

DOI: 10.11779/CJGE2023S20034

# 木质素改良黄土动本构关系研究

王谦<sup>1</sup>, 刘钊钊<sup>2,3</sup>, 王兰民<sup>1</sup>, 王妍<sup>1</sup>, 马婧<sup>1</sup>, 胡雪枫<sup>1</sup>, 钟秀梅<sup>\*1</sup>

(1. 甘肃省地震局中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000;  
3. 四川大学水利水电学院水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 为有效改善黄土的动力易损性, 选取新型环保加固材料木质素作为改良材料。基于室内试验, 研究了不同掺量木质素改良黄土的动本构关系, 分析了不同木质素掺量的改良黄土的滞回曲线特性和阻尼特性, 并基于试验结果提出了考虑木质素掺量的改良黄土 Hardin-Drnevich 改进模型。研究表明: 不同木质素掺量的改良黄土骨干曲线具有显著差异, 同等动应力条件下, 掺量 1% 的改良黄土的动应变最小。不同掺量的木质素改良黄土的阻尼比曲线和滞回曲线均具有显著差异, 掺量 1% 的木质素改良黄土的滞回圈长轴更短, 形状更为扁窄, 面积更小。木质素改良黄土的阻尼比随木质素掺量的增加具有先减小后增大的特点, 1% 掺量的木质素改良黄土的阻尼比最小。木质素改良黄土动本构关系符合 Hardin-Drnevich 双曲线模型, 并可在模型中引入木质素掺量  $m$  作为参数, 得出相关性良好的 Hardin-Drnevich 改进模型。木质素可有效改善黄土的抗变形能力和动刚度, 但木质素掺量的持续增加不会导致其动力特性的持续增强。  
**关键词:** 动三轴试验; 骨干曲线; 滞回曲线; Hardin-Drnevich 模型; 动刚度

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S2-0235-06

**作者简介:** 王谦(1985—), 男, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事岩土地震工程方面的研究工作。E-mail: wangq0930@126.com。

## Dynamic constitutive relationship of lignin-modified loess

WANG Qian<sup>1</sup>, LIU Zhaozhao<sup>2,3</sup>, WANG Lanmin<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, MA Jing<sup>1</sup>, HU Xuefeng<sup>1</sup>, ZHONG Xiumei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou 730000, China; 2. Department of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** To effectively improve the dynamic vulnerability of loess, lignin is selected as the environmentally friendly material to enhance the loess. Based on the dynamic triaxial tests, the dynamic constitutive relationship of lignin-modified loess is studied. A Hardin-Drnevich modified model considering the lignin content is discussed. The results show that the backbone curves of the modified loess with different lignin contents have significant differences. Under the same dynamic stress, the dynamic strain of modified loess with lignin content of 1% is the smallest. The hysteresis curves and the damping ratio-dynamic strain curves of the modified loess with different lignin contents have significant differences. The long axis of the hysteretic cycle of modified loess with lignin content of 1% is shorter, the shape is narrower, and the area is smaller. The damping ratio of the modified loess increases firstly with the increase of the lignin content, and it has a peak when the lignin content is 1%. The dynamic constitutive relationship of the lignin-modified loess conforms to the Hardin-Drnevich hyperbolic model, and the lignin content  $m$  can be introduced into the model to obtain a well-correlated Hardin-Drnevich modified model. The lignin can effectively improve the dynamic deformation resistance, seismic performance and dynamic stiffness of loess. However, the continuous increase of lignin content doesn't lead to the continuous improvement of dynamic characteristics.

**Key words:** dynamic triaxial test; backbone curve; hysteretic curve; Hardin-Drnevich model; dynamic stiffness

## 0 引言

黄土是广泛分布于中国北方地区的一种特殊的第四纪松散沉积物, 以粉粒为主, 多架空孔隙, 胶结性差, 富含易溶性盐, 具有湿陷性、强水敏性和振敏性等不良工程特性, 其在中国黄土高原地区分布厚度大,

连续分布范围广, 地形地貌极其复杂。作为中国西部

**基金项目:** 甘肃省地震局创新团队专项(2020TD-01-01); 地震科技发展基金项目(2022S02); 国家自然科学基金项目(51778590); 地震科技星火计划项目(XH20057, XH21034)

**收稿日期:** 2023-11-30

\*通信作者(E-mail: xmzhong26@163.com)

山地与东部平原的重要转换区域,黄土高原地质构造复杂、新构造活动强烈,历史上曾多次发生强震<sup>[1]</sup>。因此,黄土的不良工程性质与黄土高原高危的地震活动背景,共同决定了黄土高原地区以滑坡、震陷和液化为代表的岩土地震地质灾害十分发育,严重威胁着黄土地区城乡建(构)筑物、基础设施安全。

对黄土进行抗震加固处理,可有效改善黄土的动力易损性。作为一种新型固体废弃物改良材料,提取自造纸厂制浆废液中的木质素具备的黏结性、螯合性和抗腐蚀性等优势可有效改善黄土的胶结强度<sup>[2]</sup>,且符合绿色发展的岩土发展新趋向。有关木质素改良黄土的研究已有开展,多数研究针对了改良黄土的抗压强度、抗剪强度及其影响因素,并对木质素加固黄土的机理进行了研究<sup>[3-10]</sup>。然而,有关木质素改良黄土动力特性及其动本构关系的研究仍不多见。

土的动本构关系是表征土体动力特性的基本关系,也是分析土体非线性特性和动力失稳过程的重要基础<sup>[1]</sup>。将新型环保加固材料木质素应用到黄土改良加固中,基于动三轴试验,研究了木质素改良黄土的动应力-动应变关系,分析了木质素改良黄土的滞回曲线特征,探讨了木质素掺量对滞回曲线的影响,验证了木质素改良黄土动本构关系服从 Hardin-Drnevich 双曲线模型,分析了木质素掺量对模型参数的影响,并在双曲线模型中引入木质素掺量作为参数,得出了木质素改良黄土 Hardin-Drnevich 改进模型,并验证其适用性。

## 1 试验材料及试验方法

### 1.1 试验材料

试验所用黄土取自宁夏回族自治区西吉县,取土深度为 3 m,按照《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)<sup>[11]</sup>测试黄土基本物理性质(表 1)。黄土中砂粒(>0.075 mm)、粉粒(0.005~0.075 mm)和黏粒(<0.005 mm)含量分别为 13.7%, 80.2%和 6.1%。

表 1 试验所用黄土基本物理性质

Table 1 Physical parameters of tested loess

密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/ %	液限/ %	塑限 /%	相对质量 密度
1.35	5.21	24.0	14.5	2.72

试验所用木质素为福建某造纸厂的造纸副产品提纯物,呈黄褐色粉末状固体,具芳香气味,存在较大的黏性,可溶于水,无毒性,由粒径不同、形状各具差异的细小颗粒组成。该木质素中主要含醇羟基(-OH, 3385 cm<sup>-1</sup>)、苯环 C=C 键(653, 780, 159 cm<sup>-1</sup>)、烷烃(C-H(CH<sub>2</sub>), 1417, 2974 cm<sup>-1</sup>)、伯醇(R1-CH<sub>2</sub>-OH, 1051 cm<sup>-1</sup>)和仲醇(R1-CH(R<sub>2</sub>)-OH,

1090 cm<sup>-1</sup>)等活性官能团。

### 1.2 试验方法

对试验所用黄土进行风干、碾碎和过筛,根据预先设定的木质素和黄土的质量比(0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 3%, 4%)<sup>[5-8]</sup>称取一定质量的木质素和黄土进行充分拌合。根据击实试验得到的试验所用黄土最优含水率 14.6%,向干拌均匀的混合土料中加入相应质量的蒸馏水,再次充分拌合,密封静置 24 h 待水分迁移均匀后将其装入直径为 50 mm 的圆柱型模具中,采用两端静压的方式制备预定干密度的改良黄土试样。为保证各组试样的可对比性,压实度均设定为 95%,试样高度均为 100 mm。采用薄膜包裹成型试样并置于标准养护条件(温度 20±2°C、相对湿度≥95%)下进行养护至 28 d 后进行动三轴试验。

动三轴试验遵从《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)<sup>[11]</sup>中的振动三轴试验进行,动三轴试验设备为 Wykeham Farrance 12440 型动三轴-扭剪试验系统。试验过程分为固结和循环剪切 2 个步骤,固结过程采用各项异性固结,考虑试验结果的可对比性,固结比均取 0.59,固结和循环剪切过程中均不排水,循环荷载采用频率为 1 Hz 的正弦波,每级荷载振动 10 次,试验中实时记录动应力和动应变的变化。

## 2 木质素改良黄土的动本构关系

### 2.1 骨干曲线特征

骨干曲线为土体不同动应力幅值作用下相同振次的动应力和动应变关系曲线,体现出土体在动荷载作用下的非线性特征。为便于对比研究,选用每级动荷载下第 5 次的动应变数据,得出木质素改良黄土的动应力-动应变曲线如图 1 所示。

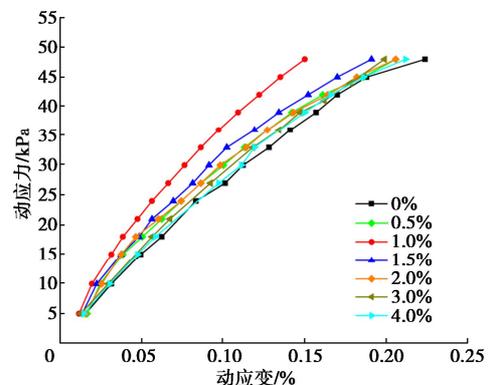


图 1 木质素改良黄土动应力-动应变曲线

Fig. 1  $\sigma_d$ - $\varepsilon_d$  curves of lignin-modified loess

由图 1 可知,木质素改良黄土的动应变随着动应力的逐级增加均呈现出明显的逐渐增大的趋势,但由

于木质素掺量差异, 改良黄土的动应力-动应变曲线具有较大不同。在动应力加载初期, 改良黄土动应力-动应变曲线已存在较大差异, 掺量 1% 的改良黄土动应变增长缓慢, 而掺量 3%, 4% 的改良黄土以及重塑黄土动应变迅速增长且骨干曲线几乎完全重合; 随着动应力的持续加载, 改良黄土动应力-动应变曲线差异性逐渐增强, 同等动应力条件下, 掺量 1% 的改良黄土动应变最小, 表现出了较好的抗动变形能力。而重塑黄土动应变最大, 抗动变形能力最差。

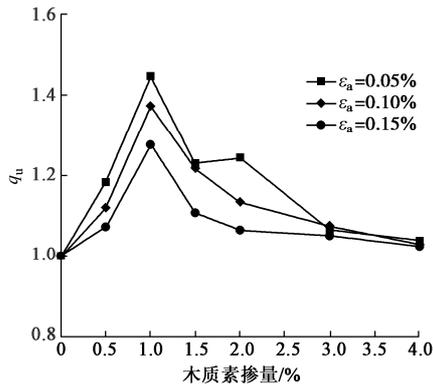


图 2 改良黄土的动应力比与木质素掺量的关系曲线

Fig. 2  $q_u$  versus lignin content of lignin-modified loess

图 2 为不同动应变水平下改良黄土的动应力比  $q_u$  与木质素掺量的关系, 其中动应力比  $q_u$  为同一动应变水平下木质素改良黄土与重塑黄土的动应力之比。根据图 2 可知, 不同动应变水平下, 改良黄土的动应力比随木质素掺量的增加先增加后减小, 在木质素掺量 1% 左右时达到最大值, 在木质素掺量大于 3% 后与素土相近。随着动应变的增加, 不同掺量的木质素改良黄土的动应变比均减小。结合后文图 4, 重塑黄土虽经压实处理, 但土体内部依然存在较多孔隙, 且颗粒间的胶结物质较少, 骨架结构较为脆弱, 稳定性较差<sup>[7]</sup>, 在动荷载作用下结构迅速劣化。其动应变随着动应力的增加增长较为迅速, 骨干曲线最低。当木质素掺量低于 1% 时, 由于少量的木质素无法对土体内部的大孔隙进行充分填充, 并且其无法充分胶结颗粒、加固黄土骨架<sup>[4, 7]</sup>, 因此动应变依然较快增长, 但骨干曲线高于重塑黄土, 表明其抗动变形的能力较重塑黄土趋于优良。在掺量 1% 左右时, 木质素的填充孔隙和胶结颗粒效果达到最好, 土体结构稳定性明显增强<sup>[7]</sup>, 表现出了良好的抗动变形能力, 动荷载作用下的动应变增长缓慢, 骨干曲线最高。当木质素掺量超过 1% 时, 过多的木质素颗粒充盈于改良黄土中, 此时木质素颗粒由于其黏结性和整合性会优先于自身集合, 使得其加固土体的效果被弱化<sup>[3]</sup>; 同时, 过多的木质素颗粒会增大黄土颗粒的间距, 导致颗粒间的吸引力降低, 此时木质素由“胶结作用”转变为“润滑作用”

<sup>[3, 10]</sup>, 导致改良黄土在动荷载作用下动应变增长迅速, 其骨干曲线较 1% 掺量木质素改良黄土的骨干曲线低, 抗动变形能力趋于弱化。

## 2.2 滞回曲线特征

滞回曲线是指土体在承受循环荷载时, 一个周期荷载作用下的应力应变关系所组成的滞回圈, 体现出应力应变的滞后性与土体的黏滞特性。根据动应力-动应变分析结果, 选择 1% 掺量的木质素改良黄土在动荷载 10, 21, 30, 39, 48 kPa 条件下振动 5 次时的滞回圈, 分析木质素改良黄土的滞回曲线特征, 如图 3 所示。

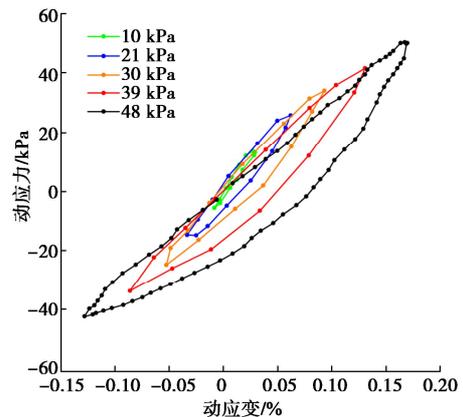


图 3 不同动应力条件下 1% 掺量木质素改良黄土滞回曲线

Fig. 3 Hysteresis loop of modified loess with lignin content of 1% under different dynamic stress levels

由图 3 可知, 木质素改良黄土滞回曲线近似呈封闭、两端尖的长梭形状。随着动应力幅值的不断增加, 改良黄土滞回圈逐渐变厚、长轴不断增长、面积不断增加, 表明土体内部承受动荷载变形时摩擦作用所消耗的能量不断增多。此外, 滞回圈整体随动应力幅值的增加不断偏离动应力轴, 向动应变轴偏转, 其倾斜程度与动应力幅值呈负相关关系, 滞回圈饱满程度与动应力幅值呈正相关关系。

为进一步分析木质素掺量对改良黄土滞回曲线特征的影响, 选择不同掺量木质素改良黄土在动应力幅值 48 kPa 条件下振动 5 次时的滞回圈进行差异性分析, 如图 4 所示。由图 4 可得, 不同掺量的木质素改良黄土滞回曲线特征具有显著差异。掺量为 1% 的木质素改良黄土的滞回曲线相较于其他掺量的木质素改良黄土长轴更短, 形状更为扁窄, 面积更小, 表明改良黄土内部承受动荷载变形时摩擦作用所消耗的能量更小, 动刚度更大。而重塑黄土的滞回曲线长轴最长, 形状最为宽厚, 面积最大, 说明其动刚度比木质素改良黄土的动刚度更小。此外, 滞回曲线向动应变轴偏移时, 其倾斜程度与土体动刚度和弹性性能呈正相关关系<sup>[12]</sup>, 即滞回曲线长轴向动应变轴的倾斜程度越

小,土体动刚度越小,动弹性模量越小。由图可知,掺量为1%的改良黄土滞回曲线长轴与动应变轴的夹角最大,其相相对质量密度塑黄土和其他掺量的木质素改良黄土拥有最优的动刚度;而重塑黄土的滞回曲线长轴与动应变轴的夹角最小,说明其动刚度最小。综上可知,木质素可有效改善黄土的动刚度,但木质素掺量的持续增加并不会持续增强改良黄土的动力稳定性,而是在掺量1%时达到最佳效果。

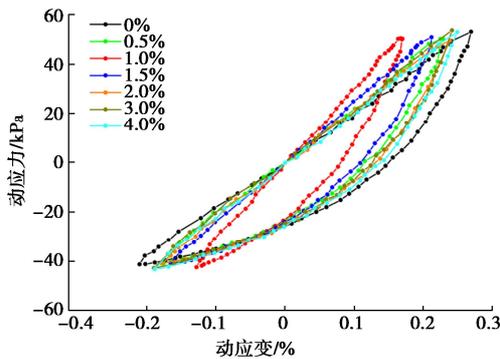


图4 不同掺量木质素改良黄土滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis loop of modified loess

改良黄土阻尼比-动应变关系曲线可直观反应出木质素掺量对改良黄土动刚度和动力稳定性的影响。不同掺量木质素改良黄土的阻尼比曲线如图5所示。

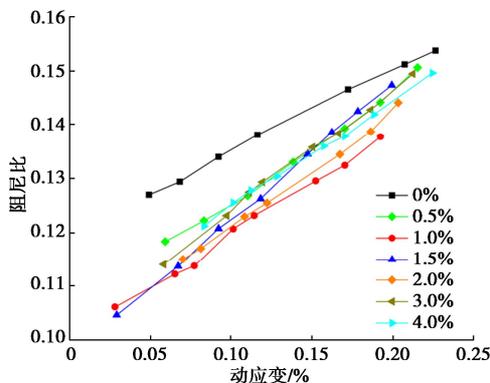


图5 木质素改良黄土的阻尼比与动应变的关系

Fig. 5  $D-\varepsilon_d$  curves of lignin-modified loess

由图5可得,不同掺量的木质素改良黄土阻尼比均随动应变的增大而增大,但增长趋势存在差异。重塑黄土在小动应变时阻尼比较大,但增长速率较慢。加入木质素后,在小动应变条件下,改良黄土的阻尼比明显减小,但其随着动应变的增加增长速率较快。木质素掺量为0.5%时,改良黄土的阻尼比较重塑黄土的阻尼比略明显减小;木质素掺量为1%时,动应变为0.5%~2%改良黄土的阻尼比均达到最小;木质素掺量为1.5%时,尽管动应变小于0.5%时改良黄土的阻尼比较1%掺量的木质素改良黄土的阻尼比略有减小,但阻尼比-动应变曲线的斜率明显增大;木质素掺量达到2%后,改良黄土的阻尼比较1%掺量的木质素改良黄土的阻尼比均增大,但其阻尼比-动应变曲线的

斜率较1.5%掺量的木质素改良黄土减小;木质素掺量为3%,4%的改良黄土的阻尼比曲线与0.5%掺量的改良黄土的阻尼比曲线几乎重合。而在同一动应变水平下,木质素改良黄土的阻尼比均小于重塑黄土的阻尼比,说明其相对于重塑黄土动刚度更大。综合以上分析可知,重塑黄土在动荷载作用下,随着动应力幅值的不断增大,动应变不断增大,黄土颗粒间的胶结和骨架结构逐渐破坏,土颗粒则容易发生相对滑移,土体内部摩擦消耗的能量逐渐增大,因此所表现出的阻尼特性也逐渐增大。掺入木质素后,由于土体中的大、中孔隙被木质素填充,且木质素的黏结性、螯合性导致土颗粒之间的胶结强度提升,在动荷载作用下,土体颗粒之间摩擦减小,由于颗粒摩擦导致的能量损耗也减小,故阻尼比也减小。因此,在同一动应变条件下,重塑黄土阻尼比最大,动刚度最小;而0.5%,3%,4%的阻尼比处于中间位置,1%掺量的改良黄土阻尼比最小,动刚度最大。

综合木质素改良黄土骨干曲线特征、滞回曲线特征和阻尼比特征,木质素可显著改善黄土的抗变形能力和动刚度,且木质素改良黄土在掺量1%时动力特性最为优良,这与静力特性研究结果一致<sup>[12]</sup>。

### 3 改进的 Hardin-Drnevich 模型

#### 3.1 模型验证

根据动三轴试验中实时记录的动应力、动应变数据以及动弹性模量定义,绘制不同掺量木质素改良黄土  $1/E_d-\varepsilon_d$  关系曲线,如图6所示。由图可得,不同掺量木质素改良黄土动弹性模量的倒数  $1/E_d$  和动应变  $\varepsilon_d$  存在较好的线性相关关系。即不同掺量木质素改良黄土动本构关系符合 Hardin-Drnevich 双曲线模型<sup>[13]</sup>。由于研究中木质素改良黄土除木质素掺量因素外,其余土体物性参数和试验条件均一致,因此不同的木质素掺量导致 Hardin-Drnevich 双曲线模型参数存在差异。

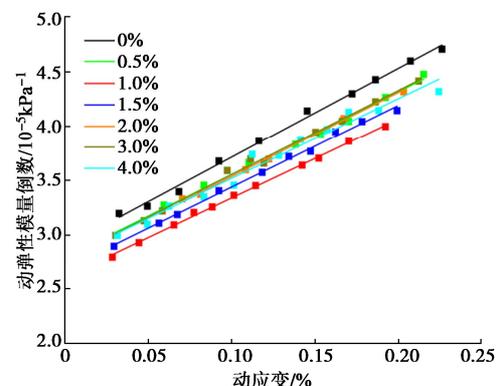


图6 木质素改良黄土的动弹性模量倒数与动应变的关系

Fig. 6  $E_d^{-1}-\varepsilon_d$  curves of lignin-modified loess

#### 3.2 改进的 Hardin-Drnevich 模型

木质素改良黄土动本构关系符合 Hardin-Drnevich

双曲线模型, 且木质素掺量对改良黄土动本构关系和模型参数具有显著影响。但该模型中无法精确反映出掺量对其动本构关系的影响, 因此在 Hardin-Drnevich 双曲线模型中尝试引入木质素掺量  $m$  作为模型参数进行改进, 得出更为精确且能反映出木质素掺量对其动本构关系影响的 Hardin-Drnevich 改进模型。

由图 6 可知, 反映改良黄土初始动弹性模量、表征曲线截距的模型参数  $a$  随木质素掺量增加变化较大, 而反映改良黄土最大动应力幅值、表征曲线斜率的模型参数  $b$  变化较小。绘制模型参数  $a$  与木质素掺量  $m$  的关系曲线, 如图 7 所示。选择 GuassAmp 函数对  $a$ - $m$  的关系曲线进行非线性高斯拟合, 得出  $a$  和  $m$  的函数表达式:

$$a = a_0 + A \times \exp\left(-0.5 \times \left(\frac{m - m_c}{w}\right)^2\right) \quad (1)$$

式中:  $A$ ,  $m_c$ ,  $w$ ,  $a_0$  均为模型参数;  $A$  表征  $a$ - $m$  曲线的峰值, 即初始动弹性模量的最大值的倒数;  $m_c$  为曲线峰值对应的木质素掺量, 即最优掺量;  $w$  为标准方差, 表征曲线宽度;  $a_0$  为高斯函数修正系数, 无明确的物理意义。模型参数如表 2 所示, 曲线相关系数为 0.9913, 相关性良好。

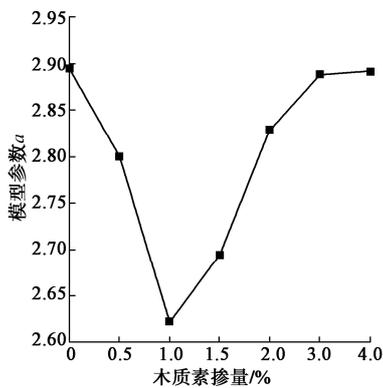


图 7 模型参数  $a$  和木质素掺量  $m$  的关系曲线

Fig. 7 Relationship between parameter  $a$  and lignin content  $m$

表 2 GuassAmp 函数模型参数

Table 2 Parameters of GuassAmp model

$a_0$	$m_c$	$w$	$A$	相关系数 $R^2$
2.8924	1.1546	0.4482	-0.2792	0.9913

因此改进后的木质素改良黄土的 Hardin-Drnevich 模型为

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_d}{a_0 + A \times \exp\left(-0.5 \times \left(\frac{m - m_c}{w}\right)^2\right) + b\varepsilon_d} \quad (2)$$

通过该改进模型再次对动弹性模量的倒数  $1/E_d$  和动应变  $\varepsilon_d$  进行拟合, 并与试验实测数据进行对比, 如图 8 所示, 模型参数如表 3 所示。拟合相关系数为 0.9861~0.9974, 呈现出良好的线性相关关系。

在该改进模型中建立了木质素掺量和改良黄土动本构关系的联系, 通过设定不同的木质素掺量  $m$  和动应力幅值可较为精确且快速的确定相应动应变, 或者通过设定不同的木质素掺量  $m$  和动应变可较为精确且快速的确定相应动弹性模量, 对木质素改良黄土的动本构关系研究有较好的推进作用与实践价值。

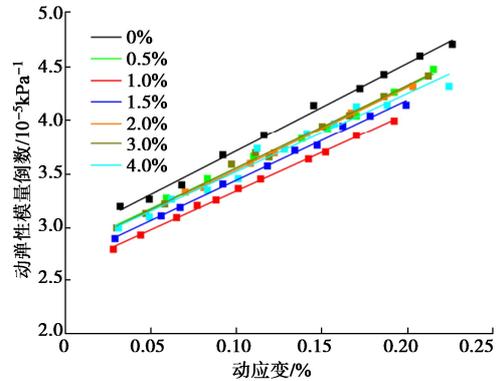


图 8 Hardin-Drnevich 改进模型拟合  $1/E_d$  和  $\varepsilon_d$  关系曲线

Fig. 8 Fitting results of modified Hardin-Drnevich model

表 3 Hardin-Drnevich 改进模型模型参数

Table 3 Parameters of modified Hardin-Drnevich model

试样	$a_0$	$A$	$m_c$	$w$	$b$	相关系数 $R^2$
0%	1.3576	1.5701	0.3398	2.0032	8.1520	0.9924
0.5%	1.3847	1.4154	-4.2441	-1.7561	7.6105	0.9898
1%	1.3108	1.3109	1.6212	-6.8109	7.2419	0.9974
1.5%	1.3340	1.3612	-2.2218	-3.2447	7.5011	0.9936
2%	1.3146	1.5052	1.5531	1.6960	7.7331	0.9934
3%	0.8675	3.446	1.6339	-1.2614	7.7409	0.9915
4%	1.2772	4.4059	1.9786	1.3832	7.3299	0.9861

## 4 讨 论

基于木质素改良黄土动本构关系的分析研究, 木质素可有效提升改良黄土的抗动变形能力和动刚度。其动力特性提升的主要原因在于细小的木质素颗粒可有效充盈于黄土中原有的大、中孔隙中, 致使改良黄土密实度提高, 同时由于木质素具有良好的黏结性和螯合性, 能够促使木质素附着于黄土原有颗粒的连接处, 使得土颗粒之间的胶结作用进一步增强, 从而有效提升了黄土的骨架强度<sup>[7-8]</sup>。此外, 改良黄土在养护过程中, 通过水解作用和仲醇羟基上的氧原子质子化作用, 促使木质素的正电荷和颗粒表面的负电荷中和, 缩小双电层厚度, 增强了双电层的吸附作用, 导致颗粒间距减小, 进一步增强土体黏聚力<sup>[6,9]</sup>。因此, 木质素可显著提升改良黄土的密实度、胶结强度、骨架强度和黏聚力, 在动荷载作用下表现出优良的动力特性。

木质素掺量对改良黄土抗动变形能力和动刚度有显著影响, 在掺量为 1% 时, 表现出最佳动力特性。木质素掺量的持续增加不会导致其动力特性的持续增强, 主要原因在于木质素属于轻质化材料, 密度较小,

当木质素掺量超过 1% 时, 过多的木质素颗粒充盈于改良黄土中, 此时木质素颗粒由于其黏结性和整合性会优先于自身集合而不是加固土体<sup>[3]</sup>; 并且, 过多的木质素颗粒会增大黄土颗粒的间距, 导致颗粒间的吸引力降低, 此时木质素由“胶结作用”转变为“润滑作用”<sup>[3, 10]</sup>, 导致改良黄土动力特性反而有所下降。

## 5 结 论

基于不同掺量的木质素改良黄土动三轴试验, 分析了改良黄土的动本构关系, 研究了木质素改良黄土 Hardin-Drnevich 改进模型。主要得出 3 点结论。

(1) 木质素可有效改善黄土的抗动变形能力, 不同木质素掺量的改良黄土骨干曲线具有显著差异。同等动应力条件下, 掺量 1% 的改良黄土动应变最小, 表现出了良好的抗动变形能力。

(2) 掺入木质素可有效改善黄土的动刚度, 不同掺量木质素改良黄土的滞回曲线和阻尼比-动应变曲线具有显著差异。掺量 1% 的改良黄土滞回圈相较于其他掺量, 其长轴更短, 形状更为扁窄, 面积更小, 且阻尼比在不同动应变条件下达到最小, 动力稳定性更优。

(3) 木质素改良黄土动本构关系符合 Hardin Drnevich 双曲线模型; 在模型中引入木质素掺量  $m$  得出相关性良好且能反映出木质素掺量对其动本构关系影响 Hardin-Drnevich 改进模型。

### 参考文献:

- [1] 王兰民, 石玉成, 刘 旭, 等. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003. (WANG Lanmin, SHI Yucheng, LIU Xu, et al. Loess Dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 蒋挺大. 木质素[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2009. (JIANG Tingda. Lignin[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. (in Chinese))
- [3] 侯 鑫, 马 巍, 李国玉, 等. 木质素磺酸盐对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 2): 18-26. (HOU Xin, MA Wei, LI Guoyu, et al. Influence of lignosulfonate on mechanical properties of Lanzhou loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S2): 18-26. (in Chinese))
- [4] 贺智强, 樊恒辉, 王军强, 等. 木质素加固黄土的工程性能试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(3): 731-739. (HE Zhiqiang, FAN Henghui, WANG Junqiang, et al. Experimental study of engineering properties of loess reinforced by lignosulfonate[J]. Rock and Soil Mechanics,

2017, 38(3): 731-739. (in Chinese))

- [5] LIU W, WANG J, LIN G C, et al. Microscopic mechanism affecting shear strength in lignin-treated loess samples[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019: 7126040.
- [6] 钟秀梅, 刘 伟, 刘钊钊. 不同制样方法对木质素改良黄土力学特性影响[J]. 世界地震工程, 2020, 36(1): 197-204. (ZHONG Xiumei, LIU Wei, LIU Zhaozhao. Effect of different sample preparation methods on mechanical properties of lignin improved loess[J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(1): 197-204. (in Chinese))
- [7] 刘钊钊, 高中南, 马紫娟, 等. 木质素改良黄土孔隙细观特征研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(增刊): 557-564. (LIU Zhazhao, GAO Zhongnan, MA Zijuan, et al. Research on pore microscopic characteristics of lignin-modified loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(S0): 557-564. (in Chinese))
- [8] CAI G J, ZHANG T, LIU S Y, et al. Stabilization mechanism and effect evaluation of stabilized silt with lignin based on laboratory data[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2016, 34(4): 331-340.
- [9] ZHANG T, CAI G J, LIU S Y. Assessment of mechanical properties in recycled lignin-stabilized silty soil as base fill material[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 1788-1799.
- [10] ZHANG T, CAI G J, LIU S Y. Application of lignin-stabilized silty soil in highway subgrade: a macroscale laboratory study[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(4): 04018034.
- [11] 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))
- [12] 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 Zhaozhao. Mechanical Properties and Reinforcement Mechanism of Lignin-Modified Loess[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020. (in Chinese))
- [13] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1972, 98(7): 667-692.

(编校: 胡海霞)