

交通荷载作用下结构性软土动应力 - 动应变 关系试验研究

雷华阳, 姜岩, 陆培毅, 李志伟

(天津大学 土木工程系, 天津 300072)

摘要: 通过对天津滨海新区典型结构性软土进行室内循环三轴试验, 研究在交通荷载长期作用下, 结构性淤泥质粉质黏土的动应变发展情况; 考虑不同的振动波型、动应力频率、动应力比以及固结状态对动应力 - 动应变关系的影响, 得到淤泥质粉质黏土的临界动应力比和动应力 - 动应变关系随加载频率、围压及固结状态而变化的规律。试验结果表明, 结构性淤泥质粉质黏土存在一个临界动应力比和一个振动频率阈值; 同时, 在半正弦波型条件下动弹性模量和动剪切模量随固结压力值的变化存在一个转折点。

关键词: 土力学; 交通荷载; 结构性软土; 动三轴试验; 动应力 - 动应变关系

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 1 - 3052 - 06

EXPERIMENTAL STUDY OF DYNAMIC STRESS-STRAIN RELATION OF STRUCTURAL SOFT SOIL UNDER TRAFFIC LOAD

LEI Huayang, JIANG Yan, LU Peiyi, LI Zhiwei

(Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Through the dynamic triaxial tests of structural soft soils, the dynamic strain analysis is conducted on the silt soils under traffic load, and the influence of vibration type, vibration frequency, stress ratio, consolidation status of soils are taken into account. The variation rules of the critical dynamic stress ratio of the silt soils and dynamic stress-strain with vibration frequency, confining stress and consolidation status are obtained. Some conclusions can be drawn from the research: (1) there is a critical dynamic stress ratio and a threshold of vibration frequency for structural silt soils under traffic load; (2) there is a turning-point for the dynamic elastic modulus and dynamic shear strain of silt soil under half-sine wave condition.

Key words: soil mechanics; traffic load; structural soft soil; dynamic triaxial test; dynamic stress-strain relation

1 引言

城市的快速发展对交通的需求日益提高, 而解决交通拥挤状况的重要途径是建设立体交通网络, 于是高速公路、铁路、地铁等一大批交通项目已经建成或正在建设之中, 由此产生的岩土工程问题也

接踵而来, 如对于交通荷载这类具有作用时间长、有一定作用周期的循环荷载可能产生的破坏情况, 循环荷载下地基土的力学响应及破坏机制如何, 尤其是对于结构性较强的饱和软黏土地区, 这些问题的研究将对有效控制、避免或减轻地面沉降灾害的发生、预测均有重要的理论价值和实际意义。

目前, 国内外关于土动力学方面的研究主要集

收稿日期: 2006 - 11 - 22; **修回日期:** 2007 - 04 - 03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50508021)

作者简介: 雷华阳(1974 -), 女, 博士, 1994年毕业于吉林大学建设工程学院岩土工程专业, 现任副教授, 主要从事岩土力学方面的教学与研究
工作。E-mail: leihuayang74@yahoo.com.cn

中在两个方面：一是关于周期荷载作用下黏性土性状的研究^[1-9]，主要包括孔隙水压力发展变化的研究和周期荷载作用下软黏土的变形分析，多采用不排水正弦循环荷载下的变形计算及预测；二是由地震作用引起的土的变形性状问题研究，主要局限于砂土地基液化等方面^[10-14]。

交通荷载作为一种特殊的循环荷载，既不同于静荷载，也不同于地震荷载，关于饱和黏性土地基在各类动荷载(如周期荷载)作用下力学性状的研究成果相对较少。因此，如何能准确地模拟交通荷载作用、合理评价土体的动应变变化规律、研究控制永久变形的措施、评价具有一定结构性的饱和软黏土在重复荷载下的力学性状等，对于解决沿海城市基础设施建设中的设计计算具有重要的参考价值。

欲解决和研究这些问题，应首先研究交通荷载对结构性土体动应变的影响规律。本文以典型海相淤泥质粉质黏土为研究对象，进行交通振动荷载作用下结构性黏土的动力稳定性研究，主要探讨分析在不同振动波型、固结状态、围压以及频率下结构性黏性土的动应变发展情况，为研究交通荷载所引发的各种问题的解决提供理论依据。

2 动应力 - 动应变关系试验研究

2.1 动三轴试验简介

本次试验仪器采用 DDS - 70 电磁式振动三轴仪。动力加荷部分采用电磁式激振器，频率为 0~10 Hz，最大轴向动荷载为 1 372 N。所用试样为高 80 mm、直径 39.1 mm 的圆柱体。可测定的参数主要有动弹性模量、动阻尼比和液化强度等。

试验取用滨海新区典型的淤泥质粉质黏土的原状土，埋深 7~15 m，其基本物理力学指标如表 1 所示。

表 1 试验用土的基本物理力学指标

Table 1 Basic physico-mechanical indexes of test soil

γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	w /%	G_s	e	w_L /%	w_p /%	I_p	a_{1-2}	E_s	快剪指标	
							$/\text{MPa}^{-1}$	$/\text{MPa}$	c/kPa	$\varphi/(\circ)$
17.8	42.8	2.71	1.18	38.0	20.2	17.8	0.92	2.55	5.0	7.68

若要较准确地反映土体在交通循环荷载长期作用下表现出来的变形性状，必须尽可能正确地模拟现场的实际条件，主要包括土性条件、初始受力条件、实际振动荷载的模拟及排水条件等。

为模拟交通荷载对地基土振动影响，给出试验参数应力比 $r(r = \sigma_d / (2\sigma_c))$ ，即表示竖直方向的振动荷载与侧压力的比值，其取值范围为 0.18~0.28。

为模拟初始受力条件，分均压和偏压固结 2 组试样。均压固结试样的有效围压根据取样深度确定，经固结后，在正常固结状态下进行动三轴试验。对于偏压固结试样首先在一定静止土压力系数条件下偏压固结，然后再进行动三轴试验。本试验中取 $K = 1.0, 0.7(K = \sigma_3 / \sigma_1)$ 。

车辆行驶对土体的振动作用主要决定于其所施加的动荷载大小及振动频率，其中振动频率反映了车辆行驶速度的变化。根据现场实测资料，其振动频率是不断变化的，结合测试仪器的范围，本次试验选择振动频率分别为 1, 2 和 5 Hz。选用的振动波型包括正弦波和半正弦波 2 种。

由于交通荷载作用下饱和土体几乎不发生排水和体积变化，因此采用不排水三轴试验来模拟。

2.2 试验数据整理

本次研究共进行了 24 组淤泥质粉质黏土动三轴试验。动应变与振动次数的关系曲线见图 1；不同频率下动应力 - 动应变关系曲线见图 2；不同围压下动应力 - 动应变关系曲线见图 3~5；不同振动波型下动应力 - 动应变关系曲线见图 6。

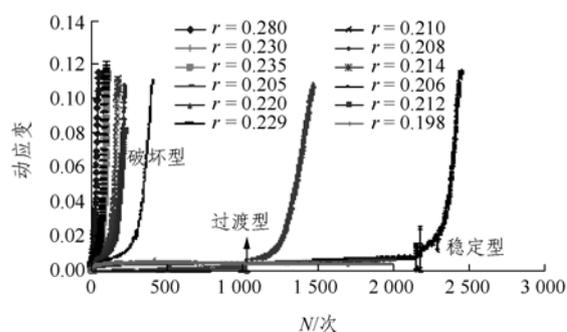


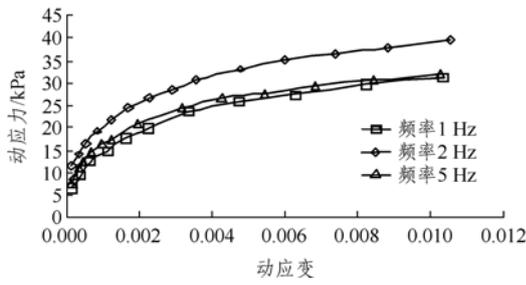
图 1 动应变与振动次数的关系曲线

Fig.1 Relation curves between dynamic strain and vibration times

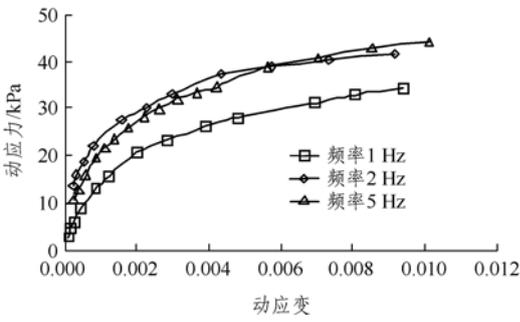
2.3 试验结果分析

(1) 图 1 表明，淤泥质粉质黏土动应变随振动次数 N 的增加而累积增长，相同的固结条件和围压作用下，存在一个临界动应力比，当动应力比大于或等于临界动应力值时，土体会迅速达到破坏状态。根据试验可得，临界动应力比 $r_c = 0.205$ 。

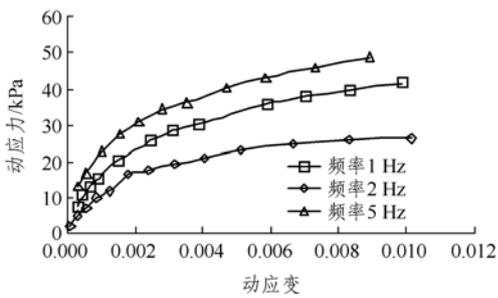
淤泥质粉质黏土在交通荷载作用下产生的动应变和振动次数的关系表现为稳定型、过渡型和破坏型 3 种典型情况。



(a) $\sigma_3 = 80 \text{ kPa}$



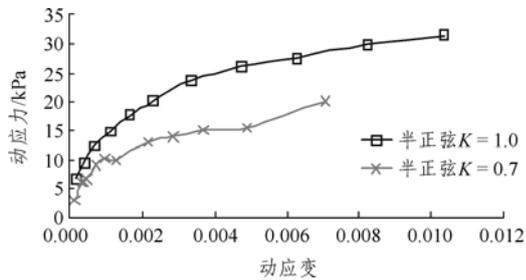
(b) $\sigma_3 = 120 \text{ kPa}$



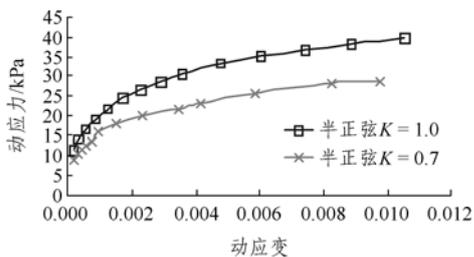
(c) $\sigma_3 = 150 \text{ kPa}$

图2 不同频率下动应力 - 动应变关系曲线($K = 1.0$)

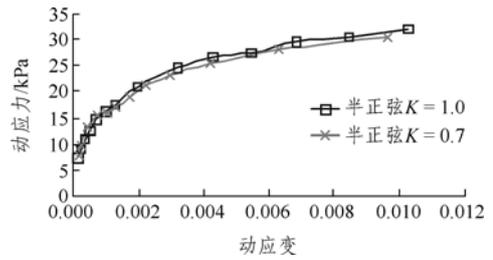
Fig.2 Relation curves between dynamic stress and strain under different frequencies($K = 1.0$)



(a) 1 Hz



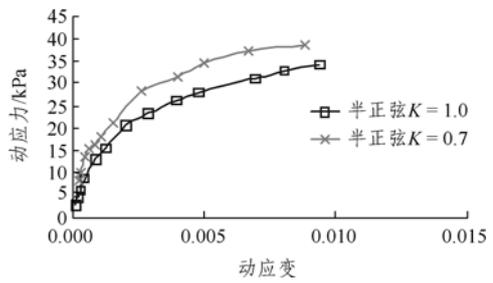
(b) 2 Hz



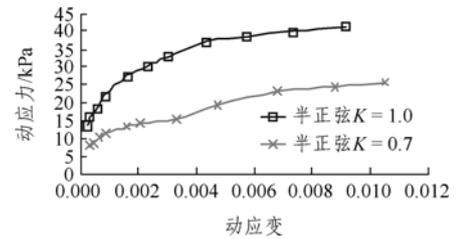
(c) 5 Hz

图3 围压 80 kPa 下动应力 - 动应变关系曲线

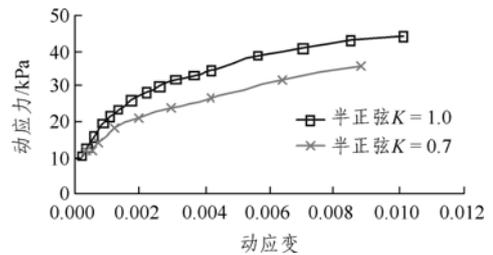
Fig.3 Relation curves of dynamic stress and strain under different consolidation ratios with a confining pressure of 80 kPa



(a) 1 Hz



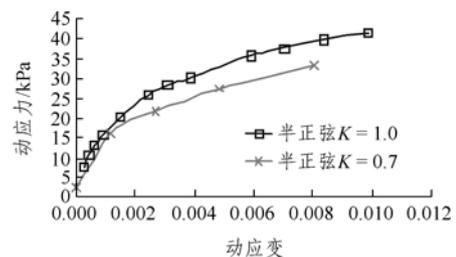
(b) 2 Hz



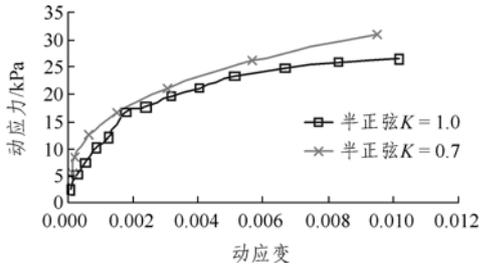
(c) 5 Hz

图4 围压 120 kPa 下动应力 - 动应变关系曲线

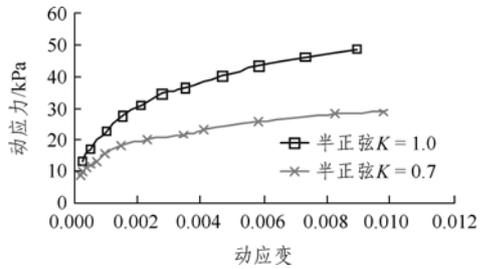
Fig.4 Relation curves between dynamic stress and strain with a confining pressure of 120 kPa



(a) 1 Hz

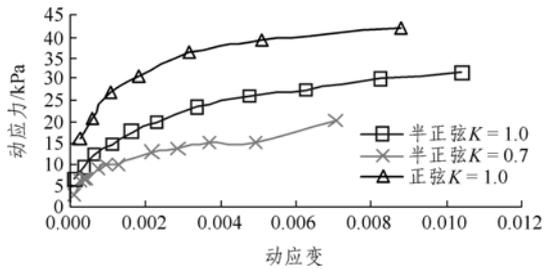


(b) 2 Hz

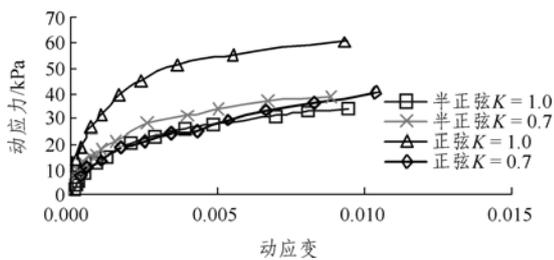


(c) 5 Hz

图 5 围压 150 kPa 下动应力 - 动应变关系曲线
Fig.5 Relation curves of dynamic stress and strain with a confining pressure of 150 kPa



(a) $\sigma_3 = 80$ kPa



(b) $\sigma_3 = 120$ kPa

图 6 不同振动波型下动应力 - 动应变关系曲线
Fig.6 Relation curves between dynamic stress and strain under different vibration types

(2) 当 $r < 0.205$ 时, 试样的变形属于稳定型曲线, 主要表现为较小的可恢复弹性变形, 其特点是在加载初期, 试样变形较快, 随着加载次数的不断增加, 试样基本保持原有结构特征, 动应变值基本稳定不变。

(3) 当 $r = 0.205 \sim 0.220$ 时, 试样的变形曲线表现为过渡型, 主要表现为加载初期变形较小, 在一

定的上限振动次数以后, 试样结构由于重复荷载作用达到破坏, 且随着动应变的增大, 变形破坏的速率也随之加快。当 $r = 0.210$ 时, 上限振动次数为 2 161 次; 当 $r = 0.220$ 时, 上限振动次数为 1 075 次。

(4) 当 $r > 0.220$ 时, 试样的变形曲线为破坏型曲线。动应变值随振动次数快速增加, 在少量振动次数后, 试样的结构就发生明显的破坏, 造成试样变形破坏的速率也随之加快。

(5) 图 2 表明, 等围压固结条件下, 频率越低, 产生的动应变幅值越大; 频率越高, 产生的动应变幅值越小。随着频率的升高, 动应变幅值逐渐减少, 表明淤泥质粉质黏土的频率效应较为明显。

同时, 当动应力水平相同时, 频率低于 2 Hz 和高于 2 Hz 时, 均表现为围压越高, 产生的动应变越小。当频率为 2 Hz 时, 围压从 120 kPa 增加到 150 kPa, 动应变从减少转变为快速增长。从微观上可以解释为: 对于淤泥质粉质黏土来说, 存在一个界限应力水平值和振动频率门槛值。若加载值超过土体结构屈服应力时, 土体的结构将受到破坏; 卸载时, 土体结构部分恢复, 破坏结构的恢复需要一定的时间。当振动频率较低, 结构可能部分或大部分恢复; 振动频率较高, 结构只能小部分或很小部分得以恢复; 振动频率达到一定程度后, 土体结构破坏基本上没有恢复时间, 完全不能恢复。

(6) 图 3~5 表明, 在半正弦波型围压较小时, $K = 0.7$ 时对土体的变形作用比 $K = 1.0$ 的大。随着围压逐渐增大, 频率的大小对变形的作用较为明显, 出现门槛振动频率。其变形特征与正弦周期荷载情况下有所不同^[15], 可以解释为: 当初始剪应力为 0, 土粒骨架处于某种平衡状态。在半正弦波振动条件下, 试样不会形成大主应力方向发生 90° 偏转。因此, 土粒骨架不易于滑动, 相应地动变形也较小。若初始剪应力不为 0, 该剪应力将改变初始的土粒骨架, 使变形在循环荷载下变形速率和幅度都有所提高。

(7) 图 6 表明, 等压固结条件、半正弦波情况下动变形较大; 而偏压固结时, 半正弦与正弦条件下的动变形基本接近, 表明振动模拟波型影响不显著。

(8) 图 7 表明, 半正弦波等压固结振动条件下 $1/E_d$ 与 ϵ_d 关系近似为直线, 即 $1/E_d = a + b\epsilon_d$ (a 为截距, b 为斜率), $E_d = \sigma_d / \epsilon_d$ (E_d 为动弹性模量, ϵ_d 为动应变)。

① $\sigma_3 = 150$ kPa 时, 有

$$1/E_d = 20.962\epsilon_d + 0.0375 \quad (R = 0.9929)$$

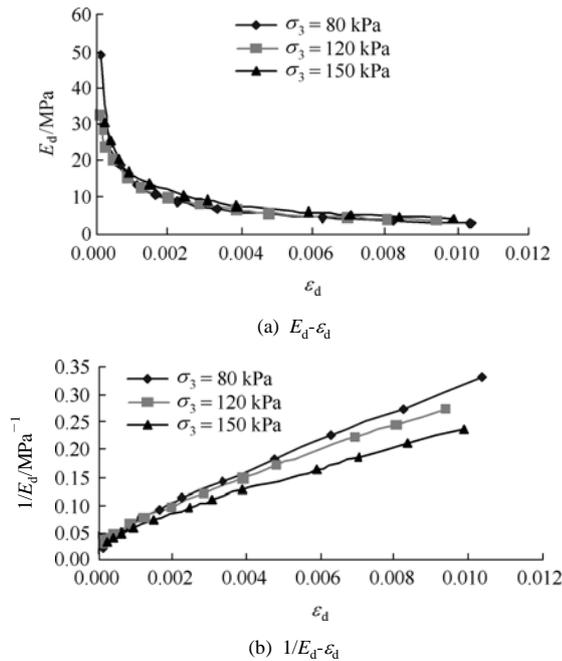


图7 淤泥质粉质黏土 $1/E_d$, E_d 与动应变关系曲线($K = 1.0$)
Fig.7 Relation curves of $1/E_d$, E_d and dynamic strain of muddy silty clay($K = 1.0$)

② $\sigma_3 = 120$ kPa时, 有

$$1/E_d = 25.901\varepsilon_d + 0.0398 \quad (R = 0.9928)$$

③ $\sigma_3 = 80$ kPa时, 有

$$1/E_d = 29.327\varepsilon_d + 0.0365 \quad (R = 0.9910)$$

淤泥质粉质黏土在半正弦波模拟交通荷载作用下的动应力 - 动应变关系的形式仍可用Kondner的双曲线关系描述^[16]。同样, 在偏压固结状态下, $1/E_d$ 与 ε_d 关系也可近似为直线(见图8), 即

① $\sigma_3 = 150$ kPa时, 有

$$1/E_d = 26.708\varepsilon_d + 0.0359 \quad (R = 0.9712)$$

② $\sigma_3 = 120$ kPa时, 有

$$1/E_d = 23.398\varepsilon_d + 0.0263 \quad (R = 0.9911)$$

③ $\sigma_3 = 80$ kPa时, 有

$$1/E_d = 48.445\varepsilon_d + 0.0496 \quad (R = 0.9662)$$

根据以上分析可以得到不同固结状态不同围压下淤泥质粉质黏土的 a 和 b 值及最大动弹性模量 E_{od} , 同时也可得到相应的最大动剪切弹性模量 G_{od} (见表2)。

(9) 图8, 9表明, 淤泥质粉质黏土的动弹性模量 E_d 、动剪切模量 G_d 随固结压力、动应变的变化幅度不同而异。在相同固结比条件下, 采用半正弦波振型, 动弹性模量和动剪切模量随固结压力值的变化出现转折点。这一点与正弦波条件下得出的结论有所不同^[16], 但是2个参量值均随 ε_d 值增大而减小。

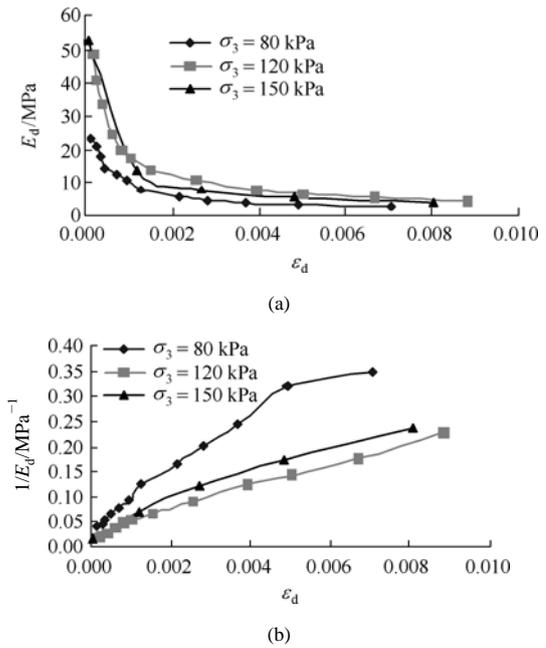


图8 淤泥质粉质黏土 $1/E_d$, E_d 与 ε_d 关系曲线($K = 0.7$)
Fig.8 Relation curves of $1/E_d$, E_d and ε_d of muddy silty clay($K = 0.7$)

表2 参数表

Table 2 Parameter table

K	σ_3/kPa	a/kPa^{-1}	b	E_{od}/MPa	G_{od}/MPa
1.0	80	0.0365	29.327	2.740	1.015
	120	0.0398	25.901	2.513	0.931
	150	0.0375	20.962	2.667	0.988
0.7	80	0.0496	48.445	2.016	0.747
	120	0.0263	23.398	3.802	1.408
	150	0.0365	26.708	2.740	1.015

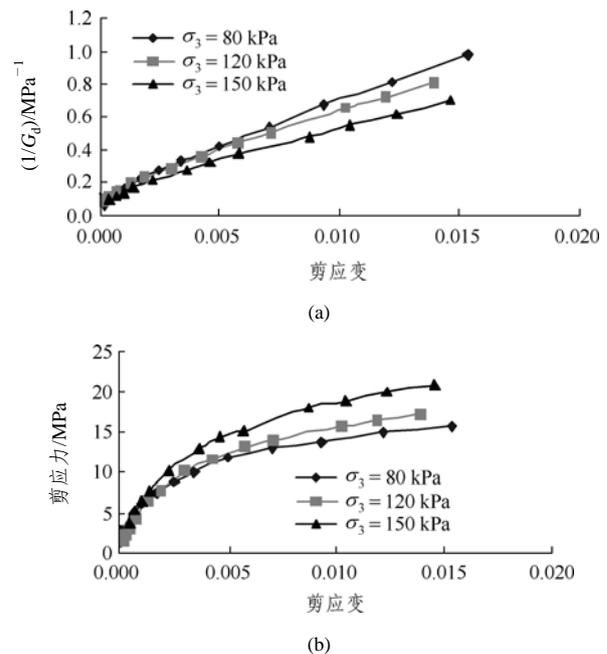


图9 淤泥质粉质黏土 $1/G_d$ 、剪应力与剪应变的关系曲线
Fig.9 Relation curves of $1/G_d$, τ_d and γ_d of muddy silty clay

在固结压力一定的条件下, 加荷的初始阶段应变值虽然较小, 但动剪切模量却有很大变化。因此, 在交通荷载作用下土体迅速变形, 随着应变的增加, 剪切模量变化趋于缓和, 即曲线呈现先陡后平的趋势。

3 结 论

通过对天津地区淤泥质粉质黏土的动力特性试验研究, 可得出如下结论:

(1) 淤泥质粉质黏土在交通荷载作用下存在一个临界动应力比。其动应变和振动次数的关系表现为稳定型、过渡型和破坏型 3 种典型情况。当所施加的动荷载小于土体的临界动应力时, 随着循环次数的增加, 土体变形基本保持常量, 属于稳定型曲线; 当所施加的动荷载超过土体临界动应力时, 随着循环次数的增加, 土体变形也逐渐增加, 但增加的速率呈现两种趋势: 一种是逐渐降低, 直至趋向一常数; 另一种则随循环次数的增加, 土体变形迅速加大, 最终达到破坏。

(2) 在半正弦波型条件下, 固结应力比增大, 动变形也会不同程度地增大。围压较小时, $K < 1.0$ 时对土体的变形作用都比 $K = 1.0$ 时的大。随着围压逐渐增大, 频率的大小对变形的作用较为明显, 出现门槛振动频率, 其变形特征与正弦周期荷载情况下的有所不同。

(3) 等压固结条件、半正弦波情况下动变形较大; 而偏压固结时, 半正弦与正弦条件下的动变形基本接近, 表明振动模拟波型影响不显著。

(4) 在相同固结比条件下, 采用半正弦波振型, 动弹性模量和动剪切模量随固结压力值的变化与正弦波振型条件下得出的结论有所不同, 存在一个转折点。

参考文献(References):

[1] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.(XIE Dingyi. Soil dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988.(in Chinese))

[2] 白冰, 周健. 周期荷载作用下黏性土变形及强度特性述评[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 84 - 90.(BAI Bing, ZHOU Jian. Some problems on behavior of saturated clay under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(3): 84 - 90.(in Chinese))

[3] 闫澍旺. 往复荷载作用下重塑软黏土的变形特性[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(1): 48 - 53.(YAN Shuwang. The deformation behavior of remold soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(1): 48 - 53.(in Chinese))

[4] 蒋军. 循环荷载作用下黏土应变速率试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 529 - 531.(JIANG Jun. Study on the strain rate of clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

2002, 24(4): 529 - 531.(in Chinese))

[5] 周建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 75 - 78.(ZHOU Jian, GONG Xiaonan. Study on strain soften in saturated soft clay under cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(5): 75 - 78.(in Chinese))

[6] YASUHARA K, HIRAO K, FLHYDE A. Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 100 - 116.

[7] 廖红建, 宋丽, 杨政, 等. 往返荷载下黏性土的强度及取值标准试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 16 - 20.(LIAO Hongjian, SONG Li, YANG Zheng, et al. Experimental study on shear strength and yield criterion of cohesive soils under repeated loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 16 - 20.(in Chinese))

[8] 何昌荣. 动模量和阻尼的动三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 39 - 48.(HE Changrong. Dynamic triaxial test on modulus and damping[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(2): 39 - 48.(in Chinese))

[9] 冯秀丽, 叶银灿, 马艳霞, 等. 动荷载作用下海底粉土的孔压响应及其动强度[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(3): 429 - 433.(FENG Xiuli, YE Yincan, MA Yanxia, et al. Silt pore pressure response and dynamic strength under dynamic loading[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(3): 429 - 433.(in Chinese))

[10] 徐干成, 郑颖人, 谢定义. 饱和砂土动应力应变特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 1995, 28(2): 59 - 63.(XU Gancheng, ZHENG Yingren, XIE Dingyi. Experimental study on dynamic stress-strain behavior of saturated sand[J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(2): 59 - 63.(in Chinese))

[11] 陈国兴, 刘雪珠, 庄海洋. 南京粉质黏土与粉砂互层土及粉细砂的抗液化性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(2): 28 - 34.(CHEN Guoxing, LIU Xuezu, ZHANG Haiyang. Experimental study on liquefaction resistant characteristics of silty clay with fine sand interbed and fine sand in Nanjing[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(2): 28 - 34.(in Chinese))

[12] 王建华. 软土地基震陷的弹塑性分析[J]. 天津大学学报, 1996, 29(3): 336 - 341.(WANG Jianhua. Elastoplastic analysis on seismic settlement of soft clay foundation[J]. Journal of Tianjin University, 1996, 29(3): 336 - 341.(in Chinese))

[13] 周海林, 王星华. 动三轴试验中的饱和砂土孔隙水压力分析[J]. 铁道学报, 2002, 24(6): 93 - 98.(ZHOU Hailin, WANG Xinghua. Study on pore water pressure of saturated sand in dynamic triaxial test[J]. Journal of the China Railway Society, 2002, 24(6): 93 - 98.(in Chinese))

[14] 黄雨, 陈竹昌, 周红波. 上海软土的动力计算模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2000, 28(3): 359 - 363.(HUANG Yu, CHEN Zhuchang, ZHOU Hongbo. Dynamic calculation model of Shanghai soft soil[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2000, 28(3): 359 - 363.(in Chinese))

[15] 唐益群, 黄雨, 叶为民, 等. 地铁列车荷载作用下隧道周围土体的临界动应力比和动应变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1566 - 1570.(TANG Yiqun, HUANG Yu, YE Weimin, et al. Critical dynamic stress ratio and dynamic strain analysis of soils around the tunnel under subway train loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1566 - 1570.(in Chinese))

[16] 唐益群, 王艳玲, 黄雨, 等. 地铁列车荷载下土体动强度和动应力 - 动应变关系[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 701 - 704.(TANG Yiqun, WANG Yanling, HUANG Yu, et al. Dynamic strength and dynamic stress-strain relation of silt soil under traffic loading[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2004, 32(6): 701 - 704.(in Chinese))