

DOI:10.11918/202204043

# CFRP局部加固对腐蚀后风电塔筒滞回及屈曲特性影响

王道永<sup>1,2</sup>, 宋波<sup>1,2</sup>, 刁硕<sup>1,2</sup>, 卢晨虎<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

2. 北京科技大学 强震区轨道交通工程抗震研究北京市国际科技合作基地, 北京 100083)

**摘要:** 海上风电塔长期服役于海洋腐蚀环境中, 塔筒结构在海洋腐蚀环境及风、浪、地震等往复荷载作用下易出现局部屈曲及倒塌破坏。本文提出将碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)用于腐蚀后风电塔筒的局部加固, 开展了CFRP-钢结构单剪实验及数值仿真研究。在单剪实验的基础上, 基于ABAQUS软件及Python编程开展了CFRP加固腐蚀风电塔筒的滞回性能研究, 对比了4种腐蚀工况及6种加固工况结构的破坏形式及耗能机制。研究表明: 高温环境会使CFRP与钢的黏结界面出现软化现象, 导致CFRP-钢复合结构承载力下降。但在拉力作用下CFRP-钢复合结构均表现为纤维断裂早于胶层破坏, 在数值模拟时可以将CFRP与钢的黏结关系简化为绑定关系。在循环荷载作用下遭受腐蚀的风电塔筒结构出现提前屈曲, 屈曲后结构刚度退化加速, 延性降低, 材料塑性耗能比例减小, “屈曲铰”耗能比例增加, 整体耗能能力下降; 使用CFRP加固后, 可以延缓结构屈曲出现的时间, 扩大材料塑性区域, 增加材料塑性耗能比例, 提升结构整体耗能能力。为防止CFRP加固层数较少时结构出现突发破坏的现象, 加固时应注重考察结构延性变化情况。

**关键词:** 风电塔筒; 海洋腐蚀; 结构屈曲; CFRP加固; 有限元模拟; 滞回性能

中图分类号: TU33+4 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2023)10-0040-09

## Influence of CFRP local reinforcement on hysteretic and buckling characteristics of corroded wind turbine tower

WANG Daoyong<sup>1,2</sup>, SONG Bo<sup>1,2</sup>, DIAO Shuo<sup>1,2</sup>, LU Chenhu<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Beijing International Cooperation Base for Science and Technology-Aseismic Research of the Rail Transit Engineering in the Strong Motion Area, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The offshore wind turbine tower has been used in the marine corrosive environment for a long time. The tower structure in marine corrosive environment is prone to local buckling and collapse under the impact of wind, wave, earthquake and other reciprocating loads. In this paper, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is proposed for local reinforcement of the corroded wind turbine tower. The single shear test and numerical simulation study of CFRP steel composite structure are carried out. On the basis of simple shear test, the hysteretic performance of corroded wind turbine tower strengthened with CFRP is studied using ABAQUS software and python. Structural damages and energy consumption mechanisms under four corrosion conditions and six reinforcement conditions are compared. Results show that the high temperature environment softens the contact between CFRP and steel, which reduces the bearing capacity of CFRP steel composite structures. The fiber fracture of CFRP steel composite structure occurs earlier than the damage of adhesive layer under tensile force. The contact relationship of CFRP steel can be simplified as the “Tie” in numerical simulation. Under the cyclic load, the corroded tower structure shows early buckling, the proportion of material plastic energy consumption decreases and the proportion of “buckling hinge” energy consumption increases. After CFRP strengthening, the buckling of the structure can be delayed, the plastic region of the material can be expanded and the overall energy dissipation capacity of the structure can be improved. In order to prevent the sudden damage of the structure when the number of CFRP strengthening layers is small, attention should be paid to the structural ductility change during strengthening.

**Keywords:** wind turbine tower; marine corrosion; structural buckling; CFRP reinforcement; finite element simulation; hysteretic behavior

收稿日期: 2022-04-11; 录用日期: 2022-08-22; 网络首发日期: 2023-03-31

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20230331.1358.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(52078038); 科技部国家级外专项目(G2021105009L); 北京科技大学科技与文明中外人文交流研究开放课题(2020KFYB012)

作者简介: 王道永(1995—), 男, 硕士研究生; 宋波(1962—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 宋波, [songbo@ces.ustb.edu.cn](mailto:songbo@ces.ustb.edu.cn)

与陆上风电结构相比,海上风电塔长期服役于海洋腐蚀环境中,腐蚀速度约为陆上的 4~5 倍。根据风电场设施防腐及结构与海水的接触情况,可以将海洋环境分为:大气区、浪溅区、潮汐区、全浸区、海泥区。在浪溅区,由于干湿交替,氧气充足,腐蚀最为严重。遭受腐蚀的风电塔结构在风浪及地震等往复荷载作用下常出现塔筒屈曲及倒塌破坏。

目前国内外诸多学者针对海洋钢结构腐蚀及结构屈曲开展了相应研究。文献[1]研究了 Westernmost Rough 风电场钢结构腐蚀速率,实验中观察到最高腐蚀速率为 0.83 mm/a。文献[2]通过对 7 根锈蚀 H 型钢柱进行低周加载实验及有限元模拟,研究了腐蚀 H 型钢柱的力学性能与腐蚀形貌之间的关系。文献[3]基于腐蚀统计规律,运用 MATLAB 编程结合 ANSYS 对含随机腐蚀的圆钢管构件进行了轴拉、轴压、剪力作用下力学性能的劣化规律研究。文献[4]通过三维图像测量和有限元分析研究了腐蚀钢板的屈曲行为,同时提出了一种通过卷积神经网络(CNN)评估壳元件有效板厚的方法。针对钢结构屈曲行为,文献[5]对薄壁箱形受压构件的屈曲行为进行了实验研究,探究了局部板屈曲和整体柱屈曲的相互作用行为。文献[6]根据 Flügge 壳理论和 Eringen 的非局部弹性理论,推导出非局部各向异性薄壁圆柱壳在轴向压力、扭转和外压联合作用下的平衡控制方程。文献[7]针对 H 型截面提出“屈曲铰”的概念,并对“屈曲铰”的耗能形式展开了研究。

在 CFRP 加固研究方面,文献[8]对粘贴 CFRP 的 3 种长细比钢板进行了压缩实验,提出黏结碳纤维板的钢板承载力估算方法。文献[9]研究了胶层类型、胶层厚度和 CFRP 板黏结长度对黏结性能的影响,建立了 CFRP 板-钢界面的黏结-滑移模型。文献[10]基于实验研究了 CFRP/胶黏剂/SPCC 组合薄层压板在轴向和弯曲载荷下的应力应变性能和破坏模式。文献[11]对 CFRP 加固圆锥壳在均匀外压下的线性和非线性屈曲进行了研究。结果表明,CFRP 加固可以提高此类结构的刚度和屈曲强度。文献[12]研究了在偏心荷载下 CFRP 薄壁组合柱的屈曲和极限状态,结果表明,偏心压缩荷载对被测结构的屈曲和屈曲后承载力影响较大。文献[13]研究了 CFRP 加固钢梁在冲击载荷下的响应,比较了 CFRP 厚度和长度对结构冲击响应的影

响[14]针对黏合层增强的 CFRP 接头黏结过早失效问题,研究了准静态和冲击下的承载能力。

虽然国内外诸多学者对钢材腐蚀、屈曲及 CFRP 加固做了大量研究工作,但现有研究较少涉及 CFRP 加固腐蚀后风电塔筒结构,且风电塔筒壁厚比较大,腐蚀及 CFRP 加固对结构屈曲及滞回耗能机制的影响尚不明确,因此本文以实际海上工程为背景,开展腐蚀及 CFRP 加固对风电塔筒屈曲及耗能机制影响的研究。

## 1 工程背景与风电塔筒加固方式

本文以江苏省如东县某海上风电塔结构为背景,该风电塔结构尺寸参数见图 1。为明确腐蚀及 CFRP 加固对风电塔筒屈曲及滞回性能的影响,本文选取腐蚀速度最快的浪溅区塔筒为研究对象开展研究。

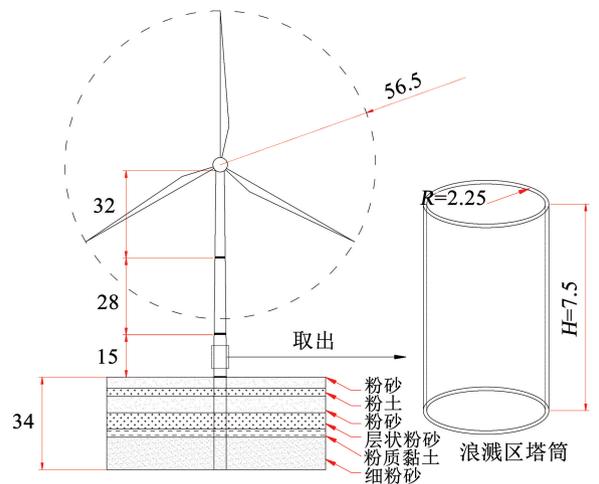
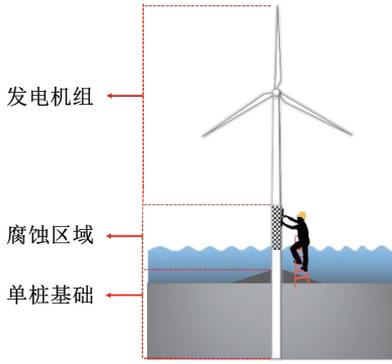


图 1 风电结构尺寸参数(m)

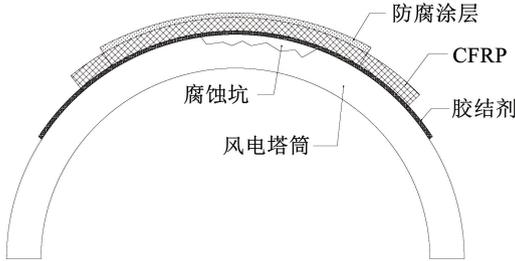
Fig. 1 Wind turbine tower structure dimensions(m)

实地测得该海域最大可能潮差 6.76 m,浪花飞溅最大高度为 0.74 m,则浪溅区总高度  $H=7.50$  m。该区域位于风电塔筒结构第三段,其外径为 2.25 m,未腐蚀前壁厚 50 mm,材料为 Q345B 钢材。考虑该区段上部结构总重作为该区段竖向荷载,上部结构包括风轮叶片、轮毂、机舱及上中部塔筒,总质量为 354 058 kg,对应竖向压力  $F=3 469.77$  kN。

本文采用 CFRP 对风电塔筒腐蚀区域进行局部加固,见图 2。一方面 CFRP 与风电塔筒协同受力,承担部分荷载,起到加固效果;另一方面,CFRP 可以在钢材表面与海水之间形成一道保护层,起到良好的防腐效果。



(a) CFRP 加固风电塔示意



(b) CFRP 加固风电塔构造

图 2 CFRP 加固风电塔

Fig. 2 Wind turbine tower strengthened with CFRP

## 2 CFRP-钢结构单剪实验

由于海上风电塔结构所处环境昼夜温差大,昼间塔筒表面温度最高可达 60 °C 以上,因此单剪实验设置常温(25 °C)和高温(60 °C)两种工况,CFRP 粘贴方式为单面粘贴一层 25 mm 宽 CFRP 浸渍布材,  $L = 300$  mm,不同工况试件具体参数见表 1。

表 1 CFRP-钢结构单剪实验工况

Tab. 1 Single shear test conditions for CFRP-steel structure

试件编号	实验温度/°C	加载前处理
A-25-1	25	不做处理
A-25-2	25	不做处理
B-60-1	60	高温加热 30 min
B-60-2	60	高温加热 30 min

实验构件采用 Q345B 钢,CFRP 采用卡本 CFS-I-200 布材,浸渍胶采用卡本 CFSR-A/B 胶,单剪实验试件尺寸及加载示意图 3。

不同实验工况下结构破坏状态见图 4。实验表明,常温及高温状态下结构破坏均表现为 CFRP 钢接合部位最先出现纤维断裂,并逐步发展导致构件破坏,CFRP 与钢材内部间胶体未出现破坏现象。

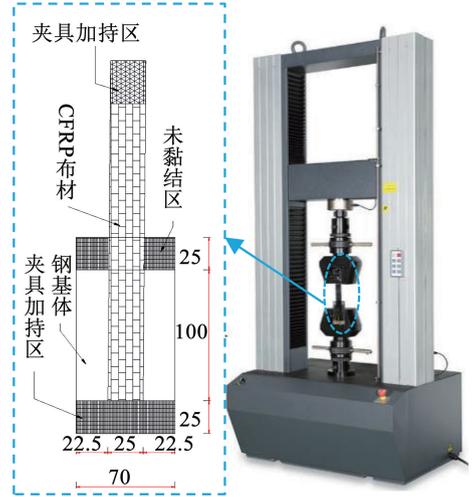
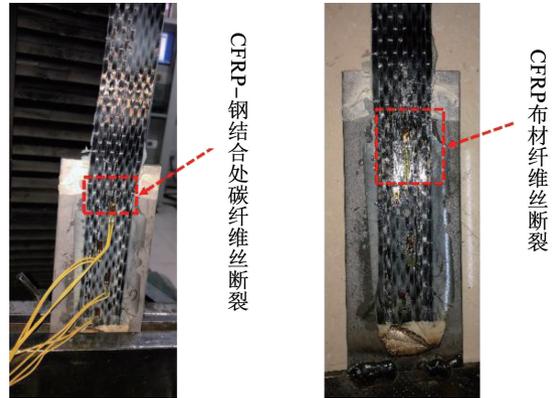


图 3 CFRP-钢结构单剪实验 (mm)

Fig. 3 Single shear test of CFRP-steel structure (mm)



(a) 25 °C 结构破坏形态

(b) 60 °C 结构破坏形态

图 4 CFRP-钢结构单剪破坏形态

Fig. 4 Single shear failure of CFRP-steel structure

结合图 5 可以看出,常温状况下试件最大拉力为 5.22 kN,高温状况下最大拉力为 4.51 kN,下降 18.3%。碳纤维的耐高温性能好,但是高温下黏结剂会出现软化现象,这导致了高温实验下试件的拉力-位移曲线斜率较常温下变小。但 60 °C 尚未达到胶体玻璃化温度,因此构件最终破坏形态表现仍为纤维断裂破坏。

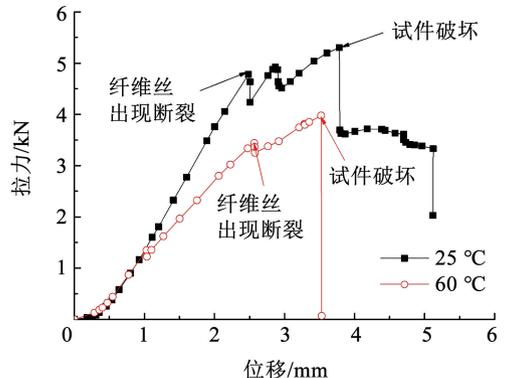


图 5 CFRP-钢单剪实验拉力-位移曲线

Fig. 5 Force-displacement curve of CFRP-steel

在实验基础上,利用 ABAQUS 软件建立 CFRP-钢结构单剪实验有限元模型,见图 6。在有限元模型建立时假定 CFRP 与钢界面之间无滑移,胶结材料简化为绑定约束。

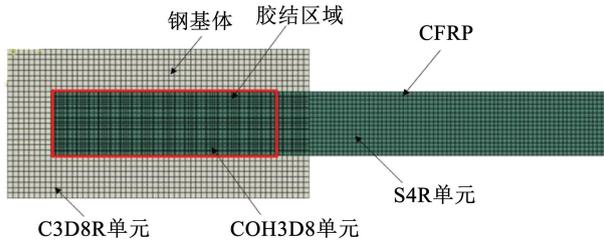


图 6 CFRP-钢结构有限元模型

Fig. 6 Finite element model of CFRP-steel structure

在定义材料本构时,CFRP 材料在弹性阶段采用“ENGINEERING CONSTANTS”模型,在材料破坏阶段采用“HASHIN DAMAGE”模型,材料属性见表 2。

表 2 CFRP 材料本构参数

Tab. 2 Constitutive parameters of CFRP materials

参数	取值	参数	取值
$E_1$ /GPa	235	$X_T$ /MPa	3 400
$E_2$ /GPa	17	$X_C$ /MPa	1 700
$\nu_{12}$	0.34	$Y_T$ /MPa	62
$G_{12}$ /GPa	48	$Y_C$ /MPa	190
$G_{13}$ /GPa	48	$S_{XY}$ /MPa	81
$G_{23}$ /GPa	45	$S_{YZ}$ /MPa	81

对比 CFRP-钢结构有限元模拟和实验所得拉力-位移曲线及构件破坏情况,见图 7。

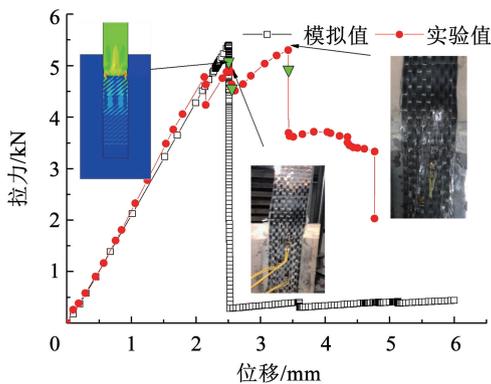


图 7 有限元模拟与实验数据对比

Fig. 7 Comparison between simulation and experiment results

从图 7 可以看出,在加载初期,模拟值与实验值基本重合且均处于线弹性状态,在经过弹性段后模拟值出现拉力峰值点,最大拉力为 5.3 kN,此时纤维在 CFRP 与钢黏结端部处出现断裂,结构失去承载力;实验数据显示出多个峰值点,达到第一个峰值

时拉力为 4.8 kN,左侧纤维在 CFRP 钢黏结端部出现断裂,造成承载力小幅度下降,右侧纤维继续承载使得拉力回升至 4.9 kN,直至拉力达到 5.2 kN 时纤维全部断裂,失去承载能力。从结构破坏形态及拉力和位移关系可以看出,在有限元模拟中将 CFRP 与钢黏结关系简化为绑定关系是可行的。

### 3 腐蚀对在役薄壁塔筒滞回性能影响

#### 3.1 腐蚀塔筒简化建模

根据浪溅区腐蚀特点,利用 Python 语言编写塔筒随机腐蚀坑脚本,结合 ABAQUS 软件建立高度 2 400 mm,外径 460 mm,壁厚 6 mm,腐蚀率  $P$  分别为 5%、10%、15% 和 20% 的 4 组随机腐蚀结构模型,见图 8。随机腐蚀塔筒表面的随机腐蚀坑大小、数量及分布规律遵循正态分布,并按照式(1)、(2)计算。

$$f(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(h-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中: $\sigma$  为标准差; $\mu$  为平均值; $h$  为腐蚀坑深度。

$$d_n(t) = \begin{cases} 0 & 0 < t < T_{st} \\ d_\infty \{1 - \exp[-((t - T_{st})/\eta)^\beta]\} & T_{st} < t < T_L \end{cases} \quad (2)$$

式中: $d_n(t)$  为时间  $t$  所对应的腐蚀深度; $d_\infty$  为腐蚀极限深度; $t$  为腐蚀时间; $T_{st}$  为腐蚀开始的时刻; $T_L$  为结构寿命或结构维护保养时刻。

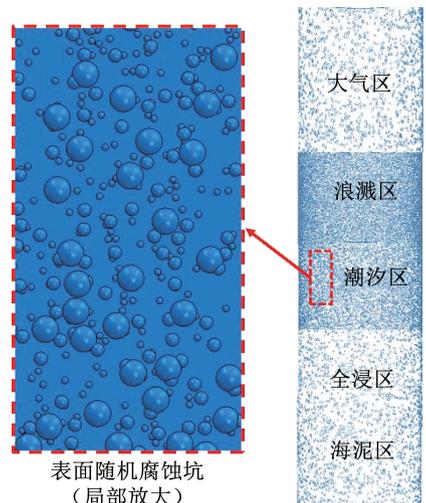


图 8 随机腐蚀结构模型

Fig. 8 Random corrosion model

在随机腐蚀模型基础上,建立 10 组腐蚀率为 0% ~ 20% 均匀变化的等效腐蚀模型,腐蚀程度由均匀的壁厚削减表征。模型材料为 Q345B 钢材,研究中不考虑腐蚀对材料本构关系的影响,钢材本构按照表 3 进行取值<sup>[15]</sup>。

表 3 Q345B 钢材本构参数

Tab. 3 Constitutive parameters of Q345B steel

属性	取值	属性	取值
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 850	C <sub>kin-1</sub>	7 993
弹性模量/10 <sup>5</sup> MPa	2.06	C <sub>kin-2</sub>	6 773
泊松比	0.28	C <sub>kin-3</sub>	2 854
屈服强度/MPa	345	γ <sub>1</sub>	175
屈服面应力/MPa	429	γ <sub>2</sub>	116
硬化参数	1.2	γ <sub>3</sub>	34

对比等效腐蚀与随机腐蚀模型推覆分析所得  $F-\Delta$  曲线见图 9, 随机腐蚀结构与均匀腐蚀存在对应关系, 通过对比随机腐蚀与均匀腐蚀结构的反力及位移关系可知, 其差异值均在 2% 以内, 可以满足用均匀等效腐蚀建模代替随机腐蚀建模的计算精度。

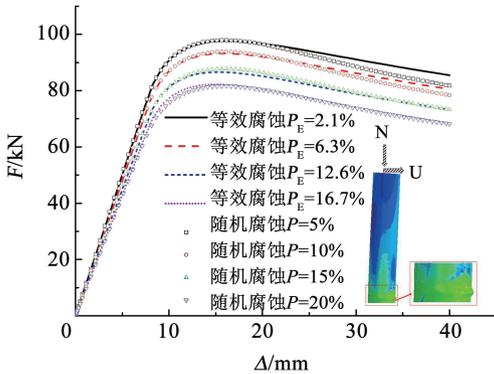


图 9 等效腐蚀与随机腐蚀  $F-\Delta$  曲线

Fig. 9 Equivalent corrosion and random corrosion  $F-\Delta$  curves

根据腐蚀率与反力对应关系可以得到随机腐蚀率与均匀腐蚀率之间的拟合关系, 由拟合结果可知随机腐蚀率与等效腐蚀率满足式(3)所示关系:

$$P_E = \begin{cases} 0 & 0 < t \leq T \\ 1.7606[A(t-T)^n]^2 + 0.5252[A(t-T)^n] - 0.0036 & t > T \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_E$  为等效腐蚀率;  $T$  为防腐涂层寿命;  $t$  为结构服役时间; 结构腐蚀参数取  $A=1.423, n=0.6$ 。

根据式(3)可以计算出不同腐蚀时间所对应的塔筒等效腐蚀率, 进而得到不同区段塔筒的等效壁厚, 见表 4。

表 4 浪溅区塔筒等效腐蚀厚度

Tab. 4 Equivalent corrosion thickness of tower

t/a	实际腐蚀率/%	等效腐蚀率/%	等效壁厚/mm
0	0	0	50.00
10	3.74	1.85	49.09
20	7.23	4.35	47.84
30	9.82	6.49	46.78

根据浪溅区塔筒等效腐蚀厚度, 建立不同腐蚀年限的风电塔筒浪溅区有限元模型见图 10。塔筒

及 CFRP 均采用 S4R 单元, 循环荷载作用下 Q345B 材料本构选用 ABAQUS 中的 Combined 的模型, 材料硬化参数按照表 3 取值。

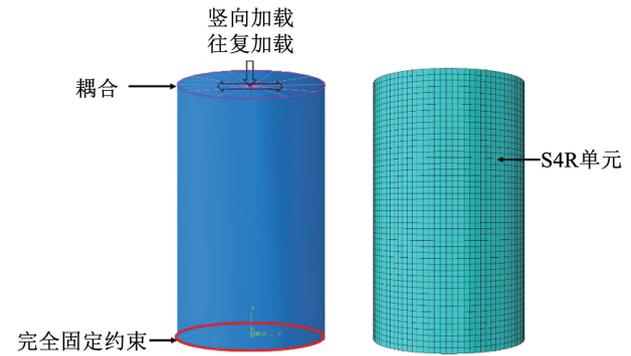


图 10 塔筒结构有限元模型

Fig. 10 Finite element model of wind turbine tower

在软件中首先施加竖向荷载, 按照实际结构上部荷载施加 3 469.8 kN 竖向力。横向加载采用位移控制, 结构屈服前以  $0.2\delta_y$  为增量进行逐级递增加载, 屈服后采用整数倍的  $\delta_y$  进行循环加载, 加载到  $10\delta_y$  结束。结构屈服位移为<sup>[16]</sup>

$$\delta_{yTN} = \frac{P_{yN} h^3}{3EI} \quad (4)$$

$$P_{yN} = \left( \sigma_{yN} - \frac{N}{A} \right) \frac{W}{h} \quad (5)$$

式中:  $h$  为水平荷载作用高度;  $I$  为断面极惯性矩;  $\sigma_{yN}$  为材料屈服强度;  $N$  为轴向作用力;  $A$  为构件截面面积;  $W$  为断面系数。

### 3.2 腐蚀结构反力 - 位移滞回曲线分析

在循环荷载作用下, 不同结构顶部反力 - 位移滞回曲线见图 11。分析可知, 随腐蚀时间增加, 滞回曲线的“捏缩”效应越来越明显。无腐蚀与有腐蚀结构均在第 8 次循环加载时达到最大反力值, 但反力值下降明显, 且结构在经过最大反力点后开始出现局部屈曲, 且达到局部屈曲后水平反力峰值下降趋势加剧, 腐蚀年数增加导致塔筒壁厚进一步减小, 进而导致屈曲提前发生。

提取结构反力 - 位移骨架曲线, 见图 12。从图中可以看出, 在往复荷载作用下, 结构均经历了弹性、塑性发展、反力下降及破坏 4 个阶段。在第一阶段, 骨架曲线均呈线性关系。随着加载位移增大, 骨架曲线出现转折, 结构刚度开始出现下降趋势, 试件屈服并逐渐进入塑性阶段。当水平荷载达到最大值后, 曲线开始下降, 结构侧向刚度进一步减小, 直到结构破坏。此外, 不同壁厚结构的骨架曲线之间均有明显分离, 说明腐蚀不仅引起结构初始刚度变化还会引起结构水平反力的明显减小。

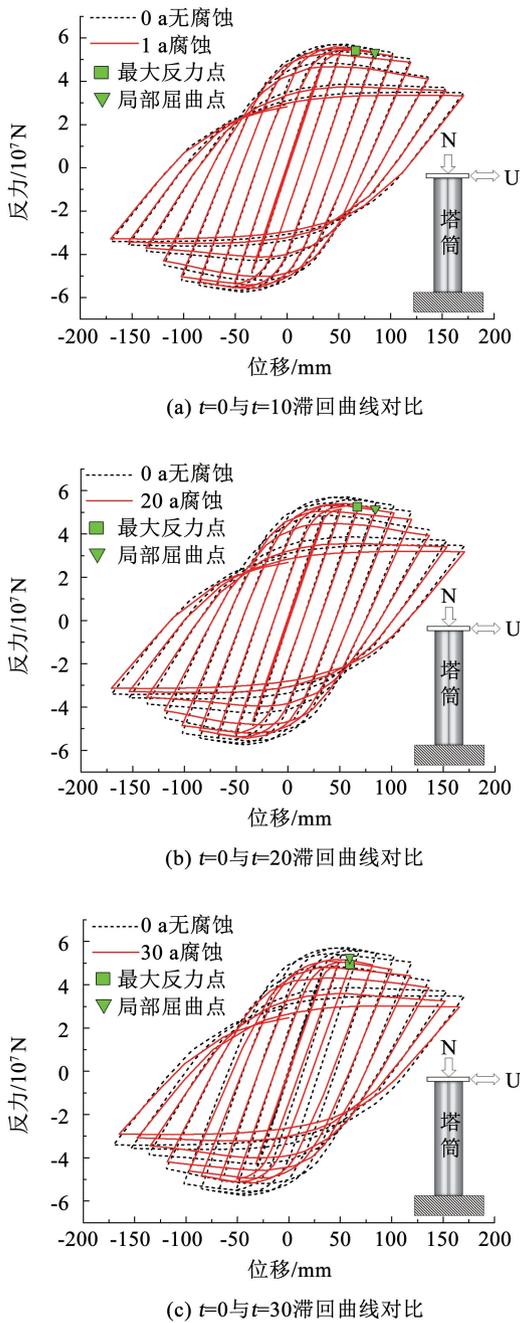


图 11 不同腐蚀结构顶部反力 - 位移曲线

Fig. 11  $F-\Delta$  curves of different corrosion structures

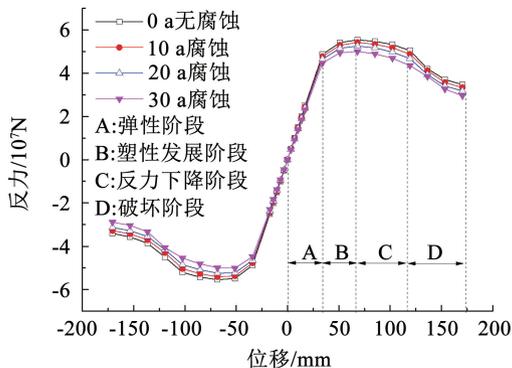


图 12 不同结构的反力 - 位移骨架曲线

Fig. 12  $F-\Delta$  skeleton curves of different structures

### 3.3 腐蚀结构刚度退化及延性分析

《建筑抗震试验规程》<sup>[17]</sup> 中规定试件的刚度可用反力 - 位移骨架曲线的割线刚度  $K_i$  来表示,  $K_i$  可按式(6)计算:

$$K_i = \frac{|F_i| + |-F_i|}{|\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (6)$$

式中:  $F_i$ 、 $-F_i$  分别为第  $i$  次循环时推向、拉向峰值点的荷载,  $\Delta_i$ 、 $-\Delta_i$  分别为第  $i$  次循环时推向、拉向峰值点的位移。

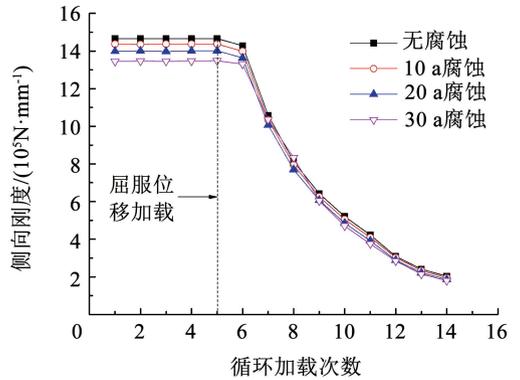


图 13 结构刚度退化曲线

Fig. 13 Structural stiffness degradation curves

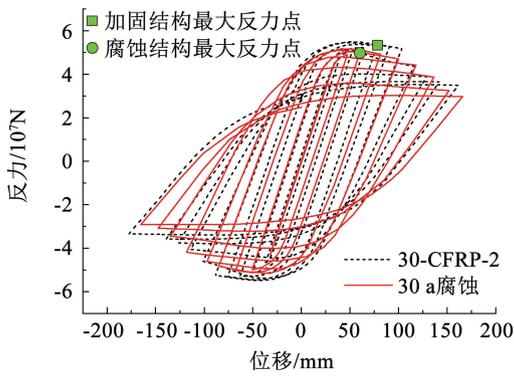
由图 13 可以看出,不同结构的刚度退化规律趋于一致。加载初期,结构处于弹性阶段,刚度基本保持不变;加载至屈服位移后,结构刚度出现显著退化,在位移达到  $5\delta_y$  后,退化降幅开始逐渐降低。由于腐蚀后截面尺寸变小,弹性阶段发展较快,导致腐蚀程度越高的结构其刚度退化速度越快。

## 4 CFRP 局部加固对腐蚀结构滞回性能影响

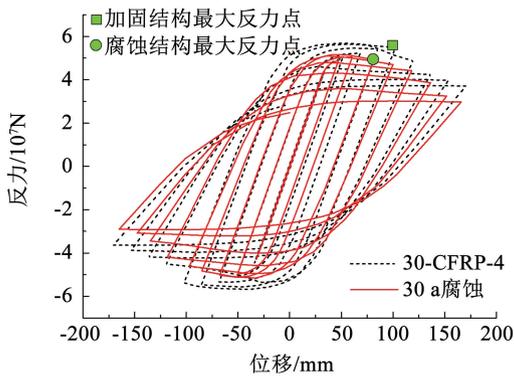
对不同腐蚀工况的塔筒结构粘贴 2 层和 4 层 CFRP,并使 CFRP 受拉方向与塔筒环向保持一致。利用 ABAQUS 对不同加固工况进行低周往复加载数值模拟。

### 4.1 CFRP 局部加固对结构滞回曲线的影响

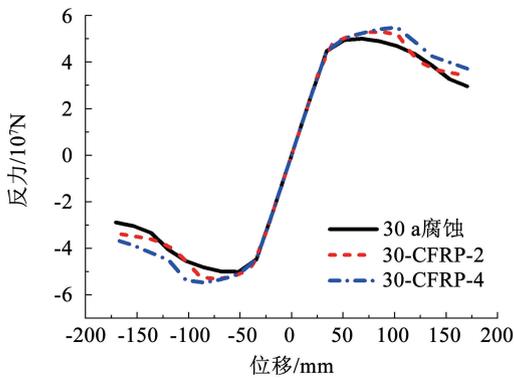
提取 CFRP 加固腐蚀 30 a 结构的滞回曲线及骨架曲线,见图 14。对于 2 层 CFRP 加固的结构,最大承载力和结构屈曲分别出现在第 9 次及第 10 次循环加载,相对于为加固结构,屈曲时间延缓。对于 4 层 CFRP 加固的结构,最大承载力和结构屈曲分别出现在第 10 次及第 11 次循环加载,屈曲后结构承载力随之下降。CFRP 层数的增加使得钢材屈曲后 CFRP 能够继续承担较大的外力,不至于使得 CFRP 产生快速破坏。



(a) 2层CFRP加固



(b) 4层CFRP加固



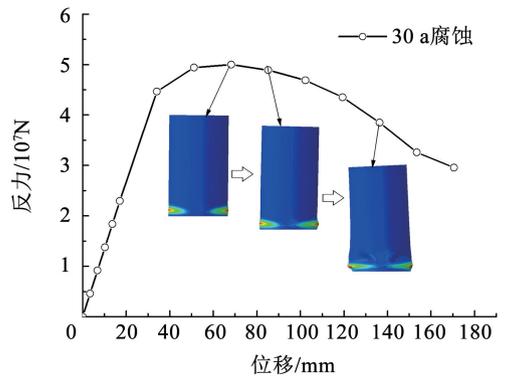
(c) CFRP加固前后骨架曲线对比

图 14 CFRP 加固腐蚀 30 a 塔筒结构

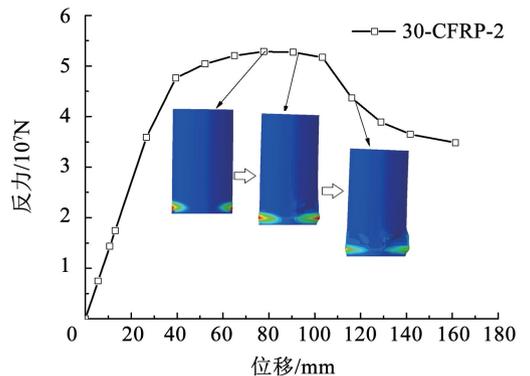
Fig. 14 CFRP reinforced 30 a corrosion tower structure

### 4.2 CFRP 加固对结构屈曲的影响

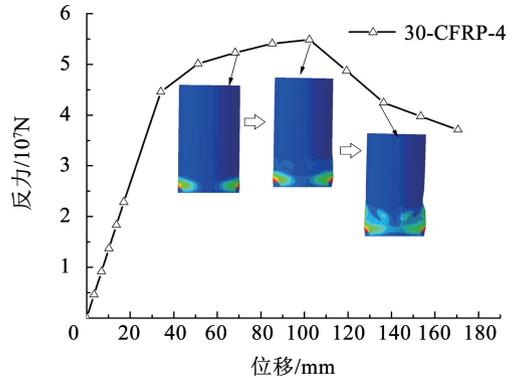
腐蚀 30 a 结构加固前后的骨架曲线及结构屈曲特征见图 15。由图 15(a) 可知,对于腐蚀后结构,当加载至其最大承载力时结构开始出现屈曲,当结构发展为“象足式”屈曲时承载能力开始下降。当结构承载力降低到最大承载力的 85% 以下,结构破坏,塔筒的“象足式”屈曲变成“褶皱”变形。CFRP 加固使得结构由集中的“象足式”屈曲转化为范围更大的“褶皱式”屈曲,进而使得结构反力下降速度减缓。但由于 CFRP 的破坏特性,当结构达到最大承载力后,经过两次循环加载结构就达到破坏状态。



(a) 30 a 腐蚀结构



(b) 2层CFRP加固



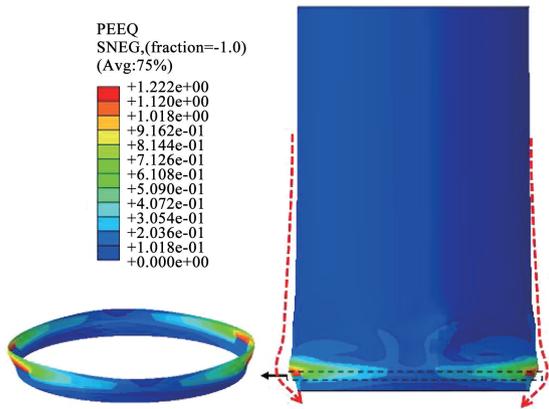
(c) 4层CFRP加固

图 15 30 a 腐蚀结构反力 - 位移曲线

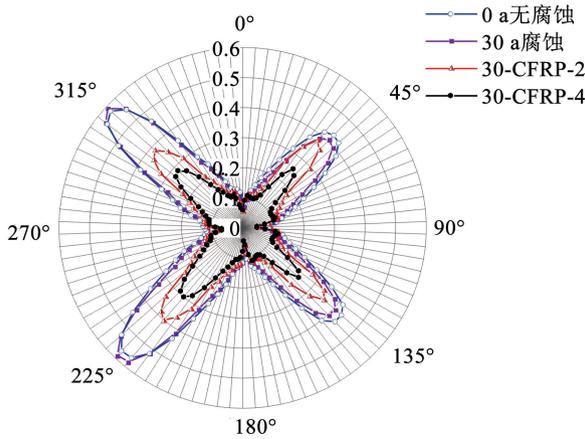
Fig. 15  $F-\Delta$  curves of 30 a corroded structure

### 4.3 CFRP 加固对结构耗能机制影响

图 16 为腐蚀 30 a 的结构及加固后底部屈曲位置材料的等效塑性应变值 (equivalent plastic strain, PEEQ)。由图 16(b) 可知,未腐蚀结构的最大等效塑性应变为 0.58,腐蚀后结构最大等效塑性应变为 0.60,由于腐蚀后结构“屈曲铰”出现时间早,因此“屈曲铰”耗能代替了材料塑性耗能,导致腐蚀后结构屈曲部位塑性发展较快。在使用 2 层及 4 层 CFRP 加固后结构最大等效塑性应变最大值降低为 0.40 和 0.30,且整个塔筒圆周范围内的 PEEQ 值均小于未腐蚀结构。



(a) PEEQ数据提取位置



(b) 塔筒屈曲部位沿圆周PEEQ值

图 16 腐蚀 30 a 结构 PEEQ 值

Fig. 16 PEEQ of 30 a corrosion structure

结合图 17 中 PEEQ 值沿结构高度变化对比分析可知,未使用 CFRP 加固的结构在距结构底部 500 ~ 1 000 mm 处屈曲幅度最大,材料塑性应变发展快,整个塑性区长度为 2 000 mm,腐蚀后结构的塑性区长度减小为 1 800 mm,腐蚀后结构的耗能形式由材料塑性变形耗能向“屈曲铰”耗能转变。在使用 2 层及 4 层 CFRP 加固后的结构其塑性区长度

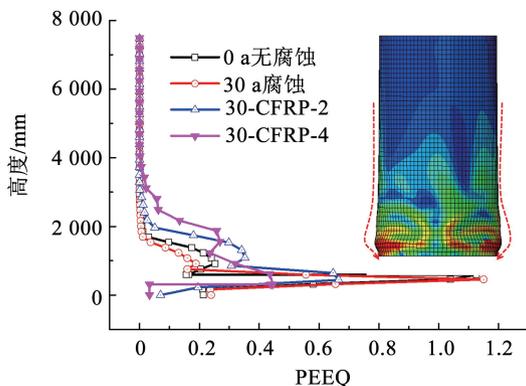


图 17 PEEQ 沿结构高度变化

Fig. 17 Change in PEEQ along structure height

分别为 2 300 mm 和 3 800 mm,CFRP 加固在减缓结构屈曲的同时也扩大了材料塑性区的长度,使结构由“屈曲铰”耗能向塑性耗能转变,从而提高了结构的整体耗能能力和材料的利用效率。

对于不同结构的滞回耗能总量对比见图 18,腐蚀导致结构整体耗能能力降低,但 CFRP 加固后结构整体耗能能力显著提高,除腐蚀 30 a 的加固结构外,腐蚀 10 a 及 20 a 的结构耗能总量均能在加固后达到甚至超过未腐蚀结构的水平。

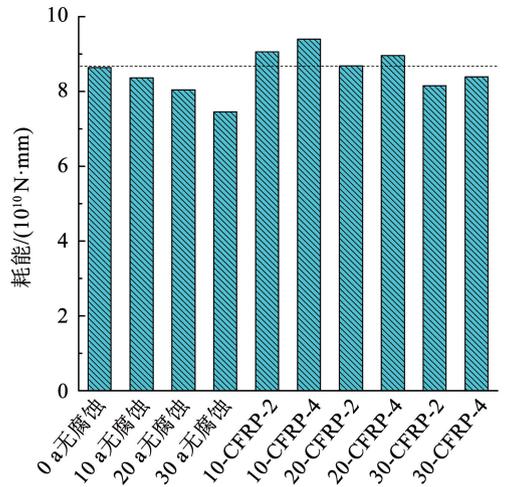


图 18 不同结构滞回耗能总量

Fig. 18 Total hysteretic energy consumption of different structures

### 5 结 论

本文开展了不同温度下 CFRP-钢结构单剪破坏形态及腐蚀和 CFRP 加固对风电塔筒结构屈曲及滞回性能影响的研究,得出以下结论:

- 1) 高温状态下,胶层的软化现象对 CFRP-钢结构破坏形态影响较小,在数值模拟时可以用简化的绑定约束代替 CFRP 和钢之间的胶结作用;
- 2) 循环荷载作用下腐蚀导致风电塔筒提前屈曲,结构刚度退化加速,延性降低,材料塑性耗能比例减小,“屈曲铰”耗能比例增加,整体耗能能力下降;
- 3) CFRP 加固可以延缓结构在循环荷载作用下屈曲的发生,“屈曲铰”耗能比例相应减小,材料塑性区域扩大,整体耗能能力提升。

### 参考文献

[1] KHODABUX W, CAUSON P, BRENNAN F. Profiling corrosion rates for offshore wind turbines with depth in the North Sea[J]. Energies, 2020, 13(10): 2518. DOI: 10.3390/en13102518

[2] XU Shanhua, ZHANG Zongxing, QIN Guangchong. Study on the seismic performance of corroded H-shaped steel columns [J]. Engineering Structures, 2019, 191: 39. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.04.037

- [3]何剑侠. 随机点蚀圆钢管构件力学性能劣化的数值分析[D]. 南京: 东南大学, 2018  
HE Jianxia. Mechanical properties deterioration assessment of random pitting steel tube members using numerical method[D]. Nanjing: Southeast University, 2018
- [4]全邦釘, 真鍋佑輔, 片岡望, 等. 三次元画像計測および有限要素解析による腐食鋼板の座屈挙動の検討[J]. 土木学会論文集 A2(応用力学), 2014, 70(2): 1\_877  
CHUN P J, MANABE Y, KATAOKA N, et al. An investigation of buckling behavior of corroded steel plates by three dimensional image measurement and finite element analysis [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM)), 2014, 70(2): 1\_877. DOI: 10.2208/jscejam.70.1\_877
- [5]森下泰光, 山田靖則, 中井博, 等. 薄肉補剛形断面を有する鋼圧縮部材の連成座屈挙動に関する実験的研究[J]. 鋼構造論文集, 2003, 10(40): 33  
MORISHITA H, YAMADA Y, NAKAI H, et al. Experimental study on interactive buckling behavior of steel compression members with thin-walled stiffened box cross section[J]. Kou Kouzou Ronbunshuu 2003, 10(40): 33. DOI: 10.11273/jssc1994.10.40\_33
- [6]GHAVANLOO E, FAZELZADEH S A, SOHRABPOUR S. Buckling analysis of nonlocal anisotropic thin-walled cylindrical shells subject to combined loading [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016, 142(12): 06016009. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001164
- [7]陈以一, 程欣, 贺修樟. 薄柔截面构件屈曲铰及钢框架破坏机构分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 109  
CHEN Yiyi, CHENG Xin, HE Xiuzhang. Buckling hinge of non-plastic section members and analysis of failure mechanism of steel frames[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(4): 109. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2014.04.015
- [8]松村政秀, 北田俊行, 徳林宗孝, 等. 炭素繊維シートを円周方向に貼付する橋脚鋼管柱の耐震補強法に関する実験的研究[J]. 土木学会論文集, 2004(766): 17  
MASAHIDE M, TOSHIYUKI K, MUNETAKA T, et al. Study on seismic retrofitting of circular steel bridge piers stiffened in circumference direction by CFRP sheets [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 2004 (766): 17. DOI: 10.2208/jscej.2004.766\_17
- [9]王海涛. CFRP 板加固钢结构疲劳性能及其设计方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2016  
WANG Haitao. Study on the fatigue behavior of CFRP plate strengthened steel structures and its design method[D]. Nanjing: Southeast University, 2016
- [10]MUFLIKHUN M A, HIGUCHI R, YOKOZEKI T, et al. The evaluation of failure mode behavior of CFRP/Adhesive/SPCC hybrid thin laminates under axial and flexural loading for structural applications[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 185: 107747. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107747
- [11]TARAGHI P, SHOWKATI H, ZIRAKIAN T. Buckling stability performance assessment of CFRP-strengthened conical shells under uniform external pressure[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 148: 106618. DOI: 10.1016/j.tws.2020.106618
- [12]DEBSKI H, ROZYLO P, TETER A. Buckling and limit states of thin-walled composite columns under eccentric load [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 149: 106627. DOI: 10.1016/j.tws.2020.106627
- [13]KADHIM M M A, WU Z, CUNNINGHAM L S. Experimental and numerical investigation of CFRP-strengthened steel beams under impact load[J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145(4): 04019004. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002288
- [14]MORGADO M A, CARBAS R J C, DOS SANTOS D G, et al. Strength of CFRP joints reinforced with adhesive layers [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 97: 102475. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2019.102475
- [15]王萌. 强烈地震作用下钢框架的损伤退化行为[D]. 北京: 清华大学, 2013  
WANG Meng. Damage and degradation behaviors of steel frames under severe earthquake[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013
- [16]小野潔, 藪本篤, 秋山充良, 等. 軸圧縮力と 1 方向正負交番曲げを受けるスパイラル鋼管の耐震性能とその評価法[J]. 土木学会論文集 F, 2010, 66(2): 301  
KIYOSHI O, ATSUSHI Y, MITSUYOSHI A, et al. Seismic performance evaluation of hollow spiral steel pipes under compressive axial force and bending moment [J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu F, 2010, 66(2): 301. DOI: 10.2208/jscejf.66.301
- [17]建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015  
Specification for seismic test of building: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015

(编辑 苗秀芝)