

熔融石英粒径对透明土位移测量精度的影响

常艳^{1,2}, 雷振坤^{1,2}, 赵红华^{1,2}, 于绅坤^{1,2}

(1. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 工业装备与结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 利用透明土技术和激光散斑图像结合数字图像相关方法(DIC方法)测量土体内部的位移场,是研究土力学问题的一种新方法。通过试验研究不同粒径范围的熔融石英颗粒(中细砂 0.1~0.3 mm、中砂 0.3~0.5 mm、粗砂 0.5~2 mm、细砾 2~5 mm),揭示粒径对激光散斑图像质量、DIC 查询窗口和位移场测量精度的影响。结果表明,不同粒径的熔融石英透明土模型产生的散斑场图像、灰度直方图明显不同;相同入射激光下,小粒径比大粒径模型获得更好质量的散斑图像。位移误差直方图显示,位移误差依赖于查询窗口尺寸和颗粒大小。通过平均灰度梯度调整查询窗口,不同粒径的透明土模型可以给出彼此相当的测量精度。数字和物理平移试验显示,由小粒径石英颗粒配置的透明土模型能够得到更高的测量精度。

关键词: 透明土; 熔融石英; 粒径; 数字图像; 激光散斑; 测量精度

中图分类号: TU 411.99; TU 473.1+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)02-0493-08

Influences of grain sizes of fused quartz on displacement measurement accuracy of transparent soil

CHANG Yan^{1,2}, LEI Zhen-kun^{1,2}, ZHAO Hong-hua^{1,2}, YU Shen-kun^{1,2}

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Laser speckle image of transparent soil, which is a novel method for studying the soil mechanics problems, can be used to measure the displacement field inside the soil mass through digital image cross correlation (DIC) method. Tests are conducted on fused quartz particles with four different grain sizes, i.e. fine quartz (0.1-0.3 mm), medium quartz (0.3-0.5 mm), coarse quartz (0.5-2.0 mm), and fine gravel quartz (2-5 mm). This paper reveals the influences of grain sizes of fused quartz on the quality of laser speckle image, the selection of appropriate query window size and the displacement measurement accuracy of transparent soil. The results show that the gray histograms and the speckle patterns are different for transparent soils of different grain sizes. With the same incident laser light, the quality of image for smaller sizes is better than that of the larger sizes. The histograms of obtained displacement error indicate that the displacement error is dependent on the query window size and grain size. By adjusting the query window size with the average gray level gradient, the transparent soil models of different grain sizes can provide the equivalent measurement accuracy. Digital and physical translation tests show that the transparent soil models of smaller sizes tend to give higher measurement accuracy.

Keywords: transparent soil; fused quartz; grain sizes; digital image; laser speckle; measurement accuracy

1 引言

透明土是用骨架材料和折射率匹配的孔隙液配制成的人工土体,最早由 Welker 等^[1]制成。随后,熔融石英被用于制作透明土^[2-4]。透明土在桩土贯入以及其他岩土工程问题研究中得到了应用^[5-6]。

大量试验显示,数字图像相关方法(DIC方法)位移测量与散斑图像质量密切相关,透明土模型试

验精度依赖目标位移幅值和查询窗口尺寸^[7]。不同材质性状的透明颗粒和不同成分的孔隙流体被用于透明土,骨架材料如硅胶和熔融石英常具有不同粒径,但散斑图像是否不同,是否影响 DIC 精度和 DIC 算法的实施(如是否需要使用不同尺寸的查询窗口),尚未发现相关成果发表。本文选用 4 种粒径范围的熔融石英砂作骨架材料,匹配溴化钙水溶液做成透明土模型进行研究。

收稿日期: 2015-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51308091, No. 11672066); 中央高校基本科研业务费专项项目(No. DUT15QY48)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51308091, 11672066) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(DUT15QY48).

第一作者简介: 常艳,女,1988年生,硕士,主要从事基于透明土中面激光成像技术的桩-土-承台相互作用研究。E-mail: jenny-cy@foxmail.com

通讯作者: 女,赵红华,1977年生,博士,副教授,主要从事岩土力学和岩土工程方面的科研和教学工作。E-mail: zhaoh@dlut.edu.cn

2 试验设备和方案

试验包括 4 个透明土模型, 由 4 种粒径 (中细砂 0.1~0.3 mm、中砂 0.3~0.5 mm、粗砂 0.5~2 mm、细砾 2~5 mm) 的熔融石英与折射率 1.458 2 的溴化钙水溶液, 置于 16 cm×12 cm×12 cm (长×宽×高)、厚为 5 mm 的玻璃箱内制成。光学位移平台 (MODEL No.: STEL0606 SP100, SERIAL No.: 10040, PACIFIC PRECISION LABS, INC.) 提供每步 0.125 mm 的平移 (共 32 次)。绿激光 (15 mW, 532 nm) 透过柱面镜产生厚度为 4~5 mm 的扇面激光, 在模型内形成切平面。位移平台每次移动后, 高速相机捕获图像 (768 像素×1 024 像素)。试验系统如图 1 所示。

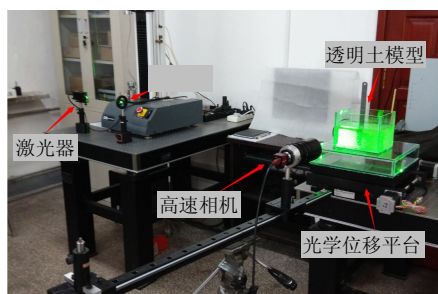


图 1 试验系统

Fig. 1 Experimental system

3 MatPIV 和可靠性

试验采用 MatPIV 软件提供的函数进行 DIC 计算^[8]。算法假定获得两张图像 I_1 和 I_2 , 使用方形查询窗口 (边长为 N), 将 I_1 和 I_2 按查询窗口两两比较:

$$R_e(s, t) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left[I_1^{i,j}(m, n) - I_2^{i,j}(m-s, n-t) \right]^2 =$$

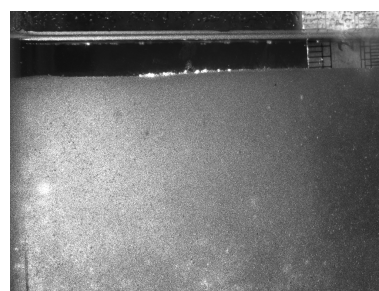
$$\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_1^{i,j}(m, n)^2 - 2 \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_1^{i,j}(m, n) I_2^{i,j}(m-s, n-t) + 2 \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_2^{i,j}(m-s, n-t)^2 \quad (1)$$

式中: $I_1^{i,j}(m, n)$ 和 $I_2^{i,j}(m-s, n-t)$ 分别为 I_1 和 I_2 第 i 行第 j 列处窗口对应点 (m, n) 和 $(m-s, n-t)$ 的灰度; $R_e(s, t)$ 为对应窗口各点灰度差的平方和, 简化后为

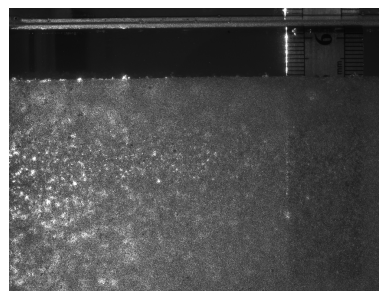
$$R_e(s, t) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_1^{i,j}(m, n) I_2^{i,j}(m-s, n-t) \quad (2)$$

R_e 取得最大值的 (s, t) 为 $I_1(m, n)$ 点的位移。研究粒径影响前, 需检查 MatPIV 算法可靠性。将平台移动 4 mm 时所拍 6 幅图像的平均图像 (见

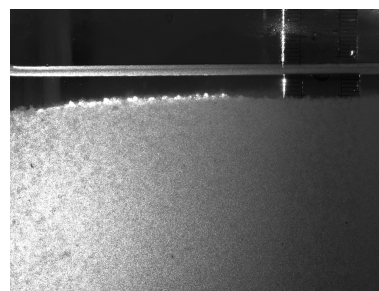
图 2), 每一幅进行自相关计算, 得到 SEM (均值误差) 和 Std (误差标准差) 均为 0, 程序本身没有对位移场引进误差。



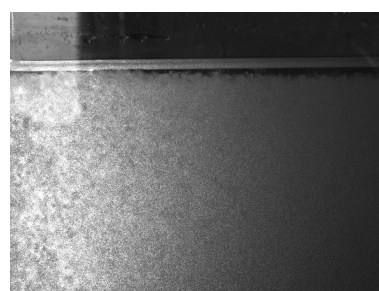
(a) 0.1~0.3 mm



(b) 0.3~0.5 mm



(c) 0.5~2 mm



(d) 2~5 mm

图 2 光学平台移动到 4 mm 处所拍 6 幅图像的平均图像

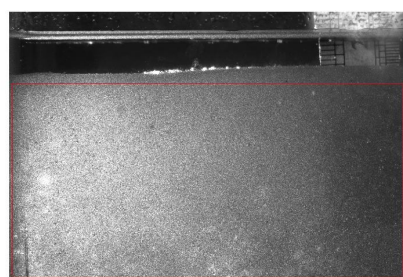
Fig. 2 Average images of 6 images taken when optical platform moving 4 mm

4 不同粒径熔融石英砂对基于数字相关技术的透明土模型试验的影响

试验拍得 8 位灰度图像, 其灰度直方图是灰度级的函数, 表示图像中某个灰度级的像素个数, 反映灰度分布的相对频率。图像灰度随机分布, 大小不同的颗粒散斑效应不同, 其图像灰度分布不同。

取图2中4幅图像,截取每幅图像透明土区域(见图3),计算得到不同特征的灰度直方图(见图4)。

0.1~0.3 mm 粒径散斑图像亮度均匀,多数像素灰度值接近灰度级中值,较高或较低的像素较少,DIC 运算效果良好。0.3~0.5 mm 粒径散斑图像偏暗,灰度值高的像素很少,多数像素灰度值较低,DIC 运算效果也很好。0.5~2、2~5 mm 粒径散斑图像亮度很低,像素灰度平均值非常低,原因可能是当激光强度不变时,随着熔融石英粒径增大,激光进入模型深度变浅,散斑场亮度分布不均匀度增加所造成的。两个较大粒径的透明土模型,使用功率更高、厚度更薄的激光光源将有助于得到更好的散斑图像。



(a) 4.0 mm 处平均后图像



(b) 截取图像

图3 散斑区域截取(以0.1~0.3 mm 粒径模型为例)
Fig.3 Cutting of speckle area (0.1-0.3 mm model)

5 根据平均灰度梯度选择查询窗口

从文献可知,DIC 位移场测量误差的理论分析通常考虑随机噪声、图像子区尺寸和插值误差的影响^[9-10]。本文研究了在得到相当位移场精度的情况下熔融石英粒径对 DIC 使用的查询窗口尺寸的影响。

对每个透明土模型拍得的 32 幅图像序列进行相关处理,对比不同尺寸查询窗口所得位移场与预加位移场之间误差场的均值误差 SEM 和标准差 Std 。

SEM 定义为

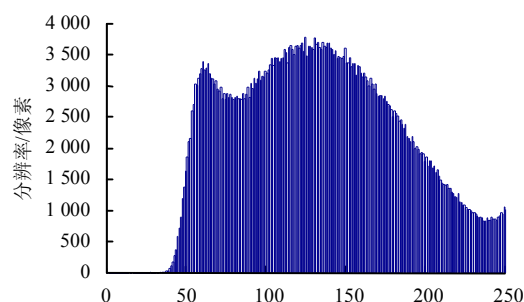
$$SEM = u_{\text{mean}} - u_{\text{imp}} \quad (3)$$

式中: $u_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i$ 为位移场计算结果的算术平均值; u_{imp} 为预加位移; SEM 为误差水平。

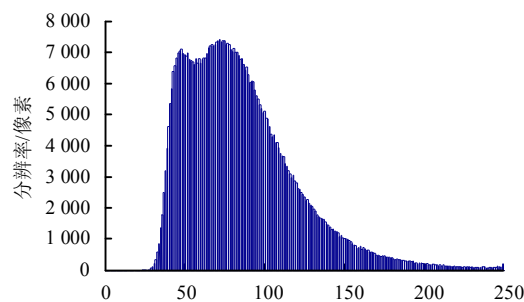
Std 定义为

$$Std = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - u_{\text{mean}})^2} \quad (4)$$

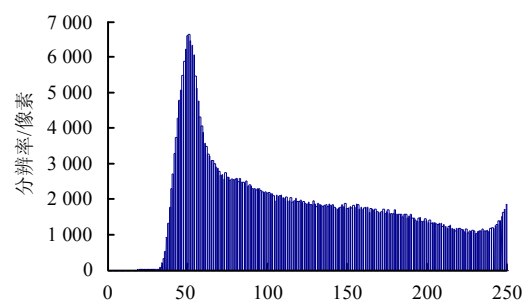
式中: Std 为计算结果对 SEM 的分散程度。



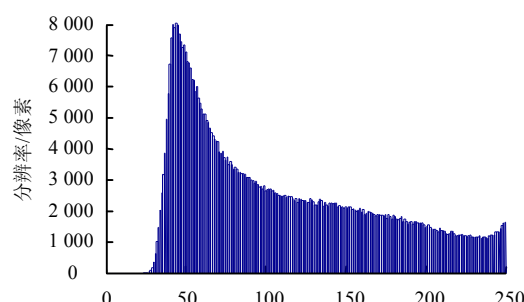
(a) 0.1~0.3 mm



(b) 0.3~0.5 mm



(c) 0.5~2 mm



(d) 2~5 mm

图4 透明土模型散斑图像灰度直方图
Fig.4 Gray histograms of speckle image for transparent soil models

一点的位移量由该点周围子区域的散斑分布计算得到,子区尺寸直接影响位移测量精度。子区太大,区域内有过多点,会将本属误差的信息误识为位移向量,子区太小,又会因实际位移太大超过子区尺寸而漏识位移向量。

Wang 等^[10]通过数学推导证明, DIC 中使用线性插值计算一维应变和双线性插值计算二维应变场,局部参数 $SEM(u_e)$ 是有偏估计,且是变化前、后图像插值误差 $h_x(x_{ij})$ 、白噪声标准差 σ^2 、亚像素位移 τ_x 和图像子区灰度平方和 $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_x^2(i, j)$ 的函数:

$$SEM(u_e) \cong \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [-h_x(x_{ij}) f_x(x_{ij})] + (1 - 2\tau_x) N^2 \sigma^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_x^2(x_{ij})} \quad (5)$$

式中: $h_x(x_{ij}) = g(\xi_{ij}) - f(x_{ij})$, $\xi_{ij} = x_{ij} - u$ 为像素点 x_{ij} 在变形后图像 I2 中对应点的坐标。

此外, $Std(u_e)$ 为图像噪声和图像子区灰度梯度平方和的函数:

$$Std(u_e) \cong \frac{\sqrt{2}\sigma}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_x^2(x_{ij})}} \quad (6)$$

可见,子区灰度梯度平方和可作为子区内部散斑图像质量的有效参数,用于图像子区尺寸的自适应选择^[11],但不能直接应用于整个散斑图。潘兵等^[11]随后提出全局参数平均灰度梯度 δ_f 用于评价整个散斑图的质量,该参数定义为

$$\delta_f = \frac{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H |\nabla f(x_{ij})|}{WH} \quad (7)$$

式中: W 、 H 为图像宽、高(像素); $|\nabla f(x_{ij})| = \sqrt{f_x^2(x_{ij}) + f_y^2(x_{ij})}$ 为像素点灰度梯度向量的模, $f_x(x_{ij})$ 和 $f_y(x_{ij})$ 分别为像素点 x_{ij} 在 x 方向和 y 方向的灰度梯度,由中心差分梯度算子确定。比较 SEM 和 Std , δ_f 较大的散斑图 DIC 位移精度较高。

潘兵^[11]、孙倩文^[12]等证明,式(5)、(6)中子区 x 方向的灰度梯度平方和可近似为子区尺寸 N 和 δ_f 的函数:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_x^2(x_{ij})} \cong N \delta_f \quad (8)$$

从式(8)可看出,具有不同 δ_f 的散斑图,调整子区大小 N ,可在算法上保证所得位移场精度相当。

6 熔融石英粒径对数字相关处理查询窗口尺寸的影响

不同散斑场的散斑尺寸不同,随机选取 4 个透明土模型在预加位移 3.375、3.500 mm 处所拍图像的平均图像,采用 $N = 8 \sim 64$ 像素,步长为 2,共 29 种查询窗口,迭代 3 次(重叠率 0.5),得到位移场并计算误差场(测量位移场-预加位移场)的 SEM 和 Std (见图 5)。从图 5 可以得出,同样大小的查询窗口,粒径越小,均值误差和标准差越小,精度和稳定性越高。

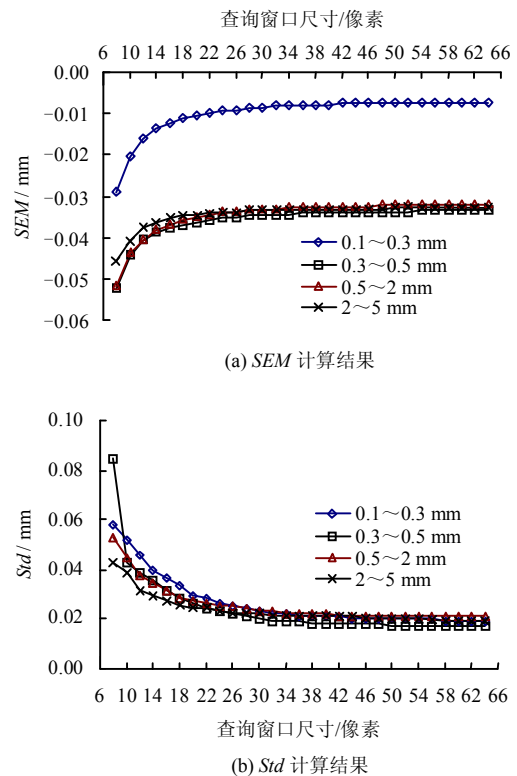


图 5 不同尺寸查询窗口引起的 SEM 和 Std 的变化
Fig.5 Variations of SEM and Std with different query window sizes

图 6~9 为不同粒径熔融石英模型的计算位移场与预加位移场误差统计直方图。由图 6 可知, $N = 16$ 像素时, $0.1 \sim 0.3$ mm 粒径模型 DIC 计算得到的位移场误差最小 (SEM 最小,距 0 最近),稳定性最好 (SEM 最小)。同理比较图 6~9 可得,使 $0.3 \sim 0.5$ 、 $0.5 \sim 2$ 、 $2 \sim 5$ mm 粒径模型 DIC 计算所得位移场精度最高的查询窗口尺寸分别为 $N = 32$ 像素、 $N = 16$ 像素、 $N = 32$ 像素。分析结果表明在图像数字相关 DIC 处理中,不加分析地将一种查询窗口尺寸应用于不同的散斑图,无法保证所获位移场精度之间的可比性。在对各组图像进行 DIC 计算前,需对各自使用的查询窗口尺寸进行选择。

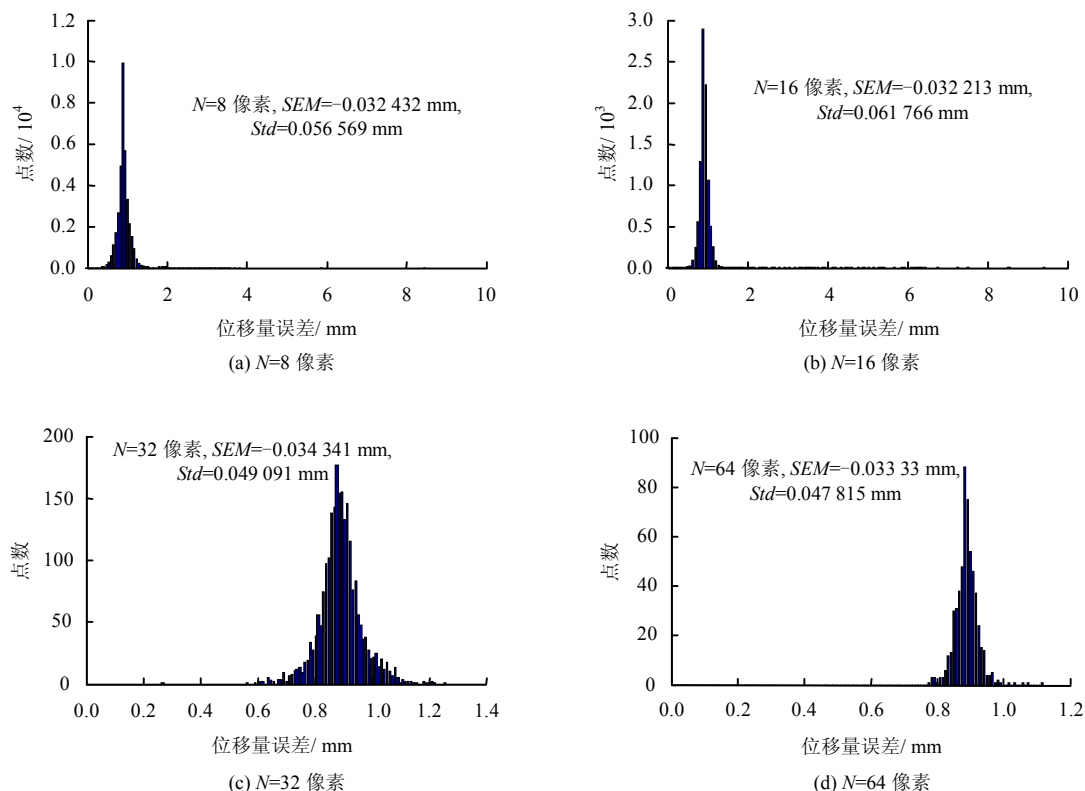


图6 0.1~0.3 mm 熔融石英模型分别采用不同像素查询窗口计算位移场与预加位移场误差的统计直方图
Fig.6 Histograms of displacement error for transparent soil model of 0.1-0.3 mm fused quartz using query windows with different pixels

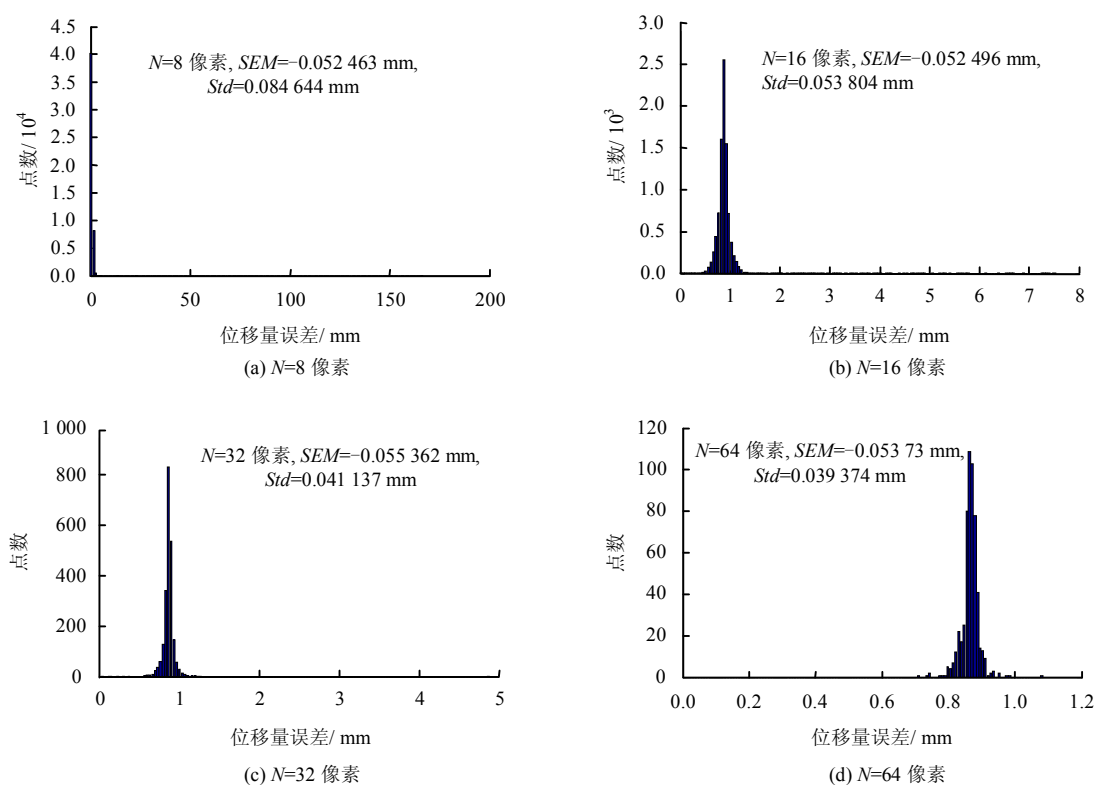


图7 0.3~0.5 mm 熔融石英模型分别采用不同像素查询窗口计算位移场与预加位移场误差的统计直方图
Fig.7 Histograms of displacement error for transparent soil model of 0.3-0.5 mm fused quartz using query windows with different pixels

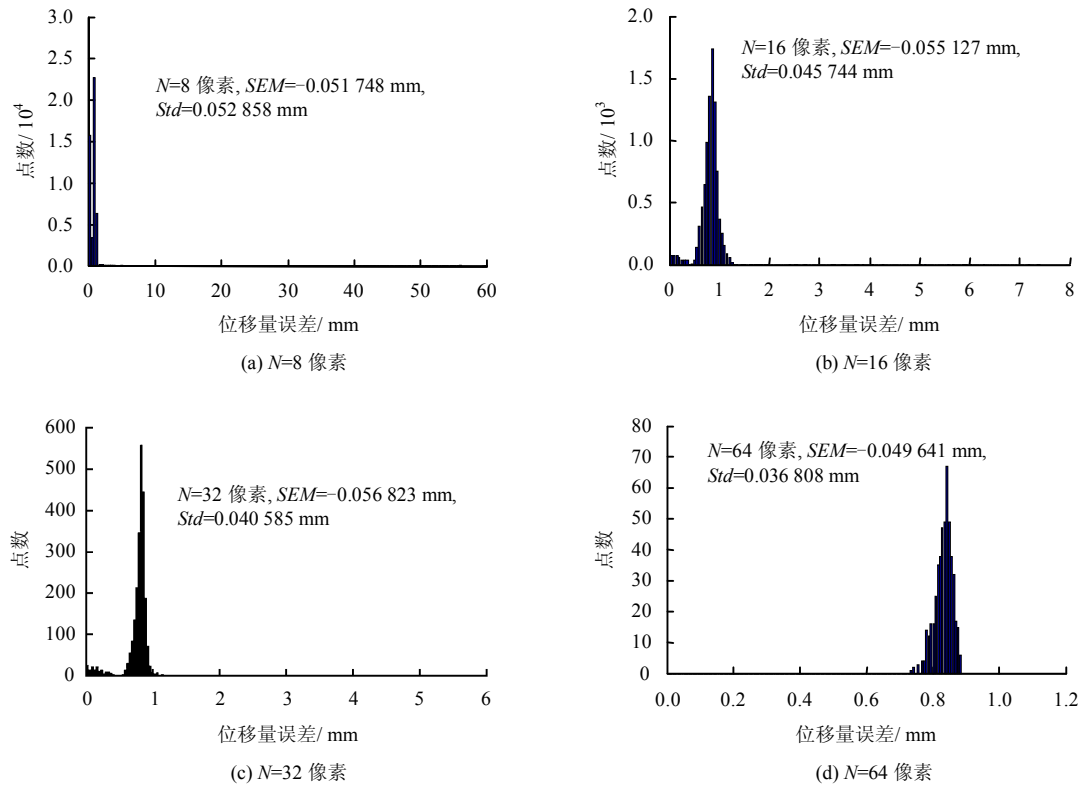


图 8 0.5~2 mm 熔融石英模型分别采用不同像素查询窗口计算位移场与预加位移场误差的统计直方图

Fig.8 Histograms of displacement error for transparent soil model of 0.5-2 mm fused quartz using query windows with different pixels

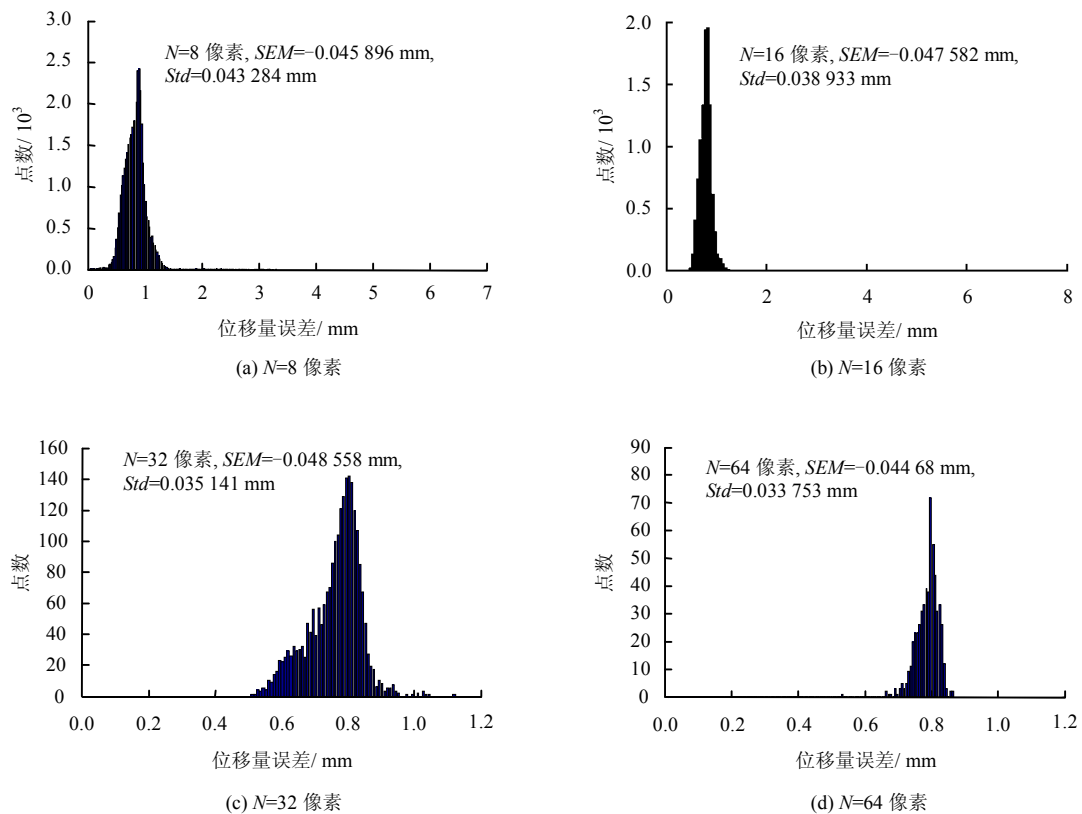


图 9 2~5 mm 熔融石英模型分别采用不同像素查询窗口计算位移场与预加位移场误差的统计直方图

Fig.9 Histograms of displacement error for transparent soil model of 2-5 mm fused quartz using query windows with different pixels

7 平移试验

7.1 等效窗口尺寸

位移测量精度分析是通过数字平移和物理平移试验进行的。为使分析等效, 需对查询窗口尺寸 N 进行选择, 使不同数字图像的 $N\delta_f$ 等价(式(8))。随机选择位移平台移动 4.0 mm 处拍得的数字散斑图像组, 分别进行平均化处理, 计算处理后散斑图像的 δ_f 并调整 N (见表 1)。可以看到, 大粒径模型需要相对较大尺寸的查询窗口, 可以推论其具有较大平均尺寸的散斑场。

表 1 各粒径组预加位移 4 mm 处平均图像的平均灰度梯度和所使用的查询窗口尺寸

Table 1 The calculated query window sizes for different grain size group to achieve the equivalent measurement precision (at 4 mm displacement)

粒径 / mm	平均灰度梯度	等效窗口尺寸 / 像素
0.1~0.3	21.282 4	16
0.3~0.5	17.923 6	20
0.5~2.0	17.244 8	20
2.0~5.0	17.218 7	20

7.2 数字平移试验

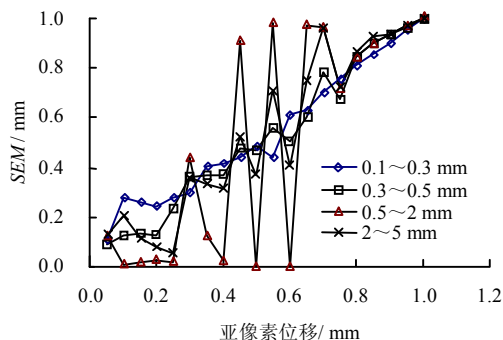
本试验研究在不考虑试验系统随机误差影响的预加位移场中粒径对 DIC 计算精度的影响。选取预加位移 4.0 mm 处所拍图像的平均图像, 用傅里叶变换相移定理将每幅图像在水平方向进行数字平移, 每步 0.05 像素, 移动 40 次。对每组图像相邻两幅之间用表 1 中的等效窗口进行相关处理, 得到位移场, 然后计算误差场的 SEM 和 Std (见图 10)。

图 10 显示, SEM 和 Std 是亚像素位移的函数, 近似呈直线分布, 这种分布已由 Scherier 等^[13]研究证明, 是由相移定理采用的亚像素插值算法引起。经窗口调整后的 SEM 和 Std 分布区间几乎与模型粒径无关, 但模型粒径越大, 数据抖动越明显, 其中 0.5~2 mm 粒径模型曲线比 2~5 mm 粒径模型曲线波动更厉害。说明粒径较大时粒径组分布跨度较大模型的 DIC 计算精度稳定性不如粒径分布较均匀的模型, 小粒径模型的 DIC 位移计算精度稳定性好。

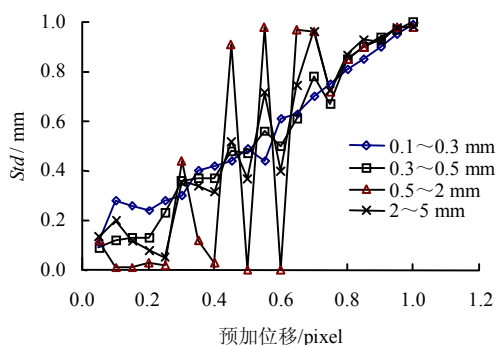
7.3 物理平移试验

选取 0.1~0.3 mm 模型预加位移 0~4 mm (步长 0.125 mm) 各处的图像组 (每组 6 幅) 进行平均化处理, 得到用于 DIC 计算的 33 幅物理平移图像, 相邻两幅之间用表 1 中等效窗口进行处理, 得到 SEM 和 Std 。0.3~0.5、0.5~2、2~5 mm 模型进行

相同的处理, 结果如图 11 所示)。

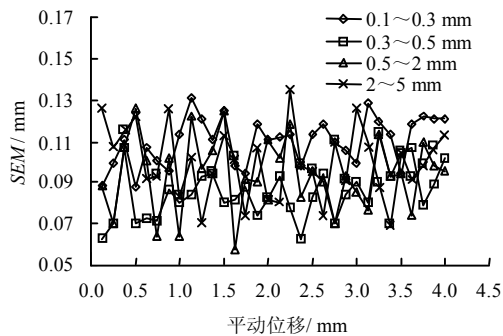


(a) 不同预加位移时前后两幅图 DIC 位移的 SEM 值

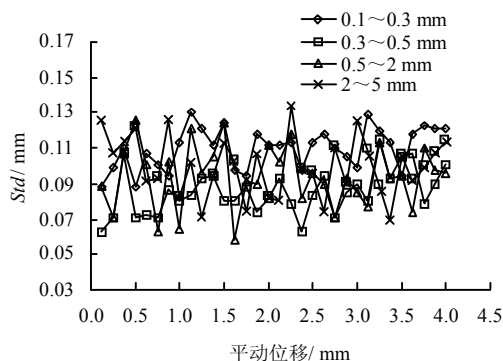


(b) 不同预加位移时前后两幅图 DIC 位移的 Std 值

图 10 数字平移试验的 SEM 、 Std 计算结果
Fig.10 Calculation results of SEM and Std by digital translation test



(a) 不同平移位移时 SEM 的变化



(b) 不同平移位移时 Std 的变化

图 11 物理平移试验的 SEM 、 Std 计算结果

Fig.11 Calculation results of SEM and Std by physical translation test

可以看到,不同粒径组 *Std* 和 *SEM* 的分布区间几乎相同; 0.1~0.3 mm 粒径组模型比 0.3~0.5 mm 粒径组模型更透明,本组试验中, DIC 位移测量更稳定,但 0.3~0.5 mm 粒径组模型测量更精确;大粒径组 0.5~2、2~5 mm 模型位移测量稳定性差,但测量精度与小粒径组 0.1~0.3、0.3~0.5 mm 粒径模型相近。这说明,在充分评估数据稳定性的前提下,小粒径模型位移场的测量,可以获得较好的测量精度。

8 结 论

熔融石英砂作为透明土模型试验中重要的天然砂土模拟材料,是激光散斑场形成的直接原因,对散斑图质量有重要影响,也影响 DIC 位移场计算精度。本文研究了这种影响,由不同粒径熔融石英砂配置的透明土模型试验出发,从测量系统、DIC 程序和参数、散斑直方图、数字和物理预加位移场精度等方面进行了比较分析,得到的主要结论如下:

(1) 大粒径模型在增大激光功率并保证模型激光射入一侧散斑可识别的条件下能够获得一定的可测量区域。

(2) 小粒径透明土模型图像的灰度分布比较均匀,大粒径透明模型图像的灰度分布相对不均匀。

(3) 为保证精度和不同粒径模型位移场精度的可比性,在 DIC 计算之前,需选择查询窗口尺寸;大粒径模型 DIC 位移场精度稳定性不如小粒径模型。

(4) 本例分析表明小粒径透明土模型的 DIC 位移测量精度较好。

(5) 据等效窗口尺寸可以推论,大粒径模型的散斑平均尺寸较大,但由于试验窗口尺寸数少,不足以得到规律性结论。

本文 DIC 处理前没有对图像进行增强和去噪,没有对图像对比度和噪声水平进行评估,试验只能得到定性结论,若要定量揭示粒径的影响,还要对图像做进一步处理。

参 考 文 献

- [1] WELKER A, BOWDER J, GILBERT R B. Applied research using a transparent material with hydraulic properties similar to soil[J]. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 1999, 22(3): 266—270.
- [2] EZZEIN F, BATHURST R J, EZZEIN F. A transparent sand for geotechnical laboratory modeling[J]. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 2011, 34(6): 590—601.
- [3] ISKANDER M G, LIU J, SADEK S. Transparent amorphous silica to model clay[J]. *American Society of Civil Engineers*, 2014, 128(3): 262—273.
- [4] GUZMAN L I, ISKANDER M G, SUESCUN-FLOREZ E, et al. A transparent aqueous-saturated sand surrogate for use in physical modeling[J]. *Acta Geotechnica*, 2014, 9(2): 187—206.
- [5] NI Q, HIRD C C, GUYMER I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry[J]. *Geotechnique*, 2010, 60(2): 121—132.
- [6] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于透明土的管桩贯入特性模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(8): 1564—1568.
CAO Zhao-hu, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Based on transparent pipe pile penetration characteristics of soil model test study[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(8): 1564—1568.
- [7] SADEK S, ISKANDER G M, LIU J Y. Accuracy of digital image correlation for measuring deformations in transparent media[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2003, 17(2): 88—96.
- [8] JOHAN K S. MatPIVtut: An introduction to MatPIV v. 1.6.1[R]. Cambridge, UK: Center for Mathematical Sciences, Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge, 2007: 19—20.
- [9] 潘兵, 吴大方, 夏勇. 数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究[J]. *实验力学*, 2010, 25(2): 120—129.
PAN Bing, WU Da-fang, XIA Yong. Study of speckle pattern quality assessment used in digital image correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, 25(2): 120—129.
- [10] WANG Y Q, SUTTON M A, BRUCH H A, et al. Quantitative error assessment in pattern matching: Effects of intensity pattern noise, interpolation, strain and image contrast on motion measurements[J]. *Strain*, 2009, 45(2): 160—178.
- [11] PAN B, XIE H, WANG I, et al. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns[J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7037—7048.
- [12] 孙倩文, 刘永亮, 毛灵涛, 等. 数字体图像相关法中体散斑图的质量评价研究[C]//北京力学学会第20届学术年会论文集. 北京: 北京力学学会, 2014.
SUN Q W, LIU Y L, MAO L T, et al. Quality evaluation research of speckle image using digital image correlation method[C]//Proceedings of the 20th Annual Conference of the Beijing Institute of Mechanics. Beijing: Beijing Institute of Mechanics, 2014.
- [13] SCHREIER H W, SUTTON M A. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions[J]. *Experimental Mechanics*, 2002,

42(3): 303—310.