

芯柱式构造柱约束墙体抗震变形能力试验研究

李英民^{a,b}, 郑妮娜^{a,b}, 夏洪流^{a,b}, 葛玉琦^{a,b}

(重庆大学 a. 土木工程学院, b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 芯柱式构造柱可解决现浇构造柱支模难、造价高、工期长等问题。通过 11 个试件(6 个芯柱式构造柱约束墙体、2 个现浇构造柱约束墙体、3 个素墙体)的低周反复加载试验,对比分析了不同约束条件下墙体的骨架曲线特征、位移延性及位移角,探讨了竖向压应力、高宽比及墙体形式对芯柱式构造柱约束墙体变形能力的影响。试验结果表明,芯柱式构造柱的作用与传统现浇构造柱相近,可通过对墙体的约束增强墙体的整体变形能力。

关键词: 砌体结构; 芯柱式构造柱; 低周反复加载试验; 位移延性; 变形能力

中图分类号: TU365 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)04-0001-06

Pseudo-Static Test on Seismic Deformation Capacity of Masonry Wall Constrained by Core-Tie-Columns

LI Ying-min^{a,b}, ZHENG Ni-na^{a,b}, XIA Hong-liu^{a,b}, GE Yu-qi^{a,b}

(a. College of Civil Engineering; b. Key Lab of Chinese Education Ministry for Construction and New Technology of Mountain Cities, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: A new tie-column such as core-column, named as core-tie-column, for the substitution of cast-in-place tie-column was used to improve seismic performance of masonry structures. Pseudo-static tests of 11 wall specimens including 6 walls constrained by core-tie-columns, 2 walls constrained by cast-in-place tie-columns, and 3 walls without constraints were carried out to study the seismic deformation capacity of masonry walls with core-tie-columns. The skeleton load-displacement curves and the normalized skeleton curves, displacement ductility factors, drift angles of the specimens were analyzed and compared. The effects of the level of vertical compress load, aspect ratio and the wall style on the deformation capacity of the wall with core-tie-columns were distinguished. It is shown that the constraints effects of core-tie-columns on masonry wall are effective and the walls with core-tie-columns have good deformation capacity as those with cast-in-place tie-columns.

Key words: masonry construction; core-tie-column; pseudo-static test; displacement ductility; deformation

砌体结构是中国广大村镇房屋的主要结构形式。研究^[1-2]和震害^[3-5]表明,构造柱—圈梁是保证砌体结构实现预期抗震性能的有效措施。事实上,限于经济、技术、意识等多种原因,村镇砌体结构房

屋不采用构造柱—圈梁的现象普遍存在^[6]。为解决现浇构造柱造价高、施工难度较大、工期较长、与预制板的搁置关系复杂等问题,作者提出芯柱式构造柱,旨在通过砌筑加灌芯的方式形成构造柱^[7],所用

收稿日期: 2009-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908242); 国家科技支撑计划(2009BAJ28B01-2); 重庆市城乡建设委员会科技项目(城科字 2009 第(3)号)

作者简介: 李英民(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地震动模型化与结构抗震设计研究, (E-mail) liyingmin@cqu.edu.cn。

预制块及构造柱形式如图 1。预制块可随构造柱设置部位改变形式,与墙体咬合砌筑以形成马牙槎。

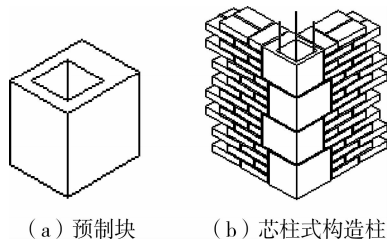


图 1 预制块及芯柱式构造柱

构造柱的抗震性能突出表现在对墙体形成约束而提高其变形能力^[8-10]。文献[1,2,11-14]分别针对不同约束措施下的烧结普通砖、混凝土小型空心砌块、混凝土多孔砖等墙体的抗震性能进行了低周反复加载试验研究,结果表明构造柱和圈梁措施可以有效提高墙体的变形能力。但相关研究结论局限于传统的现浇构造柱和圈梁约束的墙体,不能直接应用于芯柱式构造柱约束墙体。为此,进行了 11 个墙体的低周反复加载试验,重点考察芯柱式构造柱约束墙体的变形能力。

1 试件设计及试验方案

1.1 试件设计

试件设计考虑了约束类型、墙体形式(实墙、带门洞和带窗洞墙),竖向压应力(0.5、0.3、0.2 MPa)、高宽比(0.5、0.75)等因素,共设计 11 个试件(见表 1),包括 3 个无约束措施墙体(简称素墙),记作 W-1~3;2 个现浇构造柱约束墙体(简称现浇式墙),记作 BCW-1~2;6 个芯柱式构造柱约束墙体(简称芯柱式墙),记作 BC1W-1~6。

表 1 试件参数

编号	约束	σ / MPa	形式	强度/MPa	
				砂浆	混凝土
W-1	素墙	0.5	无	2.8	
BCW-1	现浇式	0.5	无	3.0	16.9
BC1W-1	芯柱式	0.5	无	2.5	18.5
W-2	素墙	0.5	门洞	4.5	
BCW-2	现浇式	0.5	门洞	3.4	16.8
BC1W-3	芯柱式	0.5	门洞	4.8	25.1
W-3	素墙	0.5	窗洞	6.9	
BC1W-5	芯柱式	0.5	窗洞	6.8	25.1
BC1W-4	芯柱式	0.3	无	3.3	19.5
BC1W-2	芯柱式	0.2	无	10.3	25.1
BC1W-6	芯柱式	0.5	无	6.9	25.1

11 个试件可形成 6 个对比组,第 1 组包括 3 个实墙试件 W-1、BCW-1 和 BC1W-1;第 2 组包括 3 个带门洞墙试件 W-2、BCW-2 和 BC1W-3;第 3 组包括 2 个带窗洞墙试件 W-3 和 BC1W-5;第 4 组包括竖向压应力依次为 0.5、0.3 及 0.2 MPa 的 3 个芯柱式墙 BC1W-1、BC1W-4、BC1W-2;第 5 组包括 2 个高宽比分别为 0.5、0.75 的芯柱式墙 BC1W-1 和 BC1W-6;第 6 组包括芯柱式实墙 BC1W-1、带门洞墙 BC1W-3 和带窗洞墙 BC1W-5。

所有试件都采用一砖墙,240 mm 厚,这样可以避免半砖墙无法包含丁砖作用的缺点。除试件 BC1W-6 尺寸为 2 m×1.5 m(高宽比 0.75)外,其余试件尺寸均为 3 m×1.5 m(高宽比 0.5)。试件高度与宽度的缩尺比为 1/2,由于砌筑芯柱式构造柱的预制块难以缩尺加工,所以现浇式及芯柱式构造柱断面均采用 240 mm×240 mm,着重对比素墙、芯柱式墙与现浇式墙的性能差别。试件立面图如图 2 所示。

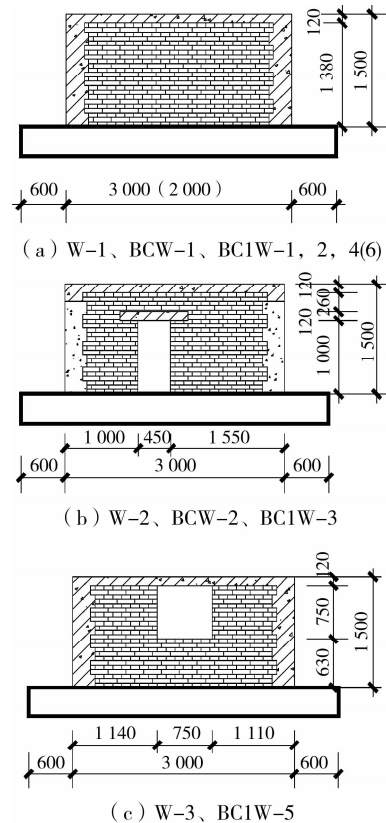


图 2 试件立面图(其中 W-1~3 两侧没有构造柱)

芯柱式构造柱采用的混凝土预制块的规格为 300 mm(长)×240 mm(宽)×180 mm(高),居中开设 150 mm×150 mm 的孔洞。构造柱、圈梁的尺寸及配筋如图 3。墙体和两种构造柱间均沿墙高间隔

500 mm 配置 2 ϕ 6 拉结筋,拉结筋伸进墙内 1 000 mm,共布置了 2 道拉结筋。

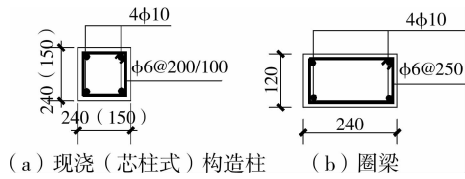


图 3 构造柱、圈梁断面图

1.2 加载装置及加载方案

试验加载装置如图 4。采用力和位移混合控制加载方案,具体加载制度如下:

1)在试件上等分 3 次加足竖向荷载,试验过程中使其保持恒定;2)预加水平反复荷载,荷载值不超过开裂荷载的 20%;3)以荷载控制加载,第 1 级荷载取 50 kN,以开裂荷载 20%为级差,每级荷载循环 1 次;4)试件开裂且滞回曲线发生明显弯曲后改用位移控制加载,以 $\Delta = 0.5$ mm 为级差,每级循环一次,当荷载下降较多时,调大位移控制步长为 1 mm,荷载下降至 85%极限荷载时结束试验。

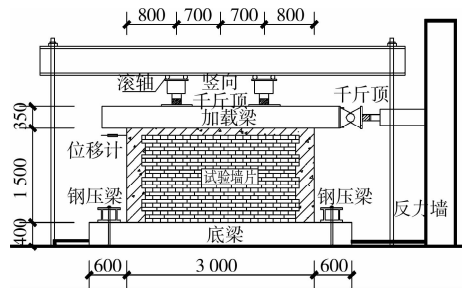


图 4 试验加载装置

2 试验结果

评价结构或构件的变形能力一般采用试验结果中的位移延性系数、位移角、骨架曲线及归一化的骨架曲线。

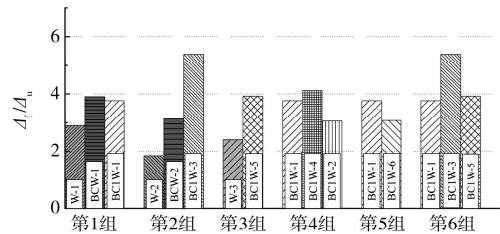
2.1 终止位移、位移延性系数及位移角

试验终止时试件墙顶正、负向位移的平均值称为终止位移,记作 Δ_t ,该值反映了试件在低周反复加载下墙顶的最大侧移能力。位移延性系数包括从开裂到极限荷载阶段的位移延性系数 Δ_u/Δ_c 和从极限到破坏阶段的位移延性系数 Δ_f/Δ_u ,其中, Δ_c 、 Δ_u 、 Δ_f 分别为试件开裂、极限、85% 极限荷载时的墙顶水平位移(单位 mm)。终止位移 Δ_t 一般大于或等于 Δ_f 。由于试验中开裂点的判断有一定的人为因素,所以取 2 个系数进行综合评价。位移角表示试件的相对变形值,对墙体变形能力及抗震能力的评价更客观。表 2 列出了各试件的终止位移 Δ_t (单位 mm)、位移延

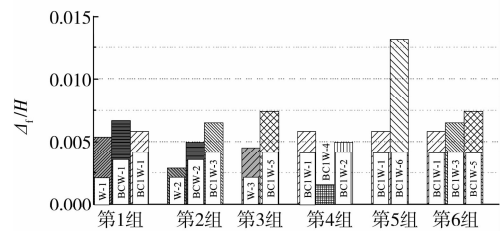
性系数 Δ_u/Δ_c 、 Δ_f/Δ_u 及位移角 Δ_c/H 、 Δ_u/H 和 Δ_f/H 。图 5 给出了 6 组试件的 Δ_f/Δ_u 及 Δ_f/H 柱状图。

表 2 终止位移、延性系数及位移角

编号	Δ_t	Δ_u/Δ_c	Δ_f/Δ_u	Δ_c/H	Δ_u/H	Δ_f/H
W-1	7.2	3.62	2.89	1/1 956	1/540	1/187
BCW-1	10.2	6.22	3.91	1/3 650	1/587	1/150
BC1W-1	10.2	4.84	3.77	1/3 140	1/649	1/172
W-2	4.1	3.96	1.84	1/2 547	1/643	1/349
BCW-2	11.0	3.96	3.13	1/2 500	1/631	1/202
BC1W-3	9.4	4.18	5.39	1/3 462	1/828	1/154
W-3	7.6	3.02	2.40	1/1 607	1/531	1/222
BC1W-5	21.9	8.23	3.93	1/4 355	1/529	1/135
BC1W-4	20.2	3.80	4.13	1/2 288	1/603	1/146
BC1W-2	12.1	5.09	3.06	1/3 140	1/616	1/202
BC1W-6	20.9	4.04	3.08	1/944	1/234	1/76



(a) 极限到破坏阶段的位移延性系数 Δ_f/Δ_u



(b) 破坏时的位移角 Δ_f/H

图 5 各组试件的 Δ_f/Δ_u 及 Δ_f/H 对比

2.2 骨架曲线和归一化骨架曲线

骨架曲线是滞回环的峰值包络线。归一化骨架曲线是以 P/P_u 和 Δ/Δ_u 为纵、横坐标将骨架曲线无量纲化。骨架曲线全面反映了试件在低周反复加载中的承载力—变形关系;而归一化的骨架曲线可反映试件开裂点、极限荷载点和破坏荷载点的位移和承载力的相对关系,能直观反映试件从极限到破坏的变形能力差别。6 组试件的骨架曲线和归一化骨架曲线分别如图 6—11。

3 变形能力分析

以下分别结合表 2、图 5 和图 6—11,基于 6 组

试件依次分析不同约束措施下实墙、带门洞墙和带窗洞墙的变形能力差别,及竖向压应力、高宽比、墙体形式对芯柱式墙变形能力的影响。

3.1 不同约束措施实墙的变形能力

图 6 给出第 1 组实墙试件的骨架曲线和归一化骨架曲线。

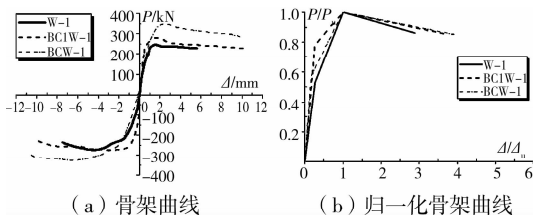


图 6 第 1 组试件的骨架曲线

从骨架曲线形态及终止位移来看,现浇式墙 BCW-1 和芯柱式墙 BC1W-1 在极限荷载之后,骨架曲线下降速度较素墙 W-1 缓慢,并延伸得更远,下降至 85% 极限荷载后仍有一定的承担竖向及水平荷载的能力和变形能力。BCW-1 和 BC1W-1 的 Δ_t 较 W-1 提高了 42%。

从位移延性系数来看,开裂到极限阶段,芯柱式墙 BC1W-1 和现浇式墙 BCW-1 的 Δ_u/Δ_c 分别较素墙 W-1 提高 34% 和 72%,BC1W-1 较 BCW-1 少 22%。极限到破坏阶段,BC1W-1 与 BCW-1 的 Δ_f/Δ_u 分别较 W-1 提高 30% 和 35%,BC1W-1 与 BCW-1 之间的差别仅为 4%。

从位移角来看,构造柱使墙体刚度有所增大,开裂时现浇式墙 BCW-1 和芯柱式墙 BC1W-1 的位移角分别较素墙 W-1 减少 46% 和 38%。开裂后位移角增长较快,到极限荷载时,BC1W-1 和 BCW-1 的位移角分别较 W-1 少 17% 和 8%。极限荷载后,墙体自身刚度显著下降,位移角迅速增大,构造柱对墙体的变形约束作用明显,BC1W-1 和 BCW-1 的破坏位移角分别较 W-1 增大了 9% 和 25%,BC1W-1 较 BCW-1 少 13%。

由以上分析可知,芯柱式墙的位移延性系数较素墙有所提高,开裂和极限荷载时的位移角较素墙小,破坏荷载时的位移角较素墙大,从极限到破坏的变形能力显著提高。芯柱式构造柱对实墙试件的变形约束能力较现浇构造柱略差。

3.2 不同约束措施开门洞墙的变形能力

图 7 给出第 2 组带门洞试件的骨架曲线和归一化骨架曲线。

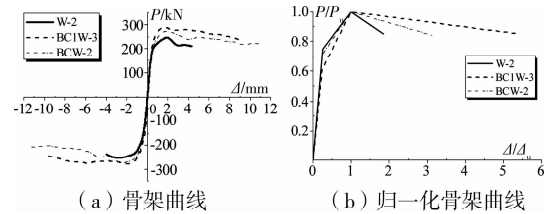


图 7 第 2 组试件的骨架曲线

从骨架曲线形态及终止位移来看,现浇式墙 BCW-2 和芯柱式墙 BC1W-3 极限荷载后承载力下降缓慢,至 85% 极限荷载后仍可继续承载及变形。BCW-2 和 BC1W-3 的 Δ_t 分别较素墙 W-1 提高了 168% 和 129%。由于开洞墙刚度较小,极限荷载后,3 个墙体的承载力下降均较相应实墙快,现浇式和芯柱式构造柱在下降段发挥了较大的约束变形作用,BC1W-3 和 BCW-2 下降段明显缓于 W-2。

从位移延性系数来看,开裂到极限阶段,素墙 W-2 与现浇式墙 BCW-2 的 Δ_u/Δ_c 相同,芯柱式墙 BC1W-3 的 Δ_u/Δ_c 较二者提高了 6%。极限到破坏阶段,BC1W-3 和 BCW-2 的 Δ_f/Δ_u 分别较 W-2 提高了 193% 和 70%,BC1W-3 的 Δ_f/Δ_u 较 BCW-2 大 72%。

从位移角来看,芯柱式墙 BC1W-3 的 Δ_c/H 和 Δ_u/H 分别较素墙 W-2 减少 26% 和 22%,破坏时 BC1W-3 和现浇式墙 BCW-2 的 Δ_f/H 分别较 W-2 增大 133% 和 73%,BC1W-3 较 BCW-2 提高了 31%。

由以上分析可知,芯柱式构造柱对带门洞墙的变形能力的约束较强,芯柱式墙的 Δ_f/Δ_u 和 Δ_f/H 好于现浇式墙。

3.3 不同约束措施带窗洞墙的变形能力

图 8 给出第 3 组带窗洞试件的骨架曲线和归一化骨架曲线。

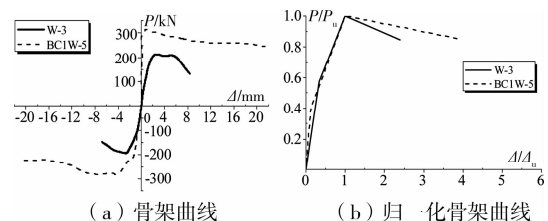


图 8 第 3 组试件的骨架曲线

从骨架曲线形态及终止位移来看,素墙 W-3 的承载力在极限荷载之后迅速下降,芯柱式墙 BC1W-5 的 Δ_t 是 W-3 的 2.88 倍。从位移延性系数来看,BC1W-5 的 Δ_u/Δ_c 较 W-3 提高了 173%; Δ_f/Δ_u 较 W-3 提高了 64%。从位移角来看,W-3

和 BC1W-5 极限荷载时的位移角大致相同,破坏荷载时 BC1W-5 的位移角较 W-3 增大了 64%。可知,芯柱式构造柱在极限荷载后发挥了较大的约束作用,极大提高了带窗洞墙的变形能力。

3.4 竖向压应力对芯柱式墙变形能力的影响

图 9 给出竖向压应力分别为 0.5、0.3、0.2 的芯柱式墙 BC1W-1、BC1W-4、BC1W-2 的骨架曲线和归一化骨架曲线。

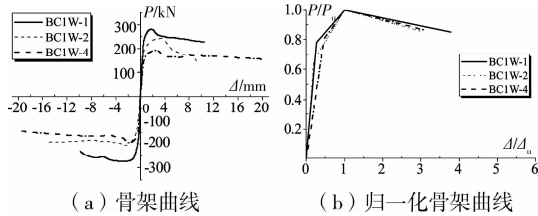


图 9 第 4 组试件的骨架曲线

从骨架曲线形态及终止位移来看,竖向压应力较小试件在极限荷载之后,承载力下降较缓慢,变形能力有所增强,BC1W-2 的破坏形态为弯-剪型,而 BC1W-1 和 BC1W-4 的破坏形态为剪切型,BC1W-4、BC1W-2 的 Δ_f 分别较 BC1W-1 增大 98% 和 19%。从位移延性系数来看,BC1W-4 的 Δ_f/Δ_u 及 BC1W-2 的 Δ_u/Δ_c 分别较 BC1W-1 提高了 10% 与 5%,另外两个系数反而较 BC1W-1 小。从位移角来看,BC1W-4 破坏时的位移角较 BC1W-1 增大 18%。总体上,竖向压应力降低使芯柱式墙的变形能力略有提高,与文献[15]得出的试验规律一致。

3.5 高宽比对芯柱式墙变形能力的影响

图 10 给出高宽比分别为 0.5 和 0.75 的芯柱式墙 BC1W-1、BC1W-6 的骨架曲线和归一化骨架曲线。

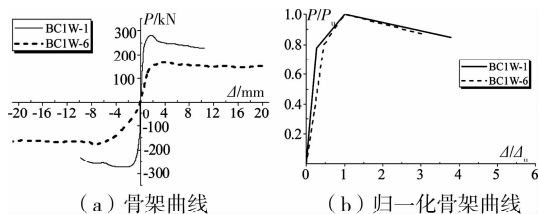


图 10 第 5 组试件的骨架曲线

从骨架曲线形态及终止位移来看,BC1W-6 刚度小,加载初期弯曲变形明显,其 Δ_f 较 BC1W-1 增大了 105%。从位移延性系数来看,BC1W-6 的 Δ_u/Δ_c 较 BC1W-1 增大 7%, Δ_f/Δ_u 较 BC1W-1 少 19%。从位移角来看,BC1W-6 在开裂、极限和破坏时的位移角分别较 BC1W-1 增长了 160%、

177% 和 126%。高宽比较大的墙趋向于发生弯-剪破坏,破坏时的顶部侧移较大,所以变形能力较高宽比较小的墙有所提高。

3.6 墙体形式对芯柱式墙的影响

图 11 给出墙体形式不同的芯柱式墙的骨架曲线和归一化骨架曲线。

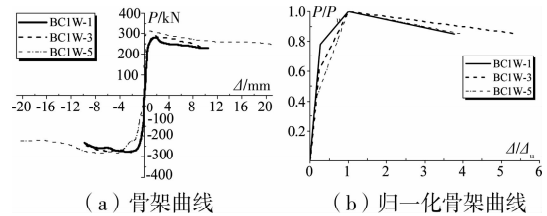


图 11 第 6 组试件的骨架曲线

从终止位移来看,带窗洞墙 BC1W-5 的 Δ_f 较实墙 BC1W-1 有大幅提高。从位移延性系数来看,BC1W-3、BC1W-5 的 Δ_u/Δ_c 分别较 BC1W-1 提高 11% 和 118%; Δ_f/Δ_u 分别较 BC1W-1 提高 43% 和 4%。从位移角来看,BC1W-3、BC1W-5 开裂时的位移角分别较 BC1W-1 小 29% 和 44%; 破坏时的位移角分别较 BC1W-1 大 12% 和 27%。芯柱式构造柱的侧向刚度相对于开洞墙体的刚度比较大,因此对开洞墙的约束能力更强,芯柱式构造柱约束开洞墙的变形能力好于其约束的实墙,与现浇构造柱墙的规律基本一致。

4 结论

进行了 11 个墙体(高宽比 0.5~0.75,竖向压应力 0.2~0.5 MPa)的低周反复加载试验,通过 6 组试件的骨架曲线特征、终止位移、位移延性系数和位移角对比,得到以下结论:

1) 芯柱式构造柱约束实墙的位移延性系数 Δ_u/Δ_c 、 Δ_f/Δ_u 分别较素墙提高了 34% 和 30%,分别较现浇构造柱约束实墙少 22% 和 4%;破坏荷载时的位移角较素墙提高了 25%,较相应现浇式墙少 13%,总体上芯柱式构造柱对实墙的变形约束能力与现浇构造柱接近。

2) 芯柱式构造柱对带门洞(窗洞)墙的约束较强,位移延性系数 Δ_u/Δ_c 、 Δ_f/Δ_u 分别较素墙提高了 6% (173%) 和 193% (64%),破坏荷载时的位移角增大了 133% (64%)。现浇构造柱约束带门洞墙的 Δ_u/Δ_c 、 Δ_f/Δ_u 及 Δ_f/H 较素门洞墙分别提高 0、70%、73%,芯柱式构造柱对带门洞墙的约束作用好于现浇构造柱。芯柱式构造柱对开洞墙的变形约束作用好于实墙。

3) 随竖向压应力减小,芯柱式构造柱约束实墙

的变形能力略有提高。

4)高宽比较大的芯柱式墙的变形能力好于高宽比较小墙体。

综上,芯柱式构造柱约束墙的位移延性系数、位移角均较素墙有所提高,对实墙的约束效果较现浇式构造柱稍差,对开洞墙的约束效果较现浇式构造柱好,总体对变形能力的改善与现浇构造柱相近,初步表明芯柱式构造柱可代替现浇构造柱使用。

参考文献:

- [1] 周炳章. 用钢筋混凝土构造柱提高砖混结构抗震性能的试验研究及设计计算[C]// 中国建筑学会地震学术委员会. 地震工程论文集. 北京: 科学出版社, 1982: 214-245.
- [2] 朱伯龙, 蒋志贤, 吴明舜. 外加钢筋混凝土柱提高砖混房屋抗震能力的研究[J]. 同济大学学报, 1983(1): 31-43. ZHU BO-LONG, JIANG ZHI-XIAN WU MING-SHUN. A study on aseismic capacity of brick masonry buildings strengthened with reinforced concrete columns[J]. Journal of Tongji University, 1983(1): 31-43.
- [3] 李英民, 刘立平. 汶川地震建筑震害与思考[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2008: 6.
- [4] 刘晓峰, 蔡贤辉, 程耿东. 砌体结构震害及农村房屋加固的锚固拉结方法[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 631-638. LIU XIAO-FENG, CAI XIAN-HUI, CHENG GENG-DONG. Earthquake damage of masonry buildings and anchorage-tie strengthening method for rural houses [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(5): 631-638.
- [5] DOGANGU N A, UUAL A, LIVAOGLU R. Seismic performance of masonry buildings during recent earthquakes in turkey [C]//14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [6] 李英民, 刘立平, 郑妮娜, 等. 村镇建筑实用抗震技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009: 47.
- [7] 重庆大学. 一种用于砌体结构的构造柱以及其专用预制块: 中国, 200820100863. 6[P]. 2009-9-16.
- [8] MIHA TOMAZEVIC, IZTOK KLEMENC. Seismic behaviour of confined masonry walls [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997(26): 1059-1071.
- [9] YANG WEIJUN, LIU CHENGWEI, YIN MINGJUAN. Experimental research on seismic behavior of concrete brick wall [C]//Niu Ditao, Ru Jiping. The 8th International Symposium on Structural Engineering for Young Experts. Beijing: Science Press, 2004: 1011-1016.
- [10] SHEDID M T, DRYSDALE R G, El-dakhkhni W W. Ductility of reinforced concrete masonry shear walls under seismic loading [C]//14th World Conference On Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [11] 金伟良, 徐铨彪, 潘金龙, 等. 不同构造措施混凝土空心小型砌块墙体的抗侧力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(6): 64-72. JIN WEI-LIANG, XU QUAN-BIAO, PAN JIN-LONG. Experimental study on lateral resistance behavior of small concrete hollow block wall with different constructional measures [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(6): 64-72.
- [12] 杨伟军, 陈利群, 祝晓庆. 混凝土多孔砖墙体抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2008(9): 126-133. YANG WEI-JUN, CHEN LI-QUN, ZHU XIAO-QING. Experimental study on seismic behavior of concrete perforated brick walls [J]. Engineering Mechanics, 2008(9): 126-133.
- [13] FRANCESCA DA PORTO, MANUEL GRENDENE, CLAUDIO MODENA. Estimation of load reduction factors for clay masonry walls [J]. Earthquake Engng Struct. Dyn., 2009, 38: 1155-1174.
- [14] 周锡元, 李万举, 闫维明, 等. 构造柱约束的混凝土小砌块墙体抗震性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2006(8): 45-50. ZHOU XI-YUAN, LI WAN-JU, YAN WEI-MING, et al. An experimental study on the seismic behavior of small concrete block walls confined by tie columns and beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2006(8): 45-50.
- [15] 朱伯龙, 吴明舜, 蒋志贤. 砖墙用钢筋网水泥砂浆面层加固的抗震能力研究[J]. 地震工程与工程振动, 1984(3): 70-81. ZHU BO-LONG, WU MING-SHUN, JIANG ZHI-XIAN. A study on aseismic capacity of brick wall strengthened with cement mortar reinforced with steel mesh [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1984(3): 70-81.

(编辑 胡英奎)