

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高職組 土木科

第三名

最佳團隊合作獎

091203

傳音入密—聲波應用於建築安全分析之研究

學校名稱：臺北市私立開南高級商工職業學校

作者：  職二 吳泰宏  職二 李秉叡  職二 連凱煜  職一 黃睿宇	指導老師：  張丕白  劉宗憲
---	-----------------------------

關鍵詞：機械波、混凝土、撞擊

# 摘 要

新聞經常報導土木建築發生漏水、海砂屋或裂縫等災害。臺灣位於地震頻仍區域，建築結構需要加強檢測，才能住的更安心。此外海洋季風的氣候常有豪雨，最近釀成三號國道崩塌意外，土木結構需要全面性的安全檢測。然而現有檢測方式以破壞性為主，需耗費許多時間與金錢。因此我們研發以非破壞性方式，樽節成本並能快速分析土木結構的系統，能維護民眾的安全。本研究系統包含以下兩大項：

## 一、機械波產生裝置

利用電磁效應產生磁力，並以訊號產生器調整電場的頻率，規律地敲擊待測物，產生相同的聲波。

## 二、聲音檢測裝置

將撞擊物體的反射波輸入頻譜分析儀分析波形，以電腦程式將聲波轉變成頻譜，進行分析比較。

## 壹、 研究動機

購屋時最怕買到漏水、海砂屋或是有裂縫的房屋。漏水、海砂屋短期會造成壁癌，危害身體健康，長期則會加速腐蝕鋼筋嚴重損害建築結構；有裂縫的房屋則會導致房屋倒塌。漏水的混凝土於短期內，會在牆面滲出白色的痕漬，即俗稱「壁癌」。長期累積會加速腐蝕鋼筋，造成混凝土塊剝落，嚴重損害建築結構，甚至會有黴菌的產生，對居家環境及身心健康產生傷害。而有裂縫的房屋，對結構也會有很大的影響，嚴重時會導致房屋倒塌。

此外臺灣位於歐亞板塊與菲律賓板塊交界處，為全球地震最頻繁的區域，建築結構更需要檢測，才能讓人們住得更安心。我們利用所學的相關知識（表 1）配合基礎的儀器，檢測土木與建築結構，維護民眾居住的安全。

表 1 高職課程相關內容

科目名稱	年級	內 容	作品應用部分
基礎化學	高一	生活中的物質	研究混凝土的組成
基礎物理	高一	聲 音	產生聲音的原因與聲音特性
		電與磁	電磁鐵製作
計算機概論	高一	繪圖軟體	繪製精確的波形曲線
		應用軟體	繪製波形與曲線圖
建築材料	高一	混凝土	研究混凝土的組成
工程力學Ⅱ	高二	混凝土的特性	研究混凝土的性質
選修物理	高三	聲 波	聲音的波形的產生

## 貳、研究目的

現有檢測鋼筋混凝土結構，以局部破壞性的鑽勘為主，此種檢測方式會毀損建物，因此難以分析梁柱等主要結構。有鑑於此，我們研究非破壞性的量測方式，進行土木結構的檢測，分析是否有海砂成分，或有壁癌、裂縫與混凝土的比例。能防治土木結構的瑕疵，即早維修或修改補強，避免悲劇的發生。

大部分民眾在購買房屋時，都無法得知建築的品質，而檢測這建築物相關問題，都需要花費許多的時間與金錢，如果能夠有方便檢測房屋，且不需花費過多金錢，可以即時檢測分析出建築物的安全，則可保障民眾住的安全。

### 叁、研究設備及器材

本研究所的設備、器材與工具，分爲下列三大類：

一、研究設備：參閱（表2）所列。

表2 研究設備一覽表

研究設備	規 格	數 量	備 註
水泥攪拌機	小型	1	
加速度規	小型	1	
信號產生器		1	產生標準訊號供校正
電源供應器		1	提供固定電壓
三用電表	類比	2	
筆記型電腦		1	訊號處理
印表機		1	資料輸出

二、研究器材：參閱（表3）所列。

表3 研究器材一覽表

研究器材	規 格	數 量	備 註
麥克風	動圈式	2	擷取聲波
麥克風	電容式	2	擷取聲波
麥克風放大器	高傳真	1	訊號放大
線 材	低雜訊	3	訊號傳送
金屬材料	銅、軟鐵、鋁	5	量測機構
木板	無	2	儀器裝置
混凝土牆		5	分析波形

三、工具機：參閱（表4）。

表4 研究工具機一覽表

研究器材	規 格	數 量	備 註
槌 子	小	2	木槌、橡膠槌
尖嘴鉗	電子用	4	無 牙
斜口鉗		1	
螺絲起子組		4	
銼 刀		5	一 組
電 鑽	小型	2	

## 肆、研究過程或方法

### 一、混凝土的劣化特性

#### (一) 壁癌：

壁癌是混凝土牆面防水不良或有裂縫，受到酸性水氣侵蝕而滲透到內部，與水泥、砂、磚牆裡的鹼性離子（如鈉、鈣、鎂、鉀）產生酸鹼中和作用，形成碳酸鹽( $\text{CO}_3^{2-}$ )結晶體，當此結晶體淤積在牆面會使塗料或壁紙起泡、鼓起、碎裂、剝落，再與空氣中的二氧化碳結合成結晶體，成為白色針狀或粉末的壁癌。壁癌會損壞建築結構，此外壁癌會使牆面溫暖、潮濕，並產生許多毛狀結晶物與孔隙，適合黴菌、細菌等微生物繁殖。這些黴菌隨著空氣飄散各處不斷繁殖，充斥整個居家環境，為害人們的居家環境與身心健康。

#### (二) 裂縫

裂縫的深度，若是 1、2 公分深為表層裂縫，比較沒有安全顧慮；深度超過 3、4 公分為深層裂縫，或許短期內沒有危險性，但雨水、空氣之中的水氣，會不斷的鏽蝕結構中的鋼筋，經過長時間會造成嚴重危害。

#### (三) 海砂屋

混凝土取用海邊的砂子，而非正常所用的河砂。海水含有豐富的氯化鈉，導電性高並且海鹽有潮解性，會吸收水氣，根據研究海砂屋只有六至十年的使用壽命。

#### (四) 地震傷害

最近地震頻繁嚴重危及土木結構，往往外圍結構並無明顯損壞，但內部結構已深受影響。

## 二、機械波產生裝置

### (一) 電磁鐵芯

常用的鐵材分為生鐵、熟鐵、鋼三種，生鐵為含碳量相當高的合金，碳占整個合金的 2.5~4.5% 左右，鋼則較低含碳量為 0.02~2.14%，熟鐵則幾乎不含碳。熟鐵雖然硬度較低但產生磁力後無蓄磁力，能產生穩定的機械波利於量化分析。

### (二) 電磁鐵線圈

線圈的圈數越多磁力就越強，但圈數過多會達到磁飽和，所以必須實驗出電磁鐵的最佳線圈匝數。

### (三) 裝置設計

以訊號產生器調整電場的時間，進行重複撞擊產生機械波，設計機械波產生裝置如（圖 1）所示。

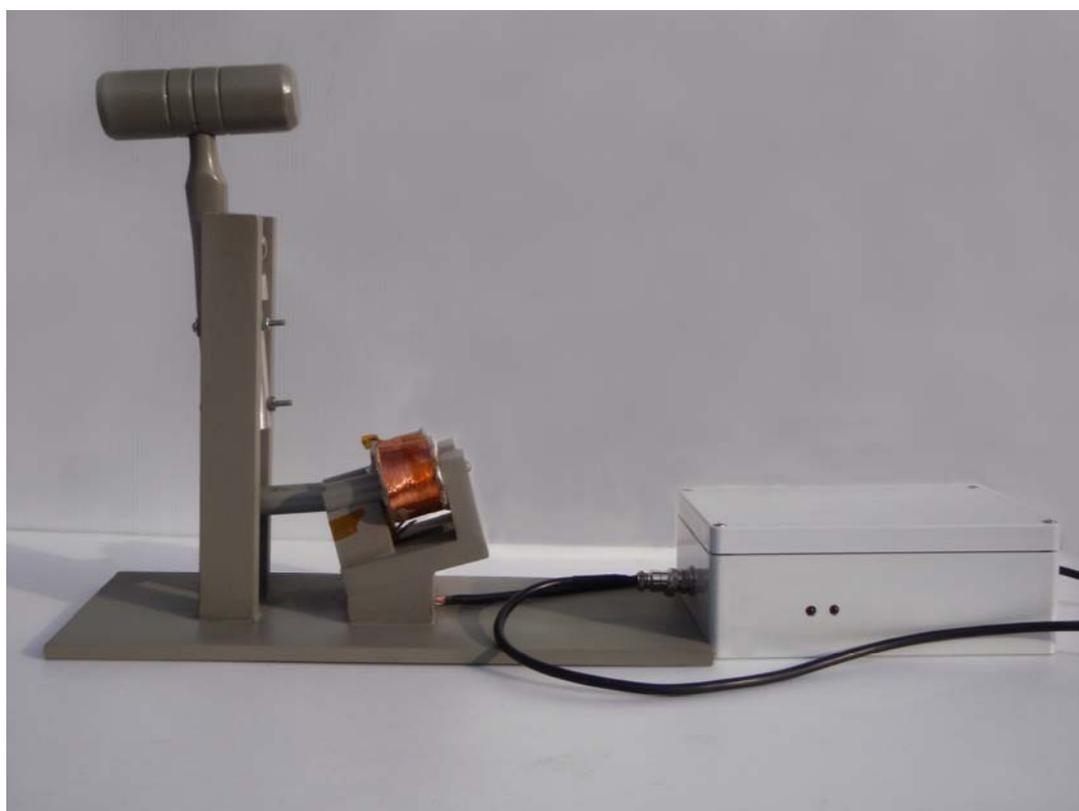


圖 1 機械波產生裝置

### 三、聲波原理

聲波是空氣粒子的位移，在波的途徑中設定一粒子的位置為  $x$  點，當波經過時它會以自己的平衡位置為中心，作出振動如（式 1）所示。

$$S = S_0 \sin[\omega(t - \frac{x}{v})] \dots\dots\dots \text{式 (1)}$$

$S_0$  是位移的振幅， $\omega$  為角頻率， $\omega = 2\pi \times f$ ， $f$  為頻率單位為赫芝 Hz， $t$  為時間，而  $v$  為波速。而波長與頻率的關係為（式 2），其中  $\lambda$  為聲波的波長。

$$\omega = f\lambda \dots\dots\dots \text{式 (2)}$$

#### （一）聲音的傳播：

聲波屬於機械波，是經由介質震動來傳遞，介質是讓聲波傳播的媒介，如空氣、水、固體，所以氣體、固體、液體都能傳遞聲波。聲音在固體中傳播速度最快，其次是液體，在氣體中最慢。聲波具有反射（例如回音）、折射（當通過兩種或以上不同介質時，聲波的傳播速率會產生變化，而改變傳播方向）、繞射（聲波遇到障礙物時有轉彎的現象）。聲波常用於地質探測，如探測石油，船隻用聲納探測水面下的物體。因此，我們運用聲波的這些特性分析土木結構。

#### （二）聲音波形的分類

##### 1. 穩定聲波

聲音震幅的變化不大稱為穩定聲音，此類聲音在測定時，要注意測定位置的選定（圖 2）。

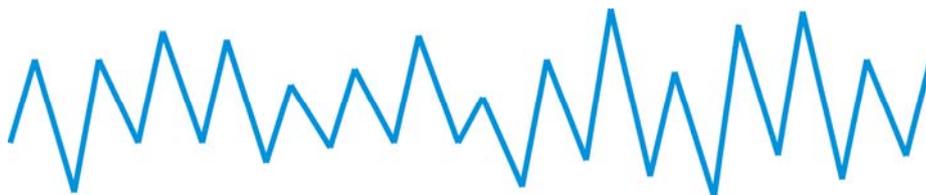


圖 2 穩定聲波

## 2. 變動性聲波

聲音變化不規則且起伏相當大時，稱之為變動性聲音，例如道路所測得之聲音，大部分均屬於變動性聲音（圖 3）。

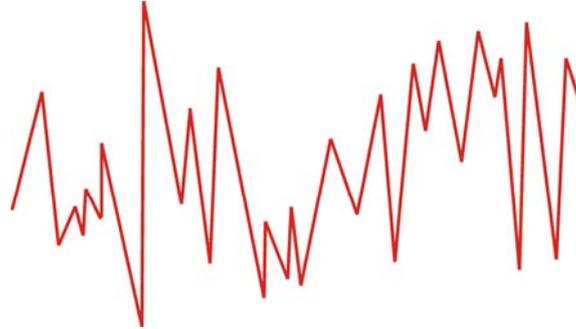


圖 3 變動性聲音聲波

## 3 衝擊性聲音 (Impulsive Noise)

當一聲音之繼續時間在 1 秒以內，稱之為衝擊性聲音（圖 4）。

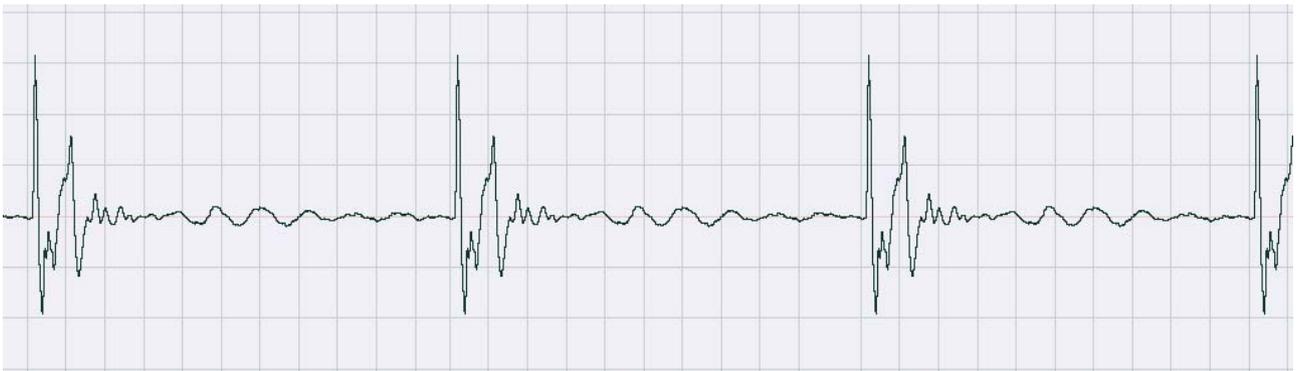


圖 4、衝擊性聲音聲波

本研究主要運用「衝擊性聲音」，將木槌與橡膠撞擊建築物的機械波音頻訊號加以放大，再用電腦音效卡轉換為數位訊號進行研究（圖 4）。

## 四、聲波量測與分析

聲波的測定系統區分為以下幾部分：

- (一) 音源部：能發出穩定機械波的裝置，用槌子規律撞擊產生穩定的聲波。
- (二) 收音部：使用麥克風將聲波的力學能，轉換為電子訊號。
- (三) 紀錄部：包括資料記錄器（含數位紀錄器、電腦等）。
- (四) 分析部：包括電腦（含分析軟體、介面卡）、即時分析的頻譜分析儀。

## 五、聲波分析

我們使用撞擊材料的吸收聲波，測試壁癌、裂縫、海砂屋與正常混凝土，再由頻譜儀與音響公司所提供之頻譜分析軟體，比較波形的變化。頻譜分析軟體與頻譜儀的分析原理相同，基本原理都是「傅立葉分析法」。

傅立葉分析法是法國數學家傅立葉（Jean Baptiste Fourier, 1786-1830）發明，使用疊加原理分析非正弦波波形。只要仔細地選擇正弦波的頻率與振幅，任何波形都能用正弦波的總和而表示。每一條曲線都能藉由足夠數量的簡諧曲線疊加，而精確地複製，所以任何曲線都可利用波的疊加而產生。

（圖 5）是傅立葉定理的圖解說明，在  $x=0$  處，鋸齒波隨時間的變化情形，用（式 3）表示這個波形的傅立葉級數。

$$y(t) = -\frac{1}{\pi} \sin \alpha t - \frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha t - \frac{1}{3\pi} \sin 3\alpha t \cdots \cdots \cdots \text{式(3)}$$

（式 3）中， $\omega=2\pi/T$ ， $T$  是波的週期。（圖 5）中的顏色曲線代表了（式 3）中前六項諧波的總和，結果與原波形十分吻合。如果諧波的項數越多會越近似原波形。

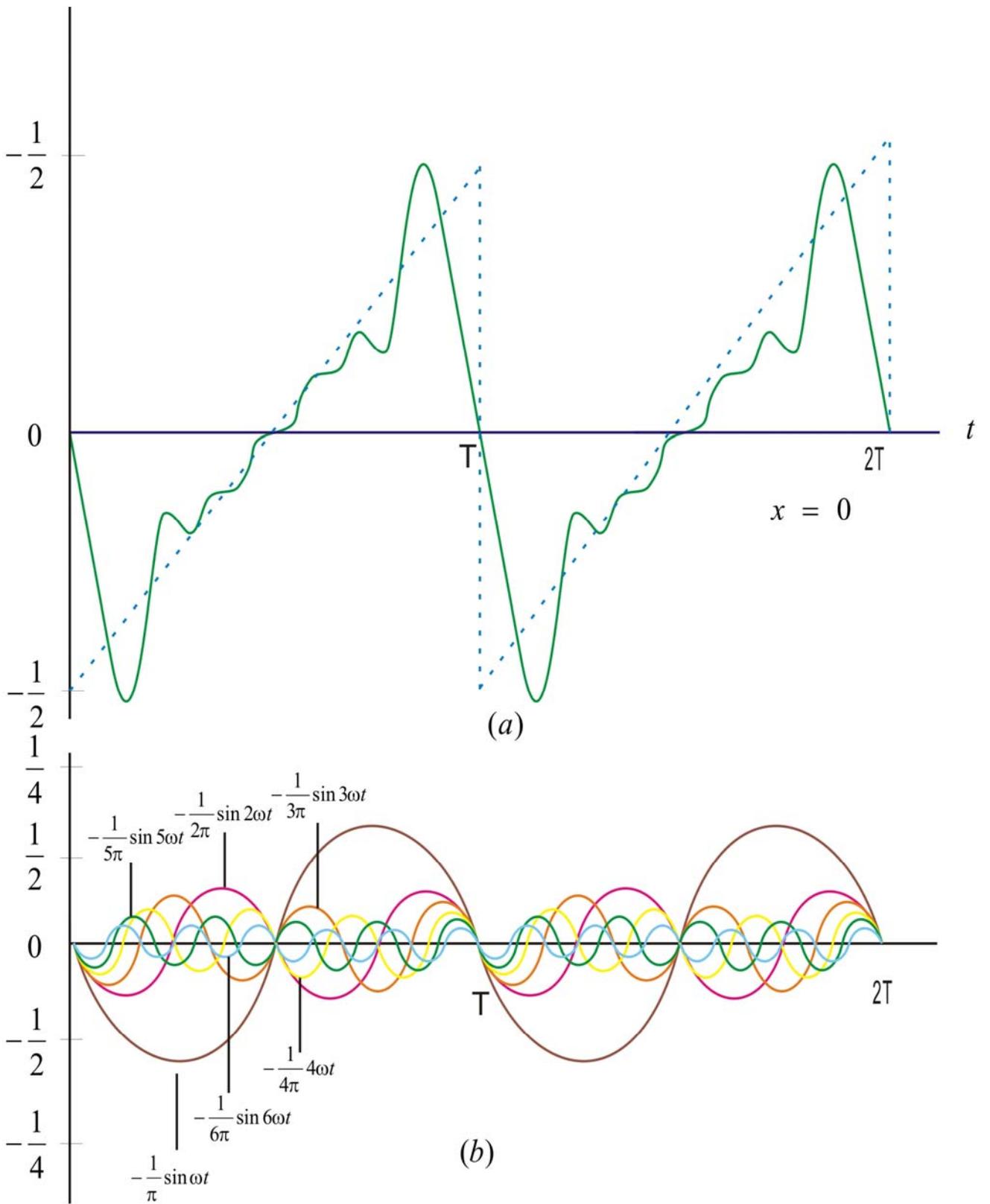


圖 5 傅立葉分析原理

## 伍、研究結果

### 一、機械波產生裝置

聲頻分析需要有相同的撞擊力，由實驗得知0.35牛頓的力（圖6），能得到強度夠大夠穩定的機械波。（圖7）為混凝土牆受到木槌撞擊所產生的波形，（圖8）為此訊號拉長之波形。以訊號產生器調整電場的頻率，以木槌規律地敲擊產生機械波，可獲得規律頻率並且振幅一致的機械波。



圖6 機械波產生裝置發出穩定的力

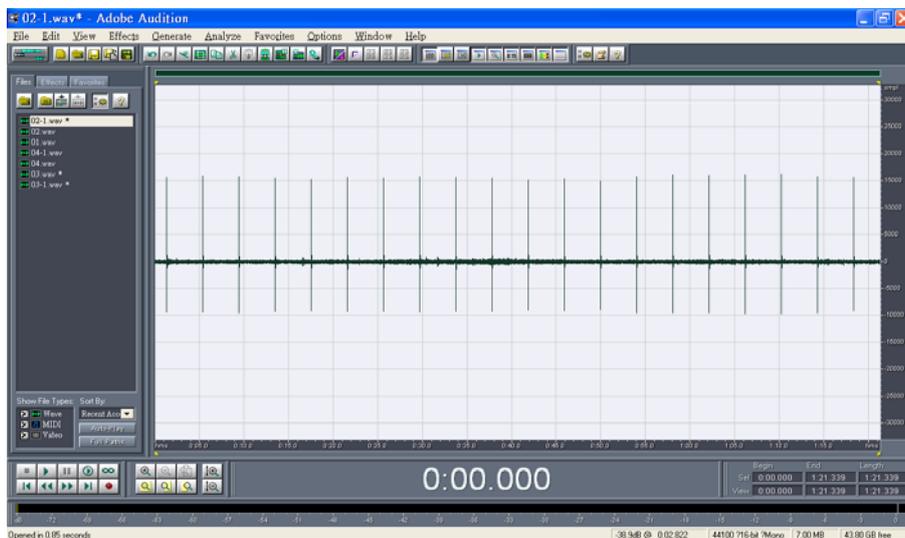


圖7 混凝土牆受木槌撞擊所產生之波形

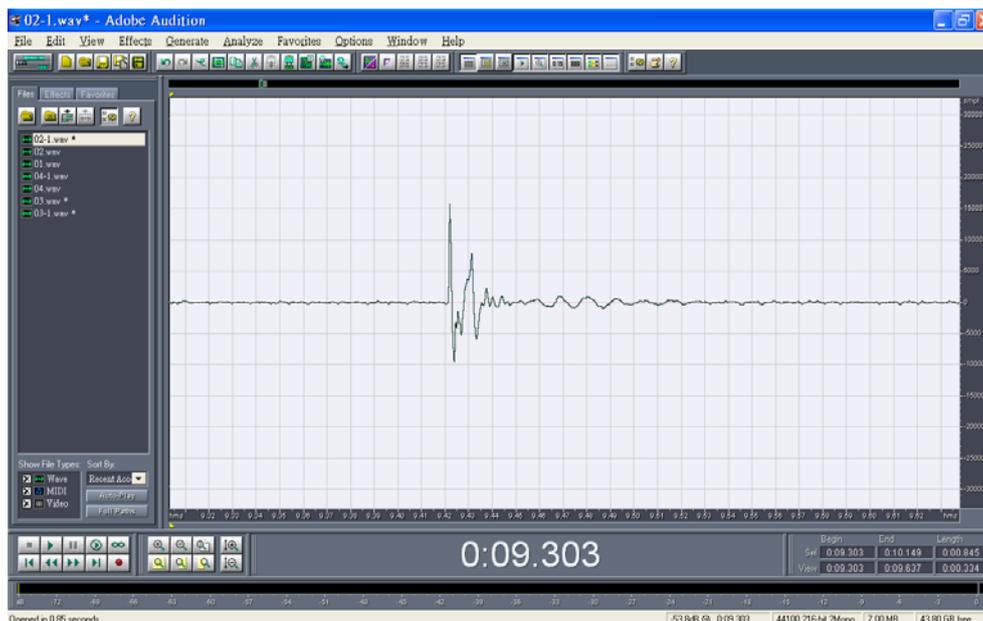


圖8 混凝土牆木槌撞擊波形之拉長訊號

## 二、聲波測試位置

將麥克風貼緊混凝土牆（圖9），以頻譜分析軟體，所得之頻譜圖如（圖10）所示。（圖11）則為相同受測點，麥克風懸空靠近撞擊面所得頻譜圖。比較兩種位置的頻譜，得知麥克風緊貼牆面，能大幅降低2.5kHz、5kHz、7.5kHz與10kHz頻率的雜訊干擾。其他性質的混凝土牆也是相同情況，所以麥克風貼緊牆面可以得到較佳訊號。



圖9 貼緊混凝土牆測試聲波

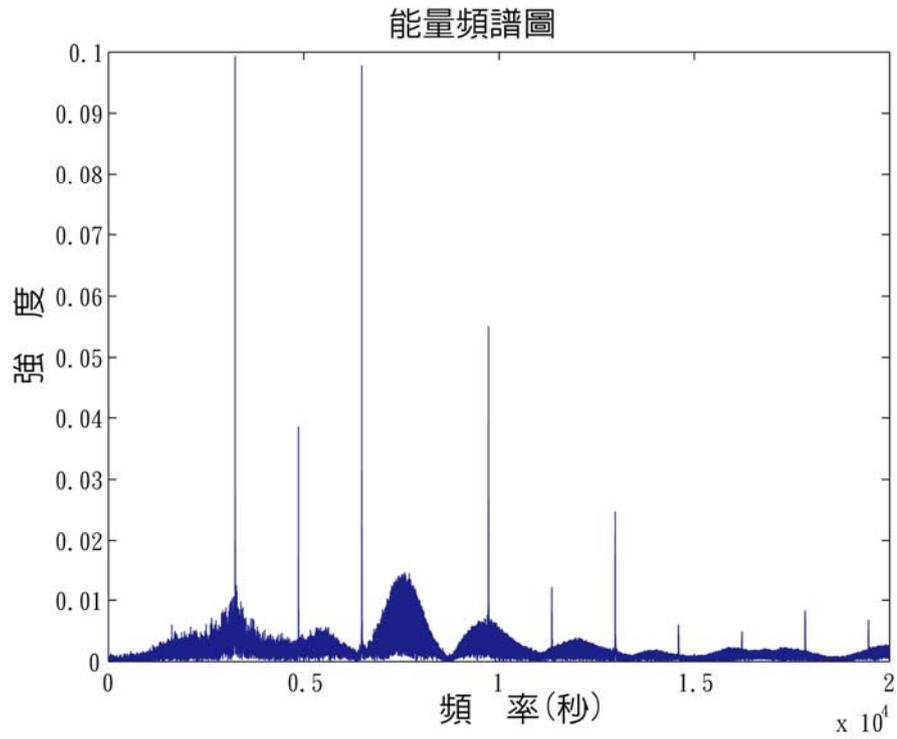


圖10 麥克風貼緊牆面之撞擊點頻譜

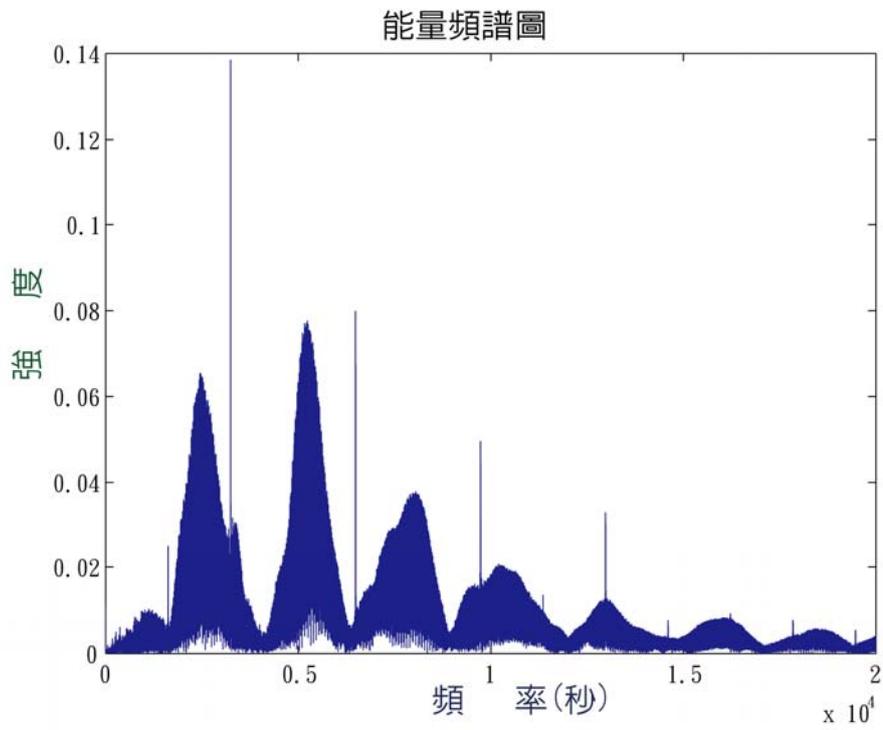


圖11 麥克風懸空接近撞擊點之頻譜

### 三、混凝土裂縫分析

(圖12)為小裂縫混凝土牆，(圖13)則為大裂縫混凝土牆。結構正常之混凝土牆，經實驗裝置敲擊後，產生之聲波頻譜圖如(圖14)所示。小裂縫之頻譜分析結果如(圖15)所示，(圖16)則為大裂縫頻譜分析圖。



圖12 小裂縫混凝土牆



圖13 大裂縫混凝土牆

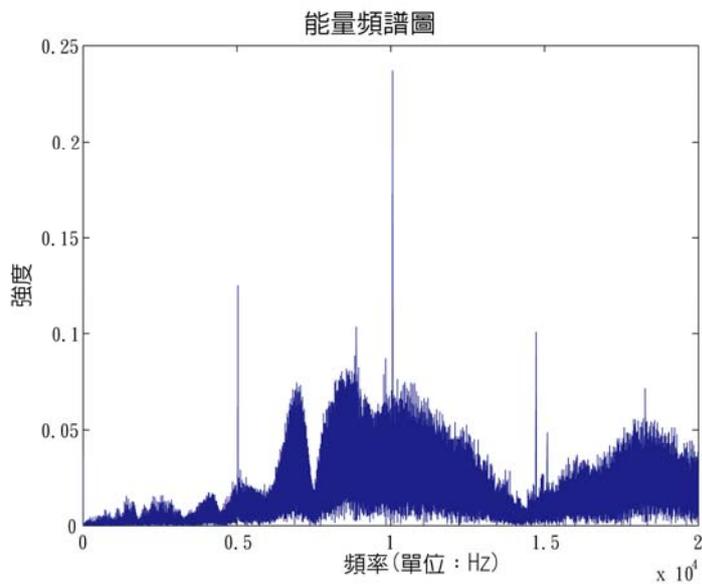


圖14 正常混凝土牆頻譜

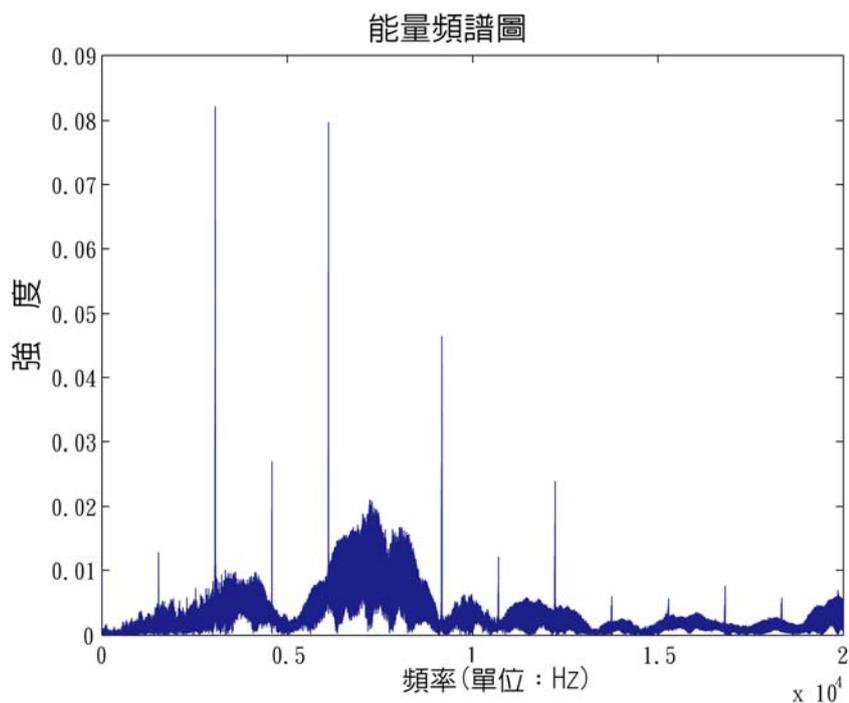


圖15 小裂縫混凝土牆頻譜

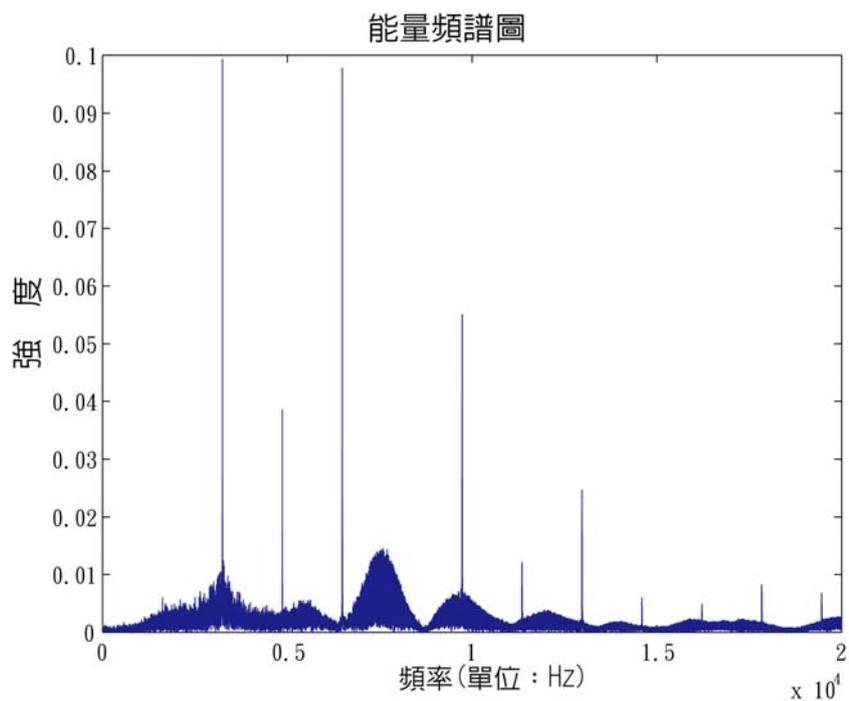


圖16 大裂縫混凝土牆頻譜

由（圖15）得知小裂縫之混凝土牆，因結構較為鬆散，撞擊牆面所產生的諧波經混凝土吸收後頻率會下降，大裂縫的高頻吸收更明顯。此因混凝土牆有裂縫時，聲波藉由裂縫間的空氣傳波，裂縫越大頻率就越低。所以可藉由聲波頻譜變低判定有無裂縫，正常混凝土牆頻譜，最低諧波則為5kHz（圖14）；有裂縫的諧波於2.5kHz、5kHz、6kHz、10kHz以及12.5kHz有較大的波峰。

#### 四、壁癌與海砂屋的分析

海砂含有豐富的氯化鈉，導電性高並且海鹽有潮解性，能吸收水氣造成房屋壁癌等問題，所以壁癌混凝土牆（圖17）與海砂屋（圖18）的頻譜圖相近。（圖19）為壁癌混凝土牆的頻譜，（圖20）則為海砂屋的頻譜，兩者主要諧波均位於1kHz、2.5kHz與5kHz。此因海砂屋與壁癌混凝土牆都會吸收水氣，經敲擊後形成類似的機械波。



圖17 壁癌混凝土牆



圖18 海砂屋混凝土牆

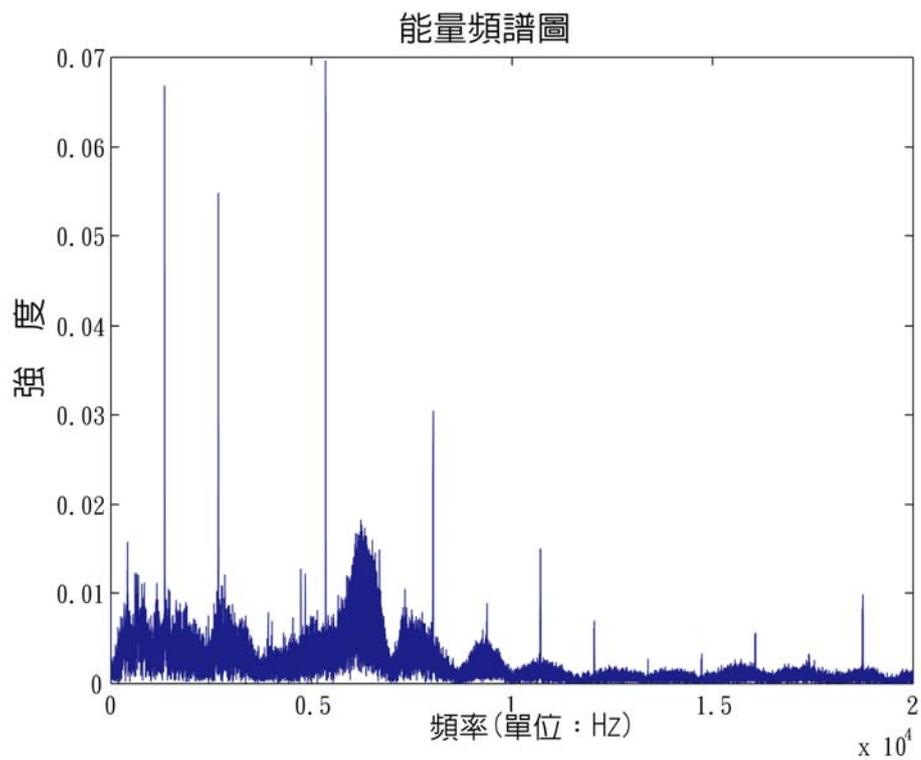


圖19 壁癌混凝土牆頻譜

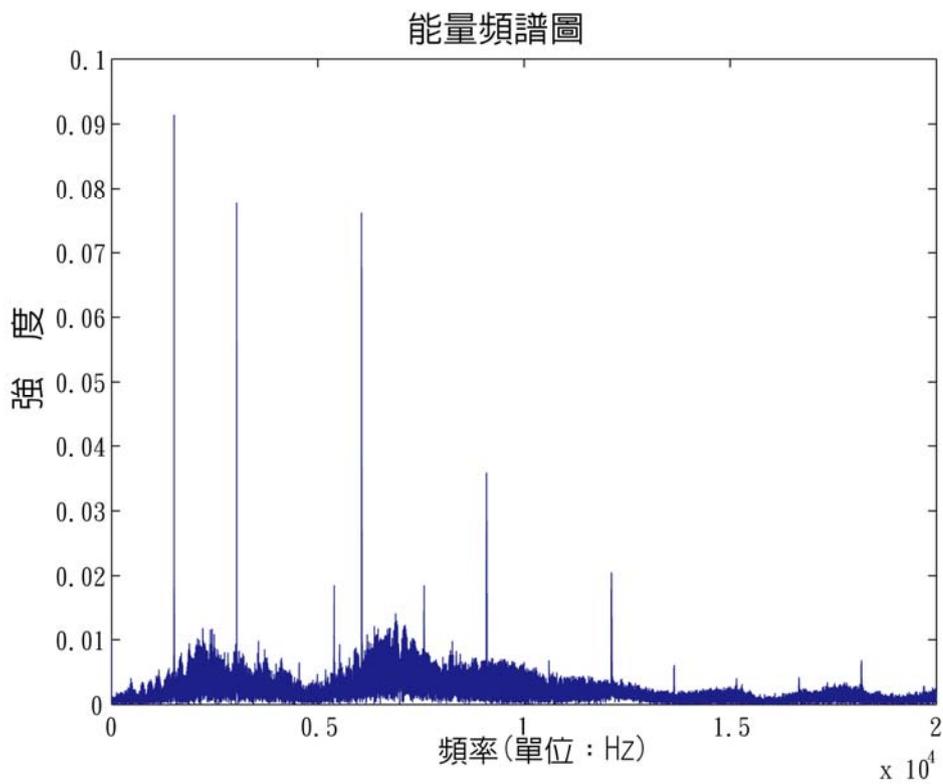


圖20 海砂屋混凝土牆頻譜

## 五、混凝土牆面舊化分析

屋齡四十年的老舊混凝土牆面（圖21），經頻譜分析如（圖22）所示。舊建築混凝土牆結構更為鬆散，低頻諧波比裂縫牆面還要多。越老舊之混凝土牆面，敲擊產生之低頻諧波越多，主要位於2kHz、2.5kHz與4kHz的諧波波峰。



圖21 老舊房屋混凝土牆面

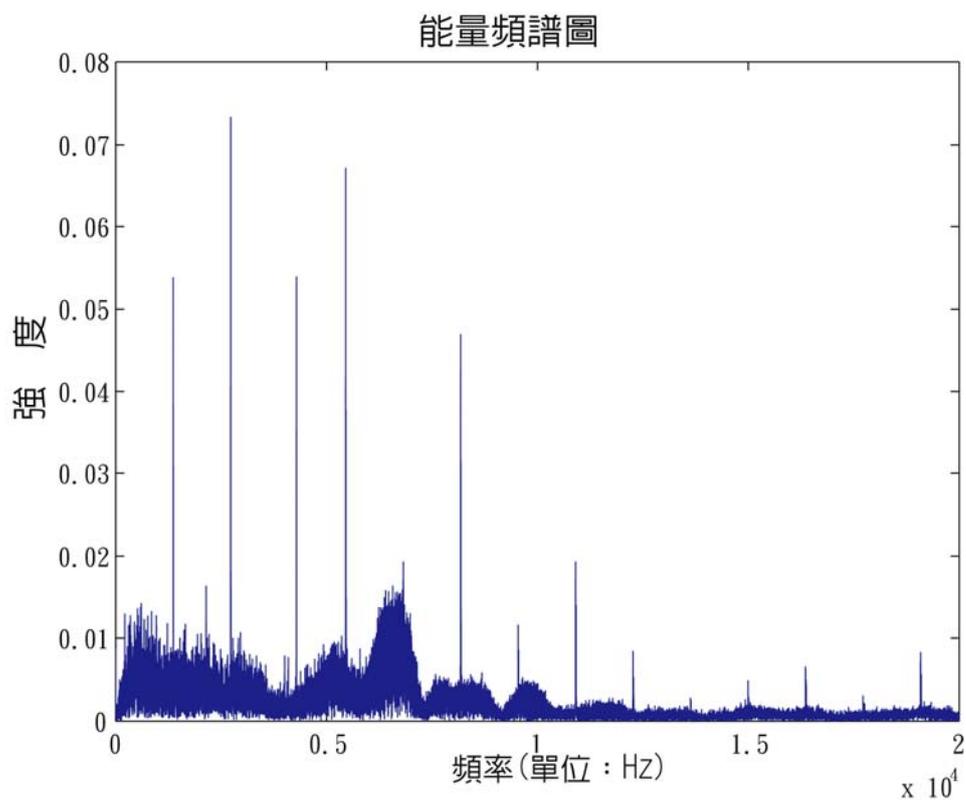


圖22 老舊房舍混凝土牆頻譜

## 六、混凝土成分分析

混凝土是將粗細骨料（小石，砂），水泥，水，摻合劑按照計畫數量，利用拌合機拌合均勻，灌注於預先製作好的模型內，目前建築工程中使用最主要的水泥為波蘭水泥。常用的混凝土的成分如（表 5）所示：

表 5 常用的混凝土的成分

體積比（水泥：砂：石子）	品 質 與 用 途
1 : 1 : 2	須有大強度及水密性時用之。
1 : 1 : 3	抗壓強度較前者低，使用目的與前者同。
1 : 2 : 4	為一般鋼筋混凝土之標準配合，亦用於受震動之機械底座。理想抗壓強度為 $140\text{kg/cm}^2$ ，容許應力為 $45\text{ kg/cm}^2$ 。
1 : 2 : 5	用於機械基底，擋牆，橋腳、地板等，為中等配合。
1 : 3 : 6	不受大應力之大體積構造物，為貧配合。
1 : 4 : 8	僅受自重之大體積混凝土，為極貧配合。

由（表 5）得知混凝土的成分影響結構甚巨，因此我們調配了不同濃度的混凝土，運用我們的研究系統分析，結果如（圖 23）至（圖 25）所示。由於沒有鋼筋，因此高頻會比一般鋼筋混凝土結構衰減嚴重，水泥含量越多高頻也越多，因此高頻的響應與水泥含量成正比，也與強度成正比。

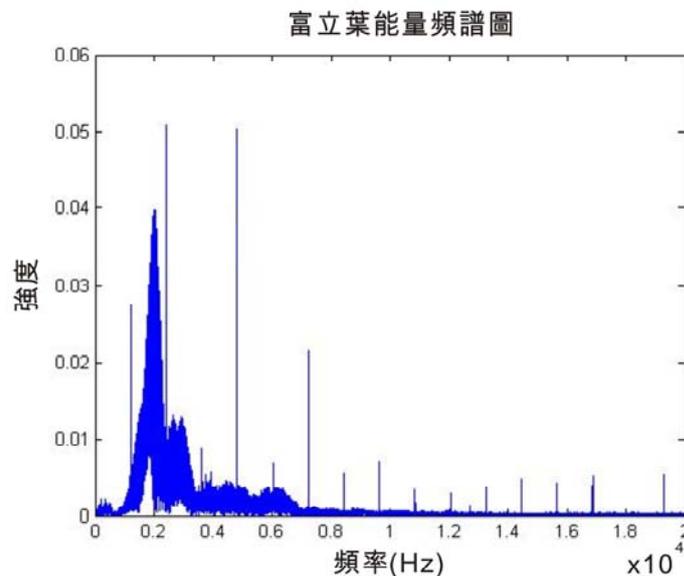


圖23 水泥、砂1：1頻譜

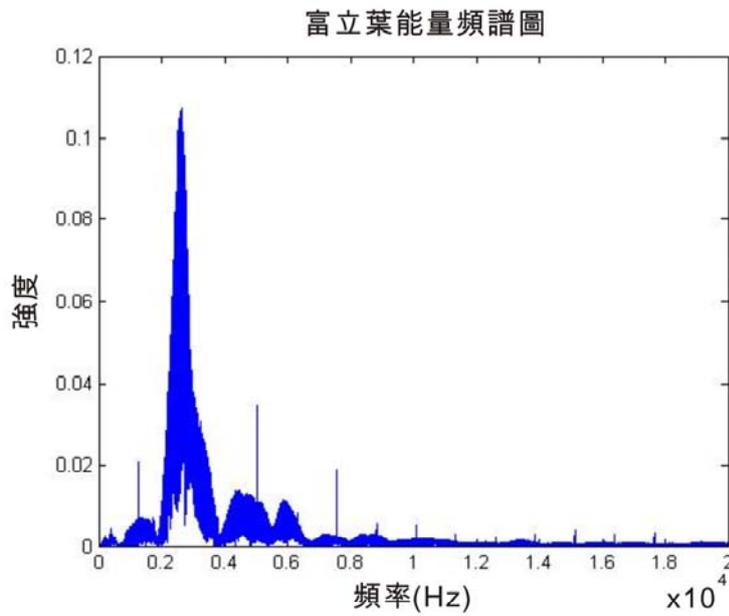


圖24 水泥、砂1：2頻譜

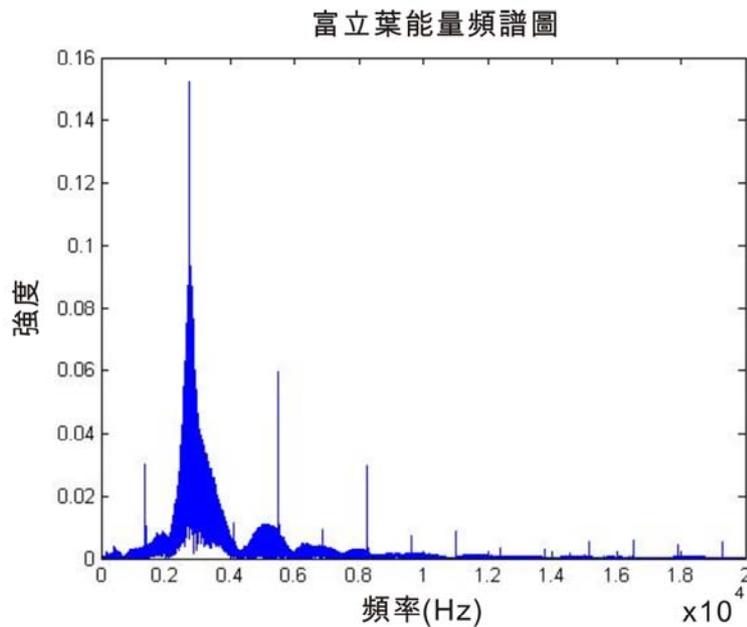


圖25 水泥、砂1：3頻譜

## 七、研究結果

經多次實驗得知，不同結構的牆面經敲擊後，會產生特有的聲波。經頻譜分析後，有裂縫的牆壁會有頻率較低的頻譜，而海砂屋與含水量較多的混凝土頻譜頻率更低，至於越老舊的房屋，其頻譜除了頻率低以外，頻譜的亂度也增加。此外也能分析出混凝土成分比與強度，因此我們可以利用頻率分析，判定混凝土結構是否有問題，特別是有低頻率的波峰，一定有結構或成分變異的問題。

## 陸、討 論

一、問題：如何使研究系統易於攜帶檢測？

討論：本裝置大部分由木質構成，並且配合模組化之訊號產生器與電源供應器，研發出體積輕巧的裝置，並且質量較輕容易攜帶。僅需外加麥克風與筆記型電腦即可進行量測與分析。

二、問題：不同的取樣方式是否會影響實驗結果？如何設定最佳的量測方式？

討論：我們實驗了三種不同的取樣方式（圖 26），圖中 T 為敲擊面，R 為聲波取樣面。結果如（圖 27）至（圖 29）所示，頻譜相近只是雜訊強度不同，並不會影響分析結果。

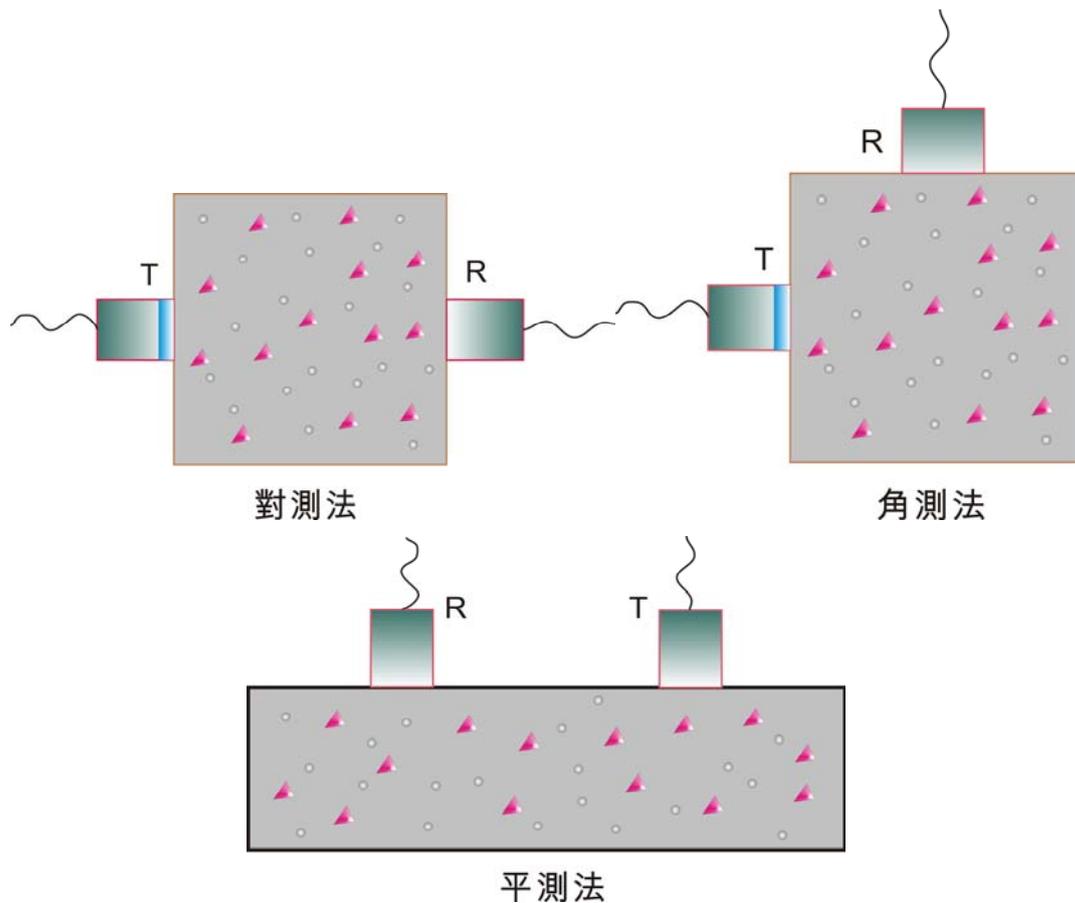


圖 26 三種不同的取樣方式

富立葉能量頻譜圖

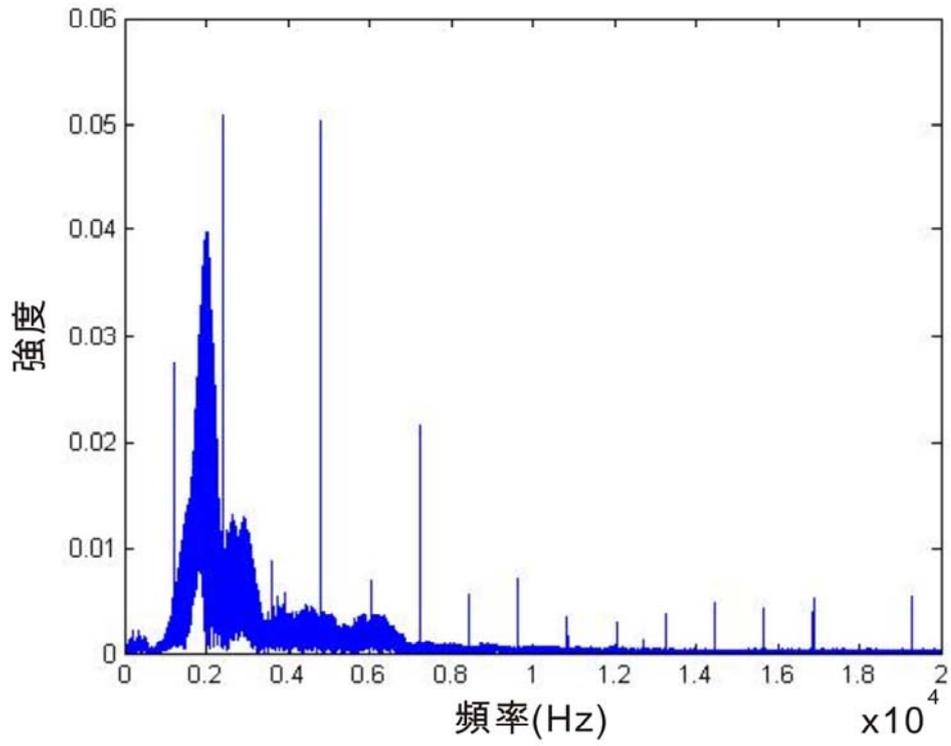


圖 27 平測法取樣頻譜

富立葉能量頻譜圖

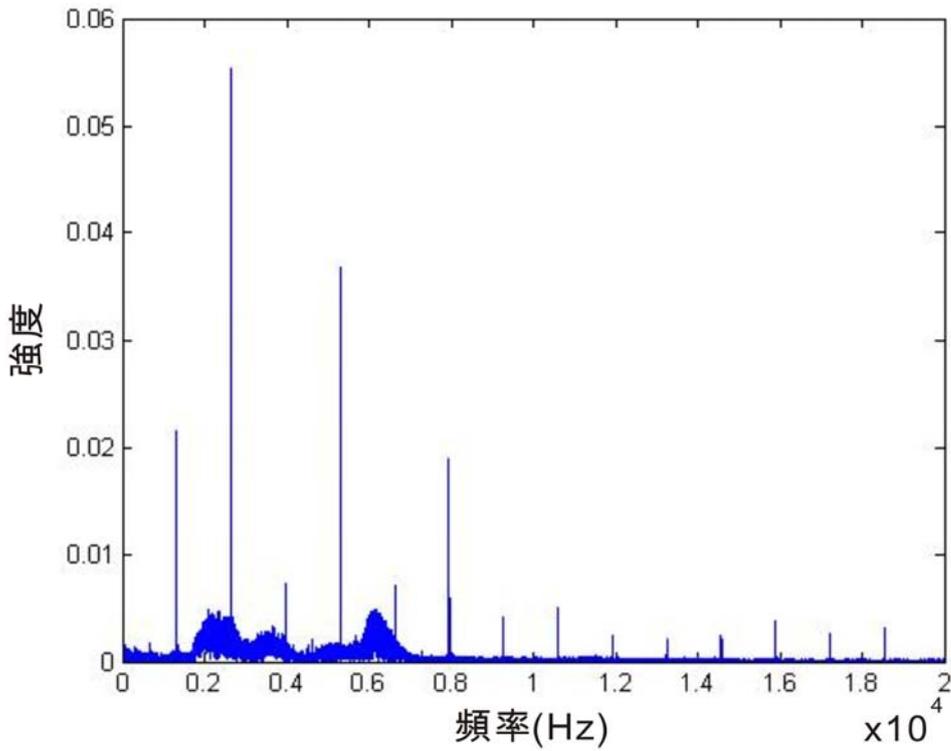


圖 27 角測法取樣頻譜

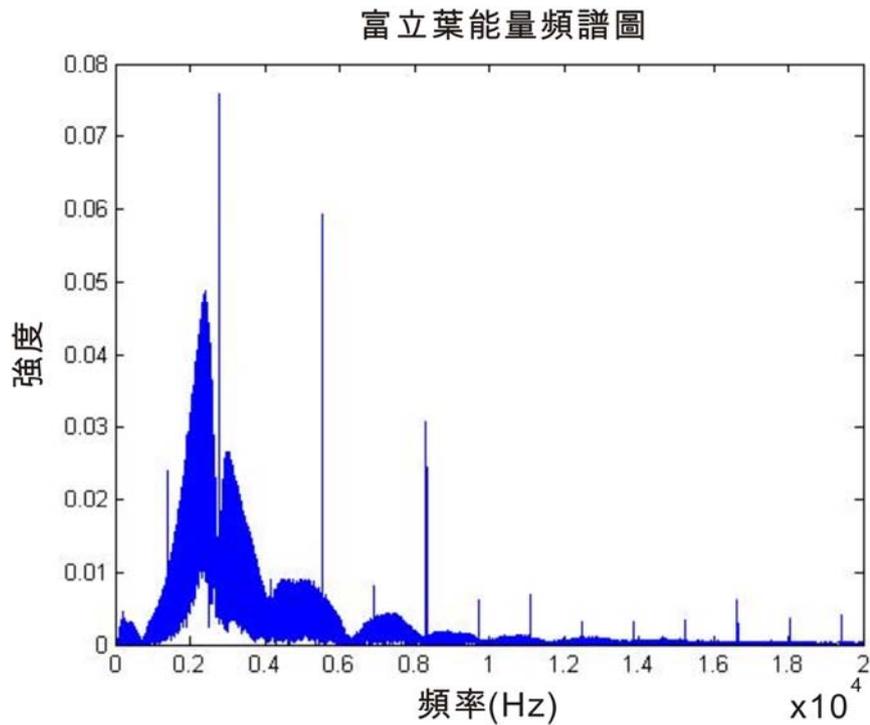


圖 28 對測法取樣頻譜

解決方案：爲了方便取樣，並能廣泛大量地取樣，例如樓房的外牆就不適合對測法取樣，所以我們採用平測法進行續實驗。

### 三、問題：機械波產生裝置的材質選取？

討論：金屬槌雖然可以產生較大的聲音，但是卻會破壞材料的表面，使用木槌也可以產生明顯的聲波，並且不會破壞混凝土牆面。

### 四、問題：可否使用此系統分析其他材料？

討論：除了混凝土牆外，計畫以後使用本系統分析水果、食物、木材、金屬，量測聲波對水果的含水度以及含糖量的聲波差異，或應用於河堤及護岸內部淘空，隧道砌襯後狀況評估等。

解決方案：請教土木技師毛昭綱先生，他表示我們的取樣方式能廣泛地運用各種結構檢測，但是要更大量的取樣並進行統計，才能有更精準的分析結果。

## 柒、結 論

經由長期的研究與實驗，獲得結論如下：

### 一、機械波的應用

聲波可以用於檢測混凝土的結構，並且經由簡單的系統即可進行檢測。配合電腦分析，判斷出波形振幅與諧波頻率，即可判定裂縫、壁癌、海砂屋或老化等因素。如此一來在買賣房屋時，使用我們研發的系統，就可以很快並且不用花費太多金錢，初步檢測房屋是否有問題了。

### 二、未來展望

本系統能檢測固體材料的特性，計畫應用於河堤及護岸內淘空，隧道砌襯後狀況評估等。未來將繼續發展，朝下列方向努力：

#### （一）配合超音波檢測

未來計畫將超音波加入，得到更多樣的數據分析。

#### （二）建立全國房屋安全資訊系統

由於本研究系統容易攜帶操作簡便，如果能對全國房屋進行檢測，讓全國民眾能擁有居住的保障。

#### （三）數位化波形資料庫

利用本研究系統取樣，配合電腦建立各種混凝土牆的頻譜資料庫，方便日後建築安全的分析與研究。

#### （四）地質檢測

最近發生國道三號七堵段走山事故，由電視新聞報導得知，國道工程局巡查時，以榔頭敲擊錨頭與擋土牆，以人耳判斷是否夠紮實，或滲水後導致的地質變化。有經驗的工程師，能運用敲擊的聲音分辨岩錨是否劣化。因此我們的研究系統，如果增加敲擊的力量，更能精確地分析地質與擋土牆面的安全，避免悲劇的發生。

## 捌、參考資料及其他

- 一、陳耀如、洪國珍、劉叔松，建築材料 I，旭營文化事業有限公司，2004年。
- 二、陳宏州，工程力學 II。矩陣出版有限公司，2003 年。
- 三、黃甄玲，羧酸系分散劑的合成以及對水泥漿體性質的影響，國立台灣師範大學化學系碩士論文，P3-p5，2004 年。
- 四、曾國輝，化學，台北市，藝軒圖畫出版社，2002 年。
- 五、林敬二等編著，高中化學，臺北市，三民書局，2007 年。
- 六、楊明豐編著，數位邏輯實習，初版，台北市，碁峰資訊股份有限公司，2002 年。
- 七、姚珩、張嘉泓、施華強、李重賢、鍾彩霞、陳東閔，高一基礎物理，翰林出版社，1998 年 3 月。
- 八、中國土木水利工程學會與混凝土工程委員會，鋼筋混凝土學，科技圖書，2009 年。
- 九、陳啓中，建築結構學，詹氏書局，2007 年
- 十、中華民國科學教育館，中小學科展作品專輯，臺北市，豐山彩色印書有限公司，2008 年
- 十一、毛昭綱，鋼結構設計（修訂四版），全華科技，2009 年。
- 十二、毛昭綱，鋼筋混凝土學（修訂版），全華科技，2008 年。
- 十三、毛昭綱，材料力學（修訂版），全華科技，2008 年。
- 十四、顏榮記，土木施工法，科學技術叢書，三民書局，1991 年。
- 十五、周耀鑾、黃依典，土木材料學，科教圖書出版社，1983 年。
- 十六、符芳、錢士英、王永達，景觀建築工程材料學，地景企業股份有限公司，1996 年。
- 十七、蔡守智，建築結構體之施工與監工（增訂版），詹氏書局，2000 年。
- 十八、呂文堯、游新旺，鋼筋混凝土，新文京開發出版有限公司，2002 年。

## **【評語】 091203**

- 1.對於實驗設備之研製，能整合物理基本知識，運用得宜。
- 2.主題目標與實際工程應用符合性高，未來深入探究，可有收穫。
- 3.在現場實驗之原始資料日後可增強取樣方法、頻率與數量。