



## 结构尺寸对方钢管混凝土短柱抗震性能影响的试验研究

金浏 梁健 李冬 杜修力

### EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF STRUCTURAL SIZE ON THE SEISMIC PERFORMANCE OF SQUARE CFST SHORT COLUMNS

JIN Liu, LIANG Jian, LI Dong, DU Xiu-li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.10.0760>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

##### 结构尺寸对钢筋混凝土短柱抗震性能影响:细观分析

EFFECT OF STRUCTURAL SIZE ON SEISMIC PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE SHORT COLUMNS—A MESO-SCALE STUDY

工程力学. 2018, 35(12): 164-174 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.10.0765>

##### CFRP加固钢筋混凝土方柱抗震性能尺寸效应的细观分析

MESO-SCALE ANALYSIS OF SIZE EFFECT ON ASEISMIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE SQUARE COLUMNS STRENGTHENED WITH CFRP

工程力学. 2021, 38(7): 41-51 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.07.0435>

##### 内藏钢管超高强混凝土芯柱组合柱抗震性能试验研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF COMPOSITE COLUMNS WITH HIGH STRENGTH CONCRETE FILLED STEEL TUBE CORES

工程力学. 2017, 34(8): 96-104 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0170>

##### 部分预制装配型钢混凝土短柱抗震性能试验研究

RESEARCH ON SEISMIC PERFORMANCE OF PARTIALLY PRECAST STEEL REINFORCED CONCRETE SHORT COLUMNS

工程力学. 2020, 37(10): 179-191 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.11.0702>

##### 型钢高延性混凝土短柱抗震性能试验研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SEISMIC BEHAVIOR OF STEEL REINFORCED HIGH DUCTILE CONCRETE SHORT COLUMNS

工程力学. 2017, 34(1): 163-170 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2015.06.0484>

##### 轴压加载下高强钢筋混凝土柱尺寸效应试验研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE SIZE EFFECT OF HIGH-STRENGTH RC COLUMNS UNDER AXIAL COMPRESSION

工程力学. 2017, 34(4): 49-56,71 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2015.09.0744>



订阅号: 面向读者



订阅号: 面向作者

扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1000-4750(2023)04-0035-11

# 结构尺寸对方钢管混凝土短柱抗震性能影响的试验研究

金 浏, 梁 健, 李 冬, 杜修力

(北京工业大学城市减灾与防灾防护教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘 要:** 为了研究在低周往复荷载作用下结构尺寸对方钢管混凝土短柱抗震性能的影响, 对 6 根方钢管混凝土短柱开展了水平往复加载试验, 分析了截面尺寸对柱破坏形态、滞回曲线、骨架曲线以及不同抗震性能指标(如刚度退化、耗能能力、延性等)的影响, 阐明了不同截面尺寸对柱名义抗剪强度的影响规律和机制, 研究表明: 不同截面尺寸的试件破坏形态基本相同, 表现为柱底部钢管鼓曲、核心混凝土被压碎的破坏形态; 当截面尺寸由 200 mm 增至 600 mm 时, 在不同加载方向上, 方钢管混凝土短柱名义抗剪强度分别下降了 63.1% (59.8%), 表现出显著的尺寸效应; 随着截面尺寸增大, 相对名义刚度与平均耗能系数呈降低趋势; JIN 等提出的考虑尺寸效应的抗剪强度公式计算值与试验值吻合良好, 说明考虑尺寸效应的方钢管混凝土柱抗剪承载力计算公式能够较为准确的预测其抗剪承载力。

**关键词:** 方钢管混凝土短柱; 尺寸效应; 抗震性能; 名义抗剪强度; 试验研究

中图分类号: TU398+.9 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.10.0760

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF STRUCTURAL SIZE ON THE SEISMIC PERFORMANCE OF SQUARE CFST SHORT COLUMNS

JIN Liu, LIANG Jian, LI Dong, DU Xiu-li

(The key laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In order to study the seismic performance of square concrete filled steel tubular (CFST) short columns, a total of 6 specimens with different cross-sectional sizes were tested under combined constant axial loading and cyclic lateral loading. The failure mode, hysteretic curves, skeleton curves and seismic performance indexes (e. g. stiffness degradation, energy dissipation, ductility, et al.) with different cross-section sizes were analyzed. Meanwhile, the nominal shear strength of specimens with different cross-section sizes was studied. The results indicate that the final failure modes, i.e., the bulge formed a complete ring on each side and the core concrete crushed at the same location, are similar for all columns with different cross-sectional sizes. The decline of nominal shear strength can be observed obviously as the structural size increases, i.e. the nominal shear strength decreases by 63.1% and 59.8% as the cross-section size varies from 200 mm to 600 mm under two opposite loading directions, indicating an obvious size effect; the relative nominal stiffness and the average energy dissipation coefficient decrease with the increase of structural size. The predicted values of shear strength formula that considers the size effect agree well with the tested values, implying this formula can be used to evaluate the shear capacity of square CFST short columns.

**Key words:** square CFST short column; size effect; seismic performance; nominal shear strength; experimental studies

收稿日期: 2021-10-04; 修改日期: 2022-01-18

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC1504302); 国家自然科学基金项目(51822801)

通讯作者: 杜修力(1962—), 男, 四川人, 中国工程院院士, 博士, 博导, 主要从事土木工程防灾减灾方面研究 (E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn).

作者简介: 金 浏(1985—), 男, 江苏人, 教授, 博士, 博导, 主要从事混凝土结构防灾减灾领域研究 (E-mail: jinliu@bjut.edu.cn);

梁 健(1992—), 男, 河北人, 博士生, 主要从事钢-混凝土组合结构抗震性能领域研究 (E-mail: liangjian258217@163.com);

李 冬(1988—), 男, 北京人, 副研究员, 博士, 博导, 从事混凝土材料及工程结构防灾减灾领域研究 (E-mail: dong\_li@bjut.edu.cn).

由于钢管混凝土柱具有承载力高、耐火性能良好以及抗震性能好等优势,越来越多的高层和超高层建筑以及大跨度桥梁采用钢管混凝土柱作为其主要承重构件<sup>[1-4]</sup>。在我国建筑结构中,矩(方)形钢管混凝土柱由于布置简单、施工方便而被较多的采用,其最大截面尺寸已达到4 m×2 m<sup>[3-4]</sup>。当钢管混凝土柱截面尺寸较大时,在建筑结构中往往容易形成短柱<sup>[5]</sup>。地震作用下,短柱往往容易发生脆性剪切破坏<sup>[5]</sup>。国内外专家学者针对钢管混凝土柱的抗震性能开展了一系列的研究<sup>[6-16]</sup>,针对方钢管混凝土柱抗震性能影响因素的研究主要集中在轴压比<sup>[6-12, 14-15]</sup>、宽厚比<sup>[6-7, 9-10]</sup>、长细比<sup>[6, 11]</sup>、混凝土强度<sup>[6, 8, 10, 12]</sup>以及钢材强度<sup>[6, 9, 12]</sup>等。然而,现有研究成果<sup>[5-16]</sup>,多基于缩尺模型开展的破坏性试验,试件截面尺寸大多集中于150 mm×150 mm~300 mm×300 mm,且多是研究钢管混凝土长柱的压弯力学性能,因而无法反映建筑结构中大尺寸钢管混凝土短柱的抗震性能。另外,通过对大尺寸钢筋混凝土柱抗震性能及尺寸效应的研究表明:其抗震性能与构件尺寸密切相关<sup>[16-18]</sup>。同时,王文静<sup>[19]</sup>和陈鹏<sup>[20]</sup>对钢管混凝土柱在轴压荷载作用下力学性能的尺寸效应进行了试验研究,研究结果表明:钢管混凝土柱的破坏形态、峰值应力和峰值应变等轴压力学性能表现出明显的尺寸效应;同时,还发现规范中轴压承载力计算公式并未考虑尺寸效应的影响,随着截面尺寸的增加有高估承载力的趋势。目前,各个国家都颁布了钢管混凝土结构技术规范和规程<sup>[21-23]</sup>,各个规范提出的构件水平承载力计算公式也是基

于缩尺模型试验并进行扩展外推得到的,而对于大尺寸钢管混凝土柱是否适用或是否也存在一定程度的尺寸效应,有待进一步研究。

本文对6个几何相似的方钢管混凝土短柱开展低周往复加载试验,研究了截面尺寸对方钢管混凝土短柱破坏模式、滞回曲线、骨架曲线以及抗震性能指标(刚度退化、耗能能力和延性等)的影响规律;提出了适用于方钢管混凝土柱局部屈曲长度的计算公式;并且详细分析了截面尺寸对于柱名义抗剪强度的影响。本文揭示了大尺寸方钢管混凝土短柱的抗震性能及其尺寸效应规律,为钢管混凝土结构的应用提供一定的参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

以截面尺寸( $B = 200\text{ mm}$ 、 $400\text{ mm}$ 、 $600\text{ mm}$ )为主要研究参数,本文设计3种工况共计6个方钢管混凝土短柱试件,试件设计参数和几何尺寸示意图分别见表1和图1。

表1中: $B$ 为截面尺寸(横截面宽度); $t$ 为钢管厚度; $L$ 为试件有效高度。试件的剪跨比 $L/B$ 为2;截面宽厚比 $B/t$ 为50,满足现行规范要求<sup>[21]</sup>。

表1 试件基本参数  
Table 1 Basic parameters of specimens

试件编号	$B/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$B/t$	$L/\text{mm}$	$n$
CFST-ST-1/2	200	4	50	400	0.4
CFST-SF-1/2	400	8	50	800	0.4
CFST-SX-1/2	600	12	50	1200	0.4

注: $B$ 为横截面宽度; $t$ 为钢管厚度; $L$ 为试件有效长度; $n$ 为轴压比。

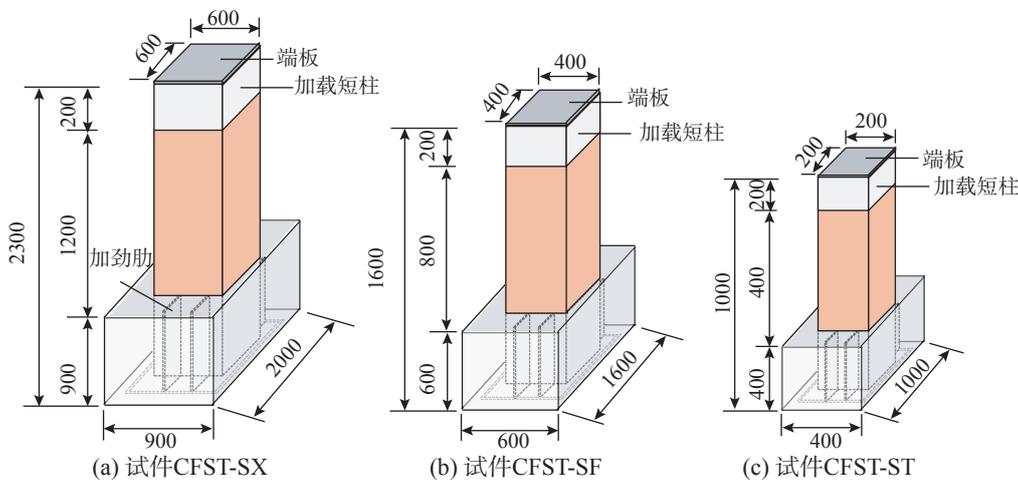


图1 方钢管混凝土短柱试件几何尺寸及构造

Fig. 1 Dimensions and configuration of square CFST short columns

轴压比  $n$  按照  $n = N / (f_y A_s + f_c A_c)$  进行确定, 其中  $N$  为作用在试件上的轴向荷载;  $f_y$  为钢材屈服强度;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度;  $A_s$  与  $A_c$  分别为钢管和核心混凝土的面积。试件分为 3 组, 分别采用 CFST-ST-1/2、CFST-SF-1/2、CFST-SX-1/2 的编码形式对各试件进行编号, 其中: CFST 代表钢管混凝土; S(Square) 表示方形截面; T(Two)/F(Four)/X(Six) 表示试件不同的横截面宽度; 1/2 则表示同一组试件内的编号。以 CFST-ST-1 为例, 其表示截面尺寸  $B$  为 200 mm 的第 1 根方钢管混凝土柱。

为了保证试件与底座的刚性连接, 将钢管底端与加劲肋和底板进行焊接, 从钢管另一端浇筑混凝土, 并采用振捣棒进行振捣, 保证混凝土密实。核心混凝土自然养护 28 d 后, 将核心混凝土顶部打磨、找平, 最后焊接顶部刚性端板来保证钢管和核心混凝土共同受力, 试件制作完成。

### 1.2 材料性能

试件外部钢管均采用 Q345 钢材制作。为了保证试件宽厚比一致, 分别取不同厚度  $t$  的钢材制作标准拉伸试件并按照《金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》(GB/T 228.1-2010)<sup>[24]</sup> 进行拉伸试验, 测量得到的钢材力学性能, 见表 2。

表 2 钢材材性表  
Table 2 Material properties of steel

组别	$t_a/\text{mm}$	$E_s/\text{GPa}$	$f_y/\text{MPa}$	$f_u/\text{MPa}$	$\mu$
1	3.91	277.16	356.28	495.07	0.27
2	7.91	245.78	325.99	486.93	0.29
3	11.80	242.75	338.96	536.25	0.28

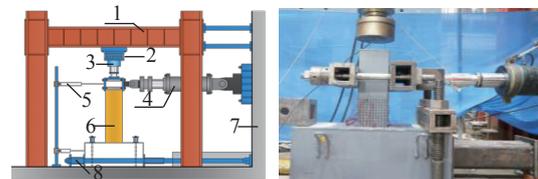
注:  $t_a$  为拉伸试件的平均厚度;  $E_s$  为弹性模量;  $f_y$  和  $f_u$  分别为钢材屈服强度和抗拉强度;  $\mu$  为泊松比。

试件采用同一等级强度的同一批次商品混凝土进行浇筑。预留混凝土标准试块 (150 mm×150 mm×150 mm) 自然养护至 28 d 后, 根据《普通混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2019)<sup>[25]</sup> 测量其抗压强度和劈裂抗拉强度分别为 58.5 MPa 和 4.93 MPa。在试件加载之前对预留混凝土试块进行测试, 其抗压强度为 61.2 MPa。按照《混凝土结构设计规范》<sup>[26]</sup> 对混凝土轴心抗压强度进行计算, 为 37.0 MPa。

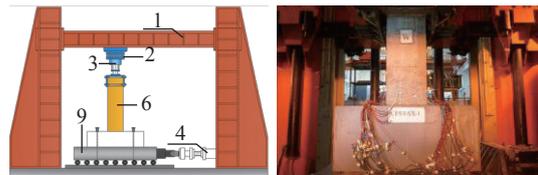
### 1.3 试验装置与加载制度

本试验在北京工业大学结构工程试验中心进行。采用两种不同的加载装置对不同截面尺寸的方钢管混凝土短柱进行加载, 如图 2 所示。图 2(a)

为 300 t 的液压千斤顶和 100 t 的水平作动器对试件 CFST-ST 进行加载。图 2(b) 为 4000 t 大型试验机对试件 CFST-SF 和 CFST-SX 进行加载。



(a) 试件 CFST-ST ( $B=200$  mm) 加载装置



(b) 试件 CFST-SF ( $B=400$  mm) 和 CFST-SX ( $B=600$  mm) 加载装置

注: 1—刚性框架; 2—滚轴; 3—液压千斤顶; 4—水平作动器; 5—位移计; 6—试件; 7—反力墙; 8—地锚; 9—滑板车

图 2 加载装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test loading device

试验首先施加轴力至设计轴压力并持续至试验结束。水平方向加载全程采用位移控制, 当侧移率  $\theta = \Delta/L$  ( $\Delta$  为水平位移,  $L$  为试件长度) 为 0.25%、0.5% 和 0.75% 时, 施加 1 次加载循环; 当侧移率  $\theta = \Delta/L$  为 1.0%、1.5%、2%、2.5%、... 时, 施加 2 次加载循环, 如图 3 所示。依照此加载制度, 直至试件水平承载力降至峰值承载力的 85% 或者试件破坏<sup>[13]</sup>, 则停止加载, 试验结束。

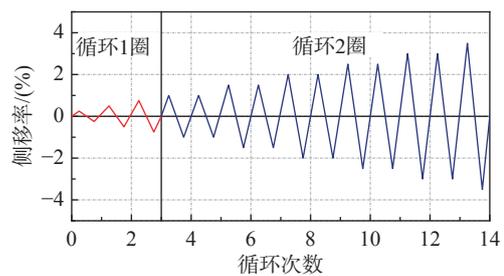


图 3 加载制度

Fig. 3 Loading scheme

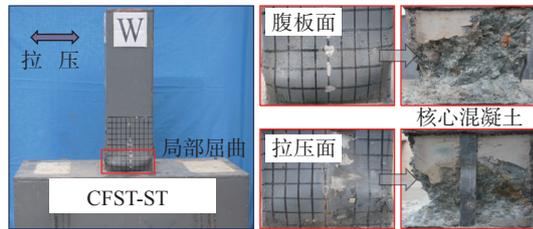
### 1.4 试验测量

本文试验主要测量内容包括竖向荷载和水平荷载、加载点处的水平位移和主要应变。对于竖向荷载和水平荷载主要采用力传感器进行监控和采集。加载点处的水平位移则采用拉线位移计进行采集。在加载端面及其相对面沿柱高布置竖向应变片, 监测外部钢管的竖向应变。另外, 采用手动测量方法记录试件底部的局部屈曲长度。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 破坏过程及形态

图4给出了方钢管混凝土短柱的最终破坏现象：所有试件的破坏模式基本相同，均表现为底部鼓曲、核心混凝土被压碎的破坏现象。



(a) 试件CFST-ST( $B=200$  mm), 网格尺寸 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$



(b) 试件CFST-SF( $B=400$  mm), 网格尺寸 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$



(c) 试件CFST-SX( $B=600$  mm), 网格尺寸 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$

图4 试件最终破坏形态

Fig. 4 Failure diagram of all specimens

各试件的破坏过程也大致相同，经历了弹性阶段、弹塑性阶段以及破坏阶段。本文以典型试件CFST-SX-1( $B=600$  mm)为例，具体破坏过程见图5所示。在试验加载初期，试件处于弹性阶段，试件表面没有明显变化，应变表现为线性增长。随着水平位移的增大，试件底部受压侧出现轻微的鼓曲现象，柱底纵向应变达到屈服应变，试件进入弹塑性阶段。随后进行反向加载，鼓曲部分被拉平，另一侧柱底部出现鼓曲现象。随着加载过程的进行，核心混凝土被压碎，底部钢管局部屈曲范围逐渐增大，并且伴随有漆皮掉落的现象。当试件到达峰值承载力后，试件水平承载力开始下降，并且腹板面(与加载方向平行的截面)也出现了局部屈曲的现象。随着侧移率的进一步加大，柱底部形成明显的环状鼓曲，试件水平承载力下降至峰值承载力的85%以下，试验结

束。为了观察核心混凝土的破坏形态，加载结束后将外部钢管剥开，发现核心混凝土被压碎，破坏严重，如图4所示。

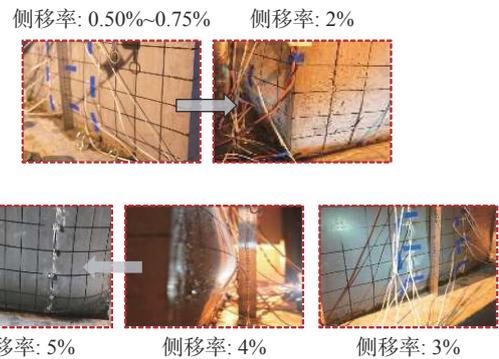


图5 典型柱CFST-SX-1破坏过程

Fig. 5 Failure process of typical column CFST-SX-1

### 2.2 滞回曲线

图6给出了6个方钢管混凝土短柱滞回曲线。在试件加载初期，曲线基本保持线性，试件处于弹性阶段。在弹性阶段，试件整体变形较小，卸载后残余变形较小，滞回环面积不大，试件在该阶段基本上不产生能量耗散。随着水平位移的增大，试件屈服，残余变形逐渐变大，曲线斜率减小，滞回环饱满，能量耗散逐渐增多，此时试件处于弹塑性阶段。当试件进入破坏阶段，残余变形和能量耗散不断增大，试件水平承载力和刚度退化明显。由于钢材的Bauschinger效应<sup>[15]</sup>和核心混凝土的累积损伤，在同级水平位移下，第2次循环加载时试件的水平承载力明显低于第1次循环加载。图6中标示了试件局部屈曲的起始点，随着截面尺寸 $B$ 的增大，试件发生局部屈曲时所对应的侧移率在减小。

### 2.3 骨架曲线

各个试件的水平荷载-水平位移骨架曲线以及特征点(屈服点、峰值点、破坏点)均见图7所示。骨架曲线与滞回曲线一致，都经历了弹性-弹塑性-破坏三个阶段，相同截面尺寸的两根试件水平承载力和曲线变化趋势基本相同。从图7能够看出，当截面尺寸 $B$ 为 $200$  mm时，试件CFST-ST下降段较缓；但是当截面尺寸 $B$ 为 $400$  mm和 $600$  mm时，试件CFST-SF和CFST-SX的下降较快。这是因为当截面尺寸增大时，外部钢管对于核心混凝土的有效约束面积减小，导致核心混凝土损伤累积较快，这与WANG等<sup>[27]</sup>试验结果一致。

需要说明的是，在我国现行规范中，对多层、

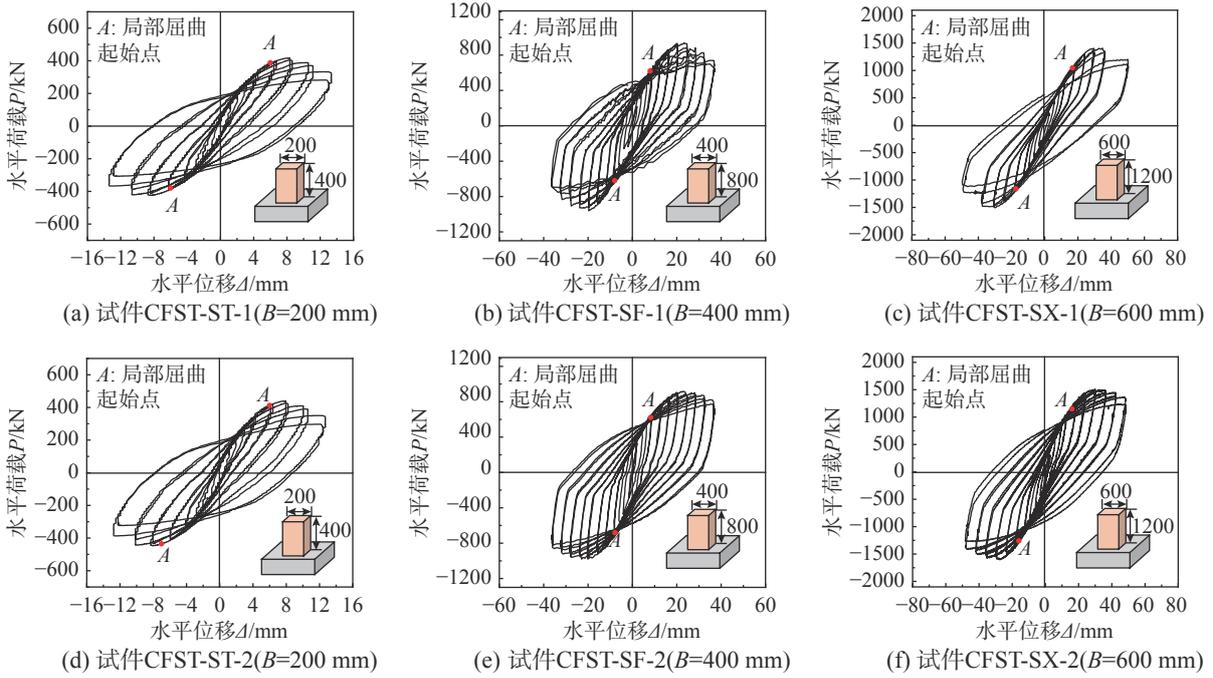


图 6 不同截面尺寸的试件滞回曲线

Fig. 6 Load-displacement hysteretic curves of specimens with different cross-section sizes

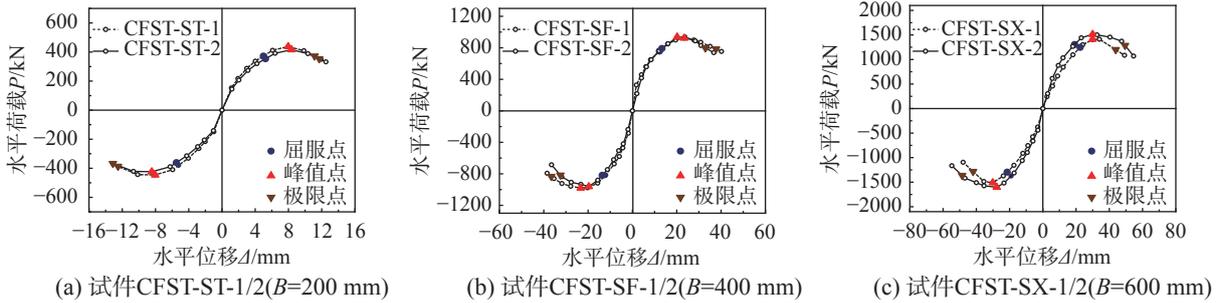


图 7 试件的骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves of all specimens

高层钢管混凝土柱在不同阶段的层间位移转角提出了限值要求<sup>[21]</sup>：弹性和弹塑性层间位移转角的限值分别为  $\theta_e = 1/300$  和  $\theta_p = 1/50$ 。如图 8 所示，方钢管混凝土短柱的位移转角  $\theta_{e,t}$  和  $\theta_{p,t}$  均满足规范要求，但是随着截面尺寸  $B$  的增大，层间位移角呈减小的趋势。

#### 2.4 名义剪切强度

现有研究<sup>[28]</sup>表明：方钢管混凝土柱剪跨比  $L/B \leq 2$  时，属于短柱。在轴向荷载和水平荷载的共同作用下，方钢管混凝土短柱最终破坏形态可能为剪切破坏或者弯剪破坏<sup>[28]</sup>。为了更加准确地评价本文试验试件的破坏模式，根据《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)<sup>[21]</sup> 分别计算了当方钢管混凝土短柱发生压弯破坏和弯剪破坏时的水平承载力分别为  $V_m$  和  $V_s$  (见表 3 所示)。

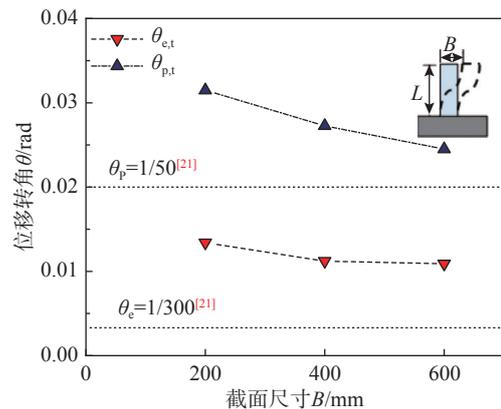


图 8 位移转角  $\theta$  与截面尺寸  $B$  关系曲线

Fig. 8 Relationship between the tested drift angle  $\theta$  and cross-section size  $B$

本文设计工况下的方钢管混凝土短柱发生压弯破坏时的水平承载力大于发生弯剪破坏时的水平承载力，所以可以判定试验试件的最终破坏形

表 3 不同破坏形态下方钢管混凝土短柱水平承载力  
Table 3 Lateral bearing capacity of square CFST stocky with different failure modes

试件编号	水平承载力/kN		
	$V_m$	$V_s$	$V_e$
CFST-ST	404.4	379.6	431.0
CFST-SF	1617.7	921.2	951.0
CFST-SX	3639.7	1283.5	1509.6

注:  $V_m$  为发生压弯破坏时的水平承载力;  $V_s$  为发生弯剪破坏时的水平承载力;  $V_e$  为试验水平承载力的平均值。

态为弯剪破坏。因此, 本文采用名义抗剪应力  $\tau = P/B^2$  ( $P$  为柱水平荷载) 来研究截面尺寸  $B$  对方钢管混凝土短柱水平承载力的影响。图 9 给出了特征点处(屈服点、峰值点、破坏点)的方钢管混凝土短柱名义抗剪应力随截面尺寸变化示意图。随着截面尺寸  $B$  由 200 mm 增加 600 mm 时, 在不同加载方向上, 柱在屈服点、峰值点和极限点处的名义抗剪应力分别下降了 60.6% (60.6%)、63.1% (59.8%)、63.1% (59.8%), 均表现出了显著的尺寸效应。

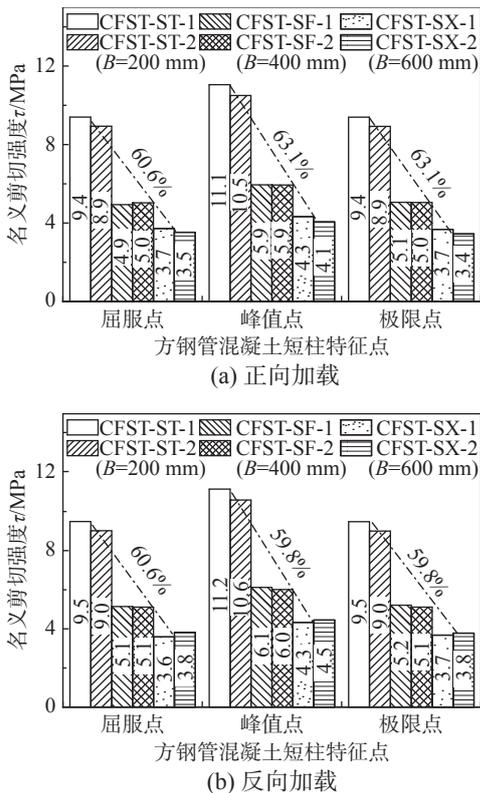


图 9 特征点处的试件名义抗剪应力图  
Fig. 9 Nominal shear stress of specimens at the characteristic points

在轴向荷载和水平荷载的作用下, 外部钢管处于双向应力状态(忽略径向应力), 核心混凝土处于三向应力状态; 当截面尺寸增大时, 外部钢

管对核心混凝土约束减弱<sup>[27]</sup>, 核心混凝土抗压强度增加有限, 使得外部钢管的轴向应力增大, 而环向应力减小, 导致方钢管混凝土短柱水平承载力随着截面尺寸的增大而减小。同时, 随着截面尺寸的增大, 核心混凝土的有效约束面积减小, 横向变形提前, 使得试件 CFST-SF( $B = 400$  mm) 和试件 CFST-SX( $B = 600$  mm) 的抗剪强度降低。

### 2.5 刚度退化

结构或试件的刚度退化通常采用割线刚度来表征, 刚度退化曲线能够反映试件在水平往复荷载作用下的损伤退化。为更好的表征截面尺寸  $B$  对于试件刚度的影响, 本文引入相对名义刚度  $K_r$  描述<sup>[18]</sup>, 其为:

$$K_r = K_{sec}/(3EI/L^3) \quad (1)$$

式中:  $K_{sec}$  为割线刚度;  $E$  为混凝土弹性模量;  $I$  为截面惯性矩。图 10 给出了试件相对名义刚度的退化曲线。由于外部钢管的局部屈曲以及核心混凝土的损伤累积, 使得试件刚度都经历了较为明显的退化; 随着截面尺寸  $B$  增大, 试件损伤累积提前, 使得相对名义刚度呈减小趋势。另外, 大尺寸试件的刚度退化相较于小尺寸试件要大。

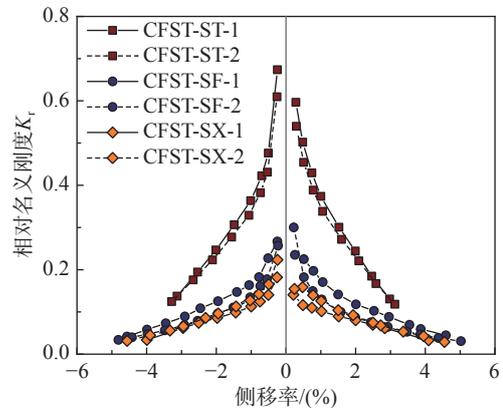


图 10 试件相对刚度变化图  
Fig. 10 Relative nominal stiffness of all the specimens

### 2.6 耗能能力

结构或构件的耗能能力是衡量其抗震性能的重要指标之一。本文采用等效黏滞阻尼系数<sup>[16]</sup>和平均耗能系数<sup>[18]</sup>来评价方钢管混凝土短柱的耗能能力, 如图 11 所示。

图 11(a) 给出了方钢管混凝土短柱的等效黏滞阻尼系数  $\xi_e$  与滞回圈数示意图。所有试件的最终等效阻尼系数位于 0.3~0.4。随着水平位移的增大, 试件等效黏滞阻尼系数逐渐增大, 耗能能力增强。

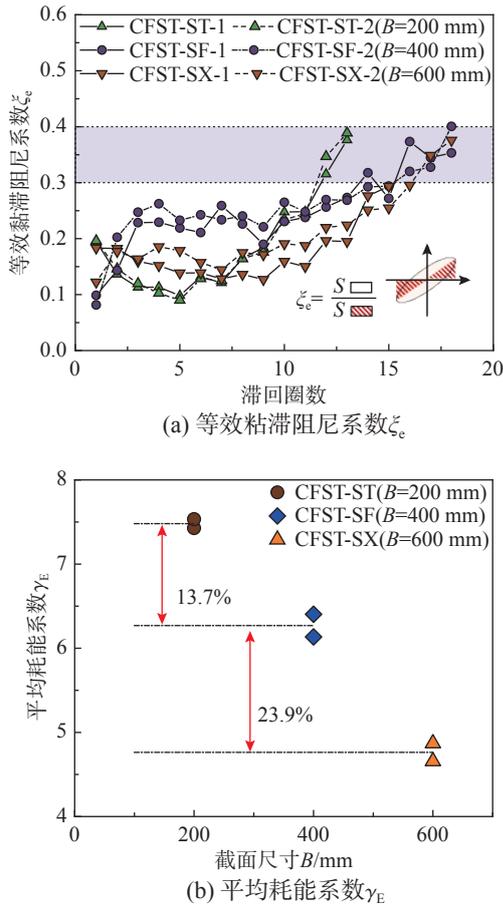


图 11 试件能量耗散能力图  
Fig. 11 Energy dissipation capacities of specimens

为了研究截面尺寸对方钢管混凝土短柱耗能能力的影响，本文采用平均耗能系数  $\gamma_E$ <sup>[18]</sup> 作为评价指标，即为：

$$\gamma_E = \frac{E_u}{mE_y} \quad (2)$$

式中： $\gamma_E$  为平均耗能系数； $E_u$  为试件屈服后至极限点的滞回环面积总和； $E_y$  为名义弹性耗能， $E_y = P_y \Delta_y / 2$ ，其中  $P_y$  和  $\Delta_y$  分别为构件屈服荷载及其对应的位移。

图 11(b) 为方钢管混凝土短柱平均耗能系数随截面尺寸  $B$  的变化图，其平均耗能系数随着截面尺寸的增大而减小。随着截面尺寸增大，试件 CFST-SF( $B=400$  mm) 与试件 CFST-SX( $B=600$  mm) 的平均耗能系数分别下降 13.7% 和 23.9%，表现出明显的尺寸效应，与于春义<sup>[18]</sup> 研究结果一致。

### 2.7 局部屈曲长度

本文依据试件最终破坏结果，测量了方钢管混凝土短柱底部局部屈曲长度，见图 12 所示。图 12(a) 所示，外部钢管在荷载作用下处于轴向受压和环向受拉的双向应力状态，所以其局部屈曲

集中于柱底部的一定区域内。图 12(b)~图 12(d) 给出了不同截面尺寸的方钢管混凝土短柱局部屈曲长度  $l_t$ 。为了分析截面尺寸  $B$  对方钢管混凝土短柱局部屈曲长度的影响，本文采用名义局部屈曲长度  $l_t/B$  进行评价。从图 12 分析得知，随着截面尺寸  $B$  由 200 mm 增大至 600 mm 时，名义局部屈曲长度  $l_t/B$  增大了 17.02%。说明约束越大，核心混凝土的变形能力越好，柱底部局部屈曲长度越小。

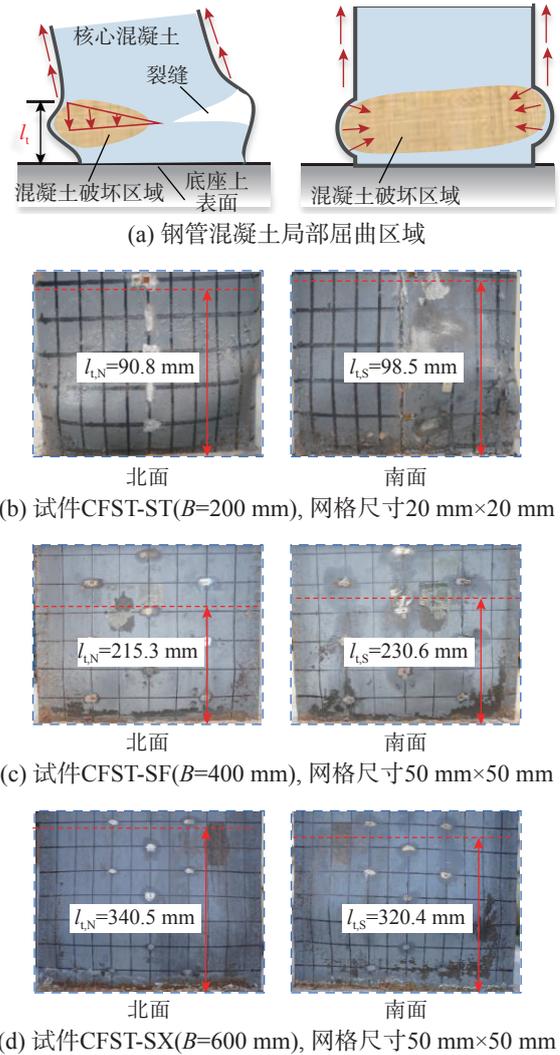


图 12 柱局部屈曲区域与长度  
Fig. 12 Local buckling region and length of columns

图 13 给出了 YASUI<sup>[29]</sup> 和 WU 等<sup>[30]</sup> 提出的适用于圆钢管混凝土柱局部屈曲长度的计算公式。从图 13 可以看出 YASUI<sup>[29]</sup> 和 WU 等<sup>[30]</sup> 的计算公式的预测结果与试验结果之间存在较大误差，低估了方钢管混凝土柱局部屈曲长度。依据现有计算公式并结合试验数据进行拟合，本文修正并得到了适用于方钢管混凝土柱局部屈曲长度  $l_t$  的计算公式，即为：

$$l_t = 4t \sqrt{\frac{B}{t} - 1} \quad (3)$$

式中： $l_t$  为方钢管混凝土柱局部屈曲长度； $t$  为试件钢管的厚度。

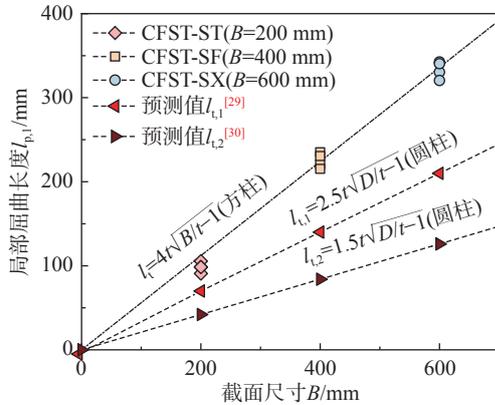


图 13 柱局部屈曲长度试验值与计算值对比图

Fig. 13 Comparison of experimental and calculated values of local buckling length of specimens

总体来说，圆钢管混凝土柱局部屈曲长度小于方钢管混凝土柱。方柱外部钢管对于核心混凝土的约束效果弱于圆柱，所以方钢管混凝土柱的核心混凝土会产生较大的横向变形，外部钢管产生较大的局部屈曲来满足柱能量耗散和塑性变形。本文提出的局部屈曲长度的计算公式的预测

值与试验值之间的误差均值为 5.9%，误差较小。因此，本文提出的公式能够较好的预测方钢管混凝土柱局部屈曲长度。

### 3 方钢管混凝土短柱抗剪承载力计算

结合上述分析，在轴向荷载和水平荷载的共同作用下，方钢管混凝土短柱剪切承载力受到截面尺寸的影响显著。现阶段，中国<sup>[21]</sup>、美国<sup>[22]</sup>和欧洲<sup>[23]</sup>等国家和地区均颁布了钢管混凝土规范或规程。其中，方钢管混凝土柱剪切承载力计算公式均是基于小尺寸试件的试验而建立的。因此，现行规范对大尺寸方钢管混凝土短柱抗剪承载力计算公式的适用性有待验证。

本文采用中国规范 GB 50936—2014、美国规范 AISC 和欧洲规范 EC4 对试验结果进行验证。表 4 给出试验水平承载力 ( $V_{ue}$ )、中国规范计算值 ( $V_{up,China}$ )、美国规范计算值 ( $V_{up,America}$ )、欧洲规范计算值 ( $V_{up,Europe}$ )，还给出 JIN 等<sup>[31]</sup>提出的抗剪承载力计算公式的计算值 ( $V_{up,Jin}$ )。图 14 给出了方钢管混凝土短柱截面尺寸与试验名义抗剪强度 ( $\tau_{ue}$ ) 和各国规范计算 ( $\tau_{up,China}$ 、 $\tau_{up,America}$ 、 $\tau_{up,Europe}$ ) 名义抗剪强度的示意图。

表 4 试件抗剪承载力计算值与试验值

Table 4 Calculation and test result of shear capacity of columns

试件编号	$V_{ue1}$ (正向)/kN	$V_{ue2}$ (反向)/kN	$V_{up,Jin}$ /kN <sup>[31]</sup>	$V_{up,China}$ /kN <sup>[21]</sup>	$V_{up,America}$ /kN <sup>[22]</sup>	$V_{up,Europe}$ /kN <sup>[23]</sup>
CFST-ST-1	419.98	423.92	430.51	105.02	139.69	132.51
CFST-ST-2	442.09	446.23	430.51	105.02	139.69	132.51
CFST-SF-1	951.83	961.63	913.20	419.13	553.57	541.03
CFST-SF-2	950.21	938.31	913.20	419.13	553.57	541.03
CFST-SX-1	1456.70	1509.42	1593.33	1396.89	1245.40	1225.83
CFST-SX-2	1558.30	1512.59	1593.33	1396.89	1245.40	1225.83

注： $V_{ue1}$  和  $V_{ue2}$  为试验中柱正向加载和反向加载的峰值承载力； $V_{up,Jin}$  为文献<sup>[31]</sup>中计算方法的计算值； $V_{up,China}$ 、 $V_{up,America}$ 、 $V_{up,Europe}$  为根据中国规范、美国规范和欧洲规范得到的横向承载力的计算值。

综上所述，为了考虑截面尺寸对于方钢管混凝土柱抗剪承载力的影响，JIN 等<sup>[31]</sup>提出了考虑尺寸效应的抗剪承载力计算公式。该计算公式基于叠加原理分别计算了钢管、轴力以及核心混凝土对于方钢管混凝土柱抗剪承载力的贡献，总承载力  $V_u$  为：

$$V_u = V_s + V_c + V_n \quad (4)$$

式中， $V_s$ 、 $V_c$  和  $V_n$  分别为钢管、核心混凝土以及轴力对承载力的贡献。其中钢管对柱抗剪承载力

的贡献，结合长细比的影响，按照如下式 (5) 和式 (6) 进行插值计算。

$$V_s = 0.3f_y A_s, \lambda \rightarrow 0 \quad (5)$$

$$V_s = \frac{1 + \alpha_s^2}{6\lambda} f_y A_s, \lambda \rightarrow 3.0 \quad (6)$$

式中： $f_y$  为钢管屈服强度； $A_s$  为钢管的截面面积； $\alpha_s$  为混凝土截面宽度与钢管截面宽度之比； $\lambda$  为柱的长细比。另外，根据桁架-拱模型<sup>[31]</sup>，可计算轴力对柱抗剪承载力的贡献，即  $V_n$  为：

$$V_n = \beta N \quad (7)$$

式中： $N$ 为作用在柱上的轴力； $\beta$ 为计算系数， $\beta = \alpha \lambda$ ，其中 $\alpha$ 为轴力影响系数，建议取0.05<sup>[31]</sup>。

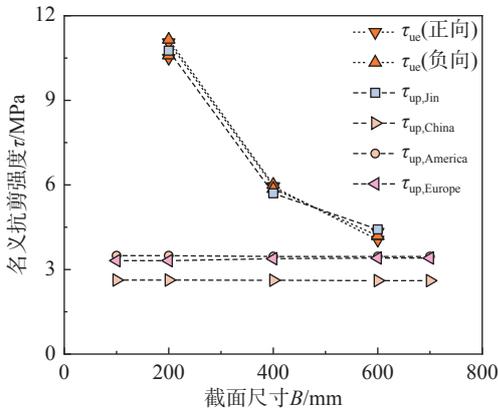


图 14 名义抗剪强度-截面尺寸曲线  
Fig. 14 Nominal shear strength with different cross-section sizes of specimens

由于核心混凝土的非均质性以及钢管与核心混凝土的相互作用，导致方钢管混凝土柱抗剪强度存在尺寸效应<sup>[31]</sup>。为了合理计算核心混凝土对于抗剪承载力贡献，JIN 等<sup>[31]</sup>中提出了考虑尺寸效应的计算公式，其中，核心混凝土对柱抗剪承载力的贡献  $V_c$  为：

$$V_c = \tau_c A_c = \frac{V_0}{\sqrt{1+B/D_0}} \cdot \phi \cdot \gamma \cdot A_c \quad (8)$$

式中： $\tau_c$  和  $A_c$  分别为核心混凝土的名义抗剪强度和截面面积； $V_0$  和  $D_0$  为与混凝土有关的经验系数； $\phi$  和  $\gamma$  分别为强度提高系数和尺寸效应削减系数，即为<sup>[31]</sup>：

$$\phi = \frac{2}{\lambda + 2} \quad (9)$$

$$\gamma = \begin{cases} 1, & \lambda \rightarrow 0 \\ (\gamma_{cr} - 1) \tanh(\omega \lambda) + 1, & 0 < \lambda < \lambda_{cr} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $\gamma_{cr} = \frac{\sqrt{1+B/D_0}}{V_0} \cdot f_t$ ， $f_t$  为混凝土的抗拉强度； $\omega$  为尺寸效应调节系数，建议取值为 5.0~8.0<sup>[31]</sup>，本文中取值为 6.0。

综合上述分析，考虑尺寸效应的方钢管混凝土柱抗剪承载力计算公式，应为：

$$V_u = V_s + V_n + V_c = V_s + \beta N + \frac{V_0}{\sqrt{1+B/D_0}} \cdot \phi \cdot \gamma \cdot A_c \quad (11)$$

为了确定式 (11) 中的  $V_0$  和  $D_0$  两个参数，本文根据 BAZANT 和 KIM<sup>[32]</sup> 提出了剪切强度的尺寸效应理论公式，即为：

$$\tau_c = \frac{V_0}{\sqrt{1+B/D_0}} \quad (12)$$

式中： $\tau_c$  为素混凝土柱名义剪切强度； $V_0$  和  $D_0$  为与混凝土有关的经验系数； $B$  为试件截面尺寸 (此处取柱的横截面宽度)。式 (12) 转化为线性方程，即为：

$$Y = AX + C \quad (13)$$

式中： $Y = (1/\tau_c)^2$ ； $X=B$ ； $A = 1/D_0$ ； $C = 1/D_0^2$ 。以最小尺寸的素混凝土柱为基准试件，对不同尺寸的素混凝土柱进行结果分析，如图 15 所示。

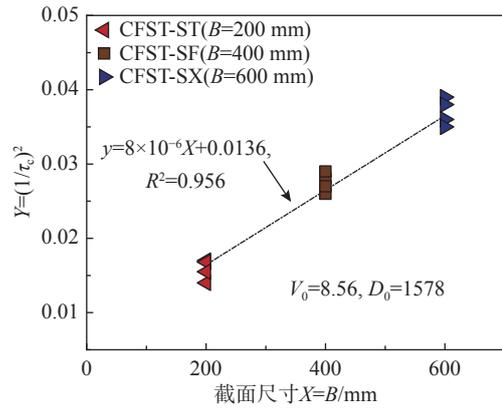


图 15 柱尺寸效应公式回归曲线  
Fig. 15 Size effect regression curves of columns

图 15 给出了  $V_0$  和  $D_0$  在本文中的取值为 8.56 和 1578。将试验参数和系数代入式 (11) 中求得试验试件的抗剪承载力预测值，见表 4 所示。从表 4 和图 14 分析可知，通过试验结果与中国规范、美国规范、欧洲规范的计算结果对比发现，规范中柱剪切承载力计算公式并未考虑截面尺寸的影响。随着截面尺寸的增大，规范剪切强度计算值基本保持不变，导致方钢管混凝土短柱的安全冗余度下降。

JIN 等<sup>[31]</sup> 提出的考虑尺寸效应的计算值与试验值之比的均值为 1.01(1.00)，而各国规范 (中国、美国、欧洲) 计算值与试验值之比的均值分别为 2.48(2.50)、2.00(2.01) 和 2.08(2.09)。通过对比分析发现，相较于规范计算公式，文献 [31] 中提出的考虑尺寸效应的方钢管混凝土柱抗剪承载力计算公式误差控制较好，能够较好的反映结构尺寸的影响，在一定程度上具有较高的准确性，可以作为方钢管混凝土短柱抗剪承载力的评估方法。

## 4 结论

本文通过对 6 根不同截面尺寸的方钢管混凝土

土短柱在恒定轴力和水平往复荷载共同作用下的破坏模式、滞回曲线、骨架曲线以及抗震性能指标进行了研究；另外对名义抗剪强度以及局部屈曲长度进行详细的分析，得到了如下结论：

(1) 大尺寸方钢管混凝土短柱在水平往复荷载作用下，其破坏过程、破坏形态、滞回曲线等与小尺寸试件基本相似。由于核心混凝土被压碎、钢管局部屈曲导致试件水平承载力不足而发生破坏。

(2) 随着截面尺寸的增大，方钢管混凝土短柱的名义抗剪强度呈下降趋势。当截面尺寸  $B$  由 200 mm 增大至 600 mm 时，柱名义抗剪强度分别下降了 63.1%(59.8%)，表现出明显的尺寸效应。

(3) 方钢管混凝土短柱位移转角随着截面尺寸的增大呈减小趋势，能够满足规范要求，但是其安全冗余度减小。试件最终等效粘滞阻尼系数位于 0.3~0.4，表现出了良好的耗能能力；柱平均耗能系数随着截面尺寸增大而降低。

(4) 提出适用于方钢管混凝土柱局部屈曲长度的计算公式，计算值与试验值之间误差为 5.9%，误差较小，可作为其局部屈曲长度的评估方法。

(5) 各国规范中方钢管混凝土短柱抗剪承载力计算公式并未考虑截面尺寸的影响。采用文献 [31] 中提出了考虑尺寸效应的方钢管混凝土短柱抗剪承载力计算公式的计算值，计算不同截面尺寸 ( $B=200$  mm、400 mm、600 mm) 的误差分别为 1.01%、1.02%、2.84%。该公式能够较为准确的预测方钢管混凝土短柱抗剪承载力。

#### 参考文献：

- [1] 郝际平, 黄育琪, 樊春雷, 等. 带约束拉杆壁式钢管混凝土柱拟静力试验研究[J]. *工程力学*, 2021, 38(12): 39 — 48.  
HAO Jiping, HUANG Yuqi, FAN Chunlei, et al. Quasi-static tests of walled concrete-filled steel tubular columns with binding bars [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(12): 39 — 48. (in Chinese)
- [2] YANG L G, WANG Y Y, ELCHALAKANI M, et al. Experimental behavior of concrete-filled corrugated steel tubular short columns under eccentric compression and non-uniform confinement [J]. *Engineering Structures*, 2020, 220: 111009.
- [3] 徐礼华, 宋杨, 刘素梅, 等. 多腔式多边形钢管混凝土柱偏心受压承载力研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(4): 135 — 146.
- [4] 范重, 王倩倩, 李振宝, 等. 大直径钢管混凝土柱抗震性能试验研究及承载力计算[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(11): 34 — 41.  
FAN Zhong, WANG Qianqian, LI Zhenbao, et al. Experimental study on seismic behavior of CFST column with large diameter and calculation of bearing capacities [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(11): 34 — 41. (in Chinese)
- [5] WU B, PENG C W. Shear performance of thin-walled steel tube infilled with precast segments containing DCLs [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 167: 105862.
- [6] 柯晓军, 苏益声, 商效瑀, 等. 钢管混凝土组合柱压弯性能试验及承载力计算[J]. *工程力学*, 2018, 35(12): 134 — 142.  
KE Xiaojun, SU Yisheng, SHANG Xiaoyu, et al. Strength calculation and eccentric compressive test of steel tube-reinforced concrete composite columns [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(12): 134 — 142. (in Chinese)
- [7] SAKINO K, TOMII M. Hysteretic behavior of concrete filled square steel if the Japan tubular beam columns failed in flexure [J]. *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, 1981, 3: 439 — 446.
- [8] MORISHITA Y, TOMII M. Experimental studies on bond strength between square steel tube and encased concrete core under cyclic shearing force and constant axial force [J]. *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, 1982, 4: 363 — 370.
- [9] VARMA A H, RICLES J M, SAUSE R, et al. Seismic behavior and modeling of high-strength composite concrete-filled steel tube (CFT) beam-columns [J]. *Journal of Construction Steel Research*, 2002, 58(5): 725 — 758.
- [10] 吕西林, 陆伟东. 反复荷载作用下方钢管混凝土柱的抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2000, 21(2): 2 — 11.  
LYU Xilin, LU Weidong. Seismic behavior of concrete-filled rectangular steel tubular columns under cyclic loading [J]. *Journal of Building Structures*, 2000, 21(2): 2 — 11. (in Chinese)
- [11] 韩林海, 游经团, 杨有福, 等. 往复荷载作用下矩形钢管混凝土构件力学性能的研究[J]. *土木工程学报*, 2004, 37(11): 11 — 22.  
HAN Linhai, YOU Jingtuan, YANG Youfu, et al. Behavior of concrete-filled steel rectangular hollow sectional columns subjected to cyclic loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(11): 11 — 22. (in Chinese)

- [12] 游经团, 韩林海. 钢管高性能混凝土压弯构件滞回性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(3): 98 — 103.  
YOU Jingtuan, HAN Linhai. Experimental study on high-performance concrete filled steel tubular column subjected to cyclic loading [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(3): 98 — 103. (in Chinese)
- [13] HAN L H, YANG Y F, TAO Z. Concrete-filled thin-walled steel SHS and RHS beam-columns subjected to cyclic loading [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 41(9): 765 — 780.
- [14] VARMA H A, RICLES J M, LU W L. Seismic behavior and design of high-strength square concrete-filled steel tube beam columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 169 — 179.
- [15] HAN L H, TAO Z, YAO G H. Behavior of concrete filled steel tubular members subjected to shear and constant axial compression [J]. Thin-Walled Structures, 2008, 46(7): 765 — 780.
- [16] 解咏平. 钢筋混凝土柱抗震性能尺寸效应试验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.  
XIE Yongping. Size effect on seismic behavior of reinforced concrete columns [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [17] 李振宝, 郭二伟, 周锡元, 等. 大尺寸RC梁柱节点抗震性能及尺寸效应试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 39 — 47.  
LI Zhenbao, GUO Erwei, ZHOU Xiyuan, et al. Seismic behaviors and size effects of large-scale interior beam-column joints of RC frames [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7): 39 — 47. (in Chinese)
- [18] 于春义. 高强混凝土柱抗震性能尺寸效应试验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.  
YU Chunyi. Size effect of seismic behavior of high strength concrete columns [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] 王文静. 大尺寸圆形钢管混凝土轴心受压性能及尺寸效应[D]. 北京: 北京工业大学, 2007.  
WANG Wenjing. Size effect on axial compression performance of full-scale circular concrete filled steel tube [D]. Beijing: Beijing university of technology, 2007. (in Chinese)
- [20] 陈鹏. 圆钢管混凝土轴压短柱尺寸效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
CHEN Peng. Research on size effect of axially loaded circular concrete-filled steel tubular stub column [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [21] GB 50936—2014, 钢管混凝土结构技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
GB 50936—2014, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [22] ANSI/AISC 360-16, Specification for structural steel buildings [S]. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [23] EN1994-1-1, Eurocode4: Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [24] GB/T 228.1—2010, 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
GB/T 228.1—2010, Metallic materials-tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [25] GB/T 50081—2019, 普通混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.  
GB/T 50081—2019, Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [26] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
GB 50010—2010, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [27] WANG Y Y, CHEN P, LIU C Y, et al. Size effect of circular concrete-filled steel tubular short columns subjected to axial compression [J]. Thin-walled Structures, 2017, 120(11): 397 — 407.
- [28] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构(修订版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
CAI Shaohuai. Modern steel tube confined concrete structures (revised edition) [M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese)
- [29] YASUI N. Elasto-plastic analysis for local buckling behavior of circular tubes under axially cyclic loading [J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 2001, 543: 161 — 181.
- [30] WU B, PENG W C, ZHAO X Y. Cyclic loading tests of semi-precast circular steel tubular columns incorporating precast segments containing demolished concrete lumps [J]. Engineering Structures, 2020, 211(5): 110438.
- [31] JIN L, FAN L L, DU X L, et al. Size effect of square concrete-filled steel tubular columns subjected to lateral shear and axial compression: Modelling and formulation [J]. Engineering Structures, 2020, 157: 107158.
- [32] BAZANT Z P, KIM J K. Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beam [J]. Journal of American Concrete Institute, 1984, 81(5): 456 — 486.