

文章编号: 1673-9469 (2019) 03-0046-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.03.009

## EPS 颗粒整体集合的直剪试验研究

刘家兴<sup>1, 2</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为研究聚苯乙烯泡沫颗粒整体集合的抗剪强度特性, 通过直剪试验, 针对粒径为 1、3 及 5 mm 的泡沫颗粒, 测定了不同法向应力条件下剪应力与剪切位移之间的关系, 分析了颗粒粒径及压缩性对抗剪强度的作用影响。结果表明: 随着粒径的增加, EPS 颗粒整体集合的抗剪强度逐渐降低; 当 EPS 颗粒粒径由 1 mm 增加至 5 mm 时, 其整体的内聚力由 8.1 kPa 减小至 2.75 kPa, 内摩擦角也随之减小, 其原因在于 EPS 颗粒整体集合的压缩量随粒径的增加而增大。

**关键词:** EPS 颗粒; 直剪试验; 抗剪强度; 压缩量

**中图分类号:** TU441.3

**文献标识码:** A

## Direct Shear Test on An Assembly of Many EPS Beads

LIU Jiaying<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to study the shear strength characteristics of an assembly of many Expanded Polystyrene beads, direct shear tests were carried out to investigate the relationship between shear stress and shear displacement under different normal stress conditions. The effects of particle size and compressibility on shear strength were analyzed for the beads with particle sizes of 1 mm, 3 mm and 5 mm. The results show that the shear strength of an assembly of many EPS beads decreases with the increase of particle sizes. The cohesion of the assembly decreases and the internal friction angle decreases from 8.1 kPa to 2.75 kPa when the particle sizes of EPS increases from 1 mm to 5 mm. The reason is that the compression of an assembly of EPS beads increases with the increase of particle sizes.

**Key words:** EPS beads; direct shear test; shear strength; compression

EPS 颗粒具有质量轻、不吸水<sup>[1]</sup>等特点。轻质 EPS 颗粒混合土指的是由原料土、EPS 颗粒、固化剂和水混合而成的混合土, 该混合土质量轻、强度高、侧向变形小<sup>[2-3]</sup>。在工程建设中, 常使用轻质 EPS 颗粒混合土作为轻质填料, 以解决工程中遇到的土压力较大、差异沉降大等难以解决的问题<sup>[4-5]</sup>。

轻质 EPS 颗粒混合土作为一种土工填料, 其力学特性的研究十分重要。马时冬<sup>[6]</sup>采用中砂为原料土, 通过试验研究不同 EPS 颗粒形状(球粒 1 ~ 3 mm, 碎粒 1 ~ 5 mm 和片状颗粒 0.5 mm × 4 mm × 16 mm)

混合土的力学特性。研究成果表明, 球状 EPS 颗粒混合土的轻质效果最好。Abdelrahman<sup>[7-11]</sup>等通过直剪试验、三轴压缩试验和无侧限抗压强度试验, 研究 EPS 颗粒的含量和粒径对轻质 EPS 颗粒混合土抗剪强度的影响。研究表明, EPS 颗粒粒径越大, 混合土的抗剪强度越高; 随着 EPS 颗粒掺量的增多, 混合土抗剪强度降低。Deng<sup>[12]</sup>等对原料土为砂土的无固化剂轻质 EPS 颗粒混合土进行了直剪试验, 他认为该混合土颗粒之间有三种剪切机制, 分别是砂-砂、砂-EPS 颗粒、EPS 颗粒-EPS 颗粒剪切机制,

收稿日期: 2019-04-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578213)

作者简介: 刘家兴(1996-), 男, 江苏新沂人, 硕士研究生, 助理工程师, 从事土的基本力学特性研究。

随着 EPS 颗粒掺量的增加,砂-砂之间剪切作用减弱, EPS 颗粒-砂、EPS 颗粒-EPS 颗粒之间剪切作用增强。罗会武等<sup>[13]</sup>通过试验研究了纯砂的剪切机制,而关于纯 EPS 颗粒的研究较少,且 EPS 颗粒的掺入对轻质 EPS 颗粒混合土的抗剪强度影响很大,因此有必要对纯 EPS 颗粒进行研究,以更深入地了解 EPS 颗粒的掺入对轻质 EPS 颗粒混合土抗剪强度的影响。为更加深入地了解 EPS 颗粒之间的剪切机制,本文通过直剪试验,对不同粒径下球状 EPS 颗粒整体集合的抗剪强度特性进行研究,为在混合土中力学特性的研究和在工程中的应用提供参考。

## 1 试样及试验方案

文中 EPS 颗粒的密度由密度试验<sup>[14]</sup>测得。粒径为 1、3 和 5 mm 的 EPS 颗粒密度分别为 17.93、14.49 和 13.52 kg/m<sup>3</sup>。

直剪试验仪器采用应变控制式直剪仪,采用分级加载方法分别在 12.5、25、50 和 75 kPa 的垂直压力下对粒径为 1 mm 的 EPS 颗粒整体集合进行直剪试验。当垂直压力为 75 kPa 时,粒径为 3 mm 和 5 mm 的 EPS 颗粒整体压缩至剪切盒下盒,因此当粒径为 3 mm 和 5 mm 时,研究垂直压力为 12.5、25 和 50 kPa 时颗粒整体集合的抗剪强度特性。

为便于比较,制样时控制试样的密度相同,使 EPS 颗粒在相同垂直压力下具有相同的性质。根据土工试验规范<sup>[14]</sup>,本文认为在垂直压力的作用下试样每小时垂直变形不超过 0.005 mm 时变形稳定。待试样变形稳定后,按规范中快剪速率即 0.8 mm/min 的剪切速率对 EPS 颗粒整体集合进行剪切试验。由于所做试样为颗粒整体集合,为增加试验结果的可信度,每组试验做三次,取试验均值以作分析。试验方案如表 1 所示。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 法向应力作用下 EPS 颗粒整体集合的压缩

不同垂直压力下 EPS 颗粒整体集合的压缩量如图 1 所示。当 EPS 颗粒粒径由 1 mm 增大至 5 mm 时,以 50 kPa 的垂直压力为例,压缩量由 3.126 mm 增大至 11.105 mm。与粒径为 1 mm 的 EPS 颗粒散体相比,粒径为 3 mm 和 5 mm 时, EPS 颗粒整体集合的压缩量增长迅速,这是由于 3 mm、5 mm 颗粒

表 1 试验方案

Tab.1 Test scheme

试验序号	垂直压力 /kPa	粒径 /mm	加载速率 /(mm·min <sup>-1</sup> )	组数
L-12.5-1	12.5	1	0.08	3
L-25-1	25	1	0.08	3
L-50-1	50	1	0.08	3
L-75-1	75	1	0.08	3
L-12.5-3	12.5	3	0.08	3
L-25-3	25	3	0.08	3
L-50-3	50	3	0.08	3
L-12.5-5	12.5	5	0.08	3
L-25-5	25	5	0.08	3
L-50-5	50	5	0.08	3

本身压缩率较大。且当 EPS 颗粒粒径为 1 mm 时,由于粒径较小,随着压力的施加, EPS 颗粒逐渐压缩,填补颗粒间的空隙;而当 EPS 颗粒粒径为 3 mm 和 5 mm 时, EPS 颗粒的粒径较大,压缩量主要由 EPS 颗粒的压缩引起,因而压缩较大。

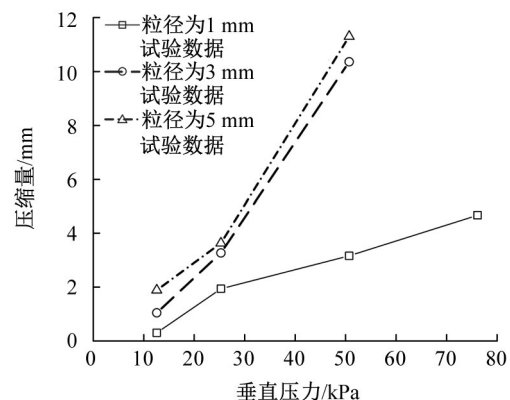


图 1 不同粒径下压缩量-垂直压力关系曲线

Fig.1 Compression-Vertical Pressure Curve at Different Particle Sizes

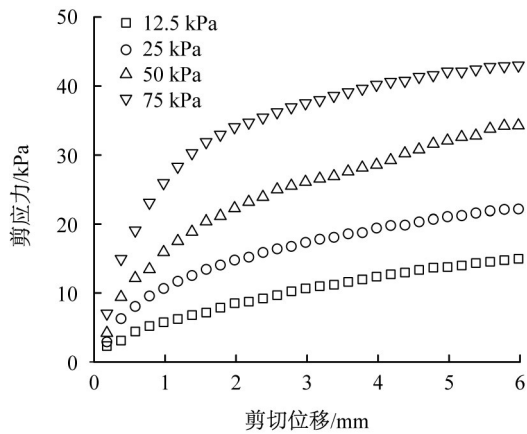
### 2.2 剪应力-剪切位移曲线

根据试验结果绘制出剪应力-剪切位移曲线如图 2 所示。由图 2 可知, EPS 颗粒整体集合的剪应力随剪切位移的增加而增大,表现为硬化型。

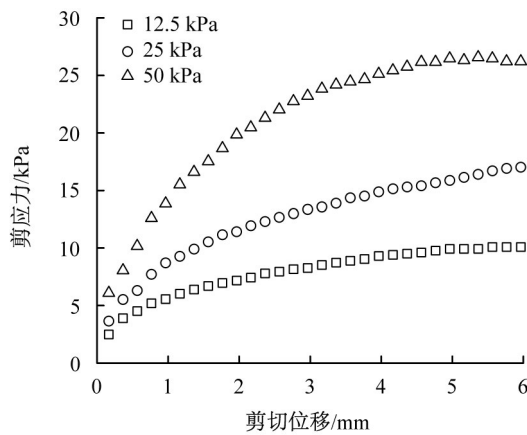
在垂直压力的作用下,当剪切位移小于 2 mm 时,剪应力随剪切位移的增加而迅速增大,而当位移大于 2 mm 时,剪应力以较慢的速率增加,为硬化阶段。

### 2.3 抗剪强度及抗剪强度参数

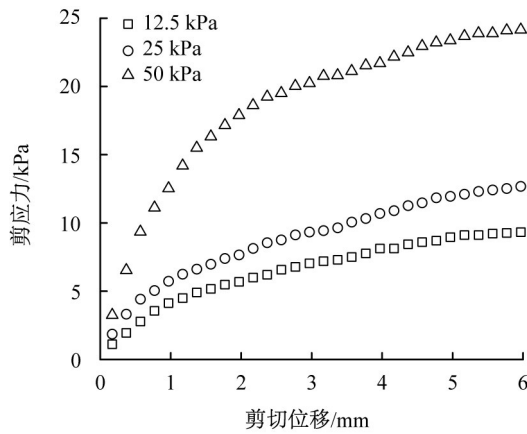
根据土工试验规范<sup>[15]</sup>,当曲线无峰值时取剪切



(a) 1 mm



(b) 3 mm



(c) 5 mm

图2 EPS颗粒整体集合剪应力-剪切位移关系曲线  
Fig.2 Shear Stress-Shear Displacement Curve of an assembly of many Expanded Polystyrene beads

位移为4 mm时对应的剪应力作为EPS颗粒整体集合的抗剪强度。根据实测的垂直压力和抗剪强度绘制Mohr-Coulomb破坏包络线如图3所示。

由图3可知, EPS颗粒整体集合的抗剪强度随垂直压力的增加而增大。对于给定的垂直压力(例如50 kPa), 粒径为1 mm的EPS颗粒整体集合在破

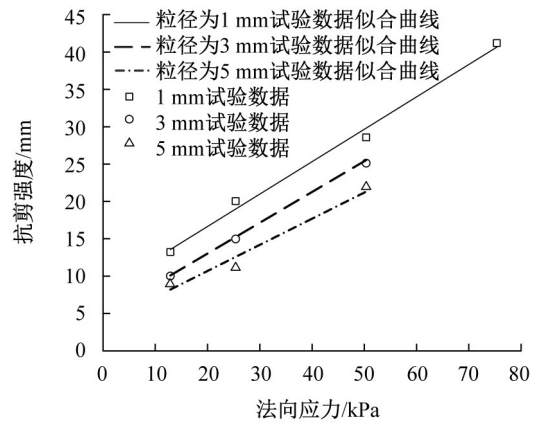
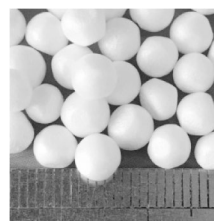


图3 不同粒径下抗剪强度与垂直压力关系曲线  
Fig.3 Curve of relationship between shear strength and vertical pressure under different particle sizes

坏时剪应力大于粒径为3 mm, 5 mm的EPS颗粒试样。当EPS颗粒粒径为1 mm时, 颗粒散体的抗剪强度最大, 当垂直压力为12.5、25和50 kPa时, EPS颗粒散体的抗剪强度分别为12.84、20.02和29.54 kPa。

以粒径为5 mm的EPS颗粒为例, 由图1、图4所示, 当垂直压力为12.5 kPa时, EPS颗粒整体集合的压缩量仅为1.88 mm, EPS颗粒压缩变形较小, 颗粒基本呈球形, 颗粒间接触面积小; 而在50 kPa的垂直压力下, EPS颗粒整体集合的压缩量为11.1 mm, EPS颗粒的压缩变形较大, 颗粒基本呈多边形, 颗粒间的接触面积较大, 颗粒间的摩擦比较明显, 因而EPS颗粒散体的抗剪强度较大。



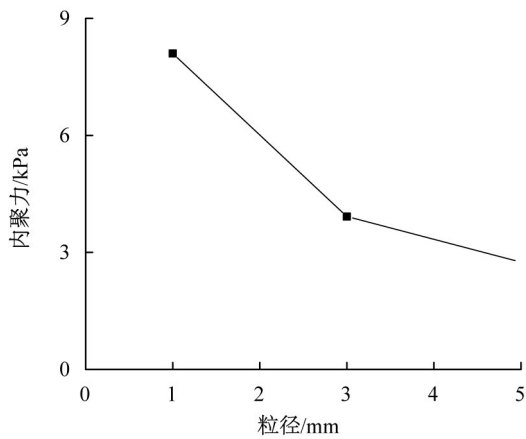
(a)12.5 kPa



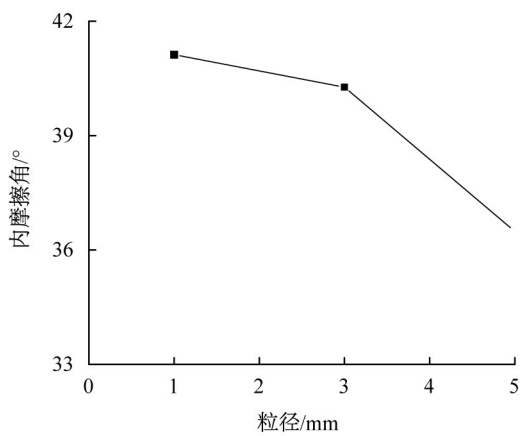
(b)50 kPa

图4 粒径为5 mm的EPS颗粒剪切后形状  
Fig.4 Shear Shape of EPS Particles with 5 mm Size

根据试验结果绘制出内聚力-粒径、内摩擦角-粒径曲线如图5所示。由图5可得, 随着粒径的增加, EPS颗粒整体集合的内聚力和摩擦角呈减小趋势, 当EPS颗粒粒径为1 mm时, EPS颗粒整体集合的内聚力最大, 为8.1 kPa, 当EPS颗粒粒径为3、5 mm时, 颗粒散体集合的内聚力分别为3.92 kPa和2.75 kPa, 降低了66%。当EPS颗粒粒径由1 mm增大至5 mm时, 颗粒整体集合的内摩擦角由41.17°



(a) 内聚力 - 粒径关系曲线



(b) 内摩擦角 - 粒径关系曲线

图5 内聚力、内摩擦角 - 粒径关系曲线

Fig.5 Curves of cohesion, internal friction angle-particle size

降低至 36.85°, 仅减小了 1%。Abdelsalam<sup>[16]</sup>、Ozer<sup>[17]</sup> 等学者对聚苯乙烯泡沫块体进行直剪试验, 试验结果表明, EPS 块体的内聚力在 12 ~ 49.8 kPa 之间。Horvath<sup>[18]</sup> 认为, 用于生产 EPS 块体的原料是由直径接近中等粗砂的聚苯乙烯颗粒组成, 且这些颗粒本身具有内聚力和内摩擦角。因此认为本文所研究的 EPS 颗粒整体集合内存在内聚力和内摩擦角合理。

### 2.4 摩擦系数

为研究垂直压力对 EPS 颗粒整体集合抗剪强度的影响, 本文得到不同垂直压力下不同 EPS 颗粒粒径的摩擦系数。摩擦系数定义为抗剪强度与相应垂直压力之间的比值, 因而摩擦系数大于 1 表示抗剪强度大于施加的垂直压力, 而小于 1 则表示抗剪强度小于垂直压力。摩擦系数 - 垂直压力的关系曲线如图 6 所示, 粒径为 1 mm 的 EPS 颗粒整体集合的剪切系数由 1.03 降为 0.55, 粒径为 3 mm 的颗粒整

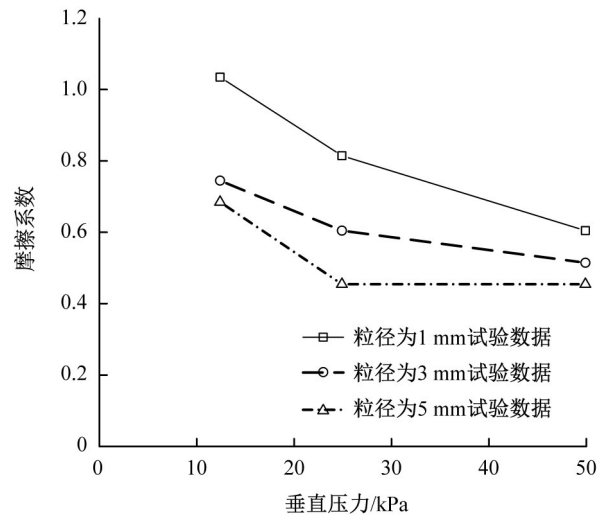


图6 摩擦系数 - 垂直压力关系曲线

Fig.6 Curves of Friction Coefficient and Vertical Pressure

体集合剪切系数由 0.73 降为 0.5, 粒径为 5 mm 的颗粒整体集合的剪切系数由 0.67 降为 0.45。研究结果表明, 垂直压力对 EPS 颗粒整体集合抗剪强度的影响随 EPS 颗粒粒径和垂直压力的增大而减弱。

### 3 总结

1) EPS 颗粒整体集合的剪应力随剪切位移的增加而增大, 表现为硬化型。

2) 当 EPS 颗粒粒径从 1 mm 增加至 5 mm 时, 试样的内聚力从 8.1 kPa 减小到 2.75 kPa; 内摩擦角随粒径的增加而略有减小, 从 41.17° 下降到 36.85°。

3) 随着垂直压力的增大, 相同粒径下 EPS 颗粒整体集合的压缩量增大, 从而 EPS 颗粒变形较大, 颗粒间的接触面积越大, 颗粒间的摩擦较明显, 因而 EPS 颗粒散体的抗剪强度增大。

4) 相同垂直压力下, 随着 EPS 颗粒粒径的减小, EPS 颗粒在垂直压力的作用下填补 EPS 颗粒整体集合的空隙, 接触面积增大, 抗剪强度增大。

#### 参考文献:

[1] DUSKOV M. Materials research on EPS20 and EPS15 under representative conditions in pavement structures[J]. Geotextiles and Geomembrances, 1997, 15: 147-181.  
 [2] TAKASHI T, ALI P, NOBUYUKI Y. Development of a geomaterial from dredged bay Mud[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 13(2): 152-160.

- [3] HOU T S. Influence of expanded polystyrene size on deformation characteristics of light weight soil[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(11): 3320-3328.
- [4] GAO H M, LIU J Y, LIU H L. Geotechnical properties of EPS composite soil[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 5: 69-77.
- [5] TSUCHIDA T, KANG M. USE of lightweight soil method in seaport and airport construction project[C]// Proceeding of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials, 2002.
- [6] 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.
- [7] ABDELRAHMAN G E. Lightweight fill using sand, polystyrene beads and cement[C]// Proceedings of The Ice-Ground Improvement, 2010, 163(2): 95-100.
- [8] NICHOLAS T R. Characterization of expanded polystyrene (EPS) and cohesive soil mixtures[M]. 1992 Dutch Open(tennis). Chrono Press, 2012.
- [9] EDINÇLILER A, ÖZER A. Effects of EPS bead inclusions on stress-strain behaviour of sand[J]. Geosynthetics International, 2016, 21: 89-102.
- [10] SHIRAZI A N, HAYDARIAN H, NASEHI S A. Shear and Compression Behaviors of Sandy and Clayey Soils Mixed with Different Sizes of Expanded Polystyrene Beads[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(6): 3823-3830.
- [11] LI M D, WEN K J, LI L, et al. Mechanical properties of expanded polystyrene beads stabilized lightweight soil[J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 13(3): 459-474.
- [12] DENG A, XIAO Y. Shear behavior of sand-expanded polystyrene beads lightweight fills[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(S2): 174-179.
- [13] 罗会武, 陈培帅, 陈卫忠, 等. 不同颗粒级配钙质砂剪切特性研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2018, 35(4): 40-43.
- [14] 刘宇翼. EPS颗粒的堆积密度和颗粒密度相关性试验研究[J]. 煤炭技术, 2015(11): 320-322.
- [15] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准[S].
- [16] ABDELSALAM S S, AZZAM S A. Reduction of lateral pressures on retaining walls using geofabric inclusion[J]. Geosynthetics International, 2016, 23(6): 395-407.
- [17] OZER A T, AKAY O. Interface Shear Strength Characteristics of Interlocked EPS-Block Geofabric[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015: 04015156.
- [18] HORVATH J S. Expanded polystyrene (EPS) geofabric: an introduction to material behavior[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 13(4): 263-280.

(责任编辑 李新)