

文章编号: 1000-7598-(2007)05-1045-05

砂土 EPS 颗粒混合轻质土的物理力学特性

汤 峻¹, 朱 伟², 李明东¹, 姬凤玲³

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 南京 210098;
3. 深圳大学 土木工程系, 深圳 518060)

摘 要: 对以砂土为原料土、以水泥为固化材料的 EPS 颗粒混合轻质土进行了一系列室内试验。结果表明: 压实条件和含水率对其密度和强度有很大的影响, 存在适宜压实次数和最优含水率; 对施工含水率对其应力-应变关系的影响进行了分析, 得到在水灰比一定的情况下强度与水泥的添加量的线性关系。

关 键 词: 轻质土; EPS; 压实; 最优含水率; 无侧限抗压强度; 应力-应变关系

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Physico-mechanical properties of sand EPS beads-mixed lightweight soil

TANG Jun¹, ZHU Wei², LI Ming-dong¹, JI Feng-ling²

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Department of Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: A series of laboratory tests were carried out to investigate the physico-mechanical properties of EPS beads-mixed lightweight soil which is made of sand and treated with cement. Results show that the compaction and moisture content of the treated soil have significant effects on its density and strength. There exist suitable compaction times and optimum moisture content. The effect of the moisture content during sample preparation on the stress-strain relationship was analyzed and linear relationship was obtained between the strength and cement content with fixed water-cement ratio.

Key words: lightweight soil; EPS; compaction; optimum moisture content; unconfined compression strength; stress-strain relationship

1 前 言

EPS 颗粒混合轻质土就是在原料土中添加聚苯乙烯泡沫塑料 (EPS) 颗粒、固化材料和水混合搅拌后经过固化形成的轻质土工材料, 其英文名称有 EPS beads-mixed lightweight geomaterial^[1], or beads treated soil^[2], or stabilized light soil^[3]等, 译文也有多种, 泡沫塑料混合轻土^[4], 泡沫塑料轻质填土^[3, 5], 聚苯乙烯泡沫塑料路堤填料^[6]以及发泡颗粒混合轻土^[7]。笔者认为, “EPS 颗粒混合轻质土”较符合英文原意, 可以明确反映出其“轻质土”的本质, 说明其轻质填料为聚苯乙烯泡沫塑料颗粒, 亦包含用废弃泡沫塑料再生颗粒作为轻质填料的方法。

EPS 颗粒混合轻质土具有优良的物理力学性能: 密度小, 湿密度一般可以达到 1.0 g/cm^3 以下^[4];

强度高, 淤泥 EPS 颗粒混合轻质土的 28 d 无侧限抗压强度可达 400 kPa 以上^[4]; 压缩性小^[3]; 密度、强度、压缩模量都可以通过配方的改变进行调节^[3, 4]; 能够利用废弃泡沫塑料和建设废弃土, 兼顾环境问题^[5]; 经济性好^[8]。

马时冬^[3]对以中砂为原料土的 EPS 颗粒混合轻质土进行了试验研究, 分析了密度、无侧限抗压强度和变形特性间的相关关系, 比较了加球粒、碎粒和片粒泡沫塑料颗粒时, 材料性能的区别。姬凤玲等^[8]对疏浚淤泥固化土利用 EPS 颗粒进行了轻量化处理, 认为处理效果受到废弃淤泥的性质、固化材料的种类及添加量、轻质材料的粒径、形状等的影响, 得到的轻质土材料具有良好的经济性。马殿光等^[9]研究了利用废弃泡沫塑料再生 EPS 颗粒和淤泥制作的 EPS 颗粒混合轻质土的单轴压缩特性。

EPS 颗粒混合轻质土具有良好的轻质性, 可使

收稿日期: 2005-06-08

修改稿收到日期: 2005-09-12

作者简介: 汤峻, 男, 1981 年生, 硕士, 法国里尔科技大学工程师在读。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: tj81930@yahoo.com.cn

软土地基沉降、挡土墙土压力、高边坡稳定性等问题得到很好的解决。由于工程和现场材料的限制, EPS 颗粒混合轻质土应该使用就近可以获取的各种土材料进行制作, 因此对其在各种土材料条件下的制作工艺和力学性质的把握非常重要。在使用高含水率的淤泥和黏性土作为原料土制作 EPS 颗粒混合轻质土时, 一般考虑将水泥、黏土、EPS 颗粒搅拌成流动性浆体浇注施工, 而对于以低含水率的砂土或粉土为原料土制作的 EPS 颗粒混合轻质土则需碾压施工。

本文针对原料土为砂土的 EPS 颗粒混合轻质土, 通过室内试验的方法, 对其物理力学性质进行了研究, 分析了压实情况、含水率以及水泥的添加量对其密度、强度和应力-应变关系曲线的影响, 找出了适宜压实次数及最优含水率, 并发现在水灰比一定的情况下强度与水泥的添加量可用线性关系拟合。

2 试验方法

2.1 原材料

EPS 颗粒混合轻质土的原材料包括原料土、泡沫塑料颗粒、水和固化材料。本次试验研究中使用的原料土为砂土, 初始含水率为 0.1%, 松散堆积密度为 1.54 g/cm^3 。颗粒分析试验结果见图 1, 即细粒(粒径小于 0.075 mm)含量大于 5%, 粒径大于 0.25 mm 的颗粒含量为 88.8%, 而粒径大于 0.5 mm 的颗粒含量为 23.4%, 属于中砂。 $C_u = 1.58$, $C_c = 0.96$, 为级配不良砂^[10]。泡沫塑料使用的是发泡聚苯乙烯(EPS)颗粒, 圆球状, 粒径为 $1\sim 3 \text{ mm}$, 堆积体密度为 0.0368 g/cm^3 , 颗粒密度为 0.0613 g/cm^3 。采用南京江南水泥有限公司生产的《钟山牌》C32.5 普通硅酸盐水泥作为单一型固化材料, 水使用自来水。

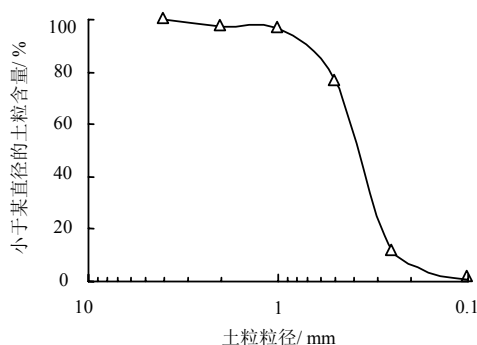


图 1 原料土粒径分布曲线

Fig.1 Particle size distribution curve

2.2 配比

试验中所采用的配比为每立方米砂中添加 1 m^3 的泡沫塑料颗粒(按堆积体体积进行添加)、 $100\sim 300 \text{ kg}$ 水泥和 $100\sim 300 \text{ L}$ 水。对于本文下面叙述需要涉及的配比, 其代号及原材料构成见表 1。

表 1 试样的原材料构成

Table 1 Primary material components of specimens

配比代号	原材料			
	砂土/ cm^3	EPS 颗粒/ cm^3	水/ mL	水泥/ g
Case-1	1 000	1 000	100	100
Case-2	1 000	1 000	150	100
Case-3	1 000	1 000	200	100
Case-4	1 000	1 000	250	100
Case-5	1 000	1 000	300	100
Case-6	1 000	1 000	100	100
Case-7	1 000	1 000	150	150
Case-8	1 000	1 000	200	200
Case-9	1 000	1 000	250	250
Case-10	1 000	1 000	300	300

2.3 制样与养护

制样时按一定体积量取砂和 EPS 颗粒, 按设计配比加入水泥和水, 水泥按质量控制。通过机械强制式搅拌机拌和后, 形成均匀的拌和物。将拌和物通过三轴击样器(锤重 0.307 kg , 自由落下高度 25 cm), 分 3 层击实的成型方法装入直径为 39.1 mm 、高为 80 mm 的圆柱形铜制模具中, 置入标准养护箱中养护(温度为 $20\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, 湿度大于 90%), 养护 24 h 后脱模, 再放入标准养护箱内进行养护, 到设计龄期(7 d, 28 d)后进行试验。

2.4 物理力学性质试验方法

EPS 颗粒混合轻质土应用时最主要的性质是强度和密度, 无侧限抗压强度试验是确定这种土材料力学性质的主要方法之一。本文参照国家《土工试验方法标准》^[11]进行无侧限抗压强度试验, 应变速率为 1.18 mm/min 。试验中每组 3 个试样, 进行平行试验。强度为各试样的峰值强度, 密度为试样养护时的湿密度, 均取 3 个试样的平均值。

3 物理力学特性

密度试验结果表明, EPS 颗粒混合轻质土的养护湿密度在 $1.0\sim 1.22 \text{ g/cm}^3$ 之间, 只有普通土的 60%~70%, 体现了其轻质性。无侧限抗压强度试验结果表明, EPS 强度在 $235\sim 1\ 665 \text{ kPa}$ 范围变化, 既反映了其高强度, 也充分体现了其强度可调节性的优点。它们受到压实情况、含水率、固化材料的添加量的影响, 分述如下。

3.1 击实的影响

在使用砂土作为原料土制作 EPS 颗粒混合轻质土时，如果不进行压实，EPS 颗粒混合轻质土的结构很松散，强度很低，如果过量压实，又可能会增大密度，影响其轻质性，因此需要对适宜的压实条件进行研究。

在试验室内是通过击实来模拟其现场的压实施工。由于击实能量过大会引起泡沫塑料颗粒破碎，所以，选择较小的能量进行击实（约为轻型击实试验击实功的 1/25~1/3）。采用 Case-2 的配比，使用三轴击样器进行击实，每层厚度为 2.7 cm，分 3 层击实，每层击实 1, 2, 4, 8 次，换算得出的击实功在 23.5~187.9 kJ/m³ 范围内。

3.1.1 密度和强度

由图 2 可见，(1) 在泡沫塑料、水、水泥添加量相同的情况下，EPS 颗粒混合轻质土的密度会因为击实功不同而不同。在击实功较小时密度随着击实功的增大而增大较快，而后逐渐减缓，在击实 4 次和 8 次时密度相差很小，说明层高为 2.7 cm 时 4 次的密度提高的潜力已经很小。(2) 对于 Case-2 配比的 EPS 颗粒混合轻质土，在本试验中的最大密度为 1.15 g/cm³，仍可起到较好的轻质效果。

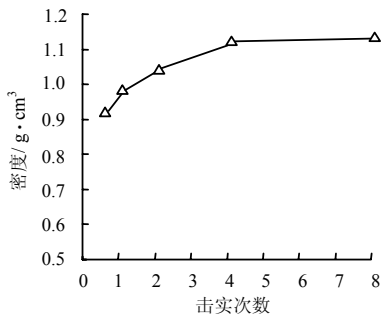


图 2 击实次数与密度的关系

Fig.2 Relationship between compaction times and density

由图 3 可见，在泡沫塑料、水、水泥添加量相同的情况下 EPS 颗粒混合轻质土的无侧限抗压强度会因为击实功的不同差别很大。击实 4 次时无侧限抗压强度达到击实 1 次的 2 倍，在 4 次以后强度随击实功增加而增加的速度减慢，在击实次数为 4 次和 8 次之间，无侧限抗压强度相差很小，这说明层高为 2.7 cm 时 4 次标准击实功下的强度提高的潜力已经很小。

上述现象产生的原因是：在击实功作用下 EPS 颗粒混合轻质土的颗粒之间的间隙减小，密度增大。同时，颗粒之间的接触面积增加，水泥反应生成的胶结物使接触面连接更牢固。对于任意一个截面

处，整个截面上的黏结力随之而增加，明显地提高了无侧限抗压强度，但当击实功达到一定的数量时，由于试样已经被充分压密，所以强度和密度的变化不明显。

根据无侧限抗压强度随击实功变化的情况，并参考密度的变化情况，笔者认为砂土 EPS 颗粒混合轻质土存在适宜击实次数，也就是在取得较高强度的前提下不浪费击实功，本次的试验适宜击实次数为 3~4 次。

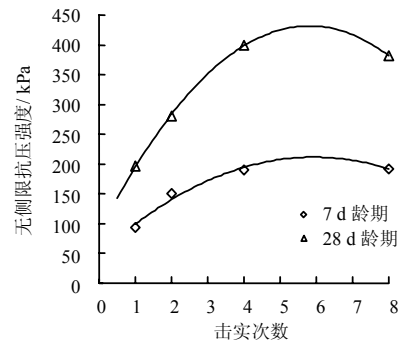


图 3 击实次数与强度的关系

Fig.3 Relationship between compaction times and strength

3.1.2 应力-应变关系曲线

图 4 为 Case-2 配比、不同击实次数的单轴压缩应力-应变曲线。可以看出，在击实次数从 1 次变到 4 次的范围内试样的强度和刚度都增加，塑性降低，与此相应试样的破坏应变减小。在击实次数为 4 次和 8 次之间时，试样的强度、刚度和破坏应变相差不大。

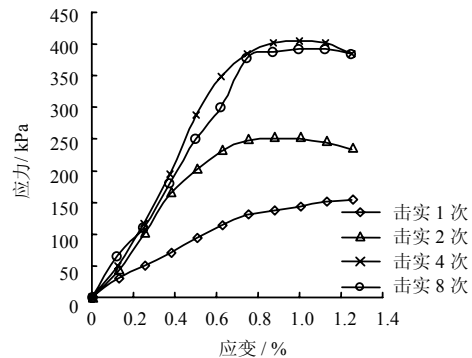


图 4 击实次数对应力-应变关系的影响

Fig.4 Effect of compaction times on stress-strain relationship

3.2 含水率的影响

试验中使用的砂为干砂，在制样过程中发现，添加水使砂的含水率为 6.5 %且水泥添加量介于 100~300 g 时，拌和物不够湿润，比较松散，即使

在击实后 24 h, 颗粒间黏结力较小, 在拆样时仍有砂粒和泡沫塑料颗粒脱落; 当添加水使砂的含水率为 19.5 % 时, 在击实过程中出现水泥浆渗出的现象, 即“泌水”现象; 当添加水使砂的含水率为 26 % 时, 泌水现象非常严重, 造成了水泥的损失和强度的降低。鉴于此, 笔者认为砂土 EPS 颗粒混合轻质土存在适宜含水率。本次试验适宜含水率在 9.75 % ~ 19.5 % 之间。

3.2.1 密度和强度

图 5 为不同含水率对砂土 EPS 颗粒混合轻质土密度的影响曲线。当含水率在 6.5 % ~ 19.5 % 变化时, EPS 密度在 1.00 ~ 1.22 g/cm³ 变化, 而含水率 16.2 % 之前密度随含水率的增大呈上升趋势。

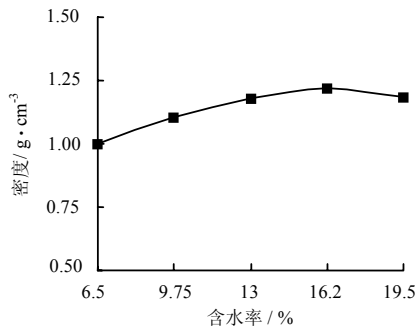


图 5 含水率对密度的影响

Fig.5 Effect of moisture content on density

图 6 为 Case1 ~ Case5 配比的试样的无侧限抗压强度变化图, 即在其他材料添加量相同时无侧限抗压强度与含水率的关系。由图可见, (1) 在泡沫塑料、水泥添加量同样的情况下, EPS 颗粒混合轻质土的无侧限抗压强度会因为含水率不同而不同。(2) 在 EPS 颗粒和固化材料添加量相同时, 存在一个含水率, 使得材料的强度最大, 在此定义为砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优含水率。本次试验的最优含水率为 13 %。

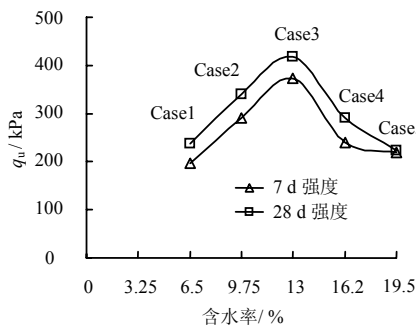


图 6 含水率对强度的影响

Fig.6 Effect of moisture content on strength

3.2.2 应力-应变关系曲线

图 7 为含水率对单轴应力-应变关系曲线的影响情况。由图可见, 含水率对变形的影响明显, 当含水率在 6.5 % ~ 13 % 范围变化时, 试样的强度和刚度都增加, 破坏应变减小, 脆性特性越明显; 但当含水率在 13 % ~ 19.5 % 范围变化时, 试样的强度和刚度都降低, 塑性增加, 这进一步说明了砂土 EPS 颗粒混合轻质土存在一个最优含水率。

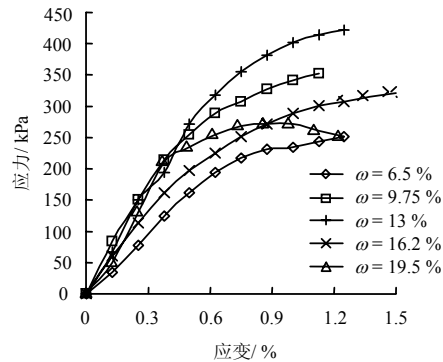


图 7 含水率对应力-应变关系的影响

Fig.7 Effect of moisture content on stress-strain relationship

3.3 水泥添加量的影响

3.3.1 密度和强度

对 Case6 ~ Case10 试样, 每组取 3 个样, 按照其养护 28 d 龄期的密度均值来分析。由图 8 可见, 在 EPS 颗粒添加量相同时, 随着水泥添加量的增加, 试样 28 d 密度值介于 1.04 ~ 1.19 g/cm³ 之间。随着水泥添加量的增大, 密度也呈增大趋势, 但在水泥添加量介于 150 ~ 300 kg/m³ 之间时, 其密度差值在 0.01 ~ 0.08 g/cm³ 的微小范围内波动, 即水泥添加量对密度的影响不明显, 这是因为在整个轻质混合土试样中, 水泥添加量所占的比例较小。

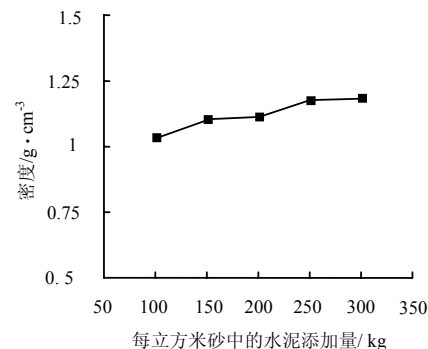


图 8 水泥添加量对密度的影响

Fig.8 Effect of additive rate of cement on density

图9为 Case6~Case10 配比的试样的 28 d 龄期无侧限抗压强度变化图,即在砂和泡沫塑料的体积相等、水和水泥质量相等时,强度与水泥添加量之间的关系。由图可见,在试验范围内轻质土的无侧限抗压强度随着水泥添加量的增加而增加,其关系可用线性拟合,如下式:

$$q_u = k(C - C_0) \quad (1)$$

式中: k 为固化系数; C_0 为最低水泥添加量,若水泥添加量低于这个数值时,没有固化效果。本次试验 $k = 7.10 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg}$, $C_0 = 63.37 \text{ kg/m}^3$ 。

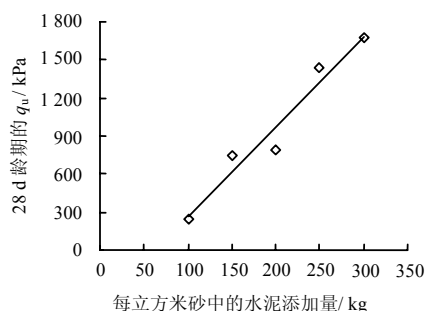


图9 水泥添加量对强度的影响

Fig. 9 Effect of additive rate of cement on strength

5 结论

通过进行以砂土为原料土的 EPS 颗粒混合轻质土试验,得出以下结论:

(1) 在施工中必须进行压实。在压实功较小时密度和无侧限抗压强度随着击实功的增大而增大较快,而后逐渐减缓,并存在适宜击实功。

(2) 与其他材料相同的情况时,存在一个含水率,使得该材料的无侧限抗压强度最大,即为“最优含水率”。

(3) 在砂和泡沫塑料的体积相等、水和水泥质量相等时,水泥添加量对轻质混合土试样密度的影响较小,无侧限抗压强度与水泥添加量之间的关系可用直线拟合。

参考文献

- [1] Kunio Minegishi, Katsuhiko Makiuchi, Rriki Takahashi. Strength-deformational characteristic of EPS beads — mixed lightweight geomaterial subjected to cyclic loading[A]. *Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-materials*[C]. Tokyo: The Japanese Geotechnical Society, 2002. 119—124.
- [2] Takashi Tsuchida, Minsoo Kang. Use of lightweight soil method in seaport and airport construction project[A]. *Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-materials*[C]. Tokyo: The Japanese Geotechnical Society, 2002. 215—228.
- [3] 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(2): 245—249.
- [4] 姬凤玲, 朱伟, 范昭平. 疏浚淤泥再生泡沫塑料混合轻量土的试验研究[A]. 第九届土力学及岩土工程学术会议论文集[C]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [5] 姬凤玲, 朱伟, 李明东. 废弃泡沫塑料的疏浚泥固化处理技术的研究[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(5): 69—72.
- [6] 张忠坤, 殷宗泽, 曹正康, 等. 聚苯乙烯泡沫塑料路堤填土三轴试验研究[J]. 河海大学学报, 1997, 25(5): 106—108.
- [7] 徐光黎, 小玉荣二, 坂手道明. 发泡颗粒混合轻量土及其原位力学性质[J]. 水文地质工程, 2004, (增刊): 18—22.
- [8] 姬凤玲, 朱伟, 张春雷. 废弃淤泥的土工材料化处理技术的试验与探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1999—2003.
- [9] 马殿光, 朱伟, 姬凤玲. 一种新型废弃发泡颗粒轻质土工材料的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, (增刊): 67—71.
- [10] 卢廷浩. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2002.
- [11] GB/T50123—1999, 土工试验方法标准[S].