

软黏土动力特性的试验研究

潘 婧

(南京高等职业技术学校,江苏 南京 210000)

摘要:淤积滨海平原区软黏土为多种岩性岩相的沉积复合体,破坏应变较小且极易扰动,该类软黏土的动力特性仍未完全探明。现以诺软黏土为例,现场取样开展室内微机控制动三轴试验,对试样施加正弦波荷载,通过改变动应力大小、震动次数、围压,研究其动力特性。研究表明:动模量比 R_c 随动剪应变 r_d 成倍增减,在相同的动剪应变水平时,初始动模量随固结压力增加而增加;在相同动应力幅值作用下,随着循环周次的增加和动应力幅值增大,软黏土最大动应变也随之逐渐增大;当振动周次增加时,沉积土层动强度则相应减小;且土层动应力幅值 σ_d 随着固结压力 σ_{3c} 的增大而逐渐增大;动内摩擦角随循环次数的增加而减小。

关键词:软黏土; 动力特性; 动三轴试验; 振动荷载

中图分类号:TU435;TU41

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)12-0035-05

doi:10.13402/j.gcjs.2024.12.158

Experimental study on dynamic characteristics of soft clay

PAN Jing

(Nanjing Higher Vocational and Technical School, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: The soft clay in the silted coastal plain area is a sedimentary complex of multiple lithology and lithofacies, with small failure strain and easy to be disturbed. The dynamic characteristics of this kind of soft clay have not been fully explored. Now, taking Nuoshan soft clay as an example, the indoor microcomputer-controlled dynamic triaxial test is carried out on the site, and the sine wave load is applied to the sample, and its dynamic characteristics are studied by changing the magnitude of dynamic stress, vibration times, and confining pressure. The results show that the dynamic modulus increases and decreases exponentially with the dynamic shear strain r_d than R_c . At the same dynamic shear strain level, the initial dynamic modulus increases with the consolidation pressure; Under the same dynamic stress amplitude, the maximum dynamic strain of soft clay will gradually increase with the increase of cyclic cycles and dynamic stress amplitude; When the vibration frequency increases, the dynamic strength of Lano sedimentary soil layer decreases correspondingly; And dynamic stress amplitude of soil layer σ_d with consolidation pressure σ_{3c} increases gradually; The dynamic internal friction angle decreases with the increase of the number of cycles. The research results can improve the understanding of complex sedimentary dynamic characteristics.

Key words: soft clay; dynamic characteristics; dynamic triaxial test; vibration load

结构性软黏土具有结构强度,它呈脆性破坏,且破坏应变较小,极易扰动,因而软黏土的动结构特点极不易掌握。动力作用过程中土体的应力-应变关系是表征其动力特征的主要参数,是土体在

动荷载作用下失稳破坏的重要判据之一。

动应力-应变循环曲线可很好地表征土体动力特性关系^[1]。大多数情况都用 HARDIN 等^[2-3]研究提出采用动应力、动应变最大值规则来绘制循环曲

收稿日期:2020-03-13

作者简介:潘 婧(1989—),女,讲师,从事土木工程方面的研究。

线的骨干曲线。这一方法是针对等幅往返周期荷载而言的,实际中有许多振动所引起的往返应力并非等幅,如构造不规则的地震往返应力作用下卸荷、再加荷。在这种情况下构成应力-应变关系分支曲线的方法要比等幅往返周期荷载复杂得多,FINN 等^[4]从土的不规则往返应力试验中总结出的“外大圈”规则。MATASOVIC 等^[5]根据饱和砂土往返荷载试验结果,提出土的初始滞回圈和任意后续滞回圈之间的关系。国内不少学者针对软黏土动力特性开展一系列研究。杨爱武等^[6]依托天津滨海新区结构性海积软土背景,通过三轴试验,分析了振动频率对软黏土应力-应变关系、孔压变化的影响。雷华阳等^[7]通过循环三轴试验对饱和软黏土进行了动力试验,分析了动渗耦合作用下饱和软黏土的渗流特性、动弹性模量等变化规律。李明枫等^[8]以正常固结饱和软黏土为研究对象,基于 GDS 动静真三轴仪对其开展了循环荷载下动力特性分析,探讨了循环应力比等对饱和软黏土到了动力特性的影响。丁智等^[9]依托地铁隧道穿越的饱和软黏土为例,开展了室内动三轴试验,分析了振动频率、固结度、排水条件对软黏土动孔压和应变的影响。软黏土属浅海相沉积物,以碎屑沉积物为主。因沉积环境的不断改变,使得该地区软黏土物质组成极其复杂,极易受扰动而发生破坏,该类软黏土的动结构特点仍未完全探明。

现以软黏土为例,采用微机控制动三轴试验机,通过改变动应力大小、震动次数、围压,获得振动作用下试样的动强度、动模量以及动阻尼比,从而研究土的动力特性和有关指标的变化规律,以期可为相关研究提供参考。

1 研究区概况

项目研究地区根据沉积环境可分为 4 个工程地质单元区。即:阶地漫滩区(Ⅰ区)、湾-海交互区(Ⅱ区)、滨海砂积延拓区(Ⅲ区)、淤积滨海

平原区(Ⅳ区)。

研究区土体层理从上至下分为河床相、漫滩-河口湾相及三角湾沉积土层,包括砂(中-细)、砂质粉质黏土,局部夹杂透镜体,发育层理以水平层理为主,偶见交错层理。在研究区北部地区,由大量黏土质粉细砂沉积。

以淤积滨海平原区软黏土为研究对象(图 1),该类软黏土一般为淤泥质黏土,灰色、饱和,流塑,富含植物残体,高压缩性,低强度。所研究软黏土的物理力学参数如表 1 所示。



图 1 研究区软黏土

2 室内试验方案设计

2.1 设备简介

试验采用自主研发的动三轴试验机(型号 TDS-20),如图 2 所示。该设备轴向最大输出试验荷载为 20 kN,加载精度为 $\pm 1\%$ FS,测量精度为 $\pm 1\%$ FS;三轴室最大压力 3 MPa,轴向激振器行程为 ± 40 mm;轴向、侧向激振频率为 0~20 Hz;数据采集和处理由计算机实现。



图 2 20 kN 微机控制动三轴试验机

表 1 淤积滨海平原区软黏土物理力学参数

含水率/%	天然密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙比	孔隙率/%	液限/%	固结系数/($\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1}$)
26.28	1.96	1.28	42.28	43.57	0.03
塑限/%	压缩指数/ MPa^{-1}	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)	—
18.29	0.35	5.76	33.29	14.76	—

2.2 试验方案

试验取自淤积滨海平原区软黏土, 共 3 组。试验试样为根据动三轴试验机型号及 GB/T 50123—2019 土工试验方法标准^[10], 确定土样为圆柱体: 直径 $D=39.1$ mm, 高度 $H=80$ mm。在进行固结试验前, 先进行真空抽气 2 h, 再注水浸泡 24 h 以后备用。所有试样的斯开普顿 (skempton) 孔压系数 $B>0.98$, 以保证试样处于饱和状态。在试验仪器上固结时, 实行双面排水固结, 等固结稳定后再开展振动三轴试验。测试内容分别为动弹性模量和阻尼比试验、动力变形试验和动强度试验。本次采用的动三轴试验三轴室最大压力 3 MPa、轴向激振器行程 ± 40 mm; 轴向、侧向激振频率 0 ~ 20 Hz, 据此设计试验方案如表 2 所示。所采用正弦波形如图 3 所示。

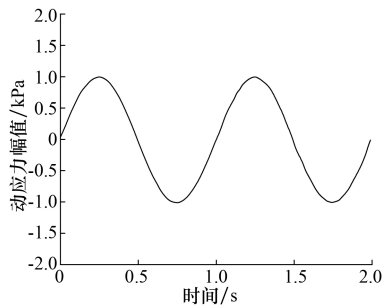


图 3 试验正弦波

2.3 动弹性模量试验

(1) 打开动力控制系统和量测系统的仪器电源, 预热 30 min。振动频率采用 0.33 Hz, 输入波形采用正弦波, 试验循环次数为 3 次。

(2) 安装试样, 按照要求的固结比和围压 (表 2) 逐级施加侧向压力和轴向压力, 直到两者达到预定压力; 然后打开排水管使试样排水固结; 固结完成后关排水阀, 并计算振前干密度。

(3) 选择动应力大小。在不排水条件下对试样施加动应力, 测记动应力、动应变和动孔隙水压力, 直至预定振次 (3 次) 停机, 打开排水阀排水, 以消散试样中因振动而引起的孔隙水压力。

排水完成后, 关闭排水阀, 进行下一级动力试验。动应力分为 6 ~ 10 级 (分别是 ± 0.2 、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 kPa)。

(4) 按上述方法, 进行其他围压和固结比下的动弹性模量试验。

采用 Davidenkov 模型描述土的剪切力与剪应变的关系, 动模量比、动剪应变的表达式如下:

$$R_G = E_d / G_{d0} (1 + \mu) \quad (1)$$

$$\gamma_d = (1 + \mu) \varepsilon_d \quad (2)$$

式中: R_G 为动模量比; γ_d 为动剪应变; E_d 为土体的动力弹性模量, GPa; G_{d0} 为土体初始动剪切模量, GPa; ε_d 为土体动应变; μ 为泊松比。

采用式 (1) 绘制 $R_G - \gamma_d$ 曲线。

2.4 动强度试验

(1) 打开动力控制系统和量测系统的仪器电源, 预热 30 min。动强度试验的振动频率选为 1.0 Hz, 输入波形为正弦波。

(2) 安装试样并按照要求的固结比和围压 (表 2), 逐级施加侧向压力和轴向压力, 直到两者达到预定压力; 然后打开排水管使试样排水固结; 固结完成后关排水阀, 计算振前干密度。

(3) 在不排水的情况下施加动应力进行振动直到破坏, 测记试验中的动应力、动应变及动孔压的变化过程。

(4) 在相同初始应力条件下 (围压和固结主应力比相同), 分别施加 4 ~ 6 个不同的动应力进行动强度试验至试样破坏, 第一组施加 28.0、38.5、45.5、54.0 kPa, 第二组施加 25.0、53.0、58.0、71.5 kPa, 第三组施加 59、79、83 kPa。破坏标准选用应变达到 5%。

3 试验结果分析

3.1 $R_G - \gamma_d$ 试验分析

$R_G - \gamma_d$ 关系曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 动模量比 R_G 随动剪应变 γ_d 成倍增减。以图 4(a)

表 2 试验方案

试验内容	波形	频率/Hz	围压 σ_3 /kPa	动应力 σ_d /kPa	震动次数/次	排水条件
动弹性模量试验	正弦波	0.33	300、600、1 000、1 500	$\pm (0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8) \sigma_3$	3	不排水
动强度试验	—	1.0	—	25 ~ 83	3	—

为例, R_G 在 γ_d 从 10^{-5} 变化到 10^{-4} 时, 减小 20 % 左右; γ_d 从 10^{-4} 变化到 10^{-3} 时, R_G 减少 70 % 左右; γ_d 从 10^{-3} 变化到 10^{-2} 时, R_G 减少 95 % 以上。因此, 动剪应变水平是影响动模量的重要因素。

3.2 动强度试验分析

周期动荷载作用一定循环周数后, 绘制成动应力比 $\sigma_d/2\sigma_{3c} \sim \lg N$ 关系曲线。每组试验整理时的试样破坏标准是轴向最大动应变 $\varepsilon_d = 4\%$ 。

3.2.1 最大动应变与循环周次的关系

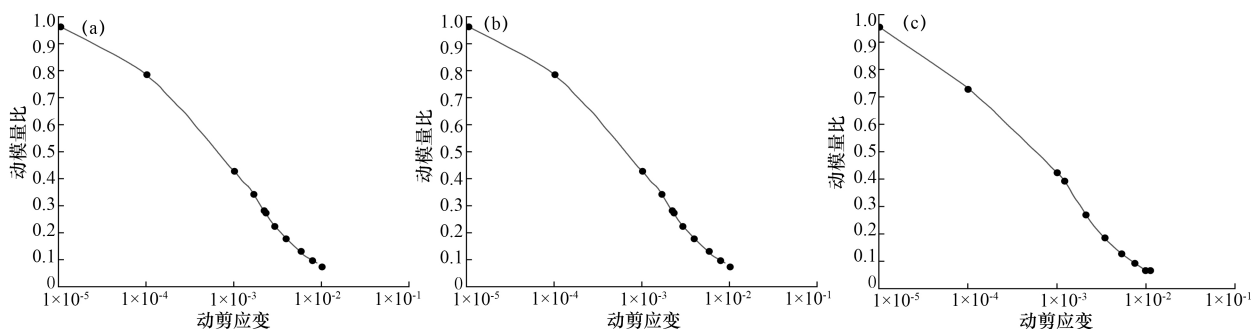
试验结果如图 5 所示。由图 5 可知, 动应力作用情况相同时, 研究区土体最大动应变与作用

循环周数成正比。荷载作用幅值越大, 相同循环作用次数后, 软黏土动应变最大值也最大。

3.2.2 动强度的试验结果

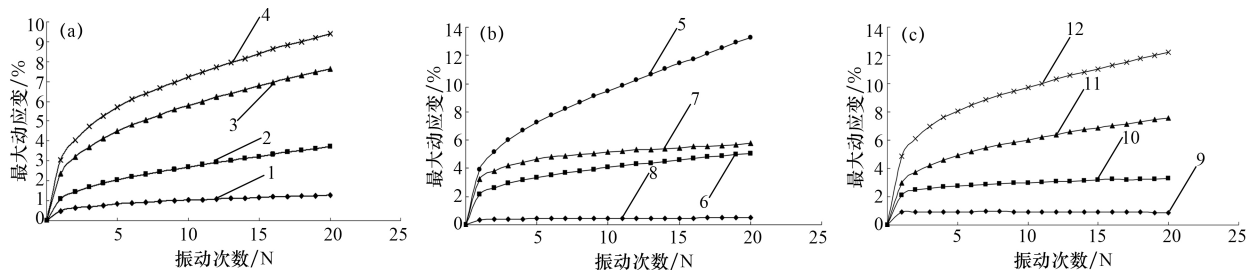
不同围压下动强度试验结果如图 6 所示, 即对于某个指定的破坏应变, 当振动周次增加时, 沉积土层动强度则相应减小。

对于指定的破坏标准, 试验结果显示研究区软黏土动应力与固结压力成正比, 这一试验结果与静载荷载条件下表现规律基本一致, 即土体抗剪强度与围压成正比。当试验围压为 0 时, 研究区软黏土动强度亦为 0, 可以认为土体无动黏聚力。不同振动周次所对应的动摩擦角 φ , 如表 3 所示。



(a) 第一组; (b) 第二组; (c) 第三组

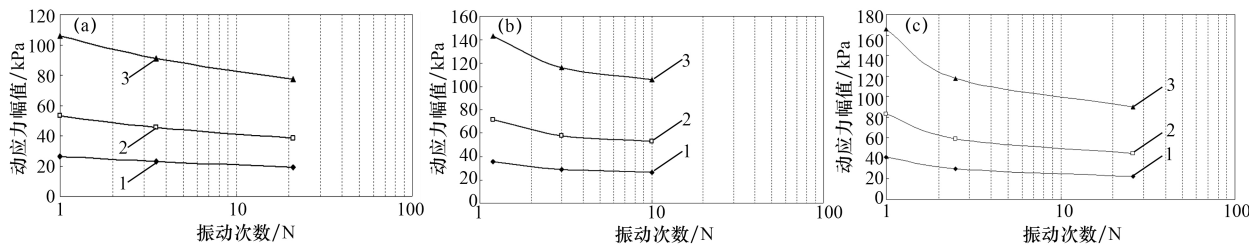
图 4 $R_G - \gamma_d$ 关系曲线



(a) 第一组; (b) 第二组; (c) 第三组

σ/kPa : 1—28; 2—38.5; 3—45.5; 4—53; 5—25; 6—53;
7—58.0; 8—71.5; 9—45; 10—59; 11—79; 12—83。

图 5 最大动应变与循环周次的关系曲线



(a) 第一组; (b) 第二组; (c) 第三组

σ/kPa : 1—50; 2—100; 3—200。

图 6 不同围压下动强度试验结果

表 3 不同振动周次所对应的动摩擦角 (°)

试验编号	振动周次 $N=5$	振动周次 $N=8$
1	10. 58	10. 39
2	12. 64	12. 37
3	12. 27	11. 82

4 结 论

软黏土因其复杂的沉积环境使其极易受扰动而发生破坏,破坏应变较小,极易扰动,其动力特性需深入探讨和研究。本文以软黏土为例,现场取样开展室内微机控制三轴试验,对试样施加不同形式和不同强度的振动荷载,研究其动力特性。主要结果:

(1) 动模量比 R_c 随动剪应变 r_d 成倍增减,动剪应变水平是影响动模量的重要因素;动剪应变水平相同时,初始动模量与固结压力成指数形式正比例增长;

(2) 在相同动应力幅值作用下,土体最大动应变与作用循环周数成正比。荷载作用幅值越大,相同循环作用次数后,软黏土动应变最大值也最大;

(3) 当振动周次增加时,软黏土动强度则相应减小;且土层动应力幅值 σ_d 随着固结压力 σ_{3c} 的增大而逐渐增大,研究区域土体的动内摩擦角为 $10.58^\circ \sim 12.64^\circ$ 。

参考文献:

[1] 雷华阳,许英刚,缪姜燕,等. 动渗耦合作用下软黏土

动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42 (3): 601 – 610.

[2] HARDIN B, DRNEVICH V. Shear modulus and damping in Soil; measurement and parameter effect[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, 1972, 98 (6): 603 – 624.

[3] HARDIN B, DRNEVICH V. Shear modulus and damping in soils; design equations and curves[J]. Journal of Soil Mechanics and foundations, ASCE, 1972 (7): 667 – 692.

[4] FINN W, LEE K, MARTIN G. An effective stress model for liquefaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1977 (6): 517 – 533.

[5] MATASOVIC N, VUCETIC M. Cyclic characterization of liquefiable sands[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1993 (11): 1085 – 1821.

[6] 杨爱武,王亚成. 不同频率影响下结构性软黏土动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (增刊 2): 184 – 188.

[7] 雷华阳,许英刚,缪姜燕,等. 动渗耦合作用下软黏土动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42 (3): 601 – 610; 655.

[8] 李明枫,王永政,张婷婷. 三维应力状态下饱和软黏土循环动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43 (6): 1523 – 1532.

[9] 丁智,张涛,魏新江,等. 排水条件对不同固结度软黏土动力特性影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37 (5): 893 – 899.

[10] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.