

董亮,夏峰.天津地区土动力学参数变异性对地表地震动参数的影响[J].地震工程学报,2017,39(6):1062-1069.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1062

DONG Liang,XIA Feng.Effect of Variability in Soil Dynamic Parameters on the Ground Motion Parameters of a Site Surface in the Tianjin Area[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(6):1062-1069.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1062

天津地区土动力学参数变异性 对地表地震动参数的影响^①

董 亮,夏 峰

(中国地震局第一监测中心,天津 300180)

摘要:收集天津地区十多年来的 83 份地震安全性评价报告,统计 202 个钻孔的 1 650 组动三轴数据,分别给出不同种类土在不同区间深度下的统计代表值及其标准差。以某典型Ⅲ类场地为例,用等效线性化方法进行多种地震动强度及相位输入下的水平成层场地地震反应分析计算,详细研究该地区覆盖土层动剪模量比和阻尼比变异性对地表峰值加速度及其反应谱的影响。结果表明:场地地表峰值加速度和反应谱随土动剪切模量比增大或减小而增大或减小,随土动阻尼比增大或减小而减小或增大;在大震输入条件下,地表峰值加速度和地表反应谱的中、高频段随土动剪切模量比减小而减小的变化尤为明显,动阻尼比变化也有一定影响,但不如土动剪切模量比减小变化时影响明显;在中震、小震地震动输入条件下,场地土的动剪模量比和阻尼比变异性对地表峰值加速度和反应谱影响并不显著。

关键词:土动力学参数变异性;不同工况;地震动峰值;反应谱;土层反应

中图分类号:TU435

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2017)06-1062-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1062

Effect of Variability in Soil Dynamic Parameters on the Ground Motion Parameters of a Site Surface in the Tianjin Area

DONG Liang, XIA Feng

(First Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China)

Abstract: In recent years, seismic safety evaluation has been conducted at many engineering sites in the Tianjin area where dynamic nonlinear soil parameters can be obtained. In this study, we collected 83 seismic safety evaluation reports in this area and obtained 1 650 groups of dynamic triaxial data on soil from 202 boreholes. We then determined the representative values and their standard deviations of different types of soil at different intervals and different depths. A typical site III is taken as an example. By using the equivalent linearization method to calculate the seismic response of the site under different ground motion intensities and phases, we studied in detail the influence of variability in the dynamic shear modulus ratio and damping ratio of the overlying

① 收稿日期:2016-07-07

作者简介:董 亮(1979—),男(汉族),山西阳泉人,工程师,从事土木工程和工程地震研究工作。E-mail:dL9536@126.com。

通信作者:夏 峰(1980—),工程师,硕士,主要从事地震监测、GPS 数据处理分析、工程地震及数值模拟相关工作。

E-mail:272861761@qq.com。

soil on the peak ground acceleration and response spectrum of the site. The results show that the peak ground acceleration and ground response spectrum of the site increase or decrease with an increase or decrease, respectively, in the soil dynamic shear modulus ratio. However, the acceleration and spectrum increase or decrease with a decrease or increase, respectively, in the soil dynamic damping ratio. Under the input of a great earthquake, the soil dynamic shear modulus ratio decreases, and the peak ground acceleration and medium and high frequency portions of ground response spectrum decrease clearly. The change in the dynamic damping ratio also has a certain impact on peak ground acceleration and the ground response spectrum, but this is not as obvious as the change in the soil dynamic shear modulus ratio. Under the input of moderate and small earthquakes, variability in the soil dynamic shear modulus ratio and damping ratio have little impact on the peak ground motion acceleration and ground response spectrum.

Key words: variability of soil dynamic parameters; different conditions; peak ground acceleration; response spectrum; soil response

0 引言

天津地区位处华北平原东部,是环渤海经济的中心地带,许多超高层和大跨度类建设难度颇大的工程日益增多。然而该地区工程场地以软弱场地居多,且位处郯庐地震带与张-渤地震带交汇附近,强地震活动频繁,故如何最大限度地减轻该地区未来地震带来的灾害成为地震学家们的研究热点。

以往的工程经验表明,在地震发生时间、地点和强度无法准确预知的情况下,减轻地震灾害最有效的途径是对建筑工程科学合理的抗震设防。我国自 1998 年《中华人民共和国防震减灾法》颁布实施以来,明确规定一般重大工程抗震设防要按工程场地地震安全性评价工作结果设防。该评价工作要求考虑了特定的工程地质及地震环境条件下给出的设防参数,而在特定的地震环境下,场地工程地质条件的确定对工程设防要求的确定尤为关键。场地工程地质条件的确定主要包括土层埋深、层厚、密度、剪切波速、动剪切模量比和阻尼比等。

以往的震害经验和土层地震反应研究结果均表明,特定地区土层的动剪切模量比和阻尼比对土层地震反应结果有重要影响^[1-2],故研究其特性对确定一般重大工程抗震设防参数有实际工程意义。目前土的动剪切模量比和阻尼比的确定是由现场取样,通过实验室试验来测定。其主要采用动三轴和共振柱方法,其中共振柱方法主要应用于核电等 I 类安评工作的三轴试验参数的确定,其他类安评工作的土样动力学参数均由动三轴试验测得。由于实际工程场地地质条件差别较大、不同试验仪器的动剪模量比和阻尼比试验测试技术也存在一定差异,同时考虑到影响土的动剪模量比和阻尼比因素的复杂

性,测试结果具有较大的离散性,因此土的动力学参数(即动剪切模量比和阻尼比参数)都是基于大量试验数据资料给出的拟合曲线。国内外研究者对不同地区不同类型土的动剪切模量比和阻尼比进行了大量的试验统计研究,并取得了很多有价值的成果^[1-7]。另外,一些学者在长期的研究经验积累中发现土的动力学参数的不确定性对土层地震反应结果的影响较大,并得出了一些初步规律^[8-12],从而进一步满足了工程设防的需求。然而上述研究并未同时考虑土的动剪切模量和阻尼比的离散程度(变异性)对场地地震动参数的影响。夏峰等^[2]详细对比分析了天津地区淤泥质粉质黏土的动力学参数变异性对土层计算结果的影响,有一定的探索意义和使用价值。因此,本着更广泛探索该地区土动力学参数性质,更深入研究各类土的动剪模量比和阻尼比的变异性,对该地区场地地表地震动的影响具有重要的工程意义。

本次工作收集整理了天津地区近十多年来 83 份具有完整土动力学参数实验数据的地震安全性评价报告,共计 202 个取样钻孔,1 650 组动三轴数据;按文献[1]中统计 2 的方法,分别整理给出了粉质黏土、黏土、粉土、淤泥质土和砂土等在不同深度下的动剪切模量比和阻尼比平均值及均方差。以天津地区某典型 III 类场地为例子,构建土层计算分析模型,进行不同工况下土层地震反应的计算分析,并对比分析该地区各类土的动剪切模量和阻尼比的变异性对地表地震动参数确定的影响。

1 数据来源及统计结果

自 2002 年以来,中国地震局第一监测中心在天

津及周边地区完成了几百个重大工程场地地震安全性评价工作,积累了大量不同类型、不同深度的土动力学参数。据工程经验,天津市区及周边地区的覆盖层厚度绝大多数在 100 m 范围内,塘沽地区均在 100 m 以上,故本文筛选土体埋深在 120 m 以内的各类动三轴实验参数。考虑到试验仪器和实验方法的不同可能引起的数据差异,本次工作选用天津市科维防灾研究所完成的 1 650 组动三轴试验数据为

表 1 不同土类型各区间组样本量统计分布表

Table 1 Different types of soil samples in all interval groups

类型	区间组/m								
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~90	90 以上
粉质黏土	88	123	78	79	58	79	78	111	103
黏土	21	8	11	16	4	26	14	22	19
粉土	58	36	46	27	31	19	25	46	33
砂土		6	29	48	37	33	39	91	67
淤泥质土	18	23							

表 2 天津地区粉质黏土的 $G/G_{\max}$ - γ 和 λ - γ 平均关系曲线代表值及其标准差

Table 2 The mean values of $G/G_{\max}$ - γ , λ - γ and their standard deviation of silty clay in Tianjin area

深度范围/m	最大值	参数	剪应变 $\gamma/(10^{-4})$							
			0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
0~10	平均值	$G/G_{\max}$	0.994	0.988 8	0.947	0.900	0.657	0.498	0.176 7	0.098
	标准差		0.003	0.006 0	0.026	0.045	0.104	0.114	0.072 4	0.046
	平均值	λ	0.033	0.041 3	0.068	0.085	0.130	0.150	0.187 2	0.199
	标准差		0.005	0.006 6	0.009	0.011	0.014	0.013	0.014 9	0.027
10~20	平均值	$G/G_{\max}$	0.994	0.989 5	0.950	0.906	0.671	0.515	0.189 1	0.107
	标准差		0.002	0.005 3	0.024	0.042	0.106	0.121	0.089 2	0.064
	平均值	λ	0.030	0.038 0	0.065	0.081	0.128	0.148	0.185 1	0.196
	标准差		0.006	0.007 3	0.009	0.011	0.014	0.013	0.015 8	0.027
20~30	平均值	$G/G_{\max}$	0.995	0.991 1	0.957	0.919	0.706	0.556	0.223 6	0.133
	标准差		0.002	0.004 6	0.020	0.037	0.103	0.130	0.131 8	0.105
	平均值	λ	0.026	0.034 0	0.058	0.074	0.120	0.141	0.182 7	0.195
	标准差		0.007	0.008 2	0.011	0.013	0.017	0.018	0.021 9	0.030
30~40 m	平均值	$G/G_{\max}$	0.995	0.991 4	0.958	0.921	0.710	0.558	0.212 3	0.120
	标准差		0.002	0.003 9	0.018	0.032	0.088	0.104	0.072 5	0.047
	平均值	λ	0.026	0.033 6	0.058	0.073	0.119	0.141	0.183 8	0.197
	标准差		0.008	0.009 2	0.011	0.011	0.012	0.011	0.020 9	0.034
40~50	平均值	$G/G_{\max}$	0.995	0.991 8	0.960	0.924	0.719	0.571	0.229 1	0.135
	标准差		0.002	0.004 0	0.018	0.033	0.094	0.118	0.114 1	0.092
	平均值	λ	0.028	0.035 7	0.060	0.075	0.119	0.140	0.179 1	0.193
	标准差		0.008	0.009 0	0.009	0.009	0.011	0.012	0.019 9	0.032
50~60	平均值	$G/G_{\max}$	0.996	0.992 1	0.962	0.927	0.724	0.575	0.226 6	0.131
	标准差		0.001	0.003 3	0.015	0.027	0.081	0.102	0.095 8	0.075
	平均值	λ	0.026	0.033 5	0.057	0.071	0.117	0.139	0.185 8	0.203
	标准差		0.008	0.009 0	0.011	0.012	0.015	0.018	0.031 7	0.044
60~70	平均值	$G/G_{\max}$	0.995	0.991 6	0.959	0.923	0.717	0.567	0.222 4	0.127
	标准差		0.002	0.004 2	0.019	0.035	0.096	0.116	0.086 9	0.059
	平均值	λ	0.025	0.032 1	0.056	0.070	0.115	0.137	0.180 6	0.195
	标准差		0.006	0.006 6	0.007	0.008	0.010	0.009	0.019 3	0.034
70~90	平均值	$G/G_{\max}$	0.996	0.992 6	0.964	0.932	0.742	0.597	0.244 4	0.147
	标准差		0.002	0.004 2	0.019	0.034	0.091	0.109	0.099 6	0.085
	平均值	λ	0.026	0.033 3	0.057	0.071	0.116	0.138	0.183 1	0.200
	标准差		0.006	0.007 4	0.009	0.010	0.015	0.017	0.028 6	0.042
≥ 90	平均值	$G/G_{\max}$	0.996	0.992 8	0.965	0.934	0.747	0.604	0.255 3	0.154
	标准差		0.001	0.003 2	0.014	0.027	0.085	0.113	0.129 5	0.112
	平均值	λ	0.026	0.033 5	0.056	0.077	0.114	0.136	0.182 4	0.200
	标准差		0.006	0.007 0	0.009	0.066	0.014	0.015	0.025 1	0.040

统计资料,按文献[1]统计 2 的方法得到不同类型土各统计区间样本分布情况(表 1)。由于篇幅所限,表 2 仅给出了该地区的粉质黏土统计代表值及标准差。

2 场地条件概况及土层地震反应模型建立

以天津市西青区某典型项目场地(Ⅲ类场地)为

例,收集该工程场地的钻孔勘察、剪切波速测试和土动力学参数测试资料,建立地震反应分析模型如表 1 所列。按年代成因该场地自上而下为表层人工填土、第四系全新统与上更新统、全新统的河床~河漫滩相、河流相、滨海潮汐相及浅海相交互沉积的一套砂类土与黏性土的沉积地层。具体分层情况见表 3。

表 3 典型场地模型土层钻孔剖面参数

Table 3 The borehole profile parameters in different soil layers of the representative site model

土层序号	土类号	层底深度/m	密度/(g·cm ⁻³)	波速 v_s /(m·s ⁻¹)	土质类别	成因年代
1	1	1.5	1.85	126	杂填土	Q _{ml}
2	1	3.0	1.85	131	杂填土	
3	1	4.5	1.85	133	杂填土	
4	1	5.3	1.85	134	素填土	
5	2	7.0	1.94	140	粉土	Q ₄ ³ al
6	3	8.5	1.83	144	淤泥质粉质黏土	Q ₄ ¹ m
7	4	10.5	1.94	152	粉质黏土	
8	4	12.5	1.94	160	粉质黏土	
9	4	14.5	1.94	168	粉质黏土	
10	5	15.5	1.89	172	粉质黏土	Q ₄ ¹ m
11	6	17.0	2.00	174	粉质黏土	Q ₅ ⁵ al
12	6	19.0	2.00	181	粉质黏土	
13	6	21.0	2.00	195	粉质黏土	
14	7	24.0	1.96	210	粉质黏土	
15	7	28.0	1.96	238	粉质黏土	Q ₅ ⁵ al
16	8	31.5	1.95	265	粉土	
17	9	35.7	1.98	296	粉质黏土	
18	10	38.0	2.03	320	粉土	
19	10	40.3	2.03	343	粉土	Q ₅ ⁵ al
20	11	43.0	2.09	340	粉质黏土	
21	11	44.7	2.09	364	粉质黏土	
22	12	48.0	1.98	364	粉土	
23	13	52.0	1.94	388	粉质黏土	Q ₅ ⁸ al
24	12	54.0	1.98	445	粉土	
25	14	58.0	2.02	433	粉质黏土	
26	14	62.0	2.02	428	粉质黏土	
27	14	66.0	2.02	431	粉质黏土	Q ₅ ⁸ al
28	14	69.7	2.02	442	粉质黏土	
29	15	72.5	1.98	445	粉土	
30	16	75.0	2.01	426	粉质黏土	
31	15	78.0	1.98	422	粉土	Q ₅ ² al
32	17	80.3	2.05	436	粉质黏土	
33	15	81.4	1.98	465	粉土	
34	17	84.0	2.05	443	粉质黏土	
35	18	87.0	2.08	441	粉土	Q ₅ ² al
36	18	90.0	2.08	445	粉土	
37	18	93.0	2.08	445	粉土	
38	19	96.0	2.05	488	粉质黏土	
39	20	100.0	1.96	516	粉土	

3 输入地震动时程确定

在充分考虑工程场地所处的地震地质环境条件下,以最新颁发的《中国地震动参数区划图》为基础,

确定了场址地震危险性计算所需的区域地震区带和潜在震源区相关地震参数,计算得到场地水平向基岩 50 年超越概率 2%、10%和 63%的基岩 5%阻尼比的反应谱曲线(图1),其对应的基岩加速度峰值

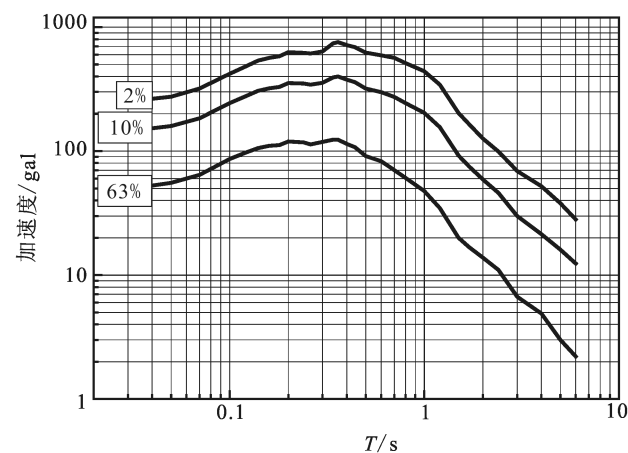


图 1 典型场地基岩不同超越概率反应谱

Fig.1 Response spectrum curves of the representative site rock in different exceeding probabilities

分别为 264.6 gal、150.7 gal 和 50.9 gal。

考虑到在同一目标谱拟合得到的地震动时程输入情况下,土层地震反应分析结果仍受不同相位影响显著,故每个概率水平下合成三个相互独立的样本时程作为土层地震反应分析的计算输入,以便作对比分析。本次工作采用拟合目标函数的三角级数迭加法合成基岩地震加速度时程,分别将地震危险

性分析得到的场地水平向基岩 50 年超越概率 2%、10% 和 63% 的基岩 5% 阻尼比的反应谱作为合成的目标函数,再综合考虑、确定表征本地区地震活动特征的强度包络函数等相关参数,合成作为场地地震动反应分析计算的输入地震动时程。给出每个概率水平下的三个相互独立的随机样本时程同时满足:

(1)拟合目标反应谱的周期控制点数不少于 50 个;

(2)目标谱的周期控制点大体均匀地分布于周期的对数坐标上,且控制点谱的相对误差小于 5%。图 2 是本次工作拟合得到的不同概率水平和不同相位下的地震动时程。

4 不同工况地震反应分析

为研究天津地区土的动力学参数变异性对地表地震动参数的影响,对场地土层计算模型的动三轴数据取值参照不同深度、不同类型土的动剪切模量比和阻尼比进行不同的组合,共形成 9 种不同组合工况。具体组合形式见表 4(其中 G/G_{max} 为动剪切模量比, $\bar{G}/G_{max}$ 为动剪切模量比均值, (G/G_{max}) 为动剪切模量比标准差; λ 为阻尼比, $\bar{\lambda}$ 为阻尼比平均值, λ_0 为阻尼比标准差)。以上文拟合出的人造地

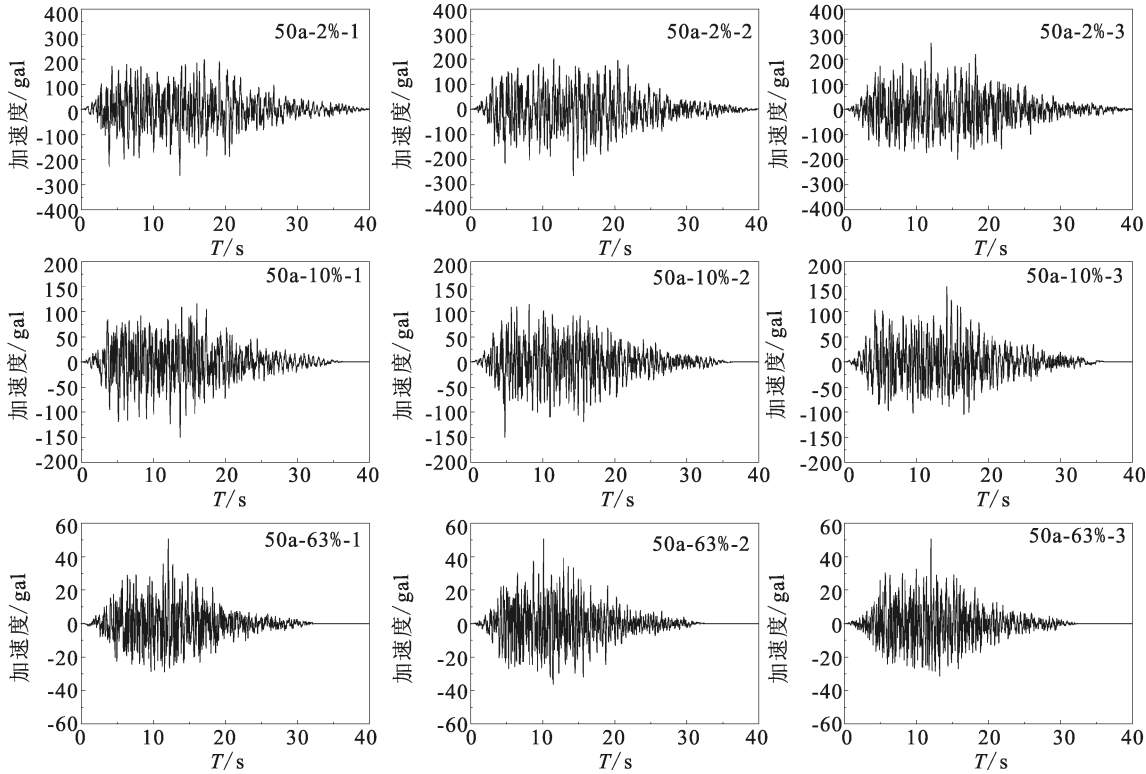


图 2 典型场地基岩不同超越概率人造地震动时程

Fig.2 The artificial acceleration time-histories of the representative site rock in different exceeding probabilities

震动时程作为输入,采用等效线性化方法进行各工况下的土层地震反应分析计算,分别得到各工况下不同概率和不同相位下的地表地震动参数。

4.1 土动力学参数变异性对地表峰值加速度的影响

在输入地震动参数及土层其他输入参数不变的情况下,仅按表 4 设计的不同工况逐一改变土层的动剪模量比和阻尼比与其标准差的不同组合值,分别计算得到不同工况下地表峰值加速度值及其相比实测工况下的增幅值并列于表 5,反应谱结果见图 3。

由表 5 可知,在大震及不同相位输入情况下,动

表 4 土的动剪模量比和阻尼比与剪应变幅值关系曲线变异性的不同组合

Table 4 Different combination of the variability of relation curve of shear strain with soil dynamic shear modulus ratio and damping ratio

参数组合	$\overline{G/G_{\max}}$	$\overline{G/G_{\max}}+(G/G_{\max})_{\sigma}$	$\overline{G/G_{\max}}-(G/G_{\max})_{\sigma}$
$\bar{\lambda}$	标准工况	工况 3	工况 6
$\bar{\lambda}+\lambda_{\sigma}$	工况 1	工况 4	工况 7
$\bar{\lambda}-\lambda_{\sigma}$	工况 2	工况 5	工况 8

表 5 场地各工况地表峰值加速度及相比标准工况下的增幅值结果表

Table 5 The peak ground acceleration under each condition and the increase compared with that under standard condition

输入工况	标准工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6	工况 7	工况 8
大震 (2%) 三相 位	1 峰值/gal	253.6	240.7	272.3	259.6	249.6	273.3	168.5	160.9
	增幅/%	—	—5.1	7.4	2.4	—1.6	7.8	—33.6	—36.6
	2 峰值/gal	262.4	239.0	267.8	258.9	246.0	278.4	187.1	175.9
	增幅/%	—	—8.9	2.1	—1.3	—6.2	6.1	—28.7	—33.0
	3 峰值/gal	259.3	238.1	270.7	260.6	245.6	275.6	156.9	144.2
	增幅/%	—	—8.2	4.4	0.5	—5.3	6.3	—39.5	—44.4
中震 (10%) 三相 位	1 峰值/gal	166.5	156.8	175.0	168.6	159.2	177.6	159.7	149.9
	增幅/%	—	—5.8	5.1	1.3	—4.4	6.7	—4.1	—10.0
	2 峰值/gal	165.4	157.1	175.7	160.5	152.3	169.0	171.2	161.0
	增幅/%	—	—5.0	6.2	—3.0	—7.9	2.2	3.5	—2.7
	3 峰值/gal	165.7	155.4	175.1	168.9	159.8	180.7	145.8	141.2
	增幅/%	—	—6.2	5.7	1.9	—3.6	9.1	—12.0	—14.8
小震 (63%) 三相 位	1 峰值/gal	58.0	54.9	61.3	59.3	56.1	62.7	56.8	53.8
	增幅/%	—	—5.3	5.7	2.2	—3.3	8.1	—2.1	—7.2
	2 峰值/gal	58.7	55.1	62.4	59.0	55.5	62.8	56.8	53.6
	增幅/%	—	—6.1	6.3	0.5	—5.5	7.0	—3.2	—8.7
	3 峰值/gal	61.5	57.1	65.6	61.1	57.6	65.0	61.5	57.6
	增幅/%	—	—7.2	6.7	—0.7	—6.3	5.7	0.0	—6.3

剪切模量比减一倍标准差(也即工况 6、7 和 8),地表地震动峰值加速度较标准工况下有明显减小(能达到 40%左右),这表明在强地震动输入条件下地表峰值加速度受动模量比减小影响显著;而动剪切模量比均值加一倍标准差(也即工况 4、5 和 6)对地表峰值加速度值影响不太明显,只比动剪切模量比均值情况下略有增大;在中、小地震及不同相位输入情况下,地表峰值加速度受动剪切模量比均值加或减一倍标准差条件影响有限。在不同的地震动强度输入下,阻尼比均值加或减一倍标准差,对地表峰值加速度也有一定影响,其影响幅度多在 10%以内,且随阻尼比均值加或减一倍标准差呈减小或增加趋势。

4.2 土动力学参数变异性对地表加速度反应谱的影响

从图 3 可见,在大震及不同相位输入条件下,相同工况的地表反应谱形状相似,但在不同工况条件下其差别明显。动剪切模量比减一倍标准差(即工况 6、7 和 8),地表反应谱较标准工况下有明显偏低,在中、高频段尤为明显,这表明动剪切模量比的减小对地表反应谱值的中、高频段减小变化影响显著;动剪切模量比加一倍标准差(即工况 3、4 和 5)地表反应谱较标准工况下略有偏高,但在中、高频段影响幅度远不及动剪切模量比减一倍标准差情形,这表明动剪切模量比的增加对地表反应谱值的增加变化影响有限;在中、小震输入条件下,动剪切模量比加

或减一倍标准差对地表反应谱计算结果影响不大。另外,在不同强度的地震输入条件下,阻尼比均值加

或减一倍标准差对地表反应谱影响不大,但其谱值随阻尼比均值加或减一倍标准差呈减小或增加趋势。

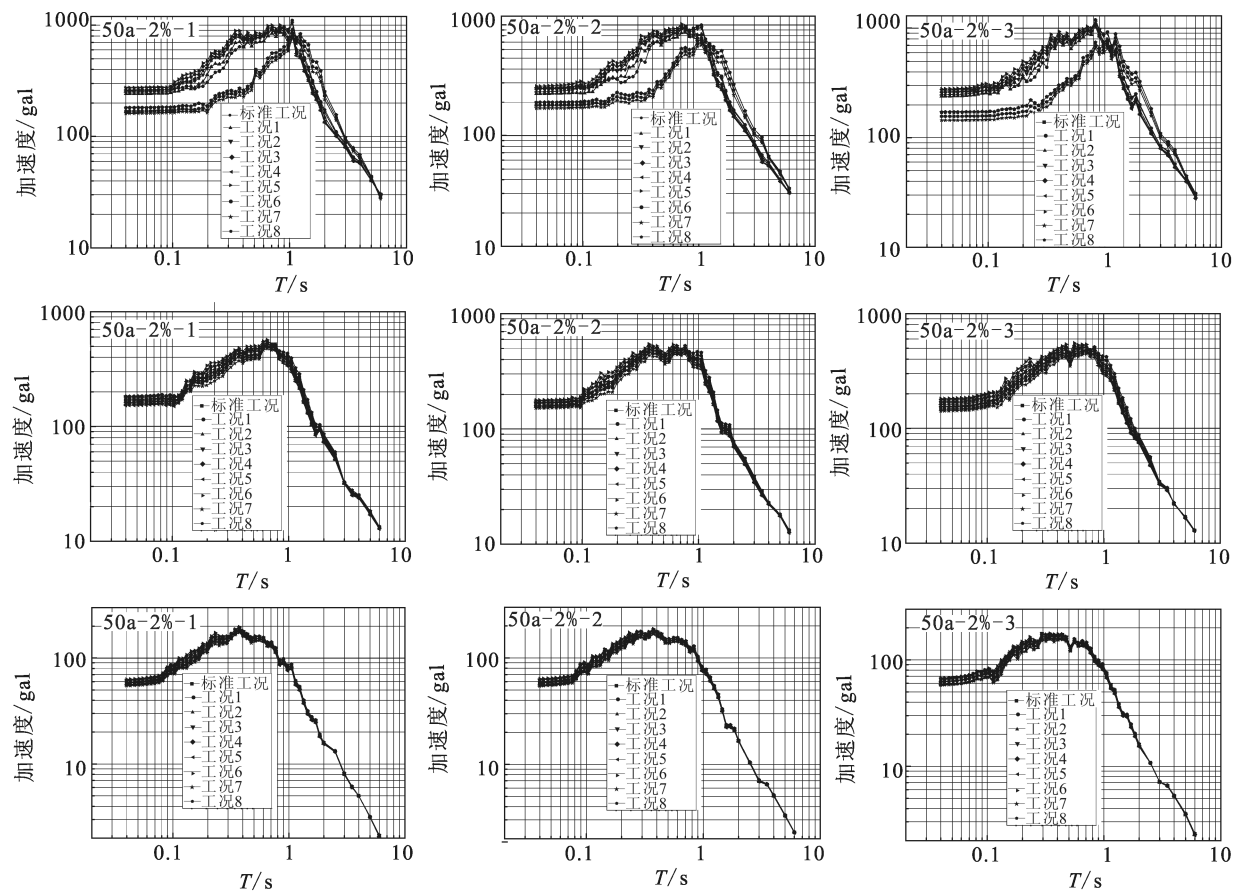


图 3 不同相位、不同工况、不同超越概率水平地表计算反应谱图

Fig.3 The response spectrum curves under different exceeding probabilities,different phases,and different conditions

5 结论

本文在收集天津地区土动力学参数基础上,以该地区某典型场地(Ⅲ类场地)为例,重点讨论在不同地震动强度输入下该地区土动力学参数变异性对地表地震动参数确定的影响。计算结果分析表明:

- (1) 场地地表峰值加速度和反应谱随土动剪切模量比增大或减小而增大或减小,在强地震动输入条件下,地表峰值加速度和地表反应谱的中、高频段随土动剪切模量比减小变化影响尤为明显。
- (2) 场地地表峰值加速度和反应谱随土动阻尼比增大或减小而减小或增大,在强地震动输入时影响明显,且动阻尼比减小变化较其增大变化对结果影响更明显。
- (3) 在强地震动输入条件下,场地土的动剪模量比变异性较其阻尼比变异性对地表峰值加速度和反应谱影响更为显著。

在人们越来越关注建筑抗倒塌设防的今天,在新一代地震动参数区划图颁布伊始,基于以上分析,建议在天津地区的一些重大工程项目抗震设防参数确定时要慎重,尤其是要充分考虑大震条件下的土动力学参数变异性对结果可能产生的影响。

参考文献(References)

[1] 夏峰,宋成科,孟庆筱,等.天津地区覆盖层土动力学参数统计分析[J].地震工程学报,2015,37(1):49-54.
XIA Feng,SONG Chengke,MENG Qingxiao,et al.Analysis of Soil Dynamic Parameters of Overburden in the Tianjin Area [J].China Earthquake Engineering Journal,2015,37(1):49-54.

[2] 夏峰,郭宝震,余大新,等.厚层淤泥质粉质黏土的力学特性参数对地表地震动参数的影响[J].地震工程学报,2016,38(3):391-397.
XIA Feng, GUO Baozhen, YU Daxin, et al. Influence of Dynamic Characteristic Parameters of Thick Mucky Silty Clay on Surface Ground Motion Parameters[J].China Earthquake En-

- gineering Journal, 2016, 38(3): 391-397.
- [3] 王绍博, 丁海平. 土动力参数对土层动力反应的影响[J]. 地震工程与工程震动, 2001, 21(1): 105-108.
WANG Shaobo, DING Haiping. Effect of Soil Dynamic Parameters on Seismic Responses of Soil Layers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(1): 105-108.
- [4] 孔宇阳, 廉超, 李井冈, 等. 武汉地区典型土类动力非线性参数的统计分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 832-837.
KONG Yuyang, LIAN Chao, LI Jinggang, et al. Statistical Analysis of Dynamic Nonlinear Parameters of Typical Soils in Wuhan Area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 832-837.
- [5] 袁晓铭, 孙锐, 孙静, 等. 常规土类动剪模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000(4): 133-139.
YUAN Xiaoming, SUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory Experimental Study on Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of Soil[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000(4): 133-139.
- [6] KOKUSHO T. Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range[J]. Soils and Foundations, 1980(2): 45-60.
- [7] ROLLINS K, EVANS M D, Diehl N B, et al. Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Eng ASCE, 1998(5): 396-405.
- [8] 陈国兴, 刘雪珠, 朱定华, 等. 南京新近沉积土的动剪模量比与阻尼比的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 1023-1027.
CHEN Guoxing, LIU Xuezh, ZHU Dinghua, et al. Experimental Studies on Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of Recently Deposited Soils in Nanjing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 1023-1027.
- [9] 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]. 地震工程与工程振动, 2005(2): 167-171.
LIU Hongshuai, BO Jingshan, WU Zhaoyin, et al. Effects of Soil Parameters on Ground Surface Acceleration Peak and Response Spectra[J]. Journal of Seismological Research, 2005(2): 167-171.
- [10] 陈国兴, 刘雪珠, 王炳辉, 等. 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 Guoxing, LIU Xuezh, WANG Binghui, et al. 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.
- [11] 楼梦麟, 严国香, 沈建文, 等. 上海软土动力参数变异性对土层地震反应的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1368-1372.
LOU Menglin, YAN Guoxiang, SHEN Jianwen, et al. Effect of Variability of Dynamic Parameters of Soft Soil in Shanghai Region on Seismic Response of Layered Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1368-1372.
- [12] 石玉成, 蔡红卫, 徐晖平. 场地地震反应分析中的不确定性及其处理方法[J]. 西北地震学报, 1999, 21(3): 242-247.
SHI Yucheng, CAI Hongwen, XU Huiping. Uncertainties in Site Earthquake Response and the Way of Its Processing[J]. Northwestern Seismological Journal, 1999, 21(3): 242-247.