

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 全船簡化區塊結構模型分析船舶碰撞與擱淺之抗撞性能

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2611-E-002-015-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系暨研究所

計畫主持人：洪振發

計畫參與人員：彭彥惇 陳世昌 姚俊璋

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 1 月 7 日

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

## 全船簡化區塊結構模型分析船舶碰撞 與擱淺之抗撞性能

計畫類別：個別型計畫      整合型計畫

計畫編號：NSC 91 - 2611 - E - 002 - 015 -

執行期間： 91年 8月 1日至 92年 7月 31日

計畫主持人：洪振發

共同主持人：

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：台灣大學工學院造船及海洋工程學系

中華民國 92年 10月 1日

# 全船簡化區塊結構模型分析船舶碰撞與擱淺之抗撞性能

計劃編號：NSC91-2611-E-002-015

執行期限：九十一年八月一日至九十二年七月三十一日

計劃主持人：洪振發 研究人員：彭彥惇 陳世昌 姚俊璋

國立台灣大學工程科學及海洋工程學系

## 一、摘要

本研究以能量法來估算船體碰撞或擱淺結構之損壞狀況。估算過程假設撞擊前與撞擊後運動能損失，為結構塑性化吸能與結構件摩擦消能的總和。為便於工程應用，依船體結構之構造特性劃分區塊結構，以區塊結構逐次估算結構件損壞吸能，累積破壞區的總內能，達到運動能扣除摩擦能的能量損失為止。結構破壞吸能估算系統依據結構受力與變形狀況分成六種結構破壞吸能模式。

在船舶碰撞與擱淺時以船體總動量不變條件，估算整體運動能的損失。同時從碰撞前後之運動狀況、結構全塑化與失效模型的吸能機制，以能量平衡原理，估算整體破壞狀況與區塊結構能量分佈狀況。

估算方法以有限元素法進行結構碰撞分析作為比較。

**關鍵詞：** 船舶、碰撞、擱淺、區塊結構、結構破壞、損壞模式、FEM。

## ABSTRACT

In this works, the damages of ship structures subjected to collision and grounding are estimated by an energy approach, in which the kinematical energy loss of moving ship after collision or grounding should equal to the summation of energy absorbed by damage structure parts and frictional resistance.

The ship structure is divided into block structures according to the construction types. The energy absorbed damaged structural blocks and frictional resistance of contacted blocks will be calculated and assembled to total damaged energy sequentially, until the energy has been balanced. 6 energy absorption modes have classified according to loading and failure state of structures. Only the plastic energy is taken into consideration.

The principle of conservation of momentum of ships is used to predicate the motion states of ship after collision or grounding, and the loss of kinematical energy. The approximations of energy absorbed by damaged structures for each energy absorption mode are compared with the results calculated by finite element method.

**Keywords:** Ship, collision, grounding, block structures, structure damage, failure model, FEM

## 二、研究計畫動機與目的

近年船舶愈來愈大，速度也快，雖可降低運輸成本，提高運輸效率，但船舶在航運過程遭遇碰撞與擱淺的或然率也增高，尤其對於油輪、液化油品船、化學船等，在碰撞與擱淺後所造成的傷害與環境污染更為嚴重。以勞氏驗船協會的全球船舶意外事故統計資料為例[1,2]，1995年到1996年共有367艘船完全損失，其中1/3是因碰撞與擱淺所致。

龐大的運動船體含帶巨大動能與動量在碰撞或擱淺時，局部碰撞接觸區在短時間內進行能量轉換，以致結構在短時間內超越線彈性範圍，進入塑性、大變形、不穩定的現象，甚至發生穿破、撕裂、摺皺等現象，而導致後續的船體進水，油品、化學品外流等嚴重災難。由於油輪碰撞或擱淺造成的災難，國際海事安全公約已對油輪的使用與建造提出要求如MAPOL 73/76/78, OPA90, TOCA等。各國驗船協會也對碰撞擱淺問題發展相關設計的估算方法[3-6]。ISSC94、97[7,8]，祁與崔[9]對過去10年的研究，作了整體性的檢討。

一般而言從船舶碰撞與擱淺的研究的方法概分成下面幾類：

- 針對事故發生的進行調查統計分析[9-11]
- 碰撞模型試驗或實船試驗[12-14]
- 整體或局部的詳細數值分析，一般採用FEM分析[15-18]。
- 採用簡化解析法或經驗式分別對船體整體結構估算或局部結構估算[19-27]。

船舶碰撞與擱淺問題就力學觀點需考慮材料非線性、幾何非線性、接觸與運動以及結構不穩定等問題。以船舶設計的觀點，碰撞與擱淺問題分成船體運動、船樑結構分析、結構耐撞強度、殘餘強度與船舶安全性等問題。由於船舶的複雜性，非線性暫態有限元素分析雖可得到不錯結果，但分析過程需要龐大的人力與計算時間，更重要者依分析問題重點的不同，不同分析參數，(如材料特性、網格分佈、時步大小、接觸條件、邊界條件、初始條件與

施力條件等) 影響分析結果甚巨, 如對碰撞船體本身的結構與力學狀況以及程式系統之特性不能充分掌握, 則很容易誤用, 而致分析結果不可信。

由船舶結構太複雜, 在船舶碰撞與擱淺所造成結構損壞研究較少直接採用詳細的破壞力學或衝擊穿甲等先進力學, 詳細分析裂縫成長、板殼穿刺、撕裂、剪切等過程。多數研究以巨觀的船體運動特性發展有效的簡化理論與試驗模型, 並發展簡化估算程序與設計式, 便於工程上的應用。且船舶碰撞與擱淺屬於低速的衝擊行為, 結構的破壞時間變化率不大, 如分析重點不在探討結構損壞過程的變化狀況, 而在結構衝擊過後的損壞結果, 則可以擬靜態分析與結構件塑化的簡化模型, 推算結構損壞與塑化的吸能狀況。為便於設計時檢核抗撞強度, 而將結構破壞依結構特性分成不同的破壞模式, 分別推導估算式。

由於簡化之故, 目前船舶耐撞強度與殘餘強度的研究成果多屬於特殊狀況與特殊結構型態, 應用上常有限制。

國內有關低速撞擊與高速衝擊已有一些研究, 其部份理論雖可應用於船舶碰撞與擱淺問題, 但由於船體大質量, 運動時挾帶著流體慣性力, 以及船體結構複雜, 而具問題特殊性, 必須對針船舶予以考慮, 才能有合理的假設。國內有關船體碰撞與擱淺的研究不多, 李雅榮教授在國科會計畫進行三年的研究[28]已完成部份的高速船舶結構碰撞的衝擊力過程的分析與抗撞能力的評估。

由於完全的船體 FEM 撞擊分析所需人力與計算量相當龐大, 過度簡化模式分析常不易掌握整體結構的相互關係, 本計畫建立一個合理簡化的分析系統, 將船體以簡化區塊結構模型組成全船結構, 進行船體碰撞與擱淺之動態結構分析以提高分析效率。

### 三、體碰撞與擱淺之系統能量方程式

#### 3.1 船體碰撞

假設 A 船具質量  $M_1$ , 以速度  $V_1^0$  行駛, 遭 B 船 (質量為  $M_2$ ) 以速度  $V_2^0$  前進撞擊, 座標系統如圖 1, 被撞船在  $x-y-z$  座標系統 (座標原點在 A 船中心) 向  $x$ -方向行進, 撞擊船原在  $x'-y'-z'$  座標系統 (座標原點在 B 船中心) 向  $x'$ -方向進行。假設碰撞後兩船連成一體, 共同在  $\xi-\eta-\zeta$  座標系統 (標原點在撞擊後兩船連接點) 向  $\xi$ -方向運動。從運動系統的動量與角動量不變原理, 可得兩船碰撞後之運動方程式為:

$$M_1 V_1^0 + M_2 V_2^0 = M_1 V_1^a + M_2 V_2^a \quad (1)$$

$$I_1 \omega_1^a + M_1 \xi_{G1} V_1^a \cos \alpha + I_2 \omega_2^a + M_2 \xi_{G2} V_2^a \sin \beta = M_1 \xi_{G1} V_1^a \cos \alpha + M_2 \xi_{G2} V_2^a \sin \beta \quad (2)$$

$$V_1^a \sin \alpha + \xi_{G1} \omega_1^a \cos \alpha + V_2^a \sin \beta + \xi_{G2} \omega_2^a \cos \beta = 0 \quad (3)$$

其中:  $M_1$  與  $M_2$  分別為被撞船與撞擊船的質量 (含流體附加質量);  $I_1$  與  $I_2$  分別為兩船的轉動慣量 (含附加質量);  $\alpha$  與  $\beta$  分別為兩船撞前的運動方向與撞擊後運動方向之夾角;  $\xi_{G1}$  與  $\xi_{G2}$  為兩船中心在撞擊後  $\xi-\eta-\zeta$  座標系統的座標值。  $V_1^a$ 、 $\omega_1^a$ 、 $V_2^a$  與  $\omega_2^a$  分別為兩船中心碰撞後之速度與角速度。

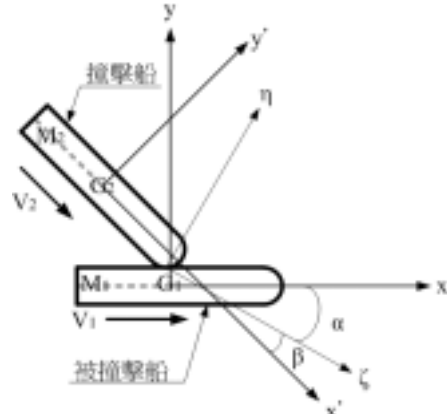


圖 1. 兩船撞擊前後之座標系統

則撞擊後運動能的損失為:

$$\Delta E_k = 0.5(M_1 V_1^{a2} + M_2 V_2^{a2} + I_1 \omega_1^{a2} + I_2 \omega_2^{a2}) + E_w - 0.5(M_1 V_1^0 + M_2 V_2^0) \quad (4)$$

其中,  $E_w$  為兩船撞擊激起流體運動的能量損失。式 (1) 與 (2) 所含的流體附加質與式 (4) 中的  $E_w$  在碰撞過程成頗為複雜的情況下, 估算時傾向於採用保守估計, 假設碰撞時間很短, 而不考慮  $E_w$ 。船體側移附加值量與船體值量比為 0.4~1.3, 撞擊時間小, 0.4 為可用值, 持續時間越長, 移附加值量與船體值量比越大。

在分析過程考慮較嚴荷狀況: 令  $M_2$  船以速度  $V_2^0$  側向撞擊  $M_1$  船。為簡化問題處理, 令  $M_1$  船靜止,  $M_2$  船座標與  $M_1$  船的  $x-y-z$  座標系統成  $90^\circ$ 。撞擊後  $\xi-\eta-\zeta$  座標與  $x'-y'-z'$  座標平行,  $\xi-\eta-\zeta$  座標原點在撞擊後兩船連接點。則式 (1), 與 (2) 可簡化為:

$$M_1 V_1^a + M_2 V_2^a = M_2 V_2^0 \quad (5)$$

$$I_1 \omega_1^a + M_1 \xi_{G1} V_1^a \cos \alpha = M_2 \xi_{G2} V_2^0 \cos \beta \quad (6)$$

假設兩船撞擊後黏在一起繼續  $M_2$  船前進方向則:

$$V_2^a = V_1^a + \xi_{G1} \omega_1^a \quad (7)$$

可得碰撞後船的速度與角速度為:

$$V_1^a = V_2^0 / (1 + M_1 \xi_{G1}^2 / I_1 + M_1 / M_2) \quad (8)$$

$$\omega_1^a = V_2^0 \times (M_1 \xi_{G1} / I_1) / (1 + M_1 \xi_{G1}^2 / I_1 + M_1 / M_2) \quad (9)$$

碰撞後運動能的損失為:

$$\Delta E_k = 0.5(M_1V_1^{a2} + M_2V_2^{a2} + I_1\omega_1^2) + E_w - 0.5M_2V_2^2 \quad (10)$$

船舶破撞或擱淺時，令船體阻力功率等於結構塑性變形與破壞以及碰撞結構表面摩擦力的能率，可表為下式：

$$F_R V = \dot{E}_p + \dot{E}_c + \dot{E}_f = F_p V + \int P_s \mu V_s dS \quad (11)$$

其中： $V$  與  $F_R$  分別為船體前進速度與阻力； $\dot{E}_p$  為結構塑性化吸能率； $\dot{E}_c$  為裂縫尖端能量消滅率； $\dot{E}_f$  為結構表面摩擦力消能率； $F_p$  為接觸破壞結構的受力總合；結構  $P_s$  為互撞結構接觸面的垂直壓力； $\mu$  為結構與礁岩的摩擦係數； $V_s$  為相撞結構接觸面的相對速度。上述  $V$ 、 $F_R$ 、 $F_p$ 、 $V_s$  與  $P_s$  等為時間函數。

### 3.2 船體擱淺

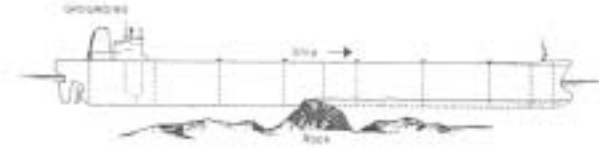


圖 2. 船舶擱淺示意圖

在擱淺的情況分析時常假設水下障礙物在船體碰撞後保持不動，船體損壞部份所吸收的能量與摩擦能量損失應等於船體碰撞前的運動能。船體結構的損傷依結構吸收能量的多寡而定。假設碰撞後彈性構件不儲存能量，擱淺時，流體擾動之動能損失不考慮。

船體擱淺前運動能為式(11)能率積分總和為：

$$\int F_R(t)V(t)dt = 0.5 \times MV_0^2 \quad (12)$$

## 四、結構損壞之變形能量

船舶碰撞或擱淺過程結構的變形狀況很難確定單純的損壞模式，只能概分為變形區與無變形區。尤其結構破裂或撕開後，無變形的結構穿入破壞變形的空間，使的變形狀況更為複雜。一般採用有限元素法直接分析，可有效模擬其破壞與變形狀況，如想模擬詳細變形過程常，則需採用很細的網格與很小的分析時步，否則 FEM 分析過程將因元素破壞、飛散而造成分析不穩定與結果錯誤。

在估算法不計算結構破壞變形過程的行為，只考慮可能破壞的部分，逐段預估破壞，累積破壞結構區塊能量。每個可能損壞常部分以擬靜態分析來預估破壞與塑性化狀態。實際上結構的破裂與變形

是隨時間改變的。

本研究將結構的破壞變形吸能模式分為下列六種：

1. 彎曲結構件的全塑化彎曲模式， $E_1$ 。  
承受側向力的板與樑結構，結構大變形破壞後，不考慮彈性彎曲力矩。樑結構考慮塑性鉸與軸向塑性變形能，板結構只考慮面內薄膜(membrane)塑性化吸能。
2. 板與樑結構的側向剪切破壞模式， $E_2$ 。  
板與樑結構承受側向力，剪應力很大時，板被穿破，樑被剪斷。
3. 板結構面內撕裂模式， $E_3$ 。  
承受面內衝擊力造成面內大變形、局部塑性化與剪切或撕裂。
4. 板與樑結構壓潰模式， $E_4$ 。  
結構的壓縮挫屈造成結構件的全塑化，板與樑結構產生側向大變形甚至摺皺變形。
5. 結構尖端裂縫擴展模式， $E_5$ 。  
結構件接近破裂區，裂縫尖端引致結構撕開與分離。
6. 結構直接拉伸斷裂模式， $E_6$ 。  
板與樑結構受拉力而致拉伸斷裂。

事實上，結構破壞時，常有多種上述模式同時存在，但簡化估算結構損壞吸能的計算式，同時考慮多種模式則不易處理。撞擊過後，在破壞的結構中，所有彈性應變能將釋放，只考慮塑性化吸能。

為便於工程應用，上述 6 種破壞模式吸能估算推導成損壞結構體積與吸能關係：

$$E_d = C(\epsilon_c, \text{變形型態, 幾何特性})\sigma_f R_V \quad (12)$$

各種破壞模式的能量常數， $C$ ，則個別依照其變形型態與幾何特性，推導或統計迴歸而得。

以有限元素分析，可對每一個元素進行應變能計算，但在估算法，不易分辨彈性變形與塑性變形。由破壞區塊依可能的衝擊力量與位置，循序就每個結構逐一計算其塑性化吸收能量，算到吸收能量與區塊結構的內能相等為止。工程應用上，需更進一步簡化，將結構分成區塊，由區塊結構估算破壞吸能，累積總估算能量與前述式(3)或(10)之運動能損失總量相當為止。這種估算含有誤差，但為較便捷可行的估算方法。

許多研究者以結構形分類透過系列探討（或統計迴歸）而歸納簡算式，此部分將在後續的延伸研究中逐次完成。

## 五、船體碰撞與擱淺結構損壞估算

本研究發展之船體碰撞與擱淺結構損壞估算系

統，在船舶碰撞情況，先依據式(4)到式(9)估算碰撞前後船體運動能之損失；在擱淺狀況暫假設擱淺後船體靜止，擱淺前之運動能完全損失。計算流程如下：

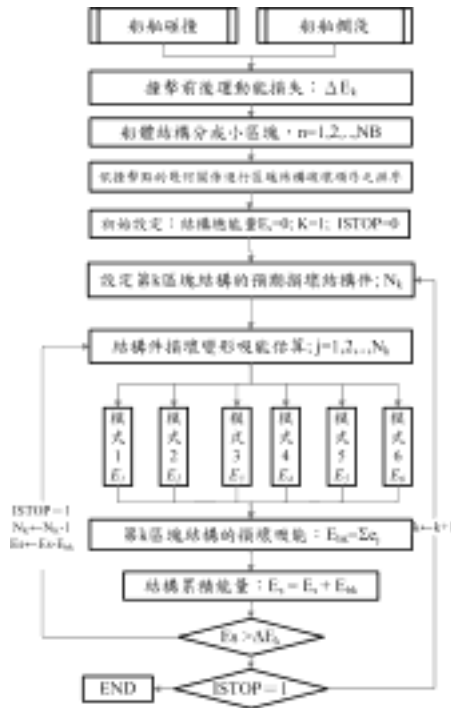


圖 3. 船舶碰撞與擱淺結構損壞分析流程

## 六、說明例

### 6.1 樑結構受撞擊破壞

一長為  $2l$  兩端固定樑，中央承受低速撞擊（如圖 4）其彎曲變形之撓度為：

$$w = \left( \frac{3x^2}{l^2} - \frac{2x^3}{l^3} \right) w_0 \quad (13)$$

其中： $w_0$  為樑中央之撓度。  
樑中央與兩端之撓度區率為

$$w' = 6w_0 / l^2 \quad (14)$$

則最大彎曲應變為：

$$\epsilon_b = 6(w_0 / l)(h / l) \quad (15)$$

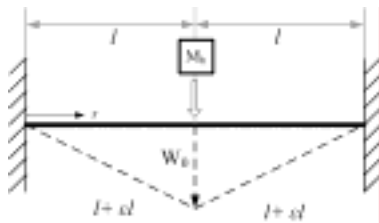


圖 4. 兩端固定量撞擊例

在樑兩端點與中點成全塑化時，樑軸向平均應變為

$$\epsilon_p = (l_p - l) / l = \sqrt{1 + (w_0 / l)^2} - 1 \approx 0.5 \times (w_0 / l)^2 \quad (16)$$

令樑最大應變為  $\epsilon_t = \epsilon_p + \epsilon_b$

當  $\epsilon_t$  等於材料破壞應變  $\epsilon_c$  時樑將斷裂：

$$\epsilon_c = 0.5(w_0 / l)^2 + 6(w_0 / l)(h / l) \quad (17)$$

由上式可得

$$(w_0 / l) = -6(h / l) + \sqrt{36(h / l)^2 + 2\epsilon_c} \quad (18)$$

樑破壞後吸收的能量為：

$$E_d = \sigma_f \times \epsilon_p \times (2lA) + \sigma_f Z_p (4w_0 / l) \quad (19)$$

其中  $Z_p$  為樑全塑化斷面模數； $A$  為樑斷面積； $\sigma_f$  為降伏應力與破壞應力之平均值。

以一矩形斷面樑為例，其「寬 x 高」為「 $b \times d$ 」則：

$$Z_p = bd^2 / 4 = Ah / 4 \quad (20)$$

代入式(7)則樑破壞時量吸收的能量為：

$$\begin{aligned} E_d &= \sigma_f A w_0 (w_0 / l) + \sigma_f Ah (w_0 / l) \\ &= \left( (w_0 / l)^2 + (h / l)(w_0 / l) \right) \sigma_f Al \\ &= C(\epsilon_c, \text{斷面幾何特性}) \sigma_f R_V \end{aligned} \quad (21)$$

為工程應用上的方便，估算式常推導成，單位體積能量常數（ $C$ ）乘上流應力（flow stress,  $\sigma_f$ ）與損壞結構件體積（ $R_V$ ）。

當  $h/l$  數值很小時，樑破壞時的撓度  $w_0$  遠大於  $h$ 。彎曲應變能部分可以忽略。

例： $h/l = 0.01$ ,  $\epsilon_c = 0.2$ ，由式(18)可得

$$w_0 / l = 0.575 \gg h / l$$

承受側向力的板結構破壞後，不考慮彈性彎曲力矩板結構只考慮面內薄膜（membrane）塑性破壞吸能，及式(17)與式(21)中，可略去  $(h/l)$  相關項。

**數值例：**方塊撞擊矩形斷面樑（圖 5）

樑尺寸：長 x 寬 x 高 =  $1m \times 0.1m \times 0.1m$

方塊尺寸：長 x 寬 x 高 =  $0.14m \times 0.1m \times 0.1m$

方塊初速度：30.87 (m/s)

材料特性

項目	樑	方塊*
彈性模數(Pa)	210e+9	210e+10
切線模數(Pa)	320e+6	320e+9
波森比	0.300	0.33
降服應力(Pa)	255e+6	255e+9
密度(Kg/m <sup>3</sup> )	7850	7850×40
破壞 $\epsilon_c$	0.2	0.2

註：\*方塊材料性質的設定係假設方塊不會損壞，且有足夠質量以提供足夠初始運動能以撞壞樑

方塊初始運動能為  $E_{k0} = 0.5M_b V^2 = 0.2095MJ$ 。

$l = 0.5m, A = 0.01m^2, h = 0.05m, h/l = 0.1$ 。

降服應力  $\sigma_y = 255MPa$ ，破壞應力  $\sigma_u = 319MPa$

$$\sigma_f = 0.5 \times (\sigma_y + \sigma_u) = 287MPa$$

假設樑斷面裂開到「樑高/4」時將折斷，此時

$h' = 0.0375m$ ， $h'/l = 0.075$ ，由式(16)計算  $w_0/l$

$$\frac{w_0}{l} = -6 \times 0.075 + \sqrt{36(0.075)^2 + 2 \times 0.2} = 0.3262$$

由式(8)可計算樑結構破壞吸收之能量為：

$$E_d = \sigma_f A (w_0/l)(w_0 + h') = 1.878MJ$$

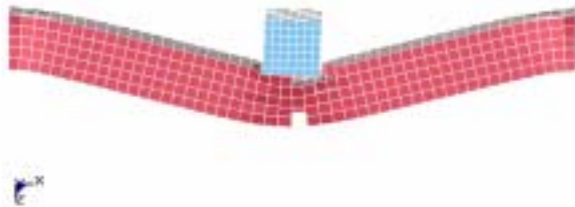


圖 5. 方塊低速撞擊兩端固定樑

應用 LS/DYNA 程式分析上述碰撞問題，在樑被撞斷後：

樑的內能為：0.1748MJ；樑的運動能為 0.0010MJ

方塊內能為：0.0017MJ；方塊運動能為 0.03204MJ

多餘能量係因分析結束時，樑與與方塊結構在破壞後不穩定之運動狀態，數值誤差尚未排除。

## 6.2 評比模型

美國海軍發展中心進行一系列的擱淺試驗，其目的在模擬 30,000~40,000 噸油輪擱淺狀況，模型比例為 1:5，撞在錐形礁岩(Rodd, 1996)。圖 6 為其中一種雙層底結構，在內底與外底之間無橫向大樑，模型長×寬×深為 6.7m×2.54m×0.74m。

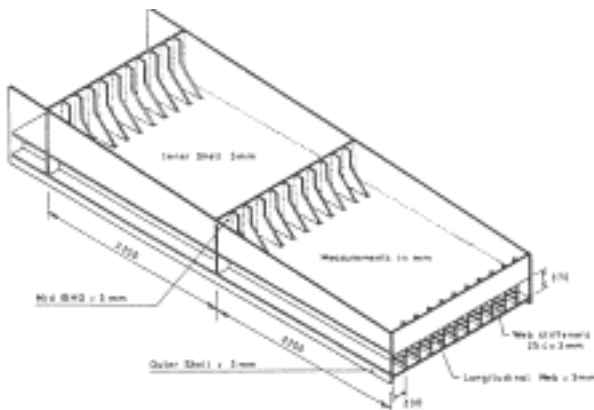


圖 6. 比較模型之尺寸

有限元素分析模型與撞擊後模型前端與底部的破損狀況如圖 7 所示。橫向結構與船底縱向肋板破壞狀況則如圖 8 所示。

分析模型外殼與內底均為 3mm，令縱向肋骨的橫截面積融入平板，則內外底板的等效厚度為 5.7mm，船底肋板等效厚度為 3.4mm。令結構鋼材之

破壞應變  $\epsilon_c = 0.2$ ，流應力  $\sigma_f = 287MPa$ 。

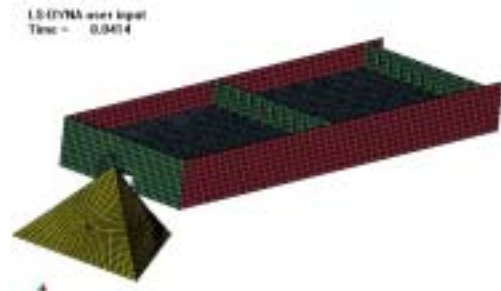


圖 7. 比較模型 FEM 模型

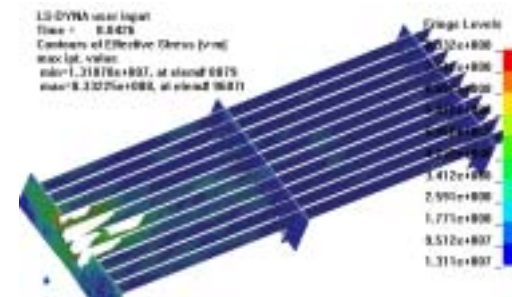


圖 8. 擱淺後橫向與船底縱向結構破壞狀況

本研究採用的角錐為底邊長 3.2728m 的正三角形，高度 0.8m，尖角菱線正向船體，上部 0.4m 高的部分穿入船體，故下底板的穿入寬度為 1.6364m，內底板穿入寬度為 0.1227m，錐體切開船體平均寬度為 0.8796m。錐體前尖後鈍，平均切割寬度為：

$$0.5 \times 0.8796m = 0.4398m$$

計算方法如下：

結構分成前後兩部分，再分底板、縱向肋板、左右側殼與橫向結構等共 11 個區塊。

外底與內底板結構損壞屬於板結構面內撕裂模式， $E_3$ ，依 Wierzbicki & Thomas (1993) 結構破壞能量為：

$$E_3 = 3.21(t/b)^{0.6} \sigma_f Al$$

其中： $t$ 、 $b$  與  $l$  分別為結構破壞部分的等效厚度、寬度與長度。

每單位長度外底與內底板結構破壞吸能為

$$E_3/l = 3.21 \times (5.7/439.8)^{0.6} \times 287 \times (2 \times 0.0057 \times 0.8796) = 0.68098MJ/m$$

船底肋板損壞為板與樑結構壓潰模式， $E_4$ ，依 Pedersen & Zhang(2000) 結構破壞能量為：

$$E_4 = 3.5(t/b)^{0.67} \sigma_f Al$$

船底縱向肋板損壞 4 根，每單位長度破壞吸能為

$$E_4/l = 3.5 \times (3.4/370)^{0.67} \times 287 \times (4 \times 0.37 \times 0.0034) = 0.02183MJ/m$$

船體前端外殼破壞屬於彎曲結構件的全塑化彎曲模式， $E_1$ ，依式(17)

$$E_1 = 0.77 \epsilon_c \sigma_f Al = 0.77 \times 0.2 \times 287 \times (0.4 \times 0.0034 \times 0.8796)$$



$$= 0.05282MJ$$

船體初運動能為  $0.87153MJ$ ，碰撞後船體破壞吸收大部分能量，錐體吸收能量不計則船體損壞範圍為：

$$l_d = (0.87153 - 0.05282) \div (0.68098 + 0.02183) \\ = 1.1424m$$

利用 FEM 非線性暫態分析結果船體損壞範圍  $1.23m$  (如圖所示破壞範圍)，估算方法能量略高。

## 七、結論

本計畫為計畫主持人未來五年船舶碰撞與擱淺系列之第一年，重點在文獻檢討與船體結構在衝擊後整體性的損壞狀況估算，將船體結構依結構型態與破壞狀況，粗略分成 6 個結構損壞吸能模式。假設彈性應變能在衝擊過後應全部釋放，且結構變形應回復，故只考慮塑性損壞。應用能量平衡的原理，算到船體運動能損失與損壞結構吸收能平衡為止。

本計畫估算方法，可相當程度掌握撞擊後的船體結構損壞狀況，但尚無法掌握損壞歷程。

## 八、參考文獻

1. Lloyd's Register of Shipping. World Casualty Statistics, 1995.
2. Lloyd's Register of Shipping. World Casualty Statistics, 1996.
3. Egge, E.D. Boeckenhauer M. (1991) Calculation of the Collision Resistance of Ships and its Assessment for Classification Purposes, Marine Structures. 4, 36-56.
4. Paik, J.K., Chung, J.Y., Choe, I.H., Thayamballi, A.K., Pedersen, P.T. and Wang, G. (1999). On Rational Design of Double Hull Tanker Structures against Collision, The 1999 annual meeting of the SNAME. Trans. SNAME 107.
5. Wang G., Chen, Y., Zhang H., Peng H., (2002). Longitudinal Strength of Ships with Accidental Damage. Marine Structures 15, 2002, pp.119-138.
6. Paik, J.K. and Pederson P.T., (1995). Ultimate and Crushing Strength of Plated Structures, J. Ship Research, 39:3, pp.259-261.
7. Ohtsubo H., Astrup O.C., Cazzulo R., Kim O., Luh P.A., Spangenberg S., Spenger J.S., Sucharski D. (1994). Structural Design for Pollution Control. 12<sup>th</sup> ISSC, St. John's, Canada.
8. Ohtsubo H., Astrup O.C., Lehmann E., Mastro M.G., Paik J.K., Spangenberg S., Ximenes M. C., Zhu L., (1997). Structural Design against Collision and Grounding, 13<sup>th</sup> ISSC, Trondheim, Norway.
9. Qi E. R. and Cui W.C., (2001). A State-of-Art Review on Ship Collision and Grounding, J. Ship Mechanics, 5(4), pp.67-80.
10. Simonsen, B.C. and Hansen, P.E. (1999). Statistical and Theoretical Analysis of Ship Grounding Accidents, J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering.
11. Lax R. and Kujala P. (2001) Statistics on Ship Groundings in Finish Waters and Simulation of the Grounding Event by Model Scale Testing. Helsinki University.
12. Lehmann, E. (1999) Experimental Ship Structural Analysis. VDI Berichte 1463, 1-40.
13. Rodd, J.K. (1966). Observations on Conventional and Advanced Double Hull Grounding Experiment, Int. Conf. On Design and Methodologies for Collision and Grounding Protection of Ships, San Francisco, USA, pp.13.1-13.13.
14. Endo, H., Yamada, Y. and Kitamura, O. (2001). Experimental Study on the Buffer Bow Structures. PRADS 2001
15. Kitamura, O. (1996). Comparative Study on Collision Resistance of Side Structure. Marine Technology 34:4, 293-308.
16. Donner R., Besnier, F. and Sourne H.Le. (2001). Numerical Simulation of Ship-Submarine Collisions. PRADS 2001, 1309-1314.
17. Kajaste-Rudnitski J. and Kujala P., (2001). FE Approach to the Ship Grounding Event, Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Stavanger, Norway, June 17-22, 2002.
18. Lehmann E., Egge, E.D., Scharrer, M. and Zhang, L. (2001). Calculation of Collisions with the Aid of Linear FE models. PRADS 2001, 1293-1300.
19. Minorsky V.U. (1959) An Analysis of Ship Collision with Reference to Protection of Nuclear Power Plants. J. Ship Research. 3:2.
20. Yang, P.D.C., Caldwell J.B. (1988). Collision Energy Absorption of Ships' Bow Structures. J. Impact Engineering. 7:2, 181-196.
21. Petersen, M.J. (1982). Dynamics of Ship Collision. Ocean Engineering 9:2, 295-329.
22. Pedersen, P.T. and Zhang, S. (2000). Absorbed Energy in Ship Collision and Grounding – Revising Minorsky's Empirical Method. J. Ship Research, 44:02, pp. 140-145.
23. Suzuki, K., Ohtsubo H., and Sajit K.S. (2001). A Simplified Internal and External Mechanics Model for Ships' Collision. PRADS 2001, 1301-1307.
24. Wang, G., Ohtsubo, H. and Liu, D. (1997). A Simple Method for Predicting the Grounding Strength of Ship, J. of Applied Mechanics 41:3, 241-247.
25. Simonsen, B.C. (1997). Ship Grounding on Rock – I. Theory. J. Marine Structures 10:7, 519-562.
26. Simonsen, B.C. (1997). Ship Grounding on Rock – II. Validation and Application. J. Marine Structures 10:7, 563-584.
27. Wierzbicki, T. & Thomas, P. (1993). Closed-form Solution for Wedge Cutting Force Through Thin Metal Sheet, J. Mechanical Science, 35:3/4, pp.209-229.
28. 李雅榮, (1998-2002). 高速船艏結構碰撞破壞之研究, 國科會計畫 88-91 年計畫。