

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2008.06.019

击实参数对砂土 EPS 颗粒混合轻质土的影响

李明东¹, 朱伟^{2,3}, 张春雷³, 赵干²

(1. 淮海工学院土木工程学院, 江苏 连云港 222005; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为了明确击实参数对砂土 EPS 颗粒混合轻质土(LSES)物理力学性质的影响,利用室内试验研究了击实能量(击实一次的击实功)和击实次数对 LSES 物理力学性质的影响.结果表明:LSES 的干密度、无侧限抗压强度、黏聚力、内摩擦角均随击实次数的增加而增加,增加速度由快逐渐减慢并逐渐趋于稳定.随着击实能量的增加也会增加,但增加速度不趋于稳定.根据室内试验结果总结了干密度和无侧限抗压强度的计算式.

关键词:EPS 轻质土; 击实功; 干密度

中图分类号: TU441+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2008)06-0814-04

我国东南沿海地区存在着大量的软土地基.在软土地基上开展土木工程建设时,附加应力使得下卧层地基沉降大,容易失稳.轻质土具有密度小的优点,能够减小附加应力,从而减小地基沉降,提高地基稳定性.采用轻质土技术已成为解决软土地基上工程问题的新思路^[1].

砂土 EPS 颗粒混合轻质土(lightweight sand-EPS beads soil,简称 LSES)具有密度和强度可以调节的优点,是一种性能优良的轻质土.日本的山田纯男等^[2]最早用砂土和 EPS 颗粒等材料混合制备了 LSES,并成功应用在日本神户岸壁修复工程中.2002 年,规矩等^[3]研究发现 LSES 的强度和破坏应变随密度的增加而增加.马时冬^[4]研究发现 LSES 的密度随 EPS 颗粒添加量的增加而减小,其强度随水泥添加量的增加而增加,随 EPS 颗粒添加量的增加而减小.顾欢达等^[5]建立了用于评价强度和预测应力应变关系的两相体模型,并利用室内试验进行了验证.王庶懋等^[6-8]对其动力特性的研究发现水泥掺量的增加、围压和 EPS 颗粒含量的减小均会提高最大循环应力比,并利用 CT 观测了其微观结构^[9],发现它是一种局部孔隙比分布差异较大的特殊结构性土.

为了提高 LSES 的强度,在施工中必须进行压实施工^[10].为了解决陡边坡的稳定问题,笔者^[11]在新安江交通道路中应用了该材料,达到了提高稳定性的目的.但在工后的动力触探检测中发现 LSES 的强度不稳定,相差可达 1 倍,压实控制不好可能是重要原因.压实的控制是 LSES 施工中的重要因素,急需进行深入研究.

压实施工在室内利用击实来模拟,本文研究了不同的击实能量(击实一次的击实功)和击实次数对 LSES 的干密度、无侧限抗压强度、固结排水剪强度的影响,并在试验数据的基础上建立了干密度和无侧限抗压强度的计算式.

1 试验材料与方法

1.1 原材料和配方

试验所用砂土的颗粒分析试验结果如图 1 所示,该砂土的不均匀系数 $c_u = 2.61$,曲率系数 $c_c = 0.89$.砂土使用前进行风干,风干松散堆

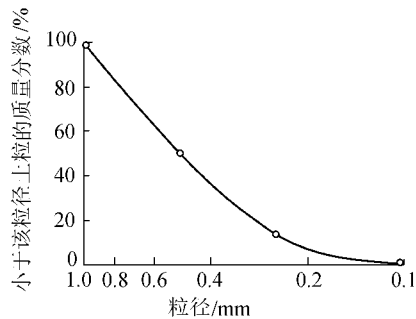


图 1 试验用砂土的颗粒分析

Fig.1 Particle size distribution curves of sand

积密度为 1.54 g/cm^3 . 经击实试验测试,其最优含水率为 12% . 所用 EPS 颗粒为发泡 EPS 球粒,粒径为 $1\sim 3\text{ mm}$,堆积体密度 0.0368 g/cm^3 . EPS 颗粒体积置换率为 50% (EPS 颗粒松散堆积体积等于干砂松散堆积体积) 所用固化材料为“钟山牌”32.5 号普通硅酸盐水泥,添加量为 6.5% (水泥占干砂的质量百分比). 水为自来水,按砂的最优含水率添加.

1.2 制样方法与试样养护

采用制备常规土工三轴试样的三轴制样器制备试样,模具为圆柱形三瓣模(饱和器),直径为 39.1 mm ,高为 80.0 mm . 采用 4 个不同的击实能量进行击实,其击实参数如表 1 所示,击实层数为 3 层,击实次数分别为 1,2,3,4,6,8,12,16 次.

制样前,首先量取干砂、EPS 颗粒,加入水泥后拌和均匀,再加入水拌和均匀. 利用前述击实参数击实试样,将制备的试样置入标准养护箱中(温度 $(20\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度大于 90%) 养护. 养护 24 h 后脱模,再放入标准养护箱内,养护至 28 d 进行干密度试验、无侧限抗压强度试验和三轴固结排水剪切试验.

1.3 物理力学性质试验

密度试验中首先量测试样的高度和直径,将试样放入烘箱中($105\text{ }^{\circ}\text{C}$) 烘干 8 h 以上,称量干质量,并计算干密度 ρ_d . 每组设 3 个平行试样,取其均值作为 LSES 的干密度.

在强度试验前,首先对 LSES 试样进行浸泡饱和. 将养护至 28 d 龄期的试样置于水中浸泡 24 h 以上,经测试试样饱和度均接近 100% . 无侧限抗压强度试验所采用的应变速率为 1.18 mm/min ,每组 3 个平行试样,取应力峰值的均值作为 LSES 的无侧限抗压强度.

三轴剪切试验采用固结排水剪方法,剪切中始终保持孔隙水压力为零,压缩速率为 0.072 mm/min ,应变控制在 15% 以内. 试验中的围压分别取为 50 kPa , 100 kPa , 150 kPa , 200 kPa .

试验参照 GB/T50123—1999《土工试验方法标准》^[12] 进行.

2 击实参数对物理力学性质的影响

2.1 击实参数对干密度的影响

不同击实能量、不同击实次数下 LSES 的干密度变化情况如图 2 所示. 击实对 LSES 的干密度有很大的影响,最大差别可以达到 0.3 g/cm^3 . 随着击实次数的增加,LSES 的干密度整体上呈增加趋势,但增加趋势逐渐减缓,并趋于稳定. 在相同的击实次数下,LSES 的干密度随击实能量的增加呈增加趋势,但没有稳定的趋势. 这可能是击实作用对孔隙和 EPS 颗粒的压缩引起的.

2.2 击实参数对无侧限抗压强度的影响

不同击实能量、不同击实次数下 LSES 的无侧限抗压强度的变化情况如图 3 所示. LSES 的无侧限抗压强度随着击实次数的增加整体上呈增加趋势,但增加趋势逐渐减缓,并逐渐趋于稳定. 对于同一击实次数,随着击实能量的增大,无侧限抗压强度呈增加趋势.

表 1 击实参数

Table 1 Compaction parameters			
代号	锤质量/g	落距/cm	击实能量/ ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$)
CC1	295.8	12	10.87
CC2	295.8	24	21.74
CC3	591.6	18	32.61
CC4	591.6	24	43.48

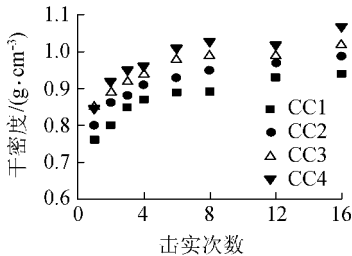


图 2 击实参数对干密度的影响

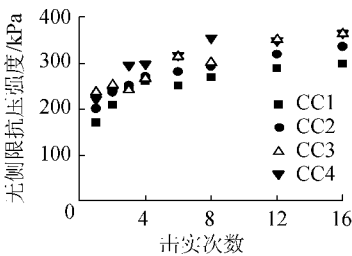


图 3 击实参数对无侧限抗压强度的影响

Fig.2 Effect of compaction parameters on dry density Fig.3 Effect of compaction parameters on unconfined compression strength

2.3 击实参数对三轴力学性质的影响

击实能量为 10.87 kJ/m^3 、击实次数为 3 次的 LSES 在不同围压下的应力-应变关系如图 4 所示. 随着围压的增加,LSES 的应力-应变关系先由应变软化型向理想弹塑性型转化,再向应变硬化型转化. 随着围压的增

加,强度逐渐增加,破坏应变逐渐增加,这是与常规土一致的。LSES 的应力在小应变下提高很快,一般在 2% 以内就能接近强度,说明它是一种破坏应变很小的材料。

对不同围压下的 LSES 的峰值强度按照摩尔库仑理论进行整理,得到其黏聚力和内摩擦角,它们随击实次数变化的情况分别如图 5 和图 6 所示(击实能量为 10.87 kJ/m³)。由图 5 可见 LSES 的黏聚力随击实次数的增加而增加,在击实次数较少时,黏聚力的提高速度比较快,随着击实次数的增加,提高黏聚力的作用逐渐减弱。由图 6 可见 LSES 的内摩擦角随击实次数的增加而增加,在击实次数较少时,内摩擦角的提高速度比较快,随着击实次数的增加,提高内摩擦角的作用逐渐减弱。

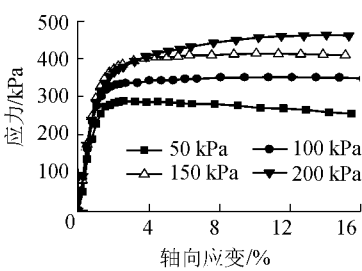


图 4 不同围压下的应力-应变关系
Fig.4 Stress-strain relationship under different confined pressures

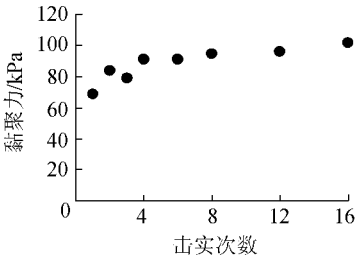


图 5 击实次数对黏聚力的影响
Fig.5 Effect of compaction times on cohesion

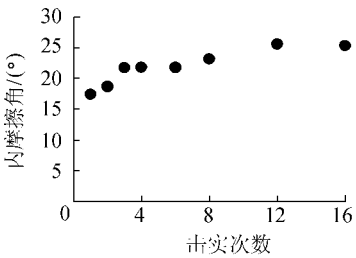


图 6 击实次数对内摩擦角的影响
Fig.6 Effect of compaction times on friction angle

3 干密度和无侧限抗压强度的计算式

3.1 干密度的计算式

由图 2 可见,LSES 的干密度与击实次数呈现为双曲线关系,因此,LSES 的干密度与击实次数的数学关系可以表达为式(1)。式(1)计算结果如图 7 中曲线所示,图中点为试验值,可见,该计算式的效果很好。

$$\rho_d = \rho_{dmin} + \frac{T}{a + bT} \tag{1}$$

式中: ρ_d ——LSES 的干密度,g/cm³; ρ_{dmin} ——LSES 的松散干密度,即不进行击实的自然堆积干密度,g/cm³;a——干密度初始提高速度的倒数;b——干密度最大提高量的倒数;T——击实次数。

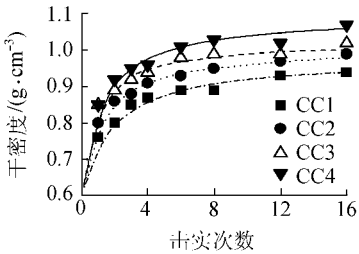


图 7 干密度计算式拟合效果
Fig.7 Fitting effect of dry density equation

对不同击实能量下的干密度初始提高速度和最大提高量进行整理,如图 8 所示,由图 8 可见初始提高速度随击实能量的增加呈增加趋势,但从 32.61 kJ/m³ 增加到 43.48 kJ/m³ 时变化不大,最大提高量也随着击实能量的增加而增加,而且在从 32.61 kJ/m³ 增加到 43.48 kJ/m³ 时大幅提高。

3.2 无侧限抗压强度的计算式

图 9 是不同击实能量下 LSES 的无侧限抗压强度与干密度提高量的关系。由图 9 可见,无侧限抗压强度

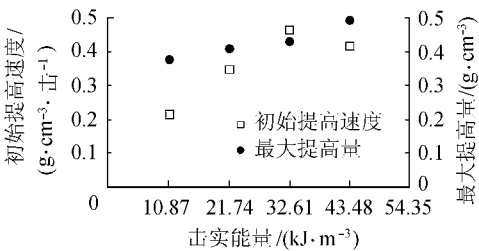


图 8 击实能量对干密度计算参数的影响
Fig.8 Effect of compaction energy on parameters for dry density equation

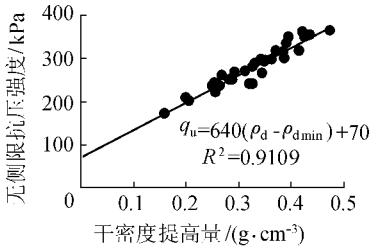


图 9 干密度与无侧限抗压强度的关系
Fig.9 Relationship between dry density and unconfined compression strength

随干密度提高量的增加而增加,且两者呈正线性相关关系,可以表达为式(2).式(2)计算的结果如图 9 的直线所示.试验结果与计算结果复相关系数为 0.9109,说明拟合程度很好,该计算式的适用性较好.

$$q_u = k(\rho_d - \rho_{dmin}) + q_{u0} \tag{2}$$

式中: q_u ——LSES 的无侧限抗压强度,kPa; k ——LSES 的干密度强化系数,kPa/(g·cm⁻³); q_{u0} ——不击实时 LSES 的无侧限抗压强度,kPa.

4 结 论

a. LSES 的干密度、无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角均随着击实次数的增加而增加,但增加速度逐渐减缓,并趋于稳定.这些性质随着击实能量的增加也会增加,但没有趋于稳定的趋势.

b. 干密度随击实次数的增加而增加,两者表现为双曲线关系,可以表达为 $\rho_d = \rho_{dmin} + \frac{T}{a + bT}$.

c. 无侧限抗压强度与干密度正线性相关,可以表达为 $q_u = k(\rho_d - \rho_{dmin}) + q_{u0}$.

参考文献：

[1] 安原一哉.轻质土研究概述[C]//地盘工学会. 量地盘材料の開 と适用に关するシンポジウム 表论文集.东京:地盘工学会,2000:1.

[2] 山田纯男,长坂勇二,西田登,等. 生土スチロ-ル片と砂とを混合した 量土[J].土と基础,1989,37(2):25-30.

[3] 规矩,大岭,川野,等. 量混合土静的强度全国一齐试验[C]//地盘工学会. 量地盘材料の開 と适用に关する 表论文集.东京:地盘工学会,2002:3-22.

[4] 马时冬.聚苯乙烯泡沫塑料轻质填土(SIS)的特性[J].岩土力学,2001,22(3):245-248.

[5] 顾欢达,顾熙.两相体模型在评价发泡颗粒轻质土应力-应变特性中的应用[J].岩土工程学报,2006,28(8):994-997.

[6] 王庶懋,高玉峰,张益纯.动荷载下砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土(LSES)的强度标准及破坏机理研究[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(2):197-201.

[7] 王庶懋,高玉峰.砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土的动剪切模量衰减特性分析[J].岩土力学,2007,28(5):1001-1004.

[8] 王庶懋,高玉峰,Ali,等.砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土(LSES)临界循环应力比的试验研究[J].防灾减灾工程学报,2007,27(2):171-176.

[9] 王庶懋,高玉峰.砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土(LSES)细观结构的 CT 研究[J].岩土力学,2006,27(12):2137-2142.

[10] 长坂,加藤,井田川,等. 量土の施工方法と事例[C].地盘工学会. 量地盘材料の開 と适用に关するシンポジウム 表论文集.东京:地盘工学会,2000:85-112.

[11] 李明东,朱伟,马殿光,等. EPS 颗粒混合轻质土的施工技术及其应用实例[J].岩土工程学报,2006,28(4):533-536.

[12] GB/T50123-1999,土工试验方法标准[S].

Effect of compaction parameters on lightweight sand-EPS beads soil

LI Ming-dong¹, ZHU Wei^{2,3}, ZHANG Chun-lei³, ZHAO Gan²

- (1. College of Civil Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China ;
2. Geo-technical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China ;
3. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :The laboratory tests were conducted to investigate the effect of compaction parameters, compaction energy (work per compaction time) and compaction times, on the physico-mechanical properties of the lightweight sand-EPS beads soil (LSES). The test results show that the dry density, unconfined compression strength, cohesion and friction angle of the LSES increase with the increase of the compaction energy and compaction times, and the increment gradually decreases and tends to be stable. The above properties increase with the increase of the compaction energy. Finally, equations for the dry density and unconfined compression strength were obtained based on the laboratory test results.

Key words :EPS ;lightweight soil ; compaction work ; dry density