

文章编号: 1000-7598 (2012) 01-0024-07

基于图像测量的饱和细砂排水剪切试验研究

郭 莹^{1,2}, 王 健¹

(1. 大连理工大学 建设工程学部土木工程学院 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 将计算机数字图像测量技术应用于土工静力三轴试验的土样变形测量, 实现了土样变形的非接触测量。针对南宁饱和细砂, 采用干装敲击法和控制不同初始成样含水率的湿装夯实法制备松砂和密砂试样, 联合采用数字图像测量技术与常规三轴变形量测方法, 在不同围压下进行了固结排水剪切试验。着重探讨了成样方法、初始成样含水率、密实程度、固结围压对两种量测方法所获得的应力-应变关系与邓肯-张模型中的切线模量 5 参数的影响。试验结果表明: 成样方法、初始成样含水率、密实程度和围压决定土样的剪切破坏形式, 影响应力-应变关系; 剪切破坏的形式以及剪切带位置的不同, 导致图像测量和常规三轴试验获得的轴向应变和偏应力数值均存在不同程度的差异; 邓肯-张模型 5 参数不仅受到试样的成样方法、初始成样含水率、密实程度的影响, 而且受到量测方法的影响。

关 键 词: 图像测量; 南宁饱和细砂; 排水剪切试验; 成样方法; 切线模量参数
中图分类号: TU 411 **文献标识码:** A

Study of drained shear tests of saturated fine sand based on digital image measuring

GUO Ying^{1,2}, WANG Jian¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: By the application of computer digital image measuring technique to sample deformation measurement of soil static triaxial test, non-contact measuring of soil specimen deformation was realized. For Nanning saturated fine sand, loose and dense samples were prepared respectively by dry-rapping method and wet-tamping method controlling the different initial moisture content. Combining the digital image measuring technique with traditional triaxial deformation measuring method, consolidation drained shear tests were made under different confining pressures. The influence of sample preparation methods, initial moisture content, degree of compaction and consolidation pressure on relation of stress and strain and different of tangent modulus 5 parameters of Duncan-Chang model by means with the two measurement methods are researched. The test results show that the forms of sample shear failure are decided by the sample preparation method, initial water content, density and confining pressure; and the relations between stress and strain are affected also. There were differences of axial strain and deviator stress by image measuring and traditional triaxial cause because the different shear failure forms and the location of shear band. Duncan-Chang model 5 parameters are affected not only by the sample preparation method, initial moisture content and, density, but also by the methods of measurement.

Key words: digital image measuring; Nanning saturated fine sand; drained shear test; sample preparation method; tangent modulus parameter

1 引 言

土力学的发展离不开土工试验研究, 土工试验在土力学理论的形成和发展过程中发挥了极其重要的作用, 其中土工静力三轴试验在土工试验中处于相当重要的地位。土工静力三轴试验推动了土体变

形与强度特性及本构关系的研究, 是土体的应力-应变特性、变形与强度特性测试的最重要和最常用的试验方法。土体的力学性能测试和土体的变形测试息息相关, 因此, 土体的变形测试是静力三轴试验中的关键环节。

常规静力三轴仪一般采用安装在压力室外的百

收稿日期: 2010-10-28

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(No. 50639010); 国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 50808033)。

第一作者简介: 郭莹, 女, 1963 年生, 博士, 副教授, 主要从事土工试验研究、土体特性研究工作。E-mail: dl-guoying@163.com

分表或位移传感器量测试样体的轴向变形, 采用量水管或体变计量测饱和试样体的体变, 试样体的径向变形则通过假定换算得到, 这种变形测量本身存在着诸多缺点和不足^[1]。轴向变形测量仪器的安放位置导致轴向位移测量结果中不仅存在位移传感器基座的移动误差, 而且存在底座与试样以及活塞与顶部试样帽之间的贴紧误差^[1]。变形测量的不准确会直接影响土体力学性质的试验结果, 影响土体应力-应变关系及强度特性的研究。

随着数字图像采集设备的不断更新, 图像测量系统分析及处理技术的不断发展, 将数字图像测量系统应用于土工静力三轴试验可以有效地解决上述问题。邵龙潭等^[2-4]自主开发了土工静力三轴试验的试样变形计算机数字图像测量技术, 并对端部约束以及系统的测量误差、测量方法进行了分析和讨论。该技术能够以非接触的方式测量受端部约束较小的试样中部位置的变形, 解决了常规三轴试验中变形测量的一些问题, 并引入了亚像素角点检测方法对试样变形进行了测量, 取得了很好的效果^[5-6]。

上述技术经过进一步改进开发, 在常规土工静力三轴仪量测系统装配了基于亚像素角点检测的数字图像测量系统, 联合采用两种变形测量方法量测轴向变形, 在不同成样方法、不同密实度、不同初始成样含水率、不同围压条件下, 针对南宁饱和细砂进行一系列的静力三轴固结排水剪切试验, 探讨了两种变形量测方法所获得的应力-应变关系曲线、邓肯-张模型中的切线模量 5 参数的差异, 并对产生差异的原因进行了分析。

2 数字图像测量系统组成与测量方法

2.1 系统组成

基于数字图像测量方法的土工静力三轴试验系统主要包括土工静力三轴仪和数字图像测量系统。其中数字图像测量系统基于亚像素角点检测技术进行局部变形测量^[5-6]。数字图像测量系统主要由基于 USB2.0/1394 数据传输技术的 CMOS 摄像机 (分辨率为 1 280×1 024 像素)、计算机和计算机图像处理软件组成。为了能够更加精确地测量试样变形, 减小误差, 对常规土工静力三轴仪进行了一系列的改造, 也对图像测量系统进行了改进和完善。

2.1.1 压力室的改造

常规三轴试验系统配套的三轴压力室是一个透明的有机玻璃圆筒。依据光学成像原理, 弧形表面对光的折射和反射会引起物体在光学系统中所成图像的扭曲变形, 会影响试样变形的测量精度。为了

在进行数字图像测量时消除该误差, 首先将圆形压力室改为量测面为有机玻璃透明平面, 其他方向为钢制圆柱形的封闭压力室, 如图 1 所示, 压力室圆柱面内侧喷涂黑色漆, 上下两端采用高流明的三基色平面灯源作为辅助照明设备。在三轴土样的径向变形测量中, 径向边缘角点是试样的外轮廓, 通过压力室后方的黑色背景可以改变背景色和试样径向边缘角点的对比度, 使得边缘角点性态稳定, 图像识别准确度增加。

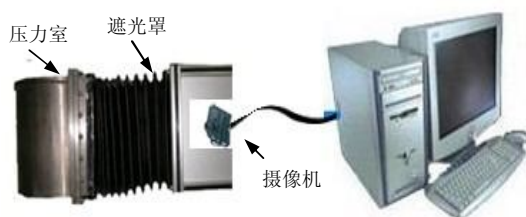


图 1 数字图像测量系统
Fig.1 Digital image measurement system

2.1.2 加设遮光罩

摄像机在对试样进行变形拍摄时, 外界光强弱的变化会对角点的识别产生影响, 因此在摄像机与试样之间加设了一个可伸缩的遮光罩, 如图 1 所示, 截面大小与压力室钢化玻璃平面大小一致, 可以扣在压力室量测平面, 遮光罩内放置摄像机, 这样里面就形成一个密闭的黑色环境, 能够有效地防止外界光源对角点识别精度的影响。

2.1.3 印制白色方块状标志的黑色乳胶膜

将用于包裹试样的乳胶膜加工成黑色, 并在表面印制白色方块状标志, 主要目的是使三轴试样表面及径向边缘形成高对比度的尖锐角点, 以便计算机精确识别并检测角点的位置。印制的白色方块采用白色弹力丝网印刷油墨, 该油墨不溶于水, 与乳胶膜具有几乎相同的弹性, 且对乳胶膜有很好的附着力, 黏结牢固, 能够很好地印制在黑色乳胶膜整个表面, 如图 2(a)所示。

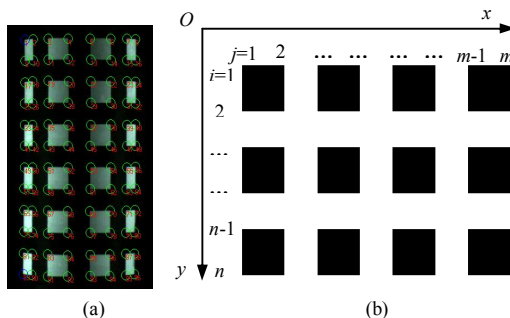


图 2 角点位置分布图
Fig.2 Distribution diagram of corner location

2.2 测量方法

如图 2(b)所示,通过亚像素角点检测方法可以确定包裹试样的橡皮膜表面每一时刻每个角点在平面上二维投影的 x 方向和 y 方向的坐标,这里 x 、 y 选用图像坐标系, x 方向定义为径向, y 方向定义为轴向,以此来计算试样表面的径向变形和轴向变形。考虑到试样表面是曲面,各角点与镜头间的物距在试验过程中是变化的,不是平面变形,因此在计算变形时只选用径向边缘两角点和轴向两端处于同一平面内与镜头物距相同的角点计算,并对镜头畸变误差、投影误差和摄像机偏心误差均进行了修正。

计算轴向应变时,选取要求获取变形结果的试样区域边界上处于同一纵向轴线两边缘角点位置的相应坐标数据,通过计算各个时刻 y 方向所有同一轴线端点 2 个角点的纵坐标差值相对于初始时刻的变化量与初始时刻之比求和取平均值求得,根据图 2(b) t 时刻的平均轴向应变 ε_a^t 为^[5-6]

$$\varepsilon_a^t = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{(y_{nj}^0 - y_{lj}^0) - (y_{nj}^t - y_{lj}^t)}{(y_{nj}^0 - y_{lj}^0)} \quad (1)$$

式中: y 为初始和 t 时刻的角点纵向坐标; n 为计算区域竖向角点总数; m 为横向角点总数。本文统一

采用 24 个方块作为轴向应变计算区域, $n=12$, $m=8$ 。

3 试验条件及试验方法

采用广西南宁港砂土,基本参数见表 1,根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2002)定名为细砂。三轴试样高度为 80 mm,直径为 39.1 mm,采用初始成样含水率 w_0 分别为 0%、6%、12%制备试样,其中 w_0 为 0%时采用干装敲击法制备试样,其余采用湿装夯实法制备试样,然后统一采用通加二氧化碳、无气水进行试样饱和,饱和度在 95%以上。控制成样相对密实度 D_r 分别为 30%和 70%,相应的干密度分别为 1.44 g/cm³ 和 1.58 g/cm³,围压分别为 100、200 和 300 kPa,进行一系列的静力三轴固结排水剪切试验,应变控制方式加荷,剪切速率控制为 0.4 mm/min。三轴仪主机为南京电力电机厂制造,采用步进电机按照固定剪切速率抬高下底座方式剪切,围压系统、轴力量测、轴向位移量测、体变量测系统、计算机控制与采集系统为南京土壤仪器厂有限公司制造,同时装配了基于亚像素角点识别的数字图像测量系统,该套系统由大连理工大学环境土力学研究室研制,利用常规静力三轴仪进行量测的同时利用数字图像变形量测系统进行试样的变形量测,以下试验数据分别简称常规和图测。

表 1 南宁细砂的基本参数
Table 1 Parameters of Nanning fine sand

试样	土粒相对	最大干密度	最小干密度	颗粒组成/%						不均匀系数	曲率系数
	密度 G_s	$\rho_{dmax}/(g/cm^3)$	$\rho_{dmin}/(g/cm^3)$	>2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.075 mm	<0.075 mm	C_u	C_c
细砂	2.65	1.79	1.34	1.8	1.3	6.1	14.9	72.8	3.1	1.96	0.88

4 应力-应变关系特性分析

图 3(a)、(b)、(c)分别给出了相对密实度为 30%,干装敲击法成样和初始成样含水率为 6%、12%的湿装夯实法成样,围压分别为 100、200、300 kPa 时两种测量方法获得的偏应力($\sigma_1-\sigma_3$)-轴向应变 ε_a 关系曲线图,干装法本文以初始成样含水率 w_0 为 0%表示。图 4(a)、(b)、(c)分别给出了相对密实度 70%,干法成样和初始成样含水率为 6%、12%的湿法成样,在 100、200、300 kPa 围压下两种测量方法的应力-应变关系曲线图。图中 N 代表常规结果, D 代表图测结果。下面分别就两种测量方法、不同成样方法等探讨试验结果的差异。

4.1 两种测量方法的影响

图 3 和图 4 中图像测量获得的最大轴向应变 ε_{amax} 普遍小于常规的结果,特别地,图测结果的应力-应变关系曲线的前端普遍比常规的结果陡,说明

图测获得的初始切线模量大于常规获得的结果,这种现象对于应变软化的曲线更加显著,而且随着围压的增大也更加显著。图测出现峰值时的应变值小于常规量测对应的应变值。图测的应力-应变曲线要比常规的更加平滑、连续,说明能够消除因试验仪器以及外界环境影响而产生的突变点,获得试验结果更可靠。

表 2 给出了常规量测与图测获得的偏应力最大值和最大轴向应变值的对比结果,同时给出了获得应力-应变曲线的形式以及由图测获得的图像判别的试样破坏形式。从表 2 的数值可以看出,在不同的相对密实度、成样方法、初始成样含水率和围压的情况下,图测偏应力最大值均低于常规偏应力最大值,并且同样试验结束时间,图测的最大应变值均小于常规控制最大应变值。两种量测方法获得的应力-应变曲线形式完全一致,密实砂样基本呈现应变软化,但是湿装法成样的小围压条件呈现应变硬

化;松砂样的应力-应变关系曲线形式受到成样方法的影响。应变软化的试样破坏形式均为剪切破坏,

如图 5(a)、(b)的图像测量出现明显的剪切带;应变硬化试样的破坏形式均为鼓胀破坏,如图 5(c)所示。

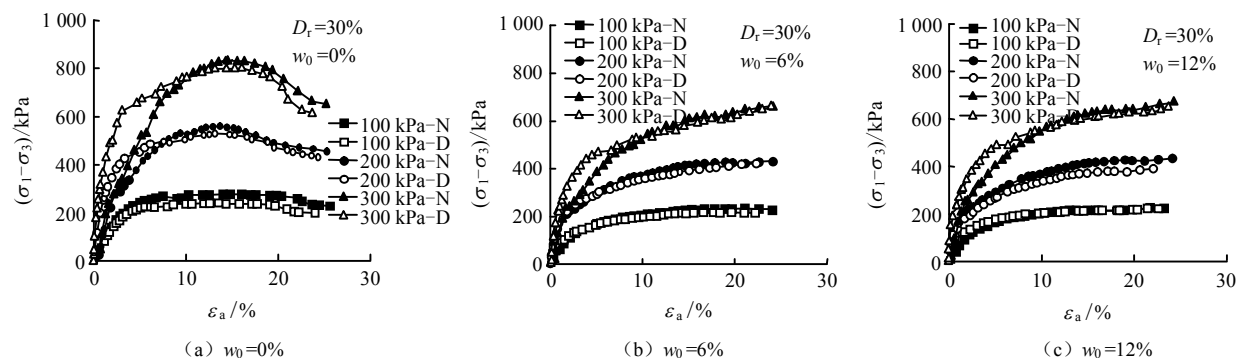


图 3 30%相对密度试样的 $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_a$ 关系曲线

Fig.3 The relation curves of $(\sigma_1-\sigma_3)$ vs. ε_a for 30% relative density samples

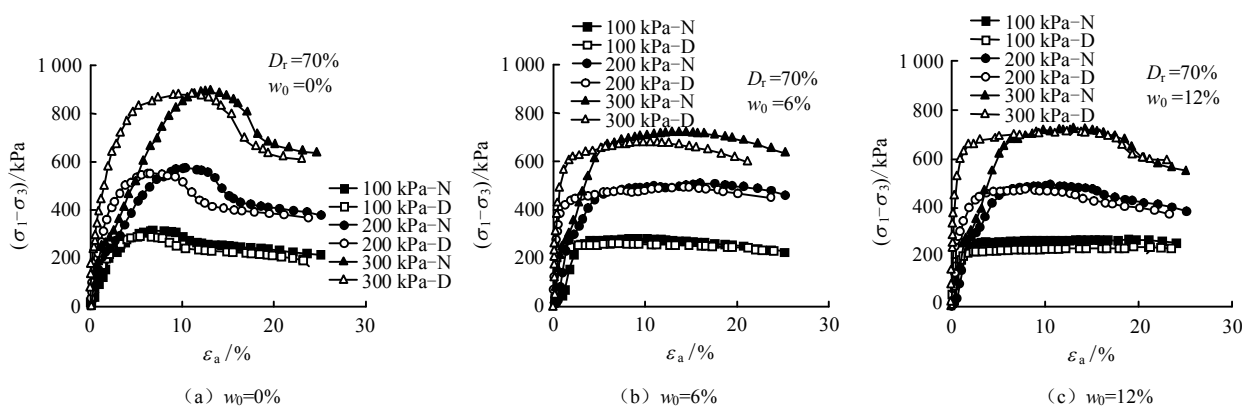


图 4 70%相对密度试样的 $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_a$ 关系曲线

Fig.4 The relation curves of $(\sigma_1-\sigma_3)$ vs. ε_a for 70% relative density samples

表 2 不同试验条件下的三轴试验结果对比

Table 2 The results comparison of triaxial test in different test conditions

试样 编号	相对密度 $D_r/\%$	初始成样含水 率 $w_0/\%$	围压 σ_3/kPa	常规偏应力最大值 /kPa	图测偏应力最大值 /kPa	控制实测最大 轴向应变/%	图测最大轴 向应变/%	应力应变 曲线形式	破坏 模式
050	30	0	100	278.3	240.9	25.45	23.80	应变软化	剪切
048	30	0	200	559.9	529.1	25.32	24.34	应变软化	剪切
049	30	0	300	832.6	800.2	25.35	23.77	应变软化	剪切
043	30	6	100	233.2	218.2	24.05	22.16	应变硬化	鼓胀
044	30	6	200	432.3	421.8	24.13	22.19	应变硬化	鼓胀
045	30	6	300	662.4	656.8	24.17	22.81	应变硬化	鼓胀
037	30	12	100	224.4	219.8	23.06	22.42	应变硬化	鼓胀
035	30	12	200	432.3	389.8	24.13	22.05	应变硬化	鼓胀
036	30	12	300	668.7	648.3	24.17	23.56	应变硬化	鼓胀
004	70	0	100	314.6	291.8	25.05	23.02	应变软化	剪切
005	70	0	200	575.1	552.8	25.12	23.59	应变软化	剪切
006	70	0	300	891.2	879.2	24.66	22.94	应变软化	剪切
032	70	6	100	279.6	259.8	25.01	23.76	应变软化	剪切
011	70	6	200	508.0	492.4	25.08	23.51	应变软化	剪切
012	70	6	300	719.3	669.6	25.12	21.04	应变软化	剪切
016	70	12	100	271.0	238.4	24.02	22.31	应变硬化	鼓胀
017	70	12	200	499.0	481.3	25.07	23.14	应变软化	剪切
018-1	70	12	300	715.6	702.1	24.17	16.79	应变软化	剪切
018-2	70	12	300	724.3	712.0	24.96	22.91	应变软化	剪切

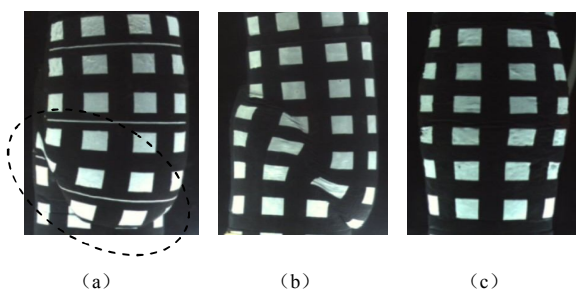


图5 图测试样典型破坏形状
Fig.5 Typical failure shapes of sample on digital image measurement

需要指出,表2中018-1试样的常规控制的最大应变和图测的最大应变相差很大,并且这种现象只偶然发生在剪切破坏中,通过采集的图像发现,这与剪切带出现的位置有关。通过分析图测结果发现,018-1试样出现了图5(a)所示侧面出现剪切带的剪切破坏模式。当侧面出现剪切带时,试样发生前后剪切,此时图像测量不能完整地量测到剪切带,由于试样下部第6行方块的部分角点被向前方剪切的部分试样挡住,如图5(a)中的虚线圆内,造成图测过程中下边缘角点较多缺失,此时图测系统会自动找一个与它原来位置接近的角点重新跟踪记录,当挡住的角点过多时,将引起较大的图像测量误差,导致轴向应变的计算误差,造成图测的最大轴向应变值减小。这种情况下图像测量结果不够准确必须弃用,重新进行试验,018-2就是重新试验获得的数据,图4(b)采用了018-2的试验结果。需要指出的是,并非所有剪切带出现在试样侧面的情况都存在这一问题,出现这种现象只是极个别现象。对于图5(b)、(c)则没有这个问题,6个方块的数据完整,图像测量结果比较可靠。

4.2 成样方法的影响

针对饱和中砂采用干装敲击法、控制同样初始含水率的湿装夯实法和水下沉积法等实验室常用的成样方法制备制样进行的静力三轴固结排水剪切试验,结果表明^[7],成样方法对饱和中砂的静力变形与强度特性均产生显著影响。

采用干装敲击法和控制不同初始含水率的湿装夯实法制备南宁细砂试样,图3和图4给出了相对密度分别为30%和70%的干装法和初始成样含水率为6%、12%湿装法的试验结果,表2列出了全部试样获得的最大偏应力、应力-应变曲线形式与破坏模式。

由图3和表2可见,对于松砂,干装法获得的应力-应变关系曲线以应变软化为主要特征,其破坏

模式均为剪切破坏。但是这种软化现象比较特别的是,采用两种测量方法获得结论相同,在轴向应变为15%之前基本呈现应变硬化的现象,应变软化出现在较大轴向应变时。初始含水率对于应力-应变形式、破坏模式以及偏应力最大值的影响不大,但是与干装法明显不同的是,湿装法获得的应力-应变曲线均为应变硬化形式,破坏模式均为鼓胀破坏。而且数值上看,同样围压条件下,干装法偏应力的最大值均大于湿装法的结果。说明两种成样方法制备试样的结构存在差异。值得注意的是,在较大轴向应变条件下,干装法和不同初始成样含水率的湿装法获得的偏应力基本接近,说明初始制备试样的不同结构性影响在大应变时将被消除。

由图4和表2可见,对于密砂,干装法和不同初始成样含水率的湿装法获得的应力-应变关系曲线均以应变软化为主要特征,其破坏形式基本为剪切破坏。但是初始含水率为12%、围压为100 kPa的结果是个例外,此时呈现应变硬化现象,图测的图像亦为鼓胀破坏。其他软化现象依然存在一定的差异,干装法的峰值出现在较小轴向应变时,相对而言,图测法获得的峰值点出现更早,而湿装法的软化现象有时并不明显,如6%含水率时在轴向应变为15%之前基本呈现应变硬化的现象,应变软化出现在较大轴向应变时。说明湿装法的应力-应变形式、破坏模式与围压和初始含水率均存在相关性,初始含水率对于偏应力最大值的影响不大。从图4和表2数值对比看,干装法的偏应力最大值依然普遍大于湿装法的结果,说明两种成样方法制备密砂试样的结构依然存在差异。同样值得注意的是,在较大轴向应变条件下,干装法和不同初始成样含水率湿装法获得的偏应力也有趋于一致的趋势,进一步说明初始制备试样的不同结构性影响在大应变时将基本消除。不仅如此,在较大应变时松砂和密砂的偏应力值也基本趋于一致。

5 邓肯-张模型中的切线模量参数

在弹性理论范畴内,邓肯-张非线性弹性模型能较好地描述土的应力-应变关系的非线性,在国内外的土工计算中得到广泛应用,其中切线模量参数得到比较广泛的应用。切线模量 E_t 的计算公式中存在5个试验参数,依次为:模量参数 K 、 n ,强度指标 c 、 ϕ ,破坏比 R_f 。邓肯-张模型参数的变化会对土工问题计算的结果产生较大影响,一般认为参数 c 、 ϕ 、 R_f 、 K 的敏感性较强^[8]。关于邓肯-张模型参数的确定方法,模型的提出者指出,模型参数必须

且只需用常规三轴试验来确定。整理三轴试验结果时,分别绘出 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 、 $\varepsilon_a / (\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 、 $\tau - \sigma$ 关系曲线,即可确定邓肯-张模型切线模量 5 个参数,即 K 、 n 、 c 、 φ 、 R_f 。

邓肯-张模型参数的整理是建立在三轴试验结果基础之上的,因此,三轴试验的各个环节,从取样、制样、试验过程量测精度等环节都能对试验结果产生影响。先进的试验仪器和精密的测量手段是三轴试验的发展趋势,从而得到更加精确的试验结果,模型参数也会更符合实际情况。孙益振等^[9]曾应用初期的数字图像测量技术对邓肯-张模型参数进行研究,发现不同测量方式得出的模型参数值差

别很大。现根据采用常规和基于亚像素角点检测方法图测获得的前述试验结果整理邓肯-张模型中的切线模量参数并进行分析。

通过两种测量方法得到不同相对密实度、干装敲击法和控制不同初始成样含水率的湿装法的邓肯-张模型 5 参数整理结果见表 3,整理方法按照《土工试验规程》(SL237—1999)。依据规程破坏点的选取原则为,当应力-应变曲线出现峰值时取峰值,无峰值时取 15%应变对应的偏应力。由表 3 可见,不仅密实度、成样方法、初始成样含水率对模型参数具有不同程度的影响,不同变形量测方法之间也存在很大差异。

表 3 不同测量方法得到的邓肯-张模型参数

Table 3 Parameters of Duncan-Chang model by different measurement methods

$D_r / \%$	$w_0 / \%$	c / kPa		$\varphi / (^\circ)$		R_f		K		n	
		常规	图测	常规	图测	常规	图测	常规	图测	常规	图测
70	0	0	0	36.8	36.6	0.41	0.54	140	245	0.45	0.84
70	6	0	0	33.6	33.1	0.48	0.68	169	794	0.48	0.89
70	12	0	0	34.0	33.8	0.41	0.67	214	776	0.27	0.81
30	0	0	0	35.6	35.1	0.84	0.91	100	199	0.67	0.90
30	6	0	0	31.1	30.2	0.79	0.89	90	100	0.39	1.00
30	12	0	0	31.2	30.8	0.61	0.60	111	125	0.64	0.65

两种密实度条件下,干装法的抗剪强度指标 φ 值普遍大于湿装法,松砂相差数值更大,不容忽略;图测获得的抗剪强度指标 φ 值普遍小于常规结果,但数值相差不大可以忽略,对湿装法而言初始成样含水率对强度指标基本没有影响。

对于 $D_r = 70\%$ 的密砂试样,由两种测量方法获得的其余模型参数 R_f 、 K 、 n 均存在较大的差异,图测获得的破坏比 R_f 、 K 和 n 值均大于常规获得的结果,而且差异较大, K 值最大相差甚至接近 5 倍。这与前述分析相吻合。由图 4 可见,对于密砂其应力-应变关系曲线呈应变软化,图测获得的应力-应变关系曲线的前端斜率比常规的结果大,且随着围压的增加,其斜率增大更加明显,因而导致 n 值增大。成样方法和初始含水率对破坏比 R_f 和 n 值影响不大,但是对 K 值有一定影响,湿装法的 K 值大于干装法。

对于 $D_r = 30\%$ 的松砂试样,可以认为,成样方法、初始含水率、测量方法对模型参数 R_f 、 K 、 n 的影响相对密砂均有所降低。总体上看,图测获得的 R_f 、 K 、 n 数值依然普遍大于常规获得结果,但是两种测量方法获得的湿装法 R_f 、 K 比较接近。这与前述分析相吻合,如图 3 所示,对于湿装法成样的松砂,应力-应变关系曲线呈应变硬化,图测获得的

应力-应变关系曲线的前端斜率尽管也比常规的结果大,但增加的幅度明显小于应变软化的结果。对于干装法成样的松砂,应力-应变关系曲线呈应变软化,图测获得的 K 值是常规结果的 2 倍。

6 结 论

数字图像测量技术的应用为土工三轴试验提供了全新的变形测量手段,对常规三轴仪进行改造后安装了计算机数字图像测量系统,联合采用常规的量测手段和基于亚像素角点检测的图像测量技术进行试样的变形量测。针对南宁细砂采用两种成样方法、两种初始成样含水率制备松、密两种试样,进行了多个围压条件下的固结排水剪切试验,对两种变形测量方法得到的应力-应变曲线、邓肯-张模型中的模量 5 参数进行了对比分析,得到如下结论:

(1) 通过对两种测量方法获得的应力-应变特性比较后发现,图像测量的应力-应变曲线要先于常规的应力-应变曲线发展,且偏应力最大值也稍低于常规。当试样的剪切带出现在侧面,并且有多数角点被向前方剪切的土体遮住时,图测的轴向应变最大值相比常规结果存在较大程度的减少,此时试验结果应弃用。

(2) 两种量测方法获得的南宁细砂的应力-应

变关系均表明,砂样的成样方法对应力-应变关系具有显著影响,同样条件下干装法获得的偏应力最大值普遍高于不同初始成样含水率湿装法的结果,湿装法的初始成样含水率对偏应力最大值的影响不大。特别地,干装法的松砂样呈现应变软化特征,图像测量结果显示均出现剪切破坏;湿装法试样则均呈现应变硬化现象,图像显示均出现鼓胀破坏。在较大应变、相同围压条件下,不同成样方法、不同制样密实度、不同初始成样含水率的偏应力数值基本趋于一致,说明此时制备试样的初始结构性影响基本消除。

(3) 两种密实度条件下,干装法的抗剪强度指标 φ 值普遍大于湿装法;常规获得的抗剪强度指标 φ 值普遍大于图测结果,但数值相差不大,可以忽略,湿装法的初始成样含水率对强度指标基本没有影响。

(4) 成样方法、初始成样含水率和测量方法对于密砂的破坏比和模量参数影响较大,图测获得的数值均大于常规结果;成样方法和初始含水率对破坏比 R_f 和 n 值影响不大,但是对 K 值有一定影响,湿装法的 K 值大于干装法。成样方法、初始含水率、测量方法对松砂的破坏比和模量参数的影响相对密砂均有所降低,这种影响的大小与应力-应变关系曲线形状和破坏模式有关。

参考文献

- [1] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利水电出版社, 1983.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 邵龙潭, 王助贫, 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.
SHAO Long-tan, WANG Zhu-pin, LIU Yong-lu, et al. 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.
- [5] 邵龙潭, 董建军, 刘永禄, 等. 基于亚像素角点检测的试样变形图像测量方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 329—333.
SHAO Long-tan, DONG Jian-jun, LIU Yong-lu, et al. Digital image measurement method of measuring triaxial specimen deformation based on sub-pixel accurate corner locator[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 329—333.
- [6] 董建军, 邵龙潭, 刘永禄, 等. 基于图像测量方法的非饱和压实土三轴试样变形测量[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 618—622.
DONG Jian-jun, SHAO Long-tan, LIU Yong-lu, et al. Measurement of deformation of unsaturated soil triaxial specimen based on digital image measurement method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(6): 618—622.
- [7] 郭莹, 陈珍. 成样方法对饱和中砂静力三轴固结排水剪切试验结果的影响[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增刊2): 306—311.
GUO Ying, CHEN Zhen. The influence of sample-preparing methods on experiment results of saturated medium sand in static triaxial consolidation drained shear test[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2010, 43(Supp. 2): 306—311.
- [8] 尹蓉蓉, 朱合华. 邓肯-张模型参数敏感性分析[J]. 地下空间, 2004, 24(4): 434—437.
YIN Rong-rong, ZHU He-hua. Analysis of parameters sensitivity of Duncan-Chang model[J]. **Underground Space**, 2004, 24(4): 434—437.
- [9] 孙益振, 邵龙潭, 李根华. 基于数字图像测量的Duncan-Chang模型参数研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 335—338.
SUN Yi-zhen, SHAO Long-tan, LI Gen-hua. Study on Duncan-Chang model parameters based on digital image processing method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 335—338.