

文章编号: 1000-4750(2010)Sup.I-0068-05

烈度指标函数对 IDA 曲线离散性的影响

*杨 成^{1,2}, 潘 毅^{1,2}, 赵世春^{1,2}, 李彤梅^{1,2}, 李英民³

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川, 成都 610031; 2. 抗震工程技术四川省重点实验室, 四川, 成都 610031;

3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400050)

摘 要: 利用 SPO 非线性分析得出了结构基本周期随地震作用逐渐变大而延长的基本规律, 并得出了增量动力分析中结构随地震作用提高渐进的软化及损伤过程, 提出了渐变的增量动力分析 IM 函数。经与弹性反应谱和 Cordova 双参数模型比较, 使用该函数作为烈度指标对 IDA 曲线收敛有一定提高。研究结果可应用于基于非线性地震响应分析的结构抗震性能评估。

关键词: 地震工程学; 非线性分析; 增量动力分析; 地震响应; 反应谱

中图分类号: TU973⁺.31 **文献标识码:** A

EFFECT OF SEISMIC INTENSITY MEASURE FUNCTION TO THE IDA CURVES DISPERSION

*YANG Cheng^{1,2}, PAN Yi^{1,2}, ZHAO Shi-chun^{1,2}, LI Tong-mei^{1,2}, LI Ying-min³

(1. School of Civil Engineering, South West Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Key laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610031, China;

3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400050)

Abstract: The inelastic lengthening rule of the fundamental period of a structure due to its softening under the enlarging of earthquake forces is derived by SPO. The structural asymptotical softening and damage along the IM increasing in IDA are analyzed. An asymptotical IM function for IDA was presented. The comparison between the elastic spectrum and Cordova's two-parameter models show that the asymptotical IM function can improve the convergence of IDA curves. All the improvements and results from these researches are available for the aseismic performance evaluation of a building, which was based on nonlinear seismic response analysis.

Key words: seismic engineering; nonlinear analysis; increment dynamic analysis; seismic response; response spectrum

增量动力分析(Increment Dynamic Analysis, 简称 IDA)采用将一条地震动幅值按比例逐级放大, 对同一结构进行多次非线性时程分析, 提取结构在各单次时程分析中的最大反应数据, 然后在以烈度指

标(Intensity Measure, 简称 IM)和损伤指标(Damage Measure, 简称 DM)分别为横坐标、纵坐标的图上按地震动放大顺序描点连线, 将单一的非线性时程分析结果由“点”连成“线”, 甚至可通过多条地

收稿日期: 2009-03-19; 修改日期: 2010-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(90815011); “十一五”科技支撑计划项目(2009baj28b01-3); 西南交通大学科技发展基金项目(2007A06, 2008A02, 2008A05)

作者简介: *杨 成(1977—), 男, 四川人, 讲师, 博士, 国家一级注册结构工程师, 从事结构抗震研究(E-mail: yangcheng@swjtu.edu.cn);

潘 毅(1977—), 男, 重庆人, 副教授, 博士, 从事结构抗震研究(E-mail: panyi332@yahoo.com.cn);

赵世春(1961—), 男, 黑龙江人, 教授, 博士, 从事结构抗震研究(E-mail: sujuzsc@163.com);

李彤梅(1967—), 女, 北京人, 副教授, 硕士, 从事结构抗震研究(E-mail: tongmayli@163.com);

李英民(1968—), 男, 山东人, 教授, 博士, 从事结构抗震研究(E-mail: liyingmin@cqu.edu.cn).

震动的 IDA 将“线”分析拓展为面分析^[1]。IDA 没有丢掉静力推覆(Static Pushover Analysis, 简称 SPO)所具备的结构破坏全过程非线性分析能力, 且是多个动力非线性时程分析的结果, 理论基础较 SPO 更严密。不同的 IDA 曲线是地震非平稳特征与结构非线性耦合的结果差异, 针对同一结构则是地震动特性的间接体现。上述概念是单次、离散的时程分析所不能体现的。

1 IDA 曲线的离散控制

1.1 IDA 曲线的离散问题

IDA 曲线的离散控制问题一直影响该方法的工程应用。尽管 Mwafy 在离散动力推覆分析(Static Pushover)中用上包络线、下包络线和 SPO 结果进行了有效对比, 但承认动力推覆的数据离散很大程度上取决于地震动的样本特性, 可能会影响结构的评估结论^[2]。Vamvatsikos 针对 IDA 曲线的离散现象进行了基于分位值的结构抗震性能评估, 同时也指出更小的离散性有助于降低地震样本数量的分析需求、增加中位估计曲线的可靠性^[3]。国内在这方面讨论较少, 马千里分析了有限地震动样本输入下的平均 IDA 曲线, 利用具备统计意义的 IDA 极限位移和 SPO 的分析结果进行了对比^[4]。总体上看, 以地震作用-损伤关系为基础的结构抗震性能评估需要对 IDA 曲线离散程度加以控制。

1.2 弹性反应谱作为烈度指标对 IDA 曲线的离散控制

由于损伤指标 DM 通常由抗震评估的目标事先决定, 因此无法通过改变其函数形式来控制收敛。通过改进 IM 函数形式充分体现地震作用的灾害特性, 从统计意义上把握结构的抗震性能, 成为当前该问题研究的主要方法^[5]。很多简单的抗震评估以地面峰值加速度(Peak Ground Acceleration, 简称 PGA)为指标来衡量地震烈度, 主要是由于该参数在计算机未普及时代获取相对方便。而当前, 机算求解第一振型控制下的建筑结构基本周期对应的弹性加速度反应谱值 $S_a(T_1)$ 已经相当快捷, $S_a(T_1)$ 显然比 PGA 更能体现指定地震输入下的结构受力反应。Vamvatsikos 对比了二者分别作为 IM 函数时的 IDA 曲线簇, 结果显示 $S_a(T_1)$ 比 PGA 有更好的收敛效果^[3]。

1.3 考虑基本振型滑移的 Cordova 双参数烈度指标和 SPO 一样, IDA 过程中, 地震作用的不断提

高将导致结构材料非线性的深度发展。按照我国当前“三水准、两阶段”的抗震设防依据, 基本烈度以上的结构地震响应实际上是地震动的非平稳特性与结构非线性耦合的结果。此时仍然采用弹性谱值 $S_a(T_1)$ 作 IM 将无法考虑结构软化和刚度退化导致的等效基本周期延长, Cordova 将这种现象称为周期滑移(period shift)。由于采用一般的时程分析程序不易观察结构非线性振动时周期的瞬时变化, 本文以文献[6]给出的钢筋混凝土框架模型为例, 计算了 SPO 加载条件下的每一个加载步长对应的结构等效基本周期(图 1)。可见随着水平作用力的增加, 结构非线性程度的深入, 该算例所表现出的有效基本周期延长约为结构弹性基本周期的 2 倍。图 1 中曲线末端较长的平台段是水平加载接近结构承载力的表现, 该损伤条件下, 结构无法表现稳定的振动特性, 因此不将其作为振型滑移的分析对象。

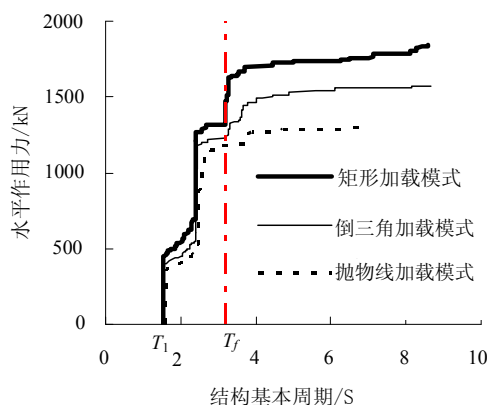


图 1 SPO 过程中的结构基本周期延长

Fig.1 Structure's fundamental period shifting under SPO with different later force patterns

基于类似观察, Cordova 将原有的弹性加速度反应谱值 $S_a(T_1)$ 替换为能够考虑基本周期滑移的烈度指标, 以正确衡量 IDA 逐步增大的地震作用。改进后的 IM 函数式如下:

$$S^* = S_a(T_1)^{1-\alpha} S_a(T_f)^\alpha \quad (1)$$

其中: T_f 为结构软化后被延长的等效基本周期; α 为振型滑移参与系数。式(1)将考虑结构软化的反应谱值 $S_a(T_f)$ 溶入原有的烈度指标 $S_a(T_1)$, 在一定程度上考虑了结构非线性发展引起的地震作用变化。Cordova 针对 4 种典型建筑结构, 8 条地震记录的 IDA 统计分析显示: $T_f=2T_1$ 以及 $\alpha=0.5$ 时 IDA 曲线簇收敛程度最好。

1.4 渐变参数控制的烈度指标

虽然振型滑移参与系数 α 能够表达结构软化的发展深度, 但 α 取 0.5 的依据仅仅来自统计结果,

其计算机上存在的问题在于:在 IDA 所有级别动力加载下, S^* 对延长周期反应谱值的纳入程度自始至终不变。也就是说: S^* 所表征的烈度量仅仅由结构非线性发展的两个状态所决定,退化前的弹性状态和结构刚度退化至 $T_f=2T_1$ 时的非弹性状态,和刚度退化的具体过程无关,这是力学概念上明显的瑕疵。相关分析^[5]甚至发现,在结构刚度退化的早期,采用 Cordova 建议的式(1)替代 $S_a(T_1)$ 作为 IM 函数时, IDA 曲线离散程度非但没有得到改善,还可能适得其反。因此,文献[5]建议在式(1)的两个恒定参数基础上继续改进,考虑利用渐变参数控制的 IM 函数,让烈度指标能够描述 IDA 过程中地震作用水平的渐变过程,从机理上寻找更为合适的 IM 函数形式。

以此为依据,本文对双参数烈度指标的改进意见如下:

1) T_f/T_1 的比值由 2 改为由 SPO 分析辅助确定,因为不同的结构类型、设计规范控制下的结构在达到承载力前所体现出的延性水平出入较大,而 SPO 相对 IDA 的计算量较小,对动力非线性响应分析也有一定的参考、比较价值。

2) 将 α 取 0.5 值改为渐变随 IDA 加载级别控制的渐变函数,表达式如下:

$$\alpha_i = \begin{cases} 0.65 \times \frac{S_{a,i}(T_1) - S_{a,475y}(T_1)}{S_{a,max}(T_1) - S_{a,475y}(T_1)}, & S_{a,i}(T_1) > S_{a,475y}(T_1) \\ 0, & S_{a,i}(T_1) \leq S_{a,475y}(T_1) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $S_{a,i}(T_1)$ 表示第 i 个级别 IDA 地震输入下的结构基本周期对应的弹性反应谱值; $S_{a,475y}(T_1)$ 表示 50 年超越概率 10% 水平下对应的规范设计反应谱值(简称“中震”); $S_{a,max}(T_1)$ 表示 IDA 动力响应失稳前最大响应谱值。式(2)采用渐变的 α 是为了描述每一个 IDA 加载级对应的结构刚度退化现象,以此达到数据收敛的效果。而原来对全过程起收敛作用的 $\alpha=0.5$ 在 IDA 加载失稳前收敛性显得不足。根据本文分析,式(2)中 IDA 加载失稳前的 α 建议取 0.65。另外,根据 SPO 曲线等效屈服点的研究结论,在水平地震力达到中震程度以前,结构可基本等效为弹性结构^[7]。此时弹性谱值是其真实的受力反应,结构没有发生明显的刚度退化和振型滑移,采用较大的振型滑移参与系数 α , 收敛效果可能适得其反^[5]。

故结构受力响应小于 $S_{a,475y}(T_1)$ 时,将 α 设置为 0,以反应完全的弹性谱响应特征。

2 程序编制及结构算例

自动提取多次时程分析结果中指定的响应信息并加以处理是 IDA 分析的难点。仅一条地震动的 IDA 曲线的计算可能需要将时程分析程序重复执行 10 次以上,若仅靠手动重复执行单次运算、提取数据并进行后处理,巨大的工作量将使 IDA 丧失工程应用意义。而关于该问题的程序编制技巧,国内外相关文献均未见透露。本文调用 Visual Fortran 6.5 中的 DFPORT 函数库,以 system 函数执行控制台命令可实现对时程分析程序的捆绑(wrap),将 IDA 的数据准备、时程分析程序执行、结果数据收集整合为一组完整的代码,便于控制。这样,多条地震记录的形成 IDA 曲线“簇”可不停机一次计算完成。本文计算捆绑了美国太平洋地震工程中心编制的开放式结构计算软件,框架梁柱均采用纤维模型(Fiber Section)^[11-12]。

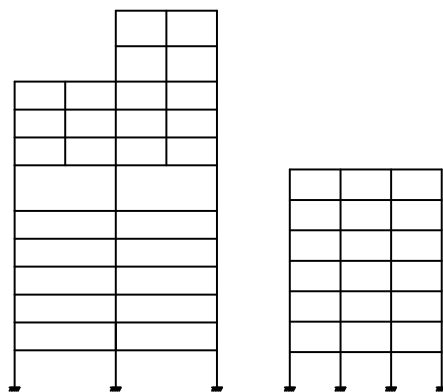


图2 12层和7层钢筋混凝土框架结构简图

Fig.2 Elevation of two RC frame with 12 floors and 7 floors

选取文献[8]中使用的两个钢筋混凝土框架算例(荷载、配筋及构件尺寸详见该文献)(图2)。地震烈度 8 度,地面峰值加速度 0.20g,场地类别为 II 类,设计地震分组为第一组。结构 1 基本周期 1.68s,总高 41.5m,底层每跨 12m;结构 2 基本周期 1.08s,总高 25.8m,底层每跨 6m,按现行中国规范结合 PK 软件设计。因为美国地质勘测中心(USGS)的四类场地划分与中国规范不能直接对应,故对比范立础^[9]等将中北美地震记录场地情况按我国抗震规范四类场地等效划分的结果,同时参考文献[4]的地震记录选取依据,通过 USGS 取 11 条较为典型的地震动记录,使本算例地震动 PGA 在 0.20g—0.65g,

震中距在 100km 以内,均选自 USGS 中的 S2 类场地,对应剪切波速和覆盖土厚度参数按中国规范均可划为 II 类场地。

3 算例分析

以同一条地震输入为前提,框架结构的每层侧移角-楼层剪力 IDA 曲线表现特征都不一样^[3,10]。故因篇幅所限,也为体现地震作用和结构总体损伤之间关系,参考文献^[3,5],只列出每榀框架全部楼层最大层间侧移角-地震烈度指标函数 IDA 曲线。同时

采用本文 1.4 节两条修正 IM 函数建议,对取 3 种不同 IM 函数的 IDA 曲线进行了计算,以比较其收敛效果。收敛关系的度量参数采用 IM 值和 DM 值的对数线性回归均方差^[5]。根据统计结果的图表显示(图 3—图 4,表 1):在 Cordova 提出的 IM 函数基础上,采用按本文 1.4 节建议的修正方法对提高 IDA 曲线收敛性有一定作用。另外,根据 SPO 非线性分析,在达到水平承载力极限前,本文 12 层钢筋混凝土框架的基本周期滑移比 T_f/T_1 为 1.85,7 层框架为 1.68。

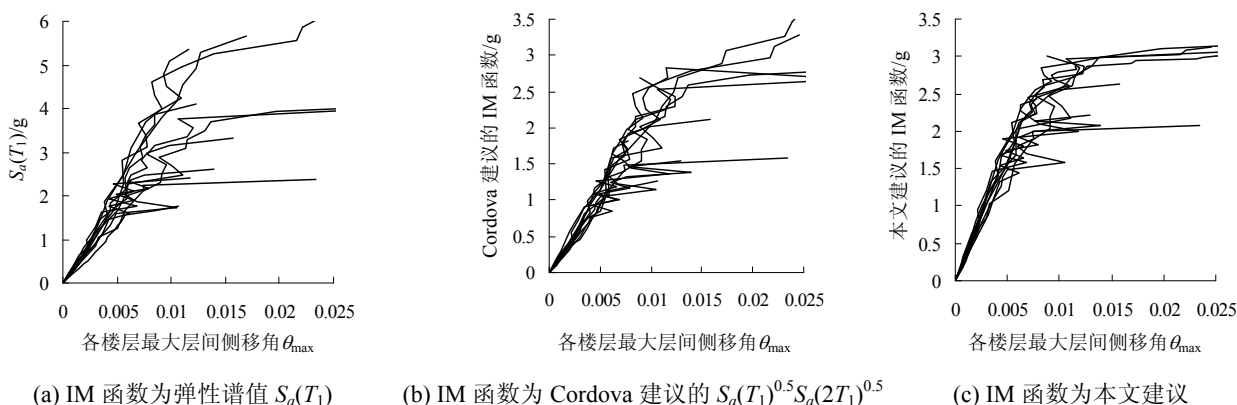


图 3 采用不同 IM 函数的 12 层钢筋混凝土框架 IDA 曲线

Fig.3 IDA curves for RC frame with 12 floors

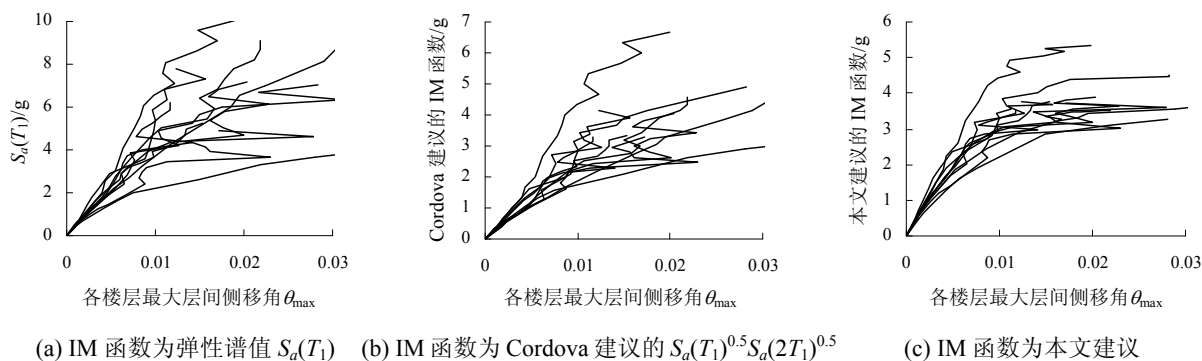


图 4 采用不同 IM 函数的 7 层钢筋混凝土框架 IDA 曲线

Fig.4 IDA curves for RC frame with 7 floors

表 1 采用不同 IM 函数的 IDA 曲线均方差比较

Table 1 Dispersion between drift and the seismic intensity by

结构算例	$\sigma_{\ln \theta_{\max}} / IM$		
	IM 函数形式		
	$S^* = S_a(T_1)$	Cordova 建议 $S^* = S_a(T_1)^{0.5} S_a(2T_1)^{0.5}$	本文 建议
12 层钢筋混凝土框架	0.277	0.208	0.162
7 层钢筋混凝土框架	0.269	0.254	0.182

4 结论

本文在 Cordova 提出的 IM 函数 $S^* = S_a(T_1)^{1-\alpha}$.

$S_a(T_f)^\alpha$ 基础上做出 2 点修正: 1) T_f/T_1 的比值由 2 改为由 SPO 分析辅助确定; 2) 将 α 取 0.5 值改为渐变随 IDA 加载级别控制的渐变函数。以 2 个典型的钢筋混凝土框架为算例计算所得 IDA 曲线簇显示: 上述 2 点修正对提高 IDA 曲线收敛性有一定的改进作用。当然,更多的算例和地震动样本有利于本文分析结果的进一步优化。

参考文献:

[1] 李建中, 宋晓东, 范立础. 桥梁高墩位移延性能力的

- 探讨[J]. 地震工程及工程振动, 2005, 25(1): 43—48.
- Li Jianzhong, Song Xiaodong, Fan Lichu. Investigation for displacement ductility capacity of tall piers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(1): 43—48. (in Chinese)
- [2] Mwafy A M, Elnashai A S. Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings [J]. Engineering Structures, 2001, 23: 407—424.
- [3] Vamvatsikos D. Seismic performance, capacity and reliability of structures as seen through incremental dynamic analysis [D]. Stanford, CA: Stanford University, 2002.
- [4] 马千里, 叶列平, 陆新征. 采用逐步增量弹塑性时程方法对 RC 框架结构推覆分析侧力模式的研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 132—140.
- Ma Qianli, Ye Linping, Lu Xinzhen. Study on lateral load patterns of pushover analysis using incremental dynamical analysis for RC frame structures [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 132—140. (in Chinese)
- [5] Cordova P P, Deirlein G G, Mehanny S F. Development of a two-parameter seismic intensity measurer and probabilistic assessment procedure[C]// Kabeyasawa T. The Second U.S.-Japan Workshop on Performance-based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, Sapporo, Hokkaido, Japan, 2000.
- [6] 杨成, 李英民, 杨溥. 振型耦合的适应性水平荷载模式对结构 POA 分析的影响[J]. 重庆大学学报, 2007, 30(5): 66—72.
- Yang Cheng, Li Yingmin, Yang Pu. Effect of the adaptable distribution for lateral forces considering modes coupling on structure pushover analysis [J]. Journal Chongqing University, 2007, 30(5): 66—72. (in Chinese)
- [7] 杨溥, 李英民, 熊振勇. 能力曲线简化方法对比研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(4): 59—63.
- Yang Pu, Li Yingmin, Xiong Zhenyong. Study on the comparison of different methods of simplifying capacity spectrum [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2005, 27(4): 59—63. (in Chinese)
- [8] 杨成. 结构弹塑性地震反应分析的改进能力——需求曲线方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- Yang Cheng. Improved capacity-demand-diagram method for estimating seismic deformation of inelastic structures [D]. Chongqing: Chongqing University, 2003. (in Chinese)
- [9] 范立础, 卓卫东. 桥梁延性抗震设计[M]. 第 1 版. 北京: 人民交通出版社, 2001: 265—290.
- Fan Lichu, Zhuo Weidong. Ductility based bridge seismic design [M]. 1st ed. Beijing: China Cammunications Press, 2001: 265—290. (in Chinese)
- [10] 杨成, 赵世春, 赵人达. 地震作用特征对 IDA 曲线的影响分析[J]. 四川大学学报(工程版), 2010, 42(2): 93—99.
- Yang Cheng, Zhao Shichun, Zhao Renda. Research on the different of seismic effect to structural IDA [J]. Building Science Research of Sichuan (Engineering Science Edition), 2010, 42(2): 93—99. (in Chinese)
- [11] 杨红, 吴晶晶. 考虑结构局部反应特征的时程分析法输入地震波研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(11): 29—35.
- Yang Hong, Wu Jingjing. A study on the earthquake input for time-history analysis based on the local response characteristic of structures [J]. Journal of Civil Engineering, 2007, 40(11): 29—35. (in Chinese)
- [12] 叶列平, 陆新征, 马千里, 汪训流, 缪志伟. 混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例[J]. 工程力学, 2006, 23(增刊 II): 131—140.
- Ye Lieping, Lu Xinzhen, Ma Qianli, Wang Xunliu, Miao Zhiwei. Nonlinear analytical modals, methods and examples for concrete structures subject to earthquake loading [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(Sup. II): 131—140. (in Chinese)