

DOI: 10.11779/CJGE201802012

PIV 技术在非饱和冻土冻胀模型试验中的实现与 灰度相关性分析

刘振亚¹, 刘建坤¹, 李 旭^{*1, 2}, 胡田飞¹, 房建宏²

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 多年冻土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室青海研究观测基地,
青海 西宁 810001)

摘要: 粒子图像测速法(PIV)已经在流体力学和岩土工程中得到广泛应用, 并取得了良好的试验结果。但是, 由于黏性土缺乏表面纹理, PIV 技术尚未在冻结黏性土颗粒迁移分析中得到成功应用。针对黏性土冻结过程中的土颗粒迁移问题, 采用自制的 PIV 冻土模型试验箱, 以非饱和粉质黏土作为试验土样, 结合 Canon EOS 1300D 相机和 GeoPIV 软件, 提出了 PIV 技术在非饱和冻土中的实现方法。结果表明: ①试验过程中光线的变化会极大的影响试验结果, 故需要在摄影棚中构建恒定光场; ②为便于 PIV 分析, 试验前需对冻土进行表面纹理构建, 粒径 0.3 mm 石英砂是纹理构建的最佳示踪粒子; ③非饱和粉质黏土在冻结过程中的冰水相变会导致图像灰度变化, 根据统计结果, 将种子区域灰度相关性及整体灰度相关性分别调整为 0.85 和 0.69。

关键词: 非饱和土; 粉质黏土; 岩土 PIV; 冻胀模型

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)02-0313-08

作者简介: 刘振亚(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事冻土路基及相关研究工作。E-mail: zhya_liu@163.com。

Application of PIV in model tests on frozen unsaturated soils and grayscale correlation analysis

LIU Zhen-ya¹, LIU Jian-kun¹, LI Xu^{1, 2}, HU Tian-fei¹, FANG Jian-hong²

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Qinghai Research and Observation Base, Key Laboratory of Highway Construction & Maintenance Technology in Permafrost Regions,

Ministry of Transport, Xining 810001, China)

Abstract: PIV is a velocity-measuring technique commonly used in the field of experimental fluid mechanics and geotechnical tests, but few previous reports are found on the use of this technique in frozen silty clay (especially unsaturated condition) due to the lack of surface texture. The self-made model test apparatus for frozen soil, Canon Eos camera and GeoPIV software, are used to analyze the movement of soil particles. The experiment results demonstrate that: (1) The constant light area is needed to be built in studio which significantly affects the PIV results. (2) Due to the insufficient surface texture of clayey soils, PIV cannot be used. Therefore, to allow the analysis, some materials are used to make the artificial texture of silty clay and the silica particles with a diameter 0.3 mm are the best tracking particles. (3) Change of ice-water phase during freezing will cause the grayscale variation of silty clay images inevitably. The minimum acceptable correlation coefficient tolerance for seed is 0.85 and the minimum correlation coefficient tolerance is 0.69 according to the statistical results.

Key words: unsaturated soil; silty clay; GeoPIV; freezing model

0 引言

在岩土工程中, 明确土体变形的过程和原因对工程设计、运营、维护都具有重要的意义^[1-2]。冻土在冻结过程中会产生冻胀变形, 对寒区土工构筑物的服役性能造成极大威胁。然而, 冻土的冻结过程是温度场、水分场及应力场相互作用的一个极其复杂的热力学、物理化学和力学的综合问题^[3-4]。其中, 冻土的变形测

量是冻土力学中的重要内容。

目前, 冻土变形试验测量手段主要有千分表、位移传感器、应变规等, 但均受到空间、精度、测点个

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479001, 41471052); 北京市自然科学基金项目(8152024)

收稿日期: 2017-07-20

*通讯作者(E-mail: cexuli2012@163.com)

数等的制约，往往不能得到理想的结果。张长庆等^[5]利用应变电测法进行了冻土变形测量，一定程度提高了冻土变形测量的精度。CT 技术可以实现冻土试验过程的无损实时监测和内部结构的定量描述。刘增利等^[6]采用 CT 技术对冻土单轴压缩下的塑性损伤和微裂纹扩展损伤进行了动态识别，结果表明 CT 技术能在试验加载全程对样品不同断面进行多次检测，能真实反映冻土内部微结构变化，并建立了冻土单轴压缩损伤本构模型。孙星亮等^[7]对冻土在三轴压缩过程中的结构损伤进行了 CT 技术测试，分析了冻土在受载前后的结构损伤及蠕变过程。刘波等^[8]亦借助 CT 在非损伤情况下，对试验中的正冻土样每间隔一定时间进行了断层扫描，结合实测的试验前后水分场的变化特征；并借助 Matlab 软件提取扫描图像中每一点的灰度值进行分析，指出冻土温度上升和融化过程中灰度均值随时间呈明显上升趋势。此外，盛熠等^[9]、凌贤长等^[10]、王大雁等^[11]采用超声波技术对冻土进行了测定，并计算了相关的冻土力学特性参数，如泊松比、剪切模量等。武建军等^[12]利用白光散斑照相、激光散斑照相和激光显微散斑照相技术相结合的方法，研究了冻土位移的大变化范围特性及微区内位移细节。姜凡等^[13]采用分层电容传感器检测了冻土冻结锋面的移动规律，并利用电容层析成像技术对冰、水分布进行了图像分析。综上所述，目前对冻土变形的研究，特别是图像分析方面形成了很多方法，得到了包括冻土位移、动力学特性参数(单轴及三轴压缩下内部损伤、蠕变，弹性参数(杨氏模量、剪切模量及泊松比)等，但非侵入式图像分析技术还存在许多不足。

PIV (particle image velocimetry) 是一种可以精确分析小变形的图像处理技术，近年来在岩土工程中也得到了广泛应用^[14-15]，但是在冻土工程中的应用还比较少。Arenson 等^[16]、Xia 等^[17]和 Azmatch 等^[18]通过荧光粉水溶液标记的 Devon 黏土进行了基于 PIV 技术的冻土冰透镜体生长和微观机理研究，指出冻土的固结现象与孔隙水压变化有关，水平向应变是在冻结锋面迁移过程中，垂向的零位移边界限制引起的。由此可见，PIV 技术对分析冻土的分层冻胀具有较好的前景。

粉质黏土是最为常见的岩土材料，但是由于对其分层冻胀特性研究的不足，尚未形成具有统一共识的冻胀模型。显然，PIV 技术可为明确黏性土分层冻胀特性提供方法，但是由于缺乏表面纹理，限制了 PIV 技术在黏性土中的应用。针对这一问题，本文采用多种方法构建粉质黏土表面纹理，通过分析冻结前后图像灰度变化，确定了纹理构建的最佳示踪粒子和方法及 PIV 计算的合理灰度相关系数取值。

1 PIV 技术简介

岩土工程中有一系列的图像分析技术允许非侵入式的大试样变形观察和记录。PIV (Particle Image Velocimetry) 技术是一种快速发展的图像分析技术，最早用于流体力学，其使用激光脉冲以设定的时间间隔照亮移动流体中的示踪粒子，可以评估示踪粒子位置处的流体流动模式^[19-20]。因此，通过比较在几个时间间隔内获取的数字图像就可以追踪变形介质中颗粒或颗粒集的运动。

在 PIV 中，变形试样的数字图像首先被分成像素的“初始网格”，然后在已知的时间间隔之后，将其与后续图像中相应的扩大“搜索网格”进行比较。最后，通过具有最高相关性的初始和搜索网格之间的相对位置，确定整体位移和变形，如图 1 所示。

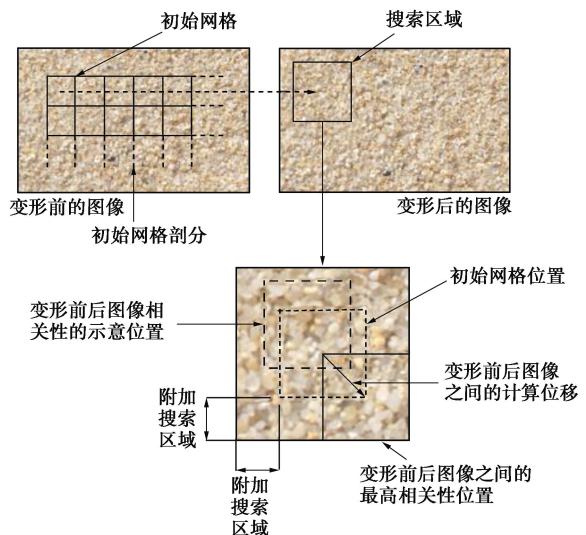


图 1 土体 PIV 原理示意图

Fig. 1 Sketch map of GeoPIV

在流体和气体的 PIV 分析中，需要通过示踪粒子标记运动轨迹。与流体和气体不同，土样的 PIV 分析中通常不需要侵入性的示踪粒子。多数情况下砂土颗粒本身固有的纹理就可以作为示踪粒子。在分析中通常将一块区域作为一个分析单元，通过记录该单元的平均位移来表征土体颗粒的运移。

PIV 的精度取决于图像的质量和每个初始网格内的像素数量：像素数越多，搜索图像中最佳匹配的误差就越小，但分析时间也越长^[21]。如果扩大每个初始网格的大小会导致分析区域内总网格数减少，从而降低整体图像分析结果的准确性。搜索精度受到位移大小的影响，如果位移边界都是整数个像素点，则精度会更高，对拟合算法的依赖也越小^[22]。

实际在流体流动分析中，使用照片平面跟踪粒子

无法记录离开照片平面外的粒子位移, 这可能影响结果的正确性。如果粒子在岩土分析中移动到采样窗口外, 也会出现类似的问题。PIV 不能用于跟踪大的位移, 因为位移过大时, 计算网格的特性和位置都会发生变化。增大附加搜索区域也不能解决问题, 只会增加分析时间和多次的虚拟相关性匹配^[21]。PIV 不能有效地应用到黏土材料的位移分析中, 主要是因为黏土材料缺乏表面纹理。

在 PIV 进行岩土分析的过程中, 还需在图像中构造固定点, 其在不同图像之间始终保持图像固定, 只有这样, 才能将以像素为单位的图像位移转化成以长度(如 mm)为单位的实际位移。在图像位移和空间位移之间进行坐标转换的时候还应注意对象的失真, 这就要求相机平面与模型平面之间应尽可能减少介质的存在, 并最大化地保证拍照平面与模型平面的垂直。

综上所述, 可以将土体变形场看作低速的运动流场, 实际上, 在光源照射下砂土颗粒本身可以形成天然的灰度散斑图像。因此可以借助 PIV 技术来观察土体实时的变形形态, 追踪土体变形颗粒的运动轨迹, 最终得到土体变形位移场的分布规律。

2 冻土 PIV 模型试验设备

试验土样取自青海省橡皮山国道 214 沿线, 土样的基本性质见表 1, 该土样为低液限粉质黏土。击实试验的结果表明, 该土样的最大干密度为 1.877 g/cm^3 , 最优含水率为 13.2%。

表 1 粉质黏土的基本性质

Table 1 Physical parameters of silty clay

最大干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最优含水率/%	液限/%	塑限/%	颗粒相对密度	粉粒含量/%	黏粒含量/%
1.877	13.2	31.2	18.3	2.72	38.2	25.1

冻土模型试验设备示意图及实物图见图 2, 3, 试验系统主要有以下几部分组成: ①数据采集和分析装置主要包括 Canon EOS-1300D 数码相机拍照系统, Data taker DT-80 数据采集系统(可采集冻土内部温度、水分、土压力等数据), 以及计算机用于 PIV 软件分析等, PIV 软件采用 White 等人开发的 GeoPIV 软件。②冻土试样制样及冻土模型箱, 主要包括静力压实设备、控温室、模型箱、低温冷浴机等。③其他附属设备, 如摄影棚、恒温 LED 光源、温度传感器、水分传感器等。

试验主要流程及注意事项如下:

首先, 制备一定含水率的粉质黏土, 并密封静置

使含水率分布均匀。将土样用于制备一定孔隙比的非饱和粉质黏土试样, 试样长 300 mm, 宽 300 mm, 高度 800 mm, 试验制备过程中需要对其进行表面纹理构建, 下文会详细说明。采用静力压实方法进行制样, 控制试样高度。安装相关传感器。

其次, 将控温室温度调整为 1°C 以提高试验效率, 将冻土模型箱采用保温材料包裹, 仅留观察窗一侧。通过低温冷浴设定冻土上层温度边界为 -5°C。

再次, 调整照相机三脚架, 使其尽量水平, 开启照相机自动拍照程序, 设定自动拍照间隔, 对于冻土的变形来说, 经过多次试验, 自动拍照间隔以 5 min 为宜。

最后, 如图 4 所示, 试验中发现, 如果不遮挡自然光进行试验, 试验过程中的环境光线变化会极大地影响试验结果。必须保证前后两张图片的光场基本相同, 不然 PIV 计算时会造成明显的误差或者无法计算, 因此, 经过试验, 在控温室中用 LED 光源制造近似恒定的光源, 并用摄影布将整个装置至于其中, 避免受到环境光的影响(如图 3 实物图所示)。这样在拍照过程中得到的照片可以保证计算的精度满足要求。

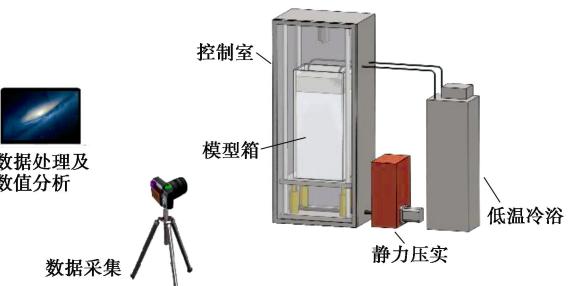


图 2 冻土 PIV 系统示意图

Fig. 2 PIV analysis system of frozen soils



图 3 冻土模型试验系统实物图

Fig. 3 Model test apparatus for frozen soils

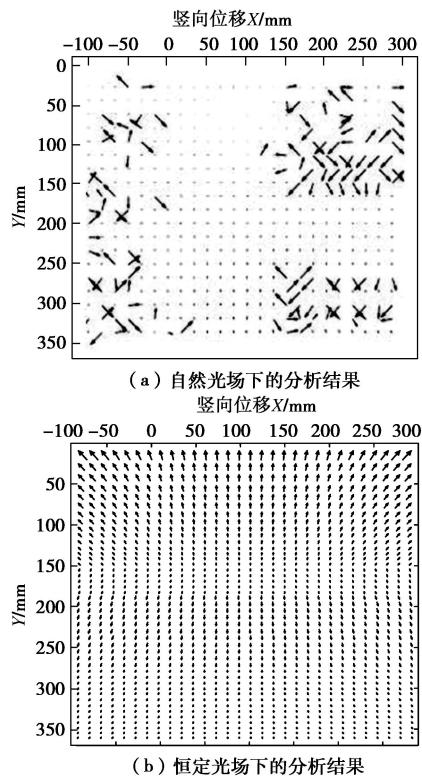


图 4 自然光场与恒定光场条件下图片分析位移场对比

Fig. 4 GeoPIV analysis of examples with natural and constant lights

3 冻结粉质黏土表面纹理构建

利用 PIV 进行微应变分析的过程中, 必须保证单一网格的灰度值必须是复杂的而不是单一的。对于砂土来说, 其自身颜色多样化, 因此可以直接进行 PIV 的分析而不需要进行额外的处理, 而对于黏土来说, 其本身颜色灰度值变化不大, 因此, 不能直接用作 PIV 分析, 需要对其进行表面纹理构建。总的来说, 重建的表面纹理既要满足 PIV 分析的要求, 又不能过多地影响土性, 合理的表面纹理构建材料及方法对黏土的 PIV 分析来说十分重要。国内外 PIV 试验大多针对自身纹理清晰的土体, 例如砂土、透明土进行。而对于自身纹理不清晰的土体, 例如粉质黏土、黏土, 需要人工构造纹理, 才能满足 PIV 图像识别的需要。国内外有关纹理构造的研究和讨论不多, 尚处于摸索试错阶段。Xia 等^[17]通过荧光粉溶液的方法进行了表面纹理的构建, 但由于冻土在非变形情况下只要有温度梯度的存在, 水分的迁移都会发生, 因此荧光粉溶液纹理无法代表土体的位移, 只能表征冻结缘的形态。王世鑫等^[23]通过在黏性土中加入炭末混入黏性土的方法人工制斑, 提高了 PIV 分析精度, 但其能否在冻土中应用还缺乏相关研究。Teh 等^[24]通过纤维构造了高岭土的表面纹理, 但在研究中发现由于纤维的表面吸

附作用及摩擦力大等因素, 其位移很难准确表征土体的位移。White 等^[22]在黏性土中增加了染色纤维和细砂进行表面纹理的构建, 实现了 PIV 技术在黏性土中的应用, 但染色棉絮会随土体冻结而发生破坏, 细砂掺入黏土会极大影响其冻结特性, 因此在冻土中的应用还有待进一步研究。

本文在前人研究的基础上, 选择氧化钛、石英砂、尼龙纤维等分别对冻土进行表面纹理构建。不同材料的示意图如图 5 所示。



图 5 3 种示踪粒子示意图

Fig. 5 Three kinds of tracking particles

分别采用上述不同的纹理构造材料进行试验, 压实后的冻土模型试样如图 6 所示。然后将不同纹理构造的土样进行冻结试验, 并在试验过程中每隔 5 min 进行一次拍照, 对拍摄得到的图像进行 PIV 分析, 对于无纹理构造试样来说, 其无法进行 PIV 分析。将氧化钛、尼龙纤维和石英砂构造的试样分别进行 PIV 计算, 得到其位移场如图 7 所示。

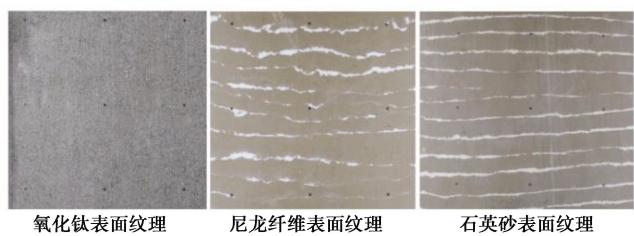


图 6 3 种不同材料表面纹理示意图

Fig. 6 Three kinds of artificial surface textures

通过图 7 可以看出: 氧化钛纹理和二氧化硅纹理都能得到均匀稳定的位移场; 尼龙纤维纹理的位移场比较紊乱, 其原因可能是, 经冻胀挤压后, 尼龙纤维会附着这边壁上, 影响了测量的精度。

由于构造氧化钛纹理, 需要在粉质黏土中掺入大量的氧化钛, 对土体土性影响较大, 因此考虑对土体土性影响相对较小的石英砂。经过多次尝试发现, 0.3 mm 石英砂即能取得较好的试验结果。

因此最终选定和推荐的纹理构造方法为: 采用粒径为 0.3 mm 的石英砂, 土样采用静力压实, 分层摊铺的方法, 摊铺一层土样后, 在观察窗表面附近铺洒一定宽度和厚度的石英砂, 再摊铺下一层, 最后再控制固结应力或者干密度将土样在静力作用下整体压实。

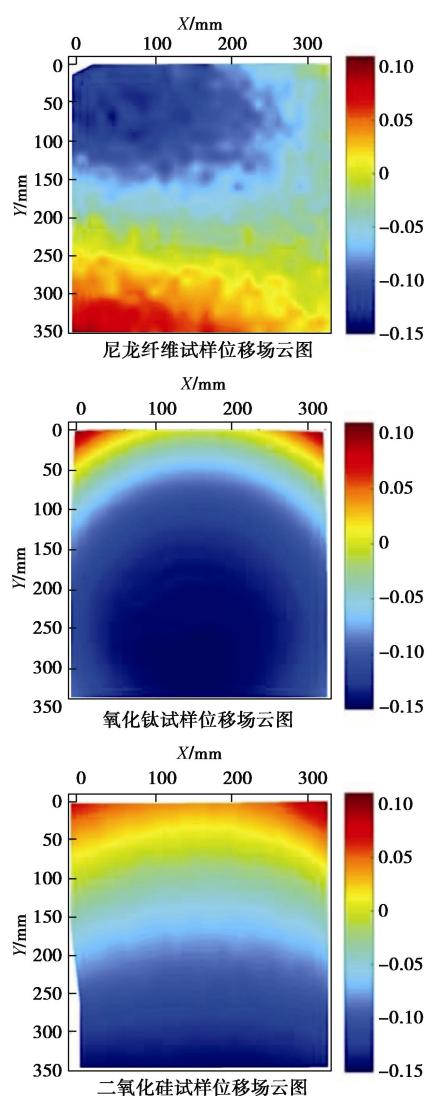


图 7 不同纹理构造试样位移场云图

Fig. 7 Three kinds of displacements under different tracking particles

4 灰度误差分析

在常温土样的应变 PIV 分析中, 从 t_1 时刻到 t_2 时刻, 土样发生位移, 在恒定光场的情况下, 理论上某一像素块在土体发生位移后的图像中, 仍存在与原来图像中基本相同的一个像素块, 通过多个像素点组成的像素块在两个时刻之间的灰度相关性计算, 即可确定土体的位移。在常温土的 PIV 计算中, 设定一个相关系数, 进行像素块的相关性分析并在此基础上再进行位移分析能够得到理想的结果。但是对于冻土来说, 土体在冻结过程中, 发生冰水相变, 改变了原来的组成结构。土样中某一点的灰度值会因为土样冻结而发生变化, 并不是简单的某一像素块发生了位移, 而是某一像素块改变灰度, 变成了另一个像素块, 同时发生了位移。因此, 进行冻土的 PIV 计算必须对像素块冻结过程中的灰度误差进行分析。

判断两个像素块的灰度相关度一般用下式表示:

$$R = \frac{\sum_{m} \sum_{n} A_{m,n} B_{m,n}}{\left(\sum_{m} \sum_{n} A_{m,n}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{m} \sum_{n} B_{m,n}^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

利用灰度的相关度来判定发生位移前后的图像相关性, 图像的相关度定义为式 (1), 其中 $A_{m,m}$ 和 $B_{m,n}$ 分别为图像 A 和图像 B 中 (m, n) 点用 RGB 表示的灰度值。

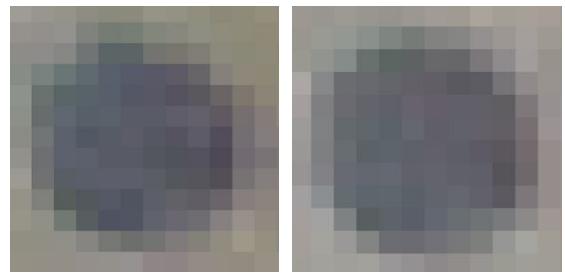
冻结土体的位移变化是必然的, 因此无法在两张图像中确定某一个相同的像素块位置。为描述某一像素块的灰度变化, 本文取观察窗表面控制点的灰度相关度进行表征。初步计算表明仅冰水相变的较短时间内灰度发生明显改变, 其后变化较小。因此, 本文不再分析随着冻结过程进行的灰度变化趋势, 仅分析冰水相变发生前与稳定后的灰度变化。具体方法为: 取 16 个控制点周围 12×12 大小的像素块冻结过程中 24 h 后的图像, 分别与冻结前的控制点图像进行相关性分析, 如图 8, 9 所示。



(a) 冻结前 (b) 冻结 24 h 后

图 8 控制点 1 冻结前后图像

Fig. 8 Images of centroid point 1 before and after 24 h freezing



(a) 冻结前 (b) 冻结 24 h 后

图 9 控制点 2 冻结前和冻结 24 h 后图像

Fig. 9 Images of centroid point 2 before and after 24 h freezing

通过 Matlab 程序的简单处理即可将图像转换成像素矩阵, 并分析两张图片的相关系数。通过分析冻结前后控制点图像的相关系数来评价冻结给图像本身带来的不可抗变化, 从而确定在进行像素块搜索时的最佳参数, 避免造成虚拟相关匹配。本文将模型箱 16

个控制点在不同饱和度试样进行试验过程中,冻结前后的灰度相关系数如图 10 所示。

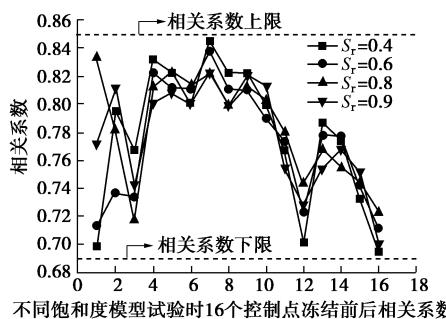


图 10 16 个控制点不同饱和度试样下冻结前后相关系数

Fig. 10 Correlation coefficients of 16 centroid points before and after freezing by varying degrees of saturation

由图 10 可知,冻土在冻结过程中,控制点的像素灰度会由于冰水相变的存在导致不可逆的变化,其灰度变化前后的相关系数不同区域有所区别,其变化范围为 0.69~0.85。

对于 PIV 图像识别技术来说,有两个关键参数,一个是种子区域相关性阈值 (minimum acceptable correlation coefficient tolerance for seed),一个是整体相关性阈值 (minimum correlation coefficient tolerance)。如果采用过高的阈值会导致 PIV 分析无法进行,如果采用过低的阈值,会导致虚假匹配,位移场产生紊乱。对于砂土,White 等^[22]的取值分别为 0.90 和 0.75。对于冻土,考虑到冰水相变引起的灰度相关性降低,需要适当降低这两个阈值。参考图 10 的统计结果,本文对这两个阈值分别取为 0.85 和 0.69。数据分析结果表明,这个取值是合理有效的。

5 基于 PIV 的非饱和土冻土冻结变形试验结果分析

采用 0.3 mm 石英砂,分层压实的方法制样,控制压实度为 0.95,土样的饱和度为 0.9,得到非饱和粉质黏土冻结模型试验试样。将试样放入控温室中,并用保温材料包裹金属面,控温室温度控制为 1℃。设定上表面边界温度为 -5℃。进行冻结冻结时间为 36 h,设定相机自动拍摄间隔为 5 min,部分试验结果如图 11 所示。

在 PIV 中设定两个灰度相关性阈值分别为 0.85 和 0.69,采用 White 等开发的 GEOPIV_RG 进行图像分析。未经数据过滤的颗粒运动示意图和颗粒位移等值线图如图 12 所示。

从图 11 初步的分析结果可以看出,颗粒位移图符合在侧限条件下上边界负温情况下的冻结粉质黏土体变趋势。即存在一定的边界效应,但呈中部隆起状态,

越靠近冷端颗粒位移越明显。说明本文提出的纹理构建方法和相关系数取值对于非饱和粉质黏土的冻结体变 PIV 分析是有效的。

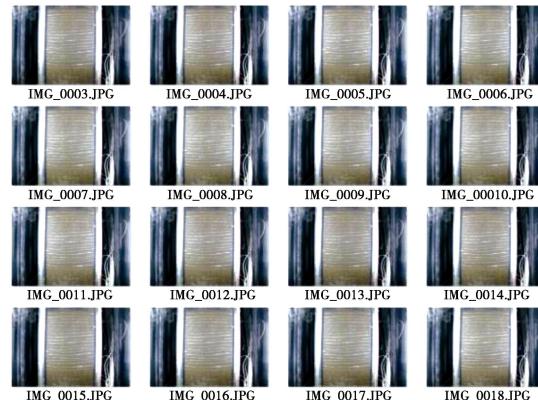


图 11 部分拍摄图片

Fig. 11 Part of experimental images during freezing

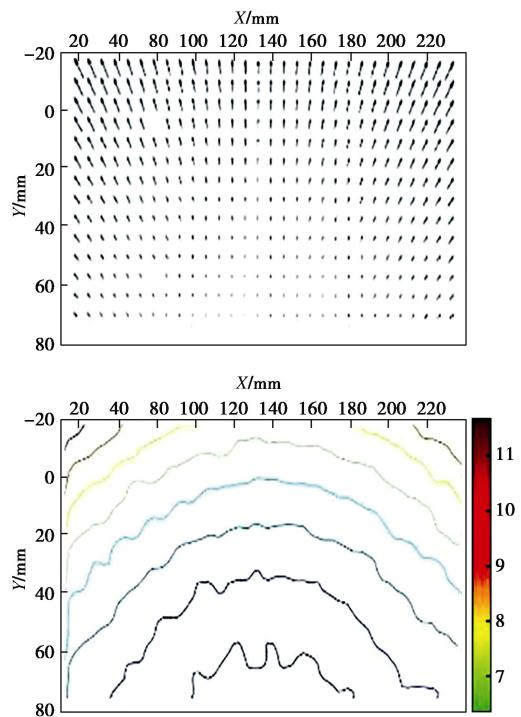


图 12 非饱和粉质黏土冻结体变计算颗粒位移与等值线图

Fig. 12 Movement of particles and contours of unsaturated silty clay during freezing

6 结 论

本文通过自制的冻土 PIV 系统,进行了冻结黏性土 PIV 测试实现方法的研究,得到以下 3 点结论。

(1) 光场对试验结果影响极大,甚至影响试验能否进行,采用摄影棚和 LED 光源制造恒定光场能得到较好的试验结果。

(2) 黏土的表面纹理构建是进行冻土 PIV 颗粒迁移分析的基础,对比了尼龙纤维、氧化钛、石英砂

等示踪粒子, 指出粒径 0.3 mm 的石英砂是较合适的选择。

(3) 对于冻土来说, 由于冰水相变会导致图像灰度相关性降低。根据统计结果, 将种子区域灰度相关性及整体灰度相关性分别调整为 0.85 和 0.69。结果表明, 这一调整是必要及合理的。

参考文献:

- [1] AJAZ A, PARRY R H G. Stress - strain behaviour of two compacted clays in tension and compression[J]. *Géotechnique*, 1975, **25**(3): 495 – 512.
- [2] TARANTINO A, COL E D. Compaction behaviour of clay[J]. *Géotechnique*, 2008, **58**(3): 199 – 213.
- [3] 李东庆, 魏春玲, 吴紫汪. 边坡渗流对冻土地区路基稳定性的影响分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2000, **36**(3): 175 – 179. (LI Dong-qing, WEI Chun-ling, WU Zi-wang. Analysis of the influence of the slope seepage on embankment stability[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Science)*, 2000, **36**(3): 175 – 179. (in Chinese))
- [4] 令 锋, 吴紫汪. 渗流对多年冻土区路基温度场影响的数值模拟[J]. 冰川冻土, 1999, **21**(2): 115 – 119. (LING Feng, WU Zi-wang. Numerical simulation of the influence of seepage on temperature field of roadbed in permafrost region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, **21**(2): 115 – 119. (in Chinese))
- [5] 张长庆, 彭万巍, 于志秋. 应变片用于冻土变形测试初探[J]. 冰川冻土, 1995(增刊 1): 147 – 150. (ZHANG Chang-qing, PENG Wan-wei, YU Zhi-qiu. Primary study of measuring deformation of frozen soil with strain gauge[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995(S1): 147 – 150 (in Chinese))
- [6] 刘增利, 张小鹏, 李洪升. 基于动态 CT 识别的冻土单轴压缩损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 542 – 546. (LIU Zeng-li, ZHANG Xiao-peng, LI Hong-sheng. A damage constitutive model for frozen soils under uniaxial compression based on CT dynamic distinguishing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(4): 542 – 546. (in Chinese))
- [7] 孙星亮, 汪 稔, 胡明鉴. 冻土三轴剪切过程中细观损伤演化 CT 动态试验[J]. 岩土力学, 2005, **26**(8): 1298 – 1302, 1311. (SUN Xing-liang, WANG Ren, HU Ming-jian. A CT-timely experimental study on meso-scopic structural damage development of frozen soil under triaxial shearing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(8): 1298 – 1302, 1311. (in Chinese))
- [8] 刘 波, 李东阳, 刘璐璐, 等. 冻土正融过程 CT 扫描试验及图像分析[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(12): 2014 – 2019. (LIU Bo, LI Dong-yang, LIU Lu-lu, et al. CT scanning and images analysis during frozen soil thawing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, **37**(12): 2014 – 2019. (in Chinese))
- [9] 盛 煜, 彭万巍, 福田正己. 超声波技术在冻土物性测试中的应用探讨[J]. 冰川冻土, 2001, **23**(4): 432 – 435. (SHENG Yu, PENG Wan-wei, FUKUDA M. Approach to the application of ultrasonic technology to measuring physical properties of frozen soils[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, **23**(4): 432 – 435. (in Chinese))
- [10] 凌贤长, 徐学燕, 徐春华, 等. 冻结哈尔滨粉质黏土超声波速测定试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(4): 456 – 459. (LING Xian-zhang, XU Xue-yan, XU Chun-hua, et al. Study on frozen harbin silty clay through its measuring tests of ultrasonic velocity[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, **24**(4): 456 – 459. (in Chinese))
- [11] 王大雁, 朱元林, 赵淑萍, 等. 超声波法测定冻土动弹性力学参数试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(5): 612 – 615. (WANG Da-yan, ZHU Yuan-lin, ZHAO Shu-ping, et al. Study on experimental determination of the dynamic elastic mechanical parameters of frozen soil by ultrasonic technique[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, **24**(5): 612 – 615. (in Chinese))
- [12] 武建军, 俞祁浩. 冻土位移的散斑照相测量[J]. 冰川冻土, 1997, **19**(3): 258 – 262. (WU Jian-jun, YU Qi-hao. Measuring frozen soil displacement with speckle photography[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997, **19**(3): 258 – 262. (in Chinese))
- [13] LIU S, JIANG F, LIU J, et al. Measurement of ice movement in water using electrical capacitance tomography[J]. *Journal of Thermo Science*, 2009, **18**(1): 8 – 12.
- [14] 李元海, 朱合华, 上野胜利, 等. 基于图像相关分析的砂土模型试验变形场量测[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 36 – 41. (LI Yuan-hai, ZHU He-hua, KATSUTOSHI U, et al. Deformation field measurement for granular soil model using image analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, **26**(1): 36 – 41. (in Chinese))
- [15] 张 嘎, 牟太平, 张建民. 基于图像分析的土坡离心模型试验变形场测量[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(1): 94 – 97. (ZHANG Ga, MU Tai-ping, ZHANG Jian-min. Displacement measurement using image analysis in centrifuge modeling of slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(1): 94 – 97. (in Chinese))
- [16] ARENSEN L U, SEGO D C, TAKE W A. Measurement of

- ice lens growth and soil consolidation during frost penetration using particle image velocimetry (PIV) [C]// 60th Canadian Geotechnical Conference. Ottawa, 2007.
- [17] XIA D, ARENSEN L U, BIGGAR K W, et al. Freezing process in Devon silt-using time-lapse photography: proceedings[C]// 58th Canadian Geotechnical Conference. Ottawa, 2005.
- [18] AZMATCH T F, ARENSEN L U, SEGO D C, et al. Measuring ice lens growth and development of soil strains during frost penetration using particle image velocimetry (GeoPIV)[C]// Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost. Fairbanks, 2008.
- [19] ADRIAN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, 23(1): 261 – 304.
- [20] ADRIAN R J. Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow. a review[J].
- [21] WHITE D J. Investigation into the behaviour of pressed-in piles[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2002.
- [22] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 619 – 631.
- [23] 王世鑫, 王旭东. 基于粒子图像测速技术的黏性土变形测量研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2015(2): 102 – 107. (WANG Shi-xin, WANG Xu-dong. Deformation measurement of cohesive soil based on PIV technology[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2015(2): 102 – 107. (in Chinese))
- [24] TEH K L, CASSIDY M J, LEUNG C F, et al. Revealing the bearing capacity mechanisms of a penetrating spudcan through sand overlying clay[J]. Géotechnique, 2008, 58(10): 793 – 804.

第十届全国基坑工程研讨会（第1号征文通知）

由中国建筑学会建筑施工分会基坑工程专业委员会主办，兰州理工大学承办的“第十届全国基坑工程研讨会”将于2018年9月在甘肃省兰州市召开。

主办单位: 中国建筑学会建筑施工分会基坑工程专业委员会

承办单位: 兰州理工大学

协办单位 (排名不分先后): 中铁西北科学研究院; 兰州大学; 西北民族大学; 兰州交通大学; 甘肃土木工程科学研究院; 《岩土工程学报》编辑部; 《岩土力学》编辑部 (待增补)

会议主题: ①基坑工程设计理论与实践及其新进展、行业的发展趋势; ②基坑工程施工和监测领域的技术、新工法和新设备; ③基坑工程及特殊岩土层中的地下水问题及控制技术; ④基坑施工对周围环境的影响评估与控制技术; ⑤地铁深基坑工程中的设计、施工与监测技术; ⑥黄土、软弱土等特殊

土地区基坑设计与施工的关键技术; ⑦深基坑工程支护结构与降水相关问题数值模拟研究; ⑧超深基坑工程的设计、施工与监测的关键技术; ⑨基坑工程领域的信息化技术及其应用; ⑩重、大、特基坑工程的典型案例和基坑工程事故分析。

重要日期安排: ①2018年4月30日前提供论文电子版一份,发送至邮jikenghy2018@163.com。②论文将组织学术委员会专家评审,录用通知及修改意见将在2018年5月31日前通知作者。③作者根据修改意见和排版要求定稿,于2018年6月20日前将修改稿和修改说明电子版发到会议组委会。

会议秘书处联系地址: 甘肃省兰州市七里河区兰工坪路287号, 兰州理工大学土木工程学院 (730050)。联系人: 周勇 13119308411, 叶帅华13893624445, 韦正德13639330876, 杨校辉 15095338032。会议论文提交电子邮箱: jikenghy2018@163.com。

(第十届全国基坑工程研讨会会务组 供稿)