

昆明盆地土体动力参数对土层地震反应影响研究^①

太树刚, 李建有, 石宝文, 赵淑芳, 常玉芳, 张 鹏

(昆明南方地球物理技术开发有限公司, 云南 昆明 650231)

摘要: 土动力参数是土层地震反应分析的重要参数之一,且具有较强的区域性特点。本文统计分析昆明盆地区域内101个场地的94组粉土和167组黏土的动三轴试验数据,并通过土层地震反应分析计算,与袁晓铭的推荐值和《工程场地地震安全性评价工作规范》(DB001-94)中给出的规范值做对比。结果表明:三种不同的土动力参数存在较大差异,对土层地震反应分析结果亦有较大的影响,随着超越概率的降低,对峰值加速度、反应谱和特征周期的影响更加明显;统计的土动力参数与实际值对应的土层地震反应分析结果较接近,因此统计的粉土和黏土土动力参数在昆明盆地具有一定的代表性和适用性,在Ⅱ、Ⅲ级工程场地地震安全性评价工作中具有一定的借鉴和参考作用。

关键词: 土动力参数; 统计分析; 土层反应; 昆明盆地

中图分类号: O324; TU311.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2016)03-0382-09

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2016.03.0382

Effect of Soil Dynamic Parameters on Seismic Response of Soil Layers in Kunming Basin

TAI Shu-gang, LI Jian-you, SHI Bao-wen, ZHAO Shu-fang, CHANG Yu-fang, ZHANG Peng
(Kunming Southern Geophysical Technology Development Co., Ltd, Kunming 650231, Yunnan, China)

Abstract: Dynamic soil parameters are important for analyzing the seismic response of the soil layer, and have strong regional characteristics. The Kunming basin is a faulted basin that developed after the Late Cenozoic Era. The Pliocene to Quaternary sedimentary thickness reaches up to one thousand meters. The stratum formation is mainly composed of deposition, grade alluvial, and alluvial faces with the shape distribution of a thin layer or lens. The typical soil layer in Kunming basin consists of silt and clay soils. For a deeper understanding of the dynamic soil characteristics in Kunming basin and to conduct a seismic safety evaluation of construction sites, it is important to investigate the statistical values of the dynamic parameters such as the shear modulus ratio and the damping ratio of silt and clay soils at different depths in the Kunming region. In addition, studies are needed to compare the effects of the dynamic parameters' statistical values, norm values, and the recommended values on the soil seismic response by developing soil layer models and analyzing soil seismic responses. In this paper, we analyze the triaxial test dynamic parameters of silt and clay from 94 and 167 sample groups, respectively, collected from 101 sites in the Kunming basin region. Based on our soil seismic response calculations, we compare our results with the values recommended from Yuan Xiaoming and with those found in the code for the seismic safety evaluation of engineering sites (DB001-94). The results show that our statistical values of the dynamic parameters differ greatly from the other two sets of recommended values.

① 收稿日期:2015-04-13

作者简介:太树刚(1978—),男,工程师,主要从事工程场地地震安全性评价和工程质量检测工作。

E-mail:sgtai78@163.com

The effects of different dynamic parameters on the soil seismic response are obvious and those with a lower probability of exceedance include the influences on peak acceleration, response spectra, and characteristic period. The site response analysis results of the statistical and test values are similar. The statistical values can be used for reference in work levels II and III for the seismic risk assessment of engineering projects in Kunming basin.

Key words: soil dynamic parameters; statistical analysis; soil seismic response; Kunming basin

0 引言

等效线性化土层地震反应分析方法是目前最常用的土层地震反应方法,而土的动剪切模量比和阻尼比是该方法中不可或缺的参数。《工程场地地震安全性评价》^[1]规定:I 级工作应对各层土样进行动三轴和共振柱试验,II 级工作和地震小区划应对有代表性的土样进行动三轴或共振柱试验。对于 II 级工作和地震小区划,场地中的薄层或透镜体则可以参考基于试验数据得到的规范值或推荐值。目前应用较为广泛的有《工程场地地震安全性评价工作规范》^[2]中给出的规范值和袁晓铭等^[3]对全国中东部十几个地区的常规土类进行大量试验所给出的推荐值。

施春花等^[4]、孔宇阳等^[5]和兰景岩等^[6]分别对北京地区粉质黏土、武汉地区典型土类和渤海不同土类土动力学参数进行统计分析,并做了适用性论证;吕悦军等^[7]对渤海海底的常规土类动剪切模量比和阻尼比进行了试验研究,得出各类土的动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化关系及推荐值;战吉艳等^[8]、张亚军等^[9]分别对苏州和渤海海域典型土类的土动力学参数进行了统计分析。大量的研究表明,由于土的类型、形成时代及沉积环境的不同,土的动力学参数存在较强的区域性。

昆明盆地是晚新生代以来形成的断陷盆地,上新世~第四纪沉积厚达千米,地层主要以湖积、冲积和冲洪积相为主,多以薄层或透镜体形态分布。本文拟对昆明盆地典型土层——粉土、黏土动三轴试验所得的动剪切模量比和阻尼比数据进行统计分析,给出不同埋深的动力学参数统计值,并通过土层地震反应分析,对比规范值和推荐值,论述本文所得的统计值对于昆明地区地震安全性评价结果的适用性。

1 数据统计来源

共收集了昆明盆地区域范围内 101 个场点(图 1)的 94 组粉土和 167 组黏土的动三轴试验数据。动三轴试验数据由云南省设计院集团勘察分院、山

东同方防震技术有限公司及山东省地震工程研究院土力学与年代学试验室完成。试验仪器均使用北京市新技术研究所生产的 DDS-70 微机控制电磁式多功能静动三轴试验系统。收集的所有样品埋深在 1 ~100 m 之间,在浸水饱和及固结完成后,在不排水的条件下进行试验。

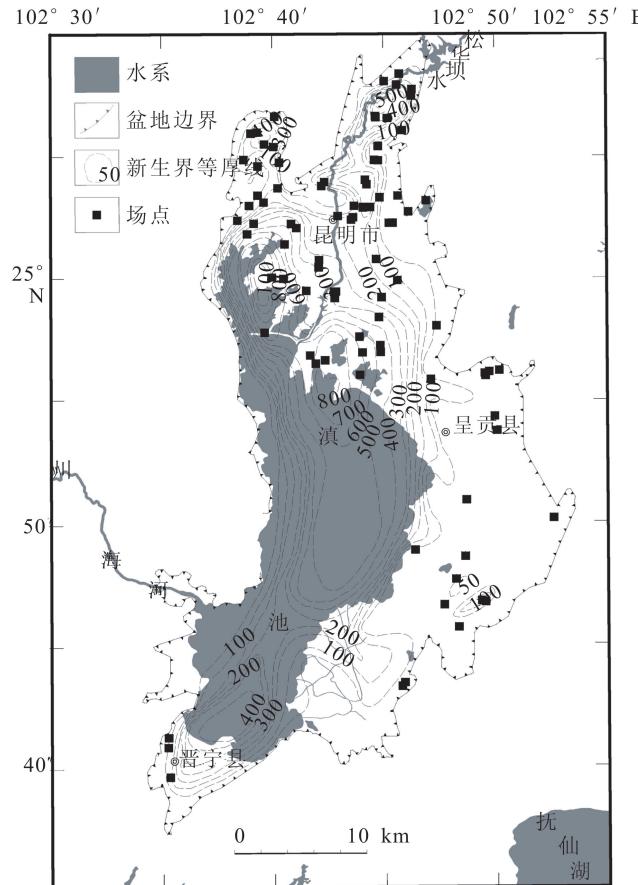


图 1 工程场点分布图

Fig.1 Distribution map of project sites

2 数据的统计结果与分析

由于土样的埋深对土的剪切模量比和阻尼比有重要影响^[10-11],故综合考虑统计样本数量,剔除异常值后,按照表 1 中不同埋深区间进行粉土和黏土的统计。表 2 给出了不同埋深区间的统计平均值。

统计分析表明,随剪应变的增大,动剪切模量比和阻尼比试验值离散程度呈先增大后减小的趋势。

以粉土 15~30 m 区间为例,从样本值和平均值的统计情况及离差(图 2)可以看出,当剪应变增大时,动剪切模量比的最大离差绝对值从 0.003 6 增加至 0.204 8,而后减小至 0.165 1;阻尼比的最大离差绝对值从 0.032 0 增加至 0.063 4,而后减小至 0.051 2。黏土在 10~15 m 区间中,从样本值和平均值的统计情况及离差(图 3)可以看出,当剪应变增大时,动剪切模量比的最大离差绝对值从 0.003 8 增加至

0.230 3,而后减小至 0.105 0;阻尼比的最大离差绝对值从 0.043 8 增加至 0.094 2,而后减小至 0.084 1。无论是粉土还是黏土,剪应变为 $5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ 时,动剪切模量比的离差值曲线较为平缓,而剪应变为 $5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2}$ 时,离差值曲线“跳跃”较为明显;对于阻尼比,不同剪应变对应的离差值曲线“跳跃”均较明显,即阻尼比的离散性相对动剪切模量更大,这可能与黏性土阻尼的离散性较大有关^[12]。

表 1 样本量统计

Table 1 Statistics of soil samples at different depth ranges

	深度/m	0~15	15~30	30~45	45~60	60~75	75~100			
粉土	样本数量/组	14	18	16	19	13	14			
	总计					94				
黏土	深度/m	0~5	5~10	10~15	15~20	20~30	30~40	40~60	60~80	>80
	样本数量/组	14	22	15	20	20	18	22	28	8
	总计					167				

表 2 不同埋深区间的统计平均值

Table 2 Mean values of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soil samples at different depth ranges

土类	深度/m	参数	剪应变 $\gamma /(\times 10^{-4})$							
			0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
粉土	0~15	G/G_{\max}	0.997 4	0.994 6	0.976 1	0.952 5	0.805 0	0.691 7	0.331 4	0.201 0
		λ	0.007 1	0.009 7	0.020 4	0.029 0	0.066 0	0.090 5	0.148 9	0.166 3
	15~30	G/G_{\max}	0.997 2	0.994 4	0.972 8	0.947 4	0.799	0.680 4	0.309 5	0.181 1
		λ	0.008 3	0.011 2	0.023 4	0.032 8	0.073 0	0.100 4	0.169 3	0.190 1
	30~45	G/G_{\max}	0.997 9	0.995 9	0.979 7	0.960 4	0.826 5	0.697 5	0.338 8	0.206 9
		λ	0.009 3	0.012 2	0.025 1	0.035 0	0.076 4	0.103 9	0.172 1	0.181 2
	45~60	G/G_{\max}	0.997 9	0.995 8	0.979 6	0.960 2	0.832 6	0.690 1	0.342 6	0.206 2
		λ	0.007 1	0.010 1	0.022 9	0.032 8	0.073 3	0.099 5	0.166 0	0.187 6
	60~75	G/G_{\max}	0.992 4	0.985 1	0.935 3	0.900 4	0.675 1	0.574 9	0.294 6	0.113 9
		λ	0.023 2	0.030 1	0.055 2	0.070 9	0.121 2	0.150 3	0.189 7	0.204 4
黏土	75~100	G/G_{\max}	0.996 8	0.994 4	0.973 2	0.948 8	0.825 9	0.707 8	0.364 8	0.227 9
		λ	0.010 0	0.013 3	0.026 9	0.037 0	0.076 1	0.100 0	0.157 9	0.163 6
	0~5	G/G_{\max}	0.997 8	0.995 6	0.978 3	0.957 6	0.821 4	0.700 4	0.329 4	0.199 9
		λ	0.005 8	0.008 0	0.018 1	0.026 2	0.062 5	0.088 1	0.156 4	0.178 5
	5~10	G/G_{\max}	0.997 3	0.994 5	0.973 3	0.948 4	0.791 9	0.661 6	0.294 6	0.175 5
		λ	0.013 9	0.018 2	0.034 9	0.046 9	0.092 8	0.120 4	0.181 9	0.199 0
	10~15	G/G_{\max}	0.997 5	0.995 1	0.976 0	0.953 3	0.808 2	0.683 6	0.315 9	0.190 7
		λ	0.013 6	0.017 6	0.033 9	0.045 9	0.093 2	0.122 3	0.186 8	0.204 7
	15~20	G/G_{\max}	0.997 7	0.995 5	0.977 8	0.956 7	0.819 1	0.698 4	0.332 1	0.203 3
		λ	0.017 3	0.021 9	0.038 6	0.050 0	0.091 5	0.116 2	0.172 8	0.189 1
	20~30	G/G_{\max}	0.998 0	0.996 0	0.980 3	0.965 0	0.836 4	0.723 0	0.357 5	0.221 5
		λ	0.016 2	0.020 9	0.039 3	0.052 2	0.100 6	0.130 2	0.200 8	0.222 6
	30~40	G/G_{\max}	0.997 9	0.995 7	0.978 9	0.958 9	0.827 5	0.710 8	0.346 1	0.214 0
		λ	0.010 4	0.014 2	0.029 5	0.040 8	0.086 6	0.116 5	0.190 2	0.212 7
	40~60	G/G_{\max}	0.997 6	0.995 1	0.976 0	0.953 4	0.808 5	0.683 9	0.316 3	0.191 2
		λ	0.012 4	0.016 3	0.031 8	0.043 1	0.087 5	0.115 6	0.184 9	0.206 1
	60~80	G/G_{\max}	0.997 4	0.994 9	0.975 0	0.951 5	0.801 7	0.674 1	0.304 9	0.182 5
		λ	0.011 8	0.015 4	0.030 3	0.041 7	0.089 0	0.119 6	0.190 8	0.211 1
	>80	G/G_{\max}	0.997 9	0.995 9	0.979 9	0.960 7	0.847 0	0.721 6	0.359 5	0.223 7
		λ	0.018 3	0.023 3	0.041 9	0.054 4	0.098 9	0.124 5	0.183 3	0.201 2

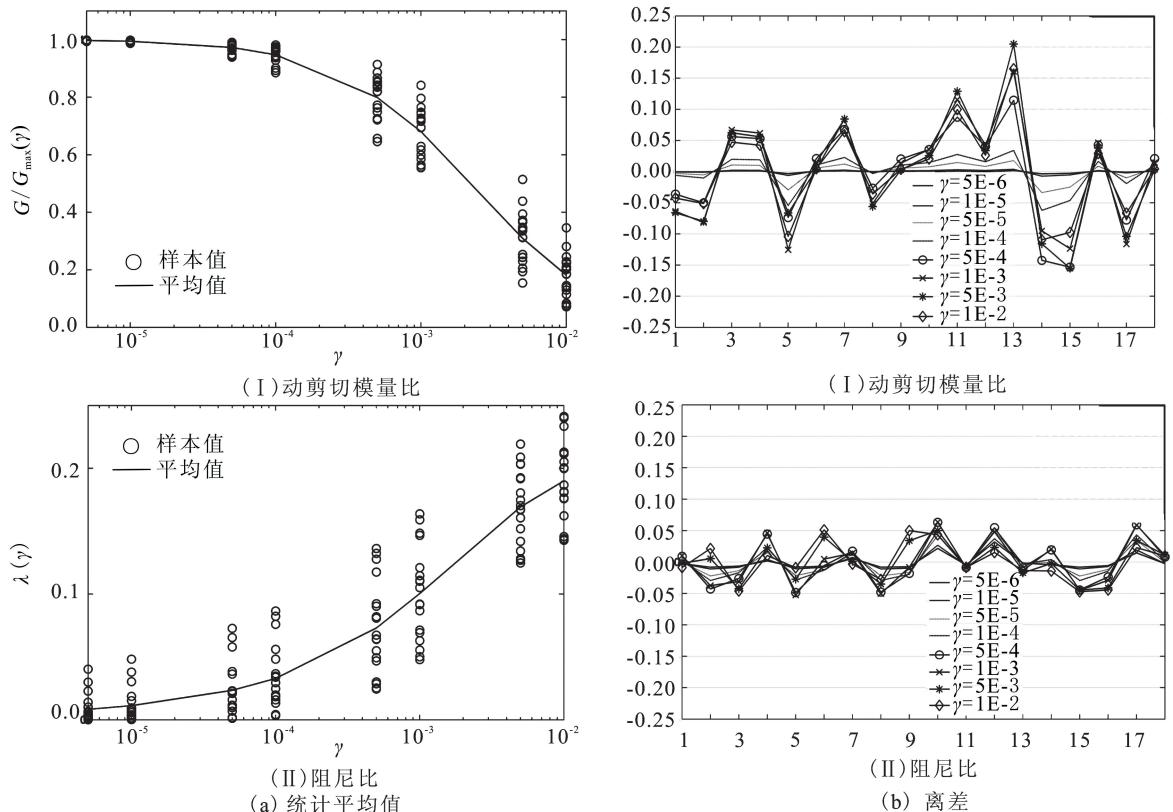


图 2 粉土 15~30 m 区间动剪切模量比与阻尼比的统计平均值及离差

Fig.2 Mean values and deviations of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of silt at a depth of 15~30 m

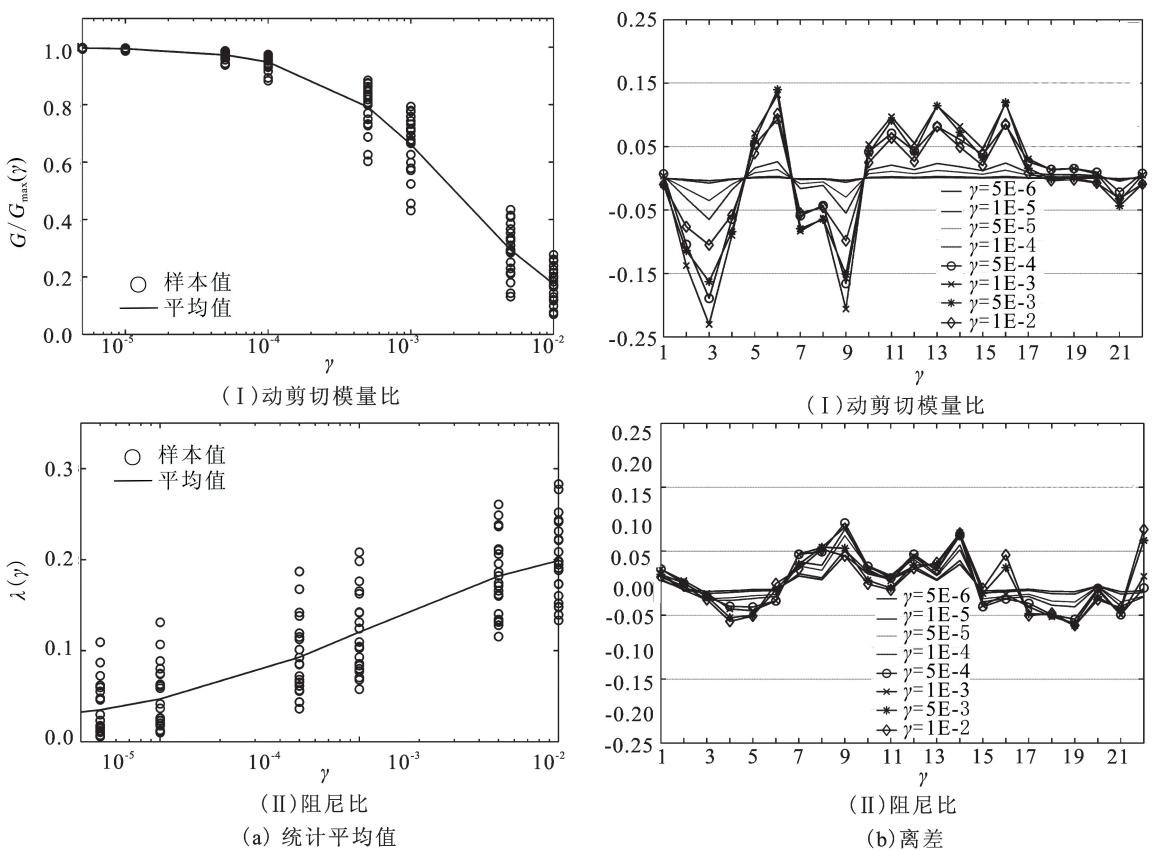
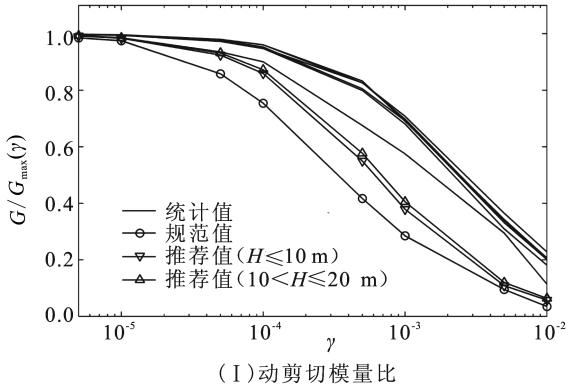


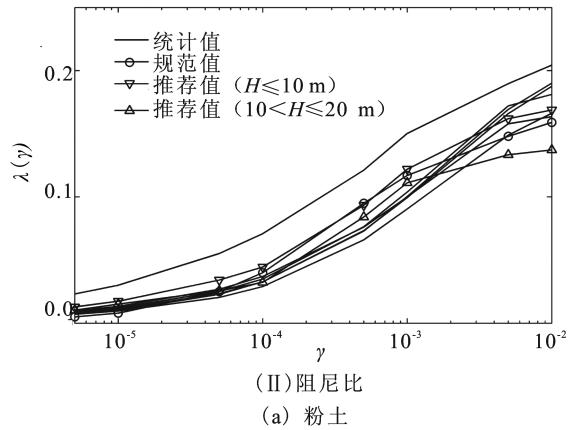
图 3 黏土 5~10 m 区间动剪切模量比与阻尼比的统计平均值及离差

Fig.3 Mean values and deviations of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of clay at a depth of 5~10 m

图4(a)表明:粉土的动剪切模量比统计值最高,尤其在大应变值范围内,明显高于推荐值和规范值;剪应变在 10×10^{-4} 时不同深度的粉土统计值均大于规范值的一倍多,最大为规范值的2.5倍;与袁晓铭的推荐值相比,统计值是推荐值的1.4~1.9



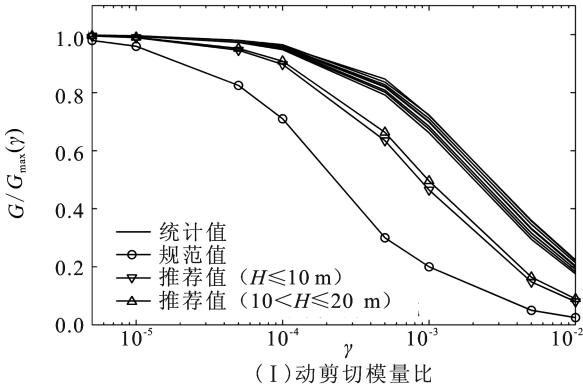
(I) 动剪切模量比



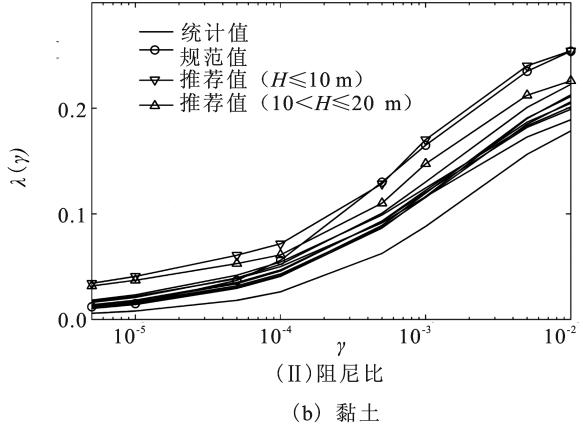
(II) 阻尼比

(a) 粉土

倍。由图4(b)可看出,黏土的动剪切模量比同样是统计值最高,规范值最低;剪应变在 10×10^{-4} 时黏土的统计值是规范值的3.3~3.6倍;与袁晓铭的推荐值相比,统计值是推荐值的1.3~1.6倍。而粉土和黏土的三种阻尼比总体相差均不明显。



(I) 动剪切模量比



(II) 阻尼比

(b) 黏土

图4 动剪切模量比和阻尼比统计值与规范值、袁晓铭推荐值的对比

Fig.4 Comparison of the values of dynamic shear modulus ratio and damping ratio proposed by Yuan Xiaoming, code, and values in this paper

3 土体动力参数对土层地震反应的影响

动剪切模量比和阻尼比对土层动力反应的影响显著^[13-14],尤其是地震活动强烈地区($\geq 0.2g$ 的区域),等效剪应变 10^{-3} 附近或更高值域的土体剪切模量比值往往对土层地震反应的计算结果产生很大的影响^[15]。上述统计分析表明统计值、规范值和推荐值有较大差异。为了分析这种差异对土层地震反应分析的影响,下面针对2个实际场地钻孔模型,分别运用统计值、推荐值、规范值及实际值(钻孔中土样动三轴试验值)4种不同的土动力学参数进行计算比较。

3.1 计算模型及计算参数的选取

采用昆明盆地2个典型钻孔作为计算模型(表3)。计算模型1和计算模型2中剪切波速、密度值和其余土类的动力学参数均为实测所得,仅粉土和

黏土的土动力学参数采用统计值、推荐值、规范值和实际值分别进行计算。

根据地震危险性分析结果,采用人工合成地震动,按50年超越概率63%、10%和2%三种概率水准合成基岩加速度时程。为了考虑相位随机的影响,每一概率水准合成3条时程曲线(图5)进行土层地震反应计算。土层地震反应分析采用一维频域等效线性化计算程序^[16]。

3.2 土层地震反应计算结果及分析

运用一维等效线性化波动方法进行地震反应分析计算,三种不同的土动力学参数对应的50年超越概率63%、10%和2%的地表平均反应谱见图6,地震动加速度峰值和速度峰值列于表4。反应谱特征周期利用双参数法^[17]确定(表5):

$$T_g = 4.44 \times \frac{V_{\max}}{A_{\max}}$$

表 3 计算模型

Table 3 Computational models

计算模型 1				计算模型 2					
序号	土性名称	厚度/m	波速/(m·s ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	序号	土性名称	厚度/m	波速/(m·s ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)
1	填土	2.8	157	1.60	1	填土	2.9	153	1.60
2	黏土	3.4	163	1.84	2	黏土	2.1	158	1.78
3	砂砾石	5.7	204	2.01	3	砂砾石	2.7	207	2.01
4	粉土	4.2	185	1.89	4	粉土	4.8	182	1.89
5	粉土	6.4	188	1.89	5	黏土	4.3	188	1.85
6	粉土	3.5	194	1.89	6	粉土	4.1	204	1.89
7	黏土	2.6	206	1.85	7	黏土	4.3	193	1.86
8	粉土	4.6	236	1.88	8	黏土	7.3	215	1.86
9	黏土	4.6	239	1.86	9	粉土	5.7	278	1.88
10	粉土	5.7	290	1.88	10	粉土	7.1	310	1.90
11	粉土	6.1	324	1.90	11	粉砂	6.1	324	1.93
12	黏土	5.8	306	1.87	12	黏土	5.4	330	1.89
13	粉土	4.2	357	1.92	13	粉土	5.4	367	1.92
14	黏土	5.8	367	1.89	14	粉土	4.4	400	1.92
15	黏土	5.2	401	1.89	15	黏土	4.7	398	1.89
16	粉土	6.6	433	1.92	16	粉土	5.1	427	1.95
17	黏土	7.1	405	1.89	17	黏土	6.5	405	1.89
18	粉土	8.5	465	1.95	18	粉土	8.0	450	1.95
19	泥质砂岩		543	2.10	19	泥质砂岩		537	2.10

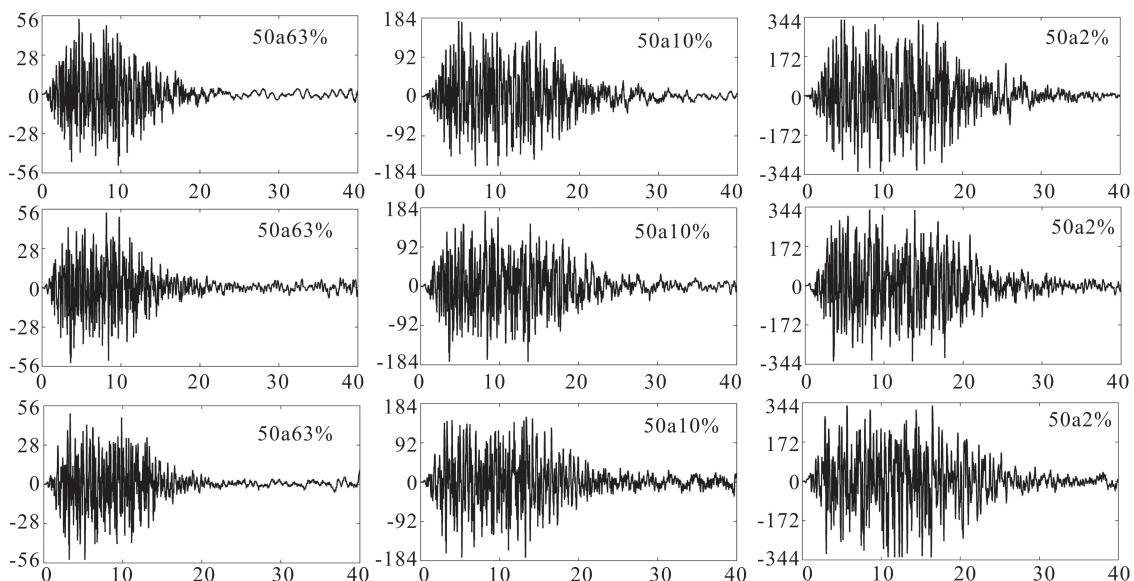


图 5 输入地震动加速度时程

Fig.5 Acceleration time histories of ground motion

表 4 不同土动力学参数取值下的峰值加速度和峰值速度

Table 4 Peak acceleration and peak velocity from different soil dynamic parameters

计算模型	概率水准(50 年)	加速度峰值 / gal				速度峰值 / (cm·s ⁻¹)			
		统计值	推荐值	规范值	实际值	统计值	推荐值	规范值	实际值
1	63%	81.5	74.2	66.9	84.8	9.8	9.7	9.5	9.8
	10%	242.9	189.6	99.2	253.5	31.3	32.7	24.8	32.4
	2%	442.2	282.7	132.7	466.1	72.4	64.9	42.9	76.0
2	63%	81.5	75.3	66.0	84.1	9.6	9.8	9.7	9.9
	10%	217.1	194.0	97.5	231.4	30.4	32.5	25.8	31.7
	2%	405.6	355.6	115.9	451.2	67.7	68.7	43.3	70.3

表 5 不同土动力学参数取值下的特征周期

Table 5 Characteristic period from different soil dynamic parameters

概率水准(50 年)	特征周期 T_g /s							
	计算模型 1				计算模型 2			
	统计值	推荐值	规范值	实测值	统计值	推荐值	规范值	实测值
63%	0.53	0.58	0.63	0.51	0.52	0.58	0.65	0.52
10%	0.57	0.77	1.11	0.57	0.62	0.74	1.17	0.61
2%	0.73	1.02	1.44	0.72	0.74	0.86	1.66	0.69

式中: A_{\max} 为加速度峰值; V_{\max} 为速度峰值。

从图 6 可以看出, 50 年超越概率为 63% 的情况下, 四种不同土动力学参数对应的反应谱差别不大, 而 50 年超越概率为 10% 和 2% 时, 实测值和袁晓铭的推荐值与规范值对应的反应谱差别较大, 尤其在大震情况下, 差别更明显。这种差别主要表现为在高、中频段, 谱值从高到低依次为实测值、推荐值和规范值; 而在低频段正好相反。采用本文统计值计算所

得的反应谱较推荐值和规范值, 是最接近实际反应谱的。由表 4~表 6 可以得出, 用统计值计算所得的地震动参数最接近实测值的地震动参数, 相差不超过 10%; 而采用推荐值和规范值所得的计算结果与实测值的差异较大, 规范值的更甚。随着概率水准的减小, 峰值加速度的差异变大, 峰值速度和特征周期亦有变大的趋势。

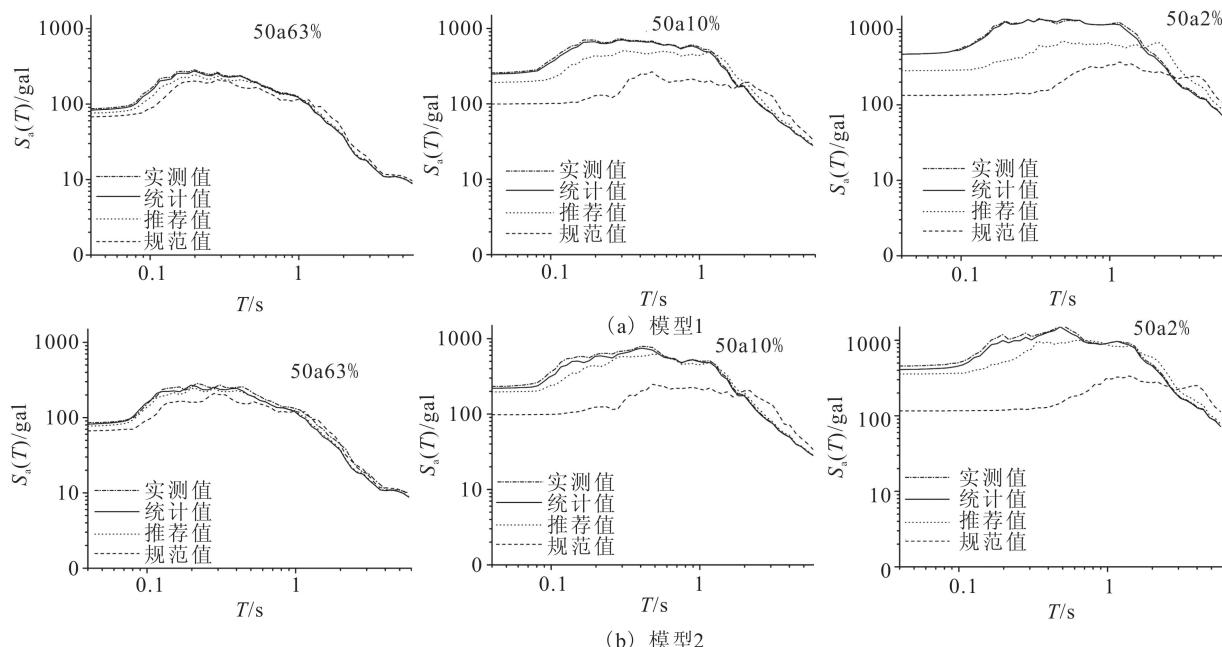


图 6 不同概率水准不同土动力学参数的平均反应谱曲线

Fig.6 Average response spectrum curves of different soil dynamic parameters at different exceeding probabilities

表 6 三种土动力学参数与实测值计算结果的误差

Table 6 Deviation of results between three schemes of soil dynamic parameters and measured values

计算模型	概率水准(50 年)	误差值/%								
		峰值加速度			峰值速度			特征周期		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
1	63%	4	13	21	0	1	3	4	14	24
	10%	4	25	61	3	1	23	0	35	95
	2%	5	39	72	5	15	44	1	42	100
2	63%	3	10	22	3	1	2	0	12	25
	10%	6	16	58	4	3	19	2	21	92
	2%	10	21	74	4	2	38	7	25	141

注: 表中 T1、T2、T3 分别代表统计值、推荐值和规范值

综上所述,不同土动力参数对以Ⅱ、Ⅲ类场地为主的昆明盆地的土层地震反应分析的结果影响较大,再次印证了土动力参数具有较强的区域性。本文统计值的数据资料来源于昆明盆地,与规范值和推荐值相比,更能代表昆明盆地区域场地土的动力特性。

4 结论与讨论

本文对昆明盆地粉土和黏土的土动力参数进行了不同深度的统计分析,并与目前运用较为广泛的袁晓铭的推荐值和规范值做了分析对比,得出以下结论:

(1) 统计值的动剪切模量比最高,尤其在大应变值范围(0.001~0.01)内,明显高于推荐值和规范值;其次为推荐值和规范值。而三者的阻尼比总体相差不明显。

(2) 50年超越概率为63%的情况下,不同土动力参数对应的反应谱、地震动加速度峰值和特征周期差别不明显;50年超越概率为10%和2%时,实测值对应的反应谱与规范值和推荐值的差别较明显,而与统计值较接近,误差不超过10%。

(3) 在高、中频段,统计值和推荐值计算的反应谱高于规范值计算的反应谱;在低频段则正好相反。

(4) 不同概率水准下计算的特征周期,统计值最小,规范值最大,两者最大相差约1倍。

经对比分析,采用本文统计的土动力参数,在昆明盆地更具代表性和适用性,因此本文的统计值在Ⅱ、Ⅲ级工程场地地震安全性评价工作中具有一定的借鉴和参考作用。由于统计样本数量的限制,统计中只考虑了围压(埋深)对土动力学参数的影响,而未考虑土体的密度、状态、沉积时代等因素的影响。鉴于多因素的影响,土动力学参数具有较大的离散性,故在影响重大的工程和超高层建筑中不可直接使用本文的统计值。

参考文献(References)

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB 17741-2005,工程场地地震安全性评价[S].北京:中国标准出版社,2005;5. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China.GB 17741-2005, Evaluation of Seismic Safety for Engineering Sites[S].Beijing: Standards Press of China,2005;5.(in Chinese)
- [2] 中国地震局.DB001-94,工程场地地震安全性评价工作规范[S].北京:地震出版社,1994;1-50. China Earthquake Administration.DB001-94, Code for Seismic Safety Evaluation of Engineering Site[S].Beijing:Seismological Press,1994:1-50.(in Chinese)
- [3] 袁晓铭,孙锐,孙静,等.常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J].地震工程和工程振动,2000,20(4):133-139. XUAN Xiao-ming,SUN Rui,SUN Jing, et al. Laboratory Experimental Study on Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of Soils[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2000,20(4):133-139.(in Chinese)
- [4] 施春花,吕悦军,彭艳菊,等.北京地区粉质粘土动力学参数的统计分析[J].震灾防御技术,2009,4(1):69-79. SHI Chun-hua, LV Yue-jun, PENG Yan-ju, et al. Statistical Analysis of Dynamic Parameters of Silty Clay in Beijing Area [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2009, 4 (1):69-79. (in Chinese)
- [5] 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,2014,12(4):832-837. KONG Yu-yang, LIAN Chao, LI Jing-gang, et al. Statistical Analysis of Dynamic Nonlinear Parameters of Typical Soils in Wuhan Area[J].China Earthquake Engineering Journal, 2014, 12(4):832-837.(in Chinese)
- [6] 兰景岩,刘化涤,吕悦军,等.渤海海域典型场地土的动剪切模量比和阻尼比的统计值[J].地震研究,2012,35(2):260-267. LAN Jing-yan, LIU Hua-di, LV Yue-jun, et al. Statistical Value of Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of the Soils in Bohai Sea[J].Journal of Seismological Research,2012, 35(2):260-267.(in Chinese)
- [7] 吕悦军,唐荣余,沙海军.渤海海底土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J].防灾减灾工程学报,2003,23(2):35-42. LV Yue-jun, TANG Rong-yu, SHA Hai-jun. Experimental Study on Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of the Soils of Bohai Seafloor[J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003,23(2):35-42.(in Chinese)
- [8] 战吉艳,陈国兴,杨伟林,等.苏州第四纪沉积土动剪切模量比和阻尼比试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(3):559-566. ZHAN Ji-yan, CHEN Guo-xing, YANG Wei-lin, et al. Experimental Study on Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of Suzhou Quaternary Sedimentary Soil[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(3):559-565.(in Chinese)
- [9] 张亚军,兰宏亮,崔永高.上海地区土动剪切模量比和阻尼比的统计研究[J].世界地震工程,2010,26(2):171-175. ZHANG Ya-jun, LAN Hong-liang, CUI Yong-gao. Statistical Studies on Shear Modulus Ratios and Damping Ratios of Soil in Shanghai Area[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26 (2):171-175.(in Chinese)
- [10] 袁晓铭,孙静,非等向固结下砂土最大动剪切模量增长模式及Hardin公式修正[J].岩土工程学报,2005,27(3):264-269. YUAN Xiao-ming, SUN Jing. Model of Maximum Dynamic Shear Modulus of Sand under Anisotropic Consolidation and Revision of Hardins Formula[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(3):264-269.(in Chinese)
- [11] Zhang J F, Andrus R D, Juang C H. Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships[J].Journal of

- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131 (4): 453-464.
- [12] 蔡辉腾, 危福泉, 蔡宗文. 重庆主城区粉质黏土动力特性研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊2): 224-228.
CAI Hui-teng, WEI Fu-quan, CAI Zong-wen. Study of Silty Clay Dynamic Characteristics in Chongqing Downtown Area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Supp2): 224-228. (in Chinese)
- [13] 王绍博, 丁海平. 土动力参数对土层动力反应的影响 [J]. 地震工程和工程振动, 2001, 21(1): 105-108.
WANG Shao-bo, DING Hai-ping. Effect of Soil Dynamic Parameters on Seismic Responses of Soil Layers[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(1): 105-108. (in Chinese)
- [14] 兰景岩, 薄景山. 土动力学参数对设计反应谱的影响 [J]. 地震工程和工程振动, 2008, 28(3): 184-188.
LAN Jing-yan, BO Jing-shan. Effect of Soil Dynamic Parameters on Design Response Spectrum[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(3): 184-188. (in Chinese)
- [15] 李小军. 工程场地地震安全性评价工作及相关技术问题 [J]. 震灾防御技术, 2006, 1(1): 15-24.
LI Xiao-jun. Evaluation of Seismic Safety for Engineering Sites and Relevant Technical Problems[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(1): 15-24. (in Chinese)
- [16] 廖振鹏, 李小军. 地表土层地震反应的等效线性化解法 [C]// 地震小区划——理论与实践. 北京: 地震出版社, 1989: 141-153.
LIAO Zhen-peng, LI Xiao-jun. Equivalent Linearization Method for Solving the Seismic Response of the Surface Soil[C]// Seismic Microzonation Theory and Practice. Beijing: Seismological Press, 1989: 141-153. (in Chinese)
- [17] 廖振鹏, 李大华. 设计地震反应谱的双参数标定模型 [C]// 地震小区划——理论与实践. 北京: 地震出版社, 1989: 196-206.
LIAO Zhen-peng, LI Da-hua. A Two-parameter Calibrating Model for Seismic Response Spectrum[C]//Earthquake Microzonation Theory and Practice. Beijing: Seismological Press, 1989: 196-206. (in Chinese)

(上接 381 页)

- XU Guang-xing, YAO Ling-kan, LI Zhao-hong, et al. Dynamic Response of Slopes under Earthquakes and Influence of Ground Motion Parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 918-923. (in Chinese)
- [12] 吴志坚, 王兰民, 陈拓, 等. 汶川地震远场黄土地震动场地放大效应机制研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3736-3740.
WU Zhi-jian, WANG Lan-min, CHEN Tuo, et al. Study of Mechanism of Site Amplification Effects on Ground Motion in Far Field Loess during Wenchuan Ms8.0 Earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3736-3740. (in Chinese)
- [13] Louis Gelli, Pierre-Yves Bard, Beatrice Jullien. The Effect of Topography on Earthquake Ground Motion: A Review and New Results[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988, 78(1): 42-63.
- [14] 王伟. 地震动的山体地形效应研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011.
WANG Wei. Effect of Hill Topography on the Ground Motion [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2011. (in Chinese)
- [15] 王海云. 土层场地的放大作用随深度的变化规律研究——以金银岛岩土台阵为例 [J]. 地球物理学报, 2014, 37(3): 1498-1509.
WANG Hai-yun. Study on Variation of Soil Site Amplification with Depth: A Case at Treasure Island Geotechnical Array, San Francisco Bay[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 37(3): 1498-1509. (in Chinese)