

文章编号: 1001-4888(2022)04-0497-10

胶结钙质砂与钢界面剪切力学特性的试验研究^{*}

吕海波^{1,2}, 蒋代苹¹, 柴源³

(1. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西桂林 541004; 2. 贺州学院 建筑与电气工程学院, 广西贺州 542899;
3. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 在珊瑚礁上进行桩基工程建设很容易引起钙质砂胶结破坏和颗粒破碎, 桩侧摩阻力减小, 最终导致桩的承载力降低。为研究胶结钙质砂与结构物界面力学特性, 以掺入硅酸盐水泥制备的胶结钙质砂为研究对象, 利用室内应变控制式直剪仪, 开展了一系列胶结钙质砂与钢界面剪切试验; 探究了法向应力、粗糙度对界面强度的影响, 并与相同粒径的未胶结钙质砂界面剪切试验结果进行了对比。研究表明: 法向应力和粗糙度是影响接触面强度的重要因素。随着粗糙度的增大, 当胶结钙质砂界面剪切破坏时, 先发生界面滑移剪切破坏, 继而发生界面附近胶结钙质砂剪切破坏。低法向应力下, 胶结钙质砂和未胶结钙质砂界面剪切特性很接近, 高法向应力下, 两种钙质砂剪切特性差异较大。

关键词: 胶结钙质砂; 界面剪切; 界面强度; 粗糙度

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-217

0 引言

钙质砂是一种由珊瑚、贝壳等海洋生物遗骸碎屑形成的特殊岩土介质, 具有孔隙多、强度低、易胶结、颗粒易破碎等特性^[1-4], 主要分布于南、北回归线之间的大陆架和海岸线。在钙质砂地层, 首先遇到的是采油平台的桩基工程问题。20 世纪 60 年代末的一次海洋石油平台建设中^[5], 一根大直径钢管桩穿入胶结钙质砂地层时, 桩身突然自由下落 15m 左右, 直至高承载力的地层后才停止下落。由于当时人们忽略了钙质砂力学性质的特殊性, 导致此后在巴西、美国、澳大利亚等国的石油平台建设中, 钙质砂多次引起了一系列工程问题并造成重大损失。最有影响力的是 20 世纪 80 年代澳大利亚 North Rankin “A”平台打入钢管桩时因钙质砂地层承载力低而被迫重新施工^[6]。实践表明, 在钙质砂地层成桩施工中, 桩周钙质砂的胶结破坏以及颗粒破碎使得桩承载力大大降低, 而普通材料的传统设计理论已不适用于钙质砂, 故对钙质砂胶结性和颗粒破碎性的研究日益受到关注。

我国对钙质砂工程特性的研究源于南海开展的吹填岛礁工程, 钙质砂作为岛礁重要建筑物的地基材料, 研究其与结构物间的界面力学特性对上部结构基础的安全和稳定具有重要意义。一直以来, 砂土与结构物间的相互作用都是岩土界研究的核心课题^[7-9]。目前, 探究砂土与结构物间的界面力学特性主要以室内试验为主, 张嘎等^[10,11]、冯大阔等^[12,13]利用自己研制的循环加载剪切仪对粗粒土与结构接触面进行了大量的试验研究, 包括室内单调剪切、循环剪切, 总结了粗粒土与结构接触面间的力学特性和受力变形机理。然而, 钙质砂作为一种特殊的岩土材料, 其物理力学性质有别于一般的粗粒土。为研究钙质砂与结构物之间的界面力学特性, 吴梦喜等^[14]对钙质砂与光滑钢板接触面进行了一系列的剪切

^{*} 收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2021-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(51169005, 41272358); 广西自然科学基金重点项目(2018GXNSFDA281038)

通信作者: 吕海波(1973—), 男, 博士, 教授, 博导。主要从事特殊性土的工程特性研究。Email: lhb@glut.edu.cn

试验研究,结果表明钙质砂与光滑钢板的接触属于摩擦接触,且界面剪应力与正应力之比与切向位移有良好的归一性。孙吉主等^[15,16]通过室内拉拔试验研究了钙质砂与钢界面的应力-应变规律,从微观机理上解释了钙质砂桩侧阻力低的性质。史乃伟^[17]对粗颗粒钙质砂的界面摩擦特性进行了研究,数值分析表明颗粒破碎分布有一定的规律性,且颗粒破碎率与初始法向应力有关。Kou 等^[18]进行了钙质砂与钢板界面剪切试验,分析了表面粗糙度和平均粒径对界面流动摩擦的影响,结果表明峰值强度随粗糙度的增加而增加。芮圣洁等^[19]进行了钙质砂与钢界面循环剪切刚度和阻尼比的试验研究,结果表明法向应力和剪切位移幅值对界面剪切刚度和阻尼比起控制作用。此外,钙质砂含有一定的胶结性。在钙质砂胶结性方面,Akili 等^[20]尝试使用化学方法进行胶结;王丽等^[21]、钱慧良等^[22]通过用胶结剂建筑石膏粉、方解石粉、硅酸盐水泥对钙质砂进行胶结,发现同配比下的胶结剂,用硅酸盐水泥胶结效果较好,且胶结后的强度最高。在钙质砂固化力学方面,方祥位等^[23]、刘汉龙等^[24]对微生物固化后钙质砂的动剪应力进行了研究,发现固化后钙质砂的动剪应力和抵抗变形能力有了明显提高。

综上所述,已有研究主要聚焦于钙质砂与结构物间的相互作用、胶结钙质砂的制备及其力学特性,但对胶结钙质砂与结构物间的相互作用鲜有研究。为模拟钢管桩打入胶结钙质砂地层,本文利用应变控制式直剪仪对胶结钙质砂与钢板进行一系列剪切试验,探究了钢板粗糙度、法向应力对界面强度的影响,并与未胶结钙质砂界面剪切、胶结钙质砂自身剪切和未胶结石英砂界面剪切试验结果进行了对比,本文研究成果在一定程度上可为我国南海桩基工程的建设提供理论参考依据。

1 试验内容

1.1 试样制备

本文试验胶结钙质砂采用人工制备的方法,取中国南海某岛礁钙质砂,经清水冲洗混合均匀并自然风干,过筛后颗粒级配曲线如图 1 所示,不均匀系数 C_u 为 4.61,曲率系数 C_c 为 1.13,级配良好。经掺入 10% 的硅酸盐水泥(水泥与钙质砂之比为 10%),搅拌均匀后装满底下垫有玻璃片的环刀(内径为 61.8mm、高为 20mm),盖 upper 玻璃片,轻轻放入水槽内浸水饱和 24h,制备好的水泥胶结钙质砂如图 2 所示。

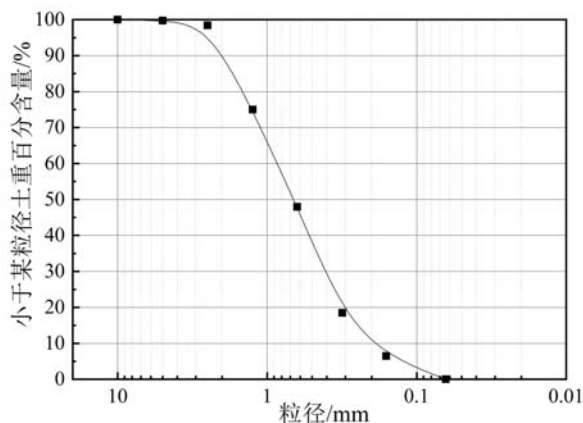


图 1 钙质砂颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain gradation curve of calcareous sand

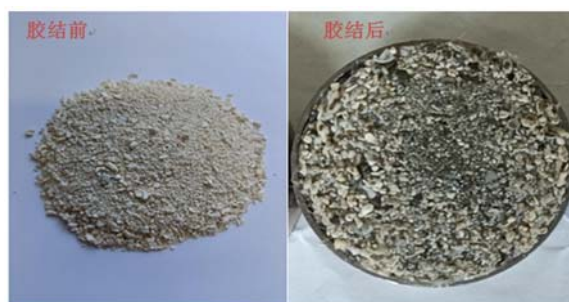


图 2 胶结前后的钙质砂

Fig. 2 Calcareous sand before and after cementation

1.2 试验设备

试验仪器采用 ZJ 型应变控制式直剪仪,如图 3 所示。上下剪切盒内径均为 61.8mm、高为 20mm。剪切过程中,剪切速率为 0.2mm/min,上盒位置固定不动,竖向荷载通过下部加砝码由传力杆经刚性盖传至砂样的方式实现,水平荷载由伺服电机施加。

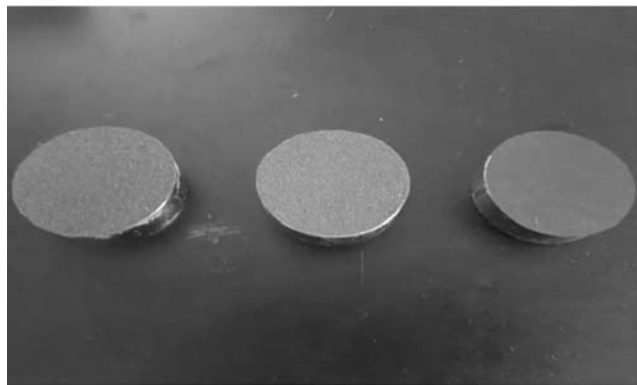
1.3 试验方法

将试样和钢板分别装入上、下剪切盒,在钢板装入下剪切盒之前,先去除钢板表面污渍并用酒精擦

拭晾干,表面贴上不同规格目数的砂纸以模拟钢板表面不同的粗糙度,贴好砂纸后的钢板如图 4(a)所示。为了量化砂纸粗糙度,本文试验借鉴了汪优等^[25]测得的砂纸表面粗糙度指标(见表 1)和建立的砂纸规格 N 与接触面粗糙度 R_a 的指数化拟合公式:

$$\ln R_a = A(\ln N)^B \quad (1)$$

式中: $\ln R_a$ 为砂纸粗糙度 R_a 的对数; $\ln N$ 为砂纸规格 N 的对数; A 、 B 为常数。将粗糙度对数 $\ln R_a$ 与砂纸规格对数 $\ln N$ 之间关系进行拟合,获得如图 4(b)所示关系曲线。根据粗糙度指标测量数据拟合得到 A 、 B 值分别为 27.848 和 -1.321 。试验采用规格为 150 目、400 目、2400 目的砂纸,根据公式(1)得出钢板表面砂纸粗糙度分别为 $26.41\mu\text{m}$ 、 $13.06\mu\text{m}$ 、 $6.06\mu\text{m}$ 。



(a)不同粗糙度钢板

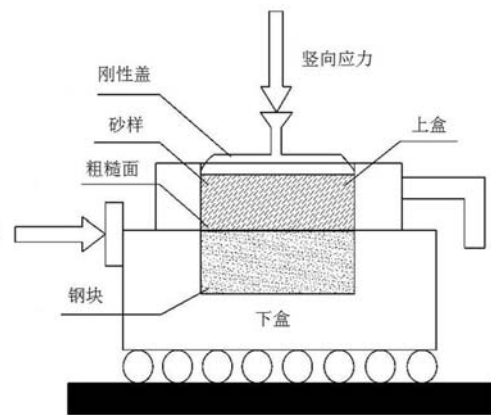
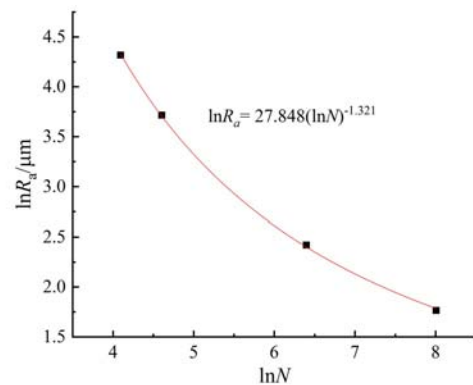


图 3 ZJ 型应变控制式直剪仪

Fig. 3 ZJ strain controlled direct shear apparatus



(b)砂纸规格与砂纸粗糙度关系曲线

图 4 钢板表面砂纸粗糙度示意图

Fig. 4 Diagram of sandpaper roughness of steel plate surface

表 1 砂纸表面粗糙度指标

Tab. 1 Index of roughness of sandpaper

砂纸粒径/ μm	砂纸规格 N	$R_a/\mu\text{m}$
250	60	75.02
150	100	41.06
23	600	11.24
5	3000	5.84

在不同垂直应力(100kPa、200kPa、300kPa、400kPa)和不同粗糙度($26.41\mu\text{m}$ 、 $13.06\mu\text{m}$ 、 $6.06\mu\text{m}$)条件下,推动下盒形成剪切,共进行了 21 组剪切试验,包括胶结钙质砂自身剪切、胶结钙质砂界面剪切、未胶结钙质砂界面剪切和未胶结石英砂界面剪切(试验编号 CC、UC、UQ 分别代表胶结钙质砂、未胶结钙质砂和未胶结石英砂,粗糙度里“—”表示自身剪切),试验方案见表 2。

表 2 试验方案
Tab. 2 Experimental scheme

试验编号	粗糙度/ μm	法向应力/ kPa	胶结度/ $\%$
CC-1	26.41	100	10
CC-2	26.41	200	10
CC-3	26.41	300	10
CC-4	26.41	400	10
CC-5	13.06	100	10
CC-6	13.06	200	10
CC-7	13.06	300	10
CC-8	13.06	400	10
CC-9	6.06	100	10
CC-10	6.06	200	10
CC-11	6.06	300	10
CC-12	6.06	400	10
CC-13	—	100	10
CC-14	—	200	10
CC-15	—	300	10
UC-16	26.41	100	0
UC-17	26.41	200	0
UC-18	26.41	300	0
UQ-19	26.41	100	0
UQ-20	26.41	200	0
UQ-21	26.41	300	0

2 试验结果与分析

2.1 法向应力对界面剪切特性的影响

当界面粗糙度为 $6.06\mu\text{m}$ 、 $13.06\mu\text{m}$ 、 $26.41\mu\text{m}$ 时,不同应力状态下胶结钙质砂的界面剪应力-剪切位移曲线如图 5 所示。由图可知,随着法向应力的增大,界面剪切强度逐渐增大,且剪切软化趋势也更

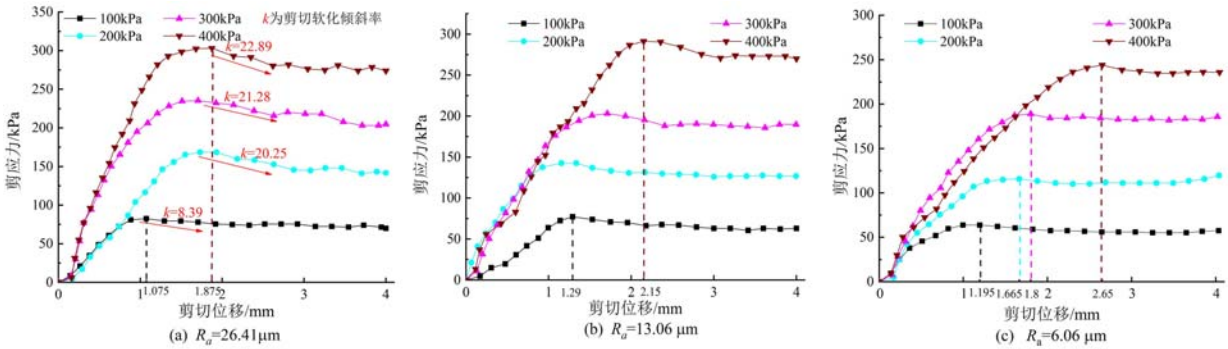


图 5 胶结钙质砂界面剪应力与剪切位移的变化曲线

Fig. 5 Curve variation of shear stress and shear displacement at interface between cemented calcareous sand and steel 加明显。例如,当钢界面粗糙度为 $26.41\mu\text{m}$ 时,法向应力从 100kPa 增大到 400kPa ,界面抗剪强度从 82.6kPa 增大到 303.2kPa ,同时,剪切软化(界面剪应力从峰值减小到稳定阶段)倾斜率 k 从 8.39 增大到 22.89 。随着胶结钙质砂界面剪切的发生,界面峰值强度下的极限切位移也随着法向应力增大而逐

渐增加,如在钢界面粗糙度 $6.06\mu\text{m}$ 状态下,法向应力 100kPa 、 200kPa 、 300kPa 、 400kPa 的极限切位移分别为 1.195mm 、 1.665mm 、 1.80mm 、 2.650mm 。这是因为钢界面附近处的胶结钙质砂颗粒剪碎后位置发生了重新排列,细小砂颗粒填充在大颗粒孔隙内或大颗粒与大颗粒之间,使得钢板附近的胶结钙质砂细颗粒越来越多;另一方面,由于钢板与胶结钙质砂之间的刚度相差很大,剪切过程中胶结钙质砂受到钢板的挤压,使得钢界面附近胶结钙质砂更加密实,可近似认为胶结钙质砂在钢界面附近形成了一层很薄的“刚性层”,法向应力越大,钢板的挤压力也越大,刚性层逐渐增厚,故界面剪坏对应的极限切位移逐渐增加。而当法向应力一定时,极限切位移随着粗糙度的增大呈减小的趋势,如粗糙度由 $6.06\mu\text{m}$ 增大到 $26.41\mu\text{m}$,法向应力为 100kPa 时,极限切位移减小了 0.120mm ;法向应力为 400kPa 时,极限切位移减小了 0.775mm 。

2.2 粗糙度对界面剪切力学特性的影响

结构面不规则、多缺陷是影响接触面力学性能的重要因素,在界面粗糙度为 $26.41\mu\text{m}$ 、 $13.06\mu\text{m}$ 、 $6.06\mu\text{m}$ 时,分别对胶结钙质砂与钢界面剪切下的剪应力和法向应力之间的关系曲线进行线性拟合,拟合结果如图 6 所示。

由图 6 可知,在法向应力相同的条件下,界面剪应力随界面粗糙度增大而增大,如当法向应力 $\sigma=400\text{kPa}$ 时,粗糙度从 $6.06\mu\text{m}$ 增大到 $26.41\mu\text{m}$,剪应力 τ 从 263.01kPa 增大到 303.19kPa ,相差 40.18kPa ,且二者之间呈线性关系,线性拟合得到的界面力学参数见表 3。

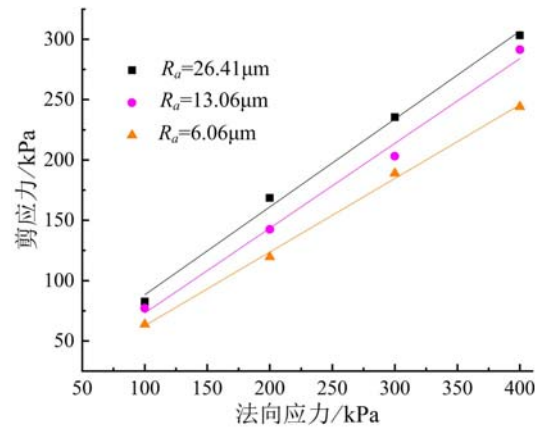


图 6 不同粗糙界面下剪应力与法向应力关系图
Fig. 6 Diagram of shear strength and normal stress at different rough interface

表 3 界面力学特性参数

Tab. 3 Interface mechanical characteristics parameter

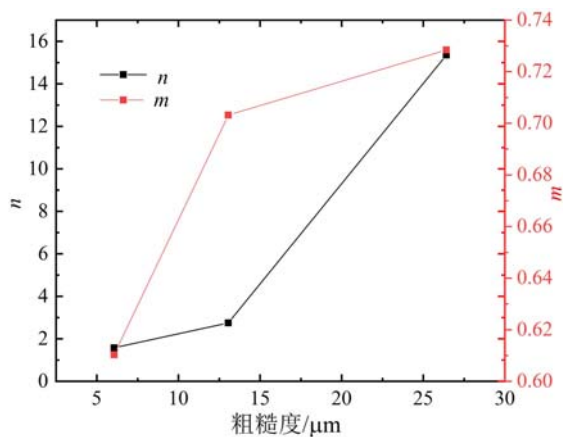
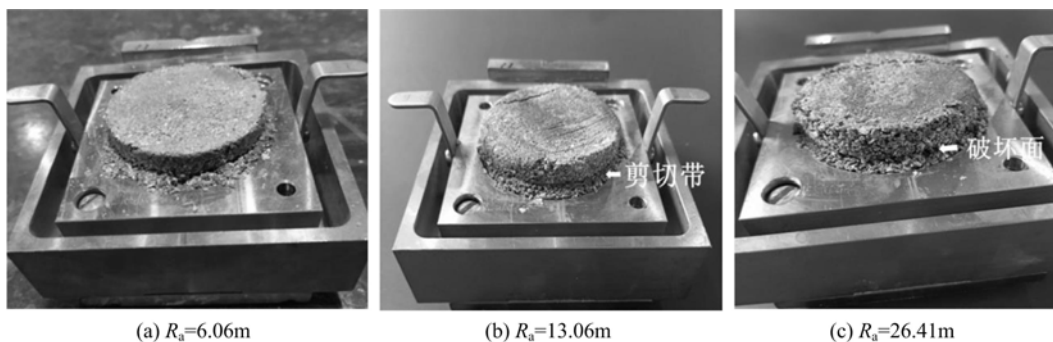
粗糙度/ μm	界面摩擦角/ $(^\circ)$	剪应力 τ 与法向应力 σ 关系式	R^2	黏聚力/ kPa
$R_a=26.41$	36.070	$\tau=0.7284\sigma+15.356$	0.9962	15.356
$R_a=13.06$	35.115	$\tau=0.7032\sigma+2.756$	0.9927	2.756
$R_a=6.06$	33.703	$\tau=0.6103\sigma+1.575$	0.9980	1.575

由表 3 可知,界面剪应力与法向应力关系式符合摩尔-库伦定律,然而,尽管表中剪应力与法向应力关系式形式相同,但 σ 前后的系数不同,不妨将表中的剪应力与法向应力关系式用同一表达式来表示:

$$\tau = m\sigma + n \quad (2)$$

显然, m 、 n 取值与粗糙度 R_a 有关,粗糙度 R_a 对系数 m 、 n 的影响曲线关系见图 7。综合式(2)和图 7 可以看出, m 、 n 分别代表了不同的物理意义, n 值代表当 $\sigma=0\text{kPa}$ 时胶结钙质砂与钢界面的初始剪切强度,其值随接触面粗糙度的增大而增大; m 值代表 τ 随 σ 增加而变化的强弱程度,其值随界面粗糙度增大而增大,但增大程度逐渐减弱。

图 8 给出了不同粗糙度下胶结钙质砂的剪切破坏形态。从图 8(a)可以看到,当粗糙度为 $6.06\mu\text{m}$ 时,试验结束,试样上表面光滑平整,下表面周围颗粒破碎较多,破坏位置处于胶结钙质砂与钢界面的交界处。结合图 5(c)剪应力-剪切位移关系曲线可以看到,在很小的剪切位移下,界面剪应力达到峰值后缓慢减小并趋于稳定,此时剪切破坏是界面滑移剪切破坏。随着粗糙度的增大,当粗糙度为 $13.06\mu\text{m}$ 时,初始剪切破碎后的颗粒镶嵌在不规则的凹槽内,剪切结束后,试样上表面除了出现裂纹外仍较平整,下表面出现了颗粒粒径 $1\sim 1.5$ 倍的剪切破碎带;当粗糙度为 $26.41\mu\text{m}$ 时,界面不规则显得越发突出,使得凹槽与胶结钙质砂的接触面积增大,导致界面附近处的胶结钙质砂被剪碎,形成剪切破坏面,表明随着界面粗糙度的增大,胶结钙质砂与钢界面依次出现界面滑移剪切破坏和界面附近胶结钙质砂剪切

图 7 粗糙度 R_a 对系数 m 、 n 的影响Fig. 7 Effects of roughness R_a on coefficients m and n 图 8 胶结钙质砂与钢界面剪切破坏形态图 ($\sigma=200\text{kPa}$)Fig. 8 Shear failure plane morphology of cemented calcareous sand and steel interface ($\sigma=200\text{kPa}$)

面剪切下的剪应力值。说明在法向应力一定的条件下,当胶结钙质砂发生剪切破坏时,低强度的钙质砂自身先发生滑移剪切破坏,剪切位移达到界限剪切位移(二者剪切强度相等时所对应的剪切位移)后,发生界面剪切破坏,剪切破坏模式如图 10 所示。

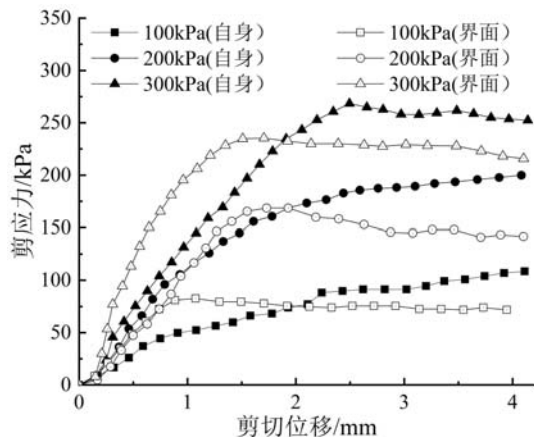


图 9 胶结钙质砂界面剪切与自身剪切的剪应力与剪切位移曲线对比

Fig. 9 Comparison of shear stress and shear displacement curves between interfacial shear and self-shear of cemented calcareous sand

破坏。

2.3 胶结钙质砂界面剪切与自身剪切对比

为研究胶结钙质砂界面剪切与自身剪切的区别和联系,本文进行了不同应力状态下胶结钙质砂自身剪切和粗糙度为 $26.41\mu\text{m}$ 的界面剪切试验,结果如图 9 所示。由图 9 可知,在初始剪切阶段,不同法向应力下的胶结钙质砂界面剪应力与自身剪应力均随法向应力的增大而增大,但胶结钙质砂界面剪应力迅速增大,且大于自身剪应力,说明钢界面与胶结钙质砂组成的系统初始强度大于胶结钙质砂自身的强度。随着剪切位移的增长,当剪切位移大于 2mm 后,自身剪切下的剪应力值大于界

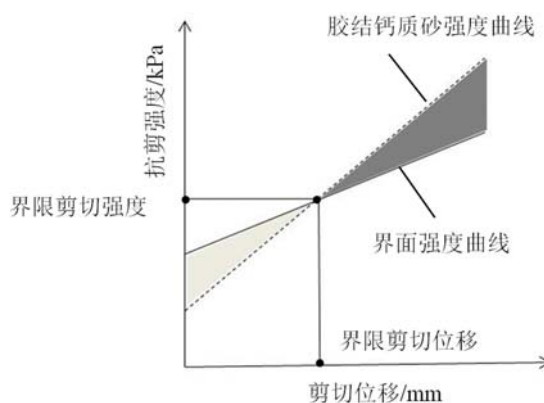


图 10 剪切强度破坏模式示意图

Fig. 10 Schematic diagram of shear strength failure mode

2.4 与未胶结钙质砂界面剪切对比

图 11 给出了不同法向应力下胶结钙质砂和未胶结钙质砂界面剪应力、摩擦系数和竖向位移(以下简称“体变”,数值为正表示剪胀,数值为负表示剪缩)随剪切位移的变化。由图 11(a)可知,随着剪切位移的增加,两种钙质砂的界面强度迅速增长,但胶结钙质砂的界面强度比未胶结钙质砂界面强度大。同时,同一剪切位移下对应的两种钙质砂界面强度之间存在差异,具体表现为:胶结钙质砂的界面强度随剪切位移的增长表现为先增大到峰值后逐渐减小,最终趋于稳定的趋势,呈剪切软化特性;未胶结钙质砂界面强度随剪切位移的增长表现为先增长到一定值后趋于稳定,呈应变硬化型。此外,可以看到在低应力 100kPa 下两种钙质砂界面强度很接近,因为在低应力下,若界面附近两种钙质砂的颗粒破碎少或不发生破碎,界面强度主要由钙质砂的界面摩擦性质控制。两种钙质砂的界面摩擦特性如图 11(b)所示,由图可知,在低应力 100kPa 下,两种钙质砂的界面摩擦系数很接近,这主要跟两种钙质砂具有相同的级配有关;此外,还可以看到,随着法向应力增大,两种钙质砂的界面摩擦系数均减小,但胶结钙质砂的界面摩擦系数大于未胶结钙质砂,因为相比未胶结钙质砂,胶结钙质砂具有一定的胶结结构,整体性良好,将钢管桩打入胶结钙质砂地层过程中,桩与胶结钙质砂互相发生界面摩擦,胶结钙质砂颗粒脱离相互之间的咬合比较困难,须克服颗粒间的胶结性之后才发生移动,故在桩基施工过程中出现钙质砂地层打入桩时桩侧摩阻力低,在胶结钙质砂地层中引起桩周胶结钙质砂的结构性破坏和颗粒破碎。

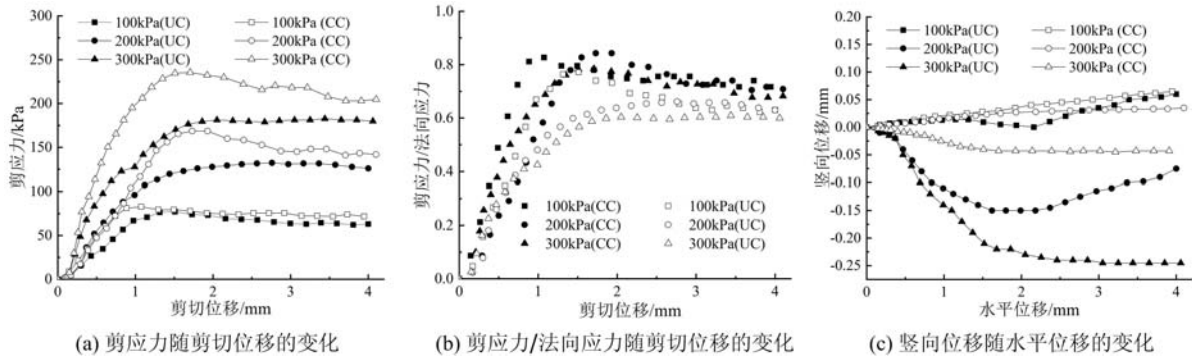


图 11 胶结钙质砂与未胶结钙质砂界面剪切力学特性的对比 ($R_a = 26.41\mu\text{m}$)

Fig. 11 Comparison of interfacial shear mechanical properties between cemented and uncemented calcareous sand ($R_a = 26.41\mu\text{m}$)

由图 11(c)可以看到,两种钙质砂的体变呈相似的变化趋势:在低应力 100kPa 下体变较小,几乎不发生改变;高应力 300kPa 下体变逐渐剪缩,但未胶结钙质砂剪缩程度大于胶结钙质砂。这是由于胶结钙质砂颗粒内部存在黏结力,阻碍了胶结钙质砂颗粒之间的位置移动,因而胶结钙质砂受力下的剪缩程度小于未胶结钙质砂。

2.5 与石英砂界面剪切对比

本文试验选取与胶结钙质砂具有相同粒径的石英砂进行了界面剪切强度对比,试验结果如图 12 所示。由图可知,由于胶结钙质砂颗粒不规则并具有一定的胶结强度,当胶结钙质砂和普通石英砂与同一粗糙钢板发生界面剪切时,石英砂界面剪应力随剪切位移的增加而增大,呈剪切硬化特性,但胶结钙质砂的界面剪应力比石英砂明显要大,且二者

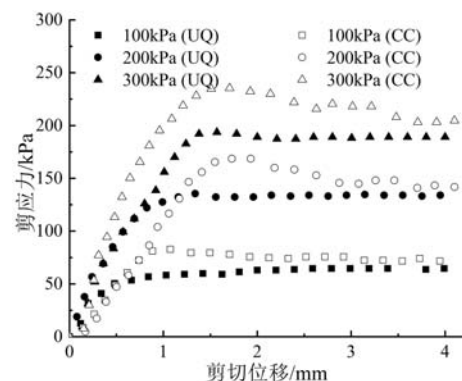


图 12 胶结钙质砂与石英砂界面剪切力学特性的对比 ($R_a = 26.41\mu\text{m}$)

Fig. 12 Comparison of interfacial shear mechanical properties between cemented calcareous sand and quartz sand ($R_a = 26.41\mu\text{m}$)

的差距随法向应力的增大而逐渐增大。随着界面剪切的进行,胶结钙质砂的界面强度有明显的峰值,超过峰值后,界面强度逐步降低,界面剪应力-剪切位移呈软化型。正是这种软化特性,当胶结钙质砂地层

打入桩后,桩侧摩阻力降低,最终导致桩的承载力整体降低,桩身出现不均匀下沉。

3 结论

本文基于室内应变控制式直剪仪,探究了法向应力、粗糙度对胶结钙质砂与钢界面剪切特性的影响。通过与胶结钙质砂自身剪切试验结果对比,得出了胶结钙质砂界面剪切破坏模式。同时,将胶结钙质砂与未胶结钙质砂、未胶结石英砂的界面剪切结果进行对比,得出了三种砂之间的界面剪切差异,具体结论如下:

(1) 在胶结钙质砂与钢板的界面剪切试验中,法向应力和粗糙度是影响界面剪切强度的重要因素。在法向应力一定的条件下,增大界面粗糙度,界面强度显著提高,同时,极限切位移随粗糙度的增大而减小;在接触面粗糙度一定的条件下,界面强度和界面峰值强度对应的极限切位移均随法向应力的增大而增大。

(2) 与胶结钙质砂自身剪切相比,当胶结钙质砂发生剪切破坏时,低强度钙质砂自身先发生滑移剪切破坏,当达到界限剪切位移(即二者剪切强度相等时所对应的剪切位移)后,发生界面强度破坏。

(3) 与未胶结钙质砂界面剪切相比,胶结钙质砂界面剪应力-剪切位移曲线呈“剪切软化”趋势,未胶结钙质砂的界面剪应力-剪切位移曲线呈“剪切硬化”趋势。低法向应力条件下,两种钙质砂的界面强度和体变均很接近;高法向应力条件下,胶结钙质砂界面强度大于未胶结钙质砂,且两种钙质砂体变呈剪缩趋势,但未胶结钙质砂剪缩程度更大。

(4) 与未胶结石英砂界面剪切相比,石英砂界面剪应力随剪切位移的增加而增大,呈剪切硬化特性,但胶结钙质砂的界面强度比石英砂要大。

参考文献:

- [1] 汪轶群,洪义,国振,等. 南海钙质砂宏细观破碎力学特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(1):199—206 (WANG Yiqun, HONG Yi, GUO Zhen, et al. Micro-and macro-mechanical behavior of crushable calcareous sand in South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1):199—206 (in Chinese))
- [2] 高冉,叶剑红. 中国南海吹填岛礁钙质砂动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(10):3897—3908, 3919 (GAO Ran, YE Jianhong. Experimental investigation on the dynamic characteristics of calcareous sand from the reclaimed coral reef islands in the South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(10):3897—3908, 3919 (in Chinese))
- [3] Pham H H G, Impe P V, Impe W V, et al. Effects of particle characteristics on the shear strength of calcareous sand[J]. Acta Geotechnica Slovenica, 2017, 14(2):76—89.
- [4] 李飒,刘富诗,戴旭,等. 碳酸钙含量对钙质砂性质影响的室内试验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(1):88—94 (LI Sa, LIU Fushi, DAI Xu, et al. Indoor experimental study of the effect of calcium carbonate content on properties of calcareous sand[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(1):88—94 (in Chinese))
- [5] McClelland B. Calcareous sediments; an engineering enigma [C]//Proceedings, International Conference on Calcareous Sediments, 1988:777—787.
- [6] Dolwin J, Khorshid M S, Goudoever P van. Evaluation of driven pile capacity—methods and results [C]//Proceedings, International Conference on Calcareous Sediments, 1988:409—428.
- [7] Lings M L, Dietz M S. The peak strength of sand-steel interfaces and the role of dilation[J]. Soils and Foundations, 2005, 45(6):1—14.
- [8] 冯大阔,张建民. 粗粒土与结构接触面静动力学特性的大型单剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7):1201—1208 (FENG Dakuo, ZHANG Jianmin. Monotonic and cyclic behaviors of coarse-grained soil-structure interface using large-scale simple shear device[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7):1201—1208 (in Chinese))
- [9] 赵程,谢俊飞,王文东,等. 粗砂与结构物接触面的剪切特性试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(10):1406—1413 (ZHAO Cheng, XIE Junfei, WANG Wendong, et al. Experimental study on shear behavior of interface between coarse sand and structure[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2019, 47(10):

- 1406—1413 (in Chinese))
- [10] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1):21—25 (ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1):21—25 (in Chinese))
- [11] 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 deformation characteristics of interface between soil and structure under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2):254—258 (in Chinese))
- [12] 冯大阔, 张建民. 循环直剪条下粗粒土与结构接触面颗粒破碎研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4):767—773 (FENG Dakuo, ZHANG Jianmin. Particle breakage of gravel-structure interface under cyclic shear[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4):767—773 (in Chinese))
- [13] 冯大阔, 张建民. 法向应力对接触面循环单剪力学特性的影响研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(1):18—26 (FENG Dakuo, ZHANG Jianmin. Effect of normal stress on cyclic simple-shear behavior of gravel-structure interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1):18—26 (in Chinese))
- [14] 吴梦喜, 楼志刚. 钙质砂与钢板接触面力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3):369—371 (WU Mengxi, LOU Zhigang. Experimental study on mechanical behavior of calcareous sand-steel interfaces[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3):369—371 (in Chinese))
- [15] 孙吉主, 王勇, 汪稔. 钙质砂的接触摩擦特性及其理论模型研究[J]. 勘察科学技术, 2004, 22(5):7—9, 30 (SUN Jizhu, WANG Yong, WANG Ren. Study on the behaviors of calcareous sand-structure interface and its theoretical model[J]. Site Investigation Science and Technology, 2004, 22(5):7—9, 30 (in Chinese))
- [16] 孙吉主, 王勇. 钙质砂与结构接触面的本构模型研究[J]. 力学季刊, 2006, 27(3):476—480 (SUN Jizhu, WANG Yong. Constitutive model of calcareous sand structure interface[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2006, 27(3):476—480 (in Chinese))
- [17] 史乃伟. 钙质砂界面摩擦特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2018 (SHI Naiwei. Research on the properties of interface friction between calcareous sand and structure[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018 (in Chinese))
- [18] Kou H L, Diao W Z, Zhang W C, et al. Experimental study of interface shearing between calcareous sand and steel plate considering surface roughness and particle size[J]. Applied Ocean Research, 2021, 107(8):490—499.
- [19] 芮圣洁, 国振, 王立忠, 等. 钙质砂与钢界面循环剪切刚度与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1):78—86 (RUI Shengjie, GUO Zhen, WANG Lizhong, et al. Experimental study of cyclic shear stiffness and damping ratio of carbonate sand-steel interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1):78—86 (in Chinese))
- [20] Akili W, Torrance J K. The development and geotechnical problems of Sabkha, with preliminary experiments on the static penetration resistance of cemented sands[J]. Journal of Engineering Geology, 1981, 14(1):59—73.
- [21] 王丽, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 钙质砂的胶结性及对力学性质影响的实验研究[J]. 实验力学, 2009, 24(2):133—143 (WANG Li, LU Xiaobing, WANG Shuyun, et al. Experimental investigation on cementation of calcareous sand and its basic mechanical characteristics[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(2):133—143 (in Chinese))
- [22] 钱慧良, 杨钧岩. 胶结性对钙质砂剪切特性影响的试验分析[J]. 工程建设, 2019, 51(6):14—20 (QIAN Huiliang, YANG Junyan. Experimental analysis of influence of cementing properties on shear characteristics of calcareous sand[J]. Engineering Construction, 2019, 51(6):14—20 (in Chinese))
- [23] 方祥位, 申春妮, 楚剑, 等. 微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10):2773—2779 (FANG Xiangwei, SHEN Chunni, CHU Jian, et al. An experimental study of coral sand enhanced through microbially-induced precipitation of calcium carbonate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10):2773—2779 (in Chinese))
- [24] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. MICP胶结钙质砂动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1):38—45 (LIU Hanlong, XIAO Peng, XIAO Yang, et al. Dynamic behaviors of MICP-treated calcareous sand in cyclic tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1):38—45 (in Chinese))
- [25] 汪优, 李奕金, 谭伟, 等. 考虑结构表层粗糙度的混凝土桩-黏土界面剪切特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(10):2502—2509 (WANG You, LI Yijin, TAN Wei, et al. Experimental study on shear

properties of concrete pile-clay interface considering surface roughness of structure[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2019, 50(10):2502—2509 (in Chinese))

Experimental study on shear mechanical characteristics of cemented calcareous sand and steel surfaces

LÜ Haibo^{1,2}, JIANG Daiping¹, CHAI Yuan³

(1. Guangxi Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. School of Architecture and Electrical Engineering, Hezhou University, Hezhou 542899, Guangxi, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

Abstract: During the construction of pile foundation projects on coral reefs, it is easy to cause the cementation damage of calcareous sand and particle breakage. Thereby, the side friction resistance of the pile is reduced, which ultimately leads to the reduction of the bearing capacity of the pile. In order to investigate the mechanical characteristics of the interface between cemented calcareous sand and structure, a series of shear tests on the interface between cemented calcareous sand and steel were carried out with the aid of strain controlled direct shear apparatus in laboratory, taking the cemented calcareous sand made by Portland cement as research object. The influence of normal stress and roughness on interfacial strength were investigated, and it was further compared with the results of interfacial shear test with un-cemented calcareous sand with the same particle size. The results indicate that: the normal stress and roughness are significant factors affecting the interface strength. With the increasing of roughness, when the interface shear of cemented calcareous sand failure occurs, the shear slip failure of the interface comes out firstly, and then the shear failure appears on the cemented calcareous sand near the interface. At low normal stress, the interfacial shear characteristics of cemented calcareous sand and un-cemented calcareous sand are very similar, but at high normal stress, there is a great difference between them.

Keywords: cemented calcareous sand; interfacial shear; interfacial strength; roughness