

插桩自升式平台桩腿结构分析

任贵永 李淑琴

(天津大学海洋与船舶工程系)

本文对插桩自升式钻井平台在站立状态正常钻井和风暴自存工况下的桩腿结构,用我国设计建造的自升式平台数据,选取底部不同支承型式的计算模型进行结构静力分析和共振可能性分析。

一、插桩自升式平台结构特点

插桩自升式平台具有若干个可以升降并可直接插入海底的桩腿,以便移位和插入海底进行钻井作业。海上使用过程中有以下四种状态:拖航状态,升桩和降桩状态,插桩和拔桩状态,着底状态。本文分析着底状态,平台站立在海上进行钻井作业或风暴自存。这时桩腿承受整个平台的重力荷载和环境荷载以及作业荷载;风暴自存时,还要承受最大的设计环境荷载。

插桩自升式平台桩腿在海底有一定插桩深度,由于工作海域和水深情况都是可变的,所以插桩深度也不是固定的。因此,在桩腿结构分析中涉及到桩和土相互作用的问题以及桩腿着底状态时底部边界条件和计算模型简化问题。本文重点分析不同插桩深度对桩腿应力和平台自振特性的影响。

二、计算模型和基本参数

本文用我国设计建造的自升式平台有关数据进行分析。为便于分析对比,根据需要扩展了有关数据。

平台工作水深为40米,桩腿设计插入深度为12米,而实际插入深度最大在25米以上,现取26米;桩腿设计长度为78米,当插入深度为26米时,为保持40米工作水深,桩应加长到92米;桩腿直径3米,4根;船体长57.6米,宽34米,型深5.5米;桩腿横向间距为27.4米,纵向间距为34.8米;设计风速51.5米/秒,设计波高11米,波浪周期11.6秒。不同海域土质不同,渤海湾表层有1到3米浮泥,下面为淤泥层,各河口附近,淤泥层厚度在16米以上,渤海中部和东部淤泥较浅,下面为细沙层或硬土层,具有较大的承载能力。

自升式平台主要由船体(包括固定在船体上的固桩架)和桩腿两大部分组成,通过固桩装置将这两部分牢固地联结在一起,形成整体空间结构。本文研究着底状态桩腿结构,可将船体部分大大简化。船体上所受的力是通过联结四个桩孔、互相垂直的四个主桁传递给桩

本文1983年9月2日收到。

腿,再由桩腿将全部力传递给海底,形成了船体—桩腿—海底的空间刚架力学模型,图1为底部铰接计算模型,用三维梁元计算。采用SAP—5有限元静动结构分析程序在FACOM—160机上进行静力及自振特性分析。

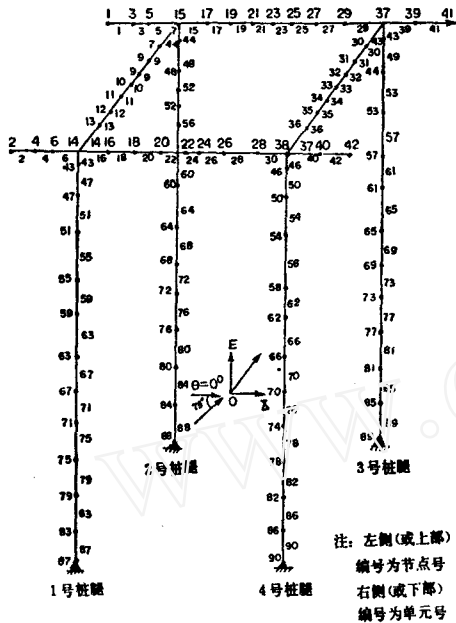


图1 底部铰接计算模型

本文按不同插桩深度分别采用铰支承和刚性支承计算模型,单元由上而下编号,泥面以上编号相同。随插桩深度增加而增加单元或改变支承形式。自升式平台整体动力计算也采用该模型。

三、桩腿应力分析

桩腿为封闭圆筒形,外板厚度从上而下分别为50、44、36、30和38毫米。沿桩长设置四条厚为40毫米、宽为760毫米的补强垫板作为桩孔的加强。

本文以桩腿插入海底6米、12米、20米和28米四种情况,分别按海底以下3米铰接、12米铰接、12米刚接、18米刚接和25米刚接5个计算模型计算桩腿的内力和应力,得出分布规律。

桩腿属压弯构件,临界屈曲应力 σ_{cr} ,计算和稳定性校核标准,均按我国海上移动式钻井船入级与建造规范^[1]要求进行。临界屈曲应力按下式计算:

$$\text{当 } \lambda \geq \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_c}} \text{ 时,}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2},$$

$$\text{当 } \lambda < \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_c}} \text{ 时,}$$

船体简化为互相垂直的四个箱型梁,其轴线选在船体型深二分之一处,按构造划分单元。桩腿与船体假定为铰接。

为了简化计算,我国海上移动式钻井船入级与建造规范^[1]和国外移动式平台规范^[2]都提出桩腿底端简化的支承形式,即对插桩自升式桩腿应考虑以海底泥面以下3米作为铰接支承进行着底状态的强度计算。对于插桩深度不大的情况,这样简化是可以的。而当插桩深度大于4倍桩腿直径时按上述简化计算,会有较大误差,上部应力偏大,下部应力偏小。为避免用更复杂的弹性地基分析,故采用视固定深度方法将桩腿底端简化刚接。实际上桩端是介于铰接和刚接之间的弹性支承。视固定深度 h 规定为:对于硬粘土, $h = 3.5 - 4.5D$ (D 为桩径);对于很软的淤泥, $h = 7 - 8.5D$;对于一般情况时, $h = 6D$ ^[3]。

$$\sigma_{cr} = \sigma_s \left(1 - \frac{\sigma_s}{4\pi^2 E} \lambda^2 \right);$$

式中 λ 为长细比; σ_s 为屈服极限,板厚大于32毫米时, $\sigma_s = 3500 \text{ kg/cm}^2$,板厚小于32毫米时, $\sigma_s = 4000 \text{ kg/cm}^2$; E 为钢材弹性模量。

桩腿整体稳定按下式计算;

$$\frac{\sigma_a}{[\sigma_a]} + \frac{\sigma_b}{[\sigma_b]} \leq 1$$

式中 σ_a 为轴向压应力; σ_b 为弯曲压应力; $[\sigma_a]$ 为容许的轴向压应力; $[\sigma_b]$ 为容许的弯曲压应力。

在桩腿应力分析中,应选取对桩腿产生最大应力的风、浪入射方向。经波浪搜索计算,风、浪与平台中轴线呈 75° 入射方向对桩腿最不利。同时还计算了风暴自存和正常钻井两种工况在 90° 时的入射方向。从应力计算结果可知,桩腿受轴向压应力和弯曲应力,以弯曲应力为主。由于桩腿入土深度不同,各种计算模型得出的弯矩值相差很大。表1列出了受力最大的2号桩腿各节点的弯矩值。图2为各计算模型弯矩值的比较曲线。

表 1 2 号 桩 腿 总 弯 矩 (单位 $\text{kg} \cdot \text{cm} \times 10^6$)

弯矩值 节点号	模 型	3 米铰接	12米铰接	12米刚接	18米刚接	25米刚接
15		745.5	876.7	461.1	496.5	539.3
44		723.4	859.3	443.6	473.0	522.6
48		682.1	814.8	388.5	429.3	474.6
52		511.3	758.5	332.5	366.7	418.0
56		532.4	655.9	223.7	264.8	313.4
60		456.8	592.1	153.7	196.2	246.6
64		352.7	490.1	48.5	91.2	143.7
68		279.8	398.0	92.9	56.0	51.3
72		182.5	314.8	161.0	126.6	83.3
76		98.9	207.6	253.5	214.8	169.6
80		0	106.7	347.4	306.5	259.7
84			0	444.4	400.3	351.2
88					496.9	
88'						555.9

从表1和图2、3可以看出:桩腿随入土深度增加和支承型式的改变,其各截面的弯矩值发生较大的变化,当桩底端为铰接时,桩腿与船体连接处,即桩腿上部弯矩 $M_{上}$ 为最大,桩腿底端,即桩腿下部弯矩 $M_{下}$ 为零。而当桩腿底端为刚接时,桩腿的 $M_{上}$ 和 $M_{下}$ 均随视固定深度增加而增大,而且桩腿底部弯矩 $M_{下}$ 与上部弯矩 $M_{上}$ 之比也随着增大,但桩腿在海底泥面处的弯矩却减小(表2)。

表2

计 算 模 型	视固定 深度 M	桩腿 $M_{上}$ $\text{kg} \cdot \text{cm} \times 10^6$	桩腿 $M_{下}$ $\text{kg} \cdot \text{cm} \times 10^6$	桩腿 $M_{泥面}$ $\text{kg} \cdot \text{cm} \times 10^6$	$\frac{M_{下}}{M_{上}}$
3米铰接		745.5	0		
12米铰接		876.7	0	207.6	
12米刚接	12	461.1	444.4	253.5	0.964
18米刚接	18	496.5	496.9	214.8	1.001
25米刚接	25	539.3	555.9	169.6	1.031

从表2可以看出, $M_{下}$ 与 $M_{上}$ 之比, 当视固定深度为18米时, 其比值近似为1, 当视固定深度减小为12米时, 其比值减少3.6%, 而当视固定深度增加到25米时, 其比值增大3.1%。可见视固定深度由12米增加到25米, $M_{下}/M_{上}$ 值变化不大。

从图3还可看出, 各计算模型桩腿弯矩值比较曲线的趋势是一致的, 基本上相互平行。如果只按海底泥面以下3米铰接进行桩腿强度计算, 桩腿根部弯矩为零; 而考虑到视固定深

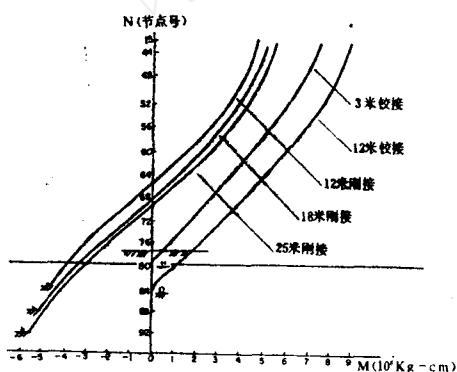
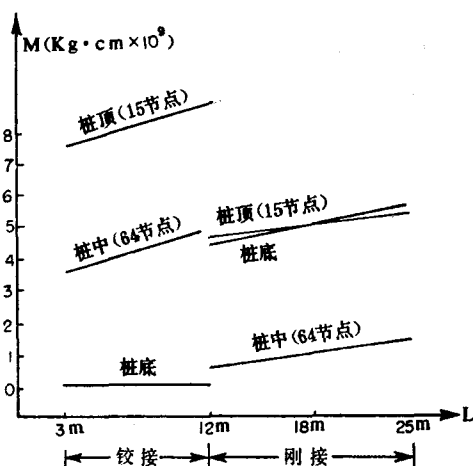


图2 底部不同支承桩腿弯矩图

图3→



度, 桩腿根部仍承受较大的弯矩, 当视固定深度为18米时, 桩腿上部和下部弯矩基本相等, 所以对桩腿底部强度应给予足够重视。从拖航工况的桩腿强度分析来看, 也要求桩腿根部(即桩腿下部)有足够的强度。根据插桩自升式平台的特点, 从设计的安全考虑, 应采用不利的合理组合。建议该类平台可根据3米铰接状态桩腿上部的最大弯矩及18米刚接时桩腿下部的最大弯矩来综合考虑设计桩腿的外壳板厚度, 兼顾桩腿上部、中部和下部的强度要求。

四、桩腿振动分析

自升式钻井平台在风、浪、流等动力荷载作用下会产生振动。由于平台质量主要集中在船体上, 所以平台整体振动的前三个模态频率主要反映了桩腿振动的情况。

用图 1 计算模型算得自升式平台的自振周期,表 3 列出了不同支承条件下前三个模态的自振周期。

表3

模 态 数	3 米铰接	12米铰接	12米刚接	18米刚接	21米刚接
第一模态周期 (秒)	5.967	7.588	3.797	4.322	4.599
第二模态周期 (秒)	5.882	7.401	3.766	4.289	4.566
第三模态周期 (秒)	5.342	6.812	2.972	3.314	3.488

从表 3 可以看出,后三种情况随视固定深度增加自振周期增大,同样前二种情况也随铰接深度的增加而增大。对于同样入土深度如12米,不同支承条件,自振周期变化很大,12米铰接的基频对应的自振周期为12米刚接自振周期的 2 倍。从平台与波浪共振可能性分析来看,12米铰接情况是不利的。但这是假设的极端情况,土对桩腿总有一定的固定作用。

表 3 所列的数值是正常钻井工况的自振周期,风暴自存工况基频的自振周期和正常钻井工况的数值基本相同。第一模态平台以沿宽度方向摆动为主,第二模态平台以沿长度方向摆动为主,第三模态以沿铅直方向转动为主,这三个模态均以桩腿振动为主,因为振动中的位移总是先以整体结构中较薄弱的方向开始,即在整体刚度小的方向上产生第一主振型,由于基频的频率很低,对应的周期很大,可以作为分析平台能否与波浪发生共振以及是否对平台进行动力分析的基本依据。表 3 列出 3 米铰接和12米铰接模型平台基频对应的周期分别为 5.967秒和7.588秒,平台自振周期位于 5 秒至20秒范围内应进行动力响应分析^[1]。

我国《海上移动式钻井船入级与建造规范》^[1]和《海洋建筑物动力学》^[3]都提出,应研究某一重现期的最大波高 H_{max} 对应的周期 T 对平台产生的最大应力,其周期范围由下式确定:

$$\sqrt{6.5H_{max}} \leq T < 20 \text{秒}$$

从式中可以看出,应研究的最小波浪周期 T_{min} 为:

$$T_{min} = \sqrt{6.5H_{max}}$$

当平台自振周期与波浪周期接近时将发生共振,如将 3 米铰接和12米铰接模型平台的自振周期代入上式,可得到平台与最小波浪周期发生共振时最大波高分别为5.5米和8.9米。可见铰接模型可能与较大波高发生共振。

五、结 论

通过上述计算、分析,可得以下结论:

1.对插桩自升式平台桩腿强度分析时,不应仅按海底以下 3 米铰接支承计算,而应根据不同插桩深度和土质情况分别按不同支承情况计算,分析桩腿上部、中部和底部最不利的受

1) Design of offshore steel structures by Torgeir Moan, 1980.

力情况, 建议根据 3 米铰接状态桩腿上部的最大弯矩及 18 米刚接时桩腿下部的最大弯矩综合考虑。桩腿底部截面尺寸应给予足够重视。

2. 插桩自升式平台应防止插入海底过深, 否则不便于插桩和拔桩作业。可在底部设置桩靴, 使桩腿入土深度减小, 对于这种情况可将桩腿底部作为铰支撑进行结构分析。

3. 插桩自升式平台, 在渤海和黄海作业, 应进行动力分析, 有可能在较大波浪 (约 5 ~ 8 米波高范围) 时发生共振。

4. 插桩自升式平台在风、浪、流作用下, 随着在海上站立时间的增长, 特别是经过大的风浪之后, 土对桩腿的作用减弱, 即固结度减弱, 刚度减小, 自振周期要增大, 故从动力分析角度看, 土对桩腿的固结度不宜估计过大。

参 考 文 献

- (1) 中华人民共和国船舶检验局, 海上移动式钻井船入级与建造规范, 1982 年, 6·6·3 和 3·3·3。
- (2) The American Bureau of Shipping, *Rules for Building and Classing Offshore Mobile Drilling Units*, 1980, 4·5·1。
- (3) 哈勒姆等著, 海洋建筑物动力学, 海洋出版社, p99—100, 123。

AN ANALYSIS OF THE LEG STRUCTURE OF THE WITHOUT-MAT JACK-UP PLATFORM

REN GUIYONG LI SHUQIN

(Tianjin University)

Abstract

This paper presents the analysis of the leg structure of the without-mat jack-up platform in the elevated position under normal drilling conditions and severe storm conditions. It mainly analyzes the static stress of the leg, the natural vibration behavior of the platform and the probability of resonating with waves.

This paper adopts the data of the platform which was both designed and constructed in our country. It adopts a lot of mechanical models according to different soil conditions and different depths of the leg penetrating in the sea bed. The results of analysis have been tabulated and plotted, and a comprehensive analysis has been carried out. The results obtained have provided an important basis for the design and operation of this type of jack-up drilling platform.