

文章编号: 1007-7294(2005)05-0105-10

潜艇横向刚性构架区域应力计算解析方法

朱邦俊, 万正权, 王永军, 黄进浩

(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要:本文对框架肋骨及平面舱壁船体结点区域的应力进行理论求解, 考虑了内、外框架肋骨和结点区域嵌入厚板, 以及厚、薄板连接处由于中曲面不一致引起的附加力矩和邻近普通肋骨对框架肋骨及平面舱壁纵向弯曲的影响。应用本文的计算方法、现行计算方法和有限元方法进行实际结构结点应力的比较计算, 结果表明本文的计算方法比现行的计算方法更合理、更全面。

关键词: 潜艇结构; 框架肋骨; 平面舱壁, 弹性基础梁

中图分类号: U661.43 **文献标识码:** A

An analytical method for stresses of the connection of submarine pressure hull and transverse rigid frame

ZHU Bang-Jun, WAN Zheng-Quan, WANG Yong-Jun, HUANG Jin-Hao

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: This paper developed an analytical method for the stresses of the connection of submarine pressure hull and frame stiffener and/or transverse bulkhead considering the influence of the outer/inner frame stiffener and embedded thicker plate. The effects of additional bending moment are accounted for in the present method due to the adjacent ring-stiffener of pressure hull and the mismatch of mid-section between the thick and thin plates. The comparative studies are performed between the present method, existing analytical method and finite element method. The numerical results show that the present method is more rational and comprehensive comparing to the existing analytical method.

Key words: submarine structure; frame stiffener; transverse bulkhead; elastic foundation beam

1 引言

这里所说的横向刚性构架主要指耐压船体中的框架肋骨(或特大肋骨)和内部平面舱壁(见图1, 2)。目前所采用的计算方法^[1]是将构架简化为弹性支座, 船体壳板为弹性支座上的无限长弹性基础梁, 没有考虑内、外框架肋骨的差异、没有考虑局部嵌入厚板结构及厚、薄板连接处由于中曲面不一致而产生的附加力矩影响、更没有考虑邻近普通肋骨对结点区域的纵弯影响。虽然文献[1]中采用相当面积来修正弹性支座刚度(考虑偏心影响); 也给出支撑环结构的折算厚度来处理局部加厚问题, 但都缺乏理论依据。基于目前计算方法^[1]中的许多不合理性, 本文建立了一个较为精确合理的力学模型(见图1), 并进行严格的推导, 给出了横向刚性构架区域应力计算表达式。

收稿日期: 2005-06-14

作者简介: 朱邦俊(1938-), 男, 中国船舶科学研究中心研究员。

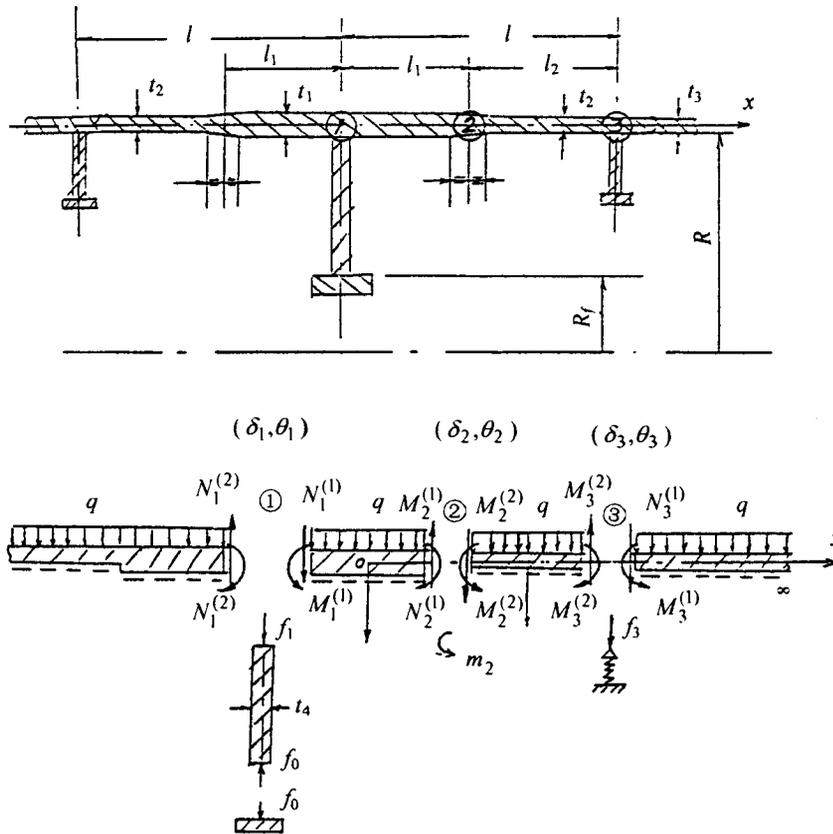


图 1 框架肋骨船体结点及其力学模型

Fig1 The model of the connection of pressure hull and frame stiffener

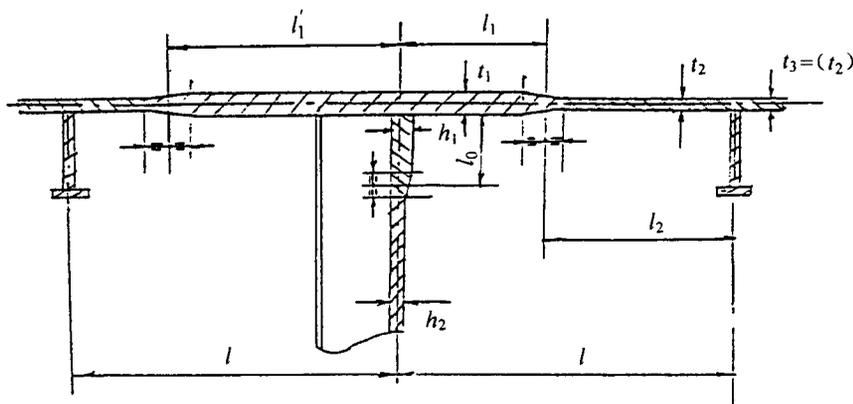


图 2 平面舱壁区域的船体结点结构

Fig2 The connection of pressure hull and transverse bulkhead

2 基本假定

- (1) 假定框架肋骨左右的结构和载荷对称($\vartheta_1=0$)；
- (2) 忽略轴向力引起的复杂弯曲；
- (3) 框架肋骨邻近的普通肋骨设定为弹性支座；
- (4) 将框架肋骨分解成肋骨腹板(二维环板)和肋骨翼板(一维圆环)；

(5) 以厚板削斜过渡的中心点作为厚、薄板连接的分界点。

3 力学模型及内力与位移的关系式

(1) 力学模型

力学模型见图 1, 将框架肋骨处(节点①), 厚、薄板连接处(节点②), 普通肋骨处(节点③)切开, 耐压船体分解为三段受均布力 q 作用的弹性基础梁, 梁的端部受剪力 N 和力矩 M 的作用; 普通肋骨为一弹性支座, 承受压力 f_3 ; 厚、薄板连接处中曲面不一致产生一集中力矩 m_2 ; 框架肋骨腹板受均布力 f_1 和 f_0 ; 肋骨翼板受均布力 f_0 。节点①、②、③位移和转角分别为 δ_1 、 ϑ_1 、 δ_2 、 ϑ_2 、 δ_3 、 ϑ_3 。

(2) 内力与位移的关系式

根据弹性基础梁的基本理论求解^[2,4]可得梁的内力与位移关系。

a. 普通肋骨右端为半无限长弹性基础梁

$$\begin{cases} l_2 N_3^{(1)} = -\frac{q l_2^2}{12} b_1'' + K^{(2)} \left[a_1'' \psi^{(2)} + a_2'' \varphi_1^{(2)} + b_3'' \frac{\delta_2}{l_2} + b_5'' \vartheta_2 \right] \\ M_3^{(1)} = \frac{q l_2^2}{12} b_2'' + K^{(2)} \left[a_2'' \psi^{(2)} + a_3'' \varphi_1^{(2)} + b_4'' \frac{\delta_2}{l_2} + b_6'' \vartheta_2 \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$$b_1'' = \frac{6}{u_2}, \quad a_1'' = 8K_2^{(2)} u_2, \quad a_2'' = -2K_2^{(2)}, \quad b_3'' = 4K_2^{(2)} u_2, \quad b_5'' = (1+4u_2) K_2^{(2)}$$

$$b_2'' = \frac{6}{(2u_2)^2}, \quad a_3'' = \frac{K_2^{(2)}}{u_2}, \quad b_4'' = -K_2^{(2)}, \quad b_6'' = -K_2^{(2)} \left(1 + \frac{1}{2u_2} \right)$$

$$K_2^{(2)} = \frac{1}{6} \left(2u_2 \frac{t_3}{t_2} \right)^2 \chi_2(u_2), \quad K^{(2)} = \frac{Et_2^3}{(1-\mu^2) \chi_2(u_2) l_2}, \quad u_2 = \frac{0.642l_2}{\sqrt{Rt_3}}$$

$$u_2 = \frac{0.642l}{\sqrt{Rt_2}}, \quad q = (1-0.5\mu)p, \quad p \text{—水压力, MPa;}$$

一般情况下 $t_3 = t_2$ 。

b. 厚度为 t_2 、长度为 l_2 的有限长弹性基础梁

$$\begin{cases} l_2 N_3^{(2)} = \frac{q l_2^2}{12} b_1' - K^{(2)} \left[a_1' \psi^{(2)} + a_2' \varphi_1^{(2)} + b_3' \frac{\delta_2}{l_2} + b_5' \vartheta_2 \right] \\ M_3^{(2)} = \frac{q l_2^2}{12} b_2' - K^{(2)} \left[a_2' \psi^{(2)} + a_3' \varphi_1^{(2)} + b_4' \frac{\delta_2}{l_2} + b_6' \vartheta_2 \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$b_1' = 6\mu_1(u_2), \quad a_1' = 6K_1^{(2)} \mu_1(u_2) + \frac{2}{\mu_0(u_2)}, \quad a_2' = 1 + K_1^{(2)} \chi_2(u_2)$$

$$b_3' = 6K_1^{(2)} \mu_1(u_2), \quad b_5' = \frac{1-\mu_0(u_2)}{\mu_0(u_2)} + 3K_1^{(2)} \mu_1(u_2), \quad b_2' = \chi_2(u_2),$$

$$a_3' = \frac{\mu_1(u_2)}{2} + \frac{1}{6} \frac{\chi_2(u_2)}{\mu_0(u_2)}, \quad b_4' = K_1^{(2)} \chi_2(u_2), \quad b_6' = \frac{1-\mu_1(u_2)}{2} + \frac{1}{2} K_1^{(2)} \chi_2(u_2)$$

$$K_1^{(2)} = \frac{(2u_2)^4}{36} \chi_2(u_2)$$

$$\begin{cases} l_2 N_2 = \frac{q l_2^2}{12} \zeta_1^{(2)} + K^{(2)} \left[\frac{2l_1}{l_2} \zeta_2^{(2)} \psi^{(1)} + \zeta_3^{(2)} \varphi_1^{(1)} + \zeta_4^{(2)} \frac{\delta_1}{l_2} \right] \\ M_2^{(2)} = \frac{q l_2^2}{12} \xi_1^{(2)} + K^{(2)} \left[\frac{2l_1}{l_2} \xi_2^{(2)} \psi^{(1)} + \xi_3^{(2)} \varphi_1^{(1)} + \xi_4^{(2)} \frac{\delta_1}{l_2} \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$\begin{aligned} \zeta_1^{(2)} &= -6\mu_1(u_2) + \left[6K_1^{(2)} \mu_1(u_2) - \frac{2}{\mu_0(u_2)} \right] \eta_1 + [K_1^{(2)} \chi_2(u_2) - 1] \eta_4 \\ \zeta_2^{(2)} = \zeta_4^{(2)} &= \left[\frac{2}{\mu_0(u_2)} - 6K_1^{(2)} \mu_1(u_2) \right] \eta_2 - [K_1^{(2)} \chi_2(u_2) - 1] \eta_5 + 6K_1^{(2)} \mu_1(u_2) \\ \zeta_3^{(2)} &= 2 \left[6K_1^{(2)} \mu_1(u_2) - \frac{2}{\mu_0(u_2)} \right] \eta_3 + 2 [K_1^{(2)} \chi_2(u_2) - 1] \eta_6 - 2 \left[3K_1^{(2)} \mu_1(u_2) + \frac{\mu_0(u_2) - 1}{\mu_0(u_2)} \right] \\ \xi_1^{(2)} &= \chi_2(u_2) - [K_1^{(2)} \chi_2(u_2) - 1] \eta_1 - \left[\frac{\chi_2(u_2)}{6\mu_0(u_2)} - \frac{\mu_1(u_2)}{2} \right] \eta_4 \\ \xi_2^{(2)} = \xi_4^{(2)} &= [K_1^{(2)} \chi_2(u_2) - 1] \eta_2 - K_1^{(2)} \chi_2(u_2) + \left[\frac{\chi_2(u_2)}{6\mu_0(u_2)} - \frac{\mu_1(u_2)}{2} \right] \eta_5 \\ \xi_3^{(2)} &= 2 [1 - K_1^{(2)} \chi_2(u_2)] \eta_3 - [1 - K_1^{(2)} \chi_2(u_2) - \mu_1(u_2)] - 2 \left[\frac{\chi_2(u_2)}{6\mu_0(u_2)} - \frac{\mu_1(u_2)}{2} \right] \eta_6 \\ \eta_1 &= \frac{b_1 a_3 - b_2 a_2}{a_1 a_3 - a_2}, \quad \eta_2 = \frac{b_3 a_3 - b_4 a_2}{a_1 a_3 - a_2}, \quad \eta_3 = \frac{b_5 a_3 - b_6 a_2}{a_1 a_3 - a_2} \\ \eta_4 &= \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_1 a_3 - a_2}, \quad \eta_5 = \frac{a_1 b_4 - a_2 b_3}{a_1 a_3 - a_2}, \quad \eta_6 = \frac{a_1 b_6 - a_2 b_5}{a_1 a_3 - a_2} \\ a_1 &= a_1' + a_1'' + \frac{2EF_3 l_2^2}{K^{(2)} R^2}, \quad a_2 = a_2' + a_2'', \quad a_3 = a_3' + a_3'' \\ b_1 &= b_1' + b_1'', \quad b_2 = b_2' - b_2'', \quad b_3 = b_3' + b_3'' + \frac{EF_3 l_2^2}{K^{(2)} R^2} \\ b_4 &= b_4' + b_4'', \quad b_5 = b_5' + b_5'' + \frac{EF_3 l_2^2}{K^{(2)} R^2}, \quad b_6 = b_6' + b_6'' \end{aligned}$$

c. 厚度为 t_1 、长度为 l_1 的有限长弹性基础梁

$$\begin{cases} l_1 N_2^{(1)} = \frac{q l_1^2}{12} \zeta_1^{(1)} - K^{(1)} \left[\zeta_2^{(1)} \psi^{(1)} + \zeta_3^{(1)} \varphi_1^{(1)} + \zeta_4^{(1)} \frac{\delta_1}{l_1} \right] \\ M_2^{(1)} = \frac{q l_1^2}{12} \xi_1^{(1)} - K^{(1)} \left[\xi_2^{(1)} \psi^{(1)} + \xi_3^{(1)} \varphi_1^{(1)} + \xi_4^{(1)} \frac{\delta_1}{l_1} \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$\begin{aligned} \zeta_1^{(1)} &= 6\mu_1(u_1), \quad \zeta_2^{(1)} = 6K_1^{(1)} \mu_1(u_1) + \frac{2}{\mu_0(u_1)}, \quad \zeta_3^{(1)} = K_1^{(1)} \chi_2(u_1) + 1, \quad \zeta_4^{(1)} = 6K_1^{(1)} \mu_1(u_1) \\ \xi_1^{(1)} &= \chi_2(u_1), \quad \xi_2^{(1)} = K_1^{(1)} \chi_2(u_1) + 1, \quad \xi_3^{(1)} = \frac{\chi_2(u_1)}{6\mu_0(u_1)} + \frac{\mu_1(u_1)}{2}, \quad \xi_4^{(1)} = K_1^{(1)} \chi_2(u_1) \\ K_1^{(1)} &= \frac{(2u_1)^4}{36} \chi_2(u_1), \quad K^{(1)} = \frac{Et_1^3}{(1-\mu^2)\chi_2(u_1)l_1}, \quad u_1 = \frac{0.642l_1}{\sqrt{Rt_1}} \end{aligned}$$

$$\begin{cases} l_1 N_1^{(1)} = -\frac{ql_1^2}{12} \xi_1^{(0)} + K^{(1)} \left[\xi_2^{(0)} \psi^{(1)} + \xi_3^{(0)} \varphi_1^{(1)} + \xi_4^{(0)} \frac{\delta_1}{l_1} \right] \\ M_1^{(1)} = \frac{ql_1^2}{12} \xi_1^{(0)} - K^{(1)} \left[\xi_2^{(0)} \psi^{(1)} + \xi_3^{(0)} \varphi_1^{(1)} + \xi_4^{(0)} \frac{\delta_1}{l_1} \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$$\begin{aligned} \xi_1^{(0)} &= 6\mu_1(u_1), \xi_2^{(0)} = 6K_1^{(1)} \mu_1(u_1) - \frac{2}{\mu_0(u_1)}, \xi_3^{(0)} = K_1^{(1)} \chi_2(u_1) - 1, \xi_4^{(0)} = 6K_1^{(1)} \mu_1(u_1) \\ \xi_1^{(0)} &= \chi_2(u_1), \xi_2^{(0)} = K_1^{(1)} \chi_2(u_1) - 1, \xi_3^{(0)} = \frac{\chi_2(u_1)}{6\mu_0(u_1)} - \frac{\mu_1(u_1)}{2}, \xi_4^{(0)} = K_1^{(1)} \chi_2(u_1) \end{aligned}$$

d. 框架肋骨腹板径向位移 $u(r)$ 与 f_0 、 f_1 的关系

$$u(r) = \frac{1}{E} \left\{ \mp \frac{(1+\mu)R_f^2 R^2 + (1-\mu)R^2 r^2}{(R^2 - R_f^2)t_4 r} f_1 \pm \frac{(1+\mu)R_f^2 R^2 + (1-\mu)R_f^2 r^2}{(R^2 - R_f^2)t_4 r} f_0 \right\} \quad (6)$$

式中“ \mp ”、“ \pm ”符号,上符号为外框架肋骨,下符号为内框架肋骨。

4 问题求解

4.1 节点③平衡条件

$$\begin{cases} N_3^{(1)} - N_3^{(2)} + f_3 = 0 \\ M_3^{(2)} - M_3^{(1)} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中 $f_3 = \frac{EF_3}{R^2} \delta_3$, F_3 —节点③处普通肋骨剖面面积。

由平衡条件式(7)可解得

$$\begin{cases} \psi^{(2)} = \eta_1 \frac{ql_2^2}{12K^{(2)}} - \eta_2 \frac{\delta_2}{l_2} - \eta_3 \vartheta_2 \\ \varphi_1^{(2)} = \eta_4 \frac{ql_2^2}{12K^{(2)}} - \eta_5 \frac{\delta_2}{l_2} - \eta_6 \vartheta_2 \end{cases} \quad (8)$$

4.2 节点②平衡条件

$$\begin{cases} N_2^{(2)} - N_2^{(1)} = 0 \\ M_2^{(2)} - M_2^{(1)} + m_2 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $m_2 = \frac{pR}{2} \Delta \cdot \varepsilon = \frac{qR}{2(1-0.5\mu)} \Delta \cdot \varepsilon$; Δ 为相邻厚、薄板中曲面之间的距离, mm; ε 为考虑轴向力偏心

引起的力矩符号参数,当外表面重合时为-1,中面重合时为0,内表面重合时为1。

由平衡条件式(9)可解得

$$\begin{cases} \psi^{(1)} = \frac{q}{12} g_1 + g_2 \delta_1 \\ \varphi_1^{(1)} = \frac{q}{12} g_3 + g_4 \delta_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中:

$$\begin{aligned}
 g_1 &= \frac{e_3 e_6 - e_2 e_7}{e_1 e_6 - e_2 e_5}, \quad g_2 = \frac{e_4 e_6 - e_2 e_8}{e_1 e_6 - e_2 e_5}, \quad g_3 = \frac{e_1 e_7 - e_3 e_5}{e_1 e_6 - e_2 e_5}, \quad g_4 = \frac{e_1 e_8 - e_4 e_5}{e_1 e_6 - e_2 e_5} \\
 e_1 &= \frac{2l_1 K^{(2)} \xi_2^{(2)} + K^{(1)} \xi_2^{(1)}}{l_2^2}, \quad e_2 = \frac{K^{(2)} \xi_3^{(2)} + K^{(1)} \xi_3^{(1)}}{l_2}, \\
 e_3 &= l_1 \xi_1^{(1)} - l_2 \xi_1^{(2)}, \quad e_4 = -\frac{K^{(2)} \xi_4^{(2)}}{l_2^2} - \frac{K^{(1)} \xi_4^{(1)}}{l_1}, \\
 e_5 &= \frac{2l_1 K^{(2)} \xi_2^{(2)} + K^{(1)} \xi_2^{(1)}}{l_2}, \quad e_6 = K^{(2)} \xi_3^{(2)} + K^{(1)} \xi_3^{(1)}, \\
 e_7 &= l_1^2 \xi_1^{(1)} - l_2^2 \xi_1^{(2)} - \frac{6R\Delta \cdot \varepsilon}{(1-0.5\mu)}, \quad e_8 = -\frac{K^{(2)} \xi_4^{(2)}}{l_2} - \frac{K^{(1)} \xi_4^{(1)}}{l_1}
 \end{aligned}$$

4.3 节点①平衡条件

$$\begin{cases} N_2^{(1)} - N_1^{(1)} - f_1 = -2N_1^{(1)} - f_1 = 0 \\ M_1^{(2)} = M_1^{(1)} \end{cases} \quad (11)$$

由平衡条件式(11)可得

$$\delta_1 = \frac{2N_0^{(1)} - f_1}{2G_1} \quad (12)$$

式中:

$$\begin{aligned}
 N_0^{(1)} &= \frac{q}{12} \left(l_1 \xi_1^{(0)} - \frac{K^{(1)}}{l_1} \xi_2^{(0)} g_1 - \frac{K^{(1)}}{l_1} \xi_3^{(0)} g_3 \right) \\
 G_1 &= \frac{K^{(1)}}{l_1} \xi_2^{(0)} g_2 + \frac{K^{(1)}}{l_1} \xi_3^{(0)} g_4 + \frac{K^{(1)}}{l_1^2} \xi_4^{(0)}
 \end{aligned}$$

4.4 框架肋骨求解

根据框架肋骨根部($r=R$)处耐压船体挠度与肋骨腹板根部位移相等,及肋骨腹板顶部($r=R_f$)处与肋骨翼板位移相等,可求得框架肋骨作用力 f_0 、 f_1 ^[9]。

$$\begin{cases} f_0 = \frac{N_0^{(1)} M}{G_1} \\ J \cdot M - \left(L - \frac{R_f^2}{EF_f} \right) \left(K + \frac{1}{2G_1} \right) \\ f_1 = \frac{- \left(L - \frac{R_f^2}{EF_f} \right) \frac{N_0^{(1)}}{G_1}}{J \cdot M - \left(L - \frac{R_f^2}{EF_f} \right) \left(K + \frac{1}{2G_1} \right)} \end{cases} \quad (13)$$

式中:

$$\begin{aligned}
 J &= \pm \frac{R}{Et_4} \frac{2m^2}{1-m^2}, \quad K = \mp \frac{R}{Et_4} \frac{(1-\mu) + (1+\mu)m^2}{1-m^2} \\
 L &= \pm \frac{R}{Et_4} \frac{(1+\mu)m + (1-\mu)m^3}{1-m^2}, \quad M = \mp \frac{R}{Et_4} \frac{2m}{1-m}
 \end{aligned}$$

$m = \frac{R_f}{R}$, 其中“±”或“干”符号, 上符号为外框架肋骨, 下符号为内框架肋骨。

对于无翼板的矩形肋骨, $f_0=0$, 且

$$f_1 = \frac{N_0^{(1)} / G_1}{K+1 / (2G_1)} \quad (14)$$

如果设定框架肋骨为弹性支座, 则支座承受的压力 f_1 为

$$f_1 = \frac{2N_0^{(1)} EF}{2G_1 R^2 + EF} \quad (15)$$

式中 F 为框架肋骨横剖面面积。

4.5 内部平面舱壁

平面舱壁区域船体结点其结构型式见图 2。将内部平面舱壁视为一个特殊的内框架肋骨, 其翼板面积 F_f 为零 (即无翼板), 翼板半径 R_f 为零, 腹板厚度为折算厚度 \tilde{t}_4 ,

$$\tilde{t}_4 = h_2 + \frac{F_H}{2R} + (h_1 - h_2) \frac{l_0}{R} \quad (16)$$

式中: F_H 为不带附连翼板的垂直加强材的横剖面总面积。

对于平面舱壁, $R_f=0$, 则 $m=R_f/R=0$, 且 $J=M=0$, 可得与 (14) 式相同的 f_1 表达式, 如果假定平面舱壁为弹性支座, 则

$$f_1 = \frac{2N_0^{(1)} E\tilde{F}}{2G_1 R^2 + E\tilde{F}} \quad (17)$$

式中 \tilde{F} 为平面舱壁相当面积, 建议取

$$\tilde{F} = 0.9R\tilde{t}_4 \quad (18)$$

若舱壁板相对嵌入厚板为非对称布置, 则应计算两次: 即 $\left(\begin{matrix} l_1=l_1 \\ l_2=l-l_1 \end{matrix} \right)$ 和 $\left(\begin{matrix} l_1=l_1' \\ l_2=l-l_1' \end{matrix} \right)$ 。当有一边尺度大于 l 时, 按最小的一边进行一次计算。如果厚板两边都大于 l 时, 按等厚壳计算。

5 主要应力计算

5.1 框架肋骨或舱壁处船体壳体纵向和周向应力

$$\begin{cases} \sigma_1 = -\frac{pR}{2t_1} \pm \frac{6M_1^{(1)}}{t_1} \quad (\text{上符号为外表面, 下符号为内表面}) \\ \sigma_2 = -\frac{E\delta_1}{R} + \mu\sigma_1 \end{cases} \quad (19)$$

5.2 框架肋骨应力计算

(1) 肋骨翼板应力

$$\sigma_f = -\frac{f_0 R_f}{F_f} \quad (20)$$

(2) 肋骨腹板上任意一点的应力

$$\begin{cases} \sigma_r = \pm \frac{\left(1 - \frac{R_f^2}{r^2}\right)}{(1-m^2)t_4} f_1 \pm \frac{\left(\frac{R^2}{r^2} - 1\right)m^2}{(1-m^2)t_4} f_0 \\ \sigma_\theta = \pm \frac{\left(1 + \frac{R_f^2}{r^2}\right)}{(1-m^2)t_4} f_1 \mp \frac{\left(\frac{R^2}{r^2} + 1\right)m^2}{(1-m^2)t_4} f_0 \end{cases} \quad (21)$$

式中:上符号为外框肋,下符号为内框肋。

5.3 厚、薄板突变处薄板一侧的应力

$$\begin{cases} \sigma_1 = -\frac{pR}{2t_2} \pm \frac{6M_2^{(2)}}{t_2} \quad (\text{上符号为外表面,下符号为内表面}) \\ \sigma_2 = -\frac{E\delta_2}{R} + \mu\sigma_1 \end{cases} \quad (22)$$

式中 $\delta_2 = \delta_1 + 2l_1\psi^{(1)}$ 。

6 框架肋骨实例计算分析

(1) 框架肋骨船体结点基本参数

$R=4080\text{mm}, t_1=48\text{mm}, t_2=t_3=34\text{mm}, l=642.6\text{mm}, l_1=322\text{mm}, l_2=320.6\text{mm};$

普通肋骨 $T = \frac{120 \times 24}{238 \times 24}$, 肋骨剖面面积 $F_3=8592\text{mm}^2$;

框架肋骨 $T = \frac{365 \times 48}{1000 \times 34}$, 框肋剖面面积 $F=51520\text{mm}^2$;

框肋翼板剖面面积 $F_f=17520\text{mm}^2$;

$R_f = \begin{cases} R+1000=5080\text{mm} (\text{外框肋}) (\text{略去板厚影响}) \\ R-1000=3080\text{mm} (\text{内框肋}) \end{cases};$

$p=6.4\text{MPa}, q=(1-0.5\mu)p=5.44\text{MPa}。$

(2) 计算结果(见表1)

7 分析与结论

分析表1计算结果,可以得出下列一些结论:

a. 内框肋的挠度小于相应的外框肋,说明内框肋的刚度大于外框肋,由此引起内框肋根部壳板内表面纵向应力(设计时的主要控制应力)明显大于相应的外框肋。

b. 将框肋简化为弹性支座,对框肋根部的壳板应力有一定影响,其结果介于外框肋和内框肋之间,几乎是内、外框肋结果的平均值。因此,弹性支座方法引起的偏差,对于外框肋是偏于安全的,对于内框肋是不安全的,在本算例中的内框肋根部壳板内表面纵向应力偏差已超过5%,不能忽视。

c. 框架肋骨邻近的普通肋骨对框肋处的纵弯影响还是比较明显的,如本算例使框肋处壳板内表面纵向应力下降约15%。

表 1 框架肋骨计算结果
Tab.1 Numerical results of the connection of pressure hull and frame stiffner

计算方法		挠度与应力		框肋根部 处 挠度 (mm)	框肋翼板 处 挠度 (mm)	框肋处壳板内 表面纵向应力 (MPa)	框肋处壳板外 表面纵向应力 (MPa)	厚薄板连接处 薄板—侧内表 面纵向应力 (MPa)	厚薄板连接处 薄板—侧外表 面纵向应力 (MPa)	框肋翼板应力 (MPa)
本文方法	外框肋	$\epsilon=1$		3.92	3.52	-767.95	223.95	-145.43	-622.57	-135.99
		$\epsilon=0$		4.35	3.92	-732.37	188.37	-327.26	-440.74	-151.15
		$\epsilon=-1$		4.78	4.31	-696.31	152.31	-509.39	-258.61	-166.14
	内框肋	$\epsilon=1$		2.86	2.87	-856.57	312.57	-145.92	-622.08	-182.38
		$\epsilon=0$		3.18	3.19	-830.86	286.86	-327.80	-440.20	-202.71
		$\epsilon=-1$		3.49	3.50	-804.59	260.59	-509.98	-258.02	-222.81
本文方法将框肋 作为弹性支座	外框肋	$\epsilon=1$		3.35	3.35	-815.59	271.59	-146.20	-621.80	-161.16
		$\epsilon=0$		3.73	3.73	-784.66	240.66	-327.55	-440.45	-179.12
		$\epsilon=-1$		4.10	4.10	-753.80	209.80	-509.70	-258.30	-196.88
有限元方法	外框肋	$\epsilon=0$		4.56	4.00	-854.92	310.92	-314.93	-453.07	-154.37
		$\epsilon=0$		3.41	3.20	-951.08	407.08	-315.33	-452.67	-203.81
	内框肋	$\epsilon=1$		3.87	3.48	-779.8	235.9	-149.8	-614.6	-137.1
		$\epsilon=0$		4.29	3.87	-743.4	199.5	-331.5	-434.1	-152.2
	外框肋	$\epsilon=-1$		4.72	4.25	-707.0	163.1	-513.3	-253.4	-167.2
		$\epsilon=1$		2.83	2.84	-857.0	313.3	-137.5	-626.6	-184.5
内框肋	$\epsilon=0$		3.14	3.15	-831.1	287.2	-320.0	-445.2	-204.8	
	$\epsilon=-1$		3.46	3.47	-805.0	261.2	-502.5	-263.8	-225.2	

本方法不考虑邻近肋骨及中曲面不一致影响

有限元方法

d. 厚、薄板连接处中曲面不一致引起的附加力矩 m_2 对框肋根部壳板纵弯有一定影响, 当 $\varepsilon=-1$ 时应力为最小。当然, m_2 对连接处的纵弯影响较大, 为了降低这一影响, 应尽量考虑中面重合, 若做不到, 也应选择外表面重合 ($\varepsilon=-1$), 这样可以获得框肋处壳板最小的内表面纵向应力和薄板一侧相对较小的内表面纵向应力 (相对 $\varepsilon=1$ 时薄板一侧产生较大的外表面纵向应力而言)。

e. 本文方法计算结果与有限元计算结果相当一致, 证明本文提出的解析方法是正确可靠的, 可直接用于工程设计。

参 考 文 献:

- [1] GJB/Z21A-2001. 潜艇结构设计计算方法[S]. 2001.
- [2] 朱邦俊. 与大深度和高强度钢相适应的内部球面舱壁的结构型式和计算方法[R]. 无锡: 中国船舶科学研究中心科技报告, 02413, 2002.
- [3] 朱邦俊, 万正权. 环肋圆柱壳应力分析的一种新方法[J]. 船舶力学, 2004, 4(8): 61-67.
- [4] 朱邦俊, 万正权, 王永军. 潜艇耐压船体横向刚性构架区域的应力计算方法[R]. 无锡: 中国船舶科学研究中心科技报告, 2005.