

DOI: 10.11779/CJGE201702011

EPS 混合土的动模量和阻尼比特性

高洪梅^{1, 2}, 沈艳青^{1, 2}, 王志华^{1, 2}, 陈国兴^{1, 2}

(1. 南京工业大学城市地下空间研究中心, 江苏 南京 210009; 2. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘 要: 作为一种路堤填料, EPS 混合土在动力荷载作用下的模量和阻尼比是进行路堤动力稳定性分析的重要参数。开展了 15 个循环扭剪试验研究 EPS 混合土的动力特性, 分析了 EPS 混合土的骨干曲线、模量以及阻尼比特性, 重点讨论了配合比和初始固结条件的影响。结果表明, EPS 混合土具有典型的动力非线性特征, 受水泥土强度和初始应力状态控制; EPS 掺入比对混合土的初始剪切模量几乎无影响, 但土体进入非线性阶段后, EPS 颗粒对混合土强度的削弱作用明显; EPS 颗粒与水泥土间薄弱接触面的动力行为导致“结构阻尼”效应, 是混合土阻尼机制的重要组成; EPS 混合土的初始剪切模量随试样初始小主应力增大而增大, 其模量衰减特性与初始小主应力和 EPS 掺入比显著相关。基于试验结果, 给出了描述 EPS 混合土骨干曲线、模量衰减和阻尼比增长特性的经验模型。

关键词: EPS 混合土; 动应力-应变关系; 初始固结状态; 动剪切模量; 阻尼比

中图分类号: TU411.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)02-0279-08

作者简介: 高洪梅(1982-), 女, 山东威海人, 博士, 副教授, 主要从事软基处理及土动力学研究。E-mail: hongmei54@163.com。

Dynamic modulus and damping ratio characteristics of EPS composite soil

GAO Hong-mei^{1, 2}, SHEN Yan-qing^{1, 2}, WANG Zhi-hua^{1, 2}, CHEN Guo-xing^{1, 2}

(1. Research Center of Urban Underground Space, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: The shear modulus and damping ratio of EPS composite soil, as a kind of artificial filling material, are the key parameters to analyze the dynamic stability of embankment. 15 cyclic torsional tests are conducted on the hollow cylindrical samples of EPS composite soil to study its dynamic characteristics. The characteristics of skeleton curve, dynamic shear modulus and damping ratio for EPS composite soil are analyzed. The influences of mixing ratio and initial consolidation state are discussed. It is found that the EPS composite soil is characterized by typical dynamic non-linearity which is controlled by the strength of cemented soil and the initial stress state, but EPS bead content has no obvious influence on the initial shear modulus. After EPS composite soil enters the non-linear deformation stage, EPS beads have a remarkable weakening effect on its strength. The “structural damping” effect induced by the dynamic behavior of the weak interface formed between EPS beads and cemented soil is an important component of the damping mechanism for EPS composite soil. The initial shear modulus increases with the increase of the initial minor principal stress. And the modulus attenuation characteristics are significantly influenced by the initial minor principal stress and EPS bead content. Based on the test results, the empirical models are given to describe the skeleton curve, modulus attenuation and damping growth characteristics for EPS composite soil.

Key words: EPS composite soil; dynamic stress-strain relationship; initial consolidation state; dynamic shear modulus; damping ratio

0 引 言

得益于 20 世纪中叶以来土工材料的快速发展和环境保护的需求, EPS 颗粒轻质混合土在 20 世纪 60 年代被提出, 其通常由原料土、EPS (聚苯乙烯泡沫) 颗粒、胶结材料和水混合而成。近 10 年来, EPS 混合土在软土地基处理、路堤和桥台、高速公路以及地下管线工程等方面得到大量的应用^[1-2]。作为一种人工填

土材料, EPS 混合土具有可控的强度和变形特性, 可以根据工程需要选择合适的配比以满足作为填料的力学特性要求^[3]。而且, 环境友好也是其显著的优势。

近 20 年来, 围绕 EPS 混合土的基本物理力学特

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578286)

收稿日期: 2015-12-11

性开展了大量的试验研究。混合土的各相配比以及其对强度、变形和破坏模式的影响成为讨论的重点^[4-5]。EPS 混合土作为土工填料时, 往往需要考虑地震、波浪和交通等动力荷载的作用。因而, EPS 混合土的动力特性同样是工程上关心的问题。Kunio 等^[6]认为, EPS 混合土在循环荷载作用下的强度和变形受围压的影响显著。王庶懋等^[7]通过 EPS 混合土的动三轴试验分析了割线剪切模量的衰减特性, 并给出了与水泥含量和 EPS 含量有关的拟合公式。李晶等^[8]通过反复加载三轴试验发现, 以砂土和淤泥分别作为原料土时, 相应的 EPS 混合土回弹模量的大小呈现差异, 但是阻尼比差别不大。李明东等^[9]对 EPS 混合土开展了循环三轴试验, 给出了稳定型和破坏型两种动应力-应变关系, 并建议以填料无侧向抗压强度的 0.75 倍作为考虑交通荷载时路基强度设计参数。黎冰等^[10]对 EPS 混合土进行的动三轴试验表明, 其动应力-应变符合双曲线关系, 水泥掺入比对混合土变形的影响趋势在不同量级应变幅值下截然相反。尽管如此, 国内外在 EPS 混合土动力特性方面的报道仍非常有限, 尤其是在 EPS 混合土特殊结构性对其动模量和阻尼比影响方面的认识明显不足。

作为多组分构成的 EPS 混合土具有以下特殊结构性: ①胶结材料与原料土形成的固化物一般较 EPS 颗粒具有更大的强度; ②EPS 颗粒与固化物间形成的接触面为薄弱面, 依赖固化物和 EPS 颗粒的材料性质。显然, EPS 混合土的结构性受控于其配合比。另外, 当 EPS 混合土作为路堤填料时, 不同位置土体的初始应力状态呈现差异, 偏压固结状态存在, 而在现有的 EPS 混合土动力特性研究中, 初始固结状态的影响也未得到足够的重视。

本文开展了一系列的 EPS 混合土空心圆柱试样循环扭剪试验, 讨论了 EPS 混合土动应力-应变关系、动模量和阻尼比特性。试验考虑了 EPS 混合土的不同水泥含量、EPS 掺入比和养护龄期等因素, 针对不同初始固结状态, 分析了 EPS 混合土的特殊结构性对其动力特性的内在影响机制。

1 试验材料及制样方法

1.1 试验材料

本文中的 EPS 混合土为人工制备土样, 由原料土、EPS 球形颗粒、水泥和水混合搅拌而成。原料土为长江江畔现场挖取的漫滩相沉积淤泥质粉质黏土, 其基本物理力学性质见表 1。

采用的 EPS 颗粒如图 1 所示。其颗粒粒径为 2~3 mm, 纯颗粒密度为 23.7 kg/m³, 堆积密度为 15.9

kg/m³。[#]32.5 普通硅酸盐水泥作为胶结材料。

表 1 原料土的物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soil							
含水率	湿密度	饱和	孔隙	比	液限	塑限	压缩系数
/%	/(g·cm ⁻³)	度/%	比	重	/%	/%	a_{1-2}/MPa^{-1}
48.1	1.68	96	1.37	2.74	39.2	22.6	0.98



图 1 试样中添加的 EPS 颗粒

Fig. 1 EPS beads used in this study

1.2 制样方法

本文 EPS 混合土为空心圆柱样, 其制备过程包括以下步骤: ①将原料土烘干、碾碎; ②根据试验设计的配比, 称取一定质量的烘干原料土和水泥; ③加水搅拌至均匀的泥浆状; ④根据设计配比添加一定体积的 EPS 颗粒, 再次搅拌均匀; ⑤将充分搅拌的均匀流态试样装入空心圆柱试样制样器并养护成型。

表 2 试验方案

Table 2 Test schemes					
试验 编号	水泥含 量 a_w /(kg·m ⁻³)	EPS 掺 入比 λ_{VE}	龄期 /d	初始固结 应力比 R_0	平均有效 固结压力 p'_0/kPa
1	32.6	1.430	7	1.5	100
2	48.8	1.430	7	1.5	100
3	65.1	1.430	7	1.5	100
4	32.6	0.954	7	1.5	100
5	32.6	1.907	7	1.5	100
6	32.6	2.384	7	1.5	100
7	32.6	1.430	7	2.5	100
8	32.6	1.430	7	1.5	50
9	32.6	1.430	7	1.5	150
10	32.6	1.430	14	1.5	100
11	32.6	1.430	28	1.5	100
12	32.6	1.430	7	1.0	50
13	32.6	1.430	7	1.0	100
14	32.6	1.430	7	1.0	150
15	32.6	1.430	7	1.0	300

1.3 试验方案和加载方法

本文着重讨论影响 EPS 混合土动力特性的两个方面: ①EPS 混合土的配合比; ②初始固结条件。配合比方面, 考虑了水泥含量 a_w 、EPS 掺入比 λ_{VE} 以及养护龄期 3 个因素。其中, a_w 表示单位体积 EPS 混合土内添加的水泥质量 (kg/m³); EPS 掺入比 λ_{VE} 指 EPS 颗粒体积与原料土体积之比; 养护龄期考虑 7, 14, 28 d 三种情况。

对于偏压固结条件, 保持中主应力系数 $b_0 = (\sigma'_{20} - \sigma'_{30}) / (\sigma'_{10} - \sigma'_{30}) = 0.5$ 。考虑初始固结应力比 R_0 、平均有效固结压力 p'_0 和小主应力 σ'_{30} 的影响, 其中, $p'_0 = (\sigma'_{10} + \sigma'_{20} + \sigma'_{30}) / 3$, $R_0 = \sigma'_{10} / \sigma'_{30}$, 通过调整施加于试样的轴力、扭矩、内外围压实现初始应力状态模拟。式中的下标 0, 表示初始固结状态。设计试验方案见表 2。

利用 GDS 空心圆柱仪施加扭矩实现动力加载条件, 荷载分 11 级施加, 每一级持续 10 s, 循环 5 次, 周期为 2 s, 图 2 为试验施加的循环扭矩时程。

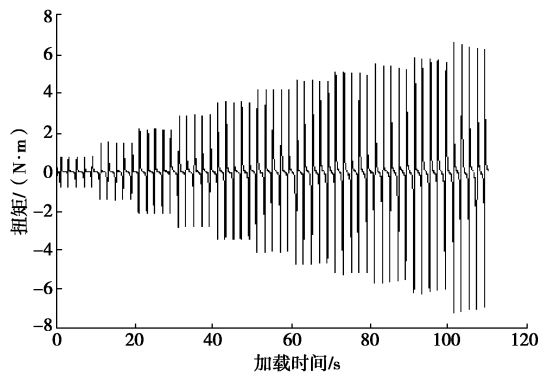


图 2 扭矩加载时程

Fig. 2 Time histories of applied torsional moment

2 试验结果及分析

2.1 循环剪应力-应变骨干曲线

将每级荷载下 5 个循环周次得到的滞回曲线峰值点对应的横、纵坐标取平均值, 构建循环剪应力-应变骨干曲线。Hardin 等^[11]所给出的双曲线模型常用于描绘土体的动剪应力(τ_d)-动剪应变(γ_d)骨干曲线, 其表达式如下:

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{a_t + b_t \gamma_d}, \quad (1)$$

$$a_t = 1/G_0, \quad (2)$$

$$b_t = G_0/\gamma_r, \quad (3)$$

式中, G_0 为土体的初始(最大)剪切模量(MPa), γ_r 为参考剪应变。

整理试验得到的全部 15 组数据可以发现, 无论是均压还是偏压固结状态, EPS 混合土的动剪应力-应变骨干曲线均可采用式(1)拟合, 且每组试验曲线拟合的 R^2 均在 0.95 以上。

(1) EPS 混合土的配合比对骨干曲线的影响

图 3 比较了水泥含量(a_w)和养护龄期(CD)对混合土骨干曲线的影响。明显地, 水泥含量越大, 使土体产生相同应变反应所需的应力幅值也越大。这一结论与大多数的水泥胶结混合土的动力反应是一致

的^[12]。原因在于, 水泥混合土的强度在很大程度上依赖于土体中固化物形成的胶结结构强度。此外, 图 3 中不同养护龄期试样骨干曲线的差异也适用于上述解释。

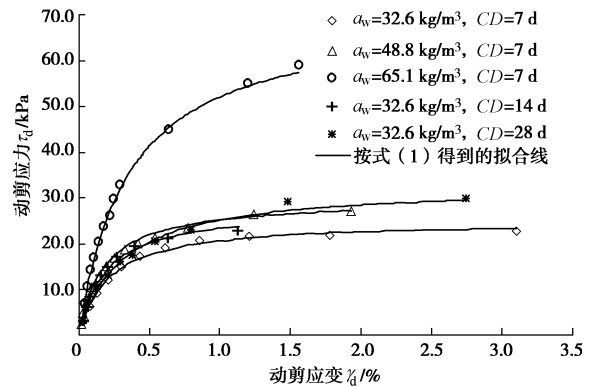


图 3 水泥含量和养护龄期对骨干曲线的影响

Fig. 3 Effect of cement content and curing day on skeleton curve

作为 EPS 混合土的重要组成部分, 被水泥固化物包裹的 EPS 颗粒对混合土的骨干曲线同样具有重要的影响, 如图 4 所示。一个显著的特征是, 4 组不同 EPS 掺入比 λ_{VE} 下的混合土骨干曲线在土体应变达到约 0.2% 时开始出现明显的差别。混合土中 EPS 含量越高, 则产生相同应变反应所需的应力越小。这说明, EPS 颗粒对混合土强度的贡献是负面的, 主要体现在两个方面: ①EPS 颗粒在弹性阶段及屈服后的较大应变范围内, 其强度较混合土中固化物的强度低。尽管 EPS 材料具有典型的压硬性, 但在混合土的试验应变范围内, EPS 颗粒远未进入压硬阶段; ②EPS 颗粒与固化物间接接触面的抗剪强度较固化物抗剪强度低。因此, EPS 含量越多, EPS 颗粒与水泥固化物的接触面积越大, 并最终体现其强度越低。

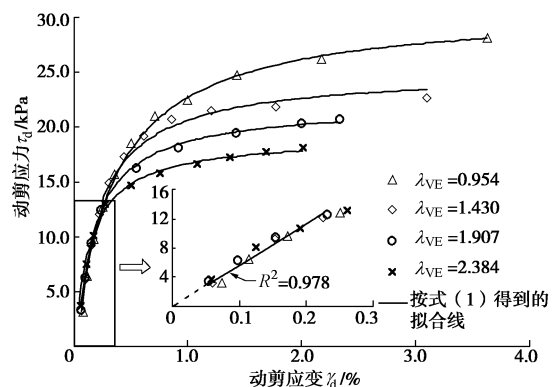


图 4 EPS 掺入比对混合土骨干曲线的影响

Fig. 4 Influence of EPS bead content on skeleton curves

需要提及的是, 4 组 EPS 掺入比试样具有相同的水泥含量, 它们在应变小于 0.2% 时的骨干曲线部分没有体现出明显的差异。4 组试样应变小于 0.2% 时的骨

干曲线近似可用一条直线拟合。这说明,混合土试样在循环荷载下的小应变阶段主要依赖固化物构成的骨架提供强度支撑。

EPS 混合土作为填料使用时的“轻质性”是其优势所在,具有明显的减沉作用。但是,EPS 颗粒对混合土强度的负面影响不可忽略。在实际工程应用中,图 4 揭示的现象可在设计中给予适当的考虑。例如,填筑 EPS 混合土路堤时,考虑动力荷载在土体中引起的动应力和应变自上而下逐渐衰减,可将路堤填料分区。路堤下部采用相对较高 EPS 含量的填料,而路堤上部采用相对较低 EPS 含量的填料。如此,既可维持路堤的整体动力稳定性,也可进一步减小路基沉降。

(2) 固结应力比对骨干曲线的影响

EPS 混合土作为路堤填料使用时,初始固结后的应力各向异性是存在的。图 5 讨论了本文设计的 $p'_0=100$ kPa, $a_w=32.6$ kg/cm³, $\lambda_{VE}=1.430$, $CD=7$ d 时,不同固结应力比下 EPS 混合土骨干曲线的差异。一般认为,固结应力比不等于 1,则土中存在初始静剪应力将使土颗粒骨架处于更为稳定的状态。因而,偏压固结比在一定值内,土体动强度随固结应力比增大而增大^[13]。然而,图 5 的试验结果却表明,偏压固结状态似乎削弱了 EPS 混合土的强度。原因在于,常规的动三轴试验大多是在相同的有效围压(小主应力) σ'_{30} 下改变轴向应力讨论固结应力比的影响。而图 5 试验的平均有效固结应力 p'_0 均为 100 kPa,对应固结应力比 $R_0=1.0$, $R_0=1.5$ 和 $R_0=2.5$ 时的 σ'_{30} 分别为 100, 80, 57.1 kPa。据此,图 5 的试验结果可理解为由 σ'_{30} 引起。若以 τ_d/σ'_{30} 评价动强度,假设以 1% 作为破坏应变,则与 $R_0=1.0$, $R_0=1.5$ 和 $R_0=2.5$ 对应的动应力比分别为 0.257, 0.263 和 0.335。如此则可得到固结应力比越大,土体动强度也越大的结论,这与其它天然土或人工土料所得到的认识是一致的^[14]。因此,仅仅依据固结应力比讨论三轴偏压状态下的土体动强度是不准确的,还应结合试样的 σ'_{30} 综合分析。

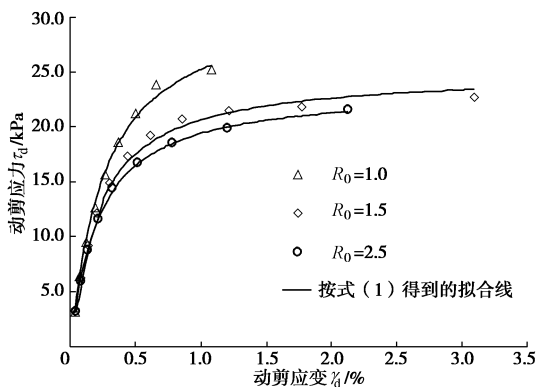


图 5 固结应力比对 EPS 混合土骨干曲线的影响

Fig. 5 Influence of consolidation stress ratio on skeleton curves

2.2 动剪切模量特性

由于缺乏针对 EPS 混合土小应变 (10^{-6}) 范围的共振柱试验,利用式 (2) 获得的拟合参数 a_t 求取 G_0 ,该值将用于本节对 EPS 混合土模量衰减的分析。

(1) 初始剪切模量

图 6 反映了 EPS 混合土配合比及养护龄期对 G_0 的影响。由图可见,水泥含量 a_w 越大,则 G_0 越大。 $a_w=65.1$ kg/m³ 时, $G_0=201.2$ MPa; $a_w=32.6$ kg/m³ 时, $G_0=118.2$ MPa。两者相差接近 41%。其他条件相同时,龄期 28 d 的混合土的 G_0 较龄期为 7 d 的混合土 G_0 增长 21%。然而,混合土中的 EPS 掺入比对 G_0 的影响却并不明显。所有 4 组 λ_{VE} 中,最大 G_0 和最小 G_0 间的差异仅为 0.6%。该结果再次证明, EPS 混合土在小应变条件下的强度由固化物强度决定,而 EPS 颗粒在小应变条件下对模量影响不明显。

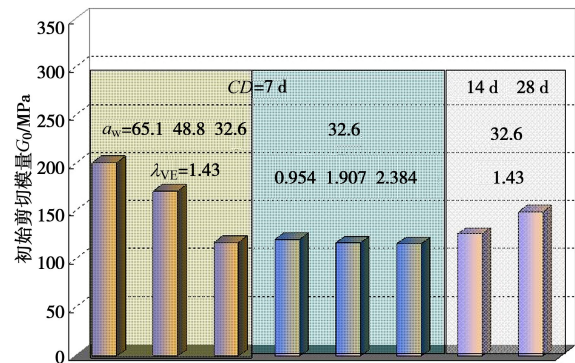
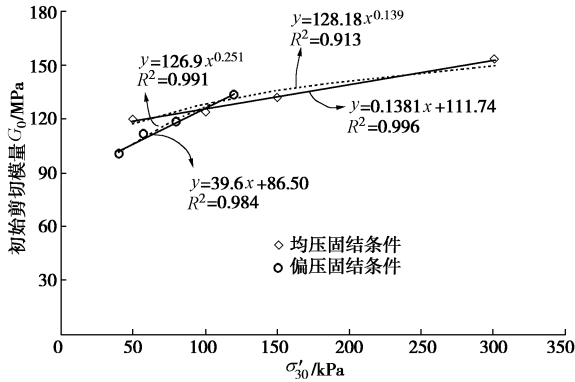


图 6 EPS 混合土的配合比及养护龄期对 G_0 的影响

Fig. 6 Influence of mixing ratio and curing day on G_0

正如已有大量研究成果所提到的,有效围压对土体的初始剪切模量具有重要的影响。图 7 表明,对于均压固结情况, EPS 混合土初始剪切模量与最小主应力 σ'_{30} 间存在良好的线性关系,此时 $\sigma'_{30} = p'_0$;而对于偏压固结情况, EPS 混合土的初始剪切模量同样随 σ'_{30} 的增大而增大,但是,两者之间更符合指数关系,此时 $\sigma'_{30} \neq p'_0$ 。需要指出的是,图 7 中偏压固结的 4 个试验工况中,包括平均固结应力为 100 kPa,而固结应力比分别为 1.5 和 2.5 的工况 1 和工况 7,以及固结应力比为 1.5,平均有效固结应力分别为 50, 150 kPa 的工况 8 和工况 9。由此可见,在三轴应力状态下,平均有效固结应力 p'_0 和固结应力比 R_0 与偏压固结试样的初始动剪切模量间缺乏明确的关系, EPS 混合土的初始动剪切模量与最小主应力 σ'_{30} 密切相关。此外还应看到,图 7 中均压固结和偏压固结的拟合线存在相交的情况。相对于均压固结条件,偏压固结时的 σ'_{30} 对 EPS 混合土的初始剪切模量影响更大。

图7 σ'_{30} 对 EPS 混合土 G_0 的影响Fig. 7 Influence of σ'_{30} on G_0

(2) EPS 混合土的动剪切模量衰减特性

土体的动剪切模量在加载过程中随应变增长而不断衰减是土体非线性的一个典型特征。目前, 研究者针对不同土类提出了众多的动剪切模量衰减公式, 如 Hardin 和 Drnevich 给出的双曲线模型^[11]、Darendeli 模型^[15]以及 Rollins 等提出的适用于砂砾土的模型^[16]等。结合本文试验数据, 在充分比较已有模型的基础上, 本文认为 Darendeli 模型描述 EPS 混合土模量衰减特性是合适的。Darendeli 模型的表达式如下:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + (a\gamma_d)^b}, \quad (4)$$

式中, $a = 1/\gamma_r$, b 为拟合参数。后文中所有工况得到的动剪切模量比 G/G_0 与动剪应变 γ_d 关系采用式(4)拟合, 所有工况的 R^2 均大于 0.98。拟合参数 a 值的分布区间为[2.1, 4.6]; b 值区间为[0.9, 1.4]。

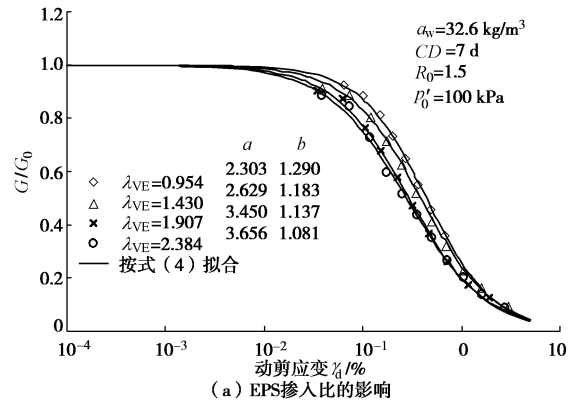
图 8 给出了 EPS 混合土不同配比和初始固结条件下的模量衰减实测数据及拟合曲线。从图中可知, EPS 混合土的水泥含量、EPS 掺入比、均压固结和偏压固结下的最小主应力 σ'_{30} 对 $G/G_0 - \gamma_d$ 关系都有不同程度的影响。依据试验数据得到的一些定性结论如下:

a) γ_d 在 0.01%~3% 范围内, λ_{VE} 越大, 则 G/G_0 越小, 如图 8 (a) 所示。不同水泥含量 a_w 的 EPS 混合土 $G/G_0 - \gamma_d$ 关系点集中于一个较小的范围, 离散性相对较小, 如图 8 (b) 所示。随应变增长, 混合土中更多的 EPS 颗粒与水泥固化物发生接触破坏, 这是 EPS 混合土模量衰减的原因之一。因此, λ_{VE} 较 a_w 对 $G/G_0 - \gamma_d$ 关系曲线的影响更为显著;

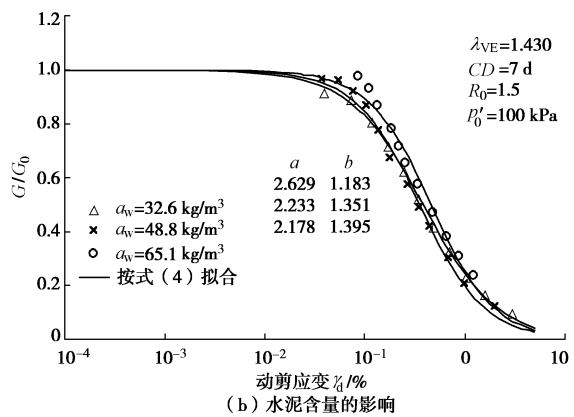
b) 与已有的相关报道类似, 均压固结状态下的 σ'_{30} 对 $G/G_0 - \gamma_d$ 曲线影响同样不明显, 见图 8 (c); 但是, 偏压固结状态下, σ'_{30} 对 $G/G_0 - \gamma_d$ 关系曲线的影响较为显著, 如图 8 (d) 所示。

总体上看, EPS 混合土的模量衰减规律与其它天然土或人工土有着相似的特征。特别地, 当 EPS 混合土作为路堤填料使用时, 对于近边坡填料的动力学行

为描述宜考虑其所处的偏应力状态, 以更为准确地模拟不同区域土体的非线性演变过程。



(a) EPS 掺入比的影响



(b) 水泥含量的影响

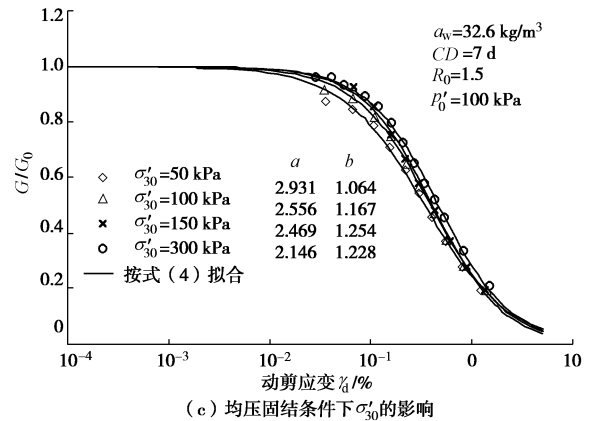
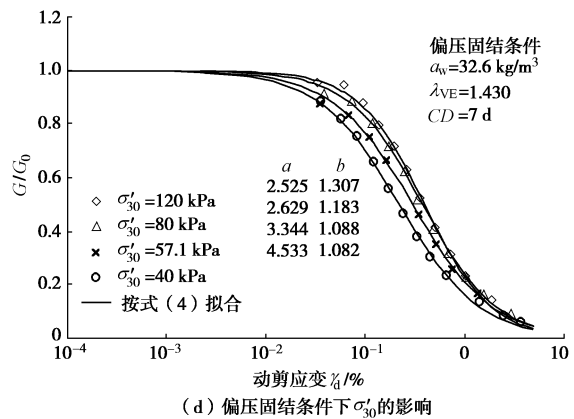
(c) 均压固结条件下 σ'_{30} 的影响(d) 偏压固结条件下 σ'_{30} 的影响

图8 EPS 混合土的模量衰减及影响因素分析

Fig. 8 Curves of shear modulus attenuation with influence factors

2.3 阻尼比特性

(1) EPS 混合土的阻尼机制及阻尼比特征

动力荷载作用下,土体应变发展的同时一般将伴随阻尼比的增长。EPS 混合土由原料土、EPS 颗粒、水泥和水多种材料混合而成。若将 EPS 混合土中的水泥固化物作为一种材料,则 EPS 混合土在动荷载下的阻尼机制可能包括以下 3 个方面:①水泥固化物的材料阻尼部分;②EPS 颗粒材料阻尼部分;③水泥固化物和 EPS 颗粒接触面的“结构阻尼”部分。因此, EPS 混合土与天然土体阻尼机制存在一些典型的差异。例如,受水泥含量的影响, EPS 混合土的破坏可能呈现柔性变形破坏和脆性裂缝破坏两种^[3],破坏形式的不同意味着阻尼增长机制的差异。另外, EPS 颗粒与水泥固化物间的接触面是一个薄弱面,接触面上发生的剪切或拉伸行为需要消耗一定的能量,这与大多数天然土体所不同。图 9 将本文均压固结条件下 EPS 混合土与几种典型土体的阻尼比增长曲线进行了比较。其中, EPS 混合土的阻尼比增长拟合曲线借鉴了 Rollins 等提出的砂砾土曲线^[16],表达式为

$$D = D_{\min} + D_{\max} (1 + k \gamma_d^{n_1})^{n_2} \quad (5)$$

式中 D_{\min} 为 EPS 混合土的最小阻尼比,对于本文中的 15 个工况,取 $D_{\min} = 1\%$ 是合适的; D_{\max} 为最大阻尼比,该值与 EPS 混合土的配合比及初始固结状态均相关,介于 18%~27%之间; k , n_1 和 n_2 为拟合系数。

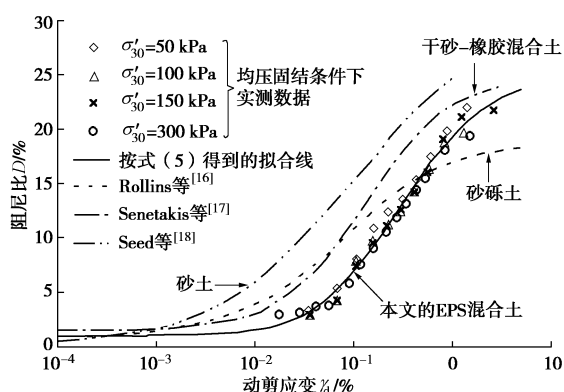


图 9 几种典型土类的阻尼比增长曲线

Fig. 9 Curves of damping ratio growth of several typical soils

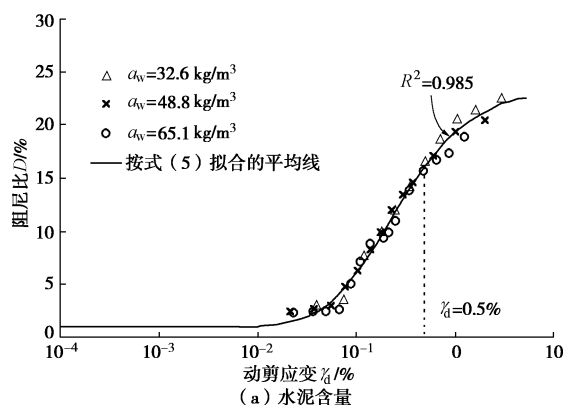
图 9 中 4 类土体的阻尼比增长曲线表明,材料阻尼在土体阻尼机制的形成中具有重要的作用。在整个应变增长过程中,水泥胶结的 EPS 混合土较砂土和无胶结的干砂-橡胶混合土的阻尼比小。这表明了水泥胶结在提高土体强度、降低土体阻尼效应上具有显著的作用。与砂砾土曲线相比较,当 $\gamma_d < 0.5\%$ 时, EPS 混合土阻尼比小于砂砾土阻尼比,当 $\gamma_d > 0.5\%$ 时,情况则相反。Lin 等^[19]指出在应变增长过程中,颗粒压紧作用减缓了土体的阻尼比增长。另一方面,随应变增

长, EPS 混合土除了整体变形耗能外,内部的原生微小裂隙扩展、EPS 颗粒与水泥固化物接触面的剪切错动甚至开裂等行为也将消耗更多的能量。综合两方面考虑, EPS 混合土在应变达到一定程度后,其阻尼比大于砂砾土的阻尼比是可以理解的。这也可以认为是 EPS 混合土“结构阻尼”作用的结果。

此外,从图 9 中还可以看到,本文进行的 4 个有效围压下的均压固结试样阻尼比离散性非常小。直至 γ_d 达到 0.8% 以后,有效围压对阻尼比的影响才有所体现。有效围压越大,阻尼比越小。围压越高,土体颗粒的运动受到更大的阻力, EPS 混合土中的裂隙扩展和薄弱结构面的错动同样将受到限制。

(2) EPS 混合土阻尼比增长的影响因素

图 10 (a) 显示了 3 组不同水泥含量的 EPS 混合土阻尼比增长曲线。3 组试验数据按式 (5) 拟合得到的平均线的 R^2 达到 0.985。这说明,水泥含量对 EPS 混合土阻尼比增长的影响不明显。当动剪应变 $\gamma_d > 0.5\%$ 后, a_w 的影响略微显现。直到 γ_d 达到 3%, 不同 a_w 下 EPS 混合土的最大和最小阻尼比仅相差 2.8%。反观图 10 (b) 的拟合线, 4 组不同 λ_{VE} 的试样阻尼比自 $\gamma_d > 0.02\%$ 后开始呈现明显的差异。而且,随着动剪应变的增大, 4 组试样的阻尼比差异也逐渐扩大。至 $\gamma_d = 3\%$ 时, 4 组试样最大阻尼比和最小阻尼比间相差 6.1%。因此,水泥和 EPS 颗粒作为两种重要组分,对 EPS 混合土的阻尼影响存在不同的机制。水泥含量是 EPS 混合土中水泥固化物强度及其非线性演变过程的主要影响因素,它对 EPS 混合土阻尼比增长曲线的影响体现为材料阻尼。而 EPS 掺入比决定了混合土中 EPS 颗粒的数量以及 EPS 颗粒与水泥固化物接触面的数量。一般认为, EPS 颗粒材料的弹性性能良好,甚至有研究表明,其应变达 0.5% 到 1% 时, EPS 泡沫颗粒仍处于弹性变形阶段^[20-21]。然而, EPS 颗粒与水泥固化物接触面随应变增长将出现“质”和“量”的双重弱化。这种接触面的“弱化”行为将随着 λ_{VE} 的增大而消耗更多的能量。因此, λ_{VE} 对 EPS 混合土阻尼比增长曲线的影响主要体现为“结构阻尼”的影响。



(a) 水泥含量

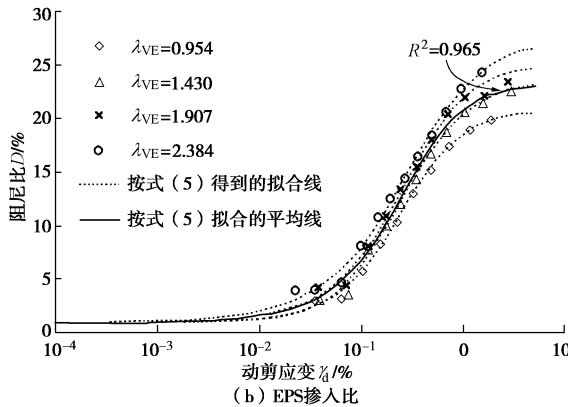


图 10 配合比对 EPS 混合土阻尼比增长曲线的影响

Fig. 10 Effect of mixing ratio on growth curves of damping ratio

图 11 为偏压固结条件下, EPS 混合土阻尼比在不同 σ'_{30} 下的 $D - \gamma_d$ 实测值及其拟合平均线, 拟合平均线的 R^2 达到 0.991。与均压固结条件相同的是, σ'_{30} 对偏压固结条件下的混合土阻尼比增长规律的影响也不明显。此外, 偏压固结条件和均压固结条件下的拟合平均线略有差异。在 $\gamma_d < 0.2\%$ 时, 均压固结条件下的阻尼比较偏压固结条件下的阻尼比略小。当 $\gamma_d > 0.2\%$ 时, 情况则相反。

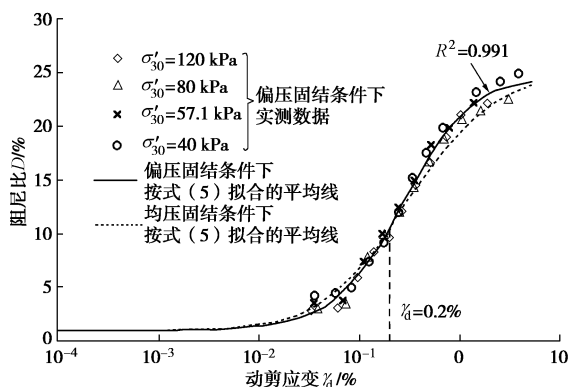
图 11 偏压固结下 σ'_{30} 对阻尼比增长曲线的影响

Fig. 11 Influence of σ'_{30} on damping ratio of EPS composite soil under anisotropic consolidation state

3 结 论

本文基于 GDS 空心圆柱扭剪仪, 考虑 EPS 混合土的配合比和初始固结状态等因素, 开展了 15 个工况的 EPS 混合土循环扭剪试验, 得到以下结论:

(1) EPS 混合土的动力非线性显著, 其动剪应力 - 应变关系符合双曲线特征。养护时间越长、水泥含量越高, EPS 混合土的初始动剪切模量及动载下的强度将得以提高。EPS 颗粒含量对混合土的初始动剪切模量几乎无影响。当混合土进入非线性阶段后, EPS 颗粒含量对动强度的削弱作用是明显的。

(2) 均压固结和偏压固结条件下 EPS 混合土的

初始动剪切模量都随小主应力 σ'_{30} 的增大而增大, 均压固结条件下, 两者关系接近线性; 而偏压固结条件下, 两者之间更符合指数函数关系。

(3) 应用 Darendeli 模型描述 EPS 混合土的模量衰减特性被证明是合适的。估计动力荷载下 EPS 混合土模量衰减时, 应重点考虑偏压固结条件下的 σ'_{30} 和 EPS 掺入比因素。本文试验中, 均压固结条件下的 σ'_{30} 和水泥含量对混合土模量衰减特性的影响并不明显。

(4) 给出了一个描述 EPS 混合土阻尼比增长规律的经验模型。混合土中的 EPS 颗粒与固化物间的薄弱接触面导致的“结构阻尼”是显著的。

参考文献:

- [1] YOONZ G L, JEON S S, KIM B T. Mechanical characteristics of light-weighted soils using dredged materials[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2004, 22(4): 215 - 229.
- [1] MIAO L C, WANG F, HAN J, et al. Properties and applications of cement-treated sand-expanded polystyrene bead lightweight fill[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(1): 86 - 93.
- [3] LIU H L, DENG A, CHU J. Effect of different mixing ratios of polystyrene pre-puff beads and cement on the mechanical behaviour of lightweight fill[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24(6): 331 - 338.
- [4] GAO H M, CHEN Y M, LIU H L, et al. Creep behavior of EPS composite soil[J]. Science China (Technological Sciences), 2012, 55(11): 3070 - 3080.
- [5] KIM Y T, AHN J, HAN W J, et al. Experimental evaluation of strength characteristics of stabilized dredged soil[J]. Journal of Material in Civil Engineering, 2010, 22(5): 539 - 544.
- [6] KUNIO M, KATSUHIKO M, RIKI T. Strength deformational characteristics of EPS beads-mixed lightweight geomaterial subjected to cyclic loading[C]// Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geomaterials. Tokyo, 2002: 119 - 124.
- [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 - 1005. (WANG Shu-mao, GAO Yu-feng. Study on degradation behavior of dynamic shear modulus for lightweight sand-EPS beads soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 1001 - 1005. (in Chinese))
- [8] 李 晶, 缪林昌, 钟建驰, 等. EPS 颗粒混合轻质土反复荷载下变形和阻尼特性[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1769 - 1775. (LI Jing, MIAO Lin-chang, ZHONG Jian-chi, et al. Deformation and damping characteristics of EPS

- beads-mixed lightweight soil under repeated load-unloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(6): 1769 - 1775. (in Chinese))
- [9] 李明东, 田安国. 泡沫塑料混合轻质土在循环荷载下的力学性质[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(11): 1806 - 1810. (LI Ming-dong, TIAN An-guo. Mechanical properties of EPS beads mixed lightweight soil under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(11): 1806 - 1810. (in Chinese))
- [10] 黎冰, 高玉峰. 黏土与 EPS 颗粒混合轻质土的动力变形试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(7): 1042 - 1047. (LI Bing, GAO Yu-feng. Experimental study on dynamic deformation characteristics of lightweight clay-EPS beads soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(7): 1042 - 1047. (in Chinese))
- [11] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effect[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, 1972, **98**(SM6): 603 - 624.
- [12] MAHER M H, RO K S, WELSH J P. High strain dynamic modulus and damping of chemically grouted sand[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1994, **13**(2): 131 - 138.
- [13] FLORA A, LIRER S, SILVESTRI F. Undrained cyclic resistance of undisturbed gravelly soils[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, **43**(4): 366 - 379.
- [14] ESTELLE D R, IRINI D M, RICHARD C, et al. Shear modulus and damping ratio of grouted sand[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, **24**(6): 461 - 471.
- [15] DARENDELI M B. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves[D]. Austin: University of Texas, 2001.
- [16] ROLLINS K M, EVANS M D, DIEHL N B, et al. Shear modulus and damping relationships for gravels[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, **124**(5): 396 - 405.
- [17] SENETAKIS K, ANASTASIADIS A, PITILAKIS K. Dynamic properties of dry sand/rubber (SRM) and gravel/rubber (GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, **33**(1): 38 - 53.
- [18] SEED H B, WONG R T, IDRISS I M, et al. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 1986, **112**(11): 1016 - 1032.
- [19] LIN S Y, LIN P S, LUO H S, et al. Shear modulus and damping ratio characteristics of gravelly deposits[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, **37**(3): 638 - 651.
- [20] TRANDAFIR A C, ERICKSON B A. Stiffness degradation and yielding of EPS geofoam under cyclic loading[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, **24**(1): 119 - 124.
- [21] ZARNANI S, BATHURST R J. Influence of constitutive model on numerical simulation of EPS seismic buffer shaking table tests[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, **27**(4): 308 - 312.