

# 海洋工程中的力学问题

林同骥 浦群

(中国科学院力学研究所)

**[摘要]** 本文概述“七五”国家自然科学基金重大项目“海洋工程中的力学问题”的社会、工程背景和学科特点,并扼要介绍13个子课题的主要研究成果。

## 一、引言

人口、资源和环境是当今世界各国面临的三大基本问题。人们已经预见到陆地承载人类的生存能力总有一天将出现超负荷状态,而辽阔的海洋蕴藏着丰富的资源,可以为人类生存繁衍提供极大的物质基础。

海洋是一个蓝色的宝库。据预测,本世纪末海洋石油产量占世界石油总产量的比例将从目前的22%上升到40%左右;此外,海洋还有波浪能、潮汐能、丰富的生物和矿物资源,还可建设海底隧道、海底油库、海上机场、海上城市等等,开发前景十分广阔。但海洋的开发和利用与一个国家经济发展程度关系密切。与人类在20世纪向空间的探索和开发相仿,未来的21世纪必将是开发海洋的新世纪。

我国海岸线漫长、海域辽阔,拥有140万平方公里的大陆架,有着丰富的油气资源。近期以开发海洋油气资源为目标的海洋工程的发展必将推动有关的学科发展和技术进步,并培养人才和积累经验,为我国在下世纪更大规模开发海洋奠定基础。

海洋工程与空间工程一样,是一门综合性很强的科学,它涉及环境、物性、载荷、动力响应、安全评价及有关技术等各方面的问题。就学科论,海洋工程与土木工程、机械工程、流体力学、海洋动力学、大气边界层、地震力学、断裂力学、结构稳定、土力学、计算和应用数学、实验技术等等密切相关。由于离岸工程长期经受风、浪、流、冰、地震等耦合作用的严峻环境,它使原先的学科面临着一些棘手的问题,同时也提出了原有学科中没有考虑到的新问题。海洋工程力学是近二三十年发展起来的新兴学科,其内容包括海洋工程流体力学、海洋工程结构力学、海洋土力学以及它们之间的交叉和耦合问题。

国家自然科学基金“七五”(1987—1991年)重大项目“海洋工程中的力学问题”是以海洋油气资源的开发工程为背景,研究各种海洋工程结构及其地基在波浪、海流、海冰、地震耦合作用的严峻环境下的载荷及其响应,分析海洋工程结构失效乃至破坏的原因与机理,为我国自行经济、安全地设计建造海洋平台和有效地进行油气生产提供科学依据,并推动与海洋工程有关学科的发展。本重大项目是在国家科委新技术局“六五”重大项目“工程中的力学问题”的一个部分——“海洋工程力学问题”的基础上进行的。结合我国国情,针对海洋平台设计中的关键问

本文于1992年11月16日收到。

题,把研究划分为海洋流体力学、海洋结构力学和海洋土力学三大部分共 13 个子课题。在学术上以跟踪世界研究动向、赶超世界先进水平为目标;在“六五”期间以研究线性问题为主,而本重大项目则向考虑耦合作用和非线性发展。对研究工作的安排采取近期与远期相结合,以使部分研究成果能较快应用于工程实际。

## 二、研究概况和主要成果

本项目由中科院力学所、大连理工大学、清华大学、北京大学、上海交通大学、南京东南大学、天津大学、同济大学、南京水科所、华中理工大学、国家地震局哈尔滨工程力学所、中国船舶总公司 702 研究所等 12 个单位承担,共有 351 名科技人员参与了研究工作,实现了预期目标,部分内容超过预定指标,于 1991 年 6 月通过了国家自然科学基金委员会组织的重大项目验收鉴定。从总体上讲,项目的研究水平与国际上现有的研究水平相当,部分研究内容达到国际先进水平。一些成果已应用于渤海石油开发工程、蛇口散装码头设计、南海海底管线铺设前期研究,有的成果已为交通部港口工程技术规范所采用。在国内外有影响的刊物上共发表论文 184 篇,在国内外学术会议上交流论文 209 篇,完成中、英文专著 8 册。获部委级二等奖 1 项、三等奖 3 项、四等奖两项。培养博士后 1 名、博士生 28 名、硕士生 143 名。为国家海洋工程力学的研究和发展锻炼培养了队伍、打下了坚实的基础。以下分别介绍 13 个子课题的主要研究成果

**1. 海洋环境** 海洋环境是一切海工结构设计的重要基础资料。该课题主要研究海洋环境中波、流和风在不同海域、不同季节的演化和运动规律以及地形、海流和风联合作用下非线性水波动力学过程。

我们用摄动法导出了在剪切流、密度分层和地形联合影响的复杂条件下孤立波演化的方程,用解析方法得到波流参数和环境参数的显式关系,国外尚未见到同类工作。对中等陡度岸坡椭圆余弦波的爬高和反射的研究取得了弱非线性的解析解,提出了浅水长波在水流和缓变地形组合条件下演化的二维理论和数值方法。

对水流和地形组合作用下波谱变形的研究,国外着重于采用波能守恒分析,我们则采用波作用量守恒方程,在理论和方法上优于国外同行,研究成果已为交通部有关规范采纳。波浪破碎是目前国际上尚无统一认识的难题,我们在大量实验和理论研究基础上,提出了适用于纯波和波流共存条件的波破的极限波陡指标。

对风生浪机制和实用预报方法的研究,从理论上提出了湍流在不规则界面上合理的动量输运边界条件,使风浪增长率数值预测大为改善。提供了第二代和考虑波波非线性相互作用的第三代风浪预报业务系统,经国家海洋环境预报中心评定,可作为长期预报或后报业务系统,准确率接近国际水平。

**2. 波浪载荷** 波浪载荷是海工结构经常性的作用力来源。该课题主要研究大尺度海工结构对波浪的反射、绕射和辐射引起的载荷,重点研究非线性波与结构物的相互作用。

对非线性水波的绕射和辐射问题,提出了二阶绕射势辐射条件的完备的数学表达,适用于无限和有限水深,给出了二阶势的远场高阶渐近解,完善了二阶波绕射理论和数值方法,澄清了学术界在这方面的争论。提出和发展了一整套浮体一阶、二阶波浪力和运动响应的预报方法,已多次应用于海洋工程设计。通过实验优选了透射系数最小、消波最佳的浮堤堤型,已为上海内河航运局和长江轮船公司采用。

对破碎波与强非线性波流场进行了分析,成功地模拟了卷跃破碎的演化过程。提出了计算破波拍击力的动量理论。在浅水破碎波对直立圆柱作用力的研究中,提出破波力的构成应考虑因波面变陡发生不完全绕流导致的附加压力,建立了破碎波对直立圆柱的多参数经验关系,经审定已列入交通部港口工程技术规范补充条文。

波流非线性载荷的数值模拟,采用边界元法和时间步进法直接计算波流耦合作用下的圆柱受力,取得较好效果。

**3. 粘性载荷** 对于海洋工程中的小尺度构件,波浪和海流引起的载荷主要是以旋涡运动为特征的粘性载荷问题。粘性旋涡流动也是当今流体力学研究的前沿问题。

针对 Morison 公式使用范围受到限制的情况,开展了多种条件下粘流载荷实验研究。提出了广义无量纲参数  $Kc$ <sup>①</sup> 数的概念,在国内外率先将纯波与波浪、规则波与不规则波条件下水动力系数与  $Kc$  数的相关关系归一化,并给出力的群桩系数以及合力群桩系数与桩间距、 $Kc$  数的相关关系,部分成果已纳入我国港口技术规范。用合理的数据处理方法,解决了中等  $Kc$  数下振荡流中圆柱升力系数分散问题,揭示了多峰值变化规律。获得了规则和不规则波中单柱水动力变化特征及统计分布。

钝体粘性绕流的数值模拟集中在数值方法和流动机制方面。发展了离散涡方法,对组合流中平板长时间周期性尾流的数值模拟,揭示了分离尾迹的演化分型。改进了随机涡法,结合网格涡技术求解 N-S 方程,模拟了横向涡街、升阻力特性及锁定现象。离散涡结合非定常边界层的计算,给出了振荡流绕圆柱群的水动力特性。高雷诺数圆柱非定常分离流的数值模拟,揭示了分离尾迹的三维演变。综合分裂涡法和网格涡技术,模拟了小  $Kc$  数圆柱振荡绕流的柱面附着涡。极小  $Kc$  数振荡圆柱诱导的二次涡流研究,发现了等涡量线和等动能线的分叉现象。

通过建立在 U 型振荡水洞及水槽中有效的流动显示技术,生动清晰地揭示出复杂流场中涡运动特点,由此研究了粘性载荷的物理机制。振荡流绕不同截面柱体的研究揭示了  $Kc$  数效应及物体形状和方位的影响,指出升力显著与横向涡街的相对应以及射流涡的出现与升力极值的相对应。柱群绕流的显示,给出了柱间距与尾迹分型的关系。海底波浪形边界对圆柱绕流影响的研究,揭示了强间隙射流的存在与负升力出现的关系。振动柱的锁定与稳定的研究,揭示了产生激振力的机制。

**4. 风载** 混凝土或钢结构的拖运或轻型柔性结构的采用,使风载和风振问题变得突出。该课题在高雷诺数( $2 \times 10^5 - 10^6$ )、不同无量纲中心距(1:05—7)、不同风向角( $0^\circ - 90^\circ$ )以及本底湍流度为 0.12%、大湍流度为 10% 下进行了系统的实验,给出双柱的时间平均和脉动风载特性,其中,在超临界  $Re$  数时斜列双柱的平均压力分布和各种布置时的脉动压力分布,为国际上首次获得。大气边界层气流绕经有限长单柱和双柱的实验,以及与均匀流状态的对比实验,比国外更为系统和接近工程实际。对均匀流和剪切流绕单柱和串列双柱的数值模拟,开发了计算程序,特别是给出了高  $Re$  数的结果。

**5. 冰与结构** 冰力学是 70 年代左右为适应极地开发需要出现的新兴学科。该课题主要研究海洋冰载荷及冰与结构相互作用的力学机制,包括海冰的本构关系和结构受冰力作用的静、动力响应。

①  $Kc = 2\pi(A/D)$ , 式中  $A$  是振幅或波高,  $B$  是结构物特征长度。

提出以紧凑压缩试件(CCTS)研究海冰断裂韧性  $K_{Ic}$ 、并据此计算冰载荷的观点,得到了裂缝尖端应力强度因子  $K_I$  的系列无量纲数值结果。运用应变能密度因子理论研究海冰的复合断裂准则,得到了张开和剪开混合的断裂准则和裂缝失稳扩展时开裂角的走向。在研究海冰的弹性性质及横向变形特性方面,提出了半破坏模量  $E_{0.5f}$ ,它位于冰内出现较多滑移细裂纹的非线性变形阶段,因而较为合理,受到国际同行重视。

冰板受力通常呈现非线性变形行为,假设冰为刚-塑性材料,采用钱令希-钟万勰的极限分析上、下限定理,获得了半无限冰板与单柱作用的变分解。此外,还研究了应变速率影响的海冰板的韧脆转变点。全面研究了冰的压缩破坏强度、断裂韧性和拉伸强度的尺寸效应,探讨了海冰拉伸强度的晶粒尺寸效应和应变速率敏感性。运用近代光测力学技术,采用白光散斑干涉,研究了冰的各向异性非线性变形全过程。

对冰与结构作用时的冰振问题,提出了“冰力振子模型”,弥补了国际上常用的“强迫振动模型”和“自激振动模型”之不足,使这两种对立的理论获得基本统一的解释。用此理论已预测到由实验证实的“频率锁定”现象。

首次提出,通过调整局部刚度和优化振型以改善柔性结构冰振的概念,并采用振型优化和动态子结构方法建立了完整的分析模式和计算程序,得到国际同行肯定与好评。根据冰振特点提出并完成了由结构动力响应过程反求冰力过程的理论模式和计算程序,已为渤海工程设计公司采用。

**6. 结构动力分析** 在平台结构的非线性响应分析方面,将 Lanczos 算法和模态综合相结合,可用静力模态代替主模态的计算。对海洋平台结构参数变化引起结构动态性能变化的研究,采用矩阵摄动和特征向量降阶法,可用于修改设计或估计使用后平台特性变化。发展了直接谱分析法用于平台随机波浪作用下均方响应的计算以及参数变化时均方响应的修改。以上述理论方法研究为基础建立了大型分析程序 ENST-OS88,可用于海洋平台的静动力和拖航分析。为渤海和南海西部石油公司提供的多次计算结果得到美国 ABS 的认可。

钢导管架平台的模型试验得到了前四阶频率及模态,研究了通过传递函数的测量来估计平台局部损伤。

小型钢平台模型的地震振动台实验指出了强地震下有效的局部非线性耗能措施。用反复载荷模拟地震作用,对重力式平台钢筋混凝土腿柱进行模型试验,建立了腿柱的非线性恢复力模型,用此模型进行强地震下平台结构弹塑性响应计算,给出了腿柱破坏的位置和过程。

建立了实际平台的动力特性、动力响应和长期强震的现场观测,积累了大量原始资料。

**7. 固定式平台的结构分析和耦合特性** 完成了多级动态子结构分析的理论和方法的研究。提出了一系列超单元动态子结构系统方法。对子结构系统的自由振动分析,提出了一种与模态综合技术无关的结构树周游的子空间迭代法。对多级子结构系统的强迫振动分析,提出了与自由振动分析相对应的振型迭加超单元动态子结构方法,实现了对任意多级子结构系统的自由振动分析和强迫振动分析的统一模式的精确子结构算法。还提出了与超单元动态子结构方法相对应的结构树部分周游策略,使计算效率大大提高。

对沉箱罐体群结构及其与基础的耦合动力特性分析,提出了两类计算模型和分析计算方法:一类是具有不同对称性子结构的耦合分析方法;另一类是对由  $C_{nv}$  对称罐体群结构与分层轴对称基础的体系,提出了在任意载荷作用下的结构静、动力分析的新方法,在此基础上又

提出并实现了该类结构体系耦合振动分析的有限元方法。

以饱和土壤的 Biot 理论为土壤力学分析的基本模型,建立了饱和土的动力学基本方程,给出了与动力微分方程变分对应的泛函表达式,采用多重子结构方法进行结构与饱和土相互作用的动力有限元分析,开发了通用程序 DIASS。

**8. 结构安全性** 包括结构的构件及总体安全性两方面。在带缺陷平台结构承载力研究方面完成了带缺陷构件组成的结构的后屈曲强度及承载力的研究。通过钢结构在反复荷载下破坏性态研究得出一种确定安定性载荷的新方法。分析和建立了结构在受损构件相继破坏下的崩塌模型。根据环境载荷的不确定性,引入模糊数学分析研究平台结构的模糊响应,提出了结构安全度评估的“模糊层次分析”模型。在局部构件安全性方面,对管状构件、一般形状壳和锥柱结合壳等进行了较系统研究,包括管状构件几何损伤、弹塑性、布局、残余应力等对强度、屈曲影响的研究及后屈曲分析的研究。

提出了海底管线屈曲传播压力的哑铃型新模型并考虑了中间接触段,在研究涡型几何缺陷影响上,提出了在柱面周向和轴向都存在涡型缺陷的分析方法,为国外同行引用和肯定。

**9. 结构疲劳强度** 以板状焊接接头模拟导管架平台管节点,在空气、海水自由腐蚀和有阴极保护下,开展了常幅及变幅随机加载下国产海上平台钢 E36-Z35 的海水腐蚀疲劳试验,得到相应的应力与疲劳寿命和均方根应力与疲劳寿命的关系曲线,并提出了疲劳强度和寿命的板厚度修正公式。在常幅循环载荷和随机变幅载荷下的海水腐蚀疲劳裂纹扩展试验,得到了焊接接头热影响区的裂纹扩展速率曲线和相应的 Paris 公式中的材料参数值,并用断裂力学方法进行了寿命估算。对 A537, A131 钢焊接接头粗晶区、正火区和母材,以及对 921A 钢的海水腐蚀疲劳试验,给出了起裂、扩展和断口特性。针对工程实际需要,在给定的随机载荷谱下进行模拟疲劳研究,并用于海洋平台结构模型试验。以三维表面裂纹研究为基础,对管节点表面裂纹应力强度因子提出既有严格理论基础和较高计算精度又适应工程应用的简便近似方法。针对海洋结构特点及疲劳过程的随机性,研究用概率断裂力学方法估算管节点疲劳寿命,得出了统计分布及特性,分析了影响参量的敏感性。

**10. 海洋土力学特性** 为结合我国情况制订工程设计规范,探明我国多海域海洋土的特性极为重要。由于已有资料多为砂土和粘土的,本课题主要进行海洋粉土动力特性的系统研究和动态实验技术研究。

对不同平均剪应力  $\tau_a$  和循环剪应力  $\tau_c$  作用下粉质土衰化的实验研究,揭示了在周期载荷作用下海洋粉质土强度和刚度的衰化规律。考虑到海洋环境中在长期的前期小波浪作用后海洋土静态强度的变化,实验研究了前期循环载荷对土静力特性的影响,得到前期循环载荷使粉质土的不排水强度出现显著衰减,衰减程度取决于循环载荷大小和循环次数的结论。对周期载荷作用下孔隙水压力的发展规律的实验研究,提出了适合于粉质土累积孔压发展规律的关系模式。通过研究综合平均剪应力、循环剪应力和循环次数,建立了确定周期抗剪强度的方法。采用不同超固结比状态的海洋粉质土进行动力特性实验,得出不同超固结比时动强度变化规律以及循环强度比随超固结比增大而降低,和在三轴及单剪两种不同应力条件下变化程度不同的结论。

精细改进引进的拟静扭剪/共振柱仪,开展主应力轴偏转对土动力特性影响研究,建立了包含主应力与动剪应力方向交角  $\alpha_0$  影响的动力本构模式,并应用于工程动力分析。

发展了埋置孔压传感器于试样中部以测定中部孔压的技术,采用硅橡胶代替通常在实验中用的橡皮膜,从而提高了振动孔压的量测精度,研制了动态侧压系数测定仪。

**11. 应力波理论应用于沉桩分析** 引进并推广了国际上较为通用的一维应力波理论微机应用软件。在收集海上、陆上14根开口打入大超径钢管桩工程的地质、施工与试验实测资料基础上,通过反算分析,提出了适合我国工程及土质情况的沉桩能力预测分析方法和计算参数,建立了连续打入桩时土静阻力的估算方法。建立了整套打桩现场动力监测技术,成功地应用于渤海B234-3/4单点系泊平台桩基的现场动力监测。发展了现场随桩的打入观测桩内土芯顶面高程变化的实用方法。进行了横纹硬木及纸质锤垫动、静模量测定试验及石棉片薄钢板互层锤垫的刚度随锤击次数的变化规律的现场实测。建立了室内落锤式冲击试验装置并进行了沉桩阻力的模型试验。建立了根据打桩过程实测顶力、速度和位移直接反演土性参数的理论和计算程序。

**12. 地基稳定性及变形** 海底土层稳定模型试验是该课题研究工作的重点。建成了长23.6米、宽0.8米、深1.0米、带有3.6米长地下式地基段的海底土层稳定模型试验槽,不仅国内唯一,国际上亦为数不多。研制了性能优于美国同类试验所用的微型应力传感器。进行了土层表面为平面及0.015坡度斜面下的试验,取得一批不同波浪条件下,地基不同深度处的应力、孔压及位移数据,实验结论有助于阐明波浪作用下海底土层中的应力状态和位移(滑移、液化、失稳)可能性,并为理论计算提供实验验证。

基于波浪压力下海底土层中孔隙水流动状况的分析,提出了描述孔隙水流动引起海底土层位移场和应力场的简化力学模型,并结合模型试验和海域情况进行计算,指出波高对土层的位移和应力有重要影响。考虑土的粘弹性特征、非线性特征及海水与土体在泥线处的动力耦合作用,推导得出波浪引起的海底土层残余孔隙压力的计算方法并编制了程序。

运用可靠度理论,结合渤海一座混合座底式平台的设计方案,分析探讨了海洋平台地基稳定性的可靠度及其敏感性,提出了有关设计参数的分项系数建议值。

**13. 桩土相互作用** 通过室内模型桩试验,在轴向静力和周期载荷综合作用下分别研究了粘土和砂土中桩的拉力特性,综合分析模型桩与现场桩结果,提出以归一化桩累积位移定值作为确定桩身承载力的主要位移条件,给出归一化桩身承载力随动、静载荷比值的数量关系及突变界限。研究了轴向静载下桩的垂直方向的应力与位移曲线。提出综合考虑桩尖和桩侧载荷下,桩身压缩量的计算方法。研究了单桩在侧向静载及反复载荷下的 $p$ - $y$ (水平应力-水平位移)曲线。在国际上首次进行了侧向载荷下模型群桩的 $p$ - $y$ 曲线实验,给出了桩间距对 $p$ - $y$ 的影响。

### 三、结束语

尽管人类在海洋技术上已取得重大进展,但离开真正驾驭大海还有很大距离。海洋工程的发展方兴未艾,它向力学工作者提出了挑战,也提供了机会。

海洋工程力学的研究不仅涉及多个分支学科,研究综合性强,且研究内容亦是多层次的,既有为工程设计直接所用的应用性研究,也有以工程和高技术发展需要为背景的基础性研究,它们是互相联系、互相依赖和互相制约的有机整体。

从世界发展趋势和我国具体情况看,需要大力开展海洋工程力学研究,争取尽早使我国海

上油气开发从反承包过渡到独立自主。

## MECHANICS PROBLEMS IN OFF-SHORE ENGINEERING

Lin Tongji      Pu Qun

(Mechanics Institute Academia Sinica)

### Abstract

“Mechanics problems in off-shore engineering” was a major project supported by the National Natural Science Foundation of China in 1987—1991. In present paper the social and the engineering background and the scientific characteristics of this project were summarized. The major research results for 13 sub-projects were brief mentioned.

· 信息 ·

## 国家自然科学基金委员会举行数理科学基金项目成果报告会

国家自然科学基金委员会组织的“数理科学基金项目成果报告会”1993年2月17—19日在北京举行。举行这样的报告会是国家自然科学基金委员会成立以来的第一次,引起了各方面的重视。参加这次成果报告会的有:各有关方面的负责同志,在京的20余所高等院校、科研单位的百余名科技工作者,国家自然科学基金委员会的部分工作人员及应邀前来的十几位中国科学院学部委员。

此次报告会有9名代表在大会上作了成果报告,36名代表分别在数学、力学、物理和天文等4个分会场报告了他们的科研成果。这些报告从不同侧面展示了我国实行基金制以来数理科学基金项目取得的成果,尤其可喜的是一些中青年富有创造性的工作受到了与会专家的高度评价。

到会的学部委员和与会代表就如何发展科学基金制;在基金工作中更好依靠专家;加强基金项目的后期管理;提高基金评审的公正性、科学性和资助效益;在当前形势下科学基金如何在“稳住加强一头”方面发挥应有的作用;如何加强对数理科学的支持;推动数理科学的发展;在国际上争得一席之地等问题进行了座谈。

一些学部委员认为,这次报告会虽然是数理科学基金资助项目中的一部分,但体现了科学基金在基础研究中的重要作用。部分成果正是由于得到科学基金的资助或通过持续稳定的资助,才得以发展并走向世界,引起国际学术界的重视。国家决定,今后3年给科学基金每年增加7000万元,使“八五”期间的科学基金总额达15亿元人民币,对稳定基础研究队伍、加强基础研究工作是十分有意义的。但是从科技发展的需要来看,大家希望今后能不断增加对基础研究的投入,并且能有科研津贴等改善政策匹配。

(数理科学部 岳忠厚 李西云)