

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.005



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



石灰-木质素改良黏土的动剪切模量特性

周恩全, 刘平, 张曼, 陆建飞

(江苏大学土木工程与力学学院, 江苏镇江 212013)

摘要:将木质素用于土体改良是处置木质素的有效措施之一。为研究石灰-木质素共同改良黏土的效果,开展石灰-木质素改良黏土的共振柱试验,分析固结围压、石灰-木质素掺量对改良土动剪切模量特性的影响,并基于相对结构度方法提出改良土最大动剪切模量的表征模型。结果表明:随着围压的增加,石灰-木质素改良土的最大动剪切模量以及动剪切模量比提高;4%石灰+4%木质素改良土的最大动剪切模量与动剪切模量比均为最高,在300 kPa围压条件下,该改良土的最大动剪切模量较8%石灰改良土提高了17.3%,较纯土提高了185.4%;基于抗剪强度参数提出改良土的相对结构度计算方法,其中4%石灰+4%木质素改良土的相对结构度最大;在Hardin公式基础上引入相对结构度,建立改良土最大剪切模量的表征模型,该模型具有较好的准确性,可为评价石灰-木质素改良黏土的动剪切模量特性提供借鉴。

关键词:石灰-木质素;改良土;动剪切模量;模量比;相对结构度

中图分类号: TU442 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)02-0080-10

Dynamic shear modulus of clay stabilized by lime-lignin

ZHOU Enquan, LIU Ping, ZHANG Man, LU Jianfei

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Using lignin for soil stabilization is one of the effective measures for lignin disposal. In order to study the effect of lime-lignin on stabilizing clay, a set of resonance column tests was conducted on clay stabilized by lime-lignin. The effects of confining pressure and lime-lignin content on the dynamic shear modulus characteristics of the stabilized soil were analyzed. Based on the relative structural degree method, a characterization model for the maximum dynamic shear modulus of the stabilized soil was proposed. The results show that the maximum dynamic shear modulus and dynamic shear modulus ratio of clay stabilized by lime-lignin increase with the increase of confining pressure. The maximum dynamic shear modulus and dynamic shear modulus ratio of 4% lime + 4% lignin stabilized clay are the highest. Under the confining pressure of 300 kPa, the maximum dynamic shear modulus of 4% lime + 4% lignin stabilized clay is 17.3% higher than that of 8% lime stabilized clay and 185.4% higher than that of pure clay. Based on shear strength parameters, the relative structural degree of stabilized soil is calculated and the relative structural degree of 4% lime + 4% lignin stabilized clay is the highest. On the basis of Hardin formula, a characterization model of maximum shear modulus is established by introducing the relative structural degree. The model has good accuracy and can provide a basis for evaluating the

收稿日期: 2023-10-27

基金项目: 南京市交通运输科技项目(2022)

作者简介: 周恩全(1986-),男,博士,副教授,主要从事环境岩土工程及土动力学研究, E-mail: enquan1986@126.com.

Received: 2023-10-27

Foundation item: Nanjing Transportation Technology Project (2022)

Author brief: ZHOU Enquan (1986-), PhD, associate professor, main research interests: environmental geotechnical engineering and soil dynamics, E-mail: enquan1986@126.com.

dynamic shear modulus of clay stabilized by lime-lignin.

Keywords: lime-lignin; stabilized clay; dynamic shear modulus; modulus ratio; relative structural degree

随着道路交通行业的快速高质量发展,对公路路基强度、稳定性及耐久性的要求越来越高,土体改良剂的应用越来越广泛。但传统改良剂在生产使用过程中有一定缺陷:水泥和石灰等在生产过程中能耗大,且会产生 CO_2 、 SO_2 等有害物质^[1-2];经其固化后的土体在冲击荷载下易产生裂纹和破坏,表现出脆性特点^[3],且可能对原生植被生长以及周围环境、土体安全造成不利影响^[4-5]。因此,需要探索经济、环保、高效的新型土体改良剂,以完全或者部分替代传统改良剂。此外,受交通荷载的影响,改良土作为路基填料时的动力特性有待深入探讨。

据统计,目前全球化学浆年产量约1.5亿t,同时产生木质素0.7亿t^[6],其中仅2%的木质素可用于生产其他增值化学品^[7],绝大多数作为低质燃料燃烧或直接作为污染物排放^[8-10],这些处理方法不仅经济效益低,且易污染土壤、水体等^[11]。目前,已有学者关注到木质素可单独或者联合改良土体,并对木质素改良土的动力特性开展了一系列研究。Zhang等^[12]研究了木质素改良黄河粉土的动力特性,结果表明,添加木质素可有效提高粉土的动强度和动剪切模量,且最佳木质素掺量为5%。Chen等^[13]研究了木质素改良粉土在循环荷载作用下的变形特性,结果表明,添加2%木质素可显著改善粉土的动强度和回弹模量。Kim等^[14]计算分析了木质素改良天然路基的力学性能,结果表明,添加木质素可有效提高路基土弹性模量。刘钊钊^[15]研究了木质素改良黄土的动力特性,结果表明,木质素掺量为1%时,改良黄土的动弹性模量达到最大值,动残余应变增幅最小,表现出最佳的动刚度特性。刘尧伍^[16]研究了木质素改良碳酸型盐渍土的动力特性,结果表明,添加木质素能显著提高试样的动剪切模量。Zhang等^[17]、张笑峰^[18]研究了木质素-石灰改良黄河粉土的变形特性,结果表明,木质素(6%)+石灰(3%)改良粉土的回弹模量最大,改良效果最好。刘笑^[19]研究了木质素-石灰改良粉土的动力特性,结果表明,改良剂的掺入会提高土体的动强度,木质素(6%)+石灰(3%)改良粉土的动强度最高。程菲菲^[20]研究了干湿循环作用下木质素-石灰改良粉土的动力特性,结果表明,木质素(6%)+石灰(3%)改良粉土经历1次干湿循环后延性降低、动弹性模量增大,之后,随着干湿循环次数的继续增加,土体循环延性增大、动弹性模量减小。

已有研究表明,木质素的添加可有效提高土体的动强度、动剪切模量等动力性能;且相较于木质素单独改良土体,木质素和石灰共同改良土体的动力性能提升效果更显著。但当前学者们更多关注木质素和石灰共同改良粉土等特殊土的动力性能,对二者共同改良黏土的动力性能研究较少;此外,当前对木质素和石灰共同改良土的研究主要基于室内试验结果进行现象层面的常规阐述,对改良土的细观结构变化,尤其是改良土结构度演变的研究很少。实际上,在土中添加木质素和石灰后,土体细观结构及结构度的演变是造成改良土力学特性得以改善的内在机制。笔者采用共振柱试验仪开展石灰-木质素改良黏土的动力特性研究,分析石灰、木质素掺量和固结围压等因素对石灰-木质素改良土动剪切模量特性的影响规律,基于抗剪强度参数提出石灰-木质素改良土的相对结构度表达式,并基于相对结构度建立了石灰-木质素改良土的最大动剪切模量表征模型。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验所用黏土取自江苏省镇江市江苏大学施工工地,如图1所示。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[21]测定该黏土的液限 W_L 为40.1%,塑限 W_P 为21.6%,塑性指数 I_P 为18.5,比重 G_s 为2.72,最优含水率 w_{op} 为18.4%,最大干密度 γ_{dmax} 为1.82 g/cm³。该黏土为低液限黏土,其颗粒级配曲线如图2所示。



图1 黏土

Fig. 1 Clay

试验所用木质素取自山东省济宁市太阳纸业股份有限公司,见图3。该木质素是天然的高分子聚合物,具有特殊的芳香气味,且黏性较大,溶于水后可形成黑褐色溶液。

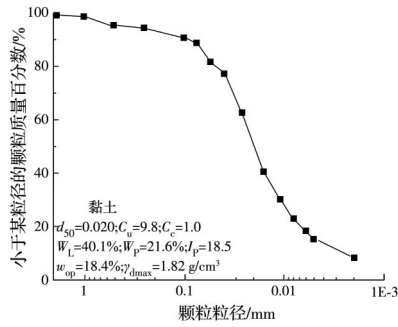


图 2 黏土颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve of clay

试验所用石灰取自江苏省南京市红太阳生物化学有限责任公司,见图4。该石灰为生石灰,石灰含量达99.6%以上,比重为3.4。

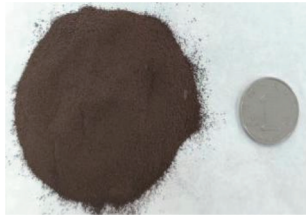


图 3 木质素

Fig.3 Lignin



图 4 石灰

Fig.4 Lime

1.2 试样制备及试验方案

1.2.1 动剪切模量试验

动剪切模量试验根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[21]开展,试验方案如表1所示。试验使用GZZ-50型共振柱试验仪,可在试样未破损情况下采用自由振动法测得试样在小应变范围($5 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-4}$)内的动剪切模量。试验主要考虑石灰掺量、木质素掺量及固结围压等因素的影响。前期预试验证实,8%木质素改良黏土的加

表 1 试验方案

Table 1 Test scheme

试验编号	石灰-木质素掺量	围压/kPa	养护龄期/d
S0M0	0	50、150、300	14
S8M0	8%石灰	50、150、300	14
S6M2	6%石灰+2%木质素	50、150、300	14
S4M4	4%石灰+4%木质素	50、150、300	14
S2M6	2%石灰+6%木质素	50、150、300	14
S0M8	8%木质素	50、150、300	14

州承载比(CBR)达到最大;参考其他学者^[19-20]的研究结果及工程应用需求,试验中石灰、木质素掺量分别设置为0(纯黏土)、8%石灰、6%石灰+2%木质素、4%石灰+4%木质素、2%石灰+6%木质素、8%木质素,试验编号依次为S0M0、S8M0、S6M2、S4M4、S2M6、S0M8(其中S代表石灰,M代表木质素)。固结围压 σ'_c 分别为50、150、300 kPa,养护龄期为14 d;试验控制改良黏土的总质量一致,采用纯黏土的最优含水率 $w_{op}=18.4\%$ 控制加水量,主要试验过程见图5。

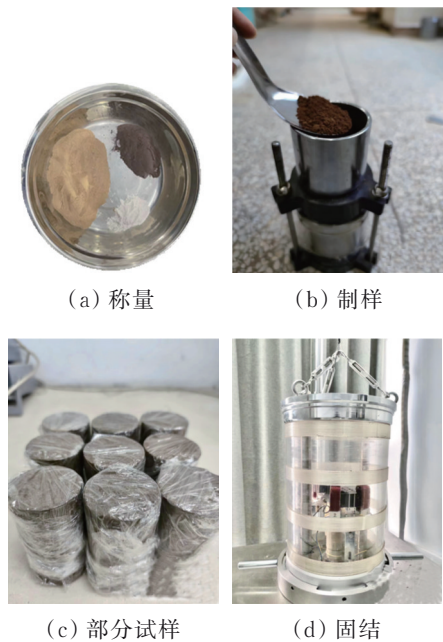


图 5 试样制备及试验过程

Fig. 5 Sample preparation and test process

1)备土、制样。黏土烘干碾碎后过2 mm筛,根据试验方案称取黏土、石灰、木质素并干拌均匀,形成混合土;根据黏土最优含水率称取水,并与混合土充分混合搅拌,随后将石灰-木质素改良黏土装入保鲜袋中,静置1 d。采用击实法分5层制备直径50 mm、高100 mm的圆柱形试样,试验过程中需保证所有试样每层击实功一致,每层击实后将表面刮毛,再进行下一层击实。试样制备完成后用保鲜袋密封包裹,置于标准养护箱内养护至14 d预定龄期(养护温度为 $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$,相对湿度 $\geq 95\%$)。

2)固结、试验。将养护完成后的试样安装于GZZ-50型共振柱试验仪,打开排水阀进行排水固结,固结围压设定为50、150、300 kPa;固结时长为12 h,达到1 h内固结排水量变化不大于 0.1 cm^3 的稳定标准。固结完成后,关闭排水阀并对试样施加剪切激振,完成试验。

1.2.2 SEM 试验

扫描电镜(SEM)测试按照 Hitachi Regulus8100 型扫描电子显微镜的操作说明开展。石灰与木质素掺量、养护龄期以及备土、制样、养护的操作流程均与动剪切模量试验保持一致。对养护完成后的试样进行脱水、喷金处理,制成标准试样后开展 SEM 试验,如图 6 所示。

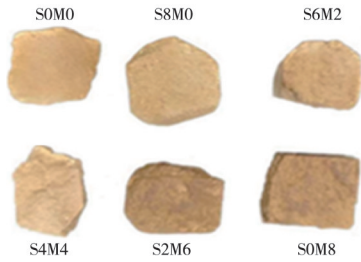


图 6 扫描电镜试样
Fig. 6 SEM specimens

2 最大动剪切模量及动剪切模量比

2.1 最大动剪切模量

图 7 为石灰-木质素改良黏土的动剪切模量 G_d 随剪应变 γ_d 的变化曲线。由图 7 可知,在 $5 \times 10^{-6} \leq \gamma_d \leq 5 \times 10^{-4}$ 范围内,石灰-木质素改良黏土的动剪切模量 G_d 随动剪应变 γ_d 的增大而降低,这符合一般黏土的动变形特性。改良土的骨架曲线符合双曲线模式^[22],其表达式为

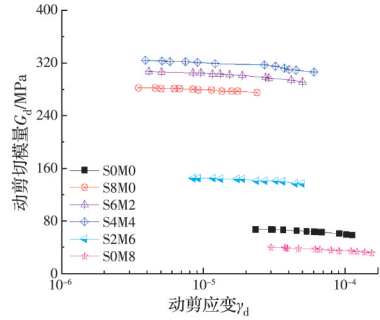
$$\frac{1}{G_d} = a + b\gamma_d \quad (1)$$

式中: a 、 b 为无量纲拟合参数,其中 a 为 $\frac{1}{G_d}$ - γ_d 关系直线的截距, b 为 $\frac{1}{G_d}$ - γ_d 关系直线的斜率。当 $\gamma_d = 0$ 时,可得最大剪切模量 $G_{max} = 1/a$ 。

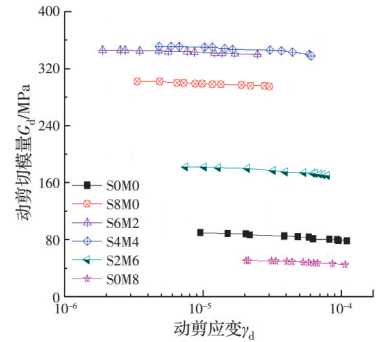
图 8 为石灰-木质素改良土最大动剪切模量 G_{max} 与固结围压 σ'_c 、改良剂掺量的关系。由图 8 可知:

1)在相同石灰-木质素掺量下,改良土的最大动剪切模量 G_{max} 随固结围压 σ'_c 的增大而增大。产生该现象的原因在于,固结围压 σ'_c 越大,土体受到的侧向约束力越强,对土体的挤压作用也随之增强,促使土体颗粒间接触更为紧密,颗粒间咬合力提升,进而增强试样抵抗剪切变形的能力,最终表现为试样的最大动剪切模量 G_{max} 增大。

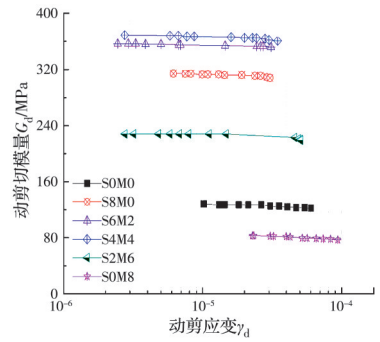
2)在相同固结围压 σ'_c 下,改良土的最大动剪切模量 G_{max} 由高到低分别为 S4M4、S6M2、S8M0、S2M6、S0M0、S0M8。其中,4% 石灰+4% 木质素改良土的 G_{max} 最高,显著高于 8% 石灰改良土;8% 木质素改良土的 G_{max} 最低。以 $\sigma'_c = 300$ kPa 为例,



(a) 围压为 50 kPa



(b) 围压为 150 kPa



(c) 围压为 300 kPa

图 7 石灰-木质素改良黏土动剪切模量与剪应变的关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between dynamic shear modulus and shear strain of lime-lignin stabilized clay

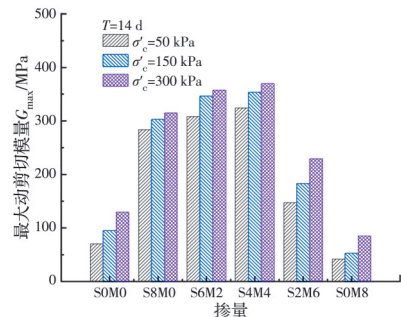


图 8 最大动剪切模量与石灰、木质素掺量的关系

Fig. 8 Relationship between maximum dynamic shear modulus and lime-lignin content

S4M4 的 G_{max} 相比 S8M0 提高了 17.3%, 相比 S0M0 提高了 185.4%。上述结果表明,木质素可代替部分石灰用于黏土改良,且该复掺方案能显著提高改良土的最大动剪切模量,实现更好的改良效果。

2.2 动剪切模量比

采用动剪切模量比 G_d/G_{max} 来描述石灰-木质素改良黏土动剪切模量的衰退特性。引入 Martin 等^[23] 提出的 Davidenkov 模型, 描述改良土动剪切模量比 G_d/G_{max} 随剪应变的变化关系, 其表达式为

$$\frac{G_d}{G_{max}} = 1 - \left[\frac{\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_0} \right)^{2B}}{1 + \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_0} \right)^{2B}} \right]^A \quad (2)$$

式中: A 、 B 及 γ_0 为与土性相关的无量纲拟合参数。

图 9 为相同石灰-木质素掺量下, 固结围压 σ'_c 对改良土动剪切模量比 G_d/G_{max} 与动剪应变 γ_d 关系的

影响规律。由图 9 可知, 在小应变范围 ($10^{-6} \sim 10^{-4}$) 内, 试验点与模型曲线的拟合性较好, 改良土的模量比 G_d/G_{max} 随动剪应变 γ_d 的增大而减小。后期将进一步开展大应变范围 ($10^{-4} \sim 10^{-2}$) 的试验, 以验证模型的适用性。在相同石灰-木质素掺量下, 随着固结围压 σ'_c 的增加, 动剪切模量比 G_d/G_{max} 随动剪应变 γ_d 的衰减速度变得缓慢, 即固结围压 σ'_c 越高, 改良土的动剪切模量比 G_d/G_{max} 越大。这一现象的内在机理为: 围压 σ'_c 增大时, 改良土颗粒间的结合更紧密, 颗粒间摩擦力随之增强, 进而提升了改良土的整体刚度。

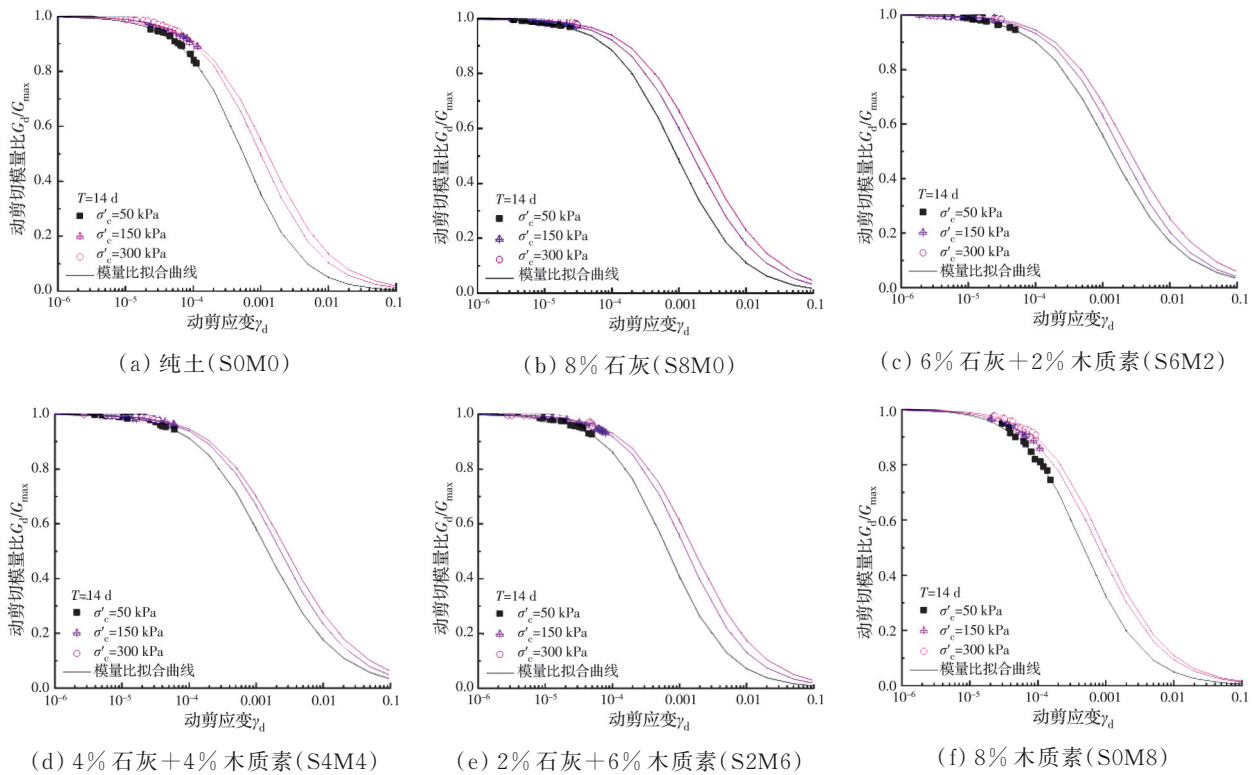


图 9 固结围压对动剪切模量比发展曲线的影响

Fig. 9 Effect of consolidation confining pressure on the development curves of dynamic shear modulus ratio

图 10 为相同固结围压 σ'_c 下石灰-木质素掺量对改良土动剪切模量比 G_d/G_{max} 与动剪应变 γ_d 关系曲线的影响规律。由图 10 可知, 在不同石灰-木质素掺量下, 改良土的动剪切模量比 G_d/G_{max} 衰减曲线存在明显差异; 其中, 石灰改良土、石灰-木质素改良土的模量比衰减曲线均高于纯黏土, 而木质素改良土的模量比衰减曲线低于纯黏土。4% 石灰+4% 木质素改良土的动剪切模量比 G_d/G_{max} 最高, 6% 石灰+2% 木质素改良土次之, 这与石灰-木质素掺量对最大动剪切模量的影响规律一致。

3 基于结构度的最大动剪切模量表征

3.1 改良土的微观结构特征

图 11 为 4 个典型试样在 3 000 倍放大倍数下的扫描电镜 (SEM) 微观结构图, 图 12 为改良土微观特征示意图。结合图 11、图 12 的观测结果, 对改良土的微观结构演变规律阐述如下:

1) S0M0 (纯黏土) 试样的微观结构主要由片状土颗粒及孔隙组成。

2) 与 S0M0 相比, 试样 S0M8 (木质素改良土) 中胶结物显著增加, 这些胶结物使土颗粒间产生联结, 使得较小的颗粒联结成较大的团聚物。需要说

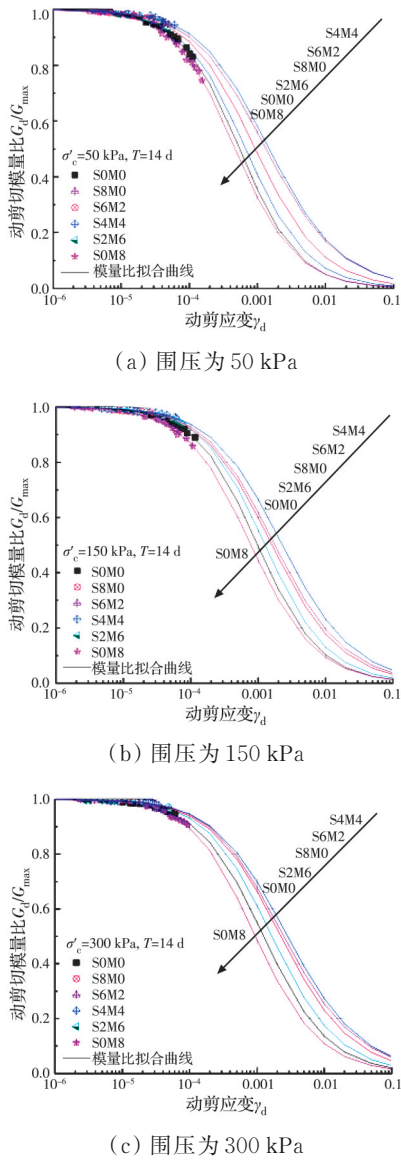
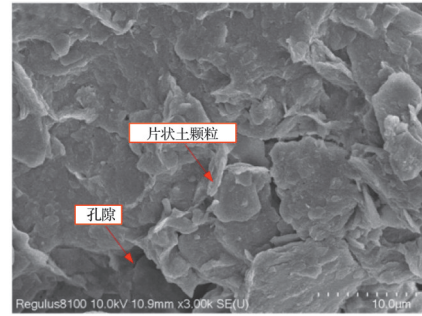


图 10 石灰-木质素掺量对动剪切模量比发展曲线的影响
 Fig. 10 Effect of lime-lignin content on the development curves of dynamic shear modulus ratio

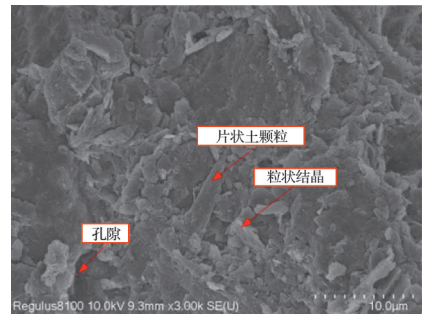
明的是,控制石灰、木质素和黏土的总质量不变,木质素或石灰的掺入,会相应减少黏土的质量占比。木质素激发产生的胶结物对动剪切模量的提升作用,弱于黏土占比降低所引发的动剪切模量衰减作用,最终造成改良土动剪切模量的降低。

3)石灰掺入土体后,与 SOM0 相比,试样 S8M0 (石灰改良土)中粒状结晶显著增加,这是碳化作用、离子交换与颗粒凝聚效应共同作用的结果。此类粒状结晶可填充土颗粒间的孔隙,增大颗粒间摩擦力。此外,石灰的掺入还会对改良土体产生膨胀挤密作用^[24];同时,石灰与土体成分反应生成的水化硅酸钙、水化铝酸钙会在土颗粒周围形成一层保护膜,增强颗粒间的黏着力并填充孔隙,从而增加土体的密实度^[25]。上述多重作用对动剪切模量的提升

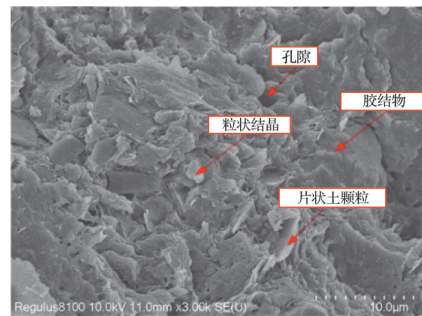
效果强于黏土占比的减少对动剪切模量的降低效果,最终促使改良土的动剪切模量的升高。



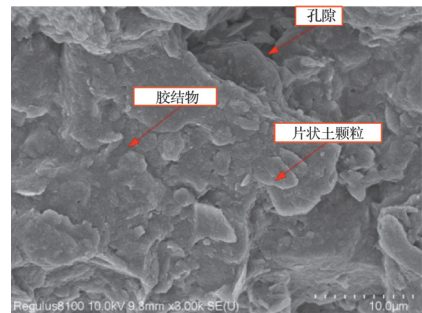
(a) SOM0



(b) S8M0



(c) S4M4



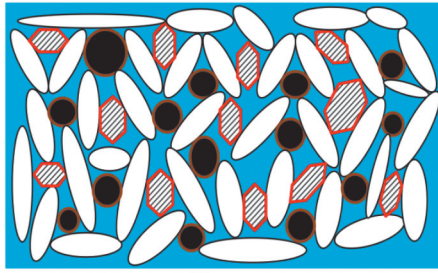
(d) SOM8

图 11 不同掺量石灰-木质素改良土的扫描电镜图像
 Fig. 11 SEM images of lime-lignin stablized clay with different contents

4)与 SOM0 相比,试样 S4M4 (石灰-木质素改良土)中粒状结晶和胶结物含量增加。该试样除了具备 SOM8 (木质素改良土)和 S8M0 (石灰改良土)单独改良的效果外,木质素掺入土体后还会发生水解

反应,释放水分以促进石灰与土体的反应。上述效应的联合作用显著提升了改良土的动剪切模量特性,进而使得试样 S4M4 的动剪切模量提升效果最优。

改良土细观结构的演变特征一定程度上反映了其动剪切模量的演化规律,因此,进一步提出基于结构性理论的改良土动剪切模量表征方法。



图例: ○片状土颗粒 ●胶结物 ▨粒状结晶 ■孔隙

图 12 改良土细观特征示意图

Fig. 12 Schematic diagram of mesoscopic characteristics of stabilized clay

3.2 基于抗剪强度参数的相对结构度表达方法

谢定义等^[26]基于压缩试验定义了综合结构势,以此表征土体在压缩试验条件下的结构性特征。在此基础上,侯天顺等^[27]基于无侧限抗压强度试验提出了轻量土的相对结构度计算方法,其表达式为

$$k = \frac{q_u'}{q_u} \quad (3)$$

式中: q_u' 为不同配比重量土的无侧限抗压强度; q_u 为最优含水率下纯土的无侧限抗压强度。

试样所受动剪切作用与压缩试验、无侧限抗压试验中试样的受力特征有显著差异。因此,依据土体极限平衡理论,构建基于抗剪强度参数的土体相对结构度指标,以此表征改良土的结构特征。

已知土体处于极限平衡状态的条件为

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (4)$$

由于式(3)中相对结构度表达的是土体无侧限状态下的结构特征,即 $\sigma_3=0$ 、 $\sigma_1=q_u$,因此可将式(4)改写为

$$q_u = 2c \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),即可得到基于抗剪强度参数的改良黏土相对结构度表达式

$$k = \frac{q_u'}{q_u} = \frac{c' \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right)}{c \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (6)$$

式中: c 、 φ 为最优含水率下纯土的抗剪强度参数; c' 、 φ' 为不同改良剂掺量下改良土的抗剪强度参数。

对养护 14 d 后的试样 S0M0、S8M0、S6M2、S4M4、S2M6、S0M8 开展直接剪切试验,设定法向应力为 100、200、300、400 kPa,剪切速率为 0.8 mm/min。表 2 为各掺量下基于抗剪强度参数的改良黏土相对结构度 k 的计算结果。由表 2 可知,当改良土的黏聚力与内摩擦角提升至最大值时,其相对结构度也达到最高水平。这是由于该状态下改良土颗粒间的联结作用最强,木质素生成的胶结物和石灰生成的粒状结晶能有效包裹、联结土颗粒,实现改良土孔隙的充分填充,最终体现为动剪切模量与相对结构度的最大值均在试样 S4M4 中出现。此外还发现 8% 木质素改良黏土的相对结构度最小。

表 2 石灰-木质素改良黏土的相对结构度

Table 2 Relative structural degree of lime-lignin stabilized clay

试验编号	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	相对结构度
S0M0	44.26	25.08	1
S8M0	114.24	40.01	3.522
S6M2	192.87	41.02	6.085
S4M4	240.63	43.08	7.969
S2M6	145.05	32.86	3.828
S0M8	38.07	7.74	0.627

3.3 基于相对结构度的最大动剪切模量表征方法

依据骨架曲线的双曲线模型,计算得到改良土的最大动剪切模量 G_{\max} ;参考 Hardin 等^[28]提出的土体最大动剪切模量的经验公式

$$G_{\max} = A \cdot F(e) \cdot R_{oc}^n \cdot (\sigma_c')^{0.5} \quad (7)$$

式中: A 为材料参数; $F(e)$ 为与土孔隙比有关的函数,对于黏性土, $F(e) = (2.97 - e)^2 / (1 + e)$; R_{oc} 为土的超固结比; n 为与黏性土塑性指数 I_p 有关的常数,按经验取值。

为实现不同掺量改良土最大动剪切模量 G_{\max} 的统一表达,基于式(7),引入改良土相对结构度 k 和孔隙比 e ,则石灰-木质素改良土的最大动剪切模量 G_{\max} 可表示为

$$\begin{cases} G_{\max} = \mu \cdot k^{n_1} F(e) \cdot (\sigma_c')^{n_2} \\ F(e) = e^{n_1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: k 为改良土的相对结构度,可由式(6)求得,结果见表 2; e 为孔隙比,可由式(9)计算; μ 、 n_1 、 n_2 为与改良土性质有关的拟合参数。

$$e = \frac{v_v}{v_t + v_s + v_m} = \frac{v - (v_t + v_s + v_m)}{v_t + v_s + v_m} \quad (9)$$

式中: v 为试样总体积; v_v 为改良黏土的孔隙体积; v_t 为土颗粒体积; v_s 为石灰颗粒体积; v_m 为木质素颗粒体积。

将相关试验数据代入式(8),采用非线性最小二乘法进行多元拟合,得到拟合参数: $\mu = 364.86$ 、 $n_1 = 0.63$ 、 $\eta_1 = 2.34$ 、 $n_2 = 0.1$,模型决定系数 $R^2 = 0.989$ 。最终得到石灰-木质素改良土的最大动剪切模量表征模型,见式(10)。

$$G_{\max} = 364.86 \cdot k^{0.63} \cdot e^{2.34} \cdot (\sigma'_c)^{0.1} \quad (10)$$

图13为基于表征模型式(10)计算得到的最大动剪切模量 G_{\max} 预测值与试验值的误差图。可见,表征模型预测值的误差绝大部分在8.5%以内,散点在45°对角线两侧均匀分布。因此,该模型能够有效表征石灰-木质素改良土的最大动剪切模量 G_{\max} 与相对结构度、孔隙比、固结围压之间的关系,具有一定的准确性与合理性。

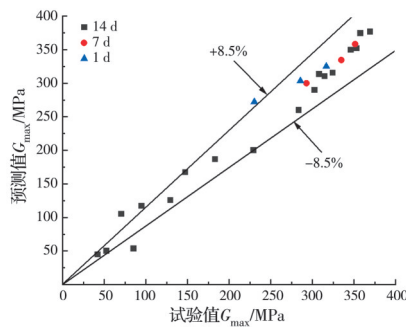


图13 最大动剪切模量计算结果误差图

Fig. 13 Error diagram of calculation results for maximum dynamic shear modulus

为验证式(10)的适用性,对养护龄期1、7 d的试样S6M2开展验证试验。结果显示,在50、150、300 kPa围压下,该表征模型预测值的误差均在8.5%以内,表明在石灰和木质素总量为8%的条件下式(10)能够有效预测改良土的最大动剪切模量。

4 结论

以石灰-木质素改良黏土为研究对象,系统研究改良土的动剪切模量特性,并基于相对结构度提出改良土最大动剪切模量的表征方法,主要结论如下:

1)4%石灰+4%木质素改良土的最大动剪切模量以及动剪切模量比最高;在300 kPa围压下,4%石灰+4%木质素改良土的最大动剪切模量相比8%石灰改良土提高了17.3%,相比纯土提高了185.4%,表明采用木质素部分替代石灰用于改良黏土可得到更好的改良效果。

2)在黏土中添加石灰-木质素产生的粒状结晶、胶结物等物质改善了黏土的细观结构特性;基于抗剪强度参数建立了改良土相对结构度的计算方法,结果显示,4%石灰+4%木质素改良土的相对结构度最大。

3)在Hardin公式基础上引入相对结构度,建立了石灰-木质素改良土最大动剪切模量的表征模型,该模型能合理表征改良黏土的最大动剪切模量与固结围压、孔隙比及相对结构度的关系。

4)以4%石灰+4%木质素作为复合改良剂可显著提升黏土的动剪切模量,且提升效果优于8%石灰。因此,以4%石灰+4%木质素改良黏土作为路基填料可明显改善路基的动变形特性,并在一定程度上减少石灰用量,减轻石灰生产与使用过程中造成的环境问题,具有可观的应用前景。需要指出的是,研究结果是基于石灰和木质素掺加总量为8%得到的,需进一步开展相关试验,拓展研究结果的适用性。

参考文献

- [1] 陈斌,王高强,刘春,等.木质素改良土抗剪强度参数试验研究[J].北方交通,2021(7):51-54.
CHEN B, WANG G Q, LIU C, et al. Experimental study on shear strength parameters of lignin improved soil [J]. Northern Communications, 2021(7): 51-54. (in Chinese)
- [2] 赵之,杨秀娟,石庆红,等.磷石膏/木质素固化铅污染土的无侧限抗压强度[J].土木与环境工程学报(中英文),2025,47(1):89-99.
ZHAO Z, YANG X J, SHI Q H, et al. Unconfined compressive strength of phosphogypsum/lignin solidified lead contaminated soil [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(1): 89-99. (in Chinese)
- [3] TA' NEGONBADI B, NOORZAD R. Physical and geotechnical long-term properties of lignosulfonate-stabilized clay: An experimental investigation [J]. Transportation Geotechnics, 2018, 17: 41-50.
- [4] CHEN Q S, INDRARATNA B, CARTER J, et al. A theoretical and experimental study on the behaviour of lignosulfonate-treated sandy silt [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61: 316-327.
- [5] 王欢,曹素娟,曹义康,等.木质素改良膨胀土的工程特性及微观机理[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(6):9-15.
WANG H, CAO S J, CAO Y K, et al. Engineering characteristics and microscopic mechanism of lignin ame-

- liorating expansive soil [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(6): 9-15. (in Chinese)
- [6] 魏文慧, 平清伟, 盛雪茹, 等. 木质素型橡胶助剂的研究进展[J]. *中国造纸*, 2021, 40(8): 83-89.
WEI W H, PING Q W, SHENG X R, et al. Research progress of lignin as additive in rubber composites [J]. *China Pulp & Paper*, 2021, 40(8): 83-89. (in Chinese)
- [7] AHMAD U M, JI N, LI H Y, et al. Can lignin be transformed into agrochemicals? Recent advances in the agricultural applications of lignin [J]. *Industrial Crops and Products*, 2021, 170: 113646.
- [8] 王才威, 杨东杰, 邱学青, 等. 木质素多孔碳材料在电化学储能中的应用[J]. *化学进展*, 2022, 34(2): 285-300.
WANG C W, YANG D J, QIU X Q, et al. Applications of lignin-derived porous carbons for electrochemical energy storage [J]. *Progress in Chemistry*, 2022, 34(2): 285-300. (in Chinese)
- [9] 李鹏辉, 吴彩文, 刘宸, 等. 木质素复合水凝胶性能及应用的研究进展[J]. *生物工程学报*, 2022, 38(7): 2489-2498.
LI P H, WU C W, LIU C, et al. The performance and applications of lignin based hydrogels: A review [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2022, 38(7): 2489-2498. (in Chinese)
- [10] 周姚红, 张晓华, 熊万明. 木质素催化氧化制备芳香醛研究进展[J]. *精细化工*, 2022, 39(3): 442-453.
ZHOU Y H, ZHANG X H, XIONG W M. Research progress of preparation of aromatic aldehydes by catalytic oxidation of lignin [J]. *Fine Chemicals*, 2022, 39(3): 442-453. (in Chinese)
- [11] The pulp, paper and paperboard point source category: 40-CFR-430 [S]. Washington D.C., U.S. Environmental Protection Agency, 2024.
- [12] ZHANG J W, HAN Y, WANG X J, et al. Experimental investigation of the dynamic characteristics of treated silt using lignin: Case study of Yellow River flood basin [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(5): 04021056.
- [13] CHEN Q S, INDRARATNA B. Deformation behavior of lignosulfonate-treated sandy silt under cyclic loading [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, 141(1): 06014015.
- [14] KIM S, GOPALAKRISHNAN K, CEYLAN H. Impact of bio-fuel co-product modified subgrade on flexible pavement performance [C]//*GeoCongress 2012*. Oakland, California, USA. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2012.
- [15] 刘钊钊. 木质素改良黄土力学特性及加固机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
LIU Z Z. Mechanical properties and reinforcement mechanism of lignin-modified loess [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020. (in Chinese)
- [16] 刘尧伍. 无磺木质素加固碳酸型盐渍土工程效果与机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
LIU Y W. Effective assessment and stabilization mechanism of sulfur-free lignin-stabilized soda alkaline soil [D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [17] ZHANG X F, ZHANG Y M, LIU X, et al. Shake-down behavior of Yellow River alluvial silt stabilized with lignin-lime combined additive [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(1): 04019318.
- [18] 张笑峰. 长期循环荷载作用下木质素-石灰改良粉土变形特性研究[D]. 山东 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
ZHANG X F. Study on deformation characteristics of lignin-lime improved silt under long-term cyclic load [D]. Qingdao, Shandong: China University of Petroleum (Huadong), 2019. (in Chinese)
- [19] 刘笑. 木质素改良粉质铁路路基土力学特性研究[D]. 山东 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
LIU X. Study on mechanical properties of lignin modified silty railway subgrade soil [D]. Qingdao, Shandong: China University of Petroleum (Huadong), 2018. (in Chinese)
- [20] 程菲菲. 干湿循环作用下木质素-石灰改良粉土的力学特性研究[D]. 山东 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
CHENG F F. Study on mechanical properties of lignin-lime improved silt under dry-wet cycle [D]. Qingdao, Shandong: China University of Petroleum (Huadong), 2019. (in Chinese)
- [21] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [22] KONDRER R L. Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1963, 89(1): 115-143.
- [23] MARTIN P P, SEED H B. One-dimensional dynamic ground response analyses [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1982, 108(7): 935-952.
- [24] 杨志强, 郭见扬. 石灰处理土的物理力学性质及其微观机理的研究[J]. *岩土力学*, 1991, 12(3): 11-23.
YANG Z Q, GUO J Y. The physio-mechanical properties and micro-mechanism in lime-soil system [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1991, 12(3): 11-23. (in Chinese)

- [25] 杨爱武,王韬,许再良. 石灰及其外加剂固化天津滨海软土的试验研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(5): 996-1004.
YANG A W, WANG T, XU Z L. Experimental study on lime and its additional agent to cure Tianjin marine soft soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(5): 996-1004. (in Chinese)
- [26] 谢定义,齐吉琳. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651-656.
XIE D Y, QI J L. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 651-656. (in Chinese)
- [27] 侯天顺,崔奕翔. EPS颗粒混合轻量土的动力变形特性及修正Hardin-Drnevich模型研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1602-1611.
HOU T S, CUI Y X. Dynamic deformation characteristics and modified Hardin-Drnevich model for light weight soil mixed with EPS particles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(9): 1602-1611. (in Chinese)
- [28] HARDIN B O, BLACK W L. Vibration modulus of normally consolidated clay [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(2): 353-369.

(编辑 朱备)