

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

利用衝擊振動法檢測沈箱式防波堤安全性的研究

## Application of Impact Vibration Testing to Examining Cracks of Caissons

計畫編號: NSC87-2611-E-009-003

執行期間: 86年8月1日至87年7月31日

主持人: 郭一羽

國立交通大學

### 一、中文摘要

沈箱式防波堤受到破壞其因素錯綜複雜，難以由直接的檢測判斷沈箱的損壞與否。本文利用簡單、方便的「衝擊振動試驗法」，在蘇澳港北堤五座沉箱測量垂直、水平的速度及加速度之數據，由頻譜的特徵頻率來判斷沈箱安全性。沈箱結構物的特徵頻率，不隨接收點的改變而產生變化。結構物損壞時，裂縫會形成自由面，造成特徵頻率降低。龜裂沈箱結構物的特徵頻率有下降的趨勢，特徵頻率隨著沈箱損壞的程度而下降，破損越嚴重特徵頻率下降越多。頻譜形狀可作為輔助判斷沈箱損壞與否的依據，值得以後進一步的研究。

關鍵詞: 衝擊振動試驗法，沉箱龜裂，特徵頻率。

### Abstract

The collapse of caissons often comes after initial small cracks in them become larger and worse for a period of time. It is a problem to know whether caisson cracks or not. In the paper we proposed a available nondestructive testing method, Impact Vibration Testing, to examine cracks of caissons. The field data of both velocity and acceleration in vertical and horizontal directions were collected in corresponding different locations of five caissons in Su-ao harbor. Two caissons have small crack, one has rather large crack and two are good.

The performance of spectrum showed

that peak frequencies of spectrum vary slightly in different locations of each caisson. For the same condition of cracks in different caissons, the mean peak frequencies are almost the same. However, for different conditions of cracks of different caissons, the mean peak frequencies are distinguished. The peak frequency of spectrum decrease as the caisson has the larger cracks.

**Key words:** Impact Vibration Testing, Caisson Crack, Peak Frequency.

### 二、計劃緣由與目的

近來本省港灣及海岸遭颱風過境侵襲而受損，如八十三年提姆、道格，八十五年賀伯等颱風過境，造成花蓮港消波胸牆、蘇澳港防波堤、宜蘭烏石漁港防波堤、龍洞南口遊艇港防波堤、海洋大學海堤等嚴重災害。因為早期沒有一套能夠有效監測沈箱的方法。通常當沈箱的損壞大到能被肉眼所見的程度時，往往已是非常嚴重，倘若能在嚴重破壞之前能偵知損壞，便可即時維修避免災害發生，節省災後修復的工程費用，維護人民生命財產安全，並避免因運輸線破壞造成社會成本損失。

因此港灣之防波堤及碼頭等應於颱風侵襲後或是定期的實施安全檢測和評估，應用電腦之整合，即可迅速進行沈箱破壞的診斷與監測，以防止結構破壞的擴大，不需如傳統的方法派遣潛水夫至水面下進行勘驗，此將為快速與經濟之方法，如何利用適當的方法在不破壞結構物本體的情況下，予以檢測是相當重要的課題。

應用非破壞性檢測法於混凝土結構物的完整性已經有相當多的研究成果，舉凡強度的檢測、鋼筋腐蝕的檢測及裂縫的檢測。如郭(1996)、張(1993)、黃(1995)等人。由於非破壞檢測技術的進步，使得我們對於結構物破壞程度的評估能有更進一步的認知與可靠度，然而各種檢測方法卻有不同之處，如何藉由經濟、簡易及迅速的方式，來檢測得知沈箱的破壞程度，是刻不容緩的工作，因此有必要積極的發展一些有效方便的檢測方法，以達到定期安全評估或建立預警系統的目的。

本文以特徵頻率來判斷沈箱裂縫，而「衝擊振動試驗」的方法可以很方便的計算出這個數值。沈箱式防波堤結構的損壞可能是由於混凝土的老化破裂、鋼筋的腐蝕、基礎的沈陷、淘空、沈箱內的砂石流失等種種原因，故防波堤受到破壞其因素錯綜複雜，難以由直接的檢測來發現。「衝擊振動試驗法」是一種簡單、方便的方法，由其試驗結果的特徵頻率來判斷沈箱安全檢測，甚具應用價值。

### 三、研究內容與成果

#### 3.1 結構振動之基本理論

結構物的自然振動頻率可藉由運動方程式來推得。一單自由度系統，其運動方程式為

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (1)$$

其中  $m$ 、 $c$ 、 $k$  分別為系統之質量、阻尼、勁度，而  $x(t)$  及  $f(t)$  各為位移及外力。若外力  $f(t)$  為一頻率為  $\omega$  之簡諧力，則響應  $x(t)$  亦為一頻率為  $\omega$  之週期性位移。若結構物為無阻尼自由振動時，其特徵值為

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

其中  $\omega_n$  稱為系統之自然頻率。若含阻尼之自由振動，其阻尼振動頻率 (damped vibration frequency) 為

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3)$$

式(3)中， $\zeta$  為阻尼比(damping ratio)，

其定義為

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_c} \quad (4)$$

式(4) 臨界阻尼係數  $c_c$  (critical damping coefficient) 定義為

$$c_c = 2m\omega_n = 2\sqrt{km} = \frac{2k}{\omega_n} \quad (5)$$

對一般結構系統的阻尼而言，阻尼比大致上都是小於 20%，因此阻尼振動頻率與無阻尼頻率相差有限。

#### 3.2 結果與分析

本實驗資料取樣頻率為 100Hz，歷時 1 分鐘，每筆總點數 6000 點，第一次是針對兩座沈箱作實驗，這兩座沈箱分別為一座完整與一座破洞的沈箱，每座沈箱取加速度水平向及垂直向的信號各 15 筆、速度水平向及垂直向各 15 筆的信號，第二次是對另外三座沈箱作實驗，其中兩座是裂縫，一座是完整的沈箱，每座沈箱取加速水平向及垂直向的信號各 10 筆。

擷取消波胸牆上各個測點的振動資料，每筆資料作傅立葉轉換計算出頻譜，再依頻譜表找出主頻。在分析時將主頻明顯記錄下來後，以主頻當作是結構物此點的特徵頻率，將水平向及垂直向加速度信號求出的兩種特徵頻率，如圖 1 及圖 2。

由圖 1 及圖 2 即可看出每種配置的五種不同位置其特徵頻率的偏差量相當小，然而不同配置的偏差量就比較明顯一些。配置不同特徵頻率會有不同，但應該不是位置不同的緣故，因為每種配置有五個不同位置的測試，這五種不同位置所作的特徵頻率偏差量甚小，也不是每次振動模式不同所造成的，因為不同氣爆仍然會有相同的特徵頻率。會造成配置不同偏差量較明顯的原因，可能是儀器設定上的問題，雖然有此問題，但大致上都非常接近誤差量不是太大，不至於對以後應用上造成困擾。

由這兩張圖看出沈箱 C 與沈箱 E 不同配置實驗結構物的特徵頻率數值雖然有所偏差，但其特徵頻率值的偏差量不大，圖

3、圖 4 特徵頻率值分別為  $2.1 \pm 0.2$  (Hz)、 $4.1 \pm 0.2$  (Hz)，在完整與破洞的沈箱都有相同的結果，所以由這點可以看出水平向加速度及垂直向加速度求得的特徵頻率都不會受到施測點位置不同的影響，觀察這項的結果後，第二次實驗時為了節省實驗的時間，就僅僅以一種配置如圖 2 方形配置部份作檢測。

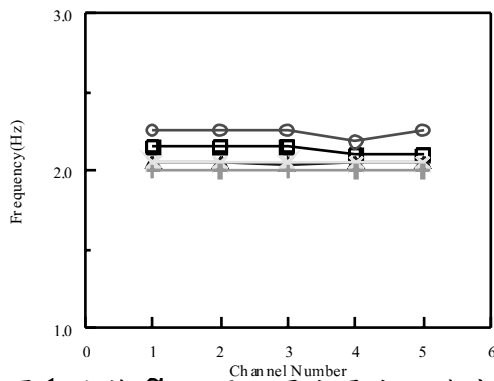


圖 1 沈箱 C 不同配置水平向加速度振動的特徵頻率

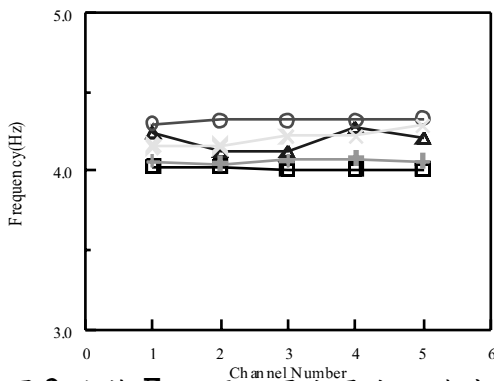


圖 2 沈箱 E 不同配置水平向加速度振動的特徵頻率

所謂破損沈箱是指本實驗所作的破洞及裂縫兩種損壞程度的沈箱，含裂縫沈箱 A、裂縫沈箱 B 及破洞沈箱 C。我們利用蘇澳港現有的兩種明顯不同損壞程度及完整的沈箱進行測試，以便能找出其中特徵頻率的差異。由上述結果可以瞭解沈箱結構物的主頻率並不受施測點的影響，且不受速度及加速度信號振動反應的影響，基於以上這些原因，可以是將所量測到的各組特徵頻率值全部平均以求取每個沈箱的特徵頻率。因此將沈箱衝擊振動試驗所得到的有效特徵頻率值平均，水平向信號求取的特徵頻率如表 1 及垂直向信號求取的特徵頻率值如表 2，就以此為各個沈箱的特徵頻率值。

表 1 水平向信號求出特徵頻率值

沈箱	A	B	C	D	E
特徵頻率(Hz)	3.01	2.91	2.03	4.24	4.26

表 2 垂直向信號求出特徵頻率值

沈箱	A	B	C	D	E
特徵頻率(Hz)	3.14	2.94	2.04	4.49	4.25

由表 1 及表 2 可以看出，裂縫沈箱 A、B 其特徵頻率值介於  $2.91 \sim 3.14 \text{ Hz}$ ，破洞沈箱 C 其特徵頻率值介於  $2.03 \sim 2.04 \text{ Hz}$ ，而完整沈箱 D、E 其特徵頻率值介於  $4.24 \sim 4.49 \text{ Hz}$ 。因此，很明顯的可以知道，當結構物破壞時，特徵頻率有下降的趨勢。而造成此種結果的原因，係由於沈箱產生了裂縫，破壞了原來沈箱的完整性，又因裂縫是一自由面，造成勁度  $k$  值降低，由式(2)得知當結構物的質量不變時，其特徵頻率與勁度的平方根成正比，因此裂縫產生後，結構物的特徵頻率會下降，且初期裂縫會增加磨損面造成阻尼增加，由式(4)得知阻尼比會變大，由式(3)知阻尼比變大，特徵頻率會變小，亦可了解初期裂縫特徵頻率會降低。然而破洞沈箱 C 因為毀損嚴重，已經有氣爆現象，其隔艙內的填充物已流失，初步判斷其沈箱整體的質量有減少，式(2)得知特徵頻率與質量平方根成反比，但實驗結果其特徵頻率比裂縫沈箱 A、B 更小，這可能是勁度下降更多所造成的。這項發現使我們更能確定衝擊振動試驗的可行性，可以用特徵頻率作為檢測沈箱損壞與否的主要依據，進而更容易瞭解損壞的程度。

以  $\phi(f)/m_0$  值為縱座標、頻率(Hz)為橫座標作無因次頻譜圖，五座沈箱水平向加速度信號求出的頻譜經過無因次化所繪的圖形如下，裂縫沈箱 A 如圖 3。

裂縫沈箱 A 的頻譜形狀發現在高頻處有明顯能量，能量恰好出現在兩倍頻，類似雙峰，此有可能在這兩倍頻的地方確實是有能量集中的現象，而另一種原因可能是高調波 (harmonic wave) 造成兩倍頻處能量的出現。

由以上的觀察，大致上可以分為三類做比較：

1. 裂縫的沈箱 A、B，大部份在約兩倍主頻

- 處會出現微小能量中，類似雙峰的情況。
2. 破洞沈箱 C 有主頻之外，在較高頻處有很雜亂的能量出現。
  3. 完整沈箱 D、E 圖形僅在主頻處出現峰值，高頻的地方幾乎不會有任何雜訊，但若能量大時在低頻處出現雜亂的現象。

以上的結論可以發現沈箱的完整與否除了可藉由特徵頻頻率觀察之外，頻譜形狀或許也可以作為沈箱破壞與否的一種判斷工具，但是頻譜圖形所牽涉的因素眾多，因此並不能完全以頻譜形狀來判別沈箱的損壞與否，僅僅只能作為輔助的參考依據。

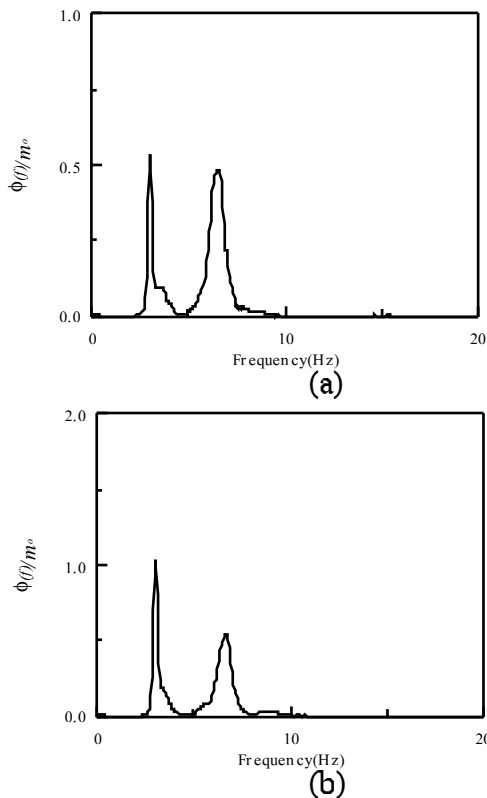


圖 3 沈箱 A 同次實驗不同位置無因次化頻譜形狀圖

#### 四、結論

本文之研究獲得以下之結論：

1. 衝擊振動試驗法以前是運用在陸上的橋樑，經由本次實驗結果證實可以用於港灣結構物的檢測，唯無氣爆衝擊外力的港灣尚需克服此問題。
2. 衝擊振動試驗法初步的成果可以很準確

的以特徵頻率檢測沈箱的損壞與否，這個檢測方法將可提供檢測單位作為港灣檢測的一項參考依據。

3. 沈箱結構物的特徵頻率，不隨接收點位置的改變而產生變化。
4. 相同配置時以速度、加速度所求得特徵頻率偏差量極小。
5. 結構物損壞時，裂縫會形成自由面，無法傳遞能量，造成振動頻率降低，龜裂沈箱結構物的特徵頻率有下降的趨勢，特徵頻率隨著沈箱損壞的程度而下降，破損越嚴重特徵頻率下降越多。
6. 頻譜形狀可作為輔助判斷沈箱損壞與否的依據，破洞沈箱的除了主頻能量集中外，在高頻處也會有能量集中的現象。
7. 激振點並非固定方向，且氣爆亦無法得其外力大小，但特徵頻率不會隨著有所改變。

#### 五、計劃成果自評

本研究為交通大學土木研究所施程懿同學的碩士論文，且投稿於第 20 屆海洋工程研討會論文。此研究並於蘇澳港防波堤實際從事現場量測，具有實務應用之研究。

#### 六、參考文獻

1. 郭宏模，「預力混凝土橋現地試驗與動力監測系統」，碩士論文，台灣大學土木工程研究所，第 9-43 頁（1996）。
2. 張世傑，「模態分析法在混凝土橋監測分析之應用」，碩士論文，台灣大學土木工程研究所，第 14-24 頁（1993）。
3. 黃怡文，「模態分析法檢測鋼筋混凝土橋面版完整性之研究」，碩士論文，海洋大學河海工程研究所，第 5-80 頁（1995）。
4. 葉啟章，「模態分析法應用於混凝土版非破壞性檢測之研究」，碩士論文，海洋大學河海工程研究所，第 96-100 頁（1993）。
5. 楊世仲，「預力混凝土結構之動態特徵與模態分析」，碩士論文，台灣大學土木工程研究所，第 25-41 頁（1995）。
6. 蘇益民，「鋼橋動力監測系統」，碩士論文，成功大學建築研究所，第 1-9 頁（1994）。