

(3)

抗震结构

弹塑性

能量

结构模型

20-33

抗震结构总输入能量及其影响因素分析

肖明葵 刘波 白绍良

(建筑工程学院)

TU352.11

摘要 采用时程分析法综合考虑各种影响因素分析了单自由度弹性和弹塑性体系、多自由度弹性和弹塑性体系剪切型、弯曲型以及剪弯型结构在罕遇地震作用下的总输入能量反应及其受各类因素影响的规律, 得出了上述结构的总输入能量谱曲线, 提出了多自由度体系及弹塑性能量分析简化分析方法的建议, 为寻求基于能量准则的结构抗震设计方法和完善结构抗震双重破坏准则提供了一定的依据。

关键词 罕遇地震, 抗震结构, 总输入能量

中图分类号 TU311.3

结构地震反应的能量分析方法是一种能较好地反映结构在强地震地面运动作用下的非线性性质及地震动三要素(幅值、频谱特性和持时, 对结构抗震性能影响的方法。地震时, 结构处于能量场中, 地面与结构之间有连续的能量输入、转换与耗散。研究这种能量的输入与耗散, 以估计结构的抗震能力, 是结构抗震能量分析方法所关心的问题。同时, 随着对结构破坏机理的深入研究, 人们已经认识到位移首次超越单一指标破坏准则的局限性, 而考虑变形和塑性累积损伤的双重破坏准则较为符合震害实际, 在国内外抗震研究中引起了相当的重视。无论是讨论结构抗震的能量分析方法还是建立结构抗震的双重破坏准则, 首先涉及的问题是必须了解在不同的强震地面运动中输入到不同结构中的总能量及其影响因素。对于这一问题, 各国学者进行了不同程度的研究。豪斯纳认为可用弹性体系的无阻尼速度谱作为结构的总输入能量, 但豪斯纳研究的对象是具有滑移型恢复力特性的结构; 秋山宏等研究了单质点体系和多质点体系总输入能量之间的关系, 但他研究的对象是以剪切变形为主的钢结构。目前, 全面考虑地震动特性及结构自身的特性, 分析不同结构地震总输入能量及其影响因素的研究并不多见。

为满足建筑结构抗震破坏准则中对能量分析的要求, 探讨抗震结构的能量分析方法, 本文综合考虑地震动三要素及结构自身动力特性的影响, 分析了单自由度体系和多自由度体系剪切型、弯曲型以及剪弯型等不同类型结构在罕遇地震作用下的总输入能量反应。

1 计算模型及参数

1.1 结构分析模型

收稿日期: 1995-11-02

肖明葵, 女, 1952年生, 副教授, 重庆建筑大学建筑工程学院(630045)

* 国家自然科学基金资助项目。

本文对多自由度体系采用层间模型,根据其变形型式不同分为剪切型、弯曲型和剪弯型模型。将各楼层质量集中于相应楼面处,层间单元以不同变形型式的杆置换,各杆刚度为该层的层间刚度。对于剪切型结构,各质点仅考虑一个平动自由度,各杆刚度由D值法求得;对弯曲型结构,各质点处同时考虑质点的平动自由度和杆端截面处的转动自由度,各杆刚度由两质点间杆的弯曲变形刚度确定;对于剪弯型结构,各质点处同时考虑质点的平动和杆端截面处的转动两个自由度,层间单元刚度按现行抗震规范(GBJ11—89)所规定的框架剪力墙结构中的框墙率考虑该层总框架及总剪力墙的刚度。

1.2 计算参数

本文将考虑各种因素对结构地震总输入能量影响时所取的计算参数列于表1中

表1 计算参数(个数)

影响因素	弹性	弹塑性	备注
单、多自由度	2	2	单自由度、多自由度
结构自振周期 T_0	21(14、5)		单自由度取 $T_0 = 0.2 \sim 3.0$; 多自由度剪切型取 $T_0 = 0.2 \sim 1.2$; 剪弯型、弯曲型取 $T_0 = 1.0 \sim 3.0$
结构变形特征	3	3	剪切型、剪弯型、弯曲型共3种
地震动输入	1(2)	1(2)	实际地震记录、人造地震波共2种 (样本间空间 $m = 30$)
恢复力模型		1(2)	二线型、三线型2种,主要算例均取二线型
屈服强度系数 (ξ_s)		5	单自由度、多自由度的剪切杆抗剪屈服强度 ξ_{s1} , 取0.2、0.3、0.4、0.5、0.6, 弯曲杆抗弯屈服强度 ξ_{s2} , 取:0.3、0.4、0.5、0.6、0.7
刚度折减系数		5	0.1、0.05、0.0、-0.01、-0.02
烈度	1(3)	1(3)	7°、8°、9°, 基本考虑7°
耗能	1	1	动能、阻尼耗能、滞回耗能及总输入能(简称为 E_K 、 E_D 、 E_H 及 E_I)

2 罕遇地震作用下单自由度结构总输入能量谱及其影响因素

2.1 单自由度体系结构地震总输入能量谱

单自由度弹性和弹塑性地震总输入能量反应如图1和图2所示。图中横坐标表示结构的不同自振周期,纵坐标表示以速度为单位的结构地震总输入能。图中曲线I—IV表示I—IV类场地条件下的结构地震总输入能。图2和图3中的 ξ_s 表示结构的屈服强度系数。图1、图2和图3所示曲线分别为在7°和8°罕遇地震下同一集系30条人造波作为输入时结构的总输入能平均值。从这些能量反应谱曲线可以明显地看出:结构总输入能量反应受到地震动特性及结构自身动力特性的影响。

以下分别讨论这些因素的影响。

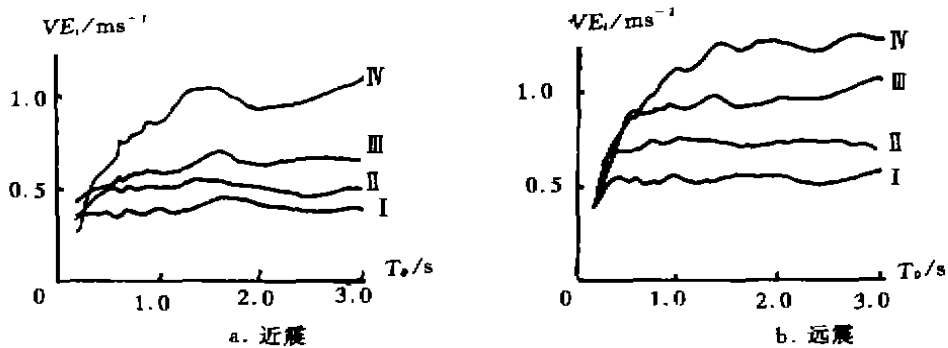


图 1 单自由度体系弹性地震总输入能量谱(7°罕遇地震)

2.2.1 地震动三要素对结构总输入能量的影响

2.2.1.1 幅值的影响

幅值的影响考虑在不同的地震烈度中。图 3 所示为 8°罕遇地震的人造波作为输入,在 II 类场地情况下,单自由度体系当屈服强度系数 $\xi_y = 0.3$ 时,结构恢复力模型中第二折线刚度 $P = 0.05$ 时的总输入能量反应谱曲线。其纵横坐标的表示与前面的图形相同。与图 2 中 b 图 II 类场地土情况的能量谱相比较,可以明显地看出,地震动最大峰值加速度的大小对结构地震总输入能有明显的影响。7°罕遇地震(最大峰值加速度为 2.2m/s)作用下,其总输入能量反应明显小于在 8°罕遇地震(最大峰值加速度为 3.696m/s)作用下的结构地震总输入能反应。即地震波的最大峰值加速度越大,结构的总输入能越大。

2.2.1.2 频谱特性的影响

地震动频谱特性也是对结构破坏起主导作用的因素之一。地震时,其能量将以不同类型的波扩散出去。传至地表时,由于土的滤波特性,某些频带的波得到加强。因此,在地表所记录的波形是一些频带较宽的地震波形。当地震波中占有优势的波动分量的周期与建筑物周期相近时,将使建筑物产生类共振现象,使其遭到较大的破坏。对于结构地震能量反应同样有这种类共振现象产生。图 4 为一组剪切型结构当输入 7°罕遇人造波且为 III 类场地土,远震时结构产生类共振的图示。

地震动频谱特性可以用功率谱、反应谱和傅里叶谱表示。从功率谱的角度来看,建筑物所处场地的场地土中,其硬、软土的功率谱频率成份有很大的不同。因此本文对频谱特性这一影响能量反应的因素主要以不同的场地类别加以考虑。显然,这忽略了一些影响频谱特性的因素,如震源机制等等。但由于震源机制的复杂性,这方面的研究工作目前尚无定论,因此,本文仅考虑场地类别对能量反应的影响。

从图 1 和图 2 所示结构总能量反应谱曲线可以看出,同一自振周期的结构,在不同场地条件下其能量反应不同。为了明确地考虑场地土在地震作用下的动力反应,89 规范修订时,其场地类别的划分主要取决于土的刚度,按土的平均剪切波速及土层覆盖厚度确定其类别,从硬到软分为 I、II、III、IV 类场地。图 1 和图 2 清楚地反映出这样一个事实:即场地土越硬,地震动所

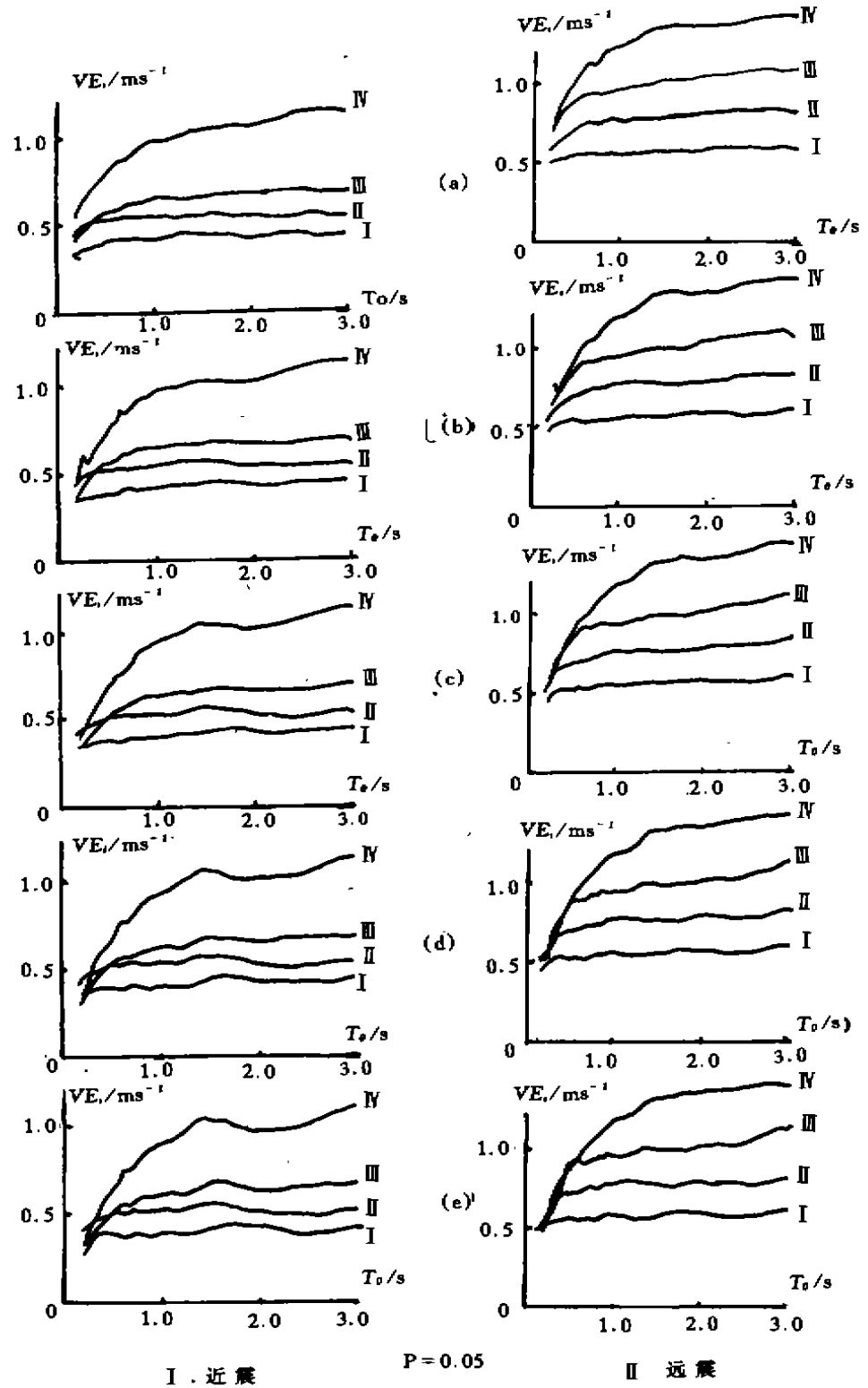


图2 单自由度体系弹性地震总输入能(7°罕遇地震)

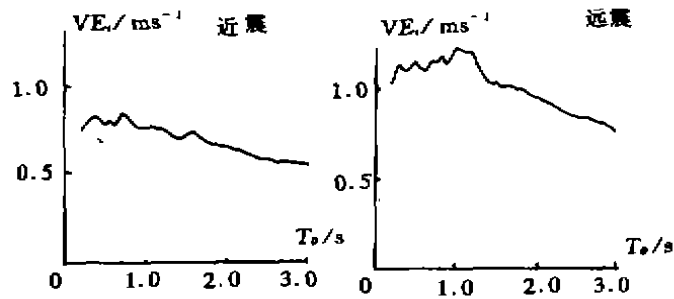


图 3 8°罕遇地震作用下单自由度体系弹性地震震总输入能量谱

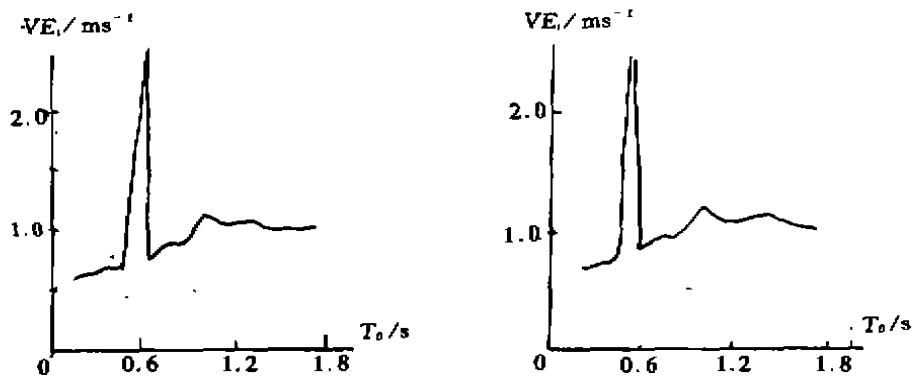


图 4 结构能量反应的类共振现象

输入到结构中的总能量越小场地土越软,则能量反应越大。从动力学的观点看,这是由于土层的滤波特性(或称为土层的地震效应)所致。场地土不同,从而导致了不同场地上的地震地面运动谱特性的差异。一般来讲,场地土越软,其地面运动的中、低频分量越多;反之,场地土越硬,其高频分量越多。而且,不同软硬场地上其地震地面加速度时程的强度曲线亦有不同。场地土自硬至软,平稳段趋于增长,同时,下降段趋于平缓,因而导致了图 1 和图 2 的计算结果,这种现象与震害观测是一致的。

2.2.1.3 地震动持时的影响

强震持续时间对结构反应的影响主要表现在结构的非线性反应阶段,持时的重要意义是同时反映在非线性的最大位移反应和能量损耗累积这两种反应中的。但目前对持时尚无确切定义,因此,本文在分析能量反应时对于罕遇 7°近震取持时为 15s,对于远震取为 20s,罕遇 8°近震取为 25s,远震取为 30s。从图 1 和图 2 可以明显地看出其它条件相同的情况下,远震时结构地震总输入能明显大于近震时结构地震总输入能,即地震动持量越长,输入到结构的累积总能量越大。

2.2.2 结构自身动力特性对总输入能的影响

2.2.2.1 结构自振周期的影响

无论对于弹性还是弹塑性体系,不同自振周期结构的地震总输入能量反应是不相同的。从图 1、图 2 和图 3 可以清楚地看出这一点。由于其分析结果是采用样本空间为 30 条人造波

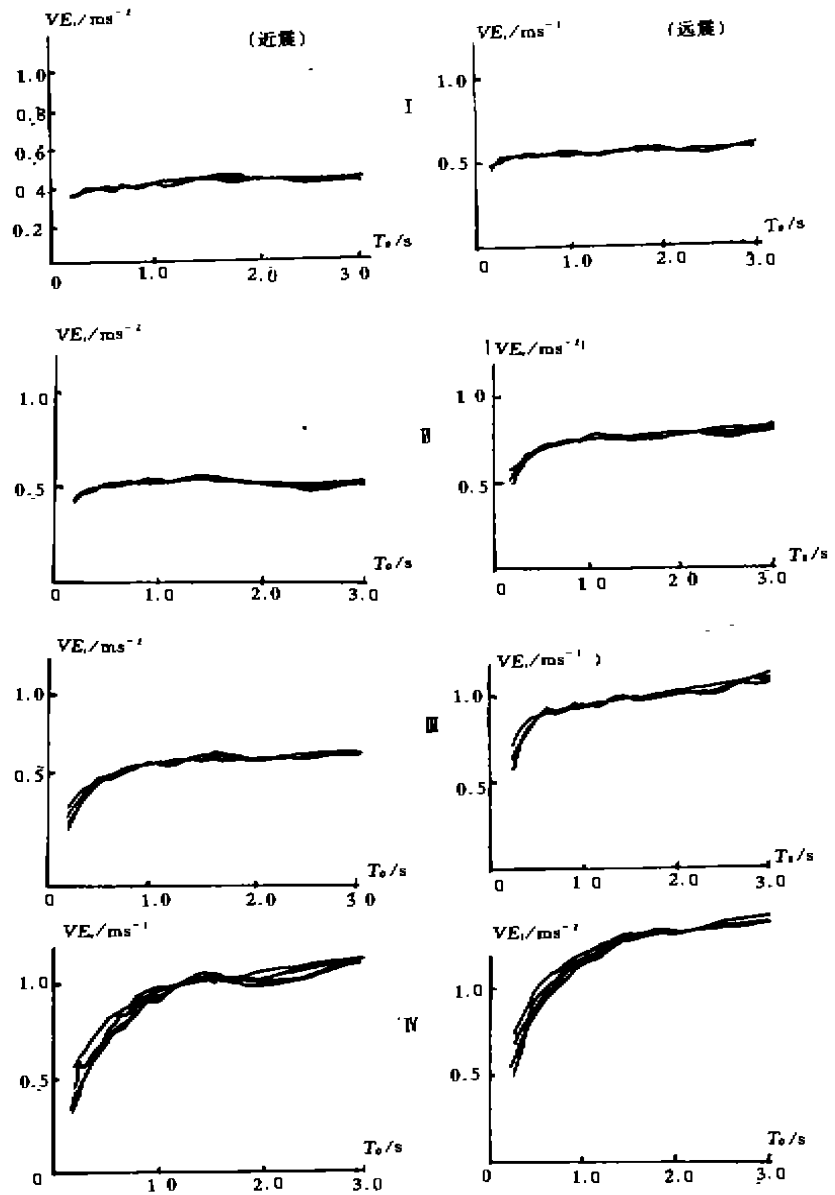


图 5 相同场地条件下同强度结构的总输入能

的计算结果平均值而得出的,虽然这 30 条波都是同一集系(即罕遇 7°或 8°分别为 I、II、III 和 IV 类场地)的波,且都具有相同的最大加速度峰值,但是由于其最大加速度峰值出现的时程点不同,所计算出的不同自振周期结构能量反应值也不同,取其均值的结果使得谱曲线偏向平滑化。但如果分析图 4,可以看出,考虑一条波的能量反应,当结构自振周期与场地特征周期相近时,能量反应曲线出现峰值。从图 1 和图 2 可知,不同自振周期的结构其地震总输入能量是不同的。

2.2.2.2 屈服强度系数 ξ_y 的影响

图 5 所示为同样的场地类别,结构的屈服强度系数分别为 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 和 0.6, 自振周期从 0.1~3.0s, 第二折线刚度系数 $P=0.05$ 时单自由度体系 5 条总输入能量谱曲线。从图中可以看出,不同 ξ_y 的 5 条地震动总输入能量谱曲线基本重合,这说明结构的强弱不影响地震动输入给结构的总输入能。

2.2.2.3 第二刚度系数 P 的影响

恢复力模型中第二刚度折减系数 P 值的选取决定着能否较好地反映结构的受力过程和变形过程,且直接影响结构进入非线性后的地震反应分析。本文分别取 $P=0.1, 0.05, 0.0, -0.01, -0.02$ 进行了计算,计算结果示于表 2 中。因 $P=-0.02$ 时大多数自振周期不同的结构能量积分发散,故计算结果未收入表 2 中。

从表 2 中不难看出,取不同的 P 值计算时,结构的滞回耗能有明显的不同,但结构的总输入能的值没有因 P 值的取值改变而出现大的变化。这说明 P 值的取值不同对结构的滞回耗能影响显著,而对结构的总输入能影响不明显。由此,与描述结构地震反应的其它指标相比,结构的总输入能影响因素偏少,从而用结构的地震能量反应来描述结构地震反应更具优越性。

综上所述,可以看出:地震动三要素对结构地震总输入能量反应的影响显著,不同自振

周期的结构,其总输入能量反应不同。而结构的屈服强度系数 ξ_y 的取值和恢复力模型中的第二刚度系数的取值对总输入能反应基本上无影响。

2.2.3 多自由度体系总输入能量

图 6、图 7、图 8 所示分别为剪切型、弯曲型和剪弯型结构在罕遇 7°人造波输入情况下的弹性地震总输入能量谱曲线。图 9、图 10 和图 11 分别为剪切型、弯曲型和剪弯型结构在 7°罕遇人造波输入情况下的弹塑性地震总输入能量谱曲线。其纵横坐标的表示与前面的图形相

表 2 不同 P 值的结构能量反应

P	ξ_y	VE_s	VE_d	VE_n	VE_t
0.1	0.2	.026	.268	.444	.520
	0.3	.027	.268	.446	.521
	0.4	.026	.272	.444	.522
	0.5	.027	.277	.443	.524
	0.6	.033	.304	.422	.522
0.05	0.2	.033	.305	.420	.521
	0.3	.032	.309	.418	.522
	0.4	.032	.311	.416	.522
	0.5	.035	.347	.388	.523
	0.6	.035	.348	.386	.523
0.0	0.2	.035	.350	.384	.523
	0.3	.035	.352	.384	.524
	0.4	.036	.388	.346	.523
	0.5	.036	.389	.345	.523
	0.6	.036	.390	.343	.522
-0.01	0.2	.036	.392	.342	.522
	0.3	.037	.424	.300	.522
	0.4	.037	.424	.299	.522
	0.5	.037	.426	.297	.521
	0.6	.037	.426	.295	.521

表 3 单自由度弹性、弹塑性总输入能比较(单位:m/s)

T ₀	场 震								地 震							
	I		II		III		IV		I		II		III		IV	
	弹性	弹塑性	弹性	弹塑性	弹性	弹塑性	弹性	弹塑性	弹性	弹塑性	弹性	弹塑性	弹性	弹塑性	弹性	弹塑性
0.2	.350	.350	.420	.425	.274	.323	.292	.388	.444	.461	.477	.518	.426	/	.380	/
0.25	.345	.356	.448	/	.321	.378	.366	.455	.485	/	.549	.571	.543	.606	.465	.560
0.3	.373	.374	.476	.481	.394	.416	.445	.503	.512	.526	.592	.621	.659	.693	.540	.633
0.4	.378	.379	.486	.498	.454	.486	.558	.605	.550	.536	.682	.679	.764	.792	.694	.783
0.5	.366	.382	.513	.523	.496	.538	.619	.679	.529	.527	.691	.688	.863	.864	.846	.894
0.55	.385	/	.521	.524	.528	.556	.640	.742	.543	.543	.676	.709	.872	.899	.853	.944
0.6	.355	.378	.495	.528	.558	.558	.728	.761	.538	.533	.697	.715	.897	.910	.889	.971
0.65	.338	.391	.487	.528	.527	.573	.715	.773	.502	.527	.694	.729	.862	.897	.923	1.002
0.7	.386	.413	.524	.543	.559	.591	.763	.798	.517	.540	.710	.737	.882	.904	.959	1.024
0.8	.377	.399	.505	.536	.571	.612	.782	.871	.531	.551	.749	.748	.913	.926	1.00	1.096
0.85	.352	.396	.491	.538	.585	.625	.824	.904	.522	.553	.726	.745	.909	.927	1.05	1.121
0.9	.369	.403	.508	.542	.598	.626	.852	.912	.540	.557	.738	.759	.939	.947	1.07	1.141
1.0	.401	.411	.520	.538	.594	.642	.825	.938	.568	.568	.765	.779	.906	.940	1.14	1.179
1.2	.353	.417	.496	.545	.596	.641	.969	.987	.512	.553	.750	.769	.923	.952	1.13	1.222
1.4	.392	.436	.548	.571	.638	.673	1.03	1.036	.527	.564	.749	.766	.988	.998	1.26	1.313
1.6	.434	.449	.544	.559	.687	.671	1.03	1.025	.549	.566	.737	.755	.911	.988	1.22	1.320
1.8	.427	.436	.516	.539	.631	.659	.939	1.018	.558	.576	.696	.769	.928	.998	1.26	1.360
2.0	.413	.433	.508	.536	.615	.653	.891	1.013	.542	.564	.732	.787	.955	1.024	1.25	1.331
2.4	.352	.418	.438	.512	.617	.660	.953	1.060	.522	.568	.723	.788	.940	1.045	1.22	/
2.8	.361	.430	.455	.528	.621	.686	1.00	1.111	.548	.587	.732	.812	1.104	1.104	1.31	1.435
3.0	.371	.437	.475	.538	.643	.693	1.07	1.129	.576	.603	.696	.837	1.107	1.103	1.28	1.442

注:1 本表弹塑性值是由 $\xi_s = 0.4, P = 0.05$ 时计算出的单位质量的总输入能。

2 “/”表示计算时浮点溢出。

同。从这些图中可以看出,多自由度体系的总输入能量反应的影响因素与单自由度体系相同,这里不再赘述。

3 单、多自由度体系弹性与弹塑性总输入能比较

表 3 所示为单自由度体系弹性与弹塑性地震总输入能的比较。

从表中可以看出,除特别长的周期结构外($T_0 > 2.0s$),对于短周期及中长周期结构,其弹

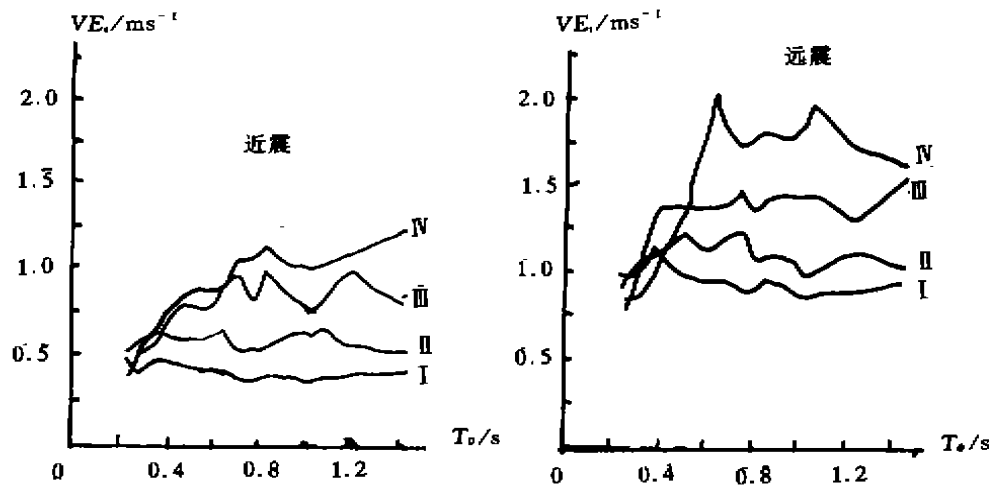


图6 剪切型结构弹性地震总输入能量谱

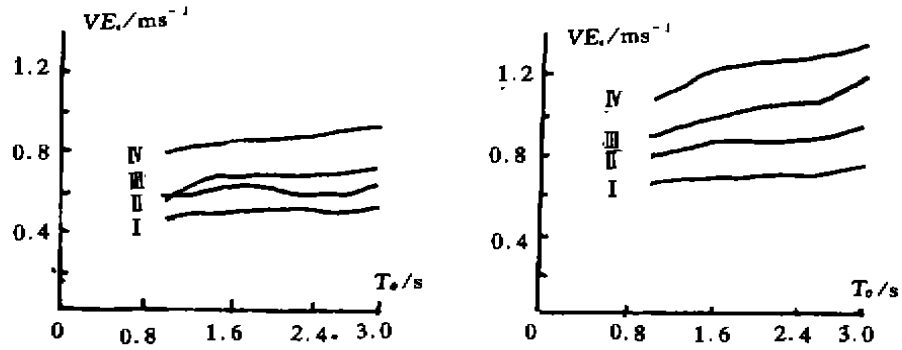


图7 弯曲型结构弹性地震总输入能量谱

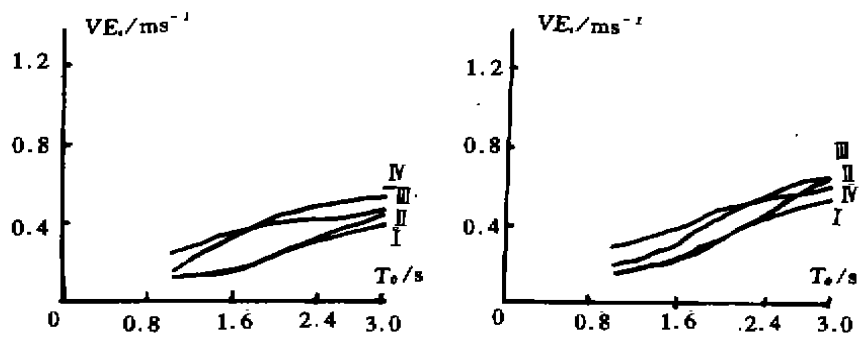


图8 剪弯型结构弹性地震总输入能量谱

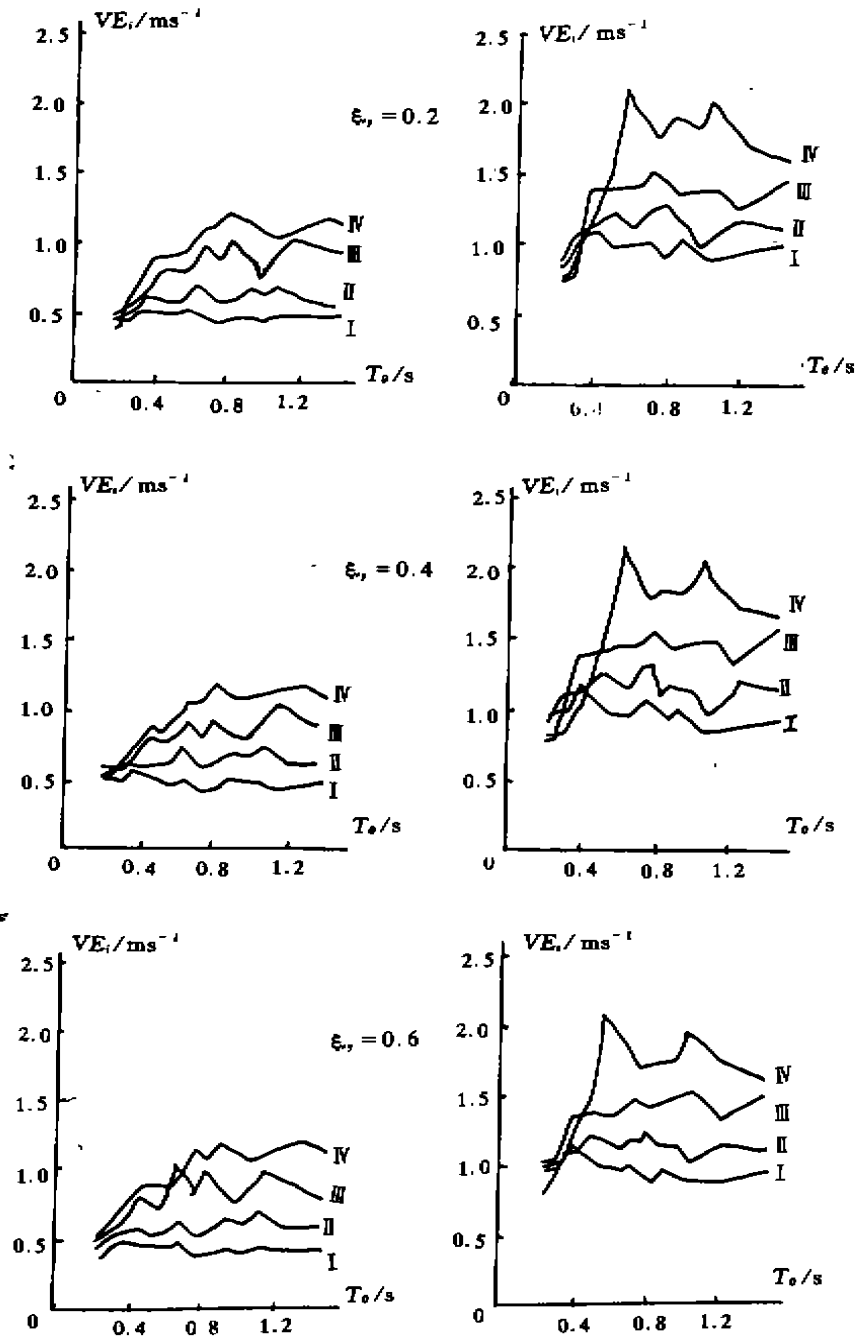


图 9 剪切型结构弹塑性总输入能量谱

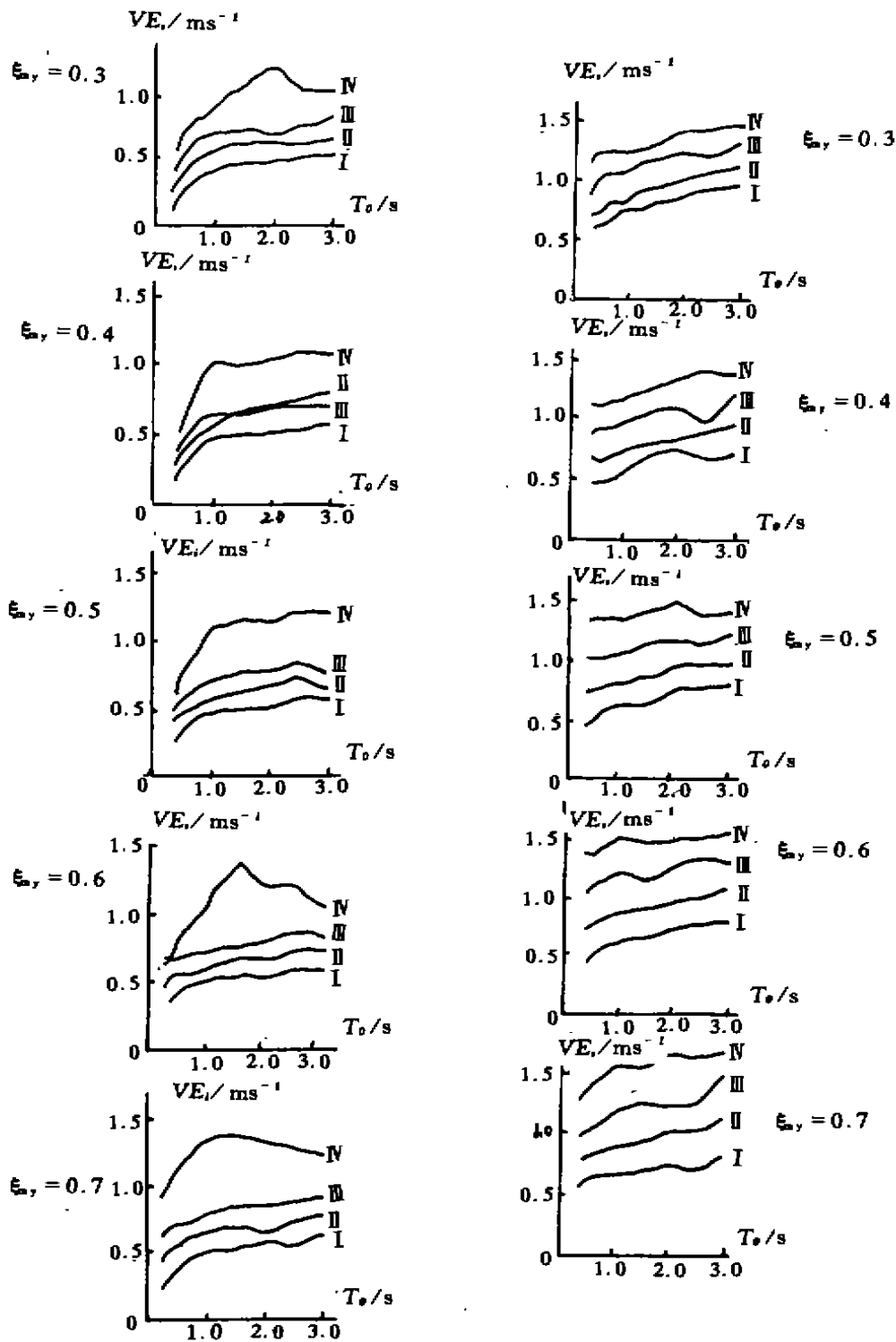


图 10 弯曲型结构弹性总输入能量谱

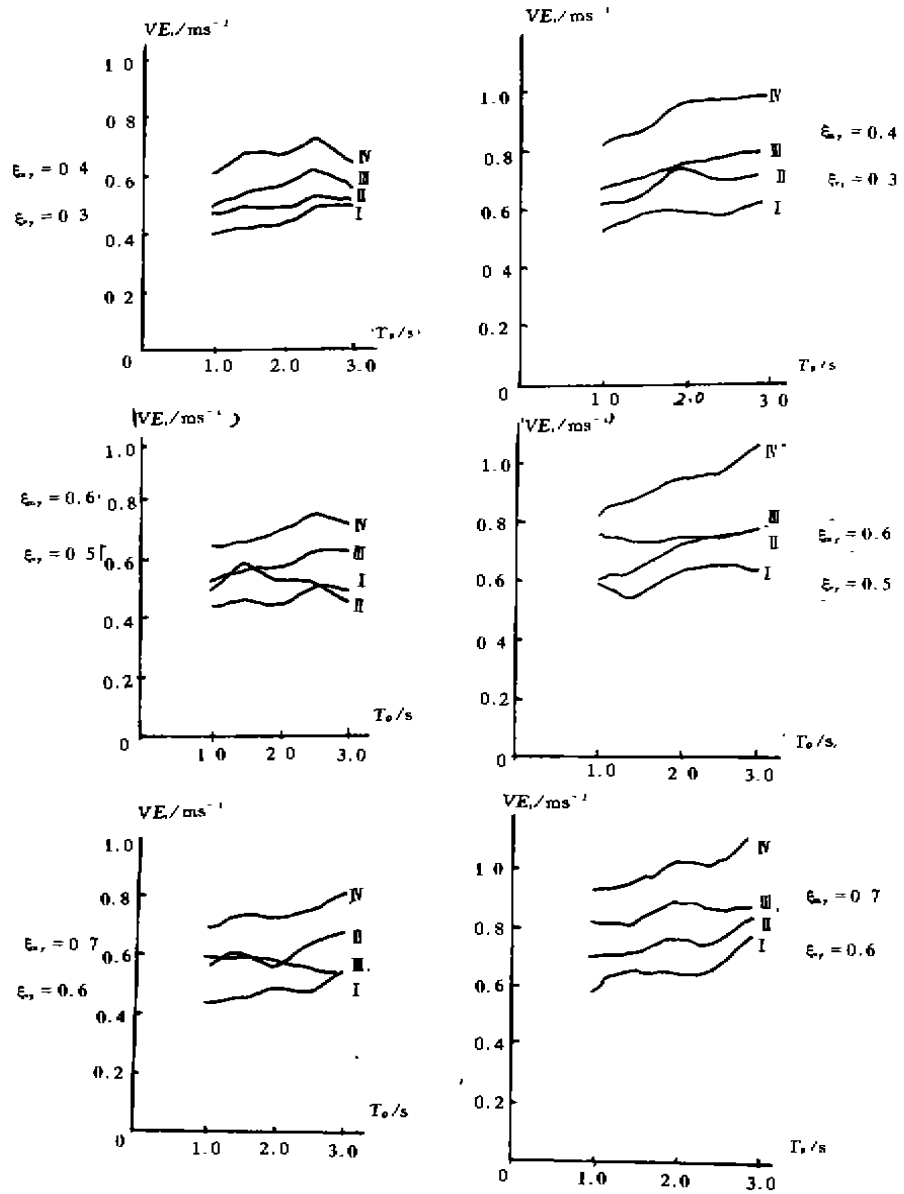


图 11 剪弯型结构弹塑性总输入能量谱

性分析与弹塑性分析的结构地震总输入能量反应相差很小,一般在 1%~5%。这与日本学者秋山宏对钢结构地震总输入能量的研究成果相吻合。对比图 6 与图 9,图 7 与图 10,图 8 与图 11 可知,对于多自由度体系,弹性与弹塑性地震总输入能量反应相差也很小。因此,可以设想以简单的弹性分析代替较为复杂的弹塑性总输入能量的分析,这将使计算工作得以简化。

4 单自由度体系与多自由度体系总输入能的比较

比较前述各类结构的地震总输入能量谱曲线,不难发现,各谱曲线对于各种因素的影响所显出的大致规律是相同的。限于篇幅,不再一一列出这些谱曲线和数表。但本文通过对这些数表及谱曲线图对比,发现对于不同变形型式的结构,若其自振周期相同,虽在相同的地震作用下,其单位质量的总输入能也是不同的。由于高振型的影响,多自由度体系的地震总输入能的值大于单自由度的值,其中,剪切型结构的值比单自由度体系约大 30%,弯曲型结构的值比单自由度体系约大 20%,剪弯型结构的值比单自由度体系约大 10%。

5 本文对结构地震总输入能简化分析的建议

通过以上分析可知,结构的地震总输入能量反应有如下特点:

1) 地震动三要素对结构地震总输入能反应影响显著;结构自振周期不同,地震总输入能量不同;但结构的屈服强度系数的取值及结构的第二刚度系数 P 的取值对结构地震总输入能的影响不大,说明结构的地震总输入能量反应谱较之其它地震反应谱稳定。

2) 在同一强震作用下,场地条件相同,自振周期相同的结构,其弹性与弹塑性能量反应误差在工程所允许的精度范围内。因此本文建议采用较为简单的弹性分析代替弹塑性地震总能量反应的分析。

3) 对多自由度体系,结构变形型式不同,单位质量的总输入能即不同;但与单自由度体系的地震总输入能量相比,存在较强的规律性,即剪切型、弯曲型和剪弯型结构地震总输入能分别比单自由度体系的值大 30%、20% 和 10% 左右。

基于上述分析,本文对结构地震总输入能量的简化分析方法提出初步设想为:

① 以弹性分析代替结构的弹塑性地震总输入能的分析,为减小误差,以修正系数进行修正。

$$\text{即: } VE_{I \text{ 弹塑性}} = (1 + \eta) VE_{I \text{ 弹性}} \quad (1)$$

式中, η 根据本文分析结果,建议取 0.05。

② 以单自由度体系的分析代替多自由度体系的总输入能量的分析,但须乘以修正系数 C_m 。

$$\text{即: } E_{I \text{ 总多}} = C_m E_{I \text{ 总单}} \quad (2)$$

式中: C_m 为以单代多的修正系数,对于剪切型结构, $C_m = 1.3$, 弯曲型结构 $C_m = 1.2$, 剪弯型结构 $C_m = 1.1$ 。

若要求实际结构的地震总输入能,建议参照现行抗震规范(GBJ11-89)中求算结构总水平地震作用的简化分析方法,采用等效质量系数。根据本文的结果,建议对剪切型、弯曲型和

剪弯型结构分别取 $\xi = 0.90, 0.85$ 和 0.80 。

即:
$$E_{0, \text{总多}} = \xi M E_{0, \text{总单}} \quad (3)$$

式中, $E_{T, \text{总多}}$ 为单位质量结构总输入能; $E_{0, \text{总多}}$ 为实际多自由度体系结构总输入能, $E_{0, \text{总单}}$ 为单自由度体系结构总输入能, M 为多自由度结构质量。

6 结 语

本文所得出的抗震结构总输入能量反应及其谱曲线以及各因素的影响规律和建议的简化方法所考虑的因素较全面。虽然这些研究成果还只是初步的,有待进一步研究完善,但仍可以为发展抗震结构的能量分析方法和进一步完善基于最大变形反应和能量累积的双重破坏准则提供一定的依据。

参 考 文 献

- 1 Kato, B., Akiyama, H. (加藤勉, 秋山宏), Energy Input and Damage in Structures Subjected to Severe Earthquakes (《受强震作用结构的能量输入和破坏》), Trans. of A. I. J., NO235., 1975
- 2 Housner, G. W. (豪斯纳), Limit Design of Structures to Resist Earthquakes. (《结构抗震极限设计》), Proc. of 1st WCEEE 1956
- 3 Akiyama, H. and Kato, B., Energy Concentration of Multi-story Buildings (《多层建筑中的能量集中》), Proc. of 7th WCEE Vol. 4 p. 553, 1980
- 4 Huang Zong Ming, wang Song Fan and Lai Ming, Energy Analysis for the non-linear earthquake response of structures, proc. Tenth World Conf. on earthquake energy. Madrid, Spain, 1992
- 5 黄宗明, 白绍良, 赖明. 结构非弹性地震能量反应的分析方法. 工程力学增刊, 1994

(编辑:王秀玲)

Analysis of the Total Energy and Its Influencing Factors for Seismic Structures

Xiao Mingkui Liu Bo Bai Shaoliang

(Chongqing Jianzhu University)

Abstract In this paper, the total input earthquake energy and influencing effects for shear type, shear-bending type, bending type aseismic structures of the single freedom system and multiple freedom elastic-plastic system are analyzed by synthesizing various effects and employing the time-history analysis method. Based on the analysis results, the total input earthquake energy

(下转 52 页)