

含不同高度窗下墙的预制剪力墙结构抗震性能研究

易苗苗, 吴韬

(安徽新华学院 土木与环境工程学院, 安徽 合肥 230088)

摘 要: 为研究预制装配式剪力墙结构中窗下墙高度对结构抗震性能的影响, 本文设计了含有不同窗下墙高度的剪力墙结构模型。采用 PKPM 和 ETABS 软件分别验证和研究了结构在小震下的设计指标和大震下的抗震性能。PKPM 软件小震分析结果表明, 本文设计的含有不同高度窗下墙的剪力墙结构分析模型, 能够满足规范中的各类设计指标; 窗下墙高度的增加会增大结构的刚度。ETABS 软件弹塑性 Pushover 分析结果表明, 随着窗下墙高度的增加, 结构在大震下的层间位移角有所减小; 并且窗下墙高度变化, 会影响结构中剪力墙损伤的分布。

关键词: 预制剪力墙结构; 窗下墙; 数值模拟; 抗震性能

中图分类号: TU375.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382 (2021) 01-059-05

Seismic Performance of Precast Concrete Shear Wall Structures with Different Height of Window Wall

Yi Miaomiao, Wu Tao

(School of Civil & Environmental Engineering, Anhui Xinhua University, Hefei 230088, China)

Abstract: To study the influence of the height for window wall in precast concrete shear wall structure on the structural seismic performance, the structures of precast concrete shear wall structure with different height of window wall are designed in this paper. The structural design parameters under minor earthquake and seismic performance under major earthquake are validated and investigated based on the numerical model established in PKPM and ETABS software, respectively. The analysis results under minor earthquake from PKPM software show that the designed structures with different height of window wall have reasonable design parameters, which can satisfy the demand of the design significations. Increasing the height of window wall will enhance the structural stiffness. The Pushover analysis results from ETABS software show that increasing the height of window wall reduces the structural inter-story drift and influences the damage distribution of concrete shear wall.

Key words: precast concrete shear wall structure; window wall; numerical simulation; seismic performance

现浇钢筋混凝土剪力墙结构中,窗下墙通常采用砌体填充墙砌筑,虽然填充墙可以增加结构的刚度^[1-2],但在地震荷载作用下会首先发生破坏^[3-4]。因此在结构设计时,通常将其考虑为非结构构件,

并将其忽略,仅适当考虑其对结构刚度的影响。

预制装配式剪力墙结构是由预制剪力墙在施工现场拼装而成的结构体系,其中预制剪力墙为主要的受力构件^[5-8]。为提高结构的施工效率,避免

收稿日期: 2020-10-26

基金项目: 建筑结构安徽省普通高校重点实验室项目 (KJ2019A0886); 安徽省高等学校省级自然科学基金项目 (KJ2018ZD054); 安徽省高等学校优秀青年人才基金项目 (gxyq2019130); 安徽新华学院校级项目 (2018zr016)。

作者简介: 易苗苗 (1983-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 绿色建筑的结构性能。

吴韬 (1982-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 结构动力分析与工程防灾减灾研究。

在施工现场二次砌筑填充墙,预制剪力墙通常在工厂生产时,将门窗洞口预留于剪力墙中,将窗下墙与剪力墙作为一个整体共同预制。此时,窗下墙不再是传统意义上的非结构构件,而是作为结构构件参与结构受力。现场拼接时,窗下墙和下层连梁不设置竖向连接钢筋,形成一种“双连梁”体系,以避免连梁刚度过大对结构性能产生影响。采用钢筋混凝土制作成的窗下墙,其承载力远大于现浇钢筋混凝土剪力墙结构中砌体填充墙。若仍采用现有的设计方法,将其考虑为非结构构件,会导致实际结构刚度偏大,产生预期以外的破坏模式。文献^[9-10]通过拟静力试验和数值模拟研究了窗下墙高度对剪力墙构件性能的影响,结果表明,窗下墙会增大结构的承载力和刚度。但目前针对装配式混凝土结构抗震性能展开的研究主要集中在构件本身,对填充墙尤其是预制混凝土窗下墙对主体结构抗震性能影响的研究未见报道。

本文以某钢筋混凝土剪力墙结构为原型,设计了含有不同高度窗下墙的对比模型,并采用 PKPM 软件对结构进行小震弹性分析,并与相应的设计规范进行对比,验证所设计的对比模型满足规范要求。采用 ETABS 软件,建立含有不同高度窗下墙的钢筋混凝土剪力墙结构弹塑性分析模型,并通过 PKPM 计算结果进行验证。采用 Pushover 分析方法,研究了不同高度窗下墙对整体结构抗震性能的影响。

1 分析模型

1.1 结构设计

本文的分析模型以某 13 层钢筋混凝土剪力墙结构建筑为基础,该结构的层高 2.9 m,结构长度和宽度分别为 62.4 m 和 13.4 m。建筑所处地区的抗震设防烈度为 7 度 (0.1 g),地震分组为第一组,场地类别为 II 类,特征周期为 0.35 s,阻尼比为 5%。

图 1 为结构的平面布置,其中剪力墙厚度为 200 mm;三种分析模型中梁的布置方式和截面尺寸均相同。剪力墙和梁采用 C30 混凝土,纵向受力钢筋和箍筋采用 HRB400 钢筋。对比模型中,窗下墙高度分别为 0 mm (窗下无墙)、600 mm (窗下矮墙) 和 900 mm (窗下高墙)。

1.2 有限元模型

PKPM 和 ETABS 软件已经被众多学者用于设计和分析剪力墙结构^[11-13],并与试验结果进行对比^[13]。分别采用 PKPM 和 ETABS 软件建立三种结构的数值分析模型,如图 2 所示 (以无窗下墙的模型为例)。模型中梁刚度放大系数分别取 2 (中梁) 和 1.5 (边梁)。ETABS 模型中混凝土梁及剪力墙配筋采用 PKPM 计算结果,剪力墙采用非线性分层壳模型建立^[14];混凝土梁采用框架单元,并在梁两端指定软件默认的塑性铰 (M3 铰);楼板采用弹性薄壳单元,并在各层定义刚性隔板,梁的刚度放大通过增加梁的惯性矩来实现。弹塑性推覆分析的荷载分布采用倒三角荷载。

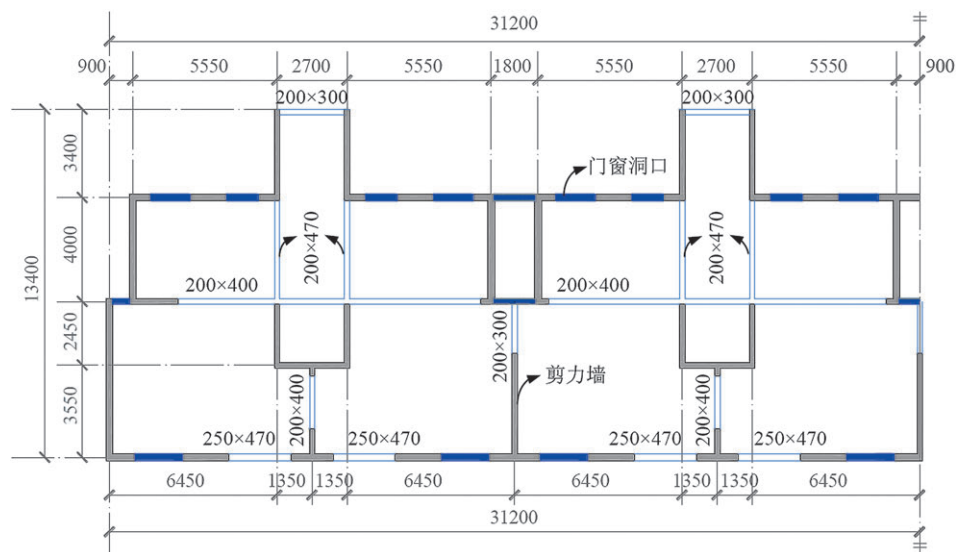


图 1 结构平面布置

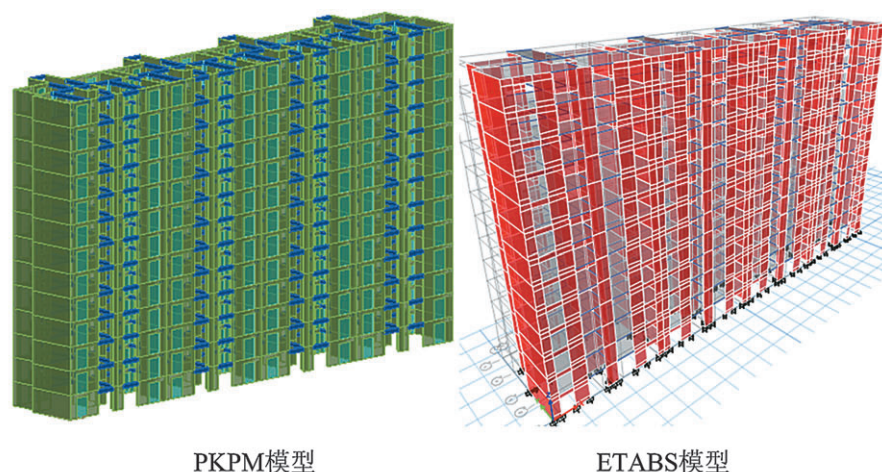


图 2 数值分析模型

2 弹性分析

2.1 模态分析结果

采用 PKPM 和 ETABS 分析得到的三种分析模型的前三阶周期和结构质量对比,如表 1 所示。可以看出,采用 ETABS 和 PKPM 建立的有限元模型模态分析结果误差较小。随着窗下墙高度的增加,结构的自振周期不断降低,表明结构刚度随着窗下墙高度的增加而不断增大。

表 1 周期和质量对比

模型类型	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)	质量 (t)
PKPM	无墙	0.732	0.730	0.558
	矮墙	0.699	0.616	0.522
	高墙	0.686	0.579	0.507
ETABS	无墙	0.714	0.644	0.474
	矮墙	0.674	0.574	0.435
	高墙	0.665	0.530	0.427

2.2 层间位移角

以 PKPM 分析结果对比不同模型在小震下的层间位移角分布,如图 3 所示。结构的层间位移角随着窗下墙高度的增加而减小,当窗下墙高度增大到 600 mm 时,结构的层间位移角最大减小了 6.1%,当窗下墙高度达到 900 mm 时,层间位移角的减小幅度达到 8%。三种模型在小震下的峰值层间位移角均小于规范^[15]规定的弹性位移角限值 0.1%。

2.3 结构稳定性

三种模型在地震荷载作用下的稳定性验算结果,如表 2 所示。三种对比模型均具有良好的抗

倾覆能力,且结构的刚重比满足高层混凝土结构技术规程^[16]的限值,因此结构的稳定性能够满足要求。

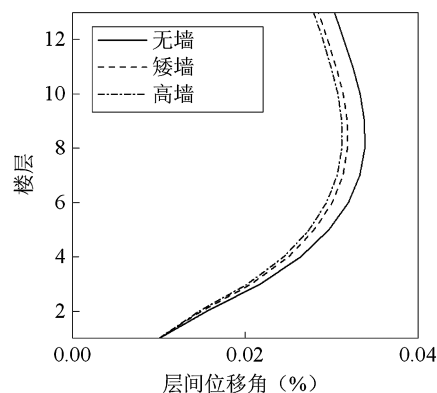


图 3 对比模型在小震下的层间位移角

表 2 抗倾覆验算

结构	方向	抗倾覆力矩	倾覆力矩	刚重比
无墙	X	3.87×10^6	1.12×10^5	19.94
	Y	6.97×10^5	1.07×10^5	20.06
矮墙	X	3.89×10^6	1.29×10^5	28.08
	Y	7.01×10^5	1.11×10^5	21.92
高墙	X	3.91×10^6	1.36×10^5	31.53
	Y	7.05×10^5	1.14×10^5	22.59

3 弹塑性推覆分析

3.1 Pushover 曲线

含不同高度窗下墙结构的 Pushover 曲线,如图 4 所示。可以看出,当结构的顶点位移超过建筑抗震设计规范^[15]规定的弹塑性位移角限值

(1/120) 时, 三种模型仍未出现承载力下降, 表明三种结构均具有良好的延性。随着窗下墙高度的增加, 结构的刚度和承载力增大。当窗下墙高度增加到 900 mm 时, 结构的承载力较无窗下墙时增大了 31.8%。

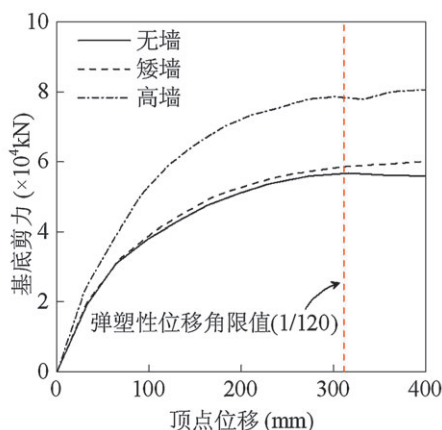


图 4 对比模型的 Pushover 曲线

3.2 层间位移

根据能力谱分析方法^[17-18], 由结构的 Pushover 曲线和设计反应谱曲线可以转化得到结构的能力谱曲线和不同地震强度下的需求谱曲线, 能力谱和需求谱曲线的交点为结构在不同地震强度下的性能目标。结构的能力谱 (谱加速度 (S_a) - 谱位移 (S_d)) 曲线由 Pushover 曲线经公式 (1) 计算得到。

$$S_a = \frac{V_b}{M_1^*} \quad S_d = \frac{U_n}{\Gamma_1} \cdot \Phi_{N1} \quad (1)$$

式中 V_b 为推覆分析得到的结构基底剪力, U_n 为推覆分析得到的结构顶点位移, Φ_{N1} 为是弹性阶段第一振型的 N 楼层振幅, M_1^* 和 Γ_1 分别为结构第一振型的模态质量和第一振型参与系数, 可以通过公式 (2) 计算。

$$M_1^* = \frac{\left(\sum_{j=1}^N m_j \cdot \Phi_{j1} \right)^2}{\sum_{j=1}^N m_j \cdot \Phi_{j1}^2} \quad \Gamma_1 = \frac{\sum_{j=1}^N m_j \cdot \Phi_{j1}}{\sum_{j=1}^N m_j \cdot \Phi_{j1}^2} \quad (2)$$

式中 m_j 为 j 楼层的质量, Φ_{j1} 为是弹性阶段第一振型的 j 楼层振幅。

结构的需求谱曲线由设计反应谱曲线经公式 (3) 转化得到:

$$S_d = \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \cdot S_a \quad (3)$$

式中 T 为结构的周期。结构分析时常采用的阻尼比一般为 5%, 因此需要确定结构的等效阻尼比, 以获得结构在罕遇地震下的弹塑性需求谱曲线。等效阻尼比可以根据文献^[14]中的计算公式得到。本文取无窗下墙结构的能力谱曲线与结构所在地区罕遇地震下弹塑性需求谱曲线的交点所对应的谱位移作为推覆分析时的目标位移, 根据公式 (1) 可以将目标谱位移转换为结构的目标顶点位移 (270 mm)。

图 5 为对比模型在达到目标顶点位移时的层间位移角分布, 可以看出, 窗下墙高度的增加会降低结构在罕遇地震下的层间位移, 同时结构的层间位移在二层以上分布较为均匀, 一层位移较小。相比于小震下三种模型的层间位移角分布, 罕遇地震下, 窗下墙高度为 600 mm 和 900 mm 模型的层间位移角差距不大, 比无窗下墙的结构最大降低了 16.7% 左右。因此, 窗下墙对结构在罕遇地震下的抗震性能有显著提高。

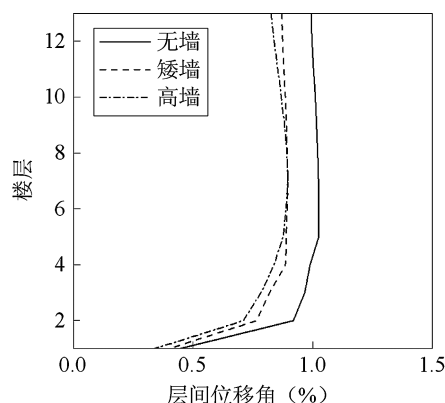


图 5 对比模型在大震下的层间位移角

3.3 剪力墙应力分布

对比含不同窗下墙高度的结构在达到目标位移时剪力墙中钢筋的应力分布, 可以看出, 结构中剪力墙的伤害主要集中于结构下部, 上部剪力墙受力较小。窗下无墙的结构中, 剪力墙中钢筋应力较大的部位主要集中于 1-2 层, 随着窗下墙高度的增加, 剪力墙中钢筋应力较大的部位逐渐往结构高度方向发展, 在窗下高墙模型中, 结构底部 1-4 层的钢筋均能达到屈服强度。表明窗下墙高度的变化, 会影响结构的损伤分布。

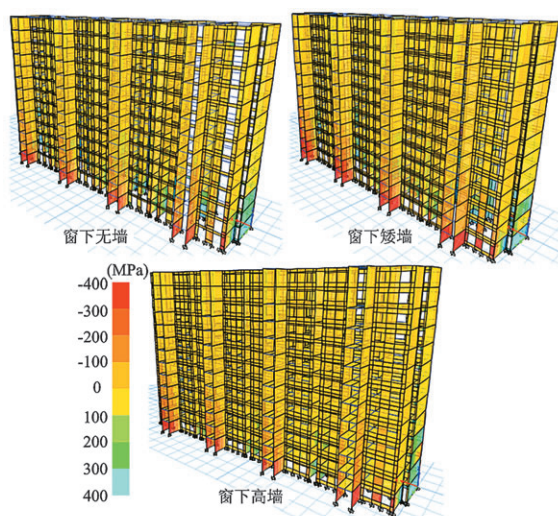


图6 对比模型加载至目标位移时剪力墙钢筋应力分布

4 结论

本文通过采用PKPM和ETABS软件对13层含有不同高度窗下墙的预制剪力墙结构进行弹性分析和弹塑性Pushover分析,主要得到以下结论:

(1)小震弹性分析结果表明,本文设计的13层含有不同高度窗下墙的预制剪力墙结构基本合理,各参数均能满足相应的规范要求。

(2)结构分析时考虑预制剪力墙中的窗下墙会增加结构的刚度和承载力,并且结构刚度和承载力随窗下墙高度的增加而增大;小震下结构的层间位移角随着窗下墙高度的增加不断降低,当窗下墙高度达到900mm时,层间位移角的减小幅度为8%。罕遇地震下,窗下墙高度为600mm和900mm的结构,其层间位移角的差距不大,比无窗下墙的结构最大降低了16.7%左右。

(3)三种模型中剪力墙的损伤主要集中于结构的底部,但窗下墙高度的增加会使得结构中剪力墙的损伤略微向结构上部发展。以上分析结果表明,在预制钢筋混凝土剪力墙结构中考虑窗下墙能提高结构的抗震性能。

参考文献:

[1] 朱荣华,沈聚敏. 砖填充墙钢筋混凝土框架拟动力地震反应试验及理论分析[J]. 建筑结构学报,1996,17(4): 27-34.

[2] 李英民,韩军,田启祥,等. 填充墙对框架结构抗震性能的影响[J]. 地震工程与工程振动,2009,29(3):51-58.

[3] 清华大学土木工程结构专家组,西南交通大学土木工程结构专家组,北京交通大学土木工程结构专家组,等. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报,2008,29(4):1-9.

[4] 关国雄,夏敬谦. 钢筋混凝土框架砖填充墙结构抗震性能的研究[J]. 地震工程与工程振动,1996,16(1): 87-99.

[5] 张锡治,李义龙,安海玉. 预制装配式混凝土剪力墙结构的研究与展望[J]. 建筑科学,2014,30(1):26-32.

[6] 种迅,万金亮,蒋庆,等. 水平拼缝部位增强叠合板式剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2018,35(4): 107-114.

[7] Shen S D, Pan P, Miao Q S, et al. Test and analysis of reinforced concrete (RC) precast shear wall assembled using steel shear key (SSK)[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2019, 48(14): 1595-1612.

[8] Chong X, Xie L L, Ye X G, et al. Experimental study on the seismic performance of superimposed RC shear walls with enhanced horizontal joints[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2019, 23(1): 1-17.

[9] 万金亮. 窗下墙对预制混凝土剪力墙结构抗震性能影响的试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.

[10] 张蓝方. 带窗下墙的预制混凝土剪力墙结构抗震性能研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.

[11] 冯友鸿. 高层框架核心筒结构抗震性能研究[D]. 南昌:南昌大学,2020.

[12] 查申申. 高层剪力墙结构边缘构件消能保护方法研究[D]. 廊坊:防灾科技学院,2020.

[13] 赖正聪,潘文,白羽,等. 基础隔震在高烈度区大高宽比剪力墙结构中的应用与试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017,38(9):62-73.

[14] 林旭川,陆新征,缪志伟,等. 基于分层壳单元的RC核心筒结构有限元分析和工程应用[J]. 土木工程学报, 2009,42(3):49-54.

[15] 建筑抗震设计规范:GB50011-2010(2016年版)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ 3-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[17] 孙国华. 基于功能的高层钢框架静力弹塑性抗震分析的改进方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005.

[18] Fajfar P. Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, 28(9): 979-993.