建筑结构弹塑性时程分析中地震动记录选取方法的比较研究

曲 哲 叶列平 潘 鹏

(清华大学教育部结构工程与振动重点实验室，北京 100084)

摘要： 选择合适的地震动记录是采用弹塑性时程分析预测建筑结构地震响应的基础。列举了现有针对不同分析目的的三种地震动记录选取方法，比较了按不同方法建立的地震动记录选择集的地面运动峰值和反应谱特性，并通过分析两个不同初始周期框架结构的弹塑性地震响应，对不同地震动记录选取方法的分析结果进行了比较。研究结果表明，基于设计反应谱和基于最不利地震动的选取方法均与结构的初始周期相关，当结构在地震作用下刚度退化比较明显时，这些方法有可能难以达到预期的目标；而当地震动强度指标恰当、且选取的地震动记录数量较多时，基于台站和地震信息的选取方法不会造成过大的结构弹塑性地震响应的离散性，同时这种方法不依赖于结构的动力特性，操作简便，适用性强，适于在研究不同结构类型和不同动力特性建筑结构的抗震性能时应用。

关键词： 建筑结构；弹塑性时程分析；地震动记录；地震动强度；反应谱

中图分类号： TU312$^+$.1 **文献标识码：** A

文章编号： 1000-131X(2011)07-0010-12

Comparative study on methods of selecting earthquake ground motions for nonlinear time history analyses of building structures

Qu Zhe Ye Lieping Pan Peng

(Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of the Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing100084, China)

Abstract: Careful selection of earthquake ground motions forms the basis for performing nonlinear time history analyses of building structures. Different methods of selecting earthquake ground motions should be used in accordance with the purpose of the time history analyses. The applicability and applicable conditions of typical selection methods are discussed. Features of the earthquake ground motion sets established by different methods are compared in terms of the ground motion peak values, frequency contents and nonlinear seismic responses of building structures. The results show that the method based on design spectra and the method based on most-unfavorable earthquake may sometimes be unable to fulfill the aim of the selection due to their dependency on the initial vibration period of the structures, especially when the structure suffers significant stiffness degradation during the earthquake. On the other hand, the earthquake ground motions selected by the method based on the station/earthquake information would not induce unacceptable scattering in the nonlinear seismic responses of the structure given that appropriate earthquake intensity index is adopted. This method is simple and widely applicable for its independency on the dynamic characteristics of the building structures, which makes it favorable in studying the seismic performance of building structures of various types and dynamic characteristics.

Keywords: building structure; nonlinear time history analysis; earthquake ground motion; earthquake intensity; response spectrum

E-mail: qz@mails.tsinghua.edu.cn; ylp@tsinghua.edu.cn

引 言

弹塑性时程分析被认为是目前预测建筑结构地震响应和抗震性能评估最为准确的数值分析方法。

基金项目：国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90815025)，清华大学自主科研项目(201007214)

作者简介：曲哲，博士研究生

收稿日期：2009-09-18

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

除了结构的分析模型，地震动输入的选择也是影响弹塑性时程分析结果的重要因素。受多种因素的影响，地震动本身存在很大的随机性。迄今的研究表明[1]，地震动强度、频谱和持时是影响结构弹塑性地震响应的三个主要因素。为获得结构在不同地震动强度输入下的结构抗震性能，一般通过调整实际地震动记录的幅值来设定地震动强度大小。调幅时有多种地震动强度指标可供选用，如我国《建筑抗震设计规范》[2]采用地面峰值加速度（*PGA*）作为调幅指标，日本建筑中心[3]以地面峰值速度（*PGV*）作为调幅指标，美国 ATC-63[4] 等基于性能的抗震设计指南则选用结构基本周期对应的加速度谱值 $S_a(T_1)$ 作为调幅指标。文献[5]的研究表明，采用单一的地震动强度指标对地震动记录进行调幅，难以在各个周期段内均有效减小结构地震响应的离散性。但相对来说，在较大的周期范围内，*PGV* 与结构弹塑性地震响应的相关性最佳。为此，本文算例分析中采用 *PGV* 作为地震动记录的调幅指标。

除地震动幅值外，场地的地震动特性还包括地震动的频谱特性和持时，因此除调幅外，地震动记录选取方法也对结构的地震响应分析结果有直接影响。本文通过按不同分析目的所选取的三种地震动记录选择集的反应谱特性和两个不同初始周期框架结构在这些地震动作用下的弹塑性地震响应分析，对合理选取地震动记录的方法进行研究。

1　现有的地震动记录选取方法

根据分析目的的不同，各国抗震规范、指南和相关文献中用于结构弹塑性时程分析的地震动记录选取方法大致可分为以下三类。

1.1　基于台站与地震信息的选取方法

该方法又可分为两种，一种是以 ATC-63[4] 为代表的面向研究的选取方法；另一种是以 ASCE 7[6] 为代表的面向设计的选取方法。

1.1.1　ATC-63 中的选取方法

作为采用结构易损性曲线（fragility curve）评价建筑结构抗倒塌能力的基础，ATC-63[4] 以广泛的适用性为出发点，提出了一套基于台站和地震信息的地震动记录选取方法。其宗旨在于，一方面要排除不必要的或人为引入的离散性，如过小的地震或极少发生的震源机制下获得的地震动记录、仪器的有效记录频段与仪器安放位置的影响等；另一方面又希望保留地震动记录本身合理的离散性，包括地震动的频谱与持时特性的差异，以使所建立的地震动选择集可以为评价不同建筑结构的抗震性能提供统一的标准。

因此，其地震动记录选取规则尽量不直接限制地震动的频谱与持时特性，而是通过台站与地震信息来间接控制所选地震动的频谱与持时特性。其中，台站信息包括台站所在的场地条件、台站距离地震断层的距离、台站强震仪的有效记录频段等；地震信息则主要是独立的地震事件及其震级和震源机制等。

1.1.2　ASCE 7 中的选取方法

美国抗震设计规范 ASCE 7[6] 要求时程分析所选用的地震动记录应在震级、断层距和震源机制等方面与对当地最大考虑地震（Maximum Considered Earthquake，MCE）贡献较大的地震相一致。一个地区的最大考虑地震（MCE）由地震危险性分析给出，综合考虑了该地区附近各断层和潜在震源可能发生的不同震级地震的概率，并以谱加速度的形式给出对应于不同超越概率的地震动强度。进行时程分析时，根据当地最大考虑地震（MCE），通过“反综合”过程，反演出对当地地震危验性贡献较大地震的震级与震中距等参数。由反综合得到的震级和震中距，再加上场地条件，即可作为地震动记录选取的依据。文献[7]对这一反综合过程做了详细的介绍。

该方法希望所选地震动记录与抗震设计规范中规定的设计地震动（与 MCE 成比例）取得一致，并且仅针对一个特定的地点和特定的场地，是面向工程设计的。由于该方法的实施需要以比较明确的潜在震源区域、详细的地震历史记录和比较充分的地震危险性分析为基础，因此暂不在本文中讨论。

1.2　基于设计反应谱的选取方法

基于设计反应谱的地震动记录选取方法，是直接将地震动记录反应谱与设计反应谱进行比较，由此来控制所选地震动记录的频谱特性，即所选用的实际地震动记录的反应谱与规范的设计反应谱尽可能接近。文献[8]提出的双频段控制方法比较有代表性。该方法在地震动记录数据库中直接挑选那些经调幅后其拟加速度反应谱在短周期段（如 $[0.1\text{s}, T_g]$）和结构一阶自振周期附近（$[T_1-\Delta T_1, T_1+\Delta T_2]$）与设计反应谱相差较小的地震动记录，而不考虑场地条件、震级、震中距等一系列客观参数的限制。其中，T_g 为场地特征周期，即设计反应谱短周期平台段终点对应的周期；T_1 为结构的一阶自振周期；ΔT_1 与 ΔT_2 为周期控制范围。考虑到结构遭受地震损伤后周期会有所增大，一般 ΔT_2 大于 ΔT_1。文献[8]建议取 $\Delta T_1=0.2\text{s}$，$\Delta T_2=0.5\text{s}$。

基于设计反应谱的地震动记录选取方法与工程结构的动力特性相关，即对不同基本周期的结构，所

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

选地震动记录可能不同。另一方面,该方法将与地震动特性有关的一切问题抛给设计反应谱,而设计反应谱实际上只是针对某种场地上的地震动特性经过多方面综合考虑后的一个偏于安全的结果。这种确定性的表达形式不利于反映地震动合理的离散性。因此,这种方法主要适用于地震动记录选取数量较少时的工程结构弹塑性时程分析校核。如我国抗震规范要求至少采用 3 条地震动记录对设计进行校核,美国 ASCE 7 要求用不少于 3 条地震动记录输入下的地震响应最大值对设计进行校核,而 FEMA 356[9] 则规定可以采用不少于 7 条地震动记录输入下的地震响应平均值对设计进行校核。

新西兰规范[10] 的地震动记录选取方法是基于台站和地震信息选取方法与基于设计反应谱选取方法的结合。该规范要求首先按照与 ASCE 7 类似的方法,挑选出与对当地地震危险性贡献较大的地震在震级、震中距和场地条件等方面相匹配的地震动记录,再根据一定的准则从中挑选出与规范的设计反应谱相接近的地震动记录,从而综合考虑了台站和地震信息对地震动特性的影响以及与规范设计反应谱相一致的问题。

1.3 基于最不利地震动的选取方法

在工程设计中,特别在非常重要的工程抗震设计中,有必要采用相对苛刻的地震动记录进行结构地震安全性的验算,即选用可能对结构造成最严重破坏的地震动记录。谢礼立、翟长海等[11-12] 在比较地震动潜在破坏势的基础上,提出了最不利地震动的概念,并结合我国现行抗震规范关于地震动强度等级和场地类别的划分,给出了确定最不利地震动的方法和对应于不同场地类别和结构类型的最不利地震动记录。确定最不利地震动包括以下两步:

(1) 分别按基于地震动本身特性或其线弹性反应谱的强度指标对所有地震动记录进行排序。根据翟长海等的研究[13],在实际应用中可以只考虑以下 5 个指标,即地面峰值加速度(PGA)、地面峰值速度(PGV)、地面峰值位移(PGD)、有效峰值速度(EPV)和相对能量持时(T_d)。对于各个指标,分别挑选排名靠前者,形成地震动记录备选数据库。

(2) 计算非线性单自由度体系在地震动记录备选数据库中的地震动输入下的地震响应,挑选出地震响应最大的地震动记录,即为最不利地震动。其中,非线性单自由度体系的周期与所研究结构的一阶自振周期相同。在计算非线性响应时,一般遵循等延性条件,即通过调整单自由度体系的屈服承载力,使其在不同地震动记录作用下具有相同的延性。谢礼立指出[11],原则上只考虑某一位移延性下的结果即可,并且单自由度体系可以采用双线性滞回模型。屈服强度系数和累积滞回耗能是文献[11-13]采用的非线性响应指标。

可见,上述过程中的第(2)步在比较结构的非线性地震响应时,是与结构自振周期相关的。为了兼顾适用性,翟长海等人[12] 将结构一阶自振周期分为 0 ~ 0.5s,0.5 ~ 1.5s 和 1.5 ~ 5.5s 三个区段,分别给出了适用于不同区段的最不利地震动记录,以便于工程应用。

综上所述,以上三种地震动记录选取方法所希望达到的目标并不相同。

基于台站和地震信息的地震动记录选取方法希望得到一个能够适用于不同结构类型和不同自振周期结构的地震动记录集合,并以此作为评价和研究各类建筑结构抗震性能的基础。这往往需要较多的地震动记录。

基于设计反应谱的地震动记录选取方法主要用于在实际工程设计中对所设计结构或既有结构的抗震性能进行校核与检验。为减少计算工作量并与规范设计目标相一致,该方法希望能够给出数量较少且尽量与规范的设计反应谱相一致的地震动记录,从而使所选地震动记录输入下的结构地震响应的离散性尽量小一些。

基于最不利地震动记录的选取方法,寻求少量具有很大潜在破坏势的地震动记录,以用于检验地震危险性很高地区的建筑或非常重要的建筑的抗震安全性。在采用该方法选出的地震动记录输入下,结构地震响应应明显大于按其他方法选出的地震动记录输入下的结构地震响应。

由此可见,基于设计反应谱的选取方法和基于最不利地震动的选取方法对于地震动记录输入下结构地震响应结果都有明显的倾向性。前者希望在所选地震动记录输入下结构的地震响应离散性比较小,后者则预期得到较大的结构地震响应。与之相比,基于台站和地震信息的地震动记录选取方法没有类似的倾向性。

然而,结构地震响应与输入地震动记录之间存在复杂的关系,上述基于设计反应谱和基于最不利地震动的地震动记录选取方法能否实现预期的效果,是值得探讨的问题。另一方面,虽然基于台站和地震信息的地震动记录选取方法的应用目标与后两种方法不同,但它所选出的地震动记录在结构地震响应的离散性和造成结构损伤程度等方面,与后两种方法是什么关系,也是值得关注的问题。为此,本文将按上述三

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

种方法，针对短周期和中长周期的两个算例结构，分别建立不同的地震动记录选择集，比较不同选择集中地震动记录的反应谱特性以及在这些地震动记录输入下结构的地震响应，从而对上述两方面问题进行讨论。

2　按不同方法建立的地震动记录选择集

2.1　地震动记录数据库

美国 PEER/NGA 强震记录数据库收集了自 1935 年至今的 3000 多条地震动记录。中国强震动台网中心(CSMNC)在 2008 年汶川地震中也获得了许多宝贵的强震记录。本文从这两个记录数据库中挑选出关键数据齐全的地震动记录，作为本文研究的地震动数据库。这些关键数据包括台站的场地条件和断层距等，同时要求强震仪的有效频率至少达到 0.16Hz，即有效周期至少达到 6s。另外，排除了地面峰值加速度 *PGA* 小于 40Gal 或地面峰值速度 *PGV* 小于 5cm/s 的地震记录。这样，从以上 PEER/NGA 数据库以及 CSMNC 的汶川地震数据库的近 4000 条地震动记录中得到 414 条地震动记录，每条地震动记录均包含 2 个水平分量，绝大部分地震动记录还包含竖向分量。

以包括上述 414 条地震动记录的数据库为基础，按照上节介绍的三种选取方法，分别建立地震动记录选择集。由于基于设计反应谱的选取方法和基于最不利地震动的选取方法都与所研究结构的动力特性相关，因此本文以下文介绍的一阶自振周期分别为 0.41s和 1.40s 的 3 层和 8 层钢筋混凝土框架结构为对象。需要说明的是，由于上述三种方法的应用目标不同，选择集包含的地震动记录数量应有所差别。比如，基于台站和地震信息的选取方法应选择较多的地震动记录，如 ATC-63 中的远场地震选择集包含了 22 条地震动记录；而基于设计反应谱或基于最不利地震动的选取方法一般只需要选出 3 条地震动记录。但为了比较不同选取方法所选地震动记录在结构弹塑性地震响应离散性和造成结构损伤程度方面的差异，每个选择集均包含 10 条地震动记录。

2.2　基于台站与地震信息的选取方法

综合考虑我国抗震设计规范的相关要求和 ATC-63 的地震动选取建议，按以下 6 条规则从上述 414 条地震动记录的数据库中选出 10 条水平地震动，记为“A 集”，相关信息列于表 1。

(1) 地震震级 $M>6.5$，以排除不太可能对建筑结构造成严重损坏的地震。

(2) 断层距大于 10km，以减少近场效应的影响。

(3) *PGA* 大于 0.2*g* 且 *PGV* 大于 15cm/s，以排除不太可能对结构安全性造成影响的地震。

(4) 30m 土层平均剪切波速介于 200～500m/s 之间。由于直接在坚硬岩石上的建筑结构并不多见，而软弱土层上的建筑结构的地震响应受结构与土的耦合作用影响较大，因此在针对大量的一般建筑结构抗震性能且不考虑结构-土耦合作用的研究中，宜排除坚硬岩石与软弱土层场地上记录到的强震记录。

(5) 同一地震只选取 1 条记录，且同一记录中的 2 个水平分量中只取 *PGV* 较大的 1 个，以消除选取过程对于地震事件的依赖性。当同一地震事件中记录到的地震动记录有不止 1 条符合其他所有条件时，选取 *PGV* 最大的 1 条。

(6) 仪器位于自由场地或较小建筑物的地面层，以避免结构-土耦合作用对地震动特性的影响。

表 1　基于台站与地震信息的选择集——A 集

Table 1　Selection based on station and earthquake information—Set A

ID	地震事件			台站条件		强震记录			
	震级	时间	名称	*Vs*_30 (m/s)	断层距(km)	文件名称	*PGA* (*g*)	*PGV* (cm/s)	T_d(s)
1	6.50	1976	Friuli, Italy-01	424.8	14.97	A-TMZ270	0.31	30.78	4.9
2	6.53	1979	Imperial Valley-06	274.5	22.03	H-DLT352	0.35	32.99	50.3
3	6.54	1987	Superst Hills-02	207.5	23.85	B-IVW360	0.21	34.51	28.7
4	6.93	1989	Loma Prieta	370.8	27.67	HSP000	0.37	62.30	16.4
5	7.28	1992	Landers	353.6	23.62	YER270	0.24	51.40	17.6
6	6.69	1994	Northridge-01	450.3	20.10	ORR090	0.57	52.54	9.1
7	6.90	1995	Kobe, Japan	256.0	19.14	SHI000	0.24	37.84	10.3
8	7.14	1999	Duzce, Turkey	326.0	12.02	BOL090	0.82	62.07	9.4
9	7.62	1999	Chi-Chi	446.6	45.15	TCU095-E	0.38	62.02	13.2
10	8.00	2008	汶川地震	300.0[1]	18.76	UA0097	0.48	35.87	72.0

注：1 数值为估计值，代表 II 类场地。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.3 基于设计反应谱的双频段控制选取方法

以杨溥等[8]建议的双频段控制选取方法为基础，首先以 PGV 作为地震动强度指标，将地震动记录统一调幅至 $PGV=50\text{cm/s}$，再将拟加速度反应谱与我国抗震设计规范的 8 度区第一组 II 类场地（$T_g=0.35\text{s}$）的设计反应谱进行比较，选取在 $[0.1\text{s}, T_g]$ 和 $[T_1-\Delta T_1, 2.0T_1]$ 两个频段上相对偏差的平均值最小的 10 条地震动记录，记为“B 集”，相应基本周期分别为 0.41s 和 1.40s，所选取地震动记录的有关信息见表 2 和表 3。PGV 取 50cm/s 是日本抗震设计中普遍采用的第 2 水准地震动强度水平，大致相当于我国规范 8 度设防的罕遇地震水平。频段 $[0.1\text{s}, T_g]$ 对应于我国抗震设计规范设计反应谱的平台段，频段 $[T_1-\Delta T_1, 2.0T_1]$ 则位于下文算例结构的基本周期 T_1 附近，其中取 $\Delta T_1=0.2\text{s}$。

表 2 基于设计反应谱的选择集——B 集（$T_1=1.40\text{s}$）

Table 2 Selection based on design response spectrum—Set B ($T_1=1.40\text{s}$)

ID	地震事件			台站条件		强震记录			
	震级	时间	名称	V_s_30 (m/s)	断层距(km)	文件名称	PGA (g)	PGV (cm/s)	T_d (s)
1	6.53	1979	Imperial Valley-06	205.8	23.17	H-CAL315	0.08	13.30	23.3
2	6.53	1979	Imperial Valley-06	162.9	10.79	H-E03140	0.27	46.79	11.9
3	6.53	1979	Imperial Valley-06	348.7	12.69	H-PTS315	0.20	16.05	16.9
4	6.54	1987	Superst. Hills-02	208.7	17.03	B-BRA225	0.16	13.90	13.5
5	6.54	1987	Superst. Hills-02	193.7	13.03	B-WSM090	0.17	23.46	19.6
6	6.93	1989	Loma Prieta	597.1	19.97	CYC285	0.48	39.66	12.2
7	7.28	1992	Landers	345.4	62.98	FTI090	0.12	16.37	13.5
8	7.62	1999	Chi-Chi	272.6	37.48	CHY088-E	0.14	20.95	33.9
9	7.51	1999	Kocaeli, Turkey	274.5	51.98	ZYT090	0.11	15.23	38.9
10	7.90	2002	Denali, Alaska	376.1	126.40	PS11066	0.07	9.67	76.6

表 3 基于设计反应谱的选择集——B 集（$T_1=0.41\text{s}$）

Table 3 Selection based on design response spectrum—Set B ($T_1=0.41\text{s}$)

ID	地震事件			台站条件		强震记录			
	震级	时间	名称	V_s_30 (m/s)	断层距(km)	文件名称	PGA (g)	PGV (cm/s)	T_d (s)
1	6.53	1979	Imperial Valley-06	162.9	10.79	H-E03140	0.27	46.79	11.9
2	6.53	1979	Imperial Valley-06	206.1	3.86	H-E08140	0.60	54.20	6.8
3	6.53	1979	Imperial Valley-06	196.9	17.94	H-E12140	0.14	17.58	19.1
4	6.06	1986	N. Palm Springs	345.4	3.67	MVH045	0.22	31.35	5.1
5	7.28	1992	Landers	345.4	21.78	DSP090	0.15	20.93	32.0
6	7.13	1999	Hector Mine	271.4	41.82	21081090	0.18	27.67	27.5
7	7.13	1999	Hector Mine	379.3	31.06	22170090	0.15	17.67	13.1
8	7.62	1999	Chi-Chi	442.2	24.11	CHY046-E	0.14	20.55	33.0
9	7.62	1999	Chi-Chi	475.5	9.35	TCU122-N	0.26	34.03	30.3
10	8.00	2008	汶川地震	100.0[1]	41.91	UA0034	0.14	17.52	89.5

注：1 数值为估计值，代表 III 类场地。

2.4 基于最不利地震动的选取方法

以谢礼立等[11]提出的最不利设计地震动的概念为基础，按以下两步选择地震动记录：

(1) 分别按 PGA、PGV、PGD、EPV 和相对能量持时 T_d 对地震动记录进行排序，各取前 20 位，从而得到共 71 条地震动记录。

(2) 将这 71 条地震动记录调幅至 $PGV=50\text{cm/s}$，计算自振周期为 T_1 的理想弹塑性单自由度体系在各地震动记录输入下的等延性滞回耗能 E_h 和屈服系数 C_y（延性系数取 $\mu=2.0$）。71 条地震动记录的最大屈服系数和滞回耗能分别记为 C_{ymax} 和 E_{hmax}，按式(1)计算每条地震动记录的 D 值并排序，取 D 值最大的前 10 条

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地震动记录，记为“C 集”，相应基本周期分别为0.41s 和1.40s，所选地震动记录的相关信息见表 4 和表 5。

$$D = \frac{1}{2}\left(\frac{C_y}{C_{ymax}} + \frac{E_h}{E_{hmax}}\right) \quad (1)$$

式中：C_y 为屈服系数，即所需屈服承载力与重力的比值，$C_y = F_y/mg$，F_y 为单自由度体系达到延性系数 2.0 所需的屈服承载力，m 为单自由度体系的质量。

表 4　基于最不利地震动的选择集——C 集（T_1 = 1.40s）

Table 4　Selection based on most unfavorable earthquake—Set C（T_1 = 1.40s）

ID	地震事件			台站条件		强震记录			
	震级	时间	名称	Vs_30（m/s）	断层距（km）	文件名称	PGA（g）	PGV（cm/s）	T_d（s）
1	6.54	1987	Superst. Hills-02	348.7	0.95	B-PTS225	0.45	111.89	10.3
2	6.69	1994	Northridge-01	336.2	17.28	STM090	0.88	41.69	8.8
3	6.90	1995	Kobe，Japan	312.0	0.94	KJM000	0.82	81.55	8.4
4	7.62	1999	Chi-Chi	553.4	0.11	CHY080-E	0.97	107.50	21.8
5	7.62	1999	Chi-Chi	305.9	0.59	TCU065-N	0.60	78.74	28.5
6	7.62	1999	Chi-Chi	433.6	0.64	TCU067-E	0.50	79.52	21.7
7	7.62	1999	Chi-Chi	549.4	0.00	TCU074-E	0.60	73.33	11.7
8	8.00	2008	汶川地震	300.0[1]	42.78	UA0030	0.15	17.71	91.1
9	8.00	2008	汶川地震	100.0[1]	42.73	UA0193	0.25	16.08	94.4
10	8.00	2008	汶川地震	100.0[1]	13.74	UA0285	0.58	60.98	78.5

注：1 数值为估计值；100.0 代表 III 类场地；300.0 代表 II 类场地。

表 5　基于最不利地震动的选择集——C 集（T_1 = 0.41s）

Table 5　Selection based on most unfavorable earthquake—Set C（T_1 = 0.41s）

ID	地震事件			台站条件		强震记录			
	震级	时间	名称	Vs_30（m/s）	断层距（km）	文件名称	PGA（g）	PGV（cm/s）	T_d（s）
1	6.53	1979	Imperial Valley-06	223.0	0.47	H-BCR230	0.77	45.89	9.8
2	7.01	1992	Cape Mendocino	311.8	7.88	RIO360	0.55	42.04	10.9
3	6.69	1994	Northridge-01	257.2	0.37	TAR090	1.78	116.49	10.5
4	6.90	1995	Kobe，Japan	312.0	0.94	KJM000	0.82	81.55	8.4
5	7.62	1999	Chi-Chi	664.4	1.84	TCU129-E	1.01	59.96	27.3
6	8.00	2008	汶川地震	100.0[1]	11.28	UA0001	0.24	27.52	78.0
7	8.00	2008	汶川地震	300.0[1]	28.68	UA0148	0.33	21.55	78.6
8	8.00	2008	汶川地震	100.0[1]	42.73	UA0194	0.22	28.78	94.3
9	8.00	2008	汶川地震	100.0[1]	13.74	UA0285	0.58	60.98	78.5
10	8.00	2008	汶川地震	300.0[1]	9.59	UA0316	1.02	47.87	50.8

注：1 数值为估计值；100.0 代表 III 类场地；300.0 代表 II 类场地。

3　不同地震动记录选取方法的比较

3.1　弹性反应谱的比较

图 1 和图 2 分别对 T_1 = 1.40s 和 T_1 = 0.41s 两种情况比较了上述 A、B、C 三个选择集中地震动记录的拟加速度反应谱，并与我国规范的设计反应谱做了比较。表 6 给出了三个选择集的平均拟加速度反应谱对应于结构一阶自振周期 T_1 的谱值 $S_a(T_1)$。可见，对于 T_1 = 1.40s 的中长周期 8 层框架结构，在结构基本周期附近，C 集地震动记录的平均拟加速度反应谱值大于 B 集，略大于 A 集（图 1 与表 6），三者的差别并没有所预期的那样显著，这主要与本文以地面峰值速度 PGV 作为地震动强度指标对地震动记录进行了调幅有关。根据文献[5]的研究，PGV 与结构弹塑性地震响应的相关性在中长周期范围内相对较好，因此采用 PGV 对地震动记录进行调幅处理可以有效地降低地震动在中长周期频段内的离散性。当所选择的地震动记录数量较多时，其选取方法对地震动记录的破坏势影响将小于采用合理地震动强度指标（如 PGV）

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

进行调幅的影响。对于 $T_1 = 1.40$s 的 8 层框架，地震动记录的强度已通过 *PGV* 得到较好的控制，因此 C 集地震动记录的拟加速度反应谱平均值仅略大于 B 集，而与 A 集相当。

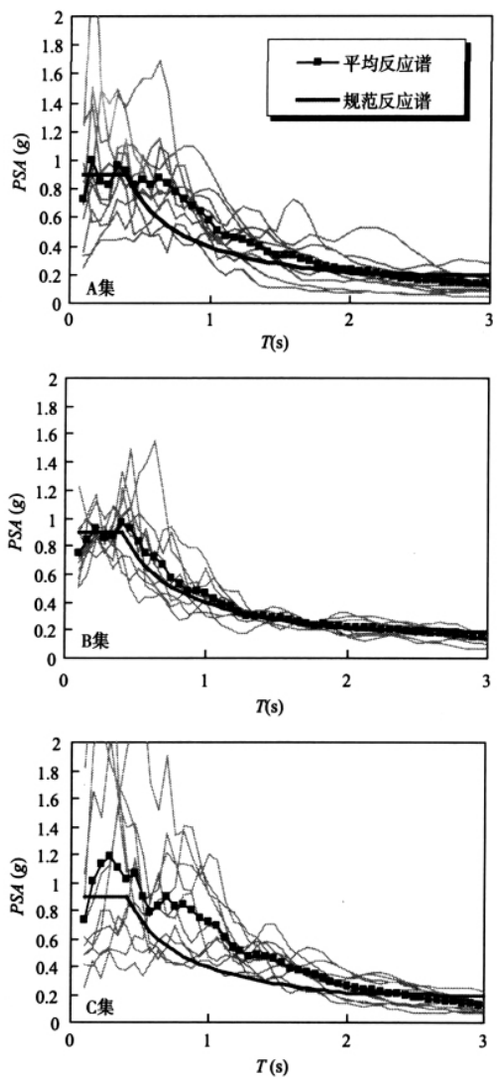


图 1 三个选择集中地震动记录的拟加速度反应谱与规范设计反应谱的比较（$T_1 = 1.40$s）

Fig. 1 Pseudo spectral accelerations of selected ground motions compared with design spectrum ($T_1 = 1.40$s)

表 6 各选择集的地震动记录对应于结构基本周期的平均拟加速度谱值 $S_a(T_1)$ 及其离散性

Table 6 Mean values and dispersions of the pseudo spectral accelerations of the selected ground motion at fundamental period T_1 of the structures

结构及周期	$S_a(T_1)$ 平均值			$S_a(T_1)$ 离散系数		
	A 集	B 集	C 集	A 集	B 集	C 集
8 层框架	0.39	0.28	0.43	0.36	0.15	0.24
3 层框架	0.93	0.77	1.90	0.35	0.18	1.35

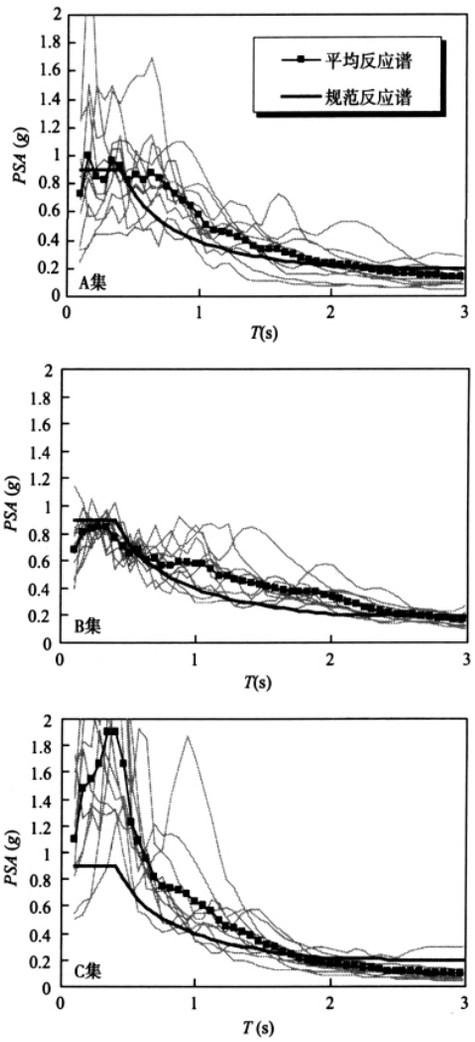


图 2 三个选择集中地震动记录的拟加速度反应谱与规范设计反应谱的比较（$T_1 = 0.41$s）

Fig. 2 Pseudo spectral accelerations of selected ground motions compared with design spectrum ($T_1 = 0.41$s)

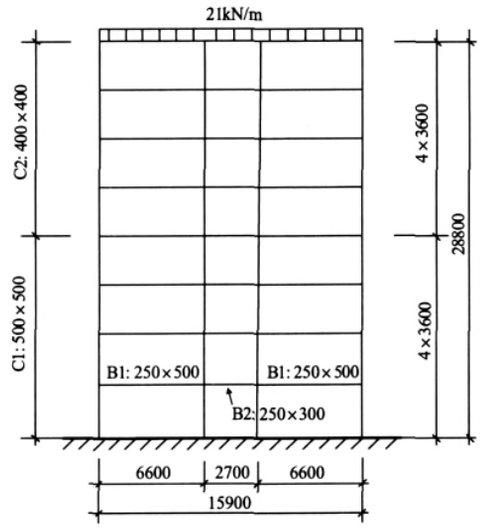
而对于 $T_1 = 0.41$s 的短周期 3 层框架，C 集地震动记录的平均拟加速度谱远大于 A 集与 B 集（图 2 与表 6）。这表明，对于短周期结构，采用 *PGV* 作为地震动强度指标并不能有效地减小结构地震响应的离散性。这与文献 [5] 的研究结果相一致。

3.2 结构非线性地震响应的比较

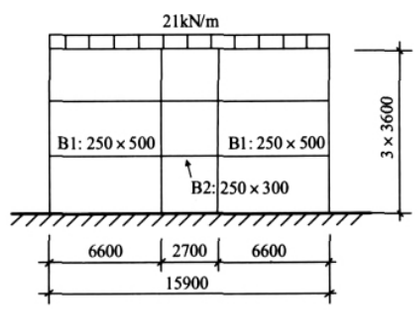
以图 3 所示的 8 层和 3 层的 3 跨钢筋混凝土平面框架结构为分析对象。假设结构位于 8 度设防第一组 II 类场地。两个框架结构各层层高均为 3.6m。8 层框架的下部 4 层框架柱截面尺寸为 500mm × 500mm，上部 4 层柱截面尺寸为 400mm × 400mm，各层框架梁的截面尺寸均相同，边跨为 250mm × 500mm，中间短跨为 250mm × 300mm。3 层框架结构各构件的截面尺寸与 8 层框架的下部 4 层相同。各楼层框架梁上均作用 21kN/m 的等效均布竖向荷载。全结构采用 C30 混

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

凝土，HRB335 级钢筋。8 层和 3 层结构一阶自振周期分别为 1.40s 和 0.41s。



(a) T = 1.40s 的 8 层框架结构



(b) T = 0.41s 的 3 层框架结构

图 3　算例钢筋混凝土框架结构示意图

Fig. 3　Structural layouts of the RC frames

图 3　算例钢筋混凝土框架结构示意图

Fig. 3　Structural layouts of the RC frames

采用 ABAQUS/Standard 进行弹塑性时程分析。钢筋混凝土构件采用截面纤维模型模拟，钢筋和混凝土纤维的本构模型均与文献[14]中采用的模型相同。其中钢筋模型为双线型骨架线，卸载时保持初始刚度，反向加载时指向历史最大应变点；混凝土模型在受压区越过峰值应变后为线性下降段，卸载时考虑一定的刚度退化，受拉区混凝土为双线型骨架线，卸载时指向受拉初始点。

图 4 和图 5 分别比较了上述 8 层和 3 层框架在 A、B、C 三组地震动记录（PGV = 50cm/s）输入下的侧移、层间位移角的均值和标准差。如前文所述，上述三种选取方法所希望达到的目标并不相同。B 集地震动记录输入下的结构地震响应离散性应该相对比较小，C 集地震动记录输入下的结构地震响应应该相对较大，而 A 集则没有类似的倾向性。但是，从图 4、图 5 中 A、B、C 三组地震动记录输入下结构地震响应的比较中，并不能明显地看出这些趋势。这主要表现为：

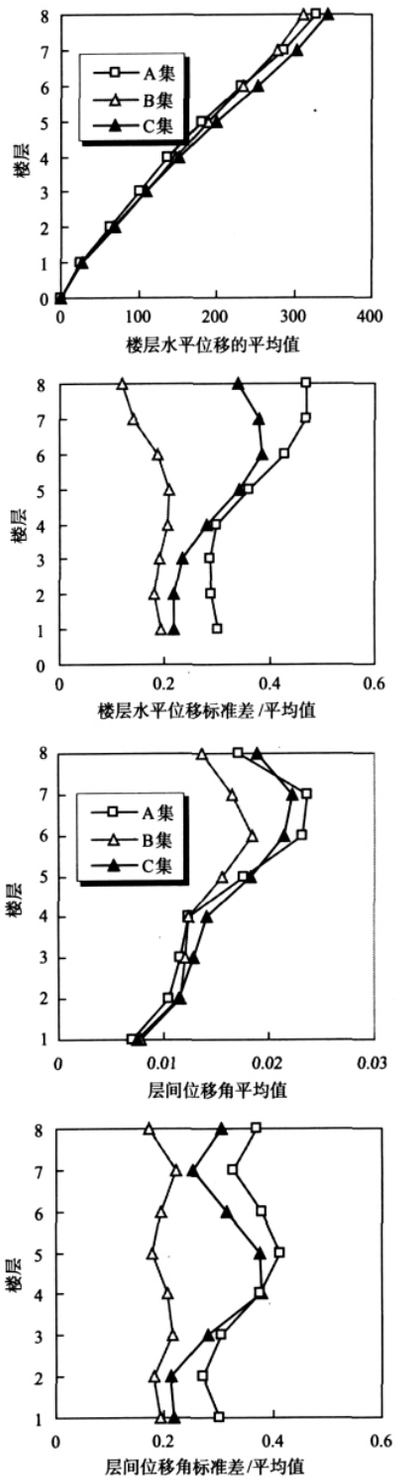


图 4　T_1 = 1.40s 的 8 层框架结构层间位移角的均值与离散系数

Fig. 4　Mean values and coefficients of dispersion of the story drift ratios for the 8 story frame (T_1 = 1.40s)

(1) 尽管在结构基本周期 T_1 附近，不同地震动记录选择集的拟加速度反应谱平均值存在一定的差别，如对于 T_1 = 1.40s 的中长周期框架（图 1），在 T_1 附近，C 集地震动记录的拟加速度反应谱平均值与 A 集

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

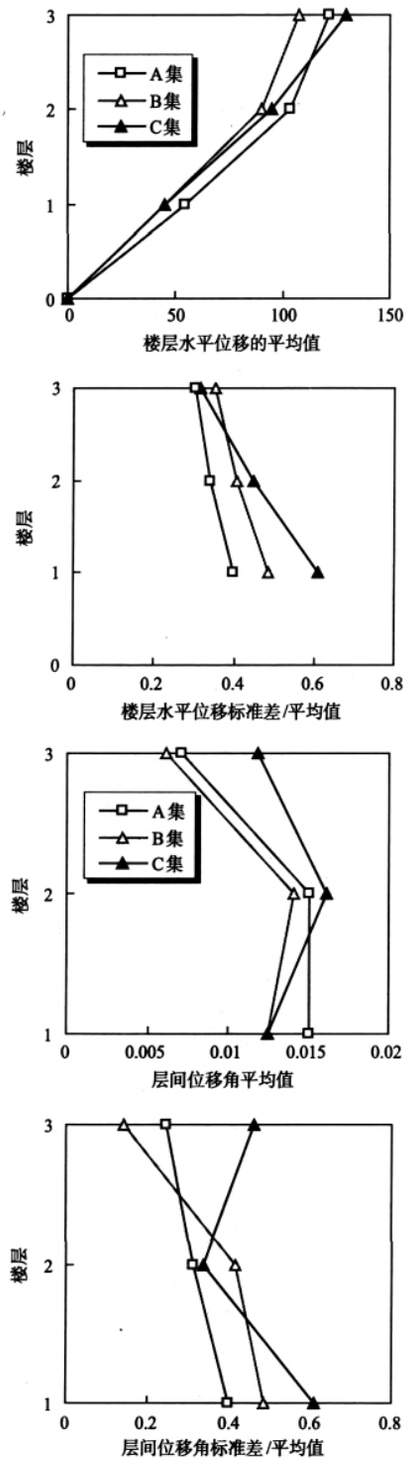


图 5 T_1 =0.41s 的 3 层框架结构层间位移角的均值与离散系数

Fig. 5 Mean values and coefficients of dispersion of the story drift ratios for the 3 story frame (T_1 =0.41s)

相当，远大于 B 集；对于 T_1 =0.41s 的短周期框架（图 2），在 T_1 附近，C 集地震动记录的拟加速度反应谱平均值远远大于 A 集和 B 集。但是，在图 4 和图 5 中可以看到，无论对于 8 层框架还是 3 层框架，在 C 集地震动记录输入下结构的非线性地震响应并不明显大于 A 集或 B 集，这一点在短周期的 3 层框架中表现得尤其突出。

（2）由表 6 可见，B 集地震动的拟加速度反应谱在结构一阶自振周期附近的谱值的离散性明显小于 A 集或 C 集，但如图 4 和图 5 所示，B 集地震动记录输入下结构地震响应的离散性并不明显小于 A 集或 C 集作用下地震响应的离散性。这在短周期的 3 层框架中表现得尤其突出。由此可知，尽管 B 集选取方法能够减小结构基本周期 T_1 附近拟加速度反应谱的离散性，但 B 集地震动记录输入下结构的非线性地震响应的离散性并不明显小于 A 集或 C 集。

以上分析结果并不符合 B 集和 C 集的选取方法所期望得到的结果。本文认为这主要与结构损伤后刚度退化所导致的结构周期延长有关。下面对此问题做进一步分析。

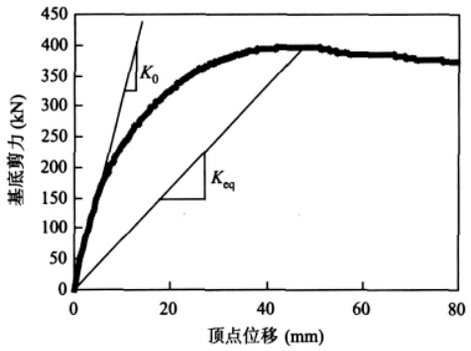
对于线弹性体系，结构的地震响应由结构的一阶周期 T_1 所对应的反应谱值控制，地震动强度指标 S_a（T_1）即根据这一结论给出[15]。对于弹塑性体系，结构进入塑性阶段后刚度会有所降低，自振周期延长，这在钢筋混凝土结构中表现得尤为明显。混凝土开裂、钢筋屈服、塑性变形发展等，都会造成结构刚度的显著降低，并且这种结构刚度的退化是一个渐进过程，这可从图 6 给出的上述 3 层与 8 层框架结构的推覆分析曲线中清楚地看出。推覆分析采用的是与第一振型对应的侧力分布模式。在结构损伤后的振动中，初始周期 T_1 及其对应的模态可能并不占主要成分，而是某一个等效周期 T_{eq} 及其对应的模态占主导。在研究等价线性化分析的文献中，有不少关于 T_{eq} 取值的讨论[16-17]。由于 T_{eq} 取值不是本文的重点，这里暂且取峰值荷载处的割线刚度 K_{eq} 所对应的结构周期为 T_{eq}，即

$$T_{eq} = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K_{eq}}} \tag{2}$$

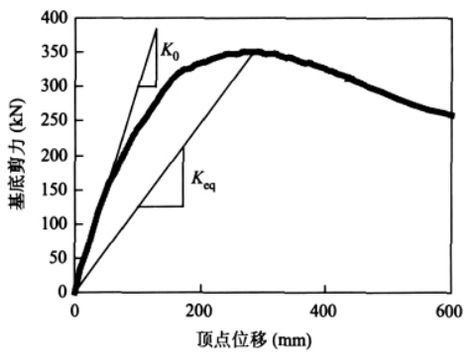
式中：M 为结构的总质量；K_{eq} 为相应推覆分析曲线峰值承载力点所对应的割线刚度。根据图 6 推覆分析结果，以上 3 层与 8 层框架结构的等效周期 T_{eq} 分别为 0.81s 和 2.10s，比各自的初始周期 0.41s 和 1.40s 分别延长了 98% 和 50%。

下面分别针对两个算例结构，比较初始周期 T_1 和等效周期 T_{eq} 所对应的三组地震动反应谱的平均值和离散性。图 7 和图 8 了给出了相应这两个结构的三个地震动记录选择集的平均拟加速度反应谱及其离散性，具体数值见表 6 和表 7。以 T_1 =0.41s 的 3 层框架为例，由图 7、表 6 和表 7 可知，C 集的谱值 S_a（T_1）远大于 A 集和 B 集的谱值 S_a（T_1）；但在等效周期 T_{eq} = 0.81s 处，A、B、C 三个选择集的谱值 S_a（T_{eq}）却相差不

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)3 层框架



(b)8 层框架

图 6　两个框架的推覆曲线

Fig. 6　Pushover curves of the two frames

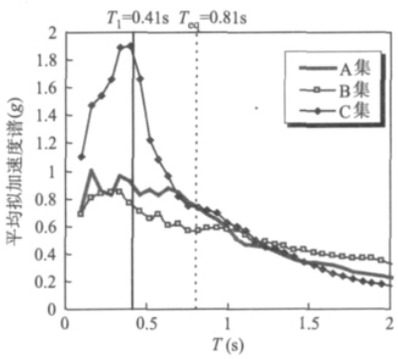
大。在离散性方面，初始周期处 $T_1 = 0.41$s，B 集的离散系数仅为 0.18，远小于 A 集和 C 集；而在等效周期 $T_{eq} = 0.81$s 处，A、B、C 三个选择集的离散性也相差不大。可见，从统计意义上看，式(2)定义的等效周期所对应的谱值 $S_a(T_{eq})$ 与结构的非线性地震响应之间的相关性更好。对于 8 层框架结构，由图 8、表 6 和表 7 也可以观察到类似的现象。

表 7　各选择集的地震动记录对应于结构等效周期的平均拟加速度谱值 $S_a(T_{eq})$ 及其离散性

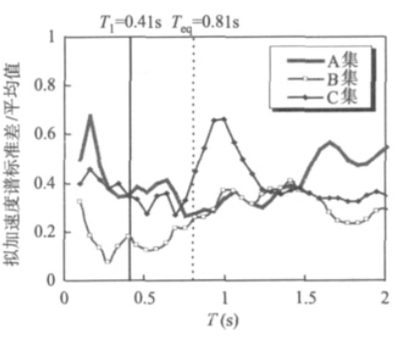
Table 7　Mean values and the dispersions of the pseudo spectral accelerations of the selected ground motions at equivalent period T_{eq} of the structures

	$S_a(T_1)$					
	平均值			标准差/平均值		
	A 集	B 集	C 集	A 集	B 集	C 集
8 层框架	0.25	0.16	0.26	0.47	0.36	0.31
3 层框架	0.73	0.56	0.73	0.27	0.26	0.45

为了更加直观地说明结构非线性地震响应与 $S_a(T_1)$ 和 $S_a(T_{eq})$ 相关性的差别，表 8 给出了在 A、B、C 三个选择集中的 30 条地震动记录输入下，结构最大顶点位移与 $S_a(T_1)$ 和 $S_a(T_{eq})$ 的相关系数。可见，不论是短周期的 3 层框架，还是中长周期的 8 层框架，$S_a(T_{eq})$



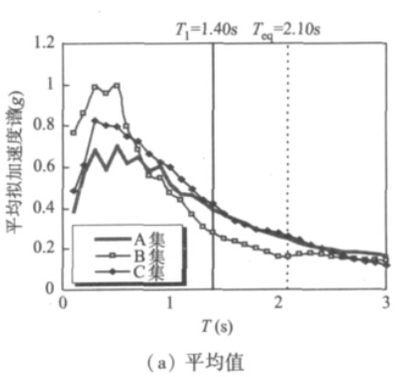
(a) 平均值



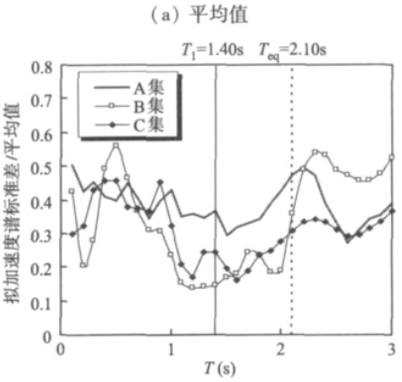
(b) 离散系数

图 7　针对 3 层框架的三个地震动记录选择集的平均拟加速度反应谱及其离散性

Fig. 7　Mean values and the dispersions of pseudo acceleration spectra of the three ground motion sets for the 3 story frame



(a) 平均值



(b) 离散系数

图 8　针对 8 层框架的三个地震动记录选择集的平均拟加速度反应谱及其离散性

Fig. 8　Mean values and the dispersions of pseudo acceleration spectra of the three ground motion sets for the 8 story frame

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

与结构最大顶点位移的相关系数都远远大于 $S_a(T_1)$ 与结构最大顶点位移的相关系数。这说明与初始周期 T_1 相比，等效周期 T_{eq} 所对应的谱值 $S_a(T_{eq})$ 对结构的非线性地震响应有更加显著的控制作用，这是非线性结构与线弹性结构在地震响应方面的一个显著区别。

表 8 结构最大顶点位移与不同周期对应的拟加速度谱值 S_a 的相关系数

Table 8 Correlation coefficients between maximum roof displacements and pseudo spectral accelerations

	$S_a(T_1)$	$S_a(T_{eq})$
3 层框架	0.15	0.78
8 层框架	0.35	0.81

上述基于设计反应谱(B 集)和基于最不利地震动(C 集)的选取方法，均与结构的动力特性、尤其是与结构的初始周期 T_1 相关。但从上述分析可见，结构初始周期 T_1 对应的反应谱谱值 $S_a(T_1)$ 与结构非线性地震响应的相关性并不大。相比之下，结构等效周期 T_{eq} 对应的谱值 $S_a(T_{eq})$ 与结构非线性地震响应的相关性更大。为此，当采用与结构动力特性相关的地震动记录选取方法时，应首先正确认识并估计与结构非线性地震响应相关性较大的等效周期范围，才有可能实现预期的选取目的。而 T_{eq} 与结构自身特性有很大关系。如对于本文的 3 层框架 $T_{eq}/T_1 = 1.97$；而 8 层框架，$T_{eq}/T_1 = 1.5$，两者相差较大。对于实际工程结构的弹塑性地震响应分析，T_{eq} 的变化范围可能更大。因此，基于设计反应谱(B 集)和基于最不利地震动(C 集)的地震动记录选取方法存在一定的局限性。与此相对，基于台站和地震信息的选取方法与结构的动力特性无关，更具有一般性。

4 结论

本文总结了目前常见的 3 种用于结构弹塑性时程分析的地震动记录选取方法，分别建立了相应的地震动记录选择集，并对一个短周期和一个中长周期的钢筋混凝土框架结构进行了弹塑性时程分析。根据不同的地震动记录选取方法所对应的结构弹塑性地震响应结果，得到以下结论：

(1) 当所选地震动记录较多时，地震动强度指标将对结构的非线性地震响应起到比较明显的控制作用。选用合理的地震动强度指标对地震动记录进行调幅后，能够有效减小结构地震响应的离散性，从而可减小不同地震动记录选取方法之间的差异。

(2) 由于实际结构的非线性行为总是伴随着结构刚度和振动模态的变化，结构的初始周期并不能有效反映结构弹塑性地震响应特性，因此在采用与结构动力特性相关的地震动记录选取方法以达到某种特定的目的时，需对与结构非线性地震响应的相关性较大的等效周期 T_{eq} 有比较准确的估计。

(3) 基于台站与地震信息的地震动记录选取方法与结构的动力特性无关，操作简便，适用性强，并且通过选择合理的地震动强度指标能够有效地减小结构地震响应中过大的离散性。该方法适于在研究不同类型、不同动力特性的建筑结构的抗震性能中使用。

(4) 准确估计结构的等效周期 T_{eq}，对于把握结构的非线性地震响应具有一定价值，其对应的反应谱谱值可以作为地震动强度指标，在建筑结构的抗震设计和抗震性能评估中应用。等效周期 T_{eq} 的取值和适用性等问题，值得在以后的工作中进一步加以研究。

参 考 文 献

[1] 胡聿贤. 地震工程学 [M]. 第 2 版. 北京：地震出版社，2006：93-104

[2] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2001 (GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001(in Chinese))

[3] The building standard law of Japan [S]. 4th Edition. Tokyo: The Building Center of Japan, 2004

[4] ATC-63 Quantification of building seismic performance factors [S]. Redwood City: Applied Technology Council, 2008

[5] 叶列平，马千里，缪志伟. 结构抗震分析用地震动强度指标的研究 [J]. 地震工程与工程振动，2009，29(4)：9-22(Ye Lieping, Ma Qianli, Miao Zhiwei. Study on earthquake intensities for seismic analysis of structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4): 9-22(in Chinese))

[6] ASCE/SEI 7—05 Minimum design loads for buildings and other structures [S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2005

[7] Bazzurro P, Cornell C A. Disaggregation of seismic hazard [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, 89(2): 501-520

[8] 杨溥，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(Yang Pu, Li Yingmin, Lai Ming. A new method for selecting inputting waves for time-history analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 33-37(in Chinese))

[9] FEMA 356 Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings [S]. Washington DC: Federal

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Emergency Management Agency, 2000

[10] NZS 1170.5 Structural design actions [S]. Wellington, New Zealand: Standards New Zealand, 2004

[11] 谢礼立, 翟长海. 最不利设计地震动研究 [J]. 地震学报, 2003, 25(3): 250-261 (Xie Lili, Zhai Changhai. Study on the severest real ground motion for seismic design and analysis [J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(3): 250-261(in Chinese))

[12] 翟长海,谢礼立. 抗震结构最不利设计地震动研究 [J]. 土木工程学报, 2005,38(12):51-58(Zhai Changhai, Xie Lili. The severest design ground motions for seismic design and analysis of structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2000,38(12):51-58(in Chinese))

[13] 翟长海, 谢礼立. 估计和比较地震动潜在破坏势的综合评述 [J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(5): 1-7 (Zhai Changhai, Xie Lili. A comprehensive method for estimating and comparing the damage potential of strong ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(5): 1-7(in Chinese))

[14] 曲哲. 摇摆墙-框架结构抗震损伤机制控制及设计方法研究 [D]. 北京: 清华大学, 2010 (Qu Zhe. Study on seismic damage mechanism control and design of rocking wall-frame structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010(in Chinese))

[15] Bazzurro P, Cornell C A, Shome N, et al. Three proposals for characterizing MDOF nonlinear seismic response [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1998, 124(11): 1281-1289

[16] Miranda E, Ruiz-Garcia J. Evaluation of approximate methods to estimate maximum inelastic displacement demands [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(3):539-560

[17] Kwan W P, Billington S L. Influence of hysteretic behavior on equivalent period and damping of structural systems [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, 129(5): 576-585

曲 哲(1983 -),男,博士研究生。主要从事建筑结构抗震理论与设计方法及 FRP 加固混凝土结构技术研究。

叶列平(1960 -),男,博士,教授。主要从事混凝土结构及地震工程研究。

潘 鹏(1976 -),男,博士,副教授。主要从事建筑结构抗震、隔震理论和应用及动力试验技术研究。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net