

DOI: 10.11779/CJGE2019S2017

# 海湾相有机质浸染砂的动力特性试验研究

杜娟<sup>1,2</sup>, 刘冰洋<sup>2</sup>, 郑刚<sup>1</sup>, 魏晶<sup>2</sup>, 胡俊<sup>2</sup>, 卫宏<sup>2</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 海南大学土木建筑工程学院, 海南 海口 570228)

**摘要:** 海南省沿海地区分布着一种特殊的海湾相有机质浸染砂, 为研究其动力特性, 利用动三轴仪进行了不同围压和含水率下的动力变形特性及动强度特性试验研究。分析含水率、围压对其动应力-动应变关系、动弹性模量、阻尼比的影响。试验结果表明: 在动应变不变的条件下, 动应力随含水率的增多而减小, 随围压的增大而增大; 动弹性模量在含水率变化时, 变化趋势较平缓; 阻尼比随着动应变的增加而增大, 随含水率的增大而减小。在围压改变时, 阻尼比的变化不明显。为海南省海湾相有机质浸染砂地区构筑物的动力计算参数的选取提供参考依据。

**关键词:** 海湾相有机质浸染砂; 动三轴实验; 含水率; 围压; 动力特性

中图分类号: TU441 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0065-04

作者简介: 杜娟(1978—), 女, 副教授, 硕士, 主要从事土力学及地基处理等方面的教学和科研。E-mail: dujuan2012@hainu.edu.cn。

## Experimental study on dynamic characteristics of bay facies organic sand

DU Juan<sup>1,2</sup>, LIU Bing-yang<sup>2</sup>, ZHENG Gang<sup>1</sup>, WEI Jing<sup>2</sup>, HU Jun<sup>2</sup>, WEI Hong<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

**Abstract:** A special kind of bay facies organic sand is distributed in the coastal areas of Hainan Province. In order to study its dynamic characteristics, the tests on dynamic deformation and strength properties under different confining pressures and moisture contents are performed. The dynamic stress-dynamic strain relation, dynamic elastic modulus, damping ratio and dynamic strength of the samples under various moisture contents and confining pressures are analyzed. The tests indicate that, under the constant dynamic strain, the dynamic stress decreases with the increase of the moisture content and increases with the increase of the confining pressure. When the moisture content changes, the change trend of the dynamic elastic modulus is relatively gentle. The damping ratio increases with the dynamic strain and decreases with the moisture content. When the confining pressure changes, the damping ratio does not change obviously. It may provide a reference basis for the selection of dynamic parameters of structures in the bay facies organic sand-impregnated sand areas of Hainan Province.

**Key words:** bay facies organic sand; dynamic triaxial test; moisture content; confining pressure; dynamic characteristic

## 0 引言

海南岛及近海属于中国大陆东南沿海地震带的雷琼地震亚区, 主要有4个地震丛发区<sup>[1]</sup>。而大量震害分析表明地基砂土液化是主要震害之一<sup>[2]</sup>。土的动力特性是土动力学与岩土地震工程的基础, 主要研究动荷载作用下土的变形和强度特性的变化规律<sup>[3]</sup>。张建民<sup>[4]</sup>在砂土动力学的基本理论方面取得了较多的研究成果; 褚峰等<sup>[5]</sup>对淤泥质砂土进行不同应力状态下的动三轴实验, 研究其动变形及动强度特性; 王权民<sup>[6]</sup>确定了中粗砂与细粉砂的液化曲线和动本构关系及相应的动孔压模型; 王艳丽等<sup>[7]</sup>研究不同固结围压对饱和砂土动力特性的影响; 王海东等<sup>[8]</sup>研究大应变下含

水率对非饱和砂土动力特性的影响。

海南省海湾地区由于特殊的地理位置, 海水不断涌人土体, 海水中的腐殖质等经过长期的一系列变化, 浸入到砂土内部或土表面<sup>[9-11]</sup>, 形成特殊的海湾相有机质浸染砂。前期已对该砂土的静力特性进行了初步的研究工作<sup>[12]</sup>。本文利用动三轴试验对海湾相有机质浸染砂试样在振动荷载作用下的动力特性进行研究, 分析含水率、围压对其动应力-动应变关系、动弹性

基金项目: 国家自然科学基金项目(51368017); 海南省教育厅高等学校科研项目(Hnky2016ZD-7); 海南省重大科技计划项目(ZDKJ201803)

收稿日期: 2019-04-30

\*通讯作者(E-mail: 874321872@qq.com)

模量、阻尼比的影响, 为该地区构筑物的动力计算提供可靠的参数。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料

本次试验砂样呈深灰色, 有腥臭味。试验土样的物理力学性质指标见表1。

表 1 试样土样的物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of test specimens

颗粒相对密度 $G_s$	最大干密度 $\rho_{d\max}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	相对密实度 $D_r$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\phi/^\circ$
2.62	1.73	0.203	0	30

### 1.2 试样制备

将试样逐层振密, 各层接触面用小刀刮毛, 以保证层间接触良好。用乳胶薄膜固定, 成型过程中抽掉膜中的空气, 并在很低压强条件下褪去薄膜定形, 最后用二氧化碳法对试样进行饱和。

### 1.3 试验方案

采用GDS振动三轴仪, 分别在围压为100, 150, 200 kPa, 含水率为18%, 24%, 30%的条件下进行固结不排水振动三轴试样。

## 2 试验结果分析

### 2.1 海湾相有机质浸染砂的动应力 - 动应变关系

图1为不同含水率条件下砂土的动应力 - 动应变关系曲线, 可以看出砂土在围压分别为100, 150, 200 kPa时, 不同含水率土体的动应力 - 动应变变化趋势相近, 单条曲线均呈现出开始时应力 $\sigma_d$ 出现明显递增现象, 应变 $\varepsilon_d$ 在达到一定值后应力 $\sigma_d$ 曲线变缓, 呈应变硬化型。相同围压条件下, 达到相同动应变时动应力基本随着含水率的增大而增大。图2为不同围压条件下砂土的动应力 - 动应变关系曲线, 结果表明, 有机质浸染砂在不同围压下的动应力 - 动应变曲线变化趋势相近。在含水率、围压相同时, 动应力随着动应变的增加而增大, 变化趋势较平缓。含水率、动应变相同, 围压越大, 动应力越大。

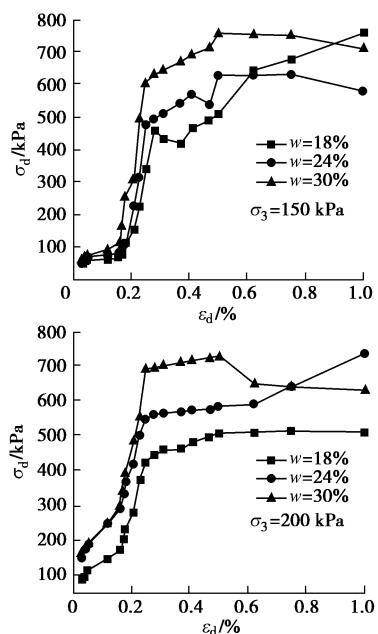
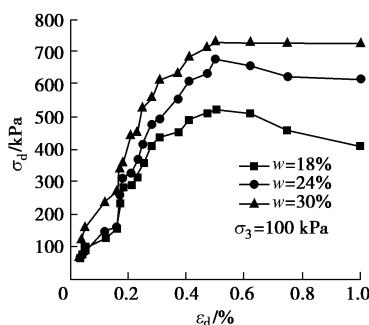


图1 不同含水率下动应力 - 动应变关系

Fig. 1 Dynamic stress-strain curves under different moisture contents

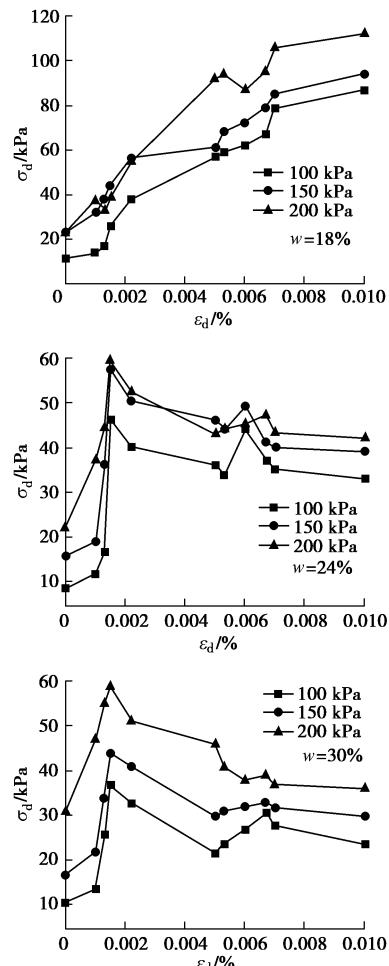


图2 不同围压下动应力 - 动应变关系

Fig. 2 Dynamic stress-strain curves under different confining pressures

## 2.2 动弹性模量

在相同围压下的动弹性模量与动应变之间的关系可用Hardin-Drnevich的修正线性曲线模型<sup>[13]</sup>来表示:

$$1/E_d = a + b\epsilon_d \quad (1)$$

式中,  $E_d$ 为动弹性模量(kPa),  $\epsilon_d$ 为动弹性应变(%),  $a$ ,  $b$ 为与固结围压相关的拟合参数。

图3, 4分别为不同含水率、不同围压下动弹性模量与动应变的关系曲线。从图3中可以看出, 砂土在不同含水率下的动弹性模量-动应变关系相似。相同含水率、围压下的动弹性模量随着动应变的增加而减小, 且变化频率由快变为较平缓。同时, 当达到同一动应变时, 动弹性模量随着含水率的增加而减小; 在达到相同弹性模量时, 动应变随含水率的增大而减小。从图4中可以看出, 有机质浸染砂在达到同一动应变时, 随着围压的增大而减小。对试验结果进行分析, 认为在同一含水率、不同围压作用下的动应力-动弹性模量曲线的变化可能是由于土体在动荷载作用下, 含水率、围压、固结比等条件对土体内部结构产生影响。

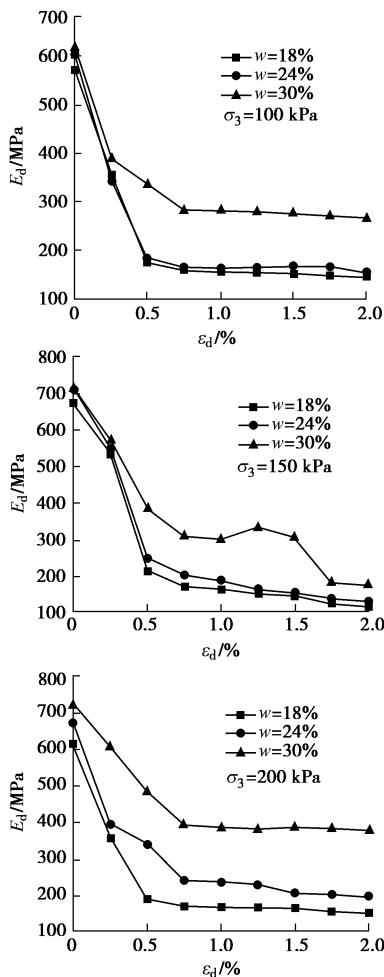


图3 不同含水率下的动弹性模量与动应变的关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of dynamic elastic modulus vs. stress under different moisture contents

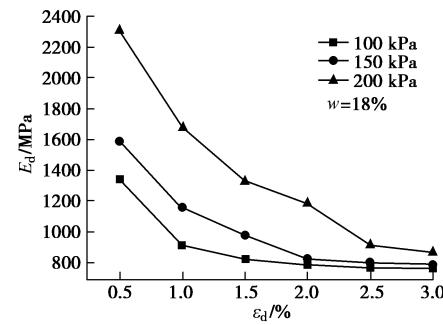


图4 在不同围压下的动弹性模量与动应变关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of dynamic elastic modulus vs. stress under different confining pressures

对 $1/E_d$ 与 $\epsilon_d$ 进行直线拟合, 可得到参数 $a$ 和 $b$ , 如表2所示。当 $\epsilon_d$ 趋向于0时, 土体处于弹性状态, 此时所对应的弹性模量即为砂土的最大动弹性模量, 即 $E_{d\max}=1/a$ 。从表中可以看出, 有机质浸染砂的最大动弹性模量值与其含水率和围压有关。在同一含水率下, 随着围压的增大动弹性模量逐渐增大。围压相同时, 有机质浸染砂的最大动弹性模量随着含水率的增加而减小。

表2 最大动弹性模量数据表

Table 2 Values of maximum dynamic elastic modulus

含水率 $w/\%$	试验参数		围压 $\sigma_3/kPa$	最大动弹性模量 $E_{d\max}/MPa$
	$a$	$b$		
18	0.0421	14.2071	100	23.7530
	0.0414	12.7536	150	24.1546
	0.0375	7.0123	200	26.6667
24	0.0851	18.2431	100	11.7509
	0.0837	17.0702	150	11.9474
	0.0625	11.1428	200	16.0000
30	0.2312	13.6703	100	4.3252
	0.2281	13.5584	150	4.3840
	0.1775	11.7583	200	5.6338

## 2.3 阻尼比

阻尼比反映土在循环荷载中的能量耗散, 也是土动力特性的一个重要指标。图5为不同围压下阻尼比与含水率的关系曲线, 从图中可以看出, 海湾相有机质浸染砂的阻尼比随着含水率的增大而减小, 在同一含水率下, 围压越大, 阻尼比的值越高。达到相同的阻尼比时, 含水率与围压的变化相同, 含水率增大, 围压也逐渐增大。

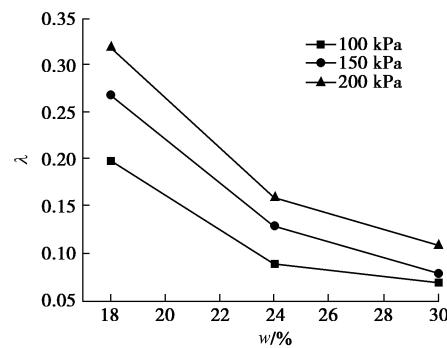


图5 阻尼比与含水率的关系

Fig. 5 Relationship curves of damping ratio vs. moisture content

### 3 结 论

(1) 不同含水率的海湾相有机质浸染砂试样在不同围压下的动力特性不同, 同一试样在不同阶段的动力特性也有区别, 但是整体表现出一定的规律性。

(2) 在相同的动应变条件下, 随着含水率的增大, 有机质浸染砂中的动应力越小。动应变相同时, 有机质浸染砂的动应力随着围压的增大而增大。

(3) 动弹性模量在含水率变化时, 变化趋势较平缓。动弹性模量随含水率的增大而减小。在同一含水率下, 随着含水率的增大, 动弹性模量越来越小。随着围压增加, 动弹性模量逐渐增大。

(4) 阻尼比随含水率的增大而减小, 围压改变时, 阻尼比的变化不明显。

### 参考文献:

- [1] 张慧, 李志雄, 李盛. 海南岛及近海波速比特征初步研究[J]. 地震工程学报, 2018, **40**(3): 524 – 534. (ZHANG Hui, LI Zhi-xiong, LI Sheng. Preliminary study on the wave velocity ratio ( $v_p/v_s$ ) in hainan island and offshore areas[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, **40**(3): 524 – 534. (in Chinese))
- [2] 刘惠珊, 张在明. 地震区的场地与地基基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. (LIU Hui-shan, ZHANG Zai-ming. Earthquake zone site and foundation[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1994. (in Chinese))
- [3] 刘汉龙. 土动力学与土工抗震研究进展综述[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(4): 148 – 164. (LIU Han-long. A review of recent advances in soil dynamics and geotechnical earthquake engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(4): 148 – 164. (in Chinese))
- [4] 张建民. 砂土动力学若干基本理论探究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(1): 1 – 50. (ZHANG Jian-min. New advances in basic theories of sand dynamics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(1): 1 – 50. (in Chinese))
- [5] 褚峰, 邵生俊, 陈存礼. 饱和淤泥质砂土动力变形及动强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增1): 3299 – 3305. (CHU Feng, SHAO Sheng-jun, CHEN Cun-li. Experimental study of dynamic deformation and dynamic strength properties of saturated silty sand[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, **33**(S1): 3299 – 3305. (in Chinese))
- [6] 王权民, 李刚, 陈正汉, 等. 厦门砂土的动力特性研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(10): 1628 – 1632. (WANG Quan-min, LI Gang, CHEN Zheng-han et al. Research on dynamic characteristics of sands in Xiamen city[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(10): 1628 – 1632. (in Chinese))
- [7] 王艳丽, 胡勇. 饱和砂土动力特性的动三轴试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, **6**(2): 295 – 299. (WANG Yan-li, HU Yong. Dynamic triaxial study on dynamic characteristics of saturated sands[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, **6**(2): 295 – 299. (in Chinese))
- [8] 王海东, 陈曦, 李建文, 等. 大应变作用下含水率对非饱和砂土动力特性影响的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016, **36**(1): 193 – 199. (WANG Hai-dong, CHEN Xi, LI Jian-wen, et al. Experimental study on the effect of water content on the dynamic characteristics of unsaturated sandy soil under large-strain[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, **36**(1): 193 – 199. (in Chinese))
- [9] HU Jun, ZHANG Lei, WEI Hong, et al. Experimental study of the compressive strength of chemically reinforced organic-sandy soil[J]. Geomechanics and Engineering, 2018, **16**(3): 247 – 255.
- [10] YI Jun, WEI Hong. Existing form and causes of bay facies organic sand[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, (405/406/407/408): 2730 – 2733.
- [11] 王志鑫. 海湾相有机质侵染砂的成因与工程特性的实验室研究[D]. 海口: 海南大学, 2012. (WANG Zhi-xin. laboratory studies on the causes of infected gulf-phase organic sand and engineering properties[D]. Haikou: Hainan University, 2012. (in Chinese))
- [12] 胡勇士, 卫宏, 胡俊, 等. 海南有机质浸染砂变形特性研究[J]. 科学技术与工程, 2015, **15**(35): 58 – 63. (HU Yong-shi, WEI Hong, HU Jun, et al. Study on the deformation property of organic infect sand in Hainan[J]. Science Technology and Engineering, 2015, **15**(35): 58 – 63. (in Chinese))
- [13] 周志国, 张云雁, 符必昌, 等. 昆明长水国际机场砂页岩残积红土动力特性研究[J]. 地质力学学报, 2018, **24**(6): 795 – 802. (ZHOU Zhi-guo, ZHANG Yun-yan, FU Bi-chang, et al. A study on dynamic characteristics of sandshale eluvial laterite at Kunming Changshui inter national airport[J]. Journal of Geomechanics, 2018, **24**(6): 795 – 802. (in Chinese))

(责编: 黄贤沙)