

EPS 粒径对轻量土抗剪强度的影响规律

侯天顺^{1,2}, 徐光黎²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了确定 EPS 粒径对轻量土抗剪强度的影响, 通过直剪试验研究了水泥掺入比 12%、20%, EPS 颗粒体积比 40% 的 3 种 EPS 粒径混合土的抗剪强度特性。结果表明: 轻量土的剪应力-剪切位移关系曲线有硬化、软化两种形态, 取决于水泥掺入比、法向应力等因素。抗剪强度包线为折线型包线, 与传统结构性土体包线形态一致。水泥掺入比与 EPS 颗粒体积比相同时, 随着 EPS 粒径增大, 轻量土密度不变, 抗剪强度减小, 单价降低, 但强度衰减率远远低于单价降低率; 剪切面上 EPS 发生剪缩与剪断, 受水泥掺入比、EPS 粒径的控制; 黏聚力随 EPS 粒径增大而减小, 内摩擦角没有显著变化规律。轻量土剪切破坏过程, 可以划分为变形协调、逐渐破损、纯摩擦 3 个阶段。提出了固化土、EPS 3 界面接触抗剪强度模型, 从理论上证明了混合土强度随 EPS 粒径增大而衰减的规律。根据混合土的强度衰减率低于单价降低率, 推荐实际生产过程中可以采用 3~5 mm 的 EPS 球粒, 进行配方寻优, 适当降低造价。

关键词: 轻量土; 抗剪强度; EPS; 粒径; 直剪试验

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)10-1634-08

作者简介: 侯天顺(1981-), 男, 湖北省郧西县人, 博士, 讲师, 主要从事土力学基本理论与土体工程性质方面的教学与科研工作。E-mail: houtianshunyx@sina.com。

Influence law of EPS size on shear strength of light weight soil

HOU Tian-shun^{1,2}, XU Guang-li²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Lab of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: To determine influence of EPS (Expanded polystyrene) size on shear strength of light weight soil, the shear strength characteristics of mixed soil (cement mixed ratio of 12% and 20% and EPS volume ratio of 40%) with three kinds of EPS sizes are studied by means of direct shear tests. The results show that there are two types of shear stress-shear displacement relation curves: strain hardening and strain softening, and they are decided by cement mixed ratio, normal stress and so on. Its shear strength envelope is broken line, and it has the same shape as that of traditional structural soil. When the cement mixed ratio and EPS volume ratio are the same, with the increase of the EPS size, the wet density of light weight soil is constant, the shear strength decreases, the unit price reduces, but the strength reduction rate is far below the reduction rate of the unit price. Shear contraction or shear fracture may occur in EPS on shear planes, and it is decided by the cement mixed ratio and EPS size. Cohesion decreases with the increase of the EPS size, and internal friction angle has no obvious variation law. Shear failure processes of light weight soil can be divided into three stages: deformation coordination, progressive damage and pure friction. A shear strength model for 3 interfaces (stabilized soil-stabilized soil, stabilized soil-EPS, EPS-EPS) is brought forward. The strength reduction law of light weight soil with the increase of the EPS size is theoretically proved. According to the fact that the strength reduction rate is far below the reduction rate of unit price, EPS beads whose diameter is 3-5 mm should be used in construction, and prescription can be optimized, then the cost can be reduced appropriately.

Key words: light weight soil; shear strength; EPS; size; direct shear test

0 引言

从某种意义上说, 人类社会发展史实际上是一部破坏生态环境与耗费自然资源的历史。从氟氯化化合物到南极上空的臭氧空洞, 从二氧化碳气体到全球变

暖, 从两极冰川融化到马尔代夫危机, 从京都议定书

基金项目: 国家自然科学基金项目(40572152); 生物地质与环境地质教育部重点实验室开放基金项目(BGEGF200814)

收稿日期: 2010-05-25

到哥本哈根会议，说明有害流体造成的生态破坏与环境污染，已经引起了全世界人们的高度关注。但是，

表 1 黏土基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of clay									
天然密度	比重	含水率	塑限	液限	塑性指数	液性指数	重度	孔隙比	最优含水率
$\rho /(\text{g cm}^{-3})$	G_s	$w/\%$	$w_p/\%$	$w_L/\%$	$I_p/\%$	I_L	$\gamma /(\text{kN m}^{-3})$	e	$w_{op}/\%$
2.055	2.73	20.20	21.88	39.36	17.49	-0.096	20.55	0.597	23.0

如建筑弃土、废弃塑料等固体废物似乎还没有引起人们足够的重视。随着国民经济的快速发展，我国将进入大规模开发利用城市地下空间的新时期，其中建筑弃土就是其面临的主要环境问题之一。同时，伴随人们生活水平的提高，人们越来越青睐塑料制品，尤其是塑料包装材料的丢弃造成了严重的白色污染。目前，对于建筑弃土、废弃塑料，人们已经采取了很多办法进行回收利用，但是相当部分还是堆放、填埋于大中城市近郊或农村，存在很多安全隐患。而轻量土则能大规模的消纳弃土与塑料颗粒，体现了一种“减重增强”的原创性土体改良理念，具有广泛的应用前景。

轻量土具有轻质性、自立性、耐压性、耐久性、缓冲性、施工性、隔热性、经济性、环境性等优点，它的一切土力学参数均可以通过配合比改变而进行调节。轻量土主要有 4 类：EPS，发泡颗粒混合轻量土，气泡混合轻量土，次生材料混合轻量土。轻量土应用于岩土工程领域，最初源于泥炭、炭灰、火山灰、火山凝灰岩、浮石等天然材料。1965 年，EPS 在挪威作为防冻材料登上了历史的舞台^[1]。1985 年在奥斯陆召开的国际道路会议上公开了该项技术，从此 EPS 在瑞典、法国、加拿大、荷兰、日本等国也得到广泛的应用^[1-2]。20 世纪 80 年代日本等国开始研究发泡颗粒混合轻量土与气泡混合轻量土。关于发泡颗粒混合轻量土较早的报道是 1989 年日本期刊《土と基礎》^[3]。可以这样说，轻量土兴起于挪威，在日本则得到了空前的发展^[3-8]。1989 年以后，翻译者翻译了一些国外轻量土技术应用资料^[9-12]，但是很遗憾并没有引起国人的关注。2001 年左右，马时冬^[13]、刘汉龙^[14]、陈忠平^[15]、顾欢达^[16]、朱伟^[17]、徐光黎^[18]等一批留日学子学成归来，将轻量土技术引入中国，引发了国人的研究热潮^[1-2, 19-20]。

马时冬以 1~3 mm 球粒，1~3 mm 与 1~5 mm 碎粒，0.5 mm×4 mm×8 mm 与 0.5 mm×4 mm×16 mm 片状的 EPS 颗粒制备砂土轻量土，认为密度 1.0 g/cm³ 左右，水泥掺量 6%~8%，水灰比 1，添加 1~3 mm EPS 球粒与碎粒的 SLS 具有较好的工程应用前景^[13]。而其他研究者基本上都是采用 1~3 mm 的 EPS 球粒进行试验^[11-2, 13, 16, 20]，粒径大于 3 mm 的 EPS 球粒对轻量土抗剪强度的影响规律研究，国内未见相关报道。在轻质材料体积相当的前提下，如果采用更大粒

径的 EPS 球粒，而不会显著降低混合土的力学特性，那么就可以大规模生产超轻材料获得轻量土，极大的降低工程造价，具有重要的理论与现实意义。本着变废为宝与节约资源的思想，本文通过直剪试验研究不同 EPS 粒径对轻量土抗剪强度的影响规律。

1 试验概况

为了让试验具有代表性、可重复性、可对比性，试验用土取自武昌关山超市附近一基坑约 5 m 深处（原生土），为典型的关山黏土，深黄色，铁质含量较高，非常坚硬，基本物理参数见表 1。以干土质量为标准，将黏土烘干以后进行粉碎，然后过 1 mm 筛，过滤掉少量杂物与碎石。轻质材料有 3 种粒径的 EPS 颗粒，具体参数见表 2。水泥为华新水泥有限公司制造的华新堡垒牌 32.5 复合硅酸盐水泥。水为普通自来水。

表 2 EPS 颗粒基本物理参数

Table 2 Basic physical parameters of EPS			
形态	粒径 d/mm	纯颗粒密度 $\rho_e /(\text{g cm}^{-3})$	堆积体密度 $\rho_{堆} /(\text{g cm}^{-3})$
球粒	2~3.5	0.038	0.025
	3.5~5	0.010	0.0066
	5~6	0.0086	0.0053

按照配比先把水泥倒入干土中，用调土刀把二者强制式搅拌 5 min，直到拌匀。再加水，把水泥土搅拌 5 min，直到形成均匀水泥浆体。然后，加入 EPS 颗粒，强制式搅拌 10 min，制得均匀的轻量土。采用质量控制，用 2000 g 电子称称量预定好的混合土，将其填入制备重塑土环刀样品的模具中，模具装料之前，先在内壁均匀涂一层凡士林。然后用橡胶锤击实样品，并脱模装入已经涂好凡士林的环刀，两端修平，样品见图 1。将带环刀的样品送入标准养护箱内养护，养护温度为 20±2 ℃，湿度>95%，养护 24 h 后脱模，再放入养护箱中养护到 28 d。取样后，对试样进行抽气饱和 2 h，浸水 24 h 后，放在标准固结仪上依照 50，100，200，300 kPa 浸水固结 24 h，再按照规范^[21]要求在直剪仪上进行固结快剪试验。

为了研究不同粒径对轻量土抗剪强度的影响，采用了 12%，20% 高低剂量不同的水泥掺入比，EPS 颗粒占轻量土的体积百分数均为约 40%，具体方案见表

3. 为了使探索的结果尽可能的具有一般性, 每个配比

的样品 3 组, 每组 4 个。



图 1 抽气饱和后不同 EPS 粒径的轻量土

Fig. 1 Light weight soil with different EPS sizes after pumped saturation

表 3 试验方案

Table 3 Test schemes

水泥掺入比 $a_c/\%$	EPS 颗粒掺入比 $a_e/\%$	含水率 $w/\%$	龄期 T/d	湿密度 $\rho/(g\ cm^{-3})$
12	2 ($d=2\sim3.5\ mm$)	40	28	1.1567
12	0.5263 ($d=3.5\sim5\ mm$)	40	28	1.1456
12	0.4526 ($d=5\sim6\ mm$)	40	28	1.1452
20	2 ($d=2\sim3.5\ mm$)	40	28	1.1937
20	0.5263 ($d=3.5\sim5\ mm$)	40	28	1.1828
20	0.4526 ($d=5\sim6\ mm$)	40	28	1.1823

2 试验结果与分析

在试验过程中, 出现了新的问题, $a_c=12\%$, $a_e=0.4526\%$ 这一配比的试样在抽气饱和 2 h、浸水 24 h 后取样时, 结构松散, EPS 发生了强烈的收缩变形, 与固化土之间形成了明显的界面分离, 脱模后固化土骨架完全坍塌, 导致试验失败, 见图 1 (a)。另外, $a_c=12\%$, $a_e=0.5263\%$ 的试样 EPS 也出现了略微收缩, 但骨架仍能完整。为此, 重新制备试样, 对 $a_c=12\%$ 的 3 个配比的试样采用浸水饱和的方法, 其它步骤同上。浸水饱和的方法可行, 3 种粒径的轻量土没有出现 EPS 与固化土界面分离现象。高水泥剂量的试样采用抽气饱和和一切正常, 见图 1 (b)。EPS 粒径的大小直接关系到土的工程性质, 而且极大地影响工程造价, 深入研究尤为必要。

2.1 不同 EPS 粒径对剪应力 - 剪切位移关系的影响

试验结果表明: 轻量土的剪应力 - 剪切位移关系曲线有硬化、软化两种形态, 取决于水泥掺入比、法向应力等因素。浸水饱和的试样在图 2 中单独标记, 其它均为抽气饱和和试样, 下文类同。由图 2 知:

(1) 当 $a_c=12\%$ 时, 抽气饱和与浸水饱和对轻量土抗剪强度影响很小, 剪应力 - 剪切位移关系曲线基本上重合。结合图 1 知, $a_c=12\%$ 时, 随着 EPS 粒径增大, 固化土与 EPS 出现界面分离的现象越发明显, 最

终导致含有 5~6 mm EPS 的轻量土抽气饱和后结构破坏, 但是 $a_c=20\%$ 的不同粒径的轻量土却一切正常。这些现象说明, 混合土的强度来源于固化土的强度, 而 EPS 主要扮演减重角色, 而且 EPS 这种泡沫塑料是由骨架与气孔组成, 内部同时存在闭式气孔与开式气孔。当水泥剂量较低时, 固化土结构相对较弱, 同体积 EPS 而粒径较大者相当于内部孔隙更多, 抽气以后, EPS 体内气体逸散, EPS 收缩。EPS 收缩以后, 导致 EPS 与固化土出现界面分离, 低剂量水泥的混合土本身结构很弱, 大粒径导致 EPS 界面之间的结点固化效应微弱, 抽气作用下孔隙很快贯通整个土体, 所以低剂量水泥的混合土容易出现 EPS-固化土界面分离现象, 粒径越大越显著, 反之高水泥剂量的混合土正常。无论是抽气饱和, 还是浸水饱和, EPS 具有憎水性, 而水泥的胶结作用致使水无法完全进入固化土内部孔隙中, 即无法饱和。所以两种饱和方法不会引起强度显著差别。

(2) 当 $a_c=12\%$ 时, 法向应力 $\leq 100\ kPa$, 剪应力 - 剪切位移关系曲线均为软化型, 而法向应力 $\geq 200\ kPa$ 则是硬化型。而 $a_c=20\%$ 时, 所有曲线都是软化型。说明轻量土类似于超固结黏土与密砂, 曲线类型受到自身结构强度与法向应力控制。

(3) 水泥掺入比、EPS 体积比相同的条件下, 随

着粒径的增大, 相同法向应力下对应的抗剪强度有不

同程度的降低。

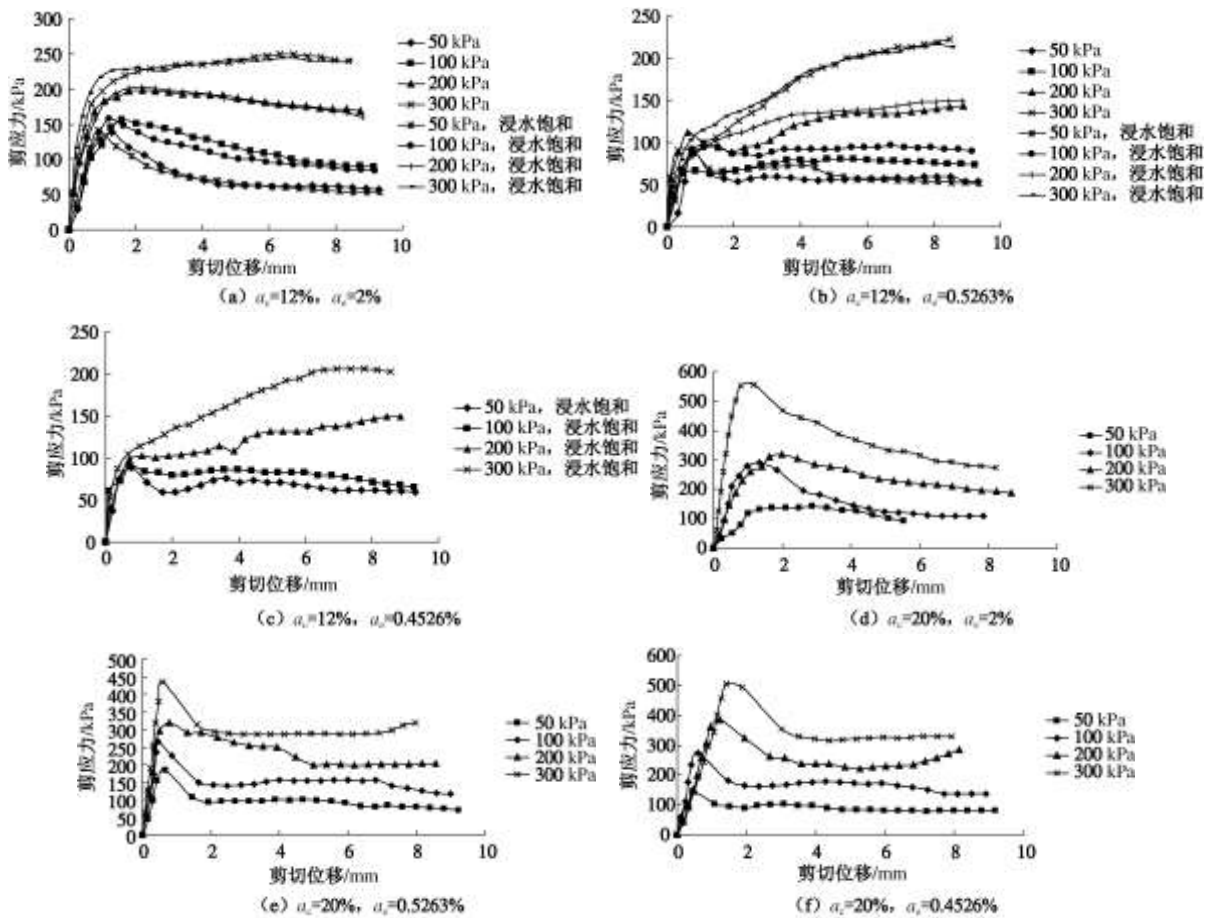


图2 不同 EPS 粒径轻量土的剪应力 - 剪切位移关系曲线

Fig. 2 Shear stress-shear displacement relation curves for light weight soil with different EPS sizes

2.2 不同 EPS 粒径对抗剪强度包线的影响

由图 3 知, 水泥掺入比、EPS 粒径对轻量土的抗剪强度包线有很大影响。 $a_c=12\%$ 时, 两种饱和方法对应包线基本重合。同体积 EPS, 高、低水泥剂量对轻量土黏聚力影响很大, 对内摩擦角影响也较大。同水泥掺入比、同体积 EPS, 随着粒径增大, 黏聚力迅速衰减。值得关注的是, 包线的折线型变化与传统结构性土体一致, 印证了混合土的确属于结构性土体。折线交点反应了超固结状态向正常固结状态的转换, 对应着土体强度由黏聚力体现向由内摩擦角体现的转换。

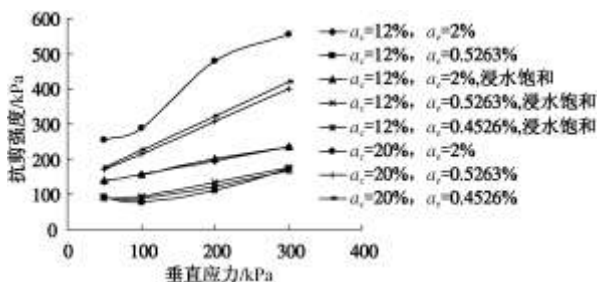


图3 不同 EPS 粒径轻量土的抗剪强度包线

Fig. 3 Shear strength envelopes of light weight soil with different

EPS sizes

2.3 不同 EPS 粒径对抗剪强度的影响

为了研究 EPS 粒径对轻量土抗剪强度的影响规律, 把 2~3.5 mm、3.5~5 mm、5~6 mm 在图中依次记为 2.75, 4.25, 5.5 mm。由图 4 知, 轻量土抗剪强度随 EPS 粒径增大逐渐衰减, 不同法向应力条件下强度不同, 但是相同水泥剂量时衰减率基本上相同。以 2~3.5 mm 的 EPS 混合土强度为基准, $a_c=12\%$ 时 3.5~5 mm 的 EPS 混合土强度衰减率为 28.87%~42.35%, 均值 36.26%; 5~6 mm 的 EPS 混合土强度衰减率为 25.94~49.87%, 均值 38.16%。 $a_c=20\%$ 时 3.5~5 mm 的 EPS 混合土强度衰减率为 21.80%~32.51%, 均值 27.24%; 5~6 mm 的 EPS 混合土强度衰减率为 25.15%~35.76%, 均值 30.53%。水泥剂量相同, 同体积 EPS, 粒径越大, 内部孔隙越多, EPS 实体物质越少, 混合土的强度当然会减小。另外, 图 4 中绘制的是部分原始数据, 并非各种配比时平均抗剪强度, 单点误差导致极少数强度随粒径增大而增大的假象。

由图 5 知, 3 种粒径的轻量土剪切面上的 EPS 都

发生了强烈的剪切收缩变形。2~3.5 mm 的 EPS 在混合土中分布均匀, 剪切半面非常完整, 剪切面上 EPS 被剪缩(空气逸散, 压剪成扁平状, 但没有被剪断)发生定向排列; ≥ 3.5 mm 的 EPS 粒径越大, 在混合土中分布越不均匀, 剪切半面越不完整, 越发松散, EPS 剪切定向特征不明显, 没有显著的剪缩现象, 但是却发生了剪断(EPS 被剪切分成两半), EPS 粒径越大, 剪断效应越明显。另外, $a_c=12\%$, EPS 粒径 ≥ 3.5 mm 的轻量土破坏后, 结构非常松散, 不同粒径的轻量土非剪切面上 EPS 基本上都呈球状, 这些说明 EPS 变形及破坏特征在低法向应力下取决于自身结构强度(水泥剂量)与剪应力。

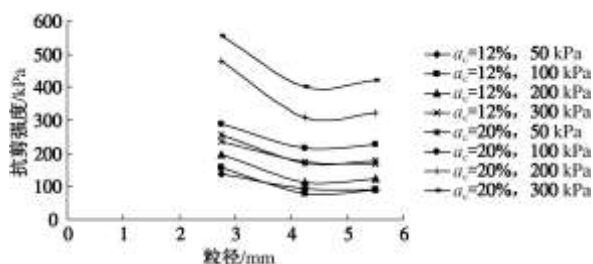


图 4 抗剪强度衰减曲线

Fig. 4 Reduction curves of shear strength



图 5 剪切破坏后的轻量土

Fig. 5 Light weight soil after shear failure

由图 6, 7 知:

(1) 轻量土的黏聚力 c 随 EPS 粒径增大而逐渐衰减, $a_c=12\%$ 时衰减率最大为 47.06%, $a_c=20\%$ 时衰减率最大为 30.12%, 说明水泥剂量越高, 胶结作用越明显, 自身结构强度越大, 能够大大弱化 EPS 粒径增大带来的副作用。

(2) 轻量土的内摩擦角 φ 随 EPS 粒径增大没有显著变化规律, $a_c=12\%$ 时, $\varphi \in [17.95^\circ, 21.12^\circ]$; $a_c=20\%$ 时, $\varphi \in [42.54^\circ, 44.34^\circ]$ 。

(3) $a_c=12\%$ 时, 抽气饱和与浸水饱和对应的强度参数基本相同。

(4) EPS 体积相同时, 水泥剂量从 12% 增大到

20%, 对应的黏聚力、内摩擦角都增大到约为原来的 2 倍, 实际上水泥这种细粒物质克服摩擦的性能是较弱的, 从一个侧面反映了不能完全分离 c , φ 来探讨土的抗剪强度问题。

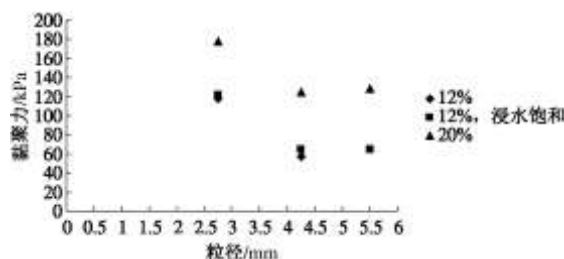


图 6 黏聚力与 EPS 粒径关系曲线

Fig. 6 Relation curves between cohesion and EPS size

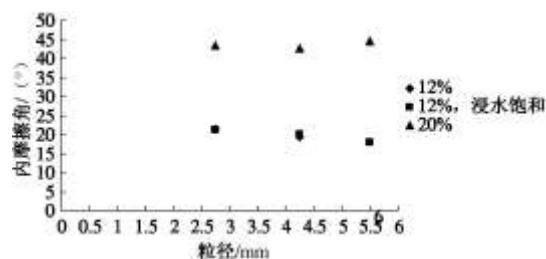


图 7 内摩擦角与 EPS 粒径关系曲线

Fig. 7 Relation curves between internal friction angle and EPS size

2.4 不同 EPS 粒径对轻量土密度、强度、单价的影响

探讨这一课题的初衷在于土壤改良, 降低造价, EPS 粒径增大可以降低造价, 但会减弱, 问题是单价降低率与强度衰减率差别有多大。下面为了讨论问题的方便, 把轻量土养护 28 d 湿密度、法向应力 100 kPa 时的抗剪强度、单价绘制于同一张图上。材料价格参考现在市场价, 废弃黏土不计价, EPS 颗粒 6000 元/t, 水泥 300 元/t, 水 2 元/m³。

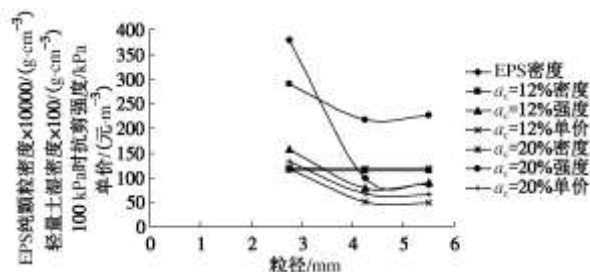


图 8 EPS 粒径对轻量土密度、强度、单价的影响

Fig. 8 Influence of EPS size on density, shear strength and unit price of light weight soil

由图 8 知, 相同剂量的水泥, 同体积 EPS 的情况下, 随着 EPS 粒径增大, EPS 纯颗粒密度急速衰减, 最大衰减率达 77.37%, 轻量土湿密度不变。 $a_c=12\%$

时, EPS 粒径从 2~3.5 mm 增加到 3.5~5 mm, 5~6 mm, 混合土相应强度衰减率为 36.26%, 38.16%, 相应单价降低率 56.39%, 59.21%; $a_c=20\%$ 时, EPS 粒径从 2~3.5 mm 增加到 3.5~5 mm、5~6 mm, 相应强度衰减率为 27.24%, 30.53%, 相应单价降低率 48.90%, 51.35%。这些事实说明: ①EPS 减重属于体积效应, 与粒径无关; ②高水泥剂量可以大大弱化软夹杂带来的强度损失; ③无论水泥剂量高低, 随着 EPS 粒径的增大, 混合土强度衰减率远低于单价降低率, 这些说明现实工程中应该选择适宜的大粒径轻质材料。

3 EPS 粒径对抗剪强度的影响机理探讨

3.1 剪切过程理论探讨

通过大量试验分析, 从混合土中抽取一个微元体为研究对象, 轻土剪切破坏过程可以表示为图 9。由图知, 轻土主要是由固化土与 EPS 组成, 固化土通过结点固化效应形成坚固的网状土骨架, 而 EPS 作为软夹杂向混合土引入孔隙, 起到减重作用。实际上, 轻土的很多独特的物理力学特性在于引入的 EPS, 它轻质、具有一定强度、破坏应变很大, 憎水性, 理想弹塑性等等。固化土的破坏应变一般在 2% 以内, 而 EPS 的破坏应变很大, 所以剪切初始状态, 固化土与 EPS 主要是变形协调, 强度主要由固化土的黏聚力承担。随后进入逐渐破损阶段, 剪切面上的 EPS 变形越来越大, 待固化土中剪切面完全贯通的那一刻, 强度达到峰值。剪切面贯通后, 剪切面上的 EPS 与粗糙不平的固化土很快会被剪断(水泥剂量较高形成牢固的骨架包裹 EPS, 才会发生 EPS 剪断, 反之 EPS 只会剪缩)。随后进入纯摩擦阶段, 强度基本上完全来源于混合土上、下剪切面之间的纯摩擦作用, 在法向应力不变时, 摩擦性能是一定的, 所以出现了图 2 中各试样残余强度趋向某一定值的现象。

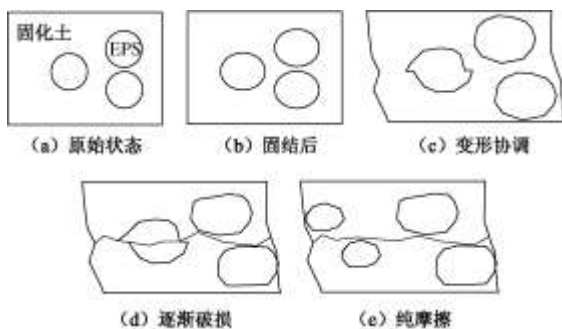


图 9 轻土剪切破坏过程

Fig. 9 Shear failure process of light weight soil

3.2 抗剪强度模型与讨论

直剪试验虽然人为固定剪切面, 试验本身存在诸

多缺陷, 但是并不妨碍我们对问题的探索。从上分析知, 轻土的抗剪强度来源主要有 3 部分: 固化土之间的抗剪强度 τ_{ss} , EPS 颗粒之间的抗剪强度 τ_{ee} , 固化土与 EPS 颗粒之间的抗剪强度 τ_{se} , 见图 10。抗剪强度模型可以表示为: $\tau_f = \tau_{ss} + \tau_{ee} + \tau_{se}$ 。

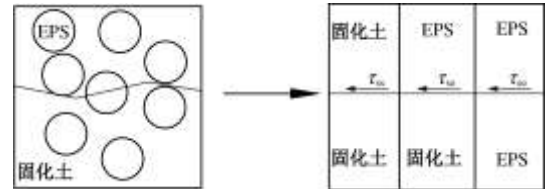


图 10 轻土抗剪强度模型

Fig. 10 Shear strength model for light weight soil

为了从理论上探讨 EPS 粒径对混合土强度的影响, 把混合土中的固化土、EPS 分解为 3 界接触: s-s, s-e, e-e。水泥剂量相同, 同体积 EPS 条件下, 假设 τ_{ss} 、 τ_{se} 与 EPS 粒径无关, 那么 EPS 粒径对轻土强度的影响问题转变为讨论 τ_{ee} 的问题。再假设 EPS 的强度与密度成正比, 即理论上存在 $\tau_{ee(2.75)} : \tau_{ee(4.25)} : \tau_{ee(5.5)} = \rho_e(2.75) : \rho_e(4.25) : \rho_e(5.5) = 1 : 0.2631 : 0.2263$ 。现在来看混合土在高、低水泥剂量条件下的实测强度变化规律(以法向应力 100 kPa 下的抗剪强度进行对比): $a_c=12\%$ 时, $\tau_f(2.75) : \tau_f(4.25) : \tau_f(5.5) = 1 : 0.5764 : 0.5012$; $a_c=20\%$ 时, $\tau_f(2.75) : \tau_f(4.25) : \tau_f(5.5) = 1 : 0.7819 : 0.7484$ 。理论分析与实测结果表明: 轻土的抗剪强度随 EPS 粒径增大逐渐衰减, 同时衰减程度受水泥剂量影响很大, 高水泥掺入比能够大大减小强度衰减率。

讨论:

(1) 不能用理论模型直接定量判定不同粒径的混合土强度, 因为 $\frac{(\tau_{ss} + \tau_{se}) + \tau_{ee1}}{(\tau_{ss} + \tau_{se}) + \tau_{ee2}} \neq \frac{\tau_{ee1}}{\tau_{ee2}}$ 。

(2) τ_{se} 与 EPS 粒径无关, 这一假设不合理。这一假设显然有悖于实际情况, 因为前面对 $a_c=12\%$ 的试样进行抽气饱和后, 发现 5~6 mm 的 EPS 轻土结构坍塌, 而小粒径的土则是正常的, 这至少说明了 EPS-固化土界面之间的相互作用体系与粒径有很大关系。但是问题自身是非常复杂的, 这些问题有待于进一步探究。

(3) 本文涉及到了轻质材料粒径对混合土强度影响的土力学基本课题, 增大粒径降低了造价, 但同时又降低了强度, 而增大水泥剂量就可以增强, 所以可以结合实际工程进行配方优化。

4 结 论

(1) 轻土的剪应力 - 剪切位移关系曲线有硬

化、软化两种形态,受水泥掺入比、法向应力等因素影响。轻浆土是一种结构性土体,其抗剪强度包线为折线型包线,与传统结构性土体包线形态一致。

(2) 以 2~3.5 mm 的 EPS 混合土抗剪强度为基准(EPS 体积比为 40%), $a_c=12\%$ 时 3.5~5 mm、5~6 mm 的 EPS 轻浆土强度衰减率依次为 36.26%, 38.16%; $a_c=20\%$ 时强度衰减率依次为 27.24%, 30.53%。剪切面上 EPS 发生剪缩与剪断,受水泥剂量、EPS 粒径的控制,混合土胶结结构越强, EPS 粒径越大, EPS 越容易发生剪断效应。

(3) 轻浆土黏聚力随 EPS 粒径增大而减小,内摩擦角随 EPS 粒径增大没有显著变化规律, $a_c=12\%$ 时, $\varphi \in [17.95^\circ, 21.12^\circ]$; $a_c=20\%$ 时, $\varphi \in [42.54^\circ, 44.34^\circ]$ 。

(4) 水泥剂量、EPS 体积相同时,随着 EPS 粒径增大, EPS 纯颗粒密度急速衰减,轻浆土湿密度不变,无论水泥剂量高低,混合土的强度衰减率远远低于单价降低率,实际工程中应该选择适宜的大粒径轻质材料。

(5) 在轻浆土中抽取了一个土单元,从理论上研究了轻浆土剪切破坏过程,可以划分为变形协调、逐渐破损、纯摩擦 3 个阶段。提出了轻浆土固化土、EPS 3 界面接触抗剪强度模型,从理论上证实了轻浆土随 EPS 粒径增大而强度逐渐衰减的规律。

(6) 水泥剂量过大以后,材料由内摩擦型材料向凝聚型材料转化,加之 EPS 粒径影响,实际试验过程中发现 $a_c=20\%$, EPS 粒径 ≥ 3.5 mm 的试样不均匀、试验结果离散性很大,为此数次重复制样,实际样品数量共 80 块,且都是在同一台直剪仪上测试。另外,发现粒径 ≥ 5 mm 的 EPS 颗粒,粒径过大,颗粒密度极小,材料拌制过程中极易上浮,塑性水泥土与 EPS 成“两张皮”,为此推荐实际生产过程中可以采用 3~5 mm 的 EPS 球粒,进行配方寻优,适当降低造价。

参考文献:

- [1] 董金梅. 聚苯乙烯轻质混合土工程特性的试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (DONG Jin-mei. Study on the engineering characteristic of light heterogeneous soil mixed expanded polystyrene[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [2] 姬凤玲. 淤泥泡沫塑料颗粒轻浆土力学特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (JI Feng-ling. Study on mechanical properties of light weight bead-treated soil made from silt[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [3] 山田純男, 長坂勇二, 西田登, 等. 発生土スチロール片と砂を混合した軽量土[J]. 土と基礎, 1989, 37(2): 25 - 30. (YAMADA S, NAGASAKA Y, NISHIDA N, et al. Foamed particle light-weight soil with sand[J]. Soil and Foundations, 1989, 37(2): 25 - 30. (in Japanese))
- [4] YAJIMA J, MYDIN S H. Mechanical properties of the unsaturated foam composite light-weight soil[C]// 4th International Conference on Unsaturated Soils. United States: American Society of Civil Engineers, 2006(147): 1639 - 1650.
- [5] YAJIMA J, MARUO S, OGAWA S. Deformation and strength properties of foam composite light-weight soil[J]. Doboku Gakkai Rombun Hokokushu, 1994(499): 197 - 205.
- [6] KIKUCHI Y, NAGATOME T, FUKUMOTO H, et al. Absorption property evaluation of light weight soil with air foam under wet sand condition[J]. Zairyo/Journal of the Society of Materials Science, 2008, 57(1): 56 - 59.
- [7] 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.
- [8] OH S W, LEE J, KWON Y C, et al. Bearing capacity of light weight soil using recycled styrofoam beads[C]// Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002, 12: 670 - 674.
- [9] 多孔聚苯乙烯材料施工法(EPS 施工法)[J]. 白敏华, 译. 铁道建筑, 1989(5): 40 - 41. (Construction method of porous expanded polystyrene(EPS method)[J]. BAI Min-hua, trans. Railway Engineering, 1989(5): 40 - 41. (in Chinese))
- [10] 村田修. 轻质土工材料 EPS[J]. 潘君牧, 译. 路基工程, 1991(2): 75 - 78. (MURATA S. Light-weight geomaterial-EPS[J]. PAN Jun-mu, trans. Subgrade Engineering, 1991(2): 75 - 78. (in Chinese))
- [11] 横田圣哉, 三嶋信雄. 泡沫混合轻浆土[J]. 于晓波, 译. 路基工程, 1997(4): 81 - 86. (YOKOTA, MISHIMA N. Foam light-weight soil[J]. YU Xiao-bo, trans. Subgrade Engineering, 1997(4): 81 - 86. (in Chinese))
- [12] 三木博史. 发泡空心颗粒混合轻浆土在海堤加高工程中的应用[J]. 于晓波, 译. 路基工程, 1998(2): 85 - 89. (MIKI H. Foamed particle light-weight soil and its application in seawall engineering[J]. YU Xiao-bo, trans. Subgrade Engineering, 1998(2): 85 - 89. (in Chinese))
- [13] 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. (in Chinese))
- [14] 刘汉龙, 朱伟, 高玉峰, 等. 一种轻质混合土及生产方法: 中国, CN1373261[P]. 2002-10-09. (LIU Han-long, ZHU Wei, GAO Yu-feng, et al. A sort of light-weight soil and its production method: China, CN1373261[P]. 2002-10-09. (in Chinese))
- [15] 陈忠平, 邓江, 王树林, 等. 一种轻质填土体结构及其施工方法: 中国, CN1422826[P]. 2003-06-04. (CHEN Zhong-ping, DENG Jiang, WANG Shu-lin, et al. A sort of light-weight filling structure and its construction method: China, CN1422826[P]. 2003-06-04. (in Chinese))
- [16] 顾欢达, 顾熙, 申燕, 等. 发泡颗粒轻质土材料的基本性质[J]. 苏州科技学院学报, 2003, **16**(4): 44 - 48. (GU Huan-da, GU Xi, SHEN Yan, et al. The fundamental properties of light soil mixed with foamed beads[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou, 2003, **16**(4): 44 - 48. (in Chinese))
- [17] 朱伟, 秦建设, 钟小春, 等. 一种土工实用的气泡发泡装置: 中国, CN2614776[P]. 2004-05-12. (ZHU Wei, QIN Jian-she, ZHONG Xiao-chun, et al. A sort of foam production device: China, CN2614776[P]. 2004-05-12. (in Chinese))
- [18] 徐光黎, 杨银湖. 轻量土及其在工程中的应用[J]. 地质科技情报, 2005, **24**(4): 94 - 98. (XU Guang-li, YANG Yin-hu. Light-weight soils and their applications[J]. Geological Science and Technology Information, 2005, **24**(4): 94 - 98. (in Chinese))
- [19] 黎冰. 动荷载下黏土与 EPS 颗粒混合轻质土的变形和强度特性试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (LI Bing. Experimental study on the deformation and strength properties of lightweight clay-EPS beads soil under cyclic loading[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [20] 侯天顺, 徐光黎. 发泡颗粒混合轻量土三轴应力 - 应变 - 孔压特性试验[J]. 中国公路学报, 2009, **22**(6): 10 - 17. (HOU Tian-shun, XU Guang-li. Experiment on triaxial pore water pressure-stress-strain characteristics of foamed particle light weight soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, **22**(6): 10 - 17. (in Chinese))
- [21] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. (Ministry of Water Resources, People's Republic of China. GB/T50123—1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: Chinese Plans Press, 1999. (in Chinese))