

# 黏土与 EPS 颗粒混合轻质土的动强度特性 试验研究

高玉峰<sup>1, 2</sup>, 黎冰<sup>3</sup>

(1. 河海大学 岩土工程水利部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098;  
3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 通过一系列的室内动三轴试验研究黏土与 EPS 颗粒混合轻质土(LCES)的动强度特性。首先确定压应变达到 5% 是适合 LCES 的动力破坏标准, 然后着重研究围压、水泥含量和 EPS 掺入比对 LCES 动强度特性的影响。试验结果表明, 随着围压和水泥含量的增大, LCES 的动强度增大, 但围压对 LCES 动强度的影响程度随着水泥含量的增大而逐渐减小; 随着 EPS 掺入比的增大, LCES 的动强度先增大后减小, 所以对于 LCES 的动强度来说, 可能存在一个最佳 EPS 掺入比。水泥和 EPS 颗粒的掺入对 LCES 的动强度指标  $c_d$  的提高贡献相当大, 而对  $\varphi_d$  的提高作用相对较小。LCES 动强度曲线  $\tau_d-N_f$  符合乘幂函数关系, 在综合考虑围压、水泥含量和 EPS 掺入比的基础上, 将 LCES 的动强度曲线进行较好的归一化, 并得到 LCES 的动强度公式。

**关键词:** 土力学; 黏土与 EPS 颗粒混合轻质土; 动三轴试验; 破坏标准; 动强度

**中图分类号:** TU 41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2007)增 2 - 4276 - 08

## EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC STRENGTH PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CLAY MIXED WITH EPS BEADS SOIL

GAO Yufeng<sup>1, 2</sup>, LI Bing<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Geotechnical Engineering of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;  
3. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** A series of laboratory dynamic triaxial tests are carried out to study the dynamic strength properties of lightweight clay mixed with expanded polystyrene beads soil(LCES). Firstly, the material will be in failure when the compressive strain reaches 5%, which can be considered to be a suitable dynamic failure criterion of LCES, and then the effort is focused on the confining pressure, cement content and EPS content effect on the dynamic strength properties of LCES. The test results indicate that the dynamic strength of LCES increases with the increasing confining pressure and cement content, however, the effect of confining pressure on the dynamic strength declines when the cement content increases. The dynamic strength of LCES initially increases and then decreases with the increase of EPS content, so LCES may has an optimal EPS content for the dynamic strength. Cement and EPS have considerable effects on the increase of the dynamic strength paramete of LCES, but they have few effects on the increase of the parameter  $\varphi_d$ . The relationship of dynamic shear strength and cyclic number( $\tau_d-N_f$ ) can be simulated by the power function properly. By considering synthetically the influences of

**收稿日期:** 2006 - 07 - 06; **修回日期:** 2006 - 10 - 17

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50479020)

**作者简介:** 高玉峰(1966 -), 男, 1999 年于浙江大学岩土工程专业获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。  
E-mail: yfgao66@yahoo.com.cn

confining pressure, cement content and EPS content, dynamic shear strength curves of LCES are normalized, and the dynamic strength formula is obtained.

**Key words:** soil mechanics; lightweight clay mixed with EPS beads soil; dynamic triaxial test; failure criterion; dynamic strength

## 1 引言

黏土与 EPS 颗粒混合的轻质土(简称 LCES)是轻质土的一种, 它是由黏性土、水泥、聚苯乙烯(expanded polystyrene, 简称 EPS)颗粒和水按照一定的比例混合搅拌压实而成。由于 EPS 颗粒的掺入, 使得其密度大大降低, 最小可以到  $0.66 \text{ g/cm}^3$  左右<sup>[1]</sup>, 所以若使用 LCES 作为工程填土材料, 可以有效地降低对地基的竖向压力; 而水泥的掺入又使得其具有较高的强度和抗变形能力, 从而更好地满足工程需要。此外, 针对分布广泛的软黏土地基, LCES 的一个突出优点是可以就地取土作为原料土, 这样既可以减小软黏土层的厚度又可以降低工程造价。基于以上优点, LCES 在岩土工程中已经得到了广泛的应用<sup>[2, 3]</sup>。

在工程应用中, LCES 不可避免的会受到交通、地震、波浪等动荷载的作用, 所以必然要考虑其动强度问题。目前关于 LCES 性质的研究大多集中在静力特性方面<sup>[1, 4~8]</sup>, 还未见动强度方面的研究成果。本文将通过一系列的室内动三轴试验确定适合 LCES 的破坏标准, 并对其动强度变化规律进行研究。

## 2 试验方法及内容

本次试验原料土取自南京河西地区 5~7 m 深处的软黏土, 其物理力学性质指标如表 1 所示。水泥为南京地产雨花牌 R32.5 普通硅酸盐水泥, EPS 颗粒为球粒, 直径为 2~4 mm, 密度为  $27 \text{ kg/m}^3$ , 水为自来水。制备试样时, 按照预定的配比将软黏土、水泥、EPS 颗粒和水混合搅拌均匀, 分层装入直径为 61.8 mm、高 140 mm 的模具中, 然后放入标准养护箱内养护 24 h 后脱模, 脱模后把试样放入标准养护箱内继续养护。养护 28 d 后将试样抽真空 2 h, 再放入水中浸泡 24 h 后进行动力试验。

表 1 土的物理力学性质指标

Table 1 Physico-mechanical properties of soft clay

容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	含水率 $w/\%$	孔隙比 $e$	相对 密度 $G_s$	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑性指数 $I_p$	液性指数 $I_L$
16.4	45.2	1.42	2.73	27.3	47.5	20	0.886

为了确定适合 LCES 的破坏标准以及研究其动强度特性, 分别对不同水泥含量和 EPS 掺入比的 LCES 进行动三轴试验, 试验方案如表 2 所示。围压取 50, 100, 150 kPa, 含水率为 65%(是指制样时掺入水泥之前水的质量与干土质量之比)。试验时, 试样等向固结完成后在不排水条件下分级施加波形为正弦波的循环荷载, 加载频率为 0.1 Hz。

表 2 试验方案

Table 2 Experiment schemes

水泥含量 $C_c/\text{kg}$	EPS 掺入比 $V_e$			
	0.87	1.30	1.74	2.17
49	DT11	DT12		
73	DT21	DT22	DT23	DT24
91	DT31	DT32	DT33	DT34
109	DT41	DT42		

注: 表中 DT11~DT42 为试样编号, 水泥含量  $C_c$  是指  $1 \text{ m}^3$  的 LCES 中所含有的水泥质量; EPS 掺入比  $V_e$  以添加的 EPS 颗粒纯体积与原料土的体积之比来表示。

## 3 破坏标准的确定

动强度是指在一定的应力往返作用次数下达到某种特定的破坏标准所需的动应力。从动强度的定义可以看出, 如果这个破坏标准不同, 相应的动强度也就不同, 所以合理地确定破坏标准是讨论动强度问题的基础。目前常用的破坏标准主要有: 孔压标准、屈服标准和应变标准。本次试验中, 即使使用抽真空饱和、反压饱和以及二氧化碳通水饱和等饱和方法, LCES 仍然不能饱和<sup>[1, 4]</sup>, 因此, 以土体处于饱和状态为前提的孔压破坏标准对 LCES 不适用。

LCES 的动应变随加载次数的变化关系曲线如

图 1 所示。由图 1 可知，加载过程中 LCES 的应变增长速率比较稳定，并未出现变形急速陡转的情况，所以屈服破坏标准对 LCES 也不适用。试验过程中发现，试样没有明显的剪切破坏面，而是变形起控制作用，所以采用应变破坏标准。和黏性土在循环加载过程中表现出来的拉应变与压应变基本对称的特性<sup>[9]</sup>相比，图 1 中各种配比下 LCES 的 $\epsilon_a-N$  曲线表明，循环加载过程中 LCES 试样表现为明显的偏压，不产生拉应变或产生的拉应变很小，这主要是由于水泥的掺入，使得 LCES 具有结构性，颗粒之间有较强的黏结力造成的。比较图 1 中的 DT11 和

DT33, DT34, DT41，可以看出 DT11 在加载过程中产生了拉应变或随着加载次数的增大有产生拉应变的趋势，而 DT33, DT34 和 DT41 在 3 种围压下都未产生拉应变，并且偏压的程度相对更加严重，这是由于水泥含量的不同造成的。试样 DT11 的水泥含量较低，颗粒之间的黏结力较弱，易产生拉应变，而 DT33, DT34 和 DT41 的水泥含量较大，因此试样的结构性强，颗粒之间的黏结力相对较强，所以不易产生拉应变。和水泥土的脆性破坏性状<sup>[10]</sup>不同，由于 EPS 颗粒的掺入，使得 LCES 具有一定的延性，所以 LCES 不会发生脆性破坏。

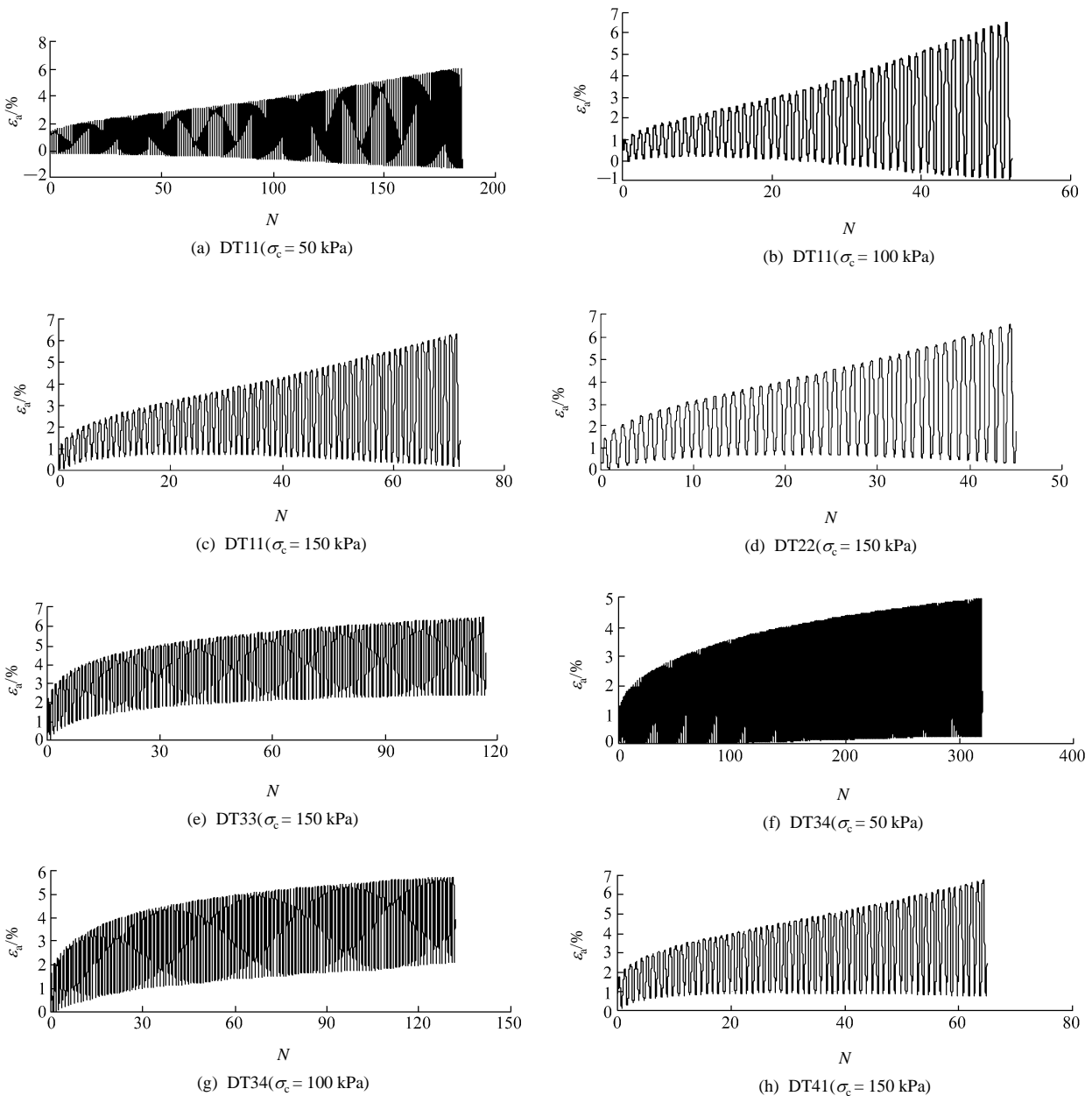


图 1 不同配比下 LCES 的 $\epsilon_a-N$  曲线

Fig.1  $\epsilon_a-N$  curves of LCES under various mixing proportions

考虑到 LCES 在实际工程中多应用于公路工程, 变形要求相对较高; 此外, 由于 LCES 在动加载过程中不产生或产生的拉应变很小, 因此忽略拉应变的影响, 所以以压应变达到 5% 为 LCES 的破坏标准比较适合。

### 4 动强度曲线分析

用动剪应力  $\tau_d$  与破坏时振动次数  $N_f$  的关系曲线来表示 LCES 的动强度的变化, 其中  $\tau_d$  为试验动加载过程中试样 45° 面上的动剪应力幅,  $N_f$  为破坏振次。

#### 4.1 围压的影响

图 2 所示为不同围压下 LCES 的动强度曲线。由图 2 可知, LCES 的动强度随着围压的增大而增大, 这是由于随着的围压增大, LCES 颗粒之间的接触越发紧密, 抵抗外荷载的能力提高所致。进一步分析可以发现, 围压每增大 50 kPa, 其动强度增长 20%~40%, 而且随着水泥含量的增大, 动强度随围压增长的幅度呈降低趋势。这可以从水泥固化

特性的角度来理解, 掺入到 LCES 中的水泥遇水发生水化反应从而产生水化物, 产生的水泥水化物主要有两个作用, 一是包裹黏土和 EPS 颗粒表面并相互胶结在一起, 增强黏结力, 二是填充颗粒之间的孔隙, 减小试样的孔隙比<sup>[5, 11]</sup>。所以水泥含量越高, 颗粒之间的黏结力越强, 孔隙比越小, 试样受到围压的影响也就越小。而水泥较少时, 颗粒之间的黏结力较弱, 孔隙比较大, 这为围压作用下使得颗粒间的接触更加紧密提供了相对大的空间。

#### 4.2 水泥含量的影响

不同水泥含量下 LCES 的动强度曲线如图 3 所示。图 3 表明, 在相同破坏振动次数下, 随着水泥含量的增加, LCES 的动强度随之增大。从前面的分析已知, 由于水泥的掺入, 增强了 LCES 颗粒间的黏结力, 减小了 LCES 的孔隙比, 所以水泥含量越高, 水泥水化物就越多, 试样的孔隙比越小, 颗粒之间的黏结力越强, 因此试样承受动荷载的能力就越强, 即动强度越高。

#### 4.3 EPS 掺入比的影响

图 4 描述了不同 EPS 掺入比下 LCES 的动强度

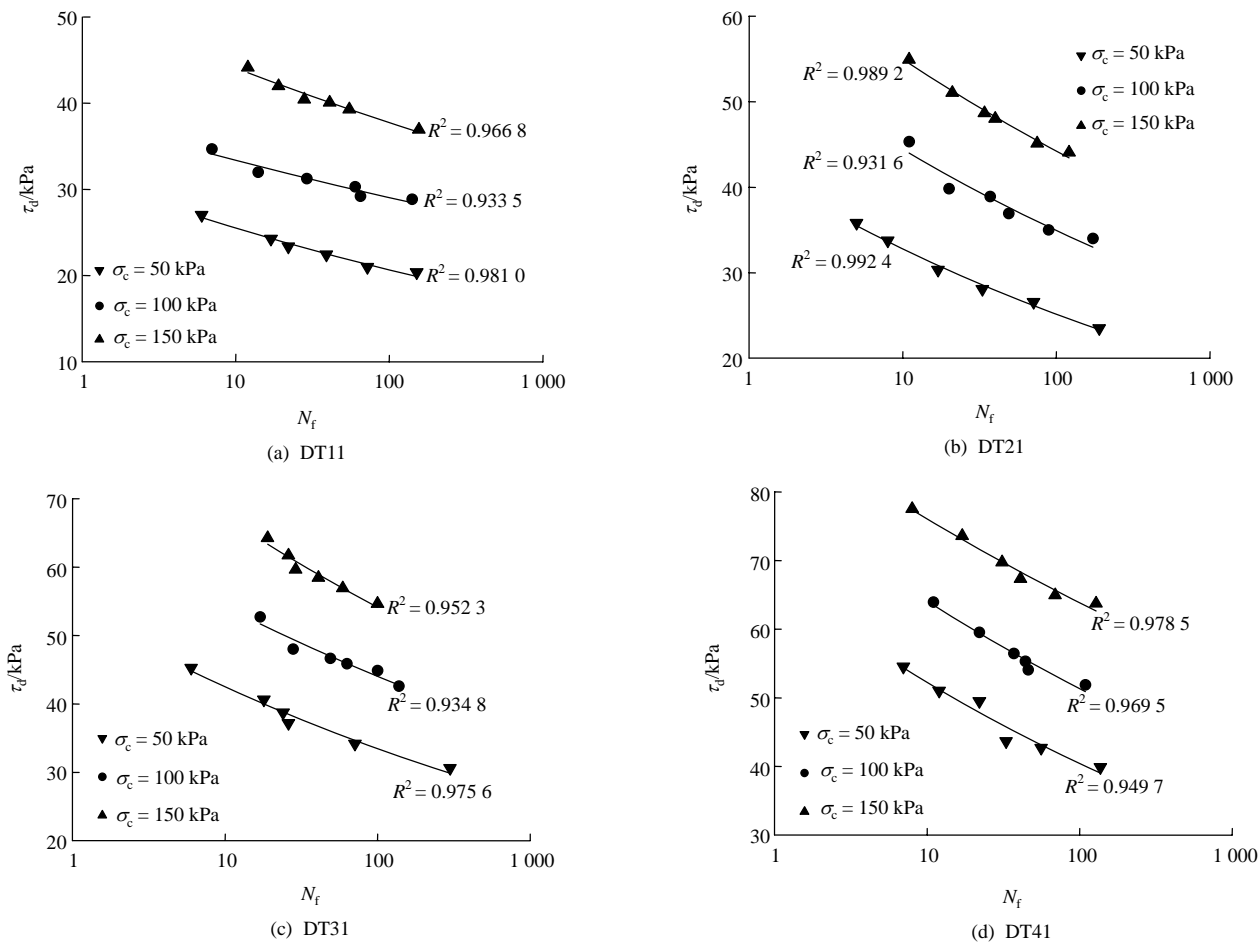


图 2 不同围压下 LCES 的动强度曲线

Fig.2 Dynamic strength curves of LCES under various confining pressures

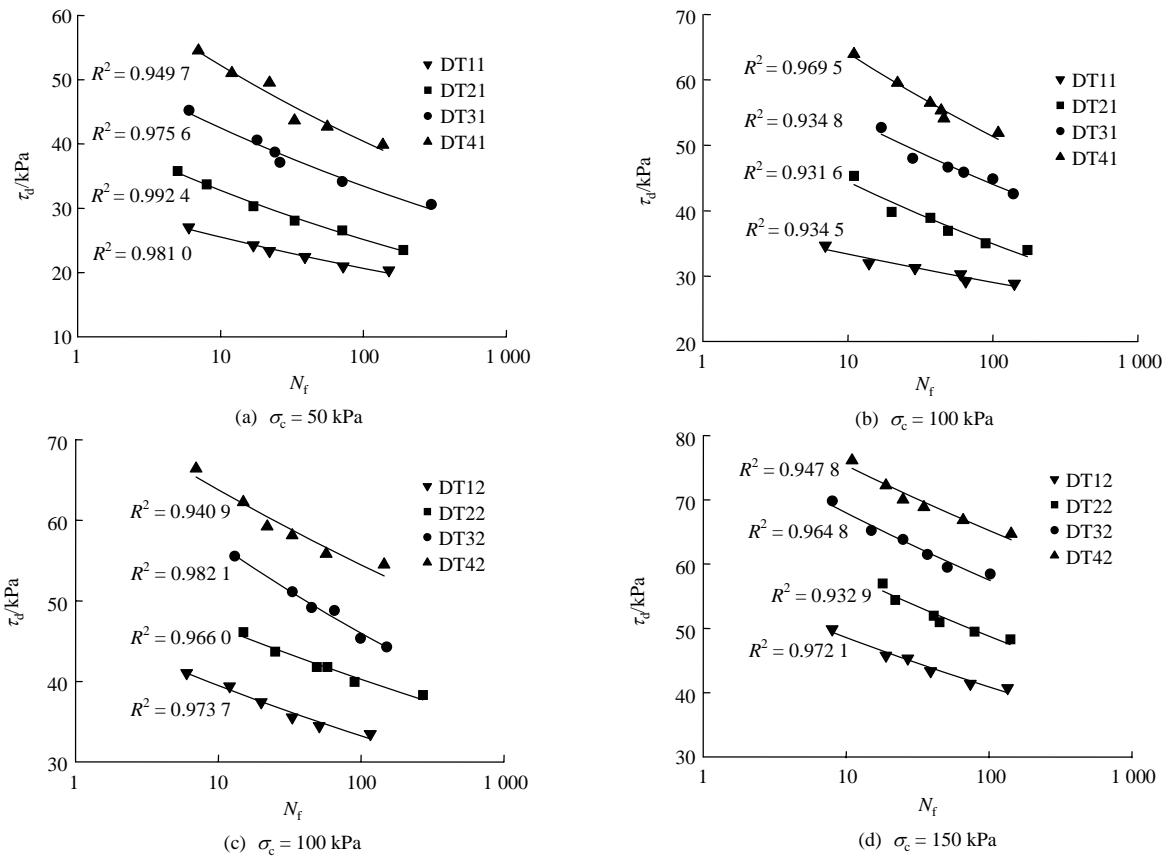


图3 不同水泥含量下 LCES 的动强度曲线

Fig.3 Dynamic strength curves of LCES under various cement contents

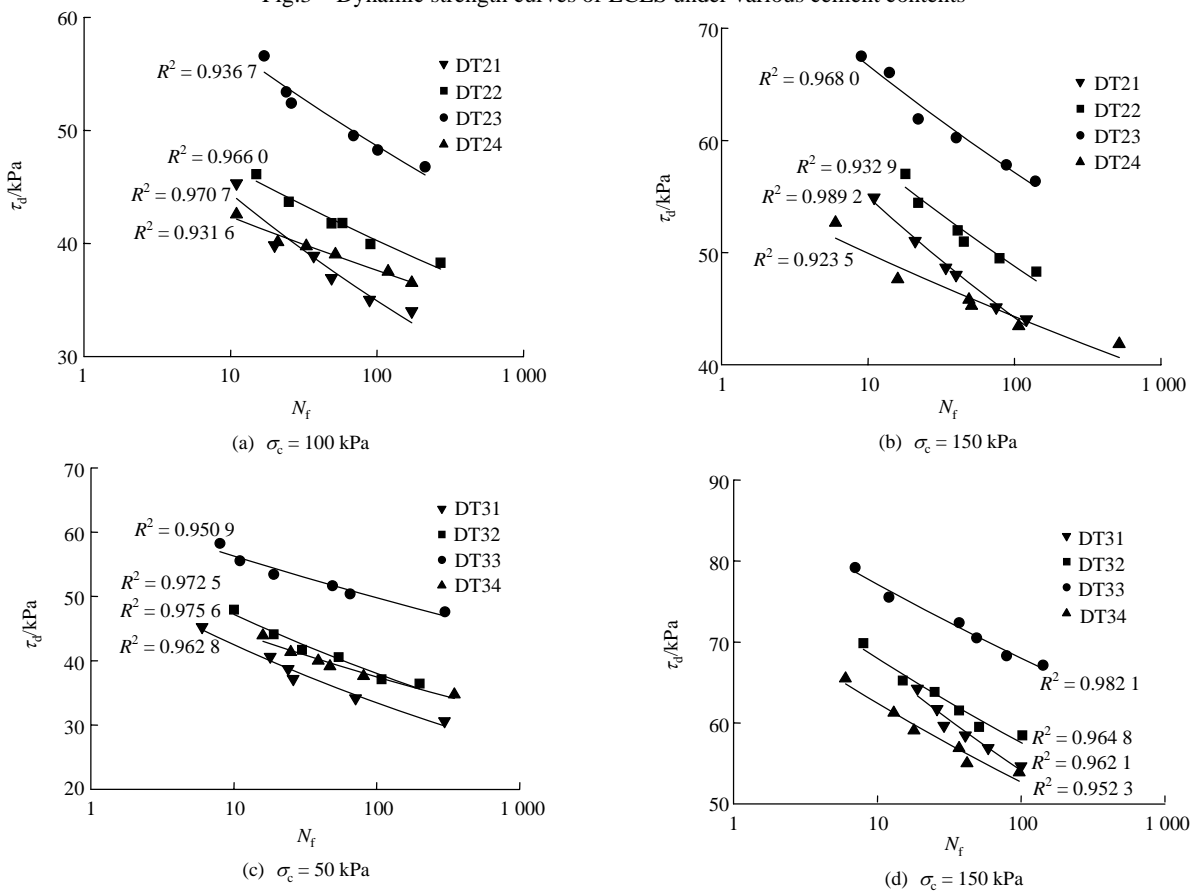


图4 不同EPS掺入比下 LCES 的动强度曲线

Fig.4 Dynamic strength curves of LCES under various EPS contents

变化趋势。从图 4 中很容易发现, LCES 的动强度先随着 EPS 掺入比的增大而增大然后又随之减小, 而并不是 EPS 掺入比越小, 动强度越高。参照图 5 所示的 LCES 的体积构成示意图, 造成上述情况主要是因为 EPS 掺入比从  $V_{e1}$  增大到  $V_{e2}$  后, 造成 EPS 颗粒与水泥土(水泥与水、黏性土混合后发生水化反应形成水泥土, 为方便说明, LCES 中除 EPS 颗粒外统称为水泥土)的接触面增多和孔隙比增大, 这会导致 LCES 的动强度降低; 在 EPS 掺入比增大的同时, 水泥土所占的体积也从  $V_{s1}$  减小到  $V_{s2}$ , 由于水泥含量的定义为  $1 \text{ m}^3$  LCES 中所含有的水泥质量, 即不论 EPS 掺入比为多大, 单位体积内 LCES 中所含有的水泥质量都相同, 因此体积为  $V_{s1}$  的水泥土和体积为  $V_{s2}$  的水泥土中所含的水泥质量是相同的, 所以水泥土 2 的强度必然大于水泥土 1 的强度, 这又会提高 LCES 的动强度; 因此, 在两者的综合影响下, EPS 掺入比的变化对 LCES 的动强度的影响比较复杂, 很难判断 EPS 掺入比的变化会使 LCES 的动强度提高还是降低。本次试验得到的结果是: EPS 掺入比在 0.87~2.17 范围内变化时, LCES 的动强度先增大后减小。

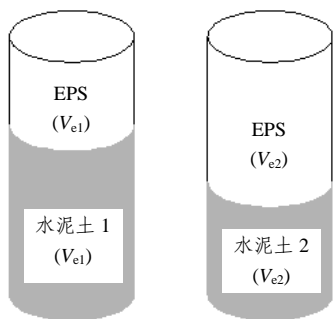


图 5 LCES 的体积构成示意图

Fig.5 Scheme of volume constitutes of LCES

### 5 动强度指标分析

图 6 所示为根据不同破坏振次下的  $\tau_d$  由 Mohr 应力圆绘制出 LCES 的强度包络线。观察图 6 可以发现, 和砂土、黏土等普通土体不同, 随着水泥含量的增大, LCES 的 Mohr 应力圆直径逐渐增大, 跃过了原点, 这是由于水泥的掺入增强了颗粒之间的黏结力, 使得 LCES 具有一定的抗拉强度。这是一般土体所不具备的性质。

从前文的分析中已知, 水泥和 EPS 颗粒是影响

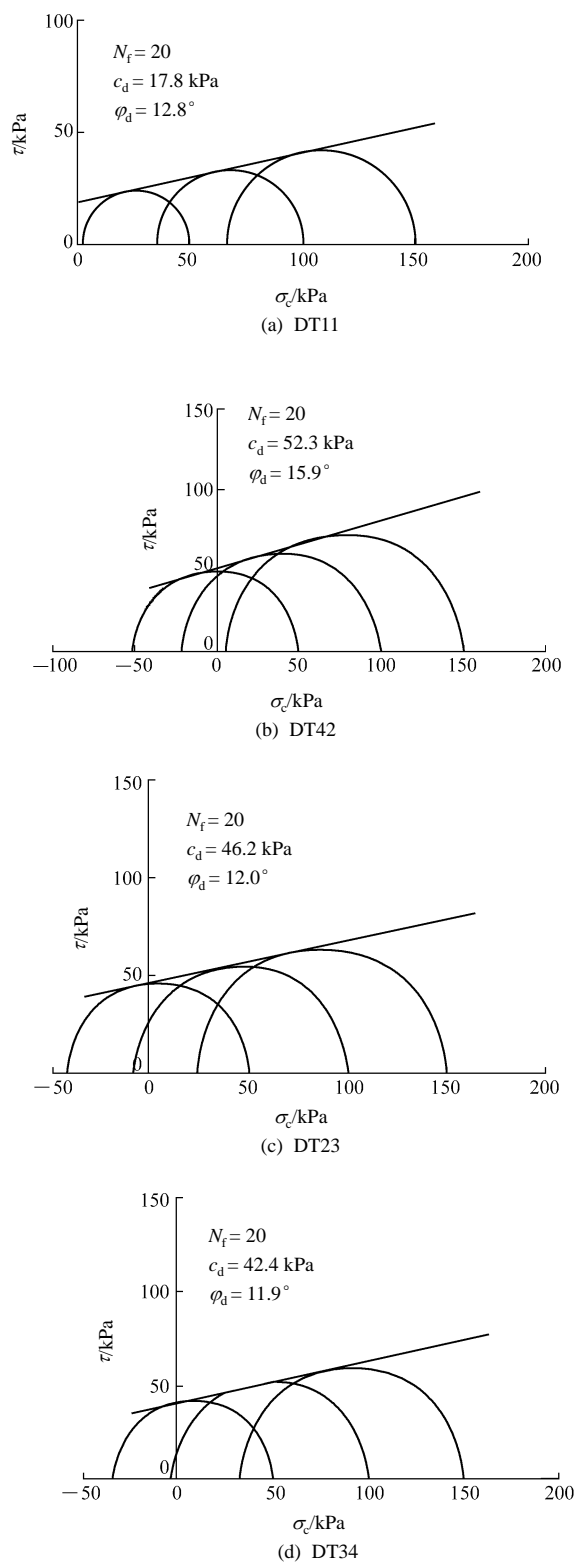


图 6 不同配比下 LCES 的动强度包线

Fig.6 Dynamic strength envelopes of LCES under various mixing proportions

LCES 动强度的主要因素, 所以水泥和 EPS 颗粒也必然是其动强度指标的主要影响因素。以与 8 级地震相对应的等效循环周数  $N_f = 20$  为例<sup>[12]</sup>, 由动强度包络线得到 LCES 的动强度指标  $c_d, \phi_d$ 。分析得到

的所有动强度指标发现,  $c_d$ ,  $\varphi_d$  可以用包含水泥和 EPS 掺入比两个自变量的函数关系式来表达, 具体表达式如下:

$$c_d = 0.366 + 10.040 \sin(33.573V_e) + 0.509C_c \quad (1)$$

$$\varphi_d = 6.550 - 2.848 \sin(41.453V_e) + 0.083C_c \quad (2)$$

式中:  $C_c$  和  $V_e$  分别为水泥含量和 EPS 掺入比。

运用式(1), (2)计算得到不同配比下 LCES 的动强度指标, 然后将计算得到的预测值与试验值作对比, 具体如图 7 所示。由图 7 可知, 试验值与预测值非常接近, 说明用式(1)和(2)预测 LCES 的动强度指标是可行的。从式(1), (2)的形式中不难看出, LCES 的动强度指标大小与水泥含量呈线性关系, 而 EPS 掺入比的影响可以通过正弦函数来表示, 这与上述动强度曲线分析中得出的 LCES 的动强度随水泥含量增大而增大, 随 EPS 掺入比的增大而先增大后减小的结论是一致的。从图 7 中还可以看出,

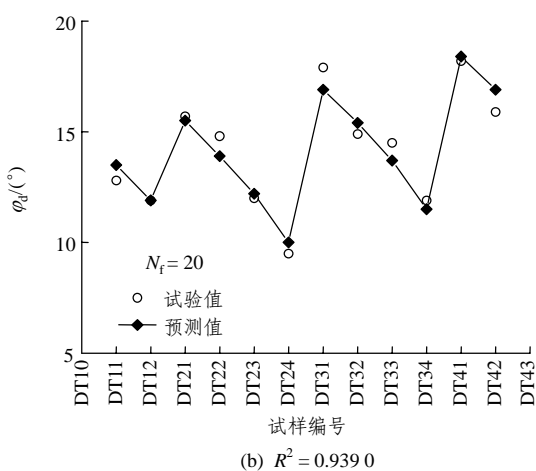
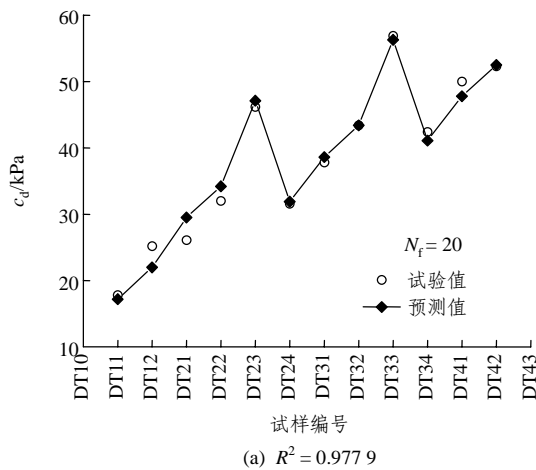


图 7 动强度指标的试验值与预测值

Fig.7 Measured and predict dynamic strength indices of LCES

LCES 的动强度指标  $c_d$  值比一般土体要大很多, 这也是 LCES 在动加载过程中为什么不产生或产生的拉应变很小的主要原因; 而和一般饱和软黏土相比,  $\varphi_d$  并没有增大多少。这说明水泥和 EPS 颗粒的掺入对  $c_d$  的提高贡献相当大, 而对  $\varphi_d$  的提高作用相对较小。

## 6 动强度曲线的归一化和动强度公式

由于水泥和 EPS 颗粒的掺入, 使得 LCES 的动强度特性复杂化, 所以若能得到一个可以综合考虑水泥含量和 EPS 掺入比变化的 LCES 的动强度公式, 那么这将对 LCES 的设计与应用提供很大的方便。

通过对 36 组试验的试验结果进行回归发现,  $\tau_d$  与  $N_f$  之间较好地符合乘幂函数关系, 即

$$\tau_d = a(N_f)^b \quad (3)$$

式中:  $a$ ,  $b$  为与试样配比及围压相关的常数部分 LCES 的动强度拟合曲线如图 2~4 所示。

从前文的分析中已知, LCES 的动强度随着围压和水泥含量的增大而增大, 随着 EPS 掺入比的增大而先增大后减小, 所以用围压、水泥含量和 EPS 掺入比为因子将动强度归一化, 然后得到式(3)中系数  $a$ ,  $b$  的值。借鉴式(1)和(2), 令  $F(C_c, V_e) = 3.851 - 1.963 \sin(82.257V_e) + 0.105C_c$ , 以  $\tau_d / (\sigma_c^{0.361} F(C_c, V_e))$  为纵坐标,  $N_f$  为横坐标, 将本次试验中 216 个试验点绘在该坐标上, 如图 8 所示。

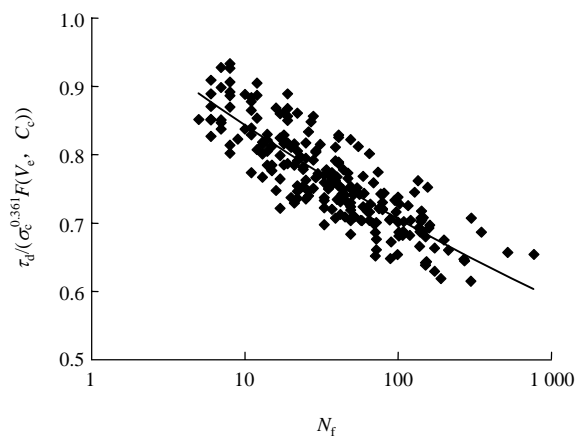


图 8 LCES 的动强度归一化曲线

Fig.8 Normalized dynamic strength curve of LCES

通过对上述结果进行回归分析, 得到动强度的表达式:

$$\tau_d = \sigma_c^{0.361} [3.851 - 1.963 \sin(82.257V_e) + 0.105C_c] N_f^{-0.077} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_c$  为围压。

## 7 结 论

本文通过室内动三轴试验详细研究了黏土与 EPS 颗粒混合轻质土的动强度特性, 着重研究了围压、水泥含量和 EPS 掺入比的影响, 得到了如下结论:

(1) 在分析了各种配比下 LCES 的动应变随加载次数变化关系曲线的特点基础上, 确定了压应变达到 5% 为 LCES 的破坏标准。

(2) LCES 动剪强度曲线  $\tau_d-N_f$  符合乘幂函数关系;

(3) LCES 的动强度随着围压和水泥含量的增大而增大, 但由于水泥含量的增大会增强 LCES 颗粒间的黏结力, 所以围压对 LCES 动强度的影响随着水泥含量的增大而减小。EPS 掺入比为 0.87~2.17 内变化时, 随着 EPS 掺入比的增大, LCES 的动强度先增大后减小。

(4) 水泥和 EPS 颗粒的掺入对 LCES 的动强度指标  $c_d$  的提高贡献相当大, 而对  $\phi_d$  的提高作用相对较小。

(5) 综合考虑围压、水泥含量和 EPS 掺入比的影响, 可以将 LCES 的动强度曲线进行较好的归一化, 并得到了 LCES 的动强度公式, 可以为 LCES 的设计与应用提供参考。

## 参考文献(References):

- [1] 董金梅. 聚苯乙烯轻质混合土工程特性的试验研究[博士学位论文][D]. 南京: 河海大学, 2005.(DONG Jinmei. Study on engineering characteristic of light heterogeneous soil mixed with expanded polystyrene[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 2005.(in Chinese))
- [2] 山田純男, 長坂勇二. フラダン. テー ジ - 発泡ビーズと建設発生

- 土を用いた軽量混合土[J]. 土と基礎, 1994, 42(10): 25 - 30.
- [3] 鳩津晃臣. 軽量盛土工法の進展[J]. 土と基礎, 1989, 37(2): 7 - 11.
- [4] YASUHARA K. Recent Japanese experiences with lightweight Geomaterials[C]// Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials. [S. l.]: [s. n.], 2002: 35 - 39.
- [5] 姬凤玲. 疏浚淤泥泡沫塑料颗粒混合轻质土力学特性研究[博士学位论文][D]. 南京: 河海大学, 2005.(JI Fengling. Study on mechanical properties of lightweight bead-treated soil made from dredged soils[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 2005.(in Chinese))
- [6] TAKAO S, TAKASHI T, KOJI M, et al. Field placing test of lightweight treated soil under seawater in Kumamoto port[J]. Soils and Foundations, 2001, 41(5): 145 - 154.
- [7] 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, 22(3): 245 - 248.(MA Shidong. The properties of stabilized light soil(SLS) with expanded polystyrene[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(3): 245 - 248.(in Chinese))
- [8] 湯怡新, 奥村樹郎, 石毅和宏, 等. 軽量混合処理土の  $K_0$  圧密および耐久特性[C]// 第 31 回地盤工学研究発表会講演集. [S. l.]: [s. n.], 1996: 2 495 - 2 496.
- [9] 孙光文, 陈颖辉, 陈忠义. 加芯搅拌桩破坏模式的分析[J]. 山西建筑, 2006, 32(12): 86 - 87.(SUN Guangwen, CHEN Yinghui, CHEN Zhongyi. Analysis of damage mode of core mixing pile[J]. Shanxi Jianzhu, 2006, 32(12): 86 - 87.(in Chinese))
- [10] PARK D. Evaluation of dynamic soil properties: strain amplitude effects on shear modulus and damping ratio[Ph. D. Thesis][D]. New York: Cornell University, 1998.
- [11] 王文军, 朱向荣, 方鹏飞. 纳米硅粉水泥土固化机制研究[J]. 浙江大学学报, 2005, 39(1): 148 - 153.(WANG Wenjun, ZHU Xiangrong, FANG Pengfei. Analysis of reinforcement mechanism of nanometer silica fume reinforced cemented clay[J]. Journal of Zhejiang University, 2005, 39(1): 148 - 153.(in Chinese))
- [12] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.(QIAN Jiahuan, YIN Zongze. Principles and calculation methods in geotechnical engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 1996.(in Chinese))