

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 複材結構損傷的非破壞評估及智慧監測診斷系統之研究(2/2)

### Nondestructive Evaluation, Smart Monitoring and Diagnostics of Damages in Composite Structures

計畫編號：NSC 90-2212-E-009-052

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：尹慶中 國立交通大學機械工程學系

計畫參與人員：黃俊銘、李金福、劉育翔 國立交通大學機械系

E-mail: ccyin@cc.nctu.edu.tw

#### 摘要

本研究為二年期計畫，第一年的研究完成纖維繞線複材圓管結構的導波波傳分析，並發展複材圓管材料勁度矩陣係數的反算，建立以圓管導波為基礎的非破壞檢測理論及分析方法；第二年工作則以表面粘著之壓電晶片作為超音波導波的致動器及感測器，發展主動偵測複材結構損傷的智慧監測技術及診斷系統，識別結構內部損傷位置。

關鍵字：纖維繞線複材圓管、導波、結構健康監測、非破壞檢測、致動/感測器

#### ABSTRACT

Guided wave propagation in a filament wound composite cylindrical shell was studied in the first year of a two-year-long research project. The phase velocity and group velocity dispersion curves of the guided waves in composite tubes were formulated by the first order shear deformation theory. An inverse scheme based on dispersion curves of the guided waves was developed to determine the stiffness components of the composite tubes. Research in the second year concentrated on development of smart monitoring system using built-in piezoelectric actuator/ sensor in an effort to in-situ detect damage positions.

Keyword: filament wound composite tube, guided waves, structural health monitoring (SHM), nondestructive test, actuator/sensor

#### 一、緒言

纖維補強複材具有質輕、強度高、耐腐蝕等高分子複材的優異性質，具有極高的經濟效益與重要性。高分子複材的破壞韌性較差，受到撞擊或疲勞負荷，容易損傷而影響整體強度。故複材結構的品質確認及使用期間的定期安全檢驗，都需要可靠、有效的非破

壞檢測技術。

本研究修正 Mirsky[1]的理論分析，以一階剪變形假設近似圓管導波的波傳，並推導暫態響應之近似解。導波的頻散曲線將用以反算複材圓管的材料勁度係數，暫態解則可供瞭解圓管導波的波傳特性，並模擬材料微破壞產生之音洩波在複材結構表面的動態響應。

複材損壞通常都是漸進式(progressive)的破壞，而非災難式(catastrophic)的失效。複材的破壞模式複雜，對於結構的安全性有不同的影響，對於結構勁度分量的減損亦有所不同。材料的彈性波波速與勁度係數直接相關，因此，若能藉黏著於結構表面的壓電元件，長期主動地監測結構的波速變化以及損傷缺陷邊緣的繞射波[2-3]，不僅可以偵測材料破損的位置，還可以得知結構受損後的剩餘勁度及破損的種類，將可大幅提昇結構的安全性。本計畫最終目的將建構一個具有評估、診斷複材結構損傷的智慧監測系統及其方法。

#### 二、理論分析

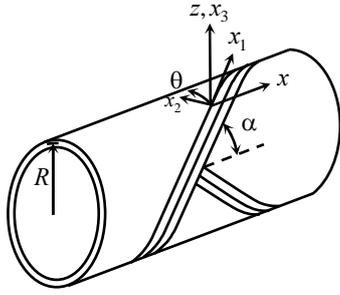
纖維繞線複材圓管係將纖維束纏繞於心模後，烘焙而成，在平行體段，纏繞角度為定值。每個積層內的材料性質可以合理假設為橫向等向性(transversely isotropic)材料，如圖一所示，令圓管上局部任一點的纖維束纏繞方向為  $x_1$  軸，垂直圓管表面的方向為  $x_3$  軸，若積層為偶數排列，例如  $[(\alpha/-\alpha)_n/90_m]$ ，將各積層材料的勁度係數以下式加成，

$$C_{ij} = \sum C_{ij}^{(k)} (h_k - h_{k-1}) / \sum (h_k - h_{k-1}) \quad (1)$$

則複材圓管材料的全域應力應變關係如下：

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{x\theta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{\theta\theta} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{\theta z} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{x\theta} \end{pmatrix} \quad (2)$$

故材料仍僅具有五個獨立的勁度係數。



圖一 纖維繞線複材圓管及座標系統

### 纖維繞線複材圓管

本研究修正 Mirsky[1]對於圓管導波分析的一階剪變形假設，將圓管的位移函數設為

$$\begin{aligned} u_x &= u(x, \theta, t) + z\varphi_x(x, \theta, t), \\ u_\theta &= v(x, \theta, t) + z\varphi_\theta(x, \theta, t), \\ u_z &= w(x, \theta, t), \end{aligned} \quad (3)$$

依據圓柱座標系統，其應變可以表示為

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial x} + z \frac{\partial \varphi_x}{\partial x}, \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_z}{r} = \frac{1}{R+z} \left\{ \frac{\partial v}{\partial \theta} + z \frac{\partial \varphi_\theta}{\partial \theta} + w \right\}, \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0, \\ \gamma_{x\theta} &= \frac{\partial u_\theta}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_x}{\partial \theta} = \frac{\partial v}{\partial x} + z \frac{\partial \varphi_\theta}{\partial x} + \frac{1}{R+z} \left\{ \frac{\partial u}{\partial \theta} + z \frac{\partial \varphi_x}{\partial \theta} \right\}, \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} = \varphi_x + \frac{\partial w}{\partial x}, \\ \gamma_{\theta z} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z} - \frac{u_\theta}{r} = \varphi_\theta + \frac{1}{R+z} \left\{ \frac{\partial w}{\partial \theta} - v - z\varphi_\theta \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

在平面應力(plane stress)下，面內(in-plane)的應力與應變關係及橫向(transverse)剪力與應變關係為

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{x\theta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{\theta\theta} \\ \gamma_{x\theta} \end{pmatrix} \quad (5a)$$

$$\begin{pmatrix} Q_{\theta z} \\ Q_{xz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_4 Q_{44} & 0 \\ 0 & k_5 Q_{55} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_{\theta z} \\ \gamma_{xz} \end{pmatrix} \quad (5b)$$

$Q_{ij} = C_{ij} - C_{i3}C_{3j}/C_{33}$ ， $k_4$ 及 $k_5$ 為剪變形修正係數，根據導波的頻散曲線將可反算 $k_4$ 及 $k_5$ [4]。應用漢彌頓原理(Hamilton's principle)可推導運動方程式如下：

$$[\mathbf{A}] \begin{pmatrix} u \\ v \\ \varphi_x \\ \varphi_\theta \\ w \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_x \\ f_\theta \\ M_x \\ M_\theta \\ -f_z \end{pmatrix} = \rho \begin{pmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \\ \ddot{\varphi}_x h^2/12 \\ \ddot{\varphi}_\theta h^2/12 \\ -\ddot{w} \end{pmatrix} + \frac{\rho h^2}{12R} \begin{pmatrix} \ddot{\varphi}_x \\ \ddot{\varphi}_\theta \\ \ddot{u} \\ \ddot{v} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中各項係數、徹體力(body forces)所產生之彎矩定義請參考朱寶聖[5]，此處從略。

假設一個沿圓管軸向波傳的時諧(time-harmonic)導波的位移函數為

$$\begin{aligned} u(x, \theta, z, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} U_n \cos(n\theta) \right\} e^{i(kx - \omega t)} dk, \\ \varphi_x(x, \theta, z, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_{xn} \cos(n\theta) \right\} e^{i(kx - \omega t)} dk, \\ v(x, \theta, z, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} V_n \sin(n\theta) \right\} e^{i(kx - \omega t)} dk, \\ \varphi_\theta(x, \theta, z, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_{\theta n} \sin(n\theta) \right\} e^{i(kx - \omega t)} dk, \\ w(x, \theta, z, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} W_n \cos(n\theta) \right\} e^{i(kx - \omega t)} dk. \end{aligned} \quad (7)$$

其中，下標 $n$ 稱為周向匝數，導波的周向波數與周向匝數的關係為 $k_\theta = n/R$ 。圓管導波相速度的頻散方程式為

$$\mathbf{\Omega} = \det[\mathbf{A}(n, k)] = 0 \quad (8)$$

圓管導波沿軸向傳遞的群速度則為

$$c_g = -\frac{\partial \mathbf{\Omega} / \partial k}{\partial \mathbf{\Omega} / \partial \omega} \quad (9)$$

### 纖維編織複材層板

纖維編織(woven)複材層板的材料阻尼較大，高階的板波不易生成。故本研究將層板的位移假設為一階剪變形，即

$$\begin{aligned} u_x &= u(x, y, t) + z\varphi_x(x, y, t), \\ u_y &= v(x, y, t) + z\varphi_y(x, y, t), \\ u_z &= w(x, y, t), \end{aligned} \quad (10)$$

板波相速度與群速度的推導及計算詳見林克劫[4]。

### 小波轉換分析

導波訊號係以群速度向四方波傳，本研究以連續小波轉換計算原始暫態波訊號的包絡線峰值，此即為波群訊號的波傳指標。連續小波轉換表示如下：

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int h(t) \Psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (11)$$

其中， $h(t)$ 為板波訊號， $\Psi(t)$ 為母小波， $a$ 為尺度係數， $b$ 為時間延遲。本文採用高斯母小波

$$\Psi(t) = \exp(i\omega_0 t - t^2/2) \quad (12)$$

其中， $\omega_0 = 5.3 \text{ Mrad/sec}$ ，板波頻率 $f = \omega_0 / 2\pi a$ 。

### 三、結果與討論

本研究先將上述理論的數值結果與 Heimann & Kolsky[7]及駱東春[8]的等向性圓管導波相速度頻散曲線的結果比較，正解與近似解非常吻合，但是較高頻率處的偏差逐漸增大，此與剪變形修正係數 $k_4$ 與 $k_5$ 相關。由密度 $7.86 \text{ g/cm}^3$ ，內徑 $31 \text{ mm}$ ，外徑 $32 \text{ mm}$ ， $C_{11}=C_{22}=C_{33}=269.93 \text{ GPa}$ ， $C_{44}=C_{55}=C_{66}=76.92 \text{ GPa}$ ， $C_{12}=C_{13}=C_{23}=115.39 \text{ GPa}$ 的鋼管導波相速度頻散曲線正解，以簡單體法反算剪變形修正係數，獲得 $k_4 = 0.8225$ 、 $k_5 = 0.8851$ ，而 Reissner [9]及 Mindlin [10]的剪變形修正係數分別為 $5/6$ 及 $\pi^2/12$ 。

本研究以石墨環氧樹脂纖維繞線複材圓管為例，計算導波的相速度與群速度頻散曲線。假設複材的質

量密度為  $\rho=1.578 \text{ g/cm}^3$ ，勁度係數  $C_{11}=160.73 \text{ GPa}$ ， $C_{22}=13.92 \text{ GPa}$ ， $C_{12}=6.44 \text{ GPa}$ ， $C_{23}=6.92 \text{ GPa}$ ， $C_{66}=7.07 \text{ GPa}$ ，纖維繞線角度為  $\alpha = \pm 26^\circ$ ，內徑  $49.12 \text{ mm}$ ，外徑  $50.88 \text{ mm}$ ，剪變形修正係數分別為  $k_4 = 0.8926$ ， $k_5 = 0.8876$ 。圖二所示為該複材圓管的扭轉波、縱波( $n=0$ )、撓性波( $n=1$ )的頻散曲線，圖三所示為其群速度頻散曲線。本研究根據複材圓管導波之縱波( $n=0$ )及撓性波( $n=1$ )的相速度頻散曲線，以延伸拉格蘭吉乘子改良簡單體法反算材料的勁度係數，所獲得的勁度係數與理論值的誤差僅  $0.1\%$ 。

圖四為本研究進行結構健康監測的實驗示意圖，待測的結構可以為複材圓管或層板[6]。圖五所示為一  $60 \text{ 公分}$  見方之纖維編織碳纖維複材  $6 \text{ 層板}$  試片，板中央上下方分別黏貼一張 Kapton® 軟性電路板，其與複材板之間黏貼四組  $0.254 \text{ mm}$  厚之圓形 PZT-4 壓電陶瓷片，構成間距  $20 \text{ 公分}$  見方的陣列。每組壓電陶瓷的極化方向反稱黏貼於複材板的兩側，因此僅能致動生成反對稱板波(即撓性波)，也僅能感測撓性波。該複材受一自由墜落體低速衝擊，產生一個十字型衝擊損傷。

圖六所示為感測/致動器間不同頻率板波直接波傳的訊號，以及經過連續小波轉換(採用高斯母小波)所獲得之訊號，圖中較大的訊號即為  $A_0$  板波訊號，隨著工作頻率增加， $A_0$  板波的群速度遞增，波傳時間差遞減。圖七所示則為直徑  $10 \text{ mm}$  圓孔散射波訊號及其小波轉換訊號，緊接在直接波傳板波訊號之後的微小訊號即為散射波。由於散射波訊號相對於直接波傳板波訊號很微小，傳統的  $8 \text{ 位元}$  示波器或 A/D 卡無法滿足實驗要求，必須採用具備較高解析度的 A/D 卡，本實驗系統採用具  $12 \text{ 位元}$  之 A/D 卡(GaGe Compuscope 12100)擷取板波訊號。

散射波訊號的包絡線峰值對於工作頻率即為散射波頻譜，惟系統的頻率響應並非平坦一致，故散射波頻譜必須對於直接波傳板波頻譜予以規一化(normalize)，規一化後的散射波頻譜如圖八所示，散射波頻譜凹陷處的板波頻率與缺陷尺寸有關。圖九所示為小波轉換前、後之散射波訊號的灰階圖。經過小波轉換後，訊號的訊噪比有明顯的改進，緊接在直接波傳板波訊號之後的散射波訊號也較為清楚的呈現。

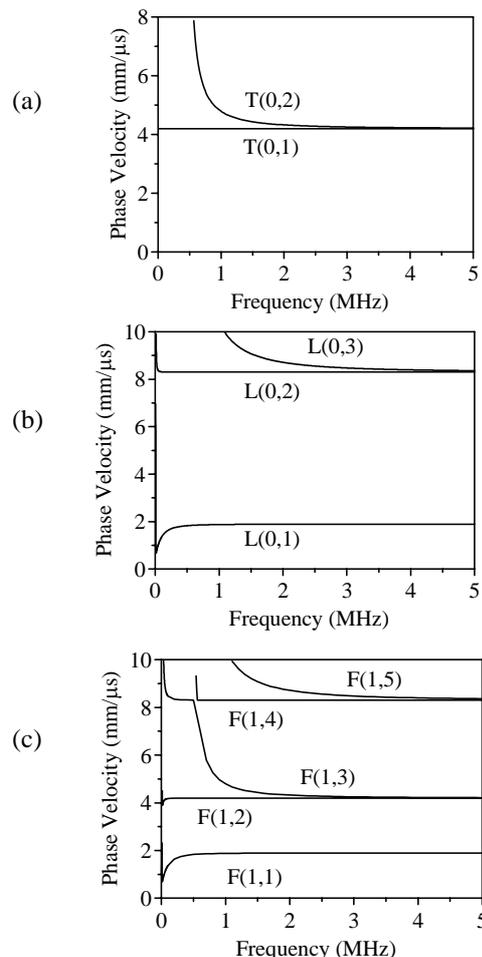
#### 四、結論與展望

本研究第一年期間已完整分析圓管導波波傳的頻散特性，建立以圓管導波波傳為基礎的材料勁度係數之反算方法。提供導波響應之解析解評估發展結構健康監測系統，並瞭解壓電元件激振生成圓管導波的機制及其響應。所推導的暫態波響應未來可供模擬雷射超音波的生成與複材微破壞所引致的音洩波傳響應。

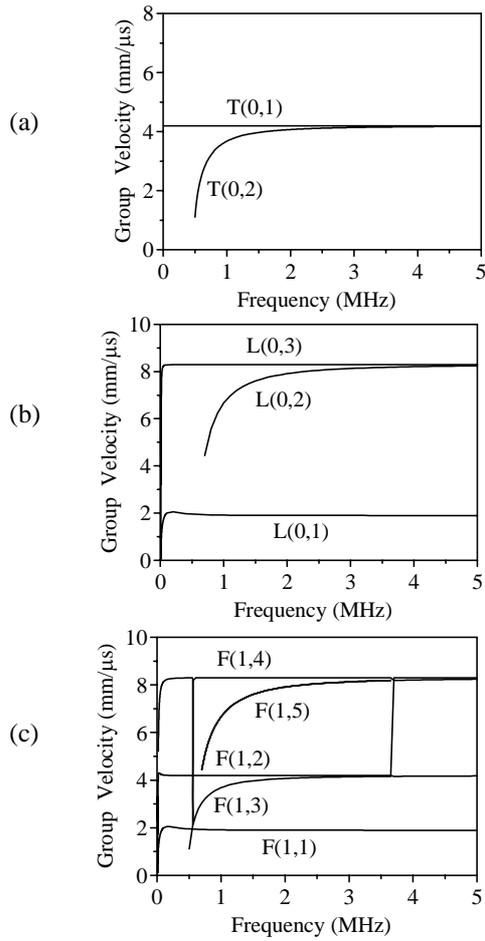
第二年的研究主要在於發展一個具有評估、診斷複材結構損傷的智慧監測系統及其方法。在纖維編織複材層板或繞線複材圓管表面黏著數個壓電片，形成一組陣列，作為偵測結構損傷的導波制動器及感測器。在成品使用之初，即先行偵測各個壓電元件間的波傳特性及材料性質，使用期間則定期進行自我檢測。實驗及分析系統已可反算複材結構損傷的缺陷位置，受到纖維編織複材高阻尼性質的限制，缺陷尺寸反算的準確度尚待改進；然而本系統對於等向性平板圓洞缺陷的尺寸，已具備良好的偵測及反算能力。

#### 參考文獻

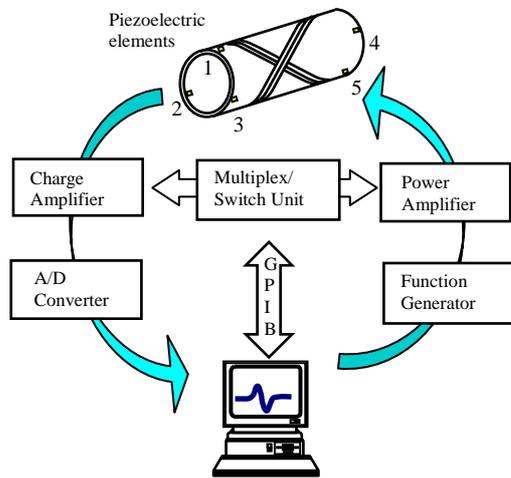
- [1] I. Mirsky (1964), "Vibration of orthotropic, thick, cylindrical shells," *J. Acoust. Soc. Am.*, **36**, 41-51.
- [2] S. Beard and F.-K. Chang (1997), "Active damage detection in filament wound composite tubes using built-in sensors and actuators," *J. of Intelligent Material System and Structures*, **8**, 891-897.
- [3] Y.-S. Roh (1998), *Built-in Diagnostics for Identifying an Anomaly in a Plate Using Wave Scattering*, Ph.D. Dissertation in Aeronautics and Astronautics, Stanford University.
- [4] 林克劫(1999), 複材層板微破壞的音洩波傳研究，國立交通大學機械系碩士論文，新竹市。
- [5] 朱寶聖(2001), 纖維繞線複材圓管的導波波傳與材料常數之反算研究，國立交通大學機械系碩士論文，新竹。
- [6] 李金福(2002), 平板缺陷的板波散射與主動偵測研究，國立交通大學機械系碩士論文，新竹市。
- [7] J. H. Heimann and H. Kolsky (1966), "The propagation of elastic waves in thin cylindrical shells," *J. Mech. Phys. Solids*, **24**, 121-130.
- [8] 駱東春(1994), 圓管的導波波傳研究，國立交通大學機械研究所碩士論文，新竹市。
- [9] E. Reissner (1945), "The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates," *J. Appl. Mech., Trans. ASME*, A-69.
- [10] R. D. Mindlin (1951), "Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic plates," *J. Appl. Mech., Trans. ASME*, **18**, 31-38.



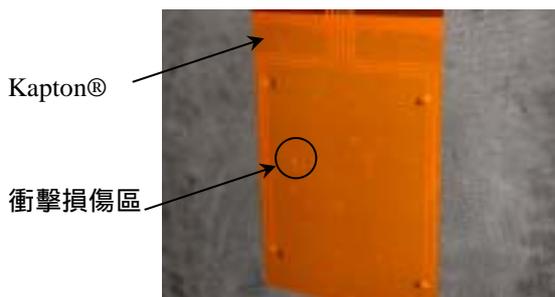
圖二 複材圓管導波相速度頻散曲線，(a) 扭轉波、(b) 縱波、(c)  $n=1$  之撓性波。



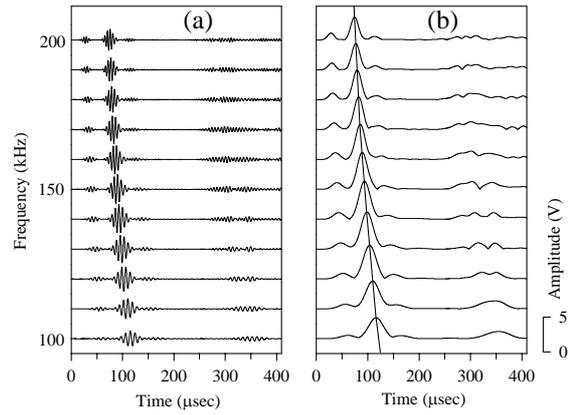
圖三 圖二之群速度頻散曲線



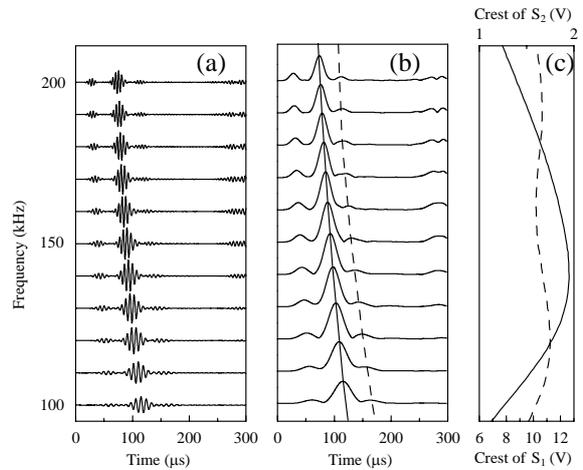
圖四 結構健康監測實驗示意圖



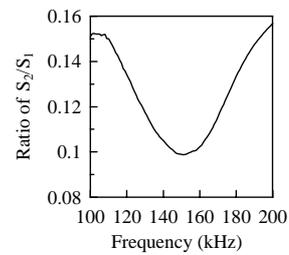
圖五 纖維編織複材試片、陣列壓電換能器及損傷區



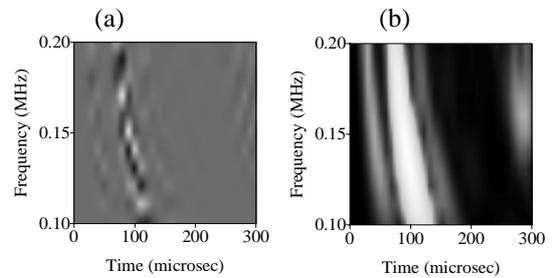
圖六 (a)直接波傳板波訊號及(b)小波轉換訊號



圖七 (a)直徑 10 mm 圓孔散射波訊號、(b)小波轉換訊號、(c)直接波傳板波(實線)及散射波(虛線)頻譜



圖八 直徑 10 mm 圓孔之散射波訊號頻譜



圖九 圖七之(a)原始訊號及(b)小波轉換之訊號灰階圖