

# 锚栓屈服型可抬升柱脚节点抗震性能试验研究

陈刚<sup>1</sup>, 高玲<sup>1</sup>, 张煜坤<sup>2</sup>, 郑七振<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海建工一建集团有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 为满足结构在震中安全且震后可修复使用的目的, 设计了一种锚栓屈服型可抬升柱脚节点, 该节点是一种半刚性节点, 将柱脚锚栓的一部分作为节点的阻尼器, 阻尼器为柱脚提供抗弯能力和可抬升能力, 在地震时柱脚节点塑性变形主要集中在阻尼器上, 震后通过更换阻尼器即可完成柱脚节点的修复。为此, 设计一组普通外露式柱脚节点和锚栓屈服型可抬升柱脚节点进行对比试验, 并通过拟静力试验, 研究它们在低周往复荷载下的滞回特性、抗弯承载力、刚度退化、耗能能力等抗震性能, 同时研究柱脚节点在更换阻尼器前后的抗震性能。研究表明: 对比普通外露式柱脚节点, 锚栓屈服型可抬升柱脚具有更好的耗能能力和变形能力, 试件的损伤基本集中在可更换的阻尼器上, 耗能模式和损伤机制较为合理。在进行修复后, 除初期转动刚度略低于修复前试件外, 整体抗震性能基本可恢复至震前水平。另外, 该新型柱脚的阻尼器拆卸和更换较为简便。

**关键词:** 可恢复功能结构; 可抬升柱脚; 可更换构件; 锚栓屈服; 抗震性能

中图分类号: TU 391

文献标志码: A

## Experimental study on seismic performance of anchor joint with bolt yield-type liftable column

CHEN Gang<sup>1</sup>, GAO Ling<sup>1</sup>, ZHANG Yukun<sup>2</sup>, ZHENG Qizhen<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Construction No.1(Group)Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** In order to ensure the safety of the structure in the epicenter of the earthquake and the rapid repair and use after the earthquake, a liftable column base node with yield-type anchor bolts was designed. This node was a semi-rigid node. A part of the column base anchor bolts were used as the damper of the node. The damper provided the bending resistance and uplift capacity for the column base. The plastic deformation of the column base node was mainly concentrated on the damper during the earthquake. After the earthquake, the column base node could be repaired by replacing the damper. To this end, a set of ordinary exposed column base nodes and liftable column base nodes with anchor bolt yield-type were designed for comparative tests, and their seismic performance under low cycle

收稿日期: 2023-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978401); 上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(21DZ1202807)

第一作者: 陈刚(1980-), 男, 实验师。研究方向: 装配式建筑结构。E-mail: cg.sh.2008@163.com

repeated loads, such as hysteresis characteristics, bending bearing capacity, stiffness degradation, energy dissipation capacity, were studied through quasi-static tests. At the same time, the seismic performance of column base nodes before and after replacing dampers were also studied. The research results indicated that compared to ordinary exposed column base nodes, the yield-type anchor bolts could lift the column base node with better energy dissipation and deformation capacity. The damage of the specimens was mainly concentrated on replaceable dampers, and the energy dissipation mode and damage mechanism were more reasonable. After the repair, except for the initial rotational stiffness slightly lower than the pre repair specimen, the overall seismic performance could basically recover to the pre earthquake level. In addition, the damper of the new column base was easy to disassemble and replace.

**Keywords:** *recoverable functional structure; liftable column base; replaceable components; anchor bolt yielding; seismic performance*

随着建筑工业发展和抗震设计理念的升级,在保障人的生命安全的前提下,为了减轻结构在地震中受到的破坏,降低地震所造成的经济损失,确保结构在震后能快速修复并恢复其使用功能,可恢复功能结构<sup>[1]</sup>(earthquake resilient structure)在近年来成为各国学者研究的热点之一。可恢复功能结构是指利用摇摆结构、自复位、可更换构件<sup>[2-4]</sup>等技术,使结构在地震发生时不会受到大的损坏,震后无需修复或稍加修复便可恢复其使用功能。可恢复功能结构,特别是带有自复位功能和带有可更换构件的结构,由于其设计、安装的特点,通常需要在建造时使用大量的预制装配式构件<sup>[5-9]</sup>。随着装配式结构的推广和可更换构件的标准化,未来城市的建设和管理效率都会大大提升。研究可恢复功能结构对于建筑工业化的推动和对建筑的全寿命周期管理均有非常积极意义。

柱脚节点设计是可恢复功能结构研究的重要组成部分,也是目前国内外学者研究的重点方向<sup>[10-15]</sup>。Fang等<sup>[16]</sup>详细分析了可恢复功能中可更换元件在柱脚设计方面的应用,同时阐述可更换构件目前存在的问题以及未来发展方向。Chi等<sup>[17-18]</sup>提出一种自复位可抬升柱脚节点形式,在钢柱内部设置预应力钢筋使得柱脚有一定自复位能力,同时在柱脚节点处设置截面削弱的盖板作为可更换的耗能构件。低周往复荷载试验结果表明,该柱脚节点在4%位移角作用下,界面削弱的盖板出现无拉断的拉伸和压屈的变形特征,震后可通过更换盖板对柱脚节点进行快速修复。Kamperidis

等<sup>[19]</sup>提出并设计了一种带自复位能力的摇摆柱脚。该设计方法将钢柱分为两部分,下部为底部带钢板的钢管混凝土,用来支撑预应力平台和连接柱脚阻尼器。阻尼器是一种沙漏型变截面金属杆,在地震过程中通过发生剪切变形来耗散地震能量,震后可对阻尼器进行更换,柱脚自复位能力则由预应力筋提供。杨熠明等<sup>[20]</sup>提出了一种自复位混凝土框架柱脚节点设计方法,混凝土柱脚穿有钢靴,以方便与底板部可更换阻尼器进行机械连接,其中,防屈曲阻尼器由削弱截面的螺杆和防屈曲套管制成,套管内通过注浆的方式填充密实。拟静力实验结果表明,柱脚耗能能力良好,震后通过更换阻尼器可快速对柱脚进行修复,残余变形基本集中在阻尼器上。对于自复位框架结构,国内外专家学者都已作出大量研究,提出形态各异的自复位节点和框架设计,大多数采用耗能角钢、防屈曲钢板、钢绞线等。但这些耗能元件通常需要在钢柱和底板上焊接连接板,存在着连接易失效、残余变形大等问题,或者需要在钢柱上打孔开缝,容易造成钢柱自身损伤。

为解决上述问题,本文提出了一种新型锚栓屈服型柱脚节点的设计,将柱脚节点设计为半刚性连接的可抬升柱脚,并在柱脚部添加可更换的阻尼器和耗能装置,防止竖向构件在地震中发生严重损伤的同时,一定程度上限制结构位移反应,给予结构柱脚震后修复的能力。将柱脚锚栓的一部分截面进行削弱,作为耗散地震能量的阻尼装置。在地震发生时,通过锚栓拉伸屈服允许

柱脚发生一定的抬升和转动，使地震后构件损伤主要集中在作为“保险丝”的锚栓上，震后直接对其进行更换，便可实现修复。

为研究锚栓屈服型可抬升柱脚节点、大地震作用下锚栓阻尼器的耗能能力，以及更换阻尼器前后的抗震性能，进行低周往复荷载下的拟静力对比试验。根据试验结果，分析新型柱脚节点的设计合理性和实用性，并为今后的工程设计和研究提供一定的参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

本文共设计两组缩尺比例为 1/3 的试件：第 1 组为普通外露式柱脚(FIX)和锚栓屈服型可抬升柱脚(UPLIFT1)的对比试件，第 2 组为锚栓屈服型可抬升柱脚在更换阻尼器前后(UPLIFT2、UPLIFT3)的对比试件。钢筋混凝土基础尺寸为 800 mm×300 mm×350 mm，其中混凝土等级 C30，钢筋采用 HRB300 带肋钢筋，纵筋直径为 13 mm，箍筋直径为 6 mm。

普通外露式柱脚的锚栓选用 Q235 的 M12 细目螺杆，而锚栓屈服型可抬升柱脚使用的锚栓由阻尼器、接驳器、锚固段螺杆以及金属套管 4 个部分组成。第 1 部分阻尼器由 M12 细目螺杆制成，将螺杆一部分截面削弱，削弱段长度为 10 倍螺杆直径即 120 mm，螺杆的钢材使用 Q235 钢；第 2 部分为方便阻尼器更换所设置的接驳器，接驳器使用高度为 60 mm 的 M12 螺母；第 3 部分为锚固段螺杆，理想情况下锚固段螺杆与混凝土黏结良好，不发生相对滑移，该部分使用的高强度锚杆由 45 号钢材制成，以保证阻尼器屈服时该部分仍保持弹性；第 4 部分为直径 16 mm 的金属套管，为防止阻尼器在受压时发生屈曲而设计。锚栓设计如图 1 所示。

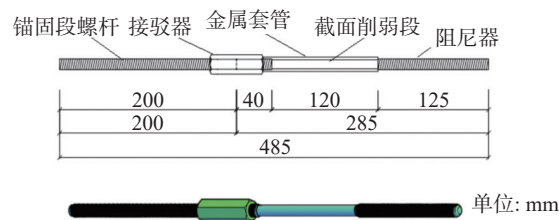


图 1 屈服型锚栓设计图  
Fig.1 Yield anchor design

试验钢柱采用截面为 150 mm×150 mm×7 mm×10 mm 的 H 型钢，在设计时保证锚栓先于柱脚底板和钢柱屈服，高度为 1050 mm(含底板)，底板厚度为 32 mm，使用的钢材为 Q235(屈服点为 235 N/mm<sup>2</sup>，抗拉强度为 400 N/mm<sup>2</sup>)。柱底部设置有抗剪键，形状为直径 30 mm 的圆柱体，主要防止在试验过程中试件的锚栓及阻尼器被剪坏。底板共有 8 个直径 18 mm 的螺栓孔以及两个直径 18 mm 的灌浆孔。钢柱上部翼缘上共有 8 个直径 20 mm 的螺栓孔，以便螺杆穿过与作动器相连接，水平加载点处焊接钢板(钢板厚度  $t=9$  mm)，以防止加载时柱上部翼缘发生变形。钢柱截面形状、尺寸及构造如图 2 所示。

试件组装完成后如图 3 和 4 所示。为防止往复加载过程中顶部混凝土发生破坏，普通外露式柱脚节点在基础上部设置无收缩灌浆料作为垫层。

试验中，普通外露式柱脚所使用的锚栓及锚栓屈服型可抬升柱脚使用的带阻尼器锚栓材料力学性能如表 1 所示，混凝土材料性能如表 2 所示。

### 1.2 加载装置

加载装置使用 500 kN 油压千斤顶，如图 5 所示。加载使用电液伺服控制，能够及时反馈加载反力。液压千斤顶端头连接部设为铰接可自由转动，以保证加载时柱脚节点仅发生转动。基础上设有两根压梁，通过高强度地脚螺栓固定到基础，防止试验时发生位移。

本试验采用低周往复加载，加载点设在试件顶部，加载过程共分为两个阶段。第一阶段主要采用荷载控制方式，每级荷载为试件屈服荷载预测值  $0.2P_y$ ，加载至  $0.6P_y$ ，作为试验的预加载阶段。正式加载时，每级荷载增加  $0.1P_y$ ，直至锚栓(阻尼器)屈服，记录试件的屈服转角  $\theta_y$ 。反向加载至另一侧锚栓屈服并回复至柱脚节点转角为 0，之后停止荷载控制加载，进入第二阶段位移控制加载。

位移控制加载阶段以荷载控制阶段得到的屈服转角  $\theta_y$  为基准，按照图 6 加载制度循环往复加载直至试件失效，其变形超过极限承载状态，或荷载下降到最大荷载值的 85% 时，可停止试验。实验过程中通过设置在柱脚底板两端的位移计实时观测钢柱转角。

### 1.3 测量布置

实验过程中为观测结构各部分的位移和转角，每个试件共布置 7 个位移计，具体如下：在

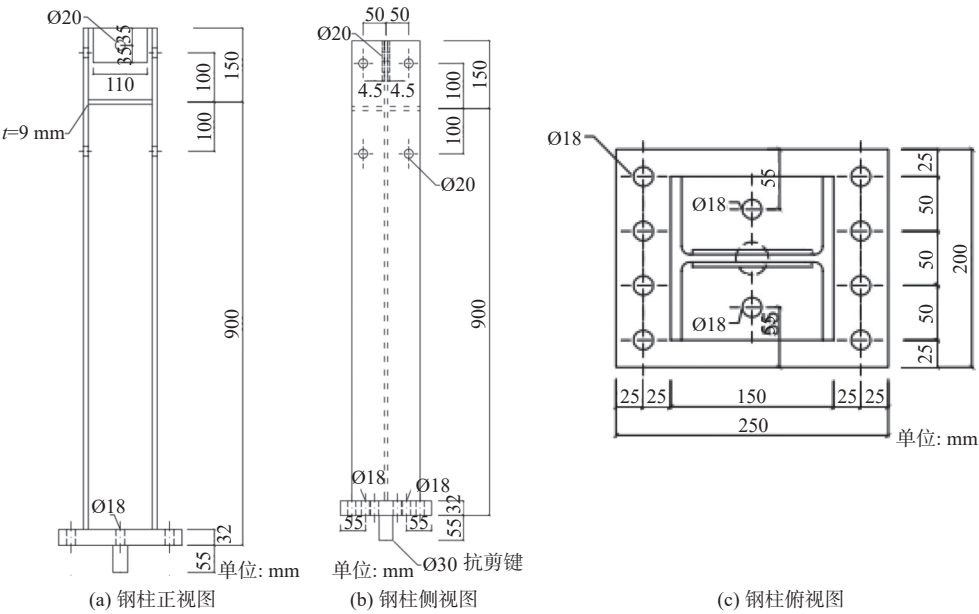


图 2 钢柱设计图

Fig.2 Design drawing of steel column

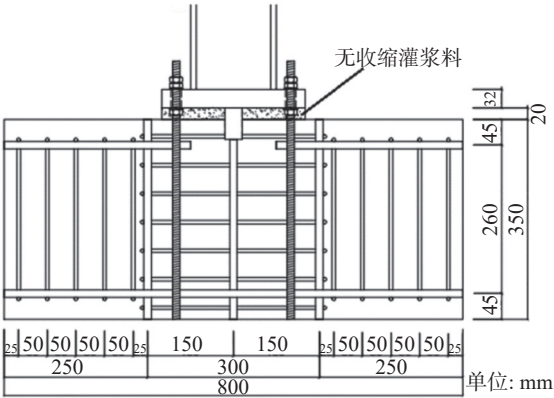


图 3 普通外露式柱脚整体组装设计图

Fig.3 General exposed column base overall assembly design drawing

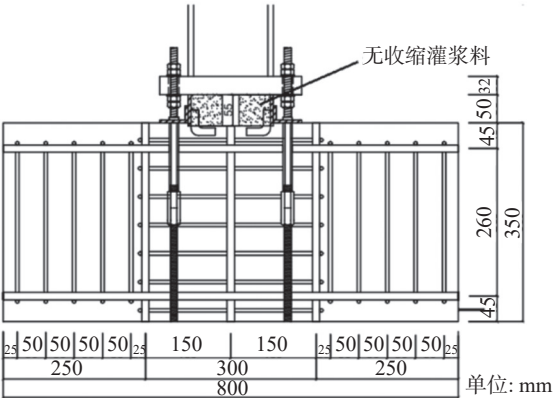


图 4 锚栓屈服型可抬升柱脚试件 UPLIFT1, UPLIFT2 整体组装设计图

Fig.4 Overall assembly design drawing of liftable column base with yield-type anchor bolt for test pieces UPLIFT1 and UPLIFT2

表 1 锚栓材料力学性能

| Tab.1 Mechanical properties of anchor materials |                                |                                |                                |       |
|-------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|
| 试件类型                                            | 屈服应力/<br>(N·mm <sup>-2</sup> ) | 抗拉强度/<br>(N·mm <sup>-2</sup> ) | 弹性模量/<br>(N·mm <sup>-2</sup> ) | 伸长率/% |
| 普通锚栓                                            | 391.43                         | 406.97                         | 1.8×10 <sup>5</sup>            | 8.75  |
| 屈服型锚栓                                           | 545.00                         | 620.79                         | 2.1×10 <sup>5</sup>            | 10.23 |

表 2 混凝土材料性能

| Tab.2 Concrete material properties |      |                            |
|------------------------------------|------|----------------------------|
| 试件类型                               | 龄期/d | 抗压强度/(N·mm <sup>-2</sup> ) |
| 基础混凝土                              | 28   | 33.11                      |
| 无收缩灌浆料                             | 3    | 53.38                      |

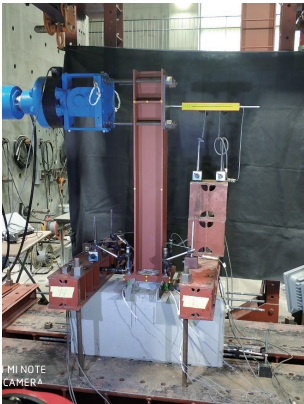


图 5 加载装置

Fig.5 Loading device

加载点处布置 1 个量程为 200 mm 的位移计(CDP-200)，在柱脚底板四角(W1，W2，E1，E2)设置

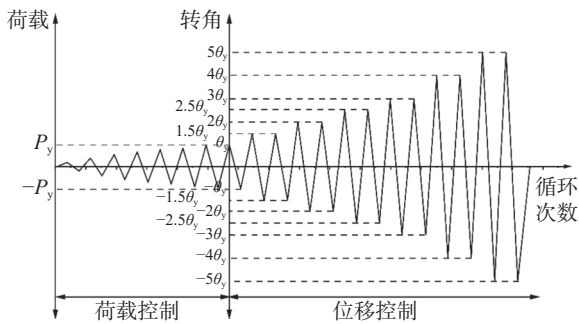


图6 试验加载制度

Fig.6 Test loading system

4个量程为25 mm的位移计(CDP-25),在柱脚底板左侧设置1个位移计(CDP-25),在基础右侧设置1个位移计(CDP-25),各位移计布置如图7所示。

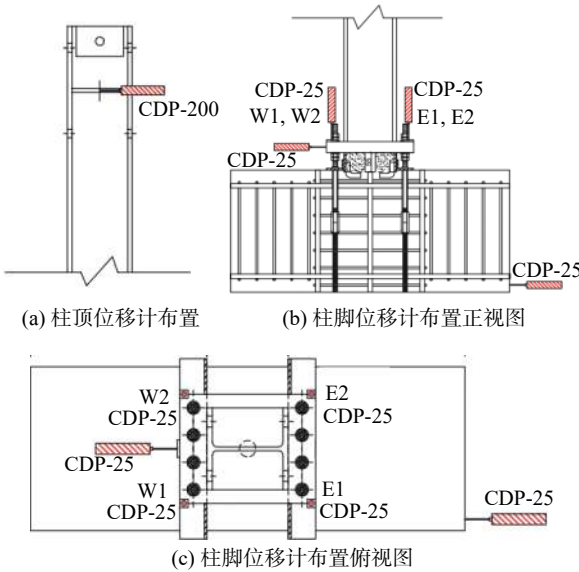


图7 位移计布置图

Fig.7 Displacement meter layout

## 2 试验现象及破坏形态

普通外露式柱脚(FIX)试验过程中并未观察到钢柱、底板,基础发生明显破坏,试件的屈服、失效主要由锚栓控制。底板转角 $\theta=0.005$ 时,试件整体发生屈服;底板转角 $\theta=0.034$ 时,试件强度已下降至峰值荷载85%以下。

锚栓屈服型可抬升柱脚(UPLIFT1)试件从试验开始加载到试验结束,并未发现钢柱和底板发生明显破坏。底板转角 $\theta=0.014$ 时,试件发生屈服。底板转角 $\theta=0.044$ 时,试件东侧3号阻尼器突然发生断裂,此时由于两侧锚栓受力不均,钢柱发生

整体的平面外转动,试件失效,破坏模式属于明显的脆性破坏。

由于UPLIFT1试件在位移控制加载阶段的 $4\theta_y$ 加载时出现了阻尼器断裂,导致阻尼器难以在原位更换,且在加载 $3\theta_y$ 第2循环时试件出现了强度下降,故作为更换前试验的UPLIFT2试件加载循环的最大转角控制在 $2.5\theta_y$ 。底板转角 $\theta=0.011$ 时,UPLIFT2试件发生屈服,达到 $2.5\theta_y$ 时,试件实际转角 $\theta=0.028$ 。将阻尼器取下观察,如图8所示,拆卸阻尼器的过程较为便利,将柱脚底板上螺母放松后便可顺利取下。由于并未加载至完全破坏,由拉伸造成的劲缩现象并不明显,部分阻尼器并未发生明显屈曲。



图8 UPLIFT2 阻尼器破坏情况

Fig.8 Damage in UPLIFT2 damper

UPLIFT3试件为UPLIFT2试验完成后直接在原位更换阻尼器进行的试验。更换阻尼器的过程较为顺利,首次试验过后接驳器处并未发生连接破坏。更换阻尼器后UPLIFT3试件从试验开始至试验结束,并未观察到钢柱和底板发生明显变形,试件加载到屈服阶段的底板转角为 $\theta=0.014$ ,停止加载前最大转角为 $\theta=0.042$ 。阻尼器拆卸后观察到的损伤情况如图9所示,损伤情况与更换前的两个试件基本一致。阻尼器主要发生拉伸变形,削弱段有一定程度屈曲,与柱脚底板连接部位存在弯曲变形。



图9 UPLIFT3 阻尼器破坏情况

Fig.9 Damage in UPLIFT3 damper

### 3 锚栓屈服型可抬升柱脚节点抗震性能分析

#### 3.1 滞回性能对比

通过试验中位移计采集到的底板转角和作动器水平反力可提取各试件的滞回曲线, 滞回曲线为试件在整个加载过程中的弯矩 ( $M$ )–转角 ( $\theta$ ) 关系。各试件的滞回曲线如图 10 所示, 普通外露式柱脚 FIX 试件的滞回曲线(图 10(a))呈“Z”型, 表明试件的耗能较差, 属于“滑移”较长的类型。普通外露式柱脚 FIX 试件在转角达到 $4\theta_y$ 之后承载力明显下降, 且相同转角下, 每循环的强度下降较为明显, 仅为第 1 循环的 75% 左右。

锚栓屈服型可抬升柱脚 UPLIFT1 试件滞回曲线(图 10(b))基本上呈“弓形”, 形状较为饱满, 表明试件后期的承载能力更高更稳定, 延性和耗能特性较好。在破坏前承载力并未有明显下降, 阻尼器发生断裂之后试件承载力发生突然下降, 但由于同侧其他阻尼器并未断裂, 试件还能继续承受一定水平荷载; 试件在相同转角的第 2 循环加载时, 强度下降并不明显。更换阻尼器前后试件耗能模式没有发生明显变化, 滞回曲线

均呈标准的“弓形”, 承载力稳定, 耗能能力良好。

对比图 10(c)和图 10(d)可以发现, 更换阻尼器前后试件耗能模式没有发生明显变化, 滞回曲线均呈标准的“弓形”, 耗能能力良好。由于实验过程中 UPLIFT2 和 UPLIFT3 阻尼器也出现了不同程度的屈曲, 在弯矩  $M = 0$  时, 滞回曲线均出现了一定的“捏缩”。通过观察对比两条滞回曲线每一循环峰值可以看出, 更换阻尼器前后, 试件的承载力并无明显变化; UPLIFT2, UPLIFT3 试件在相同转角的第 2 循环加载时, 强度下降并不明显。

#### 3.2 骨架曲线对比

普通外露式柱脚 FIX 和锚栓屈服型可抬升柱脚 UPLIFT1 的骨架曲线如图 11 所示; 试件在更换阻尼器前后(UPLIFT2, UPLIFT3)的骨架曲线对比如图 12 所示。

根据各试件的骨架曲线, 可通过能量等值法求出各柱脚的真实屈服转角 $\theta_y$ 和弯矩 $M_y$ , 各试件峰值弯矩及达到峰值弯矩时的转角记为 $M_P$ 和 $\theta_P$ , 柱脚在弹性阶段的转动刚度记为 $K_e$ , 试件从屈服点到弯矩峰值点之间的斜率作为柱脚在塑性阶段的转动刚度 $K_P$ , 各试件骨架曲线特征点如表 3 所示。

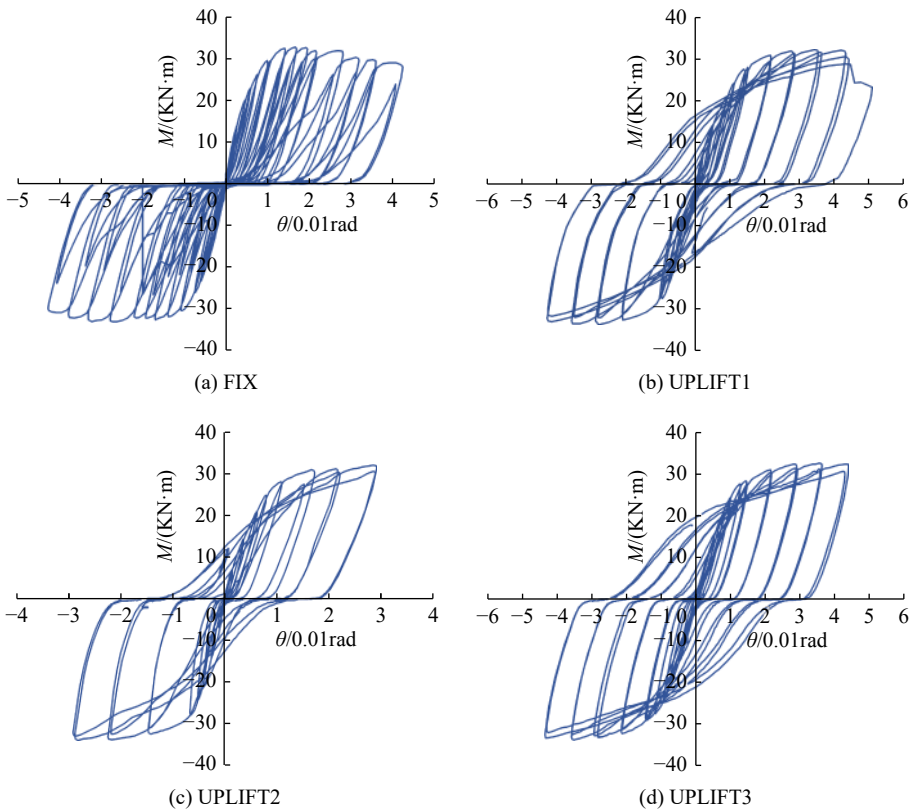


图 10 各试件滞回曲线  
Fig.10 Hysteresis curve of each test piece

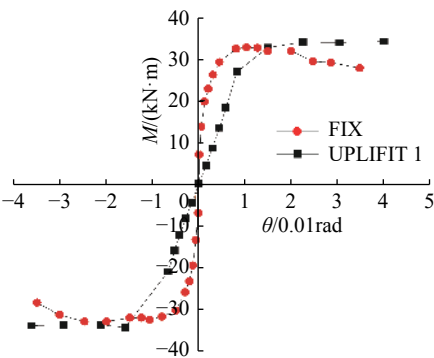


图 11 普通外露式柱脚和锚栓屈服型可抬升柱脚骨架曲线

Fig.11 Skeleton curves of common exposed column base and liftable column base with yield-type anchor bolt

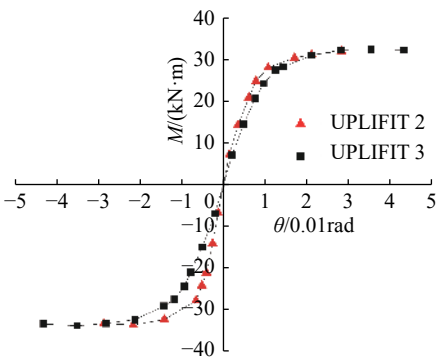


图 12 试件在更换阻尼器前后的骨架曲线对比

Fig.12 Comparison of skeleton curves of specimens before and after damper replacement

表 3 各试件骨架曲线特征点

Tab.3 Characteristic points of skeleton curve of each test piece

| 试件        | $M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$ | $\theta_y/\text{rad}$ | $M_p/(\text{kN}\cdot\text{m})$ | $\theta_p/\text{rad}$ | $K_e/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$ | $K_p/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$ | $K_p/K_e$ |
|-----------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------|
| FIX正向     | 26.96                          | 0.003                 | 32.67                          | 0.010                 | 8987                                               | 816                                                | 9.4%      |
| FIX反向     | 27.01                          | 0.003                 | 32.52                          | 0.011                 | 9003                                               | 689                                                | 7.7%      |
| UPLIFT1正向 | 27.47                          | 0.015                 | 31.06                          | 0.035                 | 1831                                               | 180                                                | 9.8%      |
| UPLIFT1反向 | 28.42                          | 0.012                 | 32.67                          | 0.036                 | 2368                                               | 177                                                | 7.5%      |
| UPLIFT2正向 | 28.04                          | 0.011                 | 31.79                          | 0.028                 | 2549                                               | 221                                                | 8.5%      |
| UPLIFT2反向 | 29.17                          | 0.009                 | 33.69                          | 0.022                 | 3241                                               | 348                                                | 10.7%     |
| UPLIFT3正向 | 28.09                          | 0.014                 | 32.23                          | 0.035                 | 2006                                               | 197                                                | 9.8%      |
| UPLIFT3反向 | 29.50                          | 0.015                 | 33.83                          | 0.035                 | 1967                                               | 216                                                | 11.0%     |

从表 3 可以看出：转角达到  $\theta=0.012$  左右时，锚栓屈服型可抬升柱脚才发生屈服；转角达到  $\theta=0.035$  时，锚栓屈服型可抬升柱脚的强度才达到峰值，表明试件具有良好的变形能力。普通外露式柱脚与锚栓屈服型可抬升柱脚在塑性阶段的转动刚度均为弹性阶段转动刚度的 7.5%~10%。

3.3 刚度退化对比

在相同位移或转角循环下的环线刚度为每次循环峰值的平均割线刚度，可根据如下公式进行计算。

$$k_i = \sum_{j=1}^n Q_j^i \bigg/ \sum_{j=1}^n \theta_j^i \tag{1}$$

式中： $k_i$ 表示环线刚度； $Q_j^i$ 表示位移或转角延性系数为  $j$  时，第  $i$  次加载循环的峰点荷载值； $\theta_j^i$ 表示位移或转角延性系数为  $j$  时，第  $i$  次加载循环的峰点位移或转角。

普通外露式柱脚 FIX 和锚栓屈服型可抬升柱脚 UPLIFT1 的刚度退化曲线如图 13 所示。由图可

知，普通外露式柱脚的初期刚度较大，加载初期锚栓与混凝土存在一定的黏结力，随着循环荷载不断增大，锚栓和混凝土的黏结迅速失效，试件的转动刚度在初期加载后迅速退化。之后柱脚的弯矩基本由两侧锚栓承受轴向拉力来承担，随着转角的增大，试件转动刚度的下降趋于平缓。由于阻尼器段与混凝土无黏结，锚栓屈服型可抬升柱脚的初期刚度下降较为平缓；因阻尼器带有截面削弱段，加载中后期刚度同样要低于普通外露式柱脚。

试件在更换阻尼器前后(UPLIFT2, UPLIFT3)的刚度退化曲线对比如图 14 所示。由图可知，更换阻尼器后，试件的初期转动刚度有所降低，在试验加载到试件底板转角为  $\theta=0.02$  左右时，刚度变化基本趋于一致，均经过速降、次降和缓降 3 个过程。

3.4 耗能能力

等效黏滞阻尼系数根据式(2)计算<sup>[17]</sup>。随转角

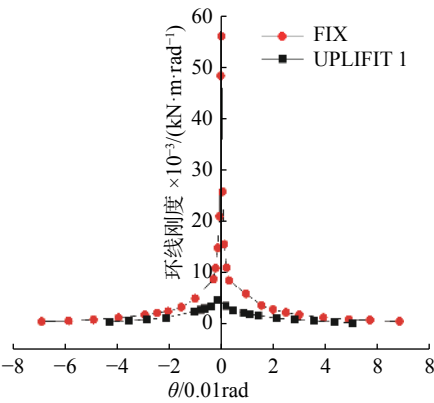


图 13 普通外露式柱脚和锚栓屈服型可抬升柱脚刚度退化曲线  
Fig.13 Stiffness degradation curve of common base and liftable column base with yield-type anchor bolt

的增加，各试件每循环等效黏滞阻尼系数变化如图 15 所示。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \times \frac{\Delta W}{W} \quad (2)$$

式中： $h_{eq}$ 表示等效黏滞阻尼系数； $\Delta W$ 表示正反向加载一次循环所消耗的能量； $W$ 表示等效势能。

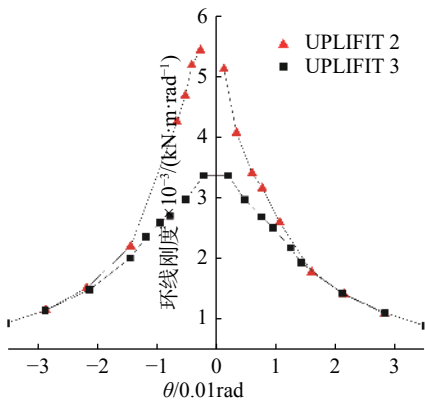


图 14 试件更换阻尼器前后的刚度退化曲线  
Fig.14 Stiffness degradation curve of specimen before and after damper replacement

由图 15(a)可见：当转角增加时，普通外露式柱脚 FIX 耗能基本没有增加，且相同转角下的第 2 循环耗能要显著低于第 1 循环，表明试件第 1 循环耗能几乎来自于锚栓与混凝土间黏结的失效；第 2 循环等效黏滞阻尼系数基本在 0.05 以下，说明第 2 循环加载时试件基本没有耗能能力。由

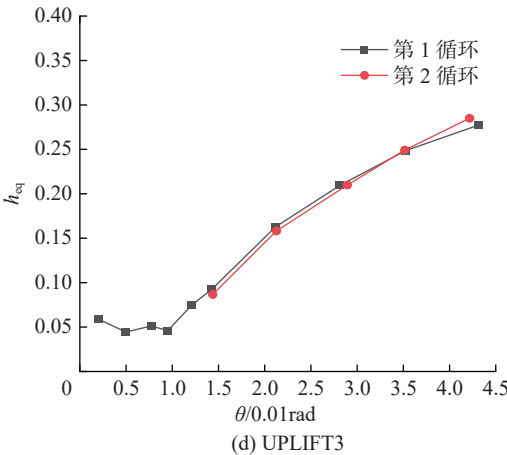
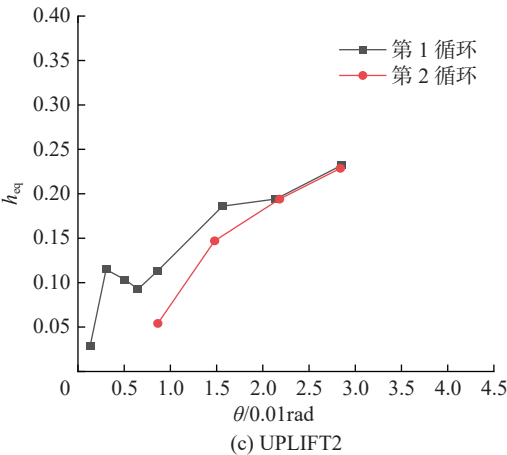
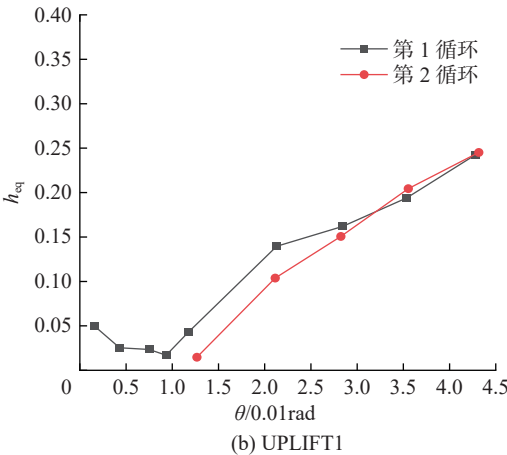
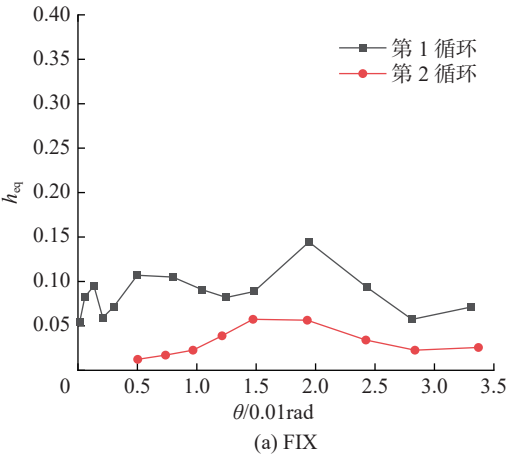


图 15 各试件等效黏滞阻尼系数

Fig.15 Equivalent viscous damping coefficient of each test piece

图 15(b)和图 15(c)可见, 锚栓屈服型可抬升柱脚的等效黏滞阻尼系数随着转角的增大而增大, 表现出一定的线性增长规律, 表明试件耗能性能良好。由图 15(d)可见, UPLIFT3 试件在同转角下两次加载循环的等效黏滞阻尼系数基本一致, 表明更换阻尼器后锚栓屈服型可抬升柱脚耗能基本上完全来自于阻尼器的变形。

4 结 论

通过对比分析两组试件的试验现象和抗震性能数据, 得出以下结论:

- a. 锚栓屈服型可抬升柱脚充分利用了阻尼器的塑性变形能力, 具有优秀的耗能能力, 且根据试验现象可知, 整个试件的损伤基本集中在阻尼器部分, 钢柱、底板、基础等均未发现影响节点受力性能的明显变形, 抗震设计原理较为合理。
- b. 锚栓屈服型可抬升柱脚在进行过一次低周反复荷载试验后, 原位更换阻尼器过程较为简便, 连接件状态良好。更换阻尼器后试件除初期刚度有略微下降外, 其余受力性能均与更换阻尼器前试件基本一致, 表明柱脚节点在震后可以修复的条件下, 后续也能保持良好性能。
- c. 锚栓屈服型可抬升柱脚具有较好变形能力, 在失效之前底板最大转角已达 4.2%, 且在达到峰值转角前试件弯矩的增长较为稳定。由于阻尼器中间段截面经过削弱, 柱脚转动中心内移, 锚栓屈服型可抬升柱脚节点的转动刚度比使用同直径锚杆的普通外露式柱脚要低。因此, 在满足承载力的情况下, 可以使用直径较大的锚栓和阻尼器。

参考文献:

[1] 吕西林, 陈云, 毛苑君. 结构抗震设计的新概念——可恢复功能结构 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2011, 39(7): 941–948.

[2] 周颖, 吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 1–10.

[3] 张国伟, 赵紫薇, 孙祚帅. 自复位结构抗震性能研究综述 [J]. 建筑结构, 2018, 48(S2): 463–470.

[4] 陈以一, 贺修樟, 柯珂, 等. 可更换损伤元结构的特征与关键技术 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(2): 1–10.

[5] 刘如月, 薛潘荣, 颜桂云. 带可恢复功能节点的装配式框

架结构抗震性能 [J]. 福建工程学院学报, 2020, 18(6): 553–559.

[6] 陈云, 陈超, 徐子凡, 等. 装配式自复位摇摆钢框架抗震性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42(12): 23–34.

[7] 吕英婷, 郭子雄, 黄婷婷, 等. 装配式震损可更换组合柱抗震性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 1–10, 22.

[8] 周振勤. 带有摇摆架的预应力自复位装配式混凝土框架抗震韧性研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.

[9] 姜子钦, 杨晓峰, 张爱林, 等. 可恢复功能装配式中柱节点耗能装置试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 15–23.

[10] 李国强, 孙哲, 张贵鹏, 等. 一种可更换消能摇摆钢柱柱脚节点性能研究 [J]. 土木工程学报, 2022, 55(1): 10–20.

[11] 丁红岩, 马耀邦, 张浦阳. 预制混凝土管柱柱脚节点抗震性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2015, 45(12): 99–103.

[12] PALAZZO B, CASTALDO P, MARINO I. The dissipative column: a new hysteretic damper[J]. Buildings, 2015, 5(1): 163–178.

[13] 吕西林, 武大洋, 周颖. 可恢复功能防震结构研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 1–15.

[14] 赵亚硕, 王伟, 方成. 基于高强钢环簧的摩擦耗能自复位消能减震阻尼器受力性能与试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(11): 108–115, 142.

[15] 楚功峻, 王伟. 基于新型可更换阻尼器的自复位模块钢框架抗震性能研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(11): 1–8, 25.

[16] FANG C, WEI W, QIU C X, et al. Seismic resilient steel structures: a review of research, practice, challenges and opportunities[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 191: 107172.

[17] CHI H, LIU J, GARLOCK M. Design and analytical validation of post-tensioned column bases[C]//Proceeding of the 2008 Structures Congress. Vancouver: ASCE, 2008.

[18] CHI H, LIU J. Seismic behavior of post-tensioned column base for steel self-centering moment resisting frame[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 78: 117–130.

[19] KAMPERIDIS V C, KARAVASILIS T L, VASDRAVELLIS G. Self-centering steel column base with metallic energy dissipation devices[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 149: 14–30.

[20] 杨熠明, 杨溥, 高浩捷, 等. 自复位 RC 框架柱脚节点在不同轴压比下的抗震性能试验研究 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(5): 542–550.

(编辑: 丁红艺)