## 地震工程学报 CHINA EARTHQUAKE ENGINEERING JOURNAL

Vol. 41 No. 3 June, 2019

李哲明,吴从晓,黄青青,等.装配式混凝土金属消能减震连接体系抗震性能分析研究[J].地震工程学报,2019,41(3):679-687. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.679

LI Zheming, WU Congxiao, HUANG Qingqing, et al. Seismic Performance of the Connection System of Precast Concrete with a Metallic Energy Dissipator[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3): 679-687. doi: 10.3969/j.issn.1000 — 0844. 2019, 03.679

## 装配式混凝土金属消能减震连接体系 抗震性能分析研究

李哲明1,吴从晓1,2,黄青青2,吴从永1

(1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广东技术师范学院天河学院, 广东 广州 510540)

摘要:为了研究装配式混凝土金属消能减震连接体系的抗震性能,对金属消能减震连接体系和普通预制装配式框架进行了数值仿真分析,分析了消能器不同设计参数对该体系抗震性能的影响。分析结果表明:金属消能减震连接体系的抗震性能优于普通预制装配式框架,屈服位移有显著提高,较好的延缓了梁端的破坏,对梁端保护作用明显,并且有效的解决了梁端后浇区施工困难的问题;金属消能器腹板高度越小耗能效果越好,但初始刚度及承载力也越小;翼缘板厚度越小消能器越早屈服耗能,但过小的翼缘板厚度会导致耗能能力不足,并且应变过大会导致其与梁柱连接部位被破坏;随着消能器高度的增加,构件跨中弯矩越大,也越早屈服耗能,但过大的消能器高度会导致其弯曲变形严重。

关键词: 装配式混凝土; 消能减震; 金属消能器; 抗震性能

中图分类号: TU375.4

文献标志码:A

文章编号: 1000-0844(2019)03-0679-09

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.679

## Seismic Performance of the Connection System of Precast Concrete with a Metallic Energy Dissipator

LI Zheming<sup>1</sup>, WU Congxiao<sup>1,2</sup>, HUANG Qingqing<sup>2</sup>, WU Congyong<sup>1</sup>

(1.School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China;

2. Tianhe College, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510540, Guangdong, China)

**Abstract:** To study the seismic performance of the connection system of precast concrete with a metallic damper, numerical simulation analyses of the connection system and ordinary prefabricated assembly frame are carried out; the influence of different design parameters of the damper on the seismic performance of the system is also analyzed. The connection system of the metallic damper shows better seismic performance than ordinary precast concrete frames, which could delay beam end damage, and effectively solve difficulties associated with construction of the subsequent concrete casting area at the beam end. Decreases in metallic damper height improve the energy dissipation ability but reduce the initial stiffness and bearing capacity. In addition, as the height of the energy dissipator increases, the larger the mid-span

收稿日期:2018-03-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0703600);广州市属高校科研项目(12016307); 广州市珠江科技新星专项(1517000272)

第一作者简介:李哲明(1992-),男,硕士研究生,主要从事结构抗震与减震方面研究。E-mail:446323780@qq.com。

通信作者:吴从晓(1981一),男,副教授,博士,主要从事结构抗震与减震方面研究。E-mail:wu-congxiao@163.com。

bending moment of the member and the earlier it yields. However, the oversize of the energy dissipator leads to severe bending deformation.

**Keywords:** precast concrete; energy dissipation and vibration reduction; metallic energy dissipator; seismic performance

## 0 引言

预制装配式混凝土结构具有以下几个优点:(1) 生产效率高,施工周期短;(2)提高建筑物质量;(3)减少建筑垃圾,有利于环境保护;(4)有利于建筑业可持续发展及"十三五"重点发展的建筑结构形式。但预制装配式混凝土框架结构的连接位置常位于节点部位,由于其施工过程中存在二次浇注,从而导致节点的连接性能与现浇混凝土结构相比较差,在地震中水平荷载的反复作用下容易破坏,难以满足抗震设计规范中"强节点,弱构件"的设计要求。震害调查发现预制装配式混凝土结构连接节点连接处的破坏非常严重。因此,解决节点部位二次浇注造成的施工困难及抗震性能薄弱的问题具有重要的研究意义。

近年来, Vidjeapriya、Choi、Hossein等对螺栓 连接、焊接连接梁柱节点进行了研究[1-3],得出预制 装配式节点抗震性能与现浇混凝土节点抗震性能接 近。李世达、杨卉、于建冰等人对外接式节点、穿筋 式节点、套筒灌浆连接节点及预应力钢绞线现浇节 点进行研究[4-6],得出与前述相同的结论。吴从晓等 人提出一种新型预制装配式消能减震框架节点,并 由赖伟山、杨诚等人进行了试验研究[7-8],得出该消 能减震节点对抗震性能有较大幅度的提高。以上研 究还是只基于传统的连接形式,仍没有解决节点处 箍筋绑扎和混凝土浇筑的施工复杂问题,为解决后 浇节点施工困难,吴从晓等人结合新型连接节点和 消能器的优点,提出了一种新型预制装配式混凝土 框架结构金属消能减震装配式框架,其采用金属消 能器作为连接节点,既可通过消能器进行屈服耗能 保护节点免受地震力破坏,也可方便节点处施工。 付焕昌、张玉凤等人已对该金属消能减震连接体系 进行了有限元模拟分析[9-10],讨论其性能和特性。 本文在此基础上对该预制装配式消能减震连接体系 进行往复荷载下的数值仿真分析及参数对比分析研 究,研究其在地震荷载作用下的抗震性能。

## 1 普通装配式框架的有限元模拟

#### 1.1 普通预制装配式框架模型概况

基于文献[11]中的预制装配式钢筋混凝土框架进行数值仿真分析,框架的几何尺寸及配筋如图 1、

图 2 所示。框架梁、柱采用 C30 混凝土,装配后浇区(梁端部 100 mm)采用 C40 混凝土。纵筋采用级别为 HRB335 的钢筋,材料性能试验得到的屈服强度为 476 MPa,箍筋采用 HPB300,屈服强度为287 MPa,试件梁柱混凝土保护层厚度为15 mm。

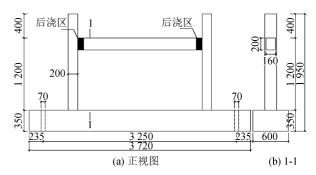


图 1 框架正视图与剖面图

Fig.1 Front view and cross section of the frame

#### 1.2 有限元模型的建立

为了验证有限元模型的正确性,利用 ABAQUS 软件建立以上试验钢筋混凝土框架模型。

#### 1.2.1 材料本构模型及单元类型

本文根据国内外已有的研究成果,调用清华大学 土木工程系结构工程研究所基于大型通用有限元程 序 ABAQUS 开发的一组材料单轴滞回本构模型 PQ-Fiber,混凝土材料本构模型采用 UConcrete02,钢筋材 料本构模型采用 USteel02。混凝土单元和钢筋单元均 采用二维纤维单元。在程序中可以通过\*rebar 关键 字定义钢纤维,截面上每增加一根钢纤维即增加一个 材料积分点。钢筋混凝土框架的网格大小为80 mm。

#### 1.2.2 边界条件及加载制度

试验设计轴压比为 0.4,竖向荷载为 300~kN,通过计算转换钢筋混凝土模型柱顶上的均布荷载为  $7.5~N/mm^2$ 。有限元模拟时在柱底施加完全固定约束,将右侧梁端耦合到一点上,用来施加位移荷载。文献[11]中试验采用位移和荷载混合控制加载,为确保数值模拟时的收敛性,在进行有限元分析时采用纯位移加载方案。以每级  $\Delta y$  递增循环加载,当位移达到试验加载最大位移时,分析终止。

#### 1.3 有限元模型的验证

分析得出该模型的滞回曲线及骨架曲线图如图 3、图4所示。图5为有限元分析与试验结果变

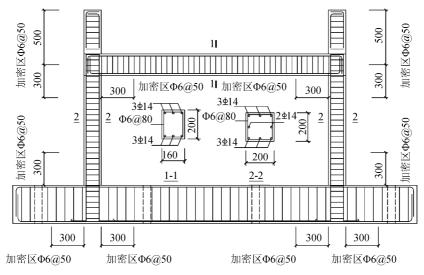


图 2 框架配筋图

Fig.2 Reinforcement diagram of the frame

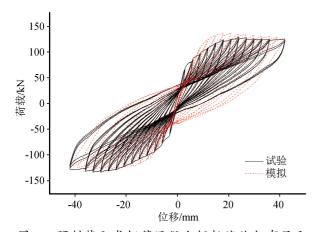


图 3 预制装配式钢筋混凝土框架试验与有限元模拟的滞回曲线对比图

Fig.3 Comparison between tested and simulated hysteretic curves of precast fabricated RC frame

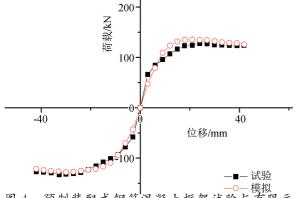
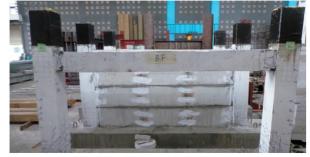
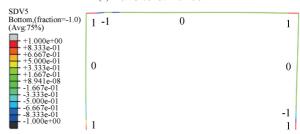


图 4 预制装配式钢筋混凝土框架试验与有限元模拟的骨架曲线对比图

 $\begin{array}{ccc} \mbox{Fig.4} & \mbox{Comparison between tested and simulated skeleton} \\ & \mbox{curves of precast fabricated RC frame} \end{array}$ 



(a) 试验框架最终破坏图



(b) 有限元模拟框架最终破坏图

图 5 构件最终破坏模式对比图

Fig.5 Comparison between final failure modes of components

形对比图,其中图(b)为混凝土纤维模型 PQ-Fiber 中的截面屈服标志(0:未屈服;一1:混凝土压碎;1:钢筋拉屈),图(a)为试验试件的破坏图。表 1 为普通预制装配式框架试验和模拟的荷载-位移骨架曲线特征点参数对比。

从图 3~图 5 及表 1 分析可得:

(1) 有限元模型的滯回曲线和骨架曲线与试验 基本吻合,试验与有限元模拟的屈服位移误差仅有 0.13%,峰值荷载误差为 6.27%,其屈服荷载、初始 刚度误差在 15%左右。

表 1 试验和模拟的荷载-位移骨架曲线特征点参数对比

Table 1 Comparison between feature points parameters of tested and simulated load-displacement skeleton curves

性能参数 -	构件类型			
	模拟	试验	差值	
屈服荷载/kN	119.89	104.18	15.08%	
屈服位移/mm	11.26	11.27	0.13%	
初始刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	10.65	9.24	15.24%	
峰值荷载/kN	135.40	127.41	6.27%	

- (2) 试验最终破坏模式为两端柱底压碎、梁端 开裂,与有限元模拟结果一致。
- (3)由于试验过程中构件有产生滑移,理想滞回曲线应比试验滞回曲线饱满,与有限元模拟结果一致。

基于以上分析,有限元计算结果与试验测得的结果基本吻合,且有限元模拟可以较好的反应结构的力学性能,从而验证了有限元模型的正确性。

## 2 金属消能减震连接体系

预制装配式金属消能减震连接体系的耗能原理为:小震时,结构层间产生的变形较小,金属消能器处于弹性阶段,可给结构提供一定的刚度;大震作用时,当结构层间产生大的变形时,消能器通过腹板翼缘板的弯曲变形和剪切塑性变形来耗散结构的能量<sup>[12]</sup>。其具有取材容易、初始刚度大、滞回性能稳定、疲劳性能好等优点,利用钢板平面内产生弯曲弹塑性变形以达到消能减震的目的。

#### 2.1 金属消能器的设计

金属消能器的基本构造由腹板、左右侧翼缘、上下端连接板组成,构造如图 6 所示。翼缘板为主要的耗能部件,左右侧翼缘对腹板起约束作用,抑制腹板发生转动,上下端连接板使消能器与钢筋混凝土连接为整体。

为了使金属消能器在小震下处于弹性状态充当 梁柱节点连接构件,在大震自作用下先于主体结构 耗能。设计消能器时要使其受弯承载力低于预制混 凝土梁。根据混凝土结构设计原理中的双筋矩形截 面受弯承载力公式、抗弯截面系数及弯曲正应力公 式设计出消能器的初步尺寸(见表 2)。

$$\begin{cases} M_{\rm u} = M_{\rm ul} + M_{\rm u2} = \\ \alpha_1 f_{\rm c} b h_0^2 \xi (1 - 0.5 \xi) + f_{\rm y} A_{\rm s}' (h_0 - a') \\ W = I/y \\ \sigma = M_{\rm u}/W \end{cases}$$
(1)

式中:M<sub>u</sub> 为正截面受弯承载力设计值;f<sub>c</sub> 为混凝土轴心抗压强度设计值;b 为截面宽度;h<sub>0</sub> 为截面有效

高度; $\xi$  为相对受压区高度;f', 为普通钢筋抗拉强度设计值;A'。为纵向受拉钢筋面积;a' 为保护层厚度;W 为截面的抵抗系数;I 为截面的惯性矩;y 为形心轴x 到截面边缘的距离; $\sigma$  为弯曲正应力。

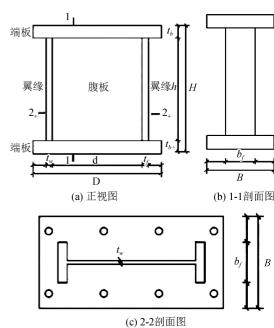


图 6 金属消能器构造图

Fig.6 Structure diagram of the metallic damper

表 2 消能器初步设计尺寸

Table 2 Original design size of the damper

端板尺寸 $D \times B \times t_{\rm b}/{\rm mm}^3$	翼缘板尺寸 $b_{\mathrm{f}} \times t_{\mathrm{f}} \times h/\mathrm{mm}^3$	腹板尺寸 d×t <sub>w</sub> ×h/mm³	总高度 H/mm
180×160×10	80×10×100	100×10×100	120

#### 2.2 金属消能器的有限元模型建立

#### 2.2.1 单元选择及材料本构

金属消能器采用 ABAQUS 中的 C3D8R 单元(三维八节点六面体缩减积分实体单元)。其端板、腹板、翼缘板均为 Q235 钢,材料本构采用弹性强化模型及双线性模型,弹性模量 E 设为 200 000 N/mm²,泊松比 $\mu$  设为 0.3。

### 2.2.2 接触处理及网格划分

金属消能器通过面对点 Tie 接触与梁柱构件连接,金属消能器端板、腹板与翼缘板通过焊接工艺连接,整体性好,不考虑相对胡滑移,因此有限元模型中金属消能器各部分采用面对面 Tie 接触连接。金属消能器的网格大小为 10 mm。

## 2.3 装设金属消能器的装配式混凝土框架的有限 元模拟分析

在以上普通预制装配式有限元模型的梁端装设金属消能器,由 ABAQUS 有限元分析,得出普通预

制装配式框架和装设金属消能器框架的滞回曲线和 骨架曲线对比图,如图 7、图 8 所示。表 3 为普通预 制装配式框架和装设金属消能器框架的荷载-位移 骨架曲线特征点参数对比。

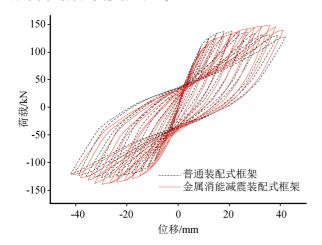


图 7 普通预制装配式框架与金属消能减震装配式框架的滞回曲线对比图

Fig.7 Comparison between hysteretic curves of precast fabricated RC frame and fabricated RC frame with a metallic damper

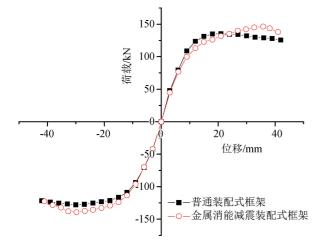


图 8 普通预制装配式框架与金属消能减震装配式框架的骨架曲线对比图

Fig.8 Comparison between skeleton curves of precast fabricated RC frame and fabricated RC frame with a metallic damper

由图7、图8及表3可以得出:

- (1)金属连接体系的屈服位移比普通装配式框架大47%,说明金属消能器先于框架开始屈服耗能后,较好的提高了框架的结构的延性,对框架有较好的保护作用,符合预期设计要求。
  - (2) 金属连接体系的初始承载力及刚度小于普

通预式框架,随着消能器屈服耗能进入塑性状态,承载力开始逐步提高并最后超过普通装配式框架,符合消能器同时具有耗能和连接的作用。

# 表 3 普通预制装配式框架与金属消能减震装配式框架的 荷载-位移骨架曲线特征点参数对比

Table 3 Comparison between feature points parameters of skeleton curves of precast fabricated RC frame and fabricated RC frame with a metallic damper

	构件类型				
性能参数	普通预测 装配式 框架	金属消能 减震装配 式框架	差值		
屈服荷载/kN	119.89	124.61	3.94%		
屈服位移/mm	11.26	16.56	47.14%		
初始刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	10.65	7.52	29.36%		
峰值荷载/kN	135.40	146.28	8.03%		

## 3 金属消能器不同设计参数下的构件性能分析

#### 3.1 不同厚度腹板对框架性能的影响对比

对比了 4 个不同腹板高度的金属消能器,其中构件 S11 ~ S14 的腹板高度分别为: 80 mm、100 mm、120 mm、140 mm,腹板厚度、翼缘板厚度、翼缘板宽度、消能器高度,均分别为10 mm、10 mm、80 mm、120 mm。研究不同高度的腹板对消能器抗震性能的影响。图 9 为各消能器的应力云图,图10、图 11 分别为装设不同规格腹板框架的骨架曲线、滞回曲线。表 4 为装设不同厚度腹板的框架的荷载-位移骨架曲线特征点参数对比。

由图 9~图 11 及表 4 分析可得:

- (1)由消能器应力云图可以看出,在往复荷载作用下金属消能器翼缘板先屈服耗能,翼缘板从靠近端板处至中心部位应力逐渐增大,符合结构力学中两端固接构件中部弯矩最大的原则。随着腹板高度逐渐增大,消能器应力云图中翼缘板应力分布基本一致。
- (2) 随着腹板高度增大,金属消能器刚度增大,可以看到 S14 比 S11 初始刚度增大了 43%。消能器刚度越小,会越快进行屈服耗能对主体结构产生保护作用。
- (3) 从消能器应力云图可以看出,S14 的最大应力为 250 N/mm²,消能器才刚开始屈服耗能,从骨架曲线也可以看出,由于消能器刚度过大,主体结构在消能器屈服前已经破坏,构件 S14 的屈服位移比 S11 大 75%,对结构的保护作用显著。
- (4) 随着腹板高度的增大,结构的峰值荷载也增大,阻尼比减小,从骨架曲线也可以看出,S11~

S13 对结构的保护作用都有较好的效果,但 Q235 极限应力在 375~500 N/mm² 内,S11 屈服应力已 超过极限应力不能满足耗能要求。因此消能器腹板

高度过大不利于屈服耗能,高度过小会因刚度较小产生过大应力导致消能器破坏,合理的设计腹板高度对研究金属消能器抗震性能有重要指导意义。

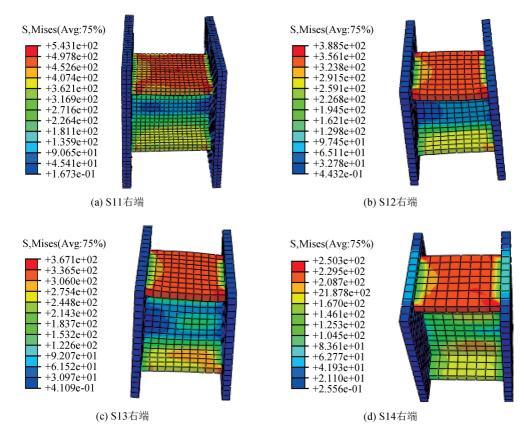


图 9 消能器应力云图

Fig.9 Stress nephogram of the damper

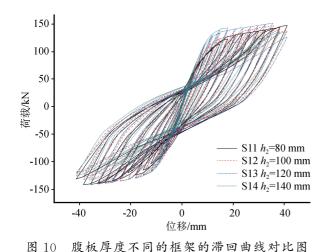


Fig.10 Comparison between hysteretic curves of frame

3.2 不同厚度的翼缘板对框架性能的影响对比

with different web thickness

对比了 4 个不同厚度翼缘板的金属消能器,其中构件  $S21 \sim S24$  翼缘板的厚度分别为 6 mm、8 mm、10 mm、12 mm,腹板高度、翼缘板厚度、翼缘

板宽度、消能器高度,均分别为100 mm、10 mm、x80 mm、120 mm。研究不同厚度的翼缘板对消能器抗震性能的影响。图 12~13 分别为装设不同翼缘板厚度消能器的框架的滞回曲线、骨架曲线对比图。表5为装设不同厚度翼缘板消能器的框架荷载-位

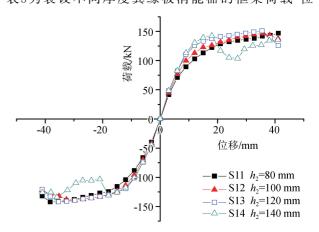


图 11 腹板厚度不同的框架骨架曲线对比图 Fig.11 Comparison between skeleton curves of frame

Fig.11 Comparison between skeleton curves of frame with different web thickness

## 表 4 腹板厚度不同的框架的荷载-位移骨架曲线 特征点参数对比

Table 4 Comparison between feature points parameters of skeleton curves of frame with different web thickness

性能参数 -	构件编号			
	S11	S12	S13	S14
屈服荷载/kN	126.22	124.61	133.22	126.98
屈服位移/mm	19.85	16.56	14.85	11.37
初始刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	6.36	7.52	8.97	11.17
峰值荷载/kN	146.92	146.28	151.13	142.74
阻尼比	12.60	11.84	9.57	9.08

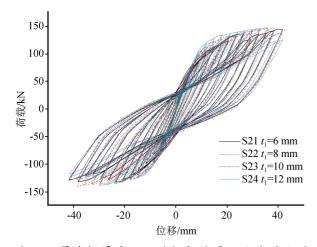


图 12 翼缘板厚度不同的框架的滞回曲线对比图 Fig.12 Comparison between hysteretic curves of frame with different flange thickness

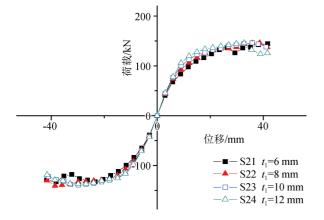


图 13 翼缘板厚度不同的框架骨架曲线对比图 Fig.13 Comparison between skeleton curves of frame with different flange thickness

移骨架曲线特征点参数对比。

由图 12、图 13 及表 5 分析可得:

(1) 随着翼缘板厚度从 6 mm 增加到 12 mm, 消能器的刚度增大,结构的初始刚度也随之增大 55%。但翼缘板越薄,消能器越快屈服耗能,越早对 结构提供消能减震作用,S21 比 S24 的屈服位移增大50%,阻尼比增大50%,但从骨架曲线可以看出, 翼缘板最薄的 S21 在位移达到 27 mm 时就出现下降段,是由于金属消能器过早开始屈服耗能,在加载位移较小时消能器就出现了较大的应变,导致消能器与梁柱连接部位出现错动,不仅消能器无法有效的进行消能减震,还导致结构稳定性出现问题,主体结构开始破坏。

## 表 5 翼缘板厚度不同的框架的荷载-位移骨架曲线 特征点参数对比

Table 5 Comparison between feature points parameters of skeleton curves of frame with different flange thickness

性能参数 -	构件编号			
	S21	S22	S23	S24
屈服荷载/kN	123.62	126.41	124.61	127.29
屈服位移/mm	20.30	18.00	16.56	13.51
初始刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	6.09	7.02	7.52	9.42
峰值荷载/kN	144.47	146.27	146.28	146.02
阻尼比	14.20	12.34	11.84	9.44

(2)随着翼缘板厚度的增加,结构的初始刚度越大,初始承载力也越大,但消能器刚度越大,屈服位移越大,消能器需要更大的加载位移才能开始屈服耗能对结构提供保护作用,混凝土梁柱会在消能器屈服耗能前已经出现裂缝并开始破坏。从骨架曲线也可以看出,S22~S24 随着翼缘板厚度的增加,由于混凝土出现裂缝,结构就越早出现下降段。

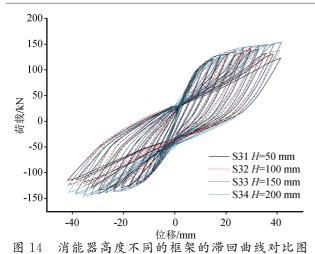
(3) 因此合理的选择翼缘板厚度,既要使消能器尽早屈服耗能对结构提供保护作用,又要适当增大翼缘板厚度以免消能器出现较大的应变使得结构稳定性被破坏。

#### 3.3 不同高度的消能器对框架性能的影响对比

对比了 4 个不同高度的金属消能器,其中构件 S31~S34 消能器的总高度分别为 70 mm、120 mm、170 mm、220 mm,腹板厚度、腹板高度、翼缘板厚度、翼缘 板 宽度,均分别为 10 mm、100 mm、10 mm、80 mm。研究不同消能器高度对其抗震性能的影响。图 14、图 15 分别为装设不同高度消能器的框架的骨架曲线、滞回曲线。表 6 为装设不同高度消能器的框架的骨架的荷载-位移骨架曲线特征点参数对比。

由图 14、图 15 及表 6 分析可得:

(1) 只改变消能器的高度,不改变截面尺寸和截面惯性矩,由于设计的消能器刚度比混凝土梁小,因此随着消能器高度的增加,结构 S34 比 S31 的初始刚度小 19%,初始承载力稍微减小。



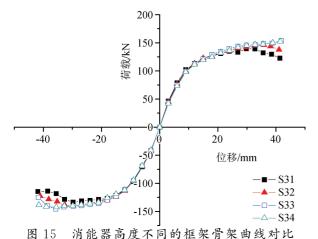


Fig.15 Comparison between skeleton curves of frame with different damper height

表 6 消能器高度不同的框架的荷载-位移骨架曲线 特征点参数对比

Table 6 Comparison between feature points parameters of skeleton curves of frame with different damper height

性能参数 -	构件编号			
	S31	S32	S33	S34
屈服荷载/kN	118.96	124.61	130.93	127.52
屈服位移/mm	14.41	16.56	19.00	19.17
初始刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	8.25	7.52	6.89	6.65
峰值荷载/kN	139.29	146.28	153.70	152.39
阻尼比	10.85	11.84	13.02	14.55

(2)随着消能器高度的增大,消能器跨中弯矩越大,越早屈服耗能,对主体结构的保护作用越好。消能器高度从 70 mm增加到 220 mm,结构的屈服位移增大 33%,阻尼比增大 34%。可以看出结构S31由于消能器高度过小,导致消能器需要加载很大的位移才能提供足够的弯矩让消能器开始屈服耗

能,消能器越晚屈服,主体结构越早开始出现破坏, 从而导致骨架曲线中 S31 很早开始出现下降段。

(3)随着消能器高度的增大,可以看出结构 S33和 S34的滞回曲线和骨架曲线基本一致,特征 点数据也基本一致,原因是在消能器高度达到一定 数值时,消能器屈服所耗散的能量已经足够对主体 结构提供保护作用。消能器高度太大,对结构没有过多的增益,不仅容易使得消能器产生过大的弯曲变形导致结构失稳,还会影响美观。因此需要把消能器高度控制在适当的范围才能把消能器的耗能减 震作用发挥到最大值。

#### 4 结论

通过对预制装配式混凝土框架结构金属消能减震装配式框架以 ABAQUS 软件进行参数分析可以得出以下结论:

- (1)金属消能减震装配式框架的屈服位移相对普通装配式框架有显著提高,较好的减轻了梁端的破坏,消能器屈服耗能效果明显,对框架有较好的保护作用。在梁端装设金属消能器不仅提高了装配式结构的抗震性能,还有效的解决了梁端后浇区施工困难的问题。
- (2)随着消能器腹板高度的减小,消能器刚度 降低,更早进入屈服耗能保护主体结构,但初始承载 力也随之降低,因此设计金属消能器的腹板高度既 要保证结构的承载力,又要适当降低其刚度过早耗 能屈服。
- (3)由于该金属消能器主要为弯曲变形耗能,随着翼缘板厚度的减小,消能器更快屈服耗能保护主体结构,但随着消能器翼缘板截面面积减小,加载位移的增大翼缘板耗能能力逐渐不足,消能器应变过大导致其与主体结构连接部位破坏,结构失稳。因此设计金属消能器要尽量减小翼缘板厚度使消能器更快屈服耗能的能力,又要保证翼缘板有足够的截面面积提供足够的耗能。
- (4)随着金属消能器高度的增大,消能器跨中弯矩增大,更早进入屈服耗能,但为了保证消能器的弯曲变形控制在合理范围内,所设计的消能器能达到足够耗能能力即可。

#### 参考文献(References)

[1] VIDJEAPRIYA R, JAYA K P. Behaviour of Precast Beam-

- column Mechanical Connections under Cyclic Loading[J]. Asian J Civil Eng, 2012, 13(2): 233-245.
- [2] CHOI H K, CHOI Y C, CHOI C S. Development and Testing of Precast Concrete Beam-to-Column Connections [J]. Engineering Structures, 2013, 56:1820-1835.
- [3] HOSSEIN Parastesh, IMAN Hajirasouliha, REZA Ramezani. A New Ductile Moment-resisting Connection for Precast Concrete Frames in Seismic Regions: An Experimental Investigation [J]. Engineering Structures, 2014, 70:144-157.
- [4] 李世达.预制混凝土框架柱及节点抗震性能试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

  LI Shida. Experimental Study on Seismic Performance of Precast Concrete Columns and Joints[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [5] 杨卉.装配式混凝土框架节点抗震性能试验研究[D].北京:北京工业大学,2014.
  YANG Hui. Experimental Study on Seismic Performance of Precast Concrete Frame Joints[D]. Beijing: Beijing University of Technology,2014.
- [6] 于建兵,郭正兴,管东芝.新型预制装配框架节点抗震性能研究 [J].施工技术,2014,43(22);26-29. YU Jianbing, GUO Zhengxing, GUAN Dongzhi. Experimental Study on Seismic Behavior of a New Precast Beam-to-Column Connection[J].Construction Technology,2014,43(22);26-29.
- [7] 赖伟山.新型预制装配式消能减震混凝土框架节点抗震性能试验研究[D].广州:广州大学,2014.

  LAI Weishan. Experimental Studies on Seismic Behaviors of the Newly Energy-dissipative Prefabricated Frame Structure Joints[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2014.

- [8] 杨诚.预制装配式与现浇混凝土消能减震框架结构抗震性能试验研究[D].广州:广州大学,2016.
  YANG Cheng.Experimental Study on Seismic Performance of
  - YANG Cheng. Experimental Study on Seismic Performance of Ordinary Concrete Frame Structure and Energy-dissipative Precast Concrete Frame Structure [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2016.
- [9] 伏焕昌,吴从晓,张玉凤,等.预制装配式混凝土框架结构金属消能减震连接体系抗震性能分析研究[J].工程抗震与加固改造,2016,38(1):89-97.
  - FU Huanchang, WU Congxiao, ZHANG Yufeng, et al. Seismic Performance Study on Connection System of Prefabricated Concrete Structure with Metallic Damper[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016(1):89-97.
- [10] 张玉凤.新型预制装配式消能减震混凝土框架结构抗震性能分析研究[D].广州:广州大学,2016.

  ZHANG Yufeng. Analysis Studies on Seismic Performance of the Newly Energy-dissipation Prefabricated Frame Structure [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2015.
- [11] 龙佳栋、装配式混凝土框架减震墙板结构抗震性能研究[D]. 广州:广州大学,2016. LONG Jiadong.Studies on Seismic Performance of Prefabricated Frame-Damping Wall Structure[D].Guangzhou:Guangzhou University,2016.
- [12] 何志明,周云,陈清祥.剪切钢板阻尼器研究与应用进展[J]. 地震工程与工程振动,2012,32(6):124-135. HE Zhiming,ZHOU Yun,CHEN Qingxiang.Advance in Research and Application of Steel Shear Panel Dampers[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2012,32(6):124-135.