

文章编号:1000-1301(2009)04-0009-14

结构抗震分析用地震动强度指标的研究

叶列平,马千里,缪志伟

(清华大学 土木工程系,北京 100084)

摘要:随着基于性能结构抗震设计方法的推广应用,结构弹塑性时程分析逐渐成为主要的分析方法,但该方法所面临主要困难是缺乏对地震波选择的统一标准。由于影响地震动的参数很多,且不同参数对结构弹塑性地震响应的影响规律又十分复杂,因此能综合反映各种地震动参数对结构弹塑性地震响应影响的地震动强度指标成为基于性能结构抗震设计方法研究中的一个基本问题。本文参考已有学者的研究成果,总结归纳了现有主要的33个地震动强度指标,基于弹塑性SDOF和MDOF系统的代表性地震响应指标,分析了不同地震动强度指标与不同结构地震响应指标之间的相关性,研究了不同地震动指标的适用范围和优缺点,给出了结构抗震分析用地震强度指标的建议。

关键词:地震动强度指标;单自由度体系;多自由度体系;有效强震持时;相关系数;结构地震响应
中图分类号:TU375 **文献标志码:**A

Study on earthquake intensities for seismic analysis of structures

YE Lieping, MA Qianli, MIAO Zhiwei

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Assessing the elastoplastic performance of seismic structures is now playing a more and more important role in performance based seismic design. Nevertheless, it is difficult to use an appropriate earthquake intensity index for variant ground motions. Since the influence of different factors of ground motions upon elastoplastic performance of seismic structures is quite sophisticated, it is significantly important to choose a rational earthquake intensity index, which could give the comprehensive reflection of the variant characteristics of ground motions and the seismic responses of structures. Herein, the existing 33 earthquake intensity indices in the literatures are reviewed and summarized. The correlation between these earthquake intensity indices and the seismic response of structures is studied for elastoplastic SDOF and MDOF systems, and the applicability and characteristics of these earthquake intensity indices are also discussed. Based on the correlation analysis, a suggestion for selecting earthquake intensities is presented.

Key words: earthquake intensity index; SDOF system; MDOF system; effective duration of earthquake; correlation coefficient; seismic response of structures

概述

强震地面运动十分复杂。在结构工程领域,地震对结构破坏能力的大小主要与地面振动的幅值、频谱特

收稿日期:2008-09-18; 修订日期:2009-01-19

基金项目:国家自然科学基金重点项目(90815025)

作者简介:叶列平(1960-),男,教授,主要从事结构工程抗震和混凝土结构的研究。E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn

性和强震持时这三个因素有关。但是,如何寻求一个能综合反映地震动强度大小的指标用于结构抗震分析,一直是结构工程抗震研究所面临一个难点,也成为实现基于性能抗震设计亟待解决的一个基本问题。学术界对此问题早有争论,刘恢先^[1]曾对此问题作过探讨,提出了选择地震动强度指标的两个方向:一是从地面运动参数入手,如采用 PGA、PGV 等,以及 Goodman 和 Newmark 等人提出的加速度脉冲平方总和的期望值等;另一个是考察结构的最大地震响应,主要是各种谱曲线值,如 Benioff 建议的位移谱曲线面积,麦德韦杰夫建议的位移谱曲线值,Housner 建议的速度谱曲线值等。刘恢先认为,可以考虑采用有阻尼的加速度谱曲线最大值。

目前结构抗震分析和设计中运用比较广泛的地震动强度指标主要是地面峰值加速度(PGA)^[2]。但近年来的各种分析研究和震害经验表明,PGA 指标很不完善^[3-4]。Housner^[5]的研究表明,采用简单的单一参数描述地震动强度指标丢失了大量的地震动信息,无法全面描述各种地震动特性对结构地震损伤的影响。于是不少学者提出了各种复合型指标以及三阶段参数指标(下文将列出)。对于复合型指标,Nau 等^[6]研究认为也不一定能更全面地反映地震地面运动对结构损伤程度的综合影响规律,因此认为 PGA、PGV 和 PGD 三个地震动峰值参数仍是最重要的描述地震动特性的参数,但 Fajfar^[3]则认为采用地震动谱强度指标是更好的选择。

本文总结归纳了目前许多研究者提出的各种地震动强度指标,并基于弹塑性 SDOF 系统和 MDOF 系统的代表性地震响应指标(位移、基底剪力、输入能量、滞回耗能等),研究了不同地震动强度指标与这些结构地震响应指标之间的相关性,分析了不同地震动强度指标的适用范围和优缺点,为结构抗震分析合理选用地震动强度指标提供参考。

1 现有地震动强度指标

1.1 地震动峰值

PGA 是最早使用的地震动强度指标,也是目前大多数国家采用的。PGV 也是一个重要的地震动强度指标,Neumann 认为用 PGV 比 PGA 更能体现地震动强度等级^[7],目前日本就采用 PGV。PGD 虽然用得较少,但也有学者将 PGD 与另外一些指标进行了对比研究^[8]。

1.2 地震动谱峰值

刘恢先曾考虑采用有阻尼的加速度谱曲线的最大值作为地震动强度指标,也有学者将此概念推广,将速度谱和位移谱的最大值也作为地震动强度指标^[7]。由此得到反应谱峰值表达的地震动强度指标,即谱加速度峰值 PSA、谱速度峰值 PSV 和谱位移峰值 PSD。

1.3 地面加速度峰值与速度峰值比

对于地震而言,地面加速度峰值与速度峰值是由频率成分不同的地震动所引起的,并且各自具有不同的衰减特性,为兼顾考虑地面加速度峰值与速度峰值的影响,有学者使用地面速度峰值与加速度峰值比(PGV/PGA)作为一种强度指标^[9-10]。

1.4 Housner 谱强度

Housner 研究认为,弹性结构地震响应的最大应变能 $E_{e,\max}$ 与拟速度谱值 S_v 具有如下关系^[11]:

$$E_{e,\max} = mS_v^2/2 \quad (1)$$

因此,结构的反应谱值也可以作为地震动强度指标,来衡量地震输入结构的能量大小和对结构的破坏能力。Housner 定义了地震动谱烈度,

$$S_I(\zeta) = \int_{0.1}^{2.5} S_v(\zeta, T) dT \quad (2)$$

其中, ζ 为结构阻尼比; S_v 为拟速度谱。

1.5 Arias 强度

Arias 以单位质量弹塑性体系的总滞回耗能作为结构地震响应参数,提出了一个与结构单位质量总滞回耗能量相关的地震强度指标^[12],用于各种周期的结构:

$$I_A(\zeta) = \frac{\cos^{-1}\zeta}{g\sqrt{1-\zeta^2}} \int_0^t \ddot{x}^2(t) dt \quad (3)$$

其中, ζ 为结构阻尼比; g 为重力加速度; t_f 为地震动总持时; $\ddot{x}(t)$ 为地震动加速度时程。

Trifunac 和 Brady 根据 Arias 强度指标, 对地震强震持时作了定义^[13], 记为有效强震持时 t_D ,

$$t_D = t_{95} - t_5 \tag{4}$$

其中, t_{95} 与 t_5 分别为按照式(3)计算所得 Arias 强度分别占整个地震结束时刻计算所得 Arias 强度的 95% 与 5% 的对应时刻, 这是目前使用最广泛的地震强震持时定义。有研究表明^[14], 地震动持时对结构的弹性反应或进入塑性程度不深的弹塑性反应没有影响或基本上没有影响。但是, 对于那些由于塑性变形集中因而具有较大延性系数的楼层, 其影响不能忽视。

1.6 修正的 Arias 强度

Araya 等人研究发现, Arias 强度反映了地震动的峰值和持时, 但没有反映地震动频谱特性的影响, 因此对 Arias 强度作了修正^[9], 提出如下指标:

$$I_{A,m} = I_A / v_0^2 \tag{5}$$

其中, v_0 为地震动加速度曲线单位时间内通过零点的次数。

1.7 Housner 强度

Housner 认为, 地震对结构的破坏能力可以通过输入结构单位质量的总能量在时间域上的平均量来衡量。考虑到结构总输入能量与地震加速度平方的积分成正比, 因此提出了如下形式的地震动强度指标^[15]:

$$P = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \ddot{x}^2(t) dt \tag{6}$$

其中, t_1, t_2 分别为地震强震持时的始末时刻。该公式表达的物理含义是加速度平方在 t_1 至 t_2 时间域内的平均值, 可简称为平均加速度平方指标。引入式(4)的有效强震持时 t_D (当然 t_1, t_2 也可设定为地震始末时刻), Housner 强度可以写成:

$$P_a = \frac{1}{t_D} \int_{t_5}^{t_{95}} \ddot{x}^2(t) dt \tag{7}$$

同样的, 可将上述方法推广到速度或位移, 得到平均速度平方指标和平均位移平方指标:

$$P_v = \frac{1}{t_D} \int_{t_5}^{t_{95}} \dot{x}^2(t) dt \tag{8}$$

$$P_d = \frac{1}{t_D} \int_{t_5}^{t_{95}} x^2(t) dt \tag{9}$$

随后, Housner 进一步对上述指标作开方处理, 得到如下系列地震动强度指标^[16]:

$$\begin{cases} a_{rms} = \sqrt{P_a} \\ v_{rms} = \sqrt{P_v} \\ d_{rms} = \sqrt{P_d} \end{cases} \tag{10}$$

1.8 Nau 和 Hall 指标

Nau 和 Hall 沿用了 Arias 指标的概念, 并作了适当简化后, 采用了如下形式的指标^[17]:

$$\begin{cases} E_a = \int_0^{t_f} \ddot{x}^2(t) dt \\ E_v = \int_0^{t_f} \dot{x}^2(t) dt \\ E_d = \int_0^{t_f} x^2(t) dt \end{cases} \tag{11}$$

其中, t_f 是地震动总持时。与 Housner 指标类似, Nau 和 Hall 指标也可以得到对应的平方根形式指标, 表示如下:

$$\begin{cases} a_{rs} = \sqrt{E_a} \\ v_{rs} = \sqrt{E_v} \\ d_{rs} = \sqrt{E_d} \end{cases} \tag{12}$$

1.9 Park - Ang 指标

Park 和 Ang 研究结构损伤程度与地震动强度的关系后,提出了 Park - Ang 指标^[18],认为该指标能够较好地描述地震动强度与结构损伤指标之间的关系,称为“特征强度”,该指标的表达式如下:

$$I_C = a_{rms}^{1.5} t_D^{0.5} \quad (13)$$

其中, a_{rms} 指标参见式(10)。

1.10 Fajfar 指标

Fajfar 和 Vidic 研究了地震动强度与结构损伤程度及地震输入能量的关系后,提出了以下地震动强度指标^[3]:

$$I_F = v_{max} t_D^{0.25} \quad (14)$$

该指标适用于中长周期的结构。

1.11 Riddell 指标

Riddell^[8]总结了前人所提的各种指标后,采用形如式(15)的指标形式:

$$I = Q^\alpha t_D^\beta \quad (15)$$

其中, Q 为地震动参数。通过对不同周期、不同延性的结构采用不同的指标及参数进行滞回耗能的统计分析后, Riddell 针对不同地震动参数控制区建议了如下三参数指标,

$$I_d = d_{max} t_D^{1/3} \quad (16a)$$

$$I_v = v_{max}^{2/3} t_D^{1/3} \quad (16b)$$

$$I_a = \begin{cases} a_{max} t_D^{1/3} \\ a_{max} \end{cases} \quad (16c-1)$$

$$(16c-2)$$

式(16a)与(16b)分别适用于等位移区和等速度区,式(16c)适用于等加速度区,其中式(16c-1)适用于屈服后刚度退化结构,式(16c-2)则适用于理想弹塑性和屈服后强化型双线性结构。

1.12 第一周期谱加速度指标 $S_a(T_1)$

Bazzurro^[19]提出直接采用与结构弹性基本周期对应的有阻尼的谱加速度值 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度的归一化指标。这一指标简单实用,且与传统的 PGA 指标相比可以大大降低结构地震响应分析结果的离散性^[20],但是只适用于中短周期结构,对于受高阶影响较大的长周期结构适用性较差,且该指标与结构周期相关,不是仅根据地震动特性归纳出的强度指标。

1.13 累积绝对速度指标

Kramer^[21]也曾提出一种对加速度时程绝对值进行积分的指标,如式(17),

$$CAV = \int_0^{t_f} |\dot{x}(t)| dt \quad (17)$$

1.14 有效设计加速度指标

Benjamin^[22]在研究中指出,太高频的地震动成分对结构地震响应影响很小,但对加速度峰值影响却很大,因此建议通过低通滤波方式将加速度时程中频率高于 9Hz 的成分滤去,然后用滤波后的加速度时程峰值作为设计或研究用的地震强度归一化指标,称为有效设计加速度(effective design acceleration,简称 EDA)。

1.15 地震动强度指标小结

除了以上给出的有代表性的地震动强度指标外,还有很多学者提出了其他一些地震动强度指标,如 Nuttli^[23]提出了持续最大加速度指标(sustained maximum acceleration)和持续最大速度指标(sustained maximum velocity);Sarma 和 Yang^[24]以 Arias 强度指标为基础提出了 A95 指标等。这些指标与上述指标相比并无明显优势,且应用不广泛,因此本文研究不再包括。

单一的地震动强度指标能否适用于不同周期范围的结构,是很多研究者关心的问题。将结构的加速度、速度和位移反应谱统一表示在 Newmark 三对数坐标反应谱中后,三种地震反应谱分别在不同周期段近似存在一个常数区段,分别对应于短周期范围、中周期范围和长周期范围,但各周期范围的界限仅能近似确定^[25]。Riddell^[8]对常用的地震动强度指标进行研究后认为,与 PGA 相关的指标在短周期范围内比较适用,与 PGV 相关的指标在中周期范围内表现最好,而与 PGD 相关的指标在长周期范围内最适用。已有的单一强度指标都无法在各个周期段内的适用性达到最佳,因此这就要求在对不同结构进行分析研究时,需要根据结构的周期范围选择合适的地震动强度指标。

2 地震动记录选取及地震动强度指标合理性的评价方法

2.1 地震动记录选取

本文从 PEER 强震记录数据库^[26]选取了 60 条原始地震记录进行统计计算(见表 1)。所选取的地震动记录 PGA 范围为 0.089g~0.822g,PGV 范围为 4.0 cm/s~89.66 cm/s,PGD 范围为 0.17cm~57.01cm,强震持时范围为 1.83s~36.62s,既涵盖了我国现行规范按八度抗震设防要求的多遇(70 cm/s²)和罕遇(400 cm/s²)地震,也有部分超出规范的强震记录。这 60 条地震记录基本涵盖了可能发生的地震类型和地震强度,本文以此为基础对不同地震动强度指标的适用性进行分析研究。

表 1 60 条地震动记录汇总表

Table 1 60 Earthquake records used in the study

地震名称	测站信息	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	t_D (s)
U. S. Imperial Valley 16/10/1979	5169 Westmorland Fire Sta	0.089	4.67	0.61	19.11
U. S. Big Bear 28/06/1992	23542 San Bernardino - E & Hospitality	0.101	11.9	3.35	13.40
U. S. Loma Prieta 18/10/1989	58471 Berkeley LBL	0.117	20.85	4.42	23.61
U. S. Borrego Mtn 09/04/1968	117 El Centro Array #9	0.130	26.3	12.18	7.98
U. S. Anza(Horse Cany) 25/02/1980	5044 Anza - Pinyon Flat	0.131	5.1	0.49	25.57
U. S. Coyote Lake 06/08/1979	47379 Gilroy Array #1	0.132	8.3	1.52	1.83
U. S. Hollister 28/11/1974	47379 Gilroy Array #1	0.132	4.0	0.17	5.76
U. S. San Fernando 09/02/1971	127 Lake Hughes #9	0.157	4.5	1.28	2.42
U. S. Superstn Hills(B) 24/11/1987	5062 Salton Sea Wildlife Refuge	0.167	18.3	4.3	9.99
U. S. Northridge 17/01/1994	90011 Montebello - Bluff Rd.	0.179	9.4	1.48	13.00
U. S. Hollister 09/04/1961	1028 Hollister City Hall	0.196	12.4	4.29	10.62
Taiwan Chi - Chi 20/09/1999	ILA067	0.200	11.84	7.72	17.16
U. S. Chalfant Valley 21/07/1986	54100 Benton	0.210	13.54	2.87	19.11
U. S. Westmorland 26/04/1981	5062 Salton Sea Wildlife Ref.	0.214	4.8	1.08	16.69
U. S. Loma Prieta 18/10/1989	1002 APEEL 2 - Redwood City	0.220	34.3	6.87	6.17
Japan Kobe 16/01/1995	0 Shin - Osaka	0.243	37.8	8.54	11.79
Turkey Kocaeli 17/08/1999	Ambarli	0.249	40.0	30.08	10.31
U. S. Whittier Narrows 01/10/1987	90009 N Hollywood - Coldwater Can	0.250	14.3	1.11	36.62
Japan Kobe 16/01/1995	0 Kakogawa	0.251	18.7	5.83	10.21
U. S. Livermore 27/01/1980	57T02 Livermore - Morgan Terr Park	0.252	9.8	1.3	13.16
U. S. Loma Prieta 18/10/1989	58235 Saratoga W Valley Coll.	0.255	42.4	19.55	2.43
U. S. Livermore 27/01/1980	57T01 Livermore - Fagundas Ranch	0.258	9.6	0.55	11.11
Italy Friuli 15/09/1976	8014 Forgaria Comino	0.260	9.3	1.07	3.06
Turkey Kocaeli 17/08/1999	Yarimca	0.268	65.7	57.01	4.44
U. S. San Fernando 09/02/1971	24278 Castaic - Old Ridge Route	0.268	25.9	4.67	15.34
U. S. Northridge 17/01/1994	90009 N. Hollywood Coldwater Can	0.271	22.2	11.69	15.37
Japan Kobe16/01/1995	0 Takatori	0.272	16.0	4.47	16.42
U. S. Parkfield 28/06/1966	1438 Temblor pre - 1969	0.272	15.0	3.4	13.53
U. S. Northridge 17/01/1994	90016 LA N Faring Rd	0.273	15.8	3.29	5.62
U. S. Parkfield 28/06/1966	1015 Cholame #8	0.273	11.3	3.2	10.80
U. S. Landers 28/06/1992	22170 Joshua Tree	0.274	27.5	9.82	8.78
U. S. Loma Prieta 18/10/1989	1002 APEEL 2 Redwood City	0.274	53.6	12.68	8.40
U. S. Loma Prieta 18/10/1989	1601 Palo Alto SLAC Lab	0.278	29.3	9.72	11.57
U. S. Morgan Hill 24/04/1984	57383 Gilroy Array #6	0.292	36.7	6.12	26.02
U. S. Whittier Narrows 01/10/1987	90079 Downey Birchdale	0.299	37.8	4.95	6.47
Taiwan Chi - Chi 20/09/1999	CHY041	0.302	20.4	8.62	3.07
U. S. Whittier Narrows 01/10/1987	90019 San Gabriel E Grand Av	0.304	23.0	3.34	30.17
Italy Friuli 06/05/1976	2000 Tolmezzo	0.310	30.8	5.08	4.99
U. S. Coyote Lake 08/06/1979	1705 Gilroy Array #2	0.340	24.87	5.82	4.93
Italy Friuli 06/05/1976	2000 Tolmezzo	0.350	22.0	4.11	4.36
Italy Irpinia 23/11/1980	Sturmo	0.360	52.7	33.1	4.24
U. S. Loma Prieta 18/10/1989	47381 Gilroy Array #3	0.370	44.65	19.33	15.48
U. S. Cape Mendocino 25/04/1992	1806 Rio Dell Overpass Ff.	0.385	43.8	21.64	11.25
U. S. Loma Prieta 18/10/1989	58135 UCSC Lick Observatory	0.390	17.53	5.03	14.89

续表 1

U. S. Chalfant Valley 21/07/1986	54428 Zack Brothers Ranch	0.4	44.52	8.59	9.67
U. S. Coalinga 22/07/1983	1162 Pleasant Valley P. P. - FF	0.41	18.9	5.63	8.13
U. S. Landers 28/06/1992	23 Coolwater	0.42	42.34	13.82	5.49
U. S. Coyote Lake 06/08/1979	1705 Gilroy Array #6	0.43	49.22	7.67	8.22
U. S. Loma Prieta 18/10/1989	47379 Gilroy Array #1	0.473	33.9	8.03	3.23
U. S. Imperial Valley 15/10/1979	2316 El Centro Array #4	0.49	37.4	20.1	3.65
Turkey Duzce 12/11/1999	Duzce	0.54	83.5	51.6	6.69
U. S. Cape Mendocino 25/04/1992	1806 Petrolia	0.59	48.1	21.92	10.78
Japan Kobe 16/01/1995	2046, Kjm, 090	0.6	74.32	19.9	17.57
U. S. N. Palm Springs 08/07/1986	5072 Whitewater Trout Farm	0.612	31.5	4.58	9.52
Mexico Victoria 09/06/1980	6604 Cerro Prieto	0.621	31.6	13.2	3.38
U. S. Cape Mendocino 25/04/1992	1806 Petrolia	0.66	89.66	28.98	8.76
USSR Gazli 17/05/1976	9201 Karakyr	0.72	71.55	23.7	15.96
U. S. Landers 28/06/1992	24 Lucerne	0.785	31.9	16.42	6.79
Japan Kobe 16/01/1995	2046, Kjm, 000	0.82	81.28	17.68	13.53
Turkey Duzce 12/11/1999	Bolu	0.822	62.1	13.55	8.32

2.2 地震动强度指标合理性的评价方法

地震地面运动十分复杂而又极不规则,不同特性的地面运动会引起不同的结构破坏现象。众多学者研究提出了上述各种地震动强度指标,但是对这些指标各自的特点和差异缺乏系统的比较,这对于结构抗震分析研究中合理选择地震动强度可能会带来困难,并可能使分析研究结果的适用性有一定的缺陷。

合理的地震强度指标应能反映结构地震响应指标或损伤指标^[9]。为此,本文分别以弹塑性 SDOF 系统和 MDOF 系统的最大地震响应指标 Rep (如位移 S_d 、基底剪力 V_b 、结构输入能量 E_i 、滞回耗能 E_H 等)与地震动强度指标 I 之间的线性相关性,来评价各地震动强度指标的合理性。具体方法如下,对弹塑性 SDOF 系统和 MDOF 系统在第 i 条地震动输入下进行弹塑性时程计算分析,求出相应的结构最大地震响应 Rep_i ,则由第 i 条地震记录的某一强度指标 I_i 和该地震记录得到的弹塑性 SDOF 系统和 MDOF 系统最大地震响应 Rep_i ,得到 $Rep-I$ 坐标系中的一个数据点 (Rep_i, I_i) ;对所有 60 条地震动记录进行计算分析后,即可针对某一地震动强度指标 I ,在 $Rep-I$ 坐标系中获得 60 个数据点(如图 1),由此得到 Rep 与 I 之间的 Pearson 乘积矩相关系数 ρ ,相关系数越大,该地震动强度指标 I 与某一结构最大地震响应指标 Rep 的相关性就越好,则用该地震动强度指标 I 来评价该地震响应指标 Rep 就越合理。对不同结构参数进行上述同样的分析,即可对不同地震动强度指标进行全面评价。

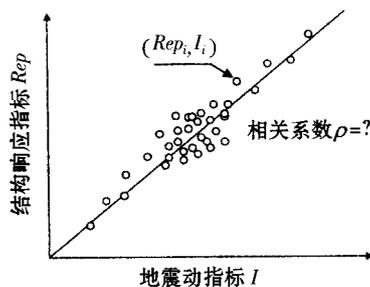


图 1 结构响应与地震动指标的相关性

Fig. 1 Correlation between intensity indices and structural seismic responses

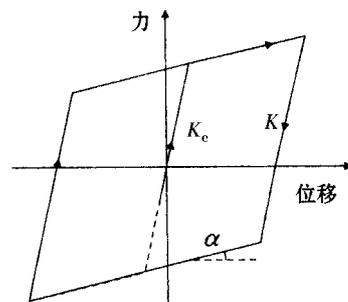


图 2 SDOF 系统滞回模型

Fig. 2 Hysteresis model

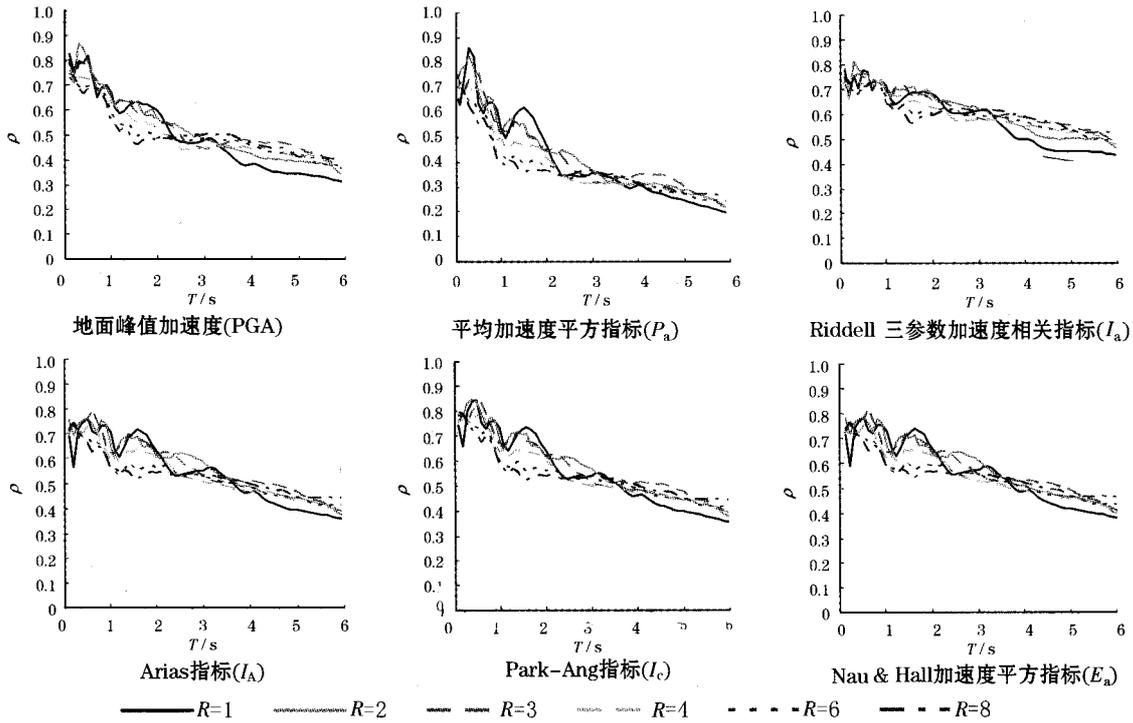
3 SDOF 系统的分析

3.1 分析模型与结果

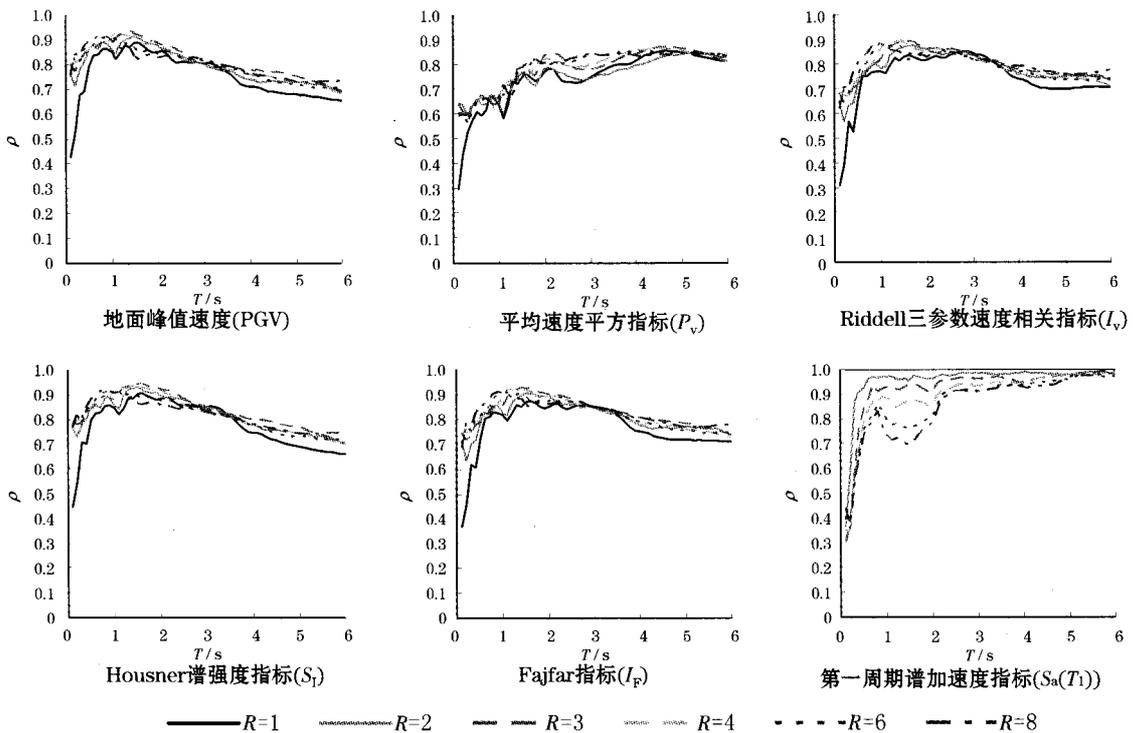
所分析的弹塑性 SDOF 系统的阻尼比取 5%,其力-位移关系采用双线型模型(见图 2),强度折减系数 R 分别取 1(弹性)、2、3、4、6 和 8,共 6 种;弹塑性 SDOF 结构的屈服后刚度系数 α 取 0.1。结构周期从 0.1s 到 6s,间隔 0.1s 取值。

由于前述地震动强度指标很多,且弹塑性 SDOF 系统的响应指标也很多,本文限于篇幅,无法将所有计

算结果列出。根据已有文献资料对各地震动指标的研究结论以及本文计算分析结果,以下仅列出部分具有代表性地震动强度指标的分析结果。同时,考虑到基于性能抗震设计的需求,主要考察 SDOF 系统的位移响应 S_d (见图 3)和地震输入能量 E_I (见图 4)与不同地震动强度指标之间的相关性。由图 3 和图 4 可见,虽然各地震动强度指标与 S_d 和 E_I 的相关系数在数值上有所不同,但对某一地震动强度指标,其与 S_d 和 E_I 的相关系数随周期的变化趋势是十分相近的。因此,图 4 中 E_I 与不同地震动强度指标之间的相关性,仅列出了应用最多的地震动强度指标的分析结果。



(a) 第一类地震动强度指标



(b) 第二类地震动强度指标

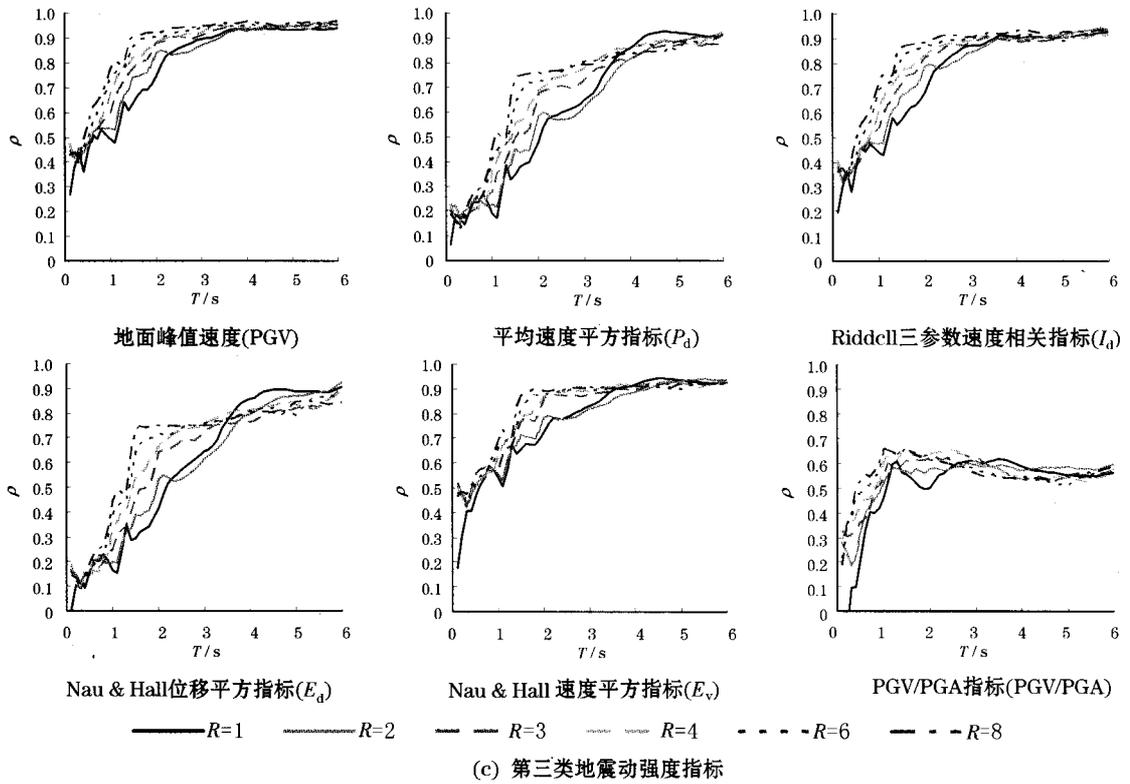
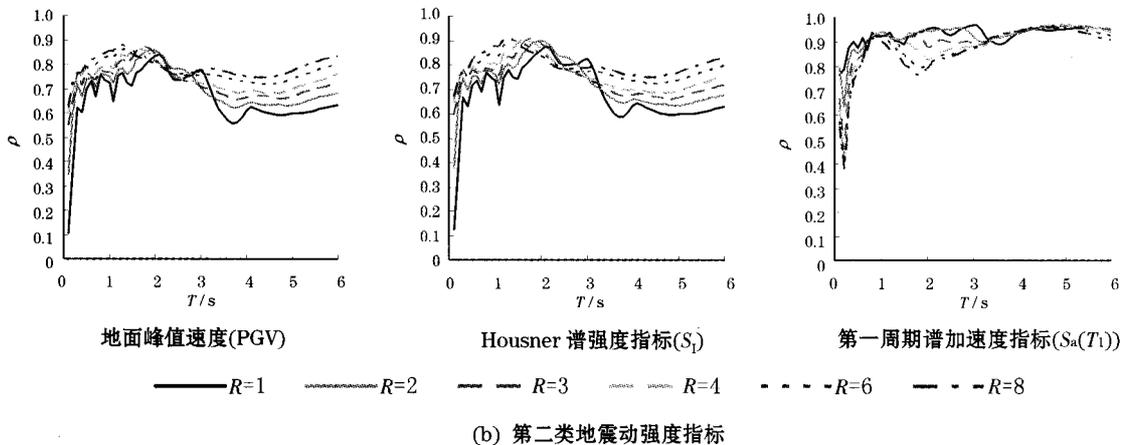
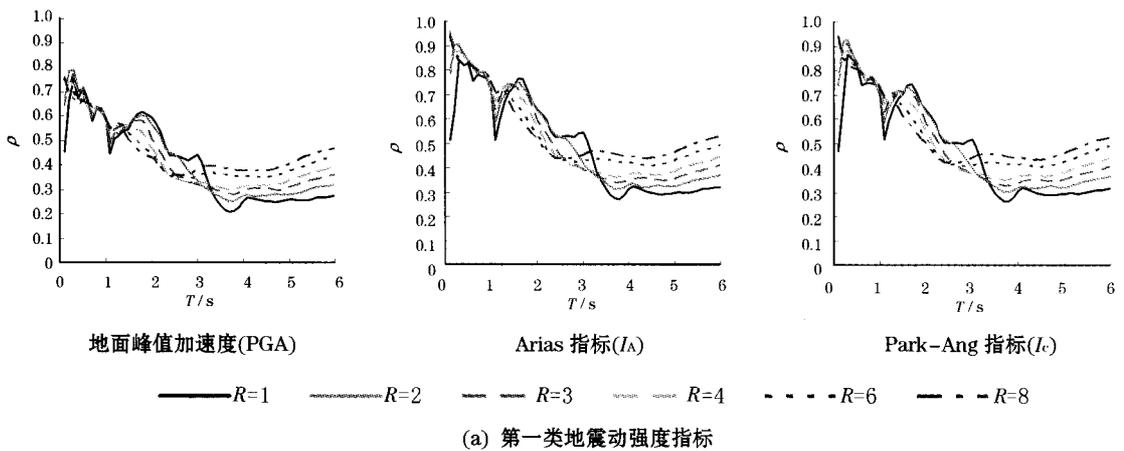


图3 S_d 与不同地震动强度指标 I 之间的线性相关系数 ρ 随周期的变化图

Fig. 3 $\rho - T$ relationships for S_d under various I and R



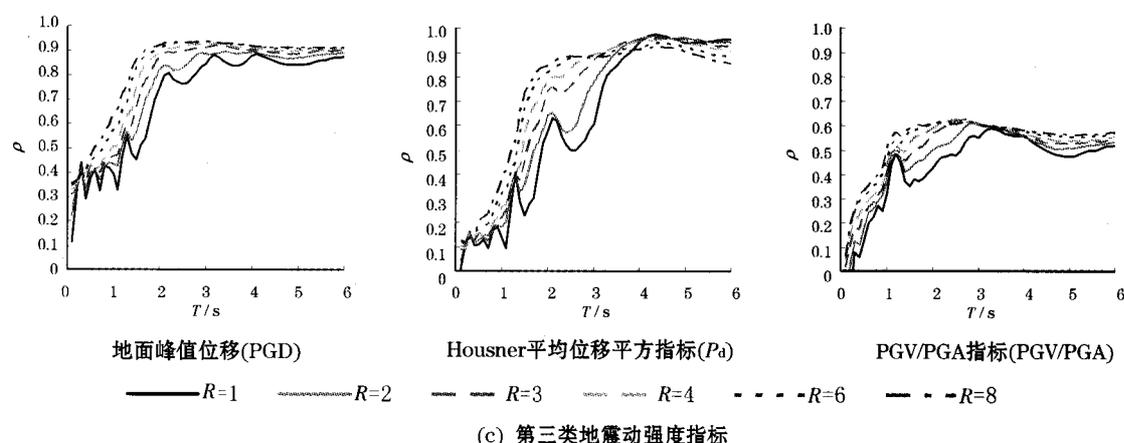


图4 E_1 与不同地震动强度指标 I 之间的线性相关系数 ρ 随周期的变化图

Fig. 4 $\rho - T$ relationships for E_1 under various I and R

根据地震动强度指标与结构地震响应相关系数 P 随周期 T 的变化趋势,地震动强度指标可分为以下三类:

(1) 第一类以 PGA 为代表(见图 3(a),图 4(a)),对短周期结构的相关程度较高,对中长周期特别是长周期结构的相关程度却较低,相关系数随周期呈先高后低的线性下降趋势,这类指标有 PGA、PSA、 $I_A(\zeta)$ 、 P_a 、 a_{rms} 、 E_a 、 a_{rs} 、 I_c 、 I_a 、SMA、EDA 和 A_{95} 。另外,采用 CAV 指标计算结构位移和基底剪力响应时,虽然其相关系数随周期增长下降并不明显,但在计算输入能量和滞回耗能响应时,相关系数随周期仍呈现明显的先高后低的下降趋势,对长周期结构的相关程度偏低,因此也将其归入此类。

(2) 第二类以 PGV 为代表(见图 3(b),图 4(b)),相关系数在较大的周期范围内,特别是中长周期范围都比较大,沿周期分布相对均匀。对弹性结构而言,除短周期范围稍差外,在中长周期范围内,这类地震动强度指标与结构响应之间的相关程度都比较大。而对于弹塑性结构而言,该类地震动强度指标在结构全周期范围内都表现出了相对较高的相关程度。这类指标有 PGV、PSV、 $S_1(\zeta)$ 、 $I_{A,m}$ 、 P_v 、 v_{rms} 、 v_{rs} 、 I_F 、 I_v 和 SMV。指标 $S_a(T_1)$ 对于弹性结构在全周期内表现出良好的相关性,但是对于弹塑性结构在短周期范围内相关性出现下降,而在中长周期范围内仍有极好的相关性,因此也将其归入此类。

(3) 第三类以 PGD 为代表(见图 3(c),图 4(c)),该类地震动强度指标对长周期结构相关性较高,而对中短周期结构(主要是周期小于 2s 的结构)的相关性相对于以上第一、二类的指标要小得多,相关系数随结构周期的变化呈先低后高的上升趋势。这类指标有 PGD、PSD、PGV/PGA、 P_d 、 d_{rms} 、 E_v 、 E_d 、 d_{rs} 、 I_d 。

从各类指标的对比来看,第一类和第三类指标适用的结构周期范围有较大的局限性,因此较为适用于抗震分析的地震动强度指标应从第二类指标中选取。

3.2 地震动强度指标的建议

目前结构抗震分析研究大多采用的 PGA 指标,虽然简单易用,但在中长周期范围与结构地震响应的关系程度较小,无法较好地反映地震动强度对中长周期结构地震响应的影响,因此有必要考虑采用更加合理且简便的地震动强度指标。

图 5 以 $R=4$ 的弹塑性 SDOF 系统为例,给出所有第二类指标与主要结构地震响应(加速度响应 S_a 、位移响应 S_d 、结构输入能量 E_1 、滞回耗能 E_H)间的相关系数随周期的变化曲线比较图。由图可见,第二类指标对中长周期结构的相关性最高,对短周期和长周期结构的相关性,虽然不同指标各有差异,但都保持了较理想的相关性。

根据以上分析结果,考虑到工程应用的简便性,本文建议采用 PGV 作为结构抗震分析用地震动强度指标。但 PGV 指标与我国现行结构抗震设计采用的 PGA 指标的转换关系还需进一步进行深入研究。另外,在结构周期大于 0.4s 时, $S_a(T_1)$ 指标与结构主要地震响应的关系系数也很高,且可较为简便地与规范设计反应谱相联系,但对周期小于 0.4s 的结构可选择 PGA 指标作为补充。

需要特别说明的是,Riddell 提出的是三参数相结合的指标,上述分析中将这三个指标分开进行了评价,但从图 3 和图 4 的结果可知,即使将 Riddell 三参数指标结合起来一起评价,其相关系数与 PGV 指标相比并

无明显提高,仅在长周期段比 PGV 指标稍好,但也与 $S_a(T_1)$ 指标相差不多。因此,与 PGV 或 $S_a(T_1)$ 相比, Riddell 三参数指标从整体上来看并无特别优势,且 Riddell 指标的公式复杂,选用周期段分界也不明确。

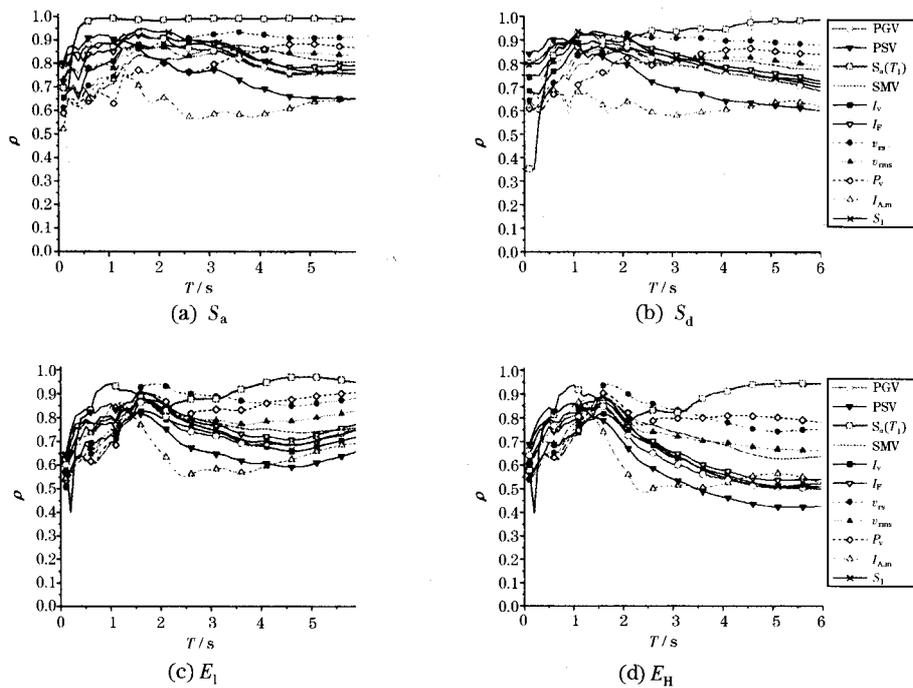


图5 第二类指标相关系数 ρ 随周期 T 的变化曲线 (SDOF, $R=4$)

Fig. 5 $\rho - T$ relationships for maximum seismic responses under various I in Group 2 (SDOF, $R=4$)

4 MDOF 系统的分析

由于实际结构为 MDOF 系统,具有多阶模态,且实际地震动是频带较宽的非平稳随机过程,频谱成分复杂, MDOF 系统的地震响应比 SDOF 系统更为复杂。因此,在 SDOF 系统分析研究的基础上,本文又以 MDOF 系统为研究对象,进一步考察各种地震动强度指标与代表性结构地震响应之间的相关性。MDOF 系统的地震响应主要考察最大顶点位移、最大层间位移、最大基底剪力和总输入能量。

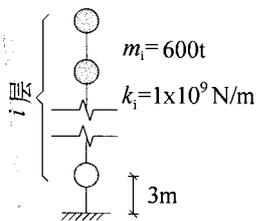


图6 串连剪切层模型

Fig. 6 Lumped mass shear story model

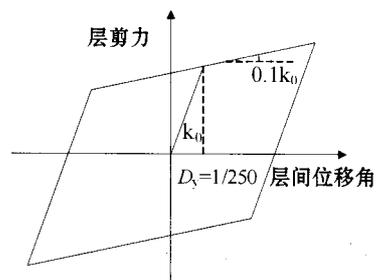


图7 剪切层模型层间滞回模型

Fig. 7 Relationship between shear and drift

4.1 MDOF 系统分析模型及分析参数

分别以具有剪切型侧移变形的框架结构和具有弯剪型侧移变形的框剪结构为研究对象。对于框架结构,本文选用简单的剪切层模型(见图6),结构层间剪力-层间位移角关系采用图7所示的双线型滞回关系。对于框剪结构,为使分析模型更接近实际,采用基于通用有限元软件 MSC. MARC 的杆系-分层壳有限元分析模型(见图8)^[27]。

对于 MDOF 剪切层模型,共分析了 10 个模型,层数分别为 3、6、8、10、12、15、20、30、40 和 50 层,一阶自振周期分别为 0.29 s、0.59 s、0.78 s、0.98 s、1.17 s、1.47 s、1.96 s、2.94 s、3.92 s 和 4.90 s。所有模型的重量和刚度均匀分布,每层质量为 600 t,层间弹性剪切刚度为 $1 \times 10^9 \text{ N/m}$,层间屈服位移角为 1/250,屈服后刚度系数 α 取 0.1。

对于 MDOF 框剪结构,共分析 5 个模型,分别为 8、12、18、24、30 层,一阶周期分别为 0.46 s、0.76 s、1.29 s、1.93 s 和 2.73 s。结构阻尼采用 Rayleigh 阻尼,阻尼比为 5%。

4.2 计算结果

图 9 和图 10 分别给出了 MDOF 剪切层模型和 MDOF 框剪结构分析得到的结构最大顶点位移、最大层间位移、最大基底剪力及结构地震输入能与部分主要地震动强度指标的相关系数 ρ 随结构基本周期的变化情况。

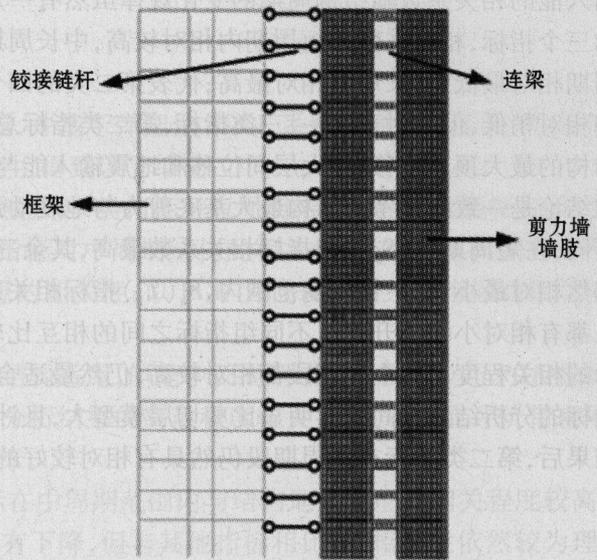


图 8 框-剪结构分析模型

Fig.8 Planar frame shear-wall structure

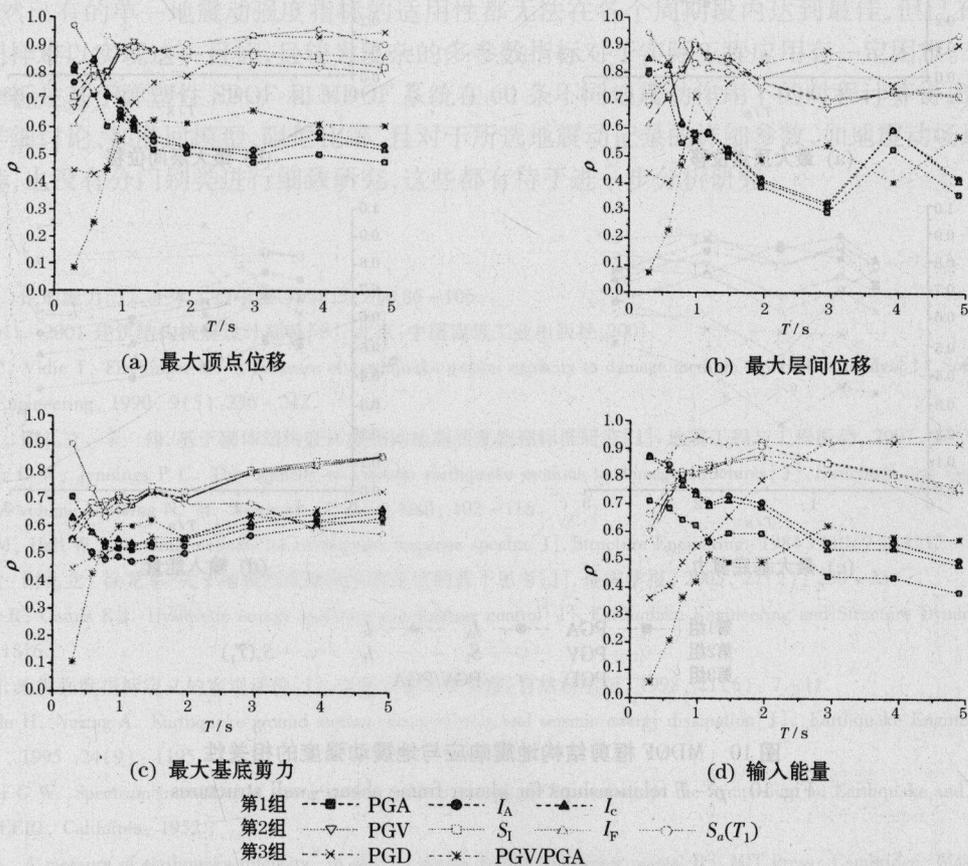


图 9 MDOF 剪切层模型框架结构地震响应与地震动强度的相关性

Fig.9 $\rho - T$ relationships for lumped mass MDOF systems

4.3 MDOF 系统的计算结果分析

由图 9 MDOF 剪切层模型的分析结果可见,主要地震动强度指标与最大顶点位移、最大层间位移和地震

输入能的相关系数随结构周期的变化规律虽然有一定的波动,但整体上仍具有一定的相似性。代表第一类的三个指标,相关系数在短周期内相对较高,中长周期相对较低;代表第三类的两个指标,相关系数则是在短周期相对最低,而长周期相对最高;代表第二类的四个指标,相关系数在中周期范围表现最好,短周期和长周期相对稍低,但相对于第一、三类指标,第二类指标总体上相关系数在所有周期段上都相对较高。因此,对于结构的最大顶点位移、最大层间位移和地震输入能与地震动强度指标的相关性大致与 SDOF 系统分析所得的结论是一致的。考察结构最大基底剪力与地震动强度指标的相关性,其变化规律与前面的三种响应有所不同,在短周期内, $S_a(T_1)$ 指标相关系数最高,其余三种第二类指标与第一类指标相关系数相当,第三类指标仍然相对最小;在中长周期范围内, $S_a(T_1)$ 指标相关系数略有下降,而其余指标的相关系数随结构周期的延长都有相对小幅上升。从不同组指标之间的相互比较来看,除 $S_a(T_1)$ 指标在长周期较低外,其余第二类指标的相关程度在各个周期段都相对较高,仍然最适合用于抗震分析。对于 MDOF 框剪结构(见图 10),不同指标的分析结果之间差异明显比剪切层模型大,且计算结果上下波动也相对较大,但是比较三类指标的分析结果后,第二类指标在各周期段仍然具有相对较好的相关性。

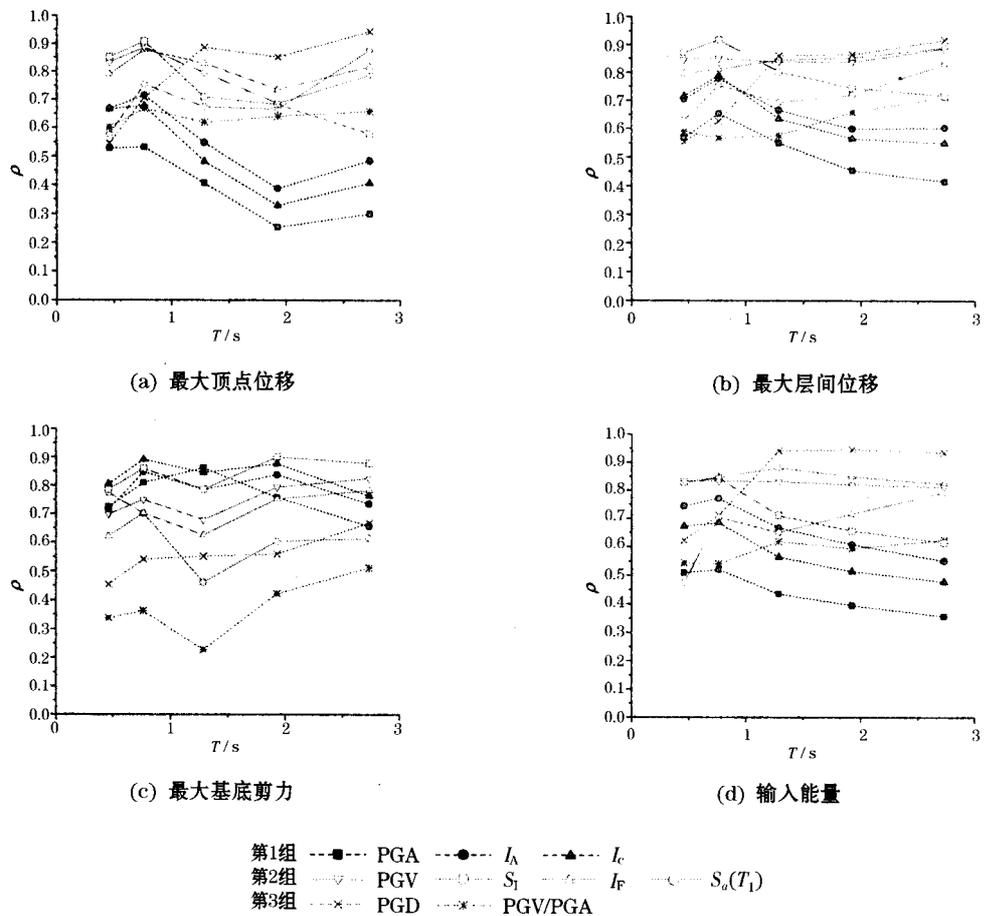


图 10 MDOF 框剪结构地震响应与地震动强度的相关性
 Fig. 10 $\rho - T$ relationships for planar frame shear - wall structures

综上所述分析结果,PGV 指标对 MDOF 系统结构的各种地震响应都有较好的相关性,可以适用于以不同地震响应为研究目标的结构抗震分析。而对于 $S_a(T_1)$ 指标,图 9 的结果表明,该指标对于剪切层模型结构的最大顶点位移、最大层间位移、总输入能量等结构地震响应相关性较好,但是基底剪力与 $S_a(T_1)$ 指标的相关性在长周期段较差;而图 10 的结果则显示,对于框剪结构,几种地震响应与 $S_a(T_1)$ 指标的相关性总体上均不如 PGV 指标,另外考虑到 $S_a(T_1)$ 指标与结构基本周期相关,无法直接由地震动参数给出,因此对于 MDOF 系统不建议采用 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度指标,特别是对于框剪类型的结构。

5 结论

本文列举了不同学者提出的 33 个地震动强度指标,并基于弹塑性 SDOF 系统和 MDOF 系统,分析研究了主要结构地震响应与各地震动强度指标之间的相关性,得到以下结论:

(1)地震动强度指标可以分为三类,以 PGA 为代表的第 1 类指标对短周期结构的相关程度较高,对中长周期结构的相关程度却较低;以 PGV 为代表的第 2 类指标对中周期结构的相关程度较高,长周期和短周期范围内不同指标的相关程度有所降低,但仍保持较理想的相关性;以 PGD 为代表的第 3 类指标对长周期结构的相关性较高,而对中短周期结构的相关性较差。

(2)目前较多采用的 PGA 指标虽然对周期较短的结构适用,但是中长周期结构地震响应与 PGA 指标的相关性较差,用于中高层结构抗震性能评价时,会导致分析结果的离散程度较大,给抗震性能评价带来不准确性,因此 PGA 不适合作为抗震分析的单一地震动指标。

(3)对弹塑性 SDOF 系统和 MDOF 系统,PGV 指标在中周期范围内与结构地震响应的相关程度较高,在短周期和长周期范围内虽然相关程度较中周期范围略有下降,但与其他指标相比,其相关性依然较为理想。考虑到 PGV 具有较好的工程使用的简便性,因此 PGV 是基于性能设计和评价较为合适的单一地震动强度指标。但 PGV 指标与我国现行抗震规范采用的 PGA 指标的对应关系还需进一步进行深入研究。

(4)虽然在中长周期范围 $S_a(T_1)$ 指标与 SDOF 系统的地震响应具有较高相关性,但与 MDOF 系统特别是框剪结构的地震响应相关性有所降低,总体上不如 PGV 指标;而且该指标与结构基本周期相关,无法单独由地震动参数直接给出,因此不太适合 MDOF 结构的抗震分析使用。

(5)虽然已有的单一地震动强度指标的适用性都无法在各个周期段内达到最佳,但已有多参数地震动强度指标同样难以实现这一目标,且较为复杂的多参数指标对于实际工程应用有一定困难。

本文分析是基于弹塑性 SDOF 和 MDOF 系统在 60 条不同地震动作用下的时程计算得出的,很多其它结构参数未详细讨论,如滞回模型、阻尼比等,且对于所选地震动记录的详细参数,如地震动场地、震中距、地震频谱特性等,也没有分门别类进行细致研究,这些都有待于进一步分析研究。

参考文献:

- [1] 刘恢先. 论地震力[J]. 土木工程学报, 1958, 5(2): 86 - 106.
- [2] GB 50011 - 2001 建筑结构抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [3] Fajfar P, Vidic T, Fischinger M. A measure of earthquake motion capacity to damage medium - period structures[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1990, 9(5): 236 - 242.
- [4] 郝敏, 谢礼立, 李伟. 基于砌体结构破坏损伤的地震烈度物理标准研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(5): 27 - 32.
- [5] Housner G W, Jennings P C. The capacity of extreme earthquake motions to damage structures[J]. Structural and Geotechnical Mechanics, 1977, A volume honoring N. M. Newmark, Prentice Hall: 102 - 116.
- [6] Nau J M, Hall W J. Scaling methods for earthquake response spectra[J]. Structure Engineering, 1984, 110(7): 1533 - 1548.
- [7] 郝敏, 谢礼立, 徐龙军. 关于地震烈度物理标准研究的若干思考[J]. 地震学报, 2005, 27(2): 230 - 234.
- [8] Riddell R, Garcia E J. Hysteretic energy spectrum and damage control[J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 2001, 30(12): 1791 - 1816.
- [9] 叶献国. 地震强度指标定义的客观评价[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 1998, 21(6): 7 - 11.
- [10] Sucuoglu H, Nurtug A. Earthquake ground motion characteristics and seismic energy dissipation[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1995, 24(9): 1195 - 1213.
- [11] Housner G W. Spectrum intensities of strong motion earthquakes[C]//Proceedings of the Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures, EERI, California, 1952.
- [12] Arias A. A measure of earthquake intensity, in seismic design for nuclear power plants[R]. MIT Press: Cambridge, Massachusetts, 1970.
- [13] Trifunac M D, Brady A G. A study on the duration of strong earthquake ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(3): 581 - 626.
- [14] 宋雅桐, 朱继澄. 地震动持续时间对多层结构反应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 1983, 3(4): 49 - 59.
- [15] Housner G W. Measures of severity of earthquake ground shaking[C]//Proceedings of the U. S. National Conference on Earthquake Engineering, EERI, Ann Arbor, MI, 1975.
- [16] Housner G W, Jennings P C. Generation of artificial earthquakes[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1964, 90(EM1): 113 - 150.

- [17] Nau J M, Hall W J. An evaluation of scaling methods for earthquake response spectra[R]. Structural Research Series No. 499, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, IL, 1982.
- [18] Park Y J, Ang A H S, Wen Y K. Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 740 - 757.
- [19] Bazzurro P, Cornell C A, Shome N, et al. Three proposals for characterizing MDOF non - linear seismic response[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(11): 1281 - 1289.
- [20] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 2002, 31(3): 491 - 514.
- [21] Kramer S L. Geotechnical earthquake engineering[M]. U. S. : Prentice - Hall, 1996.
- [22] Benjamin J R, Associates. A criterion for determining exceedance of the operating basis earthquake[R]. EPRI Report NP - 5930, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1988.
- [23] Nuttli O W. The relation of sustained maximum ground acceleration and velocity to earthquake intensity and magnitude[R]. Miscellaneous Paper S - 71 - 1, Report16, U. S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1979.
- [24] Sarma S K, Yang K S. An evaluation of strong motion records and a new parameter A_{95} [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1987, 15(1): 119 - 132.
- [25] Decanini L D, Mollaioli F. An energy - based methodology for the assessment of seismic demand [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21(2): 113 - 137.
- [26] Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER strong motion database [DB/OL]. California; Berkley, 2005 [Sep, 2005]. <http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html>.
- [27] 叶列平, 陆新征, 马千里, 等. 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(supII): 131 - 140.