

文章编号:1673-2049(2015)03-0038-08

# 钢混框剪高层结构地震能量分布及耗散研究

鲍文博<sup>1,2</sup>, 付亮华<sup>1</sup>, 陆海燕<sup>1,2</sup>, 徐广洋<sup>1</sup>

(1. 沈阳工业大学 建筑工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 沈阳工业大学 辽宁省建筑材料力学重点实验室, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:**为了研究复杂建筑结构在地震作用下地震能量的分配与耗散机制,基于能量平衡原理和PERFORM 3D软件对钢筋混凝土框架-剪力墙高层结构模型进行了动力弹塑性能量时程分析,得到了框剪高层结构在罕遇地震作用下地震能量的输入、分布及耗散规律;考察了地震动特性对钢混框剪高层结构地震能量输入及分配的影响,确定了地震耗能占输入能的比例时程;分析了结构阻尼比和结构延性对框剪高层结构地震输入能、阻尼耗能和滞回耗能及其耗能比例的影响规律,确定了阻尼比对滞回耗能和延性比对阻尼耗能的交互影响;研究了框剪高层结构地震滞回耗能沿结构竖向分布和沿横向构件内部分配的规律,确定了竖向刚度分布对结构地震滞回耗能的影响;揭示了钢混框剪高层结构地震输入能量及其分布规律。所得结论可为基于能量平衡原理的抗震设计理论在复杂钢筋混凝土高层建筑结构实际工程中的运用提供参考。

**关键词:**能量平衡原理;地震能量分布;耗能机制;钢筋混凝土;框剪结构

**中图分类号:**TU973.31

**文献标志码:**A

## Research on Seismic Energy Distribution and Dissipation of Reinforced Concrete Frame-wall High-rise Structure

BAO Wen-bo<sup>1,2</sup>, FU Liang-hua<sup>1</sup>, LU Hai-yan<sup>1,2</sup>, XU Guang-yang<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870,

Liaoning, China; 2. Liaoning Provincial Key Laboratory of Construction Materials Mechanics,

Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to investigate the mechanism of seismic energy distribution and energy dissipation of complex building structure, the time history analysis of dynamic elastoplastic energy for a reinforced concrete (RC) frame-wall high-rise structure was made by using software PERFORM 3D based on the principle of energy balance. Meanwhile, the rule of earthquake input energy and its distribution were obtained for RC frame-wall structure under rare earthquake. The influences of ground motion characteristics on the earthquake input energy and its distribution in the RC frame-wall high-rise structure were examined, the time histories of the ratios of seismic energy dissipation to input energy were obtained. The influences of damping ratios and ductility ratios on the earthquake input energy, damping energy and hysteretic energy and its ratios to input energy were discussed, and the mutual influences of damping ratios on the hysteretic energy and the ductility ratios on the damping energy were determined. The distributions of the hysteretic energy along vertical direction and among RC members of the building structure were

收稿日期:2014-12-26

基金项目:国家自然科学基金项目(90815023);辽宁省教育厅科学研究基金项目(L2011011)

作者简介:鲍文博(1958-),男,辽宁大连人,教授,工学博士,E-mail:wenbobao@163.com。

researched, and the effects of lateral stiffness on the hysteretic energy were confirmed for the frame-wall high-rise structure. The rules of earthquake input energy and its distribution among energy components were indicated for RC frame-wall high-rise structure. The obtained conclusion for seismic design theory based on the energy balance principle can provide reference for the engineering practice of complex RC high-rise building structure.

**Key words:** principle of energy balance; seismic energy distribution; energy dissipation mechanism; reinforced concrete; frame-wall structure

## 0 引言

基于能量平衡原理的结构抗震设计理论把地震作用看作是对结构的一种能量输入与结构对能量吸收的过程加以研究,前者为能量对结构的作用而后者为结构在能量作用下的能量效应,当结构的能量效应不大于结构吸能的极限值时认为结构不会出现倒塌。在地震作用下,结构的能量平衡方程为<sup>[1]</sup>

$$E_D + E_H + E_E = E_I \quad (1)$$

式中: $E_I$ 为地震输入能量; $E_D$ 为系统的阻尼耗能; $E_H$ 为累积滞回耗能,只有结构的形变进入塑形阶段以后才会出现; $E_E$ 为结构在地震作用下的弹性振动能量,包含系统的动能和弹性应变能。

对于有阻尼抗震系统,在小震作用下除震动初期外一般  $E_E$  远小于  $E_D$ ,在大震作用下  $E_E$  通常远小于  $E_D$  或  $E_H$ <sup>[1-2]</sup>,所以在强震分析中忽略  $E_E$  一般不会引起太大的误差。

现行的单一指标设计方法采用承载力或最大位移反应进行结构的地震破坏评估和抗震设计,不能很好地反映地震动特性及累积耗能等对结构破坏的影响,难以对许多震害现象作出全面的解释。基于能量平衡的建筑结构抗震设计理论全面地反映了地震作用对给定结构的影响和特定结构在给定地震动下的抗震能力,更好地揭示了建筑结构的抗震本质或机理<sup>[1-3]</sup>。

基于能量平衡的结构抗震设计<sup>[4-5]</sup>自20世纪50年代提出以来,很多学者对其进行了大量的研究,Akiyama<sup>[6]</sup>和徐培蓁等<sup>[7]</sup>进行了较为系统的研究,提出了基于能量抗震设计的思路和方法,并应用于日本《基于能量抗震设计规程》。Fajfar等<sup>[8-9]</sup>在地震输入能、系统累积滞回耗能和结构变形的抗震设计方法等方面进行了大量研究,提出RC结构的N2设计方法。Akbas等<sup>[10-11]</sup>基于性能设计,开发了评价框架结构所需抗震能量的程序,提出了钢结构抗震设计的能量方法。Benavent-Climent<sup>[12]</sup>基于试验研究提出地震往复作用引起损伤的能量量化模

式,实现了地震的损害评估。Leelataviwat等<sup>[13]</sup>将基于能量原理推广应用于多自由度系统和结构抗震评估。近些年中国学者也进行了大量研究工作,在基于能量抗震设计的基础理论研究<sup>[2,14-16]</sup>和工程应用研究<sup>[1,7,16]</sup>等方面做了大量工作,取得了重大进展。由于问题的复杂性,使得目前基于能量原理的抗震研究尚有一定的局限性,特别是在复杂工程结构如混合结构体系、刚度非均匀分布高层结构中的应用和分析方面还有很大的差距。

本文基于能量抗震设计理论,以1个15层钢筋混凝土框架-剪力墙结构为案例,利用抗震设计非线性软件PERFORM 3D进行结构的地震能量弹塑性分析。研究在强震作用下复杂高层结构地震能量的输入、分配与耗散机制,以及地震动特性对于地震总能量及各分能量的影响趋势;分析结构阻尼比和结构延性等结构特性对框剪高层结构地震输入能、阻尼耗能和滞回耗能及其耗能所占比例的影响规律,确定了阻尼比对滞回耗能和延性比对阻尼耗能的交互影响;讨论框剪高层结构地震累积滞回耗能沿结构竖向分布和沿横向内部构件分配的规律,明确竖向刚度分布对结构地震滞回耗能的影响规律。

## 1 结构分析模型及输入地震动

### 1.1 结构分析模型

基于中国现行设计规范,利用ETABS程序设计了1个15层钢筋混凝土框架-剪力墙结构。结构底层高度为4.5 m,其他层高度为3.3 m,第1层柱子的截面尺寸为750 mm×750 mm,第2~15层柱子的截面尺寸为700 mm×700 mm;6.3 m跨梁截面尺寸为250 mm×700 mm;6.0 m跨梁截面尺寸为250 mm×600 mm;2.7 m跨梁截面尺寸为250 mm×400 mm;剪力墙厚度均为350 mm。主筋为HRB335,所有连梁和框架梁采用C30混凝土,第1~7层框架柱和剪力墙均采用C35混凝土,第8~15层框架柱和剪力墙采用C30混凝土。研究对象所处建筑场地的设防烈度为7度,设计基本加速度

为  $0.1g$  ( $g$  为重力加速度), 设计地震分组为二组, 场地类别为 II 类。底层柱和地面按固接处理, 仅考察  $y$  方向地震作用 ( $x$  和  $y$  方向如图 1 中坐标系所示), 15 层钢筋混凝土框架-剪力墙结构平面如图 1 所示, 梁和柱的配筋情况见表 1。

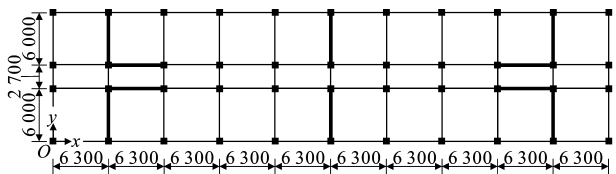


图 1 框剪结构平面(单位:mm)  
Fig. 1 Planar Graph of Frame-wall Structure (Unit:mm)

本文在使用 PERFORM 3D 进行有限元分析时, 采用纤维模型来模拟框架结构的梁、柱和墙单元, 即分别采用梁纤维截面、柱纤维截面和墙纤维截面来定义框架梁、框架柱和剪力墙截面, 采用梁单元和板壳单元来分别模拟连梁和楼板结构。钢筋和混凝土本构关系参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 的相关规定取值, 钢筋采用二折线本构关系, 混凝土采用三折线本构关系。分析采用 Rayleigh 阻尼, 通过结构阻尼比 (本文取  $0.05$ ) 及  $20\%$  和  $90\%$  的弹性第 1 周期来计算 Rayleigh 阻尼

的比例系数。分析中均考虑重力的荷载-位移 ( $P-\Delta$ ) 效应。

1.2 输入地震动的选取

地震动是频带较宽的非平稳随机过程, 受震源性质、震中距和场地条件等诸多因素的影响, 因此选用不同的地震动输入往往导致时程分析结果相差很大。尽管研究时应尽量考虑不同地震动特性的影响, 但过大的离散不利于分析。本文按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 第 5.1.2 条相关规定, 在场地和地震动强度统一的前提下选择用于时程分析的地震动。依据这一原则, 选用 8 条天然地震记录和 2 条人工波作为输入地震动, 具体参数如表 2 所示。由于主要研究高层钢混框架-剪力墙结构在大震作用下的累积塑性变形能的分布规律, 分析时地震动的强度统一按照 7 度罕遇地震考虑, 将所有地震波的峰值加速度调整到  $220\text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$ , 10 条地震波的持时分布在  $10\sim60\text{ s}$  内, 无特殊说明时结构阻尼比均取为  $0.05$ 。

2 地震动输入及地震能分布

震害理论与实践表明, 地震动特性对于结构地震响应及其表现具有重要影响。为了研究地震动特性对于复杂建筑结构抗震性能的影响, 基于非线性

表 1 框架剪力墙结构各构件配筋

Tab. 1 Reinforcement of Each Component of Frame-wall Structure										
楼层	剪力墙 厚/mm	墙端配筋 面积/mm <sup>2</sup>	框架柱截面尺寸	柱每侧配筋 面积/mm <sup>2</sup>	连梁截面 尺寸	连梁配筋面积/mm <sup>2</sup>		框架梁截面尺寸	框架梁配筋面积/mm <sup>2</sup>	
						上	下		上	下
1	350	2 000	750 mm×750 mm	1 950	350 mm× 700 mm	2 000	2 000	250 mm×700 mm,	1 350,	1 350,
2~4			700 mm×700 mm	1 800		2 000	2 000	250 mm×600 mm,	1 250,	1 250,
5~7						1 800	1 800	250 mm×400 mm	1 000	1 000
8~11		1 750	700 mm×700 mm	1 470		1 800	1 800	250 mm×700 mm,	1 100,	1 100,
12~15						1 600	1 600	250 mm×600 mm,	1 000,	1 000,
								250 mm×400 mm	1 000	1 000

表 2 地震动参数

Tab. 2 Ground Motion Parameters								
地震波名称	方向	地震波类型	记录时间	地震烈度	峰值加速度/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ )	持续时间/s	特征周期/s	场地类别
El Centro	东西	EL-EW 波	1940-05-18	6.7	215.00	25.00	0.55	II
El Ccentro	南北	EL-NS 波	1940-05-18	6.7	313.00	25.00	0.55	II
唐山	东西	TS-EW 波	1976-07-28	7.8	65.94	49.22	0.35	II
唐山	南北	TS-NS 波	1976-07-28	7.8	55.49	59.92	0.35	II
LomaPrieta	东西	Loma-EW 波	1989-10-17	7.1	473.10	10.00	0.45	II
LomaPrieta	南北	Loma-NS 波	1989-10-17	7.1	410.10	10.00	0.45	II
Northidge	东西	Nor-EW 波	1994-01-17	6.8	516.50	25.00	0.33	II
Northidge	南北	Nor-NS 波	1994-01-17	6.8	415.80	25.00	0.33	II
人工波 1		人工波 1			343.00	20.00		II
人工波 2		人工波 2			429.00	20.00		II

抗震分析系统 PERFORM 3D,以选择的 10 条地震动记录为输入,对上述建立的钢筋混凝土框架-剪力墙高层结构模型进行了动力弹塑性时程分析,得到了复杂高层结构在 7 度罕遇地震作用下的非线性能量时程。

图 2 为 15 层框剪结构模型在上述地震动作用下得到的动力弹塑性能量时程分析结果,分别为框剪结构总的地震输入能时程、地震滞回耗能时程、地震阻尼耗能时程以及地震滞回耗能占总耗能的比例时程,揭示了框剪结构总体的地震能量分布情况。在不同地震动作用下,各部分地震能的变化规律接近。地震初期,滞回耗能为 0 而阻尼耗能很小,表明结构此时速度小且无塑性变形,地震输入能主要由结构的动能和弹性应变能构成;之后随着地震作用的继续,地震能量进入持续增长期,地震输入能随滞回耗能和阻尼耗能的增加而迅速增加,结构逐渐出现塑性变形,耗能在地震输入能中占的比例越来越大;地震进行到一定程度之后,滞回耗能和阻尼耗能趋于定值而几乎不再增加,此时耗能在地震输入能中占的比例达到最大值,表明结构的耗能能力达到饱和。以上是从地震输入能量角度观察到的 3 个阶段,即地震输入能在框剪结构中的出现、增长和饱和,也反映了地震持时的影响。阻尼耗能和滞回耗能占总输入能的比例增长迅速,前期受弹性地震能交替变化的影响而出现较大波动,随着滞回耗能的增加,总地震耗能占总地震输入能的比例趋于稳定,很快逼近 100%。同时,由能量时程曲线看到,尽管峰值加速度相同,但不同地震波的能量时程差别明显,说明地震动频谱等特性对地震能有显著影响。

### 3 结构特性对地震耗能的影响

结构阻尼和结构延性是框剪结构 2 个典型的结构特性和重要综合指标,对于结构耗能和抗震性能具有重要作用。以下讨论结构阻尼和结构延性对混凝土框剪高层结构地震能量输入及其耗散的影响。

#### 3.1 阻尼比的影响

基于上述框剪结构模型,分别取结构阻尼比  $\xi$  为 0,0.02,0.05,0.1,0.15,0.2,采用上述地震动分别进行弹塑性动力时程分析,得到不同地震波作用下框剪结构在地震结束后地震耗能的分布情况,如图 3 所示。

阻尼比对框剪结构总的地震输入能影响如图 3(a)所示,大多地震波下的地震输入能曲线变化平缓,说明一般情况下阻尼比对框剪结构地震输入能的影响

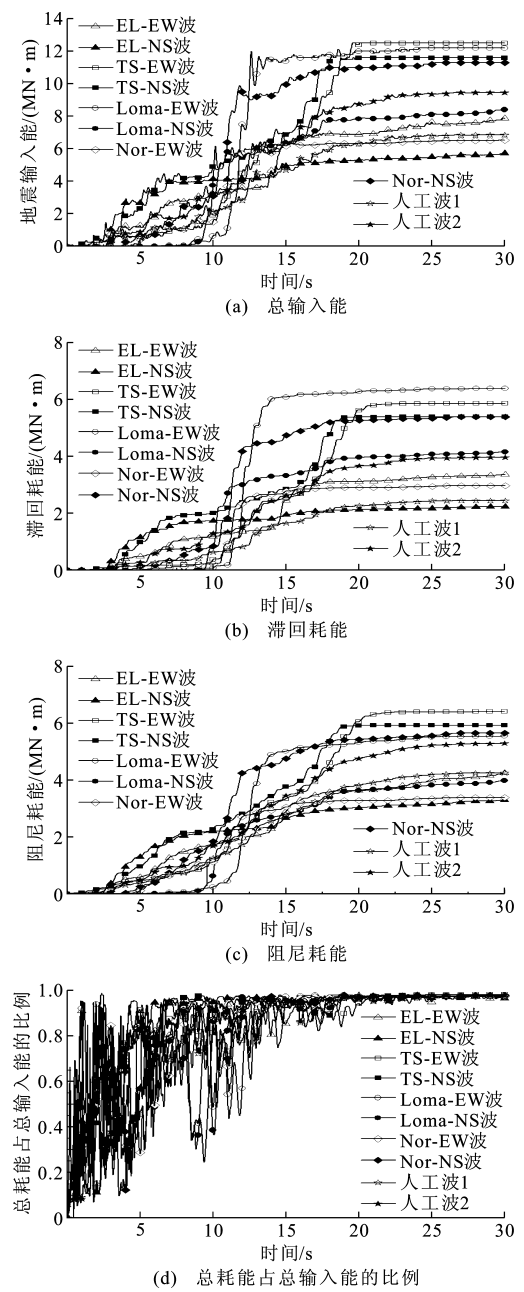


图 2 不同地震动作用下地震能量时程

Fig. 2 Time Histories of Seismic Energy Under Ground Motions

有限。阻尼比对框剪结构阻尼耗能的影响如图 3(b)所示,不同地震波下的阻尼耗能曲线变化明显,说明阻尼比对框剪结构阻尼耗能的影响显著。

分析显示,框剪结构在各种地震动作用下的阻尼耗能均随阻尼比增加而增加,限于篇幅仅给出在 EL-EW 波下的阻尼耗能时程曲线,如图 3(c)所示,在其他地震动作用下的阻尼耗能也有类似的时程规律。为了研究阻尼耗能在地震过程中的分配机制,分析了阻尼耗能在整个地震过程中占地震输入能量的比例时程,图 3(d)给出了在 EL-EW 波下的阻尼

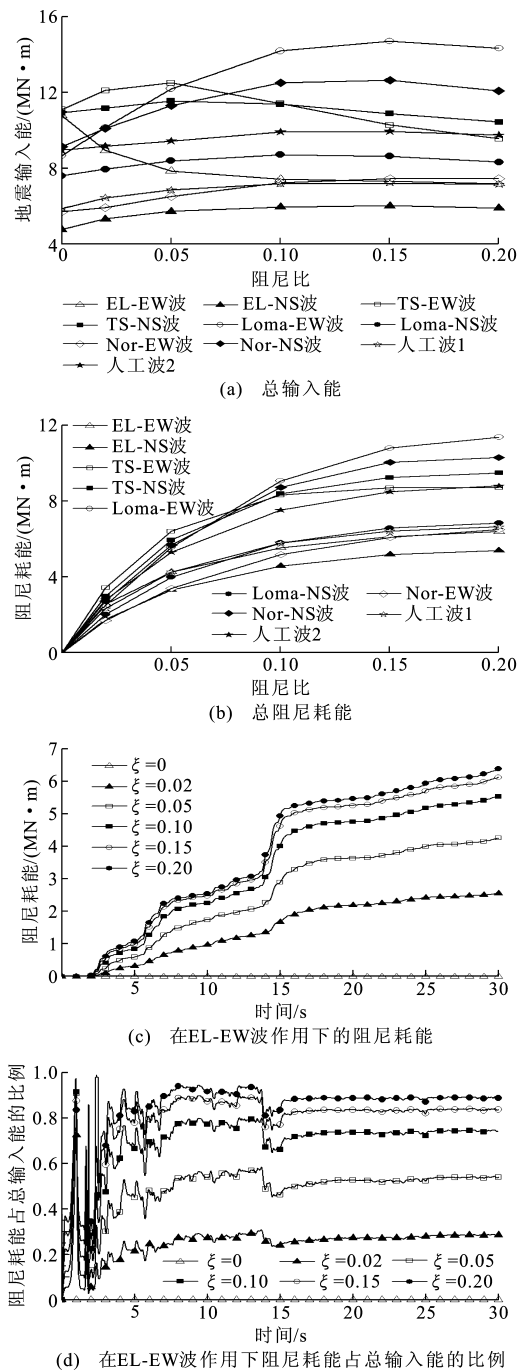


图3 不同地震动作用下输入能和阻尼耗能随阻尼比变化的时程

Fig. 3 Time Histories of Input Energy and Damping Energy with Damping Ratios Under Ground Motions

耗能占输入能的比例时程,在其他地震波作用下阻尼耗能比例时程随阻尼比的变化规律相似。可见,不同地震波对应的阻尼耗能比例随着阻尼比增加而增加,当阻尼比增加到20%时,阻尼耗能将占到输入能量的90%左右。在整个地震过程中,每个阻尼比下的阻尼耗能占输入能量比例在大多时程上的比例相近,如图3(d)所示。

3.2 延性比的影响

延性是结构在大变形下消耗地震能量的能力,是重要的结构性能。结构的延性有多种表达方式,为了反映结构的总体延性对框剪结构地震能量的影响,本文采用顶点侧移延性比 $\mu$ ,并通过静力弹塑性分析加以确定。静力弹塑性分析中均采用倒三角水平加载模式,基于目标位移法获取 Pushover 曲线,将基底剪力与顶点位移关系曲线转换为二折线模式并通过 Demand 分页求取性能点。在上述框剪结构模型的基础上,分别进行断面设计的调整获得不同的延性比。框剪结构的结构阻尼比取0.05,采用上述地震动分别进行弹塑性动力时程分析,得到不同延性比框剪结构在上述10个地震动作用下的地震总输入能及其滞回耗能分布规律,如图4所示。

由图4(a),(b)的分析结果可见,结构延性比对框剪结构总的地震输入能和滞回耗能影响显著,后者随前者增加而稳定增加,说明框剪结构的地震耗能性能对结构延性比敏感。

由图4(b)还可见,不同地震动下的滞回耗能均随延性比增加而显著增加。图4(c)给出了不同延性比的框剪结构在EL-EW波作用下的滞回耗能时程,其他地震动下的阻尼耗能也有类似的时程规律。图4(d)考察了框剪结构滞回耗能在整个地震过程中的分配机制, $\mu=1$ 时结构处于弹性状态,滞回耗能为0;当 $\mu>1$ 时,滞回耗能占地震输入能量的比例有一较大突变,之后该比例的增加幅度随着延性比增大而逐渐减小;当 $\mu=5$ 时该框剪结构的滞回耗能将占到总输入能的50%左右。

3.3 阻尼比和延性比的交互影响

以上讨论了框剪结构在地震过程中阻尼比对阻尼耗能和结构延性对滞回耗能的影响。事实上,阻尼比对滞回耗能和结构延性对阻尼耗能也有显著影响。图5给出了在上述地震动作用下框剪结构的总滞回耗能随阻尼比的变化规律和总阻尼耗能随延性比的变化规律。分析表明,框剪结构的总滞回耗能随阻尼比的增加而减少,而框剪结构的总阻尼耗能却随延性比的增加而增加。

4 地震滞回耗能及其分配规律

地震滞回耗能能力是框剪结构耗散地震能的重要性能,也是评价结构地震损伤的重要指标。因此,了解地震过程中地震滞回耗能在框剪结构中的分布规律,对于分析结构刚度和强度设计的均衡性并发现薄弱环节从而指导或优化设计均有重要意义。为

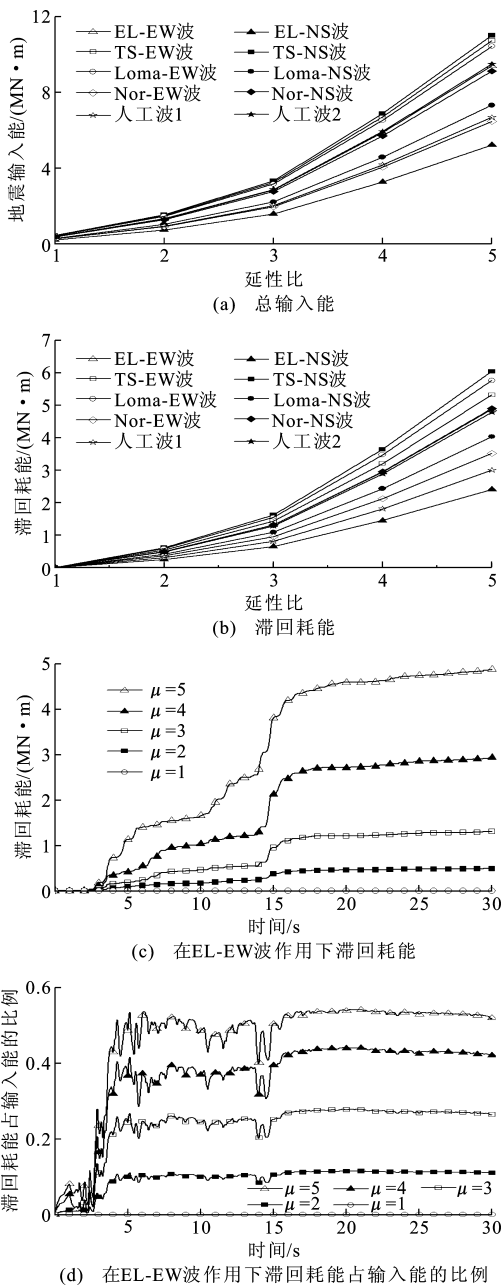


图 4 不同地震动作用下输入能和滞回耗能随延性比变化的时程

Fig. 4 Time Histories of Input Energy and Hysteretic Energy with Ductility Ratios Under Ground Motions

此,本文以上述 15 层 RC 框剪结构为分析模型(阻尼比取为 0.05),并以上述地震动为时程输入,研究了高层钢混框剪结构在 7 度罕遇地震作用下地震滞回耗能沿结构竖向和横向的分布规律。

#### 4.1 滞回耗能沿框剪结构竖向的分配

对于高层框架-剪力墙结构,地震滞回耗能沿竖向的分布是不均匀的。图 6 为 15 层 RC 框架-剪力墙结构分析模型在 7 度罕遇地震作用下各层滞回耗能的分布情况。由图 6 可见,在各类地震动下框剪

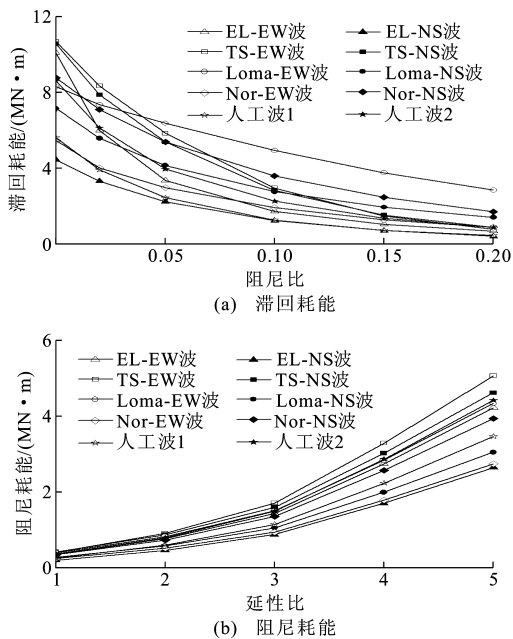


图 5 不同地震动作用下地震耗能随阻尼比和延性比的变化曲线

Fig. 5 Variation Curves of Seismic Energy Dissipation with Damping Ratios and Ductility Ratios Under Ground Motions

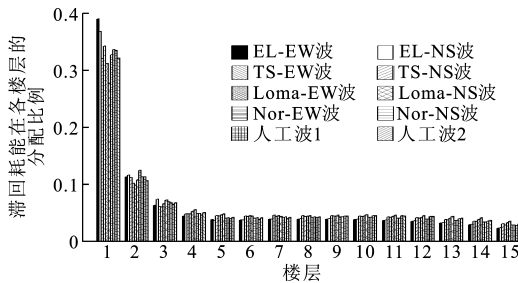


图 6 各层滞回耗能占总滞回耗能的比

Fig. 6 Ratios of Hysteretic Energy for Each Floor to Total Hysteretic Energy

结构的滞回耗能竖向均呈现“下大上小”的分布规律。在正常设计情况下,底部几层会占据相当大比例的地震滞回耗能。该 15 层框剪结构底部累积滞回耗能所占比例较大,底部 3 层占总耗能的 44%~50%;底层耗能集中,不同地震动对应的滞回耗能达到了总滞回耗能的 32%~39%;第 2 层及第 2 层以上各层的滞回耗能比较均衡,第 2 层平均耗能在 10%左右,第 3 层平均耗能在 7%左右,其余各层占到总滞回耗能的 3.5%~5%,可见上部各层耗能分布合理。

#### 4.2 滞回耗能在框剪结构内部的分配

在竖向分布规律确定的前提下,每层滞回耗能沿横向的分布主要取决于所在层的连梁、剪力墙、框架梁和柱等结构构件。图 7 为框剪结构连梁、剪力

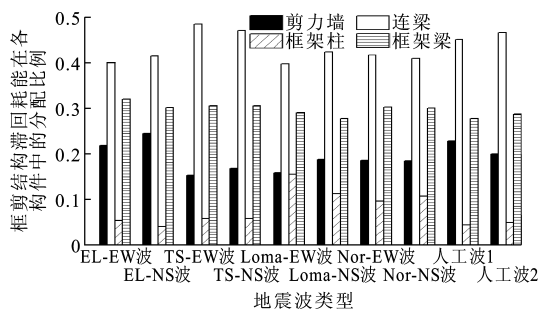


图7 滞回耗能在钢混框剪高层结构构件中的分配比例

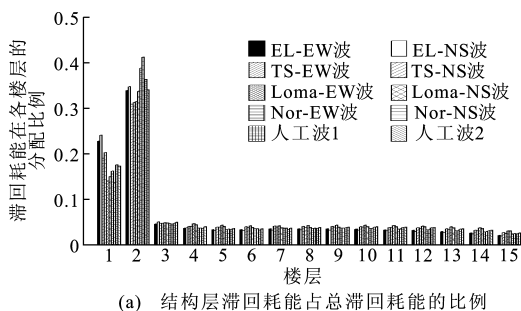
Fig. 7 Distribution Ratios of Hysteretic Energy Among Structural Members of RC Frame-wall High-rise Building

墙、框架梁和柱构件滞回耗能的分布情况,各类构件滞回耗能与整个体系总滞回耗能的比值反映各部分滞回耗能占总耗能的比例。由图7的计算结果可见,在上述10个地震动作用下每层各部分构件的滞回耗能占结构总耗能的比例均衡,连梁为40%~48%,剪力墙为15%~24%,框架柱为4%~15%,框架梁为27%~32%。从结构耗能大小可以看到,连梁和剪力墙耗能占总耗能的55%~72%,框架耗能占31%~47%,体现了剪力墙与连梁体系为第1道防线和框架体系为第2道防线的“两道设防”抗震设计思想。应当注意,连梁构件虽然占总结构的体积比例不大,但滞回耗能占到总耗能的40%以上,连梁在罕遇地震作用下这种高强的地震能消散能力应引起足够的重视。

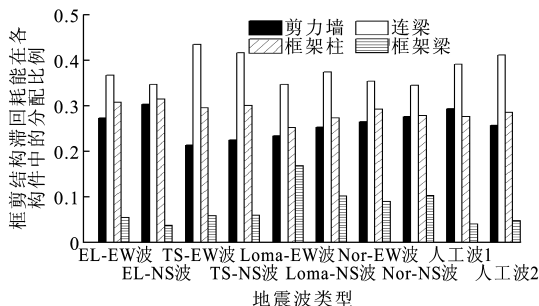
#### 4.3 滞回耗能在有薄弱层的框剪结构中的分配

结构沿竖向的布置方案对其抗震性能有很大影响,为此中国《高层建筑混凝土结构技术规程》和《建筑抗震设计规范》对此都有着严格要求。

为了研究侧向刚度不利分布的影响,本文中仅在上述15层钢混框剪结构的基础上把第2层所有框架柱的尺寸由原来的700 mm×700 mm调整为550 mm×550 mm且配筋量减半,其余设计参数不变。尽管对于框剪结构仅仅调整柱子的截面及配筋量对于结构的层间弹性侧移刚度影响不大,但在大震作用下结构一旦进入弹塑性变形阶段后会由于结构刚度重分布而导致第2层耗能急剧增加,出现累积滞回耗能显著集中现象。从耗能角度看,弹性侧移刚度削弱不多的第2层已经变为该结构的薄弱层,反映了地震累积滞回耗能对于竖向刚度变化的敏感性。图8给出了在上述10个地震动作用下,框剪结构每层滞回耗能占总滞回耗能的比例。由图8可见,在第2层为薄弱层的情况下,滞回耗能占总耗能的比例沿框剪结构竖向分布规律发生显著变化,



(a) 结构层滞回耗能占总滞回耗能的比例



(b) 构件滞回耗能占结构总滞回耗能的比例

图8 滞回耗能在有薄弱层的RC框剪高层结构中的分配比例

Fig. 8 Distribution Ratios of Hysteretic Energy of RC Frame-wall High-rise Structure with Weak Story

滞回耗能在底层大幅减小,在薄弱层急剧增加而在其他层变化不大。总体上,框剪结构连梁的耗能平均水平略有减小,框架梁和框架柱的耗能比例基本未变,但薄弱层剪力墙滞回耗能大幅增加使结构总剪力墙滞回耗能占总滞回耗能的比例由原来的15%~24%增加到21%~30%,如图8(b)所示。由图8(a)的计算结果可见,滞回耗能在薄弱层出现集中现象,占总滞回耗能的比例由原来的10%~12.5%增加到31%~41%,说明薄弱层的剪力墙和柱子形成了大量的塑性铰。这种结构耗能集中在某一层而形成薄弱层,对结构抗震非常不利,在设计中应当避免。

## 5 结语

(1)高层钢混框剪结构在地震动作用下的地震输入能及其分量受地震动特性影响较大,但在不同地震动作用下的变化规律趋于一致。

(2)阻尼比和延性比对钢混框剪高层结构的耗能规律有重要影响。地震阻尼耗能及其占输入能量的比例均随阻尼比增加而增加,地震滞回耗能及其占输入能量的比例均随结构延性比增加而增加,框剪结构的总滞回耗能随阻尼比的增加而减少,总阻尼耗能随延性比的增加而增加。

(3)钢混框剪高层结构的地震累积滞回耗能在

结构内部分布不均匀。地震累积滞回耗能沿框剪结构竖向分布呈“下大上小”的分布规律,底层占总滞回耗能的 60% 左右,沿框剪结构内部构件分配的比例取决于剪力墙和框架结构的具体构造,在本文分析采用的钢混框剪高层结构中,剪力墙滞回耗能占总耗能的 60% 左右,框架滞回耗能占总耗能的 30% 左右,连梁总滞回耗能占到 40% 以上。

(4) 地震累积滞回耗能对于竖向刚度变化敏感,当钢混框剪高层结构竖向刚度分布不均时,累积滞回耗能占总输入能的比例沿结构竖向分布规律将发生显著变化。在薄弱层出现滞回耗能集中现象,剪力墙或柱子会形成大量的塑性铰,设计中应当避免。

## 参考文献:

## References:

- [1] 秋山宏. 基于能量平衡的建筑物抗震设计[M]. 叶列平, 裴星洙, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010.  
AKIYAMA H. Earthquake Resistant Design Method for Buildings Based on Energy Balance[M]. Translated by YE Lie-ping, PEI Xing-zhu. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [2] 白绍良, 黄宗明, 肖明葵. 结构抗震设计的能量分析方法研究述评[J]. 建筑结构, 1997, 27(4): 54-58.  
BAI Shao-liang, HUANG Zong-ming, XIAO Ming-kui. Research Review on Energy Analysis Method in Seismic Design of Structure[J]. Building Structure, 1997, 27(4): 54-58.
- [3] 孙国华, 顾强, 何若全, 等. 弹性 SDOF 体系地震动输入能量的影响因素分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(4): 63-68.  
SUN Guo-hua, GU Qiang, HE Ruo-quan, et al. Analysis of Influence Factor of Earthquake Input Energy of Elastic SDOF Systems[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(4): 63-68.
- [4] HOUSNER G W. Limit Design of Structures to Resist Earthquakes[C]//EERI. Proceedings of the 1st World Conference on Earthquake Engineering. Berkeley: Earthquake Engineering Research Institute, 1956: 1-13.
- [5] HOUSNER G W. Behavior of Structures During Earthquake[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1959, 85(4): 109-129.
- [6] AKIYAMA H. Earthquake Resistant Limit State Design for Buildings[M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1985.
- [7] 徐培蓁, 叶列平. 日本《基于能量抗震设计规程》介绍[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(3): 59-66.
- XU Pei-zhen, YE Lie-ping. Introduction of *Technological Standard for Earthquake-resistant Calculation Method for Buildings Based on Energy Balance in Japan*[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(3): 59-66.
- [8] FAJFAR P, VIDIC T. Consistent Inelastic Design Spectra: Hysteretic and Input Energy[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1994, 23(5): 523-537.
- [9] FAJFAR P, GASPERSIC P. The N2 Method for the Seismic Damage Analysis of RC Buildings[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1996, 25(1): 31-46.
- [10] AKBAS B, SHEN J, HAO H. Energy Approach in Performance-based Seismic Design of Steel Moment Resisting Frames for Basic Safety Objective[J]. The Structural Design of Tall Buildings, 2001, 10(3): 193-217.
- [11] CHOU C C, UANG C M. A Procedure for Evaluating Seismic Energy Demand of Framed Structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2003, 32(2): 229-244.
- [12] BENAVENT-CLIMENT A. An Energy-based Damage Model for Seismic Response of Steel Structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007, 36(8): 1049-1064.
- [13] LEELATAVIWAT S, SAEWON W, GOEL S C. Application of Energy Balance Concept in Seismic Evaluation of Structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(2): 113-121.
- [14] 樊长林, 张善元, 路国运. 基于能量被动耗能结构抗震设计方法的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(4): 140-147.  
FAN Chang-lin, ZHANG Shan-yuan, LU Guo-yun. Study on Energy Based Seismic Design Method for Structure with Passive Energy Dissipation System[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(4): 140-147.
- [15] 程光煜, 叶列平. 弹塑性 SDOF 系统的地震输入能量谱[J]. 工程力学, 2008, 25(2): 28-39.  
CHENG Guang-yu, YE Lie-ping. Earthquake Input Energy Spectrum for Inelastic SDOF Systems[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(2): 28-39.
- [16] 缪志伟, 叶列平. 钢筋混凝土框架-联肢剪力墙结构的地震能量分布研究[J]. 工程力学, 2010, 27(2): 130-141.  
MIAO Zhi-wei, YE Lie-ping. Study on Distribution of Cumulative Hysteretic Energy in Reinforced Concrete Frame-coupled Shear Wall[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(2): 130-141.