



复杂荷载作用下预应力钢管混凝土柱的滞回性能

吴刚¹, 刘洋², 陈伟², 张学森¹, 张克², 王宇航³, 陆一安³, 刘宇森³

(1. 中广核风电有限公司, 北京 100070; 2. 金风科技股份有限公司, 北京 100176; 3. 重庆大学
土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 预应力钢管混凝土格构式塔架充分发挥了钢管混凝土组合结构承载力高、抗侧刚度大的优势, 且体内无粘结预应力钢绞线能有效解决塔架构件尺寸设计超限和疲劳问题。风电塔架在服役期内受到压弯、弯扭和压弯扭等耦合荷载, 为研究其关键构件在复杂荷载作用下的受力性能, 开展了4个预应力钢管混凝土柱的低周往复加载试验, 分析其破坏模式和滞回性能。结果表明: 在压弯荷载作用下, 构件以柱脚处外钢管钢材弯曲型破坏为主, 弯扭/压弯扭试件破坏模式为弯扭-扭转型; 钢绞线对柱脚处钢材鼓曲、柱身斜向裂缝有抑制作用, 使构件初始弹性刚度、总耗能提高了34.55%、37.67%, 但对承载力影响不显著; 弯扭比对试件的峰值荷载、延性系数、弹性刚度影响较大, 对耗能能力影响较小; 预应力损失与构件塑性变形密切相关。

关键词: 风电结构; 预应力钢管混凝土柱; 复杂荷载; 破坏模式; 滞回性能

中图分类号: TU398.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Hysteretic performances of prestressed concrete-filled steel tubular columns under complex loading conditions

WU Gang¹, LIU Yang², CHEN Wei², ZHANG Xuesen¹, ZHANG Ke²,
WANG Yuhang³, LU Yian³, LIU Yusen³

(1. China General Nuclear Power Group (CGN) Wind Energy Co., Ltd, Beijing 100070, P. R. China; 2. Goldwind Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100176, P. R. China. 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Prestressed concrete-filled steel tubular (CFST) lattice towers capitalize on superior load-bearing capacity and lateral stiffness of composite CFST members. The application of unbonded prestressing strands effectively addresses dimensional design limitations and fatigue issues. Wind turbine towers in service are subjected to compression-bending, bending-torsion, and compression-bending-torsion loads. To investigate the seismic performances of key components, four low-cycle reversed loading tests were conducted on prestressed CFST columns, focusing on failure modes and hysteretic performances. Results reveal that under compression-

收稿日期: 2025-08-20

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFF0505400); 重庆市杰出青年科学基金(2024NSCQ-JQX0096)

作者简介: 吴刚(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事钢-混组合结构、风电结构研究, E-mail: 157273697@qq.com。

刘宇森(通信作者), 男, 博士, Email: liuyusen_mail@163.com。

Received: 2025-08-20

Foundation items: National Key Research and Development Program (No. 2024YFF0505400); Chongqing Science and Technology Bureau (No. 2024NSCQ-JQX0096)

Author brief: WU gang (1983-), senior engineer, main research interests: steel-concrete composite structures and wind turbine structures, E-mail: 157273697@qq.com.

LIU Yusen (corresponding author), PhD, E-mail: liuyusen_mail@163.com.

bending, failures were dominated by flexural buckling of outer steel tubes near the column base, while specimens under bending-torsion and compression-bending-torsion exhibited coupled flexural-torsional failure. Prestressing strands mitigated steel's local buckling and suppressed diagonal cracking along columns, increasing initial stiffness and energy dissipation by 34.55% and 37.67%, with limited effect on ultimate capacity. Bending-to-torsion ratios significantly affected peak load, ductility, and stiffness, but had a minor impact on energy dissipation. And prestress loss was strongly correlated with plastic deformation.

Keywords: wind turbine structures; prestressed concrete-filled steel tubular columns; complex loading conditions; failure modes; hysteretic performances

预应力钢管混凝土格构式塔架是创新性应用预应力钢绞线和钢管混凝土的组合结构^[1]。相比于传统柔性钢塔易在风致作用下发生共振^[2],钢混塔筒生产效率低、拼装吊装周期长、运输易超限、供应链长等诸多问题^[3-4],格构式塔架因抗侧刚度大,将单根构件受弯模式转化为四根角柱受轴力作用,极大提高了材料利用率,且散件运输、干式装配化连接能有效解决生产运输等问题。下部格构式塔架由四根预应力钢管混凝土角柱组成,在风机运行过程中,受上部钢塔/叶片自重产生的轴力、水平风荷载引起的倾覆弯矩、叶片偏航/变桨引起的扭矩的作用,塔架处于压弯扭复杂荷载作用状态^[5]。因此,研究预应力钢管混凝土角柱在复杂荷载作用下的滞回性能具有重要的工程价值和科学意义。

目前,学者对复杂荷载下中空夹层钢管混凝土构件的力学性能开展了系统研究。Hsiao等^[6]开展了中空夹层圆钢管混凝土柱在压弯荷载作用下的侧向循环加载试验,在保持稳定轴向力的条件下,试件最终以柱脚处钢材局部屈曲的形式破坏。Uenaka^[7]通过圆形截面中空夹层混凝土构件的单调加载试验发现,弯剪作用下构件的外钢管在弯矩最大处撕裂,夹层混凝土呈现剪切破坏。黄宏等^[8]考察了长细比、空心率和轴压比对中空夹层钢管柱的压弯扭性能的影响,发现随着轴压比的增大、偏心率减小、空心率增大,试件的抗扭承载力和延性更好。Zhan等^[9]、Huang等^[10]研究表明,在主弦上施加预应力能显著提升钢管混凝土桁架梁的初始抗弯刚度与极限抗弯承载力。Jin等^[11]开展了预应力中空夹层钢管混凝土柱的轴向拉伸往复加载试验,通过对比不同含钢率、预应力水平和张拉方式发现,截面含钢率越高,构件承载力更高,且初始预应力越大,构件延性越好。贾俊峰等^[12]、魏博等^[13]将无粘结预应力筋嵌入钢筋混凝土柱,作为自复位耗能元件,该类构件在压弯荷载作用下呈现旗帜形滞回曲线,呈现出良好的抗震性能,且耗能装置可更换。

现有研究对复杂荷载作用下预应力钢管混凝土柱的受力性能关注较少,尤其缺乏对格构式塔架

中压弯、弯扭及压弯扭等实际荷载工况的系统研究。笔者基于实际格构式塔架角柱的复杂受力特性,开展预应力钢管混凝土柱的拟静力试验,分析其抗震性能,揭示该类构件在复合荷载作用下的力学性能。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计4个预应力钢管混凝土柱试件,为更好地模拟实际塔架在复杂荷载下的滞回性能,试验工况涵盖压弯、弯扭、压弯扭等。试验轴压比 n 为轴向合力与实测截面抗压强度的比值。

$$n = \frac{N_m}{(f_y A_s + f_c A_c)} \quad (1)$$

式中: N_m 为轴力; f_y 、 A_s 分别为钢材屈服强度和面积, f_c 、 A_c 分别为混凝土抗压强度和面积。

塔架设计轴压比为轴力设计值与组合截面抗压承载力比值,工程中轴压比为0.2~0.6,为避免轴压比过高/过低导致试件极端破坏,保证钢管混凝土约束效应和延性表现良好^[14-15],兼顾工程设计和轴力加载便利性,确定试验轴压比为0.3。轴力 N_m 由预应力与外施轴力共同构成,外施轴力通过千斤顶加载,以模拟叶片、钢塔及格构段自重引起的稳定轴力;预应力则表现为随加载变化的变轴力,以其初始值计入总轴压比。弯扭比为柱底截面弯矩和扭矩的比值,通过调整加载点与试件顶部的水平距离,实现不同弯扭比下试件的弯矩和扭矩耦合作用,对比组试件3和试件4旨在对比分析不同弯扭比对构件力学性能的影响规律。通过在角柱内设置有/无预应力钢绞线对比试验,探讨预应力作用对角柱抗裂性、刚度及承载力的影响规律,试件设计参数详见表1。

试件有效高度为650 mm,外钢管采用 $\Phi 108$ mm $\times$ 4.5 mm的Q355无缝钢管,管内灌注细骨料混凝土,实测立方体抗压强度为54.5 MPa。内钢管采用 $\Phi 108$ mm $\times$ 4.5 mm的Q235无缝钢管,主要作为钢绞线的穿索孔道、较少参与构件受力,管内布

表 1 试件参数

Table 1 Test parameters of specimens

序号	试件编号	初始预应力/kN	弯扭比	总轴压比	加载方式
1	BT-NP-H00	0	3.29	0	弯扭
2	CB-P-30	235		0.30	压弯
3	CBT-P-H30	235	3.29	0.30	压弯扭
4	CBT-P-L30	235	1.64	0.30	压弯扭

注:试件编号中的C、B、T分别表示轴压、弯曲、扭转荷载;P、NP表示有、无预应力;H、L分别表示大、小弯扭比,后面的数字表示试件总轴压比。

置3根公称直径为15.2 mm、抗拉强度等级为1860 MPa的无粘结钢绞线进行张拉。根据《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—

2021)^[16],实测钢材力学性能参数如表2所示。

表 2 钢材力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel

钢材类别	厚度/外径/ mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ GPa
外钢管	3.00	320	465	200
内钢管	1.50	193	311	203
钢绞线	7×15.2	1748	1997	198

为保证试件与加载工装间的有效传力,试件顶部焊接30 mm厚端板并焊接环向加劲肋。试件底部埋入钢筋混凝土底座,焊接30 mm端板,并加设纵向、环向加劲肋,如图1所示。

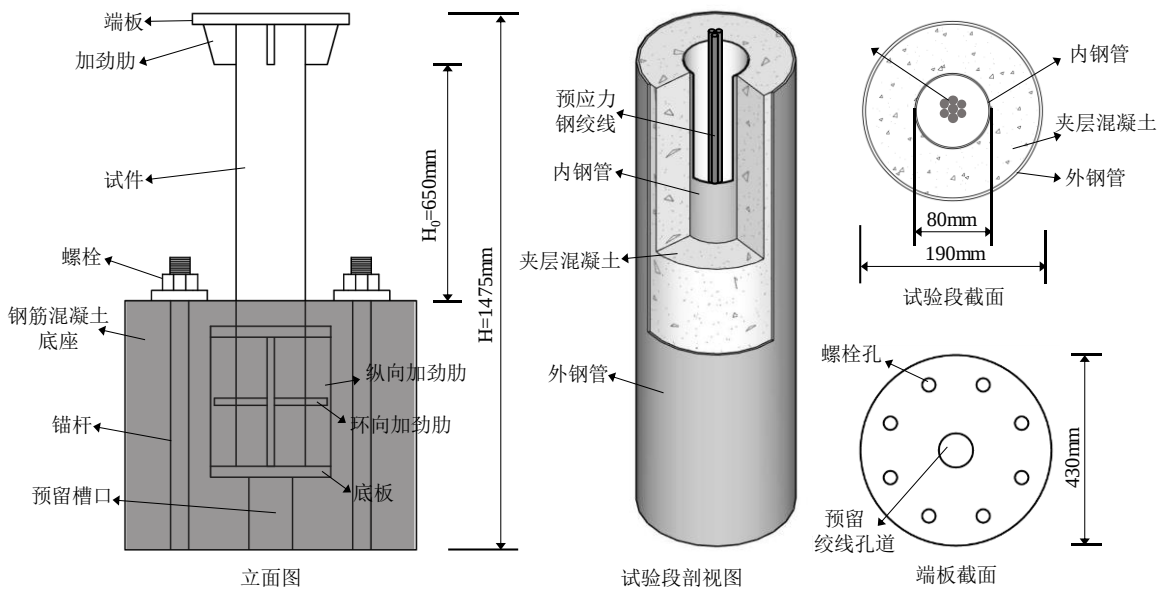


图 1 预应力钢管混凝土柱几何尺寸

Fig. 1 Geometric dimensions of prestressed concrete-filled steel tubular corner columns

如图2所示,体内无粘结钢绞线采用后张拉方式。张拉前用高压气体清除管内杂质,然后保证锚垫板与孔道轴线一致,分级张拉钢绞线至初始预应力。最后,用三孔式圆盘锚具锚固钢绞线,保证钢绞线锚固区长度不小于200 mm,并用机器切除多余钢绞线

1.2 加载方案

采用团队自主研发的加载装置^[17]进行压弯扭复合荷载加载,如图3所示。

千斤顶经分配梁以均布荷载的形式传递至试件,实现“轴压”加载,且加载过程中需保持轴压力稳定。连接水平作动器和加载梁的十字铰保证了加载梁在加载过程中的自由度,水平作动器启动时可实现“弯扭”加载。同时启动竖向千斤顶和水平作动器,通过调节水平作动器在反力墙连接端部上的位置,当扭臂为0、400、800 mm时,分别实现本试验的“压弯”、大弯扭比和小弯扭比的“压弯扭”加载。

为检查加载工装连接螺栓是否存在滑移、测量仪器是否正常工作,正式加载前对试件进行预加载,根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[18],采用位移控制,以水平作动器水平位移

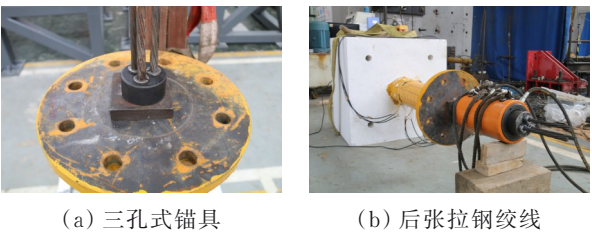


图 2 钢绞线张拉

Fig. 2 Tensioning of post-tensioned strands

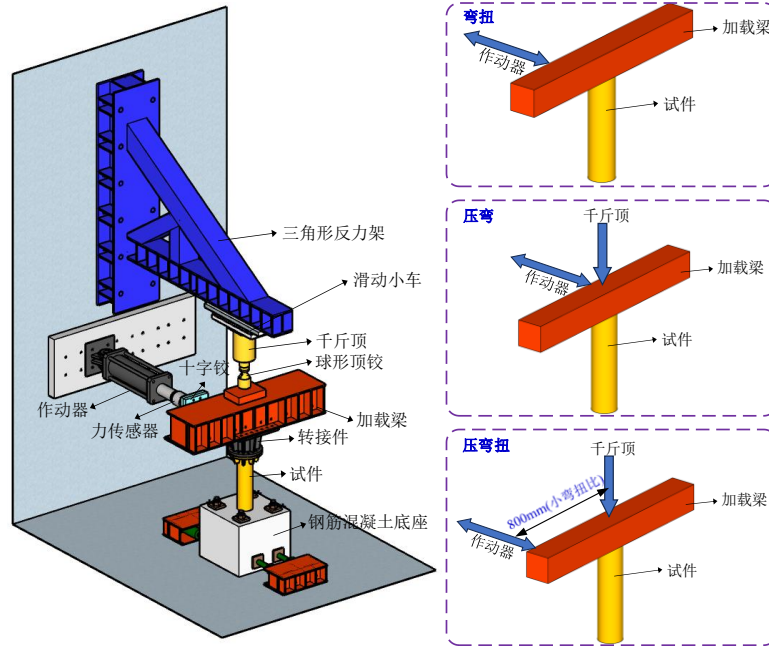


图3 加载装置

Fig. 3 Loading device

4mm 为加载级,每级加载稳定 1min 后记录相应水平荷载、钢材应变、试件现象。当荷载接近峰值荷载后,加载速率变慢并仔细记录试件破坏形态。当水平荷载下降至峰值荷载 85% 时,或当试件变形破坏严重至无法再继续加载时,停止加载,具体加载制度见图 4。

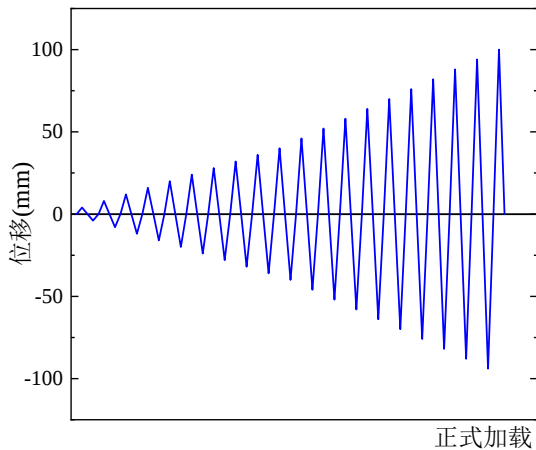


图4 加载制度

Fig. 4 Loading history

1.3 测点布置

考虑到压弯扭/弯扭试件在加载过程中受到扭剪力,在柱脚往上 100 mm 处布置 8 个测点,每个测点布置三向应变花,而压弯试件布置正交应变花,如图 5(a)所示。在水平作动器、试件柱顶设置位移测点,采用 LVDT 顶针式位移计 1 和 2 分别量测水平作动器和试件柱顶的水平位移,如图 5(b)所示。在水平作动器、轴压千斤顶、预应力钢绞线端部,分

别连接力传感器,实时记录试件水平力、轴压力、预应力的变化。

2 试验破坏模式

所有试件外钢管均在柱脚附近发生较大变形,其破坏模式如图 6 所示。压弯试件 CB-P-30 以柱脚处钢材“象腿式”破坏,且加载过程中预应力损失最大,即水平位移为 0 时,角柱内预应力值相比于初始预应力,最大损失 49%。弯扭和压弯扭试件均在柱脚处发生斜向鼓曲、褶皱突出,大弯扭比试件 CBT-P-H30 局部屈曲倾斜约为 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$,而小弯扭比试件 CBT-P-L30 约为 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。这表明,随着弯扭比减小,预应力钢管混凝土柱脚处的剪切变形更大。此外,同等弯扭比下,无应力的弯扭试件 BT-NP-H00 相比于有预应力试件 CBT-P-H30 表现出更大的变形能力,这表明预应力的施加对构件的抗侧刚度有所影响。

如图 7 所示,所有试件柱脚处夹层混凝土均发生了明显的混凝土破碎现象。压弯试件以弯曲变形为主,仅在柱脚处出现混凝土压溃,而压弯扭试件在柱身出现斜向或贯通裂缝。无预应力试件 BT-NP-H30 在弯扭荷载作用下,斜向裂缝更为密集,而有预应力试件 CBT-P-H30 由于钢绞线的施加,仅有一条竖向贯通裂缝,这表明无粘结钢绞线的施加对预应力钢管混凝土柱的斜向剪切裂缝有抑制作用。同时,随着弯扭比的减小,柱身剪切应力变大,小弯扭比压弯扭试件 CBT-P-L30 柱身出现更多斜向裂缝。

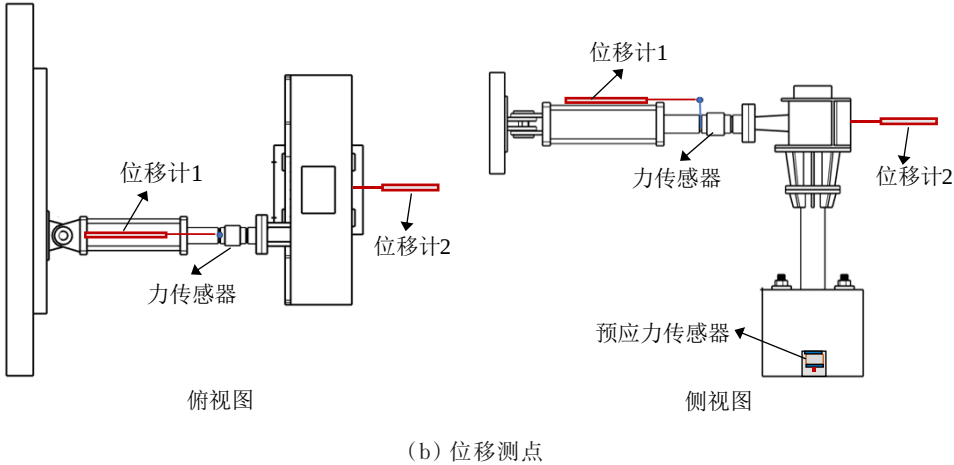
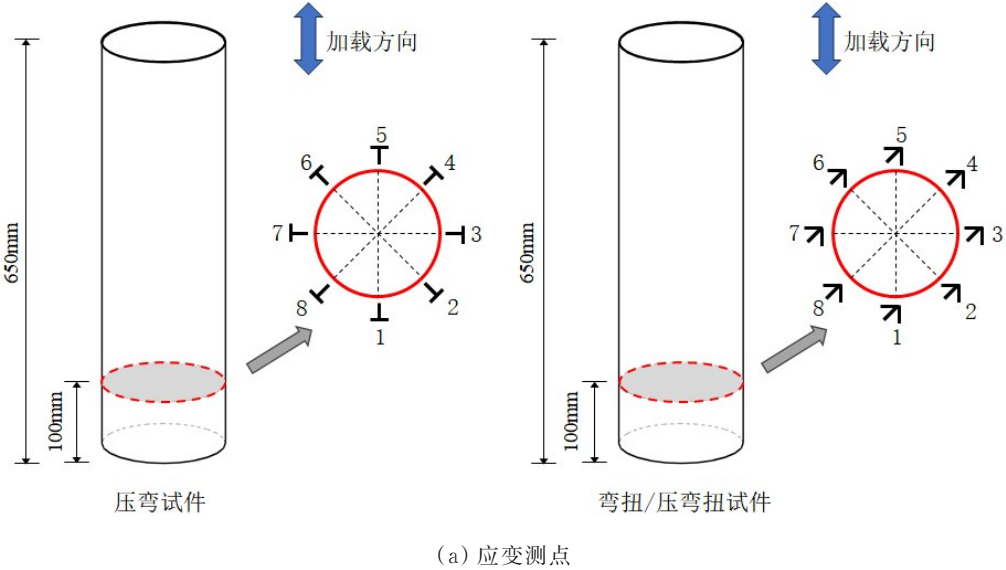


图 5 应变测点和位移计布置

Fig. 5 Arrangement of strain and displacement meters

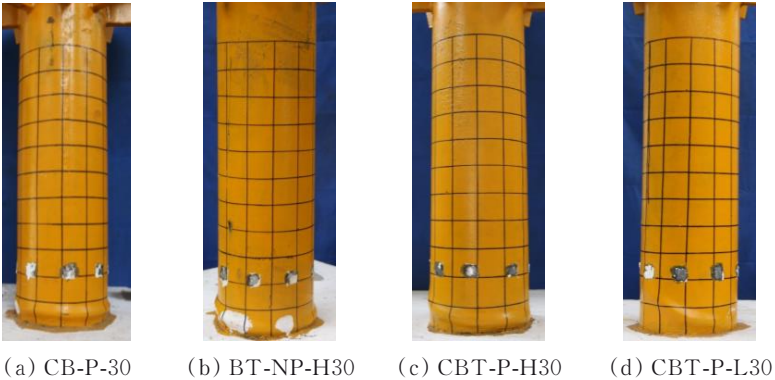


图 6 试验破坏现象

Fig. 6 Failure modes of specimens

3 试验结果分析

3.1 滞回曲线

为综合对比各试件在不同加载工况下的滞回特性,以水平加载千斤顶位移计1的测值为横轴、千斤顶实测水平力为纵轴,绘制各试件的荷载-位移滞

回曲线如图8所示。各试件滞回曲线的饱满程度可直观体现试件的耗能能力^[19]。除无预应力试件BT-NP-N00在弹塑性发展阶段有明显“捏缩”现象外,其余有预应力的压弯/压弯扭试件的滞回曲线均呈现饱满的梭形,具有良好的耗能能力。对比试件CBT-P-H30和CBT-P-L30,随着弯扭比的减小,扭

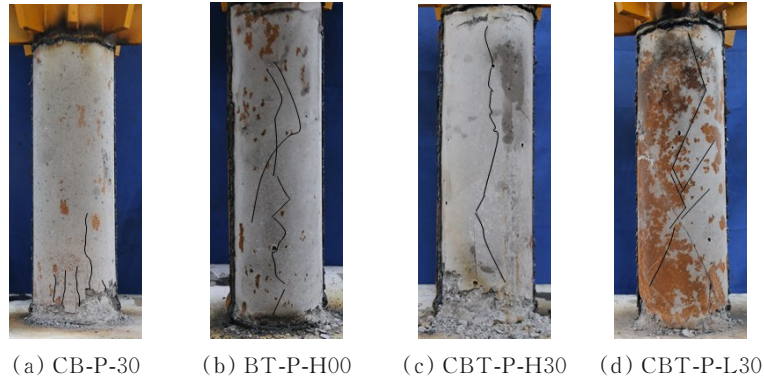


图7 混凝土裂缝

Fig. 7 Concrete cracks

矩占比更大,对试件承载力有所削弱。此外,试件初始微小偏心及加载工装局部连接的不均匀性引起弯扭耦合效应,导致引起正、负向承载力存在差

异。加载后期,柱脚局部屈曲逐渐累积,使滞回曲线呈现一定程度的不对称性。

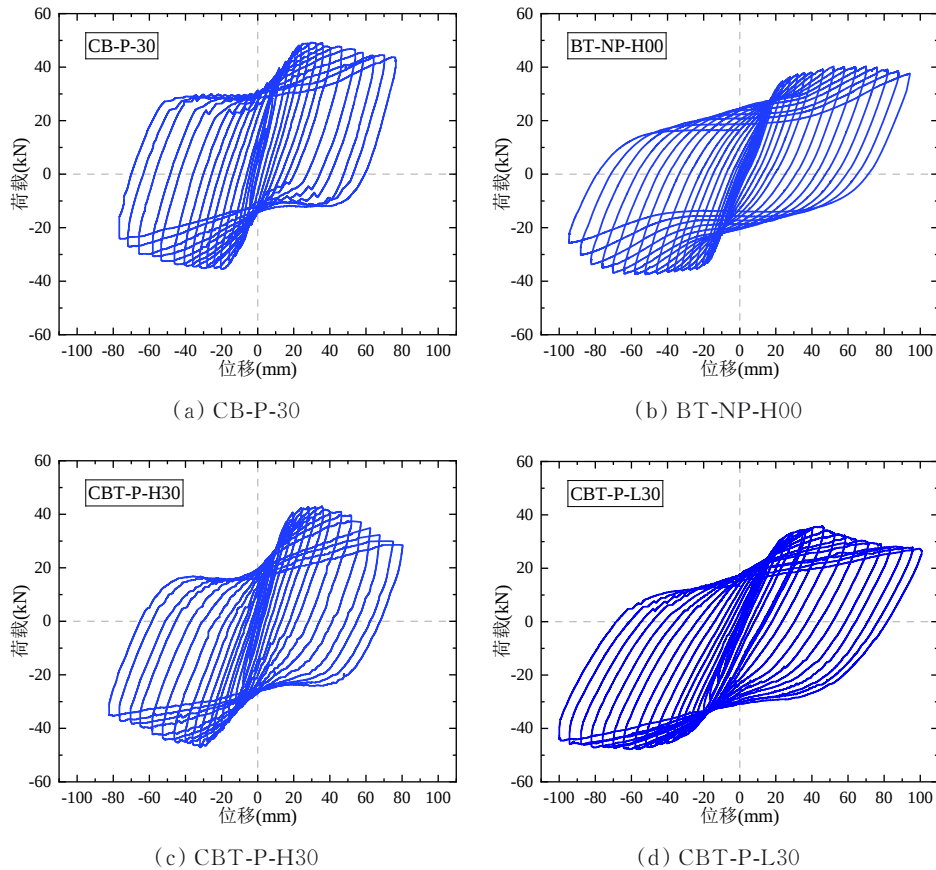


图8 滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic curves

3.2 骨架曲线

图9为各试件水平千斤顶荷载与千斤顶位移计1的骨架曲线,通过几何作图法^[20]确定试件屈服位移和屈服荷载,取承载力降至峰值荷载85%时所对应的位移或试验结束时对应的位移为极限位移,相应的力学性能如表3所示。复杂荷载下预应力钢管混凝土柱经历了线弹性、弹塑性、极限破坏等阶段,

其骨架曲线呈现标准的“S”形。同等弯扭比下,对比有无预应力试件CBT-P-H30和BT-NP-H00,预应力的施加引起构件轴压比增大,但对构件承载力提高不显著,两者变化范围仅为6.74%,但有预应力试件较无预应力试件的初始弹性割线刚度提高了34.55%。随着试件弯扭比从3.29减小至1.64,小弯扭比试件CBT-P-L30较大弯扭比试件CBT-P-

H30的峰值荷载、结构延性系数、初始弹性刚度分别降低16.93%、16.7%、25.88%,这表明弯扭比与构件的承载力、结构延性密切相关。

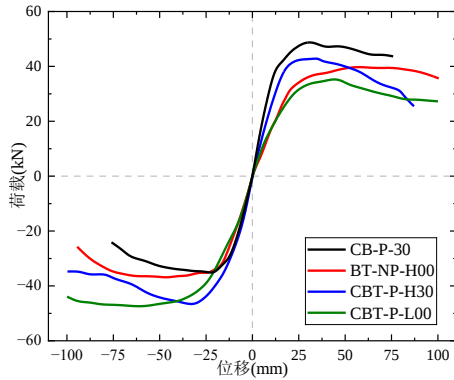


图9 骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves

表3 骨架曲线力学特征参数

Table 3 Mechanical parameters of skeleton curves

试件编号	F_y/kN	Δ_y/mm	F_p/kN	Δ_u/mm	μ	$K/(kN/mm)$
CB-P-30	40.31	15.37	48.79	75.90	4.94	3.94
BT-NP-H00	35.09	27.06	39.82	94.26	3.48	1.79
CBT-P-H30	39.60	18.33	42.94	61.55	3.36	2.74
CBT-P-L30	29.13	24.22	35.67	67.79	2.80	2.03

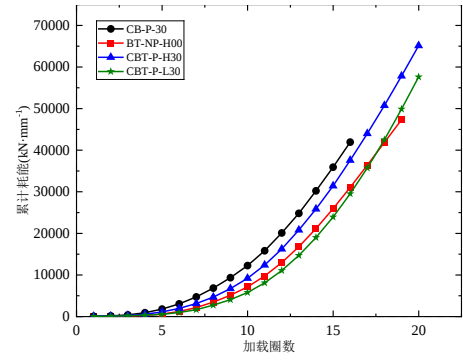
注: F_y 、 P_u 分别表示屈服荷载、极限荷载; Δ_y 、 Δ_u 分别表示屈服位移、极限位移; μ 表示结构延性系数, K 表示初始割线刚度。

3.3 能量耗散

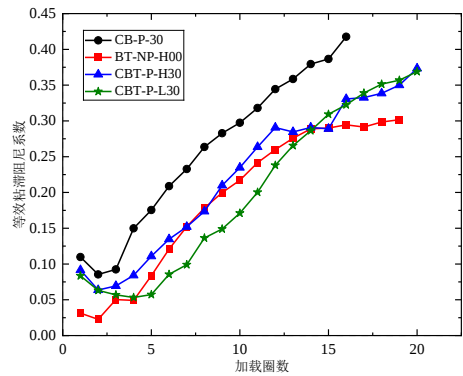
荷载-位移曲线滞回环所包围的面积是结构转化为非弹性变形所吸收的能量,滞回环面积越大,结构耗能能力越强^[21]。各试件的累积耗能和等效粘滞阻尼系数随加载圈数的变化规律如图10所示。各试件的耗能随着加载圈数的增加而增加,且在加载初期,试件的等效粘滞阻尼系数的增速差异不明显。继续加载,压弯试件粘滞阻尼系数最大,耗能能力最强,随着弯扭比的增加,试件受到的扭转作用更大,表现出更差的耗能能力。相比于无预应力试件BT-NP-H00,有预应力试件CBT-P-H30总耗能、粘滞阻尼系数分别提高了37.67%、23.73%,而大/小弯扭比的试件的总耗能和粘滞阻尼系数的差异分别为11.55%、1.17%,可忽略不计,这也间接体现了预应力对构件耗能的贡献,弯扭比对构件的耗能能力影响较小。

3.4 刚度退化

采用割线刚度定义试件的抗侧刚度^[22],其退化过程如图11所示。所有试件的刚度退化程度均是先急后缓。随着弯扭比的减小,扭臂增大,扭矩的存在会降低试件的初始刚度,且弯扭比越小的试件,初始弹性刚度越小。而压弯试件CB-P-30可视



(a) 累积耗能



(b) 粘滞阻尼系数

图10 能量耗散

Fig. 10 Energy dissipation

为扭臂为0的压弯扭试件,其初始刚度最大。同时,无应力试件BT-NP-H00的刚度最小,而其余有预应力的试件的弹性刚度均较高。因此,预应力钢管混凝土柱的初始弹性刚度与弯扭比、是否施加预应力有关。

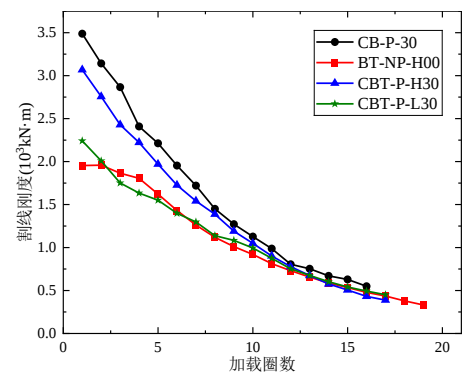


图11 刚度退化

Fig. 11 Stiffness degradation

3.5 钢绞线应力

随着作动器水平位移的增加,钢管混凝土柱内预应力值的变化规律如图12所示。随着往复加载的进行,各试件预应力呈交替变化,且变化规律基本一致。压弯试件CB-P-30预应力刚度曲线后期出现离散,主要由预应力释放与钢管局部屈曲累积引起,体现出构件进入非线性阶段后刚度退化及预应

力重分布特征。

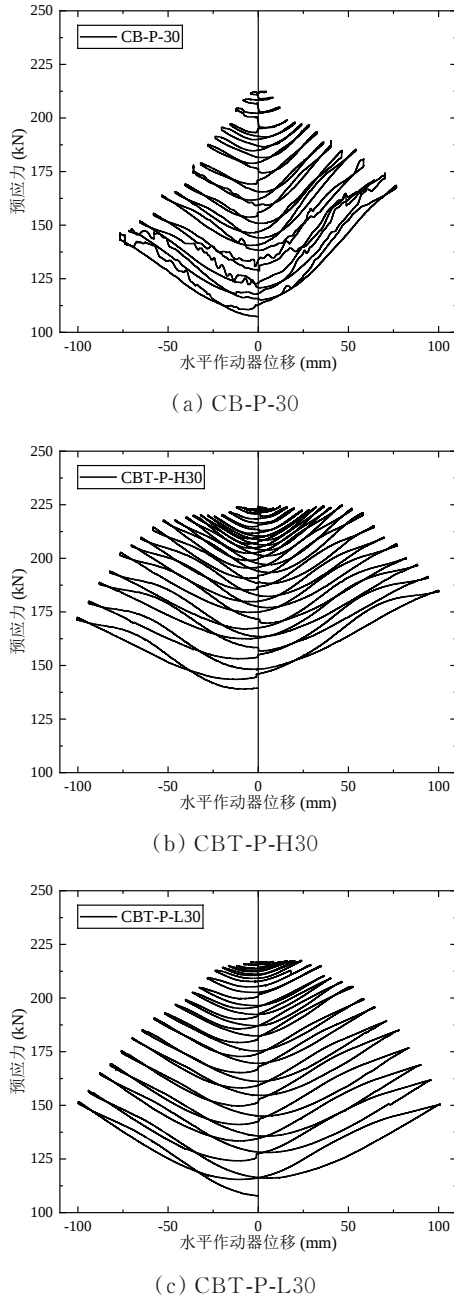


图 12 预应力-水平位移曲线

Fig. 12 Prestress - horizonal displacement curve

当水平横向位移为 0mm 时,钢绞线的应力尚未恢复到初始预应力,这表明在整个循环加载过程中,钢绞线力有所损失。钢管混凝土角柱中预应力损失的比率 $R_{\text{loss}}^{[23]}$ 可由式(2)确定。

$$R_{\text{loss}} = \frac{P_{11}}{P_{10}} \quad (2)$$

式中: P_{11} 为各位移水平下每根钢绞线应力损失值; P_{10} 为钢管混凝土角柱的初始预应力值。

试件的预应力损失值和损失率如图 13 所示。加载初期,各试件的预应力损失值在弹性阶段几乎呈线性增加,预应力损失率在 10% 以内,可忽略不

计。各试件的钢绞线在加载结束后均未达到屈服,这表明预应力钢绞线在整个受力过程中能够保持协同工作。此外,压弯试件 CB-P-30 的预应力损失值和损失率最大,这是因为柱内预应力损失与构件的塑性变形密切相关。同等初始预应力水平下,随着扭臂从 0 增加到 8mm,弯扭比从 ∞ 减小到 1.64,但构件受到的剪切应力更大,试件的破坏模式从弯曲型转换到弯曲-扭转型,构件沿轴向的塑性变形减小,故而随着弯扭比的减小,预应力损失减小。

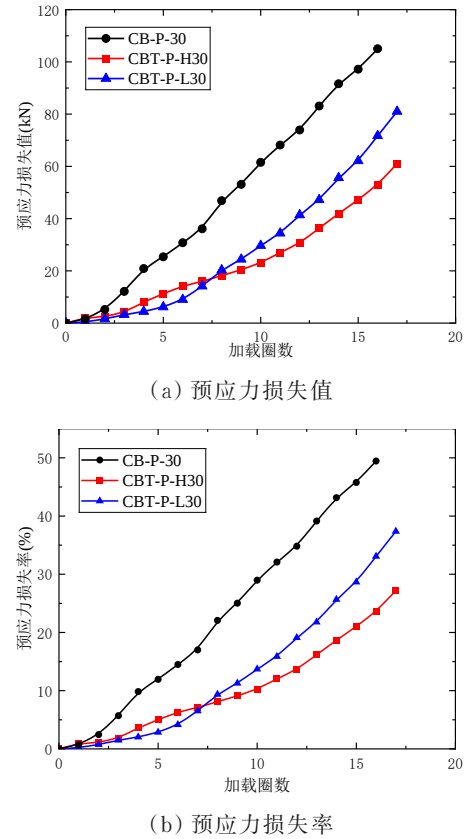


图 13 预应力损失

Fig. 13 Prestress loss

3.6 应变分析

沿着作动器加载方向,选取试件柱脚截面最外侧的应变测点 1 和 5 进行外钢管的应变分析,如图 14 所示。随着水平位移的增加,压弯试件 CB-P-30 和弯扭试件外钢管的推拉侧应变值基本对称,且呈现相似规律,弹性阶段的应变值基本线性增加,待钢材进入塑性阶段后,应变呈非线性快速增长。随着弯扭比的减小,试件柱身剪切变形增大,推侧的塑性变形难以恢复,故而引起柱脚处外钢管推拉应变值不对称。同等弯扭比下,与大/小弯扭比试件相比,无预应力试件 BT-NP-H00 表现出更大的应变值和更快的塑性发展,这也间接体现了钢绞线对角柱施加的预应力对构件进入塑性时的应变发展有抑制作用。

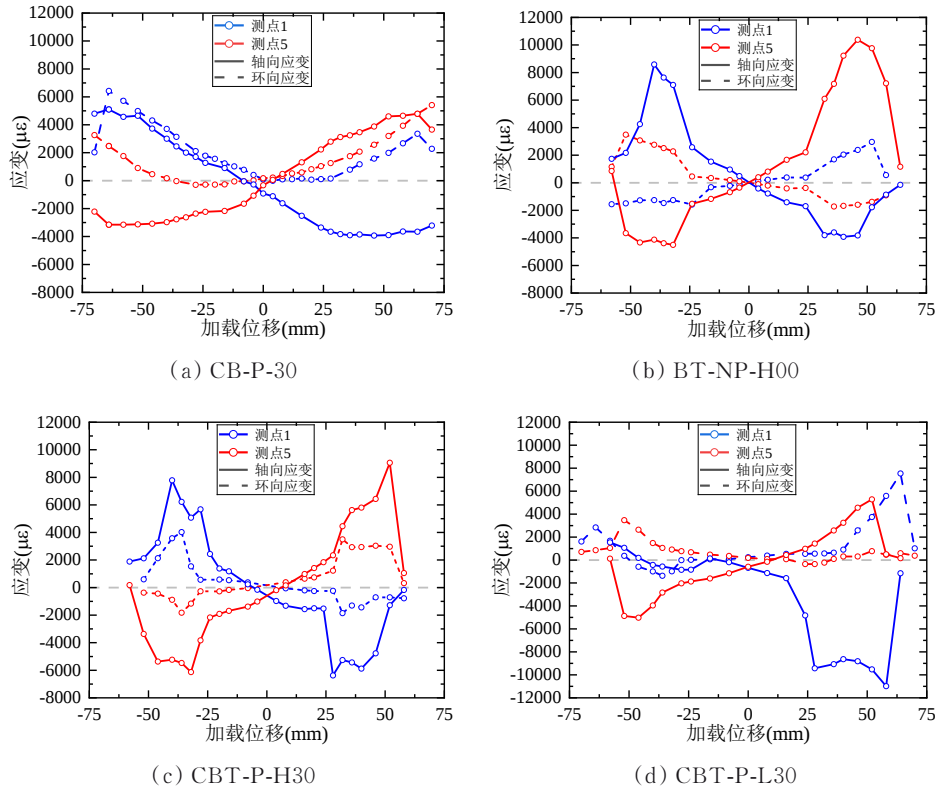


图 14 应变分析

Fig. 14 Strain analysis

4 结论

通过拟静力试验,研究预应力钢管混凝土柱在复杂荷载作用下的滞回性能,基于试验结果得出以下结论:

1)压弯荷载作用下,预应力钢混凝土柱以柱脚处外钢管象脚式弯曲型破坏为主。弯扭/压弯扭荷载下,破坏模式为弯曲-扭转型,且柱脚处钢材为斜向外鼓曲。

2)预应力钢管混凝土柱的滞回性能良好。无粘结预应力钢绞线的使用,对柱身斜向裂缝产生和柱脚外钢管的塑性发展有抑制作用。

3)预应力对钢管混凝土柱的压弯扭承载力影响不显著,但对其初始弹性刚度、总耗能有显著提高,提高幅度为 34.55%、37.67%。随着弯扭比从 1.64 增至 3.29,构件峰值荷载、延性系数、初始弹性刚度、总耗能分别提高了 16.93%、16.7%、25.88%、11.55%。

4)钢绞线的施加能显著提升构件耗能能力,且往复加载过程中存在预应力损失,其值与构件的塑性变形密切相关。

参考文献

[1] LIU Y S, WANG Y H, ZHOU X H, et al. Lateral bearing capacity of self-centering prestressed concrete

filled steel tubular lattice rocking tower [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2025, 231: 109616.

[2] REN W, ZHOU X H, DENG R, et al. Experimental and analytical investigation of stiffened steel tubes for wind turbine towers under compression-bending load [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 193: 107296.

[3] TAN J K, RAN Y D, SU H, et al. Enhancing shear capacity of vertical joints in concrete towers with steel arc bolts [J]. Structures, 2025, 79: 109632.

[4] QUILLIGAN A, O'CONNOR A, PAKRASHI V. Fragility analysis of steel and concrete wind turbine towers [J]. Engineering Structures, 2012, 36: 270-282.

[5] LIU Y S, ZHOU X H, WANG Y H, et al. Compression-bending-torsion bearing performance of CFST jacket foundation for offshore wind turbines [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2025, 232: 109609.

[6] HSIAO P C, KAZUHIRO HAYASHI K, NISHI R, et al. Investigation of concrete-filled double-skin steel tubular columns with ultrahigh-strength steel [J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(7): 04014166.

[7] UENAKA K. Concrete filled double skin tubular deep beam having outer circular and inner square sections under bending-shear [J]. Structures, 2018, 14: 313-321.

[8] 黄宏, 朱琪, 陈梦成, 等. 方中空夹层钢管混凝土压弯扭构件试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(3): 91-97.

- HUANG H, ZHU Q, CHEN M C, et al. Experimental study on concrete-filled double-skin square steel tubes under compression-bending-torsion loading conditions [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(3): 91-97. (in Chinese)
- [9] ZHAN Y L, ZHAO R D, MA Z J, et al. Behavior of prestressed concrete-filled steel tube (CFST) beam [J]. *Engineering Structures*, 2016, 122: 144-155.
- [10] HUANG W J, LAI Z C, CHEN B C, et al. Experimental behavior and analysis of prestressed concrete-filled steel tube (CFT) truss girders [J]. *Engineering Structures*, 2017, 152: 607-618.
- [11] JIN K Y, ZHOU X H, HU C, et al. Study on axial tensile behavior of CFDST columns strengthened with prestressing technique [J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 214: 113341.
- [12] 贾俊峰, 魏博, 欧进萍, 等. 外置可更换耗能器的预制拼装自复位桥墩抗震性能试验研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(5): 154-162.
- JIA J F, WEI B, OU J P, et al. Tests for seismic performance of prefabricated self-centering bridge piers with external replaceable energy dissipator [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(5): 154-162. (in Chinese)
- [13] 魏博, 贾俊峰, 欧进萍, 等. 外置耗能器对自复位预制 RC 桥墩抗震性能的影响研究[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(2): 220-229.
- WEI B, JIA J F, OU J P, et al. Study on the effect of exterior dampers on the seismic performance of self-centering precast bridge columns [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(2): 220-229. (in Chinese)
- [14] LI Z Y, XU B, WANG J, et al. Experimental and two-scale numerical studies on the behavior of prestressed concrete-steel hybrid wind turbine tower models [J]. *Engineering Structures*, 2023, 279: 115622.
- [15] LIU F Q, YANG D D, WEI C Y, et al. Behaviour and design of prestressed stayed circular concrete-filled double skin steel tubular (PS-CCFDSST) columns under axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2024, 318: 118788.
- [16] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Metallic materials—Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [17] ZENG W Y, ZHOU X H, WANG Y H, et al. Seismic behavior of hollow circular UHPFRC columns with high strength steel reinforcements and tubes subjected to combined compression-bending-torsion load [J]. *Engineering Structures*, 2025, 343: 121075.
- [18] 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [19] 杜春雨, 梁晓, 张惠申, 等. 预制节段拼装中空夹层钢管混凝土桥墩自复位与耗能能力计算方法研究[J/OL]. *工程力学*, 2024: 1-10. (2024-12-25). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GCLX2024122300I&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- DU C Y, LIANG X, ZHANG H S, et al. Study on self-reset and energy dissipation capacity calculation method of precast segmental assembled hollow sandwich concrete filled steel tubular pier [J/OL]. *Engineering Mechanics*, 2024: 1-10. (2024-12-25). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GCLX2024122300I&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [20] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. *工程力学*, 2017, 34(3): 36-46.
- FENG P, QIANG H L, YE L P. Discussion and definition on yield points of materials, members and structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(3): 36-46. (in Chinese)
- [21] 廖飞宇, 韩浩, 王宇航. 带环向脱空缺陷的钢管混凝土构件在压弯扭复合受力作用下的滞回性能研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(7): 57-68, 80.
- LIAO F Y, HAN H, WANG Y H. Cyclic behaviour of concrete-filled steel tubular(CFST) members with circumferential gap under combined compression-bending-torsion load [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(7): 57-68, 80. (in Chinese)
- [22] GUO J R, SUN L H, ZHAO H, et al. Seismic performance of a novel non-diaphragm joint between concrete-filled cold-formed high-strength square steel tubular columns and composite beams [J]. *Engineering Structures*, 2025, 339: 120700.
- [23] YANG Y, FENG S Q, XUE Y C, et al. Experimental investigation on the seismic behaviour of innovative self-centring precast steel-concrete hybrid frames [J]. *Engineering Structures*, 2021, 239: 112222.