

文章编号:1674-2974(2016)07-0050-07

外置金属阻尼器的新型自复位 约束砌体墙抗震性能研究*

胡晓斌^{1†}, 李文霞², 刘坤¹, 陈璐¹

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013)

摘要:研制了一种同时布置体内无黏结预应力筋和外置金属阻尼器的新型自复位约束砌体墙,通过拟静力试验研究了该自复位墙在低周反复荷载作用下的滞回性能,重点探明了预应力筋初始预应力、金属阻尼器屈服荷载大小对其耗能性能的影响,最后基于试验结果建立了数值分析模型.研究表明:该自复位约束砌体墙滞回曲线呈“旗形”,在较大位移下未出现明显的损伤,且在加载及卸载过程中没有明显的强度和刚度退化;随着预应力筋初始预应力的增加,墙体的自复位性能增强,但其耗能能力会降低;随着金属阻尼器屈服荷载的增大,墙体的耗能能力增强,但会产生少量的残余变形;数值模拟结果与试验结果吻合较好,表明本文所提出的分析模型能较好地模拟该自复位约束砌体墙的力学行为.

关键词:新型自复位约束砌体墙;外置金属阻尼器;拟静力试验;抗震性能;数值分析

中图分类号: TU352

文献标识码: A

Seismic Performance of a New Type of Self-centering Confined Masonry Wall with External Steel Dampers

HU Xiao-bin^{1†}, LI Wen-xia², LIU Kun¹, CHEN Lu¹

(1. College of Civil Engineering, Wuhan Univ, Wuhan, Hubei 430072, China;

2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co, Ltd, Jinan, Shandong 250013, China)

Abstract: A new type of self-centering confined masonry wall equipped with both unbounded tendons and external steel dampers was proposed. Its hysteresis behavior was studied through pseudo-static tests under cyclic loading, which focused on investigating the influence of the initial prestress of the tendon and the yield load of dampers on the energy dissipation capacity of the proposed wall. Based on the test results, a simplified numerical analysis model was established. It is showed that flag shape was a typical hysteresis curve of the wall. During the loading and unloading process, the wall specimen remained intact, and significant degradation of strength and stiffness was not observed. It is also found that the increase of the initial prestress in tendons led to the enhancement of the self-centering ability but the reduction of the energy dissipation capacity of the wall on the other hand, when the yield force of steel dampers increased, the energy dissipation capacity of the wall was improved, but some residual displacement occurred. Moreover, the numerical analysis results matched well with the test results, which indicate that the proposed numerical models can well capture the mechanical behavior of the wall.

* 收稿日期:2015-09-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51208386, 51578429), National Natural Science Foundation of China(51208386, 51578429)

作者简介:胡晓斌(1979-),男,湖北钟祥人,武汉大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: newhxb@126.com

Key words: a new type of self-centering confined masonry wall; external steel damper; pseudo-static test; seismic performance; numerical analysis

自复位结构是一种新型的抗震结构形式,近年来得到了研究者和工程技术人员的高度重视.和传统的抗震结构相比,自复位结构最为突出的特点在于卸载后变形能完全或基本恢复.在强震作用下,自复位结构基本不产生残余变形,震后不需或经少量的维修即可恢复正常使用,从而大大地降低了震后修复成本^[1-3].自复位结构体系可分为3种类型:自复位框架结构、自复位墙结构和自复位支撑框架结构,其中自复位墙主要由3部分组成:墙体、后张拉无黏结预应力筋和阻尼器.与普通的抗震墙不同,自复位墙在墙底(或沿墙高)设置水平缝,在水平荷载作用下,墙体能绕墙底两端产生微小的转动,即所谓的摇摆响应.

对于自复位墙结构,国内外少数学者开展了相关的理论分析、试验研究和数值模拟工作.在理论分析方面,Armouti^[4]首先建立了自复位混凝土墙的理论分析模型,其中混凝土墙简化成一个刚体,预应力筋采用弹簧来模拟,墙底与基础的接触采用位于两端的只受压连接模拟.在试验研究方面,Perez等^[5-7]设计了5个6层自复位混凝土墙进行拟静力试验,结果表明自复位混凝土墙能承受很大的非线性侧向变形而不发生显著的破坏,并且能保持自复位性能,不产生残余变形.Toranzo等^[8-11]对未布置预应力筋的自复位约束砌体墙,提出了直接基于位移的抗震设计方法,并对一缩比为40%的3层自复位约束砌体墙模型进行了振动台试验,试验模型考虑了楼板和边柱的作用.试验结果表明自复位约束砌体墙能极大地减小结构的损伤,提高传统砌体结构的抗震性能.在数值模拟方面,Kurama^[12]针对自复位混凝土墙,建立了基于DRAIN-2DX纤维模型梁柱单元的分析模型,并进行了非线性地震反应分析.Toranzo^[9]针对未布置预应力筋的自复位约束砌体墙,提出了用于有限元分析的数值分析模型,其中墙体采用桁架模拟,墙底设置一组只受压的弹簧来模拟墙和基础间的接触,阻尼器通过弹簧模拟.

从以上可看出,目前的研究主要针对自复位混凝土墙,对于自复位约束砌体墙的研究很少,且已有的研究中并未布置预应力筋,而预应力筋对于提高墙体的自复位能力具有重要意义^[13-14].基于此,本文提出一种同时布置体内无黏结预应力筋和外置金属阻尼器的新型自复位约束砌体墙,首先通过拟静力试验研究该新型自复位墙在低周反复荷载作用下的滞回性能,然后基于试验结果,提出适用于该新型

自复位约束砌体墙的数值分析模型.

1 外置金属阻尼器的新型自复位约束砌体墙研制

1.1 墙体构造

如图1所示,墙体采用砌体砌筑而成,周边设置混凝土构造柱和圈梁以提供约束,构造柱下部预埋双头螺栓以连接金属阻尼器.为防止墙体发生平面外倾覆,约束砌体墙置于凹槽型基础梁中.基础梁肩部预埋螺栓,通过连接件(图1(c))连接金属阻尼器.墙底及基础梁间设置水平缝,在水平荷载作用下,约束砌体墙可绕墙底两端产生微小的转动.预应力筋穿过竖向贯穿约束砌体墙及基础梁的预留管道,上下两端通过锚具锚固.

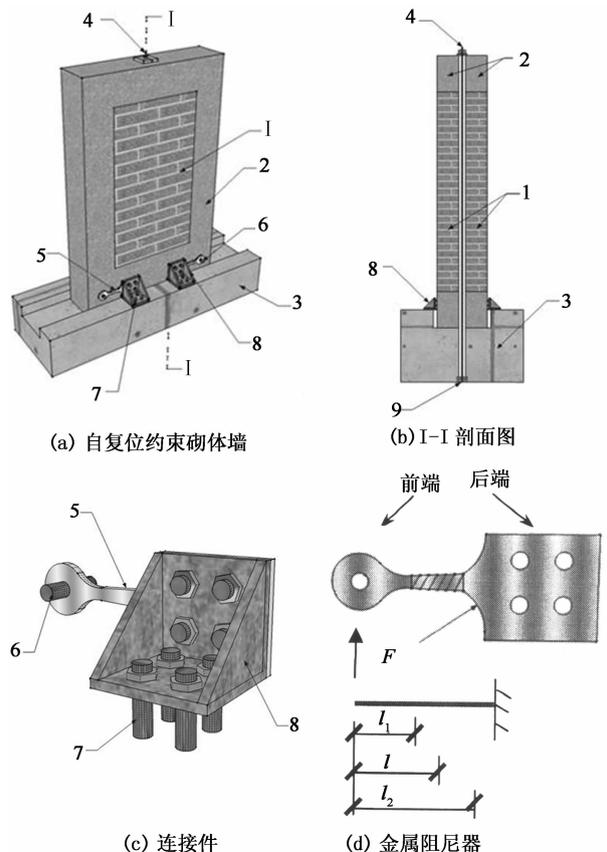


图1 外置金属阻尼器的新型自复位约束砌体墙示意图

Fig.1 Schematic drawing of the new type of self-centering confined masonry wall with external steel dampers

1—砌体墙; 2—构造柱及圈梁; 3—基础梁;
4—预应力筋; 5—金属阻尼器; 6—预埋双头螺栓;
7—预埋螺栓; 8—连接件; 9—锚具

1.2 金属阻尼器设计

约束砌体墙底部两端对称布置4个金属阻尼器,如图1(d)所示,其前端通过预埋螺栓与构造柱连接,后端通过螺栓与连接件相连.金属阻尼器采用Q235钢材加工制作.随着墙体的转动,该阻尼器绕后端发生转动,当受弯屈服后会产生较大的塑性变形,从而达到耗能减震的目的.为避免塑性变形集中,将金属阻尼器的耗能部位限制在一定长度的区域内,如图1(d)中阴影区域所示.此外,在容易发生应力集中的部位使用圆弧过渡.

金属阻尼器可简化为一变截面悬臂梁进行受力分析,如图1(d)所示,其中 F 表示阻尼器前端所受的荷载.设任一截面高度为 h ,此截面到作用点的距离为 l ,当全截面屈服时,设相应的屈服荷载为 F_y ,则有:

$$F_y l = f_y W_p = \frac{f_y t h^2}{4}. \quad (1)$$

式中: f_y 为钢材屈服强度; W_p 为计算截面的塑性截面模量; t 为阻尼器的厚度.假设耗能区域各截面同时屈服,则由式(1)可得

$$h^2 = 4 \frac{F_y l}{f_y t}. \quad (2)$$

由式(2)可知,金属阻尼器耗能区域两侧轮廓线应为抛物线,但为方便起见,实际加工时取为直线.

2 拟静力试验概况

2.1 试件设计

考虑到加载条件,墙体尺寸取为 $1\,350\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ (高 \times 宽 \times 厚),混凝土构造柱及圈梁截面尺寸均为 $200\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ (高 \times 宽),基础梁截面尺寸为 $400\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ (高 \times 宽),其中凹槽深 100 mm .此外,为便于施加预应力,在基础梁底部设置混凝土支墩,其尺寸为 $800\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高).砌体墙采用MU10蒸压灰砂砖砌筑,施工时预留管道周围的砌体需要进行切角处理.除支墩采用素混凝土外,其他混凝土构件均按照构造要求进行配筋,混凝土强度等级均为C20,纵筋采用HRB335.预应力筋采用钢绞线 $1\phi^s 1 \times 7$ (公称直径 $d=15.2\text{ mm}$).

为研究金属阻尼器对该新型自复位约束砌体墙抗震性能的影响,设计了2种不同尺寸的阻尼器,其厚度为 10 mm ,分别记做SD-1和SD-2,如图2所示.由式(1)可知,2种阻尼器的屈服荷载存在如下

关系:

$$F_{y2} = 4F_{y1}. \quad (3)$$

式中: F_{y1} , F_{y2} 分别表示SD-1和SD-2的屈服荷载.

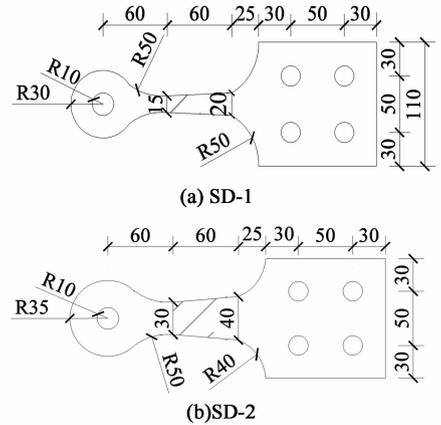


图2 金属阻尼器尺寸

Fig. 2 Dimensions of the steel dampers

2.2 加载装置与测点布置

拟静力试验加载装置与测点布置如图3所示,水平荷载由 60 t 液压千斤顶施加,其加载端与连接支架连接.基础梁通过4个地锚栓锚固于试验室台座.共布置3个位移计,2个力传感器.其中,位移计1和2于墙顶左右两侧对称布置,用于测量墙顶的水平位移,位移计3用于测量自复位墙墙底的水平滑移;力传感器分别测量墙顶水平力及预应力筋在加载过程中的拉力.

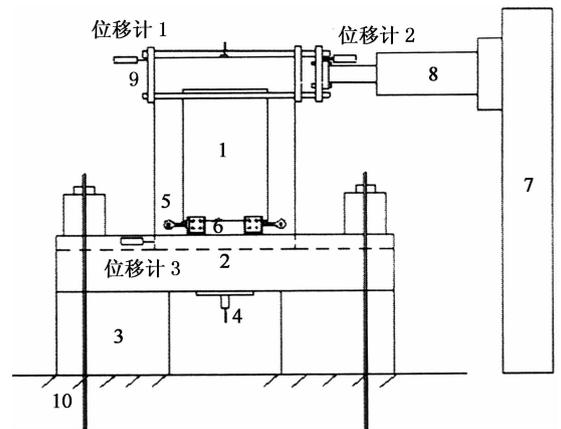


图3 试件设计及加载装置

Fig. 3 Specimen design and loading device

- 1—约束砌体墙;2—基础梁;3—支墩;
4—预应力筋;5—金属阻尼器;6—连接件;7—反力墙;
8—千斤顶;9—连接支架;10—地锚栓

2.3 加载制度及工况

采用位移控制分级加载,如图4所示.第一级位

移幅值为 4 mm,随后以 4 mm 递增加载幅值,直到水平位移幅值达到 20 mm(墙高的 1.5%左右),每级加载循环 1 次.规定千斤顶对自复位约束砌体墙施加推力时,水平力及位移为正,反之为负.

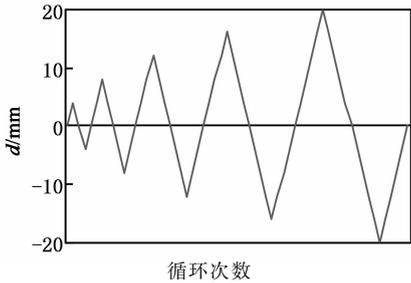


图 4 加载制度
Fig. 4 Loading rule

为考察预应力筋初始预应力的影响,考虑了 3 种情况:未布置预应力筋,初始预应力为 0,初始预应力为 $0.1f_{ptk}$,其中 f_{ptk} 表示预应力筋强度标准值,其值为 1 860 MPa.对于金属阻尼器,如前所述,也考虑了 3 种情况:未布置金属阻尼器,布置 SD-1 阻尼器及布置 SD-2 阻尼器.由以上可得 9 种工况,如表 1 所示,其中 f_{p0} 表示初始预应力.图 5 所示为试验现场照片.

表 1 加载工况
Tab. 1 Loading conditions

工况序号	金属阻尼器	预应力筋
1		未布置
2	未布置	$f_{p0} = 0$
3		$f_{p0} = 0.1 f_{ptk}$
4		未布置
5	SD-1	$f_{p0} = 0$
6		$f_{p0} = 0.1 f_{ptk}$
7		未布置
8	SD-2	$f_{p0} = 0$
9		$f_{p0} = 0.1 f_{ptk}$



图 5 试验现场照片
Fig. 5 Field photo of the test

3 试验结果及分析

3.1 金属阻尼器试验

为考察本文设计的金属阻尼器的耗能能力,使用 30 t 油压千斤顶对其进行了重复加载试验.采用位移控制加载,加载制度如图 6(a)所示.试验中,金属阻尼器发生了明显的变形,如图 6(b)所示.该金属阻尼器的力 F -位移 d 滞回曲线如图 6(c)所示,其形状饱满,表明本文设计的金属阻尼器具有良好的耗能性能.

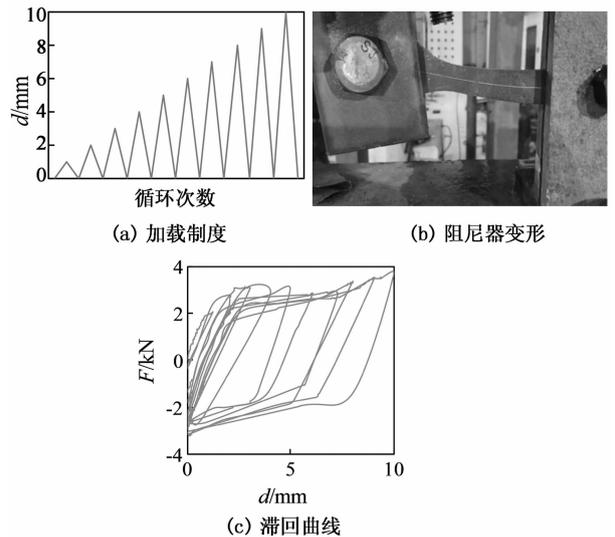


图 6 金属阻尼器试验
Fig. 6 Test of the steel damper

3.2 新型自复位墙拟静力试验

3.2.1 试验现象

在加载过程中,构造柱及圈梁均完好,墙体未出现明显的破坏,且绕墙底两端发生转动,如图 7(a)所示.实测结果表明,在加载过程中水平滑移很小,其最大值不超过 1 mm,表明所采取的墙底构造措施是可靠的,能满足预定要求.加载过程中,金属阻尼器耗能区域发生了明显的变形,如图 7(b)所示.



(a) 墙体绕端部转动 (b) 金属阻尼器变形

图 7 典型试验现象
Fig. 7 Typical phenomena observed in the test

3.2.2 预应力筋拉力

考察加载过程中预应力筋拉力最大的工况 6. 预应力筋拉力 P -墙顶水平位移 d 曲线、拉力 P 随时间 t 变化的曲线分别如图 8(a)(b) 所示. 可以看出: 1) 随着墙体水平位移变大, 预应力筋的拉力也逐渐增大. 当卸载后, 预应力筋的拉力基本回到初始值; 2) 预应力筋所受的最大拉力为 77.7 kN, 相应的最大应力为 558.9 MPa, 远小于其强度标准值 1 860 MPa, 表明预应力筋在加载过程中始终处于弹性状态.

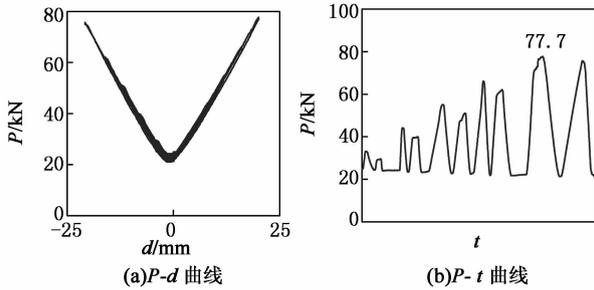
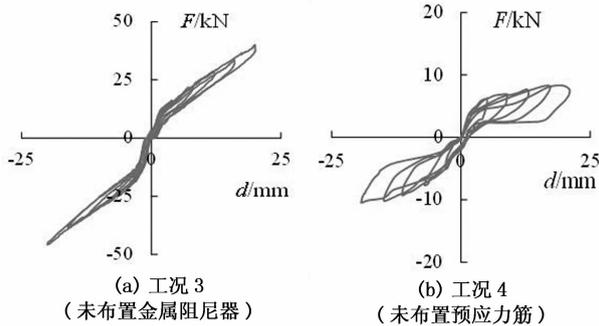


图 8 预应力钢筋拉力

Fig. 8 The tension force of the prestressed tendons

3.2.3 滞回曲线

试验所得典型工况下墙顶水平力 F -位移 d 的滞回曲线如图 9 所示.



(c)FS 模型

图 9 典型滞回曲线

Fig. 9 Typical hysteresis curve

可以看出: 1) 滞回曲线的形状均呈“旗形”, 因此可用 FS(Flag-shaped) 模型^[15] 来描述其恢复力特性, 如图 9(c) 所示, 其中 f_y 表示屈服荷载, k_e 表示弹性刚度, α 和 β 分别表示屈服后的刚度系数及耗能参数; 2) 滞回曲线加载及卸载没有明显的刚度退化,

且卸载后残余变形很小或基本没有, 表明本文所提出的新型自复位约束砌体墙具有较好的自复位性能; 3) 当未布置金属阻尼器时(即工况 1~3), 自复位墙仍具有一定的耗能能力, 其原因在于墙体与基础梁之间可能存在一定的摩擦力而耗能; 4) 当未布置预应力筋时(即工况 1, 4, 7), 墙体卸载后基本上没有残余变形, 表明墙体仅通过自重也可基本上实现自复位.

图 10 所示为预应力筋不同初始预应力对应的滞回曲线. 可以看出: 1) 布置预应力筋后, 墙体的强度和刚度得到显著提高. 尤其对于屈服后刚度, 当未布置预应力筋时, 墙体屈服后刚度趋近于为 0 或负值, 当布置预应力筋后, 墙体屈服后刚度变为正值; 2) 随着初始预应力的增加, 墙体的强度显著增加, 但屈服后刚度变化不大; 3) 随着初始预应力的增加, 墙体卸载后残余变形减小, 表明增加初始预应力有利于提高墙体的自复位性能.

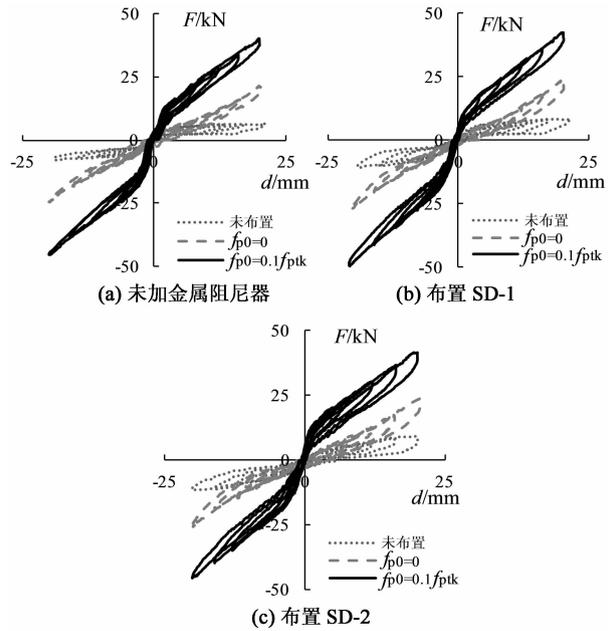


图 10 不同初始预应力下的滞回曲线

Fig. 10 Hysteresis curves corresponding to various prestress

图 11 所示为不同阻尼器对应的滞回曲线. 可看出: 1) 布置金属阻尼器后, 滞回曲线的形状更饱满, 所围成的面积显著增加, 表明金属阻尼器可有效地提高自复位约束砌体墙的耗能能力; 2) 随着阻尼器屈服荷载的增加, 滞回曲线所围成的面积变大, 表明自复位约束砌体墙的耗能能力增强; 3) 随着阻尼器屈服荷载的增加, 墙体卸载后残余变形变大.

3.2.4 等效黏滞阻尼系数

为量化新型自复位约束砌体墙的耗能能力, 选取各工况中位移幅值最大的滞回环计算等效黏滞阻

尼系数 ξ_{eq} , 如下式所示:

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{4\pi E_S} \quad (4)$$

式中: E_D, E_S 分别表示滞回耗能及最大应变能。

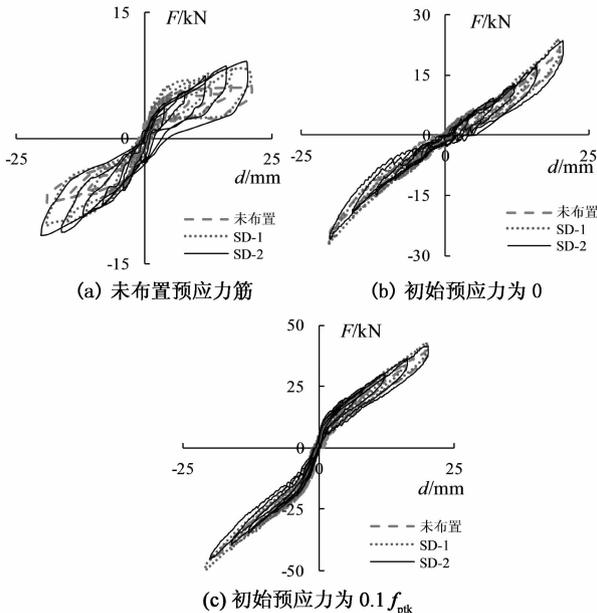


图 11 不同金属阻尼器下的滞回曲线
Fig. 11 Hysteresis curves corresponding to different steel dampers

由式(4)计算所得等效黏滞阻尼系数见表 2. 可看出: 1) 随着预应力筋初始预应力的增大, ξ_{eq} 减小, 表明初始预应力的增加会降低自复位约束砌体墙的耗能能力; 2) 随着金属阻尼器屈服荷载的增大, ξ_{eq} 增大, 表明自复位约束砌体墙的耗能能力增强。

表 2 等效黏滞阻尼系数

Tab. 2 The equivalent viscous damping coefficient

阻尼器	$f_{p0} (f_{pk})$	ξ_{eq}
无阻尼器	未布置	0.164
	0	0.079
	0.1	0.069
SD-1	未布置	0.179
	0	0.090
	0.1	0.078
SD-2	未布置	0.187
	0	0.099
	0.1	0.089

4 有限元数值分析模型

4.1 数值分析模型的建立

采用 OpenSees^[16] 建立有限元数值分析模型, 如图 12(a) 所示. 由试验结果可知, 墙体基本上没有明显的损伤, 因此采用弹性梁柱单元 (elastic Beam Column) 进行模拟.

预应力筋采用桁架单元 (Truss element) 来模拟, 其底端固定于基础, 顶端与墙体通过刚性连接件 (rigid-link) 来模拟, 其材料采用 Steel02 材料进行模拟 (即 Giuffre-Menegotto-Pinto 模型), 该材料可以直接施加初始应力来考虑初始预应力.

金属阻尼器采用零长度 (zeroLength) 单元进行模拟, 即通过位于同一位置的 2 个节点来建模, 采用 Steel01 材料模拟其力-位移本构关系, 如图 12(b) 所示, 其中 E 表示弹性刚度, α 表示屈服后刚度系数, f_y 表示屈服强度.

墙体与基础之间的水平缝用一组只受压弹簧来模拟. 与阻尼器相似, 采用零长度单元来模拟只受压弹簧, 其力-位移本构关系选用弹性不能受拉材料 (Elastic-No Tension Material), 如图 12(c) 所示. 墙体与阻尼器及只受压弹簧间通过刚性连接件连接.

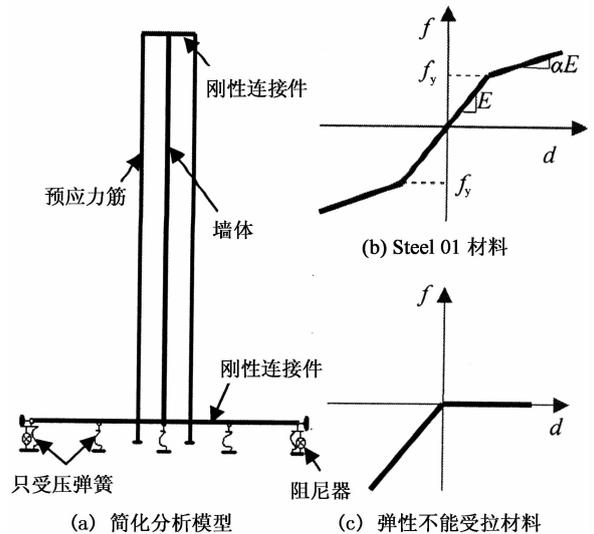


图 12 基于 OpenSees 的自复位约束砌体墙简化分析模型

Fig. 12 Simplified numerical analysis model of the self-centering confined masonry wall in OpenSees

4.2 分析结果对比

采用前节建立的简化数值分析模型, 选取 2 个代表性的工况进行模拟, 分别为工况 6 和 9. 前者对应于 SD-1 阻尼器, 后者对应于 SD-2 阻尼器.

将数值分析结果与试验结果进行对比, 如图 13 所示. 可以看出: 1) 从整体上来说, 数值模拟结果与试验结果吻合较好, 表明所建立的模型具有较高的分析精度, 且计算效率很高, 可进一步用于数值拓展分析; 2) 相对于采用 SD-1 的工况, 采用 SD-2 的工况数值模拟和试验结果相差较大, 其原因可能在于金属阻尼器 SD-2 并没有充分地发挥作用, 其连接方式、布置位置等还需要进一步改进.

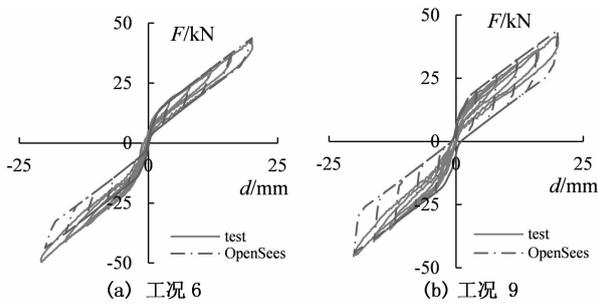


图 13 数值模拟与试验结果对比

Fig. 13 Comparison between the results from the numerical simulation and the test

5 结论

本文研制了一种同时布置体内无黏结预应力筋和外置金属阻尼器的新型自复位约束砌体墙,并通过拟静力试验研究了该新型自复位墙在低周反复荷载作用下的滞回性能,基于试验结果提出了简化的数值分析模型.可以得出如下结论:

1) 本文设计的新型自复位约束砌体墙构造措施合理、可靠,达到了预期的目标,其外置式弯曲耗能型金属阻尼器耗能性能稳定.

2) 该新型自复位墙在加载过程中未出现明显的损伤,且在加载及卸载过程中没有明显的刚度退化,其滞回曲线呈“旗形”,可用 FS 模型近似描述其恢复力特性.

3) 布置预应力筋后,墙体的强度和刚度显著提高.随着预应力筋初始预应力的增加,墙体的自复位性能增强,但其耗能能力会降低.

4) 布置金属阻尼器后,墙体的耗能能力显著提高.随着金属阻尼器屈服荷载的增大,墙体的耗能能力增强,但会产生少量的残余变形.

5) 基于 OpenSees 的新型自复位约束砌体墙简化数值分析模型具有较高的分析精度,且分析效率很高,可进一步用于拓展分析.

参考文献

- [1] 潘振华, 潘鹏, 邱法维, 等. 具有自复位能力的钢结构体系研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(S1): 403-410.
PAN Zhen-hua, PAN Peng, QIU Fa-wei, et al. Analysis of self-centering steel structures' development[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S1): 403-410. (In Chinese)
- [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.
ZHOU Ying, LV Xi-lin. State-of-the-art on rocking and self-centering structures[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9): 1-10. (In Chinese)
- [3] 易伟建, 尹攀. 基于位移及滞回耗能的结构抗震性能评估新方法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(8): 1-6.
YI Wei-jian, YIN Jiang. A new method for evaluating seismic performance based on displacement and hysteretic energy[J].

- Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(8): 1-6. (In Chinese)
- [4] ARMOUTI N. Seismic performance of precast concrete structural walls[D]. Bethlehem, PA: Department of Civil and Environmental Engineering, Lehigh University, 1993: 50-61.
- [5] PEREZ F J. Experimental and analytical lateral load response of unbonded post-tensioned precast concrete walls[D]. Bethlehem, PA: Department of Civil and Environmental Engineering, Lehigh University, 2004: 21-43.
- [6] PEREZ F J, PESSIKI S, SAUSE R. Lateral load behavior of unbonded post-tensioned precast concrete walls with vertical joints[J]. PCI Journal, 2004, 49(2): 48-64.
- [7] PEREZ F J, PESSIKI S, SAUSE R. Seismic design of unbonded post-tensioned precast concrete walls with vertical joint connectors[J]. PCI Journal, 2004, 49(1): 58-79.
- [8] TORANZO L A, CARR A J, RESTREPO J I. Improvement of traditional masonry wall construction for use in low-rise/low-wall-density buildings in seismically prone regions[C]//New Zealand Society for Earthquake Engineering 2001 Conference. Wellington, New Zealand: New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2001: 81-87.
- [9] TORANZO L A. The use of rocking walls in confined masonry structures: a performance-based approach[D]. Christchurch: University of Canterbury, 2002.
- [10] TORANZO L A, CARR A J, RESTREPO J I. Displacement based design of rocking walls incorporating hysteretic energy dissipators[C]//Proceedings of the 7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures. Assisi, Italy: Italian Working Group on Seismic Isolation (GLIS) of the Italian National Association for Earthquake Engineering, 2001: 42-46.
- [11] TORANZO L A, CARR A J, RESTREPO J I, et al. Rocking confined masonry walls with hysteretic energy dissipators and shake-table validation [C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, Canada: Canadian Association for Earthquake Engineering, 2004: 66-71.
- [12] KURAMA Y C. Seismic analysis, behavior and design of unbonded post-tensioned precast concrete walls[D]. Bethlehem, PA: Department of Civil and Environmental Engineering, Lehigh University, 1997: 66-72.
- [13] 胡晓斌, 贺慧高. 往复荷载作用下自复位墙受力机理研究[J]. 工程力学, 2013, 30(11): 202-206.
HU Xiao-bin, HE Hui-gao. Study on the mechanical behavior of self-centering wall under cycle loading[J]. Engineering mechanics, 2013, 30(11): 202-206. (In Chinese)
- [14] 胡晓斌, 贺慧高, 彭真, 等. 往复荷载作用下自复位墙滞回性能研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(11): 23-28.
HU Xiao-bin, HE Hui-gao, PENG Zhen, et al. Study on hysteretic performance of self-centering wall subjected to cyclic loading[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(11): 23-28. (In Chinese)
- [15] CHRISTOPOULOS C, FILIATRAULT A E, FOLZ B. Seismic response of self-centering hysteretic SDOF systems[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(5): 1131-1150.
- [16] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. Open system for earthquake engineering simulation user command—Language manual: OpenSees version 1.7.3[M]. Los Angeles: University of California, 2006: 58-61.