

· 综述 ·

文章编号: 1006 - 7329(1999)05 - 0117 - 05

弹塑性反应谱研究综述

23
117-121

TU311.3

肖明葵 严涛 王耀伟 赖明

(重庆建筑大学 建筑工程学院 400045)

摘要 随着结构弹塑性地震反应研究的深入, 弹塑性反应谱的研究取得了大量研究成果。本文对各种形式的弹塑性反应谱的研究进行了综合讨论, 并指出要使弹塑性反应谱能用于抗震设计应解决的关键问题。

关键词 地震动; 弹塑性结构; 反应谱 建筑结构

中图法分类号 TU311.3

文献标识码 A

反应谱理论是结构抗震设计的基础理论之一。弹性反应谱的研究已经趋于成熟, 并在各国抗震设计规范中得以广泛的应用。但是, 地震作用具有很大的不确定性, 在强烈地面运动的作用下, 一般结构都可能达到屈服而进入非弹性工作阶段, 结构非线性地震反应分析受到各国研究者的广泛重视。我国现行抗震规范(GBJ11-89)^[1]第一条就以我国现有科技水平和经济条件为前提, 提出了三水准抗震设防要求。其设防目标在第二和第三水准烈度时, 都允许结构进入非弹性工作阶段, 即结构通过塑性变形来耗散地震能量, 因此, 结构非线性地震反应的研究具有重要意义。各国研究者从不同的角度多方面进行了非线性地震反应的研究。其中作为一种基础性的研究工作, 弹塑性反应谱的研究受到极大的关注, 并取得了多方面的成果。

1 弹性及弹塑性反应谱

反应谱是指单自由度体系对于某个实际地震加速度的最大反应与体系的自振特性(自振周期和阻尼比)之间的函数关系。质量为 m 的单自由度体系在地面运动加速度 $\ddot{x}_g(t)$ 的作用下其弹性和非弹性体系的运动微分方程可由达朗伯原理得到为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

和
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + F(x) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

式中, c 为结构的阻尼系数。(1)式与(2)式的主要区别在于等式左端的第三项, (1)式中的 k 是弹性体系的刚度系数, kx 表示体系的弹性恢复力, 仅仅是一个时间的函数, 而(2)式中 $F(x)$ 的表示弹塑性体系的恢复力, 当体系在弹性阶段时, 它也仅是一个时间函数, 但当体系进入非弹性变形阶段, 它就随体系的位移的改变而变化, 对于不同的弹塑性变形, 有不同的恢复力模型。

弹性反应谱基于结构是单质点弹性体系, 结构所处的地面相当于刚性平面以及地面运动时程就是强震观测记录等三个假设而得到。对于一组 N 个具有不相同自振周期 $T_i (i=1, 2, \dots, N)$ 和相同阻尼比 ξ 的单自由度体系, 在某一给定地震加速度 $m\ddot{x}_g(t)$ 的作用下, 可求得各体系的最大加速度反应、最大速度反应和最大位移反应分别为^[2]:

收稿日期: 1998-11-30

作者简介: 肖明葵(1952-), 女, 重庆人, 重庆建筑大学副教授, 主要从事结构抗震研究

$$\left. \begin{aligned} S_a(T, \xi) &= w \left| \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi \omega_D (t-\tau)} \sin \omega_D (t-\tau) d\tau \right|_{\max} \\ S_v(T, \xi) &= \left| \int_0^t \dot{x}_g(\tau) e^{-\xi \omega_D (t-\tau)} \cos \omega_D (t-\tau) d\tau \right|_{\max} \\ S_d(T, \xi) &= \frac{1}{w} \left| \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi \omega_D (t-\tau)} \sin \omega_D (t-\tau) d\tau \right|_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, $w = \frac{2\pi}{T}$, $\omega_D = \sqrt{1 - \xi^2}$ 。将所得到的最大反应按周期(或频率)的大小排列起来,所得到的 S_a 、 S_v 、 S_d 与周期的关系曲线分别称为绝对加速度反应谱、相对速度反应谱和相对位移反应谱,总称为弹性地震反应谱。

若考虑结构为单质点弹塑性体系,即对体系的运动微分方程(2)进行求解时考虑结构进入非线性工作状态,结构动力参数中引入屈服强度系数或位移延性系数,或者考虑结构的低周疲劳性能即可以得到各种形式的弹塑性反应谱,这类非线性地震反应谱包括塑性耗能谱、残余位移谱、延性谱、弹塑性位移比谱以及考虑反复大变形性能的低周疲劳寿命特性的非线性反应谱等等。

2 弹塑性反应谱的研究

弹塑性反应谱的研究涉及地震动特性以及结构动力特性之间的关系,对于深入了解复杂地震地面运动特性与结构动力特性之间的关系,为抗震设计提供设计准则和参数基础具有重要的意义。早在 50 年代,人们从 EL Centro(1940 年)地震中一些钢筋混凝土房屋经历了相当大的塑性变形而抵抗了地震灾害的现象中认识到非线性地震反应分析的必要性。最初的研究,以及六十年代初 Newmark 和 Veletos 的研究^[3]都是针对具有理想弹塑性恢复力模型的单自由度系统,输入 EL Centro 等少量几条地震记录计算其地震反应。在这些研究中引入了延性系数的概念,得出了理想弹塑性体系的地震力系数或最大反应加速度可用其刚度与弹塑性系统初始刚度相同的弹性系统的值乘以与容许塑性变形有关的折减系数的结论,并建议了工程设计地震力的折减系数,即

$$F = F_e / \mu$$

式中, F_e 为相应的弹性系统的地震力系数;而当时采用的 μ 则是反映理想弹塑性体系的塑性变形程度的参数:

$$\mu = x_{\max} / x_y$$

式中, x_{\max} 为结构的最大位移, x_y 为结构的屈服位移,这些研究明确了结构延性是一个反映地震作用下结构耐受变形的能力和耗能能力的重要指标。但当时所定义的延性系数是针对理想弹塑性体系的,不能反映一般结构的恢复力特性以及耗能能力。

在这期间, Housner 从能量分析的角度提出了采用弹性体系的拟速度谱等价弹塑性体系的破坏能量谱并用以估计结构弹塑性耗能的方法^{[4][5]}。当时的研究所依据的地震记录太少,不具备统计特性。Housner 的等价谱对于某些地面运动而言往往会造成较大的误差或者低估了结构的破坏耗能能力。

70 年代, Newmark 和 Hall 等人基于当时的研究水平提出了估计地震动的线性反应谱和非线性反应谱的方法^{[6][7][8]}。以后,他们又仿照确定线性反应谱的步骤,利用 10 条国际上常用的加速度记录作为输入,通过选定 4 个结构参数,即自振周期、阻尼比 ζ ,恢复力特性类型(主要针对弹塑性、双线性及刚度退化这三种非线性恢复力模型)和不同的延性系数 μ 以及 3 个地震动参数,即地震动最大加速度、速度和位移,对这些不同结构参数的单质点体系的地震反应进行了大量的数值计算,并将其结果作出了几种不同的非线性反应谱,如非线性屈服反应谱、非线性加速度反应谱以及非线性总变形反应谱等,并将其以加速度、速度和位移的三联谱图的形式表示。从这些研究中可知,低频(长周期)(0.3~2 Hz)弹塑性系统,对应于不同 μ 值的最大位移反应相近;其弹塑性系统最大位

移与相应弹塑性系统的最大位移相近; 小于 0.3 Hz 的低频段内 μ 值大时位移稍小, 且趋于地面运动最大位移; 高频(大于 20~30 Hz)(短周期)弹塑性体系最大加速度与相应的弹塑性系统相近, 对应于不同 μ 值, 最大加速度趋于相等, 并趋于地面运动最大加速度。中频弹塑性系统, 不同 μ 值情况的能量近似相等, 并与相应的弹性系统相近(即最大速度反应相近)。由于这些近似关系, Newmark 等提出以弹塑性设计谱分频段考虑地震力折减系数而得出非线性设计谱的方法, 中低频弹塑性地震力折减系数为 $1/\mu$ (位移或速度)或 $1/\sqrt{2\mu-1}$ (加速度)。

我国对弹塑性反应谱的研究始于 60 年代, 王前信等人研究了具有双线性弹塑性恢复力模型的单自由度体系在 EL Centro 1940Ns 等 3 条地震记录输入下的反应^[9], 并定义代表强度的无量纲量

$$b = F_s/mg$$

式中, F_s 为系统屈服强度, m 为系统的质量。由此得到输入的位移谱和能量谱, 体系的阻尼耗能谱、塑性耗能谱和残余位移谱等, 该项研究表明, 体系有一在一定 b 值下的最佳屈服强度, 在这一屈服强度下, 结构的弹塑性变形反应近似等于最大弹性变形反应。同样也得出中频结构(6~9 Hz), 输入能量为常量, 且近似等于体系的塑性耗能的总和。该项研究提出弹塑性抗震设计应以最大位移反应为依据并补充能量设计的想法。并建议考虑体系进入塑性时设计加速度应以体系的延性系数 μ 进行折减。

该项研究以及 Newmark 等人的研究成果对我国的抗震设计及研究的影响很大, 长期以来, 人们采用结构最大位移反应或位移延性反应单一指标进行结构地震评估, 采用弹性或非弹性反应谱确定地震力而进行结构抗震设计, 而非弹性设计反应谱由弹性设计反应谱乘以与位移延性相关的折减系数而得到。80 年代, 我国对延性谱和位移比谱的研究较为活跃。陈聃等人研究的延性谱^[10]是以延性系数为谱坐标, 并反映地震对结构强度及延性两方面要求及这两者相互关系的非线性反应谱。该项研究中, 考虑了卸载刚度退化与屈服后负刚度的存在对反应的影响, 并专门研究了屈服后刚度斜率问题。他们还研究了不同周期结构在地震作用下的不倒塌最小临界强度 λ_c 值, 而得出倒塌谱^[11]。该项研究显示了长周期结构的耐震性质, 并建议了强度——延性的双重抗震设计准则。韦承基等人研究的位移比谱^[12]以弹塑性结构最大位移反应与相应弹性结构最大位移反应的比值作为谱坐标, 并考虑不同的结构强度值作出谱曲线。该项研究表明, 在短周期部分, 弹塑性位移反应较之相应结构的弹性位移反应大得多, 因而谱值较高, 并随周期的增长而下降至地震波卓越周期附近出现转折点, 周期大于转折点的结构, 最大弹塑性位移与相应最大弹性位移相接近。该项研究给出了以二折线拟合的硬、软两种场地的位移比谱, 以便从弹性位移谱简便地得出弹塑性结构的最大位移反应。

这些研究都是仅考虑最大位移反应或位移延性反应单一指标, 并由这些单一指标所得的抗震设计方法基本上没有能够反映地震动持续时间对结构破坏的影响, 亦不能反映地震力这种反复作用荷载而引起结构的累积疲劳的影响。为能反映累积破坏的影响, 80 年代末, 程民宪等人将钢筋混凝土框架和钢框架的低周疲劳性能引入地震反应谱的计算中, 以地震反应累积损伤系数的形式考察了结构低周疲劳性能对地震破坏反应的影响, 并作出了以残余强度为谱坐标的非线性反应谱^[13]。他们的研究表明较短周期的结构由于产生较大塑性变形其疲劳破坏的效应较大, 而对于相同条件的结构, 地震动持续时间越长, 残余强度谱值越低, 累积损伤效应越大。该项研究建立了钢筋混凝土结构和钢结构累积损伤系数作为评估结构破坏的指标之一。残余强度谱表明了结构地震反应随强震持时增长而累积损伤明显加重的规律, 但是仅由累积损伤这一单一指标也同样不能作为结构抗震设计的依据。

随着结构抗震理论研究的深入, 目前人们对地震作用下结构破坏比较一致的看法是, 基于最大位移反应首次超越和塑性累积损伤的双重破坏准则比较符合震害和试验实际。因此, 近 10 年来, 各国研究者都广泛采用能量耗散来描述结构的塑性累积损伤, 普遍认为结构能量反应及其谱形式具

有形式简单、计算方便且又能较好地反映地震动的强度、频谱特性及持时对结构破坏的综合影响。近 10 年来,许多研究者研究了采用能量谱的形式来确定地震地面运动对结构的总输入能量,并以结构滞回耗能作为对结构破坏的评估。最具代表性的研究是 Akiyama, Fajfar, Bertero 等人采用不同阻尼模型,考虑多种不同恢复力滞回模型的影响,并采用多种不同的地震地面运动记录作为输入所进行的分析。Akiyama 的研究表明^[14],单质点弹塑性体系的地震总输入能量与相应的弹性体系的总输入能量近似相等,因此他建议对单质点体系采用两折线形式的总输入能量谱。但他的研究没从设计应用的角度去考虑问题,而仅仅通过能量谱的比较来说明能量分析在抗震设计中的重要意义。Fajfar 和 Bertero 的研究重点分析了滞回耗能在结构总耗能中的比例和在结构层间的分布规律^{[15][16][17][18]}。而要得到能够用于抗震设计和评估结构破坏的结构滞回耗能谱的一个关键问题是要分析清楚结构的破坏状态与滞回耗能之间的关系,而这是一个主要依靠结构试验或大量的地震害数据积累才能解决的非常复杂的问题。

3 结 语

20 多年来,众多学者相继对结构非线性地震反应进行了大量的研究,提出了许多有益的见解。但是,目前对于弹塑性反应谱的研究成果还主要只能提供一些抗震设计的概念以及对结构破坏与地震地面运动特性和结构动力参数及特性之间的关系的认识。就目前国际国内对地震动及其结构反应的研究现状来看,还不可能比较可靠地给出指定场地的地面运动时程,也不可能对量大而面广的各种结构物进行比较细致的弹塑性动力时程反应分析。工程抗震设计中还主要依赖于简化的分析方法,因此,弹塑性反应谱的研究仍然有其重要的工程意义。但要提出具有统计意义,且能全面反映地震动特性(包括震幅、频谱及持时)以及结构的非线性动力特性,并能适用于设计的弹塑性反应谱,就必须对结构的破坏状态与最大位移和累积耗能之间的关系有较为全面的认识,通过大量试验和震害积累而建立起比较符合实际并能得到认可的破坏准则,这需要大量的工作积累才能完成,这就是目前制约弹塑性反应谱的研究向着更加深入和实用化的方向发展的关键,也是今后一段时间抗震研究者所应重视的研究课题。

参 考 文 献

- [1] 建筑抗震设计规范[S](GBJ11-89)
- [2] R.W. 克拉夫, J. 彭津著. 结构动力学[M]. 北京:科学出版社,1981
- [3] A.S.Veletsos, N.M.Newmark. Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motion, 2WCEE[M], 1960
- [4] Housner, G.W., Limit design of structures to resist earthquakes, Proc. of first World Conf. on Earthquake Engrg., Berkeley, CA[C], 1956
- [5] Housner, G.W., Behavior of structures during Earthquakes, J. of the Engrg. Mech. Div., ASCE[J], 1959, 85(4)
- [6] N.M.Newmark, W.J.Hall, A Rational Approach of Seismic Design Standars for structures, 5WCEE[M], 1975
- [7] N.M.Newmark, 高耸结构的地震分析和设计的新趋势. 地震工程学(中译本)[M], 北京:科学出版社, 1978
- [8] N.M.Newmark, Earthquake Resistant Design and ATC Provisions, Proc. 3rd CCEE[J], 1979, 1: 609 ~ 651
- [9] 王前信,等. 弹塑性反应谱. 地震工程研究报告集[R], 第二集, 北京:科学出版社, 1965
- [10] 陈 聃. 抗震结构的延性谱. 清华大学抗震抗爆工程研究报告集[R], 清华大学出版社, 1980
- [11] Chen Dan. Ductility Spectra and Collapse Spectra for Earthquake Resistant Structures, Proc. 7th European Conference on Earthquake Engineering[M], 1982
- [12] 韦承基. 弹塑性结构的位移比谱[J]. 建筑结构学报, 1986, 4(1)
- [13] Cheng Minxian, Chen Dan. Residual strength spectra for Earthquake Resistant Structures, Proc. Int. Conference on De

- sign. Construction and Repair of Building Structures in Earthquake Zones[M], 1987
- [14] Akiyama, H. Earthquake limit-state design for Buildings[M], University of Tokyo Press, 1985
- [15] Fajfar, P., Vidic, T., and Fischinger, M., Seismic demand in medium and long-Period Structures, Earthquake engng. and Struct. dyn[J], 1989, 18
- [16] Bertero, V. V., Uang, C. M., Issues and future directions in the use of an energy approach for seismic-resistant design of structures, Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings, Ed. by P. Fajfar, and H. Krawinkler, Elsevier Applied Science[M], 1992
- [17] Peter Fajfar, Tomag Vidic, Consistent Inelastic Design Spectra: Hysteretic and Input Energy, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1994, 23
- [18] Y. H. Chai, P. Fajfar, Formulation of duration-dependent inelastic seismic design spectrum, Journal of Structural Engineering[J], 1998

A Review and Analysis of Seismic Response Spectra of Elastic-Plastic Structures

XIAO Ming-kui YAN Tao WANG Yao-wei LAI Ming
(Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University, 400045 China)

Abstract The research on seismic response spectra of Elastic-Plastic structures has gained a lot of useful results with the development of the research on seismic response of elastic-plastic structures. This paper discusses the various kinds of elastic-plastic response spectra and points out the key problem which must be solved for their use in seismic design.

Key Words earthquake; elastic-plastic structure; response spectra

(上接第 81 页)

A Generalized P. Bhattacharya and N. P. Mukherjee Theorem

FU Shilu¹ ZHANG Lin-hua² WU Chuan-zhi¹

(1. Dept. of Fundamental Sciences, Logistics Engineering College, 400016, China; 2 Dept. of Fundamental Sciences, Chongqing Jianzhu University, 400045, China)

Abstract Let G be a group of odd order. In this paper, by the definition of $S_*(G)$, a sufficient condition for supersolvability is given, thus the P. Bhattacharya and N. P. Mukherjee Theorem is extended.

Key Words maximal subgroup; cyclic group; supersolvable group