钢筋混凝土框架结构侧向倒塌地震易损性分析

吕大刚,于晓辉,陈志恒

(哈尔滨工业大学 土木工程学院,150090 哈尔滨,ludagang@hit.edu.cn)

摘 要: 为研究钢筋混凝土框架结构在地震作用下的侧向倒塌易损性,采用多地震动增量动力分析方法,用FEMA准则和结构有限元计算失稳作为结构侧向倒塌能力点的确定准则,分析得到一栋5层3跨钢筋混凝土框架结构的侧向倒塌易损性曲线.结果表明:FEMA准则对结构侧向倒塌定义偏于保守.在大震作用下,结构倒塌风险较小.

关键词: 地震易损性;侧向倒塌;倒塌易损性;增量动力分析

中图分类号: TB318 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)06-0001-05

Lateral seismic collapse fragility analysis of RC frame structures

LÜ Da-gang, YU Xiao-hui, CHEN Zhi-heng

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, ludagang@hit.edu.cn)

Abstract: To study the lateral seismic collapse fragility of RC frame structures, multi-record incremental dynamic analysis method is utilized to get the lateral seismic collapse fragility curves of a three-bay and five-storey RC frame building, in which the FEMA-rule and computational non-convergence are taken as a rule of lateral collapse of structures. The results demonstrate that the FEMA-rule is conservative to determine lateral collapse. Under the major earthquake, the structural collapse risk is limited.

Key words: seismic fragility; lateral collapse; collapse fragility; incremental dynamic analysis

控制和预测结构在地震作用下的倒塌是结构设计和评定工作的核心目标.因此,有必要对结构在地震作用下发生倒塌这一动力失稳问题进行深入研究.由于影响结构地震倒塌的因素众多,且涉及大量不确定性因素,因此倒塌易损性分析成为结构倒塌预测的有效手段.

结构倒塌可以分为竖向(连续)倒塌和侧向(增量)倒塌2种.其中,竖向倒塌是由于结构中某一构件由于丧失承载能力退出工作,而引起的结构连续倒塌;侧向倒塌则是由于结构侧向塑性变形过大而引起的侧向承载力丧失.结构在地震作用下的倒塌过程可视为2类倒塌的相继发生,即:在地震作用下,结构逐渐出现较大的塑性变形,当某一构件的损伤过大,随即退出工作,进入结构竖向倒塌过程.

侧向倒塌作为结构地震倒塌过程的第一阶段,是预测和控制结构发生倒塌的关键.作为一种动力分析方法,IDA方法可有效解决结构侧向倒塌问题.IDA思想早在1977年就由Bertero[1]提出,2000年被美国联邦紧急事务署(Federal Emergence Management Agency, FEMA)推荐条例FEMA350[2]采用,并作为结构侧向倒塌能力分析的重要方法予以推荐,被广泛应用于结构侧向倒塌易损性分析.Zareian和Krawinkler[3-4]同时考虑地震动不确定性和模型不确定性,进行了地震倒塌易损性研究.Liel等[5]在地震倒塌易损性研究中,同时考虑了地震动不确定性和结构不确定性.叶列平和陆新征等[6-7]仅考虑地震动不确定性,利用结构侧向倒塌易损性曲线,采用倒塌储备系数作为评价指标,对结构抗倒塌能力及其影响因素进行了研究.

收稿日期: 2010-04-23.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(90715021);国家自然科学基金资助项目(50978080);地震行业科研专项基金资助项目(200808073).

作者简介: 吕大刚(1970—),男,教授,博士生导师.

本文以一栋5层3跨钢筋混凝土框架结构为例进行侧向倒塌地震易损性分析. 选择60条地震动作为输入,以记录对记录(Record – to – record, RTR)的形式考虑地震动的不确定性. 基于IDA方法,分别采用FEMA准则和有限元计算失稳作为倒塌能力点的确定原则,分析得到结构侧向倒塌易损性曲线.

1 侧向倒塌能力点的确定准则

IDA曲线反应了地震动强度参数(Intensity Measure, IM)与结构破坏(反应)参数(Damage Measure, DM)之间的关系. 在IDA分析中应保证所选用 *IM* 具有单调性,如:峰值加速度(PGA)和谱加速度(S_a)等参数; *DM* 应能较好地表征结构的性能,如:承载力、变形以及损伤等参数.

文献[8]提出了确定结构侧向倒塌能力点的基本原则:以结构发生动力失稳处的 *IM* 或 *DM* 量值作为结构侧向倒塌能力点. 根据定义侧向倒塌点的参数不同,结构侧向倒塌有3种定义准则:DM准则、IM准则和IM-DM准则.

DM准则是以 *DM* 量值 C_{DM} 定义结构侧向倒塌能力点,当 $DM \geqslant C_{DM}$ 时,结构发生倒塌,如图1所示. 我国抗震规范[9]对不同形式结构的塑性极限给出了相应的最大层间位移角限值,可视为采用DM准则进行结构侧向倒塌定义. 由于结构侧向倒塌为动力失稳问题,其主要特征为:在微小外部激励增长下,结构反应无限增大. 因此,图1出现了同一 C_{DM} 对应IDA曲线中多个极限点的情况.

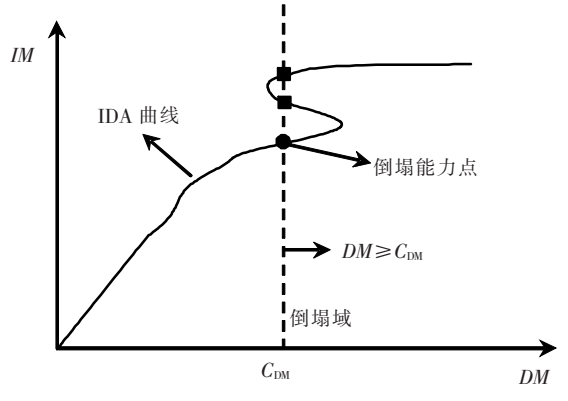


图1 DM准则确定倒塌能力点

IM准则是用 *IM* 量值 C_{IM} 作为结构侧向倒塌能力点,当 $IM \geqslant C_{IM}$ 时,结构发生倒塌,如图2所示. IM准则更能描述结构倒塌的特点,如:可采用IDA曲线的平台段起始点对应的 *IM* 值作为 C_{IM}. 然而采用IM准则定义结构的侧向倒塌会出现倒塌点处的 *DM* 过大的情况. 因此,综合考虑 *IM* 和 *DM* 的两种测度的IM-DM混合准则是定义结构侧向倒塌点的较好方法,即:当 $IM \geqslant C_{IM}$ 或 $DM \geqslant C_{DM}$ 时,结构发生倒塌. 基于IDA曲线,FEMA350[2]建议:当切线刚度退化成初始刚度的20%,或最大层间位移角超过10%时,定义为结构侧向倒塌. FEMA原则实际采用的是IM-DM混合原则,如图3所示.

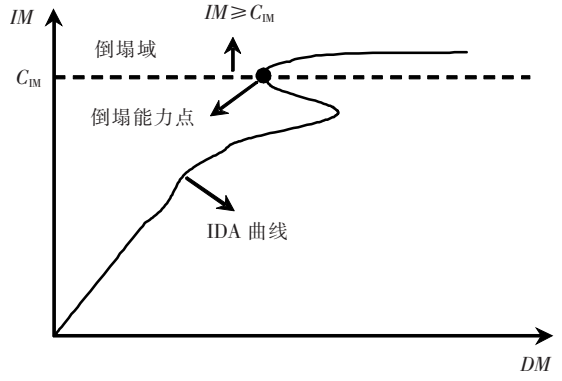


图2 IM准则确定倒塌能力点

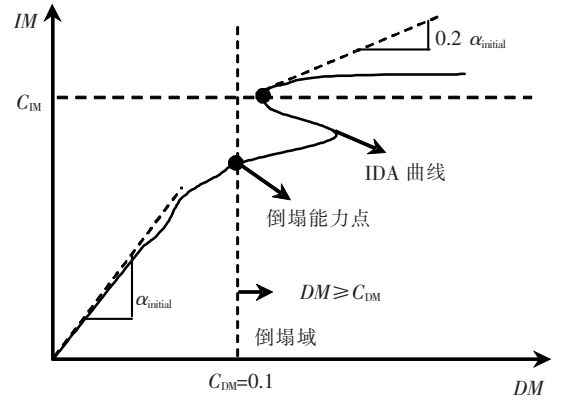


图3 FEMA准则(IM-DM原则)确定倒塌能力点

本文基于IM原则,曾提出一种“折半取中”方法,通过逼近结构有限元计算失稳点来定义结构侧向倒塌[10]. 文献[8]提出了IDA分析中确定调幅系数的Hunt & Fill原则. 其中,Hunt的过程是进行侧向倒塌点的搜索阶段;Fill的过程是为了保证IDA曲线的光滑,对IDA曲线中间距较大的两点进行补充分析. 本文作者基于OpenSees[11]平台,实现了Hunt & Fill过程,如图4所示. 为了保证搜索得到的侧向倒塌点具有更高的可信度和稳定性,采用多种求解法则循环进行非线性动力方程的求解,包括:Newton法则、改进的Newton法则以及Broyden法则. 若3种法则均无法使有限元分析收敛,则以当前状态为结构动力失稳,以该点对应的 *IM* 量值作为侧向倒塌能力点. 为进行对比分析,本文同时采用FEMA350采用的IM – DM原则进行侧向倒塌的确定.

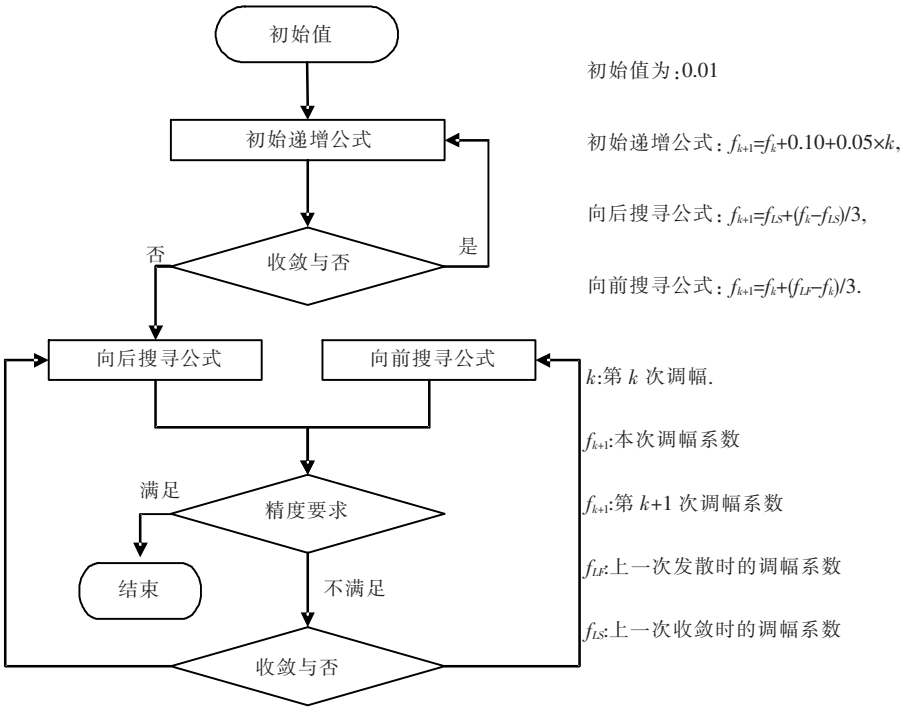


图 4　Hunt & Fill 的分析流程

2　结构侧向倒塌地震易损性

地震动选择的不同会造成结构 IDA 分析结果的较大差异,这体现了地震动不确定性对 IDA 分析结果的影响. 因此,在结构侧向倒塌研究中,常常考虑地震动的不确定性,采用侧向倒塌易损性作为描述结构抗倒塌能力的工具. 研究表明[8]:采用谱加速度 S_a 作为 *IM* 可以有效地刻画结构侧向倒塌,并减少地震动不确定性对 IDA 分析结果的影响.

结构侧向倒塌易损性表征的是结构在不同地震动强度下,发生侧向倒塌的失效概率: $P[\text{Collapse}\mid S_a=x]$. 文献[3-4]采用对数正态分布函数对结构侧向倒塌易损性进行研究.

$$P[\text{Collapse}\mid S_a=x]=\Phi\left(\frac{\ln(x/m_R)}{\beta_R}\right). \quad (1)$$

式中 m_R 和 β_R 为易损性函数参数.

本文采用统计的方法进行结构侧向倒塌地震易损性分析.

$$P[\text{Collapse}\mid S_a=x]=\sum_{i=1}^{N}a_i/N, \quad (2)$$

$$a_i=\begin{cases}0, x<C_{S_a}^i;\\ 1, x\geqslant C_{S_a}^i.\end{cases} \quad (3)$$

式中: N_x 为 $S_a=x$ 时,有限元分析的次数. 本文仅考虑地震动的不确定性,则 N_x 等于地震动记录的条数 N; $C_{Sa}^i(i=1,\cdots,N)$ 为基于每一地震动 IDA 分析的结构侧向倒塌点.

采用统计的方法进行结构侧向倒塌易损性分析,可采用如下步骤:

1) 从地震动记录数据库中(例如 PEER 的数据库)选择 N 条地震动记录;

2) 建立结构的非线性有限元模型;

3) 对结构进行 N 次 IDA 分析,确定相应的 N 个倒塌能力点 $C_{Sa}^i(i=1,2,\cdots,N)$;

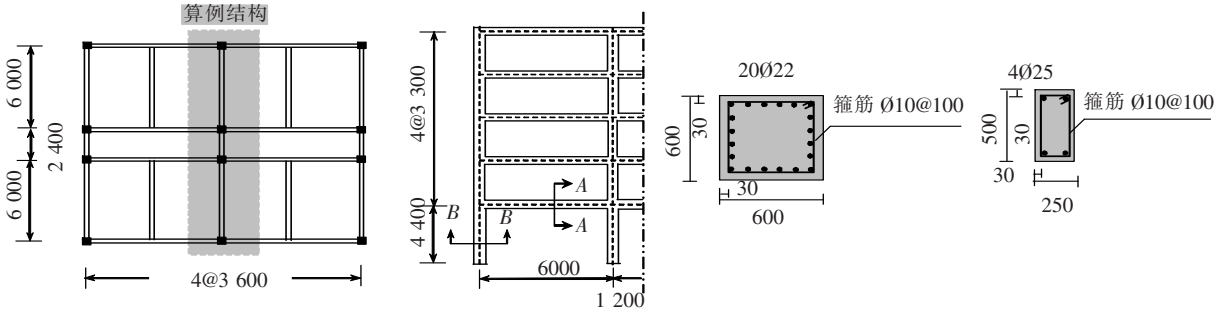
4) 按式(2)确定结构倒塌概率 $P[\text{Collapse}\mid S_a=x]$;

5) 在合理的范围内增量式地遍取 $S_a=x$,获取结构侧向倒塌概率的离散数据点;

6) 利用步骤(5)中获得的离散数据点,采用最小二乘法或极大似然法对式(1)进行拟合,并估计倒塌易损性函数参数 m_R 和 β_R.

3　算例分析

5 层 3 跨钢筋混凝土框架结构,8 度设防,设计基本加速度为 0.2 g,场地土为Ⅱ类. 结构平面布置、立面尺寸及典型梁柱截面配筋情况,见图 5. 基于 OpenSees 分析平台,梁和柱采用基于位移的非线性纤维梁-柱单元模拟. 混凝土采用 Concrete01 材料,钢筋采用 Steel02 材料. 综合考虑计算精度和效率,梁构件设置 5 个积分点,柱构件设置 10 个积分点. 柱截面考虑纵向钢筋和箍筋对核心混凝土的轴向承载能力的加强,采用 Mander 约束混凝土本构模型对核心混凝土进行模拟[12].



(a)结构平面布置　(b)结构立面布置　(c)$A-A$ 截面配筋　(d)$B-B$ 截面配筋

图5　算例结构平面和立面布置及典型梁柱配筋（mm）

考虑场地类型与地震动分组，根据地震动特征周期选取了60条距离震中10 km以上的地震，地震动列表见文献[13]. 选取结构第一周期对应的谱加速度为 IM，分析得到60条IDA曲线. 基于FEMA原则，确定60个结构倒塌能力点，见图6. 基于Hunt & Fill原则逼近结构有限元分析发散点，确定60个结构倒塌能力点，见图7.

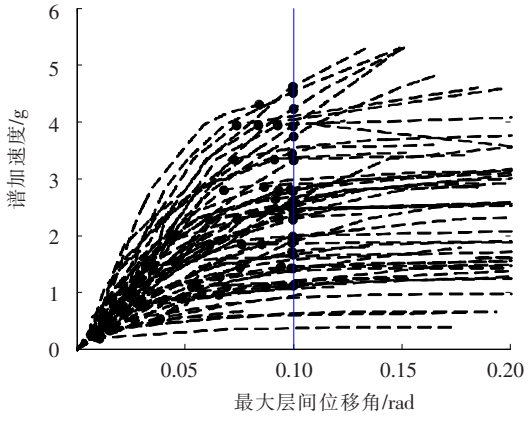


图6　基于FEMA原则的侧向倒塌能力点

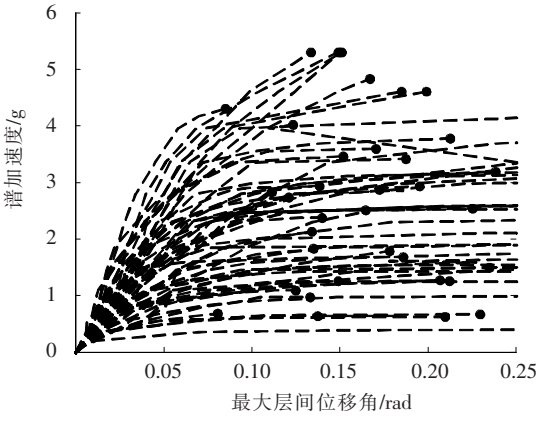


图7　基于有限元分析失稳原则的侧向倒塌能力点

从图6可见，当钢筋混凝土结构达到这些控制点时，IDA曲线已经呈现出较为明显的水平段，说明采用FEMA原则进行结构侧向倒塌能力点的确定，可以较好地表征结构侧向倒塌的动力失稳特性.

利用式(2)得到了结构基于不同准则的倒塌易损性数据点，进一步采用最小二乘法对这些离散点进行式(1)的拟合，获得连续的侧向倒塌易损性曲线，如图8所示.

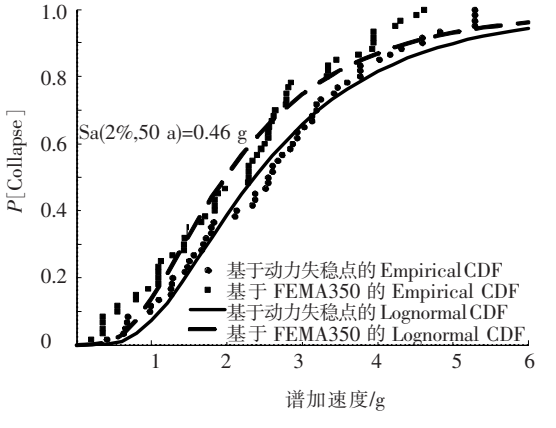


图8　结构侧向倒塌易损性曲线

由图8可见，当结构采用FEMA原则确定倒塌能力点时，结构倒塌能力中位值 $m_R = 1.90$ g，对数标准差为 $\beta_R = 0.64$ g，结构在大震作用下(Sa(2%,50 a))发生倒塌的概率为1.32%. 当采用计算发散点作为控制准则时，结构的倒塌能力中位值 $m_R = 2.32$ g，对数标准差为 $\beta_R = 0.60$ g，罕遇地震水平下结构发生倒塌的概率为0.35%. 由此可知：

1）基于FEMA的确定结构侧向倒塌能力点的方法相对保守，可较为有效地对结构的侧向倒塌风险进行控制；

2）我国规范的大震作用下，结构发生倒塌的风险较小. 按其进行结构设计，可有效地控制结构侧向倒塌风险，但不能完全释放结构抵抗倒塌的能力，会造成结构设计的浪费.

4　结　语

以一栋 5 层 3 跨钢筋混凝土框架结构为例进行侧向倒塌易损性分析. 选择 60 条远场 II 类场地的地震动作为输入,分别采用 FEMA 倒塌能力点确定原则,和基于有限元计算失稳的倒塌能力点确定原则,分析得到结构的侧向倒塌地震易损性曲线. 研究表明:结构侧向倒塌易损性可有效刻画结构在不同强度地震动作用下,发生倒塌的危险. FEMA350 和我国规范对倒塌能力点的确定原则均相对保守,可较为有效地对结构的侧向倒塌风险进行控制,但无法完全释放结构抵抗倒塌的能力.

参考文献:

[1] BERTERO V V. Stength and deformation capacities of buildings under extreme environments [C]//PISTER K S. Structural Engineering and Structural Mechanics. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 1977: 211 – 255.

[2] Federal Emergency Management Agency. Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings, FEMA350 [R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2000.

[3] ZAREIAN F. Simplified performance-based earthquake engineering [D]. San Francisco: Stanford University, 2006.

[4] ZAREIAN F, KRAWINKLER H. Assessment of probability of collapse and design for collapse safety [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(13): 1901 – 1914.

[5] LIEL A B, HASELTON C B, DEIERLEIN G G, *et al.* Incorporating modeling uncertainties in the assessment of seismic collapse risk of buildings [J]. Structural Safety, 2009, 31(2): 197 – 211.

[6] 陆新征,叶列平. 基于 IDA 的结构抗地震倒塌能力研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(1): 13 – 18.

[7] 唐代远,陆新征,叶列平,等. 柱轴压比对我国 RC 框架结构抗地震倒塌能力的影响[C]//北京市建筑设计研究院. 第十二届高层建筑抗震技术交流会论文集. 北京: 中国建筑学会抗震防灾分会, 高层建筑抗震专业委员会, 2009: 35 – 45.

[8] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491 – 514.

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

[10] 吕大刚,于晓辉,王光远. 基于单地震动记录 IDA 方法的结构倒塌分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(6): 33 – 39.

[11] MCKENNA F, FENVES G L, SCOTT M H. Open system for earthquake engineering simulation [R]. University of California at Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2008.

[12] MANDER J B, PRIESTLEY M J, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. ASCE/Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804 – 1826.

[13] 陈志恒. 钢筋混凝土框架结构的倒塌失效模式、风险与鲁棒性分析 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.

(编辑　赵丽莹)