

连梁中安装 SMA 阻尼器框剪结构非线性分析

毛晨曦¹, 张予斌¹, 李 波¹, 王振营², 李 惠², 欧进萍^{2,3}

(1.中国地震局工程力学研究所,150080 哈尔滨;2.哈尔滨工业大学 土木工程学院,150090 哈尔滨;
3.大连理工大学 土木水利学院,116024 辽宁 大连)

摘 要:为改善钢筋混凝土框架-剪力墙结构中小跨高比连梁的脆性破坏模式,提出在连梁中安装形状记忆合金(shape memory alloy,简称 SMA)阻尼器,并采用数值分析对此类结构的抗震性能进行研究.以一幢阻尼器控制的 18 层平面框剪结构为例,对该结构进行 Pushover 分析及静力往复荷载作用下的非线性分析,研究了安装 SMA 阻尼器的连梁的两个设计参数(屈服力比和屈服位移比)取值对整体结构非线性性能的影响.分析结果表明:屈服力比对结构损伤模式影响显著,当屈服位移比相同时,屈服力比越小,阻尼器进入屈服越早,变形集中在阻尼器中,结构自复位能力越强;屈服力比相同时,随着屈服位移比增大,连梁中 SMA 阻尼器屈服被延后,结构中混凝土构件越早发生损伤.

关键词: 框架-剪力墙结构;连梁;形状记忆合金阻尼器;Pushover 分析;静力往复荷载

中图分类号: TU398⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2013)12-0070-08

Nonlinear analysis of reinforced concrete frame-shear wall structure
with shape memory alloy dampers in coupling beams

MAO Chenxi¹, ZHANG Yubin¹, LI Bo¹, WANG Zhenying², LI Hui², OU Jinping^{2,3}

(1.Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 150080 Harbin, China;
2.School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
3.School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, 116024 Dalian, Liaoning, China)

Abstract: To improve the brittle fracture mode of coupling beams with small span-depth ratio in RC frame-shear wall structure, a shape memory alloy (SMA) damper is installed into coupling beams in this study. The seismic performance of the structure is studied by numerical analysis. A planner 18-story frame-shear wall structure is utilized. SMA dampers are installed into coupling beams at each story. Static monotonic and cyclic loading are applied on the structure. Influence of two parameters of the coupling beam with SMA damper, the yield force ratio and the yield displacement ratio, on the nonlinear behavior of the whole structure is addressed. The analysis results indicate that the failure mode is remarkably affected by the yield force ratio. For the structures with the same yield displacement ratio, when their yield force ratio decrease, the dampers yield more early and deformation of the coupling beams is more easily to be concentrated in the dampers. At the same time, the structure has good re-centering ability. With the same yield force ratio, the increasing of yield displacement ratio results in the delay of SMA damper yielding and the concrete members damage early.

Key words: frame-shear wall structure; coupling beam; shape memory alloy damper; Pushover analysis; static cyclic load

收稿日期: 2013-04-15.
基金项目: 国家自然科学基金(91315301);地震行业科研专项资助项目(201308003);中国地震局工程力学研究所基本科研基金(2009-A01).
作者简介: 毛晨曦(1974—),女,副研究员,硕士生导师;
李 惠(1966—),女,教授,博士生导师;
欧进萍(1959—),男,博士生导师,中国工程院院士.
通信作者: 毛晨曦,maochenxi@iem.ac.cn.

框架-剪力墙结构被广泛用于高层建筑.根据延性抗震设计思想,在罕遇地震作用下,剪力墙连梁应首先屈服,形成塑性铰耗散地震能量,但由于连梁跨高比往往较小,易发生脆性剪切破坏,耗能能力有限.为改变连梁的不利失效模式,许多学者提出了改善方案,如:在连梁中采用斜向交叉暗

柱式配筋^[1]或复合斜筋^[2]等;采用钢连梁^[3]或劲性钢筋混凝土连梁^[4];在连梁中设置竖向钢阻尼器^[5]或软钢阻尼器^[6].这些方法在一定程度上提高了连梁的延性和耗能能力,但地震后混凝土连梁的损伤仍然较重,修复费时费力甚至难以修复.

形状记忆合金 (shape memory alloy, 简称 SMA) 是一种新型智能材料,具有超弹性特性.处于奥氏体状态的 SMA 在外力作用下将发生马氏体相变,外力消失后材料内部又发生马氏体逆相变,其加卸载应力-应变曲线呈现很好的滞回特性,并且只要应变幅值不超过 SMA 的极限可回复应变,卸载后材料自动回复到变形前的形状,没有残余变形.利用这一特性,国内外很多学者开展了相关研究,提出了各具特色的 SMA 被动阻尼器,并进行了大量试验研究^[7-12],包括对 SMA 阻尼器的疲劳性能的研究^[8-9].SMA 超弹性阻尼器的优点是阻尼器可自复位,地震后不需维修或替换.在目前开发的各种 SMA 材料中,丝材性能最为稳定,因此各国研究者提出的 SMA 阻尼器多采用 SMA 丝作为耗能核心材料.

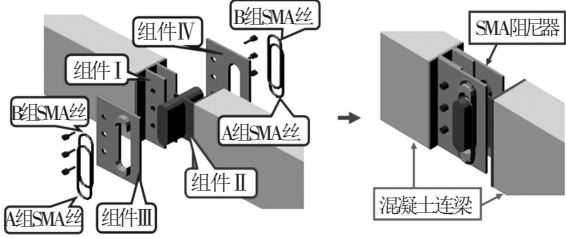
本文提出在框剪结构的连梁中安装 SMA 阻尼器,并通过合理设计,使连梁的变形大部分集中在阻尼器中,减轻混凝土的不可修复损伤,同时确保框架-剪力墙整体结构具有合理的损伤模式.以一幢 18 层平面框架-剪力墙结构为研究对象,在各层连梁中安装 SMA 阻尼器,进行结构在静力单调及往复荷载作用下的分析,研究了带 SMA 阻尼器连梁的设计参数对整体结构的抗侧能力、损伤模式及自复位能力的影响.

1 连梁中 SMA 阻尼器构造设计及简化本构模型

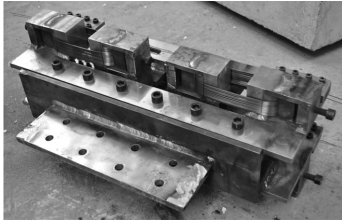
为改善传统钢筋混凝土连梁的变形和损伤模式,将普通钢筋混凝土连梁从跨中断开,安装文献^[13]设计的 SMA 阻尼器,构造设计见图 1(a).

阻尼器由 4 个钢组件构成:组件 I、II 预埋在断开的连梁悬臂端,组件 III、IV 通过其上预留的椭圆形孔洞套在组件 II 上,并用螺栓与组件 I 固定;在连梁前后两侧分别有 A、B 两组 SMA 丝,A 组 SMA 丝连梁前侧缠绕在组件 II 上端和组件 III 下端,在连梁后侧缠绕在组件 II 上端和组件 IV 下端,B 组 SMA 丝在连梁前侧缠绕在 II 下端和组件 III 上端,在连梁后侧缠绕在组件 II 下端和组件 IV 上端.由于这种特殊的构造设计,在水平地震作用下,不论墙肢向哪一侧振动,总有一组 SMA 丝工作耗能.图 1(b)是根据上述原理加工制造的 1/3

缩尺比 SMA 阻尼器,核心耗能元件为直径 1.2 mm 的 NiTi 合金丝,每个受力方向缠绕 96 圈,每根丝的工作长度为 120 mm.



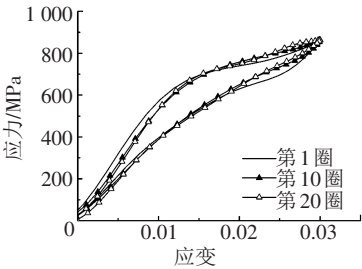
(a) 阻尼器构造设计



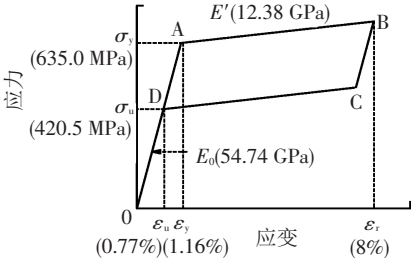
(b) 1/3 缩尺比的 SMA 阻尼器

图 1 SMA 阻尼器构造设计及照片

根据文献^[14]研究结果:室温条件下,直径为 1.2 mm 的 SMA 丝在加载频率为 3 Hz 的正弦荷载作用下的应力-应变曲线以及 SMA 丝分段线性化的简化本构模型,如图 2(a)和(b)所示.图中 ε_y 、 ε_u 和 ε_r 分别为材料的屈服应变、卸载回复应变和极限可回复应变, σ_y 、 σ_u 为材料的屈服应力、卸载回复应力, E_0 、 E' 代表材料的初始弹性模量、屈服后弹性模量.



(a) SMA 丝的应力-应变曲线



(b) SMA 丝的简化本构模型

图 2 SMA 丝应力-应变曲线及简化本构模型

根据 SMA 材料的本构模型、SMA 阻尼器的构造设计和工作原理,可得到图 1(a)中 SMA 阻尼器的简化力学模型和相关参数,见图 3(a).需要说明的是,由于本文提出的 SMA 阻尼器是竖向布置在连梁中部,因此阻尼器的控制力也是竖向

作用在连梁上.图 3(a)中, F_{dy} 、 Δ_{dy} 为阻尼器的屈服力、屈服位移; F_{du} 、 Δ_{du} 为阻尼器的卸载回复力及相应位移; k_d 为阻尼器的初始刚度 ($k_d = F_{dy}/\Delta_{dy}$); k'_d 为阻尼器的屈服后刚度. 图 3(b) 给出了图 1(b) 中 SMA 阻尼器在各位移幅值下的力-变形曲线, 以及根据该曲线拟合得到的该阻尼器各特征参数.

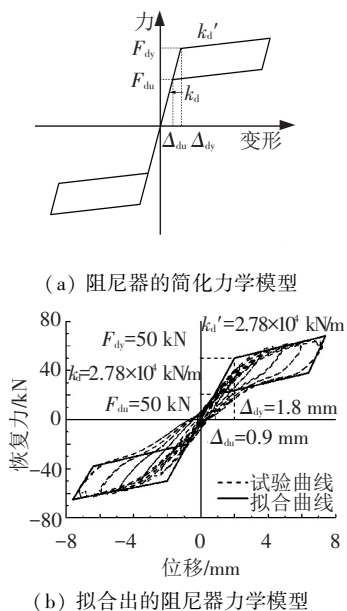


图 3 阻尼器简化力学模型

为采用 ABAQUS 软件对安装 SMA 阻尼器的框剪结构进行非线性分析, 本文采用 FORTRAN 语言编写了 SMA 材料的简化本构模型子程序, 并通过 ABAQUS 中的用户材料子程序接口 UMAT, 将其添加到 ABAQUS 材料库中^[15].

2 带 SMA 阻尼器连梁设计参数

SMA 阻尼器对连梁变形及耗能特征的改善, 以及对整体结构损伤模式的控制, 不仅与阻尼器本身特征参数的取值有关, 更大程度上取决于阻尼器特征参数与混凝土梁端设计参数的合理匹配. 本文定义了两个特征参数: 屈服力比及屈服位移比. 这两个参数反映了阻尼器参数与梁端设计参数的匹配关系, 因此称为带 SMA 阻尼器耗能连梁的特征设计参数.

1) 屈服力比. 若要连梁发生合理失效模式, 阻尼器屈服力 F_{dy} 是一个重要设计参数. 若 F_{dy} 过大, 接近连梁极限承载力时, 阻尼器还未充分发挥耗能作用, 连梁就已失效; 若 F_{dy} 过小, 则耗能连梁刚度较小, 会削弱框剪结构的整体刚度. 对连梁极限承载力, 应按照连梁实际配筋, 计算正截面承载力, 再反推得到连梁的抗剪承载力, 同时, 计算斜截面承载力, 取两者的最小值, 作为连梁的抗剪承载

力. 考虑到混凝土连梁“强剪弱弯”的设计原则, 往往连梁的斜截面承载力远大于由正截面承载力反推得到的梁端抗剪承载力, 因此将阻尼器的屈服力 F_{dy} 与连梁按正截面抗弯承载力 M_{cb} 反算出来的抗剪承载力 Q_b 相比, 作为第一个设计参数——屈服力比:

$$\Gamma = F_{dy}/Q_b, \quad (1)$$

式中 $Q_b = M_{cb}/(l_c/2)$, l_c 为连梁净跨.

2) 屈服位移比. 为了控制 SMA 阻尼器屈服与梁端混凝土出现损伤的次序, 同时也为了工程应用方便, 定义阻尼器的屈服位移 Δ_{dy} 比上连梁净跨 l_c 作为第二个设计参数——屈服位移比:

$$\Delta = \Delta_{dy}/l_c. \quad (2)$$

当确定了合适的 SMA 阻尼器与连梁屈服力比的数值, 即可根据梁端极限抗剪承载力推算 SMA 阻尼器的屈服力, 进而根据单根丝的屈服应力和面积计算阻尼器中所需要的 SMA 丝的根数 (即 SMA 丝的缠绕圈数); 然后, 根据预计的阻尼器与连梁的屈服位移比, 推算阻尼器中 SMA 丝的屈服位移, 进而根据 SMA 丝屈服位移与屈服应变的关系, 计算得到阻尼器中 SMA 丝的长度.

3 结构概况及有限元模型

3.1 结构概况

根据中国现行结构设计规范^[17] 设计了一幢 18 层钢筋混凝土框架-剪力墙结构, 在每层连梁跨中安装 SMA 阻尼器, 通过改变连梁中阻尼器设计参数取值, 研究其对整个框架-剪力墙结构损伤模式的影响. 结构底层层高 4.5 m, 其他层层高 3.6 m, 总高度 65.7 m. 结构位于 II 类场地, 设计地震分组第一组, 设防烈度 8 度, 框架和剪力墙抗震等级均为一级. 该结构采用的材料、构件尺寸及配筋情况见文献^[16].

3.2 结构有限元模型

利用软件 ABAQUS 建立了上述结构的有限元模型. 用壳单元 S4R 模拟墙肢和连梁; 用梁单元 B31 模拟框架、墙肢端柱和暗柱; 墙肢端柱、暗柱中的钢筋也采用梁单元 B31 模拟, 墙肢内分布筋及连梁箍筋、纵筋以钢筋层的形式弥散在壳单元中. 每层连梁跨中安装 SMA 阻尼器. 连梁的模型由两片 L 形悬臂梁、4 根铰接链杆和 SMA 阻尼器组成, 在实际结构中, 断开连梁间的轴力是通过楼板传递的, 模型中采用四根水平链杆来模拟楼板传递轴力的作用, 用只承受拉压变形的桁架单元 T3D2 模拟 SMA 阻尼器. 图 4 给出了结构和安装 SMA 阻尼器的连梁的有限元模型.

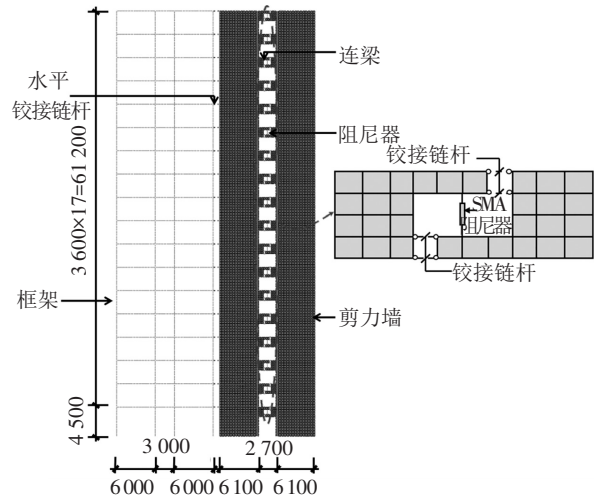
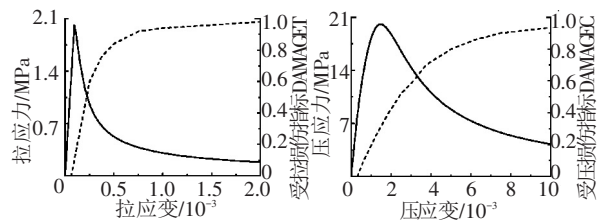
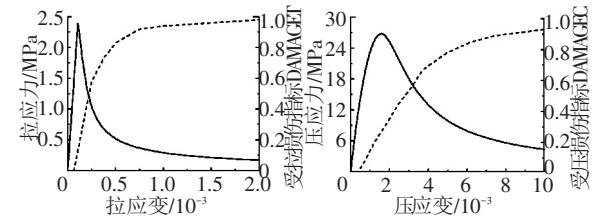


图 4 结构及附加 SMA 阻尼器连梁的有限元模型

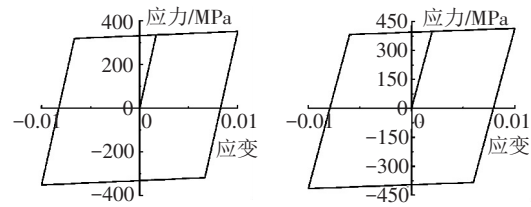
混凝土采用规范^[17]中的混凝土单轴应力-应变曲线,并采用 ABAQUS 软件中提供的混凝土损伤塑性模型;钢筋也采用规范^[17]中折线形式的弹性-线性强化模型.图 5 给出了混凝土和钢筋本构模型形式,其主要参数见表 1、2,材料本构模型中的数据均采用标准值.



(a) C30 混凝土本构模型及损伤参数



(b) C40 混凝土本构模型及损伤参数



(c) HRB335 钢筋本构模型 (d) HRB400 钢筋本构模型

图 5 混凝土与钢筋本构模型

表 1 混凝土本构模型中的主要参数

材料	弹性模量/ MPa	泊松比	开裂应力/ MPa	开裂应变	受压峰值 应力/MPa	受压峰值应变	受压极限应变
C30	25 680	0.2	2.01	9.48×10^{-5}	20.1	1.47×10^{-3}	3.38×10^{-3}
C40	31 100	0.2	2.39	1.04×10^{-4}	26.8	1.59×10^{-3}	3.18×10^{-3}

表 2 钢筋本构模型中的主要参数

材料	弹性模量/GPa	泊松比	屈服应力/MPa	钢筋硬化段斜率/GPa
HRB335	200	0.3	335	2
HRB400	200	0.3	400	2

经计算,各层连梁端部的正截面抗弯承载力 $M_{cb}=1\,230.2\text{ kN}\cdot\text{m}$,按抗弯承载力换算的连梁端部抗剪承载力 $Q_b=911.3\text{ kN}$.为研究 SMA 阻尼器对整体结构抗侧能力、损伤模式、自复位能力的影响,选取 5 种屈服力比($\Gamma=0.4、0.6、0.8、1.0、1.2$)和 3 种屈服位移比($\Delta=1/800、1/620、$

$1/465$)的附加 SMA 阻尼器结构进行分析.各结构中 SMA 阻尼器的屈服力 F_{dy} 、屈服位移 Δ_{dy} 和阻尼器的初始刚度 k_d ,见表 3.若采用直径 1.2 mm 的奥氏体 SMA 丝,则各参数情况下 SMA 阻尼器中所需要的 SMA 丝缠绕圈数与丝的工作长度也列于表 3.

表 3 带 SMA 阻尼器连梁的设计参数

Γ	Δ		
	$\Delta=1/800(\Delta_{dy}=3.4\text{ mm})$	$\Delta=1/620(\Delta_{dy}=4.4\text{ mm})$	$\Delta=1/465(\Delta_{dy}=5.8\text{ mm})$
$\Gamma=0.4(F_{dy}=364.5\text{ kN})$	$k_d=108.0\text{ kN/mm}$ (293 圈,261.2 mm)	$k_d=83.7\text{ kN/mm}$ (293 圈,337.1 mm)	$k_d=62.8\text{ kN/mm}$ (293 圈,449.4 mm)
$\Gamma=0.6(F_{dy}=546.8\text{ kN})$	$k_d=162.0\text{ kN/mm}$ (439 圈,261.2 mm)	$k_d=125.6\text{ kN/mm}$ (439 圈,337.1 mm)	$k_d=94.2\text{ kN/mm}$ (439 圈,449.4 mm)
$\Gamma=0.8(F_{dy}=729.0\text{ kN})$	$k_d=216.0\text{ kN/mm}$ (585 圈,261.2 mm)	$k_d=167.4\text{ kN/mm}$ (585 圈,337.1 mm)	$k_d=125.6\text{ kN/mm}$ (585 圈,449.4 mm)
$\Gamma=1.0(F_{dy}=911.3\text{ kN})$	$k_d=270.0\text{ kN/mm}$ (731 圈,261.2 mm)	$k_d=209.3\text{ kN/mm}$ (731 圈,337.1 mm)	$k_d=156.9\text{ kN/mm}$ (731 圈,449.4 mm)
$\Gamma=1.2(F_{dy}=1\,093.6\text{ kN})$	$k_d=324.0\text{ kN/mm}$ (877 圈,261.2 mm)	$k_d=251.1\text{ kN/mm}$ (877 圈,337.1 mm)	$k_d=188.3\text{ kN/mm}$ (877 圈,449.4 mm)

4 整体结构 Pushover 分析

为研究荷载作用下,结构中不同类型构件的破坏次序,本文对上述结构施加倒三角形侧向荷载,对结构进行 Pushover 分析.

在对 Pushover 计算的结果进行分析时,除通过结构的基底剪力-顶点位移曲线观察结构的抗震能力,还记录了不同类型构件出现损伤的特征点.根据阻尼器先屈服耗能、其他构件后损伤;次

要构件先破坏、主要构件后损伤的设计目标,确定了连梁中安装 SMA 阻尼器的框剪结构的合理损伤模式为:阻尼器屈服、连梁钢筋屈服、框架梁钢筋屈服、墙肢底端钢筋屈服、墙肢底端混凝土压碎、框架柱钢筋屈服、阻尼器破坏(SMA 丝超过极限可回复应变).

图 6、7 给出了不同连梁设计参数下结构在推覆过程中的基底剪力-顶点位移曲线,以及在此过程中不同类型构件出现损伤的顺序.

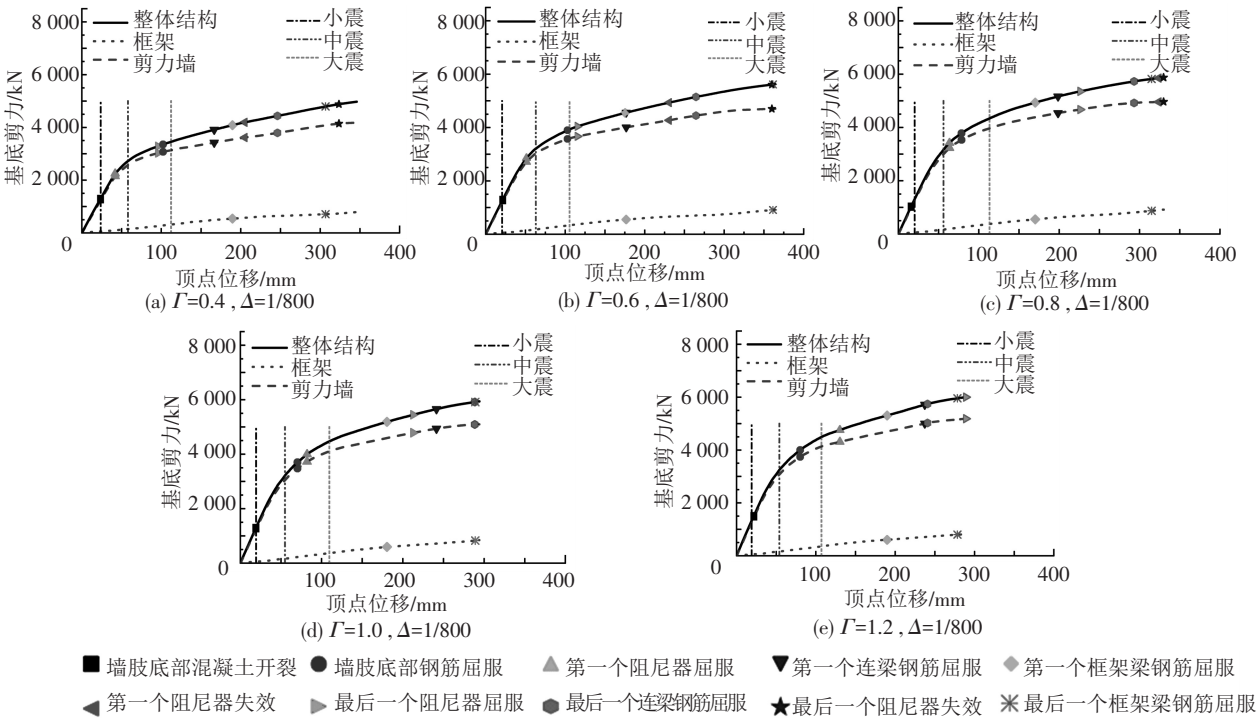


图 6 不同屈服力比情况下结构基底剪力-顶点位移曲线 ($\Delta = 1/800$)

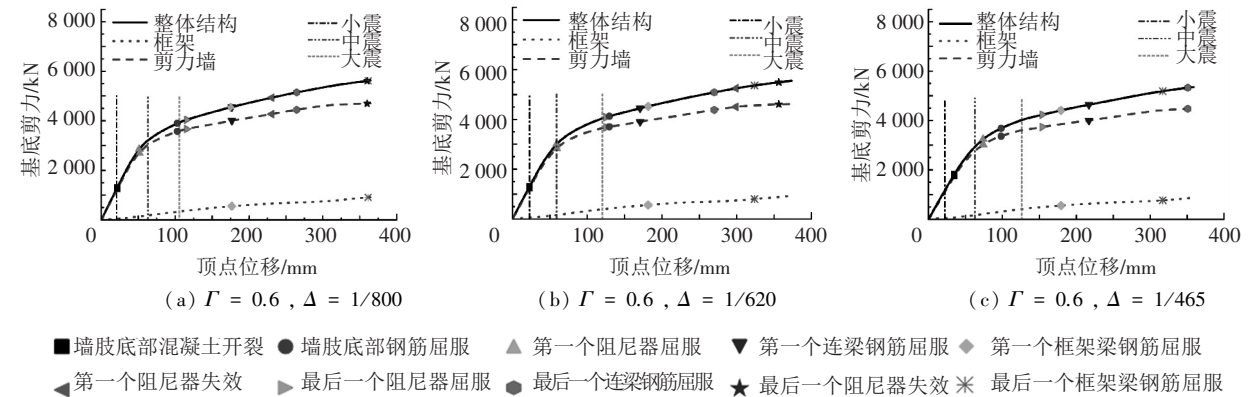


图 7 不同屈服位移比情况下结构基底剪力-顶点位移曲线 ($\Gamma = 0.6$)

图 6 为屈服位移比 $\Delta = 1/800$ 时,不同的屈服力比下结构的基底剪力-顶点位移曲线.为观察不同抗侧力体系提供的抗震能力,图 6 分别给出了结构中的框架、剪力墙以及整体结构的基底剪力-顶点位移曲线.为了观察在不同水平地震力作用下结构的性能,本文还采用 ATC-40^[18] 中所述的能力谱法找到该结构分别在 8 度小震、中震及

大震下的性能点,并标在各图中(图中的三条竖向虚线与整体结构基底剪力-顶点位移曲线的交点).在屈服位移比相同的情况下,随着屈服力比的增大,连梁刚度增大,从而整个结构的抗侧能力也增大了,但过大的屈服力比会导致连梁中的阻尼器难以屈服,从而损伤集中在阻尼器两端的混凝土梁中,这一点可以从各图中不同构件损伤出

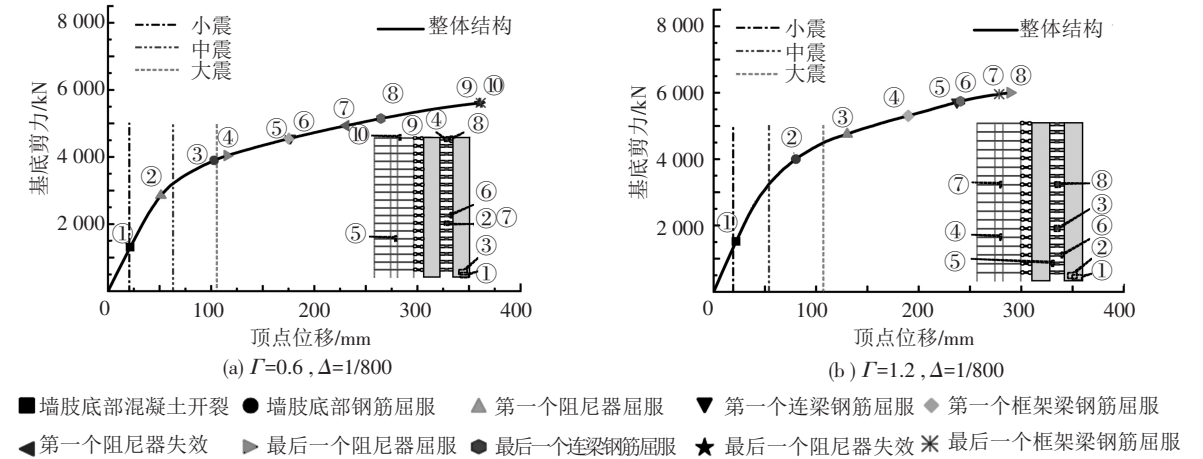
现的次序观察到: 当屈服力比 $\Gamma = 0.4$ 时, 墙肢底部混凝土先开裂, 随后连梁中的 SMA 阻尼器屈服, 当侧向力进一步加大, 墙肢底部钢筋与混凝土连梁钢筋屈服, 这一构件损伤次序是基本合理的; 但随着屈服力比的增大, 当 $\Gamma > 1.0$ 之后, 出现了阻尼器屈服晚于墙肢底部钢筋屈服的现象, 在地震力作用下, 阻尼器将不能及时有效屈服耗散地震能量, 结构损伤也将集中在墙肢及混凝土的连梁中. 此外, 从图 6 还观察到, 当 $\Gamma < 0.6$, 阻尼器在小震下处于弹性, 中震和大震下屈服; 但当 $\Gamma > 0.6$ 后, 阻尼器在中震下还未屈服. 因而根据图 6 分析, 对于连梁中安装 SMA 阻尼器后, 阻尼器与梁端的屈服力比, 本文建议取值应小于 0.6.

图 7 为屈服力比 $\Gamma = 0.6$ 时, 不同屈服位移比下结构的基底剪力-顶点位移曲线, 图中同样标出了小震、中震和大震的性能点, 以及不同类型构件出现损伤的特征点. 从图中看出, 屈服位移比对整体结构抗侧力能力并无明显影响, 但会影响不同类型构件出现损伤的次序, 也即影响结构的损伤模式. 随屈服位移比的增大, 连梁中 SMA 阻

尼器屈服将被延后, 结构中混凝土构件出现损伤将被提前, 如图 7 所示, 当屈服位移比增大, 墙肢底端钢筋屈服提前. 此外, 如屈服位移比过大, 可能出现连梁中 SMA 阻尼器在中震下不能及时屈服耗能的问题, 如图 7 中 $\Delta = 1/465$ 的工况. 因此, 根据图 7 的分析, 本文建议连梁中安装 SMA 阻尼器后, 阻尼器的屈服位移比取值应小于 $1/620$.

在图 6、7 中, 均是墙肢底部的混凝土最先开裂, 这是因为在水平荷载作用下, 墙肢底部的弯矩最大, 并且随着外力的增大最先达到混凝土的开裂弯矩. 另外, 由于框架-剪力墙结构中的剪力墙刚度很大, 变形能力相对较小而框架的变形能力比较强, 所以在推覆分析过程中, 损伤多集中在剪力墙中, 框架损伤较轻, 只有框架梁的钢筋发生了屈服, 而框架柱的钢筋并没有发生屈服.

为了进一步说明损伤在结构各构件中的分布, 图 8 以屈服位移比相同 ($\Delta = 1/800$), 屈服力比不同 ($\Gamma = 0.6$ 与 $\Gamma = 1.2$) 的两种工况为例, 详细分析了整体结构在推覆过程中构件损伤的次序, 并在图中标出了损伤构件在结构中的分布位置.



5 整体结构往复荷载作用下分析

除 Pushover 分析, 本文还对上述结构施加了静力往复荷载, 以观察不同的连梁阻尼器设计参数对整体结构在地震荷载作用后的自复位能力的影响. 根据 Pushover 分析的结果, 屈服力比对结构的性能影响较大, 所以本节重点对相同屈服位移比 ($\Delta = 1/800$), 不同屈服力比的 4 种结构在往复荷载作用下的反应进行分析.

5.1 加载制度

基于以上 Pushover 分析的分析结果, 利用能力谱法, 可以获得屈服位移比 $\Delta = 1/800$, 屈服力比分别为 $\Gamma = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ 的 4 种工况在小震、中震、大震下的性能点, 表 4 列出了结构达到

性能点时所承受的水平外力.

表 4 各性能点处结构的水平外力 kN

工况	小震	中震	大震
$\Gamma = 0.4 (\Delta = 1/800)$	1 307	2 723	3 453
$\Gamma = 0.6 (\Delta = 1/800)$	1 258	3 207	3 929
$\Gamma = 0.8 (\Delta = 1/800)$	1 306	3 160	4 341
$\Gamma = 1.0 (\Delta = 1/800)$	1 307	3 209	4 470

采用力控制加载, 分别以结构在小震、中震、大震性能点处水平外力作为加载幅值, 每一个幅值下都对一个完好结构往复加载一周.

5.2 结果分析

图 9 给出了每种连梁阻尼器设计参数工况下, 结构在分别相当于小震、中震、大震水平的往

复荷载作用下的基底剪力-顶点位移曲线。

从图 9 可看出:1)小震性能点加载幅值下,结构处于弹性阶段,没有残余变形,中震性能点加载幅值下,结构开始进入塑性阶段,卸载完成后,结构虽有残余变形,但是很小,大震性能点加载幅值下,结构发生严重的塑性变形,卸载完成后,产生很大的残余变形(约为 14~26 mm);2)结构的

屈服位移比相同时,屈服力比越小,连梁的变形越容易集中在阻尼器中,梁端混凝土的损伤越小,自复位能力越强,因而结构的残余变形也越小;3)与前述 Pushover 分析结果相似,随着屈服力比的增大,阻尼器进入屈服越晚,墙肢底部钢筋发生屈服越早,结构的损伤模式逐渐趋于不合理。

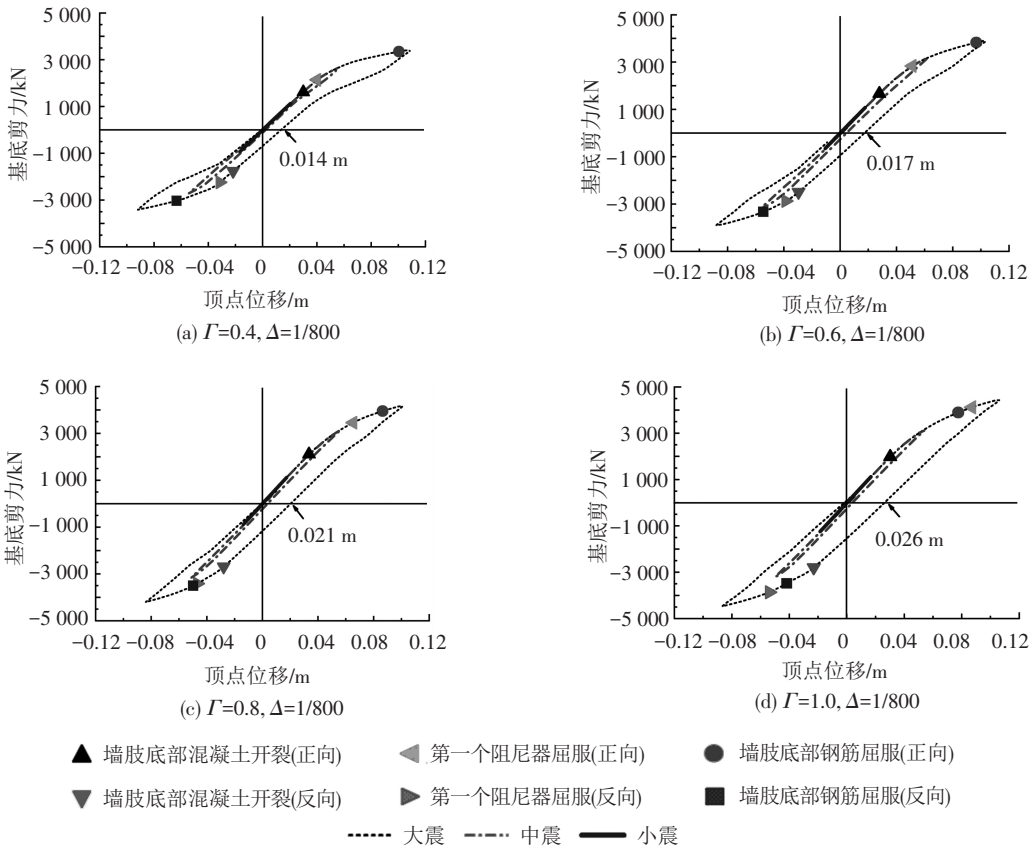


图 9 往复荷载下相同屈服位移比结构的基底剪力-顶点位移曲线

6 结 论

- 1) 在单调荷载作用下,屈服力比 Γ 对结构的抗侧能力、损伤模式的影响要大于屈服位移比 Δ . 屈服位移比 Δ 相同的情况下,屈服力比 Γ 越小,阻尼器进入屈服耗能状态越早,变形和损伤集中在阻尼器中,结构的损伤模式比较合理。
- 2) 在往复荷载作用下,屈服位移比 Δ 相同的情况下,屈服力比 Γ 越小,结构自复位能力越强. 因此综合考虑以上两条结论,屈服力比 Γ 取小于 0.6 较为合理。
- 3) 屈服力比 Γ 相同时,随着屈服位移比 Δ 的增大,连梁中 SMA 阻尼器屈服将被延后,则结构中混凝土构件的损伤将被提前,并且,过大的屈服位移比可导致连梁中 SMA 阻尼器中震下不能及时屈服耗能. 建议屈服位移比 Δ 取值应小于 $1/620$.

参考文献

- [1] PAULAY T. Coupling beams of reinforced concrete shear walls [J]. Journal of The Structural Division, 1971, 97 (3): 843-862.
- [2] 傅剑平, 皮天祥, 韦锋, 等. 钢筋混凝土联肢墙小跨高比复合斜筋连梁抗震性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 57-64.
- [3] PARK W S, YUN H D. Seismic behavior and design of steel coupling beams in a hybrid coupled shear wall systems [J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(23): 2472-2484.
- [4] 王祖华, 桑文胜. 劲性钢筋混凝土连梁的性能与计算方法 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 1995, 23(1): 34-43.
- [5] 潘超, 翁大根. 连梁内设置竖向变形阻尼器的耗能剪力墙体系减震分析与设计 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 39-46.

- [6] 滕军, 马伯涛, 周正根, 等. 提高联肢墙抗震性能的连接耗能构件关键技术 [J]. 工程抗震与改造加固, 2007, 29(5): 1-6.
- [7] 倪立峰, 李秋胜, 李爱群, 等. 新型形状记忆合金阻尼器的试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3): 145-148.
- [8] DOLCE M, CARDONE D. Mechanical behavior of shape memory alloys for seismic applications 1: martensite and austenite NiTi bars subjected to torsion [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(11): 2631-2656.
- [9] DOLCE M, CARDONE D. Mechanical behavior of shape memory alloys for seismic applications 2: austenite NiTi wires subjected to tension [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(11): 2657-2677.
- [10] DOLECE M, CARDONE D, MARNETTO R. Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29: 945-968.
- [11] LINDT J W, POTTS A. Shake table testing of a superelastic shape memory alloy response modification device in a wood shear wall [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(8): 1343-1352.
- [12] 李宏男, 钱辉, 宋钢兵, 等. 一种新型 SMA 阻尼器的试验和数值模拟研究 [J]. 振动工程学报, 2008, 21(2): 179-184.
- [13] 王立军, 毛晨曦, 董金芝. 安装形状记忆合金阻尼器的剪力墙结构抗震性能分析 [J]. 世界地震工程, 2011, 27(3): 101-107.
- [14] LI Hui, MAO Chenxi, OU Jinping. Experimental and theoretical study on two types of shape memory alloy devices [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2008, 37(3): 407-426.
- [15] 董金芝, 毛晨曦, 曹鹏. 基于 ABAQUS 的形状记忆合金本构研究 [J]. 低温建筑技术, 2010, 12: 51-52.
- [16] 王大磊. 连梁中安装 SMA 阻尼器的框架-剪力墙结构抗震试验研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.
- [17] GB50010—2010 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [18] ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete building [R]. Redwood City, California: Applied Technology Council, 1996.

(编辑 赵丽莹)