

数字图像技术在岩土工程中的应用综述

李 凯, 何志鹏, 谢建文

河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100

摘 要: 数字化、信息化时代的到来, 给岩土工程的各个领域带来了新的研究手段. 数字图像处理技术在宏观变形和非可视领域都有着广泛应用. 在宏观变形方面的应用包括小范围的实验测试和大规模的地质灾害监测. 在非可视领域包括显微结构方面的应用、高速动力学方面的应用和声学成像方面的应用. 数字图像技术在应力探测上具有巨大作用, 特别是结合光弹实验在岩土工程中的应用.

关键词: 数字图像处理; 岩土工程; 宏观变形; 非可视领域; 应力探测; 地质灾害监测

THE APPLICATION OF DIGITAL IMAGE TECHNIQUES IN GEOTECHNICAL RESEARCHES: A Review

LI Kai, HE Zhi-peng, XIE Jian-wen

School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China

Abstract: The digitalization and information technology has added new research methods for geotechnical engineering in all aspects. The digital image technique is broadly applied in the researches of macroscopic deformation and invisible scales as well. The application in macroscopic deformation involves small scale experimental testing and large scale geo-hazard monitoring. For invisible scales, the applications are in the areas of microstructure, high-speed dynamics and acoustic imaging. The digital image technique plays a significant role in stress detection, especially in geotechnical engineering combined with photoelastic experiment.

Key words: digital image technique; geotechnical engineering; macroscopic deformation; invisible scale; stress detection; geo-hazard monitoring

0 前言

岩土工程是土木工程中的一个重要分支^[1], 因其涉及地下一些人们从未深入研究的领域, 具有很大的不确定性. 几乎所有土工建筑物的修建都离不开岩土工程, 这就迫切需要对岩土工程各方面进行深层次的分析研究. 传统的试验、勘察以及监测手段可以帮助

人们了解岩土体的工程地质条件, 达到预防地质灾害的目的, 但是鉴于岩体的复杂性, 很多分析都建立在岩土体均质化的假设条件下或者只进行了定性的描述分析. 数字图像处理技术作为一种非接触、精确度高的光学测量手段为岩土工程的定量化研究提供了便利.

数字图像处理作为一种量测岩土体空间结构及几

收稿日期: 2019-08-30; 修回日期: 2019-09-24. 编辑: 张哲.

基金项目: 中央基本科研业务费项目“岩土体高速剪切弱化特性的试验研究”(2013/B17020119).

作者简介: 李凯(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究地质灾害防治方向, 通信地址: 江苏省南京市江宁区佛城西路 8 号, E-mail/hhu_llkk@163.com

何形态的数字表征手段,可以很好地应用于岩土体的宏观监测与微观结构定量分析中^[2].与传统手段相比,数字图像处理在微观上可以帮助人们更加全面地认识岩土体内部的结构特征^[3]和动态变形特征^[4-5],还可研究流-固耦合动力学特征^[6],在宏观上结合 InSAR 遥感技术可以实现对大型边坡^[7-8]、公路^[9]等的监测研究,解决了传统传感器监测时易受扰动、准确性低的问题,实时、自动化的监测大大降低了操作的复杂性.此外,超声波成像钻孔电视的应用克服了传统钻孔取心耗时久、取心不连续、原位信息缺失严重和对孔内裂隙、溶洞发育状况感知不形象的弊病^[10],加强了人们对深部岩体结构特征的了解.

近年来,许多学者应用数字图像处理技术对岩土体的微观结构以及宏观监测等方面做了很多实验研究,并且取得了很好的成果,证明了数字图像处理技术在研究岩土工程上的可行性与高效性.但是综合论述其应用的文章相对较少,基于此,本文主要从宏观变形、非可视领域和应力探测这3个方面讲述数字图像处理技术在岩土工程中的应用.

1 宏观变形应用

数字图像技术的主要优点是仅仅需要摄像机作为传感器,而且与其他机械传感器不同的是,光不影响土的行为或应力场^[11].这种方法已经广泛应用于研究室内试验^[12]和原位监测^[13]等岩土工程的宏观变形中.

1.1 实验室测试

在实验室测试研究中,数字图像技术能作为可视化、数字化和分析现象的通用工具.该方法可作为某些特定实验有价值的补充手段,如剪切和三轴试验中岩土材料剪切带的发展^[14-15]、岩体断裂过程^[16]、隧道模型试验^[13]、滑坡^[17]、地震^[18]等.由于实验室空间有限或实验环境特殊,有些实验很难对整个测试过程进行监控.数字图像技术的另一个优点是,可以将相机放置在有限的空间内,监控整个测试过程,并从测试后相机拍摄的图像中提取重要数据,如离心试验^[19]或落塔试验^[20].

应变局部化是岩土材料剪切过程中最重要的现象之一,它可以看作是剪切带.岩土材料破坏的实质是剪切带的产生.然而,在实验过程中,剪切带的扩展并不是那么容易监测的.在数字图像应用程序的早期阶

段,科学家和工程师们喜欢使用一个网格印在乳胶膜上进行平面应变条件下地质颗粒材料测试,这能够通过跟踪数字化的图像网格来测量定向角和剪切带厚度^[14].然而,这种实验方法是在假定土工材料与膜变形一致的前提下进行的.后来 White 和他的同事提出了基于数字图像技术的土壤变形测量方法,称为粒子图像测速(PIV)和摄影测量^[21].Wolf 等^[22]于2003年提出了3个系列的颗粒材料拉伸变形沙箱实验.他们结合 X 射线和 PIV 研究了颗粒结构的变化和剪切带形态的形成.最近,Salazar 等^[15]开发了一种三轴测试单元,该单元配备了内部摄像头监控系统.相机监控系统安装在三轴电池内部,可以捕捉到三轴电池内部的真实视图.数字图像技术的应用使岩土材料剪切试验和三轴试验更加直观,可以对实验过程进行监测和再现.测试过程中的细节可以通过数字图像数据挖掘出来.数字图像技术在模型试验研究中也得到了很好的应用.在离心试验或大型振动台试验过程中,可安装摄像头监测滑坡模型试验和隧道模型试验的变形或破坏过程,Towhata^[13]、Matziaris^[23]、Shi^[17]等人做了相关方面的研究.

由于直接连续的数据记录,数字图像处理在实验室试验中对宏观变形的应用得到了广泛的报道.在实验室测试中,图像比例尺总是以米为单位,很少能达到几百米.但是,这项技术可以用于更大规模的情况,例如地质灾害监测,这将在下一节讨论.

1.2 地质灾害监测

数字图像技术具有实时、高效、精准的优点.近些年来干涉合成孔径雷达(InSAR)的广泛应用已证明了这种技术在提供亚厘米精度空间连续变形方面的强大之处. InSAR 适合变形监测的另一个原因是它能够在白天或是晚上以及各种天气全天候、全天时条件下工作^[24],更加全面地获取地形变化信息,尤其适用于高速公路沉降的检测以及流状滑坡位置的准确识别.如张庆云等基于高级 InSAR 时序分析方法分析了济宁地区高速公路沉降^[9].Huang 等^[8]基于 InSAR 技术分析了数字高程模型在 ALOS/PALSAR 遥感影像地形变形中的应用,为流状滑坡灾害的评估提供了基础数据.此外,数字图像技术可以实现较大规模的监测,Arnous 和 Green^[25]利用遥感和地理信息系统工具建立了亚克巴湾沿海地区地理数据库,然后基于数字高程模型

(DEM)确定了地形特征和地质灾害图,取得了很好的地质灾害监测效果。

数字图像处理技术在监测岩体内部工程地质灾害方面也有较好的应用,具有再现性好、处理精度高、适用面宽、灵活性高等优点^[26]。传统隧道变形测量往往依靠人工拉尺读数测量,这种方法不仅效率低、精度差、对作业人员技术要求高,而且在较长隧道中几乎无法实施^[27]。通过在开挖部分布置传感器网络,间隔性地放置图像传感器电荷耦合元件(CCD),对目标物体(点光源)进行拍摄^[28],然后利用数字图像处理技术对不同时期拍摄到的图像进行平滑、锐化、腐蚀、去噪等处理后对比分析,即可识别隧道内部存在的病害。这种方法不仅大大减少了室外工作量,而且有利于对岩体内部工程的稳定性作出更加合理准确的评价。

现代地质灾害的监测已经趋向于动态的监测,数字图像技术很好地满足了这个需求。利用这种技术对滑坡或者隧道等工程进行实时监测,可以做出及时且有效的防护措施。同时,数字图像技术是一种低成本的处理技术,可大大减少经济上的投入。

2 非可视领域的应用

数字图像技术是一种粒子追踪方法,可以确定图像中斑点或者粒子的位移^[16],应用于非可视领域的研究。数字图像技术在岩土工程非可视领域的应用主要表现在显微结构的应用、高速动力学上的应用及声学成像上的应用。

2.1 微观结构

岩体内部的微观结构和组成决定了其在外力作用下的应力-应变状态,进而控制了其宏观力学响应和破坏机制^[2]。数字图像处理技术作为一种精准量测微观结构的手段已经广泛地应用于土和岩体的量化研究,通过对岩土材料颗粒形状、粒径、球度等的研究可以合理解释宏观的变形破坏现象。例如 Alshibli 等^[29]通过数字图像技术对砂土的表面粗糙度、球度进行了详细的微观分析,对研究砂体进行了分类;彭瑞东等^[4]利用数字散斑相关的方法测量了岩石的变形。在了解岩土颗粒微观物理力学性质的基础上可以得出相关的物理参数,并建立较为真实合理的离散元模型,增加模拟过程的可靠性。张波等^[30]、朱泽奇等^[31]、徐文杰等^[32]都在数字图像处理技术的基础上对岩石或土体

的微观结构进行了观测分析,并对相应的物理力学实验进行了数值仿真研究。

宏观连续的岩土体在微观上表现为一系列颗粒和孔隙组成的结构系统。结合 CT 或 SEM 拍摄的岩土体微观结构相片,数字图像技术可以高效率低消耗地探明岩土体内部颗粒和孔隙间的关系,通过量化分析更好地理解岩土体在外力作用下的宏观变形和破坏机理。聂志红等^[33]基于 MATLAB 数字图像处理技术对 PFC 模拟下的粗粒土的形成进行了研究,得出了粗粒土的粒间孔隙特征与其影响因素;刘春等^[34]提出了岩石颗粒与孔隙系统数字图像识别的方法,并引入了概率统计的方法,实现了由二维颗粒面积计算颗粒系统的三维分选系数。岩土体内部的微观结构不是一成不变的,在受外力作用或是外部环境改变时,岩土体内部尤其是孔隙部分会发生较大的变化,进而影响岩土体宏观的物理力学性质,Kozaki 等^[35]通过对 CT 图像处理分析,研究了膨润土的微观结构与质量运输间的关系。

岩土体显微结构的观察分析是实验或者工程中相当重要的一部分,颗粒的粗糙度、圆度、球度以及与孔隙间的关系等都可能是影响岩土体性质的因素之一。应用数字图像处理技术对颗粒体结构和组成进行相关的分析研究能得到更为精确合理的数据和结果。

2.2 高速动力学

当岩体受到的外力达到自身最大的抗压或者抗剪强度时,岩体会发生破坏,由于破坏的速度快、时间短,人们往往通过破裂面的形貌特征来确定裂纹的性质,但是破坏的岩体呈现出很多交错的破裂面,严重影响了对裂纹性质的判断。在岩土工程中,使用高速摄像机捕捉动态事件是一种常见的手段,高速摄像机可以捕捉到岩体突然而且剧烈的破坏过程,找出裂纹的起始位置以及之后的发展延伸,结合数字图像处理技术则可确定裂纹的形成机制以及其性质,如剪切和拉伸裂纹。宋义敏等^[36]、Wong 等^[37]均在高速摄像机的基础上研究了单轴压缩条件下岩石裂纹的起裂延伸过程,得出了相应的变形场和裂纹的性质。除了确定裂纹起裂延伸之外,应用高速摄像机和数字图像处理技术还可以探究岩体材料自身性质,比如充填介质、结构面倾角、结构面数量等对裂纹动态断裂特性的研究以及在冲击荷载下岩石破裂的过程。

在实际岩土工程中,例如隧洞发生岩爆碎屑弹射

轨迹的研究、流状滑坡或泥石流中岩块滑移的研究以及高速公路沥青材料疲劳破坏的追踪等等,从动力学角度分析都需要用到高速摄像机和数字图像处理技术.通过对各种动态过程拍摄记录和图像处理,不仅可以得出相关的运动规律还可以进行有效的预测和预防.

数字图像处理技术和高速摄像机结合为解决岩土工程中一些动态过程提供了手段,在清晰展示动态变化全过程的同时,也方便了对其进行更深层次的研究,还能做出相应的预防和预测.

2.3 声学成像

在岩土工程中,岩土体的材料性质以及内部复杂的结构面很大程度上决定了岩土体的力学性能及其在工程中的稳定性.目前了解岩土体内部信息的方法主要有扫描电镜、计算机断层成像、超声波无损检测以及声发射技术等^[38].声学成像技术就是在后两者的基础上结合计算机成像及处理而产生的,根据声波回波的强弱及速度等来判断岩体内部的缺陷位置及大小,进而做出更为准确的稳定性评价.

声学成像技术是一种将声学信息转换为数字图像信息,然后通过反演来重塑被研究物体的手段,具有非接触性、穿透性强、快速简单的优点,因此可以用于探究岩土体内部的结构信息.如对桩基缺陷的监测,还有钻孔电视测井技术(BHTV)的应用.王锡勇等^[39]基于超声波钻孔电视研究了深部岩体结构面特征;史永跃等^[10]更是总结了超声波成像钻孔电视在工程勘察中的应用;Benson 等^[40]利用三维声发射定位和 X 射线计算机断层成像技术,对三轴压缩条件下的 Etna 玄武岩进行了缓慢破坏成像;宋义敏等^[41]结合声发射技术和数字散斑相关方法研究了单轴压缩条件下岩石变形演化的声发射特征.此外,声学成像技术在海洋地质等深度大、范围广的领域也有较好的应用^[42-43],结合地震反射技术可以形成高分辨率的海底地质形态,方便海底资源的找寻.

声学成像技术既克服了声波探测不直观、人为影响因素大的缺点,也解决了 CT、电镜扫描研究对象体积小的问题,是研究岩土工程一种较为全面有效的手段.

3 应力探测

在岩土工程中,岩土体内部应力的分布以及在加载、卸载情况下,应力的传导、重分布直接关系着岩土

体的稳定性.现阶段人们主要通过数值模拟和室内试验的手段了解岩土体内部的应力分布状况及应力传导规律.两者都会用到数字图像技术进行处理分析,数值模拟需要用数字图像技术进行预处理方便建立准确可靠的物理模型.例如,丁秀丽等^[44]在对土石混合体相片数字图像处理的基础上,应用 PFC 进行了颗粒流建模模拟,分析了土石混合体的力学性质;严成增等^[45]基于数字图像技术获取了岩石材料的真实细观结构,并应用有限元法-离散元法(FDEM)进行了建模和数值模拟,得出了非均质花岗岩岩样破裂时应力的分布情况.不同于数值模拟,室内试验往往在后期处理阶段会应用到数字图像处理技术.在室内试验中,研究试样内部应力分布最常用手段是光弹测试技术,通过制备特殊的试验装置来尽可能地还原岩土体在天然条件下的受力状况.

光弹实验装置的主要部分如图 1 所示,由数码相机、偏光镜、光弹性材料样本以及平行光源组成,通过将具有应力双折射的透明材料制作成被研究岩土体的形态,并施加与实际岩土体所受相似的力,经过偏振光场后就可以观察到模型各处的干涉条纹,确定模型各处的应力状况.图 2 所示的是单个粒子在偏振场中受到两点压力时的光弹响应,从颜色的深浅和分布可以了解到该粒子受力时的应力状态.光弹试验的优点在于能保持样本的完整性,成像直观,操作简便,在研究颗粒体的力学行为中起到了巨大的推动作用.刘建国^[46]等人应用光弹法检测了颗粒物质体系中力链结构,揭示了二维颗粒体系的力学行为,得到了宏观与细观、细观与微观之间的联系.侯明勋和他的导师^[47]应用光弹试验对颗粒介质接触应力网络进行了测试,并

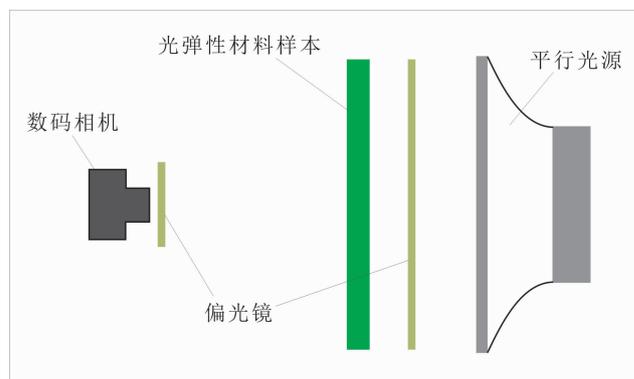


图 1 典型光弹性装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the typical photoelastic device

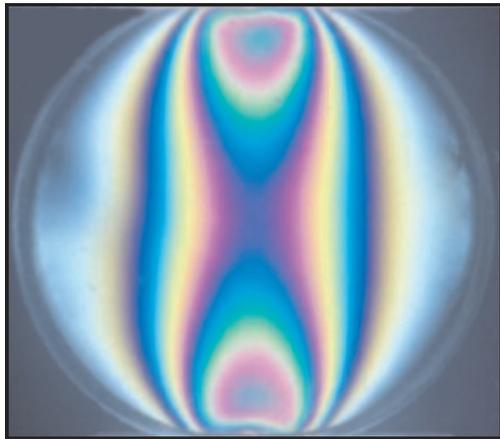


图2 偏振场中单个粒子受到两点压力时的光弹响应

Fig. 2 Photoelastic response of a single particle under two-point pressure in the polarized field

对其出现的拱效应特性做了研究,较为合理地解释了应力局部化和土拱效应现象. Zheng 等^[48]、Wang 等^[49]通过自制光弹试验装置研究了剪切力引起的颗粒阻塞现象以及基底摩擦对剪切阻塞的影响.

无论数值模拟建模还是室内光弹试验结果处理,经过数字图像处理技术之后精度都得到了很大的提升,方便人们去探索岩土颗粒受力时力链的分布与传导.为解释宏观的变形破坏现象提供了理论依据.如何进一步提高数字图像处理技术的精度以及找到与岩土颗粒力学性质更为相似的光弹试验材料仍需要探索研究.

4 结论

从微观岩土颗粒形态的研究到宏观滑坡隧洞等地质灾害的监测,从室内物理力学试验和数值模拟研究到室外钻孔等原位试验的研究,数字图像处理技术已经应用到岩土工程领域的各个方面.归纳总结为以下3个主要方面.

(1)宏观变形方面.在室内试验研究中,数字图像处理技术可以作为一些试验的补充手段,监测整个试验过程并从拍摄结果中提取重要数据.更加直观地观测岩土体材料剪切试验和三轴试验,在模型试验的研究中也有较好的应用.在地质灾害监测中,结合卫星遥感可以实现大规模的监测,具有实时、准确、高效的优点,并且不受地形和气候影响,自动化的监测也减少了人力物力的投入,提高了监测的准确性和可靠性.

(2)非可视领域方面.主要为数字图像技术在微观结构、高速动力学以及声学成像方面的应用.经过数字图像处理技术处理可以清晰地看到岩土体颗粒的形态以及颗粒与孔隙间的分布关系,从微观上解释岩土体宏观破坏的机理.此外,数字图像处理技术与高速摄像机结合可以得到岩土体突然且剧烈的破坏过程以及在冲击荷载下的变化情况,为实际工程中如岩爆碎屑弹道的研究以及流状滑坡块石运动的研究提供了手段.声学成像技术可以探明岩土体内部结构信息,比如桩基缺陷的监测、钻孔测井技术的应用以及单轴、三轴试验条件下岩土体内部破裂情况等.

(3)应力探测方面.数字图像技术在研究岩土体内部应力分布方面也有很重要的作用,通过对现实岩土工程相片的数字化分析,可以建立与实际相贴合的物理模型,增加了数值模拟结果的准确性与真实性.另一方面,数字图像技术结合光弹测试技术可以直观地看出岩土体在外力作用下应力的分布与传导,为解释岩土体宏观破坏现象提供依据.

5 展望

数字图像技术在岩土工程中的应用已经十分广泛,但是在某些方面的应用研究还有待深入.如何进一步提高微观识别岩土体颗粒形态及其与孔隙间关系的算法精度及尺寸效应问题;在应用数字图像处理技术计算岩土试样表面位移场时,如何获取更多点的位移信息;还有是否能找出更加符合岩土颗粒力学特征的应力双折射材料进行光弹性试验研究,或者结合光学等其他学科研发新的试验方法去测试岩土体内应力分布;数字图像处理硬件设备技术的提高是否会有新的发现等等,都需要人们去探索研究.

参考文献:

- [1]包承纲. 岩土工程试验研究中的若干新进展[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 1-9.
- [2]陈从新, 刘秀敏, 刘才华. 数字图像技术在岩石细观力学研究中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 53-61.
- [3]王慧妮, 倪万魁. 基于计算机 X 射线断层术与扫描电镜图像的黄土微结构定量分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 243-247, 254.
- [4]彭瑞东, 翁炜, 左建平, 等. 数字散斑相关法在 SEM 观测岩石变形时的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(4): 650-656.
- [5]Sang Y, Zhao J L, Duan F H, et al. A novel automatic device to

- measure deformation inside transparent soil based on digital image correlation technology [J]. *Measurement Science and Technology*, 2019,30(3):035202.
- [6]朱万成,康玉梅,杨天鸿,等.基于数字图像的岩石非均匀性表征技术在流固耦合分析中的应用[J].*岩土工程学报*,2006,28(12):2087-2091.
- [7]赵永红,王航,张琼,等.滑坡位移监测方法综述[J].*地球物理学进展*,2018,33(6):2606-2612.
- [8]Huang Y, Yu M, Xu Q, et al. InSAR-derived digital elevation models for terrain change analysis of earthquake-triggered flow-like landslides based on ALOS/PALSAR imagery[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015,73(11):7661-7668.
- [9]张庆云,张景发,刘国林,等.基于高级 InSAR 时序分析方法的高速公路沉降分析[J].*科学技术与工程*,2018,18(20):20-26.
- [10]史永跃,尚彦军,孙元春,等.超声波成像钻孔电视在工程勘察中的应用[J].*工程勘察*,2010,38(8):82-87,92.
- [11]Allersma H G B. Using digital image processing in field measurement [J]. *Géotechnique*, 1996,46(3):561-563.
- [12]Lee C, An S, Lee W. Real-time monitoring of SPT donut hammer motion and SPT energy transfer ratio using digital line-scan camera and pile driving analyzer[J]. *Acta Geotechnica*, 2014,9(6)959-968.
- [13]Towhata I, Kawamata Y, Nakayama M, et al. E-Defense shaking test on large model of underground shaft and tunnels[M]//Yoo C, Park S W, Kim B, et al. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. New York: CRC Press, 2015:31-40.
- [14]Alshibli K A, Sture S. Sand shear band thickness measurements by digital imaging techniques [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1999,13(2):103-109.
- [15]Salazar S E, Barnes A, Coffman R A. Development of an internal camera based volume determination system for triaxial testing [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015,38(4):549-555.
- [16]Lin Q, Labuz J F. Fracture of sandstone characterized by digital image correlation [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013,60:235-245.
- [17]Shi Z M, Wang Y Q, Peng M, et al. Landslide dam deformation analysis under aftershocks using large-scale shaking table tests measured by videogrammetric technique [J]. *Engineering Geology*, 2015,186:68-78.
- [18]Krim J, Yu P D, Behringer R P. Stick-slip and the transition to steady sliding in a 2D granular medium and a fixed particle lattice [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2011,168(12):2259-2275.
- [19]Herbert D M, Gardner D R, Harbottle M, et al. The development of a new method for testing the lateral load capacity of small-scale masonry walls using a centrifuge and digital image correlation [J]. *Construction and Building Materials*, 2011,25(12):4465-4476.
- [20]Huang Y, Mao W W. First results derived from a drop-tower testing system for granular flow in a microgravity environment[J]. *Landslides*, 2013,10(4):493-501.
- [21]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.
- [22]Wolf H, König D, Triantafyllidis T. Experimental investigation of shear band patterns in granular material [J]. *Journal of Structural Geology*, 2003,25(8):1229-1240.
- [23]Matziaris V, Marshall A M, Yu H S. Centrifuge model tests of rainfall-induced landslides[M]//Yu W. *Recent Advances in Modeling Landslides and Debris Flows*. Cham: Springer, 2015:73-83.
- [24]Tralli D M, Blom R G, Zlotnicki V, et al. Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2005, 59(4):185-198.
- [25]Arnous M O, Green D R. GIS and remote sensing as tools for conducting geo-hazards risk assessment along Gulf of Aqaba coastal zone, Egypt[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2011,15(4):457-475.
- [26]赵慧俊,马月辉,刘宁宁,等.基于数字图像处理的隧道围岩形变量测[J].*现代电子技术*,2018,41(21):76-79.
- [27]何国华,刘新根,陈莹莹,等.基于数字图像的隧道表观病害识别方法研究[J].*重庆交通大学学报(自然科学版)*,2019,38(3):21-26.
- [28]周奇才,孙月腾,陈海燕,等.地铁隧道变形监测的数字图像处理技术研究[J].*中国工程机械学报*,2009,7(4):463-468.
- [29]Alshibli K A, Alsaleh M I. Characterizing surface roughness and shape of sands using digital microscopy[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2004,18(1):36-45.
- [30]张波,陶连金,黄俊,等.基于微观图像处理技术的土体三轴试验颗粒流模型[J].*工业建筑*,2013,43(4):86-91.
- [31]朱泽奇,肖培伟,盛谦,等.基于数字图像处理的非均质岩石材料破坏过程模拟[J].*岩土力学*,2011,32(12):3780-3786.
- [32]徐文杰,岳中琦,胡瑞林.基于数字图像的土、岩和混凝土内部结构定量分析和力学数值计算的研究进展[J].*工程地质学报*,2007,15(3):289-313.
- [33]聂志红,袁梦,王翔.粗粒土的粒间孔隙特征与其影响因素的相关性研究[J].*铁道科学与工程学报*,2018,15(7):1700-1707.
- [34]刘春,许强,施斌,等.岩石颗粒与孔隙系统数字图像识别方法及应用[J].*岩土工程学报*,2018,40(5):925-931.
- [35]Kozaki T, Suzuki S, Kozai N, et al. Observation of microstructures of compacted bentonite by microfocus X-ray computerized tomography (Micro-CT)[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2001,38(8):697-699.
- [36]宋义敏,马少鹏,杨小彬,等.岩石变形破坏的数字散斑相关方法研究[J].*岩石力学与工程学报*,2011,30(1):170-175.
- [37]Wong L N Y, Einstein H H. Using high speed video imaging in the study of cracking processes in rock[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2009,32(2):164-180.
- [38]王宇,李晓,胡瑞林,等.岩土超声波测试研究进展及应用综述[J].

- 工程地质学报,2015,23(2):287-300.
- [39]王锡勇,苏锐,陈亮,等. 基于超声波钻孔电视的深部岩体结构面特征研究[J]. 世界核地质科学,2014,31(1):39-44,62.
- [40]Benson P M, Thompson B D, Meredith P G, et al. Imaging slow failure in triaxially deformed Etna basalt using 3D acoustic-emission location and X-ray computed tomography[J]. Geophysical Research Letters, 2007,34(3):L03303.
- [41]宋义敏,邢同振,赵同彬,等. 岩石单轴压缩变形场演化的声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(3):534-542.
- [42]Gutowski M, Bull J M, Dix J K, et al. 3D high-resolution acoustic imaging of the sub-seabed[J]. Applied Acoustics, 2006,69(3):262-271.
- [43]Vardy M E. Deriving shallow-water sediment properties using post-stack acoustic impedance inversion[J]. Near Surface Geophysics, 2015,13(2):143-154.
- [44]丁秀丽,李耀旭,王新. 基于数字图像的土石混合体力学性质的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(3):477-484.
- [45]严成增,郑宏,孙冠华,等. 基于数字图像技术的岩土材料有限元-离散元分析[J]. 岩土力学,2014,35(8):2408-2414.
- [46]刘建国,孙其诚,金峰. 光弹法检测颗粒物质体系中的力链结构[C]//中国力学学会学术大会 2009 论文摘要集. 郑州:中国力学学会,郑州大学,2009:1.
- [47]侯明勋. 颗粒介质接触应力网格测试及拱效应特性研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [48]Zheng H, Dijkstra J A, Behringer R P. Shear jamming in granular experiments without basal friction[J]. EPL (Europhysics Letters), 2014,107(3):34005.
- [49]Wang D, Ren J, Dijkstra J A, et al. Microscopic origins of shear jamming for 2D frictional grains[J]. Physical Review Letters, 2018,120(20):208004.

《地质与资源》编辑部版权声明

本刊已许可中国知网、万方数据、重庆维普等期刊网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊作者所得稿酬中已包含上述网络著作权使用费。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。