

加密预制构造柱约束砌体结构抗震性能

胡晓平¹, 李英民¹, 曾文玲²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 中国建筑科学研究院 深圳分院, 深圳 518075)

摘要:随着建筑产业化的兴起, 预制式构造柱约束砌体结构受到越来越多的关注。为验证预制构造柱约束砌体结构的抗震性能以及其改进构造柱布置方案的效果, 采用数值模拟方法对 6 度区与 7 度区两组模型的静动力弹塑性抗震性能进行了分析, 对比了现浇构造柱、预制构造柱、加密预制构造柱模型的变形能、层位移、层间位移角以及结构整体耗能特征。分析表明: 采用加密构造柱的改进方案并未明显改变原预制构造柱约束砌体结构的整体刚度, 但可大幅度提高其耗能能力, 使之与现浇构造柱砌体结构模型基本相当, 该改进方案可作为预制构造柱约束砌体结构的设计规定在村镇建筑中使用。

关键词:砌体结构; 预制构造柱; 层间位移角; 结构整体耗能

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0088-05

Preliminary study on seismic behavior of masonry structures with encrypted fabricated tie-columns

Hu Xiaoping¹, Li Yingmin¹, Zeng Wenling²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Chinese Academy of Building Science, Shenzhen 518075, P. R. China)

Abstract: With the rise of the architectural industrialization, the prefabricated structure column is getting more and more attention. In order to verify the performance of the prefabricated constructional column confining masonry structure and the effect of improved design methods, this paper analysed the static dynamic elastic-plastic seismic performance on the two groups of masonry structures in the case of the earthquake of 6 and 7 degree. comparing the deformation energy, layer displacement, inter story drift angle and the structure energy consumption of the cast-in-situ structural column, prefabricated structural column, and encrypted prefabricated structural column. The analysis shows that the improved scheme has not changed the rigidity of the original prefabricated structural columns obviously, but improved the energy dissipation capacity greatly and approached the seismic performance of the precast structure, the improved scheme can be used as the design rule of the prefabricated structural columns to constrain the masonry structure.

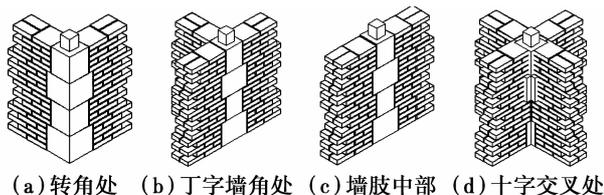
Key words: masonry structures; the prefabricated structural column; inter story drift angle; structure energy consumption

建筑产业化是利用标准化设计、工业化生产、装配式施工和信息化管理等方法来建造、使用和管理

建筑, 是建筑工业化发展的必然趋势, 更是建筑业的深刻变革。建筑产业化可促进传统产业升级、转变

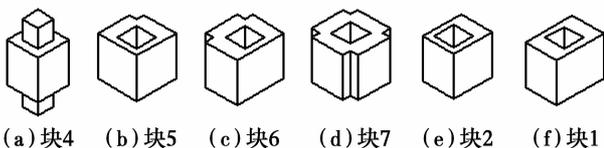
城镇化建设模式、全面提升建筑品质,是建筑业转变发展方式的重要举措^[1]。

城镇化建设应把焦点放在村镇建筑上,目前,中国广大县、镇、村中房屋的主要结构形式仍为砌体结构。整体性不足是砌体结构震害严重的主要原因之一^[2],而提高砌体结构整体性的现浇构造柱存在造价较高、施工难度较大、工期长等问题,在村镇建筑中很难推广使用^[3]。近年来兴起的装配式预制构造柱建造技术,一方面减小了施工难度,适应了城镇砌体建筑施工的方式,用一种更适应农村砌筑方式的方法达到抗震构造措施要求;另一方面,预制构造柱继承预制构件的优点,保养时间足,无季节限制,强度高,在建筑产业化的推行中,预制构造柱约束砌体结构比现浇构造柱约束砌体结构具有更大的优势。现今规范对现浇构造柱约束砌体较为详尽,但对预制式构造柱规定甚少,对于预制构造柱的实行带来了大的阻碍。尽管以往的试验研究表明^[4-5]预制式构造柱约束墙体的滞回耗能性能、延性、变形性能均优于无构造柱约束墙体,但仍稍弱于钢筋混凝土现浇构造柱约束墙体。笔者通过数值模拟的方式,以现浇构造柱的抗震性能为目标,对预制构造柱布置方案进行加密改进,进而使预制构造柱约束砌体结构达到规范对砌体结构耗能、延性、变形等性能要求。



(a)转角处 (b)丁字墙角处 (c)墙肢中部 (d)十字交叉处

图 1 预制式构造柱约束墙体示意图



(a)块4 (b)块5 (c)块6 (d)块7 (e)块2 (f)块1

图 2 预制式构造柱预制块块体

1 建模原理和砌体本构关系

采用整体式建模方法进行建模,将砌块和粘结材料作为一个匀质化连续体来考虑,即将粘结材料弥散于整个结构中,不考虑砌块与粘结材料的相互作用,连续体材料材料性质和本构关系等通过对整体连续材料的试验或理论分析获得。

楼板和构造柱按 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》附录 C 确定受压和受拉应力-应变曲线,ABAQUS 建模采用混凝土损伤塑性模型。墙体受压本构关系采用文献[6]提出的应力应变关系:

$$\frac{\sigma}{f_m} = \frac{\eta(\epsilon/\epsilon_m)}{1 + (\eta - 1)(\epsilon/\epsilon_m)^{\eta/(\eta-1)}} \quad (1)$$

式中: σ 、 ϵ 分别为受压应力-应变曲线上任意一点的应力和应变; f_m 、 ϵ_m 分别为砌体轴心受压强度的平均值及相应的应变。

墙体受拉借用混凝土受拉的本构关系,假定弹性阶段应力-应变关系为直线,对下降段进行适当修正后,受拉的应力-应变关系^[7-8]为:

$$f_{tm} = \begin{cases} \frac{\sigma}{\epsilon_t}, \frac{\epsilon}{\epsilon_t} \leq 1 \\ \frac{\sigma}{\epsilon_t} \frac{\epsilon/\epsilon_t}{2(\epsilon/\epsilon_t - 1)^{1.7} + \epsilon/\epsilon_t}, \frac{\epsilon}{\epsilon_t} > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ 、 ϵ 分别为受拉应力-应变曲线上任意一点的应力和应变; f_{tm} 、 ϵ_t 分别为砌体轴心受拉强度的平均值和相应的应变。

预制式构造柱视为灌芯混凝土砌块砌体,数值模拟时借用灌芯混凝土砌块砌体强度公式对其强度进行计算。

采用倒三角形水平位移加载模式对结构进行加载,每一秒加载位移增量为 1 mm,加载时间为推覆各模型至承载力下降为极限荷载的 90% 时终止加载^[9]。

2 模型信息

本文是对现浇构造柱、预制构造柱、加密预制构造柱约束砌体模型进行对比分析,建立了 6 度(0.05 g)区和 7 度(0.1 g)区的 7 层两组模型,对每模型分别按规范要求布置现浇构造柱和预制构造柱、加密预制构造柱 3 种布置方式,现浇构造柱与预制构造柱布置平面图见图 3;加密预制构造柱的加密位置在 AB 轴线中所有纵墙中间位置。共建两组 6 个模型进行对比分析。

模型层高 3 m,总高度 21 m。场地类别 II 类,设计地震分组第二组,构造柱、圈梁、楼板采用 C20 混凝土,烧结砖采用 MU10 等级,砂浆采用 M5 等级,楼板厚度为 100 mm,构造柱尺寸为 240 mm×240 mm,现浇构造柱纵筋采用 4 ϕ 14,圈梁尺寸为 240 mm×120 mm,纵筋采用 4 ϕ 10 钢筋,楼、屋面恒载分别取值 2、4 kN/m²,活载分别取值 2、0.5 kN/m²。经计算,结构纵横两个方向高宽比都满

足规范要求。

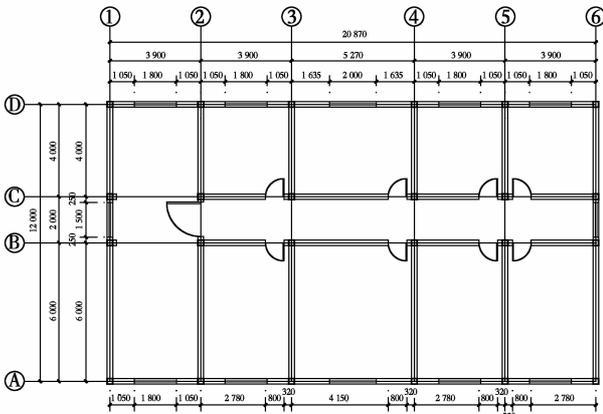


图 3 现浇构造柱平面布置图

表 1 模型结构变形能统计表

模型	变形能 E_p	变形能 E_c	E_c / E_p
6 度 7 层现浇模型	50 307.20	68 8897.7	13.694
6 度 7 层预制模型	51 410.88	509 432.3	9.909
6 度 7 层预制加密模型	49 013.83	673 228.6	13.735
7 度 7 层现浇模型	55 510.29	674 128.6	12.144
7 度 7 层预制模型	55 912.91	666 790.4	11.926
7 度 7 层预制加密模型	55 436.36	734 553	13.250

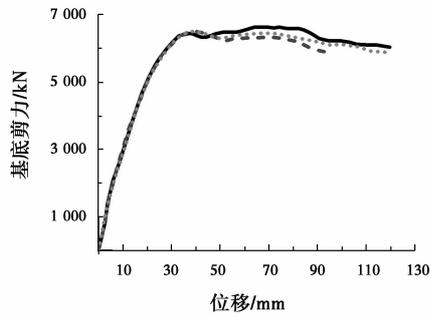
注:变形能 E 单位为 $\text{kN} \cdot \text{mm}$ 。

通过比较这两组模型中钢筋混凝土现浇构造柱约束砌体结构和预制式构造柱约束砌体结构进行 Pushover 推覆分析后得到能力曲线及结构变形能及变形能增量见表 1,从破坏阶段变形能与屈服阶段变形能的比值来看,前者的变形耗能要大于后者,特别是 6 度 7 层模型尤为明显,在此对比下预制构造柱砌体结构模型要取代现浇构造柱砌体结构模型需要进行改进,对预制式构造柱约束砌体结构提出了加密构造柱的改进方案。分析改进后的预制式构造柱约束砌体与原模型的变形耗能能力增长量可以得到,在墙体中加密构造柱的预制式构造柱约束砌体结构抗震能力优于加密前的预制式构造柱约束砌体结构,且可与现浇构造柱约束砌体结构比肩。

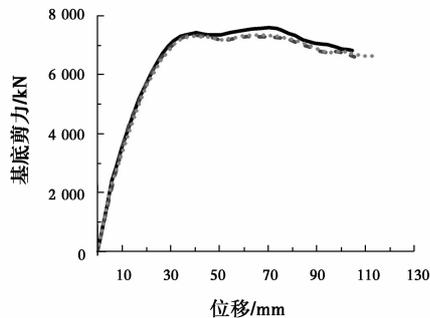
3 算例分析

3.1 静力弹塑性分析结果

对于以上两组砌体模型进行 Pushover 推覆分析得静力推覆能力曲线见图 4。



注:—— 67XJ --- 67YZ 67YZJM
(a) 7度6层模型



注:—— 77XJ --- 77YZ 77YZJM
(b) 7度7层模型

图 4 结构 Pushover 静力推覆能力曲线图

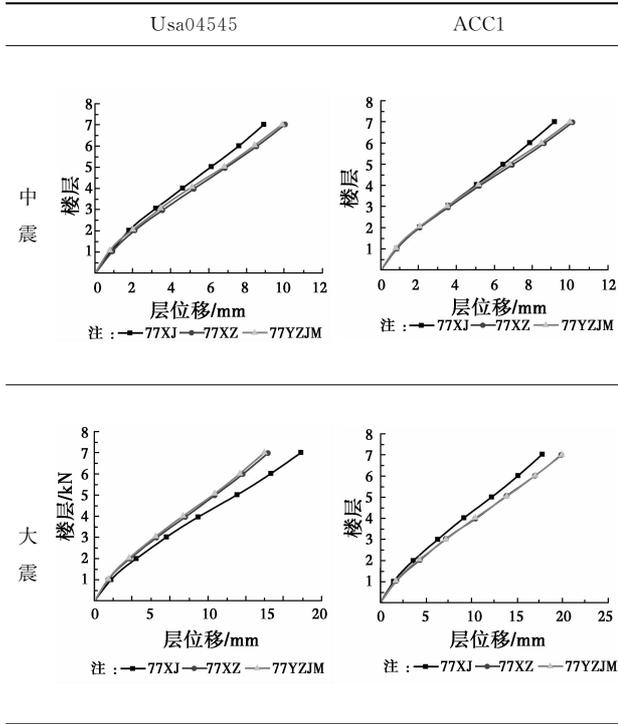
所得各砌体结构模型变形能列于表 1。

3.2 动力弹塑性分析结果

依据反应谱的两个频段选择地震波;根据选择算例模型位于抗震设防烈度 7 度区,场地类别二类,设计地震分组第二组,按照双频段选波程序选择地震动记录为 Usa04545, ACC1,其中 ACC1 为人工波,Usa04545 为天然波。对弹塑性时程分析模型按照 7 度(0.1 g)中震、大震进行调幅,对应加速度幅值分别为 100、220 cm/s^2 。本节对选取 7 度 7 层 3 个模型(77XJ、77YZ、77YZJM)进行弹塑性时程分析。下面分别提取其在两条天然波 Usa04545,人工波 ACC1 对应中震、大震作用下层位移、层间位移角、整体耗能结果进行分析。

3.2.1 层位移 在统计结构在中大震地震作用下层位移时发现 3 个模型的纵向层位移曲线表现为一定的剪切变形特点并基本重合,下面仅取曲线有较大差异的横向层位移曲线进行展示、对比分析。

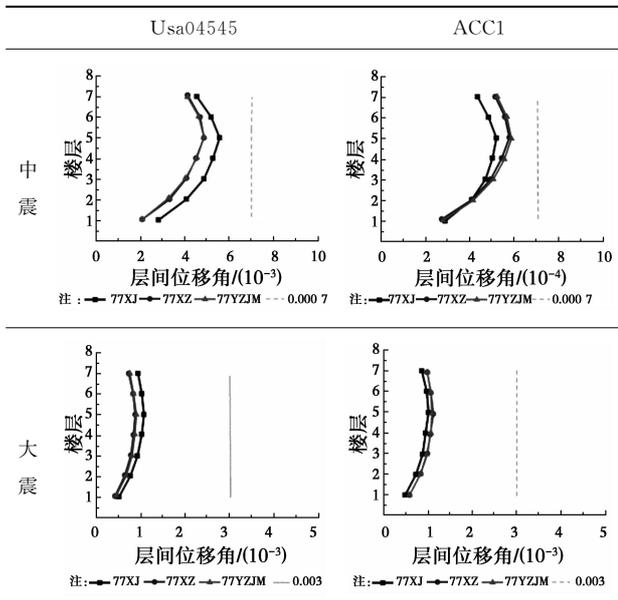
表 2 结构在中大震作用下层位移图



模型在各水平地震波中大震作用下的层位移取自顶层位移达到最大时刻时对应的各层层位移,从模型对三条波的地震响应来看,结构在横向表现为一定的弯曲变形特点。77XJ、77YZ、77YZJM 模型层位移表现根据地震波不同有大小的差异,但相差不大。

3.2.2 层间位移角 在统计结构在中大震地震作用下层间位移角发现 3 个模型的纵向层间位移角相似,以下展示的是差异较大的横向层间位移角。

表 3 结构在中大震作用下层间位移角图



3 个结构在中震作用下层间位移角相差较大,而在大震作用下差异相对小些;对 77YZ 与 77YZJM 两个模型几乎重合,说明加密方案对预制构造柱约束砌体结构的刚度影响很小。

表明预制式构造柱可起到约束墙体变形能力的作用,作用较现浇构造柱的平均水平略低,且加密预制构造柱并未增强其约束墙体变形能力。

选用文献^[11]中关于砌体结构层间位移角限值,两条地震波中震作用下的最大层间位移角在充分运行(完好)0.07%性能水准之下,满足三水准中震可修的结构抗震设防目标。两条地震波大震作用下的最大层间位移角在基本运行(中等破坏)0.33%性能水准之下,满足三水准大震不倒的结构抗震设防目标。

3.2.3 整体耗能 结构在地震作用下的响应可以大致分为吸收能量和耗散能量两个过程,其中吸收的能量一部分作为动能和内能储存起来,另一部分则作为粘性阻尼耗能和塑性变形能消散掉,其中损伤耗能体现了结构的损伤破坏程度。从分析结果中提取的能量平衡图得到,3 个模型在中大震作用下主要表现为粘性阻尼耗能,塑性变形能和损伤耗能几乎可以忽略不计,说明结构进入塑性程度很低,结构所储存的动能和内能也很少。结构的整体耗能程度用粘性阻尼耗能和塑性变形耗能占整个输入能的比例表示,3 个模型在中大震作用下的整体耗能指标见表 4。

表 4 结构在中大震下的整体耗能指标

模型	中震		大震	
	Usa04545	ACC1	Usa04545	ACC1
77XJ	0.718 9	0.870 8	0.819 7	0.909 6
77YZ	0.650 2	0.861 8	0.813 7	0.908 5
77YZJM	0.656 8	0.864 8	0.828 9	0.910 9

从表 4 中两条地震波对应的结构整体耗能指标可以看出,结构在中震作用下改进后加密预制构造柱模型 77YZJM 相对于原预制模型 77YZ 有一定提高,但仍小于现浇模型 77XJ。结构在大震作用下整体耗能指标大于中震作用下的耗能指标。77YZJM 优于 77XJ 说明在大震作用下,改进后的结构布置方案表现出较好的抗震性能。

4 结 论

1)在相同结构布置、材料强度的条件下替换现

浇构造柱为预制式构造柱,对比两个结构的抗震性能发现预制式构造柱约束砌体结构弱于现浇构造柱约束砌体结构。

2)改进方案为在墙中部加密构造柱。经计算,改进后的每开间纵墙中部加设预制式构造柱在耗能方面有较大提高,与现浇构造柱约束砌体结构相近。但并未改变预制构造柱约束砌体结构的刚度。

3)改进后加密预制构造柱约束砌体模型与原模型以及现浇构造柱砌体模型在大中震荷载作用下的层间位移角都在规范规定限值之内,满足三水准中震可修、大震不倒的设防目标。

4)通过数值模拟研究改进后加密预制构造柱约束砌体结构抗震性能良好,村镇建筑可采用加密施工方便、性能良好的预制式构造柱的方式以达到良好的抗震性能,且可以作为建筑产业化在村镇建筑方面的初始推进目标。

参考文献:

[1] 赖明. 建筑产业化是建筑工业化发展的必然趋势[J]. 建筑, 2014(5): 25.
[2] 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.

[3] 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.
[4] 郑妮娜. 装配式构造柱约束砌体结构抗震性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
[5] 殷圆圆. 芯柱式构造柱约束砌体结构抗震性能评价 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
[6] 杨卫忠. 砌体受压本构关系模型[J]. 建筑结构, 2008, 38(10): 80-82.
[7] 李英民, 韩军, 刘立平. ANSYS 在砌体结构非线性有限元分析中的应用研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(5): 90-96.
[8] 熊峰, 应付钊. 非线性有限元法分析预应力砌体墙结构 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2000, 32(3): 16-20.
[9] 曾文玲. 预制构造柱砌体结构抗震性能模拟及设计规定 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
[10] GB50010—2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
[11] 熊立红. 多层混凝土砌块结构性能抗震研究 [D]. 北京: 中国地震局工程力学研究所, 2005.
[12] ABAQUS/Standard User's Manual [M]. Hibbitt, Karlsson, Sorensen, Inc. 2002.

(编辑 王维朗)