

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.04.009

EPS 颗粒轻质混合土蠕变特性试验研究

高洪梅^{1,2},刘汉龙^{1,2},刘金元³

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;

2.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098 3. 瑞尔森大学土木工程系,安大略 多伦多 M5B 2K3,加拿大)

摘要:利用双联高压固结仪,采用分级加载和分别加载方式,对新型填土材料 EPS 颗粒轻质混合土的蠕变性进行了对比试验研究,并基于试验结果建立了压缩蠕变本构关系式.试验结果表明:EPS 颗粒轻质混合土呈现衰减蠕变特性,不出现急剧流动阶段.压力越大,达到蠕变稳定的时间越长.由蠕变本构关系式计算的蠕变变形与试验数据对比表明,这种蠕变本构关系式总体上能够反映这种新型填土材料的蠕变特性,可应用于工程实践.

关键词:EPS 颗粒轻质混合土 分别加载 分级加载 陈氏叠加法 高压蠕变仪 蠕变模型

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2010)04-0402-05

轻质混合土是基于材料本身的轻量化、易施工性以及可利用废旧 EPS 泡沫、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^[1-3],它是由原料土、固化剂(如水泥、粉煤灰)、轻质材料及水混合而成的.发泡聚苯乙烯(expanded polystyrene)颗粒轻质混合土(简称 EPS 颗粒轻质混合土)组成中的轻质材料选用 EPS 颗粒,它是一种轻型高分子聚合物,在土工泡沫材料中应用最为广泛^[4-5].EPS 颗粒轻质混合土,在岩土工程性质方面具有许多优点^[6-7],如轻量化、自立性、快硬性、流动性、强度与密度可调节性,有效利用废弃物而具有环保性.其工程应用也相当广泛.例如:用它作为软弱地基的路堤填土,可减小地基沉降;用它作为公路桥台与路堤间的填料,可缓解公路桥头跳车问题;其侧向土压力系数很小,可用于减轻对构造物的水平土压力;利用其流动性,可将其用于管道、涵洞等不规则形状结构处的填埋.利用其自立性,在用地相对紧张的城市公路拓宽工程中,将其用作拓宽路基填料,可节省放坡用地.国外,特别是日本,EPS 颗粒轻质混合土的试验研究与工程应用都较多^[8-9].而最近几年,EPS 颗粒轻质混合土在国内工程实践中也收到了较好的效果^[2].

工程实践表明,岩土材料都具有较明显的流变特性,许多工程事故正是由于忽视了岩土材料的流变性而引发的.为此,Geuze 等^[10-11]对土体流变系统进行了研究,维亚洛夫等^[12-15]从不同角度对土的蠕变性进行了研究.EPS 颗粒轻质混合土作为一种新型的岩土材料,其蠕变性能还未见有人研究.笔者在高压固结蠕变试验的基础上,采用分级与分别加载方式,对比研究了 EPS 颗粒轻质混合土的蠕变特性,并根据分别加载试验结果,建立了该类土的单向压缩蠕变模型.

1 试验方法

试验在双联高压固结仪上进行,试样高 2 cm,面积 30 cm².在试验过程中,温度控制在 20~26℃之间.EPS 颗粒轻质混合土由原料土、水泥、EPS 颗粒和水混合而成.本着废物利用的原则,试验用原料土取宁波绕城高速西段地下 2~2.5 m 深的工程弃土,为低液限黏土,其基本物理性质见表 1.

表 1 原料土的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of soil

含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	干密度/(g·cm ⁻³)	饱和度/%	孔隙比	土粒相对密度	液限/%	塑限/%
56.9	1.65	1.05	98	1.59	2.72	42.4	25.3

在制样之前将土烘干,再用橡胶锤敲成粉末.这样做的好处是^[16]制样过程中可以较为精确地控制试样

收稿日期:2009-08-12

基金项目:国家自然科学基金(50379010)

作者简介:高洪梅(1982—),女,山东威海人,博士研究生,主要从事环境岩土研究.E-mail:hongmei54@163.com

含水率,土颗粒可以和水混合均匀,不至于在搅拌过程中形成土块,影响试样的质量. EPS 颗粒可以采用废弃泡沫塑料粉碎片. 由于时间与粉碎条件所限,采用了粒径为 2~3 mm 的球粒,其堆积密度为 0.019 g/cm³,是土密度的 1/80~1/100. 水泥为 325 号普通硅酸盐水泥. 水取自自来水. 配比(均为与干土的质量比),轻质料为 4%,水泥为 10%,水为 80%. 将各材料按比例用感量为 0.01 g 的电子天平称好. 混合方法:先将干土和水混合搅拌均匀,直至拌和物中没有明显的土颗粒存在. 再加入水泥拌和,直至拌和物中各处干稀均匀. 最后加入 EPS 颗粒,使得每颗 EPS 颗粒都有水泥浆液包裹且在泥浆中分布均匀. 调配好后,将混合物浆液分数次压入环刀内,要尽量填实,务必使试样均匀、密实、没有孔洞. 试样采用无锡市锡仪建材仪器厂生产的恒温恒湿标准养护箱养护. 养护温度(20±2)℃,相对湿度 100%,养护龄期 14 d.

室内蠕变试验按加载方式分为分别加载与分级加载 2 种^[17]. 分级加载就是在同一试样上逐级加上不同的压力,即在某一级压力水平下让土样蠕变给定的时间,然后将压力水平提高到下一级的水平,直到所需的压力水平. 但这种加载方式假定土体满足线性叠加原理,需要用包尔茨曼叠加原理叠加来获得完整的曲线,不能模拟土体的非线性特性,且获得的蠕变曲线是阶梯形的,不便于实际工程应用,还必须采用坐标平移法来获得和分别加载相似的曲线. 分别加载就是对同一种土样的若干试样,在完全相同的仪器和完全相同的试验条件下,进行不同压力水平下的蠕变试验,从而得到不同压力水平下的蠕变曲线. 从理论上说,分别加载方式能较好地符合蠕变试验所需的条件,且能直接得到蠕变全过程曲线. 但由于试验仪器与条件的限制,到目前为止很少有人进行分别加载试验. 笔者对 EPS 颗粒轻质混合土进行了分别与分级加载试验的对比. 试验中所采用的土样为重塑混合样,相比原状土,比较容易保证试样性质相似. 试验仪器为同一批双联高压固结仪. 一组分别加载试验在同一时间段内完成,以保证相同的试验环境,尽量减小误差. 加载压力分为 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa 5 个等级. 分级加载时,上一级压力下变形基本稳定时加下一级压力. 稳定标准为连续 2 d 变形保持不变. 一组分级加载试验需要历时近 2 个月.

2 试验结果及分析

图 1 是试样在分别加载与分级加载下的变形-时间曲线. 由分级加载试验曲线转化为分别加载试验曲线的方法有 Boltzmann 线性叠加法和陈氏叠加法 2 种^[18]. Boltzmann 线性叠加法假设土体为线性流变体,但实际土体不能简单地视为线性流变体. 陈氏叠加法优点在于,采用适当的试验技术与方法,用作图法建立真实变形过程的叠加关系,不论后效影响是线性的还是非线性的均可适用^[19]. 本文分级加载试验曲线根据陈氏叠加法进行转化,转化后的蠕变试验曲线与分别加载蠕变曲线的对比如图 2 所示. 图中 S 代表分别加载蠕变曲线, G 代表由陈氏叠加法转化而成的分别加载蠕变曲线.

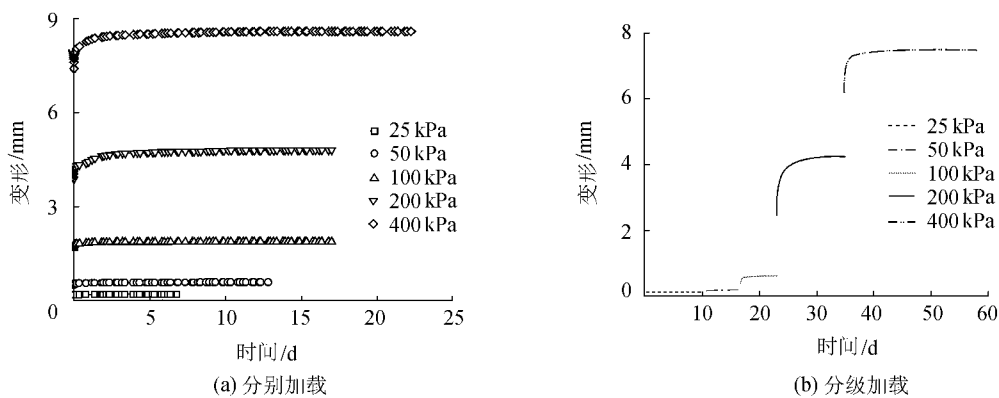


图 1 EPS 颗粒轻质混合土的蠕变曲线

Fig. 1 Creep curves for light-weight EPS treated soil

由图 2 可以看出,经陈氏叠加法转化后的试验曲线在一定程度上可以反映蠕变规律,但与实际情况仍有很大差别,低压力(25 kPa, 50 kPa)下,两者差别不大,基本一致,而较高压力(100 kPa, 200 kPa, 400 kPa)下,两者差别越来越大,表明应力历史的影响是不可忽略的,在前一级的压力下会使土硬化,相同压力下使得蠕变变形量大大减小. 分级加载试验结果不管是 Boltzmann 线性叠加法还是更易反映真实变形过程的陈氏叠加法,都会与分别加载试验结果存在较大误差,所以,试验条件允许情况下应尽量采用分别加载方式.

由图 1(a)可以看出:(a)EPS 颗粒轻质混合土具有蠕变特性,而且稳定时间随压力大小而变化,压力越大,达到稳定的时间越长,25 kPa 压力下达到稳定的时间为 8 d,而 400 kPa 压力下达到稳定的时间长达 23 d。(b)单向压缩蠕变形态为衰减蠕变,到达一定时间后会稳定到一个固定的值,没有出现第 3 阶段的急剧流动阶段。

3 蠕变模型

分别加载试验曲线排除了加载状态的影响,试验结果比较可靠^[9],本文蠕变模型根据分别加载试验曲线来建立。将图 1(a)中的变形-时间关系表示在双对数坐标上,如图 3 所示。各试验曲线近似为直线,用直

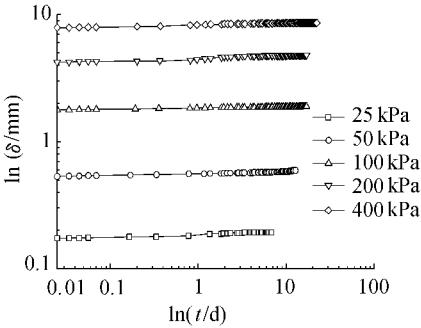


图 3 双对数坐标下的蠕变曲线

Fig. 3 Creep curves in double logarithmic coordinates

线拟合,相关系数为 0.988 ~ 0.994。因此,在一定压力作用下,变形-时间的关系可表示为

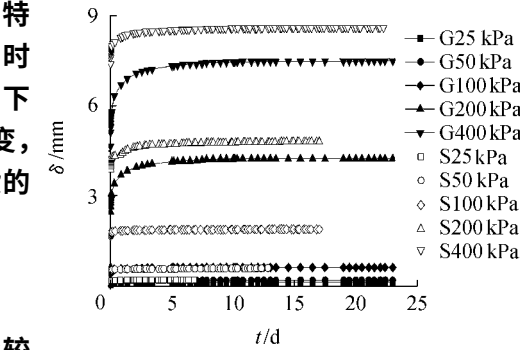


图 2 陈氏叠加法转化后的蠕变曲线与分别加载蠕变曲线的对比

Fig. 2 Comparison between creep curves derived by Chen's superposition method and those from single-step creep tests

即

$$\ln \delta(p, t) - \ln \delta(p, t_0) = n (\ln t - \ln t_0) \quad (1)$$

$$\delta(p, t) = \delta(p, t_0) \left(\frac{t}{t_0} \right)^n \quad (t > 0) \quad (2)$$

式中: t_0 ——参考时间,可取 $t_0 = 1 \text{ d}$; $\delta(p, t)$ ——压力 p 作用下 t 时刻的变形; $\delta(p, t_0)$ ——压力 p 作用下 t_0

时刻的变形; t ——时间; n ——直线的斜率,与土的性质有关,对于同一配比的试样,由于各压力作用下的直线基本平行,所以可认为 n 为常数。

等时曲线可由蠕变曲线得到,如图 4 所示。压力-变形关系接近于直线,可用直线关系进行拟合,相关系数均大于 0.99。因此,在一定时刻 t ,土体的压力-变形关系可表示为

$$\delta(p, t) = \delta(p_0, t) + k(p - p_0) \quad (3)$$

式中: p_0 ——参考压力,可取 25 kPa; $\delta(p_0, t)$ —— p_0 作用下 t 时刻的变形; k ——拟合直线的斜率,对同一配比的试样, k 随时间的增加略有增大,但变化不大,变化范围为 0.021 09 ~ 0.022 89,所以可近似地认为 k 为常数。 $t = 0$ 时的变形假定为 0。由式(2), (3)可以得到

$$\delta(p, t) = [\delta(p_0, t_0) + k(p - p_0)] \left(\frac{t}{t_0} \right)^n \quad (4)$$

式中: $\delta(p_0, t_0)$ —— p_0 作用下 t_0 时刻的变形,对同一种配比的试样来说是一个确定的值; n ——双对数坐标下蠕变曲线的斜率。该模型只有 n 和 k 2 个参数。根据试验资料, EPS 颗粒轻质混合土的参数 n 和 k 分别如表 2 和表 3 所示。

根据本试验结果得到的蠕变关系表达式为

$$\delta(p, t) = [0.181 + 0.0222(p - 25)] \left(\frac{t}{1117} \right)^{0.0135} \quad (5)$$

$\delta(p_0, t_0)$ 是压力为 25 kPa、时间为 1 d 时的变形,其值为 0.181。图 5 为模型模拟的蠕变曲线与试验结果的对比,可以看出本模型能够比较好地模拟 EPS 颗粒轻质混合土的蠕变特性,大部分压力下的拟合效果较好。200 kPa 压力下 2 种曲线有一定的差别,这是因为试验不可避免地存在一定误差,模型建立过程中的参数均使

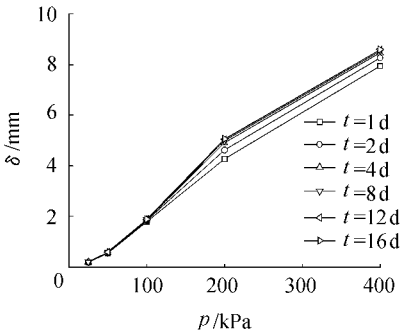


图 4 EPS 颗粒轻质混合土的等时曲线

Fig. 4 Isochrones of light-weight EPS treated soil

用平均值也会引起误差.

表 2 EPS 颗粒轻质混合土的蠕变参数 n

Table 2 Values of creep parameter n for light-weight EPS treated soil

压力 /kPa	n 值	相关系数 R
25	0.01995	0.994
50	0.01488	0.988
100	0.01003	0.993
200	0.01990	0.988
400	0.01258	0.993

表 3 EPS 颗粒轻质混合土的蠕变参数 k

Table 3 Values of creep parameter k for light-weight EPS treated soil

t/d	k 值	相关系数 R
1	0.021 09	0.998
2	0.022 05	0.996
4	0.022 66	0.993
8	0.022 89	0.993

4 结 论

- a. 分级加载的试验曲线经过陈氏叠加法处理后,与分别加载试验曲线还会存在较大差距,在试验条件允许的情况下,要尽量采用分别加载方式.
- b. 单向压缩蠕变形态为衰减蠕变,到达一定时间后会稳定到一个固定的值,没有出现第 3 阶段的急剧流动阶段.
- c. EPS 颗粒轻质混合土具有蠕变特性,而且压力越大,蠕变变形达到稳定的时间越长.
- d. EPS 颗粒轻质混合土的变形-时间关系可用幂函数来表示,而压力-变形关系可用直线关系来表示,根据试验结果建立的本构模型,在一定程度上可以较好地反映蠕变特性.
- e. 总体来说,本文建立的模型可以较好地反映该材料的蠕变特性,个别压力下存在一定误差. 该模型进一步改进后,可以更加真实地反映 EPS 颗粒轻质混合土的蠕变特性.

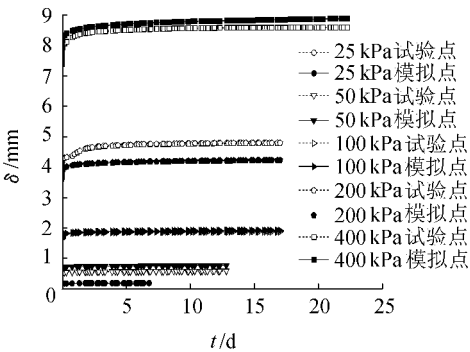


图 5 蠕变试验结果与模型计算结果的对比

Fig. 5 Comparison between measured and predicted values

参考文献:

[1] 刘汉龙,董金梅,高玉峰. 轻质混合土技术开发与工程特性[J]. 岩土力学,2005,26(增刊 1):13-16. (LIU Han-long,DONG Jin-mei,GAO Yu-feng. Technical development and engineering characteristics of lightweight mixed soil[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(Sup 1):13-16. (in Chinese))

[2] 姬凤玲,朱伟,李明东. 废弃泡沫塑料疏浚泥固化处理技术的研究[J]. 环境科学与技术,2004,27(5):69-77. (JI Feng-ling,ZHU Wei,LI Ming-dong. Solidification technique for disposal of scrap foam plastics and dredged silt[J]. Environmental Science and Technology,2004,27(5):69-77. (in Chinese))

[3] 董金梅,刘汉龙,洪振舜,等. 聚苯乙烯轻质混合土压缩变形特性的试验研究[J]. 岩土力学,2006,27(2):286-289. (DONG Jin-mei,LIU Han-long,HONG Zhen-shun,et al. Test study on compression and deformation behavior of light heterogeneous soil mixed with expanded polystyrene[J]. Rock and Soil Mechanics,2006,27(2):286-289. (in Chinese))

[4] 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):1964-1968. (DONG Jin-mei,LIU Han-long,GAO Yu-feng,et al. Study on compressive strength properties of light heterogeneous soil mixed with expanded polystyrene[J]. Rock and Soil Mechanics,2004,25(12):1964-1968. (in Chinese))

[5] 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. Factors influencing on physico-mechanical properties of the light soil mixed polystyrene[J]. Rock and Soil Mechanics,2005,26(3):445-449. (in Chinese))

[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 with expanded polystyrene[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2004,26(5):579-583. (in Chinese))

[7] TSUCHIDA T,PORBAHA A,YAMAME N. Development of a geomaterial from dredged bay mud[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2001,13(2):152-160.

- [8] 董金梅,刘汉龙,洪振舜,等.聚苯乙烯轻质混合土三轴压缩试验研究[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(1):99-103.
(DONG Jin-mei,LIU Han-long,HONG Zhen-shun,et al.Study on properties of lightweight polystyrene heterogeneous soil with triaxial compression tests[J].Journal of Hohai University Natural Sciences,2005,33(1):99-103.(in Chinese))
- [9] SATOH T,TSUCHIDA T,MITSUKURI K,et al.Field placing test of lightweight treated soil under seawater in kumamoto port[J].Soil and Foundations,2001,41(5):145-154.
- [10] GEUZE E C W A,TAN T K.The mechanical behavior of clays[C]//HARRISON V G W.Proceeding of the 2nd International Congress on Rheology.Britain:Academic Press,1954.
- [11] 陈宗基.固结及次时间效应的单维问题[J].土木工程学报,1958,5(1):1-10.(CHEN Zong-ji.One-dimensional problems of consolidation and secondary time effects[J].China Civil Engineering Journal,1958,5(1):1-10.(in Chinese))
- [12] 维亚洛夫 C C.土力学的流变原理[M].杜余培,译.北京:科学出版社,1987.
- [13] SINGH A,MITCHELL J K.Closure general stress-strain-time function for soils[J].Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,ASCE,1968,94(1):21-46.
- [14] TAVENAS F,LEROUEIL S,LA ROCHELLE P,et al.Creep behavior of an undisturbed lightly overconsolidated clay[J].Canadian Geotechnical Journal,1978,15:402-423.
- [15] MESRI G,FEBRES-CORDERO E,SHIELDS D R,et al.Shear stress-strain-time behavior of clays[J].Geotechnique,1981,31(4):337-552.
- [16] 何稼.废弃轮胎橡胶颗粒轻质混合土基本特性试验研究[D].南京:河海大学,2008.
- [17] 艾志雄,边秋璞,赵克全.岩土蠕变试验及应用简介[J].三峡大学学报:自然科学版,2006(6):518-521.(AI Zhi-xiong,BIAN Qiu-pu,ZHAO Ke-quan.Brief introduction to creep tests and their application to geomaterials[J].Journal of China Three Gorges University Natural Sciences,2006(6):518-521.(in Chinese))
- [18] 邓志斌.软黏土蠕变试验与本构模型辨识方法研究及应用[D].长沙:中南大学,2007.
- [19] 刘雄.岩石流变学概论[M].北京:地质出版社,1994.

Creep behaviors of light-weight EPS treated soil

GAO Hong-mei^{1,2}, LIU Han-long^{1,2}, LIU Jin-yuan³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 21098, China;

3. Department of Civil Engineering, Ryerson University, Toronto, ON, M5B 2K3, Canada)

Abstract: A series of tests on the creep behaviors of light-weight expanded polystyrene (EPS) treated soil were performed with single-step and multi-step loading methods by use of twin high-pressure consolidation apparatus. A compressive creep constitutive model was proposed for the light-weight EPS treated soil based on test results. The test results indicate that the light-weight EPS treated soil exhibits attenuating creep behaviors and has no sharp creep stage. The larger the load, the longer time the creep deformation reaches the steady stage. A comparison between the measured and predicted values from the creep model show that the proposed creep model can reflect the creep behaviors of the new fill material and can be applied in engineering practice.

Key words: light-weight EPS treated soil; single-step loading; multi-step loading; Chen's superposition method; oedometer creep apparatus; creep model