

# 组合框架结构柱和梁板间耗能分配规律分析\*

蒋丽忠 陈伟娜 董立冬

(中南大学土木建筑学院,长沙 410075)

**摘要** 将能量原理运用到钢-混凝土组合框架结构地震反应分析中,利用有限元软件模拟组合框架在地震荷载作用下的动力响应,分析结构阻尼比、地震动峰值和持时等因素对滞回耗能分配规律的影响,探讨组合结构总输入能量及层间和柱、梁板间能量分配规律.研究表明总输入能受阻尼比和地震动频谱特性影响较大,地震动峰值影响较小;滞回耗能在结构层间分布为底层大顶层小的梯形分布;柱耗散的滞回能随阻尼比、地震动峰值或卓越周期增加而增加,阻尼耗能随之减少,梁耗散与柱相反;地震动持时对柱和梁的耗能分配影响很小.

**关键词** 钢-混凝土组合结构, 阻尼耗能, 滞回耗能, 总能量分配, 层间分配, 构件间分配

## 引言

结构能量反应及其转化形式具有形式简单,计算方便,又能较好地反映地震动的强度、频谱特性,特别是强震持续时间对结构破坏的综合影响<sup>[1]</sup>. 1956年, Housner<sup>[2]</sup>首次提出用能量分析的观点进行结构抗震设计的思想. 1969年, Cismiciu 提出“基于能量概念的抗震设计规范”的设想. 随着计算机技术的飞速发展,结构地震反应非线性时程分析方法的广泛应用,深入系统地进行结构动力弹塑性能量反应分析的条件进一步成熟,能量分析方法的研究进入了新时期<sup>[3-6]</sup>.

钢-混凝土组合结构是由钢部件和混凝土或钢筋混凝土部件组合成为整体的结构.充分结合了钢材和混凝土两种材料的力学性能,广泛应用于大跨度、重载等结构中,具有自重轻、承载力高、延性好、耗能强和损伤轻等优点<sup>[7]</sup>.由于组合结构自身组成的复杂性及组成构件研究的理论欠缺,目前关于组合框架结构抗震性能的研究还相对滞后.

本文基于能量原理对钢-混凝土组合结构进行能量反应分析,利用有限元软件模拟其在地震荷载下的动力响应,综合考虑地震动三要素和结构阻尼的影响,研究组合结构总能量、层间及构件间能量耗散的分配规律及影响因素.为组合结构的抗震设计提供一定的参考依据.

## 1 组合结构的滞回耗能

能量方程有2种定义,相对能量方程和绝对能量方程;为减少计算结果受不同地震波处理方法的影响,本文采取相对位移为基础定义能量方程.多自由度结构地震反应作用下相对能量平衡方程如下:

$$-\int_0^t \{\dot{x}(t)\}^T [M] \{\dot{x}_g(t)\} dt = \int_0^t \{\dot{x}(t)\}^T [M] \{\ddot{x}(t)\} dt + \int_0^t \{\dot{x}(t)\}^T [C] \{\dot{x}(t)\} dt + \int_0^t \{\dot{x}(t)\}^T \{F(x)\} dt \quad (1)$$

式(1)主要由如下四项组成:结构的总输入能(左项)、结构的动能(右式第1项),为结构阻尼耗能(右式第2项),系统总的变形成能(右式第3项).

式中 $\{\dot{x}(t)\}$ 、 $\{\ddot{x}(t)\}$ 分别 $t$ 时刻体系相对于地面的速度和加速度列向量;

$f_s(x)$ 为结构的恢复力列向量;

$[M]$ 、 $[C]$ 分别结构质量矩阵和阻尼矩阵

$\{\ddot{x}_g(t)\}$ 为地面运动加速度向量.

结构对地震动输入的吸收主要分为两部分:一部分是通过阻尼耗能,另一部分则由结构通过变形耗散.变形耗散的能量由结构的弹性应变能和塑性变形耗散即滞回耗能组成.滞回耗能最具有工程意义<sup>[8]</sup>,当地震动结束时弹性变形是可恢复的而塑性变形则

不可恢复,弹性应变能远小于滞回耗能,强震持时对抗结构塑性累积破坏效应主要由滞回耗能反映

### 2 组合框架计算模型

地震动输入主要影响动力时程分析法其结果的可靠性.地震波主要由幅值,频谱和持时三个要素组成.分析中选用实际加速度峰值,并根据表1

表1 地震输入及有关参数

Table 1 Seismic input and related parameters

Earthquakename	Direction	Recording time	Magnitude	Ground acceleration cm/s <sup>2</sup>	Characteristic period	Site class
Qianan wave	northsouth	1976	5.8	132.4	0.1	I
Taft wave	eastwest	1957	7.7	152.7	0.44	II
EI wave	northsouth	1940	7.1	341.7	0.55	III
Tianjin earthquakes	northsouth	1976	6.9	145.8	0.9	IV

动力地震分析使用 ABAQUS 有限元软件,某三层、双跨(3900mm × 2)、单开间(3000mm)钢-混凝土组合框架,如图1所示,该组合框架由钢管混凝土柱和钢-混凝土组合楼盖组成,1层层高为4000mm,2和3层层高均为3600mm,钢管混凝土柱采用Φ168mm × 6mm的Q235钢管,内填C40混凝土,钢-混凝土组合楼盖由工字钢梁I20a(16Mn钢)和120mm厚的C40混凝土板组成.梁柱节点采用栓焊型,腹板与加强环采用M16高强螺栓连接,上下翼缘板与加强环用钢板焊接.结构选用组合框架的退化三线型恢复力模型<sup>[10]</sup>,模型中的参数k<sub>0</sub>、k<sub>2</sub>、k<sub>3</sub>、x<sub>c</sub>、x<sub>y</sub>根据下式确定:

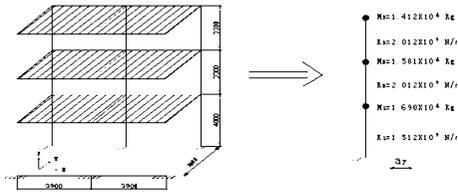


图1 组合框架简化计算模型  
Fig.1 Calculating model of CFS

进行调幅.能量持时采用文献[9]定义的70%能量持时,如下:

$$T_{0.70} = T_{0.80} - T_{0.10} \tag{2}$$

地震波选用天然地震记录:EI Centro波、Taft波、宁河地震天津记录和迁安波,实际加速度峰值调幅分别为620、1200和1500gal,地震输入及有关参数如表1所示.

### 3 组合结构能量分配规律及影响因素

#### 3.1 组合结构总输入能量分配规律

##### 3.1.1 阻尼比对阻尼耗能和滞回耗能分配规律的影响

为分析阻尼比对阻尼耗能和滞回耗能分配规律的影响,简化分析过程,瑞利阻尼中,采用恒定阻尼系数,质量阻尼系数a不变,取刚度阻尼系数b为0.006,0.012和0.018,将EI-centro波的最大加速度调整到620gal输入到CFS框架中,得滞回耗能能量分配比时程如图2所示.

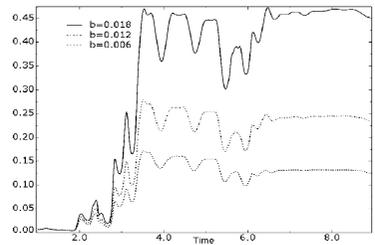


图2 滞回耗能占总输入能量百分比时程  
Fig.2 Time history of hysteretic energy account for the input energy ratio

由上图可知,EI-centro波下,阻尼耗能随结构阻尼比(刚度阻尼比)的增加而增加,结构的滞回耗能及其占总输入能的百分比减小(b=0.006时12.5%左右,b=0.012时23%左右,b=0.018时约45%),这是因为在其它条件相同的情况下,结构的总输入能保持不变,结构的阻尼比增大时,由结构阻尼耗能所耗散的能量增大,从而结构的滞回耗能减小,其在总输入能中所占的比例也减小.

##### 3.1.2 地震动峰值对阻尼耗能和滞回耗能分配规

$$k_0 = K_e = \frac{P}{f} = \frac{EI/(1 + \xi)}{48L^3} \tag{3}$$

$$k_2 = (0.6 \sim 0.8)K_e, k_3 = (0.1 \sim 0.15)K_e, x_c = P_c/K_e, x_y = (1.5 \sim 2)x_c \tag{4}$$

式中:ξ为刚度折减系数,a、b、L分别为组合梁集中荷载距中支座、边支座的距离及组合梁的跨度,P<sub>c</sub>为钢-混凝土组合连续梁的屈服荷载.

律的影响

为对比不同地震动峰值对阻尼耗能和滞回耗能分配规律的影响,将 El - centro 波峰值加速度调整到 620gal、1200gal 和 1500gal 作为地震输入,阻尼比和持时不变. 得滞回耗能能量分配比时程如图 3 所示.

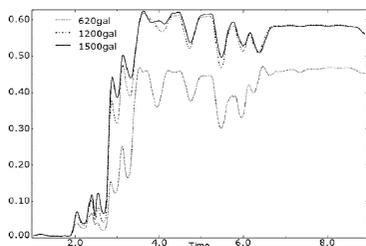


图3 滞回耗能占总输入能量百分比时程

Fig.3 Time history of hysteretic energy account for the input energy ratio

由图 3 可知:

1)结构的能量反应随地震动最大峰值加速度的增加而增加. 地震加速度峰值为 1500gal 时结构的反应均大于地震加速度峰值为 1200gal 和 620gal 的反应,输入到结构中的总能量随地震动峰值的增加而增加,因而通过结构阻尼及塑性变形耗散的能量就相应的增加. 在 620gal 峰值时,塑性变形耗散的能量在 40% 左右,结构部分进入塑性状态,到 1200gal 时,已经超过 50%.

2)地震动峰值对总输入能的分配比例的影响较小,其影响规律是地震动峰值增加,滞回能在总输入能中的百分比减少(从 1200gal 到 1500gal 过了 6s 之后可以看出).

### 3.1.3 频谱对阻尼耗能和滞回耗能分配规律的影响

为对比地震波频谱特性对地震总输入能在阻尼耗能和滞回耗能之间分配规律的影响,采用 El - centro、迁安和宁河波进行分析,为消除地震加速度峰值和持时不同所产生的影响,将各条波的加速度均调整为 1200gal,经过调整后,用峰值、持时均相同,频谱不同的三条地震波分别进行计算,得滞回耗能能量分配比时程如图 4 所示.

地震波频谱特性对结构反应的影响较大,影响的情况也较复杂. 由上图可知,总的趋势是:地震波的卓越周期越长,结构的阻尼耗能和滞回耗能越大;卓越周期越短,阻尼耗能和滞回耗能越小. 在迁安波作用下,框架基本处于弹性阶段,其能量反应较小;在 El - centro 和宁河波作用下,结构的反应

相对大一些,宁河波作用下的反应比 El - centro 波下的反应稍大.

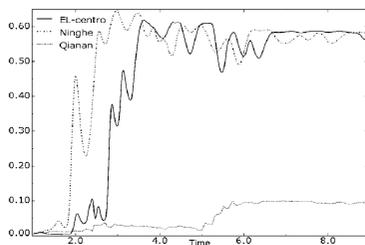


图4 滞回耗能占总输入能量百分比时程

Fig.4 Time history of hysteretic energy account for the input energy ratio

在 El - centro 和宁河波作用下,强震持时比较长,结构的能量反应较大,在强震持时反应过程中,能量曲线变化较大但均匀,表明结构在整个强震持时过程中塑性较出现较均匀而且较多,结构的滞回耗能在强震有效持时  $T_d = T_{0.8} - T_{0.1}$  内达到峰值或接近其最终累积值. 阻尼耗能有持续积累增长的趋势,反映了在地震反应达最大时结构的强度与刚度退化使滞回耗能减小,结构阻尼的影响在结构进入弹塑性范围后有所增强,表明结构阻尼机制的复杂性. 由图 4 滞回耗能分配比例时程曲线可知,三条地震波作用下,迁安波作用时滞回耗能占总输入能百分比在 0 ~ 5% 左右,El - centro 和宁河波均在 40 ~ 60% 之间. 地震波频谱特性对分配比的影响较复杂,但基本上是地震波的卓越周期越大,滞回耗能占总输入能百分比越大.

## 3.2 组合结构层间能量分配规律

### 3.2.1 阻尼比对阻尼耗能和滞回耗能在层间分配规律的影响

地震动输入和结构参数与 3.1.1 节相同,能量在层间的分配比如图 5 和 6 所示. 由图 5,6 主要可以得出:

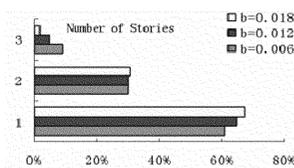


图5 层间滞回耗能分配  
Fig.5 Storey distribution of hysteretic energy

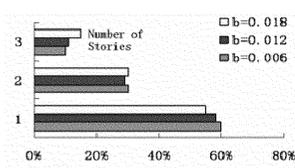


图6 层间阻尼耗能分配  
Fig.6 Storey distribution of damping energy

1)滞回耗能和阻尼耗能沿结构层间自下向上逐渐减小的规律. 随着阻尼系数增加,滞回耗能减少,阻尼耗能增加,这与总能量分配规律是一致的.

同样说明结构的阻尼比越大,结构总输入能中通过阻尼消耗的能量越大,所以结构的滞回耗能就小.

2)结构的阻尼比对于滞回耗能在楼层之间的分配并无大的影响,但还呈现如下特点:结构阻尼比越大,结构底层消耗的滞回能越大,顶层消耗的滞回能越小,中间层的滞回能基本上无变化.

### 3.2.2 地震动峰值对阻尼耗能和滞回耗能在层间分配规律的影响

地震动输入和结构参数与3.1.2节相同,得能量在层间的分配比如图7和8所示.

由下图可知,地震峰值增加后,输入到结构中的总能量增加,从而输入塑性变形和阻尼耗散的能量增加.随着地震烈度的增加,底层滞回耗能所占比例减少,而顶层滞回耗能比例增大,主要因为随着地震峰值增加,塑性铰发展从底层逐渐朝上层扩展,所耗散的滞回耗能就大.但是阻尼耗能层间分配受峰值影响就比较小.

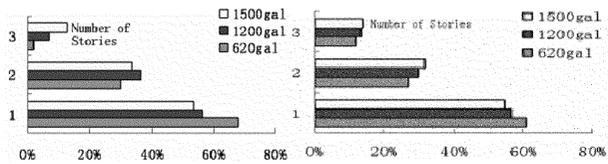


图7 层间滞回耗能分配

图8 层间阻尼耗能分配

Fig. 7 Storey distribution of hysteretic energy

Fig. 8 Storey distribution of damping energy

### 3.2.3 地震动频谱对对阻尼耗能和滞回耗能在层间分配规律的影响

地震动输入和结构参数与3.1.3节相同,得能量在层间的分配比如图9和10所示.

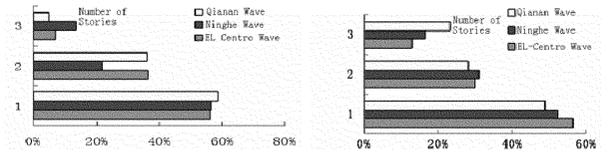


图9 层间滞回耗能分配

图10 层间阻尼耗能分配

Fig. 9 Storey distribution of hysteretic energy

Fig. 10 Storey distribution of damping energy

由图9可知,地震波频谱特性对结构滞回耗能层间分配的影响较复杂,但基本是随地震动卓越周期的增大,底层滞回耗能所占比例增大,而上层滞回耗能所占比例减小.框架在迁安波作用下基本保持弹性,形成的塑性铰相对很小,在El-centro波作用下形成的塑性铰又比宁河波作用下小而且少.宁河波破坏相对最严重,虽然此时El-centro波的

卓越周期0.55最接近结构的自振周期0.52,但宁河波强震持时更长,这说明强震持时对结构有较大的破坏作用,结构非线性中选择地震波时,必须结合地震波强震持时来考虑,选波必须在强震持时内.由图10可以看出同样的规律,频谱特性对阻尼耗能层间分配影响,和滞回耗能相似.

### 3.2.4 地震动持时对阻尼耗能和滞回耗能在层间分配规律的影响

考虑持时的影响,采用El-centro波、迁安波、宁河波三条波,消除峰值和频率的影响,峰值加速度统一调整到1200gal,持时时间取分别:El-centro波取8s、12s、16s,迁安波取4s、8s、16s,宁河波取3s、8s、10.98s滞回耗能和阻尼耗能能量在层间的分配比如图11~13所示.

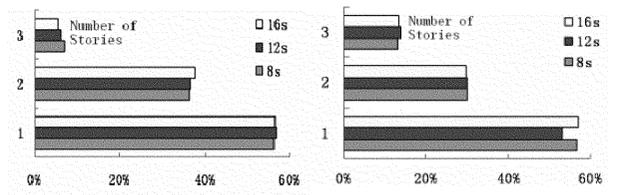


图11 El-centro波下持时能量层间分配

Fig. 11 Storey distribution of energy with El-centro wave

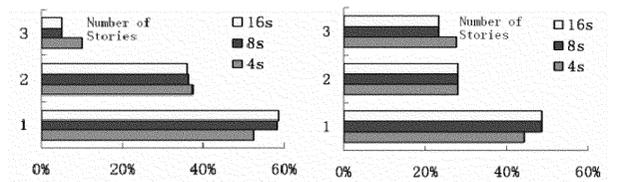


图12 迁安波下持时能量层间分配

Fig. 12 Storey distribution of energy with Qianan wave

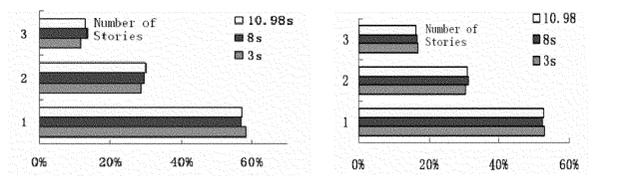


图13 宁河波下持时能量层间分配

Fig. 13 Storey distribution of energy with Qianan wave

由图11~13可知,地震动持时对滞回耗能和阻尼耗能在层间的分配比例影响很小,地震动持时越大,输入到结构的累积总量越大,要求结构通过阻尼和塑性变形所耗散的能量也越大.从图12发现迁安波三个持时段的能量分配与El-centro波和宁河波分配有明显的异常情况:迁安波4s与8s、12s分配是顶层相对比例大,底层相对比例小.

原因是迁安波峰值加速度值出现在4.3s,由此可知峰值加速度出现时刻对能量层间分配影响较大。

### 3.3 组合结构构件间能量分配规律

#### 3.3.1 阻尼比对阻尼耗能和滞回耗能在柱、梁板间分配规律的影响

地震动输入和结构参数与3.1.1节相同,得能量在构件间的分配比如图14~15(这里只列出柱的能量分配)所示。

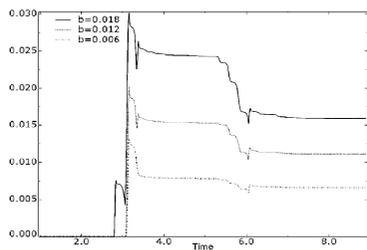


图14 柱在总滞回耗能间分配

Fig. 14 Ratio of total hysteretic energy dissipated by columns

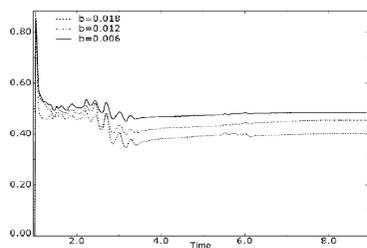


图15 柱在总阻尼耗能间分配

Fig. 15 Ratio of total damping energy dissipated by columns

由上图可知,在El-centro波620gal下,通过组合柱消耗的滞回耗能很少,大多数被梁板吸收。而通过柱消耗的阻尼耗能几乎和梁板持平,占到50%左右。随着阻尼系数b增加,柱的滞回耗能在总滞回耗能的分配增加。而阻尼耗能分配规律呈现相反的现象。总的规律也能反应延性框架的“强柱弱梁”的耗散机制,首先结构是通过梁板吸收能量。随着输入能量增加,逐步扩大到柱上。

#### 3.3.2 地震动峰值对阻尼耗能和滞回耗能在柱、梁板间分配规律的影响

地震动输入和结构参数与3.1.2节相同,得能量在构件间的分配比如图16、17(这里只列出柱的能量分配)所示。

由图16可知,柱在总滞回耗能间分配规律是:柱耗散的滞回能所占的比例随地震动加速度峰值的增加而加大。梁则相反。这表明,当结构承受较小地震作用时,结构中滞回耗能主要靠梁板来消散,

但在较大地震作用下,随着梁板的破坏,结构的滞回耗能则由柱来耗散。这与抗震设计所要求的延性破坏相一致。但过了峰值1200gal以后,柱分担的滞回耗能比例就变化很小。主要由于柱耗散能量也具有极限。由图17知,柱在总阻尼耗能分配的规律与滞回耗能相反。地震动开始2s内,柱吸收的输入能主要通过阻尼耗散。这也是和耗散机理一致的。

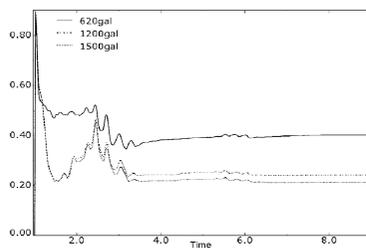


图16 柱在总滞回耗能间分配

Fig. 16 Ratio of total damping energy dissipated by columns

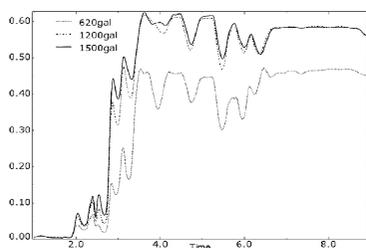


图17 柱在总阻尼耗能间分配

Fig. 17 Ratio of total damping energy dissipated by columns

#### 3.3.3 地震动频谱对阻尼耗能和滞回耗能在柱、梁板间分配规律的影响

地震动输入和结构参数与3.1.3节相同,得能量在构件间的分配比如图18、19(这里也只列出柱的能量分配)所示。

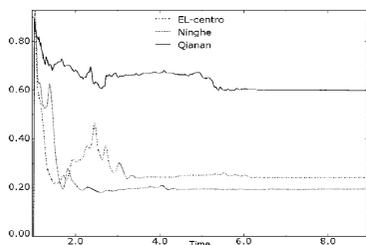


图18 柱在总滞回耗能间分配

Fig. 18 Ratio of total damping energy dissipated by columns

由上图可知,在相同峰值1200gal下,地震动卓越周期增大,通过柱耗散的滞回能量所占比例增大,而梁中滞回耗能所占比例明显相应减少。迁安波下,柱基本保持弹性状态,塑性铰几乎没有形成,主要通过梁板和阻尼来消耗地震输入能,符合延性框架

要求的梁铰机制. 而宁河波和 El-centro 波下柱端已产生大量塑性铰, 其塑性变形能量分别达到 15% 和 10% 左右. 对于柱在总阻尼耗能分配可得如下规律: 随着地震卓越周期的增大, 柱耗散的阻尼能量所占比例减少, 与滞回耗能比相反, 起到互补作用.

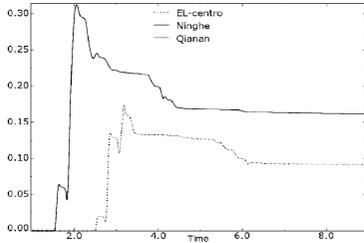


图 19 柱在总阻尼耗能间分配

Fig. 19 Ratio of total damping energy dissipated by columns

### 3.3.4 地震动持时对阻尼耗能和滞回耗能在柱、梁板间分配规律的影响

考虑持时的影响, 本文采用 El-centro 波、迁安波、宁河波三条波, 消除峰值和频率的影响, 峰值加速度统一调整到 1200gal, 持时时间取分别: El-centro 波取 8s、12s、16s, 迁安波取 4s、8s、16s, 宁河波取 3s、8s、10.98s, 滞回耗能和阻尼耗能在构件间的分配如图 20~21 所示(这里也只列出柱的能量分配).

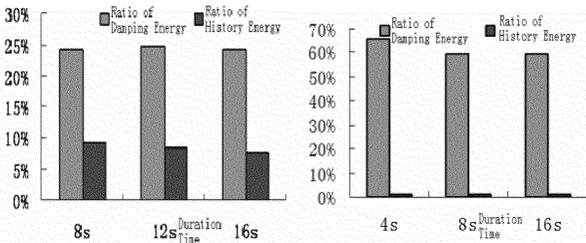


图 20 El-centro 和迁安波下柱的耗能分配

Fig. 20 Energy dissipation by columns with El-centro and Qianan wave

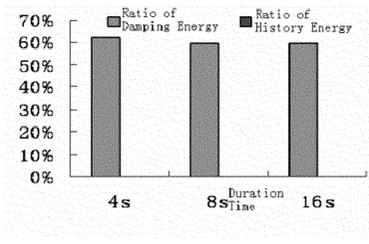


图 21 宁河波下柱的耗能分配

Fig. 21 Energy dissipation by columns with Ninghe wave

由上图可知, 地震动持时对阻尼耗能和滞回耗能在柱、梁板间分配影响很小, 只有迁安波在 4s 持时

影响大些, 这里同时时在层间分配影响相同, 主要由于峰值加速度出现的影响(出现时间 4.3s). 因此考虑持时在层间及柱、梁板间能量分配时必须考虑峰值加速度的影响(主要是峰值出现时刻影响). 宁河波下因组合柱没有进入塑性状态, 故滞回耗能比为 0%.

## 4 结论

考虑结构阻尼比、加速度峰值、频谱和持时对组合结构总输入能、层间和构件间的能量耗散分配规律影响表明:

1) 阻尼比(刚度阻尼比)对 CFS 框架总输入能分配影响较大, 规律为阻尼耗能和滞回耗能在总输入能中所占比例均随阻尼比增大而减小. 地震动峰值对 CFS 框架总输入能分配影响较小, 规律为地震动峰值越大, 滞回能在总输入能中的百分比越小. 频谱特性对 CFS 框架反应的影响较大, 情况也较复杂. 总的趋势为, 卓越周期越长, 结构阻尼耗能和滞回耗能越大, 反之则越小.

2) CFS 框架主要通过底层耗散地震输入能, 阻尼和地震动三要素对滞回耗能在结构层间分配总的的影响规律为底层大顶层小, 成梯形分布.

3) 总滞回耗能在柱耗散的滞回能分别随阻尼比、加速度峰值和卓越周期增大而增加, 梁板所占比例减小. 阻尼耗能分配规律与之相反. 持时对阻尼耗能和滞回耗能在柱、梁板之间的分配影响很小, 只有在加速度峰值出现的时刻影响较大.

## 参考文献

- 1 Mckeivitt, WE. etal. Hysteretic energy spectra in seismic design. Proceedings of 7th WCEE, Vol. 7, Istanbul, Turkey, 1980
- 2 Housner, G. W. Limit design of structures to resist earthquakes. Proc. of first world conf. on earthquake engrg. Berkeley, CA, 1956, 1~2
- 3 肖明葵, 刘波, 白绍良. 抗震结构总输入能量及其影响因素分析. 重庆建筑大学学报, 1996, 6, (2): 20~33 (Xiao Mingkui, Liu Bo, Bai Shaoliang. Analysis of the Total Energy and Its Influencing Factors for Seismic Structures. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 1996, 6(2): 20~33 (in Chinese))
- 4 谭丽芳, 蒋丽忠, 董立冬. 基于 Push-over 分析的钢-混凝土

- 土组合框架抗震性能研究. 动力学与控制学报, 2008 (2): 169 ~ 172 (Tan Lifang, Jiang Lizhong, Dong Lidong. Push-over analysis on the steel-concrete composite frame structure with three stories. *Journal of Dynamics and Control*, 2008 (2): 169 ~ 172 (in Chinese))
- 5 叶献国. 建筑结构弹塑性地震反应中的能量表达及应用. 合肥工业大学学报, 1998, 21 (5): 16 ~ 22 (Ye Xianguo. Energy expressions of earthquake response and damage in inelastic structure and applications. *Journal of Hefei University of Technology*, 1998, 21 (5): 16 ~ 22 (in Chinese))
- 6 周云, 徐彤, 周福霖. 抗震与减震结构的能量分析方法研究与应用. 地震工程与工程振动, 1999, 19 (4): 19 ~ 26 (Zhou Yun, Xu Tong, Zhou Fulin. Research and development of structural seismic design based on energy method. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1999, 19 (4): 19 ~ 26 (in Chinese))
- 7 蒋丽忠, 董立冬, 余志武. 基于滞回耗能的钢-混凝土组合框架抗震性能分析. 铁道科学与工程学报, 2007, 6 (4): 49 ~ 55 (Jiang Lizhong, Dong Lidong, Yu Zhiwu. Analysis on seismic behavior of steel-concrete composite frame structure based on hysteretic energy. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2007, 6 (4): 49 ~ 55 (in Chinese))
- 8 史庆轩, 熊仲明, 李菊芳. 框架结构滞回耗能在结构层间分配的计算分析. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2005, 37 (2): 174 ~ 178 (Shi Qingxuan, Xiong Zhongming, Li Jufang. Calculation analysis of the storey distribution of hysteretic energy for frame structures. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2005, 37 (2): 174 ~ 178 (in Chinese))
- 9 糜永红. 建筑结构在地震作用下的能量反应分析及应用研究. 湖南大学 [硕士学位论文], 2003 (Mi Yonghong. Seismic Response Analysis of Building Structure Based on Energy Theory. [Hunan University, Master Degree Thesis], 2003 (in Chinese))
- 10 蒋丽忠, 曹华, 余志武. 钢-混凝土组合框架地震弹塑性时程分析. 铁道工程与工程学报, 2005, 3 (2): 1 ~ 6 (Jiang Lizhong, Cao Hua, Yu Zhiwu. Elastic-plastic earthquake response of Steel-concrete composite frame structure. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2005, 3 (2): 1 ~ 6 (in Chinese))

## ANALYSIS OF THE LAWS OF CONSUMING ENERGY DISTRIBUTION BETWEEN COLUMNS AND BEAMS, PLATES ABOUT COMPOSITE STRUCTURE\*

Jiang Lizhong Chen Weina Dong Lidong

(School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract** The energy principle was applied into the analyses of seismic response of one steel-concrete composite structure, and the dynamic response of the structure under earthquake load was analyzed by finite element software. The distribution regularity of hysteretic energy between columns and beams, plates, was investigated which took into account the structure damping ratio, peak ground shaking, strong motion duration and other influence factors. The results show that, the input energy is greatly affected by the damping ratio and peak ground shaking, but strong motion duration effect is relatively small. The storey distribution regularity of hysteretic energy is ladder-shaped distribution. The hysteretic energy dissipated by columns increases but the damping energy decreases with the increases of structure damping ratio, peak ground shaking and predominant period; beams and plates are contrary to columns. Ground motion duration has little effect on energy distribution.

**Key words** steel-concrete composite structure, damping energy, hysteretic energy, input energy distribution, storey distribution, components distribution