

文章编号:1671-8879(2009)06-0054-05

# 循环荷载作用下软粘土的强度判别标准试验

雷华阳,姜 岩,陆培毅

(天津大学 土木工程系,天津 300072)

**摘 要:**对天津地区软粘土进行了一系列动三轴试验,测定并分析了动荷载作用下轴向应变及孔隙水压力的变化规律,探讨了合适的动应变破坏标准,同时给出了不同破坏标准下的动强度差异。结果表明:具有结构性的软粘土,其临界动应力比并非一个定值,而是随着围压的增大而降低;当围压低于结构屈服应力时,不同的应变破坏标准对土体的动强度值确定影响很小;随着围压的增大,这种影响将较明显,但随着振动次数的增大,不同应变破坏标准下的动强度差异性逐渐减小,并趋向于一个稳定值;利用动应变发展过程中存在的变形转折点作为强度判别标准是可行的。

**关键词:**岩土工程;交通荷载;软土;结构性;应变破坏标准;动强度

**中图分类号:**TU41

**文献标志码:**A

## Test on shear strength criterion of soft soil under cyclic loading

LEI Hua-yang, JIANG Yan, LU Pei-yi

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

**Abstract:** A series of cyclic triaxial shear tests were performed on soft soil in Tianjin city, which reveals the law of axial strain and pore water pressure under dynamic loading. The appropriate failure criterion of dynamic strain is discussed, meanwhile the difference of cyclic strength under different standards is given. The results show that: the critical dynamic stress ratio of structural soft clay is not a fixed value, which reduces when the pressure increases; when the confinement pressure is below the structural yield stress, the influence of different failure criterions of strain on the dynamic strength is little, when the pressure increases, the impact will be more obvious, but with the increase of cyclic number, the dynamic strength under different failure criterions of strain tends to a stable value; so using a turning point as the failure criterion of strength is feasible. 1 tab, 3 figs, 19 refs.

**Key words:** geotechnical engineering; traffic loading; soft soil; structural characteristic; failure criterion of strain; dynamic strength

## 0 引 言

由于受到车辆振动荷载的长期作用,中国东南沿海地区的粘性土地基会产生超孔隙水压力,造成

固结沉降,使路基出现较大的变形。目前,国内外已发生多起由于行车振动荷载作用而导致的路基破坏的事例。粘性土在物理力学性质、土的颗粒组成等方面的特性,使得影响粘性土动强度的因素很复

收稿日期:2008-12-16

基金项目:国家自然科学基金项目(50508021)

作者简介:雷华阳(1974-),女,河北冀州人,副教授,工学博士,E-mail:leihuayang74@yahoo.com.cn。

杂<sup>[1]</sup>。为了确保建筑物的安全和稳定,研究软粘土在交通荷载作用下的动力特性具有一定的工程实用性。由于地震荷载作用引起的破坏比较严重,损失也比较大,因此,以砂为主开展地基液化的研究在国内外已进行的很广泛<sup>[2-6]</sup>。目前,国内外学者密切关注动力循环荷载作用产生的变形、强度和稳定问题,对于黄土、砂土、一般粘性土以及饱和软粘土等在循环荷载作用下的动力特性研究已取得了大量的成果<sup>[7-16]</sup>。其中,土体的动强度问题通常被定义为,在一定的动应力振动次数下,产生某一指定破坏应变所需的动应力<sup>[17]</sup>。如果振动次数可以按照不同震级提出的等效循环次数来确定的话,破坏应变的标准不同,相应的动强度也不同。以往的试验结果说明,绝大多数粘土都或多或少的具有结构性。静力试验表明,由于结构屈服应力的存在,使得土体静强

度变化规律呈现阶段性的变化。为此,本文选取天津滨海新区原状软土,根据一系列动三轴试验结果,分析了土体的轴向应变以及孔隙水压力随时间的变化规律,提出适合于交通荷载作用下粘性土破坏时的动剪强度判别标准,得出不同标准下粘性土的动剪强度变化规律。

### 1 试验条件

试验选取天津滨海新区典型的淤泥质粉质粘土的原状土,埋深 4~13 m,试验用土的基本物理力学指标见表 1。参考文献[18]提出的原状土压力与强度的确定方法,通过单向压缩试验结果,显示本文所涉及的结构性软粘土的前期固结压力和结构屈服应力分别为 105 kPa 和 128 kPa。

本次试验仪器采用 DDS-70 电磁式振动三轴仪。

表 1 试验用土的基本物理力学指标

天然重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	含水量 $W/\%$	相对密度 $G_s$	孔隙比 $e$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	塑性指数 $I_p$	压缩系数/ MPa	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	快剪	
									内聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
17.8	42.8	2.71	1.18	38.0	20.2	17.8	0.92	2.55	5.0	7.68

动力加荷部分采用电磁式激振器,频率选择范围为 0~10 Hz,最大轴向动荷载为 70 kg。所用土样为高 80 mm、直径 39.1 mm 的圆柱体。进行试验之前,测得试样的孔隙水压力系数  $B$  均大于 0.95。

在试验过程中,以结构屈服应力作为界限值,分别采用围压 100、150、200 kPa 进行等压固结,采用振动频率为 1 Hz 的正弦波来模拟交通工具施加的

交通荷载,重点探讨了结构性软土的动力特性变化规律。

### 2 轴向应变特性分析

原状软土在不同固结压力下的轴向动应变与振动次数之间的变化关系如图 1 所示。

从图 1 可以看出,土样动应变随振动次数的增

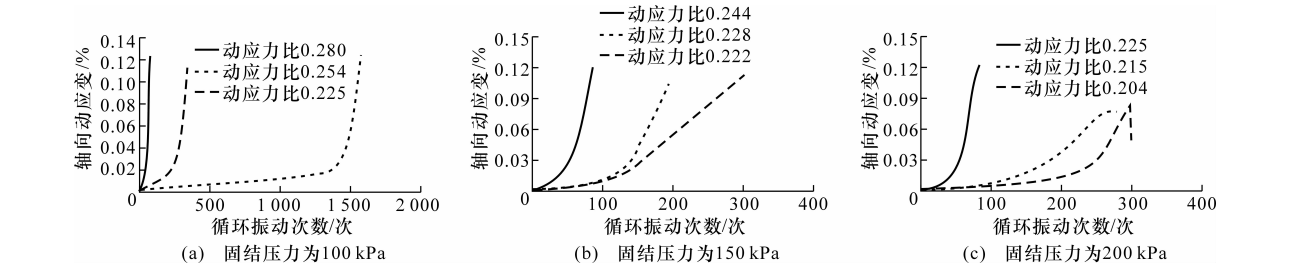


图 1 不同固结压力下轴向动应变与循环振动次数的关系

加而累积增长。在承受动荷载初期,动应变增长缓慢;当振动达到一定次数后,出现应变转折点,变形开始急剧增大,之后在较少的振动次数下就可达到破坏。在相同的固结条件和围压作用下,存在一个临界动应力比,当应力比大于或等于临界值时,土体会迅速达到破坏状态。同时,在 3 种围压条件下的动应力比的临界值也有所不同。根据试验可得,当围压值低于结构屈服应力时,土体的临界动应力比值为 0.220~0.225;随着围压的不断增大,超过结构屈服应力值时,临界动应力比值降低为 0.206;当

围压继续增大时,临界动应力比值可降低到 0.198。由此可见,结构性土体的临界动应力比并不是一个定值,而是与围压大小相关的值。

由于土体结构性的存在,在低围压条件下,尤其是在低于土体的结构屈服应力情况下,土体的结构性基本上没有遭到破坏,刚度较高,受到外力作用很难发生变形,所以达到破坏时所需要的循环应力比数值较大;而当应力水平超过结构屈服应力时,会出现结构性的大量破坏,土骨架刚度急剧变小,轴向动应变则随着振动次数的增加出现急剧增大现象,达

到破坏所需要的循环应力比相应减小。

### 3 孔隙水压力变化分析

原状软土在不同固结压力下的孔隙水压力与循环振动次数之间的变化关系如图 2 所示。

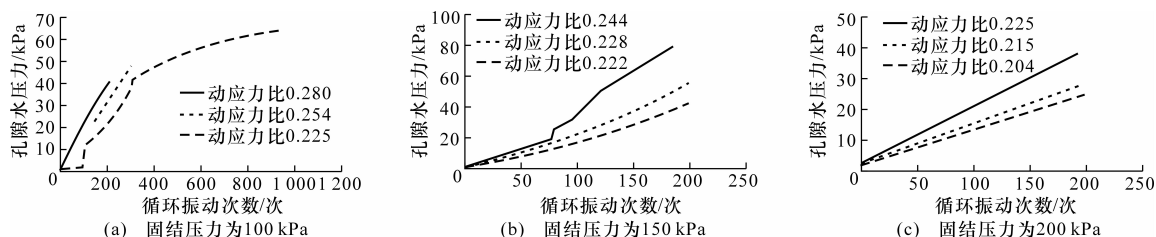


图 2 不同固结压力下孔隙水压力与循环振动次数的关系

隙水压力达到一定程度以后,孔隙水压力随着循环振动次数增加地非常缓慢,达到稳定状态;另一种是当动应力比较大时,孔隙水压力基本上随着循环振动次数呈线性关系,并且增加的速率随着动应力比的增大而增大。当临界动应力比为 0.225 时,与土体的轴向动应变临界循环应力比相同。

当围压超过结构屈服应力后,孔隙水压力的变化基本呈现线性增长,同时动应力比的改变对于孔隙水压力值的影响也趋于不明显状态。其原因:一方面是由于土体结构破坏;另一方面是土样的渗透系数较小,从而使得孔隙水压力在短期内不能得以消散,从而造成孔隙水压力的线性增长。

### 4 结构性软土的应变破坏标准

沈珠江在其结构性粘土堆砌体模型理论中认为<sup>[19]</sup>,结构性软粘土变形发展规律与其结构的变化有关。天然粘土颗粒之间的胶结强度是不一样的,土体内部存在胶结比较弱的面或带,如砖墙的灰缝。在荷载作用下,薄弱处先发生破损,就如砖墙先沿灰缝发生裂缝,裂缝之间是保持完好的小块体或团粒,整个过程中土体的变形并不大。随着荷载的持续作用,小土块逐步破裂成更小的土块,最终导致土体结构的严重破坏,使土体结构产生极大的变形。循环荷载作用下软粘土结构变化及变形的发展也可用该理论来解释,应变曲线上转折点的出现,标志着土体结构即将出现坍塌性破坏。因此,以转折点处的应变值作为土体破坏的取值标准较为合适。

对于这种结构性软土,不同固结压力状态下的破坏应变取值并不相同。当固结压力值小于结构屈服应力时,破坏应变取值基本上与固结压力和循环应力比无关;而当固结压力超过结构屈服应力时,随着循环应力比逐渐增大,破坏应变发生的越早,对应

从图 2 可以看出,随着动应力比的增大,孔隙水压力不断增大。当围压低于结构屈服应力时,孔隙水压力随着循环振动次数的变化可分 2 种情况:一种是动应力比较小时,在最初的循环振动次数内,孔隙水压力随着循环振动次数的增加,增加较快,当孔

的应变值也就越大。

在分析各动应力幅值作用下的实际转折点应变时发现,原状结构性软土的破坏应变值基本上在 1.27~2.13 之间。也就是说,在循环荷载作用下,如果采用 5% 以上的应变破坏标准,不安全因素将会偏多。

### 5 结构性软土的动强度

众所周知,土体的动强度随土体破坏标准的改变而变化。本次试验选用轴向弹性和塑性应变之和  $\epsilon_a$  的值分别为 2%、5% 作为应变破坏标准,研究土体动强度与应变破坏标准的关系。

根据不同的应变破坏标准,可以得到土样达到破坏时的振动次数。由此可以得出,该结构性软土的动强度变化曲线如下页图 3 所示。

从图 3 可以看出,无论选取哪种应变破坏标准,结构性软土在低围压条件下的动强度明显比其他固结压力高。随着围压的不断增大,动强度曲线位置不断下降,这种现象可以用土体所具有的结构性来解释。当土体所受围压较小时,自身的结构性影响比较大,此时施加的动应力值也较小,这就使得其动强度曲线位置较高;随着围压的逐渐增大,尤其是超过土体的结构屈服应力值后,土体的结构强度影响逐渐减弱,相应的动应力幅值也不断增大,动强度曲线就会不断地降低。

当围压低于结构屈服应力时,不同的应变破坏标准对土体的破坏动应力的影响很小;随着围压的不断增大,2 种应变破坏标准对破坏动应力的影响比较大;在振动次数相同的情况下,采用的应变破坏标准越高,动强度也越高,就越偏于不安全;当荷载的循环振动次数很大时,均趋于一个最小的动强度比(如图 3 中给出的虚线所示)。在实际工程中,土体

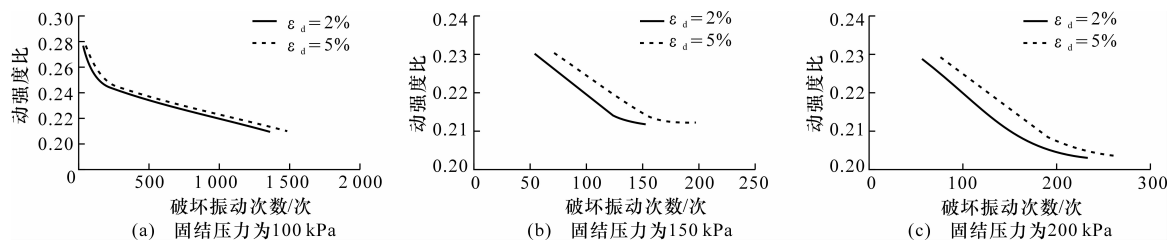


图3 不同应变破坏标准下动强度变化的比较

常常处于正常固结状态,因此在设计中可将设计荷载控制在临界最小动强度内。

## 6 结 语

(1)在动应变发展过程中存在一个变形转折点,转折点之前应变发展速率较慢;转折点之后土体应变开始急剧增大,该值在 1.27~2.13 之间。

(2)在相同的固结条件和围压作用下,存在一个临界动应力比;该临界动应力比并不是一个定值,而是与围压大小相关,并随着围压的逐渐增大而降低。

(3)孔隙水压力的变化以结构屈服应力为转折点,呈现出不同的变化规律,一种是孔隙水压力在最初的循环振动次数内,孔隙水压力随着循环振动次数的增加,增加较快,当孔隙水压力达到一定程度以后,孔隙水压力随着循环振动次数的增加变得非常缓慢,达到稳定状态;另一种情况是孔隙水压力基本上随着循环振动次数呈线性关系,并且增加的速率随着动应力比的增大而增大。

(4)结构性软土在低围压下的动强度较高,随着围压的不断增大,动强度曲线位置不断下降,当围压低于结构屈服应力时,不同的应变破坏标准对土体的动强度值的确定影响很小,随着围压的增大,这种影响较明显,不过随着循环振动次数的增大将趋于一个最小的动强度比;利用动应变发展过程中存在的变形转折点,作为强度判别标准是可行的。

## 参考文献:

## References:

- [1] 魏汝龙. 软粘土的强度和变形[M]. 北京:人民交通出版社,1987.
- [2] Guo T Q, Prakash S. Liquefaction of silts and silt-clay mixtures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(8): 706-710.
- [3] Timothy D S, Scott M O. Liquefaction resistance using CPT and field case histories[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(12): 856-869.
- [4] 程国勇, 王建华, 张献民. 饱和砂土的剪切波速与其抗液化强度关系研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4):

689-693.

CHENG Guo-yong, WANG Jian-hua, ZHANG Xian-min. Experimental study on quantitative relationship between shear wave velocity and cyclic liquefaction resistance of saturated sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 689-693.

- [5] Andrus R D, Stokoe K H. Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(11): 1015-1025.
- [6] 柯 瀚, 陈云敏, 周燕国, 等. 动态三轴试验确定砂土抗液化强度[J]. 土木工程学报, 2004, 37(9): 48-54.  
KE Han, CHEN Yun-min, ZHOU Yan-guo, et al. Evaluation of liquefaction resistance by means of dynamic triaxial tests with shear wave velocity measurement [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(9): 48-54.
- [7] 白 冰, 周 健. 周期荷载作用下粘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.
- [8] 阎澍旺. 往复荷载作用下重塑软粘土的变形特性[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(1): 48-53.  
YAN Shu-wang. The deformation behavior of remold soft clay under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(1): 48-53.
- [9] 蒋 军. 循环荷载作用下粘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.
- [10] 周 建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软粘土应变软化研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 75-78.  
ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Study on strain softening in saturated soft clay under cyclic loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(5): 75-78.
- [11] Yasuhara K, Hirao K, Flhyde A. Effects of cyclic loading on untrained strength and compressibility of clay [J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1): 100-116.
- [12] 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 Chang-rong. Dynamic triaxial test on modulus and damping[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1997,19(2):39-48.
- [13] 王建荣,张振中,王峻,等. 振动频率对原状黄土动本构关系的影响[J]. 西北地震学报,1999,21(3):310-314.
- WANG Jian-rong,ZHANG Zhen-zhong,WANG Jun, et al. Effect of vibration frequency on dynamic constitutive relationship of loess[J]. Northwestern Seismological Journal,1999,21(3):310-314.
- [14] 陈存礼,胡再强. 强夯地基黄土的动力特性参数及其与振动频率的关系[J]. 西安理工大学学报,1998,14(2):216-220.
- CHEN Cun-li,HU Zai-qiang. Dynamic characteristics parameters and their relation to vibrofrequency of dynamically-compacted foundation loess [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1998, 14 (2): 216-220.
- [15] 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.
- YUAN Xiao-ming,SUN Rui,SUN Jing,et al. Laboratory experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20 (4): 133-139.
- [16] 廖红建,宋丽,杨政,等. 往返荷载下粘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 Hong-jian,SONG Li,YANG Zheng,et al. Experiment study on shear strength and yield criterion of cohesive soils under repeated loads[J]. Rock and Soil Mechanics,2001,22(1):16-20.
- [17] 谢定义. 土动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.
- [18] 王国欣,肖树芳,周旺高. 原状结构性土先期固结压力与结构强度的确定[J]. 岩土工程学报,2003,25(2):249-251.
- WANG Guo-xin,XIAO Shu-fang,ZHOU Wang-gao. Determination of preconsolidation pressure and structural strength of undisturbed structural soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25 (2):249-251.
- [19] 沈珠江. 结构性粘土的堆砌体模型[J]. 岩土力学,2000,21(1):1-4.
- SHEN Zhu-jiang. A masonry model for structured clays[J]. Rock and Soil Mechanics,2000,21(1):1-4.
- 安:长安大学,2007.
- [5] 吴耀东,吴玉辉,李想,等. 桥面防水层性能试验研究[J]. 北方交通,2008(2):101-104.
- WU Yao-dong,WU Yu-hui,LI Xiang,et al. Research on test of deck waterproof layer for property[J]. Northern Communications,2008(2):101-104.
- [6] 张占军. 水泥混凝土桥面沥青混凝土铺装结构研究[D]. 西安:长安大学,2000.
- [7] 祝海燕,王选仓. 旧水泥路面薄层沥青罩面结构层间剪应力分析[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报,2006,8(4):1-2.
- ZHU Hai-yan,WANG Xuan-cang. Shearing stress analysis of thin asphalt overlays on old cement concrete pavement[J]. Journal of Liaoning Provincial College of Communications,2006,8(4):1-2.
- [8] 蒋维祥,魏为成. 水泥混凝土桥面防水粘结层研究综述[J]. 公路交通技术,2007(增刊):87-90.
- JIANG Wei-xiang,WEI Wei-cheng. Study on waterproof binding layer on concrete bridge pavement[J]. Technology of Highway and Transport, 2007 (S): 87-90.
- [1] 卢铁瑞. 立交桥桥面防水层性能研究及应用[J]. 石油沥青,1996,10(1):37-45.
- LU Tie-rui. The properties researches and application of water-proof layer in the deck of inter-change[J]. Asphalt,1996,10(1):37-45.
- [2] 刘贤惠,武泽锋,李巍,等. 同步碎石封层技术简介[J]. 东北公路,2003,26(1):21-24.
- LIU Xian-hui,WU Ze-feng,LI Wei,et al. Synchronous crushed stone seal coat technology[J]. Northeastern Highway,2003,26(1):21-24.
- [3] 张新荣,焦生杰. 同步碎石封层技术与设备[J]. 筑路机械与施工机械化,2004,21(11):1-4.
- ZHANG Xin-rong,JIAO Sheng-jie. Synchronous pavement surface dressing and equipment[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2004, 21 (11):1-4.
- [4] 屈娜. 同步碎石用于桥面防水粘结层的研究[D]. 西

(上接第 23 页)

## 参考文献:

## References: