



海洋水动力工程研究论丛

重力式复合结构码头 受波浪力与码头面高程确定方法

刘海源 耿宝磊 蔡艳君 陈汉宝 著

Gravity Composite Structure Wharf
Wave Force and Wharf Surface Elevation
Determination Method



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



海洋水动力工程研究论丛

Gravity Composite Structure Wharf
Wave Force and Wharf Surface Elevation
Determination Method

重力式复合结构码头 受波浪力与码头面高程确定方法

刘海源 耿宝磊 蔡艳君 陈汉宝 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书通过理论分析和模型试验,提出单个和多个重力式复合结构波峰面高度半经验计算公式以及下部结构(沉箱)所受波浪力半经验计算公式,提出重力式复合结构码头面板所受波浪上托力计算方法以及重力式复合结构码头面高程的确定方法。

本书可供海洋及海岸工程相关专业学生、科技人员等参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

重力式复合结构码头受波浪力与码头面高程确定方法 / 刘海源等著. —北京:人民交通出版社股份有限公司, 2017. 11

ISBN 978-7-114-14261-1

I. ①重… II. ①刘… ②耿… ③蔡… III. ①码头工程—工程结构—研究 IV. ①U656.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 252956 号

海洋水动力工程研究论丛

书 名: 重力式复合结构码头受波浪力与码头面高程确定方法

著 作 者: 刘海源 耿宝磊 蔡艳君 陈汉宝

责任编辑: 陈 鹏 崔 建

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 720×960 1/16

印 张: 7.5

字 数: 136 千

版 次: 2017 年 11 月 第 1 版

印 次: 2017 年 11 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14261-1

定 价: 37.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

我国“十一五”期间,随着经济的高速发展,在离岸深水港口建设方面的需求日益迫切。为了突破离岸深水港建设相关关键技术,2006年交通运输重大科技攻关项目“离岸深水港建设关键技术研究”得以立项。作为离岸深水港建设关键技术之一的开敞式码头建设关键技术,码头的结构选型是重要的研究内容。在该研究之前,我国应用最广泛、最成熟的开敞式码头结构形式一般为桩基结构和重力式结构。随着水深增加,这种常规的码头结构形式造价呈非线性增长,投资巨大。而桩基—重力式复合结构介于重力式结构和桩基结构之间,可以充分发挥各自的优点,是一种很有发展前途的新型结构。但是对于这种结构码头面高程如何确定,码头所受波浪力如何,在当时的规范中尚未有明确的规定,规范对相关结构设计的计算方法也不适用。因此,针对该结构开展了码头受波浪力以及码头面高程确定方法的系统研究。本书就是该研究成果的总结。

本书在参阅大量国内外学者有关文献的基础上,采用理论分析和模型试验相结合的方法,对重力式复合结构码头波峰面高度、水下沉箱所受波浪力、码头面板所受波浪力及桩基受力进行了系统研究,提出了单个和多个重力式复合结构波峰面高度半经验计算公式及下部沉箱结构所受波浪力半经验计算公式,提出了重力式复合结构码头面板所受波浪上托力计算方法及重力式复合结构码头面高程的确定方法。

本书的研究成果,可以作为离岸深水港和大型开敞式码头的设计参考,还可以为相关规范的修订与制订提供基础资料,具有一定的推广应用价值。

受作者水平所限,书中难免存在错误、纰漏之处,敬请读者提出宝贵意见。

作 者

2017年8月31日

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外相关研究情况	3
1.3 本文的研究内容	16
2 重力式复合结构波峰面高度及下部沉箱波浪力理论分析	17
2.1 重力式复合结构最大波峰高度的计算	17
2.2 水下沉箱各个面上的波浪力计算	18
3 重力式复合结构波峰面高度与波浪力物理模型试验概况	25
3.1 试验内容	25
3.2 试验条件	25
3.3 试验仪器设备	30
3.4 模型设计	31
4 重力式复合结构波峰面高度研究	39
4.1 单个重力式复合结构波峰面高度	39
4.2 单排重力式复合结构波峰面高度	52
5 重力式复合结构下部沉箱受波浪力研究	58
5.1 单个重力式复合结构下部沉箱波浪力	58
5.2 单排重力式复合结构下部沉箱波浪力	90
5.3 水下沉箱受力对比分析	93
5.4 下部沉箱波浪力作用点分析	96
6 重力式复合结构码头面板波浪力研究	98
7 重力式复合结构桩基受力分析	108
8 重力式复合结构码头面高程确定方法研究	111
参考文献	112

1 绪 论

1.1 研究背景

我国是一个资源相对贫乏的国家,随着我国经济的高速发展,对国外资源的需求越来越大,对于石油等一次性能源和铁矿石等金属矿等更是如此。这类大宗散货的海上远距离运输,采用超大型船舶具有非常明显的经济效益。随着船舶的大型化,船舶抗浪稳定性得到提高,泊稳条件要求降低,加之我国现有海岸线深水资源的限制,使得码头的建设正向自然条件更为恶劣的深水地区发展。在国家“十一五”期间,离岸深水港的建设迫切提到议事日程上来。为了突破离岸深水港建设相关关键技术,2006年交通运输重大科技攻关项目“离岸深水港建设关键技术研究”得以立项。该项目是中华人民共和国成立以来我国最大的水运工程科技项目,从我国国情出发,针对我国离岸深水港建设的特殊自然条件,对多个研究方向的关键技术进行科技攻关,形成了一系列创新性强的成果,最终形成了我国离岸深水港建设的成套技术,促使我国建港技术处于世界领先水平。重力式复合结构码头面高程确定方法研究就是离岸深水港建设关键技术之一。

在该研究之前,我国应用最广泛、最成熟的开敞式码头结构形式一般为桩基结构和重力式结构。随着水深增加,这种常规的码头结构形式造价成非线性增长,投资巨大。而桩基—重力式复合结构介于重力式结构和桩基结构之间,可以充分发挥这两种结构的优点,是一种很有发展前途的新型结构,该结构示意图见图 1-1。但由于离岸深水码头的建设所面临的自然环境条件恶劣,荷载的动力性明显增强,我国现行规范对结构设计的相关计算方法已经不再适用。而码头面高程的确定,不仅影响到码头建设的经济性,还对码头结构、装卸设备、工作人员的安全以及码头作业是否方便起着重要的作用。目前现行的开敞式码头面高程的确定方法仅适用于透空的桩基梁板结构,不适用重力复合结构,同时现行规程规定方法中对波峰面高度的计算没有考虑波浪与建筑物相互作用后的变化。虽然公式中有一富余高度 $\Delta(0.0 \sim 1.0\text{m})$,但当波浪与重力式复合结构相互作用时,受波浪反射、绕射的影响,波峰面高度较没有建筑物时加大,以及水位的不同其增加的量值可能超过富



裕高度 Δ 。因此,通过试验得出波浪与结构物作用后波峰面变化规律,得到一种更为普遍的计算方法,对于今后类似工程有重要的借鉴和推广意义。

1.2 国内外相关研究情况

目前,国内外关于重力式复合结构的研究成果不多。对于相关结构受力方面的研究则较多,主要集中在重力式沉箱受力、透空结构上部结构受力等方面。而专门针对沉箱+桩基的复合结构波峰面变化规律、水下沉箱的受力及面板上托力方面的研究成果则较少。2006年大连理工大学针对重力式复合结构所受波浪总力进行了系统研究,并提出了计算方法,但并没有进行重力式复合结构波峰高度及面板受力的相关研究。

1)我国现有技术标准中对开敞式码头面高程的确定及波峰高度计算方法

交通运输部2014年5月实施的《海港总体设计规范》(JTS 165—2013)中的5.4.6~5.4.8条规定:

5.4.6 码头前沿顶高程应满足当地大潮时码头面不被淹没,便于作业、结构安全和码头周边衔接等要求,并应根据当地潮汐、波浪、泊位性质、船型、装卸工艺、船舶系缆、路域高程、防汛等要求确定。

5.4.7 码头前沿顶高程的确定应满足码头上水控制标准和上部结构受力控制标准的要求。实体结构形式的码头前沿顶高程可按上水控制标准确定,必要时按受力控制标准校核。

5.4.8 码头前沿顶高程可按下列规定进行计算,必要时可采用模型试验验证。

5.4.8.1 码头前沿顶高程计算根据所采用波浪和潮位组合标准的不同,应按基本标准和复核标准分别计算。潮位与波浪组合的标准及富余高度可按表1-1确定。

潮位与波浪的组合标准及富余高度

表1-1

组合情况	上水标准		受力标准		
	设计水位	富余高度 Δ_w	设计水位	波浪重现期	富余高度 Δ_F
基本标准	设计高水位	一般情况可取10~15年重现期波浪的波峰面高度,并不小于1.0m; 掩护良好码头可取1.0~2.0m	设计高水位	50年	0~1.0m

续上表

组合情况	上水标准		受力标准		
	设计水位	富余高度 Δ_w	设计水位	波浪重现期	富余高度 Δ_F
复核标准	极端高水位	一般情况可取 2~5 年重现期波浪的波峰面高度; 掩护良好码头可取 0~0.5m	—	—	—

注:1.按受力标准设计时波浪采用波列累积频率为 1% 的波高。

2.按上水标准设计时波浪采用波列累积频率为 4% 的波高。

3.对于风暴潮增水情况明显的码头,应在设计高水位基础上考虑增水影响。

4.受力标准的波浪重现期采用结构设计的规定,一般为 50 年,有特殊要求时,可相应调整。

5.4.8.2 按上水标准控制的码头前沿顶高程可按下式计算:

$$E = DWL + \Delta_w \quad (1-1)$$

式中: E ——码头前沿顶高程(m);

DWL ——设计水位(m),按表 1-1 选取;

Δ_w ——上水标准的富余高度(m),按表 1-1 取值。

5.4.8.3 按受力标准控制的码头前沿顶高程可按下列公式计算(图 1-2):

$$E = E_0 + h \quad (1-2)$$

$$E_0 = DWL + \eta - h_0 + \Delta_F \quad (1-3)$$

式中: E ——码头前沿顶高程(m);

E_0 ——上部结构受力计算的下缘高程(m),根据结构计算所能承受的波浪作用情况确定,应以满足竖向受力要求为主,必要时需同时考虑水平受力的要求。波浪作用计算应考虑结构物尺度和布置影响,必要时可由模型试验确定;

h ——码头上部结构高度(m);

DWL ——设计水位(m),按表 1-1 选取;

η ——水面以上波峰面高度(m);

h_0 ——水面以上波峰面高出上部结构底面的高度(m),当波峰面低于上部结构底面时为 0;

Δ_F ——受力标准的富余高度(m),按表 1-1 取值。

以上规定主要针对桩基透空结构,对于复合结构而言,水下沉箱与波浪的相互作用,受波浪反射、绕射的影响,波峰高度较没有建筑物时加大,其增加的量值可能超过富余高度。因此,通过试验得出波浪与结构物作用后波峰面变化规律,得到一种更为准确的计算方法,进而确定码头面高程将更加合理。

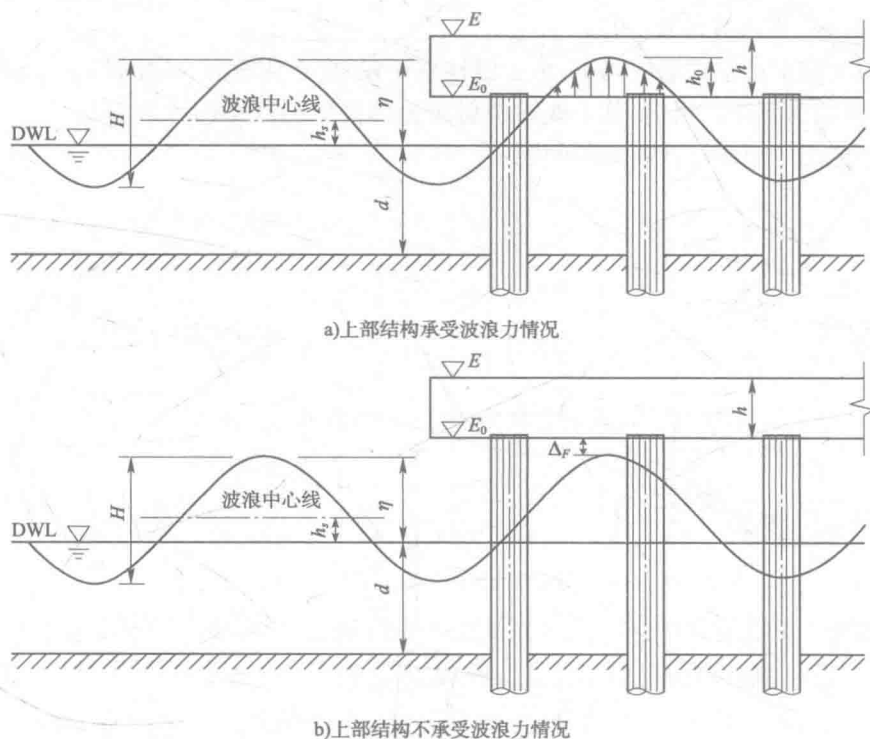


图 1-2 受力标准控制时码头前沿顶高程计算示意图

我国《港口与航道水文规范》(JTS 145—2015)对波浪作用于柱体上最大波峰高度进行了规定,其按图 1-3 确定。

按照此方法确定的最大波峰高度只是针对单个圆柱墩而言,对于重力式复合结构不能按此计算。

2) 基于线性绕射理论对群墩波峰高度的计算

对于离岸透空桩基码头,已有较多研究认为可以忽略桩柱的反射影响,上部结构下群桩间水域波面高程,可直接按下式计算即按推进波考虑。该式按二阶 Stokes 波理论算得。

$$\eta = \frac{H}{2} \cos kx + \frac{\pi H^2}{2L} \left[\frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi h}{L} (\operatorname{ch} \frac{4\pi h}{L} + 2)}{4 (\operatorname{sh} \frac{2\pi h}{L})^3} \right] \cos 2kx \quad (1-4)$$

式中: H ——推进波波高(m);

h ——水深(m)；

L ——推进波波长(m)。

对于离岸透空式墩柱码头,由于墩柱直径较大,必须考虑各墩间的相互散射影响,计算较为复杂。目前,基于线性绕射理论的群墩相互作用计算方法,已在工程中得到应用。但还存在着一些问题。

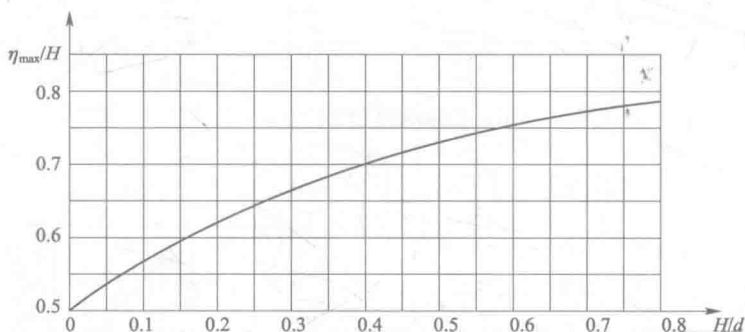


图 1-3 柱体波峰在静水面以上最大波峰面高度 $\eta_{\max}$ 曲线图

如图 1-4 所示半径为 a_δ ($\delta = 1, 2, 3, \dots, \Delta$) 的 Δ 个圆墩柱。垂直位于水平海底,水深为 d ,圆柱墩位置由 $\gamma_\delta, \theta_\delta$ 确定,波动场中任一点 P 的位置,相对于原坐标系,由 γ_0, θ_0 确定。相对于以圆柱中心为坐标原点的各圆柱坐标系,由 $\gamma_\delta, \theta_\delta$ 确定,所有夹角 θ 均以 X 轴正方向的逆时针方向为正。

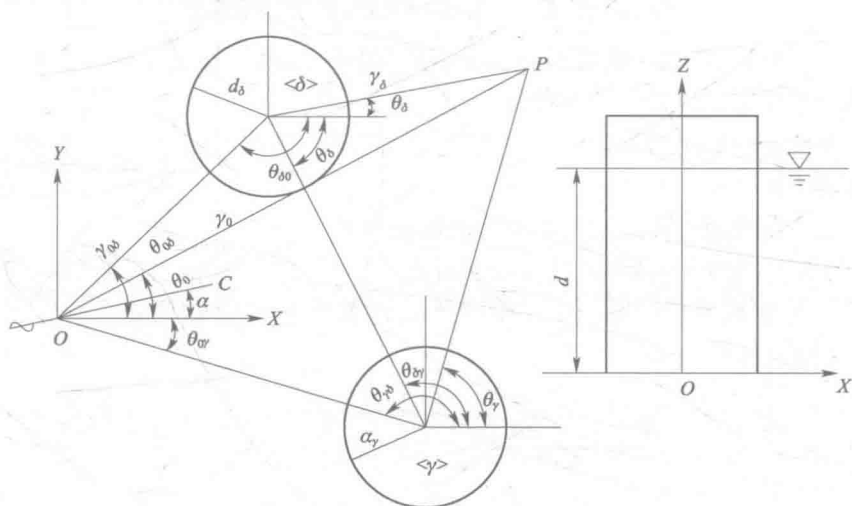


图 1-4 圆柱墩位置的确定

基于线性绕射理论,可求得群墩波动场中的任一点 P 的由入射波势函数和 Δ 个墩柱散射波势函数组成的总势。并通过坐标变换可得该点相对于 δ 个圆柱墩坐标系的总势为:

$$\begin{aligned} \phi^\delta = f(z) & \left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} \{ -J_n(K\gamma_\delta) \exp[iK\gamma_{0\delta} \cos(\theta_{0\delta} - \alpha)] \exp\left[\text{incos}(\theta_\delta - \alpha + \frac{\pi}{2})\right] + \right. \\ & \left. A_n^\delta H_n(K\gamma_\delta) \exp[in\theta_\delta] \right) + \left(\sum_{\gamma=1}^{\delta-1} + \sum_{\gamma=\delta+1}^{\Delta} \right) \\ & \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^\gamma H_{n+m}(K\gamma_{\delta\gamma}) J_m(K\gamma_\delta) \exp[im(\theta_{\delta\gamma} - \theta_\delta)] \exp[in\theta_{\gamma\delta}] \} e^{-i\omega t} \quad (1-5) \end{aligned}$$

式中, $f(z) = \frac{gH\text{ch}KZ}{2\omega\text{ch}Kd}$; H 为入射波高; K 为波数; ω 为波频; J_n 为 n 阶贝塞尔函数; H_n 为 n 阶汉开尔函数; 系数 A_n^δ 和 A_m^γ 可利用圆柱表面边界条件及将无穷级数取有限项 M 建立方程组求解。

根据线性波浪理论,波动场中任一点波面高度可用下式求解。

$$\eta = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_z = 0 \quad (1-6)$$

由此可得群墩波动场中任一点 P 处的波面高度为:

$$\begin{aligned} \eta = -\frac{iH}{Z} & \left(\sum_{n=-M}^M \{ -J_n(K\gamma_\delta) \exp[iK\gamma_{0\delta} \cos(\theta_{0\delta} - \alpha)] \exp\left[\text{incos}(\theta_\delta - \alpha + \frac{\pi}{2})\right] + \right. \\ & \left. A_n^\delta H_n(K\gamma_\delta) \exp[in\theta_\delta] \right) + \left(\sum_{\gamma=1}^{\delta-1} + \sum_{\gamma=\delta+1}^{\Delta} \right) \\ & \sum_{m=-M}^M A_m^\gamma H_{n+m}(K\gamma_{\delta\gamma}) J_m(K\gamma_\delta) \exp[im(\theta_{\delta\gamma} - \theta_\delta)] \exp[in\theta_{\gamma\delta}] \} e^{-i\omega t} \quad (1-7) \end{aligned}$$

天津大学宋仍运用该理论方法对日照港和青岛港墩柱结构进行了计算,计算结果发现当水深波长比 0.15 以上时,计算结果与模型试验值大体相符,但当水深波长比在 0.15 以下时,计算结果与模型试验值误差较大。这主要是因为线性绕射理论是基于水体无黏性的假定得出的,当波浪的非线性影响增强时,该方法不再适用。

以上波峰高度的研究主要针对桩基透空结构和墩柱结构而言,对于重力式复合结构,由于结构形式上的不同,波浪与其相互作用也不同,从而使波峰高度变化也会不一样。

3) 透空结构码头面板底部波浪上托力研究

目前关于码头面板波浪上托力的研究主要集中在桩基透空结构及水平板方面。

若桩基码头结构物上部结构底高程较低,在恶劣海况下当波浪在其面板下面

通过并与之接触时,面板下面除了作用有强度变化较缓慢的波压力外,在波峰刚接触到面板时尚存在着历时很短但强度极大的冲击压力,这种极强冲击荷载会引起建筑物的整个上部结构失稳或造成局部破坏。另外在波浪离开上部结构底面时,面板底面受到的波浪负压力作用对混凝土结构的耐久性也是一个很大的威胁。

大尺度水平平板结构的冲击问题,近年来引起越来越多的关注。1995年, N. Suchithra 沿用小尺度水平圆柱冲击问题的处理方式给出了冲击力的简化表达式,通过物理模型试验得到了水平平板的冲击系数。在水平平板冲击问题的理论研究方面, Kaplan 也采用与处理小尺度水平圆柱相近的方法,给出了作用在水平平板上的冲击力的公式。

Kaplan 采用与处理小尺度水平圆柱相近的方法,通过动量和阻力分析计算作用在水平平板上的垂直冲击力。假设波浪沿平板长度方向行进,波峰淹没位于静水面上的水平平板,平板厚度不计,因而不考虑浮力。平板为长方形,长为 L , 宽为 b 。作用在平板上的竖向冲击力 F_z 是两项之和,即动量项和阻力项。其中动量项为:

$$F_{z_{\text{mom}}} = \frac{\partial}{\partial t} (m_{3p} \dot{\eta}) \quad (1-8)$$

式中: m_{3p} ——平板淹没部分的附加质量。

$$m_{3p} = \rho \frac{\pi}{8} b l^2 \quad (1-9)$$

$$F_{z_{\text{mom}}} = \rho \frac{\pi}{8} b l^2 \ddot{\eta} + \rho \frac{\pi}{4} \eta \dot{b} l \frac{\partial l}{\partial t} \quad (1-10)$$

式中: l ——平板淹没长度,由波浪沿平板底部行进的距离确定,起始点为波浪初始冲击到平板上的位置。

上式中第二项随时间变化,直到当波浪淹没到达平板末端时,此时 $\frac{\partial l}{\partial t} = 0$, 上式第二项也变为 0。作用在平板上的竖向冲击力:

$$F_z = \left(\rho \frac{\pi}{8} l^2 \ddot{\eta} + \rho \frac{\pi}{4} \eta l \frac{\partial l}{\partial t} + \frac{\rho}{2} \eta |\dot{\eta}| l C_D \right) b \quad (1-11)$$

式中: C_D ——阻力系数,这里取值 2.0。

Kaplan 考虑了平板的淹没长宽比的影响修正了上式。平板淹没部分的附加质量 m_{3p} , 修正为:

$$m_{3p} = \rho \frac{\pi}{8} \frac{b l^2 l}{\left[1 + \left(\frac{l}{b} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (1-12)$$

其中 l/b 为平板的淹没长宽比。作用在平板上的竖直冲击力修正为:

$$F_z = \rho \frac{\pi b}{8} \frac{l^2}{[1 + (\frac{l}{b})^2]^{\frac{1}{2}}} \ddot{\eta} + \rho \frac{\pi b l}{4} \frac{dl}{dt} \frac{1 + \frac{1}{2}(\frac{l}{b})}{[1 + (\frac{l}{b})^2]^{\frac{3}{2}}} \dot{\eta} + \frac{\rho}{2} \dot{\eta} |\dot{\eta}| b l C_D \quad (1-13)$$

Kaplan 通过实验验证了上述方法的计算结果。丹麦水力研究所(DHI)扩展了 Kaplan 的计算程序,包括更多的特点,但是基本方法仍然是动量变换和 Morison 形式的方程。

Kaplan 等人的研究忽略了冲击时波浪破碎和变形的影响,以及冲击时在平板底部和波浪自由面之间形成的可压缩的空气槽的影响,用推广小尺度圆柱冲击问题的处理方法来研究与其性质差别很大的大尺度平板结构的冲击问题,存在着较大的缺陷。

国内学者根据波浪理论和有关的物理模型试验结果,对透空式建筑物面板的波浪上托力作了一些针对性的研究,并提出了一些工程上使用的估算方法。

天津大学李炎保、宋初等人对开敞式桩基、墩柱码头进行了模型试验,指出除波浪要素、上部结构在静水面的高度等条件外,码头上部结构波浪上托力还与结构形式密切相关。同时指出影响码头面板波浪上托力影响因素很多,包括波浪要素、面板在静水面以上高度、上部结构沿波浪传播方向的宽度、码头结构和接岸形式等。其中最主要的因素是入射波波高和码头面板底部高程。

1997 年,大连理工大学王永学等通过一系列波浪水槽试验对不同波浪参数,不同相对净空,不同结构物尺度等情形的规则波冲击问题进行了试验研究,任冰在此基础上进行了进一步的研究。试验结果表明:即使在入射波为规则波的情形下,波浪冲击压力峰值也具有随机性;对于线形波和非线形波,冲击压力峰值的最大值出现在不同的相对净空处;相对净空对于负冲击压力的分布没有显著影响等。

我国《海港工程设计手册》推荐了一个结构相对简单的波浪上托力计算公式。当推进波对码头上部结构建筑物作用时,面板上的波浪压强按波面形状分布,板上各点压强 p 可由下式得到:

$$p = \beta \gamma (\eta - \Delta h) \quad (1-14)$$

式中: p ——波浪上托力压强 (kN/m^2);

β ——压力反应系数,当上部结构的宽度约在 10m 以下时,可取 $\beta = 1.5$,当上部结构宽度较大时,可取 $\beta = 2.0$;

γ ——水的重度 (kN/m^3);

Δh ——超高,面板底部与静水面之间的距离(m);

η ——波峰面在静水面上的高度(m),按下式计算:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos kx + \frac{\pi H^2}{2L} \left[\frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi h}{L} (\operatorname{ch} \frac{4\pi h}{L} + 2)}{4 (\operatorname{sh} \frac{2\pi h}{L})^3} \right] \cos 2kx \quad (1-15)$$

式中: H ——推进波波高(m);

h ——水深(m);

L ——推进波波长(m)。

则单位宽度面板上波浪总上托力可写为:

$$P = \int_{x_1}^{x_2} p dx \quad (1-16)$$

式中: P ——波浪总上托力(kN/m)。

该公式采用了两个假定,一是对压力修正系数 β 值假定是一个常数,从而使波浪上托力压强值和面板高程的关系成直线。二是对波浪上托力的性质研究采用静水压力的观点,即 $p = \gamma h$ (h 为静水压头)的假定,这就限定了最大波浪上托力的压强值必然出现在面板在静水面处。而实际上波浪上托力是一个具有较高频率的冲击性作用力,波浪上托力压强系数($k = \frac{p}{\gamma h}$)是随高程变化的曲线,最大波浪上托压强值应位于速度最大处。因此该公式有其一定的局限性。

河海大学过达和蔡保华曾对浅水中的水平板、底部带纵梁的“Π”形板以及破碎波作用下的水平板进行波浪上托力试验。根据波浪数据以及有关试验资料的分析,认为面板上的波浪上托力压强值 p 变化规律是一条指数函数曲线,其基本形式为:

$$\frac{p}{\gamma H} = \beta_1 \left[\beta_2 \left(\frac{\eta}{H} \right) - \frac{\Delta h}{H} \right] \exp \left[\mp n \left(\frac{\Delta h}{H} - a \right) \right] \quad (1-17)$$

式中: η ——波峰顶点在静水面上的高度(m),与 $h/L, L/H$ 有关,对推进波可按二阶 Stokes 波计算,对破碎波和“Π”形板的计算中取 $\eta = 1.2H$;

a ——最大压强位置的超高系数,对推进波取0.2,对破碎波取0.3;

n ——指数曲线修正系数,对高桩码头取2.5,当 $\Delta h/H - a$ 为正时取负号,当 $\Delta h/H - a$ 为负时取正号;

β_1 ——压强系数,与建筑物的结构形式和波浪性质有关,由试验资料确定,对高桩码头推进波不破碎取4.2,破碎波取7.0;

β_2 ——波面修正系数,反映波浪受到面板压制而产生的能量反射,也由试验资

料确定,对高桩码头,推进波不破碎取 1.5,破碎波取 1.0。

对水平面板所受波浪总上托力进行计算时,考虑到上托力是一种尖峰脉冲性荷载,具有较大的不均匀性,因此在建筑面板上同时出现最大冲击压强的区域不会太大。假定在波浪上托力作用区域内压强为均布荷载,则单位宽度面板上波浪总上托力可按下式计算:

$$P = \beta_3 p l_0 \quad (1-18)$$

式中: P ——单位宽度面板上的总上托力(kN/m);

β_3 ——总上托力修正系数,建议采用 0.75;

l_0 ——计算长度(m),建议采用 $L/9 \sim L/6$,当梁格布置较密或梁高较大时取 $L/9$,对平板或梁格较疏时取 $L/6$ 。

南京水利科学研究院周益人等,通过透空平板波浪上托力系列试验研究,提出了水平板最大冲击压强和上托力的试验经验公式。其中最大冲击压强公式为:

$$\frac{p}{\gamma H} = \theta_1 \left[1 - \frac{\Delta h}{\eta} \right]^{0.6} \exp \left[-2.2 \theta_1 \left(\frac{\Delta h}{H} - 0.25 \right)^2 \right] \quad (1-19)$$

式中: p ——波浪最大冲击压强(kN/m²);

γ ——水的重度(kN/m³);

Δh ——超高,面板底部与静水面之间的距离(m);

H ——推进波波高(m);

η ——波峰面在静水面上的高度(m),按式(1-15)计算;

θ_1 ——冲击角影响系数,由下式求得:

$$\theta_1 = 1.2 \theta_2 \exp \left[-200 \theta_2 \left(\frac{H}{L} - 0.055 \right)^2 \right] \quad (1-20)$$

θ_2 ——板宽和水深影响系数,由下式求得:

$$\theta_2 = 3.1 \operatorname{th} \left(\frac{B}{2.5H} \right)^{1.5} \operatorname{th} \frac{2\pi h}{L} \quad (1-21)$$

式中: B ——水平板沿波浪传播方向的宽度,当 $B/H < 1.68$,板宽影响较小,取 $B/H = 1.68$;

L ——推进波波长(m);

h ——水深(m)。

最大上托力公式为:

$$\frac{P}{\gamma H B} = \vartheta \left(1 - \frac{\Delta h}{\eta} \right)^{0.8} \exp \left[-2.7 \vartheta \left(\frac{\Delta h}{H} - 0.35 \right)^2 \right] \quad (1-22)$$

式中: P ——单位宽度波浪最大上托力(kN/m);

- γ ——水的重度 (kN/m^3) ;
- Δh ——超高, 面板底部与静水面之间的距离 (m) ;
- H ——推进波波高 (m) ;
- η ——波峰面在静水面上的高度 (m) ;
- ϑ ——冲击角影响系数, 由下式求得:

$$\vartheta = \vartheta_0 \vartheta_1 \exp \left[-600 \vartheta_1 \left(\frac{H}{L} - 0.055 \right)^2 \right] \quad (1-23)$$

式中: ϑ_0 ——相对板宽影响系数, 当 $L/B > 10$ 取 $K_0 = 1.7$, 当 $L/B \leq 10$, K_0 取 1.4 ;
 ϑ_1 ——板宽和水深影响系数, 由式 (1-24) 求得:

$$\vartheta_1 = 0.9 \text{th} \left(\frac{B}{2.5H} \right)^{1.5} \frac{2\pi h}{L} \quad (1-24)$$

式中: B ——水平板沿波浪传播方向的宽度, 当 $B/H < 1.68$, 板宽影响较小, 取 $B/H = 1.68$;

- L ——推进波波长 (m) ;
- h ——水深 (m) 。

该公式考虑了波陡、波高、超高、板宽和水深等因子的影响, 另外除了考虑得到广泛认可的动力因素外, 还提出一个影响因子, 即波浪冲击角, 最终将波陡因子直接引用到计算公式中。

以上研究得到的波浪上托力经验公式, 均是按照推进波来考虑的, 没有考虑波浪的反射影响, 仅适用于 $\Delta h/H < 0.6$ 的情况, 认为当 $\Delta h/H > 0.6$ 时, 一般情况下, 波面不再接触上部结构底面, 也不再有波浪上托力的作用。日本合田良实提出一个有明显反射现象、码头前产生立波的估算波浪上托力的经验公式。合田良实考虑到水体附加质量随时间变化的动量理论, 进行了栈桥面板上托力的试验研究。他认为作用于透空式栈桥面板底部的最大上托力主要是冲击性荷载, 假定波浪作用区内的压强是均匀分布的, 计算长度为 $L/4$, 则波浪总上托力值与栈桥面板设置高程的关系可表示为:

$$P = \xi \gamma H \frac{L}{4} B \text{th} \frac{2\pi h}{L} \left(\frac{H}{\Delta h_0} - \frac{\Delta h_0}{H} \right) \quad (1-25)$$

式中: P ——面板上波浪总上托力值 (kN) ;

- ξ ——压力修正系数, 随面板在波浪中心线上的不同高度而变化, 见表 1-2 ;
- γ ——水的重度 (kN/m^3) ;
- B ——栈桥面板宽度, 该宽度为与波峰线平行的面板宽度 (m) ;
- L ——原始推进波波长 (m) ;