

# 山东地区地震加速度反应谱特征 周期的统计研究<sup>1</sup>

王红卫 葛孚刚 王冬雷 冯志军 李 红

(山东省地震局, 济南, 250014)

**摘要** 本文收集整理了 2010 年至 2013 年期间山东地区 830 个地震安全性评价工程的场地类型、覆盖层厚度、钻孔剪切波速、自由基岩地震动峰值加速度和地震加速度反应谱特征周期等资料, 在计算出场地指数的基础上, 采用回归分析方法, 对特征周期与基岩峰值加速度、场地指数之间的关系进行了统计研究, 并得出了三者之间的定量表达式。结果表明, 特征周期与基岩峰值加速度的自然对数呈线性相关, 与场地指数呈非线性相关。

**关键词:** 特征周期 场地指数 地震峰值加速度 定量关系 山东地区

## 引言

作为建筑工程抗震设计的重要参数, 地震加速度反应谱特征周期的取值在现行的《中国地震动参数区划图》(中国地震的参数区划图编图组, 2001)、《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010)中均有明确规定。但基于强震记录和土层地震反应的分析结果表明, 其取值往往偏低(夏蕊芳等, 2012; 尤红兵等, 2014), 从而低估了地震危险性, 这种情况在土层覆盖较厚时尤其明显。地震安全性评价工程中, 采用土层等效线性化模型分析得到的特征周期值也往往高于规范结果。本文采用山东地区地震安全性评价的资料数据和结果, 在计算出场地指数的基础上, 综合考虑了加速度峰值和场地条件因素, 采用回归分析方法, 给出了特征周期的统计关系表达式。

针对地震动场地效应, 很多学者采用等效线性化模型结果进行统计研究(高孟潭等, 2009; 李小军等, 2001; 吕悦军等, 2011)。为了细化地震动场地效应与场地条件的对应关系, 国内有些学者使用场地指数来表征场地条件, 探讨了其与地震动参数、地震灾害的关系(刘曾武等, 1993; 杨光等, 1994)。

目前国内通用的场地类型分 4 类, 各种场地类型(特别是 II、III 类场地)对应着较宽泛的场地条件, 因此基于场地类型得到的地震动参数统计规律往往是分段的和较为粗略的, 且

**1 基金项目** 地震科技星火计划项目(编号: XH14031)资助

[收稿日期] 2015-10-19

[作者简介] 王红卫, 男, 生于 1966 年。副研究员。主要研究领域: 地震工程、地震预测。E-mail: w\_h\_w8407@163.com

无法形成统一表达式。场地指数作为描述场地条件的一种指标, 具有在 0—1 之间连续取值的优势。为了减小统计数据的离散性, 本文使用场地指数对场地进行细致分类, 并结合场地指数给出了特征周期与基岩峰值加速度的定量统计关系, 在等效剪切波速和覆盖层厚度已知的情况下, 可估算出场地在不同基岩峰值加速度下的特征周期值。这使得在一个较大范围内, 通过非地质钻探手段获得相关数据的前提下, 进行场地条件相关的区域性特征周期区划成为可能, 在地震区划研究、震害预测、地震应急等领域具有一定实用意义。

## 1 场地指数的定义与计算方法

场地指数由《构筑物抗震设计规范》(国家技术监督局、中华人民共和国建设部, 1993) 首先采用, 主要由土层刚度和覆盖层厚度两个因素综合确定。表征土层刚度的平均剪切模量  $G(\text{MPa})$  可由下式得到:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \rho_i V_{si}^2}{g \sum_{i=1}^n d_i} \times 10^{-3} \quad (1)$$

其中,  $d_i$  为第  $i$  层土的厚度 (m),  $\rho_i$  为第  $i$  层土的密度 ( $\text{kN/m}^3$ ),  $V_{si}$  为第  $i$  层土的剪切波速 (m/s),  $n$  为覆盖层的分层数,  $g$  为重力加速度 ( $9.81\text{m/s}^2$ )。

场地指数  $\mu$  按照下式计算:

$$\mu = \gamma_G \mu_G + \gamma_d \mu_d \quad (2)$$

$$\mu_G = \begin{cases} 1 - e^{-6.6(G-30)10^{-3}} \dots (G > 30\text{MPa}) \\ 0 \dots \dots \dots (G \leq 30\text{MPa}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_d = \begin{cases} e^{-0.5(d-5)^2 10^{-3}} \dots \dots (d \leq 80\text{m}) \\ 0 \dots \dots \dots (d > 80\text{m}) \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\gamma_G$  和  $\gamma_d$  为权系数, 一般  $\gamma_G=0.7$ ;  $\gamma_d=0.3$ 。

$d$  为场地覆盖层厚度 (m), 可取为地表至剪切波速大于 500m/s 层面的距离。场地土层的平均剪切模量一般采用地面以下 20m 深度范围内土层的计算值, 当覆盖层厚度小于 20m 时, 应按实际覆盖层厚度确定。

## 2 基础资料

本文基础资料来源于 830 个已通过评审的山东地区重大工程场地地震安全性评价项目, 所收集数据包括场地类型、覆盖层厚度、钻孔剪切波速、自由基岩地震动峰值加速度结果和地震加速度反应谱特征周期结果, 其中后两项使用了多遇地震、设防地震 (一般情况下取 50 年超越概率等于 10%)、罕遇地震的数据, 资料产出时间范围为 2004 年至 2012 年, 空间上涵盖整个山东内陆, 涉及多种工程地质条件。其中 II 类场地资料点 634 个, 占比 76%; III 类场地资料点 189 个, 占比 22%。山东地区空间分布上以 II、III 类为主, IV 类场地稀少, I 类场地工程的特征周期往往由基岩分析结果直接标定, 统计价值不大, 且本文的统计区间并非按场地类型来进行, 资料基本可满足本文需求。资料点的空间分布情况参见图 1。



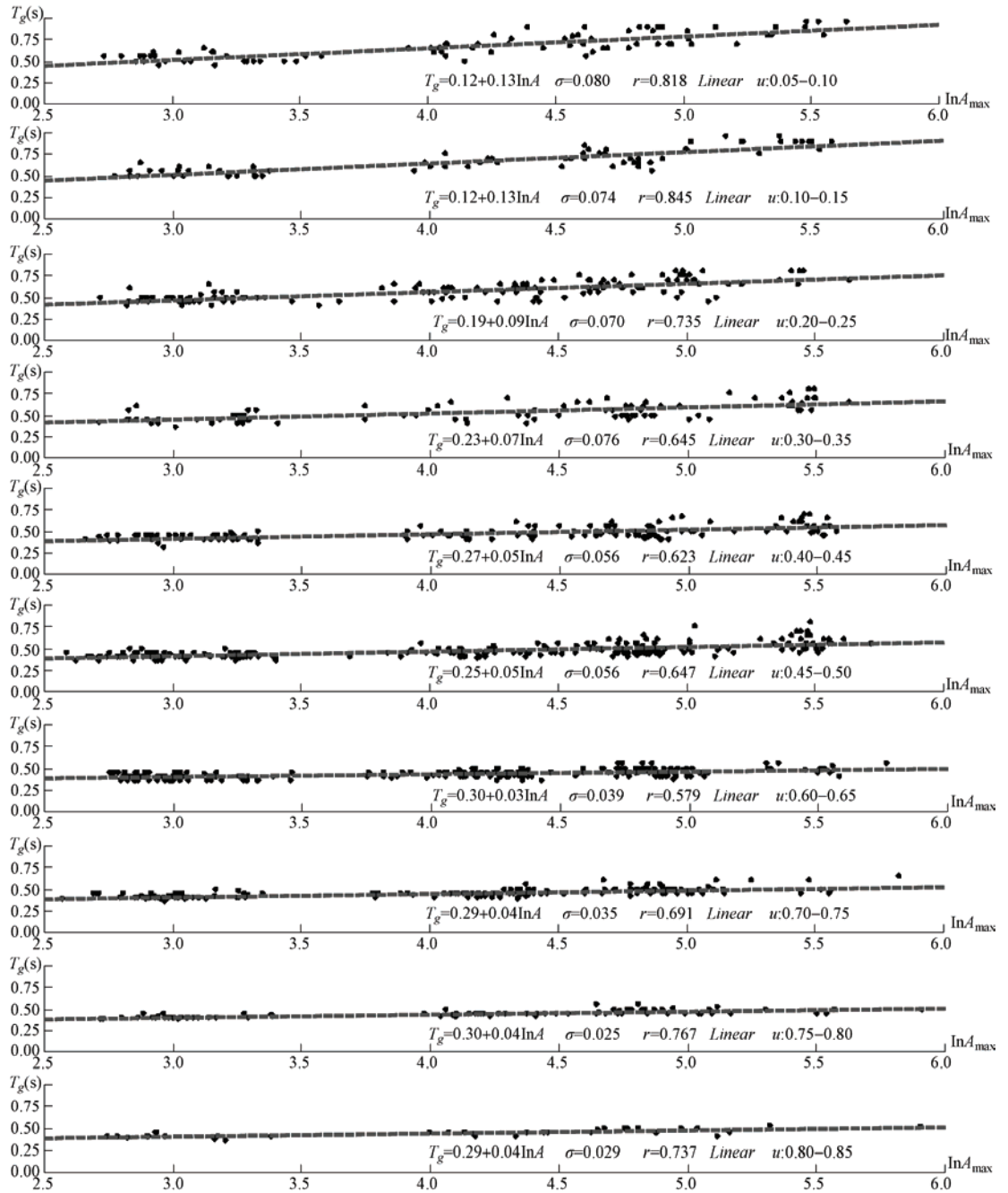


图 2 部分场地指数分类区间线性拟合曲线

Fig. 2 Some linear fitting curves of site index classification intervals

表 1  $T_g=C_0+C_1\ln A_{\max}$  线性关系拟合参数表

Table 1 List of parameter for  $T_g=C_0+C_1\ln A_{\max}$  linear fitting

场地指数分类区间	样本数目	$C_0$	$C_1$	标准差	相关系数	是否显著相关
0.00—0.05	6					否

续表

场地指数分类区间	样本数目	$C_0$	$C_1$	标准差	相关系数	是否显著相关
0.05—0.10	84	0.11533	0.13389	0.08	0.818	是
0.10—0.15	69	0.11695	0.13211	0.074	0.845	是
0.15—0.20	108	0.12728	0.11444	0.079	0.767	是
0.20—0.25	144	0.18565	0.09489	0.07	0.735	是
0.25—0.30	111	0.23466	0.08214	0.073	0.689	是
0.30—0.35	93	0.22699	0.07244	0.076	0.645	是
0.35—0.40	126	0.2544	0.06352	0.074	0.599	是
0.40—0.45	150	0.26588	0.0494	0.056	0.623	是
0.45—0.50	249	0.24779	0.05245	0.056	0.647	是
0.50—0.55	291	0.29074	0.03913	0.05	0.565	是
0.55—0.60	291	0.29186	0.03496	0.046	0.55	是
0.60—0.65	252	0.29622	0.03337	0.039	0.579	是
0.65—0.70	222	0.2845	0.03809	0.048	0.557	是
0.70—0.75	168	0.28898	0.04022	0.035	0.691	是
0.75—0.80	78	0.30121	0.03504	0.025	0.767	是
0.80—0.85	36	0.29106	0.0365	0.029	0.737	是
0.85—0.90	6					否
0.90—0.95	6					否
0.95—1.00	0					否

### 3.2 系数 $C_0$ 、 $C_1$ 与场地指数的关系

由图 2 和表 1 可知,随着场地指数的变化,(5)式中的  $C_0$ 、 $C_1$  本身也存在着规律性变化。剔除不具备显著相关性的 4 类分档数据,首先绘制散点图,进而对  $C_0-\mu$  关系和  $C_1-\mu$  关系分别进行指数函数、幂函数、多项式的拟合比较。以相关性最佳为原则,并考虑参数变化的物理意义与边界条件,最终确定  $C_0-\mu$  关系采用二阶多项式拟合(图 3), $C_1-\mu$  关系采用幂函数拟合(图 4)。

通过拟合得到如下关系式:

$$C_0 = 0.0479 + 0.7193\mu - 0.5199\mu^2 \quad \sigma = 0.0158 \quad (6)$$

$$C_1 = 0.0326(\mu + 0.225)^{-1.2603} \quad \sigma = 0.1173 \quad (7)$$

以上两式相关系数检验结果均为显著相关。另外,对关系式进行  $t$  检验表明,在显著性水平为 0.05 时,(6)式中  $\mu$  和  $\mu^2$  对  $C_0$  均具有显著影响;(7)式中  $\mu$  对  $C_1$  具有显著影响。

### 3.3 基于场地指数的总关系式

综合(5)、(6)和(7)式,即得到基于场地指数的地震动峰值加速度场地效应关系式:

$$T_g = 0.048 + 0.719\mu - 0.520\mu^2 + 0.033(\mu + 0.225)^{-1.26} \ln A_{\max} \quad (8)$$

在资料点场地指数 0.10—0.85 的范围内,上式标准差为 0.12。

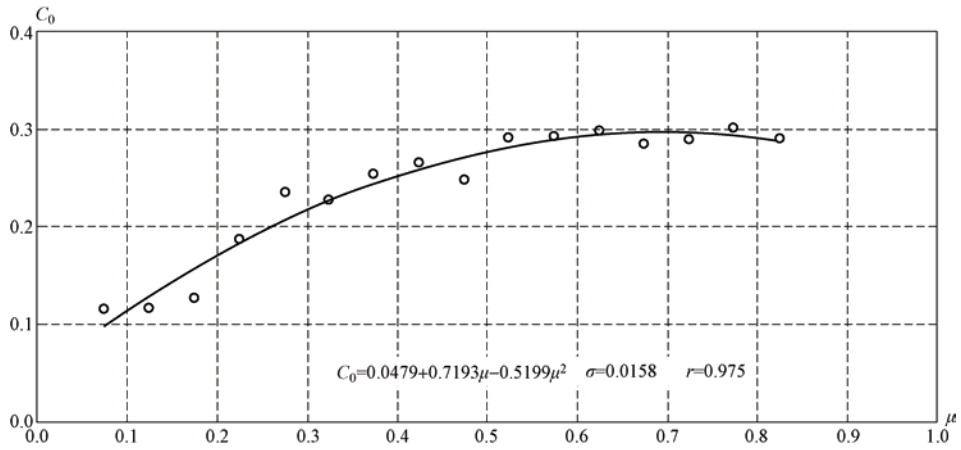


图 3  $C_0-\mu$  二次多项式拟合曲线

Fig. 3  $C_0-\mu$  quadratic polynomial fitting curve

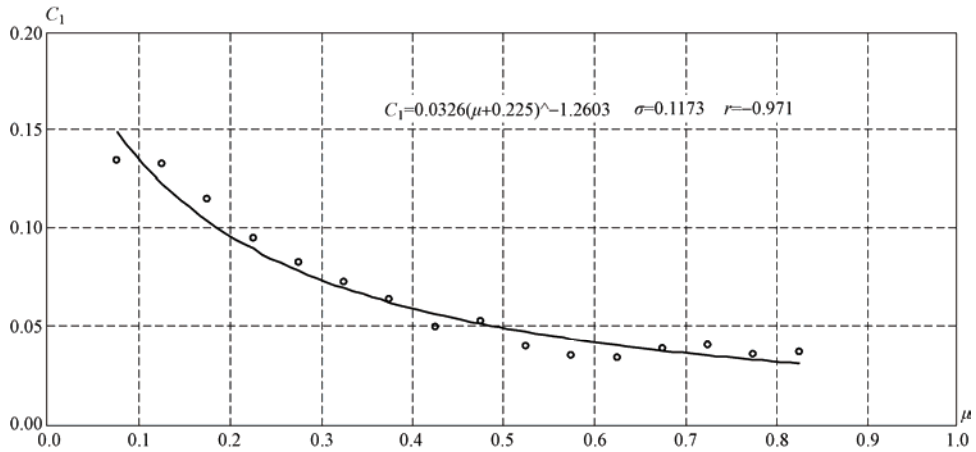


图 4  $C_1-\mu$  幂函数拟合曲线

Fig. 4  $C_1-\mu$  power function fitting curve

根据 5 个实际地震工程场地资料，按照关系式 (8) 计算了  $T_g$  值，结果见表 2。

表 2  $T_g$  算例参数表

Table 2 Parameter list of  $T_g$  instance

工程场地资料						本文计算结果		
场地描述	经度 (°E), 纬度 (°N)	覆盖层厚度 (m)	等效波速 (cm/s)	基岩峰值 (cm/s <sup>2</sup> )	实际确定 $T_g$ (s)	计算 $T_g$ (s)	场地 指数	$T_g$ 差 (s)
胶东某 I 类场地	120.38, 36.11	2.3	348	16.2	0.4	0.37	0.83	0.03
鲁中某 II 类场地	117.01, 36.53	7.8	285	51.9	0.45	0.44	0.7	0.01
鲁南某 II 类场地	118.38, 35.05	23	244	140	0.5	0.51	0.55	-0.01
鲁西某 III 类场地	115.55, 35.09	86	183	116.5	0.65	0.71	0.13	-0.06
鲁北某 III 类场地	118.67, 37.40	110	159	19.1	0.9	0.85	0.06	0.05

另外假定了两种较极端情况:

在  $\mu=0$ ,  $A_{\max}=200$  时, 计算得到  $T_g \approx 1.2\text{s}$ ;

在  $\mu=1$ ,  $A_{\max}=20$  时, 计算得到  $T_g \approx 0.3\text{s}$ 。

## 4 分析与讨论

对前述 5 个算例进行内符检验, 公式 (8) 计算出的  $T_g$  与工程场地实际确定得到的  $T_g$  的平均差值为  $0.032\text{s}$ , 总体看差别不大。根据算例的计算结果, 随着场地覆盖层变厚、变软和场地指数减小,  $T_g$  计算值逐渐增大, 与实际确定  $T_g$  具备明显的同步性。从假定情况的计算结果看,  $T_g$  计算值变化范围大致在  $0.3\text{s}$ — $1.2\text{s}$  之间, 也符合地震工程中的经验预期。但需要指出的是, 在场地指数取值趋于两端, 即接近于 1 和接近于 0 的情况下, 计算值与实际确定值存在一定幅度的背离, 而场地指数在中值附近时, 计算值与实际确定值符合程度较高。说明公式 (8) 在 II、III 类场地中适用性更好, 这应该与基础资料中 I、IV 类样本偏少不无关系。

根据定量关系式 (8), 在给定场地指数和基岩峰值加速度的情况下, 分别绘制了场地特征周期的变化曲线, 见图 5a 及 5b。由此可进一步归结出特征周期与峰值加速度、与场地条件的动态变化特点。

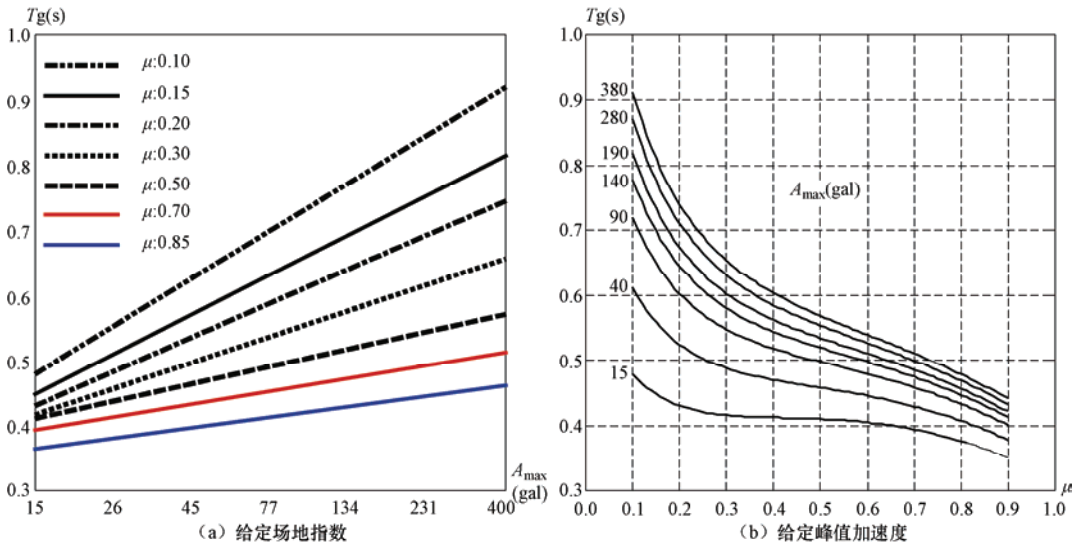


图 5 场地效应放大因子的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of site effect amplification factor

分析图 5a, 可得到:

(1) 随着  $\ln A$  增大,  $T_g$  呈线性递增。

(2) 地震烈度 V 度情况下, 随着场地条件的变化,  $T_g$  的大致变化范围为  $0.3$ — $0.5\text{s}$ ; 当地震烈度 VIII 度以上时, 由于场地条件的不同,  $T_g$  约在  $0.45$ — $0.9\text{s}$  间变动。据此推断, 在较极端情况下, 坚硬场地的  $T_g$  可低至  $0.3\text{s}$ , 软弱场地的  $T_g$  可超过  $1\text{s}$ 。

(3) 随着峰值加速度的提高, 土层非线性特征更为显著,  $T_g$ - $\mu$  曲线呈发散状态。

分析图 5b, 可得到:

(1) 随着场地指数增大,  $T_g$  呈非线性减小。

(2) 场地指数 0.35—0.60 的区段内  $T_g$  变化较平稳,  $T_g$  与场地指数大致呈线性负相关。对于软弱场地, 随着场地指数减小  $T_g$  呈明显增大趋势; 对于硬场地, 随着场地指数增大  $T_g$  则加速减小。

(3) 峰值加速度对  $T_g$  的影响程度, 软场地比硬场地更为显著。

上述特点, 与当前对场地特征周期变化规律的认知基本一致。具有实用意义的是, 本文给出的关系式能够得到体现场地特性细节的定量描述, 即在等效剪切波速和覆盖层厚度已知的情况下, 根据该公式估算出场地在不同基岩峰值加速度下的特征周期值。本文的结果与第五代《中国地震动参数区划图宣贯教材》(高孟潭主编, 2015) 所提供的特征周期调整表(表 3) 在变化范围和变化规律方面总体上是较为一致的。综上所述, 本文给出的关系式(8) 基本反映了场地特征周期变化的普遍情况。

另外, 为了研究远近震对特征周期的影响, 本文曾尝试抽取出基岩的特征周期值, 用以剔除原始数据中的远近震成分, 但资料的离散程度反而加大, 得不出规律性结论。推测可能是因为远近震的影响幅度较小, 受到了峰值加速度和场地条件对  $T_g$  显著影响的压制。因此关系式(8) 只考虑了地震大小的影响, 未涉及远近震问题。

表 3 场地基本地震动加速度反应谱特征周期调整表

Table 3 Adjustment for site characteristic period of the basis ground motion acceleration response spectrum

II 类场地基本地震动加速度反应谱特征周期分区值 (s)	场地类别				
	I <sub>0</sub>	I <sub>1</sub>	II	III	IV
0.35	0.20	0.25	0.35	0.45	0.65
0.40	0.25	0.30	0.40	0.55	0.75
0.45	0.30	0.35	0.45	0.65	0.90

本文结果在场地条件、峰值加速度范围以及适用地域上存在局限性, 有待进一步的资料积累和深入研究。另外, 当前使用的一维土层等效线性化分析计算方法也可能存在缺陷, 随着实际强震记录的日渐丰富, 有望对关系式(8) 进行检验和修正。

## 参考文献

- 高孟潭等, 2015. 中国地震动参数区划图宣贯教材 (GB 18306—2015). 北京: 中国质检出版社, 中国标准出版社.
- 高孟潭, 陈学良, 肖和平等, 2009. 湖南中强地震活动地区 II 类场地放大效应研究. 中国地震, **25** (2): 140—150.
- 国家技术监督局, 中华人民共和国建设部, 1993, 构筑物抗震设计规范 (GB 50191—93). 北京: 中国计划出版社.
- 李小军, 彭青, 2001. 不同类别场地地震动参数的计算分析. 地震工程与工程振动, **21** (1): 29—36.
- 吕悦军, 彭艳菊, 施春花等, 2011. 北京地区中硬场地地震动效应研究. 防震减灾工程学报, **31** (5): 523—528.
- 刘曾武, 1993. 一种简易的城市地震小区划方法——场地指数法. 自然灾害学报, **2** (1): 92—100.
- 夏蕊芳, 闫帅平, 冯程程, 2012. 设计特征周期的影响因素. 土木工程与管理学报, **29** (2): 99—102.
- 杨光, 刘曾武, 1994. 场地指数与地震动参数的关系. 华北地震科学, **12** (3): 43—52.



- 尤红兵, 赵凤新, 2014. 特高压电气设备抗震设计反应谱特征周期取值研究. 震灾防御技术, 9 (2): 171—181.
- 中国地震动参数区划图编图组, 2001. 中国地震动参数区划图 (GB 18306—2001). 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010. 建筑抗震设计规范 (GB 50011—2010). 北京: 中国建筑工业出版社.

## Statistical Research on the Characteristic Period of the Acceleration Response Spectrum in the Shandong Area

Wang Hongwei, Ge Fugang, Wang Donglei, Feng Zhijun and Li Hong

(Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China)

**Abstract** In this paper, we have been collected data of site type, cover thickness, shear wave velocity, seismic peak ground motion acceleration and characteristic period of the acceleration response spectrum calculated for the rock surface for 830 engineering sites in Shandong Province. On the basis of these data, site index for each site has been calculated, and with the method of regression analysis, the relations among the characteristic period, peak acceleration of bedrock and the site index are studied. A quantitative statistical relation between the characteristic period, and other parameters are achieved. The results show that the characteristic period is linearly related with the rock surface seismic peak ground acceleration, and is nonlinearly related with the site index.

**Key words:** Characteristic period; Site index; Seismic peak ground acceleration; Quantitative relation; Shandong area