

文章编号: 1000-7598-(2006)02-0286-04

聚苯乙烯轻质混合土的压缩变形特性试验研究

董金梅^{1,2}, 刘汉龙¹, 洪振舜³, 王 沛⁴, 高玉峰¹

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098; 2. 南京工业大学 土木工程学院, 南京 210009;
3. 东南大学 岩土工程研究所, 南京 210096; 4. 天津城市建设学院 土木工程系, 天津 300384)

摘 要: 聚苯乙烯轻质混合土是一种新型的填土材料, 国内对其压缩变形特性的试验研究较少。在无侧限抗压强度试验基础上, 分析了聚苯乙烯轻质混合土的破坏应变、变形系数与抗压强度的关系; 依据单向固结压缩试验, 分析了不同配比条件混合土的压缩变形特性, 得到压缩屈服应力和压缩模量, 可为工程应用提供参考依据。

关 键 词: 聚苯乙烯轻质混合土; 破坏应变; 变形系数; 屈服应力; 压缩模量

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Test study on compression and deformation behavior of light heterogeneous soil mixed with expanded polystyrene

DONG Jin-mei^{1,2}, LIU Han-long¹, HONG Zhen-shun³, WANG Pei⁴, GAO Yu-feng¹,

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil Engineering Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 4. Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

Abstract: Light heterogeneous soil mixed expanded polystyrene is a new kind of fill materials. The test studies are very scarce in China. In present study, based on unconfined compressive tests, the relationships between failure strain and compression strength, and between deformation coefficient and compression strength are analyzed. And according to one-dimensional consolidation compression tests, yield stresses and compressive modulus under different conditions of mixture ratios are obtained so as to provide reference for the application in engineering.

Key words: light heterogeneous soil with expanded polystyrene; failure strain; deformation coefficient; yield stress; compressive modulus

1 前 言

聚苯乙烯轻质混合土是基于材料本身的轻量化、易施工性及可利用建设废弃物、弃土淤泥、工业废料等废弃物而开发研制的一种新型填土材料, 由原料土、水泥、聚苯乙烯(expanded polystyrene, 简称 EPS)颗粒和水 4 种材料混合而成, 具有重量轻、流动性好和强度高特点, 在岩土工程中有广泛的应用前景。轻质混合土在国外的研究应用开始于 20 世纪 70 年代, 到现在已取得了一定的成果, 如日本在这方面的应用较多, 处于国际领先地位, 从 1988 年开始在实际工程中应用聚苯乙烯轻质混合土以来, 到 1994 年已经有 17 个工程实例了, 总施工量达 19 490 m³^[1]。我国在这方面的研究起步较晚, 应用尚属空白, 而且我国的土质和现场施工条

件与国外不同, 因此在我国研究轻质混合土的工程特性, 以指导实际工程应用, 具有比较重要的意义。

国外关于轻质混合土工程特性的研究成果较多, 其中有不少是关于气泡轻量混合土压缩变形特性^[2]方面的研究, 但尚未见到关于聚苯乙烯轻质混合土压缩变形特性方面的研究资料。马时冬^[3]、张小平^[4]等对原料土为砂土的轻质混合土作过一些研究探讨, 但主要是关于强度特性方面的研究成果。目前关于聚苯乙烯轻质混合土压缩变形特性方面的研究还很少。笔者在文[5~7]中对聚苯乙烯轻质混合土的抗压强度特性、应力应变特性、物理力学特性的影响因素进行了分析, 本文在此基础上, 对聚苯乙烯轻质混合土在无侧限和有侧限时的压缩变形特性进行系统地分析研究, 以期工程应用中

进一步分析轻质混合土填土的工后沉降和稳定性提供可靠的设计参数。

2 试验方法

试验选用的原料土取自南京市河西區地基深处的弃土淤泥,为淤泥质粉质黏土,其物理性质指标见表1。水泥为南京宁峰水泥厂标号为425的普通硅酸盐水泥, EPS 颗粒粒径为2~4 mm,用水为自来水或清洁的江河水。

表1 土样的主要物理力学性质指标

Table 1 Values of physico-mechanical indexes of the soil

含水量 /%	湿密度 /g·cm ⁻³	液限 /%	塑限 /%	液性 指数	塑性 指数	压缩系数 /MPa ⁻¹	压缩模量 /MPa
38	1.88	35.56	22.60	1.2	13	0.5	2.75

试验时,先在原料土中加入一定比例的水,对原料土的含水量进行调整,调整标准是依据施工条件而确定一个范围(如干土质量的50%~90%),本次试验的含水量调整为60%(因该含水量的混合土有一定的流动性,且试样的强度较稳定),采用B10型搅拌机搅拌均匀,使之成为泥浆,并具有一定的流动性。然后,再加入不同比例的EPS颗粒、水泥混合搅拌成均匀的水泥浆体。无侧限抗压强度试验是将水泥浆体制成直径为39.1 mm,高80 mm的试样,放入标准养护箱内养护到规定龄期后,直接进行抗压强度的测试;单向压缩固结试验是将水泥浆体放入直径为61.8 mm,高20 mm的环刀内,不脱模,将试样连同环刀一并放入标准养护箱内,养护到规定龄期,进行抽气饱和,浸透一昼夜后,放在侧限固结仪里做压缩固结试验。

目前还没有关于轻质混合土的试验规程,两种试验都依据土工试验方法标准(GB/T-50123-1999)进行试验。本次试中的试样密度在0.72~1.114 g/cm³之间,水泥掺入比为10%,15%,20%和25%(以干土质量为标准),取2~3个数据的平均值作为最终结果。

3 无侧限条件下的变形特性

对含水量为60%,不同水泥掺入比(10%,15%,20%,25%)、不同密度(0.72~1.114 g/cm³)的聚苯乙烯轻质混合土试样进行无侧限抗压强度试验,得到了破坏应变、变形系数与抗压强度的关系。

3.1 破坏应变与抗压强度的关系

破坏应变 ε_f 是指抗压强度达到最大值时所对应的应变,是衡量聚苯乙烯轻质混合土变形特性的重要指标之一。破坏应变大的材料可视为延性较好,反之,破坏应变小,则材料常为脆性破坏。工

程中往往以延性材料为理想。图1为聚苯乙烯轻质混合土抗压强度与破坏应变的关系,虽然图中数据有一定的离散性,但破坏应变与抗压强度的变化趋势基本上为乘幂关系, $\varepsilon_f = a q_u^b$,其中 q_u 为抗压强度破坏应变随抗压强度的增高而逐渐减小,破坏应变绝大多数分布在1.5%~5%之间。当 $q_u < 200$ kPa时,破坏应变较大,降低幅度也大;当 $q_u > 200$ kPa时,破坏应变小,变化幅度减小,这种关系对根据轻质混合土的抗压强度定性分析它的变形破坏方式,具有一定的参考价值。本次试验结果 $a=100.63$, $b=-0.7058$, $R^2=0.8456$ 。图1与水泥土的破坏应变结果^[8]有很大相似性,但破坏应变 ε_f 大多数分布在0.5%~2%之间,轻质混合土与水泥固化土相比,延性较好。

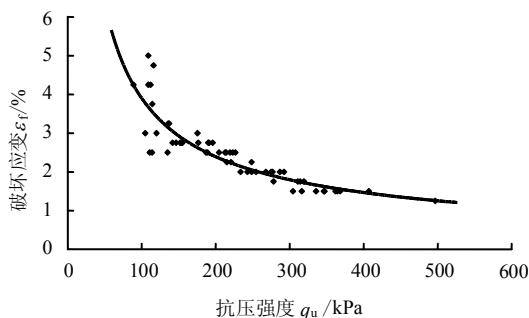


图1 破坏应变与抗压强度的关系

Fig.1 Relationship between strain at failure and compressive strength

3.2 变形系数与抗压强度的关系

变形模量是无侧限条件下压应力与相应压缩应变的比值,反映材料抵抗弹塑性变形的能力,可用于弹塑性问题的分析计算。混合土为非线性变形,变形模量不是一个确定的数,可用变形系数 E_{50} 作为表征混合土变形特性的一个参数,定义为

$$E_{50} = \frac{\sigma_{1/2}}{1/2\varepsilon_f} \quad (1)$$

式中 $\sigma_{1/2}$ 为应变为破坏应变一半时所对应的应力; E_{50} 可视为此时的割线模量。变形系数由无侧限抗压强度试验得出,它与无侧限抗压强度一样,受水泥掺入比、密度和龄期等的影响^[5]。综合上述因素的影响,归结为如图2中变形系数 E_{50} 与抗压强度的关系,可见二者也呈乘幂关系。本次试验中,聚苯乙烯轻质混合土可用 $E_{50} = a q_u^b$ 的经验关系作为推估的依据,其中 a, b 为常数, $a=0.0015$, $b=1.7194$, $R^2=0.9649$ 。但是,有些日本的相关资料认为轻质混合土变形系数与抗压强度为线性关系^[8],汤怡新等也对水泥固化土的变形系数与抗压

强度为线性关系作了介绍^[8]。本次试验的结论与他们结论不同,究其原因主要是混合土的配比标准和原料土的土粒成分不同所致。

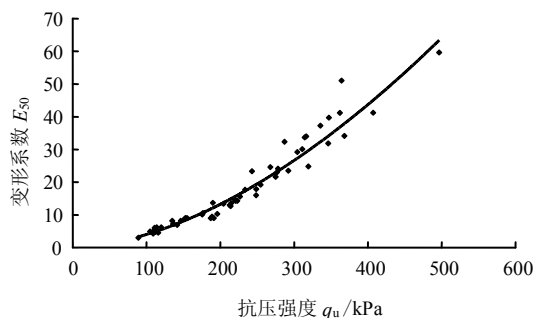


图2 变形系数与抗压强度的关系

Fig.2 Relationship between deformation coefficient and compressive strength

4 有侧限条件下的压缩变形特性分析

在实际工程中,为准确预测聚苯乙烯轻质混合土的沉降量和稳定性,需要了解轻质混合土的压缩变形特性,确定聚苯乙烯轻质混合土的屈服应力和压缩模量。通过单向压缩固结试验,本文针对聚苯乙烯轻质混合土的特有问题,分析了水泥掺入比、密度和龄期对聚苯乙烯轻质混合土压缩变形特性的影响。

4.1 不同水泥掺入比的压缩变形特性

图3为含水量60%,密度为0.845~0.866 g/cm³,水泥掺入比不同时的荷载与变形关系曲线。可以看出,水泥掺入比对压缩变形量的影响比较明显,不论7 d,还是28 d,水泥掺入比高时,相同荷载下的变形量小。整个变形曲线分为几个阶段:荷载小于压缩屈服应力(荷载与变形近似呈线性关系时所对应的最大应力)时,不同水泥掺入比的聚苯乙烯轻质混合土的变形量都比较小,变形与荷载为线性关系;当荷载超过压缩屈服应力而小于800 kPa时,变形量有大幅度的增大,说明荷载超过压缩屈服应力后,轻质混合土抵抗变形的能力减弱,变形量变大;当荷载超过800 kPa时,水泥掺入比10%的轻质混合土,变形量较大,已趋于稳定,变形幅度减小。水泥掺入比为15%和20%的轻质混合土,变形幅度较大,表明这两种情况水泥掺入比的轻质混合土,水泥的固化作用较强,而变形相对缓慢,没有达到稳定,继续增大。

龄期的影响是使各个阶段的变形量减小。当荷载小于压缩屈服应力时,龄期对变形量的影响不明显;当荷载大于压缩屈服应力时,在相同荷载下龄

期长,总体变形量小。

由图3中的曲线可以得到不同水泥掺入比和不同龄期时的压缩模量和屈服应力。屈服应力取从原点出发的直线与曲线发生弯曲后下段直线反向延长线交点处对应的应力,见表2,表中数据表明水泥掺入比高、龄期长、压缩模量和屈服应力大。聚苯乙烯轻质混合土在屈服应力前后,压缩变形量会剧增数十倍,这个特性在工程设计时不可忽视,上部荷载最好不要超过屈服应力,否则会引起混合土的破坏或结构物的沉降。

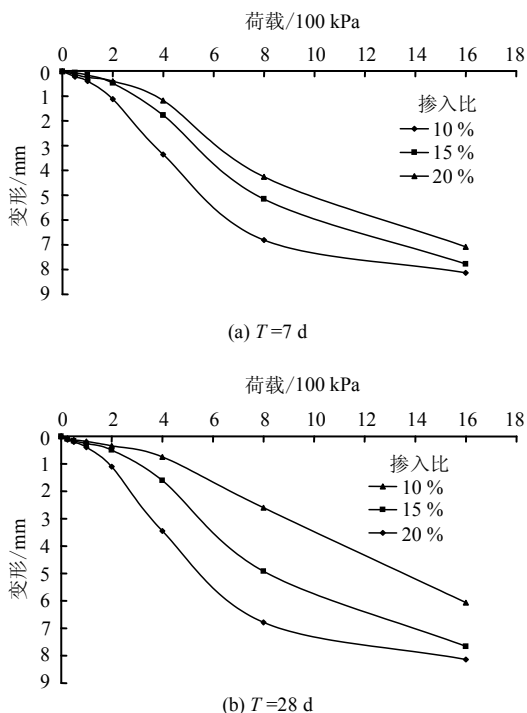


图3 不同水泥掺入比荷载与变形曲线

Fig.3 Compressive curves under different cement-mixed ratios

表2 聚苯乙烯轻质混合土的压缩模量和屈服应力
Table 2 Compressive strength and yield stress of light heterogeneous soil mixed with expanded polystyrene

龄期 T/d	ρ /g·cm ⁻³	不同水泥掺入比 C(%) 压缩模量及屈服应力					
		10		15		20	
		E_s /MPa	q_y /kPa	E_s /MPa	q_y /kPa	E_s /MPa	q_y /kPa
7	1.042~1.10			97.37	175		
	0.945~0.982			86.95	170		
	0.845~0.866	26.70	125	67.92	175	77.28	250
	0.72			39.68	160		
	1.042~1.10			129.29	300		
28	0.945~0.982			100.7	285		
	0.845~0.866	30.53	145	80.45	275	138.83	320
	0.72			54.45	280		

注: C 为水泥质量除以干土质量, q_y 为屈服应力。

4.2 不同密度的压缩变形特性

图4为水泥掺入比为15%,含水量为60%,

不同密度的聚苯乙烯轻质混合土的压缩变形曲线。密度由高到低, EPS 颗粒的含量分别对应干土质量的 2%~5%。变形曲线与不同水泥掺入比的变形曲线相似, 也分为几个阶段, 并且不同密度的变形曲线变形趋势相同(密度为 0.72 g/cm^3 的例外)。密度对变形的影响也较大, 但没有水泥掺入比的影响明显。当荷载小于压缩屈服应力时, 变形量都较小, 密度大的试样反而比密度小试样的变形量稍大, 可能是 EPS 颗粒的骨架作用在此应力范围内有所发挥; 当荷载超过压缩屈服应力时, 变形的趋势逐渐变大, 密度越大, 变形量越小, 这是由于 EPS 颗粒含量不同导致的结果。虽然密度不同, 但屈服应力差别不大(表 2), 说明密度不是影响屈服应力的主要因素。同时也看到, 从屈服应力到 800 kPa 范围内, 变形幅度最大, 主要发生的是 EPS 颗粒的变形, EPS 颗粒含量越高, 变形越大, 尤其是密度为 0.72 g/cm^3 的试样, 在荷载超过屈服应力后变形为线性降低, 水泥在其中的固化作用比较弱; 屈服应力在 $800 \sim 1600 \text{ kPa}$ 时, 变形幅度降低, 说明 EPS 颗粒已发生了较大变形, 但变形还在持续, 并没有稳定的趋势。

从表中数据可看出, 密度对屈服应力影响很小, 但对压缩模量的影响较大, 密度越大, 压缩模量也越大。龄期的影响, 同样是使变形减小, 压缩模量和屈服应力增大, 但对变形趋势没有影响。

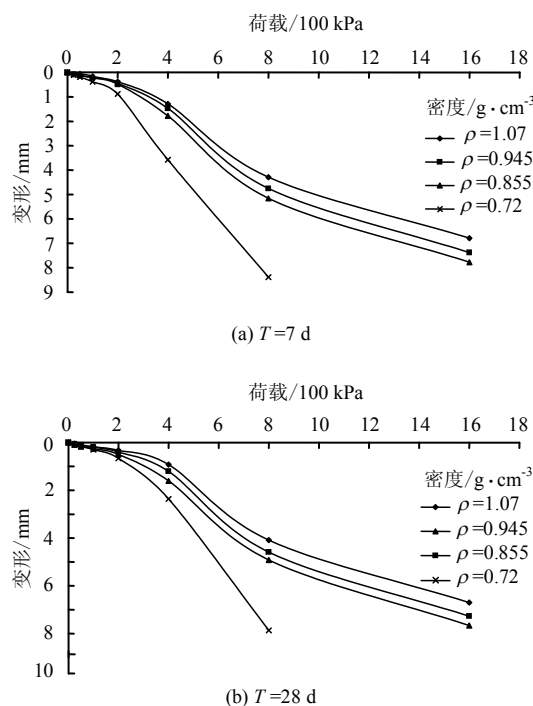


图4 不同密度的压缩曲线

Fig.4 Compressive curves under different densities

5 结 论

通过有侧限和无侧限条件下聚苯乙烯轻质混合土变形特性的试验研究, 得到如下结论:

(1) 聚苯乙烯轻质混合土的破坏应变与抗压强度的关系为乘幂关系。抗压强度较低时, 破坏应变较大, 延性比较明显; 随抗压强度的增大, 破坏应变逐渐减小, 由延性逐渐向脆性变化。

(2) 变形系数与抗压强度的关系也为乘幂关系, 变形系数随抗压强度的增高而变大。

(3) 聚苯乙烯轻质混合土的压缩变形特性受水泥掺入比、密度和龄期的影响, 变形量有所不同, 在相同应力下, 水泥掺入比高、密度大、龄期长的轻质混合土, 变形量小。反之, 变形量大。

(4) 水泥掺入比对压缩变形特性的影响, 比密度和龄期对压缩变形的影响要大。

(5) 压缩模量和屈服应力受水泥掺入比的影响较大, 随水泥掺入比的增大而增大; 密度对屈服应力影响不大, 对压缩模量影响较大, 密度大、压缩模量变大; 龄期的影响是使相同配比的聚苯乙烯轻质混合土变形量减小, 压缩模量和屈服应力增大。

上述结论是在本次试验配比范围内得到的, 是否适用于所有的聚苯乙烯轻质混合土, 还有待于今后的研究工作中进一步验证。

参 考 文 献

- [1] 李琪, 肖鹏, 张小平. 轻质回填材料的试验研究[J]. 华东公路, 2001, (4): 55—58.
LI Qi, XIAO Peng, ZHANG Xiao-ping. Test study on light backfill materials[J]. *East China Highway*, 2001, (4): 55—58.
- [2] 矢岛寿一, 丸尾茂樹, 小川正二, 气泡を混入した軽量土のせん断特性[A]. 土木学会論文集[C]. [s. l.]: 社团法人、土木学会、専務理事、三好逸二, 1994. 22—29.
- [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, (3): 245—248.
MA Shi-dong. The properties of stabilized light soil(SLS) with expanded polystyrene[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, (3): 245—248.
- [4] 张小平, 包承纲, 李进军. 泡沫轻质材料在岩土工程中的应用[J]. 岩土工程技术, 2000, (1): 58—62.
ZHANG Xiao-ping, BAO Cheng-gang, LI Jin-jun. Application of foam lightweight material in geotechnical engineering, technology of geotechnical engineering[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2000, (1): 58—62.

- [5] 董金梅, 刘汉龙, 高玉峰, 等. 聚苯乙烯轻质混合土抗压强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1 964—1 968.
DONG Jin-mei, LIU Han-long, GAO Yu-feng, et al. Study on the compressive strength properties of light heterogeneous soil mixed expanded polystyrene[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(12): 1 964—1 968.
- [6] 刘汉龙, 董金梅, 周云东, 等. 聚苯乙烯轻质混合土应力-应变特性分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 579—583.
LIU Han-long DONG Jin-mei, ZHOU Yun-dong, et al. Study on the stress-strain characteristics of light heterogeneous soil mixed expanded polystyrene[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(5): 579—583.
- [7] 刘汉龙, 董金梅, 周云东, 等. 聚苯乙烯轻质混合土物理力学特性的影响因素[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 445—449.
LIU Han-long, DONG Jin-mei, ZHOU Yun-dong, et al. Influence factors on physical and mechanic properties of the light soil mixed polystyrene[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(3): 445—449.
- [8] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, (5): 549—554.
TANG Yi-xin, LIU Han-long, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, (5): 549—554.
- [9] 土田孝, 腾骑治男. 卷沚正治, 等. 建設発生土を原料土とする軽量混合処理土の護岸工事への適用[A]. 土木学会論文集[C]. 日本: 社团法人、土木学会、専務理事、三好逸二, 2000. 13—22.