

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2012.06.005

## 多遇地震下框架结构填充墙的作用： 汶川地震的启示

张佳超, 张雷明, 刘西拉

(上海交通大学 土木工程系, 上海 200240)

**摘要:**以某3层钢筋混凝土框架结构为分析对象,考虑不同的填充墙布置,进行多遇地震作用下的计算分析。结果表明分析模型中考虑填充墙及其不同布置时,结构的动力特性、规则性特征、以及内力分布等结构的抗震性能均受到明显影响。需要指出的是在多遇水平地震作用下,由于填充墙的约束作用,框架柱端节点弯矩远大于梁端弯矩。建议结构抗震分析时,力学模型中应增加考虑填充墙参与受力计算。

**关键词:**框架结构;填充墙;规则性;框架节点

**中图分类号:**TU375.4    **文献标志码:**A    **文章编号:**1674-4764(2012)06-0025-07

## Effects of Infill Walls in Frame Structures under Frequent Earthquake: Revelation from Wenchuan Earthquake

ZHANG Jiachao, ZHANG Leiming, LIU Xila

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P. R. China)

**Abstract:**Based on a three-story RC frame, the analysis of the structure with various layouts of infill walls under frequent earthquake was conducted. The results indicate that when the infill walls and their different layouts are incorporated into the structural model, the seismic performance, such as dynamic properties, characteristics of regularity, and internal force distributions would change significantly. It should be also mentioned that because of the constraint of infill walls, the sum of moments at column ends is much larger than that at beam ends at the frame column-beam joints. It is suggested that infill walls should be adequately considered in the mechanical models during seismic analysis.

**Key words:**frame structure; infill wall; regularity; column-beam joint

2008年5月12日,四川省汶川县发生中国建国以来破坏最严重,波及范围最广的一次地震,强度达里氏8.0级。大量建筑受到不同程度的损坏甚至倒塌,造成了严重的人员伤亡及财产损失。根据震后建筑结构的震害报告<sup>[1-5]</sup>统计,此次地震中砌体结构和钢筋混凝土框架结构破坏程度最为严重,在倒塌的各类结构中所占比例也最大,其中包括不少学校教学楼和医院等公共建筑。值得注意的是,由于墙板的约束作用,地震中很多框架结构发生“强梁弱

柱”的破坏模式,与抗震设计预期不符;另外大量填充墙出现不同程度和形式的破坏甚至倒塌,严重影响人员的生存空间和灾后救援工作。惨痛的教训提醒我们必须加强对框架中填充墙的影响作用的认识,制定相应的措施指导工程实践。

长期以来工程界和学术界对填充墙在结构抗震中的影响一直很重视,开展了很多关于填充墙框架的研究工作<sup>[6-13]</sup>。然而大量的研究成果是基于对简单填充墙平面框架的定性考察,认为填充墙可明显

收稿日期:2011-02-18

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目子项目(2002CB412709)

作者简介:张佳超(1981-),男,博士生,主要从事钢筋混凝土结构抗震研究,(E-mail)jc Zhang07@yahoo.com。

提高框架的刚度、承载能力及耗能能力,造成目前填充墙框架结构的抗震设计方法过于简化和对填充墙框架结构抗震性能过于乐观的估计<sup>[14]</sup>。另外对于含填充墙的框架结构,各国的抗震规范也几乎未涉及对其进行整体结构地震效应计算的要求,中国《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010,以下简称“抗震规范”)是采取周期调整的方法计入填充墙刚度的影响,这仅是设计时考虑填充墙的作用的一种简化处理。为考察地震中结构真实的受力行为,需要进行包含填充墙在内的三维力学模型分析。考虑到当前结构工程设计是按照现行抗震规范,以多遇地震作用的计算结果为基础进行构件配筋,因此以一个有典型意义的实际工程为分析对象,按相关规范规定进行设计并建立相应的力学模型,考虑填充墙的不同布置方式,进行多遇水平地震作用下的系统的计算分析,考察填充墙对结构抗震性能的影响,以期为钢筋混凝土框架结构的抗震设计提供参考。结果表明,分析模型中考虑填充墙及其不同布置时,结构的动力特性、规则性特征、以及内力分布等结构的抗震性能均有明显变化。需要指出的是,在多遇水平地震作用下,由于填充墙的约束作用,框架柱端节点弯矩远大于梁端弯矩。建议结构抗震分析时,力学模型中应增加考虑填充墙参与受力计算。

## 1 工程概况

分析对象为一栋 3 层的教学楼,钢筋混凝土框

架结构,底层层高 4.2 m,其它层层高 3.6 m。抗震设防烈度为 7 度,设防类别为丙类,抗震等级为 3 级。梁、柱和楼板为钢筋混凝土,强度等级为 C30;填充墙为普通烧结砖砌体,砖强度等级为 MU10,砂浆强度等级为 M5。原工程平面布置及各构件几何信息详见附录 A。

## 2 力学模型

考虑 2 种填充墙的布置,借助通用有限元软件 ABAQUS 建立 3 个力学模型:1)模型 A:带楼板的框架(图 1(a)),保持原结构中填充墙的布置不变并将其以集中质量的形式作用于梁柱结点,不计填充墙的刚度及强度;2)模型 B:考虑楼板和填充墙的框架(图 1(b)),模型中各片填充墙以 4 结点等参壳单元模拟并按实际建筑平面布置建模;3)模型 C:考虑底部大空间的框架(图 1(c)),该模型除底层未布置填充墙外,其余与模型 B 相同。各模型中梁和柱以空间梁单元模拟;楼板以 4 结点等参壳单元模拟。考虑到抗震规范规定填充墙与主体结构应有可靠拉结,并能适应主体结构不同方向的层间位移,计算时假设各结点连接无破坏。材料定义如下:混凝土弹性模量为 30 GPa,泊松比为 0.18;砌体弹性模量为 2.4 GPa,泊松比为 0.15。

采用振型分解反应谱法对上述 3 个模型进行横向多遇地震作用计算。由于尚无汶川地震记录数据,因此在已得到广泛应用的 El Centro 波的基础

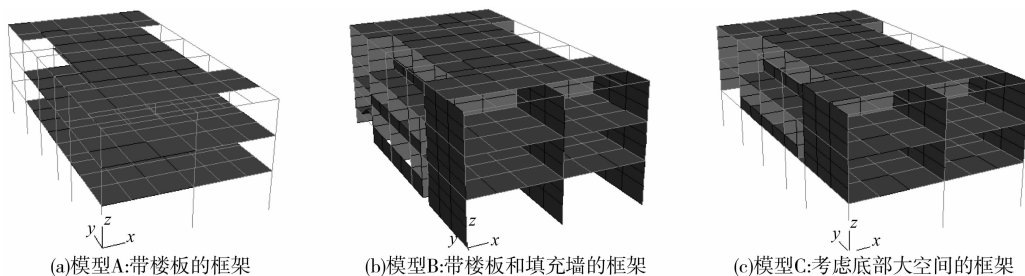


图 1 钢筋混凝土框架结构计算模型

上,按照符合抗震规范的地震影响系数曲线进行处理。具体做法为:调整 El Centro 波为 7 度设防时多遇地震时程曲线(峰值加速度 35 gal;1 gal=1 cm/s<sup>2</sup>);用 Newmark 积分方法对一系列单自由度体系进行动力方程求解,得到该波在结构阻尼比为 5% 时的加速度反应谱曲线(图 2,峰值 90.4 m/s<sup>2</sup>)。

## 3 计算结果分析

在前述工程案例 2 种填充墙布置、3 个力学模型定量计算结果的基础上,考察多遇地震下填充墙

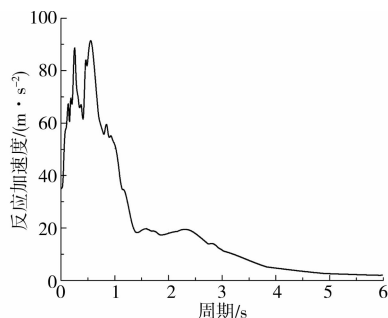


图 2 El Centro 波加速度反应谱曲线

对结构动力特性、规则性、层间剪力和节点梁柱端受力的影响。

3.1 动力特性-周期及振型

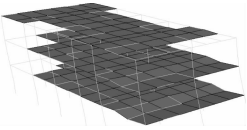
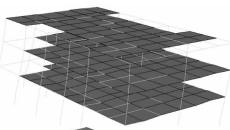
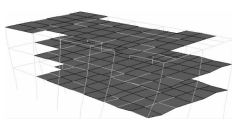
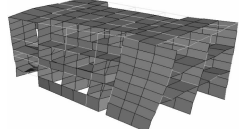
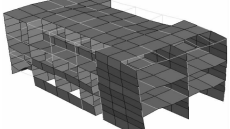
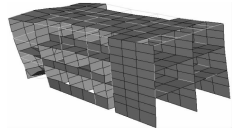
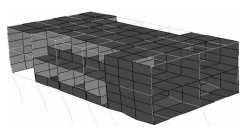
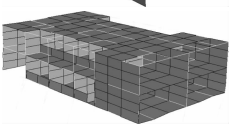
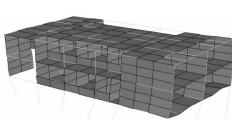
计算结果表明模型 B、模型 C 与模型 A 的基本周期比值分别为 0.29 和 0.67;并且从表 1 可以看出不同的填充墙布置会引起结构自振周期的明显变化。目前抗震规范考虑填充墙的作用时,对于框架结构建议的自振周期调整系数取值为 0.6~0.7,从表 1 可以看出考虑填充墙及其不同布置引起的结构自振周期变化已大大超出该取值范围。

另外,在前 3 阶振型(表 2)中未考虑填充墙刚度贡献的模型 A 的前 2 阶振型均为平动,第 3 阶为

扭转。考虑填充墙的刚度贡献后,模型 B 第 1 主振型为扭转;填充墙布置发生改变后,结构的振型也发生改变,如模型 C 的前 3 阶振型特征与模型 A 相同,第 1 主振型为平动。

表 1 模型 A、模型 B 和模型 C 自振周期					
振型阶次	周期/s			周期比	
	模型 A	模型 B	模型 C	模型 B: 模型 A	模型 C: 模型 A
1	0.625 2	0.179 7	0.413 3	0.29 : 1	0.67 : 1
2	0.525 7	0.155 5	0.365 2	0.30 : 1	0.69 : 1
3	0.482 5	0.149 5	0.338 5	0.31 : 1	0.70 : 1

表 2 模型 A、模型 B 和模型 C 振型

计算模型	振型		
	1	2	3
模型 A			
模型 B			
模型 C			

可见填充墙对结构动力特性影响显著。结构自振周期明显降低;填充墙不同布置引起的结构自振周期变化大大超出抗震规范建议的周期调整系数取值范围。另外由于填充墙的刚度贡献,实际结构的主振型可能为扭转而非设计预期的平动;填充墙的布置方式发生变化时,结构的振型也会随之发生明显改变。

3.2 结构规则性

结构的规则性判断,通常是通过一系列的定量指标(如楼层弹性水平位移、侧向刚度等)对规则与不规则进行划分,进而规定相应的抗震设计措施。目前我国抗震规范<sup>[15]</sup>、美国 UBC 规范<sup>[16]</sup>和欧洲规范<sup>8[17]</sup>均是采用这种方法。然而实际设计计算时由于力学模型一般不包含填充墙,因而填充墙对结构规则性的影响并未得到较好的考虑。在此暂不讨论结构规则性的判断方法,而是参考中国抗震规范条文中已有的方法(参见附录 B),通过对模型 A、模型 B 和模型 C 分别进行规则性判断,重点探讨填充墙

的影响作用。

从结构构件布置来看,该结构平面为矩形,无凹进;各层楼板有效宽度均大于本层楼板典型宽度(外轴线间宽度)的 50%;结构竖向抗侧力构件连续。模型 A 计算结果表明,结构各楼层最大弹性水平位移与楼层两端弹性水平位移平均值的比值分别为:底层 1.18,2 层 1.18,顶层 1.17,均小于 1.2;模型 A 各层侧向刚度(参见图 3)分别为:底层 431 MN/m,2 层 401 MN/m,3 层 363 MN/m,各层侧向刚度均大于相邻上一层的 70%。综上可以判断,当按照模型 A 计算时,结构在水平及竖向均是规则的。

然而力学模型中考虑填充墙的刚度贡献后,结构表现出了不同类型的不规则性。如模型 B 各楼层最大弹性水平位移与楼层两端弹性水平位移平均值的比值分别为:底层 1.22,2 层 1.28,顶层 1.25,均大于 1.2,结构为水平扭转不规则。模型 C 各层的侧向刚度分别为:底层 560 MN/m,2 层 4.04 GN/m,3 层 4.20 GN/m;底层侧向刚度仅为 3 层的 14%,结

构存在明显的抗震薄弱部位,为竖向不规则。

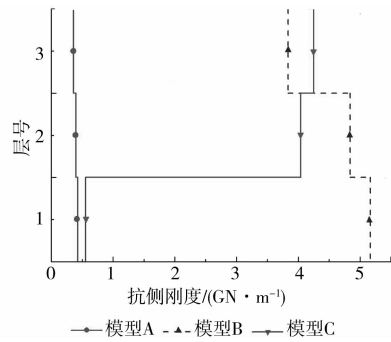


图 3 各计算模型抗侧刚度

上述结果表明,填充墙的布置形式不同时,实际结构可能表现出不同类型的不规则性,甚至出现严重不规则的情况(如造成抗震薄弱部位),并非模型 A 分析显示的那样呈现良好的规则性。如果统一按

照规则结构进行计算设计显然无法反映结构真实的抗震性能,也就无法保证结构安全。建议结构规则性判断时应综合考虑填充墙的影响,并且对刚性填充墙的布置作一定的限制要求,避免填充墙的私自拆建造成结构抗震性能的改变。

3.3 层间剪力

计算表明随着填充墙布置方式的改变,各模型之间地震效应的计算值有很大差别,如表 3 中模型 B 和模型 C 计算的各层层间剪力与模型 A 相差最大达 38.5%,说明如果忽略填充墙的强度及刚度,不能准确的反映结构的实际受力状态。

另外从表 3 可看出,多遇水平地震作用下填充墙可分担相当比例的地震剪力,如模型 B 和模型 C 中各层填充墙的剪力分担率均在 75%以上,该计算结果与文献[18]的试验结果是一致的。

表 3 模型 A、模型 B 和模型 C 层间剪力

层号	模型 A		模型 B		模型 C		剪力计算差/%	
	层间剪力 $V_a/\text{kN}$	填充墙剪力 分担率	层间剪力 $V_b/\text{kN}$	填充墙剪力 分担率/%	层间剪力 $V_c/\text{kN}$	填充墙剪力 分担率/%	$( V_a - V_b )/V_a$	$( V_a - V_c )/V_a$
1	1 364		935	82.0	1 168		31.5	14.4
2	1 131		696	82.5	1 112	83.7	38.5	1.7
3	538		374	76.3	475	76.5	30.5	11.8

注:填充墙剪力分担率为填充墙分担的水平剪力占总层间剪力的百分比。

考虑到抗震规范规定填充墙应具有满足主体结构层间变位的变形能力,本文通过修正材料的弹性模量,计算了考虑填充墙刚度退化 20%、50% 和 90% 时,模型 B 和模型 C 中填充墙的剪力分担率(图 4),以进一步从宏观上定性考察填充墙分担地震剪力的情况。结果表明模型 B 和模型 C 中填充墙的剪力分担率相当,但值得注意的是考虑填充墙一定程度的刚度退化后,其仍然能分担相当比例的水平地震剪力,如考虑刚度退化 20% 时模型 B 和模型 C 中填充墙的剪力分担率分别为 80% 和 81.9%,甚至退化 90% 时填充墙仍可承担约 50% 的剪力。

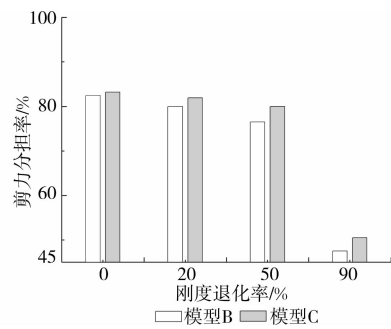


图 4 填充墙刚度不同退化程度时填充墙剪力分担率

综合分析,框架柱间的填充墙可以分担相当比例的地震剪力,一方面说明如果忽略填充墙分担地震剪力的能力,实际上造成了结构一定程度的承载力“浪费”;另一方面一旦刚性填充墙发生倒塌破坏导致结构刚度发生突变,引起的内力重分布有可能对主要构件不利甚至造成破坏,从而使结构偏于不安全。当然填充墙的这一影响的定量尚需通过试验和弹塑性计算(甚至倒塌分析)进一步研究。

3.4 节点梁柱端内力

框架结构节点的设计中,现行抗震规范对节点柱端组合的弯矩设计值做了如下规定:

$$\sum M_c = \eta_c \sum M_b \tag{1}$$

式中:  $\sum M_c$  为节点上下柱端截面组合的弯矩设计值之和;  $\sum M_b$  为节点左右梁端截面组合的弯矩设计值之和;  $\eta_c$  为柱端弯矩增大系数。抗震规范要求  $\eta_c$  在结构抗震等级为一级时取 1.7,二级取 1.5,三级取 1.3。规范意图是通过该措施确保节点柱端的实际受弯承载力大于梁,使结构中梁先屈服以实现“强柱弱梁”的抗震设计目标。

对各模型轴线 D 上各层节点处的柱梁弯矩比

$\sum M_c / \sum M_b$  进行了计算(图5),考虑了填充墙不同刚度退化程度的影响。结果表明模型A各层节点处柱梁弯矩比均小于1.2,而力学模型中考虑填充墙刚度贡献后,其对框架节点受力影响非常明显,如图6中模型B各层节点柱梁弯矩比最大2.21,最小1.13,平均为1.7;模型C各层节点柱梁弯矩比最大3.34,最小1.11,平均为2.14。考虑填充墙的刚度退化时,填充墙的约束作用逐渐减小,但对节点受力影响仍然明显,如考虑刚度退化50%时,模型B的各层框架节点柱梁弯矩比最大1.91,最小1.05,平均1.48;模型C的各层框架节点柱梁弯矩比最大2.45,最小1.02,平均1.72。

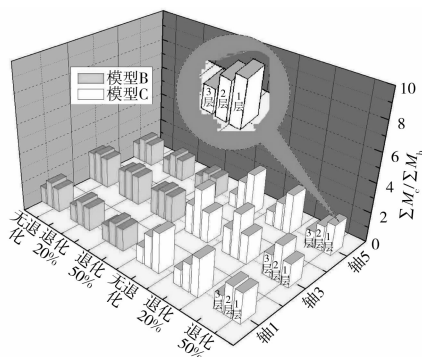


图5 填充墙刚度不同退化程度时D轴各节点柱梁弯矩比

综上表明,多遇水平地震作用下由于填充墙的约束作用,框架节点处柱端弯矩大于梁端弯矩,柱梁的弯矩比甚至达3.0以上;这一影响即使在考虑填充墙一定程度的刚度退化后仍然很明显,因而可能导致按照抗震规范设计的框架柱早于框架梁达到极限承载力,而无法实现“强柱弱梁”的抗震目标。建议结构抗震计算时,力学模型中应增加考虑填充墙参与受力计算,以正确计算结构在地震作用下节点的实际受力状态,同时应根据计算结果对框架柱做相应的加强。

## 4 结语

以一个3层钢筋混凝土框架结构为分析对象,考虑2种填充墙布置建立3个力学模型,进行多遇水平地震作用计算。结果表明填充墙对结构抗震性能有明显的影晌作用,归纳如下:

1)多遇水平地震作用下,填充墙对结构动力特性影响显著。填充墙可明显降低结构的自振周期;并且填充墙不同布置引起的结构自振周期变化,大大超出抗震规范建议的周期调整系数的取值范围。实际结构的主振型可能为扭转而非设计预期的平动。

2)多遇水平地震作用下,填充墙影响结构的规

则性。由于填充墙的不同布置,实际结构可能表现出不同类型的不规则性,甚至出现严重不规则的情况(如造成抗震薄弱部位)。建议结构规则性判断时应综合考虑填充墙的影响,并且对刚性填充墙的布置作一定的限制要求,避免填充墙的私自拆建造成结构抗震性能的改变。

3)多遇水平地震作用下,横向填充墙可以分担相当比例的地震剪力。一方面说明如果忽略填充墙分担地震剪力的能力,实际上造成了结构一定程度的承载力“浪费”;另一方面,一旦刚性填充墙发生倒塌破坏,引起的内力重分布有可能对主要构件不利,当然这一影响的定量尚需进一步通过试验和弹塑性计算(甚至倒塌分析)进一步研究。

4)多遇水平地震作用下,填充墙对框架节点受力影响明显。由于填充墙的约束作用,框架节点柱端弯矩远大于梁端弯矩。建议抗震设计及验算时,力学模型中应增加考虑填充墙参与受力计算,否则就不能正确反映结构在地震作用下节点的真实受力行为,而这对于“强柱弱梁”的抗震目标最终能否实现至关重要。

## 参考文献:

- [1] 清华大学土木结构组,西南交通大学土木结构组,北京交通大学土木结构组.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008,29(4):1-9.  
Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Xinan Jiaotong University and Beijing Jiaotong University. Analysis on seismic damage of buildings in the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9.
- [2] Zhang L M, Liu X L. Learning from the Wenchuan earthquake: key problems in collapse analysis of structures [C]//Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Chinese Association of Earthquake Engineering, Beijing, China, October 12-17, 2008. [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14\\_S31-009.PDF](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_S31-009.PDF).
- [3] 汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [4] 韩军,李英民,刘立平,等.5.12汶川地震绵阳市区房屋震害统计与分析[J].重庆建筑大学学报,2008,30(5):21-27.  
HAN Jun, LI Yingmin, LIU Liping, et al. Building damage in Mianyang City caused by the May 12, 2008 Earthquake in Wenchuan, Sichuan Province, P. R. China [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(5): 21-27.

- [5] 李宏男, 肖诗云, 霍林生. 汶川地震震害调查与启示[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 10-19.  
LI Hongnan, XIAO Shiyun, HUO Linsheng. Damage investigation and analysis of engineering structures in the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 10-19.
- [6] Chaker A A, Cherifati A. Influence of masonry infill panels on the vibration and stiffness characteristics of RC frame buildings [J]. Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28(9): 1061-1065.
- [7] Canbay E, Ersoy U, Ozcebe G. Contribution of reinforced concrete infills to seismic behavior of structural systems [J]. ACI Structural Journal, 2003, 637-643.
- [8] Pujol S, Benavent-Climent A, Rodriguez M E. Masonry infill wall: an effective alternative for seismic strengthening of low-rising reinforced concrete building structures [C]//Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Chinese Association of Earthquake Engineering, Beijing, China, October 12-17, 2008. <http://www.abam.com/uploadedfiles/tp-MasonryInfillWalls.pdf>.
- [9] Taskin B, Hasgür Z. Investigation of infill wall effect for the seismic performance of a moderately damaged RC building [C]//Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Chinese Association of Earthquake Engineering, Beijing, China, October 12-17, 2008. [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14\\_05-01-0264.PDF](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_05-01-0264.PDF).
- [10] 刘玉姝, 李国强. 带填充墙钢框架结构抗侧力性能试验及理论研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 78-85.  
LIU Yushu, LI Guoqiang. Experimental and theoretical research on lateral load resistance of steel frames with infilled walls [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3): 78-85.
- [11] Mondal G, Jain S K. Lateral stiffness of masonry infilled reinforced concrete (RC) frames with central opening [J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(3): 701-723.
- [12] Anil O, Altin S. An experimental study on reinforced concrete partially in filled frames [J]. Engineering Structures, 2007, 29(3): 449-460.
- [13] Kose M M. Parameters affecting the fundamental period of RC buildings with infill walls [J]. Engineering Structures, 2009, 31(1): 93-102.
- [14] 郭子雄, 黄群贤, 魏荣丰, 等. 填充墙不规则布置对 RC 框架抗震性能影响试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11): 46-54.  
GUO Zixiong, HUANG Qunxian, WEI Rongfeng, et al. Experimental study of the seismic behavior of irregularly brick infilled RC frames [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(11): 46-54.
- [15] GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [16] International Conference of Building Officials. Uniform building code [S]. Whittier, CA: UBC, 1997.
- [17] Eurocode 8 Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings [S]. [s.l.]: European Committee for Standardization, 2003.
- [18] Hashemi A. Seismic evaluation of reinforced concrete buildings including effects of masonry infill walls [D]. Berkeley: University of California, 2007.

(编辑 罗 敏)

附录 A:各构件平面布置及几何信息

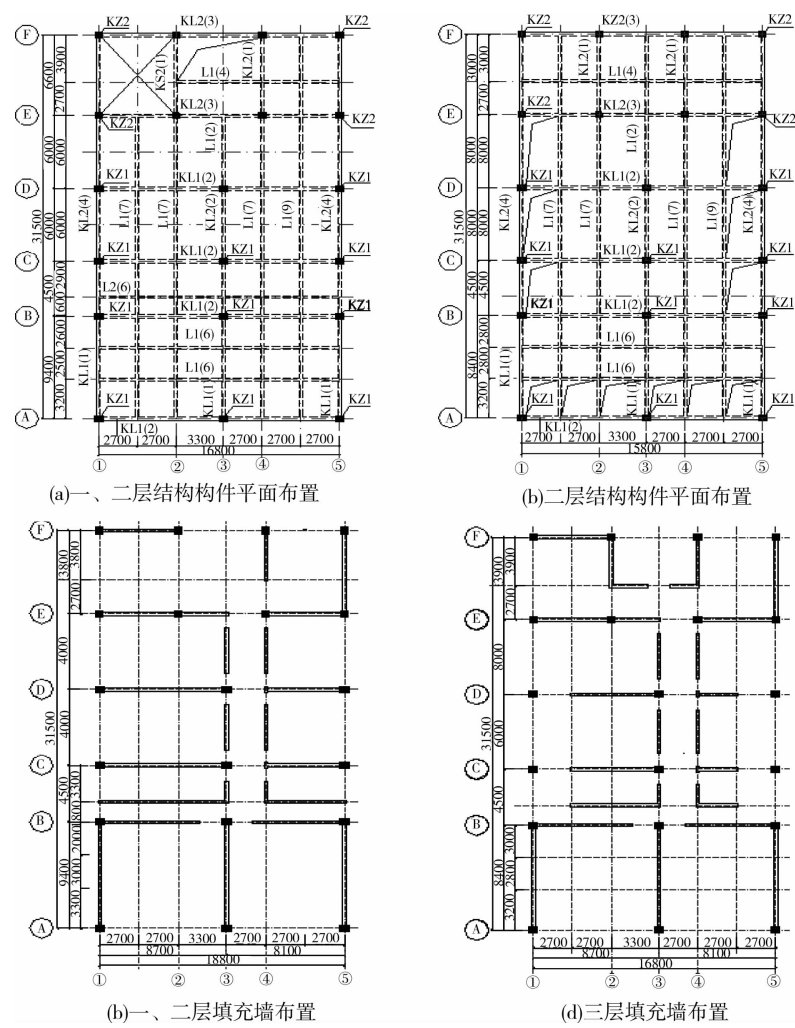


图 A1 结构平面布置

表 A1 各构件几何信息

构件编号	KZ1	KZ2	KL1	KL2	L1	L2
截面尺寸/mm	600×500	500×500	350×750	250×500	250×500	200×400

注:各层楼板厚 110 mm,填充墙厚 240 mm;屋面板厚 120 mm。

附录 B:《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)表 3.4.2:结构不规则类型定义<sup>[15]</sup>

水平不规则类型	定义
扭转不规则	楼层的最大弹性水平位移大于该楼层两端弹性水平位移平均值的 1.2 倍
凹凸不规则	结构平面凹进的一侧尺寸,大于相应投影方向总尺寸的 30%
楼板局部不连续	楼板尺寸和平面刚度急剧变化,如有效楼板宽度小于该层楼板典型宽度的 50%
竖向不规则类型	定义
侧向刚度不规则	该层侧向刚度小于相邻上一层的 70%,或小于其上相邻三个楼层侧向刚度平均值的 80%;除顶层外,局部收进的水平向尺寸大于相邻下一层的 25%
竖向抗侧力构件不连续	竖向抗侧力构件(柱、抗震墙、抗震支撑)的内力由水平转换构件向下传递
楼层承载力突变	抗侧力结构的层间受剪承载力小于相邻上一层楼的 80%