

基于位移模式的能力谱法结构抗震性能评估

顾荣蓉¹, 缪志伟²

(1. 金陵科技学院建筑科学院, 江苏 南京 210036; 2. 东南大学土木学院, 江苏 南京 210096)

摘 要:能力谱法是结构非线性静力分析的主要方法, 阐述了能力谱法的基本原理, 提出了基于位移模式的 Pushover 方法, 并用该方法计算结构的能力曲线; 分析了等效单自由度方法和等价线性化方法, 建立基于位移模式的等效单自由度体系, 基于位移模式对结构进行往复 Pushover 分析得到等效体系的参数, 对结构进行抗震性能评估, 并通过算例验证本文所提出方法的可靠性, 计算结果较好地反应了结构的非线性行为。

关键词:位移模式; 能力谱法; 等效单自由度体系; 等价线性化方法

中图分类号: TU318+1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)06-0790-05

基于结构性能的抗震设计理论经过十几年的发展已经被一些先进的规范和规程所采纳^[1-3]。建立简单的非线性方法确定结构的非线性行为是其发展的一种趋势。非线性静力分析(Pushover)方法作为计算结构非线性行为的一种方法在工程界已得到普遍应用, 其中能力谱法及改进的能力谱法是简化的非线性静力分析的主要方法。本文阐述了能力谱法的基本原理, 提出了基于位移模式的 Pushover 方法, 采用基于水平位移模式控制加载过程对结构进行 Pushover 分析得到的结构的能力曲线, 再根据等效单自由度方法将结构等效为单自由度体系, 由等价线性化方法将结构等价为弹性体系, 利用弹性反应谱得到结构的位移需求, 并以算例验证本文提出的方法的有效性。

1 能力谱法基本原理

能力谱法最初由 Freeman^[4]于 1975 年提出, 近几年, 有关研究人员对能力谱曲线以及需求谱曲线的确定进行了许多改进^[5-8], 该方法是一种利用结构能力曲线和需求谱曲线的图形对比, 直观地评价结构在地震作用下的性能的方法。其实施步骤为:

(1) 由 Pushover 分析得到基底剪力 V_b -顶点位移 U_n 曲线, 经等效转换为谱加速度 S_a -谱位移 S_d 能力曲线, 转换公式:

$$S_a = \frac{V_b}{M_1^*}, \quad S_d = \frac{U_n}{\gamma_1 X_{n1}} \quad (1)$$

式中: γ_1 、 M_1^* 为结构第一振型参与系数和广义质量。

$$\gamma_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i X_{i1})}{\sum_{i=1}^n (m_i X_{i1}^2)}, \quad M_1^* = \frac{[\sum_{i=1}^n (m_i X_{i1})]^2}{\sum_{i=1}^n (m_i X_{i1}^2)} \quad (2)$$

式中: m_i 为结构第 i 层的质量; X_{i1} 为第一振型下第 i 层质点的振幅; n 为楼层数。

(2) 建立需求谱曲线, 需求谱分为弹性和弹塑性两种需求谱。对于弹性需求谱, 我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001) 已经给出了弹性加速度设计反应谱曲线, 即规范中的地震影响系数 α 谱曲线。根据弹性体系动力方程, 在阻尼不是很大的情况下(阻尼比为 5%), 位移反应谱值 S_d 可近似由加速度值 S_a 按下式确定:

$$S_d(T) = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 S_a(T) \quad (3)$$

收稿日期: 2011-03-22 修改稿日期: 2011-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008078)

作者简介: 顾荣蓉(1982-), 女, 江苏盐城人, 博士研究生, 讲师, 主要从事结构动力学与抗震研究。

式中, T 为结构周期, 得到 $S_a(T)$ 和 $S_d(T)$ 关系曲线, 即为 AD 格式的需求谱曲线. 通过考虑等效阻尼比 ξ_{eq} , 建立强度折减系数 R 与延性系数 μ 的关系对弹性需求谱进行折减, 得到弹塑性需求谱. 关于确定 $R-\mu$ 关系的方法很多学者进行了研究, 文献[9-10] 有较详细的描述. 由于本文采用了等价线性化方法(见下文), 将弹塑性体系等价于弹性体系, 对应不同延性系数大小, 可以用不同阻尼比的线弹性单自由度体系的加速度谱表示.

(3) 将能力曲线和需求谱曲线在同一加速度—位移坐标系绘出, 则能力曲线与相应阻尼比或延性系数的需求谱曲线的交点即为地震反应点, 若能力曲线的极限点大于该地震反应点, 则认为结构的抗震性能满足要求.

2 基于水平位移模式的 Pushover 分析

2.1 基于水平位移模式的等效单自由度方法

结构的能力曲线是由 Pushover 分析方法得到的, 该方法的一个基本假定就是将实际结构的多自由度体系等效为单自由度体系^[11]. 这一等效过程是基于位移模式进行的, 这也说明了基于位移模式推覆分析的合理性. 多自由度体系在地震作用下的动力方程为:

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + \{F(y)\} = -[M]\{1\}\ddot{y}_0 \quad (4)$$

式中: $[M]$, $[C]$ 为结构质量和阻尼矩阵; $\{F(y)\}$ 为结构弹塑性恢复力; $\{y\}$ 为结构水平位移向量; 对于框架结构, 上式中的位移向量 $\{y\}$ 取楼层侧移. 设 $\{y\}$ 由结构顶点位移 y_t 和位移形状向量 $\{u\}$ 表示, $\{y\} = \{u\}y_t$, 其中 $\{u\}$ 即本文所研究的位移模式, 于是(4)式可写成:

$$[M]\{u\}\ddot{y}_t + [C]\{u\}\dot{y}_t + \{F(y)\} = -[M]\{1\}\ddot{y}_0 \quad (5)$$

上式两边乘以 $\{u\}^T$, 则推导可得等效单自由度体系的动力方程:

$$M_e\ddot{y}_e + C_e\dot{y}_e + F_e = -M_e\ddot{y}_0 \quad (6)$$

式中: $M_e = \{u\}^T[M]\{1\}$ 为等效质量; $y_e = \frac{\{u\}^T[M]\{u\}}{\{u\}^T[M]\{1\}}y_t$ 为等效位移; $C_e = \{u\}^T[C]\{u\} \frac{\{u\}^T[M]\{1\}}{\{u\}^T[M]\{u\}}$ 为等效阻尼; $F_e = \{u\}^T\{F(y)\}$ 为等效恢复力.

以上等效单自由度的推导过程是基于位移模式(即位移形状向量 $\{u\}$)进行的, 因此将基于位移模式的静力弹塑性分析结果用于等效单自由度, 在基于位移抗震设计在理论上更加合理.

2.2 水平位移模式的选取

水平位移模式是指, 以顶层水平侧移为基准得到的楼层水平位移分布形状. 文献[12] 研究了地震强度、地震波、结构的层数和跨度等因素对结构楼层位移的影响, 研究发现各种情况下结构的水平位移模式有较好的一致性, 本文的位移模式取结构前三振型的 SRSS 组合:

$$\{u\} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (X_{ij}\gamma_j)^2} \quad (j = 1, 2, 3) \quad (7)$$

基于水平位移模式的 Pushover 分析可以得到结构基底剪力—顶点位移关系、楼层剪力—层间位移关系以及各结构构件随顶点位移增加产生的弹塑性内力和变形的变化.

3 等价线性化方法

将等效单自由度体系进一步等价于弹性单自由度体系, 利用弹性反映谱来确定弹塑性反映需求. 为了便于理论分析, 需要对 Pushover 得到的能力曲线进行双折线简化, 根据能力曲线包围面积和双折线包围面积相等的原则进行简化. 双折线化的能力曲线进一步等价线性化, 在等价线性化方法中关键是要确定结构的等价刚度 K_e 和等价阻尼比 ξ_e , 这两个参数采用以下方法进行计算. 对于具有双线性的力—位移曲线(图1)的弹塑性单自由度体系, 初始周期为 T_0 , 屈服后刚度与初始刚度的比值为 β , 则可以得到等价周期与延性系数($\mu = d_p/d_y$)的关系:

$$T_e = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K_e}} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{1+\beta\mu-\beta}} = T_0\sqrt{\frac{\mu}{1+\beta\mu-\beta}} \quad (8)$$

等价阻尼比的确定方法是根据体系滞回特性利用弹塑性体系的滞回耗能与弹性体系的阻尼耗能相等的

原理. 于是可以得到等价阻尼比:

$$\xi_e = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{E_H}{E_s}$$

(9)

其中 E_H 为图 2 弹塑性体系的滞回环面积, $E_s = \frac{1}{2}K_e d_p^2$ 为体系的等价弹性势能. 本文基于位移模式对结构进行往复循环弹塑性分析得到结构的滞回模型, 按照上述等价线性化的方法等到结构的等价周期和等价阻尼比.

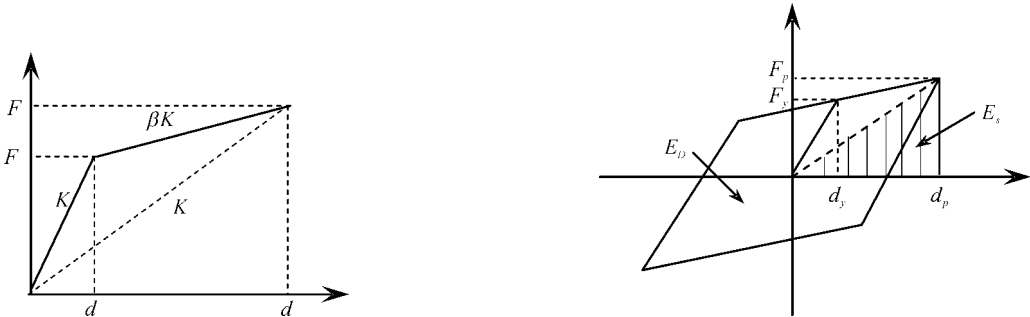


图 1 双线性的力-位移曲线

Fig. 1 Bilinear force-displacement curve

图 2 弹塑性体系的滞回环面积

Fig. 2 The hysteresis loop area of elastic-plastic system

4 算例分析

为了验证本文提出的基于位移模式的能力谱方法的准确性, 选取一栋八层钢筋混凝土框架结构进行计算分析, 平面尺寸如图 3, 梁、柱截面尺寸见表 1, 底层层高 4.5 m, 其余层高均为 3.6 m, 抗震设防烈度为 8 度, II 类场地土, 设计分组为第一组, 混凝土强度等级 C30, 楼板厚 100 mm, 楼面活载为 2 kN/m². 采用 PKPM 程序对该结构进行了配筋计算.

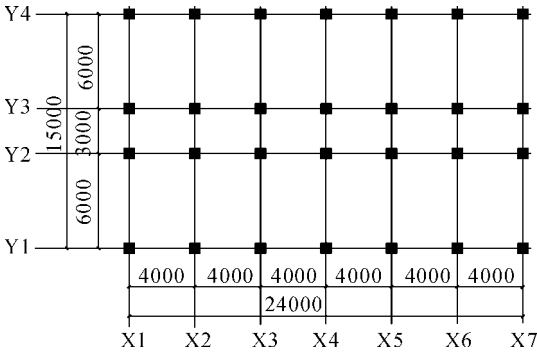


图 3 框架平面图(单位: mm)

Fig. 3 Frame plan (unit: mm)

表 1 框架梁、柱截面尺寸(单位: mm)

Tab. 1 Frame beam and column section size (unit: mm)

构件类别	楼层	
	1~4 层	5~8 层
柱	550×550	500×500
X1~X7 梁	250×400	250×400
Y1~Y2 梁	250×500	250×500
Y2~Y3 梁	250×300	250×300
Y3~Y4 梁	250×500	250×500

为了充分展示在罕遇地震作用下结构基底剪力-顶点位移关系, 根据《建筑抗震设计规范》5.5 条弹塑性层间侧移限值取 1/275, 结构顶点位移限值设定为 $H/100$ (H 结构总高度). 按前三振型 SRSS 组合求得结构的位移模式为 $\{u\} = \{1.955\ 5\ 0.874\ 5\ 0.752\ 3\ 0.593\ 8\ 0.422\ 4\ 0.252\ 5\ 0.106\ 1\}$, 按此位移模式对结构进行 Pushover 分析, 同时根据弹塑性层间侧移角限值 1/275 和顶点位移限值 $H/100$ 进行过程控制, 最终结构按层间侧移先达到限值 1/275, 此时对应的结构顶点位移为 $\Delta_u = 275\text{ mm}$. 按照 3.1 节的方法得到等效单自由度体系的能力曲线如图 4 所示, 再简化为双折线能力曲线. 图 5 为基于位移模式的循环往复推覆分析得到的等效单自由度的滞回曲线; 根据图 4 和图 5 按照等价线性化方法计算出不同延性系数对应的等价阻尼比. 等价线性体系的参数反应了结构的延性特征, 而结构的延性又与结构的位移有关, 所以在利用前述等效单自由度方法和等价线性化方法计算结构的目标位移需要根据不同的延性系数修正等价体系的参数, 表 2 给出了计算结果收敛时等价体系的参数. 根据弹性需求谱计算等价单自由度体系的位移需求为 0.207 m, 即结构的目标位移, 小于等效位移 0.214 m, 说明结构在

罕遇地震作用下的位移需求小于结构的位移变形能力,设计符合要求.

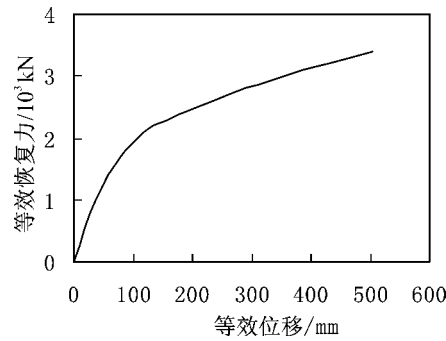


图 4 等效单自由度 Pushover 曲线
Fig. 4 Pushover curve of equivalent SDOF

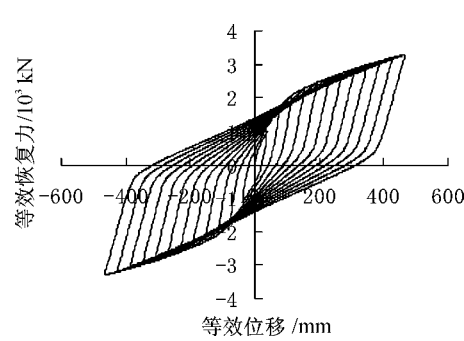


图 5 基于位移模式的往复 Pushover 滞回曲线
Fig. 5 Displacement-pattern-based hysteresis curve of reciprocating Pushover

表 2 等效体系的参数

Tab. 2 The parameters of the equivalent system

等效质量 M_e/kg	等效位移 Δ_{eu}/m	屈服强度 F_y/kN	初始刚度 $K_0/\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	屈服刚度系数 β
2 020.851 03	0.214	2 010.9	23 349.58	0.144
屈服位移/m	延性系数 μ	等价刚度 $K_e/\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	等价周期/s	等价阻尼比 h_e
0.086	2.5	11 717.65	2.41	0.27

图 6 给出了对应图 4 屈服时基于位移模式 Pushover 分析与时程分析框架构件塑性铰出现的情况. 由图 6 可以看出基于位移模式 Pushover 的方法能够很好的反应结构的破坏情况.

5 结 语

(1) 运用位移模式将结构等效为单自由度体系在理论上更加合理,基于位移模式的 Pushover 方法为计算结构的能力曲线提供了一种新的思路.

(2) 基于位移模式的 Pushover 的方法,与时程分析的计算结果比较相近,利用位移模式对结构进行 Pushover 分析能真实的反应结构在地震作用下的动力特征,结构构件的屈服破坏机制与时程动力分析的结果吻合的较好,能反应在地震作用下结构的非线性行为.

(3) 基于位移模式的能力谱方法仍需进一步的研究,如对于不同结构位移模式的确定、在等效单自由度方法和等价线性化方法中如何选取结构模型的参数从而减少等效和等价过程带来的误差,不同设防烈度和场地土对需求谱的影响等等.

参考文献 References

[1] SEAOC Vision 2000 Committee, Performance-based Seismic Engineering[R]. Report Prepared by Structural Engineering Association of California, Sacramento, California, U. S. A, 1995.

[2] ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings[R]. Applied Technology Council. Red Wood City, California, 1996.

[3] BERTEROV V. State-of-the-art Report on Design Criteria[C]. Proc. 11th World Conf . Earthquake Engineering. Mexico, Paper No. 2005.

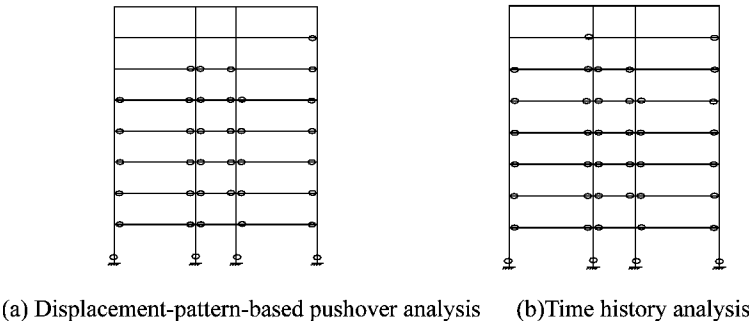


图 6 屈服时结构的塑性铰分布情况
Fig. 6 The distribution of plastic hinges of yielding structure

- [4] FREEMAN Sigmund A. Evaluations of Existing Buildings for Seismic Risk-A Case Study of Puget Sound Naval Shipyard Bremerton[C]. Washington Proceedings of the U. S. National Conference on Earthquake Engineers, EE-RI, Berkeley, 1975;113-122.
- [5] FREEMAN Sigmund A. Development and Use of Capacity Spectrum Method[C]. 6th U. S. National Conference on Earthquake Engineering, 1998.
- [6] FAJFAR Peter. Capacity Spectrum Method Based on Demand Spectra[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999,28;979-993.
- [7] 叶列平. 基于性能/位移的能力-需求曲线设计方法[J]. 工程抗震与加固改造, 2009,31(3):50-55.
YE Lie-ping. Capacity-Demand Curves Method for Performance/Displacement-based Seismic Design[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009,31(3):50-55.
- [8] 夏修身,王常峰. 钢筋混凝土桥墩基于性能的抗震设计研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2010,42(2):295-299.
XIA Xiu-shen, WANG Chang-feng. Performance-based aseismic design for RC bridge piers[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. :Natural Science Edition 2010,42(2):295-299.
- [9] 何浩祥,李宏男. 基于规范弹性反应谱建立需求谱的方法[J]. 世界地震工程, 2002,18(3):59-63.
HE Hao-xing, LI Hong-nan. A method for establishing demand spectra based on elastic spectra of seismic design code for buildings[J]. World Earthquake Engineering, 2002,18(3):59-63.
- [10] 王 威,孙景江. 基于改进能力谱方法的位移反应估计[J]. 地震工程与工程振动, 2003,23(6):37-43.
WANG Wei, SUN Jing-jiang. Estimation of Displacement Response Based on Improved Capacity Spectrum Method[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003,23(6):37-43.
- [11] 杨 溥,李英民,王亚勇,等. 结构静力弹塑性分析(Push-over)方法的改进[J]. 建筑结构学报, 2000,21(1):44-51.
YANG Pu, LI Ying-min, WANG Ya-yong, et al. A Study on Improvement of Push-over Analysis[J]. Journal of Building Structures. 2000,21(1):44-51.
- [12] 李 琪,顾荣蓉. 基于位移的抗震设计中位移模式的确定[J]. 扬州大学学报, 2005,8(2):65-69.
LI Qi, GU Rong-rong. Definition Method of Displacement-mode in Displacement-based Seismic Design[J]. Journal of Yangzhou University, 2005,8(2):65-69.

Assessment on structural performance by displacement-pattern-based capacity spectrum method

GU Rong-rong¹, MIAO Zhi-wei²

(1. Architectural Engineering Institute, Jinling Institute of Technology, Nanjing 210036, China;

2. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Capacity spectrum method is the primary method for nonlinear static analysis and the basic principles of this method are introduced in this paper. The displacement-pattern-based pushover method is proposed and the capacity curve of structure is obtained by this method. The equivalent single-degree-of-freedom method and equivalent linearization method is analyzed and MDOF system is converted into equivalent SDOF system. Based on the reciprocating pushover, equivalent system parameters are obtained and the seismic performance of the structure is evaluated. The displacement response of structure can be determinate by elastic demand spectrum. A practical example of frame structure is used to validate this methodology. The results can reflect the nonlinear behavior of the structure.

Key words: displacement-pattern; capacity spectrum method; equivalent single degree-of-freedom; equivalent linearization method

Biography: GU Rong-rong, Candidate for Ph. D., Nanjing 210036, P. R. China, Tel: 0086-18913805648, E-mail: gurr99@126.com