

砖混教室窗间墙不同构造条件下的破坏特点和抗震性能分析

吴 昊,赵世春,张蓬勃,许 沛

(西南交通大学土木工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:为了研究砖混教学楼窗间墙中构造柱的截面尺寸和配筋对纵向窗间墙破坏特点和抗震性能的影响,设计了 5 片缩尺纵墙试件,并通过低周反复加载试验对配置不同尺寸和配筋构造柱的墙体试件的破坏破坏形态、滞回特性、变形能力、刚度退化等进行了分析.结果表明,中柱的截面大小和配筋不改变墙体的破坏形态,各墙体试件均发生剪切破坏,按照规范要求设置构造柱的墙体试件表现出较好的抗震性能,构造柱与砖砌体具有较好的协同工作性能,适当增大构造柱截面尺寸能够显著改善墙体的延性耗能性能、变形能力,主裂缝宽度明显减小;增大中柱的配筋率使其成为 RC 柱时,尽管墙体试件抗侧刚度和承载力得到提高,但墙体的耗能能力和变形能力均出现降低,中柱与砖墙体的协同工作性能明显变差.因此,适当增大构造柱尺寸对于进一步提高砖混教学楼窗间墙的抗震和抗倒塌能力是有利的.

关键词:砖混结构教学楼;窗间墙;构造柱截面尺寸和配筋;破坏机理;抗震性能

中图分类号:TU 362

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2012)06-0786-06

2008 年 5·12 汶川大地震中中小学砖混结构教学楼大量破坏,部分教学楼发生粉碎性倒塌,造成重大人员伤亡和财产损失^[1],砖混学校建筑的抗地震倒塌性能成为震后人们广泛关注的热点问题.砖混教学楼一般为空旷大开间结构,图 1 给出了典型砖混教室标准层的平面布置图.为满足通风、采光等特殊要求,教室的纵墙开洞率普遍较高,如单跨外廊式教室结构的纵墙开洞率达 30%左右.由于普通砖混结构教室通常采取纵横墙联合承载的方案,门窗洞口的严重削弱造成结构纵向相对单薄,纵墙的破坏模式特别是窗间墙其破坏形态和抗震性能对纵墙的宏观破坏模式、整体结构的抗倒塌安全性等具有重要影响.因此,窗间墙应具备必要的抗倒塌储备水平以抵御超出规范规定的“大震”的“特大地震”倒塌作用.

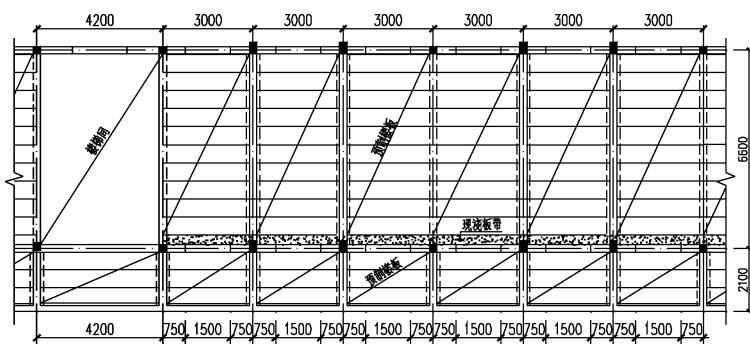


图 1 砖混结构教室标准层平面布置图

Fig. 1 Standard floor plan of brick-concrete classroom buildings

目前关于砖混结构校舍抗震性能的研究主要基于震害调查分析^[2-8],对作为关键性受力和耗能构件的纵向窗间墙在不同构造条件下的破坏机理和抗震性能等方面的研究较少^[9].本文通过 5 片纵墙试件的拟静力试验对配置不同尺寸和配筋率构造柱的窗间墙的破坏过程、破坏形态、滞回特性和变形能力等进行了比较分析.

收稿日期:2012-06-29 修改稿日期:2012-11-28

基金项目: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)

作者简介:吴 昊(1982-),男,河南周口人,博士研究生,主要从事砌体结构基本理论及结构抗震性能研究.

1 试验概况

1.1 试件设计

试件模型的设计主要结合四层单跨外廊式砖混结构教室的窗间墙的尺寸特点以及近走廊侧底层墙体的竖向荷载水平,以窗间墙中柱的尺寸和配筋率为主要参数,按照 1/2 的缩尺比例共设计了 5 片墙体试件,分别为无构造柱试件(ZQ1)、普通构造柱试件(ZQ2)、增大构造柱

表 1 试件设计参数
Tab.1 Details of specimens

编号	洞口尺寸 /mm	中柱截面 /mm	纵筋	含柱率 /%	柱配筋率 /%
ZQ1	900×900	/	/	/	/
ZQ2	900×900	120×240	4Φ8	27.8	0.7
ZQ3	900×900	120×240	4 Φ14	20.0	2.1
ZQ4	835×900	185×240	4Φ8	27.8	0.5
ZQ5	835×900	185×240	2 Φ14+2 Φ16	20	1.6

配筋试件(ZQ3)、增大构造柱尺寸试件(ZQ4)以及增大构造柱尺寸并增大配筋试件(ZQ5). 试件 ZQ1、ZQ2、ZQ3 尺寸为 600×900×240(相应的高宽比为 1.5),试件 ZQ4、ZQ5 的尺寸为 665×900×240(高宽比为 1.4),试件相关设计参数如表 1 所示,分别用含柱率、柱配筋率表示构造柱尺寸和配筋的参数变化,其中 ZQ2 试件的构造柱尺寸和纵筋是按照现行抗震设计规范要求设计的,而试件 ZQ4 虽然增大了构造柱尺寸,但其纵向配筋与 ZQ2 相同,即为现行规范规定的配筋. 各墙体试件均采用规格为 240 mm×115 mm×53 mm 的 MU10 级烧结页岩标砖和 M10 级混合砂浆砌筑而成,墙厚统一取为 240 mm. 窗间墙中柱和顶部辅助加载梁所用混凝土的设计强度等级为 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 MPa、8.9 MPa 和 26.1 MPa,中柱箍筋 φ6@150.

1.2 加载装置和加载制度

试验加载装置和测点布置等如图 2 所示. 作动器端部通过四根钢拉杆与墙体试件之间可靠连接,位移计布置在顶梁底部适当位置用以测量墙肢顶部水平位移. 加载方式为:首先用两个同步竖向千斤顶在墙体顶部施加恒定的竖向荷载,使试件产生 0.8 MPa 的压应力(相应的轴压比 0.15). 水平荷载采用低周往复加载方案,参考《建筑抗震试验方法规程》(GBJ101—96)按照力和位移混合控制,具体加载制度为墙体开裂前以 10 kN 为级差力控制加载,每级荷载循环 1 次,裂缝出现后以开裂位移的整数倍进行位移控制加载,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.

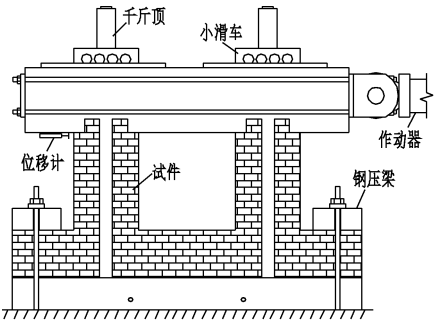


图 2 加载装置示意图
Fig. 2 Sketch of test setup

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏过程和破坏特点

各墙体试件的破坏过程基本相似,大致经历开裂、裂缝发展和最终破坏三个主要阶段. 在加载的初期阶段,试件基本处于弹性状态,墙体未见开裂现象,当荷载增大到极限荷载的 30%~40%时首先在墙体的受拉角部沿灰缝出现水平裂缝,为墙肢截面正应力超过砂浆抗拉强度引起的弯曲型裂缝.

改用位移加载后,当位移增大至一定程度后剪压复合状态下墙体的主拉应力超过其抗拉强度引起墙体发生剪切破坏,墙体突然出现沿对角分布的剪切斜裂缝,反向加载时墙体的新增斜裂缝与正向裂缝在其中一墙肢中形成交叉裂缝. 随位移和荷载的持续增大,墙体的裂缝范围不断延伸,主裂缝宽度不断加宽,其中,试件 ZQ2 和 ZQ4 沿主裂缝不断出现掉屑的现象,试件 ZQ3 和 ZQ5 的破坏墙块则不断被推出.

图 3a~e 给出了各纵墙试件的最终破坏形态,可以看出,窗间墙的裂缝类型主要为“X”形交叉裂缝或斜向裂缝,与单跨外廊式砖混结构教室的窗间墙典型震害特征具有较好的一致性. 采用增大中柱截面尺寸的试件 ZQ4 和 ZQ5 的破坏程度相应地比普通截面的试件 ZQ2 和 ZQ3 明显减轻,墙体主裂缝宽度减小,墙体表面次生裂缝增多,表明增大窗间墙中柱的截面尺寸能够有效减轻墙体的破坏程度,改善破坏墙块的整体性.

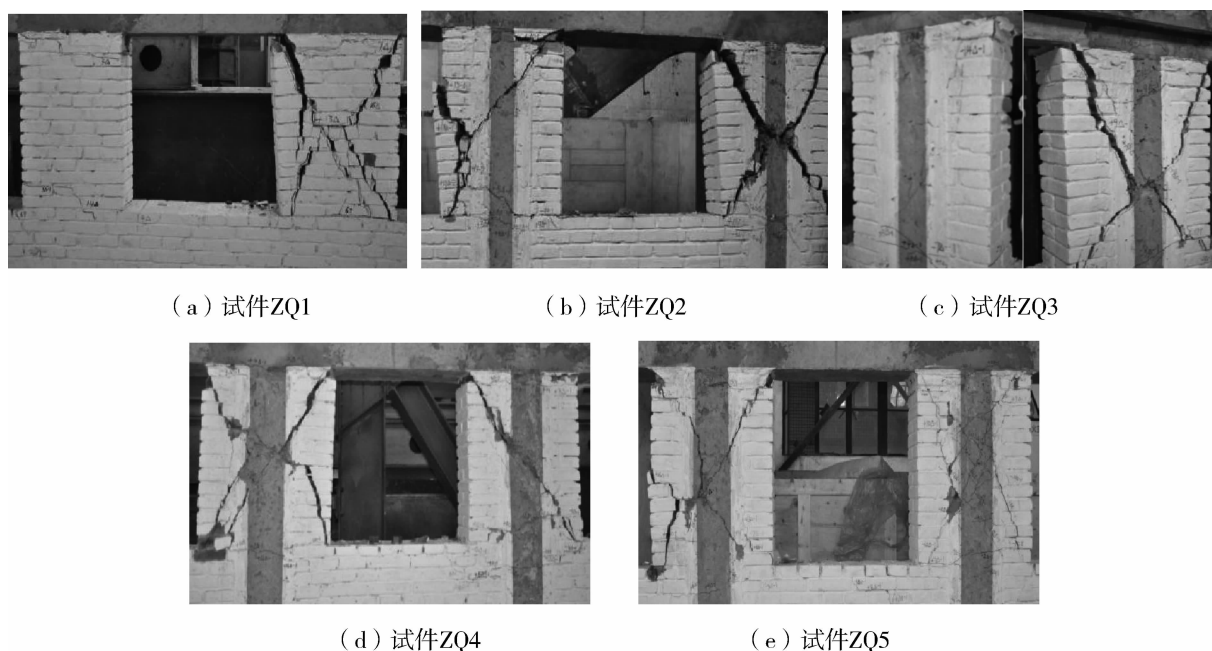


图 3 试件最终破坏状态

Fig. 3 Failure modes of specimens

尽管各墙体试件最终均表现为剪切破坏,但不同中柱做法条件下墙体的斜裂缝的生成特点有所不同(见图 4).中柱构造配筋条件下(ZQ2、ZQ4),尽管柱截面的配筋率很低,但砖砌体部分与构造柱仍表现出较好的协同工作性能,剪切裂缝生成时直接沿对角贯穿整个墙肢范围;而采用 RC 柱的试件 ZQ3 和 ZQ5 由于纵筋直径较大、屈服强度较高,RC 柱与两侧砖砌体的协调工作能力变差,剪切破坏时斜裂缝首先沿对角分布在砖砌体部分而无法形成贯通裂缝,进一步增大位移到一定程度后中柱发生剪切破坏后,RC 柱两侧的斜裂缝才形成贯通裂缝,而且最终破坏时 RC 柱中纵筋基本无明显塑性变形.

2.2 耗能性能

低周反复加载条件下滞回曲线的形状和包络面积综合反映试件的耗能能力.各墙体试件的荷载-位移角滞回曲线分别如图 5 中 a~e 所示,可以看出,纵墙试件滞回曲线均表现出明显的“捏缩”现象,反映开洞墙体的耗能性能较差.在墙肢开裂前滞回曲线基本重合为直线,墙体开裂后进入非线性变形状态,随裂缝范围的不断扩展,滞回环的包络面积不断增大.

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,其计算式如下式(1):

$$h_e = \frac{A}{2\pi V_0 \Delta_0} \quad (1)$$

式中: A 表示滞回环的包络面积; V_0 、 Δ_0 分别为正、负最大剪力和最大位移绝对值平均.试件 ZQ1 ~ ZQ5 的 h_e 曲线见图 6.

各墙体试件开裂破坏、极限承载力和最终破坏状态时的 h_{e1} 、 h_{e2} 和 h_{e3} 计算结果列于表 2.

由图 6 和表 2 可以看出,各试件的 h_e 值均很小,但中柱配筋率较低的试件 ZQ2 和 ZQ4 的 h_e 明显高于配筋率相比较高的试件

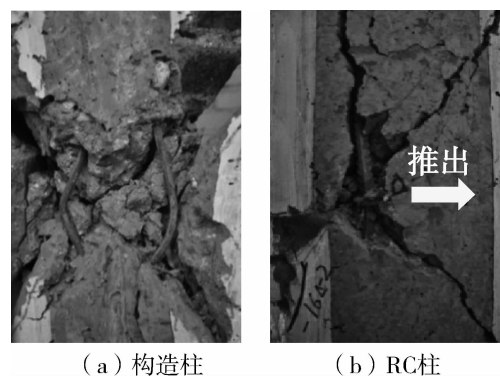


图 4 不同中柱做法墙体剪切裂缝特点

Fig. 4 Shear crack of specimens with different middle structural column

表 2 等效粘滞阻尼系数

Tab. 2 Equivalent viscous damping coefficients

编号	h_{e1}	h_{e2}	h_{e3}
ZQ1	0.040	0.064	0.068
ZQ2	0.044	0.145	0.146
ZQ3	0.048	0.085	0.086
ZQ4	0.048	0.164	0.157
ZQ5	0.046	0.059	0.094

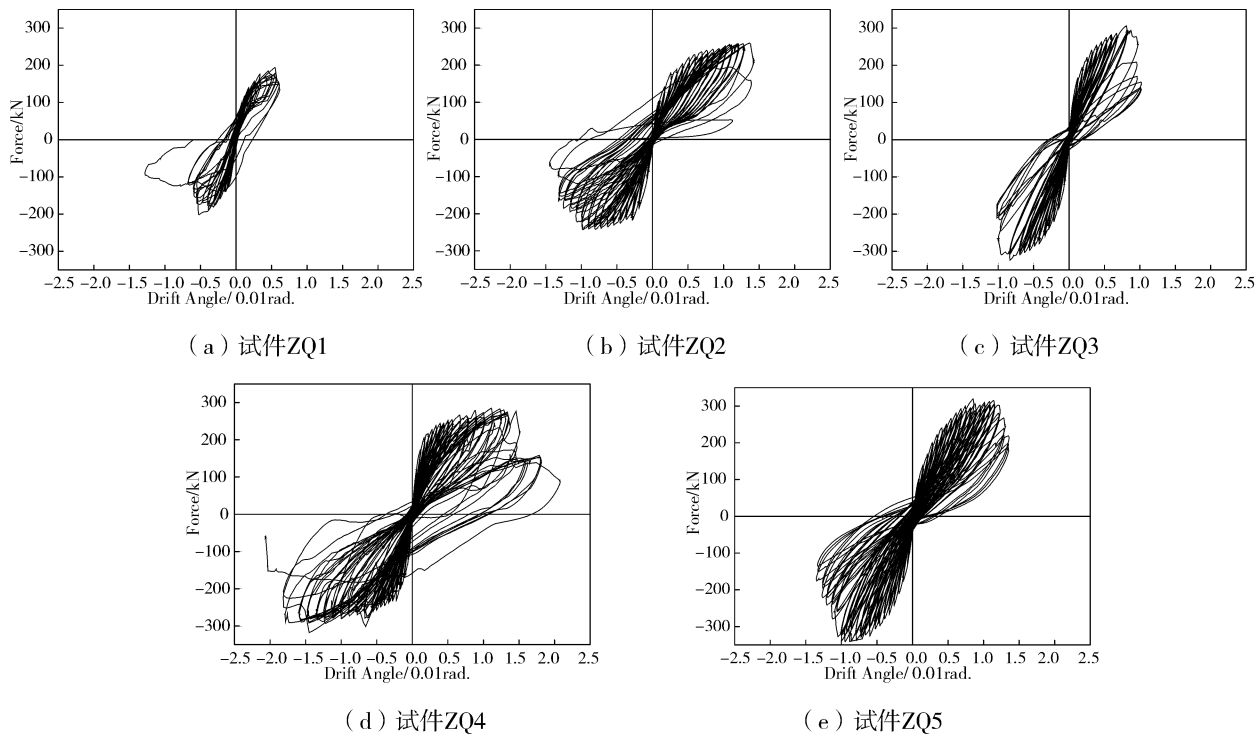


图 5 墙体试件滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves of specimens

ZQ3 和 ZQ5,而且增大柱截面尺寸的试件 ZQ4 的 h_e 结果比试件 ZQ2 提高约 10%.

2.3 位移延性分析

在结构和构件的抗震性能分析中,一般采用延性系数表示其在保持基本承载能力条件下的变形能力.墙体试件的延性系数 μ 定义为最终破坏状态时的极限位移 Δ_u 与屈服位移 Δ_y 的比值,对于骨架曲线无明显屈服点的试件 ZQ1、ZQ3 和 ZQ5,按照等能量法确定试件的名义屈服位移,各试件的极限位移角、延性系数等分别见表 3.

由表中数据可以看出,中柱的截面尺寸和配筋情况对墙体的延性影响较大,在相同柱截面条件下,按构造配筋的试件 ZQ2 和 ZQ4 的延性系数分别比配置 RC 柱的试件 ZQ3 和 ZQ5 提高 1.5 倍和 2.2 倍,表明增大柱截面的配筋率将使得墙体的延性降低.试件 ZQ4 的延性比 ZQ2 提高 46%,可见在相同配筋条件下,增大中柱截面尺寸能够有效提高窗间墙的延性,由试件 ZQ2 和 ZQ4 的破坏过程可知,在高度非线性变形区域,沿斜裂缝的摩擦过程提供了墙体大部分的延性,而且构造柱的截面尺寸越大,这种作用效果也就越明显,墙肢延性的显著改善能够避免墙体过早发生严重破坏.当增强中柱的配筋使其成为 RC 柱后,纵筋的销栓作用虽然提高构件的承载能力,但改变了墙体的破坏机制,且 RC 柱的配筋越强则纵筋的销栓作用 and 对抗侧刚度的增大作用也就越明显,导致墙体的延性比配置普通构造柱及增大截面构造柱试件相应变差,对于窗间墙延性耗能能力的发挥是不利的.

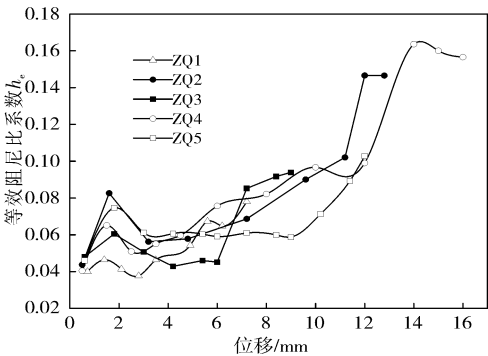


图 6 墙体试件 h_e 曲线

Fig. 6 h_e curves of specimens

表 3 极限荷载和变形能力

Fig. 3 Ultimate load and deformability

编号	F_u /kN	Δ_{cr} /mm	Δ_u /mm	位移角	μ
ZQ1	198.7	0.4	6.4	1/126	1.5
ZQ2	251.4	0.8	12	1/70	5.0
ZQ3	315.3	0.6	14.5	1/98	2.0
ZQ4	301.3	0.5	7.2	1/50	7.3
ZQ5	330.2	0.6	8.1	1/75	2.3

2.4 刚度退化分析

采用割线刚度表示低周反复荷载作用下墙体的刚度. 由于砖砌体的脆性特征, 正、负方向的刚度一般不同, 因此墙体割线刚度取为两方向荷载绝对值之和与对应位移绝对值之和的比值. 试件 ZQ1~ZQ5 的刚度退化曲线如图 7 所示.

可以看出, 除 ZQ1 外, 其他试件的初始刚度均比较大, 由于剪切破坏模式下窗间墙具有只受压对角斜撑的受力机制, 墙体一旦形成贯通裂缝, 其抗侧刚度和抗剪能力即出现不同程度地下降, 因此斜裂缝的贯通导致墙体刚度出现急剧退化, 此后退化速度减慢并逐渐趋于稳定, 尤其是试件 ZQ4 的刚度在较大范围内持续稳定退化使得墙体在严重破坏、严重变形时的抗倒塌性能得到明显改善, 对于维持破坏墙体的残存承载力是有利的.

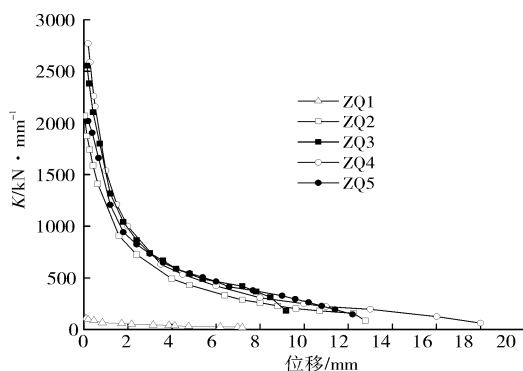


图7 刚度退化曲线

Fig. 7 Stiffness degradation curves

3 窗间墙中构造柱的设置分析

中小学砖混结构教学楼属中低层建筑(层数 3~5 层, 层高 3.6 m 左右), 窗间墙高宽比一般为 1.2~2.0, 侧身荷载作用条件下剪切变形起控制作用, 墙体的复合应力状态下墙体的破坏模式主要是由墙体的抗剪能力不足引起的剪切破坏, 特别是近走廊侧的纵墙体, 由于走廊、楼板、门窗过梁等对窗下墙的抗弯和抗剪能力的增强作用, 常规构造做法条件下普通砖混结构教室的纵墙在强破坏地震作用时一般很难出现“强柱弱梁”的整体型破坏机制, 往往是窗间墙发生比较严重的剪切破坏, 即“强梁弱柱”式层间破坏机制, 悬挑走廊造成的偏心荷载作用进一步加剧该破坏模式下结构倒塌的危险性. 由于砖混结构等脆性结构的抗震能力储备一般仅体现在墙体构件的基本抗震能力储备层次^[10], 结构纵向的冗余度水平较低, 因此有必要改善窗间墙的破坏形态, 提高墙体的抗震性能.

窗间墙的受力状态复杂, 为结构中的易倒塌构件, 一般需在墙体中部设置构造柱形成组合墙体, 中柱位于截面剪应力分布较大区域, 与两侧的砖砌体形成整体、共同作用, 侧向荷载作用时直接参与抗剪, 同时能够分散大梁集中荷载作用以及增强墙体的面内外稳定性等, 在主裂缝贯通后的反复加载过程中沿墙体斜裂缝的摩擦变形过程和柱中纵筋的反复弯拉变形等使墙体具有较好的耗能性能和变形能力, 且增大柱截面尺寸有利于这种机制的充分发挥, 因此适当增大柱截面的尺寸能够进一步改善墙体的破坏形态、抗震性能和延性等. 当增强柱截面配筋使其成为 RC 柱后其作用性质发生改变, 与砖墙体的协同工作性能变差, 尽管 RC 柱的存在对于提高墙体的极限承载力是有利的, 但同时会降低墙体的延性和耗能能力.

4 结 论

由以上分析, 可以得到以下主要结论:

(1) 砖混教学楼窗间墙的高宽比等特点决定了其在剪压复合应力状态下主要发生剪切型破坏, 墙体中配置构造柱或 RC 柱均不改变墙体的破坏模式.

(2) 纵墙试件的滞回曲线均具有明显的“捏缩”特征, 反映开洞墙体耗能能力相对较差的特点.

(3) 按照现行抗震设计规范配置普通构造柱的窗间墙表现出较好的抗震性能, 在相同配筋条件下适当增大构造柱的截面尺寸时墙体的耗能性能、变形能力以及裂缝分布状态等均得到进一步改善.

(4) 当在窗间墙中采用配筋率较高的 RC 柱时, 尽管墙体的承载能力得到提高, 但纵筋的销栓作用削弱了中柱与砖砌体部分的协同工作能力, 改变了墙体的耗能机制, 墙体的耗能能力和延性均变差.

因此, 适当增大中柱的截面尺寸同时合理控制柱截面的配筋率是砖混结构教学楼窗间墙抗震设计的关键.

参考文献 References

- [1] 徐有邻. 汶川震害的教训—教学楼倒塌的反思[J]. 建筑结构, 2009, 11(39): 50-53.
XU You-lin. Lessons from Wenchuan seismic damage: introspection on the collapse of classroom buildings[J]. Building Structure, 2009, 11(39): 50-53.
- [2] 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.
LEI Tao, LI Bi-xiong, SHUN Yuan-kun, et al. Damage investigation and analysis on school buildings in Mianzhu during Wenchuan Earthquake[J]. Building Structure, 2009, 39(11): 58-62.
- [3] 孙柏涛, 周强, 杨玉成. 乡镇中小学校舍抗震抗倒塌安居安学设防目标——汶川地震北川擂鼓镇中小学校舍震害原因探究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(2): 1-10.
SUN Bai-tao, ZHOU Qiang, YANG Yu-cheng. Seismic fortification objects of rural primary and middle schools: The damage cause study for primary and middle school buildings of Leigu Town, Beichuan County in Wenchuan earthquake[J]. Journal of earthquake engineering and engineering and vibration, 2011, 31(2): 1-10.
- [4] 熊立红, 杜修力, 陆鸣, 等. 5.12汶川地震中多层房屋典型震害规律研究[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(11): 1166-1171.
XIONG Li-hong, DU Xiu-li, LU Ming, et al. Damage of Multistory Buildings During the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(11): 1166-1171.
- [5] 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.
ZHAO Tong, ZHANG Xin-pei, TIAN Zhi-peng. Analysis of earthquake damage to masonry school buildings in Wenchuan earthquake[J]. World earthquake engineering, 2009, 25(3): 150-158.
- [6] 王立成. 汶川地震后学校砌体建筑结构破坏情况调查与分析[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 650-656.
WANGLi-cheng. Investigation and analysis for damage of school masonry buildings in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(5): 650-656.
- [7] 林树枝, 李刚, 程耿东. 提高学校建筑抗震能力的对策建议[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 644-649.
LINShu-zhi, LI Gang, CHENG Geng-dong. Countermeasures and suggestions for enhancing seismic capacity of school buildings[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(5): 644-649.
- [8] 李碧雄, 谢和平, 王哲, 等. 汶川地震后多层砌体结构震害调查及分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(4): 19-25.
LI Bi-xiong, XIE He-ping, WANG Zhe, et al. Wenchuan Earthquake Field Reconnaissance and Analysis on multi-story masonry structure buildings[J]. Journal of Sichuan university: ENGINEERING SCIENCE EDITION, 2009, 41(4): 19-25.
- [9] 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.
SHI Qing-xuan, YI Wen-zong, LIU Bo-quan. Experimental study on seismic behavior for porous masonry longitudinal wall piece between windows[J]. World earthquake engineering, 2000, 16(2): 30-34.
- [10] 赵世春, 刘艳辉, 寇举安, 等. 延性与脆性结构的抗震能力储备初探[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(3): 327-335.
ZHAO Shi-chun, LIU Yan-hui, KOU Ju-an, et al. Preliminary Research on Seismic Capacity Reserve for Ductile and Brittle Structures[J]. Journal of Southwest Jiaotong university, 2009, 44(3): 327-335.

(下转第 834 页)

Experimental investigation on shear behavior of stressed skin diaphragms by different connection types

ZHAO Hai-feng

(Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China)

Abstract: The connecting piece is an important factor in shear performance. Shear behaviour of stressed skin diaphragms using profiled sheet connected by the self-tapping screws and weld connection was studied in this paper. The paper analyzed the effect of self-tapping screws and weld connection on the failure types of skin diaphragms and shear properties, and presented the conclusion of considering the effect of the self-tapping screw connections and weld connection for skin shear resistance difference by the comparison of the data.

Key words: *stressed skin diaphragm; connectors; self-tapping screw; weld connection*

Biography: ZHAO Hai-feng, Lecturer, Master's degree, Hangzhou 311231, P. R. China, Tel: 0086-13757196107, E-mail: jiaozhun-bei@163.com

(上接第 791 页)

Failure characteristics and seismic performance analysis of longitudinal wall between windows of brick-concrete masonry classroom buildings with different structural measures

WU Hao, ZHAO Shi-chun, ZHANG Peng-bo, XU Hu

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Five reduced-scale wall specimens were designed in order to investigate the influence of section size and reinforcement ratio of middle column on the failure characteristic and seismic performance of longitudinal wall between windows of brick-concrete school buildings. The failure characteristics, hysteretic behavior, deformability and stiffness degradation of each wall specimen were analyzed respectively. The results indicate that all specimens with different middle columns are characterized by shear failure. The specimen designed in accordance with the current code for seismic design generally exhibits good seismic performance where the structural column works well with brick masonry. Increasing section size of structural column can improve the energy dissipation, deformability and the crack distribution of specimen significantly. RC column decreases the energy dissipation and deformability of wall specimens in the highly nonlinear stage, although it can increase the stiffness and bearing capacity of wall specimen. Therefore, increasing the size of structural column properly can enhance the seismic performance and anti-collapse capacity of longitudinal walls between windows of brick-concrete masonry structure.

Key words: *brick-concrete masonry school building; longitudinal wall between windows; section size and reinforcement of structural column; failure mechanism; seismic performance*

Biography: WU Hao, Candidate for Ph. D., Chengdu 610031, P. R. China, Tel: 0086-28-87601178, E-mail: yong_zhiwu@163.com