

海洋构筑物波浪载荷研究

中国科学院力学研究所 陈嗣熊

I. 目的和意义

海洋石油平台或其它海上石油工程设施(特别是立管、输油管、储油器等)的安全与性能主要取决于它们对各种载荷的响应。在平静的海面上,物体的重量、浮力和各种外部约束力(例如支架或锚链)使物体保持静平衡。然而在有风、海浪、海流、冰、泥沙、地震等自然条件下,物体上将受到各种各样的动力载荷。这些载荷将作为应力分析,疲劳寿命估算的基础。因此,对海洋构筑物载荷的分析是石油工程设计的基础。海上构筑物受到的主要载荷有以下几种:

1. 海浪绕射与由物体辐射所引起的力。这是由于物体对入射波浪的绕射而在物体上引起的激励力,与由物体的振荡与变形运动所产生的辐射波浪而在物体上产生的辐射阻尼力。

2. 运动物体所受的惯性力。这是由物体在海洋中运动的附加质量所引起的。

3. 由旋涡脱落在物体上引起的力。旋涡脱落使物体在波入射方向产生阻力,同时,还在横向引起脉动力。

4. 波浪在物体上的拍击力。当波浪突然撞到物体,它在物体上将引起脉冲载荷。同时,破碎波撞到物体也将产生拍击力。这种拍击载荷主要影响局部载荷和疲劳寿命。

5. 漂移力。这种作用力对于海上系泊的构筑物尤为重要,它的特点是低频,特征周期为30秒到几分钟。目前一般认为它是由二阶波引起的。

6. 冰对物体的作用力。这是由冰冻或浮冰的撞击所引起。

7. 由海洋中传来的地震波在物体上引起的作用力。

在设计时,我们必须先计算出主要的载荷,才能做到既安全又节省地设计海上石油设施。但是,由于问题的复杂性,其中许多作用是相互耦合的,例如表面波浪、涡旋运动与物体的振动、变形运动是耦合在一起的运动。对其中有些问题目前了解得还不十分清楚。因此,我们必须对海上物体的载荷问题作进一步的理论分析、实验测试与数值模拟,才能更安全更精确地进行工程设计。自从1947年国外第一个海上钢平台出现以来,石油开发逐渐向深海发展。早期的平台水深仅5—15米,60年代初平台水深已达到100米,1978年在墨西哥湾所建的石油平台,水深为300米。随着往越来越深的海域建造平台的趋势,造价也越来越昂贵,这就要求设计者更精确地计算平台载荷,以节省大量材料与投资,同时又保证安全。

这一科研项目将对力学学科有很大的推动。大物体波浪载荷的研究将促进表面波浪理论

的研究（包括非线性波浪理论，随机波浪理论等）；表面波、涡旋与可变形体耦合运动的实验与理论研究将发展水弹性力学；对桩柱和桩柱群的波动绕流流场研究，将推动旋涡分离流体力学的研究，尤其是将促进对桩柱群波动绕流涡旋的产生、发展和脱落，旋涡之间的相互作用，雷诺数、粗糙度、湍流度等对旋涡脱落的影响等等基本问题的研究。

II. 目前情况与发展趋势

1. 桩柱构件的波浪载荷 对于导管架平台，作用于垂直圆柱形导管上的波浪载荷，工程上常采用 Morison (1950) 的经验公式：设 F 为单位长度柱体上的作用力，则

$$F = C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} \dot{u} + \frac{1}{2} C_D \rho u |u| D \quad (A)$$

这里 ρ 为水密度， D 为柱体直径， u 为瞬时流速的水平分量， \dot{u} 为 u 对时间的导数， C_m 、 C_D 分别为惯性系数与阻力系数。（A）的第一项为惯性力，第二项为阻力， C_m 、 C_D 将通过实验

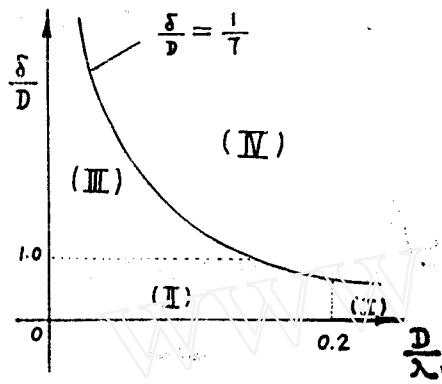


图1 Morison 公式的适用范围

和实测来确定。（A）是经验公式。关于它的适用范围，Garrison 等^[1]与 Sharpkaya^[2]分别作了实验研究。他们发现，当 $\delta/D < 1$ 时，（A）中仅第一项惯性项起主要作用，且此时 $C_m \approx 2$ 。这里 δ 为水质点运动轨道的直径。由圆柱体对入射水波问题的精确解，可以得到，当 $D/\lambda < 0.2$ 时，绕射效应可以忽略。因此，文献[3]用图给出了 Morison 公式的适用范围（图1）。图1中，在（I）区仅波绕射占主要地位，此时公式（A）不适用，必须用波绕射理论来计算载荷；在（II）区，Morison 公式（A）可以适用，但其中的阻力项可以忽略，惯性项变成主要项，此时绕射影响亦可忽略；在（III）区， $\delta/D > 1$ 且 $\delta/\lambda < 1/7$ ，此时旋涡脱落变得重要，（A）中的阻力项不能忽略，此时，在实际应用中，用（A）作为设计的基础，其中 C_m 与 C_D 将由实验和实测数据来确定；在（III）区中，当 δ/D 增加，达到 $\delta/D > 20$ 时，（A）中的惯性项可以忽略。文献[4]中给出了这一区域的更详细的分类（图2）。（IV）区为破碎波区，此时破碎波的拍打载荷占主要因素，（A）不再适用。因此，Morison 公式（A）主要适用在图1的（II）（III）区。

图2中，用直径 D 和波高 $H = \delta/2$ 以及在各种 Re 数下，给出了（A）的适用范围。在（I）区中（A）不适用，必须用波绕射理论来计算波浪载荷；在（I）区以外的区域中，（A）可以适用。在 $\delta/D \approx 2$ 处，（A）的阻力项占总载荷的10%；在 $\delta/D \approx 20$ 处，阻力项占了90%，因此

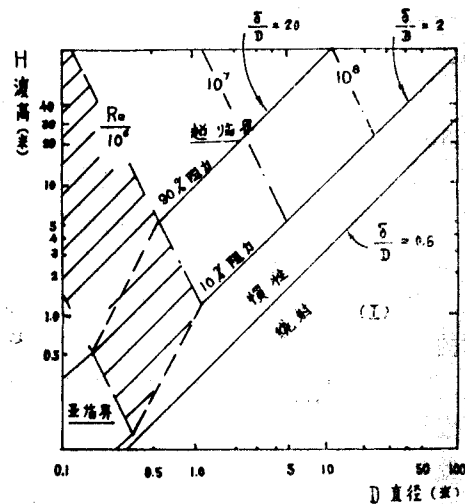


图2 Morison 公式中阻力项所占的比例及其与Re数的关系

惯性项可以开始忽略了。图 1 和图 2 已清楚地指出了公式 (A) 的大致适用范围。

在图 1 的 (II) 区只需 (A) 中的第一项, 此时作用力问题很容易解决; 在图 1 的 (III) 区, 作用力 F 主要由旋涡脱落所引起, 情况就较复杂, 因此, (A) 仍存在着以下几个设计者们必须仔细考虑的重要问题^[3]:

1) 横向力。(A) 只考虑了作用力在波传播方向的分量, 忽略了作用力的横向分量。而当 Keulegan-Carpenter 数 $K = \pi\delta/D = 5-30$ 时 (显然此时落在图 1 的 (III) 区), 横向作用力变得很大, 甚至超过了波传播方向上的分量^[3]。

2) (A) 不能包括由旋涡脱落的振荡频率引起的构件共振。旋涡脱落的振荡频率 f_v , 可由 Strouhal 数 $f_v D/U \approx 0.22$ 来确定。如果构件的自然响应频率与它接近, 则将引起共振, 从而使构件产生很大的内应力。

3) 物体表面粗糙度或尖角的影响。实验与实测表明, 粗糙度甚至可以使波浪阻力增加一倍, 但 (A) 却不能描述这种影响。

4) 三维效应的影响。实验表明旋涡强度和符号沿圆柱轴向是变化的, 同时 (A) 也不能包括沿圆柱轴向的力。

5) (A) 不能预言倾斜放置的圆柱体或多桩柱上的波浪力。对这种情形, 虽然已有实验工作, 但至今尚未总结出类似 (A) 的公式。当然, 这种情形较垂直放置的单柱体情况复杂得多。

6) 当 $\delta/\lambda > 1/7$ 时, 即在图 1 的 (IV) 区, 我们必须考虑破碎波的作用。此时 (A) 不再适用。对破碎波的作用, 工程上采用很粗糙的经验估算公式

$$f_s = -\frac{1}{2} C_{s,p} \rho D U^2$$

这里 $C_{s,p} \approx 3.5$ 。此公式未给出作用时间或冲量, 而有些实测结果表明, 这个力是很高频的脉冲载荷。

2. 大直径海上构筑物的波浪载荷 对于大直径的构件 (此时 $D/\lambda > 0.2$), 其波浪载荷主要来自波绕射与波辐射。关于波浪的绕射和辐射理论, 自 50 年代初以来, 已得到了广泛的研究, 这方面的发展大致可分以下几个方面:

1) 建立了线性波浪的一般绕射和辐射理论^[9]。由于采用了线性波假定, 波势函数可以分解成入射波势、绕射波势、物体各种运动和变形自由度的辐射波势等。这大大简化了问题的讨论。对于物体上的载荷, 也可分解成各自相应的载荷。

2) 对简单问题求得了一些解析解。对于二维圆柱体, 二维椭圆柱体, 垂直圆柱体, 半球体等简单物体, 已有了一些解析解。在短波假定下, 对于满足一定条件的二维和三维物体也有了一些解析解。这些解对于进一步了解波浪载荷与其他物理量的关系是有很意义的。

3) 一般三维线性波绕射问题的数值解 (包括辐射问题)。这方面的计算机程序, 自 1974 年以来发展很快。所用计算方法大致有: 边界元法, 有限元法, 有限差分法以及有限元和边界元混合法。这些方法各有其优缺点, 例如

a. 边界元法。它是基于在物体表面上, 由 Green 函数建立的波势函数积分方程, 然后, 再将物体表面上的积分, 用表面边界元离散化。这样在数值求解时, 所用表矩阵就可大大缩小了, 且由于此积分方程已满足了辐射条件, 因此, 克服了处理辐射条件的困难。缺点是由

于 Green 函数太繁复, 致使计算量与内存又大大增加了。

b. 有限元法。利用波势函数的泛函, 我们很自然地想到采用有限元法。这种方法的优点是可利用网格点选取的任意性, 去适应复杂形状的物体。但对辐射条件的处理较麻烦, 可采用近似迭代法^[6]等。

c. 有限差分法。这种方法最直接, 不需要复杂的 Green 函数或泛函。且容易推广到非线性自由表面条件的情形^[7]。但方法适合于处理方形构件, 对一般复杂构件的处理较困难。

d. 有限元和边界元混合法。1978 年 Zienkiewicz 等^[8]提出了这种混合法的原理。这种方法的思路是在物体表面邻近区域采用习惯的有限元法; 而在人为地选取的离开物体的标准面(例如, 对三维情形可取离开物体的一平行六面体)上, 采用边界元法。由于标准面形状简单, 在其上的包含 Green 函数的积分将可大大简化; 在物体邻近小区域上的有限元可大大节省节点数; 辐射条件将有标准面上的积分方程来保证满足。这种方法优点较多。但标准面的选取应不使其上的积分方程产生不规则频率, 否则将使数值计算发生困难。在标准面上还应满足连接条件。

4) 波的高阶绕射理论的发展。在线性波的理论中, 假定入射波为 Airy 线性波。在高阶非线性波的理论中, 假定入射波为 Stokes 波或椭圆余弦波(Cnoidal 波)。国外这方面的理论研究还刚开始, 对已获得的一些结果, 目前也有争议。但是, 二阶波力是与单点系泊中船体的漂移运动紧密相关的。只有用二阶波理论才能解释这种大振幅长周期的水平漂移运动。

5) 线性波绕射与辐射的随机过程分析。实际的入射波既非规则波也不是单方向的传播波, 而是非规则的各个方向的随机波浪。一般, 我们可用平稳随机过程来处理。这方面的理论是现成的, 我们可以直接把确定性分析的结果, 推广到随机过程的分析结果。这种分析对动力响应与疲劳寿命分析尤为重要。

3. 关于波浪载荷的实验分析与实际测试 目前国外广泛采用 U 型管来做振荡流下物体所承载荷的实验, 以模拟 Re 数与 Keulegan-Carpenter 数。有的采用脉冲水洞来做这方面的试验。不少试验结果是在海上物体的实测得到的。国外许多验证波绕射数值结果的实验, 都是在实际平台或构件上实测而得到的, 不少实测数据与理论计算结果符合得很好。说明他们的测量数据能达到相当高的精度。

参 考 文 献

- 1 Garrison, C. J., et al, *J. Waterways Port Coastal and Ocean Div. ASCE*, 103, WW2 (1977): 193-204.
- 2 Sarpkaya, T., Proc. 1st Conf. Behaviour Offsh. Struct., Trondheim, Vol. 1 (1976): 220-235.
- 3 Standing, R. G., NMI Report R. 102, OT-R-8113 (1981).
- 4 Pearcy, H. H., NMI R. 60, OT-R-7940 (1979).
- 5 Mei, C. C., *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*, Ch. 7, Wiley-Intersciences, New York (1982).
- 6 Newton, R. E., et al, *Finite Element Methods in Flow Problem*, edited by O. C. Zienkiewicz, et al, UAH Press, Huntsville, Alabama: 159-170.
- 7 Nichols, J. D., Hirt, C. W., Proc. 2nd Conf. Num. Ship Hydrodyn., Berkeley (1977): 382-392.
- 8 Zienkiewicz, O. C., et al, *Numerical Methods in Offshore Engineering*, Edited by O. C. Zienkiewicz, et al, Wiley, London: 141-183.
- 9 Chen, H. S., Mei, C. C., *Oscillations and Wave Forces in an Offshore Harbor*, Dept. of Civil Engng. MIT Report No 190 (1974).

WAVE LOADING RESEARCH ON OFFSHORE STRUCTURES

Chen Si-xiong

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

(上接第 128 页)

面进一步的工作包括有约束的运动、可变形装置组等正在进行中(D. V. Evans 未发表)。

6. 结束语

应用于波能问题的理论流体动力学是比较新的一个领域,但其思想是比较古老的。在船舶流体动力学领域中应用了多年的理论工具已经被证明是十分有用的,吸能装置更加复杂,已经获得了某些对完成整个波能计划直接有益的新成果。

前面几节提到的一般结果必然会反映出本文作者本人的兴趣,这也就是说,由于篇幅有限,有些文章没有提及。其中包括如许多设备组得到的实验报告,由英国波能计划下设的技术咨询组编写的堆积如山的文章,所涉及的内容包括从锚链的形式到环境影响等各个方面;由英国海洋科学研究所收集和处理的重要的波浪数据资料。在波能领域中发明者的创造力丝毫没有衰退的迹象,有些方案,譬如,由 Mehlum & Stamnes (1980) 和 Isaacs (1980) 各自描述的波浪聚焦的设计,由 Pleass (1978) 建议的利用波能系统淡化海水的方案和“海明”(Kaimei) 船计划(Masuda & Miyazaki 1978) 等都值得一提。

虽然对经验公式(比如预测作用在结构物上的波载的 Morison 方程)作合理的解释和推广已经证明是成功的(Dixon 等人 1980),但展望流体力学的未来,非线性的物体和波的运动是摆在我们面前需要进一步研究的领域。Count (1978 b) 关于非线性泵特性的工作是对这个困难领域的另一个有价值的贡献,该项工作需要推广到多自由度系统。另一个需要研究的领域是预测铰接的或可变形的装置组的流体力学特性,以便估计间距的重要性。当装置的数目增加时,现有的计算程序费用太高,需要建立更好的近似方法并发挥作用。

最后,由于缺乏方向能谱的经验资料,关于海洋效率的工作已经受到影响。这篇综述所提到的文章中,确实没有包括用 $I(\omega, \theta)$ 的知识根据方程(2.5)来计算海岸效率的文章。随着方向浮标测量和波浪-气候预报方法的可靠程度的增加,可以预期在将来的理论模型中,在真实的海洋条件下的性能估计将变得越来越重要。

虽然,我们认识到波能机械的生存能力只能靠大量的模型试验,归根到底还要靠紧接着的全尺寸原型试验来验证,但在将来的一段时间内流体动力学的理论显然可以在许多领域中继续发挥其有益的辅助作用。

参 考 文 献(略)

周显初译自: *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 13 (1981): 157—187. (李家春校)