

动剪切模量比与剪切波速对地震动影响及等量关系研究

孙 锐¹, 袁晓铭¹, 刘晓健^{1, 2}

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘 要: 采用数值模拟方法, 研究动剪切模量比和剪切波速对地震动的影响问题, 并以对地表加速度反应谱影响为标准研究动剪切模量比变化与剪切波速变化间的对等关系, 同时建立了等价关系式, 分析中考虑了场地类别、场地遭遇地震强度和地震输入波型的影响。结果表明: ①动剪切模量比误差和剪切波速误差对地震动都有着重要影响, 在土体强非线性和软弱场地中影响更为强烈, 实测的动剪切模量比和剪切波速比真实值低时较比真实值高时对地表反应谱影响更大, 三类场地 0.1g 地震输入时动剪切模量比 6% 误差或剪切波速 25% 误差的影响已经不可忽视; ②对不同的场地类别、场地地震烈度和地震输入波情况, 动剪切模量比单独变化与剪切波速单独变化对反应谱的影响都具有对等关系; ③动剪切模量比误差对地震动的影响程度要大于剪切波速误差, 二者对地表反应谱的敏感性相差 3~5 倍, 绝对误差相同时动剪切模量比降低情况下与剪切波速的敏感程度相差更大。

关键词: 动剪切模量比; 剪切波速; 地震动; 对等关系

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)08-1267-08

作者简介: 孙 锐(1972-), 女, 研究员, 博士, 主要从事岩土工程研究。E-mail: iemsr@163.com。

Effects of dynamic shear modulus ratio and velocity on surface ground motion and their equivalent relations

SUN Rui¹, YUAN Xiao-ming¹, LIU Xiao-jian^{1, 2}

(1. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China; 2. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The effects of the dynamic shear modulus ratio and the shear wave velocity on the surface ground motion and their equivalent effect relations with surface acceleration spectra are investigated by use of the numerical simulation method considering site types, incident seismic intensities and incident seismic wave forms. The results indicate that the errors of dynamic shear modulus ratio and the shear wave velocity both have strong effects on the surface ground motion. The effects of the dynamic shear modulus ratio and the shear wave velocity are more significant for strong nonlinear property in the weak site as well as for the cases when the two parameters by the tests are lower than the actual values, e.g., 6% error of the dynamic shear modulus ratio and 25% error of the shear wave velocity for 0.1g incidence in site III can not be neglected. The effects of the dynamic shear modulus ratio alone and the shear wave velocity alone on the spectra can be expressed by the equivalent relationships for different site types, incident seismic intensities and incident seismic wave forms. The extent of the effects of the dynamic shear modulus ratio on the spectra is much larger than the shear wave velocity by 3~5 times and the difference of the sensitive extent between the two parameters for the decreasing of the dynamic shear modulus ratio is more obvious than that of the cases for the increasing of the dynamic shear modulus ratio.

Key words: dynamic shear modulus ratio; shear wave velocity; surface ground motion; equivalent relation

0 引 言

地震中土体对上部结构破坏的影响主要表现在两个方面: ①作为持力材料, 其稳定性和变形对上部工程结构地震安全性有重要影响; ②作为波的传播媒介, 其动力特性对地震地面运动(地震动)进而对工程结构振动状况有重要影响。大量的震害资料表明^[1], 地震中土体丧失稳定性和大变形形成的地基失效在工程

结构破坏中所占比例一般并不是很大, 相对而言土层特性引起地震动的变化进而导致结构振动不同的现象则相当普遍。

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAC13B01); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2007CB714201); 黑龙江省自然科学基金项目(E200603)

收稿日期: 2008-04-13

随着我国工程场地地震安全性评价和小区划工作的日益普及^[2], 土层特性引起地震动变化的研究日益重要。目前土层特性对地震动影响研究应用最广泛的成果, 是按抗震规范确定场地基本类别, 然后取不同的反应谱进行结构抗震设计。但这一方法, 仅仅适用于普通的工业与民用建筑; 对于重大工程, 其抗震设计方案和工程造价对地震动相当敏感, 此时这一方法显得非常粗糙, 预测实际土层下地震动就成为必须进行的计算分析工作。

实际土层地震动计算中, 按规定需要通过实际测试得到土层动力特性, 其中最重要的两个参数是土层的剪切波速及剪切模量比随剪应变变化的非线性关系^[2]。实际工作中由于土的变异性 and 实验技术的局限, 这两个参数存在误差, 都会对土层地震反应的计算结果产生重要影响。深入开展这两个参数对地震动的影响研究, 对提高工程场地地震动预测水平和精度具有重要意义。关于土层剪切波速及动剪切模量比这两个参数对地震动的影响问题, 近来已经有一些分析^[3-8], 但都是对两个参数独立进行的, 或者单独分析土层的剪切波速对地震动的影响, 或者单独研究动剪切模量比的变化对地震动的作用。事实上, 这两个参数测试误差同时存在, 对地震动的影响应是一种耦合作用, 二者须同时考虑。只是这一问题很复杂, 进一步的工作目前还需要进行较多的铺垫。首先, 应从理论上进一步深化土动力特性的各个参数与地震动之间关系的认识, 并了解各参数对地震动的敏感性和影响程度及比较结果, 以利于今后进行综合分析。其次, 就以往关于动剪切模量比对地震动影响的研究成果, 因岩土工程师对反应谱概念不清, 而工程地震技术人员对动剪切模量比的概念不熟, 造成了已有研究成果的理解和推广应用上的困难, 因此需要利用大家都熟悉的剪切波速为参照物进行类比分析, 以增强双方科技人员对此问题的认识。另外, 动剪切模量比与剪切波速的测试水平对土层地震动预测结果影响很大, 其精度的提高最终依赖于相关测试技术的完善改进, 掌握动剪切模量比与剪切波速对地震动影响的敏感程度, 将有利于这两种不同测试技术的协调发展。

本文采用数值模拟方法, 研究动剪切模量比和剪切波速对地震动的影响问题。以对反应谱影响为衡量标准, 建立动剪切模量比变化与剪切波速变化间的对等关系, 以期对以上3个方面的工作起到促进作用。

1 分析方法及计算工况

1.1 分析方法

土的动剪切模量比和剪切波速都是土的基本指

标, 但动剪切模量比属于土的动力非线性性能, 而剪切波速是小应变弹性范围的力学性质。从现有的研究成果看, 动剪切模量比非线性高一些与土层波速大一些, 对地表加速度峰值和反应谱特征周期的影响趋势大体相同, 反之亦然, 即定性上二者对地震动的影响应该是相互关联的。

为获得定量的结果, 本文采用数值模拟方法, 选取两种典型场地模型、3个烈度4种实际地震记录作为输入进行土层地震反应分析计算。对每种场地模型, 选取一个波速分布和一个动剪切模量比的非线性曲线为基准, 称为基准工况, 对每个地震输入计算基准工况的地表加速度反应谱, 定义为基准反应谱。其次, 令动剪切模量比非线性曲线围绕基准线做若干上下变化, 分别计算出地表加速度反应谱。然后, 与每个动剪切模量比变化相对应, 在基准工况的基础上令剪切波速不断变化得到地表加速度反应谱, 当二者得到的反应谱基本一致时, 定义此时的剪切波速变化与动剪切模量比变化为等量关系。

这样, 本文所要建立的动剪切模量比与剪切波速的等量关系, 考虑了场地类别、场地烈度和地震输入波等几个基本要素不同组合的影响, 共包括2种场地、4个地震波和3个加速度输入峰值, 加之7组动剪切模量比及至少7组的剪切波速指标, 总计至少1176种工况, 其中6组的剪切波速指标是通过数值试验寻找到的, 因此实际计算量要远大于此。

1.2 计算程序

土层地震反应分析计算中, 采用在我国地震安全性评价和地震小区划研究工作中广泛使用的一维土层等效线性化程序 LSSRLI-1^[2]。LSSRLI-1 程序是在频域线性波动分析方法的基础上利用非线性动力方程的等效线性化处理技术给出的, 程序考虑了两个基本假设: ①覆盖土层和下卧基岩为力学性质竖向成层变化, 横向为均匀的半无限空间; ②地表水平地震动主要是由来自基岩的剪切地震波竖直上传造成的。等效线性化土层地震反应分析方法可以分成两部分: ①线性方程的频域波动求解; ②土体非线性的等效线性化处理。

1.3 计算剖面及输入波

实际土层剖面十分复杂, 这里以两个简化的剖面代表常见的二、三类工程场地作为计算模型, 如图1所示, 其中底部为基岩或剪切波速大于500 m/s的硬土层。基岩输入4种常用的实际地震记录, 如图2所示, 分别为 El-Centro 波、Taft 波、迁安波和北京饭店波。输入加速度峰值为 98.1gal, 196.2gal 和 392.4gal, 分别代表场地遭受七、八和九等3个地震烈度的情况。

1.4 动剪切模量比参数

为简化计算, 土层计算剖面中各点土的动剪切模

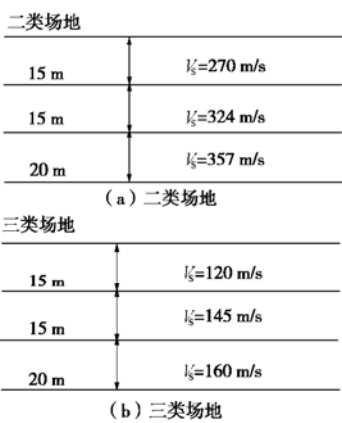


图 1 基准计算剖面
Fig. 1 Basic profile for analysis

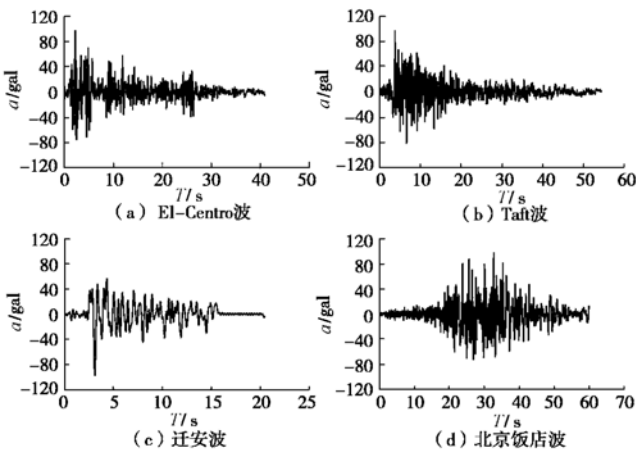


图 2 基岩输入的地震波
Fig. 2 Input waves on the bedrock

量比与剪应变关系的基准线以及各点阻尼比均取同样的值, 8 个特征应变下的值如表 1 所示, 其它应变下按双曲线插值, 并且在所有计算中取阻尼比与剪应变关系不变。

表 1 动剪切模量比和阻尼比基准值

ratio		
应变值	模量比	阻尼比
5×10^{-6}	0.998	0.007
1×10^{-5}	0.985	0.010
5×10^{-5}	0.930	0.014
1×10^{-4}	0.869	0.031
5×10^{-4}	0.571	0.074
1×10^{-3}	0.400	0.096
5×10^{-3}	0.118	0.127
1×10^{-2}	0.062	0.133

在基准工况的基础上, 剪应变 10^{-4} 处动剪切模量比误差上下浮动 3%, 6% 和 9%, 其它各应变点所对应模量比也进行相应调整, 动剪切模量比的基准值及变化曲线如图 3 所示。选择以剪应变 10^{-4} 为基准调整动剪切模量比是因为在进行土层地震反应分析时一般是

以此应变点对应的剪切模量为初始迭代模量, 它是一个具有代表意义的特征量和控制点。为简化计, 下面均以此点动剪切模量比的变化代表动剪切模量比非线性的增大或降低。计算中各土层取相同的动剪切模量比与剪应变关系。从图 3 可见, 动剪切模量比在剪应变 10^{-4} 处上下 3% 误差是很容易出现的, 而 6% 和 9% 的误差如果不是认真试验的话也容易出现。

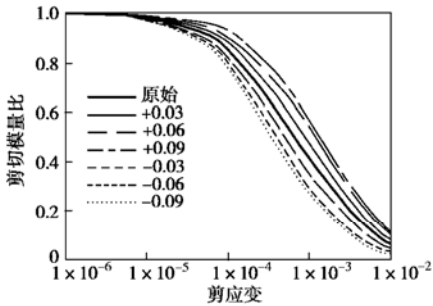


图 3 动剪切模量比的基准值及误差变化曲线
Fig. 3 Basic and variable relationships between shear modulus ratio and shear strain

1.5 剪切波速参数

图 1 的土层剖面为基准计算模型, 剪切波速随深度增加而增大。进一步, 按规范^[9]计算, 图 1 中二类场地模型的等效剪切波速为 280 m/s, 三类场地模型的等效剪切波速为 130 m/s, 分属二类、三类场地的中间值。除基准工况外, 与动剪切模量比变化具有对等意义的剪切波速变化是通过不断数值试验寻找到的, 计算中各土层剪切波速按同样比例调整。

2 3 种反应谱的对比结果

本节中各图表示的是计算出的地表加速度反应谱的 3 种对比结果: ①是基准工况的反应谱; ②是基准工况下保持剪切波速不变, 动剪切模量比按指定误差变化后的的反应谱; ③是基准工况下保持剪切模量比基准值不变, 令剪切波速不断变化后计算出的反应谱, 要求是与基准工况下动剪切模量比按指定误差变化后的反应谱近似相同。

2.1 二类场地

图 4~6 分别给出了二类场地 El-Centro 波作用时 3 个幅度输入下 3 种反应谱的对比。其中, 粗实线、细实线和细虚线分别与上面的 3 种反应谱对应。图 4 (a) 针对的是动剪切模量比降低 3%, 6%, 9% 的情况及由数值试验得到剪切波速增量的情况, 图 4 (b) 针对的是动剪切模量比增加 3%, 6%, 9% 的情况及对应的剪切波速增量的情况。因篇幅所限, 这里只提供了 El-Centro 波输入下的反应图形, 其它 3 种地震波输入的结果略去。

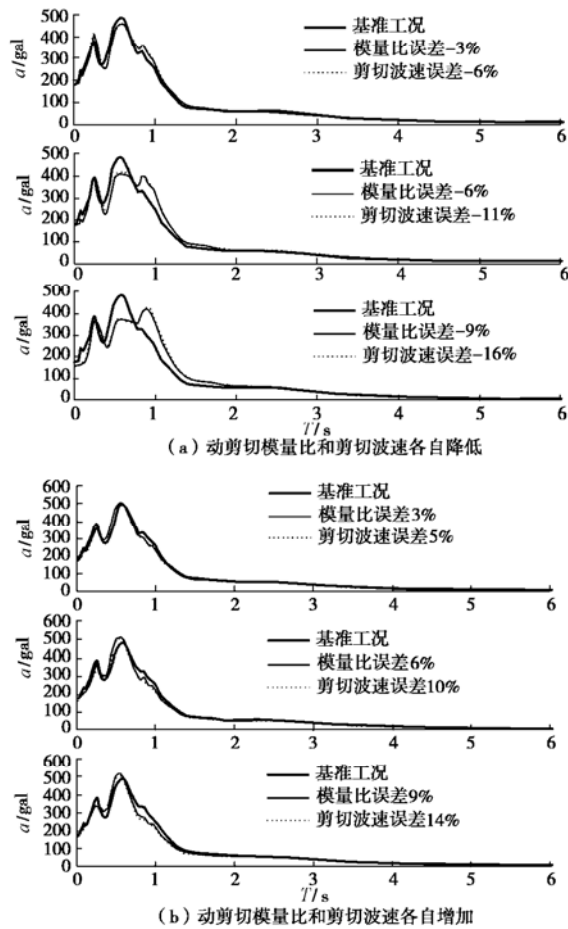


图4 0.1g的El-Centro波输入下二类场地中3种反应谱的对比
Fig. 4 Comparison among three spectra in site II under El-Centro waves with 0.1g amplitude

由图4(a)可见, 0.1g地震作用时, 动剪切模量比非线性分别降低3%, 6%和9%下对地表加速度反应谱有影响, 使地表加速度峰值降低, 反应谱特征周期延长, 且影响随动剪切模量比误差增大而显著增大。而剪切波速分别降低6%, 11%和16%下对反应谱有同样作用。与基准反应谱相比, 动剪切模量比非线性单独降低与剪切波速单独减小, 几个情况下带来的反应谱变化几乎完全重合, 说明二者对反应谱的影响不仅定性相同, 而且定量上存在对等关系。由图4(b)可见, 动剪切模量比非线性单独增加3%, 6%和9%与剪切波速单独增大5%, 10%和14%, 几个情况下带来的反应谱变化也几乎完全重合, 说明此时二者影响也存在对等关系。图4(a)和图4(b)比较, 图4(a)引起的反应谱变化更为显著。这一方面说明实测的动剪切模量比和剪切波速比真实值低时较比真实值高时对地表反应谱的影响更大。从另一个角度, 则说明具有强非线性(动剪切模量比低)和软弱性质(波速低)的土体这两个参数的误差对地表反应谱的影响更强烈。

进一步, 由图5, 6可见, 地震输入为0.2g和0.4g时动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的对等关系依然成立, 但数值方面有些变化。0.2g输入时, 动剪切模量比非线性降低3%, 6%和9%与剪切波速降低11%, 37%和55%对反应谱的影响等价; 非线性增加3%, 6%和9%与剪切波速增加7%, 12%和14%等价。0.4g输入时, 非线性降低3%, 6%和9%与剪切波速降低14%, 30%和40%对等; 非线性增加3%, 6%和9%与剪切波速增加19%, 30%和34%等价。另外, 实测动剪切模量比和剪切波速比真实值低时较比真实值高时对地表反应谱影响更大、具有强非线性和软弱性质土体的动力学参数误差对地表反应谱影响更强烈的现象更加明显。如图5(a)所示, 与0.1g输入下响应不同的是, 地震输入为0.2g和0.4g时, 动剪切模量比3%误差对反应谱的影响尚可以接受, 但对实测动剪切模量比和剪切波速比真实值低的情况, 此时动剪切模量比降低6%误差的影响已经很大, 降低9%误差的影响则相当大。

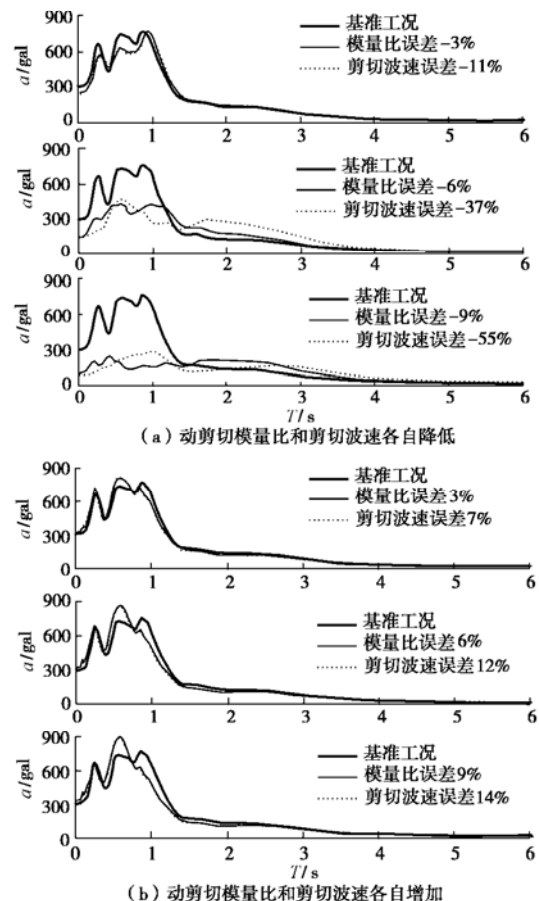


图5 0.2g的El-Centro波输入下二类场地中3种反应谱的对比
Fig. 5 Comparison among three spectra in site II under El-Centro waves with 0.2g amplitude

2.2 三类场地

图7~9分别给出了三类场地迁安波作用时3个幅

度输入下 3 种反应谱的对比, 其中图中的标识和说明同图 4~6。因篇幅所限, 这里仅提供迁安波输入下的反应图形, 其它 3 种地震波输入结果略去。

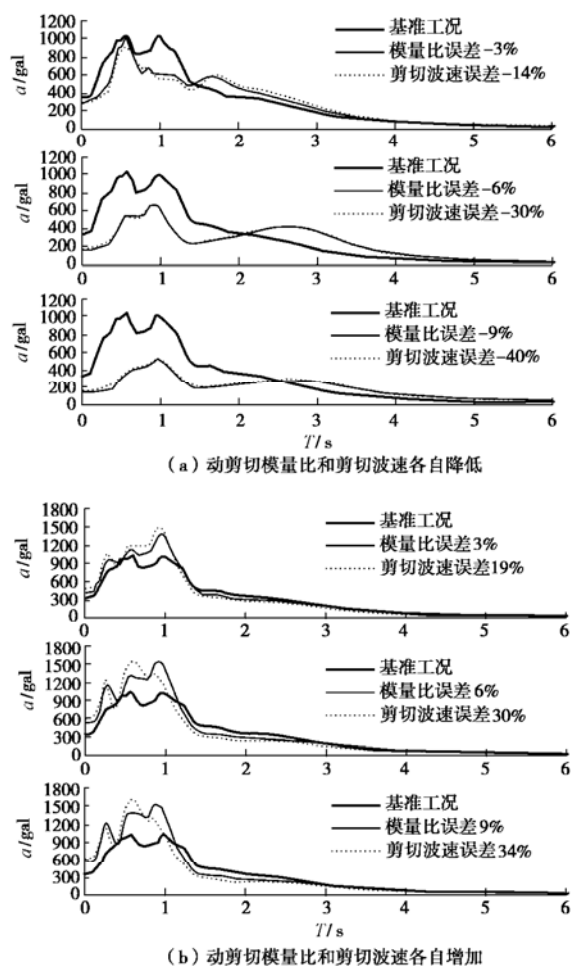


图 6 0.4g 的 El-Centro 波输入下二类场地中 3 种反应谱的对比
Fig. 6 Comparison among three spectra in site II under El-Centro waves with 0.4g amplitude

由图 7~9 可见, 三类场地迁安波作用时动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的对等关系依然成立, 但数值方面有些变化。0.1g 输入时, 非线性降低 3%, 6% 和 9% 与剪切波速降低 14%, 37% 和 42% 对等, 非线性增加 3%, 6% 和 9% 与剪切波速增加 10%, 26% 和 30% 对等; 0.2g 输入时, 非线性降低 3%, 6% 和 9% 与剪切波速降低 15%, 29% 和 45% 对等, 非线性增加 3%, 6% 和 9% 与剪切波速增加 14%, 26% 和 32% 对等; 0.4g 输入时, 非线性降低 3%, 6% 和 9% 与剪切波速降低 16%, 29% 和 41% 的对等关系, 非线性增加 3%, 6% 和 9% 与剪切波速增加 14%, 34% 和 38% 有对等关系。

如图 4 所示, 二类场地 0.1g 输入下动剪切模量比 3% 到 9% 误差对反应谱影响都不显著。与之不同

的是, 如图 7 (a) 所示, 三类场地 0.1g 输入时, 动剪切模量比降低 3% 误差对反应谱的影响尚可接受, 但动剪切模量比降低 6% 和 9% 误差的影响是非常大的, 基本上已经改变了原来谱的性质。同时, 实测动剪切模量比和剪切波速比真实值低时较比真实值高时对地表反应谱影响更大、具有强非线性和软弱性质土体土动力学参数误差对地表反应谱影响更强烈的现象变得更为显著。

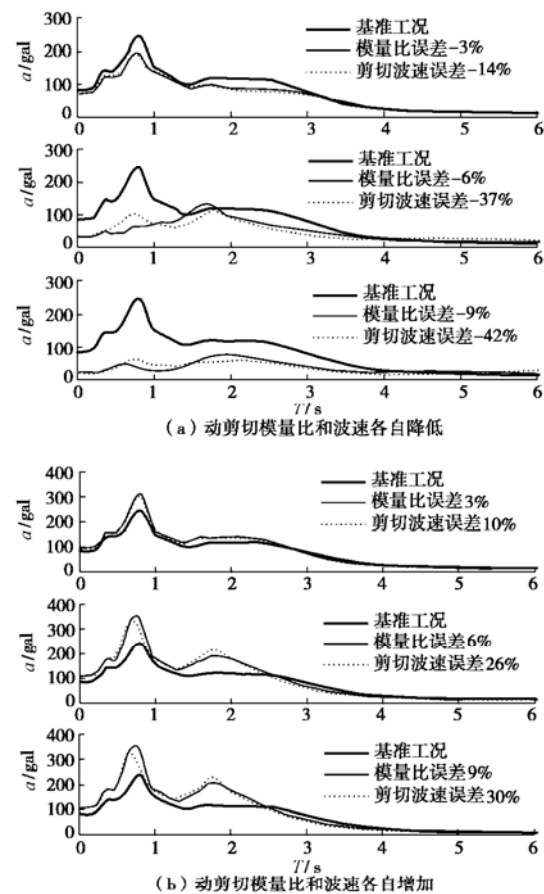
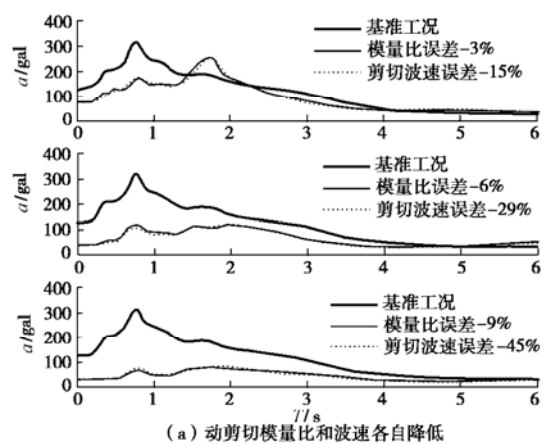


图 7 0.1g 的 迁安波输入下三类场地中 3 种反应谱的对比
Fig. 7 Comparison among three spectra in site III under Qi'an waves with 0.1g amplitude



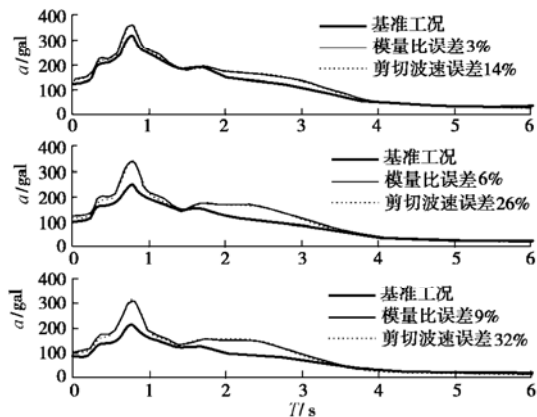


图 8 0.2g 的迁安波输入下三类场地中 3 种反应谱的对比
Fig. 8 Comparison among three spectra in site III under Qi'an waves with 0.2g amplitude

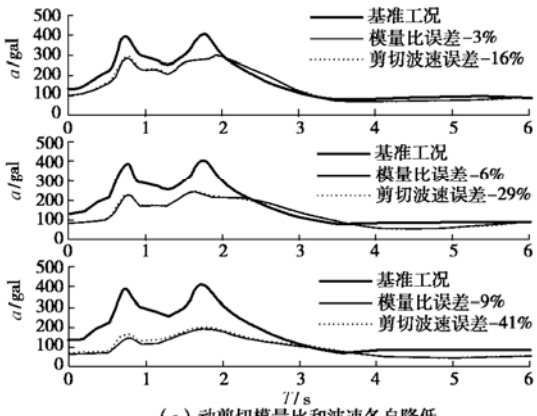


图 9 0.4g 的迁安波输入下三类场地中 3 种反应谱的对比
Fig. 9 Comparison among three spectra in site III under Qi'an waves with 0.4g amplitude

3 等量关系的建立

从上面看到，动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响定量上存在对等关系。由于土的非线性，理论上讲这种对等关系应受场地类别、场地遭遇的地震强度和地震输入波型等因素的影响。将二、三类场地在 3

种地震强度、4 种地震波输入下动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的对等关系曲线分别示于图 10，11。图中 $\Delta G/G_0$ 表示剪应变 10^{-4} 动剪切模量比的相对变化量， $\Delta v/v_0$ 表示剪切波速的相对变化量。

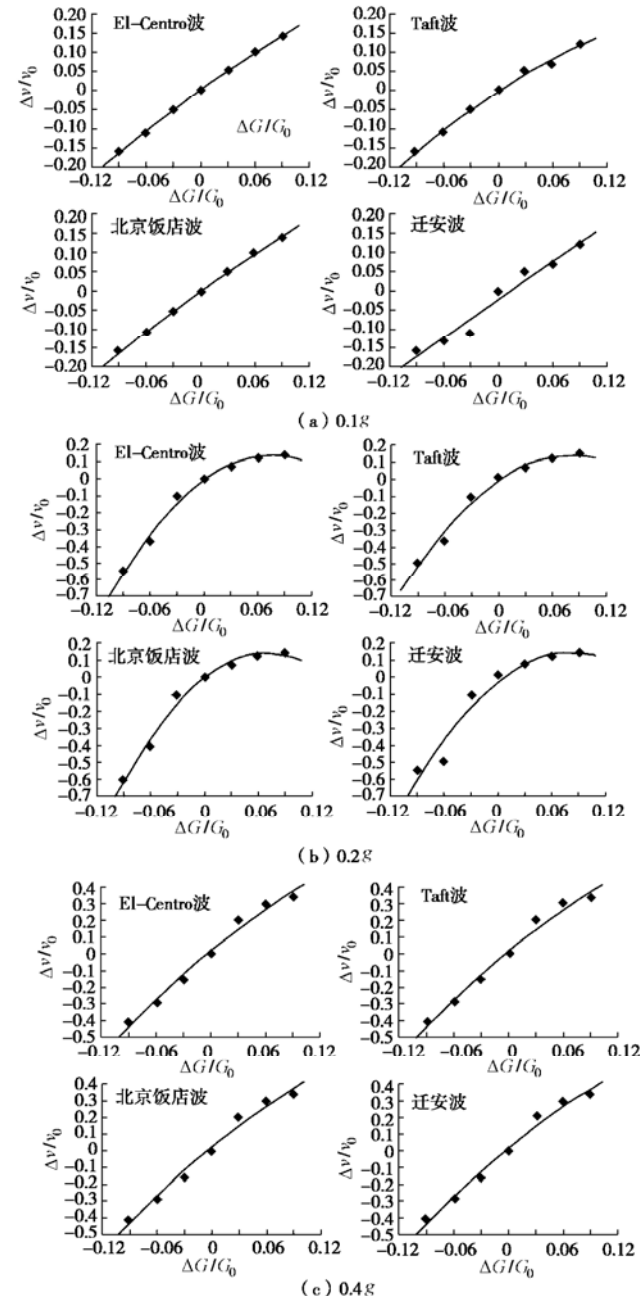


图 10 不同地震强度和不同地震波下二类场地动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的对等关系

Fig. 10 Equivalent effects of dynamic shear modulus ratio and velocity on spectra in site II under different seismic waves with different amplitudes

从图中可见，不同地震强度、不同地震波下动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响都有良好的对等关系，只是具体形式有些差异。

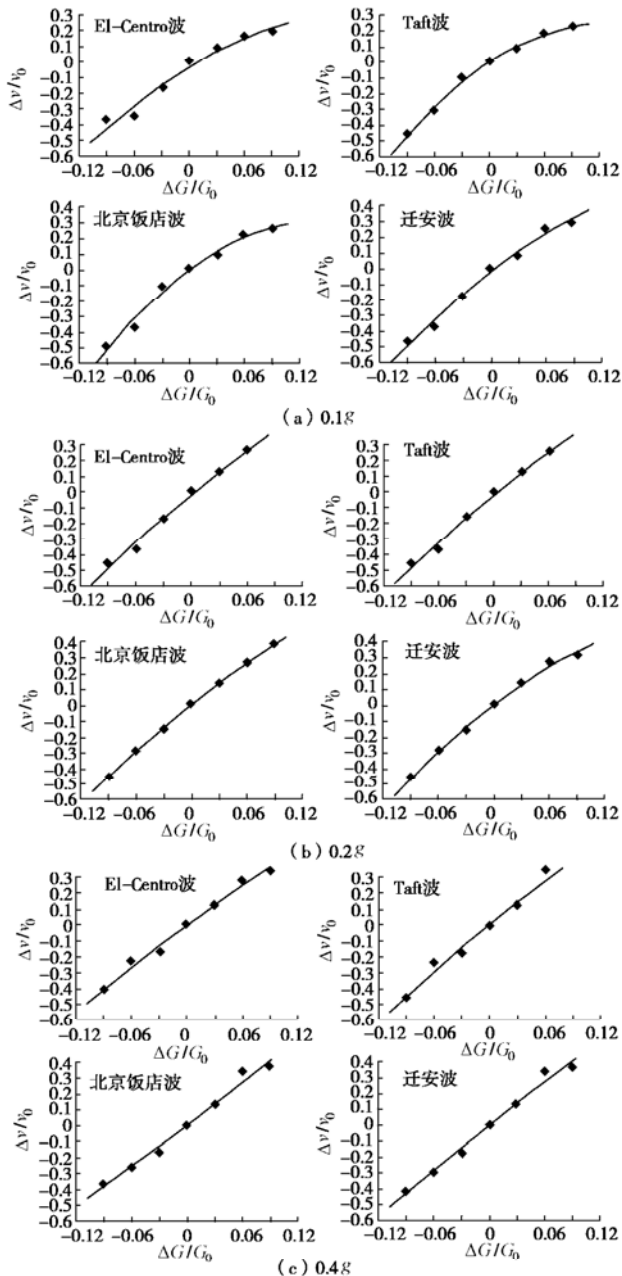


图 11 不同地震强度和不同地震波下三类场地动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的对等关系

Fig. 11 Equivalent effects of dynamic shear modulus ratio and velocity on spectra in site III under different seismic waves with different amplitudes

进一步略去地震输入波形及场地遭遇地震强度的影响,将二、三类场地动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的对等关系曲线分别示于图 12, 13 中。从图中可见,此种情况下,动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的对等关系依然存在。对二类场地,动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的对等关系可写为

$$\Delta v/v_0 = 3.37\Delta G/G_0 - 11.1(\Delta G/G_0)^2; \quad (1)$$

对三类场地,动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的对等关系可以写为

$$\Delta v/v_0 = 4.41\Delta G/G_0 - 6.28(\Delta G/G_0)^2. \quad (2)$$

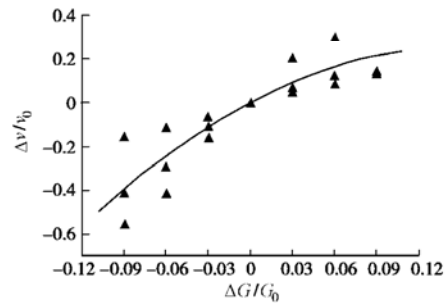


图 12 二类场地动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的对等关系

Fig. 12 Equivalent effects of dynamic shear modulus ratio and velocity on spectra for site II

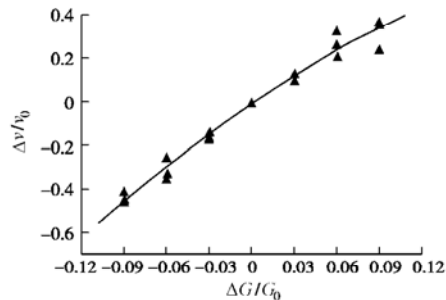


图 13 三类场地动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的对等关系

Fig. 13 Equivalent effects of dynamic shear modulus ratio and velocity on spectra for site III

从图 12, 13 以及式 (1)、(2) 的对比中,可以看出二类和三类场地的动剪切模量比与剪切波速对等关系是有差别的。最显著的差别是动剪切模量比增加段上二类场地的曲率要更大一些,说明较硬的土体在其非线性较弱时,土体动剪切模量比误差变化对地表反应谱的影响要小,这符合现有认识。

最后,将所有因素略去,将动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的对等关系示意于图 14。从图 14 看出,略去所有影响因素时动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的对等关系还是成立,在工程范围内可以接受,其表达式为

$$\Delta v/v_0 = 3.89\Delta G/G_0 - 8.69(\Delta G/G_0)^2. \quad (3)$$

按式 (3) 计算,动剪切模量比非线性降低 3%, 5%, 10% 分别与剪切波速降低 13%, 22%, 48% 对反应谱的影响等价,剪切模量比降低时,其误差的敏感性是剪切波速的 4.3 倍, 4.4 倍, 4.8 倍;动剪切模量比非线性增加 3%, 5%, 10% 分别与剪切波速增加 11%, 17%, 30% 对反应谱的影响等价,剪切模量比增加时,其误差的敏感性是剪切波速的 3.6 倍, 3.4 倍, 3.0 倍。由此可见,动剪切模量比非线性误差对地震动的敏感性要明显大于剪切波速,敏感性程度相差范围在 3~5 倍。并且,从图 14 和式 (3) 可见,动剪切模量比与

剪切波速对反应谱影响的等价关系呈现非线性, 绝对误差相同时, 动剪切模量比降低情况下与剪切波速的敏感程度相差更大一些。

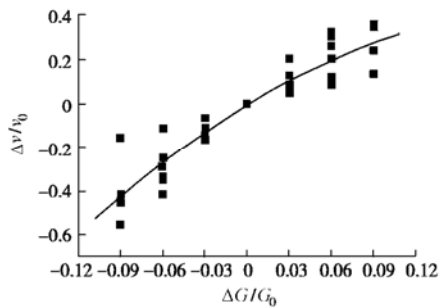


图 14 动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的对等关系
Fig. 14 Equivalent effects of dynamic shear modulus ratio and velocity on spectra

4 结 论

(1) 动剪切模量比误差和剪切波速误差对地震动都有着重要影响, 实测的动剪切模量比和剪切波速较真实值低时, 一般会使地表加速度峰值降低, 反应谱特征周期延长, 反之亦然。

(2) 具有强非线性的土体和软弱性质的场地, 其动剪切模量比和剪切波速误差对地表反应谱的影响更为强烈, 三类场地 0.1g 地震输入时动剪切模量比 6% 误差或剪切波速 25% 的误差就已经有不可忽视的影响。

(3) 实测的动剪切模量比和剪切波速比真实值低时较比真实值高时对地表反应谱的影响更大。

(4) 动剪切模量比单独变化与剪切波速单独变化都会引起地表反应谱的变化, 以对反应谱影响为衡量标准, 本文的各种工况下二者间都具有对等关系。

(5) 动剪切模量比误差对地震动的影响程度要大于剪切波速误差的影响程度, 二者对地表反应谱的敏感性相差 3~5 倍。

(6) 动剪切模量比非线性降低 3%, 5%, 10% 对反应谱的影响分别与剪切波速降低 13%, 22%, 48% 的作用等价; 动剪切模量比非线性增加 3%, 5%, 10% 对反应谱的影响分别与剪切波速增加 11%, 17%, 30% 的作用等价。

(7) 动剪切模量比与剪切波速对反应谱影响的等价关系呈现非线性, 绝对误差相同时, 动剪切模量比降低情况下与剪切波速的敏感程度相差更大。

参考文献:

[1] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988. (HU Yu-xian. Earthquake engineering[M]. Beijing: Seismic

Publishing House, 1988. (in Chinese))

- [2] 廖振鹏. 地震小区划 (理论与实践) [M]. 北京: 地震出版社, 1989. (LIAO Zhen-peng. Seismic microzonation[M]. Beijing: Seismic Publishing House, 1989. (in Chinese))
- [3] 高玉峰, 刘汉龙, 朱 伟, 等. 剪切波速对砂土层地震反应的影响[J]. 工程勘察, 2001(1): 39 - 42. (GAO Yu-feng, LIU Han-long, ZHU Wei, et al. Influences of shear wave velocity on the seismic response of sand ground[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2001(1): 39 - 42. (in Chinese))
- [4] 陈国兴, 刘雪珠, 王炳辉. 土动力参数变异性对深软场地地表地震动参数的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(1): 1 - 10. (CHEN Guo-xing, LIU Xue-zhu, WANG Bing-hui. Effect of variability of soil dynamic parameters on ground motion parameters for deep soft sites[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(1): 1 - 10. (in Chinese))
- [5] 冯志仁, 郭德存, 刘红帅, 等. 最大剪切模量对土动力参数及地震反应的影响[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(3): 90 - 95. (FENG Zhi-ren, GUO De-cun, LIU Hong-shuai, et al. Influence of maximum shear modulus on dynamic parameters and seismic response of soil layer[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(3): 90 - 95. (in Chinese))
- [6] 孙 静, 袁晓铭. 剪切模量和阻尼比的推荐值和规范值的合理性比较[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 126 - 133. (SUN Jing, YUAN Xiao-ming. Reasonability comparison between recommended and code values of dynamic shear modulus and damping ratio of soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(2): 126 - 133. (in Chinese))
- [7] 刘红帅, 薄景山, 吴兆营, 等. 土体参数对地表加速度峰值和反应谱的影响[J]. 地震研究, 2005(2): 161 - 171. (LIU Hong-shuai, BO Jing-shan, WU Zhao-ying, et al. Effects of soil parameters on ground surface acceleration peak and response spectra[J]. Journal of Seismological Research, 2005(2): 161 - 171. (in Chinese))
- [8] 李小军, 彭 青. 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, 2001, 21(1): 29 - 36. (LI Xiao-jun, PENG Qing. Calculation and analysis of earthquake ground motion parameters for different site categories[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(1): 29 - 36. (in Chinese))
- [9] GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 2001. (GB0011—2001 Code for seismic design of buildings[S]. 2001. (in Chinese))