

DOI: 10.11779/CJGE2024S20037

# 循环荷载作用下粉质黏土-混凝土界面强度预测研究

杨俊超<sup>1,2</sup>, 夏元友<sup>\*2</sup>, 崔飞龙<sup>3</sup>, 李丽华<sup>4</sup>, 吴炯晖<sup>1</sup>, 陈晨<sup>5</sup>, 田亮<sup>6</sup>

(1. 广州市第一市政工程有限公司, 广东 广州 510250; 2. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070; 3. 郑州工程技术学院, 河南 郑州 450044;  
4. 湖北工业大学, 湖北 武汉 430068; 5. 武汉工程大学, 湖北 武汉 430073; 6. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040)

**摘要:** 基于3D扫描和打印技术, 制作了与混凝土灌注桩相同的界面混凝土试件, 并进行了一系列粉质黏土-混凝土界面循环剪切试验。通过粉质黏土-混凝土界面循环剪切试验, 揭示不同循环周期、循环幅值条件下界面强度的衰减规律。通过对循环幅值和法向压力幂函数拟合, 对循环稳定后-土界面强度衰减系数进行表征, 并结合黏土-混凝土界面峰值强度模型, 提出粉质黏土-混凝土界面强度衰减模型。结果表明: 在15次循环后, 部分循环的剪切位移-剪切应力曲线近似重合; 当循环幅值逐渐增大, 剪切阶段与卸载阶段应力-应变曲线均呈现线性趋势, 每个循环圈内加载与卸载的斜率基本保持一致, 类似“平行四边形”; 不同工况的循环稳定后界面剪切峰值强度折减系数 $D_r$ 存在相同的变化趋势, 可通过循环幅值 $A$ 和法向应力 $\sigma$ 的无量纲非线性回归分析, 提出循环稳定后黏土-混凝土界面剪切峰值强度折减系数 $D_r$ 表征方法, 其拟合度较高。

**关键词:** 界面剪切; 界面强度; 粗糙度; 残余强度; 峰值强度预测

中图分类号: TU44

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S2-0194-06

**作者简介:** 杨俊超(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事桩基础、岩土和结构加固设计等方面的研究工作。E-mail: yjcresearch@163.com。

## Prediction of strength of silty clay-concrete interface under cyclic loading

YANG Junchao<sup>1,2</sup>, XIA Yuanyou<sup>2</sup>, CUI Feilong<sup>3</sup>, LI Lihua<sup>4</sup>, WU Jionghui<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>5</sup>, TIAN Liang<sup>6</sup>

(1. Guangzhou First Municipal Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510250, China; 2. Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450044, China; 4. Hubei University of Technology, Wuhan 430070, China; 5. Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China; 6. China Railway Construction Group Corporation Limited, Beijing 100040, China)

**Abstract:** Based on the 3D scanning and printing technology, the concrete specimens with the same contact surface as the concrete cast-in-place piles are produced, and a series of silty clay-concrete interface cyclic shear tests are conducted. Through the cyclic shear tests on the silty clay-concrete interface, the attenuation laws of interface strength under different cyclic periods and cyclic amplitudes are revealed. By fitting the cyclic amplitude and normal pressure power function, the strength attenuation coefficient of the concrete-soil interface after cyclic stabilization is characterized, and by combining with the peak strength model for the clay-concrete interface, the strength attenuation model for the silty clay-concrete interface is proposed. The results show that the shear displacement-shear stress curves of some cycles coincide approximately after 15 cycles. When the cyclic amplitude increases gradually, the stress-strain curves at the shear stage and unloading stage show a linear trend, and the slopes of loading and unloading in each cycle are basically consistent, similar to "parallelogram". The reduction coefficient  $D_r$  of the peak interfacial shear strength after cyclic stabilization has the same variation trend under different working conditions. A dimensionless nonlinear regression analysis of cyclic amplitude  $A$  and normal stress  $\sigma$  can be used to obtain the reduction coefficient  $D_r$  of the peak interfacial shear strength after cyclic stabilization, which has a high degree of fitting.

**Key words:** interfacial shear; interface strength; roughness; residual strength; prediction of peak strength

## 0 引言

土体与结构的界面的力学特性分析是解决土体与工程结构相互作用的关键<sup>[1-2]</sup>。在桩基础、锚杆、大坝、隧道和加筋土挡墙等构筑物中, 界面力学特性往往受到结构界面特征和土体性质的共同作用和影响。此外,

土体与结构的相互作用机理对工程结构破坏模式和稳

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(52278369); 中铁建设集团有限公司科技研究开发计划项目(23-46c); 广州市建筑集团有限公司科技计划项目(2024-KJ080)

**收稿日期:** 2024-06-21

\*通信作者(E-mail: xiayy1965@126.com)

定性评价具有重要影响,同时也是土体-结构面本构模型精细化研究的重点。大量土体与结构的界面的研究<sup>[3-6]</sup>表明界面剪切强度是土体与混凝土结构之间力学作用的重要指标之一。界面剪切强度受材料粗糙度、土壤成分、相对密度、土壤颗粒粒径分布和形态、土壤含水率、正应力大小、剪切速率、剪切方向、循环次数、环境温度等因素的影响<sup>[7-9]</sup>。

关于土体-混凝土界面本构模型也取得相应的研究。Desai 等<sup>[10]</sup>先通过改变正应力、相对位移、循环次数和初始密度等条件,依据砂土-混凝土界面循环直剪试验修正了 Ramberg-Osgood 模型参数,提出了土体与刚性界面的界面剪切强度非线性弹性模型;随后,又提出了一种基于扰动状态概念(DSC)的砂土-混凝土界面本构模型,通过循环直剪试验确定了模型参数,并通过有限元对模型进行了验证和比较<sup>[11]</sup>。Hu 等<sup>[12]</sup>提出了包含粗糙度在内的 10 个参数的界面本构模型,通过砂土-钢板的直剪试验对参数进行修正,使得模型满足界面剪切硬化、软化等应力应变行为的预测。Liu 等<sup>[13]</sup>将临界状态土力模型(CSSM)引入到界面本构模型,通过将粗糙度系数  $R_n$  对极限状态应力系数  $M_c$  进行修正,较好的描述了砂土与刚性界面之间的应变硬化、软化、法向膨胀和应力路径等。

综上所述,目前基于粗糙度系数为主要变量,预测黏土-混凝土的界面强度衰减的研究寥寥。可能原因如下:①混凝土相对钢板,其起伏度和不规则程度离散型较大,粗糙度的评价指标无法统一;②黏性土与砂土等无黏性土相比,其力学性能指标具有一定的差异性,通过一种模型覆盖所有土体-混凝土界面强度都是十分困难的。

通过定制的大型界面循环剪切试验装置,开展基于灌注桩桩身粗糙度条件下的饱和黏土-混凝土界面循环剪切试验,研究不同循环周期、循环幅值条件对粉质黏土-混凝土界面强度的衰减的影响。最后,通过对循环稳定后粉质黏土-混凝土界面强度衰减系数进行表征,并结合黏土-混凝土界面剪切强度模型,提出粉质黏土-混凝土界面强度衰减模型。

## 1 试验方案

### 1.1 试验装置

本试验采用大型循环直剪装置,如图 1 所示。该装置包含伺服加载系统、数据监测和采集系统、真空饱和系统。上下剪切盒尺寸均为  $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ ,满足 SL235—2012<sup>[14]</sup>中直剪摩擦仪的试样盒尺寸宜大于  $80\text{ mm} \times 80\text{ mm}$  的规定。装置水平方向最大荷载  $200\text{ kN}$ ,竖向最大荷载  $200\text{ kN}$ ,误差  $\pm 0.6\%$ ;

位移范围  $0 \sim 300\text{ mm}$ ,试验荷载增量  $0.0001\text{ kN}$ ;位移增量  $0.001\text{ mm}$ 。

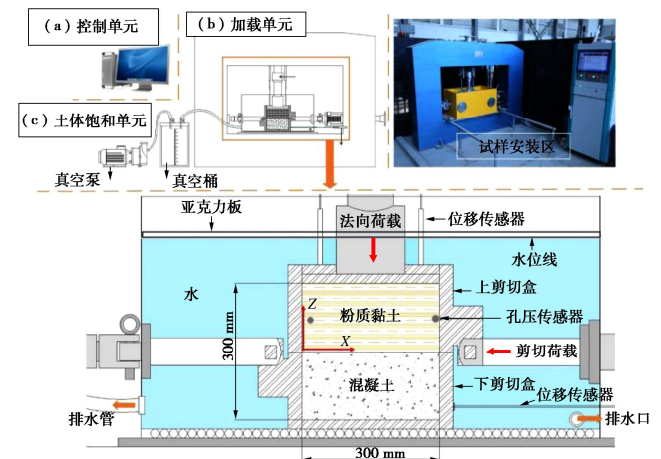


图 1 大型直剪试验装置详图

Fig. 1 Setup of large-scale direct shear tests

### 1.2 土体材料

武汉临江区域的粉质黏土广泛,埋深厚,抗剪强度低,渗透性能差。本试验土体采集于武汉临江地层地表  $-8 \sim -21\text{ m}$ 。表 1 为粉质黏土物理力学参数,测试得到其最大干密度为  $1.78\text{ g/m}^3$ 。将土体晒干烘干研磨过筛后再进行装样处理。

表 1 粉质黏土物理力学性质

Table 1 Basic physical and mechanical properties of silty clay

物理力学性能指标	数值
干重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	15.8
含水率/%	32
最优含水率/%	13
液限/%	37
塑限/%	20
孔隙比	0.82
黏聚力/kPa	44.3
内摩擦角/ $(^\circ)$	15.9

### 1.3 混凝土界面试件制作

目前,国内通常采用灌砂法<sup>[15]</sup>来评价试件界面的粗糙度系数,记做  $R_y$ :

$$R_y = \frac{V}{A} \quad (1)$$

式中:  $V$  为灌入标准砂的体积;  $A$  为混凝土试件垂直投影面积。

但灌砂法无法体现界面的各项异性。基于前期研究工作基础<sup>[5]</sup>,在 Tatone 等<sup>[16]</sup>评价参数的基础上,提出了改进 Grasselli 评价参数  $R_{MG}$ , 见式 (2)。其针对规则、不规则的界面的表征更符合客观规律。

$$R_{MG} = 2A_0 \cdot \frac{\theta_{\max}^*}{C+1} \quad (2)$$

式中:  $A_0$  为剪切方向的有效面积比;  $\theta_{\max}^*$  为最大剪切方向视倾角;  $C$  为拟合得到的节理表面粗糙度参数。

试验试块采用 3D 打印的方式还原混凝土桩桩面

粗糙度。步骤如下：通过手持 3D 扫描仪对武汉临江深基坑内裸露的不同深度位置的混凝土桩面进行 20 组随机扫描取样。再随机选取投影面积为 300 mm×300 mm 的三维模型制作混凝土试样。选取的三维模型通过 3D 打印技术制作成混凝土桩面模具，再通过模具制作混凝土试样，混凝土试块尺寸为 300 mm(长)×300 mm(宽)×150 mm(高)，数据采集及混凝土试块制作流程如图 2 所示。试验中，混凝土试块采用硅酸盐水泥 (PO32.5)。混凝土试块选用碎石为粗骨料，河沙为细骨料。

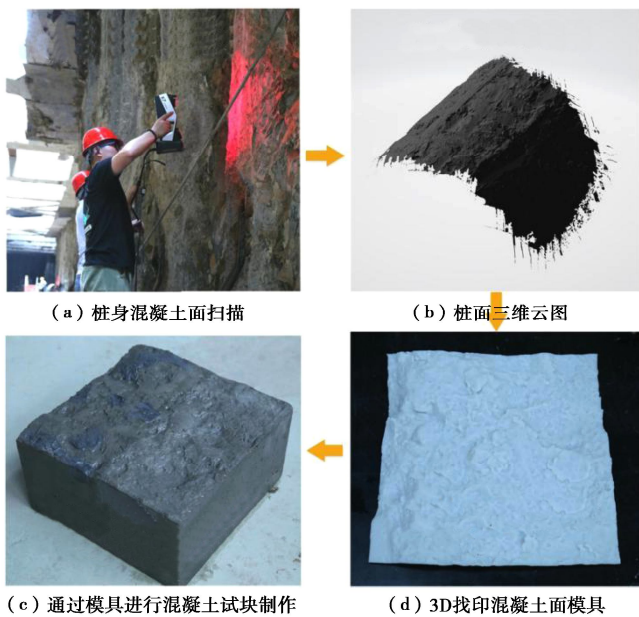


图 2 混凝土试块制作

Fig. 2 Collection and production of structural surface of concrete

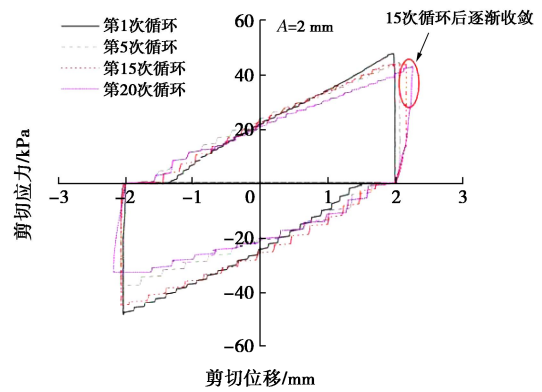
### 1.4 试验流程

直剪试验主应力分别为 100, 200, 300, 400 kPa。循环剪切速率为 1 mm/min, 剪切位移为 2, 3, 4, 5 mm, 在多次循环积累使得循环拉力稳定后, 再进行剪切破坏试验。在试验中, 法向应力通过钢柱和钢板传递到上剪切盒的粉质黏土中, 再传递到下剪切盒的混凝土试件。竖向变形和水平位移均由直线位移传感器 (LVDT) 监测。剪切最大位移为试样长度的 15%。

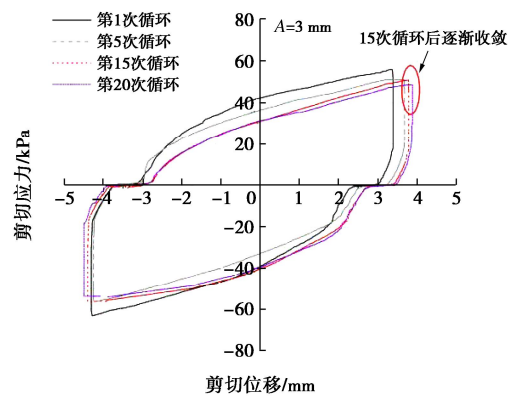
## 2 试验结果与分析

### 2.1 循环次数对剪切应力的影响

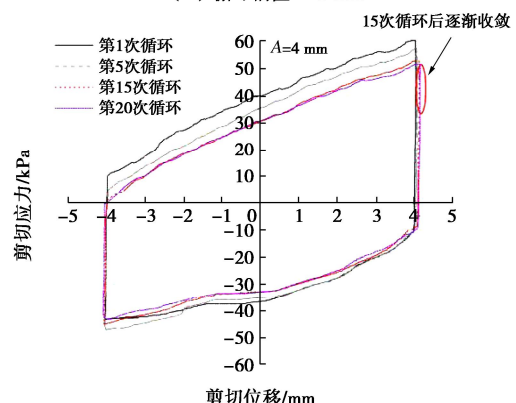
以法向压力 200 kN 为例, 不同剪切循环幅值剪切应力-剪切位移关系如图 3 所示, 每个循环的剪切应力-应变曲线基本呈现为闭合状态, 且闭合环的剪应力的极大值与极小值出现在循环的正负最大位移处, 剪切应力的最大值均出现在第 1 次循环内的最大位移处。随着循环次数增加, 剪切应力峰值逐渐降低, 加载段与卸载段间曲线夹角也逐渐变小, 即封闭的循环圈逐渐变扁平。



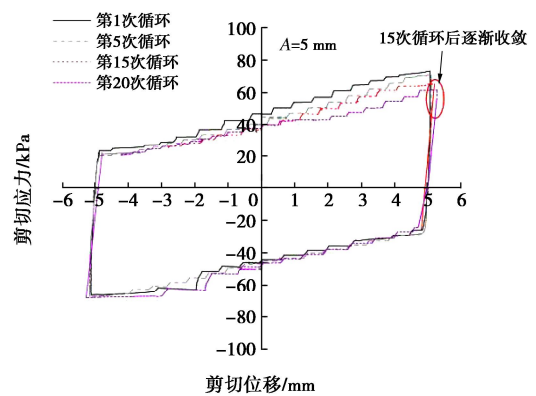
(a) 循环幅值 A=2 mm



(b) 循环幅值 A=3 mm



(c) 循环幅值 A=4 mm



(d) 循环幅值 A=5 mm

图 3 循环剪切滞回曲线

Fig. 3 Curves of shear displacement and shear stress under different cyclic amplitudes

此外, 随着循环次数的增加, 剪切应力峰值减小

的速率逐渐降低, 并逐渐趋于稳定。第 1 次循环和第 5 次循环的剪切应力-剪切位移曲线差异性较大; 而在 15 次循环后, 部分循环的剪切位移-剪切应力曲线近似重合, 这表明剪切应力-剪切位移曲线特性的差异随着循环次数的增加而减少。

## 2.2 循环幅值对剪切应力的影响

在图 3 中, 循环次数固定时, 当循环剪切幅值从 2, 3, 4, 5 mm 依次增大, 其对应循环圈内剪切应力的峰值也对应增大。Mortara 等<sup>[17]</sup>将第  $n$  次循环时循环圈极大值  $\tau_n$  与第 1 次循环时循环圈极大  $\tau_1$  之比定义为弱化系数。不同循环幅值下界面剪切弱化系数 ( $\tau_n/\tau_1$ ) 与循环次数关系见图 4。如图 4 所示, 随着循环次数的增大, 弱化系数比值不断减小, 即剪切应力极值的弱化程度变大。此外, 随着循环剪切幅值的增大, 相同循环次数下剪切应力极值的弱化程度也越大。比较图 4 中幅值下弱化系数曲线, 可以看出循环幅值越大, 曲线越陡, 即弱化增量越大, 在  $A=5$  mm 时, 最为明显。这说明循环幅值增大则对土体扰动程度越大, 土体在达到下一个稳定阶段所需要的时间或过程更长。

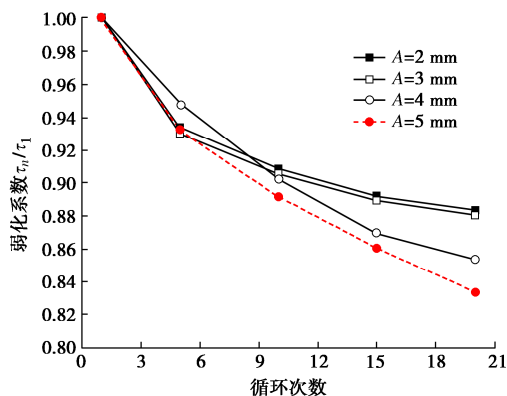


图 4 不同循环幅值下循环圈弱化系数与循环次数关系

Fig. 4 Relationship between weakening coefficient and number of cycles under different cycle amplitudes

此外, 循环幅值大小对循环圈形状改变较为显著。当循环剪切幅值较小时, 剪切阶段与卸载阶段应力-应变曲线均呈现非线性, 卸载回弹幅度较大。但当循环幅值逐渐增大, 剪切阶段与卸载阶段应力-应变曲线均呈现线性趋势, 每个循环圈内加载与卸载的斜率基本保持一致, 类似“平行四边形”, 卸载回弹位移较小。上述现象可能说明当循环幅值较小时, 卸载时桩-土界面为弹性状态; 而当循环幅值超过一定阈值, 其卸载时桩-土界面为塑性状态。

从图 4 中还可以观察到, 弱化系数  $\tau_n/\tau_1$  与循环次数呈幂函数关系, 其随循环幅值的不同平缓程度不同。因此, 将  $\tau_n/\tau_1$  作为自变量, 循环次数  $N$ 、循环幅值比

为因变量, 进行非线性拟合得到弱化系数曲线, 见下式:

$$\tau_n/\tau_1 = N^{-0.064(A/A_{\max})} \quad (3)$$

式中:  $N$  为循环次数;  $A$  为循环幅值;  $A_{\max}$  为试验中最大循环幅值。

通过式 (3) 可知, 当循环次数大于 20 次后, 弱化系数几乎无变化。因此, 随着循环次数增加, 弱化系数减小量逐渐减小, 其值逐渐趋于稳定。由于室内试验的限制, 循环次数无法持续累积, 但可通过式 (3) 进行预测。

## 2.3 基于衰减系数的循环稳定后界面剪切峰值强度预测

Poulos<sup>[18]</sup>将循环后峰值剪应力与单调加载中的峰值剪应力之比定义为应力衰减系数, 见下式:

$$D_\tau = \frac{\tau_{cp}}{\tau_p} \quad (4)$$

针对本文试验以及刘蓓<sup>[19]</sup>开展的循环剪切试验中, 不同法向压力下, 不同循环幅值的界面峰值强度衰减系数  $D_\tau$  见图 5。如图 5 所示, 相同剪切幅值下, 随着法向应力不断增大, 循环稳定后峰值强度衰减程度不断增大, 且增量不断增大。这表明高法向应力作用下, 循环剪切过程的发展对粉质黏土-混凝土界面土体扰动程度更大, 导致循环稳定后剪切强度相比单调剪切强度衰减变大。类似地, 随着循环幅值的增大, 其循环稳定后峰值轻度衰减程度不断增大, 这与 2.2 节循环圈弱化系数规律相同。

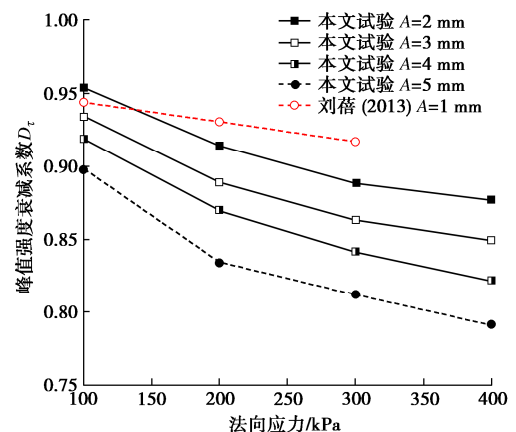


图 5 循环稳定后峰值强度衰减系数  $D_\tau$

Fig. 5 Failure mechanism of rough interface

由图 5 可知, 不同工况的循环稳定后界面剪切峰值强度折减系数  $D_\tau$  存在相同的变化趋势。因此, 通过式 (4) 对本试验以及文献中<sup>[19]</sup>峰值强度衰减系数  $D_\tau$  进行表征。将  $D_\tau$  作为因变量,  $A$  和  $\sigma$  作为自变量, 通过对自变量无量纲表示后通过非线性回归分析, 获得循环稳定后黏土-混凝土界面剪切峰值强度折减系数  $D_\tau$  预测公式如下:

$$D_{\tau} = a \left( \frac{A_{\max}}{A} \right)^b \left( \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} \right)^c \quad (5)$$

其中,  $a=0.816$ ,  $b=0.057$ ,  $c=0.066$  为拟合系数,  $A$  为循环幅值,  $A_{\max}$  为试验中最大循环幅值,  $a$  为界面剪切法向应力,  $\sigma_{\max}$  为试验中最大法向应力。

将式(5)代入式(4), 可得到循环稳定后黏土-混凝土面剪切峰值强度通过单调剪切界面剪切峰值强度的表示关系:

$$\tau_{cp} = D_{\tau} \tau_p = a \left( \frac{A_{\max}}{A} \right)^b \left( \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} \right)^c \tau_p \quad (6)$$

根据本研究团队的相关成果<sup>[5]</sup>中界面剪切极限剪切强度预测公式, 见(7), 将式(7)代入式(6)可得到循环稳定后黏土-混凝土界面剪切峰值强度  $\tau_{cp}$  预测公式, 见式(8)。

$$\tau_p = K \sigma \tan[\varphi/(91 - R_{MG})] + c \quad (7)$$

$$\tau_{cp} = a \left( \frac{A_{\max}}{A} \right)^b \left( \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} \right)^c \{ K \sigma \tan[\varphi/(91 - R_{MG})] + c \} \quad (8)$$

其中,  $R_{MG} = 2A_0 \cdot \theta_{\max}^* / C + 1$ ,  $K=0.98$ ,  $a=0.816$ ,  $b=0.057$ ,  $C=0.066$  均为拟合系数,  $a$  为法向应力,  $\varphi$  为土体摩擦角,  $c$  为土体黏聚力。

通过式(8)对本章试验和文献中<sup>[19]</sup>相关数据循环稳定后界面剪切峰值强度  $\tau_{cp}$  进行预测, 并与实际值对比见图6。试验数据与预测值数值十分接近, 只有少数数据点误差约为 $\pm 7\%$ , 而大多数数据误差范围均在 $\pm 2\%$ 以内。因此, 式(8)能够对黏土-混凝土界面循环稳定后剪切强度具有较好的预测性。

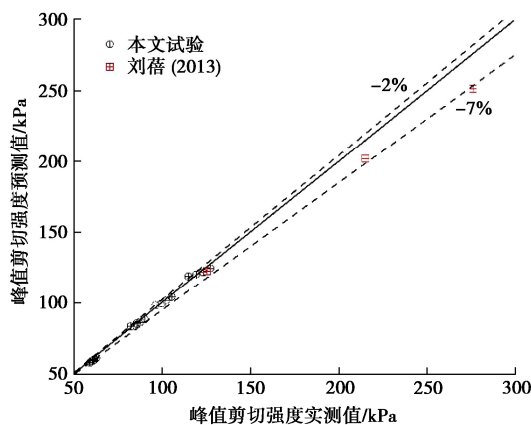


图6 黏土-混凝土界面强度预测值与实测值对比

Fig. 6 Comparison between predicted and measured strengths of clay-concrete interface

### 3 结 论

通过粉质黏土-混凝土界面循环剪切试验, 分析不同循环周期、循环幅值对界面强度的衰减影响。通过循环幅值和法向压力无量纲幂函数拟合, 对循环稳定后界面强度衰减系数进行表征, 提出粉质黏土-混凝土

界面强度衰减模型。主要得到以下4点结论。

(1) 在一个完整剪切循环内, 随着循环次数增加, 剪切应力峰值减小的速率逐渐降低, 并逐渐趋于稳定。在第15次循环后, 大部分循环的剪切位移-剪切应力曲线近似重合, 这表明剪切应力-剪切位移曲线特性的差异随着循环次数的增加而减少。

(2) 循环幅值大小对循环圈形状改变较为显著。当循环剪切幅值较小时, 剪切阶段与卸载阶段应力-应变曲线均呈现非线性, 卸载回弹幅度较大。但当循环幅值逐渐增大, 剪切阶段与卸载阶段应力-应变曲线均呈现线性趋势, 每个循环圈内加载与卸载的斜率基本保持一致, 类似“平行四边形”。

(3) 弱化系数  $\tau_n / \tau_1$  与循环次数呈幂函数关系, 随着循环次数增加, 弱化系数减小量逐渐减小, 其值趋于稳定。

(4) 将峰值剪切强度衰减系数  $D_{\tau}$  作为因变量, 循环幅值  $A$  和法向应力  $\sigma$  作为自变量, 通过无量纲非线性回归分析, 提出循环稳定后黏土-混凝土界面剪切峰值强度折减系数  $D_{\tau}$  表征方法。结合黏土-混凝土界面峰值强度模型, 提出粉质黏土-混凝土界面强度衰减模型, 具有较高的拟合度。

### 参考文献:

- [1] CHEN X, ZHANG J, XIAO Y, et al. Effect of roughness on shear behavior of red clay-concrete interface in large-scale direct shear tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(8): 1122-1135.
- [2] YANG W D, WANG Y N, WANG L, et al. Time-dependent behaviour of clay-concrete interfaces with different contact surface roughnesses under shear loading[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2021, 25(4): 539-564.
- [3] 苏新斌, 廖晨聪, 刘世奥, 等. 基于预制滑动面的饱和黏土-结构物界面强度特性三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(10): 2852-2860. (SU Xinbin, LIAO Chencong, LIU Shiao, et al. Triaxial test for strength characteristics of saturated clay-structure interface based on prefabricated sliding surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(10): 2852-2860. (in Chinese))
- [4] 王钰轲, 李朕宇, 钟燕辉, 等. 渗透型高聚物与过江盾构隧道接缝混凝土界面特性[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(增刊2): 195-200. (WANG Yuke, LI Zhenyu, ZHONG Yanhui, et al. Interfacial behavior of permeable polymer and concrete at joints of cross-river shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(S2): 195-200. (in Chinese))

- [5] YANG J C, XIA Y Y, CHEN W D, et al. The shear behavior of silty clay-concrete interface based on large-scale direct shear test[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, **7**(23): 04023084.
- [6] 成浩, 陈晓斌, 张家生, 等. 红黏土-混凝土结构接触面残余强度特性试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, **48**(9): 2458-2464. (CHENG Hao, CHEN Xiaobin, ZHANG Jiasheng, et al. Experimental research on residual shear strength of red clay-concrete structure interface[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, **48**(9): 2458-2464. (in Chinese))
- [7] MAGHSOODI S, CUISINIER O, MASROURI F. Effect of temperature on the cyclic behavior of clay-structure interface[J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2020, **146**(10): 04020103.
- [8] 何鹏飞, 马巍, 穆彦虎, 等. 冻融循环对冻土-混凝土界面冻结强度影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(2): 299-307. (HE Pengfei, MA Wei, MU Yanhu, et al. Experiment study on effects of freeze-thaw cycles on adfreeze strength at frozen soil-concrete interface[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(2): 299-307. (in Chinese))
- [9] 刘飞禹, 朱晨, 王军. 剪切速率和法向加载频率对筋土界面剪切特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(5): 832-840. (LIU Feiyu, ZHU Chen, WANG Jun. Influences of shear rate and loading frequency on shear behavior of geogrid-soil interfaces[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(5): 832-840. (in Chinese))
- [10] DESAI C S, DRUMM E. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, **6**(111): 793-815.
- [11] DESAI C S, PRADHAN S K and COHEN D. Cyclic testing and constitutive modeling of saturated sand-concrete interfaces using the disturbed state concept[J]. *Int J Geomech*, 2005, **5**(4): 286-294.
- [12] HU L, PU J. Testing and modeling of soil-structure interface[J]. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2004, **130**(8): 851-860.
- [13] LIU H, SONG E and LING H L. Constitutive modeling of soilstructure interface through the concept of critical state soil mechanics[J]. *Mech Res Commun*, 2006, **33**(4): 515-531.
- [14] 土工合成材料测试规程: SL 235—2012[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (Specification for Test and Measurement of Geosynthetics: SL 235—2012[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. (in Chinese))
- [15] 赵志方, 赵国藩. 采用高压水射法处理新老混凝土黏结面的试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 1999, **39**(4): 96-99. (ZHAO Zhifang, ZHAO Guofan. Experimental research on treating interface of young on old concrete with high pressure water jet method[J]. *Dalian Univ Technol*, 1999, **39**(4): 96-99. (in Chinese))
- [16] TATONE B S A, GRASSELLI G. A method to evaluate the three-dimensional roughness of fracture surfaces in brittle geomaterials[J]. *Rev Sci Instrum*, 2009, **80**(12): 181-106.
- [17] MORTARA G, BOULON M, GHIONNA V N. A 2-D constitutive model for cyclic interface behaviour[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2002, **26**(11): 1071-1096.
- [18] POULOS H G. Cyclic axial loading analysis of piles in sand:[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 1989,**6**(115): 836-852.
- [19] 刘蓓. 红黏土与混凝土结构界面力学特性的试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013. (LIU Bei. The Text Study on Mechanical Properties of Interface between Red Clay and Concrete Structure[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)