

张小平、牛雪、赵安生等,2011,大连地区场地土动力学参数初步研究,中国地震,27(3),280~289。

# 大连地区场地土动力学参数初步研究

张小平<sup>1)</sup> 牛雪<sup>2)</sup> 赵安生<sup>1)</sup> 马顺<sup>1)</sup> 刘超<sup>1)</sup> 刘洋<sup>1)</sup>  
李涯<sup>1)</sup> 姜华<sup>1)</sup> 张银龙<sup>1)</sup> 张凤君<sup>1)</sup>

1) 大连市地震局,大连市中山区绿山巷14号 116012

2) 辽宁省地震局,沈阳 110034

**摘要** 通过收集近年来大连地区地震安全性评价报告中土动力学参数的实验资料,统计分析粉质粘土、淤泥质粉质粘土、粘土、中砂、碎石、回填土和全风化板岩等7类土的实测动力学参数,给出了它们的动剪切模量比和阻尼比的统计值。然后,选取典型钻孔并建立了土层地震反应分析模型,分别运用本文统计值、94规范值(即原大连地震小区划的土动力学参数值)和袁晓铭等(2000)的推荐值进行土层地震反应计算,并将计算结果中的地表峰值加速度和反应谱形状进行了比较。结果表明,本文的统计值与袁晓铭等(2000)的推荐值非常接近,而与94规范值有很大的差别。

**关键词:** 场地土 土动力学参数 大连地区

[文章编号] 1001-4683(2011)03-0280-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

土的动剪切模量比和阻尼比是工程场地地震安全性评价中非常重要的两个参数,直接反映工程场地的土动力特性。大量的实验表明(袁晓铭等,2000;吕悦军等,2003),确定某个场地的土动力学参数必须考虑区域性,因为不同区域的土动力学参数与土的成分、来源、含水量、形成年代及其所处的环境密切相关。

大连地区位于辽东半岛南部,属于海滨低丘陵的地形地貌,在大地构造上属于北北东向的胶辽台隆,西侧有下辽河-渤海新生代断陷盆地,南东海域属于北黄海晚新生代拗陷。区域内第四系地层分布比较广泛,但陆域隆起区发育程度较差,主要分布在丘间谷地、河谷两侧和沿海地带。该区域有自己独特的地层特点,覆盖土的一般厚度为5~24m。根据《建筑抗震设计规范(GB50011-2010)》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010),大连地区有一小部分工程场地覆盖层小于5m(剪切波速大于250m/s)和3m(剪切波速小于250m/s),场地类别都属于Ⅰ类,但绝大部分工程场地类别属于Ⅱ类,还有一小部分覆盖层较厚的场地达到Ⅲ类,场地土对工程建设的地基稳定性和抗震设计的影响不容忽视。《工程场地地震安全性评价工作规范》(中国地震局,1994)中给出的各类土的动剪切模量比和阻尼比的规

[收稿日期] 2011-04-25

[作者简介] 张小平,男,生于1953年,高级工程师,国家注册一级地震安全性评价工程师。主要从事地震安全性评价和地震监测预报工作。E-mail: DLPXZ@163.com

范数据(本文简称 94 规范值)主要来源于 20 世纪 80 年代在大连地区地震小区划工作中采用的几种典型土类试验结果(孙静等,2004)。因此可以把 94 规范值作为 80 年代大连地区地震小区划的土动力学参数值。由于受当时实验条件等诸多因素的影响,在以后的实际应用时发现这些结果有不合理之处,且不具平均意义。故本文再次收集近年来大连地区地震安全性评价报告中的土动力学参数的实验资料并再次进行统计分析。然后选取一个典型钻孔,构建土层分析模型,做土层地震反应分析计算,同时将结果与 94 规范值和袁晓铭等(2000)的结果进行对比分析,并讨论了结果的合理性。本文所得结果对大连地区各类工程建设场地的地震安全性评价具有一定的参考价值。

## 1 大连地区场地岩土动力学参数统计分析

### 1.1 数据收集

本文收集了大连地区近年来具有完整土动力学参数实验数据的地震安全性评价报告,共 47 个钻孔中的各类岩土土样(表 1)。这些钻孔主要分布在丘间谷地、河谷两侧和沿海地带,从西北起为长兴岛开发区,东北为普湾新区,西南为旅顺口区,东南是大连市老市区和金州新区,基本上覆盖了大连地区的主城区、新区和开发区(图 1)。大连地区的土层厚度大多集中在几米至十几米的范围内,表 1 中岩土土样的采样深度大部分集中在 2~18m 范围。这些土样送中国地震局工程力学研究所后得到实测的动三轴数据。根据土类岩性的不同,分为回填土、粉质粘土、淤泥质粉质粘土、粘土、中砂、砂砾石和全风化板岩等 7 类岩土(表 1),其中粉质粘土、淤泥质粉质粘土、粘土和回填土占了绝大多数。由于密实砂、轻砂、淤泥和粉土等土样数量太少,不足以统计出合理的岩土动力学参数,因此本研究暂将其舍去,不予考虑。

表 1 各类岩土样本量统计

岩土类别	埋深(m)	样本量
回填土	0~5	12
	3~8	6
粉质粘土	8~13	12
	13~16	4
淤泥质粉质粘土	2~7	11
	7~12	5
粘土	5~10	9
	10~15	6
中砂	5~10	7
	10~15	5
砂砾石	4~9	4
	9~14	5
全风化板岩	11~18	8
		总计 94

### 1.2 各类岩土的土动力学参数统计值

同类土体的土动力学参数随深度和压力的变化而不同,但在本文统计出的各类土动力学参数却看不出这种变化,受深度的影响很小。这可能由于大连地区属滨海丘陵,绝大多数工程场地的土层厚度仅为几米至十几米,各种土层排序的规律性不强,土层的连续性也远不如北京、上海和沈阳等地。因此,我们认为在大连地区统计随深度变化的土动力学参数的意义不大,在本文统计中暂不区分各类土样的埋深。对上述 7 类岩土的动力学参数采用统计平均值。用选择标准差的方式避免被统计的数据样本过于离散,保证其集中性和统计结果的合理性。在统计过程中,分别舍弃动剪切模量比标准差超过 0.06 和阻尼比标准差超过 0.02 的样本数据(表 2),最后留下 94 组数据参与统计(表 1)。为了说明本文拟合结果的合理性和离散性,以粉质粘土为例,给出了其样本(离散)值与统计值曲线(图 2)。

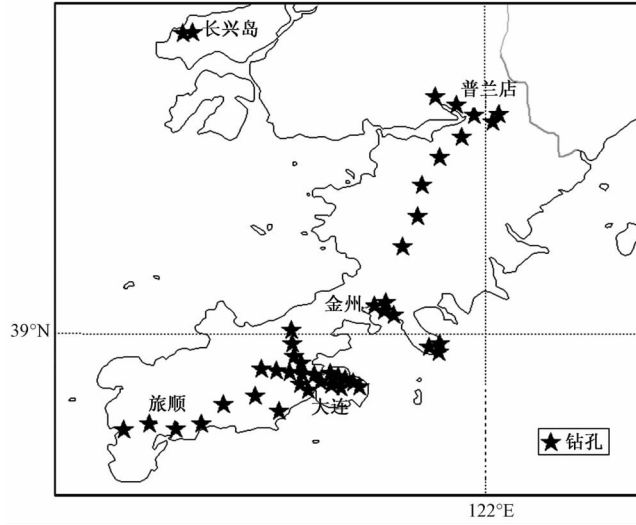


图1 研究区的钻孔分布图

表2 7类岩土动剪切模量比和阻尼比的统计结果

岩土类别	标准差最大值	参数	剪应变 $\gamma(10^{-4})$							
			0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
回填土	0.053	$G_d/G_{dmax}$	0.9912	0.9825	0.9183	0.8490	0.5300	0.3609	0.1017	0.0536
	0.012	$\lambda$	0.0157	0.0218	0.0456	0.0612	0.1058	0.1227	0.1445	0.1482
粉质粘土	0.058	$G_d/G_{dmax}$	0.9875	0.9806	0.9293	0.8734	0.5953	0.4302	0.1375	0.0730
	0.015	$\lambda$	0.0113	0.0175	0.0372	0.0516	0.1002	0.1225	0.1614	0.1736
淤泥质粉质粘土	0.051	$G_d/G_{dmax}$	0.9925	0.985	0.9296	0.869	0.5749	0.406	0.123	0.0658
	0.016	$\lambda$	0.0116	0.017	0.0393	0.0555	0.1073	0.1296	0.1615	0.1673
粘土	0.057	$G_d/G_{dmax}$	0.9933	0.9867	0.937	0.8814	0.598	0.4268	0.1298	0.0694
	0.016	$\lambda$	0.0212	0.0284	0.0548	0.0716	0.1196	0.1610	0.2100	0.2301
中砂	0.053	$G_d/G_{dmax}$	0.9935	0.987	0.9383	0.8838	0.6037	0.4325	0.1324	0.0709
	0.011	$\lambda$	0.0112	0.0153	0.0315	0.0424	0.0787	0.0989	0.1301	0.1351
砂砾石	0.049	$G_d/G_{dmax}$	0.9948	0.9897	0.9507	0.9063	0.6636	0.4998	0.1701	0.0935
	0.017	$\lambda$	0.0077	0.0112	0.0271	0.0389	0.0802	0.1004	0.1337	0.1405
全风化板岩	0.054	$G_d/G_{dmax}$	0.9938	0.9877	0.9416	0.8902	0.6259	0.4607	0.151	0.0823
	0.014	$\lambda$	0.0127	0.0176	0.0372	0.0504	0.0918	0.11	0.1376	0.143

注:表中  $G_d$  为剪切模量,  $G_{dmax}$  为最大剪切模量,  $\lambda$  为阻尼比,  $G_d/G_{dmax}$  为动剪切模量比,  $\gamma$  为剪应变。

### 1.3 统计结果的对比分析

将以上的统计值与 94 规范值以及袁晓铭等(2000)利用来自北京、上海等全国十几个地区的常规土类得出的推荐值(以下简称推荐值)进行比较(图 3~6),从这些图中可以看出,本文统计的动剪切模量比和推荐值中的动剪切模量比相差甚小,特别是图 3 中的粉质粘土,本文统计的动剪切模量比曲线与推荐值曲线重叠在一起,几乎完全相同。除了大应变和小应变两点之外,94 规范的动剪切模量比在其它应变范围内都明显小于本文统计值和推荐值。除了淤泥质粉质粘 94 规范的阻尼比值在大应变时明显大于本文统计值和推荐值以外,其它 3 种岩土统计值与 94 规范值和推荐值中的阻尼比几乎都交织在一起,差别不大,没

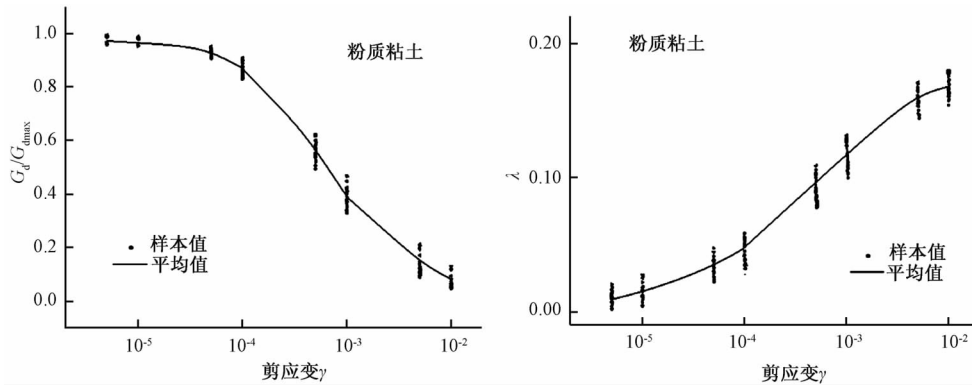


图2 粉质粘土动剪切模量比与阻尼比的样本值和统计平均值

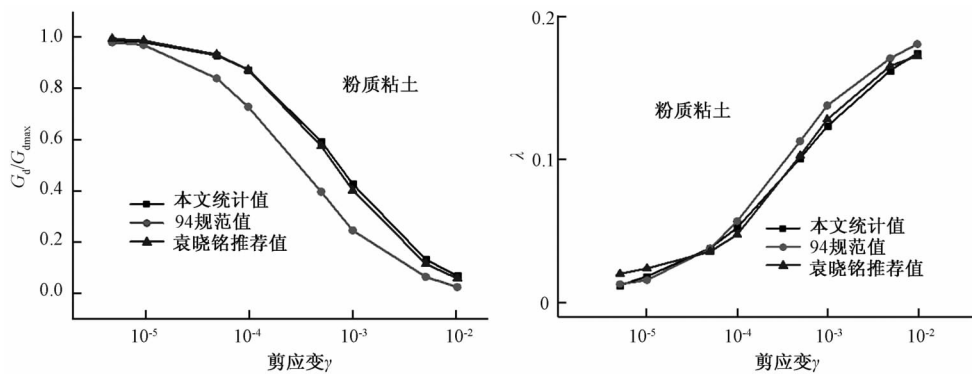


图3 粉质粘土统计值与94规范值和推荐值的比较

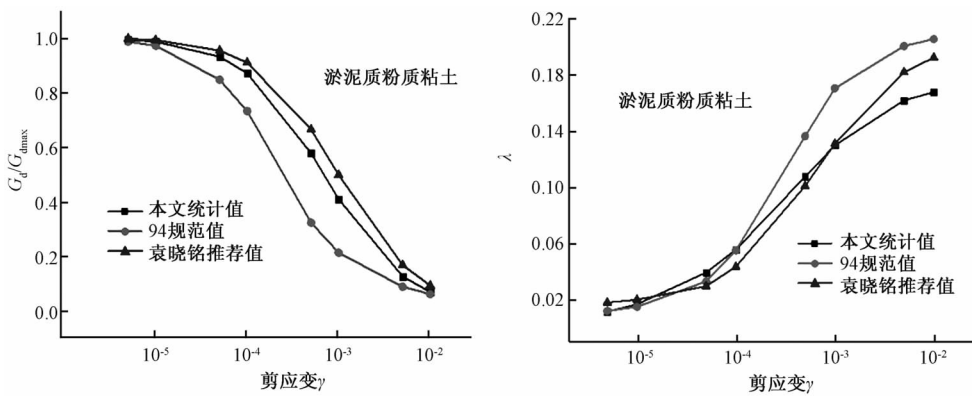


图4 淤泥质粉质粘土统计值与94规范值和推荐值的比较

有规律可循。尽管如此,还是可以看出本文统计值与94规范值和推荐值是有区别的,这也证实了土动力学参数的区域性特点,一个区域不能简单地采用另一个区域的数值。

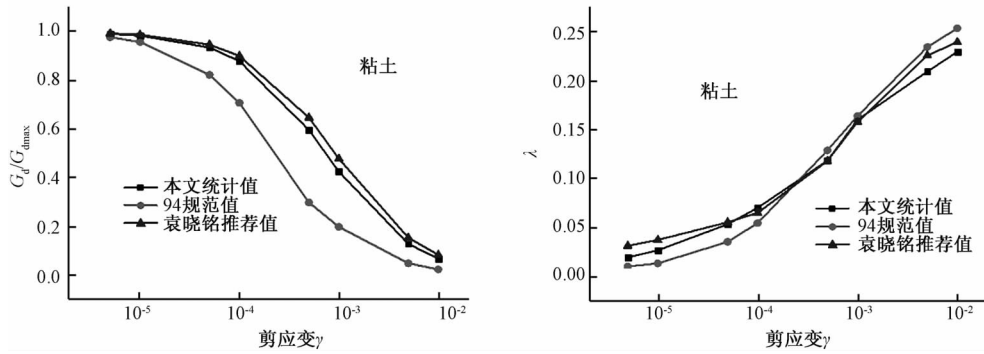


图5 粘土统计值与94规范值和推荐值的比较

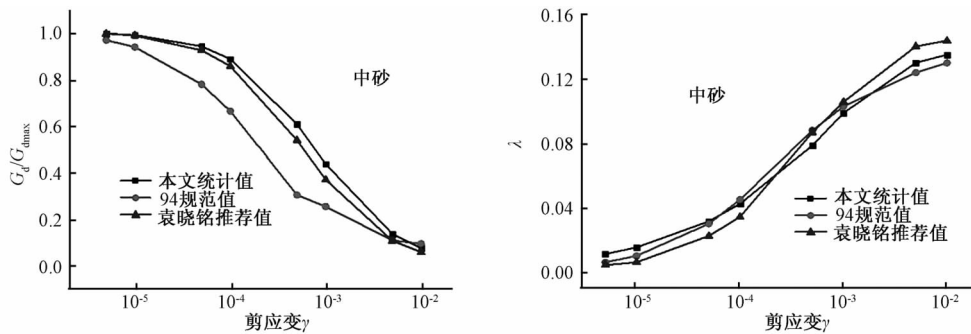


图6 中砂统计值与94规范值和推荐值的比较

## 2 统计值的适用性分析

选取实例钻孔构建土层反应计算模型,采用频域线性波动分析的一维等效线性化方法进行土层地震反应计算,在计算过程中分别采用本文统计值、94规范值和推荐值等3种不同的岩土动力学参数,通过对计算结果比较来进一步说明本文统计的岩土动力学参数的合理性和适用性。

### 2.1 钻孔模型、基岩输入地震动参数的选取和土层反应计算

#### 2.1.1 钻孔模型和基岩输入地震动的选取

选取的钻孔深度为15.1m,分析大连地区各工程场地的各种岩土分布和土层覆盖厚度的资料分析,发现类似于本钻孔情况占大多数,由此认为本钻孔有代表性,其揭示的覆盖层主要是回填土、淤泥质粉质粘土、粉质粘土、粘土、中砂和砂砾石。表3给出了钻孔土层力学模型,图7给出了钻孔的柱状图和剪切波速图。根据《建筑抗震设计规范(GB50011-2010)》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010),本钻孔所代表的工程场地类别属于II类。

把研究区域地震危险性分析所得到的基岩加速度反应谱(图8)作为目标谱,按照50年超越概率分别为63%、10%和2%的3种情况,人工合成基岩加速度时程作为基岩输入地震动计算地表土层地震反应。其中对每一种概率均合成3条时程曲线,时间离散步长为0.02s,离散点数2048个,选用60个周期数值作为拟合目标谱的控制点,目标谱与拟合谱之间相对误差要求小于5%。

表 3 土层力学模型

土类	容重	厚度(m)	层底深度(m)	剪切波速(m/s)
回填土	1.86	1.5	1.5	145
淤泥质粉质粘土	1.90	1.0	2.5	155
淤泥质粉质粘土	1.90	1.0	3.5	166
淤泥质粉质粘土	1.90	1.2	4.7	174
粉质粘土	1.95	1.0	5.7	168
粉质粘土	1.95	1.0	6.7	189
粉质粘土	1.95	1.5	8.2	199
粘土	1.95	1.0	9.2	186
粘土	1.95	1.4	10.6	223
中砂	2.08	1.0	11.6	256
中砂	2.08	1.3	12.9	296
砂砾石	2.11	1.0	13.9	365
砂砾石	2.11	1.2	15.1	392
基岩	2.20	1.0	16.1	540

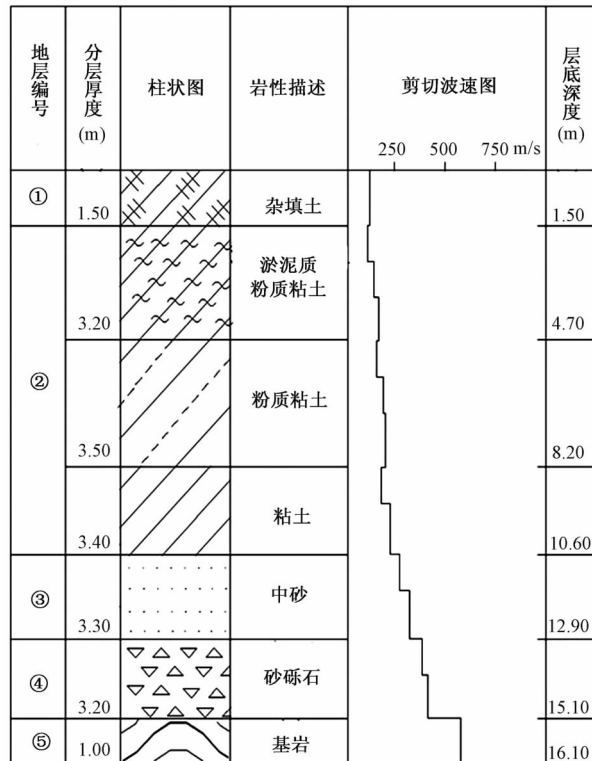


图 7 钻孔柱状图

### 2.1.2 土层反应计算

输入人工合成地震动后,由各种岩土组合参与计算的地表土层地震反应结果如 2.2 中图 9 和图 10 中所画出的曲线所示。在同一种概率条件下,每 3 条基岩地震动输入计算后都得到相应的 3 条地表地震动反应谱曲线,图中的平均反应谱曲线是这 3 条地表地震动反应

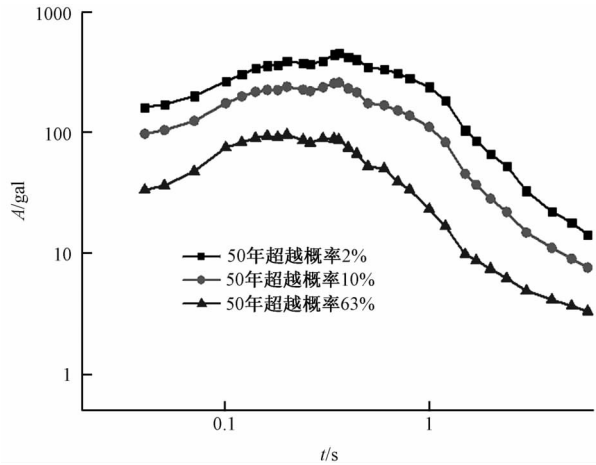


图8 不同概率水准的基岩加速度反应谱

谱曲线的平均值。

## 2.2 土层反应计算的结果分析

由于袁晓铭的推荐值中没有有关回填土和砂砾石的数据,如要同时比较本文统计值、94规范值和推荐值等3个模式,就应去掉回填土和砂砾石这两层岩土,只取在3个模式中都有淤泥质粘土、粉质粘土、粘土和中砂包括基岩共5种岩土动力学参数参与3个模式的土层反应分析计算,以下简称“3个模式5种岩土”。在此,我们把 $\beta_m A_{\max}$ 作为地震动加速度反应谱的平台值, $\beta_m$ 为反应谱的放大系数, $A_{\max}$ 为地震动峰值加速度。把代表此平台值的直线与反应谱曲线的右相交点的横坐标周期值作为反应谱特征周期 $T_g$ 值(图9、10)。根据《中国地震动参数区划图》宣贯教材(胡聿贤等,2001),统计我国大量重大工程地震安全性评价工作的分析计算结果,反应谱放大系数 $\beta_m$ 的优势分布在2.5。本项研究中,我们全部取 $\beta_m = 2.5$ ,只有这样才能用同一标准去衡量不同岩土动力学参数的地震动加速度反应谱特征周期 $T_g$ 值的大小,从而对其结果做出比较科学的分析对比。表4为“3个模式5种岩土”不同动力学参数土层反应计算的峰值加速度和反应谱特征周期值,“3个模式5种岩土”不同岩土动力学参数的平均反应谱如图9所示。

表4 “3个模式5种岩土”动力学参数取值下峰值加速度和特征周期

超越概率	峰值加速度 $A_{\max}$ (gal)			特征周期值 $T_g$ (s)		
	本文统计值	94 规范值	推荐值	本文统计值	94 规范值	推荐值
50 年 63%	59	65	59	0.30	0.33	0.30
50 年 10%	171	158	190	0.35	0.44	0.35
50 年 2%	262	223	264	0.40	0.70	.040

如不考虑袁晓铭的推荐值,仅把本文统计值和原大连小区划所得的94规范值做全面比较会更有实际意义。采用在推荐值中没有,但在本文统计值和94规范值中都有的回填土和砂砾石的参数,再加以上5种岩土的参数,恢复钻孔的全部土层共7种岩土动力学参数参与两个模式的土层反应计算,以下简称“2个模式7种岩土”。表5为“2个模式

7 种岩土”不同动力学参数土层反应计算的峰值加速度和反应谱特征周期值,“2 个模式 7 种岩土”不同岩土动力学参数的平均反应谱如图 10 所示。

在“3 个模式 5 种岩土”的情况下(表 4 和图 9),大超越概率(63%,小震)时,由 94 规范值计

算的地面峰值加速度  $A_{\max}$  略大于本文统计值和推荐值计算的  $A_{\max}$ ,由三者计算得到的反应谱差别不大。出现明显差别的是在小超越概率(中震和大震,10%和 2%)时,由 94 规范值计算的地面峰值加速度  $A_{\max}$  已明显小于本文统计值和推荐值的  $A_{\max}$ 。由 94 规范值计算的反应谱更宽,其特征周期值  $T_g$  都大于由本文统计值和推荐值得到的计算结果,最多的大出 75%,达 0.70s。还有一个非常明显的结果是由本文统计值和推荐值得出的反应谱几乎重叠在一起,说明本文统计值与推荐值的一致性很好。

“2 个模式 7 种岩土”和“3 个模式 5 种岩土”的情况类似(表 5 和图 10),大超越概率时,由本文统计值和 94 规范值的计算结果区别不大,出现明显差别的同样是在小超越概率时,由本文统计值计算的地面峰值加速度  $A_{\max}$  已明显高于 94 规范值的  $A_{\max}$ ,最大时高出 26%。使用 94 规范值计算反应谱的特征周期值  $T_g$  也明显大于由本文统计值得到的  $T_g$  值,最多的大出 83%,达到 0.77 秒。

在小超越概率时,由 94 规范值计算的反应谱的特征周期值  $T_g$  也总是远远高于根据《建筑抗震设计规范(GB50011-2010)》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)所给出的相应类别工程场地特征周期值  $T_g$  的平均值,在抗震设计中使用这一参数会过于保守,不经济。同时,由 94 规范值计算的地面峰值加速度  $A_{\max}$  又明显小于本文统计值和推荐值的  $A_{\max}$ ,在抗震设计中使用这一参数后会存在一些不安全因素。因此,由 94 规范值得到的这两个结果都是工程设计部门所难以接受的。

### 3 结论

本文给出了大连地区的土动力学参数,选取该区典型的钻孔实例和构造模型,分别运用本文统计值、94 规范值和袁晓铭等(2000)的推荐值进行了土层反应计算,结果表明:

(1) 本文的统计值和袁晓铭等(2000)的推荐值非常接近,计算得出的土层反应结果,其峰值加速度和特征周期值几乎一致,但和采用 94 规范值的计算结果相差很大。袁晓铭等(2000)的推荐值可作为大连地区地震安全性评价工作中岩土动力学参数的参考值来使用。

(2) 由于上世纪 80 年代在大连地区地震小区划工作中采用的几种典型土类所用的试验仪器是自行研制的实验样机,软硬件都有不尽人意的地方,主要由这些结果所形成的 94 规范值在多年的实际应用过程中发现了许多不合理之处,也不具有平均意义(孙静等,2004)。这些年来,在大连地区的地震安全性评价工作中也发现使用 94 规范值计算得到的地表反应谱总是出现“矮、粗、胖”的现象,对实际的工程应用有一定的影响,本文的研究结果也充分证明了这一点。更重要的是,和全国其它地区相比,用近些年大连地区岩土动力学

表 5 “2 个模式 7 种岩土”动力学参数取值  
下峰值加速度和特征周期

超越概率	峰值加速度 $A_{\max}$ (gal)		特征周期值 $T_g$ (s)	
	本文统计值	94 规范值	本文统计值	94 规范值
50 年 63%	58	60	0.38	0.38
50 年 10%	157	140	0.40	0.50
50 年 2%	263	209	0.42	0.77



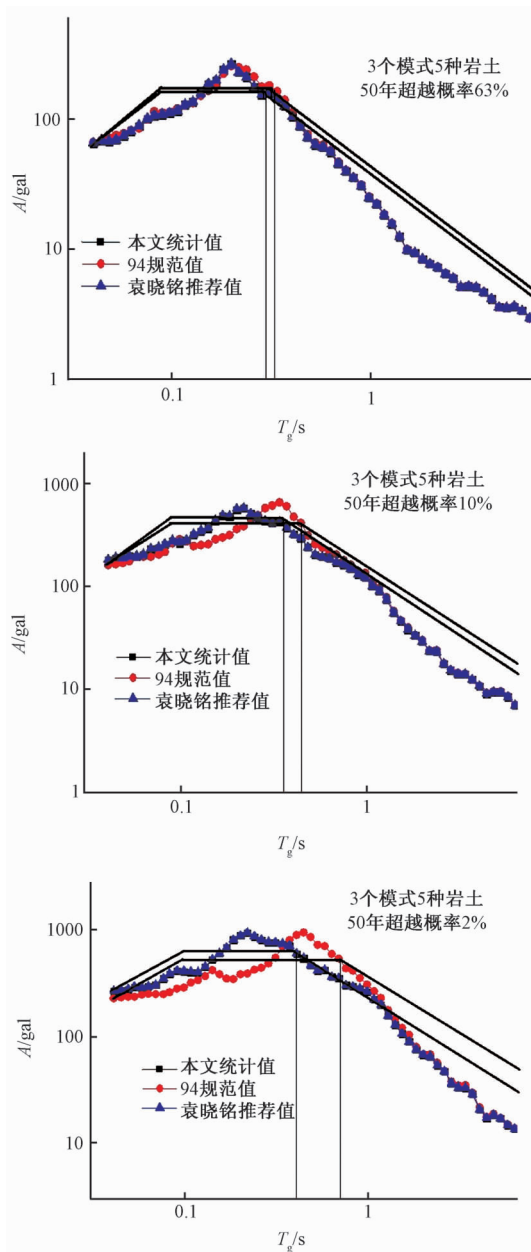


图9 不同岩土动力学参数的平均反应谱曲线(3个模式5种岩土)

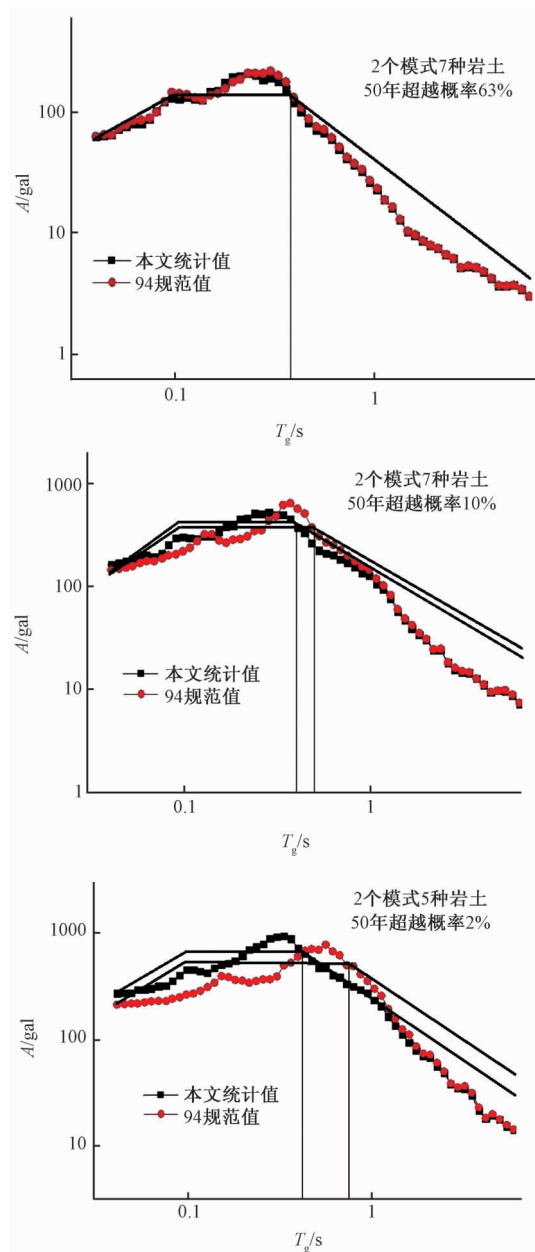


图10 不同土动力参数的平均反应谱曲线(2个模式7种岩土)

参数的统计结果(本文所作的工作)来证明上世纪80年代主要由大连地区地震小区划土动力学参数所形成的94规范值的不合理性,其说服力更强。因此,建议在今后的地震安全性评价工作中,特别是在大连地区的地震安全性评价工作中,如果没有得到实测的岩土动力学参数,不宜再采用94规范值,而应该以袁晓铭等(2000)的推荐值和本文的统计值作为参考。

虽然本文的土动力学参数的统计样本数量有限,品种不全,但对大连地区各类工程建设

的场地地震安全性评价工作还是具有一定的借鉴作用的,在得不到实测的岩土动力学参数情况下,可用本文的统计值作为参考。今后,随着大连地区重要工程地震安全性评价工作的不断开展,岩土样品更多,积累的各种岩土动力学参数的统计样本数量也会更多,届时,再进一步做这方面的工作,将会得到更加令人满意的结果。

### 参考文献

- 胡聿贤、高孟潭、杜玮等,2001,《中国地震动参数区划图》宣贯教材,85~87,北京:中国标准出版社。
- 吕悦军、唐荣余、沙海军等,2003,渤海海底土类动剪切模量比和阻尼比试验研究,防灾减灾工程学报,23(2),368~374。
- 孙静、袁晓铭、孙锐等,2004,土动剪切模量和阻尼比的推荐值和规范值的合理性比较,地震工程与工程振动,24(2),125~133。
- 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,地震工程与工程振动,20(4),133~139。
- 中国地震局,1994,工程场地地震安全性评价工作规范(DB001-94),北京:地震出版社。
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,2010,建筑抗震设计规范(GB50011-2010),北京:中国建筑工业出版社。

## Research on dynamic parameters of soil site in Dalian area

Zhang Xiaoping<sup>1)</sup> Niu Xue<sup>2)</sup> Zhao Ansheng<sup>1)</sup> Ma Shun<sup>1)</sup> Liu Chao<sup>1)</sup> Liu Yang<sup>1)</sup>  
Li Ya<sup>1)</sup> Jiang Hua<sup>1)</sup> Zhang Yinlong<sup>1)</sup> Zhang Fengjun<sup>1)</sup>

1) Earthquake Administration of Dalian City, Dalian 160012, China

2) Earthquake Administration of Liaoning Province, Shenyang 110034, China

**Abstract** In this paper, soil dynamic parameters from Dalian area seismic risk assessment reports are collected. The tested data are divided into 7 kinds of type, i. e. silty clay, muddy silty clay, clay, sanely soil, sand stone, return soil and all-weathered slate. Statistics of the dynamic parameters of soil has been done to obtain the mean values of dynamic shear modulus ratio and damping ratio. Then a typical drilling is selected to establish soil dynamic models in order to investigate the seismic response in different cases. The results show that the statistical values are close to values recommended by Yuan Xiaoming, et al (2000), but have some deviation from standard values in 94 code.

**Key words:** Site soil Soil dynamic parameter Dalian area