

文章编号: 1006-7329(1999)05-0010-06

地震作用下结构弹塑性位移反应规律的研究

10-15

尹保江¹ 黄宗明² 白绍良²

TU313
TU311.3

(1 中国建筑科学研究院 抗震所 100013; 2 重庆建筑大学 建筑工程学院 400045)

摘要 通过对单自由度体系在不同类型地面运动作用下的弹塑性位移反应特性的研究,总结了结构在地震作用下的位移反应规律,为考虑塑性累积疲劳损伤的结构地震破坏准则的研究提供依据。

关键词 结构弹塑性地震反应; 弹塑性位移反应规律; 低周疲劳破坏准则

中图法分类号 TU313

文献标识码 A

1 问题的提出

结构地震破坏准则的研究,一直是工程结构抗震领域一个十分重要的课题。目前,人们已普遍认为结构在地震作用下的破坏是由于位移的首次超越和塑性累积疲劳损伤共同作用的结果。大量的试验研究表明^[1],结构在往复荷载作用下的疲劳损伤破坏,不但和塑性耗能总量有关,而且还和位移幅值的大小、偏移量、不同幅值位移的发生顺序及其组合方式等密切相关,是一个非常复杂的问题。因此,要想考虑不同位移组合的情况,通过较为完备的试验系列来建立一个比较客观的能够反映以上各种因素的具有普遍意义的通用低周疲劳破坏准则,是相当困难的。

本文认为,地震地面运动虽然复杂,但其分类特征是明显的,结构在不同类型地震作用下的位移反应也一定会遵循某种规律。既然如此,就可以考虑放弃建立具有普遍意义的通用低周疲劳破坏准则的研究方法,而主要针对适用于地震作用的结构低周疲劳破坏准则进行研究,使问题得到简化,同时使提出的破坏准则更具有针对性。基于这种思想,本文研究了单自由度体系在不同类型地震地面运动作用下的弹塑性位移反应规律,以期作为今后研究结构地震破坏准则的参考。

2 结构位移反应规律的研究方法

根据文献^[2]的研究成果,将地震地面运动分为 5 类: S 型为短历时脉冲型地面运动; L-1 型和 M-1 型分别为长历时和中等历时有明显卓越周期的地面运动; L-2 型和 M-2 型分别为长历时和中等历时不规则的地面运动。本文选择了 79 条峰值加速度在 0.2g 以上的典型地震地面运动记录作为输入,计算了单自由度体系在这些地面运动作用下的位移反应时程。各类地震输入的分布见表 1。

表 1 本文采用地震动输入的类型分布

地面运动类型	S 型	L-1 型	M-1 型	L-2 型	M-2 型
数量(条)	19	17	19	8	16

对于每一条地震记录输入,所计算结构的基本周期 T_0 分别取为 0.5 s、1.0 s 和 2.0 s,结构的目标延性系数分别取为 2.0、4.0 和 6.0,共九种情况;阻尼比 ζ 统一取为 0.05,选用武田模型作为恢

收稿日期: 1999-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目

作者简介: 尹保江(1972-),男,中国建筑科学研究院工程师。

复力模型。

为了能够比较清晰地反映结构位移反应时程曲线的偏移特性和峰值统计规律,对每一位移反应时程曲线作出其峰值频数图,具体步骤如下:

① 滤去位移反应时程曲线上的高频点;

② 去掉时程曲线上 $t_{0.7}$ 以前的部分和 $t_{0.3}$ 以后的部分,只保留对结构的疲劳损伤有较大贡献的 $t_{0.7}$ 至 $t_{0.3}$ 部分进行分析,这里 $t_{0.7}$ 为结构首次达到 0.7 倍屈服位移(相对于初始平衡位置)的时间, $t_{0.3}$ 为结构最后一次达到 0.3 倍屈服位移(相对于最后平衡位置)的时间。

③ 将位移反应时程曲线作规一化处理,并将规一化后的位移轴从 +1 到 -1 分成若干区间,统计位移峰值位于各区间的频数;

④ 以规一化的位移为横轴,每一区间上位移峰值出现的频数为纵轴,绘出位移峰值频数图。

根据其作法,位移峰值频数图有两个主要特点:

第一,如果该图的形状尖锐,则说明尖峰点所对应的位移峰值出现的频数居多,结构以该位移幅值振动的次数最多,其它幅值的振动较少;该图的形状平缓,则说明结构按大中小幅值振动的次数比较接近;

第二,如果该图关于频数轴基本对称,则说明结构基本上是在作对称振动;如果该图的尖峰明显偏于频数轴一侧,则说明结构是在作明显的偏位振动。

为了定量地描述结构位移反应的偏移程度,本文还计算了每一位移时程的正反向最大位移之比 X_{\max}/X_{\min} 、规一化的位移平均值 X^* (即相对偏移量)和位移峰值频数叠加图的峰态系数^[3] μ_4 、 μ_4 反映了位移峰值频数图的相对集中程度, μ_4 越大,图形越集中。

位移反应大小幅值发生顺序的规律性只能通过位移反应时程曲线的形状加以归纳总结。

3 结构位移反应的规律性分析

规定位移反应绝对值最大的方向为正方向,也就是说在每个位移峰值频数图中,横坐标为 1 的频数至少为 1。然后将每一结构、每一延性水平在同类型地面运动的不同记录作用下的位移峰值频数叠加起来,得到该结构在该延性水平下的位移峰值频数叠加图。位移峰值频数叠加图在一定程度上反映了某类地震地面运动对结构位移反应的统计影响。

3.1 S 型地面运动作用下结构的位移反应规律

根据上述方法,本文对三种延性水平、三种周期的结构在 19 条 S 型地面运动作用下的 171 条位移时程曲线和 9 个位移峰值频数叠加图进行了分析,图 1 和图 2 分别是其中的某一典型位移反应时程曲线和位移峰值频数叠加图。从图中不难看出,结构的位移反应是明显不对称的,位移峰值频数图的尖峰偏向正向最大位移一侧,这说明结构大部分时间是在作偏位振动,而且是偏向最大位移一侧;大中小幅值的振动次数差异明显,大幅值的振动仅为 20 次左右(注意这是 19 条记录作用之和),平均每条记录对应着约 1 次大幅值振动,中等幅值的振动次数更少,而小幅值的振动次数高达几百次,平均每条记录对应着约 10 次小幅值振动。

描述结构偏位振动的定量指标见表 2。从表中可以看出:在脉冲型地面运动作用下,结构位移反应的相对偏移量一般在 0.1~0.23 之间,正反向最大位移之比在 2~4 之间, μ_4 较大,表明大部分时间结构是小幅值振动,大幅值位移次数很少,即结构位移反应也是脉冲型;结构的周期和反应延性对位移偏移有明显的影响,较柔的结构或较大的延性反应会引起较大的位移偏移。

为了考察 S 型地面运动作用下结构位移反应大小幅值发生顺序的特性,本文逐一分析了经过前述处理的 171 条位移反应时程曲线的强震段。在脉冲型地面运动作用下,结构位移反应一般在第一个循环即达到最大值,此后只有少数几次中偏大幅值的振动使结构产生累积损伤,然后振动很快衰减,类似于有阻尼体系的自由振动情况。统计分析表明,结构首次出现大幅值振动的情况占 82%,

随后是中等幅值的振动,中等幅值与大幅值之比一般在 0.41~0.62 之间,平均为 0.52;中等幅值出现的次数一般在 0~5 次,平均为 2 次。另外 18% 的情况为,结构先有 1~4 次较大幅值的振动,然后才是大幅值的振动,较大幅值与大幅值之比一般在 0.6~0.9 之间变化,大幅值之后的中等幅值振动与第一种情况相似。

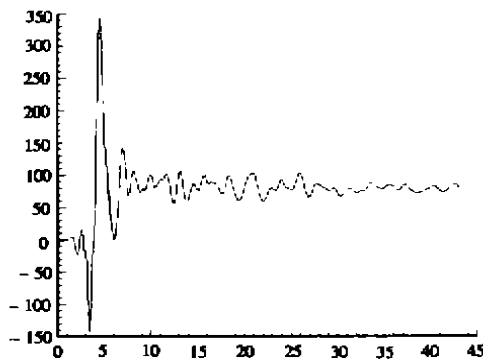


图 1 S 型地面运动作用下典型的结构位移反应时程曲线

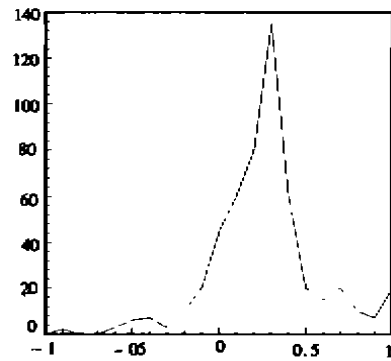


图 2 S 型地面运动作用下典型的结构位移反应峰值频数叠加图

表 2 S 型地面运动作用下结构位移反应的偏移量

μ	T	\bar{X}_{max}/X_{max}		X^*		μ^*
		平均值	方差	平均值	方差	
2	0.5	2.229	1.853	0.163	0.057	29.5
	1.0	1.746	0.594	0.136	0.078	24.5
	2.0	2.400	1.665	0.168	0.051	13.2
4	0.5	1.977	1.125	0.121	0.081	41.1
	1.0	2.590	1.301	0.193	0.108	21.4
	2.0	3.027	1.819	0.202	0.098	21.4
6	0.5	2.089	1.102	0.115	0.077	34.8
	1.0	2.814	1.737	0.171	0.095	24.4
	2.0	3.548	2.693	0.226	0.110	18.1

3.2 L-1型地面运动作用下结构位移反应规律

图 3 和图 4 分别为 L-1 型地面运动作用下结构的典型位移反应时程曲线和位移峰值频数叠加图。描述结构偏位振动的定量指标见表 3。

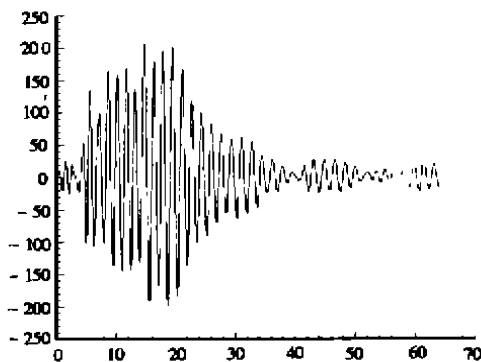


图 3 L-1 型地面运动作用下典型的结构位移反应时程曲线

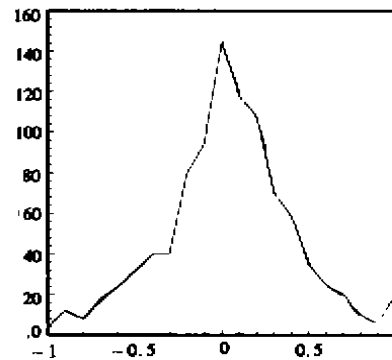


图 4 L-1 型地面运动作用下典型的结构位移反应峰值频数叠加图

表 3 L-1 型地面运动作用下结构位移反应的偏移量

μ	T	$X_{max}/X_{0.05}$		γ^*		μ_s
		平均值	方差	平均值	方差	
2	0.5	1.673	0.965	0.092	0.060	8.338
	1.0	1.189	0.171	0.083	0.035	7.775
	2.0	1.469	0.342	0.096	0.055	5.216
4	0.5	1.533	0.571	0.079	0.046	10.539
	1.0	1.345	0.515	0.049	0.050	6.230
	2.0	1.362	0.355	0.061	0.051	6.740
6	0.5	1.367	0.319	0.056	0.035	11.060
	1.0	1.503	0.823	0.047	0.057	7.230
	2.0	1.354	0.439	0.049	0.048	5.950

与 S 型地面运动相比,在 L-1 型地面运动作用下,结构的位移峰值频数图要平缓得多,且基本对称于零平衡位置。在表 3 中,峰态系数一般在 5~11 之间,正反向最大位移之比一般在 1.2~1.6 之间,相对偏移量小于 0.1,这些描述结构位移偏移的指标明显小于表 2 中 S 型地面运动作用的情况。从表 3 中还可以看到,在本文所讨论的范围内,结构的自振周期和延性反应对位移偏移的影响不大。从位移反应时程曲线也可以看出,不同延性水平下,结构位移反应时程曲线形状十分相似,围绕零平衡位置作对称振动,位移时程包络线沿时间轴基本呈单峰状或双峰状分布。双峰状分布仅发生在输入地震动是双峰状分布的情况。

以上分析表明,在 L-1 型地面运动作用下,结构位移反应具有较好的对称性,偏移很小,且振动中位移幅值的分布比较均匀,位移时程包络线沿时间轴呈由小到大、然后逐步衰减的平缓曲线。

3.3 M-1 型地面运动作用下结构位移反应规律

结构在 M-1 型地面运动作用下的典型位移反应时程曲线和位移峰值频数叠加图分别如图 5 和图 6 所示;描述结构偏位振动的定量指标见表 4。

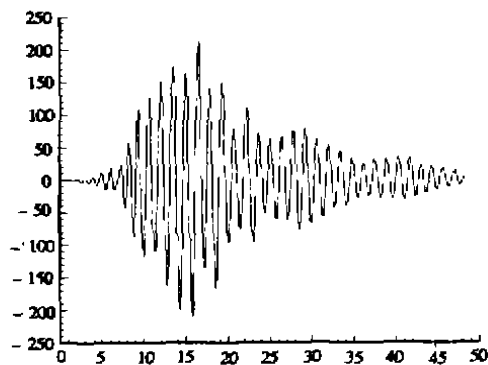


图 5 M-1 型地面运动作用下典型的结构位移反应时程曲线

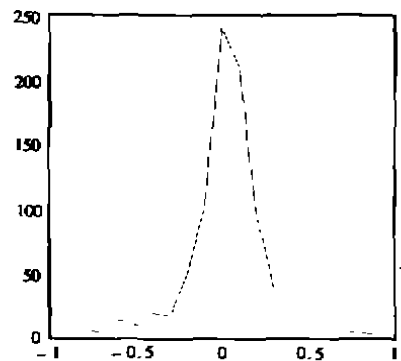


图 6 M-1 型地面运动作用下典型的结构位移反应峰值频数叠加图

在 M-1 型地面运动作用下结构位移反应曲线包络基本呈单峰状分布;位移峰值频数图的 μ_s 值介于 S 型和 L-1 型之间,位移峰值频数图的峰值所对应的位移在 0 附近,即小位移幅值的振动次数占较大比重,这部分振动对结构影响不大。相对来说,中等或大幅值的振动次数较少。正反向峰值位移之比在 1.2~1.6 之间,相对偏移量一般在 0.04~0.1 之间,和 L-1 型相近,远小于 S 型的偏移指标,说明在 M-1 型地面运动作用下,正反向位移关于初始平衡位置接近于对称分布,但也表现出一定的偏移性。结构的周期对位移偏移有一定影响,较长周期的结构产生较大的位移偏移;在所讨论的延性反应范围内,延性对位移偏移的影响不大。

表 4 $M-1$ 型地面运动作用下结构位移反应的偏移量

μ	T	$\lambda_{max}/\lambda_{min}$		λ^*		μ^*
		平均值	方差	平均值	方差	
2	0.5	1.331	0.318	0.077	0.058	14.697
	1.0	1.383	0.354	0.086	0.063	8.290
	2.0	1.566	0.499	0.096	0.062	4.793
4	0.5	1.241	0.211	0.048	0.040	15.747
	1.0	1.426	0.253	0.077	0.040	6.144
	2.0	1.579	0.547	0.106	0.118	7.637
6	0.5	1.287	0.280	0.042	0.036	9.886
	1.0	1.358	0.320	0.049	0.039	6.283
	2.0	1.445	0.539	0.060	0.048	8.777

3.4 $L-2$ 型和 $M-2$ 型地面运动作用下结构的位移反应特性

本文分别计算了 8 条 $L-2$ 型和 16 条 $M-2$ 型地面运动作用下结构的位移反应,典型的位移时程曲线如图 7 所示。

由于这两类地面运动的不规则性,使得结构反应呈现出异常复杂的特性,这主要表现在以下几个方面:

第一,结构位移反应的偏移无规律。在所计算的 216 条位移反应时程曲线中,22%的位移反应有较大的偏移量,78%的位移反应偏移量较小,结构位移反应偏移量不仅与结构本身特性有关,而且与地面运动特性有关,且二者相互影响,情况复杂。

第二,有些结构的位移反应前后阶段基本是按同一频率振动的,但是也有一些结构前后则是以不同的频率振动,如先以较高频率振动,然后以较低频率振动,出现这种情况除了有结构自身频率变化的原因外,更主要是因为 $L-2$ 型和 $M-2$ 型地面运动的频谱成分比较复杂,导致结构位移反应频率特性的多样性。

第三,结构大小位移幅值发生顺序无规律。少部分结构的位移反应包络曲线呈单峰状分布,而多数的位移反应幅值发生顺序表现出异常复杂的特性,无规律可循,其包络曲线杂乱无章。

总之,由于 $L-2$ 型和 $M-2$ 型地面运动自身特性的复杂性和随机性,使得结构反应的偏移特性、频率特性和大小幅值发生顺序等呈现出异常复杂的情形,难以总结出一般的规律。

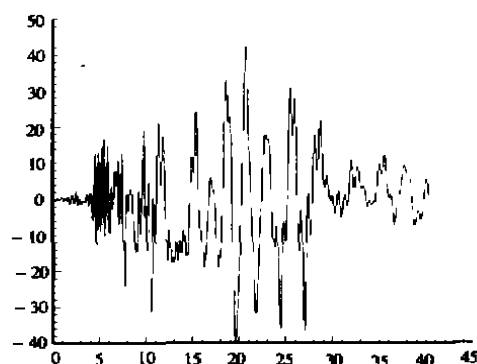


图 7 $L-2$ 型地面运动作用下的典型位移反应时程曲线

4 结构位移反应规律的试验验证

本文作者之一在研究结构的阻尼耗能问题时^[4],曾设计了 3 个小型单层钢框架结构作为试验模型,在上海同济大学土木工程防灾国家重点实验室振动台室的模拟地震振动台上进行了动力试验。台面输入采用加速度控制。为了考虑不同类型地震地面运动输入对结构反应的影响,分别选取了修正后的 Imperial Valley 地震(1940 年 5 月 18 日)Elcentro S00E 记录代表中长持时的不规则地面运动($L-2$ 型)、修正后的 Bear Valley 地震(1972 年 9 月 4 日)Melendy Ranch N29W 记录代表近场大脉冲型的地面运动(S 型)、以及具有不同频率的正弦波代表有明显卓越周期的中长持时地面运动作为台面输入,进行了动力试验。试验所记录的 20 多条具有不同延性反应的位移时程曲线结果,与前述分析结论一致。事实上,正是这些试验结果,启发了我们进行不同类型地面运动作用下结构位

移反应规律的研究。

5 结 语

为配合地震作用下结构破坏准则的研究,本文采用计算机模拟分析方法,对结构在不同类型的地震地面运动作用下的弹塑性位移反应规律进行了探索,得出了如下结果:

(1)在短持时脉冲型(S 型)地面运动作用下,结构的位移反应也是脉冲型。位移反应的非对称性明显,相对偏移量一般在 $0.12 \sim 0.23$ 之间,正反向最大位移之比在 $2 \sim 4$ 之间,结构周期越长,位移延性反应越大,偏振越显著;大小位移幅值发生的顺序,多数情况为第一个有破坏力的位移循环即达到最大位移,之后只有为数不多的几次中等幅值的振动,然后很快衰减;少数情况为先有一两次有破坏力的较大幅值的位移循环之后才达到最大位移,此后的振动规律与前一种情况一样。

(2)在长持时有明显卓越周期($L-1$ 型)地面运动作用下,在本文所讨论的周期和延性范围内,结构的位移反应具有较好的对称性,相对偏移量一般均小于 0.1 ,正反向最大位移之比在 $1.2 \sim 1.6$ 之间,大小幅值发生顺序为由小到大再逐渐衰减,位移反应包络线呈单峰状或双峰状分布。

(3)在中等持时有明显卓越周期($M-1$ 型)地面运动作用下,结构的位移反应与 $L-1$ 型地面运动作用时相近,只是振动的相对偏移量比 $L-1$ 型的略大,位移反应包络线呈单峰状分布。

(4)在长持时($L-2$ 型)和中等持时($M-2$ 型)无明显卓越周期地面运动作用下,结构的位移反应比较复杂,目前尚无法总结出其规律性。

需要指出的是,本文结论主要根据单自由度体系的分析得出,仅进行过少量多自由度系统层间位移反应的验证,其结论是否普遍适用于多自由度系统,还有待于进一步的分析和验证。

参 考 文 献

- [1] 刘伯权. 钢筋混凝土抗震结构的破坏准则及可靠性分析[D]. 重庆:重庆建筑大学建筑工程学院,1995
- [2] 尹保江,黄宗明,白绍良. 地震地面运动的分类[J]. 工程抗震,1999(已录用待发表).
- [3] 尹保江. 不同类型地震作用下结构弹塑性位移反应规律的研究[D]. 重庆:重庆建筑大学建筑工程学院,1997
- [4] 黄宗明. 结构地震反应时程分析中的阻尼问题研究[D]. 重庆:重庆建筑大学建筑工程学院,1995

A Study on Characteristics of Elasto-Plastic Displacement Response of Structures Under Seismic Action

YIN Bao-jiang¹ HUANG Zong-ming² BAI Shaoliang²

(1. Institute of Earthquake Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University, 400045, China)

Abstract The characteristics of elasto-plastic displacement response of structures subjected to different types of ground motions are studied and generalized in this paper.

Key Words elasto-plastic earthquake response; characteristics of displacement response; earthquake damage criteria