

砖混教学楼纵向窗间墙抗震性能试验研究*

吴昊¹, 赵世春¹, 许 浒¹, 张蓬勃¹, 吴 刚²

(1 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031;

2 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096)

[摘要] 通过 5 片砖混教学楼纵向窗间墙试件的拟静力试验, 分别对配置不同尺寸和不同配筋率构造柱的窗间墙试件的破坏形态、滞回性能、变形能力等进行了试验分析。研究结果表明, 构造柱的尺寸和配筋率对窗间墙的抗震性能影响较大, 增大构造柱截面尺寸但保持较低的配筋率可显著改善窗间墙的抗震性能, 但构造柱配筋增大到一定程度后反而会降低窗间墙的变形能力。因此, 适度增大构造柱尺寸并合理控制配筋率是砖混教学楼纵向窗间墙抗震设计的关键。

[关键词] 砖混结构教学楼; 窗间墙; 构造柱; 截面尺寸; 配筋率

中图分类号: TU362 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2013)01-0081-04

Experimental study on the seismic performance of longitudinal wall between windows of brick-concrete school building

Wu Hao¹, Zhao Shichun¹, Xu Hu¹, Zhang Pengbo¹, Wu Gang²

(1 School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2 Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of China Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Quasi-static tests on five specimens were conducted to investigate the seismic performance of longitudinal wall between windows of brick-concrete school building. The seismic performance of longitudinal wall between windows with different size and reinforcement ratio of structural column was investigated respectively, including damage characteristics, hysteresis behavior and deformation capacity of specimens. The results indicate that the section size and reinforcement ratio of structural column have significant effect on the seismic performance of specimens. Increasing the section size of structural column can improve the seismic performance of longitudinal wall between windows significantly. However, increasing reinforcement ratio of structural column to a certain extent will decrease deformation capacity of longitudinal wall between windows. Therefore, properly increasing the section size of structural column and reasonably controlling the reinforcement ratio are crucial important in the seismic design of longitudinal wall between windows of brick-concrete school building.

Keywords: brick-concrete school building; longitudinal wall between windows; structural column; section size; reinforcement ratio

0 引言

中小学砖混教学楼一般为空旷结构, 具有大空间、大进深等不利于抗震的特点。图 1 给出了普通砖混教学楼标准层的教室平面布置图。为满足通风、采光等方面的要求, 教室外纵墙门窗开洞率普遍较高, 如单跨外廊式教室的开洞率达 30% 左右, 严重削弱结构纵向墙体的有效抗剪面积, 导致窗间墙体成为结构抗震的薄弱环节, 在 5.12 汶川大地震中, 大量砖混结构教学楼窗间墙体发生严重破坏, 如图 2 所示。

目前窗间墙的设计大体上有 3 种方式: 砖扶壁柱式、普通构造柱式和 RC 扶壁柱式, 如图 3 所示。其中, 砖扶壁柱式由于未设构造柱, 无法与整体结构形成圈梁构造柱约束体系, 因而已极少采用。实际工程主要采用普通构造柱式, 然而, 由于构造柱设置在墙体中间, 难以对墙体形成约束效应, 因而有的工

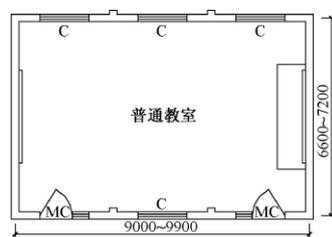


图 1 砖混结构教室
典型平面布置图



图 2 砖混教学楼窗
间墙典型震害^[1]

程采用 RC 扶壁柱(图 3(c))来增强窗间墙体的抗震性能。

汶川地震中, 窗间墙体中配置 RC 扶壁柱的砖混教室总体上表现出较好的抗震性能, 但也有部分

* 国家科技支撑计划项目(2009BAJ28B01), 国家教育部东南大学博士生国内访学基金资助项目(BSFX2009-01), 中央高校基本科研业务费专项资金资助(SWJTU10XS01)。

作者简介: 吴昊, 博士研究生, Email: yong_zhiwu@163.com。

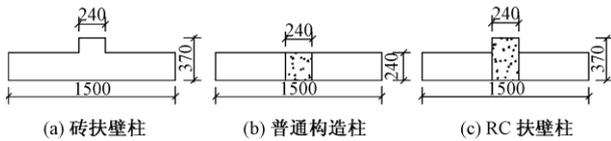


图3 窗间墙加强方式

结构发生了比较严重的破坏,见图4。然而到目前为止,国内外学者对砖混教学楼建筑抗震性能的研究^[1-5]主要基于震害分析,对砖砌体的试验研究也大多集中在两端设有构造柱的约



图4 配置RC扶壁柱的窗间墙震害

束墙体,而对中间配置构造柱的开洞墙体的抗震性能^[6,7]研究很少。因此设计了一组具有不同尺寸、配筋的构造柱的窗间墙试件,分别对其进行抗震性能试验,探索不同尺寸、不同配筋构造柱对窗间墙抗震性能的影响,为工程设计提供一定的试验依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

以4层单跨外廊式砖混教室结构的近走廊侧底层窗间墙为研究对象,以窗间墙中柱的尺寸和配筋率为主要参数,按照1/2的缩尺比例,且考虑墙体处于平面应力状态,墙体厚度对其影响不大,墙厚与原型墙体保持一致。共设计了5片墙体试件,分别为无构造柱试件(ZQ1)、配置普通构造柱试件(ZQ2)、构造柱增大配筋试件(ZQ3)、构造柱增大尺寸试件(ZQ4)、构造柱增大尺寸并增大配筋试件(ZQ5)。试件ZQ1 ZQ2 ZQ3尺寸为(宽×高×厚)600×900×240(高宽比为1.5),试件ZQ4 ZQ5尺寸为(宽×高×厚)665×900×240(高宽比为1.4)。分别采用含柱率、柱配筋率、墙肢配筋率等来表示构造柱尺寸和配筋的参数变化,见表1。

表1 试件设计参数

编号	洞口尺寸/mm	柱截面/mm	构造柱纵筋	含柱率/%	柱配筋率/%	墙肢配筋率/%
ZQ1	900×900	—	—	—	—	—
ZQ2	900×900	120×240	4φ8	20.0	0.7	0.14
ZQ3	900×900	120×240	4φ14	20.0	2.1	0.43
ZQ4	835×900	185×240	4φ8	27.8	0.5	0.13
ZQ5	835×900	185×240	2φ14+2φ16	27.8	1.6	0.44

注:1) 试件ZQ2的构造柱纵筋是按照《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)(简称《抗规》)配置的,而试件ZQ4虽然增大了构造柱尺寸,但其纵筋配筋与ZQ2相同;2) 各试件均采用规格为240×115×53的MU10级标准烧结页岩砖和M10混合砂浆砌筑而成,构造柱混凝土设计强度C25,砖块、砂浆试块和混凝土试块的抗压强度平均值分别为19.9 8.9 26.1MPa,箍筋中6@150。

1.2 加载装置和加载制度

试验加载装置如图5所示,作动器通过4根钢拉杆与试件连接,位移计布置在顶梁底部。加载方式为:用两个同步控制的竖向千斤顶在试件顶部施加恒定的竖向荷载,使试件产生与原型墙体一致的压应力(0.8MPa,轴压比为0.15)。水平荷载采用低周反复加载方案,参考《建筑抗震试验方法规程》(GBJ 101—96)采用力和位移混合控制,具体加载制度为:墙体开裂前以10kN为级差的力控制加载,每级荷载循环1次;裂缝出现后以开裂位移的整数倍来控制加载,每级循环3次,直到试件承载力出现严重下降或无法进一步加载时结束试验。

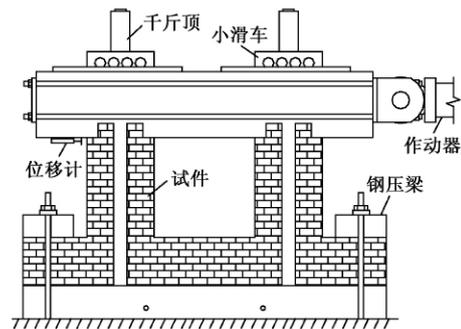


图5 加载装置示意图

2 试验结果及分析

2.1 破坏过程和破坏特点

各试件破坏过程基本相似,大致经历开裂、裂缝发展和最终破坏3个主要阶段。加载初期试件基本处于弹性状态,表面无明显裂缝。当荷载增大到极限承载力的30%~40%时在墙肢受拉角部沿灰缝出现水平弯曲线型裂缝。随着荷载与位移的增大,试件砌体部分出现斜裂缝,并大致沿对角线方向延伸且不断加宽,最终发展为剪切破坏,如图6所示。

虽然所有试件最终均为剪切破坏,但不同参数的试件斜裂缝的生成与发展及最终破坏方式存在显著差异。按构造柱尺寸及配筋的不同大体上可分为3种情况:1) 无构造柱试件(ZQ1):在双向斜裂缝相交处,被多条短斜裂缝分割的砌体剪压破坏;2) 低配筋的两个试件——普通构造柱试件(ZQ2)和构造柱增大尺寸试件(ZQ4):在低配筋情况下,斜裂缝贯穿构造柱,且随着荷载的往复,斜裂缝上下墙体相对错动,穿过斜裂缝的构造柱钢筋被错动弯拉(图7(a));3) 高配筋的两个试件——构造柱增大配筋试件(ZQ3)和构造柱增大尺寸并增大配筋试件(ZQ5):在高配筋情况下,斜裂缝无法完全贯穿构造柱,部分斜裂缝会沿构造柱边沿发展一小段,试件对角线交叉处的构造柱虽然在剪压作用下严重破碎,

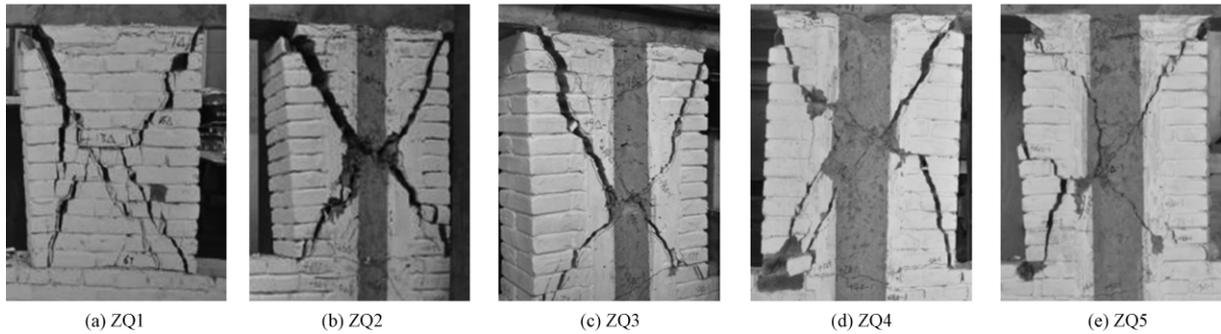


图 6 试件最终破坏状态

但构造柱中的钢筋基本上不会被剪切错动弯拉,反复的剪切错动反而促使构造柱两侧被斜裂缝分割的墙体较早脱离(图 7(b))。

2.2 滞回特性分析

图 8 给出了 5 个试件的荷载-位移角滞回曲线试验结果,可以看出,纵墙试件滞回曲线均表现出明显的“捏缩”现象,反映开洞纵墙试件的耗能性能较差。根据滞回曲线对各试件变形能力与滞回曲线耗能特性等进行分析,综合确定试件抗震性能。

2.2.1 变形能力

图 9 中给出了配置不同形式构造柱的 4 个试件的骨架曲线,可以看出,影响骨架曲线的主要参数为配筋率。墙肢配筋率为 0.14% (ZQ2) 和 0.13% (ZQ4) 的两个试件的骨架曲线具有明显的“屈服点”和较长的水平延性段。墙肢配筋率为 0.43%

(ZQ3) 和 0.44% (ZQ5) 的两个试件的骨架曲线的“屈服点”不明显,几乎不具有水平延性段。

表 2 给出了各试件的极限承载力 F_u 、极限位移角和延性系数 μ ,其中,延性系数 μ 为极限位移与名义屈服位移之比,名义屈服位移采用等效面积方法计算。

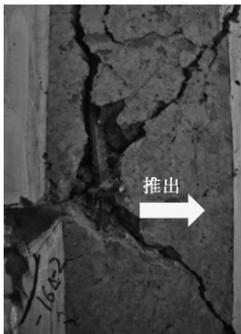
极限承载力和变形能力 表 2

编号	ZQ1	ZQ2	ZQ3	ZQ4	ZQ5
F_u / kN	198.7	251.4	315.3	301.3	330.2
极限位移角	1/126	1/70	1/98	1/50	1/75
延性系数 μ	1.5	5.0	2.0	7.3	2.3

图 9 和表 2 表明,当墙肢配筋率由 0.13% (ZQ4) 提高到 0.43% (ZQ3),由 0.14% (ZQ2) 提高到 0.44% (ZQ5) 时,极限位移角降低约 30% 左右,



(a) 低配筋情况



(b) 高配筋情况

图 7 配置不同配筋构造柱的墙体剪切裂缝特征

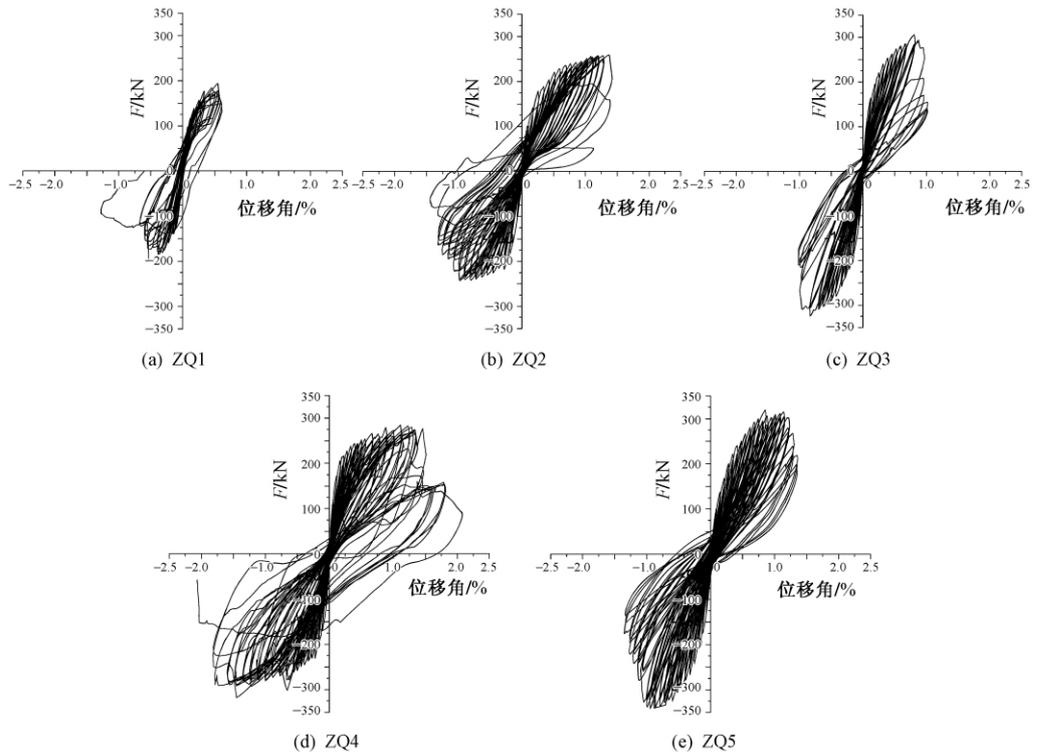


图 8 试件滞回曲线

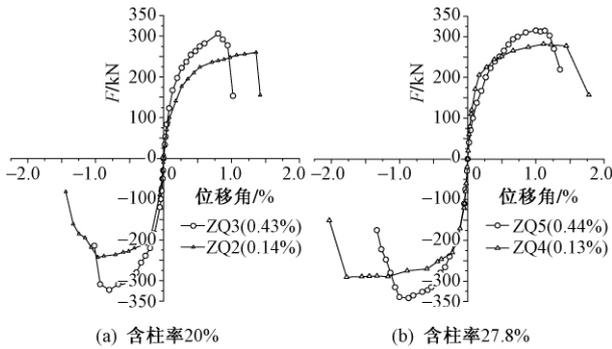


图 9 配筋率对骨架曲线的影响

延性系数降低 60% ~ 70% 左右;当墙肢含柱率由 20.0% (ZQ2 ZQ3) 增至 27.8% (ZQ4 ZQ5) 时,极限位移角增大 30% ~ 40% 左右,延性系数增加 15% ~ 45% 左右。说明增大构造柱尺寸、并按《抗规》规定的配筋率在构造柱内配置纵筋时,墙肢的变形能力比普通构造柱显著提高。

但如果再增大配筋后构件变形能力反而大幅降低,这主要是因为低配筋时,穿过斜裂缝的构造柱钢筋被斜裂缝上下墙体剪切错动而反复弯拉,因而能够为墙体提供较大变形、吸收较多能量(图 7(a))。增加构造柱钢筋时,只要穿过斜裂缝的构造柱钢筋还能够被斜裂缝上下墙体剪切错动而反复弯拉,钢筋就能够为墙体提供更大的变形、吸收更多的能量。然而当配筋高到一定程度时,穿过斜裂缝的构造柱钢筋就不发生弯曲了,钢筋变形反而会将构造柱两侧墙体推出(图 7(b)),导致墙体变形与耗能均大幅降低。

然而仅仅根据本文的几个试验结果尚不能得出按《抗规》配筋的墙肢变形能力为最大的结论。如图 10 所示,延性系数与配筋率的关系不一定为图中实线,而可能为图中虚线并存在界限配筋率,这有待进一步的试验研究。

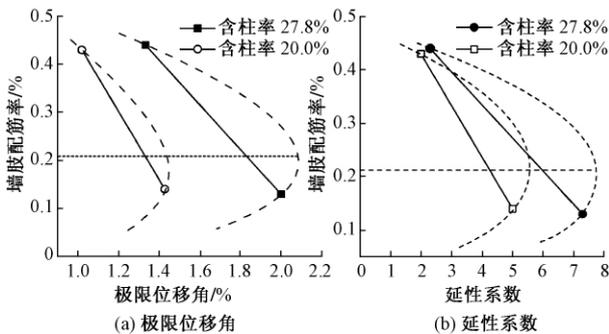


图 10 变形能力影响因素

2.2.2 滞回耗能

低周往复加载条件下滞回曲线的形状和面积能够综合反映构件的耗能能力。图 11 给出了各试件

不同位移下的滞回环进行归一化处理后的标准化滞回环,每行中 3 个小图分别对应开裂、最大荷载和最终破坏三种不同破坏状态。

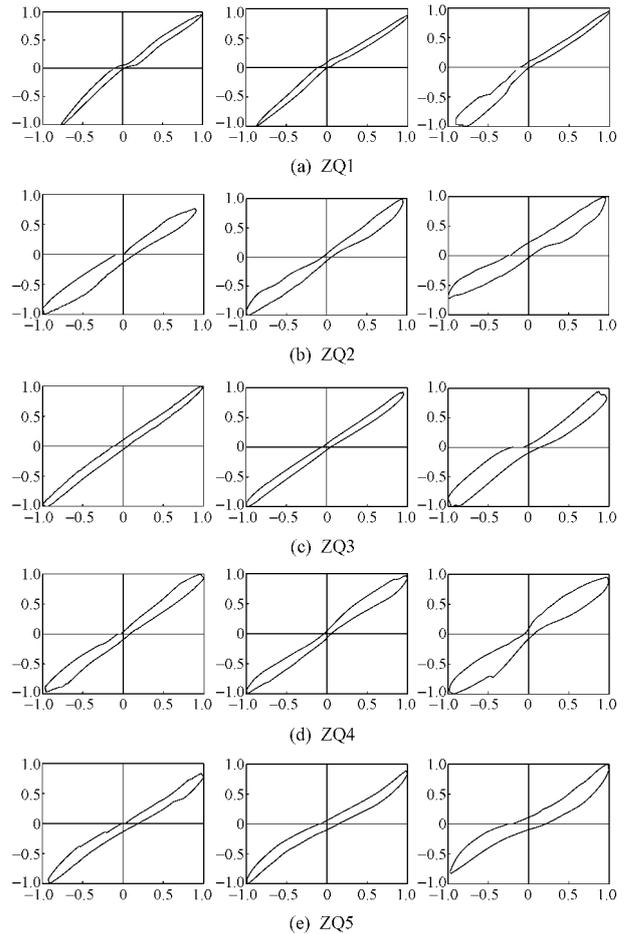


图 11 墙体试件标准化滞回环

由图 11 可以看出,各试件的标准化滞回环均不饱满,耗能能力均较低。配筋率较高的 ZQ3 ZQ5 的标准化滞回环表现出轻微的“反 S 形”特征。

采用等效粘滞阻尼系数 h_e 对试件的耗能性能进行定量分析,参考《建筑抗震试验方法规程》(GBJ 101—96) h_e 计算式如下:

$$h_e = A / (2\pi V_0 \Delta_0) \quad (1)$$

其中: A 为滞回环的包围面积; V_0 、 Δ_0 分别为正负最大剪力和正负最大位移绝对值的平均。

试件 ZQ1 ~ ZQ5 的 h_e 曲线见图 12。各墙体试件开裂、极限承载力和最终破坏时的等效粘滞阻尼系数 h_{e1} 、 h_{e2} 、 h_{e3} 计算结果列于表 3。

等效粘滞阻尼系数		表 3				
试件	ZQ1	ZQ2	ZQ3	ZQ4	ZQ5	
h_{e1}	0.040	0.044	0.048	0.048	0.046	
h_{e2}	0.064	0.145	0.085	0.164	0.059	
h_{e3}	0.068	0.146	0.086	0.157	0.094	

(下转第 90 页)

宜大于 20mm,各层抹灰间隔时间约 2~3h。浇筑灌浆料前,需使用胶带封堵模板接缝防止漏浆。浇筑施工时,在不损坏模板条件下可适度模外敲击振捣。

4 结论

(1) 置换表层截面加固混凝土柱、墙应尽量选择结构内力较小时或结构卸荷后进行,以降低剔凿施工风险。为确保施工质量,应谨慎选择置换材料、填补剔凿区、养护置换截面,以避免置换部位再出现缺陷。置换截面施工时,需尽量缩短剔凿施工及剔凿区空置的时间,以控制结构新增变形。在 9 度(8 度)抗震设防时,该加固方法鼓励使用强度等级不小于 C50 但不超过 C60(C70)的置换材料,见《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)第 3.9.3 条,尽量利用置换与保留截面之间的界面配筋(复合箍筋、拉结筋、界面植筋),确保组合截面协调变形。

(2) 研究表明:如果柱、墙置换截面加固时无卸荷,在后期新增荷载作用下,组合截面的低强保留截面应力必定大于高强置换截面应力,其程度与新增荷载及置换截面大小有关。随作用于被加固柱、墙的荷载逐渐增大,保留截面先于置换截面出现塑性变形,两者荷载效应的分配比例随之自行调整,使新增荷载效应更多地分配于置换截面,并导致置换截

面应力快速增加,直至超过保留截面应力。剔凿施工前被加固柱、墙的卸荷程度越高,保留截面出现塑性变形相对越晚。可知被加固柱、墙在承载能力极限状态下,其置换与保留截面的荷载效应分配关系与卸荷程度无关。

(3) 两个项目的设计与施工方案,得到了评审专家组的一致认可,实施后获得了良好预期的效果。此文可为处理类似结构缺陷参考。

(4) 所述加固方法拓展了《混凝土结构加固设计规范》(GB 50376—2006)相关规定的条件,如经进一步完善与验证,还可用于加固中度地震损坏的混凝土框架柱与剪力墙。

参 考 文 献

[1] 潘立. 高强材料置换混凝土柱、墙外周截面加固方法的研究[R]. 北京:建研科技股份有限公司,2011.
 [2] 潘立. 高强材料置换截面加固混凝土框架柱的研究[J]. 建筑结构,2009,39(3):88-91.
 [3] 潘立. 高强材料等截面置换表层加固混凝土墙体试验研究[J]. 建筑结构,2012,42(10):139-143,123.
 [4] JG/T 289—2010 混凝土结构加固用聚合物砂浆[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
 [5] GB/T 50448—2008 水泥基灌浆材料应用技术规范[S]. 北京:中国计划出版社,2008.

(上接第 84 页)

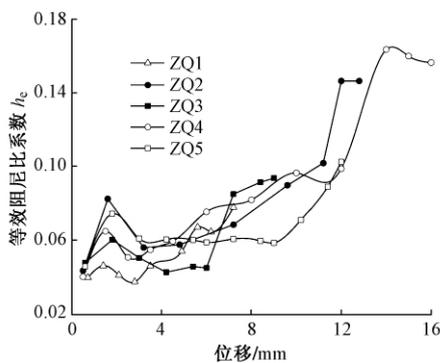


图 12 墙体试件 h_e 曲线

由图 12 和表 3 可以看出,各试件的 h_e 值均很小 h_{e1} 比较接近,但配筋率较低的试件 ZQ2, ZQ4 的 h_{e2} , h_{e3} 显著高于高配筋的 ZQ3, ZQ5 的。而试件 ZQ4 的 h_e 仅比 ZQ2 提高约 10%,表明对于单个滞回环的耗能能力,配筋率的影响较大,构造柱截面的影响则较小。

3 结论

(1) 按照《抗规》要求设置构造柱的窗间墙体具有较好的变形能力。

(2) 增大构造柱截面尺寸并按《抗规》要求的配筋率对构造柱配置纵筋时,窗间墙体的抗震性能得

到进一步改善。

(3) 增大构造柱的配筋到一定程度后反而会降低墙体的耗能性能,配筋率对耗能能力的影响较大,构造柱截面的影响则较小,但界限配筋率是多少尚需进一步的试验研究。

参 考 文 献

[1] 赵统,张新培,田志鹏. 汶川地震中小学砖混结构教学楼震害特征分析[J]. 世界地震工程,2009,25(3):150-158.
 [2] 徐有邻. 汶川震害的教训——教学楼倒塌的反思[J]. 建筑结构,2009,39(11):50-53.
 [3] 雷涛,李碧雄,顺远坤,等. 汶川地震中绵竹市中小学校舍震害调查分析[J]. 建筑结构,2009,39(11):58-62.
 [4] 李乔,赵世春. 汶川大地震工程震害分析[M]. 成都:西南交通大学出版社,2008.
 [5] 清华大学,西南交通大学,重庆大学,等. 汶川地震建筑震害分析及设计对策[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
 [6] 孙雪梅,刘伟庆. 大开间约束砖砌体开窗洞墙片的拟静力试验研究[J]. 工程抗震,2004(2):31-34.
 [7] 史庆轩,易文宗,刘伯权. 多孔砖砌体开窗洞纵墙片的抗震性能研究[J]. 世界地震工程,2000,16(2):30-34.