

文章编号: 1000-4750(2006)08-0069-05

多模态静力推覆分析及其在高层混合结构体系 抗震评估中的应用

沈蒲生, 龚胡广

(湖南大学土木学院, 长沙 410082)

摘 要: 在已有的研究基础上通过考虑多阶振型质量积的水平力分布形式下的推覆分析, 将结构推至每阶振型下的目标位移, 采用 SRSS 组合的方式得到结构的响应。对应每阶振型下推覆分析的目标位移采用弹塑性反应谱来计算。对一高层钢框架-混凝土核心筒混合结构在 7 度罕遇地震下抗震性能进行了评估, 结果显示, 多模态静力推覆分析所得的结构响应同非线性动力时程分析所得结果很接近, 尤其是在层间位移角及层间剪力这两个重要抗震指标上更为接近。

关键词: 混合结构; 多模态; pushover 分析; 弹塑性反应谱; 抗震评估

中图分类号: TU311.3; TU398 **文献标识码:** A

MULTI-MODE PUSHOVER ANALYSIS AND SEISMIC EVALUATION IN HYBRID STRUCTURES

*SHEN Pu-sheng, GONG Hu-guang

(Civil Engineering College, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: A multi-mode pushover analysis procedure is summarized and evaluated herein, which envelopes multi-mode shapes and uses SRSS combination to get the structural response. The target displacement of each mode in pushover analysis can be obtained with inelastic spectrums. A hybrid structure is used to evaluate numerically the accuracy of the proposed analysis procedure by comparing the push-over structural responses with the results of the nonlinear history analysis (NHA). It is demonstrated that the structural responses of the proposed pushover analysis are generally similar to the results from the NHA, especially in story drift and shear, which are the most critical index in earthquake resistant evaluation.

Key words: hybrid structure; multi-mode; pushover analysis; inelastic spectrum; earthquake resistant evaluation

近年来, 国内外的抗震规范逐渐由基于力控制的抗震思想转到关注基于位移(Displacement-Based Seismic Design, 简称 DBSD)和基于功能的抗震思想上来(Performance-Based Seismic Design, 简称 PBSD)。静力推覆分析亦称 pushover 分析作为一种替代非线性动力时程分析的非线性静力分析方法,

在基于位移、功能的抗震体系中有着重要的位置。美国 ATC-40 (Applied Technology Council)以及 FEMA273 和 274(Building Seismic Safety Council 1997)中对 pushover 分析方法都有详细的介绍^[1]。

静力推覆分析即 pushover 分析, 一般通过对结构施加单向水平力, 将结构推至一定的顶点位移即

收稿日期: 2004-12-06; 修改日期: 2005-05-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50378035)

作者简介: *沈蒲生(1939), 男, 江西新淦人, 教授, 博导, 主要从事混凝土基本理论及高层结构研究(E-mail: pssheng1@163.com);

龚胡广(1979), 男, 湖北黄冈人, 博士生, 主要从事高层抗震研究。

目标位移^[2,3]。目标位移的确定一般是先将结构(MDOF 体系)等效为相应的单自由度体系(SDOF), 其恢复力的骨架曲线通过 pushover 分析得到, 然后对等效单自由度体系进行动力时程分析, 得到最大位移响应, 即为目标位移。

静力推覆分析的目的一般不是得到对结构在特定的地震激励下的响应, 它通常是作为一种结构地震下的设计评估工具。对应这一目的, 地震输入一般由平滑弹性反应谱代替, 而不是一次单独的地震波记录。因此, 一般采用弹塑性反应谱的方法来得到结构的目标位移^[4]。

1 静力推覆分析及等效单自由度体系

静力推覆分析没有很严密的理论的基础, 一般是假定结构的地震响应与对应的单自由度体系的地震响应相关。这就表明结构的地震响应是由单一振型控制(一般为结构基本振型), 并且结构振型向量在整个地震反应中保持不变, 由此可以将多自由度体系的振动方程转化为单自由度体系的振动方程^[4]。

静力推覆分析中施加的单调增加的水平力可以看作是 MDOF 体系地震下的惯性力(有效地震作用), 其分布方式一般采用同结构的振型相关的形式, 如 FEMA 中采取的倒三角分布形式、均匀分布形式以及曲线分布形式。本文中采用的水平力列向量 \mathbf{P} 如下:

$$\mathbf{P} = p\mathbf{M}\boldsymbol{\phi} \quad (1)$$

式中, \mathbf{M} 为结构质量矩阵; 水平力的大小由 p 控制; $\boldsymbol{\phi}$ 为振型向量。

一般多自由度体系结构的振动方程如下:

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\phi}} + \mathbf{C}\dot{\boldsymbol{\phi}} + \mathbf{F} = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{X}_g \quad (2)$$

式中, \mathbf{M} 为结构质量矩阵; \mathbf{C} 为结构阻尼矩阵; \ddot{X}_g 为输入的地震波。

式(2)可写为如下形式^[4]:

$$m^*\ddot{u} + c^*\dot{u} + F^* = -m^*\ddot{X}_g \quad (3)$$

式中, m^* 、 c^* 、 F^* 为等效单自由度体系的质量、阻尼以及恢复力, 其表达式如下:

$$m^* = \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{M} \mathbf{1}; \quad c^* = \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\phi} \frac{\boldsymbol{\phi}^T \mathbf{M} \mathbf{1}}{\boldsymbol{\phi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}}; \quad F^* = \frac{V}{\gamma}; \quad u = \frac{q}{\gamma} \quad (4)$$

因此, 由静力推覆分析得到的基底剪力-顶点位移($V-q$)曲线可以转化为等效单自由度体系的恢复力骨架($F-u$)曲线, 如图 1 所示。

$$F_y^* = \frac{V_y}{\gamma}, \quad u_y = \frac{q_y}{\gamma} \quad (5)$$

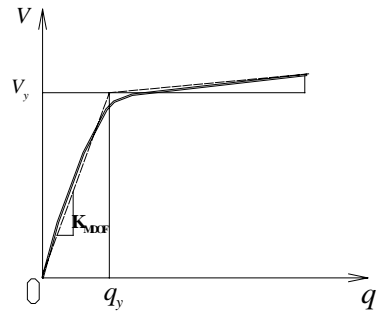


图 1 结构 pushover 分析的基底剪力与顶点位移关系

Fig.1 Base shear vs. roof displacement of pushover analysis

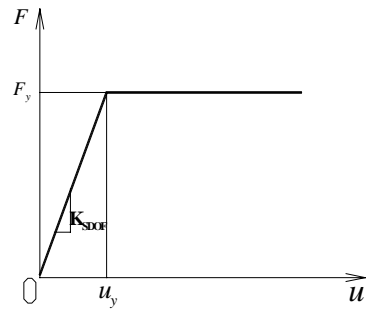


图 2 等效 SDOF 体系的恢复力关系

Fig.2 Restoring force of equivalent SDOF system

等效 SDOF 体系的基本周期为:

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{u_y m^*}{F_y}} \quad (6)$$

等效 SDOF 体系的弹性地震作用为:

$$F_{ela} = S_{ae}(T_{eq})m^* \quad (7)$$

式中, $S_{ae}(T_{eq})$ 为周期为 T_{eq} 的弹性谱加速度。弹性谱位移可以由下式计算:

$$S_{de} = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} \quad (8)$$

定义结构的屈服强度系数 R_y 为结构的弹性地震作用与弹塑性屈服力的比值, 则等效 SDOF 体系的屈服强度系数可写为:

$$R_y = \frac{F_{ela}}{F_y} = \frac{u_{ela}}{u_y} = \frac{S_{ae}(T_{eq})m^*}{F_y^*} \quad (9)$$

已有的研究表明, 知道结构的屈服强度系数 R_y 后, 可以通过弹塑性反应谱来计算结构的目标位移, 这在下一部分将有详细介绍。

当前的 Pushover 分析中, 目标位移(即顶点位移)的确定与结构振型向量的形状选择有关。已有的研究表明, 对于结构振动以基本振型为主的结构,

上述假定足够精确。但是对于振动受高阶振型影响较大的结构,则计算的目标位移偏于保守。为了考虑高阶振型的影响,Chopra 提出了模态推覆分析 (Modal Pushover Analysis, 即 MPA)^[5], Kunnath 等提出了采用自适应的加载方式的推覆分析 (Adaptive Pushover Analysis)^[6]。本文提出的多模态 pushover 分析基于以上假定,选取多阶振型向量(一般为前三阶),每阶振型向量对应的水平力列向量的分布形式同式(1),将结构推至对应每阶模态下的目标位移,得到对应每阶模态下的结构响应,并进行 SRSS 组合(平方和开方),得到结构的最终响应。每阶模态下的目标位移采用弹塑性反应谱进行计算。

2 弹塑性反应谱

弹塑性反应谱一般指弹塑性位移比谱,即 $u_{\text{inela}}/u_{\text{ela}}$, 为 SDOF 体系最大弹塑性位移与弹性位移的比值。对于延性系数可以被预估的结构,可以表示为结构延性系数 μ 和弹性周期 T 的函数。国内外在这方面做了大量的基础性工作,早在 1965 年, Veletsos 与 Newmark^[7]就提出了两种等效原则:等效位移原则,即 $u_{\text{inela}}/u_{\text{ela}}=1$; 等效应变能原则, $u_{\text{inela}}/u_{\text{ela}}=\mu/\sqrt{2\mu-1}$; 等效位移原则一般对于长周期结构体系成立,而对于中周期结构体系, Veletsos 与 Vann 推荐也采用等效位移原则^[8]。等效应变能原则则适用于短周期体系。近年来,随着静力推覆方法的推广,弹塑性反应谱得到了更深入的研究。如 Miranda^[9]、韦承基^[10]、肖明葵等^[11]分别针对美国 FEMA 规范下以及中国抗震规范,对弹塑性位移比谱进行了详细的研究,考虑了多种影响因素,得到回归公式。

对于结构屈服强度系数可以计算或估算的体系,弹塑性位移比可以表示为结构的屈服强度系数 R_y 、结构延性系数 μ 以及弹性周期 T 的函数^[9]:

$$\frac{u_{\text{inela}}}{u_{\text{ela}}} = \frac{u_{\text{inela}}}{u_y} \cdot \frac{u_y}{u_{\text{ela}}} = \frac{\mu}{R_y} \quad (10)$$

屈服强度系数 R_y 为结构弹性地震作用与结构弹塑性屈服力的比值,其经验公式很多,在文献[12]中有详细的论述。在本文中,笔者基于我国的抗震设计规范,对于一单位质量的理想弹塑性 SDOF 体系,其阻尼比按照高规规定的高层混合结构采用 0.04,考虑四种场地土条件,每种场地输入 50 条地震波记录(所有的地震波峰值加速度均归一为 220gal、400gal 以及 620gal),得到 7 度、8 度及 9

度罕遇地震下的均值 R_y 谱,对其拟合,得到以下公式:

$$R_y = 1.35(\mu-1)^{0.8} \frac{T}{T_g} + 1 \quad T \leq T_g \quad (11)$$

$$R_y = \mu \quad T > T_g$$

式中, T 为结构弹性周期, T_g 为场地特征周期。将式(11)代入式(10)中,可以得到弹塑性位移比谱的拟合公式如下:

$$\frac{u_{\text{inela}}}{u_{\text{ela}}} = \left[\frac{1}{\mu} + 1.35(\mu-1)^{0.8} \frac{T}{T_g} / \mu \right]^{-1} \quad T \leq T_g \quad (12)$$

$$\frac{u_{\text{inela}}}{u_{\text{ela}}} = 1 \quad T > T_g$$

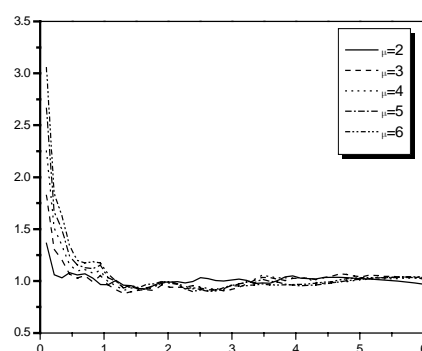


图 3 均值弹塑性位移比谱

Fig.3 Mean inelastic displacement ratio

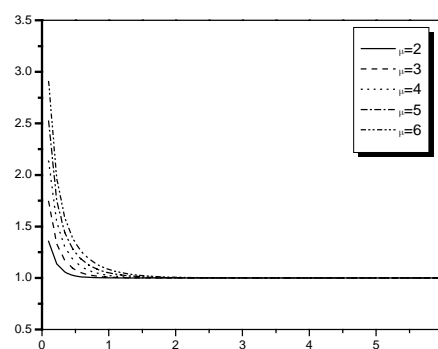


图 4 公式(12)拟合结果

Fig.4 Inelastic displacement ratio computed with equ. (12)

3 算例分析

某十二层外钢框架-内混凝土核心筒混合结构,平面尺寸及布置如下图所示,结构总高为 42m,1 层到 2 层层高为 4.5m,3 层到 12 层层高为 3.3m。外钢框架柱、梁均采用 H 型钢。梁采用 HN700×300,柱采用 HW400×400。芯筒为钢筋混凝土,墙厚为 200mm。外钢框架与混凝土核心筒之间采用两

端铰接, 楼板采用压型钢板上浇注混凝土。钢材采用 Q235, 混凝土为 C40。楼层质量分布为: 1 层~2 层为 $1.83 \times 10^5 \text{kg}$, 3 层~8 层为 $1.59 \times 10^5 \text{kg}$, 9 层为 $1.26 \times 10^5 \text{kg}$ 。

考察该结构在设计罕遇地震 7 度, 场地类别为 II 的情况下的结构抗震性能。

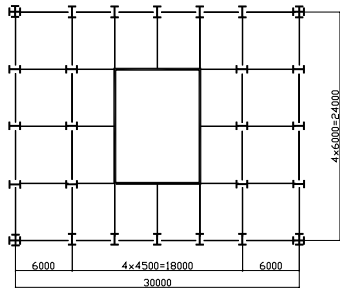


图 5 结构平面布置图

Fig.5 Plane view of the structure

选取 4 条 peer 强震记录进行非线性动力时程分析, 分别为 El-centro(NS)、Loma Prieta、Northridge 及 Morgan Hill, 峰值加速度均归一为 220gal。混合结构模型的简化可参见文献[13], 对于钢框架部分, 首先将空间结构简化成平面结构; 对于混凝土核心筒, 根据一定的等效原则等效为单片实体墙。非线性动力时程分析以及推覆分析均采用非线性静动力分析程序 IDARC2D。结构模态分析结果如下表。

表 1 结构模态分析结果

Table 1 Results of modal analysis

振型	周期/s	振型参与系数	振型参与质量/%
1	0.614	1.48	69.20
2	0.133	0.73	18.78
3	0.056	-0.38	6.30

前三阶振型所对应的等效单自由度体系(SDOF)的参数见表 2。

表 2 等效单自由度体系参数

Table 2 Parameters of the equivalent SDOF system

振型	m^*/kN	F_y^*/kN	u_y/mm	T_{eq}/s
1	8780.7	4045.4	47.6	0.645
2	4856.7	9035.6	8.4	0.135
3	3122.3	5992.8	11.8	0.157

等效单自由度体系(SDOF), 其阻尼比按照高规规定的高层混合结构采用 0.04, 采用抗震规范规定的弹性反应谱。对于一阶振型可知其弹性谱加速度 S_{ae} 为 0.39g, 由式(8)可知弹性谱位移 S_{de} 为 40.1mm。因为 $T_{eq} > T_g$, 所以采用等效位移原则, 对应的等效单自由度体系的塑性位移为 40.1mm。

由式(4)可知, 对应的多自由度体系的顶点位移(即推覆分析中的目标位移)为 $1.48 \times 40.1 = 59.3 \text{mm}$ 。同样的, 对应二阶振型时, 由弹性地震反应谱可知其弹性谱加速度 S_{ae} 为 0.54g, 由式(9)可计算出 R_y 为 3.9。由式(8)计算得弹性谱位移 S_{de} 为 2.4mm。因为 $T_{eq} < T_g$, 由式(11)反算出延性系数 μ 为 12.7。则由式(12)可得对应的等效单自由度体系的塑性位移为 7.9mm。由式(4)可知, 推覆分析的目标位移分别为 $0.73 \times 7.9 = 5.8 \text{mm}$ 。同样可求得对应三阶振型时, 推覆分析的目标位移为 3.0mm。

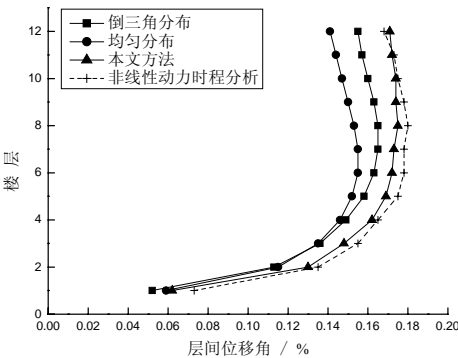


图 6 楼层层间位移角

Fig.6 Story drift

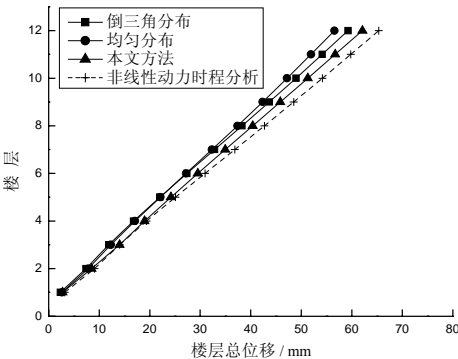


图 7 楼层总位移

Fig.7 Floor displacement

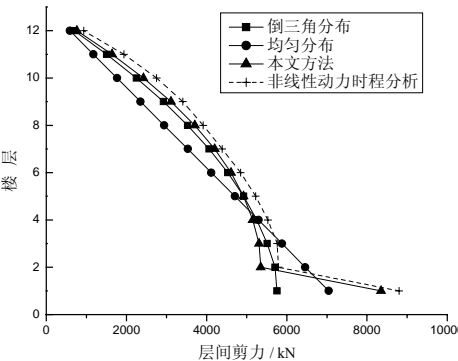


图 8 楼层层间剪力

Fig.8 Story shear

本文中非线性动力时程分析的结果为 4 条地震波下的均值响应。假定非线性动力时程分析的结果是“精确”的,同采用倒三角以及均匀分布的水平力分布形式的静力推覆分析相比,在楼层顶点位移方面,本文方法同非线性动力时程分析的结果相差 7%,倒三角与均匀分布推覆分析分别为 10.1%与 13.4%;在最大层间位移角方面,本文方法同非线性动力时程分析相差小于 4%,而倒三角及均匀分布的推覆分析误差均大于 10%;在层间剪力方面,本文方法同非线性动力时程分析的结果相比最大误差为 18%,而倒三角及均匀分布的推覆分析最大误差均超过 30%。由此可见,本文采用的多模态推覆分析(包含前三阶模态)的结果接近非线性动力时程分析的结果,尤其是在层间位移角以及层间剪力这两个重要的抗震指标的预测上,相较倒三角及均匀分布的推覆分析,多模态 pushover 分析更为接近非线性动力时程分析的结果。这是因为同一般采用不变的水平力分布形式的推覆分析相比,本文方法包含多阶模态下(一般为前三阶)的推覆分析,考虑了高阶振型的影响,因而在受高阶振型影响较为明显的层间位移角及层间剪力上有更好的近似。

4 结论

多模态静力推覆分析包含多阶振型质量积分布的推覆分析,通过 SRSS 组合(平方和开方)的形式来考虑高阶振型的影响。对应每阶振型推覆分析时,其目标位移通过弹塑性反应谱中的 $\mu-R_y-T$ 关系来计算。本文在已有研究的基础上,对应我国抗震规范,通过大量的地震波统计计算,分别得到四种场地土情况下的均值 R_y 谱,并进行了非线性拟合,得到了适用于工程应用的简化公式。

采用多模态静力推覆分析对一混合结构进行了七度罕遇地震下结构抗震性能的评估,结果显示,采用本文方法所得到的结构响应接近非线性动力时程分析的结果,尤其在对于控制结构破坏形式的层间位移角以及层间剪力这两个重要的抗震指标的预测上,相较一般倒三角分布的推覆分析而言,更为接近非线性动力时程分析的结果。

参考文献:

[1] Building Seismic Safety Council. NEHRP Guidelines for the Seismic Re-habilitation of Buildings [S]. FEMA 273, Federal Emergency Management Agency,

Washington DC, 1997.

- [2] 叶燎原, 潘文. 结构静力弹塑性分析(Push-over)的原理和计算实例[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 37~43.
Ye Liaoyuan, Pan Wen. The principles of nonlinear static analysis (push-over) and numerical examples [J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(1): 37~43. (in Chinese)
- [3] 杨溥, 李英民, 王亚勇, 赖明. 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): 44~50.
Yang Pu, Li Yingmin, Wang Yayong, Lai Ming. A study on improvement of pushover analysis [J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(1): 44~50. (in Chinese)
- [4] Krawinkler H, Seneviratna G D P K. Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation [J]. Engineering Structure, 1998, 20: 452~464.
- [5] Chopra A K, Goel A K. A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: theory and preliminary evaluation [R]. Report No. Peer-2001/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1999.
- [6] Gupta B, Kunnath S K. Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures [J]. Earthquake Spectra, 2000, 16(2): 367~391.
- [7] Veletsos A S, Newmark N M, Chepalati C V. Deformation spectra for elastic and elastoplastic systems subjected to ground shock and earthquake motion [C]. In: Proceedings of the 3rd World Conf. on Earthq. Engrg., New Zealand: Wellington, 1965, 2:663~682.
- [8] Veletsos A S, Vann W P. Response of ground-excited elastoplastic systems [J]. Journal of Structural Engineering Division, ASCE, 1971, 97(4): 1257~1281.
- [9] Miranda E. Inelastic displacement ratios for structures on firm sites [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2000, 126(10): 1150~1159.
- [10] 韦承基. 弹塑性结构的位移比谱[J]. 建筑结构学报, 1986, 4(1):40~48.
Wei Chengji. The response spectrum of displacement ratio for elasto-plastic structures [J]. Journal of Building Structures, 1986, 4(1): 40~48. (in Chinese)
- [11] 肖明葵, 王耀伟, 严涛, 赖明. 抗震结构的弹塑性位移谱[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(5): 34~40.
Xiao Mingkui, Wang Yaowei, Yan Tao, Lai Ming. The response spectrum of elasto-plastic displacement for structures subjected to seismic loadings [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2000, 22(5): 34~40. (in Chinese)
- [12] Miranda E, Bertero V. Evaluation of strength reduction factors for earthquake resistant design [J]. Earthquake Spectra, 1994, 10(2): 357~379.
- [13] 李国强, 姜丽人, 张晓光. 高层建筑钢-混凝土混合结构简化分析模型[J]. 建筑结构, 1999, (6): 12~13.
Li Guoqiang, Jiang Liren, Zhang Xiaoguang. A simple model for analysis of steel and concrete mixed structures of high-rise buildings [J]. Buildings Structure, 1999, (6): 12~13. (in Chinese)