

DOI: 10.11779/CJGE201511003

# 固化粉土小应变剪切模量与强度增长相关性研究

张涛<sup>1,2</sup>, 刘松玉<sup>1,2</sup>, 蔡国军<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(东南大学), 江苏 南京 210096)

**摘要:** 小应变剪切模量和无侧限抗压强度是表征固化土刚度和强度特性的两个重要参数。简要介绍了弯曲元测试技术的原理及其在试验中存在的问题, 采用压电陶瓷弯曲元测试技术对水泥和木质素固化剂固化粉土试样在不同养护龄期下的小应变剪切模量进行了测试, 同时对相应龄期下试样进行了常规无侧限抗压强度试验, 通过引入归一化参数  $G_{28}$  和  $UCS_{28}$  对不同固化土的小应变剪切模量和无侧限抗压强度之间的相关关系进行分析, 提出了固化土刚度与强度的相关性模型, 可为地基处理中固化土的无损测试与加固效果评价提供新的方法。结果表明, 水泥、木质素固化粉土的小应变剪切模量随养护龄期增加而增加, 养护龄期 28 d 内增长显著, 28 d 后增长趋于平稳; 相同类型固化土不论固化剂掺量多少, 其小应变剪切模量随养护时间的发展在本质上是相同的; 固化土归一化无侧限抗压强度表现出与小应变剪切模量相似的发展趋势; 提出的固化土归一化模型可作为一种土体强度无损检测的新方法。

**关键词:** 粉土; 小应变剪切模量; 无侧限抗压强度; 弯曲元; 归一化参数

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)11-1955-10

**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。

## Relationship between small-strain shear modulus and growth of strength for stabilized silt

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

**Abstract:** The small-strain shear modulus and unconfined compressive strength are two important parameters to characterize the stiffness and strength of stabilized soils. The fundamental and the main problems existing in the experiment of bender element technique are briefly reviewed. The small-strain shear modulus of cement and lignin stabilized silt are tested under different curing time by piezoelectric bender element technique. The conventional unconfined compressive strength test is also carried out on stabilized samples under different curing time. The relationships between the small-strain shear modulus and unconfined compressive strength of different stabilized soils are analyzed by introducing the normalized parameters  $G_{28}$  and  $UCS_{28}$ . A stabilization model for the stiffness and strength of stabilized soils is proposed to provide a new method for the non-destructive testing and evaluation of stabilized soils in ground improvement. It is found that the small-strain shear modulus of the stabilized silt increases with the increase of curing time. The small-strain shear modulus of the stabilized silt increases dramatically during 28 d curing time and gets steady after 28 d. The results suggest that for a given binder, the small-strain shear modulus development with time is essentially the same regardless of the dosage. The normalized unconfined compressive strength of stabilized silt shows similar characteristics to the normalized small-strain shear modulus. The proposed normalized model for stabilized soils can be used as a new method for non-destructive prediction of soil strength.

**Key words:** silt; small-strain shear modulus; unconfined compressive strength; bender element; normalized parameter

## 0 引言

岩土工程建设中通常会遇到工程性质不能满足建设需求的不良土体, 目前针对不良土体的处置方法主要有两种: 一是挖除并换填工程性质较好的土体; 二是采用化学加固的方法在土体中添加一定类型的固化

剂, 改善土体的工程性质, 使之满足工程建设需要。

**基金项目:** 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项目(NCET-13-0118); 江苏省交通科学研究计划项目(2013Y04)

**收稿日期:** 2014-12-12

\*通讯作者

前者费工时,在造成资源浪费的同时需要对土体进行二次处理。化学加固方法由于其成本低廉、操作简单已被广泛应用于道路建设、坝基加固等领域<sup>[1]</sup>。在过去的几十年内,许多添加剂已成功并广泛应用于土体加固中<sup>[2-3]</sup>。Tingle等<sup>[4]</sup>将土体固化剂分为两类:一类是以水泥、石灰和粉煤灰等为代表的传统钙基固化剂;另一类是非传统固化剂,如木质素、盐类、聚合物和树脂等。

虽然固化/稳定技术(solidification/stabilization,简称S/S技术)在土体改良和路基加固等领域的应用已经有近50a的历史,但是固化剂真正的固化原理、固化剂与土体之间的相互作用以及固化土的长期稳定性等问题仍是研究的热点和难点<sup>[5]</sup>。一般地,评价固化土强度特性的方法主要通过测试不同养护龄期下土样的无侧限抗压强度,但是大量关于固化土的文献报道均有表明,采用制作平行样的方法会导致无侧限抗压强度试验数据的离散性。因此,目前采用无损测试方法来评价固化土的强度特性得到高度关注,弯曲元无损测试就是其中的一种<sup>[6]</sup>。

自1978年Shirley等<sup>[7]</sup>将压电陶瓷材料引入土工测试并制作了最早的弯曲元波速测试装置以来,弯曲元无损测试技术已在岩土工程等领域得到广泛应用。弯曲元测试可获得土体的剪切波速 $v_s$ 和小应变剪切模量 $G_0$ 。 $G_0$ 是表征土体刚度的重要指标之一,与众多因素密切相关,如应力历史、应力水平、孔隙比、土体结构性和土骨架刚度等<sup>[8]</sup>。吴宏伟等<sup>[9]</sup>利用弯曲元测试技术研究了应力状态对上海原状黏土 $G_0$ 的影响,并利用孔隙比函数描述了 $G_0$ 与土体应力状态的关系;Zheng等<sup>[10]</sup>对橡胶粉末混合渥太华砂的动力特性进行了研究,得到了混合材料 $G_0$ 与孔隙比之间的相关关系;Puppala等<sup>[11]</sup>采用水泥、石灰和粉煤灰固化美国阿灵顿东南地区的高硫土,研究了固化剂种类、压实度和养护龄期等对固化土 $G_0$ 的影响;Truong等<sup>[12]</sup>研究了低侧限状态下,孔隙液含盐量、饱和度和固化剂掺量与颗粒状固化材料动力特性的相关关系;Flores等<sup>[13]</sup>指出固化土 $G_0$ 的增长可以认为是土颗粒间胶结性能提高的反映。现有的文献报道大多是对影响土体 $G_0$ 的因素进行分析,鲜有对 $G_0$ 本身的变化特征及 $G_0$ 与强度特性之间的内在联系进行研究。另外,固化土 $G_0$ 的研究多集中于传统固化剂,非传统固化剂固化土的研究非常少见。本文采用水泥和工业副产品木质素固化粉土,通过弯曲元无损测试技术测试了固化土的小应变剪切模量,研究了固化土在养护过程中小应变剪切模量和无侧限抗压强度的变化特征,提出了固化土强度的无损预测方法,并在相关文献资料的基础上验证了本文研究的有效性和可行性。最后,土体小应变剪切模量的研究也为探索固化土的硬化规律

提供了重要信息。

## 1 弯曲元测试技术

### 1.1 测试原理

弯曲元通常由两片长度可伸缩的压电陶瓷晶片黏合而成,是一种典型的机电传感器,可通过压电效应和逆压电效应实现机械能和电能之间的转换<sup>[14]</sup>。测试土样剪切波速时,需要一对弯曲元元件,一个作为剪切波的激发元件,另外一个作为剪切波的接收元件。激发元在脉冲电压下产生振动,试样一端激发剪切波;剪切波经土体传播后到达接收元,通过数据采集装置将接收元产生的振动转化为电信号,通过对比激发元和接收元的电信号即可计算出土体的剪切波速 $v_s$ ,即

$$v_s = L/t, \quad (1)$$

式中, $L$ 为剪切波的传播距离, $t$ 为剪切波的传播时间。

弯曲元测试中,由剪切波导致的土体应变在理想弹性范围内(土体应变小于 $10^{-5}$ ),在获得土体密度 $\rho$ 和剪切波速 $v_s$ 的条件下,根据弹性理论即可得到土体的小应变剪切模量 $G_0$ ,即

$$G_0 = \rho v_s^2. \quad (2)$$

有关弯曲元测试技术的详细原理可参考姬美秀等<sup>[15]</sup>的相关报道,本文在此不再赘述。

### 1.2 试验装置

本文采用的弯曲元测试装置为英国的GDS-BES系统,该系统将电荷放大器和示波器集成于外置的数据采集板中,只需将与弯曲元件配套的试样帽、底座与数据采集板、计算机相连,即可进行土样的弯曲元测试。图1为弯曲元片构造图。弯曲元晶片设置于试样帽或底座上,作为一种插入物形式,晶片外部涂有环氧树脂保护层,土样与试样帽或底座之间依次设置有滤纸和透水石。

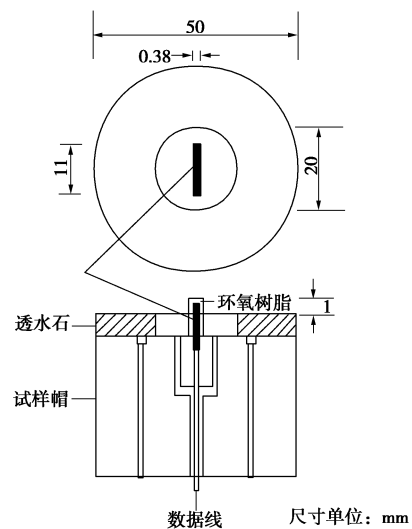


图1 弯曲元片构造示意图

Fig.1 Schematic structure of bender element

测试开始之前预先在试样顶部两端开槽, 槽口尺寸应略小于弯曲元晶片尺寸, 以保证晶片与土体紧密接触, 同时要求上下两晶片在空间位置上方向相同。本文测试试样直径 5 cm, 高 10 cm, 与无侧限抗压强度试样相同。将试样放置于试样帽与底座之间, 顶端发射波形, 底端接收波形, 并与数据采集板相连, 通过信号转换, 即可获得土样的剪切波速  $v_s$  测试结果, 其测试过程如图 2 所示。

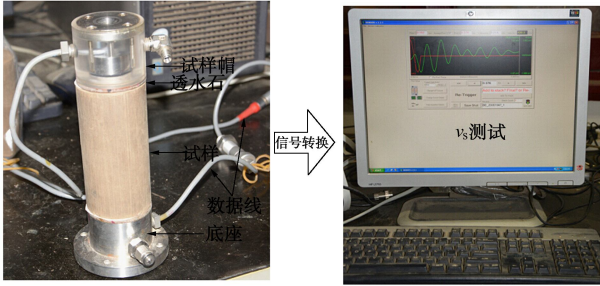


图 2 弯曲元测试示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bender element test set-up

### 1.3 存在的问题

弯曲元测试操作简单、可快速、准确地获得土体剪切波速等信息, 但在测试过程中仍存在许多值得注意的问题, 如近场效应 (near field effect)、共振频率和传播时间的确定方法等。Lee 等<sup>[16]</sup>对弯曲元测试过程中存在的电磁耦合、共振频率和近场效应等 5 个方面进行了详细的分析, 并提出了相应的措施。关于剪切波传播时间的确定方法, Viggiani 等<sup>[17]</sup>研究认为采用单周期正弦波作为激发波时, 剪切波速传播时间的判定方法主要有 3 种, 每种方法都与近场效应、传播路径等密切相关。图 3 为典型 S 波近场效应的波形图。图中接收波共有 3 个明显的波峰, 但波峰 1 是电信号受近场效应引起的, 波峰 2 才是真正的接收波峰。通过多次测试比较结果的稳定性表明, 采用输入波电压零点与接收波电压零点对应的时间差为传播时间较为精确。

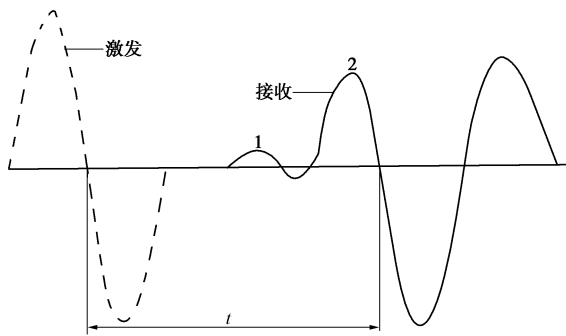


图 3 典型 S 波的近场效应及传播时间确定

Fig. 3 Near-field effect of typical S-wave signal and method of determining travel time

本文以正弦波为激发信号 (方形波适用于刚度较

小的土体)<sup>[18]</sup>, 频率范围为 100~10000 Hz, 采样时间为 10 ms, 电压幅值为 14 V, 实测传播时间初值为 5  $\mu$ s。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

土样取自江苏盐城某高速公路工程现场, 土体的颗粒粒径分布见图 4, 基本物理性质指标为: 天然含水率为 24.4%, 液限为 32.4%, 塑限为 23.6%, 塑性指数为 8.8, 最大干密度为 1.72  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 最优含水率为 16.12%, pH 值为 8.74。根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007) 的规定, 该土体黏粒 (<5  $\mu\text{m}$ )、粉粒 (5~75  $\mu\text{m}$ ) 和砂粒 (>75  $\mu\text{m}$ ) 含量分别为 10.8%, 80.1% 和 9.1%, 且塑性指数为 8.8, 小于 10, 判定该土体为低液限粉土。通过 X 射线荧光光谱仪可以测得土样的化学成分, 土样的主要化学成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{CaO}$ , 同时还含有微量的  $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{SO}_3$ , 各成分含量为:  $\text{SiO}_2$  为 63.20%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 12.53%,  $\text{CaO}$  为 6.41%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为 3.12%,  $\text{K}_2\text{O}$  为 2.46%,  $\text{MgO}$  为 2.39%,  $\text{Na}_2\text{O}$  为 2.30%,  $\text{SO}_3$  为 0.18%,  $\text{P}_2\text{O}_5$  为 0.16%, 其他为 4.25%。

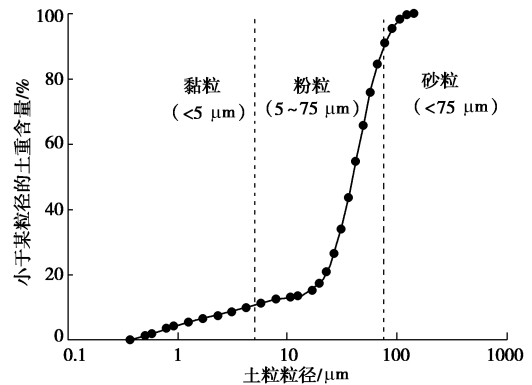


图 4 土样颗粒曲线

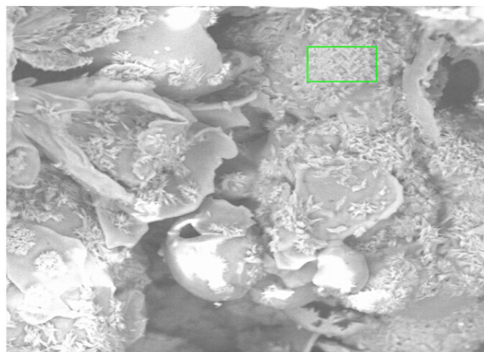
Fig. 4 Particle-size distribution of silt

固化剂种类有两种: 一为普通 32.5 硅酸盐水泥, 二为工业副产品木质素。水泥为南京生产的“海螺”牌复合硅酸盐水泥; 木质素来源于造纸厂生产过程中的副产品, 具有一定的芳香气味, 主要成分为木质素及其衍生物和水, 无毒性。Karol<sup>[19]</sup>对木质素的基本性质和在土体固化中的应用作了详细介绍。图 5, 6 分别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) 可知, 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 ( $-\text{OH}$ ,  $3355 \text{ cm}^{-1}$ )、C-C 键 ( $1595$ 、 $774$ 、 $650 \text{ cm}^{-1}$ )、甲氧基 ( $-\text{OCH}_3$ ,  $1269 \text{ cm}^{-1}$ )、磺酸基 ( $\text{S}=\text{O}$ ,  $1119 \text{ cm}^{-1}$ ) 和羰基 ( $-\text{CO}$ ,  $1045 \text{ cm}^{-1}$ ) 等活性官能基团<sup>[20]</sup>。关于应用工业副产品木质素加固土体, Ceylan 等<sup>[21]</sup>、Santoni 等<sup>[22]</sup>、Indraratna 等<sup>[23]</sup> 和刘松玉等<sup>[24-25]</sup>

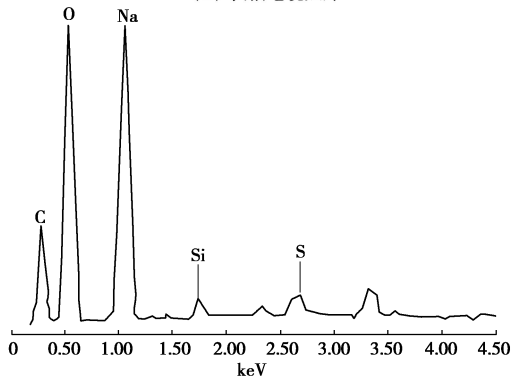
已做过大量的相关工作，结果均表明，木质素在改善土体工程性质，提高土体力学性能、耐久性和抗侵蚀特性等方面具有显著效果。

### 2.2 试验方法

将素土风干过筛（2 mm 筛），称取一定比例的干土与固化剂，均匀拌合后，加入一定量的蒸馏水，密封并浸润 12 h。固化剂掺量为固化剂与干土质量比，两种固化剂掺量均为 2%，5%和 8%。试样的含水率为素土的最优含水率，密度为素土最大干密度的 96%。将配制好的土样倒入钢模内，静压成型，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，养护龄期为 1~48 d。



(a) 扫描电镜照片



(b) 能谱元素分析

图 5 木质素微观结构及能谱分析结果

Fig. 5 Microstructure and EDS analysis of lignin

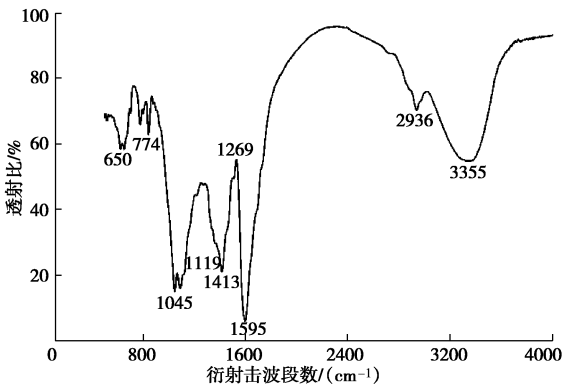


图 6 木质素官能团分析结果

Fig. 6 Analysis results of functional groups of lignin

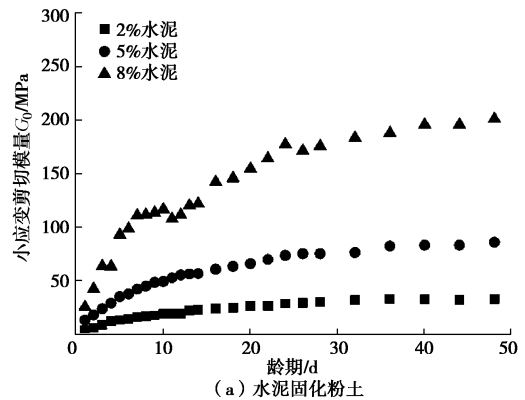
弯曲元测试之前需对试样进行称重和尺寸测量，

便于后续土样密度的计算，养护龄期 1~14 d 内每天对土样进行一次剪切波速测试；14~28 d 内每 2 d 测试一次；28~48 d 内每 4 d 测试一次，每次测试结束后，将试样放回养护室直至下一次测试。无侧限抗压强度试验按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007) 进行，每个试样均制作两个平行样，测试龄期分别为 7, 14, 28, 48 d。

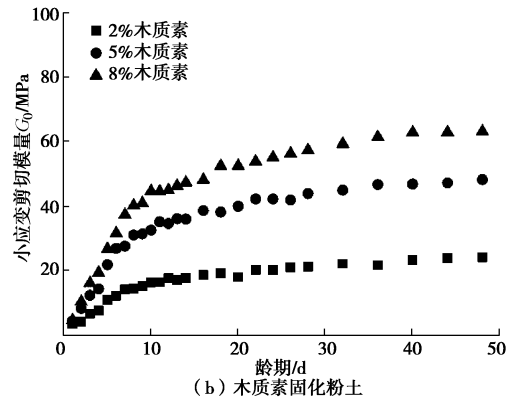
## 3 试验结果与分析

### 3.1 小应变剪切模量

通过对试样质量和尺寸的量测，计算得到固化土的密度，根据式 (2) 计算得到不同掺量下固化土试样的小应变剪切模量  $G_0$ 。图 7 为不同掺量下水泥、木质素固化粉土的小应变剪切模量随养护龄期的试验结果。图 7 中可以看出：水泥和木质素固化粉土的小应变剪切模量  $G_0$  均随养护龄期的增加而增加，28 d 龄期后增长缓慢且趋于平稳；相同龄期下，高掺量固化土的小应变剪切模量  $G_0$  较低掺量固化土高。土体小应变剪切模量的提高表征土颗粒间联结增强，土骨架刚度增大。虽然不同类型固化土的  $G_0$  值相差较大，但图 7 中水泥和木质素固化粉土的  $G_0$  随龄期表现出相似的变化规律。据此引入归一化参数  $G_{28}$  ( $G_{28}$  为 28 d 龄期时固化土的小应变剪切模量) 对固化土  $G_0$  随养护龄期的变化进行分析。



(a) 水泥固化粉土



(b) 木质素固化粉土

图 7 固化土小应变剪切模量  $G_0$  与龄期关系

Fig. 7 Relationship between small-strain shear modulus  $G_0$  and curing time of stabilized silt

图 8 为水泥、木质素固化土归一化小应变剪切模量  $G_0/G_{28}$  与龄期的变化关系。图 8 中明显看出, 经归一化处理后, 不同掺量下固化土的  $G_0/G_{28}$  具有相同的变化规律且  $G_0/G_{28}$  值分布在较小的范围内。由此推断, 相同固化剂条件下, 不论固化剂掺量多少, 土体的小应变剪切模量  $G_0$  随养护龄期的发展在本质上是相同的。将水泥、木质素固化粉土的归一化剪切模量  $G_0/G_{28}$  置于半对数坐标中, 其结果如图 9 所示。图 9 (a) 中水泥固化土的  $G_0/G_{28}$  与养护龄期表现出较好的线性关系, 其表达式为

$$G_0 / G_{28} = 0.6521 \lg t + 0.0277 \quad (3)$$

式中,  $t$  为养护龄期,  $G_{28}$  为 28d 龄期时固化土的小应变剪切模量。图 9 (b) 中木质素固化土归一化剪切模量  $G_0/G_{28}$  与养护龄期并不具有较好的线性关系, 而成折线关系。养护龄期 5 d 内, 固化土归一化小应变剪切模量随龄期增长缓慢; 5 d 后, 两者具有较好的线性关系。产生上述现象的原因可能是由于固化剂木质素与土体之间的作用机理和水泥不同, 木质素与土体之间并未发生剧烈的水化反应和硬凝反应等, 养护初期木质素与土体的相互作用缓慢, 土颗粒间胶结作用不显著。相应于木质素固化土归一化剪切模量  $G_0/G_{28}$  的两个拟合曲线表达式分别为

$$G_0 / G_{28} = 0.3833 \lg t + 0.0985 \quad (0 < t \leq 5) \quad (4)$$

$$G_0 / G_{28} = 0.5897 \lg t + 0.1431 \quad (5 < t) \quad (5)$$

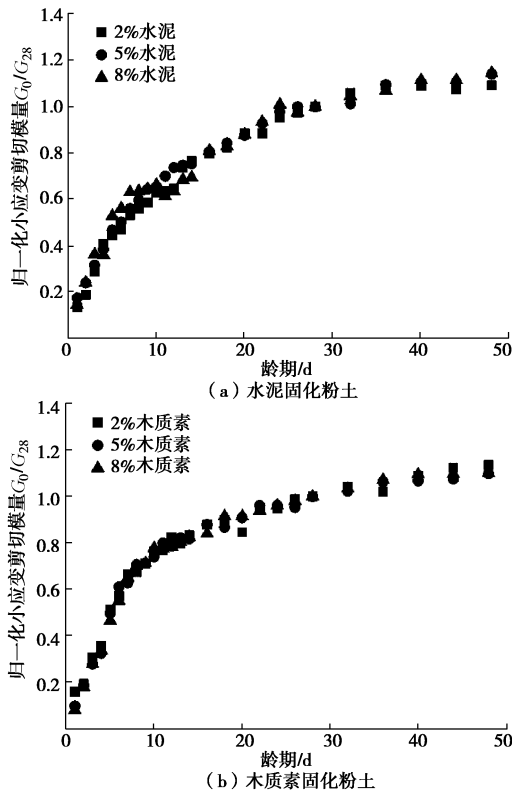


图 8 归一化小应变剪切模量  $G_0/G_{28}$  与龄期关系

Fig. 8 Relationship between normalized small-strain shear modulus  $G_0/G_{28}$  and curing time of stabilized silt

综上所述, 由两种不同类型固化土归一化剪切模量  $G_0/G_{28}$  的变化规律可知, 线性关系的斜率可用来反映固化土颗粒间的胶结程度和土骨架刚度的发展速率。

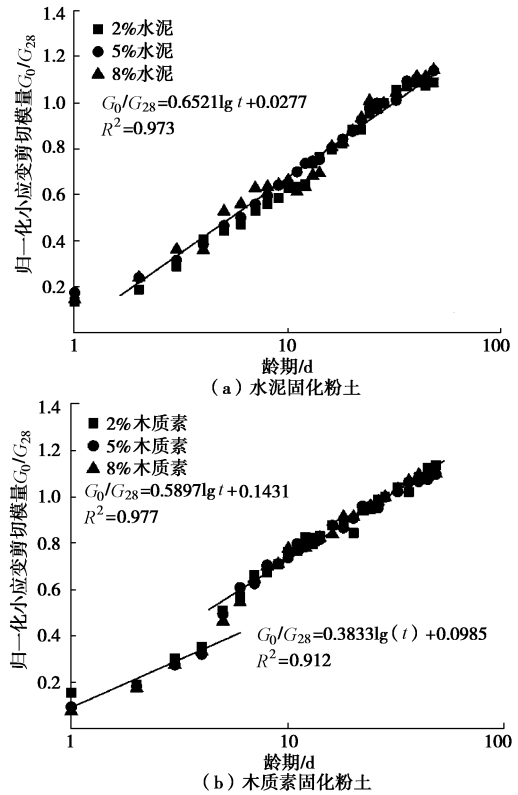


图 9 半对数坐标下固化土归一化小应变剪切模量  $G_0/G_{28}$  与龄期关系

Fig. 9 Relationship between normalized shear modulus  $G_0/G_{28}$  and curing time of stabilized silt in semilog scale

### 3.2 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度是评价固化土力学性能的基本指标之一。为了研究水泥、木质素固化粉土的强度增长特点, 对 7, 14, 28, 48 d 养护龄期下的试样进行了常规无侧限抗压强度试验, 每种掺量下的试样均制作两个平行样。图 10 为水泥、木质素固化粉土无侧限抗压强度试验结果。总体而言, 两种固化土的无侧限抗压强度随龄期增加而增长, 与小应变剪切模量  $G_0$  的试验结果类似, 固化土的无侧限抗压强度在 28 d 龄期内增长显著, 28 d 后强度增加缓慢。28 d 龄期下, 2%, 5%, 8% 掺量的水泥土和木质素土的无侧限强度分别为 500, 800, 1200, 200, 300, 500 kPa。图 10 (b) 中木质素固化土的强度低于水泥土, 这一现象与  $G_0$  的变化相一致。

参考 Horpibulsuk 等<sup>[26]</sup>的研究方法, 对无侧限抗压强度试验结果进行归一化处理, 归一化参数为 28 d 龄期下土体的无侧限抗压强度  $UCS_{28}$ , 归一化结果如图 11 所示。由于无侧限抗压强度试验结果的离散性, 使得归一化处理后, 相同养护龄期下的试验数据分布

范围较广，木质素固化土的分散性更为显著。虽然无侧限抗压强度试验归一化结果的相关性较小应变剪切模量试验结果差，但仍表现出较好的线性相关关系。水泥、木质素固化土归一化无侧限抗压强度的拟合关系式分别为

$$UCS/UCS_{28} = 0.4810\lg t + 0.2528 \quad (6)$$

$$UCS/UCS_{28} = 0.8750\lg t + 0.2174 \quad (7)$$

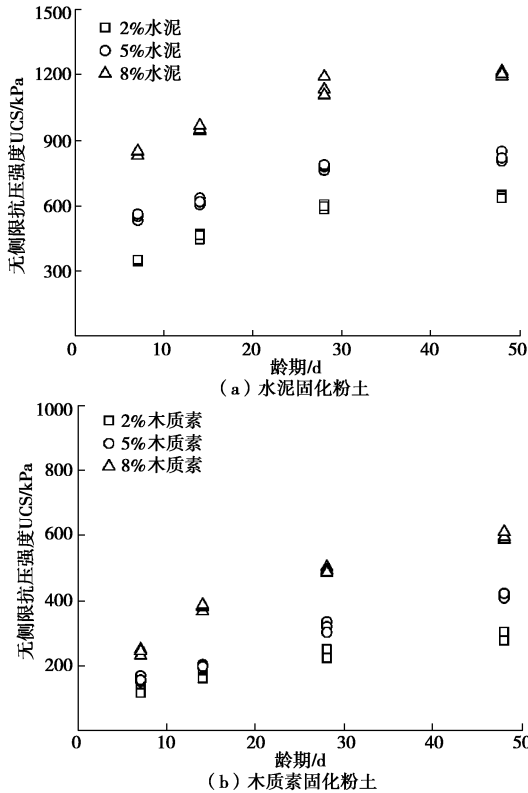


图 10 固化土无侧限抗压强度 UCS 与龄期关系

Fig. 10 Relationship between unconfined compressive strength UCS and curing time of stabilized silt

关于固化土强度与时间增长的相关关系，相关学者已做过大量的研究。Mitchell 等<sup>[27]</sup>于 1974 年首次提出水泥土强度与时间的关系式，即

$$UCS_{t_2} = UCS_{t_1} + K \cdot \lg(t_2/t_1) \quad (8)$$

式中， $UCS_{t_1}$  和  $UCS_{t_2}$  分别为  $t_1$ 、 $t_2$  龄期时水泥土的无侧限抗压强度； $K$  为相关系数。随后 Nagaraj 等<sup>[28]</sup>提出了高含水率条件下水泥固化内陆土的强度公式，即

$$UCS_t / UCS_{14d} = a + b \ln t \quad (9)$$

Horpibulsuk 等<sup>[26]</sup>在 Nagaraj 研究的基础上，提出了相类似的强度公式，即

$$UCS_t / UCS_{28d} = a + b \ln t \quad (10)$$

式中， $UCS_{14}$  和  $UCS_{28}$  分别为 14、28 d 龄期时水泥土的无侧限抗压强度， $a$ 、 $b$  均为相关常数。对比本文试验结果，水泥、木质素固化粉土的强度发展与前人研究基本一致。

通过分析不同类型固化土小应变剪切模量和无侧限抗压强度发展规律发现：土体小应变剪切模量与无

侧限抗压强度在归一化处理后就具有相似的变化特征，同时小应变剪切模量和无侧限抗压强度均可反映土颗粒胶结程度和土骨架刚度，因此，建立固化土无损测试计算模型可通过研究小应变剪切模量和无侧限抗压强度之间的关系来实现。

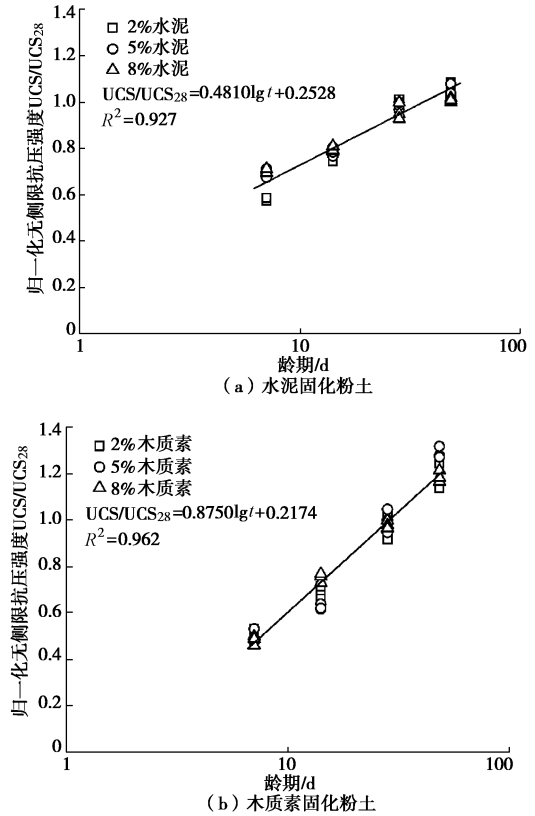


图 11 固化土归一化无侧限抗压强度  $UCS/UCS_{28}$  与龄期关系  
Fig. 11 Relationship between normalized unconfined compressive strength  $UCS/UCS_{28}$  and curing time of stabilized silt

### 3.3 小应变剪切模量与无侧限抗压强度相关性研究

图 12 为归一化小应变剪切模量  $G_0/G_{28}$  与归一化无侧限抗压强度  $UCS/UCS_{28}$  之间的关系。图 12 (a) 和 12 (b) 中试验数据虽仍存在一定的离散性，但两种固化土归一化小应变剪切模量  $G_0$  和归一化无侧限抗压强度  $UCS$  之间存在较显著的线性相关关系。相应于水泥、木质素固化土的线性拟合表达式分别为

$$G_0/G_{28} = 0.9913 UCS/UCS_{28} \quad (11)$$

$$G_0/G_{28} = 0.9693 UCS/UCS_{28} \quad (12)$$

综合分析上述试验结果和式 (11)、(12) 表明，固化土小应变剪切模量  $G_0$  的增加和无侧限抗压强度  $UCS$  的增长密切相关，两者具有基本相同的变化趋势；经归一化处理，两者具有一一对应的关系。将水泥、木质素固化土归一化模量和强度数据汇总，得到如图 12 (c) 所示的固化粉土小应变剪切模量与强度增长的相关关系，即

$$G_0/G_{28} = 0.9800 UCS/UCS_{28} \quad (13)$$



据此推断, 水泥、木质素固化土的归一化小应变剪切模量  $G_0/G_{28}$  随养护龄期的变化可用来描述固化土强度的发展和预测土体的无侧限抗压强度, 实现无损测试固化土强度的目的。

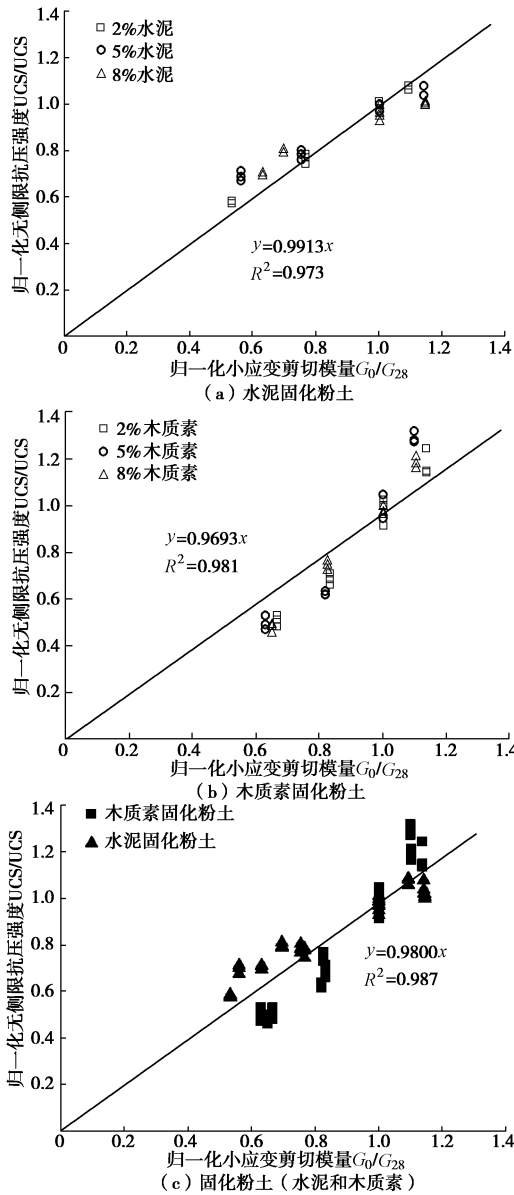


图 12 归一化小应变剪切模量  $G_0/G_{28}$  与归一化无侧限抗压强度  $UCS/UCS_{28}$  关系

Fig. 12 Relationship between normalized shear modulus  $G_0/G_{28}$  and normalized unconfined compressive strength  $UCS/UCS_{28}$  of stabilized silt

为了验证本文提出的固化粉土刚度与强度之间相关关系的正确性, 通过相关文献分析, 将其与本文结果对比, 分析结果如图 13 所示。图 13 (a) 为传统水泥固化西澳夯填土<sup>[29]</sup> (rammed earth material) 和曼谷黏土<sup>[26]</sup> (Bangkok clay) 的归一化无侧限抗压强度结果。图 13 中文献数据的相关关系与本文提出的固化粉土  $G_0$  的归一化模型并不一致, 但两者之间基本相互平行。通过对式 (3) 分析发现, 当  $t$  等于 1, 即固化剂

未发挥作用时, 土体  $G_0$  的归一化值等于模型方程的截距。如前所述, 模型方程的斜率可反映固化剂的固化速率, 对于相同固化剂水泥而言, 其固化速率基本相同。因此, 文献数据中水泥固化土的拟合直线与本文归一化模型的斜率基本相同, 两直线斜率的不同主要是由土的种类不同引起的。图 13 (b) 中木质素固化土的分析结果与图 13 (a) 水泥土的明显不同。文献分析结果与本文木质素固化粉土的强度模型差别较大<sup>[21, 30]</sup>。固化对象的不同是造成这种现象的原因之一, 但主要原因是由于固化剂木质素本身所引起的。Indraratna 等<sup>[23]</sup> 也指出非传统固化剂由于其自身组成成分的复杂性, 使得同一类型的木质素固化剂存在较大差别, 进而导致固化效果也不同。虽然木质素固化土的相关文献数据与本文模型方程的吻合性较差, 但其分析结果也表明不同木质素等非传统固化剂固化土的强度发展遵循相似的规律。

综上所述, 不论传统与非传统固化剂, 其固化土归一化小应变剪切模量  $G_0/G_{28}$  的发展可用来描述其强度的变化, 土体刚度与强度之间存在一一对应的关系。本文提出的固化土刚度与强度归一化模型在应用于其他类型的固化土时, 需考虑固化剂种类和固化对象的差异, 该模型为固化土强度的无损测试提供了新方法。

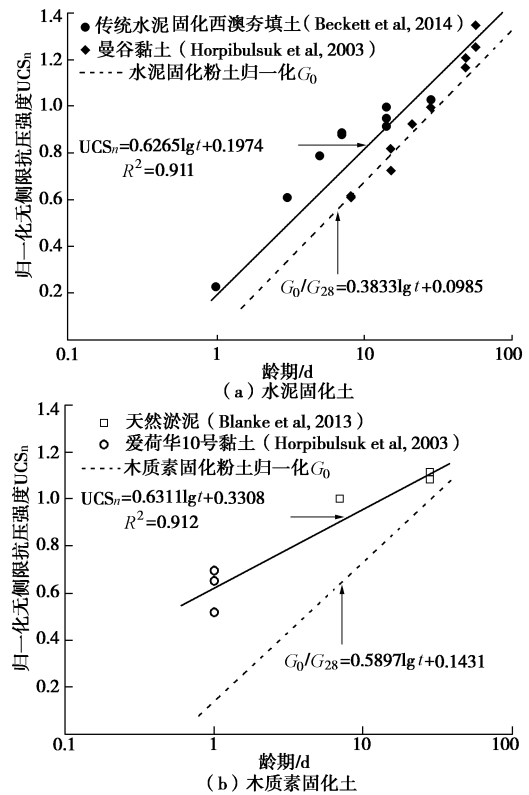


图 13 其他土体归一化小应变剪切模量  $G_0/G_{28}$  与归一化无侧限抗压强度  $UCS/UCS_{28}$  关系

Fig. 13 Relationship between normalized shear modulus  $G_0/G_{28}$  and normalized unconfined compressive strength  $UCS/UCS_{28}$  of different stabilized soils from literatures

## 4 讨 论

关于非传统固化剂与土体相互作用机制目前尚无统一论。大量相关试验结果仅在宏观上表明其固化效果,对固化剂与土体之间真正的相互作用,尚不明确<sup>[31]</sup>。Tingle 等<sup>[4]</sup>将非传统固化剂共划分为 7 类,即离子固化剂、酶、木质素、盐类、石油乳剂、高分子聚合物和树脂。本文对木质素固化粉土的机制在化学元素和微观结构上做了一定分析。图 14 为粉土和木质素改良粉土 28 d 龄期微观结构照片。图中粉土颗粒间具有明显的边界,单个颗粒表面光滑、平整且棱角分明;木质素改良土颗粒表面及颗粒间存在胶结物质,土体孔隙得到填充,这些胶结物质不仅填充孔隙也增强土体骨架刚度,这与图 7 (b) 和图 10 (b) 的试验结果相一致。图 15 为木质素改良土矿物成分分析结果。图中素土和木质素改良粉土的矿物成分基本相同,无明显新矿物生成。据此推断,木质素自身的化学组成使得其与土体的相互作用机制与水泥等钙基固化剂不同,Tingle 等<sup>[32]</sup>认为木质素主要是作为胶结物质固化土体,其与土体间并未产生剧烈的化学反应,固化作用源自其本身。张涛等<sup>[33]</sup>认为木质素及其衍生物与土体间通过水解、离子交换和质子化等一系列化学反应,最终产生具有胶结性质的高分子聚合物,填充孔隙、联结土颗粒并提高土体骨架刚度。虽然在认识木质素的固化机制上仍存在不足,但其宏观上表现的刚度与强度之间的相关关系,不仅为无损预测土体强度提供新的方法,也为深入探索期固化机制增加了试验依据。

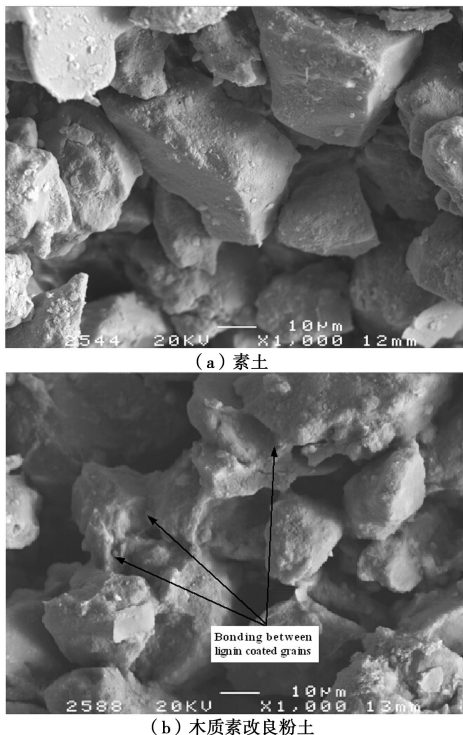


图 14 木质素改良粉土微观结构

Fig. 14 Microstructural characteristics of lignin-treated silt

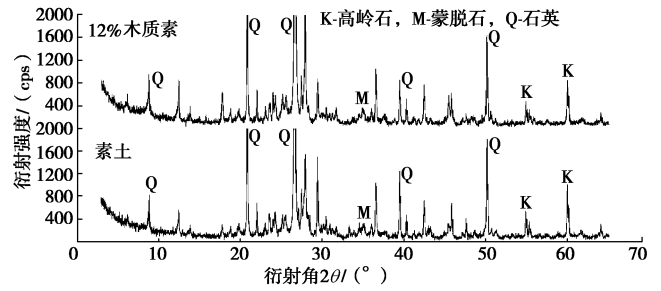


图 15 木质素改良土矿物成分分析结果

Fig. 15 Analysis results of mineral composition of silt and lignin-treated silt

土体中有机质含量和孔隙液含盐量高低对固化剂与土体间的相互作用有着重要影响,甚至会直接影响固化剂作用的发挥<sup>[34-35]</sup>。虽然本文土样为非有机质土,但从土样所在地区的沉积环境得到,该地区粉土孔隙液含盐量可能较高,本文提出的固化土刚度与强度的相关关系未考虑这一方面的影响。实际工程中,土体剪切波速受各种因素影响较大,测试结果离散性较为显著,工程实际应用时应考虑这一因素。

## 5 结 论

本文采用弯曲元测试技术,对水泥、木质素固化粉土在不同养护龄期下的剪切波速和无侧限抗压强度进行了测试,研究了不同固化粉土在养护过程中小应变剪切模量和无侧限抗压强度的发展变化,得到以下 4 点主要结论。

(1) 水泥、木质素固化粉土的小应变剪切模量随养护龄期的增加而增加,养护龄期 28 d 内增长显著,28 d 后增长趋于平稳;通过归一化处理土体小应变剪切模量后,得到固化土小应变剪切模量随养护时间的相关关系,相同类型固化土不论固化剂掺量多少,其小应变剪切模量随养护时间的发展在本质上是相同的。

(2) 两种类型固化土的无侧限抗压强度经归一化处理表现出与小应变剪切模量相似的变化趋势,半对数坐标中固化土的归一化无侧限抗压强度与养护时间成线性关系。

(3) 根据固化土归一化小应变剪切模量和归一化无侧限抗压强度之间关系,提出了固化土刚度与强度的归一化模型,固化土体小应变剪切模量随时间的变化可用来描述土体强度发展和预测固化土无侧限抗压强度。

(4) 本文提出的固化土刚度与强度的相关性模型可有效减少无侧限抗压强度等破坏试验,弯曲元测试技术可用作预测和评价固化土强度的无损测试方法,固化土小应变剪切模量的测试对地基处理效果评



价具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006. (GONG Xiao-nan. Foundation treatment manual[M]. Beijing: China Building and Architecture Press, 2006. (in Chinese))
- [2] BELL F G. Lime stabilization of clay minerals and soils[J]. *Engineering Geology*, 1996, **42**(4): 223 - 237.
- [3] SARIOSSEIRI F, MUHUNTHAN B. Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils[J]. *Engineering Geology*, 2009, **4**(1): 119 - 125.
- [4] TINGLE J S, SANTONI R L. Stabilization of clay soils with nontraditional additives[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2003, **1819**(1): 72 - 84.
- [5] BOARDMAN D I, GLENDINNING S, ROGERS C D F. Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes[J]. *Géotechnique*, 2001, **50**(6): 533 - 543.
- [6] CLAYTON C R I. Stiffness at small strain: research and practice[J]. *Géotechnique*, 2011, **61**(1): 5 - 37.
- [7] SHIRLEY D J, HAMPTON L D. Shear-wave measurement in laboratory sediments[J]. *Journal of Acoustical Society of America*, 1978, **63**(2): 607 - 613.
- [8] 周燕国. 土结构性的剪切波速表征及对动力特性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (ZHOU Yan-guo. Shear wave velocity-based characterization of soil structure and its effects on dynamic behavior[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))
- [9] 吴宏伟, 李 青, 刘国彬. 利用弯曲元测量上海原状软黏土各向异性剪切模量的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(1): 150 - 155. (NG C C W, LI Qing, LIU Guo-bin. Measurement of small-strain inherent stiffness anisotropy of intact Shanghai soft clay using bender elements[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(1): 150 - 155. (in Chinese))
- [10] ZHENG Y F, KEVIN G S. Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2000, **23**(3): 338 - 344.
- [11] PUPPALA A J, KADAM R, MADHYNNAPU 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.
- [12] TRUONG Q H, LEE C, KIM Y U, et al. Small strain stiffness of salt-cemented granular media under low confinement[J]. *Geotechnique*, 2012, **62**(10): 949 - 953.
- [13] FLORES R D V, EMIDIO G D, IMPE W F V. Small-strain shear modulus and strength of cement-treated clay[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2010, **33**(1): 62 - 71.
- [14] 陈云敏, 周燕国, 黄 博. 利用弯曲元测试砂土剪切模量的国际平行试验[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(7): 874 - 880. (CHEN Yun-min, ZHOU Yan-guo, HUANG Bo. International parallel test on the measurement of shear modulus of sand using bender elements[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(7): 874 - 880. (in Chinese))
- [15] 姬美秀, 陈云敏, 黄 博. 弯曲元高精度测试土样剪切波速方法[J]. *岩土工程学报*, 2003, **25**(6): 732 - 736. (JI Mei-xiu, CHEN Yun-min, HUANG Bo. Method for precisely determining shear wave velocity of soil from bender element tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2003, **25**(6): 732 - 736. (in Chinese))
- [16] LEE J S, SANTAMARINA J C. Bender elements: performance and signal interpretation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, **131**(9): 1063 - 1070.
- [17] VIGGIANI G. Small strain stiffness of fine grained soils[D]. London: City University, 1992.
- [18] 高新南. 小应变条件下基坑围护结构变形分析方法及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2012. (GAO Xin-nan. Research on the deformation analysis of retaining structures for deep excavations at small strain and its applications[D]. Nanjing: Southeast University, 2012. (in Chinese))
- [19] KAROL R H. Chemical grouting and soil stabilization[M]. 3rd ed. New York: Marcel Decker Incorporation, 2003.
- [20] VINOD J S, INDRARATNA B, MAHAMUD M A A. Stabilisation of an erodible soil using a chemical admixture[J]. *Proceedings of the ICE: Ground Improvement*, 2010, **163**(1): 43 - 51.
- [21] CEYLAN H, GOPALAKRISHNAN K, KIM S. Soil stabilization with bioenergy coproduct[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2010, **2186**(1): 130 - 137.
- [22] SANTONI R L, TINGLE J S, NIEVES M. Accelerated strength improvement of silty sand with nontraditional additives[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2005, **1936**(1): 34 - 42.
- [23] 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.
- [24] 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))
- [25] 刘松玉, 蔡国军. 基于生物能源副产品木质素的土体稳定性加固剂: 中国, 201010271040.1[P]. 2010 - 08 - 31. (LIU Song-yu, CAI Guo-jun. Lignin-based bioenergy by-products to stabilize soil: China, 201010271040.1[P]. 2010 - 08 - 31. (in Chinese))
- [26] HORPIBULSUK S, MIURA N, NAGARAJ T S. Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis[J]. Géotechnique, 2003, **53**(4): 439 - 444.
- [27] MITCHELL J K, VENG T S, MONISMITH. Behavior of stabilized soils under repeated loading[M]. Berkeley: University of California Press, 1974.
- [28] NAGARAJ T S, MIURA N, YAMADERA A. Induced cementation of soft clay[C]// Proceedings of the International Symposium on Lowland Technology. Saga: Saga University Press, 1998: 267 - 278.
- [29] BECKETT C, CIANCIO D. Effect of compaction water content on the strength of cement-stabilized rammed earth materials[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(5): 583 - 590.
- [30] BLANCK G, CUISINIER O, MASROURI F. Soil treatment with organic non-traditional additives for the improvement of earthworks[J]. Acta Geotechnica, 2013, **8**(1): 1 - 12.
- [31] ZHANG T, LIU S Y, CAI G J. Study on the strength characteristics and microcosmic mechanism of silt improved by lignin-based bio-energy coproducts[J]. Ground Improvement and Geosynthetics, ASCE, 2014, **238**: 220 - 230.
- [32] TINGLE J S, NEWMAN J K, LARSON S L, et al. Stabilization mechanisms of nontraditional additives[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, **1989**(2): 59 - 67.
- [33] 张涛, 刘松玉, 蔡国军, 等. 工业副产品木质素改良路基粉土的微观机理研究[J]. 岩土力学, 2014(已录用). (ZHANG Tao, LIU Song-yu, CAI Guo-jun, et al. Research on the stabilization microcosmic mechanism of lignin based by-product treated subgrade silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(accepted). (in Chinese))
- [34] XING H F, YANG X M, YE G B. Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil-cement[J]. Engineering Geology, 2009, **103**(1/2): 33 - 38.
- [35] SARIDE S, PUPPALA A J, CHIKYALA S R. Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays[J]. Applied Clay Science, 2013, **85**: 39 - 45.