

FRP 快艇結構之波擊破壞強度研究(2/3)

Study on the failure strength in slamming load for FRP crafts

計劃編號：NSC 89-2611-E-002-035

主持人：李雅榮(台大造船及海洋所)

研究人員：鍾承憲

一、摘要

接續上一年度之研究，在檢討出最適合於結構分析時之衝擊壓力預估式及模擬方式後，針對船用材料作探討。

船用 GFRP 材料普遍有拉伸與彎曲特性不同之現象，因此在強度設計時，要針對兩者不同之特性分別作材料試驗；一般複合材料之數值分析模式為利用拉伸特性來模擬材料之行為，當此數值模式運用到船用 GFRP 材料時，將會得到拉伸與彎曲特性相同之結果，此點與實際之材料行為相矛盾。

因此本文將利用理論及數值分析對 GFRP 材料之拉伸與彎曲彈性係數作探討，嘗試找出造成兩者差異之機制，並依此利用一般易於實驗室執行之材料試驗結果來建立 GFRP 材料之數值分析模式，以有效預估組合後積層板之力學特性，進而準確模擬出材料之彎曲破壞行為，為往後之波擊破壞分析建立正確之材料數值分析模式。

關鍵詞：FRP、波擊負荷。

Abstract

After deciding the numerical form in describing slamming loads, we focus on

the mechanical properties of marine FRP laminates.

Because the marine GFRP laminates have the quality of different tensile and flexural properties, we must perform two different experiment sets in strength design. When simulating the behavior of general composite material, we utilize the tensile properties as the input datum. This cannot work in marine FRP laminates. From the procedures above, we can get the conclusion that the tensile and flexural properties are the same. However, this phenomenon will contradict with the actual behavior of GFRP laminates.

In this study, we will investigate on the mechanism from theoretic and numerical analysis to explain the differences between tensile and flexural properties. As the result of the study, we can establish the numerical model to describe the behavior of marine FRP laminates and apply it to the composite laminates correctly. Therefore, we can simulate the failure behavior of FRP laminates subjecting to slamming loads from the previous datum and verify it by water impact experiment.

Keywords: FRP、slamming loads

二、緣由與目的

一般在分析複合材料積層板時，係採用原材料之材料特性值再將其依複合法則代入分析，原材料之材料特性則由相關之實驗值取得，此種數值分析模式已假設原材料各層為均質(homogeneous)，因此利用此數值模式分析原材料將會得到相同之拉伸與彎曲特性，此點與實際上船用材料之特性不同，拉伸與彎曲特性不同不僅存在於船用積層板(如 MR 積層)，亦發生於原材料(如 M300、R800)中，所以一般複合材料之數值分析模式無法將船用 GFRP 之材料特性準確預估，欲掌握 GFRP 之數值模式，必先對其材料特性做充分之討論，以建立一套可將 GFRP 這種特殊材料特性顯現之數值分析模式。

本文將利用理論與數值分析對 GFRP 之剛性做討論，嘗試找出拉伸與彎曲剛性差異之所在，並利用該結論建立 GFRP 材料之數值分析方式，為波擊破壞分析建立材料之破壞模式，以配合往後之波擊破壞研究。

三、FRP 材料剛性之討論

材料試驗中拉伸彈性係數與彎曲彈性係數分別由下面兩式計算之：

$$E_t = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \quad (1)$$

$$E_b = \frac{mL^3}{4bh^3} \quad (2)$$

m：「力量」與「位移」曲線斜率

L：試片跨距

b：試片寬度

h：試片厚度

其中，彎曲彈性係數計算式(2)係基於三點彎曲之樑理論[1](beam theory)求得，若材料為等向(isotropic)均質材，則兩者依樑理論將會有相同的值，但複合材料中兩者之值卻是不相同，欲找出原因所在，應就其基本假設來探討。

在樑理論推導 E_b 時，假設樑滿足 Kirchhoff 假設，即原來為平面之橫斷面在承受彎曲負荷後斷面仍為平面，因此若可由數值分析證明在複合材料中 Kirchhoff 假設不成立，則將可斷言複合材料之彎曲彈性係數不適用於(2)式；基於上述之想法，將針對複合材料做有限元素分析，分析軟體為 ABAQUS，為比較計，採用兩種不同之元素種類：基於 Kirchhoff 假設之殼元素(shell element)與未加諸任何限制條件之實體元素(solid element)，由此兩種元素分別對不同橫斷面之樑做分析，所討論者有等向均質(isotropic homogeneous)、等向非均質(isotropic heterogeneous)與正交異方非均質(orthotropic heterogeneous)三種橫斷面，材料係數則參考 R800 之原材料實驗值並列於下表：

斷面種類	E_1 (Pa)	E_2 (Pa)
等向均質	3.7129×10^{10}	3.7129×10^{10}
等向非均質	3.7129×10^{10}	3.6000×10^9
正交異方非均質	3.7129×10^{10}	3.6000×10^9

表 1：不同斷面使用之彈性係數

前兩種斷面之 E_1 與 E_2 指材料 1 與材料 2 之楊氏彈性係數，非均質斷面中，兩種材料之 E 值差距甚大，主要為模擬出 FRP 中纖維層和樹脂層存在之狀況；正交異方非均質斷面之 E_1 係指第 1 種材料主軸方向之彈性係數，第 2 種材料仍

為等向性；由於殼元素乃基於樑理論之假設，因此等向均質斷面數值分析之結果應與樑理論相同。

由樑理論，可得兩端簡支(Simple Support)之樑在中點受力 P 時位移量為

$$w_{\max} = w|_{x=\frac{1}{2}} = \frac{PL^3}{48EI} \quad (3)$$

因此在小變形分析時亦將此計算結果納入比較。

有限元素模型採結構之一半，因此左端節點為對稱邊界條件，右端則束縛住 2、3 方向自由度，並於對稱端施加 3 方向之向下強制位移以模擬實際試片三點彎曲之狀態，因強制位移量延伸至大變形範圍所以採幾何非線性分析，元素分割與邊界條件圖示於圖 1，厚度方向共分為 9 層(4 層材料 1、5 層材料 2)；以下為理論與數值分析結果之討論：

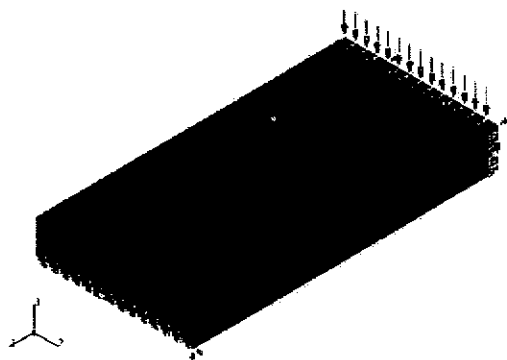


圖 1: Solid element 模擬樑之有限元素分割及邊界條件圖

首先檢視等向均質斷面，數值解析時因取結構的一半討論，因此整個結構中點外力值為右端(邊界條件為簡支)節點 3 方向反力和的 2 倍，由此可得強制位移量為 0.3mm 時使用殼元素分析所得對應之外力值為 157.5N，此結果應與樑理論者相同，將相關之幾何、材料參數代入(3)可得中點外力值為 157.36N，誤差量僅達 0.09%，實體元素所計算出之

中點外力值為 156.6N，誤差量為 0.15%；由此可確認有限元素模型之建立無論為殼元素或實體元素均無誤，可以此模型為基礎，改變不同之材料斷面做分析。

由於殼元素運算時以 Kirchhoff 假設為基礎，所以其變形後原來為平面之斷面仍維持一平面，故在此僅以實體元素結果做討論，因其較接近於實際試片之行為。圖 2、3 為等向均質斷面在小變形(0.3mm，約為板厚 3.705mm 之 1/10)及大變形(3.6mm)時靠中間四斷面 1 方向(軸向)變形圖，圖 4、5 則為等向非均質斷面而圖 6、7 為正交異方非均質斷面在小變形及大變形時靠中間四斷面 1 方向變形圖；

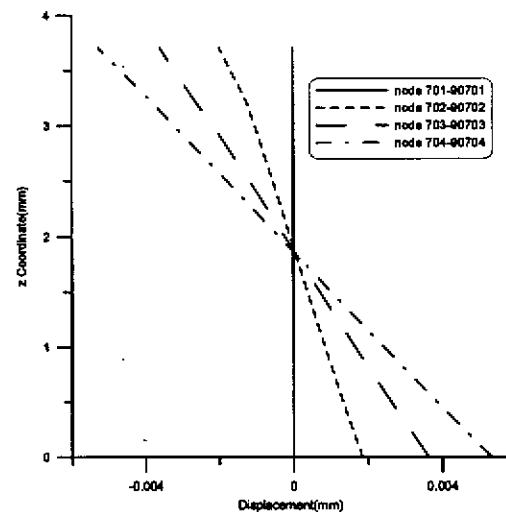


圖 2: 等向均質板小變形時靠中間四斷面 1 方向變形分布圖

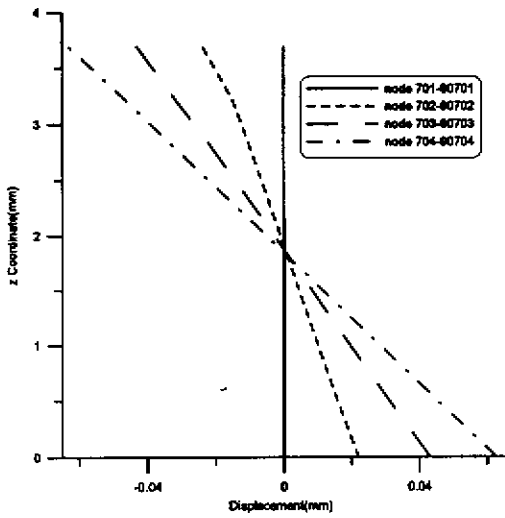


圖 3: 等向均質板大變形時靠中間四斷面 1 方向變形分布圖

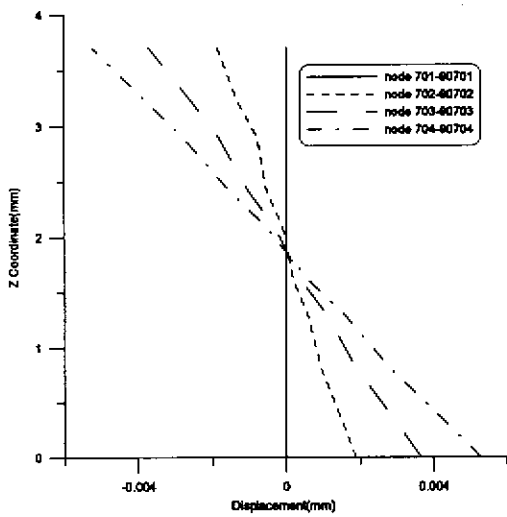


圖 4: 等向非均質板小變形時靠中間四斷面 1 方向變形分布圖

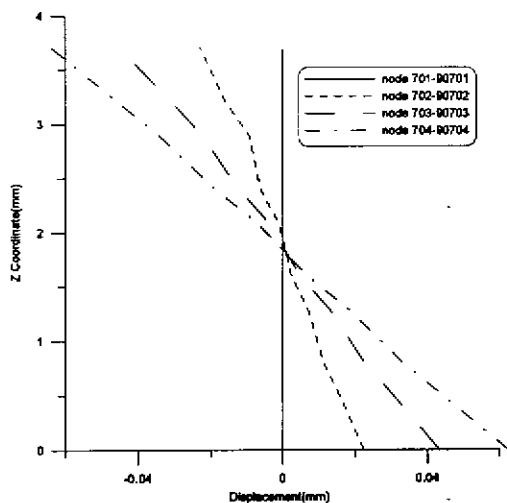


圖 5: 等向非均質板大變形時靠中間四斷面 1 方向變形分布圖

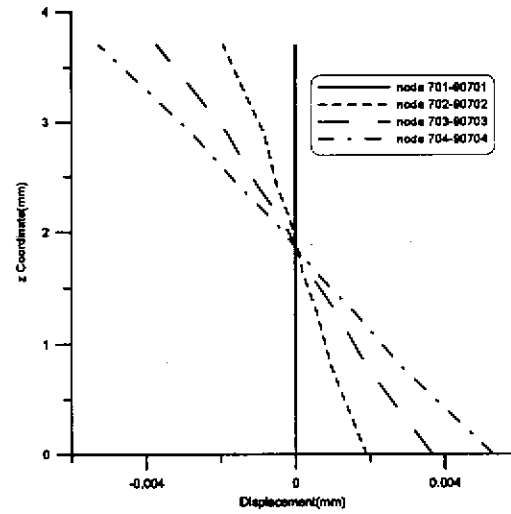


圖 6: 正交異方非均質板小變形時靠中間四斷面 1 方向變形分布圖

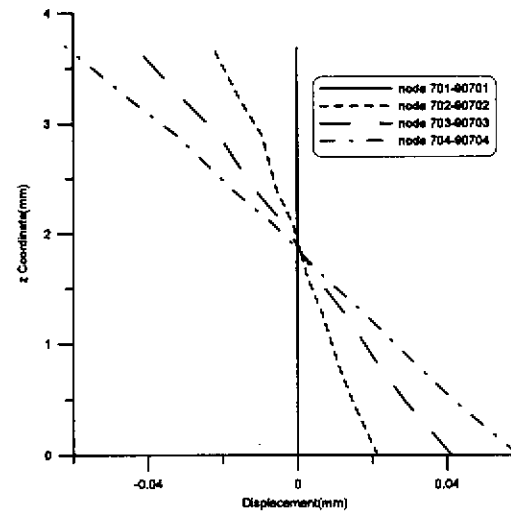


圖 7: 正交異方非均質板大變形時靠中間四斷面 1 方向變形分布圖

	Solid	Shell
等向均質板	3.6935×10^{10}	3.7185×10^{10}
等向非均質板	1.1495×10^{10}	1.1573×10^{10}
正交異方非均質板	1.1422×10^{10}	1.1502×10^{10}

單位: (N/m^2)

表 2: 使用不同元素與不同斷面所計算出之彎曲彈性係數

由各種斷面於大、小變形之變形分布圖看出只要是均質斷面，無論在大變形或小變形的狀況均符合 Kirchhoff 條件，然而非均質斷面不論其為等向或正交異方性均無法滿足 Kirchhoff 條件；除此之外，所計算之彎曲彈性係數(表 2)顯示所採用之元素為殼元素或實體元素造成之差異性相當小，此結論與欲將實際行為與樑理論差距歸咎於 Kirchhoff 條件之想法相抵觸，因此，Kirchhoff 條件似非彎曲與拉伸彈性係數差距之主因，關鍵反在斷面特性；此點可由複合樑理論 (Composite Beam Theory)[1]來思考，此理論推導兩種以上材料組成之樑的彎曲行為，以等向非均質斷面為例，其由兩種不同之等向材組成，在 pure bending 之狀況下斷面方程式為：

$$E_1 \int y dA + E_2 \int y dA = 0 \quad (4)$$

同等向均質材之推導，惟對二種材料分別積分：

$$\begin{aligned} M &= - \int \sigma_x y dA \\ &= \int E \kappa y \cdot y dA \\ &= \int E \kappa y^2 dA \\ &= E_1 \kappa \int y^2 dA + E_2 \kappa \int y^2 dA \\ &= \kappa (E_1 \int y^2 dA + E_2 \int y^2 dA) \\ &= \kappa (E_1 I_1 + E_2 I_2) \end{aligned} \quad (5)$$

因此可導得等效之彎曲彈性係數

$$\begin{aligned} \therefore \kappa &= \frac{M}{(E_1 I_1 + E_2 I_2)} = \frac{M}{E_b I} \\ E_b &= \frac{(E_1 I_1 + E_2 I_2)}{I} \end{aligned} \quad (6)$$

將本例中之相關參數代入(6)式中求

取等效彎曲彈性係數，與等向非均質材數值分析結果相同；再對比拉伸彈性係數式

$$\begin{aligned} E_t &= E_1 V_1 + E_2 V_2 \\ &= E_1 \cdot \frac{t_1}{t} + E_2 \cdot \frac{t_2}{t} \\ \therefore E_t &= \frac{(E_1 t_1 + E_2 t_2)}{t} \end{aligned} \quad (7)$$

可歸出拉伸與彎曲彈性係數差異主要在於 GFRP 材料纖維與樹脂共存顯現之不均質性，因此無法以均質之分析方式來分析。

航空常用之 CFRP 材料，因使用預浸過之碳纖維且成形過程採用品質穩定之施工法，所以纖維含量相當高，斷面相當均勻，適合一般均質斷面的分析方式；然而船用 GFRP 材料多使用手積法製作，纖維含量較低，使得不僅不同纖維複合之積層板連單一材料(如 M300、R800)積層時都會有明顯的樹脂層存在，造成斷面的不均質，也因此使得拉伸與彎曲彈性係數會有所差距，且拉伸彈性係數高於彎曲彈性係數之狀況。

四、FRP 強度之討論

FRP 材料除彈性係數外，拉伸與彎曲強度亦有所差距，且彎曲強度常高於拉伸強度，由於船用纖維有不定向、編織等種類，形式相當複雜，因此破壞形式亦隨之複雜，連帶使其於初始破壞 (First Ply Failure) 後剛性之減低量、破壞進展情形均不易掌握，欲確實掌握各項機制有所困難。

有鑑於此，將把上述因素全納入破壞後修正方式以建立彎曲破壞分析模式，彎曲破壞不同於拉伸破壞，拉伸破壞乃由斷面均勻受力後同時發生破壞，

然彎曲破壞為最外層之部分先發生破壞再擴及內層，因此兩種破壞進展不同、修正方式亦有異，拉伸破壞係假設纖維破壞後剛性全部降為 0，彎曲破壞則於初始破壞後逐漸衰減剛性，因此，結構反力不似拉伸破壞，不會在初始破壞後便立刻下降，而會繼續往上，使得計算得到之彎曲強度高於拉伸強度值。

欲做破壞分析，首先必須先決定所使用之破壞法則(Failure Criterion)，破壞法則之選取視所需分析之材料而定，如切股氈(Mat)、樹脂等在數值分析時視作等向性材料，所以使用 Von Mises 破壞法則(8)，而編紗束(Roving)視為正交異方性材料且為編織之型態，宜使用 Tsai-Wu 破壞法則[2](9)。

$$\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2 = \sigma_0^2 \quad (8)$$

$$F_{ij}\sigma_i\sigma_j + F_i\sigma_i = 1 \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (9)$$

一旦決定所使用之破壞法則後，在整個分析中便決定了何時開始發生初始破壞，接下來便要描述初始破壞後之行為，因應不同的負荷型態與材料特性，初始破壞後剛性之衰減狀況亦有不同，並隨破壞指標值(Failure Index)而變化，在此破壞指標值係指利用破壞法則判斷式所計算出之值，如在本分析中等向材(如 Mat)之剛性隨破壞指標值呈線性衰減直到剛性完全為 0、編織材(如 R800)剛性在後段呈漸進線之方式衰減。

破壞法則判斷式中分為應力表示式與應變表示式兩種，由三點彎曲破壞實驗觀察，率先達到初始破壞的部位會在破壞部位並未擴散出去時繼續下一階段的破壞，若以應力表示式來計算破壞指標值將無法顯現此項行為，而因應變為連續量，所以破壞指標值不會有突降之

狀況，較符合實際之彎曲破壞行為，因此將採用應變表示式計算破壞指標值作為剛性修正之判斷基準。

實際做破壞分析時，將應用前面彈性係數之討論結果，因前述提及 GFRP 材料有明顯之樹脂層與纖維層，因此依(6)(7)式會有不同之拉伸、彎曲彈性係數值，惟樹脂層與纖維層乃力學上之等效果量，無法直接量測，該值雖與纖維含量有關，但一來並非完全僅由纖維含量實驗便可得到，且纖維含量試驗不易於一般實驗室進行，相較之下，彎曲試驗之執行成本便遠低於纖維含量實驗，所以，將利用(6)(7)式由原材料之拉伸彈性係數與彎曲彈性係數來求取有效纖維厚度，方法如下：在已知樹脂材料係數之狀況下，拉伸、彎曲實驗可得到相對應的試片厚度、彈性係數值，將上述資料代入(6)(7)式聯立後便可得到原材料之有效纖維厚度，再由有效纖維厚度依複合法則求得有效纖維彈性係數，便可依此進行有限元素彈性分析。

表 3 為針對本文所做材料試驗之結果，由 M300、M450、R800 原材料之拉伸、彎曲彈性係數實驗值，配合已知之樹脂彈性係數，可得到該原材料之有效纖維厚度，結果示於表 4。

	拉伸特性		彎曲特性	
	彈性係數 (Pa)	強度 (Pa)	彈性係數 (Pa)	強度 (Pa)
M300	1.0032×10^{10}	1.3449×10^8	9.7080×10^9	2.7426×10^8
M450	1.0937×10^{10}	1.2292×10^8	1.0097×10^{10}	2.6980×10^8
R800	1.8695×10^{10}	3.0331×10^8	1.7260×10^{10}	4.3508×10^8

表 3：原材料之實驗結果

	拉伸試片 厚度 (mm)	彎曲試片 厚度 (mm)	有效纖維 單層厚度 (mm)	有效纖維 彈性係數 (Pa)
M300	2.816	2.370	0.2186	2.1397×10^{10}
M450	3.711	3.410	0.3555	1.9764×10^{10}
R800	3.817	3.812	0.5805	2.3696×10^{10}

表 4：原材料之有效纖維厚度與彈性係數

得到纖維層之有效彈性係數後，在求纖維層之強度，此利用原材料拉伸試驗之資料，再由有限元素拉伸彈性分析之結果可得到原材料在達到破壞負荷時之應力分布狀態，因材料在此負荷下發生破壞，故可由有限元素分析中找出對應於使用之破壞法則的最大破壞指標值，從而得到對應於該破壞法則之拉伸強度值，分析結果列於表 5，配合適當之剛性修正法則得到纖維層之拉伸強度後，進而可模擬出材料之彎曲破壞。

	拉伸強度 (Pa)	壓縮強度 (Pa)	面內剪切強 度(Pa)
M300	2.9114×10^8		
M450	2.2478×10^8		
R800	3.9065×10^8	2.2418×10^8	5.4746×10^7

表 5：原材料纖維層於有限元素分析時使用之強度值

圖 8、9 分別為 M300、R800 之彎曲破壞模擬曲線：

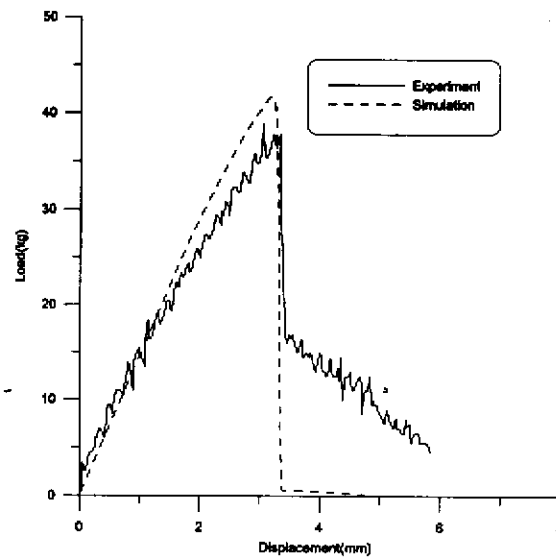


圖 8：M300 彎曲破壞模擬圖

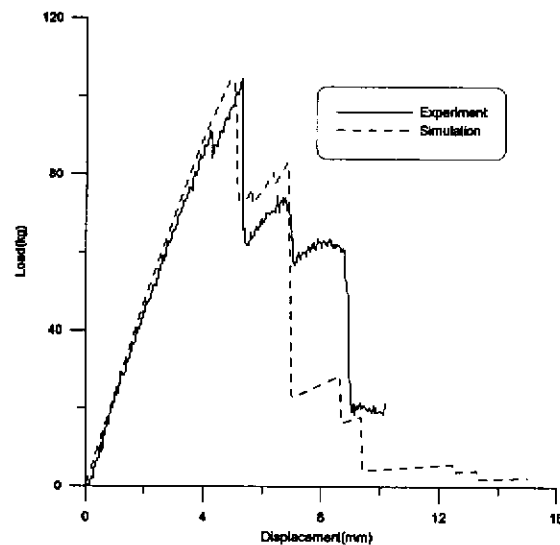


圖 9：R800 彎曲破壞模擬圖

由圖 8、9 與表 6 所示之強度計算結果觀之，誤差相當小，將此原材料之數值模式用來分析 M3-R8 積層板之彎曲破壞曲線可得圖 10，參照表 6 與圖 10，M3-R8 積層板彎曲破壞模擬曲線與實驗值之誤差僅-1.83%，M4-R8 積層板誤差稍大些，但亦僅-4.64%，由此可知，此種模擬方式可充分將材料於初始破壞後仍可承受力量之狀況顯現出來，並解釋 FRP 材料彎曲強度高於拉伸強度之現

象。

	數值模擬		實驗值	誤差 (%)
	最大負荷 (N)	強度 (Pa)	強度 (Pa)	
M300	408.6	2.7620×10^8	2.7426×10^8	0.706
M450	506.3	2.4390×10^8	2.6980×10^8	-9.599
R800	1024	4.3633×10^8	4.3504×10^8	0.297
M3-R8	1275	3.3812×10^8	3.4442×10^8	-1.830
M4-R8	603.1	2.9561×10^8	3.1000×10^8	-4.640

M3-R8 : [M300R800M300R800M300R800M300R800M300R800M300]

M4-R8 : [M450R800M450R800M450]

表 6：原材料與複合積層板彎曲強度計算

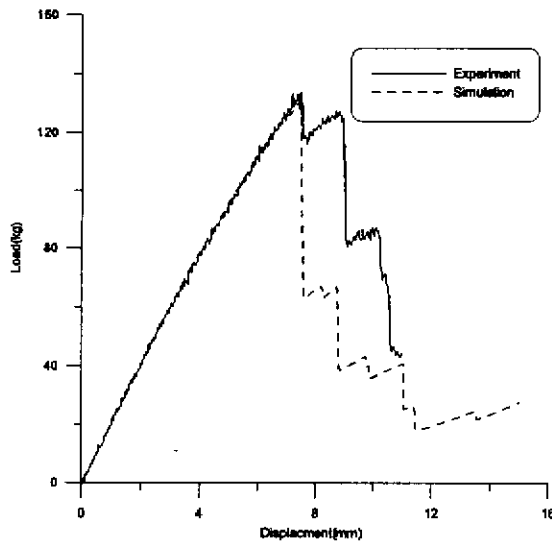


圖 10：M3-R8 積層板彎曲破壞模擬圖

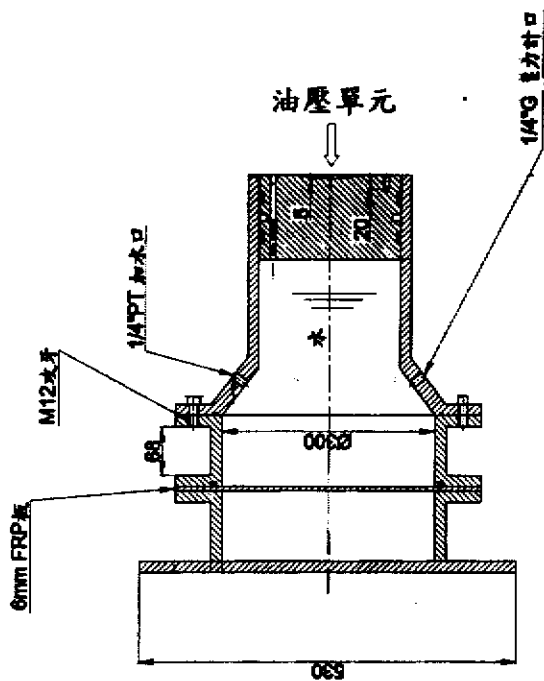
五、FRP 波擊破壞實驗之設置

在討論完船底所受波擊力之作用型態與 FRP 之材料特性，並建立數值模擬方式後，接著便要結合上述兩部份之資料來分析船底結構受波擊破壞之行為並以實驗加以驗證。

波擊破壞實驗不同於一般之波擊實驗與衝擊實驗。因探討波擊力之水衝擊實驗多為下落試驗(Drop Test)[3][4][5]，其目的在求取波擊壓力大小與分布狀況，藉由試片於一定距離從高處落下，利用位能轉換為動能之型態來模擬波擊效應，由於實驗設備之限制，使得一般所得到之衝擊壓力並不會高到使材料產生破壞的程度；另外，因水衝擊至結構時會散開至周圍部位而使壓力分佈於物體上，與衝擊試驗機利用固體衝擊而造成局部破壞的情況不同，所以亦無法直接利用衝擊試驗機達到本實驗要求之破壞形式，故應針對所要探討之問題重新設計實驗。

為求破壞形式類似於實際之波擊破壞，故仍利用水作為衝擊之媒介，因波擊力之特徵為在短時間內到達相當大之壓力，且液壓可在短時間內給予相當大的壓力，所以將利用液壓先衝擊水、再由水衝擊板來達到水衝擊之效應，如此不但力量足以使材料破壞，且負荷作用型態亦與實際波擊類似。

以下為實驗設備圖，所欲探討之試片種類有板、縱通材、板與縱通材組合結構等三類，以確實完整探討船底結構受波擊破壞之行為。



圖：波擊實驗設備

六、結語

本研究為三年計畫之第二年，至目前為止，已掌握波擊負荷作用型式與數值模擬方式；在 FRP 材料特性方面，已對其破壞模式與分析時所應使用之破壞法則做過探討，並已建立船用 GFRP 材料破壞之數值分析模式且進行相關材料實驗驗證之；在船底結構之破擊破壞實驗方面，已完成實驗儀器之規劃，將於實驗儀器設置完畢後針對船底結構做數值破壞分析並以實驗驗證之，以確認波擊破壞機制並對結構加以改良。

七、參考文獻

1. Gere and Timoshenko, "Mechanics of Materials.", PWS-KENT Publishing Company.
2. Tsai, S. W. and Wu, E. M., "A general theory of strength for anisotropic

materials", J. Comp. Mater., 5, January 1971, pp.58-80.

3. S. L. Chuang, "Experiments on Flat-Bottom Slamming.", Journal of Ship Research, vol.10, March 1966, pp.10-17.
4. S. L. Chuang, "Experiments on Slamming of Wedge-Shaped Bodies.", Journal of Ship Research, vol.11, September 1967, pp.190-198.
5. 山本善之, 大坪英臣, 河野好秀, "楔形物体の水面衝擊", 日本造船學會論文集,