

高幅值地震动参数及其潜在破坏势

徐龙军^{1,2}, 许昊^{1,3}, 谢礼立^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学(威海)土木工程系, 264209 山东 威海; 2. 中国地震局工程力学研究所, 150080 哈尔滨;
3. 伊利诺伊大学 厄本那-香槟分校 土木与环境工程系, 61801 厄本那)

摘要: 为研究高幅值地震动特性与影响,并针对该类地震动改进设计谱,统计了20次地震中60条满足 $PGA \geq 1g$ 、 $PGV \geq 100\text{ cm/s}$ 、 $PGD \geq 100\text{ cm}$ 三个条件之一的地震动记录,并计算相关参数.首先综合之前提出的与地震动特性相关的破坏势评价标准,采用因子分析法对各评价标准进行降维,得到新的综合因子,实现原始变量整合与简化,并对综合因子的物理意义给出解释.同时计算了高幅值地震动记录的特征周期和最大规范谱谱值,比较与现有规范给定值的差异,针对该类特殊地震动发生的可能性,为设计谱的完善提出建议.

关键词: 特殊地震动;潜在破坏势;因子分析;设计谱

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)10-0007-07

Parameters and damage potential of large-amplitude ground motions

XU Longjun^{1,2}, XU Hao^{1,3}, XIE Lili^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Weihai, Shandong, China;

2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 150080 Harbin, China;

3. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 61801 Urbana, USA)

Abstract: To study the properties and effects of high-amplitude ground motion, while modifying the design spectra, 60 records from 20 events satisfying at least one of the following requirements: $PGA \geq 1g$, $PGV \geq 100\text{ cm/s}$ or $PGD \geq 100\text{ cm}$, were collected and analyzed. The evaluation factors for ground motions' damage potential related with the ground motions' characteristics were summarized and the Factor Analysis Method was used to realize the simplification and integration. Explanation of new factors' physical meanings was also discussed. Additionally, characteristic periods and the maximum amplification coefficients for the large-amplitude ground motions were calculated and compared with those adopted in current design codes. Suggestions on the modification of design spectra were indicated based on the possibility of potential hazard.

Key words: special ground motion; damage potential; factor analysis method; design spectra

所谓特殊地震动,一般指在幅值、频谱和持时三要素中,至少某一要素具有某种特殊特征的地震动.相对于普通地震动,人们对特殊地震动的关注较少,但随着世界范围内近年来强烈地震的频繁发生,特殊地震动已成为重特大工程结构和设施的抗震设计必须考虑的内容.

Iwan等^[1]通过对1992年Landers地震近断层地震动的分析,较早指出特殊近断层脉冲型地震动对长周期结构的危害,引起人们对近断层地震动的关注.徐龙军等^[2]针对台湾Chi-Chi地震近断层和中远场特殊长周期地震动进行了参数对比分析,认为近断层和远场长周期地震动对长周期结构均可能造成严重的破坏效果. Bradley^[3]探讨了持时与地震动幅值的相关性问题. Strasser等^[4]通过对94条高幅值特殊地震动地震背景的考察和分析,重点探讨了高幅值特殊地震动产生的地震学和地质学原因.这些研究主要从地震动某一要素出发,探讨地震动特性或产生背景,尚缺

收稿日期: 2013-01-17.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91215301);国家自然科学基金重点面上项目(51238012,51178152).

作者简介: 徐龙军(1976—),男,副教授,博士生导师;

谢礼立(1939—),男,博士生导师,中国工程院院士.

通信作者: 徐龙军, xulongjun80@163.com.

乏对特殊地震动综合工程特征的系统分析。

通过强震动数据库记录和以往研究不难发现^[3],目前为止符合高幅值条件($PGA \geq 1 g$, $PGV \geq 1 m/s$ 或 $PGD \geq 1 m$)的特殊地震动记录只有百余条.高幅值地震动绝大多数产生于浅层地震和近断层区域,地震动记录往往在高频分量对应高幅值.由于地震动的复杂性,高幅值地震动的产生和影响存在许多未知因素.因此,有必要对该类地震动的综合工程特征及其潜在破坏势进行深入研究,从中获得新的规律和认识.本文将重点从两个方面分析该类地震动特性,一是潜在破坏势评价标准的综合与简化,二是高幅值地震作用对设计谱的影响。

1 高幅值地震动破坏势评定及问题

关于地震动潜在破坏势,翟长海等^[5]给出了一系列评价标准,认为地震作用下结构的破坏并不是单一变量可以评价的,需综合考虑多种因素.而如果评价标准采用的指标较多,则会使破坏势的计算分析工作过于繁琐.地震动破坏势的评价标准计算指标主要包括:地震动峰值(如 PGA)、等效峰值类参数(如 EPA)、反应谱峰值(如 PSA),此外还有最大增量类参数、持时、以及结构滞回能量等.针对计算参数较多的情况,翟长海等^[5]提出一种破坏势的综合评价法,在考虑原始变量间相关性后指出,对于地震动本身和结构弹性反应得到的参数,用峰值加速度、峰值速度、峰值位移,就可以代替有效峰值加速度、最大增量速度、最大增量位移.郝敏^[6]在此基础上对各类建筑物的破坏势与不同变量间相关性做了进一步研究,并对不同结构类型应主要考虑的变量进行了划分。

然而我们发现,简化后的各评定标准虽不能互相代替,但相互间仍有一定相关性,即包含信息仍有重复.同时像 Arias 强度、谱烈度等参数,虽直接应用于破坏势评价并不科学,但若能与其他相关变量整合,组合成新因子,仍不失为评价破坏势的重要参考.对具体结构破坏与这些变量进行相关性分析时也存在一定问题,即相关性较强的变量并不一定是最好的评价破坏强弱的因子,其他相关性较差的变量组合后,也可能与破坏程度更密切相关.因此,还需将所有变量进一步整合,得到相互独立的新因子,避免信息杂糅.而利用统计学中的因子分析法可以实现这一目标.因子分析得到的新因子综合绝大多数原始变量,涵盖信息完善,同时相互间独立,不存在信息重叠,在评价破坏势时更具代表性。

2 高幅值地震动参数

通过 PEER NGA Database^[14]、CESMD^[15]、K-NET^[16] 以及 European Strong-Motion Database^[17],收集了从 1971 年至 2011 年间发生的 20 次地震的 60 条高幅值记录.记录主要集中于 1994 年的 Northridge 地震、1999 年的 Chi-Chi 地震,以及 2011 年日本 Tohoku 地震.满足 $PGA \geq 1 g$ 的记录共 36 条,满足 $PGV \geq 100 cm/s$ 的共 32 条,满足 $PGD \geq 100 cm$ 的共 8 条.表 1 为 60 条记录的基本信息。

下面将对这些记录的地震动峰值、峰值比、谱峰值、持时、Arias 强度、谱烈度、有效峰值速度等进行处理,进而对高幅值地震动破坏势影响因子进行整合。

3 高幅值地震动破坏势简化分析

表 2 给出由 12 个变量作出的相关系数矩阵.本文对原始变量进行 KMO 和球形检验,得到 KMO 度量值为 0.761,球形检验相伴概率为 0.000.因 KMO 度量值小于 0.7,且球形检验相伴概率小于显著性水平 0.05,可拒绝零假设,原始变量适合做因子分析^[13]。

采用主成分分析法对原始变量进行因子提取.得到的新因子(综合因子)对原始变量的提取情况列于表 3.第一列为原始变量,第二列为初始解计算的变量共同度,第三列为因子分析最终解得到的变量共同度.表 4 为特征根及累计方差贡献率.第二列为新因子的方差贡献(特征值),可看出新因子能解释的原始变量个数.第三列为各最终解方差贡献率,第四列为累计方差贡献率.根据因子分析法要求,当累积方差贡献率大于 80% 时,可认为新因子能解释绝大多数原始信息.表中前 3 个综合因子满足上述条件,因此,仅采用这 3 个因子,便可代替之前 12 个原始变量。

通过 SPSS 可得到成分矩阵,为更直观表现综合因子与原始变量相关程度,做出相关度柱状图代替原矩阵,见图 1.由图 1 可看出各综合因子在解释原始变量时所占权重.设 3 个综合因子分别为 $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$,则 $F1$ 主要与 PGA 、 PGV 、 PGD 、 V/A 、 D/V 、 PSA 、 PSD 有关, $F2$ 主要与 EPV 、谱烈度、 PSV 有关, $F3$ 主要与持时、Arias 强度有关.其中, $F1$ 代表原始变量都为峰值因子(除去 PSV); $F2$ 代表的原始变量都和速度谱谱值相关, EPV 是从 0.8 s 到 2.5 s 周期段的速度谱均值,谱烈度是对速度谱的积分, PSV 为速度谱峰值; $F3$ 则和持时密切相关,因为 Arias 强度被证明过分考虑长持时的影响^[5].可见 3 个因子都有较明确物理意义。

表 1 高幅值地震动记录基本信息

地震	日期	震级	台站	方位	场地 类别	震中距/ km	断层距/ km	PGA/ g	PGV/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	PGD/ cm
Cape Mendocino	1992-4-25	7.0	Cape Mendocino	000	I	10.4	8.5	1.611	100.69	28.77
Cape Mendocino	1992-4-25	7.0	Cape Mendocino	090	I	10.4	8.5	1.039	41.32	12.59
Cape Mendocino	1992-4-25	7.1	Cape Mendocino	UP	I	10.4	1.1	0.754	62.70	110.61
Chi-Chi, Taiwan	1999-9-20	7.6	TCU084	EW	I	8.9	10.4	1.157	114.76	31.45
Chi-Chi, Taiwan	1999-9-20	7.6	TCU129	EW	III	14.2	1.2	1.010	60.01	50.22
Chi-Chi, Taiwan	1999-9-20	7.6	CHY080	EW	I	31.7	7.0	0.967	107.60	18.61
Chi-Chi, Taiwan	1999-9-20	7.6	CHY101	NS	III	32.0	11.1	0.440	115.04	68.78
Chi-Chi, Taiwan	1999-9-20	7.6	TCU052	EW	I	39.6	0.2	0.348	159.05	184.51
Chi-Chi, Taiwan	1999-9-20	7.6	TCU052	NS	I	39.6	0.2	0.419	118.51	246.27
Chi-Chi, Taiwan	1999-9-20	7.6	TCU052	UD	I	39.6	0.2	0.241	110.58	163.59
Chi-Chi, Taiwan	1999-9-20	7.6	TCU065	EW	III	26.7	1.0	0.814	126.22	92.61
Chi-Chi, Taiwan	1999-9-20	7.6	TCU068	EW	I	47.9	1.1	0.566	176.66	324.27
Chi-Chi, Taiwan	1999-9-20	7.6	TCU068	NS	I	47.9	1.1	0.462	263.23	430.22
Chi-Chi, Taiwan	1999-9-20	7.6	TCU068	UD	I	47.9	1.1	0.486	187.38	266.94
Chi-Chi, Taiwan	1999-9-20	7.6	TCU084	EW	I	8.9	1.1	1.157	114.76	31.45
Chi-Chi, Taiwan	1999-9-20	7.6	TCU102	EW	I	45.6	1.1	0.298	112.47	89.23
Coalinga	1983-7-22	5.8	Transmitter Hill	360	I	6.0	9.2	1.083	39.68	5.42
Denali, Alaska	2002-11-3	7.9	Pump Station #10	10047	II	84.3	1.1	0.319	134.76	102.97
El Salvador	2001-1-13	7.7	La Libertad	NS	III	-	-	1.172	61.70	96.02
Gazli, USSR	1976-5-17	6.8	Karakyr	UD	I	12.8	4.0	1.264	64.31	30.95
Imperial Valley	1979-10-15	6.5	El Centro Array #6	UD	III	27.5	1.0	1.784	69.59	17.04
Imperial Valley	1979-10-15	6.5	El Centro Array #6	230	III	27.5	1.0	0.439	109.82	65.83
Imperial Valley	1979-10-15	6.5	El Centro Array #7	230	III	27.6	0.6	0.463	109.26	44.72
Japan, Tohoku	2011-3-11	9.0	HITACHI	EW	III	245.2	58.7	1.086	43.84	28.93
Japan, Tohoku	2011-3-11	9.0	HITACHI	NS	III	245.2	58.7	1.535	64.27	20.80
Japan, Tohoku	2011-3-11	9.0	OHMIYA	NS	III	261.9	71.4	1.168	42.04	22.07
Japan, Tohoku	2011-3-11	9.0	HOKOTA	EW	III	292.3	77.8	1.056	55.63	25.19
Japan, Tohoku	2011-3-11	9.0	HOKOTA	NS	III	292.3	77.8	1.289	67.56	29.78
Japan, Tohoku	2011-3-11	9.0	SHIRAKAWA	NS	II	233.5	98.0	1.044	41.61	7.00
Japan, Tohoku	2011-3-11	9.0	MYG004	EW	I	125.9	75.1	1.022	41.65	24.15
Japan, Tohoku	2011-3-11	9.0	MYG004	NS	I	125.9	75.1	2.561	108.89	37.67
Japan, Tohoku	2011-3-11	9.0	MYG004	UD	I	125.9	75.1	1.661	30.47	11.75
Japan, Tohoku	2011-3-11	9.0	MYG012	EW	II	118.1	67.4	1.284	43.60	30.26
Japan, Tohoku	2011-3-11	9.0	IMAICHI	EW	III	293.8	125.5	1.122	44.44	14.13
Kiholo Bay	2006-10-15	6.7	USGS station 2825	090	III	32.8	-	1.031	82.35	11.35
Kobe, Japan	1995-1-16	6.9	Takatori	000	IV	13.1	0.3	0.611	127.19	35.79
Kobe, Japan	1995-1-16	6.9	Takatori	090	IV	13.1	0.3	0.615	120.73	32.74
Morgan Hill	1984-4-24	6.2	Coyote Lake Dam	285	I	24.6	0.1	1.298	80.81	9.74
Nahanni, CAN	1985-12-23	6.8	6097 Site 1	s1280	I	6.8	6.0	1.096	46.15	14.74
Nahanni, CAN	1985-12-23	6.8	6097 Site 1	UP	I	6.8	6.0	2.104	41.48	7.74
Niigata-ken	2004-10-23	6.6	NIG019	EW	II	-	-	1.009	111.20	74.32
Niigata-ken	2004-10-23	6.6	NIG021	NS	II	-	-	1.308	47.42	13.17
Northridge	1994-1-17	6.7	Rinaldi Receiving	RRS228	II	10.9	7.1	0.825	160.12	29.40
Northridge	1994-1-17	6.7	Sylmar-Converter	SCS052	III	13.1	6.2	0.612	117.43	54.16
Northridge	1994-1-17	6.7	Sylmar-Converter	SCS142	III	13.1	6.2	0.897	102.21	45.15
Northridge	1994-1-17	6.7	Sylmar-Converter-East	SCE018	II	13.6	6.1	0.828	117.50	34.45
Northridge	1994-1-17	6.7	Sylmar-Olive View Med FF	SYL360	III	16.8	6.4	0.851	128.54	36.39
Northridge	1994-1-17	6.7	Tarzana-Cedar Hill A	090	II	5.4	17.5	1.779	109.54	33.60
Northridge	1994-1-17	6.7	Jensen Filter Plant	JEN022	II	13.0	6.2	0.424	105.97	43.11
Northridge	1994-1-17	6.7	Pacoima Dam-upper left	104	I	20.4	8.0	1.592	53.71	5.73
Northridge	1994-1-17	6.7	Pacoima Dam-upper left	194	I	20.4	8.0	1.291	99.61	20.87
Northridge	1994-1-17	6.7	Pacoima Dam-upper left	UP	I	20.4	8.0	1.017	42.54	9.02
Northridge	1994-1-17	6.7	Tarzana-Cedar Hill A	090	II	5.4	17.5	1.807	112.78	34.11
Northridge	1994-1-17	6.7	Tarzana-Cedar Hill A	UP	II	5.4	17.5	1.094	74.81	18.06
Parkfield	2004-9-28	6.0	Fault Zone 11	360	I	9.2	-	1.174	204.51	82.23
San Fernando	1971-2-9	6.6	Pacoima Dam-upper left	164	I	11.9	2.8	1.226	112.49	35.50
San Fernando	1971-2-9	6.6	Pacoima Dam-upper left	254	I	11.9	2.8	1.160	54.09	11.68
SuperstitionHills	1987-11-24	6.5	Parachute Test Site	PTS225	III	16.0	0.7	0.455	112.08	53.96
Tabas, Iran	1978-9-16	7.4	Tabas	TAB-TR	I	55.2	-	0.852	121.22	95.06
Ardal	1977-4-6	6.0	Naghan 1	LG	I	5.0	4.0	1.000	56.02	5.68

表 2 原始变量相关系数矩阵

参数	PGA	PGV	PGD	V/A	D/V	EPV	持时	Arias 强度	谱烈度	PSA	PSV	PSD
PGA	1.00	-0.44	-0.49	-0.75	-0.48	-0.20	0.21	0.58	-0.25	0.61	-0.12	-0.54
PGV	-0.44	1.00	0.72	0.78	0.40	0.62	-0.23	-0.18	0.67	-0.43	0.70	0.76
PGD	-0.49	0.72	1.00	0.78	0.85	0.12	-0.05	-0.23	0.19	-0.46	0.39	0.98
V/A	-0.75	0.78	0.78	1.00	0.59	0.26	-0.14	-0.37	0.33	-0.63	0.38	0.81
D/V	-0.48	0.40	0.85	0.59	1.00	-0.05	0.12	-0.20	0.02	-0.43	0.17	0.79
EPV	-0.20	0.62	0.12	0.26	-0.05	1.00	-0.21	-0.07	0.98	-0.17	0.77	0.21
持时	0.21	-0.23	-0.05	-0.14	0.12	-0.21	1.00	0.59	-0.19	-0.02	0.03	-0.05
Arias 强度	0.58	-0.18	-0.23	-0.37	-0.20	-0.07	0.59	1.00	-0.08	0.33	0.24	-0.25
谱烈度	-0.25	0.67	0.19	0.33	0.02	0.98	-0.19	-0.08	1.00	-0.18	0.78	0.28
PSA	0.61	-0.43	-0.46	-0.63	-0.43	-0.17	-0.02	0.33	-0.18	1.00	-0.17	-0.49
PSV	-0.12	0.70	0.39	0.38	0.17	0.77	0.03	0.24	0.78	-0.17	1.00	0.43
PSD	-0.54	0.76	0.98	0.81	0.79	0.21	-0.05	-0.25	0.28	-0.49	0.43	1.00

表 3 综合因子对原始变量提取情况

变量	初始	提取
PGA	1	0.70
PGV	1	0.86
PGD	1	0.90
V/A	1	0.85
D/V	1	0.80
EPV	1	0.94
持时	1	0.70
Arias 强度	1	0.87
谱烈度	1	0.93
PSA	1	0.48
PSV	1	0.90
PSD	1	0.91

表 4 因子方差贡献率

成份	初始特征值			是否选取
	合计	方差/%	累积/%	
1	5.59	46.55	46.55	是
2	2.50	20.81	67.36	是
3	1.75	14.60	81.96	是
4	0.87	7.25	89.21	
5	0.43	3.57	92.78	
6	0.35	2.89	95.67	
7	0.23	1.88	97.54	
8	0.13	1.05	98.60	
9	0.08	0.69	99.29	
10	0.06	0.46	99.75	
11	0.02	0.15	99.90	
12	0.01	0.10	100.00	

通过成份矩阵或相关度柱状图可得原始变量与综合因子间的因子模型^[13]. 以 PGA 为例: $PGA = 0.71 \times F1 + 0.32 \times F2 + 0.32 \times F3$, 其中 $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 之前的系数为对应的相关度. 同时, 可通过回归算法得到得分系数矩阵, 计算每个综合因子得分. 每条记录对应的综合因子得分不同, 根据因子得分的

差异, 便可将综合因子涉及的物理量与具体地震作用下结构的破坏情况作最终对照.

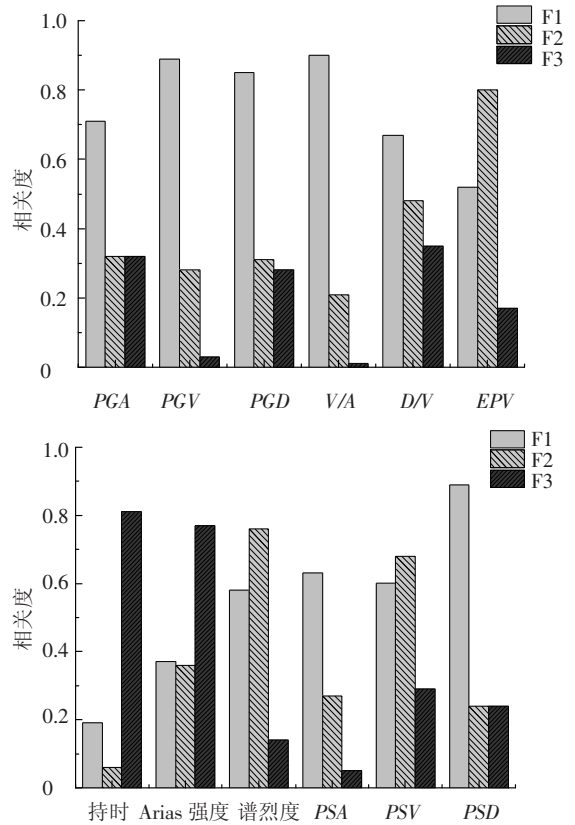


图 1 综合因子与原始变量相关程度

4 对设计谱的影响

目前世界上许多国家都有各自抗震设计谱确定和表达方法^[9], 较多采用规准谱的表达形式(放大系数谱 β). 规准谱最大值 β_{max} 和特征周期 T_g 是确定设计谱时重要的两个参数^[8]. 我国抗震规范^[12] 对这两个参数也有明确规定, 其中水平向地震动 β_{max} 取 2.25(美国 UBC 取为 2.50), 特征周期的取值依据不同场地类别的等效剪切波速和覆盖层厚度确定. 本文对高幅值地震动的特征周期和动

力系数最大值进行了分析, 与规范值进行了比较.

图 2 给出特征周期的分布, 图 3 给出动力系数最大值分布. 可以看出, 高幅值地震动的特征周期与动力系数最大值离散性较大, 很多都远远超出规范规定值. 对于特征周期, 即便不考虑具体分组而只与每类场地最大限值比较, 仍有 30 条记录 (50%) 超出抗震规范规定值^[10]. 其中 I 类场地 16 条, 最大 1.94 s; II 类场地 5 条, 最大 1.72 s; III 类场地 7 条, 最大 1.60 s; IV 类场地 2 条, 最大 1.40 s. 需要注意的是, 现阶段除墨西哥城等个别地区在规范中采用的特征周期达到 2.0 ~ 2.5 s, 其他规范的特征周期取值基本都小于 1 s. 而对于动力系数最大值 β_{max} , 共有 80% 的记录值超出我国抗震规范中给出的 2.25, 73.3% 超出美国 UBC 规范中给出的 2.50, 绝大多数都集中在 2.50 ~ 4.00, 最大值达到 6.3.

图 4 给出 5% 阻尼比下高幅值地震作用设计谱与规范设计谱对比. 图 5 给出高幅值地震作用实际规范谱与规范设计谱对比. 可以看出, 针对高幅值地震动的设计谱曲线与现有规范中给定曲线相差很大, 尤其对后三类场地条件, 高幅值地震作用下的设计谱远远高于规范设计谱限值. 同时, 对

比我国抗震规范与 UBC 规范限值不难发现, 中国规范与实际高幅值地震作用设计谱偏差更多.

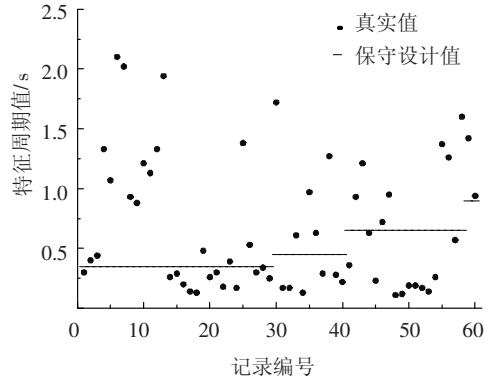


图 2 特征周期分布

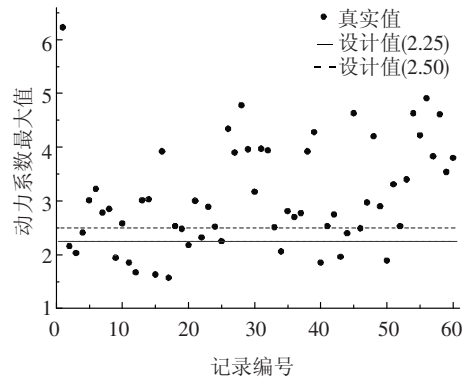
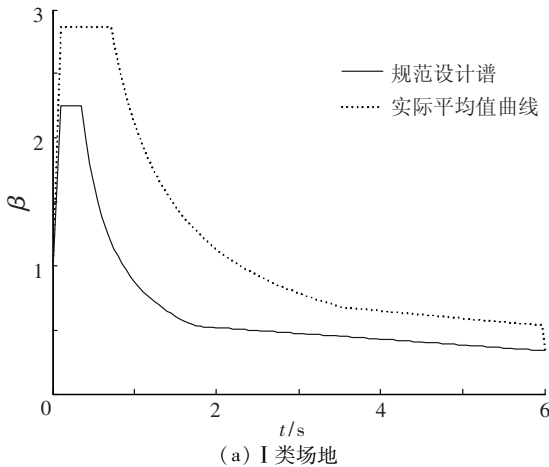
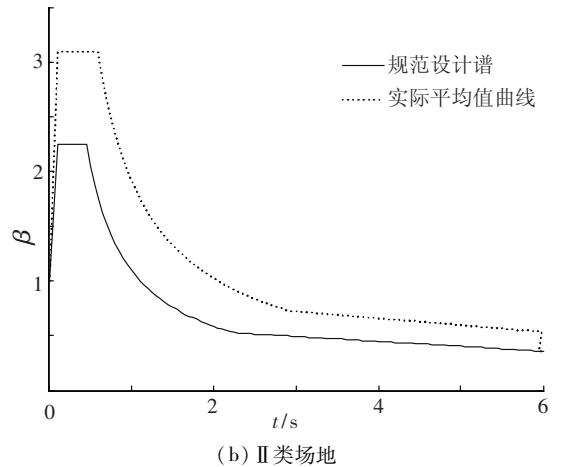


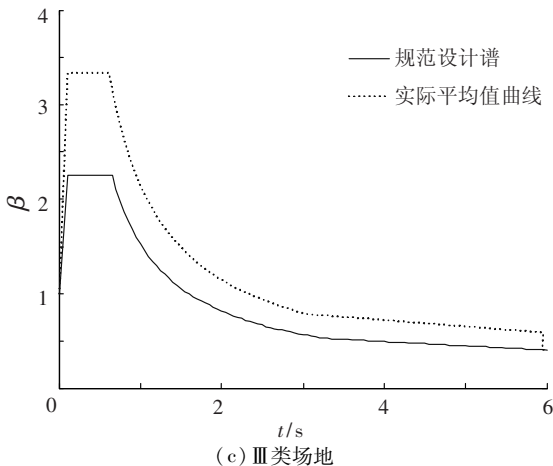
图 3 动力系数最大值分布



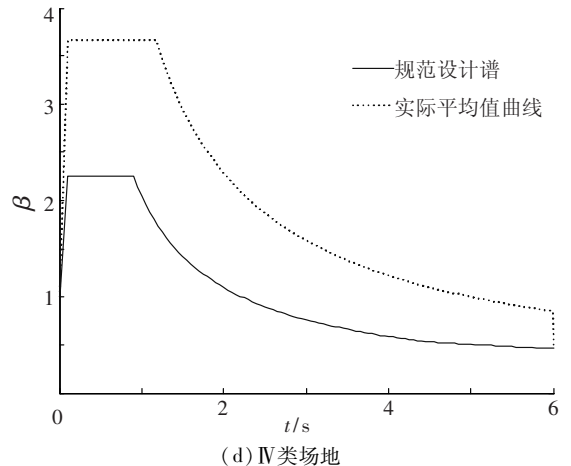
(a) I 类场地



(b) II 类场地



(c) III 类场地



(d) IV 类场地

图 4 高幅值地震作用设计谱与规范设计谱对比

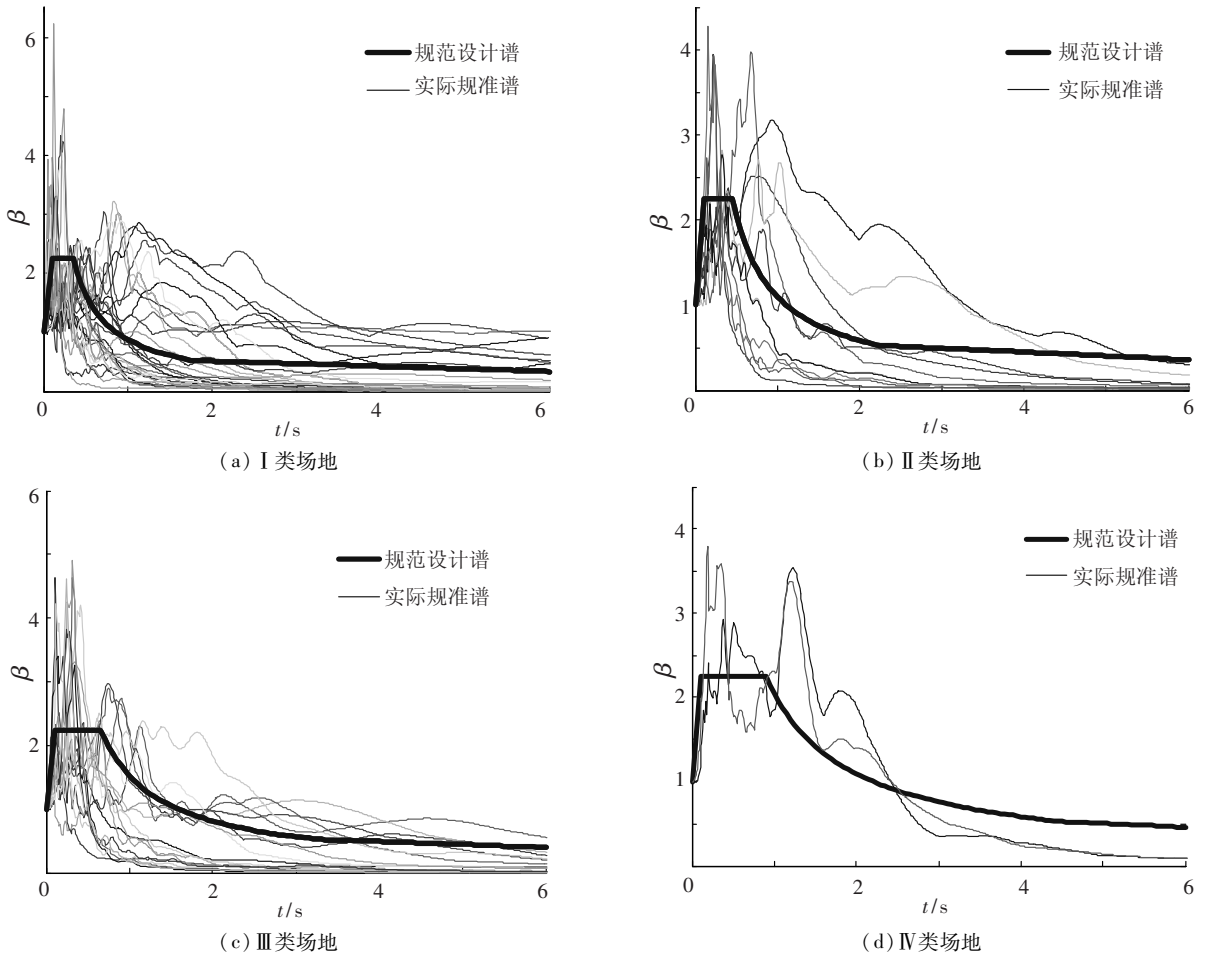


图 5 高幅值地震作用实际规准谱与规范设计谱对比

规准设计谱的取值一般要综合强震发生概率、具体地域的地质构造和地震特征,以及当地经济发展状况而定^[10].从统计数据看,美国、日本、中国台湾等国家和地区都有较多高幅值地震动的先例.而且高幅值地震动发生区域有一定的地质构造特点,从物理学角度讲,在符合一定地表和浅层构造条件时,波的干涉、二次震源的影响等都容易造成地震动幅值的放大.虽然地震的发生是随机概率事件,但地表特征和浅层构造对地震的放大作用是有规律可循的^[3].因此有必要针对高幅值地震动发生的规律,归纳出最容易导致幅值放大的各类条件,与某地区的具体地质特点相对照.在与高幅值地震动发生条件相吻合的地区,应根据一定的超越概率重新考虑特征周期、最大动力系数等的取值.只有这样,才能保证在符合该类特殊地震动发生条件的地区,结构能够安全可靠.

5 结 论

1) 高幅值地震动破坏势评定标准众多,本文将之前提出的 12 个评价标准运用因子分析法进

行降维和整合,最终简化为 3 个综合因子,分别和峰值、谱速度以及持时相关.根据 3 个综合因子的得分,可进一步分析综合因子与结构破坏之间的对应关系.

2) 因子分析法同样适用于普通地震动分析,以及新评定标准加入后的重新整合.这种方法既实现了对原始因子的简化,又保留了绝大多数重要的原始信息.同时新因子之间相互独立,不存在信息杂糅,有效提高了分析的合理性.

3) 高幅值地震动的产生很大程度上受地表及浅层地质构造的影响,有一定物理规律可循.该类地震的特征周期值和最大动力系数数值普遍很高,远超过现有规范设计谱的限值.因此有必要针对符合其产生条件的地区进行设计谱修正,重新拟定其特征周期和最大动力系数数值,以保证结构的安全可靠.

参 考 文 献

[1] IWAN W D, CHEN X D. Important near - field ground motion data from the Landers earthquake [C]//10th European Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995: 229 - 234.

- [2] 徐龙军, 胡进军, 谢礼立. 特殊长周期地震动的参数特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(6): 20-27.
- [3] BRADLEY B A. Correlation of significant duration with amplitude and cumulative intensity measures and its use in ground motion selection [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2011, 15: 809-832.
- [4] STRASSER F O, BOMMER J J. Large-amplitude ground-motion recordings and their interpretations [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29: 1305-1329.
- [5] 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.
- [6] 郝敏. 地震烈度物理标准及地震动破坏势研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [7] NEWMARK N M, HALL W H. Earthquake spectra and design [R]. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
- [8] XU Longjun, XIE Lili, HU Jinjun. The review of development and certain problems in seismic design spectra [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2007, 23: 46-57.
- [9] 徐龙军, 覃锋, 谢礼立. 分区段优化设计反应谱研究[J]. 天津大学学报, 2011, 44(8): 719-726.
- [10] 郭晓云, 薄景山, 张宇东, 等. 抗震设计反应谱的标定方法[J]. 世界地震工程, 2011, 27(1): 66-71.
- [11] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- [12] GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [13] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2004.
- [14] The Pacific Earthquake Engineering Center. PEER Strong Motion Database [EB/OL]. (2011-11-08) [2012-04-30] <http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html>.
- [15] USGS. CESMD 2012 [EB/OL]. (2012-03-01) [2012-04-30] <http://www.strongmotioncenter.org/>.
- [16] NIED of Japan. K-NET 2012 [EB/OL]. (2012-04-06) [2012-04-30] <http://www.k-net.bosai.go.jp/>.
- [17] European Commission Research Directorate General-Environment and Climate Programme. European Strong-Motion Database [EB/OL]. (2003-01-01) [2012-04-30] <http://smbase.itsak.gr/>.

(编辑 赵丽莹)