

场地条件对地面加速度峰值 离散性的影响研究¹

李建亮¹ 亢川川 何玉林 梁明剑

(四川省地震局, 成都 610041)

摘要 本文在研究了数百个工程场地钻孔资料的基础上, 选取和构造了 209 个有代表性的典型场地剖面, 利用目前工程上广泛应用的一维等效线性化波动方法, 进行了 6 种输入强度下(30gal、50gal、100gal、150gal、200gal、300gal) 的场地土层地震反应分析。在计算时对每种工况均采用 9 条互不相关的基岩加速度时程作为输入地震波, 同时用均方差来定量评估所得到的地面加速度峰值的离散性, 发现计算结果离散性很大, 其最大均方差为 0.206, 最小均方差为 0.138, 且离散性随基岩地震动输入强度的增大而变大, 随场地类别的变差也变大。

关键词: 场地条件 地震反应 地面加速度峰值 离散性

引言

场地土层是地震波的传播载体, 地震波在不同的场地土层中传播的特性存在差异, 表现为对地震动的放大或缩小, 并直接影响到地震灾害程度的分布。继 2008 年“5.12”四川汶川发生 8.0 级特大地震后, 我国修订了《中华人民共和国防震减灾法》, 重新规范了工程场地地震安全性评价行业的工作。土层地震反应分析是场地地震安全性评价的重要环节。场地土层对地面加速度峰值的影响受到研究者的广泛重视, 前人已开展了一些有益的科研工作。李小军等(2001)利用土层地震反应分析的等效线性化方法, 研究了 4 类场地条件对场地地震动峰值加速度影响的规律, 给出了每一类场地地震动参数变化的经验关系, 得到了场地条件对地震动峰值加速度的放大倍数及变化规律。李秀领(2003)计算了不同覆盖土层厚度场地的地表加速度峰值, 结果表明, 覆盖土层厚度小于 30m 时, 在不同幅值的地震动输入条件下, 地表加速度峰值变化较大; 当覆盖土层厚度超过 30m 时, 地表加速度峰值变化较小, 几乎不受覆盖土层厚度的影响。同年李秀领又对软弱层进行了较详细的研究, 当软弱层位于剖面顶部时, 输入地震动的幅值越小, 基岩加速度峰值被放大的倍数越明显; 输入地震动的幅值越大, 基岩加速度峰值被放大的倍数越小。薄景山等(2003a;

1 基金项目 地震行业科研专项项目(201008006)资助

[收稿日期] 2011-04-18

[作者简介] 李建亮, 男, 生于 1979 年。硕士, 工程师, 国家二级注册地震安评师。主要从事工程地震和地震安全性评价方面的工作。E-mail: 122529855@qq.com

2003b; 2003c) 详细分析了覆盖层厚度、软土层的埋深与厚度等对场地地表加速度峰值、反应谱特征周期及平台值的影响, 得到了一些有意义的结论。吕悦军等(2008)、彭艳菊等(2004) 分别对覆盖土层厚、土质疏松的滨海场地进行了研究, 研究结果表明, 地震动由基岩穿过较厚的软弱土层到达地表, 会产生较强的地表地震动, 并得出了 50 年超越概率 63%、10%、2% 地表峰值加速度的放大倍数。但是, 对土层地震反应分析的地面加速度峰值具有较大离散性的研究还鲜有报道, 基于此笔者在研究了数百个工程场地钻孔资料的基础上, 选取和构造了 209 个有代表性的典型场地剖面, 利用目前工程上广泛应用的场地地震反应分析一维等效线性化波动方法(廖振鹏等, 1989), 计算了场地土层在 6 种不同强度(30gal、50gal、100gal、150gal、200gal、300gal) 地震动输入下的地面加速度峰值, 在计算时每种工况均采用 9 条互不相关的基岩加速度时程作为输入地震波, 用均方差来定量评估所得到的地面加速度峰值的离散性。文中采用 9 条加速度时程作为基岩输入地震波有两个作用, 其一, 可减小由于计算结果本身的离散性而产生的计算结果误差; 其二, 用于评判我国现行的《工程场地地震安全性评价(GB 17741—2005)》(中华人民共和国国家标准, 2005) 中规定的 II 级和地震小区区化工作不少于 3 条基岩加速度时程作为地震动输入的下限要求的合理性。通过分析研究, 笔者认为应该提高该下限要求。因此对地面加速度峰值离散性进行分析研究, 既可使工程场地地震安全性评价工作得出的设计地震动参数更为精确合理, 有助于工程场地地震安全性评价工作和防灾减灾水平的提高, 又可为将来国家标准的修订提供参考, 同时也弥补了国内在该方面研究的不足。

1 场地计算模型的构建

对于场地类别的划分, 《建筑抗震设计规范(GB 5001-2010)》(中华人民共和国住房和城乡建设部等, 2010) 采用基于覆盖土层厚度和等效剪切波速的双指标法, 而《构筑物抗震设计规范(GB 50191-93)》(中华人民共和国建设部等, 1995) 则采用基于场地指数计算值的场地指数法。本文兼用双指标和场地指数法两种场地分类方法, 构建不同场地类别的场地模型。II 类场地是全国范围内最常见的场地类型, 也是研究者们重点研究的场地, 故本文在收集和构造计算模型时也是以 II 类场地为主。

根据双指标和场地指数法及其对勘测资料的统计分析, 本文所选取的覆盖土层剖面描述和土层波速测试值都是完整的 120 个典型工程场地钻孔, 建立与这些钻孔对应的计算模型, 并在这些场地计算模型的基础上, 人为地构造出另外 89 个计算模型。同时在人为构建场地模型过程中, 力求保证场地计算模型的场地指数、等效剪切波速和土层厚度较为均匀的覆盖规范所规定场地力学参数的范围, 最后组成了 209 个一维土层场地计算模型。其中, 属于 I 类场地的有 22 个; 属于 II 类场地的有 137 个; 属于 III 类场地的有 28 个; 属于 IV 类场地的有 22 个。在本文所指的 I 类场地模型中, 不包括 I 类场地中的岩石场地 I_0 类, 即指《建筑抗震设计规范(GB 5001-2010)》(中华人民共和国住房和城乡建设部等, 2010) 场地类别划分中, I 类场地的坚硬土或软质岩石场地 I_1 类。土层剪切波速值、土体密度值以及土层厚度值均取实测值或人为构造值, 土体非线性特性曲线 $G/G_{\max}-\gamma$ 与 $\zeta-\gamma$ 的值采用《工程场地地震安全性评价工作规范(DB 001-94)》(中华人民共和国地震行业标准, 1994) 中的推荐值。表 1 列出了不同场地类别场地计算模型力学参数分布情况。由表 1 可知, 本文所构建的 209 个典型钻孔所对应的力学参数分布较为均匀。

表 1 计算场地模型力学参数分布情况

Table 1 A list of mechanical parameters of site models

场地类别	计算模型个数	场地指数值 μ 分布		等效剪切波速值 V_{se} 分布		覆盖层厚度 d 分布	
		范围	个数	范围	个数	范围	个数
I	22	$1.00 \geq \mu > 0.90$	8	$450 \geq V_{se} > 400$	5	$5 \geq d > 1$	22
		$0.90 \geq \mu > 0.85$	7	$400 \geq V_{se} > 350$	6		
		$0.85 \geq \mu > 0.80$	7	$350 \geq V_{se} > 300$	6		
				$300 \geq V_{se} > 250$	5		
II	137	$0.80 \geq \mu > 0.70$	37	$450 \geq V_{se} > 400$	5	$50 \geq d > 40$	7
		$0.70 \geq \mu > 0.60$	36	$400 \geq V_{se} > 300$	29	$40 \geq d > 30$	22
		$0.60 \geq \mu > 0.50$	34	$300 \geq V_{se} > 250$	32	$30 \geq d > 20$	29
		$0.50 \geq \mu > 0.40$	30	$250 \geq V_{se} > 200$	39	$20 \geq d > 15$	29
				$200 \geq V_{se} > 150$	28	$15 \geq d > 10$	38
				$150 \geq V_{se} > 100$	4	$10 \geq d > 2.5$	12
III	28	$0.40 \geq \mu > 0.30$	11	$250 \geq V_{se} > 200$	9	$80 \geq d > 50$	21
		$0.30 \geq \mu > 0.20$	9	$200 \geq V_{se} > 150$	12	$50 \geq d > 10$	7
		$0.20 \geq \mu > 0.10$	6	$150 \geq V_{se} > 100$	7		
		$0.10 \geq \mu > 0.05$	2				
IV	22	$0.05 \geq \mu \geq 0.00$	22	$140 \geq V_{se} > 100$	17	$140 \geq d > 100$	11
				$100 \geq V_{se} > 50$	5	$100 \geq d > 80$	11

2 基岩地震动输入

为充分考虑场地土体非线性特性的影响,自由基岩面地震动加速度反应谱取《建筑抗震设计规范(GB 5001-2010)》(中华人民共和国住房和城乡建设部等,2010)中采用的标准形式。合成自由基岩面地震动参数取值分别为:地震动加速度峰值 30gal、50gal、100gal、150gal、200gal、300gal;放大系数反应谱平台值为 2.25;特征周期值为 0.45s;阻尼比为 0.05;同时采用随机相位差和适合本地区的包络函数。在拟合地震动时程时,为了考虑相位随机性的影响,对不同的目标反应谱分别合成了 9 条地震动时程,作为同一场地计算模型的输入。加速度时程合成以 0.02s 为时间间隔,共有 2048 个点。目标谱控制点在 0.04—6.0s 内插至 80 个点,以保证反应谱的拟合精度。在合成过程中,利用逐步逼近目标谱的方法,使合成的加速度时程满足基岩加速度峰值,并近似满足基岩加速度反应谱,控制相对误差小于 5% (胡聿贤,1999)。

为检验上面 9 条地震水平加速度时程之间的相关性,采用下式:

$$\rho = \frac{\left| \sum_j a_{1j} \cdot a_{2j} \right|}{\sqrt{\sum_j a_{1j}^2} \cdot \sqrt{\sum_j a_{2j}^2}}$$

定义相关系数,计算各个基岩输入强度下 9 条加速度时程两两之间的相关系数,使其均小于 0.1,以保证各水平加速度时程在统计上是互不相关的。

3 计算结果及分析

采用一维等效线性化波动方法进行土层地震反应分析计算,以上面得到的基岩地震动作为输入地震波,计算得到了地面水平加速度,根据均方差公式计算得到了地面加速度峰值的均方差。由于每个计算模型在每种强度下均输入了 9 条基岩加速度时程,故在每种输入强

度下，I类场地得到的计算结果有198个；II类场地得到的计算结果有1233个；III类场地得到的计算结果有252个；IV类场地得到的计算结果有198个；共计有1881个工况。

3.1 基岩水平地震动输入加速度峰值为30gal

由图1分析计算后可得出，在该地震动输入水平下，不同场地模型计算得到的地面水平加速度峰值具有较大的离散性。不同场地类别的离散性不同：IV类场地的离散性最大，其均方差的优势分布区间为0.17—0.23，各模型均方差均值为0.192；I类场地的离散性相对较小，其均方差的优势分布区间为0.07—0.19，各模型均方差均值为0.138；III类场地的均方差优势分布区间为0.17—0.23，各模型均方差均值为0.181；II类场地的均方差优势分布区间为0.13—0.21，各模型均方差均值为0.162。

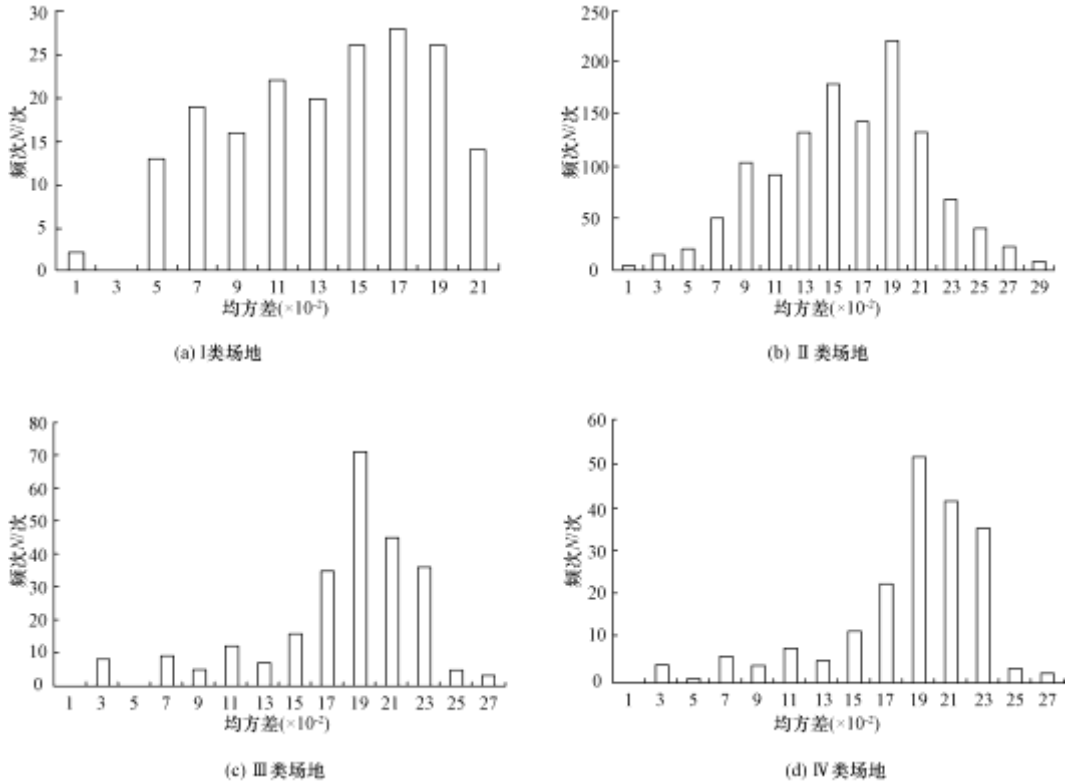


图1 基岩水平地震动输入加速度峰值为30gal时的均方差分布

Fig.1 Mean-square deviation of bedrock horizontal peak acceleration for the 30gal

3.2 基岩水平地震动输入加速度峰值为50gal

由图2计算分析后可得出，在该地震动输入水平下，不同场地类别的离散性不同：IV类场地的离散性最大，其均方差的优势分布区间为0.17—0.23，各模型均方差均值为0.192；I类场地的离散性相对较小，其均方差的优势分布区间为0.07—0.21，各模型均方差均值为0.140；III类场地的均方差优势分布区间为0.17—0.23，各模型均方差均值为0.183；II类场地的均方差优势分布区间为0.13—0.21，各模型均方差均值为0.164。不同场地模型得到的计算结果的离散性均比基岩水平地震动输入加速度峰值为30gal时大。

3.3 基岩水平地震动输入加速度峰值为100gal

由图3计算分析后可得出，在该地震动输入水平下，不同场地类别的离散性不同：IV类

场地的离散性最大，其均方差的优势分布区间为 0.17—0.23，各模型均方差均值为 0.195；I 类场地的离散性相对较小，其均方差的优势分布区间为 0.07—0.21，各模型均方差均值为 0.142；III类场地的均方差优势分布区间为 0.17—0.23，各模型均方差均值为 0.189；II类场地的均方差优势分布区间为 0.13—0.21，各模型均方差均值为 0.161。除 II类场地外，其他场地类别的计算结果离散性均比基岩水平地震动输入加速度峰值为 50gal 时大。

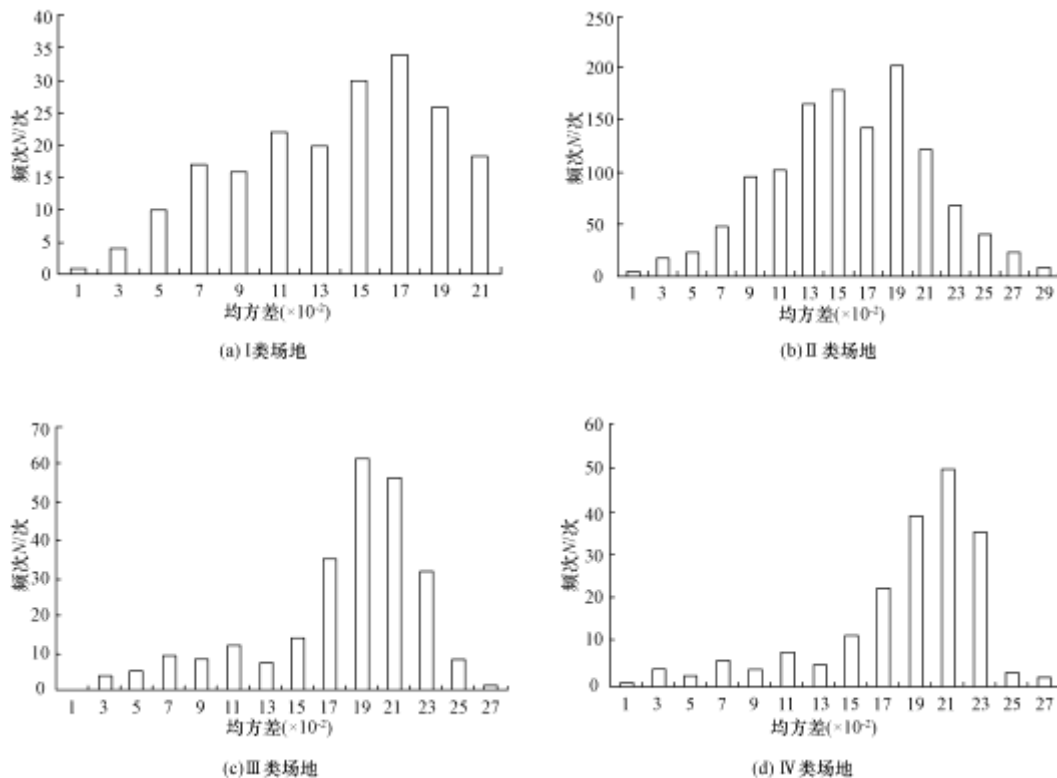
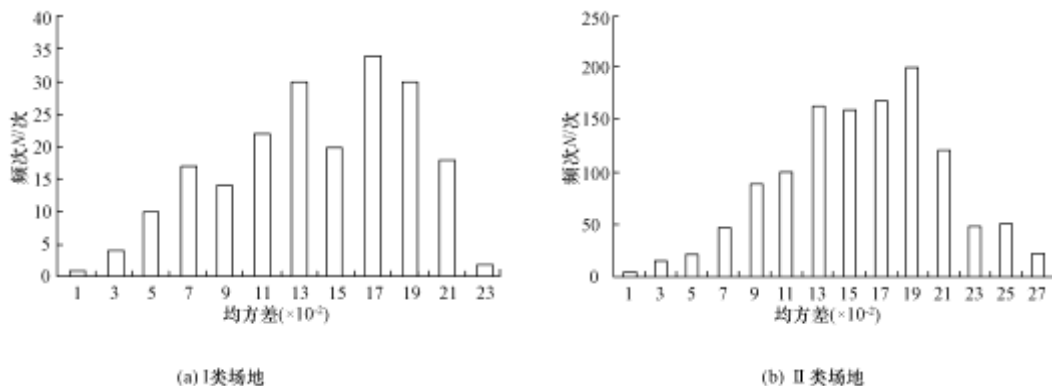


图 2 基岩水平地震动输入加速度峰值为 50gal 时的均方差

Fig.2 Mean-square deviation of bedrock horizontal peak acceleration for the 50gal



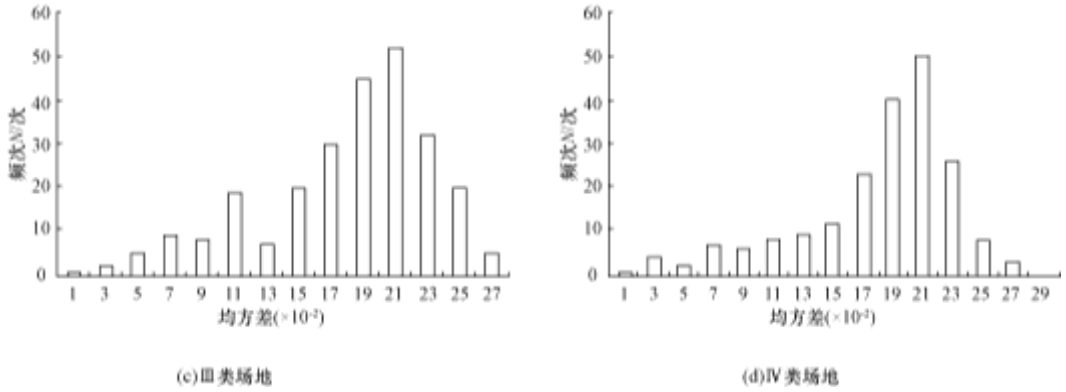


图 3 基岩水平地震动输入加速度峰值为 100gal 时的均方差

Fig.3 Mean-square deviation of bedrock horizontal peak acceleration for the 100gal

3.4 基岩水平地震动输入加速度峰值为 150gal

由图 4 计算分析后可得出，在该地震动输入水平下，不同场地类别的离散性不同：IV类场地的离散性最大，其均方差的优势分布区间为 0.17—0.23，各模型均方差均值为 0.198；I类场地的离散性相对较小，其均方差的优势分布区间为 0.11—0.21，各模型均方差均值为

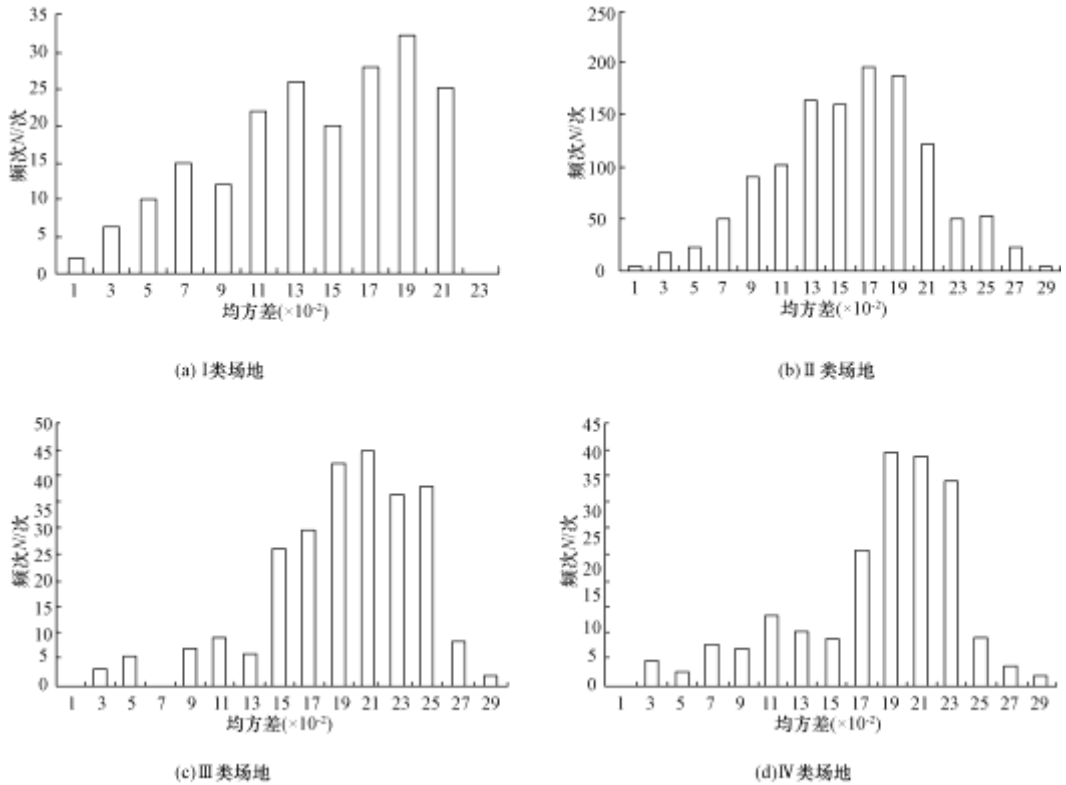


图 4 基岩水平地震动输入加速度峰值为 150gal 时的均方差

Fig.4 Mean-square deviation of bedrock horizontal peak acceleration for the 150gal

0.146; III类场地的均方差优势分布区间为 0.15—0.25, 各模型均方差均值为 0.188; II类场地的均方差优势分布区间为 0.13—0.21, 各模型均方差均值为 0.165。除III类场地外, 其他场地类别的计算结果离散性均比基岩水平地震动输入加速度峰值为 100gal 时大。这里III类场地的均方差均值仅比基岩水平地震动输入加速度峰值为 100gal 时的小 0.001。

3.5 基岩水平地震动输入加速度峰值为 200gal

由图 5 计算分析后可得出, 在该地震动输入水平下, 不同场地类别的离散性不同: IV类场地的离散性最大, 其均方差的优势分布区间为 0.17—0.23, 各模型均方差均值为 0.201; I类场地的离散性相对较小, 其均方差的优势分布区间为 0.11—0.21, 各模型均方差均值为 0.152; III类场地的均方差优势分布区间为 0.17—0.23, 各模型均方差均值为 0.195; II类场地的均方差优势分布区间为 0.11—0.21, 各模型均方差均值为 0.170。不同场地模型得到的计算结果离散性均比基岩水平地震动输入加速度峰值为 150gal 时大。

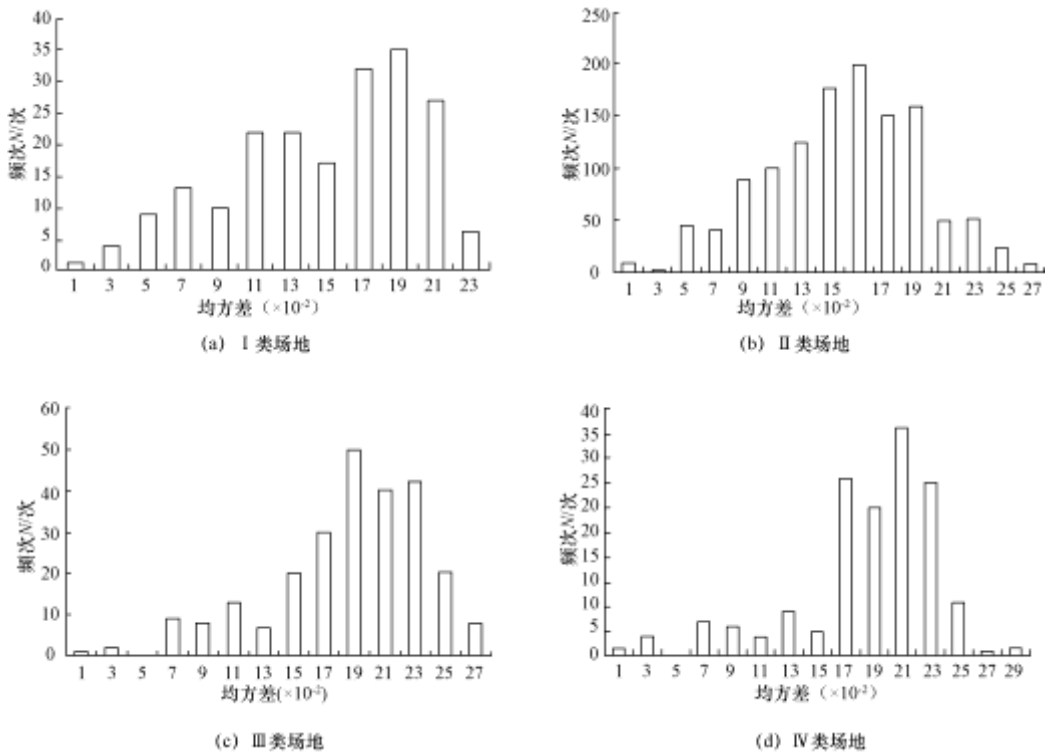


图 5 基岩水平地震动输入加速度峰值为 200gal 时的均方差

Fig.5 Mean-square deviation of bedrock horizontal peak acceleration for the 200gal

3.6 基岩水平地震动输入加速度峰值为 300gal

由图 6 计算分析后可得出, 在该地震动输入水平下, 不同场地类别的离散性不同: IV类场地的离散性最大, 其均方差的优势分布区间为 0.17—0.23, 各模型均方差均值为 0.206; I类场地的离散性相对较小, 其均方差的优势分布区间为 0.11—0.21, 各模型均方差均值为 0.155; III类场地的均方差优势分布区间为 0.15—0.25, 各模型均方差均值为 0.197; II类场地的均方差优势分布区间为 0.09—0.21, 各模型均方差均值为 0.174。不同场地模型得到的结果离散性均比基岩水平地震动输入加速度峰值为 200gal 时大。

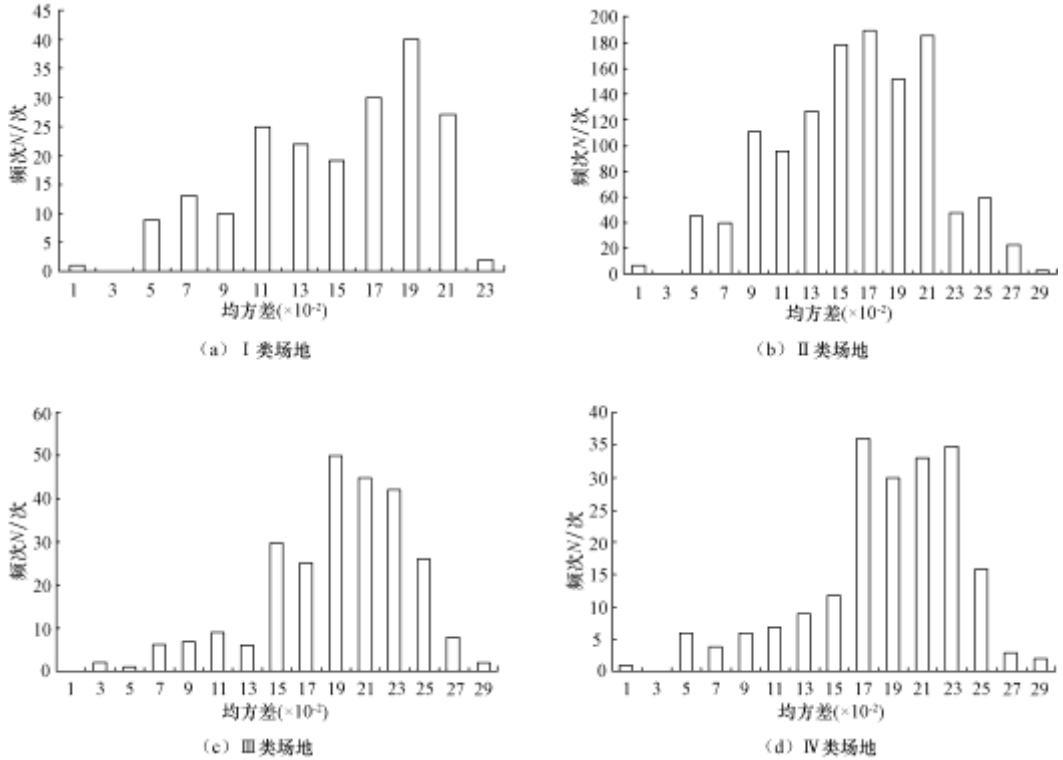


图 6 基岩水平地震动输入加速度峰值为 300gal 时的均方差

Fig.6 Mean-square deviation of bedrock horizontal peak acceleration for the 300gal

3.7 6 种基岩输入强度下均方差均值的变化规律

表 2 是上述 6 种基岩输入强度下均方差均值统计，图 7 是其变化规律。

表 2 6 种基岩输入强度下均方差均值

Table 2 Mean-square deviation under six kinds of bedrock horizontal peak acceleration

均方差均值 基岩输入强度	场地类别	I 类场地	II 类场地	III 类场地	IV 类场地
	30gal		0.138	0.162	0.181
50gal		0.140	0.164	0.183	0.192
100gal		0.142	0.161	0.189	0.195
150gal		0.146	0.165	0.188	0.198
200gal		0.152	0.170	0.195	0.201
300gal		0.155	0.174	0.197	0.206

分析表 2 可知，当基岩输入强度为 30gal、场地条件由 I 类变为 IV 类时，其均方差均值由 0.138 变为 0.190，二者之差为 0.052；而当场地条件为 I 类、基岩输入强度由 30gal 变为 300gal 时，其均方差均值由 0.138 变为 0.155，二者之差 0.017；前面的二者之差约是后面的 3 倍。其他由于场地条件的改变而导致的均方差均值的变化幅度以及由于基岩输入强度的改变而导

致的均方差均值的变化幅度间的关系，均可采用类似的分析方法得出。同样都是场地条件的改变对均方差均值的影响比基岩输入强度的改变对均方差均值的影响要大的多。

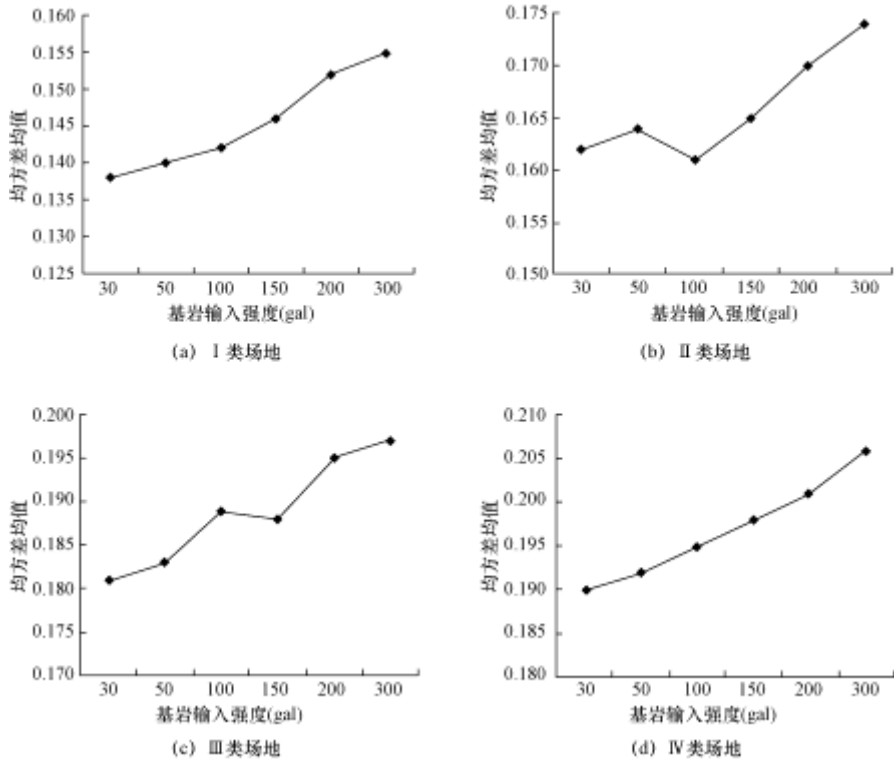


图7 6种基岩输入强度下均方差均值的变化规律

Fig.7 Mean-square deviation curve under six kinds of bedrock horizontal peak acceleration

由图7可知，不同基岩输入强度下的离散性不同：I、IV类场地的离散性随基岩输入强度的增大而变大；II、III类场地的离散性总体变化趋势是随基岩输入强度的增大而变大；而II类场地在基岩输入强度为100gal时变小，III类场地在基岩输入强度为150gal时变小。

综合上述分析可知，本文的209个土层地震反应钻孔的力学参数分布较为均匀，覆盖了I—IV类场地，计算得到了1881个工况的计算结果，基本上可以体现出4个场地类别的地面水平加速度峰值离散性的变化规律：土层地震反应的计算结果地面水平加速度峰值具有较大的离散性，不同场地类别的离散性不同，整体上IV类场地的离散性最大，III类场地的次之，之后依次是II类场地和I类场地；不同基岩输入强度下的离散性也不同，总体变化趋势是离散性的大小与基岩输入强度的大小成正比，即输入强度越大离散性越大。另外，场地条件的改变比基岩输入强度的改变对离散性的影响要大的多。

4 结语

不同场地模型计算得到的地面加速度峰值具有较大的离散性，其最大均方差为0.206，最小均方差为0.138，且离散性随基岩地震动输入强度的增大而变大，随场地类别由I类变为IV类也在变大，场地类别的改变比基岩输入强度的改变对离散性的影响要大的多。这些都令

我们不能仅仅满足于《工程场地地震安全性评价(GB 17741-2005)》(中华人民共和国国家标准, 2005)中规定的Ⅱ级和地震小区化工作不少于3条基岩加速度时程作为地震动输入的下限要求, 为此要适当增加, 以减小其本身的随机性而带来的误差, 从而使土层地震反应分析的计算结果更接近于真实值。对Ⅲ、Ⅳ类场地和地震动峰值加速度区划图中高地震动峰值区更是如此, 这样才能得到更为合理的地面加速度峰值, 为结构抗震设计提供更为准确的设计地震动参数, 使我们的抗震设计既能满足结构的安全要求, 又能避免不必要的成本投入。

致谢: 感谢评审专家对本文初稿和修改稿提出的宝贵意见和建议。

参考文献

- 薄景山, 李秀领, 刘红帅, 2003a. 土层结构对地表加速度峰值的影响. 地震工程与工程振动, **23** (3): 35—40.
- 薄景山, 李秀领, 李山有, 2003b. 场地条件对地震动影响研究的若干进展. 世界地震工程, **19** (2): 11—15.
- 薄景山, 李秀领, 刘德东等, 2003c. 土层结构对反应谱特征周期的影响. 地震工程与工程振动, **23** (5): 42—45.
- 胡聿贤, 1999. 地震安全性评价技术教程. 北京: 地震出版社.
- 胡聿贤, 2006. 地震工程学. 北京: 地震出版社.
- 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.
- 李秀领, 2003. 土层结构对地表地震动参数影响的研究. 中国地震局工程力学研究所硕士论文.
- 廖振鹏, 李小军, 1989. 地表土层地震反应的等效线性化解法. 见: 地震小区划——理论与实践. 北京: 地震出版社.
- 吕悦军, 彭艳菊, 兰景岩等, 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.
- 彭艳菊, 唐荣余, 吕悦军等, 2004. 天津滨海场地土类别特征及其对地震动的影响. 地震工程与工程振动, **24** (2): 46—52.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 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.
- 中华人民共和国国家标准, 2005. 工程场地地震安全性评价(GB 17741-2005). 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国建设部, 国家技术监督局, 1995. 构筑物抗震设计规范(GB 50191-93). 北京: 中国计划出版社.
- 中华人民共和国地震行业标准, 1994. 工程场地地震安全性评价工作规范(DB 001-94). 北京: 地震出版社.

Effects of Site Condition on Discreteness of Ground Peak Accelerations

Li Jianliang, Kang Chuanchuan, He Yulin and Liang Mingjian

(Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China)

Abstract Based on hundreds of actual engineering site profiles, we select and build 209 significant site profiles. The ground peak accelerations of constructions with different soil layers are calculated under six different input intensities (30gal, 50gal, 100gal, 150gal, 200gal, 300gal) through the equivalent linearization and wave propagation method for the earthquake response analysis of soil layers. Some more serious discreteness is showed in the seismic peak ground analysis. The maximum mean-square deviation of seismic peak ground acceleration is 0.206, while the minimum mean-square deviation is 0.138. The larger mean-square deviation is in the worse site sort than in the better site sort region. And the mean-square deviation also increases when the input intensity earthquake in bedrock increases.

Key words: Site condition; Earthquake response; Ground peak acceleration; Discreteness