

文章编号: 1000-7598-(2006)01-0029-06

数字图像测量技术在土工三轴试验中的应用研究

邵龙潭¹, 孙益振¹, 王助贫², 刘永禄¹

(1.大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023; 2. 中国农业大学 土木与水利工程学院, 北京 100083)

摘 要:将数字图像处理技术应用于土工三轴试验土样变形测量, 提供了一种新的非接触变形测量手段。可消除传统三轴系统的变形测量误差, 可测量土样任意部分的局部变形、剪切带的形成和发展过程, 可定量分析橡皮膜嵌入的影响, 还可实时跟踪并纪录土样变形过程。文中讨论了图像测量结果与传统测量结果的差别, 指出对于标准的小三轴试样可以取中间 40 mm 左右的试样段进行变形测量以排除端部效应影响。

关键词:数字图像分析; 三轴试验; 变形测量; 试验技术

中图分类号: TU 22

文献标识码: A

Application of digital image processing technique to triaxial test in soil mechanics

SHAO Long-tan¹, SUN Yi-zhen¹, WANG Zhu-pin², LIU Yong-lu¹

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A new means with digital image processing technique for deformation measuring of soil specimen in triaxial test is provided. Using this technique, the error of the deformation measurement, which occurs in traditional triaxial test, can be eliminated. The local deformation of any part of the soil specimen can be measured at will. The coming into being and development of shear bands of the specimen can also be determined. The influence of membrane penetration in the test can be analyzed quantitatively. Meanwhile, the deformation process of the soil specimen can also be tracked and recorded. Comparison of the results by digital image processing technique and by traditional method shows that the former is more accurate. It is indicated that for standard small specimen, measuring the middle 40mm part's deformation can get rid of the influence of the end on the deformation.

Key words: digital image processing technique; triaxial test; deformation measurement; experimental technique

1 引 言

土是由固、液、气三相介质组成的特殊工程材料, 因为研究对象的复杂性, 决定了土工试验对土力学的发展具有重要意义, 实验土力学成为现代土力学的重要分支。三轴试验是测试土体应力应变和强度特性最常用和最重要的试验方法, 在现代土力学的发展中占有举足轻重的地位。

传统的三轴试验设备如图 1 所示, 由三轴压力室、轴向加荷系统、周围压力施加系统、孔隙水力量测系统等部分组成。试验过程中采用千分表或电磁位移传感器测量土样的轴向变形, 通过测量土

样的体积变化得到体积变形推算其径向变形, 体积变化是通过测量土样的排水体积得到的, 因此要求土样必须完全饱和。制备饱和土样不仅费时费力, 而且完全饱和通常也很难做到。因此, 传统的土样变形测量方法, 其缺点一是变形测量精度低, 轴向变形测量仪器的安放位置及方式决定了在测量结果中必然要包含加载杆、试样帽、透水石的变形, 还包含它们及其与土样之间的初始接触变形; 二是只能测量土样的整体平均变形, 因为受土样端部约束影响, 土样变形不均匀, 所以测量结果不能准确反映土体的实际变形性质; 三是只能用于饱和土的试验, 对于地球表面普遍存在的非饱和土, 必须加以

收稿日期: 2004-10-14

基金项目: 教育部高等学校骨干教师资助计划资助 (No.2000-65), 留学回国人员科研启动基金资助项目 (No.2001-345)

作者简介: 邵龙潭, 男, 1963 年生, 博士, 教授、博士生导师, 主要从事岩土力学测试技术与设备、节水灌溉、水土保持、岩土工程灾害与防治方面的研究工作。E-mail: shaolongtan@china.com

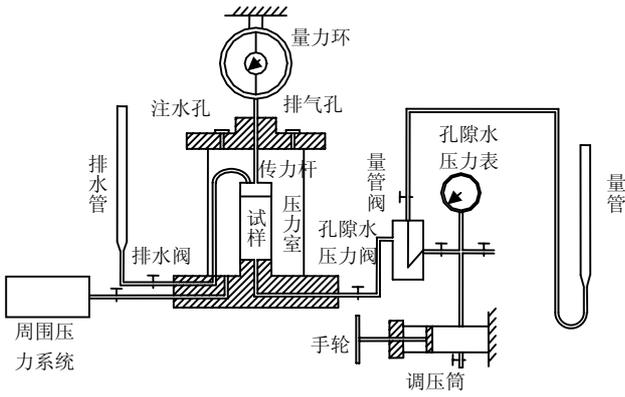


图 1 土工三轴试验仪示意图

Fig. 1 Sketch of instrument for soil triaxial test

改进才能应用。土工三轴试验存在的诸多问题影响了土体力学性能测量的可信性，因而也影响到土的应力应变和强度理论的研究^[1]。

准确测量土样的应力和变形是土的应力-应变本构关系和强度理论研究的基础。为了改进传统的变形测量方法，许多研究者做了大量的工作。其中最有代表性的是三轴土样局部位移传感器 LDT^[2]，其工作原理与 El-Ruwayih (1965) 设计的侧向应变仪相似，都是以电阻应变片测量跟随土样一起变形的固定在土样外壁的铜箔（或其它导体）的变形来确定土样的变形，这种测量方法具有很高的测量精度，一般可以达到 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 微应变，缺点是难以适应大变形，而且只能获得个别断面的变形，并且在密封室的水中测量时操作困难。

数字图像识别处理技术用于三轴土样变形测量具有非常明显的优越性，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试验中具有广阔的应用前景。

2 土样变形图像测量原理及系统组成

数字图像测量技术的发展为土工三轴试验提供了全新的变形测量手段，具有传统测量方法无法比拟的优越性。为此，笔者自主开发了三轴试验土样变形数字图像测量系统。主要工作包括：改进了传统的三轴压力室，实现了土样径向和轴向变形的测量^[3, 4]，完成了测量精度标定和与传统测量方法测量结果的对比^[5]。在此基础上应用该系统开展了传统测量系统难以做到的一些研究工作。

数字图像测量系统主要由 CCD 传感器、图像采集卡、计算机和计算机图像处理软件组成，如图 2 所示。数字图像测量系统通过对包裹土样的橡皮

膜的边缘和表面标志线的识别实现变形过程的测量。

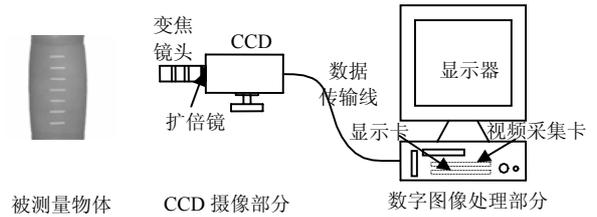


图 2 数字图像测量系统组成

Fig.2 Digital image processing system

为了精确测量三轴土样的轴向变形和径向变形，必须使土样成像清晰、边缘明显，为此对常规三轴剪切试验的配套设备进行了一些改进，主要包括：（1）采用黑色橡皮膜，使得橡皮膜与背景反差明显，边缘清晰，橡皮膜上加印白色标志线实现了轴向变形测量有了参照；（2）三轴压力室的改制，自行设计了一个可以考虑 90° 方向上的交叉测量的四方钢化玻璃压力室，同时也消除了圆形压力室的折射影响；（3）辅助照明设备，可以进一步提高图像质量，使三轴土样的轮廓和标志线更加清晰、分明。



图 3 三轴试验配套设备改制

Fig.3 The refit of triaxial equipments

图 4(a)是用计算机图像识别系统保存下来的一幅三轴土样图像，图 4(b)显示了三轴土样边缘和白色标志线位置灰度值的变化。从图中可以清楚看出，试体与其周边部分的灰度值在边缘位置有明显跃迁，满足阶跃边缘的条件。依据阶跃边缘的判断方法，可以按照一定的时间间隔，给出边缘位置的变化，得到土样的径向变形值。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。

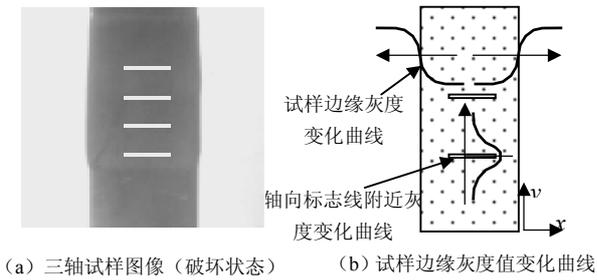


图 4 三轴试验土样变形数字图像测量

Fig.4 Image processing measurement of the deformation of soil specimen

采用亚像素插值运算和多次重复测量的方法提高测量的精度。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。从试验结果可以看出，亚像素插值算法检测物体边缘的重复性精度较好。表 1 中虽然只给出 2 个点的结果，但多点多次测量， 3σ 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（ 3σ 通常在 1.33 pixel 左右）有很大的提高。采用二次定标的方法^[8]解决了摄像视角的不同和变物距测量时图像畸变修正问题，用精确测量直径的变截面铜柱径向变形长度测量对畸变修正后的误差进行了检定，表 2 给出了测量结果。其中精确测量值是指在万能工具显微镜下测量得到的铜柱各截面的相对真值。从畸变修正后的结果来看，图像测量系统径向变形测量的绝对误差最大值为 0.009 4 mm，相对误差最大值为 0.235×10^{-3} 。

表 1 不同算法对应的 3σ 值

Table 1 The values of 3σ

	测量总次数	3σ
单像素法	20	1.330
亚像素插值法	20	0.0532

表 2 变截面铜柱直径测量结果

Table 2 Diameter measurement results of the columns

断面	精确测量	畸 变 修 正 后		
	/mm	图像测量值/mm	绝对误差/mm	相对误差/ 10^{-3}
1	35.988	35.986 8	-0.001 2	-0.033
2	39.116	39.125 2	0.009 2	0.235
3	42.002	42.008 1	0.006 1	0.145
4	44.006	44.010 3	0.004 3	0.098
5	46.000	46.005 4	0.005 4	0.117
6	49.997	50.005 1	0.008 1	0.162
7	48.040	48.030 6	-0.009 4	-0.196

目前使用的面阵 CCD 像素矩阵（宽×高）为 768×576 。在垂直方向上，除了像素点阵比水平方向少以外，其垂直测量性能也弱于水平方向，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} 左右。

3 计算机图像测量技术在土工三轴试验中的应用

与传统测量方法进行对比试验表明，数字图像测量系统的位移测量精度可以高一个数量级，而且具有很多优越性，如可消除土样加载部件之间的接触变形；可消除试样端部约束对测量结果的影响^[6]；可直接测量土样任意部分的局部变形；可直接测量原状土样，特别是非饱和土样的变形；可研究剪切带的形成过程；可定量研究橡皮膜嵌入的影响等。

3.1 三轴试验土样的端部约束与端部接触

三轴试样的端部接触问题是指在试验过程中，试样加载杆与试样帽之间以及试样两端的试样帽、透水石、滤纸和土样之间的接触面会产生压密变形，这种变形叠加到土样的变形上会影响测量结果的可靠性，也会降低试样体积变形测量的准确性。已经有研究人员采取各种措施减小端部接触引起的测量误差，如采用特殊的试样帽和活塞类型，在试验开始前要求轴向测力计有一微读数以表示传力杆与试样帽已经接触等，但这些措施并不能完全消除由于端部接触对轴向变形测量的影响。采用数字图像测量技术可以分段量测土样各部分径向和轴向变形，因此可以完全消除变形测量中端部接触的影响。

三轴试样的端部约束严重影响试样靠近端部土体的变形，试样的端部接触又导致传统变形测量中轴向应变和体积应变的测量误差。因此，切实有效地解决三轴试样的端部问题，对于研究试验土体的应力应变特性非常重要。排除试样端部约束段，直接量测三轴试样中部的轴向应变和径向应变应该是最合适的方法。以往的变形测量手段要实现上述目标比较困难，数字图像测量系统可以任意选择测量断面，实现三轴试样轴向变形和径向变形的非接触式直接测量，为三轴试验提供了新的、更加合理的变形测量手段。试验结果表明，对于直径为 39.1 mm，高度为 80 mm 的标准三轴试样，以高度中心为对称面取 40 mm 左右的试样段，基本上能够排除试样体两端刚性试样帽和底座的影响。对于变形较均匀的试样，刚性端部约束作用的影响高度可能更小，即使对于变形很不均匀的试样，上下两端的影响范围也在 20 mm 左右。应该说，越靠近试样中心部分的

土体受到三轴试样端部约束影响越小, 变形也越均匀, 但已有的研究表明, 试体本身的均匀性也会影响剪切过程中变形的均匀性 (特别是对轴向应变的影响较大)。因此, 为了排除三轴试样端部约束与端部接触的影响, 以试样高度中心分别向上、下各取 20 mm 高度, 即试样中心 40 mm 高度是一个比较合适的测量范围, 它不仅能排除端部的影响, 又可以在一定程度上消除试样局部密度不一致引起的测量误差。

3.2 三轴试验土样的局部变形图像测量结果研究

采用数字图像测量技术分段量测土样各部分的变形, 常用的邓肯-张本构模型参数试验结果与常规试验测量结果有很大差别。以福建标准砂、粉煤灰和 ISO 砂的系列三轴试验为例, 分别整理了传统整体测量结果与图像测量试样中部 4 段平均局部测量结果, 土体的强度参数 c , φ 根据库仑-摩尔包线确定, K , n , G , F , D , K_b 和 m 等 7 个试验常数的整理办法参考《土工试验规程》(SL237-1999) 中三轴压缩试验附录 a、b 中关于 $E-\mu$ 模型参数和 $E-B$ 模型参数的资料整理。表 3 是土样局部变形测量结果与整体测量结果的比较。

表 3 不同测量方法确定的土体邓肯-张参数
Table 3 Soil parameters of Duncan and Chang's Model

	标准砂 ($\rho_d=1.7 \text{ g/cm}^3$)		粉煤灰 ($\rho_d=0.8 \text{ g/cm}^3$)		ISO 砂 ($\rho_d=1.8 \text{ g/cm}^3$)	
	整体 平均	4 段 平均	整体 平均	4 段 平均	整体 平均	4 段 平均
c/kPa	0	0	0	0	0	0
$\varphi/^\circ$	39.3	38.9	33.1	32.5	38.8	38.5
R_f	0.88	0.94	0.58	0.61	0.80	0.88
D	22.53	32.75	3.78	4.51	17.02	23.58
K	1065.34	2285.07	43.66	48.60	737.39	1385.48
n	0.61	0.53	0.87	0.76	0.60	0.49
K_b	739.61	1205.46	13.29	14.51	624.60	997.70
m	0.31	0.51	0.86	0.73	0.38	0.50
G	0.35	0.49	0.14	0.16	0.32	0.37
F	0.11	0.24	0.04	0.09	0.06	0.08

结果表明, 抗剪强度值参数 φ 值相差很小, 它们与传统测量方法得到的抗剪强度值参数非常接近; 而初始弹性模量与初始体积模量的模型参数 K , n 和 K_b , m 的区别很大, 特别是 K 和 K_b 值, 因为消除了端部接触变形和端部约束的影响, 4 段测量平均值可以是整体平均测量结果的 2 倍。土体本构模型参数的差异对土体结构的应力应变分析会产生明显影响。用标准砂进行的模型试验与有限元计算

分析结果对比表明, 数字图像测量结果更合理。

3.3 三轴试验土样剪切带问题研究

土体的逐渐破损理论是当前岩土力学研究的焦点问题之一, 应变软化特性在三轴试验这一边值问题中, 表现为试样会出现剪切带。近年来, 国内外不少学者采用平面应变仪量测试样的局部侧向变形, 用于研究平面应变条件下试样剪切带的形成和发展过程。在三轴试验条件下, 由于试样剪切带位置出现的随机性, 用少数几个局部位移传感器很难准确地捕捉到三轴试样剪切带形成和发展的全过程。采用数字图像测量系统量测三轴试样的变形, 等价于在试样的轴向和径向安置了许多个非接触式局部位移传感器, 因此利用数字图像测量技术的这一特性, 只要三轴试样在剪切过程中出现剪切带, 都可以通过分析它们的轴向或径向变形来捕获剪切带的形成时间和发展规律。

图 5 给出了粉煤灰三轴试验过程中所观测到的几种破坏形态。图 6 (a) 为某一粉煤灰土样不同段轴向应变随时间的变化过程; 图 6 (b) 是该土样 4 段平均偏差应力-轴向应变关系曲线。从图 6 (a) 中可以看出, 由于剪切面的延伸方向经过 NO.4 土段, 因此在剪切带的形成和发育过程中, NO.4 土段的轴向应变会与其它 3 段 (NO.1、NO.2 和 NO.3) 有所区别。NO.1~NO.4 土段均位于试样中部, 能够排除由于试样端部约束引起的试样变形差异, 因此在初始时刻 4 段土体的轴向应变非常接近, 但当试样内开始出现剪切带后, NO.4 土段对应的轴向应变发生突变。剪切带开始形成时刻可以依据这一突变点来确定。随着加载过程的继续进行, 试样不同段土体的轴向变形也继续增加, 当剪切带发育完全成熟后, 土样开始沿着剪切带相对滑动, NO.4 土段的轴向应变出现线性增长, 而此时 NO.1, NO.2 和 NO.3 土段的轴向应变则几乎不发生变化, 可以把这一时刻作为剪切带完全形成的特征点。

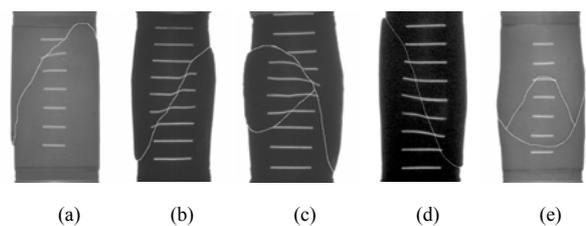
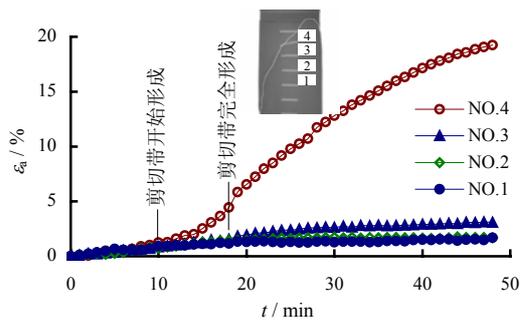
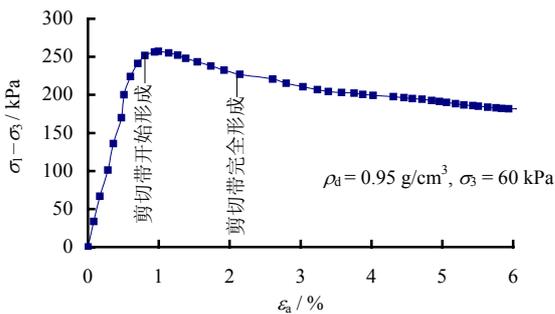


图 5 粉煤灰三轴试样剪切带破坏形态

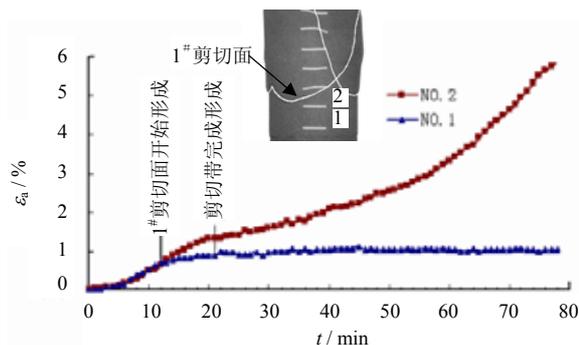
Fig 5 Shear band failure of fly ash triaxial specimen



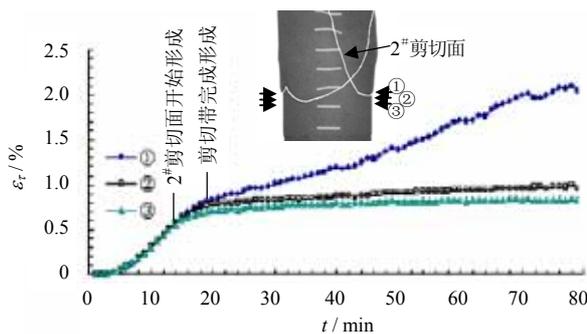
(a) 局部轴向应变随时间的变化规律



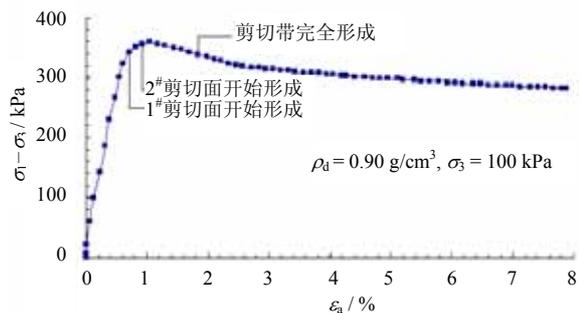
(b) 偏差应力-轴向应变关系曲线



(a) 局部轴向应变随时间的变化规律



(b) 局部径向应变随时间变化规律



(c) 偏差应力-轴向应变关系曲线

图 6 三轴试样剪切带形成和发展过程的确定(单一剪切面)
Fig 6 Confirm the start and development of shear band of triaxial specimen(single shear band)

采用同样的判别方法,可以确定 Sh-3 土样剪切带的形成和发展。因为粉煤灰三轴土样 Sh-3 在剪切过程中出现了多重交叉剪切面,需要逐一确定它们的初始形成时刻以及剪切带完全形成时间。图 7(a)用 NO.1 和 NO.2 两段土体的局部轴向应变确定 1#剪切面的形成和发展,图 7(b)用 3 个不同位置的径向应变确定 2#剪切面的形成和发展。事实上,数字图像测量系统在三轴试样变形测量的过程中,自动存储了所有轴向应变和径向应变的信息,在处理不同问题时,可以分别或同时调用相关的信息进行分析研究。图 7 给出了粉煤灰三轴土样 Sh-3 剪切带开始出现和完全形成的发展规律。在试样剪切带的形成和发展过程中可以发现,同一个试样中可以存在不同的剪切带,不同剪切带的出现存在时间上的先后次序,如上述试验中 1#剪切面比 2#剪切面形成的时间要早。

所有土样剪切带的形成和发展过程都可以用这样的方法判别。因此,采用数字图像测量技术,可以成功捕获三轴试样剪切带的形成和发展,这对于三轴试样剪切带的研究具有重要意义。

3.4 三轴试验土样膜嵌入问题研究

在土工三轴试验中,如果试样为粗颗粒的砂砾材料,由于围压作用以及橡皮膜的可延展性,试样固结时在和剪切过程中,橡皮膜会嵌入到试样表层

图 7 三轴试样剪切带形成和发展过程的确定(剪切面)
Fig 7 Confirm the start and development of shear band of triaxial specimen(multi shear bands)

的空隙里,且有效压力越大,颗粒越粗,橡皮膜的嵌入量越大。由于膜嵌入的影响,饱和砂土试样在不排水剪切时的体积是变化的;在固结排水剪切试验中,测量的排水体积中包含了膜嵌入的体积,这些由膜嵌入带来的体积误差会显著的影响砂土的试验特性^[7-9]。

受三轴试样变形测量手段的限制,在以往的研究中无法定量研究三轴试样的膜嵌入问题。利用数字图像测量技术直接量测试样白色标志线中心位置之间的距离以及各自对应的直径和排水管的液面变化,由此可以得到试验的体积变化和排水管的体积变化,而排水管的体积变化包括试样的固结体变和膜嵌入引起的体积变化,其中试样固结体变可由数字图像测量系统获得的数据计算得到,排水管变化

的体积减去试验固结变化的体积得到的就是橡皮膜嵌入到试样中的体积。

图8是采用该系统对不同围压下的等向固结试验中膜嵌入的定量分析结果。有了膜嵌入与围压的关系,在进行的固结排水剪切试验时,可以从中查到剪切开始时刻的膜嵌入量,以消除试样固结体变误差。

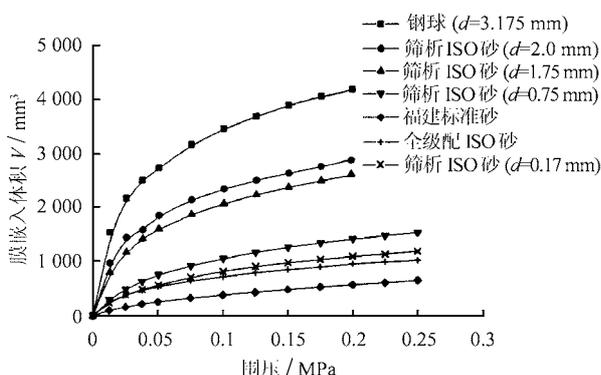


图8 不同围压下的膜嵌入

Fig.8 Membrane penetration in stated cell pressure

4 结论

数字图像测量技术的发展为土工三轴试验提供了全新的变形测量手段,具有传统测量方法无法比拟的优越性。三轴试验土样变形数字图像测量系统实现了土样径向和轴向变形的非接触式测量,应用该系统开展了用传统测量系统难以做到的一些研究工作,得到如下结论:

(1) 数字图像测量系统可以任意选择多个测量部位或测量断面,实现三轴试样轴向和径向变形的非接触直接测量,为土的三轴试验提供了新的、更加便捷的变形测量手段。大量的试验结果表明,对于直径为 39.1 mm,高度为 80 mm 三轴试样,以高度中心为对称面取 40 mm 左右的试样段,基本上能够排除试体两端刚性试样帽和底座的影响。

(2) 因为消除了端部接触变形和端部约束的影响,土样局部变形测量结果与整体测量结果是不同的。抗剪强度值参数 c , ϕ 值相差很小,而初始弹性模量与初始体积模量的模型参数 K , n 和 K_b , m 的区别很大,特别是 K 和 K_b 值,图像测量 4 段平均值甚至是整体平均测量结果的 2 倍。有限元计算与物理模型试验对比表明,用数字图像测量得到的计算参数更合理。

(3) 采用数字图像测量系统量测三轴试样的变形,等价于在试样的轴向和径向安置了许多个非接触式局部位移传感器,因此利用数字图像测量技

术的这一特性,只要三轴试样在剪切过程中出现剪切带,都可以通过分析轴向或径向变形来捕获剪切带的形成时间和发展过程,这对于三轴试样剪切带的研究具有重要意义。

(4) 利用数字图像测量技术通过试验和计算可以很容易得到试验材料在不同围压下的膜嵌入量。有了膜嵌入与围压的关系,在进行固结排水剪切试验时,可以剔除膜嵌入量,以消除试样固结体变误差。

参考文献

- [1] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [2] Goto S, Tatsuoka F, et al. A simple gauge for local small strain measurement in the laboratory[J]. *Soils and Foundations*, 1991, 31(1): 169-180.
- [3] 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.
SHAO Long-tan, WANG Zhu-pin, HAN Guo-cheng, et al. Digital image processing technique for measurement of the radial deformation of specimen in triaxial test[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2001, 23(3): 337-341
- [4] 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 Long-tan, WANG Zhu-pin, LIU Yong-lu. 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.
- [5] 王助贫, 邵龙潭, 刘永禄, 等. 三轴试样变形数字图像测量的误差和精度分析[J]. *大连理工大学学报*, 2002, 42(1): 98-103.
WANG Zhu-pin, SHAO Long-tan, LIU Yong-lu, et al. Error and accuracy analyses of digital image processing technique for measuring specimen deformation in triaxial test[J]. *Journal of Dalian University Technology*. 2002, 42(1): 98-103
- [6] 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 Zhu-pin, SHAO Long-tan. Research of influence of end effect of soil specimens in triaxial tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(3): 363-368.
- [7] Garga V K, Zhang H. Volume changes during undrained triaxial tests on sands[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, 34(5): 762-772.
- [8] 王助贫. 三轴试样变形的数字图像测量方法及其应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [9] 郭爱国, 茜平一. 三轴压缩试验中橡皮膜约束影响的校正[J]. *岩土力学*, 2002, 23(4): 442-445.
GUO Ai-guo, QIAN Ping-yi. Corrections for influence of membrane restraint in triaxial test[J]. *Rock and Soil Mechanics*. 2002, 23(4): 442-445.