

# 山东东营地区土的动剪切模量比和阻尼比试验研究<sup>\*</sup>

王津津, 张建民, 郭婷婷, 杨传成, 蔡文霞

(山东省地震工程研究院, 山东 济南 250021)

**摘要:** 对山东东营地区埋深 3.0 ~ 57.3 m 的土层划分标准层, 对采集的 42 组粘土、粉质粘土、粉土 (中密)、粉质粘土与粉砂互层土样进行动三轴试验, 通过统计分析给出了这些样品动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化试验结果, 并与袁晓铭等 (2000) 给出推荐值进行了对比分析。结果表明, 东营地区各类岩土试验结果值在该地区具有一定的代表性和适用性, 并在该地区地震安全性评价工作中得到了应用。

**关键词:** 动剪切模量比; 阻尼比; 山东东营

**中图分类号:** TV411.8

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2014)02-0263-05

## 0 前言

动剪切模量和阻尼比作为土动力特性的重要参数, 是土动力计算和场地地震安全性评价中不可或缺的内容 (蔡辉腾等, 2009)。历次地震的震害调查表明, 土的动力学特性对震害有明显的影响, 土层的共振、滤波、放大效应已受到岩土工程界的普遍重视 (孙静等, 2004)。这两个参数的选择是否合理, 将直接影响到工程结构的安全性和经济性。

国内很多学者针对土的动剪切模量比和阻尼比进行了大量的试验研究, 并取得了一些较为有价值的研究成果。祝龙根和吴晓峰 (1988) 用 Dmevich 共振柱仪提出了低幅剪应变条件下福建饱和标准砂样的  $G/G_{\max} - \gamma_d$  和  $\lambda - \gamma_d$  经验公式; 中国地震局 1994 年颁布的《中华人民共和国地震行业标准工程场地地震安全性评价工作规范》(DB001-94) 也给出了砂土  $G/G_{\max} - \gamma_d$  和  $\lambda - \gamma_d$  关系的推荐值; 袁晓铭等 (2000) 利用改造后的共振柱仪, 对来自全国中东部十几个地区的常规土类进行了大量试验, 给出 2 种固结压力下典型土类  $G/G_{\max} - \gamma_d$  和  $\lambda - \gamma_d$  关系的推荐值 (本文简称“推荐值”, 见表 3), 分别适用于土体埋深小于 10 m 和 10 ~ 20 m 两种情况。上述研究成果为合理计算土层的地震反应提供了一定帮助。

山东省东营市地处黄河三角洲平原中北部,

黄河故道及挑河以西。在微地貌类型上属黄河三角洲平原的泛滥平原或决口扇, 其覆盖土层主要受冰期一间冰期所引起的海平面变化及黄河的影响, 形成了一套以灰黄、灰黑色的粉土、粘质砂土、粉质粘土、粘土等为主海陆交互相沉积, 沉积厚度约 300 m。东营市区土层除表层土外, 总体上可分为两大类: 一类为全新统的沉积土, 为黄河多次泛滥而沉积的黄泛冲积土, 主要土层为软—流塑 (局部可塑) 的粘性土和稍密—中密的粉土组成, 局部为粉土和粘土互层; 另一类为上更新统的沉积土, 主要土层由可塑—硬塑的粘土和中密—密实的粉土组成。考虑仪器性能及钻探影响, 本文选取土样的取样范围在研究区全新统及上更新统上部, 以粉质粘土、粘土、粉土为主。

根据工程需要和山东东营地区的岩土特点, 本文对所采集的该地区具有代表性的岩土动三轴数据进行统计分析, 给出了东营地区典型土类的动剪切模量比和阻尼比随动剪应变的递变关系值 (本文简称“典型值”), 并将推荐值与典型值做对比、讨论, 为该地区建设工程地震安全性评价等工作提供参考。

## 1 土的动剪切模量比和阻尼比试验

### 1.1 试验仪器、试验样品及试验方法

试验仪器采用 DDS-70 型动三轴仪, 测试  $1 \times$

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013-12-20.

**基金项目:** 山东省科技发展项目“多龄期城市埋地基础设施震害机理与功能失效预测研究” (2010GSF10806) 及山东省地震局合同制项目“鲁中南地区黄土状土的动剪加模量和阻尼比的初步研究” (BY88) 联合资助。

$10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2}$  应变范围。试样尺寸:  $\Phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 。按照《土工试验规程》(SL237-1999) 中相应规定进行试样制备, 成型后在等固结比应力下固结, 围压大小根据试样所处土层深度对应的有效应力确定。待固结完成后, 在不排水的条件下施加动应力进行动弹模试验。

本研究共取样 42 组, 试验样品分别来自东营

市河口区 (6 组)、东一路 (7 组)、北一路 (6 组)、登州路 (6 组)、滨州路 (8 组)、东营港区 (9 组) 等地, 在山东东营地区具有一定的代表性。取样深度范围介于  $3.0 \sim 57.3 \text{ m}$ , 土样主要为粉质粘土、粘土、粉土、粉质粘土与粉砂互层 (填土及砂土除外)。各试样的描述、取样深度、重度指标见表 1。

表 1 试样基本情况表

Tab. 1 Basic situation of the sample

地层及土样性质	描述	取样深度/m	容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	样品数量
第② <sub>-1</sub> 层粉质粘土	黄褐色, 可塑	3.0 ~ 4.2	19.1	5
第③层粘土	灰褐色, 可塑	4.5 ~ 7.5	17.4	5
第④ <sub>-1</sub> 层粉土	黄褐色, 中密	9.0 ~ 14.5	19.6	7
第⑤层粘土	黑灰色, 可塑	14.5 ~ 24.8	18.2	7
第⑥层粉质粘土	灰褐色, 可塑	24.8 ~ 41.5	19.4	9
第⑥ <sub>-1</sub> 层粉质粘土与粉砂互层	灰褐—灰黄色, 密实	24.8 ~ 25.5	21.0	4
第⑧层粉质粘土	黄褐—灰褐色, 可塑—硬塑	43.0 ~ 57.3	20.1	5

## 1.2 试验结果的拟合与分析

### (1) 拟合公式

对动剪切模量比和阻尼比常用拟合模型主要有双曲线模型、分段双曲线模型以及 Davide - nkov 模型等 (谢定义, 1988), 本试验采用双曲线模型。对各层土的动剪切模量比和阻尼比数据进行拟合, 拟合公式表示如下:

$$\frac{1}{G} = A + B\gamma. \quad (1)$$

对应不同应变模量与最大模量的比值和应变的关系为

$$G/G_{\max} = 1/(1 + \gamma_d B/A). \quad (2)$$

根据 Hardin - Drnevich 模型, 阻尼比与剪应变的关系可写为

$$\lambda = \lambda_{\max} (1 - G/G_{\max}). \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  为阻尼比;  $\lambda_{\max}$  是最大阻尼比;  $G/G_{\max}$  是最大动剪切模量比;  $\gamma_d$  为剪应变幅值,  $A$  和  $B$  为回归常数。

### (2) 对试验结果的拟合

将东营市区  $3.0 \sim 57.3 \text{ m}$  钻探资料进行分层分

类, 按深度及土性共可分为 8 层代表性地层 (其中①、②、④、⑦层为砂土层, 本文不做详细研究), 各代表性地层按土性分为不同的亚层, 只将  $G/G_{\max} - \gamma_d$  拟合曲线列出, 结果见图 1。

由图 1 可见, 不论围压大小, 各类土的  $G/G_{\max} - \gamma_d$  曲线大致形状都很相似, 动剪切模量比  $G/G_{\max}$  随着剪应变  $\gamma_d$  的增大而明显减小, 当动剪应变超过  $10^{-4}$  后, 动剪切模量减小的速度加快。动剪切模量随动剪应变的这种变化趋势, 符合土的动应力—应变关系的滞后性的一般规律。

### (3) 动剪切模量比及阻尼比最大值的比较

表 2 给出了 7 组典型剪应变下的剪切模量比及阻尼比的最大值。从表 2 中可看出, 对于同一种性质的土, 在应变水平相同的情况下, 动剪切模量随围压增大而增加; 有效围压越大, 动剪切模量比  $G/G_{\max}$  随剪应变  $\gamma$  的增大而下降的幅度越小。围压对粘土、粉质粘土的动剪切模量的影响不明显, 对粉质粘土、粉砂互层土和粉土的动剪切模量的影响较明显。出现这种趋势的原因是试样的孔隙比随围压增大而减小, 相对密度增大, 土颗粒接触点增加, 使得应力波在土中的传播更快, 从而增大了动剪切模量 (陈国兴, 刘雪珠, 2004)。所以围压对粉质粘土与粉砂互层土和粉土动剪切模量的影响比对粘性土的影响明显。

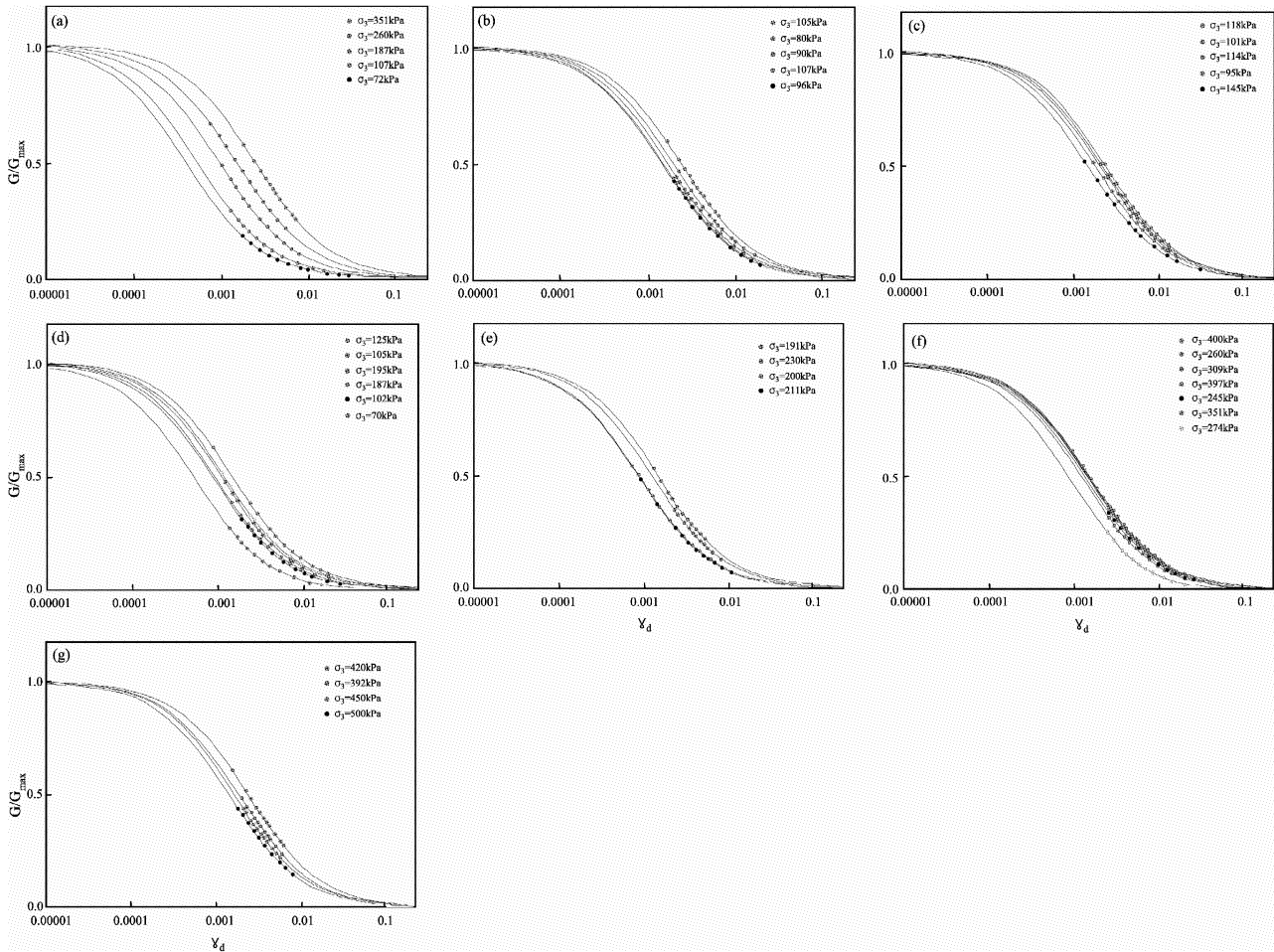


图 1 各特征层  $G/G_{\max} - \gamma_d$  关系曲线

(a) 第②<sub>-1</sub>层; (b) 第③层; (c) 第④<sub>-1</sub>层; (d) 第⑤层; (e) 第⑥层; (f) 第⑥<sub>-1</sub>层; (g) 第⑧层

Fig. 1  $G/G_{\max} - \gamma_d$  relation curve of each feature level

表 2 东营市区各地层土的  $G/G_{\max}$  和  $\lambda_{\max}$  典型值

Tab. 2 Representative value of  $G/G_{\max}$  and  $\lambda_{\max}$  of each stratigraphic soils in Dongying downtown area

地层及代表土性	取样深度/m	围压/kPa	$G/G_{\max}$	$\lambda_{\max}$
第② <sub>-1</sub> 层粉质粘土	3.0 ~ 4.2	50	0.058 2	0.213 6
第③层粘土	4.5 ~ 7.5	50 ~ 80	0.092 7	0.212 5
第④ <sub>-1</sub> 层粉土	9.0 ~ 14.5	90 ~ 150	0.148 0	0.202 9
第⑤层粘土	14.5 ~ 24.8	150 ~ 250	0.086 4	0.217 7
第⑥层粉质粘土	24.8 ~ 41.5	250 ~ 400	0.112 9	0.209 8
第⑥ <sub>-1</sub> 层粉质粘土与粉砂互层	24.8 ~ 25.5	250	0.098 5	0.204 4
⑧层粉质粘土	43.0 ~ 57.3	400	0.155 8	0.215 1

(4) 典型值与推荐值比较

从表 3 可见：(1)  $G/G_{\max} - \gamma_d$  关系中，第②<sub>-1</sub>层粉质粘土、第⑤层粘土  $G/G_{\max}$  典型值比推荐值低，第③层粘土、第④<sub>-1</sub>层粉土、第⑥层粉质粘土、第⑥<sub>-1</sub>层粉质粘土与粉砂互层和第⑧层

粉质粘土  $G/G_{\max}$  典型值比推荐值高；(2)  $\lambda - \gamma_d$  关系中，除第②<sub>-1</sub>层粉质粘土典型值比推荐值低外，其他各层典型值均比推荐值高；(3)  $G/G_{\max} - \gamma_d$  关系中，在大应变时，典型值比推荐值衰减更快。

综上所述,对于表3中各层土的典型值与推荐值相比较有高有低,由于本次研究是根据山东省东营市本地区土样的土性差异分层做的试验,相

较于推荐值更具有针对性。本次统计样本数量较多、分布范围较广,具有一定的代表性和适用性,故更适用于东营地区的各类工程。

表3 东营市区各地层土的  $G/G_{\max} - \gamma_d$  和  $\lambda - \gamma_d$  典型值与推荐值

Tab. 3 Representative value and recommended value of  $G/G_{\max} - \gamma_d$  and  $\lambda - \gamma_d$  of each stratigraphic soil in Dongying downtown area

地层及土性	剪应变 $\gamma_d$ 参数	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$
第② <sub>-1</sub> 层粉质粘土	$G/G_{\max}$	0.990 9	0.982 0	0.916 5	0.847 1	0.535 7	0.371 2	0.109 2	0.058 2
	$\lambda$	0.033 6	0.043 9	0.080 3	0.102 2	0.159 9	0.181 0	0.208 8	0.213 6
推荐值 ( $h \leq 10$ m)	$G/G_{\max}$	0.993 6	0.985 8	0.927 4	0.863 4	0.556 3	0.385 1	0.111 2	0.058 9
	$\lambda$	0.022 3	0.027 6	0.044 7	0.054 9	0.113 1	0.138 3	0.173 5	0.179 8
第③层粘土	$G/G_{\max}$	0.995 1	0.990 2	0.952 9	0.910 0	0.669 9	0.504 2	0.169 6	0.092 7
	$\lambda$	0.020 6	0.027 0	0.051 2	0.067 6	0.123 4	0.151 9	0.201 8	0.212 5
推荐值 ( $h \leq 10$ m)	$G/G_{\max}$	0.995 4	0.989 7	0.946 5	0.897 5	0.634 7	0.464 7	0.147 8	0.079 8
	$\lambda$	0.034 2	0.040 8	0.060 8	0.071 6	0.128 4	0.170 3	0.240 2	0.254 3
第④ <sub>-1</sub> 层粉土	$G/G_{\max}$	0.996 9	0.993 9	0.970 3	0.942 5	0.768 9	0.627 1	0.256 6	0.148 0
	$\lambda$	0.033 2	0.040 6	0.065 9	0.081 3	0.129 2	0.152 4	0.193 7	0.202 9
推荐值 ( $h \leq 10$ m)	$G/G_{\max}$	0.991 9	0.983 9	0.924 2	0.851 9	0.549 5	0.378 8	0.108 7	0.057 5
	$\lambda$	0.012 9	0.017 4	0.034 2	0.044 5	0.093 4	0.122 0	0.162 0	0.168 9
第⑤层粘土	$G/G_{\max}$	0.994 5	0.989 0	0.947 3	0.900 1	0.646 4	0.480 0	0.158 5	0.086 4
	$\lambda$	0.032 1	0.041 0	0.072 1	0.091 5	0.148 7	0.173 2	0.210 5	0.217 7
推荐值 ( $10 \text{ m} < h \leq 20 \text{ m}$ )	$G/G_{\max}$	0.995 9	0.990 9	0.952 4	0.908 5	0.663 2	0.495 8	0.164 2	0.089 5
	$\lambda$	0.031 7	0.037 1	0.052 9	0.061 2	0.110 1	0.147 4	0.212 3	0.225 9
第⑥层粉质粘土	$G/G_{\max}$	0.996 0	0.992 1	0.961 8	0.926 3	0.716 1	0.558 4	0.202 6	0.112 9
	$\lambda$	0.032 9	0.041 5	0.070 9	0.088 7	0.141 2	0.164 5	0.202 1	0.209 8
推荐值 ( $10 \text{ m} < h \leq 20 \text{ m}$ )	$G/G_{\max}$	0.994 6	0.990 8	0.938 0	0.882 3	0.597 9	0.426 2	0.129 2	0.069 1
	$\lambda$	0.016 5	0.018 7	0.024 9	0.038 5	0.090 8	0.116 4	0.155 9	0.163 4
第⑥ <sub>-1</sub> 层粉质粘土 与粉砂互层	$G/G_{\max}$	0.995 2	0.990 5	0.954 1	0.912 4	0.678 5	0.515 8	0.178 6	0.098 5
	$\lambda$	0.024 2	0.031 6	0.058 8	0.076 4	0.130 9	0.155 8	0.196 1	0.204 4
推荐值 ( $10 \text{ m} < h \leq 20 \text{ m}$ )	$G/G_{\max}$	0.994 6	0.990 8	0.938 0	0.882 3	0.597 9	0.426 2	0.129 2	0.069 1
	$\lambda$	0.016 5	0.018 7	0.024 9	0.038 5	0.090 8	0.116 4	0.155 9	0.163 4
第⑧层粉质粘土	$G/G_{\max}$	0.997 2	0.994 5	0.972 8	0.947 1	0.782 8	0.644 3	0.268 7	0.155 8
	$\lambda$	0.032 0	0.039 6	0.065 7	0.081 8	0.132 3	0.157 5	0.204 1	0.215 1
推荐值 ( $10 \text{ m} < h \leq 20 \text{ m}$ )	$G/G_{\max}$	0.992 7	0.985 5	0.931 6	0.872 1	0.576 9	0.405 5	0.120 0	0.063 8
	$\lambda$	0.010 3	0.015 1	0.028 7	0.032 3	0.084 1	0.111 2	0.133 4	0.137 2

### 3 结论与讨论

(1) 本文以东营市区土层资料为根据,统计分析了东营地区 3.0 ~ 57.3 m 各层典型土类粘土、粉质粘土和粉土动剪切模量比  $G/G_{\max}$  以及阻尼比  $\lambda$  随剪应变  $\gamma_d$  的递变关系。统计结果表明,山东东

营地区的土动力特性符合滞后性的一般规律。动剪切模量比  $G/G_{\max}$  随剪应变  $\gamma_d$  的增大而下降,其下降的幅度与有效围压的大小有关。在应变水平相同的情况下,动剪切模量比  $G/G_{\max}$  随剪应变  $\gamma_d$  的增大而下降的幅度越小。

(2) 在相同应变条件下,本次研究给出的典型值与袁晓明等(2000)给出的典型值具有一定

的差异性。由于本次研究是根据山东省东营市本地区土样的土性差异分层做的试验, 相较于推荐值更具有针对性。本次统计样本数量较多、分布范围较广, 避免了偶然性带来的误差, 故统计结果具有一定的代表性和适用性, 更适用于东营地区的各类工程。

(3) 本次试验采用动三轴仪, 在大应变范围内给出土的动剪切模量比及阻尼比值, 对山东省东营地区动三轴试验数据仍具有相当重要的实践意义。但是, 由于山东东营地区土层的沉积条件相对复杂, 试验结果存在一定的离散性, 因此, 对该地区的重大工程建设地震安全性评价, 一般应通过土的动力特性试验给出该工程场地典型土的  $G/G_{\max} - \gamma_d$  和  $\lambda - \gamma_d$  曲线的代表值, 以确保场地地震效应分析结果的可靠性。

#### 参考文献:

- 蔡辉腾, 危福泉, 蔡宗文. 2009. 重庆主城区粉质粘土动力特性研究[J]. 岩土力学, 28(3): 410-414.
- 陈国兴, 刘雪珠. 2004. 南京及邻近地区新近沉积土的动剪切模量和阻尼比的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 23(8): 1403-1410.
- 孙静, 袁晓铭, 孙锐. 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[J]. 地震工程与工程振动, 24(2): 125-133.
- 谢定义. 1988. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社.
- 袁晓铭, 孙锐, 孙静. 2000. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 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[J]. 大坝观测与土工测试, 12(1): 27-33.
- DB001-94, 工程场地地震安全性评价工作规范[S].
- SL237-1999, 土工试验规程[S].

## Experimental Study on Dynamic Shear Modules and Damping Ratio of Soils at Dongying Area in Shandong

WANG Jin-jin, ZHANG Jian-min, GUO Ting-ting, YANG Chuan-cheng, CAI Wen-xia  
(Shandong Institute of Earthquake Engineering, Jinan 250021, Shandong, China)

#### Abstract

The standard floors are divided for the soil whose buried depth is from 3.0 m to 57.0 m at Dongying area in Shandong. According to statistical analysis of the dynamic triaxial test on the selected 42 groups of clay, silty clay, silt (medium density), silty clay and silty sand interbedded strata, the test results of dynamic shear modulus and damping ratio variation with shear strain of the samples are given. Besides, the differences between test value and recommended value from Yuan *et al* (2000) are compared and analyzed. The results show that the experiment value of the various soils has representativeness and practicability at Dongying area in Shandong, which has been applied in the seismic safety evaluation in Dongying downtown area.

**Key words:** dynamic shear modulus; damping ratio; Dongying area