

文章编号: 1000-7598 (2010) 03-0780-05

钙质砂中模型桩的试验研究

江 浩, 汪 稔, 吕颖慧, 孟庆山

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 根据钙质砂中桩基工程的现状, 针对取自南沙群岛永暑礁的钙质砂, 设计一个室内模型试验装置来研究钙质砂中钢管桩的承载和变形性能以及影响因素, 并进行了石英砂中的对比试验。试验结果表明, 钢管桩在钙质砂和石英砂中的表现有着显著差异。钙质砂中钢管桩承载能力很低, 仅为石英砂的 66%~70%, 钙质砂中桩身轴力衰减速率缓慢, 桩侧摩阻力远远小于石英砂的, 仅为石英砂的 20%~27%, 并具有深度效应, 开口钢管桩和闭口钢管桩的桩侧摩阻力相差不大。同时表明, 钙质砂中桩侧摩阻力对相对密度的变化没有石英砂敏感, 受相对密度影响很小。由颗粒破碎引起的桩周水平有效应力的大幅降低是造成钙质砂中钢管桩桩侧摩阻力低的主要原因。

关 键 词: 钙质砂; 模型试验; 钢管桩; 桩侧摩阻力; 颗粒破碎

中图分类号: TU 472.3⁺²

文献标识码: A

Test study of model pile in calcareous sands

JIANG Hao, WANG Ren, LÜ Ying-hui, MENG Qing-shan

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: According to the current situation of pile foundation engineering, a model test equipment is designed to study the bearing and deformation characteristics of steel pipe piles in calcareous sands, which are taken from Yongshu reef in Nansha Islands in South China Sea. In contrast to the tests with silica sands, it is shown that calcareous sands behave in a completely different manner than silica sands. For sands having the same relative density, the ultimate bearing capacity in calcareous sands is only 66-70% of that in silica sands, the axial force has a slow decay rate, and the ultimate shaft friction of open-ended piles is less than that of close-ended piles in calcareous sands, nonetheless, it is only 20-27% of that in silica sands. In addition, shaft friction is very sensitive to density in silica sands but less so in calcareous sands. It is found that the reduction in lateral pressures on the pile shaft, which is caused by grain crushing under the high stress levels produced during pile driving, is the main reason for low shaft friction of steel pipe piles in calcareous sands.

Key words: calcareous sands; model test; steel pipe pile; shaft friction; grain crushing

1 引 言

钙质砂通常是指富含碳酸钙或其他难溶碳酸盐类物质的特殊介质, 多分布于南纬 30°和北纬 30°之间的热带海洋中, 在我国主要分布在南海海域。由于其特殊的沉积环境和组成, 导致其工程力学性质与一般的陆相、海相沉积物有着显著差异^[1-2]。

在过去几十年里, 在钙质砂地层上设计和建造

海洋石油平台已经成为海洋工程中一个重大的科技挑战。在桩基工程建设中, 基于其他地基材料上的传统经验已经被证明是不适用的^[3-6]。因此, 人们采用室内模型试验及现场桩基测试手段, 对钙质砂桩基工程展开深入研究, 然而国内很少见此类报道, 文献[7-9]主要综述了钙质砂中桩基工程的研究历史和现状, 对试验研究涉及较少。本文就是在此背景下进行的钙质砂中桩基模型试验研究。

收稿日期: 2009-06-19

基金项目: 国家科技支撑计划重点项目 (No. 2006BAB19B03); 国家自然科学基金重点项目 (No. 50639010); 中国科学院武汉岩土力学研究所知识创新工程领域前沿项目 (No. O712041Q01)。

第一作者简介: 江浩, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事岩土力学与工程研究工作。E-mail: jianghao99@tsinghua.org.cn

通讯作者: 吕颖慧。E-mail: yhlv@whrsm.ac.cn

2 钙质砂的模型桩试验

2.1 模型桩和模型箱

钢管桩是海洋工程中常用的基础形式,结合钢管桩在海洋平台工程中的实际应用,选择本次室内模型试验的几何尺寸相似比例为1:30^[10]。钢管桩采用无缝钢管制作而成,外径 $D_o=30$ mm,内径 $D_i=24$ mm,长度 $L=600$ mm。

为了更好地保护电阻应变片,避免电阻片引出线对桩周土的扰动,用无缝切割将模型桩沿纵长剖为两半,在其内壁贴电阻应变片,然后将模型桩用螺栓固定还原,螺栓有两个,分别设在距离桩两端100 mm处,螺栓直径 $\phi=6$ mm。在距离顶端35 mm处,设置了一对 $\phi=10$ mm圆孔,以便电阻应变片导线的引出。另外,特制作了1个直径和模型桩相同的平底活塞,可以装在开口模型桩上,用以模拟闭口模型桩。

考虑边界效应的影响,本次试验的模型箱采用直径为700 mm的钢性圆筒,高度为900 mm。图1为试验装置安装到位的照片。



图1 模型箱与模型桩
Fig.1 Testing chamber and model pile

2.2 试验材料

本次试验所用的钙质砂取自南沙群岛永暑礁附近海域,为未胶结松散珊瑚碎屑沉积物。钙质砂颗粒粒径均小于5 mm,不均匀系数 $C_u=2.78$,曲率系数 $C_c=1.19$,比重 $G_s=2.80$,最大孔隙比 $e_{max}=1.48$,最小孔隙比 $e_{min}=1.00$;作为对比试验所用的石英砂比重 $G_s=2.65$,最大孔隙比 $e_{max}=0.97$,最小孔隙比 $e_{min}=0.52$ 。试验所用钙质砂和石英砂均为干砂,含水率都小于0.2%,颗分曲线见图2。

在试验中,控制钙质砂和石英砂的相对密度,使其分别为46%、75%,装砂时,以100 mm为间隔进行捣实,控制砂样的干重度,捣实采用木板静压法,用木锤和木板把砂层击实到指定高度。在铺设400 mm砂样后,将模型桩垂直放入模型箱的中心,然后继续装样,在整个过程中,模型桩始终保

持竖直状态。

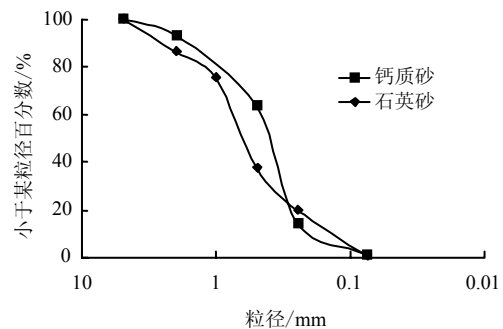


图2 试验中钙质砂和石英砂的颗分曲线
Fig.2 Particle size distributions of calcareous sands and silica sands

2.3 加载方案和数据采集

试验采用3 kN的油压千斤顶加载,其加载反力由门字型钢框提供,试验过程中,反力系统满足试验要求。试验加载通过油压表控制,采用快速加载方式,即每加一级荷载1 h后,施加下一级荷载。终止加载条件按桩顶的沉降量为前一级荷载作用下沉降量的5倍或千斤顶的行程已经达到最大。

桩顶位移由沿直径对称放置的两个百分表测得,结果取其平均值。模型桩的应变测点,均采用特殊防潮措施的箔式电阻应变片,用502胶水粘贴,703胶防水。其型号为SZ120-5AA,基底为3×5 cm,电阻值为 $120\pm 0.2\%$ Ω ,灵敏系数为 $2.11\pm 0.52\%$ 。桩身平均分为5个截面,每个截面对称地粘贴一对应变片,用以测定相应截面的应变值。粘贴在钢板上的温度补偿片埋设在模型箱边缘的砂中。试验前,对所有测量传感器进行标定和筛选,使其能满足试验的各项要求。

3 试验结果分析

3.1 荷载—沉降关系

图3为钙质砂相对密度分别为46%和75%时,闭口钢管桩的 $Q-s$ 曲线。从图中可以看出,两条曲线的拐点还是比较明显的,都属于陡降型曲线,从曲线中可以确定,钙质砂在 $D_r=46\%$ 和75%时,闭口钢管桩的承载力分别为0.58 kN和2.16 kN,后者约为前者的3.7倍,随着钙质砂相对密度的增加,桩的承载能力也得到大大提高。

在图4、5中,分别将相对密度 $D_r=46\%$ 和75%时,钙质砂中闭口钢管桩和开口钢管桩以及石英砂

中闭口钢管桩的承载能力进行了比较。开口桩虽然有“闭塞效应”，但由于试验中桩是预埋后再施加竖直荷载的，而非实际工程中将桩直接打入土中，因此桩端砂的闭塞程度很弱，对桩承载力的影响也不大，这从 $Q-s$ 曲线也可以看出来。当 $D_r=46\%$ 时，钙质砂中开口钢管桩的承载力为 0.52 kN，与闭口钢管桩的承载力 0.58 kN 相差很小；当 $D_r=75\%$ 时，两者分别为 1.84 kN 和 2.16 kN，相差不大。

通过与石英砂的对比可以发现，在相同相对密度下，钙质砂中闭口钢管桩的承载力远小于石英砂中的。当 $D_r=46\%$ 时，石英砂中闭口钢管桩的承载力为 0.83 kN，钙质砂中闭口钢管桩的承载力约为石英砂中的 70%；为 $D_r=75\%$ 时，石英砂中闭口钢管桩的承载力为 3.26 kN，与之相比，钙质砂中的承载力约为石英砂的 66%。钙质砂的颗粒破碎特性在其中起到了很大的作用，体现了钙质砂这种特殊介质与一般陆源砂的显著差异。

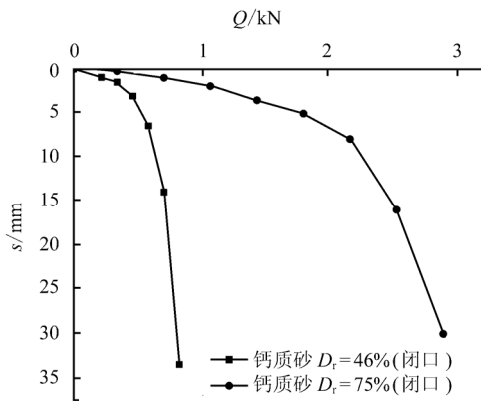


图3 不同相对密度钙质砂的 $Q-s$ 曲线
Fig.3 $Q-s$ curves of piles in calcareous sands with different relative densities

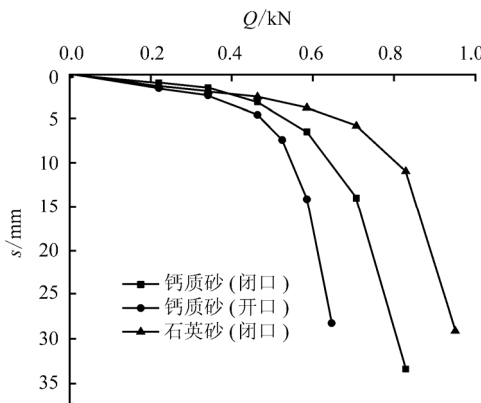


图4 $D_r=46\%$ 时钙质砂和石英砂的 $Q-s$ 曲线
Fig.4 $Q-s$ curves of piles in calcareous sands and silica sands at $D_r=46\%$

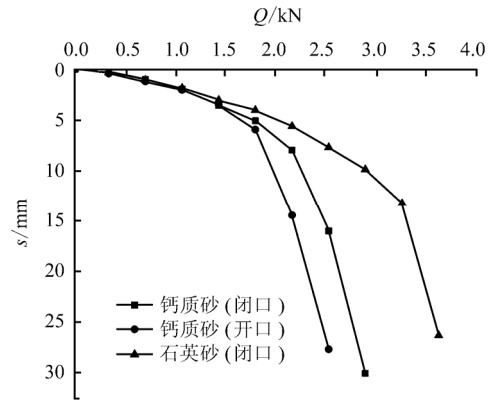


图5 $D_r=75\%$ 时钙质砂和石英砂的 $Q-s$ 曲线
Fig.5 $Q-s$ curves of piles in calcareous sands and silica sands at $D_r=75\%$

3.2 桩身轴力传递特性

图6为 $D_r=46\%$ 时，钙质砂中闭口钢管桩的桩身轴力分布。由图中可以看出，在竖向荷载作用下，桩顶轴力最大，随着深度的增加轴力不断的减小，桩底轴力最小，表明荷载在向下传递的过程中不断克服桩周砂土对桩体向上的侧摩阻力。

此外，轴力衰减速率一直很缓慢，桩身下部轴力与上部轴力相差不大，这表明桩侧摩阻力很小，桩身荷载大部分由桩端阻力来提供，表现为端承桩性状。

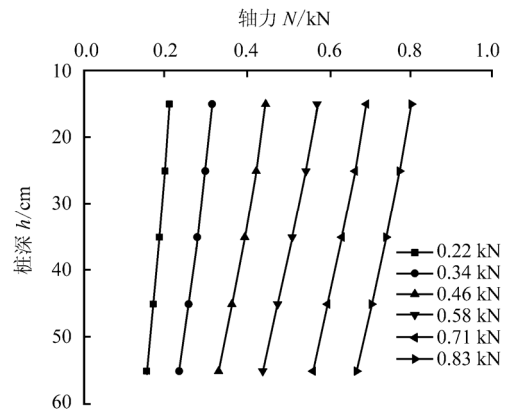


图6 $D_r=46\%$ 钙质砂闭口钢管桩桩身轴力
Fig.6 Axial force of closed-ended steel pipe pile in calcareous sands at $D_r=46\%$

与石英砂对比就可以明显发现这点差异。图7为同样是 $D_r=46\%$ 时，石英砂中闭口钢管桩的桩身轴力分布。桩身轴力沿桩身呈迅速减小，随着深度的增加，轴力衰减速率加快，桩身下部的轴力比上部的轴力小很多，在前两级荷载下，轴力接近于0。此现象说明在竖向荷载作用下，桩身荷载大部分由桩侧摩阻力来提供。

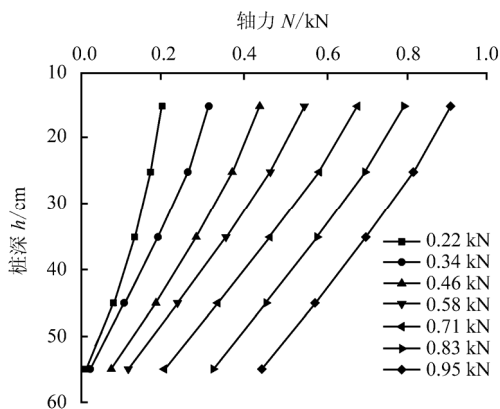


图 7 $D_r=46\%$ 石英砂闭口钢管桩桩身轴力
Fig.7 Axial force of closed-ended steel pipe pile in silica sands at $D_r=46\%$

3.3 桩侧摩阻力特性

根据实测的桩身轴力分布结果可以计算出各桩段的平均侧摩阻力。图 8 为 $D_r=46\%$ 时钙质砂中闭口、开口钢管桩和石英砂中闭口钢管桩在极限荷载作用下的桩侧摩阻力。钙质砂中钢管桩的侧摩阻力非常低，由于试验桩是预埋的而非实际工程中的打入，所以尽管闭口钢管桩的最大侧摩阻力比开口钢管桩的高一点，但仍然不超过 4 kPa，仅为石英砂的 27%（石英砂中钢管桩的最大桩侧摩阻力为 14.01 kPa）。同时，在钙质砂中，当桩入土深度超过一定深度后，侧摩阻力不再随深度增加而增大，表现出深度效应，临界深度 h_c 为 11 倍桩径左右。

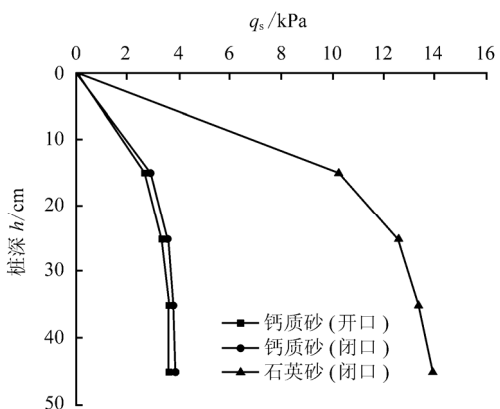


图 8 $D_r=46\%$ 极限荷载作用下桩侧摩阻力
Fig.8 Unit shaft friction of model pile under ultimate load at $D_r=46\%$

当 $D_r=75\%$ 时钙质砂中闭口、开口钢管桩和石英砂中闭口钢管桩在极限荷载作用下的桩侧摩阻力见图 9。从图中可以看出，钙质砂中钢管桩的桩侧摩阻力仍远远小于石英砂中的，最大侧摩阻力仅为石英砂的 20%。

值得注意的是，随着相对密度的增加，钙质砂中钢管桩的桩侧摩阻力并没有增加很多，当 $D_r=75\%$ 时，闭口钢管桩的最大侧摩阻力仅为 4.56 kPa，与 $D_r=46\%$ 时相比，增加不到 1 kPa。而石英砂中钢管桩的桩侧摩阻力却变化很大，最大侧摩阻力从 14.01 kPa 增加到 22.80 kPa。这说明相对密度对于钙质砂中钢管桩的桩侧摩阻力影响不大，而在石英砂中则受影响较大。

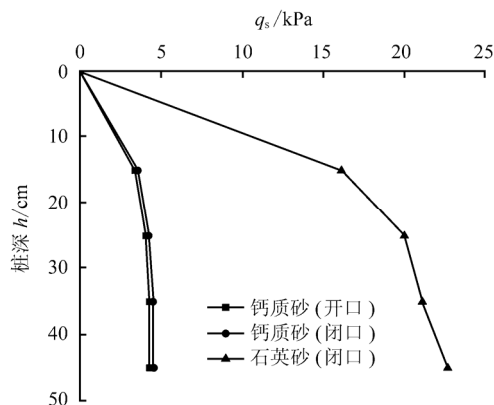


图 9 $D_r=75\%$ 极限荷载作用下桩侧摩阻力
Fig.9 Unit shaft friction of model pile under ultimate load at $D_r=75\%$

3.4 桩侧摩阻力低的原因分析

研究资料表明^[11]，钙质砂的摩擦角高于石英砂，约 10° 左右，但钢管桩的桩侧摩阻力却远远小于石英砂的，承载能力也较低，一般认为是颗粒破碎造成的。

桩侧摩阻力可以由下式求得：

$$q_s = \sigma'_n \tan \delta = K \sigma'_v \tan \delta \quad (1)$$

式中： σ'_n 为作用在桩上的有效水平应力 (kPa)； σ'_v 为有效垂直应力 (kPa)； K 为静止土压力系数； δ 为界面摩擦角($^\circ$)。

钙质砂内摩擦角试验和钙质砂—钢板接触面摩擦试验表明^[12]，钙质砂内摩擦角和桩土界面摩擦角与密实度的相关性均不大，随着侧限压力的增加，在发生颗粒破碎后内摩擦角基本无变化，而桩土界面摩擦角还有轻微增加的现象。因此，钙质砂钢管桩桩侧摩阻力低的原因可以归结为桩周的水平有效应力的减小。

桩受垂直荷载时，对桩侧土产生一定的挤压作用，一方面会使桩侧土压密，桩周水平有效应力增加，同时，由于挤压产生的高应力，促使强度低的钙质砂发生大量的颗粒破碎，导致桩周水平有效应力减小。对于钙质砂来说，颗粒破碎引起的桩周水

平有效应力的降低远远大于挤密作用导致水平有效应力的增加。而对于石英砂,基本上不发生颗粒破碎,挤密作用起主导作用,使桩侧摩阻力增加。

4 结 论

(1) 钙质砂中钢管桩在竖向荷载作用下,表现为端承桩性状, $Q-s$ 曲线呈陡降型,有着明显的极限状态。

(2) 钙质砂中钢管桩的承载能力低下,与石英砂中差异很大,同为闭口钢管桩,前者仅为后者的66%~70%;本试验中,钙质砂中开口钢管桩与闭口钢管桩的承载能力相差不大。

(3) 钙质砂中钢管桩的轴力衰减速率缓慢,桩侧摩阻力非常小,具有深度效应。当 $D_r=46\%$ 时闭口钢管桩的桩侧摩阻力比开口的大一点,但仍不超过4 kPa,仅为石英砂的27%;当 $D_r=75\%$ 时为石英砂的20%。

(4) 相对密度对钙质砂中钢管桩的桩侧摩阻力影响比石英砂中的小得多。

(5) 由颗粒破碎引起的桩周水平有效应力的大幅降低是造成钙质砂中钢管桩桩侧摩阻力低的主要原因。

参 考 文 献

- [1] 汪稔,宋朝景,赵焕庭,等.南沙群岛珊瑚礁工程地质[M].北京:科学出版社,1997.
- [2] 刘崇权,杨志强,汪稔.钙质土力学性质研究现状与进展[J].岩土力学,1995,16(4):75-83.
LIU Chong-quan, YANG Zhi-qiang, WANG Ren. The present condition and development in studies of mechanical properties of calcareous soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1995, 16(4): 75-83.
- [3] ALBA J L, AUDIBERT J M. Pile design in calcareous and carbonaceous granular materials, and historic review[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering for Calcareous Sediments. Rotterdam: A A Balkema, 1999: 29-44.
- [4] KING R W, VAN HOOYDONK W R, WINDLE D.

- Geomechanical investigations of calcareous soils on the North West Shelf Australia[C]//Proceedings of Offshore Technology Conference. [S. l.]: [s. n.], 1980.
- [5] COOP M R. The mechanics of uncemented carbonate sands[J]. **Geotechnique**, 1990, 40(4): 607-626.
- [6] NAUROY J F, LE TIRANT P. Model tests of piles in calcareous sands[C]//Proceedings of Conference on Geotechnical Practice in Offshore Engineering. Texas: [s. n.], 1983: 356-369.
- [7] 吴京平,楼志刚.海洋桩基工程中的钙质土[J].海洋工程,1996,14(3):74-82.
WU Jing-ping, LOU Zhi-gang. Research on the behavior of calcareous soils in offshore pile foundations[J]. **Ocean Engineering**, 1996, 14(3): 74-82.
- [8] 刘崇权,单华刚,汪稔.钙质土工程特性及其桩基工程[J].岩石力学与工程学报,1999,18(3):331-335.
LIU Chong-quan, WANG Hua-gang, WANG Ren. The geotechnical characters of calcareous soils and the pile foundation engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(3): 331-335.
- [9] 单华刚,汪稔.钙质砂中的桩基工程研究进展述评[J].岩土力学,2000,21(3):299-304.
SHAN Hua-gang, WANG Ren. Development of study on pile in calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(3): 299-304.
- [10] 杨俊杰.相似理论与结构模型试验[M].武汉:武汉理工大学出版社,2005.
- [11] DATTA M, GULBATI S K, RAO G V. Crushing of calcareous sand during shear[C]//Proceedings of Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 1979.
- [12] BERINGEN F L, KOLK H J, WINDLE D. Cone penetration and laboratory testing in marine calcareous sediments[C]//Proceedings of American Society for Testing and Materials Special Technical Publication. [S. l.]: [s. n.], 1981: 179-209.