

文章编号: 1000-5013(2009)02-0191-04

基于弹性总输入能的地震波选择方法

刘良林, 王全凤, 沈章春

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 针对国家标准抗震设计规范的要求, 采用弹塑性时程分析方法对结构进行分析模拟. 考虑影响时程分析可靠性的因素, 探讨目前地震动选择方案的合理性. 基于当前选波方案存在的缺陷, 并考虑持时的影响, 采用弹性总输入能对选波方案进行补充. 理论与模拟分析表明, 所提出的选波方案全面地考虑了地震动 3 个因素影响, 而且结构计算结果更合理.

关键词: 弹塑性时程分析; 地震动; 弹性总输入能; 持时

中图分类号: TU 311.4

文献标识码: A

在国家标准《GB 50011-2001 抗震设计规范》(以下简称《抗震规范》)^[1] 中规定, 对于特别不规则的结构、甲类建筑和不同场地类别下超过房屋高度范围的高层建筑, 应采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算. 由于地震作用的随机性, 结构抗震面临着如地震动输入、数学计算模型, 以及动力响应中算法等不确定性因素. 建筑结构时程分析的可靠性, 不仅取决于结构模型和计算方法, 而且与地震动输入有直接的关系^[2]. 由于输入地震动的不同, 在时程分析计算中所得出的地震反应相差甚远, 计算所得结果可以达到数倍甚至十几倍之多^[3]. 因此, 合理的选择地震动记录, 是结构时程分析方法首先要面临的问题. 本文探讨影响时程分析可靠性的因素, 以及目前地震动选择方案的合理性

1 选波方案

1.1 常规选波方案

《抗震规范》规定, 采用时程分析法时, 应按建筑场地类别与设计地震分组, 并选用不少于两组的实际强震记录和一组人工模拟的加速度时程曲线^[1]; 正确选择输入的地震加速度时程曲线, 要满足地震动 3 个要素的要求, 即频谱特性、有效峰值和持续时间均要符合规定^[1]. 我国学者在地震波选择方面做了大量的工作, 基本形成了按照反应谱的两频率段的选波思路. 国外较先进的抗震规范分别针对平立面不规则的建筑、有大跨构件且超过一定高度的高层建筑和特别重要的建筑, 提出了按照时程分析法进行抗震计算的要求. 对于时程分析法中选取地震动的原则, 基本上达成了共识. 即输入地震动的反应谱须拟合设计反应谱, 但对于反应谱拟合程度的控制尚有争议^[4].

尽管选波的基本原则要求, 记录的反应谱与场地设计反应谱相一致, 但不可能要求所选记录的反应谱与规范标准反应谱在各频段均有较好的拟合. 因此, 仍然存在有多种可选方法实现谱特性的一致性原则^[5]. 常见的选波方案有依场地选波、依场地特征周期 T_g 选波、依反应谱的两个频率段进行选波和依反应谱 T_g 前后的面积选波等 4 个方案. 基于此, 文[5]计算了结构在多遇地震下结构的弹性底部剪力、罕遇地震下结构的弹塑性顶点位移和最大层间位移角. 通过比较表明, 依反应谱的两个频率段进行选波方案的计算结果, 其结构响应的离散系数明显要小, 即该方案合理可行. 文[6]也验证了此说法.

但是很明显, 双指标选波方案没有考虑加速度反应谱的衰减规律, 也没有考虑地震动输入 3 要素中的持时. 事实上, 地面运动的持时反映出地震波的强震段的作用持续时间的长短, 是影响结构动力反应

收稿日期: 2008-06-08

通信作者: 王全凤(1945-), 男, 教授, 主要从事土木工程的研究. E-mail: qfwang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578066/E080507)

的重要因素,尤其是对于非线性反应,持时的影响尤为重要.

文[2]的研究结果表明,即使结构的力和位移反应都满足规范所规定的抗震设计要求,强震持续时间的不同将引起结构滞回耗能的不同. 结构即使是因为承载力不够或者位移过大而破坏,也可能由于过大的耗能而产生累积损伤破坏.

1.2 基于弹性总输入能选波方案

周期大于 3 s 的超大型建筑物和工程设施、工业设备,对于短脉冲高峰值的加速度地面运动,其结构的反应相对迟钝和滞后. 对于此类长周期结构,危险的是地面运动长周期成分与结构发生共振作用. 文[6]指出,对于这样的情况下仍用现行的加速度设计反应谱进行抗震验算,显然不合适. 基于此,文[4]认为,通过对速度反应谱、位移反应谱、能量反应谱的控制是解决问题的出路之一.

《抗震规范》规定进行时程分析时采用“2+1”的小样本地震动输入,而工程设计中不可能采用大样本分析. 按照双频段选波方案有可能只选到长、中、短持时中的一种或两种. 短持时地面运动引起首超破坏的可能性较大,而中长持时使结构产生累积损伤的可能性较大. 由于地震作用的往复进行,结构或构件在不断耗散能量的过程中产生累积损伤破坏. 因此,根据层间位移角判断,即使结构的位移反应没有达到位移破坏准则规定的限值,也不能认为结构安全. 这对于短持时波也是一样的^[7].

持时是影响结构弹塑性地震反应的重要因素,但是持时没有一个通用的定义. 不同的研究者出于不同的目的,使用不同的持时定义. 考虑到弹性总输入能是一个比较稳定的值,文[2,7]建议以地震动输入到线性单自由度体系的弹性总输入能反应作为补充指标,来考虑地面运动强震持时进行选波.

2 实例计算

基于场地类别、加速度峰值以及反应谱的特征周期与地震影响系数最大值,文[4]从强震记录数据库([http:// peer. berkeley. edu/ smcat/ search. html](http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html))选取了 38 条强震记录. 通过对这 38 条波形成的反应谱与修正反应谱的对比分析,选取了其中 13 条强震记录进行平面弹塑性时程分析. 按照文[2,7]提出的以弹性总输入能为双频段选波方案的补充的方法,在 12 条波的基础上,进行再次选波.

2.1 选波过程

2.1.1 持时 持时是指地震时剧烈震动的那一段时间^[8]. 文[8]通过收集国内外强震资料,对震级与持时的关系进行了拟合分析,得到了震级(M)与持时(t)的关系式. 即

$$\log t = 0.33 \times M - 0.87. \tag{1}$$

根据式(1)计算的部分地震波持时,如表 1 所示.

表 1 地震动持时

Tab.1 The motion duration of earthquake

2.1.2 地震动输入总能量计算

基于反应谱理论的思路,建立了线性单自由度体系的地震动输入能量

地震名称	SUPERSTION	CHICHI	IMPERIAL	NORTHRIDGE	LOMA
M	6.7	7.6	6.5	6.7	6.9
t/s	21.9	43.5	18.8	21.9	25.5

谱. 由于阻尼比对谱形的影响不大,因此统一采用阻尼比为 0.05 的情况进行分析^[9]. 按照文[9]提供的方法,根据表 1 计算结果及 12 条波的数据,计算各种需要的参数,如表 2 所示. 各参数的物理意义参见

表 2 参数值

Tab.2 Values of parameters

地震名称	A/g	$V/cm \cdot s^{-1}$	$V \cdot A^{-1}$	t/s	β_{max}	t_1/s	t_g/s	γ
B-ICC00	0.358	46.4	0.13	21.9	4.5	0.8	1.3	0.55
CHY006 E	0.353	70.6	0.20	43.5	7.6	2.1	2.7	0.85
H-DLT352	0.351	33.0	0.10	18.8	4.5	0.6	1.0	0.55
H-E04230	0.360	76.6	0.22	18.8	4.1	1.2	3.0	0.85
H-E05230	0.379	90.5	0.24	18.8	4.1	1.3	3.6	0.85
H-EDA270	0.352	71.2	0.21	18.8	4.1	1.1	2.7	0.85
STC090	0.368	28.9	0.08	21.9	4.5	0.5	0.8	0.55
CNP196	0.420	60.8	0.15	21.9	4.5	0.9	1.5	0.55

续表								
Continue table								
地震名称	A/g	$V/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$V\cdot\text{A}^{-1}$	t/s	β_{\max}	t_1/s	t_g/s	γ
G0400	0.417	38.8	0.09	25.5	4.5	0.6	0.9	0.55
H-E06140	0.410	64.9	0.16	18.8	4.1	0.9	1.8	0.85
LOS000	0.410	43.0	0.11	21.9	4.5	0.6	1.1	0.55
R03090	0.443	38.2	0.09	21.9	4.5	0.5	0.9	0.55

文[9]. 绘制 12 条波的 β_t 的关系曲线, 如图 1 所示. 地震动弹性总输入能^[9] 为

$$E = \frac{1}{2}m\beta^2(\frac{V}{A})A^2.$$

(2)

按照式(2) 与表 2, 图 1, 计算各条波的地震动弹性总输入能 E , 如图 2 所示. 表 2 中, 地震名称参见文

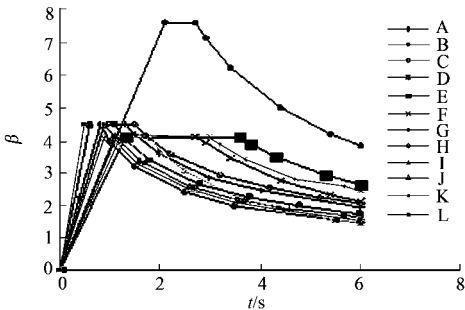


图 1 地震波的 β_t 关系曲线
Fig. 1 β_t curves of seismic waves

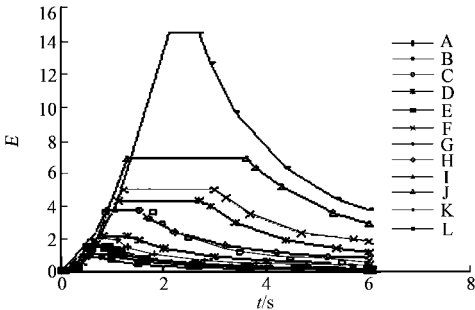


图 2 地震波的 $E-t$ 关系曲线
Fig. 2 $E-t$ curves of seismic waves

[4], 并将其按表 2 顺序编号为 A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, 对应于图 2 中曲线. 根据文[7] 建议选择波的方法, 由于地震记录 A, B 的地震动弹性总输入能量相差在 10 倍左右. 因此, 选择这两条波作为地震动输入对象.

2.2 实例计算

某 12 层钢筋混凝土框架结构, 抗震设防烈度为 8 度, ㊟类场地, 地震分组为第 1 组. 各层层高: 1~ 4 层为 4.50 m, 5~ 11 层为 3.30 m, 12 层为 3.60 m; 构件截面尺寸: 1~ 4 层梁尺寸为 700 mm×300 mm, 柱尺寸为 700 mm×700 mm; 5~ 8 层梁尺寸为 600 mm×300 mm, 柱尺寸为 600 mm×600 mm; 9~ 12 层梁尺寸为 600 mm×300 mm, 柱尺寸为 500 mm×500 mm. 根据 PKPM 软件中的 SATWE 模块计算结果, 在满足规范的要求下, 对配筋结果进行适当的调整. 运用非线性分析程序 IDARC, 根据选波方案, 输入地震波对结构进行弹塑性时程分析, 结果如表 3 所示. 表 3 中, 层间位移角分布为 φ , 变形形态为 Δ .

表 3 各种地震波输入下结构的最大反应

Tab.3 The maximum response of structure for the various seismic wave								
楼层	地震记录 A		地震记录 B		Taft 波		E+Centro 波	
	$\varphi/\%$	Δ/mm	$\varphi/\%$	Δ/mm	$\varphi/\%$	Δ/mm	$\varphi/\%$	Δ/mm
12	0.20	138.2	0.61	582.3	0.21	307.0	0.62	388.7
11	0.58	135.1	1.04	566.0	2.79	304.9	2.25	387.4
10	2.32	121.3	1.03	542.6	6.62	332.0	3.02	366.5
9	1.58	72.4	1.17	522.8	5.09	179.3	4.83	311.0
8	0.52	57.5	0.50	504.3	0.16	32.4	4.40	198.8
7	0.29	52.5	0.46	494.6	0.16	29.7	2.82	194.6
6	0.24	48.0	0.41	485.8	0.15	29.6	0.77	205.8
5	0.27	46.6	0.62	482.3	0.14	27.0	0.78	197.1
4	0.21	42.9	3.79	479.1	0.16	23.9	0.84	179.0
3	0.27	34.4	5.16	314.1	0.17	18.0	0.92	146.8
2	0.30	23.5	3.45	162.9	0.14	14.0	1.27	105.5
1	0.24	10.9	0.39	17.5	0.19	8.6	1.08	48.6

结构整体损伤值分别为 1.669, 1.891, 0.516, 0.428. 从表 3 可以看出, 对于结构的变形形态, 按照所选

出的地震动输入,基本上涵盖了目前常用的 Taft 波和 El centro 波所对应的各种状态. 这种情况的意义在于给出了结构的最大变形,比较明显地给出了结构的极限变形能力.

3 讨论

美国对 36 个梁、柱组合试件的试验结果表明,框架结构极限位移角的分布为 $3.6\% \sim 12.5\%$ ^[10]. 本文模拟得到 4 种情况下的极限位移角分布分别为 $0.20\% \sim 2.32\%$, $0.41\% \sim 5.20\%$, $0.14\% \sim 6.62\%$, $0.62\% \sim 4.83\%$. 由此可以看出,所选择的 4 条输入地震波模拟的结果是比较正确的.

从结构的弹塑性位移来看,按照本文选波方法计算出的结果,体现了结构的薄弱层位于底部几层与刚度发生突变的位置(4,5 层之间与 8,9 层之间),与实际情况比较相符;而按照常用方法选出的地震动输入,不能全面地考虑到这一点. 从结构整体的损伤指数来看,在双频率选波方案基础上补充地震动输入能进行选波的方法,其计算的结果比常用方法结果要大,而且地震纪录 A 计算的结果比文[4]结果要大. 对于结构来说,损伤指数越大,结构破坏越严重.

不论是从结构的变形形态,还是从结构的整体损伤指数来看,都应当充分考虑地震动的持时影响. 本文通过非线性分析软件 IDARC 进行模拟,验证了所采用的选波方法的正确性与合理性.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部,国家质量监督检验检疫总局,中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范[S]. 徐正忠,等. 北京:中国建筑工业出版社,2001:26-30.
- [2] 刘 纲. 抗震框架结构能量反应的初步分析[D]. 重庆:重庆大学,2002.
- [3] 王亚勇,刘小弟,程民宪,等. 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.
- [4] 安自辉. 结构在罕遇地震下的强震记录选择[D]. 西安:西安建筑科技大学,2004:1-67.
- [5] 杨 溥,李英民,赖 明,等. 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.
- [6] 王亚勇. 关于设计反应谱、时程法和能量方法的探讨[J]. 建筑结构学报,2000,21(1):21-28.
- [7] 肖明葵,刘 纲,白绍良,等. 基于能量反应的地震动输入选择方法的讨论[J]. 世界地震工程,2006,22(3):89-94.
- [8] 李顺群,张吉明,朱朝艳,等. 考虑持时作用的地震能量表达式[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2004,23(3):306-308.
- [9] 刘哲锋,沈蒲生. 地震动输入能量谱的研究[J]. 工程抗震与加固改造,2006,28(4):1-5.
- [10] 曾丽娟. 钢筋混凝土异型柱框架结构非线性有限元分析及抗倒塌验算[D]. 西安:西安建筑科技大学,2003:55-56.

The Selection Method of Seismic Wave Based on Elastic Total Input Energy

LIU Liang-lin, WANG Quan-feng, SHEN Zhang-chun

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: According to the requirements of the code for seismic design of buildings, the elasto-plastic time-history method is adopted to analyse the structure. Considering the factors influencing the reliability of the time-history method, the rational selection method of seismic wave is studied. In order to improve the defects of current selection of seismic wave, it is suggested to use the elastic total input energy as the complementary method under consideration of the influence of motion duration. A nonlinear soft IDARC program is carried out. Both theoretical and computational analyses show: this selection method of seismic wave considers three factors of ground motion comprehensively, therefore the computational results are reasonable.

Keywords: elasto-plastic time-history analysis; ground motion; elastic total input energy; motion duration

(责任编辑: 鲁 斌 英文审校: 方德平)