

图 10c

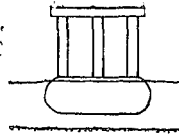


图 10d

浮板施工可以在避风条件较好的湾内海域进行。我们也可以把浮板放在岸边来进行施工，这样，材料可以从陆路运到浮板上，当然事先要对岸边进行整理。浮板可以是钢制的。如果水深允许的话，也可以利用废船或驳船来替代。在它们的上面搁置一个梁板系统来进行同样的施工。

对于海底地基的处理，除了下帽桩，我们认为可以采用螺旋桩或戴帽的螺旋桩和附加水冲吸等方法增强平台的稳性。还可以在基础底装置吸泥设备来达到把平台基础埋入土中的目的。也可以采用平台下沉就位前在海底底址邻近区进行爆炸，来达到清除该区浮泥或淤泥，同时又可以增强该区地基下卧层的密实性。这样，平台可以在海底被埋得更深和更稳固。

波 浪 和 波 载*

中国科学院力学研究所 晏名文

波浪是海水的基本运动形态，是海岸设施、近海结构和海上船舰所遇到的基本海况。因此波浪研究具有重要的理论和实际意义。

大体上说，波浪研究可以分为两个阶段。从19世纪中叶到本世纪50年代为第一阶段。在此期间主要运用流体动力学理论处理波浪，目的是用数学工具描述波浪的基本运动学特性。于是发展了各种确定性波浪理论（包括线性和非线性理论），求出基本方程的各种解析解和数值解。最近无论在极端非线性问题，还是在计算准确度和适应性方面，均取得了相当大的进展。本世纪50年代以后为第二阶段。在此期间建立并发展了波浪统计理论，以统计学和流体动力学为基础，按随机过程描述波浪，从而使实际波浪的分析和预报水平大大提高一步。这方面的工作在1960年前后达到高峰。可以说，到目前为止，大多数容易处理的海浪特性已经弄清楚，剩下许多困难的现象则需要运用复杂的数学力学工具进行分析研究。这样一些理论也许非常繁难而无法应用。所以最近又有返回到有效波高、有效周期等简单概念的趋势。

回顾历史，近代波浪理论确实已经取得巨大进展，但是，仍然有诸如波浪生成和碎浪动力学这样一些重要的科学课题需要进一步解决，完全实现海浪预报也还是一个繁重

* 1981年6月12日收到。

的任务, 必须继续改进波浪预测方法, 并直接进行现场观测分析。

50年代以后, 随着海洋开发, 特别是海上采油工业的发展, 研究近海结构的流体动力载荷或波载的兴趣越来越大, 因为波载通常是深水固定结构的主要载荷, 而风载一般不超过总环境载荷的5%。起先由于近海圆柱管柱的设计, 开始研究圆柱波载, 从而建立了Morison方程这样的半经验公式。以后由于海上钻探和采油深度加大, 发展了大型重力型平台, 相应地建立并发展了计算大型近海结构(包括水下油库和海底建筑物)波载的势流理论。总起来说, 由于近海结构波载计算的历史不长, 目前还有不少应用研究和理论课题要作。我国海上采油和海洋工程正方兴未艾, 为了自力更生设计建造国产平台和其他近海结构, 自然更应该联系我国实际海况, 加紧研究有关的波浪和波载问题。

本文试图比较系统地综述波浪和固定式近海结构的波载研究的国外进展情况。但是, 由于文献分散难找, 了解有很大局限, 难免有遗漏欠妥之虞。

一、波 浪

如前所述, 研究波浪的方法有两类: 确定性波浪理论和波浪统计理论。

2.1 确定性理论

线性波浪理论 假定不考虑海面、海底和结构表面附近的海水运动细节, 或者不研究波浪的耗散过程, 处理海浪问题时, 可以忽略海水粘度。一般来说, 无粘波浪是非线性边值问题, 没有封闭的解析解。但是, 正如Stokes(1847)所做的那样, 可以在小扰动假设下, 将自由面边界条件加以线性化, 从而把波浪问题化为正弦波型的线性问题, 建立最简单的线性波浪理论。尽管这一理论比较简单, 但却是大多数海洋工程波载计算的基础。

非线性波浪理论 随着波高与波长之比 H/λ 增大, 而随波浪变陡, 非线性效应越来越显著。为了建立完善的以摄动法为基础的非线性波浪理论, 流体力学家断断续续研究了百余年。起先Stokes(1847)对深水重力波建立了著名的Stokes级数解, 此解是以 a_1/λ 为参数的幂次展开式(a_1 约相当于第一次谐波的振幅), 从而求出任意均匀水深的周期波浪的三级近似(即Stokes三阶波浪理论)。随后Stokes(1880)又求出深水波浪的五级近似(即Stokes五阶波浪理论)。Stokes的这些工作为近代波浪理论奠定了基础, 至今仍是近海工程设计的理论基础之一。继Stokes之后, Wilton(1914)求出深水波浪的十级近似。De(1955)则求出任意深度的五级近似。这一期间由于计算上的困难, 高阶非线性波浪理论发展很慢。

Stokes级数有一个缺点。这就是当波浪的陡度太大时, 级数发散。最近几位研究者对非线性波浪摄动法作了改进。首先要提到的是Schwartz的工作(1974)。他定义了一个小参数 H/λ (这里 H 是由波峰到波谷的高度), 并借助于Pade求和法使级数收敛。Schwartz非线性理论可以计算有限水深时97%最大波陡的波浪中的流体运动, 还可计算无限水深的所有波浪, 包括最大波陡的波浪中的流体运动。不过, 当求波高、水质点的速度和压力时, Schwartz展开式长达70项之多, 计算工作量非常大, 需要计算机进行计算。Schwartz还确定了作为水的深度的函数的最大波陡。他的结果同Cappe-

lear (1959) 用绕射理论得到的结果相符合。

随后 Longuet-Higgins (1975) 定义了一个新参数 w ，

$$w = 1 - \left[\left(\frac{q_{\text{峰}}^2 + q_{\text{谷}}^2}{c^2 c_0^2} \right) \right]$$

式中 c 为相速度， c_0 为相同波长 λ 的低波速度， $q_{\text{峰}}$ 、 $q_{\text{谷}}$ 分别为波峰、波谷处水质点速度（以相速度运动的观察者所看到的）。采用此参数的优点是，未知的波高不用作展开参数，而且当波陡从零增加到最大值时， w 准确地由 $0 \rightarrow 1$ ，因为对于极限波浪， $q_{\text{峰}} = 0$ 。Cokolet (1976) 引入一个类似的小参数 ε ：

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{q_{\text{峰}}^2 + q_{\text{谷}}^2}{c^4} \right)}$$

应该指出，最近的这些高阶波浪理论的结果还有待实验验证。

值得提到的是，对于深水陡波，Longuet-Higgins (1973) 的近似理论是相当吸引人的。他的深水最大陡度波浪的近似公式很简单，而且他证明，由此算出的波浪参数与精确结果最多差 3%。

50年代以来，研究非线性波浪的纯粹数值方法发展起来。在这类方法中需要猜测波浪形状，并在计算过程中不断进行调整，直到沿波形的许多点上满足某一误差准则为止。代表性工作有 Yamada (1957)，Dean (1965)，Jhomas (1968, 1975)，Byatt-Smith (1970)，Strelkoff (1971)，Sasaki (1973) 等人的工作。目前这种数值方法在小到中等波高波浪情况下获得较好结果，而在大波高情况下误差较大。

应该指出，随着波峰的曲率加大，自由面张力愈来愈显得重要。目前还没有一种高阶理论能同时考虑重力和表面张力的作用。这是今后波浪理论的研究方向之一。

波浪破碎 当波浪达到极端波高或最大波陡时，波浪变得不稳定而破碎。波浪破碎对海上结构和舰船产生最大流体动力载荷和严重损害。此外，碎浪给海面流动传递水平动量，为海洋上部各层提供湍流混合能量，并且强化界面附近气体和某些物质的海气交换。因此，研究碎浪历来具有重要意义。但遗憾的是，至今对海浪的破碎机理了解得很少。碎波动力学还没有很好建立起来。现在充分描述与时间相依的波浪破碎过程的解析理论还没有。Price (1971) 曾经尝试研究小扰动对 120° 角流（最高波峰）的影响，但是这一理论并不适合，因为它的解包含破碎之前和破碎之后的数学奇点。用数值方法描述波浪破碎取得了一定成功。海洋工程用得较多的方法是 Dean (1971) 的方法，即事先实际测量破碎波浪的剖面，然后使一无旋流动与之拟合，条件是沿海水表面的压力同大气压的偏差最小。这种方法能粗略地预测速度场，不过主要缺点是，波形定常的假定不符合实际，不能预测波浪的演变。实验表明，这种方法所预测的逸出碎浪在破碎点的速度误差为 10—30%。波浪破碎理论的发展有赖于理论计算和实验的密切配合。

应该指出，由于海岸、海底地形，各种天然和人工障碍物的影响，浅水波浪问题比深水复杂得多。这些影响的表现形式有波浪的绕射、折射，波能吸收和浅滩效应，等等。限于篇幅，在此不一一详述。

2.2 波浪统计理论

实际海浪是海水的随机运动过程。观测表明,风浪的消长,除了受经典的流体动力学规律支配以外,还与海浪的统计规律有密切关系。尽管单个波浪是杂乱无章的,但整个海浪的概率特性却是相当稳定的。为了正确预报海浪,为了向有关工程设计提供可靠的海况,50年代前后开始发展波浪统计理论。

Barber和Vrseil(1948)最先尝试用波谱法描述不规则海浪。他们第一次测量并分析了海浪波谱。Pierson等利用Neumann(1953)从实测资料得到的波谱和Longuet-Higgins(1952)根据Rayleigh分布的波浪统计特性所取得的结果,提出新的波浪预测方法,即PNL方法。从此波谱的理论和实验研究迅速开展起来,到60年代左右达到高峰。目前波浪统计理论总的状况是,海浪的主要线性特性理论上早已弄得很清楚。但是,实践证明:有向波谱的纯线性估算应用起来有些困难。二级和三级摄动法已经揭示了一些重要的非线性特性,不过结果的实际应用非常复杂。很陡或破碎的海浪迄今还不能分析,不过研究工作在相当先进的水平上进行。风生浪机理在1955年前取得了巨大进展。但是,今天看来,这个问题是这样复杂,以致今天还不能完全了解其内在过程。实际海浪预报只有靠国家或地区投资来尝试解决。总之,目前海浪统计理论的研究势头仍在下降,不过,海浪的实际统计分析工作却一直在进行。

线性统计理论 线性波浪统计理论是最早发展的,也是工程上最常用的统计理论。现在海浪知识基本上来源于这种简单理论。在此理论中用无限多个小扰动波的线性叠加表示海况,每一波浪具有随机性的波幅、方向和相角。海面位移是高斯随机变量。若假定能谱是“窄谱宽”,则其他统计特性可以由能谱导出。50年代在线性统计理论方面做了大量工作,例如Longuet-Higgins(1957)确定了三维海水表面的若干特性。这种理论的主要限制在于对谱的高阶矩的解释。因为这些高阶矩取决于高波数和高频时的波谱形状,而且波谱的高频端总是被测量仪器歪曲,或者更确切地说,与湍流的表面张力特性有关。对于后者目前还缺乏足够的了解。在线性统计理论方面,进一步要做的工作是精心改进随机过程的线性模型。

非线性统计理论 到了60年代应用摄动法求出了非线性展开式中的二次项和三次项。二阶和三阶摄动法已经揭示了一些重要的非线性波浪特性。但是由于计算非常复杂,结果难以付诸应用。现在流行的长程高波的概率统计只局限于采用经验系数和波候统计,以致稳态海浪系统的精确统计理论似乎远没有得到最终结果。Hasselmann, Munk和Macdonald(1963)证明,在浅水涌浪(长波)情况下,应用海浪“双谱法”可从实际数据中抽出并分析二阶波浪摄动。这对于船舶有应用潜力,因为船舶对波浪应力产生非线性响应。

三阶摄动或相互作用也许同波浪统计理论的工程应用无关。但它在海浪生成和发展机理中起重要作用。不象二阶摄动那样,三阶摄动随时间增大,因此,将能量从有向波谱的一部分稳定地传递给另一部分。事实上,实验证明:如果要对海浪预报作出有意义的改进,三阶波能的传递过程显然是应该加以考虑的。

二、波 载

正如前言中提到的那样,波载是近海结构承受的主要载荷。正确预估波载是近海结构设计的先决条件。因此波浪和海流产生的作用力是海洋动力学的基本课题,引起了力学界和海洋工程界的重视。关于近海结构的波载,Hogben(1974),Milgram(1976),Lighthill(1979)均作了很好的综述,本文对波载计算的主要问题、方法和工作加以导引性的介绍。

严格说,波载分析是一个很复杂的问题,因为海水流场的运动学特性本来就难以准确确定,对结构物的振荡绕流的分离和旋涡逸出现象难以作出恰当解释,更有甚者,实验测定的数据很难准确外推到各种海洋环境中去。尽管如此,最近30年来经过各种努力,无论是半经验波载理论,还是精确的势流(绕射)理论,均取得了很大进展,在正确设计近海结构方面起了巨大作用。

近海结构上的流体动力作用主要有阻力、惯性力、侧向力和绕射力等。阻力载荷主要是由于流体相对速度形成的流动分离引起的;惯性力是物体周围流体的相对加速度有关的压力梯度引起的;侧向力是旋涡的不对称逸出引起的;绕射力是物体形成的入射波散射引起的。

将海水的运动状态,即海况转化为波载有两种方法:确定性方法和统计方法。前者广泛应用于近海结构设计中的准静态和动态分析。作准静态确定性分析时,设计波浪为具有典型的确定波高、周期和方向的最恶劣情况。动态确定性分析中,海面的时间变化史一般通过线性理论的谐波分量来模拟海洋波谱。统计方法用于结构物的长期疲劳特性分析,作为确定性分析的重要补充。

2.1 Morison 方程及有关问题

当竖立圆柱直径比波浪的波长小得多,即流体质点的运动距离显著大于圆柱直径时,可以作如下基本假设:(1)物体不影响波浪运动,(2)流动是二维的。按照一般方法,这样的圆柱绕流可以分解为满足边界条件的无旋流动和有任意脱体旋涡的旋涡运动。无旋流动代表流体对边界条件的瞬时反应。此流动的全部“记忆”都留在旋涡运动中。

最早Morison等(1950,1954)建立了计算圆柱波载的半经验公式,即所谓Morison方程:

$$F = (1/2) \rho U |U| A C_d + \rho V \dot{U} C_m \quad (2.1)$$

式中 F 为波浪对圆柱的水平作用力, A 为物体特征横截面积, V 为物体体积, ρ 为海水密度, U 为海水质点在力方向的速度, C_d 为阻力系数, C_m 为惯性力系数。虽然Morison等人并没有给出 C_d , C_m 与实验参数的变化,但是此式却符合上述原理,并且可以相当准确地预估竖立小圆柱的波载,因而在工程中获得广泛应用。

继Morison等之后,对圆柱波载开展了大量理论和实验工作,主题是 如何确定阻力系数和惯性力系数同实验参数之间的关系。

Keulegan和Carpenter (1958)对物体的二维正弦型振荡绕流作了经典性理论分析。他们发现, C_d , C_m 是周期参数, 即Keulegan-Carpenter数 $N_{kc} (=U_m T/d)$ 的函数(此处 U_m 是振荡流动的最大水平速度, T 是流动周期, d 是物体特征尺寸)。他们还发现, 对于小于3的小周期参数, 波力可由方程(2.1)的第二项势流解准确给定。

最近Sarpkaya (1976)在大的U型水槽中对圆柱的平面振荡绕流进行了大量观测实验, 取得了许多重要结果, 其实验条件是, Re 达到了 7×10^5 , N_{kc} 达到200, 相对粗糙度为0.001—0.02。他不仅用福利衰分析和最小二乘法确定了阻力系数和惯性力系数, 而且用最大的半峰值到峰值和均方根值分析了侧向力, 此外还确定了旋涡的逸出频率和Strouhal数。Sarpkaya得到如下结论: (1)对于光滑圆柱, 阻力系数惯性力系数是 Re 和 N_{kc} 的函数; (2)对于粗糙圆柱, 力系数还与粗糙度 k/d 有关, 并同相应的光滑圆柱的力系数大不相同; (3)应用“频率参数” $d^2/(vT)$ (v 为海水运动粘度)和粗糙度雷诺数 $U_m k/v$, 可以对以前的和现在得到的数据作出新的解释, 并且可以建立超临界 Re 数的圆柱振荡绕流的模型律。

按照Morison方程计算圆柱波载时, 力系数的确定还有许多问题: 一是对流场的物理性状并不充分了解, 二是缺乏准确可靠的实验数据。为此Hogben (1974)在评述中提出三条重要建议:

(1)对现有波力系数数据进行评价, 以便在现有水平上为近海结构设计提供最好的数据;

(2)需要真实海洋环境中的大尺度实验的可靠数据, 同时支持在可控制的实验条件下进行基本实验研究;

(3)以流体动力学为工具, 开展长期的基础理论研究, 以便为近海结构设计提供更好的计算方法。

事实上, 从1976, 1979年召开的两次国际近海结构物性状会议BOSS'76, BOSS'79的论文和报告来看, 近海结构的波载问题的理论与实验研究正在深入开展。需要研究的基本问题还不少, 下面择要略举数例。

旋涡逸出与侧向力 近海结构的波载计算涉及一个重要的基本问题, 即振荡绕流中的旋涡机理, 其中包括旋涡的形成、逸出、演变及其同波力的关系。现在阻力系数的测量值同计算值有较大差别, 原因之一就是旋涡逸出和出现较大侧向力。另外, 在设计近海结构时, 这种侧向力往往大得不容忽视, 特别是当旋涡逸出频率接近结构物自然频率时, 物体将发生显著振动。这是应予重视的。遗憾的是, 对圆柱振荡绕流的侧向力的研究, 相对来说, 是注意不够的。

Hogben (1975)对圆柱的振荡尾迹进行了研究。他根据直观推理, 对波浪中固定圆柱提出了一个概念模型, 即“振荡尾迹质量模型”。他假定, 尾迹边界是形状固定不变的运动的椭圆形, 而且纵向振荡的“死”尾迹中加速流体所需的力就是阻力。在这个边界以外, 通常的绕椭圆的势流理论假定仍然成立。从而得到一个相当简单的, 作为 C_d 和 N_{kc} 函数的 C_m 近似表达式:

$$C_m = \frac{\sqrt{N^2 C_d / \pi^3 + (1/4)} + (3/2)}{\sqrt{N^2 C_d / \pi^3 + (1/4)} + (1/2)} \quad (2.2)$$

此式的结果同 Sarpkaya 的实验数据在一定程度上相符合。不过此式不能准确地模拟固定的 N_{kc} 值和变化的 Re 下的 C_m, C_d 关系。尽管如此,这一极其简化的近似分析为处理振荡绕流的旋涡问题带来令人鼓舞的前景。

Sarpkaya (1976) 对物体的二维振荡绕流中的旋涡逸出在 U 型水槽中进行了实验研究。他得出如下结果:每一周期得出的旋涡数目随 $U_m T/d$ 增加而增加。此外 Keulegan 和 Carpenter (1958), Rance (1969, 1970) 等也对此问题进行了研究。

关于侧向力问题,限于篇幅,不多涉及。

高雷诺数阻力 另一个需要进行基础研究的问题是高雷诺数阻力。目前 C_d, C_m 的数据大多数来自实验室,而在实验室条件要获得典型的全尺寸雷诺数下的可靠波浪阻力载荷是很困难的。解决的办法有两个:一是采取措施,改进造波机,提高实验室的波高。目前英国国家物理实验室 (NPL) 正在通过各种方法实现这一点,圆柱振荡绕流的最大雷诺数刚超过 10^5 ;二是在海洋现场测量数据。

三维非线性效应 上面所述的理论分析和实验研究均限于二维情况。事实上,在三维情况中,用 Morison 方程是否能正确预估圆柱的波载还是问题。例如 Wiegel (1964) 证明,波浪中竖立圆柱的 C_d, C_m 对 N_{kc} 的组合实验结果变化很大。1969 年近海技术会议 (The Offshore Technology Conference) 的一些论文和报告也提到类似的变化。这种变化可能有两种原因:(1) 这些数据只作为 N_{kc} 的函数来考虑;(2) Morison 方程本身在三维波浪中根本不成立。此外,对于穿透水面的竖立圆柱,当水深 h 与波长之比 $h/\lambda < 0.25$ 时,非线性效应越来越显著,多少是与波陡成正比。加上波浪的破碎和冲击,自由面附近物体的局部载荷是很复杂的。总之,这些三维非线性问题目前还远未得到解决,将成为最近的主要研究课题。

处于平均水面附近的水平构件,随着波浪起伏,交替处于水中和空气之中,受到变化的浮力和波浪冲击作用。如果构件轴平行于波峰,这种冲击载荷很大。Karman (1929) 计算过圆柱的冲击载荷系数等于 π 。由于载荷带有冲击性,从而结构物产生动态响应。最近英国国家海洋研究所 (1977) 实验测定,该系数约等于 3.5。这与稍微计及动力放大效应的理论值相符。在严重情况下此值可能接近 6。其他形状,特别是平板所受的冲击载荷和脉动浮力还要大,加以此种载荷的时间尺度量级在严重时可能达到 0.1 毫秒。这样高的频率对构件节点的疲劳寿命无疑有显著影响。

在风暴情况下波浪通常达到极限波陡而破碎。因此,不仅近岸结构而且深水结构均可受到波浪破碎的作用。碎波造成若干影响波载分析的不确定性。无疑空气卷入会降低水的密度,因而减小波力。此外难以确定形成浪花和泡沫的水面位置。波浪破碎最严重的后果是波浪直接在结构物上破碎。目前已对此问题进行了一些简单的实验研究,并得到如下结论:碎波产生的冲击压力看来不会超过水锤理论所预测的压力。

海流对波力的影响 海流对于用Morison方程预估结构物波力有显著影响。其基本理论与船舶的兴波阻力类似。海流至少以如下四种方式改变波浪对结构物的作用力:

(1)引起海水质点速度变化。当海流方向近似平行于波浪传播方向时,海水质点速度为二者质点速度的向量和。这将产生重要影响,因为阻力与合速度的平方成正比。在一般情况下,由于Keulegan-Carpenter数的意义和估算不确定,为安全起见,最好也采用质点速度的向量和。

(2)海流改变波浪的传播方向,影响波能的集中和散布。

(3)海流改变波浪本身的形状,例如遇到迎面海流的波系会变陡,甚至破碎而释放能量。

(4)海流使结构物的尾迹和旋涡发生很大变化,从而影响Morison方程中的流体动力系数。

Longuet-Higgins 和 Stewart (1961), Dalrymple (1974), Tung 和 Huang (1973, 1976) 等人均对波浪与海流相互作用对载荷的影响进行了理论研究,建立了理论模型。限于篇幅,不拟详述。

2.2 势流理论

当结构物直径或横截面特征尺寸比波浪的波长不太小,即流体质点的运动距离并不显著大于结构特征尺寸时,波浪运动不受物体存在的影响这一假设不能成立,因而Morison方程也不成立,必须采用势流理论来计算物体波载。势流理论可以用统一的方法处理纯反射、绕射和惯性力三种载荷状态。因而有的文献把势流理论称为绕射理论。绕射理论既有实用意义,又有理论意义。因为海岸海港和石油平台均遇到水波的绕射效应,而且水波绕射问题数学上有许多不同于声波和电磁波理论的特殊边值问题。因此,水波绕射理论最近引起很大兴趣。

线性势流理论 线性势流理论的基本假设是,海水的流动是理想(无粘)流体的均匀无旋运动,而且波浪是处于静力平衡状态下的小扰动。这一问题的物理本质是,已知的入射波作用到物体以后,从物体向外形成散射波。线性势流理论的基本方程是拉普拉斯方程。求解必须满足底部、自由面和物面的边界条件,而在外部散射波速度势还须满足辐射条件。

关于求解,Lamb (1932)证明:通过应用格林定理,对于无界流体,物体周围的流动速度势可用物面上的源分布或偶极子分布描述。这种表述很容易推广到有自由面的有限深度的流动,但是必须带附加项以满足自由面和底面边界条件。在这种方法中解绕射的流体动力学问题,归结为首先确定源强度分布函数。一旦求出这一函数,此问题即视为已经解决。

目前此问题的求解情况是,对于二维问题,已经对下列情形求得解析解:圆柱、圆形浅滩顶部圆柱所产生的绕射和折射波、在无穷长直海岸线上的矩形海港中的波浪等。对于更复杂的二维问题,则需利用数值方法求解。许多文献表明,用数值方法求出的固定物体波载结果同实验很符合,对精度的唯一限制是计算机的容量和准用的机时。实际工作中这些限制往往很严格,因此应该研究计算工作量较少的计算势流波载的数学方法。

对于无界水域的势流波载的数值解,可以列举以下各人的工作: Hwang和Tuck

(1970)用源分布边界积分法解均匀水深的振荡。Shaw(1975)讨论了将此法推广到非线性波浪(象孤立波)和完全的瞬时问题。Vastano和Reid(1967)采用有限差分法求解。Chen和Mei(1974, 1975)用一组Hankel函数和三角函数作为波浪绕射问题的外部解,并通过变分原理,将外部解同内部区域的有限元解联系起来。Zienkiewicz(1975, 1977)将这些方法加以推广,使其将有限元解同任何类型的外部解,包括解析解、级数解或边界积分(源分布或格林恒等式)联系起来。同时Zienkiewicz和Betters(1975, 1977)给出完全不同的方法,其中用将形状函数推广到无限区域的“无限元”(infinite element)解波浪绕射和折射问题。

以下着重介绍各种同有限元法相结合的数值方法。用有限元法表述内部区域各方程有很多优点,例如,可以处理任意几何形状,易于处理深度、盐度和温度变化等非均匀性,容易推广到非线性问题,当需要作流体和结构物(和可能的无约束基础)的完整动力学分析时,容易建立整个系统的耦合方程,等等。

同有限元法相结合,用以求绕射和折射问题的数值解的方法主要有以下四种:

(1)边界阻尼法 此方法始于Zienkiewicz和Newton(1969)。他们用有限元法解压力波动问题。此法的优点是概念和计算简单,可用于完全的瞬时问题,而不是周期性问題。缺点是必须用有限元加以理想化的区域可能相当广。

(2)同边界解耦合 对于表面波绕射的特殊情况,Chen和Mei根据变分原理,将有限元法同用Hankel函数表示的外部级数解耦合。Zienkiewicz(1975, 1977)给出更普遍的数学表达式。

(3)与边界积分耦合 Zienkiewicz(1975, 1977)证明:两类边界积分,源分布和格林恒等式,可用来作为外部解,并与有限元准确耦合。

(4)无限元法 无限元法的定义同有限元法很相似,唯一的区别是它的范围伸展到无穷远,因之应用指数函数。Betters(1977)对于定常状态问题引入了基于指数衰减的形状函数。Zienkiewicz等(1975, 1976, 1977)将其应用于周期性问題。Gertling和Becker(1974, 1976)也将元素扩展到无穷远,但是根据的是映射方法。

为了模拟障碍物附近的海水已发展了三维有限元解,例如Hogben和Standing(1974)。完全的三维有限元法可以方便地处理结构物性状和流体性状之间的耦合关系。

以上介绍了许多数值解法。值得进一步作的工作是确定最优方法。

对于轴对称物体的起伏运动的波载情况,可以发展更简单的数值方法。例如Haskind(1957)和Neuman(1962)在入射波势和散射波势之外,引入由物体以单位速度为振幅的起伏运动而产生的势函数,从而使计算工作量小得多,因为确定势函数的势流问题是轴对称的,所以对积分方程仅在一直线上而不是在曲面上求解。Garrison(1974)将Haskind的无限深度结果推广到有限深度情况。

不过应该指出,Haskind方法只适用于轴对称强迫运动,但是其他力并不是轴对称的,不能用此方法计算。Black(1975)给出计算轴对称物体各力的有效方法。他将入射波势和散射波势按柱面波展开。由此对于无限多个柱面波的每一个,得到沿直

线的积分方程。好在只有头两个柱面波才对总力有贡献。因此,只需解头两个积分方程。但是Black方法不能描述压力分布。

非线性与粘性效应 尽管线性势流理论在设计中应用很广,但是回顾前面的基本假设,不难看出,它未考虑非线性效应和粘性分离效应。非线性效应仅在浅水大振幅波浪情况下才显著。好在重力式结构物的沉箱是在相当深的水下(即水深相对于波长 λ 较大),绕射理论的非线性自由面效应一般可以忽略。

大雷诺数下的粘性效应集中于边界层中。对于圆柱等钝体,边界层发生分离,形成尾迹,从而整个绕流以及局部压力、合力均异于基于无粘假设的计算。问题是,忽略粘性的势流理论的实际限制怎样?控制分离和尾迹发展的参数又是什么?波载计算中考虑粘性的流动理论应该如何发展?这些问题都比较复杂,有待今后进一步研究解决。

2.3 波谱分析法

确定性分析指的是将波载直接表示为入射波运动的函数,而在波谱分析法中,流体运动用谱表示,要求的是波载的统计特性。近来由于对结构物的疲劳特性以及波浪-结构物-土壤之间的相互作用引起越来越大的重视,对于用波谱法分析近海结构很感兴趣。

现在发展得较好,用得较多的是线性波谱法,或者用准随机时间史来“拟合”波载(或水面位移)谱;或者通过时域法建立将波谱转换为波载谱的传递函数。在后一方法中,采用单位波高和单一周期的海浪计算结构物的波载,而结构物的载荷、位移和应力等的最终放大,靠把实际波浪当作简谐波,或者靠直接积分求出。目前波谱分析法正在发展,问题还不少,例如,对于多自由度系统来说,需要知道交叉谱密度,但是对此目前不完全了解。特别要指出的是如果设计时忽略这些数据,常常会出现意想不到的危险。

参 考 文 献

- Atkine Research and Development (1979), Dynamics of Marine Structures.
- Bearman, P. W., et al. (1979), Hydrodynamic forces on cylindrical bodies in oscillatory flow, BOSS' 79, V. 1: 309—322.
- Bettess, P. E. (1977), Infinite elements, Intern. J. for Numerical Methods in Engineering, 11, 1: 53—64.
- Cartwright, D. E. and Longuet-Higgins, M. S. (1956), Proc. Roy. Soc., London, A. 237: 212.
- Cartwright, D. E. (1974), The Science of sea waves after 25 years, Intern. Symp. on the Dynamics of Marine Vehicle and Structures in Waves, IMECHE: 1—7.
- Chen, H. S. and Mei, C. C. (1974), Oscillations and wave forces in a man-made harbour in the open sea, Proc. of 10th Naval Hydro-

- dynamics Symp.
- Chen, H. S. and Mei, C. C. (1975), Hybrid-element method for water waves, Proc. of the Modelling Techniques Conf. , I, 63—81.
- Cokelet, E. D. (1977), Breaking waves, Nature, **267**, 5614: 769—780.
- Dean, R. G. (1965), J. Geophys. Res. , **70**: 4561—4572.
- Garrison, C. J. , et al. (1974), Wave forces on large volume structures, OTC: 2137.
- Garrison, C. J. (1974), Hydrodynamics of large objects in the sea, Part I, Hydrodynamic analysis, J. of Hydronautics, **8**: 5—12.
- Garrison, C. J. , et al. (1976), Drag and inertia coefficients in oscillatory flow about cylinders, J. of Waterways, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, 103 WW2.
- Garrison, C. J. (1978), Hydrodynamic loading of large offshore structure: three-dimensional source distribution methods, numerical methods in offshore engineering, ed. by Zienkiewicz, O. C., et al. , John-Wiley & Sons: 87.
- Hackley, M. B. (1979), Wave force simulation studies in random directional seas, BOSS'79, vol. I: 371—382.
- Hasselmann, K. , et al. (1973), Measurements of wind-wave growth and swell decay during Joint North Sea Wave Project, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg.
- Hogben, N. (1974), Fluid loading on offshore structures, a state of art appraisal, wave loads, Maritime Technology Monograph, No. 1. Roy. Inst. Nav. Archit.
- Hogben, N. and Standing, R. G. (1974), Wave loads on large bodies, Proc. Intern. Symp. on Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, I. Mech. E.
- Hogben, N. (1975), The interaction of drag and inertia forces on a cylinder in oscillatory flow, NPL Ship Division Report, no. 187.
- Hogben, N. (1976), Wave loads on structures, BOSS'76 (Behaviour of Offshore Structures, Proc. of An Intern. Conf. , 1976), Vol. 1 : 187—219.
- Hutchinson, R. S. , et al. , The pressure and wake structure of wave action on slender cylinders, BOSS'79, V. 3.
- Keulegan, G. H. and Carpenter, L. H. (1958), Forces on cylinders and plates in on oscillating fluid, J. Res. Nat. Bur. Stan-

- dards, 60, 5 : 423—440.
- Lighthill, J. (1979), Waves and hydrodynamic loading, BOSS' 79. Vol. 1 : 1—40.
- Longuet-Higgins, M. S. (1973), Proc. Roy. Soc., London, A 331: 445.
- Longuet-Higgins, M. S. (1975), Integral properties of period waves of finite amplitude, Proc. R. Soc., London, A 342 : 157—174.
- Longuet-Higgins, M. S., et al. (1976), The calculation of steep gravity waves, BOSS'76 : 27—39.
- MacCamy, R. C. and Fuchs R. A. (1954), Waves forces on piles, A diffraction theory, Beach Erosion Board Technical Memorandum no.69.
- Myers, J. J., et al. (1969), Handbook of Ocean and Underwater Engineering, McGraw Hill.
- Milgram, J. H. (1976), Waves and wave forces, BOSS'76, V. 1 : 11—38.
- Miller, B. L. P. (1976), The hydrodynamic drag of roughened circular cylinders, Trans. Roy. Instn. Nav. Archit, Presented at Spring Meeting.
- Morison, J. R., O'Brien, M. P., et al. (1950), Petroleum Transaction of the Am.Inst.of Mining, Metallurgical and Petroleum-Engineering, V. 189 : 149.
- Van Oortmerssen, G. (1972), Some aspects of very large offshore structures, Proc. 9th ONR Symp. on Naval Hydrodynamics, Paris.
- Paape, A. and Breusers, H. N. C. (1967), The influence of pile dimensions on forces exerted by waves, ASCE Proc. 10th Coastal Engineering Conf.
- Pearcey, H. H. (1979), Wave loads in the drag/inertia regimes: routes to design data, BOSS'79, V.3.
- Price, R. K. (1971), J. Geophys. Res., 76 : 1579—1581.
- Sand, S. E. and Lundgren, H. (1979), Three-dimensional structure of waves, BOSS'79, V. 1 : 117—120.
- Sarpkaya, T. and Garrison, C. J. (1963), Vortex formation and resistance in unsteady flow, J. of Appl. Mechanics, Trans. ASME: 16—24.
- Sarpkaya, T. and Tuter, O. (1974), Periodic flow about bluff bo-

- dies, Part I, Forces on cylinder and spheres in a sinusoidally oscillating fluid, Naval Postgraduate School Rep. NPS 59SL 74091.
- Sarpkaya, T. (1975), Forces on cylinders and spheres in a sinusoidally oscillating fluid, J. of Appl. Mech., ASME, **42**, 1: 32—37.
- Sarpkaya, T. (1976), Vortex shedding and resistance in harmonic flow about smooth and rough circular cylinders, BOSS'76, V. 1: 220—235.
- Schwartz, L. W. (1974), J. F. M., **62**: 553—578.
- Stokes, G. G. (1847), Trans. Camb. Phil. Soc., **8**: 441—455.
- Stokes, G. G. (1880), Math. and Phys., Papers 1: 314—326.
- Tickell, R. G. and Holmes, P. (1978), Approaches to fluid loading, Probabilistic and deterministic analyses, Numerical Methods in Offshore Engineering, ed. by Zienkiewicz, O. C., et al., John Wiley & Sons: 43.
- Vugts, J. H. (1979), A review of hydrodynamic loads on offshore structures and their formulation, BOSS'79, V. 3
- Ward, E. G. and Dalton, C. (1969), Strictly sinusoidal flow around a stationally cylinder, J. of Basic Eng., Trans., ASME: 707—713.
- Wiegel, R. L. and Delmonte, R. C. (1972), Wave induced eddies and lift forces on circular cylinders, Hydraulic Eng. Laboratory Rep. no.9—19, U. of California.
- Zienkiewicz, O. C. (1975), The finite element method and boundary solution procedures as general approximation methods for field problems, World Congress on Finite Element Methods in Structural Mech., Bournemouth.
- Zienkiewicz, O. C. and Bettess, P. (1977), Diffraction and refraction of surface waves using finite and infinite elements, Intern. J. for Numerical Methods in Engineering, **11**: 1271—1290.
- Zienkiewicz, O. C., et al. (1978), The finite element method for determining fluid loading on rigid structures, two and three-dimensional formulations, Numerical Methods in Offshore Engineering, ed. by Zienkiewicz, O. C., et al., John-Wiley & Sons: 141.