

# 静力和动力荷载作用下钢筋混凝土框—剪结构 剪力分配的研究

姚震宇, 缪志伟, 陆新征, 叶列平

(□清华大学土木工程系, 北京 100084)

**摘 要** 框架-剪力墙结构在非弹性变形阶段的内力分布, 关系到框架以至整个结构体系的安全, 应该在抗震设计中加以考虑。本文利用 MSC.Marc 2005 以及清华大学在 MSC.Marc 基础上开发的混凝土纤维模型程序 THUFIBER 和适用于剪力墙结构非线性分析的分层壳单元, 对一个钢筋混凝土框-剪结构进行了静力弹塑性计算和动力时程计算, 分析了在结构不同变形阶段水平剪力在框架和剪力墙之间的分配规律。

**关键词** 框-剪结构 静力 动力 非线性 剪力分配

**Abstract:** The distribution of internal force in frame-wall structure during the nonlinear phases concerns the safety of structure. A fiber model and a multi-layer-shell model for reinforced concrete(RC) structures based on the general-purpose finite element package of MSC.Marc is used to simulate the frame structure and the shear-wall structure respectively. In the pushover and dynamic time-history analysis of a frame-wall structure, the distribution of shear force between the frame and shear wall during different phases is studied.

**Key words:** frame-wall structure; pushover; dynamic; nonlinear; distribution of shear force

## 1 引言

钢筋混凝土框架—剪力墙结构的抗震分析中, 剪力在框架与剪力墙之间的分配, 关系到框架以至整个结构体系的安全, 是一个重要课题。在以往的框—剪结构抗震分析中, 通常采用的是协同工作算法, 计算出结构的弹性自振周期, 按小震参数计算出结构弹性地震作用  $F$ , 并将  $F$  按框架和剪力墙的弹性刚度比值进行分配。然而, 对于一般建筑结构, 在设防烈度下, 允许其在地震时进入非线性阶段, 而由于剪力墙和框架的层间位移角弹性极限值相差很远, 进入非线性阶段后它们的刚度退化过程不同, 故此时地震力在框架和剪力墙之间的分配也和弹性阶段有很大区别。所以在对框—剪结构进行抗震设计时, 应根据地震过程中, 结构在各个不同变形阶段剪力墙和框架的实际刚度进行结构总地震作用的计算及其在框架和剪力墙之间的分配, 以求得框架和剪力墙的最不利内力。虽然目前结构弹性状态的计算已经有比较完备的理论依据和计算方法, 但是非线性计算工作则基本上是靠模型试验和简化经验公式来进行, 缺乏完整和准确的非线性计算方法。

清华大学土木系在通用有限元软件 MSC.Marc 的基础上开发了针对钢筋混凝土杆系结构的钢筋混凝土纤维模型程序 THUFIBER<sup>[1,2,3]</sup>和针对剪力墙结构的分层壳墙单元模型<sup>[2,4,5]</sup>。利用这些有限元计算工具, 本文以一个按规范设计的典型钢筋混凝土框—剪结构为例, 进行了静力弹塑性分析和动力时程分析为例, 来探讨水平剪力在框架和剪力墙之间的分布及其规律。

## 2 计算模型

## 2. 1 结构设计及主要参数

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)和《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ-3-2002)的要求,利用 PKPM 软件设计一 8 层框架剪力墙结构办公楼,层高第一层 4.5 米,其余为 3m,其截面参数见表 1,结构平面布置如图 1 所示。主要设计参数如下:

该地区建筑场地为 II 类,抗震设防烈度为 8 度,设计基本地震加速度值为 0.20g,设计地震分组为第

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助课题,编号 20040003095

作者简介:姚震宇(1984.2-),男,清华大学土木系本科,主要从事结构动力学研究  
一组。剪力墙抗震等级为一级、框架抗震等级为二级。

钢筋纵向受力钢筋选用 HRB400,箍筋选用 HPB235。混凝土强度等级剪力墙梁、板、柱均采用 C30。

表 1 建筑模型截面参数

		第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层	第 7 层	第 8 层
梁截面 (cm)	横向	25×60	25×60	25×60	25×60	25×60	25×60	25×60	25×60
	纵向	25×50	25×50	25×50	25×50	25×50	25×50	25×50	25×50
柱截面(cm)		60×60	60×60	50×50	50×50	50×50	45×45	45×45	45×45
剪力墙厚度(cm)		30	25	18	18	18	18	18	18

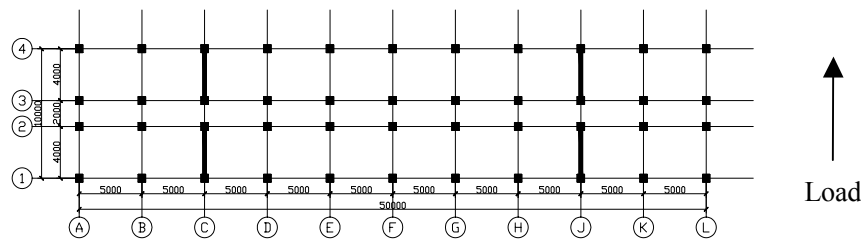


图 1 模型平面布置

模型的刚度特征值  $\lambda = 1.98$ , 满足框-剪结构的最佳刚度特征值区间  $\lambda = 1 \sim 2.5$  的要求<sup>[6]</sup>; 模型短跨方向的周期  $T = 0.60s$ , 满足结构的合理周期范围  $T = (0.06 \sim 0.08)n = (0.06 \sim 0.08) \times 8 = 0.48 \sim 0.64s$ <sup>[6]</sup>; 根据 PKPM 设计结果和配筋在 MSC.Marc 中建立有限元计算模型。

## 2. 2 结构有限元模型

为了简化计算,提高效率,采用平面有限元模型。为了验证平面模型的可靠性,分别建立结构的三维和平面有限元模型加以对比分析,如图 2 和图 3 所示。其中框架梁柱及剪力墙暗柱采用 THUFIBER 来模拟,剪力墙采用分层壳墙单元模型来模拟。

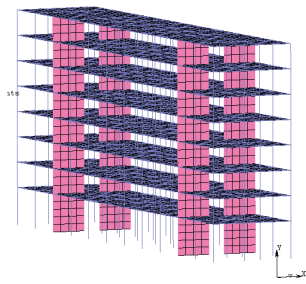


图 2 结构三维有限元模型

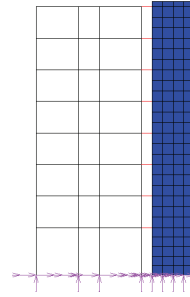


图 3 结构平面有限元模型

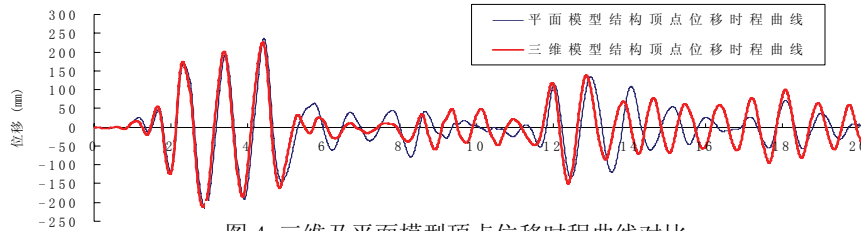


图 4 三维及平面模型顶点位移时程曲线对比

通过对比三维模型和平面模型在 0.5G 地震峰值加速度下结构的顶点位移时程曲线，如图 4 所示，可以看出两条曲线吻合较好，这说明用平面模型代替三维模型进行结构分析是可行的。

### 3 静力推覆分析

为了清晰的了解结构在整个失效过程中的行为，对上述结构进行了静力推覆分析 (Pushover)。首先对结构施加自重荷载，而后对结构施加水平倒三角荷载，如图 5 所示。采用弧长法控制，逐步增大荷载。计算得到的结构顶点位移和基底剪力的关系如图 6 所示，如图中箭头所示，当结构顶点位移达到 522mm 时，剪力墙混凝土达到压溃应变。

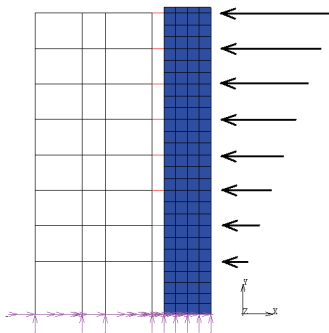


图 5 静力推覆侧向力模式

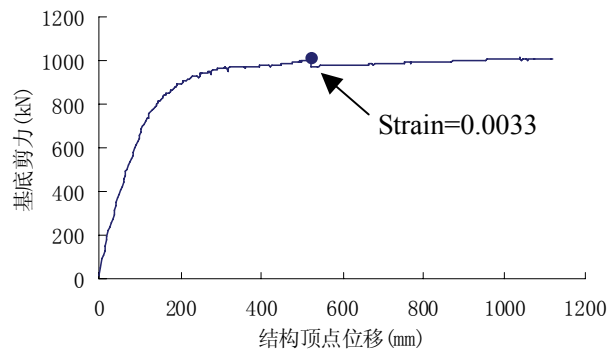


图 6 基底剪力—结构顶点位移关系

根据剪力墙纵筋达到屈服应变确定剪力墙屈服点可得顶点位移为 138.0mm 时剪力墙屈服，此时的剪力墙的平均层间位移角为 1/179.5，最大层间位移角出现在第 6 层为 1/153.0。

通过几何作图法<sup>[7]</sup>可得顶点位移为 225.7mm 时框架屈服，此时的框架的平均层间位移角为 1/109.2，最大层间位移角出现在第 1 层为 1/96.4，次大层间位移角在第 5 层为 1/100.5。

根据分析不同顶点位移时所对应的结构内力状态，取以下几个阶段来研究静力推覆下水平剪力的分布，可得如表 2 所示的结构不同受力阶段水平剪力的分布：

- (1) 剪力墙和框架都为弹性阶段，对应顶点位移为 5.7mm，
- (2) 文献[8]建议刚度特征值  $\lambda$  达最大(即最大层间位移角达 1/500)<sup>[8]</sup> 时，对应顶点位移为 42.1mm，
- (3) 剪力墙屈服前，对应顶点位移为 129.9mm，

(4) 剪力墙屈服后，框架屈服前，对应顶点位移为 212.8mm，

(5) 框架屈服后，对应顶点位移为 267.6mm。

表 2 结构不同受力阶段水平剪力的分布

标号	①	②	③	④	⑤
结构顶点位 (mm)	5.7	42.1	129.9	212.8	267.6
结构受力阶段	剪力墙和框架都为弹性阶段	刚度特征值 $\lambda$ 达最大时	剪力墙屈服前	剪力墙屈服后，框架屈服前	框架屈服后
平均层间位移角	1/4410	1/609	1/199	1/120	1/95
最大层间位移角	1/3359 (5 层)	1/500 (5 层)	1/161 (5 层)	1/104 (5 层)	1/84 (5 层)
结构基底总剪力 $V_{总}$ (kN)	89.0	349.1	780.8	914.2	952.6
框架基底总剪力 $V_F$ (kN)	17.5	96.3	215.6	326.1	358.0
$V_F / V_{总}$	19.7%	27.6%	27.6%	35.7%	37.6%

计算可得如图 7 所示各阶段框架水平剪力  $V_F$  沿楼层分布曲线，可以看出框架的最大剪力出现在第 4 层，然而由表 2 可见框架的最大层间位移角出现在第 5 层，这主要是由于建模时 1—4 层的配筋比 5—8 层的配筋强，虽然第 4 层的剪力比第 5 层的剪力大，但是第 4 层的变形仍然要比第 5 层的变形小；另外，由如图 8 所示的框架底部实际分担的总剪力的变化曲线，可以看出在整个推覆过程中，框架承受的总剪力值是不断增大的；框架底部实际分担的总剪力与相应阶段的结构底部总剪力相比，可得如图 9 所示的曲线，可以看出框架分担的剪力比例的变化规律比较复杂，主要是由于框架和剪力墙的刚度退化过程不同。与表 2 中各标号相对应，图 8 和图 9 中①—⑤标示出结构各受力阶段所对应各点。

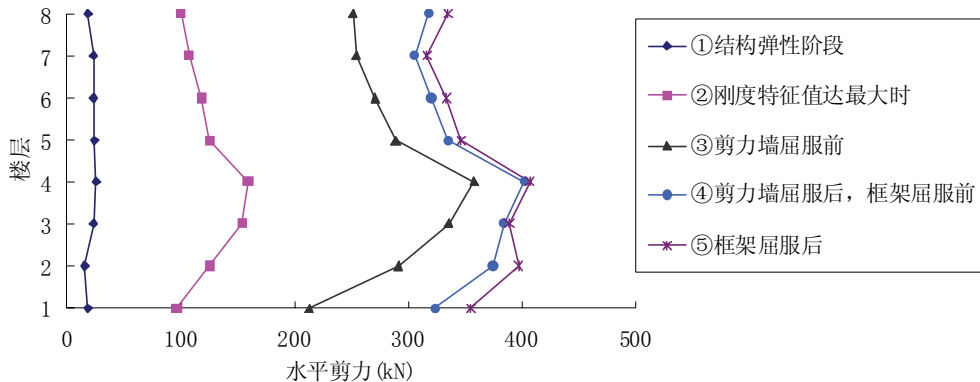


图 7 框架各阶段水平剪力沿楼层分布曲线

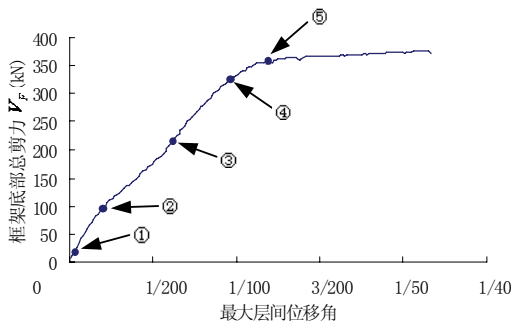


图 8 框架底部总剪力—结构最大层间位移角曲线

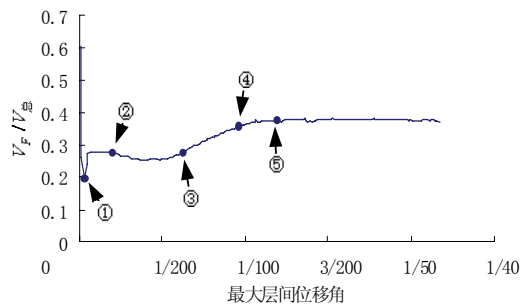


图 9 框架分担剪力比例—结构最大层间位移角曲线

## 4 动力时程分析

为了准确地了解在实际地震作用下结构的反应,对上述结构施加水平地震作用,选用 ElCentro NS 波,历时 25s,设置 8 种不同的地震峰值加速度,分别为 0.01g, 0.05g, 0.07g (8 度小震), 0.1g, 0.2g (8 度中震), 0.3g, 0.4g (8 度大震), 0.5g。计算可得结构在不同的地面峰值加速度(PGA)下的地震反应以及框架所分担地震剪力的变化规律。下面仅列出 0.07g, 0.2g, 0.4g 时结构的地震反应,如图 10-图 13 所示。

### 4.1 PGA=0.07g, 0.2g, 0.4g 时结构的地震反应

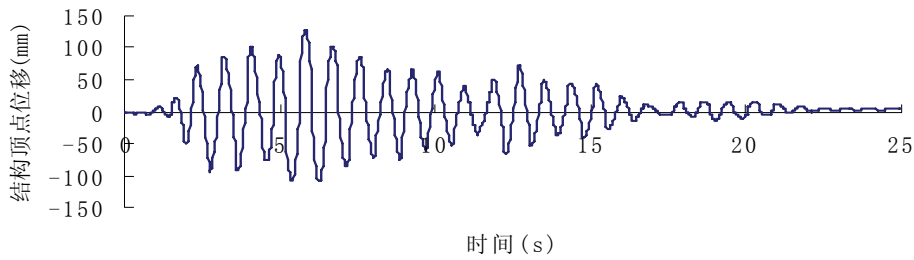


图 10 PGA=0.2g 结构顶点位移时程

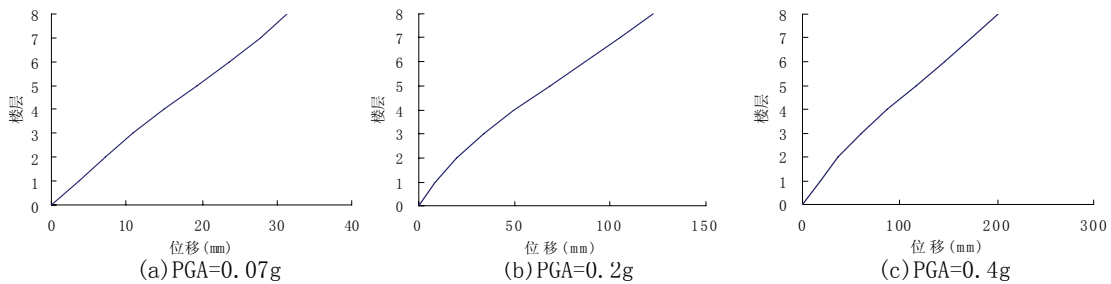


图 11 结构各层水平位移

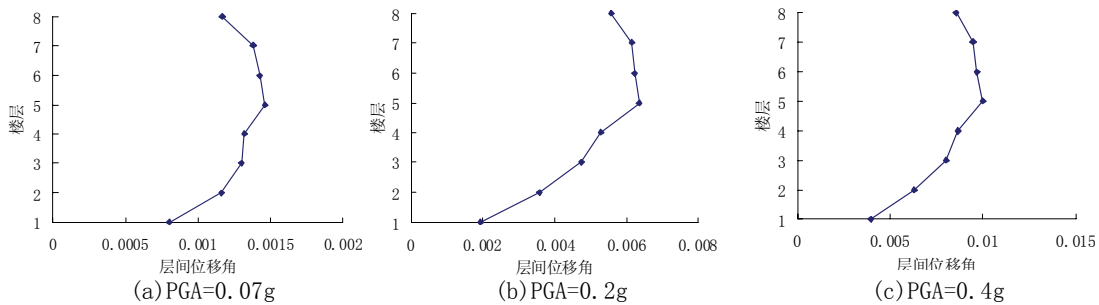


图 12 结构各层层间位移角

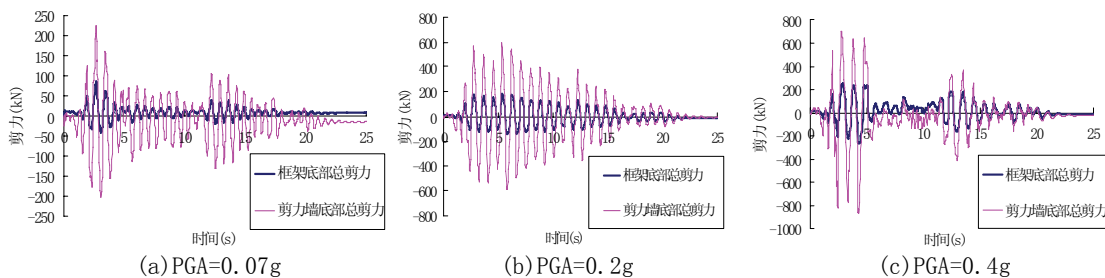


图 13 框架、剪力墙底部剪力时程

图 11 可见,在不同的峰值地面加速度(PGA)下结构的变形都为弯剪型。

由图 12(a)可得,当 PGA=0.07g 时,结构的最大层间位移角为 1/700 左右,根据前面 pushover 的结论,此时框架尚处于弹性阶段,而剪力墙已开裂,刚度降低至初始刚度的 45% 左右;由图 12(b)可得,当 PGA=0.2g

时, 结构的最大层间位移角为 1/160 左右, 根据前面 pushover 的结论, 此时框架尚未屈服, 刚度降低至初始刚度的 53% 左右, 而剪力墙基本屈服, 刚度降低至初始刚度的 20% 左右; 由图 12(c) 可得, 当 PGA=0.4g 时, 结构的最大层间位移角为 1/100 左右, 根据前面 pushover 的结论, 此时框架、剪力墙都已经屈服。

由图 13 可得, 当 PGA 分别为 0.07g、0.2g、0.4g 时, 框架分担的地震剪力  $V_F / V_{总}$  分别为 23.73%、24.07%、25.05%。

#### 4. 2 框架分担的剪力

结构中框架分担的剪力随峰值地面加速度(PGA)的关系如图 14 和图 15 所示。可以看出框架分担的剪力比例  $V_F / V_{总}$  在 PGA=0.4g 之前随着 PGA 的增大逐渐升高, 在 PGA=0.4g 之后出现明显下降(图 15), 前者主要是由于剪力墙逐渐地退出工作而使得框架承担的地震力比例升高, 后者主要是由于框架屈服后地震力将按二者屈服后割线刚度重新分配; 而框架实际分担的剪力值  $V_{Fmax}$  随着 PGA 的增大则是逐渐升高的(图 14)。

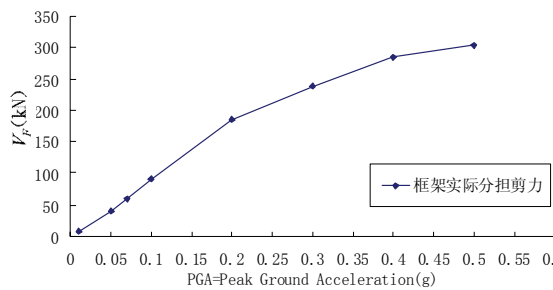


图 14 框架分担最大实际剪力-PGA 关系

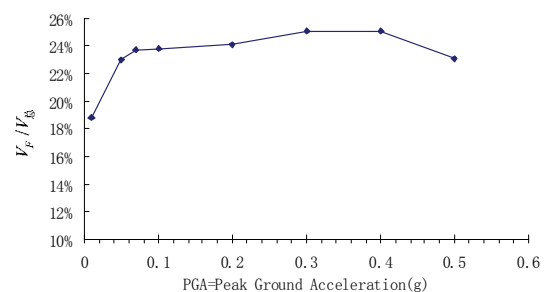


图 15 框架分担最大实际剪力/结构总剪力-PGA 关系

### 5 结论

- (1) 本文利用清华大学土木系在 MSC.Marc 基础上开发的 THUFIBER 和分层壳墙单元模型, 对一个框-剪结构进行了分析计算, 结果表明: THUFIBER 和分层壳墙单元模型可以很好的模拟框-剪结构在静力推覆荷载和动力荷载下的变形和破坏过程, 计算过程稳定, 收敛迅速, 具有出色的非线性分析能力。
- (2) 由静力计算结果可见, 框架的最大层剪力出现在第 4 层; 另外, 在整个推覆过程中, 随着层间位移角的增大, 框架承受的剪力值  $V_F$  是不断增大的, 而框架分担的剪力比例  $V_F / V_{总}$  的变化规律比较复杂。
- (3) 由动力计算结果可见, 在小、中、大震等各种不同的 PGA 作用下结构的变形都为弯剪型, 最大层间位移角都出现在第 5 层; 另外, 随着 PGA 的增大, 框架承受的剪力值  $V_F$  则是不断增大的, 而框架分担的剪力比例  $V_F / V_{总}$  先升高后降低。
- (4) 由图 15 可见,  $V_F / V_{总}$  在 PGA=0.4g 之前逐渐升高, 这是由于剪力墙比框架较早进入非线性阶段, 随着 PGA 的增大, 剪力墙逐渐退出工作, 框架承担的地震力比例则不断升高; 这与文献[8]中提到的“剪力墙遭受可允许的损坏、刚度降低或部分退出工作并吸收相当的地震能后, 框架部分能够继续承担一定的地震作用, 起到第二道防线的作用”的观点是一致的。 $V_F / V_{总}$  在 PGA=0.4g 之后

---

出现明显下降，这是由于框架屈服后，地震剪力将按二者屈服后割线刚度重新分配，此时地震力分配规律更加复杂，还需加以专门研究。

### 参考文献

- [1]陆新征, 缪志伟, 黄羽立, 叶列平. 静力和动力荷载作用下混凝土高层结构的倒塌模拟. 2005 MSC.Software 中国用户大会论文集, 成都, 2005: 1-10.
- [2]MSC. Marc Volume B: Element Library, 2004, MSC. Software Corporation.
- [3]Miao Z. W, Lu X. Z, Jiang J. J, Ye L. P, Nonlinear FE Model for RC Shear Walls Based on Multi-layer Shell Element and Microplane Constitutive Model. The 10th international conference on enhancement and promotion of computational methods in engineering and science Aug. 21-23, 2006, Sanya, Hainan, China(Accepted).
- [4]门俊, 陆新征, 宋二祥. 分层壳模型在剪力墙结构计算中的应用. 防护工程(已录用), 2006.
- [5]江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [6]周世炜. 高层建筑结构抗震分析与优化设计:[硕士学位论文], 西安建筑科技大学, 2004.
- [7]过镇海. 钢筋混凝土原理. 北京:清华大学出版社, 1999.
- [8]刘建新. 高层框-剪结构中框架地震内力的确定. 建筑结构学报, 1999, 20(3):1-3.