

三轴土样局部变形的数字图像测量方法

Digital image processing technique for measurement of the local deformation of soil specimen in triaxial test

邵龙潭¹, 王助贫¹, 刘永禄²

(1. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116023; 2. 大连理工大学 物理系, 辽宁 大连 116023)

摘要: 在已完成的土样径向变形数字图像测量基础上, 实现了土样轴向变形和径向变形的同步测量, 不仅可测量土样整体的平均变形, 而且可测量土样的局部变形, 还给出了图像测量系统的理论精度和实际测量精度。用砂土、粉煤灰两种饱和试样进行固结排水剪切试验, 对采用图像测量方法得到的三轴土样不同部位的局部测量结果和采用传统测量方法得到的整体平均测量结果进行了比较。

关键词: 图像测量; 三轴试验; 土样变形

中图分类号: TU 41; TP 391

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)02-0159-05

作者简介: 邵龙潭(1963-), 男, 吉林梨树人, 大连理工大学工程力学系教授, 博士生导师。

SHAO Long-tan¹, WANG Zhu-pin¹, LIU Yong-lu²

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. Physics Department, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Radial and axial deformations are measured by digital image processing method(DIPM) and not only the average deformation of whole specimen but also the local deformation at different location of soil specimen can be obtained. The theoretical and real accuracy are given in this paper. At the end, local deformations measured at different section by DIPM and the average results by traditional method are compared.

Key words: image processing; triaxial test; specimen deformation

1 前言*

数字图像分析和处理技术是近年来随着计算机应用的不断深入而发展起来的一门新兴技术。以 CCD 为像传感器的数字图像测量技术, 在现代光电测试技术中一支独秀, 被应用到越来越多的研究领域, 物体的长度(变形)测量是其中很重要的一个方面。文献[1]中, 曾首次尝试将数字图像测量方法应用于土工三轴试验土样径向变形的测量, 取得了非常好的效果, 不仅实现了三轴土样径向变形的直接量测, 而且具有较高的测量精度。数字图像测量技术通过 CCD 采集数字图像, 由计算机自动识别物体边缘, 实时输出变形曲线。因为具有保存物体图像的功能, 所以试验人员可以在试验结束后重新观察和分析整个试验过程。数字图像测量是一种远距离非接触式测量技术, 不会干扰试样的受力和变形, 除了需要对三轴压力室作适当改进外, 可以直接应用于任何常规三轴试验仪。

土体局部变形研究是当今土力学重要的研究领域, 由于测量方法和测试手段的限制以及在三轴条件下土体不易形成剪切带等原因, 通常只采用局部位移传感器研究平面应变土体的局部变形特性^[2~5]。

采用少数几个位移传感器很难研究三轴条件下试样的局部变形特性, 而图像测量技术可以捕获整个视场内土样的图像信息, 在土样径向变形的测量中等价

于在试样高度方向上布置了许许多多多个非接触式局部位移传感器。在文献[1]中, 土样的径向变形通过数字图像分析测量, 而轴向变形的测量依然沿袭传统方法, 用传力杆的位移来计算试样整体的平均应变。本文在已经完成的土样径向变形图像测量的基础上, 实现了土样轴向变形和径向变形的同步测量, 从而可以用于研究三轴试验条件下土样的整体变形特征和局部变形特性。

2 轴向变形测量的实现

在三轴土样径向变形的测量中, 把土样轮廓线作为图像边缘来识别, 当在三轴土样的正后方添加辅助光源时, 土样图像轮廓清晰分明, 性态稳定, 边缘识别准确。但是在土样轴线方向的任意位置, 无法找到现存的、计算机能够识别的图像边缘。为此在橡皮膜上加印白色标志线, 人为地添加三轴土样轴线方向上的检测边缘。橡皮膜上白色标志线的灰度分布呈屋顶状边缘性质, 采用图像识别算法可以自动搜索并确定白色标志线中心位置, 从而获得相邻标志线之间的距离。在假定橡皮膜和试样体同步变形的前提下, 标志线之间的高度变化即为该段土体的变形量。

* 基金项目: 教育部高等学校骨干教师资助计划资助项目(2000-65)
收稿日期: 2001-08-23

在三轴试验中,试样的围压通过压力室中的水来施加,这要求橡皮膜上的白色标志线在水中长时间浸泡不会脱落和褪色。橡皮膜在成样和剪切的过程中受到拉伸、压缩或扭曲,这又要求该白色标志线能随着橡皮膜的变形而变形。此外,为了便于对标志线的图像识别,还要求该标志线与橡皮膜有较强的对比度且色泽均匀、边缘光滑。为此,选择一种特殊的白色弹力胶,用事先准备好的模板把需要的标志线加印到橡皮膜上。该弹力胶不溶于水,与橡皮膜具有几乎相同的弹性,且对橡皮膜有很好的附着力,黏结牢固。

试验过程中,背景辅助光源的存在必然会削弱前景的相对照度,为了能够在土样外轮廓清晰成像的同时得到橡皮膜上白色标志线的图像,在试样的斜上方增加一盏前景射灯,如图 1 所示。射灯的方向和光强以不影响背景光强且能提高试样前部亮度为标准。三轴试验采用的乳胶膜通常为乳白色,实际应用效果表明,采用加印白色标志线的方法能满足三轴土样径向和轴向变形图像测量的要求。当试验土体比较纯净、色泽较浅(如石英标准砂)时,采用黑色乳胶膜,测试效果更好。

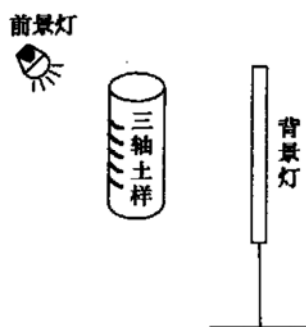


图 1 辅助照明布置图

Fig. 1 Auxiliary lighting and their layout

3 测量精度检验

理论上讲,数字图像测量系统的精度是系统边缘位置的识别精度与每个像素代表的实际长度的乘积。其中每个像素代表的实际长度即像素当量值由视场内物体成像大小以及所采用的数字图像采集设备的最大像素数决定。试验过程中,依据三轴土样直径大小不同,土样成像的大小基本确定。例如当土样直径为 39.1 mm 时,采用现有的 CCD 和视频采集卡,像素当量值在 0.14(试样整体进入视场)~0.06 mm/pixel(试样高度的一半进入视场)之间。因此,在像素当量值确定的前提下,数字图像测量系统的精度主要由系统边缘位置的识别误差决定。

边缘位置的识别精度与边缘识别方法直接相关。采用好的边缘识别算法可以大大提高边缘位置识别的

准确度,从而提高图像测量系统的测试精度。边缘识别算法很多,其中亚像素插值运算是一种原理简单且行之有效的算法。它利用图像的灰度分布曲线,用逐点求差分的办法(设定差分阈值)确定边缘的大致范围;再依据边缘两侧所对应的灰度平均值,用插值运算得到边缘的准确位置。

为了检验亚像素插值运算的有效性,对置于视场内的同一物体的边缘位置进行多次重复测量,检测结果如表 1 所示。可以看出,亚像素插值算法检测物体边缘的重复性精度较好,表 1 中虽只给出两点的结果,但多点多次测量,3 σ 一般均在 0.055 pixel 左右,这比采用单像素识别方法检测物体边缘得到的结果(3 σ 通常在 1.33 pixel 左右)有很大的提高。因此在理论上,用亚像素插值算法自动识别物体边缘时数字图像测量系统的绝对误差可以达到 0.003~0.008 mm,相对误差可以达到 10^{-4} 。

表 1 物体左右边缘占据像素宽度

Table 1 Pixels of object width

测量次数	像素宽度 / pixel	测量次数	像素宽度 / pixel
1	356.6705	11	356.6404
2	356.6756	12	356.6853
3	356.6677	13	356.6604
4	356.6510	14	356.6616
5	356.6733	15	356.6497
6	356.6679	16	356.6956
7	356.6533	17	356.6661
8	356.6675	18	356.7009
9	356.6621	19	356.6658
10	356.6742	20	356.7238

像素宽度平均值为 356.6706 pixel, 3 σ 为 0.0532 pixel。

数字图像测量系统在进行三轴土样变形测量时,真实的测量精度要低于理论精度,这是因为在实际测量过程中存在许多可能的误差源。为了减小误差影响,提高测量精度,在软件算法上采用了亚像素插值、异常数据的剔除以及多次求平均等手段,并且对图像畸变(包括 CCD 摄像机及变焦镜头的光学非线性引起的图像畸变以及三轴压力室及筒内水对光的折射和绕射引起的图像畸变等)作了系统标定,在实时测量的同时进行系统误差的修正^[6]。为了确定系统的真实测试精度,设计加工了变截面铜柱作为标准试件来实际检测。变截面铜柱的每个截面经过精密打磨,使用圆度仪校核了加工质量后,用万能工具显微镜(测量精度为 ± 0.003 mm)测量了各个截面的直径作为变截面铜柱的相对真值。图像测量系统横向变形测量的相对误差最大值为 0.235×10^{-3} (绝对误差为 0.01 mm),此外,CCD 的逐行扫描特性决定其垂直方向上的边缘检测性

表 2 试验土体基本参数
Table 2 Parameters of soil specimens

土体种类	d_s	$e_{\max}$	$e_{\min}$	ρ_d / $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	颗粒组成/ %						C_u	C_c
					> 2	2~ 0.5	0.5~ 0.25	0.25~ 0.1	0.1~ 0.015	< 0.015		
砂	2.65	0.546	0.250	2.04	0	19.65	80.22	0.12	0.01	0	1.414	0.861
粉煤灰	2.70	1.440	0.444	0.83	0	3.00	7.10	39.90	40.24	9.76	8.125	2.356

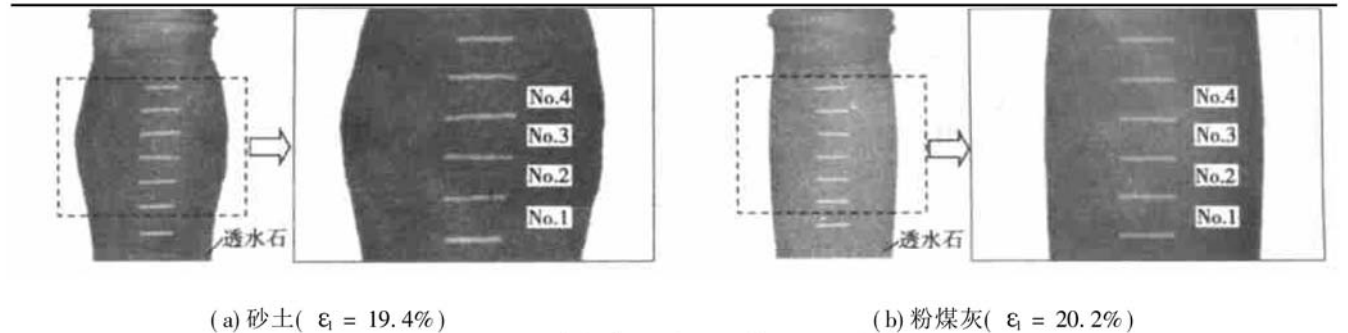


图 2 试样破坏形状及图像测量区域

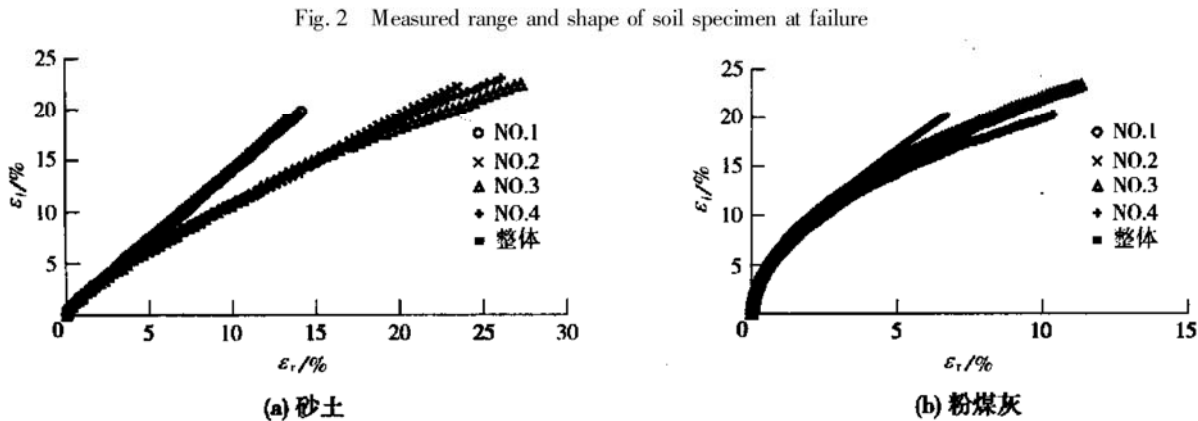


图 3 图像测量方法与传统测量方法对 $\varepsilon_1 - \varepsilon_r$ 曲线的影响

Fig. 3 Curves of radial and vertical strain measured by image processing and traditional methods

能会弱于水平方向, 因此, 在相同条件下垂直变形的测量精度略低于径向变形的测量精度, 相对误差在 0.5×10^{-3} (绝对误差为 0.03 mm) 左右。

4 土样局部变形测量结果

4.1 试验描述

试验材料选用砂和粉煤灰, 基本特性参数见表 2。三轴试样直径 39.1 mm, 高 80 mm。应用日本岛津公司生产的 AG-1 型万能材料试验机作为三轴加载设备。该试验机具有很高的轴向力和变形控制精度, 其中力传感器精度为荷载表示值的 $\pm 1\%$, 位移控制精度为 0.001 mm。按照应变控制式三轴试验要求进行固结排水试验。砂土的剪切速率为 0.2 mm/min, 粉煤灰的剪切速率为 0.1 mm/min。依据 SL 237—1999 土工试验规范要求, 砂土和粉煤灰均在压力室底座上用对开模直接成样, 并通 CO_2 和无气水饱和。砂土和粉煤灰试样的干密度分别为 2.044 g/cm^3 和 0.826 g/cm^3 。试验过程中饱和度控制在 98% 以上, 固结度控制在 95% 以上。

为了对图像测量方法得到的三轴土样局部变形测量结果与采用传统测量方法得到的整体平均值进行比较, 在固结排水剪切过程中除采用图像测量方法采集三轴土样径向和轴向变形的信息外, 同时采用常规测量方法记录整体轴向变形以及试样的排水量等试验数据。

图像测量区域如图 2 虚线所示, 试验过程中系统自动识别 NO. 1~ 4 四段土体共 5 条白色标志线之间的高度以及各自对应的直径, 进而确定不同时刻试样不同位置处的轴向应变和径向应变。其中每一段的轴向高度是视场水平中心位置 ($x = 383 \text{ pixel}$) 处上、下两条白色标志线中心的距离, 径向宽度是该段土体每一像素高度位置对应的所有直径测量值的平均值。

4.2 试验结果比较和分析

图 3、图 4 给出了砂土与粉煤灰土体径向应变-轴向应变之间的关系以及轴向应变-偏应力之间的关系, 其中整体数据是通过传统测量方法得到的试样整体的平均应变和平均应力, NO. 1~ 4 是根据图像测量方法测量白色标志线之间的轴向高度以及与之对应的径向宽度计算得到的应变、应力值。NO. 1~ 4 各段位

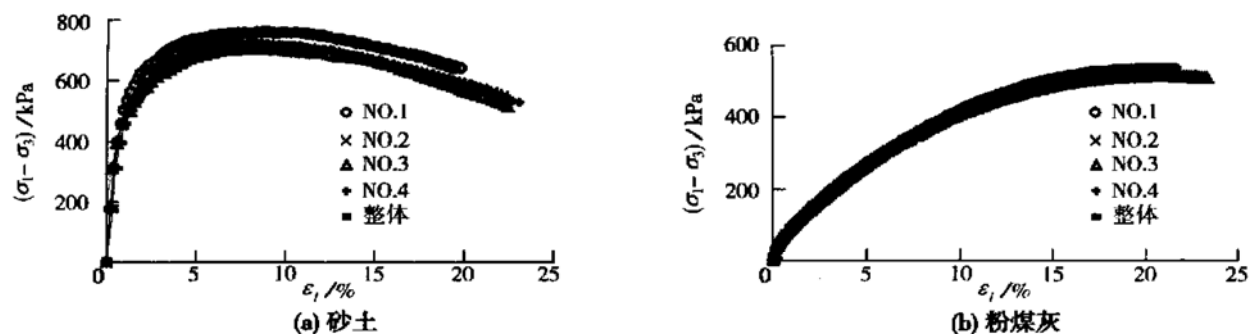
图4 图像测量方法与传统测量方法对 $\varepsilon - (\sigma_1 - \sigma_3)$ 曲线的影响

Fig. 4 Curves of vertical strain and deviator stress measured by image processing and traditional methods

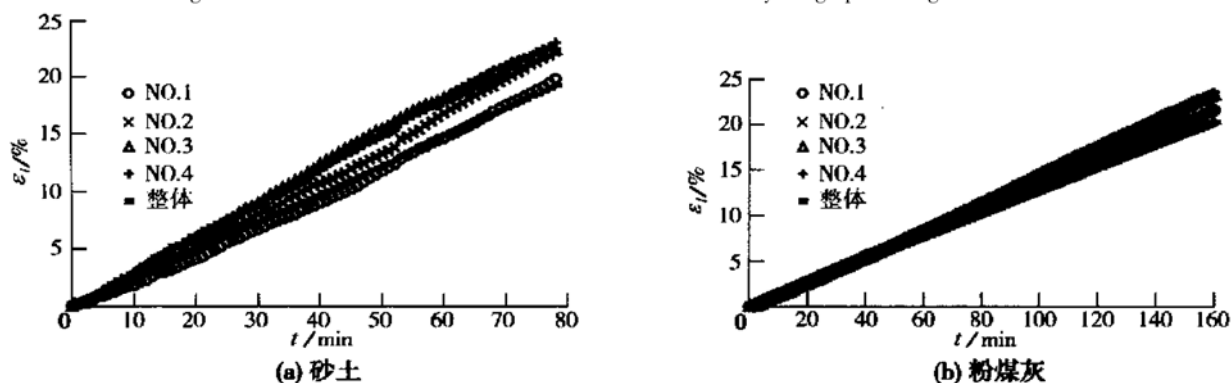


图5 不同测量位置处轴向应变随时间的变化

Fig. 5 Axial strain at different sections

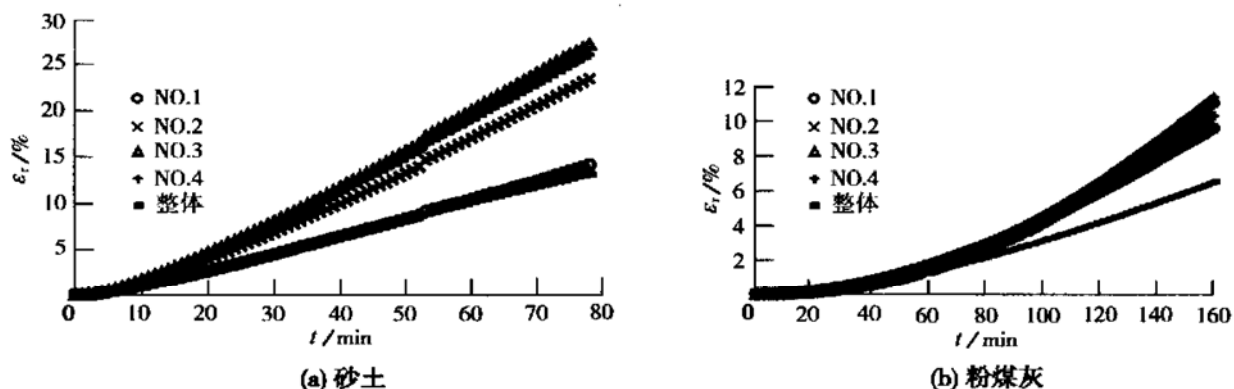


图6 不同测量位置处径向应变随时间的变化

Fig. 6 Radial strain at different sections

置如图2所示,黑框内为实际测量时视场内的图像。

从轴向应变与径向应变关系曲线看,在变形初期不管是整体测量的平均值还是分段测量值都基本重合在一起,这主要是因为变形初期试样变形比较均匀,各自差别也相对较小。随着变形的增加,试样出现了不均匀变形,整体平均值和各段之间的差异以及各段与各段之间的差异均开始增加,表现为曲线长短以及变化趋势等的不一致。砂性土体在吸水剪胀情况下(特别是在剪切后期),由于试样变形极不均匀,这一特性更加明显。

图5和图6为轴向应变、径向应变随时间的变化,从曲线上可以非常清楚地看到三轴试样局部变形的特

点。图5中各段土体径向应变随时间的增长是不一致的,这种不一致性是试样两端刚性试样帽、刚性底座对试样的约束作用引起的,规律性非常明显,表现为试样两端变形小中部变形大。应变控制式三轴试验属于等应变加荷,传统意义上的轴向应变随时间均匀变化,但从图6轴向应变随时间的变化规律看,不同测量位置的轴向应变大小存在差异,但段与段之间没有非常明确的规律性,它们之间的差异可能是由于装样过程中层与层之间试样局部密度不一致引起的,与装样密度、装样方法等都有密切关系。多次试验均表明,靠近底座的一段(NO.1),其轴向变形是最小的,这也是受到了刚性试样帽和透水石约束的缘故。

表3 局部变形测量时各段土体的应力和应变值

Table 3 Stress and strain at different section of soil specimen

测量位置	砂土					粉煤灰				
	应变最大值		破坏点强度及应变(峰值)			应变最大值		破坏点强度及应变($\varepsilon = 15\%$)		
	$\varepsilon_1 / \%$	$\varepsilon_2 / \%$	$(\sigma_1 - \sigma_3) / \text{kPa}$			$\varepsilon_1 / \%$	$\varepsilon_2 / \%$	$(\sigma_1 - \sigma_3) / \text{kPa}$		
NO. 1	19.77	14.18	759.89	8.76	6.24	21.58	9.62	505.67	15.04	5.07
NO. 2	22.18	23.47	720.48	7.33	6.23	23.20	11.18	493.96	14.97	4.79
NO. 3	22.41	27.27	703.29	8.47	7.33	23.33	11.29	484.73	14.97	4.54
NO. 4	23.04	26.07	709.83	8.40	7.18	20.27	10.32	497.93	15.00	5.50
整体平均	19.23	13.17	751.20	9.61	6.36	20.25	6.57	507.32	15.06	4.16

总的来说,粉煤灰试样的变形相对均匀,各段的轴向变形随时间的变化曲线比较接近,而砂土试样段与段之间的差异则非常明显。应用图像测量技术可以得到各段土体自身的试样面积,由此计算得到的偏差应力各段之间有所不同。

表3列出了砂土和粉煤灰在试验结束时的应变最大值以及它们各自的破坏点强度取值(依据规范要求,试样过程中出现峰值取峰值作为破坏点;否则取轴向应变为15%时的强度作为破坏强度值)。从表上数据看,尽管砂土和粉煤灰轴向应变绝对量并不相同,但各段之间最大最小差值基本一致(砂土为3.277%,粉煤灰为3.062%)。而径向应变的情况则完全不同,砂土不同段之间最大最小差值高达13.091%,粉煤灰仅为1.669%。这一差异与图2中试验结束时土样的破坏形状吻合,主要原因是刚性试样帽和底座对不同土体的侧限作用并不相同。刚性试样帽、底座对试样侧向变形的影响在应变比较小的时候就开始,在试样受剪破坏时刻已经非常明显,这可以从表3中摘录的破坏点强度值反映出来。砂土各段之间破坏点强度值的最大差异高达8.0%,即使是变形相对比较均匀的粉煤灰,破坏点强度值差异也有4.3%。

在对相同装样密度、不同围压条件下的试验数据进行整理时发现,如果仅仅关注土体的强度,不同段土体的测量结果各自对应的 c 和 φ 值相差不大,它们与传统测量方法得到的强度值参数非常接近。但是当需要确定的土体参数与土样的变形测量结果密切相关时,它们之间的差别很大,有关这方面的内容,将在另文详细讨论。

5 结 语

(1) 实现了三轴土样整体以及不同部位轴向变形和径向变形的同步测量,可以研究三轴土样的局部变形特性。讨论了土样变形数字图像测量系统的理论精度,并用变截面铜柱作实际检测,确定图像测量系统横向变形和轴向变形测量的误差分别为 0.2×10^{-3} 和 0.5×10^{-3} 。

(2) 图像测量系统作为一套独立的土样变形测量系统,适用于各种三轴试验机。它不会干扰三轴试验的任何常规操作,可以在进行传统试验数据采集的基础上同时进行三轴土样轴向变形和径向变形图像测量信息的采集。

(3) 通过砂土和粉煤灰重塑样的固结排水剪试验,结合图像测量与传统测量方法,对三轴试验土样不同部位的局部变形特性以及整体平均值进行了比较分析,指出:①由于受刚性试样帽和底座的影响,三轴土样不同段土体之间的受力变形特性并不相同,不仅集中体现在试样最后的应变总量上,对试样破坏点强度取值也有较大影响,特别是对于某些变形不均匀的土体,这种影响效果会更明显;②不同段土体之间,径向应变的差异主要受刚性试样帽和底座的影响;而轴向应变的区别则是由于装样过程中层与层之间局部密度不一致引起的,它与装样密度、装样方法等密切相关;③轴向局部变形与整体平均值基本一致,但径向局部应变与整体平均径向应变的差别较大,特别是试样中部的径向应变会远远大于整体平均应变。

参考文献:

- [1] 邵龙潭,王助贫,韩国城,等. 三轴试验土样径向变形的计算机图像测量[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 337-341.
- [2] Finno R J, Harris W W, Mooney M A, et al. Shear band in plane strain compression of loose sand[J]. Geotechnique, 1997, 47(1): 149-165.
- [3] 董建国,李 蓓,袁聚云,等. 上海浅层黄色粉质黏土剪切带形成的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 23-27.
- [4] Rhee Y. Experimental evaluation of strain softening behaviour of normally consolidated Chicago clay in plane strain compression [D]. Evanston: Northwestern University, 1991.
- [5] Viggiani G, Finno R J, Harris W W. Experimental observations of strain localization in plane strain compression of a stiff clay [A]. Proc 3rd Int Workshop Localisation Theory for Soils and Rocks Aussois [C]. Rotterdam: Balkema, 1993. 189-198.
- [6] 邵龙潭,王助贫,韩国城,等. 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(待刊).