



钙质砂土中的桩基础工程综述

周 杨, 刘晓宇, 李世海

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 桩基础广泛应用于钙质砂土这类高压缩性地基中。在总结钙质砂土的成因、分布特点、基本物理性质和力学特性的基础上, 认为在钙质砂土地基中传统打入桩提供的承载力不能满足工程要求, 并针对传统打入桩失败原因进行了分析。详细介绍了两种新型桩结构形式、施工方法、承载力特性及存在的问题, 对两种新型桩进行了比较。总结了两种新型桩的优缺点, 提出对新型桩形式的可能的改进方案。在总结已有研究的基础上, 建议引入数值模拟方法配合试验研究的新思路。

关键词: 钙质砂土; 桩基础; 钻孔灌注钢管桩; 灌浆打入桩; 数值模拟; 模型试验

中图分类号: TU 473; TU 449

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)09-0143-08

Pile foundation engineering in calcareous soils

ZHOU Yang, LIU Xiao-yu, LI Shi-hai

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Pile foundations are widely used in compressible soils such as calcareous sediments. Based on an introduction of the origin, distribution, basic physical properties and mechanical properties of calcareous soils, it is concluded that traditional driven piles are ineffective in calcareous soils and the reasons for it are analyzed. A review of the published literature pertaining to pile foundations in calcareous soils is summarized, and two new types of piles are described, along with their structural types, construction methods, bearing capacity characters, existing problems and comparison between them. Each method has its own advantages and disadvantages. Some improved schemes are proposed and new research approaches combing experiments with numerical simulation are suggested.

Key words: calcareous soils; pile foundation; drilled and grouted pile; grouted driven pile; numerical simulation; model experiment

随着我国经济的发展, 对能源的需求日益增加, 加之国防安全的需要, 南海海域因其丰富的资源和重要的地理位置, 未来将兴建大量的海上现代化工程。在南海海域广泛分布着钙质岩土, 而钙质岩土因其特殊的物理力学性质, 无法使用传统的桩基础工程设计和施工方法。我国对于钙质砂土中的桩基工程研究起步较晚, 已有的研究多集中在钙质岩土基本性质与室内模型桩试验方面。要为实际工程建设提供经济可靠的设计方案与安全评估服务, 仍有很多重要的研究工作要完成。

1 钙质砂土简介

1.1 钙质砂土的定义与分布

钙质岩土或碳酸盐类土, 通常指海洋生物(珊瑚、海藻、贝壳类)成因的、富含碳酸钙或其他难溶碳酸盐类物质的特殊岩土介质。广义的钙质岩土包括珊瑚礁岩(礁灰岩)、钙质砂(礁砂)、钙质土以及珊瑚碎屑土。钙质土沉积过程大多未经长途搬运, 保留了原生生物骨架中的细小孔隙。

钙质岩土主要分布于北纬30°与南纬30°之间的热带或亚热带气候的大陆架和海岸一带, 在中国南海诸岛、红海、阿拉伯湾南部、印度西部海

收稿日期: 2013-03-05

作者简介: 周杨(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程研究。

域、澳大利亚西部大陆架和巴斯海峡、北美的佛罗里达海域、中美洲海域以及巴巴多斯等地都有分布，如图1所示^[1]。



图1 钙质砂土分布

1.2 钙质砂基本物理性质与力学特性

1) 钙质砂基本物理性质。

钙质砂区别于一般石英砂的主要指标是碳酸钙含量。根据国际通用分类标准，海洋土中等效碳酸钙含量超过50%时，则称为钙质土。钙质土密度比石英砂略大，常在2.72~2.80 t/m³，而普通石英砂密度常在2.65~2.70 t/m³^[2]。钙质砂的孔隙率比较大，尤其是内空隙丰富。中国南海渚碧礁钙质砂孔隙率在0.434~0.584，南海永暑礁钙质砂的孔隙率在0.444~0.748，都比一般的石英砂的孔隙率(0.3~0.5)大^[3]。从微观上观察，钙质砂颗粒绝大部分小于2 mm。颗粒形状变化较大，可简要概括为4个典型形状：块状、纺锤状、片状和枝状，其中以块状和纺锤状为主。图2是扫描电镜下钙质砂颗粒的4种典型形状^[4]。

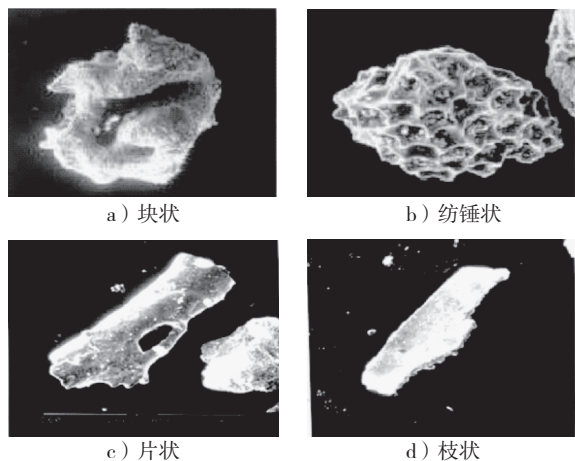


图2 扫描电镜下钙质砂颗粒典型形状

钙质砂土属半深海相沉积物，主要由富含碳酸钙颗粒的碳酸盐组成。在沉积过程中，部分碳

酸盐溶解在水中，形成碳酸盐饱和溶液。当含有碳酸盐的水溶液再次结晶时，钙质土沉积物颗粒被结晶粘在一起形成胶结结构。

钙质砂的碳酸钙含量高，通常大于80%。方解石的莫氏硬度为3，石英的莫氏硬度为7。因此，与石英砂相比，高碳酸钙含量的钙质砂质脆，在较低应力水平下就会产生颗粒破碎。实践证明，颗粒破碎是影响钙质砂力学行为的主要因素^[5]：

①钙质砂颗粒破碎随着压力的升高而加剧。一维压缩下，由于剪应力的存在，其颗粒破碎比等向压缩的大；三轴剪切条件下，其破碎受围压和剪切应变的组合控制，随着剪切应变的增加，颗粒破碎增大，但只有当围压超过一定值时，钙质砂的剪切应变才可以使颗粒破碎剧烈增加。

②颗粒破碎使钙质砂剪胀性减小，有效应力比降低，但对钙质砂强度的影响有一定的范围，存在一个临界相对破碎点，超过这个临界点，颗粒破碎将不再影响其强度特性。

2) 钙质砂力学特性。

国内将钙质砂土作为一种特殊土进行专门研究起始于20世纪80年代。20世纪90年代后期，很多有意义的成果发表出来。中国科学院力学研究所钙质土的基本力学特性以及颗粒破碎对钙质土变形及强度特性、桩基工程中的土工调查等方面进行了研究^[6-9]。中国科学院武汉岩土力学所与南海海洋研究所在珊瑚礁工程地质、钙质砂基本力学性质、颗粒破碎特性以及桩基工程方面进行了全面深入的研究^[7-12]。

钙质土的压缩特性类似于正常固结黏性土。在低压阶段，压缩变形主要在于颗粒之间位置重新调整；而当压力超过一定值时，颗粒破碎对钙质土的压缩特性起控制作用^[5]。钙质砂在三轴剪切中由于颗粒破碎导致内孔隙的释放，体变比石英砂大，并且峰值应力比与剪胀性随着围压的升高而降低。综合国内外试验结果，钙质砂土的内摩擦角常在34°~50°，比一般砂土(32°~42°)高，快剪的C值趋近于零。

1.3 钙质砂土中传统打入桩失败原因

大量的试验和工程实例表明，基于常规地基材料的桩基础设计经验在钙质砂土中是不适用

的。在澳大利亚、菲律宾、巴西等国的海洋石油平台建设过程中, 钙质砂土引起了一系列的工程问题, 并造成重大损失。1968年在伊朗的Lavan石油平台建设过程中, 直径约1 m的桩在穿过约8 m的胶结程度良好的地层后, 自由下落约15 m^[8]。在澳大利亚的North Rankin平台, 长120 m的打入桩平均桩侧摩阻力的值低至10~40 kPa^[9]。表1列出了国外学者在钙质砂土中进行的打入桩试验中测得的桩侧极限摩阻力, 试验桩的形式均为开口钢管桩, 直径在0.34~1.422 m。

表1 钙质砂土打入桩实验中桩侧极限摩阻力

数据来源	有效数据个数	极限摩阻范围/kPa	平均极限摩阻/kPa	标准偏差/kPa	变异系数
Angemeer ^[10]	7	9.2~18.3	13.4	3.3	0.25
Angemeer ^[11]	1	33.1			
Hagenaar ^[12-13]	5	16.7~22.5	20.3	2.2	0.11
Dutt ^[14]	12	9.8~18.2	13.3	2.5	0.19
Dutt ^[15]	4	9.5~17.3			
Gilchrist ^[16]	4	11.5~21.0	17.0	4.3	0.25

可以看出, 钙质砂土中打入桩的极限侧摩阻力极低, 一般在5~20 kPa, 承载力只有根据石英砂中打入桩的经验预测值的20%左右。

对于钙质砂土中打入桩侧极限摩阻力低的原因进行了大量的研究。桩侧摩阻力可由下式求得:

$$Q_s = \sigma'_n \tan \theta = K_0 \sigma'_v \tan \theta \quad (1)$$

式中: Q_s 是桩侧极限摩阻力; σ'_n 为桩侧有效水平应力; σ'_v 为有效垂直应力; θ 为桩土界面摩擦角; K_0 为静止土压力系数。

前文已有介绍, 钙质砂的内摩擦角比石英砂内摩擦角略大, 桩土界面摩擦角钙质砂比石英砂高10°左右^[1]。而且有关钙质砂内摩擦角试验和钙质砂与钢板接触面力学特性试验研究表明^[17-18], 钙质砂内摩擦角和桩土界面摩擦角与密实度的相关性不大。也就是说, 在打入桩过程中, 钙质砂颗粒受力发生破碎后, 其内摩擦角基本无变化。同时, 根据Jaky公式:

$$K_0 = 1 - \sin \theta \quad (2)$$

静止土压力系数也认为基本无变化。因此, 认为钙质砂土中打入桩桩侧摩阻力低的原因是桩打入过程中的冲击力使得钙质砂土胶结结构破坏、大量颗粒破碎, 土体发生显著体缩, 导致垂

直方向和水平方向的有效应力降低。侧摩阻力是桩基础承载力的重要组成部分, 因此传统打入桩极限承载力很低, 无法满足工程要求。

2 两种新型桩形式综述

国外的学者在20世纪70年代、80年代提出了钻孔灌浆钢管桩 (drilled and grouted piles) 和灌浆打入桩 (grouted driven piles) 两种新型桩形式, 并进行了大量的试验探究这两种桩形式的承载力特性。国内目前对钙质砂土中的新型桩结构的设计方面研究很少。

2.1 钻孔灌浆钢管桩

之所以将“drilled and grouted piles”译作“钻孔灌浆‘钢管桩’”, 是为了区别于钻孔灌注桩 (bored pile) 和沉管灌注桩 (immersed tube filling pile)。与传统打入桩以及上述两种桩不同, 钻孔灌浆钢管桩是将钢管放入到事先打好的钻孔中, 再向管桩内外灌注混凝土浆。在钻孔灌注桩的施工中, 不需要钢管, 直接向钻好的孔中投入钢筋笼并注浆; 在沉管灌注桩的施工中, 钢管或者套筒的作用只是为了成孔。而在钻孔灌浆钢管桩以及下文将介绍的灌浆打入桩 (grouted driven pile) 中, 钢管是作为最终形成的桩结构的一部分。钢管的存在保证了桩体的整体性, 有利于提高整体的承载力, 方便进行设计与计算。

1) 钻孔灌浆钢管桩的施工。

在进行施工之前, 现场勘测是任何基础工程都应进行的必要步骤。

图3是典型钻孔灌浆钢管桩示意图。钻孔灌浆钢管桩的施工主要分为3步:

① 打入先行桩。在打孔之前, 先将一个长度较短、直径较大的钢管 (即先行桩, 为施工方

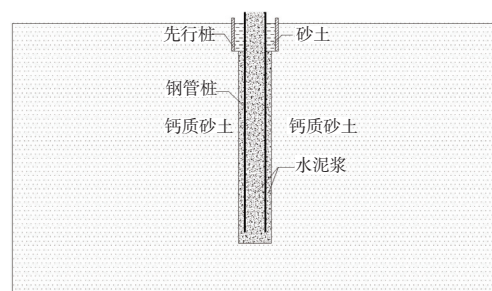


图3 钻孔灌浆桩示意图

便,先行桩直径一般比胶结层下钻孔直径大)打入地基,至达到胶结层为止。其作用是将上部松散堆积体与施工作业区隔离,确保施工的安全。由于先行桩一般很短,在打入过程中如果遇到在海床附近的高固结(低渗透率)土或盖岩,可能整体报废^[19]。

②钻孔。在胶结层至预定位置之间钻孔,孔径稍大于桩外径。

③插入桩体并向桩内外注浆。插入桩体应注意确保桩竖直。注浆位置一般选在先行桩的底部或者整个桩体结构底部。

2) 钻孔灌浆钢管桩的承载力特性。

钻孔灌浆钢管桩主要应用在钙质砂土及其他易破碎、高压缩性的基础材料中。传统打入桩在钙质砂土中的极限侧摩阻力极低:McClelland建议打入桩极限侧摩阻力值为20 kPa,极限承载力为5 MPa^[20];Agarwal建议弱固结钙质土中打入桩极限侧摩阻力值为28 kPa,弱固结和固结之间的钙质土中极限侧摩阻力为32 kPa^[21];Datta等建议未固结钙质土中打入桩的极限侧摩阻力值为15 kPa,高固结钙质土中为55 kPa^[22]。许多其他研究者对特定条件下的钙质土中打入桩的极限侧摩阻力和极限承载力进行了试验分析,得到的结果相差较大,但都远低于普通硅质砂土中的值。普遍很低并且不确定性高的承载力性能使得传统打入桩在钙质砂土中无法满足工程要求。

钻孔灌浆钢管桩作为传统打入桩的替代方案,具有高侧摩阻力和高极限承载力的优点。钻孔灌浆钢管桩的工作原理类似于传统基础工程中的置换法,将桩周的钙质砂土替换为水泥,令水泥代替自然土体发挥作用。同时,具有强胶结能力的水泥浆渗透到周围松散的土体中,提高了自然土体的胶结程度,从而大幅提高桩侧摩阻力和极限承载力。大量的室内试验、现场试验和工程案例表明,钻孔灌浆钢管桩具有很高的承载力,可以达到工程要求。Wees等进行的现场试验得到平均极限侧摩阻力为85 kPa^[23];Angemeer等在巴斯海峡进行的现场试验得到平均极限侧摩阻力为70 kPa^[17-18];Nauroy等在未胶结钙质土中进行的钻孔灌浆钢管桩试验,得到的平均极限侧摩阻力仍

然达到100 kPa^[24]。一般而言,钙质砂土中的钻孔灌浆钢管桩极限侧摩阻力的建议值为100 kPa。

3) 钻孔灌浆钢管桩存在的问题。

①钻孔稳定性问题。先行桩可以有效地保证钻孔的稳定性,但造价较高。一般对于直径小于900 mm且使用正循环钻井技术打入的钢管桩,钻孔完毕后,常采用泥浆填充钻孔来提高钻孔的稳定性。若采用泥浆填充方法,在灌注水泥浆之前,应确保钢管内外的泥浆被清理干净,否则将导致钻孔灌浆钢管桩的侧摩阻力大幅降低。澳大利亚巴斯海峡的一个工程中,由于钻孔内的泥浆未清理干净,导致桩的极限侧摩阻力比在海水环境下灌浆得到桩的极限承载力降低了90%^[17]。

②水力压裂问题。潜在的水力压裂的可能性是钙质砂土中一个尚未研究清楚的关键技术问题。水力压裂是指在压力灌浆过程中,浆液进入周围土体结构中,并对土体结构造成一定破坏的现象。这种现象常见于松散的未胶结土中。在黏土中的水力压裂现象由Andersen等在1994年进行了阐述^[25],在砂土中的水力压裂现象由Schotman等在1992年进行了说明^[26]。水力压裂会导致土体结构的破坏,从而对土体的承载力产生不利影响。对砂土和黏土的研究表明,对于松散的未胶结土,压力注浆过程中容易产生水力压裂。钙质土的结构松散,受到扰动前有一定的胶结程度,但在荷载作用下常常发生破碎,胶结结构被破坏。钙质土中压力注浆下水力压裂现象的产生及其对土体结构承载力的影响情况,目前尚未进行过深入研究。

③水泥浆体冷缩。钻孔灌浆桩桩管内外均需要灌浆,灌浆量较大。因水泥浆的水化反应过程中释放大量的热量,大体积水泥浆体结构在后期的冷却固结过程中就会发生较大的体积收缩。对于钻孔灌浆钢管桩而言,会出现沿桩长方向的较大的收缩。为缓解这种现象,可以向桩内填充预制混凝土块或者其他非构造性材料^[27]。

2.2 灌浆打入桩 (grouted driven piles)

灌浆打入桩由Barthelemy等^[28]在1986年提出后,各国研究人员对其施工工艺和承载力特性等进行了大量的研究。与钻孔灌浆钢管桩不同,灌

浆打入桩不预先钻孔, 而是将钢管桩直接打入地基中, 然后向桩外侧周围土体中灌浆 (一般通过内置在桩壁上的喷管)。

1) 灌浆打入桩的施工。

打入灌浆 (钢管) 桩如图4所示。相比普通打入钢管桩, 打入灌浆桩仅多一步灌浆过程。灌浆处一般位于桩体底部, 通过预先安置在桩体上的喷管系统 (也有打入后置入的情况) 进行压力注浆。

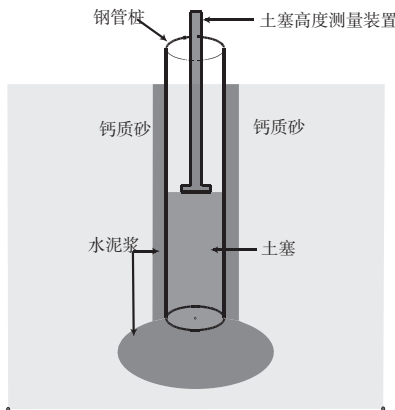


图4 打入灌浆桩示意图

由于不像钻孔灌注钢管桩那样在预先形成的钻孔中进行注浆, 打入灌浆桩的注浆环境不稳定, 对注浆压力和注浆方法的要求较高, 最终得到的桩表面注浆覆盖率可能较低。

Joer等在钙质砂土中进行了多组灌浆打入桩试验, 对钙质砂土中灌浆打入桩的灌浆覆盖面积、极限侧摩阻力的估算、极限承载力的估算等进行了研究^[29]。其设计的试验装置和注浆系统如图5和图6所示。

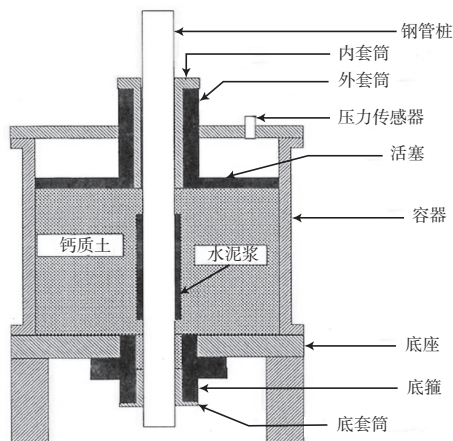


图5 钙质砂土中灌浆打入桩试验装置

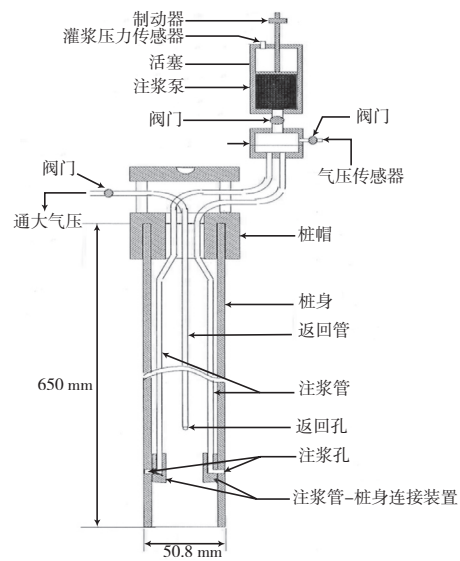


图6 钙质砂土中灌浆打入桩试验注浆装置

试验装置由3部分组成: 圆筒容器、试验桩、基座。顶部和底部的内、外套筒是为了保证桩体竖直及方便清理, 活塞可施加固结应力。套筒外径400 mm, 高400 mm, 基座高100 mm。试验桩为钢管桩, 外径50.8 mm, 内径49.2 mm, 长650 mm。

灌浆系统主要由灌浆泵和灌浆管组成。灌浆管固定在桩管内壁, 向壁外注浆。阀门1, 2, 3控制注浆过程, 达到预定的灌浆压力和灌浆量。

图7是试验得到的桩表面灌浆覆盖率与灌浆压力之间的关系。可以发现, 该试验中桩表面灌浆覆盖面积与灌浆压力无明显相关性, 桩表面灌浆覆盖率平均值在61%左右。灌浆覆盖率是决定灌浆打入桩性能的关键因素, 如何设计合理的注浆装置和注浆方案, 实现稳定且较高的桩表面灌浆覆盖率是需要重点研究的问题。

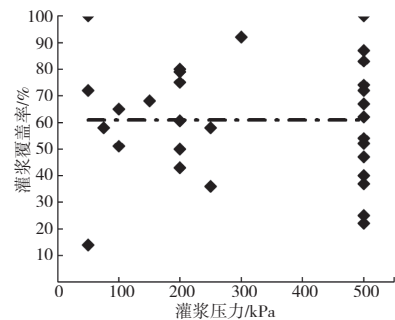


图7 钙质砂土中灌浆打入桩表面灌浆覆盖率

2) 灌浆打入桩的承载力特性。

竖向承压桩的单桩承载力 Q 由两部分组成:

作用于桩侧的总摩阻力 Q_s 和作用于桩端的端阻力 Q_p 。可表示为:

$$Q=Q_s+Q_p \quad (3)$$

而抗拔桩的抗拔承载力基本由桩侧摩阻力提供,且抗拔的摩阻力一般低于抗压的摩阻力,尤其是砂土中的抗拔摩阻力比抗压的小得多^[30]。对于近海工程,钙质砂土中单桩抗拔承载力低是主要问题。因此,提高桩极限侧摩阻力是钙质砂土中桩结构设计的主要目标。灌浆打入桩与钻孔灌注钢管桩相比,有相对较高的极限侧摩阻力和极限承载力,且无钻孔稳定性问题^[29]。大量试验结果表明,钙质砂土中灌浆打入桩平均极限侧摩阻力在100~200 kPa,相比钻孔灌浆钢管桩(≈ 100 kPa)较高。

对灌浆打入桩桩侧极限摩阻力的影响因素主要考虑桩侧极限摩阻力与无侧限抗压强度、灌浆压力和圆锥静力触探的锥体贯入阻力的相关性。已有的试验表明,极限侧摩阻力与圆锥静力触探的锥体贯入阻力相关性最高。对于锥体贯入阻力在10 MPa以上的土体,极限侧摩阻力约为锥体贯入阻力的2%^[31];或者认为二者近似满足^[32]:

$$\frac{\tau_p}{q_c} \approx 0.015 + 0.15e^{-0.04q_c/p_a} \quad (4)$$

式中: τ_p 是未经修正的极限侧摩阻力; q_c 是桩侧介质的锥体贯入阻力; p_a 是标准大气压强。因桩表面实际灌浆面积不能达到100%,所以对 τ_p 进行修正得到修正值 τ_g ,满足以下关系^[33]:

$$\frac{\tau_g}{q_c} \approx 0.02 + 0.2e^{-0.04q_c/p_a} \quad (5)$$

影响桩端阻力的主要因素有:穿过土层及持力层的特性、成桩方法、进入持力层深度和桩的尺寸等。钙质土颗粒易破碎,与石英砂相比,具有高压缩性、低强度等特点,使得钙质土提供的桩端阻力非常低,而且易导致桩发生突进型破坏,沉降时间效应和桩的沉降量显著增加。因此,在实际工程中,不选择钙质土而是选择力学性能优良的礁灰岩层作为桩结构的持力层。

2.3 两种新型桩比较

钻孔灌注钢管桩提出较早,力学机制清晰,相比传统打入桩能获得稳定的较高的承载力。

在过去的二三十年里,钻孔灌注钢管桩作为传统打入桩的替代者在澳大利亚、印度、巴西、中东等地得到了广泛的应用,取得了良好的效果,积累了大量的工程经验。但钻孔灌注钢管桩的工期长、灌浆量大,因而造价高。另外,为了保证钻孔的稳定性,需要采取支护措施确保施工安全。钻孔灌注钢管桩的注浆量大,固结后将发生较大体缩,容易产生裂纹,对承载力的提高不利。

相比钻孔灌注钢管桩,灌浆打入桩工期短、灌浆量小、无先行桩,因而造价低;无须事先钻孔,因而无钻孔稳定性问题,更加安全;灌浆量小,但往往获得更高的承载力。灌浆打入桩的缺点主要是灌浆覆盖率难以确保,导致桩侧摩阻力不稳定;由于需要采取压力注浆方式,而钙质砂土在高压条件下易发生颗粒破碎,从而破坏了原土体的结构,导致承载力下降。

3 结语

1)大量的试验和工程案例说明,基于其他材料地基的传统桩基础工程经验不能适用于钙质砂土。因此,对于能够提供足够承载力的新型桩结构设计工艺和施工方法存在迫切的需要。

2)钻孔灌浆钢管桩和灌浆打入桩是作为传统打入桩的替代者提出的两种新型桩,各自有突出的优点,也存在着一定的不足。钻孔灌浆钢管桩已得到了广泛的应用,但其工程造价太高,并且难以通过改进工艺来降低成本;而灌浆打入桩还基本处在实验室试验阶段,在工程中的应用很少。灌浆打入桩可以在保证高承载力的前提下大幅度降低成本,而且施工安全性高。由于作用机制很复杂,对灌浆打入桩的研究还有很多空白需要填补,如灌浆覆盖率、水力压裂问题、钢管桩内部形成的土芯的承载力问题。

3)在进一步研究的基础上,灌浆打入桩的施工工艺还有较大的改进空间。要提高灌浆覆盖率以及避免水力压裂,首先改进灌浆方法,如改变注浆孔的数目和相对位置;其次,研究水泥浆或混凝土浆这类多相介质在钙质砂土中的渗透规律,调整注浆压力,改进水泥浆或混凝土浆的配比,提高渗透率的同时避免水力压裂。要提高灌

浆打入桩的端承载力并提高打桩效率, 需要研究桩内部土芯的土塞现象、土塞现象对承载力的影响, 以及使用碎石体置换土芯以提高承载力的方法的可行性问题等。

4) 在桩基础的设计研究中, 群桩效应是必须考虑的问题。国内外对钙质砂土中的桩结构研究较少涉及到群桩效应问题。江浩等^[34]在钙质土中进行了群桩试验研究, 得到了一些很有意义的结果, 对群桩效应对桩结构承载力的影响进行了分析。但由于试验模拟 2×2 的高承台群桩, 桩数较少而且没有考虑承台对群桩效应的影响。事实上, 承台在群桩效应中起着重要的作用。已有的研究发现, 承台在竖向压力作用下与桩间土直接接触并承担部分荷载, 有时可高达总荷载的 $1/3$ 以上^[30]。

5) 目前, 国内外钙质砂土中桩基工程的研究方法主要是通过室内试验、现场试验结合一定的理论分析, 描述钙质砂土的力学性质以及桩土相互作用规律。国外多以钻孔灌浆钢管桩和打入灌浆桩为主要研究对象, 根据试验结果, 提出基于桩侧土的锥体贯入阻力的单桩极限承载力的经验公式。但由于试验测量技术水平的限制, 无法得到土体在空间上全场的响应情况, 而且往往只有抗压极限承载力和抗拉极限承载力及其所反映的极限侧摩阻力值能够较为准确地测得, 不能获得各处受力与响应量随时间变化的数据。现场试验可以反映土体和桩基础相互作用的真实情况, 但操作复杂、重复性差、造价高。而目前的实验室试验多为小模型试验, 虽然操作简单、重复性好且造价低廉, 但在制备土样的过程中, 温度、压力和碳酸盐浓缩等因素的改变都会增加钙质土胶结水平的不确定性^[17], 难以进行可靠的定量研究。

数值模拟方法可以方便地获取全场、实时的数据, 验证根据试验结果提出的物理模型, 也可以对未发生事件进行预测。试验结合数值模拟方法将是解决上述问题的途径。室内试验和现场试验获得的材料参数和据此提出的物理模型是数值模拟的基础, 利用数值模拟获得的数据可以验证提出的物理模型、比较试验数据和数值模拟结果对模型进行完善。结合试验与数值模拟方法为

研究桩基工程中的钙质土力学性质提供了新的思路, 并可用于指导工程设计和施工, 为提出新工艺、新技术提供平台。

参考文献:

- [1] 江浩. 钙质砂中桩基工程承载性状研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.
- [2] 白晓宇. 钙质岩土工程性状研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
- [3] 王新志. 南沙群岛珊瑚礁工程地质特性及大型工程建设可行性研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学所, 2008.
- [4] 刘崇权. 钙质土土力学理论及其工程应用[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学所, 1999.
- [5] 张家铭. 钙质砂基本力学性质及颗粒破碎影响研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学所, 2004.
- [6] 吴京平, 楼志刚. 钙质土的基本特性[G]// 第七届全国土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [7] 汪稔, 宋朝景, 赵焕庭, 等. 南海群岛珊瑚礁工程地质[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [8] McClelland B. Calcareous Sediments: An engineering enigma[C]//Proceedings of International Conference on Calcareous Sediments. Perth: [s.n.], 1988.
- [9] Dolwin J, Khorshid M S, Van Goudoever P. Evaluation of driven pile capacity- methods and results[C]// Proceedings of International Conference on Calcareous Sediments. Perth: [s.n.], 1988.
- [10] Angemeer J, Carlson E, Klick J H. Techniques and results of offshore pile load testing in calcareous soil[C]// Proceedings of 5th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1973.
- [11] Angermeier J, Carlson E, Stroud S, et al. Pile load tests in calcareous soils conducted in 400 feet of water from a semi-submersible exploratory rig[C]// Proceedings of 7th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1975.
- [12] Hagenaar J, van den Berg J. Installation of piles for marine structures in the red sea[C]// Proceedings of The 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm: [s.n.], 1981.
- [13] Hagenaar J. The use and interpretation of SPT results

- for the determination of axial bearing capacities of piles driven into carbonate soils and coral[C]// Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam: [s.n.], 1982.
- [14] Dutt R N, Cheng A P. Frictional response of piles in calcareous deposits[C]// Proceedings of 16th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1984.
- [15] Dutt R N, Moore J E, Mudd R W, et al. Behavior of piles in granular carbonate sediments from offshore Philippines[C]// Proceedings of 17th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1985.
- [16] Gilchrist J M. Load tests on tubular piles in coralline strata[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1985, 111(5): 641-655.
- [17] Beringen F L, Kolk H J, Windle D. Cone penetration and laboratory testing in marine calcareous sediments[G]// Symposium on Geotechnical Properties Behavior and Performance of Calcareous Soils. Philadelphia: ASTM Special Technical Publication STP 777, 1982.
- [18] 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.
- [19] Randolph M F, Cassidy M J, Gourvenec S M, et al. Challenges of offshore geotechnical engineering[C]// Proceedings of the Second International Conference on Site Characterization. Porto: [s.n.], 2005.
- [20] McClelland B. Design of deep penetration piles for ocean structures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division, 1974(7): 709-747.
- [21] Agarwal S L, Malhotra A K, Banerjee R. Engineering properties of calcareous soils affecting the design of deep penetration piles for offshore structures[C]// Proceedings of 9th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1977.
- [22] Datta M, Gulhati S K, Rao G V. An appraisal of the existing practice of determining the axial load capacity of deep penetration piles in calcareous sands[C]// Proceedings of 12th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1980.
- [23] Wees J A, Chamberlin R S. Khazzan Dubai No.1: Pile design and installation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division, 1971(10): 1 415-1 429.
- [24] Nauroy J F, LeTirant P. Driven piles and drilled and grouted piles in calcareous sands[C]// Proceedings of 17th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1985.
- [25] Andersen K H, Rawlings C G, Lunne T, et al. Estimation of hydraulic fracture pressure in clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994(6): 817-828.
- [26] Schotman G J M, Hospers B. An improved calculation method for conductor setting depths in sand[C]// Proceedings of Conference on Behavior of Offshore Structures. London: BPP Technical Services, Ltd, 1992.
- [27] Randolph M F, Leong E C, Houlsby G T. One-dimensional analysis of soil plugs in pipe piles[J]. Geotechnique, 1991(4): 587-598.
- [28] Barthelemy H, Bustamante M, Gouvenot K, et al. Pressure Grouted Piles: A Solution to Offshore Foundations Problems[C]// Proceedings of 3rd Annual International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling. Nantes, Paris: Editions Technip, 1986.
- [29] Joer H A, Randolph M F. Experimental Modeling of the Shaft Capacity of Grouted Driven Piles[C]// FHWA Conference on Design and Construction of Deep Foundations. Florida: FHWA, 1994.
- [30] 周景星, 李广信, 虞石民, 等. 基础工程[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [31] Abbs A F. Design of grouted offshore piles in calcareous soils[C]// Proceedings of 6th Australia and New Zealand Conference on Geomechanics. Christchurch: [s.n.], 1992.
- [32] Joer H A, Randolph M F. Modeling of the shaft capacity of grouted driven piles in calcareous soil[C]// Proceedings of International Conference on Design and Construction of Deep Foundation. Orlando: FHWA, 1994.
- [33] Gunasena U, Joer H A, Randolph M F. Design Approach for Grouted Driven Piles in Calcareous Soil[C]// Proceedings of 27th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1995.
- [34] 江浩, 汪稔, 吕颖慧, 等. 钙质砂中群桩模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010(S1): 3 023-3 028.