

恒刚度桩-土界面循环弱化机制*

刘俊伟¹, 朱娜², 凌贤长^{1,3,6}, 万志朋¹, 黄孝义⁴, 赵国晓⁵

(1. 青岛理工大学土木工程学院 青岛, 266033) (2. 中国海洋大学环境科学与工程学院 青岛, 266100)
(3. 哈尔滨工业大学土木工程学院 哈尔滨, 150090) (4. 中建八局第二建设有限公司 济南, 250014)
(5. 中国中铁建工集团山东有限公司 青岛, 266100) (6. 哈尔滨工业大学重庆研究院 重庆, 401151)

摘要 桩-土界面循环弱化机制对于桩体的承载性能具有控制作用, 基于自主研发的大尺度恒刚度界面剪切仪, 进行不同剪切位移幅值和初始法向应力下恒刚度桩-土界面循环弱化机制研究, 并推导出可用于预测不同试验条件下剪切应力的弱化公式。结果表明: 界面剪切应力-剪切位移关系曲线呈“闭回环”状发展; 随着循环次数的增加剪切应力不断弱化, 弱化主要发生在剪切的初始阶段, 其主要原因为桩-土界面土颗粒的重新排列和剪碎细化, 界面出现减压软化现象; 初始法向应力越大, 剪切位移幅值越大, 随着循环次数的增加剪切应力弱化速率越快。采用非线性对数型曲线进行拟合与真实数据曲线相似度达90%左右, 对研究桩-土界面弱化机制具有一定的意义。

关键词 桩-土界面; 法向恒刚度; 弱化效应; 颗粒破碎; 对数型弱化公式
中图分类号 TH823; TU473

引言

桩基在服役期间, 土体以上结构受力比较复杂, 不仅需要承受结构自重, 还需要承受风、浪、流等外部具有周期性的动力荷载作用。恒刚度下界面剪切弱化研究更贴近于真实桩体受力特性, 对于深入研究桩体的承载性能具有重要的意义。

Poulos^[1]研究发现, 循环荷载作用下桩-土界面的剪切弱化效应较静载作用更为重要。Tabucanon等^[2]指出, 剪切应力弱化机制与剪切位移幅值密切相关, 剪切位移幅值越大, 弱化速率越快。Airey等^[3]发现, 循环荷载下恒刚度剪切仪的研究成果与真实桩体的侧摩阻力非常相似。Fakharian等^[4]指出, 恒刚度(constant normal stiffness, 简称CNS)条件下, 界面剪应力的减小主要是由于剪切位移和循环次数的增加。Mortara等^[5]通过小型桩-土界面剪切仪进行桩-砂土界面的循环弱化研究, 指出界面体积特性对剪切应力具有重要影响。冯大阔等^[6]提出了常刚度法向边界条件不同接触面条件下的剪切弱化规律。Donna等^[7]研究了温度对不同界面应力路径的影响。刘俊伟等^[8]通过研究砂与钢板界面的循环弱化机制, 发现剪切应力弱化速率与

初始法向应力和剪切位移幅值密切相关。文献[9-16]对恒刚度下桩-土界面剪切弱化进行了研究。

现有研究对桩-土界面弱化机制进行了部分揭示, 但缺乏恒刚度下初始法向应力和剪切位移幅值对界面弱化机制影响的研究。笔者采用自主研发的大尺度恒刚度界面剪切仪, 探讨了初始法向应力和剪切位移幅值对界面弱化机制的影响, 以进一步完善恒刚度桩-土界面循环弱化机理。

1 试验设备与材料选取

1.1 CNS剪切仪研制机理及试验设备

桩基在服役期间对桩周土体具有一定的扰动作用, 根据扰动程度可将桩侧土体划分为3个区域: 剪切区、弹性区及未扰动区。剪切区土体紧邻桩身, 存在一薄层剪切带, 剪切过程中发生较大变形, 桩-土界面剪切示意图如图1所示。

剪切区与未扰动区之间为弹性变形区, 主要发生水平向弹性变形, 土体刚度近似不变, 应力与应变成正比关系变化, 可采用理想性恒刚度弹簧模型来表征土体的变形特性, 此方法更接近于真实桩土

* 国家自然科学基金资助项目(42277135, 41772318); 山东省优秀青年基金资助项目(ZR2021YQ31)
收稿日期: 2020-08-14; 修回日期: 2020-09-22

受力性状^[12-13]。未扰动区距桩体较远,不发生任何变形或变形可以忽略,因此可以简化为弹簧远端的固定端,桩-土体系如图 2 所示。

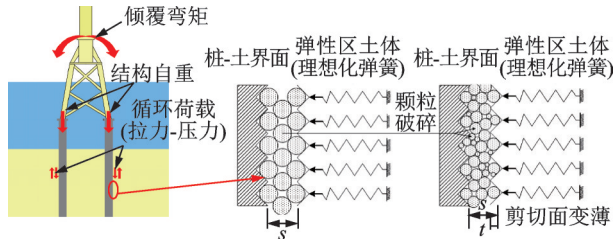


图 1 桩-土界面剪切示意图

Fig.1 Shearing diagram of pile-soil interface

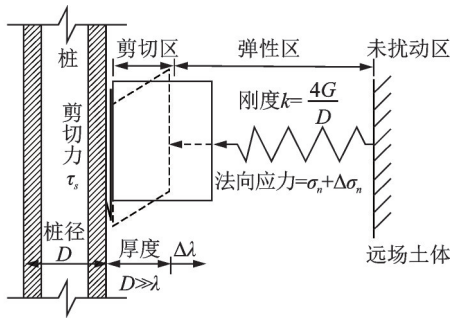


图 2 桩-土体系

Fig.2 Pile-soil system

桩侧土体厚度的变化(Δλ)会导致桩侧法向应力的变化(Δσ),桩侧弹性区土体采用理想化弹性弹簧进行类比,两者之间的关系^[17]为

$$\Delta\sigma = 4G\Delta\lambda/D = k\Delta\lambda \quad (1)$$

其中:k为土体的劲度系数;G为砂土的剪切模量;D为桩体直径。

根据桩-土作用机理,制成室内大型恒刚度桩-土界面剪切仪,其原理如图 3 所示,实物如图 4 所示。剪切仪包括桩-土循环剪切系统、法向恒刚度加载系统、循环位移控制系统及数据采集系统。法向恒刚度加载系统主要由竖向螺杆、可拆卸弹簧上固板及弹簧组件组成,为桩-土界面提供法向应力;桩-土界面循环剪切系统主要由上剪切盒和下剪切盒组成;循环剪切过程中的位移变化主要由变频电机、减速机及变频器控制箱 3 部分控制;数据采集系统记录试验过程中剪切应力的变化规律。

1.2 试验材料

试验用砂为青岛海砂,让其在自然状态下风干,如图 5 所示。用高频振筛机对砂样进行筛分,然后用精密度为 0.001 g 的电子秤进行称量,振筛机和电子天平如图 6 所示。试验砂样的颗粒级配曲线如图 7 所示。对砂样进行基本物理性质指标试验,其基本物理参数如表 1 所示。

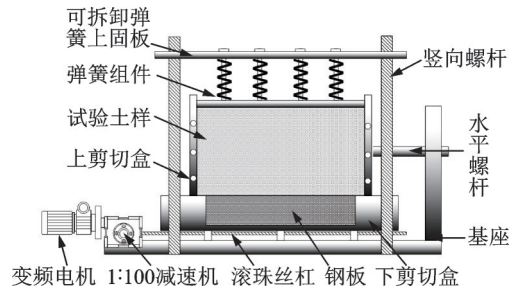
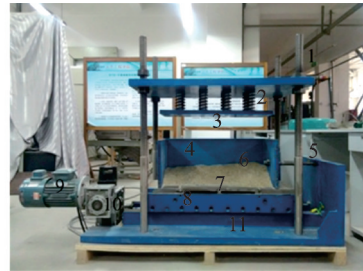


图 3 大型恒刚度桩-土界面剪切仪原理图

Fig.3 Schematic diagram of constant normal stiffness shear apparatus of pile-soil interface



1-竖向螺杆;2-弹簧组件;3-可拆卸弹簧固定板;4-上剪切盒;5-水平螺杆;6-标准砂;7-钢板;8-下剪切盒;9-变频电机;10-1:100减速机

图 4 大型恒刚度桩-土界面剪切仪实物图

Fig.4 Real picture of constant normal stiffness shear apparatus of pile-soil interface

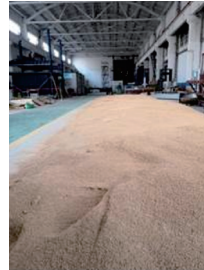


图 5 自然风干砂

Fig.5 Naturally dried sand



图 6 振筛机和电子天平

Fig.6 Sieve shaker and electronic balance

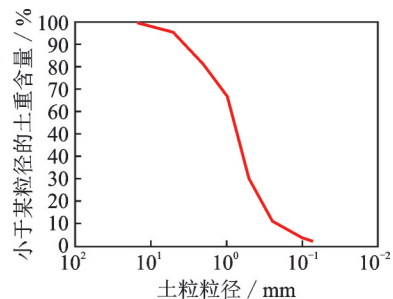


图 7 砂的颗粒级配曲线

Fig.7 Grading curve of sand

表 1 砂土的物理性质指标

Tab.1 Physical indices of testing sand

相对密度/密度	最大孔隙比	最小孔隙比	平均粒径/mm	粒径范围/mm	内摩擦角/(°)	干密度/(g·cm ⁻³)
2.65	0.52	0.30	0.72	0~15	42.8	1.95

采用剪切波速法测量模型箱内砂土的剪切模量,在砂土同一水平位置处,间隔一定距离布置 2 个三分量检波加速度传感器^[18-19],然后使用重物制造剪切波,利用加速度传感器采集到的信号计算砂土的剪切模量,剪切波速法如图 8 所示。

剪切波速 V_s 的计算式为

$$V_s = l / (t_2 - t_1) \quad (2)$$

砂土的剪切模量 G ^[20-21] 计算式为

$$G = \rho V_s^2 \quad (3)$$

其中: l 为 2 个传感器之间的距离,本次试验中 $l=50$ cm; t_1 和 t_2 分别为 2 个加速度传感器先后接受到剪切波的时间; ρ 为砂土的密度。

图 9 为加速度传感器信号,由图可知: $t_1=0.1057$ s; $t_2=0.1112$ s。计算可得试验所用砂土的剪切波传播速度为 $V_s=90.91$ m/s,砂土的剪切模量为 $G=12.45$ MPa。

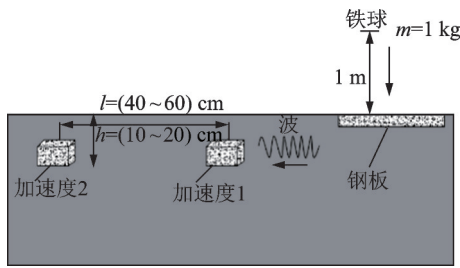


图 8 剪切波速法示意图

Fig.8 Schematic diagram of shear wave velocity method

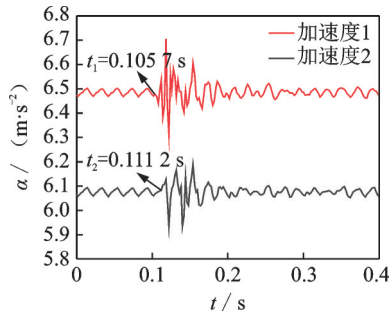


图 9 加速度传感器信号

Fig.9 The signal received by the acceleration sensor

2 试验方案

定义循环剪切路径如图 10 所示, x 轴表示相对剪切位移,试验由原点 O 出发,沿 x 轴方向①→②→③→④为一完整剪切循环,并规定①和④阶段为正向剪切,②和③阶段为负向剪切。

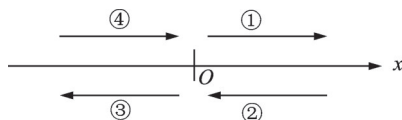


图 10 循环剪切路径

Fig.10 Schematic view of cyclic shear paths

试验伊始,进行剪切仪、传感器的检查校核,将剪切盒移至中间位置。下剪切盒内放置结构面(模拟桩体),其上表面与下剪切盒上表面齐平,并进行往复循环剪切;上剪切盒砂样则相对静止,这与真实桩-土相互作用机制一致,可以更好地模拟桩-土界面相对剪切运动。采用自制漏砂斗分层均匀铺砂,铺砂结束后将加载板置于砂土顶部,并在上部布置 2 个法向电阻应变式力传感器,通过压缩弹簧加压,直至达到相应初始法向应力。在上剪切盒侧面安装 4 个低温敏型光纤应变传感器,测量试验过程中剪切应力的变化。剪切应力表达式为

$$\sigma = \frac{1}{4} E \left(\frac{A_1}{S_{r1}} + \frac{A_2}{S_{r2}} + \frac{A_3}{S_{r3}} + \frac{A_4}{S_{r4}} \right) \quad (4)$$

其中: S_{r1}, S_{r2}, S_{r3} 和 S_{r4} 分别为 4 个光纤光栅传感器灵敏度; A_1, A_2, A_3 和 A_4 分别为中心波长的变化量; E 为水平螺杆的弹性模量。

安装、调试好所有设备后开始试验,并进行剪切应力和剪切位移的实时测量。为研究不同初始法向应力和不同剪切位移幅值对桩-土界面循环弱化的影响规律,先后进行 4 组恒刚度循环剪切试验,劲度系数 $k=50$ kPa/mm,砂密实度 D_r 均为 90%,试验循环剪切数 $N=30$ 。循环剪切试验方案如表 2 所示。

表 2 循环剪切试验方案

Tab.2 Cyclic shear test schemes

试验编号	剪切速率/ (mm·min ⁻¹)	初始法向 应力/ kPa	剪切位移 幅值/mm
S ₁	2.5	25	1
S ₂	2.5	50	1
S ₃	2.5	75	1
S ₄	2.5	25	3

3 试验结果分析

3.1 剪切应力和剪切位移关系

不同循环次数下剪切应力随剪切位移变化曲线如图 11 所示。由图可知,在第 1 次循环中:①阶段剪切应力随着剪切位移的增加不断增加;②阶段随着剪切的进行,剪切应力由最大正值迅速降低至负值,然后逐渐缓慢降低;③阶段持续降低至最大负值,降低速度逐渐变缓;④阶段剪切应力由最大负值持续增加。在剪切位移控制条件下,剪切应力-剪切位移关系曲线在除第 1 个循环的其他各个完整循环内基本闭合,形状相似,呈“闭回环”状发展,不同循环曲线不重合,随着剪切的进行各曲线竖直方向逐渐向内部压缩,水平方向逐渐向两侧鼓起。在剪切初始

阶段,闭回环差距较大。随着剪切的不断进行,闭回环之间差距逐渐减小。

由图 11 可得不同循环剪切试验的第 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30 次循环正向剪切位移幅值处的剪应力,如表 3 所示。第 5, 10, 15, 20, 25 次循环剪切应

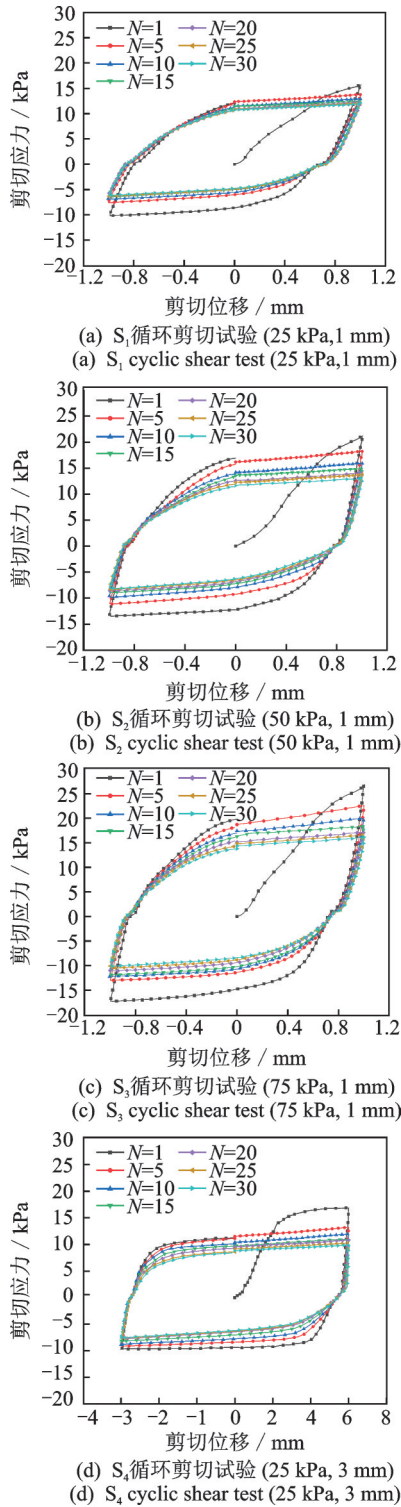


图 11 不同循环下剪应力-水平位移关系曲线

Fig.11 Variations of shear stress-displacement behavior with different cycle history

力较其前 5 次循环的衰减幅度如表 4 所示。由表可知,随着循环次数的增加,剪切应力不断弱化,弱化主要发生在剪切的初始阶段。分析原因如下:循环剪切的初始阶段法向应力较大,随着循环的进行,桩-土界面不断减缩,导致界面法向应力逐渐降低,剪切应力随之降低,出现了减压软化的现象。桩-土界面受力变形主要因为土体颗粒的重新排列和土颗粒的剪碎细化。桩-土界面初始剪切时,土颗粒长轴和短轴排序杂乱无章,交叉排列。随着循环的进行,土体颗粒长轴方向与剪切方向趋于一致,土颗粒排列更为有序,减少了颗粒所占空间面积。此外,随着剪切的不断进行,桩-土界面附近的土体颗粒表现为非常明显的破碎^[17],新破碎的小颗粒进入大颗粒之间的空隙,接触面附近土体进一步被压密^[8]。在法向恒刚度条件下,土体所占空间体积减小,土体所受的法向刚度随之减小,桩-土界面的剪切应力也不断减小,此结论与文献[5,22-23]相似。由图 11(a,b,c)可知,在剪切位移幅值相同的情况下,初始法向应力越大,剪切应力-剪切位移曲线“闭回环”越饱满;相反,初始法向应力越小,“闭回环”越扁平。相同循环次数和相同剪切位移下,法向应力越大,剪切应力越大。这说明剪切应力大小与初始法向应力密切相关,初始法向应力越大,剪切应力越大。由图 11(a,d)可知:剪切位移幅值为 1 mm 时,在第 1 循环第①阶段未出现剪切应力基本不变的水平段,剪切应力随着剪切位移的增加持续增加;剪切位移幅值为 3 mm 时,在第 1 循环的第①阶段剪切应力随着剪切位移

表 3 不同循环下正向剪切位移幅值处的剪切应力

Tab.3 Shear stress at maximum forward shear displacement under different cycles

试验 编号	循环次数						
	1	5	10	15	20	25	30
S ₁	15.62	13.76	12.93	12.50	12.26	12.10	11.96
S ₂	21.26	18.21	15.92	14.93	14.27	13.76	13.26
S ₃	26.75	22.56	19.98	18.13	17.17	16.62	16.15
S ₄	16.85	13.21	11.93	11.24	10.83	10.30	9.95

表 4 第 5, 10, 15, 20 次循环剪切应力较其前 5 次循环衰减幅度

Tab.4 Attenuation amplitude of shear stress compared with its five cycles before at cycle 5, 10, 15, 20 %

试验 编号	循环次数					
	5	10	15	20	25	30
S ₁	11.91	6.03	3.33	1.92	1.31	1.16
S ₂	14.34	12.58	6.16	4.42	3.67	3.59
S ₃	15.66	11.42	9.25	5.34	3.19	2.82
S ₄	21.59	9.67	5.85	3.65	4.83	3.39

的增加不断增加,出现一水平段,剪切应力达到最大值。这说明桩-土界面抗剪强度与剪切位移幅值的大小密切相关,剪切幅值越大,桩-土界面抗剪强度越好。

3.2 界面最大剪切应力随循环的弱化分析

图 12 为正向剪切位移幅值处的剪切应力随循环次数变化曲线。由图可知,恒刚度循环剪切作用下,随着循环剪切次数的增加,界面各循环最大剪切应力均逐渐减小,且其衰减主要发生在剪切初始阶段。对比 S_1, S_2 和 S_3 这 3 组循环剪切试验可知,循环剪切位移幅值不变,初始法向应力越大,相同循环次数剪切应力越小;对比 S_1 和 S_4 试验可知,初始法向应力相同,剪切位移幅值越大,相同循环次数剪切应力衰减越多,此结论与文献[5]一致。

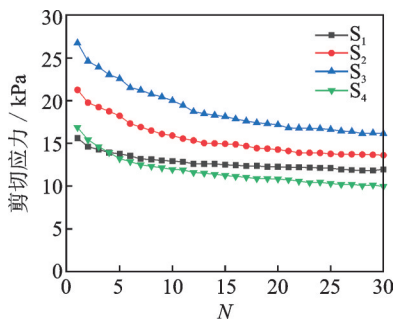


图 12 正向剪切位移幅值处的剪切应力随循环次数变化曲线
Fig.12 Variations of shear stress at maximum forward shear displacement with cycle history

3.3 无量纲对比分析

为便于分析恒刚度循环剪切试验中剪切应力的变化规律,引入无量纲弱化因子 D_τ (剪切应力比)。将剪切位移幅值处的剪切应力定义为每次循环剪切强度,将第 1 次循环剪切强度设为 τ_1 ,其余循环剪切强度分别为 $\tau_2, \tau_3, \dots, \tau_{30}$ 。 D_τ 的表达式为

$$D_\tau = \tau_n / \tau_1 \quad (5)$$

将本研究试验结果与文献[3-6, 8, 16]的结果进行对比分析,无量纲弱化因子随循环次数变化曲线如图 13 所示,各组试验条件和拟合方程系数如表 5 所示。采用非线性对数公式对剪切试验数据进行拟合,拟合非线性曲线与实测数据衰减曲线十分吻合。拟合曲线回归方程式为

$$D_\tau = 1 - v_d \ln N \quad (6)$$

其中: v_d 为无量纲弱化因子 D_τ 衰减的速率。

由图 13 和表 5 可知,各组试验所得无量纲弱化因子 D_τ 与循环次数 N 的关系曲线形状大体相似,其

与拟合对数函数相关性非常大,相关系数均为 90% 左右,验证了此对数函数表征和预测桩-土界面循环剪切过程中剪切应力随循环系数弱化规律的可行性。

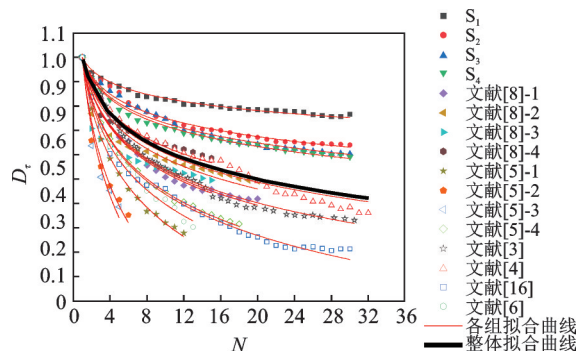


图 13 无量纲弱化因子随循环次数变化曲线

Fig.13 Variations of dimensionless weakening factor with cycle history

表 5 各组试验条件和拟合方程系数

Tab.5 Conditions of tests and coefficients of fitting equation						
试验	$k / (kPa \cdot mm^{-1})$	σ_0 / kPa	A / mm	d_{50} / mm	v_d	相关系数 / %
S_1	50	25	± 1	0.72	0.073	98.60
S_2	50	50	± 1	0.72	0.109	98.67
S_3	50	75	± 1	0.72	0.117	98.50
S_4	50	25	± 3	0.72	0.122	99.21
文献[8]-1	50	90	± 10	0.34	0.203	98.36
文献[8]-2	50	110	± 10	0.34	0.180	87.26
文献[8]-3	50	90	± 5	0.34	0.206	74.21
文献[8]-4	50	110	± 5	0.34	0.160	90.10
文献[5]-1	1 000	300	± 2	1.16	0.296	99.81
文献[5]-2	2 000	300	± 2	1.16	0.379	96.75
文献[5]-3	4 000	300	± 2	1.16	0.410	95.57
文献[5]-4	1 000	300	± 1	1.16	0.240	99.70
文献[3]	1 600	400	± 1	0.35	0.200	97.51
文献[4]	1 000	100	± 0.75	0.60	0.171	96.23
文献[16]	200	400	± 2	0.005	0.244	98.73
文献[6]	100	400	± 40	7.50	0.262	99.35

根据已有试验数据和拟合回归曲线进行分析可知, D_τ 的变化与剪切试验劲度系数、初始法向应力、剪切位移幅值及砂土平均粒径等因素密切相关,引入各影响因素修正系数归纳 D_τ 的经验公式,得

$$v_d = K_\tau \sigma_\tau A_\tau d_\tau \bar{v} \quad (7)$$

$$D_\tau = 1 - K_\tau \sigma_\tau A_\tau d_\tau \bar{v} \ln N \quad (8)$$

其中: K_τ 为试验劲度系数对 D_τ 影响的修正系数; σ_τ 为初始法向应力对 D_τ 影响的修正系数; A_τ 为剪切位移幅值对 D_τ 影响的修正系数; d_τ 为砂土平均粒径对 D_τ 影响的修正系数; \bar{v} 为将整体数据进行拟合所得到的弱化速率。

整体数据进行拟合曲线与文献[4]的拟合曲线

非常相近,根据表5分析各试验影响因素对拟合方程系数的影响权重和影响趋势,得出适合各试验条件和工况的修正系数的经验取值范围,如表6所示。劲度系数 k 与衰减速率 v_d 呈正相关, k 值越大, v_d 越大, K_r 的取值越大。当 $k \leq 1000$ 时, $0.6 \leq K_r < 1$;当 $k > 1000$ 时, $1 \leq K_r \leq 1.2$ 。初始法向应力 σ_0 与衰减速率 v_d 呈正相关, σ_0 越大, v_d 越大, σ_r 的取值越大。当 $\sigma_0 \leq 100$ 时, $0.7 \leq \sigma_r < 1$;当 $\sigma_0 > 100$ 时, $1 \leq \sigma_r \leq 1.2$ 。剪切位移幅值 A 与衰减速率 v_d 呈正相关, A 越大, v_d 越大, A_r 的取值越大。当 $A \leq 1$ 时, $0.7 \leq A_r < 1$;当 $A > 1$ 时, $1 \leq A_r \leq 1.2$ 。颗粒中值粒径 d_{50} 与衰减速率 v_d 呈正相关,颗粒中值粒径 d_{50} 越大, v_d 越大, d_r 的取值越大。当 $d_{50} \leq 1$ 时, $0.9 \leq d_r < 1$;当 $d_{50} > 1$ 时, $1 \leq d_r \leq 1.1$ 。可以根据具体试验条件进行修正系数的取值,以进行剪切应力弱化规律的预测。

表6 经验公式修正系数取值

Tab.6 Conditions of tests and coefficients of fitting equation

修正系数	K_r	σ_r	A_r	d_r	\bar{v}
经验取值	0.6~1.2	0.7~1.2	0.9~1.3	0.9~1.1	0.167

4 结论

1) 界面剪切应力-剪切位移关系曲线呈“闭回环”状发展,初始法向应力越大,初始剪切应力越大,剪切应力-剪切位移“闭回环”曲线越饱满;否则越扁平。

2) 随着循环次数的增加,剪切应力不断弱化,弱化主要发生在剪切的初始阶段,主要是因为桩-土界面土颗粒的重新排列和剪碎细化,界面出现减压软化现象。

3) 循环剪切位移幅值不变,初始法向应力越大,相同循环次数剪切应力越小;初始法向应力相同,剪切位移幅值越大,相同循环次数剪切应力衰减越多。

4) 引入无量纲弱化因子 D_r 研究界面剪切应力弱化规律,得出与真实数据相似度为90%左右的拟合对数型弱化曲线。界面剪切应力的弱化规律与初始法向应力和剪切位移幅值密切相关,剪切位移幅值相同时,初始法向应力越大则剪应力弱化速率越快;初始法向应力相同时,剪切位移幅值越大则剪应力弱化越快。

5) 推导出可用于表征和预测桩-土界面循环剪切过程中剪切应力随循环系数弱化规律的非线性对数型公式,并给出适用于不同试验条件的修正系数。

参 考 文 献

- [1] POULOS H G. Cyclic axial loading analysis of piles in sand [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1989, 115(6): 836-852.
- [2] TABUCANON J T, AIREY D W, POULOS H G. Pile skin friction in sands from constant normal stiffness tests [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1995, 18(3): 350-364.
- [3] AIREY D W, AL-DOURI R H, POULOS H G. Estimation of pile friction degradation from shearbox tests [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1992, 15(4): 388-392.
- [4] FAKHARIAN K, EVGIN E. Cyclic simple-shear behavior of sand-steel interfaces under constant normal stiffness condition [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(12): 1096-1105.
- [5] MORTARA G, MANGIOLA A, GHIONNA V N. Cyclic shear stress degradation and post-cyclic behaviour from sand-steel interface direct shear tests [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(7): 739-752.
- [6] 冯大阔, 张嘎, 张建民, 等. 常刚度条件下粗粒土与结构接触面三维力学特性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(10): 1571-1577.
FENG Dakuo, ZHANG Ga, ZHANG Jianmin, et al. Experimental study on 3D cyclic behaviors of soil-structure interface under constant normal stiffness condition [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(10): 1571-1577. (in Chinese)
- [7] DONNA A D, FERRARI A, LALLOU L. Experimental investigations of the soil-concrete interface: physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 53(4): 659-672.
- [8] 刘俊伟, 朱娜, 王立忠, 等. 循环荷载下砂与钢板界面的弱化机制 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(6): 1123-1130.
LIU Junwei, ZHU Na, WANG Lizhong, et al. The degenerate mechanism of sand - steel interface under cyclic loading [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52(6): 1123-1130. (in Chinese)
- [9] KISHIDA H, UESUGI M. Tests of the interface between sand and steel in the simple shear apparatus [J]. *Géotechnique*, 1987, 37(1): 45-52.
- [10] LOBO-GUERRERO S, VALLEJO L E. DEM analysis of crushing around driven piles in granular materials [J]. *Géotechnique*, 2005, 55(8): 617-623.
- [11] 徐肖峰, 魏厚振, 孟庆山, 等. 直剪剪切速率对粗粒土强度与变形特性的影响 [J]. *岩土工程学报*, 2013,

- 35(4): 728-733.
- XU Xiaofeng, WEI Houzhen, MENG Qingshan, et al. Effects of shear rate on shear strength and deformation characteristics of coarse-grained soils in large-scale direct shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 728-733. (in Chinese)
- [12] 章敏, 王星华, 杨光程, 等. 循环荷载作用下单桩动力模型试验与桩土界面特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1037-1044.
- ZHANG Min, WANG Xinghua, YANG Guangcheng, et al. Study of dynamic model testing of single pile and behaviors of pile-soil interface under cyclic load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (4): 1037-1044. (in Chinese)
- [13] 刘飞禹, 王攀, 王军, 等. 不同剪切速率下格栅-土界面循环剪切及其后直剪特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 387-395.
- LIU Feiyu, WANG Pan, WANG Jun, et al. Cyclic and post-cyclic shear behavior of sand-geogrid interface under different shear rates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (2): 387-395. (in Chinese)
- [14] 徐超, 陈洪帅, 石志龙, 等. 筋-土界面力学特性的水平循环剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1553-1559.
- XU Chao, CHEN Hongshuai, SHI Zhilong, et al. Research on the mechanical behavior of soil-reinforcement interface by horizontal cyclic shear test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1553-1559. (in Chinese)
- [15] 林伟岸, 詹良通, 陈云敏, 等. 含土工复合排水网衬里的界面剪切特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 693-697.
- LIN Weian, ZHAN Liangtong, CHEN Yunmin, et al. Interface shear strength of liners with geocomposite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 693-697. (in Chinese)
- [16] 刘俊伟, 张明义, 俞峰, 等. 土与PHC管桩界面剪切疲劳退化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 1037-1040.
- LIU Junwei, ZHANG Mingyi, YU Feng, et al. Experimental study on interface shear fatigue between soils and PHC pipe piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 1037-1040. (in Chinese)
- [17] BOULON M, FORAY P. Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand[C]//Proceedings of the 3th International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling. Nantes, France: Institut Francais du Petrol Nantes, 1986: 127-147.
- [18] 陈立国, 袁飞, 陈涛, 等. 基于单一敏感质量的三轴电动加速度计的设计[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(5): 932-937.
- CHEN Ligu, YUAN Fei, CHEN Tao, et al. Design of tri-axis capacitive MEMS accelerometer based on single mass[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(5): 932-937. (in Chinese)
- [19] 林然, 张振海, 李科杰, 等. 高冲击三维加速度传感器横向灵敏度校准技术[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(5): 922-928.
- LIN Ran, ZHANG Zhenhai, LI Keje, et al. New calibration technology of relative transverse sensitivity of high shock tri-axis accelerometer[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(5): 922-928. (in Chinese)
- [20] BHATTACHARYA S, KRISHNA A M, LOMBARDI D, et al. Economic MEMS based 3-axis water proof accelerometer for dynamic geo-engineering applications [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 36: 111-118.
- [21] 余璐庆. 海上风机桶形基础安装与支撑结构动力特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [22] 张嘎, 张建民. 循环荷载作用下粗粒土与结构接触面变形特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 254-258.
- ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Experimental study on cyclic behavior of interface between soil and structure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 254-258. (in Chinese)
- [23] 冯大阔, 侯文峻, 张建民. 法向常刚度切向应力控制接触面动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 846-852.
- FENG Dakuo, HOU Wenjun, ZHANG Jianmin. Experimental study on cyclic behavior of gravel-structure interface with stress-control mode under constant normal stiffness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 846-852. (in Chinese)



第一作者简介:刘俊伟,男,1983年2月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桩基础工程及相关领域。曾发表《DEM investigation of installation responses of jacked open-ended piles》(《Acta Geotechnica》2019, Vol.14, No.6)等论文。

E-mail: liujunwei@qut.edu.cn

通信作者简介:凌贤长,男,1963年10月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桩-土-结构相互作用。

E-mail: lingxianzhang@qut.edu.cn