维普资讯 http://www.cqvip.com

第29卷 第4期
2007年12月

西北地震学报
NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL

Vol. 29 No. 4
Dec., 2007

基于性能的框架结构抗震安全评估方法研究

张文明，高大峰，苏 军，王 华
（西安建筑科技大学土木工程学院，陕西 西安 710055）

摘 要：阐述了基于性能的地震反应静力非线性分析方法（Pushover法）的原理及实施步骤；利用结构有限元分析软件ETABS分别采用地震反应谱法、底部剪力法、Pushover法和动力时程分析法对一10层钢筋砼框架结构进行了抗震评估分析。结果表明Pushover法在整体层面和构件层面都能对结构的抗震性能做出很好的评估，对与算例类似的中底层结构是一种可靠实用的建筑结构抗震安全评估方法。

关键词：基于性能的抗震评估；Pushover法；框架结构；动力时程分析
中图分类号：TU352.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－0844(2007)04－0330－05

Research on Performance-based Seismic Evaluation Method of RC Frame Structures

ZHANG Wen-ming, GAO Da-feng, SU Jun, WANG Hua
(*School of Civil Eng., Xian Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China*)

Abstract: The principle and actualizing steps of nonlinear static procedure for performance-based seismic response (Pushover method) are expatiated, and it is applied to a example of 10 story RC frame structure. The results are compared with those from earthquake response spectrum method, equivalent base shear method and time history method. Its main calculation procedures are summarized by software of ETABS. It is shown that Pushover method can meet different ductility demands of existing structures which are similar to the example in performance-based seismic evaluation.

Key words: **Performance-based seismic evaluation; Pushover method; RC frame structures; Time history method**

0 引言

20世纪90年代美国学者提出了基于性能的建筑结构抗震安全评估方法。为了认识结构从弹性到弹塑性，逐渐开裂、损坏直至倒塌的全过程，进而寻求科学的措施来提高结构的抗震能力，需要对结构进行“小震”作用下的弹性分析和“大震”作用下的弹塑性分析。

一般而言，用动力时程分析法分析建筑物在强烈地面运动下的地震反应与破坏现象较为理想，但由于地震的随机性、结构性能的复杂性以及这种方法前后数据处理工作的繁冗，对专业理论水平要求高，限制了其在工程实践中的运用。

静力非线性分析方法（Nonlinear Static Procedure），也称Pushover法，是近年来兴起的一种基于性能评估结构抗震性能的有力工具。它既准确有效，又操作简单，便于应用于工程实践[1]。一些著名的结构分析软件如：ETABS、SAP2000和MIDAS等都特别增加了Pushover分析的功能[2]。Pushover分析虽然在我国抗震规范中有所提及，但目前工程界应用该方法尚处于起步阶段，因此有必要对其工程应用作进一步的探讨。

收稿日期：2007-04-22
基金项目：西安市科技攻关计划社会发展项目（GG05071）
作者简介：张文明（1981—），男（汉族），河南太康人，硕士研究生，主要从事防灾减灾及防护工程的研究.

维普资讯 http://www.cqvip.com

本文利用结构有限元分析软件 ETABS，采用 Pushover 法对一 10 层钢筋砼框架结构进行了抗震评估分析，并与动力时程分析法和传统静力线性分析方法（地震反应谱法和底部剪力法）所得结果进行了对比分析，得到了一些有价值的数据和结论。

1　Pushover 法的基本原理和实施步骤

1.1　Pushover 法的基本原理

Pushover 法是结构分析模型受到一个由工程人员定义的侧向荷载来模拟原结构所受到的地震水平作用，且不断增大侧向作用，直到控制点达到目标位移或建筑物倾覆为止。追踪得到荷载－位移曲线（又称 Pushover 曲线），与弹塑性反应谱曲线相结合进行图解，得到的一种对结构抗震性能快速评估的方法[1,4]。

Pushover 法的基本思路就是：将实际结构等效为一单自由度体系，研究其地震弹塑性反应，反推实际结构的地震弹塑性反应的控制指标（如顶点位移），最终获得实际结构地震弹塑性反应的全貌[5]。

1.2　Pushover 法的实施[2,4]

它的基本工作可分为三个部分：①建立侧向荷载作用下的结构荷载－位移曲线图；②对侧向荷载作用和结构反应进行转换处理；③对结构抗震能力进行评估。

1.2.1　侧向荷载作用下结构荷载－位移曲线图的建立步骤

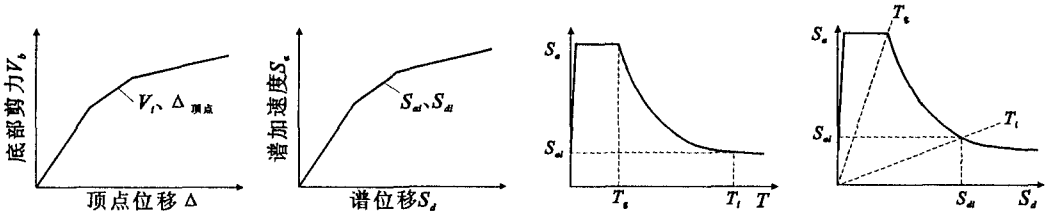
（1）确定结构计算分析模型；

（2）对结构模型施加竖向荷载（一般为重力荷载），然后施加某种水平荷载，使一个或者一批构件进入屈服状态；

（3）对于上一步进入屈服的构件，改变其状态，形成一个“新”的结构，修改结构的刚度矩阵，在其上施加一定量的水平荷载，又使一个或一批构件进入屈服状态；

（4）不断重复上一步，直到结构达到所规定的极限位移或形成机构破坏。在此过程中可记录到各级荷载下的结构反应值，并得到结构的屈服机制、塑性铰分布及出现顺序；

（5）确定荷载－位移曲线，如图 1(a)所示，表示了侧向总剪力同结构顶点侧向位移的关系。



(a) 荷载-位移曲线图　(b) 能力谱曲线图　(c) 标准加速度反应谱　(d) 结构需求谱

图 1　承载力谱转换和反应谱转换

Fig. 1　Translation of capacity spectrum and that of capacity response spectrum.

1.2.2　外作用和结构反应的转换处理

通过 Pushover 分析得到荷载－位移曲线后，其外作用（地震需求）和结构反应（结构的承载能力）要经过转换处理，才能将图上某一点的位移确定为“目标位移”与规范规定的容许变形来做比较，以评估结构的抗震能力。这一步骤的实质就是将结构由多自由度体系的地震反应转化为一个等价的单自由度体系的地震反应。处理的方法主要有“承载力谱法”和“目标位移法”两种。

（1）承载力谱法

这是美国应用技术协会文件《混凝土建筑结构抗震评估和修复》（ATC－40）推荐的方法。其基本思想是建立两条相同基准的谱线：一条是由荷载－位移曲线转化成的用谱加速度－谱位移表示的结构能力谱曲线，如图 1(b)所示；另一条是由地震动输入得到的标准加速度反应谱（如图 1(c)所示）转化成的用谱加速度－谱位移表示的结构需求谱曲线（亦称 ADRS 谱线），如图 1(d)所示。然后将两条线放在同一坐标系下，它们的交点定为“目标位移点”或“结构抗震性能点”。

（2）目标位移法

这是美国联邦紧急救援署文件 FEMA－273 中所推荐的方法。它是在 Pushover 分析时用一组修正系数，修正结构在“有效刚度”时的位移值，以估计结构顶层的非线性最大期望位移，该位移即为“目标位移”。

1.2.3　结构抗震能力的评估

可以通过如下三种方法进行结构抗震能力评

维普资讯 http://www.cqvip.com

估：

(1) 用规范规定的容许层间位移角，检验结构承载力曲线上对应于层剪力的位移角是否符合要求；

(2) 用层承载力曲线相应的恢复力模型，按时程分析校核非线性层间变形是否符合规范限值要求；

(3) 建立能力谱和需求谱，然后将两条线放在同一坐标系下，得出目标位移，同规范规定的位移容许值比较，检验是否满足弹塑性变形验算要求。

2 分析算例

2.1 工程概况

某十层钢筋砼框架结构办公楼，设防烈度为Ⅶ度，Ⅲ类场地，设计地震分组为第二组；底层层高4.3 m，其余各层层高均为3.3 m；柱面尺寸：一、二层Y向中柱700 mm×700 mm，其余均为600 mm×600 mm；横向框架梁截面尺寸300 mm×700 mm；梁板柱均现浇，C30砼；Y向三柱的实际配筋为左柱14F25，一至二层中柱14F25，三至十层中柱12F25，右柱12F25；屋面及楼面荷载按抗震要求组合后分别为4.73 kN/m² 和5.25 kN/m²；女儿墙总重402 kN，每层隔墙重1 009 kN。结构的标准层平面图如图2所示。

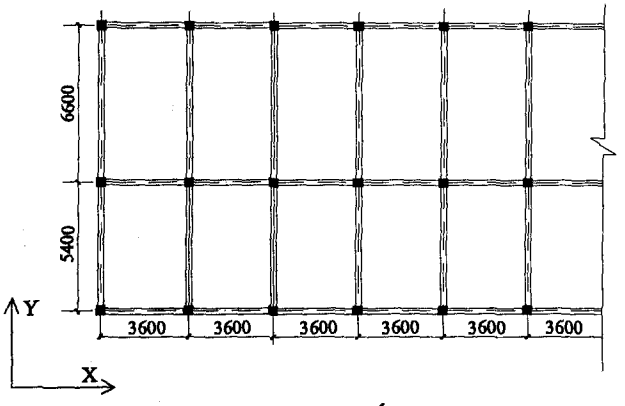


图2 标准层结构布置图

Fig. 2 Layout of the structure of the typical floor.

2.2 结构分析模型

本文采用空间杆系模型(楼板采用膜单元，如图3所示)对算例进行有限元分析，模型假定薄壁杆件在受力变形过程中其截面的形状始终保持不变，不发生剪滞和畸变两种变形形式；可经受大位移、小应变。

表1给出了结构在多遇及罕遇地震作用下各计算方法所得的各楼层Y向最大层间位移角。

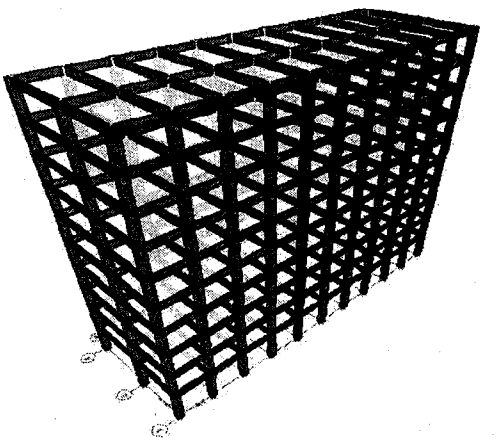


图3 有限元分析模型

Fig. 3 Finite element analysis model.

2.3 传统静力线性分析

分别用底部剪力法和地震反应谱法对结构响应进行分析。地震反应谱法考虑双向水平地震作用；振型组合采用CQC组合方式；方向组合采取修正的SRSS中国规范。表1给出了相关分析数据。由分析结果可知，在多遇地震作用下此结构的不利方向是Y向，最大层间位移角$[\theta e]_{max}=1/1133<1/550$，变形符合规范要求。另根据能量虚功图可知，底层柱梁及变截面边柱处的能量值较大，调整这些杆件的刚度对控制侧移将比较有效。这些数据和结论可作为下面时程分析及静力弹塑性分析结果的参考。

2.4 *Pushover* 分析[6-7]

2.4.1 侧向力分布形式

在pushover分析中侧向分布力模式是一个重要的因素。理论上我们所定义的侧向荷载的分布方式应既能反映出地震作用下各结构层惯性力的分布特征，又应使所求得的位移能大体真实地反映地震作用下结构的位移状况。但事实上任何一种荷载分布方式都将使得和该加载方式相似的振型作用得到加强，而忽略其他振型的作用；而且在强地震作用下结构进入弹塑性状态，结构的自振周期和惯性力大小及分布方式也因之变化，因此楼层惯性力的分布不可能用一种分布方式来反映。

为保证计算结果的有效性，本文用两种不同的侧向荷载分布方式分别进行pushover分析。第一种是均匀加速度分布(对应PUSH1)，用均一的加速度和相应质量分布的乘积获得；第二种分布方式是振型荷载分布(对应PUSH2)，用给定的振型和该振型下的圆频率的平方及相应质量分布的乘积获

维普资讯 http://www.cqvip.com

表 1　结构在多遇及罕遇地震作用下各计算方法所得的各楼层 Y 向最大层间位移角

楼层		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
多遇地震作用下反应分析	底部剪力法	1/3441	1/2401	1/1869	1/1564	1/1373	1/1249	1/1169	1/1133	1/1227	1/1718
	反应谱法	1/4065	1/2649	1/1996	1/1654	1/1449	1/1313	1/1216	1/1159	1/1232	1/1701
	HIST1	1/4949	1/3933	1/3293	1/3312	1/3567	1/3138	1/3000	1/2693	1/2779	1/3831
	HIST2	1/5491	1/3532	1/2709	1/2380	1/2304	1/2158	1/2033	1/2035	1/2296	1/3285
	HIST3	1/7150	1/4583	1/3622	1/3187	1/2922	1/2695	1/2496	1/2444	1/2572	1/3437
	PUSH1	1/5076	1/3356	1/2564	1/2045	1/1709	1/1460	1/1271	1/1138	1/1143	1/1538
	PUSH2	1/5650	1/3300	1/2315	1/1792	1/1486	1/1287	1/1163	1/1100	1/1187	1/1669
罕遇地震作用下反应分析	HIST4	1/950	1/628	1/526	1/529	1/570	1/501	1/479	1/430	1/444	1/612
	HIST5	1/872	1/561	1/430	1/378	1/366	1/343	1/323	1/324	1/365	1/522
	HIST6	1/1137	1/729	1/576	1/507	1/465	1/429	1/397	1/389	1/409	1/547
	PUSH1	1/3144	1/2041	1/1471	1/1031	1/692	1/476	1/357	1/304	1/320	1/552
	PUSH2	1/3175	1/1894	1/1247	1/806	1/523	1/373	1/305	1/290	1/338	1/620

得。两个分析工况都是从重力工况的结束处开始。

2.4.2　计算结果与分析

图 4 模拟了结构在侧向总剪力作用下由线性进入非线性，经过失稳点直至倒塌的结构变形损坏的全过程，从中可得到结构的“小震不坏”控制点、“大震不倒”控制点及结构的失稳点所对应的顶层位移和基底剪力值。图 5 给出了 Y 向结构在性能点处（PUSH1，罕遇地震作用下）的塑性铰分布，二层及三层框架梁塑性铰区出现了弯曲裂缝，无永久变形，承载力完好。图 6 给出了不同侧向力分布方式下的需求谱与能力谱族曲线图。在 Etabs 中，Pushover 曲线由程序自动计算所得，并转化为能力谱曲线，它们从整体上反映了结构抵抗水平力的能力；需求谱曲线由我国规范采用的标准加速度反应谱转化而来，它们反应了在一定地震作用下结构的地震响应。

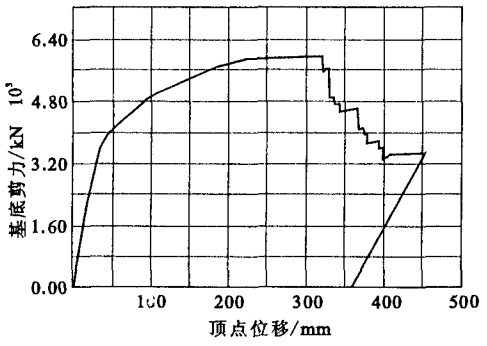


图4　基底剪力—顶点位移曲线图（PUSH1 工况下）

Fig. 4　Chart of total shear force-displacement of the top poin.

结合结构的变形及出铰顺序可以看出：

PUSH1：推覆方向为沿 Y 向，结构出铰顺序为：底层的横梁→邻近楼层横梁→底层边柱，最后变截面处的横梁首先失去承载力，结构损坏，所以在结构使用过程中要对这些构件加以关注。

PUSH2：结构的出铰顺序为：底层及变截面处的横梁→邻近楼层横梁→底层边柱→四层横梁，最后变截面处横梁失去承载力，结构破坏。

从图 6 及表 1 中的数据分析可得结构在多遇地震作用下完好无损，没有塑性现象出现；在罕遇地震作用下结构部分构件进入塑性。从塑性铰的出现顺序可以看出，本结构满足强柱弱梁的设计要求，结构底层的边柱及三层变截面处的横梁需要加以特别注意甚至加固。

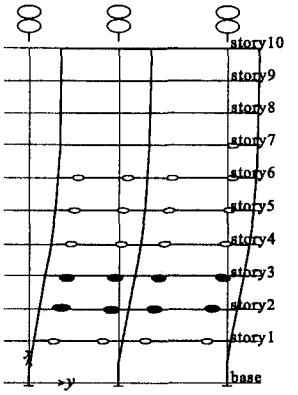


图 5　性能点处的塑性铰分布

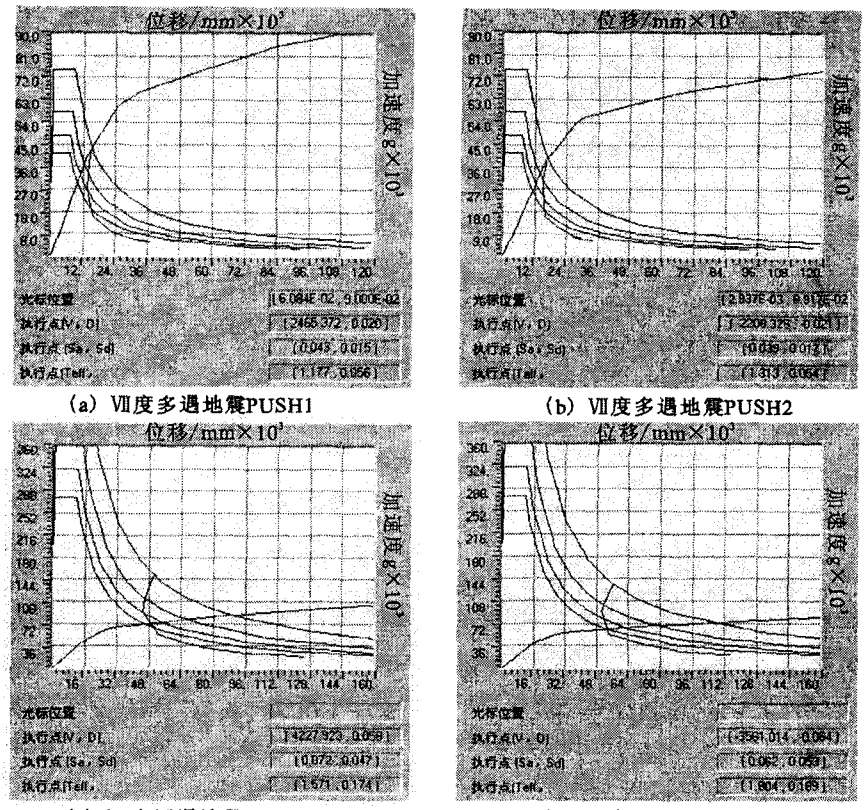
Fig. 5　Distribution of plastic hinges at different point.

2.5　弹性及弹塑性动力时程分析

为进一步研究结构的动力特性，对此结构进行弹性和弹塑性动力时程分析。选取适合Ⅲ类场地的地震波：PEL_HOLLYWOOD STORAGE 波、EMC_FAIRVIEW AVE 波及 LWD_DEL AMO BLVD 波，其中弹性时程 HIST1、HIST2、HIST3，弹塑性时程 HIST4、HIST5、HIST6。

各楼层最大层间位移角如表 1 所示，多遇地震下 $[\theta e]_{max}=1/2033<1/550$；罕遇地震下 $[\theta e]_{max}=1/323<1/50$。由分析可知，结构在多遇及罕遇地震作用下变形均符合规范要求，不会倒塌破坏，最大层间位移角在第三层，薄弱层为底层和三层。

维普资讯 http://www.cqvip.com



(a) Ⅶ度多遇地震PUSH1　(b) Ⅶ度多遇地震PUSH2

(c) Ⅶ度罕遇地震PUSH1　(d) Ⅶ度罕遇地震PUSH2

图6 需求谱与能力谱曲线

Fig. 6 ADRS and Bearing capacity spectrums.

3 结语

通过上述计算分析，可得出如下结论：

(1) 四种计算方法分析结果一致：结构在7度多遇及罕遇地震作用下是安全的，结构的薄弱层为三层变截面处以及底层，在使用过程中应加以关注。

(2) 相对于传统静力线性分析方法，Pushover法可以较全面地了解结构的内力和变形特征、塑性铰的出现顺序和位置、结构的薄弱部位及可能的破坏机制。

(3) 相对于动力时程分析法，Pushover法在很多方面都能达到同样的效果，并且能大大减少计算工作量，分析结果更为稳定。

(4) 由Pushover法得出的层间位移与弹塑性动力时程分析所得结果相比下层较大，上层较小。究其原因，可能是对算例这种中低层框架结构在PUSH1和PUSH2两种侧向分布荷载作用下，所得到的结构的能力曲线与结构的实际能力曲线相比下层较小，上层较大。对这种情况，毛建猛、谢礼立等曾在文献[8]中对一低层框架的能力曲线和实际能力曲线作了对比分析。具体原因有待进一步研究。

(5) Pushover法能有效地预测梁的破坏情况，但对柱的破坏情况估计不足，需要非线性动力方法加以对比考虑。

[参考文献]

[1] A M Mwafy, A S Elnashai. Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings[J]. Engineering structures, 2001, 23(1):407-424.

[2] 北京金土木软件技术有限公司，中国建筑标准设计研究院. ETABS中文版使用指南[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2004.

[3] 建筑抗震设计规范(GB 50011－2001)(S). 北京：中国建筑工业出版社，2001.

[4] 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):37-51.

[5] 汪大绥，贺军利，张凤新. 静力弹塑性分析(Pushover Analysis)的基本原理和计算实例[J]. 世界地震工程，2004, 20(1):45-53.

[6] 汪梦甫，王锐. 基于位移的结构静力弹塑性分析方法的研究[J]. 地震工程与工程振动，2006, 26(5):73-80.

[7] 朱建华，沈蒲生. 基于能量原理的钢筋混凝土框架结构层间弹塑性位移求解[J]. 工程抗震与加固改造，2005, 27(5):1-4.

[8] 毛建猛，谢礼立，翟长海. 模态pushover分析方法的研究和改进[J]. 地震工程与工程振动，2006, 26(6):50-55.