

增量动力分析中地震动强度参数的有效性研究

苏宁粉^{1,2}, 周颖², 吕西林², 康灵果³

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;

3. 华陆工程科技有限责任公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 分别对一 6 层规则框架、一规则超高层和一不规则超高层结构进行增量动力分析, 以峰值加速度 PGA、峰值速度 PGV、峰值位移 PGD、弹性加速度谱 $S_a(T_1)$ 、速度谱 $S_v(T_1)$ 、位移谱 $S_d(T_1)$ 、Cordova 等提出的参数 S^* 以及周颖等提出的参数 S_{12} 和 S_{123} 为地震动强度参数, 所有楼层的最大层间位移角为工程需求参数, 通过对数空间的线性回归, 以系数 R^2 为指标, 对比分析这些参数的有效性。结果表明, 反应谱参数的有效性均优于 PGA; PGD 有效性最差; 对规则结构, S^* 的有效性高于 $S_a(T_1)$ 和 PGA; 对不规则结构, 低于 $S_a(T_1)$ 但高于 PGA; 对考虑高阶振型影响的地震动强度参数, 考虑振型数越多, 有效性越高; 对超高层结构, PGV 的有效性最好; 而对 6 层框架, PGV 的有效性仅次于 S^* , 显著高于其他参数。

关键词: 增量动力分析; 地震动强度参数; 有效性; 基于性能的地震工程

中图分类号: TU313.3; TU973.14

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)06-0846-07

Study on the efficiency of intensity measures for incremental dynamic analysis

SU Ningfen^{1,2}, ZHOU Ying², LÜ Xilin², KANG Lingguo³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Hualu Engineering & Technology Company Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: The result of incremental dynamic analysis (IDA) is described by intensity measure (IM) and engineering demand parameter (EDP). Choosing different IM and EDP will get different IDA curves. The choice of IM has great effect on the result of IDA. In this paper, a six story regular reinforced concrete frame structure and two high-rise structures (one regular and one irregular) are taken as examples to conduct IDA. Nine IMs are selected. They are: (1) peak ground motion acceleration (PGA); (2) peak ground motion velocity (PGV); (3) peak ground motion displacement (PGD); (4) spectral acceleration at the structure's first-mode period $S_a(T_1, \xi)$ (ξ is damping ratio); (5) spectral velocity at the structure's first-mode period $S_v(T_1, \xi)$; (6) spectral displacement at the structure's first-mode period $S_d(T_1, \xi)$; (7) S^* proposed by Cordova; (8) S_{12} and (9) S_{123} proposed by Zhou and Su before. The maximum peak inter-story drift angle is selected as EDP. Through linear regression in logarithmic space, factor R^2 is taken as indicators to check the efficiency of candidate IMs in the IDA. The results show that the elastic spectra based IMs are more efficient than PGA and PGD is the worst one. For regular structures, S^* is more efficient than $S_a(T_1, \xi)$ and PGA. For irregular structures, S^* is better than PGA but worse than $S_d(T_1, \xi)$. The efficiency of IMs that take higher modes influence into consideration depends on the numbers of considered modes. The more modes are involved, the more efficient the IM is. PGV is the most efficient IM for high-rise structure and the one second only to S^* for the six-story frame structure.

Keywords: incremental dynamic analysis; intensity measure; efficiency; performance-based earthquake engineering

新一代基于性能地震工程(Performance-Based Earthquake Engineering, PBEE)的概率框架^[1]中, 需要大量的计算分析, 得到结构在给定地震动参数(Intensity Measure, IM)时工程需求参数(Engineering Demand Parameters, EDP)的条件互补累积分布函数, 即指定 IM 水平下, EDP 超过某一设定值的条件概率。

增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)法通过统计分析, 从概率意义上评价在不同地震危险性水平下的结构性能, 是实现 PBEE 概率框架中结构反应分析的最有前景的一种方法^[2]。然而,

IDA 统计结果受所选择的地震波及其数量、用于绘制 IDA 曲线的 IM 和 EDP 的影响, 从而影响结构抗震性能评估结果。可以通过增大地震波数量提高评估结果的准确性, 但计算量同时也显著增加。研究表明, 当采用合适的 IM 和 EDP 参数, 可以显著降低 IDA 曲线的离散性。即可以在不增加计算量的前提下, 通过选择合适的参数进行数据处理, 也可获得具有相同置信水平的统计结果。

最大层间位移角 θ_{\max} 能较好反映结构的破坏程度, 常作为 EDP 进行 IDA 分析。

近年来各国学者从不同角度对 IM 参数展开研

究,总结 IM 参数所应具备的基本性质^[3-4],提出适用于不同情况的 IM 参数,主要可分为两大类:标量型和矢量型.标量型指通过一个参数表征的地震动强度.如峰值加速度(Peak Ground Motion Acceleration, PGA)、结构基本周期对应的弹性加速度谱 $S_a(T_1, \xi)$ (ξ 为结构阻尼比)等.矢量型指由两个参数组成的向量形式的地震动强度参数,向量型地震动强度参数相比标量型地震动强度参数可提供更多的信息,并可将各影响因素分开考虑,相对于综合型的单一标量型地震动强度参数其意义更为明确^[5].纵观这些参数,基本组成单位仍然是峰值加速度/速度/位移和加速度/速度/位移反应谱.

还有研究表明,基于速度的地震动强度参数相对于传统的基于加速度的地震动强度参数有一定的优势^[5].日本是以峰值速度(Peak Ground Motion Velocity, PGV)作为烈度的物理标准,而包括我国在内的很多国家抗震设计时均采用 PGA 作为主要参数指标,相应峰值速度的研究尚存空缺^[5].目前国内已有学者建议采用 PGV 作为抗震计算的地震动强度指标^[6].在 IDA 分析中,鲜有采用 PGV 作为地震动强度参数,其适用性有待进一步研究.

本文通过算例分析,以 PGA、PGV、峰值位移(Peak Ground Motion Displacement, PGD)、结构基本周期对应的弹性加速度谱 $S_a(T_1, \xi)$ (ξ 为结构阻尼比)、速度谱 $S_v(T_1, \xi)$ 、位移谱 $S_d(T_1, \xi)$ 、Cordova 等提出的双参数地震动强度参数 $S^*[7]$ 以及作者在文献[2]中提出的参数 S_{12} 和 S_{123} 为研究对象,通过对数空间的线性拟合,以拟合判断系数 R^2 为考核指标,对比分析这些 IM 参数在 IDA 分析中的有效性.

1 地震动强度参数的有效性

地震动强度参数的有效性是指,能使在指定的地震动强度条件下工程需求参数结果的离散性相对较小,从而在不降低精度的前提下,减少估计条件概率 $G[EDP | IM]$ 时所需的地震动记录数量和非线性分析次数^[2].从工程应用角度出发,增量动力分析曲线的离散性关系到统计结果的置信水平以及获得同样置信水平统计结果所需的计算量,是评价地震动强度参数优劣的最重要因素.

2 分析方法

仅以 IM 参数的有效性作为考核指标,按以下步骤评价各地震动强度参数的优劣:

(1) 选择有代表性结构,建立弹塑性分析模型.

选择 ABAQUS 进行结构的弹塑性分析.梁、柱及支撑等构件采用梁单元 B31 模拟,剪力墙和楼板采用壳单元 S4R 模拟.梁单元混凝土本构采用 Mander 模型,编制材料子程序 UMAT;壳单元混凝土本构采用损伤塑性模型;钢材采用双线性动力硬化模型,考虑包辛格效应,强屈比取 1.2,极限应力所对应的极限塑性应变取 0.025.采用显式算法进行弹塑性时程分析.详见文献[8].

(2) 选择输入地震动记录,按照 PGA 比例调幅进行增量动力分析.

首先根据场地类型的划分在美国 PEER 强震记录数据库中初选地震波,然后按照《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[9]确定相应的设计反应谱,通过结构基本周期所对应的谱值与设计反应谱相近的原则选波.文献[10]表明,10~20 条波即可获得对地震需求足够精度的估计.综合考虑计算量,本文选择 15 条地震波进行增量动力分析.分析时逐一对所选择的地震动记录以 PGA 为地震动强度参数进行调幅,地震波沿结构弱轴方向单向输入.

(3) 将 PGA 换算为 PGV、PGD、 $S_a(T_1, \xi)$ 、 $S_v(T_1, \xi)$ 、 $S_d(T_1, \xi)$ 、 S^* 、 S_{12} 和 S_{123} ,绘制 IM-EDP 曲线.其中:

$$S^* = S_a(T_1)^{0.5} \cdot S_a(2T_1)^{0.5} \quad (1)$$

$$S_{12} = S_a(T_1, \xi)^\alpha \cdot S_a(T_2, \xi)^\beta \quad (2)$$

$$\alpha = m_1 / (m_1 + m_2);$$

$$\beta = m_2 / (m_1 + m_2)$$

$$S_{123} = S_a(T_1, \xi)^\alpha \cdot S_a(T_2, \xi)^\beta \cdot S_a(T_3, \xi)^\gamma \quad (3)$$

$$\alpha = m_1 / (m_1 + m_2 + m_3);$$

$$\beta = m_2 / (m_1 + m_2 + m_3);$$

$$\gamma = m_3 / (m_1 + m_2 + m_3)$$

式中: α 、 β 和 γ 分别为对应于 T_1 、 T_2 和 T_3 的振型参与质量系数比, m_1 、 m_2 和 m_3 分别为对应于 T_1 、 T_2 和 T_3 的振型参与质量系数, ξ 为阻尼比(下文书写时省略 ξ).

需要说明的是,分析时选择 PGA 作为地震动强度参数进行调幅,但采用其它地震动强度参数,如 $S_a(T_1)$,绘制结构的 IDA 曲线时,无需重新进行大量的运算,只需要计算出各地震动波相应于输入 PGA 的 $S_a(T_1)$ 值.选择所有楼层的最大层间位移角 θ_{\max} 为 EDP.根据结构弱轴方向的前几阶周期以及

各地震动记录的频谱特性, 换算某一确定地震动记录在 PGA 调幅为某一确定数值时相应的其他各 IM 参数值。

(4) 在对数空间对 $\ln IM - \ln EDP$ 进行线性回归, 以 R^2 值为评价指标对比 IM 参数的有效性。

如果直接从 IM-EDP 曲线簇上定量确定 IM 参数的有效性, 则需要计算任意 IM 值条件下 EDP 数据的离散性。而计算数据总是有限, 必须通过插值计算, 势必会引入误差。研究表明^[11], IM-EDP 符合对数正态分布, 即 $\ln IM - \ln EDP$ 符合线性分布规律, 这点在本文算例中也被证明。因此, 在对数空间, 使用最小二乘法得到 $\ln IM - \ln EDP$ 的最佳线性拟合 $y = mx + b$ 和判定系数 R^2 。 R^2 为 y 的估计值与实际值之比, 范围在 0 到 1 之间。如果为 1, 则样本有很好的相关性, y 的估计值与实际值之间没有差别。相反, 如果判定系数为 0, 则回归公式不能用来预测 y 值。 R^2 是表示回归分析公式的结果反映变量间关系的程度的标志, 也是反映样本数据离散程度的一个指标, 其值越接近 1, 说明数据离散程度越小。因此, 通过 R^2 值对比 IM 参数的有效性。

3 算例分析

3.1 算例结构设计及有限元模型

3.1.1 算例 1: 6 层钢筋混凝土框架

六层钢筋混凝土框架结构, 标准层平面如图 1 所示。

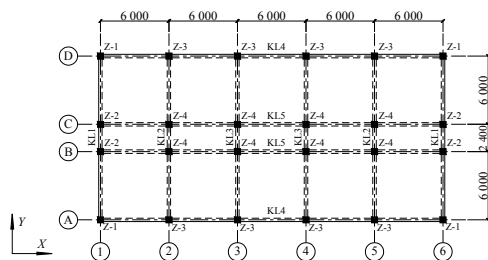


图 1 六层 RC 框架结构平面布置图
Fig.1 Plan layout of 6-story RC frame

底层层高 4.2 m, 其余各层 3.6 m, 结构总高 22.2 m。所有柱截面为 550 mm×550 mm; 所有梁截面为 300 mm×550 mm; 楼板厚 100 mm。混凝土强度等级均为 C30; 梁柱纵筋均采用 HRB400 钢筋, 箍筋采用 HPB300 钢筋。屋面恒载 8.5 kN/m², 活载 2.0 kN/m²; 楼面恒载 8.0 kN/m², 活载 2.0 kN/m²。抗震设防烈度 8 度, 地震分组为第一组, 场地类别为 III 类。结构阻尼比为 0.05。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010), 采用中国建筑科学研究院 PKPM

工程计算软件对结构进行配筋设计。结构有限元分析模型如图 2 所示, 结构 X 向的前三阶周期分别为 1.148 s、0.362 s 和 0.198 s。

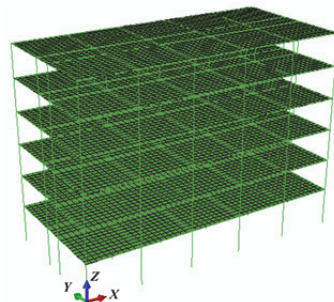


图 2 6 层 RC 框架计算模型

Fig.2 Finite element analytical model of 6-story RC frame

3.1.2 算例 2: 规则超高层结构

某型钢混凝土(SRC)框架-钢筋混凝土(RC)核心筒结构, 标准层平面如图 3 所示。层高 4 m, 共 50 层, 结构总高 200 m, 高宽比为 5。楼板厚 120 mm, 核心筒墙体厚度 1~20 层 1 000 mm、21~35 层 800 mm、36~50 层 600 mm, 梁柱构件尺寸详见文献[12]。核心筒和柱的混凝土强度等级为 C60; 楼板混凝土强度等级为 C35; SRC 柱中钢筋和型钢梁的钢材等级为 Q345。楼面恒载 5.0 kN/m², 活载 2.0 kN/m²。抗震设防烈度 8 度, 地震分组为第一组, 场地类别为 III 类。结构阻尼比为 0.04。风荷载计算基本风压 0.5 kN/m², 场地粗糙类型 C。舒适度验算基本风压: 0.3 kN/m²。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010), 采用中国建筑科学研究院 PKPM 工程计算软件对该结构进行配筋计算。结构有限元分析模型如图 4, 结构 Y 向前三阶周期为 4.48 s、1.115 s、0.477 s。

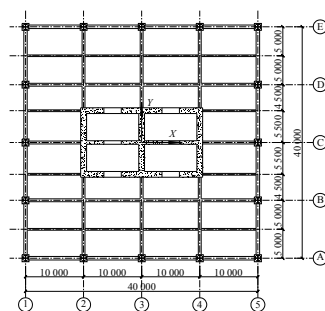


图 3 算例 2 结构标准层平面图

Fig.3 Plan layout of structure 2

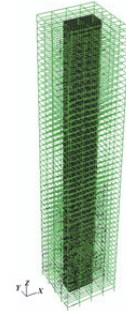


图 4 算例 2 结构有限元分析模型

Fig.4 Finite element analytical model of structure 2

3.1.3 算例 3: 不规则超高层结构

某立面收进复杂超限高层建筑, 如图 5 所示, 主体结构高 244.8 m, 结构上、中、下三部分平面

尺寸分别为 $28.5\text{ m} \times 54.0\text{ m}$ 、 $52.5\text{ m} \times 54.0\text{ m}$ 和 $60.0\text{ m} \times 60.0\text{ m}$ 。其主要抗侧力体系为型钢混凝土框架和钢筋混凝土核心筒结构, 在 46 层设置环桁架作为加强层。核心筒和框架柱的混凝土强度为 C60, 楼面梁和楼板的混凝土强度为 C35。结构钢材等级为 Q345。该结构位于上海地区, 抗震设防烈度为 7 度, 场地类别为 IV 类。该结构属于高度超限, 平、立面不规则结构。详细信息参考文献[2]。结构有限元分析模型如图 6, 结构 X 向前三阶周期为 4.403 s、1.813 s、0.759 s。



图 5 结构立面收进效果

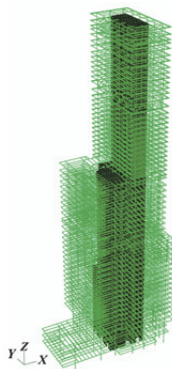


图 6 算例 3 结构 ABAQUS 弹塑性分析模型

Fig.5 Rendering view analysis of setbacks in elevation

Fig.6 Elasto-plastic model of the structure 3

3.2 地震波选择

根据每一个算例结构的场地类别以及结构基本周期点处对应的谱值与设计反应谱相匹配的原则, 分别选择 15 条地震动记录对三个算例结构进行 IDA 分析。所有强震记录来源于 PEER 强震记录数据库。地震动详细信息见文献[12]。

3.3 增量动力分析及参数有效性对比

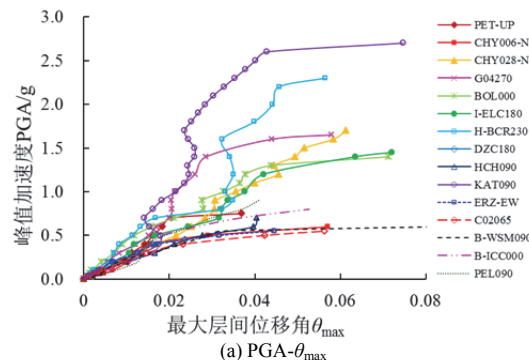
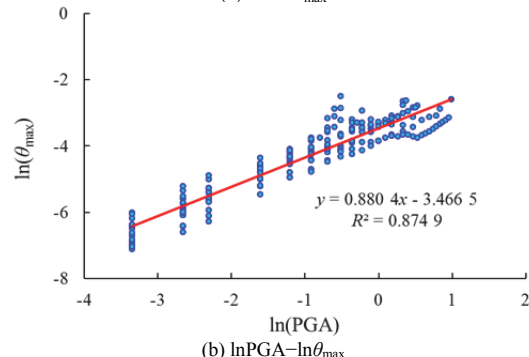
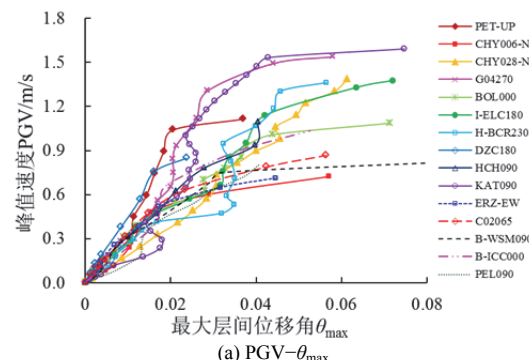
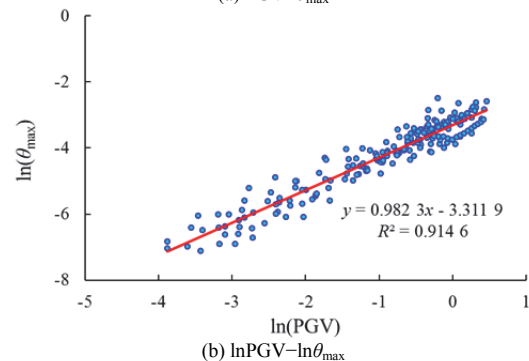
以算例 1 为例说明分析过程。

将所选 15 条地震波分别按 PGA 进行调幅, 调幅后 PGA 分别为: 0.035 g、0.07 g、0.1 g、0.2 g、0.3 g、0.4 g、0.5 g、0.6 g、0.7 g、0.8 g……并根据计算结果选择是否需要进一步增加 PGA 进行更多次计算。地震动输入方向为结构弱轴方向, 即 X 向。

计算完成后, 提取每次分析所得 θ_{\max} , 绘制 $\text{PGA}-\theta_{\max}$ 曲线簇, 如图 7(a)。然后, 在对数空间内对 $\ln(\text{PGA})-\ln(\theta_{\max})$ 进行线性回归分析, 得到判定系数 R^2 值, 如图 7(b)。再将 PGA 换算为 PGV、PGD、 $S_a(T_1)$ 、 $S_v(T_1)$ 和 $S_d(T_1)$, 并分别按公式(1)、(2)和(3)计算 S^* 、 S_{12} 和 S_{123} , 绘制不同 IM 参数时的 IDA 曲线簇, 如图 8(a)-15(a)。由图可知, IM 参数不同, IDA 曲线簇也不同; $\ln\text{IM}-\ln\text{EDP}$ 符合线性分布规

律。通过线性回归分析, 得出 R^2 值, 见图 8(b)-15(b)。

限于篇幅, 不列出算例 2 和算例 3 的 IDA 曲线簇, 将三个算例结构、9 个 IM 参数的 R^2 值汇总于表 1。 R^2 值越接近 1, 说明对应的 IM 参数在 IDA 分析时数据离散性最小, 最具有有效性。

(a) $\text{PGA}-\theta_{\max}$ (b) $\ln\text{PGA}-\ln\theta_{\max}$ 图 7 算例 1 结构以 PGA 为 IM 参数时的 IDA 曲线及 R^2 值Fig.7 IDA curves and R^2 analysis of structure 1 when IM is PGA(a) $\text{PGV}-\theta_{\max}$ (b) $\ln\text{PGV}-\ln\theta_{\max}$ 图 8 算例 1 结构以 PGV 为 IM 参数时的 IDA 曲线及 R^2 值Fig.8 IDA curves and R^2 analysis of structure 1 when IM is PGV

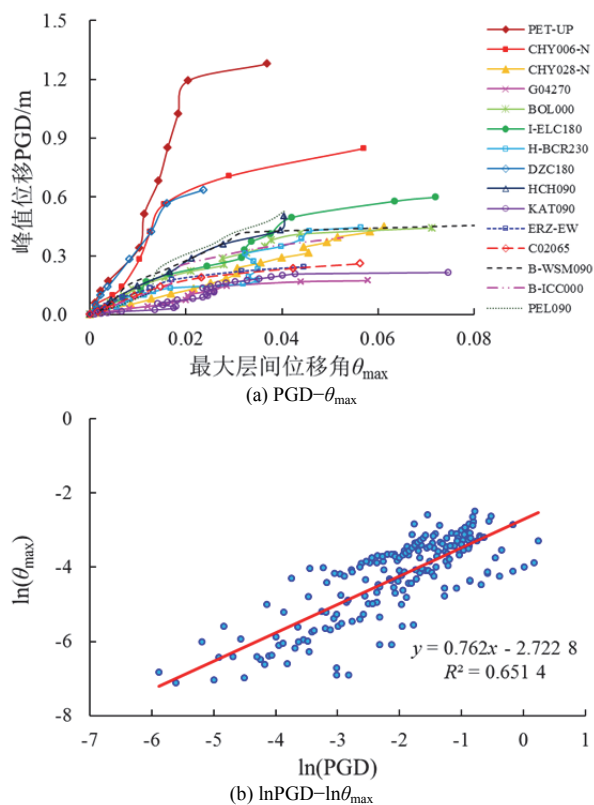


图9 算例1结构以PGD为IM参数时的IDA曲线及 R^2 值
Fig.9 IDA curves and R^2 analysis of structure 1 when IM is PGD

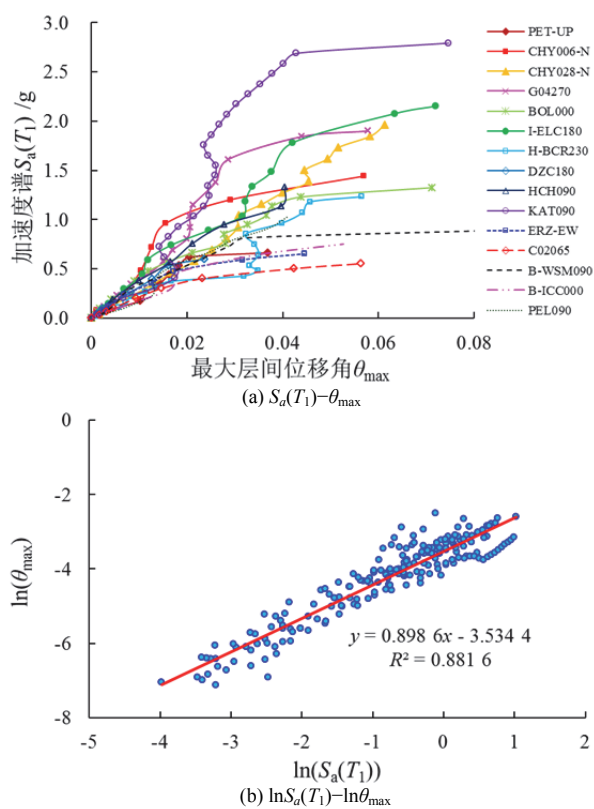


图10 算例1结构以 $S_a(T_1)$ 为IM参数时的IDA曲线及 R^2 值
Fig.10 IDA curves and R^2 analysis of structure 1 when IM is $S_a(T_1)$

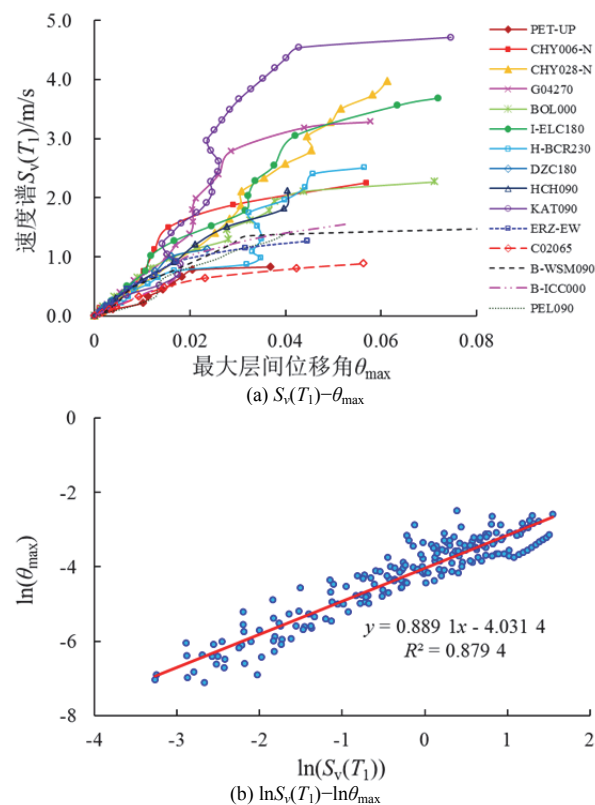


图11 算例1结构以 $S_v(T_1)$ 为IM参数时的IDA曲线及 R^2 值
Fig.11 IDA curves and R^2 analysis of structure 1 when IM is $S_v(T_1)$

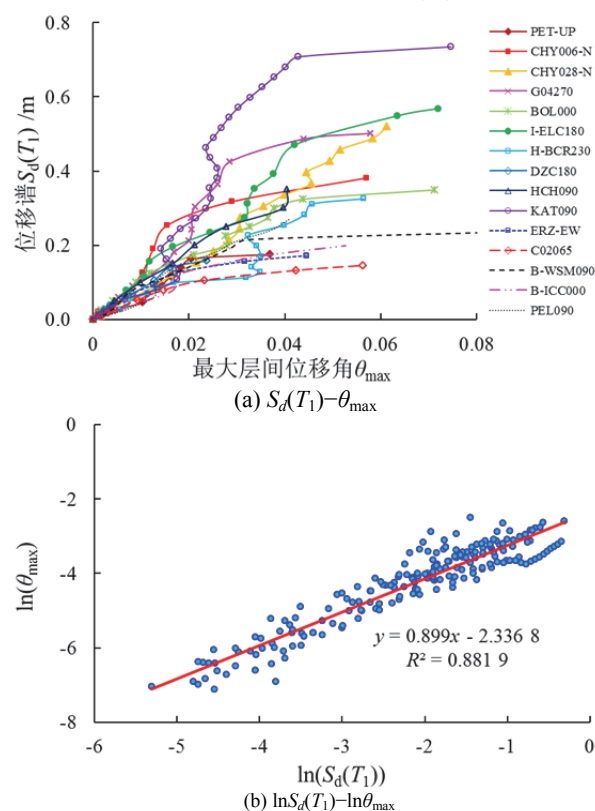


图12 算例1结构以 $S_d(T_1)$ 为IM参数时的IDA曲线及 R^2 值
Fig.12 IDA curves and R^2 analysis of structure 1 when IM is $S_d(T_1)$

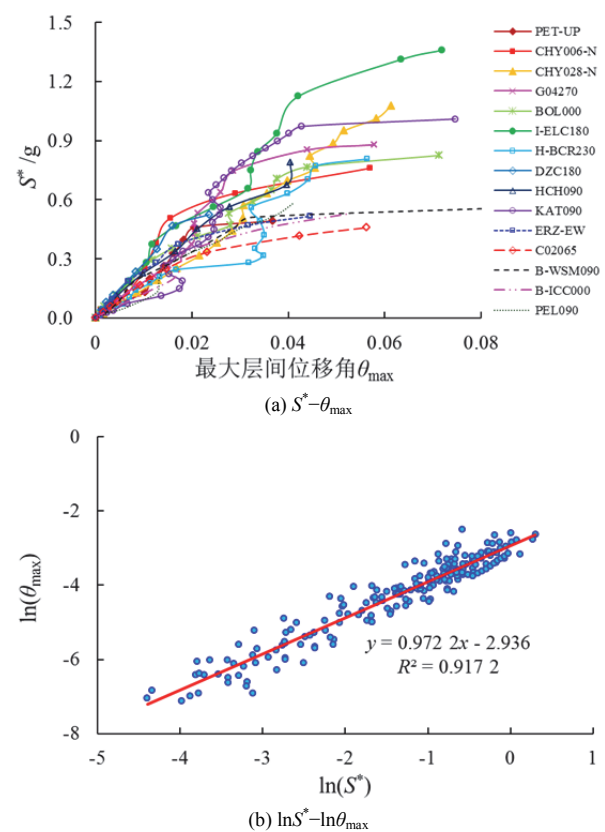


图 13 算例 1 结构以 S^* 为 IM 参数时的 IDA 曲线及 R^2 值
Fig.13 IDA curves and R^2 analysis of structure 1 when IM is S^*

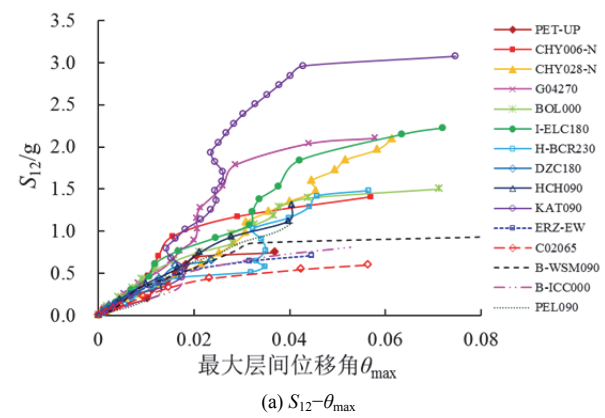


图 14 算例 1 结构以 S_{12} 为 IM 参数时的 IDA 曲线及 R^2 值
Fig.14 IDA curves and R^2 analysis of structure 1 when IM is S_{12}

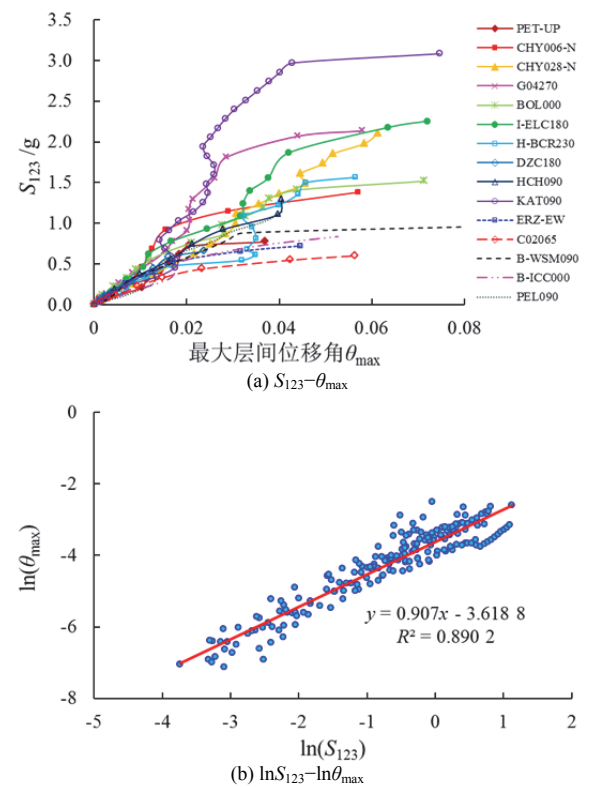


图 15 算例 1 结构以 S_{23} 为 IM 参数时的 IDA 曲线及 R^2 值
Fig.15 IDA curves and R^2 analysis of structure 1 when IM is S_{123}

表 1 三个算例结构、9 个 IM 参数的 R^2 值汇总
Tab.1 R^2 values for three structures and 9 IMs

算例	IM								
	PGA	PGV	PGD	$S_a(T_1)$	$S_v(T_1)$	$S_d(T_1)$	S^*	S_{12}	S_{123}
算例 1: 6 层规则框架	0.874 9	0.914 6	0.651 4	0.881 6	0.879 4	0.881 9	0.917 2	0.886 0	0.890 2
算例 2: 规则超高层	0.890 9	0.928 5	0.584 7	0.919 5	0.927 3	0.919 4	0.924 1	0.924 1	0.926 6
算例 3: 不规则超高层	0.830 0	0.929 0	0.584 4	0.872 5	0.918 4	0.870 8	0.859 5	0.913 4	0.924 0

由上表可得以下规律:

- (1) 无论多、高层, 规则与否, 峰值位移 PGD 的有效性显著低于其他备选参数;
- (2) 三个反应谱参数中, 加速度反应谱 $S_a(T_1)$ 和位移反应谱 $S_d(T_1)$ 的有效性基本相当; 对超高层

- 结构它们低于速度反应谱 $S_v(T_1)$, 对多层框架结构, 高于 $S_v(T_1)$; 无论多、高层, 规则与否, 反应谱参数的有效性均优于峰值加速度 PGA;
- (3) 对规则结构, Cordova 等提出的双参数地震动强度参数 S^* 的有效性高于 $S_a(T_1)$ 和 PGA; 对不规

则结构, 有效性低于 $S_a(T_1)$, 但高于 PGA;

(4) 无论多、高层, 规则与否, 与 $S_a(T_1)$ 相比, 作者在文献[2]中提出的基于弹性加速度反应谱、可以考虑高阶振型影响的多参数形式 IM 参数 S_{12} 和 S_{123} , 有效性 $S_{123} > S_{12} > S_a(T_1)$. 这说明 IM 参数考虑振型数量越多, 有效性越好;

(5) 对超高层结构峰值位移 PGV 的有效性最好; 而对多层框架结构, PGV 的有效性也仅次于 S^* , 显著高于其他参数.

4 结论

文章分别对一个 6 层规则钢筋混凝土框架结构、一个规则超高层结构和一个不规则超高层结构进行增量动力分析, 并选择 9 个地震动强度参数绘制 IDA 曲线, 通过在对数空间的线性拟合, 以拟合判断系数 R^2 为考核指标, 对比分析这些 IM 参数在 IDA 分析中的有效性. 分析表明, 结构基本周期对应的反应谱参数的有效性均优于峰值加速度 PGA; 峰值位移 PGD 的有效性显著低于其他备选参数; 对于高层及超高层结构的增量动力分析, 在选择 IM 参数时, 应考虑高阶振型的影响; 无论多、高层, 规则与否, 峰值速度 PGV 均具有很好的有效性, 在增量动力分析选择 IM 参数时, 若仅考虑有效性, 建议采用峰值速度 PGV 作为地震动强度参数.

参考文献 References

- [1] MOEHLE J, DEIERLEIN G G. A framework methodology for performance-based earthquake engineering [C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada: Vancouver, B.C., 2004.
- [2] 周颖, 苏宁粉, 吕西林. 高层建筑结构增量动力分析的地震动强度参数研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(2): 53-60.
ZHOU Ying, SU Ningfen, LÜ Xilin. Study on intensity measure of incremental dynamic analysis for high-rise structures [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(2): 53-60.
- [3] BAKER J W. Vector-valued ground motion intensity measures for probabilistic seismic demand analysis[D]. Stanford: Stanford University, 2006.
- [4] LUCO N, CORNELL C A. Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions[J]. Earthquake Spectra, 2007, 23 (2): 357-392.
- [5] 周颖, 励勤劼. 增量动力分析地震动强度参数研究综述[J]. 结构工程师, 2014, 30(6): 199-204.
ZHOU Ying, LI Mengjie. State of the art of intensity measures for incremental dynamic analysis[J]. Structural Engineers, 2014, 30(6): 199-204.
- [6] 陆新征, 叶列平, 缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析——原理、模型与在 ABAQUS, MSC.MARC 和 SAP2000 上的实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
LU Xinzhen, YE Lieping, MIAO Zhiwei. Elasto-plastic analysis of buildings against earthquake——theory, model and implementation on ABAQUS, MSC, MARC and SAP2000 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [7] CORDOVA P P, DEIERLEIN G G, MEHANNY S S F, et al. Development of a two-parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure [C]//Proceedings of the 2nd U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering for Reinforced Concrete Building Structures, Japan: Sapporo, 2000.
- [8] 苏宁粉, 吕西林, 周颖, 等. 某立面收进复杂高层建筑结构抗震性能评估[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(10): 1893-1899, 1931.
SU Ningfen, LÜ Xilin, ZHOU Ying, et al. Seismic behavior of a super-tall building with setbacks in elevation [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(10): 1893-1899, 1931.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [10] SHOME N. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures [D]. Stanford: Stanford University, 1999.
- [11] JALAYER F, CORNELL C.A. A technical framework for probability-based demand and capacity factor design (DCFD) seismic formats [R]. Report No. 2003/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California Berkeley, 2004.
- [12] 苏宁粉. 增量动力分析法评估高层及超高层结构抗震性能研究: [D]. 上海: 同济大学, 2012.
SU Ningfen. Seismic Performance Evaluation of Tall and Super-Tall Structures by Using Incremental Dynamic Analysis [D]. Shanghai: Tongji University, 2012.

(编辑 吴海西)