一种新型基础——桶形基础

施晓春　徐日庆　龚晓南
（浙江大学土木工程学系，杭州，310027）
陈国祥　袁中立
（中国石油天然气总公司工程技术研究院，天津，300451）

提　要　介绍了一种目前应用于近海工程建筑物的新型基础——桶形基础以及它的由来和发展，阐述了桶形基础在土中的工作原理，总结了目前桶形基础在试验理论研究现状，同时还介绍了桶形基础的施工方法，指出了桶形基础的应用前景。

一　概　述

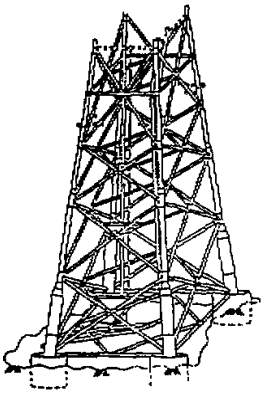


图 1　Europipe 16/11-E 平台的导管架

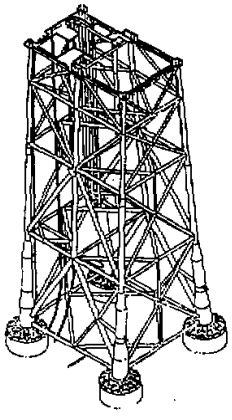


图 2　Sleipner Vest T 天然气处理平台的导管架

1994 年 7 月，在北海水深为 70m 的区域，欧洲管网(Europipe)16/11-E 大型导管架平台的建成，并投入使用，标志着一种导管架工程的新技术——桶形基础的产生。该新型基础主要是由挪威土工研究所[Norwegian Geotechnical Institute (NGI)]研究成功的。该导管架

平台见图 1。

由于欧洲管网 16/11-E 大型导管架平台的基础外形象一只倒扣在土中的桶，因此称之为桶形基础。其实它是一种带裙的圆板基础，故可称之为带裙的片筏基础或裙桩基础，近来也有人称之为板裙基础。

桶形基础具有片筏基础和桩基础的共同特点。自 70 年代早期以来，在北海频繁使用带裙的近海结构基础。这些近海结构基础的建造为技术工作者积累了大量的工程经验，加速了桶形基础构想的诞生。在 1989 年年底，挪威国家石油公司的首席基础工程师梯捷尔塔(Tor Inge Tjelta)和首席结构工程师拔尔海姆(Morten Barheim)提出了发展钢导管架的桶形基础的新构想。1992 年斯诺拉(Snorre)油田的张力腿平台[the Tension Leg Platform (TLP)]混凝土基础和海底卫星操作平台[the Subsea Satellite Production System (SPS)]的成功安装，使人们对未来桶形基础的施工方法有了更好的理解和认识。终于在 1994 年 7 月将桶形基础首次应用于欧洲管网 16/11-E 平台的建设中，接着又于 1996 年春天在斯莱纳佛斯特 SLT (Sleipner Vest T)天然气处理平台导管架(图 2)的施工中再次应用桶形基础作为其基础结构。

对于导管架平台而言，桶形基础与传统的桩基础相比，有以下几个优点：

(1)节省施工安装的费用。由于采用桶形基础，可以节省钢的用量，同时，施工过程中，采用负压下沉，可加快施工速度，节省施工时间，从而节省导管架平台的施工安装费用。

(2)便于运输和安装，特别是在浅海区。由于浅海区的水深不足，大型施工机具无法通过运输船运到施工地点，而桶形基础可以在别处安装，对桶型基础充气，利用其浮力，由驳船将其拖至施工地点，用浮吊施工完成。

(3)能够重复使用。在一处油井的油被开采完后，可以对桶形基础注压，将桶形基础从土中顶起，由驳船拖到下一开采区，下沉后继续使用。

(4)由于桶形基础的插入深度较浅，因此在设计施工桶形基础前，只须对浅部土体进行勘察研究。

(5)桶形基础的施工时间短，基础稳定性实现较快，便于在海洋上恶劣气候的间隙施工。

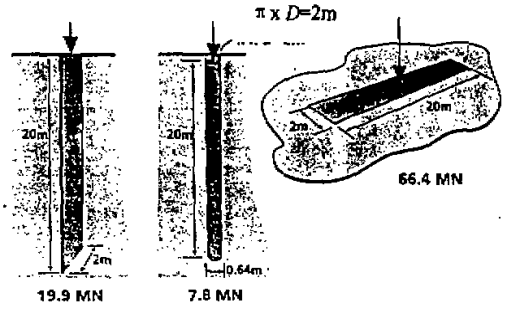


图 3 砂性土中的板基础

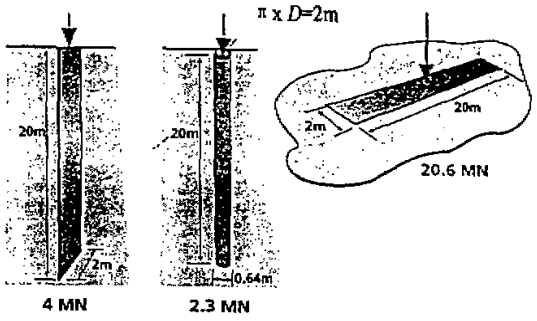


图 4 粘性土中的板基础

二 工作原理

如果将一块长为 20m、宽为 2m、厚为 25mm 的钢板，分别以(1)垂直地插入土中；(2)做成圆柱状插入土中；(3)平放在土上；(图 3, 图 4)这三种方式对粘性土或砂性土作用。假设粘性土的不排水抗剪强度 S_u 为 100kPa，砂性土的内摩擦角 ϕ 为 44°。则此钢板在理论上所能承载的垂直荷载：对粘性土，分别为 4MN、2.3MN 和 20.6MN；对砂性土，分别为 19.9MN、7.8MN 和 66.4MN。显然，将板平放在土上来承受竖向荷载是最佳的选择。但此种方式承受水平力的能力很差，无法作为结构物的基础。因此，为了既有很高的竖向承载力，又有较大的水平承载力，于是就出现了倒扣入土中的桶形基础。

在桶形基础沉入土中后，就与土体一起抵抗各种环境外力。首先桶底保持着与土有较大的接触面，使桶形基础能够承受较大的竖向荷载。桶的裙体部分可以将环境施加在桶体上的水平滑动力传递到底下更好的土层中去，从而能够承受较大的水平力作用。同时，由于桶体下沉以后形成的负压(这一现象在 1980 年瓦尔哈(Valhall)油田导管架的安装过程和 1993 年格尔范克斯 C 重力式平台的地质勘测中均被发现)[3]还可以抵抗海水的上浮力作用。

三 试验理论研究

到目前为止，已有两个导管架，采用了桶型基础，并分别于 1994 年 7 月和 1996 年春天建设成功。在这两个桶型基础导管架的设计和施工之前，作了大量试验理论研究工作。

1992 年 12 月，在施工地 16/11-E 处做了现场试验，其试验内容主要为单桶模型原位下沉试验、拉拔试验和循环荷载试验。在模型下沉过程中采用先自重后负压的技术。通过这些试验所得结果见图 5。

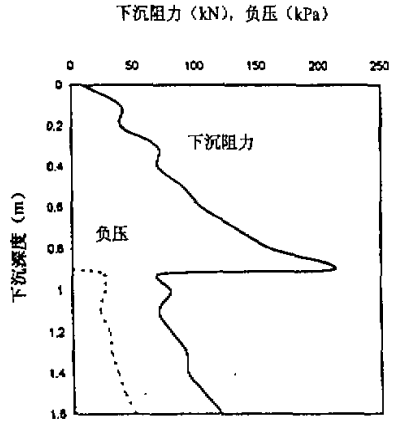


图 5 现场沉入试验[1]

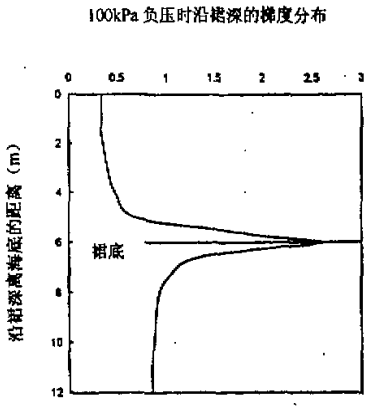


图 6 沿裙壁的水力梯度分布图[1]

由图 5 可见，采用负压可急剧减小其下沉阻力，因此，采用负压下沉为桶形基础的沉放就位提供了有利的条件，并大大减少了施工难度。这一现象是由于桶内负压作用下，产生上下水头差，引起孔隙水自下而上的运动，形成渗流和水力梯度，使土体受到向上的渗

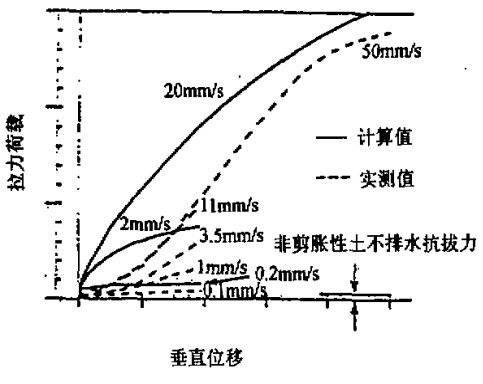


图 7 加载速率对抗拔力的影响[1]

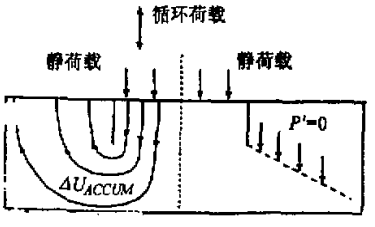


图 8 不排水循环荷载作用下的破坏机理[1]

透力。在此作用下，导致砂层变松，有效应力和抗剪强度降低，从而使桶体所受的阻力减小。这可以从欧洲管网 16/11-E 平台桶型基础在负压下沉时沿桶裙的渗流水力梯度分布图(图 6)上得到印证。最大的水力梯度产生于桶裙底缘，这是导致桶体所受下沉阻力急剧下降的原因。

挪威土工研究所(NGI)用有限元程序 ABAQUS 对桶体受静力作用时的情况进行了分析。计算所用的参数和模型详见文献[1]。图 7 是有限元计算结果与试验结果的比较。图 7

表明当拉拔力的载荷速率增加时，其抗拉承载力明显增高，只有在作用速率极低的条件下，其承载力和无剪胀性土的相近。这是由于拉拔力的载荷速率快，土体中产生的超孔隙水压力无法消散，桶内的土体受孔隙水压力的作用，体积产生膨胀，从而导致其抗拔力的增大。相反，如果加荷缓慢，超孔隙水压力能够及时得到消散，则其抗拔力较低。因此，土体中产生的超孔隙水压力是否有时间消散是基础抗拉承载力大小的关键因素。另一方面，据作者认为，在桶体的上拔过程中，桶底和土之间出现的孔隙来不及被水充满，从而出现了负压，也可能导致抗拉承载力显著增加。

挪威土工研究所在带裙的重力式基础模型试验的基础上，针对带裙重力式基础提出了一种计算循环荷载作用下基础承载力的方法[4]，随后将之推广用于计算带裙基础在循环荷载作用下基础的承载力和抗拔力。

根据桶型基础模型在循环荷载作用下的破坏模式(图 8)，提出了一种基础破坏机理，这种机理认为快速的周期性作用引起基础下的土体孔隙水压力的积累，在桶体外侧产生向上的渗流梯度，最终导致基础下沉而破坏。

对于孔隙水压力积累的机理，NGI 提出了三种模式。最重要的一种机理是在动三轴试验中观察到的传统的孔隙水压力积累机理。第二种机理认为循环荷载引起的应力变化导致土中的总应力分布的变化，此时的超孔隙水压力由两部分组成，一部分由循环荷载作用下砂土压密产生的，另一部分是由平均应力对土的作用引起的。这是一种典型的弹塑性材料在循环荷载作用下的结果。这种机理虽然过去经常被忽视，但在实验中偶尔也能见到[2]。第三种机理是有关裙顶竖向力对基板的传递作用。这种机理认为只有在其他机理作用下孔隙水压力积累到一定程度，产生对裙顶阻力破坏之后才起作用。因此，这是一种次效应。在对这些孔隙水压力积累机理描述的基础上，提出了一种在循环荷载作用下承载力的简化计算方法[1]。

四　施工方法

桶形基础的施工方法主要有以下几个步骤：

(1)将导管架(带桶型基础)从驳船上放入水中，下沉至与海底土体接触。此过程中应防止出现桶体在接触地面时的上下跳动和减小与地面的刮擦作用。

(2)在导管架和桶体的自重作用下自由下沉。

(3)在桶型基础上加重物，并在此重物的作用下下沉，此时应严格控制其下沉速度和下沉深度，以使桶体密封。注意：如果桶体在自重的作用下能够使其密封则此步骤可省。

(4)抽出桶体内的水，在桶体内形成负压，并在负压下下沉至设计深度，此时要严格控制桶内压力和桶的下沉速度，以防桶内土体破坏而隆起。

五 结束语

在我国的沿海地区分布着大量的软粘土，这些软粘土具有高含水量、低渗透性、高压缩性、抗剪强度低等特性，并且分布层很厚。在这些地区修建工程建筑物，大多要对这些土层进行处理或采用桩基础，这时的桩基础必须穿透整个土层，从而工程量很大，投资巨大，施工时间长，桶形基础所具有的诸多优点为在这些地区施工减少工程量、节省投资、缩短施工时间提供了一条新路。因此，桶形基础在粘性土地区特别是滩海淤泥和淤泥质粘土地区的工程应用有着广阔的前景。

在理论上，由于在北海地区应用桶形基础的导管架平台多处于中密砂和致密砂的分布地区，因此挪威土工研究所所进行的试验和理论研究多是针对砂性土的，而对桶形基础在粘性土中的特性研究几乎是空白，桶形基础在这方面的研究有待于进一步的深入，从而为桶形基础在粘性土区的应用提供理论依据。

参考文献

[1] Bye, A., Rognlien, B. Erbrich, C. and Tjelta, T. I.: "Geotechnical Design of Bucket Foundations"; OTC 7793, Houston May 1995.

[2] Bouckovalas, G., Marr, W. A., and Christian, J. T., "Analysing Permanent Drift Due to Cyclic loads", Journal Geotech Eng., ASCE, Vol 112, No. 6, 1986.

[3] Tjelta Tor-Inge, statoil A/S: "Geotechnical Aspects of Bucket Foundations Replacing piles for the Europipe 16/11-E Jacket", OTC 7379, Houston May 1995.

[4] Andersen, Knut H. and Lauritzsen, Rolf (1988). "Bearing Capacity For Foundations with Cyclicloads", J. Geotech. Engrg., ASCE, 114(5).