

DOI: 10.11779/CJGE201510016

木质素改良粉土热学与力学特性相关性试验研究

张涛^{1,2}, 刘松玉^{1,2}, 蔡国军^{*1,2}, 李军海³, 接道波³

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096;

3. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 为揭示木质素改良粉土热学与力学特性随养护龄期的演化规律, 通过击实试验、热阻系数测试、无侧限抗压强度试验、回弹模量试验、压汞试验和扫描电镜分析试验, 探讨改良土热阻系数、强度和刚度与木质素掺量、含水率和养护龄期的变化规律, 同时定性/定量评价改良土微观结构变化, 分析改良土热学特性与力学特性间的相互关系。结果表明: 改良土最大干密度较素土增加, 最优含水率减小, 干密度对含水率变化的敏感性增加; 热阻系数随掺量和养护龄期增加而增加, 60 d 养护龄期后热阻系数趋于相同, 热阻系数与土体密实度和组成成分的热传导特性密切相关; 改良土强度随掺量和龄期增长而增加, 28 d 龄期 12%掺量改良土强度约为素土强度 6 倍; 回弹模量的变化特征与无侧限抗压强度类似, 对于改良粉土, 木质素最优掺量约为 12%; 改良土孔隙总体积和平均孔径显著减小, 木质素包裹、连结土颗粒并填充孔隙, 形成更致密土体结构。

关键词: 木质素; 粉土; 热阻系数; 无侧限抗压强度; 压汞法

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)10-1876-10

作者简介: 张涛(1986-), 男, 安徽合肥人, 博士研究生, 主要从事特殊地基处理和土体基本性质等方面的研究工作。E-mail: zhangtao_seu@163.com。

Experimental study on relationship between thermal and mechanical properties of treated silt by lignin

ZHANG Tao^{1,2}, LIU Song-yu^{1,2}, CAI Guo-jun^{1,2}, LI Jun-hai³, JIE Dao-bo³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground

Engineering and Environmental Safety (Southeast University), Nanjing 210096, China; 3. Jiangsu Province Communications Planning and

Design Institute Limited Company, Nanjing 210014, China)

Abstract: To illustrate the evaluation laws of thermal and mechanical properties of lignin-treated silt during curing period, a series of laboratory tests including standard proctor compaction test, thermal resistivity test, unconfined compressive strength test, modulus of resilience test, mercury intrusion porosimetry and scanning electron microscopy analysis are conducted to study the relationship among thermal resistivity, strength and stiffness and lignin content, moisture content and curing time of treated silt. Moreover, the changes of microstructure of lignin-treated silt are qualitatively or quantitatively evaluated to state the relationship between thermal and mechanical properties of treated silt. The test results show that the maximum dry density of treated silt is higher than that of natural silt, but the optimum moisture content is lower than that of natural silt. The sensitivity of the dry density to changes of moisture content increases. The thermal resistivity of treated silt increases nearly with the increase of lignin content and curing time, and after 60 days of curing all the treated soils, the thermal resistivity tends to be the same. It is closely related to the density of soils and the thermal properties of soil compositions. The strength of treated silt increases with the increase of lignin content and curing time and are 6.0 times higher than natural silt for 12% lignin treated after 28 days of curing. The variation of modulus of resilience for treated silt is similar to that of the unconfined compressive strength. The optimum content of lignin for treating silt is approximately 12%. The total pore volume and average pore diameter of silt are significantly reduced, and a more stable soil structure is formed by coating, connecting particles and filling pores after treatment of lignin.

Key words: lignin; silt; thermal resistivity; unconfined compressive strength; mercury intrusion porosimetry

基金项目: 国家自然科学基金项目(41330641, 41202203); 全国优秀博士学位论文作者专项资金项目(201353); 江苏省杰出青年基金项目(BK20140027); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0118); 中央高校基本科研业务费资助项目(2242013R30014); 江苏省交通科学研究计划项目(2013Y04)

收稿日期: 2014-09-12

*通讯作者

0 引 言

天然沉积土通常难以具备直接用于工程建设的条件。中国东南沿海地区广泛沉积有大量的粉土, 该类土干燥易扬尘, 遇水浸润后易成流动状, 作为路基填料极难以压实, 且在行车荷载作用下易使路面产生开裂和沉降等破坏^[1-2]。采用化学添加剂的方法改善土体工程性质已有几十年的历史, 其中以水泥、石灰和粉煤灰等钙基添加剂的应用最为广泛^[3-5]。虽然传统无机添加剂在改善土体工程性质方面具有显著优势, 但其也存在一定的局限性。水泥土和石灰土等形成的强碱环境不仅改变周围土体和地下水的 pH 值, 而且对地下混凝土和钢结构等构筑物的寿命产生严重威胁^[6]。Chen 等^[7]和 Rolling 等^[8]研究认为, 随着添加剂掺量和养护龄期的增加, 改良土的离子交换能力和持水能力降低, 土体中所含营养成分降低, 对周围动植物生长有着重要影响。水泥土等表现出的脆性特征, 使得土体结构稳定性在行车荷载或跑道冲击荷载作用下受到较大影响。

为了解决上述传统添加剂改良土产生的一系列问题, 人们积极探索新型、高效和环境友好的土体改良剂, 工业副产品木质素就是其中典型的一种^[9]。木质素 (lignin) 是一种高分子聚合物, 含有多种活性基团, 如磺酸基、酚羟基和醇羟基等, 利用副产品木质素改良黏性土和无黏性土已经有数十年的历史^[10-11]。Tingle 等^[12]和 Santoni 等^[13]研究了木质素加固黏土和粉砂的强度特性和水稳性, 试验结果表明, 木质素改良土的强度和水稳性有显著改善, 且效果优于其他 6 种新型改良剂; Ceylan 等^[14]采用两种不同类型的工业副产品木质素加固爱荷华低塑性黏土, 改良土强度较素土有大幅提高且满足路基工程建设要求; Puppala 等^[15]采用木质素混合硫酸改良黏性土, 改良土的强度、弹性模量和膨胀性等基本工程性质有显著提高; Indraratna 等^[16]利用木质素改良澳大利亚崩解土, 通过室内模型试验对比研究了改良土的抗侵蚀性能, 得到相同临界剪应力条件下木质素改良土的掺量较水泥更少, 同时改良土的脆性特征得到有效改善。热学与力学特性是表征改良土工程性质的重要指标之一。Hotz 等^[17]和 Ekwue 等^[18]分别研究了弹性模量和体密度对土体热传导特性的影响, 均认为土体热导率与力学特性间存在一定的相关关系。然而现有关于木质素改良土的研究多集中于其力学特性, 未有对其热学特性以及养护过程中热学与力学特性的变化规律及其两者之间的相关性进行研究。

本文采用工业副产品木质素改良路基粉土, 对不

同掺量和养护龄期的改良土进行了热阻系数测试、击实试验、无侧限抗压强度试验、回弹模量试验、压汞试验 (MIP) 和扫描电镜 (SEM) 分析, 研究改良土热学与力学特性的变化规律, 分析孔隙分布与微观结构的内在联系, 定性/定量评价热阻系数与重度、无侧限抗压强度和回弹模量的关系, 进而明确木质素改良粉土热学与力学特性间的相关关系。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验用土取自江苏省盐城市某高速公路工程现场, 其中黏粒 ($d < 5 \mu\text{m}$)、粉粒 ($5 < d < 75 \mu\text{m}$) 和砂粒 ($75 < d < 200 \mu\text{m}$) 含量分别为 10.8%, 80.1% 和 9.1%。土体基本物理性质指标如表 1 所示。液、塑限 (w_L , w_p) 和塑性指数 (I_p) 分别为 32.4%, 23.6% 和 8.8。按照《土的工程分类标准》(GB/T50145—2007) 的规定, 试验用土 $I_p < 0.73 (w_L - 20) = 9.1$ 且液限 $< 50\%$, 为低液限粉土 (ML)。通过 X 射线荧光光谱分析得到土样的化学成分见表 2。土样的主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO , 同时还含有微量的 P_2O_5 和 SO_3 等。

表 1 试验土样的基本物理指标

指标	数值
天然含水率/%	26.4
液限/%	32.4
塑限/%	23.6
塑性指数	8.8
最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.72
最优含水率/%	16.12
pH	8.74

表 2 土样化学成分

成分	含量/%
SiO_2	63.20
Al_2O_3	12.53
CaO	6.41
Fe_2O_3	3.12
K_2O	2.46
MgO	2.39
Na_2O	2.30
SO_3	0.18
P_2O_5	0.16
其他	4.25

木质素来自河南某造纸厂副产品, 呈粉末状固体, 具有一定芳香气味, 其主要成分为木质素及其衍生物和少量水分, 无毒性。图 1, 2 为木质素的微观结构和官能团分析结果。通过能谱分析 (EDS) 和傅里叶红外光谱分析 (FTIR) 得到, 木质素中主要化学元素为

C、O、Na、Si 和 S, Si 元素的存在可能是由木质素中的杂质引起。木质素主要含有醇羟基 (-OH, 3355cm⁻¹)、C-C 键 (1595、774、650 cm⁻¹)、甲氧基 (-OCH₃, 1269 cm⁻¹)、磺酸基 (S=O, 1119 cm⁻¹) 和羰基 (-CO, 1045 cm⁻¹) 等活性官能基团。

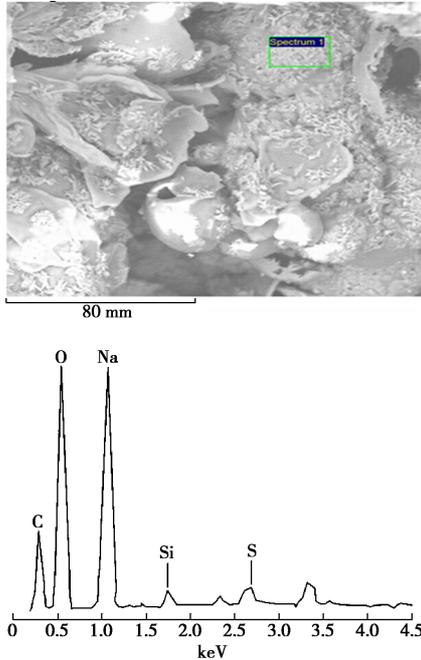


图 1 木质素微观结构及能谱分析结果

Fig. 1 Microstructure and EDS analysis of lignin

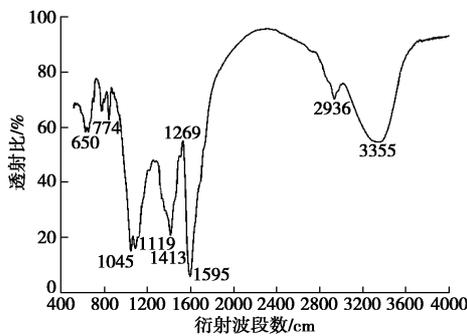


图 2 木质素官能团分析结果

Fig. 2 Results of functional group analysis of lignin

1.2 试验方法

取素土风干后过筛(2 mm 筛),木质素掺量为 2%, 5%, 8%, 12%和 15%, 添加剂掺量定义为风干木质素质量与干土质量之比。根据击实试验结果, 获得改良土体最大干密度 (ρ_{dmax}) 和最优含水率 (OMC), 无侧限抗压强度试验和回弹模量试验压实度选择 96%。将配制好的土、水和木质素混合物倒入钢模内, 采用千斤顶静压法一次静压成型, 削平试样两端并脱模, 试样直径为 5 cm, 高为 10 cm。将成型试样密封, 放入标准养护室内(养护条件为温度 20℃±3℃, 相对湿度≥95%) 养护至相应龄期。

击实试验、无侧限抗压强度和回弹模量试验均参照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007) 进行, 击实方法为重型击实, 采用南京土壤仪器厂的 SLJ-1 型标准手提击实仪进行。无侧限抗压强度采用 YSH-2 型应变控制式无侧限抗压强度仪, 轴向应变速率≤1%/min。一定养护龄期下, 测试不同掺量改良土的 3 个平行样并取其平均值。回弹模量试验按照规程中 T1036—1993 强度仪法进行, 最大压力为 200 kPa, 分五级加载, 每级荷载加、卸载时间均为 1 min。

土体热阻系数测试采用荷兰代尔夫特生产的 MTN01 型热阻/导系数测试设备, 热探针规格为: 直径 3.5 mm, 长度 120 mm。数据采集与处理软件为 CRU01。试样尺寸为 $\phi 5$ cm×10 cm 的圆柱样, 试样直径大于 10 倍的探针直径, 可忽略探针尺寸效应的影响。通过贯入装置将热探针由试样中心垂直贯入, 每个试样热阻系数的整个测试过程持续约 5 min。测试结果要求标准偏差小于 0.1, 若偏差大于此要求则需检查仪器设备重新测量。养护龄期下, 不同掺量改良土测试 3 个平行样并取其平均值。

MIP 和 SEM 试验取 28 d 养护龄期改良土 1 个平行样, 取约 1 cm³ 具有新鲜断面的典型试块各一个, 首先用液氮 (-190℃) 急速冷冻, 使得土体中孔隙水完全固态, 再用 XIANOU-18N 冷冻干燥仪抽真空 24 h, 确保试样中孔隙水完全升华, 样品达到干燥状态。MIP 和 SEM 试验分别采用美国麦克仪器公司的 AUTOPORE 9500 压汞仪和日本日立公司的 S-3400N II 型扫描电子显微镜进行。

本文试验的掺量、含水率和养护龄期等设计参数如表 3 所示。

表 3 试验设计参数

Table 3 Test design parameters

试验类型	掺量/%	含水率/%	龄期/d
击实试验	2, 5, 8, 12, 15	OMC	1
热阻系数	2, 5, 8, 12, 15	OMC,WMC,DMC	1~60
无侧限抗压强度	2, 5, 8, 12, 15	OMC,WMC,DMC	1, 7, 28, 60
回弹模量	2, 5, 8, 12, 15	OMC,WMC,DMC	1, 7, 28, 60
压汞试验	2, 8, 12,	OMC,WMC,DMC	28
扫描电镜	12	OMC	28

注: WMC=OMC+4%, DMC=OMC-4%。

2 试验结果与分析

2.1 热阻系数

热阻系数是表征土体热传导特性的重要参数之一, 与热导率互为倒数^[19]。图 3 为掺量和养护龄期对

改良土热阻系数的影响。图中改良土热阻系数随养护龄期增加而增加，60 d 龄期时，不同掺量改良土热阻系数基本相同。不同掺量下，土体热阻系数不同，一定养护龄期下，土体热阻系数随木质素掺量增加而增加。土体热阻系数受众多因素影响，如矿物成分、含水率和干密度等。养护初期，不同掺量改良土热阻系数主要受土体各组成成分性质的影响，木质素掺量增加，土体热阻系数增大，由此推断木质素的热传导性能低于土颗粒；随着养护龄期的增长，木质素与土体矿物间产生一系列的相互作用，当养护龄期达到 60 d 的时候，改良土的热阻系数主要由新的土体结构所控制。

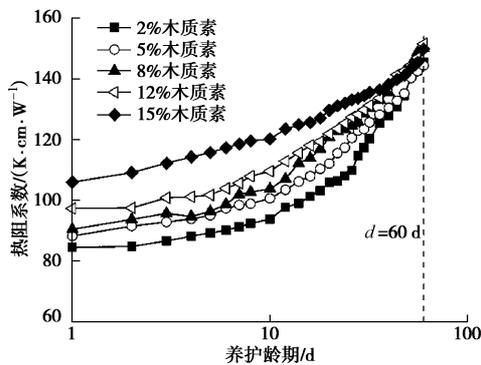


图 3 掺量和养护龄期对木质素改良土热阻系数的影响
Fig. 3 Effect of lignin content and curing time on thermal resistivity of treated silt

图 4 为不同初始含水率对改良土热阻系数的影响。由图 4 知，初始含水率的不同会引起养护初期 (<7 d) 改良土的热阻系数不同，28 d 龄期后，热阻系数基本趋于相同。养护初期，含水率为 OMC 条件下土体的热阻系数最小，DMC 热阻系数最大，WMC 热阻系数介于两者之间。Gangadhara 等^[20]研究了黑棉土、粉土和细砂等 5 种材料的热阻系数随含水率的变化规律，认为土体热阻系数随含水率增加而减小，当含水率增加至 OMC 左右时土体热阻系数达到最小。土体含水率为 OMC 时，处于相对最密实状态，颗粒间的接触最为紧密，也最有利于热能的传输。

土体中三相介质的热阻系数各不相同，空气的热阻系数约为 4000 k·cm/W，水的热阻系数约为 165 k·cm/W，土颗粒的热阻系数最低。土体 WMC 状态下较 DMC 状态下孔隙中含有更多的水分，水的热阻系数远小于空气的热阻系数，因此，相同掺量，一定龄期下，改良土 WMC 下的热阻系数小于 DMC 状态下的热阻系数。不同初始含水率、相同掺量下的改良土，经过一定的龄期 (28 d) 养护后，其固化过程基本相同，相应的热阻系数变化也基本相同。

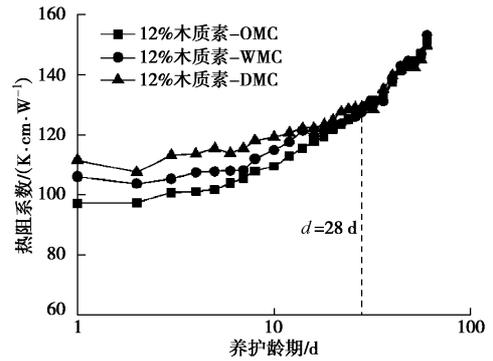


图 4 含水率对木质素改良土热阻系数的影响
Fig. 4 Effect of moisture content on thermal resistivity of lignin treated silt

2.2 击实试验

图 5 为不同木质素掺量下改良土的击实试验结果。图 5 中改良土的最大干密度 ρ_{dmax} 较素土有明显增大，木质素掺量 2%~8% 范围内，改良土 ρ_{dmax} 随掺量增加而增加；掺量大于 12% 后，土体 ρ_{dmax} 基本保持不变。对于江苏粉土而言，木质素掺量 8%~12% 条件下可获得较高干密度。改良土最优含水率 OMC 均低于素土最优含水率，2%~8% 掺量下，土体 OMC 基本相同，当掺量达到 12% 时，OMC 随掺量增加略有增大。Indraratna 等^[21]采用木质素提高粉砂的抗侵蚀性，认为木质素添加至土体中，不仅胶结土颗粒，同时填充孔隙，使土体形成致密稳定结构。改良土 ρ_{dmax} 的增大主要是由于木质素的填充和胶结作用，而当掺量较大时，土体 ρ_{dmax} 基本不变主要是由于木质素自身引起的 (木质素的重度小于土的重度)。木质素的重度小于土的重度，当木质素掺量较大时，土颗粒表面和孔隙间存在较多的木质素，此时掺量增加对土体重度影响不大。

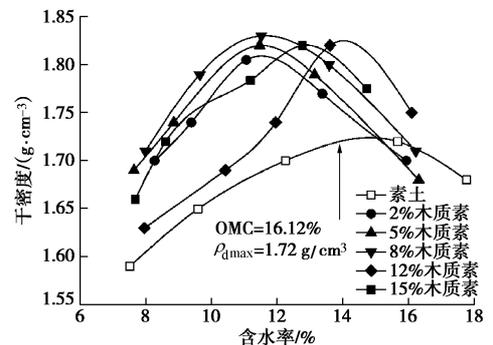


图 5 掺量对木质素改良土压实特性影响
Fig. 5 Effect of lignin content on compaction characteristics of treated silt

图 5 中还可以看出：改良土击实曲线较素土更为陡峭，15% 木质素改良土的击实曲线尤为明显。由此说明改良土干密度对含水率的敏感性较素土有所提高，实际工程施工时，为达到设计要求的密实度，应

严格控制改良土的含水率。

2.3 无侧限抗压强度

图 6 为掺量和养护龄期对改良土无侧限抗压强度 (q_u) 的影响。改良土 q_u 随掺量和养护龄期的增加而增长。图 6 中可以看出, 1d 龄期时, 不同掺量改良土 q_u 相差不大, 且与素土 q_u (105 kPa) 相当; 7 d 龄期时, 改良土 q_u 有所增长, 但 2% 和 5% 掺量下改良土 q_u 增长不明显; 28 d 龄期时, 土体 q_u 有较大幅度增长, 以 12% 掺量改良土为例, 其增幅约 380%; 60 d 龄期时, 各掺量下土体 q_u 较 28 d 龄期时无明显增长, 改良土 q_u 趋于稳定。相同龄期下, 不同木质素掺量对改良土 q_u 的影响也不同。7 d 龄期后, 12% 改良土 q_u 最大。过高掺量可能会使木质素与土体矿物间难以完全反应, 土体中存在木质素过多形成的局部软弱, 从而表现为改良土 q_u 降低的现象。Ceylan 等^[14]用两种不同的工业副产品木质素改良美国爱荷华 10 号土 (CL) 后发现, 过高的木质素掺量会造成土体强度降低的现象, 与本文研究结果一致。

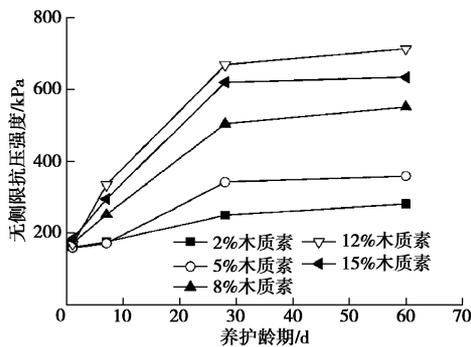


图 6 掺量和养护龄期对木质素改良土强度的影响

Fig. 6 Effect of lignin content and curing time on unconfined compressive strength of treated silt

图 7 为含水率对木质素改良土强度的影响。图中含水率对 8% 和 12% 改良土的影响表现出相似的规律, 即一定龄期时, DMC 改良土的 q_u 高于 OMC 和 WMC 时土体 q_u 。一般而言, 土体 OMC 时具有较高的干密度, 相应的具有较高的强度, 但土体强度不仅与干密度有关, 还与基质吸力密切相关。许多学者的研究表明, 较高的基质吸力会使得土体具有较大的强度与刚度。Sawangsurinya 等^[22]研究了基质吸力、含水率与土体刚度 (小应变剪切模量) 之间的关系 (图 8 所示), 认为具有较高基质吸力土体, 其刚度也较高。木质素改良土在 DMC 状态下具有较高的强度与木质素材料本身有一定的关系, 水泥、石灰等传统改良剂在养护期间发生水化反应、火山灰反应等, 同时放出大量热量, 此过程需要消耗较多的水分, 而木质素是一种有机高分子聚合物, 其改良机理与传统材料不同,

较低的含水率可在一定程度上提高土体抗压强度。

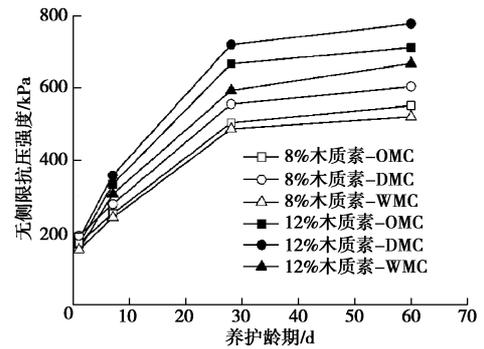


图 7 含水率对木质素改良土强度的影响

Fig. 7 Effect of moisture content on unconfined compressive strength of treated silt

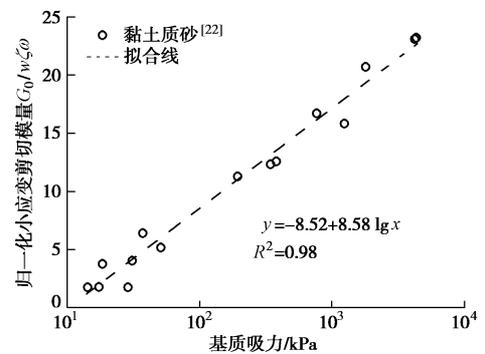


图 8 基质吸力对土体刚度的影响

Fig. 8 Effect of matric suction on stiffness of clayey sand

2.4 回弹模量

图 9 为掺量和养护龄期对改良土回弹模量的影响。与图 6 中改良土无侧限抗压强度的变化规律类似, 土体回弹模量随掺量和养护龄期增加而增长, 28 d 龄期后, 改良土回弹模量趋于稳定。与无侧限抗压强度相对应, 28 d 龄期后, 12% 掺量下, 改良土回弹模量值最大。综合改良土的压实特性、强度和回弹模量分析结果, 认为木质素改良粉土的最优掺量约为 12%。图 10 为含水率对木质素改良土回弹模量的影响。含水

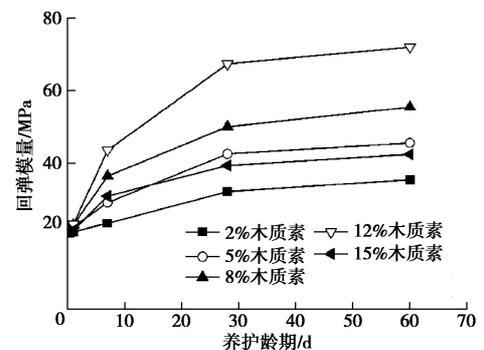


图 9 掺量和养护龄期对木质素改良土回弹模量的影响
Fig. 9 Effect of lignin content and curing time on modulus of resilience of treated silt

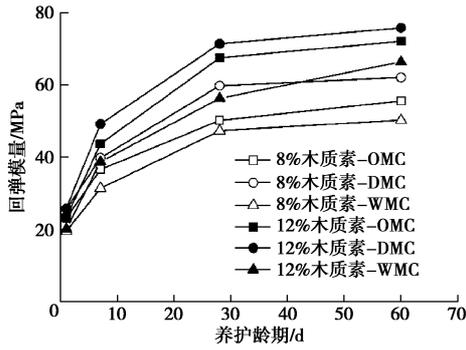


图 10 含水率对木质素改良土回弹模量的影响

Fig. 10 Effect of moisture content on modulus of resilience of treated silt

率对改良土回弹模量的影响与前述无侧限抗压强度的变化规律基本相同, 同样的, 基质吸力和木质素材料自身性质是导致改良土回弹模量随含水率变化的主要原因。

3 热学与力学特性相关性研究

3.1 孔隙分布

基于 MIP 试验的孔隙结构分析是将土体中的孔隙假定为圆柱形, Washburn^[23]提出了压力与入口孔径之间的关系式:

$$p(r) = -\frac{2\sigma \cos\theta}{r} \quad (1)$$

式中 $p(r)$ 为施加压力 (MPa); σ 为汞表面张力, 本次试验取为 0.484 N/m; θ 为汞与金属表面接触角, 取为 135° ; r 为土内孔隙直径 (nm)。

图 11 为 28 d 龄期下不同掺量改良土的 MIP 试验结果。图 11 (a) 为根据式 (1) 将外压力转换成孔隙入口直径并作为横坐标, 以试验样品质量相关的进汞体积为纵坐标绘图。由图 11 (a) 可知, 进汞量随木质素掺量增加而减小, 微观上表现为孔隙体积的减小, 结构更为致密。图 11 (b) 为不同掺量改良土的孔径分布分析结果。可以看出, 素土和 2%掺量改良土呈明显的“双峰结构”, 随着木质素掺量增加, 土体孔隙分布转变为“单峰结构”。Zhang 等^[24]研究了粗、细粒土的微观孔隙结构特征, 得到 OMC 条件下天然击实土的孔径分布大多呈“双峰结构”特征。丁建文等^[25]研究了固化土的孔径分布特征, 得到一定养护龄期下, 水泥固化土孔径分布由“双峰”向“单峰”转变的特点, 上述结论与本文研究结果一致。

为了定量评价改良土内孔隙分布特征, 本文采用高斯函数 (对数正态分布函数或两对数正态分布函数之和) 对土体孔隙体积分布曲线进行拟合, 定量表征改良土内团聚体内、间的孔隙体积和平均孔径, 高斯

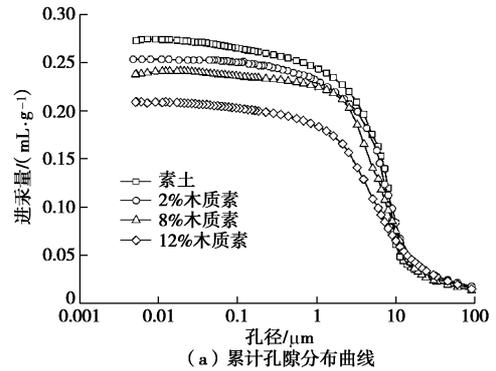
函数拟合式如下式所示:

$$f_1(d) = \frac{A_1}{w_1 \sqrt{\pi/2}} \cdot e^{-\frac{2(\lg d - \mu_1)^2}{w_1^2}} \quad (2)$$

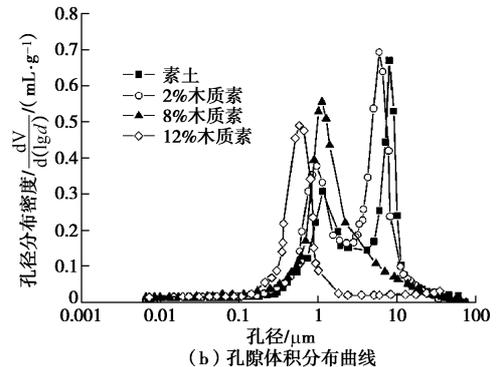
$$f_2(d) = \frac{A_2}{w_2 \sqrt{\pi/2}} \cdot e^{-\frac{2(\lg d - \mu_2)^2}{w_2^2}} \quad (3)$$

$$f(d) = f_1(d) + f_2(d) \quad (4)$$

式中 A_1, μ_1 表示团聚体内部孔隙体积 (mL/g) 和平均孔径 (μm); A_2, μ_2 表示团聚体间孔隙体积 (mL/g) 和平均孔径 (μm)^[26]。本文拟合方法和拟合结果如图 12 和表 4 所示。



(a) 累计孔隙分布曲线



(b) 孔隙体积分布曲线

图 11 不同掺量木质素改良土 MIP 试验结果

Fig. 11 MIP test results of treated silt with different lignin contents

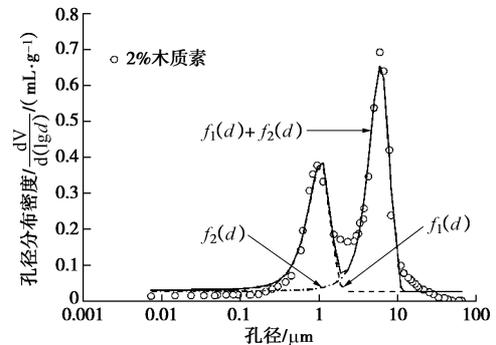


图 12 土体孔隙体积分布的高斯拟合

Fig. 12 Fitting method of distribution curve of pore size by Gaussian functions

由表 4 计算结果知, 素土孔隙分布“双峰结构”的两峰值分别在孔径 $\mu_2=8.107 \mu\text{m}$ 和 $\mu_1=1.364 \mu\text{m}$ 附近

出现；2%木质素改良土“双峰”对应的孔径分别为 $\mu_2=6.073 \mu\text{m}$ 和 $\mu_1=1.056 \mu\text{m}$ ；8%和12%改良土单峰分别出现在孔径 $1.156 \mu\text{m}$ 和 $0.617 \mu\text{m}$ 附近。28 d 龄期养护下，12%木质素改良土的平均孔径 μ_1 较素土减小 55%，内部孔隙体积 A_1 相应减少 36%。

表 4 土体孔隙体积分布曲线高斯拟合结果

Table 4 Fitting results of distribution curves of pore size based on peak analysis using Gaussian functions

土样	μ_1	w_1	A_1	μ_2	w_2	A_2
素土	1.364	0.831	0.336	8.107	3.165	2.287
2%木质素	1.056	0.669	0.298	6.073	3.466	2.730
8%木质素	1.156	0.597	0.400	—	—	—
12%木质素	0.617	0.345	0.215	—	—	—

图 13 为不同初始含水率的改良土 MIP 试验结果。图 13 (a) 中可以看出，初始含水率对试样进汞量有着一定影响，OMC 下试样进汞量最小，次之为 DMC，WMC 下试样进汞量最大。土体在 OMC 状态下最为密实，相应的孔隙体积也最小，DMC 和 WMC 状态下试样进汞量的差异与两者的干重度相对应，DMC 时的土样干重度稍大于 WMC 时的土样重度。图 13(b) 为不同含水率土样的孔隙体积分布曲线。可以看出，12%掺量改良土孔径均呈单峰分布，DMC 时土样的峰值孔径最大，WMC 次之，OMC 最小，但 WMC 与 OMC 峰值孔径相差不大。Delage 等^[27]研究了不同含水率下压实淤泥的微观孔隙特征，认为压实土体在含水率低于 OMC 时会形成以团聚体占主导的土体结构 (aggregate-dominated)，以大孔隙分布为主；含水率高于 OMC 时，土体内无明显团聚体，形成以基质为主的土体结构 (matrix-dominated)，以小孔隙分布为主。本文图 13 的 MIP 试验结果与其一致。

3.2 微观结构

图 14 为 28 d 龄期下不同掺量木质素改良土放大 500 倍的微观结构照片。图 14 (a) 中素土单个颗粒具有明显的边界和棱角，同时土颗粒间基本没有相互连结，且存在较大孔隙，宏观上表现为素土的力学性能较差，无法满足工程建设要求；随着木质素的添加和掺量的增加，土颗粒之间被胶结物质联系起来，同时土体内孔隙逐渐减小。改良土微观结构的变化特征说明，木质素添加至土体中，经过一定的龄期养护，形成具有连结土颗粒能力的胶结产物，包裹土颗粒的同时具有一定的孔隙填充作用，最后形成较为致密、稳定的土体结构，改良土的力学特性得到改善。由于木质素形成的胶结物质的导热性能较土体矿物差，包裹土颗粒后会降低土体的传热速率，由此表现为前述的木质素掺量越大，土体热阻系数越大的现象。

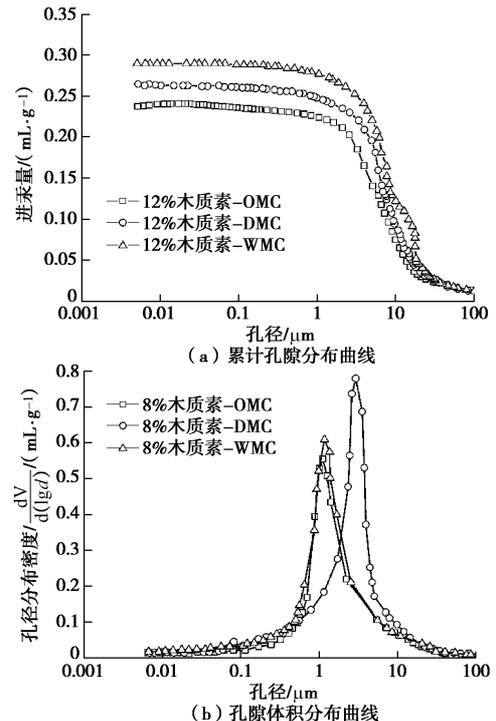


图 13 不同含水率改良土 MIP 试验结果

Fig. 13 MIP test results of treated silt with different moisture contents

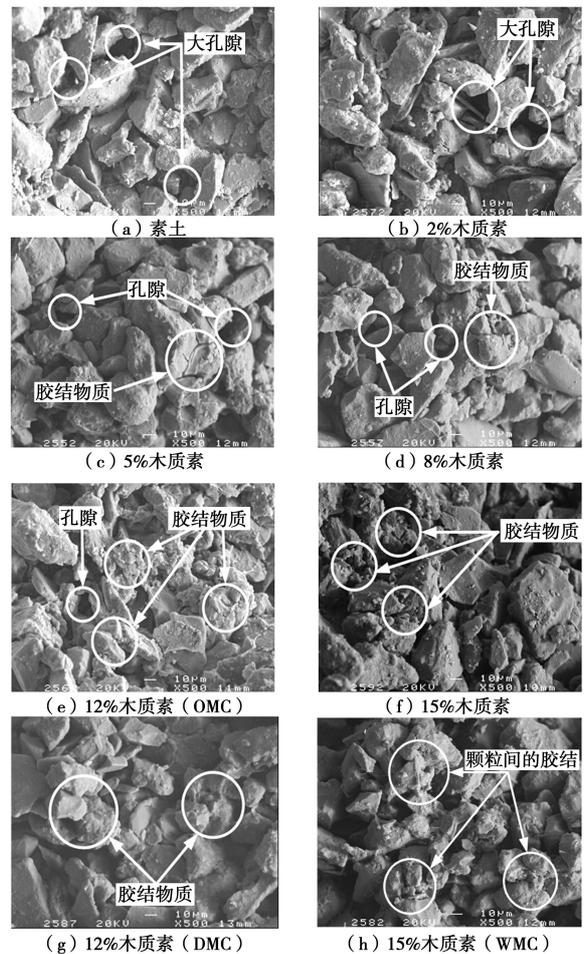


图 14 不同掺量改良土 500 倍扫描电镜照片

Fig. 14 SEM photos of samples magnified by 500 times with different lignin contents

3.3 相关性研究

图 15 为 1 d 龄期下改良土热阻系数与重度之间的关系。由图 15 可以看出, 木质素改良土热阻系数随重度增加而减小, 热阻系数与重度间呈较好的线性关系, 其表达式为

$$TR = 278.510 - 10.343 \gamma \quad (5)$$

式中 TR 为土体热阻系数 ($K \cdot cm/W$); γ 为土体重度 (kN/m^3)。Hotz 等^[17]研究了美国伊利诺伊州低塑性淤泥和人工黄土的重度与热导率 (热阻系数的倒数) 之间关系, 发现土体热导率随重度增加而增加; Lee 等^[28]采用粉煤灰改良尾矿后发现, 改良尾矿的初始热导率 (压实后未经养护的热导率) 与重度之间呈较好的线性关系, 其试验结果如图 15 所示, 与本文研究结果吻合较好。重度表示单位体积内土体的重量, 即固形物和水重量, 一定程度上反映了土体中固形物含量比例和土体的密实程度。相同土体条件下, 土体重度越大, 土体中颗粒含量越多, 颗粒间接触越紧密, 土体的热导性能越好, 从而热阻系数越小。

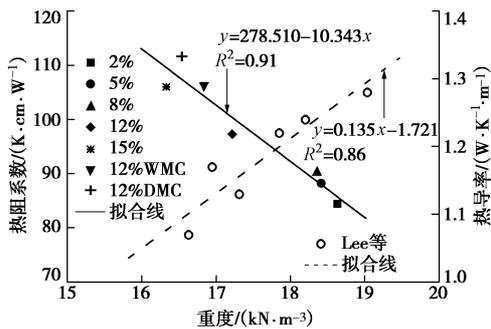
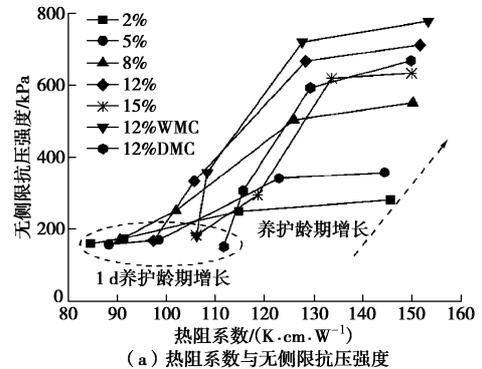


图 15 改良土热阻系数与重度关系

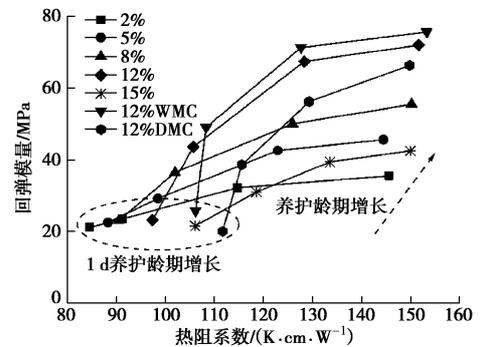
Fig. 15 Relationship between thermal resistivity and unit weight

图 16 为改良土热阻特性与力学特性的相关关系。由图 16 (a) 可以看出: 随养护龄期的增长, 热阻系数随无侧限抗压强度的增加而增加, 28 d 龄期后两者之间的增长关系最终趋于平缓。图 16 (b) 中热阻系数与回弹模量之间的相关关系表现出与图 16 (a) 中相似的规律。无侧限抗压强度和回弹模量是表征土体强度和刚度的重要指标之一, 改良土强度和刚度的发展是一个非常复杂的过程, 不仅与土体矿物成分和含水率等内在因素有关, 还受改良剂种类、掺量和养护条件等外在条件影响。改良剂与土体矿物通过一系列的物理化学反应, 生成新的矿物、胶结土颗粒和填充孔隙, 最终形成新的土体结构, 宏观上表现为土体力学性能的改善。热阻系数是反映土体热传导性能的基本指标之一, 其与矿物成分、干密度、含水率和孔隙比等密切相关, 改良剂本身以及生成胶结物的热传导性能对改良土的热学特性也有着重要影响。改良土热

学特性与力学特性间存在一定的相关关系, 许多共同因素对两者有着重要的影响, 但不同改良土随养护龄期增长过程中热学特性和力学特性的演化发展并不完全相同。



(a) 热阻系数与无侧限抗压强度



(b) 热阻系数与回弹模量

图 16 改良土热阻特性与力学特性相关关系

Fig. 16 Relationship between thermal and mechanical properties of lignin treated silt

4 结 论

(1) 木质素改良粉土的 ρ_{dmax} 较素土有所增加, 低于 12% 掺量时, ρ_{dmax} 随掺量增加而增加; 高于 12% 掺量时, ρ_{dmax} 基本不变, 斥水基团的存在使得改良土 OMC 比素土 OMC 低, 改良土干密度对含水率变化的敏感性增加, 要获得设计要求的密实度, 应严格控制含水率。

(2) 木质素改良粉土的热阻系数随养护龄期增加而增加, 60 d 龄期养护后, 改良土热阻系数基本相同; 初始含水率对土体热阻系数的影响与土体的密实度密切相关, 28 d 龄期后, 相同掺量下改良土的热阻系数趋于相同。

(3) 木质素改良粉土的无侧限抗压强度 q_u 较素土有显著提高, q_u 随掺量和养护龄期的增加而增加, 12% 掺量下 q_u 值最大, 28 d 龄期后, 改良土 q_u 无显著增长; 改良土 q_u 与基质吸力密切相关, DMC 改良土 q_u 高于 OMC 和 WMC 改良土 q_u 。回弹模量随掺量、养护龄期和含水率的变化规律与 q_u 基本相同。

(4) 微观孔隙结构分析发现: 土体孔隙分布结构由素土的“双峰结构”转变为“单峰结构”, 改良土孔隙总体积和平均孔径显著减小; 木质素具有包裹、胶结土颗粒并填充孔隙的作用, 改良土的微观结构更为稳定致密。

(5) 木质素改良土的热阻系数与重度间呈较好的线性减小关系; 养护龄期增长, 无侧限抗压强度、回弹模量随热阻系数增加而增加, 并趋于平缓; 木质素改良土热学与力学特性随养护龄期的演化规律具有一定的共同点, 但两者不完全相同。

参考文献:

- [1] ZHU Z D, LIU S Y. Utilization of a new soil stabilizer for silt subgrade[J]. *Engineering Geology*, 2008, **97**(3): 192 - 198.
- [2] 张涛, 蔡国军, 刘松玉. 南京地区典型土体热学特性与预测模型[J]. *东南大学学报 (自然科学版)*, 2014, **44**(3): 655 - 661. (ZHANG Tao, CAI Guo-jun, LIU Song-yu. Thermal properties and prediction model of typical soils in Nanjing area[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2014, **44**(3): 655 - 661. (in Chinese))
- [3] BELL F G. Lime stabilization of clay minerals and soils[J]. *Engineering Geology*, 1996, **42**(4): 223 - 237.
- [4] BOARDMAN D I, GLENDINNING S, ROGERS C D F. Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes[J]. *Géotechnique*, 2001, **51**(6): 533 - 543.
- [5] PUPPALA A J, KADAM R, MADHYANNAPU R S, et al. Small-strain shear moduli of chemically stabilized sulfate-bearing cohesive soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, **132**(3): 322 - 336.
- [6] INDRARATNA B, MUTTUVEL T, KHABBAZ H, et al. Predicting the erosion rate of chemically treated soil using a process simulation apparatus for internal crack erosion[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, **134**(6): 837 - 844.
- [7] CHEN R, DRNEVICH V P, DAITA R K. Short-term electrical conductivity and strength development of lime kiln dust modified soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(4): 590 - 594.
- [8] ROLLINGS R S, BURKES M P. Sulfate attack on cement-stabilized sand[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, **125**(5): 364 - 372.
- [9] 刘松玉, 张涛, 蔡国军, 等. 生物能源副产品木质素加固土体研究进展[J]. *中国公路学报*, 2014, **27**(8): 1 - 10. (LIU Song-yu, ZHANG Tao, CAI Guo-jun, et al. Research progress of soil stabilization with lignin from bio-energy by-products[J]. *Chinese Journal of Highway and Transport*, 2014, **27**(8): 1 - 10. (in Chinese))
- [10] SHULGA G, REKNER F, VARSLAVAN J. SW-soil and water: lignin-based interpolymer complexes as a novel adhesive for protection against erosion of sandy soil[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, **78**(3): 309 - 316.
- [11] VINOD J S, INDRARATNA B, MAHAMUD M A A. Stabilisation of an erodible soil using a chemical admixture[J]. *Ground Improvement*, 2010, **163**(1): 43 - 51.
- [12] TINGLE J S, SANTONI R L. Stabilization of clay soils with nontraditional additives[J]. *Transportation Research Record*, 2003(1819): 72 - 84.
- [13] SANTONI R L, TINGLE J S, NIEVES M. Accelerated strength improvement of silty sand with nontraditional additives[J]. *Transportation Research Record*, 2005(1936): 34 - 42.
- [14] CEYLAN H, GOPALAKRISHNAN K, KIM S. Soil stabilization with bioenergy coproduct[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010(2186): 130 - 137.
- [15] PUPPALA A J, HANCHANLOET S. Evaluation of a new chemical (SA-44/LS-40) treatment method on strength and resilient properties of a cohesive soil[C]// Preprint 78th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D C, 1999.
- [16] INDRARATNA B, MUTTUVEL T, KHABBAZ H. Modelling the erosion rate of chemically stabilized soil incorporating tensile force-deformation characteristics[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, **46**(1): 57 - 68.
- [17] HOTZ R D, GE L. Investigation of the thermal conductivity of compacted silts and its correlation to the elastic modulus[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009, **22**(4): 408 - 412.
- [18] EKWUE E I, STONE R J, BHAGWAT D. Thermal conductivity of some compacted Trinidadian soils as affected by peat content[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, **94**(3): 461 - 469.
- [19] CAI G J, ZHANG T, PUPPALA A J, LIU S Y. Thermal characterization and prediction model of typical soils in Nanjing area of China[J]. *Engineering Geology*, 2015, **191**: 23 - 30.
- [20] GANGADHARA R M, SINGH D N. A generalized relationship to estimate thermal resistivity of soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, **36**(4): 767 - 773.

- [21] INDRARATNA B, ATHUKORALA R, VINOD J. Estimating the rate of erosion of a silty sand treated with lignosulfonate[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **139**(5): 701 - 714.
- [22] SAWANGSURIYA A, EDIL T B, BOSSCHER P J. Modulus-suction-moisture relationship for compacted soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**(7): 973 - 983.
- [23] WASHBURN E W. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1921: 115 - 116.
- [24] ZHANG L M, LI X. Microporosity structure of coarse granular soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **136**(10): 1425 - 1436.
- [25] 丁建文, 洪振舜, 刘松玉. 疏浚淤泥流动固化土的压汞试验研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(12): 3591 - 3597. (DING Jian-wen, HONG Zhen-shun, LIU Song-yu. Microstructure study of flow-solidified soil of dredged clays by mercury intrusion porosimetry[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(12): 3591 - 3597. (in Chinese))
- [26] 刘兆鹏, 杜延军, 刘松玉, 等. 淋滤条件下水泥固化铅污染高岭土的强度及微观特性的研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(3): 547 - 554. (LIU Zhao-peng, DU Yan-jun, LIU Song-yu, et al. Strength and microstructural characteristics of cement solidified lead-contaminated kaolin exposed to leaching circumstances[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(3): 547 - 554. (in Chinese))
- [27] DELAGE P. A microstructure approach to the sensitivity and compressibility of some Eastern Canada sensitive clays[J]. Géotechnique, 2010, **60**(5): 353 - 368.
- [28] LEE J K, SHANG J Q. Evolution of thermal and mechanical properties of mine tailings and fly ash mixtures during curing period[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(5): 570 - 582.

岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学)2015 年度开放课题申请指南

本重点实验室自 2007 年 2 月由教育部正式批准在同济大学立项建设以来,按照教育部重点实验室的开放要求,自 2008 年起面向国内外征集开放基金项目,连续五年批准了约 40 项国内外访问学者的申请,取得了持续对外开放、合作与交流的良好效果。经研究,本年度继续设立专项开放研究基金,资助国内外学者和科技工作者来实验室开展科研工作。

资助范围: 开放课题应紧密围绕本重点实验室的主要研究方向,资助意义重大、具有重要科学意义和应用前景的研究项目。本年度开放课题主要资助的研究方向如下:①土体渐进破坏理论与软土工程;②土体宏观理论与环境土工灾变防治;③土体多场耦合理论与灾害控制;④地下工程安全理论与风险控制;⑤城市地下空间与岩体地下工程。

申请资格: 同济大学校外从事与岩土与地下工程有关的国内外高级、中级科技人员、青年科技工作者均可申请本实验室的开放基金。

资助金额: 申请者必须本着实事求是的原则申请资助金额,开放基金的资助强度一般每项不超过 4 万元。原则上每个方向批准一项,合计共资助 5 项左右。

项目执行期限: 每个项目实施期限为两年,即 2015 年 12 月 1 日至 2017 年 11 月 30 日。

考核标准: 每个开放基金资助课题应在国际学术期刊发表 1 篇被 SCI 检索的论文(有正式的检索号),且同济大学合作者需列为论文的共同作者,作者单位之一必须标注为本重点实验室,并注明课题批准号。

项目的实施与管理: 批准的开放课题资助经费实行一次核定,两批拨款。项目批准后,即拨付课题资助经费的 50%至课题负责人所在单位;其余 50%待课题结题验收后即拨付。项目负责人应当按照项目计划书组织开展研究工作,做好资助项目实施情况的原始记录,填写项目中期报告。自项目资助期满之日起 60 日内,项目负责人应当撰写结题报告、编制项目资助经费决算;取得研究成果的,应当同时提交研究成果报告。如由于客观原因不能按期完成研究计划的,项目负责人应当于项目资助期限届满 90 日前提出延期申请,申请延长的期限不得超过 1 年。

申报程序

(1) 开放基金申请人应认真阅读有关申请说明,申报课题必须符合本实验室的研究方向,属于 2015 年资助研究内容的范畴,并具有本重点实验室固定研究人员合作。同济大学有关研究人员的介绍,可查阅 <http://geotec.tongji.edu.cn/keylab/>。

(2) 本年度开放课题申请截止时间为 2015 年 10 月 30 日(以邮戳日期为准)。申请书须以纸质一式 2 份寄给:上海市四平路 1239 号(邮政编码 200092),同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室,马险峰老师收(电话:021-65984993, E-mail: xf.ma@tongji.edu.cn),除纸质申请材料,申请人须提供申请书及附件的电子文件(PDF 格式),并注意纸质申请书与电子版申请书的内容应严格一致。

(3) 最终结果将于 2015 年 11 月公布。

(岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学) 供稿)