

# 约束钢管混凝土圆柱的低周反复荷载试验研究

秦鹏<sup>1</sup>, 肖岩<sup>1</sup>, 周云<sup>1</sup>, 张国伟<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院 湖南 长沙 410082; 2. 北京建筑工程学院 土木与交通工程学院 北京 100044)

**摘要:** 文章进行了2根圆钢管混凝土柱和4根碳纤维约束圆钢管混凝土柱的低周往复荷载试验。研究了两者破坏形态、滞回性能与变形耗能等方面的差异。试验结果表明,碳纤维的横向附加约束改变了钢管混凝土柱的破坏形态,使其具有更好的延性与耗能能力。以试件的循环耗能为基础,建立了基于疲劳耗能的累积损伤模型用于模拟结构的损伤程度。分析了试件耗能与损伤指标的相关性,以及不同加载制度对试件损伤的影响。分析表明,试验加载制度的差异,对构件循环次数与损伤值的关系有所影响,循环幅值越大,单次损伤指标值越高,但是参数相同的试件在破坏状态下的耗能最终与最终损伤总指标基本一致。试件耗能与损伤指标的相关性较好,表明该模型可以模拟试件的损伤情况,能够用于地震作用后的累积损伤评估。

**关键词:** 钢管混凝土柱; 约束钢管混凝土柱; 抗震试验; 加载制度; 损伤模型

**中图分类号:** TU317+.1; TU375; P315.92 **文献标志码:** A

## Research on CFRP confined circular concrete-filled steel tubular columns subjected to cyclic lateral forces

QIN Peng<sup>1</sup>, XIAO Yan<sup>1</sup>, ZHOU Yun<sup>1</sup>, ZHANG Guowei<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Reversed cyclic loading under constant axial load experiment was conducted on 2 conventional concrete filled steel tubular (CFT) columns and 4 carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) confined concrete filled steel tubular (CFT) columns. Failure mode, hysteretic behavior and energy dissipation were investigated. The experimental results show the horizontal restraining by carbon-fiber changes the failure mode of the CFT. Based on the cyclic energy consumption of the specimens, a cumulative damage model based on fatigue energy consumption was established to simulate the damage extent of the column. The relationship between energy dissipation and damage index was analyzed, and we found that the different loading sequence has influence on the specimen damage. The damage index was increased with the cyclic amplitude, however the total energy consumption and the final damage index achieve the same level when the parameters are the same. The energy consumption of the specimens has good correlation with the damage index. This indicates the proposed model could be used for accumulative damage evaluation.

**Key words:** CFT columns; confined CFT columns; seismic testing; displacement history sequence; damage model

收稿日期: 2012-08-29; 修订日期: 2012-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178174); 国家自然科学基金青年基金项目(51308201); 湖南省自然科学基金项目(12JJ4053); 湖南省研究生科研创新项目(CXZ2010B144)

作者简介: 秦鹏(1979-),男,讲师,博士研究生,主要从事组合结构的抗震性能研究. E-mail: pengqin@hnu.edu.cn

通讯作者: 肖岩(1961-),男,教授,博士,主要从事结构工程抗震、工程结构综合防灾等方面的研究. E-mail: yanxiao@hnu.edu.cn

# 引言

钢管混凝土是在钢管中填充混凝土而形成的一种构件,它充分利用了钢管和混凝土两种材料在受力过程的相互影响、相互制约的特点,使其承载能力、延性、耗能等抗震性能较传统结构有显著提高。同时,在施工过程中钢管还可以兼做永久性模板,即节约了材料又缩短了施工周期,因此被广泛地应用于房屋与桥梁结构中。但是研究表明,对于高轴压比条件下的钢管混凝土柱,在低周疲劳试验条件下,柱端易发生塑性压屈,导致结构的滞回承载能力不稳定<sup>[1-2]</sup>。由于混凝土的开裂与钢管的屈曲,导致构件的峰值荷载能力退化加快<sup>[3-4]</sup>。为解决这一问题,肖岩等<sup>[5-8]</sup>在钢管混凝土的研究基础上首先提出了约束钢管混凝土的概念,为增强结构的抗震性能,在可能出现塑性铰的部位设置横向附加约束,控制钢管的局部屈曲,对混凝土的危险区域施加有效的约束。王庆利<sup>[9-11]</sup>等以 CFRP 为约束材料研究了方形截面与圆形截面的轴压和压弯性能。试验结果表明,CFRP 与钢管能够协同工作,与传统的钢管混凝土相比较,约束钢管混凝土能够有效地提高结构柱的轴向承载能力、延性与抗震性能,附加的横向约束有效延迟了钢管的屈曲与撕裂。本文通过对约束钢管混凝土柱与传统钢管混凝土柱的试验对比,研究了两者破坏形态、滞回性能与变形耗能等方面的差异。以试件的循环耗能为基础,建立了基于疲劳耗能的累积损伤模型,用以模拟结构在地震作用下的损伤程度。文中分析了试件耗能与损伤指标的相关性,以及不同加载制度对构件的损伤影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

为了比较传统的钢管混凝土柱与约束钢管混凝土柱的抗震性能,本文设计了 6 个模型柱,通过低周反复荷载试验,模拟不同震级条件下的结构柱反应。其中包括 2 个传统的钢管混凝土柱与 4 个约束钢管混凝土柱,钢管由整块钢板弯曲焊接而成,焊缝与轴线平行,位于拉压面的中线位置,试件的尺寸设计见表 1。约束钢管混凝土采用碳纤维布约束在预估的塑性铰区域(从柱底端向上至 300 mm 处),环绕 4 层,碳纤维与钢管之间采用 1mm 泡沫塑料填充(见图 1),黏贴剂采用碳纤维专用胶。

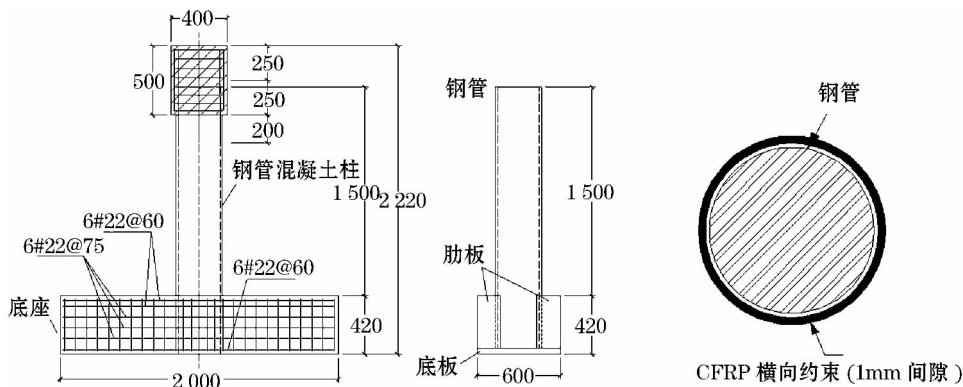


图 1 试件示意图

Fig.1 Specimen details

表 1 试件参数一览表

Table1 Parameters of test specimens

试件 编号	约束 情况	直径 (mm)	壁厚 (mm)	径厚比	钢材屈服 强度 $f_y$ (MPa)	混凝土 强度 $f_c$ (MPa)	轴压力 (kN)	加载 制度
CFT-1	否	336	3	112	270	39	1 300	等幅 6%
CFT-2	否	325	6	54	312	28	2 000	标准加载
CCFT-1	是	336	3	112	270	39	1 300	等幅 6%
CCFT-2	是	336	3	112	270	39	1 300	标准加载
CCFT-3	是	336	3	112	303	39	2 000	标准加载
CCFT-4	是	325	6	54	312	28	2 000	标准加载

## 1.2 材料特性

试件的核心混凝土强度设计等级为 C40 ,浇筑过程中留置 150 mm 的立方体试块 ,用来确定试件的混凝土强度(见表 1) 。钢管采用 Q235 钢 ,钢材的材性由标准拉伸试验确定 ,对每类钢板进行 3 个标准试件进行拉伸 ,测试方法根据《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T228 - 2002) 进行 ,钢材性能见表 1。碳纤维的抗拉强度为 3 400 MPa ,抗拉弹性模量为  $2.4 \times 10^5$  MPa ,厚度为 0.167 mm。

## 1.3 试验装置

试验装置如图 2 所示 ,通过支撑在模型柱底座上的两个钢压梁以及连接钢压梁和地槽的地脚螺栓将模型柱固定在实验室的反力槽上。模型柱的计算高度从柱底端至侧向力加载点为 1 500 mm ,轴向力通过两个 1 500 kN 的液压千斤顶施加 ,在千斤顶中穿过两根 50 mm 的高强钢拉杆 ,钢拉杆的力通过钢梁转化为轴向力加在模型柱的顶端。侧向力施加在模型柱顶部侧边 ,通过 500 kN 的作动器 ,在柱端设置位移计 ,采集侧向位移。

## 1.4 加载制度

加载过程中轴压力控制如表 1 ,为 1 300 kN 和 2 000 kN ,侧向力加载均采用位移控制(层间位移与计算高度的百分比) ,分为标准加载与等幅位移加载 ,直至试件破坏。标准加载为每个级别循环 3 次 ,加载幅值见图 3; 等幅位移加载采用 6% 的侧移率进行循环控制。

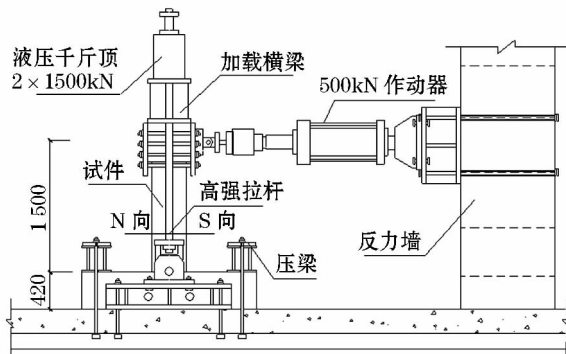


图2 试验装置示意图

Fig. 2 Test setup

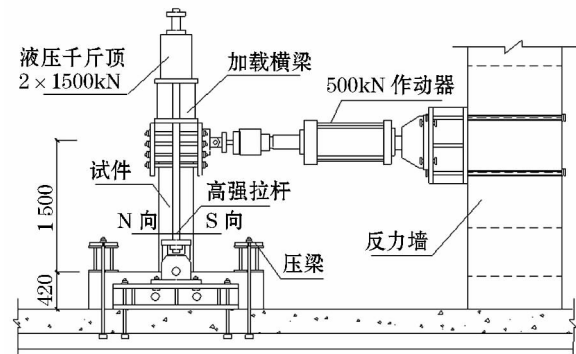


图3 标准加载制度示意图

Fig. 3 Standard loading program

# 2 试验结果

## 2.1 试验现象与破坏特征

试验结果表明 ,因为碳纤维提供了横向的附加约束 ,导致两者在循环周期、破坏形态等方面有所差异。本文选取 CFT-1 与 CCFT-1 两个典型试件进行试验现象说明。CFT-1 在 6% 的等幅侧移率作用下经历了 5 个循环周期 ,破坏形态为钢管焊缝的开裂破坏。CCFT-1 在 6% 的等幅侧移率作用下经历了 7 个循环周期 ,破坏形态为钢管撕裂破坏。为方便试验现象的描述 ,本文规定以平衡位置为零点 ,S 方向定义为正方向 ,N 方向为负方向(见图 2) ,试验现象描述如下。

CFT-1: 第一个循环周期 ,试件由零点位置沿正向至最大位移(6% 侧移率) ,试件未发现明显的变化 ,沿零点回复至正向 2% 的侧移率时 ,距离柱底 60 mm 处的受拉区(N 方向) 钢管出现屈曲 ,屈曲长度为 130 mm; 当试件经历了负向最大位移(-6% 侧移率) ,由负向最大位移往复至零点到达 -3% 侧移率时 ,受拉面(S 方向) 钢管发生屈曲 ,屈曲位置距离柱底 20 mm; 恢复至零点 ,试件的两个屈曲面均有残余变形; 第五个循环周期 ,试件由零点位置沿负向至最大位移(-6% 侧移率) ,钢管沿焊缝处撕裂 ,裂缝自底部长 50 mm ,试件破坏。随着试验的继续加载 ,焊缝处裂缝延伸; 在第七个循环内 ,试件零点位置沿负向至 -3% 侧移率 ,受拉区(S 方向) 钢管撕裂。

CCFT-1: 第一个循环周期 ,试件由零点位置沿正向至最大位移(6% 侧移率) ,试件未发现明显的变化 ,沿零点回复至正向 5% 时 ,碳纤维与钢管的接触面出现缝隙 ,受拉区(N 方向) 泡沫塑料出现错位现象; 试件由零点位置沿负向至最大位移(-6% 侧移率) ,受拉区(S 方向) 泡沫塑料同样出现错位现象 ,同时受压区

(N 方向) 距底部 30 mm 处 碳纤维沿环向出现裂纹 裂纹长 8 mm ,恢复至零点位置 ,受拉区(S 方向) 碳纤维出现错层破坏 ,钢管发生屈曲; 第二个循环周期 ,试件由零点位置沿正向至 3.5% 侧移率 ,受压区(S 方向) 距柱底 30 mm 处碳纤维沿环向均发生错层破坏 ,回复至平衡位置沿负向至最大位移 -6% 侧移率 ,受压面(N 方向) 碳纤维沿环向均发生错层破坏 ,此时 碳纤维沿裂缝逐渐裂开 ,沿柱周形成一个环; 在第三至第六个循环周期内 ,钢管的屈曲从碳纤维形成的环中挤压 碳纤维被拉断; 在第七个循环周期内 ,试件由零点位置沿正向至最大位移(6% 侧移率) ,受拉区钢管撕裂 ,试件破坏。



图 4 核心混凝土破坏

Fig. 4 Failure phenomenon of core concrete

上述试验现象说明 ,普通钢管混凝土柱的破坏特征为: 钢管局部屈曲—焊缝开裂延长—钢管撕裂; 约束钢管混凝土柱的破坏特征为: 碳纤维错层破坏—钢管局部屈曲—环向碳纤维断裂—钢管撕裂。将破坏试件的钢管进行切割 ,并与混凝土剥离 ,照片可见图 4。普通钢管混凝土柱与约束钢管混凝土柱的塑性铰位置基本一致 ,但是核心混凝土的破坏有所差异。这是因为本文试件的钢管采用竖直焊缝 ,普通钢管混凝土柱的破坏首先是焊缝破坏 ,随着焊缝不断延伸 ,焊缝处核心混凝土的横向约束力不断降低 ,导致该区域混凝土压碎剥离 ,混凝土压溃的高度与焊缝展开高度一致。对于约束试件 ,由于碳纤维的附加约束阻止了钢管的焊缝破坏 ,核心混凝土的横向约束力并未显著降低 ,因此两者塑性铰位置的核心混凝土破坏出现差异。

### 2.2 滞回曲线与耗能

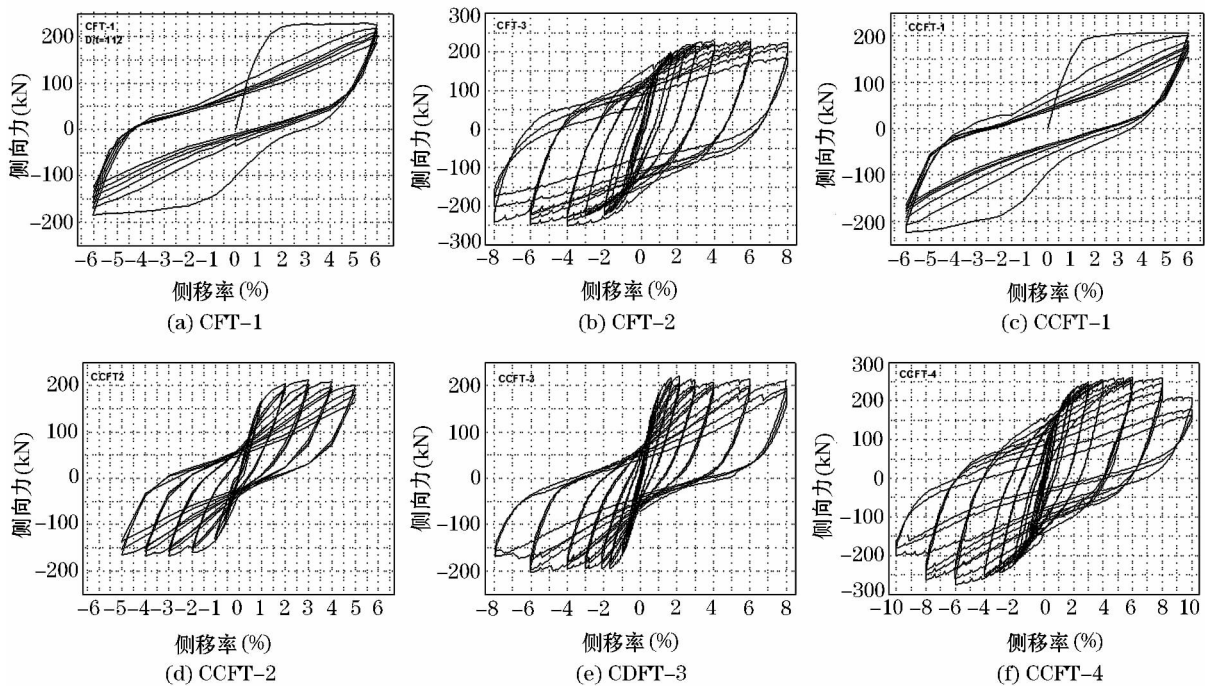


图 5 P-D 滞回曲线

Fig. 5 P-D hysteretic curves

试件的位移与荷载曲线如图 5 所示。约束钢管混凝土柱与普通钢管混凝土柱相比 ,滞回曲线呈纺锤形

状表明其具有更好的耗能性能。约束钢管混凝土柱在相同条件下的循环次数、循环幅值均有较大幅度的提高,如图5(a)~(c)、(b)~(f)这是因为塑性较区域的碳纤维增强了截面的环向约束,延迟了钢管的局部屈曲。从图5(b)~(f)还可以看到,约束钢管混凝土柱的承载能力有一定程度的提高。这是因为钢管承受双向受力状态,包括竖向压力与环向力,依据 von Mises 屈服条件,随着钢管环向应力不断增大,其纵向应力相应不断减小,由于碳纤维的附加横向约束,减小了钢管环向应力的增大,增强了钢管的竖向应力,也增大了对核心混凝土的约束能力,因此提高了核心混凝土的承载能力。结构构件在往复荷载作用下不断消耗能量,滞回曲线中,荷载曲线与位移轴所构成的面积表示耗能的大小。基于此,本文根据试验结果的滞回曲线给出了各试件的耗能计算图(见图6),计算结果表明,约束钢管混凝土柱的耗能均高于传统的钢管混凝土柱。轴压力的大小对于构件的耗能能力有较大的影响,在一定范围内,增大构件的轴压力能有效地提高其耗能能力。

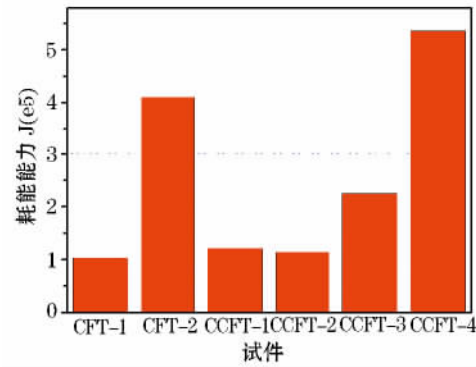


图6 耗能能力图

Fig. 6 Capacity of energy dissipation

### 3 损伤模型

地震作用导致结构在超过材料弹性变形范围下进行多次循环反复,反复次数越多,结构破坏就越严重。工程中许多结构物就是在多次小型余震中破坏的,所以地震引起的结构累积损伤对结构最终倒塌的作用不容忽视。

研究表明<sup>[12]</sup>在相同级别的变形幅值下,每一次滞回循环对钢管混凝土压弯构件所造成的疲劳损伤并不相同;此外,不同加载幅值条件下,每一次滞回循环对钢管混凝土模型柱所造成的损伤大小不仅与变形幅值有关,还与构件承受的荷载次序有关,根据 Manson-Coffin<sup>[13-14]</sup>, Miner<sup>[15]</sup>建立如下公式:

$$D = \sum_{j=1}^m D_j = \sum_{j=1}^m \left[ \sum_{i=1}^m \left[ \frac{W_j^i}{W_{ff}} \right] \right] \quad (1)$$

方程(1)中,  $D$  为构件的损伤指标,  $W_j^i$  表示在等位移幅值  $\delta$  下试件在第  $i$  次循环时耗散的能量;  $W_{ff}$  表示在等位移幅值  $\delta$  下试件所耗散的总的能量。  $n$  表示侧移率为  $\delta$  时的循环次数;  $m$  表示试验过程中侧移率的改变次数。上式中的耗能系数与循环次数服从方程(2):

$$\frac{W_j^i}{W_{ff}} = \beta (i_s)^\eta \quad (2)$$

$$\begin{cases} \beta = A\delta^B \\ \eta = C + \lg\delta^D \end{cases} \quad (3)$$

表示在等位移幅值  $\delta$  下的第  $i$  次滞回;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  分别为结构构件常数<sup>[12]</sup>。

根据上述模型,所有试件的损伤计算结果见表2。计算结果表明,约束钢管混凝土柱的损伤计算值均高于与普通钢管混凝土柱,说明在地震荷载作用下,约束钢管混凝土柱具有更好的抗损伤能力。循环次数与损伤量的关系见图7,图7(a)为普通钢管混凝土柱与约束钢管混凝土柱的循环次数与累积损伤指标对比关系图,图中可以看出约束钢管混凝土柱在相同条件下比普通的钢管混凝土柱承担了更多的循环次数,损伤的程度更大,因为本文建立的模型未考虑碳纤维的损伤情况,所以在3~8的循环周期内,约束钢管混凝土的损伤指标要略低于普通钢管混凝土。图7(b)中CCFT-1与CCFT-2两个试件的试验参数完全一致,但是试验过程中采取的加载制度不同,图中所反映的循环次数与损伤值的关系有所差异,循环幅值越大,单次损伤指标值越高。但是参数相同的试件在破坏状态下的耗能与最终损伤总指标应基本一致。最终计算值说明,不同的试验加载历程对结构性能有一定的影响,但影响不大。本文的损伤计算模型建立的基础是基于疲劳与耗能关系,因此引入了试件耗能与试件损伤指标计算值的关系,如图8所示。结果表明轴压力的大小对耗能与损伤的相关性有一定的影响,轴压力越大,相关性的偏差越大。这是因为损伤模型中的结构构件常数的确定未考虑轴压力的影响。在一定范围内,较高的轴压力能够提高构件的耗能性能,而在计算损伤值的过程中未

考虑这种效应, 所以其相关性能有所降低。

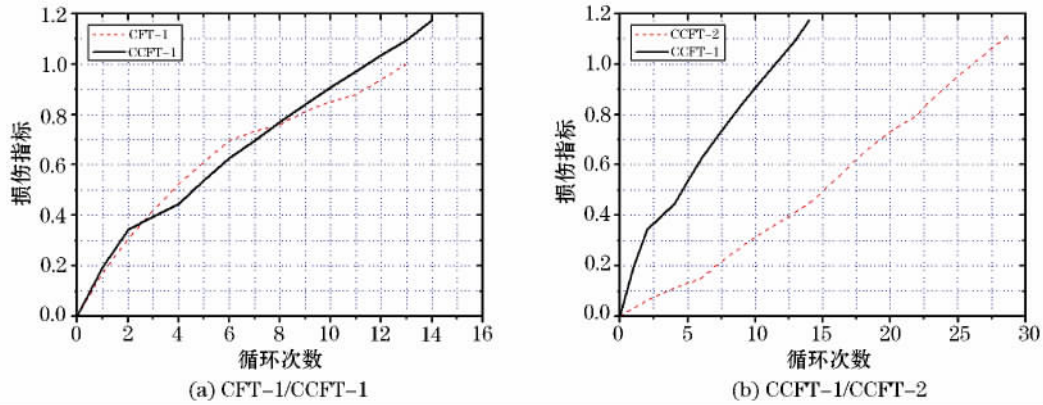


图 7 损伤指标与半循环次数关系

Fig. 7 Relation between count of half cycle and damage index

表 2 试件耗能与损伤指标

Table 2 Energy dissipation of specimen and damage index

试件编号	轴压力 (kN)	加载制度	耗能 (N·m)	损伤值	耗能/损伤
CFT-1	1 300	6%	$1.02 \times 10^5$	1.00	1.02
CFT-2	2 000	标准	$4.12 \times 10^5$	2.65	1.55
CCFT-1	1 300	6%	$1.21 \times 10^5$	1.17	1.03
CCFT-2	1 300	标准	$1.14 \times 10^5$	1.12	1.02
CCFT-3	2 000	标准	$2.27 \times 10^5$	1.76	1.29
CCFT-4	2 000	标准	$5.36 \times 10^5$	4.73	1.13

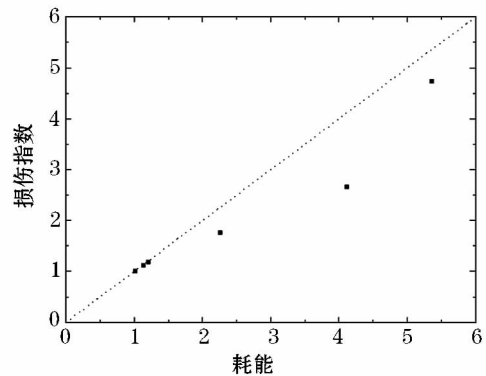


图 8 耗能 with 损伤指标相关性

Fig. 8 Relation between energy dissipation and damage

### 4 结论

本文进行了 4 根约束钢管混凝土柱及 2 根传统钢管混凝土柱的低周反复试验, 分析了两者破坏形态的差异, 建立了基于耗能的损伤模型, 根据试验结果与计算分析, 得出以下结论:

(1) 低周往复荷载条件下, 普通钢管混凝土柱的破坏形式为焊缝破坏, 而约束钢管混凝土柱因为碳纤维的环向约束阻止了焊缝的开裂, 破坏形式表现为钢管的撕裂破坏。两者破坏形态的差别, 导致了构件循环次数与循环幅值的差异, 表明约束钢管混凝土柱具有更好的延性与耗能能力。

(2) 约束钢管混凝土的碳纤维为塑性铰区域提供了附加的横向约束, 减小了钢管环向应力的增大, 增大了钢管的竖向应力, 提高了对核心混凝土的约束能力, 增强了核心混凝土的承载能力。同时因为碳纤维的附加约束改变了构件的破坏形态, 也导致核心混凝土区域的破坏形式有所区别。

(3) 以构件的循环耗能为基础, 建立了基于疲劳耗能的累积损伤模型用于模拟结构的损伤程度。计算结果表明, 试件的耗能与损伤指标的相关性基本一致, 能够较好地模拟构件的损伤情况。试验加载制度的差异, 对构件循环次数与损伤值的关系有所影响, 循环幅值越大, 单次损伤指标值越高。但是参数相同的试件在破坏状态下的耗能与最终损伤总指标应基本一致。

#### 参考文献:

[1] Sakino K, Tomii M. Hysteretic behavior of concrete filled square steel tubular beam-Column failed in flexure [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1981, 3: 439 - 446.

[2] 肖 岩. 套管钢筋混凝土柱结构的发展和展望 [J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 8 - 12.

XIAO Yan. Development and prospects of tubed reinforced concrete column structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(4): 8 -

12. ( in Chinese)
- [3] Varma A H , Ricles J M , Sause R , et al. Seismic behavior and modeling of high-strength composite concrete-filled tube ( CFT) Beam-columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research* , 2002 , 58( 5 /8) : 725 - 758.
- [4] Varma A H , Ricles J M , Sause R , et al. Experiment behavior of high strength square concrete-Filled steel tube beam-columns [J]. *Journal of Structural Engineering* , 2002 , 128: 309 - 318.
- [5] Xiao Y , He W H , Mao X Y , et al . Confinement design of CFT columns for improved seismic performance. [C]//*Proceedings of the International Workshop on Steel and Concrete Composite Construction ( IWSCCC -2003)* , Taipei 2003: 217 - 226.
- [6] Xiao Y , He W H , Choi K G. Confined concrete filled tubular ( CCFT) columns [J]. *ASCE Journal of Structural Engineering* , 2005 , 131( 3) : 488 - 497.
- [7] Choi K G , Xiao Y. Analytical model of circular CFRP confined concrete-Filled steel tubular columns under axial compression [J]. *ASCE Journal of Composites for Construction* , 2010 , 14( 1) : 125 - 133.
- [8] 肖岩 ,何文辉 ,毛小勇. 约束钢管混凝土柱的开发研究 [J]. *建筑结构学报* 2004 25( 6) : 59 - 66.  
XIAO Yan , HE Wenhui , MAO Xiaoyong. Development of confined concrete filled tubular ( CCFT) columns [J]. *Journal of Building Structures* , 2004 25( 6) : 67 - 74. ( in Chinese)
- [9] 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( 增刊) : 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( S) : 17 - 23. ( in Chinese)
- [10] 车媛 ,王庆利 ,邵永波 等. 圆 CFRP-钢管混凝土压弯构件滞回性能试验研究 [J]. *土木工程学报* 2011 44( 7) : 46 - 54.  
CHE Yuan , WANG Qingli , SHAO Yongbo , et al. Experimental study on hysteretic behaviors of concrete filled circular CFRP-steel tubular beam-columns [J]. *China Civil Engineering Journal* , 2011 , 44( 7) : 46 - 54. ( in Chinese)
- [11] 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 of static performance of axially compressed concrete filled square steel tubular stub columns confined by CFRP [J]. *China Civil Engineering Journal* , 2011 , 44( 3) : 24 - 31. ( in Chinese)
- [12] 张国伟. 钢管混凝土柱在地震作用下的累积损伤性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学 2009.  
ZHANG Guowei. Research on cumulative seismic damage of CFT columns [D]. Changsha: Hunan University , 2009. ( in Chinese)
- [13] Manson S S. Behavior of materials under conditions of thermal stress [J]. *Heat Transfer Symposium* , University of Michigan Engineering Research Institute , 1953: 9 - 75.
- [14] Coffin L F. A study of effects of cyclic thermal stresses on ductile metal [J]. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers* , 1954 , 75: 931 - 950.
- [15] Miner M A. Cumulative damage in fatigue [J]. *J. Appl. Mech.* , 1945 , 12 ( 3) : 159 - 164.