

# 離岸風機基礎土層穩定性檢監測技術研發 及港區應用調查

|     |                     |
|-----|---------------------|
| 邱永盛 | 國立中山大學海下科技研究所副教授    |
| 薛憲文 | 國立中山大學海洋環境及工程學系教授   |
| 林俊宏 | 國立中山大學海洋環境及工程學系助理教授 |
| 羅建育 | 海軍官校海洋科學系副教授        |
| 謝明謀 | 國立中山大學海下科技研究所專任研究助理 |
| 唐鼎鈞 | 國立中山大學海下科技研究所碩士班研究生 |
| 林雅雯 | 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員 |

## 摘要

在海洋工程應用中，海床之深度及其結構與物理特性是相當重要的一環，其對於海上施工與海上結構物穩定度有關鍵影響，因此，提升海床面地形探測精準度，以及了解海床下土層結構與參數之檢監測技術均是國際上海洋工程技術之發展重點。政府目前推動「千架海陸風力機」計畫，對於風機基礎土層之穩定性須有效監控；而港口浚挖工程之施作，亦須提升海床面地形探測準確度。針對上述兩大需求，本研究

以聲波在海床面與海床下之反射、散射以及傳播特性為基礎，探討整合多頻率聲學反射模擬模式、地音參數反算模式與實海域聲學探測方式，並提出離岸風機場址土層穩定性檢監測技術之概念及原型，於高雄港、碧砂漁港、臺北港進行6次多頻率海床面地形變動測量，利用各頻段之反射係數依海床表層沉積物特性反算模式進行海床下土層特性估算，估算結果與岩心樣本分析結果一致。

## 一、前言

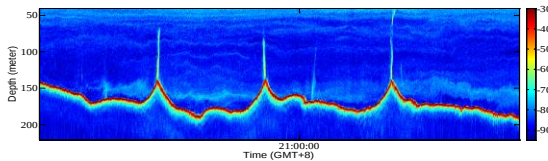
臺灣西海岸在政府積極推動「千架海陸風力機」計畫下，對於風機基礎之穩定性與風機之安全運作須有效監控。離岸風機受風、浪、海流、颱風及地震之影響，基礎可能因海床淘刷而導

致穩定性不足，須發展檢監測設備及技術以達到早期預警功能。建立本土化離岸風機基礎維管計畫及開發基礎穩定性檢監測技術，有助於離岸風機達到長期營運之目的。

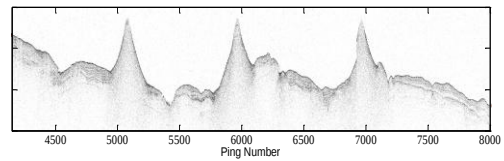
在離岸風機之架設過程或是港口浚挖實施前後，均有海床面地形與深度變動之情形，而一般市售測深儀因頻段解析度、內建聲速預設值、探測波束寬、與操作方式等條件，常存在有海床面地形、深度不一致的情形，即探測結果隨系統而變。此海床面地形探測誤差對於海上工程施作以及浚挖深度之估算將造成困難，因此須深入探討海床面地形量測誤差之來源，並研究如何提升量測準確度，俾利海上工程之實施。

聲波與聲學系統是目前海床探測的主要工具之一，亦是在大範圍海床探測上最具經濟效益之工具，圖 1 為以聲

學系統進行(a)海床面地形與(b)海床下土層結構之探測範例，兩圖為同一測線上分別以測深儀和本研究自行開發之掃頻聲納探測得之訊號，由於測深儀運用較高頻聲波(10k 至 300kHz)進行探測，因此可測得海床面反射訊號以及海水不均勻度散射訊號；而本研究使用之掃頻聲納頻率較低(1k 至 20kHz)，主要可獲得海床面與海床下土層回波。本研究以聲波在海床面與海床下之反射、散射、以及傳播特性為基礎，研究如何整合多頻率聲學系統，提升海床面地形與深度探測準確度，並提升海床下土層結構與參數之掌握度。



(a)



(b)

圖 1 臺灣西南海域海床聲學探測範例。(a)以海研三號測深儀探測得之海床面地形與深度，(b)以自行開發之掃頻聲納於同樣測線之海床下土層探測結果。

## 二、研究目的

本研究內容主要為聲學技術開發及進行兩大應用目標研究。第一個應用目標為海床面地形探測準確度提升研究，即如何運用聲學技術來正確量測到實體海床面之深度；第二個應用目標為海床下土層結構與參數特性估算研究，此目標在於發展聲學技術來估算海床表層土層之結構與參數值。

本研究在應用多頻率聲學探測海

床深度，在硬體部分，本研究分別在吊放式載台與拖曳式載台上整合 1 kHz 至 50kHz 之聲納系統，使任一載台均可同時進行多頻率探測。在軟體上，本計畫整合多頻率聲波之探測結果，獲得較精細的海床探測結果。

海床下土層結構與參數特性估算目前常採用之底層剖面儀頻率範圍大多在 1-20kHz，與本研究在海床下土層

探測使用之頻率範圍相近，但由於本研究欲進行聲納探測資料之後續訊號分析與應用，市售地層剖面儀無法因應本

研究需求，因此需使用自行開發之儀器設備進行量測與研究。

### 三、文獻回顧

有關離岸風機土層穩定性探討文獻，大多集中於探討離岸風機周圍表面土層的淘刷，因為土壤淘刷會造成基樁周圍土壤之流失<sup>[1-3]</sup>，對風機的基礎穩定性有負面的影響。然而除淘刷外，風機本身受風力、波浪及風扇運轉等因子作用下，亦會產生振動的情形，此振動將影響風機基樁周圍土層之結構，甚至可能造成土層鬆動<sup>[3-5]</sup>。臺灣常見的地震現象也可能造成突發性的海床結構變動，造成離岸風機基樁附近土層鬆動或是土壤液化等現象。這些對離岸風機基樁可能造成損害的現象雖然不一定會發生，但仍需建立適當的檢監測技術與進行相關研究。

#### 3.1 風機振動與土層穩定性之影響

離岸風機基礎土壤會受風機振動的作用力影響<sup>[6]</sup>。離岸風機在海上會受到風、浪、流以及本身運轉的影響產生振動，自然振動頻率多介於 0.3Hz-0.36Hz 間，而多葉片轉動產生之產生的振動會介於 0.5Hz 至 1.5Hz 之間<sup>[6]</sup>。風機受不同外力作用而造成的振動頻率亦不同，如圖 2(a)所示，可看到風機風扇轉軸旋轉造成之頻率、3 葉片旋轉造成之振動頻率、風力造成之振動頻率以

及波浪造成之振動頻率，這些不同振動整合起來則將產生如圖 2(b)之振動模式。Adhikari 等人<sup>[7]</sup>提出單樁離岸風機的系統模型與其振動方式，如圖 3，風機會沿著圖上 X 軸方向左右擺動，風機的擺動連帶會影響風機周圍土層的變化。當風機擺動過程中往右側彎曲時受到擠壓的土層會變形<sup>[8]</sup>，左側的縫隙則會有水滲透進來，圖 4(B)，當基樁回到原本位置時圖 4(A)在右側可能也會產生空隙，因此水會滲透進來，如此周而復始的振動之下基樁兩側的空隙會越來越大，但周圍被擠壓之土層密度會提升，導致空氣及水的穿透量會降低<sup>[9]</sup>，此現象較常發生於黏性土壤。由於離岸風機發展與大規模應用之時間尚不長，基樁與周圍土層之長期變化尚不可知，目前僅有模擬與實驗室實驗結果可供參考<sup>[8]</sup>。

風機基樁振動會造成周圍土層之密度、孔隙率、透水率、以及土層結構等物理參數之改變，此外，在工程參數上則可使用土層之剪力模數、楊式模數和泊松比等重要參數來監測土層變化。

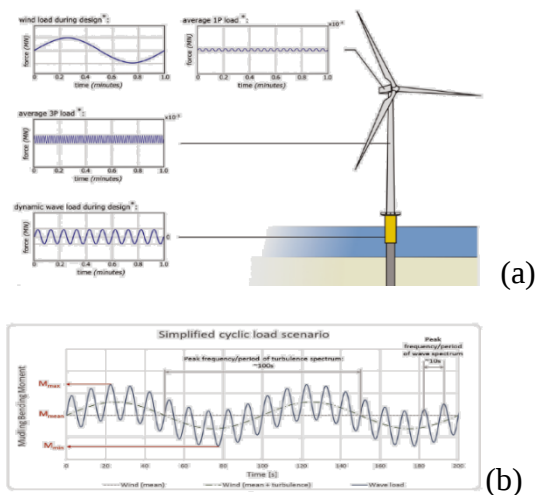


圖 2 離岸風機於不同負載下的波形示意圖<sup>[6]</sup>

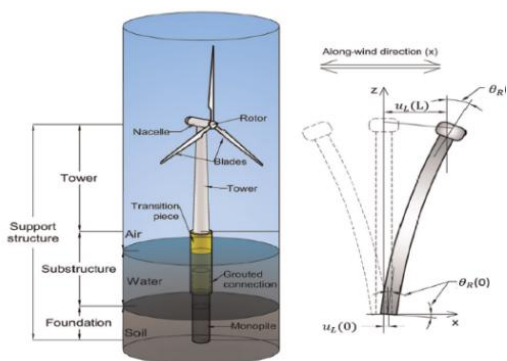


圖 3 單樁風機系統的模型及風機振動過程示意圖<sup>[7]</sup>

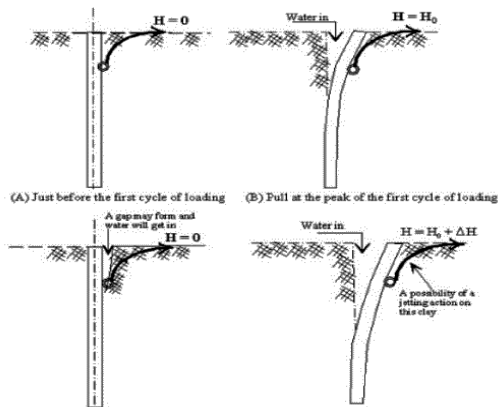


圖 4 基樁周圍土壤受到週期性的側向應力之示意圖<sup>[9]</sup>

### 3.2 周圍土壤淘刷對基樁之影響

風機基座保護工受波流水動力是否影響基座安全，陳等人[10]研究基座保護工施作前後淘刷的影響。研究發現 12m 水深基座與 16m 水深基座，淘刷深度分別為 2.73 m(1.31D) 與 2.424 m(1.17D)，淘刷範圍為 6D 與 2.5D(大於 0.5 m 深之淘刷地形)。楊等人[11]針對多功能创新型離岸風機載體式基座，藉由水工模型試驗先探討创新型離岸風機受風動力與波流水動力作用下支承基礎結構物之動力負載、風機運動模式等動態反應分析及基座周圍之地形淘刷、淘刷範圍與最大淘刷深度等進行探討。

由上述文獻可知，基樁周圍有無保護工法，對於淘刷深度有直接的影響，雖然能透過保護工來改善整體淘刷度與淘刷範圍，但仍無法完全避免淘刷對表層土層之破壞作用。

### 3.3 風機基礎周圍土壤液化評估

風機和土壤會有互制效應，臺灣處於環太平洋地震帶上，地震反覆的震動會讓土壤的顆粒相互推擠，有可能造成土壤液化，使土壤瞬間失去支撐基礎的能力，讓風機傾倒<sup>[12]</sup>。倪等人<sup>[13]</sup>指出目前離岸風機規範較少探討土壤液化對離岸風機基礎的影響，該文以福海離岸前導風場為研究對象，針對土壤發生液化前後的 p-y 曲線以及基樁側向變形於彎矩做討論。傳統無液化下的 p-y 曲線呈現凹口向下的型態，而完全液化下的 p-y 曲線呈現凹口向上的型態如圖 5。

上凹型 p-y 曲線形成之主要原因為：(1)地震力誘發之反覆剪應力作用，使得基樁與土壤界面間逐漸有小空隙

形成，導致在樁身產生小位移的狀況下樁土分離，因而從  $p-y$  曲線上看來，前端之土壤反力為零。(2)在樁身產生大位移狀況下，由於土壤顆粒間排列已達緊密堆積，若再增加位移將使得土壤產生剪脹效應，導致後段  $p-y$  曲線得以上揚。於液化過程土壤漸漸變軟，使基樁變形量更大，不僅使樁身最大彎矩增加，同時也使最大彎矩發生深度增加(7m 增加到 11.9m)。涂等人[14]指出當地震時淺層砂土發生液化的可能性相當高。國外目前對位於地震區的風機之基礎土壤發生液化對基礎穩定的評估方法尚無深入研究。結果顯示淺層土壤液化時，土層束制基樁的深度會向深層發展。

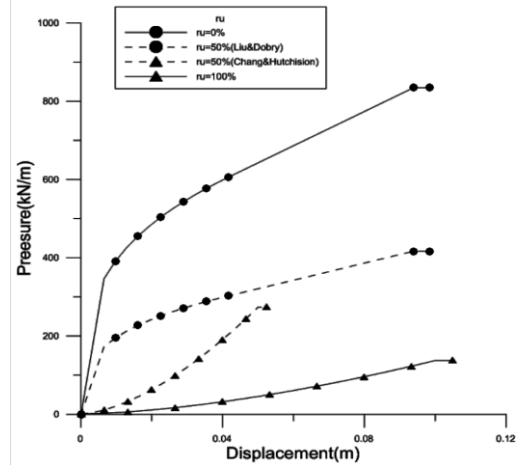


圖 5  $p-y$  曲線<sup>[13]</sup>

部分文獻指出樁的受力情形與土壤液化之相關性(最大彎矩量向深層發展)。

#### 四、多頻率海床探測實驗及資料分析

為了更深入了解以及驗證多頻率海床探測之可行性，本研究規劃並執行了一系列之海床探測實驗，可了解臺灣週邊海域真實海洋環境條件，以及多頻率海床探測技術之運用成效。

##### 4.1 海床聲學探測系統介紹

本研究首先進行多頻率聲學探測系統之發展，建置兩套拖曳式多頻率海床量測系統，分別為拖曳式自收發聲納系統(Towed sonar system)，以及吊放式

多頻率海床量測系統，如圖 6 (a)、圖 6 (b)、圖 6 (c)。圖 7 即為使用本研究團隊自行建置的海床聲學剖面儀所探測得之表層沉積物回波圖，透過海床正向反射回波能量，量測到海床反射係數。此系統最大的精進為加入多個聲學換能器以及結合接收陣列，讓原本只有中頻聲納的探測與調查，能夠提供低、中、高頻率的探測範圍(500Hz 至 50kHz)。

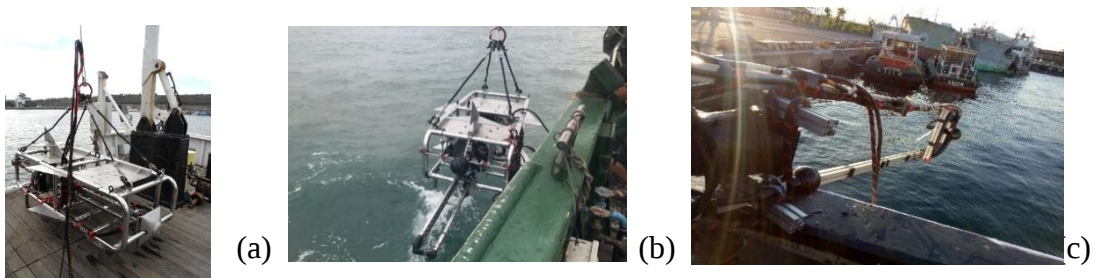


圖 6 本研究團隊自行建置開發之聲學海床量測系統，(a)拖曳式多頻率聲納系統、(b)實際佈放情形、(c)吊放式多頻率海床量測系統

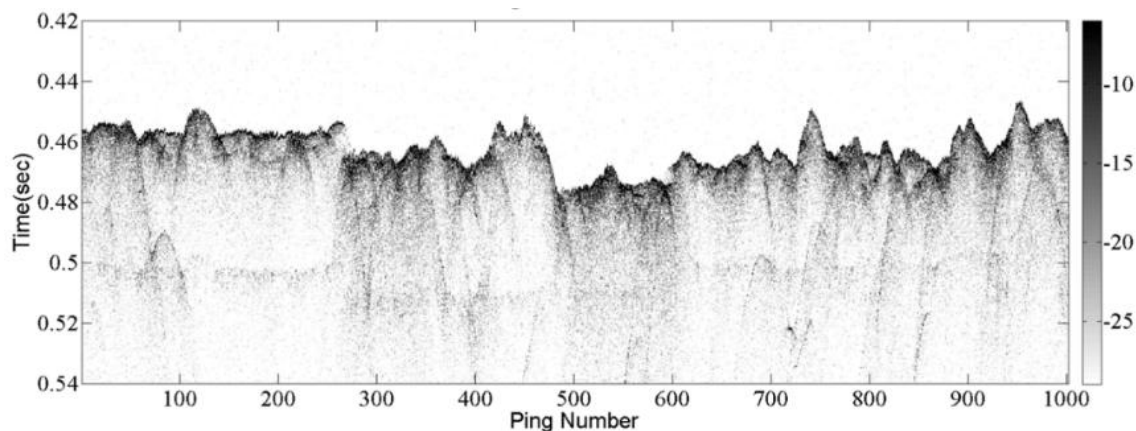


圖 7 本研究團隊自行建置底床剖面儀蒐集之海床正向反射資料範例

#### 4.2 多頻率海床探測實驗彙整

本研究於高雄港內外、碧砂漁港內外、臺北港觀測樁周邊等所進行的六次實驗。六次實驗中包含了透過聲學方式的多頻率海床面地形變動測量實驗以及多頻率海床下土層分佈調查實驗。本研究使用旋轉式採泥器進行海床底質採樣，表 1 為探測實驗表。海床底質採樣樣本經底質分析後能夠得到統體密度、平均粒徑( $\mu\text{m}$ )、成分百分比(黏土、粉砂、砂、礫石)等如表 2 及圖 8。

表 1 多頻率海床探測實驗彙整表

| 名稱    | 日期       | 地點                | 多頻率海床面地形變動測量實驗 | 多頻率海床下土層分佈調查實驗 | 底質特性初步分類 |
|-------|----------|-------------------|----------------|----------------|----------|
| 第一組實驗 | 05/30    | 高雄港內(海研三號旗津碼頭停泊處) | ✓              |                | 粉砂質      |
| 第二組實驗 | 07/22、23 | 台北港外(台北氣象港)       | ✓              | ✓              | 中砂質      |
| 第三組實驗 | 07/22、23 | 基隆碧砂漁港外           | ✓              |                | 中砂質      |
| 第四組實驗 | 09/25    | 高雄港外-北邊           | ✓              | ✓              | 粉砂質      |
| 第五組實驗 | 09/26    | 高雄港外-南邊           | ✓              | ✓              | 粉砂質      |
| 第六組實驗 | 10/08    | 台北港外(台北氣象港)       | ✓              | ✓              | 中砂質      |

表 2 底質特性分析彙整表

| OR2-2321  | 碧砂漁港-內、外        | 緯度         | 經度          | water depth(m) | 統體密度 g/cm3 | 平均粒徑 $\mu\text{m}$ |
|-----------|-----------------|------------|-------------|----------------|------------|--------------------|
| Gl01      | 粗砂含礫石           | N25°09.353 | E121°46.856 | 40.9           | 1.99       | 257.8              |
| Gl02      | 泥細礫             | N25°09.382 | E121°46.870 | 42.1           | 2.10       | 241.4              |
| Gl03      | 粗砂含礫石, 大量貝屑 2CM | N25°09.341 | E121°46.812 | 38.5           | 2.07       | 491.4              |
| Gl04      | 大量礫石, 礫塊最大 5cm  | N25°09.670 | E121°46.607 | 61.0           | 1.95       | 1067               |
| Gl05      | 灰黃色粗砂           | N25°09.440 | E121°46.766 | 41.0           | 2.00       | 477.1              |
| Gl06      | 灰黃色粗砂           | N25°09.675 | E121°47.196 | 74.0           | 1.84       | 278                |
| Gl07(港內)  | 大礫石, 礫塊         | N25°14.869 | E121°78.613 | 16.02          | -          | -                  |
| OR2-2321  | 台北觀測樁           |            |             |                |            |                    |
| Tp01      | 淘選佳中砂           | N25°11.157 | E121°22.150 | 23.0           | 2.01       | 280.2              |
| Tp02      | 淘選佳細砂           | N25°10.919 | E121°22.320 | 16.6           | 2.03       | 197.4              |
| Tp03      | 淘選佳粗砂           | N25°10.705 | E121°22.173 | 15.7           | 2.03       | 519.9              |
| Tp04      | 淘選佳中砂           | N25°10.851 | E121°21.93  | 19.8           |            | 423.5              |
| Tp05      | 泥粗砂             | N25°11.007 | E121°21.614 | 27.1           | 1.93       | 113.2              |
| Tp06      | 淘選佳中砂           | N25°11.020 | E121°22.042 | 21.8           | 2.03       | 441.6              |
| OR3-2084A | 高雄港-北邊          |            |             |                |            |                    |
| G1        | 粉砂質砂            | N22°39.844 | E120°12.579 | 25.0           | 1.90       | 47.46              |
| G2(V1)    | 粉砂質砂            | N22°40.413 | E120°12.340 | 25.0           | 1.89       | 76.81              |
| G3        | 粉砂質砂            | N22°40.990 | E120°12.543 | 22.3           | 1.98       | 88.62              |
| OR3-2084B | 高雄港-南邊          |            |             |                |            |                    |
| B(k1)     | 砂質粉砂            | N22°34.878 | E120°14.635 | 30.4           | 1.93       | 21.09              |
| D8729(k2) | 砂質粉砂            | N22°34.041 | E120°15.087 | 29.92          | 1.88       | 22.31              |
| D8747(3)  | 砂質粉砂            | N22°34.558 | E120°13.752 | 33.74          | 1.82       | 16.94              |
| X         | 砂質粉砂            |            |             |                | 1.80       | 21.19              |

其中圖 8 為將執行的底床採樣分析結果繪製於臺灣週邊地圖上，圖上能清楚的觀察出臺北觀測樁及基隆碧砂漁港外的底質特性為中砂質特性，基隆碧砂漁港內為礫石特性，而高雄港內外則偏向為粉砂質特性。

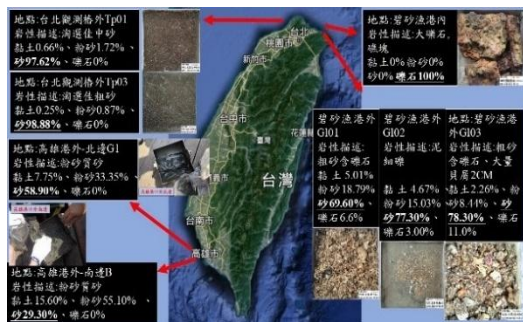


圖 8 海床底質採樣位置與底質特性初步分類圖

#### 4.3 多頻率海床面地形變動測量實驗及資料分析

本節針對碧砂漁港及高雄港之實驗資料分析結果進行介紹。

##### 4.3.1 中砂質環境(碧砂漁港週邊)

透過多頻道科學漁探儀量測，38kHz 以及 120kHz 對於砂質環境的深度量測如圖 9，從資料上看兩者所量測到的深度非常接近。當海床表面附近存在浮泥層時，100kHz 以上之聲波將顯著受到浮泥層影響，且大多只能探測得到浮泥層上緣深度。在中砂為主之海床環境中，通常不存在浮泥層，因此在 38kHz 以及 120kHz 有非常接近的深度探測結果。而在探測水深到達 41 公尺左右，根據表 2，測線可能通過含有部分泥質之海床環境，因此可見到 38kHz 以及 120kHz 探測得之深度資料有部分差異。由此顯示海床材質對於水深量測之頻率相依性有高度影響。

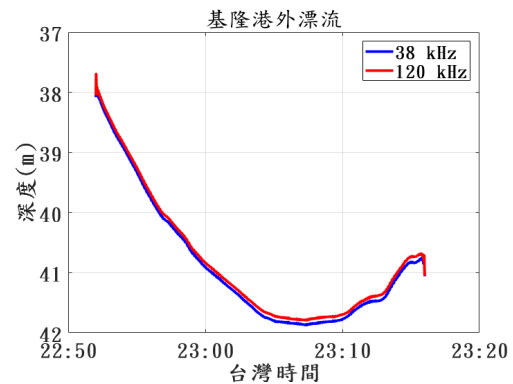


圖 9 38k、120kHz 深度量測資料

各個頻率對於海床深度的能量回波變化如圖 10、圖 11，6kHz 與 34kHz 的聲波，受到海床影響所形成的回波能量訊號(圖中的紅色框部分)。圖 12 為將

各個頻率多頻率所量測到的海床深度所繪製而成的頻率-深度變化，從該圖中能觀察到在 10-30kHz 之間，水深量測結果呈現穩定的狀態，亦即各頻率量測結果一致。在頻率小於 10kHz 時，由於聲波傳播之自身特性影響，其空間解析度較低且穿透能量較高，因此其量測得之深度較深；而在 35kHz 以上之聲波容易因懸浮粒子以及海床表面之過度層影響，量測得之深度會微幅小於實際水深。在中砂以上之硬質環境中進行海床深度量測時，使用 10-30kHz 之聲波可減少懸浮粒子與過度層之干擾，獲得較正確的實體泥層深度。

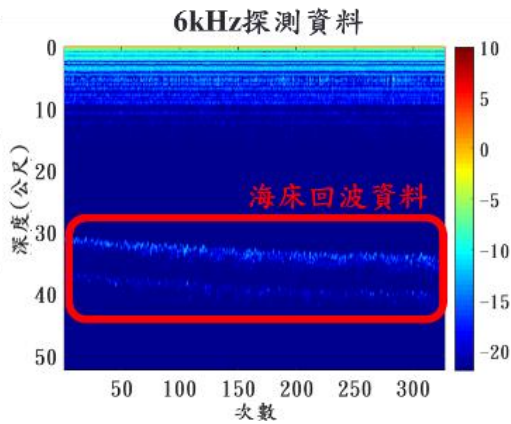


圖 10 6kHz 量測資料

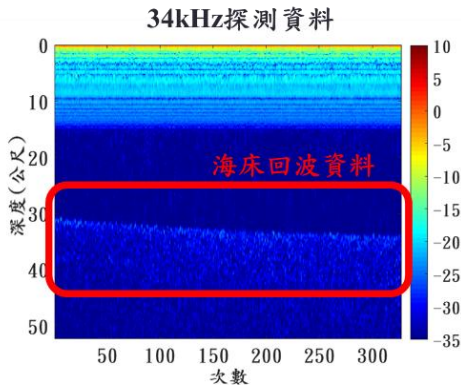


圖 11 34kHz 量測資料

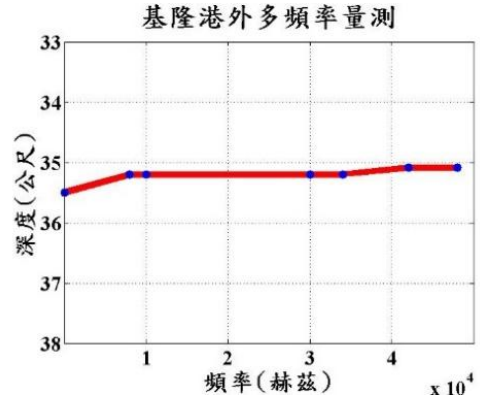


圖 12 深度-頻率變化(2kHz 至 48kHz)

#### 4.3.2 粉砂質環境(高雄港週邊)

本節探討高雄港內外多頻率水深探測結果，包含港內的儀器測試(第一組)以及港外的漂流實驗(第四、五組)。港內的儀器測試目的為確認本研究所以建置出的多頻率海床探測聲學系統，能順利的量測到不同頻率對於海床深度的變化。第一組水深量測實驗進行 2kHz 至 24kHz 的量測，海床底質主要為泥。圖 13 為 2kHz 至 10kHz 的結果，從聲學底床反射各頻率的時序列資料 (圖 13 (a))，可觀察到各頻率的能量變化，此變化來自於聲學儀器本身對於各種頻率的響應頻率不同而導致。在各頻率的頻譜圖中(圖 13 (b))，我們能觀察到頻率變化隨著我們所設計的訊號進行改變，這也證明確實是接收到本研究所以設計的聲源訊號。

接著透過本研究所以使用的訊號處理方法，將底床回波能量與其他訊號(如：自身訊號、雜訊等)分離出來如圖 14 所示，得到各個頻率對於深度的變化如圖 15，並透過基礎聲速的換算整理成表 3 以及圖 16 的頻率-水深曲線圖。圖

16 可觀察到當頻率上升，所量測到的水深會有下降的趨勢，亦即量測水深隨頻率增加遞減。當頻率小於 10kHz 時衰減率約略為 0.1875m/kHz，在頻率 10kHz 至 22kHz 時為 0.0682 m/kHz。此結果顯示除了量測水深隨頻率增加遞減，並且

當頻率提高時衰減率之趨勢會漸緩。由於此實驗區之海床表層沉積物以泥為主，且水深較淺，因此容易受到擾動形成浮泥層，進而影響高頻聲波之探測準確度。

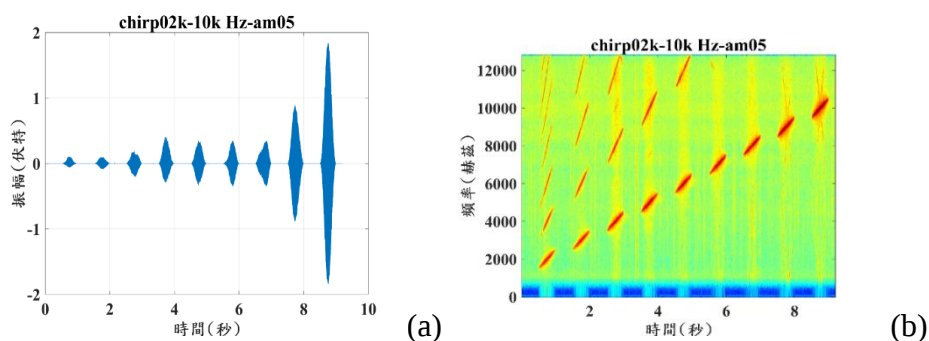


圖 13 2k 至 10kHz 訊號接收情形，(a)時序列圖、(b)頻譜圖

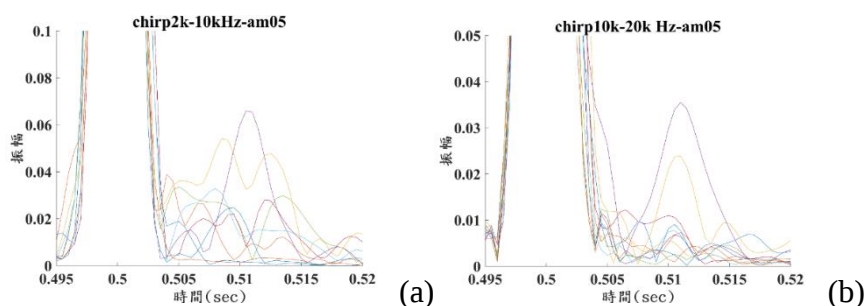


圖 14 接收訊號進行訊號處理後結果，(a) 2k 至 10kHz 資料、(b) 10k 至 20kHz 資料

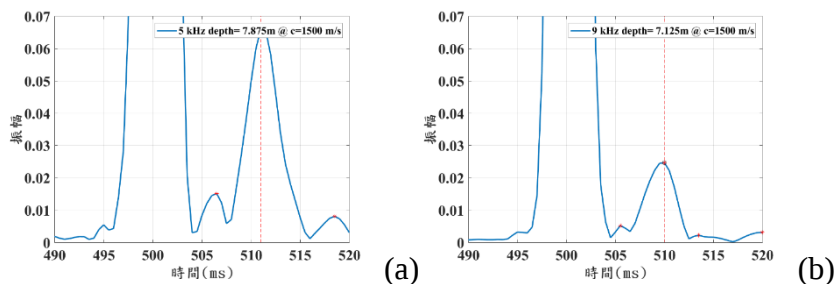


圖 15 接收訊號進行訊號處理後結果，(a)5kHz 資料情形、(b)9kHz 資料情形

表 3 頻率與量測水深關係表

| 頻率 | 5kHz    | 9kHz    | 11kHz  | 22kHz |
|----|---------|---------|--------|-------|
| 水深 | 8.875 m | 8.125 m | 7.75 m | 7 m   |

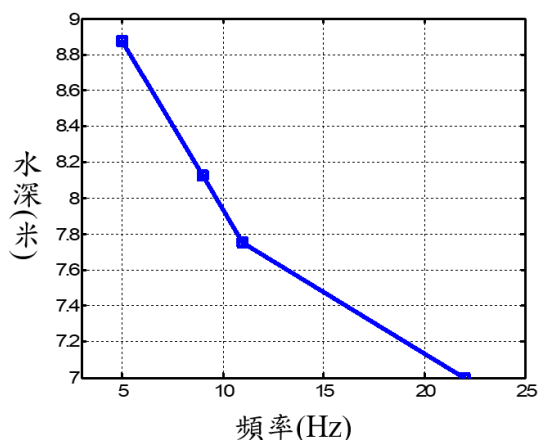


圖 16 頻率與量測水深趨勢圖

本研究對於海床面地形之深度量測建立了適切的量測方式與訊號處理方式，接著進行港外的漂流海床深度量測(第四、五組實驗)。使用拖曳式多頻率海床探測聲學系統進行量測，載台佈放深度如圖 17，透過水下壓力計記錄載台在水下時的深度變化，而載台的深度變化於 7.7 至 8.3 公尺之間。接著透過多頻率海床探測聲學系統量測資料，並運用前面章節所介紹的訊號處理方式，其結果如圖 18，35kHz 頻率在該粉砂質的環境下會產生訊號信雜比較弱的情形。藉由連續時間的排列，能夠得到連續時間的海床能量回波(圖 19、圖 20)。圖 19、圖 20 顯示在 5kHz 以及 35kHz 所量測到的聲波傳播深度(載台離海床的深度)約在 15 公尺處。

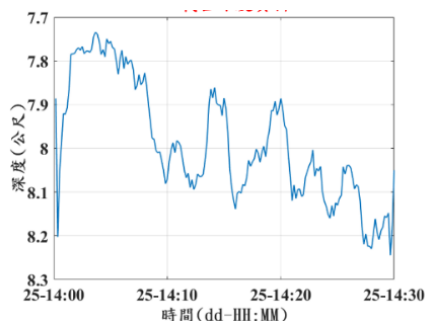


圖 17 載台深度資訊(SBE39)

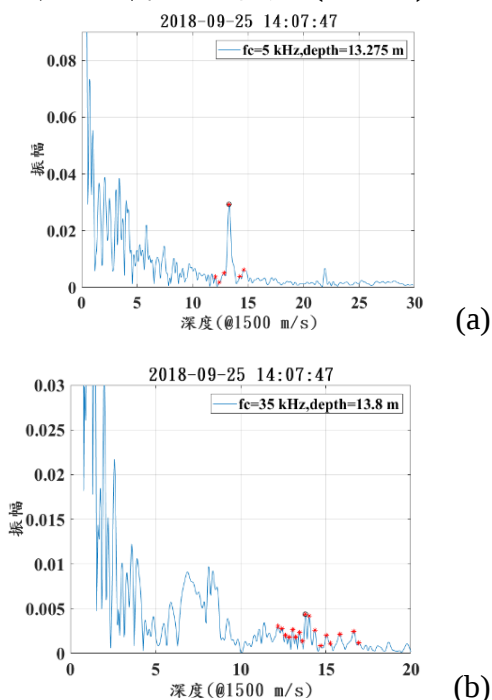


圖 18 信號處理後之情形，(a)5kHz 海床探測量測(b)35kHz 海床探測量測

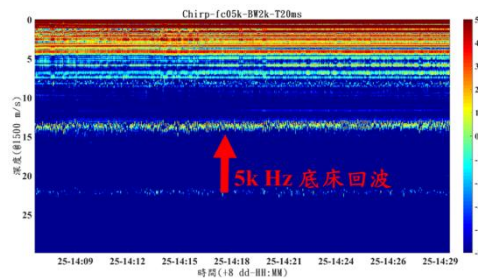


圖 19 多頻率海床探測聲學系統量測資料(5kHz)

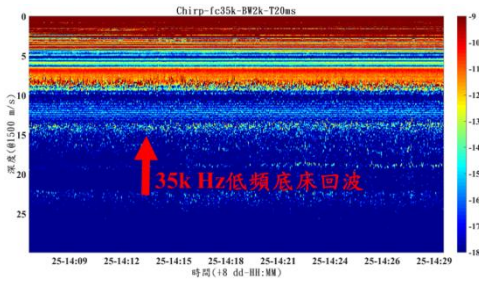


圖 20 多頻率海床探測聲學系統量測資料(35kHz)

35kHz 頻率在 10-15 公尺的深度上跟 5kHz 的資料相比，卻明顯的出現散射的情形，因此推論是由於當地的粉砂質環境，在使用較高的頻率下量測時所產生現象，亦即較高頻率的聲學量測系統在此種環境較容易受到干擾。利用載台本身所記錄到的深度(SBE39)資訊對深度上進行補正，並與當時海洋研究船上所記錄的科學魚探機(38kHz)進行比對如圖 21 所示。圖 21 中包含 5kHz、25kHz、以及 35kHz 之水深探測結果，並與海研三號上測深儀 EK-38kHz 之探測結果做比較，圖上 Ping Number 代表在進行探測量測時的資料筆數。由於本研究之多頻率海床聲學探測系統是架設在拖曳載台上操作，較容易受到震盪影響，因此若與船載系統量測結果比較，在同樣的水深變化趨勢下，本研究量測得之水深震盪變化較明顯。在這四組資料的比較中可觀察到，大部分資料均呈現量測水深隨頻率增加而減少的情形，少部分資料違反此特性推測是由外在因素造成。在頻率由 5kHz 變化至 38kHz 之過程中，量測得知海床面深度約有 10-35 公分之差異，此差異之多寡與當地海床材質有關。由量測結果可觀

察到 5kHz 之量測結果略深於 25kHz 之量測結果，但兩者差異較小，而 35kHz 與 38kHz 之量測結果則明顯小於前兩者，在 4.3.1 節中我們已了解到即使在硬質海床環境中，35kHz 以上聲波就會受到懸浮粒子以及過度層之影響，因此出現圖 21 中明顯小於 25kHz 探測結果之現象。

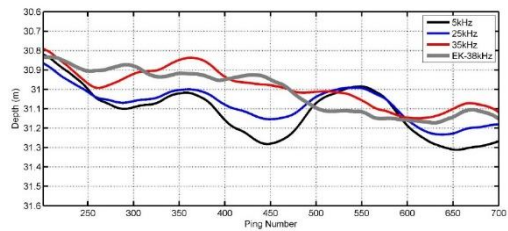


圖 21 多頻率海床探測聲學系統量測資料(5kHz、25kHz、及 35kHz)與科學魚探機資料(38kHz)之比對

由基隆碧砂漁港與高雄港之多頻率海床探測分析結果，可歸納出以下結論：

1. 碧砂漁港外之海床表層沉積物材質以中砂為主，此種環境通常不存在浮泥層，多頻道科學漁探儀上的 38kHz 以及 120kHz 的深度探測結果非常接近。
2. 使用本研究發展之多頻率海床探測技術與深度量測計算，不同頻率的聲波在面對中砂質環境時，會產生些微的影響。在 10-30kHz 之間，水深量測結果呈現較穩定的狀態；在 10kHz 以下，其空間解析度較低且穿透能量較高，量測得之深度較深；在 35kHz 以上之聲波容易受到懸

浮粒子以及海床表面之過度層影響。

3. 中砂以上之硬質環境中進行海床深度量測時，使用 10-30kHz 之聲波可減少懸浮粒子與過度層之干擾，獲得較正確的實體泥層深度。
4. 高雄港之海床表層沉積物材質主要成分有：黏土、粉砂以及砂組成。相較於碧砂漁港外之中砂為主材質，在不同的聲波頻率之深度量測，更容易受懸浮粒子以及海床表面之過度層影響。

#### 4.4 多頻率海床下土層分佈調查實驗及資料分析

本節呈現臺北港以及高雄港之實驗資料分析結果。

##### 4.4.1 砂質環境(臺北港實驗區之表層沉積物探測)

本研究於臺北港觀測樁附近以拖曳式多頻率海床探測聲學系統進行實驗。在拖曳過程中同時拍發 4-12kHz 間 5 種不同頻率訊號，中心頻率分別為 4kHz、6kHz、8kHz、10kHz、以及 12kHz，頻寬則設定同樣為 2kHz。

圖 22 為 4kHz 之海床探測回波圖，本研究之多頻率海床探測聲學系統，可在同一個拖曳過程中即可獲得不同頻率之探測結果。本海床聲學探測在水深約 15 公尺至 27 公尺之範圍間來回進行，圖 23 即為海床探測過程中的水深變化，此水深資料乃是由海洋研究船上 38kHz 之測深系統量測而得，由於多頻率海床探測聲學系統約佈放於 5-6 公尺間，因此圖 22 之縱軸標示為由探測系統所測量到的回波深度。

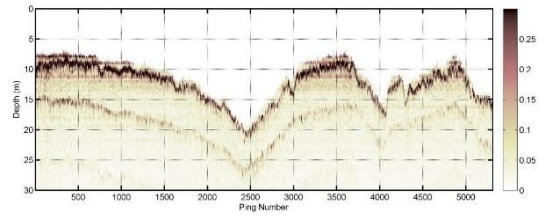


圖 22 臺北港觀測樁附近 4kHz 聲波之海床探測回波圖

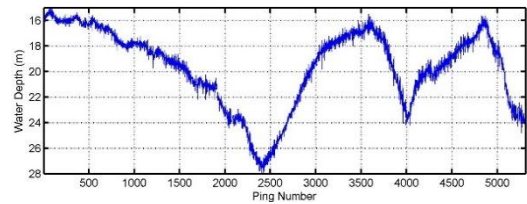


圖 23 臺北港實驗區於實驗測線上之水深變化，此為海研二號 38kHz 測深儀之探測結果

為計算多頻率海床反射係數，首先進行海床表面回波擷取，在回波訊號擷取上整合當地水深資料及載台深度資料，並設定以區域最大值(local maximum)處作為海床回波訊號擷取點，圖 24 為 8kHz 海床回波訊號之擷取範例，藉由執行此處理來準確擷取回波訊號並計算海床反射係數值。

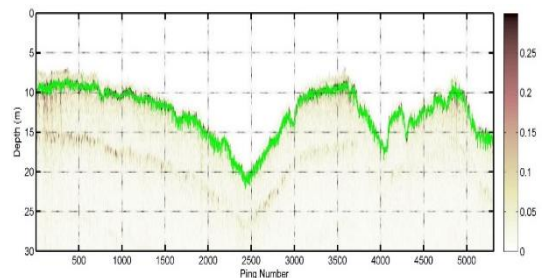


圖 24 海床回波訊號擷取範例，此為臺北港實驗區 8kHz 之訊號

獲得各頻段之反射係數後，即可依照所建置之海床表層沉積物特性反算模式進行海床下土層特性估算。根據 EDF 模式之原理<sup>[15]</sup>，運用 EDFM 所得到之有效密度(Effective Density)隨著聲波頻率提高有降低並收斂之特性，並且在頻率趨近於 0 Hz 時，有效密度將收斂於統體密度值，如圖 25 之有效密度曲線範例所示。由圖 25 中可知在同樣的海床及海水環境下，各頻率反算所得之有效密度會隨頻率降低，而且極低頻處可見到有效密度收斂於近 2000 kg/m<sup>3</sup>，此乃該環境中之實際統體密度大小。

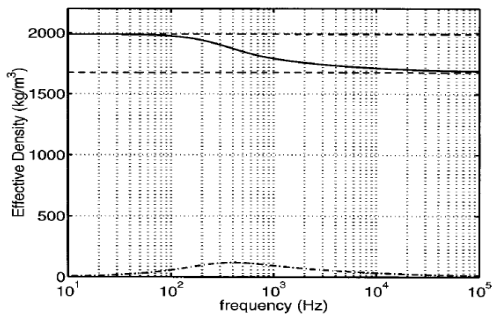


圖 25 EDF 模式所得之有效密度曲線範例<sup>[15]</sup>

當頻率不停增加時，有效密度將收斂於一下限值。由於有效密度曲線與聲波頻率之關係曲線隨海水環境與沉積物基本特性而變，因此多頻率聲學探測資料可用以獲得有效密度隨頻率之變動，進而用以估算海床參數。

圖 26 為以 4kHz、6kHz、以及 10kHz 變頻訊號探測得之海床正向反射係數，可見到海床反射係數隨測線往返而變化，且均落在-7.5dB 至-10.5dB 間。

以這些反射係數進行反算，可獲得海床表層有效密度。取探測過程中第 1000、2000、3000、以及 4000 筆探測值為例，反算結果可獲得四條有效密度曲線，如圖 27 所示。由圖 27 可知在頻率趨近於 0Hz 時，其有效密度約在 1950kg/m<sup>3</sup> 至 2200kg/m<sup>3</sup> 間變動，亦即此海域統體密度約介於 1950kg/m<sup>3</sup> 至 2200kg/m<sup>3</sup> 間，若回顧第 4.2 節之表 2，可發現此海床表層統體密度估算結果與岩心採樣分析結果一致。

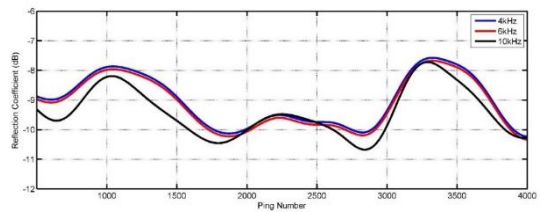


圖 26 臺北港實驗區 4kHz、6kHz、以及 10kHz 頻段聲波探測所得之海床反射係數

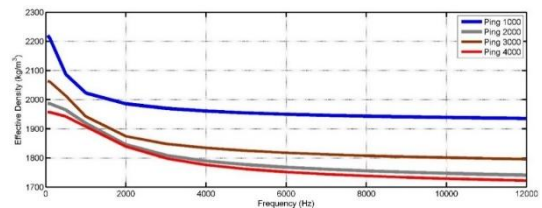


圖 27 臺北港實驗區之有效密度正向計算結果，四組資料分別為第 1000、2000、3000、以及 4000 筆探測值之有效密度曲線

透過多頻率有效密度曲線以及反算模式，可遞迴計算出此海域之海床表層粒徑大小與孔隙率，分別如圖 28 與圖 29 所示。首先在粒徑部分，由圖 28

可見到此海域之海床表層粒徑有兩個主要分佈區間，分別是 300-500  $\mu\text{m}$  以及 100-200  $\mu\text{m}$ ，同樣與第 4.2 節表 2 之岩心分析結果比較，可發現岩心資料亦大多落在此兩區間內，顯示透過此多頻率海床探測與參數反算方法可準確掌握海床表層之粒徑特性。

孔隙率部分，圖 29 為透過上述多頻率探測與參數反算方法所得之孔隙率，為驗證此孔隙率估算值之正確性，以此孔隙率搭配海水密度與沉積物粒子密度，計算在此孔隙率下之統體密度值如圖 30 所示，可發現所估算得之統體密度與岩心採樣分析結果(表 2)同樣相當吻合，且同樣分成 2000-2150  $\text{kg/m}^3$  以及 1900-1950  $\text{kg/m}^3$  兩種主要密度範圍。

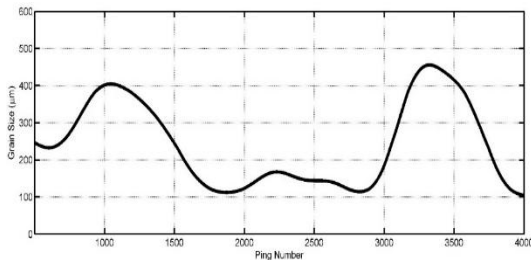


圖 28 臺北港實驗區之海床表層沉積物平均粒徑反算結果

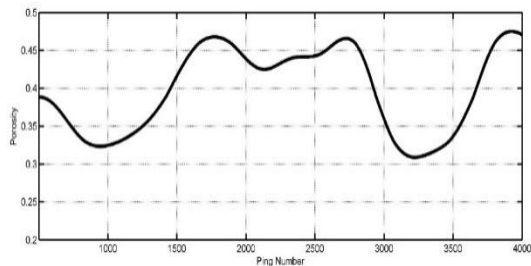


圖 29 臺北港實驗區之海床表層沉積物孔隙率反算結果

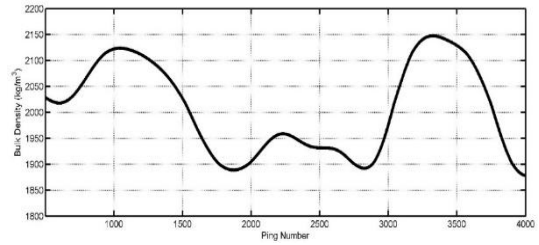


圖 30 臺北港實驗區之海床表層沉積物統體密度反算結果

#### 4.4.2 粉砂質環境(高雄港實驗區之表層沉積物探測)

本研究於高雄港亦進行了多頻率海床聲學探測，在拖曳過程中同時拍發 5-45kHz 間 7 種不同頻率訊號，中心頻率分別為 5kHz、10kHz、25kHz、30kHz、35kHz、40kHz、以及 45kHz，頻寬則設定同樣為 5kHz。

圖 31 至圖 32 分別為 5kHz 與 10kHz 之海床探測回波圖，圖 33 為探測過程之水深資料，由於 38kHz 之聲波訊號仍容易受海床附近之懸浮粒子散射，在此探測得之深度資料有較劇烈的震盪，故以移動平均處理，可獲得圖中黑色線條之平均水深。根據圖 33，此海床聲學探測是在水深約 30.5 公尺至 32 公尺之範圍間進行，由於多頻率海床探測聲學系統約佈放於 7-8 公尺間，因此圖 31 至圖 32 之縱軸標示的同樣為由探測系統所測量到的回波深度。

首先進行海床表面回波擷取，在回波訊號擷取上同樣整合當地水深資料及載台深度資料，並設定以區域最大值(local maximum)處作為海床回波訊號擷取點，擷取回波訊號並計算海床反射係數值。

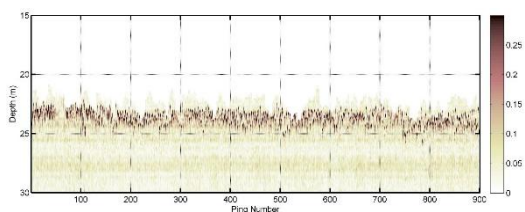


圖 31 高雄港實驗區 5kHz 頻段聲波之海床探測回波圖

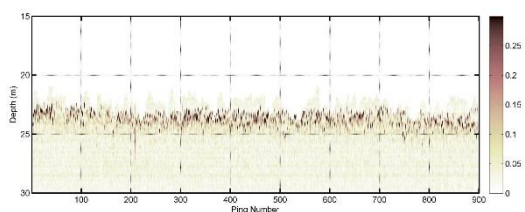


圖 32 高雄港實驗區 10kHz 頻段聲波之海床探測回波

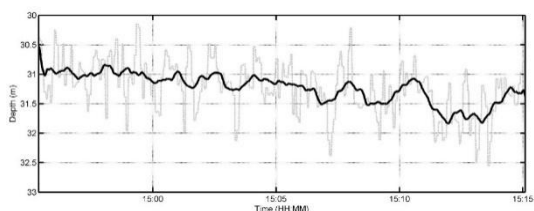


圖 33 高雄港實驗區於實驗測線上之水深變化，此為海研三號 38kHz 測深儀之探測結果

5kHz 及 10kHz 聲波訊號所得之海床反射係數如圖 34，若比較圖 34 與圖 26，可發現高雄港之反射係數量測結果低於臺北港之反射係數量測結果，且反射係數隨著頻率有明顯差異，台北港與高雄港之岩心樣本分析結果如表 4，表 4 中臺北港之海床表層材質絕大部分均以砂為主，且黏土與粉砂之比例均相當低，各頻率聲波均主要受砂質沉積物作用，反射係數一致；雄港之海床表層材

質組成雖以粉砂為主，但黏土與砂之成分亦不可忽略，由於不同頻率聲波對於不同材質之沉積物反應不一，因此海床表層沉積物之組成比例直接影響了反射係數之頻率反應，故形成圖 34 之反射係數差異。

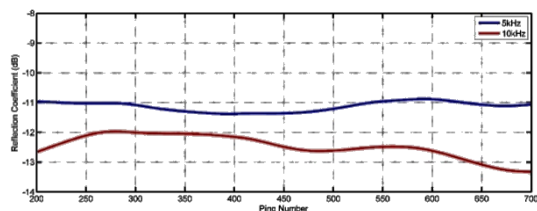


圖 34 高雄港實驗區 5kHz 與 10kHz 頻段聲波探測所得之海床反射係數

表 4 臺北港及高雄港底質特性分析彙整表

| OR2-2321      | 台北觀測<br>站 | 水深<br>(m) | 統體密<br>度 | 平均粒<br>徑(μm) | 黏土<br>(%) | 粉砂<br>(%) | 砂(%)  | 礫石<br>(%) |
|---------------|-----------|-----------|----------|--------------|-----------|-----------|-------|-----------|
| Tp01          | 淘選佳中砂     | 23.0      | 2.01     | 280.2        | 5.01      | 18.79     | 69.60 | 6.60      |
| Tp02          | 淘選佳細砂     | 16.6      | 2.03     | 197.4        | 4.67      | 15.03     | 77.30 | 3.00      |
| Tp03          | 淘選佳粗砂     | 15.7      | 2.03     | 519.9        | 2.26      | 8.44      | 78.30 | 11.00     |
| Tp04          | 淘選佳中砂     | 19.8      |          | 423.5        | 0.39      | 1.44      | 72.27 | 25.90     |
| Tp05          | 泥粗砂       | 27.1      | 1.93     | 113.2        | 0.49      | 1.43      | 98.08 | 0.00      |
| Tp06          | 淘選佳中砂     | 21.8      | 2.03     | 441.6        | 3.09      | 13.61     | 83.30 | 0.00      |
| OR3-2084<br>B | 高雄港南<br>邊 |           |          |              |           |           |       |           |
| B(K1)         | 砂質粉砂      | 30.4      | 1.93     | 21.09        | 15.60     | 55.10     | 29.30 | 0.00      |
| D8729(K2)     | 砂質粉砂      | 29.92     | 1.88     | 22.31        | 15.90     | 56.90     | 27.20 | 0.00      |
| D8747(K3)     | 砂質粉砂      | 33.74     | 1.82     | 16.94        | 17.60     | 61.80     | 20.60 | 0.00      |
| X             | 砂質粉砂      |           | 1.80     | 21.19        | 16.50     | 58.70     | 24.80 | 0.00      |

彙整上述臺北港與高雄港之多頻率海床探測分析結果，可歸納出以下結論：

1. 臺北港之海床表層沉積物材質分佈集中，以砂質為主，各頻段聲波之

反射均同樣受砂質作用，反射係數一致，且其隨頻率之變化符合有效密度曲線，可直接使用有效密度曲線之遞迴演算獲得海床表層沉積物參數。

2. 使用多頻率海床探測技術與反算技術可準確獲得海床參數，並與岩心樣本分析結果吻合，包含統體密度、孔隙率、粒徑分佈等參數，若海床表層土層產生擾動且密度及孔隙率產生變化，可使用此技術來監測得到變化情形。
3. 高雄港之海床表層沉積物材質組成較分散，包含不可忽略的黏土、粉砂、以及砂，對於不同頻段之聲波反射造成不同之作用，且黏土以及粉砂主導了高頻聲波之反射，形成

反射係數在頻率上的差異。

4. 在高雄港實驗區因不同頻段聲波反射受不同材質之反射作用主導，，在此實驗中 5kHz 與 10kHz 分別可反算出主要的平均粒徑分佈範圍，使用計算得之孔隙率來估算統體密度亦與岩心樣本分析結果相符，未來可持續使用多頻率海床聲學探測技術監測此實驗區之海床表層沉積物特性變動情形。
5. 臺北港與高雄港實驗區之海床材質分別以砂質與粉砂質為主，且在海床表層附近沒有明顯的材質變化介面，故對於臺北港與高雄港之聲學探測結果均無觀察到次表層回波存在。

## 五、結論

本研究基於離岸風機場址土層穩定度檢監測需求，以及浚挖前後海床面地形探測準確度提升需求，規劃兩大部分之研究內容，第一部分為海床面地形探測準確度提升研究，第二部分為海床下土層結構與參數特性估算研究。本研究結論如下：

1. 本研究研發的海床聲學剖面儀，此系統最大的精進為加入多個聲學換能器以及結合接收陣列，讓原本只有中頻聲納的探測與調查，能夠提供低、中、高頻率的探測範圍(500Hz 至 50kHz)。
2. 碧砂漁港為以中砂為主之海床環境

，不存在浮泥層，因此在 38kHz 以及 120kHz 有非常接近的深度探測結果。中砂以上之硬質環境中進行海床深度量測時，使用 10-30kHz 之聲波可減少懸浮粒子與過度層之干擾，獲得較正確的實體泥層深度。

3. 高雄港在聲納頻率由 5kHz 變化至 38kHz 之過程中，量測得到海床面深度約有 10-35 公分之差異，量測水深隨頻率增加遞減。當頻率小於 10kHz 時衰減率約略為 0.1875m/kHz，在頻率 10kHz 至 22kHz 時為 0.0682 m/kHz。由於此實驗區之海床表層沉積物以泥為主，且水深較淺

，因此容易受到擾動形成浮泥層，進而影響高頻聲波之探測準確度。

4. 臺北港獲得各頻段之反射係數後，即可依照所建置之海床表層沉積物特性反算模式進行海床下土層特性

估算，包含統體密度、孔隙率、粒徑分佈等參數，並與岩心樣本分析結果吻合。若海床表層土層產生擾動且密度及孔隙率產生變化，可使用此技術來監測得到變化情形。

## 參考文獻

1. Whitehouse, R.J., Harris, J., Sutherland, J., and Rees, J., "The nature of scour development and scour protection at offshore windfarm foundations." *Marine Pollution Bulletin*, vol. 62, 2011.
2. Michalis, P., Saafi, M., Judd, M.D., "Capacitive sensors for offshore scour monitoring." *Energy*, vol. 166, Issue EN4, 2012.
3. Sarah, V.E., Mieke, M., Piet, H., Michiel, S., Marc, S., "Offshore wind farms : sand as indispensable as wind." ,2014.
4. Nam, W., Oh, K.Y., Epureanu, B.I., "Evolution of the dynamic response and its effects on the serviceability of offshore wind turbines with stochastic loads and soil degradation." *Reliability Engineering and System Safety*, 2018.
5. Yu, L.Q., Wang, L.Z., Zhen, G., Bhattacharya, S., Nikitas, G., Li, L.L., "Long-term dynamic behavior of monopile supported offshore wind turbines in sand." *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, vol. 5, pp. 80-84, 2015.
6. Bhattacharya, S., Nikitas, G., Arany, L., Nikitas, N., "Soil-Structure Interactions for Offshore Wind Turbines." *Eng. Technol. Ref.*, pp. 1-16, doi: 10.1049/etr.2016.0019.
7. Adhikari and Bhattacharya, "Vibrations of wind-turbines considering soil-structure interaction." *Wind and Structures*, vol. 14, pp. 85-112, 2011.
8. Oh, Nam, Ryu, Kim, Epureanu, "A review of foundations of offshore wind energy convertors : Current status and future perspectives." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 88, pp.16-36, 2018.
9. Dean, "Wind turbine mechanical vibrations: Potential environmental threat." *Energy and Environment*. Vol. 19, pp. 303-307, 2008.
10. 陳信宏、楊瑞源、江文彬、黃煌輝、吳念祖，「離岸式風力發電機基座地形沖刷與保護工安定研究」，第 31 屆海洋工程研討會論文集，2009 年 11 月。
11. 楊瑞源、陳信宏、萬竣翔、黃煌輝

- 、陳文淵，「離岸風機與多功能載體式基座風波流動力負載及地形冲刷之試驗研究」，臺灣風能學術研討會暨 NEP-II 離岸風力及海洋能源主軸中心成果發表會，2015 年 12 月。
12. <http://pansci.asia/archives/132708>.
13. 倪勝火、范仲軒、蘇曉珮、馮宗緯，「應用 p-y 曲線法分析離岸風機單樁基礎於可液化海床砂質土壤之行為」，臺灣風能學術研討會暨 NEP-II 離岸風力及海洋能源主軸中心成果發表會，2015 年 12 月。
14. 涂亦峻、李崇正，「位於可液化砂土層中單樁基礎受震反應的離心模擬」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，2011 年 8 月。
15. Williams, K.L., "An effective density fluid model for acoustic propagation in sediment derived from Biot theory." J. Acoust. Soc. Am., vol. 110, pp.2276–2281, 2001.