

DOI: 10.11779/CJGE201803013

# 海洋土与钢桩界面剪切强度的大型直剪试验研究

闫澍旺<sup>1</sup>, 林 澍<sup>1</sup>, 贾沼霖<sup>\*, 2, 3</sup>, 郎瑞卿<sup>1</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;

3. 华电重工股份有限公司博士后科研工作站, 北京 100070)

**摘 要:** 海洋工程中现行的桩-土界面剪切强度设计方法一般有两种: ①根据工程经验与规范进行判断; ②根据土质地质勘察报告中的土体强度参数进行判断。对于海洋桩基而言, 合理地确定土-结构物界面的剪切强度尤为重要。界面剪切强度将直接影响桩基承载力的大小, 过高或过低地估算桩基承载力都可能会造成严重工程事故发生。为了研究沉桩过程中桩-土界面特性, 通过自制大型直剪仪对不同粒径的土样进行了直剪试验分析, 提出“抗剪糙度”概念, 研究了砂土的内摩擦角、相对密度和抗剪糙度三者之间的关系和黏土的抗剪糙度与不排水强度间的关系。研究表明, 土与钢板界面的抗剪糙度并非常数, 砂土抗剪糙度的变化规律性较强, 而软黏土的抗剪糙度受固结程度、扰动程度、土体强度等因素影响而呈现较大变化。最后, 对“抗剪糙度”在实际工程中的运用提出了一定的建议。

**关键词:** 海洋工程; 大直径; 超长桩; 界面强度; 抗剪糙度

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)03-0495-07

**作者简介:** 闫澍旺(1949-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程专业的教学和科研。E-mail: yanshuwang@tju.edu.cn。

## Large-scale direct shear tests on shear strength of interface between marine soil and steel piles

YAN Shu-wang<sup>1</sup>, LIN Shu<sup>1</sup>, JIA Zhao-lin<sup>1, 2, 3</sup>, LANG Rui-qing<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Character and

Engineering Environment of Tianjin, Tianjin 300384, China; 3. Huadian Heavy Industries Co., Ltd., Beijing 100070, China)

**Abstract:** There are two methods to decide the interfacial shear strength of pile-soil in ocean engineering design nowadays. One is taking the advices of engineering experience and codes, the other is calculation using the strength parameters of soils derived from geological exploration. As for the pile foundation in ocean, it is very important to reasonably estimate the interfacial shear strength of soil-structure, which will make a great difference to the pile bearing capacity. Both overestimation and underestimation of the pile bearing capacity may lead to severe engineering accidents. To study the characteristics of interface between piles and soils during pile driving, a large-scale direct shear apparatus is developed to perform the direct shear tests on soil samples with varied particle diameters. The shear-resistant coarseness between the soils and the surface of structures is introduced, and the relationships among internal friction angle, relative density and shear-resistant coarseness of sand samples are studied as well as the relationships between the shear-resistant coarseness and the undrained shear strength of cohesive soil samples. According to the results of the tests, the shear-resistant coarseness is variable, and the shear-resistant coarseness of sand changes more regularly while that of soft clay changes more greatly owing to the influences of consolidation, disturbance and strength of soils. Moreover, some advices are offered to the application of shear-resistant coarseness in practical engineering.

**Key words:** ocean engineering; large diameter; super-long pile; interfacial strength; shear-resistant coarseness

## 0 引 言

随着中国海洋事业的不断发展, 海洋工程的建设领域逐渐向深海拓展, 大直径超长桩越发成为海洋平台的热门基础形式。通常而言, 大直径超长桩的桩长可达 100 m 以上、桩径可达 2 m 以上。对于超长桩而言, 桩侧摩阻力对桩基承载力的贡献是主要的, 因此

合理确定桩侧摩阻力对于大直径超长桩的沉桩设计和

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41272323, 41372291); 天津市软土特性与工程环境重点实验室科技成果转化项目(KJZH-CA3-1746); 科技成果转化奖励资助项目

**收稿日期:** 2016-02-25

**\*通讯作者** (E-mail: jzhaolin@126.com)

施工具有重要意义。若高估了承载力,则在沉桩过程中可能会出现由于桩自重和锤重过大而产生的溜桩现象。但是,过于保守地估计承载力则可能会发生拒锤的现象,造成成本增加和经济损失。

沉桩过程对于土体而言是一种剪切作用,通常可通过剪切试验来研究桩-土界面剪切强度,进而对大直径超长桩的桩侧摩阻力进行分析。直剪试验是室内进行桩土界面强度研究的主要手段之一。对于砂土与结构物的界面强度研究,国外 Potyondy<sup>[1]</sup>、Lings 等<sup>[2]</sup>、Mortara 等<sup>[3]</sup>学者和国内胡黎明等<sup>[4]</sup>、张嘎等<sup>[5]</sup>、夏红春等<sup>[6]</sup>、李永辉等<sup>[7]</sup>都做过相应的研究,内容主要涉及砂土分别与钢铁、混凝土、石、砖的剪切试验研究;循环荷载作用下的土与结构物界面剪切试验研究;不同法向应力下砂与钢板的界面特性,等等。对于黏土与结构物界面剪切特性的研究, Potyondy<sup>[1]</sup>、卢廷浩等<sup>[8]</sup>、周凯等<sup>[9]</sup>学者先后进行了许多试验,分析了黏土分别与混凝土、石、砖等界面的接触特性,并研究了含水率、粗糙程度、法向应力等因素对黏土与结构物界面强度特性的影响。然而,上述研究工作基本是针对陆上工程进行的,其成果对于海洋工程而言具有一定的借鉴意义。

为了研究海洋工程中大直径超长钢桩与海洋土的界面剪切强度特性,本文通过研制大型直剪仪来进行钢桩与不同海洋土体间界面剪切试验,对钢桩与海洋土在沉桩过程中的摩擦特性进行研究,同时进行常规直剪仪试验作为对比,提出“抗剪糙度”概念,总结不同密实度的砂土与不同强度的软黏土的抗剪糙度变化,并对实际工程提出了一定的建议。

## 1 试验设备及试验方法

### 1.1 自制大型直剪仪

根据直剪试验原理,自行设计如图 1 所示的大型应力式直剪仪。它包含上剪切盒,下剪切盒,水平加载架,竖向加载架,直线导轨,底板,垂直加压设备,水平加荷设备,量力环及位移量测系统。

#### (1) 水平加载系统

该系统包括圆形手柄、滚轴丝杆和传动拉杆几个主要部分。将传动拉杆与底座搭接,底座可在直线导轨上作水平直线运动,通过转动手柄带动滚轴丝杆旋转向前推进,使试样在沿上下盒之间的水平面上受剪直至破坏。剪切速率可以根据需要通过改变转动手柄的速率来进行调整。

#### (2) 垂直加载系统

垂直加载采用杠杆加载方式,由垂直加压框架和 1:10 杠杆组成。通过转动垂直加压框架上的圆形手

柄可以调节垂直加压杆高度,从而调节杠杆处于水平状态。在杠杆末端吊盘上放置砝码以实现垂直加载的目的,垂直压力的大小可以通过放置在吊盘上的砝码重量计算得出。

#### (3) 剪切盒

剪切盒为矩形,包括上剪切盒和下剪切盒,均为可拆卸式。上盒双面开口,下开口的四角各有一个向内凸出 0.5 mm 的小铁片,用于放置结构物材料,同时保证结构物材料不会掉入下盒中;下盒单面开口,用于装填土样。剪切盒边长与高度分别为 152 mm 与 50 mm。下剪切盒固定在底座上,可随底座沿水平方向运动;上剪切盒通过螺栓固定在刚性支座上。上下剪切盒之间有 0.2 mm 的间隙,以消除剪切时上、下盒之间的摩擦,提高试验精度。

#### (4) 量测系统

该部分主要由量力环、百分表和数显位移表组成。量力环的率定系数为 1.972 kPa/0.01 mm,通过读取百分表的读数来计算剪应力的大小,剪切位移则通过数显位移表读取。



图 1 大型直剪仪示意图

Fig. 1 Sketch of large-scale direct shear equipment

#### (5) 大型直剪仪优势

由于常规直剪仪的剪切盒尺寸较小,上下盒套箍作用比较明显,因此对界面要求较高,一般需要非常平整与均匀的界面。而大型直剪仪具有尺寸大、剪切位移大、上下盒套箍作用不明显等优点。该直剪仪的剪切位移可达 50~60 mm,能获得残余强度范畴内的试验结果,与常规直剪仪相比更适用于大变形剪切的研究中,且试验耗时又比环剪仪短,更节约时间和成本。此外,它还能适应结构物界面存在一定粗糙度的情形,能真实地模拟实际工程中的土-结构物相互作用。

## 1.2 试验方案

### (1) 抗剪糙度定义

抗剪糙度, 可定义为桩-土界面的抗剪强度 (即抗滑动能力) 与土体自身强度之比, 即

$$R_m = \frac{\tau_{pf}}{\tau_{sf}} \quad (1)$$

式中  $R_m$  为抗剪糙度;  $\tau_{pf}$  为桩-土界面抗剪强度;  $\tau_{sf}$  为土体抗剪强度。在实际工程中, 桩-土界面抗剪强度往往很难得到, 但土体自身的抗剪强度通常都会在勘察阶段给出。因此, 根据抗剪糙度, 可以通过土体自身抗剪强度推求出桩-土界面强度。另外, 根据抗剪糙度大小, 可以较为直观地看出桩土间破坏面更倾向于出现在桩-土接触界面还是土体中。

显然, 同一种表面材料与不同土的接触特性是不同的。对于砂土和黏土, 抗剪糙度的取值应存在差异, 因此必须通过不同的试验来确定。

为了求出抗剪糙度, 应同时进行土的强度试验和土与结构物界面强度试验。土的抗剪强度由常规直剪试验方法测得。为了测得界面材料与土之间的抗剪强度, 将界面材料 (钢板) 放于上剪切盒中, 土样放置于下剪切盒之中, 用钢丝锯对土样表面进行微调处理, 尽量保证其表面与剪切面基本相齐平。试验所用钢板取自天津港, 厚度为 5 mm, 表面粗糙度参数为  $R_z$  40~100  $\mu\text{m}$ , 工程中钢管桩表面粗糙度约为  $R_z$  40~80  $\mu\text{m}$ , 二者粗糙度相当。其中,  $R_z$  为表面轮廓最大高度, 是轮廓峰顶线到谷底线的距离。

### (2) 土样制备及装样

对于砂土, 选取不同密实度的试样进行试验, 通过击实使土样达到指定的密实度, 如图 2 所示。对同样的砂土, 根据土样干密度和剪切盒容积, 可以得出达到指定密实度所需的土样质量。取相应质量的土样分别置于大直剪仪的下剪切盒和常规直剪仪的剪切盒中, 将土样分别击实至与指定密实度相对应的体积 (剪切盒容积), 由此使得两个剪切盒中的土样具有相同的密实度。另外, 考虑到海洋工程中的土体均位于水下, 击实完成后, 将土样由下至上通过滴水进行饱和, 以减小饱和过程对土样的扰动。试验时, 先轻缓地施加法向应力荷载, 然后马上进行剪切试验。

根据实际工程中的勘察资料选值, 并考虑砂样的剪胀和剪缩作用, 试验中各种砂样的密实度为: 粗砂试样的相对密度分别为 0.109, 0.280, 0.534, 0.737 和 1.0; 中砂试样相对密度分别为 0.293, 0.486, 0.668, 0.839 和 1.0; 细砂试样相对密度分别为 0.212, 0.411, 0.597, 0.930 和 1.0。

对于黏土, 考虑到海洋桩基的工作环境中其强度较低 (尤其是发生溜桩时), 本次试验选取不排水强度在 5~20 kPa 间的黏土土样进行研究。先将试验用的土加水搅拌成均匀泥浆, 放入固结槽中, 用真空预压的方法使土样达到一定的初始强度。然后, 将同一种土样分别放置在常规直剪仪和大型直剪仪中, 分别进行剪切试验。



图 2 砂土密实度控制

Fig. 2 Control of compactness of sand samples

制样时, 先将全部土样放在一个大槽子中一起固结, 当土样不排水强度达到 5 kPa 左右时, 取出一小部分土样进行试验, 之后继续将剩余土样固结。强度每增加一点便将土样取出进行试验, 直到土样加固至不排水强度为 20 kPa 左右为止。大直剪仪采用与其匹配的特制方形环刀切取土样, 常规直剪仪用常规环刀取样, 将多余土样用钢丝锯去除后, 分别移至大直剪仪和常规直剪仪中进行试验, 两者取样方式是类似的。

对于大直剪仪, 装样完毕后, 先将上盒对齐并组装到下盒上, 然后将结构物材料 (本次试验为钢板) 从上盒上开口放入, 使其与下盒土样表面相接触, 再盖上顶盖并连接加载装置。其装样方法与常规直剪仪基本一致。

## 2 试验土样性质

本次试验旨在研究海洋土体与钢桩的界面剪切特性, 采用细砂、中砂、粗砂、软黏土 4 种性质不同的海洋土体进行。

试验中细砂取自天津滨海新区某工程; 接近中砂的土取自烟台附近海滩; 粗砂取自秦皇岛附近海滩。各种砂土土样的基本物理力学性质参数如表 1 所示, 级配曲线如图 3 所示。试验用的重塑软黏土试样 s-1 与 s-2 主要取自塘沽新港的吹填土。吹填土是新近从渤海海底抽取的淤泥形成的, 其性质与海底表层软土相近。取土深度为泥面以下 1~2 m 之间, 土质为海相沉积黏土。表 2 为黏土土样的基本物理力学性质参

表 1 砂土土样的基本物理性质  
Table 1 Basic physical properties of sand samples

土样编号	土粒组成/%					颗粒粒径/mm			不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	干密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	
	>2 mm	2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.075 mm	<0.075 mm	$d_{60}$	$d_{10}$	$d_{30}$			最大	最小
细砂	—	0.1	0.9	95.0	4.0	0.152	0.080	0.103	1.90	0.870	1.72	1.45
中砂	2.25%	23	60	13.25	1.05	0.4	0.15	0.25	1.6	1.042	1.75	1.48
粗砂	10%	80.1	8.7	1	0.2	1.02	0.51	0.71	1.92	1.009	1.85	1.52

表 2 黏土土样的基本物理性质

Table 2 Basic physical properties of cohesive soil samples						
土样编号	取土深度/m	含水率 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 $e$	塑性指数	饱和度 $/\%$
s-1	1.0~1.5	53.1	18.0	1.877	19	98.8
s-2	1.5~2.0	46.1	17.9	1.767	20	97.7

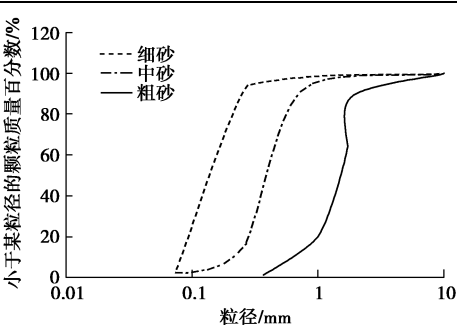


图 3 砂土颗粒级配曲线

Fig. 3 Grading curves of sand samples

数, 土样土质较为均匀, 具有含水率高、孔隙比大、压缩性大等典型软黏土特性。

3 试验结果分析

3.1 抗剪强度的确定

在常规直剪试验中, 一般取剪切位移为试样直径的 1/15~1/10 时所对应剪应力作为抗剪强度<sup>[10]</sup>。通常剪切位移在 10 mm 以内时, 土样即可达到峰值强度, 之后很快下降至残余强度水平; 而剪切位移达 20 mm 时, 通常残余强度已达稳定值。因此, 本文取大型直剪试验剪切位移为土样边长的 2/15 (20 mm) 时对应的剪应力作为稳定残余强度。试验在法向应力 200, 300, 400 kPa 下进行, 根据试验结果得到土体自身抗剪强度和界面的抗剪强度。将不同组合的抗剪强度进行对比, 具体对比结果见图 4~6。

3.2 砂土试验结果

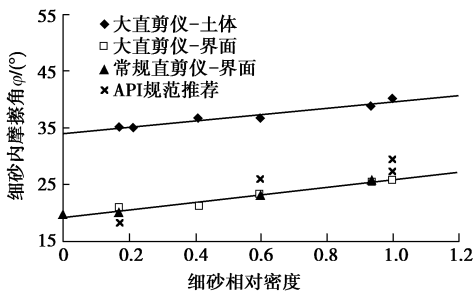
对 3 种不同粒径的砂土进行了试验, 砂土的级配情况如图 3 所示, 分别为细砂、中砂与粗砂。考虑到钢管桩的工作环境为深海, 所用土样都经过静充水饱和处理, 并通过静置使其稳定后再进行试验。

(1) 细砂试验结果

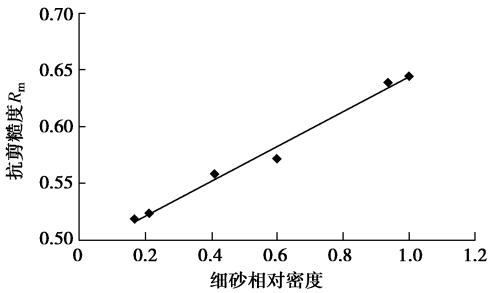
细砂的试验结果如图 4 所示。图 4 (a) 中给出了土的抗剪强度、钢板-土界面抗剪强度随土体相对密度

(即砂的密实度) 增加而变化的情况。由图中可以看出, 两者与相对密度之间均存在很好的线性关系, 且强度都随相对密度的增加而增加。其中, 钢板-土界面强度的增长速度略快。图 4 (a) 中同时也给出了美国桩基协会、API 规范推荐的钢管桩表面与细砂的界面摩擦角随细砂相对密度变化而变化的情况。由图 4 (a) 可知, API 规范的计算结果与本次试验结果非常接近。

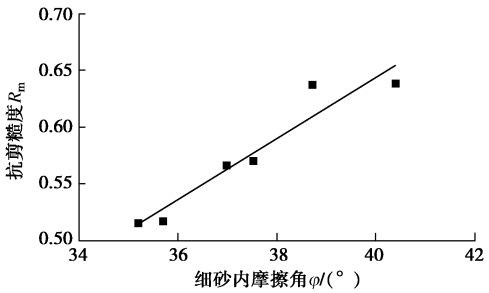
图 4 中 (b)、(c) 分别给出了抗剪糙度与相对密度、抗剪糙度与细砂内摩擦角  $\varphi$  的关系, 两者的结果都呈现出较好的线性。从图中可以看到, 材料的抗剪糙度  $R_m$  随细砂的内摩擦角  $\varphi$  增加而增加, 但变化的幅度不大。当细砂内摩擦角从  $35^\circ$  增加到  $42^\circ$  时, 抗剪糙度从 0.51 变化到 0.65。



(a) 土的抗剪强度及钢板-土界面抗剪强度与土的相对密度关系曲线



(b) 钢板-土界面抗剪糙度与细砂相对密度关系曲线



(c) 钢板-土界面抗剪糙度与细砂内摩擦角关系曲线

图 4 细砂试验结果

Fig. 4 Test results of fine sand samples



### (2) 中砂试验结果

中砂试验结果如图5所示, 图5(a)给出了土的相对密度与各试验中抗剪强度参数的关系。由图中大直剪仪及常规直剪仪的试验结果可知, 两者得出的关系是一致的, 且均与API规范推荐值相一致。

图5中(b)、(c)分别给出了抗剪糙度与相对密度、抗剪糙度与中砂内摩擦角 $\varphi$ 的关系曲线。由图可见, 抗剪糙度随土强度参数增加而变化的幅度更加平缓。当土内摩擦角从 $37^\circ$ 增加到 $50^\circ$ 时, 抗剪糙度仅从0.48变化到0.54。

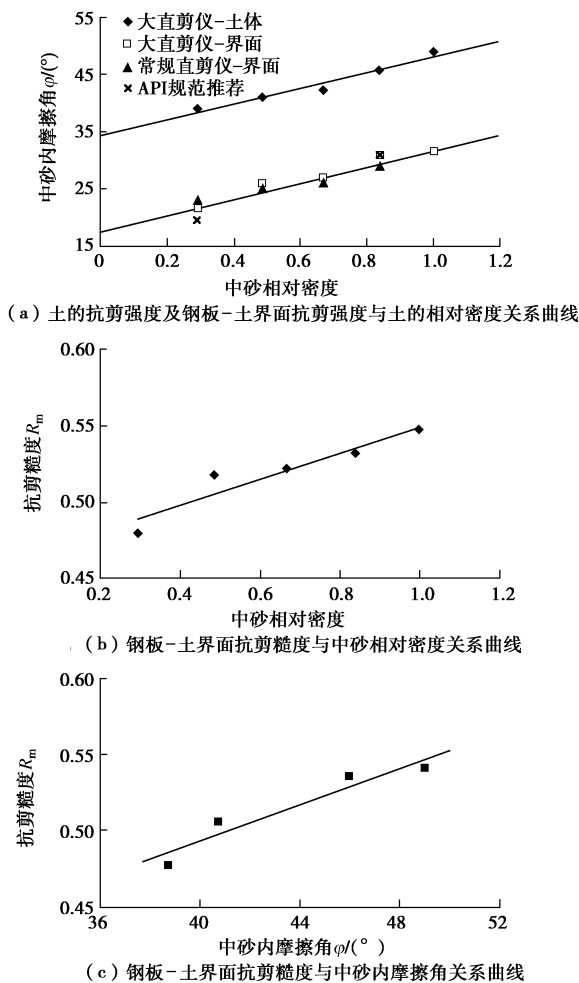


图5 中砂试验结果

Fig. 5 Test results of medium sand samples

### (3) 粗砂试验结果

粗砂试验结果如图6所示。图6(a)中分别给出了土强度参数、界面强度参数与土相对密度的关系, 并给出了大直剪仪及常规直剪仪的试验结果, 同时还给出了API规范推荐的计算结果。图6中(b)、(c)分别给出了抗剪糙度与土的相对密度、抗剪糙度与强度参数的关系曲线。由图中可以看出, 随着内摩擦角的增加, 土的抗剪糙度的变化范围也不大, 当土的内

摩擦角从 $35^\circ$ 变化到 $48^\circ$ 时, 抗剪糙度仅从0.52变化到0.62。

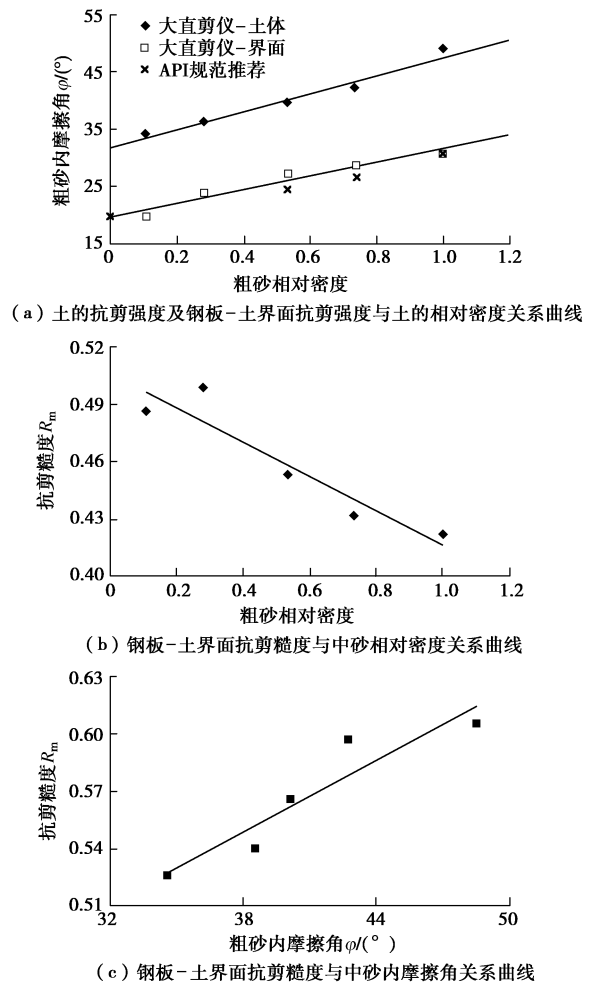


图6 粗砂试验结果

Fig. 6 Test results of coarse sand samples

### (4) 砂土试验结果综合分析

综合3种砂土的试验结果, 可观察到以下现象:

a) 对于试验所采用的3种砂土, 土的强度及界面强度均随着土的密实度增加而增加, 但增加的幅度不同。对于细砂与接近中砂的土, 当相对密度增加时, 土体自身强度的增长速度小于界面强度的增长速度, 抗剪糙度表现为随砂土相对密度的增长而增长。而对于粗砂, 在剪切作用下发生剪缩, 土自身强度的增长较快, 但由于钢板基本不会压缩且粗砂粒径变化不大, 界面抗剪强度增长速度较慢 (如图6(a)), 因而表征抗剪强度比的抗剪糙度表现为随砂土相对密度的增加而减小;

b) 尽管3种砂土的抗剪糙度因土强度不同而不同, 但在土的常见密实度范围内, 抗剪糙度的变化范围很小, 基本都介于0.45~0.65之间。因此, 在实际工程中, 当钢管桩在砂土层中工作时, 其抗剪糙度值可在0.45~0.65内依据土体强度指标进行选取。

### 3.3 黏土试验结果

在动力打桩阶段,黏土中将产生超孔压并不断累积,使得土体强度和界面强度均会减小。由于超孔压短时间内难以消散,界面强度和土体强度在短时间内均不易恢复。考虑到海洋桩基工作环境中的土体强度较低,试验所用土样的强度也处理得比较低(5~20 kPa)。图7给出了本次试验的结果以及API规范的推荐值。

与其他学者所得试验结果类似<sup>[11-12]</sup>,在本文选取的强度研究范围内,黏土与钢板的界面剪切强度低于黏土自身的抗剪强度,表现为抗剪糙度变化范围较大,为0.3~1.0(如图7),说明界面处比土体更容易发生破坏。而API规范在任意强度下得出的抗剪糙度均为1.0,即认为界面强度与土体自身强度是相等的,桩-土界面存在于土层之中。由试验结果可知,黏土不排水强度范围在5~20 kPa之间时,得出的抗剪糙度随着土体强度的增加而增大,在土体不排水强度为20 kPa左右时,抗剪糙度已基本接近1.0。当土体不排水强度大于20 kPa时,抗剪糙度将不小于1.0,即土体抗剪强度将不小于界面强度,此时可认为打桩破坏面将出现在土体中,而非接触界面处。

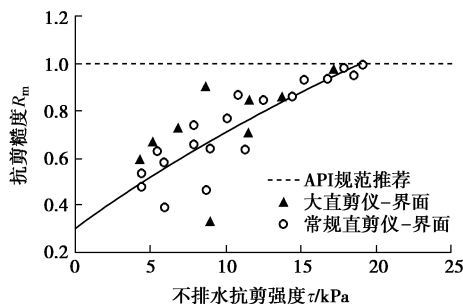


图7 土的抗剪强度与抗剪糙度的关系曲线

Fig. 7 Relationship between undrained shear strength of soils and shear-resistant coarseness

由图7可知,在动力打桩阶段,当土体强度较低时,界面处的土所受的扰动比土中剪切面所受的扰动大,且由于不排水剪切产生的超孔压短期内难以消散,界面强度不易恢复。因此,打桩阶段的界面强度往往会小于土体自身强度。若按API规范的方法将土体自身强度作为界面强度,则可能会因为高估了桩侧摩阻力而使设计偏于危险,造成溜桩的发生。本试验的结果也为溜桩过程中黏土桩侧摩阻力的急剧下降提供了一个较为合理的解释。在桩身下沉的过程中,桩侧一定范围内土体受到扰动,土体强度下降,导致桩-土界面强度下降较为剧烈,桩土间破坏面更倾向于出现在界面处。因此,在设计计算时,当土体强度较低时,

有必要在API规范的基础上再进一步考虑桩侧摩阻力的折减。本试验结果的意义在于其比较接近桩身下沉的工况,此时桩-土界面处所受到的扰动与试验条件相似。因此,本次试验的结果可为沉桩阶段钢桩承载力的设计提供一定的参考。

## 4 结论与建议

综合以上3类砂土以及重塑软黏土的试验结果,可以得出以下结论及建议:

(1) 土-结构物界面强度可以通过利用特制大型直剪仪进行直剪试验的方法来测定,能够更多地考虑实际工程中的影响因素和环境因素,得到较为接近实际工程的试验数据。在实际工程中,桩-土界面抗剪强度往往很难得到,但土体自身的抗剪强度通常都会在勘察阶段给出。因此,提出表征抗剪强度比的“抗剪糙度”概念,通过土体自身抗剪强度可以推求出桩-土界面抗剪强度,由此再进行工程中桩侧摩阻力和桩基承载力的计算。该研究成果可为海洋工程中沉桩阶段的沉桩阻力估算、沉桩能量设计提供一定的参考。

(2) 土-结构物界面的抗剪糙度并非常数。对于砂土,抗剪糙度会随着颗粒粒径、密实度等因素变化而变化,整体趋势为随着土体的强度增加而增大,但对于粗砂可能会出现减小的现象;对于软黏土,随着土体强度(固结程度)的增加,抗剪糙度变化较大,整体上呈现出随着土体强度增加而增加的趋势。

(3) 对于海洋工程中使用较多的钢管桩,本文成果具有一定的指导意义。对于砂土而言,桩-土界面抗剪糙度波动的幅度较小,介于0.45~0.65之间,与API规范推荐值较为接近。但是对于黏土,API规范给出的值较为笼统且偏于危险,因此有必要在进行沉桩设计计算时根据土体强度参数进行抗剪糙度的选择,进而得到界面强度以推测桩侧摩阻力和钢桩承载力大小。当土体强度较小时(本文结果为5~20 kPa),抗剪糙度为0.3~1.0,根据土体强度大小应适当增减;当土体强度较大时(本文结果为大于20 kPa),抗剪糙度达到1.0,可认为界面强度与土体强度相当。

### 参考文献:

- [1] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Géotechnique, 1961, 11(4): 339 - 353.
- [2] LINGS M L, DIETZ M S. The peak strength of sand-steel interfaces and the role of dilation[J]. Soils and Foundations -Tokyo, 2005, 45(6): 1 - 14.
- [3] 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.
- [4] 胡黎明, 濮家骝. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001(4): 431 - 435. (HU Li-ming, PU Jia-liu. Experimental study on mechanical characteristics of soil-structure interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001(4): 431 - 435. (in Chinese))
- [5] 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(2): 254 - 258. (ZHANG Ga, ZHANG Jian-min. Experimental study on cyclic behavior of interface between soil and structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004(2): 254 - 258. (in Chinese))
- [6] 夏红春, 周国庆, 杜泽超. 土-地下结构界面层效应试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011(6): 846 - 851. (XIA Hong-chun, ZHOU Guo-qing, DU Ze-chao. Experimental study of the soil-underground structure interfacial layer effect[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2011(6): 846 - 851. (in Chinese))
- [7] 李永辉, 王卫东, 黄茂松, 郭院成. 超长灌注桩桩-土界面剪切试验研究[J]. 岩土力学, 2015(7): 1981 - 1988. (LI Yong-hui, WANG Wei-dong, HUANG Mao-song, GUO Yuan-cheng. Experimental research on pile-soil interface shear behaviors of super-long bored pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015(7): 1981 - 1988. (in Chinese))
- [8] 卢廷浩, 王 伟, 王晓妮. 土与结构接触界面改进直剪试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2006(1): 82 - 85, 99. (LU Ting-hao, WANG Wei, WANG Xiao-ni. Experimental study on soil-structure contact surface behavior by improved direct shear tests[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2006(1): 82 - 85, 99. (in Chinese))
- [9] 周 凯, 程 寅, 黄 新. 不同桩-土界面直剪试验研究[J]. 路基工程, 2011, 5: 93 - 95, 99. (ZHOU Kai, CHENG Yin, HUANG Xin. Experimental study on direct shear of different pile-soil interface[J]. Subgrade Engineering, 2011, 5: 93 - 95, 99. (in Chinese))
- [10] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley, 2007.
- [11] 杨大方. 土与结构界面模型单剪与直剪试验对比研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2009. (YANG Da-fang. Comparison research between simple shear tests and direct shear tests on interfacial model between soil and structure[D]. Jiaozuo: Institutes of Technology of Henan, 2009. (in Chinese))
- [12] 殷 勇, 李富荣. 滨海土体与钢材接触面剪切特性试验[J]. 土工基础, 2014(6): 123 - 125. (YIN Yong, LI Fu-rong. The shear properties of the contact surface between steel and coastal plain soil[J]. Soil Engineering And Foundation, 2014(6): 123 - 125. (in Chinese))