

水泥固化粉质黏土剪切模量与阻尼比的应变相关性研究

朱海滨¹, 周宇鹏¹, 罗刚², 王中宽², 李旭晨³, 章丽莎³, 魏晓⁴

(1. 福建省公路事业发展中心, 福建 福州 350001; 2. 浙江交工集团股份有限公司, 杭州 浙江 310051;
3. 浙大城市学院, 浙江 杭州 310015; 4. 浙江大学 滨海与城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 土体的应力应变关系具有非线性特性, 表现为剪切模量随应变衰减以及循环荷载作用下的滞回性。针对水泥固化土在小应变和中应变范围内的剪切模量与阻尼比应变相关性开展共振柱试验研究, 并通过渐近线模型对剪切模量的应变相关性进行表征, 分析模型参数随水灰比、围压的变化规律。结果表明: 剪切模量随剪应变增加而降低, 且降低幅度随围压增加而降低; 阻尼比随剪应变增加而增加, 且增加幅度随围压增加而降低; 阻尼比和剪切模量之间存在特定关联, 不受配合比、养护龄期和围压的影响。阻尼比与剪切模量关联, 可以结合剪切模量应变相关性的渐近线模型预测阻尼比的应变相关性。该研究揭示了剪切模量与阻尼比在不同围压条件下随剪应变的变化规律, 表征了不同配合比、养护龄期和围压条件下剪切模量与阻尼比的应变相关性。

关键词: 水泥固化土; 共振柱; 剪切模量; 阻尼比; 非线性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)05-0188-06

Strain-dependent Shear Modulus and Damping Ratio of Cement-stabilized Silty Clay

ZHU Haibin¹, ZHOU Yupeng¹, LUO Gang², WANG Zhongkuan², LI Xuchen³, ZHANG Lisha³, WEI Xiao⁴

(1. Fujian Provincial Highway Development Center, Fuzhou, Fujian 350001, China;

2. Zhejiang Communications Construction Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310051, China;

3. Hangzhou City University, Hangzhou, Zhejiang 310015, China;

4. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: The stress-strain relationship of soil is nonlinear, characterized by the degradation of shear modulus with increasing strain and hysteresis loop under cyclic loading. Investigating the nonlinear characteristics of soil is of great importance for accurately analyzing the deformation of soil. This work conducted resonant column tests on cement-stabilized silty clay in the small- to medium-strain range, to investigate the variations of shear modulus and damping ratio with increasing shear strain under different confining pressure conditions. The effects of dosage, curing age, and confining pressures on the strain-dependence of the shear modulus and damping ratio were characterized. The test data and analysis show that the shear modulus decreases with the increase of shear strain, and the rate decreases with the increase of confining pressure. The damping ratio increases with the increase of shear strain, and the rate decreases with the increase of confining pressure. There is a specific correlation between damping ratio and shear modulus, which is not affected by dosage, curing age, and confining pressure. In addition, the strain-dependence of shear modulus was characterized by Hardin-Drnevich model, and the model parameters were found to vary with water-to-cement ratio and confining pressure. The correlation between damping ratio and shear modulus is characterized, which can be used to predict the strain correlation of damping ratio in conjunction with the asymptotic line model of shear modulus strain correlation.

Keywords: cement-stabilized soil; resonant column; shear modulus; damping ratio; non-linearity

收稿日期: 2025-05-16

修稿日期: 2025-06-20

基金项目: G228 滨海风景道(福莆宁段)绿色智慧化及文旅融合平台建设项目; 浙江省自然科学基金项目(LQ22E080012)

作者简介: 朱海滨(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事道路工程的研究工作。E-mail: Daley.zhu@163.com

通讯作者: 魏晓(1990—), 男, 博士, 研究员, 主要从事岩土工程与土体力学特性相关研究。E-mail: weixiaos@zju.edu.cn

软土、特殊土等工程性质差、抗变形能力弱的土体类型在我国广泛分布,需要通过物理或化学加固的方法使其满足工程需求。尽管学者们已开发了多种新型的土体化学加固方法^[1-2],但是水泥固化仍然是工艺最为成熟且应用最为广泛的加固方法,通过喷射、搅拌、灌浆等方法将水泥与土体混合^[3-5],实现增加土体强度、提升抗变形能力的目的。水泥固化土的应力应变关系具有明显的非线性特征,表现为随剪应变增加而衰减的剪切模量以及循环荷载作用下的应力应变滞回圈。土体在正常服役条件下所受剪应变通常在 10^{-6} 至 10^{-3} 范围(即小应变至中应变范围)^[6],其值大小随不同工程类型以及土体状态有关。因此,研究土体在小应变至中应变范围内的剪切模量与阻尼比有助于准确计算土体在服役荷载下的变形^[7]。目前,已有大量研究针对水泥固化土的强度开展研究^[8-9],但关于其剪切模量应变相关性的研究相对较少。

陈善民等^[10]利用三轴仪和共振柱研究了水泥固化温州淤泥土的动力特性,揭示了不同水泥固化土的剪切模量、弹性模量与阻尼比随应变水平、水泥掺量、围压的变化规律。王军等^[11]开展了应变控制的静、动三轴试验,发现水泥掺入比与水泥固化土的应力-应变形态(硬化型或软化型)有关,并研究了动模量的发展规律。Zhang等^[12]开展动三轴试验研究了水泥掺量、围压、应变幅值、加载频率等因素对水泥固化海相黏土动力特性的影响,发现水泥掺入比和应变幅值是影响水泥固化土动力特性的两大主要因素。Lang等^[13]利用共振柱系统测试了不同水泥掺量的水泥固化土在50 kPa至150 kPa条件下的剪切模量与阻尼比。Hoyos等^[14]开展共振柱试验研究发现拌合时的含水率会影响水泥固化土剪切模量随剪应变的衰减幅度,含水率增加会加剧模量随剪应变的衰减。Yang等^[15]利用弯曲元、超声脉冲、共振柱等测试方法测定了多种水泥固化黏土的小应变至中应变范围内的动模量和阻尼比,指出孔隙比、水泥掺量和水泥类型是影响小应变剪切模量及剪切模量非线性特性的主要因素,而围压和水泥类型的影响较小。Yao等^[16]通过弯曲元、共振柱和动三轴建立了水泥固化新加坡海相黏土在剪应变为 10^{-6} 至 10^{-2} 范围内的剪切模量衰减数据库,分析了配合比、养护龄期和围压对模量衰减曲线的影响规律,发现模量衰减曲线不受围压的影响但与水泥固化土的无侧限抗压强度具有很好的关联。

针对上述试验研究,学者们也采用不同方法表

征水泥固土的模量和阻尼比随应变幅值的变化规律。陈善民等^[10]提出可以采用Hardin-Drnechich双曲线模型^[17]描述水泥固化土剪切模量与弹性模量随应变的衰减规律。王军等^[11]采用了三参数的双曲线模型成功刻画了不同水泥掺量条件下的水泥固化土的硬化型与软化型应力-应变关系,并提出了模型参数标定方法。Zhang等^[12]基于动三轴试验结果提出了考虑围压、养护龄期、配合比、应变水平、加载频率、循环数等多因素影响的动剪切模量与阻尼比经验预测公式。Lang等^[13]标定了Hardin-Drnechich^[17]的剪切模量与阻尼比模型的参数,分析了模型参数随配合比、养护龄期和围压的变化规律。Yang等^[15]提出了SimSoil模型统一表征非加固黏土和水泥固化土在小应变至中应变范围内的剪切模量与阻尼比。Yao等^[16]发现水泥固化土的剪切模量衰减曲线可以仅与无侧限抗压强度关联,而不必分别考虑水泥固化土的孔隙比和配合比的影响,进而提出了表征水泥固化土的新模型。

冯德銮等^[18]在其综述文章中指出,不同地区的土体由于地理、气候、沉积环境、应力历史等因素影响,水泥固化土的各类力学特性具有区域性和土体特异性。基于此,本研究采用某低液限粉质黏土开展水泥固化土的剪切模量随剪应变的变化规律研究,以揭示配合比和围压等因素的影响。本研究可为类似土体的模量衰减和阻尼特性提供数据支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本研究所用粉质黏土的粒径分布曲线由激光粒度分析仪测得,粉质黏土粒径分布如图1所示。粒径小于0.075 mm的细粒占土体干重的85.4%,中值粒径 $d_{50}=0.038$ mm,不均匀系数 $C_u=4.50$,曲率系数 $C_c=1.61$ 。用《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)推荐的联合测定法测得土体液塑限分别为33.1%和16.2%,塑性指数(PI)为16.9;土粒比重为2.69。粉质黏土的塑性图如图2所示,由图2中塑性指数和液限的关系,判定该土为低液限黏土。本研究采用的安徽海螺PO42.5R普通硅酸盐水泥作为固化剂,含有约80%的水泥熟料、5%的石膏和14%方解石、粉煤灰和炉渣的混合物。

1.2 制样与养护方法

本研究采用粉质黏土为主要试验材料进行湿击法制样。将水泥、烘干土、水按给定的比例混合并搅拌均匀。拌合时的含水率(w)为水与干土的质量之

比,取 28%、35% 和 42%;水泥掺量(cc)为水泥与干土质量之比,取 20%、30% 和 40%;水灰比(w/c)为拌合时水与水泥质量之比。

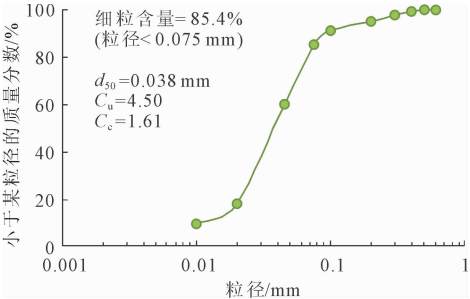


图 1 粉质黏土粒径分布

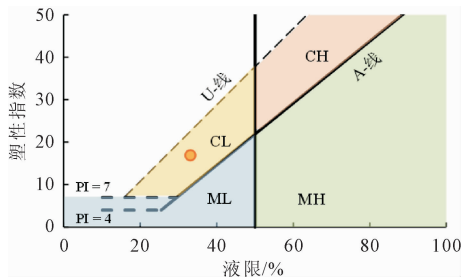


图 2 粉质黏土的塑性图

称取一定质量的拌合土加入塑料模具,用击实锤击实至预定高度,划毛上表面;重复该过程,分四层形成直径 50 mm 和高度 100 mm 试样。放置 1 d 后,拆模、泡水养护;养护龄期为 7 d、14 d 和 28 d。

1.3 共振柱试验

本试验使用的是英国 GDS 公司生产的固定-自由端共振柱仪。将养护至规定龄期的试样从水中取出擦干、放入乳胶膜后放置在置样台;安装顶帽和电磁驱动系统,并调平电磁驱动系统;安装围压罩,打开围压控制器,增加围压(σ_3)至预设值(50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa);设置激振电压等参数,进行测试。通过扫频得到共振频率(f),通过自由衰减法测试土样阻尼比(D)。

根据弹性理论可得到土体剪切波速计算公式:

$$\frac{I}{I_0} = \beta \cdot \tan\beta \tag{1}$$

式中: I 为土样的转动惯量($I = m \cdot d^2/8$, m 为土样质量, d 为土样直径); I_0 为共振柱顶盖及驱动系统等附加质量块的转动惯量,通过设备标定得到; β 为中间变量,通过查表内插得到,与剪切波速 V_s (m/s) 的关系如下:

$$V_s = \frac{2\pi fl}{\beta} \tag{2}$$

式中: f 为共振柱试验测得的共振频率,Hz; l 为试样高度,m。

土样的剪切模量(MPa)可由下式得到:

$$G = \rho V_s^2 \tag{3}$$

式中: ρ 为土体密度,Mg/m³。

给定激振电压下土样截面外沿处的剪应变通过下式计算得到:

$$\gamma_{\max} = \frac{r}{l} \frac{9.81 \times \text{Gain} \times \text{Volt}}{4\pi^2 f^2 x_d} \tag{4}$$

式中: r 为试样半径;Gain 是电荷放大器增益;Volt 为激振电压; x_d 为加速度传感器至转轴距离。其中,Gain 与 x_d 是设备参数。

公式(4)简化后得到:

$$\gamma_{\max} = X \frac{r \times \text{Volt}}{f^2 t} \tag{5}$$

式中: $X = 9.81 \cdot \text{Gain}/(4\pi^2 D)$ 。由于剪应变沿试样截面径向方向分布不均匀,取代表剪应变 γ_{rep} :

$$\gamma_{\text{rep}} = 0.8 \gamma_{\max} \tag{6}$$

采用自由衰减法测试土样的阻尼比 D 。表 1 汇总了本研究所采用的配合比、养护龄期和围压等信息。

表 1 水泥固化粉质黏土剪切模量与阻尼比试验方案

拌合 含水率 /%	水泥 掺量 /%	拌合 水灰比	围压 /kPa	养护龄期 /d
28	20	1.400		
28	30	0.930		
28	40	0.700		
35	20	1.750		
35	30	1.670	50、100、 200、400	7、14、 28
35	40	0.875		
42	20	2.100		
42	30	1.400		
42	40	1.050		

2 试验结果与分析

2.1 剪切模量与阻尼比的应变相关性

图 3 是水泥固化粉质黏土典型的剪切模量随剪应变幅值的变化规律(以 $w = 42\%$ 、 $cc = 20\%$ 、养护 7 d 的试样为例)。图 3(a)数据表明在各个围压条件下剪切模量随剪应变的增加而逐渐减小,即水泥固化土的应力应变关系呈现出一定的非线性特征;同时还可看出 $G - \gamma$ 关系随围压增加而向上移动,表明相同剪应变条件下,剪切模量随围压增加而增加。为了更好地反映剪切模量在不同围压条件下随剪应

变的变化规律,无量纲参数 $G/G_{\max}$ 随剪应变的变化规律呈现于图 3(b),可以看出随着围压增加, $G/G_{\max}$ 随剪应变的衰减幅度明显减小,表明水泥固化土在受测范围内的非线性特性随围压增加而减弱。

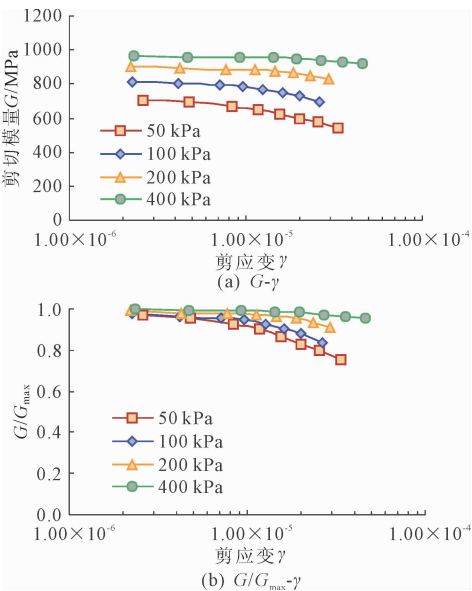


图 3 水泥固化粉质黏土剪切模量的应变相关性 ($w = 42\%$, $cc = 20\%$, 养护 7 d)

图 4 是水泥固化粉质黏土典型的阻尼比随剪应变幅值的变化规律(以 $w = 42\%$ 、 $cc = 20\%$ 、养护 7 d 的试样为例)。在相同围压条件下,阻尼比随剪应变增加而增加,表明水泥土在循环荷载作用下耗散的应变能比例随应变幅值增加而增加; $D - \gamma$ 关系随围压增加而向下移动,表明相同剪应变条件下,阻尼比随围压增加而降低,即土体对应变能的耗散程度降低;同时还能看出阻尼比随剪应变增加的幅度随有效应力增加而减小。

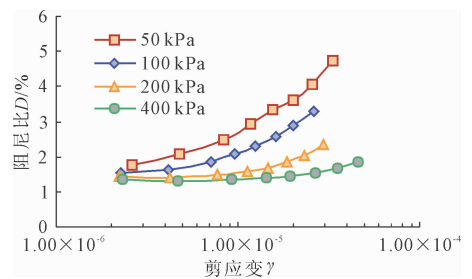


图 4 水泥固化粉质黏土阻尼比的应变相关性 ($w = 42\%$, $cc = 20\%$, 养护 7 d)

2.2 表征剪切模量的应变相关性

Hardin 和 Drnevich^[17] 提出采用渐近线模型表征土体剪切模量随剪应变的变化规律:

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (7)$$

式中: $G_{\max}$ 为土的最大剪切模量,通常在 $\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-5}$ 范围内测得; γ_r 为参考剪应变,对应于 $G/G_{\max} = 0.5$ 时的剪应变。

在此基础上衍生出多种变体,用于表征 $G - \gamma$ 关系。式(7) 可以在测试的应变范围内很好地捕捉本研究的 $G - \gamma$ 趋势(图 5)。

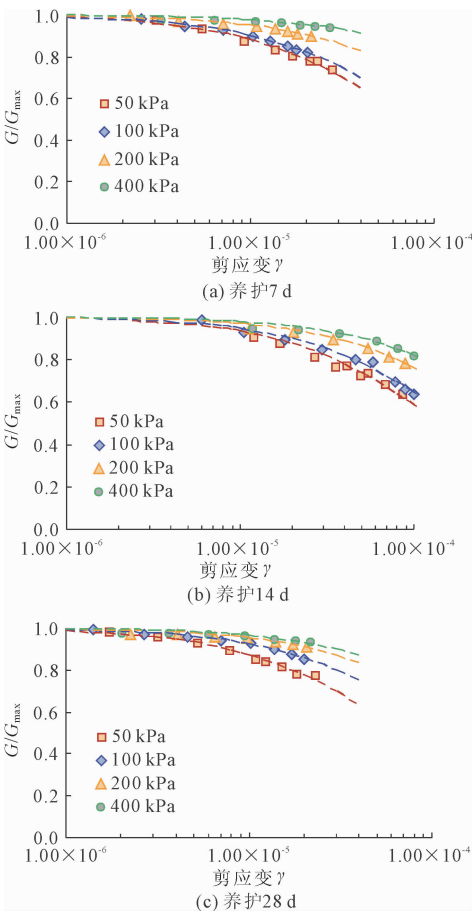


图 5 利用渐近线模型表征水泥固化粉质黏土剪切模量的应变相关性($w = 28\%$, $cc = 20\%$)

图 5 中拟合曲线的参数 $G_{\max}$ 通常取 $\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-5}$ 范围内测得的剪切模量,但由于水泥固化粉质砂土的剪切模量在此范围内的仍有轻微下降的趋势,故而将其作为模型参数进行标定。有研究表明,在相同围压条件下, $G_{\max}$ 随拌合含水率增加而减小、随水泥掺量增加而增加。当水泥掺量增加,水泥水化后形成更多的胶结物,会提升土颗粒间的连接刚度,从而增强水泥固化黏土的剪切模量。当拌合含水率增加,水泥在土体中的分布会更加分散,可能弱化水泥-土颗粒所形成的微观结构强度;同时,对于

拌合含水率较高的水泥固化土,通常以泥浆形态成样固化,不参与水化的多余水分则参与形成水泥土的孔隙,因而更高的拌合含水率往往对应更高的孔隙比,使土样的剪切模量降低。综合来看, $G_{\max}$ 随拌合时的水灰比增加而单调降低(图 6,以养护 7 d 的全部数据为例)。此外,相同配合比条件下, $G_{\max}$ 随有效应力增加而增加。

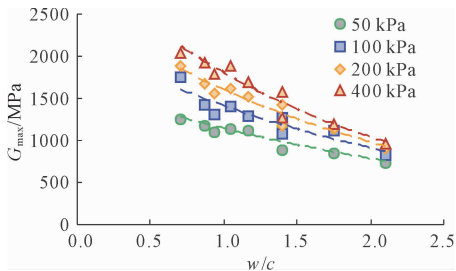


图 6 模型参数 $G_{\max}$ 随水灰比的变化规律(养护 7 d)

图 7 是 γ_r 随拌合水灰比的变化规律, γ_r 代表使土体剪切模量衰减至 0.5 倍 $G_{\max}$ 所需要施加的剪应变, γ_r 增加表明土体模量衰减减弱。可以看出,在相同围压条件下, γ_r 随拌合水灰比的增加而呈现增加趋势,且不受其他配合比参数的影响。对于 w/c 较低的试样,其 $G_{\max}$ 较高、 γ_r 较小,表明较轻微的扰动会使水泥固化土的剪切模量出现较明显的衰减;而对于 w/c 较高的试样,其 $G_{\max}$ 较小、 γ_r 较高,表明应变所致的剪切模量衰减幅度较低。这一现象可能与水泥胶结结构的损伤有关:将土样加载至某个剪应变条件下, $G_{\max}$ 较高的试样所受的胶结结构损伤比例相比 $G_{\max}$ 较小的试样要大,从而导致剪切模量衰减较快。需要注意的是,前述现象并不代表在给定应变条件下 w/c 较低试样的剪切模量比 w/c 较高试样的剪切模量更低。图 7 的数据还表明 $\gamma_r - w/c$ 关系随围压增加向上移动,且 $\gamma_r - w/c$ 关系的变化幅度也随围压增加而增加。由图 7 中数据可知,增加围压会降低模量衰减幅度(与图 3 中的试验结果一致),且增加围压所致的模量衰减减缓效果对水灰比更高的水泥固化土更显著。

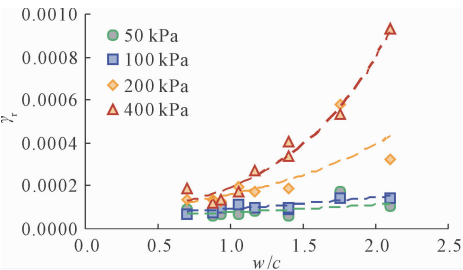


图 7 模型参数 γ_r 随水灰比的变化规律(养护 7 d)

2.3 表征阻尼比的应变相关性

图 8 是水泥固化粉质砂土的 $(D - D_{\min}) - (G/G_{\max})$ 关系,其中 $D_{\min}$ 是小应变条件下的阻尼比。图 8(a) 是 $w = 28\%$ 、 $cc = 20\%$ 并养护 7 d 试样在不同围压下的 $(D - D_{\min}) - (G/G_{\max})$ 数据,可以看出不同围压的数据具有唯一关联,表明围压对 $(D - D_{\min}) - (G/G_{\max})$ 关系没有影响。图 8(b) 是养护 7 d 的不同配合比试样的 $(D - D_{\min}) - (G/G_{\max})$,可以看出不同配合比条件下,数据点大致具有唯一关联性,表明配合比对该关联没有影响。需要注意的是,图中部分数据存在一定离散性,但仍可考虑采用单一方程表征。图 8(c) 对比了不同养护龄期的数据,可知养护龄期对 $(D - D_{\min}) - (G/G_{\max})$ 无显著影响。Zhang 等^[19]用二次函数表征 $(D - D_{\min}) - (G/G_{\max})$ 关系:

$$D - D_{\min} = c_1 \left(\frac{G}{G_{\max}} \right)^2 + c_2 \left(\frac{G}{G_{\max}} \right) - (c_1 + c_2) \quad (8)$$

式中: c_1 和 c_2 是拟合参数。

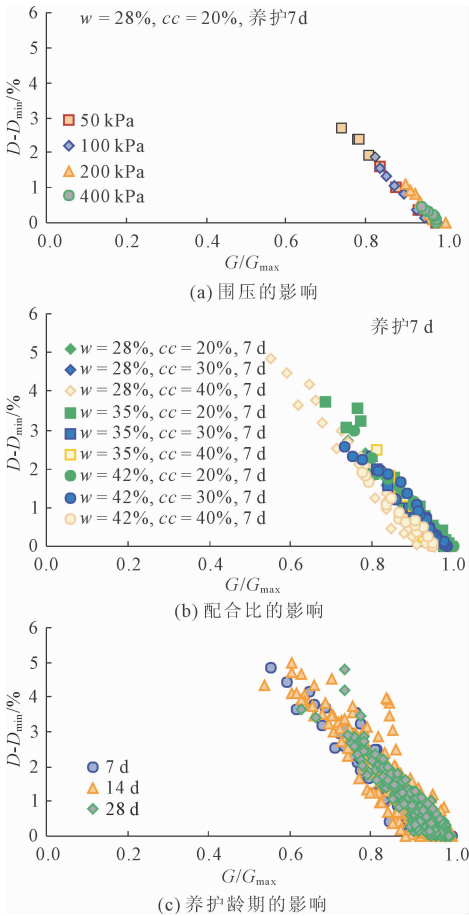


图 8 $D - D_{\min}$ 与 $G/G_{\max}$ 的关联

图 9 是利用式(8)拟合得到的 $D - \gamma$ 曲线与实测数据的对比(以 $w = 28\%$ 、 $cc = 20\%$ 、养护 7 d 为例),可以看出拟合曲线与数据吻合度较高。

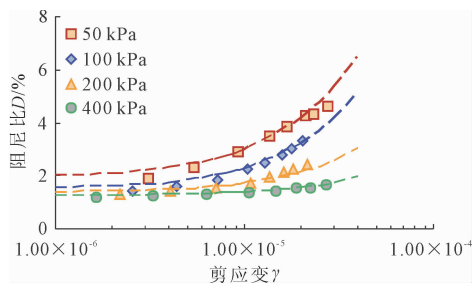


图 9 阻尼比拟合曲线与实测数据的对比
($w = 28\%$, $cc = 20\%$, 养护 7 d)

3 讨 论

本研究结果与文献中关于剪切模量衰减曲线受配合比、围压等因素影响的规律仍存在不一致。Hoyos 等^[14]发现拌合时的含水率增加会加剧模量随剪应变的衰减,而 Yang 等^[15]则发现高孔隙比(即高含水率)的水泥固化土具有更平缓的剪切模量衰减曲线。Yao 等^[16]提出具有更高无侧限抗压强度的水泥固化土的模量衰减会在更小的应变范围内出现。考虑到无侧限抗压强度随土样的孔隙比降低而增加^[20], Yao 等^[16]观察到的试验现象似乎与 Yang 等^[15]的试验结果较为吻合。在本研究中, γ_r 随水灰比增加而增加,表明较高水灰比的试样具有较低的模量衰减程度,由于无侧限抗压强度随水灰比增加而降低^[21],表明本研究的模量衰减程度应随无侧限抗压强度的降低而减弱,与 Yao 等^[16]以及 Yang 等^[15]的现象一致。值得注意的是,本研究明显观察到围压会影响剪切模量的衰减曲线,而 Yao 等^[16]的试验结果表明围压对模量衰减曲线没有影响。考虑到土体特异性^[18],还应开展进一步研究以提出统一的水泥固化土剪切模量衰减模型。此外,本研究所采用的共振柱测试设备仅能测试 $\gamma < 10^{-4}$ 以内的剪切模量与阻尼比,对于应变幅值更高的工况,可以采用动扭剪仪或动三轴仪开展,获得全应变范围内水泥土的剪切模量与阻尼比的应变相关特性。

4 结 论

本研究通过共振柱试验测试了水泥固化粉质黏土在剪应变为 10^{-6} 至 10^{-4} 范围内的剪切模量与阻尼比,揭示了剪切模量与阻尼比随剪应变水平变化的规律。主要结论有:

- (1) 剪切模量随剪应变增加而逐渐降低,且相同剪应变水平下的衰减幅度随围压增加而降低。
- (2) 可以利用渐近线模型表征受测应变范围内

的剪切模量随剪应变的变化规律;模型参数 $G_{\max}$ 随水灰比增加而降低、随围压增加而增加;模型参数 γ_r 随水灰比和围压增加而增加。

(3) 阻尼比随剪应变增加而增加,且相同剪应变条件下阻尼比随围压增加而降低。

(4) $D-D_{\min}$ 与 $G/G_{\max}$ 存在唯一相关性,与围压、配合比、养护龄期等因素无关。

参考文献:

- [1] 饶杰龙,张家新,于立通,等. 水盐含量和固化剂掺量对红黏土抗剪强度的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2024,22(6):196-201.
- [2] 王浩然,杨秀娟,陈顺福,等. 磷石膏-玄武岩纤维固化低黏聚性土的组合优化研究[J]. 水利与建筑工程学报,2024,22(6):172-180.
- [3] 李 瑛,刘兴旺,何一飞,等. 渠式切割水泥土连续墙的应用和发展[J]. 地基处理,2024,6(2):154-161.
- [4] 杨文军,吴毅航,门小雄,等. 海河交汇区水泥搅拌桩加固技术初探[J]. 地基处理,2024,6(2):162-171.
- [5] 郭琼玲. 高压旋喷桩在海上风电桩周土加固中的应用[J]. 地基处理,2023,5(1):62-66.
- [6] Mair R J. Developments in geotechnical engineering research: application to tunnels and deep excavations[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering, 1993,97(1):27-41.
- [7] Clayton C R I. Stiffness at small strain: research and practice[J]. Géotechnique, 2011,61(1):5-37.
- [8] 唐海斌. 高含水量水泥土工程特性试验研究[J]. 地基处理,2024,6(3):256-261.
- [9] 徐日庆,张白羚,张岗平,等. 软土固化材料研究进展[J]. 地基处理,2024,6(4):377-387.
- [10] 陈善民,王立忠,李 挺,等. 水泥土动力特性室内试验及符合地基抗震特性分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2000,34(4):398-403.
- [11] 王 军,郑 晓,蔡袁强,等. 应变控制下水泥土动静力特性试验[J]. 浙江大学学报(工学版),2010,44(10):1857-1862.
- [12] Zhang Lei, Shi Jun, Peng Qianzhuo, et al. Dynamic behavior of Haikou marine clay treated with cement[J]. Construction and Building Materials, 2023, 405: 133320.
- [13] Lang Lang, Li Fudong, Chen Bing. Small-strain dynamic properties of silty clay stabilized by cement and fly ash [J]. Construction and Building Materials, 2020,237: 117646.

(下转第 224 页)

- 版),2024,40(4):26-32.
- [8] 白令安,徐荣铭,马强分.理工类专业课程思政教学探索与研究——以《基础地质学》为例[J].高教论坛,2021(4):53-57,61.
- [9] 卢黎,谢强,朱正伟,等.工科专业思政课教学方案设计探索与实践——以土力学课程为例[J].高等建筑教育,2021,30(3):108-113.
- [10] 朱丽霞,周晶容.高校专业课与思政课教师协同育人理念的探析[J].武汉纺织大学学报,2021,34(5):72-76.
- [11] 张秋山,王耕.新工科背景下“滴灌”式课程思政研究[J].河北大学学报(哲学社会科学版),2022(2):85-92.
- [12] 张科,纳学梅.课程思政融入《土力学》教学的探索与实践[J].高教学刊,2021(18):113-116.
- [13] 陆勇,杨冬英,师文豪.以土力学为例探析专业课程的思政元素融入[J].高教学刊,2021(36):181-184.
- [14] 廖红建,黎莹.工科专业课程思政教学探索——以《土力学》混合式教学为例[J].水利与建筑工程学报,2022,20(1):195-198.
- [15] 李幻,颜荣涛,易磊,等.“土力学”课程思政案例素材库建设探究[J].华北水利水电大学学报(社会科学版),2021(6):71-75.

~~~~~  
(上接第 193 页)

- [14] Hoyos L R, Puppala A J, Chainuwat P. Dynamic properties of chemically stabilized sulfate rich clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004,130(2):153-162.
- [15] Yang Luling, Woods R D. Shear stiffness modeling of cemented clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014,52(2):156-166.
- [16] Yao Kai, Chen Qingsheng, Huo Jiahui, et al. Strain-dependent shear stiffness of cement-treated marine clay[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018,30(10):4018255.
- [17] Hardin B O, Drnevich V P. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1972,98(7):667-692.
- [18] 冯德奎,黎森宇,梁仕华.水泥固化滨海软土动力特性研究进展与评述[J].广东工业大学学报,2024,41(2):23-36.
- [19] Zhang Jianfeng, Andrus R D, Juang C H. Normalized shear modulus and material damping ratio relationships[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005,131(4):453-464.
- [20] Consoli N C, Quinonez R A, Gonzalez L E, et al. Influence of molding moisture content and porosity/cement index on stiffness, strength, and failure envelopes of artificially cemented fine-grained soils[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017,29(5):4016277.
- [21] 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.