

方钢管混凝土柱抗震性能试验研究和仿真分析

聂瑞锋¹, 徐培蓁², 阎宇³

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033;
3. 郑州市规划勘测设计研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 针对长细比等对方钢管混凝土柱的抗震性能的影响, 设计制作 6 个方钢管混凝土柱试件, 采用足尺比例的试件进行了低周反复荷载作用下的抗震性能试验, 并在试验基础上采用有限元软件 Abaqus 进行了数值模拟分析, 取得了较好的一致性。试验结果表明, 钢管混凝土具有较好的塑性变形能力。随含钢率增加, 钢管混凝土柱的耗能能力提高; 随轴压比增大, 试件的水平承载能力提高, 刚度和耗能能力降低; 随长细比增大, 试件的水平承载能力和刚度降低, 耗能能力下降。

关键词: 方钢管混凝土柱; 抗震性能; 低周反复荷载; 塑性变形能力; 耗能能力

中图分类号: TU398.2

文献标识码: A

Experimental Research and Finite Element Analysis on Seismic Behavior of Concrete-filled Square Steel Tubular Columns

NIE Rui Feng¹, XU Pei Zhen², YAN Yu³

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 3. Zhengzhou Urban Planning Design and Survey Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Six full scaled concrete-filled square steel tubular (CFSST) columns were tested under low cyclic loading to test their seismic behavior; and then, numerical simulation was made by Abaqus, the finite element analysis results agree well with the experimental results. Results show that CFSST has good plastic deformation capacity. The energy dissipation capacity of CFSST increases with the increasing of sectional steel ratio; the horizontal bearing capacity of CFSST increases with the increasing of axial compression ratio, while the rigidity and energy dissipation capacity reduce instead; and the horizontal bearing capacity, rigidity and energy dissipation capacity of CFSST decrease with the increase of slenderness

ratio.

Key words: concrete-filled square steel tubular; anti-seismic behavior; low cyclic load; plastic deformation capacity; energy dissipation capacity

钢管混凝土利用钢管与混凝土在受力过程中相互之间的组合作用, 充分发挥两种材料的优点, 不仅有效地提高了混凝土的强度、塑性和韧性, 同时可以有效地延缓甚至避免钢管发生局部屈曲, 具有承载力高、韧性和塑性好等优点, 适用性广^[1-2]。各种截面形式的钢管混凝土中, 方钢管混凝土以其良好的建筑适用性在工程中得到了广泛应用。其中, 日本对方钢管混凝土抗震性能的研究较早, 且较为系统^[3-5]。近年来, 我国对钢管混凝土结构抗震性能的研究逐步深入, 相继出版《钢管混凝土结构设计与施工规程 CECS28:90》^[6]、《矩形钢管混凝土结构技术规程 CECS159:2004》^[7]等, 规程中对钢管混凝土的变形计算只给出了拉伸、压缩及弯曲刚度的计算公式, 对钢管混凝土的变形性能没有涉及。许月华^[8]利用 Ansys 对钢管混凝土的弯矩曲率滞回性能进行模拟, 结果显示, 含钢率和混凝土、钢材强度越高, 试件的耗能性能越好, 并得到试验的验证。陶忠等^[9]利用数值分析的方法得到含钢率、长细比等不同参数下钢管混凝土荷载位移滞回关系, 并通过试验验证。郭立春^[10]通过设计不同的轴压比、腹厚比、截面的长宽比等参数, 对 16 根矩形钢管混凝土进行低周反复荷载试验, 得到随着截面长宽比的增加, 试件的延性有所降低。张建辉^[11]通过对 9 根方钢管混凝土短柱进行低周反复荷载试验, 从不同的长细比、腹厚比、轴压比等方面观察其对构件耗能的影响, 并逐个分析了各参数对试件延性和耗能性能的影响。

上述研究表明,钢管混凝土柱屈服后仍具有较高的承载力和耗能能力. 合理利用钢管混凝土屈服后的承载能力对震区的建筑和桥梁结构安全有着重要的现实意义.

为更好地了解方钢管混凝土柱屈服后的承载能力、塑性变形能力和耗能性能,本文对 6 根方钢管混凝土柱进行了低周反复水平荷载试验,研究了轴压比、含钢率以及长细比等参数对钢管混凝土柱抗震性能的影响,同时采用非线性有限元软件 Abaqus^[12]建立方钢管混凝土柱的有限元模型,进行参数的扩展和验证. 分析并研究了各参数对方钢管混凝土柱等效粘滞阻尼系数和延性系数等反映抗震性能指标的影响,为基于部分柱铰屈服机制设计的框架结构中允许屈服的柱提供设计依据.

1 试验概况

1.1 试件参数的确定

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)^[13]、《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—96)^[14]和《钢管混凝土结构设计与施工规程》(CECS28:90)^[6]对试件进行设计. 各试件的具体参数见表 1,试件尺寸标注见图 1,图 2 为加载装置示意图.

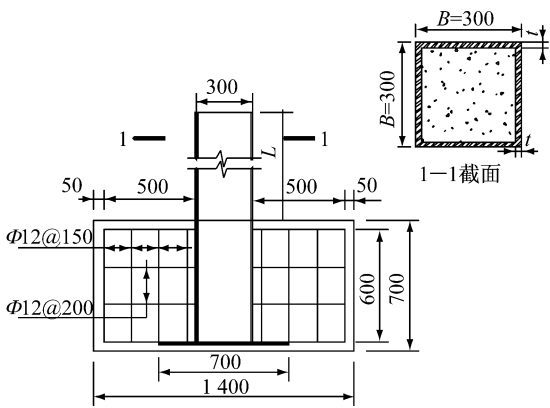
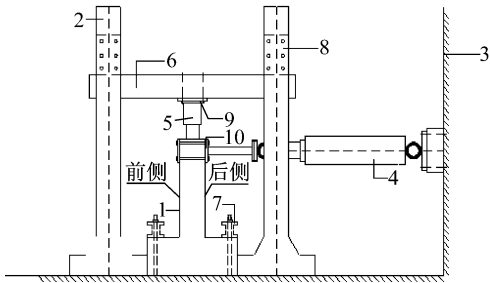


图 1 试件尺寸示意图(单位:mm)
Fig.1 Specimen sizes (unit: mm)



1—方钢管混凝土柱;2—门架;3—反力墙;4—作动器;5—竖向千斤顶;6—加载梁;7—压梁;8—小梁;9—四氟板;10—加载板

图 2 试件加载装置示意图
Fig.2 Loading devices of the specimen

表 1 试件参数表
Tab.1 Specimen parameters

| 序号 | 编号 | $B\times t\times L/(mm\times mm\times mm)$ | n | λ | f_y/MPa | f_{cu}/MPa | α | N/kN |
|----|----------|--|-----|-----------|------------------|---------------------|----------|---------------|
| 1 | CFTM5C | $300\times 5.0\times 1600$ | 0.4 | 18.47 | 299.2 | 35 | 0.070 | 1 187 |
| 2 | CFTM10C | $300\times 10.0\times 1600$ | 0.4 | 18.47 | 299.2 | 35 | 0.148 | 1 837 |
| 3 | CFTL7.5C | $300\times 7.5\times 2000$ | 0.4 | 23.09 | 299.2 | 35 | 0.108 | 1 515 |
| 4 | CFTM7.5A | $300\times 7.5\times 1600$ | 0.2 | 18.47 | 299.2 | 35 | 0.108 | 757 |
| 5 | CFTM7.5B | $300\times 7.5\times 1600$ | 0.6 | 18.47 | 299.2 | 35 | 0.108 | 2 272 |
| 6 | CFTM7.5C | $300\times 7.5\times 1600$ | 0.4 | 18.47 | 299.2 | 35 | 0.108 | 1 515 |

注:1. CFT 代表钢管混凝土构件;2. L,M 分别代表长度为 2 000 mm 和 1 600 mm 的试件;3. 5,7.5,10 分别代表钢管壁厚为 5.0,7.5 和 10.0 mm;4. A,B 和 C 分别代表轴压比为 0.2,0.6 和 0.4.

1.2 试验加载方案

首先,在柱顶按设计轴压比施加轴向压力 N ,然后在柱顶施加水平反复荷载. 试验过程中轴向压力需保持恒定. 水平加载制度采用力-位移混合加载:试件屈服前取设计屈服荷载的 1/3,2/3,1 倍进行加载,每级循环 1 次;试验过程中若未观测到刚度下降,则以 20 kN 为级差继续加载,直至试件刚度出现下降,取该时刻的荷载值为试件的屈服荷载 P_y ,对应的 Δ_y 为屈服位移;试件屈服后,采用位移控制加载,按 $1.0\Delta_y, 2.0\Delta_y, 3.0\Delta_y, \dots$,进行,每级循环 2 次,至水平荷载减小至极限荷载 P_u 的 85% 时即认

为试件破坏^[1,14]停止加载. 加载点荷载取值见图 3,图 4 为加载制度示意图.

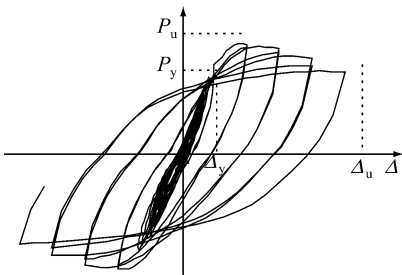


图 3 试验控制参数
Fig.3 Test control parameters

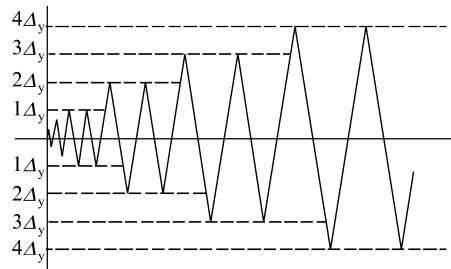


图 4 加载制度示意图
Fig.4 Loading law plan

1.3 试验数据的量测

荷载-位移滞回曲线采用 MTS 作动器控制系统自带的力和位移传感器获得. 同时, 在各试件外包钢管的底端 3 个截面(分别距柱底 20, 150 和 300 mm)处粘贴 12 片电阻应变片和 4 片电阻应变花, 其中钢管前、后侧各粘贴 6 片应变片, 各截面 2 片, 方向均为竖向; 钢管左侧各截面分别粘贴 1 片应变花; 钢管右侧中间截面粘贴 1 片应变花, 如图 5 所示.

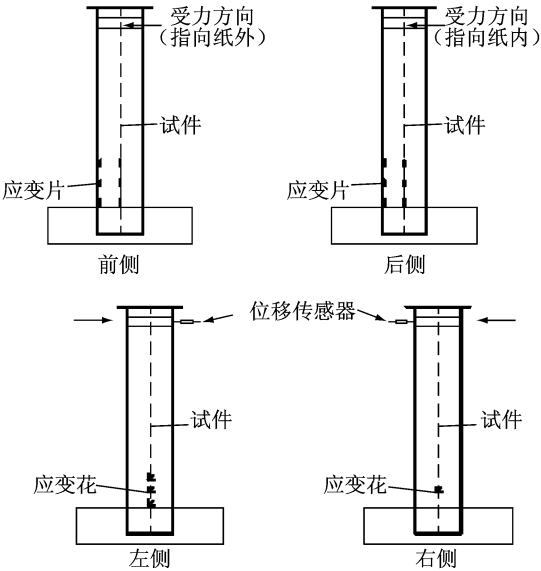


图 5 钢管混凝土柱应变片布置示意图
Fig.5 Concrete-filled steel tube column strain decorated schematic

2 试验现象

本试验 6 根方钢管混凝土试件的破坏模式类似. 试验开始阶段, 试件处于弹性状态, 钢材和混凝土各项力学性能均呈线性变化. 伴随加载的进行, 外包钢管的应变片采集数据呈现非线性加速增大态势, 表明此时外包钢管已进入弹塑性阶段. 由于钢管混凝土受力时钢管和混凝土共同作用, 此时试件的整体刚度未出现下降, 表明虽然钢管进入弹塑性阶

段, 但试件整体仍处于弹性阶段. 待加载到屈服荷载时, 试件的整体刚度开始下降, 但肉眼很难观测到试件的变形. 随之进行位移控制加载, 加载到 $2.0\Delta_y$ 时, 所有试件端部的前后侧均出现明显的鼓曲. 待加载到 $3.0\Delta_y$ 至 $4.0\Delta_y$ 时, 除试件端部前后侧鼓曲更为严重外, 端部左右侧亦出现鼓曲, 同时伴随着内部混凝土压碎的声音.

当位移角达 $1.0\% \sim 1.5\%$ 时, 试件的刚度开始下降, 试验随之转为位移控制继续加载, 直至试件的水平承载力下降到峰值荷载的 85% 以下即停止试验. 试件破坏表现为先在试件前侧或后侧的底端起鼓, 并伴随着钢管内混凝土压碎的声音, 随即在相对另一侧也出现起鼓; 随加载位移的增大, 钢管底端左右两侧亦相继出现起鼓现象, 钢管混凝土柱的底端变形呈灯笼状, 如图 6a 所示. 另有试件在钢管底端前后侧起鼓后, 侧焊缝出现开裂, 且随加载位移的增大, 焊缝开裂趋于严重, 并伴随着混凝土压碎流出, 如图 6b 所示.

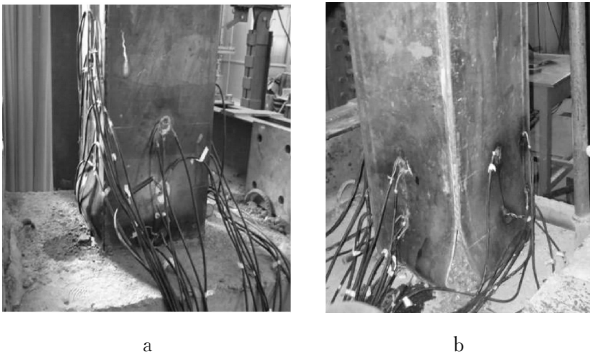


图 6 试件的破坏形态
Fig.6 Failure pattern of specimens

3 有限元数值模拟

采用 Abaqus 非线性有限元软件建立方钢管混凝土柱的模型, 如图 7 所示. 建模时, 结合 Abaqus 特点, 模型长度取试件长度的 2 倍, 两端采用端板固定. 由于模型中有大量的接触问题, 混凝土选用 8 节点线形缩减积分三维实体单元 C3D8R, 有利于计算的收敛. 钢管选用 4 节点双曲线带有沙漏控制的减缩积分通用目的壳单元 S4R. 采用映射网格划分, 在柱两端均设置刚性板. 钢材本构沿用经典二折线模型, 混凝土本构采用约束混凝土本构. 钢管内壁同混凝土采用接触处理, 法向采用硬接触, 切向采用罚函数接触, 钢管与两端刚性板采用刚性约束, 混凝土与两端刚性板采用硬接触.

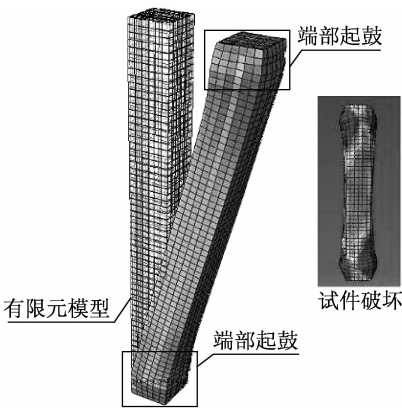


图 7 CFT 有限元模型
Fig.7 Finite element model of CFT

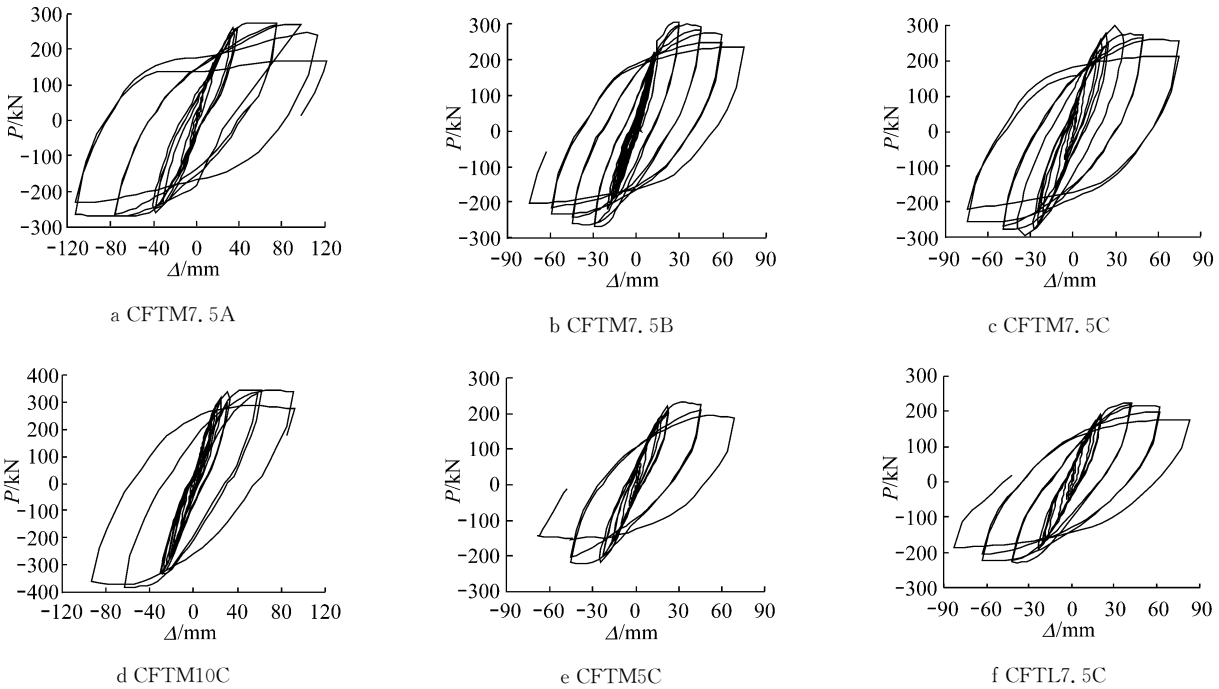


图 8 试件 $P-\Delta$ 滞回曲线
Fig.8 $P-\Delta$ hysteretic loops

表 2 极限荷载及屈服荷载试验值

Tab.2 Test value ultimate load and yield load

| 试件编号 | 极限荷载 P_u/kN | 屈服荷载 P_y/kN | 极限位移 Δ_u/mm | 极限位移角 δ_u | 屈服位移 Δ_y/mm | 屈服位移角 δ_y |
|----------|----------------------|----------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------|
| CFTM7.5A | 273.37 | 195.3 | 121.33 | 0.075 8 | 20.8 | 0.013 0 |
| CFTM7.5B | 305.97 | 218.7 | 74.60 | 0.046 6 | 17.5 | 0.010 9 |
| CFTM7.5C | 299.16 | 231.2 | 74.59 | 0.046 6 | 17.4 | 0.010 9 |
| CFTM10C | 382.43 | 253.0 | 92.28 | 0.057 7 | 19.2 | 0.012 0 |
| CFTM5C | 230.54 | 220.0 | 68.73 | 0.043 0 | 18.9 | 0.011 8 |
| CFTL7.5C | 228.80 | 190.0 | 83.60 | 0.052 3 | 21.0 | 0.013 1 |

性变形能力提高;随着轴压比增加,试件的水平承载力稍有提高,但塑性变形能力有所降低;随着长细比增加,试件的水平承载力及塑性变形能力均有所降低.各试件的数值模拟曲线也较好地验证了上述结论.

4 试验和数值计算结果

4.1 试验荷载-位移滞回曲线

各试件的荷载-位移滞回曲线如图 8 所示.除试件 CFTM5C(图 8e)外,其余各试件的 $P-\Delta$ 滞回曲线均呈现饱满的纺锤形.试件 CFTM5C 的 $P-\Delta$ 滞回曲线扁长、不饱满,滞回面积较小,说明该试件滞回耗能能力较差,这可能是该试件含钢率低,以及试验过程中无侧向支撑所致.各试件的荷载试验值见表 2.

通过对比各试件的 $P-\Delta$ 滞回曲线,可得到如下结论:随着含钢率的增加,试件的水平承载能力和塑

4.2 骨架曲线

骨架曲线反映了模型受力和变形的关系,是结构抗震性能的综合体现.图 9~11 为本试验各试件的骨架曲线.

图 9 为含钢率对试件骨架曲线的影响.含钢率

对构件受力性能的影响主要表现在:含钢率越高,钢管对核心混凝土提供的约束作用越强,核心混凝土变形性能的改善越明显,而且钢管抗局部屈曲的能力增加,也使柱的承载力和延性都得到提高. 建议钢管混凝土柱的含钢率限制在一个合理的范围内. 若含钢率太低,钢管对混凝土的约束不明显;含钢率太高,则经济性较差.

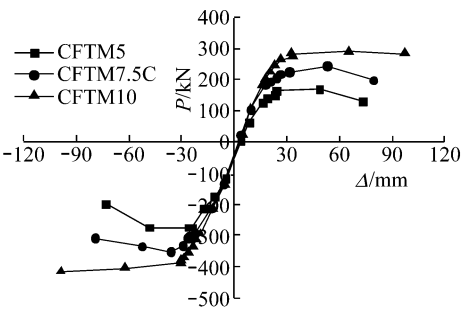


图 9 含钢率对 $P-\Delta$ 骨架曲线的影响

Fig.9 Influence of steel ratio on the $P-\Delta$ skeleton curves

图 10 为不同轴压比对试件骨架曲线的影响. 随着轴压比的增加,承载力降低,位移延性减小,曲线下降段的坡度变陡,刚度退化速度加快. 主要原因是随着轴压比的增加, $N-\Delta$ 效应引起附加弯矩随着水平位移的增加在构件内力中的比例增大,因此构件的承载力降低,位移延性减小. 同时,轴压比较大时,加快了构件屈服后弹塑性和累积损伤的发展,刚度退化速度加快. 轴压比对构件受力性能的影响主要表现在:随着轴压比的增加,试件的弹性阶段刚度略有提高,这是因为在弹性阶段,构件的变形很小, $N-\Delta$ 效应影响较小,且随轴压比的增加,核心混凝土开裂面积减小,因此弹性阶段刚度略有提高. 因此对于方钢管混凝土框架而言,为使其保持一定的塑性和抗倒塌能力,其轴压比应该有一个限制.

图 11 为长细比对试件骨架曲线的影响. 由图 11

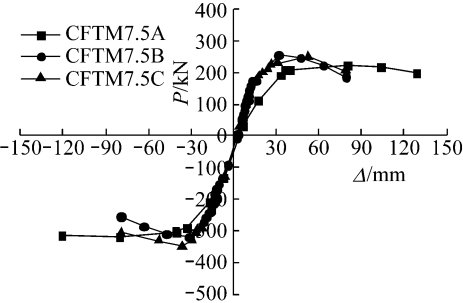


图 10 轴压比对 $P-\Delta$ 骨架曲线的影响

Fig.10 Influence of axial compression ratio on the $P-\Delta$ skeleton curves

可知,随着长细比的增加,弹性阶段和强化阶段的刚度减小,试件的水平承载力降低,位移的延性减小. 其主要原因是随着长细比的增加,轴向力 N 在试件各截面产生的附加弯矩增大,降低了试件的水平承载能力. 建议长细比控制在一定的范围内,否则钢管混凝土柱的优越性得不到充分发挥.

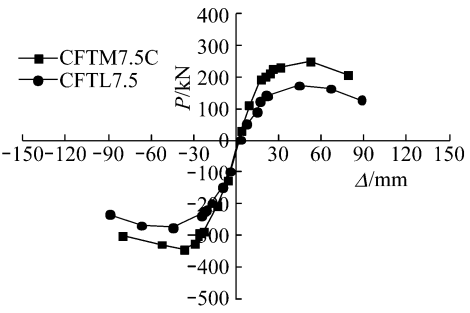


图 11 长细比对 $P-\Delta$ 骨架曲线的影响

Fig.11 Influence of slenderness ratio on the $P-\Delta$ skeleton curves

图 12 给出了试验和 Abaqus 数值计算得到的 12 条骨架曲线. 经比较可知,试件的有限元计算数值均大于试验结果,原因在于 Abaqus 数值建模中边界条件和荷载较试验更为理想化,同时有限元模型中未考虑焊缝残余应力等不利影响. 试验及有限元数值模拟的计算结果取得了较好的一致性.

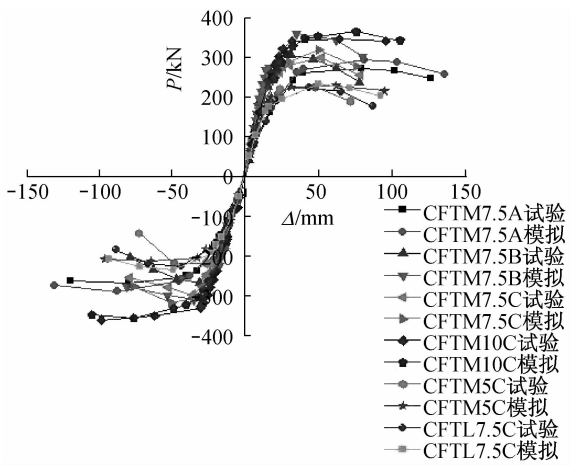


图 12 试验与模拟骨架曲线的对比图

Fig.12 Influence of steel ratio on the $P-\Delta$ skeleton curves

4.3 耗能能力和延性系数

耗能能力是评定结构抗震性能的重要指标,本文采用等效粘滞阻尼系数 h_e 来衡量结构构件的耗能能力. 等效粘滞阻尼系数可按图 13 所示的滞回曲线 ABC 与横轴所围的面积 A_1 与 $\triangle BOD$ 的面积 A_2 进行计算,其中 P 为梁端施加的荷载, Δ 为梁端位

移.

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{A_1}{A_2} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{\text{曲线}ABCOA}}{A_{\triangle BOD}} \tag{1}$$

延性是评价结构或构件抗震性能的重要指标,反映了结构、构件或材料在非弹性阶段的变形能力.

延性的大小可以通过荷载-变形曲线来表达,也可以通过延性系数 μ 来表示,按下式计算:

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \tag{2}$$

式中: δ_u 为试件的骨架曲线中极限承载力下降到 85% 对应的位移; δ_y 为试件屈服荷载对应的位移.

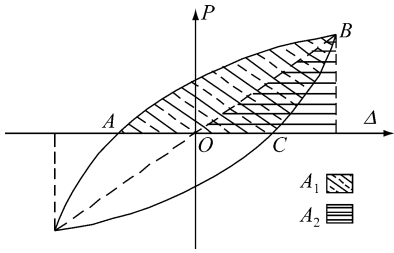


图 13 等效粘滞阻尼系数计算图
Fig. 13 Caculation diagram of damp coefficient

本试验各试件的等效粘滞阻尼系数 h_e 及位移延性系数 μ 列于表 3.

| 表 3 试件的等效粘滞阻尼系数和延性系数 | | | | | | |
|---|----------|----------|----------|---------|--------|----------|
| Tab.3 Effective coefficient of viscous-damping and ductility of specimens | | | | | | |
| 试件编号 | CFTM7.5A | CFTM7.5B | CFTM7.5C | CFTM10C | CFTM5C | CFTL7.5C |
| h_e | 0.384 | 0.358 | 0.376 | 0.395 | 0.331 | 0.330 |
| μ | 3.189 | 4.256 | 2.984 | 2.988 | 2.979 | 3.982 |

由表 3 可得:随含钢率的提高,等效粘滞阻尼系数 h_e 增大,钢管混凝土柱的耗能能力提高;随轴压比的增加,等效粘滞阻尼系数 h_e 减小,钢管混凝土柱的耗能能力降低;随长细比的增大,等效粘滞阻尼系数 h_e 减小,钢管混凝土柱的耗能能力降低. 另外,本次试验各试件的延性系数接近或大于 3,等效粘滞阻尼系数 $h_e=0.330\sim0.395$,大于普通钢筋混凝土的 0.1 左右和型钢混凝土的 0.3 左右,说明钢管混凝土柱的延性性能和滞回耗能能力良好,满足结构

抗震设计的要求.

同时,笔者还采用 Abaqus 非线性有限元软件分别模拟和研究轴压比、含钢率和长细比等影响因素对方钢管混凝土耗能能力和塑性变形能力的影响. 计算结果表明,方钢管混凝土柱的耗能能力和延性性能随含钢率 α 的增加而增大,随轴压比 n 的增大而减小,随长细比 λ 的增大而减小,验证了试验结果的可靠性和相关结论正确性. 如表 4~6 所示.

| 表 4 含钢率对等效粘滞阻尼系数和延性系数的影响 | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tab.4 Influence of steel ratio on effective coefficient of viscous-damping and ductility | | | | | | | |
| 试验编号 | ML1 | ML2 | ML3 | ML4 | ML5 | ML6 | ML7 |
| α | 0.066 | 0.078 | 0.098 | 0.108 | 0.129 | 0.154 | 0.178 |
| n | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| λ | 18.47 | 18.47 | 18.47 | 18.47 | 18.47 | 18.47 | 18.47 |
| h_e | 0.326 | 0.345 | 0.355 | 0.369 | 0.375 | 0.391 | 0.397 |
| μ | 3.051 | 2.955 | 2.770 | 3.060 | 3.050 | 3.070 | 3.057 |

| 表 5 轴压比对等效粘滞阻尼系数和延性系数的影响 | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tab.5 Influence of axial compression ratio on effective coefficient of viscous-damping and ductility | | | | | | | |
| 试验编号 | MM1 | MM2 | MM3 | MM4 | MM5 | MM6 | MM7 |
| α | 0.108 | 0.108 | 0.108 | 0.108 | 0.108 | 0.108 | 0.108 |
| n | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 |
| λ | 18.47 | 18.47 | 18.47 | 18.47 | 18.47 | 18.47 | 18.47 |
| h_e | 0.415 | 0.380 | 0.369 | 0.328 | 0.303 | 0.293 | 0.283 |
| μ | 3.216 | 3.082 | 3.060 | 2.988 | 2.839 | 2.979 | 3.216 |

5 结论

根据对 6 根方钢管混凝土柱在低周反复水平荷载作用下的试验研究,以及采用 Abaqus 软件对含钢

率、轴压比、长细比等影响参数进行扩展和验证分析,可得以下结论:

(1) 各试件的 $P-\Delta$ 滞回曲线呈纺锤形,均较圆滑、饱满,表明钢管混凝土柱具有良好的耗能能力.

(2) 钢管混凝土屈服后,骨架曲线仍呈非线性

表 6 长细比对等效粘滞阻尼系数和延性系数的影响

| Tab.6 Influence of slenderness ratio on effective coefficient of viscous-damping and ductility | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 试验编号 | MN1 | MN2 | MN3 | MN4 | MN5 | MN6 | MN7 |
| α | 0.108 | 0.108 | 0.108 | 0.108 | 0.108 | 0.108 | 0.108 |
| n | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| λ | 10.39 | 13.86 | 16.17 | 18.47 | 20.21 | 23.09 | 25.98 |
| h_e | 0.464 | 0.436 | 0.379 | 0.369 | 0.346 | 0.295 | 0.282 |
| μ | 2.804 | 2.771 | 3.048 | 3.060 | 2.882 | 3.296 | 3.000 |

上升态势,在加载后期,骨架曲线保持水平或略微下降,说明钢管混凝土柱屈服后承载力下降不明显。

(3) 随含钢率的增加,钢管混凝土柱的耗能能力提高,试件的水平承载能力提高,刚度增大,等效粘滞阻尼系数增大;随轴压比的增大,钢管混凝土柱的耗能能力降低,试件的水平承载能力提高,但刚度却降低,等效粘滞阻尼系数减小;随长细比增大,钢管混凝土柱的耗能能力降低,试件的水平承载能力降低,刚度退化较快,等效粘滞阻尼系数减小。

(4) 各试件以及计算模型的延性系数均在 3 左右,说明方钢管混凝土塑性变形能力良好。

(5) 仿真计算数值较试验数值稍大,这可能由于试件的制作偏差、材料不均匀性以及试验过程中无侧向支撑所致,同时,计算模型未考虑焊缝残余应力等不利影响。但二者基本吻合,证实了本次试验结果的可靠性并验证了相关结论的正确性。

(6) 依据试验和数值分析结果,钢管混凝土柱的耗能能力和塑性变形能力良好,能够较好地满足震区结构抗震设计要求。

参考文献:

[1] 钟善铜. 钢管混凝土结构[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社, 2003.
ZHONG Shantong. Concrete filled steel tubular structure[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[2] 韩林海, 杨有福. 现代钢管混凝土结构技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007.
HAN Linhai, YANG Youfu. Modern steel tube concrete structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.

[3] 河野昭彦, 松井千秋, 田中 幸仁. 繰返し水平力と変動軸力を受けるコンクリート充填円形鋼管柱の実験的研究[C]//日本建築学会構造系論文集(547). 东京:日本建筑学会, 2001: 193-198.

[4] 中原浩之, 蜷川利彦, 崎野健治. コンクリート充填鋼管柱の一定軸力下における繰返し曲げ性状[C]//日本建築学会構造系論文集(568). 东京:日本建筑学会, 2003: 139-146.

[5] 社团法人日本鋼構造協会. 柱を用いた鉄骨骨組の動的耐震設計法ガイドライン[R]. 东京:社团法人日本鋼構造協, 2006.

[6] 中国建筑科学研究院. CECS28:90 钢管混凝土结构设计与施工规程[S]. 北京:中国工程标准化协会, 1992.
China Academy of Building Research. CECS28: 90 Construction specification and design for structures with concrete-filled steel tube members[S]. Beijing: China Association for Engineering Construction Standardization, 1992.

[7] 同济大学. CECS159: 2004 矩形钢管混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国工程标准化协会, 2004.
Tongji University. CECS159: 2004 Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tube members [S]. Beijing: China Association for Engineering Construction Standardization, 2004.

[8] 许月华. 钢管混凝土压弯构件滞回性能分析[D]. 大连:大连交通大学土木与安全工程学院, 2005.
XU Yuehua. Analysis of hysteretic capability of concrete filled steel tube compression-bending members[D]. Dalian: College of Civil and Safety Engineering of Dalian Jiaotong University, 2005.

[9] 陶忠, 韩林海. 方钢管混凝土压弯构件荷载一位移滞回性能研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(6): 13.
TAO Zhong, HAN Linhai. Party of concrete-filled steel tubular structures load-displacement hysteretic performance study[J]. Industrial Buildings, 2000, 30(6): 13.

[10] 郭力春. 矩形钢管混凝土柱抗震性能研究[D]. 上海:同济大学建工系, 2004.
GUO Lichun. Study on seismic performance of rectangular steel reinforced concrete column[D]. Shanghai: Department of Building Engineering of Tongji University, 2004.

[11] 张建辉. 方钢管混凝土框架柱的抗震性能分析[D]. 天津:天津大学建工系, 2005.
ZHANG Jianhui. Study on seismic behaviors of concrete filled square steel tubular frame columns[D]. Tianjin: Department of Construction of Tianjin University, 2005.

[12] The Pennsylvania State University. ABAQUS standard user's manual-version 6. 5[M]. Pawtucket: Hibbit Karlsson Sorensen, 2000.

[13] 中华人民共和国建设部. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.
Ministry of Construction of P R China. GB50011-2010 Code for seismic design of building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

[14] 中国建筑科学研究院. JTJ101—96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1997.
China Academy of Building Research. JTJ101-96 Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.