

渤海海域粉质粘土动力学 参数的统计分析¹

蒋其峰 彭艳菊 荣棉水 吕悦军

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要 本文整理了 26 个渤海海域场地土动力学测试报告, 并按埋深分段统计了 0 至 115m 深度范围内粉质粘土的动力学参数, 即动剪切模量比和阻尼比。然后, 将本文统计值与袁晓铭推荐值和施春花统计过的北京地区粉质粘土的动力学参数值进行了比较, 发现海域场地土与陆地场地土的动力学参数值存在较大差异。之后, 选择渤海海域的两个场地, 建立了相应的土动力学模型, 分别选取实测值、本文统计值、施春花统计值进行场地地震反应分析, 发现本文统计值与实测值的结果符合的较好。在渤海海域场地地震反应分析工作中, 某些粉质粘土层难以获得动力学参数时, 可以参考本文的统计值。

关键词: 渤海 粉质粘土 土动力学参数 土层地震反应

引言

场地土层地震反应分析是地震安全性评价工作中的重要技术环节, 而进行土层地震反应分析时需要用到场地土的动力学参数, 包括土的动剪切模量比和阻尼比。《工程场地地震安全性评价 (GB 17741-2005)》(中华人民共和国地震行业标准, 2005) 指出, 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。在 20 世纪 70 年代, 国外众多学者就对不同土的动剪切模量和阻尼比进行了广泛的试验研究, 如: Hardin (1969) 给出了粘土的最大剪切模量经验公式; Seed 等 (1970) 给出了砂土的最大动剪切模量经验公式; Koutsoftas 等 (1980) 对新泽西海岸的两种海洋土进行了共振柱实验测试; Kagawa (1992) 根据 38 个未扰动海洋软粘土试样建立了动剪切模量的经验公式。国内学者运用共振柱、动三轴仪等方法, 研究了不同土类的动力学参数, 如: 谢君斐等 (1973) 研究了京、津、沪地区饱和粘土的动剪切模量与应变之间的关系; 祝龙根等 (1988) 对低幅剪应变条件下砂土的动力特性进行了研究, 提出了确定动剪切模量的经验公式; 费涵昌等 (1990) 对黄浦江大桥桥址土层的动剪切模

1 基金项目 国家科技重大专项 2011ZX05056-001-02, 国家自然科学基金 (项目批准号: 51208474) 与中央公益性科研院所基本科研业务专项 (ZDJ2014-07) 共同资助

[收稿日期] 2013-07-23

[作者简介] 蒋其峰, 男, 生于 1989 年。中国地震局地壳应力研究所硕士研究生。主要从事工程地震方面的研究。E-mail: hdjqf@163.com

量和阻尼比与应变的关系进行了研究。1994 年，国家地震局以地震行业规范的形式，给出了常见土类的动力学参数的建议值。2000 年，袁晓铭等（2000）对采自北京、上海、天津、南京、大连、太原、沈阳、哈尔滨等地区的土样进行了试验和统计，并给出了埋深分布在（0，10m] 和（10m，20m] 两个深度段的常见土类的动力学参数值（文中简称袁氏值）。吕悦军等（2003）对渤海海底土类动剪切模量比和阻尼比进行过统计分析，并给出了渤海海域常见土类的动力学参数。施春花等（2009）对北京地区广泛分布的粉质粘土的动力学参数按深度进行过统计分析，并给出了分布在各深度区间的粉质粘土的动力学参数。上述众多研究表明，土的动力特性具有区域性，而且陆域土与海域土的动力学参数也存在较大差异。

随着海域工程开发日益增多，需要深入研究海域土的动力学参数，以便在工程中作为参考。虽然前人对各土类的动力学参数进行过许多研究，但对海域土的研究还较少，而按埋深进行研究的则更少。作者所在工作组多年从事渤海、东海、南海等海域海洋平台的设计地震动参数研究，积累了大量的海域常见土类的动力学参数实验数据，具备了开展海域场地土动力学参数研究的基础。作为前期研究，本文选择渤海海域广泛分布的粉质粘土为例，按深度分段统计其土力学参数，给出了不同深度区间的统计值。此外，为了比较海陆土动力学参数的差别，将本文统计值与施春花等（2009）的研究成果（简称施氏统计值）、袁晓铭等（2000）的研究成果（简称袁氏推荐值）进行了对比分析；为了对比论证统计结果的合理性和可靠性，选取位于渤中和辽东湾海域的两个工程场地，建立相应的土层分析模型，分别选取粉质粘土动力学参数的场地实测值、本文统计值和施氏统计值进行一维土层地震反应分析。

1 数据的统计分析

1.1 数据来源

本文所用数据来自于渤海海域石油平台地震安全性评价使用过的数据，作者整理了该区 26 个场地钻孔的土动力学参数测试报告，统计了 0 至 115m 埋深范围内的 116 组粉质粘土的土动力学参数。这些参数由天津大学建筑工程学院岩土工程研究所测得，试验为采用 HX-100 电气伺服控制振动三轴试验装置的应力控制振动三轴试验。

1.2 数据统计与分析

根据样本随深度的分布情况，把 0 至 115m 分成 13 个埋深区间，对土动力学参数进行统计。深度区间的划分及各区间参与统计的样本量见表 1。作者首先剔除了个别的异常值，然后对同一深度区间内的土动力参数值求取均值，并给出了每个参数标准差的最大值，各深度区间的土动力学参数均值及标准差，见表 2。

表 1 各深度区间样本量

Table 1 The total numbers of samples of at different depth intervals

深度区间 (m)	(0,5]	(5,10]	(10,15]	(15,25]	(25,35]	(35,45]	(45,55]	(55,65]	(65,75]	(75,85]	(85,95]	(95,105]	(105,115]
样本量	14	12	10	8	5	4	8	14	5	10	13	7	6
总计	116												

表 2 各深度区间土动力学参数均值及标准差

Table 2 The mean and standard deviation of soil dynamic parameters at different depth intervals

深度区间 (m)	参数	剪 应 变									最大标 准差
		0.01	0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100	
(0,5]	G/G_{\max}	1.000	0.993	0.986	0.838	0.719	0.381	0.253	0.082	0.051	0.057
	λ	0.039	0.044	0.047	0.064	0.078	0.127	0.147	0.176	0.182	0.015
(5,10]	G/G_{\max}	1.000	0.992	0.985	0.885	0.785	0.450	0.310	0.103	0.059	0.047
	λ	0.028	0.033	0.034	0.046	0.059	0.113	0.138	0.180	0.191	0.014
(10,15]	G/G_{\max}	1.000	0.995	0.988	0.885	0.784	0.451	0.312	0.102	0.056	0.078
	λ	0.024	0.029	0.030	0.040	0.053	0.111	0.137	0.177	0.187	0.019
(15,25]	G/G_{\max}	1.000	0.996	0.990	0.902	0.812	0.483	0.339	0.110	0.058	0.050
	λ	0.018	0.022	0.023	0.034	0.050	0.114	0.143	0.190	0.201	0.017
(25,35]	G/G_{\max}	1.000	0.997	0.992	0.920	0.844	0.572	0.437	0.159	0.078	0.056
	λ	0.007	0.010	0.012	0.023	0.037	0.095	0.124	0.1777	0.192	0.017
(35,45]	G/G_{\max}	1.000	0.996	0.993	0.933	0.854	0.535	0.387	0.135	0.073	0.034
	λ	0.009	0.011	0.011	0.017	0.029	0.086	0.114	0.166	0.181	0.011
(45,55]	G/G_{\max}	1.000	0.995	0.991	0.946	0.875	0.559	0.407	0.142	0.075	0.060
	λ	0.008	0.009	0.011	0.022	0.036	0.088	0.116	0.177	0.195	0.015
(55,65]	G/G_{\max}	1.000	0.998	0.992	0.937	0.863	0.550	0.401	0.140	0.073	0.040
	λ	0.009	0.012	0.014	0.024	0.037	0.091	0.119	0.176	0.194	0.015
(65,75]	G/G_{\max}	1.000	0.997	0.995	0.939	0.862	0.544	0.394	0.135	0.071	0.053
	λ	0.005	0.007	0.009	0.021	0.032	0.076	0.100	0.156	0.176	0.017
(75,85]	G/G_{\max}	1.000	0.997	0.990	0.945	0.883	0.595	0.449	0.167	0.090	0.061
	λ	0.008	0.011	0.013	0.025	0.035	0.076	0.100	0.166	0.189	0.027
(85,95]	G/G_{\max}	1.000	0.996	0.992	0.946	0.879	0.589	0.445	0.174	0.100	0.068
	λ	0.007	0.010	0.012	0.024	0.034	0.073	0.097	0.157	0.177	0.018
(95,105]	G/G_{\max}	1.000	0.992	0.984	0.947	0.883	0.579	0.427	0.151	0.080	0.036
	λ	0.007	0.009	0.011	0.020	0.031	0.073	0.096	0.153	0.172	0.029
(105,115]	G/G_{\max}	1.000	0.998	0.995	0.958	0.897	0.586	0.431	0.156	0.085	0.082
	λ	0.008	0.012	0.013	0.023	0.034	0.078	0.104	0.169	0.190	0.025

图 1 给出了不同深度区间粉质粘土的动剪切模量比和阻尼比的分布曲线。可以看出，随着埋深增加，动剪切模量比总体上呈现出增大的趋势，而其阻尼比呈现变小的趋势，这种现象同时也说明，统计土动力学参数时需要考虑埋深。在小应变阶段，不同深度区间的粉质粘土的动剪切模量比的差异较小，随着应变增大，动剪切模量比的差异先增大再减小，在应变为 0.005 时，动剪切模量比的差异达到 0.214，当应变为 0.01 时，差异为 0.050；在小应变阶段，阻尼比的离散性较大，参数值差异显著，达到 0.034，随应变增大，参数值的差异表现出减小的趋势，但不及动剪切模量比显著，在应变为 0.01 时，差异为 0.029。但是，上述的变化趋势不是简单的和线性的，有些埋深层位样本参数的变化出现跳跃，为了更清晰地查看渤海海域粉质粘土的动力学参数随深度的变化情况，选取应变为 0.001 时不同埋深的粉质粘土

的动力学参数值，绘制了动剪切模量比和阻尼比随深度变化的曲线（图 2）。从图 2 可以看出，分布在埋深（25m, 35m]、（75m, 95m] 的动剪切模量比明显大于其下部相邻段；分布在（15m, 25m]、（55m, 65m] 的阻尼比明显大于其上部相邻段。

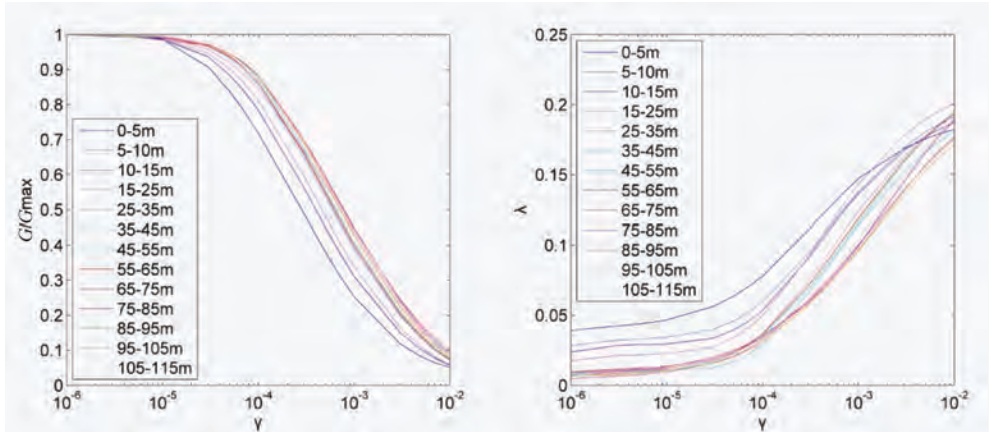


图 1 各深度区间的动剪切模量比和阻尼比

Fig. 1 Dynamic shear modulus ratio and damping ratio at different depth intervals

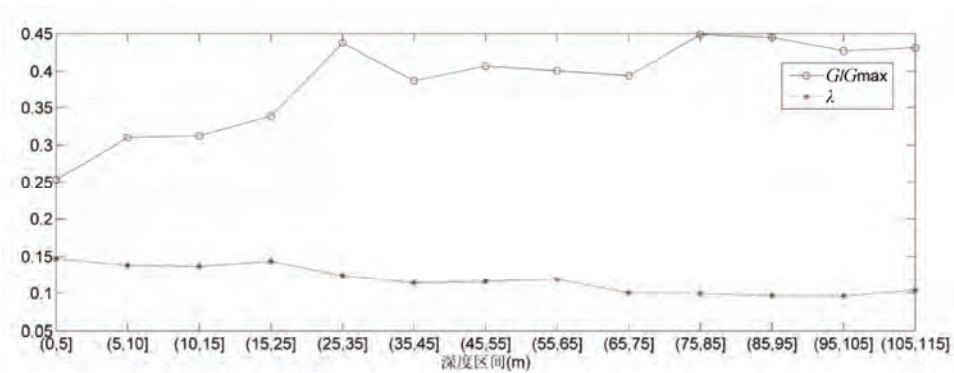


图 2 应变为 0.001 时动剪切模量比和阻尼比随深度的变化

Fig. 2 Dynamic shear modulus ratio and damping ratio versus depth under strain value of 0.001

为了进行对比分析，图 3 和图 4 分别给出了 0—10m、10—20m 埋深内本文统计值、施氏统计值、袁氏推荐值的动剪切模量比、阻尼比随应变的变化曲线。可以发现，对于动剪切模量比，施氏统计值最大，袁氏推荐值居中，本文统计值最小，这可能意味着在埋深相同的情况下，海域的粉质粘土的动剪切模量比小于陆域。对于阻尼比，总体上看袁氏推荐值小于渤海统计值和施氏统计值，渤海统计值与施氏统计值时有交叉，但在大应变下，施氏统计值明显偏大。图 5 给出了 40—50m、60—80m 埋深内本文统计值与施氏统计值的曲线，可以发现，在埋深较深时本文统计值与施氏统计值仍存在较大差异。以上分析说明，相同埋深海域土的动力学参数与陆域存在较大差异，故在参考土动力学参数值时应注意区分海域和陆域。

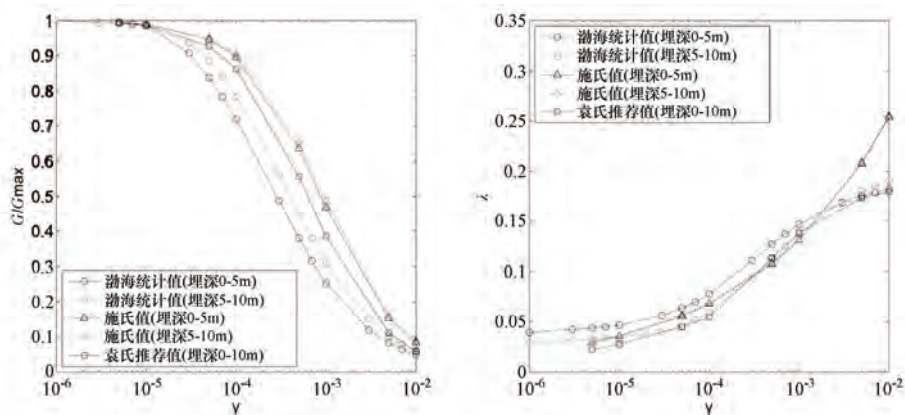


图3 埋深 0—10m 时本文统计值与施氏统计值、袁氏推荐值的对比

Fig. 3 Comparison of the values proposed by Shi Chunhua, Yuan Xiaoming and values in this paper at the depth between 0 to 10m

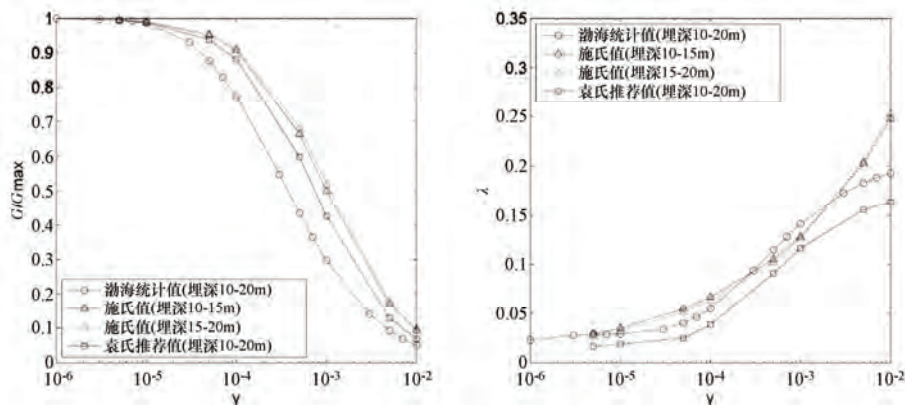


图4 埋深 10—20m 时本文统计值与施氏统计值、袁氏推荐值的对比

Fig. 4 Comparison of the values proposed by Shi Chunhua, Yuan Xiaoming and values in this paper at the depth between 10 to 20m

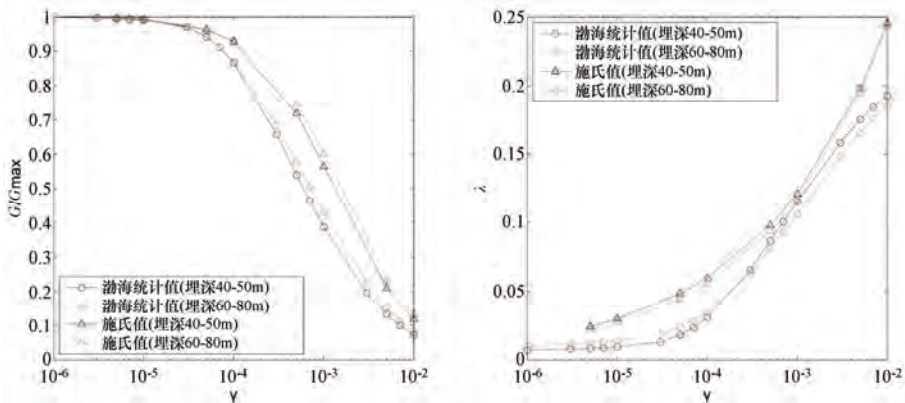


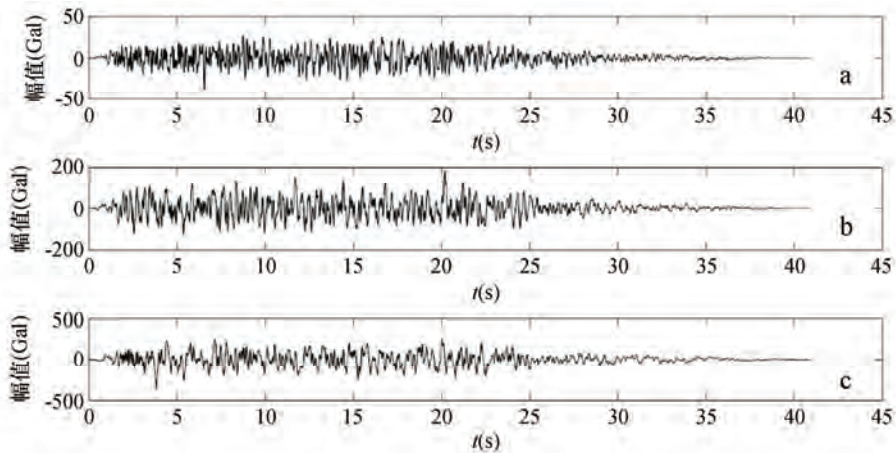
图5 埋深 40—50m 及 60—80m 时本文统计值与施氏统计值的对比

Fig. 5 Comparison of the values proposed by Shi Chunhua and values in this paper at the depth between 40 to 50m, and between 60 to 80m

2 场地地震反应分析

根据上述对比分析, 本文统计值与袁氏推荐值和施氏统计值存在较大的差异。为了分析这种动力学参数差异对土层地震反应分析结果的影响, 本文选取了渤海海域的两个场地进行场地地震反应分析, 进而对比分析这几种统计值在渤海海域的适用性。

输入加速度时程的峰值按三种超越概率水准选取, 三种概率水准分别为 50a 超越概率 63%、10%、2%, 依次对应小震、中震、大震的地震环境, 文中依次记为概率水准 1、概率水准 2、概率水准 3, 根据此处的地震危险性, 对应的峰值加速度依次为 38.5gal、184.7gal、352.6gal。三种输入加速度时程见图 6。



a. 小震; b. 中震; c. 大震

图 6 输入加速度时程

Fig. 6 Input acceleration time-history

2.1 土层分析模型

本文选取了位于渤中海域和辽东湾海域的两个场地, 分别记为场地 1 和场地 2, 场地的土层划分情况见表 3。场地 1 和场地 2 的土层分别包含 10 层粉质粘土。为了对比不同土动力学参数对土层地震反应结果的影响, 在进行土层地震反应分析时, 土层的动剪切模量比和阻尼比分别采用实测值、统计值、施氏统计值 (三种土动力学参数选取方案依次记为方案 1、方案 2、方案 3), 土层的层厚、剪切波速、密度则采用实际值。考虑到袁氏推荐值的埋深最大只达到 20m, 本文没有采用该值进行对比。

表 3 场地土层模型

Table 3 Parameters of soil layers

场 地 1					场 地 2				
序号	土层	层厚 (m)	密度 (g/cm ³)	波速 (m/s)	序号	土层	层厚 (m)	密度 (g/cm ³)	波速 (m/s)
1	非常软的粉质粘土	6.1	1.89	115	1	松散的粉砂质细砂	3.8	2.10	132.1
2	非常密实的粉砂	1.7	1.94	174	2	非常软的砂质粘土	2.0	1.94	155.0

续表

场 地 1					场 地 2				
序号	土层	层厚 (m)	密度 (g/cm ³)	波速 (m/s)	序号	土层	层厚 (m)	密度 (g/cm ³)	波速 (m/s)
3	硬到非常硬的粉质粘土	1.0	1.82	159	3	非常软至软的粉质粘土	5.2	1.94	185.0
4	密实的粉砂	4.2	2.00	235	4	非常软至软的粉质粘土	5.1	1.95	206.2
5	非常硬的粉质粘土	9.0	2.02	264	5	中密的粉质细砂	3.7	2.07	222.1
6	褐灰色砂质粉砂与粉质粘土迭层	1.2	1.99	276	6	硬的粉质粘土	4.6	2.06	271.7
7	密实的褐灰色粉砂质细砂和细砂	4.1	2.18	303	7	坚硬的粉质粘土	2.8	2.10	258.8
8	密实的褐灰色粉砂质细砂和细砂	4.0	2.05	277	8	密实的砂质粉土	4.0	2.10	259.0
9	非常密实的砂质粉砂	4.6	2.02	289	9	非常密实的粉质细砂	6.9	2.07	275.0
10	非常密实的砂质粉砂	4.6	2.02	299	10	坚硬的粉质粘土	5.1	2.04	314.2
11	硬的粉质粘土	4.5	2.11	348	11	非常密实的细砂	6.0	2.07	325.6
12	非常密实的粉砂质细砂	2.7	2.08	347	12	非常密实的细砂	5.9	2.07	339.9
13	硬到非常硬的粉质粘土	6.0	2.06	344	13	坚硬至非常坚硬的粉质粘土	5.0	1.98	317.3
14	非常密实的粉砂	9.0	2.01	353	14	坚硬至非常坚硬的粉质粘土	5.2	2.05	336.2
15	硬到非常硬的粉质粘土	6.0	2.06	362	15	非常密实的砂质粉土	3.8	1.99	357.3
16	密实的粉砂	6.0	2.06	350	16	非常密实的粘质粉土	5.0	1.99	365.0
17	非常硬的粉质粘土	4.5	1.92	364	17	非常坚硬的粉质粘土	6.2	1.98	328.6
18	非常硬的粉质粘土	4.5	1.89	373	18	非常坚硬的粉质粘土	6.1	2.04	404.6
19	非常密实的砂质粉砂	3.0	1.89	386	19	非常密实的粉质细砂	4.4	2.05	392.0
20	坚硬的粉质粘土	2.9	1.89	392	20	密实的砂质粉土和非常坚硬的粉质粘土互层	6.2	2.02	358.2
21	非常密实的砂质粉砂	3.0	1.89	375	21	非常密实的粉质细砂	3.1	2.12	398.5

续表

场 地 1					场 地 2				
序号	土层	层厚 (m)	密度 (g/cm ³)	波速 (m/s)	序号	土层	层厚 (m)	密度 (g/cm ³)	波速 (m/s)
22	非常密实的细砂	3.0	1.89	404	22	非常坚硬的粉质粘土	9.9	2.18	517.2
23	非常硬的粉质粘土	6.1	2.10	470					
24	非常密实的粉砂	4.8	2.04	508					

2.2 计算结果与分析

本文采用等效线性法进行一维土层地震反应计算，试验方法是计算每个场地在小、中、大震的输入下，分别按三种土动力学参数选取方案选择参数后的场地地表地震反应。计算结果包括：加速度反应谱、峰值加速度、峰值速度、地震影响系数最大值、特征周期。其中，反应谱的阻尼比取 0.05，加速度反应谱的特征周期采用双参数标定法得到(廖振鹏等, 1989)。加速度反应谱的计算结果见图 7 和图 8，峰值加速度 A_{\max} 、峰值速度 V_{\max} 、最大地震影响系数 α_{\max} 和特征周期 T_g 的计算结果见表 4。为了比较方案 2 与方案 3 所计算的地震动参数与实测值的差异，作者将两者的结果分别与方案 1 求取了偏差，结果见表 5。

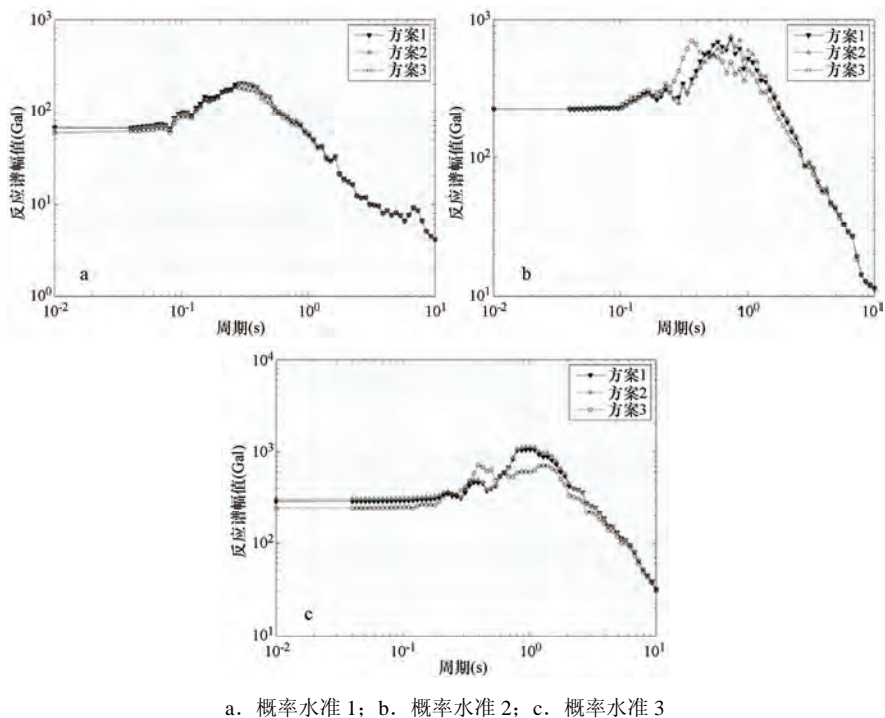


图 7 场地 1 三种概率水准的反应谱

Fig. 7 Response spectra for three probabilistic levels of exceedance (from left to right we have level 1, level 2 and level 3 respectively) for site #1

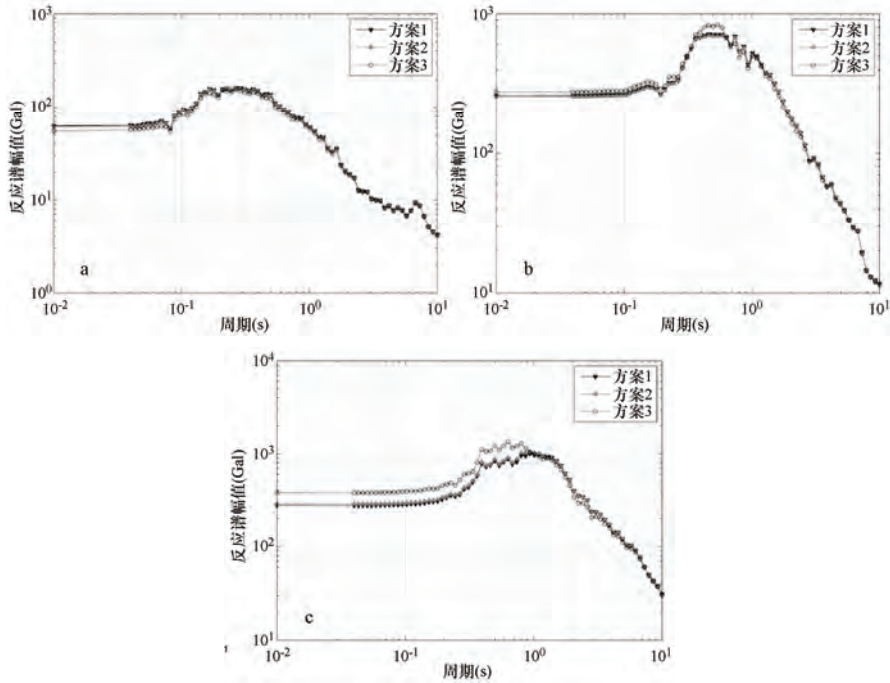
求取偏差的公式为：

偏差 = (方案 n 的结果 - 方案 1 的结果) / 方案 1 的结果

计算最大地震影响系数 (a_{max}) 和特征周期 (T_g) 的公式为:

$$a_{max} = 2.25 \times A_{max} / 980$$

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



a 概率水准 1; b 概率水准 2; c 概率水准 3

图 8 场地 2 三种概率水准的反应谱

Fig. 8 Response spectra for three probabilistic levels of exceedance (from left to right we have level 1, level 2 and level 3 respectively) for site #2

表 4 地震动参数

Table 4 Ground motion parameters

场 地 1												
地震动输入的大小	峰值加速 A_{max} (Gal)			峰值速度 V_{max} (m/s)			地震影响系数最大值 a_{max}			特征周期 T_g (s)		
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3
小震	66.24	64.55	57.18	5.09	5.10	4.82	0.15	0.15	0.13	0.34	0.35	0.37
中震	225.40	226.60	225.60	32.50	34.59	26.32	0.52	0.52	0.52	0.64	0.68	0.52
大震	288.50	306.30	241.40	66.54	69.73	62.40	0.66	0.70	0.55	1.02	1.01	1.15
场 地 2												
地震动输入的大小	峰值加速 A_{max} (Gal)			峰值速度 V_{max} (m/s)			地震影响系数最大值 a_{max}			特征周期 T_g (s)		
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3
小震	61.79	60.84	54.84	4.64	4.61	4.46	0.14	0.14	0.13	0.33	0.34	0.36
中震	260.40	256.70	276.90	34.33	33.82	34.56	0.60	0.59	0.64	0.59	0.58	0.55
大震	277.30	285.90	377.50	69.82	69.09	69.76	0.64	0.66	0.87	1.12	1.07	0.82

表 5 地震动参数的偏差

Table 5 Relative deviation of ground motion parameters

场 地 1												
地震动输入的大小	峰值加速度偏差			峰值速度偏差			地震影响系数最大值偏差			特征周期偏差		
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3
小震	0.00	0.03	0.14	0.00	0.00	0.05	0.00	0.03	0.14	0.00	0.03	0.10
中震	0.00	0.01	0.00	0.00	0.06	0.19	0.00	0.01	0.00	0.00	0.06	0.19
大震	0.00	0.06	0.16	0.00	0.05	0.06	0.00	0.06	0.16	0.00	0.01	0.12

场 地 2												
地震动输入的大小	峰值加速度偏差			峰值速度偏差			地震影响系数最大值偏差			特征周期偏差		
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3
小震	0.00	0.02	0.11	0.00	0.01	0.04	0.00	0.02	0.11	0.00	0.01	0.08
中震	0.00	0.01	0.06	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00	0.05
大震	0.00	0.03	0.36	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.36	0.00	0.04	0.27

通过对比反应谱的计算结果,可以看出多数情况下方案 2 的结果与方案 1 差别不大。在小震作用下,方案 3 的结果与方案 1 差异较小,但随着输入地震动的增大,方案 3 的结果与方案 1 之间差异增大。方案 2 的计算结果与方案 1 的最大差异为 6%,方案 3 计算结果的偏差最大达到 36%,因此方案 2 的统计参数更能体现实际场地土的动力学特征。

3 结论

本文通过统计渤海海域粉质粘土的土动力学参数,给出了渤海海域不同埋深的粉质粘土的土动力学参数的平均值。此外,选取了两个典型的场地,分别利用实测值、统计值、施氏统计值进行了场地地震反应分析。其结论为:

(1) 随着粉质粘土埋深的增加,其动剪切模量比有增大的趋势,而其阻尼比有变小的趋势。这种变化趋势说明,统计和选取土动力学参数时要考虑埋深。

(2) 在埋深相同时海域土的动力学参数与陆域土存在较大差异,并且利用陆域的土动力学参数进行海域土层地震反应分析与实际值存在较大差异,故在参考土动力学参数值时应注意区分海域和陆域。

(3) 利用本文统计的渤海海域粉质粘土的土动力学参数值进行土层地震反应分析与利用实测值进行计算的结果差别不大。在对渤海海域的场地进行地震反应分析时,在某些粉质粘土层难以获得土动力学参数的情况下,可以参考本文的统计值。

参考文献

- 费涵昌, 吴一伟, 1990. 黄浦江大桥桥址土层的动力特性研究. 见: 第三届全国土动力学学术会议. 上海: 同济大学出版社, 303—308.
- 廖振鹏, 李大华, 1989. 设计地震反应谱的双参数标定模型. 见: 地震小区划(理论与实践). 北京: 地震出版社, 196—206.

- 吕悦军, 唐荣余, 沙海军, 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): 35—42.
- 施春花, 吕悦军, 彭艳菊等, 2009. 北京地区粉质粘土土动力学参数的统计分析. 震灾防御技术, **4** (1): 69—79.
- 谢君斐, 石兆吉, 1973. 原状饱和黏土动力性能的试验研究. 哈尔滨: 中国科学院工程力学研究所.
- 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.
- 祝龙根, 吴晓峰, 1988. 低幅剪应变条件下砂土的动力特性的研究. 大坝观测与土工测试, **12** (1): 27—33.
- 中华人民共和国地震行业标准, 2005. 工程场地地震安全性评价工作规范 (GB 17741-2005). 北京: 地震出版社.
- Hardin B.O., 1969. 土的应力-应变行为的本质. 见: 地震工程和土动力问题译文集, 谢君斐等译. 北京: 地震出版社. 111—202.
- Kagawa Takaaki, 1992. Moduli and Damping Factors of Soft Marine Clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, **118** (9): 1360—1375.
- Koutsoftas D.C., Fischer J.A., 1980. Dynamic properties of two marine clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **106** (6): 645—657.
- Seed H.B., Idriss I.M., 1970. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. *Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, UCB/EERC-70/10*.

Statistical Analysis of Dynamic Parameters of Silty Clay in the Bohai Sea

Jiang Qifeng, Peng Yanju, Rong Mianshui and Lu Yuejun

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

Abstract After reviewing 26 soil dynamic reports of the site soil in Bohai Sea, we conduct a statistical study of silty clay's dynamic parameters, including dynamic shear modulus ratio and damping ratio. Then we compare the statistical values with the values proposed by Yuan Xiaoming and by Shi Chunhua respectively, and find that great differences of soil dynamic parameters exist in between ocean site and land site. Finally, we choose two sites in Bohai Sea, and compare the influence of the statistical values and Shi Chunhua's values on site seismic response for each site. Our result show that the statistical values fit better than Shi Chunhua's values. In the case of that silty clay's dynamic parameters are not available within the Bohai sea, it is reasonable to use the statistical values as the reference for sites.

Key words: Bohai Sea; Silty clay; Soil dynamic parameters; Soil seismic response