

山东省不同场地 PGA 放大影响研究^{*}

闫静茹, 张郁山, 郝明辉

(中国地震灾害防御中心, 北京 100029)

摘要: 搜集整理“场地勘察钻孔数据库及分析平台系统”中山东省 278 个土层结构数据相对完整的钻孔剖面, 采用一维等效线性化地震反应分析方法, 计算 II 类和 III 类场地在 5 种实际基岩地震动作用下的场地反应, 分析场地地震动峰值放大系数随场地类别、等效剪切波速、输入地震动强度的变化特征。结果表明: ①场地土对输入地震动具有放大作用, 这种放大作用随着地震动输入强度的增大在 II, III 类场地呈现不同的趋势; ②对比所有场地不同地震强度的 PGA 平均值及拟合曲线发现, II 类场地 PGA 多数情况高于 III 类场地; ③分析所有场地土层 PGA 随 v_{sc} 变化情况, 发现在 D, E 强震作用下, PGA 在 $v_{sc} > 350$ m/s 变化趋势平缓, 因此提出 II 类场地更为细致的划分方法, 并给出各类场地地震动参数变化的经验关系式及其系数值。

关键词: 场地效应; 场地分类; PGA ; 放大系数

中图分类号: P315.91

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)03-0569-07

0 引言

场地土层条件对地震动的振幅特性(如峰值加速度、峰值速度、峰值位移等)及地震动的频谱特性(如反应谱、傅里叶谱等)的影响研究, 一直是地震工程领域的重要问题。目前, 针对场地土层条件影响特性的研究大多集中在不同土层结构及不同场地类别对峰值放大系数及反应谱特征周期的影响规律统计上(李平, 2010; 薄景山等, 2003; 刘红帅等, 2005; 李媛媛等, 2006; 杨伟林, 2004; 罗桂纯等, 2019), 还有一些学者基于统计结果给出场地的分类方法(周锡元等, 1984; 薄景山等, 2004a, b)。虽然相关的研究成果丰富繁多, 但是多数学者基于统计学原理得到的结论并没有建立在大量的实际钻孔模型基础上。

《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015)(以下简称“五代图”)的编制综合考虑了地震环境、建设工程场地条件及重要程度、允许的风险水平等因素, 而场地条件及地震环境的确定需要以场地实际工程地质及地震资料为前提。五代图是在开展相关场地地震动效应分析的基础上, 提出了考虑场地条件影响的地震动峰值加速度和加

速度反应谱特征周期双参数调整的原则, 这种调整原则以场地特性指标为控制量, 控制参数需要通过统计场地模型的数值计算结果和强震动记录资料得到(李小军, 彭青, 2001; 李小军, 2013)。并且五代图的以大量的实测工程场地资料为基础进行场地地震动效应的分析, 以便得到合适的地震动调整参数。因此中国地震灾害防御中心建立了“场地勘察钻孔数据库及分析平台系统”, 搜集自 2000 年以来全国范围内的安评报告, 并摘取其中涉及场地条件及地震环境部分的重要数据资料, 形成数据信息全面的电子库。为了检验电子库是否可全面便捷地用于场地效应研究, 本文选取平台现阶段录入的山东省范围内钻孔资料较为完整的场地数据, 以目前较为普遍的 II, III 类场地为研究对象, 深入进行各类场地的地震动峰值加速度放大效应研究, 以期为今后开展大量丰富的场地实际钻孔的场地效应研究做铺垫。

目前, 五代图的场地地震动参数是在 II 类场地基本地震动参数基础上调整确定的, 并依次给出了其它分类场地的相关调整系数(高孟潭, 2015)。而依据现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010), 场地类别根据场地的覆盖层厚度和等效剪切波速进行划分, II 类场地作为地震动参

^{*} 收稿日期: 2020-03-29.

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1504601)资助.

数区划图中的基本场地，划分范围相较其它类别场地较为粗略和广泛，尤其剪切波速的划分范围较大。为此本文提出 II 类场地新的划分方案，并对新旧场地类别下的地表地震反应结果进行统计分析，给出不同场地类别场地地震动峰值放大参数变化的经验关系。

1 场地的选取和计算参数的确定

1.1 场地条件

本文基础数据的获取依托于“场地勘察钻孔

数据库及分析平台系统”，通过整理山东省近 20 年的数据资料，对省内涵盖的 II，III 类场地钻孔的土层分布、土层剪切波速、覆盖层厚度、成孔位置等有效信息进行梳理，最终根据地域特征，选取 278 个土层结构数据相对完整的钻孔，并建立相对应的土层反应模型。根据《建筑抗震设计规范》（GB50011—2010）中场地类别划分标准，建立的 278 个模型中，202 个属 II 类场地，另外 76 个属 III 类场地，钻孔场地模型力学参数条件分布情况见表 1。

表 1 场地模型力学参数分布情况

Tab. 1 The distribution of mechanical parameters of the site models

单位：个

场地 类别	等效剪切波速值 $V_{se}/(m \cdot s^{-1})$						覆盖层厚度 d_{se}/m						
	0 ~ 200	200 ~ 250	250 ~ 300	350 ~ 450	> 450	总计	0 ~ 15	15 ~ 35	35 ~ 45	45 ~ 80	80 ~ 100	~ 100	总计
II 类	0	22	96	64	20	202	80	96	7	14	1	4	202
III 类	13	63	0	0	0	76	0	0	0	25	35	16	76

1.2 计算方法和参数的确定

目前，我国工程场地地震安全性评价工作推荐使用的土层分析方法是频域等效线性化波动方法（Idriss，Seed，1968；廖振鹏，李小军，1989）。这一方法不仅在实际工程场地抗震设计中发挥着重要的作用，也在岩土领域的各类研究中作为基础方法支撑了更深入、更多元的研究工作（刘海笑，王世水，2006；姜通，邢海灵，2007；魏勇等，2018；Assimaki，Kausel，2002）。中国地震灾害防御中心张郁山团队开发的工程场地地震安全性评价软件（SEC R2019）不仅对传统等效线性化波动法进行了完善和丰富，还增加了时域计算和多维场地计算模块，同时软件平台增加了场地计算模型的前处理环节，可快速提高建模效率。本文基于 SEC R2019 一维等效线性化场地地震反应计算模块，编制了相应的批处理程序，简化建模与计算流程，可以快速完成成百上千钻孔模型在大量工况下的计算工作。计算分析所采用的土层剪切波速、密度值以及土的动力非线性试验结果均由实际工程中的实测资料给出，对于钻孔模型中缺乏动三轴实测数据的土类，数据由经验值给出（袁晓铭等，

2000；廖振鹏，1989）。

为了单一比较输入地震动峰值对不同场地条件的影响，强震记录的选取原则是保证地震动特征周期在一定范围内，选取不同加速度峰值地震动。本文最终选取 NGA 数据库中基岩场地所记录的 5 条实际强震记录时程（表 2），其加速度峰值分别为 50，100，200，400，650 gal（记为 A 时程、B 时程、C 时程、D 时程和 E 时程），在计算中将其幅值缩小一半作为基岩地震动输入。图 1 给出 5 条强震地震动的加速度时程和反应谱。

表 2 强震记录信息

Tab. 2 Strong earthquake record information

编号	地震名称	台站名称	加速度 峰值/gal
A	Loma Prieta	Gilroy Array #1	50
B	Irpinia, Italy -01	Sturno	100
C	Whittier Narrows -02	Mt Wilson - CIT Seis Sta	200
D	Loma Prieta	So San Francisco, Sierra Pt	400
E	Big Bear -01	Rancho Cucamonga - Deer Can	650

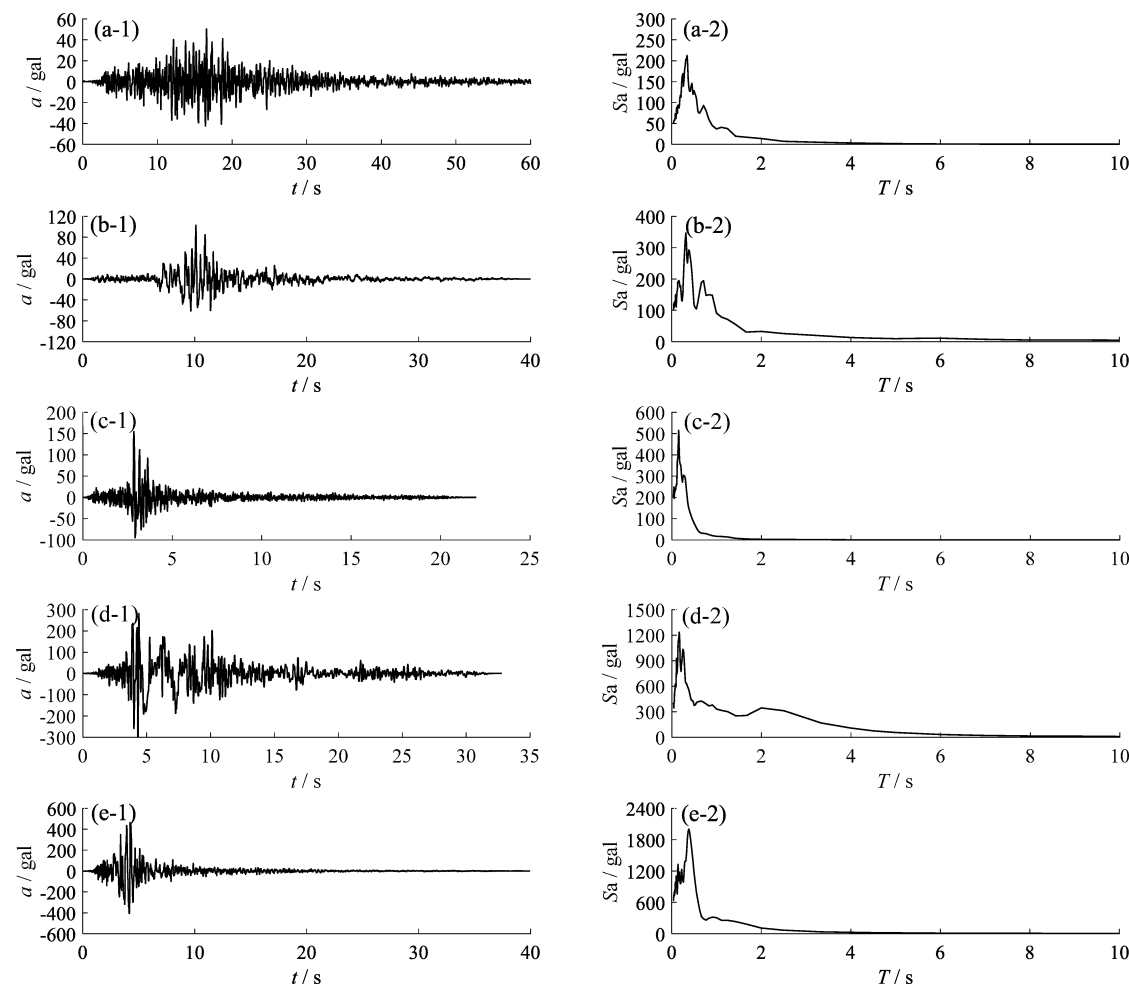


图 1 地震动 A (a), B (b), C (c), D (d), E (e) 的加速度时程和加速度反应谱

Fig. 1 Time – history and response spectrum of acceleration of earthquake motion A (a), B (b), C (c), D (d) and E (e)

2 计算结果与讨论

为分析不同场地的放大效应，设计的计算方案为：①根据钻孔剖面实测数据，分别建立场地计算模型；②对所有钻孔进行不同基岩地震输入下的土层地震反应计算，共记 1 390 个计算工况；③利用等效线性化方法对各钻孔模型的场地进行计算；④为便于叙述和分析，引入场地峰值加速度放大系数：

$$k_{si} = a_{si}/a_{pi} \quad (1)$$

式中： k_{si} ， a_{si} 分别为基岩地震动 i 输入时的峰值加速度放大系数和地表峰值加速度； a_{pi} 为基岩地震动 i 的峰值加速度。

2.1 不同场地类别场地放大效应分析

表 3 给出了不同地震动时程输入下 II，III 类场地 k_s 的平均值及标准差，可见：①场地土对输入地震动具有放大作用，这种放大作用随着地震

表 3 不同地震动时程下 2 类场地峰值加速度放大系数
Tab. 3 The peak acceleration amplification coefficient of two types of sites under different ground motions

基岩输入时程	II 类场地		III 类场地	
	均值	标准差	均值	标准差
A	1.59	0.48	1.70	0.28
B	1.39	0.23	1.33	0.16
C	1.49	0.47	1.06	0.20
D	1.46	0.51	0.65	0.34
E	1.43	0.44	0.72	0.27

动输入强度 a_p 的增大, 在 II, III 类场地呈现不同的趋势; ②在中强震作用下, II 类场地的 k_s 普遍高于 III 类场地; 在强震 D, E 作用下, III 类场地 $k_s < 1$, 说明了场地土层的非线性; ③在地震动时程 B 作用下, II 类场地, k_s 的标准差为 0.23, 与其它地震时程明显不同, III 类场地则是在地震动时程 D 作用下时标准差出现不同, 为 0.34。

为了更直观地看到 k_s 随 a_p 的变化特征, 图 2 给了 II, III 类所有场地模型 k_s 的平均值 (实线) 以及置信区间 (虚线), 置信度为 95%。由图可知: ①II 类场地对 PGA 呈现放大效应, 随着 a_p 的

增大, 放大效应略有增加, a_p 到一定强度时, 放大效应减弱, III 类场地随着 a_p 的增大由放大趋势向缩小趋势转变; ②根据置信区间可知, II 类场地放大系数 k_s 为 1.4 ~ 1.8, III 类场地 R_s 为 0.6 ~ 1.8; ③场地土对地震动具有放大作用且是非线性的, 弱地震动时软场地对地震动放大作用比中硬场地大; ④对应于表 3 中的标准差, 标准差在 0.2 上下时置信区间较窄, 样本分布更为集中, 这一类场地可能对这种地震动输入所呈现的场地反应特性较为一致, 在以后分析地震动输入强度与地震动频谱特性对不同场地类别影响时, 可以引入这一分析参数。

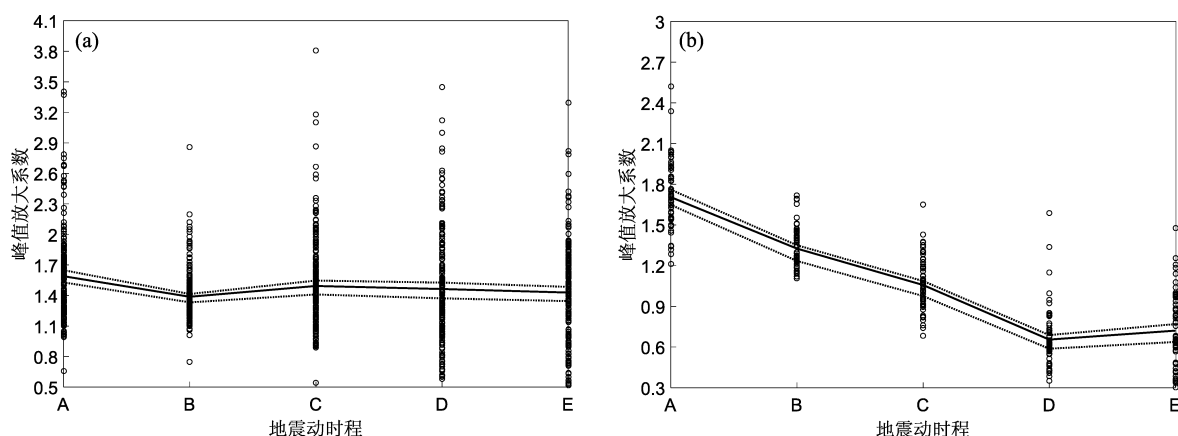


图 2 II (a), III (b) 类场地地震动加速度放大系数分布

Fig. 2 The peak acceleration amplification coefficient profiles of class II (a) and III (b) sites

2.2 场地 PGA 随 V_{se} 的变化特征

为了进一步分析场地反应与 V_{se} 的关联性, 探索场地更为细致的划分方法, 图 3 给出了 II, III 类场地在不同地震动输入下土层 PGA 的散点图, 图中还分别给出两类场地土层 PGA 的平均值 (实线) 和置信区间 (虚线)。同时, 根据最小二乘法曲线拟合原理给出散点图的 PGA 随 V_{se} 变化的趋势拟合曲线。

由图 3 可知: ①2 类场地 PGA 平均值对比结果显示, 除了地震动时程 A 以外, 其它地震作用下 II 类场地的 PGA 平均值均大于 III 类场地。②因 II 类和 III 类场地拟合曲线在后半段不好区分, 因此图中绘制了所有场地的拟合曲线进行对比, 所有地震动作用下, 所有场地拟合曲线与 II 类场地拟合曲线在前半段略有差别, 这是因为

III 类场地的 $V_{se} < 250$ m/s, 所以对前半段的影响较大, 同时, 大部分 II 类场地拟合曲线在 II 类和 III 类场地拟合曲线上方, 推测 II 类场地 PGA 大于 III 类场地的可能性更大。③分析所有场地土层 PGA 随 V_{se} 变化情况发现, 小震 A 作用下, PGA 随 V_{se} 的增大而减小; 中震 B 作用下, PGA 变化不明显; 大震 C, D, E 作用下, PGA 随 V_{se} 的增大而增大, 同时对于 D, E 这种强震作用, PGA 在 $V_{se} > 350$ m/s 变化趋势平缓。④PGA 在 $V_{se} > 250$ m/s 时变化较大 (地震 B 作用除外), 而这个范围内场地类型均属于 II 类场地。目前现行的标准和规范中, PGA 主要基于场地类别进行调整, 这种调整方法可能存在较大的误差, 本文在此基础上提出以 350 m/s 作为分界线, 对 II 类场地进行重新划分。

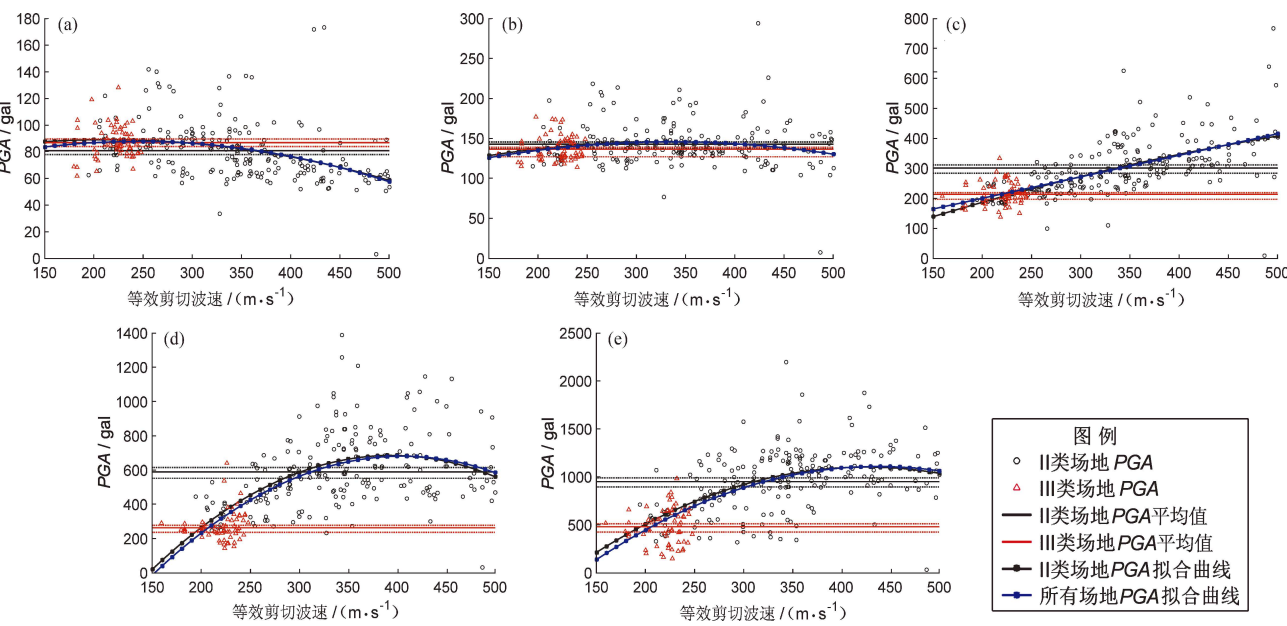


图 3 地震动 A (a), B (b), C (c), D (d), E (e) 作用下土层 PGA 散点图及拟合曲线

Fig. 3 The scatter plot chart and fitting curve of PGA under earthquake motion A (a), B (b), C (c), D (d), E (e)

2.3 场地地震动峰值放大系数经验关系

以 350 m/s 为界线, 将 II 类场地分为 II₀ 和 II₁ 类, 其中 II₀ 类 $V_{se} > 350$ m/s, II₁ 类 $250 < V_{se} < 350$ m/s, 结果见表 4。

表 4 II 类场地重新划分后各类场地的 V_{se} 范围及个数

Tab. 4 The shear wave velocity range after reclassification of class II site

场地类别	$V_{se}/m \cdot s^{-1}$	个数
II ₀	>350	84
II ₁	250 ~ 350	118
III	<250	76

为了对比 II 类场地重新划分后类场地的地震动特征及变化规律, 图 4 给出划分前后类场地 k_s 随 a_p 变化统计结果的拟合曲线和曲线的置信区间 (虚线), 根据拟合曲线分析可知: ①II₀ 类和 II₁ 类场地对基岩地震动均表现为放大, II₀ 的放大趋势随着 a_p 的增大而增大, 而 II₁ 是随着 a_p 的增大而减小, 对比原 II 类场地结果有一定的差别。III 类场地随着 a_p 增大对基岩地震动表现为由放大向缩小的变化趋势。②各拟合曲线置信区间, II₀ 场地 k_s 范围为 1.4 ~ 1.8, II₁ 场地 k_s 为 1.2 ~ 1.6, 原 II

类场地 k_s 则在 1.4 ~ 1.6, III 类场地 k_s 为 0.6 ~ 1.6。由此看出, II 类场地与 III 类场地的放大性是有明显不同的, 五代图也是依据目前的场地分类标准给出其他类别场地的调整系数。而如果按照新划分规则, III 类场地 k_s 相对于 II 类场地分两档之后 k_s 的调整系数会有一定变化, 可进一步给出地震动参数经验关系式进行分析。③II₁ 场地与 III 类场地 V_{se} 范围更为接近, 但是放大性却有很大的不同, 这种差异性的原因还有待研究。

根据图 4 拟合曲线, 进一步给出所有场地分类情况 II, II₀, II₁, III 的经验关系式如下:

$$k_s = C_1 + C_2 a_p + C_3 a_p^2 \tag{2}$$

式中: C_1, C_2, C_3 为经验关系系数, 取值见表 5。

表 5 场地地震动参数 k_s 经验关系系数值

Tab. 5 The empirical relation coefficient of ground motion parameters k_s

场地类别	C_1	$C_2/\times 10^3$	$C_3/\times 10^6$
II	1.53	-3.14	0.27
II ₀	1.66	-1.75	1.86
II ₁	1.33	1.72	-1.98
III	1.89	-5.30	5.40

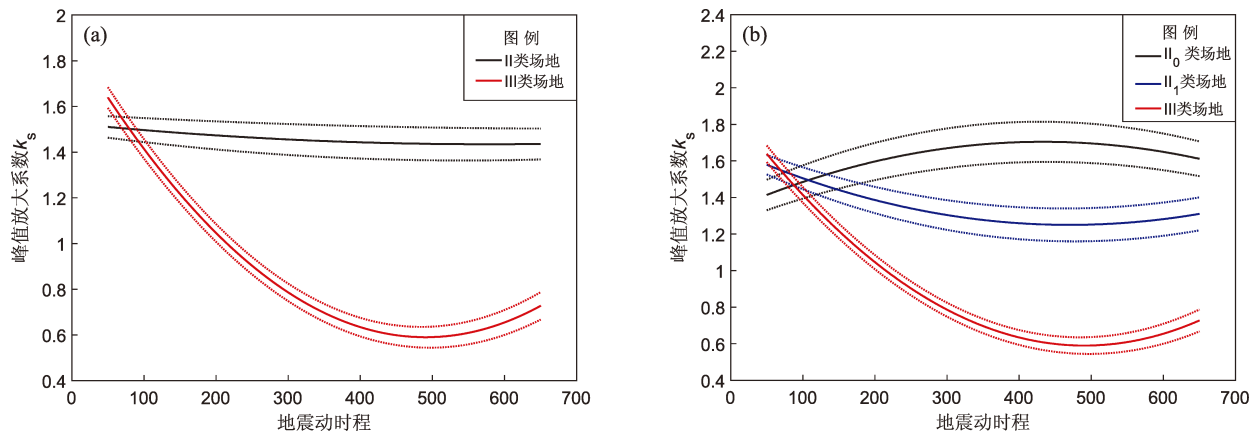


图 4 II, III 类场地拟合参数 (a) 以及 II_0 , II_1 , III 类场地拟合参数 (b) 变化曲线

Fig. 4 The variation curve of fitting parameter k_s for class II and class III sites (a), and for sites class II_0 , class II_1 and class III sites (b)

根据表 5 可得出 III 类场地 PGA 相对于 II 类场地调整系数, 并比较 III 场地的调整系数数值与五代区划图的相关系数进行比较, 见表 6。

表 6 场地 PGA 调整系数

Tab. 6 Adjustment coefficient of ground vibration peak acceleration

PGA/g	II 类场地	III 类场地	
		本文	五代图
≤ 0.05	1.00	1.24	1.30
0.10	1.00	1.16	1.25
0.15	1.00	1.14	1.15
0.20	1.00	1.14	1.00
0.30	1.00	1.20	1.00
≥ 0.40	1.00	1.20	1.00

3 结论

本文基于山东省土层结构数据相对完整的钻孔, 建立了 278 个土层反应场地模型, 通过等效线性化波动方法的场地计算结果, 分析讨论了不同场地条件对基岩地震动的放大效应, 分析结果显示, 场地的放大效应与输入的地震动强度密切相关, 除此之外, 土层的剪切波速的变化对场地放大效应的影响也非常大。本文依据现有资料, 对场地 PGA 放大效应以及场地划分类型进行了一些

初步研究, 提出 II 类场地划分为 II_0 类和 II_1 类场地, 并给出各类场地地震动参数变化的经验关系式及其系数值。

在《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010) 中, 对同一场地类别应根据不同设计地震动分组进行场地验算, 这也说明输入地震动特征周期对场地反应计算结果影响深远, 本文仅考虑了峰值加速度的影响, 在今后的工作中应针对输入地震动频谱特性的影响展开更为细致的研究。同时, 考虑到输入地震动的较大随机性, 本文只是初步分析不同场地类别 (II, III 类) 对地震动峰值加速度的普遍性放大规律, 为确定合理的放大系数应挑选更多的地震动作为输入, 以考虑其不确定性的影响。

参考文献:

- 薄景山, 李秀领, 刘德东. 2003. 土层结构对反应谱特征周期的影响 [J]. 地震工程与工程振动, 23(5): 42–45.
- 薄景山, 翟庆生, 吴兆营. 2004a. 基于土层结构的场地分类方法 [J]. 地震工程与工程振动, 24(4): 46–49.
- 薄景山, 翟庆生, 吴兆营. 2004b. 三种土层结构反应谱特征周期的统计分析 [J]. 地震工程与工程振动, 24(3): 124–129.
- 高孟潭. 2015. GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》宣贯教材 [M]. 北京: 中国标准出版社.
- 姜通, 邢海灵. 2007. 水平土层地震反应分析考虑频率相关性的等效线性化方法 [J]. 岩土工程学报, 29(2): 218–224.
- 李平. 2010. 场地类型对设计反应谱平台值的影响 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.

- 李小军. 2013. 地震动参数区划图场地条件影响调整[J]. 岩土工程学报, 35(S2): 21–29.
- 李小军, 彭青. 2001. 不同类别场地地震动参数的计算分析[J]. 地震工程与工程振动, 21(1): 29–36.
- 李媛媛, 徐扬, 吴东. 2006. 覆盖层厚度对反应谱峰值的影响[J]. 地震地磁观测与研究, 27(4): 33–38.
- 廖振鹏, 李小军. 1989. 地表土层地震反应的等效线性化解法[C]//地震小区划(理论与实践). 北京: 地震出版社: 141–153.
- 廖振鹏. 1989. 地震小区划(理论与实践)[M]. 北京: 地震出版社.
- 刘海笑, 王世水. 2006. 改进的等效线性化计算模型及在结构海床耦合系统动力分析中的应用[J]. 中国港湾建设, (1): 12–15, 42.
- 刘红帅, 薄景山, 吴兆营. 2005. 土体参数对地表加速度峰值和反应谱的影响[J]. 地震研究, 28(2): 167–171.
- 罗桂纯, 李小军, 傅磊, 等. 2019. 基于 HVSr 谱比法研究场地反应非线性特征[J]. 地震研究, 42(4): 546–554.
- 魏勇, 崔建文, 王秋良, 等. 2018. 基于合成地震动的 2014 年鲁甸 $M_s 6.5$ 地震场地效应分析[J]. 地震研究, 41(1): 32–37.
- 杨伟林. 2004. 厚软场地的地震动特征及设计反应谱研究[J]. 防灾减灾工程学报, 24(4): 406–411.
- 袁晓铭, 孙锐, 孙静, 等. 2000. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 20(4): 133–139.
- 周锡元, 王广军, 苏经宇. 1984. 场地分类和平均反应谱[J]. 岩石工程学报, 6(5): 59–68.
- Assimaki D, Kausel E. 2002. An equivalent linear algorithm with frequency – and pressure – dependent moduli and damping for the seismic analysis of deep sites[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(9–12): 959–965.
- Idriss I M, Seed H B. 1968. Seismic response of horizontal soil layers[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 94(4): 1003–1031.
- GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB 18306—2015, 中国地震动参数区划图[S].

Study on Amplification Effect of Peak Ground Acceleration Based on Different Sites in Shandong Province

YAN Jingru, ZHANG Yushan, HAO Minghui

(China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China)

Abstract

By collecting and sorting the 278 borehole profiles with comparatively complete soil structure data in Shandong province from the In – site Investigation Borehole Database and Analysis Platform System, this article calculates the site response of class – II and class – III sites under the effect of 5 different kinds of actual rock earthquake by applying linear equivalent response analysis method on one – dimensional soil layer, analyzing how the peak ground amplification coefficient changes according to the different sites, shear wave velocity and input earthquake intensity. The results show that: ① the soil in the site would amplify the input earthquake, and the effect acts differently in class – II and class – III site as the input earthquake intensified; ② by comparing the average PGA and fitting curve of different earthquake intensity in all sites, it can be concluded that the PGA in class – II is higher than that of class – III in most conditions; ③ by analyzing the change of PGA with V_{se} in all sites, it can be concluded that when $V_{se} > 350$ m/s, the trend of the PGA is even under the strong earthquake effect of D and E. So, this article proposes a more thorough classification method for class – II site and gives the changes of the earthquake parameters in all kinds and the coefficient values.

Keywords: site effect; site classification; PGA ; amplification coefficient