

场地条件对地震动参数影响的关键问题¹

吕悦军^{1,2)} 彭艳菊^{1,2)} 兰景岩²⁾ 孟小红¹⁾

1) 中国地质大学(北京), 北京 100083

2) 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

摘要 场地条件对地震动的影响很大, 在地震动幅值(如峰值加速度)和频谱特性(如反应谱特征周期)的变化上均有体现, 而我国现行抗震设计规范没有考虑不同场地条件下地震动峰值加速度和加速度反应谱平台值的变化。本文介绍了我国现行抗震设计规范中场地类别的划分方法、场地对地震动参数值的规定和存在的问题。详细分析了土层结构、覆盖层厚度等场地条件对地震动峰值加速度和反应谱的影响, 以及已经取得的研究成果。最后, 就场地分类、影响地震动参数的场地条件、地震动参数随场地条件调整的方法等, 提出了有待进一步研究的问题。

关键词: 场地条件 地震动 抗震规范 场地影响

引言

强震观测和震害资料表明(胡聿贤等, 1980; 周锡元等, 1991; 李小军等, 2001a; 2001b; 薄景山等, 2003a; 2003b; 2003c), 场地条件对地震动的影响很大, 在地震动幅值(如峰值加速度)和频谱特性(如反应谱特征周期)的变化上均有体现。如何估计场地条件对地震动特性的影响, 并在工程结构抗震设防中考虑这一影响, 一直是工程地震学的重要研究课题。

世界各国的抗震规范都不同程度地考虑了场地条件对地震动参数的影响。从 1994 版美国 NEHRP 推荐的规范开始, 美国抗震设计规范中使用 F_a 和 F_v 两个场地系数, 同时考虑场地条件对地震动峰值加速度和特征周期的影响 (Building Seismic Safety Council, 1998), 而且在 2003 版 NEHRP 规范中仍使用上述场地系数 (Building Seismic Safety Council, 2004)。与美国的抗震设计规范相比较, 在我国现行的《建筑抗震设计规范 (GB50011-2001)》(中华人民共和国建设部等, 2001) 中, 考虑了不同场地条件下地震动峰值加速度和加速度反应谱平台值的变化。在《中国地震动参数区划图 (GB18306-2001)》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫局, 2001) 中, 虽然考虑了场地条件的影响, 给出了 II 类场地条件下峰值加速度分

1 基金项目 中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项和国家科技支撑计划课题强震危险区划关键技术研究 (2006BAC13B01) 资助

【收稿日期】 2008-04-18

【作者简介】 吕悦军, 男, 生于 1966 年。中国地质大学(北京)在职博士研究生, 中国地震局地壳应力研究所研究员。主要从事地震安全性评价、地震区划等方面的研究。Email: Luyj1@263.net

区图和阻尼比为 0.05 的加速度反应谱特征周期分区图 (50 年超越概率 10%), 以及不同场地条件下反应谱特征周期的调整表, 但该图对不同类别场地条件下地震动峰值加速度却未作调整。

近年来, 随着对强地面运动记录以及重大工程地震安全性评价的深入研究, 发现场地条件不仅对地震反应谱特征周期有影响, 而且对地震动峰值的影响也同样很大。因此, 需要对场地类别的划分方法、场地条件与峰值加速度及反应谱之间的定量关系等进行更详细、更深入的研究, 以便在未来地震区划、工程结构抗震设防中, 可根据场地条件同时对地震动反应谱特征周期和峰值加速度进行调整。正是出于上述考虑, 本文介绍了我国现行规范中场地类别的划分方法、场地对地震动参数值的规定和存在的问题, 并详细分析了土层结构、覆盖层厚度等场地条件对地震动峰值加速度和反应谱的影响, 以及所取得的研究成果。最后, 就场地分类、影响地震动参数的场地条件、地震动参数随场地条件调整的方法等, 提出了有待进一步研究的问题。

1 现行抗震设计规范中有关地震动参数调整的规定

1.1 规范中的场地类别划分

我国的建筑抗震设计规范从 1959 年第一版的《地震区建筑规范 (草案)》开始, 至今已经历了 6 个版本的发展历程 (陈国兴, 2003), 目前采用的是 2001 版《建筑抗震设计规范 (GB50011-2001)》。该规范定义的场地类别有 4 类, 分类指标为地基承载力特征值、场地覆盖层厚度、等效剪切波速, 表 1 是其场地类别和判别标准, 表中 v_{se} 取地表以下 20m 和覆盖层厚度二者中的小者, 计算得到的等效剪切波速、覆盖层厚度按地面至剪切波速大于 $500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的土层或坚硬土层顶面的距离确定。

表 1 建筑抗震设计规范中场地类别和分类标准

Table 1 The site classification in the Code for Seismic Design of Buildings

场地类别	岩土名称和性质	等效剪切波速 $v_{se}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			
		$v_{se} > 500$	$500 \geq v_{se} > 250$	$250 \geq v_{se} > 140$	$v_{se} \leq 140$
I	稳定岩石, 密实的碎石土	0			
II	中密、稍密的碎石土, 密实、中密的砾、粗、中砂, $f_{ak} > 200$ 的粘性土和粉土, 坚硬黄土	< 5	≥ 5		
III	稍密的砾、粗、中砂, 除松散外的细、粉砂, $f_{ak} \leq 200$ 的粘性土和粉土, $f_{ak} > 130$ 的填土, 可塑黄土	< 3	3—50	> 50	
IV	淤泥和淤泥质土, 松散的砂, 新近沉积的粘性土和粉土, $f_{ak} \leq 130$ 的填土、流塑黄土	< 3	3—15	15—80	> 80

注: f_{ak} 为由载荷试验等方法得到的地基承载力特征值 (单位: kPa)

1.2 地震动参数随场地条件调整的规定

在《建筑抗震设计规范 (GB50011-2001)》中, 规定建筑结构的抗震影响系数应根据烈度、场地类别、设计地震分组和结构自振周期及阻尼比确定。其水平地震影响系数最大值按表 2 采用; 特征周期应根据场地类别和设计地震分组按表 3 采用, 计算 VIII 度、IX 度罕遇地震作用时, 特征周期应增加 0.05s。其中, 设计地震分组对应 3 个抗震设防水准目标, 一般取 50 年超越概率 63%、10%、2% 的地震动参数。

表 2 水平地震影响系数最大值

Table 2 The maximum value of seismic effect coefficient

地震影响	Ⅵ度	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度
常遇地震	0.04	0.08 (0.12)	0.16 (0.24)	0.32
罕遇地震	—	0.50 (0.72)	0.90 (1.20)	0.14

注：括号中数值分别用于设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.30g 的地区

表 3 不同场地下的特征周期值(s)

Table 3 The characteristic period of the response spectrum of different sites

设计地震分组	场 地 类 别			
	I 类	II 类	III 类	IV 类
第一组	0.25	0.35	0.45	0.65
第二组	0.30	0.40	0.55	0.75
第三组	0.35	0.45	0.65	0.90

《建筑抗震设计规范 (GB50011-2001)》将反应谱的适用范围延长至 6s, 这是因为随着强震加速度记录数据处理技术的提高和数字化强震仪的出现, 在 10s 以内反应谱的精度是有保障的, 但是对于房屋建筑延长到 6s 已经足够了。谱曲线仍然由 4 段组成, 但将下降段延长至 $5T_g$, 其后采用了斜直线, 取代规范中最小值为 $2\alpha_{\max}$ 的下平台。修改后的谱形状更符合不同条件下实际强震加速度反应谱的平均变化趋势。规范中 T_g 值决定于场地类别和地震动分区, 后者由《中国地震动参数区划图 (GB18306-2001)》提供。

《中国地震动参数区划图 (GB18306-2001)》给出了 II 类场地条件下阻尼比为 0.05 的加速度反应谱特征周期分区图, 分为 0.35s、0.40s、0.45s 三个分区, 基于这一结果, 可针对不同场地类别进行反应谱特征周期调整。

同时, 规范也规定了地震影响系数曲线的阻尼调整和形状参数。

1.3 存在的问题

仔细分析《建筑抗震设计规范 (GB50011-2001)》中有关场地类别划分和地震动反应谱特征周期调整的规定, 并结合已有的研究成果, 可发现存在以下有待进一步研究的问题:

(1) 从直观上看, 规范中不同类别场地的地震影响系数幅值相同, 即规范没有考虑地震动峰值加速度或反应谱 (放大系数谱) 平台值的场地调整。不同类别场地地震影响系数形状参数的水平段起始周期都是 0.1s, 而 0.1s 以下的直线下降段属人为连线。

(2) 规范中场地类别划分和表 3 中的特征周期分组似乎存在一些不完全协调之处。如 III 类场地规定, 当 $250 \geq v_{se} > 140 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和场地厚度大于 50m 时, 被划分为 III 类场地。此时根据 $T=4H/V$ (其中: T 为场地的基本卓越周期; H 为场地厚度; V 为场地的平均剪切波速), 可以得到 III 类场地的最小卓越周期为 0.8s, 而在表 3 中的特征周期分组中, III 类场地的最大卓越周期为 0.65s。

(3) 对于场地土类别划分, 取地表以下 20m 深度范围内的沉积土层为受测对象, 而在 20m 深度范围内, 填土层所占比重较大, 场地土层等效剪切波速往往较大程度地依赖于填土层的波速值, 尤其是在填土层实测波速存在一定变幅时, 其微小的变动都会影响到场地类别

定性，因此在参照表 1 确定场地类别时，难度较大。

(4) 已有研究表明（吴健等，2006），规范中的特征周期取值在不同程度上小于实际场地情况的统计平均值。

(5) 已有研究还表明（郭迅等，2000；吕悦军等，2004；彭艳菊等，2004），对于场地地表下 20m 存在较软弱的细砂层时，其波速值较低，而在划分场地分类时，只计及地表 20m 内的土层，可能无法考虑回填土层下的海泥和沉积土形成的软弱层，显然不够合理。

2 场地条件对地震动峰值的影响

众所周知，场地条件对地震动的幅值、频谱都有显著的影响，美国抗震设计规范（NEHRP 规范）中，使用 F_a 和 F_v 两个场地系数，同时考虑场地条件对地震动峰值加速度和特征周期的影响（Building Seismic Safety Council, 2004）。而在我国现行的抗震设计规范中，仅考虑了反应谱特征周期随场地条件的调整，没有对地震动的幅值（注：规范中称地震影响系数最大值）进行调整。针对场地条件、土层结构（包括覆盖层厚度）、地震动水平等因素对加速度峰值的放大效应及其统计特点，许多学者开展了一系列的研究。

2.1 不同场地条件对地震动峰值加速度的影响

李小军等（2001a；2001b）基于 188 个工程场地计算剖面模型及场地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，得到的场地条件对地震动峰值加速度的放大倍数 K_a 特征及变化规律如下：① I 类场地的 K_a 几乎不随地震动强度变化，且其值略大于 1.0；② II 类、III 类和 IV 类场地的 K_a 均随地震动强度加大而明显减小，但 II 类场地的 K_a 明显大于 1.0，特别是在地震动强度较小时，这说明 II 类场地对峰值加速度有明显的放大作用；③ III 类和 IV 类场地的 K_a 明显小于 1.0，特别是在地震动强度较大时，且 IV 类比 III 类小，这说明 III 类和 IV 类场地对峰值加速度有明显的减小作用。根据上述计算结果，建议的场地系数 K_a 值如表 4 所示。从表 4 可见，将基岩场地系数 K_a 全部取 1.0，即以此为修正的基础；II 类场地最大，数值在 1.18—1.5 之间；III 类和 IV 类场地依次减小。值得注意的是，当基岩场地的地震动达到 0.15g 时，III 类场地上的地震动就不再放大了；IV 类场地的 K_a 值全部小于 1.0，即软土地地上的地震动总是比基岩场地上的地震动小。

表 4 李小军等（2001a；2001b）建议的地震动场地系数 K_a

Table 4 The site seismic coefficient K_a values (from Li, 2001a; 2001b)

场地类别	地震动峰值加速度 A_{max} (g)					
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
I	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
II	1.50	1.45	1.40	1.33	1.25	1.18
III	1.10	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60
IV	0.80	0.70	0.60	0.55	0.50	0.45

2.2 土层结构对地震动峰值加速度的影响

2.2.1 覆盖层厚度的影响

理论分析和实测的结果都证明，基岩之上的覆盖土层对基岩输入地震动有明显的放大作

用,一般峰值加速度被放大 2—4 倍。李秀领(2003)在研究我国数百个钻孔资料的基础上,结合场地的工程地质条件,选取并构造了若干个有代表性的场地剖面,在随机选取 3 条幅值不同的强震记录作为基岩地震动输入后,利用土层地震反应分析的等效线性化波动分析方法,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,这说明覆盖土层对自由场地的峰值加速度的放大作用是有限的。

2.2.2 软弱层的影响

软弱层对地震动的影响是近年来研究的热点课题之一。目前的总体认识是,软弱层对地震动的影响取决于软弱层本身的厚度、赋存的层位、覆盖土层的厚度以及基岩输入地震动的特征。通常情况下,软弱层埋深越深,厚度越大,隔震效果越显著,即地表峰值加速度越小,归一化反应谱的特征周期越大;当软弱夹层的厚度小于 0.1m 时,对地表地震动的影响几乎可以忽略。李秀领(2003)对软弱层进行了较详细的研究,结果表明,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; 2003b; 2003c; 2004)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的影响,得到了一些有意义的结论:

(1) 在不存在软弱夹层的条件下,就计算的场地而言,覆盖层对地表加速度峰值的放大作用并不是随着覆盖层厚度的增加而无限增大,当覆盖层在 15m 左右放大作用达到极限;大于 15m 时,放大作用逐步减小。当覆盖层厚度大于 30m 时,其变化对地表加速度峰值的影响不大。

(2) 软表层对地表加速度峰值的放大作用与输入的地震动有关,输入地震动的强度越小,放大的效果越显著。随着软表层厚度的增加,地表加速度峰值减小,当软表层的厚度大于 14m 左右时,地表加速度峰值趋于稳定,基本不受表层厚度的影响;当软表层的厚度大于 6m 时,软表层的存在,在一定程度上起到了减震作用,放大系数小于 1。

(3) 不同埋深处软夹层厚度的影响。从计算结果来看,软弱夹层的厚度对地表加速度峰值有影响,而不同深度处的软夹层厚度对地表加速度峰值也有显著影响。与正常剖面相比,软夹层使地表峰值加速度 A_{\max} 值减小。但当软夹层位于下部时,厚度变化的影响更大。当软弱夹层在剖面的上部时,地表峰值加速度 A_{\max} 值随软弱夹层厚度的增大而减小;当软弱夹层在剖面的下部,软弱夹层厚度大于一定值(6m 左右)时,地表峰值加速度 A_{\max} 值随 H 的变化幅度小。

2.3 不同地震动输入对地震动峰值加速度的影响

在不同地震动水平下,场地土对基岩加速度峰值的放大效应研究方面,冯希杰等(2001)收集了 50 余个工程场地土层地震反应的计算结果,并按上述工程场地的综合分类,分别统计了每个场地 50 年 63%、10%、2% 三种超越概率水平下的地表峰值加速度与各自对应的基岩峰值加速度的比值。结果表明,场地条件对地面地震动的影响比较明显,主要体现在不同场地条件、不同地震动水平方面,其地表峰值加速度相对于基岩峰值加速度的放大倍数也不一样。总的来说,岩石类地基、碎石类地基的放大倍数较黄土地基、粘性土地基的放大倍数要稍大一些,同一类地基 2% 超越概率水平的放大倍数比 10% 和 63% 两种超越概率水平的放大

倍数要小一些。放大倍数在 1.0—2.0 之间变化, 且多数在 1.0—1.5 之间, 这同已有的强震加速度观测结果相一致。

吕悦军等(2004)、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, 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。计算结果表明, 50 年超越概率 63%、10%、2% 地表峰值加速度的放大倍数, 分别在 1.50—2.00、1.16—1.37、1.03—1.14 之间, 平均为 1.73、1.27、1.09。从中可以看出, 随着输入地震动的增大, 场地土对地震动的放大效应不是线性变化的, 因为峰值加速度达到某一较大的值以后, 受软弱场地土的非线性变形特性影响, 导致大量地震波能量的耗散, 使得地表地震动幅值降低, 对于发生概率较小的地震动, 场地放大作用减小。

3 场地条件对地震动反应谱的影响

如前所述, 现行的《建筑抗震设计规范(GB50011—2001)》按场地类别和设计地震分组, 给出了地震动反应谱特征周期的调整方案。这种考虑是对场地土层地震效应的粗略划分, 反映了特征周期的一般变化趋势。场地条件对地震动反应谱的影响因素, 主要集中在覆盖层厚度、软弱土层、局部地形地貌等方面, 许多学者对这些影响因素开展了一系列卓有成效的研究。

3.1 覆盖层厚度对地震动反应谱的影响

将地震波简化为剪切波, 剪切波从基岩上表面开始, 垂直射到土层至地表所走过的这段距离称为覆盖层厚度。覆盖层厚度对地震动的影响, 早在 1923 年日本关东大地震时就被发现。理论分析和实测结果都已证明, 覆盖土层越厚, 反应谱长周期频谱越显著, 特征周期越长。

李秀领(2003)在研究了我国数百个钻孔资料的基础上, 计算了不同覆盖层厚度场地的地表峰值加速度和归一化的反应谱。计算结果表明: 归一化反应谱的特征周期与覆盖土层厚度也存在一定的关系, 在覆盖土层厚度小于 15m 时, 反应谱特征周期几乎不受覆盖土层厚度的影响; 而当覆盖土层厚度大于 15m 时, 随着覆盖土层厚度的增加, 反应谱特征周期增大。

另外, 基岩面选取的不确定性也是影响反应谱的重要因素, 袁一凡(1992)提出, 在实际工作中取不同深度的界面作为假想基岩面, 对地震动峰值和反应谱是有影响的。一般说来, 假想基岩面越深, 受土层非线性吸收影响, 反应谱长周期成分增大, 特征周期越大, 谱形越“宽”。韦晓等(1994)通过等效线性化水平成层一维模型的地震反应数值分析, 考虑到结构自振周期的影响, 并合理准确地选取了基岩面, 其研究表明: 由于地表土与上部建筑结构的共振效应, 对于周期大于 1s 的重要结构, 应当采用真实基岩为地震动输入面; 而对于周期小于 1s 的一般性建筑结构, 则选择剪切波速为 $500\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的土层为输入面是可行的。

假想基岩面的选取与上部土层是密不可分的, 基岩面选取的不确定性将直接影响到覆盖层的厚度, 由此也将影响到地震动反应谱。在我国工程场地地震安全性评价工作中, 对于 II 级、III 级工作, 取剪切波速为 $500\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的土层为基岩面(相当于坚硬土层的剪切波速); 对 I 级工作, 取 $700\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的土层为基岩面(接近于基岩的经验数据)。然而受经费和钻探条件的限制, 以及工程场地自然因素的影响(如下伏基岩过深)还难以真实地反映基岩面, 为此, 应结合强震观测的结果和有效地选取土层波速, 来寻找基岩的剪切波速对设计反应谱特征周期以及平台值的影响规律, 以便解决实际工程问题。

3.2 软弱土层对地震动反应谱的影响

《建筑抗震设计规范(GB50011-2001)》以 20m 内土层等效剪切波速来确定场地类别, 这

对于软弱层的考虑是不够的。目前,土层结构对反应谱影响的研究重点,是软弱夹层在土层中所处的位置和在各土层不同的排列顺序对反应谱的影响,许多学者建议把软弱土层对反应谱的影响逐步应用到抗震设计规范中,以便更合理地进行抗震设计。王广军(1992)就软弱场地特征对反应谱影响进行了调整,并将其应用于抗震设计规范。黄玉龙等(2002)对香港的软泥夹层场地进行了地震反应分析,并提出了分别适用于场地有、无软夹层时的归一化设计反应谱。薄景山等(2003a)系统地分析了有软弱层存在的情况,得出了设计反应谱参数值的变化规律,并总结出在不同土层结构下软弱层的埋深以及层厚对反应谱的影响,统计出归一化反应谱的平台值和特征周期,并与现行抗震设计规范进行了详细的比较后,对场地分类的进一步研究给出了展望。李小军等(2001a; 2001b)通过一维波动等效线性化分析方法,对188个工程场地计算剖面进行了计算,得到了4类场地条件下对地震动影响的特点及规律,并给出了每一类场地地震动参数变化的经验关系。薄景山等(2004)对土层结构尤其是软夹层所在位置进行了更进一步的研究,给出了不同场地情况下不同夹层在不同位置的反应谱修正系数。

从目前的研究成果来看,我国在软弱土层对反应谱影响的研究方面已经处于一个比较成熟的阶段,其核心的场地效应问题已纳入了规范。《中国地震动参数区划图(GB18306-2001)》就以平均场地为参考,给出了反应谱的特征周期值和平台值,而其他场地的地震动参数可由土层调整表进行换算。但从场地分类的精度上看,目前的分类标准还不够完善。

对地震动影响的场地条件因素还有局部地形和地貌。目前,关于地形和地貌对地震动影响较统一的认识是:不规则地形的顶部较底部的地震动大;形态变化急剧的部位较缓慢渐变的地震动大。基于这样的认识,《建筑抗震设计规范(GB50011-2001)》规定:条状突出的山嘴、高耸孤立的山丘、非岩质的陡坡、河岸和边坡的边缘等为建筑抗震的不利地段,这些地形在场地选择时应该尽量避免。

4 问题与展望

关于场地条件对峰值加速度和反应谱特征周期的影响是一个非常复杂的问题,其实质是要预估不同场地条件对输入地震波的强度和频率特性的影响。首先,如何确定输入基准面或基岩面就是很困难的,在我国现行的抗震设计规范中,将剪切波速大于 $500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的硬土层定义为基岩,可以说是迁就钻探深度的一种粗略的处理方法。而在美国的建筑抗震设计规范中,剪切波速大于 $760 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的地层才算作是软基岩,而软基岩和硬基岩对地震波的反应特征也是有区别的。另外,土层的剪切波速分布千变万化,如何将其对反应谱的影响准确的加以分类,同样也是很困难的。在各国的抗震设计规范中,尽管都承认考虑场地的重要性,但是可以说都还没有找到很满意的实施方法。

针对我国现行抗震设计规范中存在的问题,以及对影响地震动参数的场地条件因素的分析,本文认为,存在以下有待进一步研究的问题。

4.1 场地分类新方法的研究

在我国现行的抗震设计规范中,对于场地土类别划分取地表以下20m深度范围内的沉积土层为受测对象,等效剪切波速往往较大程度地依赖于填土层的波速值,其微小变动有时都会影响到场地类别的定性,在确定场地类别时,难度较大。另一方面,对于场地地表下20m存在较软弱的细砂层,其波速值较低,在作场地分类时,只计及地表20m内的土层,可能无法考虑到回填土层下的海泥和沉积土所形成的软弱层,显然不够合理。因此,应进一步开展

确定场地分类新方法的研究。

场地土的形成时代、地质环境对地震动效应有重要的影响,尤其是地质体的时代、沉积环境、沉积层分布厚度、沉积物的粒度和密实度、下覆基岩特性等第四纪特征。因此,可利用丰富的地质资料,结合剪切波速等场地土的物理力学参数,对场地条件进行更加细化的研究,给出新的场地类别定义和划分方法,用来弥补现有场地分类方法过于简单的不足。近年来,开展的一些研究已经证实了上述构想的可行性。Wills 等(2000)根据地质体年代、土层的粒度、硬度、断裂的空间分布特征等,进行了地质特征分区,并分析了美国加利福尼亚地区剪切波速度分布特点,在 NEHRP 场地分类的基础上,又新增加了 3 类场地,将场地划分为 7 类,给出了各类场地的岩性、时代特征以及剪切波速(V_{30})的分布区间,同时还给出了不同类型场地的剪切波速随深度的分布规律。2006 年,Wills 等(2006)进一步根据地质单元的时代、沉积层分布厚度、下覆基岩特征等,并结合钻孔剪切波速资料,将美国加州场地划分为 19 类,给出了每类场地的地质特征、剪切波速的均值(V_{30}),以及钻孔剖面剪切波速随深度的分布。结果证明,所划分的场地类别对地震动参数的影响具有较好的规律性。该方法可以充分利用研究区地质特征和工程地质资料,对研究区进行相对细致的场地类别分类,依据场地类别与地震动参数之间的关系,可对地震动参数进行调整,从而得到与场地类别相关的地震动参数。同时,对于缺乏剪切波速的地区,可以根据地质特征的类比进行场地类别的判定。

4.2 影响地震动参数的场地条件分析

场地对地震动反应谱的影响因素主要集中在以下几个方面:土层结构、覆盖层厚度、局部地质地形和地貌等因素。

目前上述几个因素对地震动参数影响的研究主要集中在模拟计算方法上,建立实际的土层剖面或构建虚拟的剖面,采用地震反应分析计算场地地表的地震动,并与输入面的地震动进行比较,然后将二者的差异作为场地的影响。在缺乏强震记录的情况下,上述方法不失为一种可行的研究方法,但其合理性还无法进行验证。随着强震记录的积累,尤其是在美国等地的垂向地震台阵的建立,已经积累了部分记录,应根据实际强震记录来研究场地对地震动的影响,至少,应该以强震记录来验证室内模拟计算的真实性、合理性。同时,利用强震记录研究局部场地影响,还应考虑到震源机制、传播路径的影响,宜采用同一个地震中的同一地点的垂向记录是最可靠的资料。

4.3 地震动参数随场地条件调整的方法

场地条件不仅对地震反应谱特征周期有影响,而且对地震动峰值的影响同样也很大。因此,在未来的地震区划研究中,应考虑根据场地条件同时调整地震动反应谱特征周期和峰值加速度。研究地震动参数值随不同的场地条件控制参数,如场地类别、软硬土夹层和地形参数变化的定量关系,给出地震动参数值随场地条件的综合调整方法,包括地震动峰值、反应谱平台高度和反应谱拐点周期值的调整方法和调整系数关系。

参考文献

- 薄景山,李秀领,李山有,2003a. 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,2003b. 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.

- 薄景山, 李秀领, 刘红帅, 2003c. 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, 翟庆生, 吴兆营等, 2004. 三种土层结构反应谱特征周期的统计分析. 地震工程与工程振动, **24** (3): 124—129.
- 陈国兴, 2003. 中国建筑抗震设计规范的演变与展望. 防灾减灾工程学报, **23** (1): 102—113.
- 冯希杰, 金学申, 2001. 场地土对基岩峰值加速度放大效应分析. 工程地质学报, **9** (4): 385—388.
- 郭迅, 黄玉龙, 袁一凡, 2000. 香港场地类别划分的初步研究. 世界地震工程, **16** (1): 51—60.
- 胡聿贤, 孙平善等, 1980. 场地条件对震害和地震动的影响. 地震工程与工程振动, **1** (1): 1—9.
- 黄玉龙, 郭迅, 袁一凡, 2002. 软泥夹层对香港软土地震反应的影响. 自然灾害学报, **9** (1): 109—116.
- 李小军, 彭青, 2001a. 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.
- 李小军, 彭青, 刘文忠, 2001b. 设计地震动参数确定中的场地影响考虑. 世界地震工程, **17** (4): 34—41.
- 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.
- 吕悦军, 唐荣余, 彭艳菊, 2004. 烟台海岸软土地场特征及对地震动参数的影响. 中国地震, **20** (4): 323—329.
- 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.
- 王广军, 1992. 场地条件影响和抗震设计反应谱的若干问题. 工程抗震, 3期: 28—32.
- 韦晓, 袁一凡, 1994. 土地震反应分析中输入界面的选取. 见: 第四届全国地震工程会议论文集, 哈尔滨: 115—120.
- 吴健, 高孟潭, 2006. 场地相关设计反应谱特征周期的统计分析. 中国地震, **20** (3): 263—268.
- 袁一凡, 1992. 场地影响理论中的几个问题. 见: 地震工程研究论文集——纪念胡聿贤教授从事科学研究40年, 北京: 地震出版社.
- 周锡元, 王广军, 苏经宇, 1991. 场地·地基·设计地震. 北京: 地震出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫局, 2001. 中国地震动参数区划图 (GB18306-2001). 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫局, 2001. 建筑抗震设计规范 (GB50011-2001). 北京: 中国建筑工业出版社.
- Building Seismic Safety Council, 1998. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (1997 Edition). FEMA 302/303. Washington DC: Building Seismic Safety Council.
- Building Seismic Safety Council, 2004. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (2003 edition). FEMA 450/451. Washington DC: Building Seismic Safety Council.
- Wills C.J. and Clahan K.B., 2000. Developing a map of geologically defined site-condition categories for California. Bull. Seism. Soc. Am., **96** (4A): 1483—1501.
- Wills C.J., Petersen M., Bryant W.A. et al., 2006. A site-condition map for California based on geology and shear-wave velocity. Bull. Seism. Soc. Am., **90** (6B): 187—208.

Some Key Problems about Site Effects on Seismic Ground Motion Parameters

Lu Yuejun^{1,2)}, Peng Yanju^{1,2)}, Lan Jingyan²⁾ and Meng Xiaohong¹⁾

1) China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

Abstract The site condition has great effects on both magnitude and frequency of seismic ground motion spectrum, such as, peak acceleration and characteristic period of response spectrum. The variations of peak acceleration and flat maximum of design spectrum have not been taken into consideration in current seismic code in China. In this paper the site classification method currently being used in China is introduced, and the adjustment of ground motion parameters on different sites is discussed. Analysis on effects of site soil layer formation, thickness of overlay soil layer on peak ground motion and response spectrum is presented. Finally, some problems required further study in the future are pointed out, such as site classification, site condition effects on ground motion and adjustments of ground motion parameters.

Key words: Site condition; Seismic ground motion; Seismic code; Site effect