

动力荷载作用下河道淤泥气泡混合土的变形特性试验

刘增祥¹, 顾欢达¹, 陈冬青²

(1. 苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011; 2. 苏州市恒正工程质量检测有限公司, 江苏 苏州 215134)

摘要: 为了解河道淤泥气泡混合土(FMLSS)在动力荷载作用下的变形特性, 采用室内动三轴试验研究了围压、含水率、水泥掺入量和气泡含量对 FMLSS 动变形特性的影响。试验结果表明: FMLSS 的动应力应变关系曲线符合双曲线关系, 在一定的动应力作用下, 动应变随围压和水泥掺入量的增大而减小, 随含水率和气泡含量的增大而增大; 当动应变相同时, FMLSS 的动弹性模量随围压和水泥掺入量的增大而增大, 随含水率和气泡含量的增大而减小, 动弹性模量与动应变的关系曲线为平缓衰减型; 含水率和水泥掺入量是影响 FMLSS 变形特性的主要因素。

关键词: 河道淤泥气泡混合土; 动力荷载; 变形特性; 动应力应变关系; 动弹性模量

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2016)04-0047-06

Test on deformation characteristics of foamed mixture lightweight soil using river sludge under dynamic load//LIU Zengxiang¹, GU Huanda¹, CHEN Dongqing²(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 2. Suzhou Hengzheng Engineering Quality Test Co., Ltd., Suzhou 215134, China)

Abstract: In order to obtain the deformation characteristics a foamed mixture lightweight soil using river sludge (FMLSS) under a dynamic load, the effects of the confining pressure, water content, cement content, and air foam content on the dynamic deformation characteristics of the FMLSS were investigated using laboratory dynamic triaxial tests. Test results show that the fitting dynamic stress-strain curve of the FMLSS is of the hyperbolic type. The dynamic strain of the FMLSS decreases with the increase of confining pressure and cement content, and increases with the increase of water content and air foam content under a certain dynamic stress level. Under a constant dynamic strain, the dynamic elastic modulus of the FMLSS increases with the increase of confining pressure and cement content, and decreases with the increase of water content and air foam content. The relationship curve of the dynamic elastic modulus and dynamic strain shows a gradually decreasing trend. The water content and air foam content are the main factors influencing the dynamic deformation characteristics of a FMLSS.

Key words: foamed mixture lightweight soil using river sludge; dynamic load; deformation characteristics; dynamic stress-strain curve; dynamic elastic modulus

我国沿海地区及部分内陆城市广泛分布着高含水河道淤泥软黏土, 数量庞大, 处理成本高, 具有强度低、压缩性大、性质不稳定等特点, 通常处于流塑状态, 未经处理很难直接利用, 长期沉积对水质、环境、航运、蓄水、泄洪等都会造成不利影响, 因此如何应用经适当处理后的河道淤泥已成为目前工程界积极探索的课题。河道淤泥的传统处理方式是烧结和脱水, 但都有很大的局限性。吹填淤泥填海造陆技术、淤泥固化处理或轻量化处理技术是目前河道淤泥利用比较经济适用的技术。利用河道淤泥高含水、多孔隙、流动性、高强度、低密度、低渗透性等特征, 将河道淤泥作为原料土制成具有流动特征的气

泡混合土用于防渗工程、填土或填充工程, 不仅可以满足工程用土需求, 又能达到河道淤泥资源化利用的目的。

河道淤泥气泡混合土(foamed mixture lightweight soil using river sludge, FMLSS)由淤泥、水泥、气泡和水按照一定比例混合搅拌而成, 其材料组成和力学性质与其他类型的混合轻质土有所不同^[1-2], 常见混合轻质土多以黏性土或砂土为原料土, FMLSS 以河道淤泥作为原料土, 混入气泡使 FMLSS 的孔隙率明显增大, 自重减小, 而掺入水泥可以提高 FMLSS 的强度。根据需求不同, FMLSS 的密度可以在 0.5 ~ 1.5 g/cm³ 范围内调整, 抗压强度可以在 0.1 ~

基金项目: 国家自然科学基金(51378327)

作者简介: 刘增祥(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事软土地基处理技术研究。E-mail: zxl90@163.com

通信作者: 顾欢达(1958—), 男, 教授, 博士, 主要从事软土地基处理技术研究。E-mail: ghdgx@163.com

在实际工程中,FMLSS 作为构筑物填料会受到交通、地震、波浪等动力荷载的作用,探讨 FMLSS 在各种荷载与环境条件下的工程性质,对于掌握 FMLSS 在不同工程中的适用性是十分必要的。三嶋信雄等^[4-5] 日本学者研究了气泡混合土的基本工程性质;陈忠平等^[6] 在国内较早开始气泡混合土的研究,探讨了气泡混合土的物理和力学特性;张小平等^[7] 以砂、水泥、粉煤灰、松香胶发泡剂为原材料制作试样,对气泡混合土进行了配合比优化和三轴试验研究;顾欢达等^[8-9] 研究了气泡混合轻质土施工稳定性的影响因素,以及 FMLSS 性质的稳定性。目前对 FMLSS 的动力特性研究还很少,本文采用室内动三轴试验研究不同条件下 FMLSS 的动力变形特性,分析其内在的规律,为其工程应用提供理论依据。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验原料土取自苏州市某河道清淤的淤泥质土,根据 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》,测得河道淤泥的基本物理性能参数如下:天然密度 1.71 g/cm³,初始含水率 52.5%,孔隙比 1.36,相对密度 2.65,塑限 26.4%,液限 42.0%;液性指数 1.67,处于流塑状态。颗粒分布以粒径小于 0.075 mm 的细粒土为主,塑性指数 15.7,属于粉质黏土;不均匀系数 $C_u=5$,曲率系数 $C_c=1.31$,级配较好。淤泥土的颗粒级配曲线如图 1 所示。

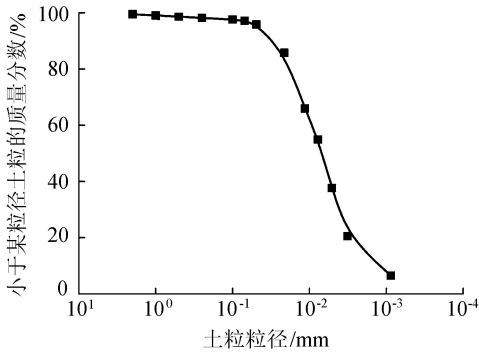


图1 淤泥土的颗粒级配曲线

由于气泡体积不便于准确测量,各组成材料的配比均以干土质量为基准。水泥掺入量为水泥质量与干土质量之比,气泡含量为气泡质量与干土质量之比;含水率指在原料土中加水之后总的含水量与干土质量之比。由于试验中考虑因素较多,动三轴试验耗时长,工作量大,因此对试验方案进行了优化,只对部分配比的试样考虑含水率与围压的影响,每个配比做 2 个平行试样试验。试样编号与配比如表 1 所示。

表 1 试样编号与配比

%

试样编号	水泥掺入量	气泡含量	含水率
D111	15	0	110
D121	15	1	110
D130	15	2	100
D131	15	2	110
D132	15	2	120
D141	15	3	110
D231	25	2	110
D331	35	2	110
D341	35	3	110

试验用水泥为普通硅酸盐水泥,发泡剂为动物蛋白类复配型发泡剂,水为蒸馏水。制备试样时,先将淤泥过 5 mm 筛,去除大颗粒杂质部分,然后按照表 1 所示的试样配比方案,在淤泥土中加水稀释后再加入水泥,用搅拌机搅拌均匀,最后加入已制备好的白色泡沫,再用搅拌机低速将气泡均匀地混入到淤泥土中,即制成 FMLSS。将搅拌均匀的混合土分层装入尺寸为 50 mm×100 mm 的模具中,放入标准养护箱内养护 24 h 后脱模,脱模后用保鲜膜将试样密封好放入养护箱内继续养护,经过标准养护 28 d 后进行动荷载试验。试验以密度作为控制试样质量的关键指标^[10]。

1.2 试验方法

采用意大利产 31-WF7015 型气动式动三轴试验仪进行动荷载试验。试验中主要考虑 FMLSS 作为填土材料以压力为主的受力情况,加载时采用的是加载—卸载—再加载—再卸载的循环加荷方式,卸载只是把加上的荷载卸掉,不施加反向拉力作用。因此,试验荷载设定波形为半正弦波的循环荷载,振动频率 1 Hz,在研究围压的影响时围压 σ_c 取 50 kPa、100 kPa 和 150 kPa,其他情况下 σ_c 均取 100 kPa;采用应力控制加荷方式,荷载分级施加,逐级增大至试样破坏,共 10 个加载阶段,每个加载阶段循环 20 次,相当于 7.5 级地震的等效谐波作用^[11],在不固结不排水条件下进行试验。

2 试验结果与分析

在动三轴试验中,由于应变的累积性和残余应变的出现,采用不同的变形确定的动弹性模量是不同的,在研究动力变形时应将波动变形、残余变形和综合变形这 3 种变形区分开。大量试验表明,采用不同的变形在定性上可得到相似规律的变化曲线,但是在量上有显著的不同,也有着不同的含义和用途^[12]。本文应变指按波动变形确定的动应变,动弹性模量也是按波动变形确定的。

2.1 动应力应变关系

图 2 为部分配比的 FMLSS 动应力应变拟合曲

线,可见动应力 σ_d 随着动应变 ε_d 的增大而增大,在开始阶段呈线性增大而后逐渐趋于稳定,拟合曲线均符合双曲线关系,即应力应变关系可表示为

$$\sigma_d = \frac{E_d}{a + b\varepsilon_d} \tag{1}$$

式中 a, b 为与围压及试样配比相关的拟合参数。

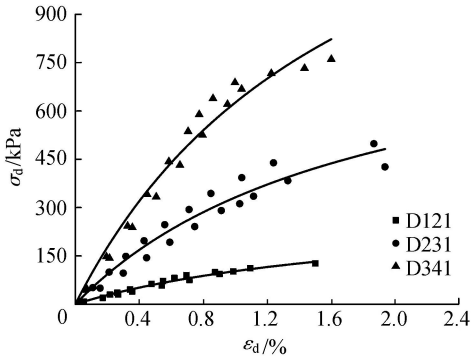


图2 不同配比 FMLSS 的 σ_d - ε_d 关系

2.2 动弹性模量

动弹性模量 E_d 是研究土体动力特性的重要参数,加载过程中每周应力循环得到一个滞回圈,每个滞回圈两顶点连线的斜率即为该周应力循环的 E_d 。试验中不考虑初始偏应力的影响,其典型滞回圈如图3所示。

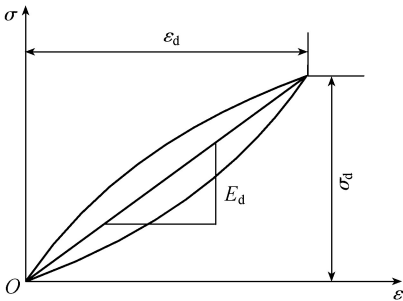


图3 典型滞回圈示意图

试验中发现,在循环荷载作用下,随着应变的逐渐增大,不可恢复的应变也会逐渐累积,软黏土的刚度都会出现非线性软化, E_d 因此不断衰减。图4为部分配比 FMLSS 的 E_d - ε_d 关系拟合曲线,可见不同配比 FMLSS 的 E_d 随着 ε_d 的增大缓慢减小,所有拟

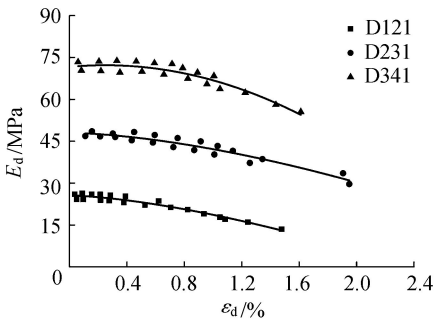


图4 不同配比 FMLSS 的 E_d - ε_d 关系

合曲线都符合双曲线关系,即满足公式:

$$E_d = \frac{1}{c + d\varepsilon_d} \tag{2}$$

式中 c, d 为与围压及试样配比相关的拟合参数。

3 动变形特性的影响因素

FMLSS 是一种混合土,其中含有水、淤泥、水泥、气泡4种主要成分,在分析其 σ_d - ε_d 关系和 E_d 的衰减规律时,必然要结合这些因素的影响进行分析。此外,还要考虑围压的影响。

3.1 围压的影响

从图5和图6可以看出,围压 σ_c 对 FMLSS 的 σ_d - ε_d 关系和 E_d - ε_d 关系有一定影响,作用效果与其他类型的泡沫混合土的性质相似^[13-14]。在相同 σ_d 作用下, ε_d 随着围压的增大而减小。因为在围压作用下, FMLSS 的变形受到约束,提高了土体抵抗变形的能力,围压越大约束作用越强。当 ε_d 相同时, E_d 随着围压的增大而增大,围压越大 E_d - ε_d 曲线斜率越大。这是因为当围压增大时, FMLSS 土颗粒之间接触更加紧密,应力波的传播路径增多,从而减小了应力波在传播过程中的能量损耗,试样土体变硬, E_d 增大。围压增大既增强了对试样的约束,又使胶结结构破坏变大,使高围压条件下比低围压条件下 E_d 的减小速度更快,曲线斜率更大。

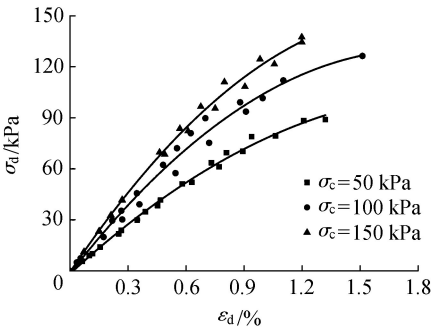


图5 不同围压下 FMLSS 的 σ_d - ε_d 关系(D121 试样)

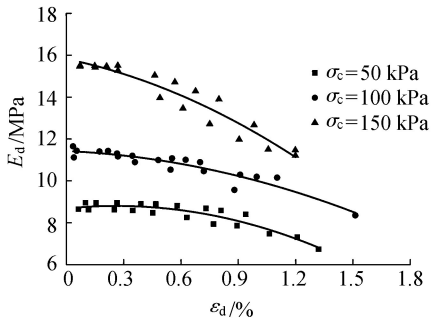


图6 不同围压下 FMLSS 的 E_d - ε_d 关系(D121 试样)

3.2 含水率的影响

从图7和图8可以看出,含水率对 FMLSS 的 σ_d - ε_d 关系和 E_d - ε_d 关系有很大影响。在相同 σ_d 作

用下, ε_d 随着含水率的增大而增大。当 ε_d 相同时, E_d 随着含水率的增大而减小。当含水率 $\omega \leq 110\%$ 时, ε_d 和 E_d 变化幅度较大; 当 $\omega > 110\%$ 时, 变化幅度比较小。这可能是因为孔隙水有助于土颗粒之间的滑动, 含水率越高作用越明显; 但含水率过高后, 孔隙水压力增大, 制约 ε_d 和 E_d 的变化。天然淤泥含水率很高, 实际工程中在满足流动性等性质指标要求的情况下, 应尽可能降低 FMLSS 的含水率, 从而减小 ε_d 和增大 E_d 。

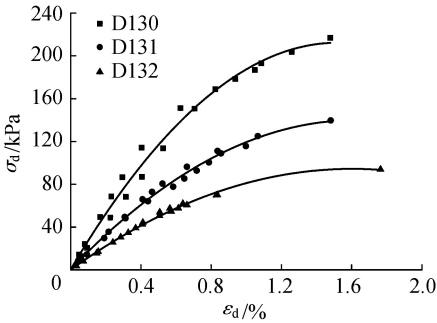


图7 不同含水率 FMLSS 的 σ_d - ε_d 关系

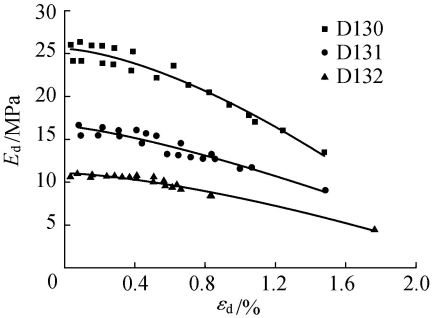


图8 不同含水率 FMLSS 的 E_d - ε_d 关系

3.3 水泥掺入量的影响

图9和图10反映出, 相比围压、含水率和气泡含量的影响, 水泥掺入量是影响 FMLSS 的 σ_d - ε_d 关系和 E_d - ε_d 关系的关键因素。在相同 σ_d 作用下, ε_d 随着水泥掺入量的增大而减小; 不同水泥掺入量的 FMLSS, 其最大 σ_d 差距较大。当 ε_d 相同时, E_d 随着水泥掺入量的增大而大幅增大, 这主要是因为河道淤泥本身强度很低, 几乎没有抵抗变形的能力, 加入

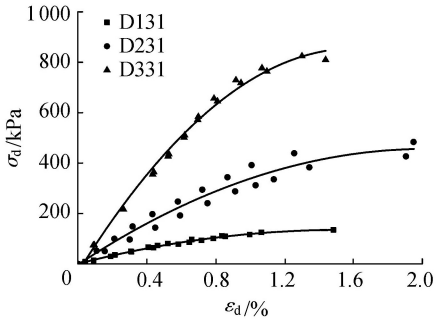


图9 不同水泥掺入量 FMLSS 的 σ_d - ε_d 关系

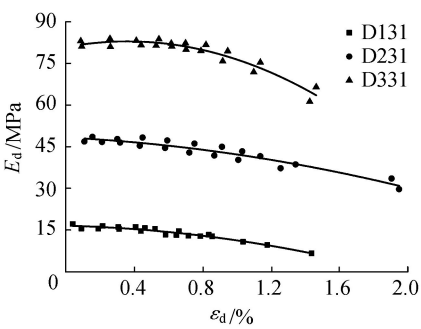


图10 不同水泥掺入量 FMLSS 的 E_d - ε_d 关系

的水泥具有固化特性, 水泥遇水产生的水化物可以包裹粒径很小的淤泥土颗粒, 增强土颗粒间的黏结力。王庶懋等^[15]从细观角度的研究也证实了这一点; 辛凌等^[16]研究指出, 土体的宏观现象是其细观结构变化的体现, 水泥掺入量影响的本质是水泥的水化作用产生的胶结物质的影响。此外, 分析图10中各曲线的变化趋势, 可以发现水泥掺入量大的曲线斜率较大, 水泥掺入量小的比较平缓, 这可能是因为水泥掺入量的提高增大了 FMLSS 的脆性。

3.4 气泡含量的影响

图11和图12反映出, 在相同 σ_d 作用下, ε_d 随着气泡含量的增大而增大; 当 ε_d 相同时, E_d 随着气泡含量的增大而减小 (图11和图12中, D121和D131试验结果不符合规律, 结合其他配比试样的试验结果, 可能是试验误差造成的)。相比水泥掺入量的影响, 气泡含量的变化对最大 σ_d 和 E_d 的影响较小, 曲线相对比较密集和平缓。气泡的加入主要是增加 FMLSS 的孔隙率, 从而降低其密度。本试验

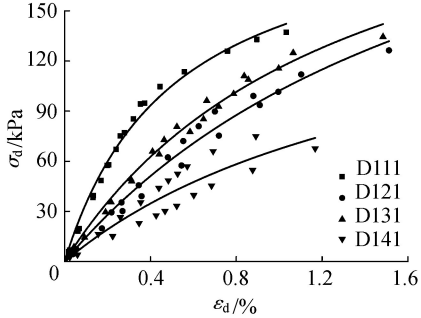


图11 不同气泡含量 FMLSS 的 σ_d - ε_d 关系

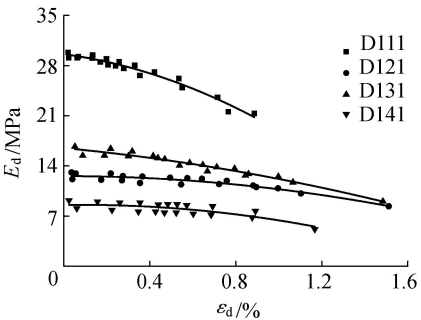


图12 不同气泡含量 FMLSS 的 E_d - ε_d 关系

中,气泡含量是决定 FMLSS 密度的关键因素,对试样尺寸和质量统计后发现各配比试样的密度变化很大,密度变化范围为 $1.23 \sim 1.55 \text{ g/cm}^3$ 。在工程实际应用中可通过调节水泥掺入量和气泡含量,得到满足不同工程要求的 FMLSS 材料。

综上分析可知,各种影响因素作用下 FMLSS 的 E_d - ε_d 关系曲线均为上凸的衰减型,且相对比较平缓,随着 ε_d 的增大, E_d 的衰减很小。试验中每个配比的试样施加最大荷载后都会发生明显破坏变形,从 E_d - ε_d 关系曲线可以看出,各配比的 FMLSS 在动荷载作用下发生大应变破坏时,其 E_d 仍能保持在初始 E_d 的 60% 以上,而一般土体在发生破坏时 E_d 会迅速降低,表明 FMLSS 是具有良好的弹性的材料,适用于对变形有较高要求的路堤路基等工程。相比于围压和气泡含量对 FMLSS 的 σ_d - ε_d 关系与 E_d - ε_d 关系的影响,含水率和水泥掺入量的影响较大,是影响其动力特性的关键因素。

4 结 论

a. FMLSS 的 σ_d - ε_d 关系与 E_d - ε_d 关系曲线都符合双曲线关系,随着 ε_d 的增大, σ_d 先增大后趋于稳定,而 E_d 先比较稳定后逐渐衰减。

b. 在相同 σ_d 作用下,FMLSS 的 ε_d 随着围压和水泥掺入量的增大而减小,随着含水率和气泡含量的增大而增大;当 ε_d 相同时,FMLSS 的 E_d 随着围压和水泥掺入量的增大而增大,随着含水率和气泡含量的增大而减小。

c. 围压和气泡含量对 FMLSS 的 σ_d - ε_d 关系与 E_d - ε_d 关系的影响较小,含水率和水泥掺入量的影响较大,是影响其动力特性的关键因素。

d. 各影响因素作用下 FMLSS 的 E_d - ε_d 关系曲线都为上凸的衰减型,且相对比较平缓,随着 ε_d 的增大, E_d 衰减很小,各配比的 FMLSS 在动荷载作用下发生大应变破坏时,其 E_d 仍能保持在初始 E_d 的 60% 以上,表明 FMLSS 是具有良好的弹性的材料。

参考文献:

[1] 李明东,朱伟,马殿光,等. EPS 颗粒混合轻质土的施工技术及其应用实例[J]. 岩土工程学报,2006,28(4): 533-536. (LI Mingdong,ZHU Wei,MA Dianguang,et al. Construction technology and application in-situ of expanded polystyrene treated lightweight soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(4): 533-536. (in Chinese))

[2] 李明东,朱伟,张春雷,等. 击实参数对砂土 EPS 颗粒混合轻质土的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2008,36(6):814-817. (LI Mingdong,ZHU Wei,ZHANG

Chunglei, et al. Effect of compaction parameters on lightweight sand-EPS beads soil [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2008,36(6):814-817. (in Chinese))

[3] 顾欢达,顾熙. 影响气泡轻质土材料施工稳定性的因素及其试验研究[J]. 岩土工程技术,2003(1):24-27. (GU Huanda,GU Xi. The major factors on construction stability of foamed light soil materials and laboratory tests [J]. Geotechnical Engineering Technique,2003(1):24-27. (in Chinese))

[4] 三嶋信雄,长尾和之. 气泡セメント盛土工法(FCB 工法)の研究[J]. 土木学会誌,1994,79(1):18-21. (MISIMA N,NAGAO K. Study of an air bubble cement fill method of construction (FCB method of construction) [J]. JSCE Magazine,1994,79(1):18-21. (in Japanese))

[5] 豊福俊泰,三嶋信雄,田中久士. 气泡混合軽量土の品質管理法に関する研究[J]. 土木学会論文集,2000,658:141-152. (TOYOFUKU T,MISIMA N,TANAKA H. Studies on quality control of foamed mixture lightweight soil [J]. Journal of JSCE,2000,658:141-152. (in Japanese))

[6] 陈忠平,王树林. 气泡混合轻质土及其应用综述[J]. 中外公路,2003,23(5):117-120. (CHEN Zhongping,WANG Shulin. Survey on bubble mixed lightweight soil and application[J]. Journal of China & Foreign Highway,2003,23(5):117-120. (in Chinese))

[7] 张小平,包承纲. 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 Xiaoping,BAO Chenggang. Application of foam light-material to geotechnical engineering [J]. Geotechnical Engineering Technology,2000(1):58-62. (in Chinese))

[8] 顾欢达,顾熙,申燕,等. 发泡颗粒轻质土材料的基本性质[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版),2003,16(4):44-48. (GU Huanda,GU Xi,SHEN Yan,et al. The fundamental properties of light soil mixed with foamed beads[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology),2003,16(4):44-48. (in Chinese))

[9] 顾欢达,顾熙. 河道淤泥气泡混合轻质土的性质稳定性试验[J]. 北京工业大学学报,2010,36(4):469-474. (GU Huanda,GU Xi. Stability of air foamed lightweight soil using river sludge [J]. Journal of Beijing University of Technology,2010,36(4):469-474. (in Chinese))

[10] 輪湖建雄,土田孝,松永康男,等. 軽量混合処理土工法の港湾施設への適用[J]. 土木学会論文集,1998,602:35-52. (WAKO T,TSUCHIDA T,MATSUNAGA Y,et al. Use of artificial light weight materials (treated soil with air form) for port facilities [J]. Journal of JSCE,1998,602:35-52. (in Japanese))

[11] 吴世明. 土动力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.

[12] 谢定义. 土动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2011.

- [13] 高玉峰,王庶懋,王伟. 动荷载下砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土变形特性的试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(9):1773-1778. (GAO Yufeng, WANG Shumao, WANG Wei. Test study on deformation characteristics of lightweight sand-EPS beads soil under dynamic load[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(9):1773-1778. (in Chinese))
- [14] 黎冰,高玉峰. 黏土与 EPS 颗粒混合轻质土的动力变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(7):1042-1047. (LI Bing, GAO Yufeng. 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))
- [15] 王庶懋,高玉峰. 砂土与 EPS 颗粒混合的轻质土 (LSES) 细观结构的 CT 研究[J]. 岩土力学,2006,27(12):2137-2142. (WANG Shumao, GAO Yufeng. Research on meso-structure of lightweight sand-EPS bead soil (LSES) using CT [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(12):2137-2142. (in Chinese))
- [16] 辛凌,沈扬,刘汉龙,等. 单轴压力下 RST 轻质土变形特性及其细观机理分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(2):160-164. (XIN Ling, SHEN Yang, LIU Hanlong, et al. Deformation behavior and its meso-mechanism analysis of lightweight soil mixed with rubber chips of scrap tires based on unconfined compressive test [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010,38(2):160-164. (in Chinese))

(收稿日期:2015-07-14 编辑:熊水斌)

(上接第 5 页)

- [23] 李小凯,石海峰. 地下水超采的经济损失计算方法及其在典型地区的应用[J]. 水利水电科技进展,2003,23(6):13-16. (LI Xiaokai, SHI Haifeng. Calculation method for economic loss caused by over mining of groundwater and its application to typical regions [J]. Advances In Science and Technology of Water Resources, 2003, 23(6):13-16. (in Chinese))
- [24] 郑州大学. 郑州市水文水资源调查评价报告[R]. 郑州:郑州大学,2006.
- [25] 洪宝鑫,瞿益民. 旱作物利用雨水量的试验分析[J]. 节水灌溉,2001,22(1):22-24. (HONG Baoxin, QU Yimin. Drought plants use experimental analysis of rain water [J]. Water Saving Irrigation, 2001, 22(1):22-24. (in Chinese))
- [26] 尚清芳. 干旱区绿洲农业生态经济系统能值分析[D]. 兰州:兰州大学,2006.
- [27] 张鑫. “四位一体”农业生态系统能流与能值分析[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2007.
- [28] 雷宏军,刘鑫,徐建新. 郑州市水资源可持续利用的模糊综合评价[J]. 灌溉排水学报,2008,27(2):77-81. (LEI Hongjun, LIU Xin, XU Jianxin. Integrated assessment of the sustainable utilization of water resources in Zhengzhou City based on a modified fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2008,27(2):77-81. (in Chinese))
- [29] 樊津江,何颖,杨蕾. 郑州市水土流失原因及防治措施[J]. 河南科学,2002,20(3):328-330. (FAN Jinjiang, HE Ying, YANG Lei, et al. Cause and prevention measure of soil and water loss on Zhengzhou City [J]. Henan Science,2002,20(3):328-330. (in Chinese))
- [30] 童绍玉. 浅析现代农业对生态环境的影响[J]. 楚雄师范学院学报,2003,18(3):75-83. (TONG Shaoyu. A brief analysis of the influences of modern agriculture on ecotope [J]. Journal of Chuxiong Normal University,2003,18(3):75-83. (in Chinese))
- [31] 赵永国. 关中平原水资源开发利用的环境负效及其对策[J]. 干旱区资源与环境,1989,8(5):59-66. (ZHAO Yongguo. Negative environmental effects and their counter measures of water resources exploitation and utilization in Guangzhou Plain [J]. Journal of Arid Land Resources & Environment,1989,8(5):59-66. (in Chinese))

(收稿日期:2015-07-30 编辑:郑孝宇)

(上接第 46 页)

- [14] 李阳袁,朱盛胜. 疏浚泥固化工程预制品的研制与示范应用[J]. 混凝土与水泥制品,2014(5):38-41. (LI Yangyuan, ZHU Shengsheng. Study and application of hardening engineering of dredged mud [J]. China Concrete and Cement Products,2014(5):38-41. (in Chinese))
- [15] 赵含梅,赵仲辉,胡孝彭,等. 固化淤泥持水特性试验[J]. 水利水电科技进展,2014,34(1):57-61. (ZHAO Hanmei, ZHAO Zhonghui, HU Xiaopeng, et al. Experimental study on water retention characteristics of solidified dredged materials [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(1):57-61. (in Chinese))
- [16] 吴红,廖德华,孔德顺,等. 不同激发剂对煤矸石基免烧砖性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2012,31(1):221-225. (WU Hong, LIAO Dehua, KONG Deshun, et al. Effect of different activators on properties of gangue based unfired brick [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2012,31:221-225. (in Chinese))
- [17] 赵永巧. 浅谈土壤固化剂的发展与固化机理研究[J]. 水利科技与经济,2005,11(10):620-624. (ZHAO Yongqiao. Introduction to the development of solidifier and the investigation of solidification mechanism [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy,2012,31:221-225. (In Chinese))

(收稿日期:2015-07-07 编辑:郑孝宇)