

海洋桩基工程中的钙质土

吴京平 楼志刚

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 本文在简述钙质土成因和组成的基础上, 介绍分析了这种土的物理力学性质, 尤其是其受力后变化的特性; 说明了钙质土与桩的相互作用特性; 对钙质土中导管架平台桩基设计的土工调查及其有关设计参数的选用作了论述。

关键词 钙质土 力学特性 平台 桩基础 土工调查

1 前言

钙质土是指富含碳酸钙颗粒或天然胶结物的碳酸盐沉积物。近 20 多年来, 钙质土相继在伊朗、澳大利亚和印度等国海域内导管架桩基平台场址的土工调查中被发现, 由于它受力后某些物理力学性能会发生显著的变化, 导致承载能力的降低, 往往给海洋平台的桩基带来极大的危害。但因其具有很强的地域性和取样分析的困难, 对它的深入全面的研究进展缓慢。80 年代中期, 对在澳大利亚的 North Rankin "A" 海洋平台建造中遇到的钙质土较全面的研究, 以及 1988 年在佩斯召开的首届国际钙质土沉积学术会议, 推动了对钙质土特性及其工程性质的研究。1988 年, 在我国南海某平台场址的土工勘探调查中首次遇到了钙质土。八五期间, 在对我国南沙进行的综合科学考察过程中, 也遇到了大量的钙质土。因此, 尽早地对这种特殊的沉积物进行研究, 掌握其性质和工程设计方法, 对南海石油天然气及南海诸岛的开发具有重要意义。

2 钙质土的成因和组成

钙质土多发现于北纬 30 度和南纬 30 度之间的、属热带或亚热带气候的大陆架及海岸线一带, 是因长期在饱和的碳酸钙溶液中, 经物理、生物化学及化学作用过程, 其中包括有机质碎屑及岩屑的破碎和胶结过程, 以及一定的压力、温度和溶解度的变化过程, 而形成的一种与陆相沉积有很大差异的碳酸盐沉积, 其主要矿物成分为碳酸钙。

钙质土的颗粒有四种: a 骨架式颗粒, 是由海洋有机物形成, 这是钙质土颗粒的主要来源; b 球形颗粒, 是一些实心的卵状或球状细粒, 本身结构性很弱, 甚至为海中生物的粪便; c 包粒, 是经无机化学沉淀而形成的具有碳酸钙同心层或包裹层的沉积颗粒; d 碎屑颗粒, 是从其它沉积物或岩石中分化得到的碎片。这些不同形状、不同强度的颗粒组成了钙质土的结构骨架, 而在其形成时的沉积环境条件, 如水深、温度、海进海退及波浪和海流能量的高低, 则直接影响着颗粒类型的形成。

胶结是钙质土的特征之一, 它是在上述特殊沉积环境里, 于颗粒周围或颗粒之间形成晶

体沉积。胶结的强度有弱有强,可从颗粒表面的弱胶结到粒间孔隙被晶体充填的强胶结。Price^[1]利用光学岩相显微镜观察到生物碎屑岩和碎屑岩之间的明显区别,即骨架式颗粒和粒间孔隙的大量存在,并指出,当钙质土的强度高时,其结晶胶结程度也高,强度低时,往往含有易破碎的贝壳、大量的粒间孔隙和较低的结晶胶结程度。

3 钙质土的基本物理力学性质

3.1 角状颗粒

钙质土的角状颗粒含量高。大量的研究表明,具有较高棱角度的钙质土往往具有较高的初始孔隙比,且对颗粒的破碎很敏感。

3.2 颗粒的易破碎性

Datta^[2]利用土样受剪或固结试验前后颗粒分布的变化,引入破碎系数 C_c 来描述土颗粒的易破碎性:

$$C_c = (\text{原土中小于 } D_{10} \text{ 的颗粒的百分比}) / (\text{受力后小于原 } D_{10} \text{ 的颗粒的百分比})$$

Datta 对四种碳酸钙含量均大于 85% 的钙质砂(A、B、C 和D)的试验研究表明:钙质砂的破碎性明显大于非钙质砂的渥太华砂(E)(如图 1),且在三轴剪应力作用下的破碎性要比在等向固结条件下更大;其破碎性随着围压的增加,剪应力的增加,粒间孔隙和片状贝壳碎片的增多,颗粒本身棱角的增大和颗粒尺寸的增大而增加。

颗粒破碎的发生和发展,将引起下述变化: 应力-应变关系由脆性向塑性发展,由剪胀到剪缩体变特性的变化,最大有效主应力比降低。

Datta 还将土的强度特性与破碎系数相联系,引入规一化的最大有效主应力比 K/K_1 , 试验表明四种钙质砂均具有良好的对应关系: $K/K_1 = C_c^{0.6}$ 。这里 K 为径一围压下颗粒破碎发生后最大有效应力比, K_1 为颗粒尚未破碎前最大有效主应力比。

因剪应力作用,将导致土颗粒的破碎,土体积收缩,最大有效主应力比明显下降,这正是造成钙质土中桩的侧壁摩阻力降低的主要原因。

3.3 强度特性

三轴剪切试验结果显示,在相同的孔隙比和相近的颗粒分布条件下,钙质砂的摩擦角明显大于普通石英砂的摩擦角。图 2 的 Datta 试验结果表明,虽然应力水平对钙质砂摩擦特性的影响很大,但其摩擦角仍要大于石英砂的摩擦角,特别是在通常的基础工程的应力范围内

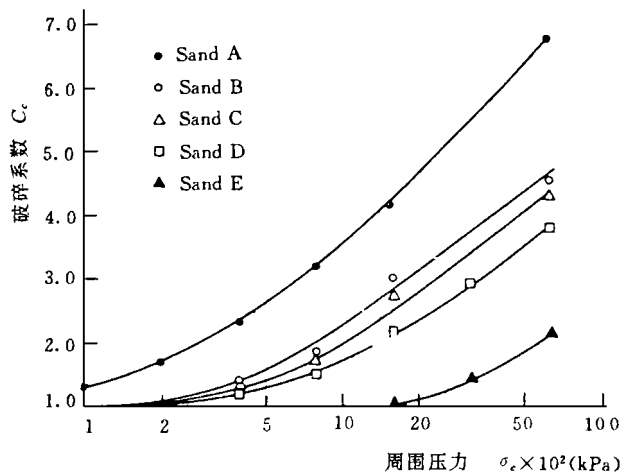


图 1 破碎系数随围压的变化

尤为明显。这主要是由于钙质砂颗粒间较高的矿物摩阻的存在颗粒破碎及其重新排列的结果。

钙质砂的体变特性与石英砂的明显不同。图 3 为 Hull^[3] 的常规三轴排水试验中主应力差和体积应变与轴向应变的关系。在应力-应变关系方面, 石英砂的初如模量要大于钙质砂, 两者的剪切强度却相差不大。应注意的, 该曲线是在试验室等围压条件下得到的, 而现场的实际情况是, 对于密实的石英沙, 因受剪体积膨胀, 将会提高土体周围的应力及其强度, 而对于钙质砂, 由于颗粒破碎及土体收缩的发生, 其现场的平均应力将会下降, 从而导致强度的降低。

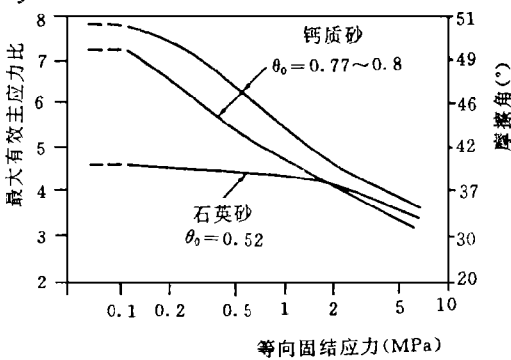


图 2 摩擦特性随应力水平的变化

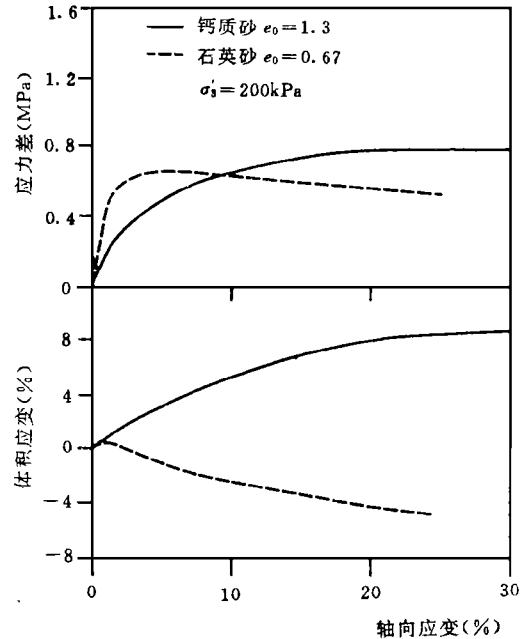


图 3 主应力差及体积应变与轴向应变的关系

有关研究显示, 在相同的孔隙比条件下, 即使土颗粒大量破碎, 钙质砂的摩擦角与其受剪前相比并无明显的差别。这说明, 土颗粒破碎本身不会直接明显地影响钙质砂的摩擦特性。另外, Dutt^[4] 指出, 等体积直接单剪试验所得的摩擦角比常规三轴试验的小 50%, 并认为受大变形的等体积直接单剪试验可提供钙质砂的最小排水摩擦角。分析其原因, 可能是由于剪应力的施加, 土颗粒破碎产生并发展, 土体积有减小的趋势, 因而使等体积试验中的法向应力明显降低所致。值得提到的是, 这些从等体积直接单剪试验中得到的较低的摩擦角, 总是在由导管架平台钢桩的抗拔试验及自升式平台插桩试验所得摩擦角的范围之内^[5], 这表明, 等体积直接单剪试验提供的应力状态与桩基工程中现场土的应力状态更为接近。

钙质土不排水条件下三轴试验的应力路径和孔隙水压力的发展规律明显不同于普通的石英砂。如图 4 所示, 钙质土在较低的围压条件下, 孔隙水压力的变化量随轴向应变的增大由正值过渡到负值, 而当围压增大到某一数值后, 孔隙水压力的变化量将始终为正值, 并维

持相当的水平,这种很高的正孔隙水压力将导致平均有效应力的明显下降。另外,Nambiar^[6]对印度西海岸碳酸钙含量为50%的粉质粘土进行的固结不排水三轴剪切试验结果表明,不排水剪切强度 S_u 与先期固结压力 p_0 之比 S_u/p_0 高于具有相同塑性指数的正常固结非钙质粘性土的相应值,这正是钙质土较高摩擦性能的一种表现形式。

胶结作用影响着钙质土的应力-应变关系,它可提高土的粘聚力,使土具有脆性,刚度和峰值强度增高,并引起应变软化现象。胶结的影响往往只反映在小应变的范围内,对较大应变下土的极限强度影响不大。

3.4 压缩特性

与石英砂相比,钙质砂颗粒具有以下特性:a 颗粒本身的硬度约为石英砂的一半,b 大量角状颗粒的存在,c 颗粒内孔隙的存在。因此,与同类的非钙质土相比,钙质土具有较高的压缩性。钙质土较高的初始孔隙比 e_0 对其压缩特性具有重要影响作用,它直接决定着:某应力增量下的体积应变,先期固结应力以及在达初始压缩曲线段之前某应力下的压缩指数的大小。压缩特性可通过一维固结或三轴等向固结试验测定,但因剪应力的影响,一维固结试验测得的压缩指数往往要比等向三轴固结试验的大。Nauroy^[7]的研究结果显示,钙质土的压缩指数在平均有效应力 $p = 500 \sim 800 \text{ kPa}$ 将达到极限值。因此,他建议将压缩曲线上 $p = 800 \text{ kPa}$ 处在斜率定义为极限压缩指数,并倾向于利用等向固结试验来确定压缩指数。

胶结作用对压缩特性的影响也主要反映在小应变范围内,对土的初始压缩曲线的斜率影响较小,但它使土的先期固结压力有增加的趋势,造成“拟超固结”现象,这种情况下钙质土的先期固结压力取决于初始孔隙比和胶结程度的大小。

3.5 循环荷载下的强度特性

由于钙质土的压缩性较大,循环荷载往往使之产生较大的塑性应变,并使孔隙水压力上升,因而使强度和刚度有较大的衰减,这是海洋工程中打入式钢管桩承载力急剧下降的主要原因之一。

Morrison^[8]对南非近海同一场地两种碳酸钙含量不同的钙质砂 C_1 和 C_2 (C_1 的碳酸钙含量约为80%, C_2 为12~50%)分别进行的等应力和等体积循环直接单剪试验结果显示:在等体积条件下,钙质土 C_1 任一周期最大应变(20%)对应的平均剪应力 τ 与第一周的最大剪应力 τ_{\max} 之比仅在20周时就降低了80~90%, C_2 约为40%,如图5、6所示。而且在最大应变时的平均剪应力与竖向有效应力的应力路径图上,其应力状态大致呈直线关系,这表明不同周次时土的摩擦角基本保持不变。图6还表明上述剪应力比的降低,在等体积条件下要比等应力条件下更为明显。由于等体积直接单剪中土的摩擦角保持不变,等体积试验不能将摩擦特性和正应力这两个因素区分开来,而等应力试验可单独对摩擦特性的影响进行评估,因此,可以认为钙质土在循环荷载作用下强度的衰减主要是因土体剪缩引起的正应力降低而造成的。

4 钙质土与桩的相互作用

对于钙质土中的打入式钢管桩,影响桩土相互作用的主要因素为:碳酸钙含量、胶结程度和土颗粒的易破碎程度。Angemeer^[9]对未胶结或轻度胶结的钙质砂进行的原位单桩垂直

加载试验结果表明: 土的侧阻和端阻与同类非钙质土相比均有明显的下降, 其表现形式为:

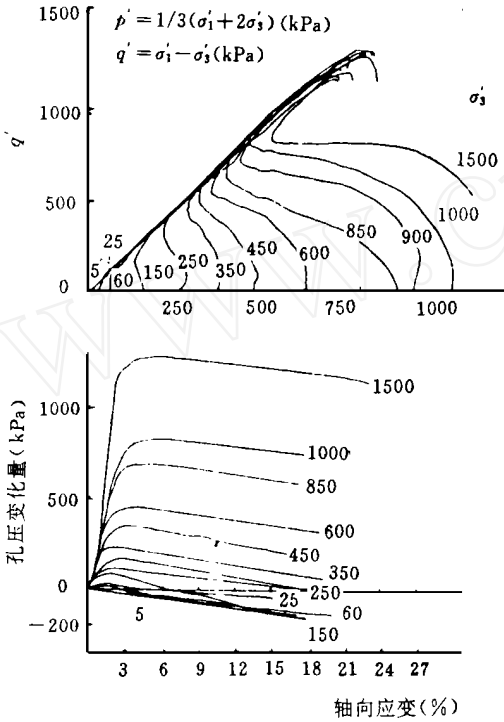


图 4 p' - q' 应力路径及孔隙水压力的变化

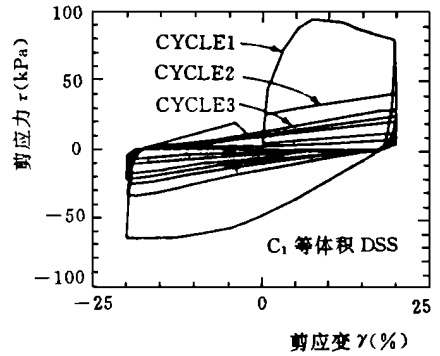


图 5 τ - γ 曲线

(1) 由于沉桩引起的土的水平应力的增量为负值, 以及残余胶结作用产生的起拱现象, 致使土的水平地基反力系数 k 降低。

(2) 土与钢桩间的摩擦角降低。

(3) 承载力和数 N_q 降低。

Nauroy^[7] 根据有限的室内模型试验和现场试验结果认为, 钙质土中打入式钢管桩的侧壁摩擦力和端阻力均是土压缩性的函数, 且极限单位侧壁摩擦力 f_L 与极限压缩指数 C_{PL} 在双对数坐标上呈递减的直线关系, 如图 7 所示。

Dowlin^[10] 对现场的实际沉桩分析结果明显, 沉桩过程中土的平均侧壁摩擦力将产生显著的衰减, 如图 8 所示, 由初始的 30~40kPa, 100 击后仅约为 10kPa。因此当桩基平台遇有较厚的钙质土且无该海区的工程经验

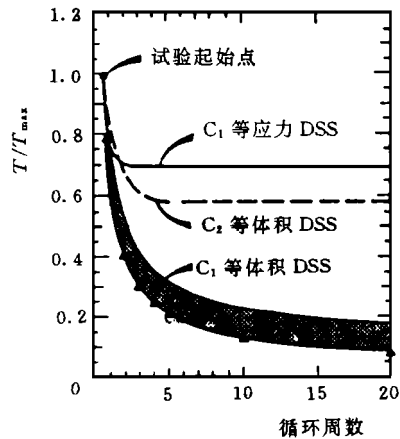


图 6 剪应力衰减情况比较

时, 应尽量避免使用普通的打入式钢桩。

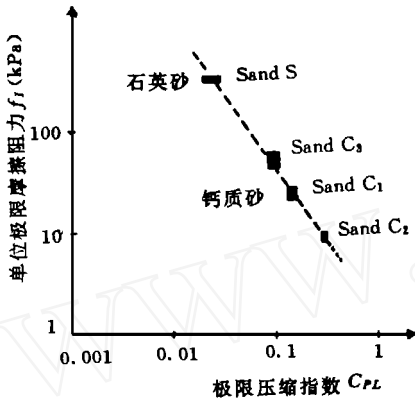


图 7 f_L 和 C_{PL} 的关系

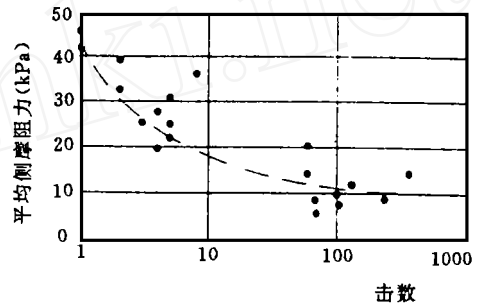


图 8 平均侧摩擦力与击数的关系

水平荷载作用下桩土的相互作用具有以下特征:

(1) 因粒间孔隙被胶结晶体充填, 故胶结钙质土的反力与位移关系, $P-Y$ 曲线初始段呈线性;

(2) 胶结晶体的破坏是相继发生的;

(3) 材料的粘性破坏后, 土颗粒破碎及体变增大, $P-Y$ 曲线呈更大的非线性;

(4) 胶结钙质土的 $P-Y$ 曲线具有较软化现象。

从以上现象可以看出: 胶结物质本身的性质和胶结程度决定初期的桩土相互作用, 而颗粒本身的特性决定其后长期的相互作用。

5 钙质土中的桩基设计

这里主要包括两方面的内容: 土工调查和桩基设计。

5.1 土工调查

迄今为止, 还没有一套完整、成熟的原位试验与试验室分析相结合的联合测试手段可用来准确、合理地测定桩基设计所需的钙质土的有关土性参数, 就是区域性的也很少。在原位试验方面, Murrff^[11] 建议用静力触探试验的圆锥锥头阻力 q_c 来描述钙质土的软硬程度。值得注意的是, 由于圆锥的锥头阻力 q_c 和侧壁摩阻力 f_s 均受到土压缩性的影响, 因此, 钙质土的摩阻比 f_s/q_c 明显高于普通非钙质土的摩阻比。

目前对于胶结程度的划分尚无统一的认识。工程应用上通常是根据土中碳酸钙的百分含量的多少对钙质土进行描述划分的, 碳酸钙含量在 12~ 50% 之间为中等程度的钙质土, 当此含量大于 50% 后, 对土性的影响则较大。表 1 介绍了室内试验分析的试验项目和试验目的, 通过这些试验可对钙质土的有关性质有较全面的了解。

表 1

试 验 类 型	试 验 目 的
1. 碳酸钙含量、比重、含水量、颗分及液塑限	分类指标
2. X 光分析	矿物成份分析
3. 显微镜分析	土的结构
4. 最大及最小孔隙比	颗粒的棱角角度
5. 粒间孔隙率	破碎性及压缩性
6. 固结不排水三轴试验	粘土的强度特性
7. 等向或一维固结试验	压缩指数
8. 等体积静、动单剪试验	摩擦及动衰减特性

5.2 桩基设计

与现有的 API(RPZA) 规范中推荐的方法相比, 钙质土中海洋工程打入式钢管桩的设计理论和设计方法没有新的发展, 只是对侧压力系数 k 、土与桩壁间的摩擦角 δ 极限单位侧壁摩阻力 f_{\max} 及极限单位端部阻力 q_{\max} 等有关参数加以适当修正。对钙质粘性土, 一般可不考虑打入式钢管桩竖向承载力的降低, 除非土处于严重的胶结状态。对于钙质砂, Aggarwal^[12] 根据自己的工程经验和现场试验结果, 依胶结程度和碳酸钙含量的大小, 提出了 k 、 δ 和极限单位阻力的建议值。另外, Cox 也曾建议根据土的压缩指数来确定极限单位阻力值的大小。Fugro-M ccelland 公司目前采用的方法是: 对中等程度的钙质砂, 一般只考虑对桩的端部承载力的影响, 而不计桩身侧壁摩阻的降低; 对高碳酸钙含量的钙质砂, 须同时考虑端部阻力和侧阻的降低, 此时的参数 f_{\max} 、 q_{\max} 和 N_q 应根据土强度的大小, 在 API 规范建议值的基础上视具体情况降低 1~2 档次。

迄今为止, 关于水平荷载作用下钙质土中 $P-Y$ 曲线构筑方法的研究和报导还很少。毫无疑问, 钙质土的胶结作用、颗粒破碎及相应的体积剪缩特性将对土强度的软化及位移的发展带来不利的影响, 尤其是这种土存在于地表面附近时可能会造成更大的危害。

应该说明的是: 已有的各种修正方法均是基于各自的土质情况和工程经验, 尚未形成成熟统一的标准。因此, 应用时需结合实际的土质条件, 依靠工程经验和自己的判断去合理地选用各有关设计参数。另外, 当遇有较厚的、承载能力极弱的钙质土时, 应避免使用普通形式的打入钢桩, 而采用扩底灌注桩, 或以此作为特殊情况下的补救措施。

6 结束语

钙质土具有特殊的生物成因和颗粒组成, 其角状颗粒含量高, 初始孔隙比大, 具有较高的压缩性。在较低的应力范围内, 钙质土具有明显的颗粒破碎现象, 颗粒破碎使钙质土的体积收缩应变增大, 较早地进入剪切收缩阶段, 导致土体剪胀率和相应抗剪强度发挥的降低, 从而使其峰值强度随应力的增加而降低, 摩尔强度包线呈弯曲形状。在波浪荷载和可能出现的地震荷载及海工结构物建造施工过程中的周期荷载作用下, 因土体剪缩引起的正应力降低将导致其动强度的显著衰减。鉴于上述原因, 当用海洋工程常规的设计计算方法进行分析

时,将会对钙质土中桩基的承载能力和沉降分别给予过高和过低的评估。

目前,对钙质土还缺少一套成熟、合理的土工测试手段,而钙质土中海洋工程桩基设计也多是依经验在常规方法的基础上对设计参数加以适当修正。因此,作者认为以下几个问题尚等进一步研究解决:

钙质土分类标准的确定;

颗粒破碎及胶结作用及其影响;

不同应力条件对钙质土性质的影响;

土的极限单位阻力值的确定;

钙质土中土反力与水平位移关系 $P-Y$ 曲线、单位侧摩阻力 T 和单位端部阻力 Q 与竖向位移 Z 的关系 $T-Z$ 和 $Q-Z$ 曲线的构筑方法。

参考文献

- 1 Price G. P. , Friction of calcareous sediments for North Rankin 'A' , Proc Int Conf on Calcareous Sediments, Vol 1, Perth, Australia, 1988
- 2 Datta, M. , Gulhati, S. K. & Rao, G. V. , Crushing of calcaroues sands during shear OTC3525, 1979
- 3 Hull T. S. et al, The static behaviour of various calcareous sediments, Proc Int conf on Calcareous Sediments, Vol 1, Perth, Australia, 1988
- 4 Dutt, R. N. , Friction of characteristics of calcaroues sands from offshore Florida, OTC5149, 1986
- 5 Dutt, R. N. , Bearing capacity Jack-up footings in carbonate granular sediments, Proc Int Conf on Calcareous Sediments, Vol 1 Perth, Australia, 1988
- 6 Nambiar M. R. M. , et al, The nature and engineering behaviour of fine-grained carbonate soil from off the west coast of India, Marine Geotechnology, Vol 6, No. 2, 1985
- 7 Nauroy J. F. , et al, Model test of piles in calcareous sands, Proc Conf on Geotechnical Practice in Offshore Engineering, Austin, 1983
- 8 Morrison, M. J. , M cintyre, P. D. & Sauls, D. P. Laboratory test results for carbonate soils from offshore Africa Proc Int Conf on Calcareous Sediments, Vol 1, Perth, Australia, 1988
- 9 Angemeer J. , et al, Techniques and results of offshore pile load testing in calcareous soils, OTC1894, 1973
- 10 Dolw in J. , et al, Evaluation of driven pile capacities methods and results, Proc Int, Conf on Calcareous Sediments, Vol 2 Perth, Australia, 1988
- 11 Murff J. D. , Pile capacity in calcareous sands: state of the art. Journal of Geotechnical Engineering, Vol 113, No. 5, 1987.
- 12 Aggarwal S. L. , Engineering properties of calcareous soils affecting the design of deep penetration piles for offshore structure, Proc , 9th OTC, Vol 3, 1979

RESEARCH ON THE BEHAVIOR OF CALCAREOUS SOILS IN OFFSHORE PILE FOUNDATIONS

Wu Jingping Lou Zhigang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract This paper briefly describes the deposition processes and formation of calcareous soils to provide basis for understanding their behavior. Emphasis is placed on the presentation of nature and mechanical properties of the soils for engineering purposes. Then response of piles in calcareous soils is discussed, and geotechnical investigation and parameter selection methods that have proposed for offshore pile design in the soils are presented.

Key Words calcareous soils, mechanical behaviour, offshore platform, pile foundations, soil investigation