

由试验视频图像计算加筋砂土位移场^{*}

徐金明, 王国珍, 王同兴

(上海大学土木工程系, 上海 200072)

摘要:由数字图像计算土体位移场时大多使用数字图像相关匹配法, 直接使用视频图像计算加筋砂土位移场的工作比较少。本文使用室内加筋砂土试验时拍摄的视频图像, 将原始视频图像转换为多帧彩色图像及相应的灰度图像, 利用最大相关匹配法对多帧图像进行相关匹配, 由匹配点(区域)的移动计算加筋砂土中不同位置的相对位移, 求得了任一时刻加筋砂土中的位移场和速度场、任一位置的位移变化过程。本文还对计算结果的主要影响因素进行了讨论。结果表明, 本文方法对研究加筋砂土的变形分布、影响因素、变形过程与破坏机理分析具有重要的参考价值。

关键词: 加筋砂土; 位移场; 视频图像; 相关匹配

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2010)06-1184-06

Calculation of Displacement Field of Reinforced Sand Soils Using Video Images

Xu Jiming Wang Guozhen Wang Tongxing

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: A lot of literatures have been published to investigate the displacement field in soil by using digital image processing. However, a little was involved in calculation for video images. In this paper, the initial video images were captured during the laboratory reinforced sand soil tests. These video images were transformed into colorful and responding grayscale images in different frames. The maximum correlation technique was used to match these frames. The movements of the matching points or regions among the frames were used to calculate the relative changes of different points in reinforced sand soil. The displacement and velocity fields of reinforced sand soil at any time and the displacement changing process of any point in the sand soil were both obtained. The principal factors influencing the computed results were further discussed. The results show that the developed method in this paper is referable in studying the deformation distribution, influencing factors, deformation process and failure mechanism of reinforced sand soil.

Keywords: reinforced sand soils; displacement field; video image; correlation matching

1 引言

使用数字图像相关技术分析室内试验图像并计算土体位移场, 国内外学者已进行了一些研究。李元海等^[1]使用数码相机获得土体变形图像序

列, 通过布置多对测点线与图像相关分析来识别变形剪切带的位置、形状与边界点。邵龙潭等^[2]使用数字图像分析和处理技术识别了三轴试验中土样表面橡皮膜标志线, 实现了土样轴向变形和径向变形的同步测量, 得到了土体的本构模型参数。

* 收稿日期: 2010-07-20(修改稿)

作者简介: 徐金明(1963-), 男, 江苏南通人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程计算技术的教学和科研工作。E-mail: xjmng@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(40972191, 50678100), 上海市教育委员会科研创新项目(09YZ39)

Sadel等^[3]使用激光技术对土体试样进行光学剖切,使用数码相机摄取试样变形前后的图像通过分析多帧图像得到了土体试样的完整三维变形场。徐金明等使用图像边缘检测技术和数学形态学方法探讨了岩石中的流体包裹体分布^[4-5]及其非均质指数^[6]、利用灰度共生矩阵法对粉质粘土图像的纹理特征进行了研究^[7]。翟文信^[8]等不但使用小波分解法研究了粉质粘土图像的纹理特征,而且使用多元线性回归分析法对土样的工程性质指标进行了预测。张世卓等^[9]通过比较图像处理结果与室内实验数据,将影像展开与嵌接技术用于隧道安全检测。

视频图像研究在运动目标识别与分析中得到了一些应用。刘雪等^[10]使用阴影去除法处理视频图像,采用基于颜色直方图的相关匹配法,实现了运动目标的提取与跟踪。杨玉珍等^[11]使用帧平均法处理视频流,使用中值滤波法对各帧图像去噪,将灰度判断与小波变换边缘检测相结合,获得了车流量、车速、车头时距等交通参数。

对加筋砂土变形和破坏机理进行研究,已有很多成果。比如,曾远等^[12]研究了砂土宏观特性的影响因素,蒋鑫等^[13]分析了加筋土路基的固结情况,张孟喜等^[14-16]探讨了筋材形状的重要作用。但是,根据试验视频图像研究加筋砂土位移场的工作还很少。

本文拟使用加筋砂土试验时拍摄的加筋砂土视频图像,采用数字图像位移测量技术来研究加筋砂土中的位移分布规律。

2 方法

砂土颗粒的数字图像由若干个不同灰度值的像素构成。由视频图像计算加筋砂土位移场的关键是找到不同帧图像之间的最佳匹配点(或最佳匹配区域)。

2.1 试验方案

加筋砂土试验在矩形刚性模型箱内进行。模型箱大小为 $62\text{ cm} \times 80\text{ cm} \times 110\text{ cm}$, 两侧挡板为高强度有机玻璃板(厚度为 10 mm), 背面和底部采用聚乙烯板作为隔板(厚度分别为 10 mm 和 20 mm), 正前方的挡墙面板为有机玻璃(大小为 $8\text{ cm} \times 8\text{ cm} \times 10\text{ mm}$)。沿墙高设 10 层加筋带, 加筋带的水平和垂直间距均为 8 cm 。水平筋和齿筋条的

宽度和厚度分别为 15 mm 和 3 mm 。填料土样选用纯净的河砂。加载过程由数显测力仪控制。试验时测量了不同荷载下各层墙面板水平位移和齿筋侧向土压力。

2.2 原始视频

高分辨率数码相机位于模型箱的正面和侧面。原始视频图像由加筋砂土试验时使用高分辨率数码相机拍摄得, 每一个视频图像由像素大小为 720×576 的多帧彩色静态图像连接而成, 每一帧数字图像可以表示成数据矩阵, 而矩阵中的每一个元素则表示图像的像素。

匹配分析之前, 需要对原始视频图像进行预处理。首先将已经压缩的原始视频图像解压成 24 色 AV 格式的视频图像, 得到 14 个 50M 以下视频图像文件; 然后从各个视频图像中选取具有一定位移直至明显破坏的视频段, 转换为多帧彩色静态图像; 最后将每一帧彩色静态图像转化为灰度图像。图 1 为原始视频中一帧图像转换成的灰度图像。



图 1 原始视频图像的灰度图像

Fig 1 A gray image of initial video image

2.3 匹配分析

试验观测断面上各点位移由像素块相关匹配得到, 而相关匹配方法主要包括特征匹配法和最大相关匹配法两种。特征匹配是根据区域特征(如形状、纹理、不变矩等参数)实现两帧图像的匹配, 而最大相关匹配则是通过计算像素点(或区域)的最大互相关系数来实现两帧图像的匹配。这两种方法中, 最大相关匹配法是比较常用的匹配方法。

本次研究采用最大相关匹配法对不同帧数字图像进行匹配分析。最大相关匹配的实现关键是计算互相关系数, 互相关系数定义为:

$$\varphi(m, n) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N fg}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N g} \quad (1)$$

$$f = f(i, j), \quad g = g(i+m, j+n) \quad (2)$$

式中: $f(i, j)$ 和 $g(i+m, j+n)$ 分别表示前、后两帧图像中像素块的灰度分布, (m, n) 为像素块中心点的新位置。

计算两帧图像同一像素块互相关函数最大值, 可以确定前一帧图像像素块在后一帧图像中的位置, 像素块中心点位移即为两个像素块的相对位移大小。

由于图像数据量较大, 直接使用式 (1) 对像素块进行匹配分析使计算量较大、效率较低。根据傅里叶变换的卷积定理, 后一帧图像块 $f(x, y)$ 和前一帧图像块 $w(x, y)$ 的空间相关 (用符号 \circ 表示) 可以使用 $f(x, y)$ 傅里叶变换与 $w(x, y)$ 傅里叶变换复共扼乘积的傅里叶逆变换求得^[17], 即

$$f(x, y) \circ w(x, y) \Leftrightarrow F(u, v) H^*(u, v) \quad (3)$$

利用这一性质, 可以在后一帧图像 $f(x, y)$ 中快速找出与前一帧图像中区域相关系数达到最大的区域 (即最佳匹配区域)。

相关匹配时, 若匹配图像区域较大, 则计算工作量也较大。由于土体在破坏前较短时间内的变形较小, 所以可对匹配图像区域大小进行适当限制。限制匹配区域可以使匹配图像的数据量减小, 也不会影响到匹配工作的准确性。对匹配区域限定后再利用基于傅里叶变换的最大相关匹配法, 可以使运算量大为降低。

2.4 位移场计算

确定最佳匹配区域之后, 就可求出两个像素块的相对位移。对匹配像素块循环计算, 可获得两幅图像任一点 (以像素块中心坐标来表示) 的像素位移分量 (dx, dy), 进而可以算出任一点的像素位移。像素位移乘以尺寸系数 δ (单个像素代表的实际长度) 就可将像素位移转化为该点实际位移大小。两帧图像中各像素块的实际位移见式 (4)。

$$ds = \delta \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} \quad (4)$$

通过对匹配像素块循环计算, 可以得到不同帧数字图像的位移场。根据视频帧率进行逐帧匹配、计算, 就可得到任意一点的速度场。

2.5 加筋砂土位移场计算的程序实现

作者利用 MATLAB 平台编写了计算程序, 用来计算加筋砂土的位移场。计算时, 首先进行视频

预处理, 得到多帧静态图像; 然后选取其中任意两幅静态图像逐块进行相关匹配分析, 最后根据图像实际大小、像素尺寸和视频帧率计算位移场和速度场。程序实现过程见图 2。

3 结果与讨论

由上述方法, 我们不仅得到了不同位置的位移场、速度场, 还得到了任一位置不同时刻的变化 (尤其是即将破坏的情况)。下面将研究加筋砂土视频图像中两个竖向分割之间区域 (像素为 90×380) 的位移变化情况。

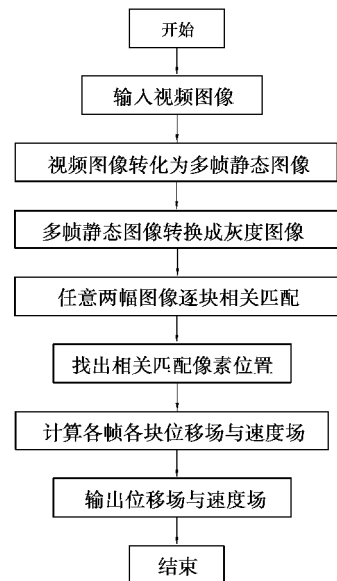


图 2 加筋砂土位移场计算实现流程图

Fig. 2 Flow chart in computing displacement field of reinforced sand soils

3.1 结果

3.1.1 位移场

图 3 和图 4 分别为视频图像中第 2 帧与第 4 帧图像的相对位移场及对应的等值线图。由图 3 和图 4 可以看出, 从左上角到右下角加筋砂土位移由基本为零逐渐增加到 9 mm 左右, 从图像上部到图像下部位移逐渐增大, 这一规律与实际情况吻合。

从图 3 还可以看出, 右上角少量点的位移方向不是向右下而是向右上, 这与该区域受到图像右部竖向分隔的影响有关, 因为这些分隔限制了砂土颗粒向下移动。

3.1.2 速度场

图 5 是第 40 帧与第 46 帧图像的速度场。

由图 5 可以看出, 加筋砂土在 $1.6 \sim 1.8$ 这

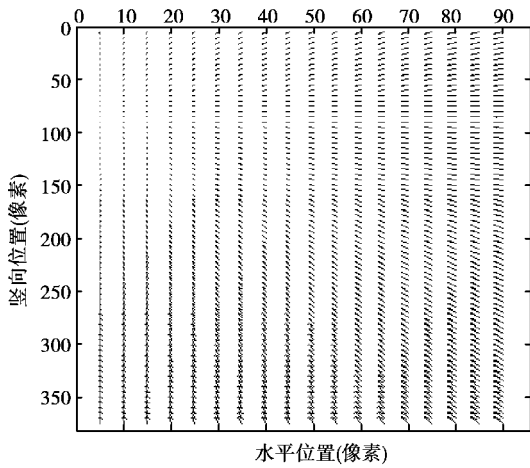


图 3 第 2 与第 4 帧图像的相对位移场
Fig 3 Displacement field between the fourth and second images

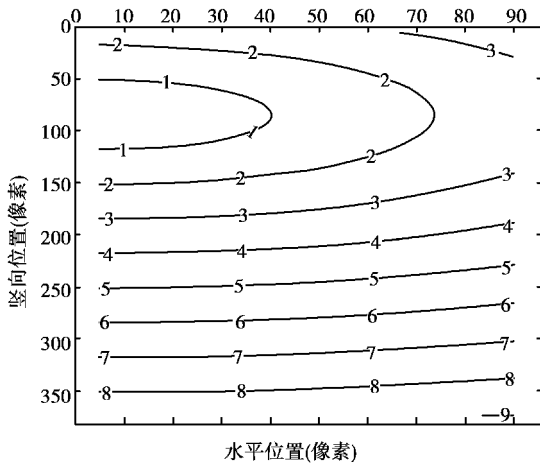


图 4 第 2 与第 4 帧图像相对位移等值线
Fig 4 Contour of displacement field between the second and fourth images

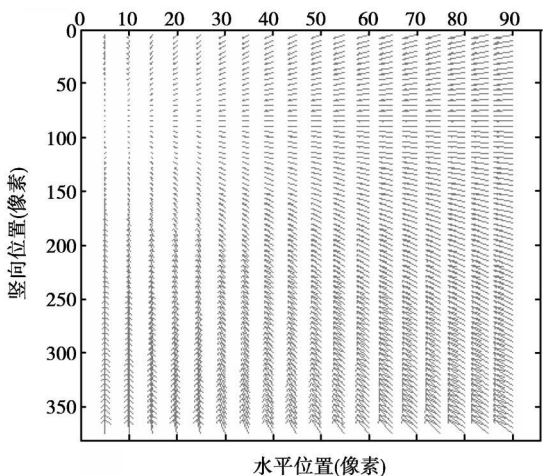


图 5 第 40 与第 46 帧图像的相对速度场
Fig 5 Relative velocity field of 40 th and 46 th images

段时间内, 从左上角到右下角的速度逐渐增大; 在图像竖向像素位置 50 ~ 100 之间部分点的速度方向是水平向左、其余点的速度方向是向左上方, 这也是受图像竖向分隔的影响。研究中还发现, 速度与位移的变化规律基本一致, 但大小不一致, 这与实际情况吻合。

3.1.3 同一点在不同时刻的位移

图 6 是视频图像左上角像素块在不同时刻的位移变化情况。

由图 6 可以看出, 在 0 ~ 3.2 s 范围内 (对应的图像帧数为 1 ~ 83) 图像块左上角点虽然存在位移、但移动速率比较平稳。在 1.8 s 时该点位移突然减小; 在最后 0.3 s 即 3.2 s ~ 3.5 s 对应图像帧数为 83 ~ 86), 加筋砂土颗粒位移急剧增大。在 3.5 s 左右时, 砂土颗粒位移大约为 3.7 mm, 此时砂土发生了破坏。

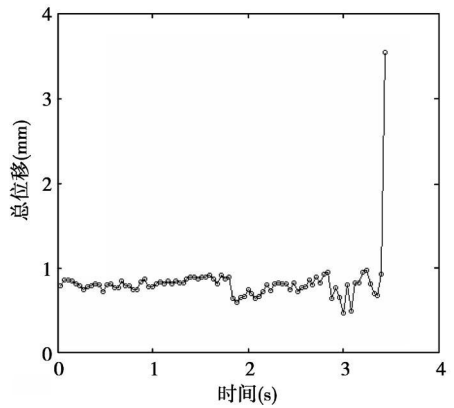


图 6 不同时刻左上角点的位移情况
Fig 6 Displacement vs time for a point in the up-left part

图 7 是视频图像左上角像素块在不同时刻的速度变化情况。

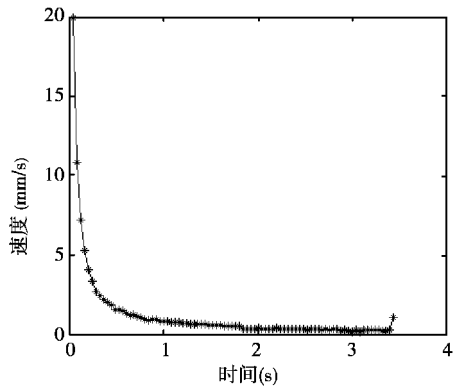


图 7 不同时刻左上角点的速度情况
Fig 7 Velocity vs time for a point in the up-left part

由图 7 可以看出, 在 0 ~ 0.5 s 这段时间内, 左上角点的移动率变化比较大, 位移从零到出现小位

移经历的时间很短;在 0.5~3.2 时间段内位移大小几乎不变,速度逐渐稳定;在 3.2~3.5 时间段内左上角点速度突然增大,位移急剧增大,砂土发生了破坏。

3.2 讨论

(1)使用本文方法可以得到加筋砂土任何时刻任何一点任意方向的位移大小和速度,还可以得到任意两个时刻加筋砂土中各点的变化情况,对分析加筋砂土的破坏机理具有重要的参考价值。

(2)试验图像左上角点位移变化时,在 1.8 s 时该点位移突然减小,然后又逐渐增大,这可能受到拍摄视频时相机镜头抖动的影响,因为相机抖动会降低不同帧图像匹配结果的准确性;在 2.9~3.2 这段时间内,土体位移量时大时小但趋势是增大的,这可能与土颗粒出现翻卷有一定关系,但用最大相关匹配方法尚难以准确估计土颗粒的翻卷现象。

(3)在进行图像块相关匹配时,目标区域是整个图像,匹配时匹配区域(图像块)大小是一个关键参数。本次研究时匹配区域取边长为 M 像素的正方形。但 M 取多少比较合适,目前尚无定论。为了尽量减少匹配区域大小对计算结果的影响,同时又不至于使匹配工作量太大,作者取 M 为 6。

(4)本文采用傅里叶变换并对匹配图像区域大小作了限定,这使计算量大大降低、计算时间明显缩短。为了更快、更准确地计算位移,可以使用特征匹配法,但特征匹配时使用哪些“图像区域特征”仍需进一步研究。

4 结语

(1)以加筋砂土试验时摄得的视频图像为例,将视频图像转化为多帧彩色图像及相应的灰度图像,使用基于傅里叶变换的最大相关匹配方法对多帧图像进行匹配,得到了加筋砂土破坏过程中同一位置不同时刻的位移大小以及不同位置同一时刻的位移和速度分布。

(2)对确定加筋砂土位移场的主要影响因素(如视频图像的拍摄环境、匹配方法、匹配区域大小等)进行了简要分析与讨论。

(3)提出的由试验视频图像计算加筋砂土位移场的方法,对研究加筋砂土的变形分布、变形过程、破坏机理与影响因素,具有重要的实际意义。

参考文献 (References)

[1] 李元海,靖洪文,朱合华,等.基于图像相关分析的

土体剪切带识别方法[J].岩土力学,2007,28(3):522-526. (Li Yuanhai, Jing Hongwen, Zhu Hehua et al. A technique of identifying shear band accurately in granular soil using image correlation analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 522-526. (in Chinese))

- [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 Longtan, Wang Zhupin, Liu Yonglu. 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. (in Chinese))
- [3] Sadek Samer, Iskander Magued G, Liu JinYuan. Accuracy of digital image correlation for measurement of deformations in transparent media[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2003, 17(2): 88-96.
- [4] 徐金明,赵晓波.边缘检测技术在确定流体包裹体迹线中的应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(6):1132-1137. (Xu Jiming, Zhao Xiaobo. Determination of fluid inclusion lines using edge detection technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1132-1137. (in Chinese))
- [5] Xu Jiming, Zhao Xiaobo, Liu Bin. Digital image analysis of fluid inclusions[J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, 2007, 44(6): 942-947.
- [6] Xu Jiming, Liu Bin, Xie Qiang. Microscopic Heterogeneity of Fluid Inclusion Distributions in Rocks. Geotechnical Special Publication No. 179. ASCE, 2008. pp. 205-212.
- [7] 徐金明,羌培,张鹏飞.粉质粘土图像的纹理特征分析[J].岩土力学,2010,30(10):2903-2907. (Xu Jiming, Qiang Pei, Zhang Pengfei. Texture analysis to photographs of silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 30(10): 2903-2907. (in Chinese))
- [8] 翟文信,徐金明,张学明,等.粉质粘土图像纹理参数的多元线性回归分析及其工程应用[J].水文地质工程地质,2009(1):90-95. (Zhai Wenxin, Xu Jiming, Zhang Xueming et al. Multivariate linear regression and applications of textural parameters of silty clay in ages[J]. Journal of Hydrological and Engineering Geology, 2009(1): 90-95. (in Chinese))
- [9] 张世卓,王泰典,林铭朗,等.影像展开与拼接技术在隧道检测之应用[J].地下空间与工程学报,2008,4(4):670-675. (Zhang Shizhuo, Wang Taidian, Lin Minglang et al. Application of image spread

- and mosaic technology in tunnel inspection [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2008 4 (4): 670-675 (in Chinese)
- [10] 刘雪, 王华杰, 常发亮. 视频图像序列中运动目标的提取与跟踪 [J]. 自动化技术与应用, 2007 26 (1): 102-103 (Liu Xue, Wang Huajie, Chang Falang. Extracting and tracking the moving object information in video sequences [J]. Techniques of Automation and Applications 2007 26 (1): 102-103 (in Chinese))
- [11] 杨玉珍, 贺晓锋, 陈阳舟, 等. 基于视频图像的交通参数检测 [J]. 控制工程, 2008 15 (3): 349-352 (Yang Yuzhen, He Xiaofeng, Chen Yangzhou, et al. Traffic Parameter detection based on video images [J]. Control Engineering of China 2008 15 (3): 349-352 (in Chinese))
- [12] 曾远, 周健. 砂土的细观参数对宏观特性的影响研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2008 4 (3): 499-503 (Zeng Yuan, Zhou Jian. Influence of micro parameters of sandy soil on its macro properties [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2008 4 (3): 499-503 (in Chinese))
- [13] 蒋鑫, 凌建明, 邱严峻. 软土地区加筋土路基大变形固结有限元分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2008 4 (1): 66-72 (Jiang Xin, Ling Jianming, Qiu Yanjun. FEA of large deformation consolidation for reinforced embankment on soft soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2008 4 (1): 66-72 (in Chinese))
- [14] 张孟喜, 张石磊, 黄瑾. 低超载下条带式带齿加筋界面特性 [J]. 岩土工程学报, 2007 29 (11): 1 623-1 629 (Zhang Mengxi, Zhang Shilei, Huang Jin. Behaviour of interface between dentistrip geosynthetic reinforcements and soil under low surcharge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2007 29 (11): 1 623-1 629 (in Chinese))
- [14] 张孟喜, 周淮. 条带式带齿加筋砂土挡墙的模型试验 [J]. 中国科学 (E辑: 技术科学), 2009 39 (1): 48-56 (Zhang Mengxi, Zhou Huai. Modeling test of dentistrip reinforced sand retaining wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2007 29 (11): 1 623-1 629 (in Chinese))
- [15] 张孟喜, 赵飞, 侯娟. 条形荷载下 H-V加筋砂土地基模型试验研究 [J]. 土木工程学报, 2008 41 (2): 94-98 (Zhang Mengxi, Zhao Fei, Hou Juan. Model tests of H-V reinforced sand bed subjected to strip loading [J]. China Civil Engineering Journal 2008 41 (2): 94-98 (in Chinese))
- [16] 张孟喜, 张石磊. H-V加筋土性状的颗粒流细观模拟 [J]. 土木工程学报, 2008 41 (5): 625-631 (Zhang Mengxi, Zhang Shilei. Behaviour of soil reinforced with H-V inclusions by PFC2D [J]. China Civil Engineering Journal 2008 41 (5): 625-631 (in Chinese))
- [17] Gonzalez Rafael C, Woods Richard E, Eddins Steven L 著. 阮秋崎等译. 数字图像处理 (MATLAB版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000 (Gonzalez Rafael C, Woods Richard E, Eddins Steven L. Translated by Ruan Qiuqi et al. Digital Image Processing (MATLAB Edition) [M]. Beijing: Electronic Industry Press 2000 (in Chinese))

征 订 启 事

《地下空间与工程学报》是地下空间开发利用与地下工程科学技术的综合性科技刊物,旨在通过国内外地下空间开发利用和地下工程相关技术新成果的交流,并兼论与之相关的岩土工程的科技问题,以促进我国地下空间的合理开发利用和地下工程新技术的不断发展。可为广大从事城市规划、建筑、人防、地铁、隧道及地下工程、环境保护等有关专业人员提供有价值的信息。

本刊为大 16开本,全国非邮发联合征订和编辑部自办发行,欢迎订阅,欲订者请向本刊编辑部函索订单。

地址:重庆市沙坪坝区重庆大学 B区《地下空间与工程学报》编辑部

邮编:400045 电话:023-65120728 传真:023-65120728

E-mail: dxkjbj@126.com dxkjpaper@126.com