

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.002

黏性土中桩-土界面受力机制室内试验研究

张明义^{1,2}, 白晓宇^{1,2}, 高 强¹, 王永洪¹, 陈小钰¹, 刘俊伟¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 青岛理工大学 蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033)

摘 要: 通过黏性土与不同表面粗糙度混凝土板的室内直剪试验, 模拟预制桩的界面受力状态。利用微型硅压阻式传感器测定桩-土界面孔隙水压力和土压力的变化, 定量分析表面粗糙度对界面抗剪强度参数、界面阻力-剪切位移曲线的影响。试验结果表明: 桩-土界面孔隙水压力约占法向应力的 10%, 实际工程中应考虑; 提出桩-土界面阻力的概念, 界面阻力由黏性土与混凝土之间黏着力和摩擦力两部分构成, 其中摩擦力为界面法向有效土压力与界面摩擦系数的乘积。随着混凝土表面粗糙度的增加, 界面黏着力增大且逐渐接近黏土自身黏聚力。表面粗糙度对界面摩擦系数影响较小, 但对界面阻力有一定影响, 桩-土界面峰值阻力和剪切位移均随粗糙度的增加而增大。试验结果能够为桩基工程的设计、施工与检测提供参考依据。

关 键 词: 静压桩; 孔隙水压力; 直剪试验; 界面阻力; 硅压阻式传感器

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)08-2167-08

Experimental study on interfacial bearing mechanism of piles in cohesive soil

ZHANG Ming-yi^{1,2}, BAI Xiao-yu^{1,2}, GAO Qiang¹, WANG Yong-hong¹, CHEN Xiao-yu¹, LIU Jun-wei¹

(1. College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China; 2. Collaborative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China)

Abstract: The interfacial force of the precast pile with different roughness was measured by indoor direct shear test in clayey soil. The changes of the pore water pressure and soil pressure on the pile-soil interface were monitored by miniature piezo-resistive sensors. The influences of interfacial roughness on interface shear strength parameter, interface resistance-shearing displacement curves were qualitatively analyzed. The results show that the percentage of normal stress accounted by pore water stress on pile-soil interface is about 10%, which is supposed to be taken into consideration in practical projects. The concept of pile-soil interface resistance is presented and the resistance is contributed by adhesive force and friction force between clayey soil and concrete. the friction force is the product of the normal effective soil stress and friction coefficient on the interface. As the interfacial roughness of the concrete increases, the interfacial adhesive force increases and gradually closes to clayey soil's inherent adhesive force. The interfacial roughness slightly impacts on interfacial friction coefficient and interface resistance: the ultimate interface resistance and shearing displacement increase with the increase of the roughness. The results provide references to the design, construction and detection of the pile foundation engineering.

Keywords: jacked pile; pore water pressure; direct shear tests; interface resistance; silicon piezo-resistive sensor

1 引 言

随着城市化进程的不断推进, 岩土工程获得迅猛发展, 施工技术及工艺逐渐向高效、环保方面转化。静力压入桩技术因具有低能耗、无污染、无振

动、控制精度高等特点获得广泛运用^[1]。

在静力压桩过程中, 桩尖土体首先被冲剪破坏, 孔隙水受到冲剪挤压作用产生急剧上升的超孔隙水压力, 造成土体的破坏和重塑, 同时桩与土之间产生滑动摩擦, 桩-土界面受力机制问题得到广泛

收稿日期: 2016-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51078196, No. 41502304); 山东省自然科学基金青年基金项目 (No. ZR2016EEQ08); 山东省高等学校科技计划项目 (No. J16LG02); 青岛市应用基础研究计划项目 (No. 16-5-1-39-jch)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51078196, 41502304), the Shandong Provincial Natural Science Foundation of China (ZR2016EEQ08), the Higher Educational Science and Technology Program of Shandong Province (J16LG02) and the Applied Basic Research Programs of Qingdao (16-5-1-39-jch).

第一作者简介: 张明义, 男, 1958 年生, 博士, 教授, 主要从事土力学及地基基础的试验、教学和研究工作。E-mail: zmy58@163.com

通讯作者: 白晓宇, 男, 1984 年生, 博士, 讲师, 主要从事地基基础及地下工程领域的研究工作。E-mail: baixiaoyu538@163.com

关注。

目前,国内外学者针对桩-土界面受力机制的研究已获得较多有价值的结论。Clough 等^[2]通过直剪试验研究土与混凝土接触面的力学特性,认为接触面剪应力和相对位移成双曲线关系。Brandi^[3]通过大型盒式直剪仪试验发现,土与混凝土的接触面附近土体的逐渐破坏会对应力-位移关系曲线产生影响。张明义等^[4]通过改进的直剪仪进行室内剪切试验,指出黏性土中桩-土界面滑动摩阻力具有明显时效性,滑动摩阻力随时间呈双曲线状增长,与桩的承载力增长曲线相吻合。钟闻华^[5]基于混凝土与粉土接触面的剪切试验发现,随着含水率的增加,桩-土接触面的摩阻力先增大后减小,土体存在最优含水率,此时界面摩阻力最大。大多数学者主要针对砂土和粉土条件下桩-土界面受力状态进行研究,黏性土方面涉及较少,同时剪切试验中通常将法向应力作为有效土压力,从而忽略桩身贯入过程中引起的超孔隙水压力对桩-土界面受力的影响。因此,在考虑孔隙水压力影响下黏性土中桩-土界面受力机制具有十分重要的意义。

在实际工程中桩表面总是粗糙的,而传统静力触探试验和模型桩试验所用桩身介质表面光滑,并不能真实反映桩-土界面受力状态。试验通过预制不同粗糙度的混凝土板来模拟多种桩壁表面实际状态,研究沉桩过程中桩-土界面受力机制。本文为研究沉桩过程中超孔隙水压力和法向压力的影响,在混凝土板表面安装微型孔隙水压力和土压力传感器来动态监测桩-土界面孔隙水压力和法向土压力的

变化。

2 试验方案

2.1 试验设计

试验采用青岛理工大学自制的桩-土界面剪切仪进行试验,剪切底盒尺寸为 40 cm×27 cm×20 cm (长×宽×高),可进行多种土工接触界面直剪试验研究。试验通过设置峰-谷距为 0、2、4、6 mm 混凝土板的齿形槽来模拟桩-土界面的不同粗糙状态。在混凝土板表面安装微型硅压阻式土压力和孔隙水压力传感器来记录试验过程中产生的法向土压力及孔隙水压力。

根据张明义等^[4]研究得出:原状土与重塑土的滑动摩擦试验曲线相似,可以用重塑土代替原状土做滑动摩擦。重塑土样还可以有效避免现场原状土样离散性的影响。试验参照《土工试验方法标准》^[6]统一配置含水率为 25% 的重塑黏性土样。

根据夏红春等^[7]研究得出:将剪切速率控制在 0.02~1.2 mm/min,剪切速率将不影响接触面的力学特性。试验剪切速率设置为 1.0 mm/min,分别施加 25、50、100、150 kPa 等 4 种垂直压力进行剪切试验,记录试验过程中产生的剪切位移、界面剪切阻力、法向土压力、孔隙水压力。

2.2 试验准备

(1) 土样制备

试验所用粉质黏土取自青岛某静压桩工地,经土工试验测得土样物理、力学指标,如表 1 所示。

表 1 土的物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

密度 /(g/cm ³)	含水率 /%	干密度 /(g/cm ³)	孔隙比	饱和度 /%	液限 /%	塑限 /%	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa	压缩系数 α_{v1-2} /MPa ⁻¹	压缩模量 E_{s1-2} /MPa	泊松比
1.98	25.3	1.58	0.728	94.9	31.3	16.5	30	27	0.32	5.5	0.3

将取回的粉质黏土切碎放入恒温干燥箱进行烘干,烘干后放入耦合式粉碎机进行粉碎处理,将粉碎干燥后的土样过 5 mm 试验筛去除大颗粒,避免对重塑土制作的影响。根据剪切仪上盒尺寸估算用土量,参照《土工试验方法标准》^[6]确定制作含水率为 25% 重塑土的用水量。将烘干的粉质黏土分 4 层、每层 5 cm 厚摊铺在土样盒底面,每层土分别进行压实、抹平、洒水,然后用塑料薄膜密封土样盒顶部,浸润 24 h 后备用,如图 1 所示。



图 1 重塑土样制作

Fig.1 Remolded sample production

(2) 混凝土板制作

根据剪切仪下盒尺寸制作混凝土板。混凝土板采用 C50 混凝土现浇, 浇筑时在板表面预留传感器安装孔洞, 振捣密实后放入标准养护室内养护, 养护 28 d 后, 测试同条件养护的边长为 150 mm 的立方体试块的抗压强度, 待其达到预定强度后使用。

将混凝土板粗糙度定义为混凝土表面齿形的峰-谷距离, 通过调整齿形的峰-谷距离来模拟不同的桩-土界面粗糙情况。本次试验中齿宽设定为 10 mm, 齿形峰-谷距分别设置为 0、2、4、6 mm 4 个等级, 分别编号 I、II、III、IV, 如图 2 所示。



图 2 混凝土板
Fig.2 Concrete plate

(3) 传感器安装

混凝土板表面分别安装 2 个微型硅压阻式孔隙水压力传感器和 1 个微型硅压阻式土压力传感器, 硅压阻式传感器具有灵敏度高、采集数据准确、采集频率高等优点。

试验采用孔隙水压力传感器尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。由于传感器尺寸过小, 将 $\phi 18 \text{ mm}$ 螺母、橡胶塞、硅胶组装形成夹持工具与传感器共同形成安装扩大头, 将传感器扩大头嵌入混凝土板内, 从而达到传感器顶面透水石与混凝土板表面齐平的安装要求。微型土压力传感 $\phi 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 可直接安装在混凝土板预留的孔洞中并用硅胶填充四周。用切割机在混凝土板表面和四周侧面刻槽用来布设传感器导线, 槽内通过硅胶填充后用环氧树脂封装。通过加工上盒限位杆螺纹来安装拉压力传感器, 将传感器与解调仪连接对界面阻力实时显示和记录。试验传感器及安装图如图 3、4 所示; 数据采集系统由计算机、数据解调仪、瞬时显示仪等组成, 如图 5 所示。

3 试验过程

首先将装有传感器的混凝土板 I 装入剪切仪下盒, 连接计算机采集系统对传感器成活率和灵敏



图 3 孔隙水压力传感器和土压力传感器
Fig.3 Water pressure sensor and earth pressure sensor



图 4 传感器安装图
Fig.4 Picture of sensor installation

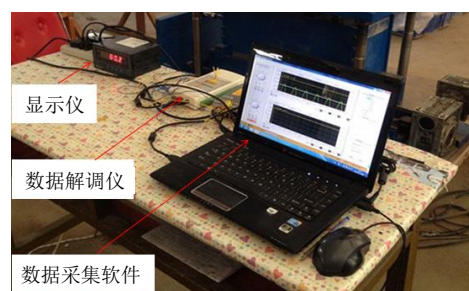


图 5 试验数据采集系统
Fig.5 Data collection system

度进行测试; 在空载情况下开动仪器记录拉压力传感器数值用以消除仪器自身摩擦对后期试验数据的影响。对浸润完成重塑土样采用分层击实的方法装入剪切仪上盒, 在装填的过程中要严格控制土样的压实度, 使其干重度的数值接近原状土样以确保试验数据的准确性^[8-9]。

考虑到剪切盒内土的自重应力 (约 4 kPa), 混凝土板分别在法向土压力为 25、50、100、150 kPa 条件下进行剪切试验, 施加剪切力的方向与混凝土板凹槽方向垂直, 当法向荷载施加后注意观察法向土压力和孔隙水压力值的变化, 静置 30 min 等其数值趋于稳定后进行剪切试验; 剪切速度设定为 1.0 mm/min, 当剪切位移稳定增加而剪切力保持不变时判定试验破坏; 试验过程中记录桩-土界面法向土压力、孔隙水压力、剪切位移和界面剪切力; 混凝土板 I 试验完成后分别换 II、III、IV 板进行试验。过程如图 6 所示, 土体剪切破坏见图 7。



图 6 混凝土板安装图

Fig.6 Picture of concrete floor installation



图 7 土体剪切破坏

Fig.7 Picture of soil shear failure

4 试验结果及分析

通过试验数据采集系统记录, 分析在不同法向土压力条件下桩-土界面孔隙水压力的变化情况。根据传感器测得法向土压力减去孔隙水压力计算得出桩-土界面实际有效应力, 绘制界面剪切力-有效应力曲线。根据试验记录的界面剪切阻力、剪切位移、有效应力等数据绘制不同粗糙度情况下的界面剪切阻力-剪切位移曲线。

4.1 桩-土界面孔隙水压力数据分析

孔隙水压力传感器通过数据解调仪与计算机相连, 对剪切过程中界面孔隙水压力进行自动采集, 并绘制界面孔隙水压力变化曲线如图 8 所示。

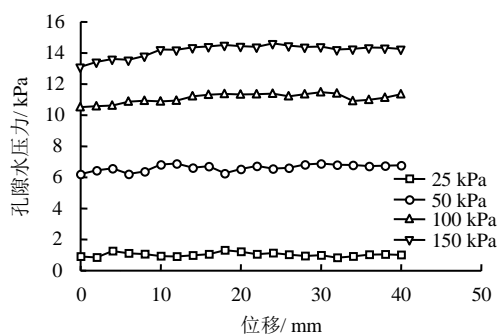


图 8 界面孔隙水压力变化曲线

Fig.8 Interface pore water pressure curves

法向荷载施加后将上盒土体静置 1 h 后进行剪切试验, 以保证重塑土体密实度^[10]。因硅压阻式微

型孔隙水压力传感器输出电压信号, 输出过程会受到直流电的轻微扰动而导致采集数据轻微波动。试验过程中孔隙水压力大致呈先上升后趋于平稳的走向, 因试验测试时间和距离较短, 未出现孔隙水压力消散现象。试验结果与唐世栋^[11]、朱向荣^[12]等对沉桩过程中超孔隙水压力变化的研究结果一致。

在试样开始进行剪切之前, 对试验过程中不同法向应力 (10、20、30、40、50、100、150 kPa) 对应的孔隙水压力值进行采集, 结果如图 9 所示。可以看出, 随着法向应力的增加界面孔隙水压力逐渐增大。当法向应力较小时, 孔隙水压力增长速度较快, 后期增长速度明显减弱, 这与朱向荣^[12]和徐永福^[13]等研究结果是一致的。通过试验测得: 桩-土界面孔隙水压力约占法向应力的 10%, 对界面受力机制的分析具有一定影响。在实际工程中, 对于黏性土中静压预应力管桩或方桩的施工和设计要适当考虑孔隙水压力对沉桩阻力和桩基承载力的影响。

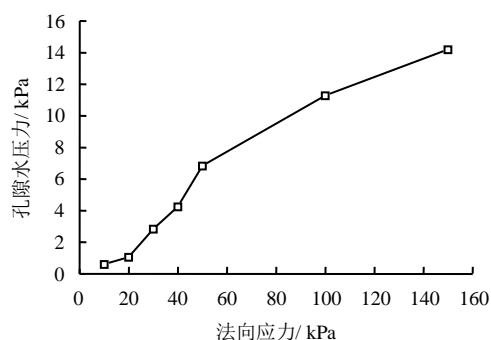


图 9 孔隙水压力随法向应力变化曲线

Fig.9 Pore water pressure curve with normal stress

4.2 桩-土界面法向土压力试验数据分析

法向土压力传感器通过数据解调仪与计算机相连, 对剪切过程中界面法向土压力进行自动采集, 并绘制界面法向土压力变化曲线如图 10 所示。

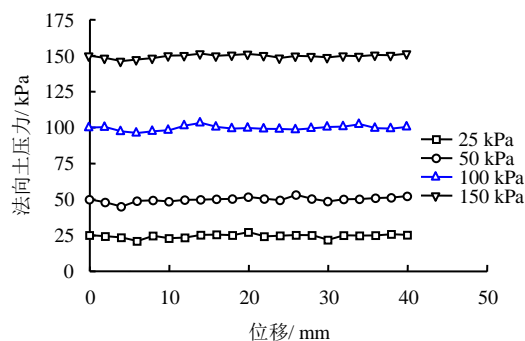


图 10 界面法向土压力变化曲线

Fig.10 Interface normal soil pressure curves

法向荷载施加后将剪切盒内土体静置 1 h 后进行剪切试验, 当剪切位移达到 2 mm 时法向土压力开始减小; 随着剪切试验地进行, 在剪切位移达到 6 mm 时法向土压力达到最小值, 其中在法向荷载为 25 kPa 和 50 kPa 时, 减小幅度较大, 约为 6 kPa; 后续剪切过程中又逐渐恢复到初始值, 同样因为直流电的干扰作用, 传感器数据发生轻微波动。当剪切试验开始时, 土体首先发生减缩现象, 使土体颗粒内部孔隙减小, 彼此接触更加紧密, 从而导致法向土压力的前期减小。试验结果与石熊等^[9]、陈俊桦等^[14]研究结论一致, 同时说明, 本试验采用的传感器类型和安装、采集方式是合理可行的, 为后续原位压桩试验测试奠定了基础。

4.3 表面粗糙度对界面剪切应力参数的影响

桩-土界面力学特性研究主要针对桩壁与其相接触一定厚度土体间的相互作用问题^[10]。界面抗剪强度参考摩尔-库仑定律进行表示, 考虑到在黏性土中沉桩会造成孔隙水压力的增加, 结合界面剪切试验测试数据, 提出界面阻力的全新概念。笔者认为, 界面阻力由黏性土与混凝土板之间黏着力和摩擦力两部分构成, 其中黏着力为黏性土与混凝土板的黏聚作用, 摩擦力为界面法向土压力减去孔隙水压力所得有效应力与界面摩擦系数的乘积。界面阻力能够更加清晰地反映黏性土中桩-土界面实际受力状况。可表示为

$$\tau = \mu p' + b \quad (1)$$

式中: τ 为界面阻力 (kPa); b 为界面黏着力 (kPa); p' 为界面有效应力 (kPa); μ 为界面摩擦系数。

对试验数据中的界面阻力、有效应力进行统计, 如表 2 所示, 根据式 (1) 对表 2 中数据进行线性回归分析, 相关系数 R 表示界面阻力与有效应力的相关程度。从表 3 可以得出线性回归相关系数均大于 0.98, 表明界面阻力与有效应力的线性关系显著。在有效应力相同的条件下, 随着粗糙度的增加, 界面阻力明显增加。

表 2 桩-土界面阻力
Table 2 Pile - soil interface resistance

混凝土板编号	不同有效应力下的界面阻力 τ /kPa			
	23.60	43.20	88.71	142.80
I	24.32	36.61	54.21	67.14
II	27.10	37.98	54.26	82.22
III	32.18	48.13	64.33	94.53
IV	34.26	49.70	62.87	94.57

表 3 界面粗糙度与相应界面阻力参数
Table 3 The corresponding parameter of interface roughness and interface resistance

混凝土板编号	黏着力 / kPa	摩擦系数	相关系数
I	16.28	0.341	0.987
II	17.26	0.401	0.989
III	22.52	0.452	0.994
IV	23.82	0.454	0.995

4.3.1 表面粗糙度对界面摩擦系数的影响

由表 3 可知, 当粗糙度为 0 mm 时, 摩擦系数最小为 0.341; 当表面粗糙度为 6 mm 时, 摩擦系数达到最大值为 0.454。随着粗糙度的增加, 界面摩擦系数增大, 但增长速率逐渐降低, 可能是黏土装入上盒过程中土体密实度控制欠佳导致^[15], 亦或是随着粗糙度的增大黏性土对其敏感性降低造成, 具体原因有待于进一步研究。

桩-土界面摩阻力由混凝土与黏性土之间摩擦力和滑动剪切带土体与上层土体的滑动摩擦力两部分构成, 其中混凝土板凹槽深度远大于黏土自身颗粒尺寸, 相比之下产生的尺寸效应使混凝土与黏性土间的接触紧密程度远小于黏土颗粒自身接触作用。界面克服黏土与混凝土颗粒间的摩阻力即可实现滑移, 其将远小于黏土颗粒间的摩阻力。粉质黏土摩擦系数为 0.53, 而改变粗糙度后界面摩擦系数在 0.34~0.44 波动。综上所述, 可以得出混凝土板粗糙度变化对桩-土界面摩擦系数影响较小, 这与钱建固等^[16]研究结论一致。

4.3.2 表面粗糙度对界面黏着力的影响

图 11 为粗糙度与黏着力关系曲线, 可以看出, 随着粗糙度的增加, 桩-土界面黏着力由 16.28 kPa 增加至 23.82 kPa。当界面粗糙度大于 2 mm 时, 黏着力增速加快, 其数值逐渐向粉质黏土自身黏聚力 27 kPa 靠近。

桩-土界面黏着力由混凝土表面与黏土之间黏聚力和混凝土板凹槽内填充土体与剪切平面上部土体的黏聚力两部分构成^[17]。粗糙度较小时, 桩-土界面黏着力主要由混凝土表面与黏土之间黏聚力提供, 此时界面黏着力数值较小, 剪切破坏面发生在混凝土与黏土接触表面; 当混凝土板粗糙度增大时, 凹槽内体积增加, 凹槽内部填充土体与剪切面上部土体接触面积增大, 导致其界面黏聚力增加, 剪切破坏面有向土体内部移动的趋势; 界面黏着力当粗糙度增大到一定程度时, 凹槽内填充土体与上部土体接触面积接近于混凝土板表面积, 桩-土界面黏着

力接近于黏土自身黏聚力,此时剪切破坏面将会发生在黏土内部。

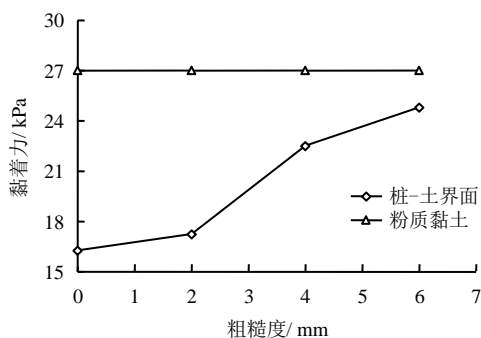


图 11 粗糙度与黏着力关系曲线

Fig.11 Relationship curves of roughness and cohesion

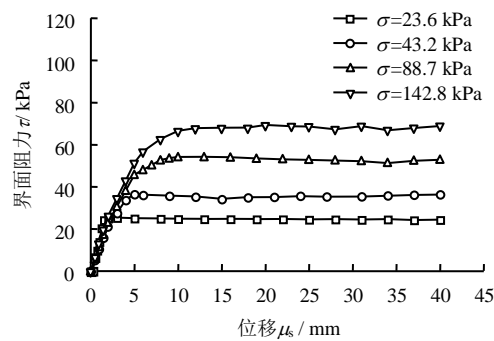
如上所述,粗糙度变化时对摩擦系数影响不明显,但对界面黏着力作用效果显著,说明粗糙度的变化对桩-土界面阻力影响较大。根据试验可以推断,桩-土界面粗糙度存在临界状态,随着粗糙度的不断增加,界面黏着力趋于稳定并接近黏性土自身的黏聚力。

4.4 法向应力对剪切应力-剪切位移的影响

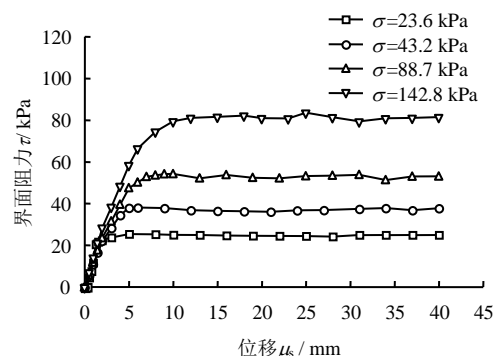
桩-土界面法向有效应力大小是决定界面阻力力学特性的重要因素之一。当粗糙度、剪切速率、土的力学指标等条件相同的前提下,桩-土界面的有效应力不同必然会影响界面阻力-剪切位移曲线的表现形式。不同有效应力情况下界面阻力-剪切位移曲线如图 12 所示。

由图可知,在粗糙度相等的条件下,随着有效应力的增加,桩-土界面初始剪切模量变化不大,对应出现的界面峰值阻力和破坏剪切位移越大。当有效应力相等时,随着混凝土板粗糙度的增加,界面极限峰值阻力和后期趋于平稳时的界面阻力均增大。在界面有效应力 $\sigma = 23.6$ kPa 情况下,界面阻力-剪切位移曲线表现成折线形,在界面阻力达到峰值后出现明显的拐点,并且在后续剪切过程中界面阻力基本保持不变;随着有效应力的增大,在 $s = 88.7$ kPa 时曲线出现一种由折线形向双曲线形变化的过渡状态;在法向应力 $\sigma = 142.8$ kPa 时,曲线呈双曲线形,界面阻力达到峰值后有减小的趋势,最后曲线趋于平稳。

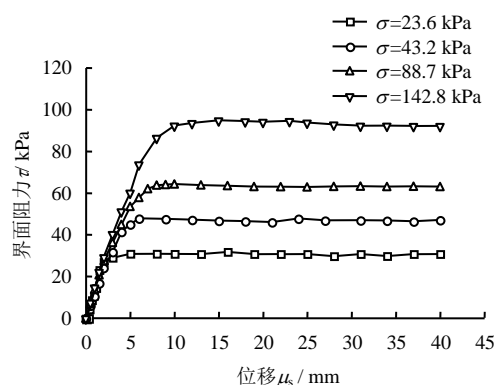
根据界面阻力-剪切位移曲线和试验后对接触界面土体破坏形态观察,双曲线形大致包括 4 个阶段,以图 12(d)中 $s = 142.8$ kPa 曲线为例进行说明:OA 段中界面阻力随剪切位移的增大近似呈线性增长,界面阻力主要由粉质黏土整体与混凝土接触面



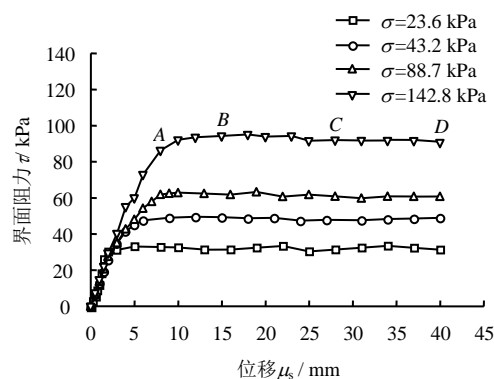
(a) I 粗糙度板



(b) II 粗糙度板



(c) III 粗糙度板



(d) IV 粗糙度板

图 12 不同法向应力下剪切应力-剪切位移曲线
Fig.12 Curves of interface resistance - tangential displacement under different normal stress

的静摩擦力提供,此时摩擦系数基本不发生变化;*AB*段中随剪切位移增大接触界面土体产生切向变形,由于黏性土中黏聚力作用与周围土体形成剪切错动带,随着位移的继续增大,土中黏聚力随之达到最大值。剪切错动带与周围土体的滑动摩擦、黏性土与混凝土接触面的动摩擦共同形成界面阻力;*BC*段中接触面的滑动摩擦力和剪切错动带内土体的黏聚力均已达到极限值,随着剪切位移的继续增大,使剪切错动带土体原结构遭到破坏,使其黏聚力降低,从而使界面阻力软化减小;*CD*段中土体结构继续遭受破坏,黏聚力继续降低,从而导致界面阻力主要由黏土与混凝土板滑动摩擦提供而趋于稳定。

综上所述:桩-土界面剪切试验中存在折线形和双曲线形两种界面阻力-剪切位移曲线。折线形曲线的破坏状态为桩-土接触界面滑动破坏,双曲线形破坏状态为接触界面土体剪切带的滑动破坏。当粗糙度相同时,随着法向应力的增加,桩-土界面破坏状态会出现从折线形向双曲线形转化的现象。

5 结 论

(1) 桩-土界面孔隙水压力约占法向应力的10%,对界面阻力有一定影响,在实际工程中应加以考虑。

(2) 提出桩-土界面阻力的概念,能够更加清晰地表达桩-土界面实际受力机制,界面阻力由界面黏着力和界面摩擦力组成,其中,界面摩擦力为摩擦系数与界面有效法向应力的乘积。

(3) 界面黏着力由桩表面混凝土与周围土体的黏聚力和混凝土凹槽中填充土体与上部土体的黏聚力两部分构成。桩-土界面阻力随着界面粗糙度的增加显著增大,但界面粗糙度存在临界状态,随着粗糙度的变化,界面黏着力不再增加而接近土体自身黏聚力。

(4) 混凝土粗糙度对桩-土界面摩擦系数影响较小,对桩-土界面黏着力影响效果显著。桩-土界面初始剪切模量随着有效应力的增加基本保持不变,对应出现的界面峰值阻力和破坏时的剪切位移越大。桩-土界面阻力随着粗糙度的增加,界面阻力峰值和趋于平稳后的界面阻力均增大。

(5) 因为已知法向压力,本试验中法向土压力传感器测试结果分析价值不大,但测试方法的成功,为后期原位压桩试验中变化的桩侧土压力(如挤土效应)提供了测试手段,对于进一步研究压入桩的施工效应(挤土效应、时间效应、土塞效应及残余

应力)有重要参考价值。

参 考 文 献

- [1] 李镜培,方睿,李林,等.基于变固结系数的静压桩周土体力学特性研究[J].岩土力学,2016,37(3):679—686.
LI Jing-pei, FANG Rui, LI Lin, et al. Study of mechanical properties of soil around jacked piles considering variable consolidation coefficient[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(3): 679—686.
- [2] 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
- [3] BRANDI J R T. Behavior of soil-concrete interfaces[R]. Edmonton: The University of Alberta, 1985.
- [4] 张明义,邓安福.桩-土滑动摩擦的试验研究[J].岩土力学,2002,23(2):246—249.
ZHANG Ming-yi, DENG An-fu. Experimental study of sliding friction between pile and soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(2): 246—249.
- [5] 钟闻华.深长桩荷载传递特性与相互作用理论及应用研究[D].南京:东南大学,2005.
ZHONG Wen-hua. Research on interaction theory and application of load transfer characteristics of deep and long pile[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [6] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—1999 土工试验标准方法[S].北京:中国计划出版社,1999.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T50123—1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [7] 夏红春,周国庆.土-结构接触面剪切力学特性及其影响因素试验[J].中国矿业大学学报,2010,39(6):831—836.
XIA Hong-chun, ZHOU Guo-qing. Experimental study of the shear mechanical characteristics at a soil-structure interface and the factors affecting them[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2010, 39(6): 831—836.
- [8] 赵春风,龚辉,赵程,等.考虑法向应力历史的黏土-混凝土界面弹塑性分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):848—855.
ZHAO Chun-feng, GONG Hui, ZHAO Cheng, et al. Elastoplastic analysis of interface between clay and concrete considering effect of normal stress history[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**,

- 2012, 31(4): 848—855.
- [9] 石熊, 张家生, 刘蓓, 等. 红黏土与混凝土接触面剪切特性试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(5): 1826—1831.
- SHI Xiong, ZHANG Jia-sheng, LIU Pei, et al. Interface between red clay and concrete[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2015, 46(5): 1826—1831.
- [10] 陆勇, 周国庆, 夏红春, 等. 中、高压下粗粒土-结构接触面特性受结构面形貌尺度影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3491—3499.
- LU Yong, ZHOU Guo-qing, XIA Chun-hong, et al. Effect of shape scale on characteristics of coarse grained soil-structural interface under medium and high pressures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(12): 3491—3499.
- [11] 唐世栋, 何连生, 傅纵. 软土地基中单桩施工引起的超孔隙水压力[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 725—732.
- TANG Shi-dong, HE Lian-sheng, FU Zong. Excess pore water pressure caused by an installing pile in soft foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(6): 725—732.
- [12] 朱向荣, 何耀辉, 徐崇峰, 等. 饱和软土单桩沉桩超孔隙水压力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5740—5744.
- ZHU Xiang-rong, HE Yao-hui, XU Chong-feng, et al. Excess pore water pressure caused by single driving in saturated soft soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp. 2): 5740—5744.
- [13] 徐永福, 傅德明. 结构性软土中打桩引起的超孔隙水压力[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 53—55.
- XU Yong-fu, FU De-ming. Excess porepressure induced in piling in saturated structural soft soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(1): 53—55.
- [14] 陈俊桦, 张家生, 李键, 等. 接触面粗糙度对红黏土-混凝土接触面力学性质的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2016, 47(5): 1682—1688.
- CHEN Jun-hua, ZHANG Jia-sheng, LI Jian, et al. Influence of interface roughness on mechanical properties of red clay-concrete interface[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2016, 47(5): 1682—1688.
- [15] 王伟, 卢廷浩, 宰金珉, 等. 土与混凝土接触面反向剪切单剪试验[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1303—1306.
- WANG Wei, LU Ting-hao, ZAI Jin-min, et al. Negative shear test on soil-concrete interface using simple shear apparatus[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1303—1306.
- [16] 钱建固, 陈宏伟, 贾鹏, 等. 注浆成型螺纹桩接触面特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1744—1749.
- QIAN Jian-gu, CHEN Hong-wei, JIA Peng, et al. Experimental study of mechanical behaviours of grouting-screw pile interface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(9): 1744—1749.
- [17] 杨有莲, 朱俊高, 余挺, 等. 土与结构接触面力学特性环剪试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3256—3260.
- YANG You-lian, ZHU Jun-gao, YU Ting, et al. Experimental study of mechanical behavior of soil-structure interface by ring shear test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3256—3260.