

混凝土構件幾何形狀對波速之影響

林宜清* 陳真芳** 蔡聖德***

關鍵詞：混凝土、敲擊回音法、應力波動速度、幾何形狀

摘 要

利用應力波動原理發展出來的非破壞性檢測方法，已廣泛的被使用來評估各種混凝土構件之完整性，而現場試體波速之決定為應用該種檢測技術之首要工作。在無限體中，波的傳動速度決定於材料本身的性質，如彈性模數(E)、柏松比(ν)及密度(ρ)，但對於土木工程常見的混凝土構件皆屬於具有其實用上的幾何形狀，例如平版、圓形柱、方形柱、矩形柱或梁及基樁，由於邊界條件的效應，使得波動所顯現出來的視波速(apparent wave speed)將不同於在無限體中的波速。本研究綜合數值分析及試驗結果歸納出混凝土平版、圓形柱、方形柱、矩形柱、基樁及標準抗壓試體間之波速關係，以作為現場測定混凝土波速之用。

前 言

非破壞試驗技術在材料品質的鑑定上扮演著非常重要角色，此乃因該等技術可普遍且迅速的對材料實施品質檢測，並使受試驗材料之原性質不被破壞。土木營建工程中，混凝土為使用最廣的一種材料，由於混凝土基本上為水泥、砂及骨材拌合水而成之非均質材料，內部存在為數可觀的微小孔隙，因此早期針對金屬類較均質材料所研發出來的非破壞波動檢測技

術如超音波法，並無法順利有效的應用至混凝土材料上，使得混凝土結構於完工時，僅能藉助施工過程中另外灌注的標準抗壓試體之壓壞試驗，當作驗收的依據。由於標準抗壓試體之製作過程及養護條件皆異於現場構件之實際情況，因此如何對完工之混凝土結構直接進行非破壞檢測，以評鑑其工程品質實為當務之急。

敲擊回音法(Impact-Echo Method)即為一種針對混凝土材料利用應力波動原理研發而成之非破壞檢測技術[1-11]，其波動的激發源乃

* 國立中興大學土木工程學系暨研究所 副教授

** 國道高速公路局汐止五股段拓建工程處幫工程師

*** 國立中興大學土木工程學系暨研究所 研究生

由一系列不同尺寸之鋼珠(直徑由4mm至15mm)掉落在試體表面上而成,所產生的應力波將往試體內部傳動,應力波遇到試體的邊界或其內部的孔隙將產生反射波,藉由訊號接收器量測試體表面受應力波到達所產生的位移擾動,再經由快速傅利葉轉換(FFT)的技巧將所量測到之位移波形轉換至頻率領域上作訊號分析。歷經八年多之研究發展,此技術已臻成熟且現場用之儀器已上市,更爲了因應營建工程的多樣性,敲擊回音法的應用觸角除了較簡易的版狀結構內部各種瑕疵之偵測外,已延伸到鋼筋混凝土柱、矩形及T形鋼筋混凝土梁及隧道工程混凝土襯砌之檢測。

爲了能確切的掌握現場混凝土構件之敲擊反應,波動速度的決定實爲首要工作。當應力波在一個無限體(infinite media)內部傳動時,其中縱波(P-wave)的速度可以用下列式子表示之:

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

由上列式子得知縱波的速度(C_p)僅和材料本身的彈性模數(E)、柏松比(ν)及密度(ρ)有關,意即當材料性質給定,則波速即可決定,問題是混凝土之材料性質隨著選用的混合材料(水泥、砂、骨材、水……等)、混合比例(水灰比、最大骨材粒徑……)及其養護條件的不同而有所不同,因此很難用一個常數來代表現場混凝土的波速,對於普通混凝土,一般其縱波波速(C_p)約介於3200~4200m/s之間。雖然抗壓強度較高的混凝土有較高的波速,但因二者間之關係仍受相當多之因素左右,並無法直接從混凝土的抗壓強度推得波速,反之亦然。因此測定波速的最佳方法即直接對現場之混凝土構件進行敲擊試驗,惟因構件幾何形狀的不同將會影響測得之波速,即試驗所得之視波速(apparent wave speed)與式子(1)之 C_p 值

將不會相同,例如沿著細長桿件軸向傳動的縱波波速可由下列式子表示之:

$$C_{p,rod} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

比較式子(1)及(2)得知由於邊界條件的導入可以造成波動速度的改變,因此在評估現場混凝土的波速時,除了材料性質外,必須將構件的幾何形狀對波速的影響納入考慮,才能測得較客觀及可靠的現場混凝土波速。

本文將就土木工程中最常見的構件,例如平版、圓形柱、方形柱、矩形柱及基樁,進行數值分析及試體試驗以探討這些構件的幾何形狀對波速之影響,並同時考慮如何利用長度對直徑比爲2:1之標準抗壓試體所測得之波速,來推求其對應之現場混凝土的波速。因此本研究在同一種的混凝土配比下並在同一次的拌合中,即同時製作了一塊平版、二根不同長度的圓形柱、一根方形柱、一根矩形柱及二個標準抗壓試體,以期在相同的材料性質下,來測定構件幾何形狀對視波速之影響。

本文綜合數值分析及試驗結果歸納出混凝土平版、圓形柱、方形柱、矩形柱、基樁及標準抗壓試體間之波速關係,以作爲現場敲擊回音試驗測定混凝土波速之用。

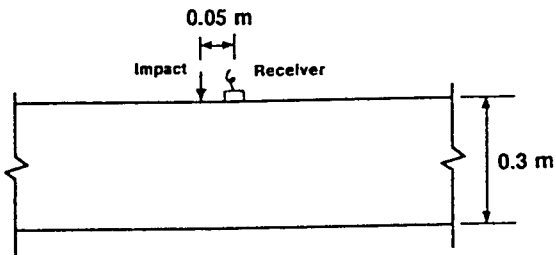
混凝土平版之視波速

本節將利用數值分析首先對混凝土平版遭受敲擊後之反應進行研究,並探討應力波在版頂面及底面間來回反射所造成的共振反應,藉由頻譜(spectrum)分析而得此一共振頻率,進而推求得到之視波速與式子(1)在無限體內之波速作一比較,以了解由於平版之上、下頂面之邊界對波速的影響。

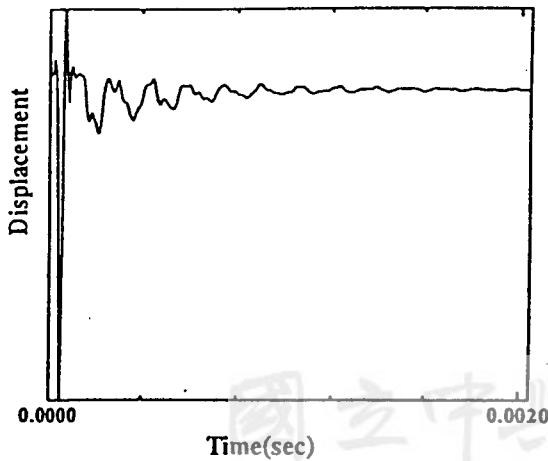
圖一(a)爲混凝土平版之數值敲擊反應分析的斷面圖,敲擊作用位置在於版頂面處,敲

擊的力和時間之關係以一個半週期的正弦函數來模擬，分析中將混凝土視成均質的線彈性體，此乃因應力波動所引起混凝土的應變值非常小，且由於波長遠大於骨材與水泥石間之膠結尺寸，波動現象並不受這些膠結介面所影響。所採用的混凝土材料性質如下：密度為 2300kg/m^3 ，彈性模數為 33100MPa 及柏松比為 0.2 ，則由式子(1)可計算求得縱波(p-wave)在無限體內的波速 C_p 為 4000m/s 。

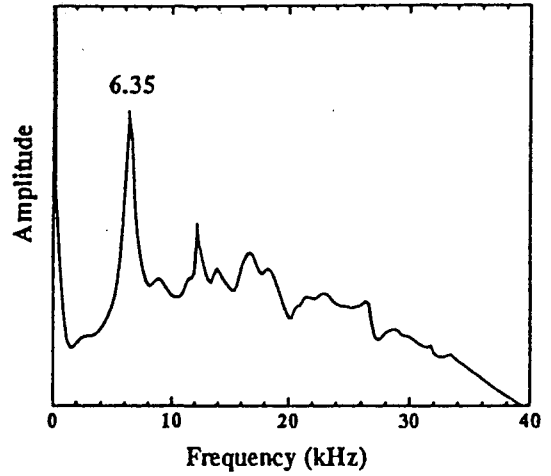
圖一、混凝土平版之數值敲擊反應分析：



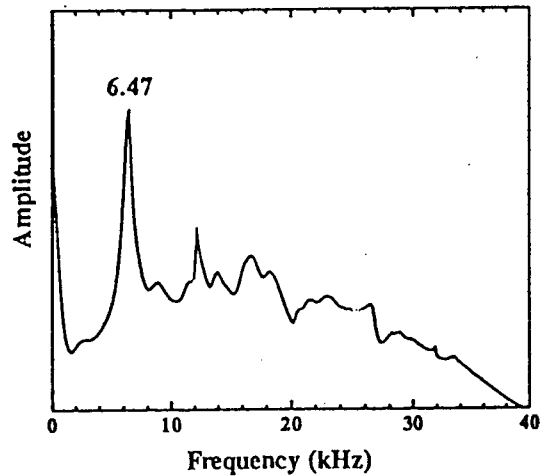
(a)斷面圖



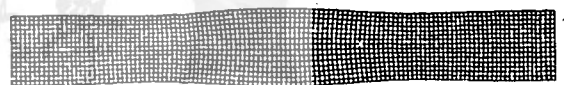
(b)位移反應圖



(c)解析度為 0.244KHZ 之頻譜



(d)解析度為 0.122KHZ 之頻譜



(e)應力波來回於版頂面及底面間之振動模態

圖一(b)為敲擊作用下距離敲擊點約0.05m處分析所得之表面垂直位移反應，該位移波形由時間間距為4 μs記錄1024筆所組成，因此總記錄時間為0.004096秒。在位移波形圖中，一開始即有一非常大之向下位移發生，此乃由於表面波到達所致，後續所產生的位移反應主要是因縱波在版頂面及底面間來回反射到達觀測點所引起，也由於縱波如此重覆反射於版頂面及底面間而產生一個共振情況，若將圖一(b)之位移波形經由FFT轉換至頻率領域上時，則可輕易的決定出此一共振情況的對應頻率。

圖一(c)即為圖一(b)之位移波形所轉換而成之頻譜，其解析度(頻率間距)為位移波形總記錄時間0.004096秒之倒數，即為0.244KHz。由圖一(c)之頻譜中，可以觀察到一個非常高振幅的尖峰位於6.35KHz處，此即為縱波在版頂面及底面間來回重覆反射所產生的共振頻率(f)。由於縱波來回一趟所需時間(週期)為頻率的倒數及來回一趟所行經的路徑為版厚度的兩倍，可以推算出縱波在平版(厚度為D)之視波速(C_{p,plate})為

$$C_{p,plate} = 2Df \quad (3)$$

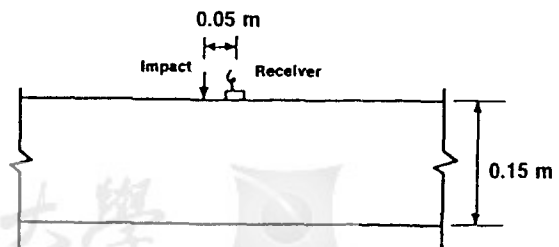
由本數值分析之版厚為0.3m及圖一(c)頻譜所得共振頻率為6.35KHz，代入式子(3)可計算得到平版之視波速為3804m/s，比在無限體內的縱波速度(C_p)4000m/s還小。為了減少因頻譜解析度誤差所導致平版視波速之計算誤差，特將位移波形之總記錄時間由0.004096秒延長至0.008192秒，因此所得頻譜之解析度則提高一倍，由原先之0.244KHz變成0.122KHz，其結果繪於圖一(d)，此時頻譜上所顯示的共振頻率為6.47KHz，其所對應之視波速則為3882m/s，略大於前例算得之3804m/s。理論上，可以繼續增加頻譜之解析度以求得較精確之視波速，但如此將使數值分析所需時間亦相對增

加，因此本研究即利用軸對稱元素分割一個厚度為0.3m直徑為2.4m之圓形平版，採用相同之材料性質，進行勁度矩陣及諧和質量矩陣之組合，並求其特徵向量(自然振動模態)及特徵值(自然振動頻率)，而得如圖一(e)所示應力波來回於版頂面及底面間之振動模態，其所對應之自然振動頻率為6.405 KHz，其值介於圖一(c)及圖一(d)頻譜所得共振頻率6.35及6.47KHz之間，再依式子(3)可以求得C_{p,plate}=2 × 0.3 × 6405=3843 m/s約為在無限體內縱波速度(C_p=4000m/s)之0.96倍，或

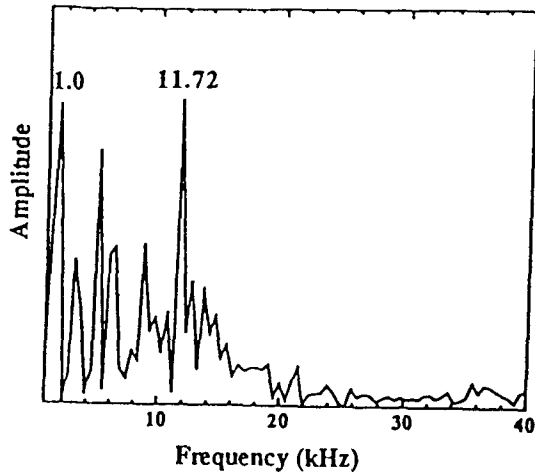
$$C_{p,plate} = 0.96C_p \quad (4)$$

圖二(a)為本研究所製作的一塊平版之敲擊試驗之示意圖，版厚為0.156m，長寬皆為0.6m。同數值分析，在版頂面利用鋼珠之掉落給予一個敲擊源，並在距離敲擊源約0.05m處放置一個位移接收器，以接收因敲擊所引起平版之反應，圖二(b)即為試驗所得之頻譜，其解析度為0.488KHz，若和圖一(c)及(d)之頻譜比較，試驗所得之頻譜存在有較多之高振幅尖峰，這是由於數值分析時所考慮的為無限延伸之平版(在版四周配置有無反射邊界)，而試驗用之平版為有限長度，因此四周邊界之效應將存在於頻譜中。

圖二、混凝土平版之敲擊試驗：



(a)試驗示意圖



(b) 頻譜

圖二(b)頻譜中有一個最高振幅之尖峰位於 11.72 KHz 處，為應力波來回於版厚間之重覆反射所致，在此尖峰之前亦存在平版受敲擊後，所產生的自然撓曲振動而激發出來的幾個高振幅尖峰，而第一個高振幅尖峰位於約 1.0 KHz 處則屬接收器本身之共振頻率。本文僅針對波來回於版頂面及底面間引起之反應即位於 11.72 KHz 處之高振幅尖峰加以討論，由式子(3)且從已知的版厚 0.156m 及共振頻率 11.72 KHz 可以算出 $C_{p,plate} = 2 \times 0.156 \times 11720 = 3660 \text{ m/s}$ ，再依照前面求得平版之視波速 $C_{p,plate}$ 為無限體內波速 C_p 的 0.96 倍，則可以估算出來試體混凝土之 C_p 值為 $3660/0.96 = 3810 \text{ m/s}$ ，由於所採用的頻譜之解析度為 0.448 KHz，可能引起 C_p 值誤差約為 2.17%，即 ± 80m/s，根據現場偵測瑕疵位置深度之應用而言，已可得到非常精確之結果。

圓形柱、方形柱及矩形柱之視波速

平版之邊界主要由版頂面及底面所構成，應力波之反射皆由此二邊界所造成。相對於平版，圓形柱、方形柱及矩形柱的四周邊界皆相互靠的很近，因此應力波之反射皆可能發生在

四周的邊界上，其敲擊反應則變得比平版還要複雜，在參考文獻[3,4]中已有詳細的探討。本文僅節錄其中之結果，簡述如后：圓形柱、方形柱及矩形柱之側向敲擊反應皆由其前幾個斷面振動模態(cross-sectional modes)所組成，各個斷面模態之頻率值與斷面尺寸及波速有關。

圓形柱之前六個斷面模態之頻率分別為

$$f_D = \frac{0.92C_p}{2D}, 1.5f_D, 2.0f_D, 2.4f_D, 2.9f_D, \text{ 及 } 3.3f_D。$$

其中 D 為圓形柱之直徑， C_p 為無限體內之波速及 f_D 為基本模態(第一模態)之頻率。因此圓形柱之視波速為 $0.92C_p$ ，或

$$C_{p,circular} = 0.92C_p \quad (5)$$

方形柱之前六個斷面模態之頻率分別為

$$f_D = \frac{0.87C_p}{2D}, 1.4f_D, 1.9f_D, 2.4f_D, 2.8f_D, \text{ 及 } 3.4f_D。$$

其中 D 為方形柱之邊長，因此方形柱之視波速為 $0.87C_p$ ，或

$$C_{p,square} = 0.87C_p \quad (6)$$

矩形柱之斷面模態頻率則隨斷面深度(D)及寬度(B)之比值的變化而有所不同，表一列出深寬比(D/B)由 0.6 至 2.0 之矩形柱在側向敲擊作用下，可能激發出來的前六個斷面模態之頻率值，表中將基本模態之頻率表示成 $f_D = \beta C_p/2D$ ，其中 β 值將因 D/B 值的不同而隨之改變，表中所列在 D/B 介於 0.80 及 0.87 之間時，存在有一個 β' 值，其為對應於斷面另一方向之基本模態頻率值[4]，在敲擊反應中亦會同時被激發出來。因此矩形柱之視波速可表示成

$$C_{p, \text{rectangular}} = \beta C_p \quad (7)$$

其中 β 決定於矩形斷面之深度(D)與寬度(B)之比值，這裡所定義的深度乃為沿著敲擊方向之斷面尺寸，而寬度則為垂直敲擊方向之斷面尺寸(即敲擊面之尺寸)。

理論上，若為同一種材料所形成之圓形、方形及矩形柱，雖然因幾何條件的不同，將會產生不同之視波速，但其對應之 C_p 值應該相同。為了驗證此一觀點，在試體準備中除了前一節之平版外，亦同時灌注有一根直徑為0.156m 及長度為0.58m之圓形柱，一根斷面尺寸為0.15m 及長度為0.6m之方形柱，及一根尺寸為0.15m × 0.18m × 0.6m之矩形柱，分別對其進行敲擊試驗，並由試驗所得之頻譜推求各根柱子之視波速，進而反推 C_p 值，作一比較。

圖三(a)及(b)分別為混凝土圓形柱之試驗示意圖及試驗所得之頻譜，在頻譜的較低頻部份存在有一些高振幅尖峰，此乃因接收器的共振及柱子本身撓曲振動所產生的，因為波在斷面中重覆反射所激發出來的前三個斷面振動模態分別顯現在11.23、17.09及22.46KHz之高振幅尖峰上，若依前列之式子， f_D 、 $1.5f_D$ 及 $2.0f_D$ 推算應得之頻率值為11.23、16.85及22.46 KHz，得相當一致的結果，其中第二斷面模

表一、矩形柱之前六個斷面模態之頻率值

Aspect Ratio (D/B)	Fundamental mode, $f_D = \frac{\beta C_p}{2D}$	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6
0.60	$\beta = 0.84$	$1.07f_D$	$1.43f_D^*$	$1.48f_D$	$1.86f_D$	$1.91f_D$
0.75	$\beta = 0.87$	$1.19f_D$	$1.60f_D^*$	$1.66f_D$	$1.98f_D$	$2.02f_D$
0.80 [†]	$\beta = 0.75$ $\beta' = 0.88$	$1.45f_D$	$1.96f_D^{\ddagger}$	$2.01f_D$	$2.41f_D$	$2.46f_D$
0.83 [†]	$\beta = 0.77$ $\beta' = 0.89$	$1.44f_D$	$1.94f_D^*$	$1.98f_D$	$2.38f_D$	$2.44f_D$
0.87 [†]	$\beta = 0.80$ $\beta' = 0.91$	$1.43f_D^{\ddagger}$	$1.93f_D^{\ddagger}$	$1.95f_D$	$2.36f_D$	$2.41f_D$
0.91	$\beta = 0.82$	$1.42f_D$	$1.92f_D$	$1.92f_D$	$2.34f_D$	$2.47f_D$
1.00	$\beta = 0.87$	$1.41f_D$	$1.90f_D$	$2.45f_D$	$2.83f_D$	$3.34f_D$
1.10	$\beta = 0.90$	$1.43f_D$	$1.92f_D$	$2.34f_D$	$2.52f_D$	$2.69f_D$
1.20	$\beta = 0.92$	$1.45f_D$	$1.94f_D$	$2.38f_D$	$2.58f_D$	$2.73f_D$
1.33	$\beta = 0.94$	$1.49f_D$	$1.98f_D$	$2.02f_D$	$2.45f_D$	$2.62f_D$
1.67	$\beta = 0.95$	$1.66f_D$	$2.11f_D$	$2.32f_D$	$2.74f_D$	$2.74f_D$
2.00	$\beta = 0.96$	$1.81f_D$	$2.06f_D$	$2.23f_D$	$2.56f_D$	$2.92f_D$

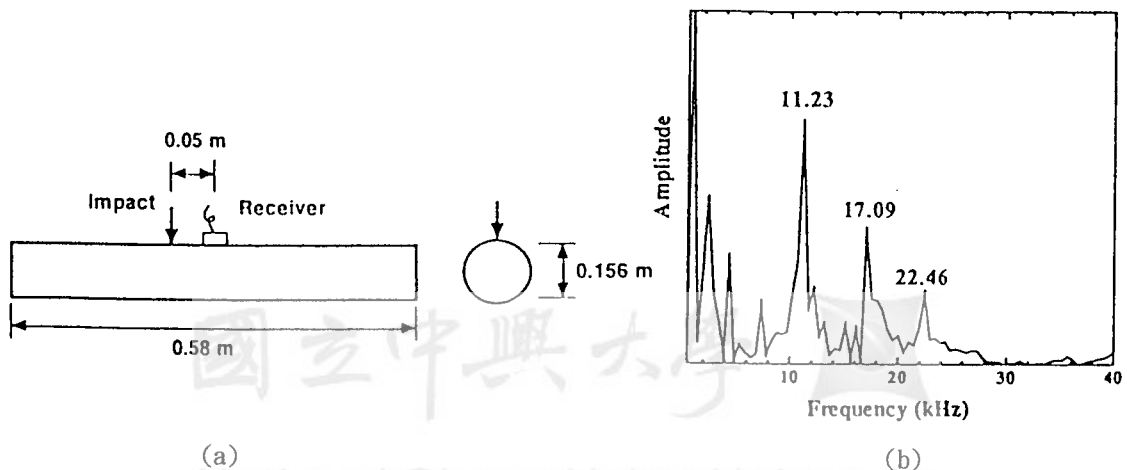
*Dominant (high-amplitude) modes in transient impact response, D/B ≤ 0.87.

†Two fundamental modes.

‡This type of response is characteristic of the response obtained from a bar when using short-duration impacts.

態之頻率值有0.24KHz之誤差仍小於頻譜本身之解析度0.488KHz。由基本模態之頻率值11.23KHz可計算出此一混凝土圓形柱之視波速為 $2 \times 0.156 \times 11230 = 3504\text{m/s}$ ，再由式子(5)可求得其 C_p 值為 $3504 / 0.92 = 3810\text{m/s}$ ，與前一節平版之試驗結果求得之3810m/s完全一樣。

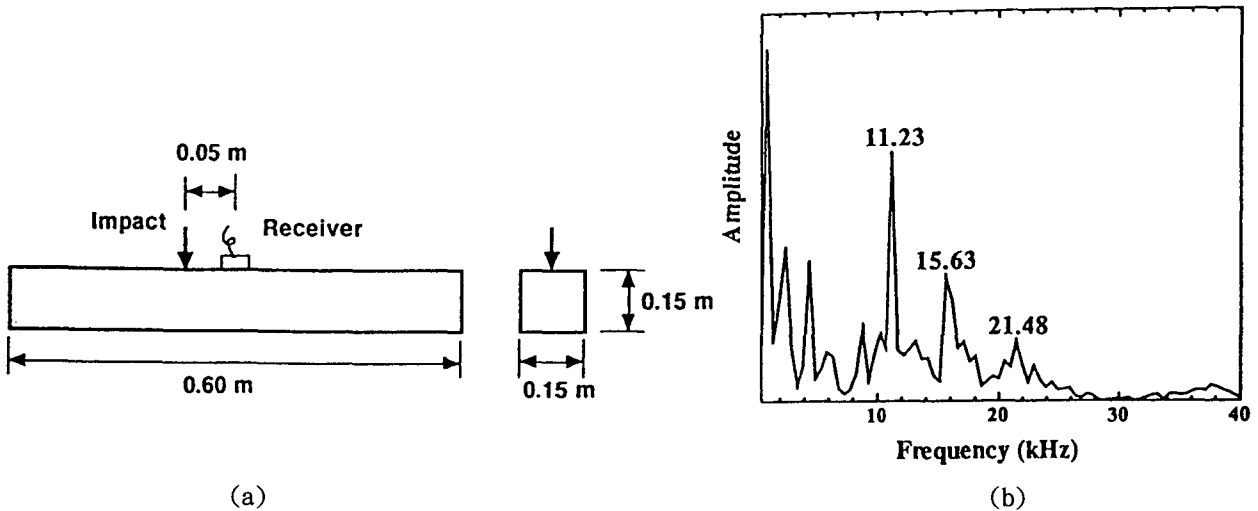
圖三、混凝土圓形柱之敲擊試驗：(a)試驗示意圖；及(b)頻譜。



圖四(a)及(b)分別為混凝土方形柱之試驗示意圖及所得之頻譜，前三個斷面模態之頻率依序為11.23、15.63及21.48 KHz，若依 f_D 、 $1.4f_D$ 及 $1.9f_D$ 來推算應為11.23、15.72及21.33 KHz，相當符合。由基本斷面模態之頻率值($f_D=11.23\text{KHz}$)及斷面之深度($D=0.15\text{m}$)可求

得此混凝土方形柱之視波速為 $2 \times 0.15 \times 11230=3370\text{ m/s}$ ，再由式子(6)計算 C_p 值應為 $3370/0.87=3870\text{m/s}$ 和前面求得之 C_p 值 3810m/s 相比較，約有1.55%之誤差此及因頻譜解析度所導致之誤差。

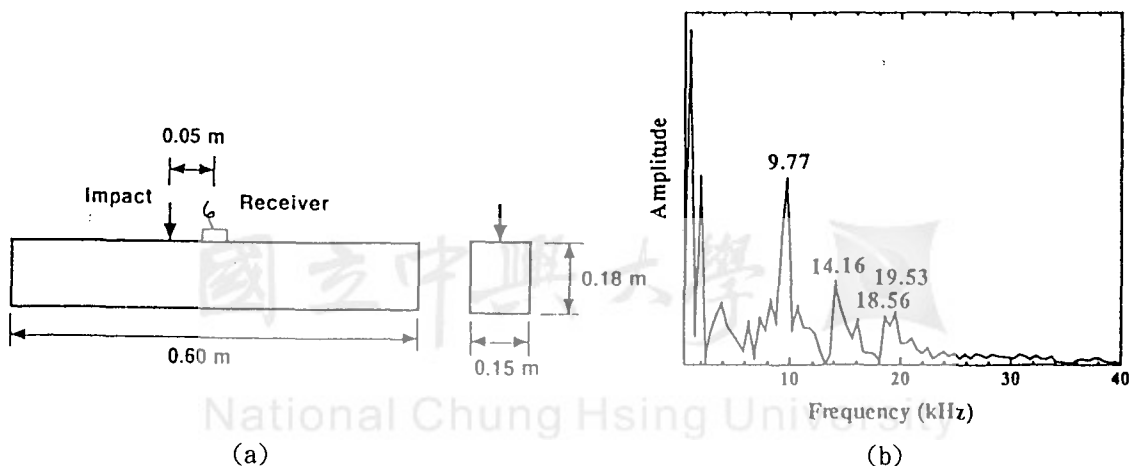
圖四、混凝土方形柱之敲擊試驗：(a)試驗示意圖；(b)頻譜。



圖五(a)為混凝土矩形柱之試驗示意圖，敲擊點作用在邊長為0.15m的表面上，此時之深度(D)為0.18m及寬度(B)為0.15m，因此其 D/B 值則為1.20，由表一可以查得前三個斷面模態對應之頻率依序為 f_D 、 $1.45f_D$ 及 $1.94f_D$ 。圖五(b)為敲擊試驗所得之頻譜，前三個斷面

模態之頻率值分別為9.77、14.16及介於18.56和19.53KHz間，此時之 $f_D = \beta C_p / 2D = 9.77\text{KHz}$ ，其中 $\beta=0.92$ ，則可計算得到 $C_p=2 \times 0.18 \times 9770/0.92=3830\text{m/s}$ ，亦和前面結果相符合。

圖五、混凝土矩形柱($D/B = 1.20$)之敲擊試驗：(a)試驗示意圖；及(b)頻譜。



混凝土基樁之視波速

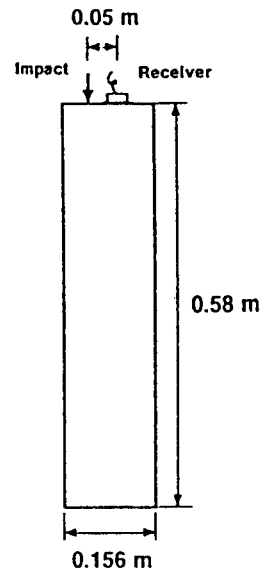
混凝土基樁屬於非常細長之構件，且應力波動在基樁非破壞檢測上之應用，皆利用軸向敲擊以導入縱波於樁身內，一般而言，若應力波之波長遠大於基樁之斷面尺寸時，縱波之波動速度可依照式子(2)求得，和式子(1)在無限體內縱波速度比較，二者間只差一個柏松比(ν)，意即若令 $\nu=0$ 代入式子(1)則可得式子(2)，因此在基樁內之視波速和在無限體內之波速的比值大小決定於柏松比，若假設混凝土之柏松比為0.2則

$$C_{p,rod} = 0.95C_p \quad (8)$$

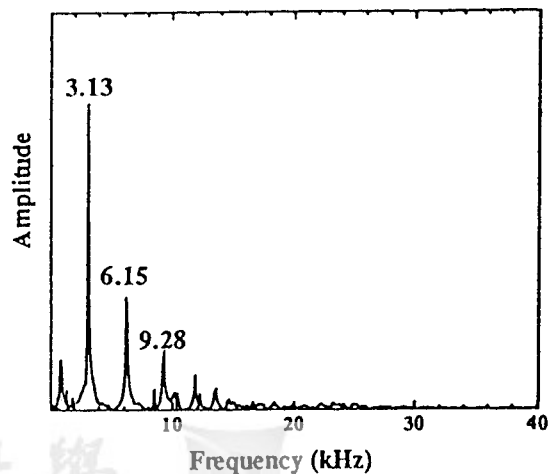
圖六(a)為一根長度(L=0.58m)與直徑(D=0.156m)比約為3.72之圓形混凝土桿件，在軸線方向進行敲擊試驗之示意圖，由於測試物體之頂面及底面距離較長，因此為了得到較佳之頻譜反應，須將前面採用的反應總記錄時間由0.002048秒延長至0.01024秒，所得頻譜之解析度約為0.098KHz。圖六(b)即為試驗所得之頻譜，應力波來回於桿件頂面及底面之頻率為3.13KHz，因此視波速為 $2 \times 0.58 \times 3130 = 3630\text{m/s}$ ，再由式子(8)求得混凝土之 C_p 值為 $3630/0.95 = 3820\text{m/s}$ ，此一結果亦和前面由平版、圓形桿件、方形桿件及矩形桿件各別試驗求得之 C_p 值相一致。

圖七(a)則將前一例子之長度增加至1.156m，而直徑維持一樣仍為0.156m，而得L/D=7.41之細長桿件之軸向敲擊試驗，所得頻譜如圖七(b)所示，由頻譜得知縱波來回於桿件頂面及底面間之頻率為1.56KHz，因此本試體之縱波視波速為 $2 \times 1.156 \times 1560 = 3610\text{m/s}$ 同時利用式子(8)則可求 C_p 值為3800 m/s，和前面L/D=3.72之桿件的 C_p 值二者間僅有0.52%之誤差。

圖六、混凝土基樁(L/D = 0.58m/0.165m)之敲擊試驗：

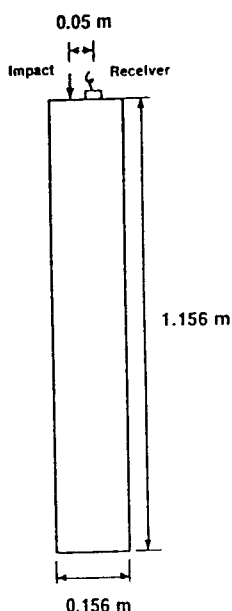


(a)試驗示意圖

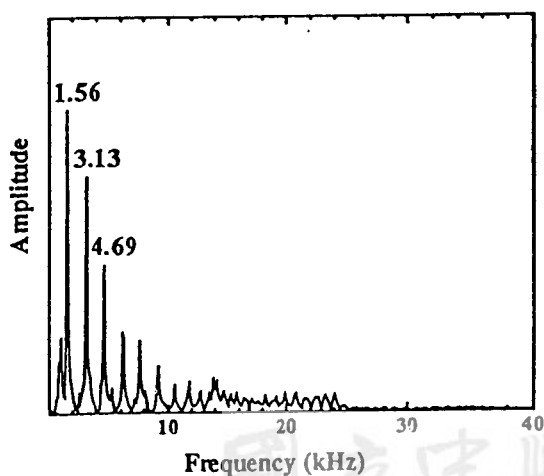


(b)頻譜

圖七、混凝土基樁(L/D = 1.156m/0.156m)之敲擊試驗：



(a)試驗示意圖



(b)頻譜

混凝土標準抗壓試體之視波速

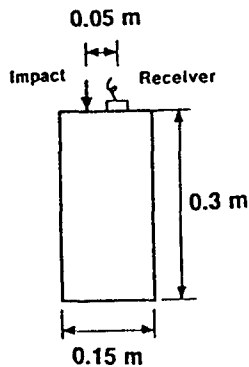
由於混凝土之標準抗壓試體(L/D=2.0)普遍使用於混凝土工程中當作強度判別的依據，因此一般於施工中皆會要求必須製作標準抗壓試體，本研究即想利用這些標準抗壓試體之敲擊試驗來推求現場混凝土可能之 C_p 值。雖然標準抗壓試體仍屬於圓柱體，但因其長度對直徑之比僅有2.0，並無法直接利用式子(8)之關係式來描述視波速與 C_p 值間之關係。

圖八(a)為標抗壓試體之試驗示意圖，而圖八(b)則為試驗所得到之頻譜，二個標準抗壓試體測得之頻譜皆相同，由頻譜中可以發現縱波來回於距離0.3m之試體頂面及底面間的頻率為5.96KHz，由此可以計算得到視波速為 $2 \times 0.3 \times 5960 = 3580\text{m/s}$ ，由於頻譜之解析度為0.098KHz，所得結果之誤差在0.82%之內，很明顯的標準抗壓試體之視波速略小於細長桿件之視波速，惟其與 C_p 值之間尚未有一明確的關係存在。本研究同樣的利用前述平版之數值分析模式，將直徑尺寸由原先2.4m改為0.15m，高度維持一樣即0.3m，而得標準抗壓試體之分析模式，進行特徵值分析，可求得應力波來回於試體頂面及底面之振動模態如圖八(c)所示，及其對應之頻率為6.28KHz，藉此推算而得之視波速為3770m/s，若與數值分析之 $C_p = 4000\text{m/s}$ 比較，可得標準抗壓試體之視波速為 C_p 之0.94倍。因此前面試驗得到標準抗壓試體之視波速3580m/s，可以轉換成混凝土之 C_p 值為3810m/s。

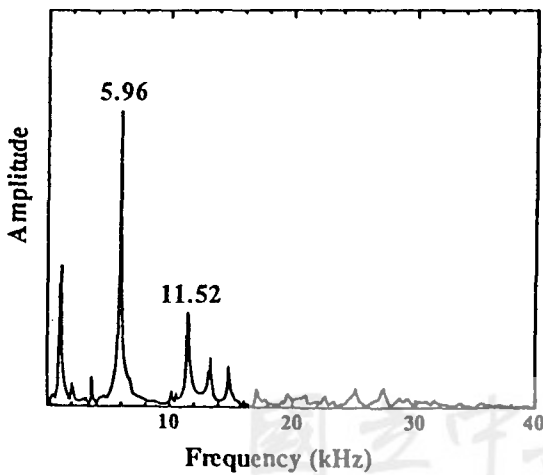
綜合本研究所有的試驗果，得知若未將構件幾何形狀對波速影響之因素考慮在混凝土波速之推求中，只比較各構件之視波速，可以發現彼此之間有很大之差異存在，但經過幾何形狀因子之修正後，由各構件之試驗結果推算出之混凝土 C_p 值介於3800與3870m/s之間，彼此間之最大誤差僅有1.84%。由於混凝土澆灌在不同的試體模子之內，其所能達到的夯實度必

有所差異，更因混凝土之非均質特性，要精確的測得現場混凝土波速實屬不易，但若能在合理的頻譜解析度要求下(例如2%的誤差)，將幾何形狀對波速的影響考慮在測試中，將可提供一個可靠評估現場混凝土波速之實用方法，並進而達到後續非破壞檢測現場混凝土品質之目的。

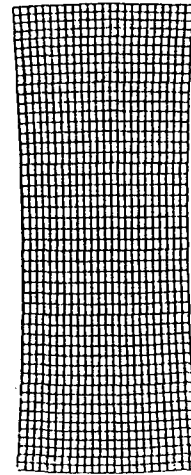
圖八、混凝土標準抗壓試體(L/D = 0.3m/0.15m)之敲擊試驗：



(a)試驗示意圖



(b)頻譜



(c)數值分析所得之模態

結 論

本文針對土木工程常見的一些凝土構件進行數值分析與實驗室試驗，以了解構件之幾何形狀對應力波動速度之影響，研究結果顯示，若直接從敲擊試驗所得之頻譜推求得到之視波速(apparent wave speed)來評估現場混凝土之品質，將產生相當大之誤差，但若針對各種構件之幾何條件對波速的影響因子導入，以求得在無限體內之波動速度(C_p)，則可以得到相當精確之結果。

綜合本文之研究結果，可得下列各種構件之視波速與 C_p 值間之關係式：

平 版： $C_{p,plate} = 0.96C_p$

圓形柱： $C_{p,circular} = 0.92C_p$

方形柱： $C_{p,square} = 0.87C_p$

矩形柱： $C_{p,rectangular} = \beta C_p$ ； β 值決定於D/B值，可由表一查得。

基 樁： $C_{p,rod} = 0.95C_p$

標準抗壓試體： $C_{p,cylinder} = 0.94C_p$

誌 謝

本研究在國科會研究編號NSC83-0115-C005-01-029E資助下完成。

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, 1986, V. 12, pp. 1 17-146.
2. Carino, N. J., and Sansalone, M., "Detection of Voids in Grouted Ducts Using the Impact-Echo Method, "ACI Materials Journal, V. 89, No. 3, May-June 1992, pp. 296-303.
3. Lin, Y., Sansalone, M., and Carino, N.J., "Finite Element Studies of the Impact-echo Response of Plates Containing Thin Layers and Voids". Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 9, No. 1, Jan. 1990, pp. 27-47.
4. Lin, Y., Sansalone, M., and Carino, N.J., "Impact-echo Response of Concrete Shafts" ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 14, No. 2, June, 1991, pp. 121 -137.
5. Lin, Y., and Sansalone, M., "Transient Response of Thick Circular and Square Bars Subjected to Transverse Elastic Impact". Journal of Acoustical Society of America, Vol. 91, No. 2, Feb. 1992, pp. 885 -893.
6. Lin, Y., and Sansalone, M., "Transient Response of Thick Rectangular Bars Subjected to Transverse Elastic Impact". Journal of Acoustical Society of America, Vol. 91, No. 5, May 1992, pp. 2674-2685.
7. Lin, Y., and Sansalone, M., "Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns Using the Impact-Echo Method". ACI Materials Journal, July-August 1992, pp. 394-405.
8. Sansalone, M., and Carino, N. J., "Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves, "Report No. NBSIR 86-3452, National Bureau of Standards, Washington, D.C./PB8 7-104444/AS, National Technical Information Service, Springfield, Va., Sept. 19 86, 222 pp.
9. Sansalone, M., and Carino, N. J., "Laboratory and Field Studies of the Impact-Echo Method for Flaw Detection in Concrete, Nondestructive Testing of Concrete, SP-1 12, American Concrete Institute, Detroit, 1988, pp. 1-20.
10. Sansalone, M., and Carino, N. J., "Impact-Echo Method: Detecting Honeycombing, the Depth of Surface-Opening Cracks, and Ungrouted Ducts Using the Impact-Echo Method, "Concrete International: Design & Construction, V. 10, No. 4, Apr. 19 88, pp. 38-46.
11. Sansalone, M., and Carino, N. J., "Detecting Delaminations in Concrete Slabs with and without Overlays Using the Impact-Echo Method, "ACI Materials Journal, V. 86, No. 2, Mar.-Apr. 1989, pp. 175-184.

EFFECTS OF CONCRETE ELEMENT'S GEOMETRY ON P-WAVE SPEED

Yiching Lin* **Chen-Fung Chen**** **Shing-De Tsai*****

** Associate Professor, Department of Civile Engineering, National
Chung-Hsing Universit*

*** Graduate Student, Department of Civile Engineering, National
Chung-Hsing University*

**** Undergraduate Student, Department of Civile Engineering,
National Chung-Hsing University*

Keywords : Concrete, Impact-Echo, Wave Speed, Geometry

ABSTRACT

Because of great progress in technical development and successful applications, the use of nondestructive testing methods based on stress wave propagation to evaluate the integrity of concrete structures is becoming popular. The determination of wave speed in concrete is the first and the most important task as these techniques are applied to field tests. In infinite media, the wave speed depends only on material properties such as elastic modules (E), Poisson's ratio (ν), and density (ρ). Concrete elements commonly used in structures have their own practical shapes such as plates, circular columns, square columns, rectangular columns or beams, and piles. The apparent wave speed, based on spectrum analysis, in these elements will be different from that in an infinite medium due to the effect of boundaries. The objective of this paper is aimed at determining the influence of boundaries on the P-wave speed. Numerical and experimental studies have been carried out to understand how the geometry of elements affects the apparent P-wave speed. This paper summarizes the results obtained from these studies and establishes the relationship between the wave

speed in infinite media and the apparent wave speed in plates, circular, square, and rectangular columns, piles, and standard cylinders.

國立中興大學



National Chung Hsing Un

論文收稿日期：82年11月30日
論文修訂日期：83年6月5日
論文接受日期：83年7月6日