在外力作用下土体内部裂隙发育过程的CT研究*

A study on the development of failures inside soil under the external force using CT technique

施 斌 姜洪涛
(南京大学地球科学系, 地球环境计算工程研究所, 南京, 210093) (南京大学城市与资源学系, 南京, 210093)

文 摘 介绍了笔者设计制造的一台适用于CT连续观察的装置, 并用这一装置对由多种材料组成的土体模型进行了垂直荷载、直剪和水平荷载试验, 同时用CT对土体模型的不同剖面进行了连续拍摄以观察内部裂隙的发展过程。试验表明, CT可以用来研究一般情况下无法观察到的土体内部结构的变化过程, 是岩土工程分析方面一个强有力的无损伤和无侵入的观察手段。

关键词 CT技术, 土体模型, 垂直荷载, 直剪试验, 水平荷载, 内部裂隙

中图法分类号 TU 411.92 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4548(2000)05-0537-05

作者简介 施斌, 男, 1961年生, 博士, 教授, 博士生导师, 现任南京大学地球环境计算工程研究所副所长, 地质工程教研室主任等, 主要从事地质工程、环境岩土工程、GIS应用、计算机应用软件开发等科研和教学工作。

Shi Bin *Jiang Hongtao*
(ACEI, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093) (Urban & Resources Department, Nanjing University, Nanjing, 210093)

Abstract In this paper, an apparatus that can be fitted into the chamber of a medical CT was built to conduct geotechnical tests. Loading and shearing experiments were performed on the soil models that were built with a variety of materials. CT images have been taken on different cross-sections inside the specimens to monitor the internal failure development in soil continuously. The results of direct shear, horizontal and vertical loading tests are presented and discussed. It has been demonstrated that CT is a powerful non-destructive and non-invasive tool for geotechnical engineering analyses.

Key words computerized X-ray tomography (CT), soil model, vertical loading, shear loading, horizontal loading, internal failure

1 概 述*

岩土体在自然营力和人为因素作用下, 发生各种复杂的变化, 如断裂、褶皱、蠕变、沉降等, 因此分析和重现这些变化过程是一个重要的研究课题。由于现实中的岩土体形状一般较大, 要在实验室中按岩土体的原形来模拟和重现其演化过程几乎是不可能的, 因而通常根据岩土体结构或形状或力学机理或它们的组合, 按照一定规则按比例缩小制成模型, 在一定的物理和化学环境中, 研究模型的演化过程。在一般条件下, 研究模型在外力作用下的变化过程, 多以其外形尺寸变化来分析岩土体的应力与应变, 最后建立相应的本构关系。由于条件限制, 一般很难观察到岩土体内部的结构变化, 若要无损伤动态观察其变化过程则更困难。

CT是英文computerized X-ray tomography的缩写, 中文名称为计算机断层扫描仪。自1973年Hounsfield发明以来, CT技术作为一项尖端的成像技术, 已广泛应用于各大医院进行人体各种病理的透视检查[1]。由于CT技术具有无损伤透视的功能, 在过去的十余年中, CT在地球科学领域中的应用一直是一个热点课题。研究的内容主要集中在岩土体的密度、孔隙度、含水量、溶质浓度、孔隙大小和裂隙宽度等, 多孔介质中流体运动也得到监测和量化[2]。80年代后期, 这一技术开始引进到土壤科学中, 如Colletta等用CT技术分析了砂盆模型[3], Spanne和Anderson等用CT技术分析了土壤与植物根系中的相互作用等[2,4]。我国学者在岩土体CT方面的研究始于90年代初期, 虽然起步较晚, 但进展较快, 成果多出自于中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室。如吴紫汪等对冻土蠕变过程中组构体积变化进行了CT分析[5]; 马巍等(1996, 1997)开展了冻土单轴和三轴蠕变过程中结构变化的CT观察[6,7]; 蒲毅彬等将CT应用到了岩土数值分析中, 取得了一系列的成果[8,9]。本文介绍的是笔者在日本地质调查所工作期间, 用CT技术对由各种材料组成的土体模型在外力作用下进行无损伤动态观察所获得的部分成果。

2 试验装置

CT技术的基本原理是利用X射线通过物体时所

* 国家自然科学基金资助项目(No. 49872088)和日本国际科技厅资助项目
到稿日期: 2000-01-17

产生的衰减而成像的,这些衰减值是由物体的密度、活性原子数量及厚度决定的。在一般的 CT 技术中,由一系列平面扇形的射线穿过物体,所产生的衰变由 1024 个探测器来测定,射线源和探测器装在一个马达上绕着物体作圆周运动。每转 360°, 扇形 X 射线对约 1 mm 厚的目标切面进行照射. 形成 256 × 256 象元的图象,每一象元的灰度由 X 射线线性衰减系数确定,而衰减系数又取决于材料的性质,如密度和有效原子数等,因此某一切面的 CT 图象就是由上述参数经计算形成的[3]。试验采用日本日立公司制造的 Hitachiw2000 型医用 CT 装置,它是世界上最先进的 CT 装置之一, CT 装置的示意图见图 1。

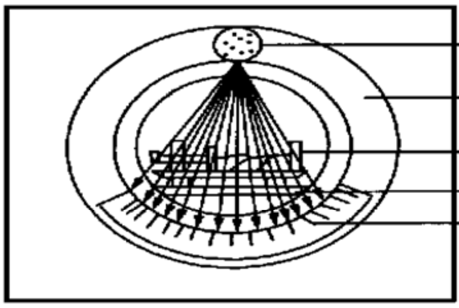


图 1 CT 装置示意图

Fig. 1 Sketch map of CT scanner

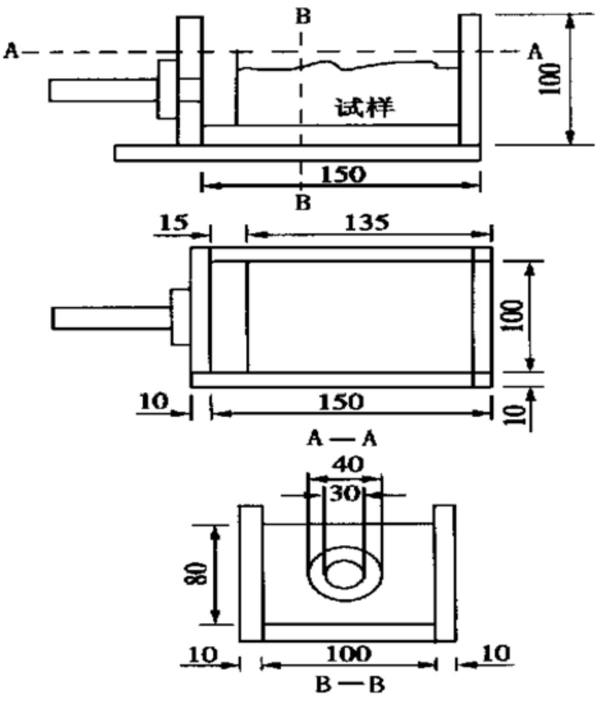


图 2 试样盆设计图(单位: mm, 不按比例)

Fig. 2 Design drawing of the soil test box

为了连续观察试样在外力作用下内部结构的变化过程,笔者设计了用有机玻璃材料制成的试样盒,见图 2,其大小为 150 mm × 100 mm × 100 mm,可放入 CT 装置的观察腔。在试样盒左侧中部安装了一个活塞,活塞的另一端与马达相连,马达的转速是可变的,活塞通过马达对盒中的试样施加平推力。试验选择的平推位移速率为 15 cm/h 和 30 cm/h。

3 模拟材料

试验模拟材料有砂、膨润土、高岭土、硅粉和玻璃球。砂粒径为 0.16~ 0.17 mm,高岭土和膨润土的纯度达 99%,玻璃球和硅粉的粒径分别为 2, 0.1 mm,硅粉的纯度为 95% ~ 98%。为了能清晰地观察试样的变形过程,一般在试样中间夹一薄层作为标志层,它的力学性质与试验材料相似,但对 X 光的吸收衰减值与上下层的试验材料有明显区别。硅粉的摩擦角与砂粒非常接近,但衰减系数明显不同,因此硅粉常被用来作为砂材料的标志层。这里的衰减系数 HU 定义为 $HU = 1000(\mu - \mu_w)/\mu_w$, μ 和 μ_w 分别为所选材料和水的线衰减值,单位为 Hounsfiled。试验所用高岭土、硅粉、砂和玻璃球的衰减值分别为 $-640HU$, $-400HU$, $400HU$ 和 $755HU$, 而膨润土的衰减值在 $-640HU$ ~ $-1000HU$ 之间。

4 试验步骤

(1) 样品制备

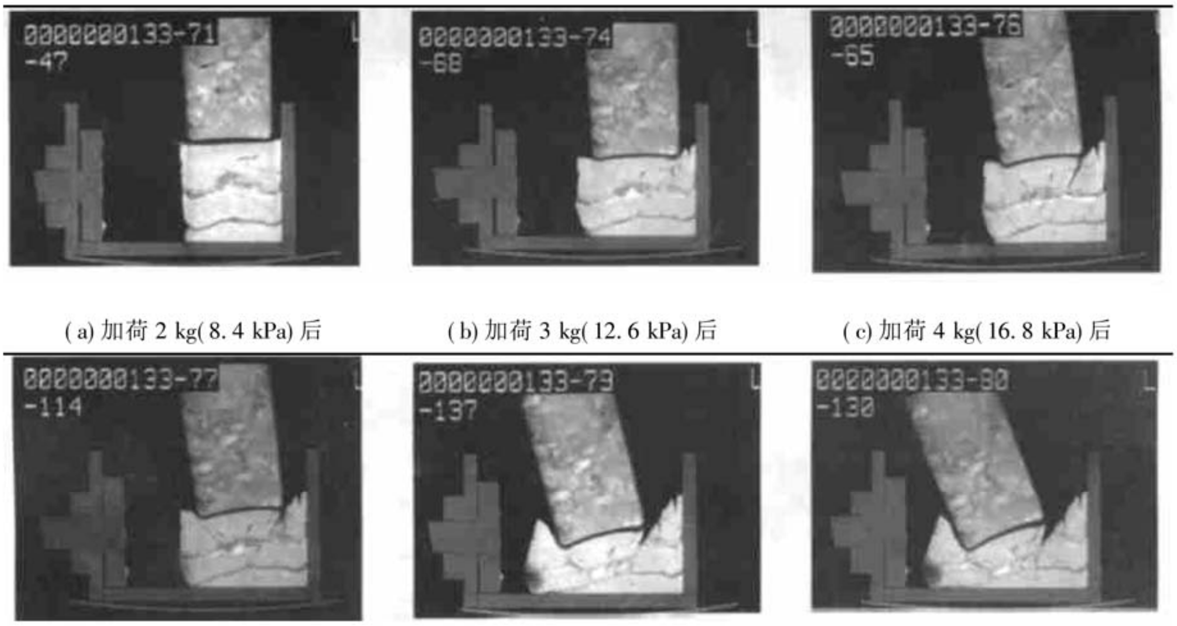
对于松散的干燥材料,如砂和硅粉,可直接倒入试验盒中,用木锤轻轻拍平。对于粘性潮湿材料,先将试样配置成所需的含水量,在塑料袋中放置 24 h 后,将土膏转移到试样盒中,用木锤将试样击实、击平。根据试样盒中试样的体积可以计算出它们的密度。

(2) 垂直荷载试验

粘土样上的垂直荷载试验主要是研究试样在荷载作用下的变形破坏过程。试样尺寸为 65 mm × 100 mm × 75 mm,从下往上,由 15 mm 厚的高岭土层, 1 mm 膨润土干粉, 20 mm 高岭土, 2 mm 硅粉, 2 mm 膨润土干粉和 35 mm 高岭土组成,高岭土的含水量为 46.3%,膨润土干粉和硅粉是作为标志层来跟踪试样及其内部裂隙面的发生和发展。垂直荷载用一个装有砂子的塑料杯和磅砣的增加来实现,杯子底部直径为 55 mm,放在试样中央,在增加每一级荷载过程中和试样变形稳定后,拍摄一系列 CT 图像来分析裂隙变形的发展过程。

(3) 直剪试验

在试样盒中,制成一个 100 mm × 100 mm × 45 mm 的长方体试样,试样材料主要为含水量为 40.7% 的高岭土,中间夹一层含水量为 78.5%, 100 mm × 100 mm × 10 mm 的膨润土作为标志层,试样放在试验盒中间。在试样的两端左半边和右半边各放一块 20 mm ×



(a) 加荷 2 kg(8.4 kPa) 后　(b) 加荷 3 kg(12.6 kPa) 后　(c) 加荷 4 kg(16.8 kPa) 后

(d) 加荷 5 kg(21.0 kPa) 时　(e) 加荷 5 kg(21.0 kPa) 后 2 min　(c) 加荷 5 kg(21.0 kPa) 后 5 min

图 3　不同垂直荷载作用下试样中部的 CT 图像

Fig. 3　The CT images of the middle cross-section of a cubical specimen at different vertical loads

50 mm × 50 mm 的木块, 然后用 30 cm/h 的速度推动活塞对试样进行剪切至破坏。在试验过程不同阶段, 试样的 4 个横断面用 CT 拍摄下来。

(4) 水平加荷试验

水平加荷试验的试样是砂子。为了减少试样盒壁和试样间的摩擦力, 在试样的底部铺设了 1 层 2 mm 厚的玻璃球。为了易于观察试样的变形, 在 2 层 15 mm 的砂层之间夹了 1 层 8 mm 硅粉作为标志层。水平荷载是通过活塞不断往前推移来实现的。推移速率为 15 cm/h。在加荷结束后, 又进行了卸荷和加荷往复试验。变形过程同样用 CT 进行了拍摄。

5　试验结果及讨论

(1) 垂直荷载

图 3 为试样在不同垂直荷载下中心部位的 CT 图像。在 2 kg 的荷载下, 试样高度减少了 2 mm, 而长度增加了约 0.6 mm, 体积净收缩了 1.8%。需要注意的是试样只有左边是自由的, 其它边被限制。

在 3 kg 荷载下, 试样的横向和垂直向变形分别是 + 10 和 - 16 mm, 净体积收缩了 3.2%, 并在荷载杯子的边缘依稀可见 2 条剪切带, 它们与水平方向的夹角大约为 49°。已知试样的内摩擦角 φ 为 10°, 因此这一结果符合 Mohr- Columb 破坏理论, 即最大主应力和最小主应力方向的夹角为 $(45° + \varphi/2)$。

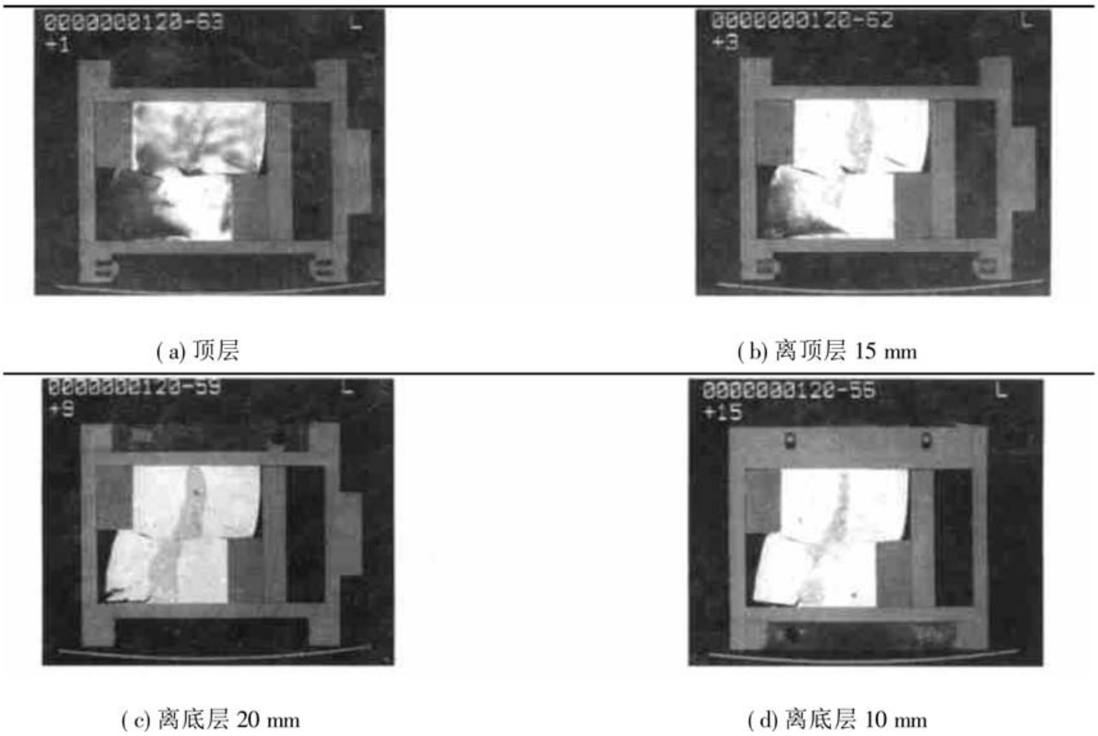
当荷载增加到 4 kg 时, 上述 2 条剪切带进一步发展为 1 个碗形的裂隙带, 见图 3(c)。由于试样的不对称变形, 右边的剪切带变成 1 条张裂隙, 裂隙的上端开口约 2 mm 宽, 向下逐渐尖灭至高岭土层与膨胀土层间的界面上。与图 3(b) 比较, 试样的体积没有发生变化, 仍为 80 mm × 100 mm × 59 mm, 但杯子底下的三角形区沉降了约 6 mm, 形成了 Punching 剪切裂隙。由于试样的不对称沉降, 加荷的杯子倾斜了 6°。

需要指出的是, 试样中的膨润土和硅粉虽然只作为标志层, 但它们对试样中裂隙的发育有一定影响, 剪切带向下发育的深度停留在它们的界面上。当荷重增加到 5 kg 时, 试样被破坏至不稳定, 其破坏过程见图 3(d) ~ (f)。

根据上述的试验结果, 试样的凝聚力 c 可用无侧限抗压试验问题进行计算获得。当试样的破坏荷载为 21 kPa, φ = 10°时, 凝聚力 c 约为 8.81 kPa。如果作为极限承载力问题考虑, c 值约为 2 kPa[10]。由于上述二种假设都不太符合本实验的边界条件, 因此 c 值可估计为在 2~ 9 kPa 范围内。

(2) 直剪试验

图 4 为 4 张在直剪过程中某一时刻高岭土试样不同高度的横截面 CT 图像。在试样上部二张 CT 图像中见图 4(a), (b), 三条裂隙清晰可见: 一条为水平向的主裂隙, 两条为与主裂隙约成 24°夹角的次裂隙。然而试样下部两张 CT 图像(图 4(c), (d)) 只见到一条水平向的主裂隙。值得注意的现象是在图 4(a), (b) 中, 没有一条裂隙是连续的, 而在图 4(c), (d) 中, 水平向的裂隙是完全连续的, 显然输入的剪切能量是恒定的。在图 4(a), (b) 中, 剪切能量或多或少消耗在二个次裂隙上, 因而主裂隙的剪切能量减少了, 主裂隙显示出不

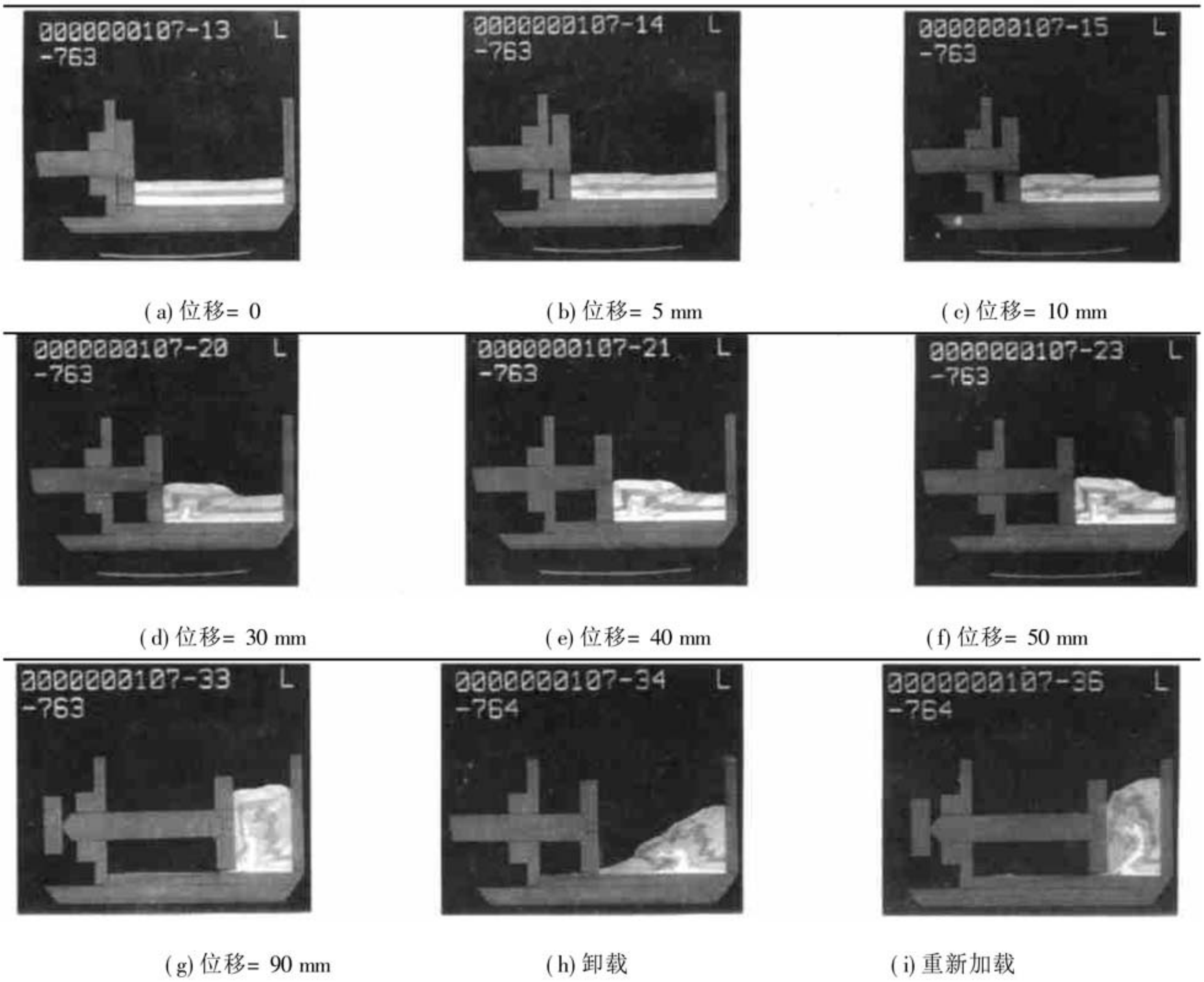


(a) 顶层 (b) 离顶层 15 mm

(c) 离底层 20 mm (d) 离底层 10 mm

图 4 试样在剪切破坏时四个不同高度水平上的 CT 图像

Fig. 4 The CT images of four surfaces at different heights in a cubical specimen at the moment of direct shear



(a) 位移= 0 (b) 位移= 5 mm (c) 位移= 10 mm

(d) 位移= 30 mm (e) 位移= 40 mm (f) 位移= 50 mm

(g) 位移= 90 mm (h) 卸载 (i) 重新加载

图 5 不同位移的砂样纵切面 CT 图像

Fig. 5 The CT images of the middle cross-section of the sand specimen during horizontal loading at different displacement

连续状态。试样从上至下这种裂隙形态的变化应归究于试样上部的无侧限和下部的有侧限所至致。

(3) 水平荷载

图 5 显示了砂试样在水平推力作用下不同阶段的 CT 图像, 试样的初始形状见图 5(a)。当活塞向前推移 5 mm 时, 可见 2 条剪切带, 前端剪切带与水平方向夹角约 41°, 后端剪切带约 60°。2 条剪切带向下延伸至玻璃球层的表面, 同时被 2 条剪切带包围的三角形区向上抬升了约 4 mm, 通过测量计算, 整个试样体积膨胀了 0.6%, 而三角形区的膨胀量约为 10.5%。

当位移为 10 mm 时, 见图 5(c), 两条剪切带的倾斜角估计分别为 44°和 63°, 这主要依据 Mohr-Columb 理论和剪胀理论估算, 前者预测的倾斜角为($45° + \varphi/2$), 而后者则为[$45° + (\varphi + \gamma)/2$], φ, γ 分别为摩擦角和剪胀角[11], 三角形区进一步向上抬升至 9 mm。

随着活塞继续推移, 后边的剪切带属被动的, 只有前端的剪切带为主动的, 同时出现了 2, 3, 4 条具有同一方向的剪切带, 见图 5(d) ~ (f)。根据标志层水平向的硅粉层变形可以看出, 三角形区外边的试样位移基本上是水平向的, 而里边的位移主要是垂直向的。当试样的长度越来越短时, 剪切带消失, 见图 5(g)。在位移 90 mm 时, 试样的体积估计增加了 13.3%。图 5(h), (i) 为试样在卸荷和重新加荷的试样形貌, 显示出上述试样的剪切带形貌被往复荷载完全破坏。

6 结　　论

利用 CT 观察岩土体试样内部结构的变化过程, 具有许多优点:

(1) 非破坏性。在测试期间土样始终处于不受扰动的状态。

(2) 连续性。利用 CT 技术可以非常容易地连续观察土样变形期间的微观结构演化。

(3) CT 技术可以展示出土样的三维形态特征, 可以显示任意断面的图象。

(4) 结合土样的其它物理化学特性, CT 图象可以分析出土样的各种性质, 如容重, 粒度, 油和水的浸润度, 岩性组成, 孔隙大小分布, 湿度及扩散系数。另外, 利用 CT 技术可以确定扰动带, 外部和内部裂缝及钻孔泥浆侵入情况。CT 扫描仪尤其适合用来研究土的压缩性和击实性。CT 技术是分析岩土体的变形, 断层和断裂, 液体运输能力和渗透性以及物理状态的有力工具。然而医用的 CT 也有一些缺点, 由于考虑 X 射线对人体的影响, 医用 CT 一般采用低能量的 X 射线源, 因此在分析土微观结构图象的一些细节或单独颗粒时精度不够, 比如分析小于粒径 1 mm 的粘土颗粒间的连接模式时就欠准确。因此, 如要研究个别土颗粒在变形过程中的行为, 需要 μm 级的分辨率, 这可以用高能量的 CT 装置[12]或同步微型 CT (CMT) 等来获得[4]。

本文在研究过程中, 得到了日本地质调查所村上裕博士和中岛博士的热心帮助, 在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

1 Hounsfield G N. Computerized transverse axial scanning (tomogrphy). British J Radiology, 1973, **46**: 1016~ 1022

2 Anderson S H, Hopmans J W. Tomography of Soil- Water- Root Processes. In: Proceedings of a Symposium Sponsored by Division S- 1 and S- 6 of the Soil Science Society of America in Minneapolis. Minnesota: SSSA, Inc, 1992

3 Colletta B, Letouzey J, Pinedo R, et al. Computerized X- ray tomography analysis of sandbox models: Examples of thin- skinned thrust systems. Geology, 1991, **19**: 1063~ 1067

4 Spanne P, Jones K W, Prunty L, et al. Potential applications of synchrotron computed microtomography to soil science. In: Proceedings of a Symposium Sponsored by Division S- 1 and S- 6 of the Soil Science Society of America in Minneapolis. Minnesota: SSSA, Inc, 1992. 43~ 57

5 吴紫汪, 蒲毅彬, 马　巍等. 冻土蠕变过程组构体积变化的 CT 分析. 冰川冻土, 1995, **17**(5): 41~ 46

6 马　巍, 吴紫汪, 蒲毅彬等. 冻土单轴蠕变过程中的结构变化的 CT 动态监测. 冰川冻土, 1996, **18**(4): 306~ 311

7 马　巍, 吴紫汪, 蒲毅彬等. 冻土三轴蠕变过程中的结构变化的 CT 动态监测. 冰川冻土, 1997, **19**(1): 52~ 57

8 蒲毅彬. CT 在岩土实验中的数值分析. CT 理论与应用研究, 1994, **3**(3): 8~ 12

9 蒲毅彬, 吴紫汪, 马　巍等. 冻土 CT 实验中的数学方程. 冰川冻土, 1995, **17**(5): 135~ 139

10 Das B M. Principles of Foundation Engineering. 2nd ed. Boston: PWS- Kent Publishing Company, 1990

11 Bardet J P, Proubet J A. Numerical investigation of structure of persistent shear bands in granular media. Geotechnique, 1991, **41**(4): 599~ 613

12 Steude J S, Hopkins F, Ander J E. Industrial X- rays computed tomography applied to soil research. In: Proceedings of a Symposium Sponsored by Division S- 1 and S- 6 of the Soil Science Society of America in Minneapolis. Minnesota: SSSA, Inc, 1992. 29~ 41