

我国规范抗震时程分析地震波选择比较研究

郭 维^{1,2,3}

(1. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京市 100101; 2. 中咨公路工程监理咨询有限公司, 北京市 100101;

3. 中咨全过程工程咨询发展研究院, 北京市 100101)

摘要: 时程分析是评估结构地震反应及性能的主要手段, 其结果受输入地震波影响很大。对地震波输入规范条款进行了总结, 辅以加权调幅法等以15层、30层钢筋混凝土结构为例, 以最大层间位移角均值作为目标反应, 将依不同规范及方法选取地震波所得的结构弹性和弹塑性时程反应结果进行了对比。研究表明:《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2016)和《建筑结构抗倒塌设计标准》(T/CECS 392—2021)的选波规定对结构弹性时程分析有较好的预估; 对结构弹塑性反应,《建筑抗震韧性评价标准》(GB/T 38591—2020)表现出与目标反应较好的一致性;《建筑结构抗倒塌设计标准》(T/CECS 392—2021)考虑了与目标谱的分段周期匹配选波, 在考虑弹塑性反应周期延长方面有所不足, 存在低估结构反应的可能。

关键词: 钢筋混凝土结构; 抗震规范; 时程分析方法; 地震波选取; 弹塑性反应

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0260-06

Comparative Study on Ground Motion Records Selection Methods in Codes for Structural Time-history Analysis

GUO Wei^{1,2,3}

(1. China Highway Engineering & Consulting Co.LTD., Beijing 100101; 2. Highway Engineering Supervision & Consulting Co.,Ltd., of CHECC, Beijing 100101; 3. Research Institute for Full-Process Engineering Management & Consulting Development of CHECC, Beijing 100101)

Abstract: Time history analysis has been used as the main method for assessing the seismic response of structures in the code. The input ground motion records are an important factor affecting the results of the time history analysis. The records input provisions involved in the building related seismic codes are summarized. With the help of the weighted scaling method et al, we take 15-storey and 30-storey reinforced concrete high-rise structures as examples, and the results of the elastic and elasto-plastic time response of the structure are compared with the seismic responses from the records selected according to the codes and methods. In the research we use the maximum inter-story drift ratios as the target response. The results show that the records selection provisions of *Code for Seismic Design of Buildings* (GB 50011—2016) and *Standard for Anti-collapse Design of Building Structures* (T/CECS 392—2021) provide a good prediction of the elastic response values by time-history method. For the elastic-plastic time-history analysis the response based *Standard for Seismic Resilience Assessment of Buildings* (GB/T 38591—2020) shows better consistency with the target response. The recommended record selection for *Standard for Anti-collapse Design of Building Structures* (T/CECS 392—2021), which considers the segment period matching with the target spectrum, which is inadequate in considering the length of the structural periods during elasto-plastic response. There is a possibility of underestimating the structural response.

Keywords: reinforced concrete structures; seismic design code; time-history analysis; ground motion records selection; inelastic seismic response

0 引言

输入地震波选择是采用时程分析进行结构抗震

设计及性能评估的基础, 在工程实践中不同地震波输入会给结构抗震分析结果带有一定的主观性^[1-3], 也可能造成结构反应相差数倍之多^[4]。随着全球范围内获取的强地震动记录不断增加及公开数据库建立, 如何从中选择合适的地震波以充分评估结构的地震反应是时程分析需要重视的问题。

我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2016)^[5]

收稿日期: 2024-12-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178473)

作者简介: 郭维(1973—), 男, 博士, 工程师, 从事桥梁及结构抗震研究及技术管理工作。

(简称“抗震规范”)对于地震动选取仅给出了较为笼统的一般性规定,初选参数(震级,距离和场地条件)、调幅方式、匹配周期范围等均没有明确的条文说法,谱匹配仅要求平均谱与目标谱的谱值在结构主要振型周期点上的误差不大于 20%,并没有很好地控制单条波反应谱的离散性。因此针对该问题,杨溥等人^[6]很早提出双频段选波方法,可保证选取地震波反应谱与目标谱能有较好的一致性。陈波等人^[7]认为对于中高层结构应选取 $[0.2T_1, 2T_1]$ 谱匹配周期段作为控制结构反应的关键区段。除了对匹配周期范围研究外,近年来国内学者从不同角度对选波方法进行了优化,如张锐等人^[8]提出了加权调幅选波法,已充分考虑了高阶振型对地震反应的影响,可有效降低结构反应的离散性。冀昆等^[9]给出了一套不依赖于结构动力特性的强震记录选取流程,主要依据是与规范设计谱的匹配一致。

考虑到结构进行抗震分析时会有不同的性能水准与功能评价要求,最新发布的《建筑结构抗倒塌设计标准》(T/CECS 392—2021)^[10](简称“抗倒塌标准”)针对弹塑性时程分析,也给出了地震波筛选原则,包括记录初选和谱匹配周期段划分等,并依据

不同场地类别和特征周期提供了推荐地震波。《建筑抗震韧性评价标准》(GB/T 38591—2020)^[11](简称“抗韧性标准”)关于地震波选取的规定与抗震规范相比,选取记录数量增多,并对峰值速度进行了限定。可见,上述各规范对输入地震波选择的规定存在一定的差别,而依照各规范选择输入地震波对时程分析结果的影响未知,适用性也有待进一步研究。

本文依据上述 3 部规范分别选取适当地震波,以及采用人工波、加权调幅法和冀昆方法作为辅助,对 8 度罕遇地震作用下 15 层和 30 层结构时程分析结果进行了比较,以进一步探讨国内规范选波条款应用于高层结构抗震的差异及适用性。

1 不同结构抗震规范选波规定

抗韧性标准^[12]要求建筑在遭遇设定地震水准的地震作用下,可维持和恢复原有建筑的功能;抗倒塌标准^[13]规定当发生爆炸、撞击、地震等偶然事件时,结构整体具有保持稳定的能力。含“抗震规范”在内的上述 3 部规范分别对地震波选取给出了相关规定,具体见表 1。

表 1 国内各结构抗震规范地震波选取条款对比

规范名称	《中国建筑抗震设计规范》 (GB 50011—2016)	《建筑抗震韧性评价标准》 (GB/T 38591—2020)	《建筑结构抗倒塌设计标准》 (T/CECS 392—2021)
记录初选	按照建筑场地类别和设计地震分组		依据场地条件初选 $PGA \geq 0.1g$, $PGV \geq 12.5 \text{ cm/s}$ 的地震波
记录来源	天然波和人工波(天然波不少于总数的 2/3)		
记录数量	3 组;时程法的包络值与振型分解反应谱法的较大值; 7 组及以上;时程法的平均值和振型分解反应谱法的较大值	不少于 11 组	应选用不少于 3 组;宜采用不少于 7 组 (同一地震事件中选用的记录不超过 2 组)
调幅方式	PGA 调幅	PGA 调幅至规定值;PGV 不应小于规定值	PGA 调幅
调幅系数	无要求	无要求	无要求
持时	有效持时为 $5T_1 \sim 10T_1$	有效持时不宜小于 $5T_1$ 和 15 s	有效持时不应小于 $5T_1$
目标谱	抗震规范设计谱(罕遇地震 T_g 增加 0.05 s)		抗震规范设计谱(罕遇地震 T_g 增加 0.05 s;极罕遇地震 T_g 增加 0.1 s)
频谱匹配	多组时程曲线的平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符		划分为 3 个匹配周期段(0.1~1.0 s;1.0~3.0 s;3.0~6.0 s)
结构反应	底部剪力的计算结果与振型分解反应谱法结果的误差在 35% 以内(单条) 底部剪力计算结果的平均值与振型分解反应谱法结果的误差在 20% 以内	无要求	无要求

注:1. T_1 为结构的基本周期;PGA 为峰值加速度;PGV 为峰值速度; T_g 为特征周期。

由表 1 可知,3 部规范的共同点在于对地震波初选仅给出了比较模糊的规定,对于初选参数没有提供可参考的范围,并且谱匹配仅规定在统计意义上相符。抗震规范和抗倒塌标准规定地震波数量下限

为 3 条,宜选 7 条;而抗韧性标准将输入地震波数量的下限值提高到了 11 条,并对时程分析输入地震波峰值速度 PGV 给出了规定。抗倒塌标准针对弹塑性时程分析的地震波选取给出了相对具体的操作方

法,选取的原始记录应满足 $PGA \geq 0.1g$ 、 $PGV \geq 12.5 \text{ cm/s}$,经 PGA 调幅后,依据结构基本周期 T_1 选取周期段 (0.1~1.0 s; 1.0~3.0 s; 3.0~6.0 s) 进行谱匹配选波,同时要求各组记录中 PGA 较大的水平记录参与谱匹配,记录反应谱的特征周期与设计谱特征周期尽量接近。针对 7 度设防区,不同场地类别 (共四类) 和特征周期分别给出了匹配各周期段的 3 组 (每组 7 条) 推荐地震波。

基于不同学者的工作^[14],发现加权调幅法和冀昆方法对长周期结构 (如高层钢筋混凝土结构) 具有较好的效果,所得结构反应准确性较高,且具有较低的离散性,也被纳入到本文比较研究之列。

2 钢筋混凝土高层结构时程分析

2.1 钢筋混凝土高层建筑结构分析模型

本文以 15 层 (45 m) 和 30 层 (100 m) 钢筋混凝土结构为实例,他们所在地区设防烈度为 8 度 (0.2g),场地类别为 II 类,设计地震分组为第二组,其结构自振特性如表 2 所示。采用 SAUSAGE 软件进行弹性和弹塑性时程反应分析,模型详细信息及建模过程可参考文献^[14]。

表 2 结构自振特性

振型	周期/s		累积质量参与系数		主振方向	
	15	30	15	30	15	30
1	1.15	2.59	0.3	0.71	Y	Y
2	0.34	0.81	0.87	0.85	Y	Y
3	0.16	0.43	0.92	0.90	Y	Y

2.2 输入地震波选择

以抗震规范设计谱 (简称“规范设计谱”) 为目标谱,各方法的设置参数及选波结果分述如下。

2.2.1 依据规范选择地震波

(1) 抗震规范^[5]: 本文采用 SAUSAGE 软件的自带功能选取满足抗震规范要求的地震波。首先针对算例结构从特征周期 $T_g = 0.45 \text{ s}$ (罕遇地震加 0.05 s) 对应的数据库中获得一定量的地震波作为备选波 (共 133 条), 再进一步针对 15 层和 30 层设置筛选参数 (见表 3), 分别优选出 7 条天然波。依据抗震规范的建议, 以 7 条地震波所得结构反应均值作为结构反应估计值。

表 3 算例结构的参数设置在满足规范要求的基础上调整了误差范围, 以筛选出更符合规范要求的地震波。它也表明抗震规范的选波规定比较宽泛, 需要小心及精细化的予以执行。

表 3 算例结构的参数设置

结构	单条地震波基底剪力与 CQC 基底剪力误差	地震波基底剪力平均值与 CQC 基底剪力误差	3 个主要周期点的平均谱值与规范谱值的误差	筛选组数每组 7 条
15	$\leq 15\%$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	15
30	$\leq 15\%$	$\leq 5\%$	$\leq 10\%$	18

(2) 抗倒塌标准^[10]: 依据算例结构的场地类别、设计地震分组和基本周期 T_1 , 选取了标准中针对 II 类场地、 $T_g = 0.45 \text{ s}$ 、 $[1 \text{ s}, 3 \text{ s}]$ 周期段推荐的 7 条地震波。

(3) 抗韧性标准^[11]: 基于 QuakeManager 选波程序, 首先从 PEER (NGA-WEST2) 数据库中对地震波进行初筛, 初筛原则如下: 震级 (M_w) 6~8 级; 断层距 20~80 km; 平均剪切波速 (V_{s30}) 260~500 m/s。该标准仅规定谱匹配满足统计意义上相符, 并没有明确说明具体标准, 参考美国规范 ASCE 7-16、欧洲规范 Eurocode 8 及陈波等人^[7] 建议匹配周期范围为 $[0.2T_1, 2T_1]$ 。最终对算例结构分别选取了 $PGV \geq 40 \text{ cm/s}$ 的 11 条地震波。 V_{s30} 是重要的场地参数, 参考了郭峰^[15] 和吕红山等人^[16] 针对 II 类场地给出的建议取值, 以 260~500 m/s 作为场地条件的筛选范围。

2.2.2 其他选波方法

加权调幅法^[8] 从 PEER 数据库中初选了 20 组水平双分量作为备选波, 详细信息可参考^[7]。然后每个台站只取其中一条水平分量, 避免同台站两分量间的相关性影响, 匹配周期段取 $[T_{m, \min}, 2T_1]$, 对算例结构分别选取匹配误差较小且 $SF \leq 4$ 的 7 条地震波。 $T_{m, \min}$ 可参考文献^[8] 根据主要影响结构反应的高阶振型数确定。

冀昆等人^[9] 给出了不同设防水准罕遇地震下的 II 类场地的记录数据集。本文 2 个高层建筑均处于 8 度设防区, II 类场地, 因此这算例结构均可直接取用冀昆方法中推荐的 7 条强震记录, 其中 5 条来源于 PEER 数据库, 2 条来源于国内的强震记录。

3 不同选波方法时程分析结果

3.1 确定目标反应

由于人工波谱与目标谱有较高的匹配度, 将输入人工波得到的结构反应均值作为目标反应。生成人工波采用 SeismoMatch 软件^[17-20], 匹配周期范围设置为 $[0.2T_1, 2T_1]$, 以规范设计谱为目标谱, 对原始加速度反应谱进行幅频调整, 按照容差从小到大的原

则,分别优选 7 条波。图 1 所示为算例结构的最大层间位移角(目标反应)沿结构层数的分布情况。

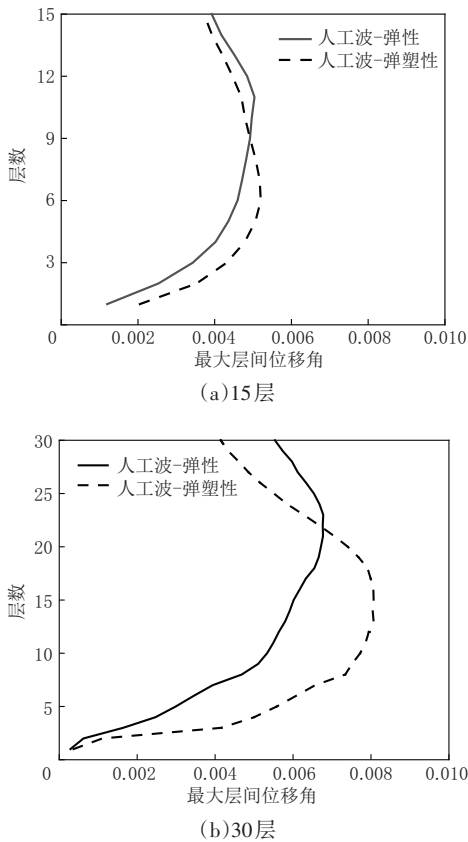


图 1 最大层间位移角目标反应

3.2 弹性时程反应对比分析

对各选波方法的时程分析结果参照目标反应进行归一化处理,即将结构反应均值除以人工波输入所得结果的均值,本文称为归一化系数 a 。图 2 和图 3 给出了各规范选波法得到的算例结构最大层间位移角均值的归一化结果,两个结构得到的结构反应均值与目标反应的偏差沿楼层变化较小,抗震规范和抗倒塌标准的归一化系数 a 接近 1,结构反应均值与目标反应比较接近,抗韧性标准的归一化系数 a 在 0.80 左右,略偏小。对于变异系数 COV,抗震规范法和抗韧性标准的 COV 比较接近,在 0.2,而抗倒塌标准的 COV 略大,约为 0.2~0.3。

加权调幅法和冀昆推荐地震波的结构反应均值与目标反应的偏差均在 20% 以内,30 层结构采用两种方法得到 a 均接近 1。冀昆推荐地震波的结构反应均值略大。从变异系数 COV 来看,加权调幅法的 COV 较小(0.1 左右)。

从弹性时程分析结果看,上述选波方法与目标反应的偏差都在 20% 以内,对结构反应评价结果具有较好的一致性。

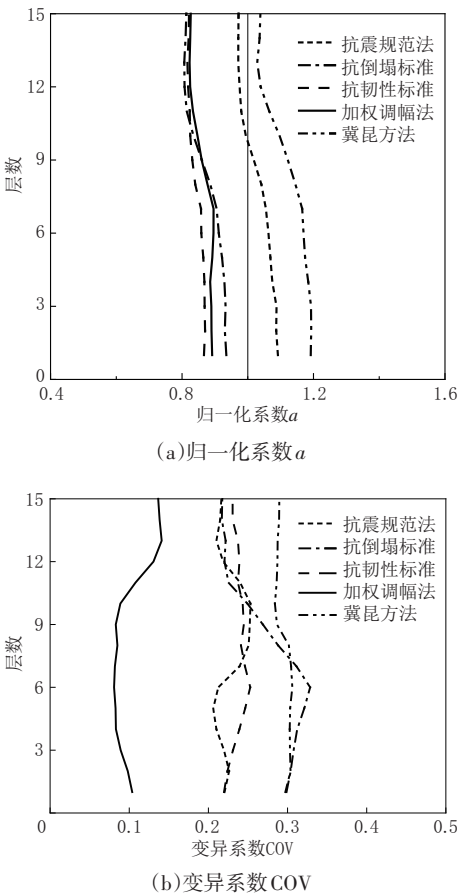


图 2 15 层结构归一化系数 a 和变异系数 COV

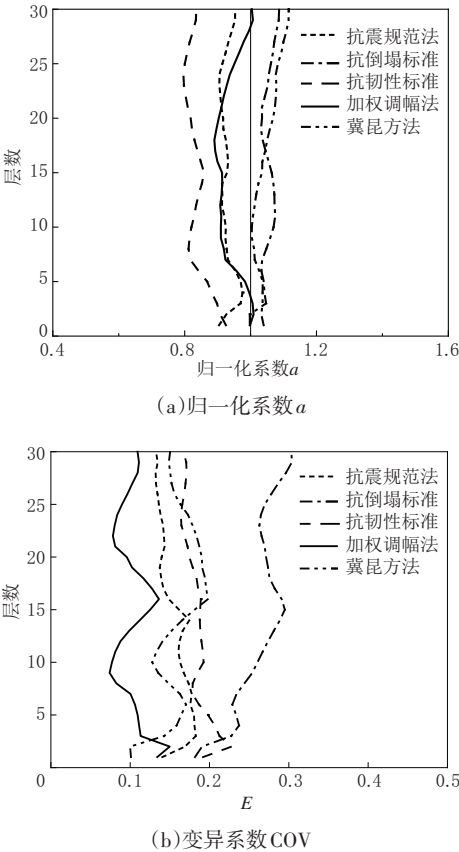


图 3 30 层结构归一化系数 a 和变异系数 COV

3.3 弹塑性时程反应对比分析

由图4和图5给出了算例结构弹塑性反应的归一化反应及变异系数计算结果,可以看出,15层结构采用各规范选波方法得到的归一化系数 a 在0.8附近,采用抗震规范法所得的 a 接近1,说明结构反应均值与目标反应较为一致,抗倒塌标准和抗韧性标准的 a 均小于1,结构反应均值与目标反应相比较小;对于30层结构,抗韧性规范 a 在0.8左右,而抗震规范和抗倒塌标准的结构反应均值与目标反应有较大的偏差,尤其是在底部的偏差均超过了55%。从算例结构弹塑性反应结果来看,抗倒塌标准选择(或推荐)的地震波都得到了较小的结构均值反应的估计,可能原因是其推荐地震波是分周期段的,这样就不能很好地反映结构弹塑性反应的周期延长效应。就30层结构而言,仍以 $\pm 20\%$ 作为评价标准,只有抗韧性标准的选波计算结果可以接受,其要求地震波的PGV限值且数量是至少11条。作者在实际操作中也发现满足PGV限值确实决定了选择的地震波。从变异系数COV沿楼层的分布来看,对于30层结构,3种规范法的COV均较大,抗倒塌标准的COV在底部达到了0.49。

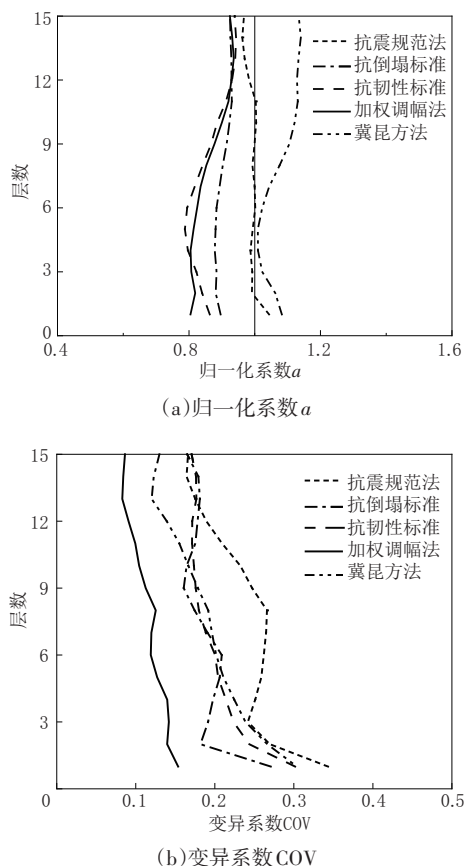


图4 15层结构归一化系数 a 和变异系数COV

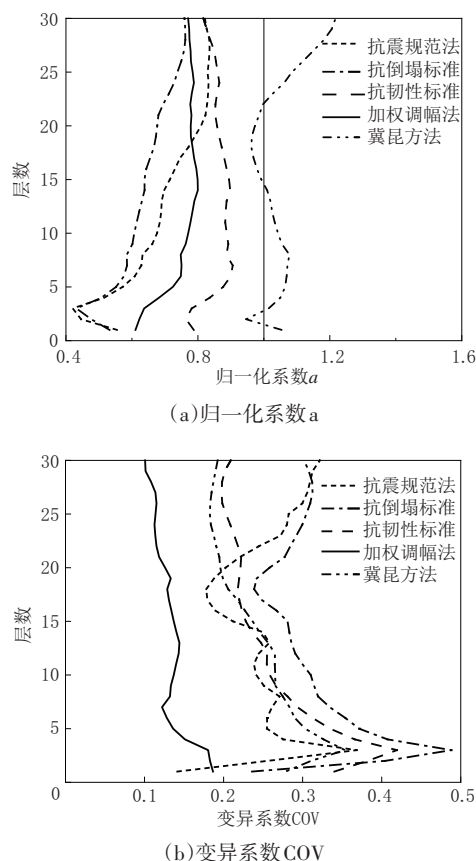


图5 30层结构归一化系数 a 和变异系数COV

从算例结构采用加权调幅法和冀昆推荐地震波得到的归一化系数 a 来看,加权调幅法的 a 小于1,尤其是30层结构在底部的 a 接近0.6;冀昆方法的 a 大于1,与目标反应的偏差在20%以内。从变异系数COV可知,加权调幅法的COV在0.2以内,冀昆方法的COV略大。

就上述弹塑性结构反应结果比较,可做如下解释:抗震规范法为依照弹性时程分析选取的地震波,在3个主要周期点谱匹配较好,其他周期段的匹配效果一般,因此,30层的预估结果不理想与谱匹配仅在主要周期点控制误差有关;抗倒塌标准依据结构基本周期 T_1 确定匹配周期段,对于弹塑性分析阶段,刚度降低会引起自振周期延长,而谱匹配在匹配范围外的匹配效果一般,3~6 s的平均反应谱值均小于目标谱值,并且直接采用了该标准附录C的(设防烈度7度)推荐地震波,这些问题都有可能造成结构弹塑性反应与真实反应产生较大的差异;冀昆等人^[9]提到对于罕遇地震作用下的结构验算,需保留一定的安全冗余度,因此推荐地震波得到的结构反应均值会较大。

3.4 最大层间位移角比较

作为本文关心的主体,图6和图7给出了依据3

部规范选择地震波,15层和30层结构最大层间位移角沿楼层的分布(均值+方差条状图),仍然可见抗倒塌规范在对结构弹塑性反应估计的非保守性。

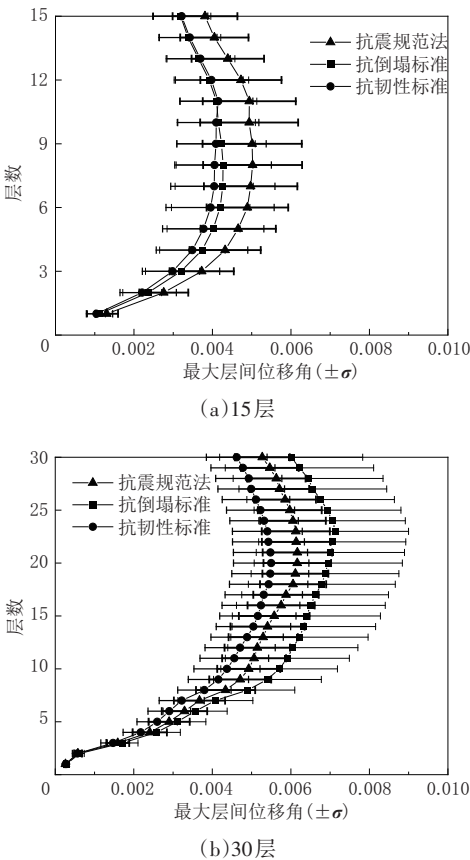


图6 弹性最大层间位移角(±σ)

4 结 语

本文对现行3部规范以及其他不同抗震时程分析选波方法进行了比较研究。以15层和30层钢筋混凝土高层建筑为例,基于各选波方法选取输入地震波,对结构进行了弹性和弹塑性时程反应分析,所得结论如下。

(1)抗震规范选波法和抗倒塌标准对于结构弹性时程反应有较好的预估,而弹塑性反应则较不一致,特别是30层结构反应均值与目标反应有较大的偏差。

(2)抗韧性标准弹性与弹塑性时程反应与目标反应的偏差在20%以内,特别是对30层结构弹塑性反应估计方面,认为是选波条文引入了PGV限值原因。

(3)抗倒塌标准推荐的地震波考虑了分周期段的目标谱匹配,在考虑弹塑性反应周期延长方面存在不足,对高层结构(如30层)地震反应存在低估可能。

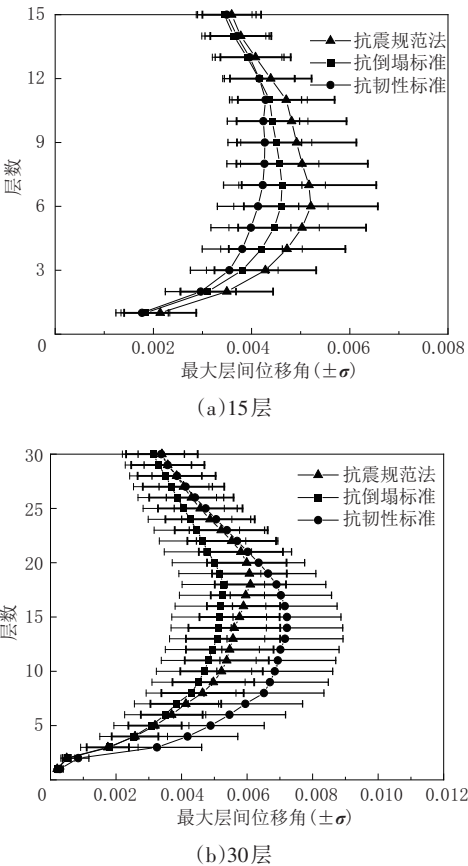


图7 弹塑性最大层间位移角(±σ)

参考文献:

[1] 张锐,李宏男,王东升,等.结构时程分析中强震记录选取研究综述[J].工程力学,2019,36(2):1-16.
[2] 温瑞智,冀昆,任叶飞.结构时程分析中多层次强震动记录输入选取研究综述[J].地震工程与工程振动,2019,39(5):1-18.
[3] 李英民,赖明,白绍良.工程结构的地震动输入问题[J].工程力学,2003,20(增刊):76-87.
[4] 王亚勇,刘小弟,程民宪.建筑结构时程分析法输入地震波的研究[J].建筑结构学报,1991,12(2):51-60.
[5] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].
[6] 杨涛,李英民,赖明.结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J].土木工程学报,2000,33(6):33-37.
[7] 陈波,徐超,温增平.地震动记录调整中反应谱控制周期及有效性分析[J].工程力学,2015,32(增刊1):1-10
[8] 张锐,王东升,陈笑宇,等.考虑高阶振型影响的时程分析加权调整选波方法[J].土木工程学报,2019,52(9):53-68.
[9] 冀昆,温瑞智,任叶飞.适用于我国抗震设计规范的天然强震记录选取[J].建筑结构学报,2017,38(12):57-67.
[10] T/CECS 392—2021,建筑结构抗倒塌设计标准[S].
[11] GB/T 38591—2020,建筑抗震韧性评价标准[S].
[12] 任军宇,潘鹏,王涛,等.GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》解读[J].建筑结构学报,2021,42(1):48-56.
[13] 叶列平,曲哲,陆新征,等.提高建筑结构抗地震倒塌能力的设计思想与方法[J].建筑结构学报,2008(4):42-50.
[14] 蔡丽桢,王东升,张锐,等.钢筋混凝土高层建筑抗震时程分析选波方法比较研究[J].世界地震工程,2021,37(2):203-213.

(下转第 272 页)