



CT 扫描技术在我国土工试验中的应用研究进展^①

王艳丽, 程展林

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要:介绍岩土 CT 可视化系统的特点, 总结 CT 扫描技术在土工试验中的应用情况, 包括黄土、冻土、膨胀土、粗粒土等土体的初始结构观测与结构性演化方面的研究进展, 指出开发定量的计算机图像分析系统, 通过 CT 细观结构图像来建立土体数值模型和开发研制动态试验 CT 扫描设备是今后应予以深入关注的研究方向。

关键词: CT 技术; 土工试验; 结构演化; 动态试验

中图分类号: TU411.92

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 1-0035-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0563

Progress in the Application of CT Scanning Technology in Chinese Soil Tests

WANG Yan-li, CHENG Zhan-lin

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: In this study, the characteristics of a geotechnical CT visualization system are introduced and the application of CT technology for soil testing are systematically summarized, including research advances in the observation of the initial structures of soil and the structural evolution of loess, frozen soil, expansive soil, and coarse-grained soil. In addition, this study indicates potential future research directions, including the development of quantitative computer imaging analysis systems, the use of the mesoscopic structures that are visualized by CT images for the establishment of numerical models, and the development of CT scanning devices for dynamic soil testing.

Key words: CT technology; soil test; structure evolution; dynamic test

0 引言

土是由岩石经过风化后产生的松散物集合体, 土体的宏观工程性质受微细结构状态和变化规律影响。土体微细结构的多样性和易变性决定了土体工程性质在宏观上的非连续性、不均匀性、各向异性和非确定性^[1]。土体微细结构的变化规律及其对宏观

力学行为影响的研究是近年来岩土学术界和工程界的前沿课题, 也是未来岩土工程研究的发展趋势^[2]。

土工试验是认识土体材料特性和揭示土工问题的重要手段, 传统的土工试验是建立在材料均质假设基础上的宏观应力和应变的测试。近年来许多学者开始重视土体的微细观力学行为, 认识到宏观的

① 收稿日期: 2015-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309027, 51379021); 湖北省自然科学基金项目(2015CFB417)

作者简介: 王艳丽(1981-), 女, 高级工程师, 主要从事土动力学宏观细观方面的理论和试验研究。E-mail: wyldhh@126.com

变形破坏由微细结构变形的累积扩展而成,掌握微细结构变形破坏的规律可以为岩土工程出现的问题给出更科学的解释。土体微细结构研究的试验方法有多种,如压汞法、气体吸附法、X射线分析法、扫描电镜法、计算机断面成像技术(CT技术)等。其中CT技术因具有无损、动态、定量检测且分层识别材料内部组成与结构信息、高分辨率数字图像显示等优点而倍受国内外工程领域及学术界的重视。近年来,CT技术在材料的无损检测和内部结构及结构性演化方面取得了长足的进展,研究对象包括岩石、混凝土、沥青、水泥、煤炭、黄土、膨胀土、冻土、粗粒土、红黏土、根植土和加筋土等,研究方向涉及材料的细观结构分析、物质的迁移和利用CT图像建立岩土材料数值模型等方面。其中材料的细观结构分析方面的成果较多,包括材料的初始结构观测和单轴、三轴加载、冻融、流变、湿化和干湿循环过程中的细观结构演化等。

本文首先介绍CT扫描技术的原理和特点及我国CT配套测试系统研发和购置情况,然后重点总结CT扫描技术在土工试验中的应用情况,并对CT技术今后的发展方向进行展望。

1 CT扫描技术的原理和特点

CT是英文Computerized Tomography的简称,一般译为“计算机断面成像技术”或“计算机层面扫描技术”,是以计算机为基础对被测体断层中某种特性进行定量描述的专门技术。CT技术是利用X射线穿透物体断面进行旋转扫描,收集X射线经此层面不同物质衰减后的信息,进行放大和模数转换后,由计算机在CT的探测空间范围内与空间某点相关的各方向射线进行空间解算,得出与该点X射线吸收系数 μ 直接关联的CT数,从而形成一幅物体层面的 μ 数字图像^[3]。物质密度与X射线吸收系数 μ 成反比,与CT数成正比。CT技术是分析土体的变形、裂隙扩展、液体的运输能力和渗透性以及物理状态的有力工具,并可无损、动态、定量地研究实验过程中土体的细观结构变化。

2 我国CT配套测试系统研发和购置情况

CT技术在国内岩土力学研究中的应用日臻广泛与深入离不开岩土CT三维可视化系统的建立和完善。岩土CT三维可视化系统主要由3部分组成,包括CT扫描机、岩土专用加载设备和图像处理系统。目前国内已有3家单位建立了岩土试验CT

工作站,最早的是中科院寒区旱区环境与工程研究所,他们于1990年引进美国GE8800型CT机,1998年引进德国西门子SOMATOM PLUS型CT机,并且研制了CT高压三轴仪和CT温控三轴仪,2010年又引进和开发了分辨率更高、测量更准确的荷兰飞利浦多能量螺旋CT机和图像处理工作站^[4]。文献^[5]反映了围绕该CT工作站的早期研究成果。后勤工程学院于2001年开发了与CT机配套的非饱和土三轴仪^[6],2004年开发了与CT机相匹配的专用三轴仪,2006年在陕西省汉中市建立了后勤工程学院(汉中)CT-三轴科研工作站。长江科学院于2008年建立了岩土试验CT工作站,该工作站采用德国西门子Somatom Sensation 40型CT机,其主要特点是具备比较高的空间和时间分辨率,以及高质量的多维重建图像,可以实现用三维的图像来观察三维的试件。在此基础上开发了一系列与之配套的试验设备,如:CT三轴仪、渗透仪、单轴压缩仪等^[3]。图1是长江科学院岩土试验CT工作站的照片。



图1 长江科学院岩土试验CT工作站

Fig.1 Geotechnical test CT workstation of Yangtze River Scientific Research Institute

3 CT扫描技术在土工测试中的应用

沈珠江^[7]指出:21世纪土力学的核心问题是土体结构性的力学数学模型。谢定义^[8]认为“土结构性是决定各类土力学特性的一个最为根本的内在因素”。土体结构性研究已成为国内外土工界的研究热点与前沿内容之一。CT技术的引入为岩土材料内部结构的无损实时监测和定量描述提供了可能。目前,国内外学者在利用CT技术观测土体的初始结构与结构性演化方面开展了相关的研究,取得了一定的研究成果。

3.1 CT扫描技术在黄土研究中的应用

黄土是在半干旱气候条件下形成的具有褐黄、灰黄或黄褐等颜色,并有针状大孔、垂直节理的一种

特殊性土,湿陷性是黄土的典型特点。在黄土的 CT 试验研究方面,国内目前已有一定程度的研究。蒲毅彬等^[9]通过对黄土在单轴、三轴、渗水及其综合作用条件下进行的 CT 扫描和图像分析,得到了陇东黄土湿陷过程的细观结构变化规律。倪万魁等^[10]利用可同步进行 CT 扫描的三轴仪,对路基原状黄土进行三轴剪切试验,从 CT 数和 CT 图像两方面分析了不同受力过程中黄土细观结构的变化,并对其机理进行解释。王朝阳等^[11]利用与 CT 机配套的专用加载设备,完成了在三轴压缩荷载作用下黄土结构破坏全过程的细观损伤扩展规律的实时 CT 检测试验,通过对试验得到的 CT 数、CT 图像等试验结果进行分析,得到了原状黄土孔隙变化特性及原状黄土的土体损伤扩展的初步规律。雷胜友等^[12]进行了原状黄土三轴剪切试验过程中的 CT 扫描,结合 CT 数据与应力-应变曲线,利用损伤理论方法解释土硬化屈服破坏过程,并提出了损伤应力和应变门槛值的确定方法,得出硬化屈服损伤过程中的损伤演化曲线和演化方程。朱元青等^[13]开展了原状 Q₃ 黄土在加载和湿陷过程中细观结构动态演化的 CT 三轴试验研究,确定了原状湿陷性黄土的结构屈服应力,提出一个基于 CT 数均值的结构性参数,得到加载和湿陷过程中的结构损伤变量的演化规律,建立了结构损伤演化方程。

3.2 CT 扫描技术在冻土研究中的应用

冻土是由土颗粒、未冻水、冰和气体组成的复杂特殊土,在外部荷载或温度梯度作用下其内部结构变化非常复杂。近年来 CT 扫描技术在冻土试验中得到了较多的应用,包括蠕变、单轴和三轴压缩、温控三轴和动三轴试验等。吴紫汪、马巍等^[14-15]利用 CT 技术观测了冻土在单轴蠕变过程中的结构变化情况,认为冻土蠕变过程中所进行的微裂缝发育、颗粒集合体的破坏以及其他结构缺陷的增生与扩展,制约着冻土结构的强化与弱化作用,控制着蠕变过程中形态特征。刘增利等^[16-17]对冻土单轴压缩进行了 CT 动态测试,给出了冻土单轴压缩过程中不同承载阶段细观结构损伤的演化特征;并采用冻土附加损伤的概念,给出了冻土在受载荷作用下产生的微裂纹与 CT 数之间的关系,冻土密度与 CT 数以及冻土内部损伤量与 CT 数间关系模型。孙星亮等^[18]利用 CT 扫描技术对冻结粉质黏土在三轴剪切过程中结构损伤的变化进行动态观测,分析了三轴剪切过程中的冻土细观变形机理和结构损伤的演化机理。凌贤长等^[19]基于对冻结哈尔滨粉质粘土

动三轴试验前后试件 CT 检测结果,详细研究了冻土的强度、微观变形机制和结构损伤等变化特性及其与试验的负温和围压、土的含水量和容重、轴向荷载的振动频率和振动次数等主要影响因素之间的关系。徐春华等^[20]开展了不等幅值循环荷载下冻土残余应变研究及其 CT 分析,根据冻土试样震融沉前后 CT 测试数据及扫描图像,定量地分析了土样结构微裂纹发展、密度变化规律,并对冻土特有的震融沉形成机理给予解释。郑剑锋等^[21]利用两种粉质黏土试样分别以不同冻结方式进行冻结,并对试样进行了无损 CT 扫描,通过冻结前后的实测 CT 数变化,得出轴向冻结方式对冻土试样内部含水量的变化影响要小于径向冻结方式。赵淑萍等^[22]利用 CT 扫描系统配套使用的可控温三轴试验仪,对不同温度条件下的冻结兰州黄土进行了一系列的 CT 扫描试验,研究了 CT 数的变化情况以及温度对土体 CT 数的影响。

3.3 CT 扫描技术在膨胀土研究中的应用

膨胀土是在自然地质过程中形成的一种多裂隙并具有显著胀缩性质的地质体,是一种结构性明显的特殊土,裂隙性是膨胀土的重要结构特性^[23]。国内外学者利用 CT 技术对膨胀土裂隙性开展了大量研究。卢再华等^[24]利用与 CT 机配套使用的非饱和土三轴仪,对非饱和原状膨胀土在三轴剪切试验过程中内部结构的变化进行了动态、定量和无损伤测量,得到了土样内部损伤结构演化的清晰的 CT 图像和相应的 CT 数据。卢再华等^[25]对南阳重塑膨胀土在干湿循环过程中裂隙的演化进行了 CT 试验研究,定义了基于 CT 数据的裂隙损伤变量,分析了裂隙损伤变量随累计干缩体积变化的规律。汪时机等^[26]以人工造孔的方式,对膨胀土试样剪切全过程进行 CT 扫描,分析不同围压及吸力作用下造孔重塑膨胀土的宏细观结构演化规律和不同破损程度的膨胀土强度及变形特性。胡波等^[27]将计算机 X 射线断层扫描技术引入裂隙面的强度试验,通过测量裂隙面真实产状,准确分析裂隙面上的破坏应力,提出了裂隙面强度参数的整理方法。

3.4 CT 扫描技术在粗粒土研究中的应用

目前 CT 技术已成功用于粗粒土的组构研究,并取得了一定的研究进展。李文平等^[28]用取自山东巨野矿区埋深近 600 m 的深部砂土样,在三轴试验机上进行围压为 12 MPa 的三轴卸载试验,同时用 CT 装置探测试样在试验全过程中内部结构变化,分析了深部砂土在高压卸载条件变形和破坏结

构性变化本质的特点。程展林等^[29]采用自主研制CT三轴仪开展了一系列粗粒土应变式三轴试验,实现了粗粒土受力过程中对试样内部结构动态变化的实时检测。针对CT三轴试验得到的CT图像,利用自行开发的“计算机图像测量分析系统”对不同宏观应变状态下的颗粒位置及其变位进行量测,获得三轴剪切过程中粗粒土颗粒的运动规律,实现了由三轴试验的CT图像取得粗粒土组构信息的研究方法,为粗粒土组构研究奠定了基础。随后他们又以某工程灰黑色千枚岩碎屑土为研究对象,开展了一系列砾石土应变式CT三轴试验,通过对特征区域CT数平均值和CT标准差的统计分析,获得了砾石土试样在剪切过程中剪切带的产生与扩展机制。左永振等^[30]将CT技术应用到砾石土浸润试验,得到的CT图片可以准确描述得到浸润峰的位置,从CT浸润图片可以看出,浸润线分层比较明显,同时出现阶梯状浸润峰,这是毛细作用在浸润峰发展过程中引发的现象。姜景山,程展林等^[31]开展了粗粒土CT三轴湿化变形试验,研究粗粒土湿化变形过程中颗粒运动规律,并对粗粒土的细观变形机理进行了初步探讨。姜景山,程展林等^[32]通过单级配砾石土CT三轴流变试验,研究粗粒土流变过程中颗粒运动规律,初步探讨了粗粒土的流变机制。

3.5 CT扫描技术在其他土体研究中的应用

目前,CT扫描技术在土工测试研究中的应用主要集中于黄土、膨胀土、冻土和粗粒土等特殊土,在其他土类中也有相关研究,如红黏土和根植土等。黄质宏等^[33]采用CT技术研究了三轴应力条件下红黏土的力学特性,并从细观的角度分析了红黏土在受到三向应力作用后土体内部结构、孔隙的变化、裂隙扩展等规律,获得CT图像、CT数与应力-应变的关系。周云艳等^[34]利用长江科学院研制的CT三轴仪,分别对素土样和含根土样进行不固结不排水的CT实时三轴剪切试验,并通过对含根土样和素土样受压过程的CT演化图片和断面上统计的裂缝数据信息进行比较分析,对比说明了素土和含根土样中裂纹扩展以及试样破坏过程的差异,揭示了根系固土的细观力学特征。

4 结语

CT扫描技术为土工试验过程的无损实时监测和内部结构的定量描述提供了一种有效手段,研究对象由黄土、膨胀土、冻土、粗粒土等特殊土向一般性土转变,研究对象向多样化发展。研究方向主要

集中在土体的细观结构演化,且多数成果还仅仅是利用直观的CT图像和CT数的大小及其分布规律来对土体的细观结构及其变形和力学机理进行分析和评价,亟需开发相应的数字图像处理程序来定量描述土体细观结构的演化规律。同时通过CT细观结构图像来建立土体数值模型的研究是未来研究的重要发展方向。另外,CT专用加载设备的研制方面也取得了较大进步,加载设备主要有单轴、三轴压缩仪,温控三轴仪,非饱和三轴仪,使土体细观结构测试由试验前后发展到试验过程中的研究,然而土体的加载方式大多局限在静力加载的范畴,无法实现动力加载过程中土样的细观结构观测,因此开发研制动态试验CT扫描设备以实现动力加载过程中土样的细观结构观测是今后的重要研究方向。

参考文献

- [1] 洪保宁,刘鑫.土体微细结构理论与实验[M].北京:科学出版社,2010.
- [2] 周健,贾敏才.土工细观模型试验与数值模拟[M].北京:科学出版社,2008.
- [3] 程展林,左永振,丁红顺.CT技术在岩土试验中的应用研究[J].长江科学院院报,2011,28(3):33-38.
- [4] 陈世杰,赵淑萍,马巍,等.利用CT扫描技术进行冻土研究的现状和展望[J].冰川冻土,2013,35(1):193-200.
- [5] 葛修润,任建喜,蒲毅彬,等.岩土损伤力学宏细观试验研究[M].北京:科学出版社,2004.
- [6] 陈正汉,卢再华,蒲毅彬.非饱和土三轴仪的CT机配套及其应用[J].岩土工程学报,2001,23(4):387-392.
- [7] 沈珠江.土体结构性的数学模型——21世纪土力学的核心问题[J].岩土工程学报,1996,18(1):95-97.
- [8] 谢定义,齐吉琳.土结构性及其定量化参数研究的新途径[J].岩土工程学报,1999,21(6):651-656.
- [9] 蒲毅彬,陈万业,廖垒荣.陇东黄土湿陷过程的CT结构变化研究[J].岩土工程学报,2000,22(1):49-54.
- [10] 倪万魁,杨泓全,王朝阳.路基原状黄土细观结构损伤规律的CT检测分析[J].公路交通科技,2005,22(6):81-83.
- [11] 王朝阳,倪万魁,蒲毅彬.三轴剪切条件下黄土结构特征变化细观试验[J].西安科技大学学报,2006,26(1):51-54.
- [12] 雷胜友,唐文栋.原状黄土硬化屈服的损伤试验研究[J].土木工程学报,2006,39(2):73-77.
- [13] 朱元青,陈正汉.原状Q₃黄土在加载和湿陷过程中细观结构动态演化的CT三轴试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(8):1219-1228.
- [14] 吴紫汪,马巍,蒲毅彬,等.冻土蠕变变形特征的细观分析[J].岩土工程学报,1997,19(3):1-6.
- [15] 马巍,吴紫汪,蒲毅彬,等.冻土三轴蠕变过程中结构变化的CT动态监测[J].冰川冻土,1997,19(1):52-57.
- [16] 刘增利,李洪升,朱元林.冻土单轴压缩动态试验研究[J].岩土力学,2002,23(1):12-16.

- [17] 刘增利,李洪升,朱元林. 冻土单轴压缩损伤特征与细观损伤测试[J]. 大连理工大学学报,2002,42(2):223-227.
- [18] 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.
- [19] 凌贤长,徐学燕,邱明国,等. 冻结哈尔滨粉质粘土三轴试验 CT 检测研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(8):1244-1249.
- [20] 徐春华,徐学燕,沈晓东. 不等幅值循环荷载下冻土残余应变研究及其 CT 分析[J]. 岩土力学,2005,26(4):572-576.
- [21] 郑剑锋,赵淑萍,马巍,等. 冻结方式对冻土试样制备的影响冰川冻土,2009,31(1):130-138.
- [22] 赵淑萍,马巍,郑剑锋,等. 不同温度条件下冻结兰州黄土单轴试验的 CT 实时动态监测[J]. 岩土力学,2010,31(增 2):92-97.
- [23] 刘特洪. 工程建设中膨胀土问题[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [24] 卢再华,陈正汉,蒲毅彬. 原状膨胀土损伤演化的三轴 CT 试验研究[J]. 水利学报,2002(6):106-112.
- [25] 卢再华,陈正汉,蒲毅彬. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的 CT 试验研究[J]. 岩土力学,2002,23(4):417-422.
- [26] 汪时机,韩毅,李贤,等. 圆柱孔破损膨胀土强度和变形特性的 CT-三轴试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(10):2763-2768.
- [27] 胡波,龚壁卫,程展林. 南阳膨胀土裂隙面强度试验研究[J]. 岩土力学,2014,33(10):2942-2946.
- [28] 李文平,张志勇,蒲毅彬,等. 深部砂土三轴高压卸载结构变化的 CT 研究[J]. 工程地质学报,2003,11(3):302-306.
- [29] 程展林,吴良平,丁红顺. 粗粒土组构研究之颗粒运动[J]. 岩土力学,2007,28(增刊):29-33.
- [30] 左永振,程展林,丁红顺. 基于 CT 技术的砾石土浸润试验研究[J]. 长江科学院院报,2011,28(2):28-31.
- [31] 姜景山,程展林,卢文平. 粗粒土 CT 三轴湿化变形试验研究[J]. 人民长江,2014,45(7):94-97.
- [32] 姜景山,程展林,左永振,等. 粗粒土 CT 三轴流变试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(9):2507-2514.
- [33] 黄质宏,朱立军,蒲毅彬,等. 三轴应力条件下红粘土力学特性动态变化的 CT 分析[J]. 岩土力学,2004,25(8):1215-1219.
- [34] 周云艳,徐琨,陈建平. 基于 CT 扫描与细观力学的植物侧根固土机理分析[J]. 农业工程学报,2014,30(1):1-8.