

庆祝中国科协成立
三十周年论文选

海洋开发工程技术 论文集

(中)



《全国海洋开发工程技术交流会》秘书处 编

海 洋 出 版 社

56.38083

06

12

海洋开发工程技术 论文集

(中)

《全国海洋开发工程技术交流会》秘书处 编

海 洋 出 版

编 者的 话

为了交流和推广我国海洋开发中已有的科技成果,研究解决在海洋开发中存在的一些工程技术问题;切磋海洋开发工程和相邻学科之间的关系;交流、展示我国在海洋开发工程技术的科研、设计、施工、制造和管理方面最新成就;探讨我国海洋开发工程技术的发展方向;为制定我国海洋开发长远规划提供决策咨询,中国海洋学会受中国科协的委托会同水产、石油地质、地理、造船、水利、能源、地震、航海、声学、海洋湖沼、仪器仪表等十三个全国学会和海军装备部、海军后勤部工程部于1987年12月中旬在广州市联合召开“全国海洋开发工程技术交流会”。此会是中国科协今年支持的重点项目,也是中国科协今年的年会内容之一。

“全国海洋开发工程技术交流会”共收到论文350余篇。本论文集选用195篇论文和73篇论文摘要。由于受到篇幅和时间的限制,还有部分文章未被收编到文集中来。这部论文集是我国近年海洋开发工程技术研究的最新成果。其内容主要有:海洋开发、海岸工程、近海工程、海洋能源利用及开发、海洋地质地貌及地震、水下工程、潜水技术及防腐、环境工程及环境污染、海洋测量及仪器、海水淡化、海洋生物、生物工程及水产等。

本论文集的论文是由发起单位分别进行征集并筛选后送交大会秘书处的。然后,大会秘书处组织力量对论文统一编辑后交海洋出版社出版。论文内容由南京水利科学研究院负责审定,在编审过程中,只对论文的个别字句作了修改;对不损论文原意的某些内容进行了适当的压缩;对一些图表作了相应的删减;删节了文章摘要和参考文献部分即收录的文章均按专业分类并适当考虑收到文章的时间顺序原则,进行编排。

参加论文集征集、编辑、编排、校对、组织协调等方面工作的主要人员有:(以下按姓氏笔划为序)王景学、许星煌、邱希盛、吴国柱、李 燎、张陆平、赵 林、洪恩、洪强、郭长林、浦庆余、秦吉明、顾洛美、徐唯义、崔 禾、钮 刚、葛志谨、潘新春、穆广志、燕 泽、瞿宁淑、韩毅等同志。

由于编审时间仓促,任务紧迫,文稿量大,书中难免有疏漏和不当之处,望论文作者及读者批评指正。

《全国海洋开发工程技术交流会》秘书处

一九八七年十二月

前 言

《海洋开发工程技术论文集》是海洋、水产、石油、地质、地理、造船、水利、能源、地震、航海、声学、海洋与湖沼、仪器仪表等十三个全国学会和海军装备部、工程部共同努力的结果，是从事海洋开发的工程技术专家、教授、科技人员和管理人员辛勤劳动的结晶，反映了我国海洋工程技术目前的发展水平和最新的研究成果，它必将对我国海洋科学技术的发展，加快海洋开发的步伐起到积极的推动作用。

《海洋开发工程技术论文集》具有三个方面的特点：第一，体现了科学技术面向经济建设的原则。我国渔业生产、海上运输、近海石油开发的不断发展，需要有与之相适应的新的工程技术，此论文集充分反映了这方面的内容。第二，内容丰富。有海洋资源开发、海洋环境监测预报服务，传统产业开发和新兴产业开发等方面的沿岸、近海、深海的工程技术。第三，论文多为我国建国30多年来海洋开发实践的总结，反映了当前我国海洋开发的成就。其作者多为从事开发实践第一线的老、中、青科技工作者，因此论文水平较高。

我国正处于新的历史发展时期，开放搞活不仅为我国经济带来了新的生机，也为海洋开发开辟了道路，进而推动了海洋工程技术的发展。海洋工程技术是新技术革命的重要内容之一，世界沿海各国为了解决资源和能源短缺，缓和空间的拥挤和就业的压力，积极发展海洋科学技术。面对新技术革命的挑战，我们从事海洋工程技术的科技人员，应倍加努力，一方面要加强技术改造，发展新兴技术，使之满足近海石油开采、近海农牧化、沿海港口建设和潮汐电站建设之需要；另一方面要开展深潜器以及深海工程技术的研究，开展生物工程和声学技术的研究，跟踪世界的现代科学技术，为二十一世纪海洋开发的大发展打下基础。

严 恺

1987年12月

目 录

56、渤海潮位、潮流计算研究报告	海洋工程公司调查管理部 (321)
57、沿海软土地基的开发利用	张鲁年 (330)
58、青岛近海8509号台风浪的计算分析	金 江 (334)
59、利用微机模拟港区二维潮流	曹祖德、张 征 (341)
60、浮式防波堤试验研究	姚国权 (345)
61、作用于滩面法向力的潜特征初析	贺松林、郑昌武、劳治声、金庆祥、任来法 (356)
62、胜利油田海堤抗浪性能的研究	俞聿修、仲跻权、肖道一、张荣远等 (361)
63、沉箱浮游拽中问题探讨	夏 林 (369)
64、有限节点法在港湾数值计算中的应用	卢启苗 (376)
65、北部湾北部海区的设计风速	李 合 (382)
66、河口水文信息系统的开发和应用	孙介民、徐海根、李九发、汪思明 (386)
67、我国沿海台风暴潮概况初探	俞慕耕 (390)
68、有潮河段二维天文潮、洪水、风暴潮综合水位 数值预报研究	陈金泉、高少平、张洪进、林 克 (395)
69、桩在侧向静、动、循环荷载下的性能 研究及 $p-y$ 曲线建议公式	高 明、陈锦珍、郑国芳、方大浪 (401)
70、蛇口港新航道、港池、泊位淤积强度及淤积量的预报	钟声扬 (409)
71、平衡沙质海岸平面曲线形态规律	夏益民 (427)
72、我国北方海港工程施工的技术水平与展望	蔡劭刚 (433)
73、港内直立消波建筑物的消浪效果	王德义、杜金曼 (440)
74、认真总结黄河口开发中的问题	王恺忱 (445)

三、近海工程

75、近海工程中船舶设计研究的回顾与展望	练 淦 (449)
76、对海洋工程技术的展望	顾懋祥、何承渊、吴有生 (459)
77、海洋开发工程中预应力混凝土耐久性的研究与应用	洪定海 (467)
78、国外海洋工程技术发展初探趋势	钮因义 (471)
79、海上系留物的系泊力	陈加菁 (476)
80、混凝土平台腿柱的抗撞性能	钱稼茹、邵晓松、陈 聘 (482)
81、可移动重力平台的地震反应	钱稼茹、陈 聘 (488)
82、载人潜水器的研究与应用	唐静文 (493)
83、龙骨深和冰结龙骨深计算公式的探讨	邓树奇 (495)
84、防止海上平台焊接层状撕裂的研究	姜丽生 (500)
85、深海潜标系统的研制	吴自然 (509)

86、单桩在轴向循环荷载下的动力特性·····	陈什昌、赵永新 (515)
87、单人常压潜水服运动阻力试验研究·····	严似松、黄根余 (521)
88、静水中半潜式平台在拖航状态下的直线稳定性分析·····	严似松、蒋 岩 (525)
89、单锚腿系泊系统在南海海域的应用研究·····	陈杰诚 (533)
90、自升式钻井平台改装设计的若干问题·····	高理伟、蔡益铨、林小山 (541)
91、改装自升式采油平台结构的强度分析·····	金德贤、李润培、韩继文、张世联 (545)
92、我国冰区海域—渤海区域海洋石油平台方案设计 ·····	林少培、孙启良、朱庭耀、杨晓峰 (552)
93、大型助航灯浮标塔架结构分析·····	任贵永、孟昭英、王仲捷 (558)
94、大尺度坐底平台波力及其浮态响应的计算与试验·····	孙意卿、吴宗敏 (564)
95、渤海湾旧平台拆除·····	姜进方 (571)
96、导管架装船基本方法及计算·····	钱东石、张增华 (576)
97、漕10—3 导管架远距运输紧固结构设计·····	李丕德 (581)
98、渤海 B Z34—4井口 导管架的设计·····	李玉珊 (586)
99、风荷载的概率分布模型·····	王 超 (593)
100、大型浮标在海洋导航中的应用·····	杨明华 (600)
101、发展海洋工程技术, 促进海洋开发事业·····	崔立增 (606)
102、试论混凝土平台的研究设计和在我国的应用前景·····	吴伦楷 (610)
103、近海工程中冰压力的模拟研究·····	杨昇田、王计春、丁兆奎 (614)
104、系泊半潜平台运动的时域模拟·····	董慎言、孙伯起 (618)
105、海上平台受压T型管节点静承载力的分析试验研究·····	杨国贤、陈 汉、于家良 (622)
106、海洋波高和周期的长期联合分布及其应用·····	方钟圣、戴顺孙、金承仪 (629)
107、浮动式消波鳍在海上过驳平台系统中的应用 ·····	黄振加、劳国升、咸圣复、胡平贤 (636)
108、高凝原油采用油水置换工艺的研究·····	卢佩琼、王惟诚 (642)
109、海洋石油平台燃气轮电站的选用·····	章季申 (647)
110、世界海洋石油钻井设备的现状及发展趋势·····	廖汉圣 (651)

渤海潮位、潮流计算研究报告

(海洋工程公司海洋调查管理部)

渤海的地理环境决定了其潮汐状况非常复杂。掌握潮汐变化规律对海洋石油勘探开发,海洋工程设计施工是至关重要的。为了提高预报的准确性,进一步掌握渤海潮汐变化规律,我们进行了《渤海潮位、潮流计算》研究。是由渤海石油公司海洋工程公司和山东海洋学院环保研究中心合作完成的。

一、流体动力学数值模型

①建立数值模型的一般过程

在开始研究任何模拟以前,首要的任务是明确问题的性质。借助现场的和实验室的观测资料,找出主要的物理过程。通常依据质量、动量或其它溶解物质的守恒原理,建立流体动力学的完整方程组。但由于太复杂,需要抓住所研究的物理过程的本质,应用已有的研究成果和流体力学的理论及方法,引入合理的简化假定和近似条件,得出模型方程组。它的正确性仅在上述近似假定的范围内成立,其数值解也仅能描述模型所包含的那些物理过程。

建立了模型方程组,选定了物理模型以后,就需寻求最合乎需要的数值解法。一个合适的数值方法取决于方程的性质,边界条件和计算机的容量等。

程序经过调试,得出了数值解,就需用现场观测资料和数值解进行比较,检验和调整模型,使之符合,能重现所模拟的物理现象的时、空分布。

经过验证的数值模型,就可作为一种工具和手段,为海洋环境预测服务。

②流体动力学数值方法(H, N方法)

1. 基本假定

(1) 对于我国沿海水域,起主导地位的海水运动,是由外来潮波引起的潮波运动。因此,主要研究长波问题。在基本潮流场的基础上,考虑风生热盐效应。

(2) 描述长波运动的参考坐标系,被置于“F—平面”上,即不考虑地球曲率的影响。这种近似描述,显然适用于水平范围不太大的海域。对于具有实际意义和预报价值的沿海水域,海湾和封闭海,无疑是合适的。

(3) 对于沿岸海域海湾,由于流场的水平 R 度远大于垂直 R 度,即具有“边界层”流场的空间特征。据次,湍流方程组可得到高度简化。对于混合强烈的海域,垂直向要素分布较均匀,可采用单层模型,即用深度平均流速来反映浅海海域的流场,将一个三维问题的描述转化为二维问题的描述。

在上述基本假定下,可得到平均流速方程(即浅水方程)。

2. 平均流速方程

平均流速方程描述了垂直方向充分混合海域的二维流动,其向量形式为:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + f \vec{K} \times \vec{V} + g \nabla s - \left(\frac{\vec{\tau}_s - \vec{\tau}_b}{\rho H} \right) = 0 \quad (1-2-1)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot (H \vec{V}) = 0 \quad (1-2-2)$$

$\vec{V} = (U, V)$ 为深度平均水平速度矢量, U, V 为欧拉坐标系中 X, Y 方向的分量; s 是平均海平面起算的水面高度; f 为科氏参量; $H = h + \zeta$; h 为水深; g 为重力加速; $\vec{k}$ 为垂直向单位向量, 向上为正; $\vec{\tau}_s$ 为海面风应力向量; $\vec{\tau}_b$ 为底摩擦应力向量; ρ 为海水密度; 算子

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y}$$

3. 数值解法

数值方法是求解浅海长波方程的一种非常具有实用意义的手段。早期采用的数值方法是有限差分法。这种方法在我国和世界上的应用迄今是相当普遍的。七十年代后期国外一些学者开始尝试采用有限元方法。我国在八十年代初推广采用。有限元方法在边界条件拟和节点安排上优于有限差分法, 但在达到相同分辨率的情况下, 有限元法需用机时较多。这可能是应用上的一个障碍。本课题的研究中主要采用有限差分法。

(a) ADI法

ADI法又称为隐式方向交替法。是由美国“LAND”公司 J.J. LEENDESTESE 提出, 在美国、日本、澳大利亚广为流行的一种差分近似解法。这种模型除了稳定性能好、积累误差小以外, 建立模型只需要水深资料和湾口的潮位资料。因此外业工作量小。

如不考虑风效应, (1-2-1) 式中 $\vec{\tau}_s = 0$ 底摩擦应力采用 $\vec{\tau}_b = \frac{\rho g}{c^2} \left| \vec{V} \right| \vec{V}$ (u, v),

c 为 CHEZY 系数 $c = \frac{4.93}{n} H^{1/6}$, n 为表征海底粗糙的 MANNIG 系数。如果代入摩擦应力公式, 则方程 (1-2-1) 可改变:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = f v + g \frac{\partial s}{\partial x} + g \frac{u (u^2 + v^2)^{1/2}}{c^2 H} = 0 \quad (1-2-3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial s}{\partial y} + g \frac{v (u^2 + v^2)^{1/2}}{c^2 H} = 0 \quad (1-2-4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial (Hu)}{\partial x} + \frac{\partial (Hy)}{\partial y} = 0 \quad (1-2-5)$$

上面三个方程的积采用双时间层的有限差分方法。令 n 为时间层数标, 即 $t = n \Delta t$ 将时间步长 Δt 分成两个半步长, 在 n 时间层首先求解 x 向动量方程 (1-2-3) 和连续方程 (1-2-5), 求得 $n + \frac{1}{2}$ 时间层上的 u 和 s , 后半时间步长即在 $n + \frac{1}{2}$ 时间层求解 y 方向动量方程 (1-2-4) 和连续方程, 求得 $n + 1$ 时间层上的 v 和 s 。上述解法的特点是, 无论是沿 x 向求解 u 和 x 或是沿 y 向求解 y, s 时, 均采用全隐方程, 因而稳定性良好。其次在每一时间层上, 对任一确定的行求解 $u-s$ 时, 或对任一列求解 $v-s$ 时, 方程均可化成三对角矩阵,

因而可用追赶法解，于是将一个二维空间问题有效地分解成一系列一维问题，使计算量大为减少。

(b) 差分网格和运算符号

ADI法采用空间交错网格，诸变量在网格上的位置见图，并相应地称为 ζ (ρ) 点， u 点和 v 点。

$K+2$	+	-	+	-	+	-	+	-	+
	•	0	•	0	•	0	•	0	•
$K+1$	+	-	+	-	+	-	+	-	+
	•	0	•	0	•	0	•	0	•
K	+	-	+	-	+	-	+	-	+
	•	0	•	0	•	0	•	0	•
$K-1$	+	-	+	-	+	-	+	-	+
	$j-2$		$j-1$		j		$j+1$		$j+2$

空间交错网格

图例：+ 为水位、质量密度和系数 c

0 为水深 h

- 为速度分量 u 、* 为速度分量 v

将微分方程离散成差分方程时，采用如下运算符号：

$$(X, Y, T) = (j\Delta X, K\Delta y, n\Delta t) = (j, k, n)$$

$$\Delta x = \Delta y = \Delta s \quad \text{空间步长} \quad \Delta t \quad \text{时间步长}$$

定义在离散网格上的变量表示为：

$$F = F(x, y, t) = F(j\Delta x, k\Delta y, n\Delta t) = F(j, k, n) = F_{j,k}^n$$

平均值和差分值的表达式：

$$\bar{F} = \frac{1}{2} (F_{j+\frac{1}{2},k}^n + F_{j-\frac{1}{2},k}^n)$$

$$\delta_x F = \frac{1}{\Delta x} (F_{j+\frac{1}{2},k}^n - F_{j-\frac{1}{2},k}^n)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{4} (F_{j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n + F_{j+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}^n + F_{j-\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n + F_{j-\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}^n)$$

在 j, k, n

以上各式不仅对 x 成立，同样也适用于 y 和 t 。相隔半时间步长的差分值和平均值，

$$F_+ = F_{j,k}^{n+\frac{1}{2}}, \quad F_- = F_{j,k}^{n-\frac{1}{2}}, \quad \delta_{+\frac{1}{2},t} F = \frac{2}{\Delta t} (F_+ - F_-),$$

$$F^{-t/2} = \frac{1}{2} (F_+ + F_-)$$

在 j, k, n

(C) 平均流速方程组的差分形式

平均流速方程组在相邻两时间层上的差分形式，在时间 n ，即 $n\Delta t$ —— $(n + \frac{1}{2})$

Δt 半步长的计算有动量方程:

$$\delta_t u - f \bar{v} + u \cdot \delta_x u + V \cdot \delta_y u + g \delta_x \zeta + g \frac{\bar{U}^2 [(\bar{u})^2 + (\bar{v})^2]^{1/2}}{(h^{-x} + \zeta^{-x}) (C^{-x})^2} - \frac{1}{\rho (h^{-x} + \zeta^{-x})} \tau_x^s = 0 \quad (1-2-6)$$

在 $j + \frac{1}{2}, k, n$

连续方程

$$\delta_t + \frac{1}{2} \tau_x^s + \delta_x [(h^{-x} + \zeta^{-x}) u] + \delta_y [(h^{-x} + \zeta^{-x}) V] = 0 \quad (1-2-7)$$

在 j, k, n

在 $n + \frac{1}{2}$ 时间层, 即 $(n + \frac{1}{2}) \Delta t$ —— $(n+1) \Delta t$ 半步长的计算公式有动量方

$$\text{程: } \delta_t V + f u + u \cdot \delta_x V + V \cdot \delta_y V + g \delta_y \zeta + g \frac{\bar{V}^2 [(\bar{u})^2 + (\bar{V})^2]^{1/2}}{(h^x + \zeta^x) (C^x)^2} - \frac{1}{\rho (h^x + \zeta^x)} \tau_y^s = 0 \quad (1-2-8)$$

在 $j, k + \frac{1}{2}, n + \frac{1}{2}$

$$\text{连续方程: } \delta_t + \frac{1}{2} \tau_y^s + \delta_x [(h^{-x} + \zeta^{-x}) u] + \delta_y [(h^{-x} + \zeta^{-x}) V] = 0$$

(1-2-9)

在 $j, k, n + \frac{1}{2}$

(d) 边界条件

推导平均流速方程组时, 给出的边界条件是闭边界上流速的法向分量为零, 水边界上强迫函数取水位值。但在选定的数值模型中, 应用上述物理边界条件时, 还需进行某些数学处理。

对于左开边界, 在 R_{j-1}, S_{j-1} 的表达式中, 包含有 $r'_{j-1/2}$, 即 $r'_{j-1/2} = 1 + \frac{\Delta t}{\Delta^2 x}$

$(U_{j+1/2} - U_{j-1/2}) + \frac{g \Delta t}{2} \frac{(u_{j-1/2}^2 + (\bar{v})^2)^{1/2}}{(h^{-x} + \zeta^{-x}) (C^{-x})^2}$ 在 $j-1$ 点展开动量方程时, 需要 $U_{j-1/2}$ 和 $V_{j-1, k+1/2}$ 的值, 但要取得上述资料较为困难。因此, 引进下列两个近似假定:

$$U_{j+1/2} - U_{j-1/2} = 0, \quad V_{j-1, k+1/2} = 0$$

$$\text{于是 } r'_{j-1/2} \text{ 在开边界取下式: } r'_{j-1/2} = 1 + \frac{g \Delta t}{2} \frac{[(u_{j-1/2}^{n-1/2})^2 + (\bar{v})^2]^{1/2}}{(h^{-x} + \zeta^{-x}) (C^{-x})^2}$$

$$\text{在 } j - \frac{1}{2}, k, n \quad \text{其中 } V = \frac{1}{4} (V_{j, k+1/2} + V_{j, k-1/2})$$

对右开边架, 处理方法相同。

因此, 在人为划定水界时, 开边界应力求满足上面两个近似假定所示的附加的运动学条件。

二维单层流体动力学模型, 可用于由于海洋开发, 如填海造地, 筑港修堤等大规模改变海湾形态的工程设施, 对流场, 水位场, 水质泥沙运动, 生态系统等可能产生的影响作出了预测和估价, 提供可行性研究的依据。

③调和分析

为了预测、预报的需要, 对进入渤海海域的分潮波进行调和分析, 计算四大分潮 (M_2 , S_2 , K_1 , O_1) 潮位和潮流调和常数。

1. 周期函数傅里叶展开

对于一周期函数, 可展成: $f(x) = \sum_{K=0}^{\infty} A_k \cos(kx - \phi_k)$ (1-3-1)

$A_k \cos(kx - \phi_k)$ 称为函数 $f(x)$ 的第 k 个调和素。

$$\text{令 } A_k \cos(kx - \phi_k) = a_k \cos kx + b_k \sin kx \quad (1-3-2)$$

其中 $a_k = A_k \cos \phi_k$, $b_k = A_k \sin \phi_k$ 。式 (1-3-1) 可写成:

$$f(x) = a_0 + \sum_{K=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \quad (1-3-3)$$

2. 傅里叶系数的确定

利用三角函数的正交性, 傅里叶系数可由下式确定:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx$$

$$a_k = \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx \quad (1-3-4)$$

$$b_k = \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(kx) dx$$

利用 (1-3-2) 式:

$$A_k = (a_k^2 + b_k^2)^{1/2}$$

$$\phi_k = \text{tg}^{-1}(b_k/a_k) \quad (1-3-5)$$

3. 分潮波调和常数

对于 M_2 分潮, 由于非线性效应, 可由下式表示:

$$\zeta(t) = H_0 + H_{M_2} \cos(\omega t - \phi_{M_2}) + H_{M_4} \cos(2\omega t - \phi_{M_4}) + \dots$$

$$= a_0 + a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t + a_2 \cos 2\omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots \quad (1-3-6)$$

按求傅里叶系数的方法, 计算出 a_1 , b_1 , 就可以求出 M_2 分潮潮位调和常数。

$$H_{M_2} = (a_1^2 + b_1^2)^{1/2}$$

$$\phi_{M_2} = \text{tg}^{-1}(b_1/a_1) \quad (1-3-7)$$

4. 周期序列调和常数

利用一个分潮周期的计算值, 推算分潮调和常数。 f_k 为一个分潮时间序列资料 (水位或流速分量), 资料数为 LM

$$\omega \rightarrow \frac{2\pi}{T} \rightarrow \frac{2\pi}{LM(\Delta t/2)L/2} \rightarrow \frac{2\pi}{LM}L$$

$$a_0 = \frac{1}{LM} \sum_{l=1}^{lm} f_k(L)$$

$$a_k = \frac{L}{LM} \sum_{l=1}^{lm} f_k(L) \cos \left(K \frac{2\pi}{LM} L \right)$$

$$b_k = \frac{1}{LM} \sum_{l=1}^{lm} f_k(L) \sin \left(K \frac{2\pi}{LM} L \right)$$

(1-3-8)

分潮调和常数 ($H_k, G_k, U_k, \xi_k, V_k, \eta_k$) 由下式求得:

$$H_k = (a_k^2 + b_k^2)^{1/2}$$

$$G_k = \tan^{-1} (b_k / a_k)$$

(1-3-9)

④ 潮流椭圆要素

利用已知分潮流调和常数推算该点分潮流的主要变化特征。

1. 潮流调和方程

若讨论平均状况,

$$u(t) = U \cos(\sigma t' - \xi)$$

北分量

$$v(t) = V \cos(\sigma t' - \eta)$$

东分量

(1-4-1)

其中 U, ξ, η, V , 为分潮流调和常数, t' 为中天时刻起算的时刻。

2. 分潮流流速流向公式

$$\omega(t) = [U^2 \cos^2(\sigma t' - \xi) + V^2 \cos^2(\sigma t' - \eta)]^{1/2}$$

(1-4-2)

$$\theta(t) = \tan^{-1} \frac{V \cos(\sigma t' - \eta)}{U \cos(\sigma t' - \xi)}$$

(1-4-3)

其中: $\theta(t)$ 采用 360° 方位角。

3. 最大(最小)流出现时刻

式(1-4-2)对 t 求导数, 令 $\frac{d\omega}{dt} = 0$, 得最大(最小)流出现时刻。

$$\tau = \frac{1}{2\sigma} \tan^{-1} \frac{U^2 \sin 2\xi + V^2 \sin 2\eta}{U^2 \cos 2\xi + V^2 \cos 2\eta}$$

(1-4-4)

若 $\frac{d^2\omega}{dt^2} < 0$, 最大流时刻; $\frac{d^2\omega}{dt^2} > 0$ 最小流时刻。

4. 最大流流速流向

$$\omega_{max} = [U^2 \cos^2(\sigma \tau - \xi) + V^2 \sin^2(\sigma \tau - \eta)]^{1/2}$$

(1-4-5)

$$\theta_{max} = \tan^{-1} \frac{V \cos(\sigma \tau - \eta)}{U \cos(\sigma \tau - \xi)}$$

(1-4-6)

因为最大流和最小流位相差 $\frac{\pi}{2}$, 所以:

$$\omega_{min} = [U^2 \sin(\sigma \tau - \xi) + V^2 \sin(\sigma \tau - \eta)]^{2/3} \quad (1-4-7)$$

$$\theta_{min} = \text{tg}^{-1} = \frac{V \sin(\sigma \tau - \eta)}{U \sin(\sigma \tau - \xi)} \quad (1-4-8)$$

5. 椭圆率

$$\text{椭圆率} = \frac{\omega_{min}}{\omega_{max}} \quad (1-4-9)$$

6. 潮流椭圆旋转方向

式(1-4-3)对 t 求导数得:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\sigma uv \sin(\eta - \xi)}{u^2 \cos^2(\sigma t' - \xi) + V^2 \cos^2(\sigma t' - \eta)} \quad (1-4-10)$$

因此, 当 $\sin(\eta - \xi) > 0$ 时为右旋, $\sin(\eta - \xi) < 0$ 时为左旋。

⑤ 平均海平面

通常根据海图水深资料确定模型计算域的边界和底形, 对于海湾这样的小水域一般在海图水深上加一常值, 但对渤海海域, 由于潮汐系统较为复杂, 存在无潮区, 加上方程含有非线性项, 海面和海底边界条件也是非线性的, 因此, 不能简单地加一常数, 将海图基准面订正到平均海平面。

我国目前海图基础面采用理论最低低潮面, 但如果采用略最低低潮面, 误差不大, 渤海采用海图水深加四大分潮振幅和作为近似的平均海平面起算的水深值。

根据南朝鲜海洋开发研究所1980年9月发表的《东中国海潮汐计算》一文中的潮汐资料(共40个见图1-5-1, 表1-5-1)用等高线法确定每个格点上的四大分潮振幅值:

$$\xi_k = H_k \cos \phi_k \quad (1-5-1)$$

$$\eta_k = H_k \sin \phi_k$$

H_k, ϕ_k 为四大分潮调和常数, k 表示分潮, 作出渤海海域 ξ_k 和 η_k 等值线分步图, 然后根据格点上的 ξ_k 和 η_k 求 k 分潮振幅:

$$H_k = (\xi_k^2 + \eta_k^2)^{1/2} \quad (1-5-2)$$

二、输入资料和验证资料

① 输入资料

渤海计算海域湾口输入资料, 通过烟台水文站的经线为渤海计算域的水界, 南端取烟台水文站潮汐调和常数, 北端取大连潮汐调和常数值。水界格点上的调和常数值采用等高线法分段内插。

② 验证资料

1. 南长山岛、葫芦岛、塘沽和营城子湾四个水文站实测资料。
2. 1958年全国海洋普查报告及图集(第三册)。
3. 南朝鲜海洋开发研究所《东中国海潮汐计算》论文(1980年9月崔秉昊)

图(2-3-1) M_2 潮波分布, 图(2-3-2) S_2 潮波分布, 图(2-3-3) O_1 潮波分布, 图(2-3-4) K_1 潮波分布, 图(2-3-5) M_2 潮流椭圆, 图(2-3-6) S_2 潮

流椭圆, 图(2-3-7) K_1 潮流椭圆, 图(2-3-8) O_1 潮流椭圆, 图(2-3-9) M_2 分潮同潮时线和等潮差线, 图(2-3-10) K_1 分潮同潮时线和等潮差线。

三、计算结果分析

①渤海四大分潮振幅和分布

图(3-1-1)四大分潮振幅和分布; 表(3-1-1)内容同上。

②渤海 M_2 分潮

1. 渤海潮汐计算结果验证

图(3-2-1)渤海计算网格示意图。

图(3-2-2)渤海四个站潮位验证曲线。

渤海计算域取渤海海峡外侧大连至烟台的潮汐调和常数插取水界格点上的输入资料。计算网格间距为纬度5分, 约9.3公里。利用南长山岛、葫芦岛、塘沽和营城子湾四个测站的实测资料对计算结果进行验证, 并参考了渤海沿岸其他水文站的验潮资料。由图(3-2-2)可看出除营城子湾潮位的拟和较差外, 其余三站的重现情况是良好的。

2. 渤海 M_2 分潮的潮波系统

由图(3-2-3)可看出, 进入渤海的 M_2 分潮波形成两个反时针旋转的潮波系统。北部辽东湾以秦皇岛附近无潮点为中心的潮波系统, 南部渤海湾和莱州湾以黄河口附近无潮点为中心的潮波系统。

图(3-2-3)渤海 M_2 分潮等振幅线和同潮时线。两个无潮点的位置分别在辽东湾和渤海湾的湾口。由于反射波能量的衰减, 其位置均偏向入射波的左侧。辽东湾无潮点离开海岸约十余公里。渤海湾无潮点位于黄河口三角洲凸出部20余公里。

同潮时线以无潮点为中心, 呈放射线状, 等振幅线与同潮时线正交, 同心圆状。 M_2 分潮振幅最大值出现在辽东湾湾底营口附近, 约1.45米, 渤海湾最大值出现在塘沽以南, 为1.10米, 莱州湾最大值仅0.57米。

3. 渤海 M_2 分潮流场

图(3-2-4)至图(3-2-7)分别表示以烟台为基准的半潮位, 低潮时, 半潮面, 高潮面, 高潮时四个不同时刻的潮流分布。应该指出, 渤海潮波系统较为复杂。涨潮、落潮流最大时刻各处并不相同, 当 $t = \frac{T}{12}$ 时, 通过渤海海峡进入的涨潮流冲着对岸滦河口方向流动, 而后分为两股较大的一股右转进入辽东湾, 较小的一股汇同从莱州湾来的海水进入渤海湾。此时莱州湾处于落潮过程, 与处于涨潮过程的辽东湾和渤海湾位相恰好相反。

$t = -\frac{7T}{12}$ 时, 情况恰好相反。辽东湾的潮流流向渤海海峡北部, 渤海湾的潮流一部分流向渤海海峡南部, 一部分进入莱州湾。 $t = \frac{4}{12}T$ 和 $t = \frac{10}{12}T$ 为转流时刻的潮流分布。渤海大部分为旋转流, 不出在憩流。

4. 渤海 M_2 分潮欧拉余流场

由于渤海潮波系统比较复杂, 欧拉余流场(图3-2-8)相应也较为复杂。

渤海海峡南部存在一股西向的欧拉余流, 速度均大, 可达5厘米/秒, 这股余流一直延

续到莱州湾中部水域。这与1986年中法合作黄河口调查发现莱州湾中央水域存在暖水性水藻种的结论相吻合。渤海海峡北部老铁山水道欧拉余流的方向向东,即流出渤海。受左旋潮波系统控制的辽东湾和渤海湾均存一个反时针方向的欧拉余环流。恰好与波系统一致。辽东湾余流速度大于渤海湾。最大余流,辽东湾在长达岛附近,渤海湾在大清河口附近。莱州湾由于既受渤海湾潮波系统的影响又受到从渤海海峡进入的潮波系统的影响,因此,不存在一个较为清晰的余环流系统。

5. 渤海M2分潮潮流椭圆要素

由图(3-2-9)可看出潮流椭圆长轴方向,即最大流方向。在辽东湾、渤海湾和莱州湾基本上和湾的长轴方向一致。这与海洋普查时实测结果相吻合。在渤海,顺时针旋转的潮流是主要的,只在渤海湾和辽东湾顶部海域潮流呈逆时针方向旋转。

6. 渤海M2分潮潮流调和常数

③渤海S₂分潮

1. 渤海S₂分潮同潮时线和等振幅线图(3-3-1)
2. 渤海S₂分潮欧拉余流场图(3-3-2)
3. 渤海S₂分潮潮流椭圆要素图(3-3-3)

④渤海O₁分潮

1. 渤海O₁分潮同潮时线和等振幅线图(3-4-1)
 2. 渤海O₁分潮欧拉流场图(3-4-2)
- 渤海O₁分潮潮流椭圆要素图(3-4-3)

⑤渤海K₁分潮

1. 渤海K₁分潮同潮时线和等振幅线图(3-5-1)
2. 渤海K₁分潮欧拉余流场图(3-5-2)
3. 渤海K₁分潮潮流椭圆要素图(3-5-3)

四、成果应用

建立基准点,订正任意格点的计算调和常数在预报海域建立潮位潮流观测站,取得一个月水位、潮流资料后,进行调和分析,求得基准点的水位和潮流调和常数。 $H_{K实}$, $G_{K实}$, $U_{K实}$, $E_{K实}$, $V_{K实}$, $\eta_{K实}$ 。基准点计算调和常数 $H_{K计}$, $U_{K计}$, $E_{K计}$, $V_{K计}$, $\eta_{K计}$ 。求出两组调和常数比值。 $\Delta H_K = \frac{H_{K实}}{H_{K计}}$ 、 $\Delta G_K = \frac{G_{K实}}{G_{K计}}$ ……对于和基准点潮汐类型相同的邻近海域中任意格点,对计算调和常数进行校正:

$H_{K'计} = H_{K计} \Delta H_K$ …… $\eta_{K'计} = \eta_{K计} \Delta \eta_K$ 。订正后的调和常数即可用来对该点的潮位、潮流进行预报。

本课题是由渤海石油公司海洋工程公司海洋工程调查部张明道,李士涛和山东海洋学院环保研究中心孙英兰合作完成的,并得到陈时俊、朱厥昌、张东升、梅孝恒、孙怀诚、钱力强、梁传正等同志的大力支持,在此深表感谢。

另有图册一本因篇幅限制故略。

沿海软土地基的开发利用

张 鲁 年

(南京水利科学研究院)

一、沿海软基开发利用的意义和前景

我国有漫长的海岸线,沿海一带可供开发利用的场地很多,发展港湾和其它工业建设的潜力很大。近年来的改革和开放,为沿海经济发展增添了新的活力,许多地区将陆续得到投资和开发。

大家知道,沿海地区广泛分布着沉积年代较近,土质较差的松软地基,像海河、黄河、长江、钱塘江、闽江和珠江等入海口附近的土层大多属于近代沉积层。这类天然地基通常具有压缩性高,强度低,抗液化性能差等方面弱点,一般都难以满足工程上的要求。

然而,港口和其它工业设施所处地理位置的特殊性,使得许多建筑物不得不建筑在沿海比较松软的地基上。尤其是近年来经济建设的不断发展,一些相对来说比较好的地基已经被陆续利用,进一步需要规划开发的大多是一些过去被认为不宜建造工程的软土地基,以及新近才吹填起来的所谓超软弱地基。对于这类松软地基,如何进行既经济而又有效的加固处理,乃是沿海软基开发利用的关键所在。

随着经济建设的蓬勃开展,我国在沿海软土地区已经积累了丰富的工程建设经验。特别是最近几年,软基处理中成功地采用了一些新技术和新工艺,为软基开发利用开创了新局面。同时,对沿海软土分布及其工程特性的研究也取得了进展,并着手建立数据库。有关地基处理的规范已提到议事日程。这些都为今后进一步开发利用沿海软基创造十分有利的条件。

二、沿海软基处理的特点与发展概况

沿海软基处理有两个明显的特点。第一个特点是情况复杂,技术难度大。例如,天津港的软基是众所周知的老大难问题。为了解决它,已用了各种处理方法。现在,又在进行难度更大的东突堤新吹填土的加固处理。这种新吹填土在沿海地区很普遍。对于这类超软弱地基,不是单一方法所能解决的。又如大连、烟台、青岛等港口,过去没有什么软基问题,但在扩建新港区时却遇到了所谓不深不浅的岩盘软弱覆盖层。采用桩基嫌入土深度不够,采用重力式,挖泥量过大又不经济。如何处理这种覆盖层,又是个新课题。沿海工程的软基处理有时需要在水下实施。水下作业的设备 and 工艺,质量控制和效果检验远比陆上复杂,技术难度更大。

第二个特点,沿海工程涉及到的软基处理通常总是大面积的,处理的费用在整个工程中占很大比重。平均约占工程总投资的30%,是个相当可观的数字。正因为如此,软基处理已愈来愈受人们重视,近年来一直被列为国家重点科研项目。

我国从五十年代中期到七十年代中期的廿年间,工程中采用的软基处理方法主要是砂

垫层和排水砂井。七十年代中期到目前为止的十年间,发展的速度比前廿年快得多。这十年里,不仅对原来使用的方法做了进一步的完善和改进,而且又接二连三地采用了一些国际上流行的方法,填补了不少空白。1975年首次使用袋装砂井,1981年研制成塑料排水带。近几年在天津、连云港等地用袋装砂井真空予压法大面积加固堆场及建筑物地基;振冲法从无到有,1979年开始得到迅速推广,秦皇岛、天津、龙口、连云港、南通、上海、宁波、福州、珠海等地都有应用。1984年还与袋装砂井真空予压法一起在天津港进行综合加固的尝试,强夯法于七十年代末引入我国后,大连、秦皇岛、天津、石臼所、上海等地得到应用;国外七十年代中期才开始实际应用的深层搅拌法,我国亦于80年达到了工程实用阶段。天津、连云港、上海等地均相继得到应用。此外,在表层处理方面,天津、深圳等地亦有成功的经验。至于国际上已大量采用的土工织物,国内也在着手研究和应用。

三、适合沿海软基开发的主要处理方法

前面提到的几种处理方法经工程实践证明,既适合于沿海软基的开发利用,也符合我国的国情。下面对这几种方法分别作一简略的评介。

(一) 排水固结法

采用什么方式造成土体内部压力差以及如何加速土体内孔隙水的排出,是排水固结法的两个有机组成部分。这一用于处理饱和软土的传统方法应用得十分广泛,而且还在不断发展和完善。堆载予压和真空予压是造成压力差的常用方法。与堆载予压相比,真空予压具有质量均匀,予压过程土体稳定,时间短,费用省等优点。

砂井可以加速土体孔隙水的排出。袋装砂井与老式砂井相比,节省用砂量,提高工效,确保排水通道的连续。用塑料排水带虽然更加简便,但效果还有待提高,价格有待降低。

袋装砂井真空予压是当今比较理想的一种排水固结方法。这一方法的关键在于获得较高的真空度。目前,真空度一般能达到600mm汞柱(相当于80kPa的堆载予压),最高曾达到700mm汞柱。单块加固面积最大已做到10,000m²。与达到同等加固效果的堆载予压相比,可节省费用40%左右。应当指出,真空予压的效果是有一定限度的。对于使用要求更高的地基,需在此基础上再进行二次加固。

(二) 振冲法

振冲法又分为振冲挤密和振冲置换两种方式。对于松砂地基,用振冲挤密方式,使松砂由疏松状态变成紧密状态;对于粘性土地基,用振冲置换方式,先成孔再填碎石制成碎石桩,与原地基构成复合地基。从广义上说,碎石桩也可属于加筋土范畴。复合地基具有桩体、砂井、垫层三种作用。这一加固方法对减少地基沉降,提高地基承载力,增强地基抗液化性能有比较明显的效果。用振冲法时可根据土质情况选择这两种方式以达到不同的加固目的。

这几年振冲法推广比较快。其原因主要是:加固后可立即造建筑物,符合快速加固的需要;适应性强,各种土质和各种场地一般都能使用;不需繁缛的三大材,比较经济实用。

目前,振冲机具的核心部分——振冲器已形成系列,且有了一套比较完整的施工工艺和质量检测方法。在软粘土的应用方面,已突破土体十字板强度小于20kPa不能采用振冲碎石桩的界限。不过,在此界限以下使用仍需慎重。此外,振冲作业时排出的大量泥水会给城