

## 木质素改良粉土基本工程特性试验研究

张涛<sup>1,2</sup>, 蔡国军<sup>1,2</sup>, 刘松玉<sup>1,2</sup>

(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)

**摘 要:** 将工业副产品木质素应用于粉土改良. 通过界限含水率、颗分、击实、无侧限抗压强度和电阻率等室内试验, 对素土及掺木质素改良土的基本物理力学性质、pH 值和电学特性等进行对比研究, 明确改良土的基本工程特性变化规律和改良效果, 并采用扫描电子显微镜 (SEM) 对土体微观结构变化进行对比分析, 阐述了木质素与土体的相互作用机理. 试验结果表明: 木质素可有效改善粉土的颗粒级配, 降低土体的塑性指数; 改良后粉土的最大干密度增加, 最佳含水率减小, 同时干密度对含水率变化的敏感性增强; 改良土的无侧限抗压强度优于素土, pH 值低于 10, 龄期和含水率对强度影响显著, 对 pH 值无明显影响; 胶结物质填充孔隙并联结土颗粒, 改良土微观结构更为稳定. 这说明木质素可有效改善粉土的基本工程特性.

**关 键 词:** 木质素; 粉土; 物理性质; 强度特性; 电阻率

中图分类号: TU 413

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)12-1766-05

## Experimental Study on Basic Engineering Properties of Silt Improved by Lignin

ZHANG Tao<sup>1,2</sup>, CAI Guo-jun<sup>1,2</sup>, LIU Song-yu<sup>1,2</sup>

(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. Corresponding author: CAI Guo-jun, E-mail: focuscai@163.com)

**Abstract:** The lignin, an industrial by-product, is utilized to improve the silt. A series of laboratory tests on moisture content, particle size distribution, compaction, unconfined compression strength and electrical resistivity are carried out to study the mechanical and physical properties of natural silt and lignin-improved silt. The pH value and electrical characteristics of improved soil are also investigated. Scanning electron microscopy (SEM) is used to analyze the variations of soils microstructure, and the stabilization mechanism of lignin-treated silt is preliminarily discussed. The results indicate that lignin can effectively improve the particle size distribution and reduce the plastic index of soil. As to improved silt, maximum dry density increases, the optimum moisture content decreases, while the change of dry density with moisture content is enhanced. The lignin-treated silt has greater strength performance than the natural silt in terms of unconfined compression strength and all the improved soils have a pH value lower than 10. Curing time and moisture content have a significant impact on unconfined compression strength, but little effect on pH value. The pores of soils are filled and particles are connected with cementing material, then a more stable soil structure was formed. It is shown that adding lignin can successfully improve the basic engineering properties of silt.

**Key words:** lignin; silt; physical properties; strength characteristic; electrical resistivity

随着我国城市化、工业化进程的不断加快, 煤、石油、天然气等化石燃料的需求越来越大, 由

此引发的气候变暖、自然资源匮乏等环境问题也越来越严重. 自然资源的可持续利用和寻求新的

收稿日期: 2014-04-22

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

作者简介: 张涛(1986-), 男, 安徽合肥人, 东南大学博士研究生; 刘松玉(1963-), 男, 江苏靖江人, 东南大学教授.

可替代能源一直备受关注,其中生物能源被认为是最高效的清洁能源<sup>[1]</sup>. 基于植物生物质的生物能源生产不仅产生生物燃料或乙醇,也产生了大量的木质素、改善木质素和木质素衍生物等副产品<sup>[2]</sup>. 木质素是一种存在于大部分陆地植物木质部中的复杂的高分子化合物,自然界中存在十分丰富,其储量仅次于纤维素,且每年以 500 亿吨的速度再生. 相关资料统计显示,我国制浆造纸行业每年要从植物中分离出大约 1.4 亿吨纤维素,同时得到 5 000 万吨左右的木质素副产品. 目前,超过 95% 的木质素副产品以“黑液”形式直接排入江河或浓缩后烧掉,很少得到有效利用<sup>[3]</sup>.

天然沉积土通常不具备作为工程建设合格土工材料的条件. 土体稳定/加固技术常用于改善土工工程特性,传统改良剂在提高土体强度和耐久性等性能的同时,也存在一定的局限性<sup>[4]</sup>. 如石灰土的强碱性对环境造成的影响、水泥土的脆性特征使得结构稳定性在动荷载下受到影响、改良土持水能力和营养成分的降低不利于周围植被的

生长等<sup>[5]</sup>. 本文利用工业副产品木质素对江苏粉土进行改良研究,通过一系列室内试验,对比分析改良前后土体物理力学指标、强度指标、pH 值和微观结构,研究改良土的基本工程特性变化规律,确定木质素改良效果,阐述木质素与土体相互作用机理,为木质素的工程应用提供设计参数.

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

试验中所用土样取自江苏省盐城市某高速公路建设现场,土体基本物理指标如表 1 所示. 表 1 中土体天然含水率为 26.4%,液、塑限分别为 32.4% 和 23.6%. 根据《土的工程分类标准》(GB/T50145—2007)判定,该试验用土为低液限粉土. 通过重型击实试验得到土体最大干密度为 1.72 g/cm<sup>3</sup>,最优含水率为 14.79%. 通过 X 射线荧光光谱仪测得土样的化学成分见表 2.

表 1 试验土样的基本物理指标

Table 1 Basic physical indicators of testing soil samples

天然含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	粒径分布/%			最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最优含水率/%	pH
				<5μm	5~75μm	>75μm			
26.4	32.4	23.6	8.8	10.8	80.1	9.1	1.72	14.79	8.74

表 2 试验土样的化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of testing soil samples( mass fraction)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	其他	烧失量
63.20	12.53	6.41	3.12	2.46	2.39	2.30	0.18	0.16	7.25	5.81

本文试验所用副产品木质素添加剂包括两种类型,即木质素 1 和木质素 2,如图 1 所示. 两种木质素均来自植物质加工厂. 木质素 1 呈黑褐色、黏稠状,可流动液体,主要成分为木质素及其衍生物,其余为水. 木质素 2 呈黄褐色,粉末状固体,含有 60%~80% 的木质素、少量纤维素和水分. 经南京大学现代分析中心检测,两种木质素均不含有任何毒性成分.

1.2 试验方法

根据试验所需土样数量,将素土风干、碾碎并过筛(2 mm 筛用于无侧限抗压强度试验,0.5 mm 筛用于含水率试验,0.3 mm 筛用于颗粒分析). 界限含水率试验、重型击实试验、无侧限抗压强度试验均依据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)进行. 试样含水率为最优含水率,压实度为 96%. 木质素 1,2 的掺量均为 2%,5%,8%,12%

和 15%,掺量为改良剂与干土质量比. 将配制好的土样塑封静置 12 h 后,静压成样,圆柱样直径 5 cm,高 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.

在进行无侧限抗压强度试验之前,首先对试样进行电阻率测试. 土的电阻率实际上是电流垂直通过边长为 1 m 的立方体土时所呈现的电阻,单位为 Ω·m,其变化范围约为 1~10<sup>5</sup> Ω·m. 本文所用的电阻率测试设备为 GWINSTEK LCR-819 型电阻率测试仪,测量前施加 2 kPa 的接触压力.

无侧限抗压强度试验后,取试样中间破碎土块若干并烘干、碾碎,过 2 mm 筛后称取 10 g 干土,用 10 mL 去气蒸馏水搅拌均匀,进行 pH 测试. 具体步骤依照 ASTM D4972-02 测试标准进行,测试仪器为日本 HORIBA pH/COND METER D-54.

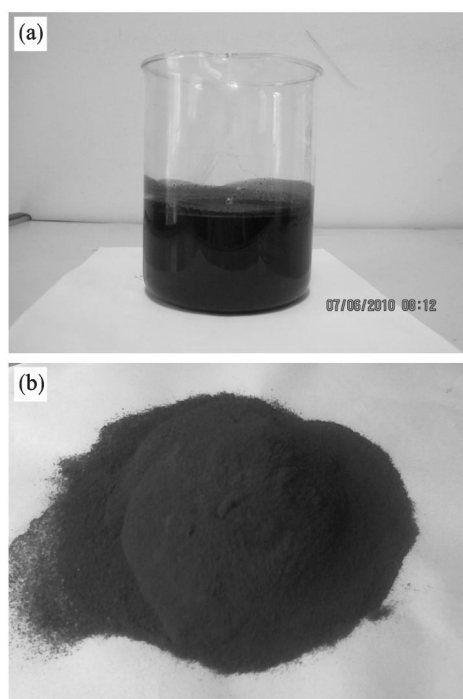


图 1 副产品木质素

Fig. 1 Lignin-based industrial coproduct

(a)—木质素 1; (b)—木质素 2.

## 2 试验结果分析

### 2.1 物理特性

1) 颗粒级配. 对素土和不同掺量木质素改良土进行颗分试验, 如图 2 所示. 7 d 龄期后, 改良土粗颗粒较素土有所增加, 且木质素 2 改良土的粒径稍大于木质素 1 改良土. 颗粒分配曲线上可以看出, 木质素对土体中粉粒的分布影响较大, 这与水泥、石灰等传统固化剂改良土的试验结果不同. Tingle 等<sup>[6]</sup>认为, 木质素是一种高分子化合物, 其本身具有一定的黏结性能, 对土体的改良作用主

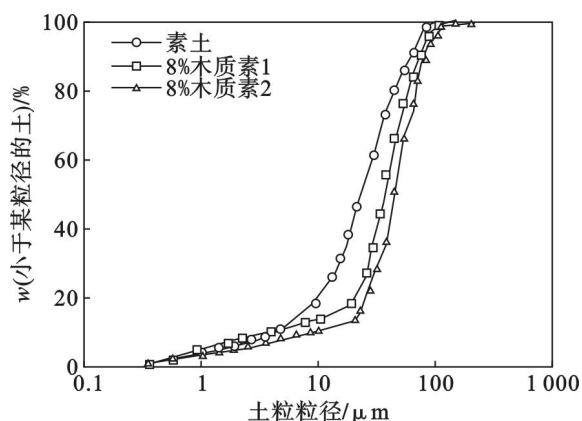


图 2 土样的颗粒级配曲线 (7d 龄期)

Fig. 2 Particle size distribution of the soil samples after 7 days of curing

要表现在孔隙填充、离子交换和胶结作用等方面. 木质素改良土的颗粒级配结果表明, 木质素与土体间的相互作用与传统钙基改良剂不同.

2) 界限含水率. 界限含水率是表征土体基本物理性质的重要指标之一. 图 3 为不同掺量下木质素 2 改良土的界限含水率. 改良土的液限和塑限随木质素掺量增加而增加, 而塑性指数随掺量增加略有减小. 土体液限从 32.4% 增加至 43.3%, 塑性指数从最高 8.8 降低至 7.7. 许多学者在研究水泥、石灰等传统改良剂和其他非传统改良剂改良土体界限含水率时, 也得到了相似的结果. Okagbue 等<sup>[7]</sup>采用木灰对黏土进行固化, 改良土的界限含水率变化规律如图 3 所示. Bell 等<sup>[8]</sup>认为, 离子交换、土颗粒絮凝和火山灰反应产生的胶凝物质包裹土颗粒等作用均可有效降低石灰土的塑性、亲水性和膨胀性. 木质素改良土的界限含水率变化特征表明, 木质素与土体之间可能通过离子交换和胶结等作用, 改善了土体的工程性质.

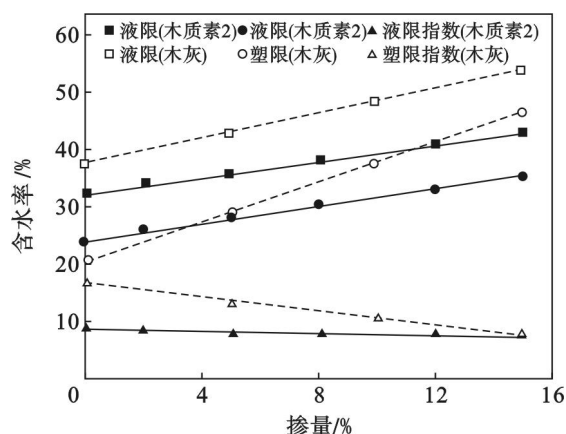


图 3 界限含水率与改良剂掺量的关系

Fig. 3 Relationships between Atterberg limits and percentages of lignin

### 2.2 力学特性

1) 重型击实特性. 由于木质素 1 材料的特殊性, 进行重型击实试验时会渗出, 导致试验结果误差较大, 故只对素土和木质素 2 改良土分别进行重型击实试验, 试验结果见图 4. 图中可以看出: 在相同击实条件下, 不同掺量的木质素改良土最佳含水率相差不大, 在 12% ~ 14% 之间变化, 仅 12% 掺量下的最佳含水率较大, 但均比素土小. 最大干密度随木质素掺量的增加基本不变, 在 1.82 g/cm<sup>3</sup> 左右, 但比素土的 1.72 g/cm<sup>3</sup> 大. 改良土击实曲线较素土更为“急陡”, 且随木质素掺量增加有增强趋势, 说明改良土干密度对含水率变化的敏感性较素土有所提高, 为达到要求的压实度, 现场施工应严格控制含水率.



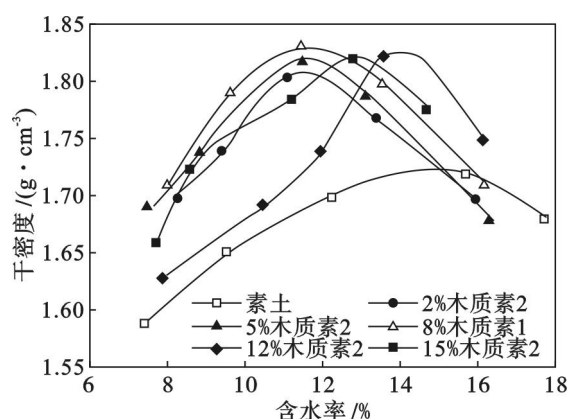


图4 改良前后干密度与含水率的变化关系

Fig. 4 Relationships between dry density and moisture content before and after lignin treatment

2) 无侧限抗压强度特性. 素土和木质素改良土的无侧限抗压强度试验结果如图5所示,其中木质素3,4为Ceylan等<sup>[9]</sup>改良爱荷华10号土(CL)的添加剂. 图中不同龄期下,改良土强度随木质素掺量增加而增加,当木质素掺量超过一定限值后,土体强度反而有所降低;随龄期增长,改良土强度提高显著,这与文献<sup>[9]</sup>中木质素改良黏土的试验结果一致. 木质素掺量过大,土体内部木质素存在局部聚集,造成土颗粒间摩阻力和土骨架强度降低,从而呈现抗压强度降低现象. 对于江苏粉土,木质素最优掺量约为12%.

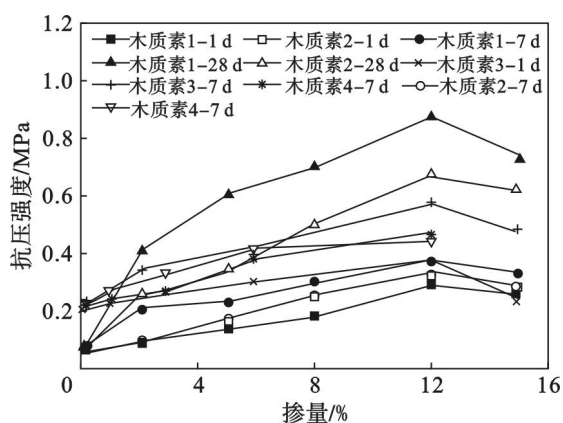


图5 无侧限抗压强度与掺量的关系

Fig. 5 Relationship between unconfined compression strength and percentages of lignin

### 2.3 pH 和电阻率特性

1) pH 特性. pH 值是表征土体内孔隙液盐浓度、矿物成分和评价改良土环境影响的重要指标之一. 图6为木质素改良土不同龄期下 pH 值与掺量的关系. 可以看出:改良土 pH 值较素土有所增大;随掺量增加 pH 值略有增加,但均小于 10.

虽然改良土体仍呈碱性,但比水泥和石灰土 pH 值有所降低,木质素改良土的环境友好性仍具有进一步改善的空间.

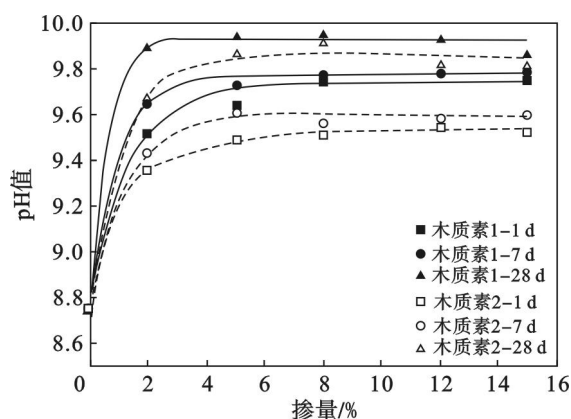


图6 pH 值与掺量的关系

Fig. 6 Relationship between pH value and percentages of lignin

2) 电阻率特性. 土的电阻率可反映土的组成和结构特征,是土的固有物性参数之一. 图7为木质素改良粉土电阻率与掺量、龄期的变化规律. 图中可以看出:相同龄期下,改良土的电阻率随掺量增加而降低,素土电阻率明显高于改良土;龄期对土体电阻率影响显著,电阻率随龄期增加而增加. 木质素1,2中均含有一定量的可溶性盐类,随木质素掺量增加,土体孔隙液含盐量增加,电阻率降低. 相同龄期下,虽然土体之间的连结特性随掺量有所提高,宏观上可表现为土体强度的提高,但孔隙液含盐量对电阻率的影响更为显著. Indraratna等<sup>[10]</sup>对木质素改良高岭土和黏土的电导率特性进行了分析,研究了改良土电导率与掺量和龄期的变化规律,结果表明,改良土电导率随掺量增加而显著增加,30 d 龄期内,改良土电导率基本不变. 改良剂掺量对土体电阻率的影响与本文试验结果基本一致.

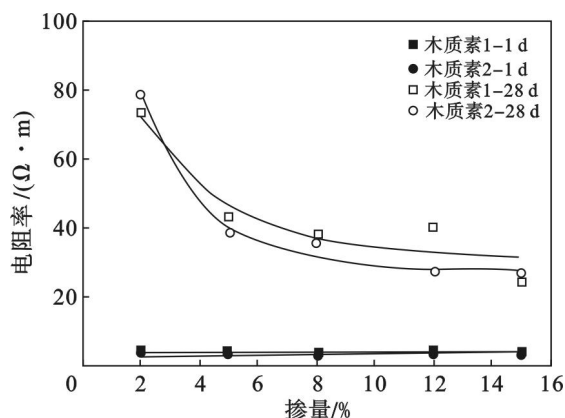


图7 改良土电阻率变化曲线

Fig. 7 Curve of improved silt's electrical resistivity

### 3 微观结构分析

为探究木质素改良后土体结构的变化,本文选取素土和 28 d 龄期下 12% 掺量木质素 1、2 的试样,使用扫描电子显微镜对其进行微结构变化特征测试分析,如图 8 所示.从图 8a 可以看出,未经木质素改良的素土试样中存在大量的孔隙,土颗粒之间具有明显的边界,单个颗粒表面光滑平整,棱角分明.图 8b 中木质素 1 改良土颗粒间孔隙得到有效填充,颗粒之间无明显边界且存在胶结物质将其联结起来,单个颗粒表面有絮状物质包裹,土体形成致密、稳定结构.图 8c 中木质素 2 对土颗粒的包裹作用更为显著,而土颗粒间的联结作用则较为薄弱.产生这一现象的原因可能是加入干粉态木质素的初期由于吸水会提高强度,后期由于水分蒸发而发生干缩,干燥状态下有机质对土颗粒能够提供的胶结力较弱,验证了图 5

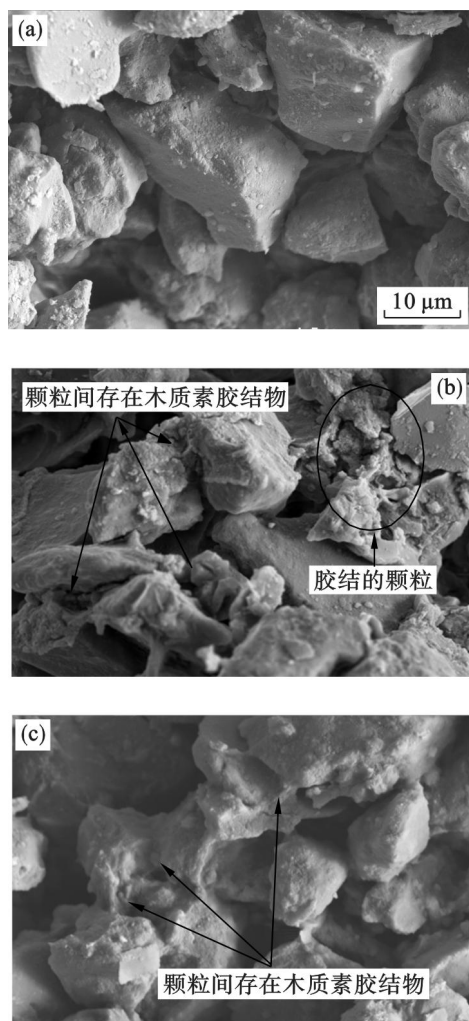


图 8 改良土微结构照片

Fig. 8 SEM photos of improved silt

(a)—素土; (b)—12% 木质素 1; (c)—12% 木质素 2.

中 7 d、28 d 时木质素 2 改良土强度较低的现象.

### 4 结 论

1) 粉土经木质素改良后的颗粒粒径有所增大,颗粒级配得到改善,塑性指数略有降低;改良土的最大干密度增加,最优含水率减小,但击实曲线较素土略陡,干密度对含水率的敏感性提高,施工中应严格控制含水率.

2) 木质素改良粉土的无侧限抗压强度大大高于素土,在最优掺量条件下,可达素土强度的 5 倍左右;含水率、掺量和龄期对强度均有显著影响,木质素 1 在相对低含水率条件下强度较高,木质素 2 则反之;木质素 1 改良土强度对龄期的变化更为敏感.

3) 木质素改良后,土体内产生絮状胶结物将颗粒相互联结,同时填充孔隙,形成较为致密、稳定的土体结构.

#### 参考文献:

- [1] Angenent L T, Karim K, Al-Dahhan M H, et al. Production of bioenergy and biochemical from industrial and agricultural wastewater[J]. *Trends in Biotechnology*, 2004, 22(9): 477 - 485.
- [2] 蒋挺大. 木质素[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. (Jiang Ting-da. Lignin [M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2008.)
- [3] Sherwood P T. Soil stabilization with cement and lime; state-of-the-art review [M]. London: Her Majesty's Stationery Office, 2008.
- [4] 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.)
- [5] Rollings R S, Burkes M P. Sulfate attack on cement-stabilized sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(5): 364 - 372.
- [6] Tingle J S, Newman J K, Larson S L, et al. Stabilization mechanisms of nontraditional additives [J]. *Transportation Research Record*, 2007, 1989(2): 59 - 67.
- [7] Okagbue C O. Stabilization of clay using woodash [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19(1): 14 - 18.
- [8] Bell F G. Lime stabilization of clay minerals and soils [J]. *Engineering Geology*, 1996, 42(4): 223 - 237.
- [9] Ceylan H, Gopalakrishnan K, Kim S. Soil stabilization with bioenergy coproduct [J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2186(2): 130 - 137.
- [10] Indraratna B, Mahamud M A A, Vinod J S. Chemical and mineralogical behavior of liginosulfonate treated soils [C]// Geocongress. Oakland, 2012: 1146 - 1155.