

# 外贴预制圈梁构造柱加固砌体结构抗震性能研究

缪海林, 宣卫红, 左 熹, 陈育志

(金陵科技学院建筑工程学院, 江苏 南京 211169)

**摘 要:**农村已建老旧房屋以无圈梁构造柱的砌体结构为主,提高其抗震性能成为亟待解决的工程问题。提出外贴预制圈梁构造柱加固技术,以提高结构的整体抗震性能。对加固后墙体的损伤特性进行数值模拟和试验研究,结果表明:采用圈梁构造柱加固措施可明显提升砌体结构的抗震性能,预制和现浇两种加固方式产生的滞回变形幅值有所不同,预制圈梁构造柱加固墙体的变形幅值相对较小,变形滞回效应更为明显,抗震性能更好。

**关键词:**外贴;圈梁构造柱;加固;抗震性能

中图分类号:TU317

文献标识码:A

文章编号:1672-755X(2022)01-0071-08

## Seismic Performance Study on Masonry Structures Reinforced with Externally Attached Prefabricated Ring Beams and Structural Columns

MIAO Hai-lin, XUAN Wei-hong, ZUO Xi, CHEN Yu-zhi

(Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

**Abstract:** The old houses built in rural areas are mainly masonry structures without ring beams and structural columns, and improving their seismic performance has become an urgent engineering problem to be solved. The reinforcement technology of externally attached prefabricated ring beams and structural columns is proposed, so as to improve the seismic performance. The numerical simulation and experimental research on the damage characteristics of the reinforced wall are carried out. The results show that the seismic performance of masonry structures can be significantly improved by the reinforcement measures of ring beams and structural columns. The hysteretic deformation amplitudes of prefabricated and cast-in-place reinforcement methods are different. The deformation amplitudes of walls reinforced with prefabricated ring beams and structural columns are relatively small, and the deformation hysteresis effect is more obvious. The seismic effect of the reinforcement measures of prefabricated ring beams and structural columns exceed the reinforcement methods of cast-in-place.

**Key words:** externally attached; ring beams and structural columns; reinforcement; seismic performance

砌体房屋是我国农村量大面广的结构形式。在历次震害中,砌体结构的震害通常比较严重。2008 年汶川特大地震中严重损坏房屋达 593.25 万间,倒塌房屋 546.19 万间,受损房屋 1 500 万间以上<sup>[1]</sup>。震后对汶川县城各结构类型的抽样调查表明,砌体结构房屋栋数占样本所有类型房屋栋数的 72.22%,建筑面

收稿日期:2022-01-17

基金项目:江苏省建筑产业现代化科技支撑项目

作者简介:缪海林(1967—),男,江苏镇江人,研究员级高级工程师,主要从事建筑结构抗震的设计和研发。

积占 60.23%。其中,严重破坏或者倒塌的砌体房屋占砌体房屋总数的 52%,破坏程度在中等及以上的砌体房屋占砌体房屋总数的 90%以上<sup>[2]</sup>。由于在我国农村自住房屋多为自主建设,建设时较少考虑地震设防,砌体结构抗震性能相对较差。砌体结构抗震性能相对较差,。因此,如何有效加固这一类抗震性能较差的砌体结构房屋是一个亟待解决的问题。

砌体结构具有成本低廉、工艺简单等优点,但作为主要承载构件的墙体是一种弱联结体系,在地震动作用下容易发生开裂;另外,由于缺少抗震第二道防线,体系单薄,砌体结构在强震作用时会因为墙体的错动而刚度突变、面外失稳,进而局部坍塌或整体倾覆。因此,有必要研究砌体结构有效、经济的加固方法,以增加其整体性和塑性变形能力,从而提高抗震性能。

目前砌体加固技术主要分为碳纤维布加固、钢筋网复合砂浆加固、钢筋网水泥砂浆面层加固等<sup>[3-6]</sup>。通过研究加固前后的破坏形态、承载能力、变形能力、刚度退化、滞回特性以及耗能能力等抗震性能,可以证明加固方案的有效性和可行性<sup>[7-9]</sup>。

本文提出一种对原结构影响较小的外贴预制圈梁构造柱抗震加固技术,采用构造柱与圈梁组成的体系加固原有砖混墙体,加固时无需改动原结构内部,仅在原结构外部增设地梁和圈梁,并在梁节点处设置立柱,形成梁—柱的构架式外贴体系,将原有老旧住宅结构固定在该构架体系上,以此加强原有建筑结构的抗震性能。这种方法施工简便,速度快,质量可靠,抗震性能好,在施工过程中简化了现浇钢筋混凝土湿作业工序,不需要购置或租赁大量钢(木)模板,不需要使用钢筋切割设备,现场劳动强度低,节约施工成本。

## 1 圈梁构造柱加固砌体结构

圈梁构造柱加固可采用现浇和预制外贴两种方式。现浇方式加固是在墙体上支架模板,浇筑混凝土以形成整体构造柱圈梁框架;预制外贴加固是先预制边柱和横梁,采用灌浆料将边柱和横梁与墙体粘结在一起,形成具有圈梁构造柱的砖混结构体系。

本文分析的墙体厚度为 240 mm,砖块采用 240 mm×115 mm×53 mm 的 MU10 实心黏土砖,采用 M2.5 和 M5 两种砌筑砂浆,加固构造柱截面为 240 mm×180 mm,圈梁截面为 180 mm×150 mm,构造柱、圈梁纵筋及箍筋均为 HPB235 级钢,均采用 C20 细石混凝土。圈梁构造柱加固墙体见图 1,构造柱和圈梁的尺寸及配筋见图 2。



(a) 现浇圈梁构造柱

(b) 预制圈梁构造柱

图 1 圈梁构造柱加固墙体

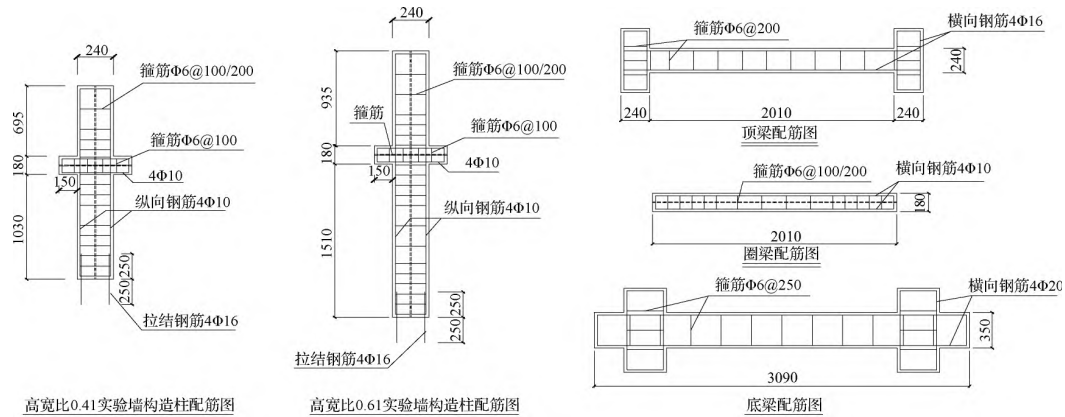


图 2 构造柱和圈梁的尺寸及配筋

## 2 结构损伤特性的数值模拟

### 2.1 损伤变量

损伤可分为拉伸型和压缩型两种。拉伸型损伤是由拉应力主导,其特点是裂纹形成和与裂纹方向正交的抗拉强度丧失,表征结构的拉伸破坏情况;压缩型损伤是由压应力主导,其特点是许多微小裂纹扩展和结构强度完全丧失,表征结构的压缩破坏情况。在塑性损伤分析中,损伤变量可以定量描述结构单元的破坏程度,拉伸损伤变量和压缩损伤变量分别描述结构的拉伸和压缩损伤情况。

ABAQUS 中的损伤模型是基于塑性的连续损伤模型,拉伸和压缩损伤变量的定义和演化律是通过各自对应的一系列数值给出的。损伤变量一般介于 0 和 1 之间,端点值分别表示初始无损状态和最后完全损伤状态。拉伸损伤变量和压缩损伤变量随非弹性应变的变化分别如图 3 和图 4 所示。

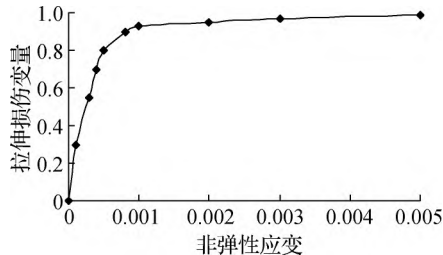


图 3 拉伸损伤变量随非弹性应变的变化曲线

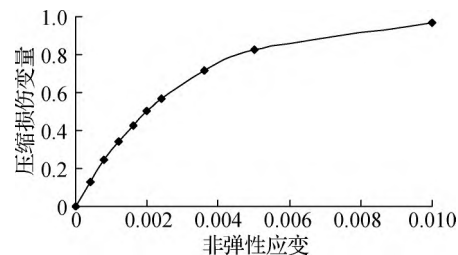


图 4 压缩损伤变量随非弹性应变的变化曲线

### 2.2 损伤分布特征分析

基于 ABAQUS 有限元计算平台,采用基于塑性的连续损伤模型,建立圈梁构造柱抗震加固砌体结构的有限元模型。构造柱、圈梁采用 C20 混凝土的力学计算参数,墙体砖块采用 MU10 黏土砖的计算参数。

以宽高比为 0.61 的圈梁构造柱加固砌体结构为研究对象,圈梁构造柱与墙体结构均采用八结点单元模拟,混凝土结构内部的钢筋采用等效刚度法进行模拟。作用力施加于圈梁轴心位置,方向由左向右。循环荷载随循环周数逐步递增,如图 5 所示。

图 6 和图 7 分别为结构体系拉伸损伤云图和压缩损伤云图,可以看出:结构的损伤以拉伸损伤为主,并且拉伸损伤的面积远大于压缩损伤的面积;未采用圈梁构造柱加固的墙体在往复荷载作用下,墙体在荷载作用位置以下部分几乎完全失效,而采用圈梁构造柱加固的结构体系在往复荷载作用下,墙体内会逐渐形成拉伸裂缝并向对角方向扩展,最终破坏时墙体形成斜向主裂缝,梁柱节点出现明显损伤,圈梁损伤较弱;加固和未加固两种结构体系仅在靠近加载点区域存在轻度的压缩损伤。

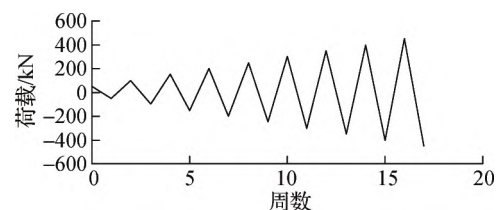


图 5 循环荷载加载过程

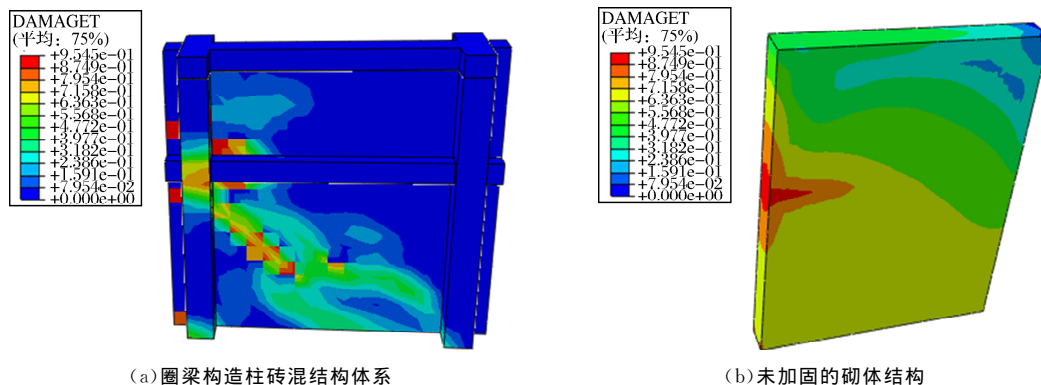


图6 结构体系拉伸损伤云图

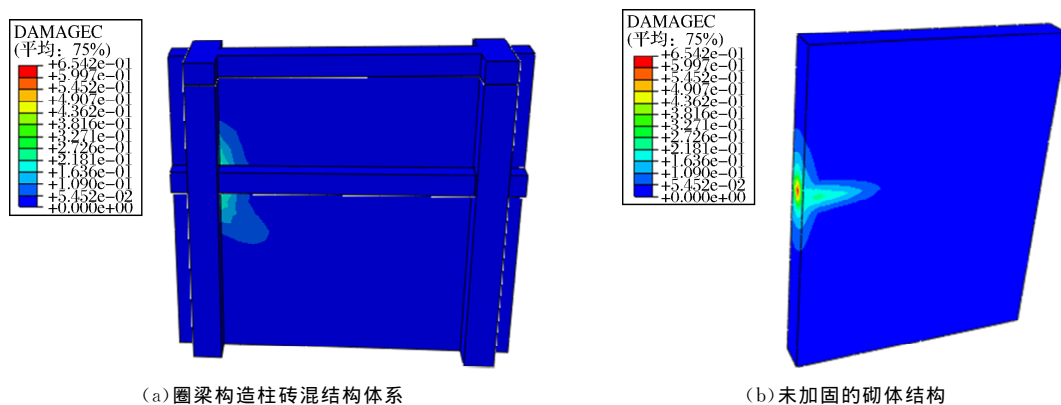


图7 结构体系压缩损伤云图

### 2.3 损伤指数分析

由于材料的拉伸和压缩都会引起损伤,因此损伤指数  $D$  可以以拉伸和压缩叠加的形式表达,即:

$$D = aD_t + (1-a)D_c \quad (1)$$

式中:  $D_t$  为拉伸损伤指数,  $D_c$  为压缩损伤指数,  $a$  为比例因子。  $a$  为一个小于 1 的正数,它取不同的值时,表示拉压损伤在总损伤中的占比不同,这有利于研究不同材料的力学损伤行为。对于混凝土材料和墙体材料而言,抗压强度远大于抗拉强度,因此,应以混凝土的拉伸损坏作为构件损伤破坏的衡量标准,取  $a=1$ 。

通过损伤分析,可以获知圈梁构造柱加固砌体结构体系的损伤分布特征。为反映圈梁构造柱体系和墙体结构在循环荷载作用下的损伤情况,需要对结构整体的损伤度进行量化,本文采用整体损伤指数的形式进行衡量。

首先,根据损伤变量的分布来定义局部损伤指数。将结构体系分为若干个区域,每个区域包含了若干个有限单元。通过非线性分析可以得到各单元的损伤变量,局部损伤指数定义为区域内各单元损伤变量的加权平均,取单元面积为权重系数,即:

$$D_i = \frac{\sum d_j S_j}{\sum S_j} \quad (2)$$

式中:  $D_i$  为区域  $i$  的局部损伤指数,  $d_j$  为区域  $i$  中第  $j$  个单元的损伤因子,  $S_j$  为区域  $i$  中第  $j$  个单元的单元面积。

其次,对局部损伤指数进行加权平均得到整体损伤指数,将局部能耗作为权重系数。因为损伤比较严重的区域,能耗也会较大,所以以能耗作为权重系数可以充分考虑损伤严重区域的权重,更为科学地衡量结构的整体损伤,计算公式为:



$$H = \frac{\sum D_i \cdot E_i}{\sum E_i} \quad (3)$$

式中:  $H$  为整体损伤指数,  $E_i$  为区域  $i$  的局部能耗。

根据以上分析,得到圈梁构造柱砖混结构体系和未加固的砌体结构的能耗和整体损伤指数(图 8 和图 9)。可以看出:圈梁构造柱加固后的砖混结构耗散能量更多,整体损伤程度明显更小,说明圈梁构造柱可以提高砌体结构的抗震性能。

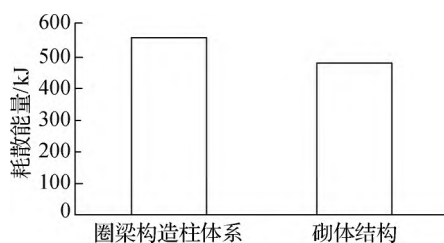


图 8 耗散能量情况

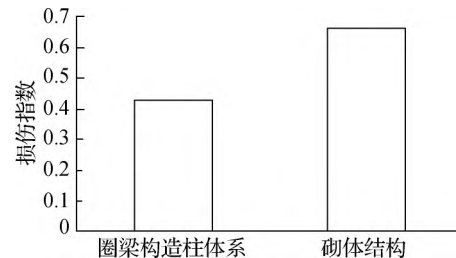


图 9 整体损伤指数情况

### 3 结构抗震性能试验

上述数值模拟结果证明了圈梁构造柱加固对砖墙抗震性能的提升作用,为了进一步说明现浇和预制两种方式对砌体结构抗震性能的影响,通过试验进行对比分析。

#### 3.1 模型制作

试验共采用 4 片不同加固方案的模型墙体,其中以现浇方式加固的墙体 2 片,以预制方式加固的墙体 2 片,具体的设计参数见表 1。

表 1 加固墙体参数

墙体编号	加固方式	墙体高宽比	砂浆强度等级
XJ-1	现浇	0.61	M5.0
XJ-2	现浇	0.40	M5.0
YZ-1	预制	0.61	M5.0
YZ-2	预制	0.61	M2.5

#### 3.2 试验装置与加载方案

试验在金陵科技学院结构工程实验室完成,采用多通道电液伺服结构试验系统进行加载,该试验系统可以实现竖直和水平两个方向同时配合加载,如图 10 所示。竖直方向配有两个最大荷载为 1 000 kN 的作动器,用于施加竖直方向的压荷载;水平方向配有最大荷载为 500 kN 的作动器,施加水平方向推拉往复荷载,最大频率为 10 Hz。

首先由竖向作动器施加 100 kN 荷载并保持稳定不变,然后由水平作动器对加固墙体施加水平循环荷载,循环荷载随着循环周数逐步递增,如图 5 所示。当墙体结构进入塑性变形阶段,加载采用位移控制。在加固墙体的圈梁跨中位置和构造柱节点位置分别设置位移测点,用于测量墙体结构在水平循环荷载作用下的位移变化。

#### 3.3 试验现象

试验过程中各墙体的变化过程如图 11 和图 12 所示。随着荷载逐步增大,当荷载接近 400 kN 时,首先在墙面上沿灰缝出现一条或几条不连续的斜裂缝,与水平方向大致呈 45°。随着荷载循环次数的增加,在砌体中不断出现新裂缝。墙体初



图 10 试验加载系统

裂后,位移幅值较荷载幅值增加更快,圈梁构造柱与墙体的粘结出现滑移。在荷载的反复作用下,墙面形成交叉斜裂缝。斜裂缝不断开展与闭合,使得原有裂缝不断延伸,向角部扩展,直到贯通,如图 11(a)所示。此时构造柱不仅出现水平裂缝,而且逐渐产生斜裂缝,如图 11(b)所示。虽然这时荷载增加不多,但墙体结构变形却增加较多,构造柱明显地发挥了对墙体的约束作用。极限荷载后,随着位移幅值的增加,构造柱四角裂缝加宽,混凝土及墙面裂缝处砖块逐渐酥碎剥落。对比图 11 和图 12 可以看出,采用预制圈梁构造柱加固的墙体无论是砖墙还是构造柱破坏程度均低于现浇加固墙体,主要原因是预制的圈梁构造柱具有更优的浇筑质量,采用的灌浆料与墙体的粘结强度也更高。

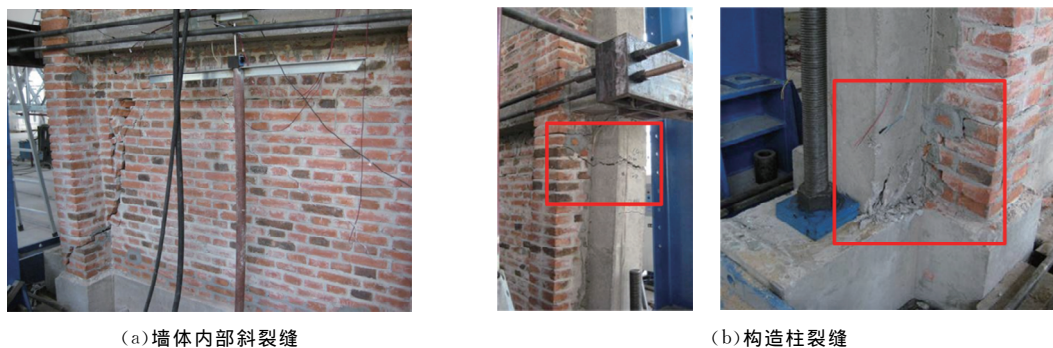


图 11 XJ-1 墙体试验宏观破坏现象



图 12 YZ-1 墙体试验宏观破坏现象

### 3.4 滞回曲线分析

各加固墙体的荷载与水平位移的滞回曲线如图 13 所示。可以看出:在荷载施加初期,各加固墙体均处于弹性阶段,整体性较好,滞回曲线基本为直线,刚度值几乎不变,耗能很少;随着加载持续,滞回环的面积增大,加固墙体出现一定的塑性变形,并存在残余变形,刚度明显退化;随着加固墙体裂缝逐渐开展,滞回曲线呈“S”形,滞回圈面积相应增大,残余变形也逐渐加大,并且由于墙体中斜裂缝的张翕以及剪切变形的影响,荷载一位移曲线出现了捏拢现象;当荷载达到极限值后,位移成倍增长,滞回环更加饱满,并向水平方向发展,捏拢趋势更加明显。各种加固墙体在受力过程中能形成完整的、面积较大的滞回环,说明试验墙体在达到极限荷载后仍有一定的耗能能力和抗倒塌能力,证明采用圈梁构造柱加固措施可以显著提高墙体的抗震性能,加固后的结构具有较好的变形能力。采用不同加固方式的墙体表现出不同的动力滞回效应,可以看出:不同墙体在循环荷载的作用下产生的滞回变形幅值有所不同,现浇方式加固墙体 XJ-1、XJ-2 的变形幅值与外贴预制加固墙体 YZ-2 的变形幅值较为接近,明显大于外贴预制加固墙体 YZ-1。这说明墙体 YZ-1 的抗震性能较好,整体性优于其余加固墙体,表明外贴预制圈梁构造柱加固措施的抗震效果能够达到甚至超过现浇圈梁构造柱加固方式。另外,YZ-1 和 YZ-2 的试验结果表明在抗震设计中砂浆强度对保证结构整体性和稳定性有重要作用。

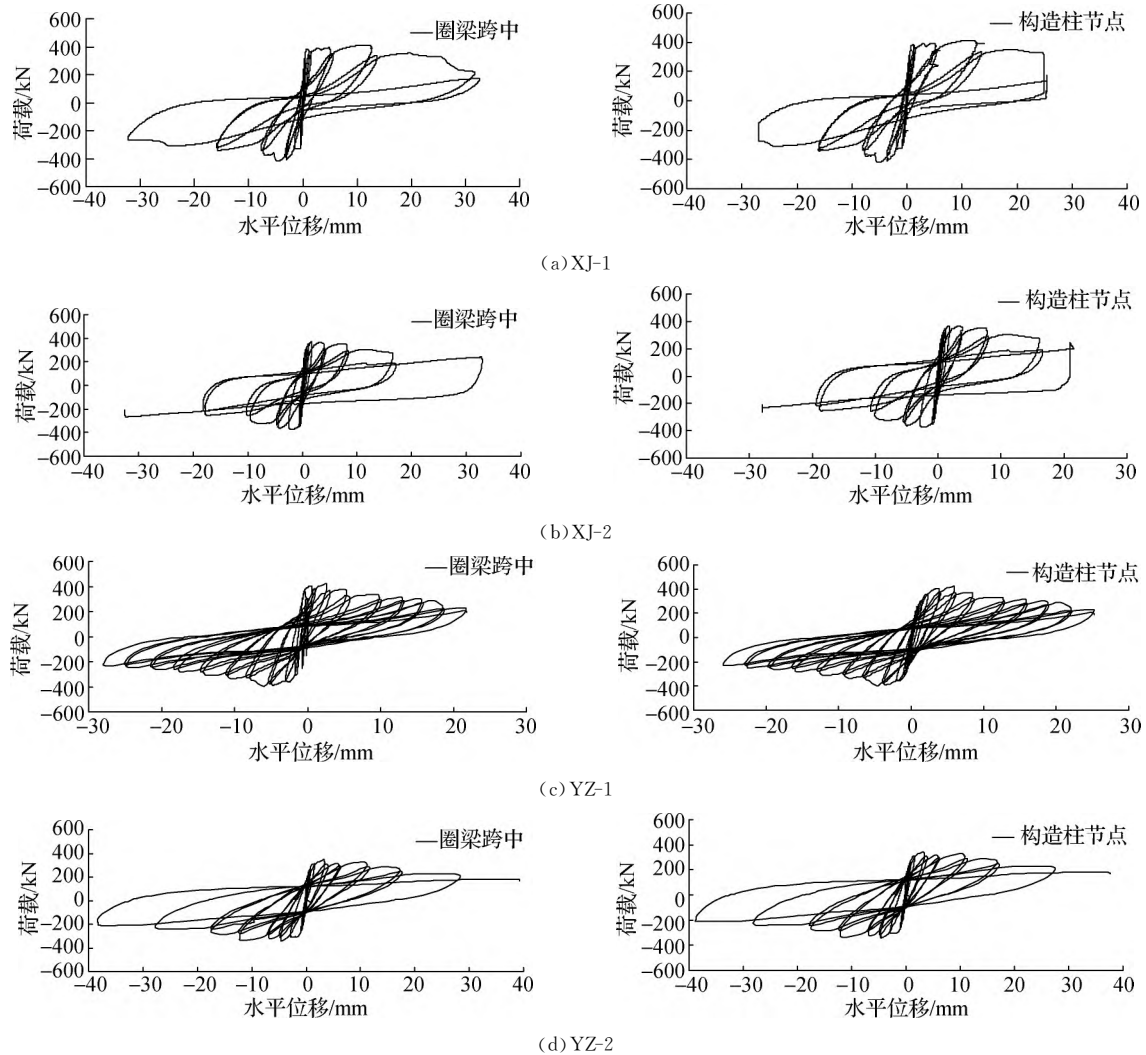


图 13 不同加固墙体的滞回曲线

### 3.5 滞回耗能分析

循环荷载输入的能量在结构中以动能、弹性应变能、阻尼耗能、滞回耗能等形式存在,其中动能和弹性应变能只参与能量的转化,不参与能量的吸收,能量主要通过滞回耗能耗散。因此,滞回耗能在衡量抗震性能的重要指标之一,它以构件裂缝的开展和塑性发展为代价来吸收和耗散地震能量。

通过 Fortran 自编写程序计算圈梁跨中和构造柱节点的滞回耗能,得出滞回耗能与循环周数的关系,如图 14 所示。可以看出:当加载周数处于前期时,圈梁基本处于弹性状态,滞回耗能以可恢复的弹性应变能为主。随着加载周数逐渐加大,构件由弹性状态向塑性状态转变,塑性不断提升,裂缝不断发展,滞回耗能在加载周数后期有较大的提高。不同墙体的能量耗散效应有所不同,其中墙体 YZ-1 的滞回耗能最大,说明该墙体结构吸收和消耗能量最多,抗震性能最好。

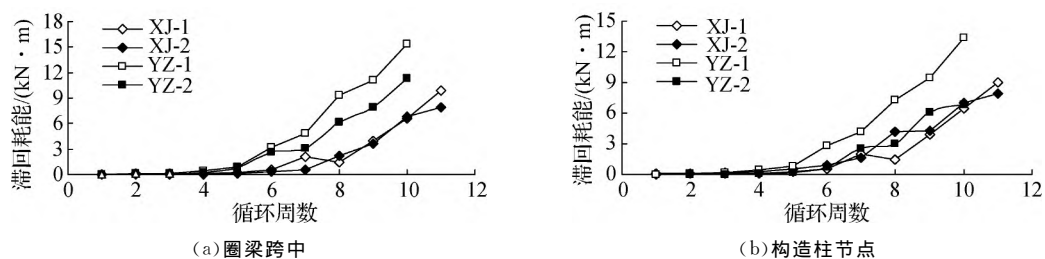


图 14 不同加固墙体的滞回耗能与循环周数的关系曲线

## 4 结 语

本文对采用圈梁构造柱加固后的墙体进行抗震性能研究,对比了损伤特性、滞回曲线、滞回耗能等方面的效应,对不同加固方法进行全面和有效的评价,得出的主要结论如下:1)外贴预制圈梁构造柱体系可有效提高砌体结构的抗震性能,加固后的结构具有较好的变形能力和耗能能力;2)外贴预制圈梁构造柱体系在达到宏观破坏时,构造柱的周围出现大量的拉伸裂缝,并呈现斜向延伸的趋势;3)加固后的墙体在受力过程中能形成完整的、面积较大的滞回环,说明试验墙体在达到极限荷载后仍有一定的耗能能力,具有一定的抗倒塌能力;4)采用现浇和预制方式的圈梁构造柱体系产生的能量效应有所不同,预制圈梁构造柱加固墙体 YZ-1 的滞回耗能最大,吸收和消耗能量最多,抗震性能最好,说明采用本文提出的外贴预制圈梁构造柱加固砌体结构技术能够保证良好的抗震性能。

### 参考文献:

- [1] 李宏男,肖诗云,霍林生.汶川地震震害调查与启示[J].建筑结构学报,2008(4):10—19
- [2] 吴迪,熊焱,崔杰,等.汶川8.0级地震中汶川县房屋震害及其加固情况分析[J].地震研究,2010(2):216—221
- [3] 信任,姚继涛.多层砌体结构墙体典型抗震加固技术和方法[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2010,42(2):251—255
- [4] 信任,何成学.震后多层砌体结构的抗震鉴定与加固设计[J].地震工程与工程振动,2011,31(1):142—147
- [5] 徐进华.中小学多层砌体结构墙体抗震加固技术及方法[J].工程抗震与加固改造,2014,36(1):115—119
- [6] ELGAWADY M A, LESTUZZI P, BADOUX M. Aseismic retrofitting of unreinforced masonry walls using FRP[J]. Composites Part B: Engineering, 2006, 37, 148—162
- [7] 王啸霆,陈曦,王涛,等.外套整体式加固砌体结构抗震性能试验研究[J].工程力学,2022,39(2):123—135
- [8] 陈伟恩.某砖混结构砖砌体墙 UHPC 抗震加固设计与分析[J].水利与建筑工程学报,2021,19(6):128—132
- [9] 李广洲,袁康,郭军林,等.高烈度区多层砌体结构基础隔震加固设计与研究[J].工程抗震与加固改造,2021,43(3):104—108

(责任编辑:湛江)