

自由液面與隔艙數對船舶穩定度影響

王永聯

*國立高雄科技大學 造船及海洋工程系

關鍵詞:自由液面、隔艙、穩定度

摘要

本文探討在自由液面與隔艙數對穩定度影響，一般細長體船舶的船艙橫剖面佔整體70~80%，因此可用橫剖面探討船體傾斜時自由液面與隔艙數對船舶穩定度變化的影響。當隔艙數增加，我們發現船舶重心位置的改變量與隔艙數成平方縮小，也就是扶正力矩將減少變化。

前言

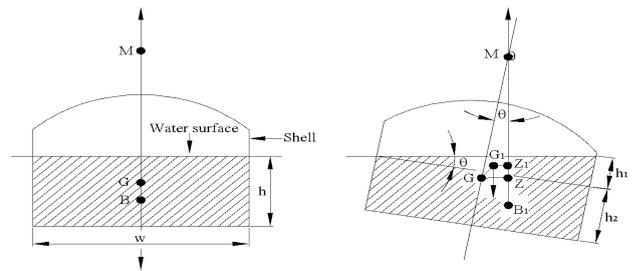
船舶航行海上常裝載原油與液態化學原料，當受風浪作用下，常造成重心改變進而翻覆，且船舶運動是屬於六軸的運動方程式，其關係相當複雜，雖可簡化為平面運動，在分析上仍有相當難度[1、2、3]。在海上航行船舶如果裝載液態原料時，遭受風浪作用將引起自由液面效應，可能造成船舶翻覆 [4、5]。一般裝載原油與液態原料的船舶形狀，可發現除船頭和船尾的幾何形狀變化較大外，其他船體的幾何形狀並未大幅改變，而一般船體寬長比小像細長體，船艙間的橫剖面形狀佔船體比例高，因此可採用船艙橫剖面來分析船舶橫向穩定性。

自由液面效應與隔艙分析

一般裝載液體船舶其船型為細長體(Slender body)，除船艙和船艙外的船體佔整體約80%，可依據橫剖面形狀做自由液面效應與隔艙分析，其結果幾乎可代表整體效應。

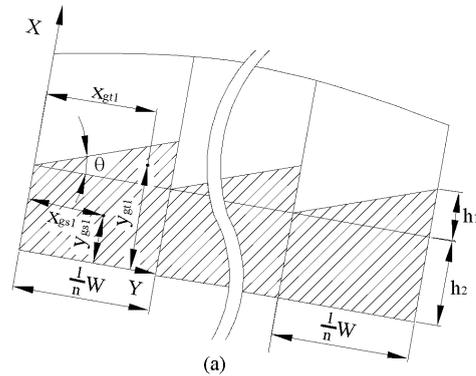
船舶運動船舶航行時常受波浪影響，造成翻覆的危險，尤其裝載液體如原油、化學液體原料和淡水等液體。當受側向波浪造成船體產生搖晃運動(roll motion)，如果裝載液體，液體會造成如圖(1)的傾斜，在假設定傾中心(M)沒有改變條件下，由於液體左傾，顯然重心(G)和浮心(B)位置都會改變，扶正力臂 GZ 將變為 G_1Z_1 ，當扶正力臂的改變造成扶正力矩減少，無法產生足夠回復力，造成船舶翻覆，因此以圖(1)為例，當船舶傾斜 θ 度時，估算扶正力臂的變化情形[6]。

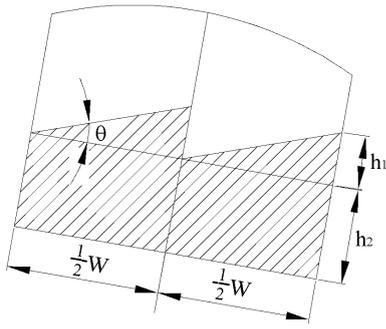
GG_1 是船舶傾斜 θ 度時重心的位移量，扶正力臂修正為 $G_1Z_1 = GM \sin \theta - GG_1 \sin \theta$ ，為了估算重心的位移量 GG_1 ，將計算船舶隔艙時重心的X軸和Y軸位移量。



圖(1)未隔艙的重心變化

當將船舶隔成 n 個相等的艙間，當船舶傾斜 θ 度時，重心與扶正力臂的變化情形如下。





(b)
圖(3) 隔艙的幾何關係

在隔艙時船舶傾斜 θ 度時，整體橫剖面面積與未傾斜時不變，因此

$$wh = n\left(\frac{1}{2} \frac{w}{n} \times \frac{w}{n} \tan \theta + \frac{1}{n} wh_2\right)$$

得

$$h = \frac{1}{2} \frac{w}{n} \tan \theta + h_2$$

(1)

在橫剖面中間的新重心位置X軸偏移距離位置

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n \rho\left(\frac{1}{n} wh_2 x_{gsi} + \frac{1}{2n} wh_1 x_{gti}\right) + w_s x_s}{\rho wh + w_s} - \frac{w}{2}$$

(2)

在橫剖面中間的新重心位置Y軸偏移距離位置

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \rho\left(\frac{1}{n} wh_2 y_{gsi} + \frac{1}{2n} wh_1 y_{gti}\right) + w_s y_s}{\rho wh + w_s} - \left(\frac{\rho wh \frac{h}{2} + w_s y_s}{\rho wh + w_s}\right)$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n \rho\left(\frac{1}{n} wh_2 y_{gsi} + \frac{1}{2n} wh_1 y_{gti}\right) + w_s y_s - \rho wh \frac{h}{2} - w_s y_s}{\rho wh + w_s}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n \rho\left(\frac{1}{n} wh_2 y_{gsi} + \frac{1}{2n} wh_1 y_{gti}\right) - \rho wh \frac{h}{2}}{\rho wh + w_s}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n \rho\left(\frac{1}{n} wh_2 y_{gsi} + \frac{1}{2n} wh_1 y_{gti}\right)}{\rho wh + w_s} - \frac{\rho wh \frac{h}{2}}{\rho wh + w_s}$$

(3)

在這裡 x_{gsi} 、 y_{gsi} 、 x_{gti} 、 y_{gti} 、 ρ 、 w_s 、 x_s 和

y_s 分別為第 i 個隔艙、方形重心距離X軸距離、方形重心距離Y軸距離、三角形重心距離X軸距離、三角形重心距離Y軸距離、裝載液體密度、單位船剖面重量、單位船剖面重心距離X軸距離和單位船剖面重心距離Y軸距離。

一般單位船剖面重心在船舳 $x_s = w/2$ ，當隔艙 $n=1$ ：

$$h_1 = w \tan \theta, \quad (4.1)$$

$$h_2 = h - \frac{1}{2} w \tan \theta, \quad (4.2)$$

單位船剖面重心的幾何關係為 $x_{gs1} = \frac{w}{2}$ 、

$$y_{gs1} = \frac{h_2}{2} = \frac{1}{2}\left(h - \frac{1}{2} w \tan \theta\right), \quad x_{gt1} = \frac{2}{3} w \quad \text{和}$$

$$y_{gt1} = h_2 + \frac{h_1}{3} = h - \frac{1}{2} w \tan \theta + \frac{1}{3} w \tan \theta = h - \frac{1}{6} w \tan \theta.$$

新重心位置 X 軸偏移距離

$$x = \frac{\rho(wh_2 \times \frac{w}{2} + \frac{w}{2} \times w \tan \theta \times \frac{2}{3} w) + w_s \frac{w}{2}}{\rho wh + w_s} - \frac{w}{2}$$

$$= \frac{\rho\left(\frac{1}{2} w^2 h_2 + \frac{1}{3} w^3 \tan \theta\right) + \frac{1}{2} w_s w}{\rho wh + w_s} - \frac{w}{2}$$

$$= \frac{\rho\left(\frac{1}{2} w^2 h + \frac{1}{12} w^3 \tan \theta\right) + \frac{1}{2} w_s w}{\rho wh + w_s} - \frac{w}{2}$$

$$= \frac{\rho\left(\frac{1}{2} w^2 h + \frac{1}{12} w^3 \tan \theta\right) + \frac{1}{2} w_s w - \frac{1}{2} w(\rho wh + w_s)}{\rho wh + w_s}$$

$$= \frac{\rho w^3 \tan \theta}{12(\rho wh + w_s)}$$

(5.1)

新重心位置Y軸偏移距離

$$y = \frac{\rho\left\{wh_2 \times \frac{h_2}{2} + \frac{w}{2} \times w \tan \theta \times \left(\frac{1}{3} w \tan \theta + h_2\right)\right\}}{\rho wh + w_s} - \frac{\rho wh^2}{2(\rho wh + w_s)}$$

$$= \frac{\rho\left\{\frac{1}{2} wh_2^2 + \frac{1}{2} w^2 h_2 \tan \theta + \frac{1}{6} w^3 \tan^2 \theta\right\}}{\rho wh + w_s} - \frac{\rho wh^2}{2(\rho wh + w_s)}$$

$$= \frac{\rho\left\{\frac{1}{2} w\left(h - \frac{1}{2} w \tan \theta\right)^2 + \frac{1}{2} \times w^2 \left(h - \frac{1}{2} w \tan \theta\right) \tan \theta + \frac{1}{6} w^3 \tan^2 \theta\right\}}{\rho wh + w_s}$$

$$- \frac{\rho wh^2}{2(\rho wh + w_s)}$$

$$= \frac{\rho\left(\frac{1}{2} wh^2 + \frac{1}{24} w^3 \tan^2 \theta\right)}{\rho wh + w_s} - \frac{\rho wh^2}{2(\rho wh + w_s)}$$

$$= \frac{\rho w^3 \tan^2 \theta}{24(\rho wh + w_s)} \quad (5.2)$$

$$GG_1 = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$= \frac{\rho w^3 \tan \theta}{12(\rho wh + w_s)} \sqrt{1 + \frac{\tan^2 \theta}{4}}$$

(5.3)

從以上分析可清楚重心位置X軸偏移和Y軸上升情形。

當隔艙 $n=2$

$$h_1 = \frac{1}{2} w \tan \theta, \quad (6.1)$$

$$h_2 = h - \frac{1}{4} w \tan \theta,$$

(6.2)

重心的幾何關係為 $x_{gs1} = \frac{w}{4}$ 、

$$y_{gs1} = \frac{h_2}{2} = \frac{h}{2} - \frac{1}{8} w \tan \theta, \quad x_{gs1} = \frac{2}{3} \times \frac{w}{2} = \frac{w}{3},$$

$$y_{gr1} = h_2 + \frac{h_1}{3} = h - \frac{1}{4} w \tan \theta + \frac{1}{3} \times \frac{1}{2} w \tan \theta$$

$$= h - \frac{1}{12} w \tan \theta, \quad x_{gs2} = \frac{w}{2} + \frac{w}{4} = \frac{3}{4} w,$$

$$y_{gs2} = \frac{h_2}{2} = \frac{h}{2} - \frac{1}{8} w \tan \theta, \quad x_{gr1} = \frac{2}{3} \times \frac{w}{2} + \frac{w}{2} = \frac{5}{6} w \text{ 和}$$

$$y_{gr1} = h_2 + \frac{h_1}{3} = h - \frac{1}{12} w \tan \theta。$$

新重心位置 X軸偏移距離

$$x = \frac{\rho \left(\frac{1}{2} wh_2 x_{gs1} + \frac{1}{2} wh_2 x_{gs2} + \frac{1}{2 \times 2} wh_1 x_{gr1} + \frac{1}{2 \times 2} wh_1 x_{gr2} \right) + w_s}{\rho wh + w_s}$$

$$- \frac{w}{2}$$

$$= \frac{\rho \left\{ \frac{1}{2} wh_2 \left(\frac{1}{4} w + \frac{3}{4} w \right) + \frac{1}{4} wh_1 \left(\frac{1}{3} w + \frac{5}{6} w \right) \right\} + \frac{1}{2} w_s w}{\rho wh + w_s} - \frac{w}{2}$$

$$= \frac{\rho \left(\frac{1}{2} w^2 h_2 + \frac{7}{24} w^2 h_1 \right) + \frac{1}{2} w_s w}{\rho wh + w_s} - \frac{w}{2}$$

$$= \frac{\rho \left\{ \frac{1}{2} w^2 \left(h - \frac{1}{4} w \tan \theta \right) + \frac{7}{24} w^2 \times \frac{1}{2} w \tan \theta \right\} + \frac{1}{2} w_s w}{\rho wh + w_s} - \frac{w}{2}$$

$$= \frac{\rho \left(\frac{1}{2} w^2 h + \frac{1}{48} w^3 \tan \theta \right) + \frac{1}{2} w_s w - \frac{1}{2} w(\rho wh + w_s)}{\rho wh + w_s}$$

$$= \frac{\rho w^3 \tan \theta}{48(\rho wh + w_s)}$$

(7.1)

新重心位置距離船底

$$y = \frac{\rho \left(\frac{1}{2} wh_2 y_{gs1} + \frac{1}{2} wh_2 y_{gs2} + \frac{1}{4} wh_1 y_{gr1} + \frac{1}{4} wh_1 y_{gr2} \right)}{\rho wh + w_s}$$

$$- \frac{\rho wh \frac{h}{2}}{\rho wh + w_s}$$

$$= \frac{\rho \left\{ \frac{1}{2} wh_2 (y_{gs1} + y_{gs2}) + \frac{1}{4} wh_1 (y_{gr1} + y_{gr2}) \right\}}{\rho wh + w_s}$$

$$- \frac{\rho wh^2}{2(\rho wh + w_s)}$$

$$= \frac{\rho \left\{ \frac{1}{2} wh_2 \left(\frac{1}{2} h_2 + \frac{1}{2} h_2 \right) + \frac{1}{4} wh_1 \left(h - \frac{1}{12} w \tan \theta \right) \right\}}{\rho wh + w_s}$$

$$- \frac{\rho wh^2}{2(\rho wh + w_s)}$$

$$= \frac{\rho \left\{ \frac{1}{2} wh_2^2 + \frac{1}{4} wh_1 \left(h - \frac{1}{12} w \tan \theta \right) \right\}}{\rho wh + w_s} - \frac{\rho wh^2}{2(\rho wh + w_s)}$$

$$= \frac{\rho \left\{ \frac{1}{2} w \left(h - \frac{1}{4} w \tan \theta \right)^2 + \frac{1}{2} w \times \frac{1}{2} w \tan \theta \left(h - \frac{1}{12} w \tan \theta \right) \right\}}{\rho wh + w_s}$$

$$- \frac{\rho wh^2}{2(\rho wh + w_s)}$$

$$= \frac{\rho \left(\frac{1}{2} wh^2 + \frac{1}{96} w^3 \tan^2 \theta \right)}{\rho wh + w_s} - \frac{\rho wh^2}{2(\rho wh + w_s)}$$

$$= \frac{\rho w^3 \tan^2 \theta}{96(\rho wh + w_s)}$$

(7.2)

$$GG_1 = \frac{\rho w^3 \tan \theta}{48(\rho wh + w_s)} \sqrt{1 + \frac{\tan^2 \theta}{4}}$$

(7.3)

從以上分析可清楚重心位置偏移。

隔成三艙間 $n=3$ ，可表成如下

$$h_1 = \frac{w}{3} \tan \theta,$$

(8.1)

$$h_2 = h - \frac{w}{6} \tan \theta$$

(8.2)
重心位置X軸偏移

$$x = \frac{\rho w^3 \tan \theta}{108(\rho w h + w_s)} \quad (9.1)$$

Y軸上升

$$y = \frac{\rho w^3 \tan^2 \theta}{216(\rho w h + w_s)} \quad (9.2)$$

(9.2)

$$GG_1 = \frac{\rho w^3 \tan \theta}{108(\rho w h + w_s)} \sqrt{1 + \frac{\tan^2 \theta}{4}} \quad (9.3)$$

(9.3)

數值模擬

現在以單層殼鋼質的船舶資料做數值模擬，船舶資料如下：

一、主要尺寸：總長194.51公尺、寬31.00公尺、深15.80公尺

二、輕載排水噸位：9735噸

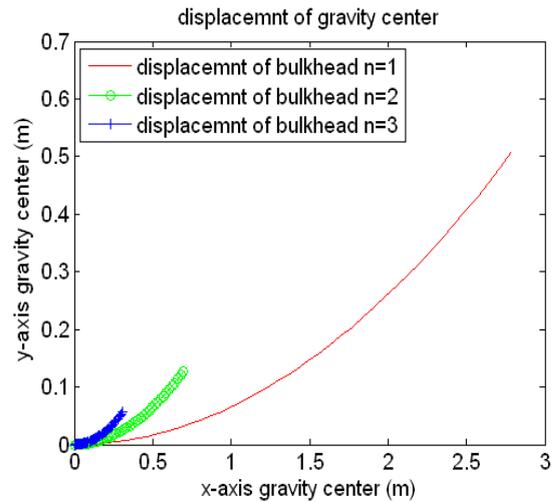
三、滿載排水噸位：51001噸

四、載重噸位：41266噸 (51001-9736=41266)

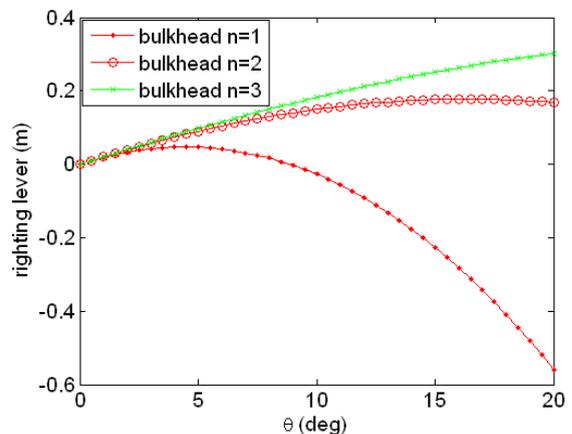
一般油輪船型(oil tanker) 的 C_B 約0.75~0.8、 C_p 約0.70~0.84和 C_M 約0.98~0.99，由 C_B 和 C_M 可知船型除船頭和船艉外，整體近似長方體，將輕載排水噸位和載重噸位平均分布在長方體上，因此每公尺的輕載排水噸位為 $9735/194.51=50.05$ (噸/m)，每公尺載重噸位為 $41266/194.51=212.15$ (噸/m)，重心距船底為 $KG=4.48$ (m)和 $GM=1.2$ (m)，船底到定傾中心高度為 5.67 (m)。

當載重為原油密度為 0.81 噸/ m^3 ，因此滿載時原油高度為 $212.15/(31*1*0.81)=8.44$ (m)，滿載時原油重心高度為 $8.44/2=4.22$ ，因此滿載時整體重心距船底的高度為 $KG=(4.48*50.05+212.15*8.44/2)/(50.05+212.15)=4.27$ (m)，在此可發現整體重心距船底的高度和原油重心高度相差 0.05 m相當小，在分析整體重心高度時，是可以忽略船殼影響。

為模擬船舶傾斜時，靜態重心位移造成扶正力臂變化情形，將使用方程式(4)~(9)、以船寬 $B=31$ (m)、 $KG=4.48$ (m)、 $GM=1.2$ (m)、原油密度為 0.81 噸/ m^3 和滿載時原油高度 8.44 (m)，在船舶傾斜從 $0\sim 20^\circ$ 時，重心位移情形，如圖(5)，有隔艙重心位移變化明顯比未隔艙降低，而且隔艙數愈大愈明顯；圖(6)是在不同隔艙時的扶正力臂，未隔艙時扶正力臂降低甚至變為負值，在船體傾斜 8.5 deg時扶正力臂降為0值，而隔艙數愈多扶正力臂正值增加。



圖(5)不同隔艙的船舶重心位移



圖(6)不同隔艙的扶正力臂

結論

船舶自由液面效應與隔艙關係，可透過船艙幾何關係建立重心位移的關係式，經數值模擬可發現重心位移是隨隔艙數平方倍降低，因此在實際船舶監造，只要做2~3隔艙就會大幅降低重心變化；如果不隔艙自由液面效應影響高，船舶扶正力臂會隨船舶橫搖角度加大變成負值，將造成船舶翻覆。

參考文獻

1. Yasuo Yoshimura, "Mathematical Model for Manoeuvring Ship Motion (MMG Model)," Workshop on Mathematical Models for Operations involving Ship-Ship Interaction August 2005 Tokyo, pp.1~6.
2. Yasuo Yoshimura, "Mathematical Model for the Manoeuvring Ship Motion in Shallow Water (3rd Report)," J. of KSNJ vol. 211, pp.115-126, 1988.

3. Wu Xiuheng, Liu Zuyuan, Shi Shengda, Feng Xuezhi. Ship maneuverability. National Defense Industry Press. 2005.

4. C.B. Barrass and Captain D.R. Derrett. Ship Stability for Masters and Mates (Sixth Edition). 2006, Pages 51–55,

Copyright © 2006 Elsevier Ltd. All rights reserved.

5. Adrian Biran, Ruben Lopez Pulido. Ship Hydrostatics and Stability. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2003.

6. D. A. Taylor, Alan S. T. Tang. 2006. Merchant Ship Naval Architecture. IMarEST.

The influence of Ship Stability under free surface effect and compartment number

Wang Yung-Lien

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Taiwan, R.O.C.

Keywords: free surface effect, stability, wave action

ABSTRACT

In this study, the stability of a ship under the free surface effect and wave action is investigated. The mid-cross-sectional shape of a liquid-carrying ship accounts for approximately 70–80% of the ship. Therefore, the changes in ship stability under different inclination conditions and compartment number can be analyzed based on the cross-section. When the compartment number increases, we find that the change in the position of the ship's center of gravity shrinks as the square of the compartment number; also, the righting moment will slightly decrease.