

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.03.020

柱壁加强型方钢管混凝土柱-H型钢梁节点 恢复力模型研究

陈丽华^{1,2}, 方志强^{1,2}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要:为深入分析柱壁加强型方钢管混凝土柱-H型钢梁节点的抗震性能,在已完成相应拟静力试验的基础上,文章通过对试验数据回归计算分析,并结合试验加载过程和构件破坏特征来确定骨架曲线模型和滞回规则,建立此类节点的恢复力模型,最后将试验数据代入恢复力模型得到恢复力曲线。与试验曲线对比分析后发现,采用考虑刚度退化的三折线型骨架模型可以较好地反映不同阶段节点的受力特征,恢复力滞回曲线与试验滞回曲线拟合良好。结果表明所建立的恢复力模型可以较好模拟节点滞回性能,为柱壁加强型方钢管混凝土柱-H型钢梁节点的弹塑性地震分析提供了参考。

关键词:柱壁加强型节点;恢复力模型;三折线骨架曲线;刚度退化规律

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)03-0411-07

Research on restoring force model of column wall reinforced concrete-filled square steel tubular column-H-steel beam joint

CHEN Lihua^{1,2}, FANG Zhiqiang^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to analyze the seismic performance of column wall reinforced concrete-filled square steel tubular column-H-steel beam joint, a restoring force model of joint was established based on pseudo-static experiments. The skeleton curve model and stiffness degradation law were determined by analyzing the experimental data using regression calculation in combination with the failure characteristics of the components during experimental loading. Finally, the experimental data were incorporated into the restoring force model to obtain the restoring force curve. The comparison between the proposed restoring force model and experimental results shows that the trilinear skeleton curve models considering stiffness degradation can better reflect the mechanical characteristics of joints at different stages. The hysteretic curve of restoring force agrees well with the experimental hysteretic curve, indicating that the established restoring force model can simulate the hysteretic performance of joints accurately. The restoring force model provides a reference for the elastoplastic seismic analysis of column wall reinforced concrete-filled square steel tubular column-H-steel beam joint.

Key words: column wall reinforced joint; restoring force model; trilinear skeleton curve; stiffness degradation law

相较于传统的混凝土结构,钢结构建筑具有自重轻、施工周期短、抗震性能优越等优点。近些

年,我国大力提倡绿色建筑,鼓励建筑工业化发展,愈发重视环境保护,而混凝土结构施工过程中

收稿日期:2023-03-07;修回日期:2023-03-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778202)

作者简介:陈丽华(1972—),女,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:hfc1997@126.com.

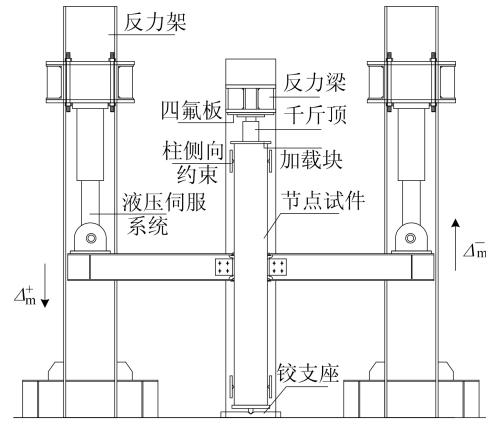
行,试验采用梁端加载的方式,左、右梁端为自由端,通过倒吊在反力架上的液压加载设备对左、右梁端施加往复荷载,上、下柱端为固定铰支座,最大加载力为 1 000 kN,柱顶上方放置千

斤顶和垫块用来施加轴压,保证轴压比为 0.15,千斤顶上设置四氟板来减小与反力梁间的摩擦力。

试验加载装置如图 2 所示。



(a) 加载装置实物图



(b) 加载装置示意图

图 2 试验加载装置图

依据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015),本次试验采用荷载-位移双控制方法的加载方式同时对左、右梁端反向加载,力和位移取向向下为正,构件屈服前通过荷载控制,以构件屈服荷载 P_y 的 0.25、0.50、0.75、1.00 倍进行分级,每级加载循环 1 次;构件屈服阶段后通过位移控制加载,以构件屈服位移 Δ_y 的 1.5、2.0、2.5 倍等逐步进行加载,每级加载循环 2 次,加载至试件破坏或

承载力下降至峰值的 85%,结束试验。

2 恢复力模型的建立

2.1 骨架曲线模型

骨架曲线如图 3 所示。从图 3a 可以看出,曲线存在明显的刚度退化和承载力下降段,特征点较为明显,但是不同构件的特征点差异较大,难以通过数学方法得到节点的一般性规律。

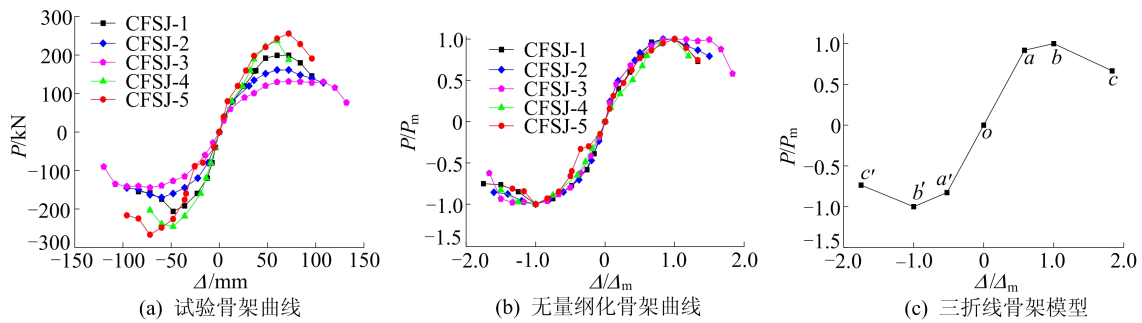


图 3 骨架曲线

对骨架曲线采用无量纲化处理,结果如图 3b 所示,经过处理后的骨架曲线在峰值点前的部分基本一致,峰值点后的数值存在一定的离散性,但总体来看经无量纲化处理后的曲线特征点统一,规律性明显。

本文选择考虑刚度退化的三折线骨架模型,具体阶段划分如图 3c 所示,各阶段的回归方程和斜率分别见表 2 所列。

表 2 骨架曲线模型回归方程

| 阶段 | 回归方程 | 斜率 |
|------|---|---------|
| oa | $P/P_m^+ = 1.5764\Delta/\Delta_m^+$ | 1.5764 |
| ab | $P/P_m^+ = 0.1944\Delta/\Delta_m^+ + 0.8056$ | 0.1944 |
| bc | $P/P_m^+ = -0.4014\Delta/\Delta_m^+ + 1.4013$ | -0.4014 |
| oa' | $P/P_m^- = 1.5801\Delta/\Delta_m^-$ | 1.5801 |
| a'b' | $P/P_m^- = 0.3613\Delta/\Delta_m^- - 0.6387$ | 0.3613 |
| b'c' | $P/P_m^- = -0.3508\Delta/\Delta_m^- - 1.3500$ | -0.3508 |

根据构件的的受力特点可以将曲线分为以下

3 个阶段:① 弹性阶段,构件由加载到屈服前的阶段,该加载阶段构件保持弹性状态,刚度尚未开始退化,折线斜率为构件的初始刚度;② 强化阶段,构件由屈服到承载力极限的阶段,该阶段随着混凝土和钢材损伤的积累,试件刚度开始退化,折线斜率降低;③ 退化阶段,构件由承载力极限屈服到失效的阶段,该阶段构件承载力不断降低,直至构件破坏。

2.2 刚度退化规律

往复荷载作用下,试验中后期构件刚度发生明显退化,将滞回曲线中加载和卸载段的斜率定量计算,每级滞回环按正、负加载方向区分,可以得到正向卸载刚度 K_1 、反向加载刚度 K_2 、反向卸载刚度 K_3 、正向加载刚度 K_4 ,刚度退化规律如图 4 所示,构件在加载初期刚度基本不变,用常数 K_0 表示。

刚度退化拟合曲线如图 5 所示。

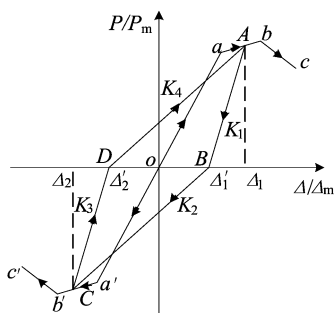
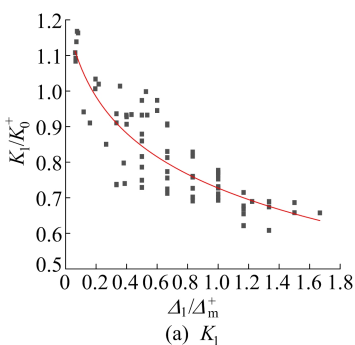
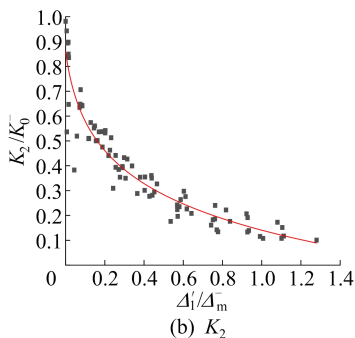


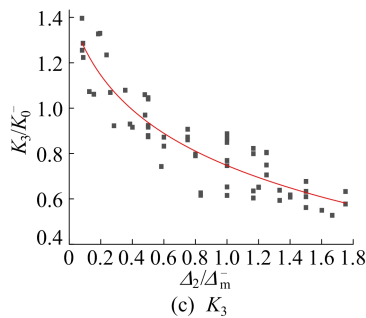
图 4 刚度退化规律



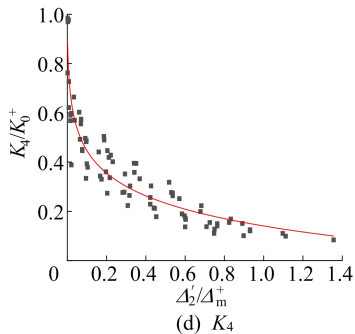
(a) K_1



(b) K_2



(c) K_3



(d) K_4

图 5 刚度退化拟合曲线

1) 正向卸载刚度 K_1 。A 点为正向卸载点, B 点为卸载至力为 0 时对应的点,由 A 点和 B 点连线所确定直线的斜率即为正向卸载刚度 K_1 ,对试验中每级滞回环的试验数据回归分析计算得到 K_1/K_0^+ 与 Δ_1/Δ_m^+ 的关系(图 5a),回归计算得到的刚度退化曲线方程为:

$$K_1/K_0^+ = -0.1902 \ln(\Delta_1/\Delta_m^+ + 0.0804) + 0.7412 \quad (1)$$

其中: K_0^+ 为构件正向加载时的初始刚度,为常数; Δ_1 为构件正向卸载点对应的位移; Δ_m^+ 为正向加载峰值位移。

2) 反向加载刚度 K_2 。C 点为反向卸载点,由 B 点和 C 点连线所确定直线的斜率即为反向加载刚度 K_2 ,反向加载的初始刚度和正向卸载的残余变形 Δ_1' 都会影响反向加载刚度 K_2 。对试验中每级滞回环的试验数据回归分析计算得到 K_2/K_0^- 与 Δ_1'/Δ_m^- 的关系(图 5b),回归计算得到的刚度退化曲线方程为:

$$K_2/K_0^- = -0.2451 \ln(\Delta_1'/\Delta_m^- + 0.0304) + 0.1106 \quad (2)$$

其中: K_0^- 为构件反向加载时的初始刚度,为常数; Δ_1' 为构件正向卸载至力为 0 时的位移; Δ_m^- 为负向加载峰值位移。

3) 反向卸载刚度 K_3 。D 点为反向卸载力为 0 时对应的点,由 C 点和 D 点连线所确定直线的

斜率即为反向卸载刚度 K_3 ,对试验中每级滞回环的试验数据回归分析计算得到 K_3/K_0^- 与 Δ_2/Δ_m^- 的关系(图 5c),回归计算得到的刚度退化曲线方程为:

$$K_3/K_0^- = -0.2129 \ln(\Delta_2/\Delta_m^- + 0.0201) + 0.7102 \quad (3)$$

其中, Δ_2 为反向卸载点对应的位移。

4) 正向加载刚度 K_4 。由 D 点和 A 点连线所确定直线的斜率即为正向加载刚度 K_4 ,对试验中每级滞回环的试验数据回归分析计算得到 K_4/K_0^+ 与 Δ_2'/Δ_m^+ 的关系(图 5d),回归计算得到的刚度退化曲线方程为:

$$K_4/K_0^+ = -0.1341 \ln(\Delta_2'/\Delta_m^+ + 0.0027) + 0.1411 \quad (4)$$

其中, Δ_2' 是构件反向卸载至力为 0 时的位移。

2.3 滞回曲线模型

本文通过对试验数据进行回归分析,得到模型三折线骨架曲线和刚度退化规律,建立了适用于柱壁加强型方钢管混凝土柱-H型钢梁节点的无量纲化恢复力模型,其滞回规则如图 6 所示。

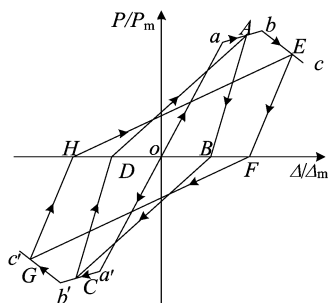


图 6 滞回规则

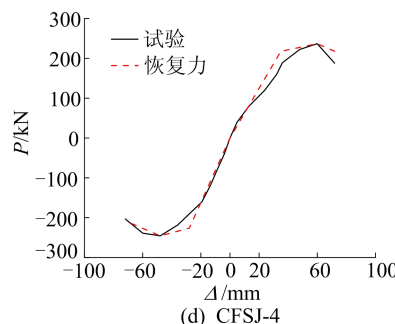
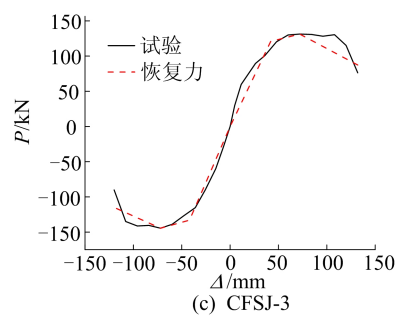
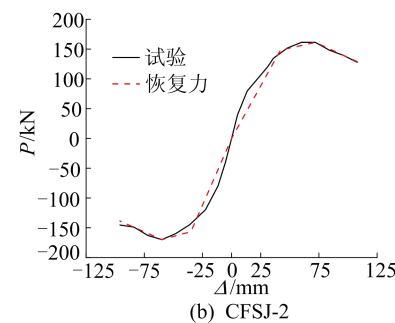
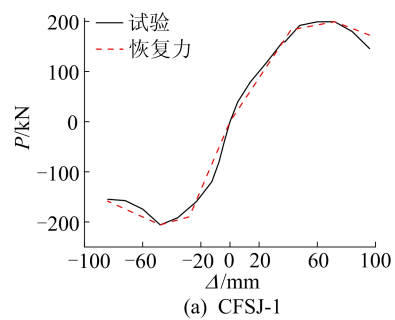
构件屈服前,加载和卸载过程均沿骨架曲线的弹性段 oa 和 oa' 进行,这一阶段的加载和卸载初始刚度分别为 K_0^+ 和 K_0^- ,当开始下一阶段的正向加载,若加载位移超过构件屈服位移,则沿 ab 段 A 点方向进行。

从构件屈服到构件最大承载力前,正向加载和卸载过程分别沿直线 DA 和 AB 进行,正向加载和卸载刚度分别为 K_4 和 K_1 ,反向加载和卸载过程分别沿直线 BC 和 CD 进行,反向加载和卸载刚度分别为 K_2 和 K_3 ,当开始下一阶段的正向加载,若构件已经达到最大承载力,则沿 bc 段 E 点方向进行。

构件达到最大承载力后,正向加载和卸载过程分别沿直线 HE 和 EF 进行,正向加载和卸载刚度分别为 K_4 和 K_1 ,反向加载和卸载过程分别沿直线 FG 和 GH 进行,反向加载和卸载刚度分别为 K_2 和 K_3 。

3 恢复力模型验证

将得到的骨架曲线回归方程代入各个构件的峰值荷载和峰值荷载对应的位移,通过计算得出各个构件的恢复力骨架曲线,将得到的恢复力骨架曲线与试验骨架曲线进行对比,相关结果如图 7 所示。



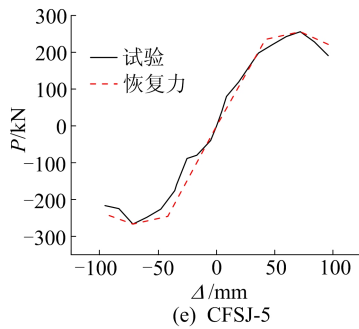


图 7 骨架曲线对比

从图 7 可以看出,三折线骨架曲线模型与构件的试验骨架曲线吻合程度较好,这表明拟合所得的恢复力骨架曲线能够较好地反映此类节点在往复荷载作用下各阶段的受力特征。

通过回归分析计算得到此类节点的骨架曲线和刚度退化规律,代入试验数据中加载级数可计算得到该级数下构件的恢复力滞回曲线,将所得的恢复力滞回曲线与试验滞回曲线对比,结果如图 8 所示。由图 8 可知,恢复力滞回曲线和试验滞回曲线在达到峰值承载力前的吻合度比较高,各级承载力和卸载刚度与试验情况基本相符,能较好反映此类节点的滞回特性。

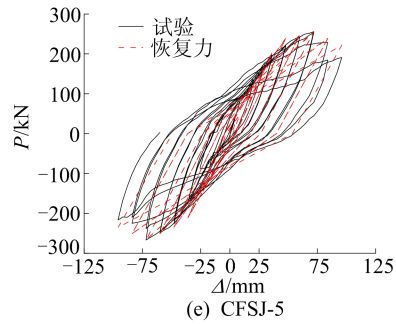
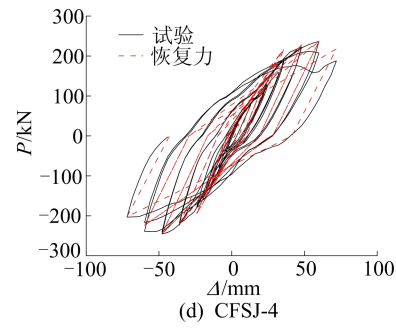
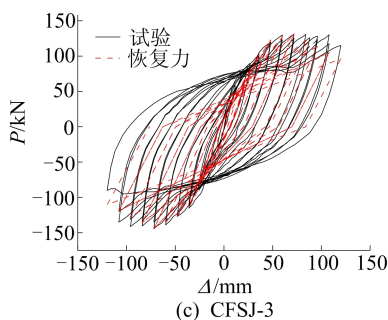
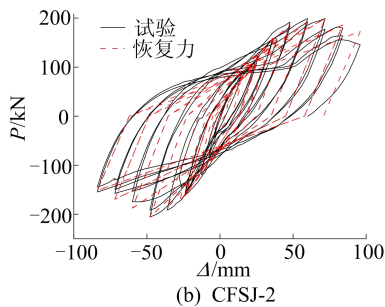
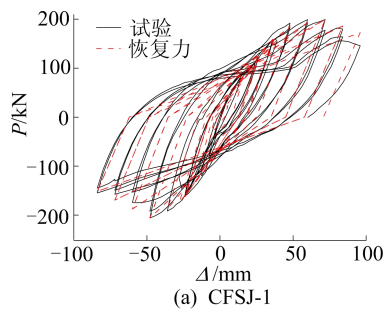


图 8 滞回曲线对比

4 结 论

本文在完成相关试验的基础上,通过对试验数据回归计算分析,得到柱壁加强型方钢管混凝土柱-H型钢梁节点的恢复力模型,与试验数据相互验证后,得出以下结论:

- 1) 选择考虑刚度退化的三折线骨架模型与试验骨架曲线拟合程度较高,且该模型可以较好地反映往复荷载作用下柱壁加强型方钢管混凝土柱-H型钢梁节点各阶段的受力特征。
- 2) 恢复力模型滞回曲线与试验滞回曲线拟合良好,可以较好地反映节点的滞回性能,证明本文所提出的恢复力模型可以为这类节点弹塑性地震分析提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] 岳清瑞,侯兆新. 对我国钢结构发展的思考[J]. 工程建设标准化,2017(5):48-56.
- [2] SIVASELVAN M V, REINHORN A M. Hysteretic models for deteriorating inelastic structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(6): 633-640.
- [3] RODRIGUES H, ROMAO X, ANDRADE-CAMPOS A, et al. Simplified hysteretic model for the representation of the biaxial bending response of RC columns[J]. Engineering Structures, 2012, 44(11): 146-158.
- [4] 董三升,赵均海,雷自学,等. 高强混凝土加芯柱恢复力特性研究[J]. 中国公路学报,2012,25(4):90-96.

(下转第 425 页)

均在 0° 风向角达到最大,而 F_y 均在 90° 风向角达到最大,结构最不利位置为31.70 m高度处。

4) 风荷载 F_x 在A类地貌和B类地貌下竖向分布最大值之比为1.00:1.23, F_y 最大值之比为1.00:1.28,B类地貌对于结构风荷载竖向分布的影响大于A类地貌。

[参 考 文 献]

- [1] 牛华伟,刘淦彬,杨风利,等. 钢管-角钢组合输电塔杆件体型系数及背风面风荷载折减系数的风洞试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(11):44-53.
- [2] YANG F L, DANG H X, NIU H W, et al. Wind tunnel tests on wind loads acting on an angled steel triangular transmission tower[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2016,156:93-103.
- [3] 张庆华,顾明,黄鹏. 500kV 单回路输电塔塔头风荷载计算模型研究[J]. 振动与冲击,2009,28(12):151-154.
- [4] 张庆华,马文勇. 多回路高压输电塔典型横担结构风力系数风洞试验研究[J]. 振动与冲击,2016,35(16):158-163.
- [5] 张宏杰,黄阳,周奇. 圆管输电塔风荷载多天平同步测力风洞试验研究[J]. 振动与冲击,2019,38(22):137-143.
- [6] YANG F L, YANG J B, NIU H W, et al. Design wind loads for tubular-angle steel cross-arms of transmission towers under skewed wind loading[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2015,140:10-18.
- [7] ZHOU Q, MA B, ZHU Q, et al. Investigation on wind loads on angle-steel cross-arms of lattice transmission towers via direct force measurement[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2019,191:117-126.
- [8] ZHOU Q, ZHANG H J, MA B, et al. Wind loads on transmission tower bodies under skew winds with both yaw and tilt angles[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2019,187:48-60.
- [9] 邓洪洲,张建明,帅群,等. 输电钢管塔体型系数风洞试验研究[J]. 电网技术,2010,34(9):190-194.
- [10] 李方慧,唐浩,支旭东. 1 000 kV 特高压变电构架风荷载特性[J]. 哈尔滨工业大学学报,2021,53(4):129-135.
- [11] 杨风利,黄国,牛华伟,等. 输电塔角钢杆件阻力系数及背风面遮挡效应研究[J]. 土木工程学报,2019,52(11):25-36.
- [12] 杨风利,牛华伟. 输电塔钢管阻力系数及背风面遮挡效应试验研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(10):3632-3644.
- [13] 沈国辉,项国通,邢月龙,等. 2种风场下格构式圆钢塔的天平测力试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2014,48(4):704-710.
- [14] CWLIO F C, NICHOLAS I, REYOLANDO M B. Experimental study of the wind forces on rectangular latticed communication towers with antennas[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2003,91(8):1007-1022.
- [15] 梁枢果,邹良浩,赵林,等. 格构式塔架三维动力风荷载的风洞试验研究[J]. 空气动力学学报,2007,25(3):311-318.
- [16] 顾明,马文勇,黄鹏,等. 复杂群塔风荷载试验研究[J]. 空气动力学学报,2009,27(2):141-146.
- [17] 顾明,黄鹏,周恒毅,等. 广州新电视塔模型测力风洞试验及风致响应研究 I: 风洞试验[J]. 土木工程学报,2009,42(7):8-13.
- [18] ZHOU X Y, HUANG P, GU M, et al. Wind loads and wind-induced responses of Guangzhou New TV Tower[J]. Advances in Structural Engineering,2010,13(4):707-726.
- [19] 禹慧. 复杂高耸结构风洞试验及风振响应研究[D]. 上海:同济大学,2007.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 416 页)

- [5] 周长东,田腾,吕西林,等. 预应力碳纤维条带加固混凝土圆形墩柱恢复力模型试验研究[J]. 工程力学,2013,30(2):125-134.
- [6] 张鹏,孙仁中,邓宇,等. 型钢混凝土受拉柱恢复力计算模型试验研究[J]. 防灾减灾工程学报,2021(3):549-557.
- [7] 郭子雄,杨勇. 恢复力模型研究现状及存在问题[J]. 世界地震工程,2004,20(4):47-51.
- [8] 殷小波,吕西林,卢文胜. 配置十字型钢的型钢混凝土柱恢复力模型[J]. 工程力学,2014,31(1):97-103.
- [9] 张月,李冬生. 耗能螺栓连接装配式钢管混凝土柱-RC梁节点恢复力模型研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(4):309-318.
- [10] 王先铁,谢川东,罗遥,等. 带楔形装置的自复位方钢管混凝土柱-钢梁节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(9):52-61.
- [11] 郑书朔,王燕,王修军,等. 矩形钢管柱与H型钢梁单边螺栓连接节点的抗震性能与恢复力模型研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(5):168-179.

(责任编辑 吴亮)