

DOI: 10.11779/CJGE202211020

# 土颗粒排列与胶结作用对人造结构性土结构性影响研究

梁传扬<sup>1, 2</sup>, 吴跃东<sup>\*1, 2</sup>, 刘 坚<sup>1, 2</sup>, 吴回国<sup>1, 2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤防工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 江苏省岩土工程研究中心, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 人工制备结构性土通常在土中添加发泡聚苯乙烯 (EPS) 和水泥等外加剂实现土颗粒预定排列方式与粒间胶结作用, 从而形成土体的结构性。然而目前针对土颗粒排列与胶结作用对人造结构性土结构性影响的研究较少。为此研究了土颗粒排列和粒间胶结对土体初始结构性和结构性演变过程的影响规律及其作用机理。研究结果表明: 土体初始结构性随着 EPS 掺量及其粒径增大而减小, 随着水泥掺量增大而增大。这是因为 EPS 掺量和粒径越大, 土体中孔隙数量越多, 孔隙体积越大, 减弱了土颗粒之间的胶结作用, 从而降低土体的初始结构性; 而水泥掺量越大, 水化产物越多, 土体的孔隙体积越小, 胶结作用越显著, 从而提高土体的初始结构性。在结构性演变过程中, 初期应力较小时, 土体的结构性随 EPS 掺量、粒径和水泥掺量的增大而增大, 这主要与 EPS 颗粒吸能减能作用和水泥水化产物胶结作用的增强有关。研究成果不仅有助于增强对结构性土体中土颗粒排列和粒间胶结作用的认识, 对人工制备结构性土工艺也有重要的技术指导意义。

**关键词:** 人造结构性土; 颗粒排列; 粒间胶结; 发泡聚苯乙烯 (EPS); 水泥

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)11-2135-08

作者简介: 梁传扬(1993—), 男, 博士研究生, 从事岩土工程特性与软基处理研究。E-mail: hhulcy@qq.com。

## Influences of arrangement and cementation of soil particles on structure of artificial structural soil

LIANG Chuan-yang<sup>1, 2</sup>, WU Yue-dong<sup>1, 2</sup>, LIU Jian<sup>1, 2</sup>, WU Hui-guo<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Geotechnical Engineering Research Center of Jiangsu Province, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** In order to obtain the predetermined arrangement and cementation of soil particles, the additives such as expanded polystyrene (EPS) and cement are usually added into the soil for the preparation of artificial structural soil, which can form the artificial structure of soil. However, there are few studies on the influences of arrangement and cementation of soil particles on the structure of artificial structural soil. A series of tests are carried out to investigate the influence law and mechanism of arrangement and cementation of soil particles on the initial structure and structural evolution of soil. The results show that the initial structure of soil decreases with the increase of EPS content and particle size, and increases with the increase of cement content. It is because that larger EPS content and particle size cause more pores and larger pore volumes in the soil, which weakens the cementation between soil particles to reduce the initial structure of the soil. In contrary, larger cement content causes more hydration products, smaller pore volumes and stronger cementations, which improves the initial structure of soil. In the process of structural evolution, large EPS content, particle size and cement content increase the soil structure when the stress is small, which is mainly related to the enhancement of the energy absorption and reduction of EPS particles and cementation of cement hydration products. The research results help to enhance the understanding of arrangement and cementation of soil particles in structural soil and provide a significant technical guide for the preparation of artificial structural soil.

**Key words:** artificial structural soil; particle arrangement; cementation; expanded polystyrene; cement

## 0 引言

由于独特的矿物成分、形成历史和环境, 天然软土在形成过程中具有一定的结构性<sup>[1]</sup>。土体的结构性是土颗粒的排列与粒间联结的综合反映, 它是“21世

纪土力学的核心”<sup>[2]</sup>。研究人员采用人工制备结构性

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX19-0419);  
中央高校基本科研业务费项目 (2019B73814)

收稿日期: 2021-10-27

\*通信作者 (E-mail: hhwyd@163.com)

土来开展土体结构性模型化研究,从而避免在单元试验或者物理模型试验中采用天然结构性土时造成取样扰动的问题,满足试验中所使用的结构性土样的结构性特征与现场基本一致的要求<sup>[3]</sup>。

为了制备具有一定结构性的土体,研究人员进行了大量的尝试<sup>[4-5]</sup>。相比较而言,发泡聚苯乙烯(expanded polystyrene,简称EPS)颗粒以其不改变土体本身的化学成分,对制备环境无严格要求等优势,成为制备人造结构性土的外加剂一个选择<sup>[6]</sup>。研究表明,EPS颗粒的刚度相对于土颗粒较小,其在土样中的存在相当于结构性土孔隙中所滞留的空气,使得掺入EPS颗粒的土样与具有相同孔隙比的土样的刚度、强度等工程特性不会产生较大差异。换句话说,EPS颗粒在人造结构性土中主要扮演的是孔隙的角色。而且,由于EPS颗粒憎水性和比表面积较大,EPS颗粒的加入会在土颗粒之间产生更多的孔隙,使得混合土样具备大孔隙比的特点和高含水率的潜能。另一方面,该人造结构性土样,不仅具有大孔隙比和亚稳定结构状态等结构性土特征,而且具备一定的可重复性、均匀性和易加工性,使得采用水泥和EPS颗粒制备人造结构性土的工艺被广泛认可<sup>[6]</sup>。

不难看出,人工制备结构性土通常使用水泥等作为添加剂来实现结构性黏土中颗粒之间的联结作用,并通过加入一定量和一定粒度的固体颗粒来模拟天然结构性土体的大孔隙特性,以体现土体中孔隙的排列<sup>[7]</sup>。可见,人造结构性土中的土颗粒排列和粒间胶结对于所形成的土体结构性起着决定性的作用,针对土颗粒排列和粒间胶结与土体结构性的关系应该作深入研究。然而,现有研究主要集中于土颗粒排列或者土粒间胶结对土体物理力学性质的影响<sup>[8-9]</sup>。这些研究均未涉及土颗粒排列与粒间胶结对土体结构性的影响,其研究成果无法直接应用于人造结构性土的结构性定量制备工艺中。想要制得设定结构性参数的结构性土体,则首先要明确土颗粒排列和土粒间胶结对土体的结构性影响规律及其作用机理。

为此,本文分别采用无侧限抗压强度试验和一维压缩固结试验,对不同EPS掺量及其粒径、不同水泥掺量的人造结构性土的结构性进行了研究,揭示了土颗粒排列和粒间胶结对土体初始结构性、结构性演变过程的影响规律,并从微观层面解释了作用机理。本文的研究成果不仅有助于增强对结构性土中土颗粒排列和粒间胶结作用的认识,而且为制备设定结构性参数的人造结构性土的工艺提供理论与技术指导。

## 1 试验方法与材料

### 1.1 试验方案

本文采用EPS颗粒结合水泥的工艺制备人造结构

性土,通过掺入一定含量和粒度的EPS颗粒改变土体的孔隙排列方式,从而影响土颗粒的排列特征,通过加入一定含量的水泥影响土颗粒间的胶结作用。为了研究土体颗粒排列和粒间胶结对土体结构性的影响,分别设置了不同EPS掺量及其粒径、水泥掺量对结构性影响的试验共7组,具体试验方案如表1所示。

表1 试验方案

Table 1 Test plans

试验 编号	EPS 掺量 $A/\%$	EPS 粒径 $S/\text{mm}$	水泥掺量 $A/\%$	备注
A	1.0	0.3~0.5	5	参考组
B	1.5	0.3~0.5	5	EPS 掺量 的影响
C	2.0	0.3~0.5	5	
D	1.0	1~3	5	EPS 粒径 的影响
E	1.0	3~5	5	
F	1.0	0.3~0.5	2	水泥掺量 的影响
G	1.0	0.3~0.5	10	

### 1.2 试验内容

目前表示土体结构性的参数主要分为两类:①反映土结构性的单值指标。该指标被称为土体构度指标或者初始结构性<sup>[10]</sup>。杨艳等<sup>[11]</sup>通过研究指出,土体灵敏度可以用来表示土体的初始结构状态。因此,本文采用灵敏度表示土体的初始结构性。②反映土结构性变化的参数<sup>[10]</sup>。此类结构性参数可以定量描述土体的结构性演变过程。本文采用应变(变形量)结构性参数来描述土体的结构性变化过程。

根据土工试验方法标准(GB/T 50123—2019),开展无侧限抗压强度试验获取土体的灵敏度,试验中采用应变控制并以1.6 mm/min的速率施加应变。通过一维压缩固结试验获取土体的变形结构势,试验中压缩荷载设置为50, 100, 200, 400, 800 kPa,且每级荷载施加持续至土样变形率小于0.005 mm/h。

### 1.3 试验材料

本次试验中使用的原料土来自中国浙江的一个建筑工地。表2显示了这种黏性土的基本物理力学特性。

表2 原料土和EPS基本特性

Table 2 Physical properties of uncemented soil and EPS

材料	液限 $/\%$	塑限 $/\%$	塑性 指数	干密度 $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	天然含 水率/%	无侧限抗 压强度 $/\text{kPa}$
原料 土	39.15	21.75	17.4	1.82	34.95	123.3
EPS	—	—	—	0.02~0.04	—	30~200

根据土的工程分类(GB/T 50145—2007),该原料土被分类为低塑性黏土(CL)。所使用的EPS颗粒来自于广州一家建筑公司。根据前人对EPS颗粒性质的研究<sup>[12]</sup>,试验选用球形EPS颗粒,该类EPS颗粒的基本特性如表2所示。试验中的水泥为产自于山东

青岛的标号为 P.O 42.5 的普通硅酸盐水泥。比表面积为 352.0%, CaO 为 59.9%, SiO<sub>2</sub> 为 22.4%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 4.2%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 3.5%, SO<sub>3</sub> 为 3.5%, MgO 为 3.5%, 其他为 3.0%。

#### 1.4 试样制备

将原料土风干后过 0.5 mm 的筛子, 按照试验方案, 分别在土中加入设定质量的 EPS 颗粒、水泥, 并用搅拌器搅拌均匀。需要注意的是, 由于 EPS 颗粒密度小, 粒径大于土颗粒, 搅拌时需要加入适量水以使 EPS 颗粒能够均匀分布在土颗粒间。由于制样含水率对饱和试验样的结构状态影响可忽略不计<sup>[13]</sup>, 本次试验根据原料土的最优含水率计算得到制样加水量。试样制备时, 预设 1.5 的初始孔隙比, 参考前人的样品制备方法<sup>[3]</sup>, 将所需质量的混合土分 3 层, 用击实器击实, 分别制得直径为 39.1 mm, 高为 80 mm 的无侧限抗压强度试验样品和直径为 61.8 mm, 高为 20 mm 的一维压缩固结试验样品。将样品放在饱和缸中抽气饱和, 在水中养护 6 d, 再抽气养护 1 d, 以获得合适的水泥强度, 从而制成具有结构性的饱和原状土样。相应的重塑样由原状样进行结构破坏后重新击实并饱和。

## 2 试验结果分析

### 2.1 颗粒排列对结构性的影响

图 1(a)展示了不同 EPS 掺量的人造结构性土其无侧限抗压强度曲线。图中,  $A_e$  为 EPS 颗粒掺量,  $S_e$  为 EPS 颗粒粒径,  $A_c$  为水泥掺量。从图 1 中可以看出, 在给定 EPS 粒径和水泥掺量后, 结构性土的原状样及其相应的重塑样的无侧限抗压强度曲线均会随着 EPS 掺量的增大而向右下方移动, 这意味着增大 EPS 掺量会降低土体的无侧限抗压强度, 并提高其延性。其原因是由于 EPS 是一种低抗压强度和高延性的材料, 当这种材料作为填充物替代了部分土体, 使土体孔隙增大, 从而降低整个土体的抗压强度并提高土体的延性。值得注意的是, 随着 EPS 掺量的增大, 在结构性土的原状样中, 无侧限抗压强度降低较多, 而在重塑样中, 其无侧限抗压强度降低较少。换句话说, EPS 掺量的增大, 主要减小了结构性土原状样的无侧限抗压强度, 而对重塑样的无侧限抗压强度影响较小。这主要是因为当 EPS 掺量增大时, 试样中的土颗粒被替代, 使得土颗粒间的胶结作用减弱, 从而显著降低了人造结构性土原状土样的无侧限抗压强度。当原状样被重塑后, 水泥的胶结已经不再发挥作用, 而且由于水泥胶结作用中的水化物附着在土团粒表面, 阻断了重塑样中大部分土颗粒之间再次联结的可能, 使得土体很难再形成次生结构, 这样便造成重塑样的抗压强度的大小主要由 EPS 掺量来决定。相比较水泥的胶结作用所提供

的抗压能力, 不同掺量的 EPS 颗粒所能决定的抗压能力在土样中几乎没有太大的差异, 使得重塑后土体的无侧限抗压强度几乎相同。

图 1(b)为不同 EPS 粒径的人造结构性土其无侧限抗压强度曲线。与 EPS 掺量所造成土样的抗压强度变化趋势相似, 随着 EPS 粒径的增大, 土体的无侧限抗压强度降低, 延性提高。相较于土颗粒, EPS 颗粒是一种表面较为圆滑的材料, 其粒径增大会使得 EPS 颗粒的比表面积增大, 从而减弱了土颗粒之间的咬合作用, 降低了土体的抗压强度。另一方面, 较大的 EPS 粒径会使得土体中土颗粒之间的孔隙更大、更多, 当施加一定的轴向压力, 这些又大又多的孔隙有助于土颗粒等位置的调整, 释放了变形能量, 进而增大了土体的延性。有趣的是, EPS 粒径的增大对减小结构性土原状样的无侧限抗压强度有较大影响, 对重塑样的无侧限抗压强度几乎没有影响。究其原因, 主要是 EPS 粒径的增大会导致试样中孔隙体积增大, 使得孔隙的比表面积增大, 因而在相同的水泥掺量下, 土团粒表面所附着的水化物变薄, 在土颗粒之间形成的胶结作用减弱, 从而降低了原状样的无侧限抗压强度。在相应的重塑样中, 土体的胶结作用较弱, 此时土体的无侧限抗压强度的差异主要由 EPS 粒径控制, 相较于水泥的胶结作用, EPS 粒径造成的强度差异较小。

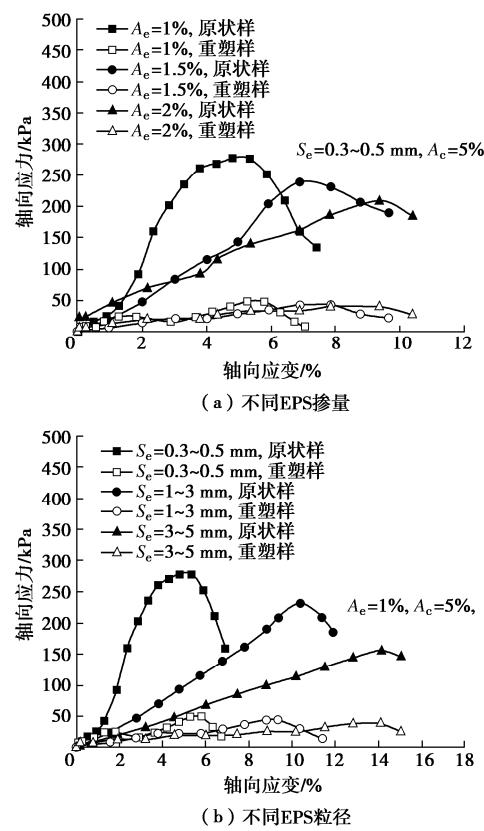


图 1 结构性土无侧限抗压强度曲线

Fig. 1 Curves of unconfined compressive strength of structural soil

通过不同 EPS 摹量和粒径的结构性土的灵敏度，对其初始结构性进行比较，如图 2 所示。可以发现，随着 EPS 摹量和粒径的增大，土体的灵敏度逐渐减小，且减小的幅度增大，表明土体的初始结构性随着 EPS 摹量和粒径的增大而逐渐减弱。这是因为 EPS 颗粒替代了样品中部分土颗粒，且与土颗粒的黏附性较差，因而较大摳量和粒径的 EPS 颗粒会减弱土颗粒之间的联结作用，进而降低土体的初始结构性。随着 EPS 摳量和粒径的增大，土颗粒间的胶结弱化越明显，使得土体的初始结构性迅速减小。

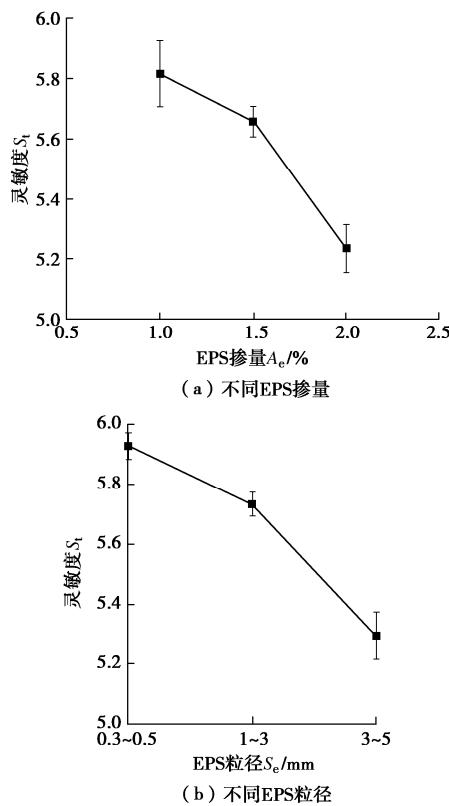


图 2 结构性土初始结构性对比

Fig. 2 Comparison of initial structure of structural soil

图 3 (a) 展示的是不同 EPS 摳量的结构性土压缩曲线。在不同 EPS 摳量的结构性土的原状样中，EPS 摳量较大的土体，在初期较小应力作用下，土体变形较小，所能承受的屈服应力也较大。这主要是由于 EPS 颗粒具有一定的弹性，大量的 EPS 颗粒会在土体中形成一个弹簧体，耗散一部分压缩能量，从而使得土体在相同的压缩作用力下变形较小而难以屈服。当压缩作用应力超过相应的屈服应力后，EPS 摳量较大的土体压缩性则表现的更大。这是由于 EPS 颗粒很容易被压缩，EPS 摳量越大，其所提供的可压缩量越大，导致压缩曲线下降得更为陡峭。

不同 EPS 粒径的结构性土压缩曲线如图 3 (b) 所示。可以发现，与 EPS 摳量所导致的土体压缩变形特征差异类似，EPS 粒径越大，土体在初期应力较小时

的变形越小，土体的屈服应力越大。这是因为 EPS 粒径越大，EPS 颗粒与土颗粒的黏附性越差，使得土体在相同压缩作用力下的体积压缩率、塑性变形和密度的增加幅度变小，而且由于 EPS 颗粒的弹性，其粒径较大会增大土体的回弹效应，使得土体变形更小，也较难发生屈服变形。一旦压缩应力达到土体的屈服应力，EPS 粒径提供给土体压缩变形的空间，压缩变形急速增大，则出现 EPS 粒径越大，变形越大的现象。

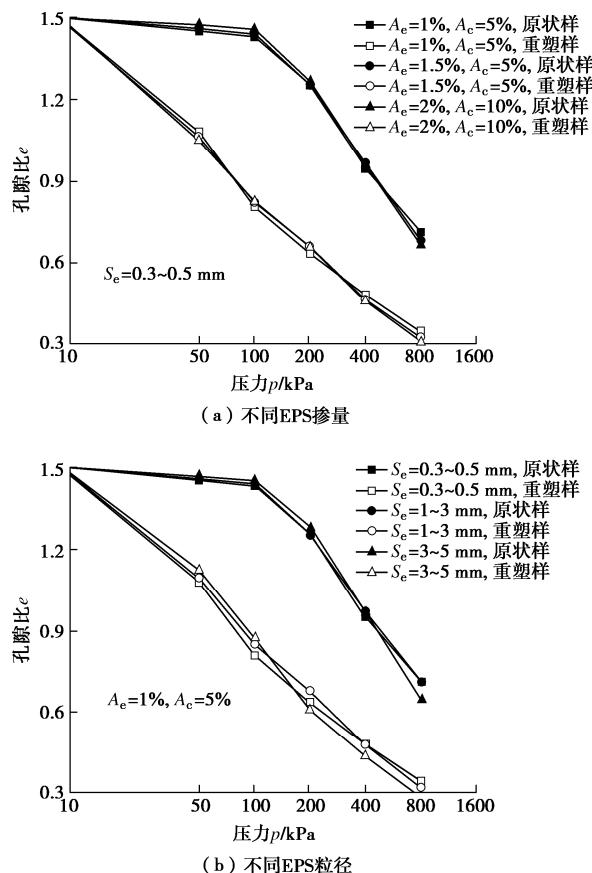


图 3 结构性土压缩曲线

Fig. 3 Compression curves of structural soil

图 4 (a), 4 (b) 分别对比了不同 EPS 摳量和粒径的土体结构性演变过程。曲线表明，土体结构性参数在压力未达到结构强度以前，压力的增长使得土体结构性参数增大。这是因为此时土体处于结构压密状态，在该阶段，土颗粒受压发生错动，但是土体结构并没有崩塌，土体的应力初期结构性因土颗粒的调整压密而增大，使得土体结构性参数有所增大<sup>[7]</sup>。之后，随着压力的增大，土体结构性参数逐渐减小并趋于稳定。这是因为此时土体处于结构破坏状态，随着压力的增大，土体在应力初期较强的结构状态被破坏，使得结构性参数明显降低。值得注意的是，结构性参数的先增大而后逐渐减小的变化过程，表明土的结构性由破坏所导致的不稳定性，在初期较大，且有突变现

象, 即曲线中的“峰值”<sup>[7]</sup>。该峰值的位置与土体的结构强度有很大关系, 比如, 随着 EPS 掺量的增大, 土体结构强度逐渐减小, 导致结构性参数的峰值位置随着 EPS 掺量的增大逐渐向左偏移, 如图 4(a) 所示。在图 4(b) 中, 由 EPS 粒径所导致的土体结构强度差异较小, 因此其结构性参数的峰值的位置也较为相近。此外, 加入较大掺量和粒径的 EPS 颗粒的试样其结构性演变曲线在上方, 意味着较大的 EPS 掺量和粒径使得土体具有更强的应力初期结构性。这是由于初期的压缩应力小于土体屈服应力, 在结构性土体原状样中, EPS 颗粒的吸能减能作用显著, 较大掺量的 EPS 颗粒耗散了更多的外荷作用, 较大的 EPS 粒径提供给土体更强的回弹性能, 使得土体能够抵抗一定的压缩应力, 因而变形较小, 表现为土体的结构性较强。随着压力较大, 逐渐超过土体的屈服应力, 此时土体结构崩解, EPS 颗粒被压缩, 由 EPS 掺量和粒径所影响的土体结构性差异较小, 因而虽然 EPS 掺量和粒径不同, 但是此时土体的结构性基本相同。

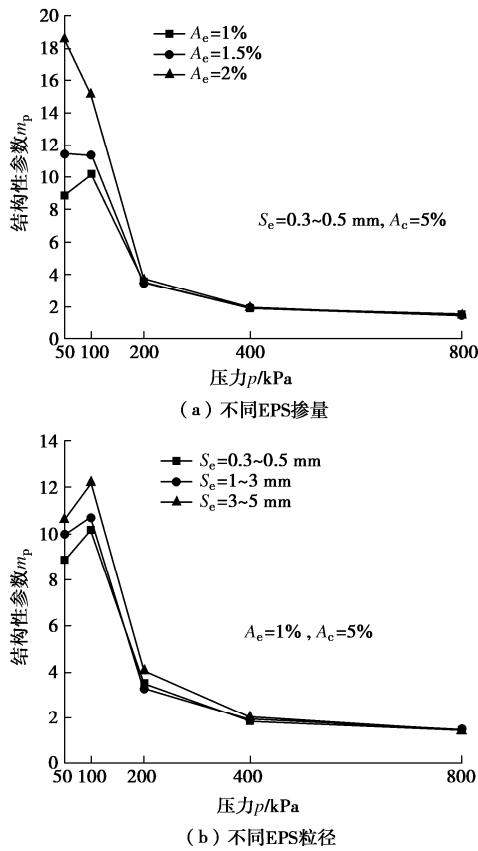


图 4 结构性土结构性演变对比

Fig. 4 Comparison of structural development of structural soil

## 2.2 胶结作用对结构性的影响

图 5(a) 展示的是不同水泥掺量的结构性土无侧限抗压强度曲线。图中, 在给定 EPS 粒径及其掺量后, 原状土样的无侧限抗压强度曲线随着水泥掺量的增大

逐渐向左上方移动, 这表明水泥掺量的增大使得土样的抗压强度增大, 延性降低。究其原因, 主要是水泥遇水发生水化反应, 放出大量的热, 促进了其他物理化学反应的发生, 导致土颗粒之间紧密接触; 而且, 水化物中存有的钙离子被大量电离出来, 由于电荷的吸引作用, 与处于负态的土颗粒紧密结合; 同时, 氢氧化钙与二氧化碳接触形成碳酸钙, 将土团粒包裹, 导致土体强度进一步提高。换句话说, 水泥水化后的产物主要凝聚成为水泥石, 增强了土体的强度, 但其凝结直至硬化的过程又降低了土样的延性, 并且水泥掺量越大, 这一特性越明显。有趣的是, 在重塑样中, 虽然水泥掺量不同, 但是土体的抗压强度和延性都较为接近。这是因为水泥在土中发生的一系列化学反应具有不可逆性, 当原有的结构被破坏, 土样中的胶结作用不复存在, 重塑样的抗压强度基本取决于土颗粒之间的咬合作用和较弱的联结作用; 此时土体中 EPS 掺量及其粒径也均相同, 重塑土体的延性也就基本趋于一致。

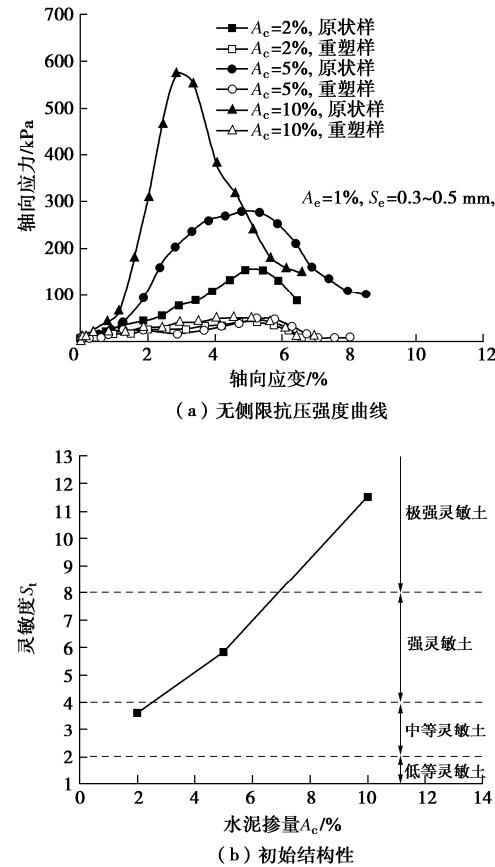


图 5 不同水泥掺量的结构性土初始结构性

Fig. 5 Initial structure of structural soil with different cement contents

不同水泥掺量的结构性土的初始结构性如图 5 (b) 所示。可以发现, 随着水泥掺量的增大, 土体的灵敏度逐渐增大, 表明土体的初始结构性随着水泥掺

量的增大而增大。水泥掺量的增大使得结构性土中水化反应剧烈, 水化产物较多, 土颗粒间的胶结作用更强, 使得土体结构强度较大, 表现为初始结构性增大, 且随水泥掺量的增大快速增长。

图 6(a) 展示了不同水泥掺量的结构性土压缩曲线。从图中可以看出, 随着水泥掺量的增大, 结构性土原状样的压缩曲线逐渐向上移动, 表明水泥掺量提高了土体抵抗压缩变形的能力。这是由于较多的水化产物填充土颗粒、EPS 颗粒以及土颗粒和 EPS 颗粒之间的孔隙, 其胶结作用更能紧密地将它们联结; 另一方面, 水泥的化学产物具有更高的强度, 使得土体整体结构性更强。当应力达到土体的屈服应力后, 土体的结构被破坏, 胶结作用失效, 不同水泥掺量的结构性土体其压缩性基本一样, 表现为压缩曲线的下降段相平行。结构性土的重塑样压缩曲线基本重合, 其原因与原状样结构崩解后所表现出的压缩曲线下降段平行的原因相同。

图 6(b) 对比了不同水泥掺量的结构性土结构性演变过程。图中显示, 水泥掺量的增大使土体的结构性参数曲线向上移动, 意味着较大的水泥掺量使土体初期结构性增大, 这是由于水泥掺量的增大使土体中

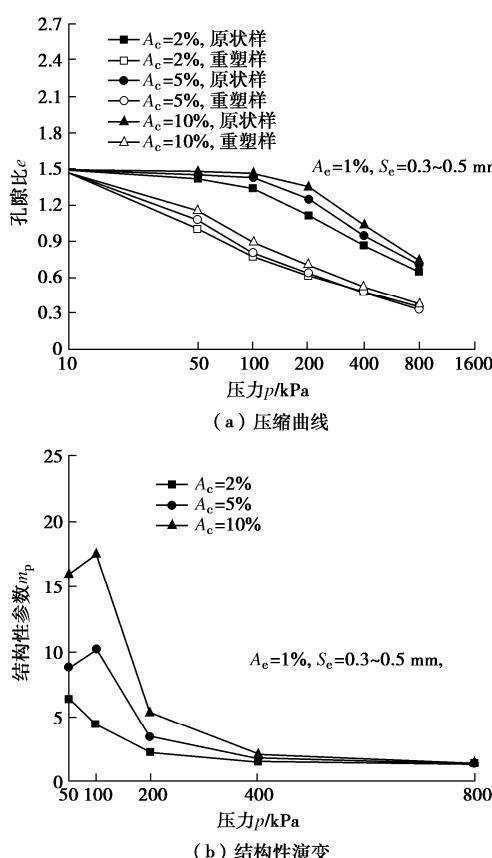


图 6 不同水泥掺量的结构性土结构性演变

Fig. 6 Structural development of structural soil with different cement contents

颗粒间的胶结作用增强, 提供了更强的结构性以抵抗变形压力。当土体结构被破坏后, 胶结作用较弱时, 土体的结构性则迅速降低并趋于稳定, 此时不同水泥掺量的土体结构性基本相一致。

### 2.3 颗粒排列与粒间胶结的作用机理

通过无侧限抗压强度试验和固结压缩试验分析不同 EPS 掺量、粒径、水泥掺量的人造结构性土的初始结构性、结构性演化过程的变化规律, 仅是揭示了颗粒排列和胶结作用对土体结构性的影响, 其影响机理则可以从微观层面进一步分析。对人造结构性土的原状样进行切样, 风干后喷金, 再采用扫描电镜, 观察不同试样的结构状态。

图 7 为每组试样的微观结构状态。随着 EPS 掺量的增大, 土体的孔隙增大, 如图 7(a), 7(b) 所示。这是由于 EPS 具有憎水性, 与土颗粒的黏附性较差, 较大的 EPS 掺量产生较大的孔隙, 使得土颗粒之间的联结作用减弱, 因此在无侧限抗压强度试验中, EPS 掺量越大, 土体强度越弱, 初始结构性越小。在压缩固结试验中, EPS 颗粒作为一种弹性材料, 可以有效耗散外荷作用, EPS 掺量越大, 耗散的能量越多, 使得土体在压缩应力较小时表现出更强的结构性。当水泥的胶结作用被破坏, EPS 颗粒开始屈服时, 土体的结构强度则大幅下降, 并由于较多的孔隙和较大掺量的 EPS 颗粒被压缩而发生更大的压缩变形。比较图 7(c), 7(d) 可以发现, EPS 粒径的增大使得土体孔隙增大, 造成土颗粒之间的胶结作用减弱, 在无侧限抗压强度试验中表现为土体强度降低, 延性提高, 初始结构性较小。另一方面, 较大的 EPS 粒径回弹性能更强, 有助于耗散部分外荷应力, 使得土体在压缩过程中, 应力较小时原始结构状态保持更久, 表现为应力初期结构性较强, 屈服应力较大。随着压缩应力增大, 较大的孔隙和 EPS 颗粒被压缩, 土体的变形增大。与 EPS 掺量及其粒径作用相反, 随着水泥掺量的增大, 土体的孔隙减小, 如图 7(e), 7(f) 所示。这是由于水泥掺量越多, 土体中发生的水化反应越剧烈, 水泥的水化产物越多, 土团粒之间的孔隙被填充而变小, 使得颗粒之间的胶结作用增强, 在结构被破坏之前表现为无侧限抗压强度高, 压缩变形小, 土体初始结构性和应力初期结构性较强。结构崩塌后, 由于不同水泥掺量的孔隙体积差异较小, 所以压缩性基本相同。可见, 颗粒排列和粒间胶结对土体结构性的影响主要是孔隙大小排列和水泥的水化产物在土颗粒间形成的胶结所主导, 水化产物的胶结提供给土体抗压强度和变形刚度, 孔隙大小则直接影响着胶结作用的强弱和结构破坏后的变形量。

在人工制备结构性土的工艺中, 掺入 EPS 颗粒的

目的是提供给土体形成较大孔隙的可能, 水泥则是通过其水化产物对土颗粒的胶结作用形成土体的结构强度。研究发现, EPS 掺量及其粒径、水泥掺量均对土体的初始结构性和在小应力状态下的初期结构性有一定影响。因此, 采用 EPS 颗粒结合水泥的方法制备人造结构性土, 对 EPS 掺量和粒径、水泥掺量进行选择时, 需要根据室内物理模型试验的要求进行测定, 以便更好地符合实际工程岩土材料结构性的特点。

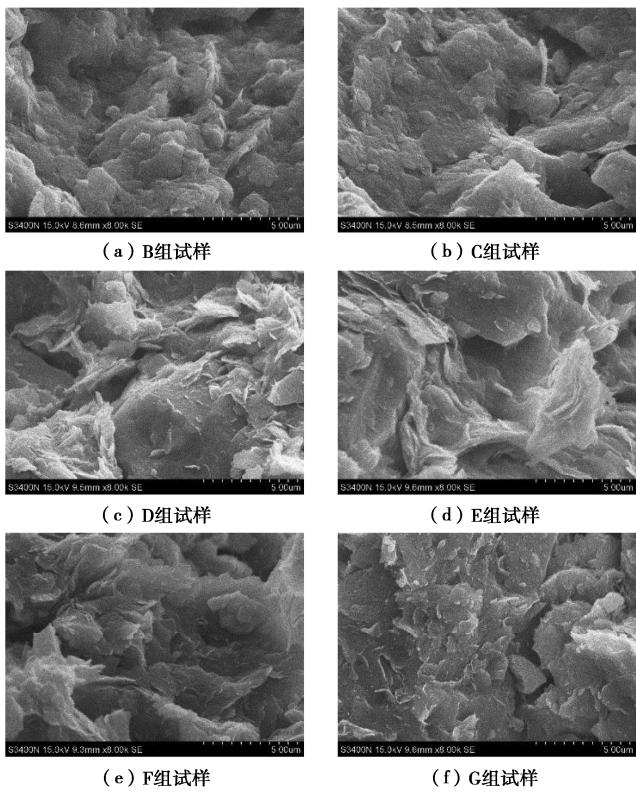


图 7 扫描电镜下的土体结构

Fig. 7 Soil structure from scanning electron microscope graph

### 3 结 论

本文分别对不同 EPS 掺量、粒径和不同水泥掺量的人造结构性土的初始结构性和结构性演变进行了研究, 通过无侧限抗压强度试验和一维压缩固结试验, 揭示了颗粒排列和胶结作用对土体结构性的影响规律, 再采用扫描电镜, 从微观角度解释了颗粒排列和胶结作用对土体结构性影响的机理, 得到 3 点结论。

(1) 人造结构性土体的初始结构性随着 EPS 掺量及其粒径的增大而减小, 随着水泥掺量的增大而增大。在土体结构性演变过程中, 初期应力较小时, 土体的结构性随着 EPS 掺量及其粒径、水泥掺量的增大而增大。结构破坏后, 土体的结构性则与 EPS 掺量及其粒径、水泥掺量关系不大。

(2) 较大掺量及粒径的 EPS 颗粒增大了土体的孔隙体积, 减弱了土颗粒之间的胶结作用, 从而降低

了土体的初始结构性; 而较大掺量的水泥产生更多的水化产物, 增强了土颗粒间的胶结作用, 进而提高了土体的初始结构性。在土体压缩过程中, 较大掺量及粒径的 EPS 颗粒能够显著增强土体的回弹效应, 耗散更多的外荷压力, 弱化较大孔隙的压缩特性, 而较大掺量的水泥也提供了更多的黏结强度, 使得土体在初期应力较小时具备更强的结构性。当应力增大, 土体结构被破坏, EPS 颗粒的吸能减能和水化产物的胶结均不再发挥作用, 此时土体的结构性趋于一致。

(3) 采用 EPS 颗粒结合水泥的方法制备人造结构性土时, 需要根据物理模型试验的要求对 EPS 掺量及其粒径、水泥掺量进行考虑与测定, 以更好地满足工程岩土结构性的特点。另一方面, 由于水泥化学反应的不可逆性以及水化产物硬化后状态稳定的特点, 阻断了土体原状结构在崩解后形成较强的次生结构, 从而减弱了土体的结构性。因此, 针对提供土颗粒胶结作用的固结剂, 建议筛选或者研制出不影响土体次生结构形成的材料。

### 参考文献:

- [1] 刘维正, 石名磊, 缪林昌. 太湖湖沼相天然沉积土结构性评价[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1616–1620. (LIU Wei-zheng, SHI Ming-lei, MIAO Lin-chang. Evaluation of soil structural characteristics of Taihu lacustrine-swamp natural sedimentary soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1616–1620. (in Chinese))
- [2] 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 model of soil structure —— the core problem of soil mechanics in the 21st century[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 95–97. (in Chinese))
- [3] JIANG M J, LI T, CUI Y J, et al. Mechanical behavior of artificially cemented clay with open structure: cell and physical model analyses[J]. Engineering Geology, 2017, 221: 133–142.
- [4] ESKISAR T. Influence of cement treatment on unconfined compressive strength and compressibility of lean clay with medium plasticity[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2015, 40(3): 763–772.
- [5] ZHANG D M, YIN Z Y, HICHER P Y, et al. Analysis of cement-treated clay behavior by micromechanical approach[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2013, 7(2): 137–153.
- [6] MEDERO G M, SCHNAID F, GEHLING W, et al. Analysis of

- the mechanical response of an artificial collapsible soil [M]// Unsaturated Soils: Experimental Studies. Berlin: Springer, 2005: 135 – 145.
- [7] 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 Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 651 – 656. (in Chinese))
- [8] DU Y J, HORPIBULSUK S, WEI M L, et al. Modeling compression behavior of cement-treated zinc-contaminated clayey soils[J]. Soils and Foundations, 2014, 54(5): 1018 – 1026.
- [9] 刘奉银, 钟丽佳, 仲 玥. 不同颗粒排列对砂土力学特性的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 1): 155 – 160. (LIU Feng-yin, ZHONG Li-jia, ZHONG Yue. Effects of different particle arrangements on mechanical properties of sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 155 – 160. (in Chinese))
- [10] 邵生俊, 郑 文, 王正泓, 等. 黄土的构度指标及其试验确定方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 15 – 19, 38. (SHAO Sheng-jun, ZHENG Wen, WANG Zheng-hong, et al. Structural index of loess and its testing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 15 – 19, 38. (in Chinese))
- [11] 杨 艳, 齐吉琳, 宋春霞, 等. 灵敏度在土结构性定量化研究中的应用[J]. 西北地震学报, 2007, 29(1): 26 – 29. (YANG Yan, QI Ji-lin, SONG Chun-xia, et al. Experimental study on the application of sensitivity in quantitative study of soil structure[J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(1): 26 – 29. (in Chinese))
- [12] 杨凯旋, 侯天顺. 击实试验类型对 EPS 颗粒轻量土击实特性的影响规律[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1971 – 1982. (YANG Kai-xuan, HOU Tian-shun. Influence of compaction test types on compaction characteristics of EPS particles light weight soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 1971 – 1982. (in Chinese))
- [13] 陈存礼, 蒋 雪, 杨 焰, 等. 结构性对压实黄土侧限压缩特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1939 – 1944. (CHEN Cun-li, JIANG Xue, YANG Jiong, et al. Influence of soil structure on confined compression behaviour of compacted loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1939 – 1944. (in Chinese))

### 彩色插图索引

- DOI: 10.11779/CJGE202211001 一文彩色插图 ..... (后插 1)
- DOI: 10.11779/CJGE202211002 一文彩色插图 ..... (后插 1)
- DOI: 10.11779/CJGE202211005 一文彩色插图 ..... (后插 2)
- DOI: 10.11779/CJGE202211011 一文彩色插图 ..... (后插 2)
- DOI: 10.11779/CJGE202211012 一文彩色插图 ..... (封 3)
- DOI: 10.11779/CJGE202211016 一文彩色插图 ..... (封 3)
- DOI: 10.11779/CJGE202211017 一文彩色插图 ..... (封 3, 封 4)
- DOI: 10.11779/CJGE202211018 一文彩色插图 ..... (封 2)