

文章编号:1001-4888(2018)02-0175-08

# 基于数字图像测量技术的尾粉砂动三轴试验研究<sup>\*</sup>

赵博雅<sup>1, 2</sup>, 邵龙潭<sup>1, 2</sup>, 孙翔<sup>1, 2</sup>, 郭晓霞<sup>1, 2</sup>, 刘港<sup>1, 2</sup>

(1. 大连理工大学工程力学系, 辽宁 大连 116085; 2. 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116085)

**摘要:** 尾粉砂的动力学特性往往通过室内动三轴试验来进行研究, 因此试验数据的精度尤为重要。本文将数字图像测量技术应用于土工动三轴试样的应变测量中。采用 Butterworth 数字滤波器进行数据降噪处理, 并将图像测量获得的整体应变结果与传感器测量的应变结果进行了比较, 表明通过图像测量方法测得的数据更能反映试样的真实变形。以某地饱和尾粉砂动三轴试验为例, 通过采用该种非接触式测量方法, 分别得到试样局部的动位移和动应变, 进而得到动模量随动应变的变化规律, 并与传感器得到的数据进行比较, 结果表明, 局部的动模量分布在整体动模量衰减曲线周围, 并且在小变形下不同位置处其动模量与整体动模量差别较大, 应变较大时, 局部动模量趋于整体动模量。

**关键词:** 数字图像测量技术; 动三轴试验; 动弹性模量; 动应变

中图分类号: O348      文献标识码: A      DOI: 10.7520/1001-4888-17-009

## 0 引言

尾矿在受到动力荷载作用下(地震荷载), 其模量会发生衰减, 阻尼增加, 最后甚至于发生液化。发生在尾矿坝底部的液化会造成坝体垮塌, 对人民生活造成威胁, 因此尾矿的动力特性研究尤为重要。目前主要利用室内动三轴试验对尾矿的动力特性进行研究, 研究所需的试验数据有等效循环荷载作用下的动应力、动应变和孔压等。尾粉砂在动荷载作用下会发生轴向的压缩和拉伸, 偏离平衡位置的应变幅值通常称之为动应变, 使用传统方法测量动应变时, 往往将试样整体作为一个单元来测量, 并不关心试样的局部变形。然而试样的局部变形却很大程度上影响着土的整体性质。试样产生局部变形的主要原因有试样的不均匀性、内部损伤、水分迁移以及试样的端部边界条件等因素。当前普遍使用的接触式传感器有霍尔效应传感器与局部位移传感器, 但这些接触式的传感器都不可避免地会对试样径向变形产生约束, 而且由于接触式传感器本身的材料性质也会对试样局部的变形特性产生影响。因此接触式传感器测量精度有限, 而且难于实现试样的局部变形测量, 而通过图像测量系统实现非接触式测量, 其应变的测量精度可达  $10^{-4}$  量级, 邵龙潭等<sup>[1-4]</sup> 都已经讨论了该系统在应变测量中的优越性。

数字图像技术具有操作简单、经济实用的特点, 且作为土工测试的一种处理手段, 已在土工试验领域展现出广阔的应用前景, 深受国内外学者的重视。White 等<sup>[5]</sup>、Alshibli 等<sup>[6]</sup> 运用数字图像测量技术研究了砂土沉桩过程变形测量、剪切带厚度等课题; Frost 等<sup>[7]</sup> 开发一套图像系统研究土体试样中空隙分布; Raschke 等<sup>[8]</sup> 利用图像技术研究土体的原位测量; Pytka 等<sup>[9]</sup> 利用摄像机测量了土体的应力应变特性; 张建民等<sup>[10]</sup> 将数字图像技术应用于粒状材料的细观组构分析, 但研究仅限于尺度较大的模型试

\* 收稿日期: 2017-01-12; 修回日期: 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(51309047)资助

通讯作者: 邵龙潭(1963—), 男, 博士, 教授。主要从事土和孔隙介质力学基本理论研究、土工结构稳定分析、土工试验测试技术与仪器研发。Email: shaolt@hotmail.com

验,没有考虑小尺寸的三轴试样。以上这些都属于静态加荷载问题研究,目前国内外运用数字图像处理技术进行动态试验过程中试样变形的研究还鲜有报道。

通过数字图像测量系统采集试样节点位置坐标,选取中间位置处的动应变进行研究,可以有效地避开三轴试样端部影响,提高三轴试验结果的准确性。对于静三轴试验,王助贫、邵龙潭等<sup>[1,2,11-13]</sup>开展了大量的研究工作。本文作者将数字图像测量技术应用于土工三轴试样表面变形测量,利用五阶 Butterworth 数字滤波器,给出较好的滤波效果,对图测系统和位移传感器测得的试样整体应变数据进行对比,并且比较了不同围压条件下传感器和图像系统给出的动模量衰减曲线,结果表明,在小变形时不同位置处其动模量与整体动模量差别较大,应变较大时,局部动模量趋于整体动模量。

## 1 动三轴试验系统的组成及测量方法

### 1.1 系统组成

大连理工大学岩土与环境力学实验室自主研发了双向振动土工三轴试验机<sup>[14,15]</sup>,可用于动三轴土样表面变形测量的研究。该试验机由特制压力室、液压加载系统、围压控制系统、图像测量系统、高频动态图像传感器测控软件等组成。图1为其组成实物图。该试验仪器具有以下特点:(1)双向振动的精确控制;(2)非正弦周期信号电液激振控制波形;(3)传感器内置;(4)图像测量与传感器测试数据的同步。



图1 双向振动土工三轴仪

Fig. 1 Geotechnical dynamic triaxial apparatus of two-way vibration

需要说明的是,在动三轴试验中,普通摄像机拍摄速度慢,无法捕捉到动力载荷作用下土样表面的细微变化,故该系统采用工业用高速摄像机(德国 AVT 公司的 Pike F-100C 高速摄像机,其分辨率在  $1000 \times 1000$  pixels 下最快图像采集速度为 60 帧,采用 1394B 型接口,具有较高的数据传输率,可编程设置多种触发方式)拍摄试样表面在动荷载下的实时变形图像。该仪器通过将高频动态测控系统作为同步主控端,在开始振动的同时,向高速摄像机周期性地输出 5V TTL 脉冲信号,摄像机收到外部脉冲后立即启动拍摄;当试验结束时,测控端停止发送脉冲信号,摄像机停止拍摄,从而实现了图像测量与传感器测试数据的同步<sup>[16]</sup>。

### 1.2 测量方法与应变计算

图像测量系统最终要测量试样表面的变形信息,为此,数据处理软件需实现下列功能:(1)对原始投影数据进行畸变修正;(2)像素当量归一化;(3)应变计算。通过畸变修正将镜头畸变通过定标校准方法来消除,将像素坐标按照真实坐标进行定位,然后将像素当量进行归一化处理,最后将所有方块标志的角点作为四节点等参元的角点,用插值方法求得试样表面任意位置的实际坐标,再依据已算得的各角点应变差值求得试样全表面的应变场。至此,完成试样表面应变(场)的计算工作。

### 1.3 测量精度

为了分析该图像测量系统的精度,对铝棒进行了循环加卸载试验,并在铝棒的横向和竖向分别粘贴应变片测量径向和轴向变形。将应变片的结果作为真值,其精度可达  $10^{-6}$  微应变。比较图像测量与应变片的测量结果,两者吻合得很好。另外,采用图像测量与排水管体变结果比较来分析该系统的精度,图像测量得到的体变数据与体变传感器的量测数据也表现出了很好的一致性。上述精度检定试验结果表明,该套系统的应变测量精度可达到  $10^{-4}$  量级<sup>[17]</sup>。

### 1.4 滤波方法

通过该套系统测量获得的位移时程曲线,在位移变化量较小时,数据噪声分量较多,应当使用滤波的方法从中找出试验指定的振动频率分量。本文采用五阶 Butterworth 数字滤波器对位移变化量较小时的数据噪声进行过滤,Butterworth 数字滤波器具有通频带内的频率响应曲线能够达到最大限度的平坦,而在阻带则逐渐下降为 0 的特点<sup>[18]</sup>,五阶 Butterworth 数字滤波器的衰减率为每倍频 30dB,满足实际试验数据的滤波要求。图 2 是使用 Butterworth 数字滤波器处理小位移(正弦)情况下的噪声的效果。由图可见,滤波后的波形能够较好反映出变形的特征,并消除了噪声的影响。

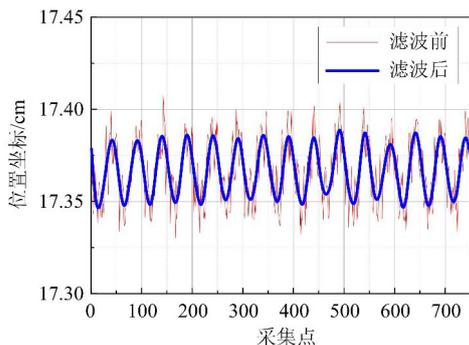


图 2 滤波效果图

Fig. 2 The filtering effect

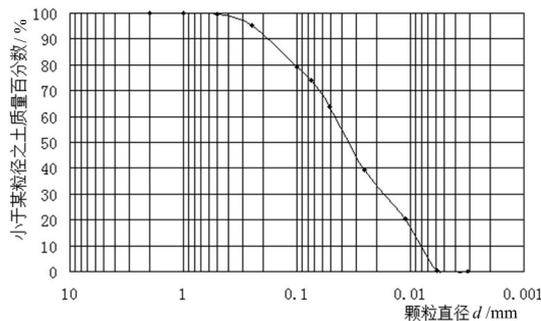


图 3 试验尾矿料的颗分曲线

Fig. 3 The gradation curve of the tailings

## 2 尾粉砂动力三轴试样整体变形测量及应用

采用上述基于图像测量技术的动三轴试验机,对传统位移传感器获得的应变数据与图像测量系统获得的应变数据进行比较。本试验取某地尾矿砂作为研究对象,试样直径为 61.8mm,高度为 125mm,在压力室外部成样,利用二氧化碳和无气水进行试样饱和,饱和度控制在 95% 以上,试样轴向应变和径向应变均采用数字图像测量系统获得。试验尾粉砂的基本物理指标见表 1,其颗粒组成如图 3 所示。

表 1 试验土料的基本物理指标

Tab. 1 Basic physical indexes of test soil

土料名称	土粒比重	不均匀系数	曲率系数	干密度/(g/cm <sup>3</sup> )
尾粉土	2.886	5.88	0.6	1.517

对尾粉砂进行常规动力三轴试验,控制围压为 100kPa、200kPa 以及 300kPa,振动次数为 15 次,分别取不同荷载等级施加动荷载,具体试验工况见表 2。

表 2 不同围压条件下的动荷载施加工况表

Tab. 2 The dynamic loading conditions under the condition of different confining pressure

围压/kPa	振次	动荷载/kN
100	15	5、7、10、15、17、20、23、25、27、30、32
200	15	5、7、10、15、20、25、30、35、40、45、47、50、53、55、57、60
300	15	5、7、10、15、20、25、30、35、40、50、60、65、70、75、80

图4和图5分别给出了不同动应力条件下,图测系统和传感器获得的应变差值随时间的变化曲线。由图4和图5可见,图像测量系统测得的应变幅值要小于传统位移传感器测得的应变幅值。通过对动应力为15kPa和22kPa的数据进行分析可以看到,当动应力增大时,二者应变幅值的差值也随之增大。该幅值差很大程度是因为试样帽与试样接触不牢、端部效应以及传感器和加载杆材料本身的变形引起的,这在传统位移传感器的测量方法中是很难避免的,而使用数字图像测量系统因为是非接触式测量,则可很好地避免以上人为原因的误差影响。

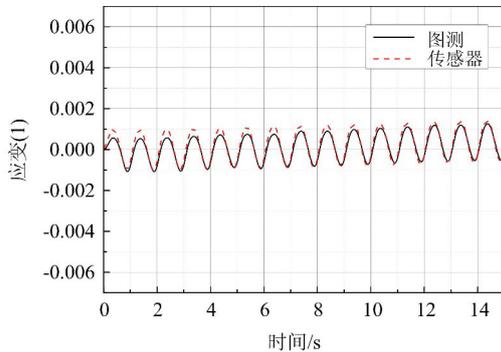


图4 动应变时程(围压100kPa,动应力15kPa)

Fig. 4 Dynamic strain time history

( $\sigma_c = 100\text{kPa}$ ,  $\sigma_d = 15\text{kPa}$ )

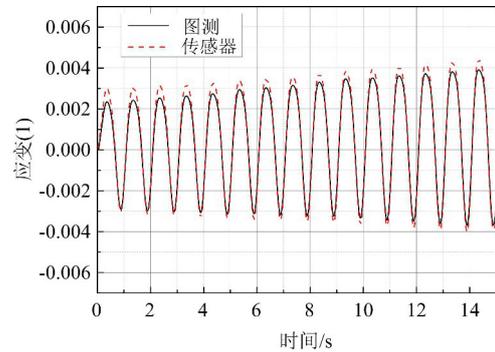


图5 动应变时程(围压100kPa,动应力22kPa)

Fig. 5 Dynamic strain time history

( $\sigma_c = 100\text{kPa}$ ,  $\sigma_d = 22\text{kPa}$ )

为了比较传感器测得的应变值与图测系统测得的应变值之间的区别,引入应变差值 $\Delta\epsilon$ ,如公式(1)所示。

$$\Delta\epsilon = |\epsilon_{\text{sensor}} - \epsilon_{\text{image}}| \quad (1)$$

式中, $\epsilon_{\text{sensor}}$ 和 $\epsilon_{\text{image}}$ 分别为传感器和数字图像测量系统所测得的应变值。

图6~图8给出了在围压100kPa、200kPa及300kPa条件下,不同动应力幅值时,动应变差的变化。由图可见,在相同围压下,随着动荷载的增大,图像测量所得到的动应变幅值与传统传感器所得到的动应变幅值的差值 $\Delta\epsilon$ 也会增大,并且振次也会对 $\Delta\epsilon$ 有影响,但影响较小,在 $10^{-4}$ 的数量级。

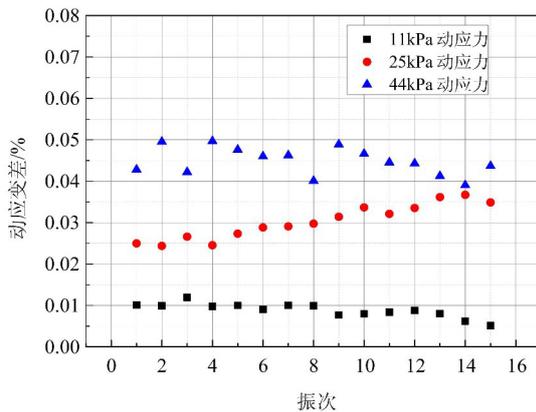


图6 100kPa围压下不同动应力对动应变差与振次关系曲线

Fig. 6 Dynamic strain difference vs. vibration times curves

for different dynamic stress when  $\sigma_c = 100\text{kPa}$

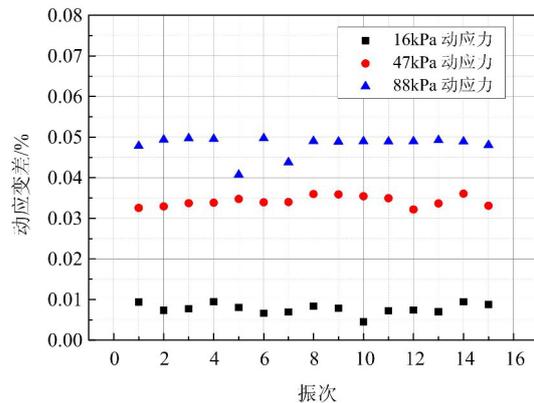


图7 200kPa围压下不同动应力对动应变差与振次关系曲线

Fig. 7 Dynamic strain difference vs. vibration times curves

for different dynamic stress when  $\sigma_c = 200\text{kPa}$

分别整理不同测量方法得到的动应变数据,按公式(2)计算动模量,如图9所示,在小应变条件下通过位移传感器测得的数据整理的动模量要小于图像测量系统获得的数值,而在动应变较大时,二者差距较小,图像测量获得的变形量要小于传感器测得的数值,究其原因主要是由端部接触造成的,即试样与试样帽、底座、透水石及滤纸各部分之间存在接触缝隙,当加载时缝隙会被压缩,导致由外部传感器测得

的轴向应变比试样的真实变形要大。因而,传感器测得的变形量并非试样本身的变形。由于图测测得的轴向动应变小于位移传感器测得的,二者之差在小应变时会占有较大的比重,而在应变较大时,这个应变差相对应应变的数量级较小,因此模量相差较小。

$$E_d = \frac{\sigma_d}{\epsilon_d}, G_d = \frac{E_d}{2(1 + \mu)} \tag{2}$$

式中,  $G_d$  为动剪切模量;  $E_d$  为动弹性模量;  $\mu$  为动泊松比;  $\sigma_d$  为动应力;  $\epsilon_d$  相应于图测或者位移传感器获得的动应变数值。

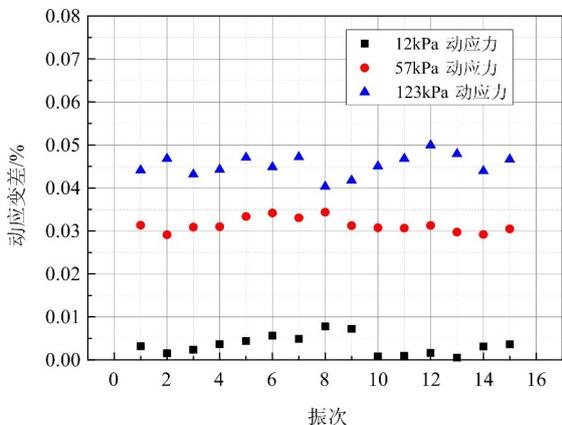


图 8 300kPa 围压下不同动应力对动应变差与振次关系曲线  
Fig. 8 Dynamic strain difference vs. vibration times curves for different dynamic stress when  $\sigma_c = 300\text{kPa}$

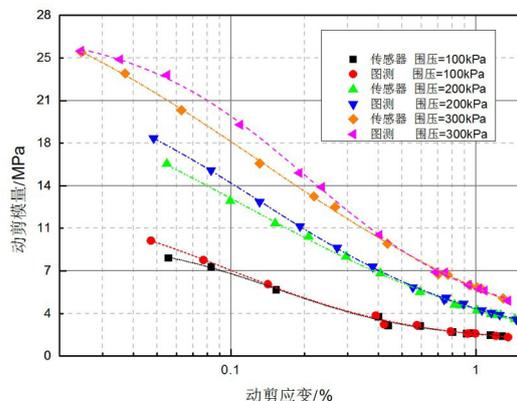


图 9 不同围压下图测与传感器得到的动模量曲线的对比  
Fig. 9 The contrast of dynamic modulus curve between the image measurement and sensor under different confining pressure

### 3 尾粉砂动力三轴局部力学特性

三轴试验试样由于其本身的不均匀性、内部损伤、水分迁移以及受到端部约束与柔性围压的边界条件,很难保证其具有代表体元的特性。例如由于端部约束的影响,当施加轴向偏压时,试样会呈现均匀鼓状变形,施加轴向偏拉,试样会呈现双曲圆柱型。因此在试样沿轴向不同位置会得到不同的应变值,通过应用数字图像测量技术,可以得到试样表面各个角点的位置坐标。我们选取试样上 6 个位置处的坐标位置信息进行处理,由于同一水平位置的节点纵坐标在整个变形过程中相差不大。因此通过计算对与选取点所在行的面积进行应力修正,修正计算公式为

$$\sigma_d = \frac{1}{2} \left( \frac{P}{S_p} - \frac{P}{S_v} \right) \tag{3}$$

式中,  $P$  为轴向动载荷大小;  $S$  为选取点对应的平均面积,此单元平均面积的计算公式为:

$$S_p = S_o(1 + \epsilon_{rp})^2, S_v = S_o(1 + \epsilon_{rv})^2 \tag{4}$$

式中,  $\epsilon_{rp}$  为单元平均峰值径向应变;  $\epsilon_{rv}$  为单元平均谷值径向应变。

图 10 是包裹试样的橡皮膜示意图,试样膜上印有白色方格,其角点为相机进行图像测量时所要捕捉的角点,通过图像处理换算出角点位置坐标。为尽可能地剔除畸变影响,本文选取了前表面中间位置处的角点,图中红色圆圈标出了 1~6 号节点即为本文所选取的位置角点。图 11(a)~(c)描述试样分别在围压 100kPa、200kPa 和 300kPa 条件下,试样前表面上所选取的角点的动模量与动应变的关系,红色实线表示使用图像测量得到的整体动模量衰减曲线。可以看出,在小应变条件下,局部动模量与整体平均动模量有较大差别。分析其原因,是由于动应变较小时,作为分母的动应变微小的区别会带来动模

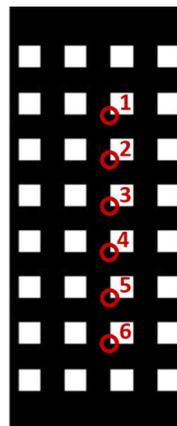


图 10 土样表面节点分布  
Fig. 10 The nodes distribution on the surface of the soil sample

量很大的差异。当动应变较大时,不同位置处的动模量大小非常接近,且逼近于整体动模量大小。

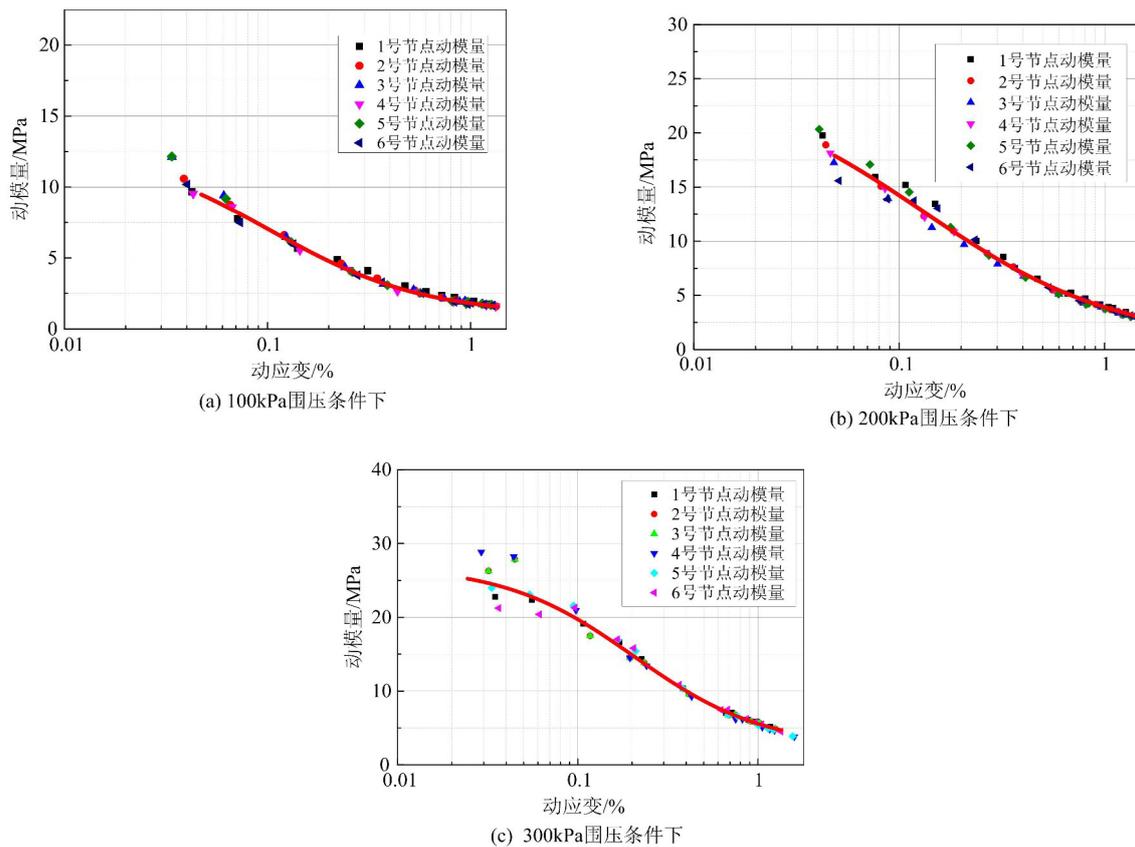


图 11 不同围压试样不同部位角点平均动模量与动应变的关系

Fig. 11 The relationship between average dynamic modulus and dynamic strain of the angular point at different positions of the sample under different confining pressure

## 4 结论

本文将计算机数字图像处理技术应用于土工动三轴试验土样表面变形测量,通过采用该种非接触式测量方法,选取适当的测量区域来有效消除端部约束的影响,并分析了传统方法不能获得的局部动模量,得到如下结论:

(1) 数字图像测量系统应用到动三轴,通过与传统传感器测量结果比较,验证了使用图像测量方法测量动位移、动应变和进行动三轴试验是可行的。并指出由于克服了接触式测量的弊端,图像测量技术对土体在受到动力荷载作用下的变形测量精度更高。

(2) 本文通过对试样不同部位的试验数据进行整理,得到不同围压下试样局部的动模量,结果显示局部的动模量分布在整体动模量衰减曲线周围,并且在小变形下不同位置处动模量与整体动模量差别较大,应变较大时,局部动模量趋于整体动模量。因此,传统的测量方法不能反映局部动模量的差异性。

随着图像分析和处理技术的进一步发展以及数字图像采集设备的日益完善,可以预见,数字图像测量技术在土工动三轴试验中将具有更广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 邵龙潭,王助贫,刘永禄. 三轴土样局部变形的数字图像测量方法[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2):159-163 (SHAO Longtan, WANG Zhupin, LIU Yonglu. Digital image processing technique for measurement of the local deformation of soil specimen in triaxial test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2):159-163 (in Chinese))
- [2] 邵龙潭,孙益振,王助贫,等. 数字图像测量技术在土工三轴试验中的应用研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1):29

- 34 (SHAO Longtan, SUN Yizhen, WANG Zhupin, et al. Application of digital image processing technique to triaxial test in soil mechanics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(1): 29–34 (in Chinese))
- [3] 王助贫, 邵龙潭, 孙益振. 基于数字图像测量技术的粉煤灰三轴试样剪切带研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(9):1163–1167 (WANG Zhupin, SHAO Longtan, SUN Yizhen. Study on shear band of fly ash triaxial specimen based on digital image processing technique[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(9):1163–1167 (in Chinese))
- [4] 邵龙潭, 刘潇, 郭晓霞, 等. 土工三轴试验试样全表面变形测量的实现[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(3): 409–415 (SHAO Longtan, LIU Xiao, GUO Xiaoxia, et al. Whole surface deformation measurement of triaxial soil specimen based on digital image processing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(3):409–415 (in Chinese))
- [5] White D, Take W, Bolton M. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. *Geotechnique*, 2003, 53(7):619–631.
- [6] Alshibli K A, Al-Hamdan M Z. Estimating volume change of triaxial soil specimens from planar images[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2001, 16(6):415–421.
- [7] Frost J D, Kuo C. Automated determination of the distribution of local void ratio from digital images[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1996, 19(2):107–117.
- [8] Raschke S A, Hryciw R D. Vision cone penetrometer for direct subsurface soil observation[J]. *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(11):1074–1076.
- [9] Pytka J, Krystyna. A new optical method for soil stress and strain investigation[J]. *Soil & Tillage Research*, 2002(65):243–251.
- [10] 张嘎, 牟太平, 张建民. 基于图像分析的土坡离心模型试验变形场测量[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(1):94–97 (ZHANG Ga, MU Taiping, ZHANG Jianmin. Displacement measurement using image analysis in centrifuge modeling of slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(1):94–97 (in Chinese))
- [11] 王助贫, 邵龙潭. 三轴试样变形数字图像测量误差和精度分析[J]. *大连理工大学学报*, 2002, 42(1):98–103 (WANG Zhupin, SHAO Longtan. Errors and accuracy analyses of digital image processing technique for measuring specimen deformation in triaxial test[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2002, 42(1):98–103 (in Chinese))
- [12] 王助贫, 邵龙潭. 三轴试验土样的端部影响问题研究[J]. *岩土力学*, 2003, 24(3):363–368 (WANG Zhupin, SHAO Longtan. Research on influence of end effect of soil specimens in triaxial tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(3):363–368 (in Chinese))
- [13] 刘港, 郭晓霞, 邵龙潭. 三轴试验土样剪切破坏过程的判别[J]. *实验力学*, 2015, 30(6):708–716 (LIU Gang, GUO Xiaoxia, SHAO Longtan. Discriminant method of shear failure process of soil specimen in triaxial test[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2015, 30(6):708–716 (in Chinese))
- [14] 桑勇, 邵龙潭. 土工试验中土样动态变形测试系统的设计[J]. *液压与气动*, 2008(7):23–25 (SANG Yong, SHAO Longtan. The design of the dynamic testing system for soil sample in soil test[J]. *Chinese Hydraulics and Pneumatics*, 2008(7):23–25 (in Chinese))
- [15] 桑勇, 邵龙潭. “动静三轴试验仪”伺服加载系统研究[J]. *大连理工大学学报*, 2010(2):202–207 (SANG Yong, SHAO Longtan. Research on electro-hydraulic servo loading system for dynamic & static triaxial apparatus[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2010(2):202–207 (in Chinese))
- [16] YANG Song, SHAO Longtan, SANG Yong, et al. Application of digital image processing technique in geotechnical dynamic triaxial test[J]. *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 2013, 39(9): 622–629.
- [17] 刘潇. 三轴试验土样全表面变形测量方法及其应用[D]. 大连理工大学, 2012 (LIU Xiao. Method of whole surface deformation measurement for soil specimen in triaxial tests and its application[D]. *Dalian University of Technology*, 2012 (in Chinese))
- [18] 庞建丽, 高丽娜. 基于 Matlab 的 IIR 数字滤波器设计方法比较及应用[J]. *现代电子技术*, 2010, 33(11):103–105 (PANG Jianli, GAO Lina. Comparison of Matlab-based design methods and application of IIR digital filters [J]. *Modern Electronics Technique*, 2010, 33(11):103–105 (in Chinese))

## On the dynamic triaxial experiment of tailings silty sand based on digital image measurement

ZHAO Bo-ya<sup>1,2</sup>, SHAO Long-tan<sup>1,2</sup>, SUN Xiang<sup>1,2</sup>, GUO Xiao-xia<sup>1,2</sup>, LIU Gang<sup>1,2</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian 116085, China)

**Abstract:** Dynamic characteristics of tailings silty sand are often studied by indoor dynamic triaxial experiment, so the accuracy of experimental data is very important. In this paper, digital image correlation technique is applied to strain measurement of triaxis dynamic specimens of geotechnical engineering. Butterworth digital filter was used to denoise data, and overall strain measurement results by DIC were compared with that obtained by using transducers, which demonstrates that the data obtained by DIC measurement can more truly reflect the deformation. Taking dynamic triaxis experiment of somewhere saturated tailings silty sand as an example, the local dynamic displacement and strain of specimens were obtained respectively based on this non-contact measurement method. Then, the variation pattern of dynamic modulus with dynamic strain was also obtained, which was compared with that obtained by transducers. Results show that local dynamic modulus is distributed around the attenuation curve of overall dynamic modulus. Moreover, under small deformation condition, the local dynamic modulus is greatly different from the overall dynamic modulus at different locations. When strain is larger, the local dynamic modulus is closer to overall dynamic modulus.

**Keywords:** digital image measurement; dynamic triaxial test; dynamic modulus; dynamic strain