

DOI : 10.16285/j.rsm.2015.06.025

钙质砂地基单桩承载特性模型试验研究

秦 月, 孟庆山, 汪 稔, 朱长歧

(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, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 根据实际工程中单桩受力特点, 对足尺桩基进行等比例缩尺, 考虑不同埋深、砂土颗粒级配等影响因素, 开展室内小尺寸模型单桩的竖向拉拔、水平推移和竖向压载试验, 分析桩身变位、变形、轴力等参数与桩基埋深、桩周砂土特性等因素的相互关系, 探究钙质砂地基中单桩在不同受力方向下的承载性状, 进而剖析钙质砂中桩-土相互作用机制。研究表明, 钙质砂地基中, 单桩变位、变形特点随着受力方向、埋深、桩周砂土特性等的变化存在明显差异; 增大桩的埋深对竖向抗拔桩的意义大过竖向抗压桩; 相同条件下桩在承受竖向抗压荷载时, 增大埋深的作用主要体现在加载初期, 随着荷载的逐渐增大, 最终差别将逐渐减小; 竖向抗压桩承载过程由以侧摩阻力承载为主发展为以桩端阻力承载为主; 颗粒破碎和重分布会引起抗拔桩 ε_{\max} 在加载后期出现衰减; 宽级配钙质砂中桩的抗拔能力较强, 而单一粒组的钙质砂则在维持桩身稳定方面占优势; 桩侧剪碎时的桩侧阻力衰减是随着颗粒破碎逐渐发生的, 而桩端压碎时的桩侧阻力衰减主要发生在砂土被压碎瞬间。研究结果对钙质砂地基中的不同功能桩基的优化、设计和施工具有重要指导价值。

关键词: 钙质砂; 模型桩; 静载试验; 承载力; 变形

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2015) 06 - 1714 - 08

A study on bearing characteristics of single pile in calcareous sand based on model experiment

QIN Yue, MENG Qing-shan, WANG Ren, ZHU Chang-qi

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

Abstract: According to the mechanical characteristics of a single pile, the full-size pile is proportionally minified. A series of experiments is conducted on the model piles under various vertical uplift static loads, horizontal static loads and vertical compressive static loads, with considering various pile lengths and surrounding sands. Relationship among parameters such as deflection, displacement, axial force and burial depth, grain gradation of surrounding sand is clarified. The influence of loading direction on the bearing capacity of single pile in calcareous sand is explored. Pile-sand interaction mechanism in calcareous sand is analyzed. It is shown that, the displacement and deformation of a single pile vary significantly with the loading direction, burial depth and grain gradation of the surrounding sand. To increase the burial depth is more favorable for uplift pile than for compression pile. The effect of increasing burial depth is more pronounced in the early loading stage, and gradually diminishes as the load increases. When a stepwise load is applied to the top of the model pile, the bearing form alters from side friction bearing to tip resistance bearing. Particle breakage and redistribution can result in a degradation in ε_{\max} of uplift pile within the late loading stage. The bearing capacity of a single pile is larger in a wider-gradating calcareous sand and the stability of the pile is better in the singleness-size sand. A decrease in side friction of the model pile would occur due to the shear-induced particle breakage in the vicinity of the pile; but at the moment the particles at pile tip crush, an instantaneous reduction in side friction would occur. The research results can provide a guidance for pile optimization, design and construction in calcareous sand.

Keywords: calcareous sand; model pile; static loading test; bearing capacity; deformation

1 引 言

在过去几十年里, 在珊瑚礁地层上设计和建造

海洋石油平台已经成为海洋工程中一项重大的工程实践。在不同碳酸钙含量和胶结度钙质砂地层上的桩基工程建设中, 基于其他材料的传统理论和经验

收稿日期: 2014-11-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (No.2013CB956104, No.2012FY112400); 国家自然科学基金重点项目 (No.41330642); 国家自然科学基金面上项目 (No.41372316)

第一作者简介: 秦月, 女, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事钙质砂等海洋岩土工程方面的研究工作。E-mail: shashabest1@163.com

已经被证明是不适用的^[1]。因此,学者们采用现场桩基测试及室内模型试验手段,对钙质砂桩基性状展开深入研究。

国外已经有较多学者开展了钙质砂地基中桩基试验研究。Angemeer 等^[2]在澳大利亚东南的巴斯海峡(Bass Strait)进行了 7 组全尺寸打入桩的试验,发现钙质砂中深埋桩的极限承载力与深度无关,其承载力比石英砂更低;Dutt 等^[3]在苏伊士海湾轻微或中度胶结的钙质砂地基中做了打入钢管桩拉拔试验,提出钙质砂成因、胶结度以及颗粒破碎是影响桩基承载特性的主要因素;Poulos 等^[4]在澳大利亚西部的 North Rankin 近海天然气平台 A 号桩进行了一系列导管荷载试验,揭示了钙质砂的侧摩擦力和变形特性。在室内试验方面,Nauroy 等^[5]通过一系列全尺寸室内模型试验研究了钙质砂中打入桩和钻孔灌注桩的桩侧摩阻力。单华刚等^[6]开展了室内钙质砂单桩模型试验、桩端土破坏模式试验、桩-土界面拉拔摩擦试验以及软硬互层地基中模型桩试验。江浩^[7]进行了钢管桩承载试验,发现钙质砂中桩侧摩阻力受相对密度影响很小,同时指出,颗粒破碎是桩侧摩阻力低的主要原因。

已有的钙质砂桩基承载性状研究成果主要集中在现场试验。在 2013 年我国南海某岛首次开展了珊瑚礁地基冲孔灌注桩施工,为满足桩基抗谐振要求,施工中并未对桩身承载性能进行深入研究。考虑到岛礁工程建设中的桩基不仅要受到上部结构荷载、施工荷载,还要承受海上风浪等因素引起的荷载,荷载条件更加复杂,因此,海上桩基工程设计需要分别考虑桩的竖向和水平承载能力,全面掌握在不同荷载条件下桩体变位、桩身变形等规律。

基于以上现状,针对钙质砂易破碎的特点^[8],考虑到桩基功能和桩周砂土特性等都对桩的承载性能造成的显著影响,本文采用分层埋入的成桩方式,开展了单桩在竖向拉拔、压载和水平推力等 3 种不同静载作用下的承载特性研究。

2 试验概况

2.1 试验材料

为了分析钙质砂桩周砂土环境对单桩承载特性的影响,本研究选用了两组不同颗粒组成的钙质砂。一组是取自南海西沙某岛原始级配的钙质砂,属未胶结松散珊瑚礁碎屑沉积物,通过筛分,得到原始级配钙质砂的不均匀系数 $C_u=2.04$, 曲率系数 $C_c=$

1.01,为级配不良土,颗粒曲线见图 1;另一组是根据前期研究成果选取相对最稳定的粒组 0.25 mm d 0.5 mm (下文简称为“均匀细砂”),用以排除试验过程中钙质砂颗粒破碎的影响。其他物性指标见表 1。

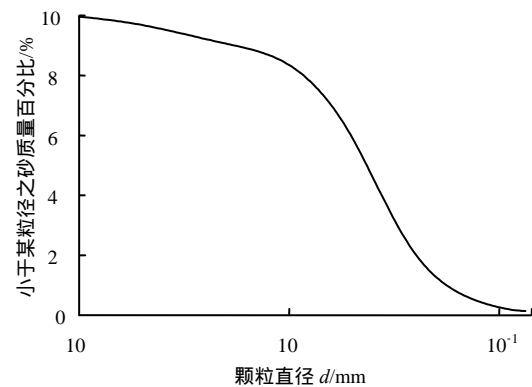


图 1 模型桩周钙质砂原始级配
Fig.1 Particle gradation of calcareous sand around model pile

表 1 砂土的主要物理力学指标

Table 1 Main physical and mechanical parameters of sand

砂土类型	初始密度 (g/cm^3)	相对密实度 /%	初始孔隙比	初始含水率 /%	相对密度
宽级配砂	1.46	74	0.90	0.91	2.75
均匀细砂	1.56	74	0.78	0.91	2.75

2.2 加载方式与装置

2.2.1 加载方式

竖向拉拔和水平推移试验采用慢速维持荷载法,即每加一级荷载后,每隔 30 min 读取位移读数,直至每小时位移小于 0.1 mm,施加下一级荷载;每级荷载增量为 0.1 kN,接近预估临近状态时减小荷载增量。

竖向压载试验每加一级荷载,稳压 30 min 视为稳定,荷载增量为 0.4 MPa。

2.2.2 钙质砂地基的模拟

试验中采用 100 cm×90 cm×90 cm 的方形模型箱模拟钙质砂地基边界。Ovesen^[9]认为,模型与箱壁的距离 B 与模型尺寸 b 之比应大于 2.82,即 $B/b > 2.82$,即可消除边界效应,而徐光明等^[10]认为, B/b 之比应大于 3.0,才可以消除边界效应。据计算,本试验中 $B/b > 2.82$ (或 3.0)。另外,根据江浩^[7]所进行的试验证明,实测临近箱壁和箱底的砂的土压力很小,几乎可以忽略不计。因此,可以不考虑模型箱边界效应的影响。



图2 模型试验装置

Fig.2 Q-S curves of uplift piles at different burial depths

2.2.3 模型桩

模型桩采用的是小比尺钢管桩，是将钢管采用线切割劈开后用对拉螺栓再次闭合形成无缝钢管，以便于在钢管内壁粘贴应变片。详细参数列于表2。

表2 钢管桩模型的尺寸参数

桩长/cm	缩尺比例	长径比	外径/mm	内径/mm
50	1/24	16/1	32	22
70	1/24	22/1	32	22

2.3 试验方案

具体的对比试验方案列于表3中。

表3 试验方案列表

Table 3 Schemes of experiments

埋深/cm	受力方向		
	竖向抗拔	抗水平推力	竖向抗压
70	C/X	X	X
60	X		
50	X		X
40	X	X	

注: C代表原始级配钙质砂, X代表均匀细砂。

3 不同功能桩基的承载性状

3.1 受力方向与桩体变位

3.1.1 竖向上拔荷载与桩顶位移

为了对比分析桩的埋深对桩抗拔特性的影响，对桩长70 cm的钢管桩分别进行了埋深为70、60、50 cm的竖向抗拔试验。竖向上拔荷载 Q 与桩顶竖向位移 S 的关系曲线如图3所示。从图中可以看出，随着荷载的增加， Q - S 曲线大致可以分为两个阶段：第1阶段位移增长速率较缓慢，并且3组不同埋深的位移增长速率基本一致，随着荷载的继续增加，各组的桩顶竖向位移 S 增长速率逐步提高，直至加载至接近极限状态时进入第2阶段，且大致以相同的位移增长速率迅速上拔并被拔出。3组试验不同之处在于桩长越短，进入第2阶段的时间越早，进而，在较低的荷载下即被拔出。

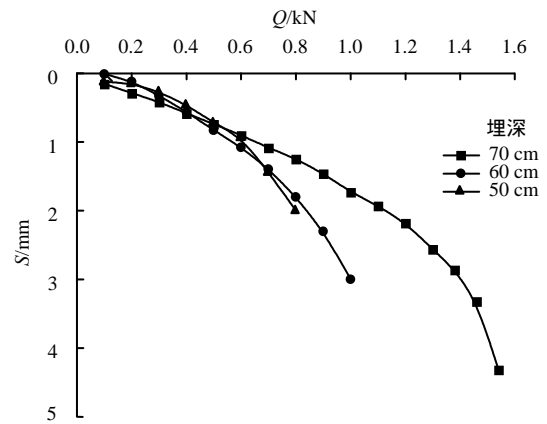


图3 不同埋深抗拔桩的Q-S曲线

Fig.3 Q-S curves of different burial depth uplift piles

Q - S 曲线上的最后一级荷载是模型桩被拔出前桩身能够维持稳定的最大荷载，以下称之为抗拔力。试验数据显示，抗拔力随着埋深的增加有增加的趋势，特别是埋深为70 cm相对于60 cm而言，抗拔力增加显著，增加了47.3%。因此，在一定深度范围内，增大桩的埋深对提高桩的抗拔能力具有显著效果。

需要注意的是：埋深为50 cm与埋深为60 cm的桩相比，抗拔力仅相差0.2 kN，然而，在实际试验中，埋深为50 cm的桩加载至0.9 kN时立即被拔出；埋深为60 cm的桩则在加至1.1 kN后，持续上拔一段位移后才被拔出，即仅仅用0.2 kN的抗拔力之差反映埋深为50、60 cm的桩的抗拔能力差异是不够全面的。这表明在实际的抗拔能力判别时，综合抗拔力、维稳时间等多因素进行考虑是有必要的。

3.1.2 竖向压力与桩顶位移

图4反映了各组竖向压力 Q 作用时桩顶竖向位移 S 的对应关系。从中可以发现，在初期荷载等级较低时，两组试验的桩顶位移增长很小，桩位几乎保持稳定；随着竖向压力的增加，桩顶位移持续增加。

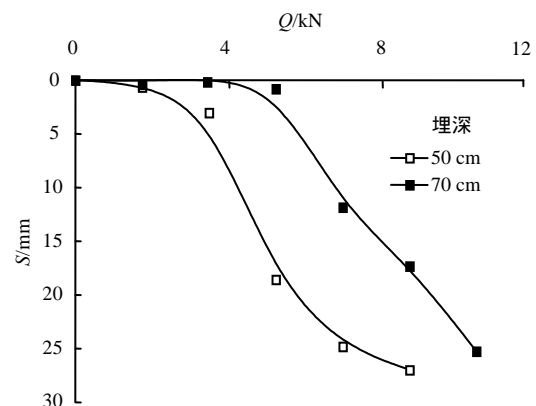


图4 不同埋深抗压桩的Q-S曲线

Fig.4 Q-S curves of compressive piles at different burial depths

桩顶位移快速发展至一定水平后，50 cm 桩最后进入另一个位移变化相对缓慢而稳定的阶段：在其桩顶位移发展的第 1 个稳定阶段至第 2 个稳定阶段开始过程中，桩周的侧摩阻力在限制桩位下沉中发挥主要作用，随着荷载的增加，使桩位持续下降，钙质砂与桩之间不断增大的相对位移使其颗粒破碎显著，桩周砂土对桩位变动的限制能力下降，因而竖向位移增长速率较大，而在侧摩阻力减小的同时，桩端砂土被不断压密，钙质砂对桩的端承能力渐渐增强，从而出现桩顶位移增长缓慢并趋于稳定的现象。可以预测，随着荷载的继续施加，70 cm 桩的桩顶位移也即将进入第 2 个稳定发展阶段。

3.1.3 水平推力与桩顶侧向位移

利用滑轮改变荷载方向，对模型桩施加水平方向的力，并使受拉侧和受压侧的应变片位于桩与水平力构成的平面内，分析单桩的水平受荷特点。试验装置见图 2(b)。

从图 5 中可以看出，桩顶侧向位移随着水平荷载增加的变化曲线平顺而规则，并且近似符合二次曲线的规律。因此，尝试利用二次多项式对二者进行拟合。关系式如下：

$$\left. \begin{aligned} (1) \text{ 埋深为 } 70 \text{ cm} \\ y = 5.552 2x^2 + 12.788 3x - 0.289 0 \\ R = 0.995 1 \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned} (2) \text{ 埋深为 } 40 \text{ cm} \\ y = 102.339 3x^2 + 1.745 8x + 0.014 8 \\ R = 0.962 3 \end{aligned} \right\} (2)$$

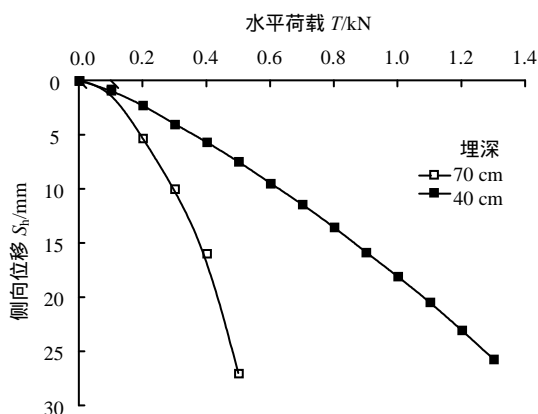


图 5 不同埋深模型桩侧向位移与水平荷载的关系
Fig.5 Variation of lateral displacement of pile with horizontal load at different burial depths

拟合结果表明，两组水平静载模型试验中模型桩的侧向位移与水平荷载的相关系数分别高达 0.995 1、0.962 3，这表明单桩在承受水平静载时，水平荷载与侧向位移之间有很强的相关性。这一规

律可用于实际工程中单桩承受水平静载作用时桩顶水平位移的预测。

3.2 受力方向与桩身变形

3.2.1 竖向上拔荷载与桩身变形

为了测定钢管桩在加载过程中的轴向变形，采用线切割的方法将其对称剖开，在内壁每隔 10 cm 等距离对称粘贴应变片后，用对拉螺栓固定桩的两端。通过对应变片数据的采集，可以获得桩身变形规律。

分析不同埋深抗拔桩的应变数据时发现，桩中部位位置处的应变最大，这说明桩在该相应位置处的变形最显著。为了研究桩身变形对桩埋深的相关关系，分析了不同埋深桩时的最大应变 ϵ_{max} 的变化规律。

不同埋深的模型桩的 ϵ_{max} 存在较显著差异。从图 6 中可以看出，随着埋深的增加，桩被拔出前的总变形量增加。各组 ϵ_{max} 演化规律的相似点是埋深为 50、60 cm 及加载前期的埋深为 70 cm 模型桩的 ϵ_{max} 增长基本呈相似且较稳定的发展趋势；不同点是随着荷载的继续增长，埋深 70 cm 桩的 ϵ_{max} 在荷载增加至 1.3 kN 后出现衰减现象。

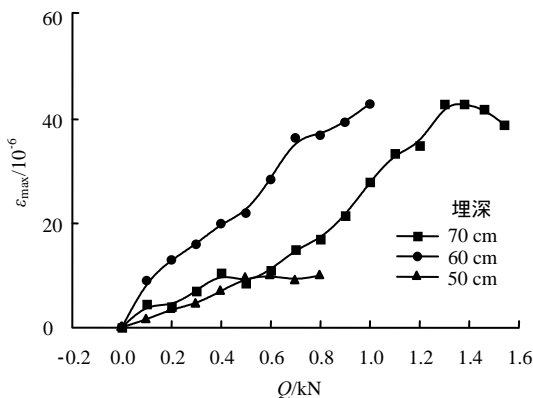


图 6 不同埋深模型桩的 Q- ϵ_{max} 曲线
Fig.6 Q- ϵ_{max} curves of piles at different burial depths

3.2.2 竖向压力与桩身变形

轴向受压桩的各处变形与各点轴力一一对应，各级压力下桩身轴力的分布规律即可解释桩身的变形响应。

以埋深为 70 cm 的桩为例，通过图 7 桩身各点的应变计算得到桩身各位置处的轴力变化规律，如图 8 所示。桩身各点轴力随着竖向压力的增大而增加，加载后期 (6.86、8.58、10.30 kN)，荷载的增加对各点轴力增长的贡献逐渐变得微弱，最后 3 级荷载的轴力差异已经变得很小，因为此时桩由于下沉使各点增加的侧摩阻力之和基本抵消了竖向荷载增量，竖向压力的增加对桩身轴力的贡献就变得不

那么显著,相应地,大的桩身变形主要集中在加载初期,随着上部荷载向轴力转换的效率降低而逐渐变小(图9);在同一级荷载下,轴力随着深度的增加而逐渐减小(桩身变形逐渐减小),也表明竖向压力在向下传递过程中一部分被消耗于克服逐渐增加的桩周侧摩阻力。

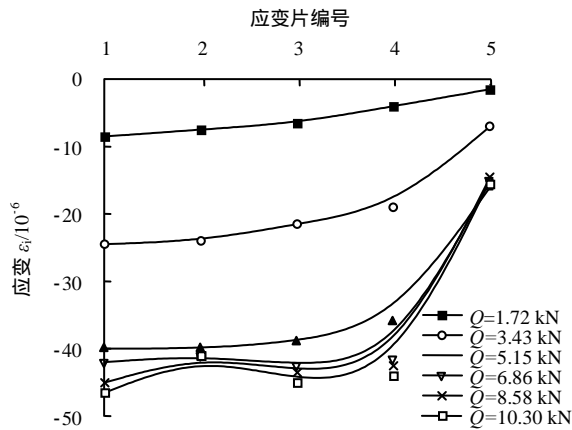


图7 各级竖向压力下各桩身各处应变
Fig.7 Strain of pile body at different positions under various vertical pressures

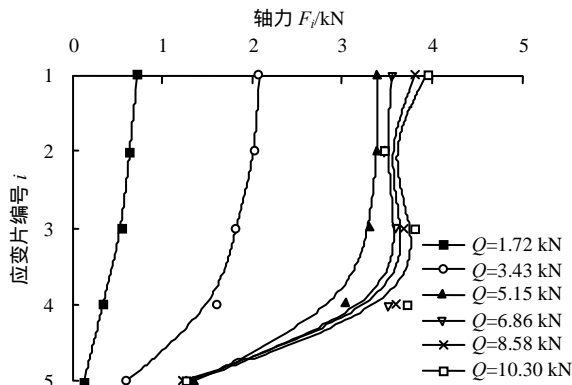


图8 各级竖向压力下桩身不同位置处的轴力
Fig.8 Axial force of pile body at different positions under various vertical pressures

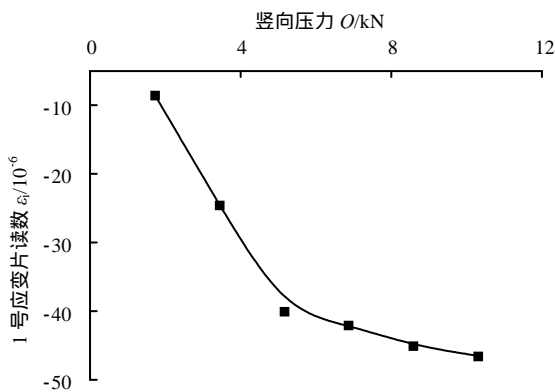


图9 各级竖向压力下1号应变片读数
Fig.9 No.1 strain gauge of pile under various vertical pressures

3.2.3 水平推力与桩身变形

图10描述的是埋深为70 cm的桩受压不同位置处的应变片读数,应变片读数随着荷载的增加有规律地增大,在桩中部位置处(2、3、4号应变片)较大,并向两端(1、5号应变片)逐渐减小。图11反映的是各应变片读数与水平荷载之间的关系,应变片读数与侧向拉力呈现良好的线性关系,相对于图10而言,更加清晰地反映了应变片读数之间的大小关系:位于桩中部的2、3号应变片读数较大。从图10、11中可以发现,5号应变片的读数基本接近于0。这表明,水平承载时,5号应变片处的桩已不受桩周砂土的约束。换言之,在相应的荷载水平下,埋深在5号应变片处及更深处的桩对承受外荷载、抵抗桩身变形已无贡献。据此推断,此水平承载桩的有效桩长位于4、5号应变片之间。

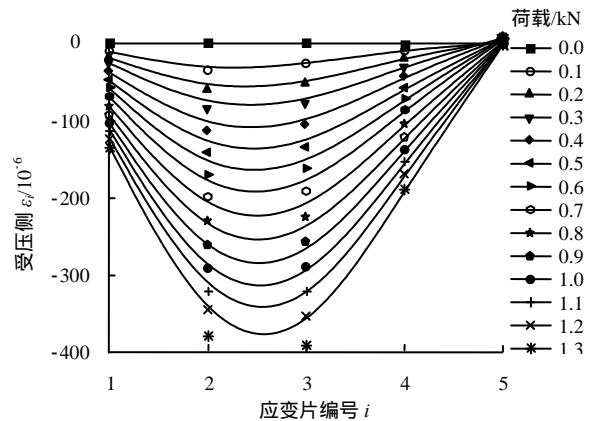


图10 不同荷载时受压侧应变
Fig.10 Compression-side strain under stepwise loadings

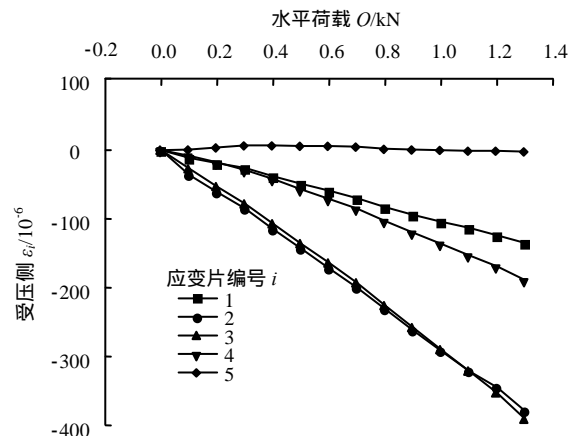


图11 受压侧应变与水平荷载的关系
Fig.11 Compression-side strain changing with horizontal load

3.3 桩周砂土级配对桩承载性状的影响

为了与原始级配钙质砂中模型桩试验结果进行

对比,同时开展了埋深为70 cm的模型桩在均匀细砂中的竖向抗拔静载试验,如图12所示。

图12表明,颗粒级配的调整对竖向抗拔模型桩的 $Q-S$ 曲线影响显著。在均匀细砂中,加载初期的桩顶位移 S_x 基本为0,即该阶段桩位保持稳定,随着竖向上拔荷载增至0.8 kN以后, S_x 才开始有显著的发展,并且在较低的荷载水平(1.3 kN)时桩即被拔出;而原始级配钙质砂中桩的竖向抗拔力则较高,达1.62 kN,与均匀细砂中的竖向抗拔力相比提高了约25%。

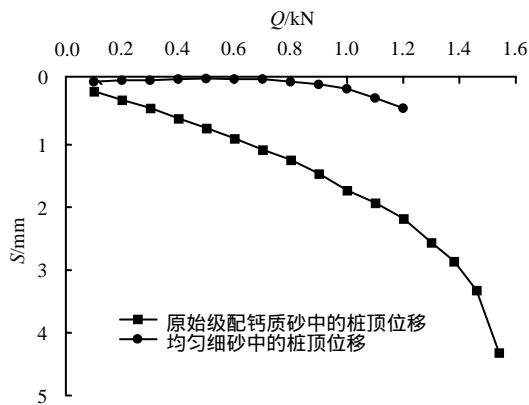


图12 不同桩周砂环境下钢管桩的 $Q-S$ 曲线

Fig.12 $Q-S$ curves of pile under different surrounding sand environments

3.4 功能桩承载性状的讨论

根据上述试验分析,以下从桩体变位特征、桩身变形特点、桩周砂土影响和桩侧摩阻力的特点几个方面进行讨论。

3.4.1 桩体变位特征

竖向抗压桩承载过程由以侧摩阻力承载为主发展为以桩端阻力承载为主。随着桩侧阻力的充分发挥以及桩端砂土的压密,桩端阻力的作用逐渐发挥。基于以上规律,结合图4可以推测,埋深的增加只在加载中期使桩的竖向位移存在较大差异,随着荷载的增加。进入端承力承载为主的阶段后,两者差异逐渐缩小。这是因为埋深的增加主要影响桩土间的侧摩阻力,当最终以端承力为主要控制因素时,增加桩长在提高钙质砂对桩的约束能力上影响较小,因而考虑提高钙质砂对桩的端承能力是抗压桩设计时需重点关注的内容。

对比不同受力方向下桩顶位移与荷载的关系时发现,相同条件下增大桩的埋深对竖向抗拔桩的意义大过竖向抗压桩,即桩顶位移对竖向拉力比竖向压力的反应更加敏感。桩在承受竖向上拔荷载时,

抗拔能力随着桩埋深的增大有显著提高,工程中可考虑以增大埋深的方式提高抗拔桩抗拔能力;而桩在承受竖向抗压荷载时,增大埋深的作用主要体现在加载初期,随着荷载的逐渐增大,最终差别将逐渐减小,因而钙质砂这类松散、易碎的地基材料中的抗压桩应主要从增大端承力的角度考虑提高桩的承载能力。

3.4.2 桩身变形特点

当单抗拔桩埋深较大时, ϵ_{max} 在荷载增至一定大小时会出现衰减,这是因为当桩身发生较大位移后,钙质砂出现颗粒破碎、颗粒的重新分布和桩端悬空使桩身周力降低,从而应变出现衰减。埋深为70 cm时,应变衰减原因与钙质砂颗粒易破碎的性质有关。竖向上拔荷载达到1.3 kN时,桩顶竖向位移已经达到2.56 mm,相对于其他两组桩而言,位移较大,桩身相对于周围钙质砂有较大的位移,对易碎的钙质砂而言出现了颗粒破碎现象,颗粒破碎和桩端悬空使桩周钙质砂颗粒位置和咬合关系发生调整。调整过程中,降低了砂对桩身的握裹作用,使桩身轴力降低,而使应变出现衰减,握裹作用的降低同时也导致了1.3 kN之后的位移增长速率加速提高(见图3)。

竖向抗压桩在相应荷载作用下,埋深足够大使桩深至一定深度时,桩端轴力接近于0,这时桩只承受侧摩阻力,属于摩擦桩。不同的竖向荷载将对应一个临界桩长。当桩身长度大于该临界桩长时,该桩端承力可以忽略不计,可将其作为摩擦桩考虑,此时增加埋深对桩的承载能力贡献微弱,此时的临界桩长可以作为工程中已知桩顶竖向静压力时最经济桩长设计的依据。

水平承载桩,桩身下部存在应变为0的点,该处桩不受桩周砂土的约束,即在相应的荷载水平下,该处及更深处对承受外水平荷载、抵抗桩身变形已无贡献。据此可估计水平承载桩的有效桩长。

3.4.3 桩周砂土的影响

桩周砂土环境对抗拔桩的竖向抗拔特性影响显著。在低荷载水平下,颗粒细而均匀的钙质砂利于桩位的稳定,因为笔者前期研究成果已表明,0.25 mm d 0.5 mm是钙质砂颗粒破碎时最稳定的粒径区间。在本试验涉及的荷载水平下,均匀细砂颗粒破碎发生的概率极小,而原始级配的钙质砂则不然。随着荷载的施加,桩位的移动与钙质砂颗粒破碎之间存在相互促进的关系,微小的桩位变动引起钙质砂颗粒发生破碎,反过来,颗粒破碎的发生

又促进了桩位的变动,因而在低荷载水平下,原始级配的钙质砂相对于均匀细砂而言, S 的变化速率大得多;而在高荷载水平下,粒组分布相对均匀,使原始级配钙质砂具有较高的抗拔能力,因为随着桩位上升,颗粒破碎发展过程中,钙质砂颗粒大小、空间排列不断调整,自然分选、不同粒径之间相互咬合,使其相对于均匀细砂而言,整体稳定性好,对桩身的握裹能力强,因而表现出较高的抗拔力。而均匀细砂由于粒径分布集中,颗粒尺寸的相似度高,在桩受荷上拔时颗粒的位置调整并不能在约束桩身位移方面发挥显著作用。因而相对于宽级配的原位钙质砂而言,抗拔能力稍显逊色。从上述结论可得到启示,不同用途(考虑因素有桩身位移的稳定、桩抗拔力的大小等)的桩对桩周钙质砂级配的要求是不同的,实际应用中需具体情况具体分析。

3.4.4 桩侧摩阻力的特点

竖向抗压静载试验中,随着桩侧阻力的充分发挥以及桩端砂土的压密,桩端阻力的作用逐渐发挥,埋深的增加主要影响桩土间的侧摩阻力。当最终以桩端阻力承载为主时,桩长对承载力的影响较小;在同一级荷载下,轴力随着深度的增加而逐渐减小,竖向压力在向下传递过程中一部分被消耗于克服逐渐增加的桩周侧摩阻力。

钢管桩周砂土对桩身提供的桩侧阻力是随着荷载的逐渐增长而逐渐发挥出来的。与不易破碎的岩土体不同的是,在承受一定荷载后,钙质砂容易产生颗粒破碎现象,桩周砂土对桩身的约束作用随着颗粒破碎后的重新分布发生动态调整,体现在桩内部则是桩身应变的变化。从图6中可以看出,当上拔荷载增至1.3 kN时,桩身应变发生了衰减现象,此时钙质砂发生了颗粒破碎,桩周砂土级配随之变化,为了维持桩身的稳定,砂土对桩身的约束相应作出调整。

3.4.5 桩侧剪碎和桩端压碎的差异性

抗压桩桩侧剪碎和桩端压碎的差异体现在桩身上时,是桩侧阻力变化的差异。桩侧剪碎主要发生在竖向荷载施加的前期。桩侧阻力逐渐发挥至最大值以及承载由以侧摩阻力为主向桩端阻力为主转变的过程中。侧摩阻力会随着桩侧砂土颗粒剪碎后的级配调整而发生衰减。桩端压碎则发生在桩侧摩阻力充分发挥之后,桩端压碎引起桩端阻力瞬时减小,桩身下沉,直至桩端再次提供足以保持桩身稳定的端承力为止。而由于此前桩侧阻力已充分发挥,因而此过程桩侧阻力的变化不显著。

4 结 论

本文对钙质砂地基中单桩在不同受力方向下的承载性状进行了研究,通过对比分析,得出的主要结论如下:

(1) 桩体变位、桩身变形受到埋深与受力方向的影响;相同条件下增大桩的埋深对竖向抗拔桩的意义大过竖向抗压桩;抗拔桩在一定荷载下会出现桩身应变衰减现象;提出了抗压桩端承力为0时的临界桩长和水平承载桩桩身下部存在应变为0时的有效桩长的确定。

(2) 宽级配和单一粒组的钙质砂在提供抗拔能力和维持桩身稳定方面体现出不同的优势:低荷载水平下,均匀细砂维持桩身稳定的能力稍强,而高荷载水平下,原始级配钙质砂具有较高的抗拔能力。实际工程中可据此具体问题具体分析。

(3) 竖向受荷的桩,荷载在向下传递过程中桩周侧摩阻力发挥着分担上部荷载的作用。

(4) 桩-土相互作用时,抗压桩桩侧剪碎和桩端压碎情况下的桩身响应特征存在差异:桩侧剪碎主要发生在竖向荷载施加的前期,此过程桩侧阻力逐渐发挥;桩端压碎则发生在桩侧摩阻力充分发挥之后,会引起桩端阻力的瞬时减小。

参 考 文 献

- [1] ANGEMEER 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.
- [2] ANGEEMEER J, CARLSON E D, KLINK J H. Techniques and Results of Offshore Pile Load Testing in Calcareous Soils[C]// Proceedings of the 5th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1973.
- [3] DUTT R N, CHENG A P. Frictional response of piles in calcareous deposits[C]// Proceedings of the 16th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1984: 527 - 530.
- [4] POULOS H G, RANDOLPH M F, SEMPLE R M. Evaluation of pile friction from conductor tests[C]// Proceedings of the International Conference on Calcareous Sediments. Perth: [s.n.], 1988: 599 - 605.

- and differential motion due to an antiplane 2D resonance in the sediment valleys embedded in a layer over the half-space[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1996, 86(5): 1434 - 1446.
- [22] SUN Chang-guk, CHUNG Choong-ki. Assessment of site effects of a shallow and wide basin using geotechnical information-based spatial characterization[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2008, 28(12): 1028 - 1044.
- [23] 郑国明. 影响福州城市地下空间开发的地质因素分析[J]. **地下空间与工程学报**, 2013, 9(1): 13 - 17.
ZHENG Guo-ming. Analysis of geological factors of exploiting underground space resources in Fuzhou city[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2013, 9(1): 13 - 17.
- [24] 郑荣章, 陈桂华, 徐锡伟, 等. 福州盆地埋藏晚第四纪沉积地层划分[J]. **地震地质**, 2005, 27(4): 556 - 562.
ZHENG Rong-zhang, CHEN Gui-hua, XU Xi-wei, et al. Sedimentary strata division of buried late quaternary of Fuzhou Basin[J]. **Seismology and Geology**, 2005, 27(4): 556 - 562.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [26] MARTIN P P, SEED H B. One dimensional dynamic ground response analysis[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1982, 108(7): 935 - 952.
- [27] 陈国兴, 庄海洋. 基于 Davidenkov 骨架曲线的土体动力本构关系及其参数研究[J]. **岩土工程学报**, 2005, 27(8): 860 - 864.
CHEN Guo-xing, ZHUANG Hai-yang. Developed nonlinear dynamic constitutive relations of soils based on Davidenkov skeleton curve[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(8): 860 - 864.
- [28] 庄海洋, 陈国兴, 梁艳仙, 等. 土体动非线性黏弹性模型及其ABAQUS软件的实现[J]. **岩土力学**, 2007, 28(3): 436 - 442.
ZHUANG Hai-yang, CHEN Guo-xing, LIANG Yan-xian, et al. A developed dynamic viscoelastic constitutive relations of soil and implemented by ABAQUS software[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 436 - 442.
- [29] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致黏弹性人工边界及黏弹性边界单元[J]. **岩土工程学报**, 2006, 28(9): 1070 - 1075.
LIU Jing-bo, GU Yin, DU Yi-xin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(9): 1070 - 1075.
- [30] 陈国兴, 陈磊, 景立平, 等. 地铁地下结构抗震分析并行计算显式与隐式算法比较[J]. **铁道学报**, 2011, 33(11): 112 - 117.
CHEN Guo-xing, CHEN Lei, JING Li-ping, et al. Comparison of implicit and explicit finite element methods with parallel computing for seismic response analysis of metro underground structures[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2011, 33(11): 112 - 117.
- [31] JIN Dan-dan, CHEN Guo-xing, DONG Fei-fan. Large-scale two-dimensional nonlinear analysis on seismic effect of Fuzhou Basin[J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2011, 90(1): 1426 - 1433.
- [32] 金丹丹, 陈国兴. 福州盆地地震效应特征的一、二维模型对比研究[J]. **土木工程学报**, 2012, 45(S1): 48 - 53.
JIN Dan-dan, CHEN Guo-xing. Large-scale two-dimensional nonlinear FE analysis vs. one-dimensional equivalent linearization analysis on seismic effect of Fuzhou Basin[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(S1): 48 - 53.
- [33] 中国地震局. GB 18306 中国地震动参数区划图(2012 报批稿)[S]. 北京: [s.n.], 2012.

上接第 1720 页

- [5] NAUROY J F, LE TIRANT P. Driven pile and drilled and grouted piles in calcareous sands[C]//The 17th Annual Offshore Technology Conference. Houston: [s.n.], 1985: 83 - 91.
- [6] 单华刚. 珊瑚礁钙质土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, 2000.
- [7] 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.
- [8] 秦月, 姚婷, 汪稔, 等. 基于颗粒破碎的钙质沉积物高压固结变形分析[J]. **岩土力学**, 2014, 35(11): 3123 - 3128.
QIN Yue, YAO Ting, WANG Ren, et al. Particle breakage-based analysis of deformation law of calcareous sediments under high-pressure consolidation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(11): 3123 - 3128.
- [9] OVESSEN N K. The use of physical models in design: the scaling law relationship[C]//Proceedings of the 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Brighton: [s.n.], 1979, 4: 318 - 323.
- [10] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. **岩土工程学报**, 1996, 18(3): 80 - 86.