

# 带自复位功能的耗能减震阻尼器研究进展

宋永生<sup>1</sup>, 王际帅<sup>2</sup>, 宣卫红<sup>1</sup>, 郭 彤<sup>2</sup>

(1. 金陵科技学院建筑工程学院, 江苏 南京 211169; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 传统的耗能支撑在强震作用后,往往产生不可修复的残余变形,给震后结构的修复和重建带来较大的困难。由于可恢复功能耗能支撑具有复位、耗能和大幅减小结构残余变形的优点,根据支撑的复位形式,分类介绍了现有不同类型的可恢复功能支撑的构造、工作原理和研究结果,并概述了现有支撑的优缺点和发展趋势。

**关键词:** 自复位; 耗能支撑; 残余变形; 预应力筋; 碟形弹簧; 记忆合金

中图分类号: TU352.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-755X(2019)01-0040-07

## Research Progress of Energy Dissipation Braces with Self-centering Function

SONG Yong-sheng<sup>1</sup>, WANG Ji-shuai<sup>2</sup>, XUAN Wei-hong<sup>1</sup>, GUO Tong<sup>2</sup>

(1. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China; 2. Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The traditional energy dissipation brace often produces irreparable residual deformation under the strong earthquake, which brings great difficulty to the post-earthquake repair and reconstruction works. Various kinds of energy dissipation brace with recoverable function for its advantages of reset, energy dissipation and greatly reducing the residual deformation were proposed. This paper introduces the structural configuration, working principle and research results of different types of self-centering energy dissipation braces according to the classification of restoration forms of braces, and summarizes the advantages and disadvantages of existing braces and the development trend in the future.

**Key words:** self-centering; energy dissipation brace; residual deformation; prestressed tendon; disc springs; shape memory alloy

地震灾害是对人类生命和财产威胁最大的自然灾害之一,给人类文明和社会发展带来了不可估量的损失。1950—1995年,中国地震死亡人数为27.47万~27.5万,经济损失为70.1亿美元<sup>[1]</sup>。1990—2014年中国地震灾害死亡人数为7.4万人,直接经济损失为10 605.81亿元<sup>[2]</sup>。地震灾害往往给建筑结构带来严重的损伤、破坏甚至导致建筑倒塌。文献[3]指出:钢支撑框架的支撑构件在层间位移角达到0.25%~0.4%的时候开始弯屈或屈服;钢框架或混凝土框架在层间位移角达到0.9%~1.25%的时候达到屈服;多种建筑外层和隔墙在层间位移角达到0.3%的时候开始破坏,在1%的时候破坏严重。

为减少地震灾害对建筑结构的影响,现有建筑结构的设计和加固通常是在建筑结构内设置消能隔减震装置来耗散地震输入能量,常用的做法有增设耗能支撑、增设隔震支座等。消能隔减震装置在结构遭受地震作用时产生阻尼力做功消耗地震输入能量,从而减小了主体结构的地震响应。然而目前广泛应用的

收稿日期: 2018-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508251); 江苏省节能减排科研专项课题

作者简介: 宋永生(1984—),男,安徽蚌埠人,副教授,博士,主要从事结构健康监测与性能评估的研究。

耗能支撑大多通过材料的塑形变形来耗散地震输入能量,震后存在不可避免的残余变形,对结构产生不利的影响并且修复代价昂贵。随着“可恢复功能抗震城市”概念的提出,结构抗震设计重点逐渐由抗倒塌设计向可修复设计转变,残余变形成为了评价震后结构可修复与否的重要指标。

针对传统耗能支撑震后残余变形过大的缺点,预应力筋材、记忆合金和碟形弹簧等可提供恢复力的材料被应用到耗能支撑中,形成具有复位功能的自复位耗能支撑。这种支撑震后基本上无残余变形且可以减小结构的残余变形,大幅度提高了结构的可修复性。然而研究表明,具有复位功能的支撑目前仍存在施工工作量大、轴向变形能力有限、构造复杂、造价较高等缺点<sup>[4]</sup>,故创新研发出构造简单、施工方便、抗震性能优越的支撑形式,将为现代结构的发展提供有力的支撑。

现有的具有复位功能的耗能支撑从受力特性上可分为双向受力支撑和单向受力支撑。根据复位装置主要可划分为预应力筋复位型、记忆合金复位型和碟形弹簧复位型,其耗能方式主要有摩擦耗能、金属塑性变形耗能、粘滞液体流动耗能和记忆合金材料耗能。

## 1 预应力筋复位型

预应力筋复位型自复位耗能支撑通过在耗能支撑中附加预先张拉的高强筋材来提供复位力。文献[5]提出了一种新型的自复位摩擦耗能支撑(SCEDB),支撑构造见图1。该支撑通过内管和外管之间连接板的滑动摩擦耗能,其复位装置为设置在内外管之间的4根预应力筋材,预应力筋材穿过内外管固定在两端,支撑通过内外管的相互运动带动摩擦耗能装置及预应力筋的变形。作者分别对SCEDB原型试件和SCEDB单层框架做了滞回加载试验,其中SCEDB滞回加载试验的结果见图2。结果表明采用预应力筋材复位的SCEDB具有良好的复位效果,装有采用预应力筋材提供复位力的SCEDB框架在层间位移角为2%时,仍具有良好的复位能力。

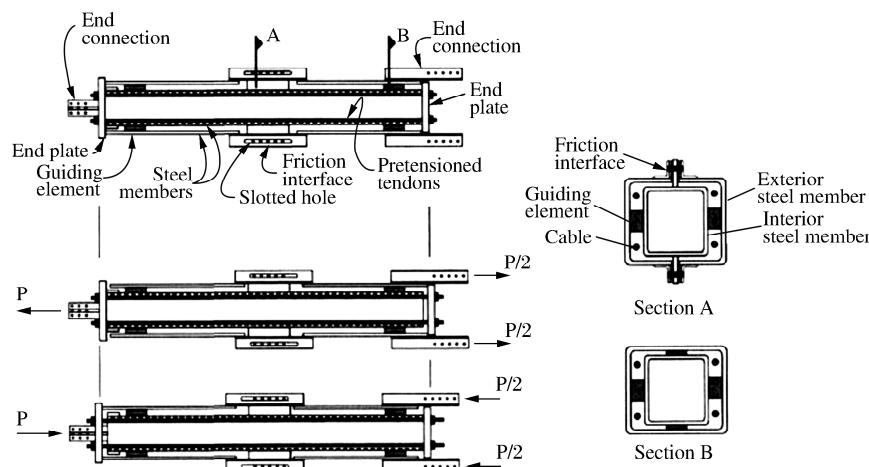


图1 SCEDB 构造图

文献[6]将耗能软钢置于等长的内外钢管的中间,并将预应力钢绞线穿过内外钢管,固定在钢管两端,形成了一种新型自复位防屈曲耗能支撑(SCBRB),构造形式见图3。SCBRB原型试件的滞回加载试验表明(图4),自复位防屈曲耗能支撑具有一定的复位效果但会存在一定的残余变形,且受限于预应力筋的弹性伸长率,支撑的变形能力有限。SCBRB钢框架和BRB钢框架的非线性动力时程的分析结果表明,初始刚度相同的SCBRB钢框架和BRB钢框架相比,具有较小最大层间位移角且残余层间位移角接近于0,但基底剪力稍大于防屈曲支撑结构。

文献[7]提出了一种新型的单向受力型自复位摩擦耗能支撑,并对其构造和工作原理进行了详细说明,支撑的构造和安装设置见图5。该支撑将摩擦复位装置和高强拉索串联使用,其中摩擦复位装置中的复位力由高强预应力筋提供。其研究结果表明采用拉索支撑能够减小结构的初始刚度,从而减小地震作用,并且在楼层层间位移角达到2%时,该支撑仍然具有理想的自复位能力。

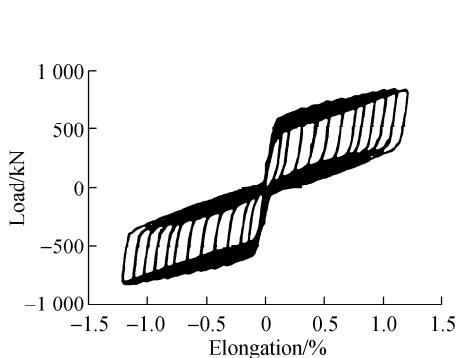


图2 SCEDB 滞回加载曲线

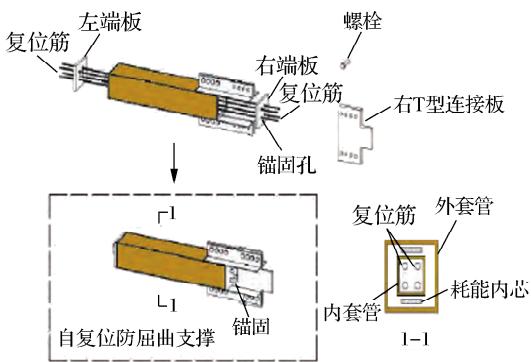
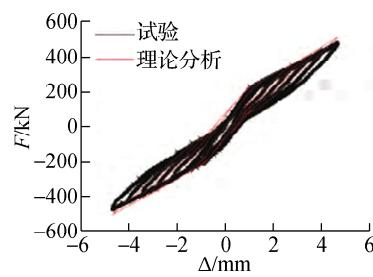


图3 SCBRB 构造图

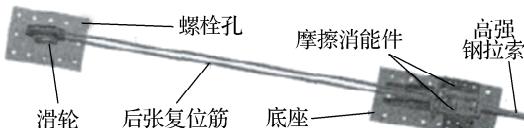


(a) 试验现场

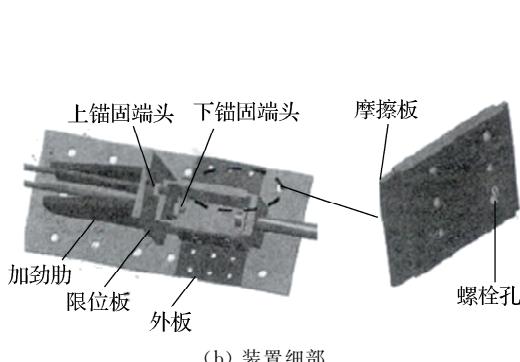


(b) F-Δ 滞回曲线

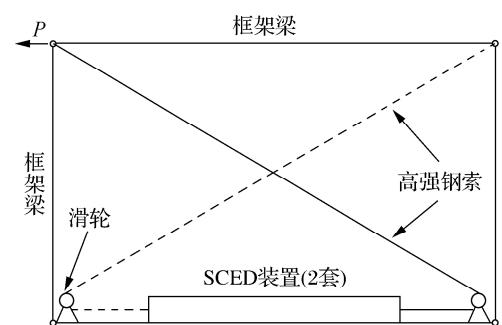
图4 SCBRB 滞回加载试验曲线



(a) SCED 装置构造



(b) 装置细部



(c) 构造图

图5 摩擦复位装置-拉索串联支撑

## 2 记忆合金复位型

文献[8]提出了一种采用记忆合金束复位的摩擦耗能支撑(SFDB),支撑构造见图6,该支撑耗能装置为高强螺栓连接的开长孔的摩擦耗能器,复位装置由对称布置的多束记忆合金绞线组成。作者对其原型试件做了滞回加载试验,并对分别安装SFDB和防屈曲耗能支撑的框架进行了推覆分析和非线性动力时程分析。结果表明:SFDB具有良好的复位能力,但复位效果随摩擦力的增大而降低;SFDB框架和BRB框架地震响应基本相同,但SFDB能明显降低框架的震后残余变形。

文献[9]提出了一种利用预张拉的记忆合金(SMA)杆提供恢复力的SMA预拉杆式自定心屈曲约束

支撑,该支撑由内套管、外套管、中套管、金属耗能核心板、端板和 SMA 杆组成,其构造见图 7。作者基于屈曲约束支撑的流变模型和形状记忆合金的分段线性本构模型,建立了可用于分析 SMA 预拉杆式自定心屈曲约束支撑滞回性能的数值模型,并基于此数值模型对该支撑进行了变参数分析。结果表明:增加金属耗能核心板截面面积,可提升支撑耗能能力,但自定心能力减弱;增加 SMA 杆的截面面积,可以同时提升支撑的自定心能力和耗能能力;提高 SMA 杆的温度,可显著提升 SMA-SC-BRB 的自定心能力(图 8)。

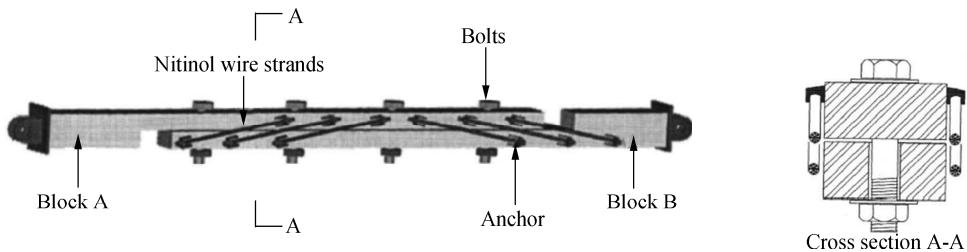


图 6 SFDB 构造图

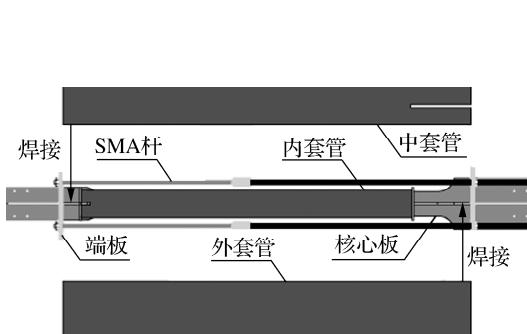


图 7 SMA 预拉杆式自定心屈曲约束支撑

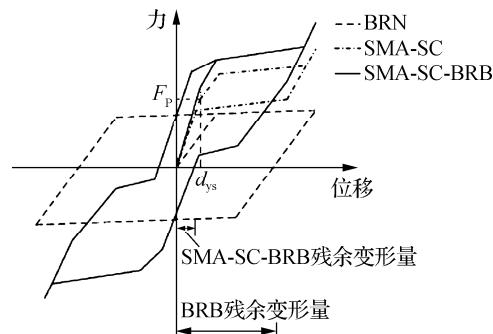


图 8 SMA-SC-BRB 的理论滞回曲线

文献[10–11]提出了一种采用记忆合金(SMA)棒和钢拉杆串联连接的单向受力型的自复位耗能支撑,该支撑通过记忆合金棒提供复位力和耗散地震能量,其由 SMA 棒、SMA 棒限位装置和钢拉杆组成,其构造见图 9。对该支撑进行了单向往复加载试验(图 10),然后又将 2 根 SMA 拉杆支撑交叉布置安装在单层的空间框架中进行振动台试验(图 11)。结果表明,该拉杆支撑能有效地减少结构的残余变形。

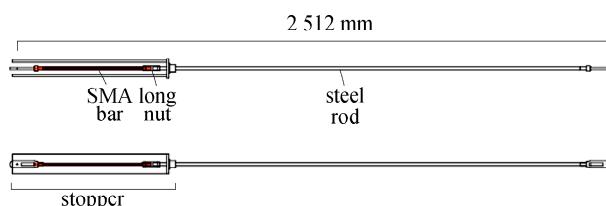


图 9 SMA 拉杆支撑构造图

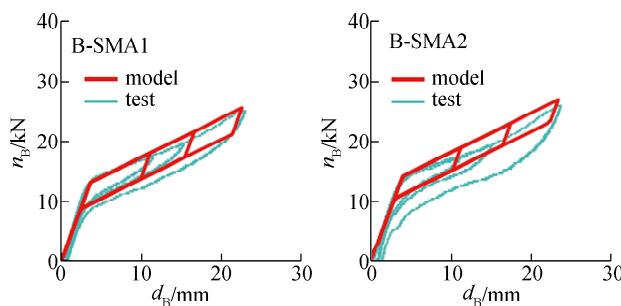


图 10 SMA 拉杆支撑滞回性能理论和试验对比

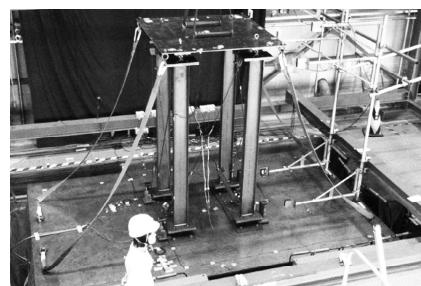


图 11 SMS 拉杆-框架振动台试验

文献[12]提出了一种新型的双向布置的双拉杆自复位耗能支撑,该支撑的耗能器为C形的金属,复位力由交叉布置的记忆合金(SMA)棒构成,复位耗能装置和4根拉杆铰接,支撑的安装布置和构造见图12。作者对其原型试件做了低周往复加载试验,试验结果见图13。结果表明:该支撑具有良好的复位效果和稳定的耗能能力。作者又对安装此支撑的框架和安装BRB等支撑的框架在OPENSEES中进行了弹塑性动力时程分析,分析结果表明,该支撑能够大幅度减小结构震后的残余变形。

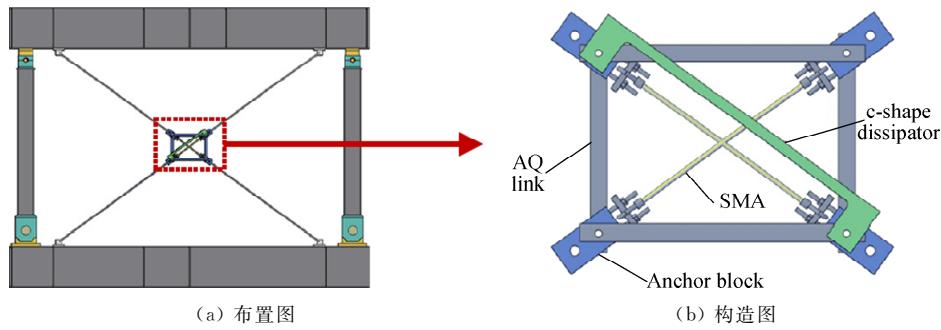


图12 双拉杆 SMA 复位耗能支撑安装布置和构造图

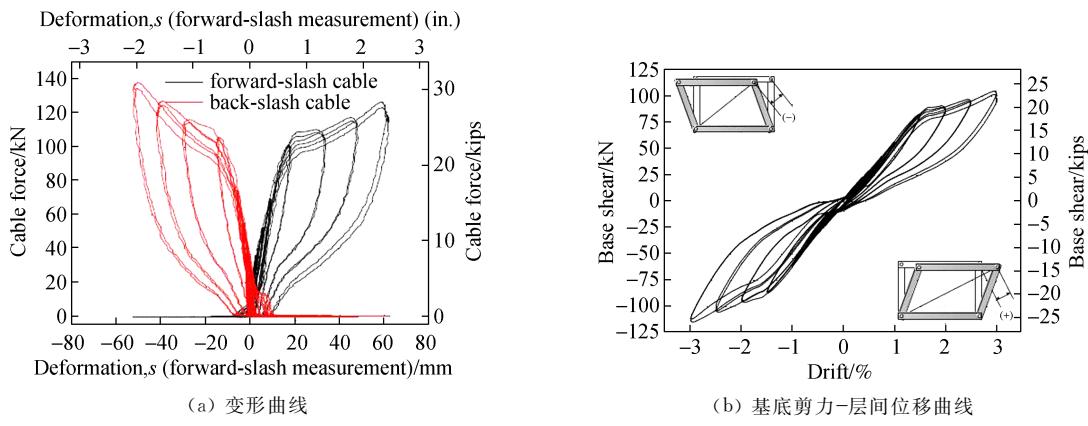


图13 双拉杆 SMA 复位耗能支撑-单层框架滞回加载曲线

### 3 碟形弹簧复位型

文献[13–15]等提出了采用碟形弹簧提供恢复力的自复位摩擦耗能支撑,该支撑通过预压碟形弹簧提供复位力,通过摩擦耗能。其由内管、外管、摩擦耗能装置和碟形弹簧组合组成,支撑构造见图14。作者建立了滞回特性的恢复力模型,并进行了低周往复加载试验,试验和预测结果对比见图15。结果表明,预压碟形弹簧自恢复耗能支撑具有稳定的“旗形”滞回曲线,且当碟形弹簧预压力能够克服摩擦耗能装置提供的摩擦力时,支撑具有良好的自恢复性能。

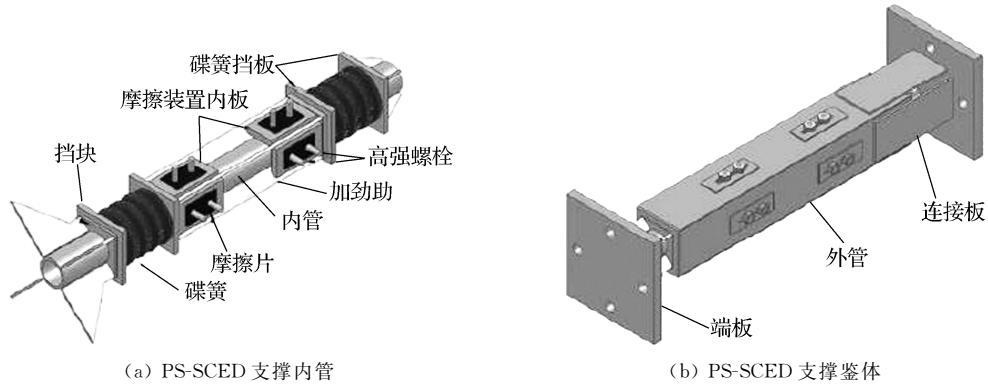


图14 预压碟形弹簧自复位耗能支撑构造图

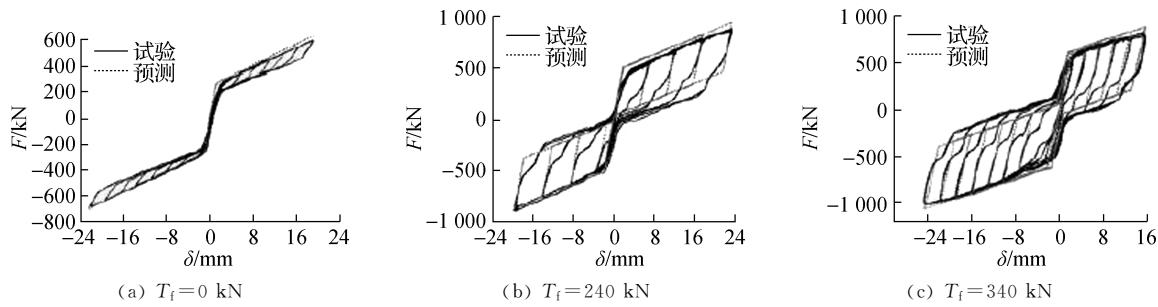


图 15 预压蝶形弹簧自复位耗能支撑试验和结果对比图

文献[16]提出了一种新型自复位粘滞阻尼耗能支撑,该支撑的耗能装置为磁流变液粘滞阻尼装置,复位装置为预先压缩的蝶形弹簧组,其原型试件见图 16。作者对该支撑试件进行了变频率和变蝶形弹簧预压力的循环往复加载试验,试验结果见图 17。试验结果表明,自复位粘滞阻尼耗能支撑具有良好的耗能能力且滞回曲线近似为理想的旗帜形;加载过程中支撑的刚度基本上为均匀变化且耗能激发荷载非常小;支撑的滞回性能受频率的影响较小;支撑的耗能能力和复位能力的稳定性较高。

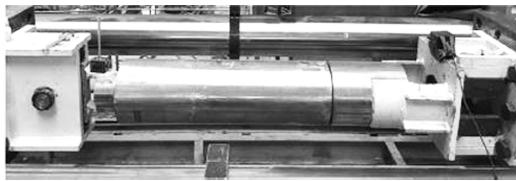


图 16 自复位粘滞阻尼耗能支撑

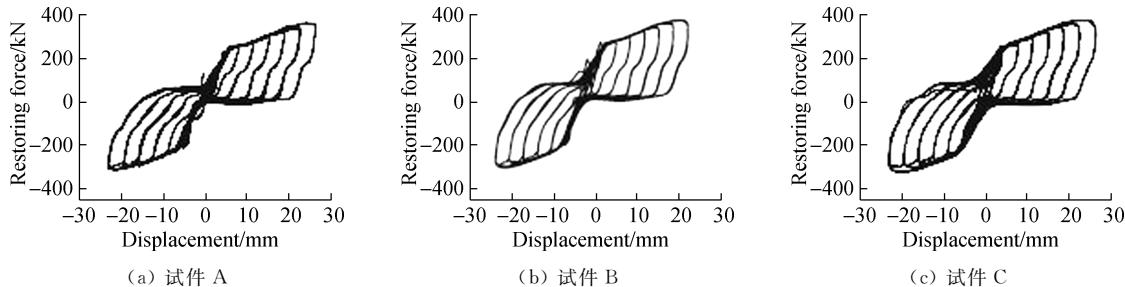


图 17 变频率和变蝶簧预压力试验

#### 4 不同类型自复位支撑的性能对比

基于复位类型的对比可知:现有的预应力筋复位型自复位耗能支撑相比于记忆合金复位型和蝶形弹簧复位型存在锚固难度大、预应力损失过大的缺点,但造价相对低廉;记忆合金复位型和蝶形弹簧复位型相对于预应力复位型自复位耗能支撑复位效果稳定、安装制作方便,但造价相对高昂,其中记忆合金复位型的力学性能对温度较敏感,容易受温度影响。基于耗能类型的对比可得:金属塑形变形耗能性能稳定,但也容易发生低周疲劳破坏;摩擦耗能则存在摩擦材料易老化和最大静摩擦力与滑动摩擦力差异大的问题;粘滞材料流动耗能存在对温度敏感和粘滞材料易泄露等弊端。基于受力特性的对比可得:双向受力支撑相比于单向受力支撑存在截面尺寸过大、构造复杂的缺点,但能承受双向的荷载;单向受力支撑则具有截面尺寸较小、轻质和充分利用高强材料的优点,但使用时需要双向布置。

#### 5 结语

从国内外已有的研究结果可以得出,具有复位功能的支撑与其他类型支撑相比具有以下显著优点:  
1)具有复位功能的支撑能够为变形后的结构提供恢复力,从而大幅度消除或减小结构的残余变形,便于结

构的震后修复;2)具有复位功能的支撑通过附设摩擦耗能器、软钢屈服耗能器或高阻尼橡胶耗能器等装置来耗散地震能量,保护了主体结构的安全,减小了主体结构的损伤;3)具有复位功能的支撑符合建筑工业化及结构设计重点由抗倒塌向可修复新型设计理念的转变,顺应现代结构发展的潮流。

但国内外关于具有复位功能的支撑的研究还不是非常成熟,各种类型的复位耗能支撑大都处于理论、试验和测试层面,鲜有实际工程应用。具有复位功能的支撑仍存在以下缺点:1)现有的自复位耗能大多构造复杂,对生产安装和锚固等工艺非常敏感,并且多为双向受力支撑,为避免受压屈曲问题,存在截面尺寸过大、自重过大、造价过高的弊端;2)现有的预应力筋复位型自复位耗能支撑受限于现有材料性能和锚固工艺的影响,在长期放置及加载过程中的预应力损失不可避免,从而影响自复位支撑的复位效果。因此,对具有复位功能的耗能支撑进行构造、造价和使用性能上的简化,提高自复位耗能支撑的经济性和适用性,成为了目前复位耗能支撑研究领域的热点。

### 参考文献:

- [1] 赵荣国,李卫平,陈锦标.世界地震灾害损失的统计[J].国际地震动态,1996(12):10-19
- [2] 郑通彦,冯蔚,郑毅.2014年中国大陆地震灾害损失述评[J].世界地震工程,2015,31(2):202-208
- [3] Stephen M.近期地震教训:建立更多可恢复性城市[J].建筑结构,2012,42(S1):1-8
- [4] 张爱林,叶全喜,詹欣欣,等.具有复位功能的支撑研究综述[J].北京工业大学学报,2016,42(9):13-38
- [5] Christopoulos C,Tremblay R,Kim H,et al. Self-centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures:Development and validation[J]. Journal of Structural Engineering,2008,134(1):96-107
- [6] 刘璐,吴斌.自复位防屈曲支撑钢框架减振效果分析[J].建筑结构学报,2016,37(4):93-101
- [7] 池沛,董军,彭洋.一种新型自复位耗能拉索支撑的理论研究与数值分析[J].振动与冲击,2016,35(21):171-176
- [8] Zhu S,Zhang Y. Seismic analysis of concentrically braced frame systems with self-centering friction damping braces[J]. Journal of Structural Engineering,2008,134(1):121-131
- [9] 谢钦,周臻,孟少平,等.SMA预拉杆式自定心屈曲约束支撑的滞回性能分析[J].东南大学学报(自然科学版),2014,44(4):799-804
- [10] Shrestha K,Omori T. Feasibility of tension braces using Cu-Al-Mn superelastic alloy bars[J]. Structural Control & Health Monitoring,2014,21(10):1304-1315
- [11] Araki Y,Shrestha K C. Shaking table tests of steel frame with superelastic Cu-Al-Mn SMA tension braces[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2016,45(2):297-314
- [12] Speicher M S,DesRoches R,Leon R T. Investigation of an articulated quadrilateral bracing system utilizing shape memory alloys[J]. Journal of Constructional Steel Research,2017,130:65-78
- [13] 徐龙河,代长顺,逯登成,等.自恢复耗能支撑框架结构滞回特性模拟分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(10):1049-1054
- [14] 徐龙河,樊晓伟,代长顺,等.预压弹簧自恢复耗能支撑受力性能分析与试验研究[J].建筑结构,2016,37(9):142-148
- [15] 徐龙河,代长顺,樊晓伟,等.预压弹簧自恢复耗能支撑子结构抗震性能研究[J].建筑结构,2017,38(6):155-162
- [16] Xu L,Xie X,Li Z. Development and experimental study of a self-centering variable damping energy dissipation brace[J]. Engineering Structures,2018,160:270-280

(责任编辑:湛江)