

预应力CFRP筋-螺纹钢-型钢/混凝土偏拉构件抗震性能试验

张鹏 花东升 邓宇 李真真 桂金洋 覃宣盛

Experiment on seismic performance of prestressed CFRP tendons and rebars-steel reinforced concrete eccentrically tensioned members

ZHANG Peng, HUA Dongsheng, DENG Yu, LI Zhenzhen, GUI Jinyang, QIN Xuansheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210617.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

偏心受拉作用下预应力CFRP筋-型钢混凝土构件抗裂试验

Experiment on crack resistance of prestressed CFRP tendons-steelreinforced concrete members under eccentric tension

复合材料学报. 2021, 38(3): 920-931 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200710.001>

CFRP筋-高强钢筋/高强混凝土柱的抗震性能

Seismic behavior of high-strength concrete columns reinforced with CFRP tendons and high-strength steels

复合材料学报. 2021, 38(10): 3463-3473 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201222.001>

碳纤维增强树脂复合材料加固钢筋混凝土柱抗震性能的尺寸效应试验

Experiment on the size effect of seismic behavior for reinforced concrete columns strengthened by carbon fiber reinforced plastics

复合材料学报. 2020, 37(10): 2645-2655 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200212.001>

低轴压比聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料中长柱抗震性能试验

Experimental study on seismic performance of polyvinyl alcohol fiber reinforced cementitious composite medium-length columns with low axial pressure ratio

复合材料学报. 2021, 38(12): 4337-4348 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210310.001>

PVC-CFRP管钢筋混凝土柱的偏心受压性能

Eccentric compression performance of PVC-CFRP confined reinforced steel tube concrete column

复合材料学报. 2017, 34(10): 2356-2366 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170222.002>

体外预应力纤维增强树脂基复合材料筋混凝土结构研究进展

A review of studies on concrete structures prestressed with external fiber reinforced polymer composites tendons

复合材料学报. 2021, 38(7): 2092-2106 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210327.001>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210617.003

预应力 CFRP 筋-螺纹钢筋-型钢/混凝土偏拉
构件抗震性能试验



分享本文

张鹏, 花东升*, 邓宇, 李真真, 桂金洋, 覃宣盛

(广西科技大学 土木建筑工程学院, 柳州 545006)

摘 要: 为研究预应力碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 筋-螺纹钢筋-型钢/混凝土 (SRC) 偏拉构件的抗震性能, 对 4 根预应力 CFRP 筋-SRC 偏拉构件、4 根预应力螺纹钢筋-SRC 偏拉构件和 3 根普通 SRC 受拉构件进行了低周反复荷载对比试验, 试验参数包括偏心距、预应力张拉水平、竖向拉力、预应力筋类型。研究结果表明: 所有构件的破坏形态均为弯剪破坏, 构件滞回曲线均较饱满, 延性较好。随着偏心距的增大, 各构件承载力、延性及耗能能力均相应降低; 随着预应力张拉水平的增大, 构件承载力有一定提高, 但耗能能力降低, 延性系数先增后降, 且增加幅度大于降低幅度; 随着竖向拉力的增大, 预应力 CFRP 筋-SRC 偏拉构件的承载力、延性及耗能能力均相应降低。相较于普通 SRC 受拉构件, 预应力 CFRP 筋-SRC 偏拉构件具有更好的承载力、刚度、延性和抗裂能力, 但耗能能力低; 相较于预应力螺纹钢筋-SRC 偏拉构件, 预应力 CFRP 筋-SRC 偏拉构件的承载力和延性较低, 但耗能能力强。

关键词: 预应力 CFRP 筋; 偏心受拉; 型钢/混凝土构件; 拟静力试验; 抗震性能

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)04-1678-14

Experiment on seismic performance of prestressed CFRP tendons and rebars-steel
reinforced concrete eccentrically tensioned members

ZHANG Peng, HUA Dongsheng*, DENG Yu, LI Zhenzhen, GUI Jinyang, QIN Xuansheng

(College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: In order to investigate the seismic performance of prestressed carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tendons and rebars-steel reinforced concrete (SRC) eccentrically tensioned member, the low reversed cyclic loading tests of four members of prestressed CFRP tendons-SRC eccentric tension, 4 members of prestressed rebar-SRC eccentric tension and 3 members of ordinary SRC tension were conducted. The test parameters include eccentricity, prestressed tension level, vertical force and the types of prestressed tendon. The results show that the failure modes of all the members are bending shear failure, and the hysteretic curves of all the members are full and the ductility is good. With the increase of eccentricity, the bearing capacity, ductility and energy dissipation capacity of each component decrease accordingly. With the increase of the prestress tensile level, the bearing capacity of the component increases to a certain extent, but the energy dissipation capacity decreases, and the ductility coefficient increases first and then decreases, and the increase range is greater than the decrease range. With the increase of vertical tensile force, the bearing capacity, ductility and energy dissipation capacity of the prestressed CFRP tendons-SRC eccentric tensile member decrease correspondingly. Compared with the ordinary SRC tensile member, the prestressed CFRP tendons-SRC eccentric tensile member has better bearing capacity, stiffness, ductility and crack resistance, but lower energy consumption capacity. Compared with the prestressed rebar-SRC eccentric tensile

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-06-04; 录用日期: 2021-06-05; 网络首发时间: 2021-06-17 15:40:55

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210617.003>

基金项目: 国家自然科学基金 (51768008); 中国博士后科学基金 (2017M613273XB); 广西自然科学基金 (2019JJA160137)

通信作者: 花东升, 硕士, 研究方向为新型复合材料及预应力型钢混凝土组合结构 E-mail: 854283267@qq.com

引用格式: 张鹏, 花东升, 邓宇, 等. 预应力 CFRP 筋-螺纹钢筋-型钢/混凝土偏拉构件抗震性能试验 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(4): 1678-1691.

ZHANG Peng, HUA Dongsheng, DENG Yu, et al. Experiment on seismic performance of prestressed CFRP tendons and rebars-steel reinforced concrete eccentrically tensioned members[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(4): 1678-1691(in Chinese).

member, the prestressed CFRP tendons-SRC eccentric tensile member has lower bearing capacity and ductility, but higher energy dissipation capacity.

Keywords: prestressed CFRP tendons; eccentric tension; steel concrete member; pseudo-static test; seismic performance

预应力型钢/混凝土 (PSRC) 结构作为一种新型现代组合结构, 可以显著的提高构件的抗裂能力, 增大构件的刚度, 减小构件断面尺寸, 充分利用高强度材料, 扩大了构件的应用范围, 能够解决建筑功能和结构抗震性能之间的矛盾, 极大地推动了土木工程技术的发展^[1-3]。对于型钢结构桁架转换层拉杆、工业厂房中双肢柱的受拉肢杆等偏心受拉构件, 在正常使用阶段就易出现大面积拉裂缝, 采用钢绞线、高强度钢筋等金属预应力筋可以有效延缓其前期的裂缝出现及开展, 但裂缝一旦出现后, 构件内部的金属预应力筋材极易被腐蚀, 进而降低构件的抗裂效果。因此对于在正常使用阶段就极易出现大面积拉裂缝的偏心受拉构件, 宜采用非金属材料做为预应力筋。而碳纤维增强树脂复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 筋具有轻质高强、耐腐蚀性能好、抗拉强度高等优势^[4-7], 在承受偏心拉力的 PSRC 结构中具有较好的应用前景。

鉴于 PSRC 结构具有预应力技术和型钢/混凝土结构的双重优点, 国内外学者对 PSRC 结构开展了大量研究, Uy 和 Craine^[8] 通过对预应力钢/混凝土组合梁的抗弯性能试验研究, 建立了荷载-挠度数值模型, 提出了一种刚塑性分析方法。王琨等^[9] 研究了预应力型钢/混凝土梁-钢管/混凝土叠合柱框架节点的抗震性能, 研究发现预应力水平的增加延缓了梁受拉区裂缝的出现和开展, 并提高了节点承载力。李世平^[10] 通过有限元模拟软件建立了考虑核心约束效应的梁构件模型, 研究了预应力型钢/混凝土梁构件的破坏过程及形态, 得到了等效塑性铰区长度计算公式和弯矩调幅系数的建议公式。邓宇等^[11] 通过对偏心拉力作用下预应力型钢/混凝土构件的静力性能进行研究, 得到了其承载力计算公式及影响因素。目前国内外对型钢/混凝土构件的抗震性能进行了较系统的研究^[12-19], 但对于在拉弯剪复合作用下的预应力 CFRP 筋-型钢/混凝土构件的抗震性能研究成果较少, 并且历次震害调查结果表明: 承受偏心拉力的构件在地震作用下往往更具有破坏性。为此, 本文通过对 11 个不同偏心距、预应力张拉水平、竖向拉力、预应力筋类型的型钢/混凝土偏拉构件

进行低周反复加载试验, 分析其破坏形态及抗震性能, 为预应力 CFRP 筋-螺纹钢-型钢/混凝土偏拉结构的工程应用和理论分析提供参考。

1 试验概况

1.1 试验设计

1.1.1 试件设计

本次试验设计了 4 个预应力 CFRP 筋-型钢/混凝土偏拉构件、4 个预应力螺纹钢-型钢/混凝土偏拉构件和 3 个普通型钢/混凝土 (SRC) 受拉构件, 共 11 个构件, 设计参数有偏心距、预应力张拉水平、竖向拉力、预应力筋类型。试件截面的宽度和高度分别为 220 mm 和 250 mm, 试件总高度 1 300 mm(不含顶部型钢加载端高度), 由于试件后期采用有粘结后张法施加预应力, 因此在基座预留 100 mm 的凹槽放置预应力筋锚具端。型钢为 Q235 钢, 规格为 HW100 mm×100 mm×6 mm×8 mm, 型钢截面相对于构件截面的含钢量为 4% (体积比), 构件中的钢筋均采用 HRB400 级螺纹钢, 上部纵筋 4C10, 基座纵筋 10C12, 箍筋 C6@100, 为防止构件节点处发生破坏, 在构件底部与基座的交接处设置 200 mm 的箍筋加密区, 加密区箍筋 C6@50, 对于 PSRC 偏拉构件, 在偏拉侧均匀对称地布置两根直径为 7 mm 的预应力 CFRP 光圆筋或直径为 15 mm 的预应力精轧螺纹钢, 试件具体尺寸及配筋图如图 1 所示。考虑到预应力筋应锚固于构件两端及后期预应力筋的张拉要求, 对加载端头进行了特殊设计, 加载端头采用 Q345 钢, 加载端板与混凝土端面之间设置过渡区, 型钢、纵筋、加劲肋与加载端板焊接为整体以模拟拉弯构件真实的整体受力状态, 试件加载端头示意图如图 2 所示。试件详细参数见表 1, 试件编号中 AEM、SEM 和 LEM 分别代表轴拉、小偏拉及大偏拉构件, F7 表示 CFRP 筋, S15 表示精轧螺纹钢, T1、T2 分别代表试件所受偏心拉力, 依次为 30 kN、50 kN, N1、N2 分别表示预应力筋张拉水平, 依次为 40% f_{ptk} 和 60% f_{ptk} , C 表示 C40 混凝土。

1.1.2 预应力部分设计

预应力筋的张拉利用自行设计的预应力张拉

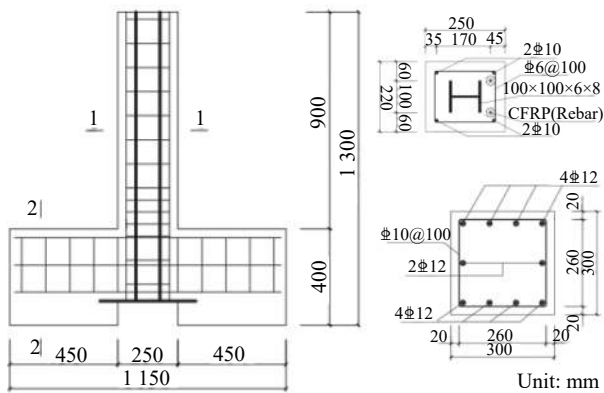


图 1 预应力碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 筋-螺纹钢-型钢/混凝土试件几何尺寸及配筋图

Fig. 1 Geometry size and reinforcing bars of prestressed carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tendons and rebars-steel reinforced concrete specimens

设备进行单端张拉，张拉装置示意图见图 3。传力路径：构件通过焊接为一体的加载端头与预应力张拉支座形成整体，通过反力板处的螺帽，将千斤顶对反力板的顶升压力转化为对延长螺杆的拉力，延长螺杆通过套筒与锚具连接，最后将拉力传递到 CFRP 筋或精轧螺纹钢，从而实现预应力筋的张拉。CFRP 筋张拉端和锚固端均采用设计锚固率为 1.0 的 OVM 新型挤压式低回缩 A7 碳棒锚具，型号 CFRM7.0，精轧螺纹钢的锚具采用生产厂家提供的配套锚具。

预应力筋的张拉控制应力 σ_{con} 分别为预应力筋的抗拉强度 f_{ptk} 的 40% 和 60%，采用有粘结后张法施工，浇筑混凝土前选用直径为 32 mm 塑料波纹管进行孔道预留，待混凝土达到预期强度后

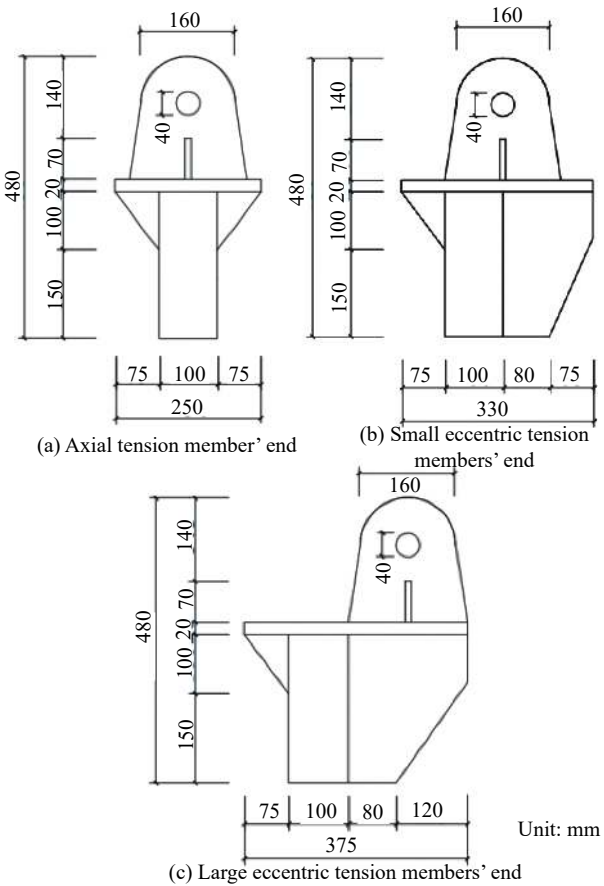


图 2 预应力 CFRP 筋-螺纹钢-型钢/混凝土试件加载端头示意图

Fig. 2 Schematic diagram of loading end of prestressed CFRP tendons and rebars-steel reinforced concrete specimens

(混凝土设计强度的 75% 以上)，将预应力筋穿入预留孔道，用锚具将一端进行固定后，采用一端固定一端张拉的张拉方式同时张拉 2 根预应力筋，张拉各阶段控制点分别为： $0 \rightarrow 0.2\sigma_{con} \rightarrow 0.4\sigma_{con} \rightarrow$

表 1 预应力 CFRP 筋-螺纹钢-型钢/混凝土试件主要设计参数

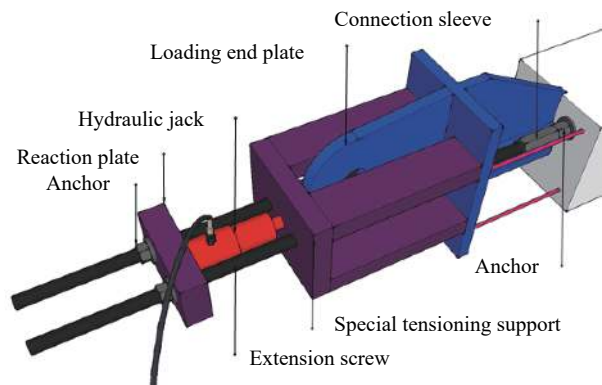
Table 1 Main design parameters of prestressed CFRP tendons and rebars-steel reinforced concrete specimens

Specimen	<i>e</i> /mm	<i>L_p</i> /%	<i>T</i> /kN	Type of prestressed tendon
SEM-F7-T1-N1/C	50	40	30	CFRP
SEM-F7-T1-N2/C	50	60	30	CFRP
LEM-F7-T1-N1/C	150	40	30	CFRP
SEM-F7-T2-N1/C	50	40	50	CFRP
SEM-S15-T1-N1/C	50	40	30	Rebar
SEM-S15-T1-N2/C	50	60	30	Rebar
LEM-S15-T1-N1/C	150	40	30	Rebar
LEM-S15-T1-N2/C	150	60	30	Rebar
ATM-T1/C	0	0	30	—
SEM-T1/C	50	0	30	—
LEM-T1/C	150	0	30	—

Notes: ATM—Axial tension member; SEM—Small eccentric member; LEM—Large eccentric member; F7—CFRP tendons; S15—Finely-rolled threaded bars; T1 and T2—Eccentric tension of the specimens, which are 30kN and 50kN; N1 and N2—Tensioning level of the prestressed tendons, which are 40% f_{ptk} and 60% f_{ptk} ; C—C40 concrete; *e*—Eccentricity; *L_p*—Prestressed tension level; *T*—Vertical pull.



(a) Physical drawing of loading device



(b) Detailed structure of loading device

图3 CFRP 筋和螺纹钢筋张拉装置

Fig.3 Tensioning device of CFRP tendons and rebars

$0.6\sigma_{con} \rightarrow 0.8\sigma_{con} \rightarrow 1.0\sigma_{con} \rightarrow 1.05\sigma_{con}$ ，持荷 2 min 后锚固、卸载，最后向预留孔道内灌入 NH-1 环氧树脂自流平砂浆，使预应力筋和周围混凝土粘结组合成一个整体。

1.2 材料的力学性能

试件所用混凝土设计强度等级为 C40，浇筑试件时按照 GB/T 50152—2012^[20] 进行浇筑，并且预留边长为 150 mm 的混凝土立方体试块和边长

为 150 mm×150 mm×300 mm 的混凝土棱柱体试块，自然养护 28 天后，实测混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 为 41.7 MPa，棱柱体抗压强度 f_c 为 28.6 MPa，弹性模量为 3.52×10^4 MPa，试验中型钢骨架均采用 Q235 级钢，加载端头采用 Q345 级钢，型钢力学性能指标由厂家提供，试验中所有钢筋均采用 HRB400 级钢筋，预应力筋分为 2 类：CFRP 光圆筋、普通的 PSB785 精轧螺纹钢筋。试验所用钢筋和预应力筋利用万能伺服试验机进行拉伸试验，各钢材性能指标如表 2 所示，预应力筋性能指标如表 3 所示。

1.3 加载方案与测点布置

采用 MTS 电液伺服作动器进行加载，具体加载装置示意图和现场图见图 4。试验时先在试件顶部用竖向作动器施加拉力至预定值 30 kN (SEM-F7-T2-N1/C 施加拉力为 50 kN)，再通过水平作动器施加低周反复荷载，水平加载采用荷载与位移混合控制的方式。试件屈服前采用荷载控制，加载初期以 3 kN 为荷载增量，裂缝出现后，增大荷载级差至 5 kN 后反复加载至试件屈服，屈服后以实测屈服位移为级差进行位移加载，每 1 级位移下循环 3 次，直到水平承载力下降到最大承载力的 85% 以下或试件不能继续承载时停止。

试验主要测点布置：试件顶部加载点和底部基座各布置 1 个位移计，以观测加载时的水平位移和检测加载过程中基座是否产生滑动。在试件底部分别对预应力筋、纵筋、型钢腹板及翼缘布置应变片或者应变花，以了解其在水平低周反复荷载下的应变情况，具体试件测点布置如图 5 所示。

表 2 钢材力学性能指标

Table 2 Mechanical properties of steel

Type		Yield strength/MPa	Ultimate strength/MPa	Modulus of elasticity/ 10^5 MPa
Steel	Q235	312.5	447.5	2.0
	Q345	395.6	556.6	2.0
Grade HRB400 reinforced	C6	492	608	2.1
	C10	475	690	2.1
	C12	438	618	2.0

表 3 预应力筋力学性能指标

Table 3 Mechanical properties of prestressed tendons

Type	Diameter/mm	Ultimate strength/MPa	Modulus of elasticity/ 10^5 MPa
CFRP	7	1 910	1.54
Rebar	15	1 026	2.10

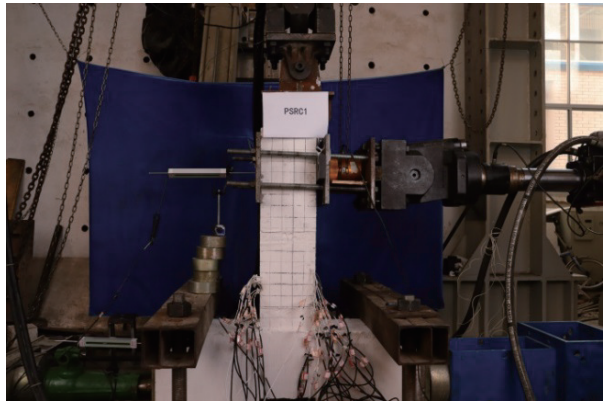
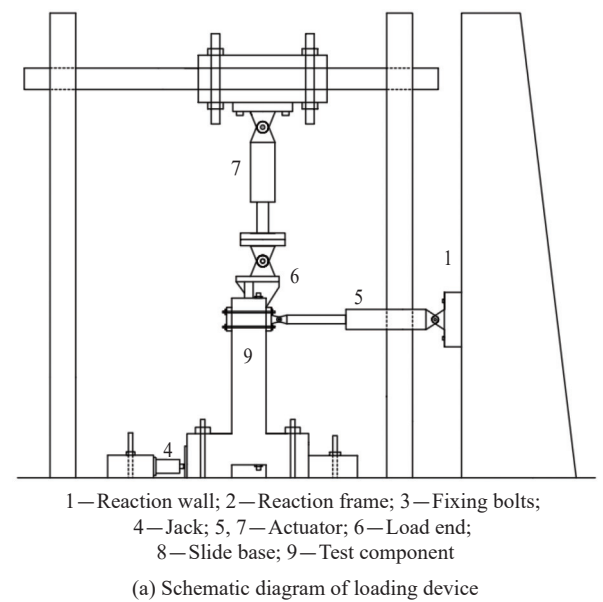


图4 试验加载装置

Fig. 4 Test loading device

1.4 试验数据修正

在加载过程中，试件受到拉-弯-剪共同作用，整体受力比较复杂，由于试件顶端会出现水平偏移，导致竖向拉力与竖直方向存在一定的夹角，同样在加载过程中水平荷载与水平方向也存在夹角，因此试件上的竖向拉力和水平力需要通过修正后得到，如图6所示，试件受力后由试件轴线与力轴线之间的几何关系得：

$$\sin \alpha = \Delta / L_1$$
 (1)

$$\sin \beta = \Delta L_2 / L_1 L_3$$
 (2)

$$\tan \theta_1 = \frac{L_1 (1 - \cos \alpha) + \delta \sin \alpha}{L_4 - \Delta - \delta \cos \alpha}$$
 (3)

因此，试件实际受力情况为

$$N' = N_1 + P_1$$
 (4)

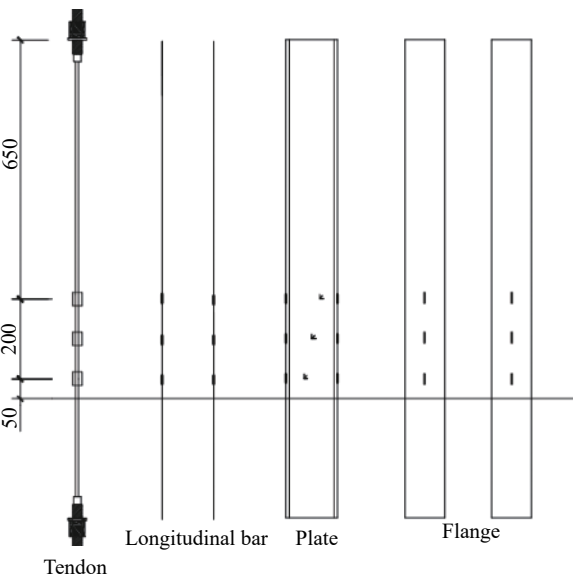
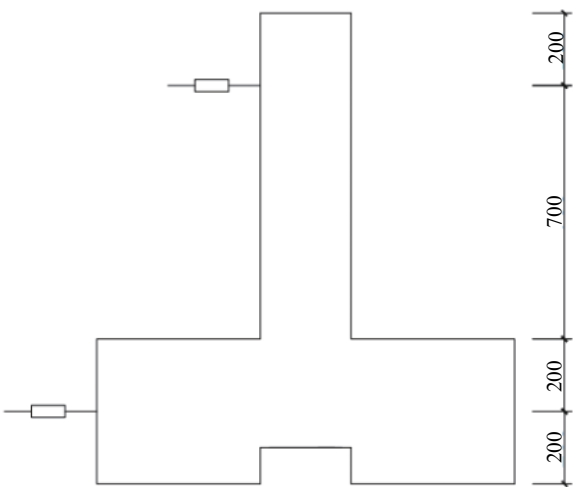


图5 预应力 CFRP 筋-螺纹钢筋-型钢/混凝土试件测点布置

Fig. 5 Measuring points layout of prestressed CFRP tendons and rebar-steel reinforced concrete specimens

$$M = P_2 L_1 - P_1 \delta - N_2 L_2$$
 (5)

$$P' = M / L_1$$
 (6)

式中： α 为轴线与竖直方向的转角； β 为竖向拉力作用方向与竖直方向的偏角； Δ 为水平力作用点处的水平位移； L_1 为水平力作用点到构件底部的距离； L_2 为竖向力作用点到试件底部距离； L_3 为竖向力作用点到竖向铰轴的距离； L_4 为试件轴线到水平铰轴的距离； δ 为水平力作用点到试件轴线的距离； θ_1 为水平铰轴与水平面的偏角； N' 为实际竖向拉力； N_1 为竖向拉力沿试件方向的分力； N_2 为竖向拉力沿垂直于试件方向的分力； M 为试件底部实际所受弯矩； P' 为实际水平拉力； P_1 为

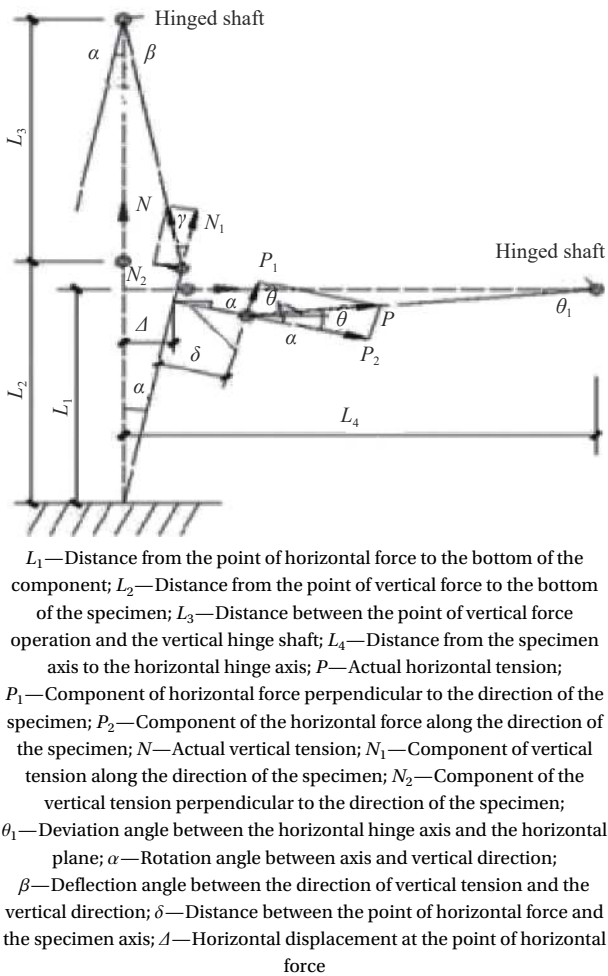


图 6 预应力 CFRP 筋-螺纹钢筋-型钢/混凝土试件变形下受力示意图

Fig. 6 Force schematic of prestressed CFRP tendons and rebars-steel reinforced concrete specimens under deformation

水平力沿垂直于试件方向的分力； P_2 为水平力沿试件方向的分力。

2 预应力 CFRP 筋-螺纹钢筋-型钢/混凝土构件试验过程及破坏特征

所有试件均主要发生弯剪破坏。PSRC 试件第一条裂缝出现时间晚于 SRC 试件，且裂缝数量及裂缝发展速度都明显低于 SRC 试件，预应力 CFRP 筋-SRC 试件、预应力螺纹钢-SRC 试件和普通 SRC 试件的破坏过程及试件最终破坏形态都较为类似，试件最终破坏图见图 7。为方便描述，特规定水平作动器左推为正向加载，对应的力和位移为正，相反右拉为反向。另规定正对试件观察面为正立面，对面为背立面，偏拉侧为右立面，对面为左立面。

加载至第一条裂缝出现之前，试件基本处于弹性工作状态，荷载和位移呈线性关系，卸载后

无残余变形，预应力 CFRP 筋或者预应力螺纹钢筋也都处于弹性状态，无残余变形。继续加载，试件左右立面下部和底部均出现细微的水平弯曲裂缝，裂缝宽度较小，试件处于弹塑性阶段，荷载-位移曲线不再呈线性发展，右立面裂缝出现的时间要晚于左立面，这主要是由于偏拉侧施加了预应力，有效提高了试件偏拉侧的抗裂能力，此时预应力 CFRP 筋仍处于弹性变形状态，而预应力螺纹钢筋处于弹塑性状态，卸载后变形不能完全恢复。随着荷载的增大，左右立面的柱根水平弯曲裂缝迅速增多，且宽度增大并向正立面逐渐延伸，由于受到型钢翼缘的约束，正立面的水平弯曲裂缝转为斜向发展且裂缝宽度不断增大，随着荷载循环，试件根部出现几条贯穿水平弯曲裂缝，当荷载增加至 (60%~80%) 峰值荷载左右时，试件屈服，由于 CFRP 筋的线弹性特征，此时预应力 CFRP 筋仍处于可恢复变形的弹性阶段，而预应力螺纹钢筋达到屈服强度，且残余变形较大。后采用位移控制的方式加载试验，斜裂缝迅速向两端(对角线方向)延伸，随着位移加载的循环，形成较为明显的近似沿对角线的“X”形交叉斜裂缝，试件根部混凝土出现压碎和少量脱落现象，并发出“噼啪”响声。当位移级数增大到一定程度时，PSRC4 试件内部发出“嘭”的一声，预应力 CFRP 筋达到极限抗拉强度被拉断，其余试件内部的预应力筋均未被拉断，试件根部与基座交界处横向裂缝宽度急剧增大，根部混凝土被压碎并出现大面积脱落，内部钢筋外露，水平承载力缓慢下降，直到水平承载力下降到峰值荷载的 85% 以下或试件不能继续承载时停止。

总体上看，试件在加载前期表现出弯曲破坏特征，预应力的施加减缓了裂缝的出现与开展速度，改善了试件正常使用性能；试件在加载后期表现出弯剪破坏特征，其破坏形态呈现典型的弯剪破坏。另外，试件的水平承载力较高，延性变形能力好，达到最大水平荷载之后承载力下降缓慢，破坏过程缓慢，属于延性破坏。

3 试验结果及分析

3.1 预应力 CFRP 筋-螺纹钢筋-型钢/混凝土构件滞回曲线

图 8 为各试件在低周反复荷载作用下水平荷载 P 与试件顶部位移 Δ 的滞回曲线。对比各滞回曲线可知：

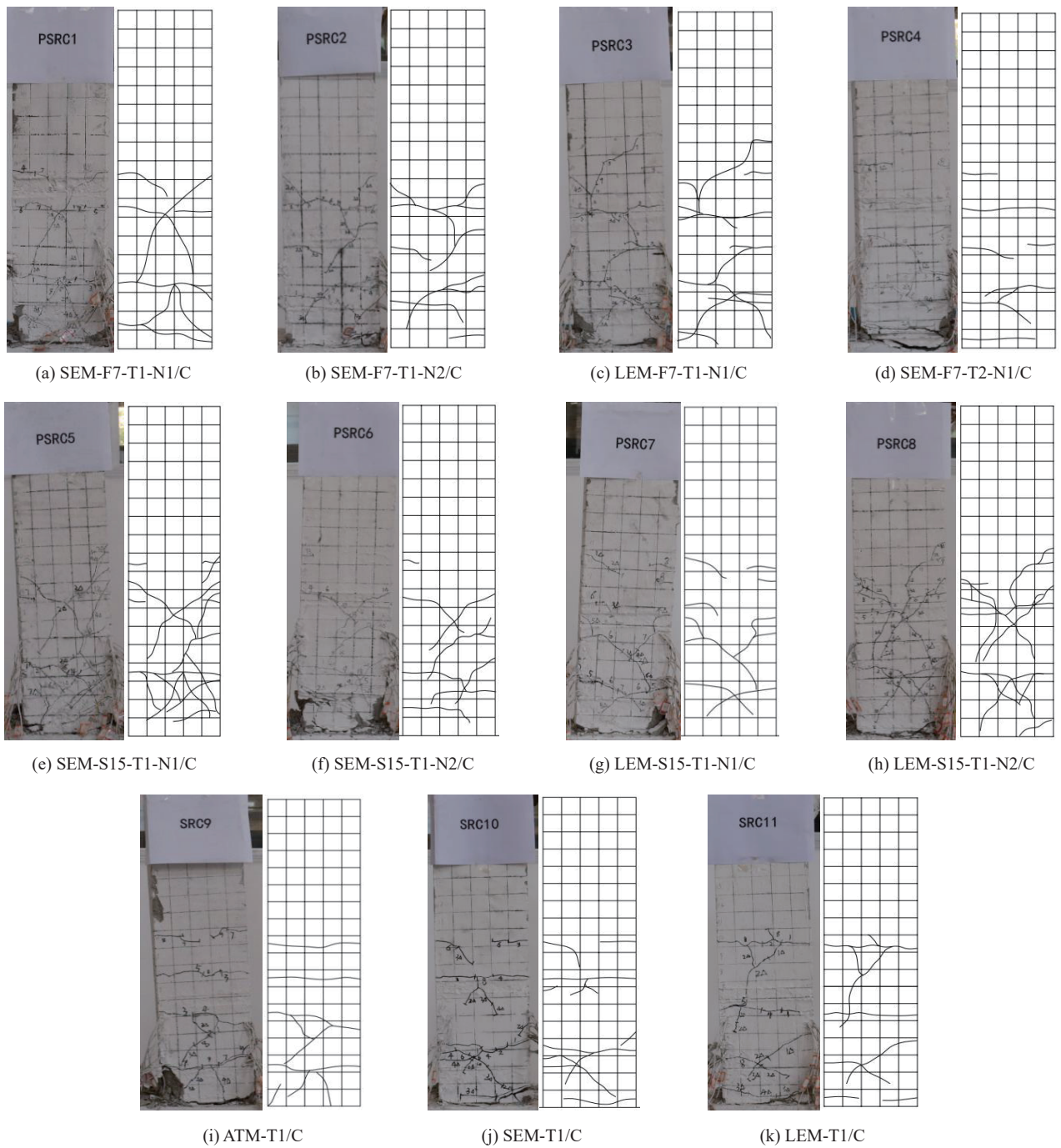


图 7 预应力 CFRP 筋-螺纹钢-型钢/混凝土试件破坏形态

Fig. 7 Failure patterns of prestressed CFRP tendons and rebars-steel reinforced concrete specimens

(1) 加载初期, 试件处于弹性阶段, 试件未开裂, 卸载后变形基本可恢复, 试件滞回曲线几乎重合为一条直线, 滞回环面积较小。继续加载, 试件进入弹塑性阶段, 试件左右立面底部开始出现横向裂缝, 试件的荷载-位移曲线呈非线性关系, 卸载后变形不能完全恢复, 试件出现强度衰减和刚度退化, 但滞回曲线开始变的饱满, 且面积不

断增大。试件屈服后, 承载力及刚度明显退化, 进入塑性变形阶段, 滞回环饱满, 曲线逐渐偏离直线, 变形加快, 但水平荷载的减小滞后于位移的变化。达到峰值荷载后, 水平承载力缓慢下降, 部分试件滞回曲线产生轻微捏拢现象, 原因在于试件中的型钢对核心混凝土的约束效应较好;

(2) 通过对比 SEM-F7-T1-N1/C 和 LEM-F7-T1-

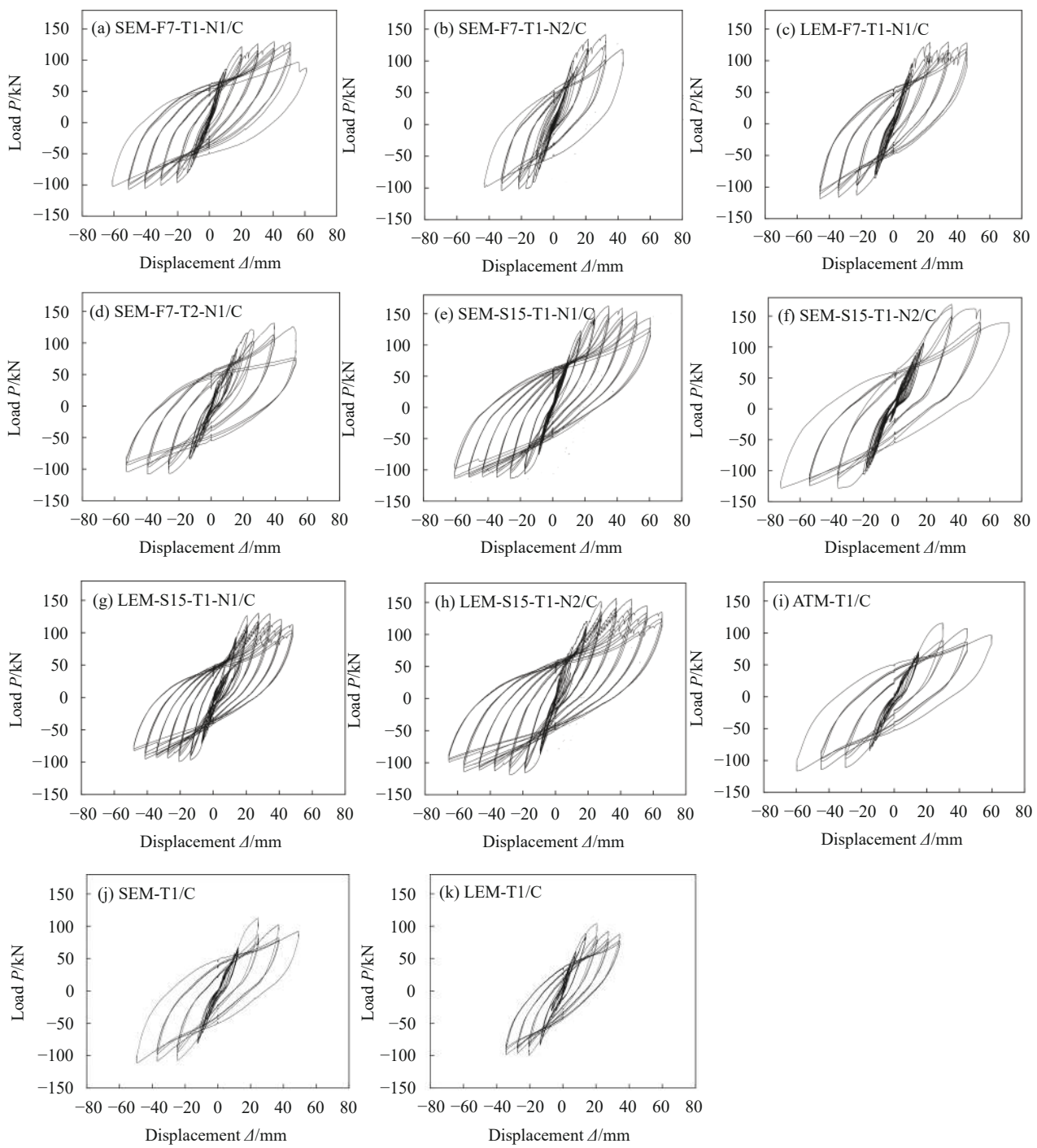


图 8 预应力 CFRP 筋-螺纹钢-型钢/混凝土试件滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic loops of prestressed CFRP tendons and rebars-steel reinforced concrete specimens

N1/C, SEM-S15-T1-N1/C 和 LEM-S15-T1-N1/C, SEM-S15-T1-N2/C 和 LEM-S15-T1-N2/C 的滞回曲线可知, 偏心距从 50 mm 增大至 150 mm 时, 滞回曲线饱满度呈下降态势, 试件极限位移明显减小, 滞回环捏缩程度变大, 后期荷载下降速率增大, 表明试件延性及耗能能力随之降低。因此, 不论预应力筋为 CFRP 筋还是螺纹钢, 偏心距对预

应力型钢/混凝土偏拉构件影响都比较大。对比 ATM-T1/C、SEM-T1/C 和 LEM-T1/C 试件的滞回曲线可知, 随着偏心距的增大, SRC 试件滞回曲线饱满度下降, 极限变形也随之减小。此外, 对比 SEM-T1/C 和 SEM-F7-T1-N1/C, LEM-T1/C 和 LEM-F7-T1-N1/C 试件的滞回曲线可知, 施加了预应力 CFRP 筋的 SEM-F7-T1-N1/C 和 LEM-F7-T1-

N1/C 试件的滞回曲线更加饱满, 且极限位移与相应的 SRC 试件相比都增加了 10 mm 左右, 表明预应力 CFRP 筋可以显著改善型钢/混凝土偏拉构件的抗震性能;

(3) 通过对比 SEM-F7-T1-N1/C 和 SEM-F7-T1-N2/C, SEM-S15-T1-N1/C 和 SEM-S15-T1-N2/C, LEM-S15-T1-N1/C 和 LEM-S15-T1-N2/C 的滞回曲线可知, 随着预应力张拉水平的提高, 试件滞回曲线饱满度下降, 但水平荷载的峰值增大, 达到最大水平荷载后承载力下降速度变快, 滞回环面积减小, 试件耗能能力降低。因此, 在实际工程中应选择合适的预应力张拉控制应力;

(4) 通过对比 SEM-F7-T1-N1/C 和 SEM-S15-T1-N1/C, LEM-F7-T1-N1/C 和 LEM-S15-T1-N1/C 的滞回曲线可知, 预应力型钢/混凝土试件滞回曲线形状基本类似, 总体呈梭形状, 但预应力筋为 CFRP 筋的试件的滞回环更加饱满, 表明预应力 CFRP 筋-型钢/混凝土偏拉构件的耗能能力更强;

(5) 通过对比 SEM-F7-T1-N1/C 和 SEM-F7-T2-N1/C 的滞回曲线可知, 随着竖向偏心拉力的增大, 试件滞回曲线饱满度降低, 极限位移减小, 变能力下降, 延性和耗能能力随之降低, 因此竖向偏心拉力对预应力 CFRP 筋-SRC 偏拉构件的抗震

性能影响较大。

3.2 预应力 CFRP 筋-螺纹钢筋-型钢/混凝土试件骨架曲线

各试件的骨架曲线如图 9 所示。通过对各试件的骨架曲线进行对比分析可知:

(1) 在初始加载阶段, 骨架曲线呈线弹性增长, 随着荷载的增加, 骨架曲线斜率减小并开始像水平倾斜, 试件达到屈服点后, 骨架曲线上升斜率明显减小, 试件刚度下降, 当试件达到峰值荷载后, 试件损伤加深导致其刚度不断退化, 骨架曲线出现明显的拐点后开始下降, 最后试件破坏。由于试件内部型钢的影响, 本试验所有试件在达峰值荷载后承载力均下降缓慢, 未出现陡降, 表明型钢混凝土偏拉构件变能力强, 抗震性能好;

(2) 如图 9(a)、图 9(b) 所示, 不论对于 SRC 试件还是 PSRC 试件, 随着偏心距的增加, 试件骨架曲线下降段斜率均逐渐增大, 试件极限位移均减小。不同偏心距下的试件骨架曲线的上升段基本重合, 偏心距对骨架曲线的初始刚度影响不大, 但在强度段和下降段, 试件的骨架曲线出现明显偏差;

(3) 如图 9(c) 所示, 对于小偏心受拉试件, 随着预应力张拉水平的提高, 试件骨架曲线下降段

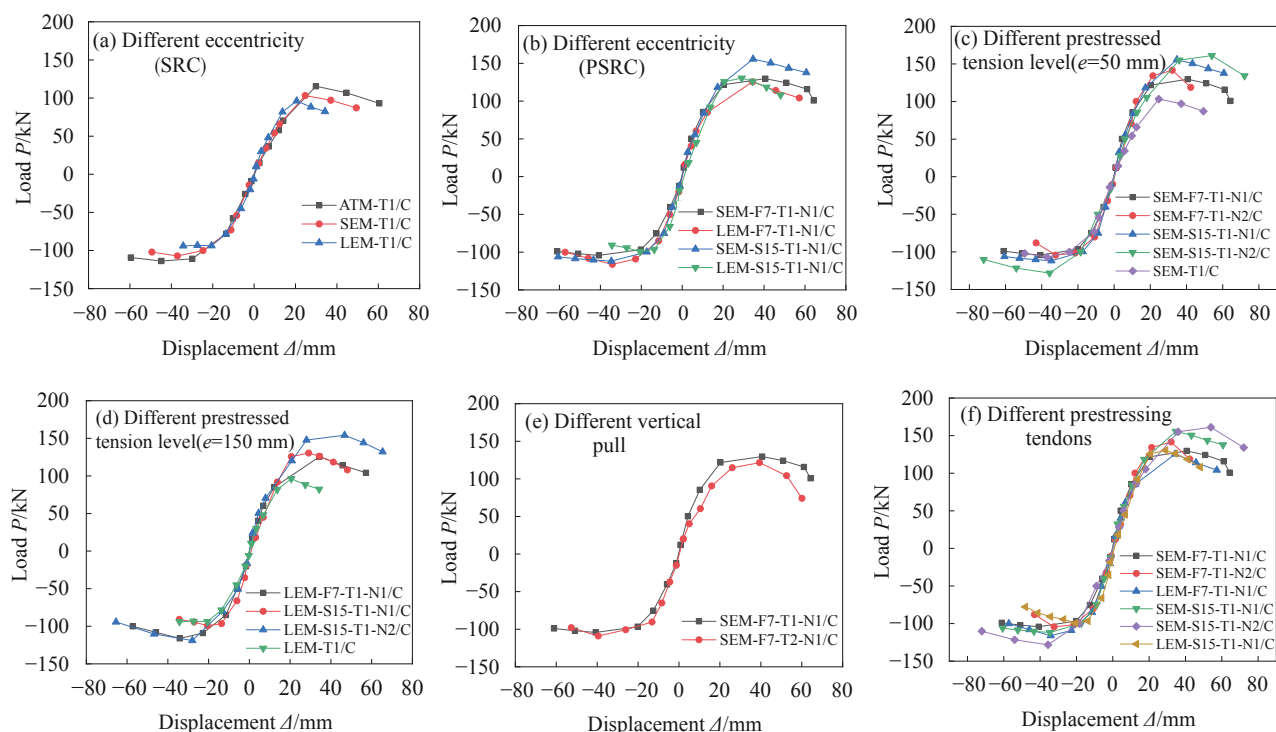


图9 预应力 CFRP 筋-螺纹钢筋-型钢/混凝土试件骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of prestressed CFRP tendons and rebar-steel reinforced concrete specimens

较陡峭，极限变形减小，延性耗能降低。原因在于预应力筋的存在减小了卸载后的残余变形。如图 9(d) 所示，对于大偏心受拉试件，随着预应力张拉水平的提高，试件承载力和极限位移均相应增大，但试件骨架曲线下降段斜率基本相同，表明试件后期强度衰减和刚度退化情况类似，原因在于偏心距较大时，预应力张拉水平对试件的影响弱于偏心距的不利影响；

(4) 如图 9(e) 所示，对于预应力 CFRP 筋-SRC 偏拉构件，随着竖向偏心拉力的增大，试件骨架曲线下降段斜率逐渐增大，试件极限位移减小，变形能力下降，延性变差；

(5) 如图 9(f) 所示，对于预应力筋为 CFRP 筋或者螺纹钢的试件，两种 PSRC 试件骨架曲线的上升段基本重合，屈服荷载值相差不大，随着反复加载次数增多，预应力筋类型对骨架曲线的影响开始表现出来，预应力筋为螺纹钢的试件的峰值荷载较高，且骨架曲线下降段较为平缓，但对于低预应力水平 ($L_p=40\%$) 的试件来说，预应力

筋为 CFRP 筋的试件的极限变能力大于预应力筋为螺纹钢的试件。总体来看，预应力筋为螺纹钢的试件的延性稍高于预应力筋为 CFRP 筋的试件，但两种 PSRC 试件的承载能力均较大且抗震性能较好。

3.3 预应力 CFRP 筋-螺纹钢-型钢/混凝土试件承载力及延性

试验所得各试件的承载力、位移、延性系数汇总于表 4。其中试件水平承载力和位移延性系数均为正向值和负向值的平均值。其中试件屈服荷载由通用屈服弯矩法确定。

对比 ATM-T1/C、SEM -T1/C 和 LEM -T1/C，SEM-F7-T1-N1/C 和 LEM-F7-T1-N1/C，SEM-S15-T1-N1/C 和 LEM-S15-T1-N1/C 的水平承载力和延性系数可知，随着偏心距的增大，SRC 试件和 P-SRC 试件的水平承载力均逐渐降低且降低幅度较小，但 SRC 试件的降低幅度要大于 PSRC 试件，原因在于偏拉侧预应力的施加提高了 PSRC 试件的刚度和恢复能力，从而减轻了偏心距的增大对

表 4 预应力 CFRP 筋-螺纹钢-型钢/混凝土试件主要实验结果

Table 4 Main experimental results of prestressed CFRP tendons and rebars-steel reinforced concrete specimens									
Specimen	Loading direction	Cracking point P_{cr}/kN	Yield point		Peak point		Ultimate point		μ
			P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	
SEM-F7-T1-N1/C	+	24.2	85.4	10.17	128.1	40.72	84.1	61.08	5.43
	-	12.1	75.3	12.56	104.2	40.70	99.0	61.05	
SEM-F7-T1-N2/C	+	32.1	100.2	12.19	141.1	32.31	116.3	43.07	3.77
	-	10.2	80.3	10.76	104.1	32.30	88.2	43.10	
LEM-F7-T1-N1/C	+	18.1	85.6	12.08	118.2	34.36	104.2	57.24	4.87
	-	14.0	85.2	11.44	110.1	34.35	100.0	57.21	
SEM-F7-T2-N1/C	+	21.1	84.0	12.12	116.0	39.48	98.1	65.81	3.99
	-	18.1	74.1	13.16	104.1	39.52	88.5	65.72	
SEM-S15-T1-N1/C	+	26.2	84.0	10.53	155.7	34.66	137.7	60.65	6.38
	-	13.8	75.2	8.66	110.0	34.65	106.1	60.63	
SEM-S15-T1-N2/C	+	30.0	105.3	18.01	161.1	54.01	134.1	72.05	3.99
	-	12.1	100.3	18.14	121.6	54.06	110.2	72.06	
LEM-S15-T1-N1/C	+	23.0	91.9	13.74	130.4	29.13	108.1	48.17	5.76
	-	15.1	66.0	6.02	114.4	29.10	96.8	48.19	
LEM-S15-T1-N2/C	+	26.1	120.2	28.88	154.1	39.27	132.1	65.42	3.63
	-	13.7	80.0	13.09	110.3	39.26	94.3	65.42	
ATM-T1/C	+	8.8	70.4	12.1	110.3	36.30	93.0	60.50	4.94
	-	10.0	80.0	12.4	106.9	36.28	90.9	60.52	
SEM-T1/C	+	4.27	65.9	12.34	103.3	24.69	87.1	49.38	4.21
	-	12.10	73.0	11.16	100.1	24.70	86.1	49.38	
LEM-T1/C	+	2.01	48.1	6.85	96.2	20.56	82.3	34.28	3.89
	-	13.23	70.0	12.36	93.71	20.60	80.9	34.25	

Notes: P_{cr} —Specimen cracking load; P_y —Yield load at the end of specimen; Δ_y —Specimen yield displacement; P_m —Peak load; Δ_m —Displacement when the specimen reached peak load; P_u —Ultimate load of the specimen at failure; Δ_u —Displacement when the specimen reached ultimate load; μ —Ductility factor which is the ratio of Δ_u to Δ_y and the ductility factor is the average of the positive and negative values.

试件水平承载力的的影响；随着偏心距的增大，试件延性系数逐渐降低，当偏心距由 50 mm 增加到 150 mm 时，SRC 试件的延性系数降低了 7.6%，PSRC 试件的延性系数降低幅度在 9%~11%，表明偏心距对 PSRC 试件延性的影响要高于 SRC 试件。

随着预应力张拉水平的增大，试件水平承载力随之增大，与试件 SEM-T1/C 相比，试件 SE-M-F7-T1-N1/C 的最大承载力增大了 14.26%，与试件 SEM-F7-T1-N1/C 相比，试件 SEM-F7-T1-N2/C 的最大承载力仅增大了 5.51%，表明当预应力张拉水平超过一定值 ($L_p>40\%$) 时，水平承载力增大幅度减慢；预应力张拉水平对试件延性的影响较大，对比 SEM-T1/C、SEM-F7-T1-N1/C 和 SEM-F7-T1-N2/C 的延性系数可知，随着预应力张拉水平的增大，试件延性系数先增后降，且上升幅度大于降低幅度，与 SRC 试件相比，预应力水平为 40% 的 PSRC 试件延性系数增大幅度较大，原因在于预应力的施加显著改善了 PSRC 试件的正常使用性能，且试件内部型钢提高了其后期抵抗地震作用的能力，因为预应力张拉水平为 40% 的 PSRC 试件延性系数高于 SRC 试件，但随着预应力张拉水平的提高，PSRC 试件的变性能力下降，延性相应降低。

对比 SEM-F7-T1-N1/C 和 SEM-F7-T2-N1/C 的水平承载力和延性系数可知，试件水平承载力随竖向拉力的增大而减小，但减小幅度不大；试件延性系数随竖向拉力的增大而减小，且减小幅度较大，延性系数降低了 26.52%。因此，竖向偏心拉力是影响预应力 CFRP 筋-SRC 偏拉构件抗震性能的一个重要因素。

对比 SEM-F7-T1-N1/C 和 SEM-S15-T1-N1/C，SEM-F7-T1-N2/C 和 SEM-S15-T1-N2/C，LEM-F7-T1-N1/C 和 LEM-S15-T1-N1/C 的水平承载力和延性系数可知，预应力筋为 CFRP 筋的试件的水平承载力低于预应力筋为螺纹钢筋的试件。预应力筋为螺纹钢的试件的延性高于预应力筋为 CFRP 筋的试件，但是两种 PSRC 试件的延性系数均大于 3，说明经过合理设计的 PSRC 偏拉构件可以满足抗震结构位移延性的要求。此外，相比于 SRC 试件，两种 PSRC 试件均能显著提高试件的开裂荷载，并且对构件承载力也有一定提升。

3.4 预应力 CFRP 筋-螺纹钢筋-型钢/混凝土试件耗能能力

采用等效粘滞阻尼系数 h_e 来表征试件的能量耗散能力，试验主要阶段各试件的等效粘滞阻尼系数见表 5。可知，随着位移级数的循环，试件阻尼系数不断增大，表明试件耗能能力随着加载进程的发展不断增强。SRC 试件破坏点的等效粘滞阻尼系数平均值为 0.275，PSRC 试件破坏点的等效粘滞阻尼系数平均值为 0.235，表明 SRC 试件的耗能能力大于 PSRC 试件，主要是由于偏拉侧预应力的施加提高了试件的抗裂能力，提升了试件前期恢复能力，减少了能量的耗散。

对比 SEM-F7-T1-N1/C 和 LEM-F7-T1-N1/C，SEM-S15-T1-N1/C 和 LEM-S15-T1-N1/C 试件破坏点的等效粘滞阻尼系数可知，SEM-F7-T1-N1/C 和 SEM-S15-T1-N1/C 试件破坏点粘滞阻尼系数分别降低了 9.8% 和 9%，表明试件耗能能力随着偏心距的增大而降低，在实际工程中应该控制偏心距；对比试件 SEM-F7-T1-N1/C 和 SEM-F7-T1-N2/C，

表 5 预应力 CFRP 筋-螺纹钢筋-型钢/混凝土试件等效粘滞阻尼系数
Table 5 Equivalent viscous damping coefficients of prestressed CFRP tendons and rebars-steel reinforced concrete specimens

Specimen	h_{ey}	h_{em}	h_{eu}
SEM-F7-T1-N1/C	0.056	0.191	0.265
SEM-F7-T1-N2/C	0.043	0.188	0.229
LEM-F7-T1-N1/C	0.052	0.183	0.239
SEM-F7-T2-N1/C	0.049	0.189	0.240
SEM-S15-T1-N1/C	0.067	0.173	0.255
SEM-S15-T1-N2/C	0.045	0.162	0.215
LEM-S15-T1-N1/C	0.059	0.167	0.232
LEM-S15-T1-N2/C	0.031	0.154	0.207
ATM-T1/C	0.063	0.228	0.295
SEM-T1/C	0.061	0.166	0.282
LEM-T1/C	0.060	0.156	0.247

Notes: h_{ey} —Equivalent damping coefficient of yield point; h_{em} —Equivalent damping coefficient of peak point; h_{eu} —Equivalent damping coefficient of ultimate point.

SEM-S15-T1-N1/C 和 SEM-S15-T1-N2/C 破坏点阻尼系数可知, SEM-F7-T1-N1/C 和 SEM-S15-T1-N1/C 试件破坏点粘滞阻尼系数分别降低了 13.6% 和 15.7%, 表明试件耗能能力随预应力张拉水平的增大而降低, 且降低幅度较大, 主要由于预应力水平大的试件受约束作用更大, 滞回曲线捏缩更明显, 表明预应力张拉水平对试件耗能能力影响很大, 张拉预应力筋时应选择合理的张拉控制应力; 对比试件 SEM-F7-T1-N1/C 和 SEM-F7-T2-N1/C 破坏点的等效粘滞阻尼系数可以看出, SEM-F7-T1-N1/C 试件阻尼系数降低了 9.4%, 表明预应力 CFRP 筋-SRC 偏拉构件的耗能能力随竖向拉力的增大而降低; 对比 SEM-F7-T1-N1/C 和 SEM-S15-T1-N1/C, SEM-F7-T1-N2/C 和 SEM-S15-T1-N2/C, LEM-F7-T1-N1/C 和 LEM-S15-T1-N1/C 试件破坏点的等效粘滞阻尼系数可知, 预应力筋为 CFRP 筋的试件的耗能能力高于预应力筋为螺纹钢的试件, 但是总体上来看, 两种类型的 PSRC 试件耗能能力均较强。

3.5 预应力 CFRP 筋-螺纹钢-型钢/混凝土试件刚度退化

采用割线刚度 K 来研究试件在低周反复加载试验中的刚度退化规律。割线刚度 K 按下式计

算:

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \tag{7}$$

式中: $+P_i$ 及 $-P_i$ 分别为第 i 次循环的峰值点正负荷载; $+\Delta_i$ 及 $-\Delta_i$ 分别为相应的位移。各试件的刚度退化曲线见图 10。

如图 10(a)、图 10(b) 所示, 不论对于 SRC 试件还是 PSRC 试件, 随着偏心距的增大, 刚度退化曲线逐渐变的陡峭, 且退化速率加快; 如图 10(c)、图 10(d) 所示, 不论对于小偏拉试件还是大偏拉试件, 随着预应力水平的增大, 试件的初始刚度也越大, 后期刚度退化也都越缓慢, 相较于 SEM-T1/C 试件, SEM-F7-T1-N1/C 试件的刚度显著提升, 表明预应力 CFRP 筋的施加可明显改善试件的正常使用性能, 提高试件的抗裂能力, 延缓试件的损伤, 进而提升试件屈服后的刚度, 减小残余变形。从图 10(e) 可知, 对于预应力 CFRP 筋-SRC 偏拉构件, 试件所受竖向拉力越大, 试件初始刚度越小, 刚度退化曲线越陡峭。从图 10(f) 可知, 预应力筋为 CFRP 筋的试件的初始刚度大于预应力筋为螺纹钢的试件, 但当试件屈服后, 预应力筋为 CFRP 筋的试件的刚度退化速率稍快些, 主要由于预应力螺纹钢屈服后延性相对较好。

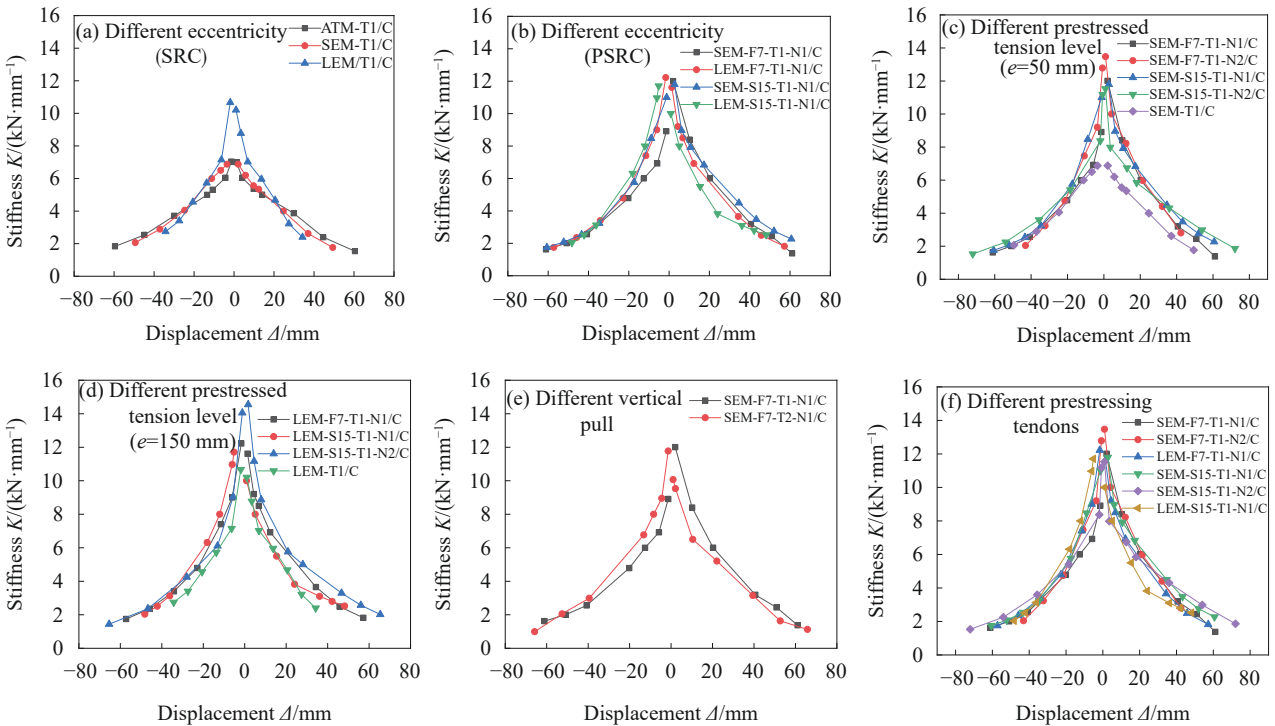


图 10 预应力 CFRP 筋-螺纹钢-型钢/混凝土试件刚度退化曲线

Fig. 10 Stiffness degradation curves of prestressed CFRP tendons and rebar-steel reinforced concrete specimens

4 结论

通过对 4 根预应力碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 筋-型钢/混凝土偏拉构件、4 根预应力螺纹钢筋-型钢/混凝土偏拉构件和 3 根普通型钢/混凝土 (SRC) 受拉构件的抗震性能试验, 得出以下结论:

(1) SRC 受拉构件和预应力型钢/混凝土 (PSRC) 偏拉构件的主要破坏形态均为弯剪破坏。所有构件滞回曲线均较为饱满, 延性较好;

(2) 随着偏心距的增大, 构件滞回曲线饱满度下降且出现捏拢现象, 构件极限变形小, 承载力下降, 强度衰减, 刚度退化速率变快, 延性及耗能能力均相应降低;

(3) 随着预应力张拉水平的增大, PSRC 构件承载力有一定提高, 但耗能能力降低, 延性系数先增后降, 且上升幅度大于降低幅度, 原因在于预应力的施加显著改善了 PSRC 构件的正常使用性能, 且构件内部型钢提高了其后期抵抗抵抗地震作用的能力, 因此预应力张拉水平为 40% 的构件延性系数高于 SRC 构件, 但随着预应力张拉水平的提高, PSRC 构件的变能力下降, 延性相应降低。因此在实际工程中, 应选择合适的预应力张拉控制应力;

(4) 随着竖向拉力的增大, 构件承载力、延性及耗能能力均相应降低, 延性系数降低了 26.52%。竖向偏心拉力是影响预应力 CFRP 筋-SRC 偏拉构件抗震性能的一个重要因素, 在工程设计中须严格控制竖向偏心拉力;

(5) CFRP 筋作为 PSRC 构件的预应力筋, 有效提高了构件的开裂荷载, 其裂缝控制性能良好。相较于普通 SRC 受拉构件, 预应力 CFRP 筋-SRC 偏拉构件具有更好的承载力、刚度、延性和抗裂能力, 但耗能能力低; 相较于预应力螺纹钢筋-SRC 偏拉构件, 预应力 CFRP 筋-SRC 偏拉构件的承载力和延性较低, 但耗能能力强。

参考文献:

- [1] 张书强, 苏小卒. 预应力型钢混凝土结构抗震性能研究综述[J]. *江西科学*, 2013, 31(1): 63-66, 89.
ZHANG Shuqiang, SU Xiaozu. A review on seismic performance of prestressed steel reinforced concrete structures[J]. *Jiangxi Science*, 2013, 31(1): 63-66, 89(in Chinese).
- [2] 熊学玉, 高峰, 徐晓明. 预应力型钢混凝土结构理论研究[J]. 工

业建筑, 2012, 42(4): 113-117.

XIONG Xueyu, GAO Feng, XU Xiaoming. Theoretical research on prestressed steel concrete structure[J]. *Industrial Building*, 2012, 42(4): 113-117(in Chinese).

- [3] 董石麟, 邢栋, 赵阳. 现代大跨空间结构在中国的应用与发展[J]. *空间结构*, 2012, 18(1): 3-16.
DONG Shilin, XING Dong, ZHAO Yang. Application and development of modern large-span spatial structure in China[J]. *Spatial Structure*, 2012, 18(1): 3-16(in Chinese).
- [4] 尹世平, 华云涛, 徐世焱. FRP配筋混凝土结构研究进展及其应用[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(1): 134-150.
YIN Shiping, HUA Yuntao, XU Shilang. Research progress and application of FRP reinforced concrete structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(1): 134-150(in Chinese).
- [5] SELVACHANDRAN P, ANANDAKUMAR A, MUTHURAMU K L. Modified froch crack width model for concrete beams prestressed with CFRP bars[J]. *Polymers and Polymer Composites*, 2016, 24(7): 587-596.
- [6] CAO Qi, ZHOU Jianpu, WU Zhimin, et al. Flexural behavior of prestressed CFRP reinforced concrete beams by two different tensioning methods[J]. *Engineering Structures*, 2019, 189: 411-422.
- [7] 程东辉, 郑文忠. 无粘结CFRP筋部分预应力混凝土连续梁试验与分析[J]. *复合材料学报*, 2008(5): 104-113.
CHENG Donghui, ZHENG Wenzhong. Test and analysis of unbonded CFRP bars partially prestressed concrete continuous beams[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008(5): 104-113(in Chinese).
- [8] UYB, CRAINE S. Static flexural behaviour of externally post-tensioned steel-concrete composite beams[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2004, 7(1): 1-20.
- [9] 王琨, 智海祥, 曹大富, 等. 预应力型钢混凝土梁-钢管混凝土叠合柱框架节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(12): 29-38.
WANG Kun, ZHI Haixiang, CAO Dafu, et al. Experimental study on seismic performance of prestressed steel-concrete beam and concrete-filled steel T-tubular composite column frame joints[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(12): 29-38(in Chinese).
- [10] 李世平. 考虑核心约束的大尺度预应力H型钢—混凝土组合梁受力性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
LI Shiping. Study on mechanical behavior of large-scale prestressed H-beam with core constraints[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019(in Chinese).
- [11] 邓宇, 武晓彤, 张鹏. 预应力型钢混凝土柱偏心受拉性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(5): 115-123.
DENG Yu, WU Xiaotong, ZHANG Peng. Experimental study

- on eccentric tensile behavior of prestressed SRC columns[J]. *Journal of Building Structure*, 2019, 40(5): 115-123(in Chinese).
- [12] 郑文忠, 王琨. 型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(3): 49-60.
ZHENG Wenzhong, WANG Kun. Experimental study on seismic performance of shaped steel concrete beam-angle steel concrete column frame[J]. *Chinese Journal of Civil Engineering*, 2011, 44(3): 49-60(in Chinese).
- [13] 杨勇, 薛亦聪, 于云龙. 部分预制装配型钢混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(8): 42-50.
YANG Yong, XUE Yicong, YU Yunlong. Experimental study on seismic performance of partially precast steel concrete columns[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(8): 42-50(in Chinese).
- [14] 薛建阳, 马辉. 低周反复荷载下型钢再生混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(12): 123-131.
XUE Jianyang, MA Hui. Experimental study on seismic performance of shaped steel recycled concrete short columned under low cyclic repeated load[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(12): 123-131(in Chinese).
- [15] 陈小刚, 牟在根, 张举兵. 型钢混凝土柱抗震性能实验研究[J]. *北京科技大学学报*, 2009, 31(12): 1516-1524.
CHEN Xiaogang, MOU Zaigen, ZHANG Jubing. Experimental study on seismic performance of steel reinforced concrete columns[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, 31(12): 1516-1524(in Chinese).
- [16] 李俊华, 王新堂, 薛建阳. 低周反复荷载下型钢高强混凝土柱受力性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2007(7): 11-18.
LI Junhua, WANG Xintang, XUE Jianyang. Experimental study on mechanical behavior of steel high-strength concrete column under low cyclic cyclic load[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007(7): 11-18(in Chinese).
- [17] 高峰, 熊学玉. 预应力型钢混凝土框架结构竖向反复荷载作用下抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(7): 62-71.
GAO Feng, XIONG Xueyu. Experimental study on seismic performance of prestressed SRC frame structures under vertical repeated loading[J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(7): 62-71(in Chinese).
- [18] 金怀印, 薛伟辰, 杨晓, 等. 预应力型钢混凝土梁-钢管混凝土柱节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(8): 66-74.
JIN Huaiyin, XUE Weichen, YANG Xiao, et al. Experimental study on seismic performance of prestressed steel-concrete beam and concrete-filled steel tubular column joints[J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(8): 66-74(in Chinese).
- [19] 傅传国, 李玉莹, 孙晓波, 等. 预应力及非预应力型钢混凝土框架受力及抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(8): 15-21.
FU Chuanguo, LI Yuying, SUN Xiaobo, et al. Experimental study on stress and seismic performance of prestressed and unprestressed steel concrete frame[J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(8): 15-21(in Chinese).
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012(in Chinese).