

混凝土坡面工厚度之非破壞檢測

蕭進裕¹ 林宜清²

關鍵詞：混凝土、厚度、非破壞檢測、ASTM C1383。

摘 要

有關混凝土厚度之工程品質檢測，目前無法目視部分均採破壞鑽心試體檢測，易造成混凝土構造物局部破壞，且對於不適合進行鑽心試體檢測之構造物，則無法有效進行品管。本文利用 1998 年公佈之非破壞檢測技術 ASTM C1383 標準試驗法，針對水利工程混凝土坡面工構造物進行厚度檢測，並考慮碎石與土壤二種底層對厚度檢測之影響。研究結果顯示，非破壞方法所量測之水利工程混凝土坡面工構造物之厚度與鑽心取樣結果比較，二者相差均在 3% 以內，故 ASTM C1383 標準試驗法在水利工程混凝土版狀構造物之厚度檢測上之應用深具可行性，應可作為實務工程上不適合鑽心之構造物驗收用之方法。

NONDESTRUCTIVE MEASUREMENT OF THE THICKNESS OF CONCRETE SLOPE PAVEMENT

Ching-Yu Hsiao¹ Yi-Ching Lin²

¹*Central Water Resources Bureau,
Water Conservancy Agency,
Ministry of Economic Affairs
Taichung 402, Taiwan, R.O.C.*

²*Department of Civil Engineering,
National Chung Hsing University,
Taichung 402, Taiwan, R.O.C.*

Key Words: concrete, thickness, nondestructive testing, ASTM C1383.

ABSTRACT

Conventionally, the thickness of concrete structures with one accessible surface was measured by coring that might cause damage to the structures. For some concrete structures those are not allowed to take cores, the thickness of such structures cannot be efficiently measured. The purpose of this paper is to evaluate the newly developed nondestructive technique (ASTM C1383) for measuring the thickness of concrete structures in water resource engineering such as slope pavement. The base materials of

¹經濟部水利處中區水資源局工程師

²國立中興大學土木工程系教授

the above concrete structures include soil and crushed rock. Experimental results show that all the measurement errors of the concrete thickness with the newly developed nondestructive technique are less than 3%. Therefore, it is practically feasible to introduce the nondestructive technique (ASTM C1383) as an alternative method for measuring the thickness of concrete structures in water resource engineering. The advantage of this alternative method is completely nondestructive.

一、前言

水利工程包括水庫、河川、海洋……等等，其中水資源之開發、河川、海岸防洪及灌溉排水工程大部份均採用混凝土為主結構體，當然混凝土之品質控管列為首要結構安全評估重點。非破壞檢測在品質管制上扮演重要角色。

超音波法為眾人熟知之一種非破壞檢測法，其應用範圍相當廣範，包括金屬材料瑕疵、焊接品質、殘留應力、人體檢查…等，惟其在混凝土材料上之應用並不理想，主要缺點為：(1)超音波引進混凝土內部之高頻波，容易被混凝土內部之小孔隙所散射，雖然後來已有較低頻之超音波儀器上市，但其透過電壓刺激壓電材料變形所產生之波源，能量仍不足，限制了應力波傳動距離；(2)埋設在混凝土內部之鋼筋影響，無法有效去除；(3)探頭尺寸過大，為了能有效產生激發源及訊號接收，混凝土表面必須特別處理並塗耦合液，施測時須給予適度壓力。

為了突破上述超音波法在混凝土材料上應用之瓶頸，敲擊回音法(Impact-Echo Method)於1980年代中期開始研發，與超音波法同樣是利用應力波動原理，但其改變了應力波激發源為機械性的敲擊方式，接收器改成由點接觸之位移訊號接收器，除了直接在時間領域上，對量測到的位移波形作訊號分析外，亦透過快速傅利葉轉換(FFT)的處理，在頻率領域上作訊號分析。

敲擊回音法之發展初期，主要應用於偵測版狀混凝土結構(例如樓版、橋面版、牆、地下連續壁…等)內部之各種瑕疵，包括：偵測鋼筋混凝土版內部之裂縫及孔隙；夯實不良之混凝土；預力套管內部因灌漿不良殘留之孔隙[1-5]。在進入1990年代後，敲擊回音法之應用則趨向多元化，其中包括桿狀結構(例如樑、柱、混凝土樁)內部孔隙、裂縫及蜂窩之偵測[6]；混凝土結構表面裂縫開裂深度之測定[7-9]；鋼筋混凝土版之厚度量測。其中有關鋼筋混凝土版

之厚度量測已被納入1998年ASTM之標準(ASTM C-1383)[10]。

由於新建完工之水利工程混凝土構造物皆須進行尺寸上之驗收，大部分水工混凝土構造物，例如水庫工程之溢洪道、取出水工、水源聯通遂道襯砌、暗渠、明渠、攔河堰、沉砂池及防洪工程之混凝土坡面工、防洪牆…等等，如僅有一面可接觸之構造物，其厚度之量測方法傳統上僅能採用鑽心取樣方式，作為驗收依據，此種方法費時昂貴且須在鑽心位置實施修補，若考慮日後耐磨性及滲水問題，鑽心破壞取樣方式則不適宜。因此有必要引進新技術，本文採用1998年公佈之ASTM C-1383標準試驗法，針對水利防洪工程之混凝土坡面工在碎石與土壤二種底層情況下進行厚度檢測，並對實測結果評估以ASTM C-1383敲擊回音法量測水利工程混凝土版厚度，取代現行採用破壞性試驗作為工程品質驗收之可行性。

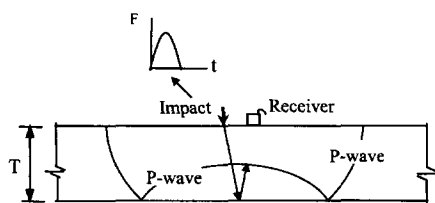
二、混凝土版狀結構厚度之檢測原理

對一厚度為 T 之混凝土版進行敲擊回音試驗，如圖1(a)，在敲擊源處產生一個壓力波(C)後，因混凝土底部為空氣介質聲阻係數小，則入射壓力波(C)將反射為張力波(T)；又當反射張力波傳至頂部自由介面時，此時的反射波將改變為壓力波(C)，如此重覆反射所得壓力波及張力波之示意圖，如圖1(b)所示。這些反射波回到敲擊面時會產生表面位移，其位移波形圖，如圖1(c)所示；在圖1(c)中，一開始有一個非常大之向下位移乃由於表面波到達導致，而當底面反射回來的張力波到達時，將造成向下位移，應力波來回傳動之結果形成如圖1(c)上標示之"2P"、"4P"、"6P"及"8P"處之向下位移反應。

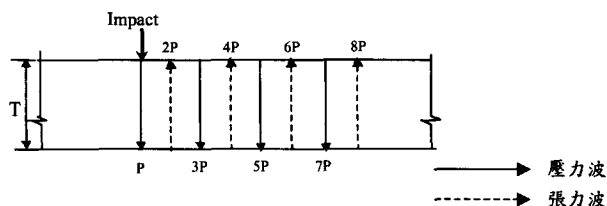
以圖1(b)所示之敲擊回音反應來說明頻率分析原理：敲擊激發之應力波會在版的頂面及底面來回傳動，因而產生一個共振條件，每次應力波到達頂面

時，將引起一個向下的位移，而應力波重覆造成頂面向下的位移反應是有週期性的，對靠近敲擊位置的點而言，應力波來回一趟行經路徑為版厚的二倍，所造成的週期則為行經路徑(2T)除以 P-波之視速度($C_{p,plate}$)，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：

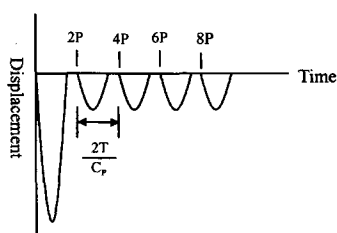
$$f = \frac{C_{p,plate}}{2T} \quad (1)$$



(a)



(b)



(c)

圖1 敲擊回音法於混凝土版試驗示意圖(a)敲擊回音試驗示意圖(b)壓力波及張力波之示意圖(c)表面位移之示意圖

記錄到之數位化波形的頻率含量可利用快速傅利葉轉換(FFT)技巧轉換到頻率領域上作分析求得，此一技巧乃基於任何一種波形皆可用一系列不同振幅、頻率及相角之正弦波的和來代表。與版之頂面及底面來回反射有關的頻譜稱為"厚度頻率"，將公式(1)改寫成如下：

$$T = \frac{C_{p,plate}}{2f} \quad (2)$$

若 P 波的視波速已知，版的厚度可以由位移波形內之主要控制頻率求得。公式(2)是利用頻率分析來解釋敲擊回音結果之基本關係式，其中混凝土版 P 波波速(C_p)與 P 波視波速($C_{p,plate}$)的關係如公式(3)所示 [11]：

$$C_{p,plate} = 0.96C_p \quad (3)$$

因此，根據公式(3)則公式(2)可改寫成下列公式

$$T = \frac{0.96C_p}{2f} \quad (4)$$

公式(4)即為 1998 年，ASTM 正式將敲擊回音法量測 P 波波速及混凝土版厚度方法納入 (ASTM C1383)[2]。以下對 ASTM C 1383 法量測 P 波波速及混凝土版厚度之檢測步驟加以敘述。

步驟一：P 波波速之量測

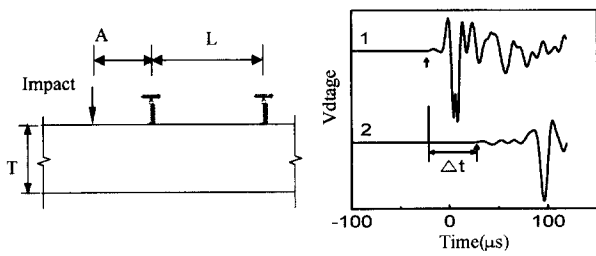
圖 2(a)為檢測示意圖，在已知之距離 L 配置兩個接收器，並於混凝土版表面距第一接收器適當距離 A 處，給予一敲擊產生暫態應力波，使三者成一直線，利用兩接收器所得之 P 波波到時間差 Δt ，及已知兩接收器距離 L，利用式(5)可算得 P 波波速。

$$C_p = \frac{L}{\Delta t} \quad (5)$$

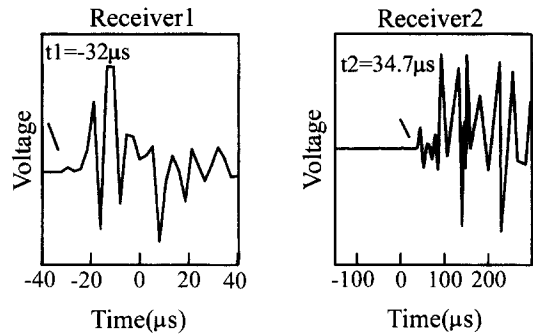
在進行混凝土波速量測時，需避開鋼筋之影響，例如測線若與鋼筋平行，則需離鋼筋至少 8 公分以上，或安排測線與鋼筋方向垂直。

步驟二：敲擊回音試驗

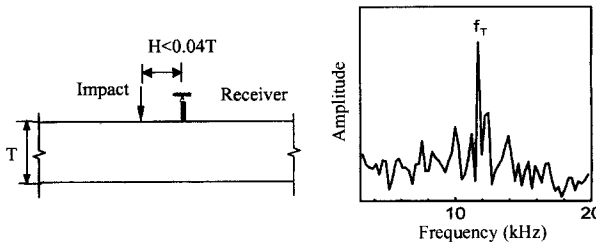
圖 2(b)為檢測示意圖，在混凝土表面給予一敲擊並在距離甚小處($H < 0.4T$)放置位移接收器，則所監測到的位移波形主要是因為 P 波到達所造成，應力波來回於混凝土版頂面及底面傳動，因而產生一共振頻率，是為"版厚頻率" f_T ，利用 FFT 技巧將接收器所量得之數位化波形轉至頻譜領域求得頻譜含量，頻譜圖中之高振幅尖峰值即導入之應力波遇到版底之邊界多次來回頂底反射造成之版厚頻率 f_T ，將所得 f_T 值及由步驟一所得 P 波波速代入式(4)計算，則可求得混凝土版之厚度。



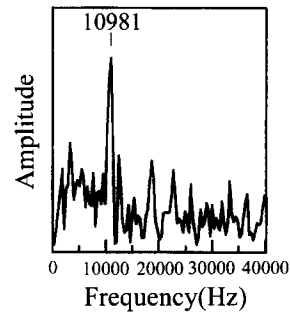
(a) P 波波速量測示意圖及位移波形圖



(a) 表面縱波波速量測波形圖



(b) 敲擊回音法示意圖及頻譜圖



(b) 頻譜圖

圖2 ASTM C1383之P波波速及版厚度量測法

圖4 實驗室試體測點1

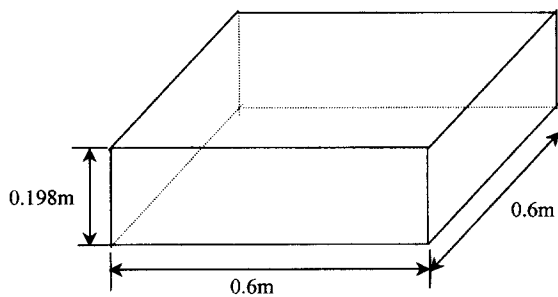


圖3 試體尺寸

首先採用圖 4 所示方法進行測點 1 表面縱波波速(C_p)量測兩接收器間之距離為 0.3 m，而敲擊源與第一接收器之距離為 0.15 m，資料抓取之時間距為 0.667 μ s，圖 4(a)為紀錄所得之波形，由紀錄波形量測第一接收器時間 t_1 為 -32 μ s，第二接收器時間 t_2 為 34.7 μ s，兩接收器之時間差為 (Δt)為 66.7 μ s，由公式(5)可求得縱波波速(C_p)為 4498 m/s，接著進行板厚頻率(f)量測，敲擊回音試驗中資料，抓取之時間距為 2.668 μ s，紀錄點數為 1024 點，因此頻譜之解析度為 0.366 kHz，圖 4(b)為試驗所得頻譜，由頻譜中可得板厚頻率(f)為 10.981 kHz，由量得之 C_p (4498 m/s)與 f (10.981 kHz)代入公式(4)可計算求得混凝土板之厚度為 197 mm，與實際混凝土板厚 198mm 比較，僅有 1 mm 誤差(相對誤差小於 1%)。

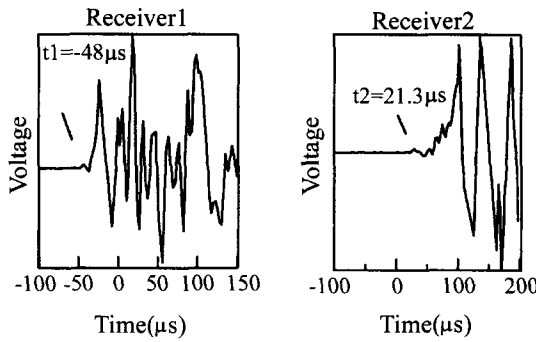
在相同條件下進行測點 2 之檢測，圖 5(a)為紀錄所得之波形。由紀錄波形量測之時間差為 (Δt)為 69.3 μ s，由公式(5)可求得縱波波速(C_p)為 4329m/s，接著進行板厚頻率(f)量測，圖 5(b)為試驗所得頻譜，由頻譜中可得板厚頻率(f)為 10.615 kHz，由量得之 C_p (4329 m/s)與 f (10.615 kHz)代入公式(4)可計算求得混凝土板之厚度為 196 mm，與實際混凝土板厚 198 mm 比較，僅有 2 mm 之誤差(相對誤差為 1%)。

三、現場檢測結果分析討論

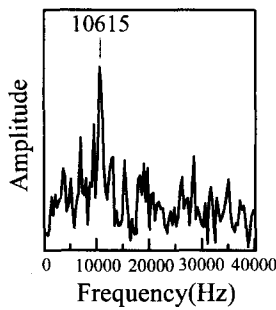
本檢測法針對水利工程混凝土板狀構造物之現場測試，選擇經濟部水利處大里溪整治工程中之大坑溪大坑、東山路堤工程及早溪新光北屯路堤工程，包括混凝土坡面工等二種不同底層分類檢測分析檢討詳述如下：

3.1 混凝土坡面工底層鋪碎石

現場檢測地點為早溪新光北屯路堤工程，混凝土坡面工厚度 200 mm 底層鋪碎石，本次檢測三點並由混凝土之實際厚度依 ASTM C 174 量取鑽心試體之長度做比較。



(a)表面縱波波速量測波形圖



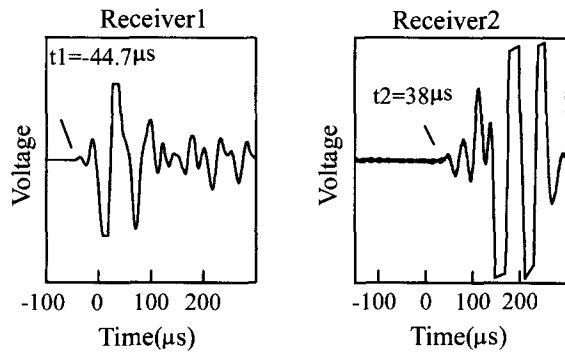
(b)頻譜圖

圖5 實驗室試體測點2

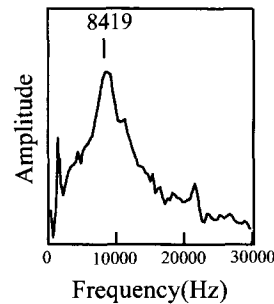
測點 1 表面縱波波速(C_p)量測，兩接收器間之距離為 0.3 m，而敲擊源與第一接收器之距離為 0.15 m，資料抓取之時間距為 0.667 μ s，圖 6(a)為紀錄所得之波形。由紀錄波形量測第一接收器時間 t_1 為 -44.7 μ s，第二接收器時間 t_2 為 38.0 μ s，兩接收器之時間差為 (Δt) 為 82.7 μ s，由公式(5)可求得縱波波速(C_p)為 3628 m/s，接著進行板厚頻率(f)量測，敲擊回音試驗中資料抓取時間距為 2.668 μ s，紀錄點數為 1024 點，因此頻譜之解析度為 0.366 kHz，圖 6(b) 為試驗所得頻譜，由頻譜中可得板厚頻率(f)為 8.419 kHz，最後由量得之 C_p (3628 m/s)與 f (8.419 kHz)代入公式(4)可計算求得混凝土板之厚度 207 mm，與實際鑽心試體長度 210 mm 比較，誤差 3 mm(相對誤差為 1.4%)。

測點 2 表面縱波波速(C_p)量測，兩接收器間之距離為 0.3 m，而敲擊源與第一接收器之距離為 0.15 m，資料抓取之時間距為 0.667 μ s，圖 7(a)為紀錄所得之波形。由紀錄波形量測第一接收器時間 t_1 為 -108.1 μ s，第二接收器時間 t_2 為 -25.3 μ s，兩接收器之時間差為(Δt)為 82.8 μ s，由公式(5)可求得縱波波速(C_p)為 3623 m/s，接著進行板厚頻率(f)量測，敲

擊回音試驗中資料抓取時間距為 5.336 μ s，紀錄點數為 1024 點，因此頻譜之解析度為 0.183 kHz，圖 7(b)為試驗所得頻譜，由頻譜中可得板厚頻率(f)為 7.687 kHz，最後由量得之 C_p (3623 m/s)與 f (7.687 kHz)代入公式(4)可計算求得混凝土板之厚度 227 mm，與實際鑽心試體長度 223 mm 比較，誤差 4 mm(相對誤差為 1.8%)。



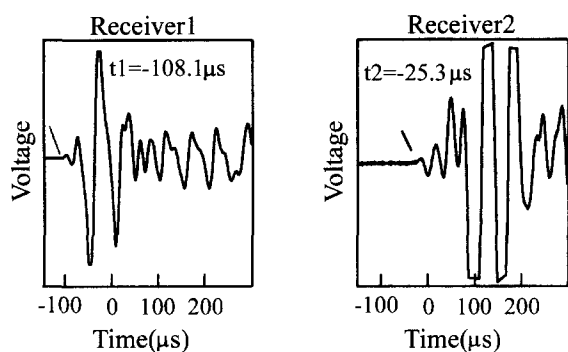
(a)表面縱波波速量測波形圖



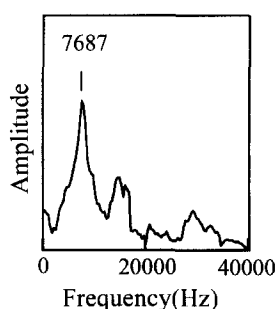
(b)頻譜圖

圖6 坡面工底層鋪碎石測點1

測點 3 表面縱波波速(C_p)量測，兩接收器間之距離為 0.3 m，而敲擊源與第一接收器之距離為 0.15 m，資料抓取之時間距為 0.667 μ s，圖 8(a)為紀錄所得之波形。由紀錄波形量測第一接收器時間 t_1 為 -48.7 μ s，第二接收器時間 t_2 為 32.7 μ s，兩接收器之時間差為 (Δt) 為 81.4 μ s，由公式(5)可求得縱波波速(C_p)為 3686m/s，接著進行板厚頻率(f)量測，敲擊回音試驗中資料抓取時間距為 2.668 μ s，紀錄點數為 1024 點，因此頻譜之解析度為 0.366 KHz，圖 8(b)為試驗所得頻譜，由頻譜中可得板厚頻率(f)為 7.687kHz，最後由量得之 C_p (3686m/s)與 f (7.687 kHz)代入公式(4)可計算求得混凝土板之厚度 231 mm，與實際鑽心試體長度 233 mm 比較，誤差 2 mm(相對誤差為 0.9%)。

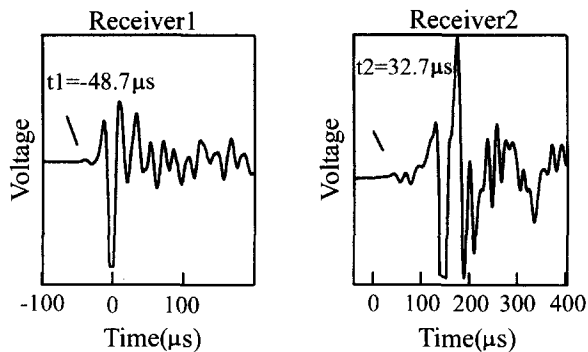


(a)表面縱波波速量測波形圖

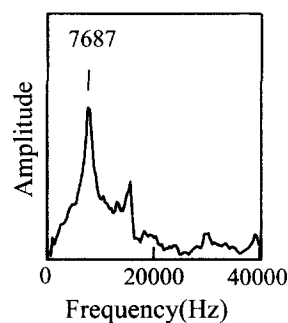


(b)頻譜圖

圖7 坡面工底層舖碎石測點2



(a)表面縱波波速量測波形圖



(b)頻譜圖

圖8 坡面工底層舖碎石測點3

表1 為混凝土坡面工底層碎石在三個不同測點，所量測之結果，與混凝土坡面工實際量取鑽心試體之長度比較，結果顯示以波速量測技術及敲擊回音法量測之絕對誤差為 3 mm、4 mm 或 2 mm，誤差均在 3.0% 以內。

表1 混凝土坡面工底層舖碎石厚度量測結果

測點	C_p (m/s)	板厚頻率 f (Hz)	IE量測厚度 (mm)	鑽心厚度 (mm)	量測誤差	
					(mm)	(%)
1	3628	8419	207	210	-3	1.4
2	3623	7687	227	223	4	1.8
3	3686	7687	231	233	-2	-0.9

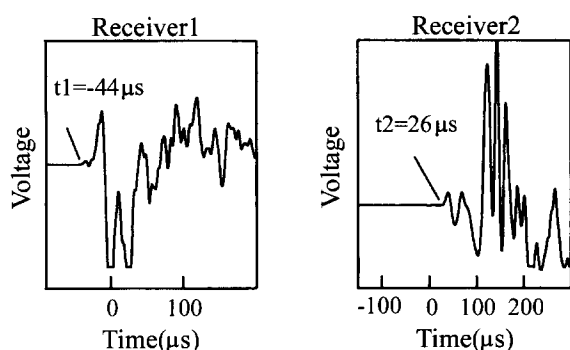
3.2 混凝土坡面工底層為原工址土壤

現場檢測地點為大坑溪大坑、東山路堤工程，臨時防洪設施混凝土坡面工厚度 70 mm 底層為原工址土壤，本次檢測三點並由混凝土之實際厚度依 ASTM C174 量取鑽心試體之長度做比較。

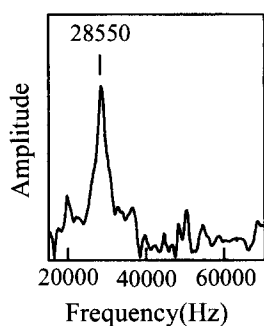
測點 1 表面縱波波速(C_p)量測，兩接收器間之距離為 0.3m，而敲擊源與第一接收器之距離為 0.15 m，資料抓取之時間距為 0.667 μ s，圖 9(a)為紀錄所得之波形。由紀錄波形量測第一接收器時間 t_1 為 -44.0 μ s，第二接收器時間 t_2 為 26.0 μ s，兩接收器之時間差為 (Δt) 為 70.0 μ s，由公式(5)可求得縱波波速(C_p)為 4286 m/s，接著進行板厚頻率(f)量測，敲擊回音試驗中資料抓取時間距為 2.668 μ s，紀錄點數為 2048 點，因此頻譜之解析度為 0.183 kHz，圖 9(b)為試驗所得頻譜，由頻譜中可得板厚頻率(f)為 28.550 kHz，最後由量得之 C_p (4286m/s)與 f (28.550 kHz)代入公式(4)可計算求得混凝土板之厚度 72 mm，與實際鑽心試體長度 70 mm 比較，誤差 2 mm(相對誤差為 2.9%)。

測點 2 表面縱波波速(C_p)量測，兩接收器間之距離為 0.3 m，而敲擊源與第一接收器之距離為 0.15m，資料抓取之時間距為 0.667 μ s，圖 10(a)為紀錄所得之波形。由紀錄波形量測第一接收器時間 t_1 為 -44.0 μ s，第二接收器時間 t_2 為 25.3 μ s，兩接收器之時間差為(Δt)為 69.3 μ s，由公式(5)可求得縱波波速(C_p)為 4329.0 m/s，接著進行板厚頻率(f)量測，敲擊回音試

驗中資料抓取時間距為 2.668 μs ，紀錄點數為 2048 點，因此頻譜之解析度為 0.183 KHz，圖 10(b)為試驗所得頻譜，由頻譜中可得板厚頻率(f)為 29.465 kHz，最後由量得之 C_p (4329.0 m/s)與 f (29.465 kHz) 代入公式(4)可計算求得混凝土板之厚度 71 mm，與實際鑽心試體長度 73 mm 比較，誤差 2 mm(相對誤差為 2.7%)。



(a)表面縱波波速量測波形圖

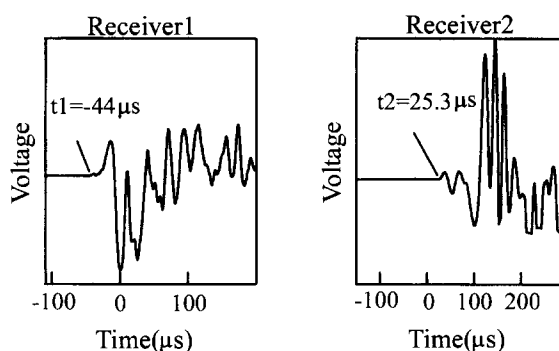


(b)頻譜圖

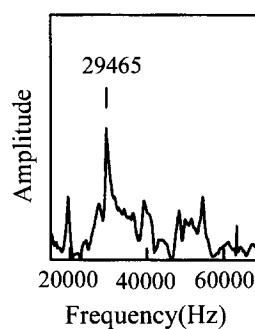
圖9 坡面工底層原工址土壤測點 1

測點 3 表面縱波波速(C_p)量測，兩接收器間之距離為 0.3 m，而敲擊源與第一接收器之距離為 0.15 m，資料抓取之時間距為 0.667 μs ，圖 11(a)為紀錄所得之波形。由紀錄波形量測第一接收器時間 t_1 為 -53.4 μs ，第二接收器時間 t_2 為 16.0 μs ，兩接收器之時間差為(Δt)為 69.4 μs ，由公式(5)可求得縱波波速(C_p)為 4323 m/s，接著進行板厚頻率(f)量測，敲擊回音試驗中資料抓取時間距為 2.668 μs ，紀錄點數為 2048 點，因此頻譜之解析度為 0.183 kHz，圖 11(b)為試驗所得頻譜，由頻譜中可得板厚頻率(f)為 25.439 kHz，最後由量得之 C_p (4323 m/s)與 f (25.439 kHz)代入公式(4)可計算求得混凝土板之厚度 82 mm，與實際鑽心試體長度 80 mm 比較，誤差 2 mm(相對誤差為 2.5%)。

表 2 為混凝土坡面工底層原工址土壤在三個不同測點，所量測之結果，與混凝土坡面工實際量取鑽心試體之長度比較，結果顯示以波速量測技術及敲擊回音法量測之誤差為 2 mm、2 mm 或 2 mm，誤差均在百分比 3.0%以內。



(a)表面縱波波速量測波形圖



(b)頻譜圖

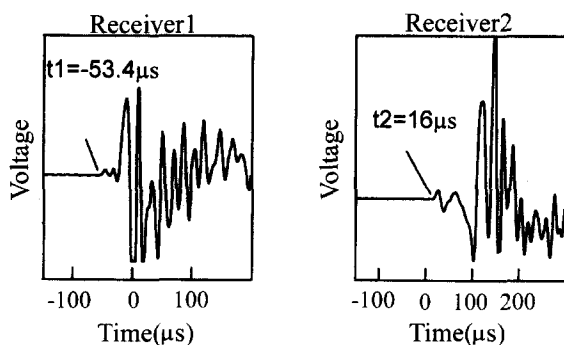
圖10 坡面工底層原工址土壤測點 2

表2 混凝土坡面工底層原工址土壤厚度量測結果

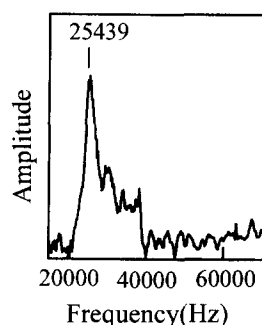
測點	C_p (m/s)	板厚頻率 f (Hz)	IE量測厚度 (mm)	鑽心厚度 (mm)	量測誤差	
					(mm)	(%)
1	4286	28550	72	70	2	2.9
2	4329	29465	71	73	-2	-2.7
3	4323	25439	82	80	2	2.5

綜合現場試驗結果，發現坡面工之水利工程版狀混凝土構造物，皆可利用 ASTM C1383 敲擊回音法準確測得其厚度，不受底層鋪設碎石或採用原工址土壤的影響，誤差均在百分比 3.0%以內，依據經濟部水利處混凝土坡面工施工規範第十條厚度檢測規定容許 5.0%之誤差，因此本檢測法非常適合當作

後度量測驗收用。



(a)表面縱波波速量測波形圖



(b)頻譜圖

圖11 坡面工底層原工址土壤測點 3

四、結論與建議

本論文以敲擊回音法量測技術為主之 ASTM C1383 標準，其中包括波速及版厚頻率量測技術以檢測水利工程混凝土版狀構造物之厚度，並由現場水利工程混凝土版底層、背面不同介質厚度檢測結果結論與建議如下：

1. 由本次水利工程現場混凝土版狀構造物坡面工(厚度 200 mm)底層鋪碎石，臨時坡面工(厚度 70 mm~80 mm)底層原工址土壤等二種厚度檢測，其中混凝土版狀構造物背面底層含二種不同介質且厚度由 70 mm 至 200 mm，檢測結果顯示二種檢測結果與真實長度誤差均在 3% 以內。
2. 由本次水利工程混凝土版狀厚度檢測之結果，顯示誤差均於 3% 以內，依據經濟部水利處施工補充說明書附件八混凝土坡面工施工規範允許 5% 厚度誤差，所以未來期望敲擊回音法量測技術能應用於工程驗收或平時品管檢驗，以避免因不適當位置鑽心取樣檢驗而造成結構強度之損失。期望由逐步漸進方式取代破壞方式之檢測，並由檢測儀

器朝自動判讀方向發展，使經驗不足之操作者一樣能很輕易的由波形數據上得知現場狀況，進而全面推廣至適用本法之工程上。

參考文獻

1. Carino, N.J., Sansalone, M. and Hsu, N.N., "Flaw Detection in Concrete by Frequency Spectrum Analysis of Impact-Echo Waveforms," *International Advances in Nondestructive Testing*, 12th Edition, W.J. McGonagle, Ed., Gordon & Breach Science Publishers, New York, pp. 117-146 (1986).
2. Carino, N.J. and Sansalone, M., "Pulse-Echo Method for Flaw Detection in Concrete," *Technical Note 1199, National Bureau of Standards*, (1984).
3. Carino, N.J. and Sansalone, M., "Detecting Voids in Metal Tendon Ducts Using the Impact-Echo Method," *Materials Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 89, No. 3, pp. 296-303 (1992).
4. Sansalone, M. and Carino, N.J., "Detecting Delaminations in Reinforced Concrete Slabs with and without Asphalt Concrete Overlays Using the Impact-Echo Method," *Materials Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 86, No. 2, pp. 175-184 (1989).
5. Sansalone, M. and Carino, N.J., "Detecting Honeycombing, the Depth of Surface-opening Cracks, and UngROUTED Ducts Using the Impact-Echo Method," *Concrete International*, April, 1988, pp. 38-46 (1988).
6. Lin, Y. and Sansalone, M., "Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns Using the Impact-Echo Method," *Materials Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 89, No. 4, pp. 394-405 (1992).
7. Lin, Y. and Su, W.C., "Use of Stress Waves for Determining the Depth of Surface-Opening Cracks in Concrete Structures," *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 5, pp. 494-505 (1996).
8. Lin, Y., Liou, T. and Hsiao, C., "Influences of Reinforcing Bars on Crack Depth Measurement by Stress Waves," *ACI Materials Journal*, Vol. 95, No. 4,

- pp. 407-418 (1998).
9. Lin, Y., Liou, T. and Tsai, W.H., "Determining the Crack Depth and the Measurement Errors Using Time-of-Flight Diffraction Techniques," *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 2, pp. 190-195 (1999).
 10. ASTM C1383, "Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02 (1998).
 11. 林宜清、陳真芳、蔡聖德，混凝土構件幾何形狀對波速之影響，*興大工程學報*，第五期，pp. 27-39 (1994).

論文收稿：91年 1月 9日

論文修訂：91年 3月 7日

論文接受：91年 3月 13日