

工程船舶文集

第十一辑

英国劳氏船级社

关于海上构筑物的设计、建造、检验的指导性文件

上海船舶设计研究所

1979年12月

内 容 简 介

这里收集了英国劳氏船级社对海上构筑物，主要是各种形式的钻井平台的设计、建造检验有关文献，这些文献不全是该社规范的正式要求，但代表了该社的看法。

这十篇文章从内容上反映了以下几个方面：

1. 动力学概率设计的基本概念及方法；
2. 如何应用电子计算机进行结构程序计算；
3. 疲劳强度的设计考虑；
4. 焊接及检验要求。

这些文章代表了近代结构设计的主要发展趋向。虽然是针对平台结构叙述的，但对船舶结构设计来说是有其共性意义的。许多观点的提出均建立在对大量已在使用的平台进行观测的统计分析基础上，这种研究方法也是值得注意的。本文集对于处在初始阶段的我国平台设计、研究、建造和检验的工程技术人员和有关专业的教学人员是有参考价值的。

目 录

海上工程劳氏规范·····	(1)
海上构筑物的安全标准·····	(8)
海上装置的结构设计审查·····	(21)
自升式桩脚的结构分析·····	(33)
半潜式平台独立结构的设计鉴定——鉴定范围 ·····	(41)
张力桩柱平台独立结构的设计鉴定——鉴定范围 ·····	(48)
重力式结构和基础的动力学特性分析及 油田现场资料的研究·····	(54)
海上钢结构疲劳破坏的防止·····	(67)
固定式海上钢结构对母钢材和焊接节点的要求·····	(83)
海洋工程部计算机程序和系统·····	(93)

海上工程劳氏规范

劳氏船级社总工程师、科学学士

T·A 伦伯罗 (Lamplough)

引 言

在近十年内,海上构筑物的研究有了迅速的发展。目前在三十四个国家的领海内,天然气和油井已经投入生产,四十五个国家正在勘探,八十个国家正在测量中。此外,在世界范围内,能源的探索,已向深海发展。自从一九七四年以来,我们调查了若干艘在水深为 400 英尺范围作业的钢质平台,一艘在水深为 500 英尺作业的平台,一艘正在建造的水深为 800 英尺作业的平台和一艘已经完成设计的,在水深为 1000 英尺作业的平台。这表明在五年时间内,平台的作业水深已增加了三倍。第一艘从事石油生产的混凝土平台——“恩科菲斯克”(EKOFISK)一号,于一九七三年六月在北海建立,在短短的四年内,已增加到十二条。

贮油库的大小和形状,加上当地的环境条件,土壤条件,水深情况和市场的远近,所有这些均影响到石油公司从经济性出发,最终选择海上构筑物的形式。

劳氏船级社在具有特殊的国际声誉,对海上构筑物的作业积累了长期的经验,再加上近 40 年来参加了对陆上石油设备和陆上化工设施的测试和检验,是能够很好地为海上开发事业服务的。

船级社所承受的主要业务有:

1. 七十艘在北海使用的水深为 400 英尺的钢结构平台;
2. 三艘混凝土平台;
3. 半潜式平台;
4. 自升式平台;
5. 铰接式构筑物;
6. 贮油浮筒及卸载系数;
7. 单浮筒系泊装置;
8. 深潜器;
9. 海上补给船的锚泊设施;
10. 潜水器具;
11. 敷管船和大型起重船;
12. 钻探船;
13. 管系。

这里准备就劳氏船级社在海上构筑物的设计、建造、安装和作业的审议阶段中为政府、石油公司、顾问公司和保险公司承担的一些业务提供了一个概貌。

设计

一、结 构

每一个新平台或海上构筑物的复杂程度，一般是由特定的作业技术要求、环境因素、地质条件、下水及安装方式等决定的。因此，这就使得各个构筑物的技术形态具有共通性，从而也就产生了严密的规范，给出普遍适合的标准，作为评定载荷的依据和作为建造要求的衡准。有效地检验这些标准是否在设计中得到正确的贯彻，始终是船级社对于海上构筑物进行完整的独立分析时所遵循的方针。为此，首先是审查和批准设计衡准：包括环境条件，材料和焊接的技术要求，地质资料、模型试验、作业的限制和设计规定等等。

然后，可以对海上构筑物作独立分析。船级社是广泛使用带有一系列本社自编的 IBM 370/158 型程序和其它的微型计算机。当前船级社使用的系统有：

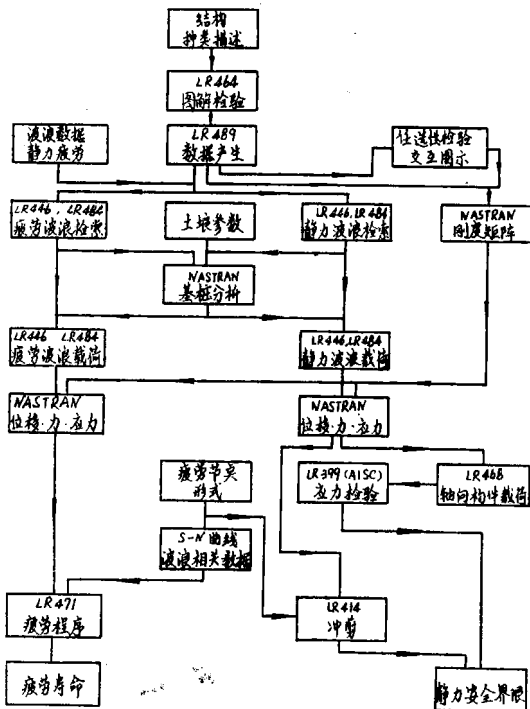
LOPS——固定钢质套筒平台的静力分析(图 1)

LOCS——重力式水泥平台分析(图 2)

LOADS——半潜式平台分析(图 3)

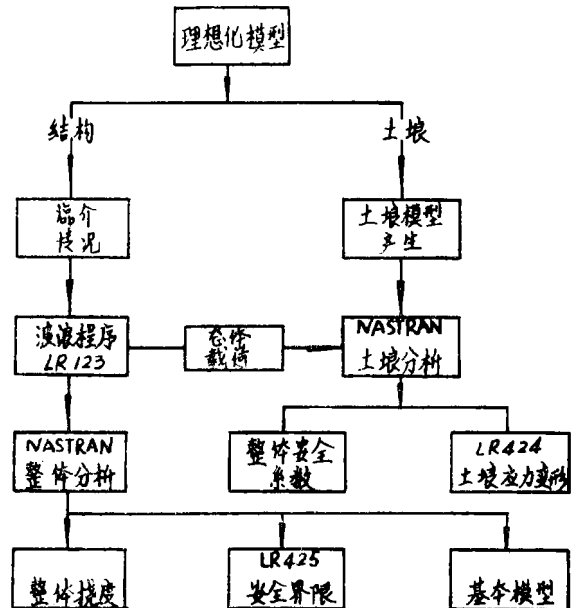
LASS——铰接式构筑物分析(图 4)

LOTS——张力桩柱式平台分析(图 5)



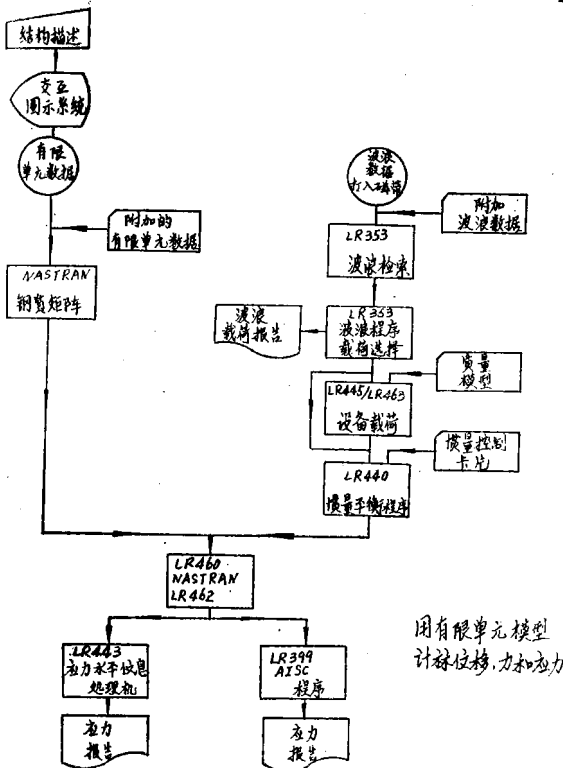
劳氏船级社海上工程固定平台系统
——LOPS 固定式平台分析系统

图 1 固定钢质套筒分析系统



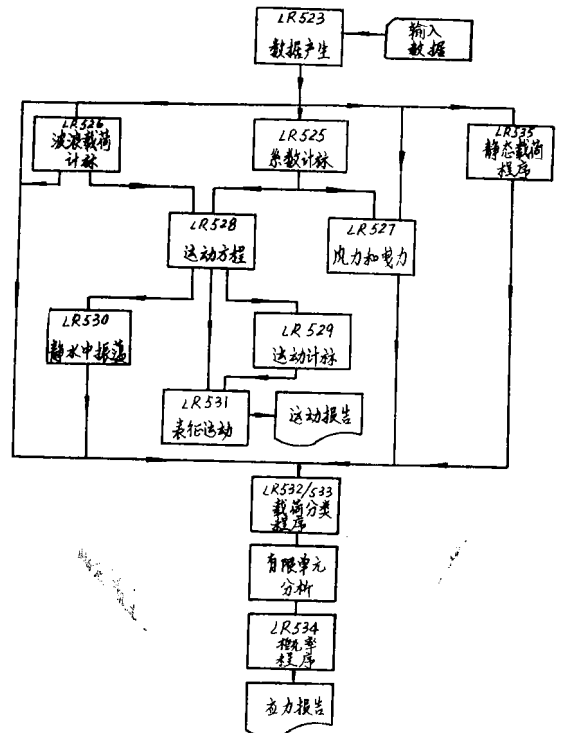
劳氏船级社海上工程混凝土系统
——LOCS

图 2 重力式混凝土平台结构的分析系统



劳氏船级社海上工程动力分析系统——LOADS

图 3a 半潜式平台分析系统(准静态)



劳氏船级社海上工程动力分析系统——LOADS

图 3b 半潜式平台分析系统(动态)

上述系统有一系列其它的自编程序补充，其中包括重力构筑物的应答分析，自升式平台的分析和一整套关于地基分析的程序。

船级社采用的所有计算机都具有三个重要特点：

1. 组件化

每一个系统包含一系列组件，这些组件具有固定的输入和输出的信息排列，以执行特定的工程功能。这在快速展算技术上是必需的。这样可以通过变换或修改特定的组件，很方便地朝任何领域展算。更重要的是对每一个系统的规模要便于处理，并采用现代化的文件编制。

2. 数据的产生

这些复杂的程序，需要大量的数据，而且输入和检验都要简化。因此所有系统均使用一般的矢量显示部件，并带有专用的从属计算机 PDP-11。船级社有二个交互图示系统，其中一个供海上构筑物专用。在此系统中，工程人员可以用光敏笔，在电视显象荧光屏上，绘出有限单元模型。同时可以非常方便地进行修改。有关信息也可以从使用光敏笔的显示荧光屏上读出。在分析开始前，为了查明所有的数据是否正确。图象可以旋转和放大。这些模型和数据可以通过专用电话线路传送到中央计算机，其结果亦显示在荧光屏上。

3. 这些系统的核心是有限单元组件 MSC/LR NASTRAN*，这是一个使用有限单元位移法，分析弹性结构负载特性的先进通用程序，其分析能力和范围包括：

* NASTRAN 系美国国家航天局结构分析程序的缩写。

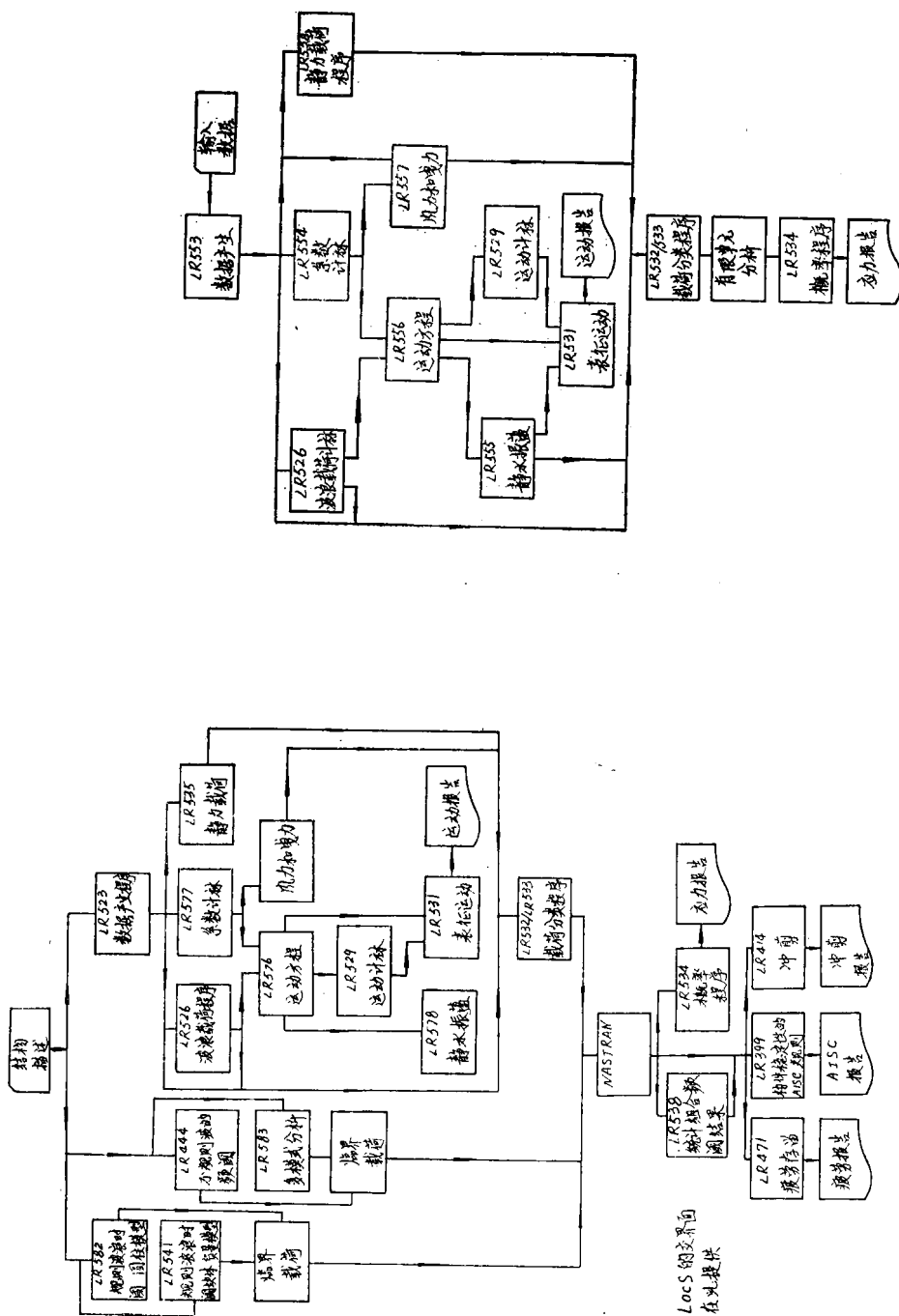


图 4 铰接式构筑物分析系统

图 5 张力桩柱平台分析系统

- (1) 对集中载荷、分布载荷、热膨胀和强迫变形的静力应答;
- (2) 对瞬态载荷、稳态谐波载荷和随机扰动载荷的动力应答;
- (3) 实数和复数的特征根值的决定。

NASTRAN程序其单元的自由度包括一维、二维和三维空间的元件。这个程序经常根据自己使用情况由洛杉矶的MCNEAL/SCH WEDLER 协会和劳氏船级社不断作修改。现已有150个海上构筑物使用此程序作了分析,其中有40个海上构筑物其工作已经超过5年,并且由船级社经常进行检验。

上述系统能分析海上构筑物的所有主要部件,例如:套筒平台、基桩、重力式混凝土平台、地基、半潜式和桩脚自升式平台。这些结构设计的评定大部分是涉及上层甲板支撑结构、顶部组件、扩形结构、直升飞机甲板等。它们都是在特定的载荷条件下,并在结构的危险点上进行分析的。应对所有主要和次要结构在承受整体和局部载荷时的合理性,以及在设计图纸中是否为实际情况相一致作出验证。如果结构设计的控制条件与最终定位处的条件各异,那末,在结构的独立分析时,也要考虑这些具体情况。

二、系统设备

独立的结构分析,仅仅是设计评定的一部分。平台的安全性与船级社的国际性协议,机械设计、电气和控制装置等方面有关。可以采用船级社关于海上构筑物的程序,来评定在完好状态下的和破损状态下的静力稳定性。在选用钻探和开采机械时,应考虑平台的安全性。同样地,应考虑在正常情况下和发生故障情况下电气装置的安全性,尤其在危险区域应给予特别注意。初置灭火和救生设备、被动防火设施(耐火隔堵)和逃避装置应予检验。在上述各项要求中,所有有关图纸都应经过检验和认可。对在北海使用的一个专用成套装置,在设计的鉴定阶段,曾审批了四千多张图纸,并且对三种不同的钢质套筒平台的初步设计作了分析。

建 造

一、钢质平台

在平台制造期间,必须控制钢材的正确选级和质量。船级社的验船师根据业主要求检视所有的材料机械性能试验,同意材料的技术规格,审批钢厂使用的冶炼方法。在需要时还应对钢材作表面检查和超声波检验。接着给钢厂颁发合格证书和有关文件;这在某些情况下是特别重要的,因这样便于未来建造的平台预定钢材。例如:北海的海上构筑物的钢材是由英国、瑞典、西德、法国、日本、美国和许多其它钢材生产国提供的。船级社通过它在各地区的验船师,自然会顾及所有的主要钢材生产厂,

当管状结构、缀杆、节点以及组合件的制造不是在主装配工地上进行时,船级社的检验主要有如下几个方面:

1. 对所用的材料和部件经常进行鉴定;
2. 认可所有的焊接和并装的方法,包括任何必要的热处理方法;
3. 认可所有非破坏性试验方案;
4. 签证所有的焊接程序和合格性试验;
5. 检视所有的制造方法,包括装配、焊接、焊前和焊后的热处理;
6. 检视必要的非破坏性试验;

7. 最后的检验：尺寸的核对，发放合格证书和相应的文件。

船级社的检验师在主装配工地上除了进行上述各项检验外，还要加上对部件运输过程中的损坏作检验。对当地焊工的合格证明也有必要检查。对由协作厂供应的成套装置，例如：起重机、合成容器、空气柜、管系等等亦应予检验，其设计应按批准的技术条件预先作出审查。

二、混凝土平台

重力式混凝土平台的检验与钢结构平台检验相似。同时由于混凝土用量大，一般超过200,000吨，因此必须设有可靠的质量检查系统，以进行有效的管理和经常性的检验。在本社鉴定这些构筑物的土木工程师支持下，具有土木工程基础知识的船级社的验船师是经常驻在现场或平台制造工厂的。在制造开始前，预应力钢筋混凝土组合件和质量控制法的技术条件应取得船级社的同意。

船级社的现场检验要求概括如下：

1. 认可材料供应，如：水泥、骨料、加助剂、钢筋和预应力钢丝等。
2. 混凝土混合设计和混凝土试样检验。
3. 认可混凝土的搅拌、运输、灌注和养护方法。
4. 认可模板系统。
5. 认可钢筋和预应力钢丝束导管的固定。
6. 认可预应力钢丝的预应力值。
7. 最后的检验：尺寸的校核和认可各种必要的修补工作。

就 位

平台就位的危险状态是拖航出海，尤其是在不使用驳船运送时。拖航方案通常是由船级社在荷兰鹿特丹市办事处的验船师进行检验。他们经常处理一些大型和非一般的拖船工程。拖航的合格证书包括了从装配工地到最终的定位地点的拖航方案和拖轮。

在就位现场上，所有基桩、次要结构的安装、甲板组件、超重机、直升飞机平台等等都应作检验。另外，还应检查所有的安全设备和必要的试验及定位系统。

作 业

在结构整个的使用期间，船级社将进行定期的检验，以确保平台按设计要求工作。通常考虑如下：

必须进行海底检验，检查海蚀或局部冲刷以及检查任何裙板结构的状况。如果上述检查认为满意，验船师将对结构的任何沉陷和差动量的可监测性作出保证，同时采取必要的合理措施。应监测腐蚀的保护系统，并查明附着海生物的种类和生长是否符合设计容许的程度。

应监视任何水下的、包括溅湿区结构的修理。在验船师的指导下，应定期地对选定区域最小数量的重要节点作严格的检验。总之，所有上述各项检验，都应在船级社的验船师监督下完成，并有相应的记录。

管 系 和 设 备

船级社承担鉴定在深海管系数设中的工艺规程设计, 评定管系的诱导应力以及确定应力的许用值。此外, 还要对管子包复层的型式及厚度是否适合作业条件进行鉴定。在钢管轧制厂就应对管子进行检验, 在敷管过程中, 船级社的验船师和检验员如有必要应随敷管船对所有焊接接头施行检查。当管系数设到靠近海岸时, 劳氏船级社工业服务组将提供对于陆上管系、耐压容器、加工设备和其它所有类似的装置和设备的检验手段。这些设备在世界各地的工厂制造期间, 如果有要求的话, 将都应检验。通常船级社的验船师将常驻在炼油厂的工地上, 以从事监督安装、批准焊工和焊接方法、以及执行其它的检验任务。

结 论

如许多年来对造船、航海业上提出过技术标准一样, 劳氏船级社制定了海上工业的标准。这个标准主要是用作独立设计鉴定和在建造期及整个使用期间检验海上装置的结构、设备和安装。

由于海上作业由政府管理条例增加, 高昂的成本费, 保险事业的要求和昂贵的修理费用等因素, 在海上工程鉴定方面, 日益强调组成一个独立的、非从属的法定机构。同时海上工业在船级社里已成为目前最迅速发展的技术部门, 进行研究和探讨是十分重要的。因此本船级社参加了所有的主要国家的海上研究委员会。同时在北海或某些美洲的重点研究工程中得到经济上的支持。

金发水译自 Lloyd's Register Offshore Engineering Lloyd's
Register of Shipping November 1976. 练 涂校

海上构筑物的安全标准

英国劳氏船级社总检验师

Clive BAINRIDGE

摘 要

决定海上构筑物的安全标准，首先要考虑构筑物的安全系数。这方面问题，由于海上活动扩展到世界范围，以及石油工业广泛采用新型结构，更加强调。

本文在考虑设计中某些参量改变对安全系数选择的影响之前，先概述海上构筑物的发展情况。

一、简介

近几年来，在很多邻近大陆架的国家中，海上勘探或开发活动促使海上构筑物迅速发展。自一九七四年以来，我们已看到的有几只水深约 400 英尺的钢质平台；一只水深约 500 英尺的平台；一只水深约 800 英尺的平台；还有一只已完成了设计的水深约 1000 英尺的平台。一九七三年六月，北海安装了第一只用于石油工业的混凝土平台 EKOFISK 1 号。短短四年中，增加了十二只。这种迅速发展，有三个重要方面关系到海上构筑物安全系数的选择。

1. 环境条件的多种变化 例如：墨西哥湾有飓风干扰，但相对平静周期较长；北海有最大的波浪和持续时间很长的坏天气；加利福利亚和新西兰海上有额外的地震危险；科克湾有严冬和浮冰；印度洋部分海上很少或几乎没有好天气，以及一年一度的季风；澳大利亚西北部有旋风。重要的是，当水深及环境恶劣程度增加时，油田储量必须是能够维持经营及弥补较高的开发费用。仅此，就促使甲板分段大小及其重量激增，亦促使每平台的钻井数增加，这两种增加，对与整体强度关系不大的主支承结构的作用载荷，有直接的影响。大陆石油公司最近安装在墨西哥湾的最高的钢桩平台，水深是 394 英尺，有 14 只井孔；而在北海的“Burmah Thistle”平台水深是 500 英尺，装有 60 只井孔。

2. 结构设计形态的变化 钢质平台。虽然还只有 12 只左右钢质平台建于水深约 400 英尺处，但已形成三种基本的套筒式，这些型式完全不同于原始套筒式概念。

1) 驳船用临时浮筒下水。例如：西欧的 Claymore 及 Piper 油田和 Amoco 的 Montrose 油田的套筒式平台。平台下部的主柱管形结构也提供了一些附加浮力。

2) 平台附加浮筏，其上装有套筒结构并拖运就位，以英国 Forties 油田的套筒平台为代表。

3) 混合结构，在平台的一侧，事先加大主柱直径，使有足够的浮力以支持拖航时露在水面上的结构。如在北海的 Shall Brent A, Burmah thistle 和 Chevron Ninian 平台，以及在新西兰海面的 Maui 油田平台。

混凝土重力式平台。此类平台亦同样有设计变迁，拖航时的吃水和基础构造对其形态有很

大影响。现有两大类:

1) 圆柱形结构: 从一混凝土箱型基础支承几个圆柱, 上层甲板装于其上。沉箱由几个内隔壁分隔成一些圆柱形或矩形的舱室。这类平台已建于 Mobil Beryl 油田和在北海的 Shell/ESSO Brent 油田。

2) 箱型结构: 此种结构, 箱型基础从海底平面一直延伸到上部支承甲板, C.G Doris 设计的已安装在 Ekofisk 及 Frigg 油田平台就是这种类型。所有这类平台都预先配备了一个 Jartan 式多孔外壳, 以减少整体波浪载荷。

已经设计了很多种其他的平台, 有些用上述的型式进行不同的组合, 此外, 如在 Exxon 的 Guyed 塔式平台及张力桩柱平台则有独特的解决方法。在海上平台的多种设计中还必须加上许多其他的海上装置, 如储油浮筒、油船装油设施、铰接的外延结构物等等。

3. 经济和社会的因素 其中有代表性的是: 保证地区油、气供应对国民经济的影响; 对某一特定地区的工业和生活供应; 保险费的增加; 生产停滞和恢复; 污染的危险及公众反对意见等。

另外, 所采取的安全系数还必须能反映出检验、营运、修理机构的有效性、防火措施、排污和控制污染、以及气象预报系统的可靠性。

面对以上迅速发展的背景, 由于每种新的结构各有特色, 采用的规范又是基于一些陆上的工艺实践, 因此在评定结构安全系数时, 对已安装的平台进行参量研究以推测其影响是十分重要的。

二、外 力

在一特定位置上, 影响海上构筑物的载荷的主要因素是波浪、流、海生物生长和水深。这些因素中, 每一项都有多种变量。例如波浪——风暴波高极值和最大可能周期、陡度、方向谱及过阈概率; 流——流速极值、方向变化、深度分布; 海生物生长——累集情况和随深度的变化; 水深——天文潮汐、风暴涌等等。

因为波浪力强大且有周期性, 故为最重要因素。由波浪引起的构件载荷是无因次曳力及惯性力系数, 直径和该处水分子速度及加速度的函数。计算水分子轨道运动有几种波浪理论, 对小直径构件的结构, 曳力是危险项, 而对大直径, 惯性项是主要的。对重力式混凝土结构, 由于其沉箱直径特大, 所以要求采用与模型试验结果吻合较佳的势能理论。

三、参 量 研 究

图 1~4 改变新开发的海域的第一只钢质平台上的一些主要因素, 清楚地表明被准确定义的每个因素在总载荷中的相对重要性。例如, 图 4 表示最低天文潮汐与风暴极值条件当用于最大载荷, 而最高天文潮汐, 仅用于最小空气间隙。将此与另一个水深 100 英尺的平台比较, 示出泥线移位增加 7% (两者高潮高差为 8 英尺)。

但是, 临界安全系数是取决于上述衡准的组合, 因此图 5 研究了风暴极值设计受海生物生长和流的影响。图 6 为考虑疲劳载荷而估算了总载荷的变化范围。

从已获得的半潜式平台经验证明, 混合式钢结构是特别有用。总载荷随波高的变化见图 7,

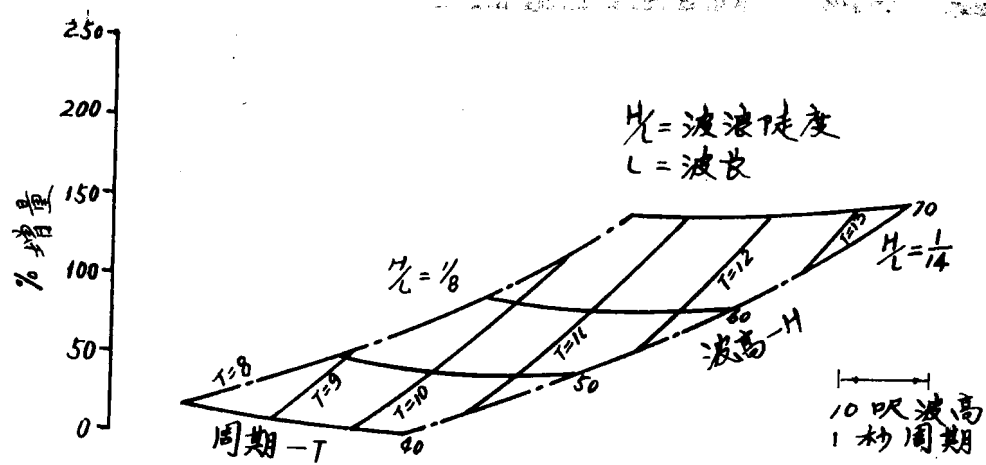


图 1 典型钢套平台，不同波高时波浪周期时总载荷的影响

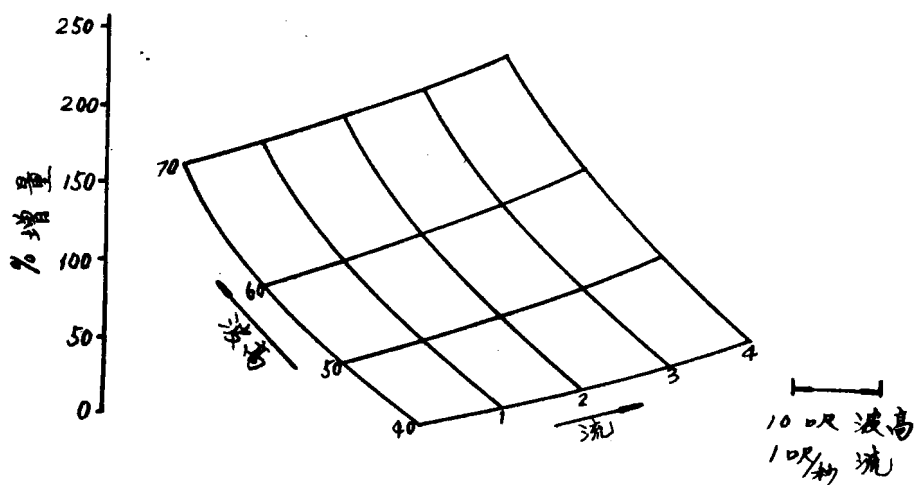


图 2 典型钢套平台，不同波高时流对总载荷的影响

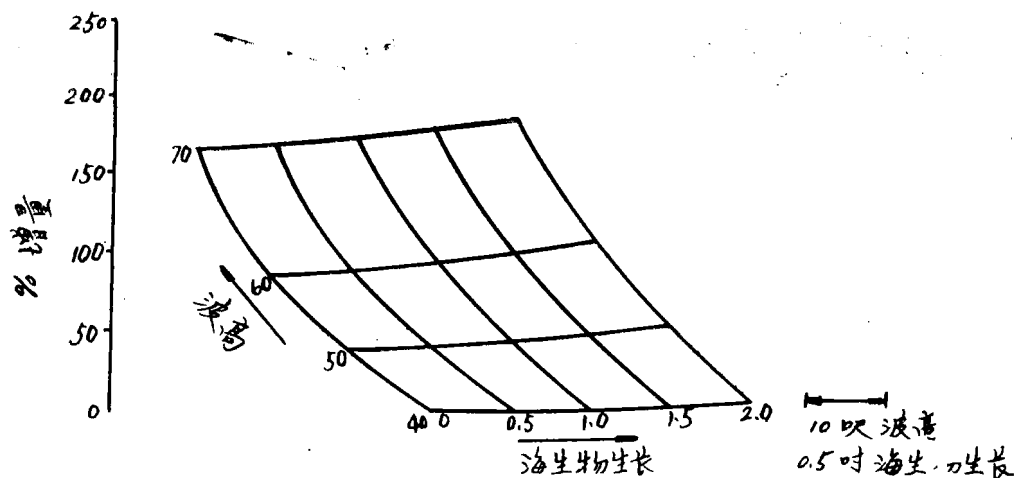


图 3 典型钢套平台，不同波高时海生物生长对总载荷的影响

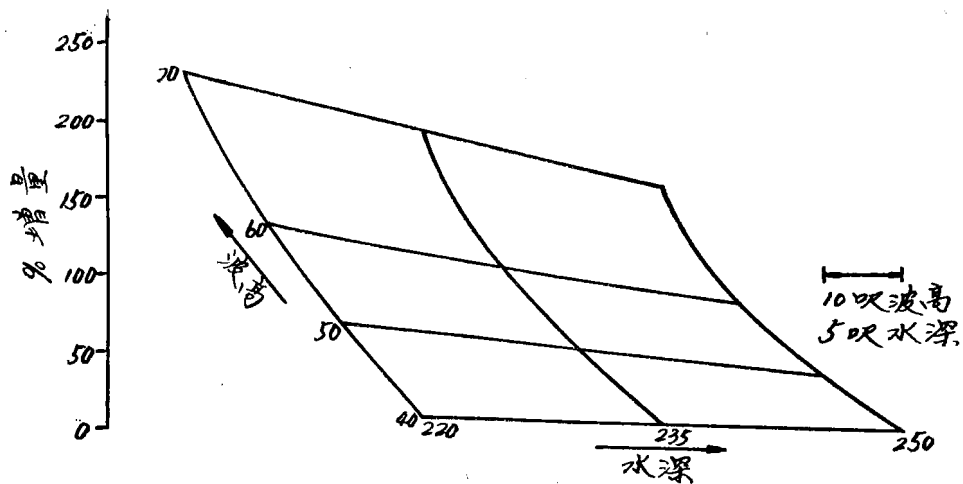


图 4 典型钢套平台，不同波高时水深对总载荷的影响

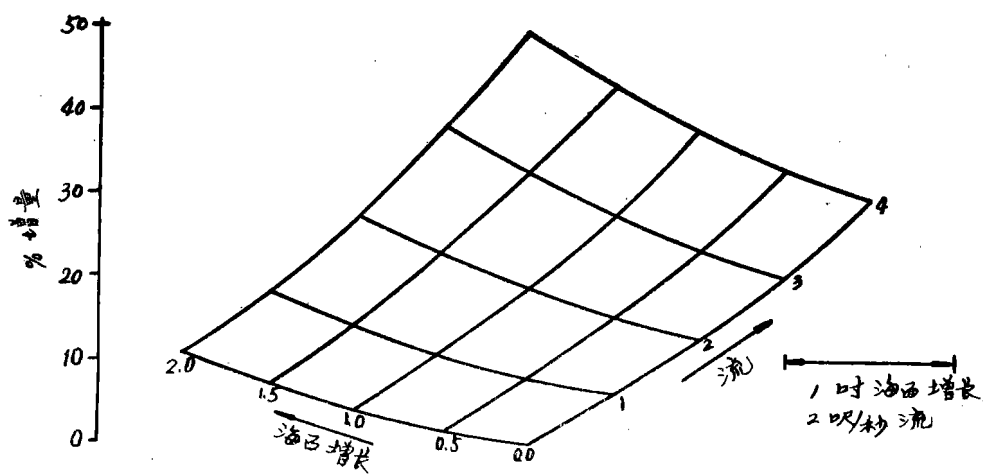


图 5 典型钢套平台，流及海生物生长对总载荷的影响

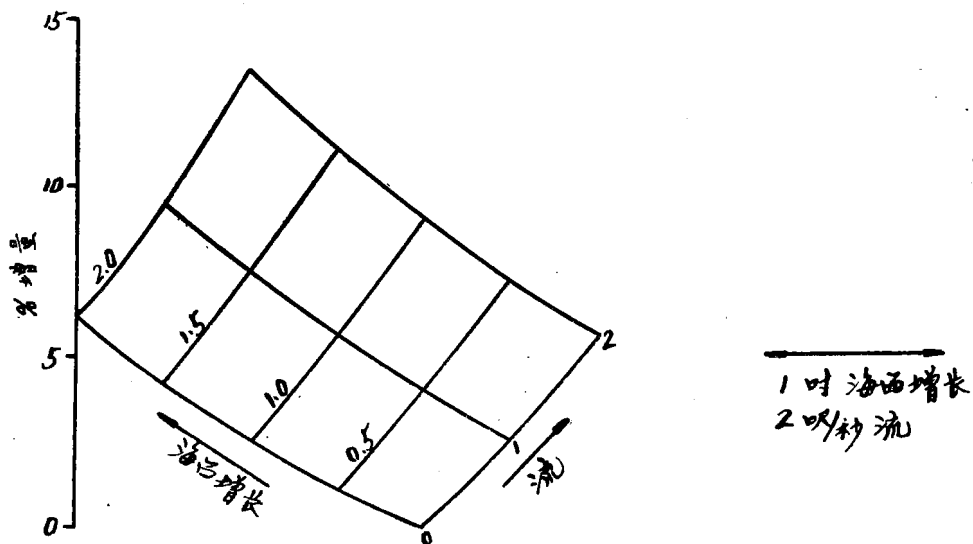


图 6 典型钢套平台，流及海生物生长对总载荷变化范围的影响

图 8 清楚地表示了这种特定的几何形状的平台，由于大直径桩脚上的惯性力使得在 10 英尺波高处载荷突然增加，此结果推动了对这类平台的疲劳载荷的进一步研究。

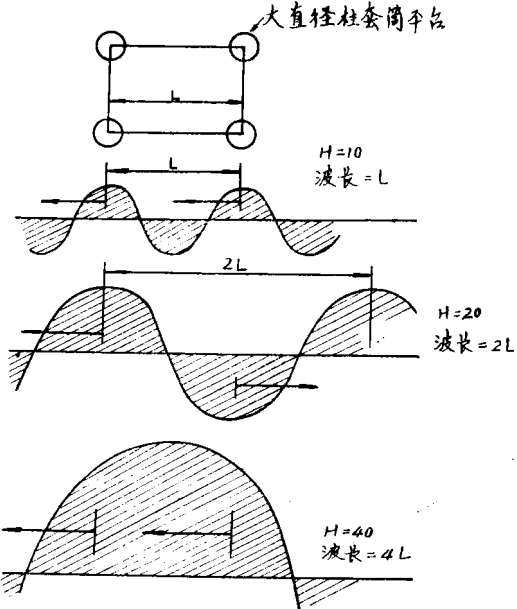


图 7 随波高 H 变化的波浪载荷

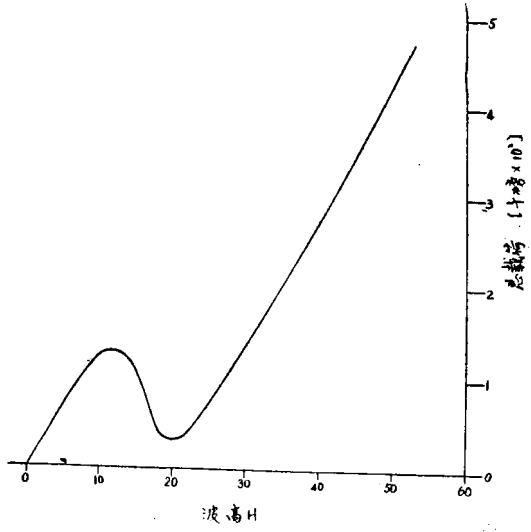


图 8 随波高 H 变化的总载荷

四、构件安全系数

通常采用先进的有限单元分析法计算钢构件或混凝土剖面中的内载荷和应力。利用大磁芯计算机，以一个或多个单元描述其每一物理构件，已经较明确地模拟钢质平台，见图 9。而对混凝土重力式平台，因其形状复杂，要求有更多的近似单元，并且难于对边界条件定义，故问题较多。本社已研究了对于如何确定最经济的单元分格尺寸，而又能保持准确的载荷分布。基于土壤与结构物相互作用的有限单元分析结果，可用传统的弹簧法来描绘地基。

最近，对一个混凝土重力式平台研究后发现，在现实的基础刚度范围内，底板中应力可能发生产 40% 的变化。

在任何强度构件的安全系数的研究中，例如梁——柱的钢管部件的强度，必须特别考虑许用应力的非线性特性。这种构件是承受轴向及弯曲联合作用载荷，要用限制“相互作用比”来设计，此值在作业状态时最大值取 1.0，而在风暴极值情况取 1.33。对钢质套筒平台载荷构件的参量研究 (图 10) 可看出其灵敏度。以轴向应力为 0.5 屈服限及相互作用比 1.0 为例，轴向应力增加 5% 屈服限，相互作用比将增加 46%，而弯曲应力增加 5% 屈服限，相互作用比只增加 29%。

近代在钢质混合式套筒平台设计中，采用了大直径加强环筋圆柱，这促进了参量研究，见图 11。临界设计条件是：平台在最大水深 500 英尺处正在保持垂直状态下沉就位。当套筒平台尚未进水定位到海底之前，桩脚上水压力最大，最小安全系数需维持 1.5。有关椭圆度设计公差规定最大为 1% 直径。本社检验员在制造过程中测得，套筒平台柱体椭圆度公差为 0.5% 直径。提高制造标准，对强度可能改善到相当于在设计水深加 20% 的余量，而仍然保持相同的有效安全系数。

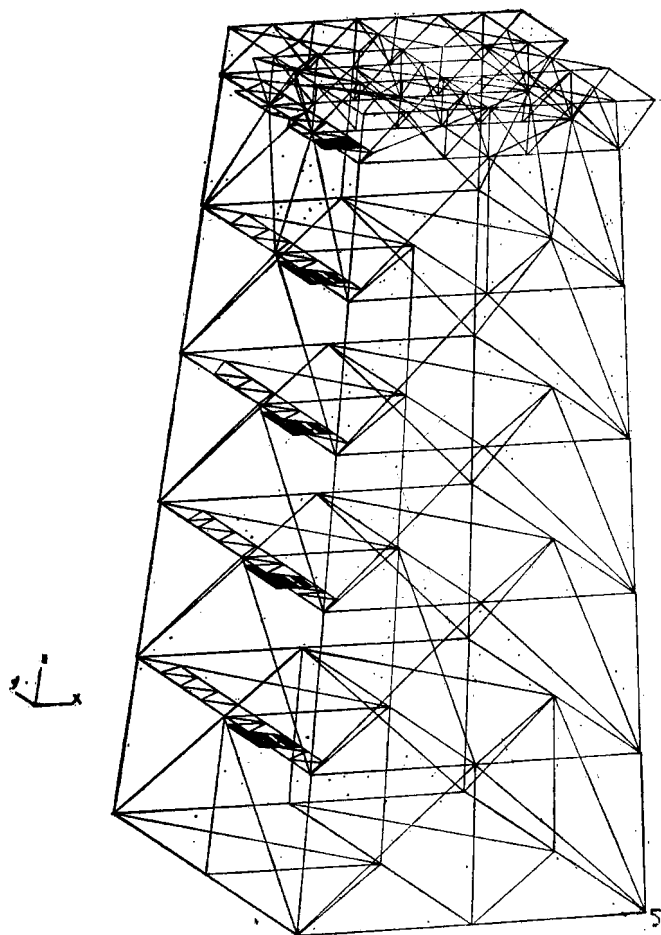


图 9 Ninian 油田南部平台的有限单元模型

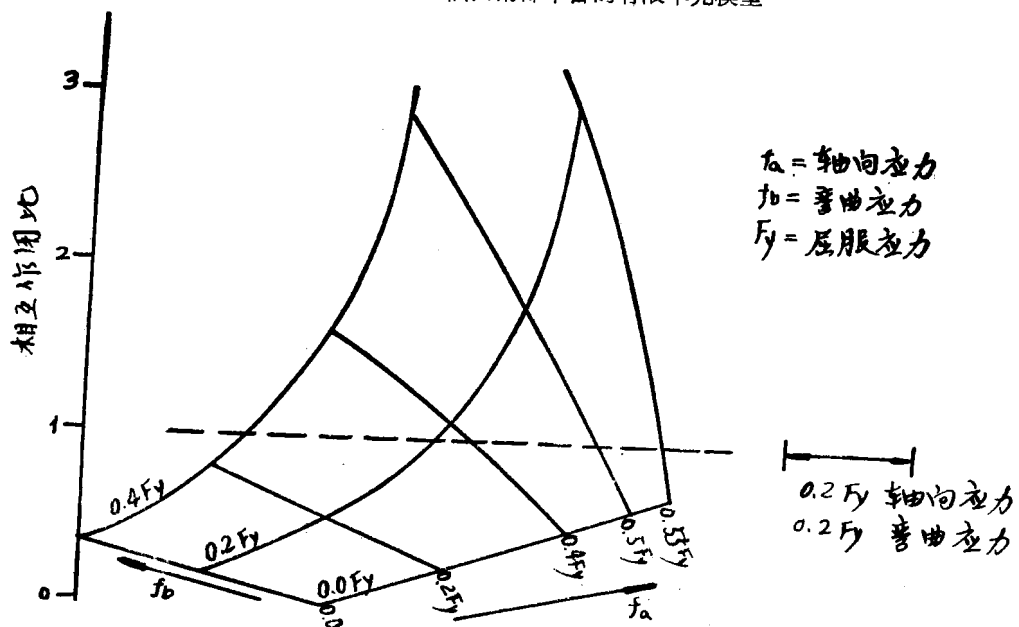


图 10 典型管状钢构件上的相互作用比随轴向及弯曲应力的变化

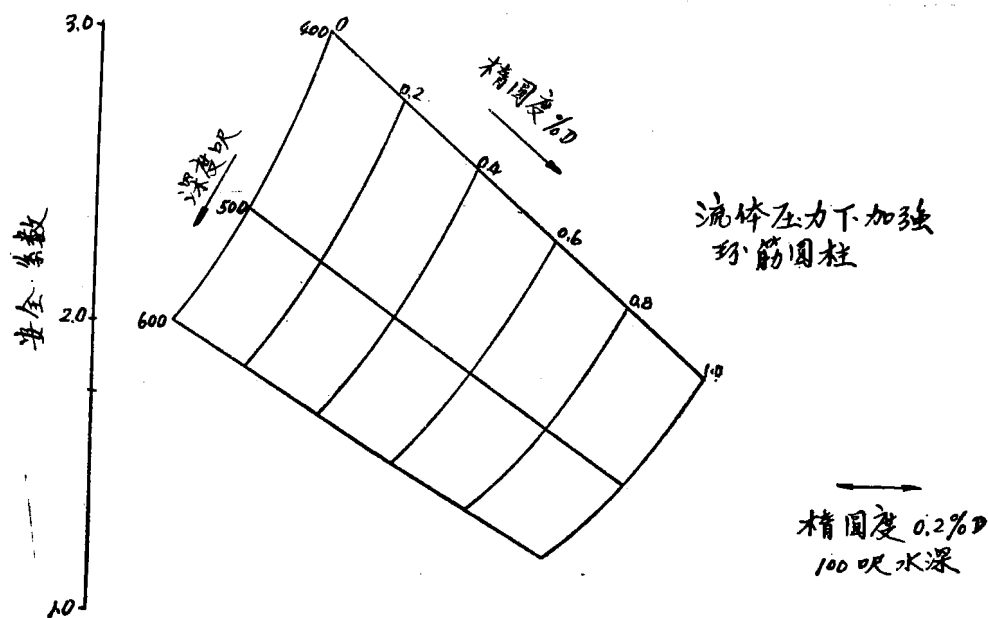


图 11 水深和椭圆度的影响

五、疲 劳

在北海平台的某些节点上已经出现疲劳破坏, 虽然未发生重大事故, 但结构的完整性下降了, 而且修复费用很大。目前对疲劳的评定, 就问题的性质和可资利用的数据而言, 只能作定性分析。对一艘北海平台以设计寿命 30 年进行评定, 核对了 1184 处可破坏的部位, 结果有 6 处计算寿命在 30 年以下, 69 处在 30~100 年之间, 余下的超过 100 年。此 6 处均位于套筒平台上部 1/3 范围内。

能得到此种产生疲劳区域的分布状况, 不仅是由于评定了 70 只钢质平台上节点的疲劳寿命, 也由于研究了一系列变量。如利用系数、许用的 S-N 曲线、几何形状上的应力集中系数, 定向波的过阈特性、波浪进角及方向、流的深度变化及持续时间、动力放大系数等等。静力强度研究, 进一步证实了在这些区域内, 某些水平构件的工作应力是高于用传统方法预测到的应力值。从我们的工作中清楚地指出, 静力的设计方法很大程度上已能顾及疲劳损伤, 若将一般公称应力取 2 万磅/平方英寸, 应用到套筒平台上部 1/3 范围内的所有节点上时, 只需要降低 20%, 或者在这范围内改进焊接剖面以使应力系数减少相同的百分数。我们每年对 40 只现有平台上这种节点进行检验, 是有希望进一步能做到定量分析。

虽然上述大部分研究是出自钢结构套筒平台, 但从图 12 与图 13 中可看出钢结构套筒平台与新型混合式钢结构套筒平台的典型损坏曲线有很大不同。例如, 对波高在 10~20 英尺之间的计算表明, 混合式损坏量增加。这是因为平台状态及大直径桩脚上的惯性载荷引起的, 在较深水中, 这类平台若基本众数频率与绝大部分这种波高的周期一致, 则因动力放大因素而助长了这种应力增加。