

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.03.004

SCFST 柱框架-支撑结构恢复力模型

赵炳震, 陈志华, 陈宪东, 武亚鹏, 雷志勇, 兰舒

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要:通过对 SCFST 柱框架-支撑结构进行拟静力性能研究发现, 支撑、梁、柱依次发生破坏, 结构破坏机制合理, 滞回曲线呈梭形, 无捏拢现象, 耗能能力良好, 骨架曲线的下降过程较为平缓, 延性较好, 结构在整体上表现出较好的抗震性能, 有限元数值模拟与试验结果符合程度较高, 验证了有限元模型的正确性。主要研究支撑两边柱的轴压比、单肢柱不同组合截面形式和框架-支撑结构中支撑钢管的刚度等因素, 基于大量的有限元数值模型对其进行分析, 得到了 SCFST 柱框架-支撑抗侧力结构的恢复力模型。运用回归分析方法建立结构的三折线骨架模型, 明确了 SCFST 柱框架-支撑结构的滞回和退化规律, 建立了此体系框架-支撑结构简化的滞回模型, 并与试验结果进行对比分析, 二者骨架曲线基本一致, 滞回环形状均呈近似的平行四边形, 吻合度较高。

关键词:方钢管混凝土组合异形柱; 框架-支撑体系; 恢复力模型; 抗震

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)03-037-13

Restoring force model of SCFST column braced frame

ZHAO Bingzhen, CHEN Zhihua, CHEN Xiandong, WU Yapeng, LEI Zhiyong, LAN Shu

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: Special-shaped column composed of concrete-filled square steel tubes(the SCFST column) braced frame has broad prospects of applications in high-rise steel structure residence for the reason that it represents considerable lateral stiffness, good seismic performance and outstanding architecture effect. Quasi-static tests were conducted to explore the seismic behavior mechanism, and beams and columns were destroyed in turn. The hysteretic curves of the structure were diamond-shaped with no pinch phenomenon, which illustrated that the structure performed well in energy dissipation. The structure had good ductility and seismic behavior in that the skeleton curve declined slowly. The finite element (FE) numerical simulation agreed well with the experimental result, verifying the correctness of the FE model. The restoring force model of the SCFST column-steel beam braced frame took axial compression ratio, the section of the column and the stiffness of the brace as main research factors. By linear regression analysis, the trilinear skeleton model was established which showed the hysteretic behavior and stiffness degradation of the SCFST column braced frame. As seen by from the comparison of the results of the model with those of the experiment, the skeleton curves of the model and the experiment were nearly the same, both of the hysteretic curves were in the shape of a parallelogram, and the anastomosis degree was high. In conclusions the restoring force model is an effective way to simulate the behavior of the frame and it can present the

收稿日期: 2018-10-17

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2017202278)。

Supported by Natural Science Foundation of Hebei Province of China(E2017202278)

作者简介: 赵炳震(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事组合结构方向研究, (E-mail) tjdgzbx@tju.edu.cn.

load displacement curve of the SCFST column braced frame under low reversed cyclic loading.

Keywords: special-shaped column composed of concrete-filled square steel tubes; braced frame system; force restoring model; anti-seismic

方钢管混凝土组合异形柱(SCFST柱),集合钢管混凝土与异形柱^[1-2]的优点,各单肢方钢管混凝土组合柱通过竖向的细长钢板进行连接,为防止竖向连接钢板局部屈曲,在钢板上间隔固定的距离焊接横向加劲肋板,形成格构式整体性良好的空间结构,如图1所示,进一步提高了异形柱的抗侧力能力,具有较好的承载能力。SCFST柱框架-支撑结构作为一种新型结构形式,组合异形柱的柱肢可放置于墙体的内部,从而增大房屋建筑的室内使用面积,使传统建筑中墙柱体系引起的室内凸角问题得到改善,提高土地的使用率。该结构抗震性能优良、产业化程度高、绿色环保,体现出较好的综合性能,适用于高层钢结构住宅,具有广阔的应用前景。目前,已完成了SCFST柱的轴压、偏压以及抗震等力学性能的试验研究及理论分析^[3-5],并完成了体系中相关节点、纯框架以及带支撑框架的抗震性能试验研究^[6-9],但是,对于SCFST柱框架-支撑结构的恢复力特性尚无研究。

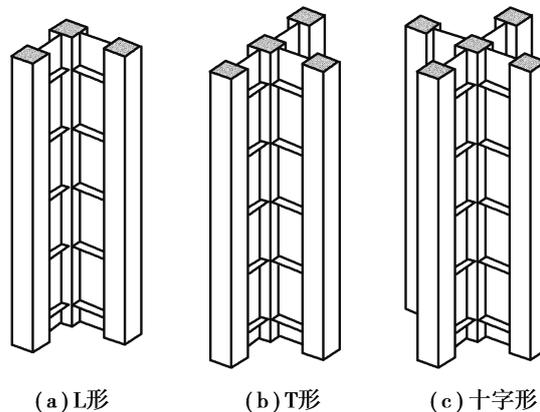


图 1 无孔钢板连接式 SCFT 柱示意图

Fig. 1 SCFST column diagram

在滞回荷载作用卸载后,结构(或构件)具有恢复初始状态的能力称为结构(或构件)的恢复力^[10]。恢复力模型可以体现结构在弹塑性地震作用中的抗震性能,这种模型是将恢复力与变形的关系曲线进行简化而得的数学模型,需要进行大量试验或有限元数值模型分析。恢复力模型曲线包含荷载位移滞回曲线和骨架曲线。文中对SCFST柱框架-支撑结构的拟静力性能进行了试验研究和有限元数值模拟,结合结构的恢复力特性,借鉴已有的研究成果^[11-13],建立恢复力模型,为结构进行弹塑性时程分析奠定理论基础。

1 拟静力试验概况

1.1 试验设计

设计了三榀SCFST柱框架-支撑结构进行低周反复荷载作用下的拟静力试验,框架梁为H型钢梁,支撑形式为人字形中心支撑。其中,带支撑框架结构跨数为单跨,层数为2层,每层高度1450mm。带支撑框架的两侧边缘构件变换SCFST柱的截面形式,试件1、2两侧均为L形截面异形柱,试件3两侧分别为T字形异形柱和十字形异形柱。SCFST柱采用冷成型钢管,柱内填自密实混凝土,各单肢柱中方钢管规格为 $\phi 75 \times 4$,竖向连接钢板高度与柱身同高,宽度和厚度采取与钢管壁一致,分别为75mm和4mm,横向加劲肋板尺寸为 $75 \times 33 \times 4$ 。3个试件的柱轴压比分别设置为0.25、0.45和0.45。钢梁采用高频焊H型钢梁,规格为 $H150 \times 75 \times 4 \times 5$,跨度为2475mm。支撑选用方形钢管,规格为 $\phi 60 \times 4$,由工厂预制完成。框架支撑结构中的梁柱节点采用对此体系适用性较好的外肋环板节点,如图2所示;人字形中心支撑的支撑节点,如图3所示。试验设计的具体方案详见相关研究^[9]。

试验用竖向千斤顶对框架支撑结构的边缘组合异形柱施加轴压荷载,2个千斤顶施加的竖向轴力保持恒定。竖向千斤顶与加载反力梁之间设置水平滑动支座,使结构在加载过程中水平向移动自由。通过计算和有限元模拟可知,一层水平荷载远小于二层的水平荷载,因此,可以忽略在一层水平方向的加载^[14]。给结构施加的侧向水平拉压往复力,由作用在加载梁上水平向放置的千斤顶提供。用地锚螺栓将试件固接在基础上,其加载装置详情,如图4所示。

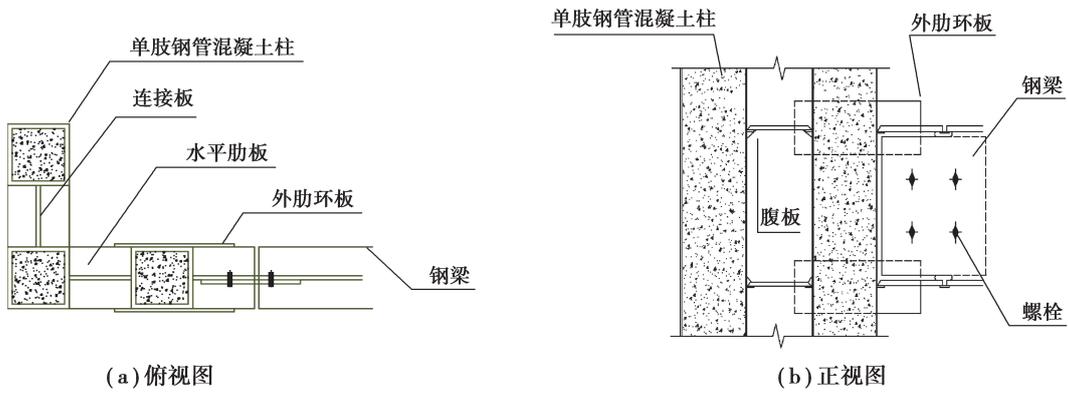


图 2 外肋环板节点

Fig. 2 Beam-to-column connections

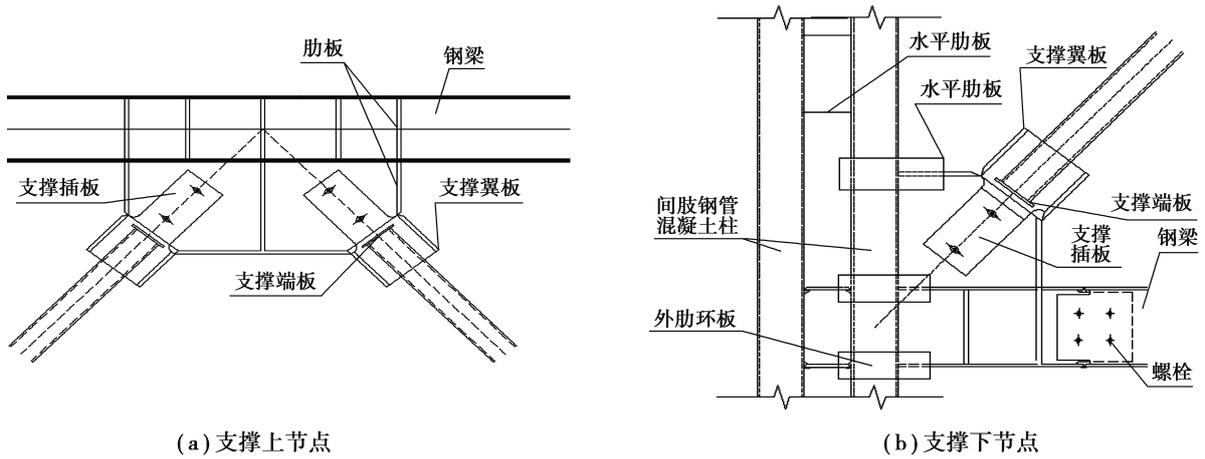
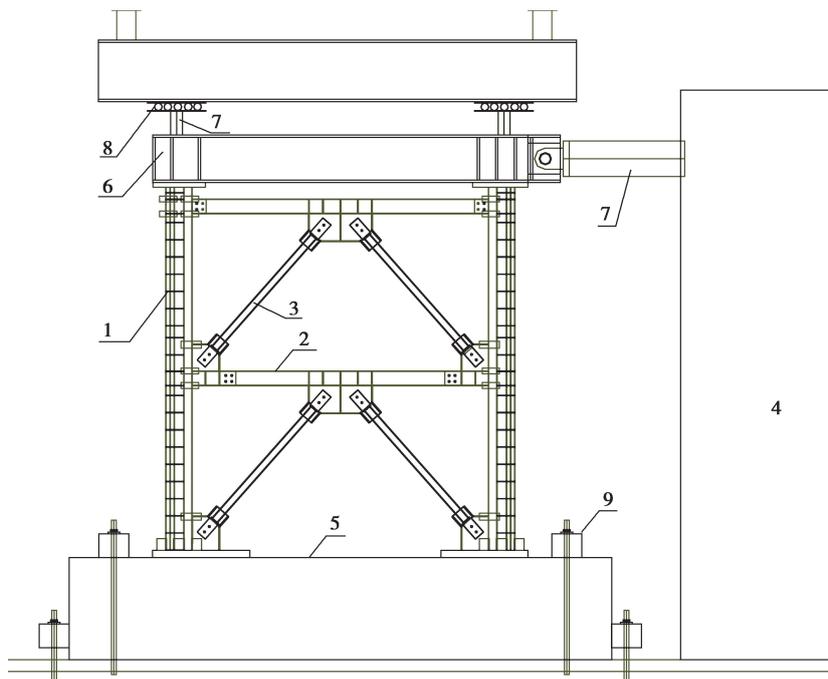


图 3 支撑节点

Fig. 3 Brace connections



注:1.SOPST 柱;2.钢梁;3.支撑;4.加载墙;5.基础;6.加载梁;7.千斤顶;8.滑动支座;9.压梁

图 4 加载装置图

Fig. 4 Test setup

1.2 加载制度

试验加载依据为《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101—2015),在正式加载前先进行 2 次预加载,检测仪器和测量装置是否可正常使用、能否顺利完成试验。在试件未达到屈服荷载时,采用力控制进行水平加载,在试验前进行有限元数值模拟得到初步结果,将控制荷载分为 0.2 倍 F_0 、0.4 倍 F_0 、0.6 倍 F_0 、0.8 倍 F_0 、1.0 倍 F_0 5 级,每级循环 1 圈加至屈服荷载 F_0 。屈服后以位移控制加载,每级位移荷载循环 2 次。所加荷载降低至 0.85 倍峰值荷载,试验结束。试验所用水平方向往复荷载的加载制度详情,如图 5 所示。

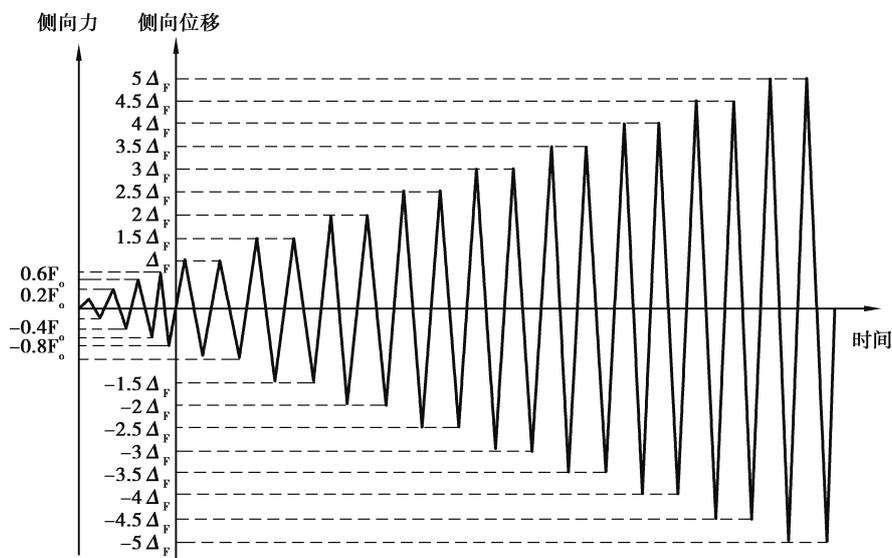


图 5 加载制度

Fig. 5 Lateral displacement history

1.3 材性试验

取支撑框架试件的柱子钢管、支撑钢管、钢梁以及肋板处材性试样进行材性试验。依据 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》对上述各处材性试样进行实验。所取各部试样的材性试验结果详情,如表 1 所示。

表 1 钢材力学性能指标

Table 1 Material properties of steel

部位	平均屈服应力/MPa	极限应力/MPa	弹性模量/($\times 10^5$ N/mm ²)
柱子钢管	354.6	421.6	1.85
支撑钢管	356.6	421.8	1.86
梁翼缘	295.1	447.3	1.82
梁腹板	317.1	454.2	1.93
单肢柱间竖向连接板	465.4	565.5	1.94
支撑节点板	298.0	447.2	1.94

用 C40 混凝土作为试件钢管柱内浇灌混凝土,混凝土进行材性试验时,设计了 6 块尺寸为 150 mm \times 150 mm \times 300 mm 的棱柱体试样,材性试样和钢管柱柱内浇灌混凝土同时制造,同条件养护。标准养护后,按照规范要求对棱柱体混凝土试样进行材性试验,得到其抗压强度平均值为 39.29 MPa。

2 试验及有限元数值模拟

在 SCFST 柱框架-H 型钢梁-人字形中心支撑结构抗震特性试验研究基础上,采用 ANSYS 软件建立有限元模型,有限元模型参数和试验试件相同。选取 SHELL181 单元模拟方钢管、钢梁、支撑钢管以及各处连接肋板。经过尝试,选用 SOLID65 单元模拟方钢管柱内的混凝土。选用 CONTAL173 单元模拟方钢管柱

和柱内混凝土之间的切向和法向接触。文中划分结构网格时,采用映射网格划分法,网格划分尽可能细密,同时考虑有限元计算的成本,其尺寸设置为 18.75 mm,即将方形钢管柱横截面沿边长方向设置为 4 个网格。材料物理力学性能采用实验值。

2.1 破坏机制

如图 6 所示,在低周往复荷载作用下,带支撑框架的二层变形大于支撑框架一层的变形;结构整体首先在支撑处发生破坏,而边柱、钢梁和支撑之间的连接节点板未发生屈曲破坏,符合设计规范所要求的“强节点弱构件”条件;此后,钢梁在两端翼缘部位发生局部屈曲破坏,塑性铰产生,此部位发生一定程度的局部扭转;由于有限元模拟中端部约束不足,在达到结束加载条件时,框架支撑结构边缘柱的加载和约束部位应力较大,整个加载过程中柱子未出现明显破坏,SCFST 柱框架-支撑结构破坏机制合理。有限元数值模拟所得应力分布情况、构件的破坏过程、试件的承载能力与试验结果一致^[9],说明文中有限元建模方式符合模拟试件的实际受力过程。

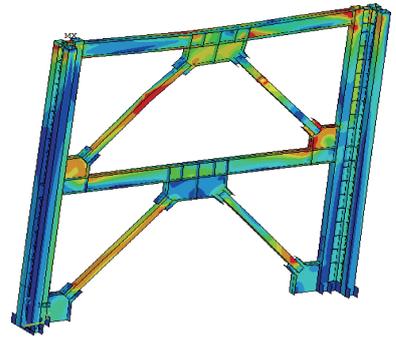


图 6 整体 SCFST 柱
框架-支撑结构应力水平

Fig. 6 Stress pattern of the frame

2.2 滞回与骨架曲线

由图 7~图 9 可知,3 个试件的滞回曲线均为梭形,无捏拢现象,耗能能力良好;骨架曲线的下降过程较为平缓,延性较好。结构整体体现出较好的抗震性能。有限元模拟与试验结果整体上一致,可很好地模拟文中研究结构的破坏和拟静力性能。

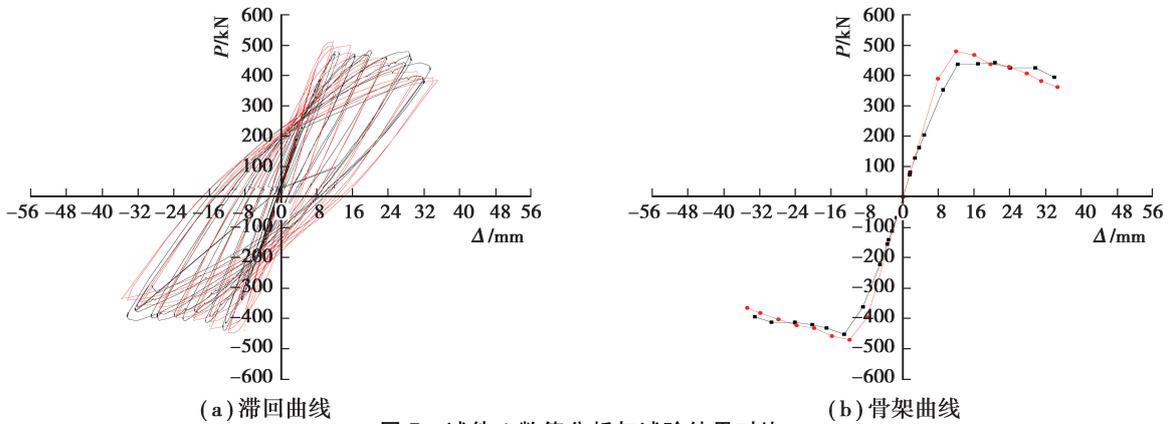


图 7 试件 1 数值分析与试验结果对比

Fig. 7 Comparison of FE analysis results and experimental results of specimen 1

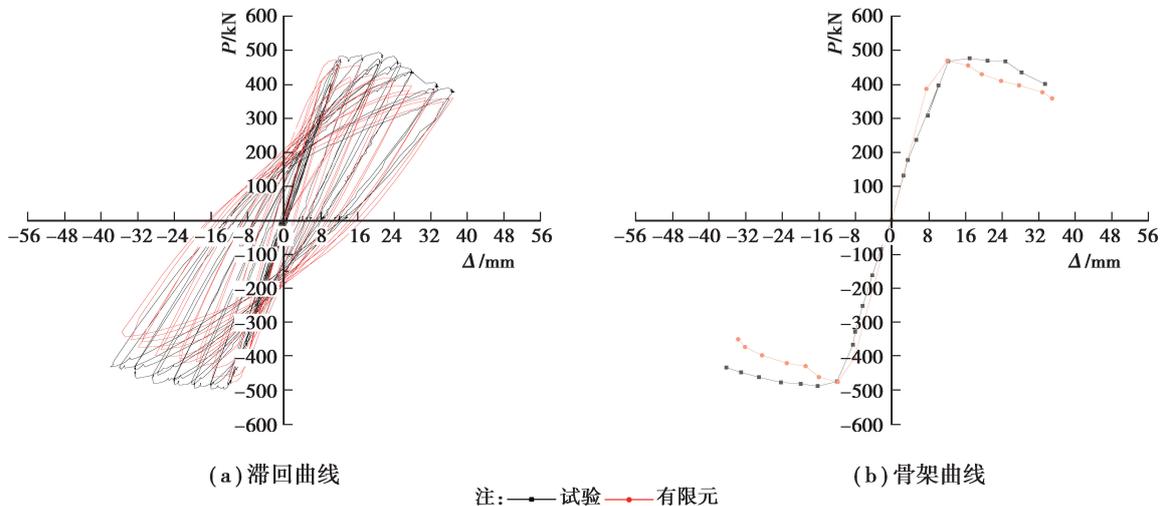


图 8 试件 2 数值分析与试验结果对比

Fig. 8 Comparison of FE analysis results and experimental results of specimen 2

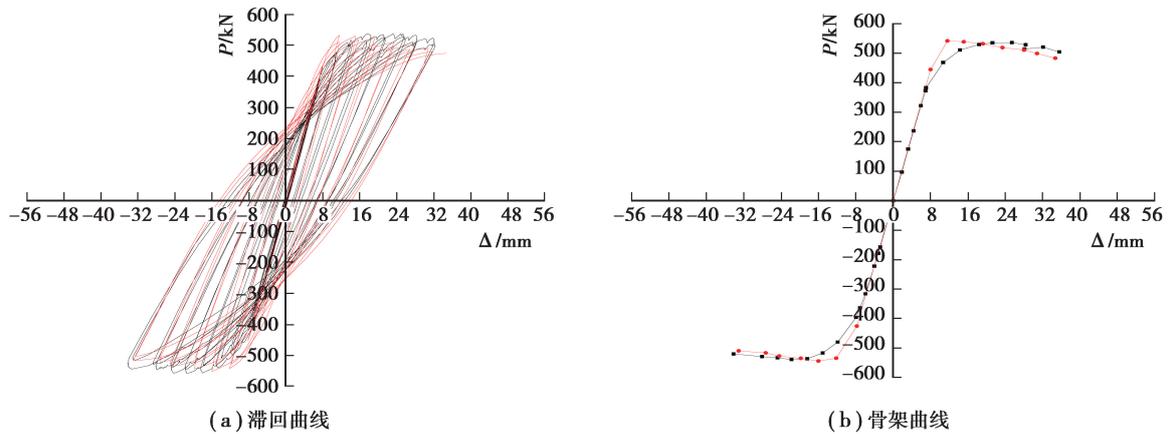


图 9 试件 3 数值分析与试验结果对比

Fig. 9 Comparison of FE analysis results and experimental results of specimen 3

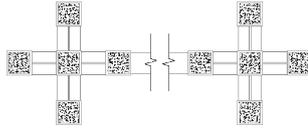
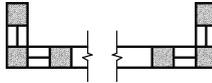
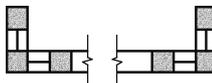
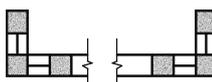
3 SCFST 柱框架-支撑结构恢复力模型

在拟静力性能试验研究和有限元数值分析的基础上,进行有限元模型参数化分析,进而研究框架-支撑结构的恢复力模型。支撑两边缘柱子的轴压比、单肢柱不同组合截面形式、组合异形柱框架-支撑结构中支撑钢管的刚度、支撑与边缘梁柱所成角度、以及梁柱与支撑钢管连接节点刚度等因素都会对该结构的恢复力特性产生影响。文中框架支撑结构恢复力模型选取支撑两边缘柱子的轴压比、柱子截面形式、支撑钢管刚度作为主要研究因素,其他参数(支撑角度、连接节点刚度)及节点设置参照实际工程应用设计。SCFST 柱各单肢方钢管规格为 $\phi 75 \times 75 \times 4$, 钢梁规格为 $H150 \times 75 \times 4 \times 5$, 各模型编号及其参数设置如表 2 所示。

表 2 各有限元模型主要参数
Table 2 Parameters of FE models

模型编号	柱截面形式	轴压比	支撑规格/mm
SJ-1		0.25	$\square 60 \times 4$
SJ-2		0.45	$\square 60 \times 4$
SJ-3		0.65	$\square 60 \times 4$
SJ-4		0.85	$\square 60 \times 4$
SJ-5		0.9	$\square 60 \times 4$
SJ-6		0.45	$\square 60 \times 4$
SJ-7		0.45	$\square 60 \times 4$

续表 2

模型编号	柱截面形式	轴压比	支撑规格/mm
SJ-8		0.45	□60×4
SJ-9		0.45	□60×3
SJ-10		0.45	□60×5
SJ-11		0.45	□60×6

3.1 骨架曲线模型

为得到骨架曲线模型,需要先确定骨架曲线的基准点,再对 11 个框架支撑结构的有限元数值分析结果进行无量纲化处理。选取达到峰值时的位移荷载点为基准点。图 10 为无量纲化处理过后的 11 个有限元数值模型的骨架曲线,可以看出,各个曲线的变化趋势一致,总体上吻合度较高。改变框架支撑结构边缘组合柱的截面形式和支撑钢管刚度对结构的初始刚度会造成一定影响,文中结构在破坏阶段的延性随着支撑钢管刚度的增大而降低。

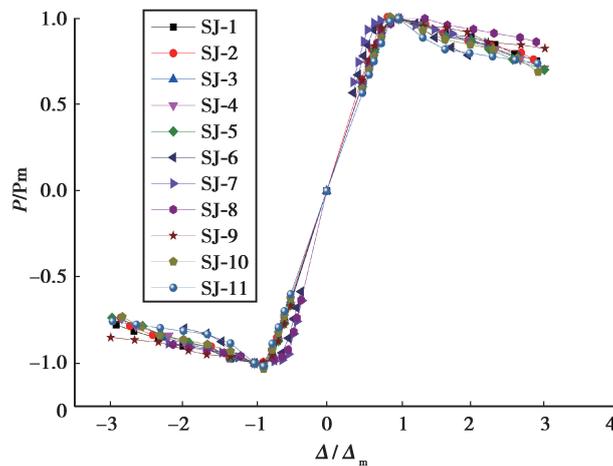


图 10 经无量纲化处理的骨架曲线

Fig. 10 Dimensionless keleton curves

对上文无量纲化处理后的有限元模型骨架曲线,选用三折线形式对其进行表达。3 个主要的特征点为屈服点荷载位移、峰值点荷载位移和有效破坏点(承载力降至峰值荷载的 85%)荷载位移。依次连接图形中折线各特征点,如图 11 所示,荷载位移骨架曲线由弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段组成,其中,OA(OA')为弹性阶段,AB(A'B')为屈服阶段,BC(B'C')为破坏阶段。

对所得特征点的荷载位移数值进行回归分析,可得 A(0.71,0.89),B(1.0,1.0),C(Δu/Δm,0.85),反向屈服点 A'(-0.68,-0.90),反向峰值点 B'(-1.0,-1.0),反向有效破坏点 C'(-Δu/Δm,-0.85)6 个坐标点。其中,A 为正向加载时的屈服点;B 正向加载时荷载达到最大为正向峰值点;C 为正向加载时结构失去承载能力的有效破坏点;A'为反向加载的屈服点;B'负向加载时荷载达到最大为反向峰值点;C'为反向加载时结构失去承载能力的有效破坏点。由图 11 可知,由于支撑过早的面外屈曲,所研究框架支撑结构屈服阶

段较短,屈服后快速达到峰值荷载。若将本结构中的普通钢管换为防屈曲支撑,结构破坏情况可得到延缓,耗能能力将有效提高。

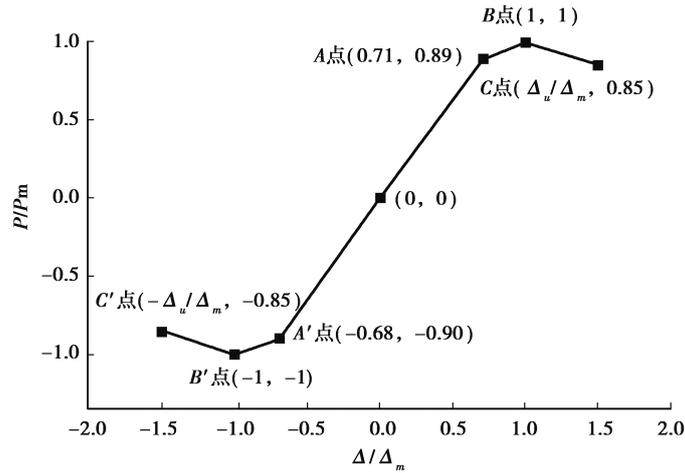


图 11 三折线无量纲化骨架曲线

Fig. 11 Trilinear skeleton curve

骨架曲线模型回归表达式,如表 3 所示。

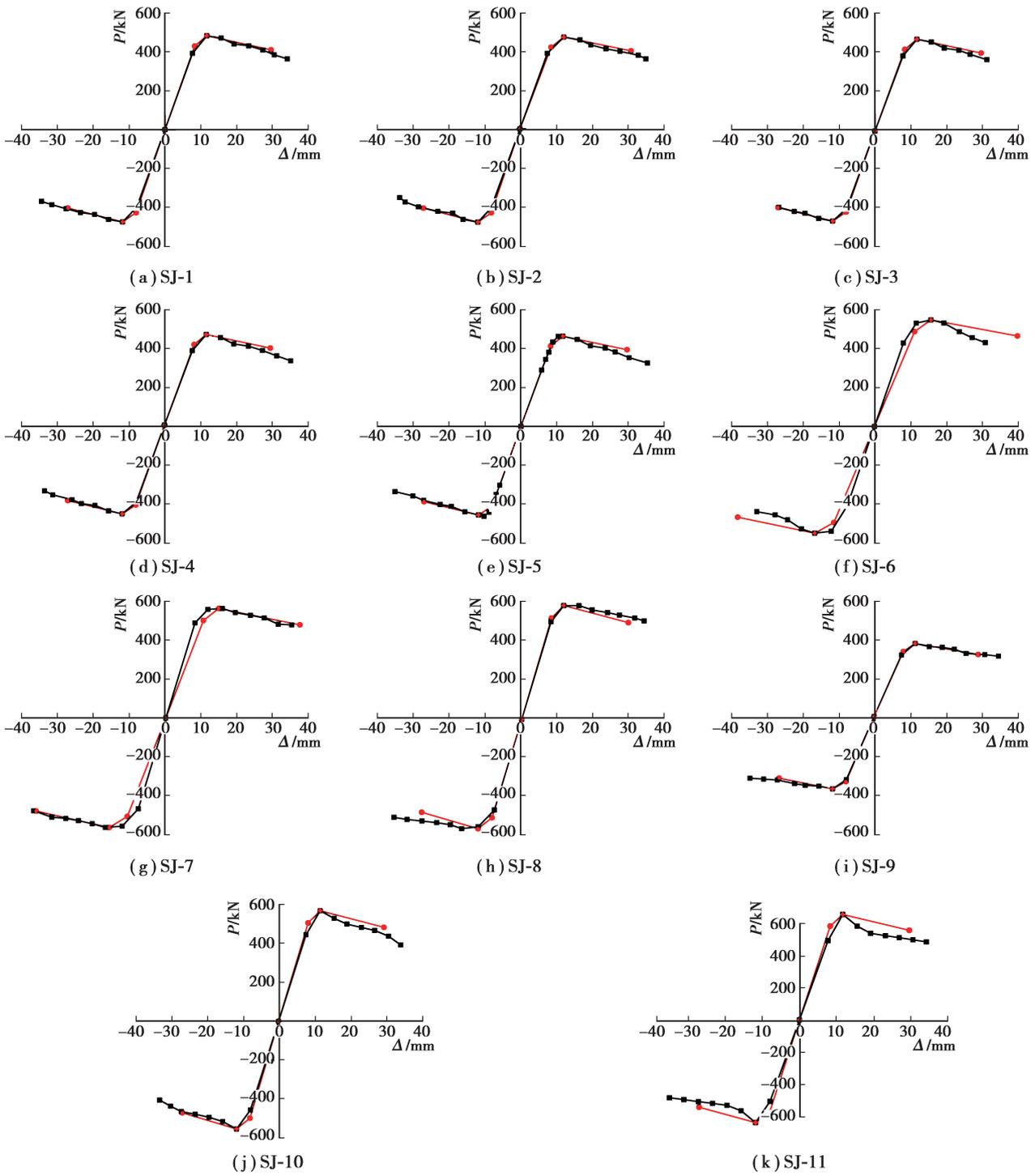
表 3 骨架曲线模型回归表达式

Table 3 Regression equations of skeleton curves

线段	回归方程
$C'B'$ 段(破坏阶段)	$\frac{P}{P_m} = -0.116 \frac{\Delta}{\Delta_m} - 1.116$
$B'A'$ 段(屈服阶段)	$\frac{P}{P_m} = 0.313 \frac{\Delta}{\Delta_m} - 0.687$
$A'O$ 段(弹性阶段)	$\frac{P}{P_m} = 1.324 \frac{\Delta}{\Delta_m}$
OA 段(弹性阶段)	$\frac{P}{P_m} = 1.254 \frac{\Delta}{\Delta_m}$
AB 段(屈服阶段)	$\frac{P}{P_m} = 0.379 \frac{\Delta}{\Delta_m} + 0.621$
BC 段(破坏阶段)	$\frac{P}{P_m} = -0.098 \frac{\Delta}{\Delta_m} + 1.098$

通过非线性数值模拟结构的峰值点荷载位移数值,以荷载的峰值荷载位移为基准,把峰值点荷载位移数值带入恢复力模型,得到简化的三折线骨架曲线模型,如图 12 所示。恢复力模型与有限元模拟骨架曲线吻合程度较高,可以有效地反映在低周往复荷载作用下 SCFST 柱框架-支撑结构的荷载-位移变化规律。

为验证恢复力模型的准确性,将模型计算结果与滞回试验结果进行分析。由图 13 可知,由于试验结构曲线复杂,两骨架曲线总体一致,在破坏阶段出现细微不重合现象。两者的变化趋势在整体上保持基本一致,再次验证了恢复力模型的正确性。该模型具有一定的普适性,可满足工程的一般应用要求。



注: —■— 有限元模型; —●— 恢复力模型

图 12 恢复力模型与有限元模型骨架曲线对比

Fig. 12 Comparison of skeleton curves of restoring force model and FE analysis

3.2 滞回规律

文中进行了大量的有限元数值模拟,并对模拟结果进行分析,在此基础上,提出了适用于框架支撑结构的拟静力曲线模型,如图 14 所示, A 点、A'点分别为正向和负向屈服点荷载位移; B 点、B'点分别为正向和负向峰值点荷载位移; C 点、C'点分别为正向和负向有效破坏点荷载位移。 O-A 段为弹性阶段,卸载基本不产生残余变形, O-A 段卸载刚度与加载刚度 K_0 近乎一致, A'O 为荷载位移曲线的发展路径。结构屈服后,其刚度和强度退化随着持续加载逐渐严重。 1-2 线段为正向卸载荷载位移曲线,正向卸载刚度 K_1 ,点 2 荷载为点 1 的 0.2 倍^[11-12]; 2-3 线段为 1-2 段卸载结束后的反向加载曲线,反向加载刚度 K_2 ; 加载至点 3 后,

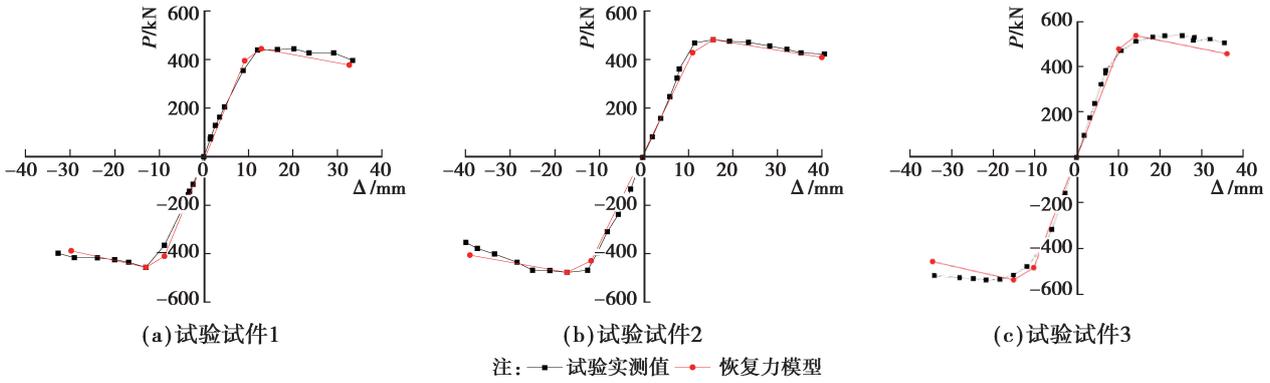


图 13 恢复力模型与滞回试验骨架曲线对比

Fig. 13 Comparison of skeleton curves of restoring force model and FE analysis

进行反向卸载,其荷载-位移关系曲线延展至点 4,3-4 段反向卸载刚度 K_3 ,点 4 荷载点 3 的 0.2 倍;之后沿折线 4-1 正向加载,正向加载刚度 K_4 ,折线 4-1 发展结束后,完成 1 个循环加载,折线段 1-2-3-4 呈现近似的平行四边形。荷载大于峰值(B 点)后,滞回曲线路径为 $a-b-c-d$,发展规律与上述折线段 1-2-3-4 相似,但产生更加严重的刚度退化。

3.3 刚度退化规律

结构在拟静力荷载作用下达到屈服后,继续施加荷载,加载和卸载刚度均会退化。文中进行有限元数值模型,得到 11 个分析结果,利用 Origin 软件对数值模拟结果进行回归分析,得到了 SCFST 柱框架-支撑结构的刚度退化规律,退化规律如图 15~图 18 所示,其中,用 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 分别表示正向卸载、反向加载、反向卸载和正向加载时的刚度。散点是依据数值分析结果所得到的具体数据点,实线则是对散点的数据拟合所得曲线。

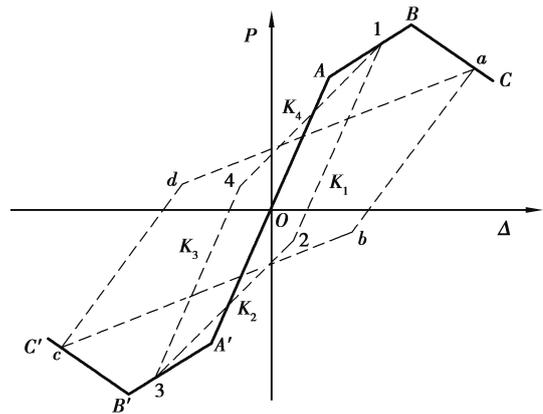


图 14 滞回曲线规律

Fig. 14 Hysteretic curve

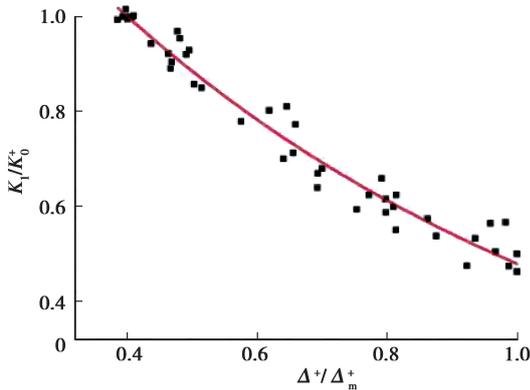


图 15 K_1 退化规律

Fig. 15 Stiffness degradation of K_1

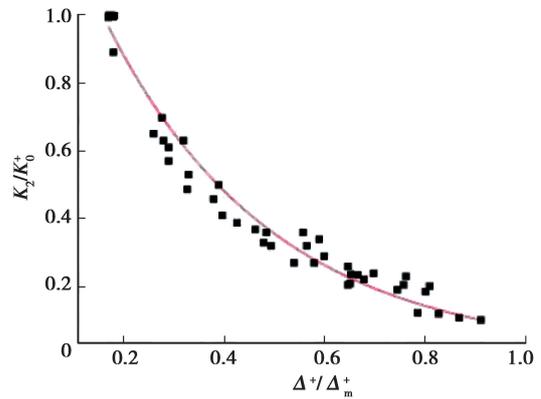


图 16 K_2 退化规律

Fig. 16 Stiffness degradation of K_2

1) 正向卸载刚度 K_1 退化规律

由回归分析可知, K_1/K_0^+ 和 Δ^+/Δ_m^+ 关系呈指数分布, K_0^+ 为正向卸载时的初始刚度, Δ^+ 为和正向卸载对应的位移, Δ_m^+ 为和正向峰值位移。由图 15 可知,相关性系数达到 96.2%,拟合效果较好。结构在正向卸载时的刚度退化方程式为

$$\frac{K_1}{K_0^+} = 1.636 * e^{(-1.299 \frac{\Delta^+}{\Delta_m^+})} \tag{1}$$

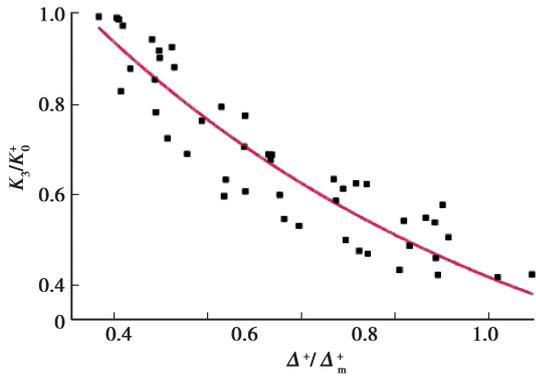


图 17 K_3 退化规律

Fig. 17 Stiffness degradation of K_3

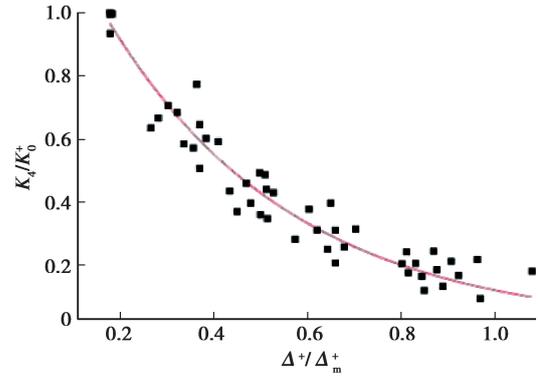


图 18 K_4 退化规律

Fig. 18 Stiffness degradation of K_4

2) 反向加载刚度 K_2 退化规律

由回归分析可知, K_2/K_0^- 和 Δ^+/Δ_m^+ 关系呈指数分布, K_0^- 为反向加载时的初始刚度, Δ^+ 为正向卸载对应的位移, Δ_m^+ 为正向峰值位移。由图 16 可知, 相关性系数高达 98.3%, 拟合效果很好。结构在反向加载时的刚度退化方程式为

$$\frac{K_2}{K_0^-} = 1.611 * e^{(-3.011 \frac{\Delta^+}{\Delta_m^+})} \tag{2}$$

3) 反向卸载刚度 K_3 退化规律

由回归分析可知, K_3/K_0^- 和 Δ^-/Δ_m^- 关系呈指数分布, K_0^- 为反向卸载时的初始刚度, Δ^- 为反向卸载对应的位移, Δ_m^- 为反向峰值位移。由图 17 可知, 相关性系数为 95.1%, 拟合效果良好。结构在反向卸载时的刚度退化方程式为

$$\frac{K_3}{K_0^-} = 1.589 * e^{(-1.336 \frac{\Delta^-}{\Delta_m^-})} \tag{3}$$

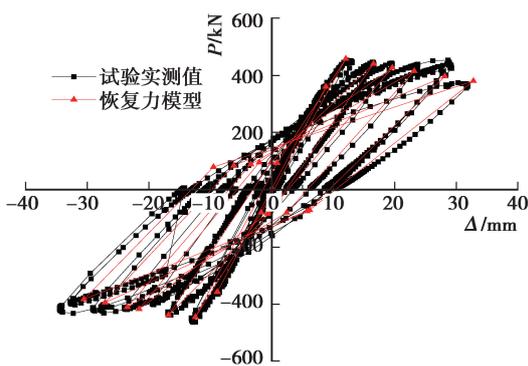
4) 正向加载刚度 K_4 退化规律

由回归分析可知, K_4/K_0^+ 和 Δ^-/Δ_m^- 关系呈指数分布, K_0^+ 为正向加载时的初始刚度, Δ^- 为正向卸载对应的位移, Δ_m^- 为正向峰值位移。由图 18 可知, 相关性系数达到 96.7%, 拟合效果很好。结构在正向加载时的刚度退化方程式为

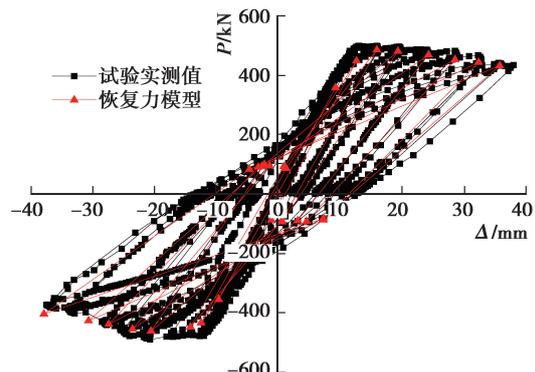
$$\frac{K_4}{K_0^+} = 1.515 * e^{(-2.519 \frac{\Delta^-}{\Delta_m^-})} \tag{4}$$

3.4 恢复力滞回模型验证

恢复力滞回模型在分析滞回规律和刚度退化结果的基础上建立, 如图 19 所示, 试验所得荷载位移关系曲线与恢复力的简化模型吻合程度较高, 近似呈现为平行四边形。经简化后的恢复力模型曲线, 虽然没有试验结果饱满, 但都呈平行四边形, 在一定程度上可有效反映 SCFST 柱框架-支撑结构强度和刚度的退化规律, 为其在工程中的应用和推广起到指导作用。



(a) 试件1



(b) 试件2

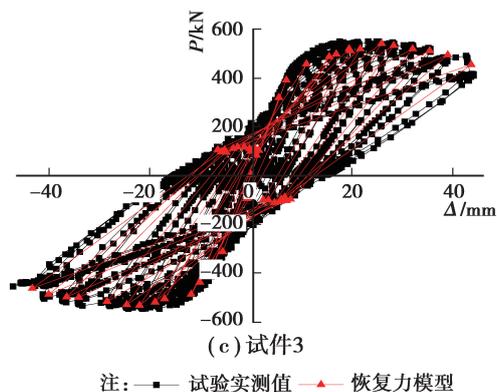


图 19 滞回模型与试验滞回曲线对比

Fig. 19 Comparison of Hysteretic curves of restoring force model and the experiment

4 结 论

文章对 SCFST 柱框架-支撑结构的拟静力性能进行了研究,基于大量有限元模型数值分析,以框架边缘柱的轴压比、柱子的截面形式和支撑钢管的刚度为主要研究因素,研究得到 SCFST 柱框架-支撑结构的恢复力模型。

1)对 SCFST 柱框架-支撑结构进行拟静力性能试验,并通过 ANSYS 软件进行建模分析,SCFST 柱框架-支撑结构中支撑、梁、柱依次发生破坏,破坏机制合理,结构滞回曲线均为梭形,无捏拢现象,耗能能力良好,骨架曲线的下降过程较为平缓,延性较好,结构整体表现出较好的抗震性能。有限元模型可较为准确地模拟试件的破坏现象、承载能力、强度和刚度退化情况以及加载曲线的变化,对结构进行深入参数化分析奠定了基础。

2)对大量的有限元数值模拟结果进行无量纲处理和回归分析,建立了三折线骨架模型。三折线骨架模型与试验荷载-位移变化规律的符合程度较高,模型可较为准确地反映所研究框架支撑结构的拟静力性能。

3)明确了 SCFST 柱框架-支撑结构在拟静力荷载作用下的受力机理和破坏机制,建立了简化的恢复力模型,并与三榀 SCFST 柱框架-支撑结构的试验数据进行分析对比,恢复力模型曲线和试验结果具有较高的吻合程度,两曲线形状都近似呈现为平行四边形,验证了模型的正确性。

参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
HAN Linhai. Concrete filled steel tube-theory and practice (the Second edition) [M]. Beijing: Science Press, 2007.(in Chinese)
- [2] 雷敏, 沈祖炎, 李元齐, 等. 异形钢管混凝土柱研究现状[J]. 结构工程师, 2013, 29(3): 155-163.
LEI Min, SHEN Zuyan, LI Yuanqi, et al. State-of-the-art of concrete-filled specially shaped steel tubes[J]. Structural Engineers, 2013, 29(3): 155-163.(in Chinese)
- [3] Chen Z H, Rong B, Fafitis A. Axial compression stability of a crisscross section column composed of concrete-filled square steel tubes[J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2010, 4(10): 1787-1799.
- [4] Zhou T, Xu M Y, Chen Z H, et al. Eccentric loading behavior of L-Shaped columns composed of concrete-filled steel tubes[C]//Zhou T, Xu M Y, Chen Z H, et al. eds. Volume 12 Number 3. The Hong Kong Institute of Steel Construction, 2016: 227-244.
- [5] Zhou T, Chen Z H, Liu H B. Seismic behavior of special shaped column composed of concrete filled steel tubes[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 75: 131-141.
- [6] 陈志华, 苗纪奎, 赵莉华, 等. 方钢管混凝土柱-H 型钢梁节点研究[J]. 建筑结构, 2007, 37(1): 50-56,59.
CHEN Zhihua, MIAO Jikui, ZHAO Lihua, et al. Study on joint of concrete-filled rectangular tubular column and H-shaped steel beam[J]. Building Structure, 2007, 37(1): 50-56,59.(in Chinese)

- [7] 王亚雯, 闫翔宇, 周婷. SCFT柱-H型钢梁平面框架抗震性能分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(B07): 9-16.
WANG Yawen, YAN Xiangyu, ZHOU Ting. Seismic behavior of SCFT column-h section steel beam plane frame [J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2015, 48(B07): 9-16.(in Chinese)
- [8] Zhou T, Jia Y M, Xu M Y, et al. Experimental study on the seismic performance of L-shaped column composed of concrete-filled steel tubes frame structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 114: 77-88.
- [9] Zhao B Z, Zhou T, Chen Z H, et al. Experimental seismic behavior of SCFRT column chevron concentrically braced frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 133: 141-155.
- [10] 沈聚敏. 抗震工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
SHEN Jumin. Asesimic Engineering[M]. Beijing:China Building Industry Press, 2000.(in Chinese)
- [11] 王来, 王铁成, 齐建伟, 等. 方钢管混凝土框架滞回性能试验与理论研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2005, 38(1): 41-46.
WANG Lai, WANG Tiecheng, QI Jianwei, et al. Experimental and theoretical study on hysteretic behavior of concrete-filled rectangular steel tubular frame[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2005, 38(1): 41-46.(in Chinese)
- [12] 王先铁, 周超, 马尤苏夫, 等. 方钢管混凝土平面框架的恢复力模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(5): 94-99.
WANG Xiantie, ZHOU Chao, MA Yousufu, et al. Study on restoring force model of concrete filled square steel tube planar frames[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(5): 94-99.(in Chinese)
- [13] 张向冈, 陈宗平, 薛建阳, 等. 钢管再生混凝土框架的恢复力模型研究[J]. 世界地震工程, 2016, 32(1): 277-283.
ZHANG Xianggang, CHEN Zongping, XUE Jianyang, et al. Study on restoring force model of recycled aggregate concrete filled steel tube frame[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(1): 277-283.(in Chinese)
- [14] 王铁成, 李新华, 王天柱, 等. 反复荷载作用下的异形柱框架滞回性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(1): 224-228.
WANG Tiecheng, LI Xinhua, WANG Tianzhu, et al. Hysteretic behavior of frame with specially shaped columns subjected to cyclic loading [J]. Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition, 2007, 37(1): 224-228.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)