

## 非线性静力分析需求谱建立方法的两点改进

朱星平

(江西省修水县建筑设计院, 江西 修水 332400)

摘要: 非线性静力分析是对结构在罕遇地震作用下进行弹塑性变形分析的一种方法, 目前广泛应用于结构的抗震性能评估中. 非线性静力分析的研究目前有若干分析方法, 这些方法在结构能力曲线建立的方法上是相同的, 即首先建立力-位移曲线, 然后转化为承载力谱, 但是在需求曲线的建立上各有不同. 通过介绍几种典型的非线性静力分析需求谱建立方法, 指出其和原有的需求谱建立方法的不同和改进之处.

关键词: 非线性静力分析; 需求谱; 高振型; 改进能力谱方法

中图分类号: TU311.3; O322

文献标识码: A

目前对结构抗震性能评估的方法主要采用非线性静力分析(Pushover)结合能力谱法, 其主要优点是: 能够确定结构在罕遇地震下潜在的破坏机制, 找到最先破坏的薄弱环节, 从而使设计者仅对局部薄弱环节进行修复和加强, 不改变整体结构的性能, 就能使整体结构达到预定的使用功能. 非线性静力分析的研究目前有若干分析方法, 这些方法在结构能力曲线建立的方法上是相同的, 即首先建立力-位移曲线, 然后转化为承载力谱, 但是在需求曲线的建立上各有不同. ATC-40<sup>[1]</sup>的需求曲线采用等效高阻尼弹性反应谱, Chopra<sup>[2]</sup>在其研究报告中提出了改进的能力谱法, 采用弹塑性反应谱代替等效高阻尼弹性反应谱.

下面介绍非线性静力分析需求谱建立方法两点改进:

(1) 在能力谱分析方法中考虑高振型特性的影响. 能力谱分析方法是一种拟动力弹塑性分析方法. 文献[3]认为由于能力谱分析方法是以结构的基本振型为计算依据, 因此结构的高振型特性无法体现, 因而得到的结果具有一定的误差.

(2) 采用等强度延性谱来估计地震位移需求. 等延性强度需求谱和等强度延性需求谱是两种不同的弹塑性反应谱. 以往估计结构的目标位移, 一般采

用等延性强度需求谱的统计结果反推出结构的延性系数. 文献[4]认为直接采用等强度延性谱来估计地震位移需求, 更加方便、简单, 且计算精度也更高.

## 1 考虑高振型特性的影响

### 1.1 多自由度弹性体系高振型分析

多自由度体系在地震力作用下的振动反应可由公式(1)表示

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

结构振动广义坐标, 结构第  $n$  振型的振动可表示为

$$x_n(t) = \phi_n q_n(t) \quad (2)$$

其中:  $q_n(t)$  为广义坐标.

引入振型质量  $M_n = \{\phi\}_n^T [M] \{\phi\}_n$  和振型刚度  $K_n = \{\phi\}_n^T [K] \{\phi\}_n$  并利用(2)式对(1)式进行化简得到

$$\ddot{q}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = -\Gamma_n \ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

(3)式即为结构在与第  $n$  振型对应的惯性力分布作用下的单自由度振动反应. 其中  $\zeta_n$  为与第  $n$  振型对应的阻尼比,  $\Gamma_n$  为结构第  $n$  振型相对应的参与系数. 得

$$q_n(t) = \Gamma_n D_n(t) \quad (4)$$

$D(t)$  为结构第  $n$  振型的位移。

因此, 结构在高振型参与下的反应为

$$x(t) = \sum_{n=1}^N \Gamma_n \phi_n D_n(t) \quad (5)$$

### 1.2 多自由度弹塑性体系高振型影响

当结构进入塑性阶段, 结构各振型对整体反应的影响将不能采用振型分解反应谱法进行分析。

此情况下结构的动力响应方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + f_s(x, \text{sign}\dot{x}) = -M\ddot{u}_g(t) \quad (6)$$

$f_s(x, \text{sign}\dot{x})$  为结构的恢复力模型。

文献[3]采取弹性体系的方法对弹塑性体系的动力方程进行简化, 得到弹塑性体系第  $n$  振型的动力方程

$$\ddot{q}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n + \frac{F_{sn}}{M_n} = -\Gamma_n \ddot{u}_g(t) \quad (7)$$

其中

$$F_{sn} = F_{sn}(q_n, \text{sign}\dot{q}_n) = \phi_n^T f_s(x, \text{sign}\dot{x}) \quad (8)$$

$$M_n = \phi_n^T M \phi_n \quad (9)$$

由此可看出结构的恢复力与结构的各振型都相关。

### 1.3 能力谱方法中高振型影响分析

#### 1) 考虑高振型影响的能力谱分析一般步骤

引入高振型影响后, 结构能力谱方法的基本过程如下:

(1) 对结构进行振型分析, 求得结构的各阶周期与振型;

(2) 针对每一阶振型, 对结构分别进行能力谱分析, 得出结构的各振型分量值;

(3) 计算出结构能力谱分析的综合结果。

#### 2) 能力谱分析

从结构各振型的参与影响来分析, 随着阶数的增加, 各振型对结构动力反应的影响逐渐减小。结构的高阶振型主要控制结构的层间位移, 而结构的基本振型主要控制结构的顶点位移。正是这种原因, 使得在分析结构的层间位移时, 引入对高振型的考虑是十分必要的。文献[3]通过考虑高阶振型影响的结构能力谱分析方法, 对结构进行能力谱分析的结果表明: 对于层间位移, 如果结构在进行能力谱分析过程中只考虑了第 1 振型的影响, 那么结构的层间位移分析的结果误差是不可忽略的。由于考虑了结构高振型的影响, 层间位移分析结果和只考虑第 1 振型的结果相比会更大。对推覆分析的结果发现: 在高振型控制的推覆工况下, 结构也出现了屈服现象。

所以如果忽略这些振型, 将对结构的层间位移分析产生很大的影响。

## 2 采用等强度延性谱来估计地震位移需求

Chopra<sup>[2]</sup>在其研究报告中提出了改进的能力谱法, 采用弹塑性反应谱代替等效高阻尼弹性反应谱。目前常用的有等延性强度需求谱和等强度延性需求谱两种不同的弹塑性反应谱。以往估计结构的目标位移, 一般采用等延性强度需求谱的统计结果反推出结构的延性系数, 文献[4]采用等强度延性谱来估计地震位移。

### 2.1 改进能力谱法和弹塑性反应谱

改进能力谱法采用弹塑性反应谱作为需求曲线。一般采用的是等延性强度需求谱, 即强度折减系数  $R$  与延性系数  $\mu$ 、结构周期  $T$  之间的关系, 简称  $R-\mu-T$  关系。近 40 年来国外地震工程研究者对弹塑性反应谱的研究, 主要就是研究  $R-\mu-T$  关系。结构的强度折减系数定义为结构的弹性强度需求与屈服强度之比 (即  $R = F_e/F_y$ )。结构的延性系数定义为最大非弹性位移与屈服位移之比 (即  $\mu = D_{\max}/D_y$ )。改进能力谱法估计结构的最大位移需求要求采用已有的关系, 反求出延性系数的大小。许多学者根据不同的地面运动记录、滞回模型、场地条件提出了众多的  $R-\mu-T$  关系, 至今  $R-\mu-T$  关系还没有统一。所以在采用能力谱法估计结构的位移需求时, 存在选取何种  $R-\mu-T$  关系的问题。

### 2.2 延性谱与强度谱

结构的屈服强度和延性系数之间的关系, 不论是对以往的基于力的设计, 还是当前倡导的基于位移的设计都很重要。屈服强度和延性系数的关系可通过两种不同的弹塑性反应谱来体现。

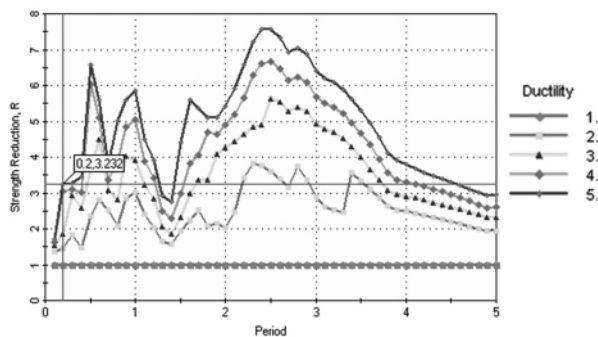


图 1 等延性强度谱

(1) 延性系数为预先设定的值, 通过动力时程迭代计算需求的强度折减系数, 从而可建立一簇延

性系数为固定值,强度折减系数为纵坐标,周期为横坐标的曲线,称为等延性强度需求谱,简称强度谱,如图1所示。由于以往的抗震设计都是基于力的设计,所以研究最多、应用最为广泛的是等延性强度需求谱,预先假定结构的延性系数(一般假定为4),从而根据强度谱可求出结构要达到预先指定的延性系数所必须满足的最小屈服强度值,如美国规范 UBC 就是采用的这一做法。

(2) 假定强度折减系数为预先设定的值,每个结构模型的延性需求值可由非线性时程分析得到,从而可建立一族强度折减系数为固定值,延性系数为纵坐标,周期为横坐标的曲线,称为等强度延性需求谱,简称延性谱,如图2所示。

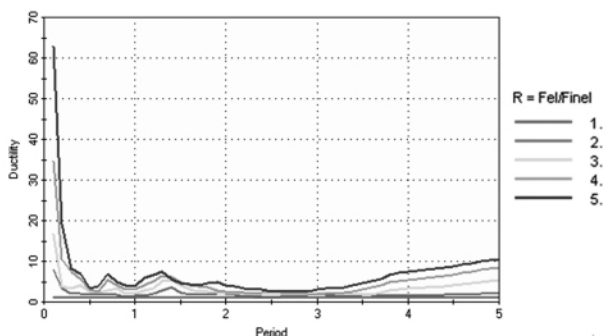


图2 等强度延性谱

强度谱和延性谱在概念上的区别取决于预先固定的是哪一个参数。强度谱固定的是延性系数,延性谱固定的是强度折减系数。从计算角度来讲,两者也存在很大区别。强度谱的计算复杂,需要迭代运算,使得计算出的延性系数与预先指定的延性系数比较接近,而延性谱的计算比较简单,只需把指定的屈服强度值代入动力方程,采用数值方法求解对应的延性系数。

改进能力谱法通过已有的  $R-\mu-T$  关系反求的大小,这个过程实际上是强度谱向延性谱转换。从理论上讲,强度谱和延性谱是可以互相转换的。曾经有些学者试图先计算出延性谱,再把延性谱转换为强度谱,以减少强度谱的计算量。但实际上,延性系数与强度折减系数  $R$  之间有可能不是单值关系,延性系数并不总是随着强度折减系数的增加而增加。

图3是周期为0.5的理想弹塑性单自由度体系在 WHITTIER-SAI TA(USC STATION 90075)地震观测站记录的1994年 Northridge 地震的东西方向分量的作用下,分别固定强度折减系数  $R$  求相应的延性系数  $\mu$  值和固定延性系数  $\mu$  求相应的强度折减系数  $R$  值时的结果比较,很明显在  $\mu=4.4 \sim 5.1$  的范

围内存在一个  $\mu$  值对应3个  $R$  值的情况。1991年, Miranda 在博士论文中指出由延性谱转换为强度谱可能会产生很大的误差。同样,如果由多条地震波平均的强度谱向平均延性谱转换也会不可避免地带来误差。当  $\mu$  较小时,这个误差不大,但随着  $\mu$  的增大,误差也逐渐增大,对于常见的为  $3.0 \sim 4.0$ ,误差甚至可达到20%左右。文献指出如果基于前述的  $R-\mu-T$  关系来预测弹塑性位移与弹性位移之比,一般会低估结构的目标位移,并建议采用比较保守的  $R-\mu-T$  关系,如 Vidic 等提出的关系式。基于此,认为如果直接采用延性谱来预测  $\mu$  值,计算出的目标位移会更加接近时程分析的结果。

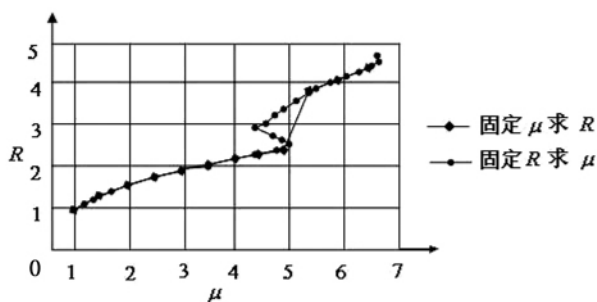


图3  $\mu$  和  $R$  的关系不唯一的情况

文献[4]通过算例分析表明:基于等强度延性谱估计出的结构目标位移与非线性动力时程分析得出的结果吻合较好。

### 3 展望

非线性静力分析需求谱的建立对于准确评估结构在罕遇地震作用下的工作性能起着重要作用,总结了需求谱建立的改进方法,得出结论如下:

(1) 改进的能力谱法,以弹塑性反应谱为基础,将结构转化为单自由度体系,主要反映的是结构第1周期的性质,引入高振型特性的分析结果表明其对层间位移的分析结果影响较大,应引入结构的高振型特性的影响。

(2) 改进的能力谱法,一般采用已有的关系来反求延性系数的大小,实际上是将强度谱向延性谱转换,而在这个转换过程中不可避免地会引入误差,故建议采用等强度延性谱作为需求曲线会更加准确。

改进的能力谱法,其根本还是以弹塑性反应谱为基础,弹塑性反应谱的建立是以1组周期变化的单自由度体系的最大反应建立的。目前随着性能设计理论的进展出现了采用结构的性

(下转第110页)

[17] 王运炎,叶尚川. 机械工程材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 232 - 240.

## Introduction of Fatigue Strength in Self - piercing Riveting

CHEN Xing - mao ,HUANG Zhi chao ,KANG Shao - wei

( Key Laboratory of Conveyance and Equipment ,East China Jiaotong University ,Ministry of Education ,Nanchang 330013 ,China)

**Abstract:** There is a lot of burr at the hole of self - piercing riveting joint ,so it is easy to enlarge the crack growth at this hole. The fatigue crack growth of self - piercing riveting is an important part that determines the fatigue life , crack propagation life of such link structure is even more important ,especially for defects of the self - piercing riveting. The main crack propagation of fatigue failure is at the surface of the self - piercing riveting hole. The paper analyzes that the main factors of fatigue strength in self - piercing riveting are mainly related to the performance of materials ,as well as the quality of the riveting point. This paper also reveals the fatigue mechanism of self - piercing riveting.

**Key words:** self - piercing riveting; microcrack; crack growth; fatigue strength

( 责任编辑: 王全金)

( 上接第 27 页) 能指标控制地震作用大小的基于性能设计的反应谱<sup>[5]</sup> ,是否可以采用基于性能设计的反应谱代替弹塑性反应谱建立需求谱还有待于进一步研究.

### 参考文献:

- [1] Applied Technology Council. ATC - 40 - Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings [R]. Calif: Applied Technology Council ,1996.
- [2] CHOPRA A K ,GOEL R K. Capacity - demand - diagram

methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: SDF systems [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engrg Res Ctr. University of California ,1999.

- [3] 王克峰,周云. 考虑高振型影响的结构层间位移能力谱分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25( 3): 33 - 40.
- [4] 易伟建,张海燕. 弹塑性反应谱的比较及其应用[J]. 湖南大学学报( 自然科学版), 2005, 32( 2): 42 - 45.
- [5] 陈贡联. 基于性能目标的反应谱研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2006.

## Two Improvements on Method of Nonlinear Static Analysis Demand Spectrum

ZHU Xing - ping

( Jiangxi Xiushui Architectural Design Institute ,Xiushui 332400 ,China)

**Abstract:** Nonlinear static analysis ,as a widely used seismic performance assessment method ,is used in elastic - plastic deformation analysis of structures under rare event of earthquake. Nonlinear static analysis has a number of current analytical methods ,which are the same in the establishment of structural capacity curve ,namely ,transfer the force - displacement curve into a capacity spectrum ,but different in the establishment of the demand curve. This paper introduces several typical nonlinear static analysis of establishing demand spectra methods ,and reveals the difference and improvement between it and original method for establishing demand spectra.

**Key words:** nonlinear static analysis; demand spectra; high modes; improved capacity spectrum method

( 责任编辑: 刘棉玲)