

自升式综合平台的外载计算

凌国灿 郑之初 鄂学全 傅仙罗

(中国科学院力学研究所)

提 要

本文给出了自升式综合平台的外载估算方法。对大尺度物体的波浪载荷用三种方法进行了计算,在计算中考虑了非线性波的影响和局部修正。本文在给定的设计波参数和海况条件下,对南海北部湾和渤海地区的自升式综合平台(方案)进行了风、浪、流外载计算。计算结果用于平台结构强度、疲劳、稳定性分析和沉块的优化设计。

一、引 言

我国近海石油边际性油田的开发,需要研制海上石油开发的早期生产系统,并设计具有钻、采、储等多功能的综合石油平台。国家经委下达了南海北部湾及渤海早期生产研究课题的科研项目。西部石油公司及渤海石油公司要求开展综合石油平台的方案设计论证。因此需要分析计算各种平台(方案)在设计波条件及海况下的外载,以进行结构方案的可行性分析。

众所周知,海上平台由于作业和生存的要求,设计时必须考虑到各种可能的载荷条件,包括重力、浮力、风、波浪、流以及冰和地震的作用等等。一般说来,重力及浮力计算简单,冰及地震作用需作专门讨论,因此本文主要分析研究近海地区在规定的海况及设计波条件下风、浪、流对平台的载荷,为结构的静动力、疲劳分析和平台的抗倾覆、抗滑移稳定性分析提供外载条件,为平台方案选择及优化设计提供依据。

平台外载计算需要遵循相应的各种国际公认的规范和方法。但目前仍有许多疑难问题,规范还不能给出有效的具体建议,例如大尺度非圆柱形潜体的非线性波绕射问题解、波流耦合作用下小尺度结构系中构件的相互干扰影响等,需要自行提供可靠的实验资料 and 理论分析计算方法。有时由于使用不同规范或安全系数的选取不同,对相同构件在相同海况和设计波条件下会得到不同的计算结果,而合理的选择往往可以节省大量的投资,减轻平台的结构重量。因此,当前在理论和实验研究的基础上,总结并提出一种在工程上有效和简便的计算方法,而它的计算结果可靠,符合规范要求,且又不致于过份偏于安全,这样的工作对独立自主地进行平台设计有着重要意义。

基于自升式综合平台有上层建筑、桁架结构、圆柱体插桩、大型沉块等部件,研究它们的波浪载荷在方法上有综合、多样的特点。所提供的南海和渤海的平台(方案)形式既类似

又有区别,海况条件也有代表性,因此本文以北部湾自升式综合平台和渤海自升式平台为计算实例,结合我们以往工作选择计算方法。通过与国内外所用方法的计算结果进行比较,检验其正确性,逐步积累经验,以期得到完整的计算方法和程序软件系统。

本文主要内容包括:风载、桩腿、管柱的波浪载荷;沉块的波浪力(包括有限元数值解和工程方法);主要结果与讨论等几个部分。由于篇幅所限,形成结果的详细方法将引用本工作的各部分系列报告。

二、平台风载

风载是指平台在海面以上的所有结构物上由风引起的载荷。它主要取决于风速、风向、受风面积及结构物形状。一般说来,风速由海面上的大气边界层湍流流动决定,它随高度有指数规律变化:

$$\frac{v}{v_r} = \left(\frac{H}{H_r} \right)^{\frac{1}{n}}$$

其中 v_r 为海平面上10米高处的风速。对于确定地区的海域,风速的分布和风向的年平均概率分布应按当地水文气象资料来选取,由此决定主要的计算风向。决定风载的另一主要因素是受风面积 A 。由于平台结构物并非都是实体(有桁架结构、管系、不规则外形等),通常用物体形状系数 C_s 与 A 的乘积来综合考虑。此外处于下风方向上的构件必须考虑遮蔽效应,工程上用修正系数 η 来处理^[2]。

相对于平台的沉块和桩柱的波浪载荷而言,平台的风载不大,但产生相当数量的倾覆力矩。从不可压流动理论和实验得到的压力分布,再积分而得的总体受力比规范所给出的结果要小。为安全计,本文采用规范推荐的公式计算风载。整理后得:

$$F = 0.0473(3.6v_r)^2(0.1z)^{\frac{2}{n}}C_s A \eta \quad (\text{N}) \quad (1)$$

其中 z 为海平面上任一点处的高度。风速变化根据规范^[2]选定,计算阵风时, $n=13$;持续风时,取 $n=8$ 。 C_s 为物体形状系数,对于平台投影面积 $C_s=1.0$,对楼房侧面 $C_s=0.5$,对桁架结构 $C_s=0.72$ 。 η 值可参考规范DnV-77^[2]。

本文用上述公式计算了南海涠洲、乌石地区的风载,根据设计单位提供的平台几何尺寸(详见图1)及海况条件^[3],特别是风向的年概率分布玫瑰图,选择与水平轴成 0° 、 45° 、 90° 及 180° 四种风向,得到了平台上部及桩腿、管柱的风载(详细计算结果参见文献[4]、[5],以涠洲及乌石两地为例,其最大风载结果列于表1:

表 1

地 区	F_{max} (最大风载) (t)	Z_c (合力作用点)(m)	α (风向角)	水深(m)
涠 洲	608.7	47.82	180°	10
乌 石	189.4	48.09	180°	17

上述荷载应与桩柱的波浪荷载合成总的最大受力荷载,供结构强度设计时进一步计算。

从风载计算中,我们发现:利用不可压空气动力学的理论和实验研究手段,弄清各种形状结构元件的阻力系数和背风区对下游物体的影响(或遮蔽),并对剪切来流绕流进行研究,是改进风载计算的重要问题。

三、桩腿及管柱 波流荷载

对于所提供的具有大型沉块的平台而言,尽管桩腿及管柱的波浪荷载在整个平台外载中占的比重不是很大,但对它的自身强度设计和平台抗倾覆的稳定性方面有着不可忽视的地位。根据海洋结构物波浪荷载的计算理论,当 $D/L < 0.2$ 时(其中 D 为结构物特征尺度, L 为波长),称为小尺度结构物,可以近似地忽略结构物对入射波的影响,此时,柱体上的流向波浪力为阻力和惯性力之和。可由 Morison 公式给出,

$$\vec{F} = \vec{F}_D + \vec{F}_I = C_D \frac{W}{2g} D \vec{U} |\vec{U}| + C_M \frac{W}{g} \frac{\pi}{4} D^2 \frac{d\vec{U}}{dt} \quad (2)$$

其中 \vec{F} 为垂直作用于构件轴向单位长度上的波浪力。 \vec{F}_D 为在构件的轴和流速 \vec{U} 构成的平面内,垂直作用于构件的单位长度上的力。 \vec{F}_I 为惯性力,它是在构件轴与加速度 $\frac{d\vec{U}}{dt}$ 构成的平面内,垂直作用于构件轴向单位长度上的力。为了便于计算空间任意放置的构件上的波浪力,速度 \vec{U} 可用向量表示,即 $\vec{U} = (\vec{V} \cdot \vec{n}) \vec{n}$, $\vec{n} = \vec{e} (\vec{V} \times \vec{e}) / |\vec{e} \times \vec{V} \times \vec{e}|$, 此

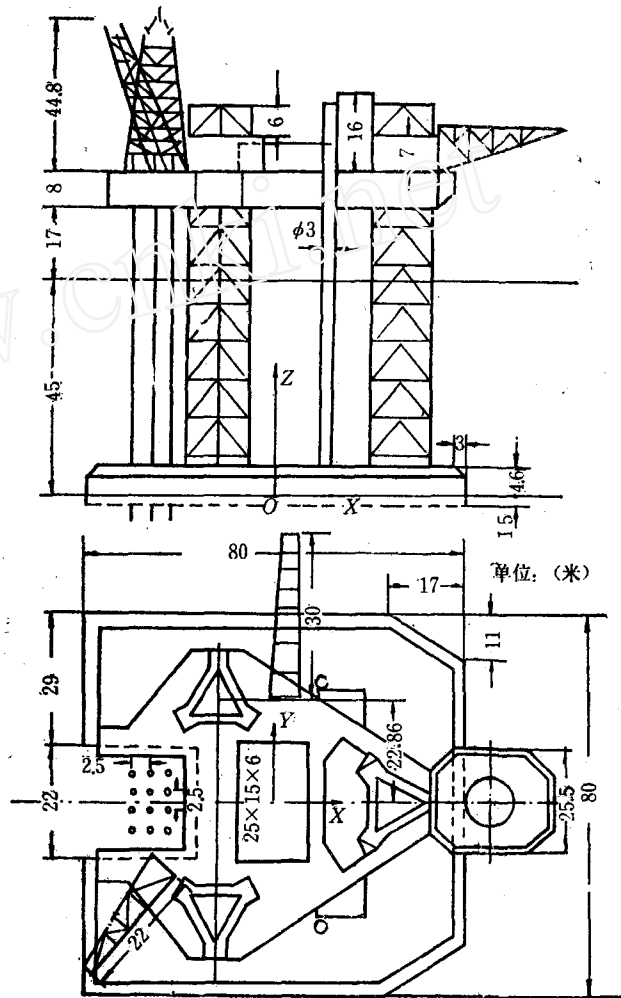


图1 南海自升式综合平台结构示意图

时 \vec{V} 为水质点运动速度。 \vec{n} 及 \vec{e} 分别为构件上单位法向量和轴向向量。整个构件上的波浪力为

$$F_h = \int_{s_0}^{s'} \vec{F} d\vec{l} \quad (3)$$

波流力矩为

$$M_h = \int_{s_0}^{s'} Z \vec{F}(z) dz$$

$$M_z = (x \sin \alpha - y \cos \alpha) F_h \quad (4)$$

水平波流作用中心 S_0 为

$$S_0 = \frac{M_h}{F_h} \quad (5)$$

作为方案论证计算, 在计算载荷时, 应考虑到风浪流同时存在, 且在它们的联合作用下使平台经受最大外载的情况, 因此, 公式中的速度 \vec{U} 应是海流速度与波浪产生的水质点运动速度两者的向量和。其中海流速度由潮汐、环流、风生流及海洋密度流叠加而成, 由波浪产生的水质点速度和加速度是波高 H 、周期 T 和质点离海底距离 d 的函数, 它们组成不同的特征参数, 例如: d/gT^2 、 H/gT^2 , 依特征参数的变化范围, 根据 Le Méhauté 给出的各种波浪理论来计算波长、波阵面及水质点的运动特性^[6]。根据设计单位提供的南海及渤海地区几个平台的几何尺寸 (详见图1、图2和图3) 和海况条件 (见表1、表2), 我们给出了特征参数的变化范围 (详见表3、表4)。

由于南海地区平台的 D/L 在 0.01~0.02 之间, 而渤海地区平台的 D/L 在 0.0147~0.0624 之间, 加上管柱之间的间距较大 (有的为本身直径的 7~9 倍), 可视为孤立柱体而忽略相互干扰, 所以用公式 (2)、(3)、(4)、(5) 计算作用在桩腿、管柱上的波流力。其中海流速度对南海地区由给定的表层、中层和底层流速拟合一个速度剖面, 对渤海地区选用文献 [1]、[2] 中给出的已知表层速度拟合速度剖面的方法, 其公式为

$$U(z) = \left(0.6 + 0.4 \times \frac{z}{d} \right) V_{\text{表层}} \quad (6)$$

根据上述地区海况条件计算得的波浪参数 $\left(\frac{d}{gT^2}, \frac{H}{gT^2} \right)$, 经判定, 这里基本上可用 Stokes 五阶波理论预计波浪特性^[7], 根据 Stokes 五阶波理论, 入射波的波势 φ 及波形函数 η 应分别为

$$\varphi(x, t) = \sum_{n=1}^5 \varphi'_n \cosh(nKs) \cos(n\theta)$$

$$\eta = \sum_{n=1}^5 \eta_n \cos(n\theta)$$

其中 $\theta = K(x \cos \alpha + y \sin \alpha - ct)$ 为相位角, $K = 2\pi/L$, L 为波长, α 为波向角, c 为波速, $s = z + d$ 。系数 φ'_n 和 η_n 的具体表达式可以从文献 [7] 中得到。波动产生的水质点的水平

表1 南海设计波参数条件

生存条件		作业条件	
	涠洲	乌石	
水深(m)	30~50	17~32	17~45
风速(m/s)	68(3min)	68	36
	59(min)	59	
波高(m)	8.3($H_{1/3}$)	6.9	5.5
周期(s)	13.1	12.0	10.7
合成流速(m/s)	表	1.85	0.77
	中	1.39	
	底	1.08	1.75

表2 渤海海况条件和设计波参数

生存条件 (50a)		作业条件 (1月)
水深(m)	15~30	15~30
最大波高(m)	10.0	4.7
平均周期(s)	10.2	7.0
最大表面流速(kn)	3.5	3.5
海生物	年增长率30mm	

速度和加速度分别是:

$$\left. \begin{aligned}
 U_w &= c \sum_{n=1}^5 \varphi'_n \cosh(nKs) \cos(n\theta) \\
 W_w &= c \sum_{n=1}^5 \varphi'_n \sinh(nKs) \sin(n\theta) \\
 \frac{dU_w}{dt} &= \frac{2\pi}{T} \left[W_w \sum_{n=1}^5 n^2 \varphi'_n \sinh(nKs) \cos(n\theta) \right. \\
 &\quad \left. + (c - U_w) \sum_{n=1}^5 n^2 \varphi'_n \cosh(nKs) \sin(n\theta) \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 U_w 、 W_w 、 $\frac{dU_w}{dt}$ 分别为沿波向坐标 x 上的速度和加速度分量。波长可由下述关系经迭代求解:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\pi H}{d} &= [\lambda + \lambda^3 B_{33} + \lambda^5 (B_{35} + B_{55})] / \left(\frac{d}{L} \right) \\
 \frac{d}{L_0} &= \frac{d}{L} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) (1 + \lambda^2 C_1 + \lambda^4 C_2)
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

系数 B_{11} 、 C_1 均为 $\frac{d}{L}$ 的函数^[1], $L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$, $\lambda = \frac{2\pi a}{L}$, a 为运算中的常数, 相应于各

表3 南海地区波浪、波浪理论的重要参数

		d 水深 (m)	波高 H_{max}	T 周期 (s)	L 波长 (m)	d/T^2	Tg/d	d/L	d/gT^2	H/gT^2	C_H
生 存 条 件	涠 洲	30	16.6	13.1	221.35	0.1749	4.279	0.1352	0.0180	0.00987	1.496
		40	16.6	13.1	233.79	0.2331	3.210	0.1711	0.0238	0.00987	1.527
		50	16.6	13.1	245.54	0.2914	2.563	0.2036	0.0297	0.00987	1.548
	乌 石	17	13.8	12.0	183.4	0.1181	6.918	0.0927	0.0120	0.00978	1.367 1.71 (参考)
		30	13.8	12.0	191.37	0.2083	3.920	0.1568	0.0213	0.00978	1.427
		32	13.8	12.0	193.91	0.2222	3.675	0.1650	0.0227	0.00987	1.434
作 业 条 件		17	11	10.7	146.0	0.1485	6.168	0.1164	0.01515	0.00980	1.35
		30	11	10.7	159.9	0.2620	3.495	0.1876	0.0267	0.00980	1.35
		45	11	10.7	173.5	0.3930	2.330	0.2594	0.0401	0.00980	1.39

表4 渤海地区波浪、波浪理论的重要参数

		d (m)	H_{max} (m)	T (s)	L (m)	d/T^2	Tg/d	d/L	d/gT^2	H/gT^2	C_H
生 存 条 件	方 案 (I)	30	10	10.2	148.44	0.2884	3.332	0.2021	0.0294	0.00981	1.53
		15	10	10.2	134.07	0.1442	6.664	0.1119	0.0147	0.00981	1.742
作 业 条 件	方 案 (I)	30	4.7	7.0	78.11	0.6122	2.287	0.3841	0.0625	0.00979	1.097
		15	4.7	7.0	70.80	0.3061	4.573	0.2119	0.0312	0.00979	1.454
生 存 条 件	方 案 (II)	30	10	10.2	184.44	0.2884	3.332	0.2021	0.0294	0.00981	1.53
		15	10	10.2	134.07	0.1442	6.664	0.1119	0.0147	0.00981	1.742

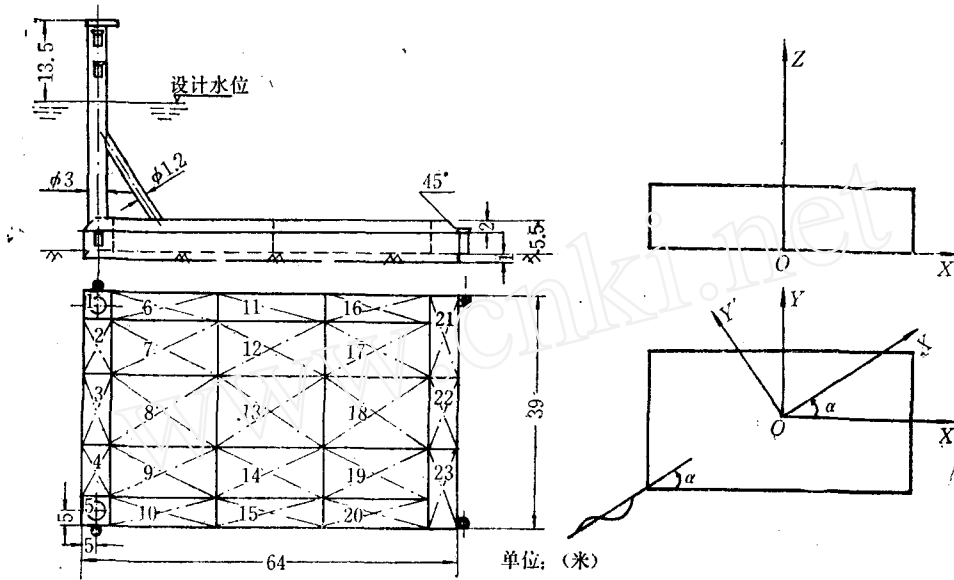


图2 渤海储油潜驳方案沉块和桩柱结构示意图(方案 I)

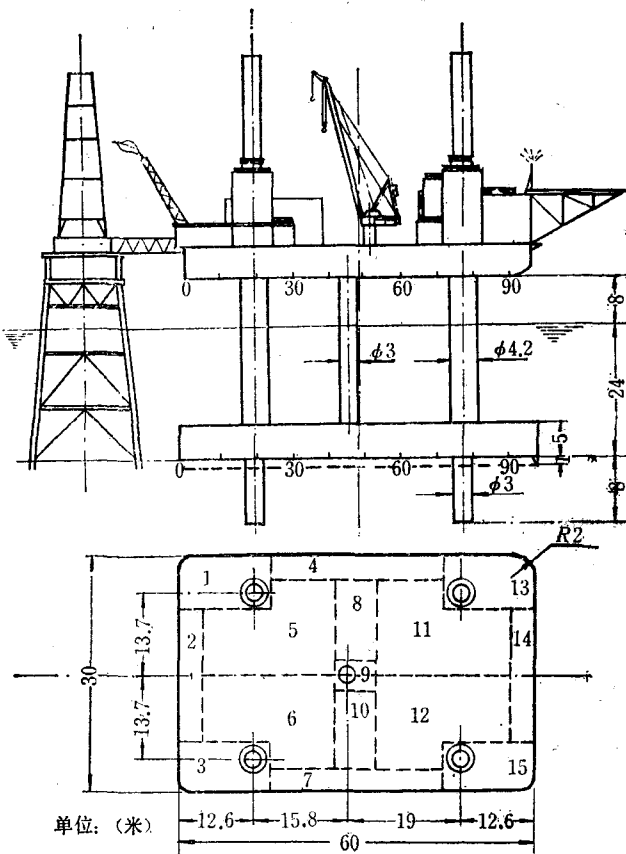


图3 渤海带沉垫插桩自升式平台结构示意图(方案 I)

种波高、周期和水深。本文计算所得南海和渤海地区波浪参数亦在表2中给出。

根据上述理论公式及平台桩腿、管柱的位置和尺寸,本文编制了桩腿波浪力的计算程序,根据不同水深,在管柱和桩腿的垂直方向上分段计算波浪力而后予以合成。公式中阻力系数 C_D 依赖于流动的 R_e 数、 $K-C$ 数和柱体的表面粗糙度,附加质量系数 C_m 主要依赖于柱体的截面形状和水质点的运动方向,根据文献〔1〕,南海及渤海平台的 C_D 为0.6~1.2, C_m 为1.3~2.0,为了得到不同波向角下对应的最大波载,我们计算了不同波流方向的载荷,表5给出了南海及渤海地区按给定海况计算平台桩腿的最大载荷〔1〕。

表 5

地 区	F_{Hmax} (水平力) (t)	F_{Vmax} (垂直力) (t)	M_{max} (波流力矩) (t·m)	α (波向角)	水 深 (m)
南 海	446.2	79.5		0°	30
	438.6	65.7		45°	30
渤 海	197.52		1748.89	0°	30
	550.38		11695.02	90°	30

按海况下的海生物增长率,二年后平台桩腿在同样水深条件下要增加22%左右。

四、沉块波浪载荷

在自升式综合平台波浪载荷中,沉块的波浪载荷占主要部分,它对平台的稳定性和抗滑移性起着决定性作用。因此,必须仔细斟酌选用的计算方法。根据南海和渤海地区提供的数据,沉块的特征尺寸与波长之比 D/L 在0.263~0.551之间,均大于可忽略物体存在对波浪影响的临界值0.2,所以需要从入射波和入射波的绕射决定作用于沉块的压力,而后积分得到波浪力。由于非线性绕射理论很不成熟,目前使用的方法基本上是基于线性绕射理论基础上的,而工程设计往往要选择简便准确的计算方法。本文比较了三种方法,即:等效圆柱近似解析法、选定绕射系数的工程近似法和有限元的数值计算法,通过比较,确定了第二种方法(我们把它叫做工程预测法)在沉块计算中的应用范围。

工程预测法的主要计算步骤是:首先精确计算入射波对沉块的波载,即Froude-Krylov力及力矩。计算中考虑到相对于水深来说沉块高度不大,只需计入Stokes五阶水波的线性分量(实际计算的波长比线性波预计的大),然后通过比较各种数值结果,并参考Hogben & Standing〔9〕对大型物体的理论计算和实验结果,确定反映沉块对波的绕射作用的绕射系数,然后进行总波载的计算,波载的基本计算公式如下:

$$F_H = C_k F_{KH}$$

$$F_V = C_v F_{KV}$$

其中 F_H 、 F_V 分别为水平波浪力和垂直波浪力, C_k 、 C_v 分别为相应的绕射系数。Froude-

Krylov力 F_{KH} 、 F_{KV} 将由满足线性化自由表面条件及海底为平面不透水的边界条件，从一阶入射波势 φ_i 得到压力分布，而后积分求得。

入射波势的精确解为^[6]：

$$\varphi_i = R \left\{ -\frac{igH}{2\omega} \cosh[K(z+d)] [\cosh(Kd)]^{-1} \right. \\ \left. \times e^{i(Kz \cos \alpha + Kx \sin \alpha - \omega t)} \right\} \quad (9)$$

$$P = -\rho g(z-d) - \rho \frac{\partial \varphi_i}{\partial t}$$

其中 $\varphi_1 = \varphi_i + \varphi_s$ ， φ_s 为绕射波势，可通过它与入射波势的相互关系而求得。下面给出具体计算波载的关系式^[10, 11]：

$$F_H = Af(\alpha) \cos \omega t \quad (10)$$

$$M_H = F_H h \quad (11)$$

$$F_V = F_V^1 - F_V^2 \quad (12)$$

$$F_V^1 = Bf(\alpha) \sin \omega t$$

$$F_V^2 = \pi BF(\gamma, \omega t)$$

$$M_V = M_V^1 - M_V^2 \quad (13)$$

$$M_V^1 = -Bf(\alpha)g(\alpha) \cos \omega t$$

$$M_V^2 = \pi BG(\gamma, \omega t)$$

其中， M_H 和 M_V 分别表示水平和垂直波浪力矩， F_V^1 、 M_V^1 表示当沉块上存在柱体、空穴或切角时应减少的垂直波载。

$$A = \gamma HC_h \frac{\sinh(Kh)}{K \cosh(Kd)}$$

$$B = \gamma HC_v \frac{\cosh(Kh)}{K \cosh(Kd)}$$

$$he = h - [K \tanh(Kh)]^{-1} + [K \sinh(Kh)]^{-1}$$

$$f(\alpha) = a \sin \frac{Kb}{2} \quad (\alpha = 0)$$

$$f(\alpha) = b \sin \frac{Ka}{2} \quad (\alpha = \frac{\pi}{2})$$

$$f(\alpha) = \left[\frac{4}{K} \sin \left(\frac{Kb}{2} \cos \alpha \right) \sin \left(\frac{Ka}{2} \sin \alpha \right) \right] (\sin \alpha)^{-1}$$

$$\left(0 < \alpha < \frac{\pi}{2} \right)$$

$$g(\alpha) = \frac{1}{K} \left[1 - \frac{1}{2} Kb \operatorname{ctg} \left(\frac{1}{2} Kb \right) \right] \quad (\alpha = 0)$$

$$g(\alpha) = \frac{1}{K} \left[1 - \frac{1}{2} K a \operatorname{ctg} \left(\frac{1}{2} K a \right) \right] \quad \left(\alpha = \frac{\pi}{2} \right)$$

$$g(\alpha) = \sqrt{\psi_{\cdot x}^2 + \psi_{\cdot y}^2} \quad \left(0 < \alpha < \frac{\pi}{2} \right)$$

$$\psi_{\cdot x} = (K \cos \alpha)^{-1} \left[1 - \frac{K}{2} b \cos \alpha \operatorname{ctg} \left(\frac{K}{2} b \cos \alpha \right) \right]$$

$$\psi_{\cdot y} = (K \sin \alpha)^{-1} \left[1 - \frac{K}{2} a \sin \alpha \operatorname{ctg} \left(\frac{K}{2} a \sin \alpha \right) \right]$$

$$\bar{F}(\gamma, \omega t) = \sum_{i=1}^n \gamma_i J_1(K \gamma_i) \sin(K \psi_i - \omega t)$$

$$\psi_i = y_i \sin \alpha + x_i \cos \alpha$$

$$G(\gamma, \omega t) = - \sum_{i=1}^n [\gamma_i x_i J_1(K \gamma_i) \sin(K \psi_i - \omega t) + \gamma_i^2 J_2(K \gamma_i) \cos(K \psi_i - \omega t)]$$

上述方程中, a 为沉块长度, b 为沉块宽度, h 为沉块高度, 计算所得的水平波浪力 F_H 的方向为 $\pm \alpha'$, 水平力矩 M_A 的方向为 $\alpha \pm \frac{\pi}{2}$, 垂直波浪力 F_V 的方向指向 Z 轴的正或负方向, M_V 的方向角为 θ , θ 由下式决定:

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\psi_{\cdot y}}{\psi_{\cdot x}} \right)$$

用上述公式进行波浪载荷的计算后, 我们看到 C_h 和 C_v 的选取对于结果的影响很大, 在一些工程计算中曾取 $C_h = 1.37$ [12], 我们根据 Hogben & Standing 的不同结构物高度与水深之比的实验结果和分析 [9], C_h 、 C_v 取决于相似参数 Ka 和 Kd , 在 h/d 较小时, C_h 随 Ka 有较大的变化, 而在浅水时, 即 h/d 较大时, 随 Kd 有明显变化, 因此, 本文在计算时, 根据不同的水深、波长及沉块的尺寸来确定 C_h 值, 其变化范围为 1.097~1.742, 而

表 6

地 区	$F_{H \max}$ (水平力) (t)	$F_{V \max}$ (垂直力) (t)	$M_{\Sigma \max}$ (总力矩) (t·m)	α (波向角)	水 深 (m)
南 海	6035.6	26461.9	396010.7	45°	30
渤海 (I 号)	3065.93	83.76	122997.7	0°	15
	3994.2	9045.56	0	90°	15
渤海 (II 号)	3744.61	0	41421.17	90°	15
	3023.06	6712.48	101477.8	0°	15

$C_v \approx 1.0$ ，我们用上述方法计算一些标准结构物的波浪载荷，其结果与数值解的结果吻合很好。计算结果表明，对于长方形沉块，其最大的波浪力不在波浪的行进方向，因此计算时取波向角从 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 依次扫描，寻找产生最大波载的波流方向角，然后进行计算。表6给出了渤海、南海平台沉块最大波浪载荷的数据（详细计算参见文献〔13〕、〔14〕）。

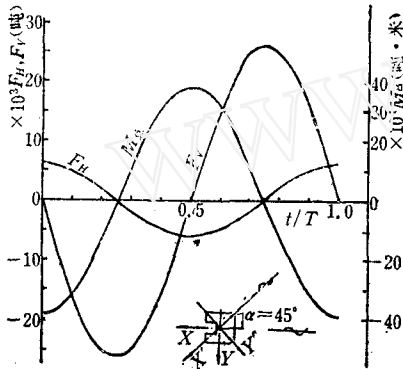


图4 南海地区沉块最大波载随时间变化曲线

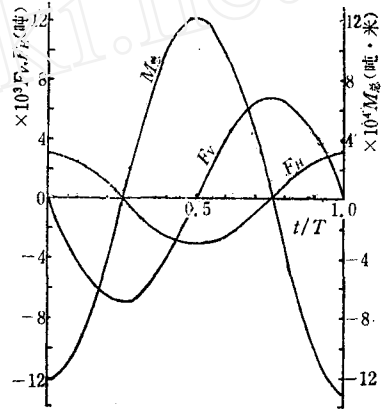


图5 渤海地区方案 I 平台沉块最大波浪载荷随时间变化曲线

图4、图5、图6给出了渤海、南海地区沉块最大波浪载荷随时间的变化曲线。从图和表的分析中可以看到，波浪载荷是周期性地变化的，水平力、垂直力和总的倾覆力矩其最大值不在同一时刻，也可以不在同一波流角的情况下，所以必须选择各种工况进行强度和稳定性计算。一般说来，平台沉块的波浪力将与波高的增大成正比，与水深的减小成反比，因此，进行方案可行性计算时，只须计算最大波高和浅水情况对应的波浪载荷。计算结果还指出：水平波浪压力沿沉块高度变化不大，基本上是均匀的，水平波浪力的合力作用点约在沉块高度的中点，随着沉块高度的加大，水平波浪力和力矩也随之增大，而在z-y平面内，沉块面积的增大，沉块的垂直波浪力和力矩将迅速增加，这些将对平台的稳定性和抗滑移性不利。

在上述计算中，对于平台沉块有切角、挖块、设桩的情况，都需扣除这一面积的受力和力矩来估计综合结果。

为了考察挖块大小对沉块波浪载荷及表面压力分布的影响，同时比较上述工程预测法计算结果的正确程度，本文用有限元数值解对几种沉块进行了波载计算。

首先，我们从基本方程出发，大型沉块线性波绕射问题可简化为求解满足线性化边界条件的Laplace速度势方程，即：

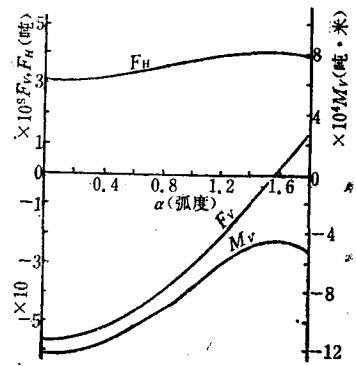


图6 渤海地区方案 I 平台沉块波载随波向角变化关系

$$\Delta\varphi=0$$

线化边界条件是:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi}{\partial z} &= 0 \\ \eta &= -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)_{z=0} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial z} &= 0 \quad z = -d \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} &= 0 \quad \text{物面} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

设波势 φ 为入射波势 φ_w 和绕射波势 φ_s 两者之和, 则无穷远处的辐射条件将是:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} \left[\frac{\partial \varphi_s}{\partial r} - iK\varphi_s \right] = 0$$

对于直立圆柱, 上述方程有精确解, 我们用有限元法求解方程(14)、(15), 主要工作是数值求解满足物面边界条件的绕射波势 φ_s 。公式(9)已经给出了入射波势的精确解,

设 $\varphi_i = R_0(\overline{\varphi_i})$, 利用(14)、(15)两式, 复波势 φ_s 同样满足:

$$\Delta \overline{\varphi_s} = 0 \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \overline{\varphi_s}}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \overline{\varphi_s} &= 0 \quad z=0 \\ \frac{\partial \overline{\varphi_s}}{\partial \eta} &= 0 \\ \frac{\partial \overline{\varphi_s}}{n} &= -\frac{\partial \overline{\varphi_w}}{\partial n} \quad \text{物面} \\ \lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} \left[\frac{\partial \overline{\varphi_s}}{\partial r} - iK\overline{\varphi_s} \right] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

可以证明求解上述方程组的问题等价于泛函 $\pi(\overline{\varphi_s})$ 的变分, 即:

$$\delta\pi(\overline{\varphi_s}) = 0$$

其中

$$\begin{aligned} \pi(\overline{\varphi_s}) &= \int_{\Omega} \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \overline{\varphi_s}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{\varphi_s}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \overline{\varphi_s}}{\partial z} \right)^2 \right] dV \\ &\quad - \int_{S_F} \frac{\omega^2}{2g} \overline{\varphi_s} dS - \int_{S_b} \left(-\frac{\partial \overline{\varphi_w}}{\partial n} \right) \overline{\varphi_s} dS \\ &\quad - \int_{S_R} \frac{i\omega}{2c} \overline{\varphi_s}^2 dS \end{aligned}$$

方程中 Ω 、 S_F 、 S_b 、 S_R 分别表示求解域、自由表面、物体表面及足够大的控制面，如图 7 所示。

在本文计算中，采用 20 个节点等参单元离散 $\delta\pi(\bar{\varphi}_{,i})=0$ ，得到每个单元内的局部刚度矩阵 a_{ij} 以及载荷向量 P_i ，其公式如下：

$$\left. \begin{aligned} a_{ij} &= \int_{\Omega'} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dV \\ &\quad - \frac{\omega^2}{g} \int_{S'_F} N_i N_j dS - \frac{i\omega}{C} \int_{S'_R} N_i N_j dS \\ P_i &= \int_{S'_b} \left(-\frac{\partial \bar{\varphi}_{\infty}}{\partial n} \right) N_i dS \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

其中 $-\frac{\partial \bar{\varphi}_{\infty}}{\partial n} = K A e^{iKz} \left\{ i n_x \frac{\cosh[K(z+d)]}{\cosh(Kd)} + n_z \frac{\sinh[K(z+d)]}{\cosh(Kd)} \right\}$ ， N_i 为形函数， $i, j=1, \dots, n_p$ ， N_p 为总结点数，于是得到数值解的线性代数方程组：

$$a_{ij} \cdot \bar{\varphi}_{,j} = P_i \quad i, j=1, 2, \dots, N_p \quad (19)$$

用有限元法解上述方程有二个难点，即网格生成及大型线性方程组的求解。本文编制了自动网格生成程序 map，以及用波前法求解任意形状的物体在线性水波中的受力分析程序，并且对波前法原有程序作了相应的修正，大大节省了系统时间（系统运行时间缩短为原程序的 1/30），这样，在小型机器上能进行节点数为 1112，单元数为 186 的水波计算问题。

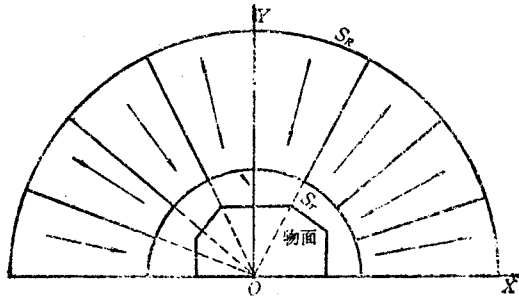


图 7 南海平台沉块有限元解分域示意图

我们以此程序首先计算了直立圆柱的数值解，并与已有的分析解比较，其结果符合极好，相对误差在 5% 以内，详见图 8，由此证明该数值解有一定的精度。然后，用此方法对南海平台沉块进行计算，同时改变挖块的大小，a. 挖块为 22×22 米²；b. 挖块为 44×44 米²；c. 挖块为 66×66 米²。图 9、图 10、图 11 给出了不同挖块下的波浪载荷变化图^[15]。从数值解计算结果中可以看到： α 为常数的面上的压力基本不变，物面上的压力沿高度的变化缓慢，这就解释了为何水平力 F_x 的作用点接近沉块的中点，而且随着挖块的增大而 F_x 大大减小，总的波浪力矩

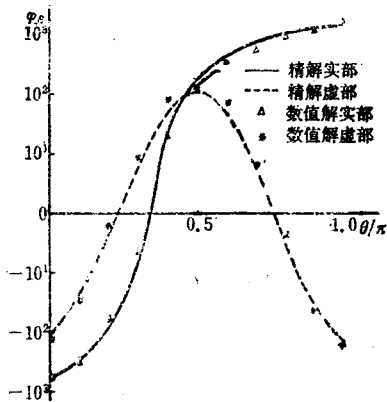


图 8 圆柱表面在水面的绕射波势精确解与有限元解的比较

也减小,这有利于平台稳定性,同时也解释了我国引进的某些国外制造的平台,为何采用大挖块的结构形式。本文的数值计算结果与工程预测法的结果比较接近,而且无论是轴向力 F_x 和垂直力 F_z ,工程预测法的结果对稳定性和抗滑移性的判断都是偏于安全的。等效圆柱法计算结果与本文的工程预测法的结果比较接近,但在水平力 F_x 的预计上约低20%,这对于平台抗滑移性的判断是不利的。

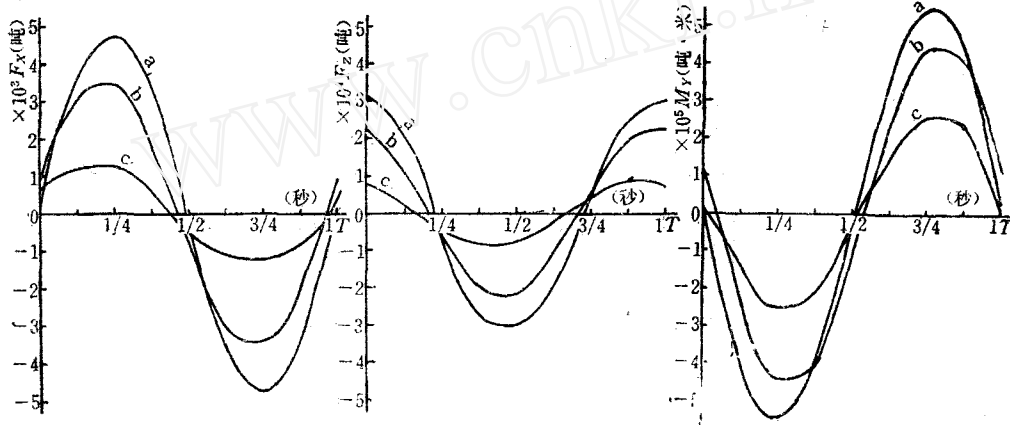


图9 南海平台不同挖块尺寸下的水平力结果比较

图10 南海平台不同挖块尺寸下的垂直力结果比较

图11 南海平台不同挖块尺寸下的力矩结果比较

五、结论和讨论

1. 本文给出了南海涠洲、乌石地区和渤海地区几种不同类型的平台的风、浪、流外载,及其随时间变化的规律。给出了自升式综合平台在相应海况及设计波参数下的计算外载的工程和有限元方法。它们是一套考虑到对不同尺度结构物有非线性波影响的分析计算方法。计算结果可用于结构的静动力、疲劳分析及平台抗滑移稳定性分析,在进行平台方案论证时,本方法是有效的工具。

2. 本文计算结果表明:在总的流体动力载荷中,波浪力是控制外载。流力及风载的量级是第二位的。对于具有大型沉块的自升式综合平台,沉块的波浪力又是诸波浪力中的控制载荷。沉块的外形尺寸及挖孔、切块对稳定性和抗滑移性有很大的影响。尽管本文的工程预测法与数值计算方法的结果符合较好,但沉块上切块、挖孔对波浪和流动的影响还须作进一步的研究。

3. 小尺度构件上,由于旋涡脱落引起的横向力具有高频随机相位和零平均值的振荡特性,不同构件上的横向力对于平台整体而言,它们很可能抵消,但对局部构件的应力疲劳分析是重要的。另外,小尺度构件的群体相互干扰是值得注意的问题,应当从实验测量、数值模拟两方面作进一步研究,使所选取的系数更为合理。

4. 海况条件和设计波参数对平台载荷的计算是至关重要的“初始”数据。所给定的个

别参数是否合乎实际,尚须作进一步的研究。

希望将本文的方法广泛用于各种平台的外载计算,并与其他计算结果作比较分析,以期进一步加以改进。

参 考 文 献

- (1) Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms. API-1986, U.S.A.
- (2) Det Norske Veritas, Rules for the Design Construction and Inspection of Offshore Structures, Appendix A, B, 1977.
- (3) 分项合同“北部湾科研项目自升式综合平台研究”附件:研究内容及要求,广州船舶及海洋工程设计公司,1987年4月。
- (4) 傅仙罗、楚士龙、凌国灿,自升式综合平台风载计算,中国科学院力学研究所报告,1987年4月。
- (5) 鄂学全、李战华、方新,自升式综合平台桩腿、管柱波流及风载计算,中国科学院力学研究所报告,1987年4月。
- (6) Sarpkaya, T., Mechanics of Wave Forces on Offshore Structure, Van Nostrand and Reinhold Co.
- (7) Skjelbrein, L. J. Hendrickson, Fifth Order Gravity Wave Theory, Proc. of Seventh Conference on Coastal Engineering, Vol.1, ch 10, 1961.
- (8) 方新、李战华、鄂学全,渤海早期生产系统自升式平台桩腿波流载荷计算报告,中国科学院力学研究所报告,1985年5月。
- (9) Hogben, N. & G. Standing, Wave Loads on Large Bodies, Pro. Int. Symp on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves, Univ. College London, pp. 258~277.
- (10) 凌国灿、郑之初、鄂学全、傅仙罗等,北部湾自升式综合平台外载分析计算,中国科学院力学研究所报告,1987年4月。
- (11) 凌国灿、郑之初、鄂学全,渤海湾自升式综合平台波流载荷分析计算,中国科学院力学研究所报告,1987年5月。
- (12) 教育部混凝土平台联合设计组,钢筋混凝土多用平台概念设计初步报告,1983年12月。
- (13) 黄华、张蝶丽、郑之初,自升式综合平台沉块波浪力的工程估算,中国科学院力学研究所报告,1987年4月。
- (14) 黄华、张蝶丽、郑之初,渤海早期生产系统自升式平台沉块波浪力的计算,中国科学院力学研究所报告,1987年5月。
- (15) 唐安民,任意形状大尺度近海建筑物波浪载荷的有限元计算,中国科学院力学研究所报告,1987年8月。

CALCULATION OF EXTERNAL LOADS ON A MAT TYPE JACK-UP PRODUCTION/STORAGE PLATFORM

Ling Guocan, Zheng Zhichu, E Xuequan and Fu Xianlou
(Chinese Academy of Sciences)

ABSTRACT

A method which can predict external loads on a mat type jack-up production/storage platform is presented in this paper. Wave forces on large bodies are calculated by three methods. The nonlinear wave effect and some improvement are considered in computation. The wave loading, current forces and wind forces on jack-up platform with/without mat are calculated under the environmental and design wave conditions in the Beibu Bay of the South China Sea and the Bohai Sea. The numerical results are used for structural analysis, anti-slide analysis of platform and optimizing mat design.

· 简讯 ·

第四届海洋能源利用学术讨论会在宁召开

中国海洋工程学会与国家科委海洋专业组——学科组办公室在南京联合召开了第四届海洋能源利用学术讨论会。13个省市44名从事于海洋能源利用的专家和工程技术人员出席了会议。中国海洋工程学会理事长严恺教授、江苏省科委副主任王永胜、江苏省科协副主席南京水科院院长窦国仁到会讲了话。会上交流了潮汐能、波浪能、温差能、潮流能及盐差能等29篇论文。他们反映了三届海洋能源利用学术讨论会以来该专业领域内在科研、设计、施工、制造和管理方面的新进展、经验和成果，与会代表对海洋能技术政策和海洋能“八五”期间国家重点新课题进行了认真的讨论，就发展和推动今后我国海洋能事业广泛地交换了意见。

会议期间由海洋能源专业委员会主任委员吴文研究员主持召开了专业委员会第二次会议，讨论了专业委员会的工作。

(施用山供稿)