

# 花岗岩残积土颗粒及水分形态三维微观结构\*

李中森, 汤连生, 桑海涛

(中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275)

**摘要:** 采用高分辨率 X 射线计算机断层扫描技术 (X-ray  $\mu$ -CT) 对花岗岩残积土三维微观结构进行重构并在以下方面取得新进展: ① 通过在试样液相中添加显影物质 (CsCl), 成功获取土中水分形态及空间分布; ② 利用 X 射线在不同物质中的衰减率差异, 进一步区分固体颗粒中高岭石与石英并确定各自空间分布; ③ 通过三维重构图像, 对颗粒空间接触关系进行初步概化与分类, 同时对 X 射线计算机断层扫描技术在非饱和土力学中的进一步应用做了前瞻。这些初步探索将有助于对土体三维真实结构的全面认识, 促进计算机断层扫描技术在岩土/地质工程领域的新开拓。

**关键词:** 花岗岩残积土; 计算机断层扫描; 三维微观结构重构; 水分形态; 颗粒接触关系

**中图分类号:** TU411.92    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0529-6579 (2017) 06-0015-07

## 3-D micro-structure of the particle and water morphology of the granite residual soil

LI Zhongsen, TANG Liansheng, SANG Haitao

(School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The high-resolution X-ray micro-computed tomography ( $\mu$ -CT) is used to investigate 3-D micro-structure of granitic residual soils. The results showed that: ① The water phase and their spatial distribution in soils can be determined by mixing the dried soil sample with CsCl solution. ② X-ray attenuation coefficient differentiation in different materials leads to easily distinguishing kaolinite and quartz in soils. ③ The spatial contact and orientation of soil particles are generalized and classified by using the reconstructed 3-D images. In addition, some further applications of the X-ray  $\mu$ -CT to the study of unsaturated soil mechanics are predicted. These preliminary findings will contribute to the better understanding of the 3-D real structure of soil and to fostering new progresses of the X-ray  $\mu$ -CT in geotechnical/geological engineering.

**Key words:** granite residual soil; X-ray micro-computed tomography; 3-D micro-structure reconstruction; water morphology; soil particle's spatial contact

土体, 作为人类活动的载体, 是现代文明发展的重要“基石”。在对土体的利用与改造过程中, 人类积累了丰富的实践经验, 例如, 对土体的夯实可以在一定程度上防止路基边坡失稳<sup>[1]</sup>、对土体成分的改良可以促进农作物的健康生长<sup>[2]</sup>等, 而

土对人类发展的影响也已渗透到各个重要学科, 包括地球科学、农业工程学、石油科学、岩土与地质工程等。

在岩土/地质工程领域, 土体通常作为受荷单元, 其应力、应变关系受到了极大关注, 作为土体

\* 收稿日期: 2016-09-11

基金项目: 国家自然科学基金 (41572277); 广东省自然科学基金 (2015A030313118, 2017A030310426)

作者简介: 李中森 (1988 年生), 男; 研究方向: 非饱和土力学; E-mail: lizhongsen@mail.sysu.edu.cn

通信作者: 汤连生 (1963 年生), 男; 研究方向: 岩土力学; E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn

体变特性的本质因素,其内部微观结构的变化则是这一领域的研究重点。在过去近 50 年历史中,对土体微观结构的研究主要采用扫描电镜<sup>[3-6]</sup>和压汞试验<sup>[7-10]</sup>,前者可以从微纳米尺度定性观察土颗粒大小、排列以及分布情况,而后者可以从定量层面表征土颗粒孔隙尺寸与相对含量。尽管,二者结合使用可以定性、定量耦合地分析土体微观结构,但是,上述方法仍具有一些无法避免的缺陷:1) 试样须干燥脱水,对土体结构产生扰动甚至破坏;2) 实验结果只能获取二维图像,无法表征土颗粒空间接触关系;3) 难以识别试样中不同矿物成分。

近年来,科学技术的日新月异极大地促进了测试方法的进步。始于 20 世纪 80 年代初的计算机断层扫描 (micro-computed tomography) 技术先后在医学、生物、材料、地球科学等领域得以广泛应用,为材料微观结构的无损检测提供了极为有效的手段<sup>[11]</sup>;如今,这一进展引起了岩土与地质工程学者们的关注并逐渐将它应用于土力学学科的相关研究<sup>[12-14]</sup>。相比于土力学中常见的压汞、扫描电镜法,计算机断层扫描技术不仅可以重构土体真实三维结构,还可进一步分析土体微观颗粒空间接触关系及孔隙变化情况等<sup>[15-18]</sup>,能够同时从“量”和“质”两方面对土体微观结构进行深入研究,而这正是众多岩土与地质工作者期盼已久的想法。

本文通过室内试验、以广州地铁 21 号线路基土为例,应用计算机断层扫描技术对工程实际中的花岗岩残积土三维微观结构进行了重构和表征,在以下方面取得了进展:

通过在试样液相中添加显影物质 (CsCl),成功获得土中水相的三维空间分布及形态;

根据不同矿物成分对 X 光谱的吸收差异,较好地地区分土颗粒中二氧化硅与高岭石;

结合三维重构图像,对土颗粒空间接触关系进行初步概化与分类。

## 1 材料与方 法

本次实验土样 (约 500 kg) 取自广州地铁 21 号线位于增城市燕岗桥附近的一处裸露边坡,作为华南地区典型的花岗岩残积土 ( $w_L = 43\%$ ,  $I_p = 17$ ),其主要矿物成分为石英 ( $\text{SiO}_2$ ) 和高岭石 [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ],除此之外,试样中还含有少量游离氧化铁,如针铁矿 ( $\alpha\text{-FeOOH}$ )、赤铁矿 ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) 等。

试样在运往实验室之后,静置约 2 周并自然干

燥,取约 1 000 g 自然干燥土样放置在 105 °C 烘箱内 48 h 以保证土样充分干燥。由于原状土含有少量 ( $w = 8.6\%$ ) 粒径小于 0.075 mm 颗粒,这些细小颗粒大部分为高岭石粘土矿物,CT 扫描精度难以准确地观测其空间结构,因此,原状土在烘干之后先后通过 1、0.5 mm 铁筛,取直径 0.5 ~ 1 mm 细土粒作为本次试验的土颗粒。如图 1 阴影部分所示,相比于原状土,本次试验土样高岭石含量偏低;但是,由于高岭石在原状土中所占比例相对较小,可以初步认为试验的土样具有较好代表性、能够反应原状土的重要结构特征。

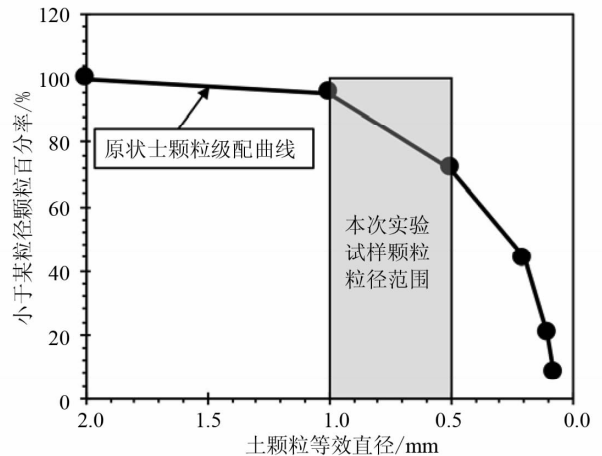


图 1 原状土颗粒级配曲线及本次试验选取土颗粒

Fig. 1 Grading curve of the intact soil and the particles selected for this study

土样筛分之后,取 100 g 粒径 0.5 ~ 1 mm 土颗粒与 20 g 质量分数 10% 的 CsCl 溶液混合、均匀搅拌以配置成含水率  $w = 20\%$  试样,将试样放在黑色密封袋内 48 h,使其内部水分均匀分布。随后,将土样置于直径约为 12 mm 的刚性塑料管内并施加 100 kPa 轴向荷载压实,压实之后将试样取出并利用胶带对其进行仔细密封以防止在实验过程中水分因吸收 X 射线能量而发生蒸发,图 2a 为本次实验制备土样外观图片。

土样制备完成之后,将其转移至 X 射线显微镜物品台并固定,本次实验采用上海光源 BL13W1 线站 X 射线三维显微镜,其主要设备组成如图 2b 所示,关于该线站详细介绍及工作原理见文献<sup>[19]</sup>。待试样安装就绪,设置 X 射线能量、完成中心轴矫正等基本步骤之后即可进行扫描,土样在旋转 180°过程中,每隔 0.25°扫描一张,每个土样将得到 720 张如图 2c 所示的投影图。随后,将试验获

得数据带回并进行如下处理：① 利用 PETRE 软件对投影图进行相位恢复并获得包含灰度信息的重建切片；② 利用 Avizo Fire 8.0 软件对上述重建切片

进行初步切割、二值化/阈值处理以获取包含水、空气、固体颗粒的土体三维结构。

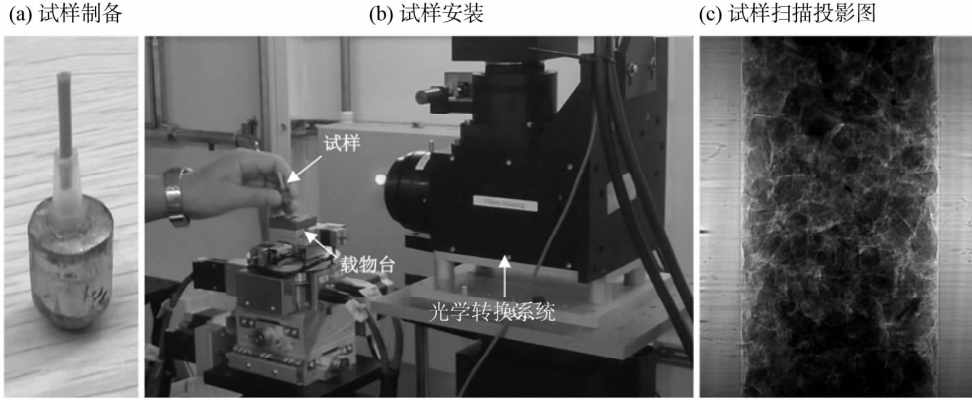


图 2 X 射线三维显微镜操作步骤

Fig. 2 Experimental operations of the X-ray  $\mu$ -CT

## 2 试验结果

### 2.1 三维结构重构

图 3a 为试样经过相位恢复后所构建的切片图，图中不同灰度信息（明暗程度）反映 X 射线在穿透试样不同物质成分时的能量衰减率，其中，黑暗区域表示 X 射线穿透物质时能量衰减较少，一般对应原子序数或者密度较小的物质，如空气、水等；相反，明亮区域表示 X 射线能量衰减程度较高，对应原子序数或者密度较大物质。表 1 为本次土样中主要物质成分对 X 射线的线性衰减系数 ( $\mu$ )，表中信息显示在 10 ~ 50 keV 的能量范围内，X 射线在水、空气中的衰减系数极为相近，较难通

过切片图像中的灰度信息直接进行区分；因此，本次实验通过在水中添加显影物质 CsCl，显著增加 X 射线在水中的衰减系数，从而有利于在重建切片图像中更加清晰地区分水、空气和固体颗粒。

图 3b 为经过阈值处理的切片图，根据图 3a 中的灰度信息并结合表 1 中 X 射线在不同物质成分中的穿透率并利用 Avizo 软件设置不同物质成分之间的灰度阈值，可以对试样中主要物质成分进行区分。对比图 3a、3b，尽管此方法会忽略试样中含量较少的成分（如针铁矿、赤铁矿），但是，利用灰度阈值分割能够较好、较合理的表征土中主要物质成分的平面分布，这也是进一步获取不同物质三维空间分布的基础。

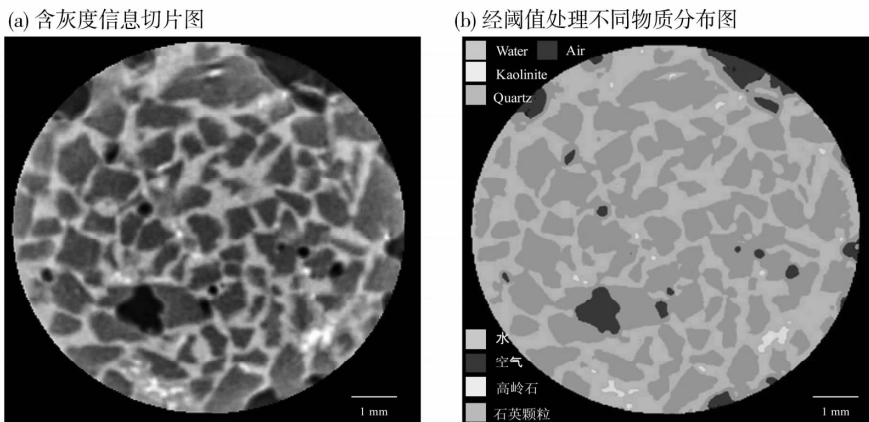


图 3 广州花岗岩残积土试样切片图

Fig. 3 Sectional image of the specimen

表 1 广州花岗岩残积土主要物质成分及 X 射线吸收系数<sup>1)</sup>

Table 1 X-ray attenuation coefficient of the main material composition of the specimen

物质成分	成分化学式	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	X 射线衰减系数/cm <sup>-1</sup>		
			10 keV	30 keV	50 keV
石英	SiO <sub>2</sub>	2.65	49.0	2.2	0.84
高岭石	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	2.63	41.9	2.0	0.78
水	H <sub>2</sub> O	1.00	5.3	0.38	0.23
空气	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> 等	0.001 3	5.1	0.35	0.21
氯化铯	CsCl	3.98	107 <sup>a</sup>	5.8 <sup>a</sup>	8.3 <sup>a</sup>

1) a 根据 CsI 的 X 射线吸收系数及相对分子质量进行估算,  $\mu(\text{CsCl}) = [\mu(\text{CsI}) \times 168] / 260$

图 4 为试样三维微观结构重构图, 根据上述步骤中获取的、经过阈值处理的切片图 (约 720 张), 利用 Avizo 软件进行三维重构。如图所示, 4a 为试样整体三维结构图, 图 4 (b - e) 分别为水、空气、高岭石以及石英颗粒的空间分布图。根据图 4 中不同物质在空间的像元大小可计算各矿物成分所占体积分数, 结合各自密度可进一步计算其质量分数。试验结果表明, 利用三维图像处理 (灰度识别) 所获得的质量含水率为 21.80%, 与试样初始含水率 20% 相比, 相对误差为 1.80%, 其主要原因来自于计算机在利用灰度值对不同矿物成分进行自动识别时存在一定误差, 目前, 利用显微 CT 技术对多孔介质中不同矿物成分进行精确区分、量化仍需进一步深入研究和改进。

需要说明的是, 本次试验试样初始含水量相对较高且水分主要以粒间自由水形式存在, 这导致图

4b、4e 中水分与颗粒的三维重构图像存在一定的相似性。为了较好地区分三维重构图像中土颗粒与水分形态三维微观结构的差异, 我们从试样中提取边长为 0.45 mm、具有代表性的正方体单元 (图 5), 利用所提取的单元体可比较清晰地区分石英颗粒、水分, 这为土颗粒各物质成分量化、大小统计提供了条件。

## 2.2 颗粒大小统计

为了对三维图像处理所得到的石英颗粒大小与实际情况进行对比, 我们从重构图像中选取了另一单元体 (图 6a), 提取试样内部石英颗粒, 利用计算机软件对每一颗粒进行颜色标记并按顺序编号 (图 6b), 按照等效圆球拟合所有颗粒并将石英颗粒等效直径进行统计、对比 (图 6c)。试验结果表明, 相比于实际情况 (土颗粒直径介于 0.5 ~ 1 mm), 利用图像识别技术获得的颗粒大小与实际情

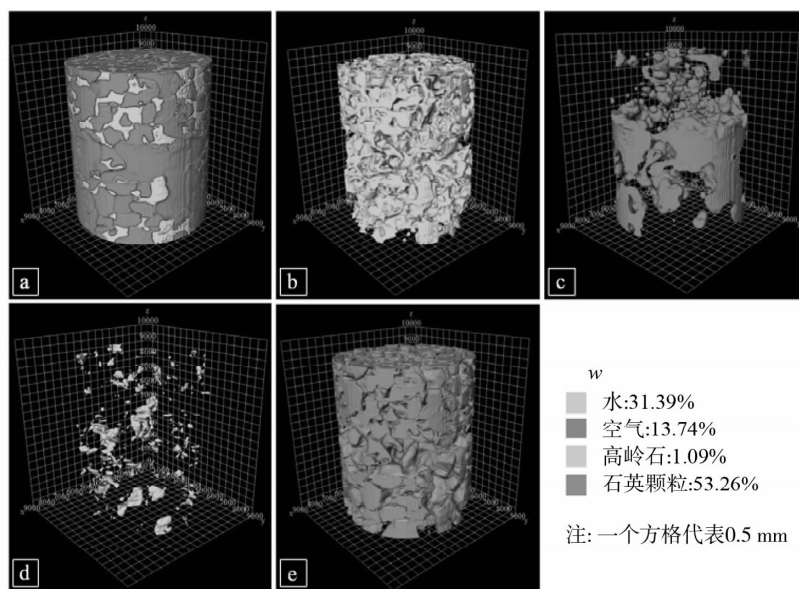


图 4 广州花岗岩残积土试样三维微观结构重构及各物质成分空间分布

Fig. 4 3-D micro structure reconstruction and the spatial distribution of the different materials

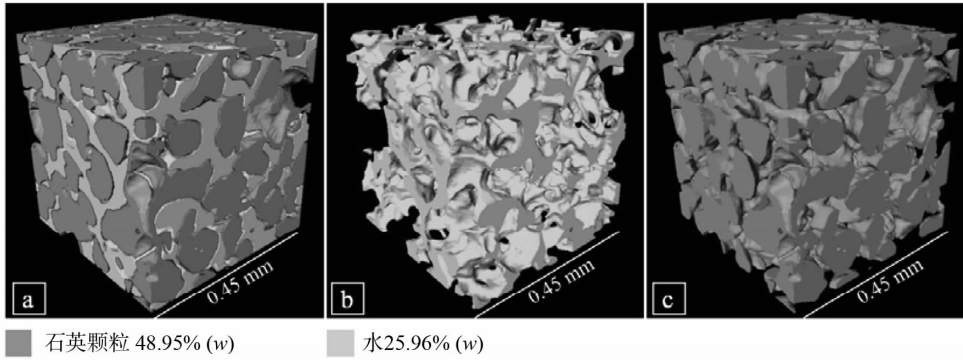


图 5 石英颗粒与水分形态三维微观结构

Fig. 5 3-D micro-structure of the quartz and water in the specimen

况存在较大误差：在试样总计 125 颗粒中，68 颗粒粒径介于 0.5 ~ 1 mm 之间，29 颗粒粒径大于 1 mm，剩余 28 颗粒则小于 0.5 mm。

造成上述偏差的主要原因有：① 在进行颗粒标记时，计算机难以精确识别相互接触的颗粒，软

件通常将紧密接触的两个甚至多个颗粒识别为单一颗粒，从而导致部分通过软件识别的颗粒粒径大于正常值；② 在制备压实试样时，轴向荷载会使部分颗粒破裂，导致粒径小于 0.5 mm。

石英颗粒标记误差(不同颜色代表不同颗粒)

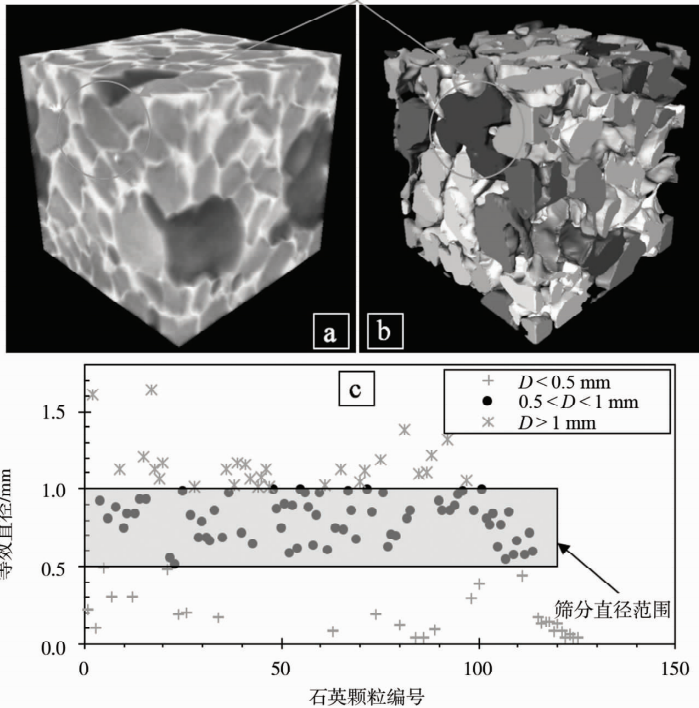


图 6 石英颗粒等效直径及其与实际情况对比

Fig. 6 Equivalent diameter of the quartz and comparison with the practical condition

### 2.3 颗粒接触关系概化

作为多孔、离散介质，土颗粒的相互接触关系是研究其力学行为的重要手段，在以往关于土颗粒接触关系的概化、分类中，一般基于二维平面图像将土体大致分为层絮状和发散状结构<sup>[20-21]</sup>，而实

际情况下，土颗粒的相互接触关系远复杂于此，因此有必要结合理论概化与实际三维微观结构对土颗粒空间接触关系进行划分。

图 7a 为土颗粒空间接触关系的 10 种常见概化模型，本次试验选取土样为经过筛分、粒径介于

0.5 ~ 1 mm 的石英颗粒, 理论上其主要空间接触方式为球-球模式, 由于少量高岭石片状粘土矿物存在, 颗粒接触关系还涉及到面-面、面-球、面-棱等形式。图 7b 为土颗粒三维重构图像中具有代表性单元体, 它们分别反映石英颗粒三种典型接触: 球-球、面-面以及面-球接触方式。

值得注意的是, 本文中颗粒接触关系的概化是针对于广州地区花岗岩残积土结构而进行的初步划

分, 当涉及到其它土质 (如我国西北地区黄土、华东地区膨胀土), 其颗粒空间接触关系的概化形式将更加丰富, 具体可见文献<sup>[19]</sup>; 此外, 文中的颗粒接触关系是通过人工识别的, 效率较低、主观因素影响较大, 在将来大规模土颗粒接触关系判定中, 需要寻找合适的计算方法、借助大型计算机自动确定土颗粒之间非常复杂的空间接触关系。

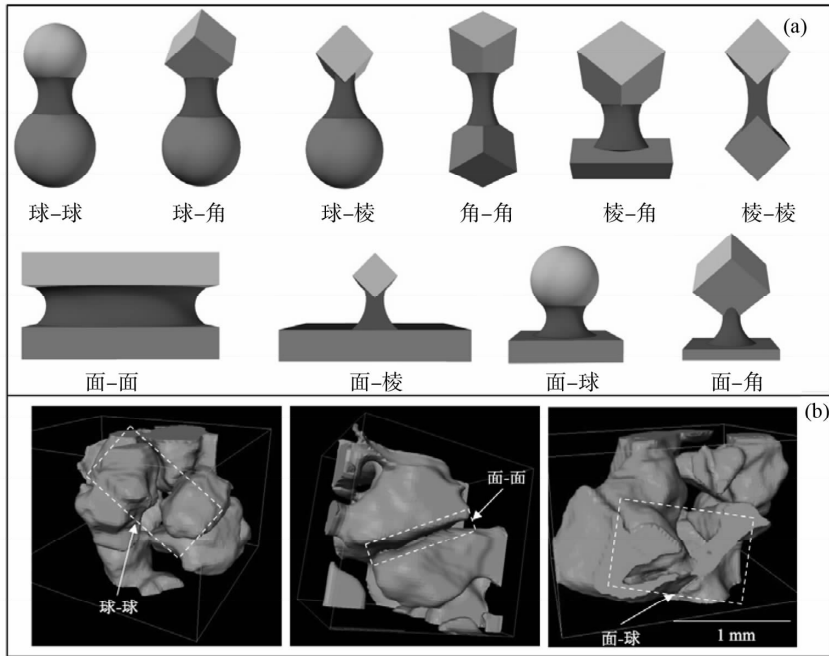


图 7 土颗粒空间结构接触关系概化 (a) 及其与三维重构图像关系 (b)

Fig. 7 Spatial contact of the soil particles and its relationship with the 3 - D reconstructed images

### 3 讨论与展望

目前, 在岩土/地质工程领域, 对土体真实三维结构的认识仍处于起步阶段, 作为初步探索, 本次研究选择具有工程代表性的湿土样, 成功获取土中水分的空间分布与形态, 具有较大理论与现实意义: ① 水分形态的精确表征可以确定试样液体收缩膜曲率半径, 利用 Jurin - Laplace 方程可进一步分析土中吸力的大小与格局; ② 根据不同物质成分对 X 射线能量吸收率的差异, 可以无损检测土样中主要物质成分, 为定性、定量分析提供辅助手段; ③ 结合不同水力、力学荷载条件, 可建立“力-时间-空间三维结构”的五维数字体系, 为复杂力学、工程问题的分析提供有效方法。

尽管如此, 计算机断层扫描技术在岩土/地质工程学科的应用仍存在一些问题和需要改进的地方, 如: ① 试样代表性, 高精度 X 射线显微镜要

求试样尺度足够小, 直径往往小于 1 cm, 微/小尺度试样的工程代表问题是制约计算机断层扫描技术进一步发展的重要因素; ② 精度, 目前实验室条件下能够对微米级颗粒进行三维表征, 然而, 对于粘性土壤, 需要发展精度为纳米级的 X 射线显微镜才足以满足对粘粒微观结构的分析需求; ③ 力学加载, 实际条件下土体颗粒往往受到各类荷载, 因此, 理论上需要将 X 射线显微镜与力学加载系统相互结合以模拟自然或者工程条件下土体的受荷情况; ④ 颗粒空间接触关系识别, 目前, 颗粒接触关系的识别主要依靠人工判断, 具有较大主观性且误差较大, 因此, 有必要根据土颗粒的空间几何坐标、利用计算机自动识别并判定不同接触关系。

### 4 结论

通过在试样液相中添加显影物质 (CsCl), 利

用计算机断层扫描技术成功获得水分三维空间形态与分布; 根据 X 射线在不同物质成分的穿透率, 可进一步区分固体颗粒中高岭石与二氧化硅成分; 结合电镜扫描图像, 对土颗粒空间接触关系进行概化; 同时, 对计算机断层扫描技术在岩土/地质工程的进一步应用做了前瞻、对存在的问题做了总结。这些初步探索将有助于对土体三维真实结构的全面认识, 促进计算机断层扫描技术在岩土/地质工程领域的新开拓。

**致谢:** 澳大利亚联邦科学与工业研究组织 CHEN Miao 教授对本文显影材料筛选给予了帮助; 三英精密仪器股份有限公司张宗和张玉芳工程师对三维图像重构分析做了大量工作; 上海光源 BL13W1 线站付亚楠博士对本文实验提供了技术指导。

### 参考文献:

- [1] PROCTOR R R. Fundamental principles of soil compaction [J]. *Journal of the Royal Aeronautical Society*, 1933, 111 (9): 245 - 248.
- [2] 王金满, 杨培岭, 石懿, 等. 脱硫副产物对改良碱化土壤的理化性质与作物生长的影响 [J]. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 34 - 37.  
WANG J M, YANG P L, SHI Y, REN S M. Effect on physical and chemical properties of soil and sunflower growth when sodic soils reclaimed with by-product from flue gas desulphurization [J]. *Journal of Soil and Water conservation*, 2005, 19(3): 34 - 37.
- [3] AHMED S, LOVELL C W, DIAMOND S. Pore size and strength of compacted clay [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1974, 100: 407 - 425.
- [4] DELAGE P, AUDIGUIER M, CUI Y J, et al. Microstructure of a compacted silt [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(1): 150 - 158.
- [5] 蒋明镜, 沈珠江. 人工制备湿陷性黄土的微结构分析 [J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(4): 486 - 491.  
JIANG M J, SHEN Z J. Microscopic analysis on artificially-prepared structured collapsible loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(4): 486 - 491.
- [6] 叶为民, 赖小玲, 刘毅, 等. 高庙子膨润土微观结构时效性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(12): 2255 - 2261.  
YE W M, LAI X L, LIU Y, et al. Experimental study on ageing effects on microstructure of unsaturated GMZ01 bentonite [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(12): 2255 - 2261.
- [7] LEFEBVRE G, DELAGE P. The use of mercury intrusion porosimetry for the analysis of soft clay microstructure [C]//International symposium on recent developments in laboratory and field tests and analysis of geotechnical problems, 1986: 31 - 43.
- [8] SIMMS P H, YANFUL E K. A discussion of the application of mercury intrusion porosimetry for the investigation of soils, including an evaluation of its use to estimate volume change in compacted clayey soils [J]. *Géotechnique*, 2004, 54(54): 421 - 426.
- [9] ROMERO E, SIMMS P H. Microstructure Investigation in unsaturated soils: A review with special attention to contribution of mercury intrusion porosimetry and environmental scanning electron microscopy [J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2008, 26(6): 705 - 727.
- [10] 孙德安, 高游. 不同制样方法非饱和土的持水特性研究 [J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(1): 91 - 97.  
SUN D A, GAO Y. Water retention behaviour of soils with different preparations [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(1): 91 - 97.
- [11] PETROVIC A M, SIEBERT J E, RIEKE P E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1982, 46: 445 - 450.
- [12] SABA S, DELAGE P, LENOIR N, et al. Further insight into the microstructure of compacted bentonite-sand mixture [J]. *Engineering Geology*, 2014, 168: 141 - 148.
- [13] KIM F H, PENUMADU D, GREGOR J, et al. Characterizing partially saturated compacted-Sand specimen using 3D image registration of high-resolution neutron and X-ray tomography [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2014, 29(6): 040140961 - 0401409611.
- [14] MASSAT L, CUISINIER O, BIHANNIC I, et al. Swelling pressure development and inter-aggregate porosity evolution upon hydration of a compacted swelling clay [J]. *Applied Clay Science*, 2016, 124/125: 197 - 210.
- [15] ANDÒ E, VIGGIANI G, HALL S, et al. Experimental micro-mechanics of granular media studied by x-ray tomography: Recent results and challenges [J]. *Geotechnique Letters*, 2013, 3(3): 142 - 146.
- [16] 刘洁, KLAUS R L, REEM F A. 微观层析成像技术在地球科学中的应用—几何结构特征、岩石物性模拟及尺度升级 [C]//中国地球科学联合学术年会, 2014.
- [17] CNUUDE V, BOONE M N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications [J]. *Earth Science Reviews*, 2013, 123(4): 1 - 17.
- [18] MAIRE E, WITHERS P J. Quantitative X-ray tomography [J]. *International Materials Reviews*, 2014, 59(1): 1 - 43.
- [19] 桑海涛. 非饱和土粒间吸力测试及其与抗拉强度的内在联系 [D]. 广州: 中山大学, 2015.  
SANG H T. The test of interparticle suction of unsaturated soils and its internal relationship with tensile strength [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2015.
- [20] SIDES G, BARDEN L. The microstructure of dispersed and flocculated samples of kaolinite [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1970, 8(3): 391 - 399.
- [21] WANG Y H, SIU W K. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. I. Surface charges and structural characterizations [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43(3): 587 - 600.