

第四章 海洋环境载荷

第一节 绪 言

海洋移动式平台在复杂多变的海洋自然环境中,将受到风、海浪、海流及海冰形成的载荷作用,在地震发生的情况下,它们还将受到地震载荷的作用。为了确保平台在恶劣海洋环境条件下的安全和业主提出的作业性能,设计者必须解决环境条件和外载荷确定这两部分工作。在平台设计检验时,“环境条件资料”和“外载荷计算书”是必不可少的技术文件,它们也是计算平台稳性、强度和运动的基础。本章主要讲叙这两部分内容。

一、设计工况与载荷

第三章已给出了移动式平台的各个设计工况,其中迁航、正常作业和风暴自存三种工况均要给出作用在平台上的环境载荷。

迁航工况:因为现行的稳性衡准采用气象衡准,所以只计及风载荷对平台的倾覆作用,而将其他环境因素放在稳性衡准数中予以考虑。

作业工况:平台在井位上进行作业,其环境和作业的总合载荷不超出为进行这种作业而确定的设计限度。根据情况,平台即可漂浮,也可坐底。

自存工况:平台在可能受到最大的设计环境载荷时,作业中止。平台在自存工况下必须是安全的。

二、确定环境条件

在确定海洋移动式平台的环境条件时,将遇到下述几种情况:

- (1) 在作业海区中,根据实际测量结果与实船工作情况决定。
- (2) 根据规范决定。
- (3) 根据业主或用户提出的要求决定。
- (4) 根据海况与气象的实测资料推算得到的结果确定。

在这些状况中,最好是根据已有的作业平台的实际工作状况,再按规范进行设计。应该指出,环境条件的确定必须得到船检部门或国家有关部门的认可,才能入级和通过法定检验。

表 4.1.1 给出了国内外一些自升式平台的海洋环境设计条件。

表 4.1.2 给出了国内外一些半潜式平台的海洋环境设计条件。

这些表可以在确定移动式平台的环境条件时作为参考。

在确定平台环境条件时,还应考虑到载荷的合理组合。对于某一种设计工况,不应简单地将各种载荷的最大值进行组合。如在考虑冰载荷的同时,再加上浪载荷,这显然是不适合的。而且,不应把意外载荷与极端环境载荷进行组合。如果在自存环境条件下再考虑地震载荷,这种情况出现的可能性是非常非常小的,对平台的要求必定过高。环境条件的确定对

表 4.1.1 自升式石油钻探平台设计条件实例

平台名称	作业海区	工 况	水深(m)	波高(m)	波浪周期(s)	风速(kn)	流速(kn)	甲板载荷(t)
渤海1号	渤海	自 存	30	8		87	3	
渤海5号	渤海、黄海	自 存	40	11		100	4	
南海1号	南海	自存(1)	91.5	15.3		109		
		自存(2)	76.2	16.9		93.2		
第四白龙	东南亚、日本沿海	自 存	75	14	9.0	109	4	1800
REGULAS	阿拉伯湾	工 作	28.5	2	3.6	30	2	
		自 存	28.5	10.7	8.4	60	2	
第六白龙	东南亚、中东	工 作	57	7	6.8~15	70	2	2200
		自 存	57	9	6.8~15	100	—	1400
		拖 航				100	—	1200
在建造中	红 海	工 作	68.5	12.2	12	70	2	1800
		自 存	68.6	12.2	12	87	2	1200

表 4.1.2 半潜式石油钻探平台设计条件实例

平台名称	作业海区	工 况	水深(m)	波高(m)	波浪周期(s)	风速(kn)	流速(kn)	甲板载荷(t)
勘探3号	黄海、东海南海	自 存	200	18		100	3	
		作 业	200	5		70	3	
SEDCO 135E	北海、澳大利亚	自 存	200	18.5		100		2500
		作 业	200	9		100		2500
第三白龙	世界各海区	移航(一)		5	6~20	29		1390
		移航(二)		18.5	11~20	117		1890
		作 业	300	12	9~20	70	3	2570
		自存(一)	300	18.5	11~20	117		2570
		自存(二)	300	37	20~25	117		2270
第二白龙	日本近海、东南亚近海	工 作	20~200	6	6.5~20	29	3	1600
		自 存		22.9	13~20	117	3	1600
AKER-H3	北海	自 存	200	30		100		

平台的安全性和经济性有很大影响,一定要反复考虑,通过可靠的资料来确定。

第二节 风及风载荷

我国位于亚洲东部,濒临太平洋,是世界上著名的季风国家之一;又是强大的太平洋台风途经的地方,特别是我国东南沿海各省和台湾省,每年都不同程度地受到台风的影响。

移动式平台在海上直接位于风载荷作用之下，一次强大的风暴和它所引起的巨浪又往往是平台遭受破坏的主要原因之一，移动式平台的事故统计充分表明了这一事实。

平台的稳性、强度和运动无一不与风载荷有关，在平台设计中一定要正确地确定设计风速及计算风载荷。

一、风

风的特征是用风向和风速来表示的，风速是空气在单位时间内所流过的距离，单位一般采用 m/s 或 kn (海里/小时)。为了便于使用，又可根据风速的大小划分为 13 个风级，称为蒲福风级。后人又将其补充了 5 级，成为现在通用的风级表 (见表 4.2.1)。但此表仍然不能包括全部自然界中所出现的风，如台风的最大风速可能达到 70 m/s，而龙卷风的风速甚至达到 100~200 m/s。

风向是指风的来向，在气象上用 16 个方位来表示。即 N(北)，NNE(东北偏北)，NE(东北)，ENE(东北偏东)，E(东)，ESE(东南偏东)，SE(东南)，SSE(东南偏南)，S(南)，SSW(西南偏西)，W(西)，WSW(西南偏西)，WNW(西北偏西)，NW(西北)，NNW(西北偏北)，如图 4.2.1 所示。

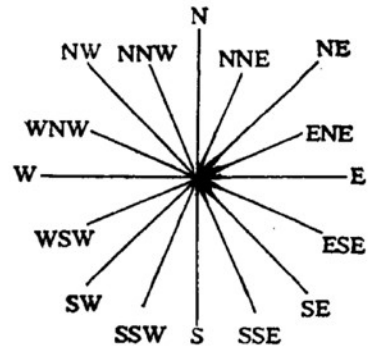


图 4.2.1 风向方位图

在平台的设计中不仅要考虑到风速，还要考虑风向，风的方向不同，风载荷的大小就不同。因此特别要确定作业海区的强风向和定常风向(强风向是指该风向的风速最大，定常风向是指该风向出现的频率最大)，以合理地确定平台的定位方向，减小平台所受风力。

二、设计风速

前面已经谈了环境条件的确定方法，这里主要介绍规范对设计风速的规定。

中国船级社规定：应根据平台的作业地区和作业方式确定设计风速。一般地说，设计风速在自存状态应不小于 51.5 m/s (100 kn)，在正常作业状态下不小于 36 m/s (70 kn)，在遮蔽海区不小于 26 m/s (50 kn)。

我国海洋水文有关专家曾对我国海区设计风速作了大量的研究，他们提出以海面上 10 m 左右高程，30 年一遇，10 分钟平均最大风速值和 1 分钟平均最大风速值分别作为一般条件和极端条件下的设计风速值。他们根据大量测量资料进行计算分析，建议采用图 4.2.2 中风速值为各海区极端条件下的设计风速值。

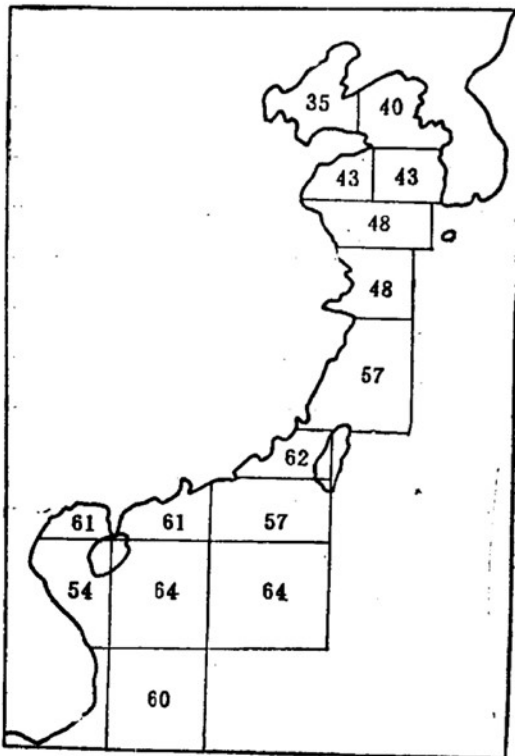


图 4.2.2 各海区设计风速建议值(m/s)(极端条件)

根据不同时距平均最大风速之间的相关关系，采用 $V_1 = 1.2V_{10}$ 或 $V_{10} = 0.83V_1$ ，将 30 年一遇 1 分钟平均风速换算为 10 分钟平均风速，得一般条件下的设计风速建议值 (见图

表 4.2.1 风级表

风级	风名	海面浪高(m)		海面状况	海面征象	陆面征象	相当风速		
		一般	最高				n mile/h	km/h	m/s
0	无风	—	—	平如镜	海面像镜子一样平静(无浪)	静,烟直上	<1	<1	0~0.2
1	无风	0.1	0.1	微波	海面有波纹,但还没有白色波顶	烟能表示风向,但风标不能转动	1~3	1~5	0.3~1.5
2	轻风	0.2	0.3	小波	波浪纹虽小,但已明显,波顶透明像玻璃,但不碎	人面感觉有风,树叶有微响,风向标能转动	4~6	6~11	1.6~3.3
3	微风	0.3	1.0	轻浪	波较大,波顶开始分裂,泡沫有光,间或见到白色波浪	树叶及微枝摇动不息,旗帜开展	7~10	12~19	3.4~5.4
4	和风	1.0	1.5	轻浪	小浪,波长较大,往前卷的白碎浪较多,有间断的呼啸声	能吹起地面灰尘和纸张,树的小枝摇动	11~16	20~28	5.5~7.9
5	清风	2.0	2.5	中浪	中浪,波浪相当大,白碎浪很多,呼啸声不断,间或有浪花溅起	有叶的小树摇摆,内陆的水面有小波	17~21	29~38	8.0~10.7
6	强风	3.0	4.0	大浪	开始成大浪,波浪白沫飞布海面,呼啸声大作(可能有多数浪花溅起)	大树枝摇摆,电线呼呼有声,举伞困难	22~27	39~49	0.8~3.8
7	疾风	4.0	5.5	巨浪	海面像由波浪堆积而成碎浪的白泡沫开始成纤维状,随风吹散,飞过几个波顶	全树摇动,大树弯下来,迎风步行感觉不便	28~33	50~61	13.9~17.1
8	大风	5.5	7.5	狂浪	中高浪,波长更大,随风吹起的纤维状更明显,呼啸声更大	可摧毁树木,人向前行感觉阻力甚大	34~40	62~74	17.2~20.7
9	烈风	7.0	10.0		高浪,泡沫纤维更为浓密,海浪卷翻,泡沫可能影响能见度	烟囱及平房顶可能受到损坏,小屋遭受破坏	41~47	75~88	20.8~24.4
10	狂风	9.0	12.5	狂涛	大高浪,波浪成长突出,纤维状泡沫更为浓密,并成片状,海浪颠簸好像槌击,浪花飞起带白色,能见度受影响	陆上少见,有时可将树木拔起,或将建筑物吹毁	48~55	89~102	24.5~28.4
11	暴风	11.0	16.0	非凡现象	特高浪,中小型的船在海上有时可能被浪所蔽,波顶边缘被风吹起泡沫,能见度受影响	陆上少见,有则必有重大损毁	56~63	103~117	28.5~32.6
12		14.0	—		空气中充满泡沫和浪花,海面因浪花的飞起成白色状态,能见度剧烈降低	陆上极少,其摧毁力极大	64~71	118~133	32.7~36.9
13							72~80	134~149	37.0~41.4
14							81~89	150~166	41.5~46.1
15							90~99	167~183	46.2~50.9
16							100~108	184~201	51.0~56.0
17							109~118	202~220	56.1~61.2

4.2.3)。

该图表明,由于渤海为半封闭浅水海区,且面积较小,受周围陆地的阻挡,因此该海区风速较其他海区为小。

黄海海区由于水面自北向南逐渐开阔,且南部受台风影响,故风速自北向南逐渐增大。

东海与浩瀚的太平洋为邻,水域极为宽阔,直接受太平洋风场的影响,且台风活动较多,故该海区风速较上述海区为大。

台湾海域一方面由于海峡效应风速较大,另一方面,由于它是太平洋台风向西北偏西移动的必经之路,台风影响显著,因此风速最大。

南海在广东、广西沿海海区因受到太平洋西行台风影响,风速较大。南海南部除受太平洋台风影响外,还是南海台风的产生地,所以风速也最大。

以上数据供确定移动式平台在我国各海域的设计风速参考使用。

挪威船级社关于设计风速的规定也具有相当的代表性,该船级社规定了两种设计风速标准,均考虑重现期。

一是选用静水面以上 10m 处的百年一遇持续风速为设计风速。在静水面以上 Z 米高处的持续风速可用下式计算:

$$V_z = V_{10}(0.93 + 0.007 Z)^{1/2}$$

式中: V_{10} 为静水面以上 10m 处的持续风速;

V_z 为静水面以上 Z m 高处的持续风速。

如缺乏有关风速数据时, DNV 规定可采用表 4.2.2 中给出的设计风速数值。表中分别给出四种海域类型和两种季节类型,即所有的季节和夏季,其中夏季是指 5 月 15 日至 9 月 15 日。

表 4.2.2 DNV 设计风速 $V_{10}(m/s)$

海域类型	所有季节	夏季
遮蔽海域	40	
正常开阔海域	45	
风暴开阔海域(北海和挪威大陆架)	50	45
极端海域(世界范围)	50	

二是采用 N 年一遇的阵风风速为设计风速,如果缺乏详细的数据,可用下式计算:

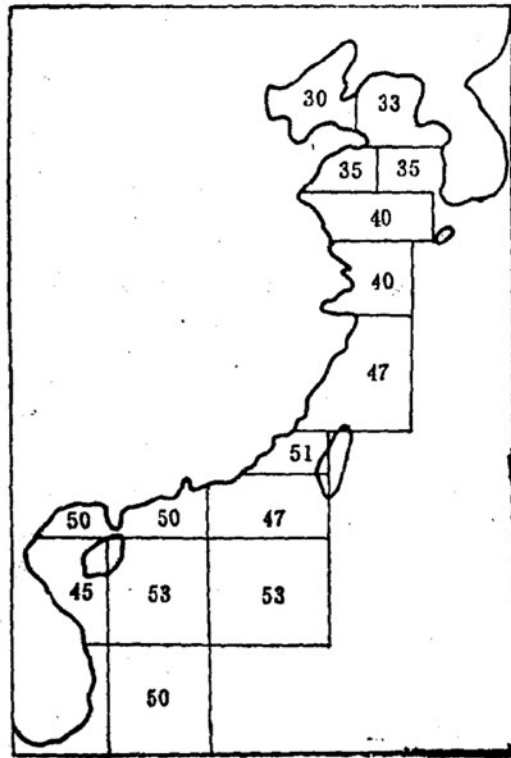


图 4.2.3 各海区设计风速建议值(m/s)
(正常作业状态)

$$V_z = V_{10}(1.53 + 0.008Z)^{1/2}$$

式中: V_z 为在静水面以上 Z m 高处的阵风风速;

V_{10} 为在静水面以上 10 m 处的持续风速。

DNV 规定的两种设计风速标准,用于不同载荷组合,当与最大波浪力组合时,采用持续风速;当用阵风风速计算的风力比用持续风速与最大波浪力组合更为不利时,则采用阵风风速。

DNV 定义的阵风风速是时距为 3 秒的平均风速,而持续风速是时距为 1 分钟的平均风速,并给出了两者之间的换算公式:

$$V_g = 1.25 V_c$$

式中: V_g 为海面以上 10 m 处的阵风风速;

V_c 为海面以上 10 m 处的持续风速。

三、风载荷计算

规范规定风压 P 按下式计算:

$$P = 0.613V^2 (\text{Pa})$$

式中: V 为设计风速(m/s)。

作用在构件上的风力 F 应按下式计算,并应确定其合力作用点的垂直高度;

$$F = C_h \cdot C_s \cdot S \cdot P (\text{N})$$

式中: P 为风压(Pa);

S 为平台在平浮或倾斜状态时,受风构件的正投影面积(m^2);

C_h 为暴露在风中构件的高度系数,其值可根据构件高度(即构件中心至设计水面的

表 4.2.3 高度系数 C_h

构件高度 h (m) (距海面)	C_h
0~15.3	1.00
15.3~30.5	1.10
30.5~46.0	1.20
46.0~61.0	1.30
61.0~76.0	1.37
76.0~91.5	1.43
91.5~106.5	1.48
106.5~122.0	1.52
122.0~137.0	1.56
137.0~152.5	1.60
152.5~167.5	1.63
167.5~183.0	1.67
183.0~198.0	1.70
198.0~213.5	1.72
213.5~228.5	1.75
228.5~244.0	1.77
244.0~256.0	1.79
256.0 以上	1.80

垂直距离) h ，由表 4.2.3 选取；

C_s 为暴露在风中构件的形状系数，其值可根据构件形状由表 4.2.4 选取，也可根据风洞试验决定。

受风构件垂直于风向的正投影面积是按结构实际挡风面积计算的，对通常用于井架、起重机及其他空心构架，可取其前后侧满实投影面积的 30%，或取前侧满实投影面积的 60%。形状系数可按表 4.2.4 选取。

表 4.2.4 形状系数 C_s

构 件 形 状	C_s
球 形	0.4
圆 柱 形	0.5
大的平面(船体、甲板室、甲板下的平滑表面)	1.0
甲板室群或类似结构	1.1
钢 索	1.2
井 架	1.25
甲板下裸露的梁和桁材	1.80
独立的结构形状(起重机、梁等)	1.50

实际上风力可以分为与风速方向一致的拖曳力和垂直风向的升力。对于较大的平面结构，如半潜式的上部甲板底面、直升机平台底面有时会产生较大的升力，而这种升力往往会使平台进一步倾斜。美国土木工程师学会给出的风载荷计算公式和系数也是很实用的：

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot V^2 S \quad (\text{N})$$

$$F_L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot V^2 S \quad (\text{N})$$

式中： C_D 为受风构件的阻力系数(根据表 4.2.5 选取)；

C_L 为受风构件的升力系数(根据表 4.2.5 选取)；

γ 为空气密度(N/m^3)；

g 为重力加速度(m/s^2)；

其他符号意义同前。

四、脉动风压的动力效应

风速和风压是非定常的。对于海上移动平台上的井架等高耸结构，由于它的刚度较低，自振周期长，在不定常的风载荷作用下具有明显的动力效应。风激振动的产生是由于结构的存在导致流线内的不稳定性和空气流动的自然周期性以及结构构件形状的影响等原因。风激振动常会带来严重的后果。因此，风对于高耸结构物的作用，除考虑平均风速产生的风压外，还应考虑脉动风压产生的脉动压力。当结构高度比宽度大 5 倍以上，自振周期大于 0.5 s，结构对动力效应比较敏感时，则应考虑动力放大系数的影响。设计风压要考虑风振系数 β 。风振系数 β 包含了脉动风压的动力作用。脉动风压如图 4.2.4 所示。

表 4.2.5 各种剖面形状结构的阻力系数 C_D 和升力系数 C_L

剖面形状及风向	C_L	C_D
	2.03	0
	1.96 2.01	0
	2.04	0
	1.81	0
	2.0	0.43
	1.83	2.07
	1.99	-0.09
	1.62	-0.48
	2.01	0
	1.99	0
	2.19	0

对于一个单自由度弹性系统,当其受稳定风压 P_s 和脉动风压 $p(t)$ 共同作用时,总风压 $P(t)$ 可用下式计算:

$$P(t) = \beta P_s$$

考虑脉动风压的风力计算公式为:

$$F = \beta P_s C_h C_s V^2 A$$

风振系数 β 可根据表 4.2.6 选取。

为确定风振系数 β , 应先计算高耸结构的自振周期, 计算时可采用工程力学中所介绍的

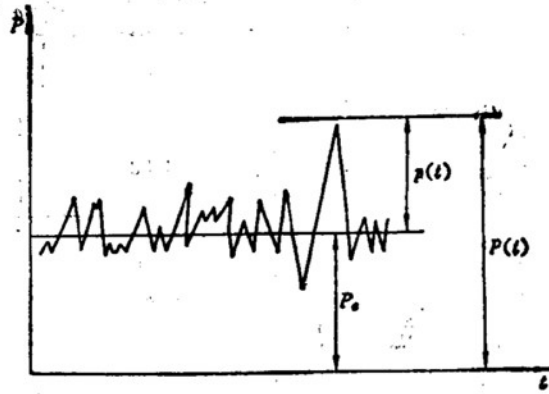


图 4.2.4 脉动风压

表 4.2.6 风振系数 β

钢结构自振周期 $T(s)$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0	5
钢结构风振系数 β	1.45	1.55	1.62	1.65	1.7	1.75

方法。

第三节 波浪与波浪载荷

一、概述

1. 我国沿海波浪的分布规律

我国沿海波浪的分布规律根据统计如下：

(1) 波向分布规律

主要取决于风向。冬季浪向偏北，并有自西向东按顺时针方向变化的趋势。春季与秋季浪向不稳定，除少数地区浪向偏北外，多数地区浪向分布紊乱。

(2) 波高的变化规律。

冬季，浪高较大，渤海出现过 8 m 大浪，山东半岛一带风浪也较大，苏、浙、闽沿海一般为 5 级浪，台湾海峡大浪较多，高达 9.5 m 以上，而台湾北部沿岸有 15 m 巨浪，广东沿海、海南岛、北部湾一带大浪较少，南沙群岛有 9.5 m 大浪。春季，渤海湾和山东半岛北部有 5 级以上大浪，渤海海峡最大浪高达 8.0 m；福建、广东、广西沿岸有 5 级浪。夏季，东、南海沿岸由于台风影响，渤、黄、东海一般有 5~6 级大浪，广东沿岸最高有 9.8 m 大浪，西沙最大波高达 10 m。秋季与夏季情况相近，台湾沿岸风浪可达 15 m。

(3) 波浪周期分布规律

波浪周期的分布规律为：由渤海、黄海至东海，北小南大，南海沿岸周期一般偏小。

冬季，从山东半岛南部至福建一带，平均周期由 4~5 秒增至 6~7 秒，最大周期达 11.4 秒，南海沿岸平均周期仅 3~4 秒，最大约 10 秒。

夏秋两季，波浪周期分布基本一致，渤海湾一带平均周期小于 4 秒，最大周期为 8.3 秒，山东半岛北部沿岸和渤海海峡，平均周期 5 秒，最大周期 13 秒，山东半岛南部、苏北和长江口沿岸直至浙闽一带，平均周期小于 5 秒，最大周期 11 秒，南海沿岸平均周期 5 秒以上，

最大周期达 12.8 秒。

夏季,由辽东湾至长江口一带,平均周期不超过 5 秒,最大周期 13.7 秒;浙闽沿岸平均周期 5 秒,最大周期 11.5 秒;海南岛、北部湾北部、西沙沿岸平均周期 4 秒,最大周期 10.9 秒。

2. 风级和浪级对应关系表

上节给出了风级表(表 4.2.1),浪级表见表 4.3.1。

风和浪总是联系在一起,但应该注意风级与浪级不总是一一对应的,波浪的成长决定于风程、风速、风时及海域地理环境。

3. 移动式平台的波浪设计标准

移动式平台的波浪设计标准,要考虑到使用时期可能出现的不利情况,以保证平台的安全,又要充分注意平台的竞争性,提高平台的经济效益。

表 4.3.1 浪级表

浪 级	名 称	波 高 范 围 (m)
0	无 浪	0
1	微 浪	$H_{\frac{1}{3}} < 0.1$
2	小 浪	$0.1 < H_{\frac{1}{3}} < 0.5$
3	轻 浪	$0.5 < H_{\frac{1}{3}} < 1.25$
4	中 浪	$1.25 < H_{\frac{1}{3}} < 2.5$
5	大 浪	$2.5 < H_{\frac{1}{3}} < 4.0$
6	巨 浪	$4.0 < H_{\frac{1}{3}} < 6.0$
7	狂 浪	$6.0 < H_{\frac{1}{3}} < 9.0$
8	狂 涛	$9.0 < H_{\frac{1}{3}} < 14.0$
9	怒 涛	$H_{\frac{1}{3}} > 14.0$

中国船级社《海上移动平台入级与建造规范》(1992)有关条文如下:

(1) 设计波高

设计波高的重现期应不小于 50 年。

特征波高采用最大波高 H_{max} , 中国沿海深水区,

东海、南海 $H_{max} = 3.2\bar{H}$ (m)

(相应波数 $N = 2000$)

黄海、渤海 $H_{max} = 2.45\bar{H} \sim 3.2\bar{H}$ (m)

(相应波数 $N = 100 \sim 2000$)

浅水区的 H_{max} 根据水深 d (m) 和波数 N 求得, $\frac{H_{max}}{\bar{H}}$ 的值见表 4.3.2。

其中, \bar{H} 为波高的平均值 (m)。

(2) 波浪周期

最大波高 H_{max} 确定之后, 其相应波浪周期 T 应在 $\sqrt{6.5 H_{max}} \leq T \leq 20$ s 的范围, 用几个不同的值对平台结构应力进行估算, 最终取使平台结构产生最大应力的值。

对于某些周期的波浪,虽然波高小于 H_{max} ,但可能对结构构件有更大的影响,亦应予以考虑。

因此在计算波浪载荷时应针对不同波浪周期、波浪方向和波峰位置进行搜索,以确定对平台最不利的状态。

表 4.3.2 H_{max}/\bar{H} 的值

N	\bar{H}/d										
	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
10	1.78	1.745	1.705	1.670	1.635	1.600	1.565	1.530	1.495	1.46	1.420
20	2.01	1.955	1.900	1.845	1.795	1.745	1.690	1.640	1.590	1.540	1.490
50	2.270	2.195	2.120	2.050	1.980	1.920	1.850	1.780	1.715	1.65	1.58
100	2.45	2.360	2.270	2.190	2.110	2.030	1.950	1.870	1.795	1.72	1.65
200	2.62	2.52	2.415	2.320	2.220	2.130	2.035	1.950	1.860	1.770	1.630
500	2.830	2.710	2.595	2.480	2.370	2.260	2.155	2.056	1.955	1.86	1.77
1000	2.98	2.850	2.720	2.590	2.470	2.350	2.235	2.125	2.015	1.91	1.81
2000	3.12	2.902	2.820	2.685	2.555	2.425	2.305	2.190	2.075	1.96	1.85
5000	3.3	3.14	2.98	2.83	2.685	2.545	2.410	2.230	2.155	2.03	1.90

二、波浪理论及适用范围

海洋工程中常用的波浪理论有:微幅波、斯托克斯波、椭圆余弦波和孤立波。这里简单地介绍这些波浪理论,并给出相应的计算公式。

1. 微幅波理论

微幅波是指波高 H 与波长 L 、水深 d 相比为小量的波。微幅波理论也称作艾里理论、线性理论或正弦波理论。微幅波理论的特点是使用简便,适用性强。在平台初步设计阶段,可以用于各种水深,其计算结果仍满足工程要求。由于它的线性性质,微幅波理论可用于研究绕射问题和各种谱分析。

微幅波理论的坐标系如图 4.3.1 所示。

基本公式给出如下:

波面方程

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (4.3.1)$$

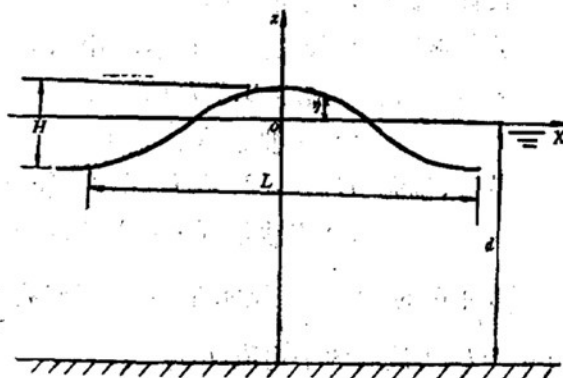


图 4.3.1 微幅波浪理论坐标系

波长
$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi d}{L} \quad (4.3.2)$$

当深水时, 即 $d/L \geq 0.5$ 时, 则 $\operatorname{th} \frac{2\pi d}{L} \approx 1.0$ 。

速度势
$$\phi = \frac{Hg}{2\omega} \frac{\operatorname{ch}[k(z+d)]}{\operatorname{ch}(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (4.3.3)$$

式中: d 为水深(m);

H 为波高(m);

T 为波浪周期(s);

k 为波数, $k = 2\pi/L$;

ω 为波频, $\omega = 2\pi/T$ 。

根据速度势 ϕ , 即可求得波浪水质点速度和加速度。

水平速度
$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\operatorname{ch}[k(z+d)]}{\operatorname{sh}(kd)} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (4.3.4)$$

垂直速度
$$v = \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

$$v = \frac{\pi H}{T} \frac{\operatorname{ch}[k(z+d)]}{\operatorname{sh}(kd)} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (4.3.5)$$

水平加速度:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot u + \frac{\partial u}{\partial z} \cdot v \approx \frac{\partial u}{\partial t} \\ \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{2\pi^2 H}{T^2} \cdot \frac{\operatorname{ch}[k(z+d)]}{\operatorname{sh}(kd)} \cdot \sin(kx - \omega t) \end{aligned} \quad (4.3.6)$$

垂直加速度:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} \cdot u + \frac{\partial v}{\partial z} \cdot v \approx \frac{\partial v}{\partial t} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= \frac{2\pi^2 H}{T^2} \cdot \frac{\operatorname{sh}[k(z+d)]}{\operatorname{sh}(kd)} \cdot \cos(kx - \omega t) \end{aligned} \quad (4.3.7)$$

在深水时, 即 $d/L \geq 0.5$, 此时速度为:

$$u = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (4.3.8)$$

$$v = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (4.3.9)$$

同样加速度为:

$$\dot{u} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (4.3.10)$$

$$\dot{v} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} e^{kz} \cos(kx - \omega t) \quad (4.3.11)$$

水面以下的压力: $P = -\rho g z - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t}$

$$P = -\rho g z + \frac{1}{2} \rho g H \frac{\operatorname{ch}[k(z+d)]}{\operatorname{ch}(kd)} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (4.3.12)$$

式中: ρ 为海水质量密度。

2. 斯托克斯波理论

斯托克斯波理论采用有限个简单的频率成比例的余弦波来逼近具有单一周期的有限振幅波, 它的适用范围较广。

斯托克斯波理论坐标系见图 4.3.2。

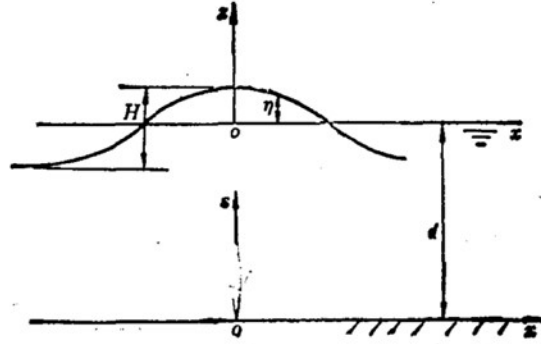


图 4.3.2 斯托克斯波理论坐标系

(1) 斯托克斯二阶波的基本公式:

速度势

$$\begin{aligned} \phi = & (Hc/2) [\text{ch}(k(z+d))/\text{sh}(kd)] \sin(kx - \omega t) \\ & + (3kH^2c/32) [\text{ch}(2k(z+d))/\text{sh}^4(kd)] \sin 2(kx - \omega t) \end{aligned} \quad (4.3.13)$$

波面

$$\begin{aligned} \eta = & (H/2) \cos(kx - \omega t) + [kH^2 \text{ch}(kd)] \cdot [2 + \text{ch}(2kd)] \\ & / [16\text{sh}^3(kd)] \cos 2(kx - \omega t) \end{aligned} \quad (4.3.14)$$

波长

$$L = (gT^2/2\pi) \text{th}(2\pi d/L) \quad (4.3.15)$$

(2) 斯托克斯五阶波基本公式:

速度势

$$\phi = \frac{L}{kT} \sum_{n=1}^5 \phi_n \text{ch}(nks) \sin(n\theta) \quad (4.3.16)$$

式中: L 为波长;

k 为波数;

T 为波浪周期;

θ 为相位角, $\theta = kx - \omega t$;

ϕ_n 为速度势系数, 其表达式如下:

$$\phi_1 = \lambda(A_{11} + \lambda^2 A_{13} + \lambda^4 A_{15})$$

$$\phi_2 = \lambda^2(A_{22} + \lambda^2 A_{24})$$

$$\phi_3 = \lambda^3(A_{33} + \lambda^2 A_{35})$$

$$\phi_4 = \lambda^4 A_{44}$$

$$\phi_5 = \lambda^5 A_{55}$$

速度势系数表达式中的 λ 是一个比值, 且 $\lambda = ka$, a 是须对每一个波确定的常数。系数 A 的表达式如下:

$$\begin{aligned}
A_{11} &= 1/s \\
A_{13} &= -c_1^2(5c_1^2 + 1)/(8s^5) \\
A_{15} &= -(1184c_1^{10} - 1440c_1^8 - 1992c_1^6 + 2641c_1^4 - 249c_1^2 + 18)/(1536s^{11}) \\
A_{22} &= 3/(8s^4) \\
A_{24} &= (192c_1^8 - 424c_1^6 - 312c_1^4 + 480c_1^2 - 17)/(768s^{10}) \\
A_{33} &= (13 - 4c_1^2)/(64s^7) \\
A_{35} &= (512c_1^{12} + 4224c_1^{10} - 6800c_1^8 - 12808c_1^6 + 16704c_1^4 \\
&\quad - 3154c_1^2 + 107)/(4096s^{13}(6c_1^2 - 1)) \\
A_{44} &= (80c_1^8 - 816c_1^6 + 1338c_1^4 - 197)/(1536s^{10}(6c_1^2 - 1)) \\
A_{55} &= -(2880c_1^{10} - 72480c_1^8 + 324000c_1^6 - 432000c_1^4 \\
&\quad + 163470c_1^2 - 16245)/(61440s^{11}(6c_1^2 - 1))(8c_1^2 - 11c_1^2 + 3) \\
c_1 &= \text{ch}(kd) \\
s &= \text{sh}(kd)
\end{aligned}$$

波长 L 及常数 α 由如下超越方程组求解:

$$\begin{cases} \frac{\pi H}{d} = \frac{\lambda + \lambda^3 B_{33} + \lambda^5 (B_{35} + B_{55})}{(d/L)} \\ \frac{d}{L_0} = \frac{d}{L} \text{th}(kd) (1 + \lambda^2 C_1 + \lambda^4 C_2) \end{cases} \quad (4.3.17)$$

式中: L_0 为深水波长, $L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$;

系数 B 和 C 的表达式如下:

$$\begin{aligned}
B_{22} &= (2c_1^2 + 1)c_1/(4s^3) \\
B_{24} &= (272c_1^8 - 504c_1^6 - 192c_1^4 + 322c_1^2 + 21)c_1/(384s^9) \\
B_{33} &= 3(8c_1^6 + 1)/(64s^6) \\
B_{35} &= (88128c_1^{14} - 208224c_1^{12} + 70848c_1^{10} + 54000c_1^8 \\
&\quad - 21816c_1^6 + 6264c_1^4 - 54c_1^2 - 81)/(12288s^{12}(6c_1^2 - 1)) \\
B_{44} &= (768c_1^{10} - 448c_1^8 - 48c_1^6 + 48c_1^4 + 106c_1^2 - 21)c_1/(384s^9(6c_1^2 - 1)) \\
B_{55} &= (192000c_1^{10} - 262720c_1^8 + 83680c_1^6 + 20160c_1^4 - 7280c_1^2 + 7160c_1 \\
&\quad - 1800c_1 - 1050c_1 + 225)/(12288s^{10}(6c_1^2 - 1)(8c_1^2 - 11c_1^2 + 3)) \\
C_1 &= (8(c_1^4 - c_1^2) + 9)/(8s^4) \\
C_2 &= (3840c_1^{12} - 4096c_1^{10} + 2592c_1^8 - 1008c_1^6 + 5944c_1^4 \\
&\quad - 1830c_1^2 + 147)/(512s^{10}(6c_1^2 - 1))
\end{aligned}$$

波剖面表达式为:

$$\eta = s - d = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^5 \eta_n \cos(n\theta) \quad (4.3.18)$$

式中: η_n 为波形系数, 由下式确定:

$$\begin{aligned}
\eta_1 &= \lambda \\
\eta_2 &= \lambda^2 B_{22} + \lambda^4 B_{24} \\
\eta_3 &= \lambda^3 B_{33} + \lambda^5 B_{35} \\
\eta_4 &= \lambda^4 B_{44}
\end{aligned}$$

$$\eta_5 = \lambda^5 B_{55}$$

求得速度势后,即可求得水质点速度与加速度:

$$\text{水平速度 } u = \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$\text{垂直速度 } v = \frac{\partial \phi}{\partial s}$$

$$\text{水平加速度 } a_x = \frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial s} v$$

$$\text{垂直加速度 } a_s = \frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} u + \frac{\partial v}{\partial s} v$$

斯托克斯五阶理论的以上计算方法写成计算机程序后,只要输入水深 d 、波高 H 、周期 T 等三个数据,便可得到五阶波波长 L 、波剖面方程、水质点速度与加速度方程等结果,并可计算出波剖面坐标和波内任一点的速度和加速度值。

3. 椭圆余弦波理论

对有限振幅波,由于波高较大,所以微幅波理论已不适用。在相对水深 $d/L < 1/8$ 左右,可采用椭圆余弦波理论。

椭圆余弦波由于比较全面考虑了影响波动性质的因素,因而具有较大的适用范围。

但是应用椭圆余弦波的理论计算工作是十分繁琐的,特别是其中包括着椭圆函数,计算上是不方便的。

椭圆余弦波的坐标系及波剖面可由图 4.3.3 所示。

在求解椭圆波的波剖面、波长、波速时首先必须求出模数 k , 这可由下式用迭代法得到:

$$T = \sqrt{\frac{16d^2}{3gH} \left\{ \frac{k \cdot K(k)}{\sqrt{1 + (H/d) [-1 + (2 - 3E(k)/K(k)/k^2)]}} \right\}} \quad (4.3.19)$$

式中: d 为水深;

H 为波高;

T 为周期;

g 为重力加速度。

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi}} \text{ 为第一类完全椭圆积分;}$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi} d\phi \text{ 为第二类完全椭圆积分;}$$

下面 $K(k)$ 和 $E(k)$ 简写成 K 和 E 。

波长

$$L = \sqrt{\frac{16d^3}{3H}} \cdot k \cdot K \quad (4.3.20)$$

波剖面

$$\eta = 16d^3 \frac{K(K-E)}{3L^2} + H[\text{cn}^2(u, k) - 1] \quad (4.3.21)$$

式中: $\text{cn}(u, k)$ 称为椭圆余弦函数;

$$u = 2K(x/L - t/T)$$

波速

$$c^2 = gd \{1 + (H/d)[-1 + (2 - 3E/K)/k^2]\} \quad (4.3.22)$$

波面下任一点的水分子速度、加速度可由 Keulegan-Patterson 方程求得:

$$\begin{cases} u/\sqrt{gd} = \eta/d - \eta^2/(4d^2) + (d/3 - z^2/(2d))\partial^2\eta/\partial x^2 \\ w/\sqrt{gd} = -z[(1/d - \eta/(2d^2))\partial\eta/\partial x + (1/3)(d - z^2/(2d))\partial^3\eta/\partial x^3] \end{cases} \quad (4.3.23)$$

将式(4.3.21)代入(4.3.23)即得水分子速度及加速度的计算公式:

$$\begin{aligned} u/\sqrt{gd} &= -5/4 + 3z_t/(2d) - z_t^2/(4d^2) + (3H/(2d)) \cdot (1 - z_t/(3d))cn^2 \\ &\quad - (1/4)(H/d)^2cn^4 - (1/(2k^2))(H/d)^2(1 - 3z/(2d^2)) \\ &\quad \times (cn^2dn^2 - sn^2dn^2 - k^2sn^2cn^2) \\ \left\{ \begin{aligned} w/\sqrt{gd} &= (\sqrt{3}z/(2kd))(H/d)^{3/2}[3 - z_t/d - (H/d)cn^2 \\ &\quad + (2H/k^2d)(1 - z^2/(2d^2))(k^2sn^2 - k^2cn^2 - dn^2)]sn \times cn \times dn \\ a_x/\sqrt{gd} = \partial u/\partial t/\sqrt{gd} &= (4KH/Td)(H/d)[3/2 - z_t/(2d) - (H/(2d))cn^2 \\ &\quad + (H/k^2d)(1 - 3z^2/(2d^2))(k^2sn^2 - k^2cn^2 - dn^2)]sn \cdot cn \cdot dn \\ a_z\sqrt{gd} = \partial w/\partial t/\sqrt{gd} &= (\sqrt{3}Kz/(kTd))(H/d)^{3/2}\{(3 - z_t/d) \cdot (sn^2 \cdot dn^2 \\ &\quad - cn^2dn^2 + k^2sn^2cn^2) - (H/d)(3sn^2dn^2 - cn^2dn^2 + k^2sn^2cn^2)cn^2 \\ &\quad - (2H/k^2d)(1 - z^2/(2d^2))[9k^2sn^2cn^2dn^2 - k^2sn^4(k^2cn^2 + dn^2) \\ &\quad + k^2cn^4(k^2sn^2 - dn^2) + dn^4(sn^2 - cn^2)]\} \end{aligned} \right. \quad (4.3.24) \end{aligned}$$

式中: $z_t = (16d^3/(3L^2))K(K - E) + d - H;$
 $cn = cn(2K(x/L - t/T), k);$
 $sn = sn(2K(x/L - t/T), k);$
 $dn = 1 - k^2(1 - cn^2);$
 $sn^2 + cn^2 = 1。$

因此,在求得模数 k 后,只要计算出椭圆函数 cn, sn, dn , 便可获得波浪的各种特征。而椭圆函数可用如下三角级数表达:

$$cn(2Kv, k) = (2\pi/(K \cdot k)) \sum_{n=0}^{\infty} q^{n+1/2} \cos(2n+1)\pi v / (1 + q^{2n+1})$$

$$sn(2Kv, k) = (2\pi/(K \cdot k)) \sum_{n=0}^{\infty} q^{n+1/2} \sin(2n+1)\pi v / (1 + q^{2n+1})$$

$$dn(2Kv, k) = \pi/(2K) + (2\pi/K) \sum_{n=1}^{\infty} q^n \cos n\pi v / (1 + q^{2n})$$

式中: $v = (x/L - t/T);$

$$q = \varepsilon + 2\varepsilon^5 + 15\varepsilon^9 + 150\varepsilon^{13} + 1707\varepsilon^{17} + 20910\varepsilon^{21} + \dots;$$

$$\varepsilon = (1 - \sqrt{k'}) / [2(1 + \sqrt{k'})];$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2}。$$

由于 k 一般比较接近于 1, 故计算时收敛得相当快。

可以证明,当 $k=0$ 时,椭圆余波即转化为正弦波。因此可以认为,线性微幅波理论是非线性椭圆余波理论的一种特殊情况。还可以证明,当 $k=1$ 时,椭圆余波变为孤立波。因此,孤立波理论也是椭圆余波理论的一种特殊情况。模数 k 的值在 0 与 1 之间变化。

4. 孤立波理论

孤立波适用于水深极浅的水域,它是椭圆波在水深趋于很小时的一个极限情况。

下面列出有关公式:

波剖面

$$\eta = H \operatorname{sech}^2 \theta \left[1 - \frac{3}{4} (1 - \operatorname{sech}^2 \theta) \right] \quad (4.3.25)$$

式中, θ 为相位角,且

$$\theta = \sqrt{\frac{3H}{4d^3}} \left(1 - \frac{5}{8} \frac{H}{d} \right) (x - ct) \quad (4.3.26)$$

波速

$$c = \sqrt{gd} \left[1 + \frac{1}{2} \frac{H}{d} - \frac{3}{20} \left(\frac{H}{d} \right)^2 \right] \quad (4.3.27)$$

理论上,孤立波的波长是无限的。但作为设计波时,可将孤立波周期化处理,按既定周期计算相当波长:

波长 $L = c \cdot T$

将波剖面公式(4.3.25)代入(4.3.23)可得波面下任一水质点的速度与加速度计算式:

$$\left. \begin{aligned} \text{水平速度 } \frac{u}{\sqrt{gd}} &= \frac{\eta_1}{d} \left[1 - \frac{5}{4} \frac{H}{d} - \frac{3}{2} \frac{H}{d} \left(\frac{2z}{d} + \frac{z^2}{d^2} \right) \right] \\ &\quad + \left(\frac{\eta_1}{d} \right)^2 \left(\frac{5}{4} + \frac{9}{4} \frac{z}{d} \left(2 + \frac{z}{d} \right) \right) \\ \text{垂直速度 } \frac{w}{\sqrt{gd}} &= \sqrt{3} \left(\frac{H}{d} \right)^3 \left(1 + \frac{z}{d} \right) \frac{\eta_1}{H} \operatorname{th} \theta \\ &\quad \cdot \left[1 - \frac{7}{8} \frac{H}{d} - \frac{1}{2} \frac{H}{d} \left(\frac{2z}{d} + \frac{z^2}{d^2} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \frac{\eta_1}{d} \left(1 - 6 \frac{z}{d} - 3 \frac{z^2}{d^2} \right) \right] \\ \text{水平加速度 } \frac{a_x}{\sqrt{gd}} &= \left\{ \frac{1}{d} \left[1 - \frac{5}{4} \frac{H}{d} - \frac{3}{2} \frac{H}{d} \left(\frac{2z}{d} + \frac{z^2}{d^2} \right) \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{2\eta_1}{d^2} \left[\frac{5}{4} + \frac{9}{4} \left(2 \frac{z}{d} + \frac{z^2}{d^2} \right) \right] \right\} \cdot \frac{\partial \eta_1}{\partial t} \\ \text{垂直加速度 } \frac{a_z}{\sqrt{gd}} &= \sqrt{3} \left(\frac{H}{d} \right)^3 \cdot \left(1 + \frac{z}{d} \right) \cdot \left\{ \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \eta_1}{\partial t} \operatorname{th} \theta \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sqrt{\frac{3}{4d^3 H^3}} \cdot c \cdot \eta_1^2 \right) \times \left[1 - \frac{7}{8} \frac{H}{d} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{1}{2} \frac{H}{d} \left(\frac{2z}{d} + \frac{z^2}{d^2} \right) - \frac{\eta_1}{2d} \left(1 - 6 \frac{z}{d} \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. - 3 \frac{z^2}{d^2} \right) \right] - \frac{1}{2dH} \left(1 - 6 \frac{z}{d} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. - 3 \frac{z^2}{d^2} \right) \eta_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial t} \operatorname{th} \theta \right\} \end{aligned} \right. \quad (4.3.28)$$

式中: $\eta_1 = H \operatorname{sech}^2 \theta$

$$\frac{\partial \eta_1}{\partial t} = \sqrt{3} \left(\frac{H}{d} \right)^3 \cdot c \cdot \operatorname{sech}^2 \theta \cdot \operatorname{th} \theta$$

5. 波浪理论的适用范围

我们已经简单介绍了微幅波、斯托克斯波、椭圆余弦波和孤立波等波浪理论。实际上，目前还没有一种适用于任何水深、波高和周期情况下的规则波理论。各种理论只是在一定的条件下，也就是在一定的范围内，与实际较为吻合。

在平台设计中，重要的是根据作业海域、波浪参数和设计要求来选择合适的波浪理论。一般情况下，我们可以从图 4.3.4 或图 4.3.5 所给出的各种波浪理论范围来确定。

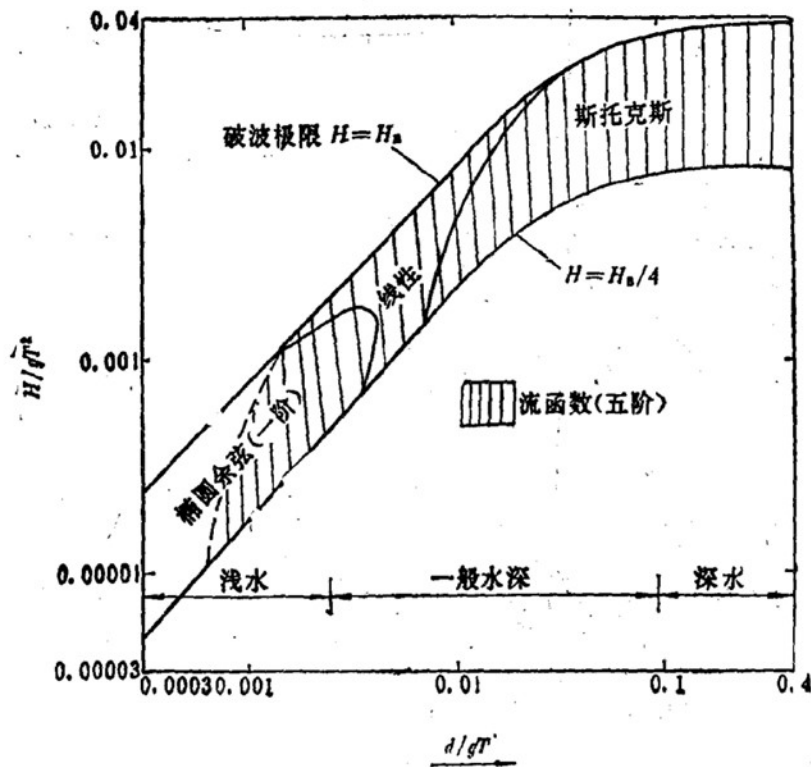


图 4.3.4 各种波浪理论的适用范围(Dean R.G.1970)

三、小尺度结构波浪载荷计算

当物体的尺度与波长相比是微小量的情况时，则可忽略物体对波浪运动的影响，这个比值一般定为 $D/L \leq 0.2$ (其中 D 是物体的特征长度，如圆柱体则 D 是直径， L 是波长)。 $D/L \leq 0.2$ 的构件，一般称为小尺度构件。对于小尺度构件单位长度上的波浪力和海流力，可用莫里森(Morison)公式计算拖曳力和惯性力后，再按同相位合成。

1. 拖曳力

拖曳力按下式计算：

$$\bar{f}_D = \frac{1}{2} \rho C_D A |\bar{u}_n| \bar{u}_n \quad (4.3.29)$$

式中： \bar{f}_D 为垂直于构件轴线单位长度上的拖曳力(N/m)；

C_D 为拖曳力系数，查表 4.3.3 或由试验测定；

ρ 为海水密度 $(\frac{kN \cdot s^2}{m^4})$ ；

A 为单位长度桩柱在垂直于矢量 \bar{u}_n 方向上的投影 (m^2/m) ；

\bar{u}_n 为与构件轴向垂直的相对速度矢 (m/s) 。

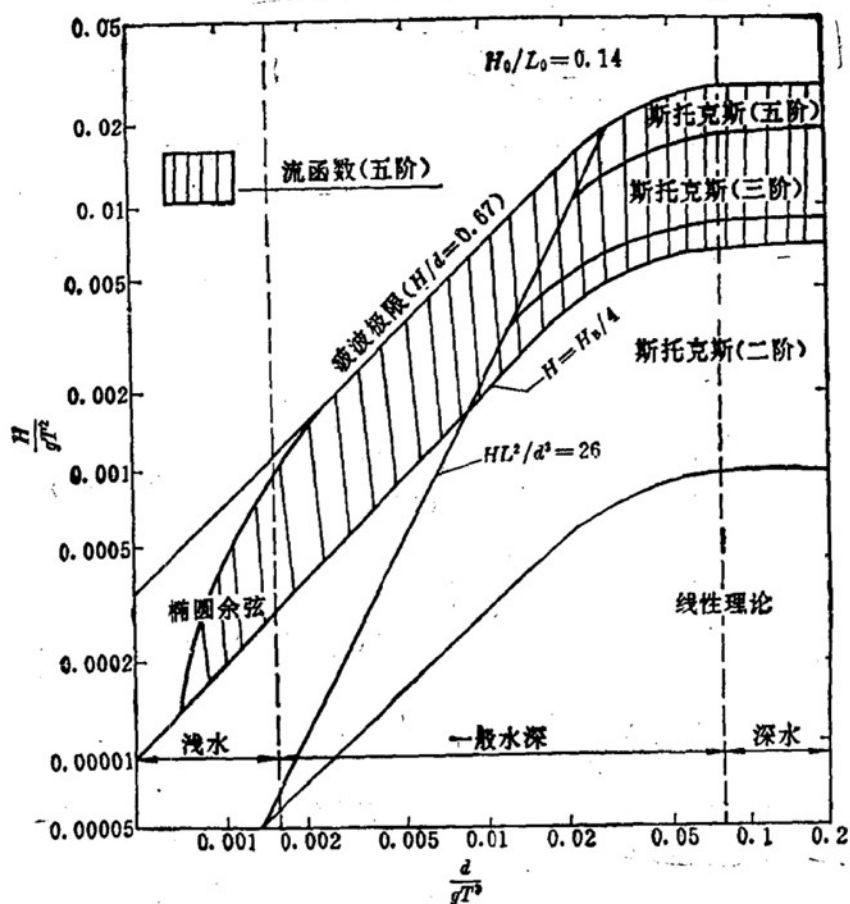


图 4.3.5 各种波浪理论的适用范围 (Le Mehouste, 1976)

2. 惯性力

在一般情况下, 作用于构件单元上的惯性力, 可以考虑为由于波浪中水质点的加速度矢量所引起的, 和由于构件在波浪中的绝对运动所引起的两部分所组成;

惯性力按下式计算:

$$\bar{f}_I = \rho(V_N \dot{u}_n + C_m V_R \dot{u}_t) \quad (4.3.30)$$

式中: \bar{f}_I 为垂直于构件轴线单位长度上的惯性力 (N/m);

ρ 为海水密度 ($\frac{\text{kN} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^3}$);

C_m 为附连水质量系数, 查表 4.3.3 或由试验测定;

V_N 为单位构件长的体积, m^3/m ;

V_R 为与附连水质量有关的单位构件长的基准体积 (m^3/m);

u_n 为与构件单元轴线垂直的、构件单元中心处波浪所引起的水质点加速度矢量 (m/s^2);

u_t 为与构件单元轴线垂直的、水质点对构件单元中心处的相对加速度矢量 (m/s^2);

作用在小尺度构件单位长度上的波浪力 (包括海流力);

$$\bar{F} = \bar{f}_D + \bar{f}_I = \frac{1}{2} \rho C_D A |u_n| u_n + \rho(V_N \dot{u}_n + C_m V_R \dot{u}_t) \quad (4.3.31)$$

该公式为莫里森公式的一般形式。对于坐底式平台在坐底状态下的小尺度直立柱构件

(立柱、桩腿等),由于构件绝对速度为零,而且此时,波浪中水质点的水平速度 u_x 和加速度分量 \dot{u}_x ,正好就直接产生与柱轴垂直的水平波力,而与水质点速度和加速度的垂直分量无关。同时,波动水质点的速度和加速度的水平分量在同一平面内具有同一的方向。因此,波浪力 F 可取惯性力和拖曳力的矢量或标量的和,它可以写成如下形式:





$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A |u_x| u_x + \rho C_M V \dot{u}_x \quad (4.3.32)$$

式中: V 为构件单位长度的排水体积 (m^3/m);

C_M 为惯性力系数, $C_M = 1 + C_m$;

其他符号意义同前。

表 4.3.3 拖曳力系数 C_D 和附连水质量系数 C_m

物体形状	基准面积 (单位长)	拖曳力系数 (C_D)	基准体积 (单位长)	附连水质量 系数(C_m)
圆柱 	D	1.0 ($l \geq D$)	$\frac{\pi D^2}{4}$	1.0 ($l \geq D$)
正方柱 	D	2.0 ($l \geq D$)	D^2	1.19 ($l \geq D$)
平板 	b	2.01 ($l \geq D$)	bD	1.0 ($l \geq D$)
球体 	D	0.5	—	0.5

注:表中 l 为柱长。

四、大尺度物体上的波浪力

在小尺度的情况下 ($D/L < 0.2$), 可以假定物体的存在对入射的波浪没有影响, 可以用当物体不存在时, 物体中心处的波浪要素来计算波浪对物体的拖曳力和惯性力。然而随着物体大小相对于波长的比值增大, 入射波在物体表面的散射效应增强了, 散射的波和入射的波相互干扰, 这就改变了物体周围的流场, 同时, 沉垫等水下结构可能没水不深, 物体的存在对自由表面影响, 即所谓的自由表面效应也可能是重要的了。因而对于大尺度物体, 前面给出的莫里逊公式不再适用, 而必须将物体的自由表面效应和相对尺度效应也考虑在内, 这样的分析通常称为“绕射理论”。在这一分析中, 粘滞效应即波浪对物体的拖曳力, 和惯性力比较常可略去不计。于是问题就归结为, 寻求物体在波浪中的反射波速度势。一旦找到了反射波的速度势, 将其和入射波的速度势叠加求出总的速度势后, 即可利用柯西积分公式确定物体表面上动压强的分布, 从而算出作用在物体上的波浪载荷。

关于粘滞效应, 亦即拖曳力的取舍问题, 主要取决于流体质点运动轨道的大小对物体大小的比值。当波长和水深一定时, 这一参数即反映为 H/D 这一比值 (H 表示波高, D 表示

物体的特征值, 例如圆柱体的直径)在 H/D 之值很小的区域($H/D < 1$), 粘滞效应可略去不计。绕射理论一般适用于全部的 $\pi D/L$ 值, 如图 4.3.6 所示。此外, 如前所述, 当相对尺度 $\pi D/L$ 很小时 ($D/L < 0.2$), 绕射效应微不足道, 莫里逊公式适用于全部的 H/D 值。当 $\pi D/L$ 和 H/D 都很小时, 则为两种理论都适用的区域。

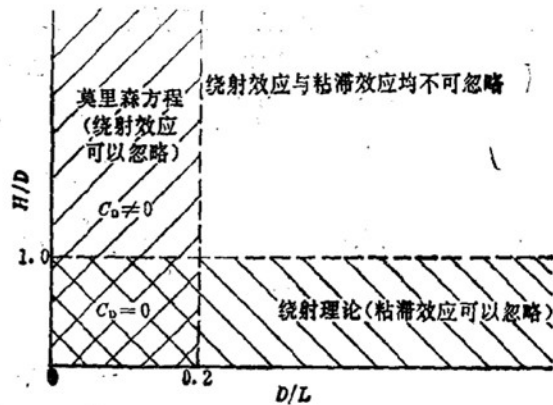


图 4.3.6 绕射理论适用范围

H —波高; D —桩柱的特征长度; L —波长

对于大尺度物体上的波浪力的理论分析和试验研究, 近年来已逐步开展。一般采用两种方法来分析: 其一是将大尺度物体作为波动着的流体边界的一部分, 先找出大尺度物体边界所散射的波浪的势函数, 再与入射波浪的势函数叠加后, 利用线性化的柯西积分公式推求出大尺度物体周界上的压强分布, 从而求出所需要的波力。这一方法由于数学上的困难, 至今只在直立圆柱等少数几种情况下, 取得了精确的解答。对任意形状大尺度物体上的波力, 只能用电子计算机求得其数值解。另一种方法是采用付汝德—克雷洛夫(Froude-Krylov)假定, 即假定波浪原有的压强分布不因物体的存在而改变, 算出未扰动的入射波在大尺度物体上的作用力——付汝德—克雷洛夫力, 再乘以一系数进行修正。这种方法需要通过模型试验以确定附加的质量效应和绕射效应。

关于大尺度的物体波浪力的理论解和数值解, 在流体力学中有详细的叙述。下面介绍用 F-K 法计算水下相对尺度较大潜没物体上的波浪力, 以解决平台设计中关于沉垫、下体的波浪载荷计算问题。

根据 F-K 法, 大尺度物体上的波浪力可表示为:

$$F = CF_K = C\rho V\dot{U} \quad (4.3.33)$$

式中: ρ 为海水密度;

V 为物体的排水体积;

\dot{U} 为结构不存在时, 体积 V 内未扰动流体的平均加速度;

C 为绕射系数, 它反映了波浪力的绕射效应和附加质量效应。它分为水平绕射系数 C_H 和垂直绕射系数 C_V , 由试验资料确定。

作用在任意形状物体上的 F-K 力可以用下面的积分形式来表示:

$$\text{水平力} \quad F_H = C_H \iint_S P \cdot \cos \alpha \cdot dS$$

$$\text{垂直力} \quad F_V = \iint_S P \cdot \sin \alpha \cdot dS$$

式中: P 为物体表面上任一点处, 未扰动的波压强;

α 为波压强矢量与水平轴线的夹角;

C_H 为水平绕射系数;

C_V 为垂直绕射系数。

在设计中, 计算体矩形沉垫的波浪载荷时, 建立的坐标系如图 4.3.7 所示。

按上述公式将线性波浪理论中压强式

$$P = \frac{\gamma H}{2} \cdot \frac{\text{ch}k(z+d)}{\text{ch}kd} \cos(kx - \sigma t)$$

代入, 可得在长方形潜体上的水平波浪力

$$\begin{aligned} F_H &= C_H \iint_S P \cdot \cos \alpha \, dS = C_H \left[\int_0^{l_1} P_1 l_2 \, dz - \int_0^{l_1} P_2 l_2 \, dz \right] \\ &= C_H \frac{\gamma H l_2}{2k} \frac{\text{sh}kl_3}{\text{ch}kd} [\cos(kx_1 - \sigma t) - \cos(kx_2 - \sigma t)] \\ &= -C_H \frac{\gamma H l_2}{k} \frac{\text{sh}kl_3}{\text{ch}kd} \cdot \sin \frac{1}{2} kl_1 \cdot \sin \sigma t \end{aligned} \quad (4.3.34)$$

式中: P_1 为作用在潜体整个迎波面上未扰动的入射波的波压强;

P_2 为作用在潜体整个背波面上未扰动的入射波的波压强;

x_1, x_2 为分别为潜体迎波面和背波面的水平位置;

C_H 为水平绕射系数, 无具体试验资料时, C_H 取值为 1.8~2.0。

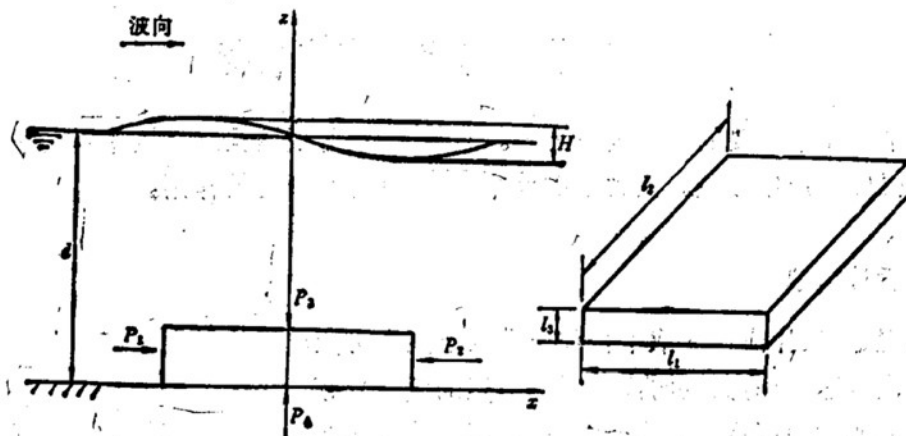


图 4.3.7 长方形潜体波浪力计算坐标系

作用在长方形潜体上的水平波浪力矩

$$\begin{aligned} M_H &= C_H \left[\int_0^{l_1} z l_1 P_1 \, dz - \int_0^{l_1} z l_2 P_2 \, dz \right] \\ &= -C_H \frac{\gamma H l_2}{k} \frac{\text{sh}kl_3}{\text{ch}kd} \left(l_3 - \frac{\text{ch}kl_3 - 1}{k \text{sh}kl_3} \right) \sin \frac{kl_1}{2} \sin \sigma t \end{aligned}$$

水平波浪力作用点离海底距离

$$e = \frac{M_H}{F_H} = \left(l_3 - \frac{\text{ch}kl_3 - 1}{k \text{sh}kl_3} \right) \quad (4.3.35)$$

在平台设计中, 有时还需计算垂直作用在沉垫顶部和底部的波浪力。根据海床地基透水和不透水的两种极端情况, 在计算中可以分成底面受波浪力作用和不受波浪力作用两种情况。

底面受波浪力作用时

$$\begin{aligned} F_V &= C_V \iint_S P \sin \alpha \, dS = -C_V \left[\int_{-l_2}^{l_2} P_3 l_2 \, dx - \int_{-l_2}^{l_2} P_4 l_2 \, dx \right] \\ &= -C_V \left[\frac{\gamma H l_2}{k} \frac{(\text{ch}kl_3 - 1)}{\text{ch}kd} \sin \frac{kl_1}{2} \cos \sigma t \right] \end{aligned} \quad (4.3.36)$$

式中: P_3 为作用在潜体顶面上未扰动的入射波的波压强;
 P_4 为作用在潜体底面上未扰动的入射波的波压强;
 C_V 为垂直绕射系数, 无试验资料时取 $C_V = 2.0 \sim 2.7$ 。

底面不受波浪力作用时:

$$F_V = C_V \iint_B P \cdot \sin \alpha \, dS = -C_V \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} P_3 l_3 \, dx$$

$$= -C_V \frac{\gamma H l_2}{k} \frac{\operatorname{ch} k l_3}{\operatorname{ch} k d} \sin \frac{k l_1}{2} \cos \sigma t \quad (4.3.37)$$

式中符号意义与式(4.3.36)相同。

在平台设计中, 为了校核稳性和强度, 往往要找出最大波浪载荷。波浪载荷不但与波浪要素有关, 而且还与波浪相对于平台的方向和位置有关。计算工程量相当大, 一般用计算机程序来完成这一工作。

第四节 海流及海流载荷

海流是海洋中主要的动力现象之一。它与风、浪等要素同时直接作用在平台上, 对平台的稳性和强度将产生影响。因此在设计中, 必须计算流载荷的作用。

一、设计流速

规范规定: 设计流速应取平台作业海区范围内可能出现的最大流速值, 即最大可能潮流流速与余流流速之和, 必要时尚应考虑流速的垂直分布。

潮流的速度随深度的变化较小, 而海流的速度随深度有一定变化。在有潮流的海区, 一般说来, 海流的速度与潮流相比是较小的。因此在工程设计中, 为简便起见可以着眼于潮流, 并近似地认为, 流速是垂直均匀分布的。

海流随水深的变化如下式所示:

$$V_z = V_s (Z/d)^{1/7}$$

式中: V_z 为海底以上高度为 Z 处的流速 (m/s);

V_s 为海面流速 (m/s);

d 为水深 (m)。

二、流载荷计算

由于海流和潮流的速度, 不像波浪水质点运动速度那样在较短的时间范围内不断重复其周期性变化, 因此相比之下, 海流和潮流的速度随时间的变化是缓慢的。在工程设计中, 为简单起见, 常将海流和潮流看作是稳定的流动, 并认为它们对平台的作用力仅仅是拖曳力。

在计算海流、潮流作用力时, 如果是海流和波浪同时存在的状态下, 应考虑流速与波浪水质点水平速度叠加后产生的拖曳力, 而不能将两者分别计算。作用于水下 Z 处的单位长度拖曳力

$$f_D = \frac{1}{2} \rho C_D \cdot D (u_w + u_s)^2$$

式中: C_D 为拖曳力系数(见表 4.3.3);

D 为圆柱直径(m);

ρ 为海水密度($\frac{\text{kN} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4}$);

u_w 为波浪水质点的水平速度(m/s);

u_s 为流速(m/s)。

海流、潮流和波浪水质点的水平速度联合作用在整个桩柱上的水平拖曳力

$$F_D = \int_0^{d+\eta} \frac{1}{2} \rho C_D \cdot D (u_w + u_s)^2 dZ$$

式中: d 为水深(m);

η 为波面高(m);

Z 为深度(m)(见图 4.4.1)。

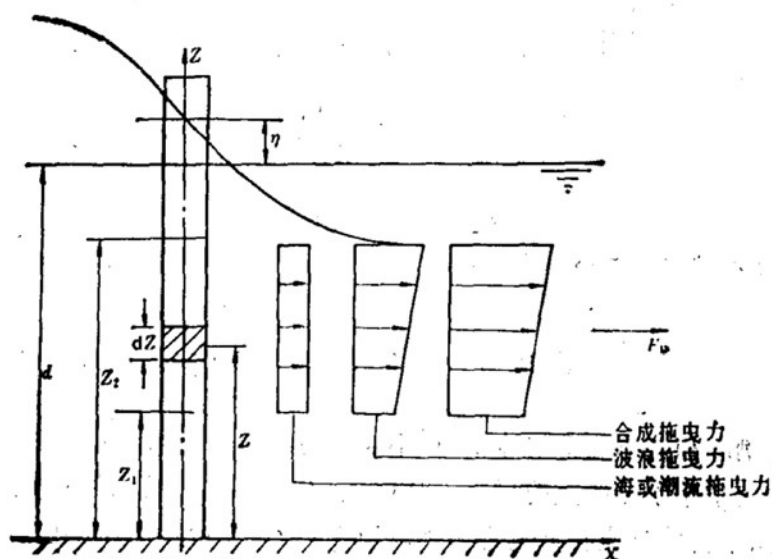


图 4.4.1 海流、潮流和波浪作用力示意图

我国船检部门给出的钻井平台水下部分构件的流力 F 计算式如下:

$$F = C_D \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A \text{ (kN)}$$

式中: v 为设计流速(m/s);

A 为构件在与流向垂直的平面上的投影面积(m^2)。

其他符号同上。

三、海流中柱体构件的卡门涡列

规范规定,对于处于海流中的柱状构件,应研究卡门涡流引起的共振的可能性。因流体沿着垂直于圆形构件轴线常速流动时,在构件周围会出现卡门涡列,当旋涡泄放时将产生可变量,其频率如与结构频率接近,将会发生共振,这是很不利的,应在平台设计中予以避免。旋涡释放频率可按下式计算:

$$f = SV_n/D \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

式中: V_{\perp} 为垂直于构件轴线的海流速度(m/s);

D 为圆柱构件的直径(m);

S 为斯特哈尔(Strouhal)数,当知道雷诺数 R_e , 可从图 4.4.2 查出。

雷诺数 R_e 可用下列式计算:

$$R_e = V_{\perp} D / \nu$$

式中: ν 为流体运动粘滞系数(m²/s)。

其他符号同上。

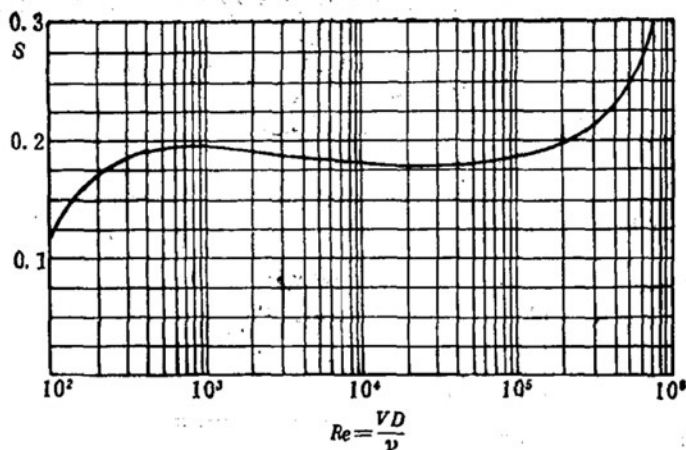


图 4.4.2 斯特哈尔数曲线

ν —流体运动粘滞系数(m²/s); R_e —雷诺数; V —流体在垂直于构件轴线上的速度分量(m/s)

第五节 海冰与冰载荷

我国北部的渤海和黄海北部的冰情,虽不及寒冷地区严重,但遇特殊严重年份,对海上钻井、采油平台会带来十分严重的后果。1969年2、3月渤海发生了60年来未曾遇到过的特大冰封,某钻采平台的支座拉筋全部被冰块割断,另一平台被海冰推倒。

由此可见,在我国渤海北部使用的海上移动式平台应考虑冰载荷,特别是在结冰期使用的坐底式平台,冰载荷常常成为平台设计的控制载荷。

一、冰载荷的主要形式

海冰对海洋工程建筑物的作用力,习惯称为冰载荷。作用于建筑物的冰载荷主要有以下几种形式。

1. 巨大的冰原包围了建筑物,整个海面处于冰层覆盖的状态。在潮流及风的作用下,大面积冰原呈整体移动,挤压平台。如果平台能承受,则冰原被桩柱切入或割裂。这种冰载荷呈周期性变化,并伴随着振动。大面积冰原在破碎前的瞬间,平台上的挤压力最大。

2. 流冰期间自由漂浮的流冰,冲击着平台而产生的冲击力。

3. 在冬季气温剧变的情况下,整体冰盖层由于温度变化引起膨胀而产生对平台挤压的膨胀力。

4. 平台四周的海冰因温度下降而结成一体,冻结成的冰盖层因潮流和风的变化而移动,产生对平台的曳力。由于水位的波动而产生垂直作用力(水位下落时冰的重力,水位上

涨时冰块得到的浮力)。

5. 流冰期冰块对平台的摩擦作用力

一些国家修建海上孤立建筑的实践经验表明,在上述各种可能产生的冰载荷中,前两种冰载荷是主要的,是使平台倾覆或结构损坏的主要原因。从我国渤海湾地区实际观察冰对建筑物的作用也表明,主要是大面积冰原在风和潮流作用下,对桩基式钻井平台产生周期性的挤压力,并有强烈的振动。下面将介绍上述两种冰载荷的计算。

二、冰载荷计算

1. 大面积冰原挤压孤立垂直桩柱所产生的冰载荷 P

$$P = mK_1K_2R_cbh \quad (\text{kN}) \quad (4.5.1)$$

式中: m 为桩柱形状系数,对圆截面采用 0.9;

K_1 为局部挤压系数;

K_2 为桩柱与冰层的接触系数;

R_c 为冰块试样的极限抗压强度 (kN/m^2);

b 为桩柱宽度或直径 (m);

h 为冰层计算厚度 (m),按国家主管部门提供的实测资料。

当计算群桩上的冰载荷时,应考虑群桩产生的遮蔽作用。

从上面的公式可以看出,要正确地确定作用于桩柱上的冰压力,合理地根据平台作业地区的实际情况决定 K_1 及 K_2 系数是十分重要的。

上式中各主要参数应尽量通过长期观测,经分析后确定。在实测资料不足的情况下,可取下列数值:

K_1 取 2.5~3.0; K_2 取 0.3~0.45。

对渤海和黄海北部沿海, R_c 取 $1470 \text{ kN}/\text{m}^2$ ($150\text{t}/\text{m}^2$)。

辽东湾 $h = 1\text{m}$; 渤海湾 $h = 0.8\text{m}$; 莱州湾 $h = 0.7\text{m}$; 黄海北部沿海 $h = 0.8\text{m}$ 。

2. 流冰对桩柱挤压力的计算

海冰在风与海流携动下,撞击平台的桩柱时,若其动能具有能够切入桩柱的全部宽度,此时桩柱所受冰压力最大值 P_{\max} ,可按公式(4.5.1)计算。

若冰块具有的动能只能切入桩柱的局部,冰块就在桩柱前停留下来。在此情况下,作用于桩柱上的最大冲击冰压力 P 将小于 P_{\max} 。冲击冰压力 P 虽较前者小,但是对于有流冰的海域,流冰对平台的冲击力是不容轻视的。

这类的冰压力计算,主要从物体撞击的能量守恒的观点出发,考虑冰对桩柱的作用力,并且在计算公式中反映出冰的运动速度这一因素。今以三角形端部桩柱为例,当尺度长、宽、厚为 $L \times B \times h$ 的冰块以速度 V (m/s) 行进时,其具有的动能 $T_{\text{冰}}$ 主要消耗于冰缘挤坏所作的功上面。在任意时刻桩柱上的冰压力 P 有如下关系:

$$P = mF_{\text{挤}}R_{\text{挤}} = mb_{\text{挤}} \cdot h \cdot R_{\text{挤}}$$

式中: m 为桩柱形状系数(见表 4.5.1)。

$F_{\text{挤}}$ 为受挤压面积, $F_{\text{挤}} = b_{\text{挤}} \cdot h$, $b_{\text{挤}}$ 为受挤压面积的宽度对于三角形端部桩柱的挤压面积的宽度(见图 4.5.1),它有下列关系:

$$b_{\text{挤}} = 2\alpha t \tan \alpha$$

表 4.5.1 桩柱形状系数 m

桩柱端部尖角 2α	180°	120°	90°	75°	60°	半圆形
系数 m	1.00	0.81	0.73	0.69	0.65	0.90

α 为冰挤压桩柱时的切入深度, 此时冰的挤压力

$$P = 2 \cdot m R_{\text{冰}} h \alpha \operatorname{tg} \alpha$$

若 K_1 取 2.5, 则挤压极限强度 $R_{\text{冰}} = 2.5 R_{\text{R}}$, 因此冰压力

$$P = 5m R_{\text{R}} h \alpha \operatorname{tg} \alpha \quad (4.5.2)$$

冰被桩柱切入深度 α 所需消耗的功

$$T_{\text{功}} = \int_0^{\alpha} P d\alpha = 2.5m R_{\text{R}} h \alpha^2 \operatorname{tg} \alpha \quad (4.5.3)$$

冰块具有的动能

$$T_{\text{动}} = \frac{1}{2} \frac{\Omega h \gamma}{g} V^2 \quad (4.5.4)$$

式中: $\Omega = B \times L$ 为冰块面积;

γ 为冰块的容重 (kN/m^3)。

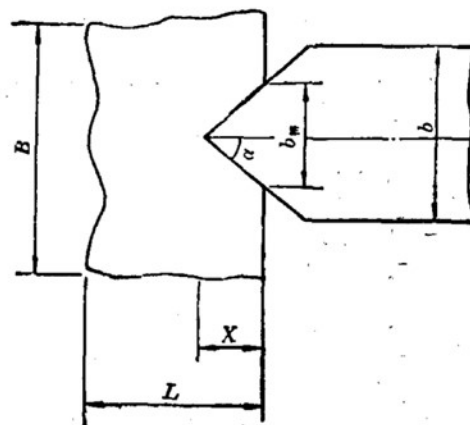


图 4.5.1 冰对三角形端部的桩柱的挤压

冰块以行进速度 V 撞击桩柱, 其具有的动能消耗于切入, 直至动能全部消耗于切入所需的功时, 冰块停止继续切入, 其切入深度为 α_0 因此 $T_{\text{动}} = T_{\text{功}}$, 因此可得桩柱切入冰块的深度

$$\alpha = 0.135 \sqrt{\frac{\Omega}{m \cdot \operatorname{tg} \alpha R_{\text{R}}}} \quad (4.5.5)$$

将 α 代入式 (4.5.2), 得冰块被桩柱切入 α 时的最大冰压力

$$P = 0.68 V h (B l \cdot R_{\text{R}} m \operatorname{tg} \alpha)^{\frac{1}{2}} \quad (4.5.6)$$

三、冰载荷计算中的几个问题

在冰载荷计算中, 有待解决的问题不少。这里对一些问题进行初步分析。

1. 关于冰的抗压极限强度问题

许多研究试验指出, 冰的抗压极限强度与海水的物理力学特性有很大的关系, 其中影响较大的有海冰的温度、盐度、密度和加荷速率。

当海水的温度降低时, 冰质就坚硬, 其抗压极限强度就相应增大。而当海冰密度越大时, 其冰质也越坚硬, 抗压极限强度也越大。

冰的盐度越大, 其抗压强度越低。淡水在 0°C 时开始结冰, 而海水的结冰温度却取决于它的盐度, 当盐度增加时, 它必须在更低的温度下才能结冰。渤海湾塘沽地区, 由于受到海河下泄淡水的影响, 海水盐度较低, 一般冬季在 $5 \sim 10\%$ 左右, 其抗压极限强度约为 $50 \sim 190 \text{ t}/\text{m}^2$ 。

实验表明, 冰的极限抗压强度与加荷速率有如下关系: 当加荷速率增快时, 抗压极限强度就明显的降低, 加荷速率快慢不同, 抗压强度可相差 $2 \sim 3$ 倍。也就是说, 当潮流流速较小时, 相当于平台对冰层的加荷速率越小, 这时冰层的抗压极限强度就较大。

2. 关于计算冰载荷作用点的位置

冰层随着潮位的涨落而升降。冰层作用于平台的挤压力的位置也随着升降。根据冰层挤压力一般是在潮流速较小的接近平潮时刻的分析,再从钻井平台的整体稳定性考虑,最不利的冰压力作用位置应选在高潮时为好。因为此时正值平潮,潮流速小,冰层对平台的挤压力最大,而作用点的位置也最高,对整个平台的倾覆力矩最大。至于对各个局部构件而言,则应根据构件的所在位置具体地分析,确定最不利的作用点位置。

3. 关于冰载荷的作用方向

大面积海冰在风与潮流的推动下而移动,因此,海冰的移动方向随着风向与流向的不同而不同。根据有关实测资料,一般来讲,海冰的流向基本上是顺着潮流的流向的,只是当风速较大时,或是当潮流速较小时(平潮时刻)风才对海冰的流向起作用。因此,在设计中确定冰载荷作用方向时,应对平台作业地区的潮流方向及出现冰封季节的风的方向作具体的分析。

在平台设计时,要考虑对建筑物来向最不利的方向。从冰层挤压平台的实际受力状况分析,当冰层斜向挤向平台时,斜角上的桩首先受到冰层的挤压。当挤压力达到冰层的抗压极限强度时,冰层破碎,向两侧流过平台,平台的斜角犹如一个尖劈将冰层劈开。显然,在这种情况下,冰层对整个平台的压力就会减小。因此,一般说来,当冰层正面挤向平台时,对整个平台会出现最大的冰压力。

第六节 地震及地震载荷

一、地震

如同陆上地震一样,在海底也会发生地震,这种在海底的地震又称为海震。海底地震多数是由海底两个地块之间的相对错动引起的。地震常常与已知的构造断裂系统有关。

我国是一个多地震国家,8级地震发生多次。根据中国科学院地球物理研究所的资料,我国渤海、台湾的东部和西部及东南沿海均属地震带。因此在设计上述地区作业的平台时应该考虑地震载荷。

地震载荷不同于风、浪、流、冰等环境载荷,它不直接作用在结构物上,而是由于地震引起结构物基础运动而产生的载荷。地震引起的结构振动称为地震响应。

地震引起平台振动,平台还要带动地基和周围的水随之振动,即平台结构和地基之间相互作用,平台桩柱和水之间也相互作用。在发生地震时,由于平台内部分布的惯性力将作为剪切力使平台与地震基之间产生滑动而导致平台倾覆。海洋平台与陆地建筑物之间的区别之一是平台具有附加质量。

地震载荷不是经常出现的环境载荷,因此,在载荷组合计算时,地震载荷不必与其他环境载荷组合。

二、地震载荷计算

工程抗震计算理论从实用出发,利用惯性力的概念,把平台结构各质点地震响应中最大惯性力作为地震时作用在质点上的地震载荷,用响应谱和动力放大系数的概念,作出计算地震载荷用的标准响应谱曲线,用这种方法来确定地震载荷。

1. 地震响应谱

地震响应谱理论是以单质点弹性系统在实际地震过程中的响应为基础，进行结构响应分析。任何复杂的结构对于地震响应都可以由若干单质点体系的响应的叠加得到。图 4.6.1 和图 4.6.2 分别给出中国船级社《海上固定平台入级与建造规范》和美国石油工业协会 (API) 的地震响应曲线。

地震响应谱的主峰位置和顶峰锐度与地表刚度有关，地表土质越软，主峰位置越向右(周期增大方向)移动。

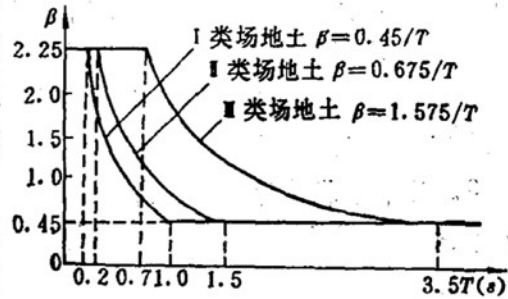


图 4.6.1 CCS 地震响应谱

CCS 响应谱给出三种类型的场地土(平台工作位置的土壤)。I 类为微风化和中等风化的基岩; II 类为饱和松散的砂类土, 软塑和极软状态的粘性土、淤泥等; III 类为 I、II 类场地土外的一般稳定土。API 地震响应谱也将场地土分成三类, 与 CCS 分法类似。

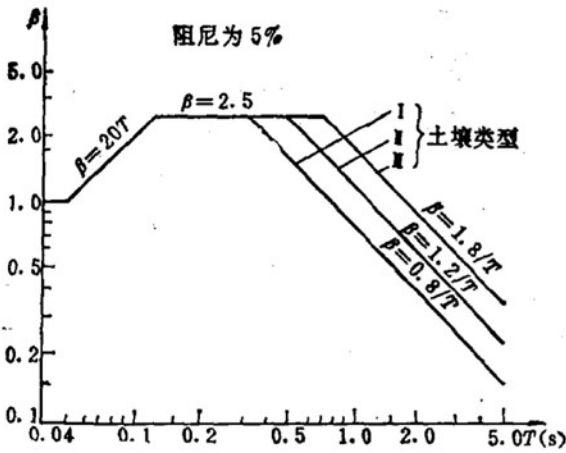


图 4.6.2 API 地震响应谱

动力放大系数 β 表示单质点弹性系统在地震作用下的最大加速度响应与最大地面加速度的比值, 可由响应谱曲线中查得。当已知结构自振周期 T 时, 可以从地震响应谱曲线查得, 或由曲线中不同类型场地土 β 的计算公式求得。图 4.6.1 CCS

地震响应谱中, 对不同场地土, 自振周期 T 与放大系数关系如下:

对 I 类场地土: 当 $T \leq 0.2s$ 时, $\beta = 2.25$; 当 $T > 0.2s$ 时, $\beta = 0.45/T$ 。

对 II 类场地土: 当 $T \leq 0.3s$ 时, $\beta = 2.25$; 当 $T > 0.3s$ 时, $\beta = 0.675/T$ 。

对 III 类场地土: 当 $T \leq 0.7s$ 时, $\beta = 2.25$; 当 $T > 0.7s$ 时, $\beta = 1.575/T$ 。

按照不同的场地土, 根据平台自振周期, 即可求出对应的 β 值, 从而得到地震响应谱的数据, 对平台进行地震响应谱分析。

2. 地震惯性力计算

平台地震载荷主要为地震惯性力和动水压力。地震惯性力可根据平台质量分布进行计算。在计算时可将平台简化成单质点系统或多质点系统。

(1) 平台按单质点系统计算地震惯性力

当平台按单质点系统计算, 平台甲板处水平向总地震惯性力:

$$P_H = CK_H \beta \cdot mg \text{ (kN)} \quad (4.6.1)$$

式中: C 为综合影响系数, $0.35 \sim 0.5$;

K_H 为水平向地震系数, 与地震烈度有关, 见表 4.6.1。

β 为相应于平台计算方向自振周期为 T (s) 时的动力放大系数, 由地震响应谱曲线查得或根据 T 算出;

m 为位于平台甲板处的质量(包括平台甲板上部结构自身质量, 甲板上的设备质量和 75% 的备品和供应品质量) 以及甲板下部结构质量和其他质量对于平台甲板处

的折算质量(kg)。

g 为重力加速度(m/s²)。

表 4.6.1 水平向地震系数与地震烈度关系

设计烈度	7	8	9
K_H	0.1	0.2	0.4

(2) 按多质点系统计算地震惯性力

平台是复杂的空间结构,当平台按多质点体系计算时,平台质点 i, j 振型水平向的地震惯性力

$$P_{ij} = CK_H \gamma_i \phi_{ij} \beta_j m_i g \quad (\text{kN}) \quad (4.6.2)$$

式中: C 为综合影响系数,同式(4.6.1);

K_H 为水平向地震系数,同式(4.6.1);

γ_i 为结构 j 振型参与系数,按下式计算:

$$\gamma_i = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_{ij} m_i}{\left(\sum_{j=1}^n \phi_{ij}^2 m_i \right)}$$

n 为质点数;

ϕ_{ij} 为 j 振型,质点 i 处的相对水平位移;

β_j 为 j 振型,自振周期 T_j (s)时的相应的动力放大系数;

m_i 为堆积在质点 i 的质量(kg)。

3. 地震引起的动水压力计算

地震时,任意方向细长杆的水下部分所受动水压力

$$P = CK_H \beta C_m V \gamma \sin^2 \varphi(i, j) \quad (\text{kN}) \quad (4.6.3)$$

式中: C, K_H, β 同式(4.6.1);

C_m 为附连水质量系数,应尽量由试验确定,在实验资料不足时可查表 4.3.3;

V 为浸水部分构件的体积(m³);对于圆柱体, $V = (1/4)\pi D^2 l$,其中 l 为构件浸水部分长度(m), D 为构件直径(m)。

γ 为海水的容重(kN/m³);

$\varphi(i, j)$ 为地震振动方向与构件之间的夹角(rad)。

应该强调的是这里给出的地震载荷计算只适用于地震烈度为 7、8、9 度的情况,对设计烈度高于 9 度的地震载荷应进行专门研究。