

明新科技大學 校內專題研究計畫成果報告

鋼筋混凝土結構物敲擊回音裂縫檢測分析研究 Crack Detection for RC Structures Using Impact-Echo Method

計畫類別：任務型計畫 整合型計畫 個人計畫

計畫編號：MUST—97 土木—02

執行期間：97年 3月 1日至 97年 9月 30日

計畫主持人：梁若暉

共同主持人：李賢文、林秀美

計畫參與人員：黃仁杰、林宗志、莊又全、汪昇鎡、熊偉翔

執行單位：土木工程系

中 華 民 國 97年 9月 30日

中文摘要

台灣在過去數十年持續大規模的公共工程建設之後，由於對施工品質的普遍輕忽，現今存在有許多仍未達設計使用年限但安全性存疑的結構物。尤其台灣位處地震帶，頻傳的地震災害更使得結構物迅速正確的安全檢查、評估與補強成為刻不容緩的工作。

敲擊回音儀(Impact-Echo System)是由負責發射訊號(聲波)的敲擊器、接收訊號的接收器及擷取並處理訊號的資料處理器(電腦)等三部分所組成；敲擊回音法(Impact-Echo Method)是一種利用聲波(應力波)的導入與反射來偵測混凝土裂縫深度及內部瑕疵的非破壞性檢測方式。

本研究計畫以敲擊回音儀進行混凝土構造體中裂縫之非破壞性檢測，藉由製作不同試體，除了收集彙整並分析所得之檢測數據資料之外，更嘗試與超音波檢測所得結果交叉比對，並進一步試以 MATLAB 進行波形訊號之數值處理，建立時間-頻率曲線計算分析，以深入瞭解鋼筋混凝土裂縫之實際波形訊號反應狀況，改進 Impact-Echo Method 非破壞檢測結果之判讀技術。

關鍵詞：非破壞檢測、敲擊回音法、超音波法、混凝土裂縫

Abstract

Impact-Echo is an acoustic method based on the use of transient stress waves generated by an elastic impact and is used for non-destructive testing of concrete structures. In practical applications, the signals obtained are often superimposed by further mechanical vibrations and the so-called geometry effects, which are mainly caused by surface waves. Due to the absorption of the concrete as well as the divergence of the acoustical waves, impact-echo signals are transient. As a result, the frequency content changes over time. Normally, the analysis is carried out on the Fourier power spectrum of the signal. However, the Fourier spectrum is still affected by the above-mentioned effects and has well-known deficiencies for short transient signals within longer time sweeps.

Keywords: NDT, Impact-Echo, Concrete, Stress Waves

目錄

中文摘要.....	I
Abstract.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	IV
表目錄.....	V
第一章 前言	
1-1 研究背景.....	1
1-2 研究目的.....	1
1-3 研究方法與流程.....	2
第二章 儀器介紹	
2-1 敲擊回音原理.....	3
2-2 敲擊回音儀器介紹.....	6
2-3 超音波原理及儀器簡介.....	11
第三章 試體規劃與製作	
3-1 試體規格.....	12
3-2 控制變數.....	13
3-3 配比設計與施作.....	18
第四章 試體檢測程序	
4-1 波速.....	23
4-2 內部瑕疵.....	30
4-3 表面裂縫.....	32
4-3-1 敲擊回音量測表面裂縫.....	35
4-3-2 超音波量測表面裂縫.....	39
第五章 結果與分析	
5-1 波速量測之比較.....	41
5-2 內部瑕疵量測之比較.....	42
第六章 結論.....	72
第七章 建議.....	73
參考文獻.....	74
附錄	
附錄一 混凝土強度與波速.....	75
附錄二 敲擊回音之波速量測圖.....	76
附錄三 敲擊回音之波速量測圖數據.....	92
附錄四 超音波之波速量測圖數據.....	97

圖目錄

圖 2-1 敲擊回音法原理示意圖	3
圖 2-2(a) 表面位移波形	5
圖 2-2(b) 表面位移波形	5
圖 2-3(a) 表面位移波形	5
圖 2-3(b) 表面位移波形	5
圖 2-4 敲擊回音儀器及配件圖	6
圖 2-5 資料擷取系統(正面)	7
圖 2-6 資料擷取系統(背面)	7
圖 2-7 室內小型變壓器(1).....	8
圖 2-8 室內小型變壓器(2).....	8
圖 2-9 汽車變壓器(1).....	8
圖 2-10 汽車變壓器(2)	8
圖 2-11 BNC 接頭	8
圖 2-12 電流轉換器	9
圖 2-13 Impact-Echo 程式 icon.....	10
圖 2-14 超音波儀器及配件圖	11
圖 4-1 縱波與橫波示意圖	23
圖 4-2 已知版厚度量測法示意圖	24
圖 4-3 直接量測法示意圖	27
圖 4-4 內部裂縫量測示意圖	30
圖 4-5 表面開放裂縫示意圖	32
圖 4-6 應力波行經路線示意圖	33
圖 4-7 表面裂縫量測示意圖	33
圖 4-8 (a)裝置設定圖 (b)敲擊後產生時間領域(V-T)圖	35
圖 4-9 雙接收器表面裂縫量測法示意圖	35
圖 4-10 表面裂縫深度驗證示意圖	38
圖 4-11 超音波表面裂縫樑測示意圖	39
圖 4-12 超音波之表面裂縫測量步驟	40

表目錄

表 3-1 試體試驗變數	13
表 3-2 變數埋設位置	13
表 3-3 試體混凝土配比設計	18
表 3-4 各試體配比資料	19
表 3-5 試體製作過程	20
表 4-1 已知版厚量測法步驟	25
表 4-2 敲擊回音之直接測量波速步驟	28
表 4-3 超音波量測波速操作步驟	29
表 4-4 模態系數	31
表 5-1 敲擊回音與超音波波速數據	41
表 5-2 試體 No.2 敲擊回音與超音波裂縫數據比較	71
表 5-3 試體 No.3 敲擊回音與超音波裂縫數據比較	71
表 5-4 試體 No.4 敲擊回音與超音波裂縫數據比較	71

第一章 前言

1-1 研究背景

美國國家標準及科技院(National institute of standards and technology)於 1983 年發展出一種利用較低頻率暫態應力波傳原理之非破壞試驗來偵測混凝土內部瑕疵的方法，此技術稱為敲擊回音法。該方法之開發係針對超音波法在混凝土材料應用上之許多限制，例如高頻波之散射衰減、激發能量不足及訊號辨識不易等缺點，加以改良。

敲擊回音法之發展初期(1983-1991)，主要應用於偵測版狀混凝土結構物，例如樓版、橋面版、牆、地下連續壁等之各種內部瑕疵，包括：鋼筋混凝土版內部之裂縫及孔隙檢測、夯實不良之混凝土之檢測、預力套管內部因灌漿不良殘留之孔隙檢測、以及瀝青混凝土內部之斷層及孔隙檢測。

在進入 1990 年代後，敲擊回音法之應用趨向多元化，其中包括桿狀結構(例如樑、柱、混凝土樁)內部孔隙、裂縫及蜂窩之檢測、隧道混凝土襯砌結構內部瑕疵之檢測、混凝土結構粘結品質之檢測、混凝土裂縫可偵測最小寬度之檢測、以及在混凝土構件載重試驗時，可協助來偵測及追蹤內部之裂縫，以確認構件之破壞機構等應用。近年來，敲擊回音之儀器配置由單一接收器改為雙接收器，並且已可以同時在時域與頻域上進行訊號分析，對於混凝土結構表面裂縫開裂深度之測定，亦有重大發展。【3】

1-2 研究目的

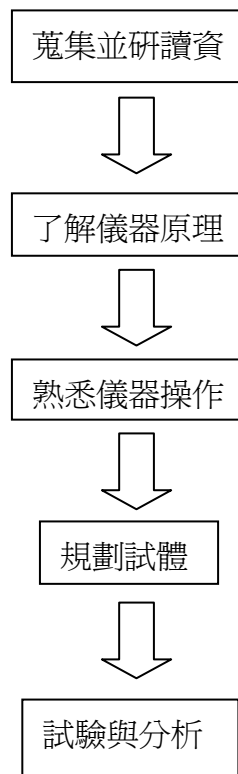
隨著台灣快速的發展，混凝土材料的使用在建築工程上仍佔大宗，因此，精確的混凝土檢測是維護工程品質的重要工具。劣質混凝土的檢測方式可以分成兩類：一為非破壞性的檢測，二為破壞性的檢測。混凝土會因環境、氣候、人為等因素而產生一些不同變化，而產生強度不足、耐久性下降、以及對安全性可能發

生疑慮的裂縫。因而混凝土結構物受損的嚴重程度可由其產生裂縫的多少、大小及深入結構物的深度來判斷。

本研究為了要了解混凝土中有哪些問題，所以我們就利用非破壞性檢測儀器-敲擊回音，來測試混凝土中的問題，而且為了更了解這些問題，我們做了不同的試體來測試，有裂縫的、不搗實的及蜂窩和空洞等來測試，最後我們再利用超音波作檢測上的比較。

1-3 研究方法與流程

1. 文獻回顧：找尋非破壞相關書籍，以及他們的碩博士論文，詳加研讀與研究。
2. 研讀 Impact-Echo 儀器操作手冊。
3. 得知儀器可測得三種瑕疵，分別為波速、內部瑕疵及表面裂縫。熟析儀器之操作方式。
4. 針對儀器可測得的三種瑕疵規劃施做試體與實驗計畫。
5. 進行試驗與分析。



第二章 儀器介紹

2-1 敲擊回音原理

在測試物體的表面利用機械性敲擊產生暫態應力波動並導入物體內，該應力波動包含有壓力波(P-wave)剪力波(S-wave)及表面波(雷利波)(R-wave)【3】，其中壓力波及剪力波在物體內部形成球狀的波形方式向前傳動，而表面波則沿著物體表面遠離敲擊點的方式向外擴散出去，當壓力波及剪力波遇到物體內部的瑕疵(如裂縫及孔隙)或物體的邊界時，將會被反射回去，這些反射波回到了敲擊面時，產生表面的位移，此等位移反應可利用訊號接收器監測到。如果將接收器安排在靠近敲擊點處，則監測到之位移波形主要是因為壓力波到達所造成。【6】

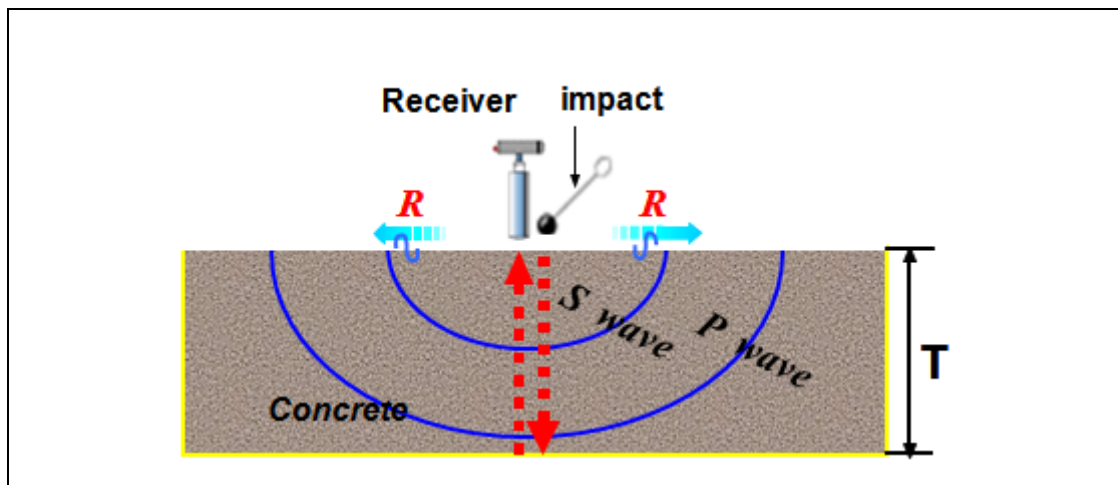


圖 2-1 敲擊回音法原理示意圖

當波在物體內部傳動若遇到不同的介質時，則波的部分能量會被反射，部分會被折射，反射波與折射波的振幅及入射波的振幅與兩種介質的聲阻係數(acoustic impedance)有關，其中聲阻係數為 P-波波速與密度之乘積，當波為正向入射時 其關係式如下：

$$A_L = A_i(Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1) \quad (\text{公式 1})$$

$$A_R = A_i(2Z_2)/(Z_2 + Z_1) \quad (\text{公式 2})$$

其中 Z_1 為第一物質的聲阻係數， Z_2 為底部物質的聲阻係數， A_i 、 A_L 、 A_R 分別為入射波，反射波及折射波的振幅。若 $Z_2 > Z_1$ 時，則 $A_L > 0$ ，即反射波與入射波同號；反之若 $Z_2 < Z_1$ 時，則 $A_L < 0$ ，即反射波與入射波異號。【6】

再敲擊點處產生一壓力波(C)後，若混凝土底部接聲阻係數較大之材料(如鋼筋)則當波遇到此介質時所產生的反射波將同為壓力波(C)，但當此反射壓力波傳至頂部時，由於頂部為自由反射介面，則此時的反射波將改變為張力波，如此重複反射所得壓力波及張力波之示意圖如圖 2-1 所示，這些反射波回到敲擊面時會產生表面的位移，其位移示意圖如圖 2-1 所示，在圖 2-1 之位移波形圖中一開始有一個非常大之向下位移，此乃由於表面波到達所致，但當底面第一次反射回來的波到達時，由於為壓力波故造成向上位移而非向下位移，此壓力波經由頂面之自由反射介面反射則變為張力波，傳至底部反射回來亦為張力波 此張力波到達頂面時便造成向下位移，如此重覆反射，及形成一向上及一向下交互出現之表面位移波形，如圖上標示之 2P、4P、6P 及 8P 處之位移反應，反之若混凝土底部接聲阻係數較小之介質，其反射所造成的張力及壓力情形與其所對應的表面位移波形，則如(圖 2-1)與(圖 2-1)所示。【6】

頻率分析原理可利用(圖 2-2 a)及圖(2-2 b)所示之敲擊迴音反應來作說明對於(圖 2-1)而言，每次應力波到達頂部時，將引起一向上一向下之位移，使得此一位移波形是有週期性的，對靠近敲擊位置的點而言，應力波來回一趟行經的路徑為版厚的四倍，所造成的週期則為行經路徑(4T)除以 P-波速度(C_p)由於頻率(f)為週期的倒數，則該特有位移波形之頻率可依下列公式計算而得：

$$F = C_p / 4T \quad (\text{公式 3})$$

若對(圖 2-3)而言，則應力波重覆造成頂面向下的位移反應，所需行經的路徑為版厚的兩倍，故位移波形的頻率則可依下列公式計算而得：

$$F = C_p / 2T \quad (\text{公式 4})$$

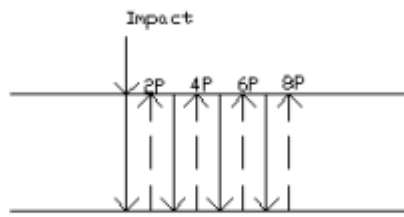


圖 2-2(a) 表面位移波形

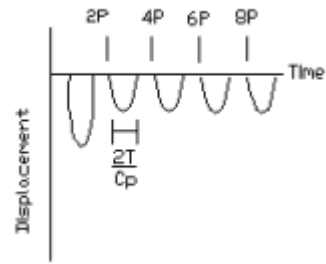


圖 2-2(b) 表面位移波形

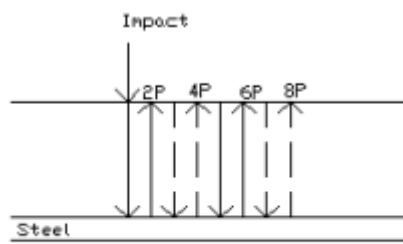


圖 2-3(a) 表面位移波形

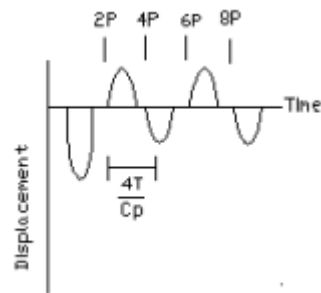


圖 2-3(b) 表面位移波形

2-2 敲擊回音儀器介紹

敲擊回音試驗系統由三個主要元件所組合而成敲擊源、接收器及含資料抓取卡之攜帶型電腦，攜帶型電腦可用來抓取接收器送出的訊號，儲存數位化之位移波形及進行訊號分析，目前已有上市的試驗系統可供使用或亦可自行組合不同元件而成。



圖 2-4 敲擊回音儀器及配件圖

- 1. 敲擊源(Impostors):**敲擊源的選定為敲擊回音試驗系統成敗之一個重要因素。一個彈性敲擊的力和時間之關係，可近似地被模擬成一個半週期的正弦函數。且敲擊的接觸時間將決定所激發之應力波的頻率含量。敲擊的接觸時間長短受敲擊器的尺寸、質量及接觸物體的表面狀況所影響，敲在一平滑且剛硬的表面上將可得到一個比敲在粗糙表面相對較短的接觸時間。試驗得接觸時間可以大約由記錄到之波形中量測因表面波經過所造成的向下位移所經時間而估得。

(敲擊源的大小有 1.8、1.5、1.2、1、0.8、0.7、0.6、0.5、0.4、0.3mm)

2. 儀器接收源(Hand-Held Transducer Units) 和 3.儀器接收源(Dual-Head

Transducer):敲擊回音法所採用的接收器為一種寬頻的位儀接收器，其與物體表面的接觸為一種很小倒錐體形之壓電材料，因此可視為類似點之接觸，所反應出來之訊號與垂直表面位移量成正比，在壓電材料及混凝土表面間使用一小片的薄鉛版來完成接收器之電路，並可使接受器與粗糙的混凝土表面緊密壓合，對表面做特別磨平處理。以上試的試驗儀器將敲擊器及接收器組合在一手提之單元內，再用來對水平、垂直與頭頂之表面進行試驗。精確測定表面裂縫之深度，有需要同時採用兩個接收器，以上試的手提單元在無法直接應用於此種狀況，可根據後述之檢測原理，自行組裝。

3. 資料擷取系統(Analog/Digital Data Acquisition System):資料擷取系統主要是接收敲擊源和接收源所敲擊的數據，然後轉換成波速數據顯示在筆記型電腦上來分析。安裝軟體用於電腦的序列阜(圖 2-5、2-6)，每一個系統都附有一組保護 Key，而且標注於軟體序號的各式為 Imyy-xxx(yy 代表發行年份 xxx 代表識別號碼)，此為該這份軟體系統專用序號。



圖 2-5 資料擷取系統(正面)



圖 2-6 資料擷取系統(背面)

資料擷取系統內的電池供應可八個小時的連續操作。當電池用盡時，可利用 9-1 2 vDC 的電源系統可操作(電池也可充電)。而下列有兩種裝置可供應：
甲、可使用室內小型的變壓器轉換 110vAC 輸入到 9Vdc 輸出(圖 2-7、2-8)，
或
乙、使用 DC-DC 的汽車變壓器連接到汽車上的燃煙器(圖 2-9、2-10)。



圖 2-7 室內小型變壓器(1)



圖 2-8 室內小型變壓器(2)



圖 2-9 汽車變壓器(1)



圖 2-10 汽車變壓器(2)

它含有公/母 9pin 的接頭之連接線是用於連接資料擷取系統到電腦序列埠。而當連接好之後，可以打開資料讀取箱上的開關，若箱上之末端的指示燈未亮，可能沒電或是電量不足。

資料擷取系統有兩個 BNC 接頭，一頭連接至資料擷取系統上的內接頭，而另一頭連接至到有含把手之測頭上的 BNC 接頭(圖 2-11)。



圖 2-11 BNC 接頭

4. **筆記型電腦(Notebook Computer):** 筆記型電腦主要是要看各個不同的波速數據，然後作為分析這個混凝土資料存檔所需要之儀器，但是這筆記型電腦也需要有敲擊回音系統光碟片才可以使用。在正常的操作下系統可以由筆記型電腦內藏中之電源供電。而且一般使用的筆記型電腦正常來說可以操作二至三個小時。可以長時間的使用。而當筆記型電腦沒電時可以插入電流轉換器，以便充電或供電操作(圖 2-12)。



圖 2-12 電流轉換器

敲擊回音測試系統時設計需要配合筆記型電腦來測試，也可以用在實驗室上的電腦上，但是用於敲擊回音試驗的電腦至少要符合以下下列要求：

- (1) IBM PC 或 PC/AT 相容含美式鍵盤。
- (2) 處理器的數度 100+MHz。
- (3) 序列以及並聯阜。
- (4) 使用 32MB RAM。
- (5) 採用 Windows95 的操作系統或是使用更新型的電腦。
- (6) 採用 active matrix screen 可供戶外之使用。

因為 Imago 是個有版權、智慧財產權的工程程式，它主要的設計是用於 Windows 95 以上的操作系統或是使用更新型的電腦。所以使用者必需要 Windows 基本的操作系統和它的基本常識。這軟體是放在一個 3.5 的軟碟中，它是屬於系統操作的一部份，而且每一份軟體都有一組序號在標籤上，而各式為 Imyy-xxx(yy 代表發行年份 xxx 代表識別號碼)，而這組序號就是我們所用敲擊回音系統的序號了。在安裝這軟體時，首先要將磁片插入適當的磁碟機，然後再 Windows95 的螢幕左下方按開始和執行鍵。開啟後輸入 a:\setup，然後按下確定。之後就按照螢幕上的說明進行安裝軟體。但要注意在安裝軟體時千萬不要更改任何目錄名稱。等安裝好軟體後它會自動產生一個程式集叫做 Impact-Echo(如圖 2-13)。



圖 2-13 Impact-Echo 程式 icon

5. **系統光碟片(Computer Software):** 此系統光碟片為這敲擊回音系統的資料片，而且附有實際測得的資料，是軟體在安裝時即會載入。
6. **儀器接收線二條(Two BNC Cables):** 接收線主要連接接收源和資料擷取系統所要連接使用的線。
7. **網路線(Serial/USB Port Cable):** 連接筆記型電腦和資料擷取系統的。
8. **充電器(Battery Charger):** 此為資料擷取系統的充電器一。
9. **車用充電器(DC Power Supply):** 此為資料擷取系統的充電器二。
10. **系統說明書(Printed Materials):** 此說明書是要我們了解敲擊回音系統是如何操作使用以及安裝。

2-3 超音波原理及儀器簡介

超音波技術是屬於工業界經常使用的五種非破壞檢測方法之一,它是利用具有壓電效應之晶體元件所製成之換能器(探頭)所發出之超過人類聽覺範圍(通常大約為20KHZ)以外頻率之機械振動(通常採用100KHZ至20MHZ之頻率)透過適當接觸媒介(耦合劑)傳遞近入被測物之內部,透過量測其內部瑕疵界面處之回波或量測音速及衰減或共振等原理來檢測其內部之瑕疵之位置於尺寸或量測物件厚度尺寸及材料特性等。

超音波儀器介紹：

1. 製造商：PROCEQ(瑞士)
2. 主要功能：測試混凝土的結構特性
3. 測試原理：裡用2個轉換器(發射及接收)的功能去計算脈衝速(us)
4. 用途：測試混凝土的均勻性,氣孔、裂縫、火災的損害、霜害、彈性模數、混凝土強度
5. 適用規範：ASTMC597



圖 2-14 超音波儀器及配件圖

第三章 試體規劃與製作

3-1 試體規格

試體乃模擬普通鋼筋混凝土，但內部我們參入了保麗龍、水管、鋼筋等。

試體規劃如下：

1. 規格： $50\text{cm}\times 15\text{cm}\times 15\text{cm}$ 共 12 個
 $100\text{cm}\times 50\text{cm}\times 15\text{cm}$ 共 2 個
 $200\text{cm}\times 25\text{cm}\times 50\text{cm}$ 共 1 個
 $25\text{cm}\times 15\text{cm}\times 15\text{cm}$ 共 4 個
 $40\text{cm}\times 15\text{cm}\times 15\text{cm}$ 共 1 個
2. 抗壓強度： $280\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
3. 試體編號：
 - (1) $50\text{cm}\times 15\text{cm}\times 15\text{cm}$
代號順序為 1~12 號
 - (2) $100\text{cm}\times 50\text{cm}\times 15\text{cm}$
代號為 S1、S2
 - (3) $200\text{cm}\times 25\text{cm}\times 50\text{cm}$
代號為 Beam
 - (4) $25\text{cm}\times 15\text{cm}\times 15\text{cm}$
代號為 A、B、C、D
 - (5) $40\text{cm}\times 15\text{cm}\times 15\text{cm}$
代號為 E

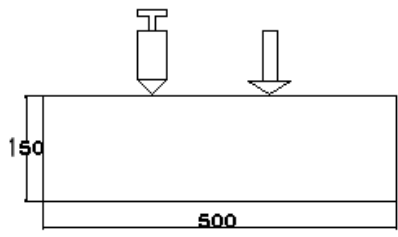
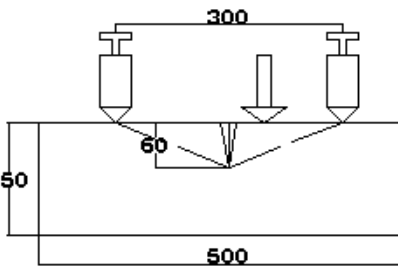
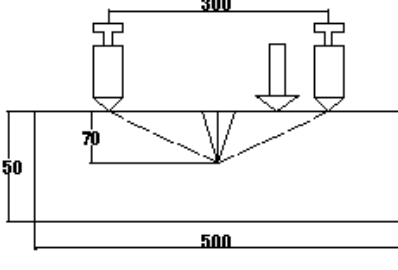
3-2 控制變數

1. 透過以下的材料使試體有不同的差異與瑕疵

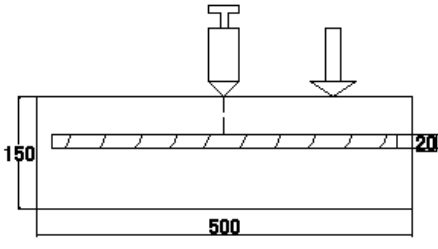
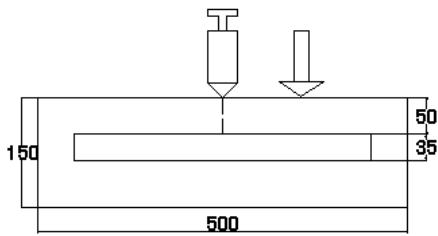
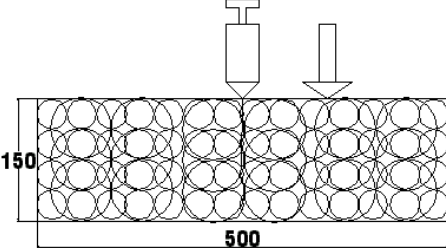
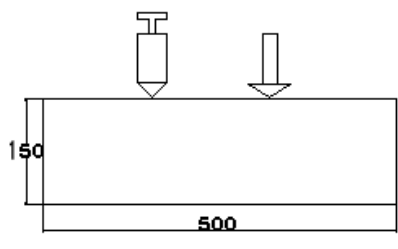
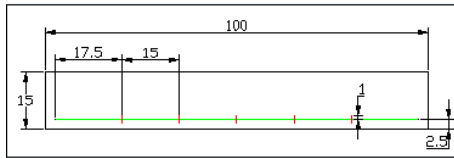
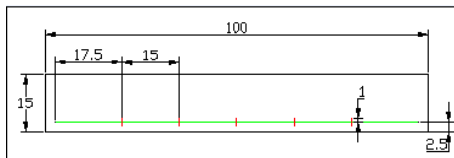
表 3-1 試體試驗變數

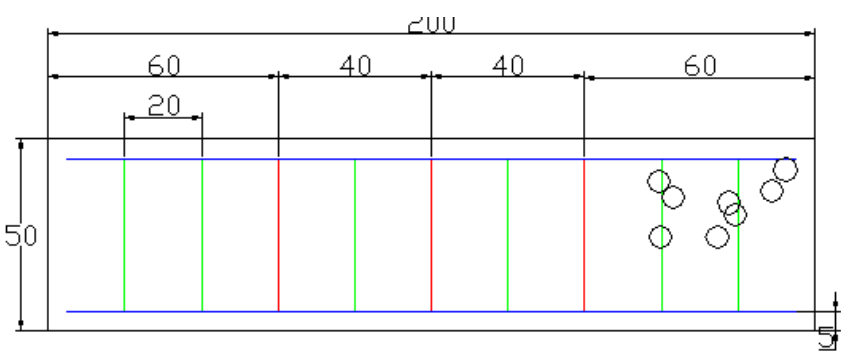
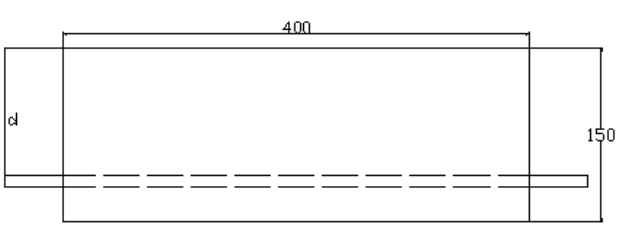
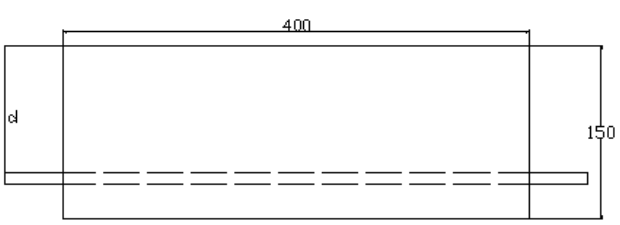
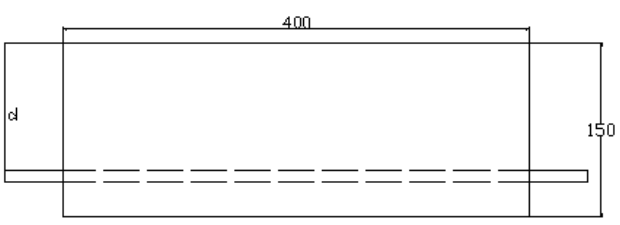
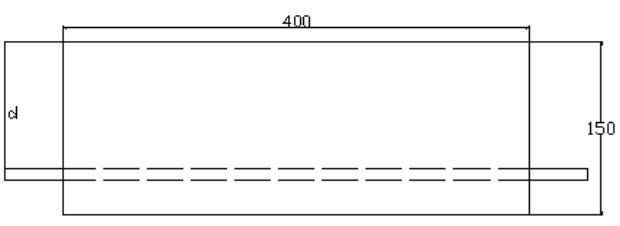
材	料	目	的
鋼筋		鋼筋是否能被察覺	
水管		水管所造成空洞是否能被察覺	
保麗龍		保麗龍所造成空洞是否能被察覺	
瓦楞紙片		製造表面深裂縫	

表 3-2 變數埋設位置

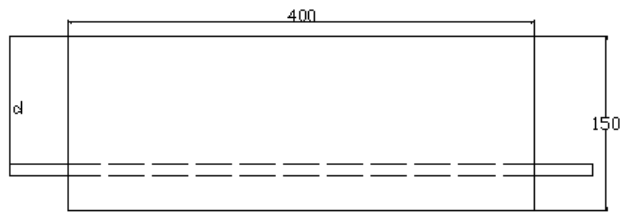
<p>1. 純混凝土，目的為控制(2~5 號)。</p>	
<p>2. 當混凝土尚未凝固時，將紙板垂直插入，可是為表面裂縫(深度為 60mm)。</p>	
<p>3. 當混凝土尚未凝固時，將紙板垂直插入，可是為表面裂縫(深度為 70mm)。</p>	

<p>4.利用紙板來造成斜裂縫 (預設角度 45 度，深度 70mm)。</p>	
<p>5.保麗龍板(厚 16mm)埋設距離表面 75mm</p>	
<p>6.塑膠紙帶製造表面淺裂縫(9mm)</p>	
<p>7.保麗龍加厚(34mm)，距離表面 50mm</p>	
<p>(7) 中間粗骨材是為不完全 (8) 的蜂窩</p>	

<p>9.鋼筋埋設距離表面 50mm 鋼筋號數 6 號(19.1mm)</p>	
<p>10.水管埋設距離表面 50mm 水管直徑 35mm</p>	
<p>11.澆製此混凝土時，以不搗實，使本試體成為具有蜂窩結構</p>	
<p>12. 純混凝土，目的為控制(6~11 號)。</p>	
<p>S1.放入鋼筋(直向二支、橫向五支)</p>	
<p>S2.放入鋼筋(直向三支、橫向五支)</p>	

<p>Beam</p> 	
<p>A 水管 d=105mm</p>	
<p>B 水管 d=90mm</p>	
<p>C 鋼筋 d=90mm</p>	
<p>D 鋼筋 d=120mm</p>	

E1 保利龍 d=75mm



3-3 配比設計與施作

混凝土配比設計：

設計試體強度為 $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ ，計算其所需之骨材含量。其配比如下：

$$f'c = 280 \text{ kg/cm}^2 \text{、坍度 } 15 \text{ cm}$$

$$\text{水 (Water)} = 202 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{水灰比 (w/c)} = 0.5$$

$$\text{水泥 (Cement)} \quad 202 / 0.5 = 404 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{粗骨材 (Agg)} \quad 0.67 \times 1650 = 1105 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{細骨材 (Sand)} \quad 2384 - 1105 - 404 - 202 = 673 \text{ kg/m}^3$$

表 3-3 試體混凝土配比設計

材料 (kg/m^3)	水	水泥	砂 (細骨 材)	石 (粗骨 材)
重量 (kg/m^3)	202	404	673	1105
比例		1	1.67	2.74







$f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ 配比設計

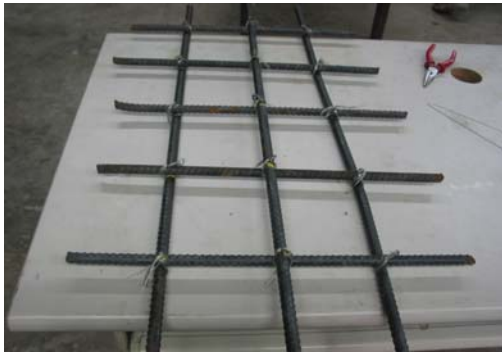
表 3-4 各試體配比資料

灌漿日期	試體編號	材料(水)	材料(水泥)	材料(細骨材)	材料(粗骨材)	材料(砂)	坍度
96.7.10	1	3.28kg	6.4kg		15.2kg	11.06kg	12cm
96.7.10	2	3.28kg	6.4kg		15.2kg	11.06kg	12cm
96.7.10	3	3.28kg	6.4kg		15.2kg	11.06kg	12cm
96.7.10	4	3.28kg	6.4kg		15.2kg	11.06kg	12cm
96.7.10	5	3.28kg	6.4kg		15.2kg	11.06kg	12cm
96.7.11	7	2.36kg	5.8kg	6.96kg	6.96kg	9.43kg	12cm
96.7.11	8	2.36kg	5.8kg	6.96kg	6.96kg	9.43kg	12cm
96.7.11	9	2.36kg	5.8kg	6.96kg	6.96kg	9.43kg	12cm
96.7.11	10	2.36kg	5.8kg	6.96kg	6.96kg	9.43kg	12cm
96.7.11	11	2.36kg	5.8kg	6.96kg	6.96kg	9.43kg	12cm
96.7.11	12	2.36kg	5.8kg	6.96kg	6.96kg	9.43kg	12cm
96.7.10	S1	15.48kg	36.9kg		88.2kg	60kg	12cm
96.7.10	S2	15.48kg	36.9kg		88.2kg	60kg	12cm
96.7.11	beam	61.2kg	114kg	154.725kg	154.725kg	221kg	15cm
96.10.22	A	1.5kg	3.5kg	4.2kg	4.2kg	5.7kg	15cm
96.10.22	B	1.5kg	3.5kg	4.2kg	4.2kg	5.7kg	15cm
96.10.22	C	1.5kg	3.5kg	4.2kg	4.2kg	5.7kg	15cm
96.10.22	D	1.5kg	3.5kg	4.2kg	4.2kg	5.7kg	15cm
96.10.22	E	1.5kg	3.5kg	4.2kg	4.2kg	5.7kg	15cm
備註： 96.7.10 和 7.11 天氣 晴天 風大 溫度 32 度至 35 度 96.10.22 天氣 晴天 溫度 27 度 *個別試體之配比已加入損失量估計值(約為 5%)							

試體實際施作過程詳如下表：

表 3-5 試體製作過程

	
1~12 號鐵模	S1、S2 模板準備
	
大梁 Beam 模板準備	大梁 Beam 編排鋼筋情況
	
Beam 鋼筋放置於模版中 保護層 50mm	S1 之編排鋼筋



S1 之編排鋼筋



S1 鋼筋放置於模版中 保護層
50mm



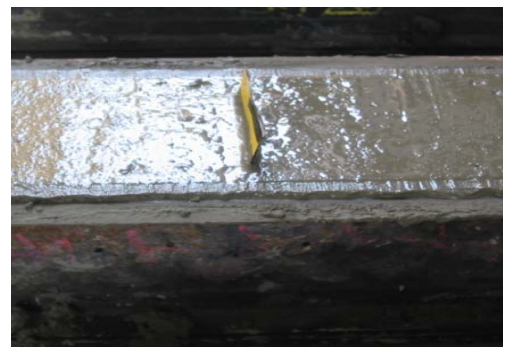
攪拌混凝土



坍度試驗



搗實



用瓦楞紙製造表面裂縫



用瓦楞紙製造表面裂縫



保麗龍放入



搗實 S1、S2 情況



大梁 灌漿完成&抗壓式體



A 試體灌漿



B 試體 保麗龍設置



覆蓋塑膠袋



拆模情形

第四章 試體檢測程序

4-1 波速

在波速測量這部分，我們主要介紹敲擊迴音及超音波之數據比對。其中敲擊迴音我們運用了「直接量測法」及「間接量測法」兩種方法。至於超音波我們介紹了直接法。

敲擊迴音波速：

波速可分為縱波和橫波

橫波：如果波傳播時介質振動方向和波前進方向垂直的波就是『橫波』，其所形成的波形會成為一個一個高低的峰谷狀，所以又稱之為『高低波』。

縱波：如果波傳播時介質振動方向和波前進方向平行的波就是『縱波』，所形成的波形會成為一疏一密的間隔狀，所以又稱之為『疏密波』。

力學波的波行方向如果和介質的振動方向相垂直，就叫做「S 橫波」(圖 4-1(a))，如繩波；如果波行方向與介質的振動方向相平行，就叫做「P 縱波」(圖 4-1(b))，如聲波。

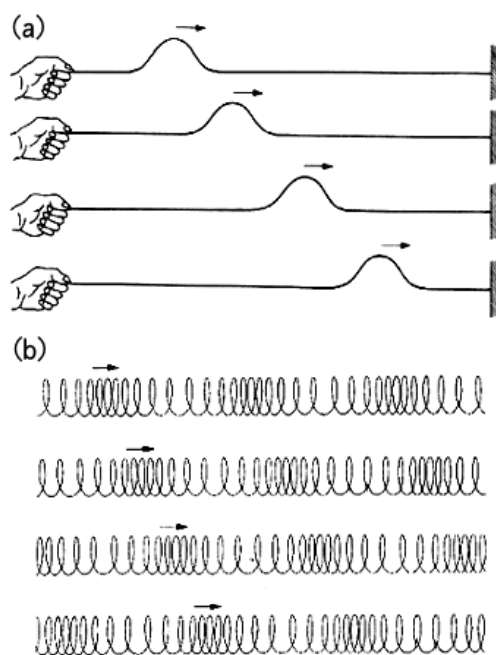


圖 4-1 縱波與橫波示意圖

已知版厚法：

敲擊回音之已知版厚測量法原理

激發之應力波會在版的頂面及底面來回傳動，因此產生一個共振條件，每次應力波到達頂面時，將引起一個向下的位移，使得此一位移波形具有週期性。對靠近敲擊位置的點而言，應力波來回一趟行徑的路徑為版後的兩倍，所造成的週期則為行徑路徑(2L)除於 P-波的波速(C_p)，由於頻率(f)為週期的倒數則該特有位移波形之頻率可以下列公式計算而得

$$C_p = f \times 2L \quad (\text{公式 5})$$

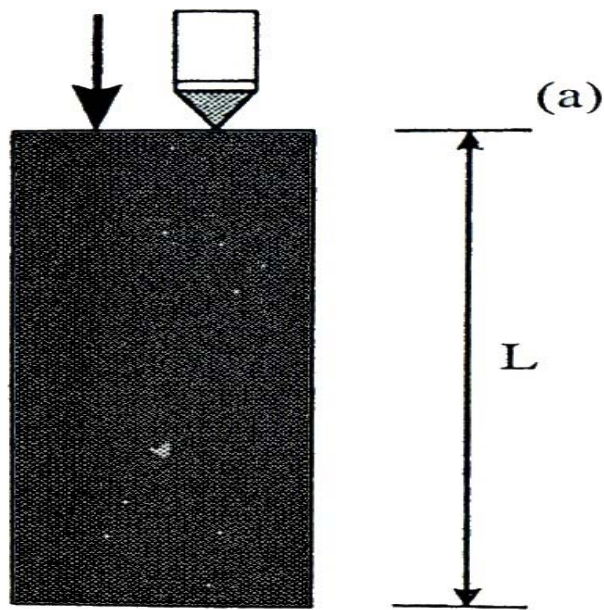
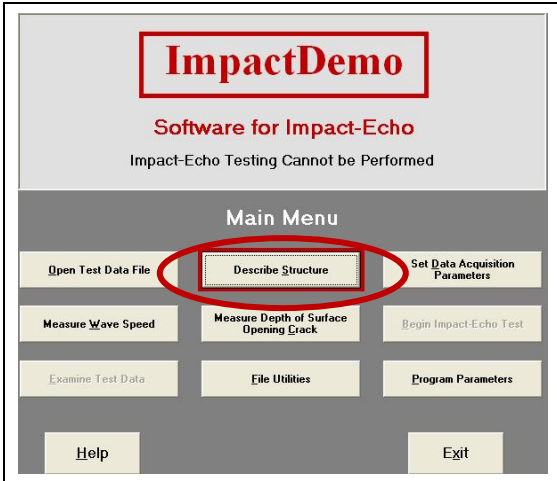
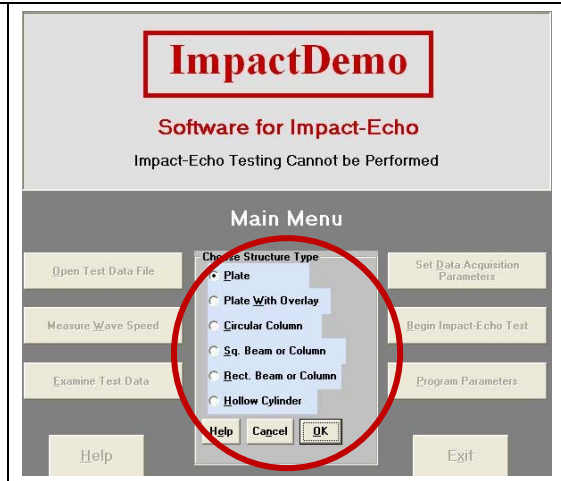
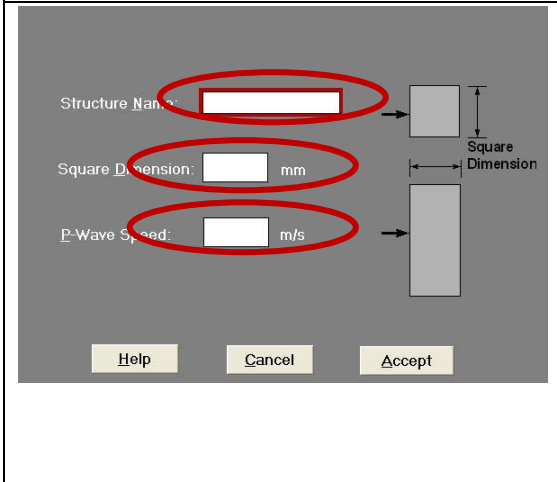
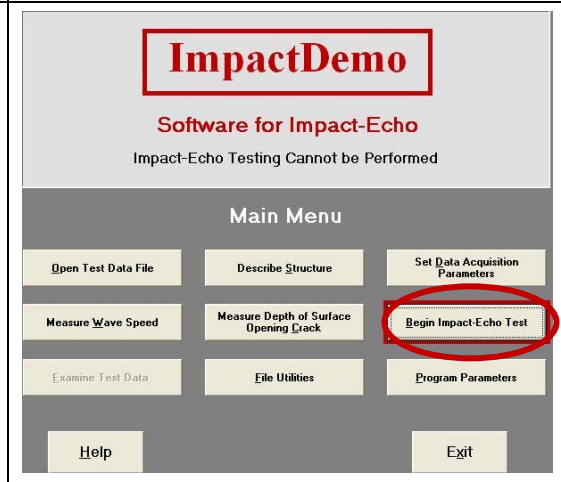
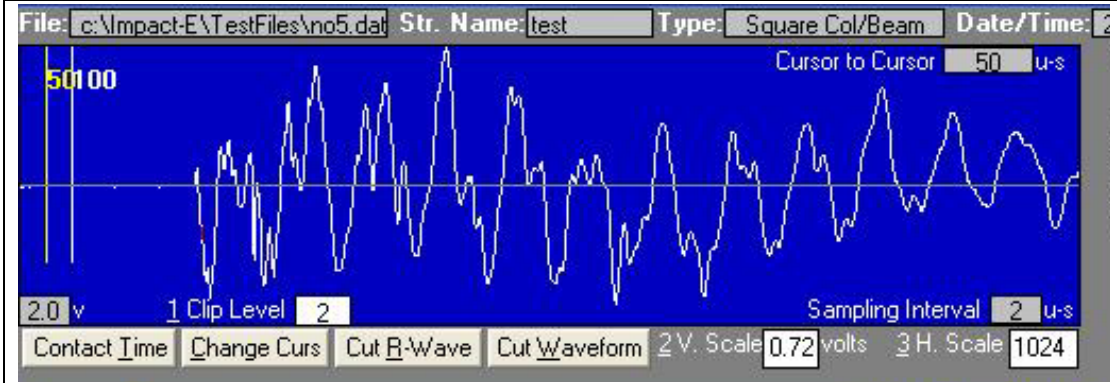
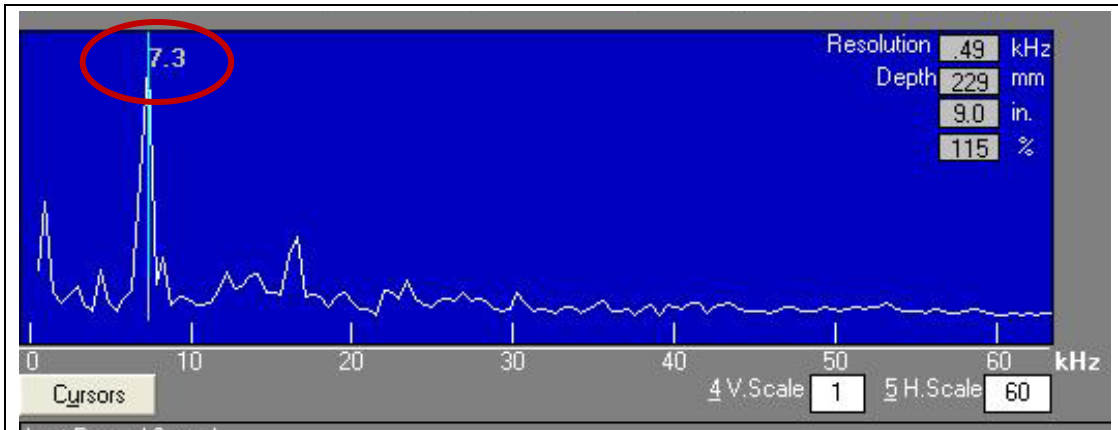


圖 4-2 已知版厚量測法示意圖

表 4-1 已知版厚度測法步驟

 <p>ImpactDemo Software for Impact-Echo Impact-Echo Testing Cannot be Performed</p> <p>Main Menu</p> <p>Open Test Data File Describe Structure Set Data Acquisition Parameters</p> <p>Measure Wave Speed Measure Depth of Surface Opening Crack Begin Impact-Echo Test</p> <p>Examine Test Data File Utilities Program Parameters</p> <p>Help Exit</p>	 <p>ImpactDemo Software for Impact-Echo Impact-Echo Testing Cannot be Performed</p> <p>Main Menu</p> <p>Open Test Data File Choose Structure Type Set Data Acquisition Parameters</p> <p>Measure Wave Speed Measure Depth of Surface Opening Crack Begin Impact-Echo Test</p> <p>Examine Test Data File Utilities Program Parameters</p> <p>Help Exit</p> <p>Choose Structure Type</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="radio"/> Plate <input type="radio"/> Plate With Overlay <input type="radio"/> Circular Column <input type="radio"/> Sq. Beam or Column <input type="radio"/> Rect. Beam or Column <input type="radio"/> Hollow Cylinder <p>Help Cancel OK</p>
<p>1. 選擇試體描述</p>	<p>2. 選擇測試之試體種類</p>
 <p>Structure Name: <input type="text"/></p> <p>Square Dimension: <input type="text"/> mm</p> <p>P-Wave Speed: <input type="text"/> m/s</p> <p>Help Cancel Accept</p>	 <p>ImpactDemo Software for Impact-Echo Impact-Echo Testing Cannot be Performed</p> <p>Main Menu</p> <p>Open Test Data File Describe Structure Set Data Acquisition Parameters</p> <p>Measure Wave Speed Measure Depth of Surface Opening Crack Begin Impact-Echo Test</p> <p>Examine Test Data File Utilities Program Parameters</p> <p>Help Exit</p>
<p>3. 輸入名稱、距離、波速</p>	<p>4. 選擇 Begin Impact-Echo Test</p>
 <p>File: c:\Impact-E\TestFiles\no5.dat Str. Name: test Type: Square Col/Beam Date/Time: 2</p> <p>50100 Cursor to Cursor 50 u-s</p> <p>2.0 v 1 Clip Level 2 Sampling Interval 2 u-s</p> <p>Contact Time Change Curs Cut B-Wave Cut Waveform 2 V. Scale 0.72 volts 3 H. Scale 1024</p>	
<p>5. 敲擊混凝土取得表面位移圖 (經過傅利葉轉換得到下圖)</p>	



6.再選取單一最高峰值 ex : 7.3khz

Normal Modes No.	kHz
1	7.3
2	10.2
3	13.9
4	17.5
5	20.4
6	24.8

7.將頻率更改為高峰值之頻率(7.3khz),選取重新計算 P 波波速即可得知

直接測量波速步驟：

敲擊回音之直接測量波速原理

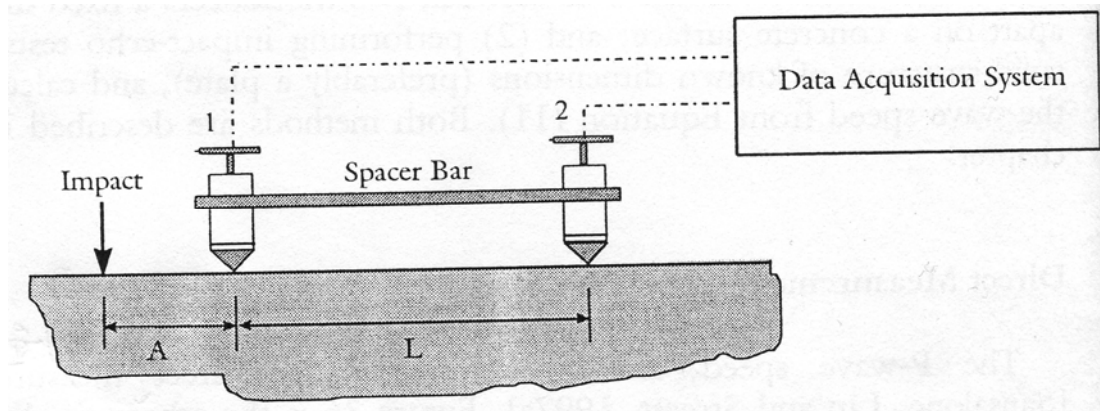
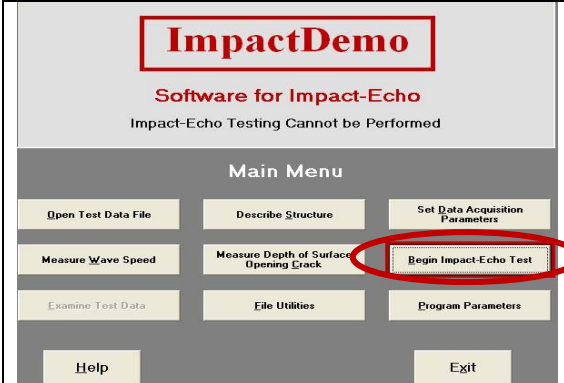
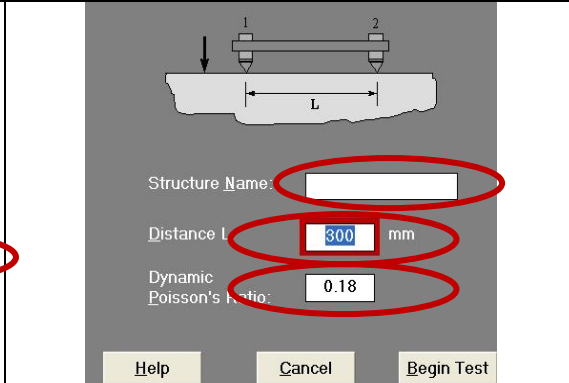
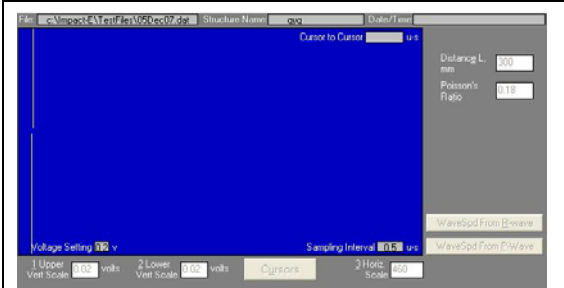
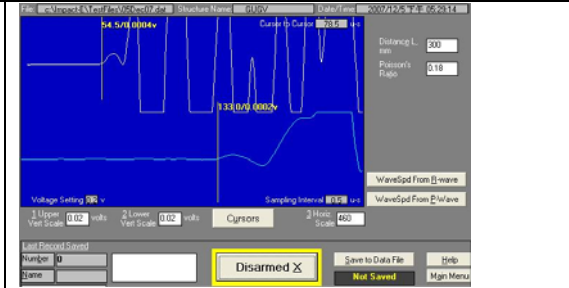
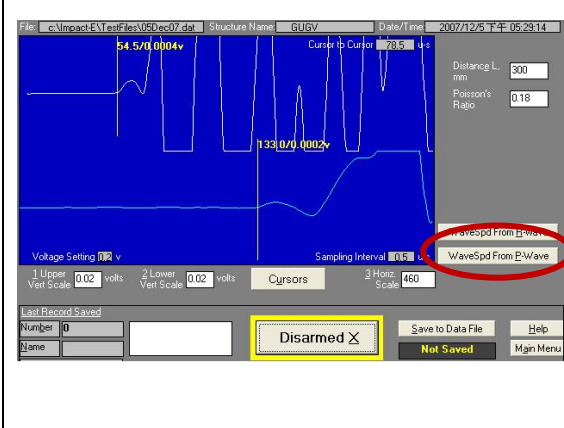
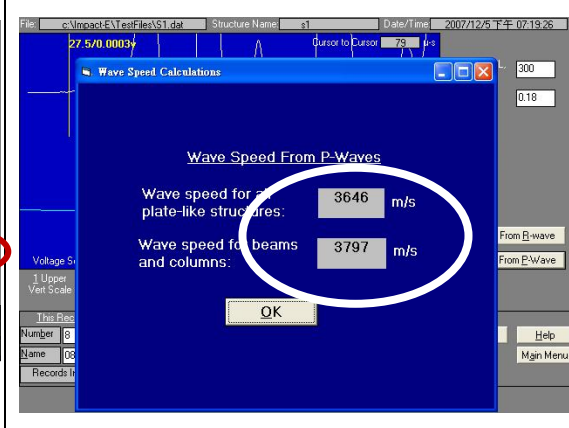


圖 4-3 敲擊回音之直接量測法示意圖

壓力波(P-波)波速得量測採用時間分析方式，時間領域的波速量測採用兩接收器對接模式，將接收器分置於樑的左右兩側。在樑的一側提供敲擊源，樑的另外一側等位置放置第二接收器，以便接收 P-波到達時間 t_2 ，第一接收器收到 R-波向下位移時，開始啟動監測系統，啟動時間為 t_1 ，樑側面的 R-波波速為 C_R ，P-波由敲擊源到第二接收器所經歷的總時間為 (Δt) ，量的寬度 L 為已知值，便可推求 P-波波速【6】

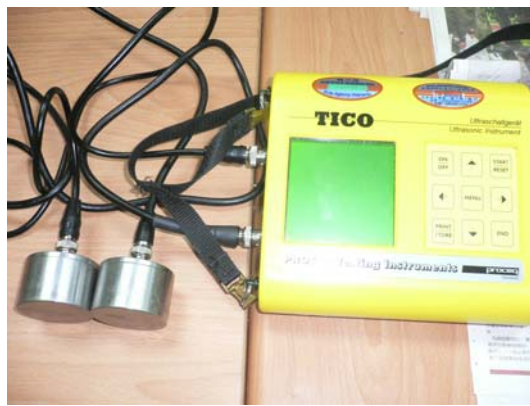


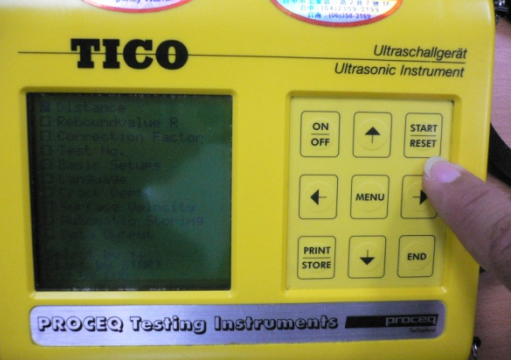


$$C_p = L / \Delta t \quad (\text{公式 6})$$

表 4-2 敲擊回音之直接測量波速步驟

	
<p>1. 選擇 Measure Wave Speed</p>	<p>2. 輸入名稱、距離、波松比(距離 300mm，波松比 0.18)</p>
	
<p>3. 開始施測</p>	<p>(上半下部都選擇接受到訊號的第一時間)</p>
	
<p>4. 按下 WaveSpdFromP-Wave</p>	<p>5. 顯示出版波速及梁波速</p>

超音波量測波速操作步驟：

表 4-3 超音波量測波速操作步驟

	
<p>1. 取出儀器與電能轉換器兩者連接</p>	<p>2. 儀器探頭先塗上藕合劑</p>
	
<p>3. 打開電源機後 按MENU 進入主此 選項</p>	<p>4. Distance 按 RESE 選擇 T 設定試體之 長度，接著按按 END 回到主選單， 在按 START</p>
	
<p>5. 接著在探頭塗上藕合劑以及在要施 測的點上塗上藕合劑</p>	<p>6. 實驗開始將探頭放置在所施測之點 上然後按 START 按後會有答答聲 直到螢幕上數據出現</p>

4-2 內部瑕疵

內部瑕疵與空洞檢測之原理如下：

內部裂縫情形會明顯的在表面位移中明顯的表示出來如下圖可以很明顯的發現有兩個間隔時間(t_d, t_s)。

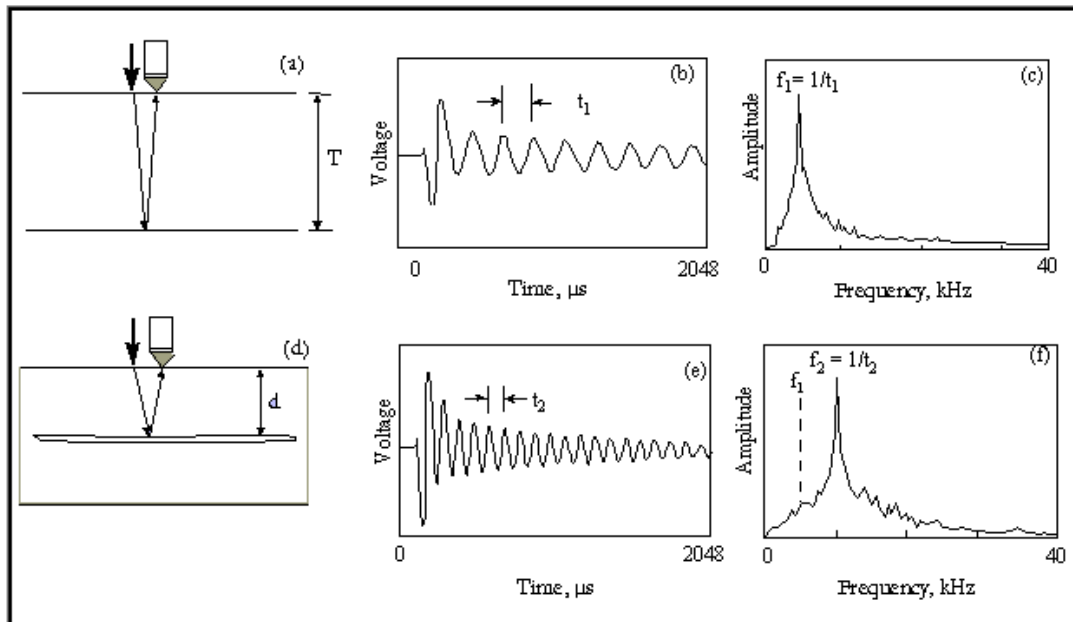


圖 4-4 內部裂縫量測示意圖

(a)(d)內部沒有瑕疵的應力波傳遞、內部有瑕疵 (b)(e)表面位移可以看出有瑕疵與沒瑕疵 t_1 & t_2 的時間差距 (c)(f)是(b)(e)進行 FFT 的轉換而得【2】

，而內部瑕疵在頻譜領域的分析則需要用模態系數，當在開始測試時需要輸入試體的寬與高(D/B 比)，本組所試做的試體 D/B 比為 1(150mm/150mm)。

表 4-4 模態系數

Aspect Ratio (D/B)	Fundamental Mode $f_1 = \beta C_p / 2D$	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6
0.60	$\beta = 0.84$	$1.07 f_1$	$1.43 f_1^{\#}$	$1.48 f_1$	$1.86 f_1$	$1.91 f_1$
0.75	$\beta = 0.87$	$1.19 f_1$	$1.60 f_1^{\#}$	$1.66 f_1$	$1.98 f_1$	$2.02 f_1$
0.80	$\beta = 0.75^*$	$1.45 f_1$	$1.96 f_1$	$2.01 f_1$	$2.4 f_1$	$2.46 f_1$
0.83	$\beta = 0.77^*$	$1.44 f_1$	$1.94 f_1$	$1.98 f_1$	$2.38 f_1$	$2.44 f_1$
0.87	$\beta = 0.80$	$1.43 f_1$	$1.93 f_1$	$1.95 f_1$	$2.36 f_1$	$2.41 f_1$
0.91	$\beta = 0.82$	$1.42 f_1$	$1.92 f_1$	$1.92 f_1$	$2.34 f_1$	$2.47 f_1$
1.00	$\beta = 0.87$	$1.41 f_1$	$1.90 f_1$	$2.45 f_1$	$2.83 f_1$	$2.34 f_1$
1.10	$\beta = 0.90$	$1.43 f_1$	$1.92 f_1$	$2.34 f_1$	$2.52 f_1$	$2.69 f_1$
1.20	$\beta = 0.92$	$1.45 f_1$	$1.94 f_1$	$2.38 f_1$	$2.58 f_1$	$2.73 f_1$
1.33	$\beta = 0.94$	$1.49 f_1$	$19.8 f_1$	$2.02 f_1$	$2.45 f_1$	$2.62 f_1$
1.67	$\beta = 0.95$	$1.66 f_1$	$2.11 f_1$	$2.32 f_1$	$2.74 f_1$	$2.74 f_1$
2.00	$\beta = 0.96$	$1.81 f_1$	$2.06 f_1$	$2.23 f_1$	$2.56 f_1$	$2.92 f_1$

內部瑕疵與空洞檢測步驟：

首先取得波速與版厚，接下來輸入數據便開始敲擊偵測，便可取得表面位移與頻譜圖，開始對這圖加以分析得知。分析內容請參考 5-2 內部瑕疵試驗結果。

4-3 表面裂縫(Surface-Opening Cracks)

表面開放裂縫是可以一種可被目視發現的瑕疵而表面開放裂縫情況有(圖 4-5)

- a. 裂縫與表面成“直角”
- b. 裂縫與表面呈“斜向”
- c. 裂縫與表面呈“曲線”

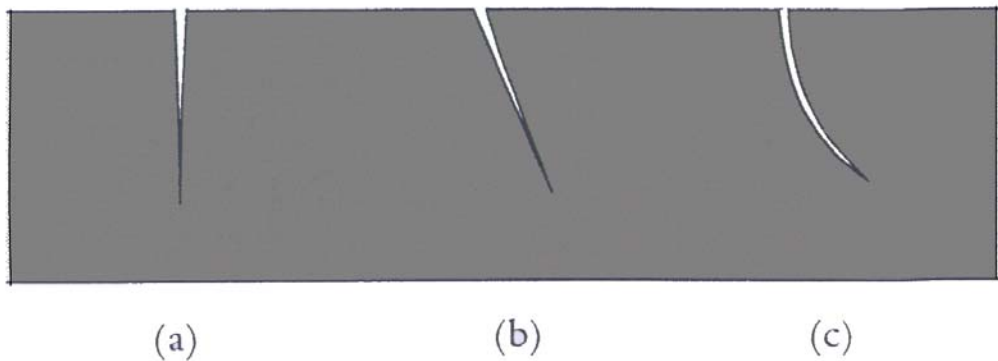


圖 4-5 表面開放裂縫示意圖

當應力波敲擊在有表面裂縫之混凝土表面時則應力波行經路線如圖 (4-6 a) 在裂縫左方敲擊產生 P 波碰到裂縫 (4-6 b) P_c 為 P 波碰到裂縫反射(4-6 c)(4-6 d) $p_d P$ 是 P、 P_c 波傳遞到裂縫最深處(點)產生的波源也同時通過了裂縫傳遞到裂縫的右方。

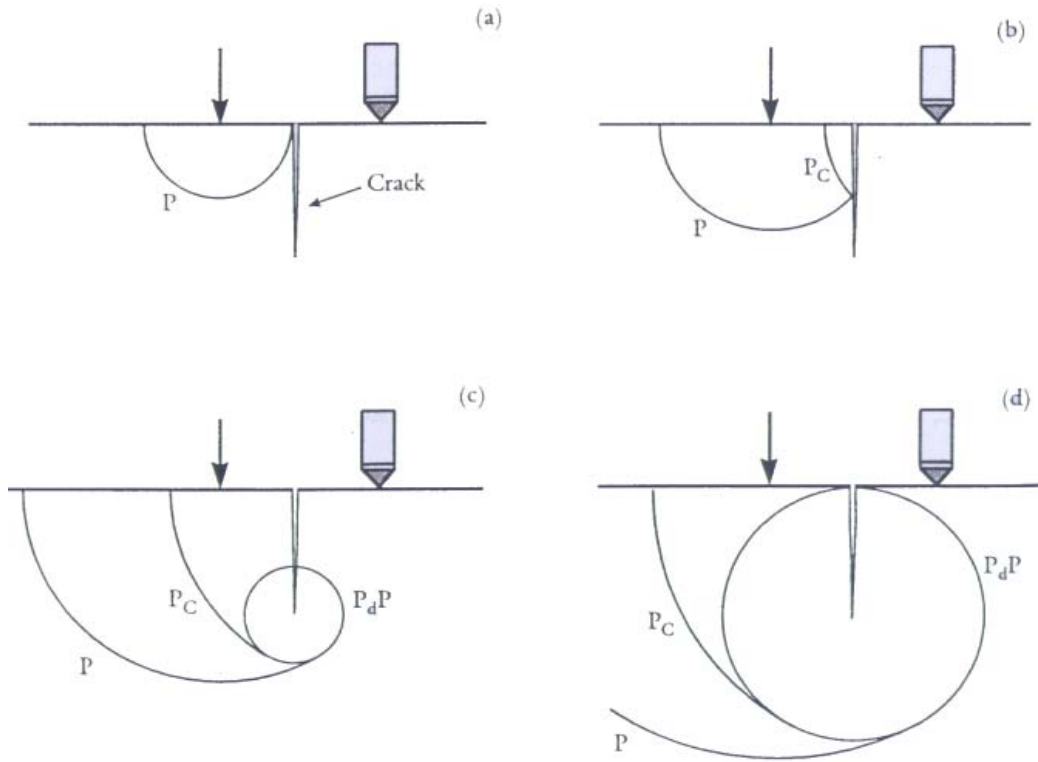


圖 4-6 應力波行經路線示意圖

在敲擊後所產生 $p_d p$ 、 P 、 P_c 波速相同且到達右方表面時間相同，而表面裂縫量測就是取決於之波的傳送時間(ΔT)。所以由此可知不管裂縫是垂直表面、呈斜向、呈曲線所測知深度都是表面與最深點的垂直距離。

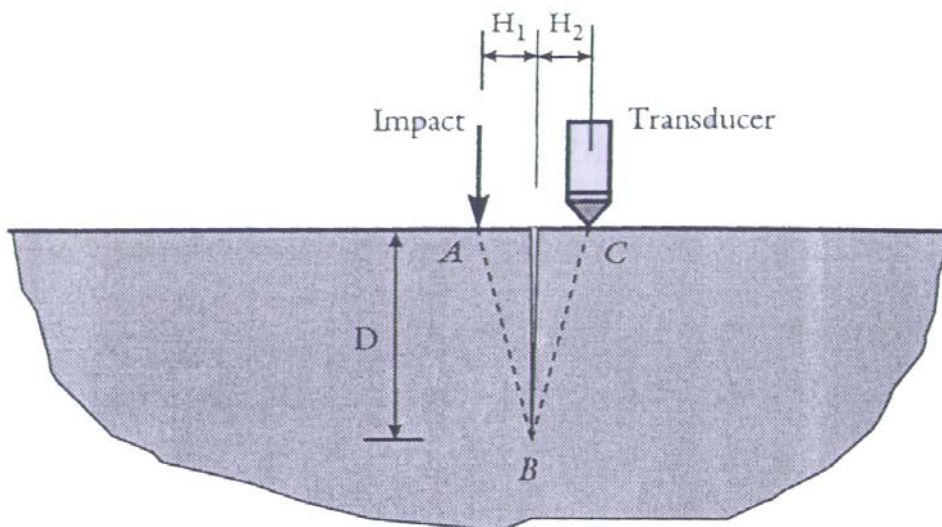


圖 4-7 表面裂縫量測示意圖

以垂直於表面裂縫來講解，須把儀器放置如上(圖 4-7)所表示

- H_1 為表面裂縫至 A 點之距離
- H_2 為表面裂縫至 C 點之距離
- A 點為敲擊點(源)
- B 點為裂縫最深處
- C 點為接收器
- D 為裂縫之最深處距離

如果已知波速 C 、傳遞時間 ΔT 、 H_1 、 H_2 ，而 P 波傳遞距離為 $\overline{AB} + \overline{BC}$ 則裂縫深度 D 可以被求得。如下

$$\begin{aligned}(AB)^2 &= H_1^2 + D^2 \\(BC)^2 &= H_2^2 + D^2 \\AB + BC &= C \times \Delta T\end{aligned}$$

未知數為 AB、BC 和 D。如果 $H_1 = H_2$ ，則 $AB = BC$ ，所以 D 可以表示為

$$D = \sqrt{\frac{C \times \Delta T}{4} - H^2} \quad (\text{公式 8})$$

但是敲擊回音法無法得知 P 波傳遞時間 ΔT ，原因在於敲擊後產生波源的起始時間，所以解決方法如下(圖 4-8 a)設定裝置 (圖 4-8 b)敲擊後產生時間領域(V-T) 圖 t_0 為敲擊後產生波源的起始時間。【2】

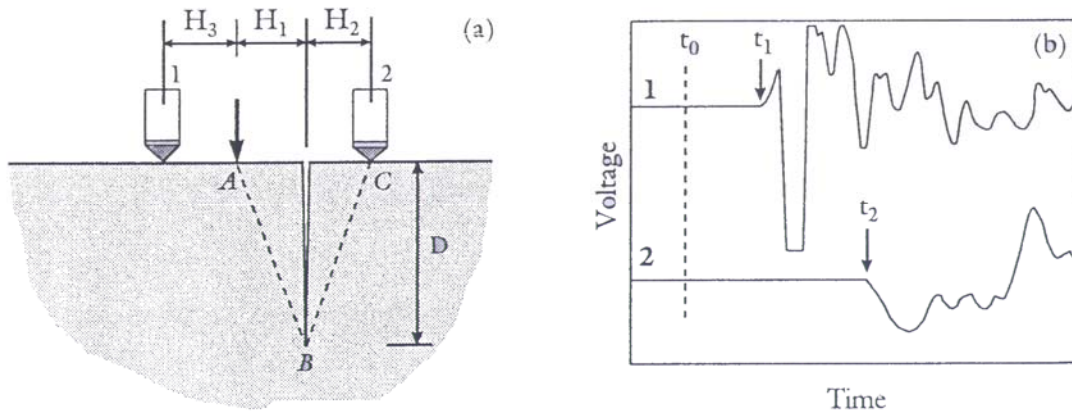


圖 4-8(a)裝置設定圖 (b)敲擊後產生時間領域(V-T)圖

$$t_1 - t_0 = \frac{H_3}{C}$$

$\Delta T = t_2 - t_0$ 也可表示為

$$\Delta T = (t_2 - t_1) + \frac{H_3}{C} \quad (\text{公式 9})$$

4-3-1 敲擊回音量測表面裂縫

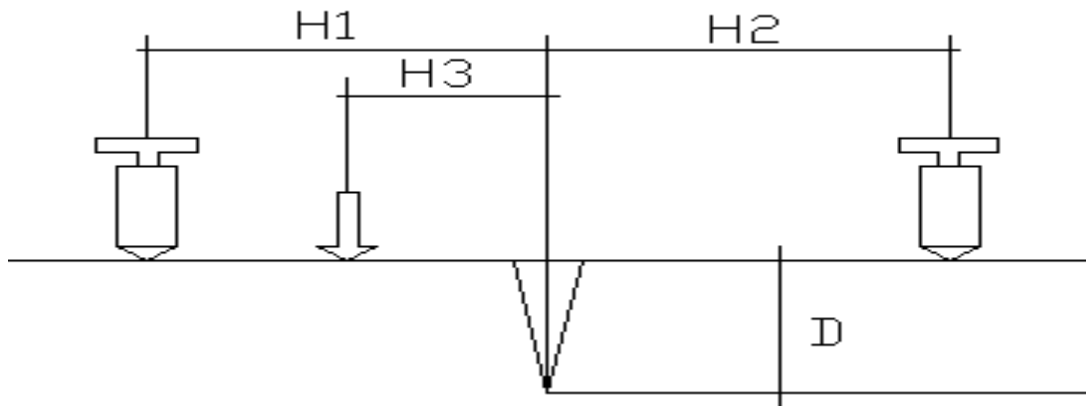
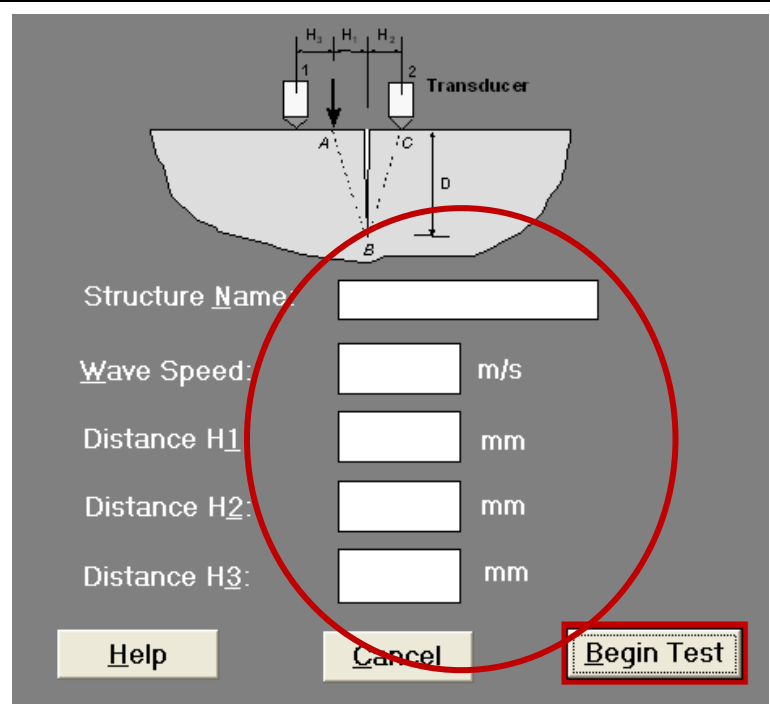
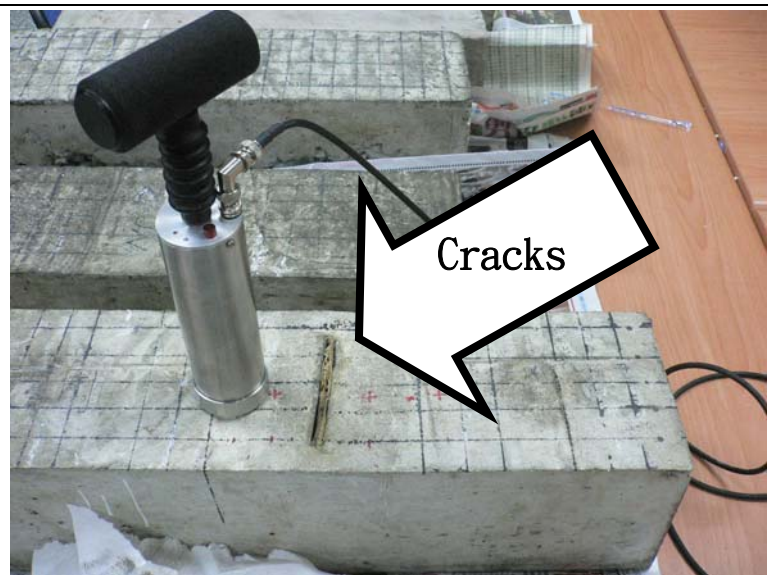


圖 4-9 雙接收器表面裂縫量測法示意圖

一. 將儀器組裝好然後
開啟，再登入敲擊回
音系統選擇測裂縫
(表面)輸入名稱、波
速、H1、H2、H3



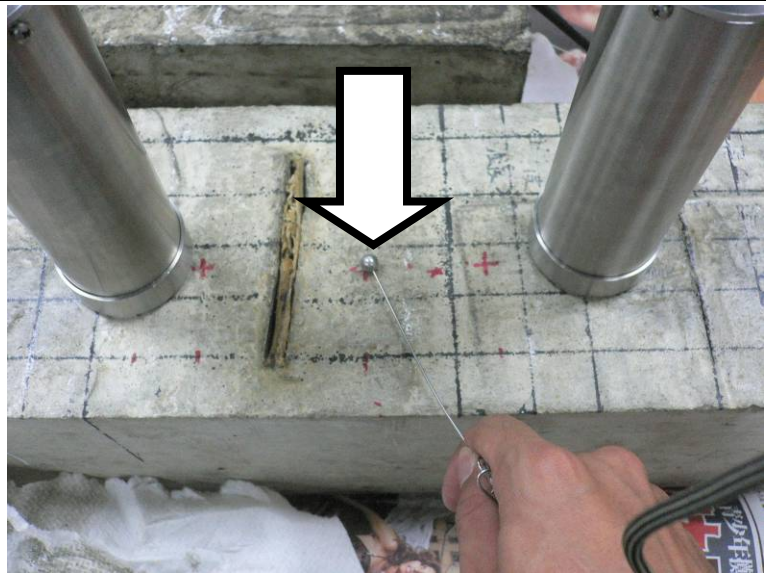
二. 再來將其中一個接
收源源放在表面裂
縫距離 H1



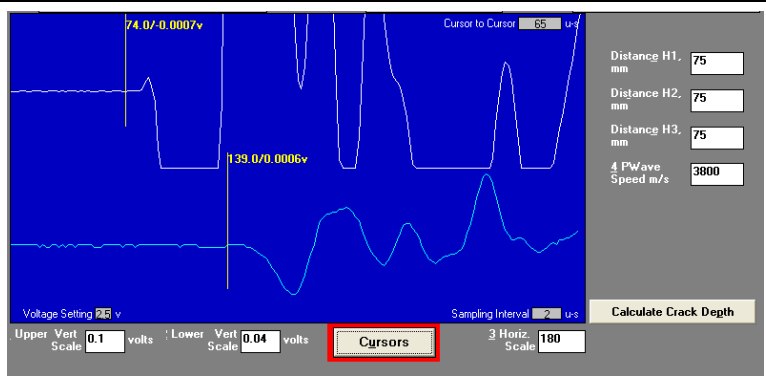
三. 然後將另一個接收源放在 H2 的距離上

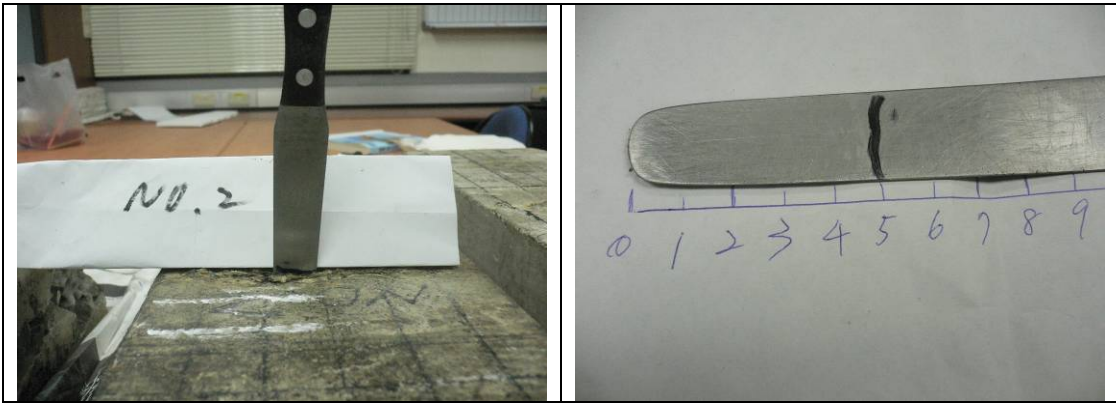


四. 再過來將敲擊源的距離放在 H3 敲擊

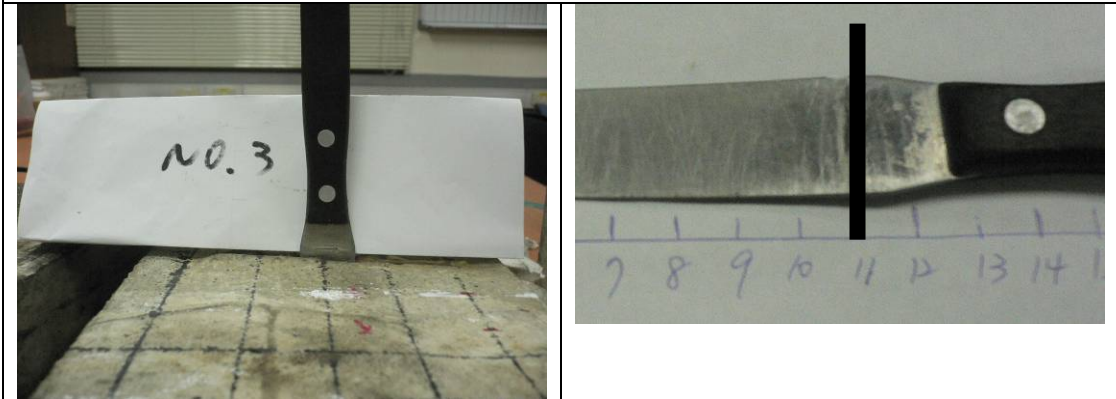


五. 最後接收敲擊時的波速數據儲存檔案和看圖

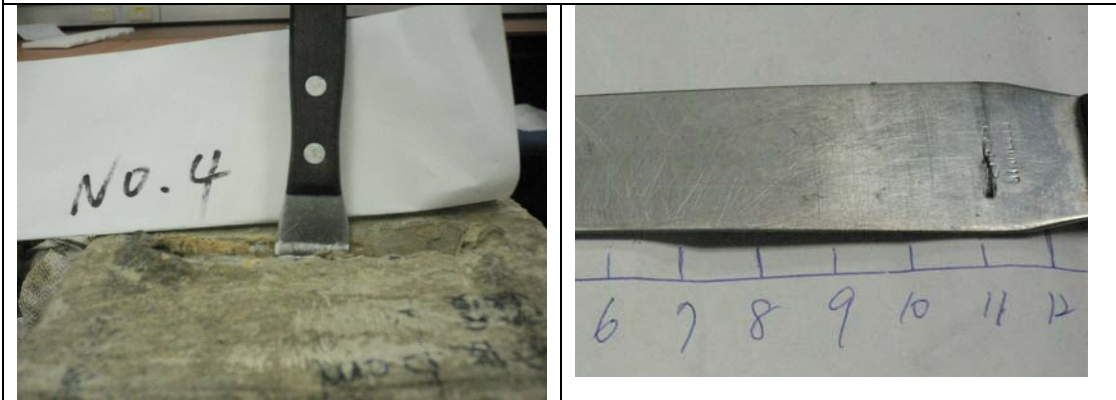




NO.2 實測深度 5cm (設計 6cm)



NO.3 實測深度 11cm (設計 7cm)



NO.4 實測深度 11cm (設計 6cm)

圖 4-10 表面裂縫深度驗證示意圖

4-3-2 超音波量測表面裂縫

因為超音波無法傳送穿過裂縫，因此若有裂縫存在於傳送路徑上，則超音波會繞過裂縫而尋找其他路徑，故儀器所顯示的時間，係由繞行裂縫尖端後所得者，利用波傳時間差量測得之距離等特性可求得裂縫之深度。

$$C = b \times \sqrt{\frac{4t_2^2 - t_1^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad (\text{公式 10})$$

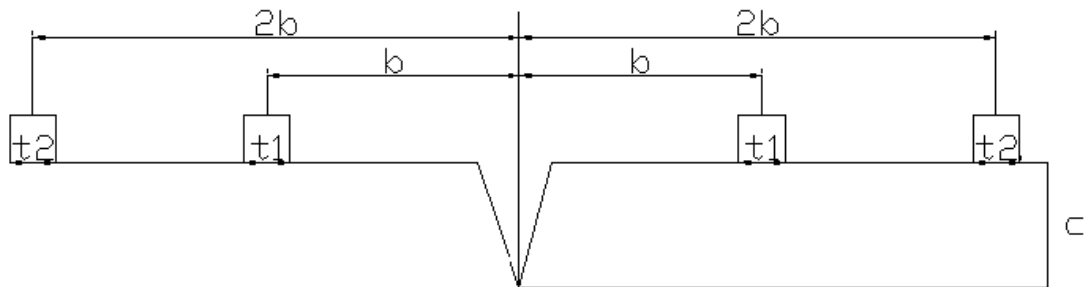


圖 4-11 超音波表面裂縫標測示意圖

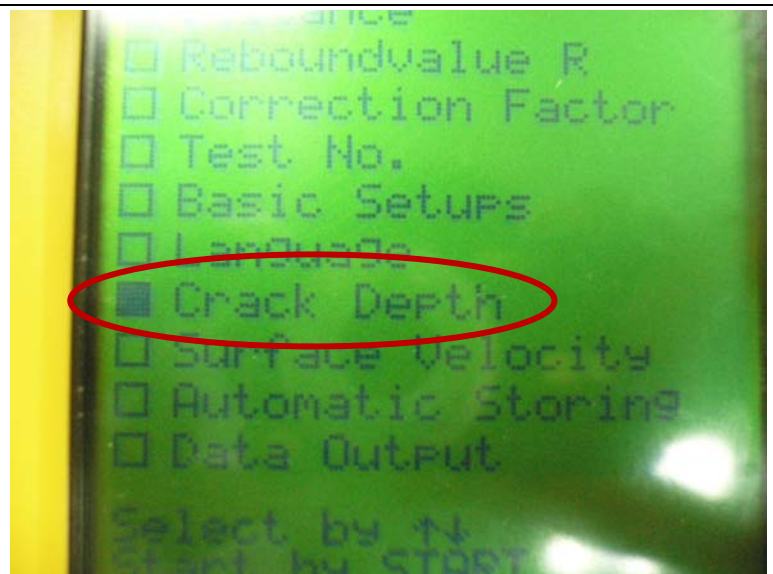
b = _____ mm

t1 = _____ us

t2 = _____ us

c = _____ mm

一. 先到主選單選擇
“Crack Depth”



二. 設定 d 值之後把兩探頭放到表面裂縫兩側距離 b 按 "START" 開始測量 t1



三. 得知 t1 之後把兩探頭移到 2b 兩點在按 "PRINT" 可得 t2



四. t1、t2 測得之後在按 "PRINT" 可得 c 值

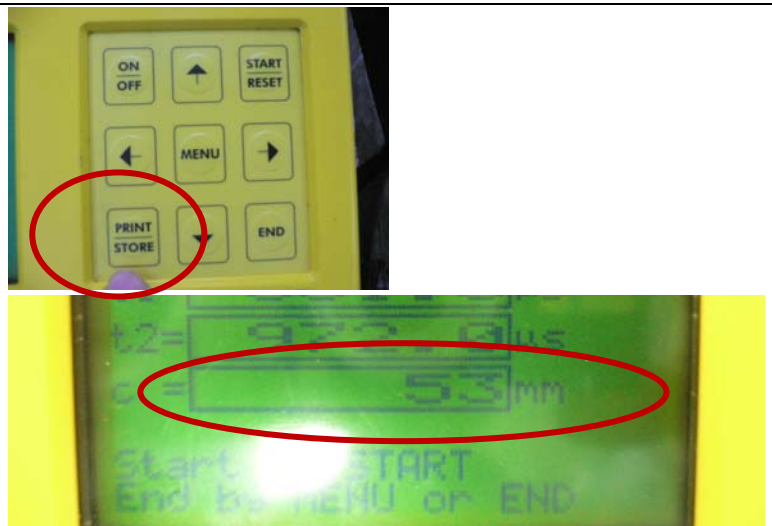


圖 4-12 超音波之表面裂縫測量步驟

第五章 結果與分析

5-1 波速量測之比較

表 5-1 敲擊回音與超音波波速數據

試體	敲擊迴音	超音波	落差
1	3461.008	3530	68.992
2	3588.302	3604	15.698
3	3216.958	3603	386.042
4	3691.225	3604	87.225
5	3811.119	3735.5	78.619
7	3696.416	3527	169.419
8	3555.626	3370	185.626
9	3363.364	3612	248.636
10	3446.633	3522.5	75.867
11	3294.936	3495.5	200.564
12	3602.806	3528.5	74.306
S1	3879.1	3806.333	72.767
S2	3774.015	3358.667	415.348
Beam	-	3734.25	-
A	-	3550	-
B	-	3473	-
C	-	3520	-
D	-	3472	-
E	-	3370	-

敲擊迴音與超音波波速有些許的落差，我們試著代入公式

$$D = \frac{C}{2f} \quad (\text{公式 7})$$

另 $f=11.2\text{kHz}$

$C1=3774$ $D1=168.5\text{mm}$

$C2=3358$ $D2=150\text{mm}$

$D1-D2=18.5\text{mm}$ 這是最大落差之波速對位置判斷上的誤差值。

5-2 內部瑕疵量測之比較

試體 No.1 內部瑕疵分析

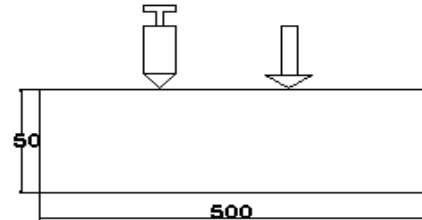
試體尺寸：50cm×15cm×15cm

埋設變數：純混凝土，目的為控制(2~5 號)

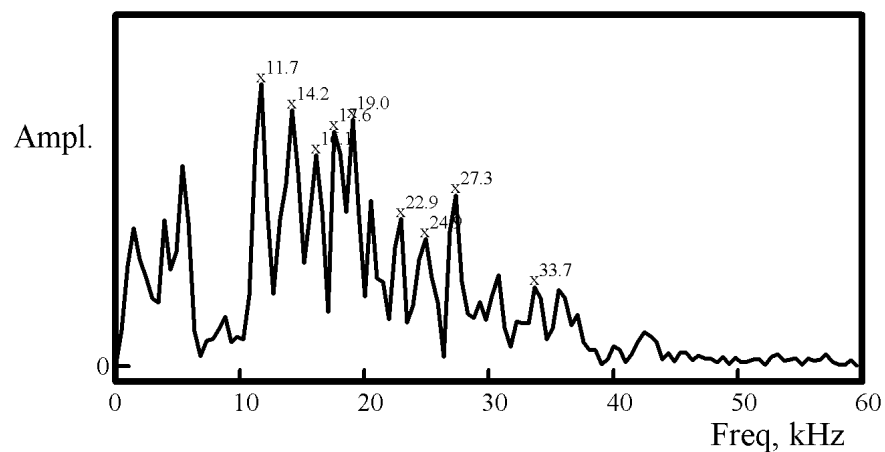
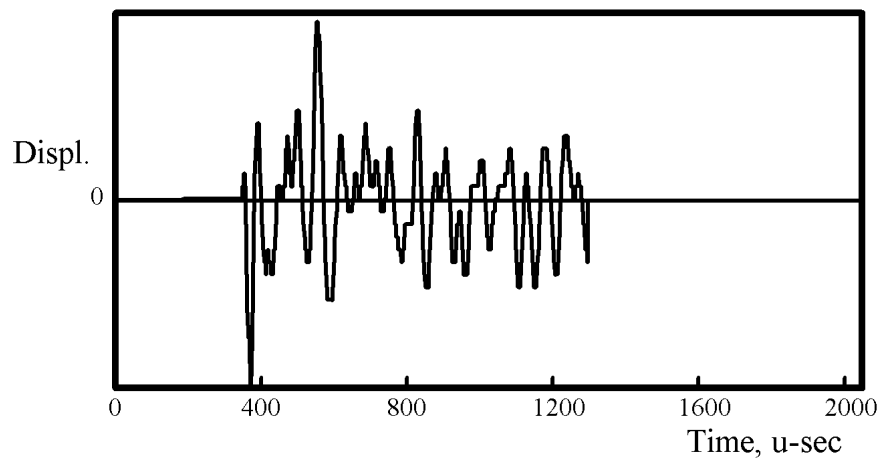
Thickness, 150 mm

Wave Speed, 4034 m/s

First mode Frequency, 11.7khz



No.	1	2	3	4	5	6
Normal mode,khz	11.7	16.4	22.2	28.1	32.8	39.8
試驗 mode,khz	11.7	16.1	22.5	27.3	33.7	-
誤差值,%	0	-0.01829	0.013514	-0.02847	0.027439	-



File-01.dat-09

NO.1 檢測分析：

- 1.表面位移圖(Disp) 看來只有單一個波長(λ)，可以解讀為無明顯瑕疵
- 2.頻譜圖中都可以明顯的看出 **Normal mode** 與**試驗 mode** 誤差值 ± 0.028
然而在頻譜圖中也出現 2 個頻率

頻率	位置	分析
14.2khz	14.2cm	接近底部之誤判
24khz	8.1cm	瑕疵可能

總結：

由誤差值僅 ± 0.028 與表面位移圖 的判定為 無瑕疵

試體 No.5 內部瑕疵分析

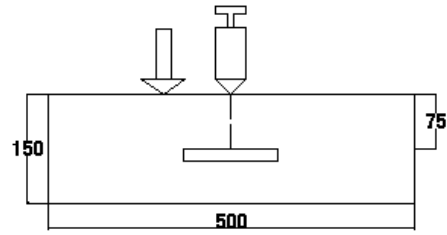
試體尺寸：50cm×15cm×15cm

埋設變數：保麗龍板(厚 16mm)埋設距離表面 75mm

Thickness, 150 mm

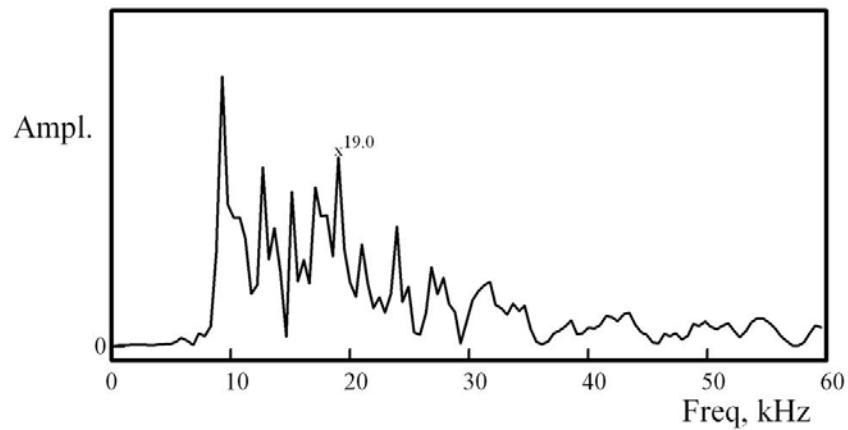
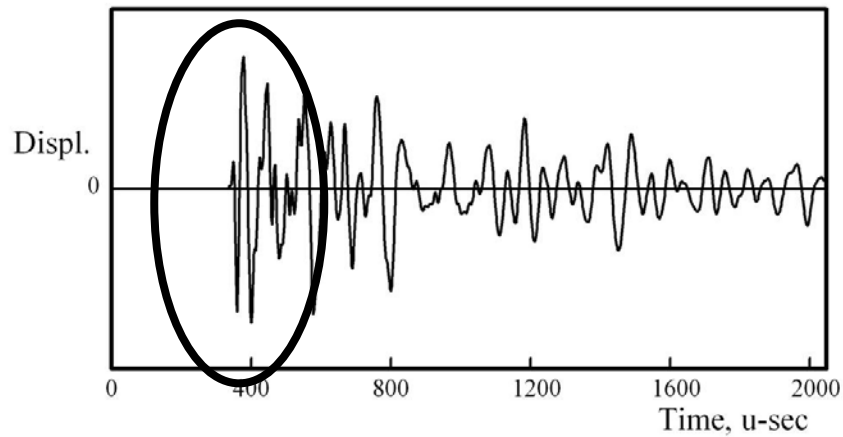
Wave Speed, 3207 m/s

First mode Frequency, 9.3khz



No.	1	2	3	4	5	6
Normal mode,khz	9.3	11.0	17.7	22.3	26	31.6
試驗 mode,khz	9.3	-	-	-	-	-
誤差值,%	0	-	-	-	-	-

File: g:\TestFiles\專題\no5.dat; Record: 17/17; 1024 Points @ 2 u-sec
 Date: 2007/12/13 06:04:42 下午
 Square Beam/Col: width 150 mm, Wave Speed 3207 m/s, 1st Mode Freq. 9.3 kHz
 Descr: ANS 7.5CM



NO.5 檢測分析：

- 1.表面位移圖(Disp) 前半部份(圈選)處，有瑕疵的反應
- 2.頻譜圖中都可以明顯的看出 19KHZ 不在正常 Normal mode

總結：

有問題(瑕疵)的 19KHZ 為深度 8.4CM。

試體 No.7 內部瑕疵分析

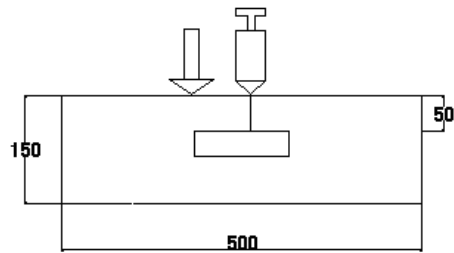
試體尺寸：50cm×15cm×15cm

埋設變數：保麗龍加厚(34mm)，距離表面
50mm

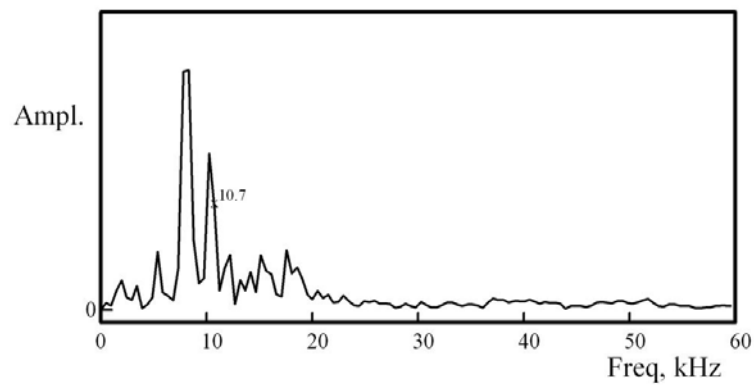
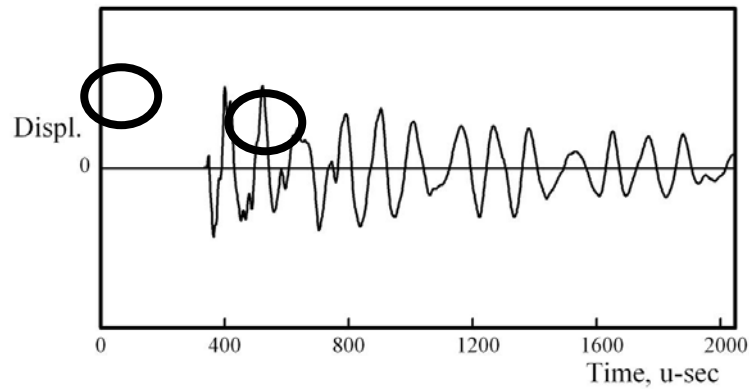
Thickness, 150 mm

Wave Speed, 3696 m/s

First mode Frequency, 10.7khz



File: g:\TestFiles\專題\no7.dat; Record: 12/12; 1024 Points @ 2 u-sec
Date: 2007/12/13 06:56:57 下午
Square Beam/Col: width 150 mm, Wave Speed 3696 m/s, 1st Mode Freq. 10.7 kHz
Descr: 7cm



File-07.dat-13

NO.7 檢測分析：

從表面位移的圖形可看出有 2 個時間間隔，可假設為有瑕疵判定。但是從頻譜圖中顯示出 15khz 與 17khz 是一個瑕疵可能而深度分別為 12cm 與 10cm。這個結果與我們埋設深度有問差(預設深度 5cm)。

試體 No.8 內部瑕疵分析

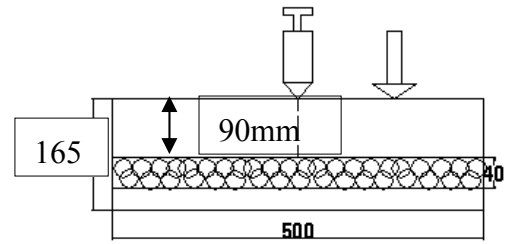
試體尺寸：50cm×15cm×16.5cm

埋設變數：不同複合材料

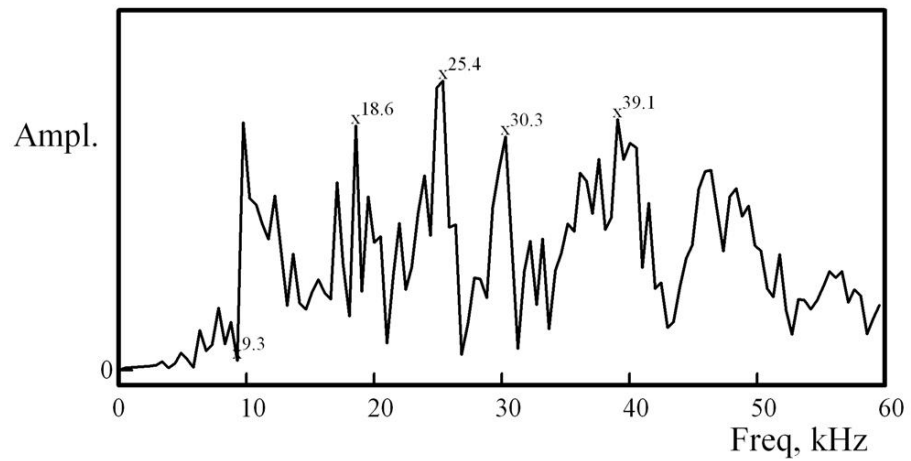
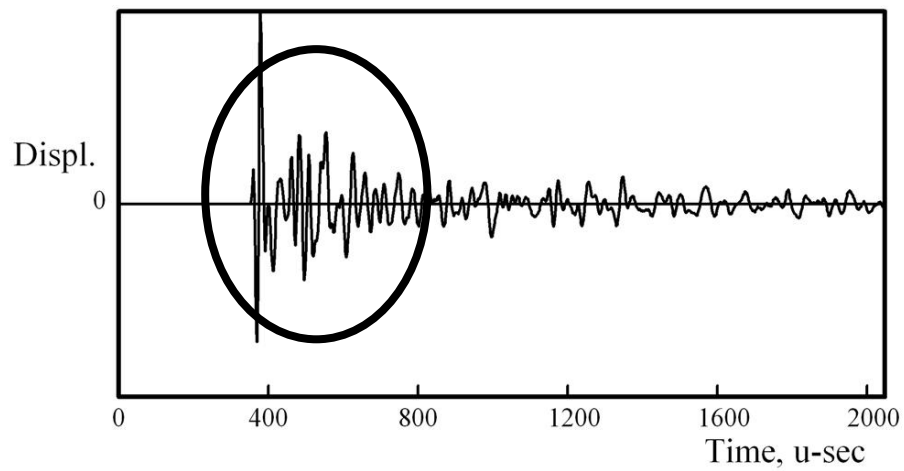
Thickness, 165 mm

Wave Speed, 3555 m/s

First mode Frequency, 9.3khz



No.	1	2	3	4	5	6
Normal mode,khz	9.3	13.1	17.8	22.5	26.2	31.9



File-08.dat-03

NO.8 檢測分析：

表面位移圖(Disp) 能夠發現時間間距相當的密集，經過 FFT 轉換後的頻譜圖可以發現結果所出現的峰值為

KhZ	D
18.6	96mm
25.4	70mm
30.3	59mm
39.1	46mm

而由外觀的量測 可以發現 90mm 是目視可得知，其他的 70mm、59mm、46mm 應為內部瑕疵。

試體 No.9 內部瑕疵分析

試體尺寸：50cm×15cm×15cm

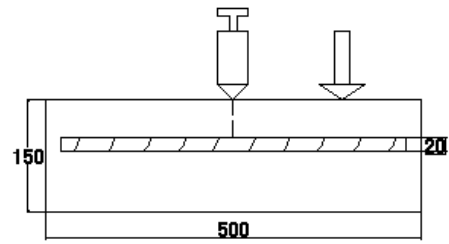
埋設變數：鋼筋埋設距離表面 50mm

鋼鯨號數 6 號(19.1mm)

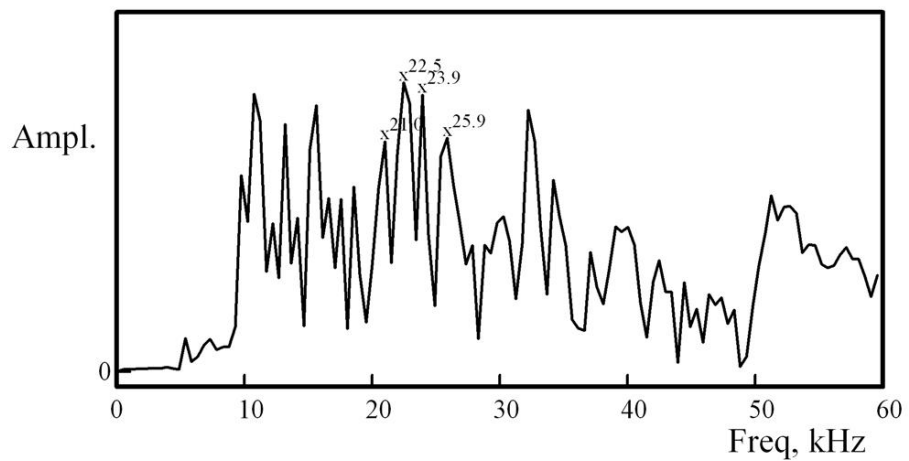
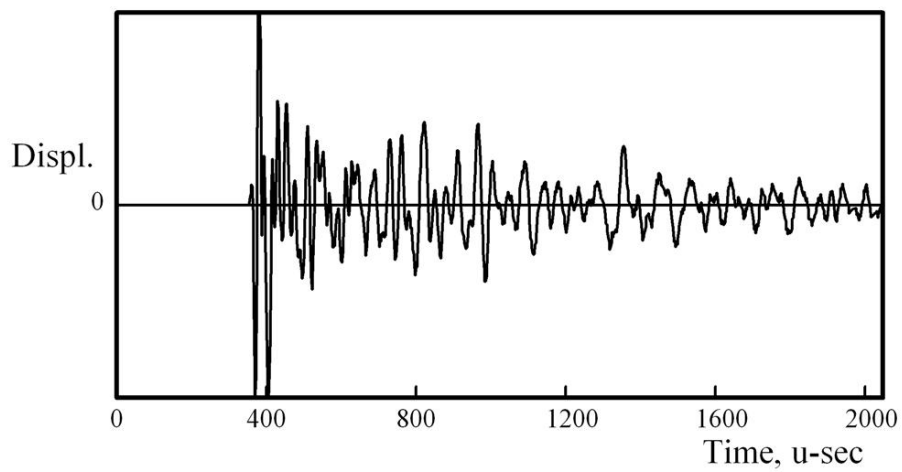
Thickness, 150 mm

Wave Speed, 3363 m/s

First mode Frequency, 11.7khz



No.	1	2	3	4	5	6
Normal mode,khz	11.7	16.4	22.2	28.1	32.8	39.8



File-09.dat-15

NO.9 檢測分析：

根據參考文獻有鋼筋反應(有密集尖尖的頻率)，由頻譜圖可以發現在(21~25khz)有所謂得尖尖的峰值。

其中以 22.5khz 深度為 75mm 最為明顯。

再根據鄭家齊老師的執導

- 當敲擊在鋼筋正上方時，鋼筋可能會在頻率域造成顯著尖峰，其頻率為

$$f_b = \zeta \frac{C_p}{4c}$$

- 修正係數 $\zeta = -0.6(d/c) + 1.5$
- $d/c \geq 0.3$ 鋼筋才能被偵測
- d 為鋼筋直徑
- c 為埋設位址

以本試體之資料代入 得 $f_b = 21.3\text{khz}$ 深度為 80mm

結論

由頻譜圖和公式所求得 頻率都具有相當的重疊性(75~80mm)，而與設計之深度 50mm 有相當的落差。

試體 No.10 內部瑕疵分析

試體尺寸：50cm×15cm×15cm

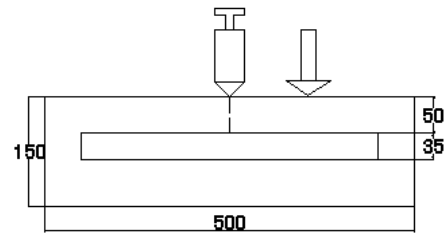
埋設變數：水管埋設距離表面 50mm

水管直徑 35mm

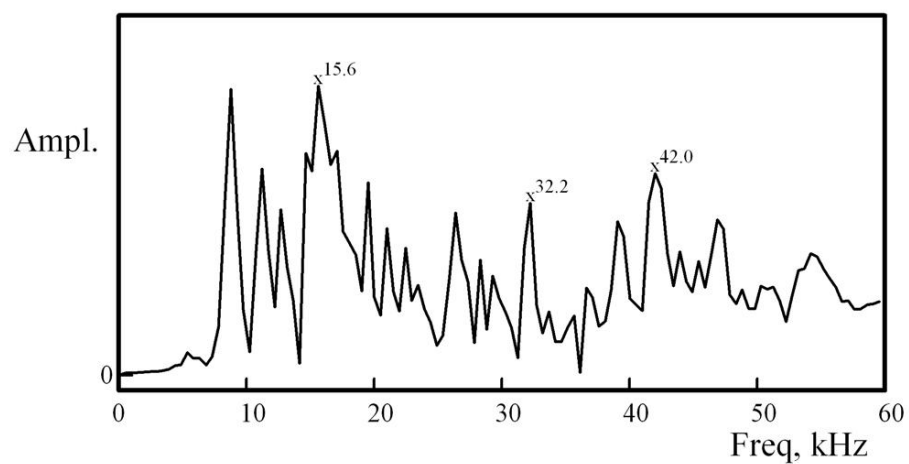
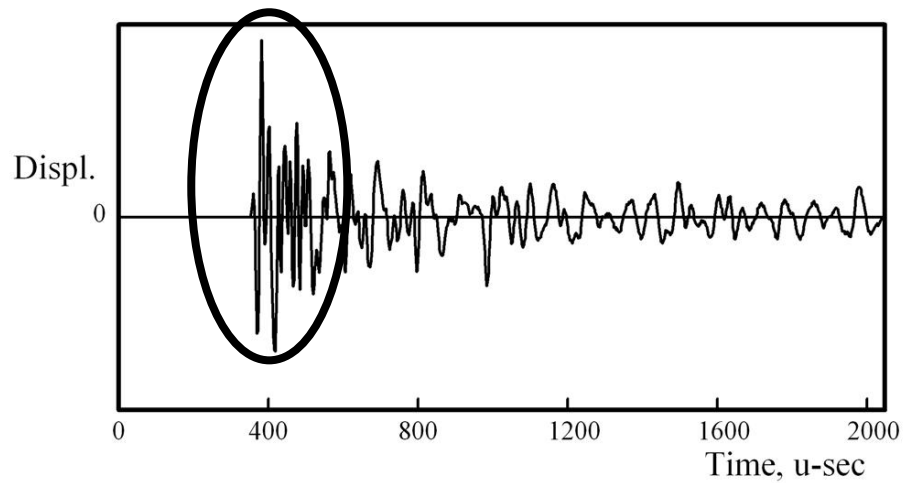
Thickness, 150 mm

Wave Speed, 3499 m/s

First mode Frequency, 11.7khz



No.	1	2	3	4	5	6
Normal mode,khz	11.7	16.4	22.2	28.1	32.8	39.8



File-10.dat-10

NO.10 檢測分析：

15.6khz D=112mm (極可能)

32.2khz D=54mm (太接近 Normal mode 32.8khz)

42khz D=42mm (極可能)

試體 No.11 內部瑕疵分析

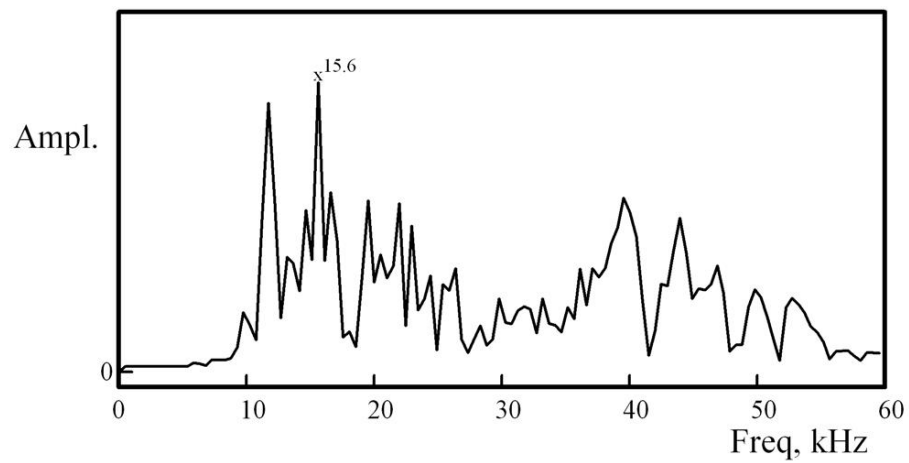
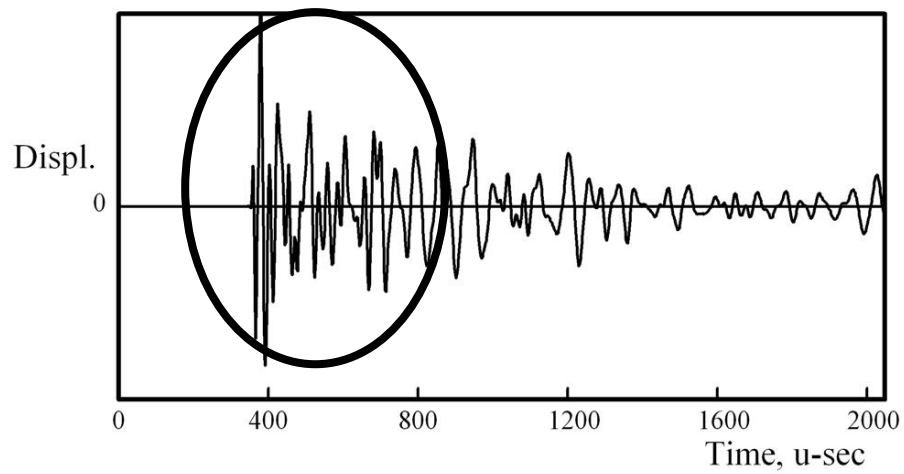
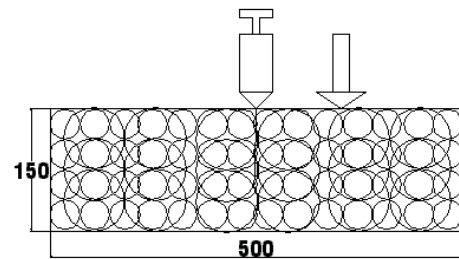
試體尺寸：50cm×15cm×15cm

埋設變數：澆製此混凝土時，以不搗實，使本試體成為具有蜂窩結構

Thickness, 150 mm

Wave Speed, 4034 m/s

First mode Frequency, 11.7khz



File-11.dat-11

NO.11 檢測分析：

表面位移可以看出有瑕疵反應，而頻譜圖中 15.6khz d=105mm。

本試體目的具有蜂窩結構 沒有明顯的反應

試體 No.12 內部瑕疵分析

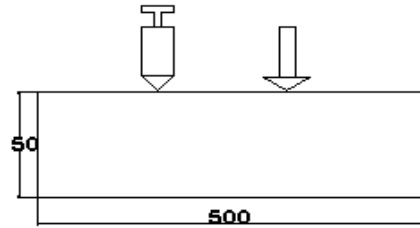
試體尺寸：50cm×15cm×15cm

埋設變數：純混凝土，目的為控制(6~11 號)。

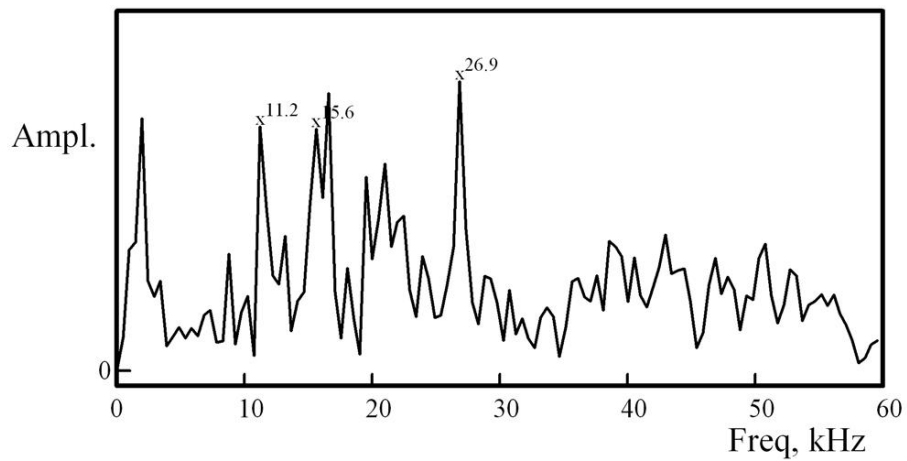
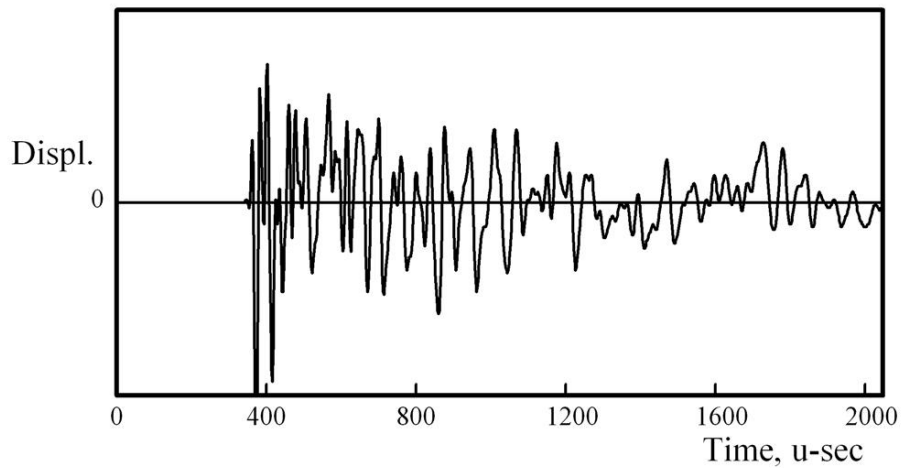
Thickness, 150 mm

Wave Speed, 3862 m/s

First mode Frequency, 11.2khz



No.	1	2	3	4	5	6
Normal mode,khz	11.2	15.7	21.3	26.9	31.4	38.1
試驗 mode,khz	11.2	15.6	-	26.9	-	-
誤差值,%	0	-0.6	-	0	-	-



File-12.dat-21

NO.12 檢測分析：

Normal mode 與試驗 mode 吻合度高 可解釋為沒有瑕疵

試體 No.S1 內部瑕疵分析

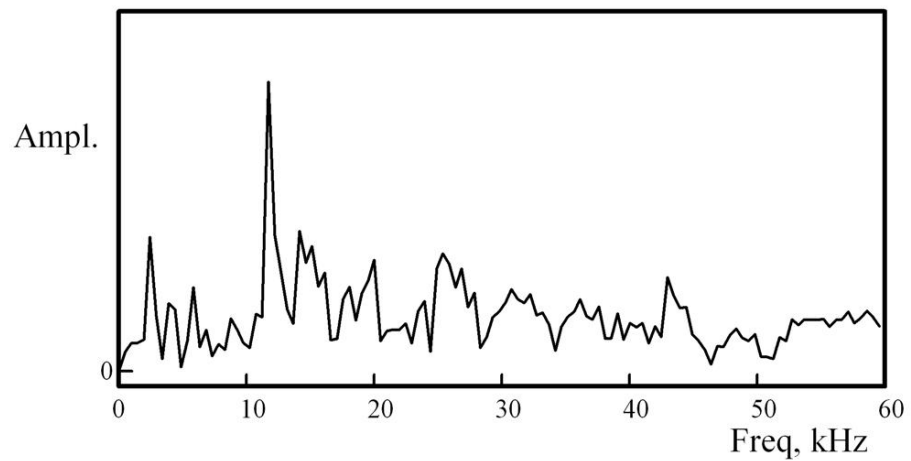
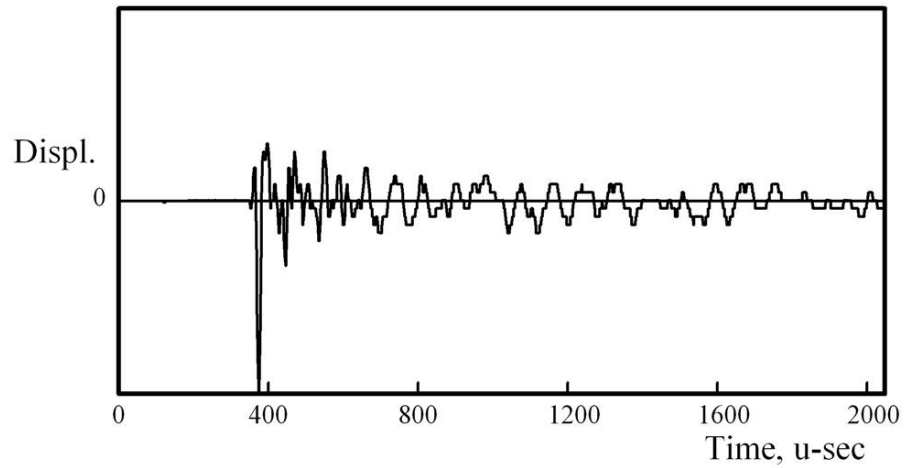
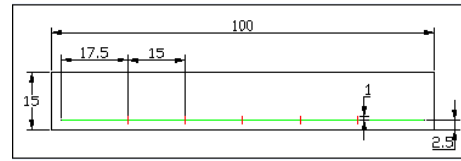
試體尺寸：100cm×50×15cm

埋設變數：放入鋼筋(直向二支、橫向五支)

Thickness, 150 mm

Wave Speed, 3879 m/s

First mode Frequency, 12.9khz



File-s1.dat-17

NO.S1 檢測分析：

從頻譜圖可知沒有瑕疵

試體 No.S2 內部瑕疵分析

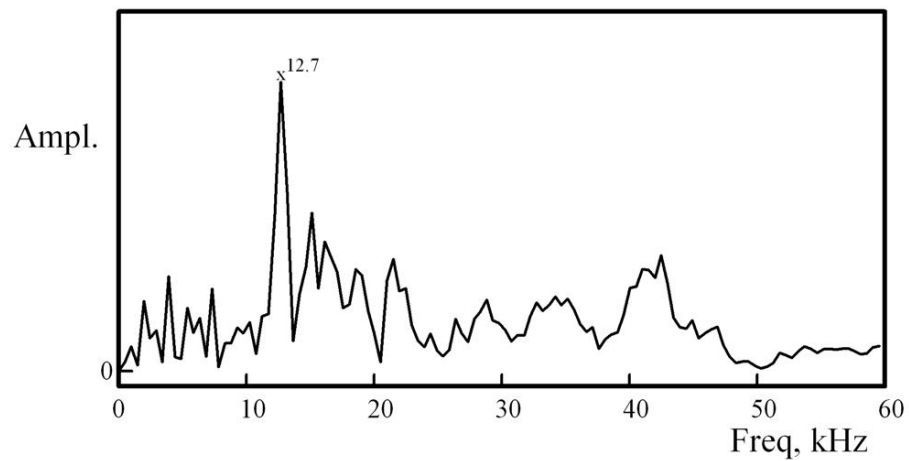
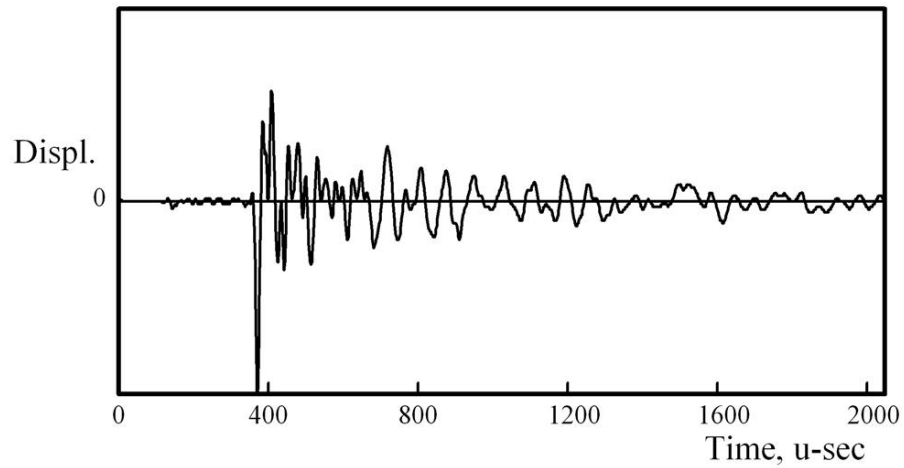
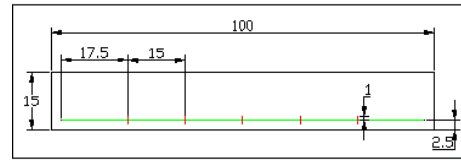
試體尺寸：100cm×50×15cm

埋設變數：放入鋼筋(直向三支、橫向五支)

Thickness, 150 mm

Wave Speed, 3774 m/s

First mode Frequency, 12.7khz



File-s2.dat-13

NO.S2 檢測分析：

沒有瑕疵反應 12.7khz 為底板。

試體 No.A 內部瑕疵分析

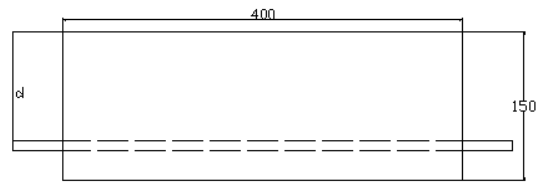
試體尺寸：25cm×15cm×15cm

埋設變數：水管 d=10.5cm

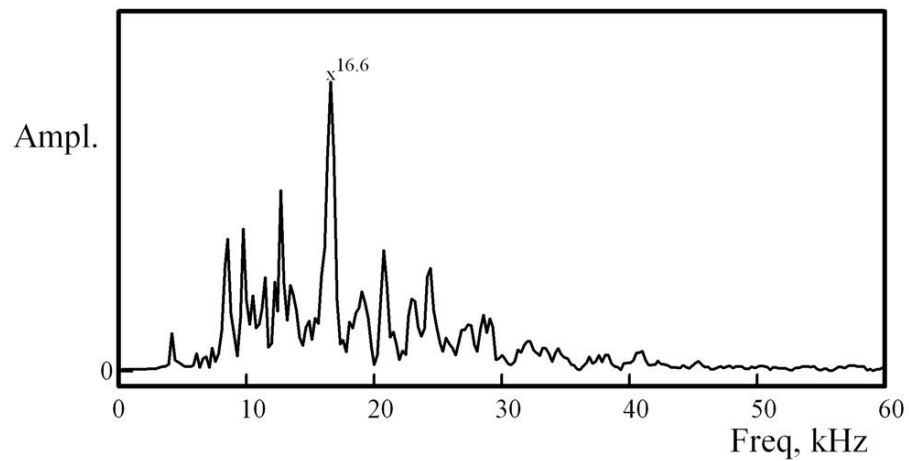
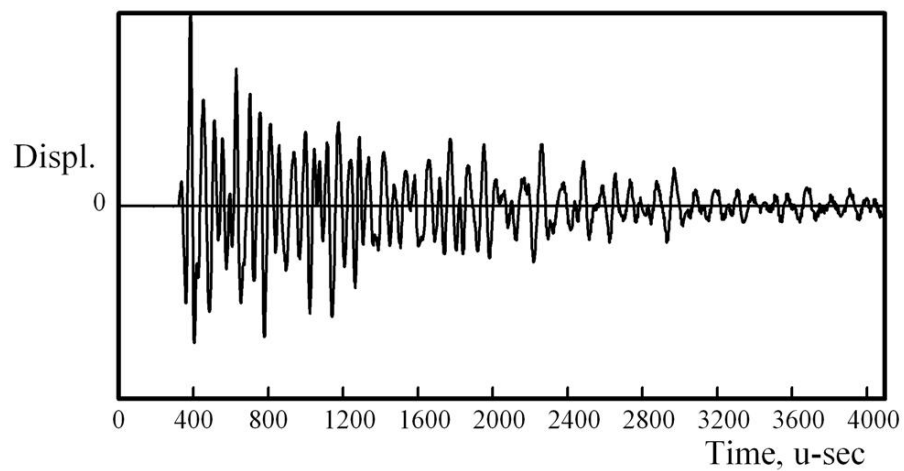
Thickness, 150 mm

Wave Speed, 3396 m/s

First mode Frequency, 11.7khz



No.	1	2	3	4	5	6
Normal mode,khz	11.7	16.4	22.2	28.1	32.8	39.8



File-a.dat-14

NO.A 檢測分析：

$F=16.6\text{kHz}$

$C=3396\text{m/s}$

$D=10.2\text{cm}$

與埋設位置 水管 $d=10.5\text{cm}$ 吻合。

試體 No.B 內部瑕疵分析

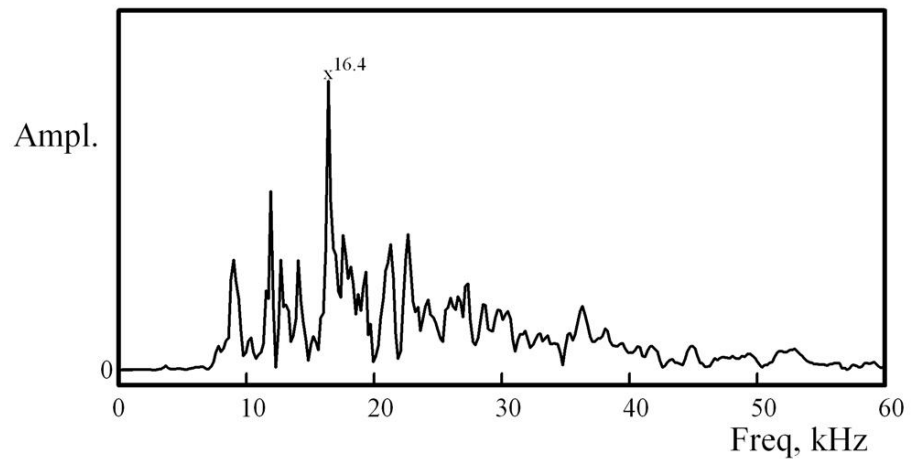
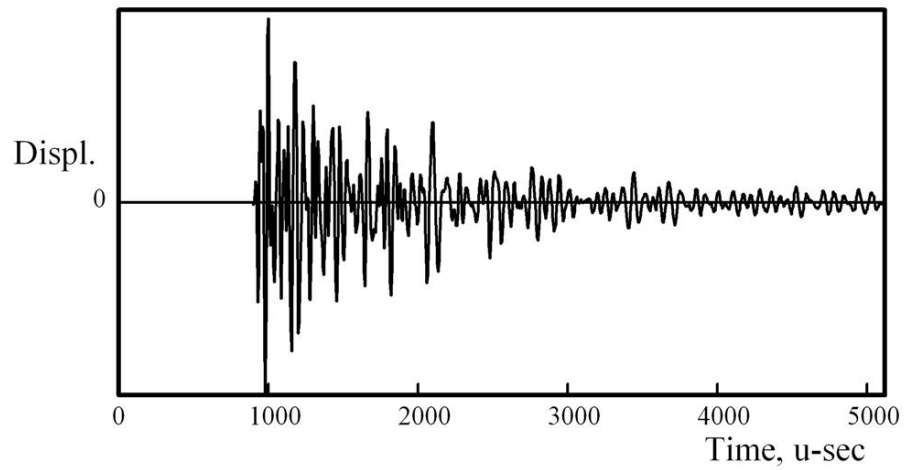
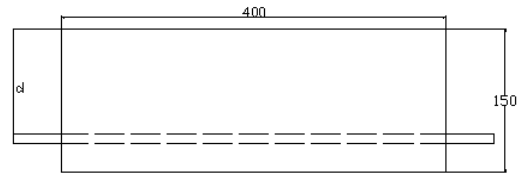
試體尺寸：25cm×15cm×15cm

埋設變數：水管 d=9cm

Thickness, 150 mm

Wave Speed, 3358 m/s

First mode Frequency, 9.7khz



File-B.dat-11

NO.B 檢測分析：

16.4khz 瑕疵位置 10.2cm 與管 d=9cm 相當接近。

試體 No.C 內部瑕疵分析

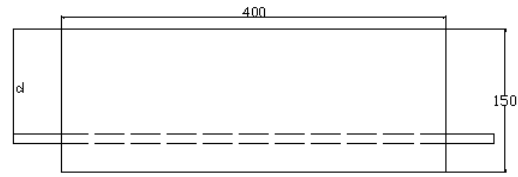
試體尺寸：25cm×15cm×15cm

埋設變數：鋼筋 d=9cm

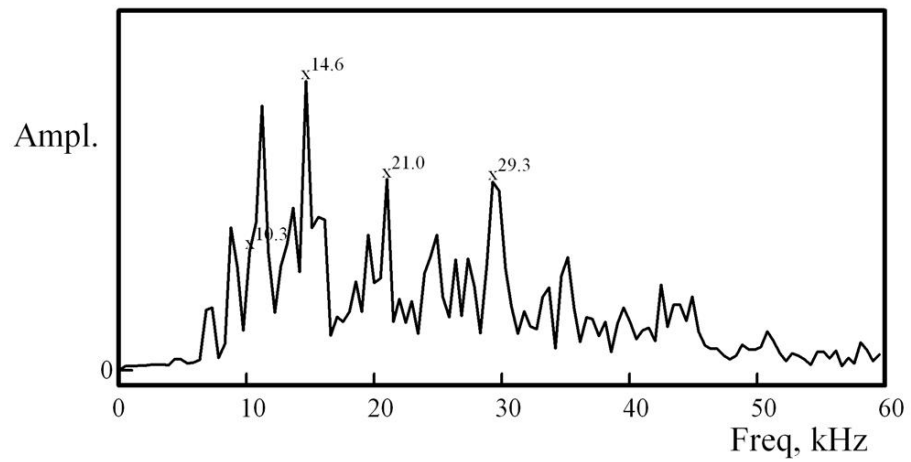
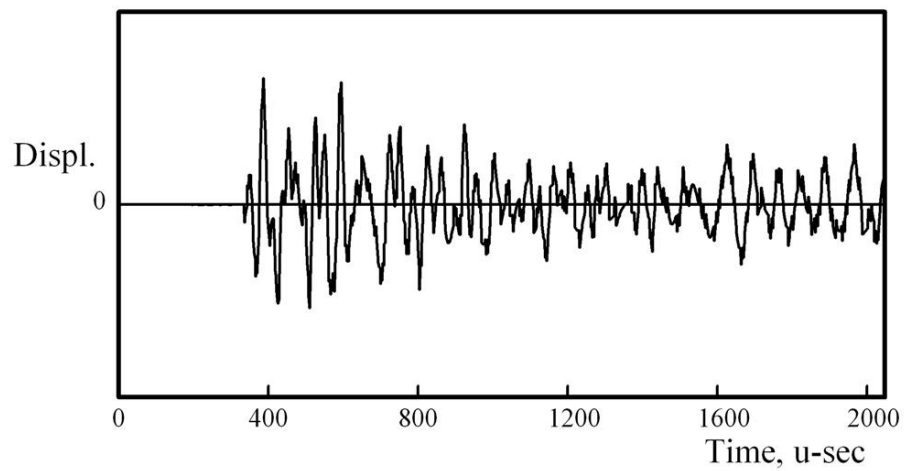
Thickness, 150 mm

Wave Speed, 3532 m/s

First mode Frequency, 11.7khz



No.	1	2	3	4	5	6
Normal mode,khz	10.2	14.3	19.5	24.6	28.7	34.8



File-c.dat-2

NO.C 檢測分析：		
頻率	位置	分析
14.6khz	12.1cm	與 14.3khz Normal mode 太過相近 排除可能
21khz	8.4cm	瑕疵可能
29.3khz	6cm	瑕疵可能
<p>總結：</p> <p>8.4cm , 6cm 是明顯的瑕疵 ，但是正確位置為 9cm ,以 8.4cm 為正確。</p>		

試體 No.D 內部瑕疵分析

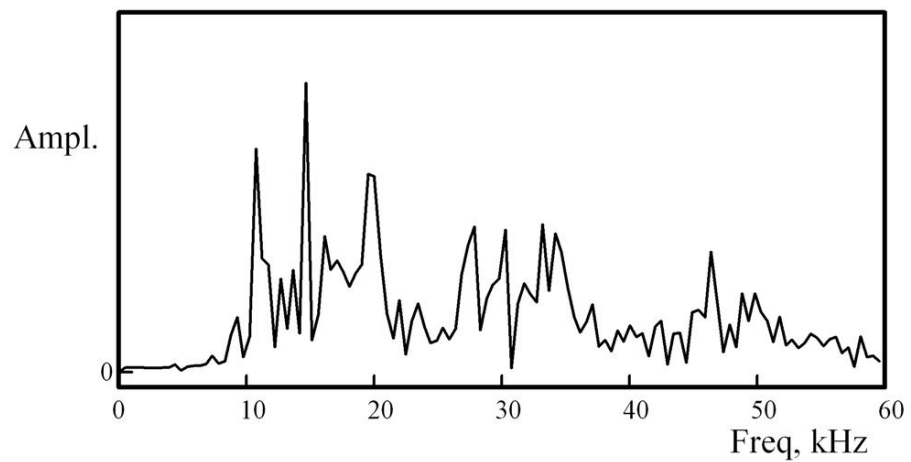
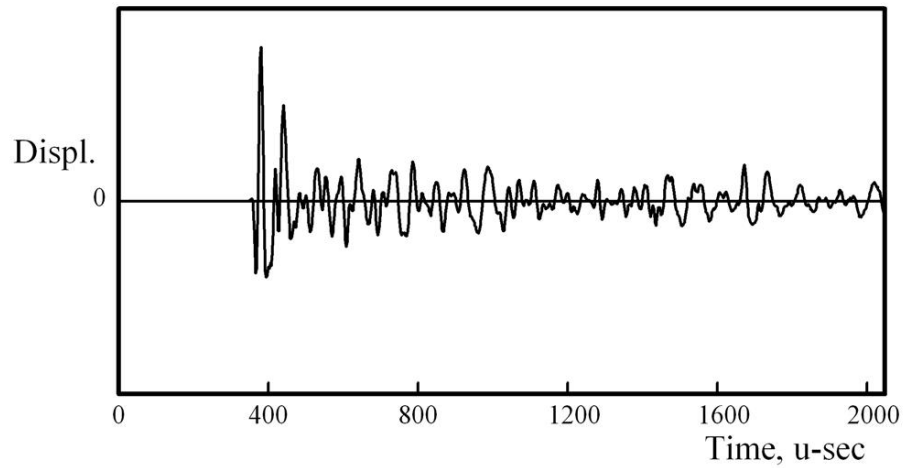
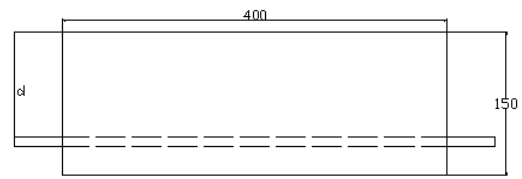
試體尺寸：25cm×15cm×15cm

埋設變數：鋼筋 d=7cm

Thickness, 150 mm

Wave Speed, 3500m/s

First mode Frequency, 10khz



File-d.dat-7

NO.D 檢測分析：

14.6khz d= 12cm

可惜 鋼筋埋設 7cm

本試驗成果不好

試體 No.E 內部瑕疵分析

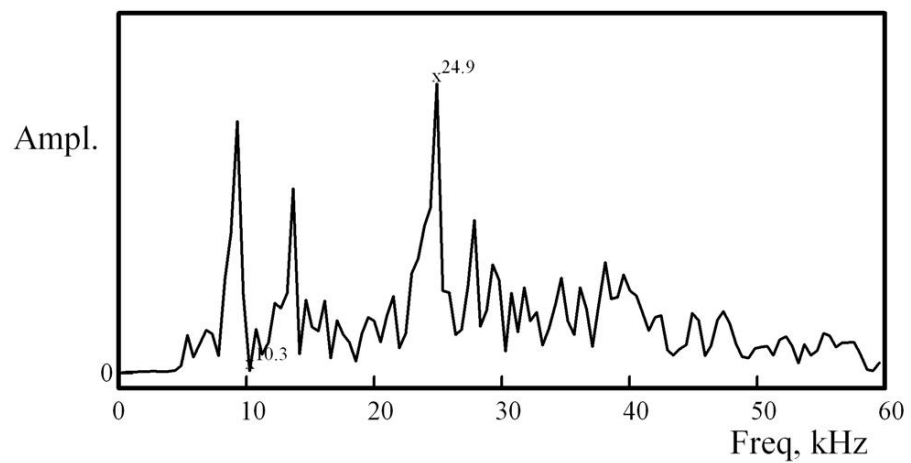
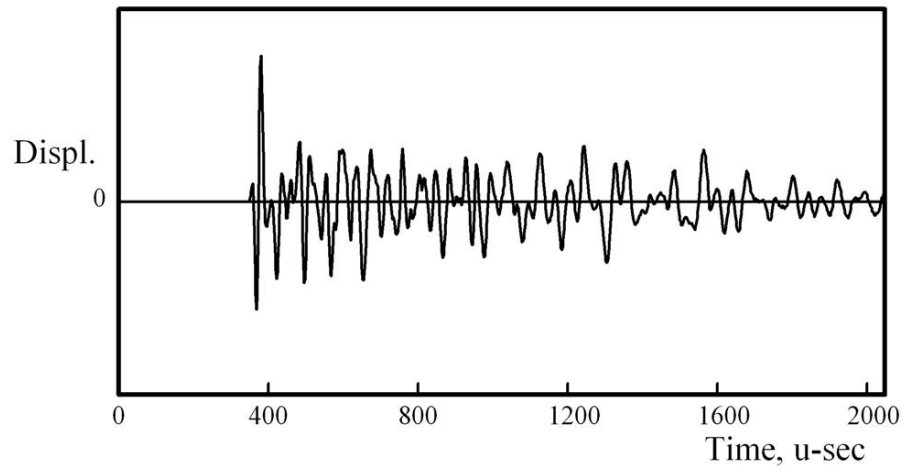
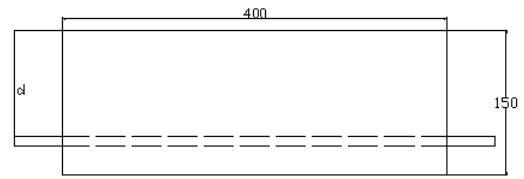
試體尺寸：40cm×15cm×15cm

埋設變數：保利龍 d=7.5cm

Thickness, 150 mm

Wave Speed, 3502 m/s

First mode Frequency, 10.3khz



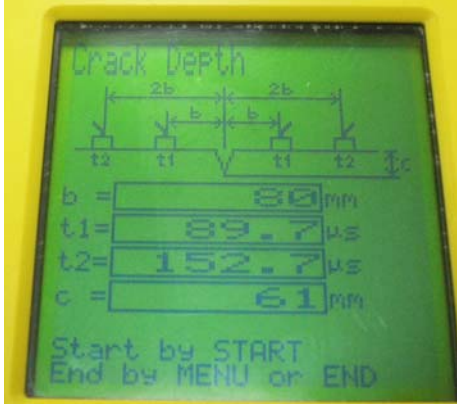
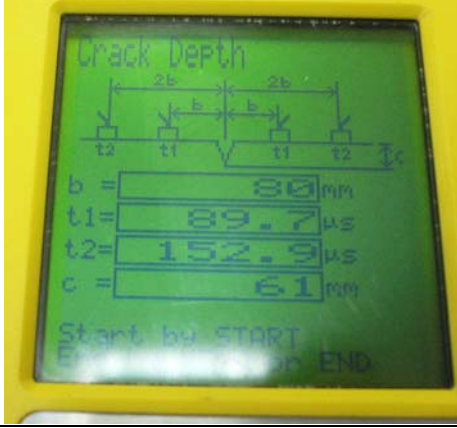
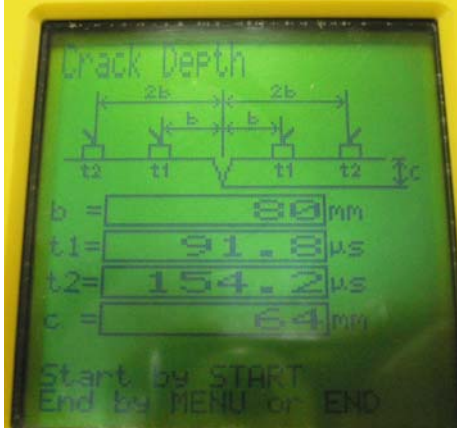
File-E.dat-02

NO.E 檢測分析：

24.9khz D=70mm

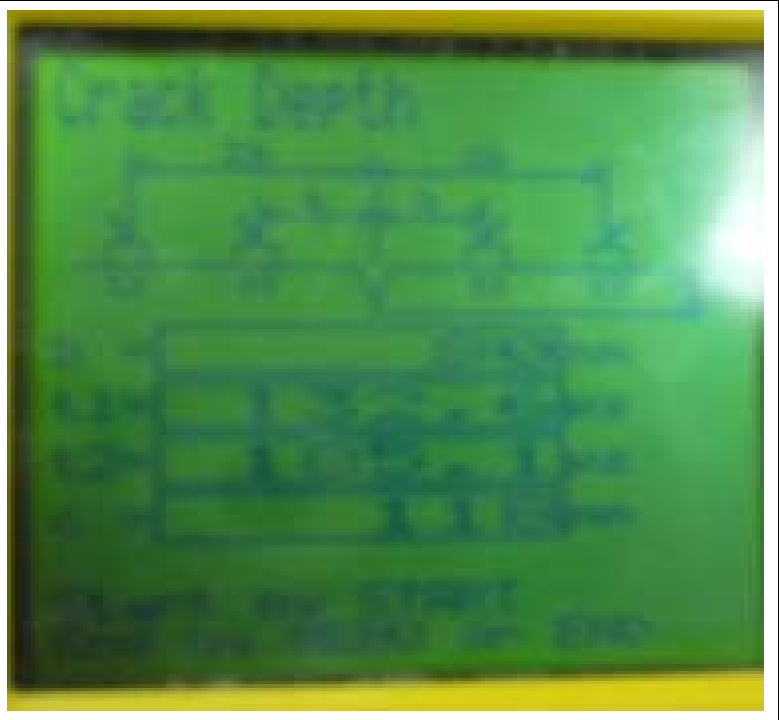
5-3 表面裂縫試驗數據

試體 No.2 表面裂縫數據

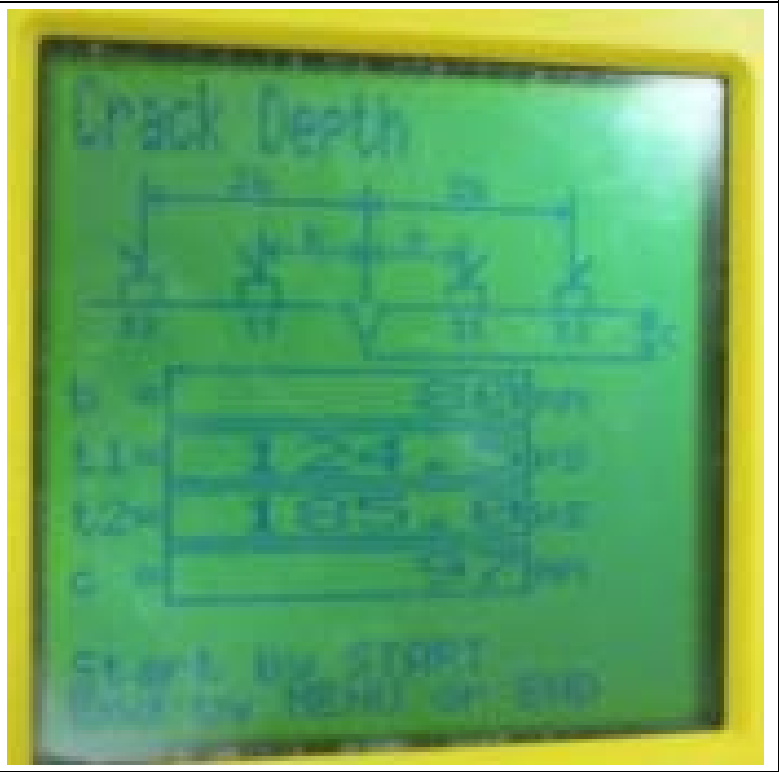
<p>2-1 b=80mm T1=89.7 us T2=152.7 us C=61mm</p>	
<p>2-2 b=80mm T1=89.7 us T2=152.9 us C=61mm</p>	
<p>2-3 b=80mm T1=91.8 us T2=154.2 us C=64mm</p>	

試體 No.3 表面裂縫數據

3-1
 b=80mm
 T1=132.6 us
 T2=185.1 us
 C=118mm



3-2
 b=80mm
 T1=124.5 us
 T2=185.0 us
 C=97 mm

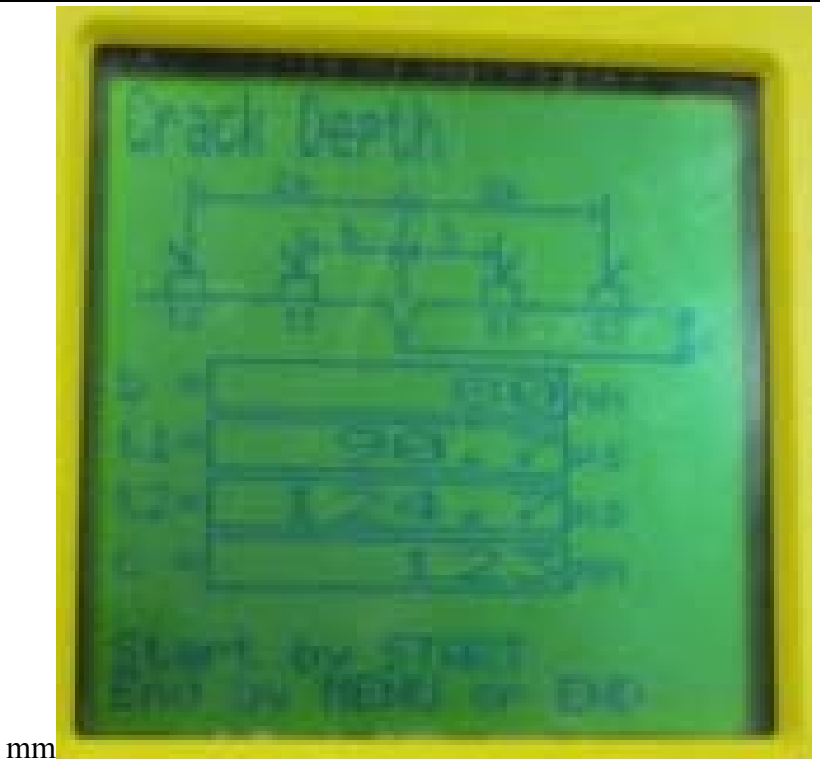


試體 No.3 表面裂縫數據(續)

3-3
 b=80mm
 T1=93.8 us
 T2=122.9 us
 C=143 mm



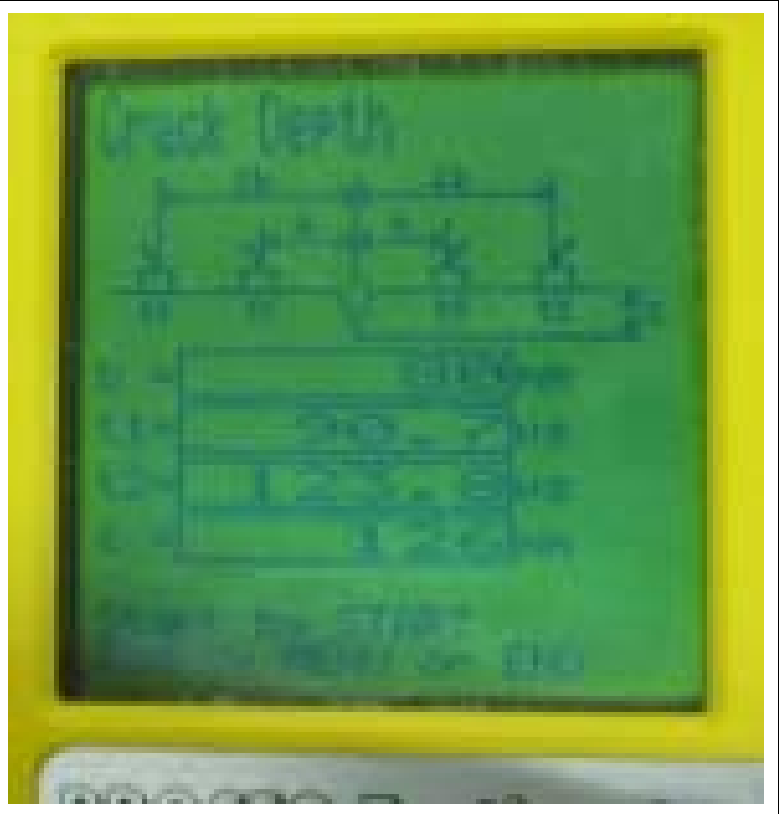
3-4
 b=80mm
 T1=90.7 us
 T2=124.7 us
 C=123 mm



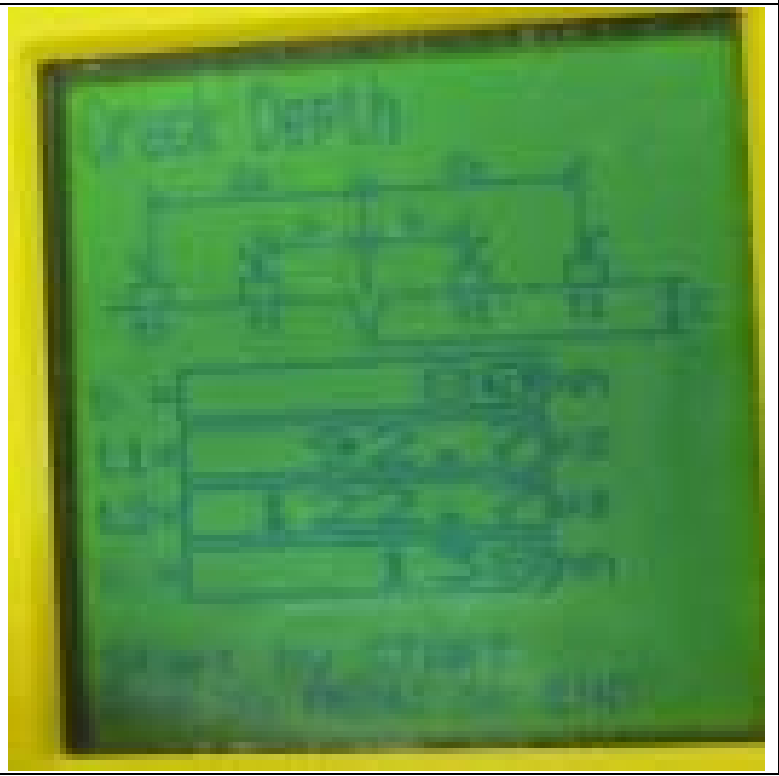
mm

試體 No.4 表面裂縫數據

4-1
b=80mm
T1=90.7 us
T2=123.8 us
C=126 mm



4-2
b=80mm
T1=92.7us
T2=122.7 us
C=138 mm



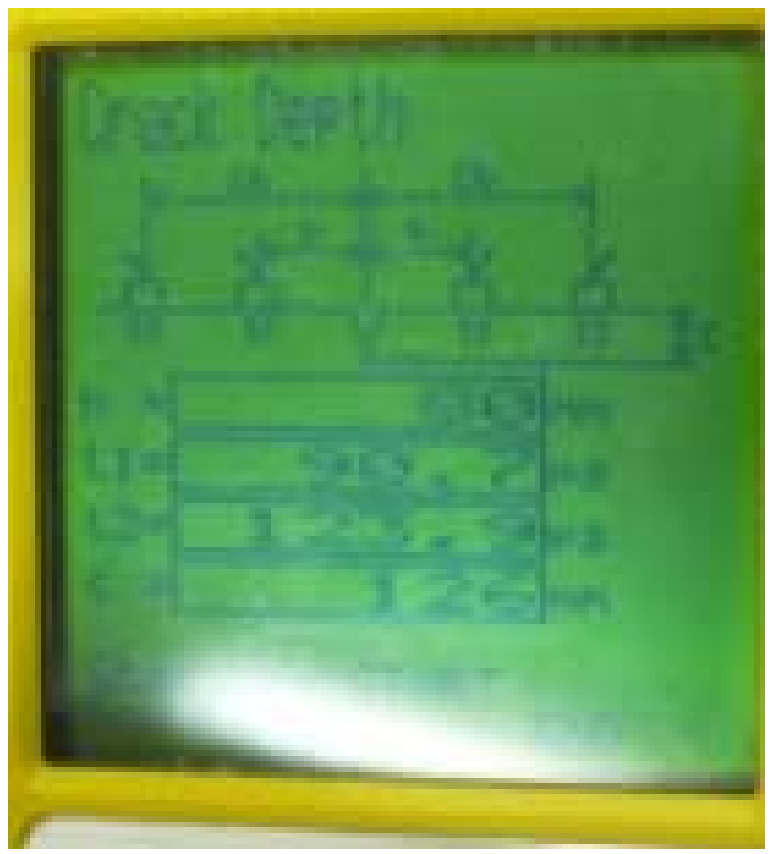
4-3

$b=80\text{mm}$

$T_1=90.7\ \mu\text{s}$

$T_2=123.9\ \mu\text{s}$

$C=126\ \text{mm}$



數據敲擊迴音與超音波測得數據比較：

表 5-2 試體 No.2 敲擊迴音與超音波裂縫數據比較

試體 2	D=50mm		
敲擊迴音	誤差(%)	超音波	誤差(%)
54	8	53	6
66	32	61	22
46	-8	61	22
55	10	64	28

表 5-3 試體 No.3 敲擊迴音與超音波裂縫數據比較

試體 3	D=110mm		
敲擊迴音	誤差(%)	超音波	誤差(%)
106	6	118	7.3
116	16	97	-11.8
102	2	143	30.0
		123	11.8

表 5-4 試體 No.4 敲擊迴音與超音波裂縫數據比較

試體 4	D=110mm		
敲擊迴音	誤差(%)	超音波	誤差(%)
115	4.5	126	14.5
113	2.7	138	25.5
109	-0.9	126	14.5
116	5.5		

第六章 結論

我們這學期以來都是在檢測混凝土構件上的問題，而我們將檢測的重點分為三個，依序是量測波速、內部瑕疵、表面裂縫等問題，最後我們得到結果以及我們的結論就是：

1. 我們在利用敲擊回音和超音波檢測波速時，我們發現到敲擊回音的準確度比超音波來得比較高。
2. 在內部瑕疵的結論中我們分以下幾點：
 - (1)在第一和第十二試體中，我們測得的結果是無瑕疵的，跟我們當初設計得非常吻合。
 - (2)而再第五和第七試體中，我們測得的結果是要有瑕疵的，因為跟當初設計時的位置出入有點不同而出現誤差，所以我們想到可能是當初埋入時的問題，幸好我們有再設計 E 試體來測試結果是非常的好誤差位置都對。
 - (3)而第八和第十一試體中，我們測得的結果是要有瑕疵的，但是只是測得的地方有點偏移，但是測得的結果也很好只是我們要再多練習。
 - (4)而第九和第十試體中，我們測得的結果是要有瑕疵的，而與我們當初設計時得位置是有落差的，可能是當初埋入時的問題，幸好我們有再設計 ABCD 四個試體來測試結果是非常的好，誤差位置都有對問題也不大。
3. 再利用兩種非破壞儀器檢測表面裂縫時，我們這組發現到敲擊回音和超音波在數據分析上有很明顯的誤差，也發現到敲擊回音會比超音波來的比較準確而可靠性也比較好。

第七章 建議

以下這段結論與建議是本組這兩學期以來對敲擊回音所遇到的問題以及對即將要接手的學弟妹給於一些結論與建議:

1. 由於我們的試體太小，可能會受到試體四周的模態係數影響，因此在這裡建議往後要作非破壞試驗的人，可能要將試體做成大型的，以便將實驗結果的準確性更加有可靠性。舉例:像我們這組因為試體作的太小，使我們這組的實驗結果準確性有點偏移，還有試體不要做太少以免實驗數據太少沒有可靠性。
2. 在此建議選擇非破壞試驗的人，在作試體時，要事先作好設計上的規畫。舉例:在此附上我們這組作試體的經驗，一開始最好先設計好要埋入的物體，例如:鋼筋、水管、保利龍、厚紙片等東西，還有最好將埋入物的長度要比試體長 5 至 8 公分(左右)以來檢測物體位置。
3. 在開始試驗之前，必須要了解儀器的操作手冊以及詳讀說明書，這樣就比較不會耽誤太多的實驗時間。舉例:在此建議大家為了了解儀器，可以到中興大學找林宜清教授和朝陽科技大學的鄭家齊副教授，像我們這組就是請到鄭家齊副教授來教導我們如何看圖而找到試體中的問題。
4. 敲擊迴音檢測為了減少量測造成的系統誤差，需注意波速量測時資料擷取時間的設定以及頻譜厚度量測之頻譜解析度。舉例:這問題我們只能說要靠自己，在操作儀器方面要了解，有哪些功能可用來幫助我們。
5. 除儀器設定之系統誤差外，需注意表面量測波速與混凝土內部波速是否可能有顯著差別，特別是當混凝土表面有泌水殘留之乳皮，或表面已嚴重劣化。舉例:發生這些問題時可能要問自己在做試體時，是否有將比例做好或者有其他因素。

參考文獻

- 【1】卓信聰，「利用敲擊回音法量測鋼筋混凝土版受高溫後之裂縫深度」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，2000
- 【2】William B. Streett, Mary J. Sansalone,「Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry」，1997
- 【3】黃洸駿，「以敲擊回音法測漸變斷面混凝土厚度之可行性」，國立交通大學土木工程學系碩士論文，2003
- 【4】許耿蒼，「以敲擊回音法評估受震後新澆置混凝土構件之鋼筋握裹損失」，私立朝陽科技大學營建工程學系碩士論文，2002
- 【5】黃愛惠，「混凝土層狀結構內層接合不同材料之轉換函數反應」，私立朝陽科技大學營建工程學系碩士論文，2004
- 【6】林宜清，「營建工程非破壞檢測」，1997
- 【7】Impact-Echo Instrument,「Impact-Echo User's Manual」，2001

附錄

附錄一 混凝土強度與波速

強度：

試體製作日期	代號(圓柱體)	波速 m/s	f_c kg/cm^2	最大荷重	備註
96/7/10	B1-1	4070	255.92	20100	
96/7/10	B1-2	4030	242.55	19050	試體有蜂窩
96/7/11	b1-1	3980	192.09	15150	
96/7/11	b1-2	3810	218.36	17150	試體傾斜，石膏未硬化
96/7/11	大梁五	3660	173.16	13600	試體傾斜，石膏未硬化
96/7/11	大梁六	3620	283.29	22250	
96/7/10	S1-1	3960	269.29	21150	
96/7/10	S1-2	3920	226.64	17800	

波速：

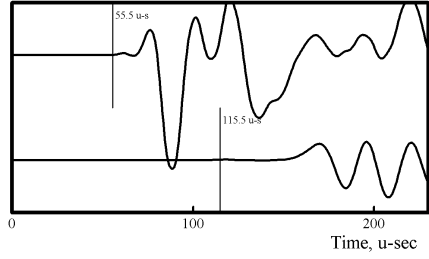
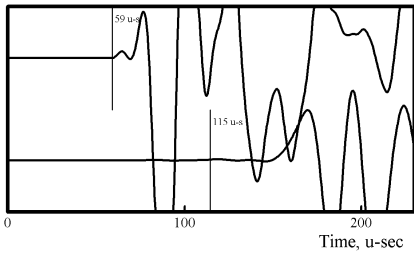
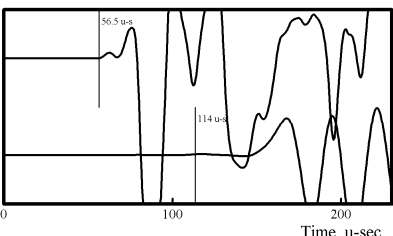
試體	長度	偵測距離	波速 m/s		
板試體 s1	L=50cm	30cm	3780m/s		
		50cm	3780m/s		
板試體 s2	L=50cm	30cm	3810m/s		
		50cm	3840m/s		
S1	L=100cm	25cm	3740m/s		
S2	L=100cm	25cm	3760m/s		

試體	波速			
大梁				
(完全搗實)	3720m/s			
(保利龍)				
10*10	3820m/s			
19*25	3710m/s			

附錄二 敲擊迴音之波速量測圖

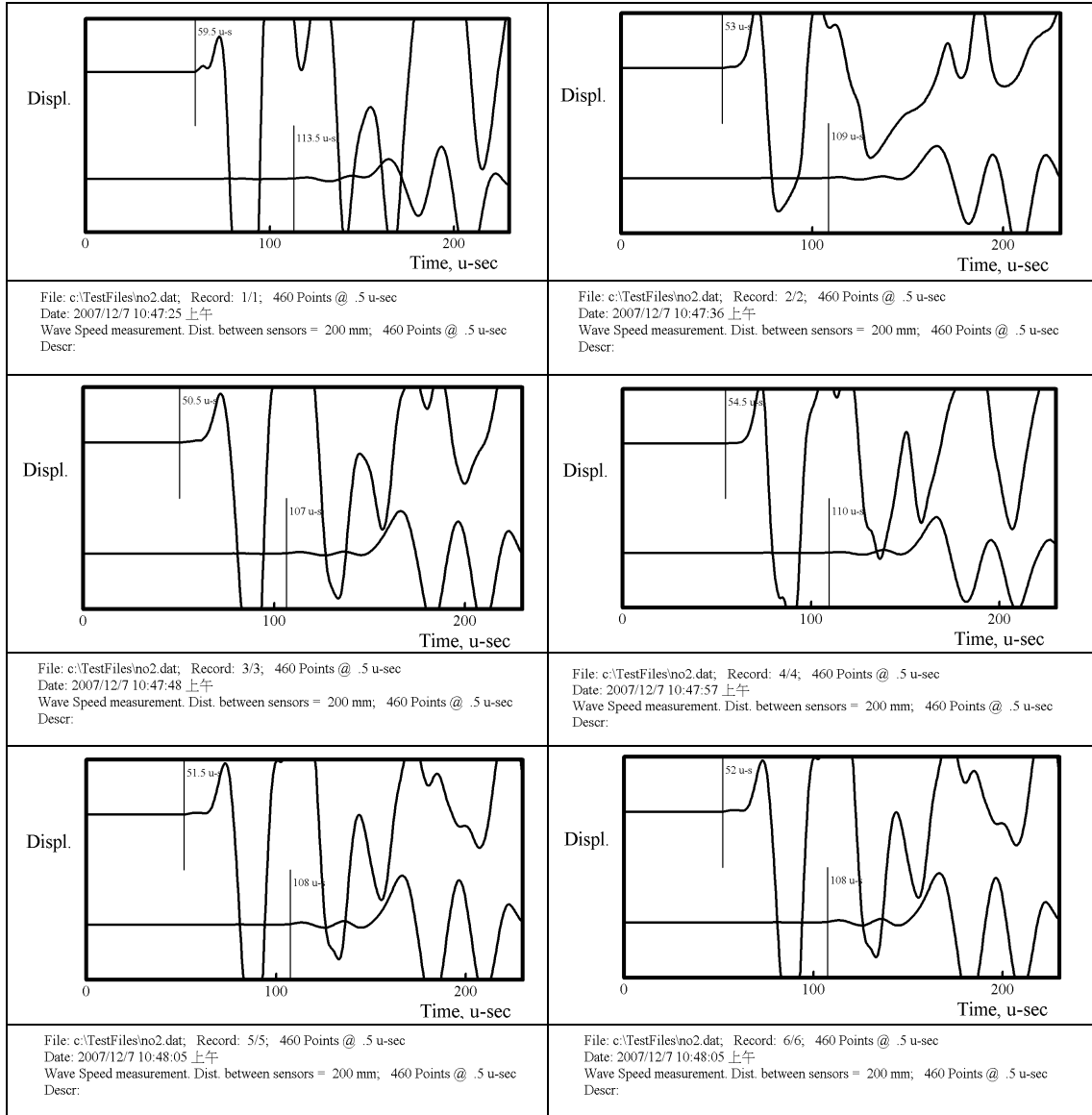
試體一號波速測量圖

測量方法：敲擊回音

 <p>Displ.</p> <p>Time, u-sec</p>	 <p>Displ.</p> <p>Time, u-sec</p>
<p>File: c:\TestFiles\n01.dat; Record: 3/3; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 10:50:52 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\n01.dat; Record: 4/4; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 10:51:16 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>
 <p>Displ.</p> <p>Time, u-sec</p>	
<p>File: c:\TestFiles\n01.dat; Record: 5/5; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 10:51:23 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	

試體二號波速測量圖

測量方法：敲擊回音



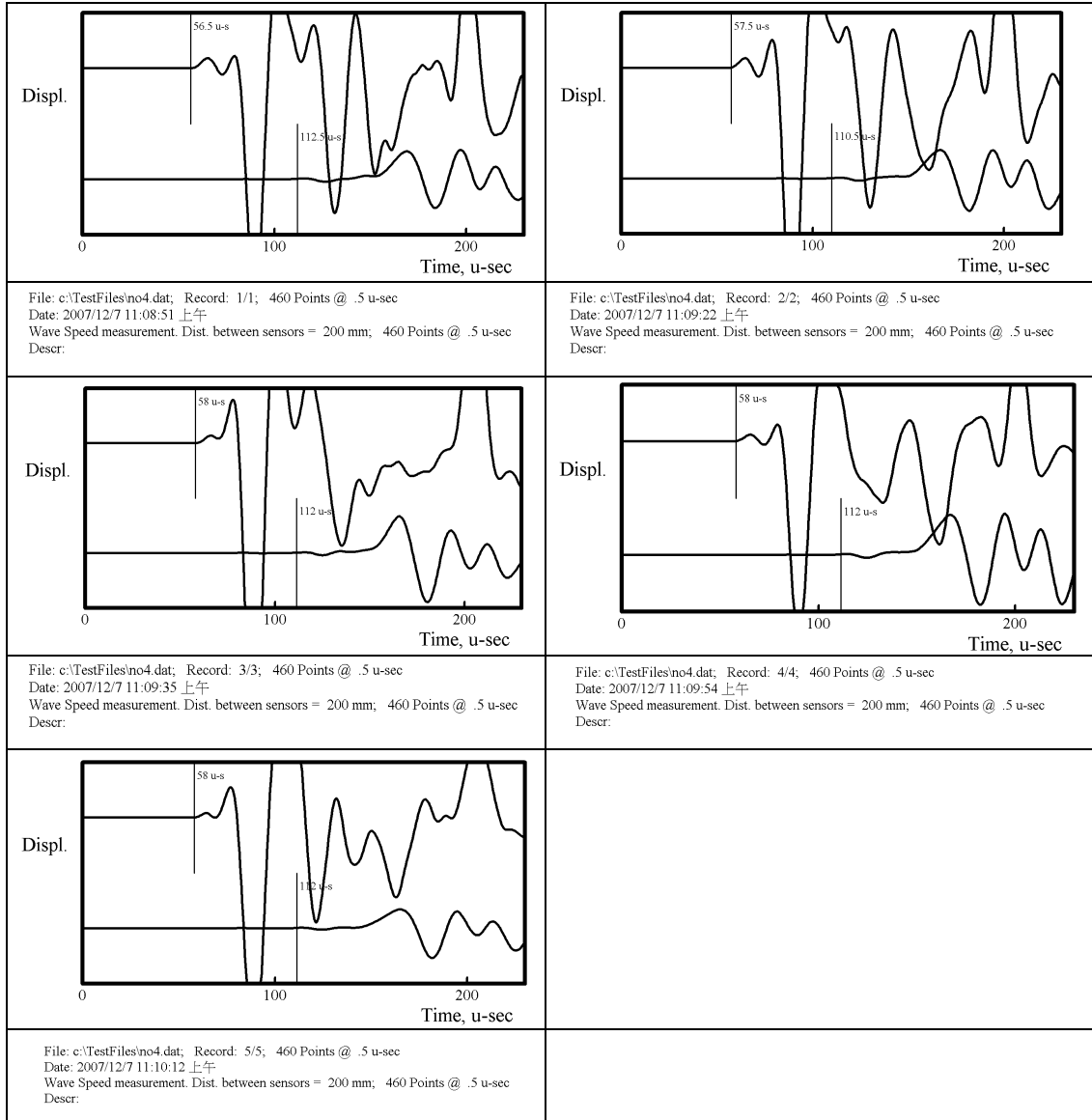
試體三號波速測量圖

測量方法：敲擊回音

<p>File: c:\TestFiles\no3.dat; Record: 6/6; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 11:11:20 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr: OK</p>	<p>File: c:\TestFiles\no3.dat; Record: 7/7; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 11:12:55 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr: OK</p>
<p>File: c:\TestFiles\no3.dat; Record: 8/8; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 11:13:05 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr: OK</p>	<p>File: c:\TestFiles\no3.dat; Record: 9/9; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 11:13:14 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr: OK</p>
<p>File: c:\TestFiles\no3.dat; Record: 10/10; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 11:13:21 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr: OK</p>	

試體四號波速測量圖

測量方法：敲擊回音



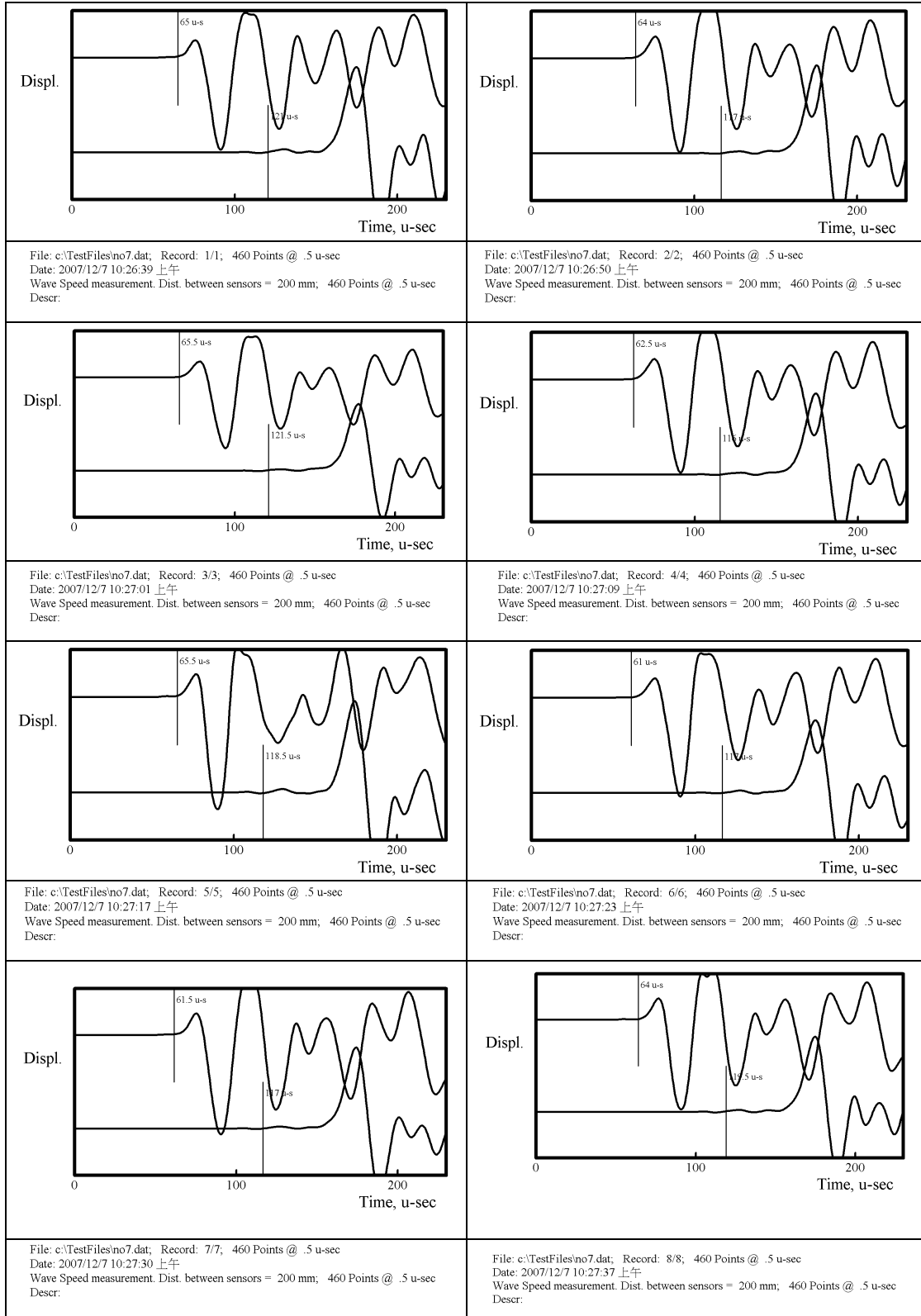
試體五號波速測量圖

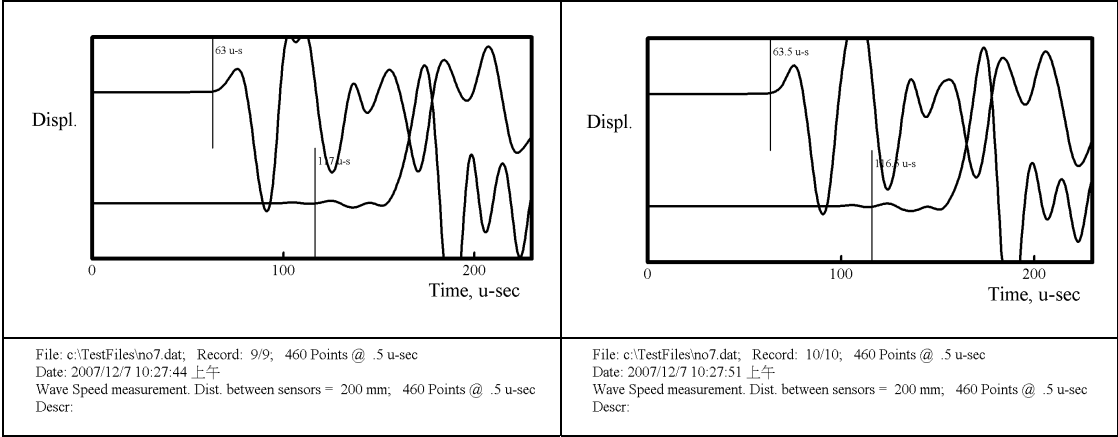
測量方法：敲擊回音

<p>File: c:\TestFiles\no5.dat; Record: 3/3; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 04:50:32 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\no5.dat; Record: 4/4; 1024 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 05:42:05 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 1024 Points @ .5 u-sec Descr:</p>
<p>File: c:\TestFiles\no5.dat; Record: 5/5; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 05:42:05 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\no5.dat; Record: 6/6; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 05:43:19 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>
<p>File: c:\TestFiles\no5.dat; Record: 7/7; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 05:43:34 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\no5.dat; Record: 8/8; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 05:43:47 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>

試體七號波速測量圖

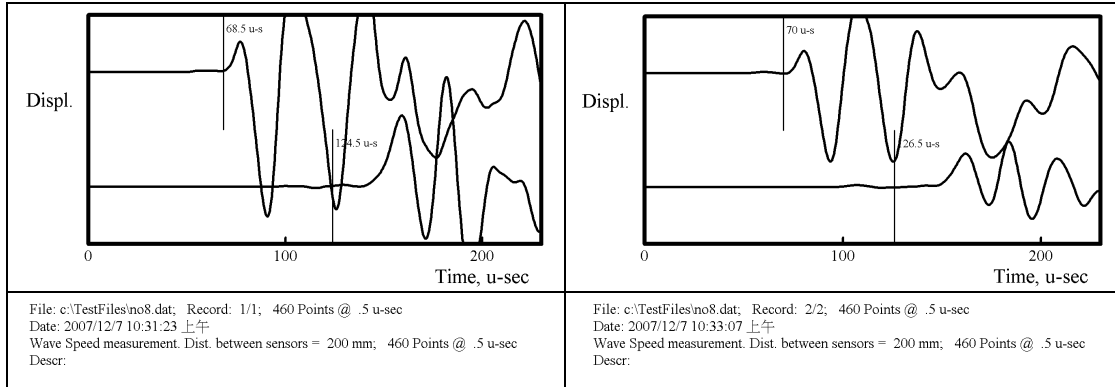
測量方法：敲擊回音





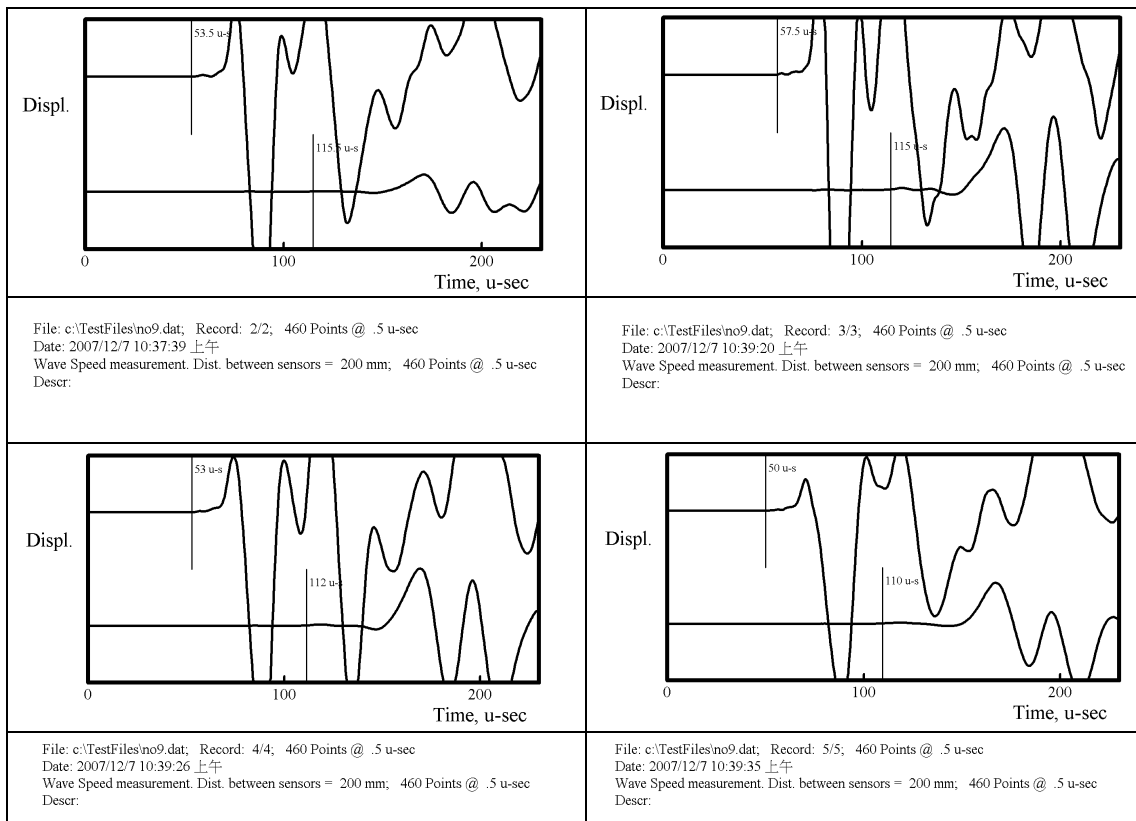
試體八號波速測量圖

測量方法：敲擊回音



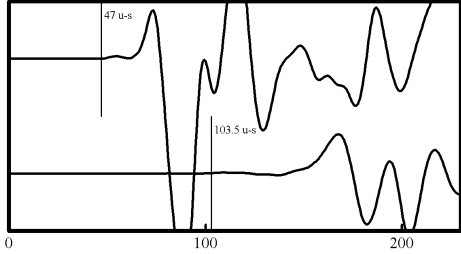
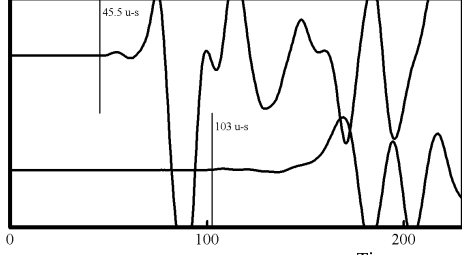
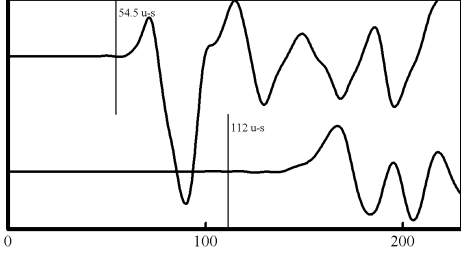
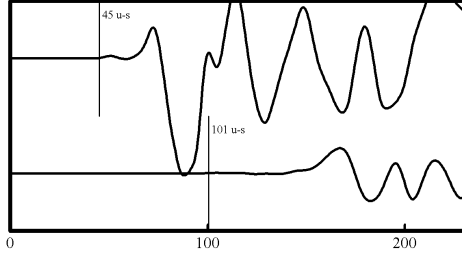
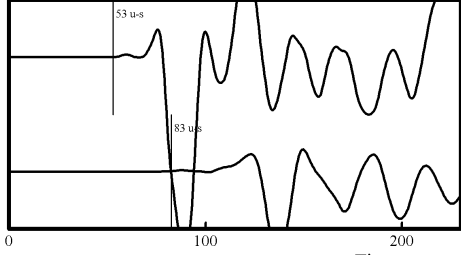
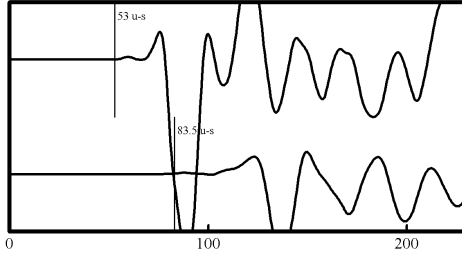
試體九號波速測量圖

測量方法：敲擊回音



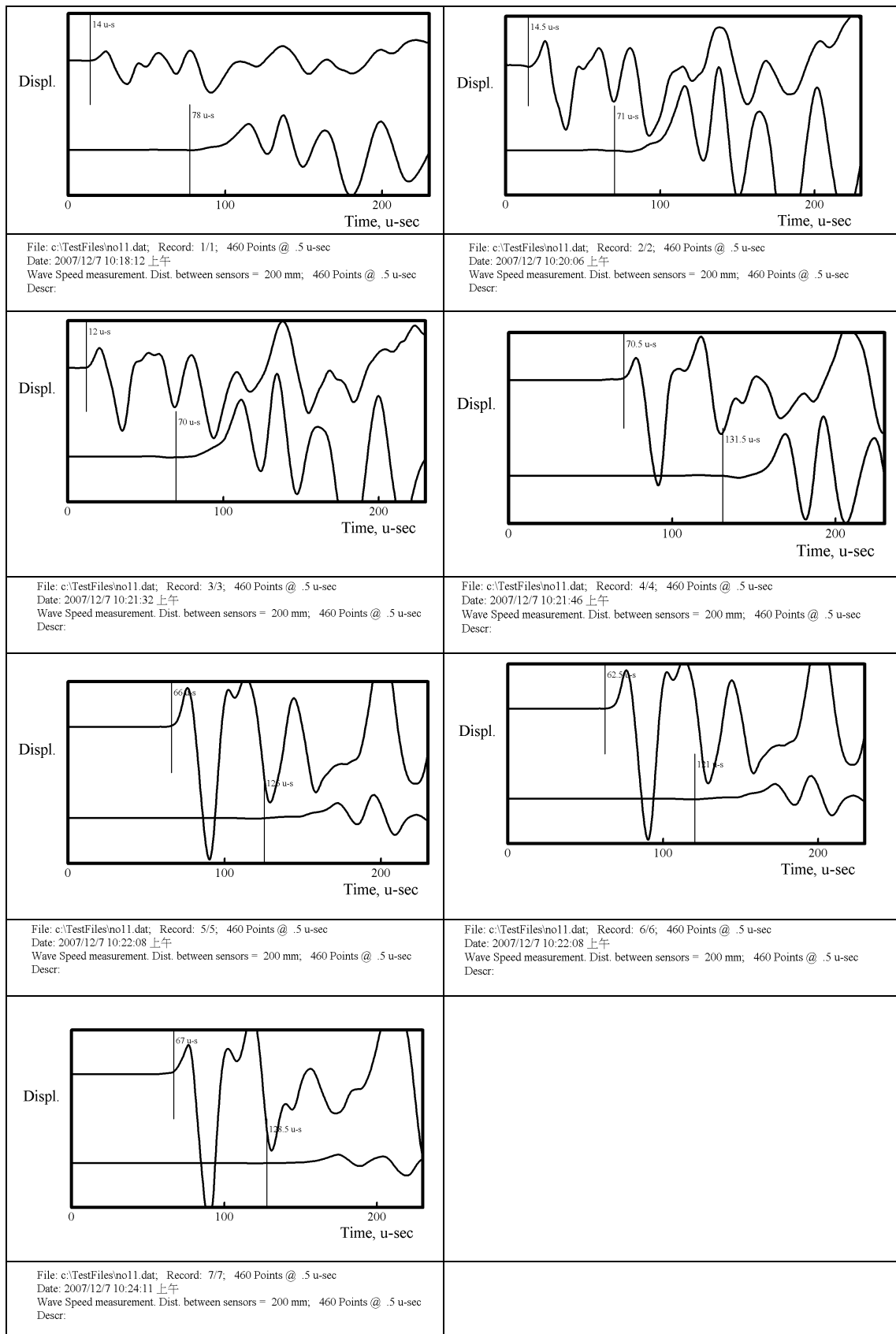
試體十號波速測量圖

測量方法：敲擊回音

 <p>Displ.</p> <p>Time, u-sec</p>	 <p>Displ.</p> <p>Time, u-sec</p>
<p>File: c:\TestFiles\no10.dat; Record: 1/1; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 10:41:31 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\no10.dat; Record: 2/2; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 10:41:46 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>
 <p>Displ.</p> <p>Time, u-sec</p>	 <p>Displ.</p> <p>Time, u-sec</p>
<p>File: c:\TestFiles\no10.dat; Record: 3/3; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 10:41:53 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\no10.dat; Record: 4/4; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 10:42:10 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>
 <p>Displ.</p> <p>Time, u-sec</p>	 <p>Displ.</p> <p>Time, u-sec</p>
<p>File: c:\TestFiles\no10.dat; Record: 5/5; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 10:43:25 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 100 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\no10.dat; Record: 6/6; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 10:43:25 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 100 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>

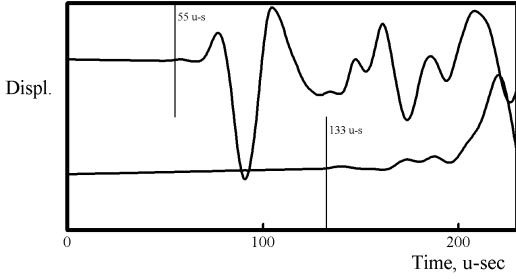
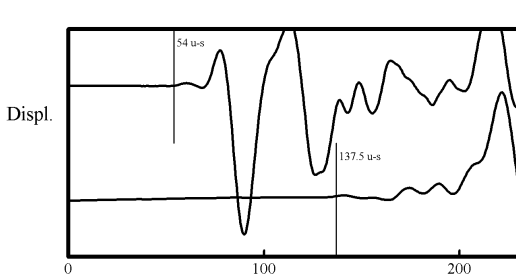
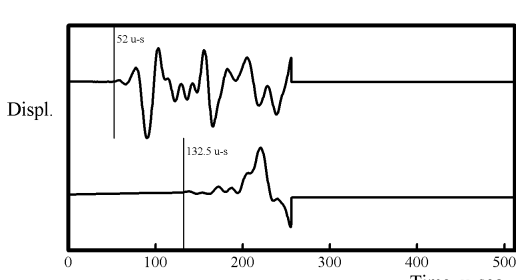
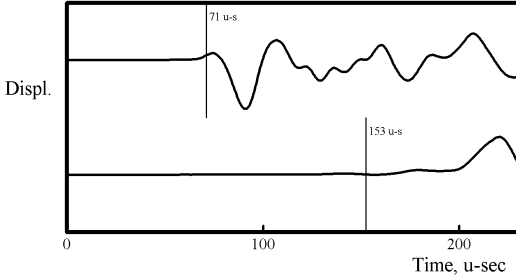
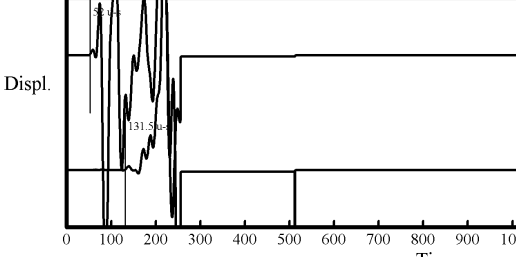
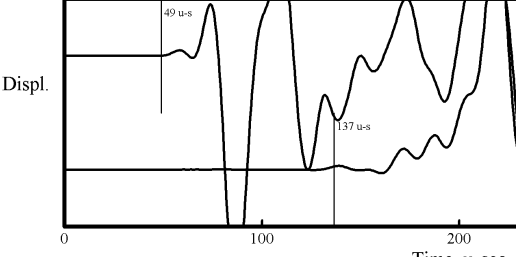
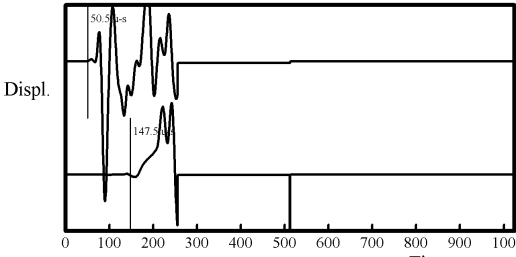
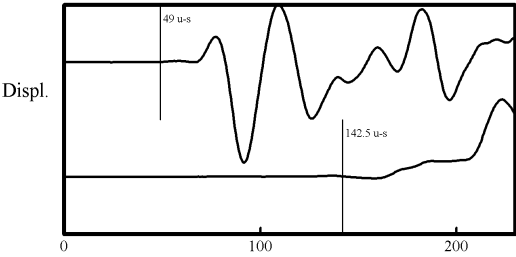
試體十一號波速測量圖

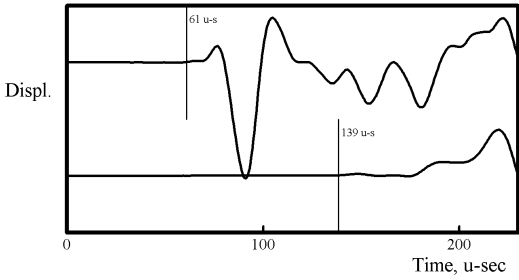
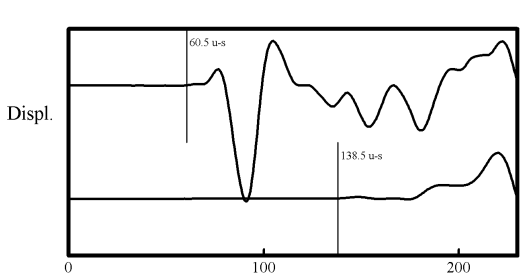
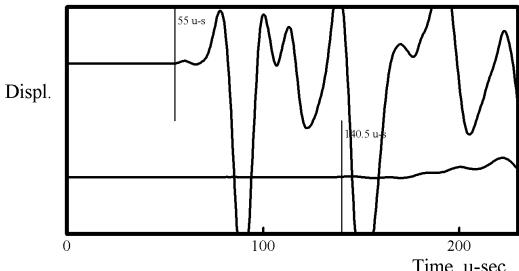
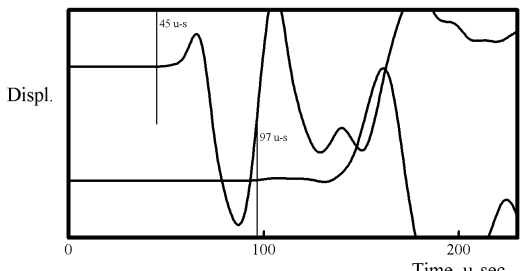
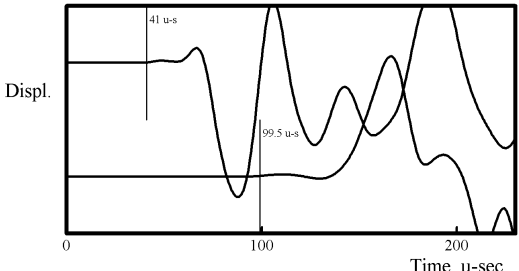
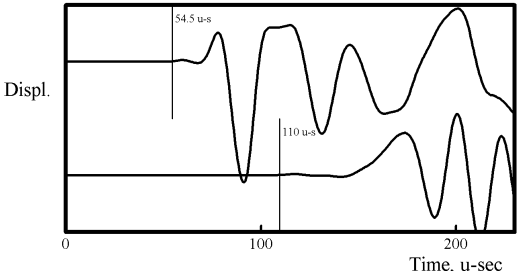
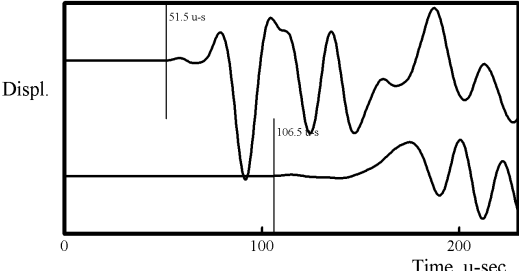
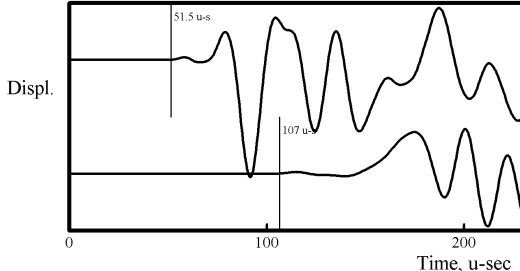
測量方法：敲擊回音

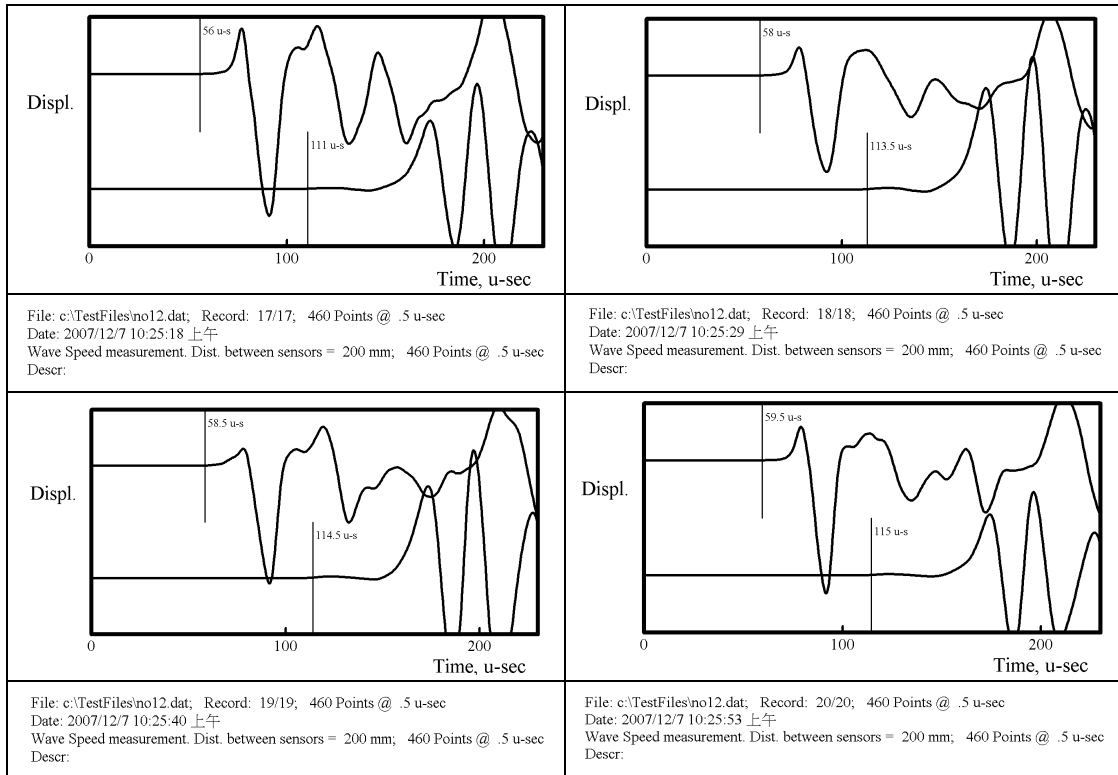


試體十二號波速測量圖

測量方法：敲擊回音

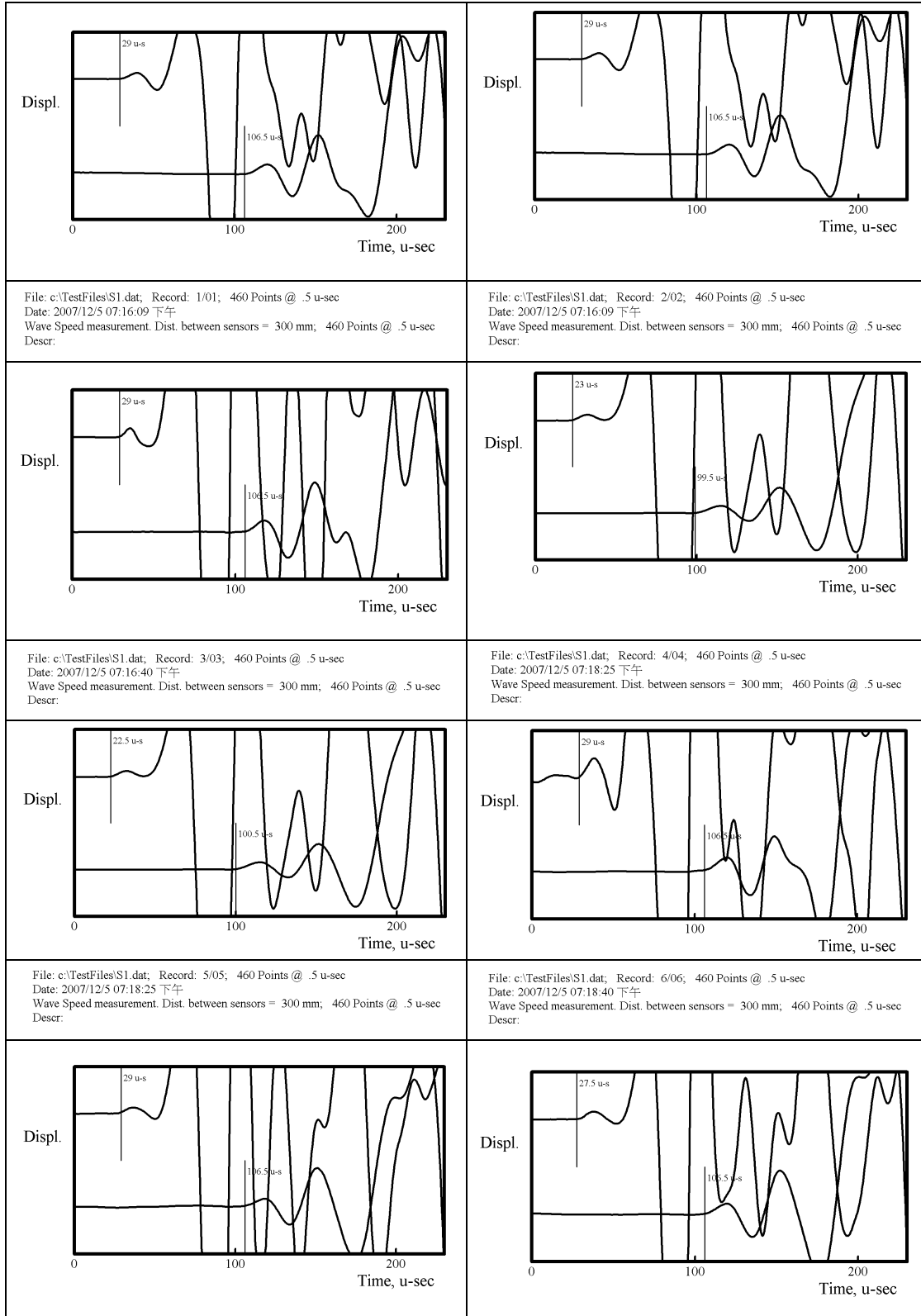
	
<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 1/1; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 05:46:11 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 2/2; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 05:47:20 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>
	
<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 3/3; 1024 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 05:49:35 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 1024 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 4/4; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 05:51:04 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>
	
<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 5/5; 2048 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 05:55:23 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 2048 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 6/6; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 05:55:23 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>
	
<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 7/7; 2048 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 05:58:46 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 2048 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 8/8; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 06:00:29 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>

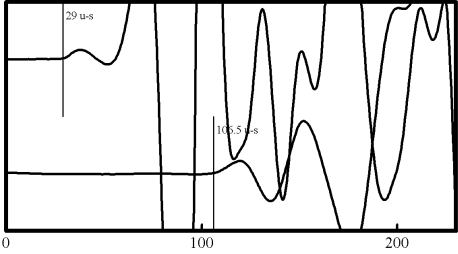
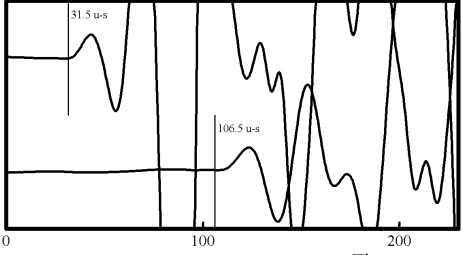
	
<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 9/9; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 06:03:42 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 10/10; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/6 06:03:42 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>
	
<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 11/11; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 09:47:48 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 12/12; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 10:09:26 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>
	
<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 13/13; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 10:14:51 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 14/14; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 10:16:45 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>
	
<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 15/15; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 10:17:07 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\no12.dat; Record: 16/16; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/7 10:17:07 上午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 200 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>



試體 S1 號波速測量圖

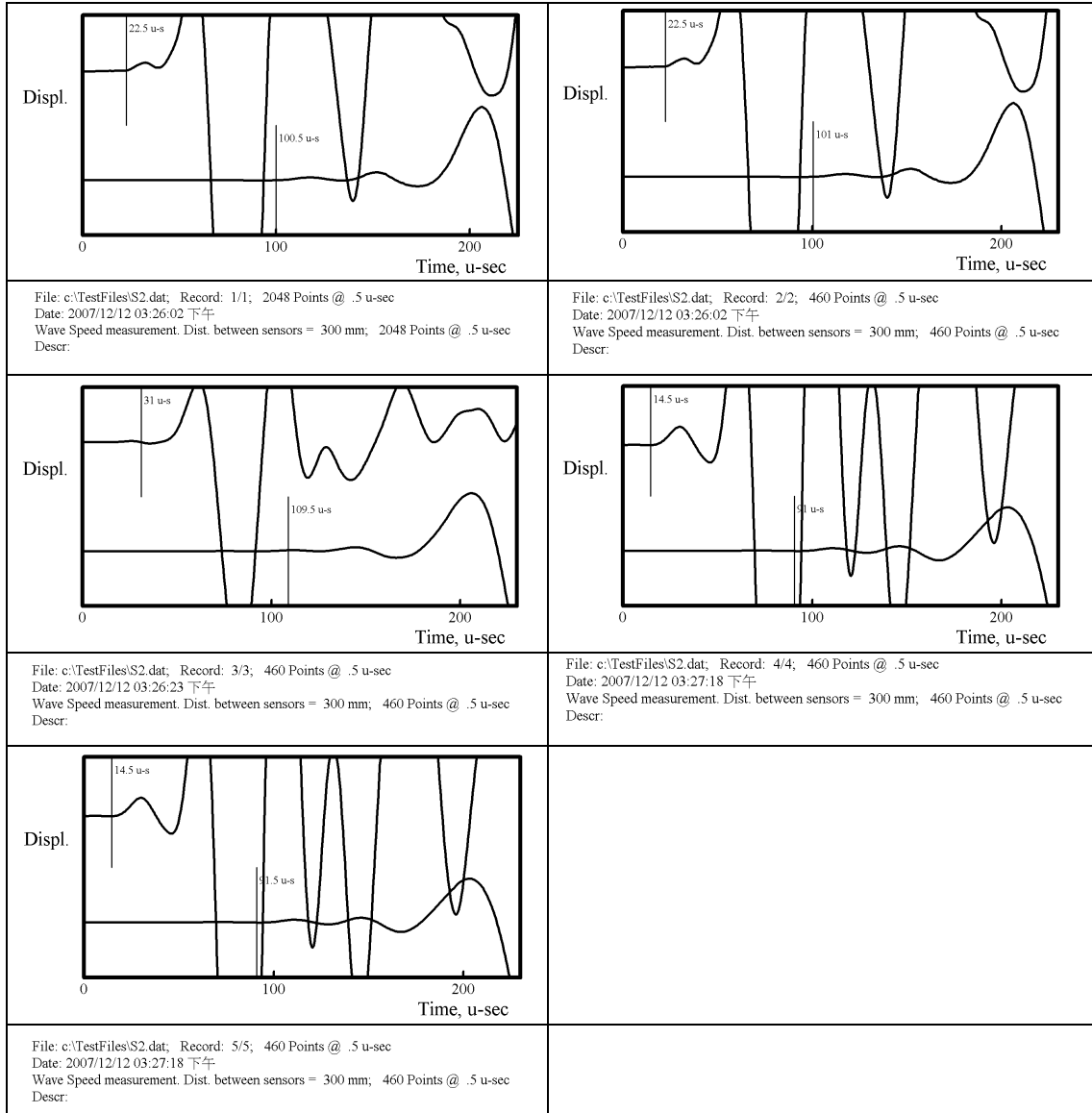
測量方法：敲擊回音



<p>File: c:\TestFiles\S1.dat; Record: 7/07; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/5 07:19:01 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\S1.dat; Record: 8/08; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/5 07:19:26 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>
<p>Displ.</p>  <p>Time, u-sec</p>	<p>Displ.</p>  <p>Time, u-sec</p>
<p>File: c:\TestFiles\S1.dat; Record: 9/09; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/5 07:19:26 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>	<p>File: c:\TestFiles\S1.dat; Record: 10/10; 460 Points @ .5 u-sec Date: 2007/12/5 07:19:56 下午 Wave Speed measurement. Dist. between sensors = 300 mm; 460 Points @ .5 u-sec Descr:</p>

試體 S2 號波速測量圖

測量方法：敲擊回音



附錄三 敲擊回音之波速量測數據

試體 1					
No	T1 u-s	T2 u-s	ΔT u-s	L, mm	P-wave
1	55.5	115.5	60	200	3333.333
2	59	115	56	200	3571.429
3	56.5	114	57.5	200	3478.261
				平均 P-wave	3461.008

試體 2					
No	T1 u-s	T2 u-s	ΔT u-s	L, mm	P-wave
1	59.5	113.5	54	200	3703.704
2	53	109	56	200	3571.429
3	50.5	107	56.5	200	3539.823
4	54.5	110	55.5	200	3603.604
5	51.5	108	56.5	200	3539.823
6	52	108	56	200	3571.429
				平均 P-wave	3588.302

試體 3					
No	T1 u-s	T2 u-s	ΔT u-s	L, mm	P-wave
1	62	126.5	64.5	200	3100.775
2	58	119.5	61.5	200	3252.033
3	60.5	121.5	61	200	3278.689
4	60	121	61	200	3278.689
5	58.5	121.5	63	200	3174.603
				平均 P-wave	3216.958

試體 4					
No	T1 u-s	T2 u-s	ΔT u-s	L, mm	P-wave
1	56.5	112.5	56	200	3571.429
2	57.5	110.5	53	200	3773.585
3	58	112	54	200	3703.704
4	58	112	54	200	3703.704
5	58	112	54	200	3703.704
				平均 P-wave	3691.225

試體 5					
No	T1 u-s	T2 u-s	ΔT u-s	L, mm	P-wave
1	46.5	128	81.5	300	3680.982
2	55	125.5	70.5	300	4255.319
3	45	125.5	80.5	300	3726.708
4	45	125	80	300	3750
5	52	133	81	300	3703.704
6	50	130	80	300	3750
				平均 P-wave	3811.119

試體 7					
No	T1 u-s	T2 u-s	ΔT u-s	L, mm	P-wave
1	65	121	56	200	3571.429
2	64	117	53	200	3773.585
3	65.5	121.5	56	200	3571.429
4	62.5	116	53.5	200	3738.318
5	65.5	118.5	53	200	3773.585
6	61	117	56	200	3571.429
7	61.5	117	55.5	200	3603.604
8	64	115.5	51.5	200	3883.495
9	63	117	54	200	3703.704
10	63.5	116.5	53	200	3773.585
				平均 P-wave	3696.416

試體 8					
No	T1 u-s	T2 u-s	ΔT u-s	L, mm	P-wave
1	68.5	124.5	56	200	3571.429
2	70	126.5	56.5	200	3539.823
				平均 P-wave	3555.626

試體 9					
No	T1 u-s	T2 u-s	ΔT u-s	L, mm	P-wave
1	53.5	115	61.5	200	3252.033
2	57.5	115	57.5	200	3478.261
3	53	112	59	200	3389.831
4	50	110	60	200	3333.333
				平均 P-wave	3363.364

試體 10					
No	T1 u-s	T2 u-s	ΔT u-s	L, mm	P-wave
1	47	103.5	56.5	200	3539.823
2	45.5	103	57.5	200	3478.261
3	54.5	112	57.5	200	3478.261
4	45	101	56	200	3571.429
5	53	83	30	100	3333.333
6	53	83.5	30.5	100	3278.689
				平均 P-wave	3446.633

試體 11					
No	T1 u-s	T2 u-s	ΔT u-s	L, mm	P-wave
1	14	79	65	200	3076.923
2	14.5	77	62.5	200	3200
3	62.5	121	58.5	200	3418.803
4	66	125	59	200	3389.831
5	70.5	131.5	61	200	3278.689
6	12	70	58	200	3448.276
7	67	128.5	61.5	200	3252.033
				平均 P-wave	3294.936

試體 12					
No	T1 u-s	T2 u-s	ΔT u-s	L, mm	P-wave
1	55	133	78	300	3846.154
2	54	137.5	83.5	300	3592.814
3	52	132	80	300	3750
4	71	153	82	300	3658.537
5	52	131.5	79.5	300	3773.585
6	49	137	88	300	3409.091
7	50.5	147.5	97	300	3092.784
8	49	142.5	93.5	300	3208.556
9	61	139	78	300	3846.154
10	60.5	138.5	78	300	3846.154
11	55	140.5	85.5	300	3508.772
12	45	97	52	200	3846.154
13	41	99.5	58.5	200	3418.803
14	54.5	110	55.5	200	3603.604
15	51.5	106.5	55	200	3636.364
16	51.5	107	55.5	200	3603.604
17	56	111	55	200	3636.364
18	58	113.5	55.5	200	3603.604
19	58.5	114.5	56	200	3571.429
20	59.5	115	55.5	200	3603.604
				平均 P-wave	3602.806

s1					
No	T1 u-s	T2 u-s	ΔT u-s	L, mm	P-wave
1	29	106.5	77.5	300	3870.968
2	29	106.5	77.5	300	3870.968
3	29	106.5	77.5	300	3870.968
4	23	99.5	76.5	300	3921.569
5	22.5	100.5	78	300	3846.154
6	29	106.5	77.5	300	3870.968
7	29	106.5	77.5	300	3870.968
8	27.5	106.5	79	300	3797.468
9	29	106.5	77.5	300	3870.968
10	31.5	106.5	75	300	4000
				平均 P-wave	3879.1

s2					
No	T1 u-s	T2 u-s	ΔT u-s	L, mm	P-wave
1	22.5	110.5	88	300	3409.091
2	22.5	101	78.5	300	3821.656
3	31	109.5	78.5	300	3821.656
4	14.5	91	76.5	300	3921.569
5	14.5	91.5	77	300	3896.104
				平均 P-wave	3774.015

附錄四 超音波之波速量測數據

試體名稱：一			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測			單位：m/s
	第一測點	第二測點	
1	3510	3510	
2	3520	3520	
3	3540	3520	
4	3540	3510	
5	3540	3520	
6	3550	3520	
7	3550	3520	
8	3560	3520	
9	3550	3520	
10	3560	3520	
平均波速	3542	3518	3530

試體名稱：二			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測			單位：m/s
	第一測點	第二測點	
1	3600	3510	
2	3630	3530	
3	3650	3540	
4	3670	3540	
5	3680	3550	
6	3680	3540	
7	3680	3560	
8	3690	3560	
9	3670	3560	
10	3670	3570	
平均波速	3662	3546	3604

試體名稱：三			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測			單位：m/s
	第一測點	第二測點	
1	3620	3470	
2	3610	3560	
3	3620	3590	
4	3620	3590	
5	3630	3590	
6	3630	3600	
7	3630	3600	
8	3630	3600	
9	3630	3600	
10	3640	3600	
平均波速	3626	3580	3603

試體名稱：四			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測			單位：m/s
	第一測點	第二測點	
1	3440	3700	
2	3440	3710	
3	3450	3720	
4	3460	3720	
5	3460	3720	
6	3460	3770	
7	3470	3780	
8	3480	3770	
9	3490	3770	
10	3490	3780	
平均波速	3464	3744	3604

試體名稱：五			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測		單位：m/s	
	第一測點	第二測點	
1	3740	3670	
2	3770	3680	
3	3770	3680	
4	3770	3690	
5	3770	3690	
6	3770	3710	
7	3780	3710	
8	3780	3720	
9	3780	3720	
10	3790	3720	
平均波速	3772	3699	3735.5

試體名稱：七			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測			單位：m/s
	第一測點	第二測點	
1	3460	3520	
2	3500	3530	
3	3500	3550	
4	3510	3550	
5	3510	3550	
6	3510	3560	
7	3510	3560	
8	3510	3560	
9	3510	3560	
10	3520	3560	
平均波速	3504	3550	3527

試體名稱：八			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測			單位：m/s
	第一測點	第二測點	
1	3310	-	
2	3370	-	
3	3370	-	
4	3370	-	
5	3370	-	
6	3380	-	
7	3380	-	
8	3380	-	
9	3380	-	
10	3390	-	
平均波速	3370	-	3370

試體名稱：九			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測			單位：m/s
	第一測點	第二測點	
1	3590	3600	
2	3600	3610	
3	3610	3610	
4	3610	3610	
5	3610	3610	
6	3620	3610	
7	3620	3610	
8	3620	3620	
9	3620	3620	
10	3620	3620	
平均波速	3612	3612	3612

試體名稱：十			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測			單位：m/s
	第一測點	第二測點	
1	3460	3510	
2	3460	3530	
3	3490	3540	
4	3510	3550	
5	3510	3550	
6	3510	3550	
7	3510	3550	
8	3510	3560	
9	3520	3560	
10	3510	3560	
平均波速	3499	3546	3522.5

試體名稱：十一			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測			單位：m/s
	第一測點	第二測點	
1	3550	3370	
2	3560	3390	
3	3560	3430	
4	3580	3430	
5	3560	3430	
6	3570	3430	
7	3560	3430	
8	3590	3430	
9	3590	3430	
10	3590	3430	
平均波速	3571	3420	3495.5

試體名稱：十二			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測			單位：m/s
	第一測點	第二測點	
1	3590	3430	
2	3600	3430	
3	3600	3440	
4	3610	3440	
5	3610	3450	
6	3610	3460	
7	3610	3460	
8	3610	3460	
9	3620	3460	
10	3620	3460	
平均波速	3608	3449	3528.5

試體名稱：S1				
波速量測				
量測儀器：超音波檢測		單位：m/s		
	50cm	30cm	25cm	
1	3830	3750	3620	
2	3860	3770	3690	
3	3860	3800	3720	
4	3870	3820	3730	
5	3880	3830	3750	
6	3860	3830	3770	
7	3890	3850	3800	
8	3830	3860	3820	
9	3860	3740	3820	
10	3890	3770	3820	
平均波速	3863	3802	3754	3806.333

試體名稱：S2				
波速量測				
量測儀器：超音波檢測		單位：m/s		
	50cm	30cm	25cm	
1	3630	3660	2720	
2	3660	3680	2730	
3	3660	3690	2730	
4	3660	3690	2730	
5	3660	3690	2730	
6	3660	3690	2730	
7	3660	3690	2730	
8	3660	3690	2730	
9	3660	3690	2730	
10	3680	3710	2730	
平均波速	3659	3688	2729	3358.667

試體名稱：大梁					
波速量測					
量測儀器：超音波檢測		單位：m/s			
	26cm	75cm	116cm	185cm	
1	3600	3690	3550	3720	
2	3620	3760	3600	3800	
3	3670	3760	3640	3820	
4	3700	3820	3650	3650	
5	3710	3830	3650	3720	
6	3720	3850	3660	3750	
7	3720	3870	3660	3770	
8	3740	3890	3670	3800	
9	3750	3910	3670	3820	
10	3750	3920	3670	3820	3734.25
平均波速	3698	3830	3642	3767	

試體名稱：A			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測		單位：m/s	
	第一測點	第二測點	
1	3810	3390	
2	3790	3390	
3	3660	3400	
4	3610	3400	
5	3650	3400	
平均波速	3704	3396	3550

試體名稱：B			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測			單位：m/s
	第一測點	第二測點	
1	3680	3350	
2	3280	3360	
3	3690	3360	
4	3670	3360	
5	3620	3360	
平均波速	3588	3358	3473

試體名稱：C			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測			單位：m/s
	第一測點	第二測點	
1	3520	3490	
2	3540	3510	
3	3520	3510	
4	3540	3510	
5	3540	3520	
平均波速	3532	3508	3520

試體名稱：D			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測			單位：m/s
	第一測點	第二測點	
1	3470	3430	
2	3510	3440	
3	3510	3440	
4	3510	3440	
5	3520	3450	
平均波速	3504	3440	3472

試體名稱：E			
波速量測			
量測儀器：超音波檢測			單位：m/s
	第一測點	第二測點	
1	3450	3230	
2	3510	3280	
3	3510	3220	
4	3520	3230	
5	3520	3230	
平均波速	3502	3238	3370