 50%。

结合上述的研究结果可知,受压钢管柱的研究倾向于对构造措施的研究。故通过引用课题组前期的试验结果来建立合理的有限元模型,在此基础上深入研究构造措施对受压方钢管柱稳定性的影响。

1 试验情况概述

引用文献 8 中对 3 根 1 500 mm 高的方钢管受压试件的试验结果进行研究^[8],截面外径 $b=100$ mm,钢管壁厚 $t=4$ mm,计算可得构件长细比 $\lambda=38.24$,设计截面尺寸如图 1。

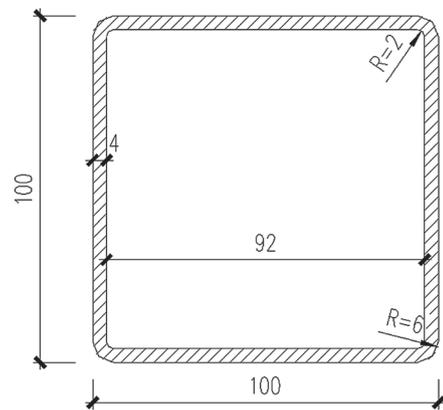


图 1 截面尺寸

试件均粘贴 2 层纵向 CFRP 布进行受压试件的研究,并粘贴环向 CFRP 布在纵向 CFRP 布外侧。为便于后续对试件的识别和说明,有必要对其编号进行解释说明。Z 代表 CFRP 布沿柱长方向粘贴在试件表面,符号前的数字代表层数,研究试件均为 2Z;E 代表偏心距离,符号前数字表示距离;M 代表在试件最外侧粘贴环向 CFRP 布作为构造措施,0M 为两端环贴 1 层,1M 为满布环贴 1 层,2M 为两端环贴以及试件中部 1/2 区域环贴 1 层,依次类推(其中两端环贴是为了防止试验加载时柱子两端因为应力集中导致局部 CFRP 布过早撕裂而影响试验结果),汇总试件编号如下表 1 所示。

表 1 试件编号及参数

编号	CFRP 层数	偏心距/mm	构造措施
2Z20E0M	2	20	两端环贴 1 层
2Z20E1M	2	20	满布环贴 1 层
2Z20E2M	2	20	两端、中部 1/2 环贴 1 层

表 2 试验结果

试件编号	初始缺陷 e/mm	极限承载力/ kN	承载力提高 /%	极限时跨 中挠度/mm
2Z20E0M	3.06	238.34	-	16.5
2Z20E1M	2.19	241.19	1.19	11.2
2Z20E2M	-0.50	240.34	0.83	12.0

通过表 2 可知,环贴 CFRP 布这种构造措施对试件受压承载力的提高意义不大,但是对柱中侧向位移的影响较大。其中 1/2 粘贴比例与全包粘贴效果接近,说明可以用 1/2 粘贴比例的环贴 CFRP 布来作为一种行之有效的构造措施。

2 ABAQUS 建模

2.1 初始缺陷的添加

首先建立所要研究的受压试件,对其采取 Buckle 分析,施加单位力进行静力加载。将屈曲模态引入同样的模型中作为初弯曲,采取位移加载的方式模拟试件受压全过程。

2.2 材料本构关系

为实现 CFRP 布的受压失效,对其赋予 Hashin 损伤^[9],在受压达到一定值后,CFRP 布将丧失抗压性能,只保留抗拉性能直到其受拉破坏^[10],故本次所建模型只采用两种材料:钢材和 CFRP 布。

钢材需考虑塑性变化,其应力应变变化过程中含有弹性阶段、塑性阶段、应变强化阶段等三个阶段,采用三折线模型,其本构关系如图 2 所示。CFRP 布材料本构关系如图 3 所示。其中建模所需材料属性来源于文献 8 中所述材性检测结果:钢材屈服强度为 242 MPa、弹性模量为 206 GPa、泊松比为 0.3、抗拉强度为 283 MPa、断裂伸长率为 26%。

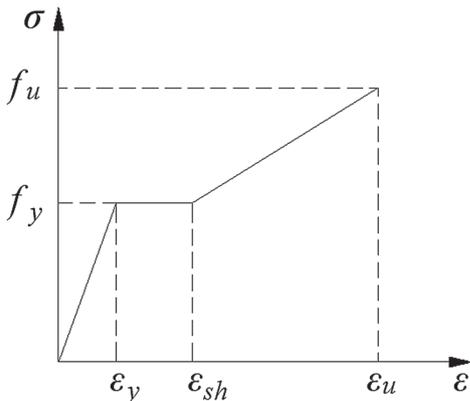


图 2 钢材本构关系模型

由于缺乏 CFRP 布的材性检测手段,故直接取用生产厂家的出场报告内相关内容,所用的 CFRP 布为日本东丽 UT70-30 (300 g/m²) 型,厚度 0.167 mm。力学性能为:受拉弹性模量为 240 GPa、抗拉强度 3 959 MPa、断裂伸长率为 1.72%。

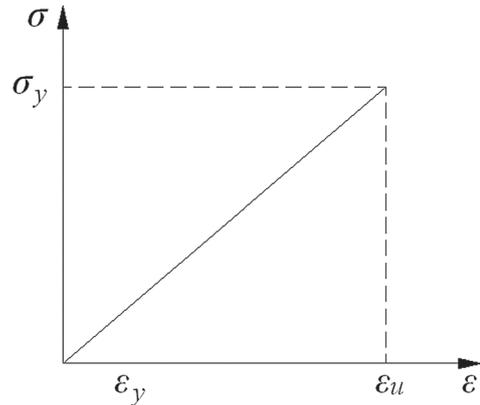


图 3 CFRP 布本构关系模型

2.3 建模要点

在柱两端设置参考点,作为柱两端受力面的耦合控制点,起到施加集中荷载的作用,防止直接施加集中力导致的沙漏问题,同时便于边界条件的施加。考虑到试验采取刀铰连接加载的方式,故试件在受压时只会沿着固定方向弯曲,非加载端设置只能绕 Y 轴旋转的约束条件,即 U1、U2、U3、UR1、UR3 均为 0;加载端设置有 Z 轴位移和可绕 Y 轴旋转的约束条件,即 U1、U2、UR1、UR3 均为 0。

加载方式分为位移加载和静力加载,Buckle 分析采用静力加载方式,引入初始缺陷后求解的非线性问题采用位移加载方式,这样可以达到很好的收敛性和良好的计算求解速度。

如图 4 所示,对于纵向粘贴 CFRP 布则加上 90 度旋转^[11],如此既可实现对两种不同方向 CFRP 布的材料方向设置。

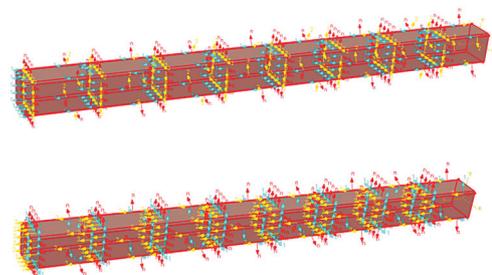


图 4 材料方向设置

2.4 单元选取

方钢管柱采用八节点线性六面体减缩积分单元 (C3D8R) 是比较适合的,因为 C3D8R 单元具有同其他单元建立良好的接触关系、可施加任意类型荷载、位移计算较为精确等特点。而对于 CFRP 布复合材料来说,考虑到 CFRP 布受力简单,故可以使用膜单元 M3D4R。采用膜单元在有效模拟

CFRP 布基础上,可显著增加计算速度,在 CFRP 布有限元建模中常被采用^[3]。

3 试验构件模拟结果分析

3.1 有限元模拟分析

如图 5 所示,由于建模时候 CFRP 布和钢管之间采取绑定连接的方式,故碳布的变形从侧面反映

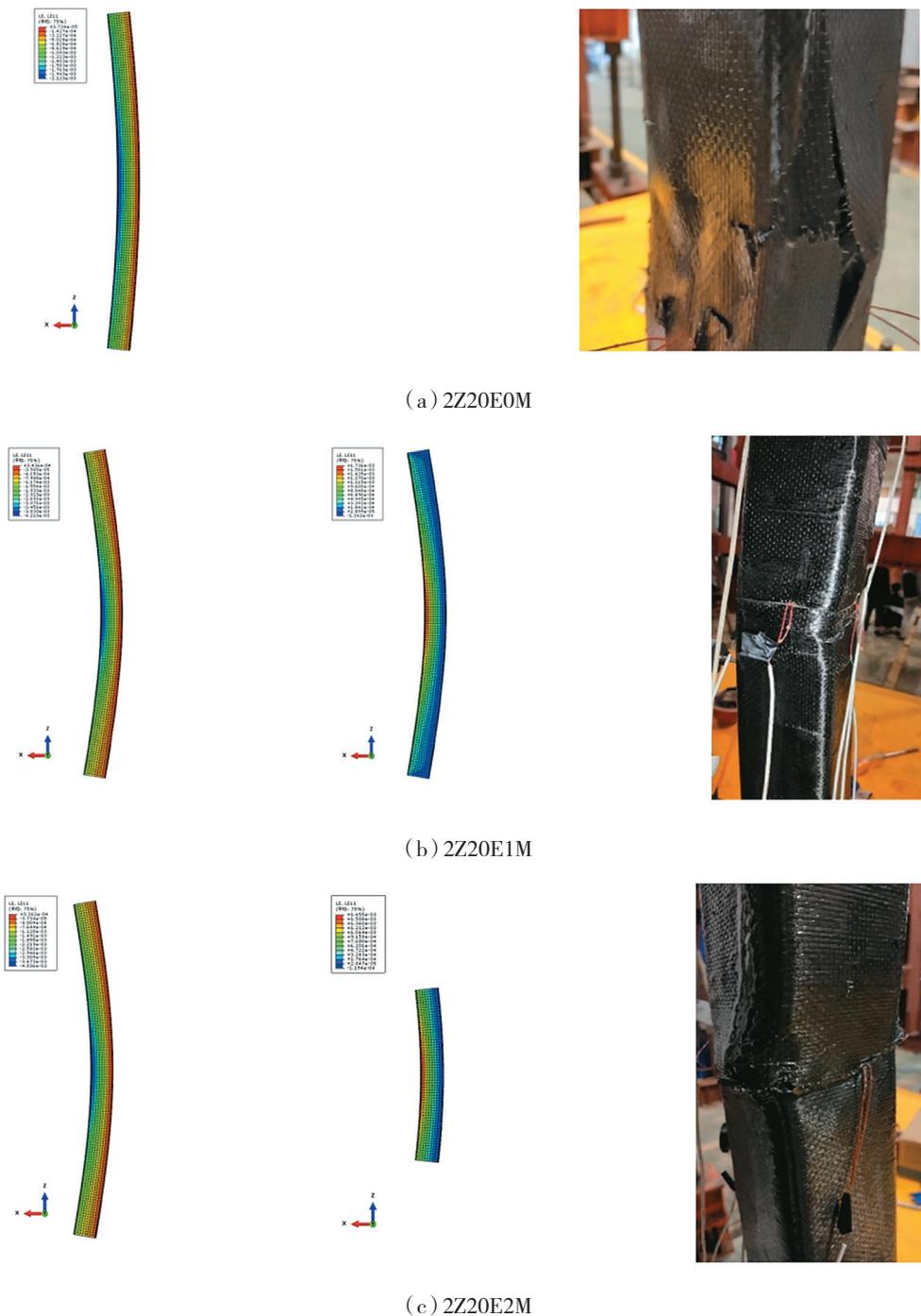


图 5 CFRP 布主应变云图与 CFRP 布破坏照片

了钢管的变形为整体失稳破坏。环向 CFRP 布的应变随着 CFRP 布环贴比例的增加而变大,表明环向 CFRP 布对钢管产生了环箍作用且作用效果随面积占比变大而加大,与试验现象相符合。综上可知,建立的模型是有效的。

3.2 试验与模拟对比

如图 6 所示,对比试验和模拟曲线后分析可知:有限元软件对 CFRP 布加固受压方钢管试件的模拟与试验加载过程相接近,虽然部分细节处不同,但是整体趋势一致。究其原因是由于模拟过程的过于理想化,忽略了试件在加工、运输、组装等过程中对试件尺寸和性能的影响。建模过程中虽把试件的初始缺陷引入到模型中,却也无法完全符合实际情况。总而言之,有限元对试件的模拟是合理的。

4 构造措施参数化模拟分析

4.1 模拟试件设计

依据试验的研究发现柱中环贴这种构造措施有助于受压方钢管延性的增加,且 1/2 粘贴比例最优。考虑实际工程中的 CFRP 布宽度都是有一定规格的,对于过长的柱子或者对构件进行粘贴加固时不能严丝合缝等原因,有必要对其进行间隔粘贴距离的研究。故依据前文的建模过程,设计模拟试件进行研究。

试件设计采用 5 条 100 mm 宽环向 CFRP 布进行间隔粘贴,具体设置为柱中环贴 100 mm 宽的 CFRP 布,然后分别按 20 mm、40 mm、60 mm 的距离进行剩余 4 条 CFRP 布的粘贴。增加编号 J 字母前数字为间隔距离,试件其他名称编号含义解释

如前文,试件设计汇总如下表 3。

表 3 模拟试件编号及参数

编号	间隔距离 / mm	偏心距 / mm	构造措施
2Z20E2M	0	20	两端、中部 1/2 环贴 1 层
2Z20E3M	0	20	两端、中部 1/3 环贴 1 层
2Z20E20J	20	20	两端环贴、中部间隔 20 mm
2Z20E40J	40	20	两端环贴、中部间隔 40 mm
2Z20E60J	60	20	两端环贴、中部间隔 60 mm
2Z20E4M	0	20	两端、中部 1/4 环贴 1 层

4.2 模拟结果

如图 7 中,2Z20E3M、2Z20E4M 弯曲内侧的云图变化呈现波浪状,表明其在 CFRP 布边缘段有应力集中现象,这表明单一的 CFRP 布如果比例过小则不能束缚住内部 CFRP 布和钢管柱的变形,随着钢管柱的变形加剧,最终可能导致环向 CFRP 布过早撕裂或断裂。

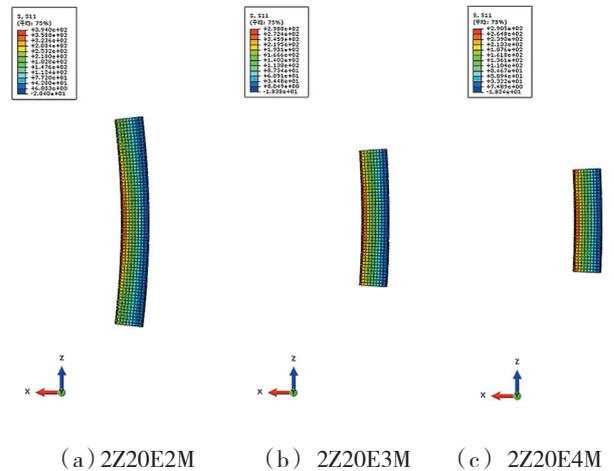


图 7 CFRP 布应力云图

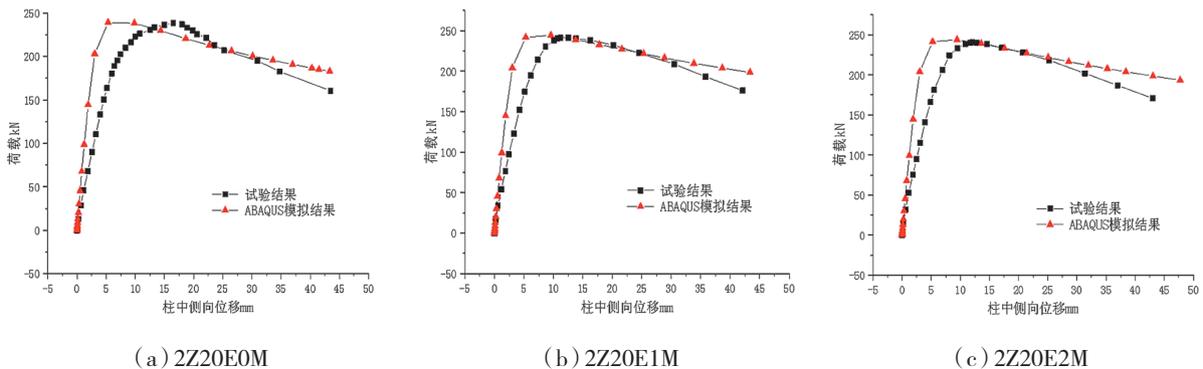


图 6 荷载 - 柱中侧向位移曲线

按照试件设计进行有限元建模分析,后处理中输出试件受压全过程对应数据,绘制图8曲线图。鉴于6个试件的变化曲线比较接近,故放大210~250 kN的刻度变化,可以清晰由上图看出试件在上升段变化一致,主要在接近极限荷载附近开始出现变化。曲线可以反映出20 mm的间隔下,总宽度均为500 mm的CFRP布加固试件表现出的延性要略优于CFRP布不间隔加固的试件。对比其他间隔粘贴CFRP布的试件发现,40 mm、60 mm间隔距离会严重削弱CFRP布的作用,特别是60 mm间隔距离,其作用效果与375 mm宽CFRP布的效果几乎一致,造成材料的浪费。

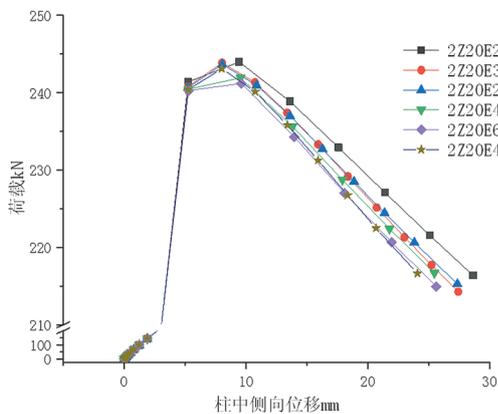


图8 荷载-柱中侧向位移曲线

5 结论

(1) 1/2 粘贴比例与全包粘贴效果接近,说明可以用1/2 粘贴比例的环贴CFRP布来作为一种行之有效的构造措施,在工程加固领域对构件进行柱中侧向位移的减缓。

(2) CFRP布比例大小需在一定范围内,否则

可能导致环向CFRP布过早撕裂或断裂。

(3) 对于环向CFRP布的粘贴,如果处于不能使用完整CFRP布的情况下或者柱中有其他原因需避开,有0~20 mm的间隔粘贴距离作为缓冲,不仅可以提高作用效果还便于加固施工,但是间隔不能过大,否则将会削弱其作用。

参考文献:

- [1] 季园园,韩庆华,芦燕,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] 江学良,杨慧,孟苗超,等.FRP在土木工程结构加固应用中的研究进展[J].科技导报,2010,28(18):111-117.
- [3] 李兆阳.碳纤维增强复合材料(CFRP)加固钢管柱力学性能数值分析[D].西安:长安大学,2016.
- [4] 王军伟.FRP加固持载钢结构轴压构件力学性能研究[D].沈阳:沈阳大学,2014.
- [5] 施文林.间隔粘贴CFRP圆钢管柱承载力性能研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [6] 松村政秀,幸田真也,久部修弘,山口隆司.偏心压缩力を受ける鋼管柱への高弾性CFRP補強効果に関する研究[A].構造工学論文[C].2013,59A:190-198.
- [7] Narmashiri K, Keykha A H. Load increment Evaluation in CFRP Strengthened Hollow Steel Columns[J]. MAGNT Research Report. 2015, 3: 1464-1475.
- [8] 罗家豪.CFRP加固受压方钢管试验研究与数值模拟[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [9] Hashin Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47: 329-334.
- [10] 张亮泉.CFRP网架结构静力与抗震性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [11] 庄茁 主译.ABAQUS有限元软件6.4版入门指南[M].清华大学出版社,2004.