

浅海固定式平台 设计与研究

何生厚 洪学福 编著



中国石化出版社

浅海固定式平台 设计与研究

何生厚 洪学福 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书作者在对浅海固定式采油平台设计研究的基础上,参考了较多的文献后编著而成,主要论述了浅海固定式采油平台设计所用的设计计算方法。全书共分为十章,分别介绍了固定式采油平台的国内外发展现状,计算模型的建立方法,外荷载的计算,平台结构计算,平台的动力响应分析,管节点应力分析方法和构件稳定性分析,最后介绍了胜利海上油田勘探开发的现状和平台的结构形式等。

本书可供高等院校海洋、石油工程专业学生、从事海洋石油平台设计的工作人员使用,也可作为建筑结构类专业学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

浅海固定式平台设计与研究/何生厚,洪学福编著.
—北京:中国石化出版社,2003
ISBN 7-80164-460-3

I. 浅… II. ①何…②洪… III. 浅海-固定式平台:
采油平台-设计 IV. TE951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 090827 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

三河市三佳印刷装订有限公司印刷

新华书店北京发行所经销

*

850×1168 毫米 32 开本 6.125 印张 169 千字
2003 年 11 月第 1 版 2003 年 11 月第 1 次印刷
定价:22.00 元

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 目的和意义	(1)
§ 1-2 国内外发展现状	(2)
§ 1-3 研究内容	(5)
第二章 力学模型的建立	(7)
§ 2-1 导管架结构受力分析模型	(8)
§ 2-2 桩的力学计算模型	(11)
第三章 荷载计算	(14)
§ 3-1 使用荷载计算	(14)
§ 3-2 环境荷载计算	(19)
§ 3-3 海流荷载计算	(47)
§ 3-4 冰荷载计算	(49)
第四章 导管架结构的计算	(51)
§ 4-1 导管架结构的分析方法	(51)
§ 4-2 桩杆件的刚度方程式	(59)
§ 4-3 整体结构的刚度方程式及其解法	(62)
第五章 桩基内力计算	(69)
§ 5-1 横向受载桩微分方程的建立	(69)
§ 5-2 $p-y$ 曲线的确定	(71)
§ 5-3 有限差分法计算桩基内力	(81)
§ 5-4 用计算机计算桩身位移和内力的方法	(88)
§ 5-5 桩基设计计算	(89)
§ 5-6 桩的强度计算	(90)
第六章 平台的动力响应分析	(100)
§ 6-1 振型分析	(100)
§ 6-2 子空间迭代法	(102)

§ 6-3 动力响应分析·····	(105)
§ 6-4 地震载荷的计算·····	(109)
第七章 管结点的应力与设计 ·····	(112)
§ 7-1 概述·····	(112)
§ 7-2 管结点的设计构造要求·····	(117)
§ 7-3 冲剪应力法校核管结点强度·····	(119)
§ 7-4 管结点应力计算与设计的其它方法·····	(130)
§ 7-5 管结点的疲劳分析·····	(135)
第八章 构件的稳定性 ·····	(139)
§ 8-1 概述·····	(139)
§ 8-2 杆的横向屈曲·····	(139)
§ 8-3 均布外压下圆筒壳的屈曲·····	(142)
§ 8-4 管形构件稳定性计算·····	(147)
第九章 浅海固定式桶形基础采油平台结构强度与 稳定性分析 ·····	(153)
§ 9-1 桶形基础结构强度与稳定性分析·····	(153)
§ 9-2 CB20B 桶形基础平台结构强度与稳定性 分析·····	(154)
§ 9-3 结论·····	(175)
第十章 胜利油田海洋工程简介 ·····	(176)
§ 10-1 浅海油田海洋工程技术·····	(176)
§ 10-2 “十五”期间工程技术研究·····	(182)
§ 10-3 结束语·····	(186)
参考文献 ·····	(187)

第一章 绪 论

§ 1-1 目的和意义

我国有漫长的海岸线，在我国的渤海、东海、南海海域，蕴藏着丰富的石油和天然气资源，随着我国海上油田的逐步开发，海上油田的地位也变得越来越重要了。现已探明，在环渤海湾地区海域，储藏着大量的石油和天然气资源。仅胜利油田在渤海湾20m水深的浅海海域，就已经开发了埕岛油田、胜海油田以及与美国 EDC 公司的合作区块埕岛西油田，建成了 70 多座固定式平台，形成了年产 220 万 t 原油的生产能力。

要开发海上油气田，就需要有钻井和采油的海上平台。钢质桩基平台(固定式平台)具有稳定性好和自持能力强的特点，而且甲板负荷大，所以除了可作为钻井平台使用外，一般多作为采油平台。对海洋平台来说，波浪荷载是一项主要的环境荷载，海浪在静水面附近波动最大、最活跃、静水面附近的波浪力也最大。另外，胜利油田的埕岛地区海域潮间带宽，底平坡小，在冬季受气象条件和大陆的影响，每年冬季都有不同程度的结冰现象。在冰情严重的年份，海冰一度封锁港湾缓和航道，撞沉或撞坏过往船只，渤海二号生产平台被冰推倒，而冰对平台的作用力就在此静水面附近。因此，改善这一区段平台的结构形式，便可改善平台的受力状况。导管架型结构便是一种减小波浪力及冰作用力的较好结构形式，所以，要在此海域内建造平台，以采用钢质桩基或桶基导管架型平台较好。海洋桩基平台受到的所有荷载，最终都是由插入土中的桩来承担的。因此，平台桩柱的强度和刚度是平台自持能力的决定因素，如何做到使平台设计既经济又安全，是平台设计的核心问题，对桩柱进行正确的力学分析计算，是这

核心问题的关键。

多年来,在学习借鉴、研究、创新和适应开发浅海边际油田采油平台的过程中,作者积累了许多成功的经验。根据胜利油田海上油田的实际情况,对浅海固定式采油平台的桩柱进行强度计算,为总结提高平台设计的理论、方法,编著了本书,期望本书对从事海洋平台设计及相关专业人员更好更快地完成浅海固定式平台的设计任务具有一定的参考价值。

§ 1-2 国内外发展现状

如果从打第一口海上油井算起,海洋固定式平台的发展,至今已有一百多年的历史。在这样长的时间里,海洋固定式平台经历了一个从浅水向深水,从技术单一到技术密集的发展过程。

1896年在美国加利福尼亚州海岸外海区用固定式的木质钻井平台,钻了世界上第一口海上井。1924年在委内瑞拉的马拉开波湖中,也是用木质平台钻了第一口水井,随后,木制平台大量出现。这种木制平台的特点是:工作的水深不大,一般都在3.5~4.5m的范围内,平台结构比较庞大,用桩量多,一座平台所用的桩都在100根以上^{[1][2]}。

1947年在墨西哥湾的沃密林,第一次采用了钢质导管架平台(水深6m)。整个平台结构先在岸上拼装,然后用驳船运到沉放地点并用起重机把它沉入海底,最后用268根20~25cm的桩把平台固定在海床上。这一新型平台结构型式的出现,由于具有工作水深大,施工方便等优点,很快得到推广和发展,并且取代了传统的木桩平台。随着技术水平的提高和大型浮吊设备的出现,钢质桩基平台有了很大的改进,平台的工作水深逐年增加,由最初的6m发展到几十米,以至超过300m的深海海域,从而大大地扩大了导管架平台的使用范围。1988年6月,美国壳牌石油公司,在墨西哥湾深水区建造了一座命名为“Bullwinkle”的导管架平台,该平台的导管架总高度为416m,该导管架采用水

下群桩固定,在导管架四个角上,共设置了 28 根桩,桩径 2.13m,桩长 164m,每根桩重 375t^[50]。1994 年 7 月,世界上第一座桶形基础固定式采油平台——Europipe 16/11E 平台,成功地安装在北海油田挪威海域,该平台以四个直径 12m,高 9.5m 的桶为基础,采用负压抽吸的施工方法将桶贯入到目的层,改变了固定式平台以桩为基础的传统结构形式和施工方法。

1966 年 12 月底,我国第一座固定式平台被成功地安装在渤海湾水深 6m 处的油田上,这是一座导管架型平台,它是作为海上钻井装置载入我国海洋油气田开发史册的。从这一平台算起,我国固定式平台发展已有 30 多年的历史。这期间,我国先后在渤海湾水深 6~25m 范围设计和安装了 100 多座固定式平台。1986 年 3 月,渤海石油公司平台制造厂为南海涠 10-3 油田成功地制造了井口导管架平台,标志着我国导管架平台制造已达到了世界先进水平。

近几年我国的海洋平台建设更是得到了迅猛发展,研制并建造了一些如采修一体化平台、桶形基础平台等新型平台,2002 年 10 月,胜利油田与美国 EDC 公司合作建造的大型集采油、注水、油气处理、油气集输、修井于一体的综合性平台顺利安装成功。该平台是胜利油田海域所建造的最大的一座固定式平台。2002 年 10 月,大港油田与美国 APACHE 公司合作的中国最大的海上平台下水。以上两座平台都是由中国石化集团石油工程建设工程有限公司建造完成的,这标志着中国石化集团具有了按照国际标准建造大型平台的能力。

海洋平台设计主要是结构强度设计和计算。目前,世界各主要海洋石油公司及海洋工程(设计)公司和集团都拥有自己的计算中心和专用的计算机程序,以承担所进行的平台设计和建造任务。因此,计算机程序(软件)的拥有量和其功能,也是衡量有关公司和集团的技术水平的一个重要标志。

目前国外正在使用的程序有:英国劳氏船级社的 LR353 程序、美国的 SACS 程序以及日本的 OJDS 程序。我国的一些高等

学校和设计研究单位近年来已开发出适用于平台设计的专用程序，如，大连理工大学的大连理工大学海洋钢质导管架平台设计分析程序，上海海洋石油平台工程设计公司的SOECO海洋平台工程计算机程序等。

导管架型固定式平台的计算主要是导管架结构计算和桩基计算。导管架结构计算的程序，都是以有限元中的直接刚度法为基础，并考虑结构-桩-土三者共同工作而编制。程序主要包括外荷载计算程序、导管架结构静力分析程序和结构-桩-土相互作用程序。

作用在海洋平台的荷载主要有使用荷载、环境荷载和安装荷载，使用荷载和环境荷载是海洋平台设计时所要考虑的主要荷载。使用荷载一般都是按规范计算^[1~7]，环境荷载计算较为复杂，环境荷载包括风、浪、流、冰、地震荷载等。风荷载的计算及其对平台的作用，有许多文献^[1~7]介绍过，现已规范化，本书将按规范^[4~5]进行计算。关于波浪、流和冰荷载计算的文献很多^[1~26]，本文将按照规范的要求，根据胜利油田海上的实际情况，选取比较合理的计算方法进行计算。

海洋平台的桩不但承受垂直荷载，而且还要承受横向荷载，人们对于这种桩的研究由来已久，其难点主要在于桩与土的相互作用。关于桩土相互作用及其内力计算问题，前人提出过很多种计算方法，主要可分为三种：极限地基反力法、弹性地基反力法和复合地基反力法。极限地基反力法不考虑地基的变形特性，所以这种方法不适用于一般桩结构物变形问题的计算。弹性地基反力法又分为线弹性地基反力法和非线性地基反力法。弹性地基反力法中最常用的是：张有令法和M法。张氏法假定土反力与土的埋藏深度无关，为一常量，这种假定显然是不对的，但他取地下一定深度的土反力作为计算值，计算方法简便，可以用手算，在以前计算机不普及的情况下，得到了广泛的应用。M法假定土反力与深度成线性关系，而土本身并不是线性的，虽然这种假定比张氏法有所改进，但仍然不太合理。由于这种方法计算简

单, 并且对于一般的桩结构物的计算也可以得到较好的结果, 因此在我国及欧洲得到了很广泛的应用。

目前世界上最流行的计算桩的方法是 $p-y$ 曲线法(复合地基反力法), 由于它能如实的把地基的非线性弹性性质及由地表面开始的进行性破坏现象反映到桩的计算中去, 所以这种计算方法最为合理。其缺点是: 要真实反映地基的性质必须要选用合适的数学模型, 以及必须使用计算机反复进行迭代计算。但是, 随着现场资料收集手段的改进和计算机速度的提高和普及, 这两个缺点已不能称之为缺点了。

§ 1-3 研究内容

为了计算浅海固定式采油平台的结构强度, 对海洋平台的外荷载、导管架以及结构-桩-土的相互耦合作用下桩的计算方法进行了研究。

第一章为引言。这一章介绍了国内外的发展现状。

第二章为力学模型的建立。为了对平台进行计算, 首先必须建立力学计算模型, 本章分别建立了导管架的力学计算模型和桩的计算模型。

第三章为外荷载计算。位于海洋中的固定式平台, 它承受着所有的环境荷载, 要对它进行强度分析, 首先必须对平台所受的风、浪、流、冰、地震等环境荷载以及使用荷载进行计算。本章根据波浪理论, 推导了平台最大波浪力的计算公式, 特别是浅海中的波浪力计算问题, 并编写了相应的计算程序。同时根据风、流、冰的计算方法, 也编制了计算风、流、冰荷载的计算机程序。地震荷载将与平台的动力特性结合起来, 在对平台进行动力分析时考虑。

第四章为导管架结构分析。由于外荷载是通过导管架结构传递给桩的, 因此还必须对导管架进行受力分析, 求出作用于桩头上的力, 然后再对桩进行计算。本章假定导管架为空间刚架, 采

用有限元数值计算方法进行计算。但海洋平台的导管架不同于一般的空间刚架，其上部是平台甲板，底部与桩相联，桩又与土相互作用，因此，本章重点研究了结构-桩-土的相互耦合作用下桩的计算方法。导管架与桩之间的处理方法是：将导管架与桩在泥面处分开，分别计算导管架和桩，将桩的桩头刚阵与导管架的刚阵相叠加，通过不断调整桩的刚度阵，使桩在泥面处的桩头位移和内力与导管架在泥面处的结点位移和内力相等。

第五章为桩基内力计算。本章是本书的重点研究内容。海洋平台的桩，不但承受甲板的垂直荷载，而且还要承受由导管架传来的波、浪、流、冰等的横向载荷，对于横向受载桩的计算，以前的文献都假定：土反力随土的埋藏深度不变或线性变化，即所谓的张氏法和 M 法。本章根据美国 API 规范提供的非线性方法即 $p-y$ 曲线法来计算土反力，由于本章考虑了土的非线性性质，克服了以上方法中存在的不足之处，使计算更为合理。

在进行桩的内力计算时，以前的文献都假定桩的截面积是不变的，对变截面的桩将无法计算或计算很不方便。本章利用有限差分法，推导出了变截面桩内力和桩身位移的计算公式，可以方便地对变截面桩进行分析计算。

第六章为平台的动力响应分析，主要研究内容是对平台在地震荷载作用下进行动力响应分析。

第七章为管结点静强度计算和疲劳分析，主要研究内容是对管结点的强度进行分析和计算，并对管结点的疲劳问题加以简单介绍。

第八章为圆管杆件的强度与稳定性分析。

第九章主要对桶型基础平台的设计计算方法加以介绍。

第十章为胜利油田海洋石油勘探开发的情况介绍。

第二章 力学模型的建立

海上钻井和采油用的固定式平台一般由甲板和支承结构两部分组成。浅海固定式采油平台，多为导管架型结构，因此本文只对导管架型固定式采油平台进行探讨(见图 2-1)。海洋平台的甲板主要用于为海上钻井和采油提供足够的场地，存放生产、生活设施。支承结构有导管架和桩组成，主要用于支承上部结构和

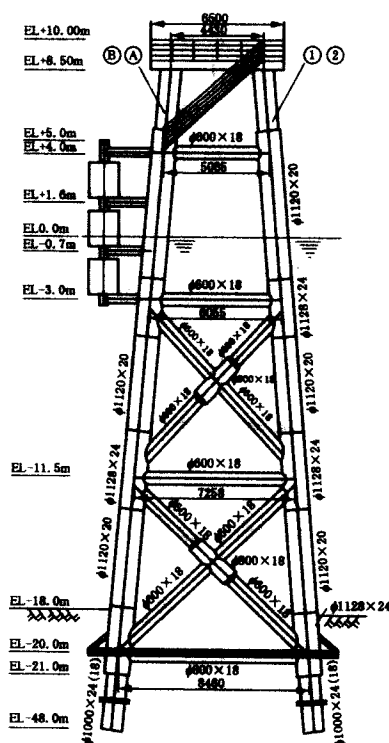


图 2-1 桩基导管架平台

将平台固定在海底，保证平台的整体稳定性。

本章将根据浅海固定式采油平台的结构特点，建立起导管架及桩的力学计算模型。

§ 2-1 导管架结构受力分析模型

一、导管架结构的分析方法

导管架结构是支承结构的一部分。对导管架结构进行受力分析，目前使用的分析方法主要有两种：一是将导管架和桩作为一个整体来考虑，将其简化为三维空间刚架结构，分析它们在海洋环境荷载和使用荷载的作用下，考虑结构-流体-基础的相互作用，计算各构件的内力。这种计算方法相当复杂，计算工作量很大，对于浅海中的平台，一般不采用这种方法。第二是仍然将导管架简化为空间刚架结构，但是却把导管架和桩在泥面处分开，对泥面以上的导管架和埋入土中的桩分别建立模型，进行编程计算。通过考虑结构-桩-土的相互作用以及土的非线性性质，不断地计算和迭代分析，不断调整结构刚度，使得导管架和桩的位移和内力在泥面处相容。由于本章考虑的是浅海中的平台，因此，本章采用第二种方法对平台进行分析计算。

二、导管架结构的力学计算模型

1. 基本假定

本章所用导管架结构的静力分析方法是以线弹性理论为基础的，因此需作如下假定：

(1) 导管架所使用的材料是线弹性的，单元结点力与结点位移之间保持线性关系；

(2) 各单元或结构变形与整个导管架结构尺寸相比很小，因此可以应用迭加原理。

在这两个假定的条件下，整个导管架结构将为线弹性结构。

2. 导管架结构力学计算模型

导管架力学的计算方法采用结构力学的直接刚度法, 将整个导管架简化为三维空间刚架结构[图 2-2(a)], 用有限元法进行计算。由于导管架的主要构件大多是杆件, 计算时将其简化为三维梁单元, 用杆件的轴线表示, 导管架构件之间的结点即为单元结点, 计算时假定单元结点为刚结点。

结点选在杆件的交叉点、桩与泥面的交点等处, 集中荷载作用点也选为结点。

两结点之间的构件, 为一个单元。

导管架与桩的联结处假定为六根弹簧支承。

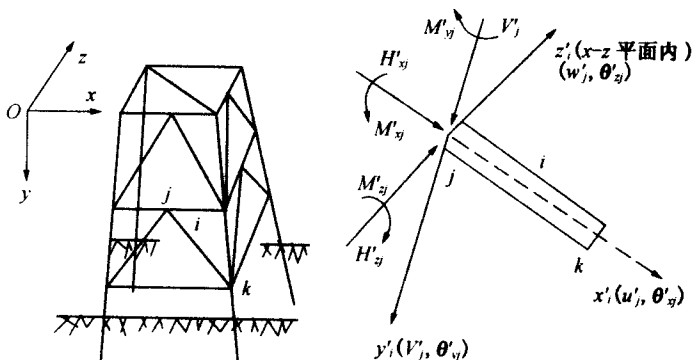
3. 坐标系

为便于分析, 本文在对导管架结构进行计算时, 选取了两个坐标系, 一个是结构坐标系, 一个为单元坐标系, 如图 2-2 所示。

(1) 结构坐标系。

结构坐标系是一空间固定的直角坐标系, 以 x 、 y 、 z 表示。如图 2-2(a) 所示。

以空间任意一点为原点, 取竖直向下为 y 轴, 在水平面内以右手坐标系构成 x 轴和 z 轴, 而构成空间结构直角坐标系。



(a) 结构坐标系

(b) 空间单元坐标系

图 2-2 结构计算模型

(2) 单元坐标系。

单元坐标系是用于表示局部构件的直角坐标系，以 x' 、 y' 、 z' 表示，如图 2-2(b) 所示。

设梁单元 i 的两端结点为 j 、 k ，以始点 j 为原点，沿单元轴线方向为 x'_i 轴，在水平面内取 z'_i 轴与 x'_i 轴相垂直， y'_i 轴与 x'_i 、 z'_i 所构成的平面垂直，并以右手坐标系的方向为正。

(3) 基本变量。

取结构任意杆件 i ，其始结点为： $j(x_j, y_j, z_j)$ ，终结点为： $k(x_k, y_k, z_k)$ ，在结构坐标系下的结点荷载列阵 $\{p_j\}$ 和 $\{p_k\}$ 以及结点位移列阵 $\{u_j\}$ 和 $\{u_k\}$ 为：

$$\{p_j\} = \begin{Bmatrix} H_{xj} \\ V_{yj} \\ H_{zj} \\ M_{xj} \\ M_{yj} \\ M_{zj} \end{Bmatrix}, \{p_k\} = \begin{Bmatrix} H_{xk} \\ V_{yk} \\ H_{zk} \\ M_{xk} \\ M_{yk} \\ M_{zk} \end{Bmatrix}, \{U_j\} = \begin{Bmatrix} u_j \\ v_j \\ w_j \\ \theta_{xj} \\ \theta_{yj} \\ \theta_{zj} \end{Bmatrix}, \{U_k\} = \begin{Bmatrix} u_k \\ v_k \\ w_k \\ \theta_{xk} \\ \theta_{yk} \\ \theta_{zk} \end{Bmatrix}$$

规定结点力 (H_{xj} , V_{yj} , H_{zj} , H_{xk} , V_{yk} , H_{zk}) 的方向与结构坐标轴方向一致时为正；结点力矩 (M_{xj} , M_{yj} , M_{zj} , M_{xk} , M_{yk} , M_{zk}) 按右手坐标系取螺旋前进的转动方向为正。结点位移与坐标轴方向一致时为正，结点转角取与外力的正向一致为正。

单元 i 在单元坐标系下的结点荷载列阵 $\{p'_j\}$ 和 $\{p'_k\}$ 以及结点位移列阵 $\{u'_j\}$ 和 $\{u'_k\}$ 为：

$$\{p'_j\} = \begin{Bmatrix} H'_{xj} \\ V'_{yj} \\ H'_{zj} \\ M'_{xj} \\ M'_{yj} \\ M'_{zj} \end{Bmatrix}, \{p'_k\} = \begin{Bmatrix} H'_{xk} \\ V'_{yk} \\ H'_{zk} \\ M'_{xk} \\ M'_{yk} \\ M'_{zk} \end{Bmatrix}, \{U'_j\} = \begin{Bmatrix} u'_j \\ v'_j \\ w'_j \\ \theta'_{xj} \\ \theta'_{yj} \\ \theta'_{zj} \end{Bmatrix}, \{U'_k\} = \begin{Bmatrix} u'_k \\ v'_k \\ w'_k \\ \theta'_{xk} \\ \theta'_{yk} \\ \theta'_{zk} \end{Bmatrix}$$

规定结点力 (H'_{xj} , V'_{yj} , H'_{zj} , H'_{xk} , V'_{yk} , H'_{zk}) 的方向与单元坐

标轴方向一致时为正;结点力矩(M'_{xj} , M'_{yj} , M'_{zj} , M'_{xk} , M'_{yk} , M'_{zk})按右手坐标系取螺旋前进的转动方向为正。结点位移与坐标轴方向一致时为正,结点转角取与外力的正向一致为正。

4. 边界条件

对于固定式采油平台,由于甲板面较小,梁格也少,计算中将梁格与支承结构一起考虑,共同建立计算模型,作用在甲板上的荷载,等效到梁格上并通过立柱传给支承结构。对于自升式钻井平台,由于其甲板整体强度和刚度较大,平台甲板与支承结构之间的联结不同于固定式采油平台,可以把平台甲板与支承结构之间的联结点简化为铰接点。在铰接点处,只有轴力和剪力而无弯矩作用。

对于支承结构部分,考虑结构-桩-土的相互作用,计算时将导管架与桩在泥面处分开,在此设结点,假定此处的结点受到六根弹簧的支承,使结点分别受到 x 、 y 、 z 三个方向的弹性位移约束和转动约束(见图 2-3)。

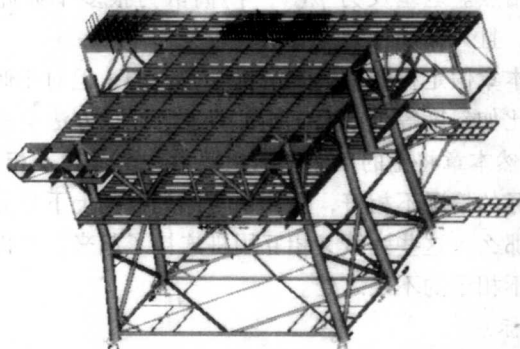


图 2-3 边界简化图

§ 2-2 桩的力学计算模型

本文在计算平台桩的桩身位移和内力时,只考虑埋入地下的

那部分。在计算平台所受到的外荷载时,则考虑平台桩在地上的那部分。

1. 基本假设

(1) 桩的材料为线弹性材料。

(2) 桩的轴线是垂直向下的,不计桩的轴向力对挠度的影响。

2. 力学计算模型

桩的计算公式都是在以上两个假设的基础上建立的。海洋平台全部埋入地下的桩,在其断面的主平面内,地表面桩顶处作用有导管架传给桩的垂直于桩的水平力 H_0 和弯矩 M_0 ,忽略其它外载荷如土的静挤压力等荷载。

由于荷载的作用使桩产生挠度,也使作为支承介质的地基产生连续分布的反力 $p(x, y)$, $p(x, y)$ 是关于深度 x 与桩的挠度 y 的函数。

本章采用有限差分法对桩进行计算。为此,将桩沿桩长离散成若干长度相同的单元。如果要对变截面桩进行计算,在截面变化处应设结点。地基反力 $p(x, y)$ 离散为很多个彼此分离的非线性弹簧,且只作用在结点处。

虽然本章假定桩的轴线是沿铅垂方向的,但对于倾斜不太严重的桩,比如斜度等于或大于 5:1 的桩,计算方法也是可以适用的^[46]。虽然本章将土的反作用力离散为一个个互不相干的弹簧,似乎与实际的情况不相符,但如果考虑到桩的上下单元之间的相互影响,那么,这些弹簧又相互用桩连接了起来,从而克服了弹簧之间互不相干的不足之处。

3. 坐标系

在对桩进行结构分析时,作为整体结构的一部分,为便于计算,建立了桩杆件的局部坐标系,如图 2-4 所示。以桩头为原点,沿桩轴向下的方向为 x'_i 轴正方向,在水平面内取 z'_i 轴,同 x'_i 、 z'_i 所构成的平面相垂直的方向为 y'_i 轴。

4. 荷载函数

由于风、浪、流等荷载,是以分布荷载的形式作用在海洋平台