



坝基含砂黏土的动剪切模量和阻尼比试验研究*

陈智慧^{1,2}, 余湘娟^{1,2}, 高磊^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098;

2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏南京 210098)

摘要: 通过对某大坝坝基的含砂黏土试样开展共振柱试验, 得到含砂黏土在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 剪应变处的动剪切模量 G 与阻尼比 D 的变化曲线及规律, 分析了固结压力对动剪切模量、阻尼比和最大动剪切模量的影响, 讨论了最大动剪切模量和最大阻尼比随含砾量变化的规律。研究表明, 在小应变 ($10^{-6} \sim 10^{-4}$) 范围内含砂黏土动剪切模量 G 随剪应变 γ 增大而衰减, 随固结压力增大而增大; 阻尼比 D 随剪应变增大而增大; 最大动剪切模量 G_{\max} 随着含砾量的增加而增大, 但最大阻尼比随含砾量的增加而减小。

关键词: 含砂黏土; 动剪切模量; 阻尼比; 共振柱试验

中图分类号: TU 435

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)06-0146-05

Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio for clay with sand of dam foundation

CHEN Zhi-hui^{1,2}, YU Xiang-juan^{1,2}, GAO Lei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The variation curves and rules of dynamic shear modulus and damping ratio for clay with sand within the shear strain range of 10^{-6} up to 10^{-4} are obtained by the resonant column test. The influence of the confining pressure on dynamic shear modulus, damping ratio and the maximum dynamic shear modulus is discussed. The variation rules of the maximum dynamic shear modulus and maximum damping ratio with the gravel content are analyzed. The results show that within the small shear strain ($10^{-6} \sim 10^{-4}$), the dynamic shear modulus G falls as the augmentation of shear strain γ , and rises with the enhancement of the confining pressure; The damping ratio increases along with the accretion of the shear strain γ ; With the increase of gravel content, the maximum dynamic shear modulus enhances, but the maximum damping ratio decreases. The results may serve as reference for similar projects.

Key words: clay with gravel; dynamic shear modulus; damping ratio; resonant column test

土的动剪切模量和阻尼比作为重要的土动力特性参数, 是土层地震反应分析中必备的动力参数, 也是场地地震安全性评价中不可或缺的内容^[1]。为此, 国内外许多学者对于黏土、砂土、粉土等土的动力参数进行了深入的研究, 提出了一些较为成熟的理论和经验公式。考虑到土性对土的动剪切模量

和阻尼比的影响, 因此不能直接套用已有黏性土的动力参数经验公式, 必须采用试验来确定, 尤其是在重大工程建设中必须实测动剪切模量和阻尼比这两个参数。目前, 动剪切模量和阻尼比的测试方法一般有两种, 一种是现场测试, 另一种是室内测试。其中室内测定土的动剪切模量和阻尼比已有较

收稿日期: 2013-09-25

*基金项目: 河海大学中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2012B02314); 中国博士后科学基金资助项目 (2012M511193); 江苏省博士后科研资助计划项目 (1102073C); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20120094120015)

作者简介: 陈智慧 (1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事土动力学及土工抗震研究。

成熟的技术手段, 如采用共振柱试验, 该试验原理可靠、操作方便、边界条件清晰并且结果离散小, 是测定小应变下动剪切模量与阻尼比较为可靠的仪器, 为了克服其小应变的限制条件, 可采用合理的拟合公式推广到大应变的结果^[2]。

对于含砂黏土而言, 由于砂粒的存在, 改变了黏土的动力学特性, 而目前对含砂黏土的动力学参数变化方面的研究还相对较少, 为了研究含砂黏土的动力学特征, 本文依托某大坝工程, 开展了原状含砂黏土的室内共振柱试验, 获得了含砂黏土的动力参数及其变化规律, 这将为该工程项目的工程建设提供可靠的依据。

1 试验概况

1.1 试验仪器

本试验采用南京工业大学和溧阳市永昌工程实验仪器有限公司联合研制的 GZZ-50 型电磁式共振柱试验仪。试样为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的实心圆柱样, 试验测定的剪应变范围为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 。试验采用自由振动法, 首先在试样直径的切线方向施加激振力, 从而产生一个自由振动, 并对此系统进行分析取得试验结果, 即取得相应剪应变下的剪切模量和阻尼比。

1.2 试验土样及方案

试验所用土样为某大坝坝基原状样, 一共 5 个试样, 编号分别为 1-1, 1-2, 1-3, 2-1, 2-2。各个土样钻孔编号、埋深及物理性质指标见表 1。在实验室完成切样后直接进行装样, 采用等压固结, 每级压力固结 12 h, 测定试样在 50, 100, 150, 200 kPa 共 4 级压力下的动剪切模量和阻尼比。

表 1 试验土样埋深及物理性质

钻孔号 (ZK)	土样编号	取土深度/m	天然密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
1	1-1	14.3 ~ 14.5	2.199	11.7	1.969
1	1-2	22.3 ~ 22.5	2.274	13.9	1.996
1	1-3	28.0 ~ 28.2	2.258	13.7	1.985
2	2-1	39.9 ~ 40.1	2.228	16.0	1.920
2	2-2	41.0 ~ 41.2	2.161	17.7	1.837

试验完毕, 按照《土工试验规程》对风干试样进行颗粒分析试验, 所得试样各粒组含量见表 2。由表 2 可知, 1[#] 钻孔试样中砾粒含量平均在 22%, 砂粒含量平均在 27%, 细粒含量略大于 50%, 而 2[#] 钻孔试样中砾粒含量平均在 10%, 砂粒含量在 33% ~ 35%, 细粒含量在 53% ~ 56%。根据《土工试验规程》中土的分类标准, 结合工程的勘探资料, 将试样定名为含砂黏土。

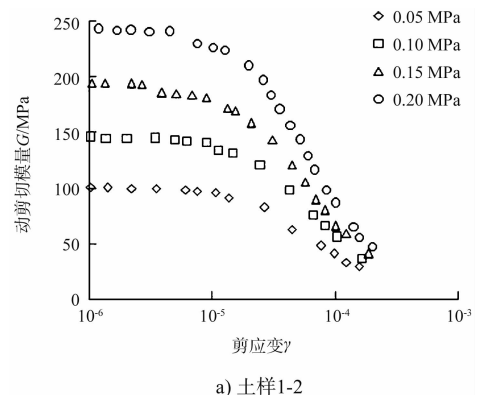
表 2 试验土样各粒组百分比含量

土样编号	取土深度/m	试样各粒组含量/%			
		10 ~ 5 mm	< 5 ~ 2 mm	< 2 ~ 0.075 mm	< 0.075 mm
1-1	14.3 ~ 14.5	11.03	11.39	27.15	50.43
1-2	22.3 ~ 22.5	10.01	12.05	27.91	50.03
1-3	28.0 ~ 28.2	10.54	11.56	27.32	50.58
2-1	39.9 ~ 40.1	4.86	5.28	35.91	53.95
2-2	41.0 ~ 41.2	5.16	4.80	33.31	56.73

2 试验结果

2.1 动剪切模量

含砂黏土的动剪切模量与剪应变的关系曲线见图 1 (由于同一钻孔变化关系相近, 限于篇幅分别以 1[#] 钻孔中土样 1-2 和 2[#] 钻孔中土样 2-1 为例)。由图 1 可知, 剪应变 γ 在 $10^{-6} \sim 10^{-5}$, 动剪切模量变化不大, 几乎是常量, 当 $\gamma > 10^{-5}$ 时, 动剪切模量呈衰减趋势, 土体开始表现出明显的非线性。



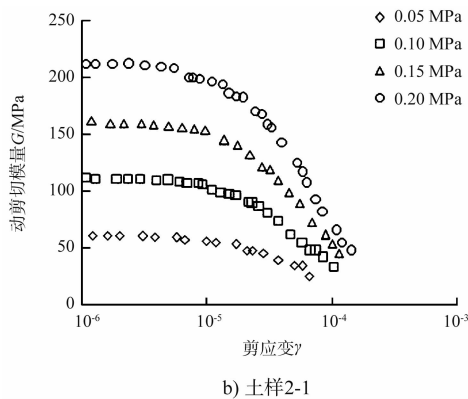


图1 含砂黏土动剪切模量 G 与剪应变 γ 的关系曲线

2.2 阻尼比

试验所测含砂黏土的阻尼比与剪应变的关系曲线见图2。由图2可知，在剪应变 $\gamma < 10^{-5}$ 时，阻尼比几乎不随剪应变变化，呈稳定水平，当剪应变 $\gamma > 10^{-5}$ 时，阻尼比随剪应变增加而增加。固结压力对阻尼比的影响并不明显，不同固结压力下阻尼比随剪应变的变化曲线维持在一条狭长的条带内，但阻尼比有随着固结压力增大而略微减小的趋势。阻尼比在 $\gamma = 10^{-4}$ 附近离散性比较大。

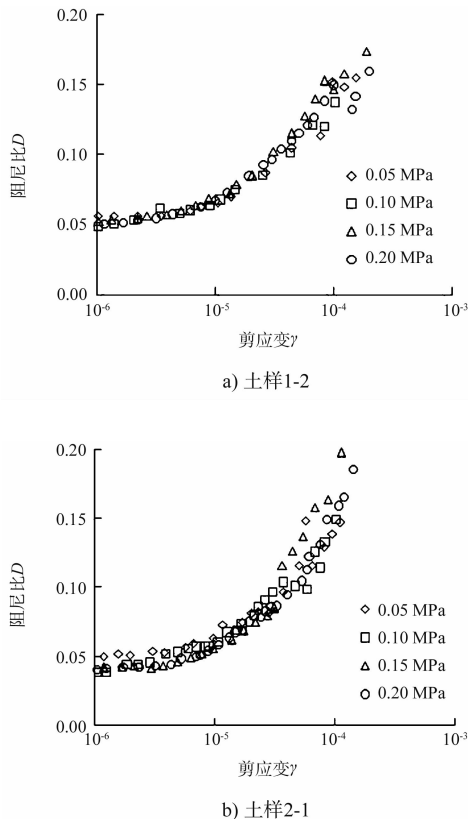


图2 含砂黏土阻尼比 D 与剪应变 γ 的关系曲线

3 试验结果分析

3.1 动剪切模量

目前，国内外对于动剪切模量主要是通过 Hardin-Drnevich 双曲线模型、分段双曲线模型、Davidenkov 模型曲线等变换得到的。其中应用 Hardin-Drnevich 双曲线模型是国内外应用最早、也是最简便的模型，已应用于大量的试验数据分析和处理^[3]。H-D 模型动剪切模量的拟合公式如下：

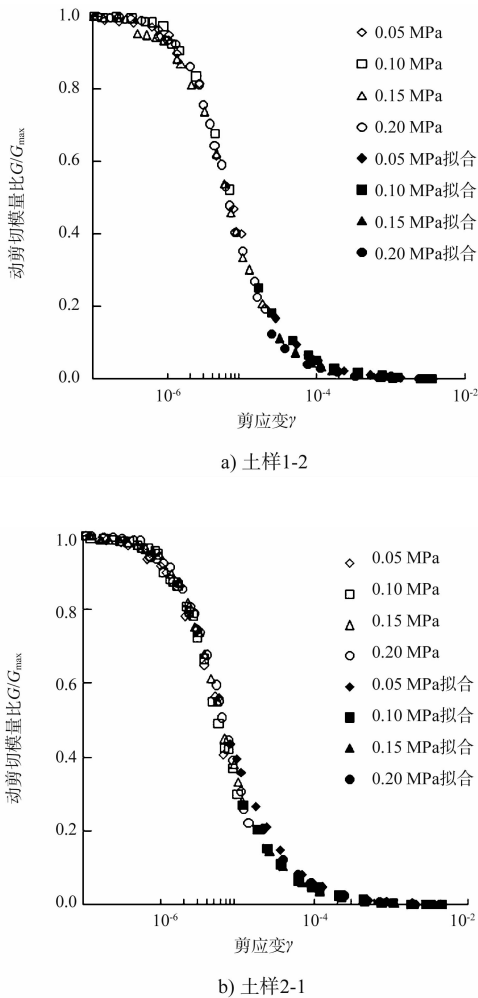
$$G/G_{max} = 1/(1 + \gamma/\gamma_r) \quad (1)$$

式中： G 为土动剪切模量； G_{max} 为最大动剪切模量； γ 为动剪应变； γ_r 为参考剪应变，由于 γ_r 难以确定，可作为拟合参数由拟合而得。

由图1可见，在相同动剪应变水平条件下，动剪切模量随固结围压增大而增大，且每级压力下增长幅值相近，因为试样的孔隙比随固结压力的增大而减小，相对密度增大，土颗粒接触面积增大，使得应力波在土中的传播更快，延缓了土体塑性变形的发展，从而增大了动剪切模量^[4]。此外在 $\gamma > 10^{-5}$ 时，动剪切模量衰减幅度随固结压力的增大而增大。随着剪应变的增大，固结压力对动剪切模量的影响逐渐减小，而剪应变对其影响慢慢上升为主要作用。

利用小应变 ($\gamma < 10^{-4}$) 的试验数据，应用 Hardin-Drnevich 双曲线模型曲线关系变换得到 $\gamma > 10^{-4}$ 范围内的动剪切模量与动剪应变关系，同时为了便于比较不同固结压力下土体动剪切模量随剪应变的变化规律，习惯上将动剪切模量随剪应变的衰减关系曲线进行归一化处理，其动剪切模量比 G/G_{max} 与剪应变 γ 关系曲线见图3。由图3可知，同一试样在不同固结压力下的 G/G_{max} 与 γ 关系曲线基本相同，试验点离散性很小。当 γ 在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ ，动剪切模量比随剪应变 γ 成比例衰减，因为随着剪应变的增加，塑性应变逐渐增大，动剪切模量迅速减小；当发生较大应变 ($\gamma > 10^{-3}$) 后，动模量比逐渐不再随应变的增大而变化，当 $\gamma \rightarrow \infty$ 时，动剪切模量减小的速度越来越小，近似平行于 γ 轴，因为在此阶段，剪应变中以塑性应变为主，弹性应变比例越来越小，动剪切模量降

低的空间越来越小, 曲线趋于平缓。应力-应变关系符合土体非线性、滞后性的一般规律。



注: 试验所测得的数据用空心图例表示, 由 Hardin-Drnevich 双曲线模型关系变换得到的结果用相应的实心图例表示。

图 3 含砂黏土动剪切模量比 G/G_{max} 与剪应变 γ 的关系曲线

3.2 阻尼比 D

试验表明, 土的阻尼比随剪应变变化的规律比较复杂, 离散性较大, 用 H-D 模型或 Davidenkov 模型描述均有困难。例如根据 H-D 模型拟合阻尼比公式:

$$D = D_{max} (1 - G/G_{max}) \quad (2)$$

将面临两个问题: 1) 在最大动剪切模量处其阻尼比为 0, 这与试验结果明显不一致; 2) 难以确定 D_{max} 。因此, 从本文的试验结果来考虑, 对于 $D-\gamma$ 关系可以采用按陈国兴等^[5] 建议的阻尼比经验公式描述:

$$D = D_{min} + D_0 (1 - G/G_{max})^n \quad (3)$$

式中: D_{min} 对应土体最大动剪切模量 G_{max} 时的阻尼

比; D_0 和 n 为与土性相关的系数。根据试验数据, 利用最小二乘法回归分析并平均化处理得到拟合参数以及所得到最大阻尼比 (表 3)。

表 3 试验土样阻尼比 D 的拟合参数

土样编号	$D_{min}/\%$	$D_0/\%$	n	D_{max}	相关性系数
1-1	4.61	14.1	0.742	0.187	0.990
1-2	5.10	12.8	0.823	0.180	0.988
1-3	3.63	13.5	0.782	0.184	0.993
2-1	4.07	16.5	0.935	0.205	0.996
2-2	4.21	24.0	0.960	0.208	0.998

试样所测微小应变时阻尼比在 4% ~ 5%, 而一般黏性土和砂土在微小应变时阻尼比小于 2% ~ 3%。土样含有 10% ~ 22% 的砾粒和 27% ~ 35% 砂粒, 相比一般土体而言, 含砂黏土粗颗粒与细颗粒间空隙较大, 在动荷载作用下, 土颗粒发生相对滑移的机会增多, 应力波在土颗粒间的传播阻力变大, 耗损的能量增多, 微小应变时阻尼比增大。

根据拟合数据, 对比文献[2] 中的推荐值可知, 试样最大阻尼比相比一般黏性土的小。张誉等^[6] 通过对砂卵石土的动三轴试验, 得出砂卵石土阻尼比上限值比砂土和黏土的小。比较不同钻孔中试样拟合所得最大阻尼比, 1[#] 钻孔中试样所得 D_{max} 比 2[#] 钻孔中试样 D_{max} 小; 比较两钻孔试样平均含砾量, 1[#] 钻孔中试样平均含砾量在 22% 左右, 而 2[#] 钻孔中试样平均含砾量在 10% 左右。由此可知, D_{max} 随着土样砾粒含量的增加而减小。含砂黏土较一般黏土颗粒粒径大、结构紧密, 相比一般黏土有较大的刚性, 振动波在土中传播时损耗的能量较少, 所以最大阻尼比较小^[6]。

3.3 最大动剪切模量

一般认为, 当土体处于 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 微小应变范围时, 土颗粒间的连接能基本保持完好状态, 土骨架的变形能够恢复, 可近似认为土体处于黏弹性状态。在双对数坐标上最大动剪切模量和平均有效固结压力之间呈良好的线性关系, 可用 Janbu 经验公式拟合^[7]

$$G_{max} = kp_a (\sigma_c/p_a)^n \quad (4)$$

式中: p_a 为标准大气压力; k 和 n 为试验参数。试验数据见表 4, 其中 R^2 表示拟合的相关系数的平方, 其值越接近 1, 表示拟合效果越佳。

表4 试验土样最大动剪切模量拟合系数

土样编号	不同固结压力下 G_{\max} /MPa				k	n	R^2
	50 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa			
1-1	97.5	130.8	171.3	226.7	1 397.6	0.59	0.965
1-2	101.0	145.4	194.9	242.7	1 515.9	0.63	0.991
1-3	78.1	120.6	186.6	215.9	1 288.3	0.76	0.985
2-1	60.0	102.4	150.2	201.1	779.9	0.86	0.999
2-2	60.0	101.7	140.2	172.0	591.4	0.76	0.999

比较表4中不同钻孔中试样最大动剪切模量可知,在相同固结压力情况下,1[#]钻孔中试样的最大动剪切模量相比于2[#]钻孔中试样大30%左右,其中在固结压力50 kPa时,超出了40%左右。Rollins等^[8]经过试验研究发现,含砾量从0增加到60%时最大动剪切模量 G_{\max} 增加了38%。Hardin和Kalinski等^[9]通过对不同级配的砂和砂砾混合物的大直径共振柱试验(试验尺寸为 $\phi 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$),发现掺砾后试样的 G_{\max} 有显著提高。通过对本文的数据结果进行分析,发现试样颗粒成分相近,均含有砾粒、砂粒、黏粒,其中砾粒以角砾为主,且试验土样的颗粒级配都良好。但不同钻孔的土样中各粒组占比不同,从而导致在相同试验条件下所得结果相差较大。1[#]钻孔中的试样含砾量比2[#]钻孔中的试样多出12%左右。含砾量的增加显著增大了土体最大动剪切模量,粗颗粒与细颗粒充分结合在一起,粗颗粒的增加增强了土样的稳定性,在相同固结压力下,土体抵抗变形的能力增大,所产生的变形小。

4 结语

1) 试验得到了小应变范围内动剪切模量,并应用H-D双曲线公式推广得到含砂黏土大应变范围($10^{-4} \sim 10^{-2}$)内的动剪切模量。研究结果表明不同固结压力下归一化后的动剪切模量比 G/G_{\max} 集中在一条狭窄的条带内,并随剪应变 γ 的增大而衰减,衰减程度与剪应变幅值相关,固结压力的影响不明显。在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 应变范围内, G/G_{\max} 衰减严重。

2) 固结压力对含砂黏土的阻尼比影响不明显,在小应变范围内,阻尼比随着剪应变的增大

而增大,同时离散性也较大。土样的最大阻尼比随含砾量的增加而降低,土样的最大动剪切模量 G_{\max} 随着含砾量的增加而增大。

参考文献:

- [1] 曾长女,刘汉龙,周云东.粉土动力特性研究综述[J].防灾减灾工程学报,2005,25(1):99-104.
- [2] 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].地震工程与工程振动,2000,20(4):133-139.
- [3] 李永强,景立平,梁海安,等.土体动剪切模量测定及非线性拟合方法研究[J].世界地震工程,2010,26(S1):247-252.
- [4] 白玉,余湘娟,高磊.南京地区粉质黏土动剪切模量与阻尼比试验研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(1):26-30.
- [5] 陈国兴,刘雪珠,朱定华,等.江苏长江以南地区新近沉积土动剪切模量比与阻尼比研究[J].防灾减灾工程学报,2007(S1):66-70.
- [6] 张誉,王汝恒,贾彬.砂卵石土在动荷载作用下的阻尼比研究[J].工业建筑,2008,38(4):59-62.
- [7] 高志兵,高玉峰,谭明慧.饱和黏性土最大动剪切模量的室内和原位试验比较研究[J].岩土工程学报,2010,32(5):731-745.
- [8] Rollins K M, Evans M D, Diehl N B, et al. Shear modulus and damping relationships for gravels [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(5): 396-405.
- [9] Hardin B O, Kalinski M E. Estimating the shear modulus of gravelly soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(7): 867-875.