

文章编号: 1000-7598-(2006) 08-1335-04

基于数字图像测量的 Duncan-Chang 模型参数研究

孙益振¹, 邵龙潭¹, 李根华²

(1. 大连理工大学 工程力学系 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024; 2. 中国联合工程公司, 杭州 310022)

摘 要: 利用三轴土样变形数字图像测量系统进行研究, 发现不同测量方式得出的 Duncan-Chang 模型参数的差别很大。分析得出, 数字图像局部变形非接触式测量与传统整体测量方式是导致模型参数存在差异的主要原因。数值算例说明了模型参数差别对位移计算结果的影响程度, 变形数字图像测量得到的模型参数 K 和 K_b 比传统测量的结果高 2~3 倍, 相应的位移计算结果是传统测量方法模型参数计算得到结果的一半。

关 键 词: Duncan-Chang 模型; 三轴试验; 数字图像测量

中图分类号: TU 411.4

文献标识码: A

Study on Duncan-Chang model parameters based on digital image processing method

SUN Yi-zhen¹, SHAO Long-tan¹, LI Gen-hua²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. China United Engineering Company, Hangzhou 310022, China)

Abstract: Digital image processing technique is used to study the Duncan-Chang model parameters based on the triaxial tests. The research has recorded valuable data using the newly developed measurement method. There are great differences between the Duncan-Chang model parameters conducted from the digital image processing technique and traditional measurement methods. The reasons that cause by the different measurement technique and measurement area are analyzed. The influence degree of parameters variety on displacements results is discussed through numerical analysis. As a result of our experiments, we conclude that the parameters K and K_b from digital image processing technique are two to three times higher than the values from traditional method. Furthermore, the displacements are about half of the value calculated from the traditional method.

Key words: Duncan-Chang model; triaxial test; digital image processing

1 引 言

Duncan-Chang 双曲线模型是一种建立在广义 Hooke 定律基础上的非线性弹性模型, 是 Duncan 等人用有限单元法对土石坝等土工建筑物中应变强化土料作非线性形的应力-应变分析而提出的一个简单实用的模型, 它考虑了工程实践经验, 参数可用常规试验技术获得, 其参数的物理意义明确, 易于确定和掌握, 便于在数值分析中应用。但大量试验证明: 由于取样、制样、试验仪器、试验方法与过程、试验人员操作熟练程度和整理分析资料等因素, 使 Duncan-Chang 双曲线模型的参数变化较大, K 值可存在成倍甚至成量级差别^[1~3], 其计算结果差

别也较大。要得到高精度的参数, 必须有先进试验仪器和测量技术。国内外许多学者在三轴试验设备和测试技术方面进行了研究, 如英国学者 Burland (1982 年)^[4]开发的电平式应变仪(Electrolevel gauge); 美国学者 Clayton(1989 年)^[5]开发的高效半导体局部应变计; 日本学者 Goto 与 Tatsuoka(1991 年)^[6]开发的局部位移计 LDT 等。而图像分析和处理技术是 20 世纪 80 年代后期才兴起的一门新的计算机应用技术, 大连理工大学环境土力学研究室成功地图像分析和处理技术应用于三轴试验, 研制开发了三轴土样变形数字图像测量系统^[7~11], 解决了常规三轴试验在测试方法和手段上存在的不足, 实现了三轴试验土样局部变形的非接触式测量, 进一步提高

收稿日期: 2004-10-22

修改稿收到日期: 2005-03-14

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: 孙益振, 男, 1976 年生, 博士, 讲师, 主要从事土体本构模型试验方面的研究工作。E-mail: willsun@dl.cn。

了三轴测试的精度及其结果的合理性、准确性和可靠性。为了实现图像测量识别试样边缘和轴向尺寸变化,对试验用的橡胶膜进行了改进,在黑色橡胶膜上印刷白色标志线,同时还增加了照明系统,使试样成像更清晰。图 1(a)是用三轴土样变形数字图像测量系统保存下来的一幅图像,图 1(b)显示了三轴试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,试样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,得到试样的径向变形值。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。在假定橡皮膜和试样同步变形的前提下,标志线之间的高度变化即为该段土体的轴向变形量。

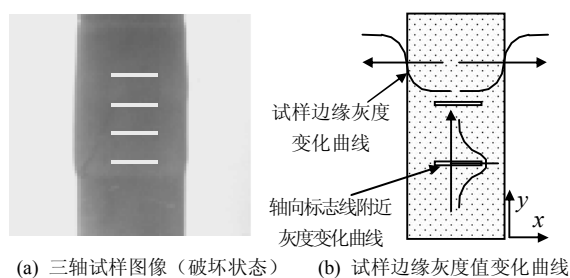


图 1 三轴试验试样变形数字图像测量

Fig.1 Image processing measurement of the deformation of soil specimen

本文将利用变形数字图像测量系统,通过室内静三轴试验进行 Duncan-Chang 模型参数的研究。对比两种方法求得的模型参数,通过具体算例,说明实测参数的不同,对位移计算结果的影响程度也不同。

2 Duncan-Chang 模型及其参数

Duncan-Chang 模型是建立在线性应力-应变模型的基础上,应用常规三轴压缩试验得到的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 一组试验曲线 ($\sigma_3 = \text{常数}$),找出其共同的数学公式,并从公式导出切线弹性模量 E_t 公

式。同时,结合试验所得的体积应变 ε_v 与轴向应变 ε_a 的关系曲线,导出泊松比 μ_t ,并以此作为计算依据,这个模型称为 $E - \mu$ 模型。在应用中发现 μ_t 公式不够完善,Duncan 和 Wong (1980 年)将 μ_t 改用体积压缩模量 B_t ,即采用 $E - B$ 模型^[12]。整理静三轴试验资料时,分别绘出 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a, \varepsilon_a / (\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a, \lg E_t - \lg \sigma_3, \varepsilon_a - \varepsilon_r, \varepsilon_r / \varepsilon_a - \varepsilon_r, \mu_t - \lg \sigma_3, \tau - \sigma$ 关系曲线 (E_t, μ_t 分别为初始切线模量和不同围压作用下的初始泊松比),即可确定 Duncan-Chang 模型参数值,即 $c, \varphi, K, n, G, F, D, K_b$ 和 m 共 9 个试验常数^[13]。

模型参数的整理是建立在三轴试验成果基础之上的,因此,三轴试验的各个环节都可能影响到试验结果,进而导致参数整理的误差。取样、制样、试验仪器、试验方法和试验过程等因素有些可以通过规范进行约束,以获取统一标准下的试验参数,但更先进的仪器和测量方法的应用是科学发展的趋势,精确、合理的试验数据整理得出的模型参数更接近真实值,利用此参数的计算结果也将更符合实际。

3 试验研究

3.1 试验设计

为了研究不同的测量方法对砂性土体的受力变形特性产生的差异及对模型参数计算带来的影响,选用了福建标准砂、石佛寺细砂(以下分别简称为标准砂和细砂)进行试验研究,其基本参数见表 1,试验控制密度和围压见表 2。三轴试样均采用小试样:直径为 39.1 mm,高为 80 mm,依据土工试验规程^[13]要求进行成样和饱和。在配置了变形图像测量系统的三轴仪上进行了一系列不同围压下的饱和试样固结排水剪切试验。利用变形数字图像测量系统来记录试样尺寸和排水液面的变化,测量数据中既包含了传统测量方式的试验数据,又有非接触测量方式获得的试样局部变形试验数据。因此,可以进行 2 种变形测量方式的对比研究。

表 1 试验用土的基本参数

Table 1 Parameters of soils

试样	比重 d_s	最大孔隙比 $e_{\max}$	最小孔隙比 $e_{\min}$	颗粒组成 /%							不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
				>2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.075	<0.075		
标准砂	2.65	0.79	0.50	0.01	0.02	56.98	35.52	7.44	0.03	0.00	2.33	1.04
细砂	2.64	0.82	0.50	0.02	0.01	0.07	3.96	76.13	10.96	8.85	2.05	1.15

表 2 试验的控制密度和围压

Table 2 Controlling densities and cell pressures

控制干密度 $\rho_d / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$		围压 σ_3 / kPa
标准砂	细砂	
1.564	1.536	100,150,200,250
1.611	1.587	
1.661	1.641	

3.2 试验资料整理

所进行的三轴试验中传统变形测量方法和变形数字图像测量方法只是在测量位置和测量方式上有所不同，测量的变量意义上是统一的，变化趋势也一致。因此，可以采用相同的参数整理公式进行参数分析。

传统测量数据是指采用传统测量方法，试样的轴向变形通过量力环上的百分表或位移传感器测量得到，轴向应变为试样整体变形的平均轴向应变。体积应变通过饱和试样的体积排水量测定。径向应变则是通过轴向应变和体积应变换算得到，也是试样整体的径向应变平均值。计算主应力差时的试样受力面积为试样整体的平均受力面积。而数字图像测量数据则为排除试样两端受约束段后的试样中部的局部尺寸测量值，轴向应变和径向应变均由局部测量段土体的轴向变形和径向变形的平均值直接计算得到，用局部测量段试样的平均受力面积计算对应的主应力差。

不同测量方法得到的两种土样不同密度的 Duncan-Chang 模型参数整理结果见表 3 和表 4。从表中数据看，除了强度参数 c ， φ 的差异不大外，其余各参数差异都比较明显，初始弹性模量与初始体积模量的模型参数 K ， n ， K_b ， m 的差别很大，特别是 K 和 K_b 值，图像测量结果最大可以达到传统测量结果的 2.64 倍，并且随密度的增大，参数 K 的测量差异有增大的趋势（见表 5、表 6）。

表 3 不同测量方法得到的标准砂的 Duncan-Chang 参数

Table 3 Parameters of Duncan-Chang Model for the standard sand in different measurement methods

参数	$\rho_d / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$					
	1.564		1.611		1.661	
	传统	图测	传统	图测	传统	图测
c / kPa	0	0	0	0	0	0
$\varphi / (^\circ)$	34.00	33.00	35.00	34.00	37.00	36.50
R_f	0.91	0.98	0.89	0.97	0.80	0.92
D	9.20	12.19	16.47	16.69	24.22	33.93
K	897.43	1 992.05	802.05	1 880.62	781.99	2 066.81
n	0.51	0.57	0.70	0.77	0.75	0.72
K_b	503.73	954.11	567.28	1 020.00	537.65	760.68
m	0.51	0.61	0.45	0.77	0.43	0.76
G	0.39	0.53	0.37	0.50	0.33	0.53
F	0.09	0.21	0.16	0.27	0.08	0.22

表 4 不同测量方法得到的细砂的 Duncan-Chang 参数

Table 4 Parameters of Duncan-Chang model for the fine sand in different measurement

参数	$\rho_d / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$					
	1.536		1.587		1.641	
	传统	图测	传统	图测	传统	图测
c / kPa	0	0	0	0	0	0
$\varphi / (^\circ)$	34.00	32.00	35.00	34.00	37.00	36.00
R_f	0.85	0.88	0.86	0.90	0.85	0.90
D	4.55	8.92	9.36	11.68	17.73	19.69
K	264.91	389.49	429.04	536.17	635.48	927.90
n	0.70	0.37	0.64	0.55	0.70	0.71
K_b	189.58	198.34	265.83	295.53	445.14	589.39
m	0.61	0.21	0.41	0.53	0.32	0.57
G	0.34	0.37	0.35	0.37	0.27	0.42
F	0.12	0.13	0.17	0.18	0.11	0.13

表 5 不同测量方法标准砂参数 K 和 K_b 的比较

Table 5 Difference of the parameters K and K_b for the standard sand

参数	$\rho_d / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$		
	1.564	1.611	1.661
$K_{\text{图测}} / K_{\text{传统}}$	2.22	2.34	2.64
$K_{b\text{图测}} / K_{b\text{传统}}$	1.89	1.80	1.32

表 6 不同测量方法细砂参数 K 和 K_b 的比较

Table 6 Difference of the parameters K and K_b for the fine sand

参数	$\rho_d / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$		
	1.536	1.587	1.641
$K_{\text{图测}} / K_{\text{传统}}$	1.47	1.25	1.46
$K_{b\text{图测}} / K_{b\text{传统}}$	1.05	1.11	1.32

变形数字图像测量方法是直接量测试样中部的径向和轴向变形，可以克服三轴试样轴向和径向应变传统测量方法中一些固有的缺点，减小或完全消除试样端部约束和端部接触引起的测量误差^[8]，尤其是克服了试样帽、底座、滤纸和试样之间的接触间隙带来的传统测量误差，使得在相同的偏差应力作用下，变形初期传统测量得到的试样整体平均轴向应变是相应用图像测量得到的局部平均轴向应变的 1 倍以上，砂土试样的初始切线模量 E_t 也有很大差别，由此导致砂土参数 K 和 n 的差别；同理，由于用两种不同的测量方法确定的试样整体平均体变与试样局部平均体变以及它们各自对应的应力水平相差较大，从而依据公式 $B_i = (\sigma_1 - \sigma_3) / 3\varepsilon_v$ 计算得到的初始体积模量 B_i 也存在差异，最终导致参数 K_b 和 m 的不同。

从表 7 中可以看出, 不论是传统方法还是数字图像测方法, 试验得出的破坏比 R_f 随 σ_3 增大而减小, 故在采用 Duncan-Chang 模型计算分析中 R_f 取值为常数是适当的。

表 7 不同测量方法标准砂参数 R_f 的比较
Table 7 Difference of the parameters R_f for the standard sand

R_f 值	σ_3 /kPa		
	100	150	200
传统	0.83	0.82	0.76
图测	0.94	0.94	0.87

4 模型参数对计算结果的影响

模型参数取值不同, 得出的计算结果也会有所差异, 而且计算中某些参数的变化将对计算结果产生显著影响, 甚至成倍变化, 这也就是所谓的参数敏感性。为考察两种不同测量方法得到的参数对计算结果的影响, 利用 Geo-slope 程序, 采用两种测量方法各自得到的 Duncan-Chang 模型参数, 计算一个油罐在均质地基上的沉降问题。地基材料选用福建标准砂, 干密度为 1.611 g/cm^3 , 模型参数见表 3, 计算结果见表 8。从表 8 可以看出, 不同测量方法得到的参数对位移计算结果的影响很大, 二者相差将近一倍, 采用常规测量方法得到的参数值计算的沉降偏大。由此可见, 模型参数的取值精确与否对计算结果的合理性意义非常明显。计算结果的差异包含了所有参数的影响, 为考察某个参数对计算结果的敏感性, 分析时只对所考察的参数进行变化, 其余参数保持不变, 即保持试验整理值。根据表 3 中干密度为 1.611 g/cm^3 的一组数据进行计算分析, 结果见图 2 和图 3。

表 8 最大水平位移和竖向位移计算结果
Table 8 Results of maximum displacements

方法	$S_{h \max}$ /mm	$S_{h \max}$ 变化率/%	$S_{v \max}$ /mm	$S_{v \max}$ 变化率/%
传统	2.57	-51	14.93	-40.9
图测	1.26		8.83	

分析图 2 和图 3 中参数的变化对位移的影响曲线, 可以得到下述结论: 各参数对计算结果的敏感性不同, 而且变化规律也不完全一致; 斜率较大的曲线表示参数的改变对位移计算结果的影响较明显。从图中可以看出, 位移计算结果对 R_f , K 和 n 值的反应敏感; 即使参数对计算结果的敏感性不明显, 如果参数的变幅很大, 再耦合其他因素, 也将会引起计算结果的较大偏差。

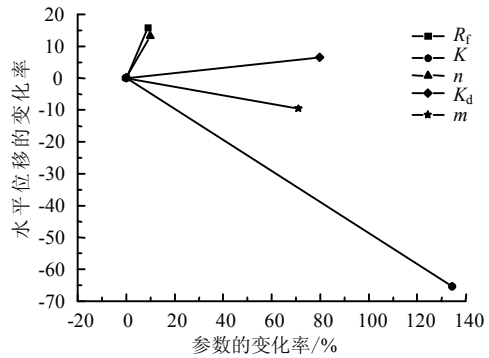


图 2 各参数变化对水平位移的影响
Fig.2 Effect of parameters changing on horizontal displacements

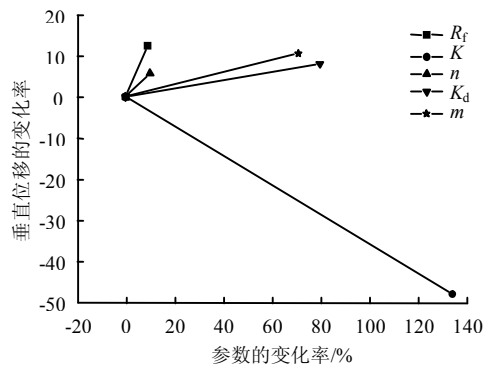


图 3 各参数变化对垂直位移的影响
Fig.3 Effect of parameters changing on vertical displacements

5 结 论

(1) 试验结果表明, 不同的测量方法得到模型参数有较大的差别, 特别是参数 K 和 K_b 。分析产生差别的原因, 说明了数字图像测量可以克服传统测量方法中的一些缺陷, 使得测得的参数更加精确。

(2) 通过计算发现, 参数的差别对计算结果有很大的影响, 传统测量方法得到的参数计算出的位移值为数字图像测量得到的参数计算出的位移值的两倍左右。由此可见, 精确的参数对计算结果的意义。

(3) 研究表明: 随密度的增大, 不同测量方法得到的参数 K 的差别有增大趋势, 对于干密度 $\rho_d = 1.661 \text{ g/cm}^3$ 的标准砂 $K_{\text{图测}}/K_{\text{传统}}$ 可达到 2.64。

(4) 试验得出的破坏比 R_f 随围压 σ_3 增大而减小, 并且 R_f 的取值对计算结果影响也很大, 故采用 Duncan-Chang 模型进行计算分析时 R_f 取为常数是适当的。

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] 屈智炯. 土的塑性力学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1987.
- [3] 何昌荣, 杨桂芳. 邓肯-张模型参数变化对计算结果的影响[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 170—174.
HE Chang-rong, YANG Gui-fang. Effects of parameters of Duncan-Chang model on calculated results[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(2): 170—174.
- [4] Burland J B, Symes M J. A simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus[J]. **Geotechnique**, 1982, 32(1): 62—65.
- [5] Clayton C R I, Khatrush S A, Bica A, et al. The use of hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation[J]. **Geotechnical Testing Journal, ASTM**, 1989, 12(1): 69—76.
- [6] Goto S, Tatsuoka F, Shibuya S, et al. A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory[J]. **Soils and Foundations**, 1991, 31(1): 169—180.
- [7] 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.
- [8] 王助贫. 三轴试验土样变形的数字图像测量方法及其应用[博士学位论文 D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [9] 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, 2002, 23(3): 337—341.
SHAO Long-tan, WANG Zhu-pin, HAN Guo-cheng. 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.
- [10] 王助贫, 邵龙潭. 三轴试验土样的端部约束与端部接触[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.
- [11] 邵龙潭, 王助贫, 刘永禄. 三轴试验土样变形的数字图像测量方法及设备[P]. 中国: ZL01 1 13831.9, 2004.
- [12] Duncan J M, Wong K S, Mabry P. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses[R]. California: University of California, 1980.
- [13] SL237 - 1999 土工试验规范[S].