

文章编号: 1000-7598-(2006)12-2137-06

砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土 (LSES) 细观结构的 CT 研究

王庶懋, 高玉峰

(河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘 要: 利用医用 CT 机从定性和定量两个层面研究了砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土 (简称为 LSES) 这种新型土工材料的细观结构, 分析了不同水泥掺量 (CC) 和 EPS 颗粒含量 (V_e/V_s) 下 LSES 不同扫描截面的 CT 图像以及平均 CT 数 ME 值和方差 SD。随着 CC 的增加, ME 值增加, LSES 的结构更加密实, 原生损伤减少, 而随着 V_e/V_s 的增加, 水泥水化物 C-S-H 包裹 EPS 颗粒表面和填充孔隙的效率都将下降, 且 V_e/V_s 与 ME 值在本次试验范围内基本呈线性关系。此外, 根据 SD 值在各截面处分布的不均匀性, 认为 LSES 是局部孔隙比分布差异较大的特殊结构性土, CC 和 V_e/V_s 是影响其结构性的主要因素。

关 键 词: 砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土; CT; 结构性

中图分类号: TU 411.92

文献标识码: A

Research on meso-structure of lightweight sand-EPS beads soil (LSES) using CT

WANG Shu-mao, GAO Yu-feng

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

Abstract: A qualitative and quantitative research is conducted on the meso-structure of a novel geo-material—lightweight sand-EPS beads soil (LSES) by a medical CT machine. CT images, average CT value (ME) and SDs for different scanning sections are analyzed under various cement contents (CC) and EPS-bead contents (V_e/V_s). With increasing CC , MEs increase, the structure of LSES become denser, hence the initial damages decrease. whereas when V_e/V_s increases, C-S-H has lower efficiency to coat EPS beads and infill the voids between particles; and V_e/V_s is linear to the MEs in this test. Additionally, due to different SD distribution for sections, LSES is defined as a special structural soil with highly different local void ratio distributions; and CC and V_e/V_s are the major factors influencing its structure.

Key words: lightweight sand-EPS beads soil (LSES); computerized tomography (CT); structure

1 前 言

1.1 LSES 简介

EPS 颗粒轻质土是将适量的原料土 (可以为砂或淤泥土)、水泥、EPS (即聚苯乙烯) 颗粒按一定比例混合后加水搅拌、压实而成, 由于 EPS 的密度很轻, 一般为 $10\sim 40\text{ kg/m}^3$, 只有常规填土密度的几十分之一, 因此将其混合在土中制成的 EPS 颗粒轻质土以其轻质的特性, 能够广泛应用于高速公路路堤、管道沟回填、边坡填土等工程中, 此外, 由于 EPS 颗粒轻质土可以大量利用工程建设中废弃的

疏浚淤泥以及有“白色污染”之称的废泡沫塑料, 并且不会影响环境, 所以, 在如今环境问题日益突出的我国, EPS 颗粒轻质土不失为一种新兴、环保、富有前景的土工材料。上个世纪 80 年代, 日本等国开始研究轻质填土, 除了以 EPS 作为轻质材料外, 还可以在土中加入表面活性剂或蛋白质发出的气泡制成气泡混合土, 到目前, 轻质填土在日本已经形成了相当规模的产业化。在我国, 马时冬^[1]、董金梅^[2]和姬凤玲^[3]通过一系列室内试验, 研究了 EPS 颗粒轻质土的一些基本物理特性和静力学特性。

以砂土为原料土的 EPS 颗粒轻质土, 即砂土与

收稿日期: 2005-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50479020)。

作者简介: 王庶懋, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事地基处理及土动力学研究。

EPS 颗粒混合的轻质土, 简称 LSES, 室内静力学试验可以得到 LSES 的一系列宏观的变形及强度特性, 然而对研究这种混合材料的细观结构特性则无能为力。此时, CT 技术无疑是解决这一问题的强有力工具。

1.2 CT 技术简介及其在岩土工程研究领域中的应用

计算机层析识别 CT(computerized tomography) 技术利用 X 射线通过物体时产生的衰变, 对试样断面进行扫描, 得到断面的 CT 图像、反映断面上所有物质点平均密度的 CT 数 ME 和反映断面上物质密度差异程度的方差数 SD, 从而可以定量地量测材料的内部结构变化。与扫描电镜 (SEM) 的分析方法相比, CT 技术可以在对试样不进行任何扰动的条件下进行内部结构的观测, 因此具有无可比拟的优势, 基于此, 近年来, 国内外的学者们逐渐将其作为一种重要测试手段应用到岩土材料的结构分析中。

Vinegard^[4]研究了岩石试样在轴对称三轴荷载作用下的性状, 并利用 CT 扫描准确描述了由岩石内部破坏导致的原生不均匀性和局部密度变化。Tani^[5]利用 CT 研究了岩石材料的力学性状。Kruse 和 Bezuijen^[6]则使用 CT 数据建立了一个离心土模型。Sugawara^[7]讨论了将工业 X 射线 CT 扫描机应用在现场岩石工程中的可能性。Otani^[8]则通过 X 射线 CT 扫描分别定性和定量地研究了以表面活性剂和蛋白质作为发泡剂的气泡轻质土 SGM 的物理特性和力学特性。直观地分析了气泡在 SGM 中的分布, 密度随养护时间的发展状况, 以一种可视化的方法显示了试样内部的应变在荷载作用下的扩展趋势。

在我国, 李晓军^[9]提出了一种利用 CT 技术定量分析黄土结构性的方法。卢再华^[10]等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。施斌^[11]用 CT 对几种材料土体模型的剖面进行了连续拍摄以观察裂隙的发展过程, 证明了 CT 可以研究在常规方法下无法观察到的土体内部结构的变化过程。此外, 葛修润等^[12]在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研制了可对岩土材料破坏过程进行同步观测的 CT 专用三轴加载设备, 解决了以往 CT 研究中试样只能在加载仪器上卸载后才能进行扫描的局限, 提高了研究的精确性。一些学者利用该设备进行了广泛的研究^[13~16]。虽然 CT 三轴仪有着众多优势, 但由于加载设备是固定在 CT 床上, 因此试样的扫描截面只能限制在横截面, 而分析材料的结构变化时若能进行全

方位的观测, 则能更准确的说明问题。

本文旨在利用医用 CT 机, 对 LSES 这种新型土工材料的细观结构, 从纵横 6 个扫描截面的 CT 图像、CT 值以及方差等方面作尝试性的研究, 分析不同水泥掺量和 EPS 颗粒含量对 LSES 内部结构的影响。

2 试验概况

本次试验所用 CT 机是 Simens SOMATOM Emotion Duo 型螺旋 CT, 其主要工作参数如表 1 所示。按照表 2 的编号及配比制样, 其中砂为中砂, 水泥为 32.5[#] 普通硅酸盐水泥, EPS 颗粒为 3 mm 球粒, 水为自来水。将搅拌好的混合土分层压实、填入直径为 61.8 mm、高为 140 mm 的圆柱体制样器中, 然后将制好的试样连同制样器置于温度为 20±2 °C, 湿度为 99 % 的标准环境中养护 14 d 后取出, 在其表面裹一层保鲜膜以防失水, 然后逐个放入 CT 机中进行扫描试验, 为保证数据的精确性, 每种配比做 4 个平行试样。扫描截面分为横截面 (a, b, c) 和纵截面 (d, e, f), 如图 1 所示。

表 1 CT 机参数

Table 1 Parameters of the CT machine	
探测器排数	2
变压器功率/kW	40
工作电压范围/kV	80~130
360° 扫描时间/s	0.8
层厚/mm	1, 1.5, 2
空间分辨率/lp·mm ⁻¹	15.5
重建时间/s 矩阵	1/512×512

表 2 试样编号及配比

Table 2 Numbers and mixture proportion of specimens			
编号	CC/%	W/C	V_c/V_s
SM111	5	0.8	1
SM122	5	1.0	1.5
SM133	5	1.2	2
SM221	10	1.0	1
SM222	10	1.0	1.5
SM233	10	1.5	2
SM321	15	1.0	1
SM322	15	1.0	1.5
SM323	15	1.0	2

注: CC 为水泥掺量, 等于水泥与砂的干质量之比; W/C 为水灰比; V_c/V_s 为 EPS 颗粒与砂在自然堆积状态下的体积之比。

3 试验结果及分析

3.1 水泥掺量的影响

SM122, SM222, SM322 的 6 个截面的典型 CT 图像和 CT 值及方差值分别见图 2 及表 3。

对比 3 种不同水泥掺量的 LSES 的纵、横截面

CT 图像,可见在 EPS 含量相同时,随着水泥掺量的增加,图像中白色区域的面积在增大。在 SM122 的 CT 图像中,黑色区域占了很大面积,其中大部分是密度很低的 EPS 颗粒,还有 EPS 与砂粒间的孔隙。由于 EPS 颗粒均为球状,且粒径相对较大,因此两者间的接触方式可视为点-点接触,这使得两种骨料间的孔隙较大。而水泥掺量较低时,水泥主要的水化产物—水化硅酸钙 C-S-H 相对较少,C-S-H 虽然有很好的胶结作用,但填充孔隙的效率却很低^[17],所以,在 LSES 的骨架中,还有大量 EPS 颗粒和砂粒间的孔隙中没有高密度的 C-S-H 填充于其中,在 CT 图像中,就表现为大块的黑色区域相连。而在 SM222 中,由于 C-S-H 的增加,这种相连的黑色区域则减少了许多,在 SM322 中,基本无相连黑色区域,而且可清楚地分辨出单个 EPS 颗粒的形状,这说明有足够多的 C-S-H 填充于孔隙中,并能将 EPS 颗粒以及砂粒包裹住,使得 LSES 的骨架更加致密。

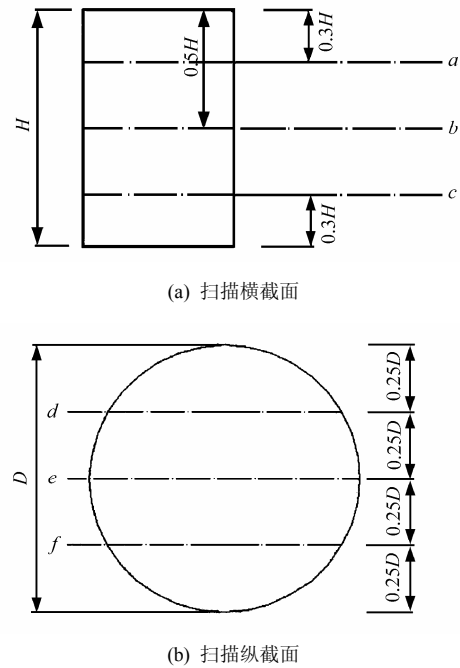


图 1 CT 扫描截面

Fig.1 The CT scanning sections

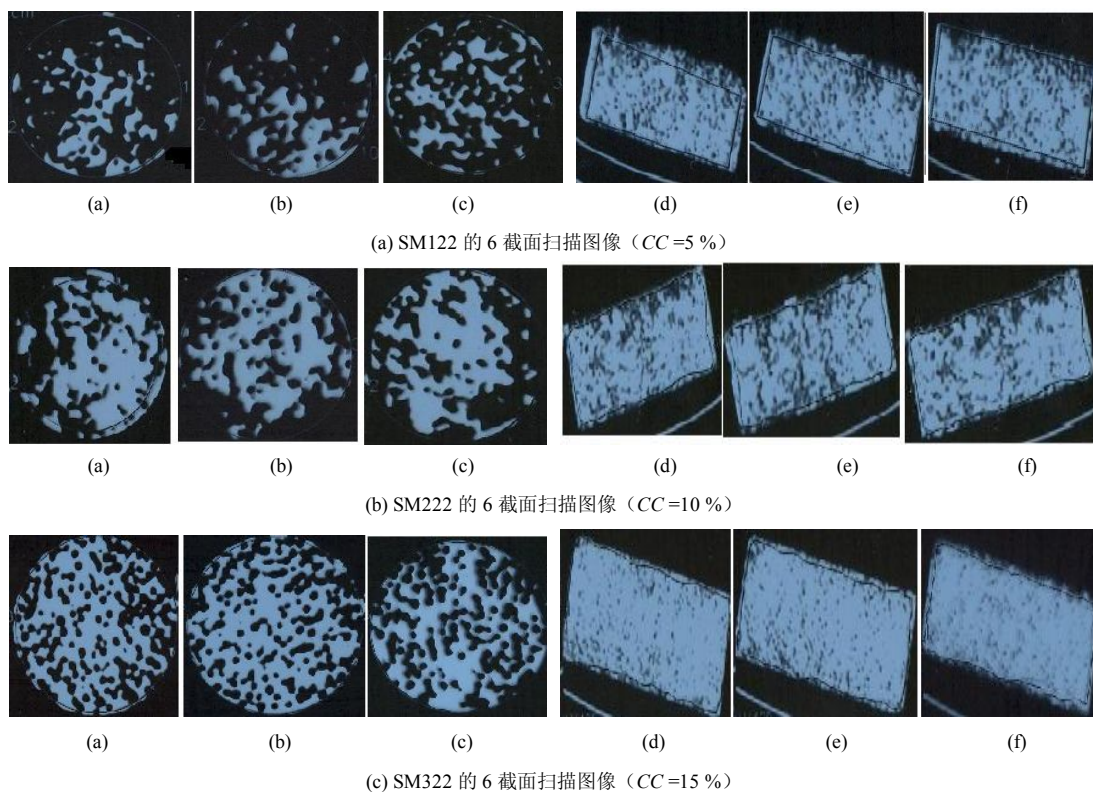
图 2 不同水泥掺量下试样的 CT 扫描图像 ($V_e/V_s=1.5$)

Fig.2 CT scanning images of spencimens with different cement contents

前面已述及,ME 表示扫描截面选定区域物质点的平均密度,而 SD 表示该区域所有物质点密度的不均匀程度。由表 3 可看出,①随着水泥掺量的增加,ME 值总体上在增加,但 SM222 比 SM122 增加的幅度要大于 SM322 比 SM222 增加的幅度,

另外各个截面的 ME 值并不相同,SM122 的差异最大,SM222 次之,SM322 最小。笔者认为,这种差异的出现一方面是由于制样时人为因素的影响,另一方面也是 LSES 这种混合材料结构特性的表现:水泥掺量较小时,LSES 中 EPS 颗粒与砂粒间的连

接相对较为松散, 内部存在着诸多相连的孔隙及裂缝, 这可视作 LSES 的原生损伤, 而这种损伤在横向和纵向都是不均匀的, 因此导致了各截面的 ME 值差异, 而随着水泥掺量增大, LSES 的结构更加密实, 原生损伤随之减少, ME 值也更加接近。②由于 LSES 是由几种密度差异很大的材料组成的混合土, 因此其 SD 值比其他均质土要大得多, 而且其 SD 值的变化也并非像均质土那样反映了结构性的增强或减弱, 水泥掺量较小时, 很多密度较低的区域如 EPS 颗粒、孔洞连接在一起, 使得总体的密度差异并不大, 而随着水泥量的增多, 高密度的 C-S-H 将 EPS 颗粒分隔开, 并填充于孔洞中, 这使得截面上的密度差异增大, 即 SD 增大。

表 3 不同水泥掺量 LSES 各截面的平均 CT 值 (ME) 及方差 (SD) ($V_c/V_s=1.5$)

Table 3 Average CT values (MEs) and SDs for different sections of LSES under various CC ($V_c/V_s=1.5$)

试样	指标	截面编号					
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>F</i>
SM122	ME	-40.8	-101.1	-153.0	37.1	71.3	87.2
	SD	334.6	364.6	365.8	374.4	361.9	382.1
SM222	ME	255.8	178.2	80.0	121.1	105.7	100.9
	SD	530.3	496.3	455.5	462.9	462.2	434.7
SM322	ME	234.6	282.4	253.2	174.6	234.0	233.5
	SD	597.6	560.0	623.0	323.5	362.1	348.2

3.2 EPS 颗粒含量的影响

SM321, SM322, SM323 的 6 个截面的 CT 图像如图 3 所示。

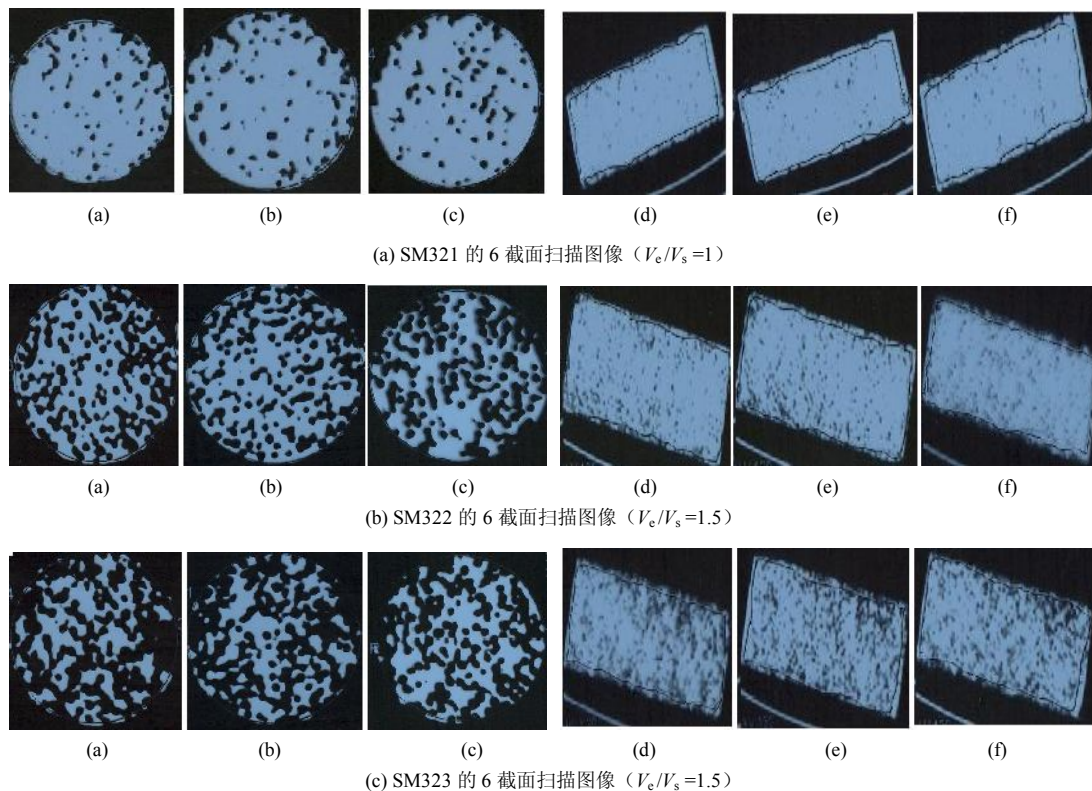


图 3 不同 EPS 颗粒含量下试样的 CT 扫描图像 ($CC=15\%$)

Fig.3 CT scanning images of specimens with different EPS-bead contents

由图 3 可以明显地看出, 随着低密度的 EPS 颗粒含量的增加, 横截面以及纵截面图像中的黑色区域面积也在迅速增加。在 EPS 颗粒含量很小 ($V_c/V_s=1$) 时, LSES 试样中的孔隙多是存在于砂粒之间, 且相对较少, 水泥水化产物 C-S-H 能够很好地起到胶结、填充的作用, 使得混合土的骨架比较牢固, 反映在图像上则是黑色球状物即 EPS 颗粒零星地分布于大面积的白色区域中; 当 EPS 颗粒含量增加 ($V_c/V_s=1.5$), 即用粒径较大的 EPS 颗粒去置换同体积的砂粒时, 球状的 EPS 颗粒之间的孔隙显然要比砂

粒之间的孔隙大得多, 这使得试样中总的孔隙数目增大, 此外, EPS 颗粒总的表面积也随之增加。姬凤玲^[3]通过扫描电镜, 观察到在以疏浚淤泥为原料土的砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土的微观结构中, EPS 表面被 C-S-H 以及固化土团粒体包裹, 从而使混合土形成一种“粒状·镶嵌·胶结·包裹”结构。与此不同的是, LSES 中砂的活性和胶结性能都很低, 无法与水泥水化物反应形成固化土团粒体, 在结构中承担胶结与填充的只有 C-S-H。因此, 当水泥掺量不变, EPS 颗粒含量增加时, 同样数量的

C-S-H 包裹 EPS 颗粒表面和填充孔隙的效率都将下降,试样中的裂缝和孔隙增多,从而使得 LSES 骨架的整体性降低。

通过分析 3 种水泥掺量下不同截面的 ME 值与 EPS 颗粒含量的关系(图 4),可以看出 ME 与 V_e/V_s 基本呈线性关系。由于 LSES 是一种人工制备的混合土,其不同截面的密度差异在所难免,然而不同水泥掺量下各个截面 ME 值与 V_e/V_s 的线性关系是大致相近的,而 ME 值是和试样密度有着线性关系^[8],所以可认为试样密度与 V_e/V_s 亦呈线性关系。需要指出的是,本次试验中 EPS 颗粒含量的取值点不多,结论可能会有一些局限性,与前人的研究也有一些出入,如山田等^[18]对由砂土为原料土的砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土进行的试验研究表明,其密度是随着 EPS 颗粒添加量的增加呈非线性降低的。因此,今后还需通过更多的试验数据进行研究。

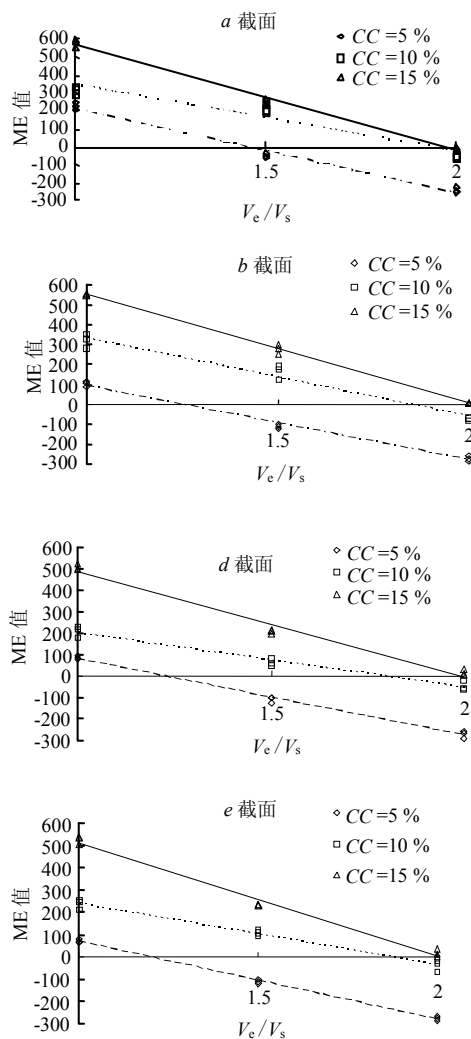


图 4 不同截面的 ME 值与 EPS 颗粒含量的关系
Fig.4 The relationship between MEs and EPS-bead contents for different sections

3.3 LSES 的结构性

土的结构性是指土中颗粒或土中颗粒及孔隙的性状及排列型式,以及颗粒之间力的相互作用。绝大多数天然土都有一定的结构性,而这种结构性对土的强度及变性特性都会有强烈的影响。沈珠江^[19]认为:21 世纪土力学的核心问题是土体结构性的数学模型。谢定义^[20]则认为土结构性的强弱不只是土结构强度的大小,而是土的联结和排列两方面的综合反映,并提出了综合反映这两方面的结构性定量指标。

从材料组成上看, LSES 这种人工制备的混合土也具有明显的结构性。水泥水化物 C-S-H 提供了结构强度,粒径相对较大的球状 EPS 颗粒的掺入使得 EPS 颗粒之间以及 EPS 颗粒和砂粒间的孔隙较多,从而使得混合土的孔隙比很高。前面已指出,水泥掺量越高,就有更多的 C-S-H 包裹于 EPS 颗粒和砂粒表面、填充于孔隙中,使得 LSES 骨架更加密实,结构强度提高,因此也就具有更强的结构性。而若 EPS 颗粒含量增大,则混合土内的孔隙和空洞增多,颗粒间接触面积就少,结构性减弱。因此可以认为,水泥掺量和 EPS 含量是影响 LSES 结构性的主要因素。此外, LSES 的结构性与其他天然土相比,也有其特殊性。从表 3 中看出,不同截面的 SD 值有较大差异,这说明试样内部的孔隙并非均匀分布,从微观尺度上说,试样内部的局部孔隙比是各不相同的。Frost^[21]认为,用单一的孔隙比数值来描述粒状土的性状是不准确的,从微观层面分析土体局部孔隙比分布的变化则能更科学地反映试样宏观的实际响应。LSES 孔隙比分布的独特性也必然要反映在其受力时的性状上,因此,要更深入地揭示其结构性,还有待于将微观测试手段 (SEM), CT 扫描以及力学试验结合起来进行进一步的研究。

4 结 语

本文利用医学 CT 机对砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土 (LSES) 这种新型的土工材料进行了内部细观结构的扫描试验,得到了不同水泥掺量和不同 EPS 颗粒含量下 LSES 的截面图象、平均 CT 数以及方差等成果,据此分析了水泥掺量和 EPS 颗粒含量对 LSES 细观结构特点的影响,并认为 LSES 是一种局部孔隙比分布不均匀的特殊的结构性土。

考虑到 X 射线对人体的影响,医用 CT 机一般采用低能量的 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^[11],针对这一

局限,有些学者^[7,8]采用了高能量的工业 CT 进行研究,以获得精度更高的图像和数据。但不管是医用 CT,或是工业 CT,价格都非常昂贵,对国内的科研部门而言是一笔很大的费用。而如今大多数市级医疗单位都配有较先进的 CT 机,笔者认为,若科研部门能与医疗单位合作,利用其 CT 机进行试验研究,充分发挥现有资源,将不失为一条经济、双赢的研究途径。

参 考 文 献

- [1] 马时冬. 聚苯乙烯泡沫塑料轻质填土(SLS)的特性[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 245—248.
MA Shi-dong. The properties of stabilized light soil (SLS) with expanded polystyrene[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(3): 245—248.
- [2] 董金梅. 聚苯乙烯轻质混合土工程特性的试验研究[博士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [3] 姬凤玲. 疏浚淤泥泡沫塑料颗粒混合轻质土力学特性研究[博士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [4] Vinegard H L, de Waal J A, Wellington S L. CT studies of brittle failure in castlegate sandstone[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.** 1991, 28(5): 441—448.
- [5] Tani, K. X-ray computed tomography technique to observe shear banding in dense sands[A]. **Proceedings of the International Symposium on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics**[C]. Nagoya: [s. n.], 1997. 315—320.
- [6] Kruse G A M, Bezuijen A. The use of CT scans to evaluate soil models[A]. **Proc. Centrifuge'98**[C]. Balkema: [s. n.], 1998. 79—84.
- [7] Sugawara K, Obara Y, Kaneko K, et al. Visualization of three-dimensional structure of rocks using X-ray CT method[A]. **Proceedings of the Asian Conference on Rock Mechanics**[C]. Seoul: [s. n.], 1997. 769—774.
- [8] Otani J, Mukunoki T, Kikuchi Y. Visualization for engineering property of in-situ light weight soils with air foams[J]. **Soils and Foundations**, 2002, 42(3): 93—105.
- [9] 李晓军, 张登良. CT 技术在土体结构分析中的应用初探[J]. 岩土力学, 1999, 20(2): 62—66.
LI Xiao-jun, ZHANG Deng-liang. Application of CT in analysis of structure of compacted soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(2): 62—66.
- [10] 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.
LU Zai-hua, CHEN Zheng-han, PU Yi-bin. A CT study on the crack evaluation of expansive soil during drying and wetting cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 417—422.
- [11] 施斌, 姜洪涛. 在外力作用下土体内部裂隙发育过程的 CT 研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 537—541.
SHI Bin, JIANG Hong-tao. A study on the development of failures inside soil under the external force using CT technique[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(5): 537—541.
- [12] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩石细观损伤扩展规律的 CT 实时试验研究[J]. 中国科学 E 辑, 2000, 30(2): 104—111.
- [13] 李晓军, 张登良. 路基填土单轴受压细观结构 CT 监测分析[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.
- [14] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 原状膨胀土剪切损伤演化的定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 1 428—1 432.
LU Zai-hua, CHEN Zheng-han, PU Yi-bin. Quantitative analysis of damage evaluation of intact expansive soil during triaxial shearing test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(9): 1 428—1 432.
- [15] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 岩石疲劳损伤扩展规律 CT 细观分析初探[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2), 191—195.
GE Xiu-run, REN Jian-xin, PU Yi-bin, et al. Primary study of CT real-image testing of fatigue meso-damage propagation law of rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(2): 191—195.
- [16] Sun H, Chen J F, Ge X R. Deformation characteristics of silty clay subjected to triaxial loading, by computed tomography[J]. **Geotechnique**, 2004, 54(5): 307—314.
- [17] 申爱琴. 水泥与水泥混凝土[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [18] 山田, 长坂, 西田, 等. 發生土スチロール片と砂とを混合した軽量土. 土と基礎, 1989, 37—2(373), 25—30.
- [19] 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.
SHEN Zhu-jiang. Mathematical modellion of soil structure—The key problem of soil mechanic ia 21 century[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1996, 18(1): 95—97.
- [20] 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.
XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 21(6): 651—656.
- [21] Frost J D, Jang D J. Evolution of sand microstructure during shear[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 2000, 126(2): 116—130.