

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1312

击实试验类型对 EPS 颗粒轻量土击实特性的影响规律

杨凯旋, 侯天顺

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为研究击实试验类型对 EPS 颗粒轻量土击实特性的影响规律, 阐明轻量土压缩密实的本质, 对 3 种不同 EPS 颗粒掺量的轻量土开展标准轻型、标准重型、小型轻型、小型重型 4 类击实试验, 并测量 EPS 颗粒体积压缩率。结果表明: 3 种配比轻量土在 4 类击实试验下, 轻量土的干密度随含水率的增加均先增大后减小, 曲线形态类似抛物线, 所得最优含水率依次接近 31%、35%、39%。同配比轻量土, 以标准轻型击实试验的最大干密度为标准, 其他 3 类击实试验最大干密度的绝对增长量为 $-0.014 \sim 0.072 \text{ g/cm}^3$, 相对增长量为 $-2.647\% \sim 13.611\%$, 4 类击实试验所获得的最大干密度基本相同。受击实筒尺寸效应的影响, 相同击实功时, 小型击实试验的最大干密度大于标准击实试验, 但差值较小。相同击实类型时, 增加击实功对轻量土最大干密度提高不明显。在击实作用下, EPS 颗粒具有明显的塑性压缩, 压缩率随含水率和 EPS 颗粒掺量的增大而减小, 其变化范围为 $0.955\% \sim 31.174\%$ 。EPS 颗粒的塑性压缩和试样孔隙比的减小是轻量土压缩密实的本质, 利用小型击实试验代替标准击实试验确定轻量土最优含水率和最大干密度的方法是可行的, 可为轻量土工程设计和施工提供参考。

关 键 词: 轻量土; 击实试验类型; 击实特性; 最优含水率; 最大干密度; EPS; 体积压缩率

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2020)06-1971-12

Influence of compaction test types on compaction characteristics of EPS particles light weight soil

YANG Kai-xuan, HOU Tian-shun

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To study the influence of the compaction test types on the compaction characteristics of EPS particles light weight soil, and to reveal the compaction mechanism of light weight soil, three kinds of light weight soil with different EPS particle contents were prepared for four different types of compaction tests, i.e., standard light-type, standard heavy-type, small light-type and small heavy-type. The volume compression ratios of the EPS particles were measured, respectively. The results show that the dry density of the light weight soil first increases and then decreases with increasing the water content for the three mixed ratios light weight soil under all the compaction tests. The curve shapes are similar to parabola, and the optimum water contents of the three mixed ratios light weight soil are approximately 31%, 35% and 39%. For light weight soil having the same ratio, the maximum dry density of the standard light-type compaction test can be taken as the standard. The absolute growth range of the maximum dry density for the other three kinds of compaction tests is from -0.014 g/cm^3 to 0.072 g/cm^3 , and the relative growth range is from -2.647% to 13.611% . The maximum dry densities obtained by the four kinds of compaction tests are basically the same. Due to the influence of size effect of the compaction cylinder, the maximum dry density of the small-type compaction test is larger than that of the standard compaction test when the compaction energy is same, but the difference of them is small. For the same compaction test type, it is found that the increase in the compaction energy has no obvious effect on improving the maximum dry density of the light weight soil. Under the compaction action, the EPS particles exhibit obvious plastic compression, and the compression ratio decreases with increasing the

收稿日期: 2019-07-29

修回日期: 2019-11-07

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51509211); 中国博士后基金 (No.2016M602863); 陕西省留学人员科技活动择优资助项目 (No.2018031); 陕西省博士后基金 (No.2017BSHYDZZ50); 西北农林科技大学外国文教专家项目 (No.A213021803)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51509211), the China Postdoctoral Science Foundation (2016M602863), the Excellent Science and Technology Activities Foundation for Returned Overseas Teachers of Shaanxi Province (2018031), the Postdoctoral Science Foundation of Shaanxi Province (2017BSHYDZZ50) and the Foreign Cultural and Educational Experts Foundation of Northwest A&F University (A213021803).

第一作者简介: 杨凯旋, 男, 1994 年生, 硕士研究生, 主要从事轻量土研究工作。E-mail: 754662925@qq.com

通讯作者: 侯天顺, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学、地基基础工程与地质灾害防治方面的教学与科研工作。

E-mail: houtianshunx@sina.com

water content and the EPS particle content. The volume compression ratio varies in the range of 0.955% to 31.174%. It is feasible to determine the optimum water content and the maximum dry density of the light weight soil by using the small-type compaction test instead of the standard compaction test, which can provide reference for engineering design and construction of light weight soil.

Keywords: light weight soil; compaction test types; compaction characteristics; optimum water content; maximum dry density; EPS; volume compression ratio

1 引言

EPS 颗粒混合轻量土是由发泡聚苯乙烯 (expanded polystyrene, 简称 EPS) 颗粒、水泥、水和原料土拌和而成的轻质土工材料。轻量土因其密度小、强度高、强度和变形模量可调, 以及自立性、易施工性、缓冲性和可大量消解废弃泡沫、废弃轮胎等高分子化合物, 对工程弃土、疏浚淤泥土、特殊土进行重复利用等优点, 被广泛应用于地基工程、路基工程、边坡工程、管道工程、景观工程中, 如处理软土地基不均匀沉降、旧路扩建、墙背回填、管道填埋、建设人造漂浮景观等工程领域^[1-4]。

早在 20 世纪, 挪威、日本、法国、荷兰等国家, 已经对轻量土开展了相关研究, 并取得了不少研究成果^[4-7]。EPS 颗粒混合轻量土自 21 世纪初被引入中国, 在中国便涌现出一批学者致力于对轻量土的研究工作。在静力特性和动力特性方面, 朱伟^[8]、董金梅^[9]、黎冰^[10]、侯天顺^[1-2, 11]、Li^[12]、Chenari^[13]等研究发现, EPS 掺量和水泥掺量是影响轻量土力学性能的主要因素。轻量土抗压强度、抗剪强度、变形模量、黏聚力、有效黏聚力、内摩擦角、有效内摩擦角、单向压缩屈服应力、加州承载比 (CBR) 值、动强度、初始压缩模量 E_0 、最大循环应力比等均随着 EPS 掺量的增大而减小, 随着水泥掺量的增大而增大。轻量土阻尼比则随着 EPS 掺量的增大而增大, 随着水泥掺量的增大而减小。以上研究成果均表明轻量土具有优良的工程特性和力学特性。

土的含水率对土料所能达到的密实度起着非常重要的作用, 研究土的击实特性, 确定土料最优含水率对地基施工具有重要意义。目前, 确定土料最优含水率和最大干密度的方法通常为进行室内标准击实试验。然而, 由于标准击实试验工序复杂、费时费力, 相关学者更青睐于研究预估最优含水率和最大干密度的简化方法。在普通土的研究方面, Gurtug 等^[14]通过在不同击实能量下对不同土开展击实试验, 介绍了一种预测土最大干密度和最优含水率的简化方法, 指出只有从塑限中获得压实特性, 才能从族曲线中得到近似的压实曲线。通过简化方法预测的最大干密度是塑限下最大干密度的 0.986 倍, 预测的最优含水率是实际最优含水率的 0.99 倍。Ul

Rehman 等^[15]基于土颗粒的基本性质指标不均匀系数 (C_u)、30%通过率 (D_{30}) 和平均粒度 (D_{50}), 提出快速估计加州承载比 (CBR) 值、最大干密度 (MDD) 和最优含水率 (OMC) 的方法, 此方法被成功应用于岩土工程和路面工程中。Soltani 等^[16]通过液塑限试验和标准击实试验, 研究了由中塑性到高塑性的 4 种不同黏土与磨碎橡胶粉料混合后土的压实特性, 发现随着橡胶掺量的增加, 稠度极限和压实特性均呈线性下降趋势, 对于高塑性黏土而言降低的速率更大, 提出了将压实特性与稠度限值联系起来的简单相关模型。经实践检验, 预估普通土最优含水率和最大干密度的简化方法, 在实际工程中得到了很好的应用。

在 EPS 颗粒混合轻量土击实特性的研究方面, 汤峻^[17]、李明东^[18-19]等研究了击实条件、击实参数、含水率对砂土 EPS 颗粒混合轻质土 (LSES) 的物理力学特性的影响, 发现随着击实能量和击实次数的增加, LSES 的干密度、无侧限抗压强度、黏聚力、内摩擦角随之增加, 存在最适宜击实次数 3~4 次和最优击实含水率 13%。朱伟等^[20]总结前人研究的成果, 引入了基于比强的最优击实含水率确定方法, 通过物理分析和试验数据分析给出了 LSES 最优击实含水率的计算式, 并验证了该方法的适宜性, 指出击实含水率的增加有利于提高击实效果, 对水泥的胶结作用是先提高后降低, LSES 的最优击实含水率受到 EPS 颗粒置换率和水泥添加量的影响。为了彻底揭示轻量土这种软夹杂土体的击实特性, 首先, 侯天顺等^[1]提出 ρ_d-w 模型、 q_u-w 模型、RS-模型, 从理论上推导出轻量土最优含水率解析式, 通过试验对模型进行检验。对比本试验和朱伟等^[20]试验的结果, 发现 3 种模型对应的最优含水率基本相同, 验证了 3 种模型的合理性, 完成了对轻量土和轻量砂最优含水率研究成果的归纳总结。随后, Hou^[21]基于混合土物质结构组成及土体压缩变密的物理本质, 建立了轻量土击实密度模型, 并对模型进行简化, 证明了该模型能够准确预测不同击实条件下混合土的湿密度, 是对轻量土密度研究的系统性阐述。有关轻量土最优含水率和最大干密度的研究, 相关学者已经取得了不少的研究成果。然而, 现有成果多是通过三轴仪饱和器开展小型击实试验, 与规范规定的标准击实试验仍存在差别。还有

两个仍待研究的科学问题：不同击实试验类型下，得到的轻量土最优含水率和最大干密度差异如何；小型击实试验受到击实筒尺寸效应的影响，得到的轻量土最优含水率和最大干密度能否代替标准击实试验确定的最优含水率和最大干密度。

基于此，本文选用水泥为固化剂，EPS 颗粒为轻质材料制备轻量土。通过开展标准轻型、标准重型、小型轻型、小型重型 4 类击实试验对不同 EPS 掺量轻量土的击实特性进行研究，确定各配比较量土的最优含水率和最大干密度。通过测量击实后 EPS 颗粒的体积压缩率，阐明轻量土这种软夹杂土体压缩密实的本质。通过对轻量土击实特性的研究，为在软基处理、台背回填等工程中应用轻量土提供参考。

表 1 原料土基本物理性质指标

Table 1 Basic physical parameters of the soil

天然密度 ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	相对密度 G_s	天然含水率 w /%	重度 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	塑限 w_p /%	液限 w_L /%	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	孔隙比 e
1.75	2.72	19.83	17.51	21.30	37.44	16.14	-0.09	0.86

2.2 试样制备

根据配比，按如下步骤进行制样：①将称取的烘干土和水泥充分搅拌 3~5 min，直至均匀；②将称取的水喷洒入水泥与干土的混合物中，充分搅拌；③加入 EPS 颗粒，强制搅拌 20 min 直到获得均匀的轻量土；④按照质量控制法，将拌和均匀的轻量土分 3 层加入到击实筒中，每层之间用刮土刀进行拉毛处理；⑤按照规范要求进行击实，直到获得击实后的轻量土试样。需要说明的是：为了使拌和的轻量土混合均匀，当制备含水率较低的土样时，可将水一次性喷洒入混合物中；而制备含水率较高的土样时，可在第 1 次加水并掺入 EPS 颗粒搅拌均匀后，再次将剩余的水分加入。

2.3 试验方案

试验方案如表 2 所示。表中各掺量均以干土的质量 m_s 为标准，含水率 $w = m_w/m_s \times 100\%$ ，其中 m_w 为水的质量；水泥掺量 $a_c = m_c/m_s \times 100\%$ ，其中 m_c 为水泥的质量；EPS 掺量 $a_e = m_e/m_s \times 100\%$ ，其中 m_e 为 EPS 的质量；EPS 颗粒体积比 $b_e = v_e/v \times 100\%$ [21]，其中 v_e 为 EPS 纯颗粒体积， v 为试样体积。本文重点研究体积置换率对轻量土最优含水率的影响 [20]，3 种 EPS 颗粒掺量 0.32%、0.81%、1.90% 对应的体积比 b_e 近似为 30%、50%、70%。EPS 颗粒属于憎水性材料，当 EPS 掺量较大时，泡沫比表面积较大，混合土水分散失较快，所以含水

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

本次试验所用的原料土为陕西杨凌高铁南站西侧某基坑的黄土，取土深度为 4~6 m。原料土呈褐黄色，具有大孔隙，天然状态坚硬，按塑性图进行分类为低液限粉质黏土，其基本物理性质指标如表 1 所示。原料土的最优含水率为 20.60%，最大干密度为 1.703 g/cm^3 。根据侯天顺等 [2] 关于不同粒径 EPS 对轻量土强度的影响研究，本试验所用的轻质材料为 EPS 颗粒，粒径为 3~5 mm，纯颗粒密度为 0.0106 g/cm^3 ，堆积密度为 0.0065 g/cm^3 。固化剂为盾石牌冀东 P·C32.5R 复合硅酸盐水泥，纯颗粒密度为 3.1 g/cm^3 。水为普通自来水。

率间距取值较大。配比为 $a_c = 15\%$ ， $a_e = 1.90\%$ 的轻量土在不同含水率下击实时，由于 EPS 泡沫含量较高，试验误差较大，所以每个配比做两个有效试样，取平均值作为试验结果。

表 2 试验方案

Table 2 Test scheme

方案	水泥掺入 比 a_c /%	EPS 掺入 比 a_e /%	含水率 w /%	击实试验类型
1	15	0.32	27, 29, 31, 33, 35	标准轻型, 标准重型, 小型轻型, 小型重型
2	15	0.81	30, 33, 35, 37, 40	标准轻型, 标准重型, 小型轻型, 小型重型
3	15	1.90	31, 35, 39, 43, 47	标准轻型, 标准重型, 小型轻型, 小型重型

根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999) [22]，本试验中轻型击实试验和重型击实试验单位体积的击实功能分别为 592.2 、 2684.9 kJ/m^3 。小型轻型和小型重型击实试验所用的仪器为直径 3.91 cm、高度 8 cm、体积 96.1 cm^3 的三轴仪饱和器，锤重为 305 g，落距为 24.8 cm。通过击实功计算，小型轻型和小型重型击实试验制样时 3 层的击实次数 n 分别为 26、25、26（控制最后一击的落高为 16.5 cm）和 116、116、116，原料土为过 2 mm 筛的烘干土。4 类击实试验的操作方法均参照土工规范 [22]。

3 试验结果与分析

3.1 击实试验类型对干密度的影响

土的最优含水率和最大干密度是反映其击实特性的两个重要参数,通过对轻量土击实后的干密度进行计算^[21,23],探究不同击实试验类型对其击实特性的影响。由图 1 可知:

(1) 在 4 类击实试验中, EPS 颗粒混合轻量土的干密度随含水率的增加呈先增大后减小的趋势,有峰值出现,曲线形状类似抛物线。表明通过 4 类击实试验均能获得轻量土的最优含水率,含黏性土轻量土的击实特性类似于普通黏性土。

(2) 同一配比的轻量土试样,在 4 类击实试验中所得到的最优含水率基本相同。不同配比的轻量土试样,随着 EPS 掺量的增加,最优含水率逐渐增大。对于 $a_c = 15\%$, $a_e = 0.32\%$ 的轻量土试样,在标准轻型、标准重型、小型轻型、小型重型 4 类击实试验中的最优含水率分别为 30.62%、30.77%、30.81%、30.75%,接近 31%。 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.81\%$ 和 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 1.90\%$ 的轻量土试样在 4 类击实试验中最优含水率分别接近 35%、39%。表明击实类型的不同对轻量土最优含水率的影响较小, EPS 颗粒掺量对最优含水率的影响显著,这与朱伟等^[20]的试验结果相同。

(3) 同一配比的轻量土试样,在 4 类击实试验中所得到的最大干密度存在差异,但差异较小。对于 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.81\%$ 的轻量土,在标准轻型、标准重型、小型轻型、小型重型 4 类击实试验中的最大干密度分别为 0.864、0.904、0.918、0.938 g/cm³。以标准轻型击实试验的最大干密度为标准,标准重型、小型轻型、小型重型 3 类击实试验最大干密度的绝对增长量分别为 0.040、0.054、0.074 g/cm³,相对增长量分别为 4.630%、6.250%、8.565%。配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.32\%$ 和 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 1.90\%$ 的轻量土,以标准轻型击实试验的最大干密度为标准,其他 3 类击实试验最大干密度相对增长量的范围依次为 1.649%~6.760%和-2.647%~13.611%。

(4) 同一配比的轻量土试样,受击实筒尺寸效应的影响,在 4 类击实试验中,击实功能相同时,小型击实试验的最大干密度大于标准击实试验的最大干密度。当击实功为 592.2 kJ/m³ 时,对于配比为 $a_c = 15\%$, $a_e = 0.32\%$ 、0.81%、1.90% 的轻量土试样,以标准轻型击实试验的最大干密度为标准,小型轻型击实试验的最大干密度绝对增长量分别为 0.066、0.054、0.072 g/cm³,相对增长量分别为 5.441%、

6.250%、13.611%。

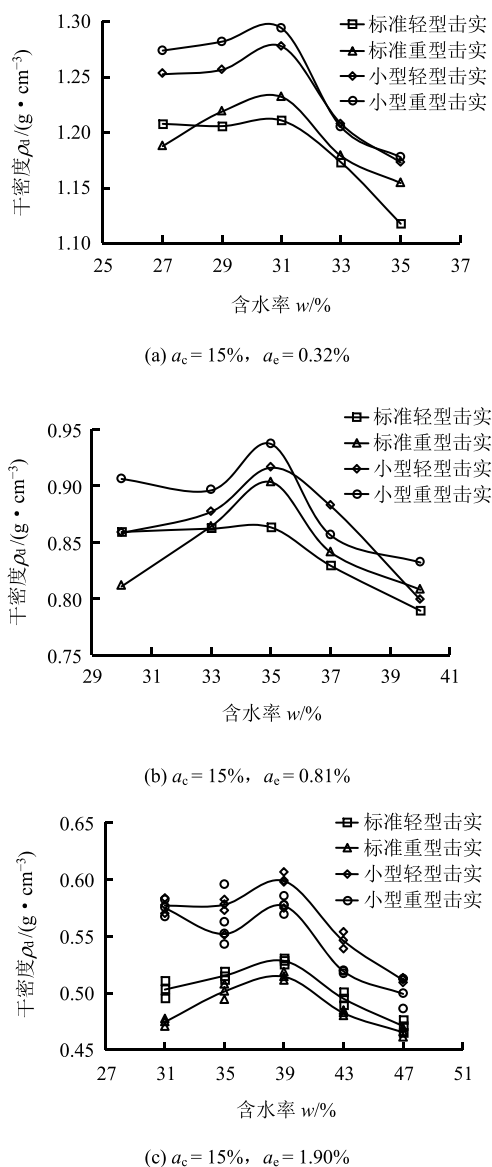


图 1 干密度-含水率关系曲线

Fig.1 Curves of dry density and water content

(5) 同一配比的轻量土试样,在 4 类击实试验中,重型击实试验的最大干密度基本大于轻型击实试验的最大干密度,但增长幅度较小,增加击实功对最大干密度的提高不明显。对于配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.32\%$ 和 $a_c = 15\%$ 、0.81% 的轻量土试样,当击实功由 592.2 kJ/m³ 增大到 2 684.9 kJ/m³,即击实功提高至 4.534 倍,以标准轻型击实试验的最大干密度为标准,标准重型击实试验的最大干密度分别提高至 1.016 倍和 1.046 倍。然而,对于配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 1.90\%$ 的轻量土,增大击实功最大干密度反而减小,规律出现反常。如当击实功提高至 4.534 倍,标准重型击实试验的最大干密度相比标准轻型击实试验提高至 0.974 倍,这与侯天顺等^[1]的试验

结果是相同的。

经分析,上述现象的出现可能存在以下原因:

(1) 当 $w < w_{op}$ 时, 轻量土含水率较小, EPS 颗粒与土粒的黏结性较差, 试样基本呈碎散状态, 击锤直接作用在 EPS 颗粒上, 造成 EPS 颗粒的体积压缩、塑性变形和密度的提高, 导致轻量土干密度随着含水率的增加逐渐增大。当 $w > w_{op}$ 时, 轻量土含水率较高, 两方面原因造成轻量土干密度的逐渐减小。①由于 EPS 颗粒和土颗粒黏结性大, 易于形成互相黏结的“弹簧体”, “弹簧体”对击锤进行反弹, 消解部分击实能量, 轻量土难以密实; ②由于 EPS 泡沫的憎水性, 试样的孔隙有自由水填充, 在击实的过程中, 试样内部形成孔隙水压力, 孔隙水压力造成击实功的浪费, EPS 颗粒不易被压缩, 试样难以密实, 轻量土密度逐渐减小。

(2) 由于受击实筒尺寸效应的影响, EPS 泡沫在体积较大的击实筒内会随意“跑动”, 不利于试样的密实, 在小击实筒内泡沫易于受到压缩而密度增大。所以, 相同击实功能下, 小型击实试验的最大干密度大于标准击实试验。

(3) 轻量土属于土夹杂土体, EPS 颗粒具有可压缩性, 轻量土在击实过程中密度的提高, 不仅来源于土体内部孔隙的减少, 而且来源于 EPS 颗粒的塑性变形^[21, 24]。可 EPS 受压缩的能力是有限的, 一旦到达压缩极限, 再增加击实功, 对干密度的提高不明显, 所以不能靠无限制增加击实功来提高轻量土密度。

(4) 对于 EPS 掺量为 1.90% 的轻量土试样, EPS 体积比近似达到 70%。由于 EPS 掺量较大, 土颗粒含量相对较少, 试样较为碎散, 土颗粒与 EPS 颗粒之间的有效黏结较小。在小击实功下, 随着试样孔隙比的减小, 轻量土容易达到密实。击实功较大时, 试样孔隙比减小的速率降低, 试样内形成以 EPS 颗粒为主的“弹簧体”, 又由于试样体积的减小和 EPS 的憎水性, 击实筒内的水分子易于产生孔隙水压力, “弹簧体”和孔隙水压力的双重作用, 对击实功进行消解, 击锤破坏轻量土内部已形成的密实结构, 反而造成轻量土最大干密度的减小, 因此, 出现图 1(c) 中的反常规律。

3.2 击实试验类型对湿密度的影响

湿密度是土工施工控制中的重要参数, 对轻量土击实后湿密度进行分析具有重要意义。由图 2 可知:

(1) 在 4 类击实试验中, EPS 颗粒混合轻量土的湿密度随含水率的增加先增大后减小, 有峰值出

现, 曲线形状类似抛物线, 说明此时存在使湿密度达到最大的最优含水率。

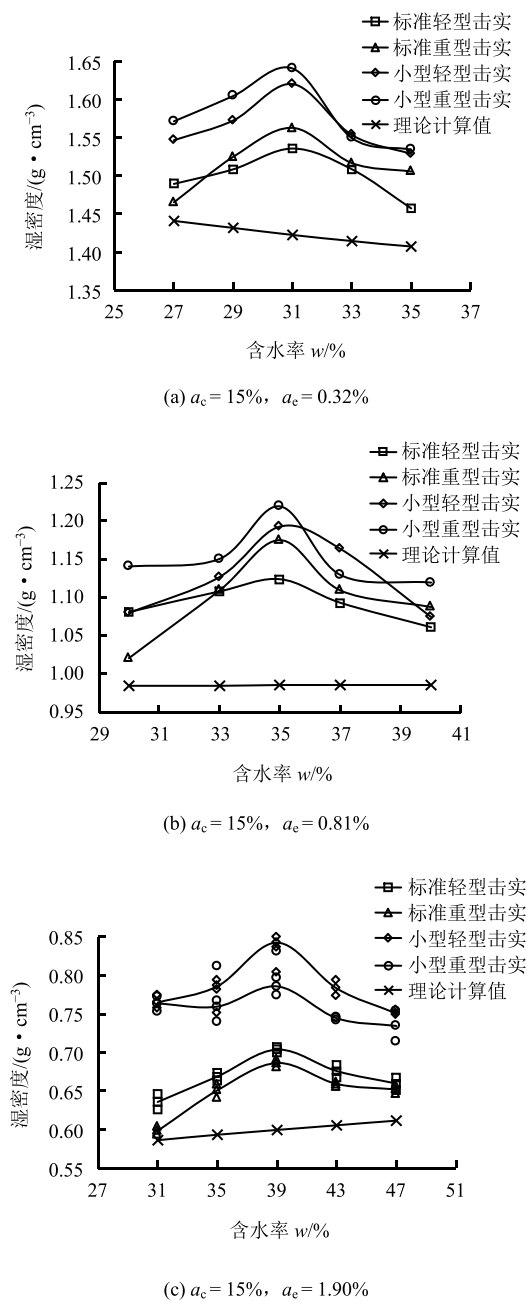


图 2 湿密度-含水率关系曲线

Fig.2 Curves of wet density and water content

(2) 根据侯天顺等^[21, 23]推导的轻量土理想密度模型, 对轻量土理论湿密度进行计算。由于 EPS 颗粒体积置换率的不同, 配比为 $a_c = 15\%$, $a_e = 0.32\%$ 的轻量土, 理论湿密度随含水率的增大而线性减小; 配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.81\%$ 和 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 1.90\%$ 的轻量土, 理论湿密度随含水率的增大而线性增大。同一配比的轻量土试样, 在 4 类击实试验中, 相同含水率时理论计算湿密度均小于击实后的实测湿密度。对于配比为 $a_c = 15\%$, $a_e = 0.32\%$ 、 0.81% 、 1.90%

的轻量土,在标准轻型击实试验中,理论计算湿密度相比于实测最大湿密度绝对误差依次为-0.113、-0.138、-0.104 g/cm³,相对误差依次为-7.906%、-14.046%、-17.340%。表明击实作用对轻量土的湿密度提高明显,轻量土击实后的湿密度不是各物质的简单掺和。理想密度模型不能反映击实作用后轻量土湿密度的变化规律,只能从混合土物质组成方面反映轻量土的湿密度大小。

(3) 对于同一配比的轻量土试样,在 4 类击实试验中,受击实筒尺寸效应的影响,相同击实功能时,小型击实试验的湿密度基本大于标准击实试验的湿密度。对于同类击实试验,重型击实试验的湿密度基本大于轻型击实试验的湿密度。与击实试验类型对干密度的影响原因相同,在轻量土配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 1.90\%$ 时,湿密度规律也出现反常。

3.3 击实试验类型对 EPS 颗粒体积压缩率的影响

为了阐明在击实过程中由于 EPS 泡沫的塑性变形而引起的轻量土密实度变化的机制,定义 EPS 颗粒体积压缩率 t_e [21] 为

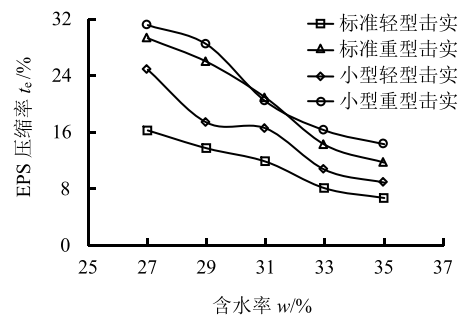
$$t_e = \frac{v_0 - v_1}{v_0} \times 100\% = \left(1 - \frac{v_2 - \frac{m_2 - m_1}{\rho_w}}{\frac{m_1 - m_0}{\rho_e}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: t_e 为 EPS 体积压缩率; v_0 为压缩前干燥 EPS 颗粒的体积; v_1 为压缩后干燥 EPS 颗粒的体积; v_2 为锥形瓶的体积; m_0 为锥形瓶的质量; m_1 为压缩后的干燥 EPS 泡沫颗粒和锥形瓶的总质量; m_2 为压缩后的 EPS 颗粒、水和锥形瓶的总质量; ρ_w 为纯水的密度,取 1 g/cm³; ρ_e 为 EPS 的纯颗粒密度,取 0.010 6 g/cm³。

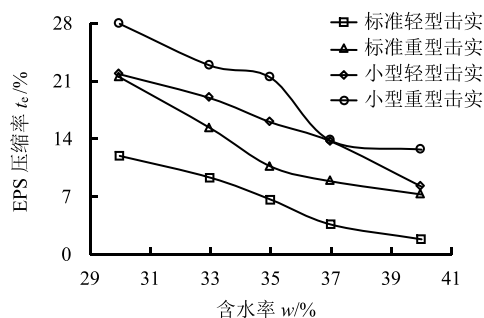
在试验过程中,基于质量守恒原理,利用排水法按照如下步骤对 EPS 颗粒体积压缩率 t_e 进行测量 [11]: ①随机选取部分击实后的 EPS 泡沫颗粒,缓慢地对其进行洗涤至表面不再残存土粒,然后自然风干,多次称量直至颗粒质量不变; ②将经风干处理的压缩后 EPS 泡沫颗粒装入已知体积和质量的锥形瓶中,称量锥形瓶和泡沫的总质量; ③用具有一定重量的纱网蒙住瓶口,同时向锥形瓶中注水,直至水满,多次注水多次称量直至质量基本不变,此时可认为瓶内 EPS 颗粒周围的孔隙全部被水充满,称量压缩后的 EPS 颗粒、水和锥形瓶的总质量; ④利用式 (1) 对体积压缩率 t_e 进行计算。

由图 3 可知:

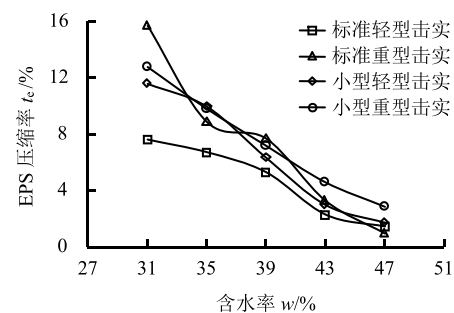
(1) 同一配比的轻量土试样,在 4 类击实试验



(a) $a_c = 15\%$, $a_e = 0.32\%$



(b) $a_c = 15\%$, $a_e = 0.81\%$



(c) $a_c = 15\%$, $a_e = 1.90\%$

图 3 EPS 颗粒体积压缩率-含水率关系曲线
Fig.3 Relationship between volume compression ratio and water content of EPS particles

中, EPS 颗粒体积压缩率随含水率的增加而减小。对于不同配比的轻量土试样, EPS 颗粒体积压缩率随 EPS 掺量的增加而减小。对于配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.32\%$ 、 0.81% 、 1.90% 的轻量土试样,在标准轻型击实试验中,随着含水率的逐渐增大, EPS 颗粒体积压缩率 t_e 的变化范围依次为 16.35%~6.782%、11.914%~1.833%、7.613%~1.434%。

(2) 同一配轻量土试样,在 4 类击实试验中,相同击实功能时,小型击实试验的 EPS 颗粒体积压缩率大于标准击实试验。同类型击实试验,重型击实试验的 EPS 颗粒体积压缩率基本大于轻型击实试验,随着击实功的增加, EPS 颗粒体积压缩率的增加幅度不明显。对于配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.81\%$ 的轻量土试样,当击实功由 592.2 kJ/m³ 增大到 2 684.9 kJ/m³,即提高至 4.534 倍,以小型轻型

击实试验的 EPS 体积压缩率为标准, 小型重型击实试验 EPS 压缩率的绝对增长量为 0.124%~6.08%,

相对增加量为 0.907%~27.794%, 对应的 EPS 颗粒压缩形态对比如图 4(c)、4(d)所示。

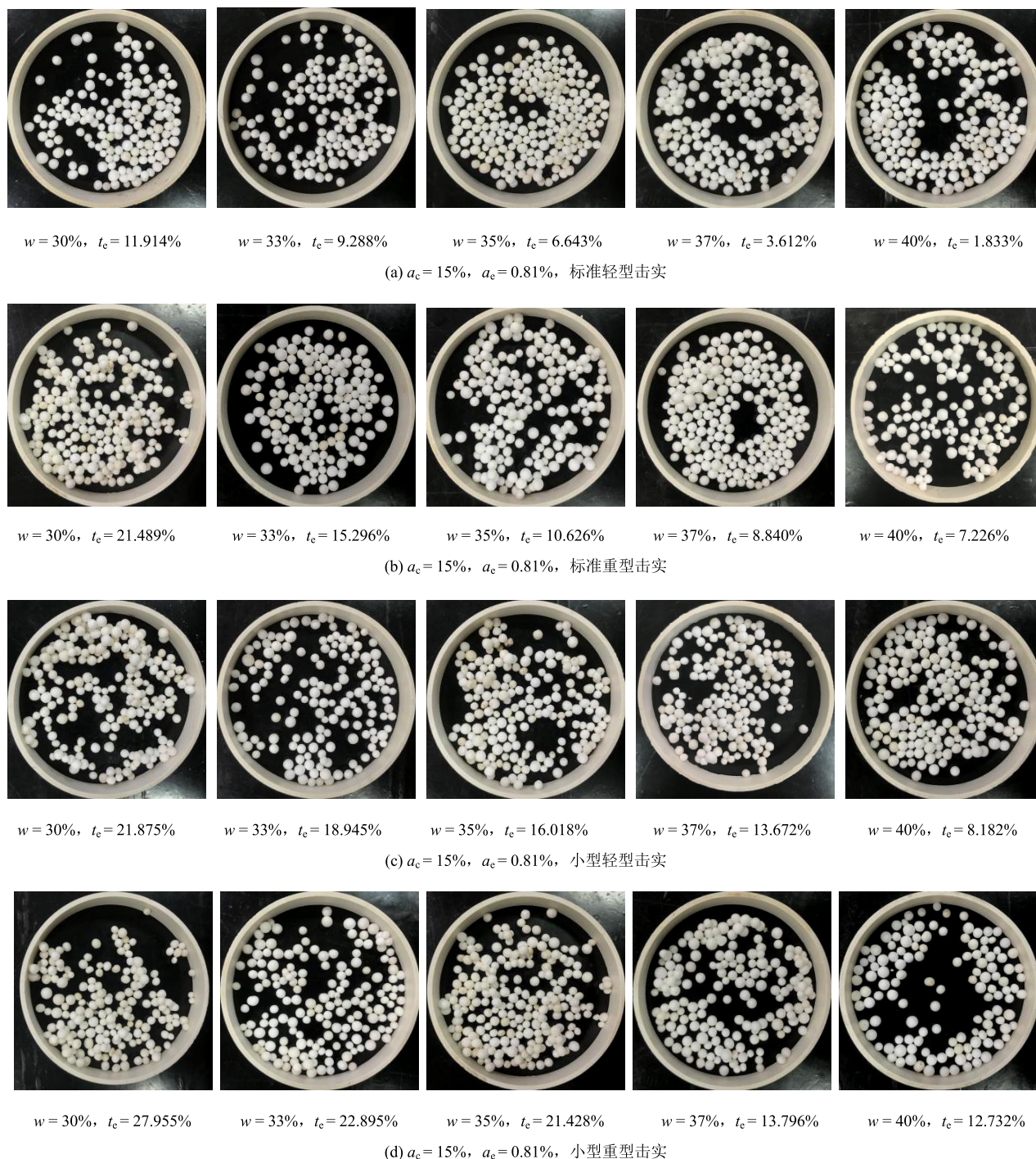


图 4 EPS 颗粒体积压缩图
Fig.4 Volume compression images of the EPS particles

基于上述结果, 对 4 类击实试验中含水率影响 EPS 颗粒体积压缩率的原因进行分析, 主要有:

(1) 当含水率和 EPS 掺量较小时, 土颗粒质量相对较多, 土颗粒和水泥形成的混合物包裹着 EPS 颗粒, 在击锤的作用下, 击实功便于从土颗粒传递到 EPS 颗粒上, 造成 EPS 的塑性压缩, 而且击实功

越大, EPS 颗粒压缩率越高。当含水率和 EPS 掺量较大时, 由于试样内部形成的“弹簧体”和孔隙水压力造成击实功的消散, 击实功不易作用于 EPS 颗粒上, 导致 EPS 颗粒压缩率较小。

(2) 由于受尺寸效应的影响, 相比于标准击实试验, EPS 颗粒在小型击实试验的击实筒内更易受

到压缩, 塑性变形更大。EPS 颗粒属于可压缩性材料, 在轻量土击实过程中, EPS 颗粒产生塑性变形, 但击实能量使 EPS 产生塑性变形的能力是一定的, 塑性变形不可能无限增大, 存在塑性变形和击实功阈值^[24]。随着击实功的增加, EPS 塑性变形的增加速率在减小, EPS 塑性变形的能力达到一定值后, 再增加击实功, 击实的能量被弹性变形吸收, 塑性压缩值不再增加, 这也是轻量土击实和素土击实的差异。

选择轻量土配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.81\%$ 的部分 EPS 颗粒, 对其在标准轻型、标准重型、小型轻型、小型重型 4 类击实试验后的压缩形态进行对比, 如图 4 所示。可发现: 随着含水率的变化, 4 类击实试验后的 EPS 颗粒均具有明显的塑性变形, EPS 被不同程度的压扁。相同击实功作用下, 小型击实试验 EPS 颗粒的塑性变形大于标准击实试验。随击实功的增加, EPS 颗粒塑性变形基本随之增加, 但增加的幅度较小。

3.4 不同击实试验类型下的试验结果与讨论

由表 3、4 可知:

(1) 配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.32\%$ 、 0.81% 、 1.90% 的轻量土, 在 4 类击实试验中, 最优含水率分别接近 31.00% 、 35.00% 、 39.00% ; 以标准轻型击实试验的最大干密度为标准, 其他 3 类击实试验最大干密度绝对增长量最大值为 0.072 g/cm^3 , 相对增长量最大值为 13.611% 。因此, 对于同一配比重量土, 4 类击实试验所得到的最优含水率和最大干密度基本相同。

(2) 配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.32\%$ 、 0.81% 、 1.90% 的轻量土, 在 4 类击实试验中, 相同击实功时, 小型击实试验所得到的最大干密度大于标准击实试验。配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.32\%$ 、 0.81% 的轻量土, 重型击实试验所得到的最大干密度大于轻型击实试验, 但增加幅度较小, 配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 1.90\%$ 时规律相反。

(3) 配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.32\%$ 、 0.81% 、 1.90% 的轻量土, EPS 颗粒压缩率随含水率和 EPS 掺量的增加而减小。当 EPS 掺量体积比达到 70% 时, 高含水率时 EPS 颗粒基本无压缩。

基于对试验结果的分析, 有如下 5 点讨论:

(1) 4 类击实试验对轻量土最优含水率和最大干密度的影响较小, 表明通过室内三轴仪饱和器进行的小型击实试验代替标准击实试验确定轻量土的最优含水率和最大干密度的方法是可行的, 可大大减少工作量。此试验结论是对侯天顺等提出的轻量

土最优含水率模型和击实密度模型强有力的佐证^[1, 20-21], 同时是对前人归纳总结的有关轻量土击实特性理论的补充和完善。

(2) 无论是小型击实试验还是标准击实试验, 不能靠无限制增加击实功和击实次数来提高密实度和强度, 以免造成击实功的浪费。本试验中, 对于配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.81\%$ (对应体积比 $b_e = 50\%$) 的轻量土, 击实功由 592.2 kJ/m^3 增大到 $2\ 684.9 \text{ kJ/m}^3$, 即提高至 4.534 倍, 小型击实试验干密度提高至 1.022 倍。侯天顺的试验结果表明^[1], 对于 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 3\%$ (对应体积比 $b_e = 50\%$) 的轻量土试样, 击实次数增至 3.76 倍, 强度仅增至 $1.04 \sim 1.32$ 倍, 对应强度差值范围仅为 $13.9 \sim 51.2 \text{ kPa}$ 。两试验结果综合表明, 增加击实功对轻量土密度和强度的提高不明显。

(3) 在原料土中加入 EPS 泡沫和水泥, 利用 EPS 颗粒的轻质性减小土体自重, 利用水泥水解水化产生的胶凝状物质包裹土和 EPS 形成轻量土的强度, 这是轻量土应用的初衷。然而, 纯粹通过增大击实功以提高轻量土的干密度, 会造成 EPS 颗粒巨大的塑性压缩, 这与轻量土应用的初衷相违背。对于配比为 $a_c = 15\%$ 、 $a_e = 0.32\%$ 轻量土, 当含水率 $w = 27\%$ 时, 在小型重型压实试验下, EPS 体积压缩率 t_e 达到 31.174% , 击实功造成 EPS 显著的塑性压缩和颗粒密度的提高。此外, 本试验中主要测量了压实后 EPS 颗粒的塑性压缩变形, 弹性压缩变形有可能更大, 所以在实际施工过程中, 无限制增加击实功以提高轻量土密实度是一种应该规避的现象。

(4) 击实作用下, 轻量土的干密度在最优含水率前后对含水率的变化敏感度不同, 含水率对轻量土干密度的影响显著。含黏性土轻量土的击实特性类似于普通黏性土, 存在最优含水率, 所以, 在实际施工的过程中, 无论对轻量土采用夯击密实还是振动碾压密实, 均应控制含水率在最优含水率附近。本试验采用即拌即击的方式对轻量土进行处理, 假设在击实过程中含水率不变, 没有考虑养护龄期对轻量土击实特性的影响, 所以此问题仍待深入研究。

(5) 李明东等^[19]在新安江电厂“88-70 开关站”道路工程中直接将含水率合适的原料土、固化材料和泡沫塑料颗粒进行混合搅拌作为路基填料。杨少华等^[25]在甬余线洋溪河东桥头软基处理工程中, 利用马歇尔击实试验获得轻量土填料的最优含水率和最大干密度。两个工程实例都获得了较好的压实效果, 但施工过程中轻量土填料最优含水率的确定方

法仍可以进一步改进。结合本试验的结果，在工程实践中，根据现有试验设备，建议使用小型轻型击实试验或标准轻型击实试验代替小型重型、标准重型、马歇尔击实试验确定轻量土填料的最优含水率

和最大干密度，以节省工作量。在施工过程中，建议根据需要埋设沉降板、测斜管、土压力盒及应变计等观测仪器，对轻量土路基在施工期和运行期的沉降变形和强度进行监测。

表 3 标准击实试验结果对比表

Table 3 Comparison of the standard compaction test results

试验类型 (击实功)	$a_c/\%$	$a_c/\%(b_c/\%)$	$w/\%$	最优含水率 $w_{op}/\%$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	EPS 颗粒体积压缩率 $t_c/\%$
标准轻型 击实试验 (592.2 kJ/m ³)	15	0.32 (30)	27	30.62	1.208	1.213	16.350
			29		1.206		13.813
			31		1.211		11.919
			33		1.173		8.142
			35		1.118		6.782
		0.81 (50)	30	34.56	0.859	0.864	11.914
			33		0.862		9.288
			35		0.863		6.643
			37		0.829		3.612
			40		0.789		1.833
		1.90 (70)	31	38.65	0.503	0.529	7.613
			35		0.515		6.720
			39		0.528		5.287
			43		0.495		2.278
			47		0.471		1.434
标准重型 击实试验 (2 684.9 kJ/m ³)	15	0.32 (30)	27	30.77	1.188	1.233	29.365
			29		1.219		25.999
			31		1.232		20.881
			33		1.179		14.231
			35		1.155		11.708
		0.81 (50)	30	34.93	0.811	0.904	21.489
			33		0.864		15.296
			35		0.903		10.626
			37		0.841		8.840
			40		0.808		7.226
		1.90 (70)	31	38.72	0.474	0.515	15.685
			35		0.501		8.863
			39		0.514		7.675
			43		0.482		3.275
			47		0.465		0.955

4 结 论

(1) 同一配比的轻量土试样，在 4 类击实试验中干密度和湿密度随含水率的增大，先增加后减小，曲线形态类似抛物线，所得到的最优含水率基本相同，含黏性土轻量土具有与普通黏性土类似的击实特性，击实类型对轻量土最优含水率的影响较小。

不同配比的轻量土试样，随着 EPS 掺量的增加，最优含水率逐渐增大，EPS 掺量对最优含水率影响较大。

(2) 同配比轻量土试样，在 4 类击实试验中所得到的最大干密度存在差异，但差异较小。受尺寸效应的影响，在相同击实功时，小型击实试验的最大干密度大于标准击实试验。重型击实试验的最大

表 4 小型击实试验结果对比表
Table 4 Comparison of the small-type compaction test results

试验类型 (击实功)	$a_c / \%$	$a_c / \%(b_c / \%)$	$w / \%$	最优含水率 $w_{op} / \%$	干密度 $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$	最大干密度 $\rho_{dmax} / (g \cdot cm^{-3})$	EPS 颗粒体积压缩率 $t_c / \%$
小型轻型 击实试验 (592.2 kJ/m ³)	15	0.32 (30)	27	30.81	1.253	1.279	24.836
			29		1.257		17.377
			31		1.278		16.564
			33		1.208		10.728
			35		1.173		8.936
			30		0.858		21.875
		0.81 (50)	33	35.02	0.877	0.918	18.945
			35		0.916		16.018
			37		0.882		13.672
			40		0.799		8.182
			31		0.577		11.562
			35		0.578		9.942
		1.90 (70)	39	38.95	0.599	0.601	6.305
			43		0.546		2.958
			47		0.511		1.701
小型重型 击实试验 (2 684.9 kJ/m ³)	15	0.32 (30)	27	30.75	1.274	1.295	31.174
			29		1.282		28.428
			31		1.294		20.377
			33		1.205		16.331
			35		1.178		14.382
			30		0.906		27.955
		0.81 (50)	33	34.96	0.896	0.938	22.895
			35		0.937		21.428
			37		0.856		13.796
			40		0.832		12.732
			31		0.575		12.768
			35		0.552		9.796
		1.90 (70)	39	39.04	0.577	0.579	7.171
			43		0.519		4.589
			47		0.499		2.854

干密度基本大于轻型击实试验, 击实功的增加, 对轻量子干密度和强度的提高不明显。

(3) 4 类击实试验下 EPS 颗粒均具有明显的塑性压缩, EPS 颗粒体积压缩率随含水率和 EPS 颗粒掺量的增加而减小, 其变化范围为 0.955%~31.174%。相同击实功下, 小型击实试验的 EPS 压缩率大于标准击实试验。增加击实功, EPS 压缩率的增幅较小。轻量子密实度的提高是混合土孔隙比减小和 EPS 颗粒塑性压缩双重作用的结果, 纯粹增大击实功能以提高轻量子干密度, 会引起 EPS 的高度压缩, 这与轻量子应用的初衷相违背。

(4) 利用室内三轴仪饱和器进行的小型击实试验代替标准击实试验确定轻量子干密度的最优含水率和最

大干密度的方法是可行的, 可大大减少工作量。同时, 为前人提出的最优含水率模型、击实密度模型及其验证提供了强有力的佐证。

参考文献

- [1] 侯天顺, 徐光黎. 轻量子最优含水率模型与检验[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1129-1134.
HOU Tian-shun, XU Guang-li. Optimum water content models and tests of light weight soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(7): 1129-1134.
- [2] 侯天顺, 徐光黎. EPS 粒径对轻量子抗剪强度的影响规律[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1634-1641.

- HOU Tian-shun, XU Guang-li. Influence law of EPS size on shear strength of light weight soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(10): 1634-1641.
- [3] 徐光黎, 杨银湖. 轻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-wight soils and their applications[J]. **Geological Science and Technology Information**, 2005, 24(4): 94-98.
- [4] 横田圣哉, 三嶋信雄. 泡沫混合轻土[J]. 于晓波译. 路基工程, 1997(4): 81-86.
- YOKOT A, MISHIMA N. Foam light-weight soil[J]. Translated by YU Xiao-bo. **Subgrade Engineering**, 1997(4): 81-86.
- [5] SIMEN V D. A review of the Netherlands approach to the use of form concrete in Holland and at Canary Wharf[J]. **Concrete**, 1991, 25(5): 49-54.
- [6] HORIUCHI S, UCHIYAMA N, ODAWARA T, et al. Flash-setting lightweight material-a first step to floating island construction[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1996, 8(3): 138-146.
- [7] YAMADA S, NAGASAKA Y, NISHIDA N, et al. Foamed particle light-weight soil with sand[J]. **Soils and Foundations**, 1989, 37(2): 25-30.
- [8] 朱伟, 姬凤玲, 李明东, 等. 轻质土密度、强度与材料组成的关系研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1411-1414.
- ZHU Wei, JI Feng-ling, LI Ming-dong, et al. Relationships among density, strength and materials of lightweight treated soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(7): 1411-1414.
- [9] 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.
- [10] 黎冰. 动荷载下粘土与 EPS 颗粒混合轻土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.
- [11] 侯天顺. 淤泥发泡颗粒混合轻土力学性质的试验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.
- HOU Tian-shun. Experimental study on mechanical properties of foamed particle light weight soil mixed with silt[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008.
- [12] 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.
- [13] CHENARI R J, FATAHI B, GHORBANI A, et al. Evaluation of strength properties of cement stabilized sand mixed with EPS beads and fly ash[J]. **Geomechanics and Engineering**, 2018, 14(6): 533-544.
- [14] GURTUG Y, SRIDHARAN A, LKIZLER S B. Simplified method to predict compaction curves and characteristics of soils[J]. **Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering**, 2018, 42(3): 207-216.
- [15] UL REHMAN A, FAROOQ K, MUJTABA H. Prediction of California bearing ratio (CBR) and compaction characteristics of granular soils[J]. **Acta Geotechnica Slovenica**, 2017, 14(1): 62-72.
- [16] SOLTANI A, DENG A, TAHERI A, et al. Consistency limits and compaction characteristics of clay soils containing rubber waste[J]. **Proceedings of The Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering**, 2019, 172(2): 174-188.
- [17] 汤峻, 朱伟, 李明东, 等. 砂土 EPS 颗粒混合轻土土的物理力学特性[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1045-1049.
- TANG Jun, ZHU Wei, LI Ming-dong, et al. Physico-mechanical properties of sand EPS beads-mixed lightweight soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 1045-1049.
- [18] 李明东, 朱伟, 张春雷, 等. 击实参数对砂土 EPS 颗粒混合轻土的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 814-817.
- LI Ming-dong, ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, et al. Effect of compaction parameters on lightweight sand-EPS beads soil[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2008, 36(6): 814-817.

- [19] 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.
- LI Ming-dong, ZHU Wei, MA Dian-guang, et al. Construction technology and application in-situ of expanded polystyrene treated lightweight soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(4): 533-536.
- [20] 朱伟, 李明东, 张春雷, 等. 砂土 EPS 颗粒混合轻质土的最优击实含水率[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 21-25.
- ZHU Wei, LI Ming-dong, ZHANG Chun-lei, et al. The optimum moisture content of sand EPS beads mixed lightweight soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(1): 21-25.
- [21] HOU T S. Model for compaction density and engineering properties of light weight soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(11): 2127-2135.
- [22] 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.
- The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T50123 — 1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [23] 侯天顺. 特征含水率对轻量土基本性质的影响规律[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2581-2587.
- HOU Tian-shun. Influence law of characteristic water content on basic properties of light weight soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(9): 2581-2587.
- [24] 李明东, 朱伟, 张春雷. 软夹杂土体的击实模型[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 149-153.
- LI Ming-dong, ZHU Wei, ZHANG Chun-lei. A compaction model of soft inclusion soils[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2009, 42(12): 149-153.
- [25] 杨少华, 胡建福, 曾怀武, 等. 人造轻质土在高等级公路上的应用[J]. 公路, 2006(6): 81-86.
- YANG Shao-hua, HU Jian-fu, ZENG Huai-wu, et al. Application of man-made light soil in high grade highway[J]. **Highway**, 2006(6): 81-86.

上接第 1970 页

- [14] CHEN G X, ZHAO D F, CHEN W Y, et al. Excess pore-water pressure generation in cyclic undrained testing[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2019, 145(7): 04019022.
- [15] CHO G, SANTAMARINA J C, DODDS J. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(5): 591-602.
- [16] CHEN G X, ZHOU Z L, SUN T, et al. Shear modulus and damping ratio of sand-gravel mixtures over a wide strain range[J]. **Journal of Earthquake Engineering**, 2019, 23(8): 1407-1440.
- [17] CATANO J, PANDO M A. Static and dynamic properties of a calcareous sand from southwest Puerto Rico[C]// GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling and Design. Orlando: ASCE, 2010: 842-851.