

刁颀, 2011, 山东 II、III 类场地地震动峰值加速度放大效应分析, 中国地震, 27(1), 92~98。

# 山东 II、III 类场地地震动峰值 加速度放大效应分析

刁颀<sup>1, 2)</sup>

1) 山东省地震工程研究院, 济南市纬七路 5 号 250021

2) 桂林理工大学地球科学学院, 桂林建干路 12 号 541004

**摘要** 利用山东地区实测的 II 类场地 358 个钻孔和 III 类场地 140 个钻孔的地震动峰值加速度, 计算了各个钻孔不同超越概率的土层地震动峰值加速度的放大系数  $k_s$ , 结果表明: (1) 同类场地土层放大系数  $k_s$  值总体符合正态分布, 既有相对集中性, 也有离散性; (2) 随着基岩面输入地震动强度的增大  $k_s$  值降低, 且 III 类场地  $k_s$  值降低较 II 类的更为明显; (3) II 类场地随着基岩输入面埋深的增加  $k_s$  值呈增加趋势, 约达 20m 深后基本趋于稳定, 而 III 类场地基岩输入面埋深的增加对  $k_s$  值的影响不甚显著; (4) II 类场地 50 年超越概率 10% 的平均  $k_s$  值 (1.47) 略高于《中国地震动参数区划图》使用的全国平均  $k_s$  值。本文尝试讨论了山东地区 II、III 类场地不同强度基岩峰值加速度输入的  $k_s$  调整值。

**关键词:** 场地 土层 地震动 峰值加速度 放大系数

[文章编号] 1001-4683(2011)01-092-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

大量强震记录 and 实际震害资料表明, 场地条件对地震动幅值频谱特性和持续时间等都有不同程度的影响。国内外场地条件对地震动影响的诸多研究成果, 已用于地震区划和重大场地的地震安全性评价。1977、1990、2001 年相继编制的全国地震区划图, 给出中硬场地 (或称一般场地或平均土地地, 即 II 类场地) 条件下的区划结果 (国家地震局, 1981, 1996; 国家质量技术监督局, 2001; 胡聿贤等, 2001)。现在实施的《中国地震动参数区划图》(国家质量技术监督局, 2001), 其地表场地地震动峰值加速度 ( $a_{hs}$ ) 的计算, 是据地震危险性分析确定的基岩场地 (I 类场地) 条件下 50 年超越概率 10% 峰值加速度  $a_r$  (即基岩输入峰值加速度) 通过  $a_{hs} = k_s a_r$  计算为 II 类场地条件下的地表地震动峰值加速度  $a_{hs}$ ,  $k_s$  为土层放大系数,  $k_s$  取值 1.00~1.25 (胡聿贤等, 2001; 卢寿德, 2006)。

近年许多学者对不同类型的土层场地条件对地震动峰值加速度的影响及  $k_s$  的合理取值等方面的研究取得了新的进展。吕悦军等 (2004、2008) 探索了场地条件对地震动参数的

[收稿日期] 2010-12-23; [修定日期] 2011-02-05

[项目类别] 山东省地震工程研究院支持的课题

[作者简介] 刁颀, 男, 生于 1977 年, 助工, 现主要从事地震安全性评价工作, 桂林理工大学地球科学学院在读工程硕士研究生。E-mail: diaoting321@163.com

影响;吕红山等(2007)通过对中美两国场地分类指标进行对比,结合土层波速资料,给出了基于中国场地分类的地震动放大系数;高孟潭等(2009)对湖南地区中强地震活动区实测的Ⅱ类场地的地震动放大作用的研究表明,湖南地区50年超越概率10%的Ⅱ类场地平均放大系数 $k_s$ 为1.30, $k_s$ 取1.25将会低估该区的地震危险性。山东地区位于华北地震区东南,郯庐地震带和华北平原地震带穿越山东及邻区,历史上发生过1668年山东郯城8½级地震,其震中烈度高达Ⅸ度。在全国地震动参数区划图上,山东某些区域的地震动峰值加速度达0.15g、0.20g(胡聿贤等2001;卢寿德2006)。区内工程地质条件复杂,既有基岩出露的山地和丘陵,也有第四系沉积厚度达300m以上的平原地区,Ⅱ、Ⅲ类场地广泛分布。本文拟利用山东地区近年实测的场地地震安全性评价资料,探索处于强震活动条件下的山东地区Ⅱ、Ⅲ类场地的地震动峰值加速度放大系数 $k_s$ 的特征。

## 1 基本资料

本文收集了近年来山东地区重大工程场地或小区划场地的498个钻孔资料,以及由地震危险性分析获得的地表基岩水平向地震动峰值加速度和经场地土层反应分析计算的场地地表水平向地震动峰值加速度。资料基本满足如下两点:

(1)可靠性。通过现场地震工程地质勘察、土层剪切波速测试等,确定场地土类型及场地类别,并选取有代表性的原状土样进行动三轴(或共振柱)测试,确定场地土动力特性。在此基础上建立场地土层地震反应分析模型,进行土层非线性地震反应计算,给出场地地面地震动参数。场地类别以《建筑抗震设计规范》规定的标准划分(中华人民共和国建设部等2001),场地地震动参数计算按《场地地震安全性评价》技术要求完成(卢寿德,2006;中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等2005)。

(2)区域代表性。498个钻孔中,Ⅱ类场地358个,Ⅲ类场地140个。Ⅱ类场地分布于鲁中、鲁东隆起区,以及向拗陷区过度的地区,剪切波速达 $500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的“基岩”面上覆土层厚度一般数米至30m,个别深者达40m;Ⅲ类场地分布于鲁西、鲁北拗陷区,剪切波速达 $500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的“基岩”面上覆土层厚度一般在50~100m左右,少数钻孔达130m。因此,这些资料基本可以反映山东地区场地的实际情况。

## 2 计算结果及分析

### 2.1 计算结果

#### (1) $k_{sp}$ 计算方法

据前述 $k_s$ 的含义,在此引入50年不同超越概率条件下的场地土层放大系数 $k_{sp}$

$$k_{sp} = a_{hsp}/a_{rp}$$

式中,下标增加的字母p表示不同超越概率水平, $a_{rp}$ 为由地震危险性概率分析方法求得的不同超越概率(63%、10%、2%)时基岩输入面的峰值加速度, $a_{hsp}$ 为按一维等效线性化模型分析方法、以相应计算程序计算得到不同超越概率(63%、10%、2%)时的土层场地地表峰值加速度(卢寿德2006;胡聿贤等1999;李小军等2001)。具体方法本文不再赘述。

#### (2)计算结果

分Ⅱ、Ⅲ类场地对各个钻孔50年超越概率63%、10%、2%的土层地震动峰值加速度放

大系数  $k_{sp}$  逐一进行了计算,分 II、III 类场地分别给出各钻孔  $k_{sp}$  计算结果(表 1、表 2)。

表 1 II 类场地的  $k_{sp}$  计算结果

	$k_{s63\%}$	$k_{s10\%}$	$k_{s2\%}$
最大值	2.08	1.95	1.99
最小值	1.04	1.00	1.00
平均值	1.59	1.47	1.44

表 2 III 类场地的  $k_{sp}$  计算结果

	$k_{s63\%}$	$k_{s10\%}$	$k_{s2\%}$
最大值	2.11	1.83	1.88
最小值	1.25	1.15	0.97
平均值	1.62	1.44	1.28

## 2.2 放大系数 $k_{sp}$ 特征分析

### 2.2.1 II、III 类场地 $k_{sp}$ 值的同异

#### (1) II、III 类场地 $k_{sp}$ 值的相对集中性

图 1 和图 2 分别是 II、III 类场地 50 年超越概率 63%、10%、2% 的同一个  $k_{sp}$  数值的累计次数曲线,其纵坐标是同一超越概率条件下相同  $k_{sp}$  值的累计次数。

图 1 表明,II 类场地的土层放大系数  $k_{sp}$  值的变化范围较大,最大相差约达 1 倍。其中,50 年超越概率 63% 的  $k_{s63\%}$  值多数为 1.35 ~ 1.75,超越概率 10% 的  $k_{s10\%}$  值多数为 1.25 ~ 1.60;50 年超越概率 2% 的  $k_{s2\%}$  值多数为 1.20 ~ 1.55。

由图 2 可见,III 类场地  $k_{sp}$  值变化范围也较大,50 年超越概率 63% 的  $k_{s63\%}$  值多数为 1.40 ~ 1.85,超越概率 10% 的  $k_{s10\%}$  值多数为 1.25 ~ 1.55,超越概率 2% 的  $k_{s2\%}$  值多数为 1.10 ~ 1.35。

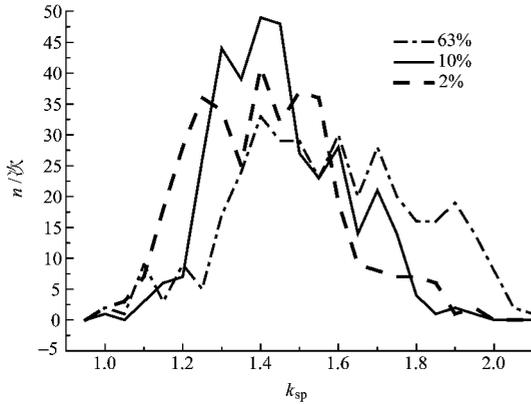


图 1 II 类场地不同超越概率的  $k_{sp}$  次数分布图

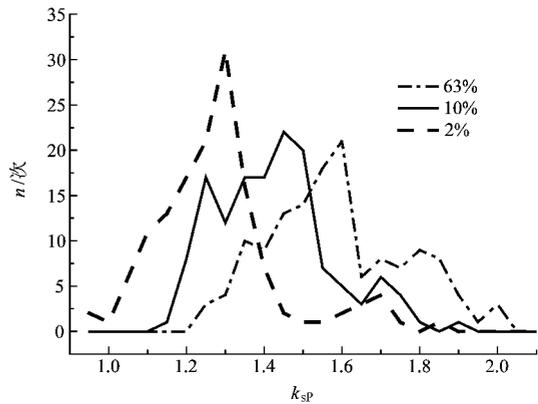


图 2 III 类场地不同超越概率的  $k_{sp}$  次数分布图

由此可以认为,无论 II 类场地,还是 III 类场地,不同超越概率的  $k_{sp}$  次数分布图总体符合正态分布,同类场地的  $k_{sp}$  值既有离散性,也有相对集中性,而随着超越概率水平的提高, $k_{sp}$  值的相对集中区域“左移”,其数值相对降低。这表明,即使是同一类场地,由于具体钻孔所代表的场地土层的地震动剪切波速、介质密度及剪应变模量等物理参数的差异,在建立具体的场地土层地震动反应模型进行计算后,其土层放大效应差别是明显的。因此,对具体场地进行相应的地震动参数的计算进行评价,是有针对性地进行工程抗震设计所必需的。

#### (2) III 类场地 $k_{sp}$ 值的变化范围较 II 类场地略大

由图 1、图 2 中 II、III 类场地 63%、10%、2% 不同超越概率水平的土层放大系数  $k_{sp}$  值的集中范围看,III 类场地集中区范围 ( $k_{sp} = 1.10 \sim 1.85$ ) 较 II 类场地 ( $k_{sp} = 1.20 \sim 1.75$ ) 略大,

反映了Ⅲ类场地土层放大效应的复杂性。

### (3) $k_{sp}$ 随着输入地震动强度的增大而减小

地震危险性分析计算求得的 50 年超越概率 63%、10%、2% 的地表基岩地震动峰值加速度, 实际代表了基岩面输入地震动强度的变化。一般说来, 同一场地阻尼比为 0.05 时, 50 年超越概率 63% 的地震动峰值加速度是超越概率 10% 的 1/3, 而超越概率 2% 的地震动峰值加速度又是超越概率 10% 的 2 倍。

图 1 和图 2 表明, 无论是Ⅱ类场地还是Ⅲ类场地, 随着超越概率水平由 63% 到 10% 再到 2%, 也即随着输入地震动峰值加速度的增大, 土层放大系数  $k_{sp}$  值在逐渐降低, 而Ⅲ类场地的  $k_{sp}$  值降低更明显些。这可能说明, 输入地震动强度较低时, 土层物理参数的反应更敏感, 因而放大效应更大。

## 2.2.2 基岩输入面埋深对 $k_{sp}$ 的影响

### (1) Ⅱ类场地基岩输入面埋深对 $k_{sp}$ 的影响较大

图 3 给出了山东Ⅱ类场地不同超越概率水平、不同深度的三点滑动平均  $k_{sp}$  值曲线图。由图可见, 随着基岩输入面埋深的增加, 各种概率水平的平均  $k_{sp}$  值逐步增加, 在基岩输入面达 20m 深后基本趋于稳定, 不再随基岩输入面的加深而显著增加。

山东Ⅱ类场地的各种超越概率的最小值所对应的基岩输入面深度都较浅, 其中与超越概率 63% 的最小  $k_{s63\%}$  值 (1.04) 相对应的基岩输入面埋深是 8m, 与超越概率 10% 的最小  $k_{s10\%}$  值 (1.11) 相对应的基岩输入面埋深是 4m, 与超越概率 2% 的最小  $k_{s2\%}$  值 (1.00) 相对应的基岩输入面埋深是 6m。这些场地的共同特点是, 实际位于出露的风化基岩上或基岩埋深很浅的场地上, 其地震动土层反应与基岩场地基本差别不大。看来, 在一定深度内, 基岩输入面的埋深对  $k_{sp}$  值的影响还是较大的, 即随基岩输入面的深度增加  $k_{sp}$  值总体呈增大趋势; 但到达一定深度后 (本文统计的山东地区结果是 20m), 基岩输入面的埋深对  $k_{sp}$  值的影响已经不敏感,  $k_{sp}$  值总体趋于稳定。

### (2) Ⅲ类场地基岩输入面埋深对 $k_{sp}$ 影响较小

图 4 是山东Ⅲ类场地不同超越概率水平、不同深度的三点滑动平均  $k_{sp}$  值曲线图。由图可见, Ⅲ类场地的基岩输入面大都在 50m 以上, 至 90m 前, 随着深度的增加其  $k_{sp}$  值也增大, 但增大的幅度很小 (仅约 0.1 ~ 0.2)。总体看来, Ⅲ类场地随基岩输入面埋深对  $k_{sp}$  值的影响已不显著。

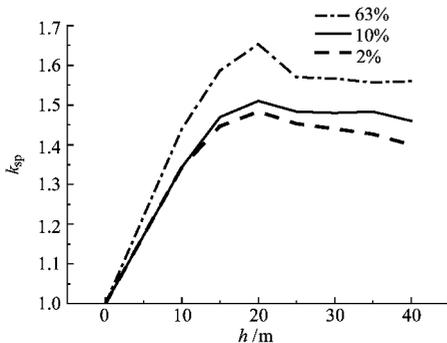


图 3 Ⅱ类场地不同深度平均  $k_{sp}$  值曲线

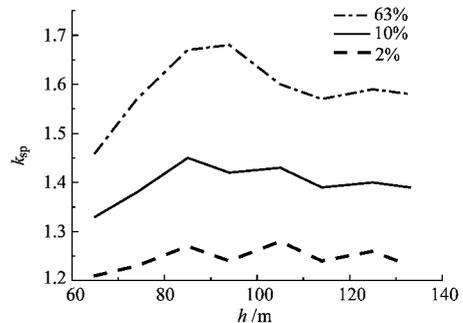


图 4 Ⅲ类场地不同深度平均  $k_{sp}$  值曲线

### 2.2.3 对山东 II、III 类场地分档基岩输入峰值加速度的 $k_s$ 调整值的讨论

图 5 是基岩输入峰值加速度 ( $a_{rp}$ ) 与 II、III 类场地放大系数  $k_s$  的关系图,按  $a_{rp}$  每  $20\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$  分档计算值做了 3 点滑动平均而求得。由图可见,随  $a_{rp}$  增大  $k_s$  呈明显下降趋势。

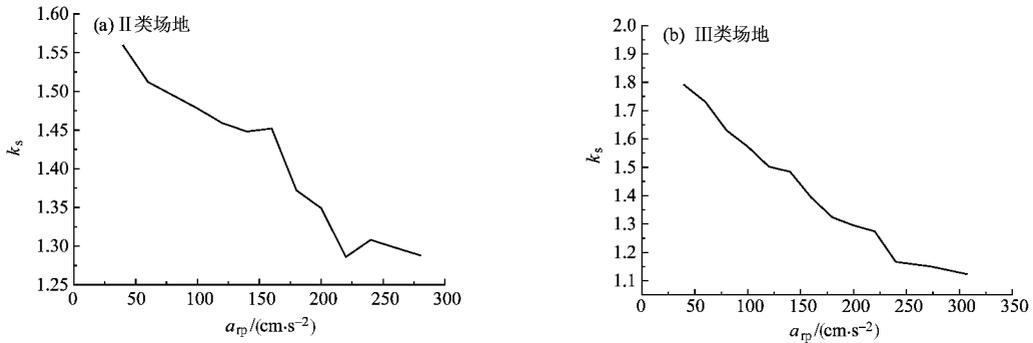


图 5 山东不同场地  $k_s$  与基岩输入峰值加速度  $a_{rp}$  曲线

经对图 5(a)、(b) 曲线进行最小二乘法拟合,由表 3 给出山东地区 II、III 类场地地震动峰值加速度放大系数的调整值。由图 5 和表 3 可见:

(1) 在  $a_{rp}$  较低的情况下,II 类场地的  $k_s$  略低于 III 类场地;而在  $a_{rp}$  较高的情况下则相反,II 类场地的  $k_s$  略高于 III 类场地。这可能反映了 III 类场地土层的非线性放大效应较 II 类场地复杂。

(2) 山东 II 类场地的  $k_s$  值要高于全国地震动区划图给出的  $k_s$  值(最高 1.25),比高孟潭等(2009)给出的湖南地区的  $k_s$  值平均结果(1.30)稍偏高,这可能反映了山东强震环境与全国平均环境以及湖南中强震环境下的土层对  $k_s$  影响的差异。

表 3 山东分类场地的放大系数  $k_s$  调整值(括号中的数值为中间值)

场地类型	$a_{rp}(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})$							
	50	100	150	200	250	300	350	400
I	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
II	1.55 (1.59)	1.45 (1.47)	1.35 (1.44)	1.30 (1.38)	1.25 (1.31)	1.20 (1.25)	1.15 (1.18)	1.00 (1.1)
III	1.79 (1.68)	1.58 (1.54)	1.45 (1.42)	1.30 (1.36)	1.15 (1.27)	1.05 (1.12)	1.00 (1.09)	1.00 (1.07)

(3) 在  $a_{rp} \leq 100\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$  时,山东 II 类场地的  $k_s$  值较吕红山等(2007)给出的中国 II 类场地的  $k_s$  值稍高,在  $a_{rp} > 100\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$  时  $k_s$  值则大体一致;山东 III 类场地的  $k_s$  值,总体低于吕红山等(2007)给出的  $k_s$  值。造成这种差异的原因可能是方法的不同和地震环境的差异,吕红山等(2007)的结果是由中美两国土层类比推导求得。本文是根据实测场地土层情况,按一维等效线性化模型分析方法计算求得。山东地区是局部强震环境,全国则是大区域的平均情况。

(4)  $k_s$  中位值的变化趋势与平均值一致,说明这种变化趋势是客观的。

### 3 结论

对山东地区实测的 458 个钻孔资料的场地土层地震动峰值加速度放大系数  $k_s$  的分析表明:

(1) 同类场地土层放大系数  $k_s$  值总体呈正态分布, 既表现出相对集中性, 也显示一定的离散性, 随着基岩输入地震动峰值加速度的增大  $k_s$  相对降低。这种变化趋势与相关研究结果一致, 也与全国平均情况相符。

(2) Ⅲ类场地随着基岩面输入地震动强度的增大  $k_s$  值的降低较Ⅱ类更为明显。

(3) Ⅱ类场地随着基岩输入面埋深的增加  $k_s$  值呈增加趋势, 在基岩输入面约达 20m 深度后基本趋于稳定, 不再随基岩输入面的加深而显著增加; Ⅲ类场地随基岩输入面埋深对  $k_s$  值的影响不甚显著。

(4) 山东地区Ⅱ类场地 50 年超越概率 10% 的平均  $k_{s10\%}$  值相对于《中国地震动参数区划图》使用的全国平均  $k_s$  值略高。依据实测资料, 讨论了山东地区Ⅱ、Ⅲ类场地不同基岩峰值加速度输入的  $k_s$  调整值。

对于土层场地(特别是Ⅲ类场地)  $k_s$  值的研究, 需要国内大范围大量实测的强震记录、场地地震工程地质勘察和土层物理参数实验等资料, 以及场地土层地震动反应模型的优化等, 才能深入推进。

致谢: 本文得到山东省地震工程研究院的支持, 欧东新教授、陈时军研究员给予悉心指导, 崔昭文高级工程师、孙昭民研究员、姜早峰高级工程师和王红卫副研究员等提出宝贵意见, 笔者在此一并致以衷心的感谢!

### 参考文献

- 国家地震局, 1981, 中国地震烈度区划工作报告, 北京: 地震出版社。
- 国家地震局, 1996, 中国地震烈度区划图(1990) 概论, 北京: 地震出版社。
- 国家质量技术监督局, 2001, GB18306—2001 中国地震动参数区划图, 北京: 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。
- 胡聿贤、高孟潭, 2001, GB18306—2001 中国地震动区划图, 宣贯教材, 北京: 中国标准出版社。
- 胡聿贤主编, 1999, 地震安全性评价技术教程, 北京: 地震出版社, 257~379。
- 李小军、彭青, 2001, 不同类别场地地震动参数的计算分析, 地震工程与工程震动, 21(1), 29~36。
- 卢寿德主编, 2006, GB1774—2005 场地地震安全性评价, 宣贯教材, 北京: 中国标准出版社。
- 吕红山、赵凤新, 2007, 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数, 地震学报, 29(1), 67~76。
- 吕悦军、唐荣余、彭艳菊, 2004, 烟台海岸软土地特征及其对地震动的影响, 中国地震, 20(4), 323~329。
- 吕悦军、彭艳菊、兰景若等, 2008, 场地条件对地震动参数影响的关键问题, 震灾防御技术, 3(2), 126~135。
- 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, 2001, GB50011—2001 建筑抗震设计规范, 15~19, 北京: 中国建筑工业出版社。
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准委员会, 2005, GB17741—2005 场地地震安全性评价, 北京: 中国标准出版社。

## Exploration for amplification effects of peak ground motion in the sites of types II & III in Shandong Province

*Diao Ting*<sup>1,2)</sup>

1) Shandong Institute of Earthquake Engineering , Jinan 250021 , China

2) Guilin University of Technology , Guilin 541004 , China

**Abstract** In this paper , amplification coefficient ( $k_s$ ) of peak ground motion with different exceedance probability in types II and III sites , Shandong Province was estimated by analyzing the data of seismic response of soil layer from 358 and 140 drills from types II and III sites separately. From the results , one can conclude that: (1) the scatter plot of  $k_s$  data shows that it generally obeys normal distribution; (2)  $k_s$  decreases with the increase of the strength of incident ground motion , a phenomenon more apparent in type III sites than in type II sites; (3) for type II site , with the increase of depth of the top surface of bedrock where ground motion incident ,  $k_s$  would increase gradually to a stable value until it reaches a depth up to approximately 20 meters or larger , while type III site  $k_s$  is normally insensitive to the depth; (4) the average of  $k_s$  for type II site is 1.47 , slightly larger than that used in the Seismic Ground Motion Parameter Zonation Map of China (GB18306 – 2001). The paper also discusses the rectified value of  $k_s$  for different strength of incident ground motion in type II and III sites in Shandong Province.

**Key words:** Seismic ground motion    Peak ground acceleration    Site condition  
Exceedance probability