武汉地区典型土类动力非线性参数的统计分析。

孔宇阳^{1,2},廉 超^{1,3},李井冈^{1,2},宋 琛^{1,3}

(1.中国地震局地震研究所,湖北 武汉 430071; 2.地震大地测量重点实验室,湖北 武汉 430071;3.武汉地震工程研究院有限公司,湖北 武汉 430071)

摘要:利用武汉地区地震安全性评价报告中共振柱实验获得的1403组土动力非线性参数数据,统 计出武汉地区7种不同土性不同埋深的土类在8个典型应变下的动剪切模量比和阻尼比的平均 值。根据2个工程场地在实验值、统计平均值、规范值输入下的土层地震反应分析结果,对比分析 了3种土动力参数值对场地地震动参数的影响,对所给出的平均值的合理性进行分析。结果表明, 与规范值相比,统计平均值与实验值的土层地震反应分析结果基本一致,计算结果真实合理,可供 武汉地区场地土动力学参数实验数据缺乏时参考使用。

关键词:武汉地区;共振柱实验;动力非线性参数;地震反应分析;合理性分析 中图分类号:P315.9 文献标志码:A 文章编号:1000-0844(2014)04-0832-06 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0832

Statistical Analysis of Dynamic Nonlinear Parameters of Typical Soils in Wuhan Area

KONG Yu-yang^{1,2}, LIAN Chao^{1,3}, LI Jing-gang^{1,2}, SONG Chen^{1,3}

(1.Institute of Seismology, CEA, Wuhan, Hubei 430071, China;
2.Key laboratory of Earthquake Geodesy, Wuhan, Hubei 430071, China;
3.Wuhan Institute of Earthquake Engineering CO. LTD, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: In recent years, seismic safety evaluation has been conducted at many engineering sites in the Wuhan area in which the dynamic nonlinear parameters of various soils were obtained. These data show diversification of soil patterns and a reasonable layout of space. According to factors such as the soil's nature, geological formation, and physical and mechanical properties, the strata are classified roughly as silty clay, clay, silt, silty sand, silty and fine sand, fine sand, and coarse sand. Among these categories, 750 groups of silty clay are identified in addition to 244 groups of clay, 63 groups of silt, 69 groups of silty sand, 93 groups of silty and fine sand, 153 groups of fine sand, and 31 groups of coarse sand. Considering the influence of depth, or confining pressure, these groups are further divided. For silty clay, 373 groups are classified at $0 \sim 10$ m, 272 at $10 \sim 20$ m,79 at $20 \sim 30$ m, and 26 at $30 \sim 50$ m. For clay, 132 groups are classified at $0 \sim 10$ m, 96 at $10 \sim 20$ m, and 16 at $20 \sim 30$ m. For silt, 23 groups are classified at $0 \sim 10$ m, 29 at $10 \sim 20$ m, and 11 at $20 \sim 40$ m.For silty sand, 34 groups are classified at $0 \sim 20$ m and 35 at $20 \sim 50$ m.For silty and fine sand, 22 groups are classified at $10 \sim 20$ m, 64 at $20 \sim 40$ m, and 7 at $40 \sim 60$ m. For fine sand, 39 groups are classified at $0 \sim 20$ m, 97 at $20 \sim 40$ m, and 17 at $40 \sim 60$ m. For coarse sand (medium sand and coarse sand), 13 groups are classified at $15 \sim 30$ m and 18 at $30 \sim 50$ m. The dynamic nonlinear parameters of soil samples were tested using a free vibration column apparatus.

The dynamic nonlinear parameters of 1403 groups of soil samples from the seismic evaluation reports of the Wuhan area were used to obtain the statistical mean values for the dynamic shear modulus ratios and the damping ratios of seven types of soil with varying depths under eight typical strains. To analyze the rationality of the statistical mean values, two typical engineering sites are chosen in which seismic response analysis is conducted. On the basis of the results, the influences of actual test values and the statistical mean standard values of code DB001-94 on ground motion parameters are compared and analyzed. In addition, the rationality of statistical mean values is demonstrated.Compared with the results of the code, the seismic response analysis results of the statistical mean values are closer to the results obtained using actual test values. Under the conditions of moderate and strong earthquakes, certain differences are noted between the results of the code and the actual test values. These differences cannot be ignored; the statistical mean values are believable and reasonable. These values can be used as references in the case of insufficient soil dynamic parameters at the Wuhan sites. However, the statistical values differ significantly when using different dynamic parameters at the same site. Therefore, for seismic safety analysis of major projects, soil sampling, and dynamic parameter testing must be conducted in accordance with the requirements of relevant codes.

Key words: Wuhan area; resonant column test; dynamic nonlinear parameters; seismic response analysis; rationality analysis

0 引言

土的动剪切模量和阻尼比是反映土体动力学特 性的两个重要参数,是重大工程场地地震安全性评 价和场地土层地震反应分析中不可或缺的基础资 料。因此对武汉地区典型土类的动剪切模量和阻尼 比进行统计研究,具有重要的应用价值和工程意义。 由于土的类型、沉积环境、地质年代不同,土的动剪 切模量和阻尼比与剪应变幅值的变化规律具有较强 的区域性。许多学者对不同地区土的动剪切模量比 和阻尼比进行了大量的实验研究与统计分析,得到 了一些可供实际工程选用的成果。张亚军等使用 352 组共振柱实验结果统计了上海地区各层土 8 组 典型剪应变下动剪切模量和阻尼比值[1]。兰青龙等 使用 142 组土样的动三轴实验结果,给出了太原地 区 8 种土类的动力非线性参数^[2]。战吉艳等利用 140 组土样的共振柱实验结果,给出了苏州第四纪 各类土的动剪切模量和阻尼比值与剪应变平均关系 曲线推荐值[3]。兰景岩等利用渤海海域6种典型土 类共 372 组动三轴实验结果,统计了渤海海域典型 场地土的动力性能,给出了渤海海域典型场地土的 动剪切模量比和阻尼比的统计值^[4]。

近十几年来,随着武汉地区基础设施建设的迅 猛发展,进行了大量场地地震安全性评价工作,使各 种土类的动力学实验资料得到了进一步积累。从这 些地震安全性评价工作中获得的土类的动力学实验 数据具有岩土类型全、空间布局均匀合理的特点,笔 者利用收集到的各类土的动力学实验资料,统计给 出了武汉地区典型土类的动剪切模量比和阻尼比的 平均值,为武汉地区重大工程场地地震安全性评价 工作提供借鉴与参考;并结合场地土层地震反应分 析与已有的成果进行对比分析,论证所给平均值的 合理性。

研究表明,固结压力和土性对动剪切模量比和 阻尼比与剪应变非线性关系有着重大的影响^[5]。因此,本文统计典型土的动剪切模量比和阻尼比时,采 用分土性进行统计,并考虑了同一土性随深度的变 化。

1 实验方法

试验是在 DGZ-1 型共振柱试验机上进行的。 根据土样所代表土层的上覆有效压力,确定实验土 样所施加的等向固结压力。对土样施加固结压力, 并使土样排水固结,固结时间为 12 小时。试验时在 微机控制下,土柱首先在一个扭矩作用下产生一个 扭转位移,然后突然释放,使之做自由振动。根据振 动频率和振幅值,按波动理论计算相应的动剪切模 量、动剪应变。根据衰减的振幅值,计算相应的阻尼 比。由动剪切模量及阻尼比与剪应变的试验数据关 系,利用最小二乘法进行回归分析可得到所需要的 试验参数。 834

自 2003 年以来,武汉地震工程研究院在武汉地 区先后完成了几百个重大工程的场地地震安全性评 价工作,积累了不同场地 1 403 组不同埋深、不同土 性的土动力学参数试验结果,并采用回归分析拟合 得到动剪切模量比G/G_{max}、阻尼比λ随动剪应变γ 的变化关系,给出了各组土样典型剪应变对应的剪 切模量比和阻尼比。

Table 1	Average	value	of	dvnamic	parameters	of	soil	in	Wuhan	area
I unit I	11, ci age	, and c		aymanne	purumeters		2011		· · umun	un vi

- 14L	Im X-7 /	4 HL.	$\gamma/ imes 10^{-4}$							
土性	埋洑/m	参数	0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
	$0 \sim 10$	$G/G_{\rm max}$	0.992 4	0.984 9	0.929 0	0.867 8	0.572 8	0.404 5	0.122 7	0.066 1
	0 10	λ	0.012 0	0.017 2	0.039 2	0.054 7	0.103 3	0.123 5	0.151 8	0.156 8
	$10 \sim 20$	$G/G_{ m max}$	0.992 7	0.985 5	0.931 8	0.872 5	0.581 2	0.411 7	0.124 8	0.066 9
扒舌私上		λ	0.011 7	0.016 8	0.038 4	0.053 7	0.101 6	0.121 9	0.150 8	0.156 0
忉贝和上	$20 \sim 30$	$G/G_{ m max}$	0.993 2	0.986 5	0.936 2	0.880 4	0.598 9	0.429 5	0.132 7	0.071 3
	20 00	λ	0.012 9	0.018 2	0.039 8	0.054 9	0.102 4	0.123 0	0.152 8	0.158 3
	$30 \sim 50$	$G/G_{\rm max}$	0.993 8	0.987 7	0.941 2	0.889 2	0.618 3	0.448 9	0.141 4	0.076 2
	30 30	λ	0.013 0	0.018 2	0.039 0	0.053 4	0.099 1	0.119 2	0.149 1	0.154 7
	$0 \sim 10$	$G/G_{\rm max}$	0.992 7	0.985 6	0.932 0	0.872 9	0.581 9	0.412 6	0.125 5	0.067 3
	0, -10	λ	0.011 3	0.016 1	0.037 2	0.052 5	0.102 0	0.123 3	0.153 7	0.159 1
禾上 上	10 ~ . 20	$G/G_{\rm max}$	0.993 0	0.986 2	0.934 6	0.877 4	0.591 7	0.422 1	0.129 1	0.069 2
和 上	10 20	λ	0.012 2	0.017 3	0.038 5	0.053 5	0.101 1	0.121 7	0.151 5	0.157 0
	20 - 20	G/G_{\max}	0.993 8	0.987 6	0.940 8	0.888 3	0.615 6	0.445 7	0.139 5	0.075 1
	$20 \sim 30$	λ	0.011 5	0.016 4	0.037 4	0.052 5	0.102 5	0.125 2	0.159 4	0.165 8
	0 10	$G/G_{\rm max}$	0.989 2	0.978 7	0.903 1	0.825 2	0.497 8	0.335 8	0.094 0	0.049 5
	$0 \sim 10$	λ	0.012 3	0.017 4	0.038 2	0.051 3	0.094 6	0.110 5	0.131 2	0.134 7
粉土	10~20	$G/G_{\rm max}$	0.992 6	0.985 4	0.931 5	0.871 9	0.579 4	0.409 3	0.122 6	0.065 4
		λ	0.010 1	0.014 6	0.033 8	0.047 7	0.091 2	0.109 4	0.135 5	0.140 1
	20~40	$G/G_{\rm max}$	0.993 5	0.987 1	0.938 9	0.885 3	0.611 7	0.443 4	0.139 6	0.075 3
		λ	0.012 2	0.017 1	0.037 0	0.050 7	0.093 6	0.112 1	0.139 6	0.144 7
	0~20	$G/G_{\rm max}$	0.992 3	0.984 8	0.928 8	0.867 6	0.572 7	0.403 6	0.120 7	0.064 4
dat est		λ	0.008 8	0.013 0	0.029 4	0.040 9	0.077 4	0.092 9	0.114 8	0.118 7
材砂	20~50	$G/G_{\rm max}$	0.993 5	0.986 0	0.942 2	0.890 1	0.630 7	0.459 8	0.149 7	0.077 9
		λ	0.009 9	0.014 1	0.029 9	0.041 9	0.076 6	0.092 6	0.116 2	0.117 1
	10 00	$G/G_{\rm max}$	0.992 9	0.985 8	0.932 4	0.873 5	0.582 7	0.412 9	0.125 0	0.066 9
	$10 \sim 20$	λ	0.010 5	0.014 6	0.031 5	0.043 2	0.079 8	0.095 2	0.117 0	0.120 9
det das zit		$G/G_{\rm max}$	0.994 2	0.988 5	0.945 2	0.883 4	0.639 2	0.474 7	0.163 1	0.092 0
粉细砂	$20 \sim 4$	λ	0.010 9	0.016 5	0.032 1	0.044 0	0.081 6	0.098 0	0.122 1	0.126 6
		$G/G_{\rm max}$	0.994 7	0.989 5	0.949 7	0.904 4	0.655 2	0.487 9	0.160 8	0.087 5
	$40 \sim 60$	λ	0.014 9	0.020 3	0.040 8	0.054 4	0.096 6	0.115 4	0.144 0	0.149 5
		G/G max	0.992 7	0.985 4	0.931 4	0.871 9	0.579 8	0.409 7	0.122 8	0.065 5
	$0 \sim 20$	λ	0.010 3	0.014 4	0.031 3	0.042 9	0.078 7	0.093 6	0.114 6	0.118 3
1		G/G max	0.994 0	0.988 0	0.942 8	0.892 0	0.625 9	0.457 2	0.145 7	0.078 7
细砂	$20 \sim 40$	λ	0.010 6	0.014 9	0.031 6	0.042 9	0.078 9	0.094 8	0.118 6	0.123 1
		$G/G_{\rm max}$	0.994 7	0.989 4	0.949 1	0.903 1	0.651 6	0.483 7	0.158 4	0.0861
	$40 \sim 60$	λ	0.011 2	0.015 5	0.032 3	0.043 9	0.081 4	0.098 6	0.125 3	0.130 4
		$G/G_{\rm max}$	0.993 8	0.987 8	0.941 7	0.889 9	0.619 6	0.450 1	0.141 9	0.076 7
山如水	$15 \sim 30$	λ	0.009 7	0.013 4	0.028 4	0.038 9	0.072 9	0.088 2	0.111 1	0.115 4
甲租砂	30~50	$G/G_{\rm max}$	0.994 6	0.989 2	0.948 4	0.902 0	0.649 2	0.481 5	0.157 6	0.085 7
		λ	0.010 0	0.013 9	0.029 4	0.040 0	0.074 4	0.090 1	0.114 4	0.119 1

按照土性、地质成因、物理力学性质等因素,武 汉地区地层可大体分为粉质黏土、黏土、粉土、粉砂、 粉细砂、细砂、中粗砂7类。其中,粉质黏土共有 750组、黏土244组、粉土63组、粉砂69组、粉细砂 93组、细砂153组、中粗砂31组。对于同一类土, 考虑埋深(围压)的影响,进一步细分。其中,粉质黏 土 0~10 m373 组、10~20 m272 组、20~30 m79 组、30~50 m26 组;黏土 0~10 m132 组、10~20 m96 组、20~30 m16 组;粉土 0~10 m23 组、10~20 m29 组、20~40 m11 组;粉砂 0~20 m34 组、20~50 m35 组;粉细砂 10~20 m22 组,20~40 m64 组、40 ~60 m7 组;细砂 0~20 m39 组、20~40 m97 组、40 ~60 m17 组;中粗砂(中砂、粗砂)15~30 m13 组、 30~50 m18 组。

按照上述分类方法,采用统计方法得到了粉质 黏土、黏土、粉土、粉砂、粉细砂、细砂、中粗砂7类土 的典型剪应变对应的动剪切模量比和阻尼比的平均 值。统计结果见表1。

3 平均值的合理性

为了分析统计平均值的合理性,笔者选取 2 个 典型场地钻孔资料,分别进行土层地震反应分析计 算,通过对比,分析研究了实验得到的动剪切模量和 阻尼比(下文称"实验值")、DB001-94 规范给出的 动剪切模量和阻尼比(下文称"规范值")⁶⁹和本文得 到的统计平均值(下文称"统计值")对地表峰值加速 度和地表加速度反应谱特征周期的影响,以实验值 的计算结果为标准来评价统计值的合理性。

3.1 场地土层地震反应计算模型及基底地震动输入

采用武汉轨道交通 6 号线场地地震安全性评价 中 2 个站点 LQJZ、YLQJZ 的实际钻孔资料,从 2 个 站点各选取一个钻孔,其土层力学模型资料见表 2、 表 3。

表 2 LQJZ 站钻孔各土层地震反应计算模型

 Table 2
 Calculation model of earthquake response of each soil layer at site LQJZ

层序	毕(上)姓	底层深	匡 度/m	剪切波速	密度	
		度/m	序皮/ III	$/(m \cdot s^{-1})$	$/(g \cdot cm^{-3})$	
1	黏土	1.8	1.8	138.0	1.743	
2	粉质黏土	5.9	4.1	180.0	1.829	
3	粉质黏土	15.0	5.1	200.0	1.916	
4	粉质黏土	16.5	4.5	205.0	1.927	
5	粉细砂	21.6	5.1	229.0	1.946	
6	粉细砂	25.5	3.9	269.0	2.013	
7	输入基底	_	_	540.0	2.200	

基底输入加速度时程采用人工合成地震动时程的办法,考虑抗震设防的三个水准目标^[7],即50年超越概率 63%、10%、2%,分别对应"小震"、"中震"、"大震"。对于每一个概率水准,选取3条天然地震动时程,选取的时程能够反映站点的区域地震环境及场地工程地质条件。人工合成地震动时程过程中,时程步长为0.02 s,选择50个周期点作为拟合目标谱的控制点,在0.04~6 s之间按对数等间距分布,目标谱与合成时程的反应谱之间的相对误差小于5%。因篇幅所限,仅给出了50年超越概率水

平10%的基岩加速度时程曲线,如图1所示。

表 3 YLQJZ 站钻孔各土层地震反应计算模型

 Table 3
 Calculation model of earthquake response of each soil

 layer at site YLQJZ

层序	岩(土)性	底层深	厚度/m	剪切波速	密度
		度/m		$/(m \cdot s^{-1})$	$/(g \cdot cm^{-3})$
1	黏土	3.8	3.8	185.0	1.749
2	黏土	9.6	5.8	178.0	1.862
3	粉质黏土	10.9	1.3	198.0	1.903
4	粉砂	17.6	6.7	227.0	1.958
5	粉细砂	22.4	4.8	245.0	1.964
6	粉细砂	29.4	5.0	253.0	1.989
7	粉细砂	34.4	5.0	277.0	2.007
8	细砂	39.4	5.0	292.0	2.034
9	细砂	45.0	5.6	315.0	2.066
10	中粗砂	5.0	6.0	345.0	2.027
11	强风化泥岩	_	—	506.0	2.200



Fig.1 Horizontal acceleration time-history curves of Bedrock (T=50 a, P=10%)

3.2 土层地震反应分析结果及合理性分析

土层地震反应分析采用一维土层地震反应分析 计算程序^[8],土层厚度、剪切波速、密度采用实测值, 计算中分别输入三种土动力参数,第一种为实验值, 第二种为规范值,第三种为统计值。分别计算了 3 种不同概率水准下地表峰值加速度、加速度反应谱 和特征周期将峰值加速度和反应谱特征周期作为比 对地震动参数。峰值加速度 A_{max}为同一概率水准 下 3 个随机相位地震动输入下的土层反应分析结果 取平均,特征周期 T_e采用双参数标定法^[9]得到

$$T_{\rm g} = 4.44 \times \frac{V_{\rm max}}{A_{\rm max}} \tag{1}$$

其中V_{max}为地表峰值速度,由土层反应分析得到的

地表加速度时程积分得到。

上述计算结果列于表 4。以计算结果为基础, 以实验值的计算结果为基准,给出了统计值、规范值 计算结果的相对误差,所得计算结果列于表 5。在 不同概率水准的基岩地震动输入下,采用三种不同 土动力参数所得到的地表加速度反应谱如图 2 所 示。

从表 4、表 5 的计算结果可以看出:(1)小震情 况下,输入实验值、统计值和规范值得到的地表峰值 加速度相差不大,特征周期一致;(2)中震情况下,输 入试验值和统计值得到的地表峰值加速度相差不 大,特征周期一致;输入规范值得到的地表峰值加速 度比试验值计算的峰值加速度小,两者有一定的差 别,最大误差达 18%,输入规范值得到的特征周期 比试验值计算的特征周期大。(3)大震情况下,输入 实验值、统计值和规范值得到的地表峰值加速度均 有一定的差别,与实验值相比,统计值得到的峰值加速 度差别较大,最大可达 22%;输入规范值得到的峰值加速 度差别较大,最大可达 22%;输入规范值得到的特征 而期比试验值计算的特征周期明显偏大,输入统 计值得到的特征周期与实验值得到的差别微小。 (4)随着输入地震动的增大,统计值、规范值计算得 到的地表峰值加速度误差有不断增大的趋势,规范 值计算得到的特征周期的误差也不断增大,统计值 得到的特征周期与实验值计算得到的差别微小。 (5)由 2 个钻孔的计算结果可以看出,土层越厚,按 试验值、统计值和规范值计算的结果差别越大。

表 4 不同土动力参数情况下的地震动参数

 Table 4
 Ground motion parameters under different soil dynamic conditions

地震动	瓶室水准	LQJZ			YLQJZ		
参数	帆平小田	实验值	统计值	规范值	实验值	统计值	规范值
$A_{ m max}/{ m gal}$	50年63%	29.1	28.8	28.4	25.3	25.2	25.0
	50年10%	86.4	86.0	73.8	79.7	80.0	65.4
	50年2%	153.1	148.3	128.2	140.0	141.1	109.1
$T_{\rm g}/s$	50年63%	0.28	0.28	0.28	0.30	0.30	0.30
	50年10%	0.31	0.31	0.33	0.33	0.33	0.43
	50年2%	0.38	0.39	0.40	0.39	0.38	0.45

表 5 土动力参数的计算结果误差(%)

 Table 5
 Deviation of results for soil dynamic parameters (%)

+7 -11	捕女とか	峰值力	叩速度	特征周期		
切址	悦平小住	统计值	规范值	统计值	规范值	
	50年63%	1	3	0	0	
LQJZ	50年10%	0.5	15	0	6	
	50年2%	3	16	3	6	
	50年63%	0.3	1	0	0	
YLQJZ	50年10%	0.1	18	0	30	
	50年2%	0.8	22	3	15	



图 2 不同概率水准下地表加速度平均反应谱曲线

Fig.2 The average acceleration spectrum curve for earth surface under different probabilities

从图 2 可以看出:小震情况下,3 种土动力参数 的反应谱差别极其微小。原因是小震情况下土体基 本处于弹性阶段,土的非线性对计算结果的影响小。 在中震、大震作用下,实验值和统计值的反应谱基本 一致,而规范值与实验值的反应谱有一定的差别。 由于武汉地区处于中强震区,中震、大震的地震动强 度不高,土层的非线性对地面运动的影响不如在强 震地区大,因此规范值与实验值的反应谱的差别不 如强震地区大,但两者之间的差别也不容忽略。预 计随着地震强度的增大,规范值与实验值的反应谱 的差别将逾发显著。

综上所述,本文统计值的数据资料来源于武汉 地区,统计值与规范值相比,更能代表武汉地区场地 土的动力特性;统计值的土层地震反应分析结果与 实验值基本一致,计算结果真实合理,可供武汉地区 重大工程场地地震安全性评价工作无土动力实验资 料时参考使用,同时可弥补取样不足所引起的土动 力数据缺乏。但必须要指出的是,统计值只是一种 平均意义上的统计参考结果,实际工程场地土的动 力学性质千差万别,同一个场地采用不同的土动力 参数的计算结果仍有显著差异,重大工程场地的土 层地震反应分析须按照有关规范要求进行详细的土 样取样和土动力参数测试工作。

4 结论

利用武汉地区 7 种典型土类共 1 403 个土样的 共振柱实验结果,统计出武汉地区典型场地土的动 剪切模量比与阻尼比的平均值。以 2 个典型场地为 基础,进行场地土层地震反应分析结算,分析论证了 统计值的合理性与适用性。本文结果表明:

(1)合理考虑了埋深(围压)的影响,给出了武 汉地区粉质黏土、黏土、粉土、粉砂、粉细砂、细砂、中 粗砂7类土的动剪切模量和阻尼比的统计平均值。

(2) 与实验值相比较,统计平均值的峰值加速 度、特征周期和反应谱的计算结果可靠合理,与实验 值基本一致;而规范值的计算结果在中震和大震情 况下有一定误差,差异不容忽略。

(3)本文的统计结果具有区域性和代表性,当 无实验资料或实验资料不足时,武汉地区土的动力 学参数可参考使用本文的统计平均值。

参考文献(References)

[1] 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)

- [2] 兰青龙,贺明华,安卫平.太原地区场地土动力性能的统计分析
 [J].山西地震,1997(3):6-11.
 LAN Qing-long, HE Ming-hua, AN Wei-ping. Several Features of Earthquake Swarm in Taiyuan Basin[J]. Earthquake Research in Shanxi,1997(3):6-11. (in Chinese)
- 【3】 战吉艳,陈国兴,杨伟林,等.苏州第四纪沉积土动剪切模量比 和阻尼比实验研究[J].岩土工程学报,2012,34(3):559-565.
 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)
- [4] 兰景岩,刘红帅,吕悦军.渤海土类动力非线性参数及合理性
 [J].哈尔滨工程大学学报,2012,33(9):1079-1085.
 LAN Jing-yan,LIU Hong-shuai,LV Yue-jun.Dynamic Nonlinear Parameters of Soil in the Bohai Sea and Their Rationality
 [J].Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(9):
 1079-1085.(in Chinese)
- [5] 袁晓铭,孙静.非均等固结下砂土最大动剪切模量的增长模式 及 Hardin 公式的修正[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)

- [6] 中国地震局.工程场地地震安全性评价工作规范(DB001-94)
 [S].北京:地震出版社,1994:1-50.
 China Earthquake Administration.Code for Seismic Safety E-valuation of Engineering Site (DB001-94)[S].Beijing: Seismological Press,1994:1-50.(in Chinese)
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑抗震设计规范 (GB50011-2010)[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:256-258.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.Code for Seismic Design of Buildings (GB50011 - 2010) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010:256-258. (in Chinese)

- [8] 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 Linear Method of Seismic Responses for Soil Layers[C]//Earthquake Microzonation. Beijing: Seismological Press,1989:141-153. (in Chinese)
- [9] 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. The Double-parameter Calibrating Model of Seismic Response Spectrum [C]//Earthquake Microzonation. Beijing: Seismological Press, 1989: 196-206. (in Chinese)