

动荷载下砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土(LSES)的 强度标准及破坏机理研究

王庶懋¹, 高玉峰¹, 张益纯²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 常州广景房地产开发有限公司, 江苏 常州 213001)

摘要: 砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土(LSES)是一种在室内试验及现场应用中都难以饱和的土工材料, 因此其动强度只能选择应变作为破坏标准. 通过分析 LSES 的强度组成和动三轴试验结果, 认为其在动荷载下的应变累积经历了 3 个阶段: 初压阶段、强化阶段和破坏阶段, 并由此选择压应变的最大值作为其破坏应变 ϵ_{af} . 围压、水泥掺入量和 EPS 体积分数对 ϵ_{af} 都有显著影响. 随着围压和 EPS 体积分数的增大, ϵ_{af} 增大; 而随着水泥掺入量的增大, 由于 LSES 塑性的变化, ϵ_{af} 则经历了先增后减的过程.

关键词: 砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土(LSES); 动强度标准; 破坏机理; 破坏应变

中图分类号: TU521 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2007)02-0197-05

砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土(LSES)是将适量的砂、水泥、EPS 颗粒按一定比例混合后, 加水搅拌而成. 由于 EPS 颗粒的密度很低($15 \sim 30 \text{ kg/m}^3$), 造成 LSES 的密度可以低达约 0.7 g/cm^3 , 因此 LSES 可以有效降低对路基的竖向荷载以及对边坡的侧向荷载, 并能提高路基的承载力和边坡稳定性, 所以被广泛应用于路基、桥台以及边坡填土^[1-2].

由于我国处于地震多发区域, 在应用 LSES 时必然要考虑到其动强度问题. 作为一种复合土工材料, LSES 在动荷载下的强度标准以及破坏机理与常规土体显著不同. 本文将通过一系列室内动三轴试验, 确定出 LSES 的动强度标准, 并对其动力破坏机理进行探讨.

1 土的动强度标准

土的动强度定义为在一定振次下, 使得土体达到某一破坏标准所需要的动应力幅值. 因此动强度与振次及破坏标准紧密相关. 破坏标准有孔压标准及应变标准 2 种. 孔压标准主要针对砂土而言. 在动力作用下, 任何时刻都有一条强度平衡线, 当孔隙水压力等于周围固结压力时, 强度平衡线达到其极限位置, 即为液化. 关于液化的含义存在 2 种不同的观点, 一种以 Seed^[3]为代表, 认为在简谐循环荷载作用下, 饱和砂土孔隙中的残余孔隙压力初次等于所施加围压时的状态, 即峰值循环孔压与围压的比值初次达到 100% 的条件或状态为初始液化. 而 Casagrande^[4]认为应区分现场液化过程与动三轴中饱和砂样的液化过程. 为防止这种混淆, Casagrande^[4-5]等将饱和砂土液化分为 2 类. 第一类为实际液化, 即松散饱和砂土丧失剪切强度, 产生流动滑移破坏; 第二类为循环活动性, 指密实砂在循环荷载作用下不断产生大应变, 持续软化. 而针对粉土、黏性土、沉积软岩等材料, 在动荷载作用下, 这些土的孔隙水压力难以达到砂土的液化标准, 即使产生很大变形, 孔隙水压力仍然达不到初始有效固结压力, 因此选用一定的轴向总应变或动应变幅如 2.5%、5%、10% 或 20% 作为应变破坏准则^[6]. 此外, 对于一些非饱和土, 也无法根据其孔压的上升状况判断其破坏与否, 如黄土的破坏动应力, 在低湿度状态取其发生脆性破坏时所对应的动应力, 在高湿度状态时则取应力应变曲线明显转折处的动应力, 即采用屈服标准^[7].

LSES 中的 EPS 颗粒是通过在聚苯乙烯珠粒中加入低沸点的液体发泡剂, 在加温、加压的条件下, 渗透到聚苯乙烯珠粒中, 使其溶胀而制成. 在 EPS 的成型过程中, 泡沫结构内封闭了大量的气体, 其体积可占 98%.

正是由于这些气体的存在 ,EPS 才具有轻质、抗震、隔热的优点 .然而 ,EPS 颗粒中的封闭气泡也使得 LSES 即使用作地下水位以下的路基填料也难以达到饱和 ,而且饱和度很低 ,这点已为多项室内试验所证实 .即便使用真空饱和、二氧化碳通水饱和以及反压饱和 ,LSES 的饱和度始终在 40% ~ 70% 的范围内 .因此 ,LSES 在试验和应用中均可视为非饱和土 ,应用于饱和土的孔压破坏标准并不适用于 LSES .另外 ,LSES 中水泥掺入量和 EPS 颗粒体积分数的不同也将决定 LSES 在动荷载下有不同的破坏形式 .本文将根据不同配比 LSES 的动三轴试验结果确定其应变破坏标准 .

2 LSES 动三轴试验

本文通过对不同水泥掺入量和 EPS 颗粒体积分数(配比见表 1)的 LSES 进行逐级加荷的动三轴试验 ,使其在动荷载作用下达到可观察的破坏 ,以分析其破坏形态以及破坏应变 .表 1 中试样编号中的 3 个数字 (即 dt 131 中的 1 3 1) 分别表示水泥掺入量、水灰比以及 EPS 颗粒体积分数 .围压取 50 ,100 ,150 和 200 kPa ,加载频率为 0.1 .LSES 试样按照表 1 的配比将砂、直径为 2 ~ 4 mm 的 EPS 颗粒、32.5 # 水泥混合后加水搅拌 ,分层填入模具中压实而成 ,然后将做好的试样连同模具置于标准环境中养护 24 h 后脱模 .试样脱模后仍放在湿润环境中 ,以防止水泥发生干缩 .养护至 14 d 后取出试验 .为保证数据的可信度 ,每组试验做 3 个平行试验 .

3 动三轴试验结果分析及 LSES 在动荷载下的破坏机理

通过对试验过程的观察 ,发现不同配比的 LSES 试样在不断累积的动荷载下 ,有着不同的应变增长特征以及破坏形式 ,配比和围压对其都有显著的影响 .

动荷载下 LSES 的强度发挥可视为由 2 部分组成 :水泥水化产物包裹于砂粒和 EPS 颗粒表面以及填充孔隙所形成的胶结强度、砂粒间及砂粒与 EPS 颗粒间的摩擦及咬合强度 .在动荷载下 ,LSES 的应变累积过程有以下几个阶段 :

- a. 初压阶段 .在加载初始阶段 ,动应力的大小以及加载周数都不大 ,使得 LSES 形成一整体的水泥水化主要产物——水化硅酸钙 (C-S-H) .C-S-H 所具有的胶结强度承担了主要的荷载作用 ,而 C-S-H 凝胶的结构特点使其具有良好的抗压性能 ,因此在拉压循环应力作用下主要产生压应变 .
- b. 强化阶段 .本文已证实在 LSES 内部存在着相连的孔隙及裂缝 ,即原生损伤 ,损伤的程度因水泥掺入量和 EPS 颗粒体积分数的不同而异 .随着动应力及加载周数的增大 ,胶结逐渐破损 ,孔隙和裂缝开始贯通 .由于 LSES 的损伤在横观层面具有各向异性的特点 ,因此 LSES 试样内逐渐形成一最薄弱截面 ,该截面的胶结强度丧失得最多 ,此时 ,动应力开始主要由砂粒间以及砂粒与 EPS 颗粒间的摩擦和咬合强度承担 .EPS 良好的弹性性能使得试样开始产生拉应变 ,此后 ,压应变和拉应变共同增大 ,试样的模量进一步衰减 .
- c. 破坏阶段 .最薄弱截面的胶结强度彻底丧失 ,动荷载完全由该截面颗粒间的摩擦强度承担 ,此时 ,破坏开始发生 ,压应变陡然下降 ,而拉应变急剧增长 ,直至试样被迅速拉坏 .

以上 3 个阶段分别对应于图 1 中曲线 $\epsilon_a \sim N$ 所示的 1 2 3 区域 .图 1 是 dt 222 在 $\sigma_c = 100$ kPa 时的循环应变随加载次数增长曲线 .配比不同的 LSES 由于性质的差异 ,其应变累积的过程也有不同的特点 .水泥掺入量高的试样由于脆性大 ,初压阶段经历得较久 ,甚至在超过仪器精度范围后 ,压应变仍没有明显上升 .如对于水泥掺入量为 15% 的试样 ,除 dt 333 在 $\sigma_c = 100$,150 和 200 kPa 下可以发生破坏外 ,其余均不会发生破坏 .在荷载施加过大后 ,读取到的拉应变数值已为试样外橡皮膜的受拉值 .结束试验 ,取出试样后发现其没有明显的薄弱区域 ,强度仍然很高 .而 EPS 颗粒体积分数高的试样 ,由于延性较好 ,在其薄弱面的胶结强度完全丧失后 ,能承受更多的压应变 ,因此其强化阶段较长 .此外 ,高围压对 LSES 应变累积的影响与 EPS 颗粒体积分数较低时类似 ,围压增大时 ,LSES 颗粒间咬合得更趋紧密 .在进入强化阶段后 ,颗粒很快进行重组 ,压应变也迅速达到最大值 ,试样开始破坏 .不过围压的影响只是在一定的水泥掺入量范围内有效 .当水泥掺入量足够

表 1 试样编号及配比
Table 1 Numbers and mixing proportion of specimens

编号	水泥掺入量/%	水灰比	V_e/V_s
dt 131	5	1.3	1.0
dt 132	5	1.3	1.5
dt 143	5	1.5	2.0
dt 211	10	1.1	1.0
dt 222	10	1.2	1.5
dt 233	10	1.3	2.0
dt 311	15	1.1	1.0
dt 322	15	1.2	1.5
dt 333	15	1.3	2.0

注 水泥掺入量为水泥与砂的干质量比 ;
 V_e/V_s 为 EPS 颗粒与砂自然堆积状态下的体积比 .

高时(如达到15%),颗粒间的胶结强度已经大到足以阻止颗粒朝着更紧密的压实状态旋转或滑动,此时,可忽略围压的影响。

根据以上分析,可认为 LSES 在动荷载下所能达到的最大压应变是其轴向破坏应变 ϵ_{af} ,因为此刻标志着 LSES 破坏的开始.图 2 分别为 dt132 在 3 种围压下达达到破坏应变时 ϵ_a 随 N 的增长曲线. ϵ_{af} 为图中箭头所指处,限于篇幅,其余编号试样的曲线没有给出.其中,dt 333 在 $\sigma_c = 50, 100$ kPa 时达不到破坏应变,压应变只是缓慢地增长,再施加更大的荷载只会使得橡皮膜相对于试样产生拉动,而得不到准确的试样应变.所有配比的 LSES 的轴向破坏应变 ϵ_{af} 见表 2.

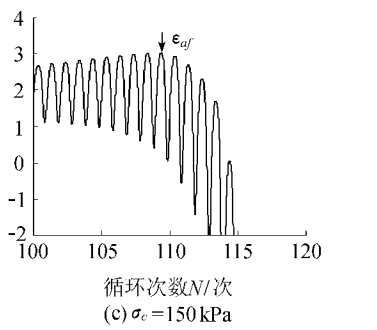
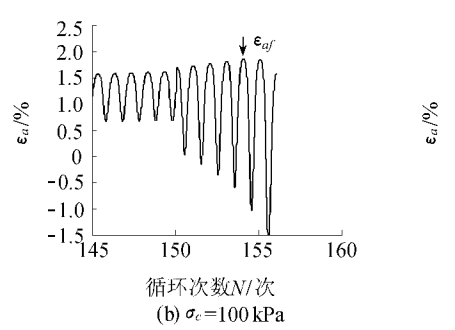
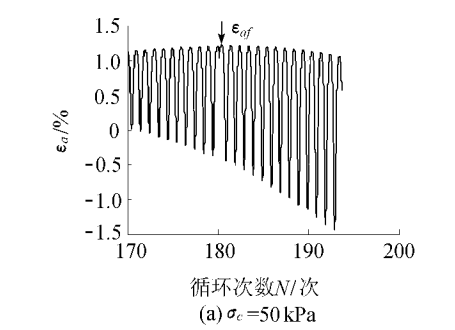


图 2 试样 dt 132 破坏时的 $\epsilon_a \sim N$ 曲线

Fig.2 $\epsilon_a \sim N$ curve for specimen dt 132 at failure

表 2 所有试样在 4 种围压下的破坏应变

Table 2 Failure strains of all specimens under four confining pressures

σ_c /kPa	ϵ_{af} /%								
	dt 131	dt 132	dt 143	dt 211	dt 222	dt 233	dt 311	dt 322	dt 333
50	0.61	1.20	2.18	*	1.13	1.35	*	*	*
100	1.18	1.82	2.35	*	2.08	3.42	*	*	2.40
150	1.69	2.94	3.84	*	2.21	4.83	*	*	2.14
200	1.94	3.64	4.21	*	3.19	5.58	*	*	2.25

注: * 表示无法达到破坏应变.

在动力研究中,采用应变破坏标准的以黏性土居多,而不同特性的土选取破坏应变的方式也不同.在研究具有结构性原状软黏土的动力破坏标准时,陈颖平等^[8]选取了“变形发展过程中出现的转折点应变”作为破坏应变,认为此时“标志土体结构即将出现坍塌性破坏”,LSES 也具有显著的结构性^[9],但与结构性软黏土不同的是,LSES 中的 EPS 颗粒为整个混合土结构提供了释放变形的弹性体系.不同配比的 LSES 表现出不同程度的延性和脆性,因而到达破坏的形式也不同.有的属于脆性破坏,应变突然增大到峰值,而延性破坏的试样在破坏前应变是逐渐累积到峰值的.为了使得不同形式的破坏具有统一的概念,也为了便于以后的动强度分析,特选择峰值累积应变作为破坏应变.

4 ϵ_{af} 的影响因素

图 3 为不同围压下几种试样破坏应变的比较.由图 3 可见,随着围压的增大, ϵ_{af} 在增大,但这种增大并无明显的规律可循.从图中还可以看出,当水

图 3 围压对 ϵ_{af} 的影响

Fig.3 Effect of confining pressure on ϵ_{af}

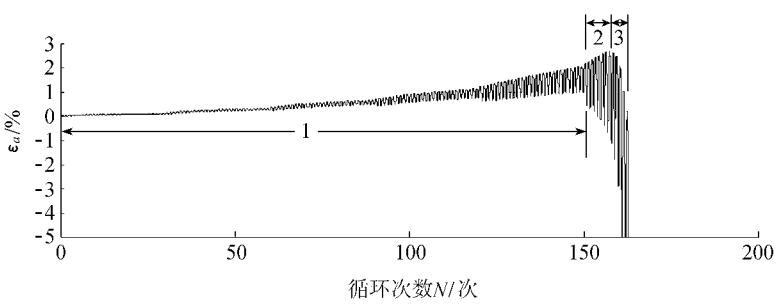
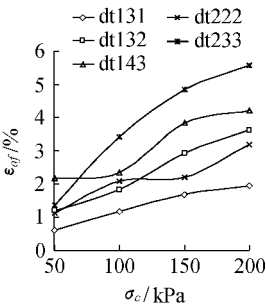


图 1 试样 dt 222 的循环应变曲线

Fig.1 Accumulation curve of cyclic strain for specimen dt 222

泥掺入量及围压相同时, ϵ_{af} 随着 EPS 颗粒体积分数的增大而增大. 图 4 为 EPS 颗粒体积分数 $V_e/V_s = 2$ 时水泥掺入量对 ϵ_{af} 的影响. 由图 4 可见, 在 2 种围压下, ϵ_{af} 随水泥掺入量的变化并非单调的. 当水泥掺入量较小时, LSES 中存在较多的孔洞和裂缝, 此时提高水泥掺入量的主要效果是包裹颗粒以增强颗粒间的胶结强度, 同时增加颗粒间接触点的数量, 以提高 LSES 的塑性. 而 Vucetic 等^[10]认为, 较高塑性的土如同一个相对柔性的弹簧系统, 能够在结构破坏前承受较大的应变, 所以水泥掺入量为 10% 时对应的 ϵ_{af} 要比水泥掺入量为 5% 时大. 但当水泥掺入量继续增大至一定值时, 颗粒间的接触点数目也发展到一定值而不继续增加, 此时再提高水泥掺入量仅是通过填充 LSES 内的孔隙而非增加土体骨架刚度来增强试样的刚度. 由于水泥胶结物 C-S-H 要比 EPS 颗粒和砂粒的强度大得多, 因此在 LSES 的内部逐渐形成了区域性的增强体, 其结果就是 LSES 内颗粒间的接触点数随着水泥掺入量的增加不增反减, 使得 LSES 的塑性降低, 破坏应变也随之下降.

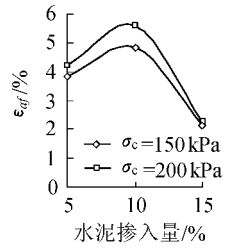


图 4 水泥掺量对 ϵ_{af} 的影响

Fig. 4 Effect of cement content on ϵ_{af}

5 结 论

- EPS 颗粒中的封闭气泡使得砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土(LSES)难以饱和, 因此孔压动强度标准不适用, 应采用应变标准.
- LSES 的强度可视为由 2 部分组成: 水泥水化产物包裹于砂粒和 EPS 颗粒表面以及填充孔隙所形成的胶结强度、砂粒间及砂粒与 EPS 颗粒间的摩擦强度. 在动荷载下, LSES 的应变累积过程有 3 个阶段: 初压阶段、强化阶段、破坏阶段.
- 根据动三轴试验结果, 认为破坏应变 ϵ_{af} 可取压应变达到最大值时的轴向应变, 水泥掺入量较高的试样由于脆性大, 在本文试验中难以达到破坏.
- 随着围压和 EPS 颗粒体积分数的增大, ϵ_{af} 增大, 而随着水泥掺入量的增大, 由于 LSES 塑性的变化, ϵ_{af} 经历了先增后减的过程.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王庶懋, 高玉峰, 朱伟, 等. 轻质土动力特性研究进展[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(增刊): 70-74.
- [3] SEED H B. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1979, 105(GT2): 201-255.
- [4] 赵成刚, 尤昌龙. 饱和砂土液化与稳态强度[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 90-96.
- [5] CASTRO G. Liquefaction and cyclic mobility of structured sand[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1975, 101(GT6): 551-569.
- [6] 廖红建, 吴建英, 黄飞强, 等. 用统一强度理论求解岩土材料的动力强度参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 1994-2000.
- [7] 骆亚生, 谢定义, 陈存礼. 黄土不同湿度状态下破坏强度的试验分析[J]. 西安理工大学学报, 2001, 17(4): 403-407.
- [8] 陈颖平, 黄博, 陈云敏. 循环荷载作用下结构性软黏土的变形和强度特性[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1665-1671.
- [9] 王庶懋, 高玉峰. 砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土(LSES)微观结构的 CT 研究[J]. 岩土力学, 2006(12): 2137-2142.
- [10] VUCETIC M, DOBRY R. Effect of soil plasticity on cyclic response[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1991, 117(1): 89-107.

Study on strength criteria and failure mechanism of lightweight sand-EPS beads soil (LSES) under dynamic loads

WANG Shu-mao¹, GAO Yu-feng¹, ZHANG Yi-chun²

- (1. Geotechnical Research Institute of Hohai University , Nanjing 210098 , China ;
2. Changzhou Guangjing Real Estate Development Co. , Ltd. , Changzhou 213001 , China)

Abstract :The Lightweight Sand-EPS beads Soil (LSES) is difficult to be saturated in both laboratory tests and field applications , therefore , only strain can be chosen as the failure criteria for its dynamic strength. Through an analysis of strength components and the result of dynamic triaxial tests of LSES , it is considered that the process of strain accumulation could be divided into three stages :the initial compression stage , the intensifying stage , and failure stage , and the maximum compression strain could be chosen as the failure strain ϵ_{af} . Moreover , the confining pressure , cement content , and EPS content are of great influences on ϵ_{af} , and ϵ_{af} increases with the confining pressure and EPS content. With the increase of cement content , ϵ_{af} experiences a process of increasing at first and then decreasing due to the variation of the plasticity of LSES.

Key words :lightweight sand-EPS beads soil (LSES) ; dynamic strength criterion ; failure mechanism ; failure strain

《中外科技与社会大事总览》简介

大型学术文献《中外科技与社会大事总览》新闻发布会于 2007 年 1 月在河海大学举行.江苏省有关厅局、出版、教育、图书馆、媒体及江苏省金陵科技著作出版基金委员会等各界有关领导、院士、学者、专家及河海大学林萍华书记、吴中如院士、朱跃龙副校长等出席,对《中外科技与社会大事总览》的学术价值及其出版的社会意义给予了很高的评价和充分的肯定.《中外科技与社会大事总览》主编、河海大学博士生导师丁长青教授对该书的基本思路、主要特点和体例设计作了说明.

该书共 313 万字,精装大 16 开,由凤凰出版传媒集团、江苏科学技术出版社、江苏省金陵科技著作出版基金委员会共同出版,由高等院校、科研单位、图书馆系统近 130 位专家学者历时 16 年合力著成,经 16 位专家分科审阅,最后经中国科学院审定.本书拥有 3 万余条索引,7 万余条事件,所使用的数千种中外资料,经省、市图书馆审定均为省级以上出版社出版的学术性、权威性文献,是高度严谨的科学史和社会史事典.

该书纵鉴古今、横贯中外,上起远古(300 万年前),下迄当今(2000 年)的中外科技史与社会史上的重大事件、人物、发现、发明、论著、学派、思潮,可谓罄书无余.为了体现清晰的历史线索,该书严格地按时序纵向编次,又按历史时段横向贯通.对发生时间确切的事件,直接精确到年、月、日,对延续较长的事件,示之以时限区间,对于特别重大的事件,有较详尽的介绍与说明.

该书的首要特色在于横向对比——中国与外国对比、科技与社会对比.在同一年段中,通过中国科技、外国科技、中国社会、外国社会四栏之间及学科之间的横向对比,使读者一眼可见中国与外国的异同,科技与社会的关系.不但呈现事实、提供知识,而且力图揭示科技与社会的相互影响、关联、作用机制和运动规律.

该书的另一特色是以时序为主线的纵向编年,严格按年代、按时间顺序纵贯古今,在此基础上又将科技与社会按照通行的学科分类标准和分类次序依数、理、化、天、地、生、农、医、工、文化、政法、经济、军事、其他等项分类编排,从而使历史事件在时间线索中仍能反映出系统归属,使偶发性的历史事件在逻辑格局、时间序列和类属网络中井然有序.

该书配有 150 余幅插图,备有先进而完善的关键词内容索引和外国人名、地名索引,从一个地名、人名、书名、物名或事名可检索到与之相关的所有页码,有的多达 110 处,几可用作专题研究.该书附有与其内容密切相关而又极为常用的中西纪年对照表和 1901 ~ 2005 诺贝尔奖获得者名录总表,使之既为一部简洁凝练而丰厚完备的科技史、社会史,又是一部包罗万象而脉络清晰的百科全书式的学术巨制.

该书作为一部编年体文献,本身只是史实、起点和手段,其最终目的是为长远的学术研究、理论归结及实践应用服务.在科学学、社会学、科学技术学、科学发展与社会发展的相关研究,中西科技的比较研究,中西社会的比较研究和当代中国的科技政策研究中,都将充分显示其巨大的理论意义和实践价值,并望在研究与应用实践和学界同仁的共同呵护中更加完善起来.

(《中外科技与社会大事总览》编委会,江苏科学技术出版社 供稿)