柔性系靠泊结构系缆力计算

王建超, 贡金鑫

(大连理工大学 土木水利学院结构工程研究所, 辽宁 大连 116023)

摘要:针对外海轻型码头结构的特点,通过能量法建立了系泊船舶在承受各种外部荷载时系缆力的数学模型, 并编制了计算程序,给出了在2种外荷载工况下系缆力与缆绳和系船墩刚度比之间的变化关系.结果表明,缆绳 和系船墩的刚度比对系缆力的影响很大,并且使系缆力发生重分配,系缆力变幅约为10%.因此,对于外海的轻 型码头结构,在计算系缆力时,建议考虑缆绳与系船墩之间的刚度比对系缆力的影响.

关 键 词:码头;柔性结构;系缆力;系泊船舶 中图分类号:TU332.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-640X(2010)02-0107-07

系泊船舶通常用多根缆绳固定在码头上,由于缆绳布置和缆绳张力计算非常重要,很多文献都对系泊问题进行了研究^[1-6],但是大部分研究都是针对近岸传统码头结构.随着船舶重量的增加和建港条件的恶化, 迫切需要研究新的码头结构型式.本文所研究的外海轻型码头结构就是为满足这种要求而提出来的一种码 头结构型式.由于这种码头的靠船墩和系船墩均用钢管焊接而成,属于柔性结构,所以在计算系缆力时结构 的变形不可忽略.

1 船舶系泊坐标系的建立

图 1 为船舶系泊图,在船舶上定义了 2 个坐标系,固定 坐标系 xyz 和随船坐标系 x'y'z',在无外力作用的初始状态 下,2 坐标系重合,坐标原点取在船舶重心处.

2 系泊系统的应变能

由于码头的系船墩和靠船墩属于柔性结构,当船舶遭受 外部环境荷载时,缆绳和护舷将受到力的作用,导致系船墩 和靠船墩产生变形.



2.1 缆绳与系船墩的应变能

系泊船舶主要有 6 个方向的自由度,分别为横移、纵移、升沉、横摇、纵摇和回转. 系泊船舶的线位移可用随船坐标系 x'y'z'相对于固定坐标系 xyz的移动来定义,令系泊船舶的线位移 $U_c = [u_{cx}, u_{cy}, u_{cz}]^T, u_{cx}, u_{cy}, u_{cz}$ 分别为系泊船舶在 x, y, z方向的线位移;系泊船舶的角位移可用随船坐标系 x'y'z'相对于固定坐标系 xyz坐标轴的转角来定义,令系泊船舶的角位移 $\theta_c = [\theta_{cx}, \theta_{cy}, \theta_{cz}]^T, \theta_{cx}, \theta_{cy}, \theta_{cz}$ 分别为系泊船舶绕 x, y, z轴的角位移.

定义船舶导缆孔局部坐标系的方向与随船坐标系相同,系船墩局部坐标系的方向与固定坐标系相同.当

收稿日期: 2009-06-10 基金项目: 国家 863 科技资助项目(2007AA11Z130) 作者简介: 王建超(1981-),男,内蒙古通辽人,博士研究生,主要从事港口工程设计、结构分析工作. E-mail: wangjianchao007@ yahoo. cn 船舶受到环境荷载作用后,船舶上第 k 个导缆孔相对于固定坐标系原点的位移为

$$\begin{bmatrix} u_{xik} \\ u_{yik} \\ u_{zik} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{cx} + c_{zk}\theta_{cy} - c_{yk}\theta_{cz} \\ u_{cy} + c_{xk}\theta_{cz} - c_{zk}\theta_{cx} \\ u_{cz} + c_{yk}\theta_{ck} - c_{xk}\theta_{cy} \end{bmatrix}$$
(1)

式中: u_{xik} , u_{yik} , u_{xik} 分别为船舶第 k 个导缆孔相对于固定坐标系的位移(m); c_{xk} , c_{yk} , c_{k} 分别为第 k 个导缆孔相 对于移动坐标系 x'y'z'的坐标(m).

当环境荷载作用在船舶上时,船舶将荷载传给缆绳和系船墩,导致缆绳和系船墩都产生水平位移(见图2).



图 2 缆绳与系船墩的变形

Fig. 2 Deformation of mooring line and moored platform

文献[1]给出的缆绳相对于随船坐标系 x'y'z'的刚度矩阵 K_k 为

$$\boldsymbol{K}_{k} = k_{k} \begin{bmatrix} \cos^{2}\boldsymbol{\Phi}_{xk} & \cos\boldsymbol{\Phi}_{xk}\cos\boldsymbol{\Phi}_{yk} & \cos\boldsymbol{\Phi}_{xk}\cos\boldsymbol{\Phi}_{zk} \\ \cos\boldsymbol{\Phi}_{xk}\cos\boldsymbol{\Phi}_{yk} & \cos^{2}\boldsymbol{\Phi}_{yk} & \cos\boldsymbol{\Phi}_{yk}\cos\boldsymbol{\Phi}_{zk} \\ \cos\boldsymbol{\Phi}_{xk}\cos\boldsymbol{\Phi}_{zk} & \cos\boldsymbol{\Phi}_{yk}\cos\boldsymbol{\Phi}_{zk} & \cos^{2}\boldsymbol{\Phi}_{zk} \end{bmatrix}$$
(2)

式中: $k_k = E_k A_k / L_{0k}$ 为每根缆绳的轴向刚度; E_k, A_k, L_{0k} 分别为第 k 根缆绳的杨氏模量、截面面积和长度; $\Phi_{xk}, \Phi_{yk}, \Phi_{xk}$ 分别为第 k 根缆绳与船舶坐标系的夹角.

设第 k 根缆绳在 x, y 和 z 方向的位移分别为 u_{xik}, u_{yik} 和 $u_{zik},$ 第 k 个系船墩在 x, y 和 z 方向的位移分别为 u_{xik}, u_{yik} 和 $u_{zik},$ 第 k 个系船墩在 x, y 和 z 方向的刚度分别为 K_{xdk}, K_{ydk} 和 $K_{zdk},$ 则由力的平衡方程可得

$$k_{k}\begin{bmatrix}\cos^{2}\boldsymbol{\Phi}_{xk}&\cos\boldsymbol{\Phi}_{yk}\cos\boldsymbol{\Phi}_{yk}&\cos\boldsymbol{\Phi}_{zk}\cos\boldsymbol{\Phi}_{zk}\\\cos\boldsymbol{\Phi}_{xk}\cos\boldsymbol{\Phi}_{yk}&\cos^{2}\boldsymbol{\Phi}_{yk}&\cos\boldsymbol{\Phi}_{zk}\\\cos\boldsymbol{\Phi}_{xk}\cos\boldsymbol{\Phi}_{zk}&\cos\boldsymbol{\Phi}_{zk}&\cos^{2}\boldsymbol{\Phi}_{zk}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_{xik}-u_{xjk}\\u_{yik}-u_{yjk}\\u_{zik}-u_{zjk}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}K_{xdk}u_{xjk}\\K_{ydk}u_{yjk}\\K_{zdk}u_{zjk}\end{bmatrix}$$
(3)

由于系船墩在 z 方向的刚度非常大,所以可以假设系船墩在 z 方向的位移 u₃ = 0.由 x 方向和 y 方向的 平衡方程可得

$$\begin{cases} u_{xjk} = \left(A_k - \frac{B_k k_k \cos \Phi_{xk} \cos \Phi_{yk}}{K_{ydk} + k_k \cos^2 \Phi_{yk}}\right) \left| \left(K_{xdk} + k_k \cos^2 \Phi_{xk} - \frac{k_k^2 \cos^2 \Phi_{xk} \cos^2 \Phi_{yk}}{K_{ydk} + k_k \cos^2 \Phi_{yk}}\right) \right| \\ u_{yjk} = \left(B_k - \frac{A_k k_k \cos \Phi_{xk} \cos \Phi_{yk}}{K_{xdk} + k_k \cos^2 \Phi_{xk}}\right) \left| \left(K_{ydk} + k_k \cos^2 \Phi_{yk} - \frac{k_k^2 \cos^2 \Phi_{xk} \cos^2 \Phi_{yk}}{K_{xdk} + k_k \cos^2 \Phi_{xk}}\right)\right| \end{cases}$$
(4)

式中:

式中: x_{ik}, y_{ik}, z_{ik} 为第 k 个导缆孔的坐标; x_{jk}, y_{jk}, z_{jk} 为第 k 个系船柱的坐标. 对式(5)进行微分,等式两边同除 以 L_k ,得

$$\delta L_{k} = \frac{x_{ik} - x_{jk}}{L_{k}} (\delta x_{ik} - \delta x_{jk}) + \frac{y_{ik} - y_{jk}}{L_{k}} (\delta y_{ik} - \delta y_{jk}) + \frac{z_{ik} - z_{jk}}{L_{k}} (\delta z_{ik} - \delta z_{jk})$$
(6)

 $\mathbb{R} \oplus : \frac{x_{ik} - x_{jk}}{L_k} = \cos \Phi_{xk}, \frac{y_{ik} - y_{jk}}{L_k} = \cos \Phi_{yk}, \frac{z_{ik} - z_{jk}}{L_k} = \cos \Phi_{zk}.$

缆绳受力变形后,导缆孔和系缆柱移动,所以有

 $\delta x_{ik} = u_{xik}, \delta y_{ik} = u_{yik}, \delta z_{ik} = u_{zik}; \delta x_{jk} = u_{xjk}, \delta y_{jk} = u_{yjk}, \delta z_{jk} = 0$ 将其分别代入式(6)中,并除以缆绳原始长度 L_{0k} ,得到第 k 个缆绳的应变 ε_k 为

$$\varepsilon_{k} = \frac{\delta L_{k}}{L_{0k}} = \frac{\cos \Phi_{xk}}{L_{0k}} (u_{xik} - u_{xjk}) + \frac{\cos \Phi_{yk}}{L_{0k}} (u_{yik} - u_{yjk}) + \frac{\cos \Phi_{zk}}{L_{0k}} u_{zik}$$
(7)

将式(4)代入式(7)就可以得到每根缆绳的应变 ε_k ,则整个缆绳系统的总应变能为

$$U_{r} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{l} E_{k} \varepsilon_{k}^{2} A_{k} L_{0k} =$$

$$\frac{1}{2} \sum_{k=1}^{l} \frac{E_{k} A_{k}}{L_{0k}} [\cos \Phi_{xk} (u_{xik} - u_{xjk}) + \cos \Phi_{yk} (u_{yik} - u_{yjk}) + \cos \Phi_{zk} u_{zik}]^{2}$$
(8)

式中:*l*为缆绳的根数.由于系船墩在z方向的位移非常小,所以可不考虑系船墩在z方向的应变能.则系船墩的总应变能 U_a为

$$U_{d} = \sum_{k=1}^{m} \frac{1}{2} \left(K_{xdk} u_{xjk}^{2} + K_{ydk} u_{yjk}^{2} \right)$$
(9)

式中:m 为系船柱的个数.

2.2 护舷和靠船墩的应变能

当环境荷载作用在船舶上时,船舶对护舷产生作用力,靠船墩和护舷都将产生位移,定义第 k 个护舷在 y 方向位移为 d_{ik};第 k 个靠船墩在 y 方向位移为 d_{jk},设第 k 个护舷在 y 方向的刚度为 K_{ytk},第 k 个靠船墩在 y 方向的刚度为 K_{yttek},则它们的关系可表示为

$$d_{jk} = \frac{K_{yfk}}{K_{yfk} + K_{ymdk}} d_{ik} \tag{10}$$

当船舶产生位移后,第 k 个护舷的位移为

$$d_{ik} = u_{cy} + (r_{xk} - u_{cx})\theta_{cz} - (r_{zk} - u_{cz})\theta_{cx}$$
(11)

式中: d_{ik} 为第k个护舷处的位移(m); r_{xk} , r_{yk} , r_{xk} 为第k个护舷在固定坐标系下的坐标(m).

当 d_{ik}<0 时,轮船在第 k 个护舷处沿 y 轴负方向有位移,护舷与船舶接触,护舷的应变能为

$$U_{f} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{2} K_{yfk} \left[- \left(d_{ik} - d_{jk} \right) \right] \left(d_{ik} - d_{jk} \right) = -\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{2} K_{yfk} \left(\frac{K_{ymdk}}{K_{yfk} + K_{ymdk}} d_{ik} \right)^{2} = -\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{2} K_{yfk} \left(\frac{K_{ymdk}}{K_{yfk} + K_{ymdk}} \right)^{2} d_{ik}^{2}$$
(12)

式中:n为护舷的个数.

当 $d_{ik} \ge 0$ 时,轮船沿 y 轴正方向有位移,护舷与轮船不接触,护舷的应变能 $U_f = 0$,同时,靠船墩的应变能 $U_{md} = 0$.

当 d_{ik}<0 时,轮船在第 k 个护舷和靠船墩沿 y 轴负方向有位移,靠船墩的应变能为

$$U_{md} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{2} K_{ymdk} (-d_{jk}) d_{jk} = -\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{2} K_{ymdk} \left(\frac{K_{yfk}}{K_{yfk} + K_{ymdk}} \right)^2 d_{ik}^2$$
(13)

3 外力对船舶做功

系泊于码头的船舶所受到的外力主要有风、水流、波浪、重力和浮力.很多文献和规范都给出了它们的计 算公式,下面将各种外力对船舶做功简述如下.

3.1 风、水流、波浪对船舶做功

3.1.1 风对船舶做功 风对船舶做的功^[2]可表示为:

$$W^{\text{wind}} = W_x^{\text{wind}} + W_y^{\text{wind}} + W_{\theta_z}^{\text{wind}}$$

$$W_x^{\text{wind}} = \frac{1}{2} C_{xw} \rho_w V_w^2 \cos^2 \alpha A_T u_{ex}$$

$$W_y^{\text{wind}} = \frac{1}{2} C_{yw} \rho_w V_w^2 \sin^2 \alpha A_L u_{ey}$$

$$W_{\theta_z}^{\text{wind}} = \frac{1}{2} C_{xyw} \rho_w V_w^2 \sin^2 \alpha A_L L_w \theta_{ez}$$
(14)

式中: W^{wind} 为风对船舶所做的功; W_x^{wind} , W_y^{wind} , $W_{\theta_x}^{\text{wind}}$ 分别为风对船舶纵向、横向和首摇方向所做的功; C_{xw} , C_{yw} , C_{xyw} 分别为纵向风力系数、横向风力系数、首摇风力矩系数; ρ_w 为空气密度; V_w 为设计风速; A_T , A_L 分别为纵向受风面积和横向受风面积; α 为风向角; L_w 为水线处船长.

3.1.2 水流对船舶做功 水流对船舶所做的功^[2]可表示为:

$$W_{x}^{\text{current}} = W_{x}^{\text{current}} + W_{y}^{\text{current}}$$

$$W_{x}^{\text{current}} = \frac{1}{2} C_{xc} \rho_{c} V_{c}^{2} \cos^{2} \beta A_{cT} u_{cx}$$

$$W_{y}^{\text{wind}} = \frac{1}{2} C_{yc} \rho_{c} V_{c}^{2} \sin^{2} \beta A_{cL} u_{cy}$$
(15)

式中: W^{current} 为水流对船舶所做的功; W_x^{current} , W_y^{current} 分别为水流对船舶纵向、横向所做的功; C_{xe} , C_{ye} 分别为纵 向水流力系数和横向水流力系数; ρ_e 为海水密度; V_e 为设计流速; β 为水流方向角; A_{er} , A_{eL} 分别为水面以下船 体纵向投影面积和横向投影面积.

3.1.3 波浪对船舶做功 波浪对船舶所做的功^[1]可表示为:

$$W_{x}^{\text{wave}} = W_{x}^{\text{wave}} + W_{y}^{\text{wave}}$$

$$W_{x}^{\text{wave}} = C_{mx} \frac{\pi \cos\alpha}{8} D^{2} \rho_{w} g H u_{cx} \frac{\sinh\left(2\pi \frac{h}{L}\right) - \sinh\left(2\pi \frac{h-d}{L}\right)}{\cosh\left(2\pi \frac{h}{L}\right)} \tag{16}$$

$$W_{y}^{\text{wave}} = C_{my} \frac{\pi \sin\alpha}{8} D^{2} \rho_{w} g H u_{cy} \frac{\sinh\left(2\pi \frac{h}{L}\right) - \sinh\left(2\pi \frac{h-d}{L}\right)}{\cosh\left(2\pi \frac{h}{L}\right)} \tag{16}$$

式中: W^{wave} 为波浪对船舶所做的功; W^{wave}, W^{wave} 分别为波浪对船舶纵向、横向所做的功; C_{mx}, C_{my} 分别为 x, y 轴方向惯性力系数; h 为水深; d 为吃水深度; D 为沿波浪前进方向的船体掩蔽宽度; α 为波浪的入射角; L 为水 深为 h 时入射波的波长; H 为入射波的波高.

3.2 重力和浮力对船舶做功

当船舶处于静止状态时,所受的重力与浮力相等,即

$$F_0 = W = \rho_c A_w T g \tag{17}$$

式中: F_0 为船体初始状态所受到的浮力; W 为船体所受重力; A_w 为水线面面积(m^2); T 为船体原吃水深度(m).

当船舶相对于固定坐标系原点产生竖直位移 u。时,船舶所受的浮力变为

$$F_{1} = \rho_{c}A_{w}(T - u_{cz})g$$
(18)

式中:F1为船体运动后所受到的浮力.在这一过程中浮力的变化值为

$$\Delta F = W - F_1 = F_0 - F_1 = \rho_c A_w u_{cz} g$$

重力与浮力的合力做的功 W_{G-F}为

$$W_{G-F} = -\frac{1}{2}\rho_c A_w g u_{cz}^2$$
 (19)

3.3 回复力做功

船舶具有6个方向自由度,当船舶分别绕 x', y'轴旋转 $\theta_{\alpha}, \theta_{\alpha}$ 角时,回复力对船舶做的功 W^{rest} 为

$$\begin{cases}
W^{\text{rest}} = W^{\text{rest}}_{\theta x} + W^{\text{rest}}_{\theta y} \\
W^{\text{rest}}_{\theta x} = -WGM_T \theta^2_{cx}/2 \\
W^{\text{rest}}_{\theta y} = -WGM_L \theta^2_{cy}/2
\end{cases}$$
(20)

式中: W_{ex}^{rest} , $W_{\thetay}^{\text{rest}}$ 分别为横向和纵向回复力对船舶所做的功,W为船体所受重力; GM_{T} , GM_{L} 分别为船舶横稳心高度和纵稳心高度.

4 变形求解

根据能量守恒原理^[11],可以认为系泊船舶所承受的外部荷载对船舶所做的功应等于积累在缆绳、系船 墩和护舷、靠船墩内的应变能.

当船舶发生位移,缆绳和护舷将发生变形,则整个系统在变形时相对于未变形状态的势能为:

$$\Pi = U - \sum_{i=1}^{n} P_i \delta_i = U_d + U_{md} + U_r + U_f - W^{\text{wind}} - W^{\text{current}} - W_{G-F} - W^{\text{rest}}$$
(21)

根据最小势能原理, $\frac{\partial \Pi}{\partial u_{cx}} = 0$, $\frac{\partial \Pi}{\partial u_{cy}} = 0$, $\frac{\partial \Pi}{\partial u_{cz}} = 0$, $\frac{\partial \Pi}{\partial u_{\theta x}} = 0$, $\frac{\partial \Pi}{\partial u_{\theta y}} = 0$, $\frac{\partial \Pi}{\partial u_{\theta y}} = 0$.

由此得到关于船舶重心处位移 u_{ex} , u_{ey} , u_{ex} 和 θ_{ex} , θ_{ey} , θ_{ex} 的 6 个方程,方程数目与未知量个数相等,方程有 唯一解.由于方程是非线性的,本文采用优化方法,引入目标函数

$$Q(u_{cx}, u_{cy}, u_{cz}, \theta_{cx}, \theta_{cy}, \theta_{cz}) = \sum_{i=1}^{o} \beta_i f_i^2(u_{cx}, u_{cy}, u_{cz}, \theta_{cx}, \theta_{cy}, \theta_{cz})$$
(22)

其中: β_i 为权系数,通常取1; f_i^2 依次为根据最小势能原理得到的6个方程的左边项. 令 ε 为给定的精度,当 $Q(u_{\alpha}^*, u_{\alpha}^*, u_{\alpha}^*, \theta_{\alpha}^*, \theta_{\alpha}^*, \theta_{\alpha}^*) \leq \varepsilon$ 时,则 $u_{\alpha}^*, u_{\alpha}^*, \theta_{\alpha}^*, \theta_{\alpha}^*,$

5 算 例

某船舶为 50 kDWT 散货船,总长 216.0 m,型宽 32.0 m,型深 16.2 m,满载状态下吃水 12.0 m,排水体积 67 238 m³,垂线间长 206.25 m,重心高度 9.01 m,横向惯 性半径 8.87 m,纵向惯性半径 51.56 m,重心纵向位置 3.44 m.

用6根直径为80mm的尼龙缆绳将轮船固定在系船 墩上,护舷采用H1600鼓型橡胶护舷,缆绳和护舷的布置 方式如图3所示.



导缆孔和系船柱的位置如表 1 所示. 在固定坐标系 *xyz* 下,1 号护舷的坐标为(-80.0 m, -16.0 m, 4.0 m),2 号护舷的坐标为(80.0 m, -16.0 m, 4.0 m).

Tab. 1 Fairlead and bollard location									
缆绳号	导缆孔坐标/ m			系缆柱坐标/m					
	x	у	z	<i>x</i>	у	z			
1	-108.0	0	7.2	-120.0	-40.0	4.5			
2	-100.0	-16.0	7.2	-90.0	-40.0	4.5			
3	-50.0	-16.0	7.2	-30.0	-26.0	4.5			
4	50.0	-16.0	7.2	30.0	-26.0	4.5			
5	100.0	-16.0	7.2	90.0	-40.0	4.5			
6	108.0	0	7.2	120.0	-40.0	4.5			

表1 导缆孔与系缆柱位置

海洋环境1为水流流速0.5 m/s,与x 轴夹角90°,风速20 m/s,与x 轴夹角90°;海洋环境2 为水流流速 1.5 m/s, 与 x 轴夹角 45°, 风速 30 m/s, 与 x 轴夹角 45°. 外力计算结果见表 2.

表 2 外力计算结果										
Tab. 2 Calculation results of external forces										
	海洋环境1		海洋环境 2							
坝 日 -	F _x ∕ t	$F_y \neq t$	F _x ∕t	F_y /t	M_z /(t·m)					
水流力	0	218.2	17.3	316.4	0					
风力	0	43.1	16.5	62.7	2 257.2					
总 力	0	261.3	33.8	379.1	2 257.2					

利用以上数据和本文推导的公式,得到海洋环境1和2情况下系缆力随缆绳和系船墩刚度比的关系(见 图4).



Fig. 4 The relationships between mooring force and stiffness ratio in marine environment

由图 4 可见,海洋环境 1 情况下每根缆绳系缆力变化幅度分别为:1 和 6 号缆绳 13.0%,2 和 5 号缆绳 5.8%,3和4号缆绳11.6%;海洋环境2情况下1~6号缆绳依次为13.2%,6.6%,15.4%,9.8%,5.0%和 12.8%.

结 6 语

通过对柔性系靠泊结构系缆力的计算可以发现,缆绳与系船墩刚度比对缆绳张力影响较大.整个系泊系 统中每根缆绳与其相应系船墩的刚度比不同,受外力作用后,每根缆绳所受的系缆力进行了从新分配.处于 外海的柔性系船墩式码头结构,在计算系缆力时,应考虑缆绳与系船墩之间的刚度比对系缆力的影响.

参考文献:

- [1] NATARAJAN R, GANAPLY C. Analysis of moorings of a berthed ship[J]. Marine Structures, 1995(8): 481-499.
- [2] 向溢. 码头智能系泊系统研究[D]. 上海:上海交通大学, 2002. (XIANG Yi. Study on smart mooring system[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2002. (in Chinese))
- [3] CHERNJAWSKI M. Mooring of surface vessels to piers [J]. Maring Technology, 1980(17): 1-7.
- [4] 向溢, 谭家华. 码头系泊缆绳张力的计算[J]. 船舶力学, 2002, 6(3): 20-27. (XIANG Yi, TAN Jia-hua. Analysis of mooring lines forces of a berthed ship[J]. Journal of Ship Mechanics, 2002, 6(3): 20-27. (in Chinese))
- [5] XIANG Yi, TAN Jia-hua, YANG Jian-min, et al. Mooring model experiment and mooring lines force calculation [J]. China Ocean Engineering, 2001(1): 25-36.
- [6] WILSON B W. Elastic characteristics of moorings[J]. Journal of the Waterways and Harbor Division ASCE, 1967, 93(WW4): 27-56.
- [7] SCHELLIN T E, ÖSTERGAARD C. The vessel in port: mooring problems [J]. Marine Structures, 1995, 8(5): 451-479.
- [8] GAYTHWAITE J W. Design of marine facilities for berthing, mooring and repair of vessels [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [9] PINKSTER J A. Low frequency second-order wave forces on vessels moored at sea[C] // Proceeding of the 11th Symposium on Naval Hydrodynamics. London: University of London, 1976: 603-615.
- [10] 龙驭球,包世华, 匡文起. 结构力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2000. (LONG Yu-qiu, BAO Shi-hua, KUANG Wenqi. Structural mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese))
- [11] 刘德贵,费景高. FORTRAN 算法汇编[M]. 北京:国防工业出版社, 1988: 341-349. (LIU De-gui, FEI Jing-gao.
 FORTRAN arithmetic collection [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988;341-349. (in Chinese))

Mooring force calculation of flexible berthed structures

WANG Jian-chao, GONG Jin-xin

(Research Institute of Structural Engineering, School of Civil Engineering and Hydraulics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Mooring force is studied according to the characteristics of open sea terminals structure. A mathematic model for calculating mooring forces is established based on energy method when the ship is subjected to external environmental loads. In addition, computer program is compiled. The relationships between mooring force and stiffness ratio of mooring line to moored platform are given for two external environmental conditions. Results show that stiffness ratio has a strong influence on mooring forces and then causes its redistribution. The change range of mooring force is in the average of around 10%. Therefore, the influence of stiffness ratio of mooring line to moored platform on mooring forces should be considered when calculating mooring forces of open sea terminals structure.

Key words: wharf; flexible structure; mooring force; berthed ship