

複合夾心板低速衝擊行為之數值解析

徐 堯 *

摘 要

本文旨在利用 ABAQUS 有限元素分析軟體，針對三種面材積層 MAM、MCM、MRM 與二種密度心材 ($\rho=0.1、0.2 \text{ g/cm}^3$) 所搭配成的六種夾心板材料進行數值分析，以探討複合夾心板材料在低速衝擊下之衝擊反應、力學特性及破壞現象。

本文將針對三維夾心板受圓球型撞頭作用的問題進行分析。為顧及計算準確性及節省計算時間，本文採用八節點的實體元素來建立模型，並用降階積分法從事數值解析。首先，在不考慮破壞的情形下，分析預測夾心板的衝擊反應（如衝擊力履歷），結果顯示六種夾心板的衝擊力主要是受到心材的掌控，面材的影響並不大。分析的結果亦與文獻上的實驗結果作比較，證明本程式有相當的準確性。此外，為了能進一步考慮面材及心材的破壞，本文針對面材的纖維拉張、壓縮破壞及脫層破壞，及心材的拉張與壓縮破壞，選取一合適的破壞法則及破壞後的材料剛性修正法，並將其加入程式中，以模擬夾心板的破壞過程。經與實驗結果相比較，本文所採用的破壞法則及剛性修正法，的確能有效的解析夾心材料受低速衝擊下的破壞反應及行為。最後，本文亦進行一系列的參數探討；諸如面材剛性 / 心材剛性比及跨距 / 撞頭直徑比等。

關鍵詞：夾心板，衝擊反應，數值分析

* 開南管理學院通識教育中心助理教授

The numerical analysis on low-velocity impact behavior of composite sandwich

Hsu Yao

ABSTRACT

The objectives of this study is to investigate the impact response, impact behavior and failure mechanism of six kinds of sandwich materials consisting of three kinds of facesheets (MAM, MCM, MRM) and two different core density($\rho=0.1, 0.2$ g/cm³) under low velocity impact.

In numerical investigation, by using the finite element software ABAQUS, the dynamic responses of sandwich plate subjected to a spherical impactor is conducted. Because it is a three-dimension problem, the plate is modeled in use of eight-node solid element, and a reduced integration scheme is adopted to save the computer time. At the beginning, under the condition without failure, the impact force history is predicted. From the numerical results, it can be concluded that the impact behavior of sandwich plates in this study are mainly controlled by core density. Further, to analyze the failure problem of sandwich plates, the failure criteria and stiffness modified method is incorporated into the program. After being compared with the experimental results, the accuracy of this analyzing tool is verified, and then several parametric studies such as ratio of facesheets stiffness to core stiffness and the ratio of span to impactor diameter are conducted.

keywords : Sandwich Plate, Impact Responses, Numerical A nalysis

複合夾心板低速衝擊行為之數值解析

徐 堯

一、引言

夾心材料是由二片薄而強度高、剛性大的面材 (Facesheets), 和一片厚而強度低、剛性小且質量輕的心材 (Core) 所組成。這種組合方式的複合材料, 除了有彎曲剛性 (Bending stiffness) 高和重量輕的優點外, 並且具良好的吸音、絕緣、隔震及衝擊能量吸收等效果, 近幾年來已廣泛地使用在許多結構物上。以船舶工程為例, 在台灣及日本, 越來越多的小型船舶, 如漁船、遊艇, 已使用夾心材料作為船體外殼。然而, 在建造過程中不經意的工具掉落, 或船舶航行時所受的波擊 (Wave impact), 船體與其他堅固物體的碰撞等, 均會使夾心材料產生破壞, 諸如面材之纖維斷裂 (Fiber breakage)、樹脂破裂 (Matrix cracking)、脫層破壞 (Delamination)、心材之壓潰 (Crushed)、剪斷 (Shear Crack) 及面材與心材間之分離 (Debonding) 等, 這些破壞會降低夾心材料的剛性、強度, 進而危及結構物的安全。因此, 為了結構物及人員的安全, 對於有關夾心材料的衝擊反應、衝擊破壞及耐撞能力等問題, 有深入探討的必要。

由於夾心材料的力學行為較為複雜, 對於各種不同幾何形狀的材料、邊界條件、撞頭形狀等衝擊問題, 想要以理論或解析方式 (Analytic method) 來予以探明, 實屬不易。故除了以實驗方式來進行研究外[1-5], 多以數值解析 (如有限元素法) 來模擬分析[6-9]。至目前為止, 利用有限元素法來分析材料未破壞前之力學行為或預測材料初始破壞外力的研究者不少[10-16], 但由於心材本身的材料行為相當複雜, 且夾心材料又牽涉到面材 / 心材力學行為的耦合效應 (Coupling effect), 想要建立一套能夠精確模擬夾心材料行為的分析工具並不容易, 尤其是

破壞必須列入考慮時更加困難。本文研究的重點即在利用有限元素的概念，建立一套數值分析程式，以期能正確地解析複合夾心板受到低速衝擊下的力學反應，並能預測材料的初始破壞（Fracture initiation）、破壞模式（Failure modes）及後破壞行為（Post-failure behavior）。利用此工具，則能對於影響材料衝擊特性的參數，如撞擊物形狀、衝擊速度、結構物尺寸、心材種類及面材疊層等進行有效率的探討。

本文擬採用有限元素商業軟體 ABAQUS，針對夾心板受到圓球型撞頭衝擊之問題，建立一個三維的分析模型。將採用八節點的實體元素，並利用降階積分法來從事數值解析。首先，暫不考慮破壞的情形，預測撞頭在不同速度下，六種不同材質夾心板的衝擊反應，以期對材料的衝擊反應有初步的認識。而後，將破壞法則及破壞後的材料剛性修正法加入程式中，以解析夾心板的破壞問題。最後，並進行一系列的參數探討。

二、夾心板之衝擊反應分析

本節主要探討夾心板受圓球型撞頭低速衝擊下的衝擊反應。由於夾心材料受到衝擊外力的作用時，對於不同的面材及心材組合，其衝擊反應、破壞機構也不盡相同，因此本文亦希望藉由此分析工具，探討三種不同積層的面材 MAM, MRM, MCM（其中，M: Mat, R: Glass/Roving, A: Aramid, C: Carbon）及二種不同密度（ $\rho = 0.1, 0.2 \text{ g/cm}^3$ ）的心材所組合成的六種夾心板，在圓球型撞頭衝擊下，其衝擊反應及破壞現象。為簡便起見，以下稱密度 $\rho = 0.1, 0.2 \text{ g/cm}^3$ 的心材為 0.1 及 0.2，單位不再贅述。

夾心板的尺寸為 $9\text{cm} \times 9\text{cm}$ ，邊界條件為四邊固定，跨距為 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 。撞頭直徑為 12.7 mm 。在這樣的衝擊條件下，夾心板極易在衝擊點下方及附近產生

破壞。如要避免此破壞的發生，衝擊能量必須相當小。本節先解析低衝擊能量(材料未破壞)的情況下，夾心板的衝擊力履歷。而後，再提高衝擊能量，進行夾心板的衝擊破壞分析。

(一) 衝擊力履歷 (破壞未發生)

由於本章所探討的夾心板，在受到四邊固定端的束限下，其長度與厚度的比值 (Length-to-thickness) 大約為 3~4 左右，已不屬於薄板結構，故無法以殼板元素來模擬，故本文選用 3D 八節點的實體元素和降階積分法來從事計算。當遇到動態問題時，大量的計算時間及成本是可以預見的。為了降低數值計算的時間，在不失計算精確度之下，如何有效降低模型的自由度是一個重要的考量。本例中所考慮的夾心板，由於其幾何形狀、材料性質及邊界條件均有對稱性、故只考慮模擬夾心板的 1/4 區域，並給予適當的邊界條件來模擬。由於撞擊點附近的變形、應力分佈較為複雜，故在該區域的網格 (Mesh) 予以細分，而在撞擊區外圍的部分則切割較粗。再則，在上表面材的三層纖維 (M, AM)，每層纖維均以兩層元素來模擬，而在下表面由於已離撞擊區域甚遠，每層纖維僅用一層元素來模擬。夾心板的元素切割圖請參考圖 1。

對於六種材料的衝擊反應進行解析後，本文發現所選用的三種面材，似乎對於衝擊反應並無造成太大的不同，倒是心材密度的差異，的確對於夾心板的衝擊反應造成影響。現以面材積層 MCM，心材密度 0.1 及 0.2 的夾心板為例，考慮在撞頭質量 0.5884Kg 及衝擊速度 $V=0.5 \text{ m/s}$ 作用下的衝擊力履歷。圖 2 為心材密度 0.1 之夾心板的衝擊力履歷實驗及數值計算結果之比較圖。由圖可知，所計算出的衝擊時間略長於實驗的結果，且衝擊力履歷最大值略小於實驗值。造成此原因，應是對於心材材質的掌握不夠精確所致[17]。當心材密度 0.2 時，如圖

3 所示，其比較結果相當良好。由以上的結果可以初步驗證本文所發展的三維夾心板有限元素分析程式的正確性及可靠性。

(二) 衝擊力履歷 (破壞發生)

本節中的衝擊破壞分析，所考慮的破壞法則及剛性修正均為一般在靜態壞分析時所使用者，並不考慮動態破壞的效應。

1. 破壞法則及剛性修正

(1) 面材：僅考慮纖維的拉張、壓縮破壞及脫層破壞。

在纖維破壞方面：最大應力破壞法則

亦即

或

將滿足以上兩不等式中任一式之單層板的縱向楊氏模數 E_1 (E_2)，波松比 ν_{12} ， ν_{13} ， ν_{21} ， ν_{31} (ν_{12} ， ν_{23} ， ν_{21} ， ν_{32})及剪切模數 G_{12} ， G_{13} (G_{12} ， G_{23})等設為零。

在脫層破壞方面：Ye Delamination 破壞法則

脫層破壞的判斷式包含兩部份，一為因厚度方向上的正向拉張應力所引起的脫層破壞；另一則為因層間剪切所造成的脫層破壞。

亦即

將滿足以上兩不等式中任一式之單層板的縱向楊氏模數 E_3 ，波松比 ν_{23} ， ν_{32} ， ν_{13} ， ν_{31} 及剪切模數 G_{13} ， G_{23} 等設為零。

以上各式中， X_t ， X_c ； Z_t ； S_{12} ， S_{13} ， S_{23} 分別代表纖維方向(1) 之極限強度，壓縮強度；厚度方向(3) 之層間拉張強度；平面(1-2)、(1-3)、(2-3)之極限剪切強度。而 σ_{11} ， σ_{33} ， τ_{12} ， τ_{23} 及 τ_{13} 則分別代表各主軸方向之正向與剪切應力成分。

(2) 心材：考慮拉張及壓縮破壞

拉張破壞：

\Rightarrow Cracks

此時 E_1 ， G_{12} ， ν_{12} 將設為零。在此， σ_1 為拉張主應力， X_t 為心材的拉張破壞強度。

壓縮破壞：

\Rightarrow Yielding

此時 E_2 ， G_{12} 將根據心材的塑性行為作修正。在此， σ_2 為壓縮主應力， X_c 為心材的降伏強度。

2. 衝擊力履歷

圖 4 為面材積層 MAM，心材密度 0.1 之夾心板，受到撞頭質量 3.234Kg

及衝擊速度 $V=2.15 \text{ m/s}$ 作用下，其實驗與計算結果之衝擊力履歷比較。在此衝擊條件下（衝擊能量約為 7 Joules），在撞擊點下方的面材會發生脫層及纖維破壞，而在面材下方的心材亦會有塑性變形。由於夾心板破壞的發生，使得在數值計算中為了檢驗初使破壞和修正材料破壞後的剛性，程式必須反覆的作應力的檢查、剛性的修正、疊代等工作。在此情形下，為了考慮計算的精確度及收斂，時間分割大抵約維持在 10^{-5} sec 的範圍（Order）內，與整個衝擊歷程所需的時間（約 $6000 \sim 8000 \times 10^{-6} \text{ sec}$ ）相較，可以得知所需的電腦計算時間相當冗長。除了計算時間冗長之外，計算資料所需的儲存空間也相當可觀。因此，對於三維夾心板的動態衝擊問題，如何有效降低計算時間及成本是一重要考量。如前所述，由於局部破壞的現象較複雜，於數值計算中不易掌握，致使計算所得的衝擊時間歷程及最大衝擊力發生的時間與實驗值有所出入（如圖 4 所示），但大致而言，比較的結果還算不錯。圖 5 為面材積層 MCM，心材密度 0.2 之夾心板的計算與實驗衝擊力履歷比較。由於心材密度較大的夾心板，其面材破壞的情形較為複雜，故在數值模擬的正確性上，也同樣不易掌握。但由圖可知，比較的結果還算滿意。

三、夾心板之靜態破壞分析

雖然本文的研究重點是夾心板，屬於三維的結構，但一般而言，為了減少計算時間及降低計算成本，多數的研究者並不採用三維的有限元素模型來從事數值計算，多以簡化的方式來將三維問題以二維的模型來近似模擬；例如因受力情形的特殊（如線負荷狀況），而將夾心板簡化成夾心樑。或利用殼元素(Shell element)、板元素(Plate element)，來處理實際上為三維結構的薄板殼。利用板殼元素的模擬方式，的確可有效降低計算時間，並且得到不錯的結果。然而，本章

所探討的夾心材，其長度與厚度的比值(Length-to-thickness ratio)大約為3~4左右，已不屬於薄板結構，對於材料內部的應力分佈、變形等問題解析，應該無法以板殼元素來模擬。與前兩節相同，本節擬採用ABAQUS所提供的八節點3D實體元素(C3D8R)來解析夾心板之衝擊反應。另外，關於衝擊破壞分析，擬從靜態破壞分析著手。所使用的破壞法則及破壞修正均與前一節所述相同。

(一) 心材密度為 0.1 之夾心板

本章將前一節所提及的破壞法則及材料破壞後的剛性修正法加入數值解析中，以分析夾心板受圓球型撞頭靜態作用下，其破壞機制及破壞現象。邊界條件為兩端自由，兩端簡支，簡支跨距為 5 公分，衝壓頭的直徑為 12.7 公分。試片的幾何尺寸為 9 公分 × 4.5 公分。進行破壞分析之前，若先能藉由實驗的觀察以初步了解夾心板的破壞現象，將有助於數值解析結果的判明。

1. 靜態實驗結果

根據文獻 [1]，心材密度 0.1，面材積層 MCM 的夾心板，受到靜態衝壓頭作用下，作用力 - 位移曲線 (F-d 圖) 上顯示幾個關鍵的檢查點 O、A、B 及 C。起初，夾心板沿著路徑 O-A 受力，沒有任何破壞現象。但由於夾心板是集中負荷，很快的便在衝壓頭的下方及附近區域產生脫層破壞，且心材亦在此區域開始發生塑性行為，使得作用力 - 位移曲線的斜率從 A 點開始降低。在作用力達到 A 點時，觀察試片可以得知，衝壓頭下方的面材纖維並未斷裂，僅在接觸點中央附近有一近似圓形的泛白區域，此泛白區域是由於面材中最上層的 Mat 纖維與中間層的 Carbon 纖維發生分離所致。隨後，沿著路徑 A-B，破壞的現象便更為複

雜。這期間，在接觸點的下方，除了原有的脫層持續擴大外，面材的纖維也開始發生壓縮或拉張破壞，心材的塑性行為也更加嚴重，甚至發生壓潰破壞。當路徑超過 B 點時，作用力似乎無法再繼續向上提升，顯示夾心板已受損嚴重而無法再有效抵抗外力。此時的夾心板試片用肉眼由上而下觀察，可以看見面材下方的心材，顯示此時的上表面材已經因衝壓頭的過量下壓而發生拉張破壞。上表面材並且在以接觸點中央為圓心，發生約與衝壓頭直徑大小相同的圓形裂縫，此裂縫乃為剪斷破壞（Plugging）。在路徑 B-C 過程中，由於面材已完全破壞，無抵抗外力的能力，幾乎只剩心材能承受衝壓頭的作用。下壓位移量到 C 點時，因為衝壓頭已沒入心材，故實驗不再繼續進行。值得一提的是，在 C 點之前，外力並沒有明顯下降的趨勢。

2. 數值解析結果

圖 6 為實驗與數值計算 F-d 圖的比較結果，不過比較的結果並不令人很滿意。探究其原因，除了是因為心材密度 0.1 之心材的材料行為並不能精確掌握外，也因為夾心板受圓球形撞頭作用下，材料的破壞行為是屬於局部破壞而較為複雜，用數值解析欲精準掌握其破壞行為並不容易。除此之外，分析中常遇到的困難便是當衝壓頭的下壓量太大時（如下壓量超過 3.5mm，此下壓量已接近夾心板厚度 13.9mm 的 30% 左右），ABAQUS 會產生警告及錯誤的訊息（如元素扭曲變形嚴重，收斂速度太慢，無法收斂或發散）而中止計算。由於本文所使用的分析工具並沒有網格自動重建（Auto-remesh）的能力，所以當接觸點附近的元素變形嚴重時，其後的解析結果正確性是值得懷疑的。也因此，對於該如何解決接觸點附近區域的嚴重破壞和大變形問題，是未來必須再加以探討的課題。

圖 7 為衝壓頭在不同下壓量 d 時，心材發生塑性行為的進展圖。圖中的網格尺寸為 13mm×13mm。在心材的元素分割中，厚度方向上分割 10 個層

(Layers), 由上而下逐一編號 (Layer1, Layer2, .etc.)。由圖 7 便可清楚的了解心材的塑性區域在平面上及厚度方向上的進展情形。起初, 當下壓量 $d=0.6\text{mm}$ 時, 僅在 Layer1 有塑性行為發生, 因略受邊界條件及試片尺寸的影響, 形狀略呈現橢圓形。當 $d=1.2\text{mm}$ 時, 除了 Layer1 的塑性範圍擴大外, 也向下擴展至 Layer4。值得注意的是, 在 Layer3 及 Layer4, 塑性區域的分佈有呈現向 45 度方向延伸的趨勢。隨著下壓量增加至 1.8mm , 塑性區域向四方及下方持續擴展, 並且在 Layer3~Layer5, 塑性區域仍呈現向 45 度方向分佈的現象。當 $d=2.4\text{mm}$ 時, 情況大致與 $d=1.8\text{mm}$ 時相類似。圖 8 為心材發生裂縫 (拉張破壞) 的示意圖。此裂縫大抵是集中位於接觸點下方 (在下壓量 d 小於 2.4mm , 僅發生在 Layer1 處), 並且為垂直方向, 主要是因為心材壓潰變形嚴重而產生, 並部不屬於剪切裂縫。至於在面材脫層破壞方面, 如圖 9 所示 (其中, Interface1 表示纖維層 M/C 的界面, 而 Interface2 表示纖維層 C/M 的界面), 脫層隨著下壓量的增加, 由接觸點中央向四方擴展。大體而言, 兩個界面的脫層面積幾乎相同, 且在衝壓頭下壓的過程中, 脫層面積大小會隨著衝壓頭與試片的接觸面積增加而增加; 而脫層面積的最終大小會與衝壓頭的實際截面積大致相同, 顯示此脫層破壞是受衝壓頭作用的影響, 屬於局部破壞。最後, 在上表面材的纖維破壞方面, 如圖 10 所示, 在面材最上層的 Mat 纖維為壓縮破壞, 而最下層的 Mat 纖維為拉張破壞, 顯示面材呈現局部彎矩的受力形態。最下層的 Mat 纖維似乎比最上層的 Mat 纖維先發生破壞, 且兩者破壞的分佈幾乎皆呈現互相正交 (Cross) 的情形, 及沿著 1 方向和 2 方向擴展, 最後擴展至約等於衝壓頭半徑的長度為止。

(二) 心材密度為 0.2 之夾心板

1. 靜態實驗結果

由實驗觀察得知[17]，心材密度 0.2 的夾心板，其破壞機制及破壞情形幾乎與心材密度 0.1 的夾心板相類似，屬於局部破壞；皆是在破壞點下方，由脫層破壞開始，而後伴隨著心材塑性變形和壓潰、上表面材的纖維破壞和剪斷破壞。在此，不再詳加敘述。

2. 數值解析結果

在下壓量小於 2mm 時，數值計算的結果與實驗結果相差不多。但是之後由於破壞逐漸嚴重，破壞現象較為複雜，因此數值模擬的結果便不是那麼吻合，但是整體而言，比較的結果令人滿意。總括而論，心材密度 0.1 與 0.2 的夾心板，其在破壞模式方面並無太大的不同，但值得注意的是在心材塑性行為進展方面，密度 0.1 之心材似乎向四方及下方進展的較快，且接觸點下方的壓潰破壞較嚴重。這是因為密度 0.1 的心材，其降伏強度及破壞強度較小的緣故。但在面材破壞方面，因為密度 0.2 的心材，其剛性及強度較大，使得位於其上的表面材，在脫層破壞及纖維破壞方面較為嚴重。

綜合言之，本文所使用的有限元素分析程式對於描述心材的塑性行為及裂縫，面材的纖維及脫層破壞，有不錯的效果。且所解析的破壞現象及破壞機制，與實驗所觀察到的相當符合。但美中不足的是，本分析工具對於破壞嚴重和大變形的解析能力尚嫌不足，仍需未來在程式功能上進一步加強。

(三)參數探討

影響夾心板衝擊反應的參數很多，諸如長寬幾何尺寸、心材密度、面材種類及邊界條件等等。若欲以動態數值解析將這些參數對低速衝擊反應的影響一一探明，所花的計算時間相當驚人。好在本文所探討的低速衝擊反應，可以由靜態

行為模擬，而省去不少時間。本節選擇二個參數；面材 / 心材剛性及撞頭直徑 / 簡支跨距比，以靜態解析的方式來作探討。

1. 面材 / 心材剛性比

本節考慮改變心材的密度（剛性），而將面材積層固定為 MCM，以探討不同心材對夾心板力學行為的影響。所考慮的五種不同密度之心材，分別標示為 H80、H100、H130、H160 及 H200。其所對應的彈性係數、降伏強度和破壞強度請參照表 1。面材 MCM 的面內有效剛性約為 20.21Gpa。夾心板的邊界條件為二端簡支、二端自由，二簡支端的距離為 5cm。

由數值分析結果得知，所考慮的五種心材密度，並不會改變夾心板的破壞模式；即夾心板的破壞模式如前所述，為衝壓頭與材料接觸點下方的局部破壞（面材纖維破壞及脫層破壞，心材塑性壓潰破壞），而不會產生心材的剪切破壞。雖然破壞現象是屬於局部破壞，但是這種局部破壞卻相當複雜，因為牽涉到面材破壞與心材破壞的耦合效應（Coupling effect）。表 2 為各種密度心材的夾心板之分析結果。由表可知，隨著心材密度的增加，材料所能承受的外力最大值也隨之增加。但是當心材為 H200 時，夾心板所能承受的外力最大值反而不及心材為 H130 或 H160 的夾心板。造成此現象的原因，應該是心材為 H160 時，與面材在破壞機構上有較佳的搭配。如前節所述，當心材密度較大時，面材在脫層破壞及纖維破壞較早發生，也較為嚴重，使得衝壓頭較早開始入侵心材而導致外力的下降。而當心材的密度較小時，如 H80，因為接觸點下方的心材，塑性及壓潰破壞較為嚴重，故被“支撐”於其上的面材，會因此而易於發生破壞，導致衝壓頭開始入侵心材。由於面材破壞及心材破壞的相互影響，使得夾心板的破壞現象較難掌握。在本例中，心材為 H130 及 H160 的夾心材，從能量的觀點來看（如表 2 所

示)，對於衝擊負荷有較佳的耐衝能力。

2. 沖壓頭直徑 / 簡支跨距比 (R/S)

本節將衝壓頭半徑固定為 0.65cm，邊界條件為二端自由，二端簡支。考慮四種不同的簡支跨距，使得衝壓頭直徑 / 簡支跨距比(R/S) 約為 0.125、0.15、0.2 及 0.25。面材積層仍為 MCM，心材密度固定為 0.1。夾心板的長寬幾何尺寸為 12cm×6cm。數值解析的結果如表 3 所示。同樣的，在本節中所考慮的不同簡支跨距，對於夾心板的破壞模式並無明顯的改變，仍是維持局部破壞的現象。由表 3 可以得知，隨著簡支跨距的增加，夾心板的最大承受外力便隨之減少，但使其產生破壞所需的能量卻隨之增加。這是因為簡支跨距較大的夾心板，其整體變形較為容易，使得外加的能量中，消耗於夾心板應變能的值增加。也就是說，若欲達到相同的破壞情形，必須對夾心板施加更多的能量。本例中，在耐衝特性的考量下，設計者可以選擇較長的簡支跨距以增加夾心板的耐衝能力。不過要注意的是，不能一味的將夾心板的簡支跨距增大，因為當夾心板長度方向上的簡支跨距增加過大時（若夾心材的寬度不變），則雖然是受圓球型撞頭的作用，但此時的夾心板較類似於夾心樑，極有可能出現心材的剪切破壞。如此，對於耐衝能力，反而有負面的影響。

四、綜合結論

夾心材料由於可因不同的面材和心材之搭配，而產生不同的力學特性，近年來此種材料在工程上的應用，日益受到重視。與積層材料相似，夾心材料在抵抗側向衝擊負荷時極易發生損傷，進而危及結構物的安全。因此本文針對夾心板材低速衝擊的問題，利用數值解析的方式進行探討。本文的計算結果與文獻的試

驗結果相比較，證實所建立的分析工具有相當的準確性。根據前面各節的探討，可歸納出下列之結論：

（一）數值解析中，本文採用拉格朗奇乘數（Lagrange multiplier）技巧來處理兩碰撞體間的接觸問題。此方法可直接求得撞擊力及材料反應，為從事衝擊研究之一簡便方法，值得採用。唯此解析方法的精確度，建立在面材及心材的材料性質能否正確掌握，尤其是材料性質較為複雜的心材。因此，建立一套正確且完整的材料實驗方法，是未來首要努力的目標。

（二）夾心板的數值解析方面，雖然不論心材密度為 0.1 或是 0.2，夾心板皆呈現局部破壞。不過，密度 0.1 之心材在心材塑性行為的進展，似乎向四方及下方進展的較快，且接觸點下方的壓潰破壞較嚴重。但在面材破壞方面，因為密度 0.2 的心材，其剛性及強度較大，使得位於其上的表面材，在脫層破壞及纖維破壞方面較為嚴重。在參數探討方面，心材密度越大的夾心材，在衝擊性能上不一定最佳，而簡支跨距越大，則需要更多的衝擊能量使其達到破壞。

五、未來研究之建議

1. 在夾心板的破壞分析中，由於破壞機制屬於局部破壞，現象較為複雜，故數值計算結果的正確性較不易掌握。對於面材或心材破壞法則的選擇及破壞後的剛性修正方法，建議可進一步的加以探討改進。
2. 在夾心板受圓球型衝壓頭作用下，由於撞擊點附近區域的變形較為嚴重，元素過度扭曲的現象會限制程式的收斂性及準確性。在程式中，若加入網格重建（Auto remesh）的功能，應該能有效改善此問題。
3. 由本文得知，三維的衝擊問題若牽涉到破壞，所需的計算時間相當多，且所

需的記憶容量也很大。如何不失計算正確性，又能降低計算成本，是未來需要進一步探討的方向。對於受力情形較簡單的夾心板，或許可用複合實體元素（Composite solid element）來減少模型的自由度。此外，對於局部破壞的問題，或許可以次結構（Sub-structure）的方法，加以分析探討以減少計算成本。

4. 撞頭斜向入射撞擊或高速貫穿等衝擊問題。

參考文獻

- [1] Donald F.Adams and Eric Q.Lewis, “Experimental Study of Three and Four-Point Shear Test Specimens”, J. of Composites Technology and Research, Vol.17, No.4, pp.341-349, 1995
- [2] Peter O.Sjoblom and J.Timothy Hartness, “On Low-velocity Impact Testing of Composite Materials”, J. of Composite Materials, Vol.22, pp.30-53, 1988
- [3] P.Robinson and G.A.O, Davies, “Impactor Mass and Specimen Geometry Effects in Low Velocity Impact of Laminated Composites”, Int. J. Impact Engng, Vol.12, No.2, pp.189-207,1992
- [4] Krishna Srinivasan, Timothy W.Coats and Jeffrey A.Hinkley, “Shear Failure and Impact Resistance in Graphite Fiber Laminates”, J. of Composite Technology and Research, Vol.14, No.4, pp.231-234, 1992
- [5] Ralph H.Zee and Chung Y.Hsieh, “Energy Loss Partitioning During Ballistic Impact of Polymer Composites”, Polymer Composites, Vol.14, No.3, pp.265-275, 1993
- [6] Young S.Kwan and Bhavani V.Sankar, “Indentation-Flexure and Low-Velocity Impact Damage in Graphite Epoxy Laminates”, J. of Composites Technology and Research, Vol.15, No.2, pp.101-111, 1993
- [7] Bhavani V.Sankar, “Low-Velocity Impact Response of Laminated Beams Subjected to Initial Stresses”, AIAA Journal, Vol.23, No.12, 1962
- [8] C.Allen Ross, Lawrence E.Malvern, Robert L.Sierakowski and Nobuo Takeda, “Finite Element Analysis of Interlaminar Shear Stress Due to Local Impact”, Recent Advances in Composites in the United States and Japan, ASTM STP 864, pp.355-367, 1985
- [9] J.R.Kommineni and T.Kant, “Large Deflection Elastic and Inelastic Transient Analyses of Composite and Sandwich Plate with a Refined Theory”, J. of Reinforced Plastics and Composites, Vol.12, pp.1150-1170, 1993
- [10] C.T.Sun and W.J.Liou, “Investigation of Laminated Composite Plates Under Impact Dynamic Loading Using a Three-Dimensional Hybrid Stress Finite-Element Method”, Computers and Structures, Vol.33, No.3, pp.879-884, 1989
- [11] K.C.Jen and K.Mao, “Modeling Progressive Failure in Laminated Composites”, Proceeding on ABAQUS User’ Conference

- [12] Fu-Kuo Chang and Zafer Kutlu, “Strength and Response of Cylindrical Composite Shells Subjected to Out-of-Plane Loadings”, J. of Composite Materials, Vol.23, pp.11-21, 1989
- [13] W.C.Hwang and C.T.Sun, “Failure Analysis of Laminated Composites by Using Iterative Three-Dimensional Finite Element Method”, Computers and Structures, Vol.33, No.1, pp41-47, 1989
- [14] S-W.R.Lee and C.T.Sun, “A Quasi-Static Penetration Model for Composite Laminates”, J. of Composite Materials, Vol.27, No.3, 1993
- [15] Yeruva S.Reddy and Junuthula No.Reddy, “Three-Dimensional Finite Element Progressive Failure Analysis of Composite Laminates Under Axial Extension”, J. of Composite Technology and Research, Vol.15, No.2, pp73-87, 1993
- [16] Youngchan Kim, Julio F.Davalos and Ever J.Barbero, “Progressive Failure Analysis of Laminated Composite Beams”, J. of Composite Materials, Vol.30, No.5, PP.536-560, 1996
- [17] 徐堯：複合夾心材料低速衝擊行為之實驗與數值分析，台灣大學造船及海洋工程學研究所博士論文

圖 1 夾心板的元素網格

圖 2 面材積層 MCM , 心材密度 0.1 , 數值與實驗衝擊力履歷比較

圖 3 面材積層 MCM , 心材密度 0.2 , 數值與實驗衝擊力履歷比較

圖 4 面材積層 MAM，心材密度 0.1，數值與實驗衝擊力履歷比較

圖 5 面材積層 MCM，心材密度 0.2，數值與實驗衝擊力履歷比較

圖 6 心材密度 0.1，面材積層 MCM 之夾心板，實驗與數值計算 F-d 關係圖比較

圖 7 心材密度 0.1，面材積層 MCM 之夾心板，心材塑性行為進展圖

圖 8 心材密度 0.1，面材積層 MCM 之夾心板，心材中央裂縫示意圖

圖 9 心材密度 0.1，面材積層 MCM 之夾心板，面材脫層破壞進展圖

圖 10 心材密度 0.1，面材積層 MCM 之夾心板，面材纖維破壞進展圖

複合夾心板低速衝擊行為之數值解析

27

表 1 DIVINYCELL 發泡材的材料性質

Core	E(Mpa)	Yielding Strength (Mpa)	Failure Strength (Mpa)
H80	80	1.2	2.2
H100	115	2.0	2.75
H130	140	2.5	4.2
H160	170	3.4	5.1
H200	230	3.8	5.8

表 2 面材 / 心材剛性比之參數探討結果

Core	Failure Strength (N)	Energy needed to fail (Joules)	Failure Mode
H80	1560	3.889	局部破壞
H100	2153	4.899	局部破壞
H130	2456	6.787	局部破壞
H160	2939	8.392	局部破壞
H200	2480	5.387	局部破壞

表 3 衝壓頭直徑 / 簡支跨距比之參數探討結果

R/S	Failure Strength (N)	Energy needed to fail (Joules)	Failure Mode
0.125	1537	4.331	局部破壞
0.15	1645	3.887	局部破壞
0.20	1889	3.772	局部破壞
0.25	2094	3.618	局部破壞

