

DOI: 10.11779/CJGE201809006

考虑岩土材料变形时空非均匀特征的 DSCM 快速分析方法

李元海^{1, 2}, 唐晓杰^{1, 2}

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 岩土材料在外荷载作用下其变形通常表现出时间与空间分布上的非均匀性特征, 在应用 DSCM (数字散斑相关方法) 进行图像像素测点的相关搜索过程中, 传统方法通常对于全部试验阶段的图像和同一幅图像上的所有测点均采用相同的搜索范围, 显然, 这是一个虽然简单但效率很低的图像搜索分析方法。提出一种依据参考网格的测点动态范围搜索方法 (简称 PDSS), 即首先利用常规搜索方法分析获得一个间距较大且覆盖正式分析范围的测点网格的位移, 然后以其作为正式图像测点分析的参考网格, 最后, 对任一测点, 以其所在的参考单元节点的最大位移作为该测点的搜索范围值, 从而可实现与测点变形大小相适应的动态范围搜索。PDSS 方法本质上是通过减少相关分析的像素点数量来大幅提高图像分析速度。试验检验结果表明, PDSS 方法相对于普通方法的图像分析速度通常可提高 10 倍左右。研究成果解决了具有时空非均匀变形特征的岩土材料 DSCM 的快速优化分析问题, 可进一步提高 DSCM 在岩土材料变形量测中的应用技术水平。

关键词: 数字散斑相关; 岩土材料; 非均匀性; 变形量测; PhotoInfor

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2018)09 - 1610 - 09

作者简介: 李元海(1969 -), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程数字照相量测技术以及地下工程安全分析与稳定性控制机理等方面的研究工作。E-mail: lyh@cumt.edu.cn。

Fast analysis method for DSCM based on spatiotemporally non-uniform deformation characteristics of geotechnical materials

LI Yuan-hai^{1, 2}, TANG Xiao-jie^{1, 2}

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics & Civil

Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The deformation of geotechnical materials under the external loads generally non-uniformly varies with time and distribution. However, the search radius or search range is conventionally invariable with all the experimental images analyzed through the whole process, as well as with the measuring points in one picture. The relevant search of the image pixels in such a case is conventionally conducted based on DSCM during the basic mechanical experiment and the model experiment research of the geotechnical materials, which is too straightforward to be efficient. In order to solve this problem, a new method named PDSS which can adjust the search range is proposed to increase the efficiency. This method starts with the measurement of grid displacement covering the whole scope of analysis. The separation distance of grids is comparatively large, and the statistics are gained through the conventional search method during this period. Then, what we acquired first will be used for the analysis of measuring points. Finally, the search range of any point will be fixed with the maximum displacement of the reference element node. Such a range can be adapted for the deformation of measuring points. Essentially, the efficiency of analysis is improved through reducing the number of pixels when the PDSS is applied. As is shown from the experimental results, the analysis speed can be increased by more than 10 times. PDSS can be used to solve the problem of fast DSCM analysis for rock and soil materials with spatial and temporal heterogeneity. The research results can further improve the application level of DSCM in experimental studies of geotechnical engineering.

Key words: digital speckle correlation; geotechnical material; non-uniformity; deformation measurement; PhotoInfor

0 引言

数字散斑相关方法(digital speckle correlation

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目 (2014CB46905); 高等学校科学创新引智计划项目 (B14021)
收稿日期: 2017 - 09 - 07

method, 简称 DSCM) 是一种以数码相机或 CCD 摄像机等工具作为数字化图像采集设备, 并利用数字图像处理分析技术, 计算追踪不同阶段中数字化散斑图像几何点的坐标变化, 从而实现位移量测以及变形分析的一种量测方法^[1]。DSCM 作为一种光测方法具有全场性、非接触性以及高精度等特点^[2], 适用于岩土材料变形过程的可视化量测^[3], 在岩土工程模型试验中有着普遍而独特的作用。近年来, 随着数字照相设备以及计算机硬件的快速发展, DSCM 在包括岩土工程在内的各领域试验研究中得以广泛应用。如在铁路轨道变形研究中, 由于此技术的量测特性, 可获得常规方法难以求取的位移数据^[4]; 在滑坡变形场研究中, 应用 DSCM 可计算滑坡体上各个点的方向和位移变化量, 得到测点的滑坡位移分布图^[5]; 利用此技术的三维观测系统可有效观测岩石变形破坏机制, 为岩土介质宏观变形破坏机制的研究提供重要借鉴^[6]。数字散斑相关法在各领域的广泛应用彰显了此方法突出的优越性。一般来说, DSCM 系统由硬件与软件两部分组成, 分别实现图像采集与图像分析两项核心功能, 在当前试验条件下, 硬件设备基本能够满足各试验对于图像采集的要求, 因此, 一套高效完整且可满足用户需求的分析软件则成为 DSCM 方法推广的关键所在^[7]。

一般而言, 如何提高图像分析的速度和变形量测的精度是优化 DSCM 系统的两个最为关键的研究内容, 围绕这两个指标的提高, 众多学者进行了相关研究。实际上, 图像分析处理系统的计算速度和精度很大程度上取决于相关搜索算法的分析效率。由于相关系数分布的多峰特性, 存在副峰被错误确定为主峰而造成分析误差的可能性, 有学者在研究过程中提出了一种针对多峰特性的多频谐波相关分析方法用以提高相关性分析的准确性^[8]; 此外, 研究人员围绕搜索算法, 还提出了如十字搜索^[9]、预测搜索^[10]、极值搜索^[11] 以及智能搜索^[12]等一系列优化方法。这些都可以看作是 DSCM 的一般算法研究, 具有一定的普适性, 都不是专门针对诸如岩土等特定材料的变形特征而进行的相关研究。实际上由于岩土材料具有变形局部化等显著特征, 在 DSCM 基本原理和基本算法的基础上, 可以且非常有必要进行一些针对性的优化研究, 例如, 局部化的破裂是岩石材料变形的一个主要特征, 在岩石目标观测面的图像上, 破裂会使裂隙区的 DSCM 图像相关分析产生较大误差甚至错误, 针对这一问题, 笔者基于岩体裂隙分布特征及其简化形式分析, 提出了“一点五块法”在减少消除误差和提高量测精度方面取得了显著效果^[13]; 再如, 砂土材料变形在大小与方向上具有渐变特征, 为此笔者提出了一种

基于岩土渐变变形特征的“局部定向搜索”(LDSR)快速分析方法^[14], 并给出了方法的适用前提条件; 进一步观察发现岩土材料都具有时空非均匀性的变形特征, 为研究大幅提高 DSCM 的分析速度提供了依据。

岩土材料的变形破坏过程通常都比较复杂^[15], 在外荷载作用下其变形往往表现出时间与空间分布上的非均匀性, 即岩土材料变形的大小在不同的时间点或阶段以及不同的空间区域往往有着明显的不同, 而在应用 DSCM 进行图像像素测点的相关搜索时, 通常对于全部试验阶段的图像和同一幅图像上的所有测点均采用相同的搜索范围, 此方法虽可实现准确的相关搜索功能, 但运算效率低下, 因此, 根据岩土材料不均匀时空变形特征, 通过研究设定动态搜索范围可有效提高搜索速度。按此思路, 笔者提出一种依据参考单元网格的测点动态范围搜索法 (point dynamic search scope method for DSCM, 简称 PDSS 法), 并在自行研制的 PhotoInfor 软件中编程实现了此项功能, 该方法的本质是通过大幅减少在岩土材料 DSCM 相关分析中像素点的搜索数量来大幅提高图像分析速度。本文将对 PDSS 方法的基本原理、适用条件以及运算速度与精度进行分析与讨论, 旨在进一步提高 DSCM 方法在岩土工程领域的应用水平。

1 岩土材料变形非均匀时空特征分析

众所周知, 岩土材料的变形具有时空非均匀性的特征, 其变形按时间发展变化通常可分为渐进型和突变型两大类, 变形过程通常先发生渐进变形, 然后产生突变^[13]; 在变形的空间分布方面, 由于岩土材料自身性质的空间差异以及应力场空间分布的不同, 岩土材料的区域局部化变形特征通常都比较显著^[16]。岩土材料时空非均匀变形特征在试验过程中也有很好的验证, 例如, 在岩石试样的单轴压缩试验中荷载-位移曲线中峰值区域的存在^[17]、图 1 所示的隧道相似模拟试验阶段与不同位置围岩位移曲线^[18]以及砂土地基承载力试验中的地基变形场分布^[19]等都显示出岩土材料普遍存在着变形时空非均匀分布的显著特征, 岩土材料的这一变形特征为 DSCM 的优化分析提供了重要依据。

2 测点动态范围搜索法原理与程序

2.1 DSCM 量测方法简介

DSCM 的核心是在变形前后的两幅图像上通过图像分析来准确识别出对应像素点的坐标变化。由于其变形前后的散斑图存在相关性, 材料发生变形后目标点的位置可基于相关系数采用式(1)进行判断。通过

计算参考点与目标点的坐标差值可获得像素测点在变形前后的像素位移。

$$R_{12} = \frac{\sum_{x=1}^{2k+1} \sum_{y=1}^{2k+1} v(x,y) \times u(x,y)}{\sqrt{\sum_{x=1}^{2k+1} \sum_{y=1}^{2k+1} v(x,y)^2 \times \sum_{x=1}^{2k+1} \sum_{y=1}^{2k+1} u(x,y)^2}} \quad (1)$$

式中 $v_i(x,y)$ 为追踪点的像素 RGB 颜色值; $u_i(x,y)$ 为基准测点的像素 RGB 颜色值; $2k+1$ 为像素块的长或宽, 单位为像素; i 取 1, 2, 3, 代表 RGB 的 3 个颜色分量 (注: 最终相关系数是对 R、G、B 3 个颜色分量分别计算出各自的相关系数, 然后求平均值)。

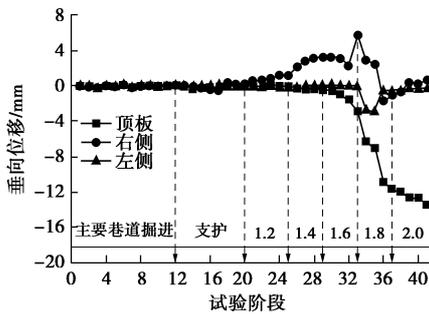


图 1 岩土材料时空非均匀变形特征^[18]

Fig. 1 Non-uniform deformation characteristics of geotechnical materials^[18]

利用上述方法, 可以确定两幅变形图像间像素测点的整像素位移值, 然而, 实际位移不一定恰为整数像素值, 因此, 为提高量测精度, 对于 1 个像素以下的小变形识别, 通常使用插值技术获得非整数坐标处的颜色灰度值, 即将 1 个像素细分为更小的像素单元进行分析。此种利用图像插值算法进行 1 个像素以下位移的识别通常称之为亚像素识别。

2.2 PDSS 分析前提条件

测点动态范围搜索法 (以下简称 PDSS) 的基本思想是基于 DSCM 分析的基本原理^[13-14, 19], 依据岩土材料变形时空非均匀性特征, 在两幅对比分析图像之间, 位移大的像素点采用大的搜索范围, 位移小的像素点采用小的搜索范围, 以此解决图像上任一点 M_i 的最佳搜索范围确定问题, 通过缩减大量的小位移像素点的搜索范围来大幅减少图像相关搜索像素点的数量, 从而大幅提高图像分析速度。

DSCM 中的 PDSS 总体分析两大步骤如下:

第 1 步: 先在图像上划分一个涵盖实际分析范围的测点间距较大的网格 (这里简称参考网格), 在测点搜索范围的确定方面同传统方法, 即所有像素测点均采用相同的搜索范围。

第 2 步: 利用第 1 步分析结果作为实际测点网格分析的参考网格, 参考网格单元 (网格单元这里定义

为在一个测点网格中, 由 4 个网格节点组成的四边形, 该四边形同时满足其内部或边界上没有其他网格节点的条件。)节点的最大位移作为网格单元内测点的搜索范围, 然后进行快速分析。

由 PDSS 的分析步骤可以看出其适用条件为: 在两幅相邻图像的分析区域中, 任意四边形区域内像素测点的 x 和 y 向位移均不大于该四边形 4 个顶点的 x 和 y 向的最大相对位移。如有个别点不满足这一条件, 则仅仅影响个别点的分析精度, 总体影响不大。本文试验验证结果表明, 几种常用的岩土材料基本上都能够很好地满足这一适用条件。

2.3 PDSS 量测基本原理

PDSS 的关键是如何根据本幅图像的参考网格来确定本幅图像测点在下一幅图像上的最佳搜索范围。传统的搜索方法, 所有测点均采用相同且固定不变的大搜索范围, 而 PDSS 仅仅搜索常规范畴内的小部分区域, 从而大幅缩短了搜索时间。

PDSS 的基本原理是: 首先, 图像上所有像素测点采用相同的搜索范围进行分析获取参考网格数据, 如图 2 所示, 假设第 k 幅试验图像上有一测点 M_i , 在外荷载作用下, 随着图像区域变形, 移动到第 $k+1$ 幅图像的位置, 产生的位移为 d_s ; 然后通过采用“点是否在四边形内部或边界”的几何判别方法确定 M_i 所在的参考网格 $P_1P_2P_3P_4$, 将 P_1, P_2, P_3, P_4 四个节点 x 和 y 方向的最大位移值作为 M_i 在第 k 幅图像上的搜索范围值。

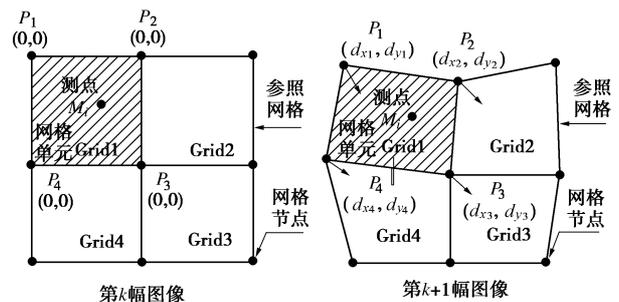


图 2 PDSS 方法的基本原理示意图

Fig. 2 Basic principle of PDSS method

2.4 PDSS 基本算法与程序实现

如图 3 所示, PDSS 法的基本算法步骤如下:

(1) 在序列图像中的第 1 幅图像上选定一个大于后续实际分析的像素测点范围, 然后选定一个较大的像素测点间距来划分初始网格。

(2) 在开始 DSCM 分析前, 设定相同的搜索范围和 1 个像素的搜索步长, 然后进行全部序列图像的测点分析, 获得的各图像对应的变形测点网格数据作为后续实际图像分析的参考网格。

(3) 利用待分析的序列图像, 重新建立图像分析项目, 选择使用参考网格, 由图像分析程序在正式分析前读取到计算机内存中。

(4) 在第 1 幅图像上的参考网格覆盖的图像范围内部, 以某个网格测点间距来划分实际测点网格。

(5) 对于实际测点网格中的任意一个网格节点 M_i (即测点), 采用“点是否在四边形内部或边界”的通识几何判别方法, 扫描分析计算机内存中所有参考网格数据, 找到测点 M_i 所在的参考网格单元 (如 $P_1P_2P_3P_4$)。

(6) 计算 M_i 所在参考网格单元的 4 个节点在第 $k+1$ 幅图像上 x 和 y 方向的最大位移绝对值 $d_{max}(\max\{|d_{x1}|, |d_{y1}|, |d_{x2}|, |d_{y2}|, |d_{x3}|, |d_{y3}|, |d_{x4}|, |d_{y4}|\})$, 然后将该位移值作为第 k 幅图像上像素点 M_i 在第 $k+1$ 幅图像上的搜索范围。

(7) 采用数字散斑相关搜索方法, 分析获得测点 M_i 在第 $k+1$ 幅图像上的位置坐标, 通过比较测点 M_i 在第 k 幅和第 $k+1$ 幅图像上位置坐标差值计算出 M_i 的位移。

(8) 在第 k 幅图像选择新的像素测点, 进行(5)~(7)三个步骤循环, 直到所有分析的网格测点分析完毕, 即可以获得全部像素测点的位移数据。

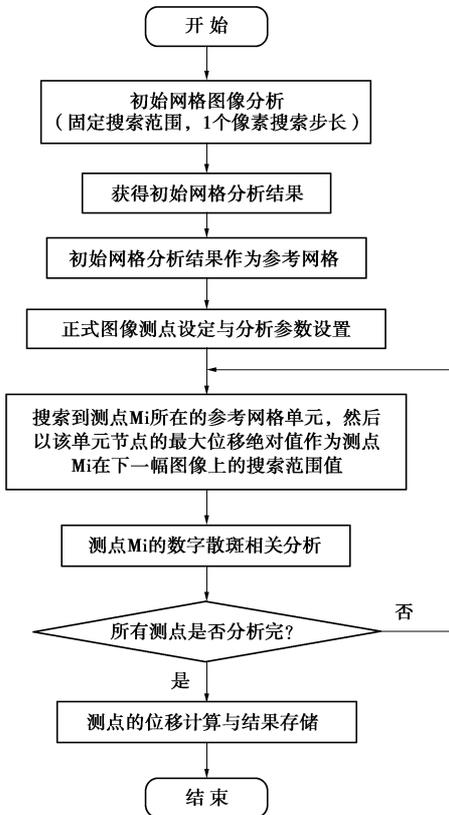


图 3 PhotoInfor 程序 PDSS 功能实现流程图

Fig. 3 Principle of PDSS in software PhotoInfor

根据 PDSS 算法与功能实现流程图, 笔者在自行

研制的数字照相变形量测软件系统 PhotoInfor 中, 将“测点动态范围搜索法”作为一种通用优化分析选项供用户选择使用, 如图 4 所示。当用户勾选“启用逐个测点动态范围搜索法 (PDSS)”时, 如果没有准备好参考网格数据, 程序会自动给出提示。

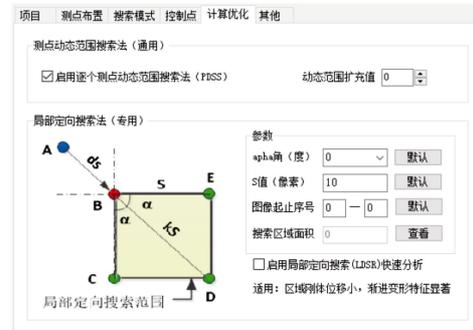
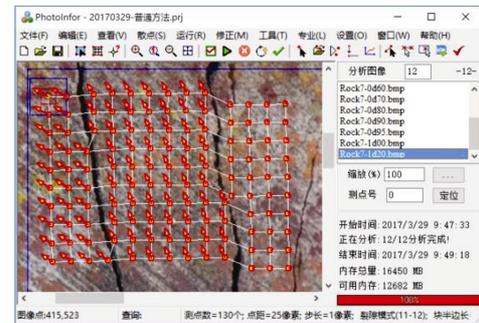


图 4 PhotoInfor 软件中测点动态范围搜索法选项

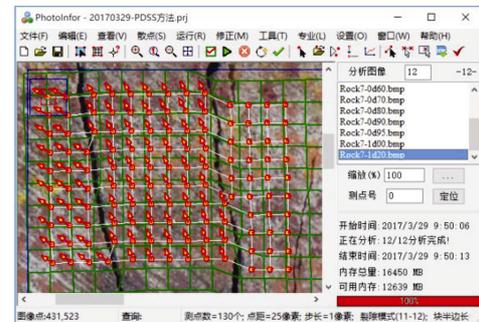
Fig. 4 User options of PDSS in software PhotoInfor

2.5 PDSS 分析效果

分别采用普通方法和 PDSS 法对同一组岩石材料的 12 张图像进行了分析速度测试对比, 结果如图 5 所示, 可以直观看出, PDSS 法与普通方法的位移分析结果相同, 但在分析速度方面存在明显差别, PDSS 方法的计算速度是普通方法的 15 倍。由此可见, PDSS 法在 DSCM 的应用中可在保证分析正确性的前提下大幅提高图像分析的速度。



(a) 普通方法, 耗时105 s



(b) PDSS方法, 耗时7 s

图 5 PDSS 方法测试分析效果

Fig. 5 Efficiency analysis of tests through PDSS

3 PDSS 法的速度分析

由于在实际 DSCM 图像分析工作中,针对一组序列图像使用相同参考网格,通过调整参数和针对不同分析需求往往要进行多次分析,参考网格一方面由于网格点数量较少,本身分析时间较短,同时实际项目分析随着分析次数的增加,参考网格分析时间所占比重甚至降低到可以忽略不计。因此,这里并没有将参考网格点的计算时间统计在内,对 PDSS 速度的考察影响不大。为定量分析 PDSS 法分析与普通方法的分析速度提高的倍数 N ,可按以下简单公式进行计算:

$$N = t_1 / t_2 - 1 \quad (2)$$

式中 N 为 PDSS 法图像分析速度提高倍数; t_1 为普通方法图像分析耗费总时间; t_2 为 PDSS 法图像分析耗费总时间。

3.1 速度与材料类型的关系

不同类型的岩土材料在荷载作用下,由于自身物理力学性质的差异,其变形区域与变形过程的时空均匀性特征大不相同。为对比 PDSS 方法在不同岩土材料中的分析速度,选取 3 种常用的岩土试验材料—岩石、砂土和相似材料,分别应用普通法及 PDSS 法进行对比分析,主要计算测试软硬件环境为 64 位 Windows10 操作系统、酷睿 i7-4770CPU (3.4G HZ)、16 GB 内存、1TB 硬盘和集成显卡。

在普通法分析中,固定搜索范围通常也是采用人工估算设定的方法,由于过大或过小的搜索范围都会影响到对 PDSS 速度的准确考察,为消除人为估算的影响,采用 PhotoInfor 软件提供的一种最佳半径自动计算功能而非人为估算来较为准确地确定普通法中的固定搜索范围参数。在 3 种岩土材料的图像分析过程中,测点分别取 5000 点与 10000 点,正方形像素块大小统一取 21 像素 \times 21 像素,亚像元参数均取 1 个像素,在 PhotoInfor 软件运行获得单个测点分析时间,经进一步计算绘制总体速度分析结果曲线如图 6 所示。由图 6 可知,应用普通方法和 PDSS 方法的岩石、砂土及相似材料的单测点分析时间分别分布于 0.1~0.2 s 区间和 0.002~0.02 s 区间内,相对于普通方法,PDSS 方法的分析速度提高了 8~16 倍。由此可见,PDSS 方法能够有效解决具有时空非均匀变形特征的岩土材料数字散斑相关快速分析问题。

在不同的岩土材料应用中,PDSS 法分析速度之所以有所差别,主要原因在于不同的材料其时空变形的特点有所不同。一般来说,PDSS 法对于不同岩土材料变形分析的速度提高程度与岩土材料局部化大变形的区域和大变形的阶段所占比例成反比。

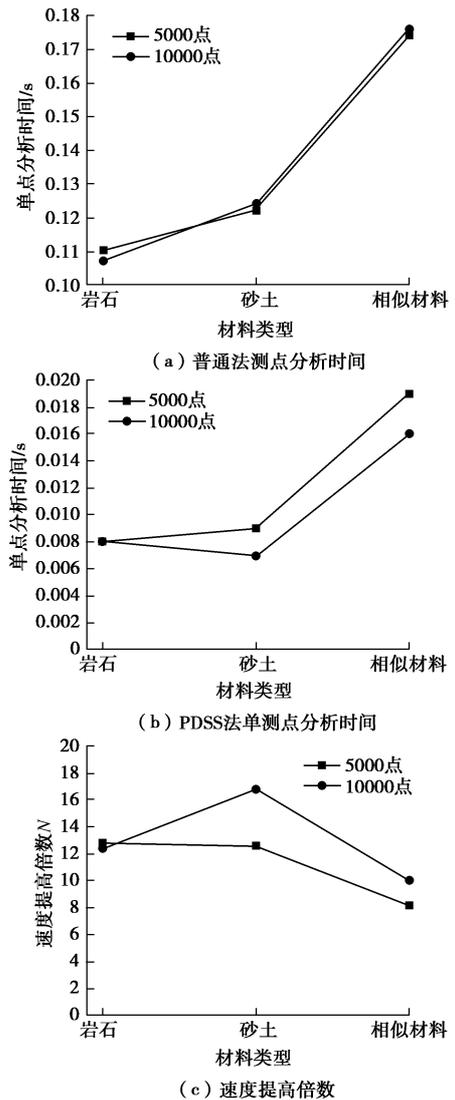


图 6 PDSS 法分析速度与材料关系

Fig. 6 Speed analysis through PDSS affected by materials

3.2 速度与像素块的关系

像素块的大小是 DSCM 中相关搜索的一个关键参数。为分析 PDSS 法分析速度与像素块大小的关系,选取岩石与砂土材料,测点数均为 5000 点,亚像元参数均取 1,像素块边长分别取 20, 25, 29, 33, 37, 41 及 45 (仅岩石) 像素,图像分析速度提高倍数如图 7 所示。可以看出,应用 PDSS 法,岩石材料图像分析速度提高 13~22 倍,砂土材料可提高 13~33 倍,且随像素块增大,提高倍数呈现先增加后趋于平缓的趋势,原因应该是 DSCM 中图像分析的总时间是像素块相关性计算时间与图像预处理和计算等时间之和,在搜索范围相同时,像素相关计算时间取决于像素块的大小,其在总体分析时间中所占比重较大,因此,像素块越大,其他分析时间占比越小,因而 PDSS 方法的速度提高倍数随着像素块的增大总体上呈现出渐趋稳定的态势。

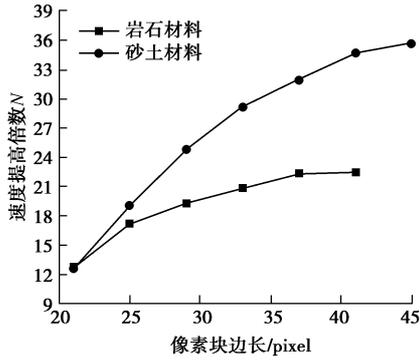


图 7 PDSS 分析速度与像素块的关系曲线

Fig. 7 Relation curves of speed analysis through PDSS affected by sizes of pixel blocks

3.3 速度与亚像素的关系

亚像素作为图像分析的另一关键参数，对于 PDSS 方法的优化效果也有着重要的影响，为分析此种影响关系，选取岩石材料和砂土材料，测点数均为 5000 点，正方形像素块大小均为 21 像素×21 像素，亚像素参数则取 0.1, 0.25, 0.5, 1，分别计算图像分析速度的提高倍数，由图 8 所示的计算结果可以看出，岩石材料和砂土材料的速度提高倍数与亚像素的关系曲线形式近似，随着亚像素的增加，PDSS 法相对于常规法的速度提升倍数近似呈线性增长，当亚像素参数较小时，PDSS 法的分析速度的提升并不明显，但随着亚像素参数值的增加，分析速度提升倍数快速增长，当亚像素参数为 1 时，分析速度可提高 10 倍以上。主要原因在于亚像素的分析过程实际上是由两部分组成，首先是在搜索范围内按 1 个像素的步长进行搜索，找到相关性系数最大的像素点后，再按实际亚像素参数对该像素点分割（如亚像素为 0.1，则 1 个像素点纵横分割成 100 块）后进行插值与相关性计算，像素分割数量越多，这一部分的计算时间增加占总时间的比重越大，而增加的时间对于普通方法和 PDSS 方法则是相同的，因此，分析速度相对提高的倍数越小（当亚像素为 0.1 时大约提高 75%），但相对于普通方法来说分析速度仍然有明显的提升。

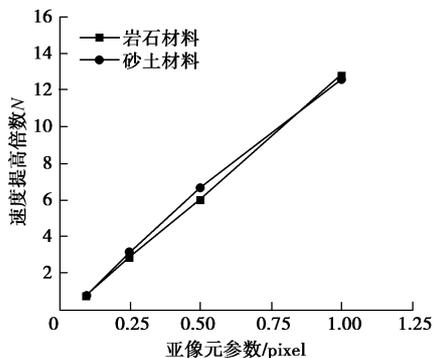


图 8 PDSS 分析速度与亚像素的关系曲线

Fig. 8 Relation curves of speed analysis through PDSS affected by sub-pixels

3.4 结合“一点五块”法的速度分析

为了考察 PDSS 在用于岩体裂隙 DSCM 分析的“一点五块”法或裂隙法的分析速度，选取岩石材料，测点数为 5000 点，正方形像素块大小为 21×21 像素，亚像素参数取 1 来进行计算，分别求取单独应用普通法和 PDSS 以及与“一点五块”法相结合的分析时间。由如图 9 所示结果可以看出，以普通法计算时间为基准，PDSS 法与“一点五块”法相结合的分析速度提高了 5 倍，尽管没有 PDSS 单独使用提高的倍数高（13 倍），但相对于单独使用“一点五块”法（-0.79 倍）来说，图像分析的速度仍有显著提高（5.4 倍）。可见，相对于普通的分析方法，PDSS 与“一点五块”法的结合在提高计算精度的同时，既能有效消除由于岩体裂隙所产生的位移分析误差，又能比较有效地提高 DSCM 的图像分析速度。

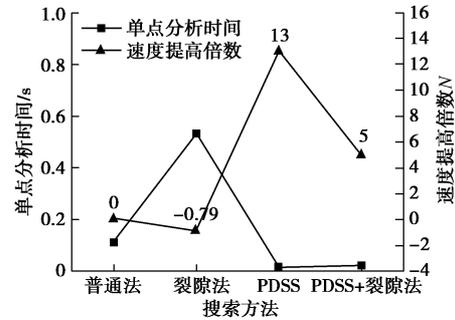


图 9 考虑裂隙影响的 PDSS 分析速度曲线

Fig. 9 Curves of speed analysis through PDSS influenced by fractures

3.5 量测精度问题分析

试验研究发现，PDSS 方法除了能够大幅提高岩土材料变形的图像分析速度之外，在一定情况下还可以“抑制”图像测点位移分析的误差或错误，从而提高 DSCM 量测的精度。究其原因在于岩土材料的数字图像在总体满足 DSCM 数字散斑相关要求的情况下，由于光照环境影响所产生的局部图像噪声通常难以完全避免，这也正是常见噪声区域附近像点产生位移分析误差或错误的主要原因。图像上出现的一些小白斑是最常见的图像噪声显现形式，当参考单元网格的 4 个节点未受噪声影响（即位移准确），而白斑（噪声区）正好位于单元网格内时，由于网格内实际测点的搜索范围主要取决于参考单元网格的 4 个节点的正确位移，不会像普通方法那样直接受到白斑噪声的影响，因此，对噪声产生的测点位移误差或错误能够起到有效的抑制作用，这一作用在下文的试验结果中也得到了验证。

另外一个精度问题是 PDSS 的适用条件问题，即 PDSS 要求网格单元内的测点位移不大于单元 4 个节

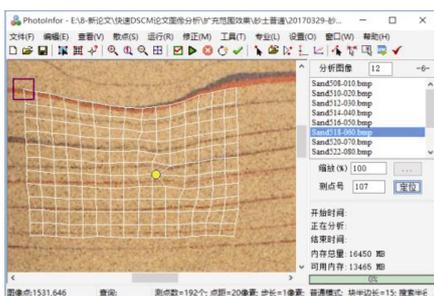
表 1 砂土材料 DSCM 中的 PDSS 位移量测精度

Table 1 Displacement precision of DSCM in sand materials through PDSS

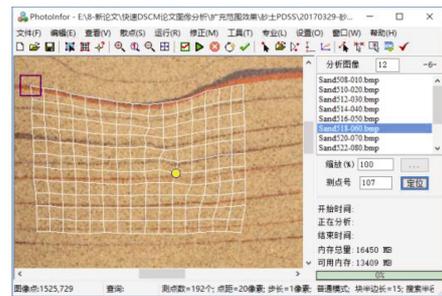
| 测点编号 | 普通法 (1.0) | PDSS (8.3) | | PDSS 扩 1 (6.6) | | PDSS 扩 2 (5.4) | |
|------|-----------|------------|------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>b-a</i> | <i>b</i> ₁ | <i>b</i> ₁ - <i>a</i> | <i>b</i> ₂ | <i>b</i> ₂ - <i>a</i> |
| #1 | 20.248 | 20.248 | 0 | 20.248 | 0 | 20.248 | 0 |
| #12 | 68.884 | 66.843 | -2.041 | 66.843 | -2.041 | 68.264 | -0.62 |
| #28 | 66.888 | 67.209 | 0.321 | 67.209 | 0.321 | 67.209 | 0.321 |
| #74 | 75.213 | 74.404 | -0.809 | 75.213 | 0 | 75.213 | 0 |
| #107 | 15.620 | 69.426 | 53.806 | 72.25 | 56.63 | 72.25 | 56.63 |
| #144 | 49.729 | 48.765 | -0.964 | 49.729 | 0 | 49.729 | 0 |

点的位移, 经试验测试, 岩石、砂土和相似材料的图像测点区域总体上都能够满足这一条件, 如对图 6 所示的岩石材料的 DSCM 分析, 通过最终图像对应的分析结果逐点比对表明, PDSS 方法和普通方法的分析结果完全相同。对于岩土材料个别区域不满足这一条件的情形(噪声引起的错误情形除外), 笔者提出一种方法, 可在 PDSS 应用的基础上来减少或消除这一问题, 同时依然能够较大幅度地提高图像分析速度。具体来说, 通过在 PDSS 确定的测点搜索范围基础上适当扩大一定范围, 理论上就可以解决参考网格内测点位移大于单元节点位移的问题。实际对砂土局部变形较大区域(滑动带)进行的测点位移测试结果如表 1 所示(括号内的数字为测点分析速度的比值), 在 192 个测点中, PDSS 法与普通方法位移量测结果有差别的测点数量为 6 个, 占比 3%, 在 PDSS 法中对所有测点动态搜索范围扩大 1 个像素后, 差别测点的数量减少 3 个, 占比下降到 1.5%, 动态搜索范围扩大 2 个像素, 有 1 个测点(#12)位移差缩小。为了考察 3 个误差点的实际情况, 在 PhotoInfor 软件中打开分析结果, 根据测点编号利用测点定位功能仔细查看后, 发现差异最大的点(#107)在普通方法分析的中间阶段发生了错误(图 10), 其余两个点(#12 和#28)的 PDSS 方法分析结果更接近于实际位移(图 11)。

因此, 变形量测精度的分析查证结果进一步表明, PDSS 方法与普通方法的分析结果基本一致, 对于极少量存在差别的分析测点, 通过对动态搜索范围小量扩充 1, 2 个像素能在保证提高分析速度的前提下, 可以有效解决岩土材料局部极小区域可能不完全满足 PDSS 适用条件的问题。



(a) 普通方法



(b) PDSS法

图 10 PhotoInfor 中的 PDSS 测点位移误差查证

Fig. 10 Error checking of measuring points in PhotoInfor through PDSS

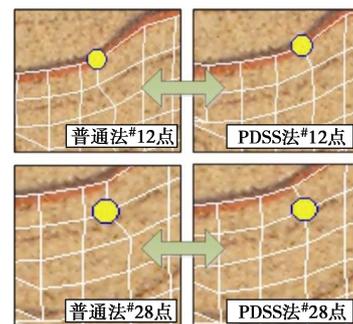


图 11 PDSS 法测点位移误差对比

Fig. 11 Error comparison of measuring points through PDSS

4 结 论

(1) 基于岩土材料变形的时空非均匀特征分析, 在岩土材料变形的 DSCM 中, 提出了一种依据参考单元网格来精确给定测点动态搜索范围的方法(简称 PDSS), 并说明了此种方法的基本原理和适用条件, 大幅提升了岩土材料变形的 DSCM 分析速度。

(2) DSCM 中的 PDSS 方法速度提升的程度与岩土材料小变形阶段图像数量占总的图像数量之比以及一幅图像上小变形区域占整个分析区域之比呈正比关系, 同时, 几种岩土材料变形试验结果表明, 相对于普通分析方法, PDSS 图像分析速度通常可提高 10 倍左右, 解决了具有非均匀时空变形特征的岩土材料 DSCM 的图像快速优化分析问题。

(3) DSCM 中相关像素块和亚像元两个关键参数影响分析表明, 随着像素块的增大, PDSS 分析速度提高倍数呈现先增加后趋于平缓的趋势, 而随着亚

像元的缩小, 尽管 PDSS 方法分析速度因亚像元的巨大计算量占比增加而降低, 但总体仍然较普通方法有明显提升。

(4) 在考虑岩体裂隙影响的 DSCM 分析中, 通过对比 PDSS 法与“一点五块”法的结合分析发现, 既能有效消除由于岩体裂隙所产生的误差, 提高计算精度, 同时依然能够提高图像分析的速度。

(5) PDSS 方法不仅能够提高岩土材料变形的 DSCM 分析速度, 同时, 可以有效“抑制”图像噪声产生的测点位移分析误差或错误, 从而可以提高岩土材料变形的 DSCM 量测精度。

(6) 试验验证表明, 在 PDSS 方法中通过对动态搜索范围小量扩充 1, 2 个像素, 在不影响 PDSS 快速分析的前提下, 能够有效解决岩土材料局部极小区域不完全满足 PDSS 适用条件的问题。

参考文献:

- [1] 李元海, 靖洪文, 刘刚, 等. 数字照相量测在岩石隧道模型试验中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(8): 1684 - 1690. (LI Yuan-hai, JING Hong-wen, LIU Gang, et al. Study on application of digital close range photogrammetry to model test of tunnel in jointed rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(8): 1684 - 1690. (in Chinese))
- [2] 王怀文, 亢一澜, 谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展[J]. 力学进展, 2005, **35**(2): 195 - 203 (WANG Huai-wen, KANG Yi-lan, XIE He-ping, Advantage in digital speckle correlation method and its application[J]. Advances in Mechanics, 2005, **35**(2): 195 - 203. (in Chinese))
- [3] TAKE W A. Thirty-sixth Canadian geotechnical colloquium: advances in visualization of geotechnical processes through digital image correlation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **52**(9): 1199 - 1220.
- [4] MURRAY C A, TAKE W A, HOULT N A. Measurement of vertical and longitudinal rail displacements using digital image correlation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **52**(2): 1 - 15
- [5] 赵永红, 王航, 张琼, 等. 用数字相关方法研究滑坡变形场[J]. 科学通报, 2016, **61**(增刊): 3163 - 3171. (ZHAO Yong-hong, WANG Hang, ZHANG Qiong, et al. A study of landslide deformation field with digital correlation method[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, **61**(S0): 3163 - 3171. (in Chinese))
- [6] 马永尚, 陈卫忠, 杨典森, 等. 基于 3D-DIC 技术的脆性岩石破坏试验研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(1): 117 - 123. (MA Yong-shang, CHEN Wei-zhong, YANG Dian-sen, et al. Experimental study of brittle rock failure based on three-dimensional digital image correlation technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(1): 117 - 123. (in Chinese))
- [7] 李元海, 靖洪文, 曾庆有. 岩土工程数字照相量测软件系统研发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 2): 3859 - 3866. (LI Yuan-hai, JING Hong-wen, ZENG Qing-you. Development and application of digital photogrammetry software package for geotechnical experiment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 3859 - 3866. (in Chinese))
- [8] ZHU H M, HU L L. Displacement measurement using digital speckle multi-frequency harmonic wave correlation method[J]. Measurement, 2016, **89**: 7 - 12.
- [9] 芮嘉白, 金观昌, 徐秉业. 一种新的数字散斑相关方法及其应用[J]. 力学学报, 1994, **26**(5): 599 - 607. (RUI Jia-bai, JIN Guan-chang, XU Bin-ye. A new digital speckle correlation method and its application[J]. Acta Mechanica Sinica, 1994, **26**(5): 599 - 607. (in Chinese))
- [10] 王昊, 马志峰. 预测搜索算法在图像相关中的应用[J]. 光学技术, 2013, **39**(3): 251 - 255. (WANG Hao, MA Zhi-feng. An improvement of digital speckle correlation method using the predictive search algorithm[J]. Optical Technique, 2013, **39**(3): 251 - 255. (in Chinese))
- [11] 王宜庚. 极值搜索法在数字相关性计算中的应用[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2004, **5**(2): 100 - 102. (WANG Yi-geng. Application of minimum searching method to calculation of digital speckles correlation[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2004, **5**(2): 100 - 102. (in Chinese))
- [12] 葛宇龙, 李晓星. 多种群遗传算法在数字散斑相关搜索中的应用[J]. 工程与试验, 2013, **53**(3): 6 - 8. (GE Yu-long, LI Xiao-xing. Application of multi-population genetic algorithm to digital speckle correlation method[J]. Engineering & Tset, 2013, **53**(3): 6 - 8. (in Chinese))
- [13] 李元海, 林志斌, 靖洪文, 等. 含动态裂隙岩体的高精度数字散斑相关量测方法[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(6): 1060 - 1068. (LI Yuan-hai, LIN Zhi-bin, JING Hong-wen, et al. High-accuracy digital speckle correlation method for rock with dynamic fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 1060 - 1068. (in Chinese))
- [14] 李元海, 贾冉旭, 杨苏. 基于岩土渐进变形特征的数字散斑相关优化分析法[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(8): 1490 - 1496. (LI Yuan-hai, JIA Ran-xu, YANG Su. Optimized method for DSCM based on progressive displacement characteristics of geotechnical materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering, 2015, 37(8): 1490 - 1496. (in Chinese))
- [15] 马少鹏, 赵永红, 金观昌, 等. 光测方法在岩石力学实验观测中的应用述评[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1794 - 1799. (MA Shao-peng, ZHAO Yong-hong, JIN Guan-chang, et al. Review on application of optical measurement methods to experimental inspection of rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1794 - 1799. (in Chinese))
- [16] 李元海. 数字照相量测技术及其在岩土工程实验中的应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009. (LI Yuan-hai. Digital photogrammetry-based deformation measurement technique and its application in geotechnical engineering test[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2009. (in Chinese))
- [17] 刘招伟, 李元海. 含孔洞岩石单轴压缩下变形破裂规律的实验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(8): 133 - 139. (LIU Zhao-wei, LI Yuan-hai. Experimental investigation on the deformation and crack behavior of rock specimen with a hole undergoing uniaxial compressive load[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(8): 133 - 139. (in Chinese))
- [18] LI Y H, ZHANG Q, LIN Z B, et al. Spatiotemporal evolution rule of rocks fracture surrounding gob-side roadway with model experiments[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016(26): 985 - 902.
- [19] 李元海, 朱合华, 上野胜利, 等. 基于图像相关分析的砂土实验模型变形场量测[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 36 - 41. (LI Yuan-hai, ZHU He-hua, UENO K, 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))

中国土木工程学会第十三届全国土力学及岩土工程学术大会 (第一号通知) 2019年7月, 中国 天津

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会

承办单位: 天津大学; 天津城建大学; 天津建筑学会岩土力学与地下工程专业委员会

会议介绍: 4年一度的中国土木工程学会全国土力学及岩土工程学术大会是我国岩土工程领域历史最为悠久、影响最为深远的学术会议之一。第十三届全国土力学及岩土工程学术大会将于2019年7月在天津召开。当前是我国基础设施工程建设飞速发展的时期, 伴随着高速轨道交通、高速铁路、高速公路、城市地铁、超高超限建筑、海洋资源开发等重大工程, 提出了许多新的土力学及岩土工程问题。第十三届学术大会将以“岩土工程品质提升与可持续发展”为主题, 对我国近年来土力学与岩土工程领域的最新研究进展进行广泛的学术交流。

征文内容: 会议主要研讨岩土工程的理论与实践、新技术和新方法等。组委会接受全文投稿, 大会学术委员会将组织专家成立论文评审委员会。征文内容包括以下12个方面。①岩土的基本性质与本构关系; ②岩土工程勘察、测试与评价技术; ③基础工程与地基处理; ④地下工程及深基坑工程; ⑤岩土工程数值仿真与信息化技术; ⑥土动力学与岩土地震工程; ⑦特殊土与边坡工程; ⑧环境岩土工程; ⑨岩土工程中的新技术与新材料; ⑩地质灾害预警与防治; ⑪重大岩土工程实录; ⑫岩土工程机械设备与施工技术。

投稿要求: 大会组委会于2018年7月31日开始接受论文投稿。应征论文须符合上述征文内容要求且未公开发表。投稿时须向会务组提交全文电子文件(投稿邮箱附后), 论文请按《岩

土工程学报》期刊格式撰写, 论文模板请登录《岩土工程学报》网站下载中心下载, 来稿务请注明作者的详细通讯地址、E-mail及联系电话。

本次会议是四年一届的学术大会, 对应征论文的学术水平与写作质量均有严格要求。每篇论文由两位专家评审, 决定是否录用。根据被录用论文的研究内容与学术水平, 分别推荐论文由《土木工程学报》(增刊)、《岩土工程学报》(增刊)、《岩土力学》(正刊、增刊)、《中国公路学报》(专刊)、《地下空间与工程学报》(正刊、增刊)、《工程地质学报》(正刊)、《防灾减灾工程学报》(专刊)、《地震工程学报》(正刊、增刊)等近十个国内高水平期刊以正刊、专刊或增刊形式发表, 其中多本期刊的专刊或增刊可被EI检索。热忱欢迎我国岩土工程勘察、设计、检测监测、科研教学、设备和施工领域的科技工作者踊跃投稿。

重要日期: 2018年7月31日: 接受论文全文投稿; 2018年11月30日: 提交论文全文截止; 2019年1月31日: 通知论文是否录用; 2019年2月28日: 提交修改后论文; 2019年3月30日: 全文移交出版印刷; 2019年7月: 会议召开。

联系方式: 联系人: 雷华阳, 联系电话: 13512418728, 刘畅, 联系电话: 13821202109, 程雪松, 联系电话: 13821807355, 张雪莲, 联系电话: 13011392385, 地址: 天津市津南区海河教育园雅观路135号天津大学北洋园校区, 第43教学楼建工学院土木工程系(300350), E-mail: cismge2019@163.com, 电话: 022-27400843。

(大会组委会 供稿)