

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0597-06

图像分析法在岩土结构中的应用

王 伟¹, 胡 昕², 洪宝宁², 何小元¹

(1.东南大学 工程力学系, 南京 210096; 2.河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘 要: 为了揭示土体工程特性与其结构变化之间的内在规律性, 探讨了图像分析方法在岩土结构研究中的发展历程, 从基本原理上分析了各种图像处理技术在岩土宏观、细观结构研究中的特点。宏观上主要是利用跟踪技术, 针对土体中标志点的移动来定量分析岩土的力学性能; 微观上主要是利用电子扫描显微技术对土的微观结构进行定量分析, 同时部分学者还发展了 X 射线计算机扫描技术。最后提出利用远距离、远心显微镜头和电荷耦合器件(CCD)共同作用, 开辟了一种新的岩土动静态微细结构研究方法。

关 键 词: 岩土结构; 图像分析; 远心显微镜头; 细观; 力学性能

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Application of image analysis method to geomaterial structure

WANG Wei¹, HU Xin², HONG Bao-ning², HE Xiao-yuan¹

(1. Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explain the regularity between engineering properties of soil and geomaterial structure feature, the development process of image analysis method was explored in the research of geomaterial structure. Based on the principles, some characteristics of image processing technologies were analyzed on the macroscopic and microscopic structure of geomaterial. From the macroscopic structure, the mechanics properties of soil were quantitatively analyzed by the displacements of symbol mark embedded in the soil. From the microscopic aspect, the microstructure of soil was also quantitatively analyzed by the technology of scanning electron microscope. In addition, few researchers used the computerized tomography to study the soil microstructure. Finally, a new research method, that is, the combination between a long work distance telecentric microscope lens and charge coupled device(CCD), was proposed to discuss the microstructure of soil under static or dynamic loads.

Key words: geomaterial structure; image analysis; telecentric microscope lens; microscopic; mechanical property

1 引 言

岩土结构可以从宏观和细观两个方面加以研究, 其研究程度与使用的方法密切相关, 本文着重阐述了图像技术在此领域的研究成果。一般来说, 宏观是基于连续介质力学和不可逆热力学理论, 认为岩土材料是一种连续体, 而细观是从土的颗粒、晶体、微裂纹角度来研究土的力学性质, 这两个方面是相互关联、不可分割的。自 1923 年土力学家 K. Terzaghi 指出, 在评价土体工程性质时必须考虑其微观结构开始, 研究土体结构的学者才渐渐多起来, 图像技术也开始被引入岩土领域进行土体结构

的研究。从 20 世纪的低倍放大镜, 30~50 年代的光学显微镜, 60~70 年代的电子显微镜, 70 年代初出现了 X 光断层摄影, 发展到 80 年代末、90 年代初伴随计算机技术和摄影的进步, 相关的图像处理软件使研究进一步量化。下面就上述图像方法逐一介绍。

2 图像分析方法

2.1 低倍放大镜

这种观察手段是进行岩土结构研究时间最早, 也是最直接、最方便的方法。利用放大镜直接观察土样的外观, 包括颗粒大小, 孔隙等, 虽然没有固

收稿日期: 2006-04-21

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助(No. 20020286019)。

作者简介: 王伟, 男, 1976 年生, 博士研究生, 主要从事土微观结构的图像处理研究。E-mail: ww117@seu.edu.cn

定的成像设备,看到的仅仅是虚像,但它是最早的图像研究方法,代表性的人物有 Terzaghi (1925 年),根据此研究手段提出了土的微观结构的概念(蜂窝结构)。Goldschmid (1926 年)提出片架结构^[2],然而,此种方法只能简单地定性分析土体结构。

2.2 光学图像技术

2.2.1 光学显微镜

这种方法是利用光学显微镜观察从原状土样中切取的薄片,如图 1 所示^[1],能够观察到比放大镜土体中更细微的结构。1932 年 Casagrade 发展了 Terzaghi 的蜂窝结构,提出了蜂窝结构中基质黏土 (Ma-trix) 和键合黏土 (Bond) 的概念。结合数字摄影技术, Murphy 等^[2] (1977 年) 和 Bhatia, Soliman (1990 年) 开始利用图像定性分析土体结构和孔隙分布, Muhunthan 和 Chamean (1992 年) 提出一种基于经典立体摄影原理的统一框架,描述了粒状介质结构,后来 Kuo 和 Frost (1993 年) 提出一种定量土孔隙率的改进方法。Muhunthan 和 Masod (1997 年) 提出了不同的改进措施,将上述 3 种方法计算的孔隙率进行了对比,1996 年 Frost 和 Kuo^[5] 提出了一种全自动图像分析系统,研究了局部孔隙分布, Kuo 等 (1998 年) 延伸了这一方法。Moore 和 Donalelson 1995 年^[6] 用分形理论定量了孔隙率和孔隙分布, Gimenez 等 (1997 年) 也用分形理论估计了基于土样孔隙率的水压传导系数。土颗粒图像的 Fourier 分析法使 Luerkens (1991 年) 提出的颗粒形态学特征的研究成为可能。Wang 等 (1997 年) 提出在光学显微镜得到的序列二值图像上用 Fourier-legendre 反算形态学特征。



图 1 光学显微镜观察结果

Fig.1 The observation of optical microscope

2.2.2 光弹

这种技术主要局限于应力测量,是观察冻结的光弹模型切片上的干涉条纹来进行应力分析。许多研究者尝试将光弹应用于粒状介质,其中一个早期应用是 Drescher 和 DeJony (1972 年) 利用灵敏的

光弹盘分析平面应变模型的内部应力,证明了一种数学模型。Allersma (1982 年) 也用光弹微粒进行了平面应变模型的应力测量,这种技术是基于透明固体颗粒的双折射性质,颗粒之间的孔隙由相同折射率的液体填充,基本应力、应力方向和主应力都可以通过图像采集而得到。PaiKowshy (1993 年) 用光弹研究了接触应力和颗粒间内部应力,由于该方法制备试件的过程比较繁琐,阻碍了它在岩土领域的进一步发展。

2.2.3 干涉

有文献报道,岩土工程中主要应用两种干涉技术:全息干涉和散斑干涉。从历史上来看,全息干涉起步早,但散斑干涉发展的越来越快。Jones 和 Wykes (1989 年) 简单讨论了全息干涉的局限性:激光源必须稳定并且能量要充足,能够形成干涉条纹,还要避免刚体运动,此外,实际测量岩土模型的操作复杂,这都限制了全息干涉在岩土结构中的应用,而散斑干涉主要应用在土木工程的实验室中,对土体的这种粒状介质来说却是一种挑战。由于散斑干涉的灵敏性很高,大变形如半个波长的离面位移就会使散斑不相关,而且土体颗粒不仅有离面位移,还会发生旋转,使准确地测量更加困难。Shchopinove (1996 年) 建议使用白光源测量大变形,但白光源的穿透深度也是影响测量的一种因素,因此,散斑干涉的测量精度虽然高,但它在岩土的应用有待进一步探讨。

2.2.4 目标跟踪技术

对于利用摄影来跟踪土体模型边界的特殊目标,早期应用的例子是 Bulaterfield 和 Andrawes (1971 年) 利用先进的光测技术研究土体变形的力学性质。后来发展到基于土颗粒集合体的计算机目标跟踪, Raschke 等 (1996 年), Gustafsson 和 Guler 等 (1999 年) 研究了粒状土的微变形, Raschke 等发展了土颗粒的边缘检测和利用图像匹配函数的颗粒跟踪,这种方法局限于小范围,并且用到阈值分割技术。Horii 等 (1997 年) 利用匹配技术测量了岩石在平面应变荷载下的位移场,为了提高测量精度,采集图像时保持相机固定,使用灵敏的薄膜,然后利用 CCD 数字化,然而,该算法只允许测量应变小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的情况。Xing 等 (1997 年) 提出一种测量二维位移的目标跟踪系统,该方法利用跟踪预先放置在模型中的白色聚丙烯标志来测量位移。Alshibli 和 Sture (1999 年)^[3] 跟踪大型土模型 ($0.5\text{ m}\times 1.22\text{ m}\times 9.1\text{ m}$) 上的嵌入格栅测量了平面应变状态下的剪切带。邵龙潭等^[4, 5] (2001~2003

年)用数字图像技术跟踪预先在土样观测面制作的白色标志线,直接量测三轴土样整体,不同部位轴向、径向变形以及三轴土样的局部变形特性,并开发了三轴土样变形数字图像测量系统,已成功应用于 39.1 mm 和 61.8 mm 直径标准土样的轴向和径向变形,分辨率达到 0.003 mm。从光测方面改进了三轴仪的土样变形测量方法。李元海^[6](2003 年),在土样的模型观测面上,设置嵌入式彩色标点,利用数码相机拍摄土样变形的各阶段,然后利用数字图像处理技术,识别并比较每一阶段的标点坐标,开发了一套软件系统,在此基础上利用高分辨率数码相机测量砂土模型变形场(2004 年),不布置标点或网格直接拍摄,然后对图像作相关分析,再利用图像匹配技术追踪点的位移,借用 FEM 常用的等参单元进行图像校准和应变计算,使砂土模型局部化变形、剪切带和渐进破坏过程的量化分析成为可能。

2.2.5 数字图像相关方法

数字图像相关方法(DIC)是光学测量中的一种数字图像处理技术,已被广泛用于力学工程的试验测量中。它的基本原理是基于变形前后两幅图像中最大相关点的变化来进行计算的。关于固体力学领域的表面位移应用 DIC 方法进行测量是由 Sutton 等人 1983 年首先提出的, Sutton^[7](2000 年)又将 DIC 方法结合立体摄影系统进行三维变形测量。Samer G. S. (2002 年)从宏观角度利用该方法研究了透明合成土模型的空间变形,分析了测量精度和误差来源,建议使用大窗口计算。同时,针对桩基对土体的影响这一简单工程问题,对比了 DIC 与有限元(Plaxis 软件)的分析结果,指出二者得到的位移趋势基本一致,都发生了渗入剪切破坏,二者的位移值有点不同,是 DIC 采用平均值的缘故。洪宝宁等^[8](2003 年)从细观角度配合利用长距离显微镜,研制了岩土材料微细结构光学测试系统,也是利用数字图像相关分析了土的孔隙总面积、孔隙率、孔隙数目、平均面积、平均周长、颗粒定向度等力学参数,为岩土材料力学模型及本构关系的建立提供了可靠的微观试验依据,对土体固结机理等研究发挥了很大的作用。

2.2.6 航空摄影

利用航空摄影技术拍摄岩石的航空照片是从宏观上进行研究的另一种方法,可以进行土体大面积变形测量。由于航空照片通过地热温差得到,因此, Sheikada 等(1993 年)提出利用红外图像预测山体滑坡的发生,结果表明山体滑坡区域的表面温度高

于其他区域。Gokceoglu(1995 年)也是根据此原理研究了 120 km² 区域的山体滑坡过程。另外, Allersma(1997 年)结合目标跟踪技术拓展了这一方法,提出一种研究因水渗透引起山体滑坡的图像测量方法,主要是跟踪山坡上的标志点进行测量,得出破坏开始于地表面的结论,该方法只能进行表面测量,且照相机需要放在变形区域之外,并且容易受到风和温度的影响,降低了测量精度。

2.3 电镜扫描技术(SEM)

SEM 就是扫描电子显微镜,观察结果如图 2 所示。Rosenqvist(1959 年)首次应用电子显微镜研究了海洋土的微观结构, Tovey 等^[9](1973 年)首次对土结构的电子显微镜照片进行了定量分析尝试,大大加速了土微观结构的研究进程, Yudhbir 和 Rahim(1993 年)用 SEM 图分析了砂土形态的影响和其机械行为的微结构原理。Luo 等(1997 年)用 SEM 图研究了高岭石的颗粒结构; Penumadu 和 Hzan 对土样从宏观和微观上研究了孔隙率和孔隙结构分布; Bai 和 Smart 用 SEM 研究了固结和不排水剪下的高岭土的微结构变化情况; Lange 用 SEM 分析了不同应力水平下的孔隙分布, Shi 等 1998 年利用 SEM 结合“CIPS”软件分析了土集合体的方向性及其对强度和渗透性的影响,国内从 20 世纪 60 年代开始利用电镜对黏性土微观结构进行研究,到 80 年代中期达到高潮。1957~1988 年间,许多研究者主要是定性解释一些土的特殊工程性质,吴义祥(1988 年)对细粒土的光片图像进行了计算机处理;施斌^[10](1990 年, 1995~1997 年, 2003 年)利用基于 SEM 方法的计算机图像处理技术定量研究土的微观结构,一方面采用 D/MAXIII A 型全自动组构测角仪对黏土样中任一矿物的任一晶面的方位倾角进行准确的统计性测定,另一方面利用俄罗斯盐业设计院开发的 Videolab 图像分析系统,提取黏性土微观结构单元体定向性的定量信息,包括颗粒或孔径的总面积、平均面积、总周长、平均周长、平均形状系数、平均粒径或孔径及其它它们之间的关系。程昌炳等(1999 年)用电镜的分析手段研究了人工制备的针铁矿胶结高岭土,论证了胶结土在剪切带上的胶结强度就是该土的黏聚力 c 。胡再强等(2000 年)对陕西某抽黄河水工程的黄土试样用电子扫描显微镜分析了其显微结构,指出黄土的湿陷性主要由其结构性和所受应力状态决定。孔令伟等(2001 年)用英国剑桥仪器公司生产的 S-250MK III 型扫描电子显微镜观察红黏土的微观形态,同时又用美国麦克公司生产的 9310 型微孔结构分析仪

(压汞测孔仪)测其孔径分布特征,为了保证测量的真实性,采用冷冻真空升华干燥法制备试样,研究表明天然红黏土的孔隙主要以小孔隙和微孔隙为主,同时存在较多大孔隙和一定的中孔隙,可见 SEM 电镜扫描方法所需的薄片试样,通常是用传统的风干法得到,目前研制成功的真空冷冻干燥仪与国际相比,还有一定的差距,仪器利用率不高,限制了我国电镜在岩土领域的发展。

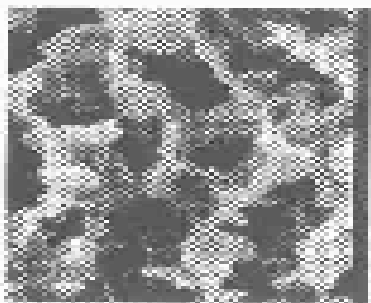


图 2 SEM 观察结果
Fig. 2 The observation of SEM

2.4 X 射线计算机扫描技术(CT)

X 射线计算机扫描技术(CT)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,它是 Hounsfield 教授发明的,用于医学界的人体检测。20 世纪 80 年代以来,在金属,陶瓷,塑料和木材的检测中广泛应用,后来 CT 在对煤层、岩石及冰层结构的研究中获得成功,其对土样的一般观察结果如图 3 所示。Colliat-Dangus (1988 年)应用 CT 机进行研究,提出了剪切带内密度定量局部测量的建设性结论。Mokni 主要研究了砂在三轴试验时的应变局部化。Tillard-Ngan, Desrues, Raynaud 等阐述了用 CT 机对泥灰岩研究的初步结果。Desrues 等^[11]对标准 Hostun RF 密砂和松砂常规三轴试验中的局部化情况进行研究,分析了局部化变形区孔隙比演化的规律。Finno 等用立体摄像测量技术研究了松砂试样在不排水和排水条件下剪切带的发展,发现连续滑动的开始总是晚于持久性剪切带的完全形成。Kruse 等^[12]把 X 射线 CT 扫描机用于土的模型离心机试验, Otani 等^[13]将工业 X 射线 CT 机用于研究土材料。1992 年和 1994 年 Konagai 等利用激光断层摄影检测了土体路基变形。Bourdean (1993 年)利用 X 光摄影法检测放置于土模型中的标记来研究循环荷载下土颗粒与土工格栅间的相互作用。Shi 等 (1999 年)利用 CT 检测了直剪试验中土试样的破坏演化规律。同年, Wong

利用 X 层析和 SEM 扫描了密砂的直剪三轴试样,利用图像分析了其连接结构,剪切带模式,剪切带内外的孔隙率。Kerchman 和 Carlson (2001 年)提出用 CT 技术评价自然土和岩石的孔隙率。吴紫汪等 (1995 年)在冻土工程国家实验室采用 CT 机 (GE8800)对冻土蠕变过程的体积变化进行了实时分析。马巍等进行了单轴,三轴试验条件下冻土试样结构变化规律的 CT 动态监测。葛修润院士 (1999 年)研制成功了与医用 X 射线 CT 机配套的岩石三轴加载专用设备,该设备可以完成常温下岩石、土和负温下冻岩、冻土、冰的压缩、卸载、蠕变、疲劳破坏 CT 实时试验,在细观尺度上研究岩土损伤破坏机理。蒲毅彬等^[14] (2000 年)对黄土湿陷过程的 CT 结构变化进行了研究。同年,李晓军等^[15]对路基填土进行了单轴受压细观结构 CT 实时监测。

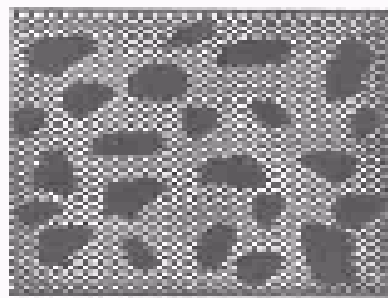


图 3 CT 观察结果
Fig. 3 The observation of CT

2.5 核磁共振成像技术(MRI)

核磁共振成像技术(MRI)是医学界利用核磁共振现象获取分子结构、人体内部结构信息的技术。与 CT 相比,核磁共振成像更加清晰,能够显示更多细节,然而,核磁共振成像设备购买、运行和维护费用非常高昂,严重地限制了 MRI 技术在岩土工程中的应用。Ng 等 (1996 年)利用 MRI 检测了直剪试验中圆形颗粒组成的土试样,研究焦点是土样发生剪切时的体积变化,内部颗粒排列和结构演化规律。Cousser^[16] (1998 年)针对工程材料(如砂、土、岩石、混凝土和木材)得到的核磁共振图像,提出了一种测量孔隙大小的新公式,目前国内尚未见公开的 MRI 相关文献报道。

3 一种新的研究方法

由于岩土介质是典型的天然材料,其具有不确定性、模糊性、各向异性等特性,使土在工程环境

作用下表现出了众多复杂的工程特征和现象。虽然, 传统的分析理论和方法能够解释部分现象, 但不能描述土体微细结构变化的实质, 因此, 建立基于细观结构变化特征的本构关系对深入研究各类岩土工程问题具有十分重要的科学意义。

笔者等通过理论分析提出了利用远距离、远心显微镜头和电荷耦合器件(CCD)共同作用可以方便有效地观测岩土微细结构在动、静态载荷下的变化特性。由于远距离、远心显微镜头不会对采集到的图像产生任何畸变影响, 因此图像质量与普通拍摄镜头采集的图像相比有很大提高, 更有利于下一步土体力学表征参数的数据提取, 从而提高了量化精度, 同时采用自行研制的三维动态跟踪平台使采集序列图像的自动化成为可能。另外, 利用 Windows 多线程技术可以实现土颗粒的动态自动跟踪, 在每一应变状态下自动将跟踪的土颗粒所处区域采集下来, 大大提高了手动寻找移动土颗粒区域的方法, 从而使得土颗粒的研究区域在不同应变状态下是一致的, 保证了下一步计算的准确度。这部分工作仍在进行中。

4 结 语

本文总结了各种图像技术在岩土宏观、细观方面上所取得的研究成果。大量文献表明, 土体在工程环境下所表现的许多复杂工程特性和现象, 都与其内部微细结构的形态和变化有关, 因此揭示土体工程特性与其微细结构变化之间的内在规律性, 建立具有微细结构变化特征背景的本构关系, 对防范地基的坍塌、下陷和变形, 以及分析污染物在岩土介质中的运移有非常重要的意义, 可见图像技术在岩土结构方面的研究有着广阔的发展空间, 关键是研究土体的宏观、细观之间的联系, 通过细观结构的定量分析来解释宏观问题, 指导实际工程。

随着计算机的飞速发展, 利用数字化的图像处理技术研究岩土结构是今后发展趋势。如果结合多种图像测试方法和有限元数值模拟将会取得更有价值的分析结果。

参 考 文 献

- [1] 施斌, 姜洪涛. 黏性土的微观结构分析技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 864—870.
SHI Bin, JIANG Hong-tao. Research on the analysis techniques for clayey soil microstructure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(6): 864—870.
- [2] Samer G S. Soil structure interaction in transparent synthetic soils using digital image correlation[D]. [s.l.]: Polytechnic University, 2002.
- [3] Alshibli K, Stare S. Sand shearband thickness measurement by digital imaging techniques[J]. **Journal of Computing in Civil Engineering**, 1999, 13(2): 103—109.
- [4] 王助贫, 邵龙潭. 三轴试验土样的端部影响问题研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 363—368.
WANG Zhu-pin, SHAO Long-tan. Research on end effect of soil specimens in triaxial tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 363—368.
- [5] 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 Long-tan, WANG Zhu-pin, LIU Yong-lu. 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.
- [6] 李元海, 朱合华, 上野胜利, 等. 基于图像分析的实验模型变形场量测标点法[J]. 同济大学学报, 2003, 31(10): 1 141—1 145.
LI Yuan-hai, ZHU He-hua, UENO Katsutoshi, et al. Application image-based measuring deformation method using target markers in physical model test[J]. **Journal of Tongji University**, 2003, 31(10): 1 141—1 145.
- [7] Sutton M S, McNeil J H. Advances in two dimensional and three computer vision[J]. **Topics in Applied Physics**, 2000, 77: 323—372.
- [8] 刘敬辉, 洪宝宁, 张海波. 一种土体微细结构连续变化过程的试验方法研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(10): 59—62.
LIU Jing-hui, HONG Bao-ning, ZHANG Hai-bo. A new experimental method for soil microstructure changing process[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2004, 37(10): 59-62.
- [9] Tovey N K. Techniques to examine micro fabric and particle interaction of collapsible soils[J]. **Genesis and Properties of Collapsible Soils**, 1995, (1): 65—91.
- [10] 施斌, 李立, 姜洪涛, 等. DIPIX 图像处理系统在土体微结构定量研究中的应用[J]. 南京大学学报, 1996, 32(2): 275—280.
SHI Bin, LI Li, JIANG Hong-tao, et al. Application of the DIPIX image processing system to the quantitative study

- of soil microstructure[J]. **Journal of Nanjing University (Natural Sciences)**, 1996, 32(2): 275—280.
- [11] Desrues J, Chambon R, Mokni M. Void ratio evolution inside shear bands in triaxial and specimens studies by computed tomography[J]. **Geotechnique**, 1996, 46(3): 529—546.
- [12] Kruse G A M, Bezuijen A. The use of CT scans to evaluate soil models[A]. **Proc. of Centrifuge'98**[C]. [s. l.]: Balkema, 1998. 79—84.
- [13] Otani J, Mukunoki T, Obara Y. Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils[J]. **Soils and Foundations**, 2000, 40(2): 111—118.
- [14] 蒲毅彬, 陈万业, 廖全荣. 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.
- PU Yi-bin, CHEN Wan-ye, LIAO Quan-rong. Research on CT structure changing for damping process of loess in Longdong[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(1): 49—54.
- [15] 李晓军, 张登良. 路基填土单轴受压细观结构 CT 检测分析[J]. **岩土工程学报**, 2000, 22(2): 205—209.
- LI Xiao-jun, ZHANG Deng-liang. Monitoring change of structure of road foundation soil in uniaxial compression test with CT[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(2): 205—209.
- [16] Cousser P. Pore size NMR imaging[J]. **Magnetic Resonance Imaging**, 1998, 16(5/6): 621—623.