

DOI: 10.11779/CJGE20240868

考虑循环软化的非线性界面本构模型研究

蔡正银, 范开放*, 朱 洵

(南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘 要: 提出一种考虑循环软化、非线性的无厚度界面本构模型。首先, 开展了砂土-钢界面的大型循环剪切试验研究, 获取了界面循环剪切下强度参数指数型的软化规律, 提出了考虑土体相对密实度和结构粗糙度耦合作用的循环软化表征方程; 其次, 将引入循环软化方程的双曲线模型作为骨架曲线模型, 实现循环荷载作用下界面从初始状态演变至临界状态的模拟; 最终, 考虑界面剪切的非线性, 构造了剪应力-剪位移的滞回圈模型, 并总结了模型的强度参数、刚度参数与法向应力、土体相对密实度、结构粗糙度的经验公式。采用新建立的模型对试验结果和既有文献结果进行了预测, 证明了对界面循环剪切试验具有良好的模拟效果。

关键词: 砂土-钢界面; 循环软化; 相对密实度; 粗糙度; 本构模型

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)10-2015-11

作者简介: 蔡正银(1965—), 男, 教授级高级工程师, 从事土的基本性质与土工测试、土的本构理论、土工离心模拟技术方面的研究工作。E-mail: zycail@nhri.cn。

Research on nonlinear constitutive model of interface considering cyclic softening

CAI Zhengyin, FAN Kaifang, ZHU Xun

(Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: A zero-thickness interface constitutive model that considers cyclic softening and nonlinearity is proposed. Firstly, large-scale cyclic shear tests are conducted on the sand-steel interface to obtain the exponential softening law of strength parameters under cyclic shear tests. A cyclic softening equation considering a coupling effect of soil relative density and structural roughness is proposed. Secondly, a hyperbolic model incorporating the cyclic softening equation is used as the skeleton curve model to simulate the evolution of the interface from the initial state to the critical state under cyclic loading. Finally, considering the nonlinearity of interface shear, a hysteresis loop model of shear stress-shear displacement is constructed. In addition, empirical formulas for the strength parameters, stiffness parameters, normal stress, relative soil density, and structural roughness of the model are summarized. A newly established model is used to predict experimental results of this paper and existing literature, demonstrating its excellent capability in simulating interface cyclic shear tests.

Key words: sand-steel interface; cyclic softening; relative density; roughness; constitutive model

0 引 言

界面承担着土体与结构间的荷载传递和变形协调功能, 由于土体与结构间的刚度巨大差异, 界面力学特性不同于周围土体、更异于结构的力学特性。界面剪切问题广泛存在于岩土工程的各个领域, 研究界面剪切的影响因素及本构模型, 对于评价结构物和土体的受力变形具有重要意义^[1]。近年来, 随着海洋资源的不断开发, 风、波浪、海流和地震等荷载下结构物-

地基土体的界面动力特性逐渐引起了广泛关注^[2-4]。

密实砂土-结构界面在循环剪切或大位移单调剪切时呈现出较明显的应变软化现象^[5-7], 国内外学者进行了大量的试验研究及本构模型开发。Shahrour 等^[5]采用直剪仪对常法向应力下密砂-钢界面的循环软化和松砂-钢界面的循环硬化现象进行了定性描述。Westgate 等^[6]和 Dejong 等^[7]的试验结果表明, 随着法向应力的增加, 剪应力-剪位移曲线从应变软化型演变

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604200); 国家自然科学基金项目(52378358, 52401336); 江苏省青年基金项目(BK20230125); 江苏省重点研发计划社会发展项目(BE2023673) This work was supported by National Key Research and Development Program of China (Grant No.2023YFB2604200), National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52378358 and 52401336), Jiangsu Provincial Youth Fund Project (Grant No. BK20230125), Jiangsu Provincial Key Research and Development Program (Social Development) Project (Grant No. BE2023673).

收稿日期(Received): 2024-08-27 修回日期(Revised): 2025-05-15 接受日期(Accepted): 2025-05-29 网络出版日期(Online): 2025-05-30

*通信作者(E-mail: kaifangfan@163.com)

成应变硬化型。Zhou 等^[8]认为随着土颗粒球形度的降低,界面剪切强度逐渐增加,应力软化现象更为显著。叶至韬等^[9]认为先期多次循环剪切会使得砂土-钢板界面强度发生软化,但并未就软化特性的影响因素进行探讨。Afzali 等^[10]和 Han 等^[11]认为在一定法向应力条件下,随着结构面粗糙程度的增加,应变软化特性呈现增强趋势。综上所述,界面强度软化特性较为复杂,受到加载条件、土体特性及结构面特性等多方面的影响^[12-14],而现有试验多针对单一因素开展,缺乏考虑多因素耦合作用的系统研究。

界面本构模型开发方面,依据包含或可描述的状态量个数,可分为以下几种类型:

(1) 0 个状态量:在试验的基础上,Shahrour 等^[5]、Zhou 等^[15]提出了弹塑性界面本构模型,模型简洁、便于理解及应用,但该类模型无法具体反映应力水平亦或土体状态等因素的影响,即此类模型实质上将相同界面在不同应力水平、不同土体相对密实度、不同结构粗糙度时视为不同材料。

(2) 1 个状态量:张嘎等^[16]建立了能统一描述单调与循环加载条件下接触面应变软化、剪胀规律及物态演化等的弹塑性损伤本构,其采用损伤因子来表征界面强度的软化特性,可以描述不同应力水平下的界面软化特性。

(3) 2 个状态量:方火浪等^[17]在粒状土的状态相关和界面弹塑性理论框架内建立了一个多重剪切界面本构模型;Zhang 等^[18]在临界状态土力学基础上,提出了归一化剪切位移的概念,并对 Pyke 准则进行了修改来模拟界面循环荷载响应;此类模型能同时反映土体状态和应力水平两个变量对界面剪切特性的影响。

(4) 3 个状态量:在二阶状态相关本构的基础上,Liu 等^[19]、刘锐明^[20]尝试将界面模型扩展至考虑结构粗糙度的影响,模型对单调剪切时的界面强度软化现象已有较好描述,但均未涉及循环剪切情形,相关研究尚且不足。

因此,本文首先针对砂土-钢桩界面的循环软化特性开展了一系列剪切试验,提出了界面循环软化的表征方法,并建立了综合考虑法向应力、土体相对密实度和结构粗糙度耦合作用的界面循环剪切本构模型,最终就模型的适用性进行了验证。

1 循环软化特性影响因素试验研究

1.1 试验概况

界面剪切试验采用南京水利科学研究院自研制的 NHRI-860 大型多功能轴对称界面剪切仪(见图 1)。

该仪器由竖向剪切控制系统、法向荷载控制系统、剪切罐、数据采集与存储系统和落砂装置构成,可用于单调和循环荷载/位移控制下的土体与模型桩界面剪切测试^[20],最大法向应力为 1 MPa,竖向剪切位移范围为 0~850 mm,剪切速率为 0.001~25 mm/s,最大桩土接触范围为 860 mm×10 mm(高×直径),剪切过程中桩-土接触面积可保持恒定,本试验的桩土接触范围设定为 668 mm×3 mm(高×直径)。试验用土取自杭州湾附近海域的含细粒土砂,细粒含量(粒径小于 0.075 mm)为 7.33%,不均匀系数 $C_u=3.75$,曲率系数 $C_c=0.03$, $d_{50}=0.28$ mm,颗粒级配曲线见文献^[21]。



图 1 大型多功能界面剪切仪

Fig. 1 Large multifunctional interface shearing instrument

试验采用砂雨法制备土样,首先在砂雨法制样标定试验的基础上^[20],称取所需干砂放入落砂装置,通过控制落距和落砂盘种类制备不同的砂土相对密度,落砂装置每制样 1 cm 提升一次。其次,对不同初始相对密度的试样进行法向应力施加,依据试样体变结果,换算出法向应力与相对密实度关系曲线。在此基础上进行相对密实度的修正,以保证不同法向应力下试样剪切前相对密实度的一致。模型钢桩采用无缝钢管进行制作,桩身表面进行开三角槽处理,通过控制三角槽间距离、槽宽以及槽深,来模拟不同界面粗糙度(表 1)。依据 Frost 等^[22]提出的轮廓算术平均值定量描述界面粗糙度,计算公式为

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z| dx \quad (1)$$

式中: R_a 为粗糙度; L 为样本长度; z 为轮廓与平均线的绝对距离。

表 1 钢桩参数

Table 1 Parameters of steel piles				
编号	槽间距/mm	槽宽/mm	槽深/mm	粗糙度/ μm
1	—	—	—	0.2
2	50	3	1	33.2
3	50	3	3	91.9
4	40	5	3	191.6
5	40	9	3	340.9

1.2 试验方案

为了探讨法向应力、相对密实度和结构粗糙度对界面循环软化特性的影响,开展了 4 个法向应力、4 个相对密实度和 5 个结构粗糙度条件下共 80 组大型界面循环剪切试验,剪切速率和剪切位移幅值分别为 0.1 mm/s 和 5 mm,循环次数设定为 200 次,试验方案如表 2 所示。

表 2 试验方案

Table 2 Testing scheme	
试验变量	变量值
法向应力 σ_n/kPa	50, 100, 150, 200
相对密实度 D_r	0.5, 0.6, 0.7, 0.8
粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	0.2, 33.2, 91.9, 191.6, 340.9

1.3 试验结果分析

图 2 展示了砂土-钢桩循环剪切试验典型结果,图 2 (a) ~ (d) 为剪应力-剪切位移曲线,图 2 (e) 为剪应力随循环剪切次数变化的曲线。为能够清晰展现界面循环剪切规律,部分试验仅展示前 10 次循环剪切结果。此外,为了方便叙述,将初次剪切的方向定义为正向剪切方向,反之为反向剪切方向。总体而言,剪应力-剪切位移曲线呈现出明显的循环软化特征,同一循环次数内的正向剪切峰值强度与反向剪切峰值强度基本一致,当循环剪切次数足够大时,滞回曲线逐渐稳定,即砂土-钢桩界面试样达到了临界状态。

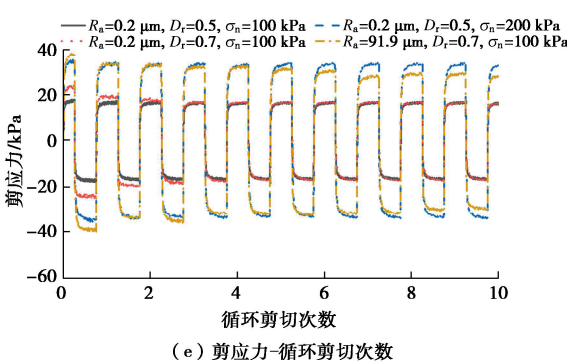
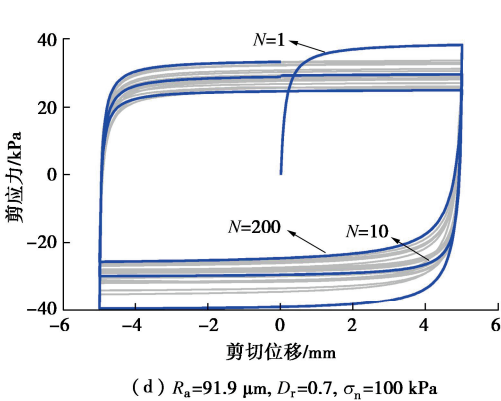
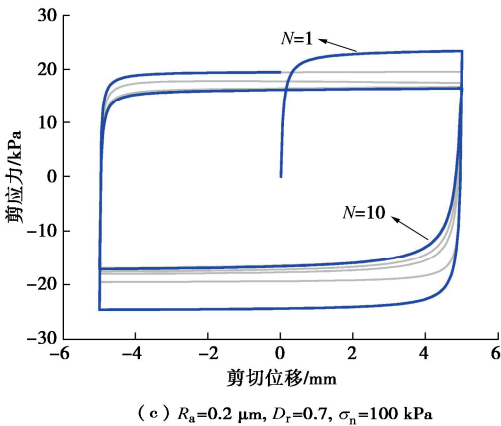
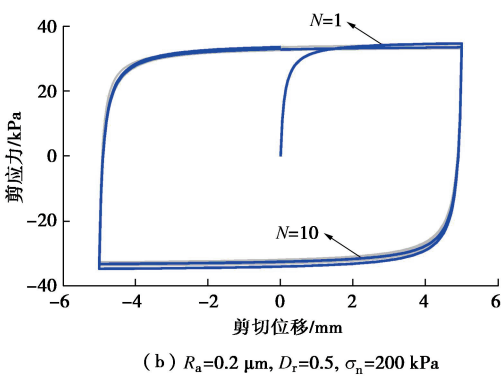
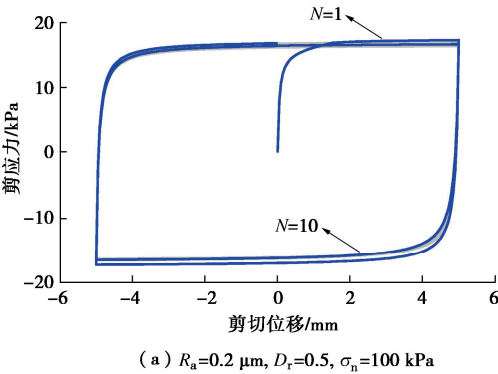


图 2 剪应力-剪切位移曲线

Fig. 2 Shear stress-shear displacement curves

对比图 2 (a), (b), 可以看出同一土体相对密实度和结构粗糙度情况下,界面剪切强度随着法向应力的增大而提升,而软化比例及速率基本不随法向应力的变化而变化;对比图 2 (a), (c), (d) 可以看出,相对密实度及结构粗糙度对界面剪切强度均有提升效果,且界面软化特性受到相对密实度及粗糙度的耦合

影响, 具体为: 界面越粗糙、相对密实度越大, 界面软化速率越慢、软化幅值越大, 这一现象与前人针对界面单调^[19-20]的研究结论类似。

2 循环剪切软化的表征模型

2.1 基本函数

在本文试验范围内, 砂土-钢桩界面的初始“结构”在循环剪切作用下不断调整、劣化, 剪切强度呈逐渐软化至稳定残余值的趋势, 是一种微观层面上连续累积且不可逆的结构损伤现象, 可用损伤力学概念描述。摩擦系数衰减是界面损伤的外化表现形式, 因此可采用摩擦系数软化曲线作为损伤函数的构造基础, 本文将界面摩擦系数 (μ) 定义为每个循环内峰值剪应力和法向应力的比值^[23]。

假定损伤量 (D) 是累积塑性位移 (z_p) 的函数: 对于完全无损的试样, $D=0$; 对于完全损伤的试样, $D=1$; 损伤函数可表示为

$$D = 1 - S(z_p) \quad (2)$$

损伤本构模型的关键在于构建合理表征界面循环特性的损伤函数。结合一组界面剪切试验数据 (R_a 为 $91.9 \mu\text{m}$, D_r 为 0.7) 说明摩擦系数的演变趋势, 进而确定损伤函数的形式。图 3 展示了不同法向应力情况下, 摩擦系数随着累积塑性位移的演变规律。考虑到正向剪切和反向剪切的峰值强度基本一致 (图 2), 此处的摩擦系数为正向剪切和反向剪切的平均值。

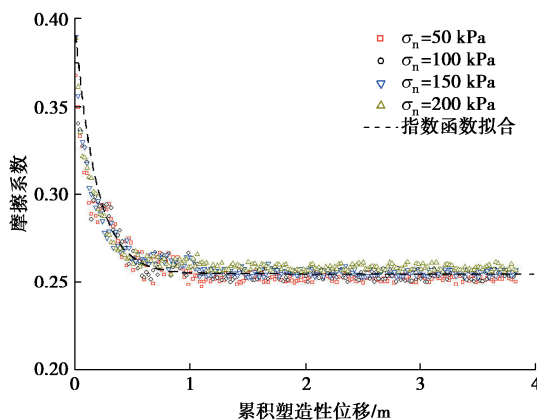


图 3 不同法向应力下摩擦系数-累积塑性位移关系

Fig. 3 Relationship between friction coefficient and accumulated plastic displacement under different normal stresses

由图 3 可以看出, 在本文法向应力范围内, 界面摩擦系数随累积塑性位移演变趋势基本一致, 均呈现出非线性衰减趋势; 摩擦系数虽有一定波动但基本与法向应力无关, 故在研究类似砂土-钢桩界面摩擦系数问题时, 可忽略法向应力的影响; 循环剪切试验中后

期, 摩擦系数基本稳定, 试样达到了临界状态, 对应的摩擦系数定义为临界摩擦系数 (μ_r)。

图 3 还表明, 摩擦系数-累积塑性位移关系可采用指数函数进行描述, $R^2 > 0.96$, 公式如下:

$$\mu = \mu_r + (\mu_i - \mu_r)e^{-z_p/\zeta_r} \quad (3)$$

式中: μ_r 为函数在 y 轴的截距, 可认为界面摩擦系数初始潜势, 定义为初始摩擦系数; ζ_r 为模型参数, 用于调节摩擦系数的衰减速率。

利用 μ_r 及 μ_i 对式 (3) 进行归一化处理, 即可得到损伤函数 D 的表达式:

$$S(z_p) = \frac{\mu - \mu_r}{\mu_i - \mu_r} = e^{-z_p/\zeta_r}, \quad D = 1 - e^{-z_p/\zeta_r} \quad (4)$$

2.2 相对密度的引入

以 R_a 为 $91.9 \mu\text{m}$ 和 σ_n 为 100 kPa 为例, 图 4 展示了不同土体相对密实度情况下, 摩擦系数随累积塑性位移的演变规律。总体上看, 随着 D_r 的增加, 衰减至稳定阶段所需的累积塑性位移有一定增加。这是因为循环剪切作用会改变初始砂土骨架结构, 影响砂土-钢桩表面间的联锁作用, 剪切过程中砂颗粒会持续滑动、滚动、磨损, 直至形成可适应当前循环剪切作用的砂-钢稳定结构。由于密实砂土间的初始骨架结构更强、孔隙更小, 砂颗粒滑动、滚动等位置调整较为困难, 因此需要更多累积塑性位移才能形成稳定的砂土-钢桩界面接触结构。

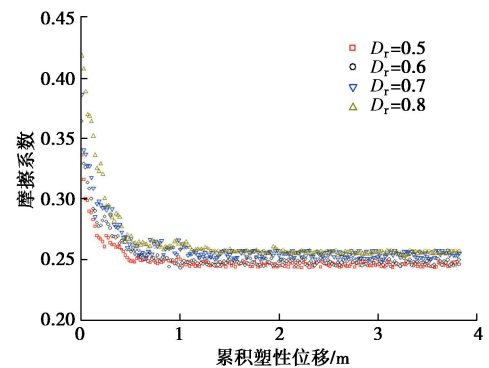


图 4 不同 D_r 下摩擦系数-累积塑性位移关系

Fig. 4 Relationship between friction coefficient and accumulated plastic displacement under different relative densities

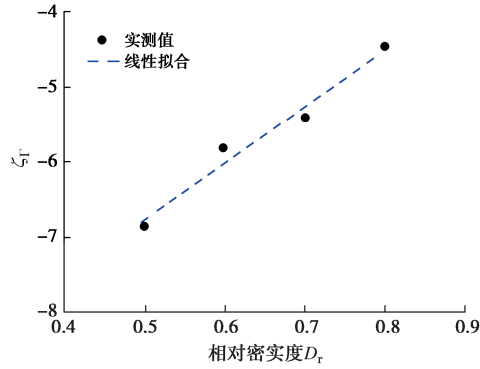
图 5 展示了以式 (4) 对试验结果进行拟合结果, 模型系数 ζ_r 与 D_r 之间存在良好的线性关系, $R^2 = 0.976$, 可用如下公式表示:

$$\zeta_r = \beta + \lambda D_r \quad (5)$$

式中: β 和 λ 为材料常数。

联合式 (4), (5), 则可得到考虑相对密实度的界面循环剪切损伤函数:

$$D = 1 - e^{-z_p/(\beta + \lambda D_r)} \quad (6)$$

图 5 参数 ζ_Γ -相对密度 D_r 关系曲线Fig. 5 Relationship between ζ_Γ and relative density

2.3 粗糙度的引入

以 D_r 为 0.7, σ_n 为 100 kPa 为例, 图 6 展示了不同界面粗糙度情况下, 摩擦系数随累积塑性位移的演变规律。随着界面粗糙度 R_a 增加, 摩擦系数的衰减越明显, 试样摩擦系数到达稳定阶段所需的累积塑性位移越大。此外, 和图 4 对比可以看出, 相较于相对密度, 粗糙度对摩擦系数演变的影响更为显著。

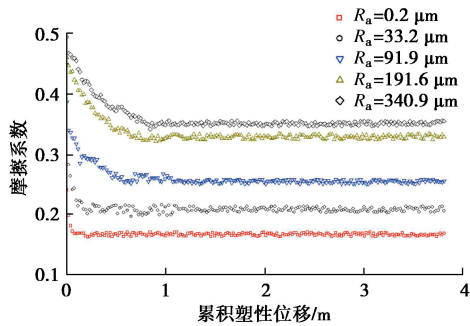


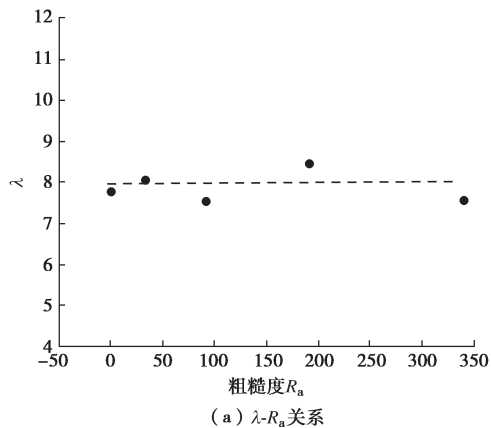
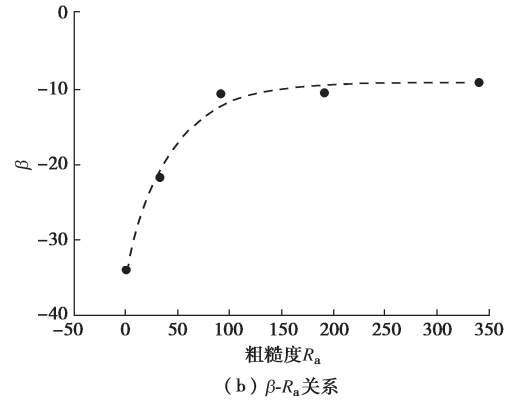
图 6 不同粗糙度下摩擦系数-累积塑性位移关系

Fig. 6 Relationship between friction coefficient and accumulated plastic displacement under different roughness

根据式 (6), 将试验得到的不同粗糙度 R_a 下 λ 和 β 进行计算汇总。由图 7 (a) 可知, λ 虽然有一定波动但基本与 R_a 无关, 可视为常数 (即 $\lambda=7.97$); 由图 7 (b) 可知, β 和 R_a 关系曲线可用指数函数拟合, $R^2>0.98$:

$$\beta = \beta_0 + \beta_R e^{(R_a/\eta)} \quad (7)$$

式中: β_0 , β_R , η 为材料参数, 在本文中依次为 -9.18, -25.12, -43.09。

(a) λ - R_a 关系(b) β - R_a 关系图 7 参数 λ , β 与粗糙度关系Fig. 7 Relationship between roughness and λ , β

联合式 (6), (7), 则可得到考虑相对密度 D_r 和界面粗糙度 R_a 的循环剪切损伤函数:

$$D = 1 - e^{\tau_p (\beta_0 + \beta_R e^{(R_a/\eta)} + \lambda D_r)} \quad (8)$$

3 界面动本构模型

由前述的试验结果可知, 循环剪切作用下砂土-钢桩界面应力位移曲线具有非线性、滞后性特点, 可由骨架曲线、卸载曲线和再加载曲线构成的滞回圈进行反映^[24-26], 如图 8 所示。

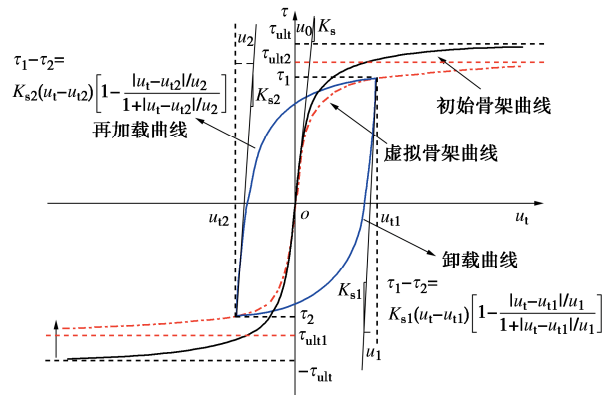


图 8 滞回圈构造示意图

Fig. 8 Schematic diagram of hysteresis loop

在前述循环软化表征模型的基础上, 进行界面动本构模型构建, 基本假定为: ①初始加载过程中, 应力-位移曲线为初始骨架曲线; ②在初始骨架曲线基础上引入界面循环剪切损伤函数, 并将其定义为虚拟骨架曲线, 以作为后续每次剪切的骨架曲线; ③卸载及再加载曲线与虚拟骨架曲线在交汇后, 后继加卸载过程中应力-位移曲线与虚拟骨架曲线一致。

3.1 基本函数

本文试验数据及大量文献^[5~7, 9, 20]表明, 小变形情况下土体与结构界面单调行为的主要特点为非线性硬化, 双曲线模型可以较好的表征此特征, 曲线基本形式如下^[26]:

$$\tau = K_s u_t [1 - H(u_t)] \quad , \quad (9)$$

$$H(u_t) = \frac{u_t / u_0}{1 + u_t / u_0} \quad . \quad (10)$$

式中: τ 为剪应力; K_s 为初始剪切刚度; u_t 为剪位移; u_0 为参考剪切位移, $u_0 = \tau_{ult} / K_s$; τ_{ult} 为当 $u_t \rightarrow \infty$ 的剪应力。

骨架曲线为无损伤和临界状态的线性叠加^[16], 将试验结束时的状态近似作为临界状态, 则表达式为

$$\tau = (1 - D)\tau_r + D\tau_c \quad , \quad (11)$$

式中: τ_r 为无损伤的界面剪应力; τ_c 为临界状态的界面剪应力。此外, 考虑到剪切过程中, 界面剪切破坏状态时的界面剪切应力与 τ_{ult} 之间的差异, 引入破坏比的概念^[20]:

$$R_f = \tau_r / \tau_{ult} \quad . \quad (12)$$

式中, R_f 为破坏比; τ_r 为界面剪切破坏状态时的界面剪切应力, $\tau_r = \sigma_n \mu_p$ 。

前人研究表明^[27], 初始剪切刚度 K_s 与法向应力 σ_n 的关系可以由如下公式表示:

$$\lg(K_s / \gamma_w) = \lg K_1 + n \lg(\sigma_n / P_a) \quad . \quad (13)$$

式中: K_1 为无量纲刚度系数; n 为刚度指数; γ_w 为水的重度, 取值 9.8 kN/m^3 ; P_a 为标准大气压, 取值 101 kPa 。

联立式 (9) ~ (13) 及式 (4), 则得到骨架曲线的表达式:

$$\tau = \frac{e^{\tau_p \cdot \zeta_r} u_t \sigma_n \mu_r K_1 \gamma_w (\sigma_n / P_a)^n}{\sigma_n \mu_r + R_f u_t K_1 \gamma_w (\sigma_n / P_a)^n} + \frac{(1 - e^{\tau_p \cdot \zeta_r}) u_t \sigma_n \mu_r K_1 \gamma_w (\sigma_n / P_a)^n}{\sigma_n \mu_r + R_f u_t K_1 \gamma_w (\sigma_n / P_a)^n} \quad (14)$$

以一组试验结果为例, D_r 为 0.7, R_a 为 $91.9 \mu\text{m}$, σ_n 为 100 kPa , 图 9 展示了骨架曲线随着循环次数的演变趋势。由图 9 可见, 本文借助损伤函数构建的虚拟骨架曲线, 能较好地反映界面强度循环软化特性。

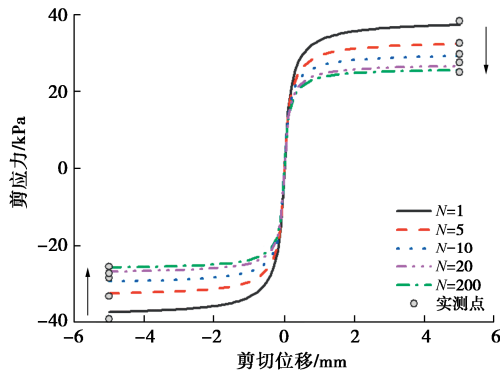


图 9 虚拟骨架曲线演化示意图

Fig. 9 Development of virtual backbone monotonic curve

当循环剪切过程中剪切位移方向发生转变时, 需要考虑剪应力-剪位移曲线的反转效应。为了很好地表征界面循环剪切的力学行为, 须对应力-位移曲线反转点进行判别^[15]。本模型中应力-位移曲线的反转判别

准则如下:

$$\begin{cases} \vec{\tau} : \dot{u}_t > 0 & (\text{加载}) \\ \vec{\tau} : \dot{u}_t \leq 0 & (\text{卸载}) \end{cases} \quad . \quad (15)$$

不同于 Masing 法则的“二倍”关系^[28], 本文的加卸载法则摒弃了骨架曲线与卸载曲线、再加载曲线的严格对应关系。如图 8 所示, 假定卸载曲线和再加载曲线均符合双曲线函数, 表达形式即为

$$\text{卸载曲线: } \tau - \tau_1 = K_{s1} (u_t - u_{t1}) \left[1 - \frac{|u_t - u_{t1}| / u_1}{1 + |u_t - u_{t1}| / u_1} \right], \quad (16)$$

再加载曲线:

$$\tau - \tau_2 = K_{s2} (u_t - u_{t2}) \left[1 - \frac{(u_t - u_{t2}) / u_2}{1 + (u_t - u_{t2}) / u_2} \right], \quad (17)$$

其中

$$u_1 = \frac{\tau_1 - \tau_{ult1}}{K_{s1}}, \quad u_2 = \frac{\tau_{ult2} - \tau_2}{K_{s2}} \quad . \quad (18)$$

式中: τ_{ult1} 和 τ_{ult2} 分别为卸载曲线和再加载曲线渐近线的纵坐标, 也即为虚拟骨架曲线渐近线的纵坐标; τ_1 和 τ_2 分别为卸载曲线和再加载曲线交点的纵坐标, 可依据剪切位移幅值 (u_{t1} 或 u_{t2}) 和虚拟骨架曲线表达式进行求解; u_1 及 u_2 为卸载曲线及再加载曲线的参考剪切位移; K_s , K_{s1} 及 K_{s2} 为虚拟骨架曲线、卸载曲线及再加载曲线的初始剪切刚度, 它们之间的关系可表示为

$$K_{s1} = \psi_1 K_s, \quad K_{s2} = \psi_2 K_s \quad . \quad (19)$$

式中: ψ_1 及 ψ_2 为材料参数。

3.2 相对密度的引入

上述基本函数中有两类需要确定的关键参数: 刚度参数 K_s 和强度参数 μ_r , μ_c 。本节思路为直接研究相对密度 D_r 与 K_s , μ_r , μ_c 的相关规律。

(1) D_r 与 K_s 的相关关系

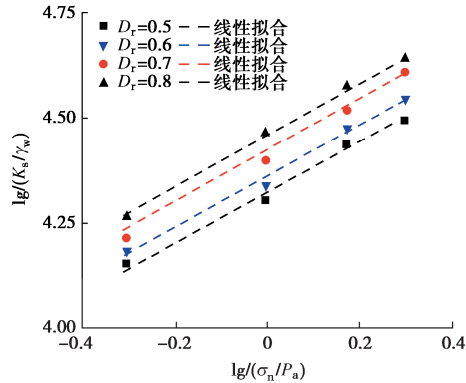
以 R_a 为 $0.2 \mu\text{m}$ (最光滑) 和 R_a 为 $340.9 \mu\text{m}$ (最粗糙) 两个界面试样试验结果为例, 图 10 给出双对数坐标系中不同 D_r 情况下的 K_s / γ_w 与 σ_n / P_a 的关系。可以看出式 (13) 对试验结果具有良好预测效果, 相关系数 R^2 均大于 0.96。不同密度得到的拟合结果规律较为一致, 各拟合线间近似平行。随着相对密度的增大, 拟合线的斜率基本保持不变, 拟合线的截距逐渐增大。

将不同粗糙度、不同相对密度情况下由式 (13) 拟合得到的参数 K_1 和 n 进行汇总, 如图 11 所示。对于每一种界面粗糙度, K_1 都随着相对密度 D_r 的增长而增长, 二者之间存在着良好的线性关系, R^2 均大于 0.95, 如下所示:

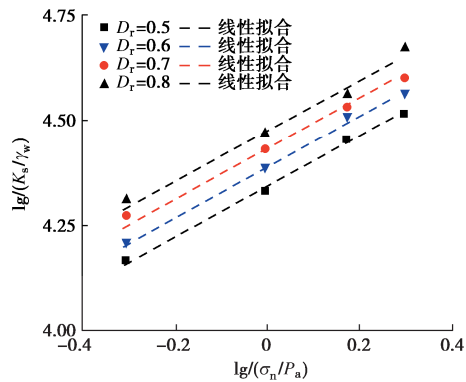
$$K_1 = a_1 + a_2 D_r \quad . \quad (20)$$

式中: a_1 和 a_2 为材料常数, 对于本文试验, $a_1 = 24225$

和 $a_2=9360$ 。



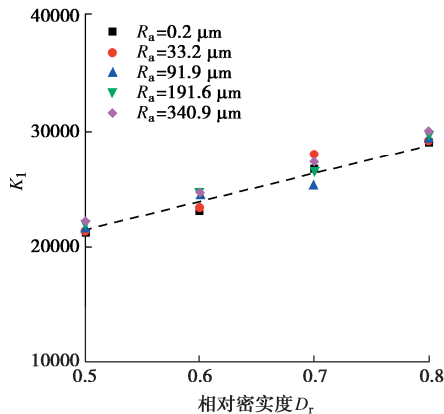
(a) $R_a = 0.2 \mu\text{m}$



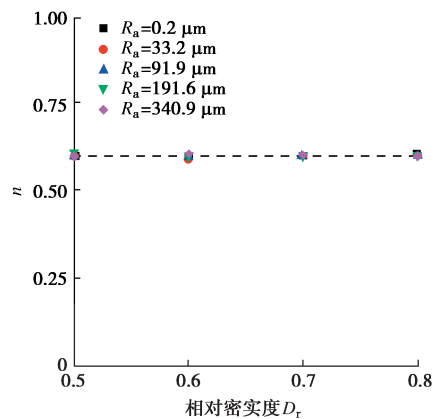
(b) $R_a = 340.9 \mu\text{m}$

图 10 $\lg(K_s/\gamma_w)$ 与 $\lg(\sigma_n/P_a)$ 关系

Fig. 10 Relationship between $\lg(K_s/\gamma_w)$ and $\lg(\sigma_n/P_a)$



(a) K_1 - D_r 相关性关系



(b) n - D_r 相关性关系

图 11 参数 K_1 , n 与 D_r 关系

Fig. 11 Relationship between K_1 , n and D_r

图 11 表明参数 n 与相对密度 D_r 的相关性不明显, 在本文试验范围内可视为常数 (即 $n=0.605$)。还可以看出, 相同相对密度 D_r 情况下, 不同粗糙度对于的 K_1 和 n 基本一致, 说明粗糙度对初始剪切刚度的影响较小, 因此忽略粗糙度对界面初始剪切刚度的影响。

综上所述, 将式 (20) 代入式 (13), 考虑法向应力 σ_n 和相对密度 D_r 的初始剪切刚度可统一表示为

$$K_s = (a_1 + a_2 D_r) \gamma_w (\sigma_n / P_a)^n \quad (21)$$

(2) D_r 与 μ_r , μ_r 的相关关系

依据试验数据, 图 12, 13 展示了 5 种界面粗糙度在法向应力 σ_n 为 100 kPa 的情况下, 摩擦系数 (μ_r , μ_r) 随相对密度 D_r 的变化趋势。由图 12 可知, 相同界面粗糙度情况下, 初始摩擦系数 μ_r 随着 D_r 增加而增大; 而临界摩擦系数 μ_r 基本不随 D_r 增加而变化 (图 13), 可视为常数。

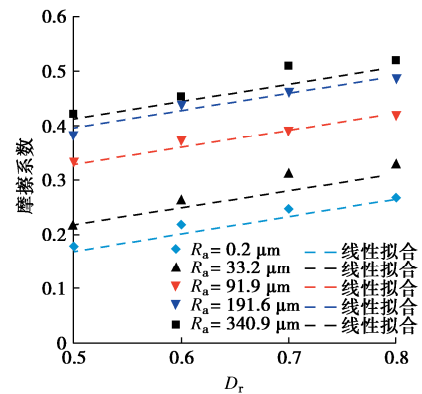


图 12 初始摩擦系数 μ_r 随相对密度变化曲线

Fig. 12 Relationship between μ_r and relative density

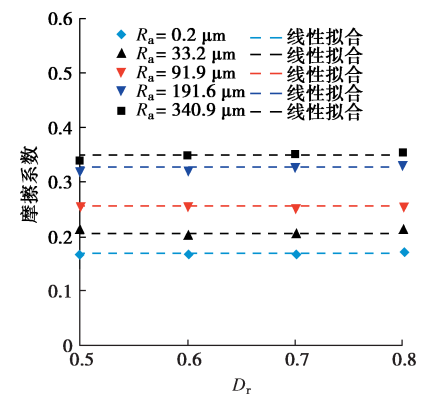


图 13 临界摩擦系数 μ_r 随相对密度变化曲线

Fig. 13 Relationship between μ_r and relative density

从图 12 可以看出, 在本文试验条件下, 不同界面粗糙度对应的 D_r - μ_r 分布均呈现出良好的线性关系, R^2 均大于 0.96, 其拟合方程可为

$$\mu_r = \mu_0 + \alpha_r D_r \quad (22)$$

式中: μ_0 和 α_r 为材料常数; μ_0 可认为最松散状态的砂土-钢桩界面的初始摩擦系数; α_r 表征界面初始摩

擦系数随相对密实度增大而增加的程度，在本文中可视为常数， $\alpha_r=0.3175$ 。

3.3 粗糙度的引入

前述可知，结构粗糙度 R_a 对 K_s 的影响较弱(图 11)，其作用主要体现在对 μ_r 、 μ_r 的影响(图 12, 13)。为进一步定量分析粗糙度对界面摩擦系数的影响，图 14 展示了 μ_0 和 μ_r 随粗糙度变化的变化趋势。

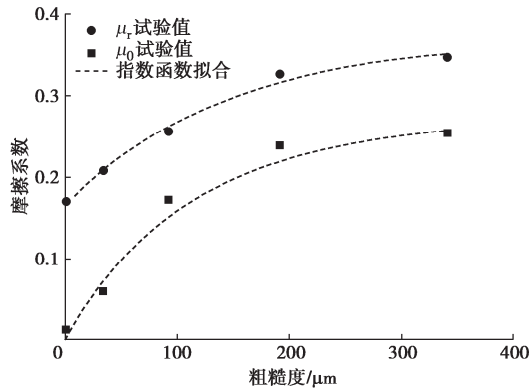


图 14 参数 μ_0 、 μ_r 与粗糙度关系曲线

Fig. 14 Relationship between μ_0 , μ_r and roughness

由图 14 可知， μ_0 -粗糙度关系曲线、临界摩擦系数 μ_r -粗糙度关系曲线均可以用指数函数进行拟合， R^2 均大于 0.96，分别如下所示：

$$\mu_0 = \mu_{0R} + \alpha_0 e^{(R_a/\zeta_0)} \quad (23)$$

$$\mu_r = \mu_{rR} + \alpha_r e^{(R_a/\zeta_r)} \quad (24)$$

式中： μ_{0R} 、 α_0 及 ζ_0 为表征 μ_0 - R_a 相关性的拟合参数，在本文中依次为 0.268、-0.266 及 -100； μ_{rR} 、 α_r 、 ζ_r 为表征 μ_r - R_a 相关性的拟合参数，在本文中依次为 0.371、-0.203、-145。

联合式 (22)，(23)，则可得到考虑粗糙度 R_a 及相对密实度 D_r 耦合作用的初始摩擦系数 μ_r 预测公式：

$$\mu_r = \mu_{0R} + \alpha_0 e^{(R_a/\zeta_0)} + \alpha_p D_r \quad (25)$$

4 本构模型验证

4.1 简化模型验证

本文不显含粗糙度和相对密实度影响的简化本构模型共有 8 个参数：刚度参数 K_1 、 ψ_1 及 ψ_2 ，刚度指数 n ，破坏比 R_f ，初始状态参数 μ_r ，临界状态参数 μ_r ，软化参数 ζ_r 。选取 Shahrour 等^[5]针对 Hostun 砂开展的密实-钢界面剪切试验结果，对简化模型进行验证，该试验的法向应力为 100 kPa，界面为光滑钢界面，循环剪切位移幅值为 1 mm，简化模型参数如表 3 所示。

图 15 给出了根据本文模型的加卸载法则和根据传统 Masing 法则计算的结果对比，可见本文模型更能捕捉界面滞回圈的非对称特点，而基于 Masing 法则预测的滞回圈形状更为对称及饱满，预测结果与试验结果吻合度较差。

表 3 简化界面模型的参数

Table 3 Model parameters of a simplified interface model

参数类名	参数符号	参数取值
刚度参数	K_1	194100
	ψ_1	2.27
	ψ_2	1.34
初始状态参数	μ_p	0.58
临界状态参数	μ_r	0.42
损伤参数	ζ_r	-115.8
刚度参数	n	0.70
破坏比	R_f	1.0

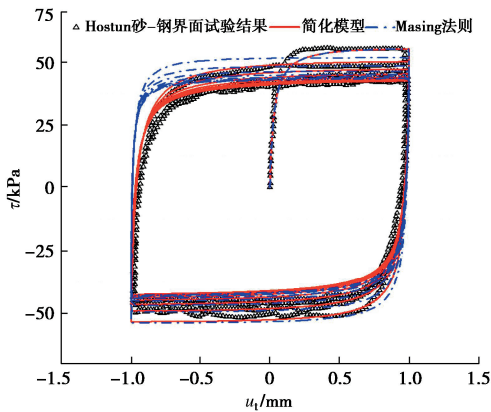


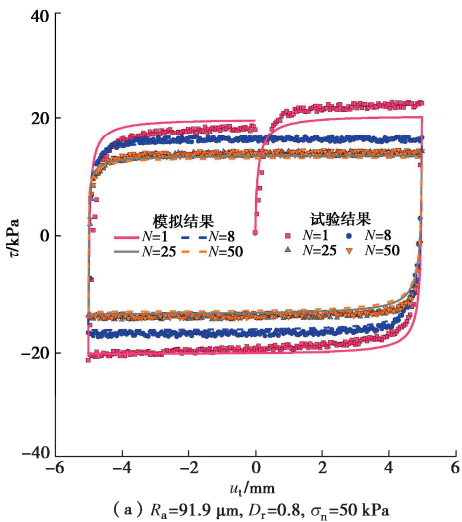
图 15 简化界面模型的验证

Fig. 15 Verification of simplified interface model

4.2 完整模型验证

本文完整界面模型主要包括 17 个参数，分别为：刚度参数 a_1 、 a_2 、 ψ_1 、 ψ_2 ，刚度指数 n ，破坏比 R_f ，初始状态参数 μ_{0R} 、 α_0 、 ζ_0 、 α_r ，临界状态参数 μ_{rR} 、 α_r 、 ζ_r ，损伤参数 β_0 、 β_R 、 η 、 λ 。全部参数均可通过界面循环剪切试验数据进行计算和率定。

以本文未参与模型构建的试验结果进行完整界面模型验证，参数如表 4 所示，图 16 展示了不同法向应力、相对密实、结构粗糙度的模拟结果，可以看出滞回圈曲线随着循环次数增加呈现出逐渐向内收缩的趋势，本文模型能较好反映这一演化规律，对砂-钢界面在任意法向应力、相对密实度、结构粗糙度的剪应力-剪位移规律都能较好预测。



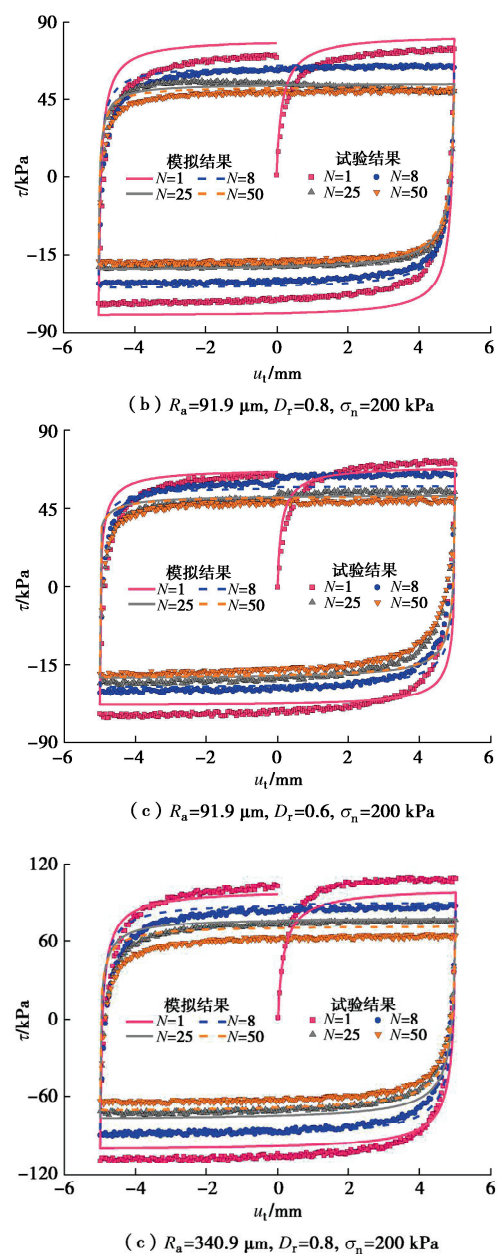


图 16 完整界面模型的验证

Fig. 16 Verification of a complete interface model

表 4 完整界面模型的参数

Table 4 Model parameters of a complete interface model

参数类名及符号		刚度参数			
		a_1	a_2	ψ_1	ψ_2
参数值		24225	9360	4.25	4.25
参数类名及符号		初始状态参数			
		μ_{0R}	α_0	ζ_0	α_r
参数值		0.268	-0.266	-100	0.3175
参数类名及符号		临界状态参数			
		μ_{rR}	α_r	ζ_r	
参数值		0.371	-0.203	-145	
参数类名及符号		损伤参数			
		β_0	β_R	η	λ
参数值		-9.18	-25.12	-43.09	7.97
参数类名及符号		刚度指数 n		破坏比 R_f	
		0.605		1.0	

5 结论与展望

本文基于 4 种相对密实度、5 种界面粗糙度及 4 种法向应力组合的 80 组大型砂土-钢桩界面循环剪切试验,提出了考虑循环软化和非线性的界面本构模型,主要得到以下 3 点结论。

(1) 随着循环剪切的进行,中密及密实砂土-钢桩界面强度的软化先快后慢,界面强度与累积塑性位移的关系可用指数函数表征;循环软化特性受控于相对密实度和粗糙度,即界面越粗糙、相对密实度越大,界面强度衰减速率越慢、衰减幅值越快。

(2) 提出了描述界面循环剪切过程的表征模型,将其引入至双曲线模型后作为骨架曲线模型,推导了卸载曲线和再加载曲线的非线性模型,并总结提出了模型参数与法向应力、土体相对密实度、结构粗糙度的经验公式。

(3) 本文提出的简化本构模型共 8 个参数,考虑相对密实度及粗糙度作用的完整本构模型共 17 个参数,参数均可通过界面循环剪切试验数据进行计算和率定,验证结果表明,本文模型能够合理预估界面循环剪切界面强度软化、剪应力-剪位移曲线滞回特性。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 蔡正银、范开放参与研究内容设计,蔡正银提供试验指导,范开放、朱洵完成试验和分析,蔡正银、范开放、朱洵参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by CAI Zhengyin and FAN Kaifang. The experiments were supervised by CAI Zhengyin. The experiments and analyses were conducted by FAN Kaifang and ZHU Xun. The manuscript was drafted and revised by CAI Zhengyin, FAN Kaifang and ZHU Xun. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

[1] YANG J, YIN Z Y. Soil-structure interface modeling with the nonlinear incremental approach[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2021, 45(10): 1381-1404.

[2] 蔡正银, 范开放, 朱 洵. 基于现场试验的海上筒型基础风电结构动力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(3): 443-452. (CAI Zhengyin, FAN Kaifang, ZHU Xun. Dynamic characteristics of offshore wind power with bucket

- foundation based on field tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, **47**(3): 443-452. (in Chinese))
- [3] FAN K F, CAI Z Y, ZHU X, et al. Investigation of natural frequency of wide-shallow composite bucket supported offshore wind turbine: application to real data[J]. Ocean Engineering, 2023, **286**: 115640.
- [4] RUI S J, WANG L Z, GUO Z, et al. Cyclic behavior of interface shear between carbonate sand and steel[J]. Acta Geotechnica, 2021, **16**(1): 189-209.
- [5] SHAHROUR I, REZAIE F. An elastoplastic constitutive relation for the soil-structure interface under cyclic loading[J]. Computers and Geotechnics, 1997, **21**(1): 21-39.
- [6] WESTGATE Z J, DEJONG J T. Role of initial state, material properties, and confinement condition on local and global soil-structure interface behavior during cyclic shear[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2023, **149**(10): 04023088.
- [7] DEJONG J T, WESTGATE Z J. Role of initial state, material properties, and confinement condition on local and global soil-structure interface behavior[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(11): 1646-1660.
- [8] ZHOU W H, JING X Y, YIN Z Y, et al. Effects of particle sphericity and initial fabric on the shearing behavior of soil - rough structural interface[J]. Acta Geotechnica, 2019, **14**(6): 1699-1716.
- [9] 叶至韬, 高玉峰, 黄星博, 等. 砂土与结构物界面的应力-位移-微结构特性及本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, **43**(6): 1549-1560. (YE Zhitao, GAO Yufeng, HUANG Xingbo, et al. Stress-displacement-microstructure characteristics and constitutive modelling of sand-structure interfaces[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, **43**(6): 1549-1560. (in Chinese))
- [10] AFZALI-NEJAD A, LASHKARI A, SHOURIJEH P T. Influence of particle shape on the shear strength and dilation of sand-woven geotextile interfaces[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, **45**(1): 54-66.
- [11] HAN F, GANJU E S, SALGADO R, et al. Effects of interface roughness, particle geometry, and gradation on the sand - steel interface friction angle[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, **144**(12): 04018096.
- [12] 刘京茂, 孔宪京, 邹德高. 接触面模型对面板与垫层间接触变形及面板应力的影响[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(4): 700-710. (LIU Jingmao, KONG Xianjing, ZOU Degao. Effects of interface models on deformation of interface between slab and cushion layer and slab stress of concrete faced rock fill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(4): 700-710. (in Chinese))
- [13] 胡黎明, 濮家骊. 土与结构物接触面损伤本构模型[J]. 岩土力学, 2002, **23**(1): 6-11. (HU Liming, PU Jialiu. Damage model of soil-structure interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(1): 6-11. (in Chinese))
- [14] 路德春, 罗磊, 王欣, 等. 土与结构接触面土体软/硬化本构模型及数值实现[J]. 工程力学, 2017, **34**(7): 41-50. (LU Dechun, LUO Lei, WANG Xin, et al. Softening/hardening constitutive model for soil-structure interface and numerical implementation[J]. Engineering Mechanics, 2017, **34**(7): 41-50. (in Chinese))
- [15] ZHOU W J, WANG L Z, GUO Z, et al. A novel t-z model to predict the pile responses under axial cyclic loadings[J]. Computers and Geotechnics, 2019, **112**: 120-134.
- [16] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面统一本构模型及试验验证[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(10): 1175-1179. (ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Unified modeling of soil-structure interface and its test confirmation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(10): 1175-1179. (in Chinese))
- [17] 方火浪, 王文杰, 施可南. 粒状土与结构接触面多重剪切界面模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, **52**(11): 80-87. (FANG Huolang, WANG Wenjie, SHI Kenan. A multi-shear bounding surface model for coarse granular soil-structure interfaces[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, **52**(11): 80-87. (in Chinese))
- [18] ZHANG P, FEI K, DAI D. Modeling of granular soil-structure interface under monotonic and cyclic loading with the nonlinear approach[J]. Computers and Geotechnics, 2023, **159**: 105480.
- [19] LIU H B, SONG E X, LING H I. Constitutive modeling of soil-structure interface through the concept of critical state soil mechanics[J]. Mechanics Research Communications, 2006, **33**(4): 515-531.
- [20] 刘锐明. 珊瑚砂与结构界面摩擦特性及其应用研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2024. (LIU Ruiming. Study on Friction Characteristics of Interface between Calcareous Sand and Structure and Its Application[D]. Nanjing: Nanjing

- Hydraulic Research Institute, 2024. (in Chinese))
- [21] 蔡世兴, 唐 译, 关云飞. 基于临界状态理论的海相含细粒土砂液化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(增刊 1): 63-66. (CAI Shixing, TANG Yi, GUAN Yunfei. Experimental study on liquefaction characteristics of marine fine-grained sand based on critical state theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(S1): 63-66. (in Chinese))
- [22] FROST J D, DEJONG J T, RECALDE M. Shear failure behavior of granular-continuum interfaces[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, **69**(17): 2029-2048.
- [23] LEE K M, MANJUNATH V R. Soil-geotextile interface friction by direct shear tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(1): 238-252.
- [24] CHIN J T, POULUS H G. A “T-Z” approach for cyclic axial loading analysis of single piles[J]. Computers and Geotechnics, 1991, **12**(4): 289-320.
- [25] ZHOU P, LI J P, DAI K S, et al. Theoretical investigation on axial cyclic performance of monopile in sands using interface constitutive models[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, **16**(7): 2645-2662.
- [26] 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.
- [27] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analyses of retaining wall behavior[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, **97**(12): 1657-1673.
- [28] 董 青, 苏 杰, 周正华, 等. 基于对数骨架曲线的时域本构及其应用[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(8): 1491-1498. (DONG Qing, SU Jie, ZHOU Zhenghua, et al. Time-domain constitutive model based on logarithmic skeleton curve and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(8): 1491-1498. (in Chinese))