

108-055-7A92

MOTC-IOT-107-H1DB002b

離岸風機基礎穩定性檢監測技術 研發



交通部運輸研究所

中華民國 108 年 2 月

108-055-7A92

MOTC-IOT-107-H1DB002b

離岸風機基礎穩定性檢監測技術 研發

著者：邱永盛、薛憲文、林俊宏、羅建育、
謝明謀、唐鼎鈞、林雅雯

交通部運輸研究所

中華民國 108 年 2 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

離岸風機基礎穩定性檢監測技術研發 / 邱永盛等
著.-- 初版.-- 臺北市：交通部運研所，民 108.02
面；公分
ISBN 978-986-05-8555-1(平裝)

1.海洋工程

443.3

108000968

離岸風機基礎穩定性檢監測技術研發

著者：邱永盛、薛憲文、林俊宏、羅建育、謝明謀、唐鼎鈞、林雅雯

出版機關：交通部運輸研究所

地址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電話：(04)26587176

出版年月：中華民國 108 年 2 月

印刷者：采峰實業有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 70 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所臺灣技術研究中心網站

定價：300 元

展售處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010800150 ISBN：978-986-05-8555-1 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)本著作保留所有權利，
欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：離岸風機基礎穩定性檢監測技術研發			
國際標準書號（或叢刊號） 978-986-05-8555-1	政府出版品統一編號 1010800150	運輸研究所出版品編號 108-055-7A92	計畫編號 MOTC-IOT-107-H1DB002b
本所主辦單位：港研中心 主管：朱金元 計畫主持人：林雅雯 研究人員： 聯絡電話：04-26587191 傳真號碼：04-26564418	合作研究單位：國立中山大學 計畫主持人：邱永盛 協同主持人：薛憲文、林俊宏、羅建育 研究人員： 地址：80424 高雄市鼓山區蓮海路 70 號 聯絡電話：(07)-5252-000#5287	研究期間 自 107 年 02 月 至 107 年 11 月	
<p>關鍵詞：離岸風機；水深測量；海床穩定性；聲學遙測；海床參數反算；多頻率聲學探測技術；適航水深；浮泥層</p> <p>摘要：</p> <p>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，且對於海上施工與海上結構物穩定度均有關鍵影響，因此提升海床面地形探測精準度，以及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之一。台灣政府積極推動「千架海陸風力機」計畫，對於風機基礎土層之穩定性產生了有效監控之需求；而港口浚挖工程之施作，亦產生了提升海床面地形探測準確度之需求。本計畫針對上述兩大需求，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，整合多頻率聲學反射模擬模式、地音參數反算模式、與實際海域聲學探測方式，研究並提出土層浚挖前後聲納測量標準，並研發離岸風機場址土層穩定性檢監測技術之概念及原型。</p> <p>成果效益與應用情形：</p> <p>研究成果可提供交通部、經濟部及風電相關產業在離岸風電基礎維護管理及基礎穩定性檢監測政策之參考。</p>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
108 年 2 月	264	300	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
<p>機密等級：</p> <p><input type="checkbox"/>限閱 <input type="checkbox"/>機密 <input type="checkbox"/>極機密 <input type="checkbox"/>絕對機密</p> <p>（解密【限】條件：<input type="checkbox"/> 年 月 日解密，<input type="checkbox"/>公布後解密，<input type="checkbox"/>附件抽存後解密，<input type="checkbox"/>工作完成或會議終了時解密，<input type="checkbox"/>另行檢討後辦理解密）</p> <p>■普通</p>			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Developing Normal Incident Sonar to Monitor Sediment Property in Wind Farm Area			
ISBN(OR ISSN) 978-986-05-8555-1	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010800150	IOT SERIAL NUMBER 108-055-7A92	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-107- H1DB002b
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR:Chin-Yuan Chu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Lin Ya-Wen PROJECT STAFF: PHONE: (04) 26587191 FAX: (04) 26564418			PROJECT PERIOD FROM February 2018 TO November 2018
RESEARCH AGENCY: National Sun Yat-sen University PRINCIPAL INVESTIGATOR: Linus Y.S Chiu PROJECT STAFF: Shiahn-Wern Shyue, Chun-Hung Lin, Jiann-Yuh Lou ADDRESS: #70 Lienhai Rd., Kaohsiung 80424, Taiwan, R.O.C. PHONE: (07)-5252-000#5287			
KEY WORDS: Offshore Turbine,Bathymetric Survey,Soil Stability,Acoustic Monitoring,Geoacoustic Inversion,Multi-frequency Acoustic Survey,Nautical Depth,Fluid Mud			
<p>ABSTRACT:</p> <p>For ocean and offshore engineering, precise measurement of water depth, sediment layering structure, and sediment characteristics is usually a key survey objective, for that seabed characteristics can directly affect the stability and safety of the offshore structures. Thus, the techniques and methods for precisely measuring seabed and sediment are very crucial for ocean engineering development. Recently, the need of monitoring the soil structure of offshore wind turbines rises because of the Thousand Wind Turbines Project of Taiwan. Meanwhile, the need of precisely measuring the water depth also appears for port dredges. This project is to develop the multi-frequency seabed and sediment survey techniques base on acoustic propagation, reflection, and scattering physics. Besides, this project also summarize the embryonic procedures for seabed and sediment surveys.</p> <p>BENEFITS AND APPLICATIONS:</p> <p>The Ministry of Transportation and Communications or Ministry of Economic Affairs or business relate to the offshore wind turbine can refer to the results for policy-making.</p>			
DATE OF PUBLICATION February, 2019	NUMBER OF PAGES 264	PRICE 300	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

離岸風機基礎穩定性檢監測技術研發

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目 錄.....	III
圖目錄.....	V
表目錄.....	XV
符號表.....	XVII
第一章 前言.....	1-1
1.1 計畫背景.....	1-1
1.2 計畫目標.....	1-2
第二章 文獻蒐集與彙整.....	2-1
2.1 離岸風機相關文獻.....	2-1
2.2 海床面地形變動量測聲納技術相關文獻.....	2-26
2.3 海床下土層分佈量測聲納技術相關文獻.....	2-41
第三章 多頻率海床面地形變動測量及土層分佈調查之可行性分析.....	3-1
3.1 多頻率海床面聲學反射聲場模擬分析.....	3-1
3.2 多頻率海床面地形變動測量之可行性分析.....	3-6
3.3 多頻率地音反算模式建置與模擬分析.....	3-9
3.4 多頻率海床下土層分佈調查之可行性分析.....	3-22
第四章 多頻率海床探測實驗及資料分析.....	4-1

4.1 海床聲學探測系統及岩心分析系統介紹.....	4-1
4.2 多頻率海床探測實驗彙整.....	4-27
4.3 多頻率海床面地形變動測量實驗及資料分析	4-39
4.4 多頻率海床下土層分佈調查實驗及資料分析	4-53
4.5 多頻率海床探測系統及實驗水槽控制型環境建置	4-66
第五章 計畫成果綜整.....	5-1
5.1 計畫工作成果.....	5-1
5.2 土層浚挖前後聲納測量標準(概念)研擬	5-2
5.3 土層穩定性檢監測技術（概念及原型）研發與測試.....	5-6
第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-2
6.3 預期效益與應用情形.....	6-3
參考文獻.....	參-1
附錄一 期中報告審查意見處理情形表.....	附錄 1-1
附錄二 期末報告審查意見處理情形表.....	附錄 2-1
附錄三 期末報告簡報資料.....	附錄 3-1

圖目錄

圖 1.1	臺灣西南海域之海床聲學探測範例。(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(a)圖同樣測線上之海床下土層探測結果。.....	1-2
圖 2.1	離岸風機於不同負載下的時間(波形)示意圖,(a)不同外力作用所造成的振動頻率,(b)不同外力作用下之整體風機振動頻率.....	2-3
圖 2.2	單樁風機系統的模型及風機振動過程示意圖.....	2-3
圖 2.3	基樁周圍土壤受到週期性的側向應力之示意圖.....	2-4
圖 2.4	基座保護工斷面佈置示意圖.....	2-5
圖 2.5	海流作用下載體式基座附近地形變化.....	2-6
圖 2.6	海流作用下載體式基座展開保護工附近地形變化.....	2-6
圖 2.7	p-y 曲線.....	2-7
圖 2.8	不同密度下土層與樁之間的顯著頻率.....	2-8
圖 2.9	基樁周圍土壤淘刷現象之監測技術.....	2-9
圖 2.10	不同量測位置下測量到的功率示意圖.....	2-10
圖 2.11	監測資料傳輸規劃.....	2-11
圖 2.12	樁-土互制系統模擬.....	2-11
圖 2.13	敲擊基樁模型,監聽其自然頻率聲響的變化.....	2-12
圖 2.14	風海觀測塔工程完工照片.....	2-13
圖 2.15	後期沖刷模擬結果.....	2-13
圖 2.16	葉片損傷風機運轉之時頻圖.....	2-14

圖 2.17	正常風機運轉之時頻圖	2-14
圖 2.18	以彈簧模擬土壤破壞情形	2-16
圖 2.19	日常維護所需之小型高速船	2-16
圖 2.20	維護管理流程圖	2-22
圖 2.21	風機維護結構圖	2-23
圖 2.22	密度盒示意圖	2-24
圖 2.23	不同海床深度下適合的風機安裝基礎型式	2-25
圖 2.24	不同相對密度下之砂土排列描述狀況	2-25
圖 2.25	控制砂斗的開口大小與砂土落距，以自由貫落方式配置不同的砂體相對密度	2-26
圖 2.26	真實海洋環境中常見的海水/海床交界面結構	2-27
圖 2.27	海水/海床交界面處過度層之孔隙率深度分布，左右兩曲線分別為軟質海床與硬質海床之孔隙率分布範例	2-27
圖 2.28	浮泥層示意圖與不同頻率測深儀量測	2-29
圖 2.29	不同頻率測深儀量測	2-29
圖 2.30	33kHz 頻率以下之回波能量差異	2-29
圖 2.31	雙頻率測深儀量測	2-30
圖 2.32	雙頻率測深儀量測	2-32
圖 2.33	Nautical Depth 之探測結果，深藍色線條為 210kHz 之深度探測結果，紫色及淺藍色線條則為以聲學量測結果反推得之統體密度 1150 kg/m ³ 以及 1200 kg/m ³ 之深度	2-33
圖 2.34	Nautical Depth 之聲學探測作業流程	2-33

圖 2.35	浚挖土方計量說明圖.....	2-35
圖 2.36	垂直音束與扇形音束示意圖.....	2-36
圖 2.37	土方計算說明示意圖.....	2-36
圖 2.38	單音束剖面與多音束系統施測示意圖.....	2-41
圖 2.39	窄頻訊號(3.5 kHz)之海床剖面儀探測結果範例.....	2-43
圖 2.40	掃頻訊號之海床剖面儀探測結果範例.....	2-43
圖 3.1	聲波傳遞示意圖.....	3-2
圖 3.2	Wentworth 沉積物粒徑表.....	3-4
圖 3.3	不同粒徑大小粒子對於各頻率聲波之單位散射強度.....	3-5
圖 3.4	5 個不同粒徑大小粒子對於各頻率聲波之單位散射強度比較	3-6
圖 3.5	實際海域聲波反射示意圖.....	3-20
圖 3.6	拖曳式載具與底床回波示意圖.....	3-20
圖 3.7	本團隊模式成果:海床反射係數、孔隙率、吸收斜率、透水率等 參數之經驗關係.....	3-22
圖 3.8	本團隊之掃頻聲納探測結果範例.....	3-24
圖 4.1	聲學探測系統，(a)多頻率海床探測聲學系統圖、(b)聲學底床剖 面儀.....	4-2
圖 4.2	聲學底床剖面儀蒐集之海床正向反射資料範例.....	4-3
圖 4.3	聲學陣列接收資料範例由上至下分別為 4 個接收器之接收情形	4-4
圖 4.4	陣列式聲學底床剖面儀於海上測試實驗中蒐集之底床回波圖	4-4

圖 4.5	聲納系統架構圖	4-5
圖 4.6	多頻率海床聲學探測系統之控制模組介面	4-8
圖 4.7	SBE39 溫壓記錄器	4-9
圖 4.8	拖曳式聲納系統，(a)外觀圖、(b)實際佈放情形	4-10
圖 4.9	多頻率海床量測系統	4-10
圖 4.10	線性頻率調變訊號頻譜圖	4-11
圖 4.11	脈衝壓縮(Pulse compression)流程圖	4-12
圖 4.12	原始實驗訊號圖(a)時頻譜圖(b)頻域圖	4-13
圖 4.13	中心頻率 5000Hz 之實驗訊號解調過程示意圖，(a) 原始訊號 $y(t)$ 乘上 $\cos(2p \cdot f_c \cdot t)$ 後、(b) 原始訊號 $y(t)$ 乘上 $\sin(2p \cdot f_c \cdot t)$ 後、(c) 為式 2.1.4 顯示訊號中心頻率回到基頻後之結果	4-14
圖 4.14	接收訊號帶通濾波示意圖(a) 濾波前訊號頻譜圖(b)帶通濾波後訊號頻譜圖	4-15
圖 4.15	接收訊號低通濾波示意圖 (a)接收訊號回到基頻後之頻域圖(b) 接收訊號進行低通濾波後之頻域圖	4-16
圖 4.16	原始實測資料與經過脈衝壓縮處理之結果圖 (a)原始實測接收資料(b)經脈衝壓縮後的結果	4-18
圖 4.17	沉積物採樣器(SHIPEK Grab Sampler).....	4-18
圖 4.18	英國 GEOTEK 公司製造之多重感應元岩心記錄器 (MSCL)各種探頭與感測器之組合：上為俯視圖、下為側視圖	4-23
圖 4.19	多重感應元岩心紀錄器量測岩心	4-23
圖 4.20	P 波接收器之感測元件以柔性橡皮膜包住，其間充滿油液，此設計使接收器能自由轉動，以增大與岩心管之接觸面積，口	

	徑介於 50~ 150mm 之岩心，均可得到良好效果.....	4-24
圖 4.21	MSCL 系統隨著岩心量測進行，可同步展現各項量測到或運算後的參數。圖中展示海研一號 9 支箱型岩心資料，每支岩心以橫虛線劃分，展示運算後的參數有 P 波振幅(P-wave amplitude)、P 波速率 (P-wave velocity)、 γ 密度 (gamma density, 近似濕統體密度)、磁感率(magnetic susceptibility)、波阻抗(impedance)、孔隙率 (fractional porosity).....	4-24
圖 4.22	透過不同粗細實心鋁圓柱體之(a) r 射線強度; 與(b)P 波走時.....	4-25
圖 4.23	雷射粒徑分析儀.....	4-26
圖 4.24	沉積物分類表.....	4-27
圖 4.25	海床底質採樣位置與底質特性初步分類示意圖.....	4-30
圖 4.26	第一組實驗位置圖，(a)Google 衛星拍攝、(b)海研三號位置現場實際拍攝.....	4-31
圖 4.27	第一組實驗儀器佈放情形，(a)儀器架子與發收換能器架設、(b)儀器下放過程.....	4-32
圖 4.28	第二組實驗位置圖，(a)臺灣周邊海域地形、(b)臺北氣象觀測樁點位.....	4-33
圖 4.29	臺北氣象觀測樁.....	4-34
圖 4.30	第二組實驗軌跡(實線為船軌跡、星號為底質採樣位置)...	4-34
圖 4.31	第三組實驗位置圖，(a)基隆碧砂漁港外實驗位置圖、(b)拖曳式多頻率海床探測聲學系統.....	4-35
圖 4.32	第三組實驗軌跡(實線為船軌跡、星號為底質採樣位置)...	4-35
圖 4.33	第四組實驗位置圖，(a)高雄港外-北邊實驗位置圖、(b)實驗測線軌跡圖(實線為船軌跡、星號為底質採樣位置).....	4-36

圖 4.34	第四組實驗過程圖，(a)拖曳式自收發聲納系統整備情形、(b)底質採樣過程、(c)海床樣本	4-37
圖 4.35	第四組實驗位置圖，(a)高雄港外-南邊實驗位置圖、(b)實驗測線軌跡圖(實線為船軌跡、星號為底質採樣位置).....	4-38
圖 4.36	第五組實驗過程圖，(a)拖曳式自收發聲納系統佈放情形、(b)底質採樣過程、(c)海床樣本	4-38
圖 4.37	第六組實驗情形，(a)昭伸公司-工作船、(b)漂流式多頻率海床量測系統.....	4-39
圖 4.38	第六組實驗過程，(a)工作船行駛至靠近臺北氣象樁、(b)漂流式多頻率海床量測系統佈放過程	4-39
圖 4.39	海洋研究船 EK 38k、120kHz 深度量測資料.....	4-41
圖 4.40	多頻率海床探測聲學系統量測資料(6kHz)	4-41
圖 4.41	多頻率海床探測聲學系統量測資料(34kHz)	4-42
圖 4.42	多頻率海床探測聲學系統取得之深度-頻率變化(2kHz 至 48kHz).....	4-42
圖 4.43	2k 至 10kHz 訊號接收情形，(a)時序列圖、(b)頻譜圖.....	4-43
圖 4.44	10k 至 20kHz 訊號接收情形，(a)時序列圖、(b)頻譜圖.....	4-43
圖 4.45	20k 至 24kHz 訊號接收情形，(a)時序列圖、(b)頻譜圖.....	4-44
圖 4.46	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	4-44
圖 4.47	接收訊號進行訊號處理後結果，20k 至 24kHz 資料.....	4-45
圖 4.48	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.....	4-45
圖 4.49	接收訊號進行訊號處理後結果，(a)11kHz 資料情形、(b)22kHz	

	資料情形.....	4-45
圖 4.50	頻率與量測水深趨勢圖	4-46
圖 4.51	載臺深度資訊(SBE39).....	4-47
圖 4.52	信號處理後之情形，(a)5kHz 海床探測量測(b)35kHz 海床探測量測.....	4-48
圖 4.53	多頻率海床探測聲學系統量測資料(5kHz)	4-48
圖 4.54	多頻率海床探測聲學系統量測資料(35kHz)	4-49
圖 4.55	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	4-49
圖 4.56	臺北港觀測樁近距離量測之 5kHz 回波能量圖	4-51
圖 4.57	臺北港觀測樁近距離量測之 10kHz 回波能量圖	4-51
圖 4.58	臺北港觀測樁近距離量測之 35kHz 回波能量圖	4-52
圖 4.59	臺北港觀測樁近距離量測之 40kHz 回波能量圖	4-52
圖 4.60	臺北港觀測樁附近 4kHz 聲波之海床探測回波圖	4-54
圖 4.61	臺北港觀測樁附近 6kHz 聲波之海床探測回波圖	4-54
圖 4.62	臺北港觀測樁附近 8kHz 聲波之海床探測回波圖	4-54
圖 4.63	臺北港觀測樁附近 10kHz 聲波之海床探測回波圖	4-55
圖 4.64	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.....	4-55
圖 4.65	海床回波訊號擷取範例，此為臺北港實驗區 8kHz 之海床回波訊號.....	4-55
圖 4.66	臺北港實驗區 6kHz 接收資料經脈波壓縮處理後之範例，紅色星號與紅色方框分別標示拍發訊號與接收訊號之抵達波峰值	

	4-57
圖 4.67	EDF 模式所得之有效密度曲線範例(圖片來源:[88, William])	4-57
圖 4.68	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.....	4-58
圖 4.69	臺北港實驗區 4kHz、6kHz、以及 10kHz 頻段聲波反算得之有 效密度(Effective Density).....	4-58
圖 4.70	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	4-58
圖 4.71	臺北港實驗區之海床表層沉積物平均粒徑反算結果.....	4-60
圖 4.72	臺北港實驗區之海床表層沉積物孔隙率反算結果.....	4-60
圖 4.73	臺北港實驗區之海床表層沉積物統體密度反算結果.....	4-60
圖 4.74	高雄港實驗區 5kHz 頻段聲波之海床探測回波圖	4-62
圖 4.75	高雄港實驗區 10kHz 頻段聲波之海床探測回波圖	4-62
圖 4.76	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.....	4-63
圖 4.77	高雄港實驗區 5kHz 與 10kHz 頻段聲波探測所得之海床反射係 數.....	4-63
圖 4.78	高雄港實驗區 5kHz(藍)與 10kHz(紅)頻段聲波之海床表層沉積 物平均粒徑反算結果.....	4-65
圖 4.79	砂粒徑分佈	4-67
圖 4.80	實驗選用之海底泥	4-68
圖 4.81	攪拌均勻後的海底泥.....	4-69

圖 4.82	實驗配置示意圖	4-69
圖 4.83	球面波擴散示意圖	4-70
圖 4.84	計算垂直入射反射係數示意圖	4-72
圖 4.85	砂子以自由質落法鋪設過程	4-73
圖 4.86	(a)使用訊號之時閾圖 (b)使用訊號之頻譜圖	4-74
圖 4.87	本實驗訊號處理能力成功解析出深度 45 公分的回波訊號	4-74
圖 4.88	砂質土壤振動前之實驗配置圖	4-75
圖 4.89	砂質土壤振動前之實驗配置圖	4-75
圖 4.90	於邊界貼上吸音棉，降低邊界反射的噪音	4-76
圖 4.91	擾動及破壞土層之情形	4-77
圖 4.92	土壤受擾動前量測到之頻譜圖	4-77
圖 4.93	土壤受擾動後量測到之頻譜圖	4-78
圖 4.94	於泥質土層進行收發實驗	4-78
圖 4.95	(a)空密度盒之質量。(b)裝滿攝氏 25°C 純水時的質量 ...	4-79
圖 4.96	(a)將密度盒取出時的情形。(b)將密度盒上方突出的部分刮 平，再進行質量量測	4-80
圖 4.97	砂子密度量測情形	4-80
圖 4.98	砂質土層受擾動前後之脈衝壓縮後的回波訊號	4-81
圖 4.99	砂質土層擾動前後反射係數比較曲線圖	4-82
圖 4.100	泥質土層受擾動前後之脈衝壓縮後的回波訊號	4-82
圖 4.101	泥質土層擾動前後反射係數比較曲線圖	4-83

圖 5.1 多孔彈性底床地音數值模式之發展介面圖.....	5-8
圖 5.2 海床物理參數反算流程圖.....	5-9
圖 5.3 海床物理及力學參數之反算過程示意圖.....	5-9
圖 5.4 過去在泥質海床所蒐集的聲納量測實驗資料.....	5-10

表目錄

表 2-1	平面動床基礎沖刷試驗波浪條件	2-5
表 2-2	拆裝維護工程設備需求	2-17
表 2-3	海陸風電產業鏈分類	2-19
表 2-4	離岸風場運維之關鍵概念	2-19
表 2-5	離岸風力運維產業說明	2-20
表 2-6	歐洲大港口之 Nautical Depth 訂定標準	2-32
表 2-7	港灣水域及海岸工程水深相關測量精度表	2-35
表 2-8	IHO 各等級水域測量基本要求	2-38
表 2-9	各廠牌多音束測深儀功能規格比較	2-39
表 4-1	多頻率海床探測聲學系統規格表	4-3
表 4-2	類比輸出模組(Analog Output Module, AO) 規格表	4-5
表 4-3	低頻功率放大器(Power Amplifier) 規格表	4-6
表 4-4	高頻功率放大器(Power Amplifier) 規格表	4-6
表 4-5	中頻聲源換能器(Transducer)規格表	4-6
表 4-6	低頻聲源換能器(Transducer)規格表	4-7
表 4-7	高頻水下換能器(Transducer)規格表	4-7
表 4-8	溫壓記錄儀(SBE39)規格表	4-9
表 4-9	線性調頻訊號(LFM)資訊表	4-11
表 4-10	多頻率海床探測實驗彙整表	4-28
表 4-11	底質特性分析彙整表	4-29

表 4-12	頻率與量測水深關係表	4-46
表 4-13	臺北港及高雄港底質特性分析彙整表	4-63
表 4-14	高雄港底質粒徑分佈表	4-64
表 4-15	統層之擾動前後之統體密度量表	4-83

符號表

由於本報告內數學符號眾多，在此依章節彙整為符號表，各章節間之數學符號為獨立使用。

第 3.1-3.2 節			
P_s	背散射波聲壓	P_i	入射波聲壓
P_0	距聲源 1 公尺處的參考聲壓	a_s	懸浮粒子顆粒半徑
f	散射型態函數	α_w	海水對聲波之吸收係數
r_1	傳感器到懸浮沉積物距離	r_2	懸浮沉積物到傳感器的距離
ω	聲波角頻率	D	傳感器的指向性函數
δv	單位散射體積	δP_{rms}	散射均方聲壓
P^*	共軛聲壓	N	單位體積內的顆粒數
M	重量濃度	ρ_s	顆粒粒子密度
α_s	顆粒粒子之吸收係數	τ	脈衝訊號長度
c	水中聲速	V_{rms}	均方根接收電壓
φ	近場係數	R	傳感器靈敏度
T_v	電壓轉換值	k_s	懸浮粒子的單位散射強度
k_t	聲學系統之系統函數	ξ	沉積物吸收常數
χ	標準散射截面	B	聲波訊號頻寬
ΔR	聲波訊號空間解析度		
第 3.3-3.4 節			
λ	材料的壓縮性	μ	剪切模數
θ	壓縮應變(dilatation)	θ^s	結構體壓縮應變

θ^f	流體壓縮應變	σ_{ij}	彈性體的應力
P R	彈性係數	Q	結構體與流體勢能交互作用之彈性係數
N	多孔材料體的剪力模數	E_c	多孔彈性體動能
K_b	多孔性材料充滿流體時，整體的彈性係數(bulk modulus of frame)		
K_r	多孔性材料內無流體時的體積彈性模數(bulk modulus of grains)		
K_f	流過多孔性材料流體的體積彈性模數(bulk modulus of fluid)		
$\tilde{\rho}_{11}$ 、 $\tilde{\rho}_{12}$ 、 $\tilde{\rho}_{22}$	密度相關函數		
ρ_1	結構體密度	ρ_0	流體密度
u^s	結構體位移	u^f	流體位移
α_∞	折曲度	X_i^s	黏性作用力
φ^s	結構體純量位移勢能	φ^f	流體純量位移勢能
Φ_s 、 Φ_f 、 Ψ_s 、 Ψ_f	勢能函數		
k	波數(wavenumber)	α	曲度(tortuosity)
η	流體黏滯性	κ	透水性(permeability)
ρ_s	海床沉積物顆粒密度	ρ_f	海床中之海水密度
β	孔隙率(porosity)	c_b	底質平均聲速
ρ	底質統體密度	μ	底質剪力模數
F	波蘇拉流體偏差 (Poiseuille flow)	J_0 J_1	圓柱貝索函數 (Bessel functions)
a	孔隙大小參數	ρ_{eff}	等效密度
$P_i(\bar{r})$	反射介面處之入射聲壓	$P_R(\bar{r})$	反射介面處之反射聲壓

P_0	聲源拍發之起始聲壓	P_b	接收器接收之反射聲壓
$\Phi_p(\vec{r})$	聲學系統方向性函數	$G_p(\vec{r})$	格林函數
h	聲學系統與海床之距離	I_i	入射波
I_r	反射波	$R(\vec{r})$	底床反射係數
$H_s(f)$	系統響應	$B_1(f)$	實驗量測收集之接收聲壓
α'	海水之吸收係數(dB/km)	f	頻率
V_s	剪應波速		
第四章			
P_s	訊號功率	P_n	噪音功率
V_s	訊號電壓振幅大小	V_n	噪音電壓振幅大小
f_c	中心頻率	t	訊號時間長度
$x(t)$	原始基頻訊號	$y(t)$	接收載波訊號
$S_1(\tau)$	聲源發射的訊號	$S_2(t+\tau)$	接收器收到的訊號
$I(1yd)$	距離聲源一碼處的強度	$I(r)$	距聲源 r 處的訊號強度
P_1	訊號拍發之聲壓	P_2	接收器收到之聲壓
r_1	聲源到海床距離	R	反射係數
t_{res}	探測系統之時間解析度	bw	訊號
第五章			
SL	聲源的均方根聲壓	r	系統與海床之距離
R_b	海床反射吸收係數		

第一章 前言

1.1 計畫背景

臺灣四面環海，海洋工程之發展與實施隨著技術的發展亦日益增加。隨著海上工程之施作，海洋環境之檢監測需求逐漸提高。臺灣西海岸在政府積極推動「千架海陸風力機」計畫之作用下，對於風機基礎之穩定性與風機之安全運作產生了有效監控之需求。詳細來說，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，需要發展檢監測設備及技術以達到早期預警功能。因此，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。

另一方面，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，亦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，因此需深入探討海床面地形量測誤差之來源，並研究提升量測準確度之方式，以助海上工程之實施。

聲波與聲學系統是現代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 1.1 為以聲學系統進行海床面地形(a)與海床下土層結構(b)之探測範例，兩圖為同一測線上分別以測深儀和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($10^1\sim 10^2\text{kHz}$)進行探測，因此可見海床面反射訊號以及海水不均勻度散射訊號；而掃頻聲納之頻率較低($10^{-1}\sim 10^1\text{kHz}$)，因此主要可獲得海床面與海床下土層回波。本計畫基於上述兩大海洋工程需求，將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，以及提升海床下土層結構與參數之掌握度。

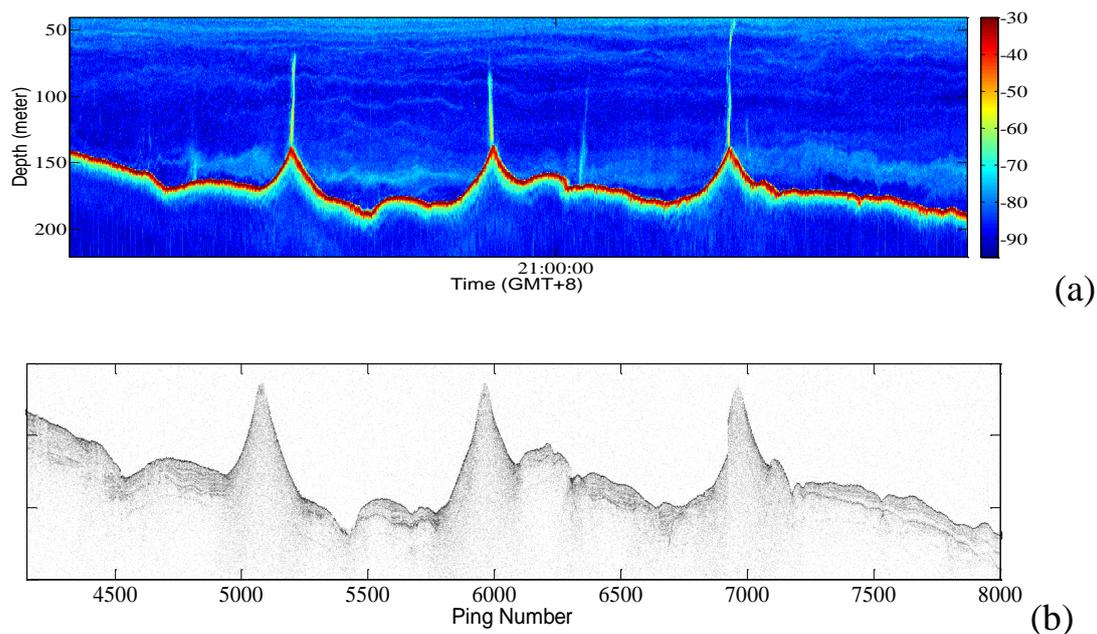


圖 1.1 臺灣西南海域之海床聲學探測範例。(a)以海研三號測深儀探測得之海床面地形與深度，(b)以自行開發之掃頻聲納於(a)圖同樣測線上之海床下土層探測結果。

1.2 計畫目標

本計畫之研究內容主要為聲學技術開發，並且主要針對兩大應用目標來作發展。第一個應用目標為海床面地形探測準確度提升研究，亦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。為完成此兩部分研究，本計畫之工作項目主要包含以下八項。

1. 國內外離岸風機基礎維管計畫、基礎周圍土層穩定性、基樁受振動後周圍土層緊密分佈、受擾動影響範圍及檢監測技術相關文獻蒐集與彙整

此工作項目可使本計畫掌握國內外之離岸風機基礎土層穩定性標準，以及基礎土層受震動後之作用與檢監測技術最新發展。

2. 利用不同頻率之聲納進行海床面地形變動測量及海床下土層分佈

之相關文獻蒐集與彙整

此工作項目可使本計畫掌握國內外最新海床聲學探測技術、研究成果、與市售系統規格。

3. 提出利用不同頻率之聲納進行基礎周圍海床面地形變動測量、海床下土層分佈及受擾動或振動影響後土層分佈調查之可行性分析

此工作項目將基於本計畫上述兩項文獻蒐集與彙整結果，分別提出 1)利用不同頻率之聲納進行海床面地形變動測量之可行性與預估可達到準確度分析，以及 2)利用不同頻率之聲納進行海床下土層分佈與穩定性調查之可行性與預估可達到準確度分析。

4. 實海域多頻率海床聲學探測技術測試驗證

此工作項目包含發展多頻率聲學探測系統，並運用此系統分別於港口海域以及離岸場域進行多頻率海床聲學探測技術測試與驗證。

5. 土層浚挖前後聲納測量標準(概念)研擬

此工作項目為整合上述研發成果，基於聲波反射、散射、以及吸收等特性，同時考量深度解析度、吸收損耗強度、以及散射訊號干擾程度，提出土層浚挖前後，海床面地形與深度探測之聲納測量標準建議。

6. 離岸風機場址土層穩定性檢監測技術（概念及原型）研發與測試

此工作項目同樣為整合上述研發成果，基於聲波反射、散射、以及吸收等特性，提出整合多頻段聲波進行海床下土層結構與參數之探測與估算技術，可用以提升土層穩定度參數估算之正確性，以提供做為海床下土層結構緊密度或鬆動程度之判斷參考。

7. 多頻率海床下土層穩定性檢監測技術之實驗室試驗與驗證

此工作項目將在中山大學實驗室中建置兩種不同緊密度之土層，並以多頻率聲納系統進土層受擾動前後之土壤緊密度探測試驗。

8. 研提離岸風機場址土層穩定性檢監測技術手冊

此工作項目將基於上述工作項目之研究成果，研擬提出離岸風機場址土層穩定性檢監測技術手冊原型，包含不同地質密度土層適用之聲納調查技術、數據分析及系統說明等。

本計畫主要進行海床面地形探測之聲學技術研究，以及海床下土層結構與參數特性估算之聲學技術研究，此研究屬於初期技術發展階段，且海床聲學探測技術研究屬於基礎技術能力提升，雖然此計畫之需求是因離岸風機基礎土層穩定性之檢監測而起，但本計畫將聚焦在聲學技術之提升發展上，而暫不將研究標的設定為特定種類基樁之研究。研究過程將基於文獻資料、數值模擬、以及實驗量測與數據分析等方式，評估聲學技術可提升之部分，並針對可提升之聲學技術提出操作方式參考，期能在未來應用於離岸風機場址之海床檢監測，以及其他淺水海域之海床探測需求上。在具體應用上，本計畫之研究成果未來應用方向包含以下 3 方面。

1. 本研究所發展之多頻率海床面地形變動探測技術可應用於檢監測淘刷情形及深度，並將量測資料提供給相關單位，由相關單位進行施工措施判定。因此本技術可應用於尚未進行淘刷保護工程之各式海上觀測樁或其他基樁之周圍土層監測。
2. 本研究所發展之多頻率海床下土層監測技術可應用於以聲學方式快速估計海床表層沉積物之物理與力學參數，雖然海床實際情形態樣及土層種類繁多，無法窮盡，本研究在今年計畫中主要著重在技術之發展以及方法論之建立，後續再針對特定海域及海床條件進行本研究成果之適用性測試。
3. 本計畫之目標為深入了解海床面反射特性與海床下土層探測之頻率相依性，由於不同海域之海水與環境特性皆不同，未來此研究成果即可作為立基，有助於針對不同港口、或不同應用目標訂定適用之探測標準。

本計畫在多頻率聲學探測上的整合分為硬體及軟體兩大部分，在硬體部分，本計畫分別在吊放式載台與拖曳式載台上整合自 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。其次在軟體上，本計劃之整合乃是指整合運用多頻率聲波之探測結果，來獲得較精細的海床探測結果。對於海床面地形探測而言，多頻率聲波探測可應用於估算 Nautical Depth、固體海床面、或其他浮泥層中等密度深度面；對於海床下土層探測而言，整合多頻率聲波之探測結果可提高海床表層沉積物之物理參數反算準確度。

目前常採用之底層剖面儀頻率範圍大多在 1-20kHz，與本計畫在海床下土層探測使用之頻率範圍相近，但由於本計畫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計畫需求，因此本計畫需使用自行開發之儀器設備進行量測與研究。

第二章 文獻蒐集與彙整

2.1 離岸風機相關文獻

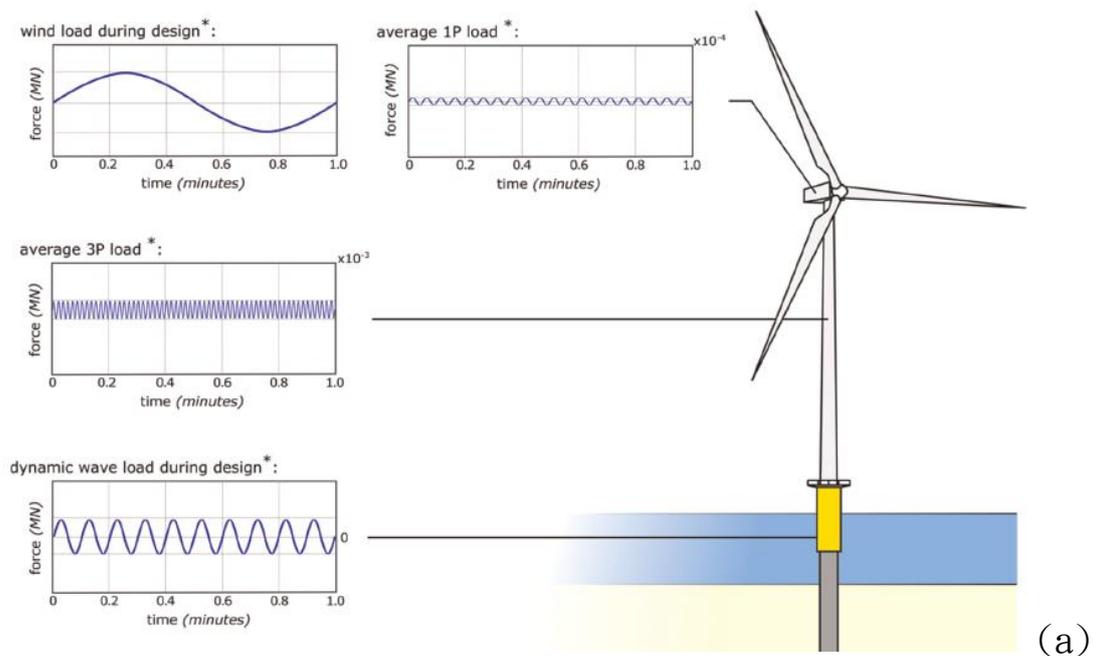
在有關離岸風機土層穩定性探討方面，過去的文獻中大多集中於探討離岸風機周圍表面土層的淘刷，因為土壤淘刷會造成基樁周圍土壤之流失^[1,15,2]，對風機的基礎穩定性有負面的影響。然而除淘刷外，風機本身受風力、波浪、以及風扇運轉等因子作用下，亦會產生振動的情形，此振動將影響風機基樁周圍土層之結構，甚至可能造成土層鬆動^[2,3,4]。此外，臺灣常見的地震現象也可能造成突發性的海床結構變動，造成離岸風機基樁附近土層鬆動或是土壤液化等現象。這些對離岸風機基樁可能造成損害的現象雖然不一定會發生，但為防患於未然，仍需發展建立適當的檢監測技術與相關計畫。

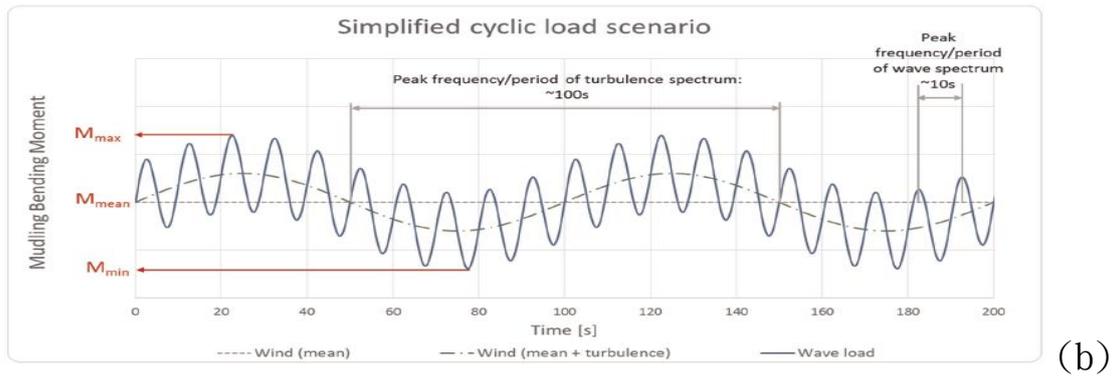
綜合以上，本節文獻匯整中將針對以下相關文獻部分進行蒐集：風機本身振動對土壤穩定性之影響、淘刷對基樁之影響、土壤液化、基樁周邊之檢監測技術、離岸風機相關維管計畫以及室內土壤試驗。

2.1.1 風機振動與土壤穩定性之影響

支撐離岸風機的土壤之間的受力情況，其實源自於風機的振動所造成的作用力^[5]。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^[5]。風機受不同外力作用而造成的振動頻率亦不同，如圖 2.1(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，這些不同頻率之振動整合起來則將產生如圖 2.1(b)之振動模式。Adhikari 等人^[6]提出單樁離岸風機的系統模型與其振動方式，如圖 2.2，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(泥)層的變化。當風機擺動過程中往右側彎曲時受到擠壓的土(泥)層會變形^[7]，左側的縫隙則會有水透進來圖 2.3(b)，當基樁

回到原本位置時圖 2.3(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，周圍被擠壓處土(泥)層密度會提升，導致空氣及水的穿透量會降低^[8]。此現象較常於黏性土壤環境中觀測到，我國離岸風場之土層條件雖較不會出現此現象，但仍可幫助吾人等充分了解國內外對於離岸風機基樁周圍土層之研究現況。最後，在離岸風機基樁周圍土層之長期變化方面，由於離岸風機發展與大規模應用之時間尚不長，由文獻資料顯示，基樁與周圍土(泥)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^[7]。由上述文獻結果可知，風機基樁振動會造成周圍土層之密度、孔隙率、透水率、以及層次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(泥)層變化^[7]。





(b)

圖 2.1 離岸風機於不同負載下的時間(波形)示意圖，(a)不同外力作用所造成的振動頻率，(b)不同外力作用下之整體風機振動頻率(圖片來源：[5])

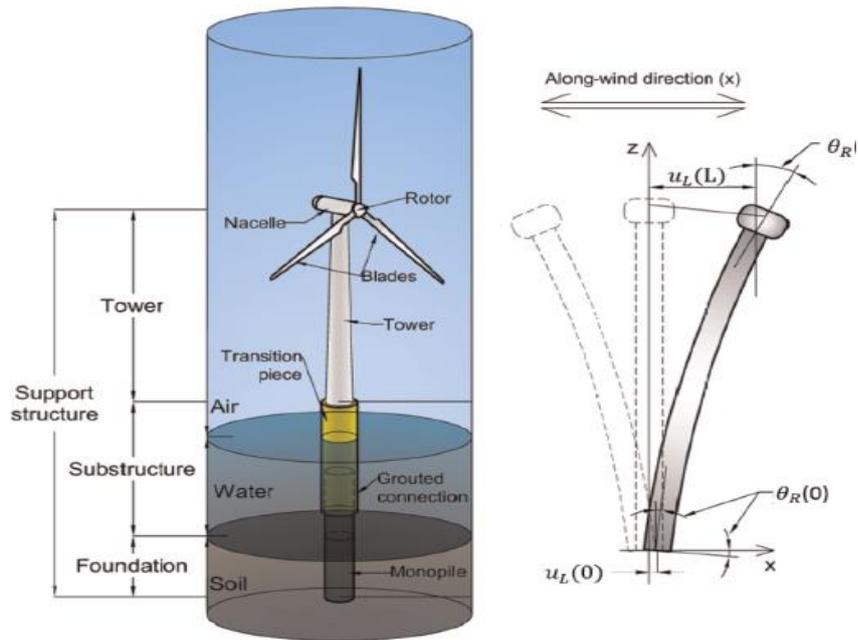


圖 2.2 單樁風機系統的模型及風機振動過程示意圖(圖片來源：[6])

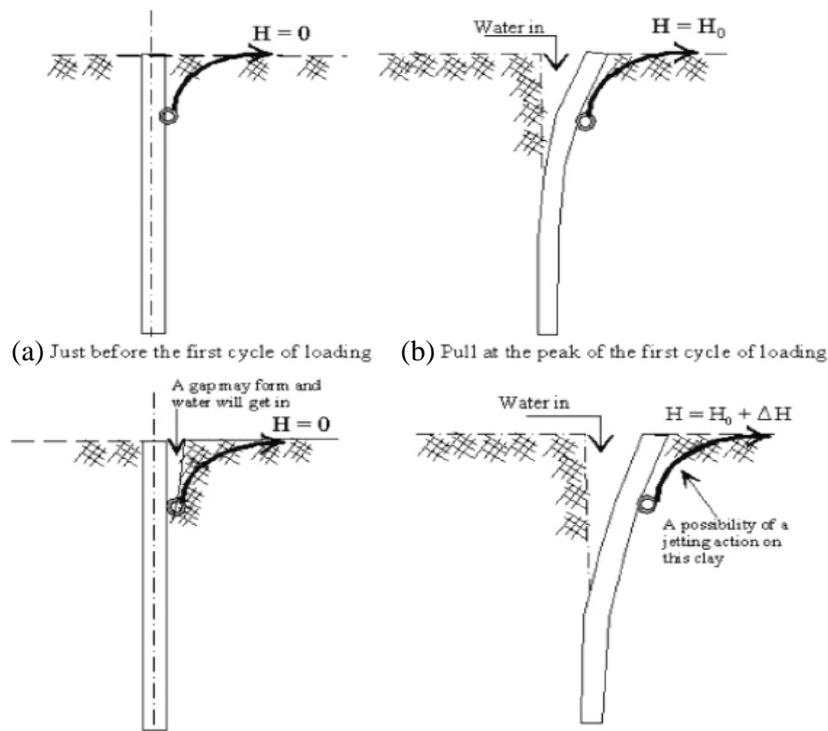


圖 2.3 基樁周圍土壤受到週期性的側向應力之示意圖(圖片來源：[8])

2.1.2 淘刷對基樁之影響

文獻^[9]探討風機基座保護工所受波流水動力是否影響基座安全，內文也進行基座保護工前與保護工後(如圖 2.4)，受到沖刷的影響。在水工試驗則用之底質材料為中值粒徑 $D_{50}=0.2\text{mm}$ 之砂粒，流速等參數基座之試驗條件如表 2-1。文中最後給出了 12m 水深基座較 16m 水深基座，受到較大的沖刷深度 2.73 m(1.31D)與 2.424 m(1.17D)影響 1.17D)，而沖刷範圍為 6D 與 2.5D(大於 0.5 m 深之沖刷地形)。而受保護工後，12m 水深基座，約 1.0~1.5 m 之沖刷深度、16m 水深基座保護工內側沖刷深度約 0.5~1.0 m。

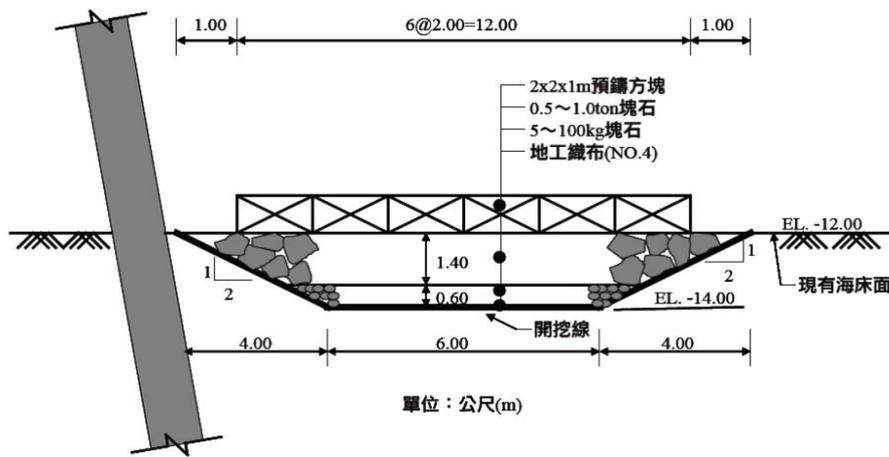


圖 2.4 基座保護工斷面佈置示意圖(圖片來源：[9])

表 2-1 平面動床基礎沖刷試驗波浪條件(表格來源：[9])

試驗 基座 水深	潮位	水位(m)		波高 $H_{1/3}$ (m)		週期 $T_{1/3}$ (sec)		海流(m/s)	
		現場	試驗	現場	試驗	現場	試驗	現場	試驗
12 m	M.W.L.	13.39	0.372	6.77	0.188	11.74	1.96	0.0	0.0
	L.L.W.L.	10.44	0.290						
	M.W.L.	12.09	0.336	2.5	0.069	7.0	1.17		
	L.L.W.L.	9.14	0.254						
16 m	M.W.L.	17.39	0.483	7.72	0.214	11.67	1.95	1.0	0.17
	L.L.W.L.	14.44	0.401						
	M.W.L.	16.09	0.447	2.5	0.069	7.0	1.17		
	L.L.W.L.	13.14	0.365						

文獻^[10]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沖刷、沖刷範圍與最大沖刷深度等相關研究探討，再依試驗結果研擬保護工方式及進行保護工模。試驗部分藉由水工模型試驗先載體式基座風機探討以下議題:動態反應分析及基座周圍之地形沖刷、沖刷範圍與最大沖刷深度等。其中水工模型以 1/49 之等比模型方式建構。結果顯示在保護工導流板後，基座迎流面前方及轉角處沖刷深度與沖刷範圍都明顯變小(如圖 2.5、圖 2.6)，基座背流面則有沖刷之情況發生，而基座兩側因仍有尾跡。但整體沖刷深度與沖刷範圍都有明顯變小，基座保護

工導流板展開確實可減緩沖刷之深度與範圍。而在經颱風波浪條件搭配海流及風速試驗後，風機機艙及塔柱之加速度主要振動頻譜為 2.15 Hz 與 0.54 Hz，主要受到波浪週期作用之影響。

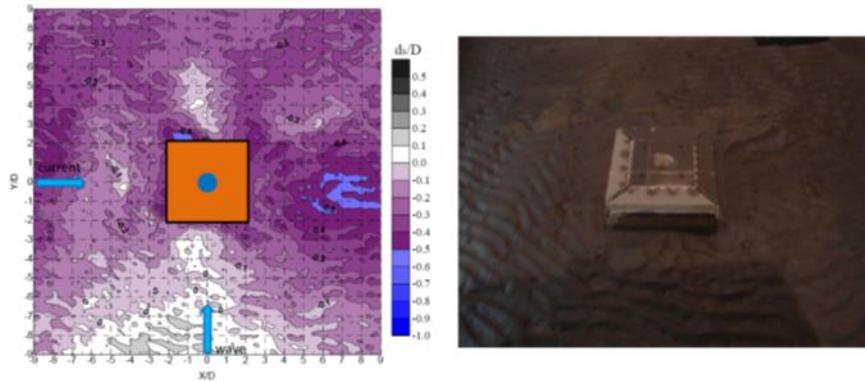


圖 2.5 海流作用下載體式基座附近地形變化(圖片來源：[10])

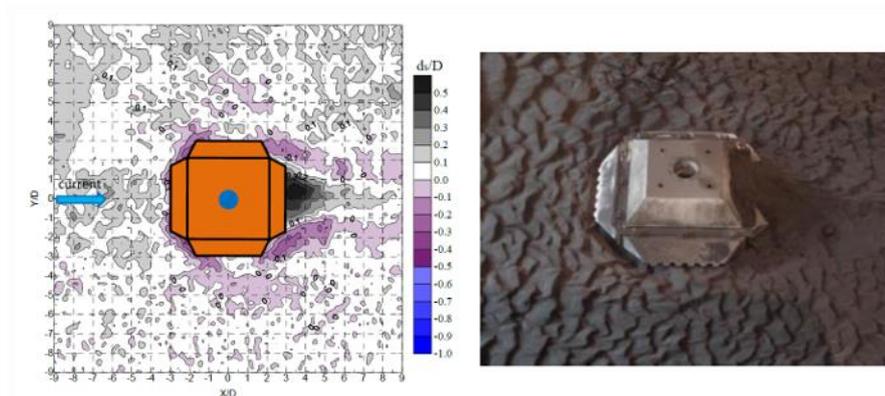


圖 2.6 海流作用下載體式基座展開保護工附近地形變化(圖片來源：[10])

由上述文獻結果可得知，基樁周圍有無保護工法，對於沖刷深度有直接的影響，而在沖刷深度上，淺水區(12m)比深水區(16m)沖刷深度大。在極端的案例中，沖刷範圍最大可以達到 6D(12m)與 2.5D(16m)。在多功能創新型離岸風機載體式基座上，能透過保護工導流板來改善整體沖刷深度與沖刷範圍。

2.1.3 土壤液化

文獻^[11]中特別提到風機設置之後，風機本身和土壤緊密貼合會相互

影響，臺灣處於環太平洋地震帶上，時常發生大大小小的地震，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的現象，使土壤瞬間失去支撐基礎的能力，就會讓風機傾倒。

文獻^[12]點出目前現有離岸風機規範中，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，針對當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。作者觀察傳統無液化下的 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 2.7。

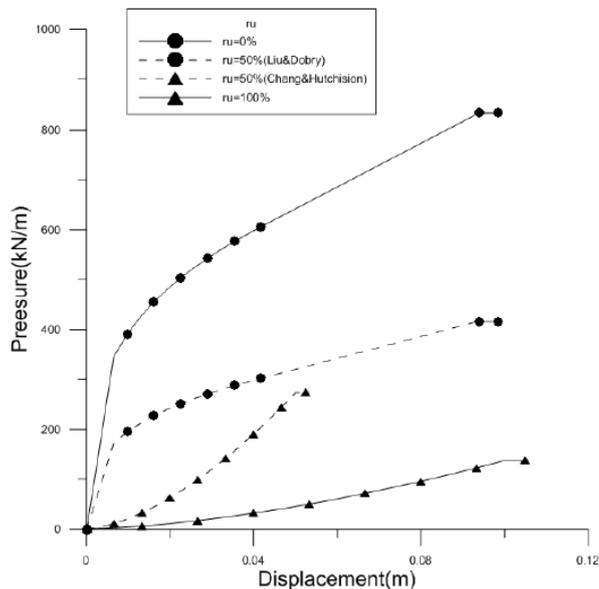


圖 2.7 p-y 曲線(圖片來源：[12])

上凹型 p-y 曲線形成之主要原因有二：(1)地震力誘發之反覆剪應力作用，使得基樁與土壤界面逐漸有小空隙形成，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 曲線得以上升。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)。

文獻^[13]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。文中特別使用尺度定律讓風機尺寸縮小。結果顯示基樁受震時，乾砂試體最大彎矩量發生在深度 4m($z/L=0.21$)處，飽和砂試體最大彎矩量發生在深度 6.4m($z/L=0.33$)處，顯示淺層土壤液化時，土層束制基樁的深度會向深層發展。

文獻^[14]採用不同材質之模型樁以探討勁度不同基樁受震反應。文獻也提到土壤液化對樁之基礎影響探討。文獻中試驗過程以濕沉降法(wet sedimentation)準備飽和砂體。試驗砂為石英砂。而試驗結果顯示，當無載重時，土壤與樁隨密度增加，頻率也增加。載重越重，樁與土的頻率會差異越大。基樁震動主要由土層掌控，但當載重大時，改由樁頂上部之慣性力掌控。(圖 2.8)

Density of soil, Dr, %	Mass on pile top	Predominant frequency, Hz	
		Soil	Pile in soil
7.5	No mass	10.49	10.49
30.6	No mass	11.68	11.7
31.7	1 disk of mass	11.8	11.7
40.5	1 disk of mass	11.8	11.7
56.6	6 disks of masses	13.1	4.88
65.4	6 disks of masses	13.2	5.1

圖 2.8 不同密度下土層與樁之間的顯著頻率(圖片來源：[14])

由上述文獻結果可得知臺灣處於環太平洋地震帶上，使得容易造成土壤液化現象。在土壤液化方面，有部分文獻利用觀察 p-y 曲線來判斷是否產生土壤液化的情形。而當土壤液化發生時，會導致土壤瞬間失去支撐基礎的能力。然而，目前現有的離岸風機規範中，較少探討土壤液化對離岸風機基礎的影響。部分文獻點出樁的受力情形與土壤液化有相關(最大彎矩量向深層發展)，這部分對於未來檢監測發展亦能提供幫助。

2.1.4 檢監測技術

在檢監測技術發展上，根據文獻蒐集之結果，現階段尚無多樣化且發展成熟之檢監測技術資料可供參考。發展較多的技術同樣是在風機周圍土層淘刷現象的監測上，如圖 2.9 所示，由於淘刷現象會造成基樁周圍土壤流失，因此有許多的監測系統是直接架設聲學探測器，持續以近距離測深方式監測海床面之型態變化，以此監測基樁周圍土層條件^[15,16]。

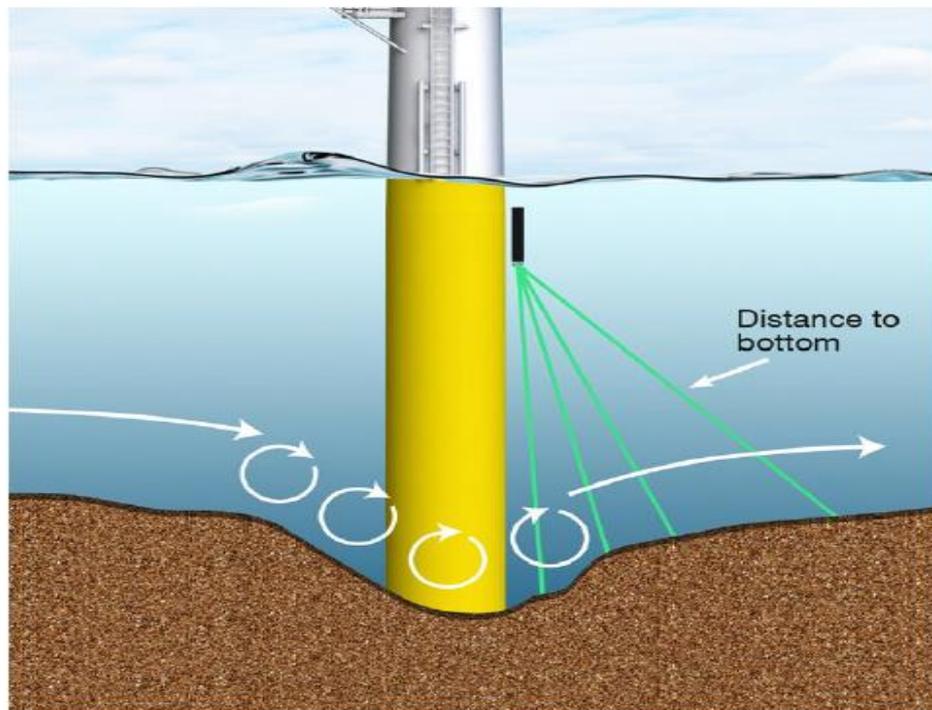


圖 2.9 基樁周圍土壤淘刷現象之監測技術(圖片來源：[16])

而針對風機基樁振動所造成之土層變動，由於此變動乃是涵蓋一定的土層厚度，因此無法單以海床面之型態變化監測而得。過去尚無聲學技術被應用在風機基樁周圍土層穩定性檢監測上，而是使用直接量測方式來進行檢監測。由於基樁振動頻率與其基礎土層剪應力條件有關^[3, 6, 7, 17, 18, 20]，亦即若風機基樁周圍土層產生鬆動情形，則風機本身的振動會直接受到影響，因此 Versteijlen 等人^[20]在基樁上架設加速規與應變計(圖 2.10)，量測及監控風機各主要結構之振動情形與振動頻

率，以此來監測風機基樁周圍土層所提供之力學條件。對比於此類直接量測之監測方式，雖然目前尚無基於聲學技術之檢監測方式發展，但是根據歷年來豐富的研究成果，以聲學方式監測基樁周圍基礎土層內部結構、物理參數、與工程參數之方式應為可行。下面兩節(2.2、2.3)將針對與海床探測聲學技術相關之文獻進行介紹。

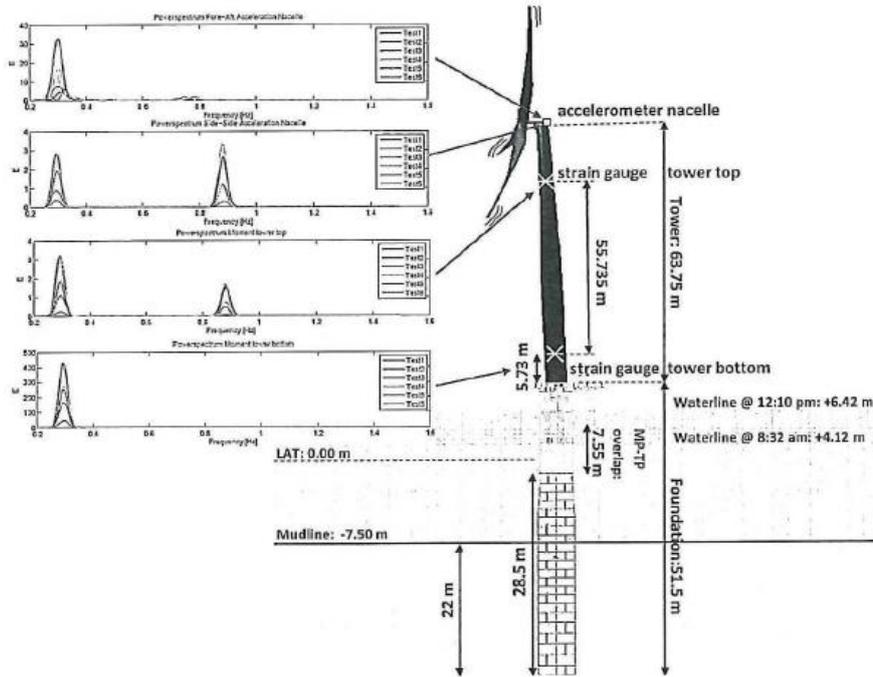


圖 2.10 不同量測位置下測量到的功率示意圖(圖片來源：[20])

文獻^[21]探討了台電公司於彰化外海之海氣象觀測塔的資料監控與資料庫建置。資料監控包含了結構振動設備安裝、結構振動資料收集、並配合國家能源主軸計畫海氣象監測資料、監測資料加值與資料庫建置、海氣象觀測塔風、波、流載重估算、海氣象觀測塔實測振動反應分析、海氣象觀測塔整體反應數值分析、參考風機受力反應分析以及教育訓練等多項工作項目。在環境資料方面包括風速、風向、氣溫、氣壓、相對濕度、降雨、淨輻射強度等水面上資料及流速、流向、波高、波週期、波向、水溫、鹽度、水密度等水面下資料，期望透過蒐集海氣象觀測塔風、波、流等，提供後續離岸風機設計作用力估算。

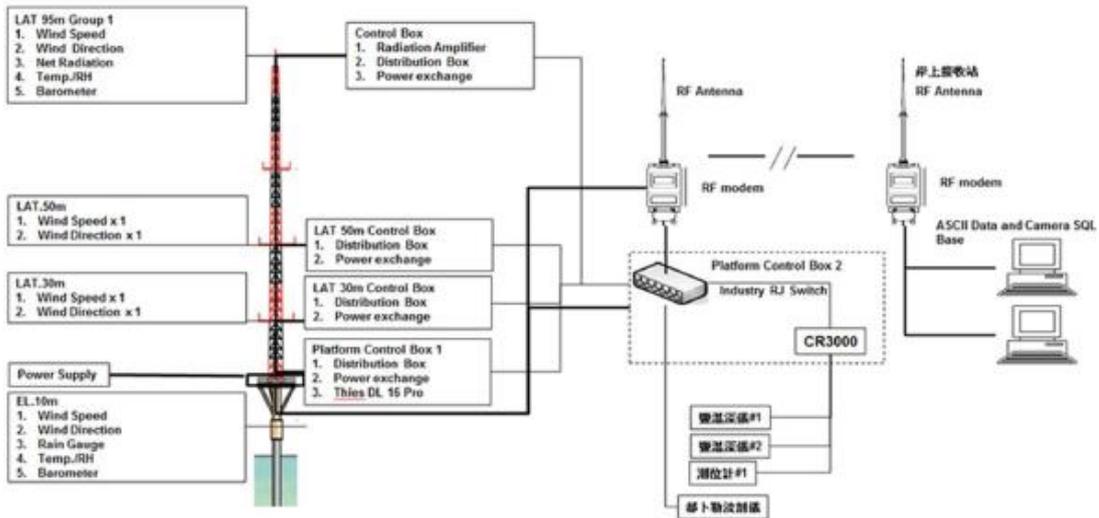


圖 2.11 監測資料傳輸規劃(圖片來源：[21])

另外，該文獻亦提及監測資料傳輸規劃，並已成功透過無線傳輸設備與陸地完成傳輸資料(圖 2.11)。結構振動監測部分，在基樁上安裝振動監測儀器(XY、XZ 方向)進行支撐結構變形分析，並且參考風機極端條件下反應分析。利用彈簧方式來觀察樁-土互制系統如圖 2.12。文獻中更提及基礎淘刷對基礎勁度之影響，透過過往潛水供水下作業，瞭解我國西部海域海床淘刷嚴重，仍急待進一步評估與研究傳統拋石防淘蝕工程的可行性。Sumer[1992]彙整各學者進行之樁周土壤淘刷實驗結果，並給出淘刷將造成大口徑單樁基礎之水平基礎勁度大幅降低。基礎淘刷深度 $S_e(4.94m)$ 約為 1.3 倍大口徑單樁基礎直徑($D=3.8m$)。

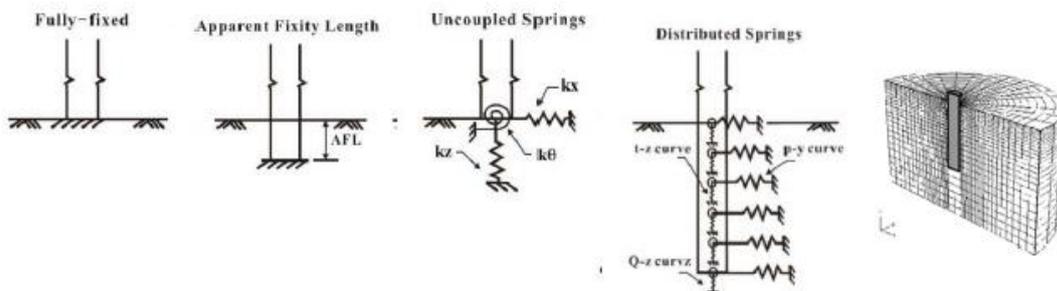


圖 2.12 樁-土互制系統模擬(圖片來源：[21])

文獻^[22]利用敲擊基樁模型並布置水下聽音器，監聽其自然頻率聲響的變化，用以監測風機健康狀態(圖 2.13)。文中利用結構本身動態振之特性，配合水下聽音器收音找出訊號特徵。比對穩定與不穩定情況。

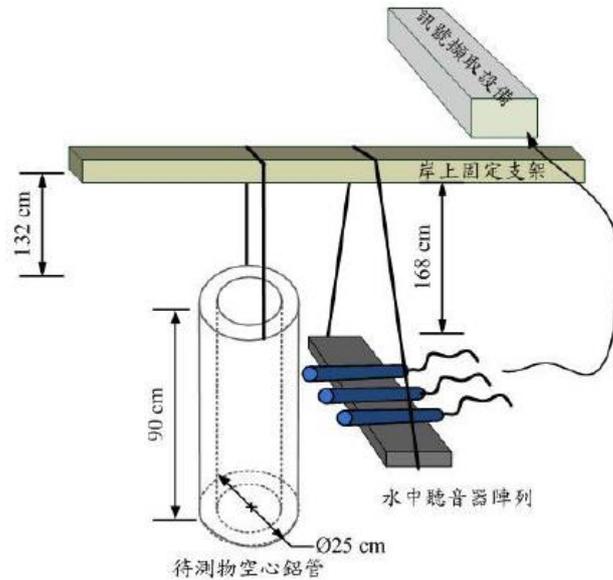


圖 2.13 敲擊基樁模型，監聽其自然頻率聲響的變化(圖片來源：[22])

文獻^[23]透過整合即時現場海象觀測資訊(風海觀測塔實際完工情形如圖 2.14)及海象預報數值模式，開發可應用於離岸風電產業之即時監測預警(報)系統。其中包括四個分項，分別為：風海觀測塔海象觀測技術發展、水動力及漂砂懸浮質影響分析數值模式(如圖 2.15)、海域懸浮泥砂濃度量測儀器開發、及遠端即時監測及預警系統開發。透過以上海象觀測資訊累積，建立海象預報技術，將影響海事工程施工品質及工期管理成效，以及於運維階段提供即時性之海象觀測資訊，供以可能發生之搶修維護參考。



圖 2.14 風海觀測塔工程完工照片(圖片來源：[23])

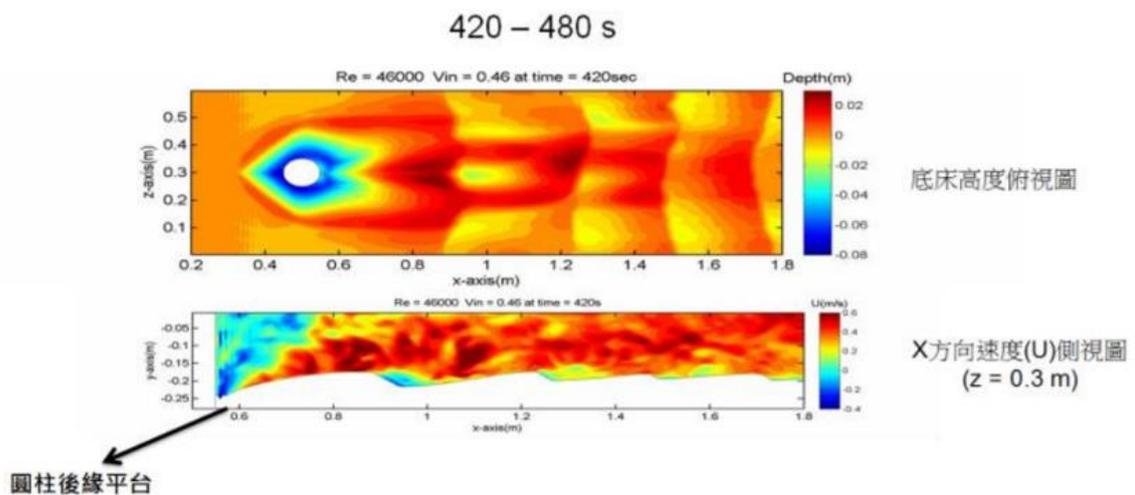


圖 2.15 後期冲刷模擬結果(圖片來源：[23])

文獻^[24]針對離岸風機的整體性能、葉片結構性能及葉片噪音引入美國智慧維護系統中心(Intelligent Maintenance System Center IMS)所開發的 Watchdog 演算法工具程式，開發一線上預兆式診斷與健康管理程式。文中提到目前風機的維護因元件及故障型態的不同，採用三種方式：第一種為非排程維修(Unscheduled Maintenance)即是元件發生故障無法運作時才去維修更換，稱為修復式維修(Corrective Maintenance)；第二種是排程維修(Scheduled Maintenance)是定時維修更換元件，以避免故障的發生稱為預防式維修(Preventive Maintenance)；第三種在風機

上最進步的維護技巧則是條件監控維修(Condition Based Maintenance)是以感測器即時監控元件或系統的狀態，用以判定是否需進行維修。而在第三種監控維修方式上，該文中透過對台電風機正常與異常操作情況下之風機葉片噪音訊號特徵分析，並觀察到正常與異常的風機葉片所發出的不同噪音訊號特徵如圖 2.16、圖 2.17。

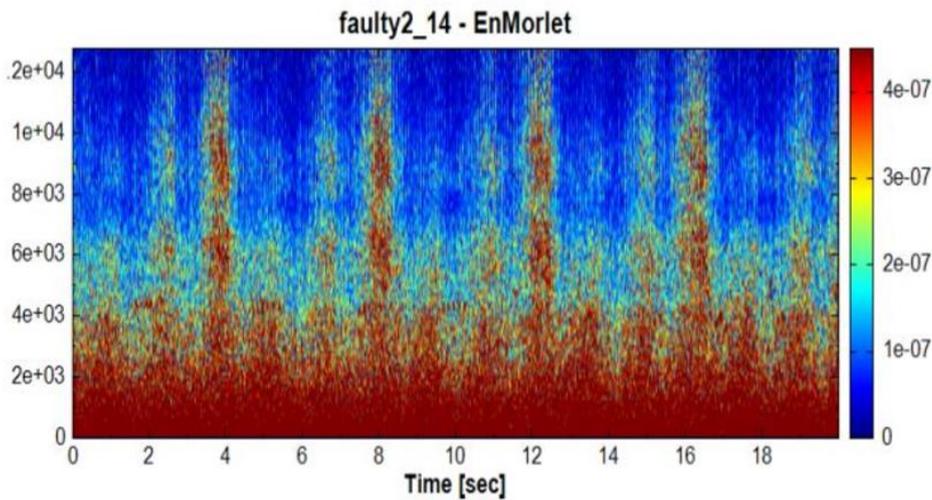


圖 2.16 葉片損傷風機運轉之時頻圖(圖片來源：[24])

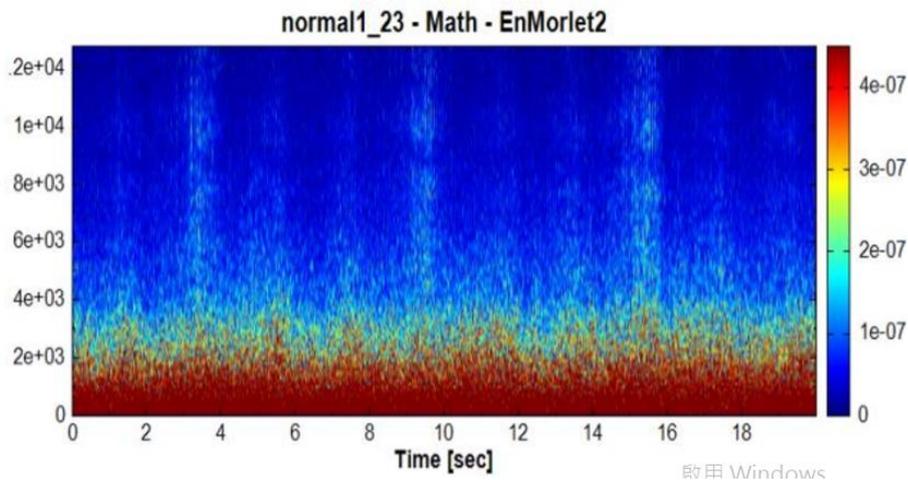


圖 2.17 正常風機運轉之時頻圖(圖片來源：[24])

文獻^[25]說明雖然臺灣風力充沛，相當適合發展離岸風力電能，但地震、洋流、高溫、高濕對於風機結構之強度考驗甚鉅，尤其是颱風與東北季風所帶來的瞬間陣風，更加考驗風機葉片及塔架結構強度。本文主要探討離岸風力發電機的結構及材料問題，包含安全性分析、腐

蝕防治、及損傷監測。

該文獻於風振分析中提到，當流體流過風機時會使風機後方產生紊流(漩渦)，當漩渦釋放頻率靠近結構物自然頻率某段範圍時，風外力激振頻率將會被強制牽引與自然頻率相等，會產生共振。而風機葉片靠近根部之前半部極容易與葉片前四階模態產生共振，葉片後半部之薄翼部分較容易有顫振產生，因此若渦致共振與顫振同時發生，則在平面彎曲之振盪會更劇烈，甚至有危及整支風機之安全性疑慮。

文獻^[26]主要探討風機樁柱之非破壞性檢測，藉由雙譜分析搭載類神經網路系統，期望藉由風機葉片本身產生的振動訊號，判別、預測樁柱健康情況。該文獻針對樁柱底做縮尺模型進行非破壞性健康檢測的實驗，實驗概念圖如圖 2.18，中心柱子為長 112cm 之 PVC 管，東西南北四個方向共接 5 層相同之彈簧，藉由彈簧不同的連接數量、狀況，來模擬土壤之破壞情形，並於 PVC 管頂部放置一振動馬達，模擬風機轉動時產生的振動，距頂部 22.4cm 處黏置一加速規，蒐集 PVC 管之振動訊號。為模擬土壤受破壞之情形，實驗中陸續拔除第一層及第二層之彈簧，再與彈簧完整為拔除時進行相互比較，結果發現當第一、二層彈簧皆被拔除時(表層土體受破壞)產生的振動明顯大於其他狀況下的振動情形。將此數據進行雙譜分析，但在這個類神經網路裡面給定的訊號包含了過多不具代表性的訊號，嚴重的干擾了系統的判斷，故造成非常大的判斷誤差，準確率須大幅提升。

由上述文獻結果可得知，目前對於離岸風機的檢監測技術，大多是圍繞在基樁本體、基樁葉片、海氣象觀測等議題上。對於土層淘刷監測上，則是有部分文獻是將聲學儀器架設於基樁本體，透過監測土層深度變化來得到淘刷情形，或是利用基樁振動方式來推估土層的受力情形。然而，較少的是透過直接量測的方式，來獲取土層層次結構等物理參數。

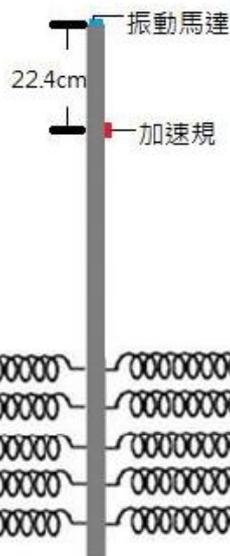


圖 2.18 以彈簧模擬土壤破壞情形(圖片來源：[26])

2.1.5 維管計畫

文獻^[27]探討彰化縣海域之風機海岸管理利用說明，文中提及開發範圍面積總計約1.1公頃，影響海域範圍約7.0 km²。而在彰濱工業區地質鑽探資料顯示，計畫區附近海域海床主由沈泥質細砂(SM)、沈泥質黏土(CL)及黏土質沈泥(ML)交互組成。在設施維護設計部分，整理維護工作主要項目包括船隻租賃與風機維護。其中，維護船隻可分為兩大類：1.日常維護所需之小型高速船(如圖2.19)。2.當有大型元件故障時則需要向海事工程廠商租賃大型工作船進行拆裝維護工程(如表2-2)。



圖 2.19 日常維護所需之小型高速船(圖片來源：[27])

表 2-2 拆裝維護工程設備需求(圖片來源：[27])

船舶	類型	優點	缺點	波高限制
快速反應船 (Quick Response Vessel)	硬式充氣艇 (RIB)	<ul style="list-style-type: none"> 能快速接近位址 市場上廣泛使用 較大部分工作船省燃料 亦可作為子艇 (daughter craft) 	<ul style="list-style-type: none"> 不適用於遠距輸送 不適用於繁苛條件輸送 不適合輸送 50 公斤 g 以上之零件與耗材 	~ < 1.0 m
工作船 (Workboat)	鋁合金或複合雙體船	<ul style="list-style-type: none"> 操作經驗 市場上廣泛使用、可長期租賃 大型工作船可容納起重設備 能容納部分駁靠設施 (Access Systems) 	<ul style="list-style-type: none"> 不適用於 2 小時以上之輸送 	0.8 - 1.5 m
小型水面雙體船 (SWATH Vessel)	小水面雙體船 (Small Water-plane Area Twin Hull Vessel)	<ul style="list-style-type: none"> 已用於商業與軍事用途 較穩定之船體有助於在較嚴苛海象條件下之人員輸送 相較於單體船與工作船, 工作人員在航行期間較為舒適 可容納中等尺寸零組件 能容納部分駁靠設施 	<ul style="list-style-type: none"> 較昂貴 吃水深 高燃料用量 	1.0 - 2.0 m
自升式平台 (Jack-up)	自升式船或駁船	<ul style="list-style-type: none"> 適合各種維修(由小到天之組件) 具備重型起重能力 具備技術人員住宿設施 頂托升起後穩定性高 可長期離岸 	<ul style="list-style-type: none"> 租用與航行費用高昂 輸送速度慢 佈署與頂托升起緩慢 頂托升起過程易受波高與海流限制 	1.0 - 2.5 m (頂托升起過程中)

在離岸風機之環境安全性維管計畫部分，根據美國能源局(U.S. Department of Energy)委託美國加州 Sandia 公司之 Sandia 國家實驗室進行之計畫報告^[28]，對於離岸風機之環境效應以及安全性需要建立 Conceptual Site Model (CSM)來輔助進行維護管理，利用 CSM 架構進行維護管理可掌握整體離岸風機周圍環境之安全性，並可提早擬定各種狀況下之因應計畫。其特點在於將離岸風機架設海域之各種海洋環境與海床土層參數納入考量，以數值模式之方式進行離岸風機周圍環境與安全行模擬，並持續收集海床土層資料，以進行模式比較與修正。

此外，由文獻中也可知道^[19,20]，在離岸風機之維護管理中最為重要的是持續的進行風機周圍土層之監測，美國 COWRIE 公司提出自風機架設前之海床調查結果，以及風機架設後之持續監測結果，以此來比對分析離岸風機周圍土層之變化情形^[19]。同樣的，Vattenfall 公司也針對英國 Kentish Flats Offshore Wind Farm 進行持續的海床調查監測，以進行離岸風機安全性之維護管理^[20]。歸納以上文獻結果，離岸風機環境安全性之維護管理計畫立基於持續且完整的環境資料蒐集及監測，由監測各項海床物理與工程參數來管理離岸風機周圍土層之安全條件。

文獻^[29]比較陸域風電產業鏈及海域風電產業鏈差異之處，探討英國發展離岸風電之潛在問題，並分析其優劣勢及我國可借鏡之處。文中亦提及海陸風電產業鏈分類為風機系統、風場施工、工程統包服務(Engineer-Procure-Construct-Install)、風場營運等四大部分(見表 2-3)，各項目又可細分為風機製造、塔架及基座、電力設備、海纜製造、海事工程、電纜鋪設、港口營運等細項。然而，整體而言，英國離岸風電產業，在風機系統製造並無本土廠商，但在 EPCI、海事工程及佈纜具有自主施工及開發能力。

文獻^[30]提到英國皇家財產局於 2014 年出版-A Guide to UK offshore Wind Operations and Maintenance，簡介相關產業內涵與先關案例介紹。根據該報告離岸風場進行運維的概念，主要分成 4 大項如表 2-4 所示。其中，營運與維護最重要之決策關鍵即為保持電力銷售與運維成本支出的平衡。文中也提及在運維產業中，可分為七大類功能如表 2-5。文中最後指出，英國與我國背景條件較為類似(本身不具備風機品牌)，其成功發展離岸風力運維產業之經驗，能夠提供國內發展離岸風力一個良好的參考。

表 2-3 海陸風電產業鏈分類(表格來源：[29])

項目	陸域風電產業鏈	離岸風電產業鏈
風機系統	風機零件製造業 塔架及基座製造業 電力設備製造業	風機製造業 塔架及基座製造業 離岸電力系統製造業 海纜製造業
風場施工	風機組裝業	海專工程承包業 電纜鋪設承攬業
EPCI [*] 承攬	EPCI 承攬業	EPCI 承攬業
風場營運	風電營運業	風電營運業 港口營運業

*Engineer-Procure-Construct-Install

表 2-4 離岸風場運維之關鍵概念(表格來源：[30])

關鍵概念	說明
風場可用性	在風場風機可用率達 90~95%間之損失電力收入與營運支出成本皆最低。
風場可進入性	須考量從基地到風場之時間及海氣像狀況以避免人員疲累及危險。
風場定期與非定期性維修	要考慮海氣象來進行維護工作，通常夏季期間風浪最小且電力產出較少，最適合進行定期維護工作。
成本降低控制	運維模式取決於與廠商簽約內容，但政府若扮演協助角色以完整國內運維產業則可適度降低成本。

表 2-5 離岸風力運維產業說明(表格來源：[30])

類別		說明
營運支援類	陸上後勤	需有多功能港埠做為風場支援，進行零組件儲存、組裝、工作船停泊及設立辦公室等。
	行政與營運基地	在港口基地設立辦公室進行行政事務與監控工作。
	海上後勤(海事工程)	根據港口基地到風場的距離來選擇，通常 12 哩內使用工作船、12-40 哩使用工作船+直升機、40 哩外建造海上基地支援。
設備維修類	風機	通常由風機廠商提供維修保固，工作內容含檢修、定期與臨時性維修、零組件供應及技術人員訓練。
	電力系統與	通常由原電力系統廠商提供維修保固，工作內容為電
	變電站	力系統與變電站維修，在英國此部分由離岸電網業者(OFTOs)負責。
	海底電纜	由原海底電纜廠商提供維修保固。
	基座	基座合約通常不具保固工作，由風場 Owner 視需要進行檢查維修。

該文獻^[31]提到目前歐洲 4 國離岸風機發展產業鏈的利基:英國成立綠能投資銀行，實施區塊開發，再生能源義務、差價合約和提供供應鏈計劃。德國具完備法規、環評、基礎設施建立，並且為全球最大風機製造國。丹麥最早開始發展離岸風電產業，具豐富開發和施工經驗。荷蘭具豐富鑽油和造船經驗，支援各風場海事工程。在風力發電的成本比重部分中，離岸風機 35%、海底基座 15%、傳輸變電 30%、風場運維 20%。並在離岸風電運維的挑戰與需求上，應以最低成本，達成電力輸出最大化為目標，其中若欲達成低成本，勢必需要仰賴在地化的資源，如在地的人員、機具(船、檢測機具、維護機具)、材料(備品、交期縮短)、技術(海工、監診技術)。

文獻^[32]提到目前世界的主流風力發電是在海底固定風機的「著床式」，大多以歐洲為中心。而日本在離岸風力發電的發展上則分為兩種方式，一種是將風機底部固定在海底的「著床式」，另一種為風機漂浮在海上的「浮體式」。未來在日本發展潛力較大的應屬浮體式，這是因為在日本著床式離岸風力發電站合適的設置地點很少，合適風場距離陸地較遠且水深(水深超過 50 公尺)。因此日本政府在產業發展策略上偏向浮體式的相關技術，是值得我國加以注意與學習。

西班牙文獻^[33]提到離岸風機由大型且複雜的渦輪機組成，需要高的

可靠性、可用性、可維護性以及安全性 (reliability, availability, maintainability and safety, RAMS)。廠商經常透過遠程監控系統來進行改善 RAMS。因此本文獻透過故障樹分析(Fault Tree Analysis, FTA)，取得每個風機的故障率來改善維護管理，最後達成用於定期維護，從而降低維護成本。在故障樹分析中，每一個維護任務都會與相關的停機時間相關聯，而停機時間則取決於內、外(如:天氣等)的因素，如圖 2.20 為維護管理流程。

文獻^[34]挪威 Maintech 公司提到離岸風機的運作和維護成本，有 73 %是來自船隻的使用，而海上風電的運維成本是陸上成本的 2 至 6 倍。運維的過程中，常會受到風、浪以及船隻供應的情形受到約束。離岸風機在維管的發展上，需要針對以下進行：管理(船舶協議、維修保養計畫)、船舶技術(提高波浪和風的可達性船隻)、渦輪技術(更好的模組技術變免起重作業)、保養(更智能解決方案、更好的監控、提前 6 個月以上)等，透過以上方式能夠減少停機時所造成的成本。

文獻^[35]中指出，維護的目的被視為確保風機可以執行其預期功能。根據瑞典標準 SS-EN 13 306(如圖 2.21)，維護分為兩大類；預防性維護和糾正性維護。這些小組後來分為基於狀態的維護和預防性維護，以及延期維護和緊急維護（糾正性維護）。

根據文獻^[36]，目前的海上維護方法仍然非常類似於陸上維護方法。在風能行業的早期階段，風力發電機組的維護方式主要是反應性維護，即風力發電機組運行直至發生故障，然而，隨著行業的發展，採用預防措施。而風力渦輪機的維護工作可以在一年內進行兩次。若風機運轉狀況沒有出現問題，則可以對風力渦輪機進行預防性維護。Opti-Offshore Wind Energy Conversion Systems (OWECS)指出，維護的方式有以下四種：無維護策略、糾正性維護(故障後維修)、機會性維護及定期維護。對於無維護策略，除了每五年進行一次大修之外，不會有預防性維護或糾正性維護。在此期間，如果可用性低於預期的最小值，則很少有替代方案可以有效解決。糾正維護策略只有在一定數量的風機故障的情況之下才會進行維修，因此此種方式不需要永久性員

工進行維護。對機會性維護而言，只當風機故障後進行維修時，同時利用機會執行預防性維護。 Opti-OWECS 研究的最後一項策略是定期維護，其中包括進行預防性維護的預定訪問，並且還可以執行糾正維護，這可以由永久的專職維護人員完成。

上述文獻提到瑞典、挪威、英國、德國、丹麥、荷蘭、西班牙、日本、美國等國，對離岸風機維管的流程與發展現況介紹。在執行維管計劃時，常須優先考量到以最低成本，達成最大化的電力輸出為目標。因此，維護上大多數必須在遠程檢監控以及決策維修時間點上進行發展;管理上則必須要有妥善的船舶協議、維修保養計畫等規劃。

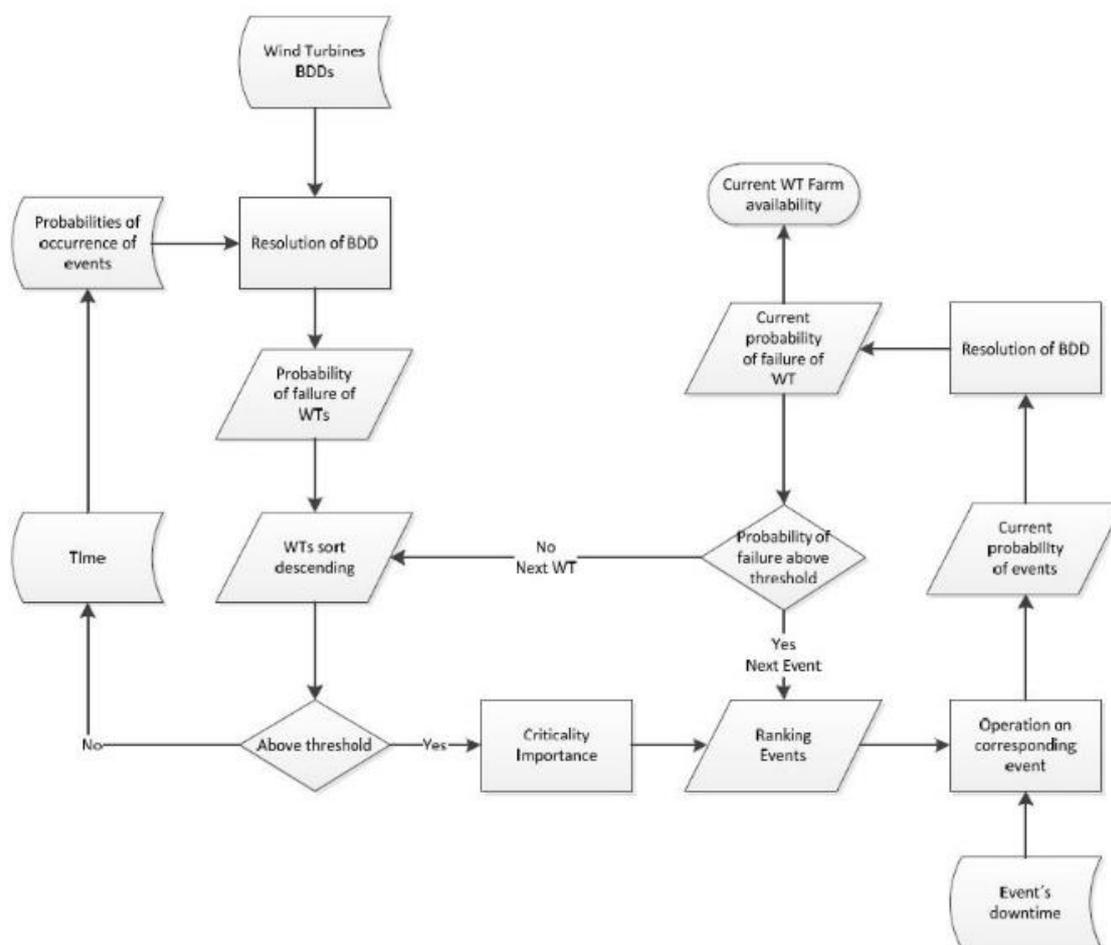


圖 2.20 維護管理流程圖(圖片來源：[34])

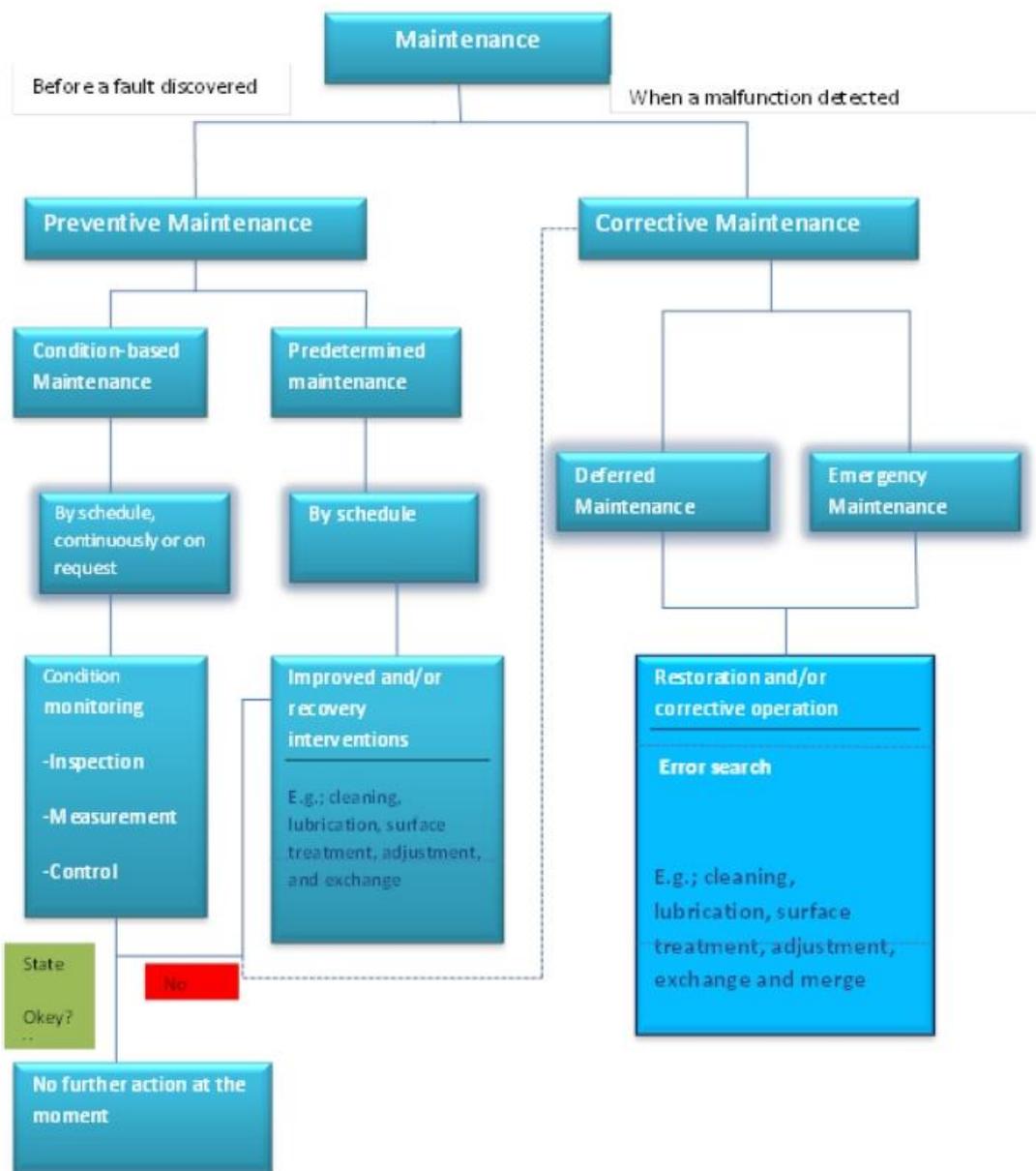


圖 2.21 風機維護結構圖(圖片來源：[35])

2.1.6 室內土壤試驗

文獻^[37]主要探討海床土壤性質差異對波浪引致淘刷之影響。將土體相對密度納入淘刷行為之考量，利用三種粒徑條件配合不同的相對密度，分析不同相對密度土體對淘刷所需啟動剪應力值之影響。該文內介紹了室內土壤乾密度及相對密度量測實驗，試驗用砂符合 ASTM-C778 之規範，根據實驗結果觀察，高相對密度土體在抗波浪淘

蝕能力較低相對密度土體還要好，推測未來可使用改良土體相對密度的方式來提高底床抗波浪運動引致的淘蝕的能力。而觀察之淘刷深度比理論值還深，推測應是波浪來回作用導致底床土體的孔隙率改變，土體自身有效應力降低，及自身抗剪能力無法抵抗水體運動產生的底床剪應力值。

文獻^[38]探討以實驗方法探討以平板式振動夯實機於不同靜態及反復載重下對乾砂填土造成之相對密度分佈及表面沉陷之改變。該研究在進行砂子密度量測實驗時，為避免因砂子排列方式不同導致密度的差異，在試驗水槽的砂層中放進數個密度盒(該文最後統一選用內徑153mm，高度10mm的密度盒如圖2.22)，待砂子鋪設完畢後將密度盒取出，將上方多餘的砂量刮平以確保砂子的體積，再量測密度盒內的砂子重量，方可計算密度。另外，在試驗水槽的側壁附近，因側壁與土壤間的摩擦力作用影響了砂子的沉降，為避免此邊界效應，該文將所有密度杯放置於距側壁至少25公分之處。



圖 2.22 密度盒示意圖(圖片來源：[38])

文獻^[39]以室內實驗方法探討不同尺寸支撐基腳貫入浸水疏鬆砂土之極限承載力。該文說明了在不同的海床深度，離岸風機必須採用不同的基礎型式(如圖2.23)，同時也比較重力式、單樁式及三腳式的基礎優缺點。室內實驗方面，該研究欲模擬臺灣彰濱地區離岸風力發電機之海床土壤之特性，選用了有效粒徑0.21mm、圓形顆粒的用砂，並使用砂斗提升法調製符合現地海床相對密度 $D_r=15\sim46\%$ 之砂土試體。然而，為模擬海床土壤長期浸泡水中近似飽和之狀況，砂土浸水之後使用真空幫浦方式，將槽內土壤空隙之空氣

抽出，並靜置至吐槽內的氣壓回升到一大氣壓時便完成進水砂土試驗配置。

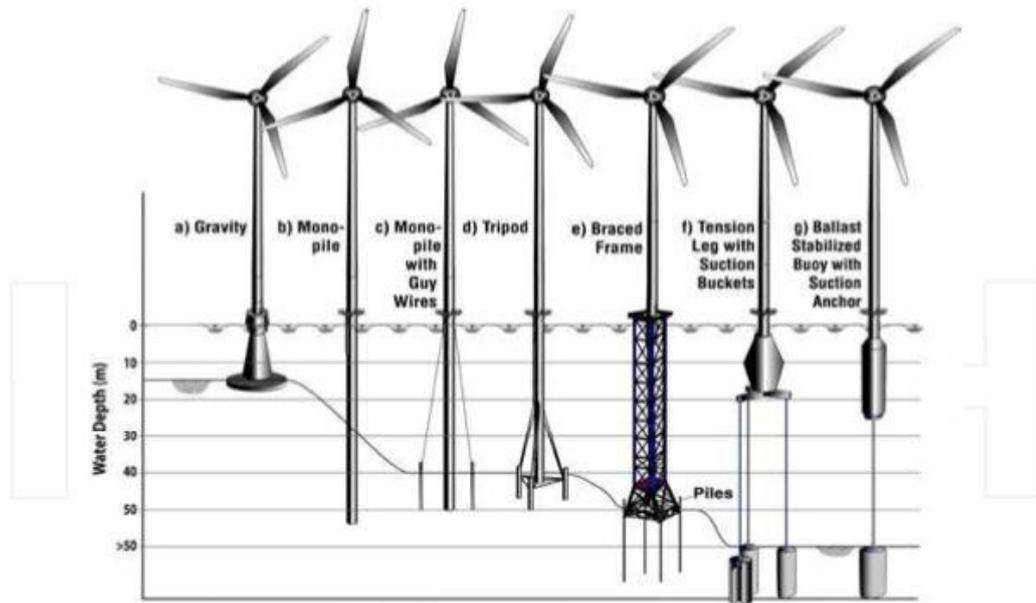


圖 2.23 不同海床深度下適合的風機安裝基礎型式

文獻^[40]主要探討砂土密度對風機安裝船支撐基腳承載力之影響。實驗於室內進行，文中提到臺灣彰濱離岸風機土壤相對密度介於15~46%，皆為疏鬆的砂土，如圖2.24所示。因此本研究用砂為粒徑0.21mm之渥太華試驗土樣，為配置不同相對密度砂土，使用空中實降法製作均勻試體(如圖2.25)，並建立砂斗開口大小、與砂土落距及製成乾砂試體相對密度之關係。當砂斗開口由5mm增加到20mm，砂土相對密度隨開口逐漸增加而逐漸減少至大約10%，此時砂土顆粒排列已極為鬆散。為模擬彰濱離岸風機土壤長期浸泡水中之飽和狀況，先將砂土浸水，接著利用真空幫浦方式將空氣完全抽出，靜置後完成模擬配置。

Qualitative Description of Granular Soil Deposits	
Relative density (%)	Description of soil deposit
0-15	Very loose
15-50	Loose
50-70	Medium
70-85	Dense
85-100	Very dense

© Cengage Learning 2014

圖 2.24 不同相對密度下之砂土排列描述狀況(圖片來源：[40])

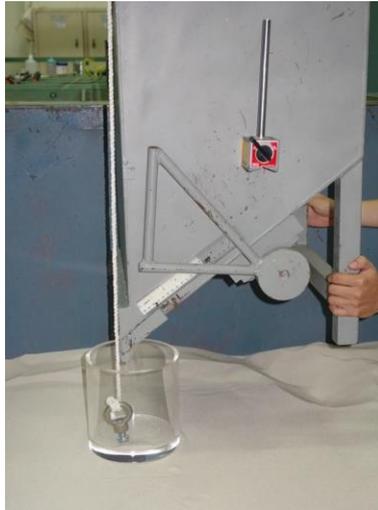


圖 2.25 控制砂斗的開口大小與砂土落距，以自由貫落方式配置不同的砂體相對密度(圖片來源：[40])

本計畫後期將於實驗室中進行模擬試驗。因此透過上述文獻可得知，室內砂質實驗的建置與密度量測方式，並且可以透過不同的鋪排方式會使砂子的排列程度不一，而產生不同的相對密度。此小節文獻回顧可成為本案未來進行室內實驗建置時的參考。

2.2 海床面地形變動量測聲納技術相關文獻

2.2.1 海床面結構特性

由於水層與海床之間常常不存在清楚的階梯式界面，而是有一層高懸浮粒子濃度之浮泥層。圖 2.26 中水層與沉積層之間即為浮泥層，由於懸浮粒子的存在，在浮泥層中，統體密度(bulk density)與黏性(viscosity)隨深度逐漸改變，因此阻力亦隨深度改變。在固體泥層之上有一層高阻力的浮泥層，而在固體泥層之上邊界處則有一層密度及孔隙率隨深度變化的過度層。圖 2.27 以軟質海床與硬質海床為例，繪出在固體泥層上緣處過度層之孔隙率分布曲線，由兩曲線均可觀察到孔隙率隨深度逐漸減少，並逐漸趨近於一穩定值，上方 10 毫米內孔隙率有較明顯的變化，即為過度層所在^[42]。由於浮泥層與過度層包含有不同粒徑大小、不同密度之顆粒，對於聲波將造成明顯的散射作用，尤

其以高頻聲波最為明顯^[43]。其次，在孔隙率與統體密度隨深度逐漸變化的過程中，高頻聲波將比低頻聲波提前產生強反射/散射波^[44,45]，造成訊號判定錯誤，或是對於真實反射波之干擾。

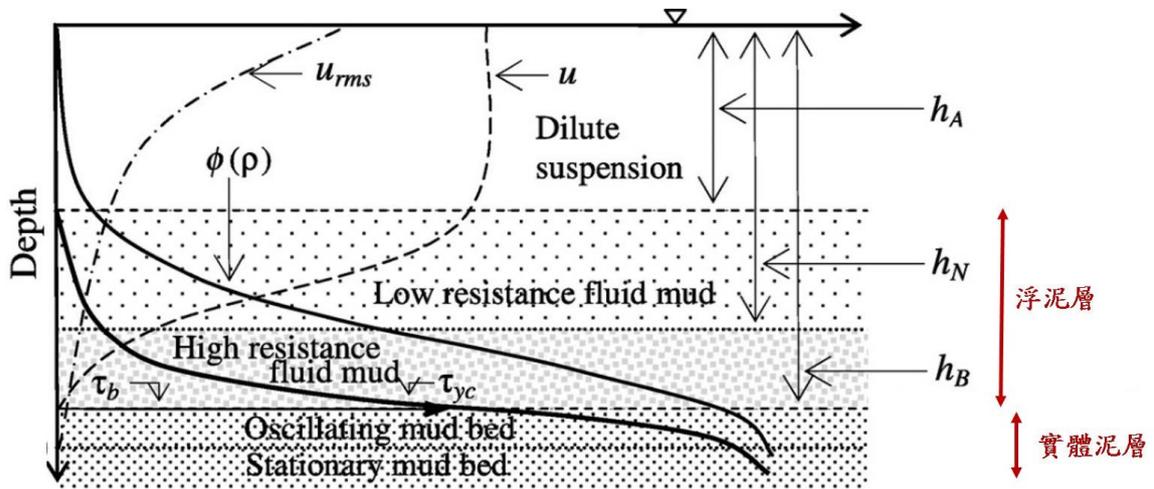


圖 2.26 真實海洋環境中常見的海水/海床交界面結構。(圖片來源：
[41])

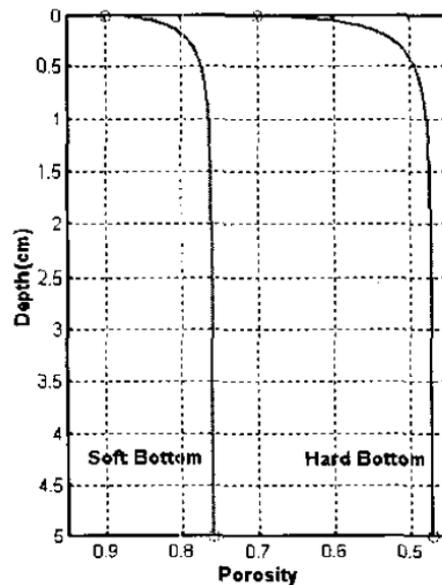


圖 2.27 海水/海床交界面處過度層之孔隙率深度分布，左右兩曲線分別為軟質海床與硬質海床之孔隙率分布範例(圖片來源：
[41])

由於懸浮粒子會對聲波造成背向散射，且頻率越高之聲波被懸浮粒子背向散射之強度越明顯，因此在使用聲納進行海床面地形探測時，浮泥層的存在會產生高頻聲波的背向散射，進而造成不同頻率聲納之量測結果差異。類似的，固體海床上緣之過度層也會造成不同頻段之聲波反射深度不同，而反應在探測結果誤差上。以市面上常見的測深聲納為例，圖 2.28 中為兩種頻率測深儀在浮泥層 (Fluid Mud) 存在的環境中所量測得之情形^[46]。在水層與固體海床間存在有浮泥層的情況下，因為浮泥層中孔隙率逐漸降低、統體密度逐漸改變、以及黏性逐漸增加，導致在不同頻率(210kHz、33kHz)量測時產生不同的量測結果。尤其是在浮泥層存在時，如圖 2.29 左圖為高頻聲波(200 kHz)會在浮泥層上邊界處反射。圖 2.29 右圖為較低頻之聲波(33kHz)有少部分受到浮泥層影響產生背向散射，然大部份能量可穿透浮泥層，在「固體海床面」反射^[47]，因明顯產生兩段不同的階層。因此兩頻率探測出之海床面地形深度即產生明顯差異。

上述所描述之頻率差異由於較大，因此在結果顯示上相當明顯。接著從圖 2.30 中亦可發現，使用 12kHz、24kHz、33kHz 三個不同頻率聲波在進行量測水深時，浮泥層下緣之高懸浮粒子濃度以及固體海床上緣之過度層也使得三個頻率之探測結果有所不同。從前面的文獻得知，當聲源頻率較低時能夠穿透的浮泥層也較為深，此現象能夠從圖 2.30(a)中清楚觀察到，深度相較於另外兩個頻率較為深，而 24kHz、33kHz 量測的深度結果較為淺如圖 2.30(b)、圖 2.30(c)。而從圖 2.30 中也能發現，當使用 12kHz 切換到 24kHz 的頻率時，量測結果上有明顯的差異，而從 24kHz 切換到 33kHz 時，差異上明顯的變小。這表示頻率與量測深度並非是以線性的方式進行改變。而基於以上多種的原因，國外在量測底床的作法上，如圖 2.31。通常會採用雙頻率的測深儀來進行測深量測^[48]，從圖上能觀察到當使用 210kHz 的聲波探測時，因為聲波本身的特性，能量會在碰到浮泥層時便產生回波能量，而其餘能量也無法抵達下方的底層。然而，在使用 33kHz 進行探測時，因為聲波特性的特性，便直接穿越浮泥層，直到在浮泥層的下一層才產生回

波能量，並且因為聲波特性的 33kHz 所產生的能量較 210kHz 高，受到鄰近懸浮粒子反射影響，在數據上呈現較為粗的範圍深度。

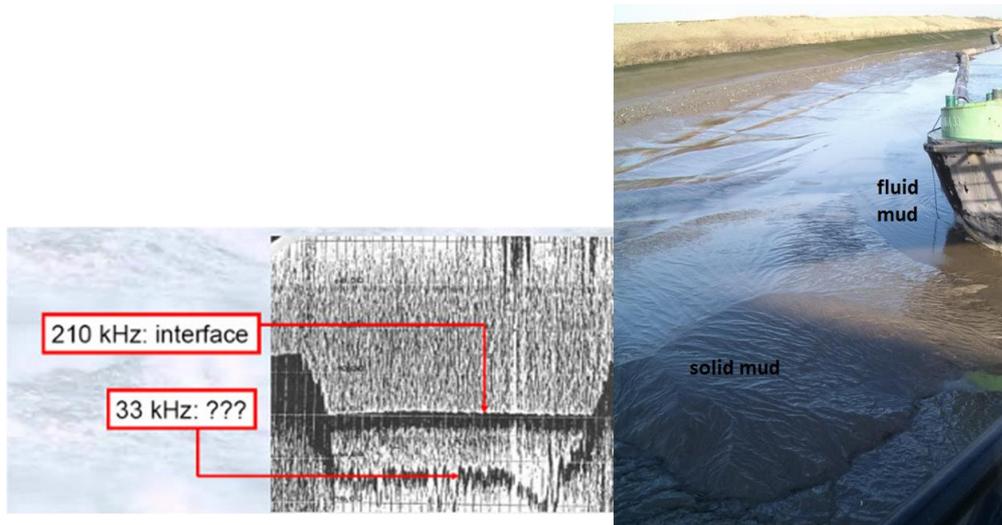


圖 2.28 浮泥層示意圖與不同頻率測深儀量測(圖片來源：[46])

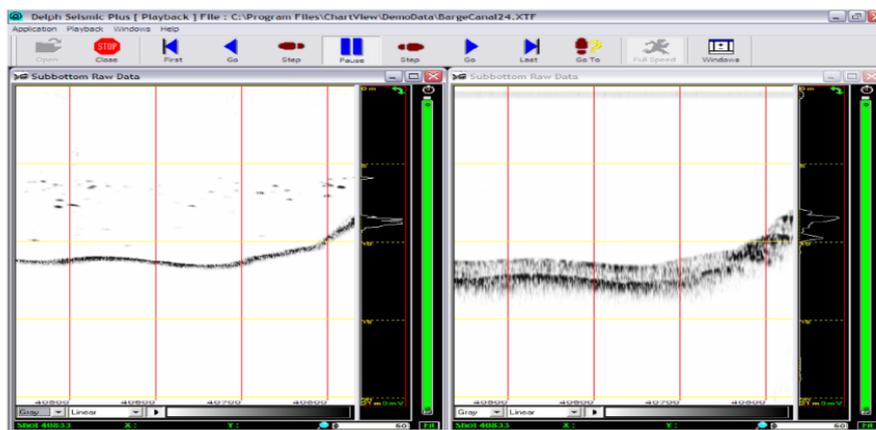


圖 2.29 不同頻率測深儀量測，(左)200kHz 之量測結果，(右)33kHz 之量測結果(圖片來源：[47])

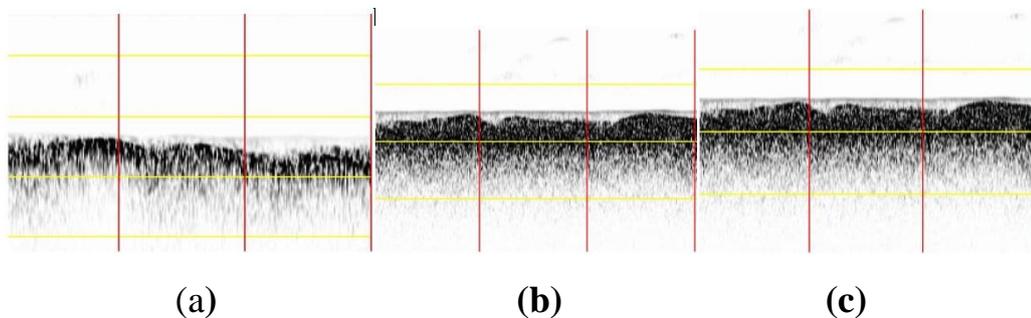


圖 2.30 33kHz 頻率以下之回波能量差異，(a)12kHz、(b)24kHz、(c)33kHz(圖片來源：[47])

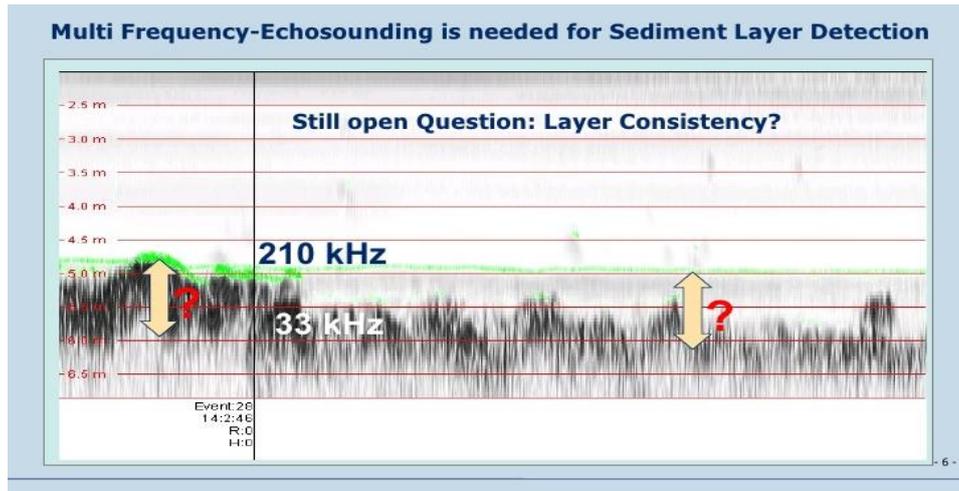


圖 2.31 雙頻率測深儀量測(圖片來源：[48])

對本案之研究目標而言，有一關鍵參數需做進一步定義，在水深量測準確度之提升上，我們想要得到的「水深」是固體海床上邊界深度，還是在其它定義下之深度？國際上通常定義固體海床開始於密度 1500kg/m^3 之深度^[93]，亦即本案所認定之固體海床上邊界深度。對港口浚挖而言，國際上公定之水深標準稱為 Nautical Depth^[49] (可譯為「安全航行深度」)，根據 Fontein 及 Byrd^[49]，國際上各大港口均需定期量測其港口之 Nautical Profile，以監控港口水深是否能提供船隻安全航行。根據歐洲幾個大港口的量測結果，各港口定義 Nautical Depth 之標準大約為統體密度 1200kg/m^3 之深度，如

表 2-6 所示^[50]。雖然目前之 Nautical Depth 訂定標準大多以密度 1200 kg/m³ 為準，但由於各港口之海床與海水條件不同，單以密度為判定標準可能存在誤差，因此世界各國在進行 Nautical Profile 量測時往往結合密度、黏性、以及聲學探測等多項方式進行判斷^[50,51]。由於以黏性判斷 Nautical Depth 的研究尚在進行中，相關應用較少，目前研究成果僅能夠提出黏性剖面在到達 Nautical Depth 時會出現明顯的不連續面，且有大幅提高的現象^[50]。世界各國目前大多仍使用密度作為 Nautical Depth 之判斷標準，因此本計畫在此暫不討論黏性的相關議題。

表 2-6 歐洲大港口之 Nautical Depth 訂定標準(表格來源：[50])

Port	Mud density at nautical depth (kg/m^3)
Zeebrugge:	1200
Rotterdam:	1200
Nantes, Saint-Nazaire, Bordeaux:	1200
Germany:	1180 – 1250

文獻上指出，以聲學方式進行深度探測是最高效率且低成本之方式^[49]，但頻率之選定則需經過研究測試。根據 Druyts 等人^[50]，市售雙頻測深儀大多使用 33kHz 以及 120kHz 或 210kHz 兩種頻率配搭進行水深探測，但經過實驗證實，兩個頻率皆無法有效探測得 Nautical Depth 深度，如圖 2.32 所示。而 Fontein 及 Byrd 使用不同頻率並搭配聲學訊號處理方式，則可以聲學探測結果反推出統體密度 1150 kg/m^3 以及 1200 kg/m^3 之深度。圖 2.33 即為其結果呈現，上方的深藍色線條為 210kHz 之深度探測結果，紫色及淺藍色線條則為以聲學量測結果反推得之統體密度 1150 kg/m^3 以及 1200 kg/m^3 之深度。因此針對港口之航行需求而言，聲學探測方式可有效協助進行大範圍之 Nautical Profile 量測，但先需針對欲探測之港口環境進行背景聲學條件量測，以正確使用聲學訊號反算等密度深度，其聲學技術使用概念與流程如圖 2.34 所示。

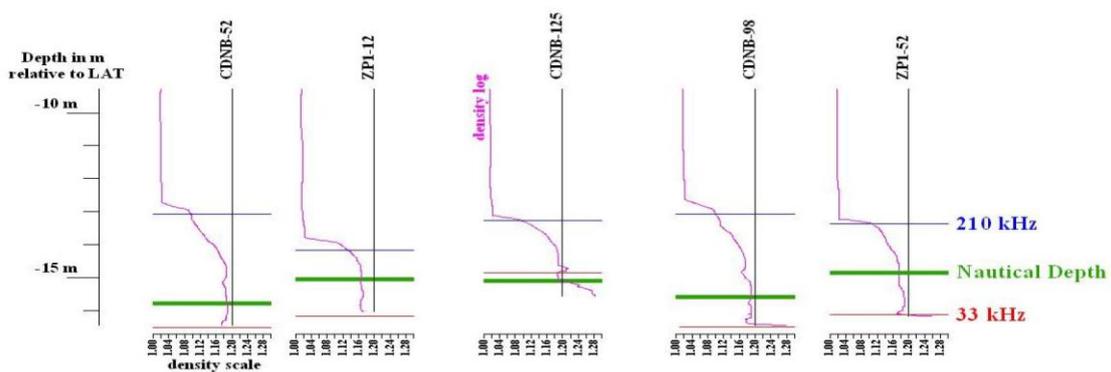


圖 2.32 雙頻率測深儀量測(圖片來源：[50])

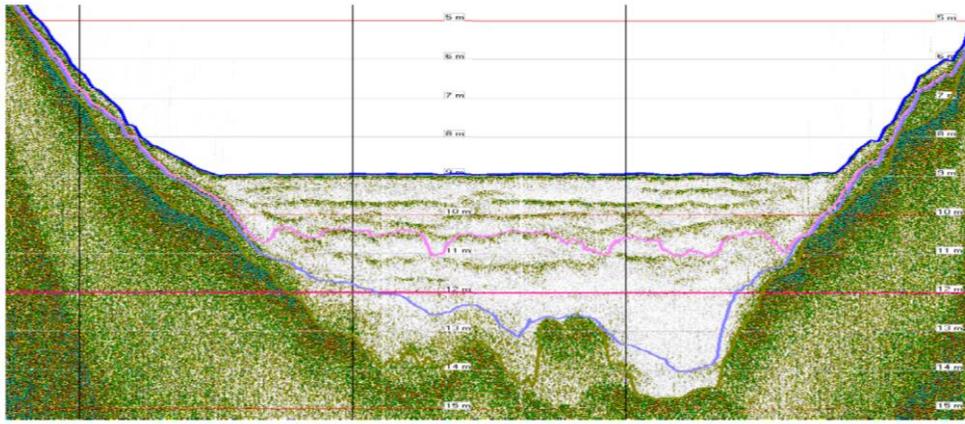


圖 2.33 Nautical Depth 之探測結果，深藍色線條為 210kHz 之深度探測結果，紫色及淺藍色線條則為以聲學量測結果反推得之統體密度 1150 kg/m³ 以及 1200 kg/m³ 之深度(圖片來源：[49])

另一方面，針對離岸風機基樁周圍海床面或其他海上觀測樁周圍海床面之探測，此時欲掌握的深度則是固體海床上邊界之深度。若欲掌握此深度，則須避開受懸浮粒子背向散射作用強的頻率範圍^[43,44]，亦即需使用頻率較低之聲波進行水深探測。但由於空間解析度隨頻率降低而降低，且低頻聲波於海床內之穿透力較強，因此亦須避免使用過低頻之聲波，因此需結合數值模擬及實驗量測等方式來探討聲波頻率之選擇與運用^[44,45]。

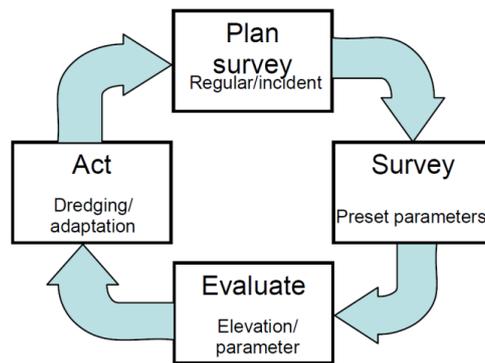


圖 2.34 Nautical Depth 之聲學探測作業流程(圖片來源：[49])

2.2.2 浚挖相關文獻及規範

本案為使海床浚挖深度計算與聲納技術結合，因此需了解過去港灣水域及海岸工程浚挖相關的規範及浚挖方式。文獻^[52]透過整理浚挖技術包含作業機具及工法、浚方處理與相關法規、浚方資源化再利用，並利用探討浚挖機具種類及適用性、浚泥輸送方式、浚泥最終棄置處理等，制訂出標準作業規範草案。其中根據港灣內軟底質、硬底質將精度分級，並規範出音響式量測的精度要求(以 5 米至 13 米做為區段分類，小於該區段精度要求 8 公分以內，區段內為 30 公分，大於該區段為 30 至 60 公分)。

文獻^[52]同時也提到，浚挖土方量的計算需使用音響式的量測，如表 2-7 表示，開挖前後的底床面高度需要精細的估計，然而聲學傳播的物理特性，不同頻率容易受水中濁度影響，導致不同型聲納(不同頻率)所測得的底床面高度不一，在這點上面，並無全頻率所量測的結果做為依據，浚挖土方計量說明圖如圖 2.35。

文獻^[53]提供從事港灣浚淤測量一套完整的作業程序與其應注意事項，並建議未來可以進一步探討 MEBS 與 Single-Beam 量測結果之計算土方量比較，藉以追求高精度的浚淤測量。該文提及單音束、多音束測深系統於浚淤測量的異同、浚淤水深測量作業流程，文中雖無單音束、多音束測深系統的實際資料進行比對，但點出了除了頻率外(文中建議單音束測深儀可為單頻或雙頻)，音束寬也是量測精準度的理由之一。

內文提及可透過使船速均衡依照規劃測線直線前進如圖 2.36，以時間表示航跡距離，開啟聲納測深儀，從電動指標紀錄而知各距離間之水深，而後轉載於平面圖上，此方法可免在淤泥處之誤差。該文亦提到土方計算(平均斷面法、不規則三角網法、網格法)說明，以及超挖與不足土方量計算說明示意圖(圖 2.37)，最後用基隆港浚淤為例說明。

表 2-7 港灣水域及海岸工程水深相關測量精度表(表格來源：[52])

工作分類	導航及疏浚測量		其他港灣工程水深測量
	硬底質	軟底質	
精度分級	工程特等	工程一等	工程二等
垂直(高程/水深)量測精度(95%信賴區間)			
機械式(水深<5m)	±8cm	±8cm	±15cm
音響式(水深<5m)	±15cm	±15cm	±30cm
音響式(水深 5 至 13m)	±30cm	±30cm	±60cm
音響式(水深>13m)	±30cm	±60cm	±60cm
特徵物/淺灘偵測能力			
最小特徵物尺寸(95%信賴區間)	>0.5m ³	>1m ³	非必要
最少音響測深點數	>3	>3	非必要
水平定位量測精度			
水平定位精度(95%)	<2m	2m	5m
特徵物之水平位置精度(95%信賴區間)			
圖面水深值	2m	5m	5m
固定之平面特徵物	3m	3m	3m
固定輔助導航裝置	3m	3m	3m
浮動輔助導航裝置	10m	10m	10m
補強控制測量精度			
水平控制	三等	三等	三等
高程控制	三等	三等	三等
測量密度	100%底床量測	測線間距<60m	測線間距<150m
品管/品保條件			
聲速品管校正	>2 次/日	2 次/日	1 次/日
平面位置檢校	1 次/日	1 次/計畫	1 次/計畫
品管測試	強迫	視需求而定(多音束測深)	選擇性
最大容許偏差(bias)	±3cm	±6cm	±15cm

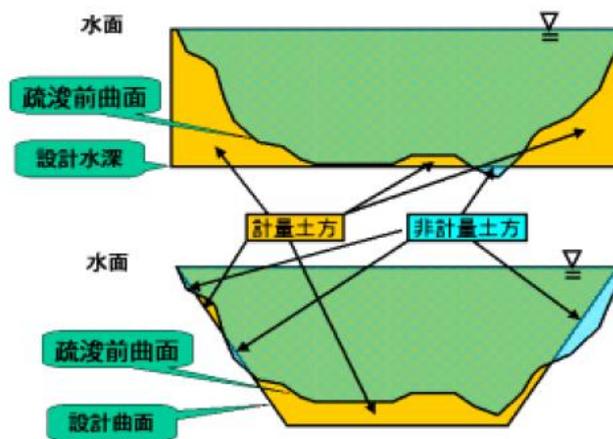
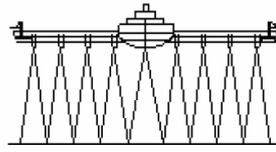
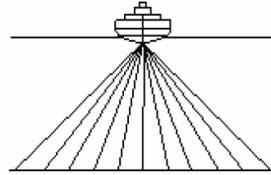


圖 2.35 浚挖土方計量說明圖(圖片來源：[52])



垂直音束示意圖【資料來源：薛憲文，2003】



扇形音束示意圖【資料來源：薛憲文，2003】

圖 2.36 垂直音束與扇形音束示意圖(圖片來源：[53])

$$V = 0.5 \sum_i^{n-1} (A_i + A_{i+1}) * L \quad (1)$$

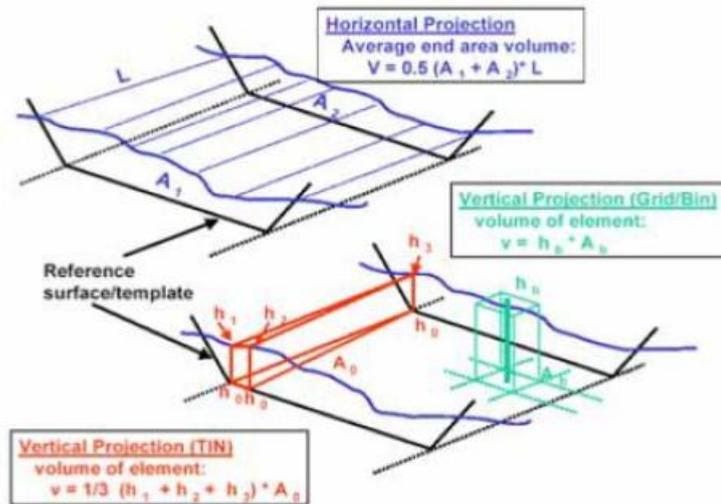


圖 2.37 土方計算說明示意圖(圖片來源：[53])

文獻^[54]探討了淺水域多音束量測水深技術，並建議其規範可做為港灣航安、浚挖及海岸工程施工的的參考依據。該文獻參照第四版『國際水道測量標準』IHO，水深量測分為特級、一級、二級及三級等四個等級(如表 2-8)。文獻中亦特別提及市售系統的多音束測深儀功能比較如表 2-9，12kHz~455kHz。

文獻^[55]主要探討聲納及測深光達兩種不同的測深方法之原理及作業方式。該文獻利用了測深光達(如圖 2.38, 用綠光雷射穿透水體)與音響方式量測, 對於誤差來源進行比較。

聲納誤差影響來源包含聲速剖面修正誤差、吃水誤差、潮汐修正誤差、載具姿態誤差、船隻船速變化誤差、海床反射誤差等(Jong et al., 2002)。另外聲速剖面修正誤差, 來自於所選用之溫、鹽、壓力等因子值。然而, 光達誤差來源則有數個影響光子路徑傳播之因素, 如水深、入射角、水的湍急程度以及水面的粗糙度等, 另外還有系統誤差(Bias)來源(主要來自於載台姿態)。

文中就東沙島、澎湖、綠島、蘭嶼、小琉球、彭佳嶼, 甚至南沙島等離島地區, 以光達與聲納進行精度、效率、與經濟效益比較, 最後則建議光達需與聲納系統搭配。

綜合以上文獻得知對於浚挖的相關計算、規範與不同底質下的精度要求。而其中, 音響式運用在計算浚挖的土方量測上相當廣泛。然而市面上的音響式儀器相當多樣化, 各家廠商所推出之規格皆不相同, 如頻率/頻段的不同(12kHz~455kHz)等。基於以上因素, 在土方量測結果上, 勢必會造成爭議。因此在本計畫中, 預計透過多頻率聲納系統經驗, 來探討此部分議題。

表 2-8 IHO 各等級水域測量基本要求(表格來源：[54])

等級	特等	一等	二等	三等
典型水域範例	港區、錨泊區和重要航道等需最少船底淨空水域	港區、進港航道、建議航道與水深 100 公尺以內的海岸水域	非特等或一等水域且水深在 200 公尺以內的水域	不屬於上述等級的外海水域
水平位置精度(95%信賴區間)	2 公尺	5 公尺+5%水深	20 公尺+5%水深	150 公尺+5%水深
水深測量精度(95%信賴區間)	a=0.25 公尺 b=0.0075	a=0.5 公尺 b=0.013	a=1.0 公尺 b=0.023	a=1.0 公尺 b=0.023
100%底床搜尋	強制執行	特定水域需要	特定水域可能需要	不需要
量測系統對海床特徵物的偵測能力	大於一公尺的特徵物	水深 40 公尺以內大於 2 公尺的特徵物；水深超過 40 公尺時為 10% 水深	水深 40 公尺以內大於 2 公尺的特徵物；水深超過 40 公尺時為 10% 水深	不需要
最大側線間距	不需要，需 100%底床搜尋	三倍測區平均水深或 25 公尺，取較大者	三至四倍測區平均水深或 200 公尺，取較大者	四倍測區平均水深

表 2-9 各廠牌多音束測深儀功能規格比較(表格來源：[54])

廠牌	Reson SeaBat				
型號	9001	9003	8101	8124	8125
音鼓頻率	455 kHz	455 kHz	240 kHz	200 kHz	455kHz
測深範圍	約 140m	約 140m	約 300m	約 400m	約 120m
音束總數	60 個	60 個	100 個	40 個	20 個
測帶夾角	90°	90°	150°	120°	120°
測深解析度	5cm	5 cm	1.25 cm	1 cm	1 cm
音束束寬	1.5°	1.5°	1.5°	2.5x3.0°	1.0x0.5°
音束最高更新率	15	15	30	30	40
音束陣列安排方式	扇形	扇形	扇形	扇形	扇形
音鼓空氣/水中重量	18/5.5kg	18/5.5kg	26.8/4.8kg	8.3/4.6kg	24.3/8.6kg

廠牌	Reson SeaBat			Odom
型號	8111	8150	8160	Echoscan
音鼓頻率	100 kHz	12/24 kHz	50kHz	200kHz
測深範圍	約 600m	約 11000m	約 3000m	約 100m
最淺測量深度	0.5m	10m		
音束總數	100 個	234 個	125 個	256 個
測帶夾角	150°	120°	120°	110°
測深解析度	3.7 cm	7.6cm, 19cm 45cm	2.4 cm, 9.6 cm	2.5 cm
音束束寬	1.5° x1.5	1.0° x1.0	1.5° x1.5	0.7° x2.5
音束最高更新率	35Hz	15Hz	35Hz	4Hz
測深精度	x	x	x	x
音束陣列安排方式	扇形	矩形	T 字型	水滴形
音鼓空氣/水中重量	72/59kg	40.8kg	x	50/30kg

廠牌	ELAC Nautik seaBeam					
型號	1185	1180	1055D	1050D	2120	3012
音鼓頻率	180 kHz	180 kHz	50/180 kHz	50/180 kHz	20 kHz	12 kHz
測深範圍	300m	600m	1500m	3000m	11000m	11000m
最淺測量範圍	x	x	x	x	x	x
音束總數	126 個	126 個	126 個	126 個	148 個	205 個
測帶夾角	153°	153°	153°	153°	150°	140°
測深解析度	x	x	x	x	x	x
音束束寬	1.5° x1.5	1.5° x1.5	1.5° x1.5	1.5° x1.5	1.0° x1.0	1.0° x1.0
音束最高更新率	x	x	x	x	x	x
音束陣列安排方式	三角形	三角形	三角形	三角形	三角形	X
音鼓空氣/水中重量	17kg	17kg	60kg	60kg	x	x

廠牌	Simrad			
型號	EM 3002	EM 3000d	EM 2000	EM 1002S
音鼓頻率	300kHz	300 kHz	200 kHz	95 kHz
測深範圍	約 200m	約 100m	約 150m	約 1000m
最淺測量深度	小於 1m	小於 1m	小於 1m	2m
音束總數	254 個	128 個	127 個	120 個
測帶夾角	130°	120°	120°	150°
測深解析度	1cm	1cm	1cm	2cm
音束束寬	1.5° x1.5	1.5° x1.5	1.5° x1.5	1.25°
音束最高更新率	40 Hz	50 Hz	50 Hz	40 Hz
測深精度	x	5cm	5cmc	x
音束陣列安排方式	圓柱形	扇形	扇形	扇形
音鼓空氣/水中重量	20/14.5kg	130/95kg	x	x

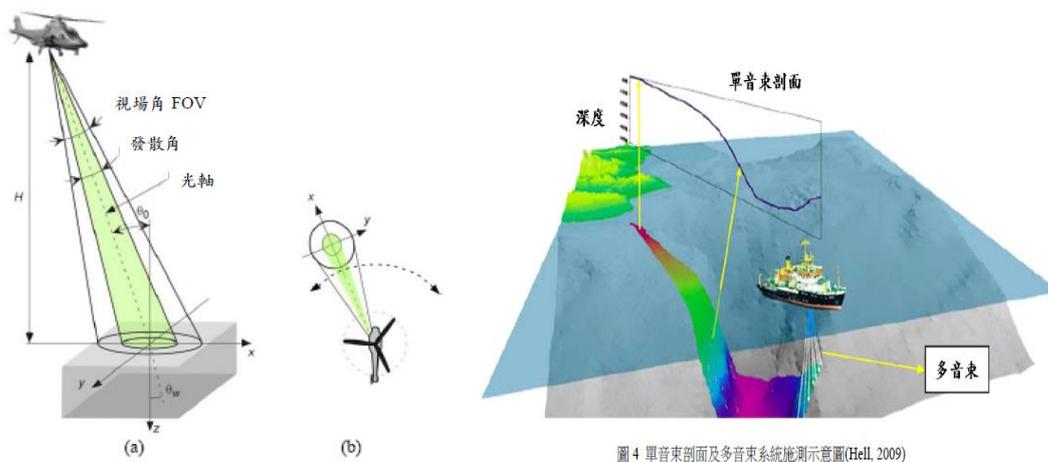


圖 2.38 單音束剖面與多音束系統施測示意圖(圖片來源：[55])

2.3海床下土層分佈量測聲納技術相關文獻

土層受到持續的振動而產生不穩定主要會造成的影響有兩方面，一方面是振動會使得土層中的顆粒性材料產生重新排列，其可能會更為緻密或更為疏鬆，另一方面其可能會在反覆的低頻振動下產生應變性的疲勞，使其有軟化的現象。此兩項影響在現象上會造成海床表面局部的沉陷或隆起，亦會使得土層的界面發生線型的變化；土壤的物理性質上將至少反映在土層密度、孔隙率、彈性波速(包含壓縮波速及剪力波速)等的變化；在土壤的工程性質上將至少反映在楊氏模數、剪力模數等參數上。應用聲納於基礎周圍土層穩定性監檢測上，主要即是針對此些土層不穩定所產生之特徵現象或物理量變化進行監測。本研究將在過程中透過文獻、數模以及試驗等方式針對前述所可能反應土層不穩定之狀態，測試應用聲納時最具靈敏度與可靠度之現象或參數，而加以發展可靠且適用之聲納監測技術。

過去在海床下土層的探測上，Lu and Liang 利用室內實驗針對海底底床之剪力波速與其密度及其液性限度分別提出經驗關係式，顯示透過底床剪力波速可加以推估其密度與液性限度^[56]；Gaiser 收集眾多底床材料之壓縮波波速與剪力波波速將之計算為波松比後，提出該波松比與底床孔隙率之經驗關係式^[57]；Ayres and Theilen 利用現地底床剪

力波速與建立強度之經驗關係式進行海底底床穩定度分析^[58]；Versteijlen et al.應用現地量測所得之剪力波速進行離岸風機基礎小應變下之側向變位分析^[59]。此些應用皆已顯示出彈性波速在底床工程參數獲得以及土工相關問題分析的應用潛力，然而，相較於陸域上的應用，其仍高度被低估，例如 Kim and Park 利用現地剪力波速進行動態夯實後現場之密度檢測，以進行成效評估^[60]；Lin et al.應用現地剪力波速進行影像化之液化潛能評估^[61]；Fratta et al.結合現場壓縮波波速與時域反射儀量測進行工地密度之快速檢測^[62]。

海床剖面儀是用來探測海床次表層(100 公尺以內)結構之聲納，其探測原理是以聲納持續接收海床下各層次界面之反射波，常用頻率範圍介於 1 kHz 至 20 kHz 間，且越低頻之聲波可提供越深的穿透力^[63]。一開始的海床剖面儀主要運用單頻或窄頻之聲納訊號，早期時使用 12kHz 的窄頻脈波，於 1980 年時 Damuth 進行了 3.5 kHz 與 12 kHz^[64]，其使用小於 5 毫秒之 3.5 kHz 窄頻脈波訊號，發現 3.5 kHz 比 12 kHz 有更大的穿透力，可使地層剖面儀探測海床沉積物之研究至較深的海床，因此發展了 3.5 kHz 地層剖面儀探測系統，此時開始地層剖面儀多半開始使用 3.5 kHz 窄頻脈波來進行探測，然而 Damuth 也使用了 3.5kHz 之地層剖面儀進行中國南海之底質探測研究^[65]，Damuth 將探測之回波聲學影像進行分類，整理後在地圖上繪出回波特性的圖，研究中也使用了活塞岩心採樣器(Piston Core)進行採樣，將不同回波特性的採樣樣本進行對照。在此類訊號之運用下，海床結構的解析度受限於訊號長短，短訊號可用以映射出較細緻的海床結構，然而長訊號具有較大的能量，可用以探測較深之層次結構。因此在海床剖面儀發展初期，海床層次解析度與可穿透深度往往是不可兼得的^[63]。圖 2.39 為早期使用 3.5 kHz 窄頻訊號進行海床剖面探測所得之探測結果範例，可見到此探測結果受訊號類型限制，無法提供精細的海床層次結構資訊。

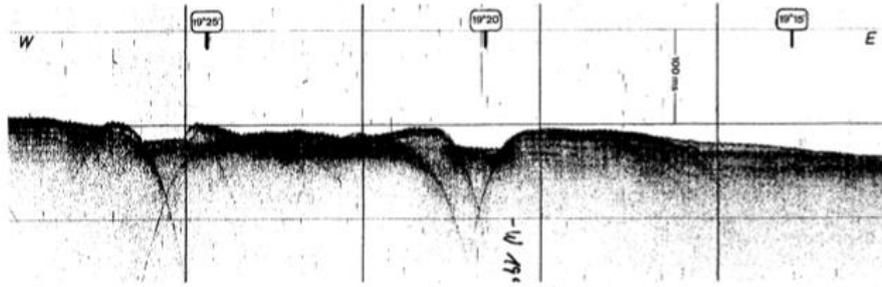


圖 2.39 窄頻訊號(3.5 kHz)之海床剖面儀探測結果範例

1989 年 Schock 發表了使用掃頻聲納地層剖面儀(Swept-frequency, or Chirp Subbottom Profiler)來進行海床沉積物之探測^[66]，掃頻訊號(Chirp)即是指頻率隨時間改變的訊號，此種訊號比起 3.5kHz 窄頻脈波擁有更大的頻寬，搭配上脈波壓縮技術可在大幅提高海床解析度，解析度甚至隨著訊號長度提高，因此使用較長的訊號可同時提高解析度以及穿透深度。掃頻訊號之探測方式大大提高了海床剖面儀的解析度，圖 2.40 為新一代掃頻聲納系統之海床探測結果範例，此範例使用 2-10 kHz 之掃頻訊號，因此掃頻訊號有一較大頻寬，所以此種訊號的解析度經訊號處理過後會比窄頻訊號來的高許多，且亦可由圖中見到很高的海床層次解析度。

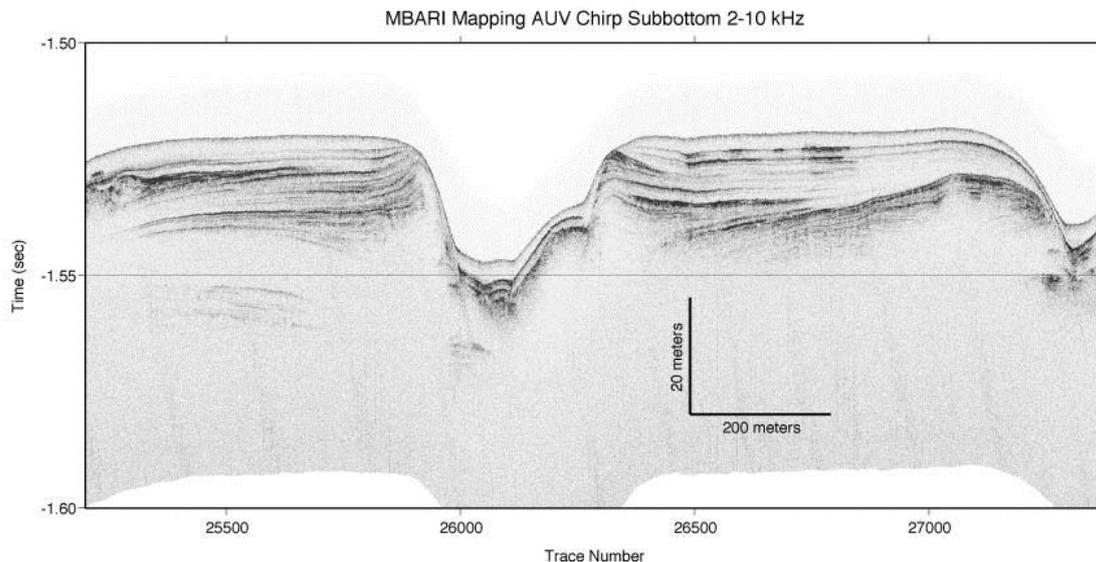


圖 2.40 掃頻訊號之海床剖面儀探測結果範例

由以上文獻結果可知，對於離岸風機基樁附近之土層穩定度監

測，寬頻掃頻聲納訊號可用於探測土層層次結構，並獲得高解析度的土層介面分佈情形，由此可監測海床表面是否產生局部的沉陷或隆起，以及土層的介面是否發生線型的變化。除了探知海床土層結構介面變化外，本案亦尋求並評估以掃頻聲納探測資料進一步估算土層物理與工程參數之可能性。

Schock 也於 2004 年 10 月發表了使用掃頻聲納數據估算海床物理及聲學特性之方法^[67]，聲波在遇到海床反射時會因為不同的海床底質而造成不同能量大小的回波，不同海床其孔隙率及造成聲波衰減都不同，利用聲音於海底沉積物此有孔隙之介質中傳播的波動方程，來達到反算海床底質特性的目的，然而利用海床之回波能量也就是反射係數，帶入反算底質物理特性之模式，即可藉由量測海床反射係數而反算出海床沉積物之特性。

2013 年計畫主持人利用底質剖面儀，研究臺灣西南海域之垂直探測回聲型態與沈積構造，其中底質剖面儀使用 EdgeTech 公司之 SB-216i 與 ODEC 公司之 BATHY-2000P 系統儀器，更於 2014 年 1 月發表一篇利用掃頻聲納於北棉花峽谷探測估算底質參數完整流程與方法^[68]，以及更進一步將單點之數據擴展成二維之資料庫，由 Schock 及計畫主持人發表之研究可以看到現階段使用掃頻聲納探測海床底質之方法已經趨近成熟，掃頻聲納是現階段用來探測海床底質最有效率的技術^[69]，此方法也一直延續使用。2013 年計畫主持人團隊亦利用 Biot 理論進行深海底質參數反算之研究^[70]，其使用海軍雙載台以大角度之探測實驗方式，其方法限制必須於深海進行，以利於分辨出底質回波訊號，以及雙載台需要相當多資源，因此計畫主持人承蒙科技部國防科技計畫經費，自行發展較為便利之探測系統，以較低成本進行探測實驗。

以下接續說明以底床剖面儀進行地音反算的研究情況—以掃頻聲納探測底床並進行反算的基礎為底床聲學模式，包含 Hamilton 底床模式^[71]、Buckingham 底床模式^[72]、以及 Biot 底床模式^[73]，其中 Biot 底床模式為目前被公認最準確的底床模式^[72-77]，此模式將底床視為填充水分的固體粒子，並以聲波傳播理論推導底質組成參數與聲學參數

間之關係，Williams^[75]也以 SAX99 之底質探測資料詳細的驗證了 Biot 底床模式，證明了 Biot 模式之準確度。

雖然 Biot 模式能夠準確描述特定底質粒子組成狀況下的聲學參數，並用來進行反算，但此模式需要 13 個輸入參數，並且計算過程複雜，因此 Williams^[76]提出將底床視為流體(即忽略 shear wave 及 slow wave 之作用)以簡化 Biot 模式，稱為 Effective Density Fluid (EDF)模式，並以實際算例證明 EDF 模式對於底床聲速、吸收係數、以及反射係數等參數之估測均與 Biot 模式一致，顯示使用 EDF 模式可以以較簡單的計算得到正確的結果。除了 Williams 之簡化工作外，Lee 和 Seong^[78]亦以小擦略角(grazing angle)假設簡化 Biot 模式，亦可獲得與 Biot 模式一致的結果。根據 Stoll 及 Kan^[79]，砂質底以及較軟的底質(如泥質底)均適用此流體化假設，因此可以使用 EDF 模式進行反算，基於此分析以及普遍度，本計畫將採用 EDF 模式進行底床參數反算。

在以掃頻聲納量測結果進行反算的部分，由於 Biot 模式或 EDF 模式均能提供反射係數之估測值，因此掃頻聲納之量測也以反射係數為主；同時，由於 Biot 模式與 EDF 模式之輸入參數中包含有透水率(permeability)、粒徑大小(grain size)、曲率(tortuosity)等參數，這些參數與反射係數之關係並不明確，但與吸收斜率(attenuation roll-off rate)有顯著關係，因此在掃頻聲納的量測上亦需量測吸收斜率，以估測上述參數。為了結合反射係數與吸收斜率兩個量測值做精確的底質參數反算，Schock^[67,80]提出以遞迴(iteration)的方式進行反算，並成功以 Asian Seas International Acoustic Experiment (ASIAEX)之實驗資料反算出表層沉積物參數，包含聲速、密度、吸收係數、表層沉積物厚度等，而在反算過程中亦可獲得孔隙率、透水率、粒徑大小等參數。

由以上文獻可知，利用海床剖面儀及寬頻掃頻聲納訊號，可量測海床表層沉積物之反射係數以及吸收斜率，以此兩個參數搭配經驗公式以及彈性海床地音模式，可有效估算海床表層之物理參數，以進行海床下土層穩定性之監測。

第三章 多頻率海床面地形變動測量及土層分佈調查之可行性分析

基於多頻率海床探測技術發展之可行性評估需求，本案除了文獻蒐集與彙整以外，亦使用多頻率海床探測測試實驗之資料，搭配聲學數值模擬分析之結果進行可行性分析與評估。本章將針對多頻率海床面聲學反射特性進行數值模擬分析，同時也介紹多頻率地音反算模式之建置及模擬分析工作。

3.1 多頻率海床面聲學反射聲場模擬分析

如第二章之文獻回顧所提，在港口或近岸海域，水層與固體土層之間搭多存在一層浮泥層，其厚度可由數公分至數公尺不等，除聲波本身隨頻率變化之解析度外，此浮泥層亦是造成各頻率探測結果差異之主因。由於浮泥層為高濃度之懸浮粒子層，因此本案在此將針對聲波於懸浮粒子層之反射特性進行模擬研究，探討各頻率之反射強度特性，聲波傳遞示意圖如圖 3.1。

根據 Throne 在 2002 年發表的論文^[81]，經懸浮粒子層散射後之接收聲壓可表示為

$$P_s = \frac{a_s f p_i}{2r_1} e^{i(\omega t - r_1(k - i\alpha_\omega))} \dots\dots\dots(3.1)$$

其中 P_s : scattered pressure 背散射波聲壓； P_i : incident pressure 入射波聲壓； r_1 : range from the particle 從傳感器到懸浮沉積物距離； α_s : equivalent particle radius 顆粒半徑； f : form function 散射型態函數； α_ω : sound attenuation 聲波在海水中被吸收的耗散。

入射波聲壓在遠場則可表示為^[82]

$$P_i = \frac{P_0 r_0}{r_2} D e^{i(\omega t - r_2(k - i\alpha_\theta))} \dots\dots\dots(3.2)$$

其中 P_0 : reference pressure 在 1 公尺處的參考聲壓 ; r_2 : range from the transducer 懸浮沉積物到傳感器的距離 ; D : directivity function of transducer 傳感器的指向性函數

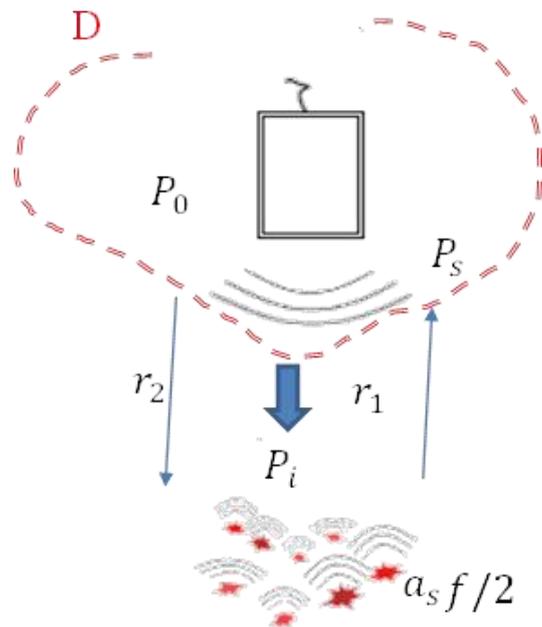


圖 3.1 聲波傳遞示意圖

將(3.2)式帶入(3.1)式，

$$P = \frac{\alpha_s f p_0 r_0 D^2 e^{i(\omega t - 2r(k - i\alpha_\theta))}}{2r^2} \dots\dots\dots(3.3)$$

假設一個基本散射量 δv ，非干向散射方均聲壓 δP_{ms} ，

$$\delta P_{ms} = N \langle PP^* \rangle \delta v \dots\dots\dots(3.4)$$

其中 P^* : conjugate of P 共軛聲壓 ; N : 單位體積內的顆粒數，假設傳感器為半徑 r 的活塞式聲源，則 $\delta v = r^2 \sin \theta d\theta d\phi dr$ 。均方根聲壓可表示為

$$P_{rms} = P_0 r_0 \langle f \rangle \left\{ \frac{3M}{16\pi \langle a_s \rangle P_s} \right\}^{1/2} \left\{ \int_{r-\tau c/4}^{r+\tau c/4} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-4\alpha r}}{r^2} D^4(\theta) d\phi d\theta dr \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(3.5)$$

N : 用重量濃度 M 取代, $M = (4/3)\pi \langle \alpha_s^3 \rangle \rho_s N$, ρ_s 為懸浮顆粒密度;
 $\alpha = \alpha_w + \alpha_s$, α_s 為懸浮沉積物的吸收耗散係數; τ : 脈衝間隔時間; c : 水中聲速;
 $\langle f \rangle = \left\{ \langle a_s \rangle \langle a_s^2 f^2 \rangle / \langle a_s^3 \rangle \right\}^{1/2}$ 懸浮顆粒形態函數。

$$\int_0^{2\pi} d\phi = 2\pi \dots\dots\dots(3.6a)$$

$$\int_{r-\tau c/4}^{r+\tau c/4} \frac{1}{r^2} dr = \frac{\tau c}{2r^2} \dots\dots\dots(3.6b)$$

$$\int_0^{\pi/2} D^4(\theta) \sin \theta d\theta = \left\{ \frac{0.96}{ka_t} \right\}, ka_t \geq 10, \dots\dots\dots(3.6c)$$

利用(3.6)式以及 $V_{rms} = RT_v P$ 帶入(3.5)式, 得到

$$V_{rms} = \frac{k_s k_t}{\varphi r} M^{1/2} e^{2r\alpha} \dots\dots\dots(3.7)$$

其中 $\alpha = \alpha_w + \alpha_s$ 表達聲波損耗; φ : 近場係數; R : 傳感器靈敏度; T_v : 電壓轉換方程式;
 $k_s = \frac{\langle f \rangle}{\sqrt{\langle a_s \rangle \rho_s}}$ 表達懸浮粒子的單位散射強度, 給定

懸浮顆粒半徑下, k_s 隨頻率改變; $k_t = RT_v P_0 r_0 \left\{ \frac{3\tau c}{16} \right\}^{1/2} \frac{0.96}{ka_t}$ 為系統函數

$$\alpha_s = \frac{1}{r} \int_0^r \zeta(r) M(r) dr \dots\dots\dots(3.8)$$

其中 ζ 為沉積物吸收常數

$$\zeta = \frac{3}{4 \langle a_s \rangle \rho_s} \langle x \rangle \dots\dots\dots(3.9)$$

χ : normalized total scattering cross-section 標準散射截面。

由(3.7)式可知散射聲場強度(亦即接收電壓強度)與懸浮粒子單位散射強度、懸浮粒子濃度、吸收係數等參數有關，本案針對散射聲場強度，運用數值模擬方式探討不同頻率之散射特性。首先針對懸浮粒子單位散射強度進行模擬討論，為了解各頻率聲波在不同粒徑大小之浮泥層中的散射情形，在此假設粒徑大小介於 $1\mu\text{m}$ 至 2mm 之間，亦即涵蓋黏土、泥、以及砂等不同大小之粒子(請參見圖 3.2)，若以 ϕ 單位表達平均粒徑大小，則 ϕ 值介於 10 至 -1 之間。

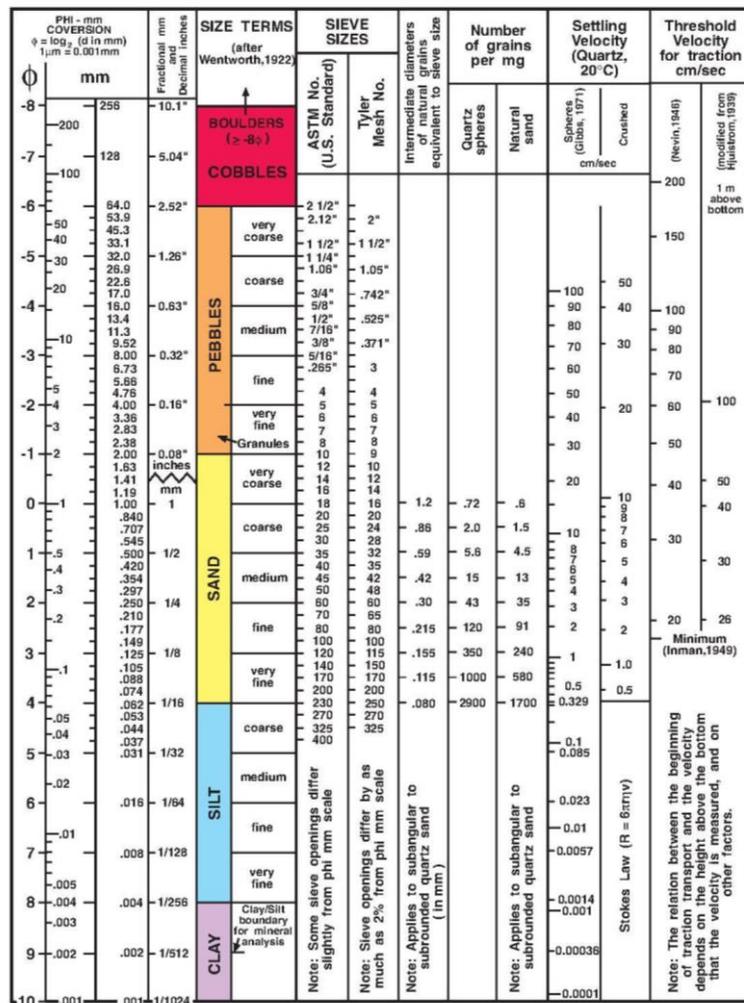


圖 3.2 Wentworth 沉積物粒徑表(圖片來源:[84])

基於上述範圍之粒徑大小變化，模擬計畫頻率在 2kHz-250kHz 間

之懸浮粒子單位散射強度，可得到圖 3.3 之散射強度變化。圖 3.3 縱軸代表粒徑大小，由上至下為由砂逐漸變化至黏土之過程；橫軸則代表聲波頻率變化，由左至右為由 2kHz 變化至 250kHz。為更清楚呈現懸浮粒子單位散射強度之變化，在此特別挑選 5 個不同平均粒徑大小之計算結果進行比較，如圖 3.4 所示。由於粒子粒徑分佈範圍很大，因此本案在此選擇使用對數單位 ϕ 來呈現。由圖 3.3 及圖 3.4 可清楚觀察到不同粒徑之懸浮粒子對於各頻率聲波之散射強度不同，首先，砂與泥之對於聲波之散射呈現出最明顯之頻率差異性，對於低頻聲波與高頻聲波之單位散射強度差異可達約 50dB。其次，雖然聲波頻率越高可帶來越高的空間解析度，但在精準探測實體海床面深度之目標下，為降低浮泥層(懸浮粒子層)所帶來之聲學散射影響，對於黏土為主之海域必須選擇使用 50kHz 以下之聲波進行探測，而對於以砂為主要組成之海域則需使用更低頻之聲波進行探測，以避免散射訊號對於實體海床面回波之干擾與判斷錯誤。

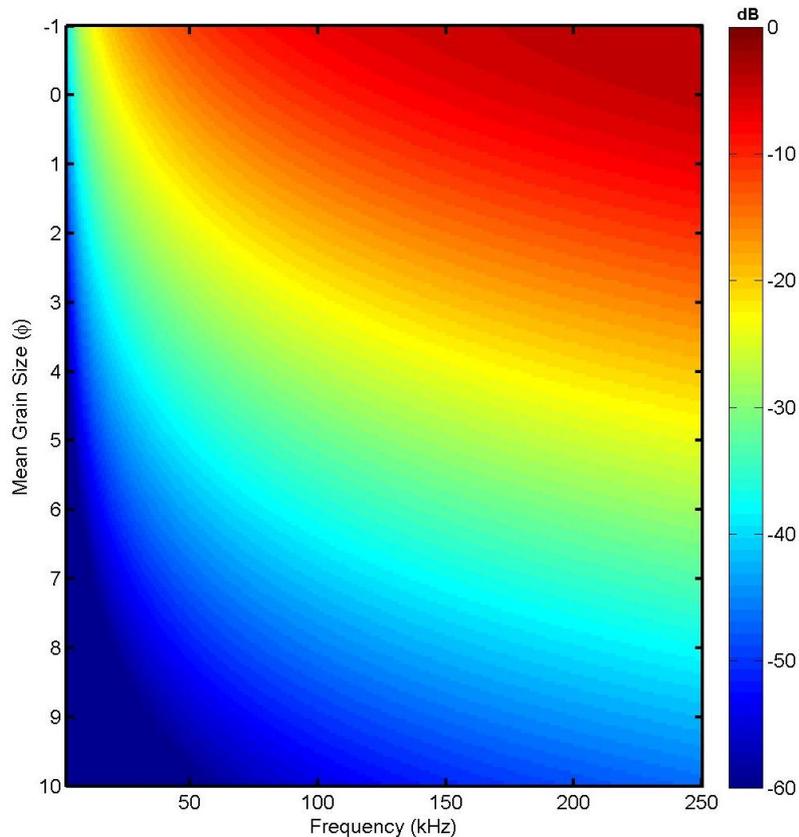


圖 3.3 不同粒徑大小粒子對於各頻率聲波之單位散射強度

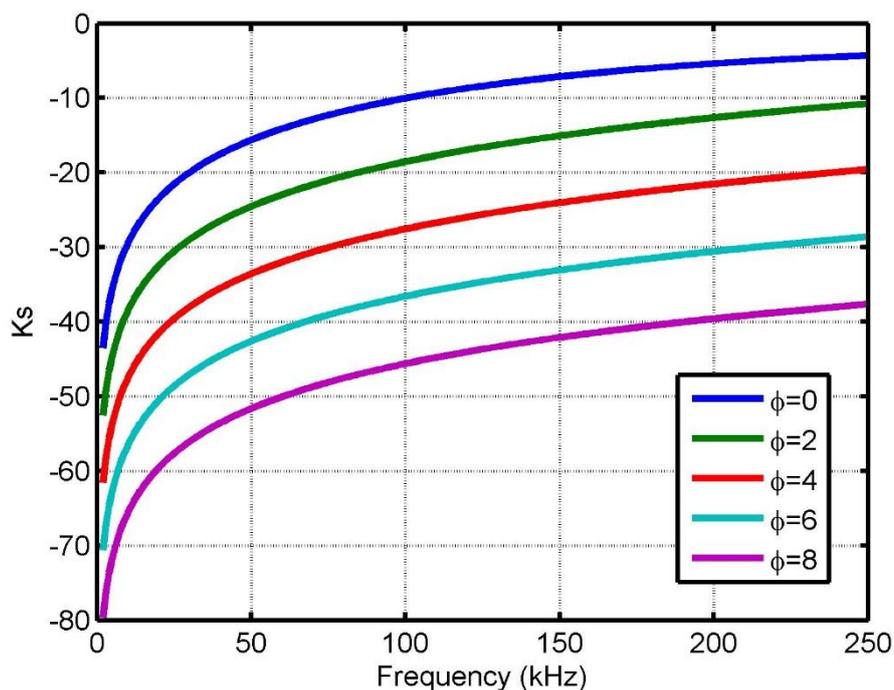


圖 3.4 5 個不同粒徑大小粒子對於各頻率聲波之單位散射強度比較

此外，由圖 3.3 及圖 3.4 亦可清楚看到頻率在 200kHz 以上之聲波有較高的單位散射強度，因此常被使用來探測浮泥層之上邊緣深度。而在實體海床面深度之探測上，由於一般黏土、泥、砂之海床面之反射係數大多介於-18dB 至-6dB 之間，因此為了不受浮泥層散射聲場之影響，需整合浮泥層懸浮粒子濃度以計算整體散射強度，並使其大幅低於海床面之反射強度，此條件可用以設計實體海床面深度之探測頻率標準。

3.2 多頻率海床面地形變動測量之可行性分析

本節依據本報告第二章之文獻彙整結果，以及第 3.1 節之模擬結果進行以多頻率聲波進行海床面地形變動測量之可行性分析。

首先，根據第二章之文獻彙整結果，海床面地形變動測量需求主要包含 Nautical Depth 安全航行深度以及固體土層上邊界深度兩種，基於聲波之背向散射與反射特性，需使用不同頻率之聲波來分別探測得

這兩種深度。如圖 2.33 所呈現出來的，在浮泥層存在的狀況下，由於統體密度在浮泥層中隨深度增加，因此對測深系統而言，不同頻率的聲波呈現出來的反射深度不一樣，對於 120kHz 或 200kHz 之聲波，其反射深度為浮泥層上邊界，而圖 2.32 也呈現，雖然有時 33kHz 之反射深度與 Nautical Depth 接近，但通常都深於 Nautical Depth。由此可知，Nautical Depth 之探測與推估，需使用介於 33kHz 至 100kHz 間之聲波頻率，且根據 Nautical Depth 為密度 1200kg/m^3 之條件，適用之探測頻率應於 40~50kHz 間。

其次，在固體土層上邊界深度探測方面，根據上節中的模擬結果可知，對於黏土為主之海域必須選擇使用 50kHz 以下之聲波進行探測（可參考圖 3.4），而對於以砂為主要組成之海域則需使用更低頻之聲波進行探測，以避免散射訊號對於實體海床面回波之干擾與判斷錯誤。由以上之文獻結果與理論分析可知，以 50kHz 以下之多頻率聲波進行海床面地形探測，搭配聲學訊號處理方式，可獲得在浮泥層下緣至固體土層範圍內之多頻率反射深度結果。

在實際運用上，本計畫由本單位現有實驗設備能力以及目前研究條件來評估可行性。在本單位現有實驗設備能力部分，可參照本報告第 5.2 節之實驗規劃，本單位現有聲源與功率放大器可支援 2 kHz 至 50 kHz 之聲波拍發與接收，因此在實驗設備能力上可進行 50 kHz 以下之多頻率海床面地形探測。本計畫也已經進行 2 次初步測試實驗，進行寬頻海床探測試驗，並採購了高頻功率放大器，確定儀器系統與實驗能力均可因應本計畫 50 kHz 以下之多頻率探測需求。

另一方面，在目前研究條件部分，由於各海域之海水條件與浮泥層條件不同，因此若以臺灣各大港口而言，各港口之浮泥層對於不同頻率深波之反射深度有所不同，且海床沉積物特性亦不同，若欲確定各港口之多頻率聲波反射深度與密度 1200kg/m^3 等密度深度之關係，需於各港口整合密度量測、黏性量測、以及多頻率聲學量測等項目，以進行多頻率聲波反射深度與不同密度等密度線之迴歸分析，才能得到明確的對應資料。本計畫在此計畫期間內可完成之研究為在浮泥層存

在的環境中，以數值模擬與實驗量測之方式獲得不同頻率聲波之反射深度，並以重錘量測法獲得固體土層上邊界深度以進行比對。

在探測解析度及準確度評估部分，由於本計畫聚焦於海床面地形探測之頻率相依性上，因此在此先假設忽略聲速、載台不穩定性等外在因素所造成之誤差，僅針對聲學訊號處理之解析度進行討論。如第 2.3 節所述，掃頻聲納訊號之使用可在不降低拍發能量(縮短聲納訊號)之條件下，提高探測解析度，且掃頻聲納訊號經脈衝壓縮(Pulse Compression)處理後其空間解析度為

$$\Delta R = c / 2B$$

其中 c 為聲速、 B 為訊號頻寬。假設使用頻寬 5kHz 之掃頻訊號，在聲速 1500m/s 之條件下，空間解析度為 15 公分，若提高訊號頻寬，則可進一步降低空間解析度。此部分為聲波訊號以及訊號處理本身之解析度特性，若回顧表 2-7 之港灣水域及海岸工程水深相關測量精度表，此解析度(± 7.5 公分)符合目前作業規範。

根據以上說明，本計畫對於多頻率海床面地形變動測量之可行性評估彙整為下列幾點

1. 基於浮泥層中密度隨深度改變之特性，以及 Nautical Depth 和固體土層上邊界深度之探測需求，以多頻率聲波進行海床面地形探測是需要的。
2. 針對 Nautical Depth 而言，120kHz 以上之聲波僅能探測得浮泥層上緣，33kHz 之聲波探測深度略深於 Nautical Depth，由文獻資料估計可使用 40~50kHz 間之聲波進行 Nautical Depth 探測(密度 1200kg/m³ 之等密度線)。
3. 針對固體土層上邊界深度而言，由理論與模擬分析結果可知，對於黏土為主之海域必須選擇使用 50kHz 以下之聲波進行探測，而對於以砂為主要組成之海域則需使用更低頻之聲波進行探測。
4. 在實驗設備與實驗能力部分，經 2 次初步測試實驗測試以及儀器採

購作業，本單位現有實驗設備可因應 50 kHz 以下之多頻率探測需求。

5. 在研究條件部分，本計畫可完成之研究項目為在浮泥層存在的環境中，以數值模擬與實驗量測之方式獲得不同頻率聲波之反射深度，並以重錘量測法獲得固體土層上邊界深度以進行比對。而各頻率聲波之反射深度與密度曲線之關係需要於各港口進行完整之前期背景環境調查，暫無法於本計畫內完成。
6. 在解析度部分，本計畫之海床探測採用寬頻掃頻聲納訊號，根據文獻資料，在使用訊號頻寬大於 5kHz 之條件下，聲納訊號處理之空間解析度可達 15 公分(± 7.5 公分)以下。

本計畫在多頻率海床面地形探測技術上之貢獻，將聚焦於提出可透過多頻率海床面反射量測，搭配重錘量測方式，針對實驗海域提出固體土層上邊界深度之最佳量測頻率範圍建議，並提出實驗海域之多頻率聲波反射深度變化。

3.3 多頻率地音反算模式建置與模擬分析

本案針對多頻率地音反算模式與學理的研究方法包含多孔彈性底床地音模式建置、地音反算法發展、正向模式建置等，本計畫使用多孔彈性底床模式 Biot Model 作為核心模式，由於 Biot 模式可連結海床物理參數和聲學參數，因此本計畫以量測得之海床反射係數以及吸收係數作為輸入，搭配地音參數經驗公式，可透過遞迴分析法獲得海床物理參數。以下就海床土層力學參數理論與聲波理論的結合作一個完整的論述。

1. 多孔彈性底床之力學參數模式建置

海底沉積物是經由長時間堆積礦物所形成的，這些顆粒狀的固體礦物，會堆積成一有固體骨架且骨架空隙中含有海水的介質，此介質因為含有水及礦物固體兩種物質，所以波動在此介質中傳播就相當的複

雜，因此 Biot 在 1962 年特別針對波動在有孔隙的介質中傳播發展出一套模式理論^[73]。Hamilton 和 Chotiros 分別量測過底床聲傳損失與底床特性的關係，Hamilton 假設海床為黏性彈性(viscous-elastic model)模型^[85]，而 Chotiros 用的是 Biot model^[86]，並與 Hamilton 的黏性彈性模型作比較，結果顯示黏性彈性模型會低估了底床聲傳損耗，而此損耗經研究發現是 Biot model 裡面 Biot slow wave 所造成的。為求精準，本案將海洋底床視為多孔質吸音材料，亦是把底床視為彈性結構體，合稱為多孔彈性材質(porous-elastic material)。依據 Biot 多孔材料的勢能理論推導出該材料應力與應變的關係。另外引入結構體與流體之間有慣性力相互作用的概念，把慣性力與流體黏性力代入多孔材的運動方程即可得到波動方程。這樣的推導如同處理彈性固體一般，可以分別得到兩個壓縮波與一個剪力波的波動方程式。Allard 等^[87]將孔隙內的流體從空氣換成水，在上述的推導中所生成的聲波轉換矩陣(transfer matrix)，透過不同材料組合的界面之速度與壓力連續的關係，就可以得到不同頻率的聲學參數，如不同入射角度的阻抗、衰減等。

多孔材具有兩種損耗能量的方式：(1)聲波傳至孔隙內，會產生流體黏滯的摩擦，因而損耗；(2)材料內彈性結構形變，或是引起空隙內流體震動，因而損耗。早期以研究剛性結構為主，因此受聲波作用，多孔材料結構的振動量很小，也乎略了整個結構體因為形變而導致的聲能損失。過去的研究推導彈性材料的應力與應變的關係，其彈性體的應力與應變為：

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu e_{ij} \dots\dots\dots(3.10)$$

其中 λ 為材料的壓縮性(拉美常數)， μ 為剪切模數(拉美常數)， θ 則為壓縮應變(dilatation)。如果只是單純的結構體或單純流體，應力與應變關係可以只利用(3.10)式，但多孔材料是結構體與流體的結合，因此，Biot 提出之理論模式描繪多孔彈性材，除了考慮了多孔彈性材料內部材質中(包括結構體與流體)應力與應變關係，還多考慮了流體與結構體相互影響的結果。多孔彈性材料內部材質中，結構體部分之應力與應變關係包括壓縮應變 θ^s 與剪應變如下

$$\sigma_{ij}^s = [(P - 2N)\theta^s + Q\theta^f] \delta_{ij} + 2Ne_{ij}^s \dots\dots\dots(3.11)$$

流體部分之應力與應變關係只有壓縮應變 θ^f ，如下

$$\sigma_{ij}^f = (-\phi P) = Q\theta^s + R\theta^f \dots\dots\dots(3.12)$$

其中 P 、 Q 、 R 、及 N 為彈性係數，其中最為特別的是 Q ，為結構體與流體勢能交互作用之項(Potential Coupling Coefficient)， N 為多孔材料體的剪力模數， $Q\theta^s$ 為材料內結構體的應變對流體應力之影響， $Q\theta^f$ 為材料內流體的應變對結構體的應力之影響。

Biot 提出三個“gedanken experiments”來解算 P 、 Q 、 R 、及 N 係數，並得到

$$P = \frac{(1-\phi)[1-\phi - \frac{K_b}{K_r}]K_s + \phi \frac{K_r}{K_f} K_b}{1-\phi - K_b/K_r + \phi K_r/K_f} + \frac{4}{3}N \dots\dots\dots(3.13)$$

$$Q = \frac{[1-\phi - K_b/K_r]\phi K_r}{1-\phi - K_b/K_r + \phi K_r/K_f} \dots\dots\dots(3.14)$$

$$R = \frac{\phi^2 K_r}{1-\phi - K_b/K_r + \phi K_r/K_f} \dots\dots\dots(3.15)$$

其中

K_b : 多孔性材料充滿流體時，整體的彈性係數(bulk modulus of frame)

K_r : 多孔性材料內無流體時的體積彈性模數(bulk modulus of grains)

K_f : 流過多孔性材料流體的體積彈性模數(bulk modulus of fluid)

接著，Biot 引入一種多孔材內部與流體之間的慣性耦合效應，此效應與流體黏性無關，只與慣性力有關。過去在解析慣性力，多半假設多孔材中結構體與流體不會產生交互作用，但實際上，Biot 認為結構體與流體間是會互相影響的，將只有彈性體相互影響的解析式做一些修正，引導出慣性耦合項的參數，為多孔材內部結構體與流體交互作用下的密度有關的參數，假設多孔材中結構體與流體不會產生交互作

用，動能則可以表示成

$$E_c = \frac{1}{2} \rho_1 |u^s|^2 + \frac{1}{2} \phi \rho_0 |u^f|^2 \dots\dots\dots(3.16)$$

ρ_1 為結構體密度、 ρ_0 為流體密度、 u^s 為結構體位移、 u^f 則為流體位移。接續以曲折度與非黏性情況下，將流體在「剛性」管壁中的運動方程式更改為：

$$-\frac{\partial p(x)}{\partial x} = j\omega\alpha_\infty\rho_0 \frac{\partial u(x)}{\partial t} \dots\dots\dots(3.17)$$

α_∞ 為折曲度，用以評估多孔性材料中孔隙扭曲的程度， ω 為聲波角頻率，而(3.17)式就是不考慮流體黏性，流體在剛性管壁中的運動方程式。若想要求得與(3.17)式相同之運動式，就必須將慣性力表示式中的結構體部分考慮成「剛性」，如

$$q_i^f = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial E_c}{\partial u_i^f} = \rho_{12}u_i^s + \rho_{22}u_i^f \rightarrow q^f = \rho_{22}u_i^f \dots\dots\dots(3.18)$$

(17)式與(18)式意義相同，皆是流體在「剛體」中運動方程式，且比較後即可得

$$\rho_{22} = \alpha_\infty \phi \rho_0 \dots\dots\dots(3.19)$$

根據這些推導，即可求出密度函數等 ρ_0 、 ρ_1 和 ρ_{11} 、 ρ_{12} 、 ρ_{22} 之間的關係。

在多孔彈性底床之波動方程描述上，可對多孔材結構體之應力與應變關係式取散度(divergence) $\nabla \cdot \sigma^s$ ，再加上黏性作用力 X_i^s ，就會得到一組在單位體積下結構體的運動方程式，在結構體部分如

$$(\rho_1 + \rho_a) \frac{\partial^2 u_i^s}{\partial t^2} - \rho_a \frac{\partial^2 u_i^f}{\partial t^2} = (P - N) \frac{\partial \theta^s}{\partial x_i} + N \nabla^2 u_i^s + Q \frac{\partial \theta^f}{\partial x_i} - \sigma \phi^2 G_c(\omega) \frac{\partial}{\partial t} (u_i^s - u_i^f) \dots\dots\dots(3.20)$$

其中 $i=1,2,3$ 。(3.20)式就是將一個彈性固體的運動方程式，加上流體黏性的作用力，再加上結構體與流體間互相影響的慣性力，所得到的結果。同理，而多孔材流體部分的運動方程式為

$$(\varphi\rho_0 + \rho_a) \frac{\partial^2 u_i^f}{\partial t^2} - \rho_a \frac{\partial^2 u_i^s}{\partial t^2} = R \frac{\partial \theta^f}{\partial x_i} + Q \frac{\partial \theta^s}{\partial x_i} + \sigma\varphi^2 G_c(\omega) \frac{\partial}{\partial t} (u_i^s - u_i^f) \quad (3.21)$$

(3.20)及(3.21)兩式經向量表示後可改寫結構體與與流體內之運動方程如下

$$-\omega(\tilde{\rho}_{11}u^s + \tilde{\rho}_{12}u^f) = (P - N)\nabla\nabla \cdot u^s + N\nabla^2 u^s + Q\nabla\nabla \cdot u^f \quad \dots\dots\dots(3.22)$$

$$-\omega^2(\tilde{\rho}_{22}u^f + \tilde{\rho}_{12}u^s) = R\nabla\nabla \cdot u^f + Q\nabla\nabla \cdot u^s \quad \dots\dots\dots(3.23)$$

在(3.22)及(3.23)式中， $\tilde{\rho}_{11}$ 、 $\tilde{\rho}_{12}$ 、 $\tilde{\rho}_{22}$ 這些與密度有關的函數在流體不同的情況下，會有不同的結果。

透過上面推導可獲得在多孔彈性材質內之波動方程式，而在波傳解的部分，因為一個保守場都存在純量位移势能(scalar displacement potential)與向量位移势能(vector displacement potential)，我們利用純量位與向量位來導出在聲波進入多孔性材料時，會出現兩個壓縮波與一個剪力波。以下單單表達壓縮波的解。壓縮波中位移向量與純量位移勢能的關係一般如下

$$u^s = \nabla\phi^s \quad \dots\dots\dots(3.24)$$

$$u^f = \nabla\phi^f \quad \dots\dots\dots(3.25)$$

其中(3.24)及(3.25)式分別為結構體與流體內之關係式，而 ϕ^s 與 ϕ^f 分別是結構體與流體的純量位移势能。因此 ϕ^s 和 ϕ^f 兩純量位移势能，可以透過(3.24)與(3.25)式表示成

$$-\omega^2(\tilde{\rho}_{11}\phi^s + \tilde{\rho}_{12}\phi^f) = P\nabla^2\phi^s + Q\nabla^2\phi^f \quad \dots\dots\dots(3.26)$$

$$-\omega^2(\tilde{\rho}_{22}\phi^f + \tilde{\rho}_{12}\phi^s) = R\nabla^2\phi^f + Q\nabla^2\phi^s \quad \dots\dots\dots(3.27)$$

上述推導說明了多孔彈性材質中之波動方程及位移勢能關係式，而 Stoll 與 Kan 於 1981 年將 Biot Theory 應用於海底沉積物中聲波傳播之研究^[79]，Stoll 與 Kan 使用勢能函數 $(\Phi_s, \Phi_f, \Psi_s, \Psi_f)$ 來描述一控制體積範圍的海床，並改寫勢能函數以描述海床固體及流體之位移向量，如下

$$u = \nabla\Phi_s + \nabla \times \Psi_s$$

$$\beta(u - U) = \nabla\Phi_f + \nabla \times \Psi_f \dots\dots\dots(3.28)$$

假設平面波解為 $e(i(k \cdot x - \omega t))$ 後得

$$-k^2 H \Phi_s + k^2 C \Phi_f = -\omega^2 \rho \Phi_s + \rho_f \omega^2 \Phi_f$$

$$-k^2 C \Phi_s + k^2 M \Phi_f = -\omega^2 \rho \Phi + \frac{(\omega^2 \alpha \rho_f)}{\beta} \Phi_f + \frac{i\omega F \eta}{k} \Phi_f \dots\dots\dots(3.29)$$

其中式(3.29)中 $k = |k|$ 為波數(wavenumber)， α 為曲度(tortuosity)， η 為流體黏滯性(pore fluid viscosity)， κk 是透水性(permeability)， ρ_f 為流體密度(pore fluid mass density)， ρ_s 為底質密度(sediment particle mass density)，以及

$$k = \frac{\omega}{c_b}, \omega = 2\pi f, k = \frac{\omega}{c}, \omega = 2\pi f \dots\dots\dots(3.30)$$

$$\rho = \beta \rho_f + (1 - \beta) \rho_s \dots\dots\dots(3.31)$$

其中 $H = \frac{(K_r - K_b)^2}{(D - K_b)} + K_b + \frac{4\mu}{3}$ 、 $c = \frac{k_r(k_r - k_b)}{D - k_b}$ 、 $M = \frac{K_r^2}{(D - K_b)}$ 、 $D = k_r[1 + \beta(\frac{k_r}{k_f} - 1)]$

f 為頻率， c_b 為底質平均聲速， ρ 為底質密度(包含固體與液體)， k_r 為底質顆粒的體積模數， μ 是底質剪力模數， k_b 是底質的體積模數， K_r, k_f 則是孔隙中液體體積模數。 F 為隨頻率增加的波蘇拉流體偏差(Poiseuille flow)，在圓柱孔隙的假設下，Biot 將 F 表示為

$$F(\varepsilon) = \frac{\frac{\varepsilon}{4}T(s)}{1 - \frac{2i}{\varepsilon}T(s)} \dots\dots\dots(3.32)$$

而

$$T(\varepsilon) = \frac{(-\sqrt{i}J_1(s\sqrt{i}))}{J_0(s\sqrt{i})} \dots\dots\dots(3.33)$$

其中 J_1 與 J_0 為圓柱貝索函數(Bessel functions)，且

$$\varepsilon = a\sqrt{\frac{\omega\rho f}{\eta}} \dots\dots\dots(3.34)$$

係數 a 表示孔隙大小參數(pore size parameter)，

$$a = \sqrt{\frac{8\alpha k}{\beta}} \dots\dots\dots(3.35)$$

Williams 在 2001 年提出了 Effective Density Fluid Model 將 Biot Theory 簡化^[88]，Williams 認為在許多應用中 EDFM 之精準度可以取代完整之 Biot Theory，使用上也較為簡化，EDFM 中假設 $k_b = \mu = 0$ ，因為在運用 Biot Theory 計算海底底質特性時影響與其他參數比起來小很多，所以此條件可以較簡單的方式表示

$$H = C_b = M = \left(\frac{1-\beta}{K_r} + \frac{\beta}{K_f}\right)^{-1} \dots\dots\dots(3.36)$$

將式(3.36)帶入式(3.29)即可得

$$\begin{aligned} -k^2 H \Phi_s + k^2 H \Phi_f &= -\omega^2 \rho \Phi_s + \rho_f \omega^2 \Phi_f \\ -k^2 H \Phi_s + k^2 H \Phi_f &= \frac{\omega^2 \alpha \rho_f}{\beta} \Phi_s + \frac{i\omega F \eta}{k} \Phi_f \dots\dots\dots(3.37) \end{aligned}$$

由式(3.37)可將 k^2 整理表示成

$$k^2 = \frac{\omega^2 \rho_{eff}(\omega)}{H} \dots\dots\dots(3.38)$$

其中

$$\rho_{eff}(\omega) = \rho_f \left[\frac{\alpha(1-\beta)\rho_s + \beta\alpha - \rho_f + \frac{i\beta\rho F\eta}{\rho f \omega k}}{\beta(1-\beta)\rho_s + (\alpha - 2\beta + \beta^2)\rho_f + \frac{i\beta F\eta}{\omega k}} \right] \dots\dots\dots(3.39)$$

由 $k = \frac{\omega}{c_b}$ 得出

$$c_b = \sqrt{\frac{H}{\rho_{eff}(\omega)}} \dots\dots\dots(3.40)$$

在此技術的應用實例上，Schock 在 2004 年^[67]以及計畫主持人^[68]於 2014 年基於上述 Biot 與 Stoll 所發展的理論，發展出一套利用掃頻聲納資料，計算海床物理及聲學特性的方法，如上述方法，以聲學反射係數進行孔隙率(Porosity) 估算，再以經驗公式估算曲度(Tortuosity) 以及透水性(Permeability)等參數，後續透過遞迴方式收斂出各海床參數值，並計算出臺灣東北海域海床底質的聲速、密度，以及吸收性(頻率相依)等參數，此技術爾後也被應用於南海觀察到砂波環境對地音參數的影響^[90]。在本計畫中，同樣的技術將運用至較淺海域，本計畫針對臺灣西部較淺海域之探測，將使用岩心採樣與分析結果來驗證聲學探測結果，並用以調校反算模式中之經驗公式與相關係數，以發展適用於臺灣離岸風場環境之反算模式。

本計畫將利用 EDFM 及量測正向反射係數的方法計算海床砂波環境底床聲學特性，並估計其誤差量。然而以上方式雖然簡化許多複雜參數，但我們只能得到較重要的底床性質參數，然而在土壤的力學參數，並不能簡化成 EDFM 型式，因此我們需要回到(3.29)-(3.32)式清楚重解 Biot 理論的推導，在此我們多導入一個參數：

$$m = \frac{c'\rho_f}{\beta}$$

其中 c' 為土壤曲度(tortuosity)為材料特性。重解 Biot 理論(3.29)-(3.32)

解為:

$$k^2 = \frac{-b \pm (b - 4ac_b)^{1/2}}{2a} \dots\dots\dots(3.41)$$

其中

$$a = C_b^2 - HM \dots\dots\dots(3.42)$$

$$b = Hm\omega^2 + \rho\omega^2 M - jH \frac{\omega F \eta}{k} - C_b \omega^2 \rho_f \dots\dots\dots(3.43)$$

$$c = -\rho m \omega^4 + \omega^4 \rho_f + j \frac{\omega^3 \rho F \eta}{k} \dots\dots\dots(3.44)$$

$k = \frac{\omega}{V_s}$ 便得到土層之剪力波數 V_s ，其中 $k = kr - jA$ ， $A = \text{Im}(k)$ ，而 $A = \text{Im}(k)$

即為土層的聲波衰減性。

2. 土層結構參數與力學參數反算

本案將處理連續變頻聲納之探測資料，計算底床垂直反射係數大小，以反算表層沉積物之力學參數值，包含剪力模數、剪力波速、透水率、孔隙率、粒徑大小，以及對聲波傳播重要的聲速、密度、以及吸收係數等。在反算部分乃是以遞迴方式結合掃頻聲納所量測得之反射係數(Reflection Coefficient)與吸收曲線斜率(Attenuation Roll-off rate)兩參數，並結合上述 Biot 與相關經驗公式進行剪力模數、剪力波速、透水率、孔隙率、粒徑大小反算。

由於反射係數對底床的統體性質(bulk sediment property)，如孔隙率(porosity)與密度(Bulk density)反應較敏感，反倒對粒徑大小(grain size)與透水率(permeability)的反應較不敏感，所以常常需要多一個衰減的量測(Attenuation roll-off)。此外，粒徑的大小並不完全左右孔隙率，粒徑的排列方式亦是關鍵參數之一，同一種粒徑不同的排列方式會造成較寬的孔隙率分佈，雖說還是存在關係:粒徑越大其孔隙會越大，而

孔隙率是影響反射係數最重要的因子，所以我們用反射係數來估計孔隙大小，Bachman 提出以孔隙率估計粒徑大小關係式，因此可用反射係數得到孔隙率後再估計出粒徑大小(如下式)，再透過吸收曲線斜率資料加以校正疊代以進行反算。

$$\phi = \frac{0.0943 - \sqrt{0.0943^2 - 4(0.0034)(\beta - 0.208)}}{2(0.0034)} \dots\dots\dots(3.45)$$

3. 聲波正向反射係數學理

本研究另一方面亦在探討聲學量測技術與反射係數計算理論，許多先前的理論多半介紹聲波為平面波入射底床時所計算反射係數公式。然而在底床探索中，聲波由拍發換能器朝底床拍發時，入射波為球面波而非平面波，因此本段落亦介紹聲波為球面波入射的反射聲壓理論，與過往估計底床反射係數的方法：

正向底床探測在實際海洋探測中，離底床界面處高度 h 的聲源拍發的入射波是為球面波，其中在底床產生的反射波分為界面處的底床表面反射波 I_r ，以及下一個底床地層界面反射波 I_i ，底床表面反射又包含沉積物表面散射 I_s 和體散射 I_v ，以下將解說第一個反射波 I_r 的接收聲壓 P_R ，實際在海洋中傳遞的物理情況。首先聲源壓力 P_0 朝向底床界面拍發，如圖 3.5 所示，在距離入射波垂直界面 r 處的反射聲壓 P_R 可以表示成下式

$$P_R(\bar{r}) = P_0 G_p(\bar{r}) \Phi_p(\bar{r}) R(\bar{r}) \dots\dots\dots(3.46)$$

其中 $\Phi_p(\bar{r})$ 是方向函數，此函數代表拍發聲源的指向性參數，也就是圖 3.5 中的波束圖，而 $\Phi_g(\bar{r})$ 為格林函數，此函數主要代表拍發聲波由聲源抵達 \bar{r} 點的傳輸損耗，因此 $P_0 G_p(\bar{r}) \Phi_p(\bar{r})$ 可以定義為靠近底床界面 \bar{r} 處的入射聲壓 $P_I(\bar{r})$ ，整理後得到 \bar{r} 處底床反射係數如下式

$$R(\bar{r}) = \frac{P_R(\bar{r})}{P_I(\bar{r})} \dots\dots\dots(3.47)$$

而在 \bar{r} 處的質點受壓力產生之位移與反射波的關係式如下

$$w_R(\bar{r}) = P_R(\bar{r})\sin(\theta)/(\rho c) \dots\dots\dots(3.48)$$

式(3.48)中 c_b 與 ρ 分別為水的聲速與密度， θ 是反射角 θ_1 的補角，由於水中切線分量的黏性耦合運動微不足道，因此切線分量可以忽略，接著將換能器在底床界面上的有效面積 A 中，所有 \bar{r} 點接收之反向散射聲壓積分，得到聲源處所接收到反射聲壓 P_b ，其中 k 是波數

$$P_b = \int_A -j \frac{\rho c k}{2\pi} w_R(\bar{r}) G_r(\bar{r}) \Phi_r(\bar{r}) d\bar{r} \dots\dots\dots(3.49)$$

上式中 $\Phi_r(\bar{r})$ 則是來自 \bar{r} 點的接收方向函數，而 $G_r(\bar{r})$ 是反向散射路徑有關的格林函數，也就是反射波由底床到水面端接收器的傳輸損耗，接著整合(3.47)到(3.49)，得到簡化的積分公式，其中將 $R(\bar{r})$ 積分結果即為球面波反射係數 R_{sph}

$$P_b = \int_A H(\bar{r}) d\bar{r} \dots\dots\dots(3.50)$$

$$H(\bar{r}) = -j \frac{k}{2\pi} P_0 G_r(\bar{r}) \Phi_r(\bar{r}) R(\bar{r}) G_p(\bar{r}) \Phi_p(\bar{r}) \sin(\theta) \dots\dots\dots(3.51)$$

不同於平面波理論中反射係數的估計方式，計算 R_{sph} 需要透過聲源聲壓 P_0 與接收聲壓 P_b ，以及傳輸過程中的格林函數 $G_r(\bar{r})$ 、 $G_p(\bar{r})$ 與聲源、接收器方向函數 $\Phi_r(\bar{r})$ 和 $\Phi_p(\bar{r})$ ，而為了獲得傳輸距離與格林函數之間關係，將前面提到 \bar{r} 處入射波整理成式(3.52)

$$P_i(\bar{r}) = P_0 G_p(\bar{r}) \Phi_p(\bar{r}) \dots\dots\dots(3.52)$$

並將有效面積內所有入射波聲壓積分，且假設拍發方向為全向性，因此 $\Phi_p = 1$ ，得到靠近底床界面處的入射聲壓 P_1 ，並整合原本的入射方向格林函數 $G_p(\bar{r})$ 為 $G'_p(r_1)$ 得到式(3.53)，

$$P_1 = P_0 G'_p(r_1) \dots\dots\dots(3.53)$$

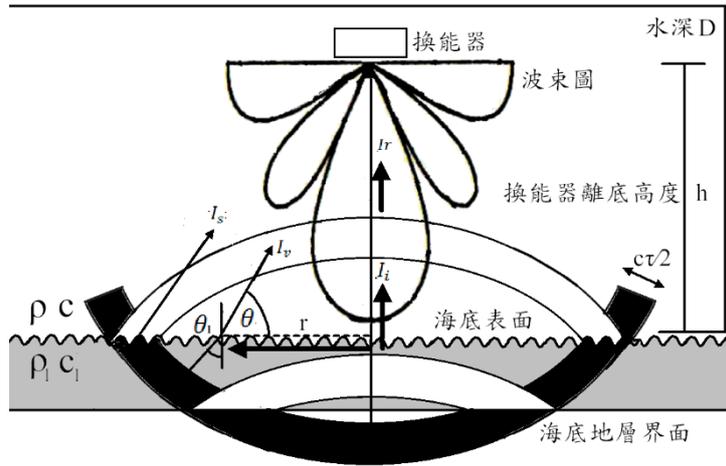


圖 3.5 實際海域聲波反射示意圖

$G'_p(r_1)$ 代表有效面積上的理論傳輸損耗，而方向函數同樣整合為 $\Phi'_p(r_1)$ 與 $\Phi'_r(r_2)$ ，其中聲波在底床反射為全向性，因此後續討論方向函數時，皆省略反射方向函數 $\Phi'_r(r_2)$ 。因此可以得到影響計算誤差的原因即為換能器與底床之間距離，使聲波傳輸損耗可能受水文環境影響，也就是前面提到的兩個格林函數所代表的 $G'_p(r_1)$ 與 $G'_r(r_2)$ ，而且此誤差有可能隨距離增加而變大。接續為簡化推導，將入射波、反射波因傳播而影響的格林函數 $G'_p(r_1)$ 與 $G'_r(r_2)$ 統籌為 G ， G 在理論解析中定義為 $1 / (\text{傳輸距離}) \times e^{ik \text{傳輸距離}}$ 。以上說明球面波的底床反射係數物理涵義，實際在底床反射係數估計，需使用聲納設備與實驗量測，並清楚了解 (3.50)、(3.51) 兩式中的各項參數，接續將說明過去如何執行。

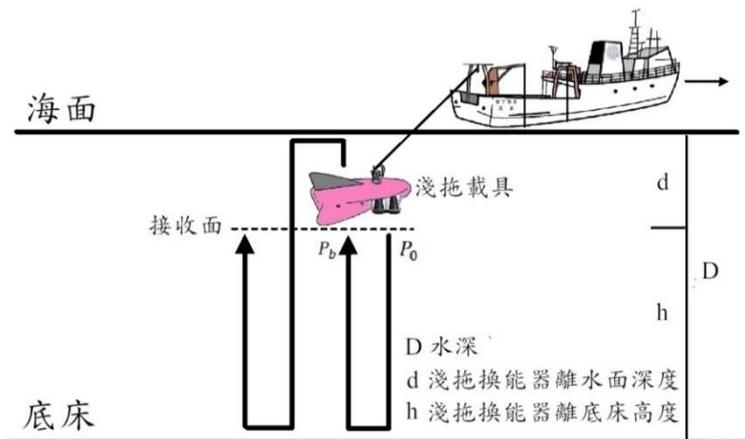


圖 3.6 拖曳式載具與底床回波示意圖

反射係數 R 定義為邊界上反射聲壓與入射聲壓的比值，根據前述推導，聲波到達底床之前傳輸距離 h ，如圖 3.6 所示，故必須考慮此段傳輸損耗 G 。而使用一般市售系統之底床聲學剖面儀，由於使用者無法完全掌控儀器訊號處理方式，常常須要使用第一與第二次底床回波，作為入射波與反射波比值，以計算反射係數，計算方法如下

$$B_1(f) = \frac{1}{2h} x(f)x^*(f)H_s(f)R(f) = G_1 P_0 \Phi_p'(h)R \dots\dots\dots(3.54)$$

首先式(3.54)表示第一次底床回波能量頻譜關係式，而 $B_1(f)$ 代表第一次底床回波的訊號能量頻譜密度， $x(f)$ 為原始能量的能量頻譜， $x^*(f)$ 代表其共軛，兩項進行相關性積分，代表經過脈衝壓縮處理，為了與上述理論推導連結，我們將之表示在 P_0 項， $2h$ 為聲源聲波經過第一次床反射回到接收器距離，在此令 $G_1 = 1/2h$ ，表示球面波損耗係由入射波與反射方向格林函數 $G_p'(h)$ 與 $G_r'(h)$ 所貢獻， $H_s(f)$ 代表系統響應，包含聲源強度 P_0 聲源強度 P_0 與方向性函數 $\Phi_p'(h)$ 。若發出的聲源強度聲源強度 P_0 與方向性函數為已知，並以實驗量測收集接收聲壓 $B_1(f)$ ，加上傳輸損耗 G_1 的補償，便可估計出反射係數 R 。

以上之聲波傳播與反射過程理論分析僅考量聲波之擴散損失，由於海水及海床對於聲波有吸收效應，頻率越高其吸收效應也越強，本計畫在模式建置與數值模擬之過程中，也加入了吸收係數之考量，在海床中的吸收係數使用單位為 dB/λ ，在單位距離內，高頻聲波會被吸收較多能量，而在海水中，則加入海水之吸收係數

$$\alpha' = 3.3 \times 10^{-3} + \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 3.0 \times 10^{-4} f^2 \quad (\text{dB/km}) \dots\dots\dots(3.52)$$

在此式中，頻率 f 之單位為 kHz，在模式之聲波傳播過程中，將依據聲波傳播距離來計算吸收衰減量。本計畫反算模式研究方法為模擬海床中正向的聲波反射係數，並將量測的反射係數(並搭配土層的聲波衰減)做為多孔彈性底床力學模式的依據進行反算，進而求得土層剪力模數、剪力波速、透水率、孔隙率、粒徑大小，聲速、密度、以及吸收

係數等重要參數。

在本團隊目前所發展之多頻地音反算模式中，可整合反射係數量測值與吸收斜率量測值，以遞迴分析之方式計算出正確的孔隙率與透水率(如圖 3.7)。由圖 3.7 可清楚觀察到底質參數隨頻率之改變，若能結合多頻率聲波進行探測及資料分析，則可於遞迴過程提高反算精準度，由此亦可判斷發展多頻率聲波海床下地質探測技術為可行。本案將整合多頻率探測所得之反射係數與吸收斜率，藉此在遞迴分析過程中更準確的獲得孔隙率、粒徑大小、透水率、與統體密度等參數，以評估海床下土層之結構穩定度與評估是否有鬆動變化。

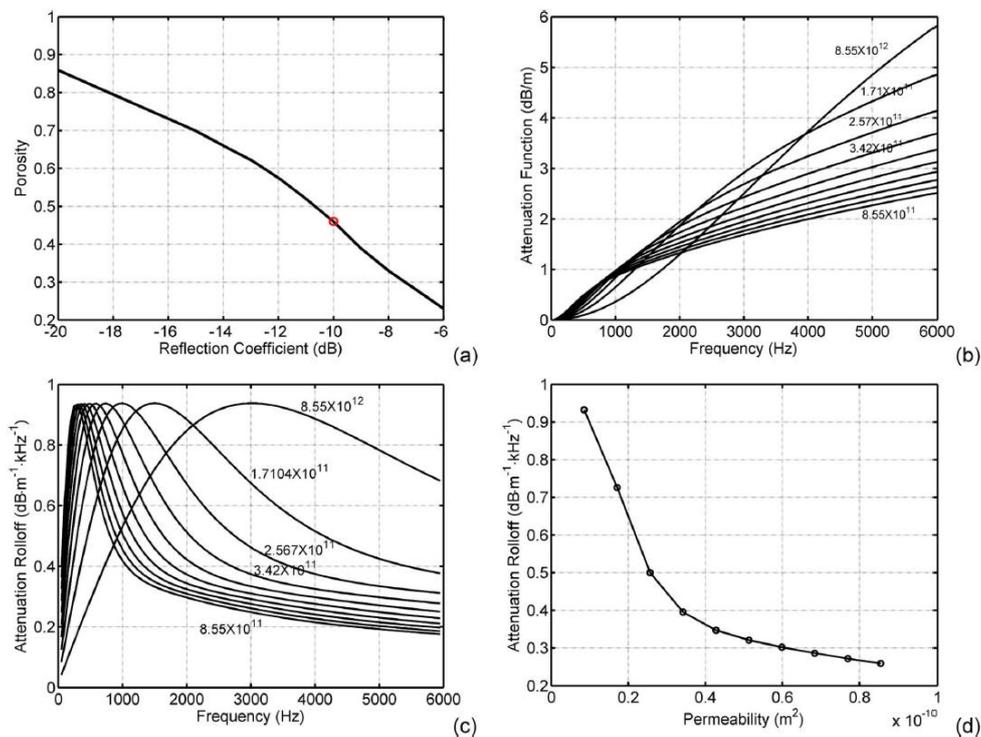


圖 3.7 本團隊模式成果:海床反射係數、孔隙率、吸收斜率、透水率等參數之經驗關係

3.4 多頻率海床下土層分佈調查之可行性分析

本節將基於第二章之文獻蒐集彙整結果，以及第 3.3 節之數值模擬結果，進行以多頻率聲波進行海床下土層分佈調查之可行性分析。

首先，根據第 2.1 節之風機基樁附近土層穩定性相關文獻可知，無論是風機基樁震動、淘刷作用、或是土壤液化作用，均會反映在土壤層次界面變化、土壤鬆緊度變化、以及剪應力變化上，亦即可由土壤層次界面之突起或凹陷、土層孔隙率、統體密度、剪應模數等參數進行監測，以下將針對各項監測項目進行可行性分析與討論。

1. 土層層次界面起伏監測

根據第 2.3 節之文獻回顧，掃頻聲納主要針對海床面下 100 公尺以內之海床土層進行探測，且根據海床組成材質之不同、水深限制、以及探測系統之操作方式，對泥質海床之探測深度通常在 40 公尺以內，而對砂質海床之探測深度則在 10 公尺以內。在以上深度限制範圍內，本計畫可獲得高解析度之海床土層層次界面資訊，在此之解析度與第 3.2 節中所述相同，主要受頻寬及聲素影響，在使用訊號頻寬大於 5kHz 時，層次界面探測精準度可在 15-20 以下(視聲速而定)。若加大使用訊號之頻寬，則可獲得更高之解析度，例如在海床土層聲速 1600m/s 之條件下，使用頻寬 8kHz 之訊號，可獲得 10 公分之空間解析度。圖 3.8 為本團隊使用自行發展之掃頻聲納系統進行海床土層結構探測之結果範例，此探測地點之沉積物組程主要為泥，由此圖可清楚本團隊之探測深度可達海床下近 40 公尺，且探測資料可清楚呈現出各層次界面之深度變化。雖然風機基樁之架設深度較深，但淘刷、土壤液化、以及振動造成之土層鬆動主要仍出現在近海床面處(海床面下約 20 公尺以內)，因此對於上述現象造成之早期土層層次界面變化，本計畫使用寬頻掃頻聲納系統可以有效掌握。

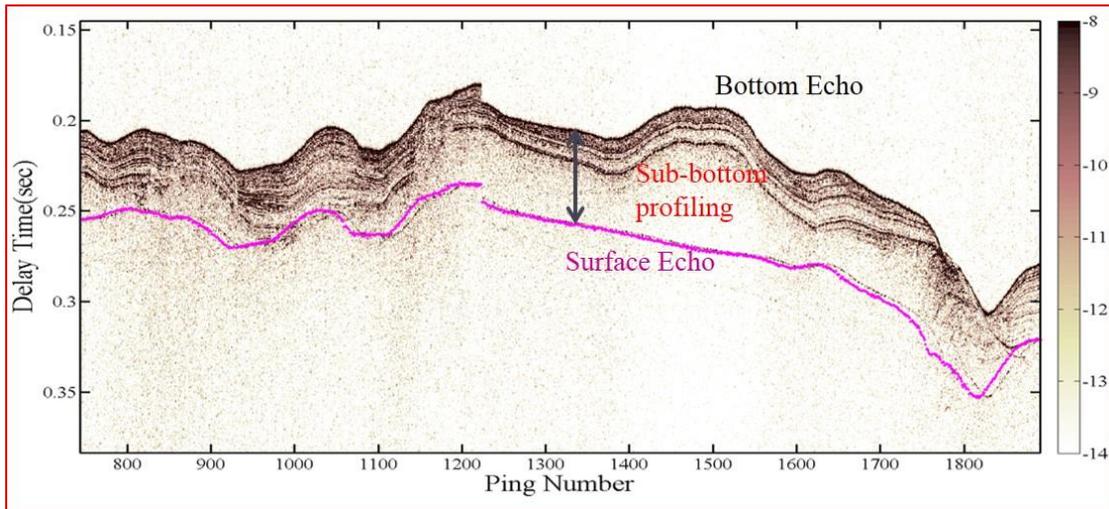


圖 3.8 本團隊之掃頻聲納探測結果範例

2. 土層孔隙率與統體密度變化監測

根據第 2.1 節之文獻回顧，土壤液化或其他土壤鬆緊度改變將造成土層內之孔隙率與統體密度變化。由上節(第 3.3 節)之理論與數值分析，以及本團隊過去之研究成果可知，現有技術可使用寬頻掃頻聲納資料有效反算海床表層沉積物之平均孔隙率與統體密度，海床表層沉積物之定義為自海床面至海床第一個次表層間之沉積物。海床表層為直接受海水作用之層次，其厚度自數公尺至數十公尺不等，且為各種鬆動作用最明顯之區域，因此監測海床表層沉積物之孔隙率與統體密度變化可有效早期發現土壤緊密度改變之問題。

本計畫目前之技術可有效反算表層沉積物之物理參數，在反算過程中有牽涉相關經驗公式之運用，雖然此技術已在南海海域以及臺灣東北和臺灣西南海域經過多次驗證，為了確保此技術在臺灣近岸之使用正確性，以及經驗公式之適用性，本計畫仍規劃進行海上實驗，現地蒐集海床土層探測資料，並以探測船採採當地土樣(岩心)，利用後續岩心感測分析資料進行比對，以達成聲學量測與實際樣本精準度比較，驗證本技術之準確性。此外，由於海床吸收係數以及 EDF 模式輸出之有效密度(Effective Density)有強烈的頻率相依性(參考第 3.3 節)，運用此頻率相依性可提高海床物理參數之估算準確度，因此本計畫將

在研究過程中探討多頻率吸收係數之量測結果(若有次表層存在)，以及多頻率有效密度曲線對於統體密度估算之準確度提升情形。

3. 土層剪應模數變化監測

海床土層之鬆動可由上述土層層次界面變化以及孔隙率和統體密度兩項進行觀測，而由第 2.1 節之文獻回顧可知，海床土層之鬆動亦會影響其力學參數，且剪應力與剪應模數亦為風機基樁在設計與運轉過程需持續監測之參數，因此本計畫也將投入研究是否能利用多頻率聲波之探測結果估算海床表層沉積物之剪應模數變化。本研究對於土壤力學性質的應用分析採用現地岩心採樣分析及土壤力學實驗，並於實驗室內可控制環境給定特定性質的土壤進行聲學實驗，可以清清楚楚了解聲學與土壤參數之關係。

根據理論分析，剪應模數可由統體密度與剪應波速求得

$$\mu = \rho V_s \dots\dots\dots(3.55)$$

其中 μ 為剪應模數、 ρ 為統體密度、 V_s 為剪應波速。根據第 3.3 節，由掃頻聲納探測結果可估算統體密度與剪應波速，因此可進一步利用(3.55)式計算得剪應模數。此估算過程在理論上為可行，但在實務上需經過實驗驗證，因此本計畫亦將進行實驗室實驗，同時進行寬頻掃頻聲納探測與剪應波量測，也進行實體樣本分析，結合三者來探討是否可以使用寬頻聲波探測資料推估海床表層沉積物之剪應模數。

根據以上分析，本計畫對於使用寬頻(多頻率)聲波進行海床下土層分佈調查之可行性分析可歸納如下

- (1) 海床下土層之鬆緊度變化，以及淘刷、土壤液化等現象，主要將表現在土層層次界面之突起或凹陷、土層孔隙率、統體密度、剪應模數等參數上。
- (2) 以寬頻掃頻聲納進行海床下土層探測，可有效在泥質海床環境獲得海床下 40 公尺內(砂質海床為 10-20 公尺以內)之土層層次結構，

在使用訊號頻寬 5kHz 以上時，層次探測準確度可達 15-20 公分，且準確度(解析度)隨訊號頻寬而提高。

- (3) 以寬頻掃頻聲納進行海床下土層探測，運用本團隊之地音反算技術可獲得海床表層沉積物之孔隙率與統體密度，因此可監控海床表層沉積物之土層鬆緊度與是否有鬆動與土壤液化情形。
- (4) 本計畫將運用實測資料來校正反算模式中的經驗公式，以提高對於孔隙率與統體密度的估算準確度。同時也探討結合多頻率資料對於統體密度估算準確度之提升成效。
- (5) 以聲學探測資料推估海床表層沉積物之土壤剪應模數在理論上可行。本計畫將以實驗室試驗的方式進行實驗驗證，以探討在實務上是否可運用多頻率聲學探測資料反算土壤力學參數。
- (6) 使用 2-12kHz 間之掃頻訊號，其中涵蓋了市售系統常用的 3.5kHz。參考文獻中可見到海床剖面儀之掃頻訊號亦大多在 1-20kHz 範圍內，為表層海床探測之市用頻段，也為本團隊設備能力可執行之頻段。

第四章 多頻率海床探測實驗及資料分析

本計畫為達到多頻率海床探測之目的，首先進行多頻率聲學探測系統之發展，基於本團隊現有之海床聲學探測系統建置經驗，建置兩套多頻率海床聲學探測系統，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，系統之發展建置細節將於本章之第 1 節中(4.1 節)進行介紹。除了多頻率海床聲學探測系統外，本計畫在實驗過程中亦使用旋轉式採泥器(Shipek Grab)進行岩心採樣，並使用底質分析儀器(包含多重感應元岩心記錄儀、雷射粒徑分析儀)進行底質參數分析，以驗證聲學探測結果，4.1 節也包含上述岩心採樣與分析之相關儀器系統介紹。4.2 節將整合介紹本計畫所執行之實驗，包含實驗設計與過程、實驗訊號、資料分析技術等，4.3 與 4.4 節則將分別綜整海床面地形量測與海床下土層探測之實驗資料分析成果。

4.1 海床聲學探測系統及岩心分析系統介紹

4.1.1 多頻率海床探測聲學系統建置

一般聲學探測系統在設計上均規劃有主要操作頻率，以國際知名大廠 EdgeTech 之聲學探測系統為例，其型號 3100/3200/3300 之海床聲學剖面儀(sub-bottom profiler)即設定 500 Hz-12 kHz、1-6 kHz 與 2-16 kHz 三種操作頻段，無法更進一步彈性運用，亦無法同時有更大範圍之頻段操作。本計畫為了進行多頻率聲學訊號海床探測，以了解海床面地形與海床下土層各別之最佳探測頻率組合，因此首先投入發展多頻率海床探測聲學系統，整合硬體系統、控制系統、以及訊號處理模組開發，以在同一載台上進行由 500Hz-50kHz 間之多頻率聲學訊號發收。以下將介紹多頻率海床探測聲學系統之開發過程。

多頻率海床探測聲學系統的開發如圖 4.1(a)，為基於本團隊於過去已建置完成的聲學底床剖面儀如圖 4.1(b)。聲學底床剖面儀搭載三顆中

頻換能器，能夠執行多種方向的收發任務(如:向下、向後以及側向等同時收發功能)，該系統也大量被運用在臺灣周邊海域的水下聲學探測與調查，包含海洋音傳、地音反算、水下通訊等應用。該系統累積相當豐富的研究成果圖 4.2 即為使用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，來量測到海床反射係數。而近年來，發現國內在水下聲學探測、調查以及應用需求上日與日俱增，因此本團隊透過持續的精進，建置出多頻率海床探測聲學系統。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，來到低、中、高頻率的範圍(500Hz-50kHz 的收發)，詳情參考表 4-1。圖 4.3 為結合 4 個水下麥克風接收陣列所得到之訊號範例，可看到 0.5-0.6 秒間有自聲源處直接傳播至水下麥克風之訊號，以及海床和水面所反射之訊號;若將各通道之接收資料進行排列與整理，即可獲得如圖 4.4 之底床回波圖。以下將更詳細地介紹多頻率海床探測聲學系統上的細節部分。

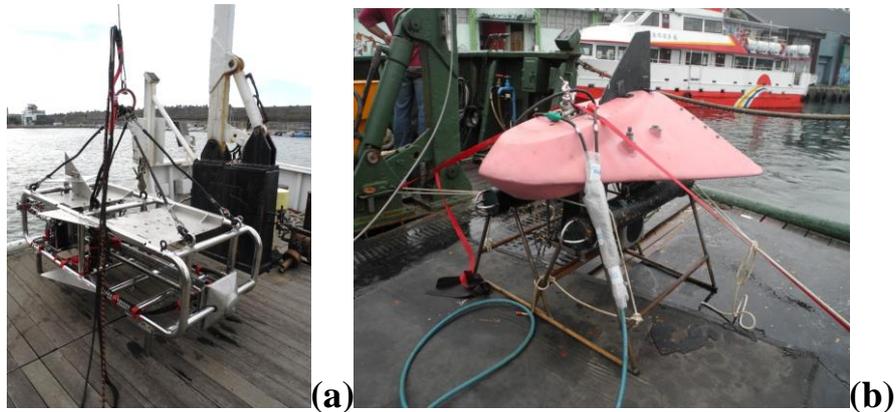


圖 4.1 聲學探測系統，(a)多頻率海床探測聲學系統圖、(b)聲學底床剖面儀

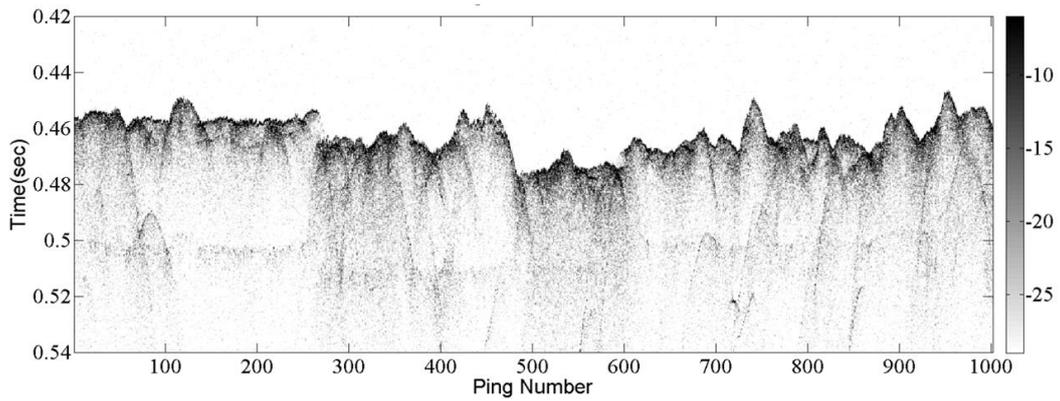


圖 4.2 聲學底床剖面儀蒐集之海床正向反射資料範例

表 4-1 多頻率海床探測聲學系統規格表

	描述
聲源響應頻率	500-50 kHz
聲源強度	149 dB// μ Pa/V@1m 至 192 dB// μ Pa/100V@1m
最大同時接收通道	4 通道
接收響應頻率	.01 - 50 kHz
接收靈敏度	-194 dB//1V/ μ Pa
作業深度	水下 100 公尺以上

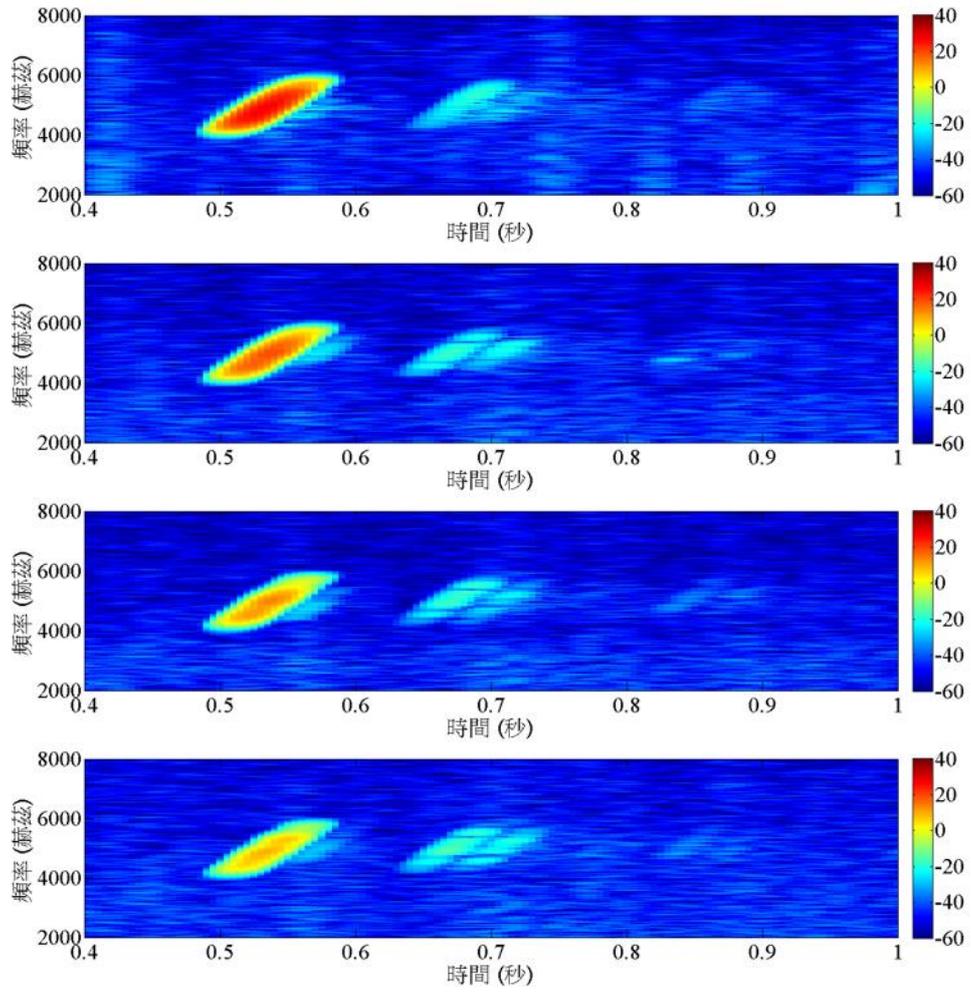


圖 4.3 聲學陣列接收資料範例由上至下分別為 4 個接收器之接收情形

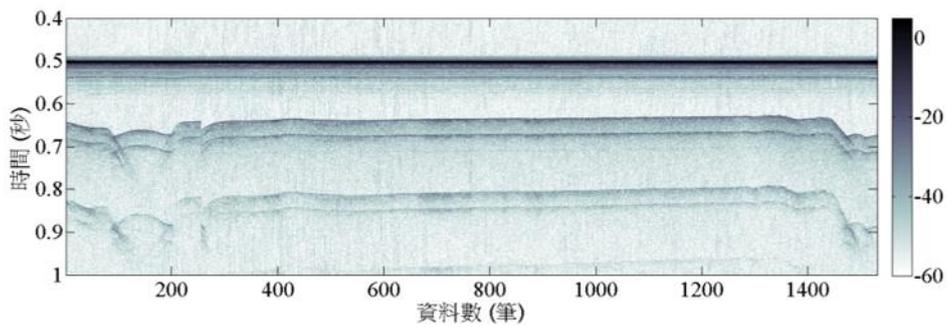


圖 4.4 陣列式聲學底床剖面儀於海上測試實驗中蒐集之底床回波圖

首先在硬體系統部分，如圖 4.5 所示，其硬體架構包含：(1)電腦、(2)類比輸出模組(Analog Output Module, AO)、(3)低、高頻功率放大器(Power Amplifier)、(4)低、中、高頻發射換能器(Transducer)、以及(5)寬頻接收換能器等部分，其中電腦、類比輸出模組及功率放大器為水上端，執行實海域海床聲學探測時通常架設於研究船之實驗室中使用，而低、高頻發射換能器及寬頻接收換能器則藉由拖曳式載台或吊放式載架於水下端使用。水上端與水下端之間透過隔離多通道電纜連接並傳遞聲源訊號與接收訊號。類比輸出模組與功率放大器之儀器規格詳列於表 4-2、表 4-3、表 4-4。接著，該系統為了能在進行海床探測時達到不同頻率聲源訊號，因此安裝了多種不同頻率的換能器，使該系統能夠涵蓋 500Hz-50kHz 的頻段。低、中、高頻的換能器規格詳請參考表 4-5、表 4-6、表 4-7。

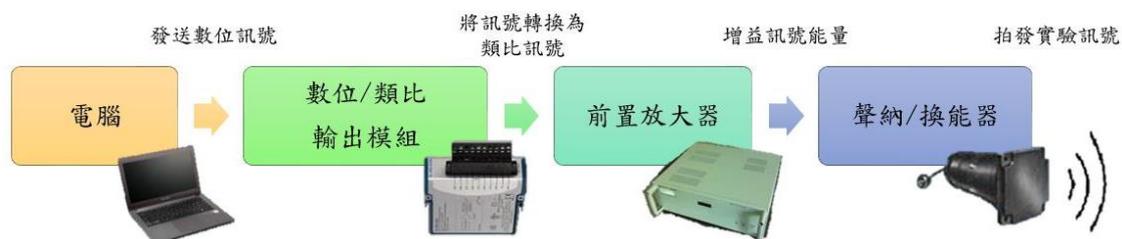


圖 4.5 聲納系統架構圖

表 4-2 類比輸出模組(Analog Output Module, AO) 規格表

項目	描述
模組	NI-9263
最大輸出電壓	± 10 V
解析度	16 bits
取樣率	100 KS/s
頻道數量	4

表 4-3 低頻功率放大器(Power Amplifier) 規格表

項目	描述
模組	GPA-8340
輸出功率(RMS)	400 W
最大輸出功率	600 W
輸出負載阻抗	25Ω(100V) / 12Ω(70V) / 8Ω(56V)
輸入靈敏度	1V/20kΩ
頻率響應	50 至 20k Hz (+1/-3dB)
失真率	在 1k Hz 時 <1%
訊噪比(S/N)	大於 95dB
外觀尺寸	482(W)×133(H)×360(D) mm

表 4-4 高頻功率放大器(Power Amplifier) 規格表

項目	描述
模組	HSA-4052
輸出功率(RMS)	200 W
最大輸出功率	300 W
輸出負載阻抗	50Ω(300V _{P-P})
頻率響應	40 至 200k Hz (+1/-3dB)
外觀尺寸	290(W)×117(H)×450(D) mm

表 4-5 中頻聲源換能器(Transducer)規格表

項目	描述
聲壓位準大小(輸出)	+190 dB re 1 V/μPa

靈敏度	-174 至 -178 dB re 1 V/ μ Pa
頻率響應	4000 至 8000 Hz
波束寬	91° 至 99° (5000 Hz)

表 4-6 低頻聲源換能器(Transducer)規格表

項目	描述
聲壓位準大小(輸出)	+149dB re 1 V/ μ Pa
靈敏度	-186 至 -190dB re 1 V/ μ Pa
指向性	全向性接收/發射
最大輸入功率	10000 watts
適用頻段	4 - 22 kHz

表 4-7 高頻水下換能器(Transducer)規格表

項目	描述
響應頻率	33 kHz
傳輸電壓響應	149 dB// μ Pa/V@1m
接收靈敏度	-194dB re 1 V/ μ Pa
適用頻段	0.01 - 50 kHz
指向性	全向性接收/發射
最大輸入功率	800 watts

接著是多頻率海床聲學探測系統之控制模組開發部分如圖 4.6 所示，為透過 LabVIEW 語言來建置的訊號控制部分。透過軟體介面的操作方式，來控制類比輸出模組的輸出，來達到能夠在同一時間內最多能發出以及接收 4 種不同的訊號。其中訊號的部分為可以依照各種實驗環境與需求來進行調整，例如:訊號頻率、訊號種類、訊號長短等。最後，透過自行設計實驗訊號以及同時配合低、高頻功率放大器，來

達到在進行多頻率海床探測時，低頻訊號以及高頻訊號能夠即時並且同步發射訊號以及訊號錯開，避免訊號干擾。

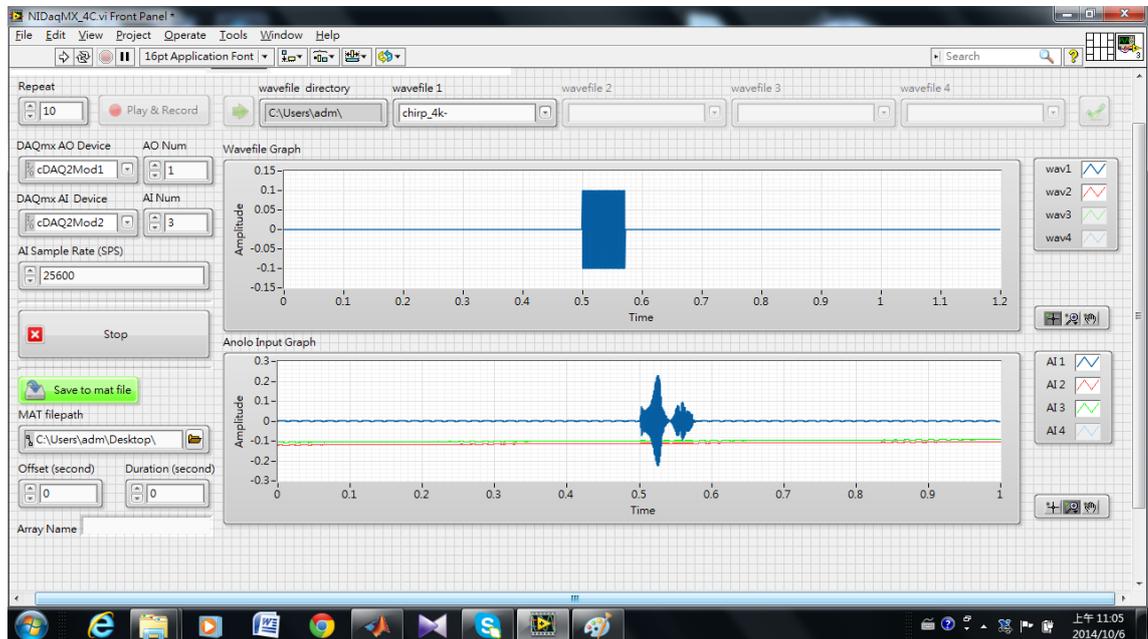


圖 4.6 多頻率海床聲學探測系統之控制模組介面

如上所述，本計畫發展之多頻率海床聲學探測系統能以拖曳式以及吊放式兩種方式操作，在拖曳式操作上，拖曳式載台上的換能器的部分包含了用以拍發聲學訊號之低頻、中頻、高頻聲源以及四顆寬頻接收水下麥克風以達到同步收發的目的。在拖曳式聲納系統之聲源端，中頻聲源使用之換能器為 TR-208，其規格如表 4-5 所示，輸出之聲壓位準大小為+190 dB re 1 V/ μ Pa，波束寬可達 91° 至 99°。低頻聲源使用之換能器為 ITC-1007，輸出之聲壓位準大小為+149 dB re 1 V/ μ Pa，且為全向性發射與接收之換能器，其規格如表 4-6 所示。高頻聲源使用之換能器為 ITC-1032，輸出之聲壓位準大小為 149 dB// μ Pa/V@1m@33 kHz，其規格如

表 4-7 所示。在接收回波訊號的部分，以四顆 ITC-1032 全向性水下換能器等間隔架設於拖曳式聲源載台上，以達陣列接收之效果，其靈敏度為-194dB re 1 V/ μ Pa，詳細規格如表 4-7 所示。圖 4.8(a)、圖 4.8(b) 為拖曳式聲納系統整體外觀及其於海研三號下放之情形。而為了確切

掌握聲納載台之深度資訊，本研究團隊於拖曳式聲納載台搭載 Sea-Bird Electronics 公司的溫壓記錄儀(SBE39)，以每 5 秒一筆之採樣頻率記錄聲源載台之深度及水文資訊，其規格如表 4-8 所示，外觀如圖 4.7 所示。此溫壓記錄儀可依照實驗需求預先設定採樣頻率及啟動時間，將其固定於拖曳式載台上，當預先設定的時間到達，溫壓記錄儀即會自動啟動並開始記錄。



圖 4.7 SBE39 溫壓記錄器

表 4-8 溫壓記錄儀(SBE39)規格表

	溫度(° C)	深度(公尺)
測量範圍	-5 至 35(° C)	600(公尺)
解析度	0.0001(° C)	0.012(公尺)
記憶體	32.9M bytes	
資料儲存	9 bytes/sample	
電池	9 Volt 鹼性電池	
電池耐久	>41000 sample	

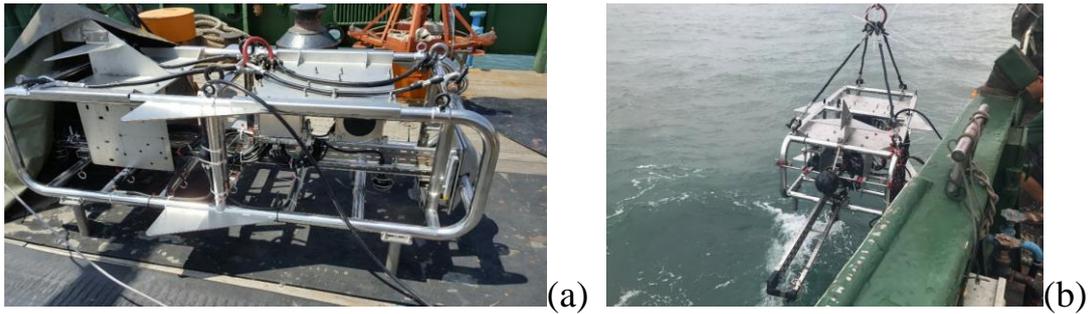


圖 4.8 拖曳式聲納系統，(a)外觀圖、(b)實際佈放情形

除了上述所介紹的拖曳式自收發聲納系統 (Towed sonar system) 之外，本團隊另外建置一套較為輕量以及簡便的吊放式多頻率海床量測系統如圖 4.9。此系統主要搭載了一顆中頻聲源、一顆高頻聲源以及一個水下麥克風，聲源與麥克風相距一米，能使用訊號頻率範圍為 2 kHz 至 50 kHz。此套系統設計作業位置於船側，使聲源垂直放進水面，此時聲源與麥克風的連線與海床面垂直。聲源完全進入水面後往海床面進行垂直拍發，此時利用於聲源正下方一米的麥克風接收，進而得到定點海床能量回波資訊。



圖 4.9 多頻率海床量測系統

4.1.2 訊號設計

本實驗中之主動聲學實驗所使用的實驗訊號使用線性頻率調變訊號 (Linear Frequency Modulation, LFM)，又稱為掃頻訊號 (Chirp)，此類型之訊號其頻率可隨著時間的增加而變化，為在一段時間內包含多種頻率之寬頻訊號。此種訊號在噪度高的環境有很強的辨識度，且經過

脈衝壓縮處理後可以得到很高的訊雜比，適合用於量測通道脈波響應，探討實驗環境通道特性與目標物反射特性，故選擇此訊號作為底床探測實驗之聲源訊號。聲源訊號頻段範圍為 2-50kHz 之線性調頻訊號，中心頻率每 2kHz 改變，頻寬為 2kHz、5kHz 兩種組合，訊號長度為 0.02 秒，每間隔 0.2 秒拍發一次，圖 4.10 為線性頻率調變訊號之時頻譜圖，縱軸為頻率，單位為 Hz，橫軸為時間，單位為秒(s)，聲源訊號資訊列於表 4-9。

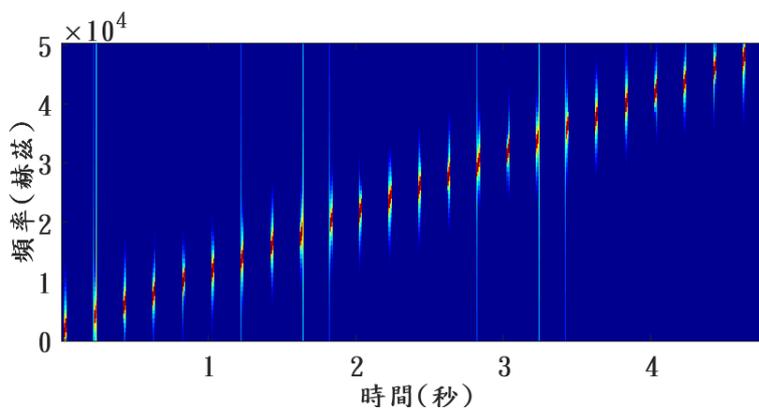


圖 4.10 線性頻率調變訊號頻譜圖

表 4-9 線性調頻訊號(LFM)資訊表

Item	Description
Signal Type	線性調頻訊號 (LFM)
Center Frequency	每 2k Hz 變化
Frequency Range	2k-50k Hz
Bandwidth	2k、5k Hz
Signal length	0.02 秒
Signal interval	0.2 秒

4.1.3 聲學資料訊號處理分析介紹

1. 脈衝壓縮

在分析實海域實驗資料的過程中，由於回波訊號常常混雜著研究船本身的機械噪音(Machinery noise)、底床反射訊號(Bottom reflection)及其他非目標訊號的混響雜訊(Reverberation)，往往會遇到目標訊號被埋藏在噪音之中的情況，因此常透過脈衝壓縮處理以提高訊雜比。訊雜比可定義為：

$$SNR = 10 \log\left(\frac{P_S}{P_N}\right) = 20 \log\left(\frac{V_S}{V_N}\right) \dots\dots\dots(4.1)$$

其中 P_S 為訊號功率、 P_N 為噪音功率、 V_S 為訊號振幅大小、 V_N 為噪音振幅大小。

脈衝壓縮又可以稱為匹配濾波器(Matched Filter)，主要包含三個步驟：解調(Demodulation)、濾波(Filter)、相關性積分(Auto-Correlation)，圖 4.11 為脈衝壓縮流程圖。



圖 4.11 脈衝壓縮(Pulse compression)流程圖

2. 解調 (Demodulation)

水下通訊較空氣中的通訊複雜也困難許多，由於聲波的傳播損耗會隨著頻率的提高以及距離的增加而加劇，因此在實驗前須考慮通信距

離選擇欲使用的訊號頻率，通信距離愈長需使用愈低的載波頻率。基於此因素，在實海域實驗中所拍發聲源訊號時需先經過調變處理，其原理為將原始訊號乘上一個載波訊號，使其從基頻移至實驗訊號欲拍發的頻段，即可進行拍發；反之，調變的逆過程為解調，可將訊號從載波上卸下，回歸到基頻(Baseband)。如式(4.2)，考慮一經過調變的聲源或接收載波訊號為 $y(t)$ ， $x(t)$ 為原始基頻訊號，利用乘上載波訊號 $\cos(f_c \cdot t)$ 進行調變， f_c 為中心頻率，透過改變中心頻率可以決定欲調變的載波頻段， t 為訊號時間長度。

$$y(t) = x(t) \cos(f_c \cdot t) \dots\dots\dots(4.2)$$

在將實驗資料進行脈衝壓縮分析時，首先須將實驗所拍發的聲源訊號以及接收訊號進行解調，在此以本論文之實驗所使用的訊號為例，說明解調之方法。考慮一中心頻率為 5000Hz，頻寬為 2000Hz 之實驗訊號如圖 4.12 所示，訊號長度為 1.0 秒，圖(a)為此原始實驗訊號之時頻譜圖，圖(b)為經傅立葉轉換之實驗訊號頻域圖。

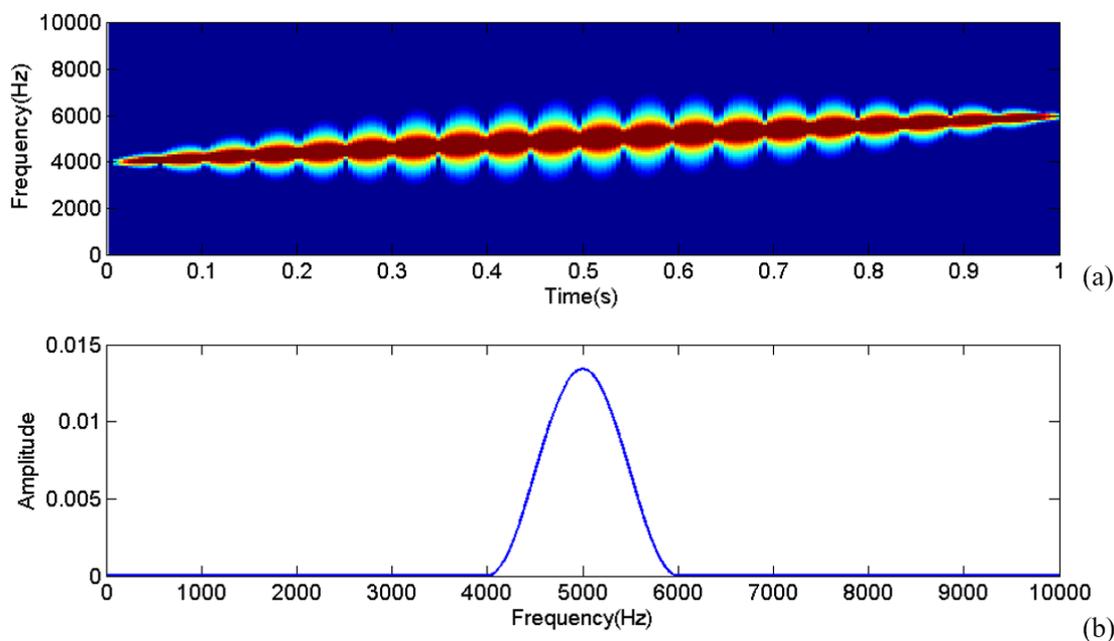


圖 4.12 原始實驗訊號圖(a)時頻譜圖(b)頻域圖

將調變後的原始訊號 $y(t)$ 如式(4.2)，利用式(4.3)與(4.4)分別乘上

$\cos(2\pi \cdot f_c \cdot t)$ 與 $\sin(2\pi \cdot f_c \cdot t)$ 。

$$y_1(t) = y(t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t) \dots\dots\dots(4.3)$$

$$y_2(t) = y(t) \cdot \sin(2\pi \cdot f_c \cdot t) \dots\dots\dots(4.4)$$

接下來使用式(4.5)將式(4.3)與式(4.4)兩式相減，將 2 倍中心頻率 f_c 處 (10000Hz)的訊號消除，僅保留存在於基頻的訊號。

$$b_y = y_1 - y_2i \dots\dots\dots(4.5)$$

圖 4.13 為實驗訊號之解調過程示意圖，圖(a)為將原始訊號乘上 $\cos(2\pi \cdot f_c \cdot t)$ 後並經傅立葉轉換的結果，其中原始訊號 $y(t)$ 被轉換至基頻 (0Hz)以及 2 倍中心頻率 f_c (10000Hz)的位置上。同樣，將原始訊號乘上 $\sin(2\pi \cdot f_c \cdot t)$ 後並經傅立葉轉換結果如圖(b)，最後將兩結果相減，消除 2 倍中心頻率 f_c (10000Hz)位置之訊號，得到如圖(c)之結果，原始訊號中心頻率被回歸至基頻。

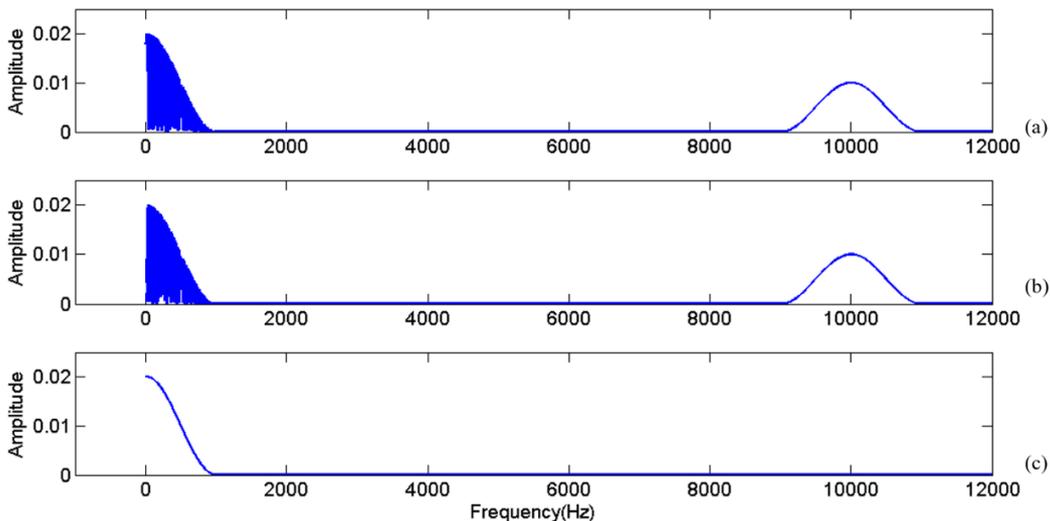


圖 4.13 中心頻率 5000Hz 之實驗訊號解調過程示意圖，(a) 原始訊號 $y(t)$ 乘上 $\cos(2\pi \cdot f_c \cdot t)$ 後、(b) 原始訊號 $y(t)$ 乘上 $\sin(2\pi \cdot f_c \cdot t)$ 後、(c) 為式 2.1.4 顯示訊號中心頻率回到基頻後之結果

3. 頻帶濾波 (Band-pass Filter)

由於實驗中的接收訊號常常受到環境噪音之干擾以及變動頻繁的水文特性所影響，很容易因為外在因素產生的雜訊而導致訊號失真，使得目標訊號本身被雜訊所覆蓋，因此在訊號處理技術上常應用濾波技術解決此問題。濾波器的功能在於消除外在干擾的雜訊，其原理為依頻率的不同產生不同的增益，使特定頻段的訊號被突顯出來，並使其他頻段的訊號衰減，藉此達到降低雜訊之目的。經由濾波處理後，訊號可以完全通過的頻率範圍稱為通帶(Passband)，而被濾除的訊號頻率範圍稱為阻帶(Stopband)，通帶與阻帶間之過度範圍則稱為過渡頻帶(Transition band)。

為了降低後續進行相關性積分時可能產生的誤差與干擾，首先會針對實驗所欲觀察的頻段進行帶通濾波(Band-pass filter)，留下欲探討的頻段範圍。以本論文之實測資料為例，圖 4.14(a)為原始接收訊號頻譜圖，由於實驗訊號頻段為 4000Hz 至 6000Hz，故進行帶通濾波時留下 3500Hz 至 6500Hz 作為主要探討頻段，其餘頻段予以濾除，帶通濾波後之訊號頻譜圖如圖 4.14 (b)。

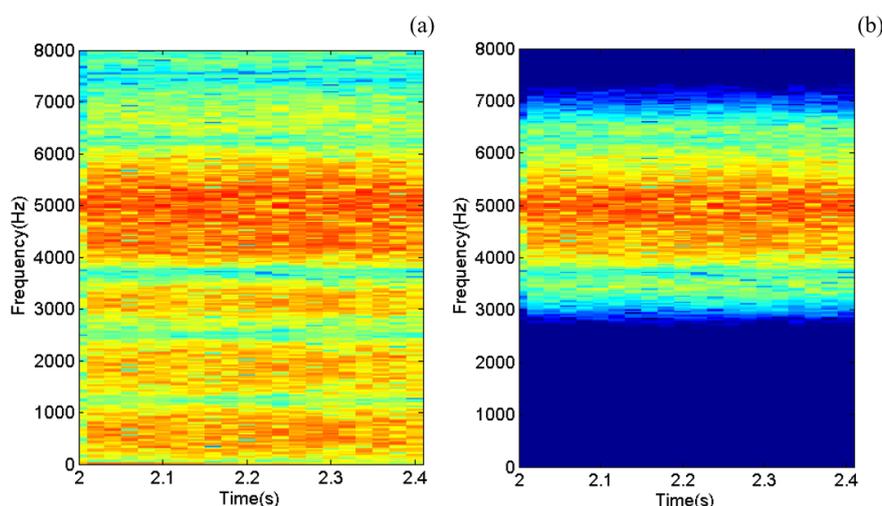


圖 4.14 接收訊號帶通濾波示意圖(a) 濾波前訊號頻譜圖(b)帶通濾波後訊號頻譜圖

經過解調後訊號已回到基頻上，下一個步驟則是透過低通濾波 (Low-pass filter) 的方式，將實驗資料中的高頻震盪部分濾除，僅保留欲觀察分析的頻段。以本論文之實測接收資料為例，實驗訊號頻段為 4000Hz 至 6000Hz，中心頻率為 5000Hz，頻寬為 2000Hz，實測接收資料經過解調後如圖 4.15(a) 所示，頻域圖中 0Hz 之位置代表原始接收訊號中心頻率 5000Hz，由於一般在進行濾波處理時，截止頻率 (Cutoff frequency) 會設定為原始訊號頻寬的一半 (1000Hz)，故 0Hz 至 1000Hz 的之區域內即表示回到基頻後的訊號頻段。如圖 4.15(b) 所示，使用低通濾波濾除 1000Hz 以上之高頻震盪後，頻域圖中 1000Hz 以上的雜訊能量明顯降低許多。

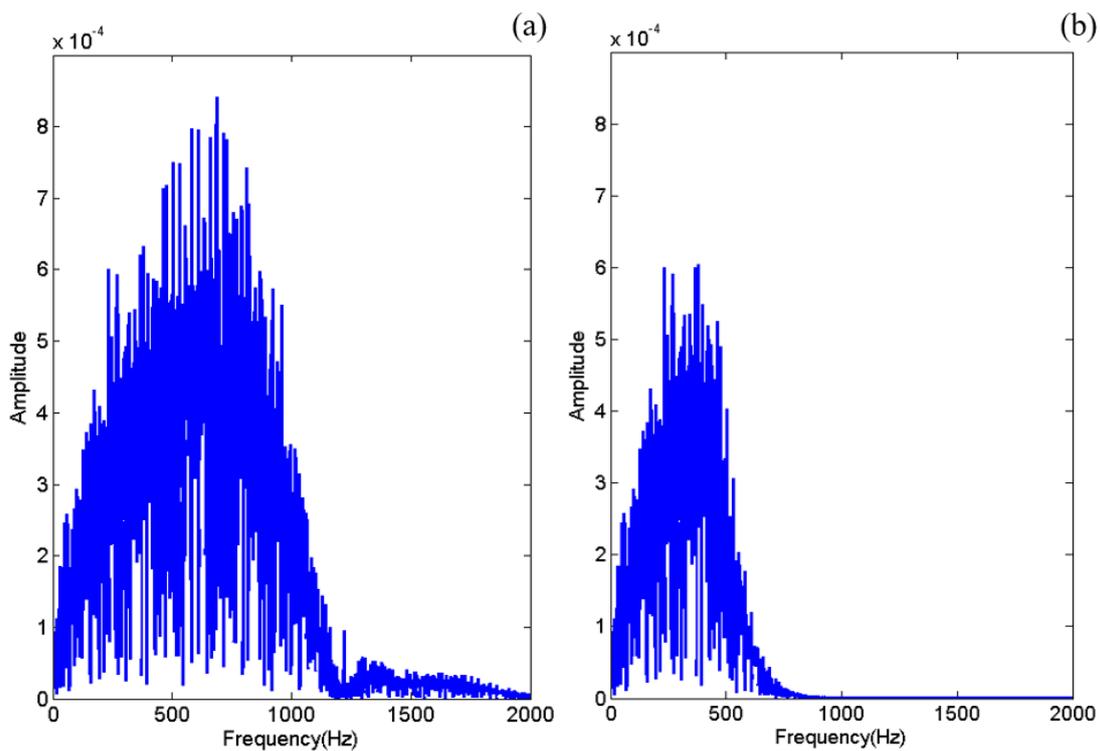


圖 4.15 接收訊號低通濾波示意圖 (a)接收訊號回到基頻後之頻域圖
(b)接收訊號進行低通濾波後之頻域圖

4. 相關性積分 (Auto-Correlation)

將原始實驗訊號與接收資料分別進行解調與濾波處理後，為了更加凸顯出目標訊號並提高訊雜比，脈衝壓縮的最後一個步驟為將兩者進行相關性積分，根據自相關函數(Auto-correlation)之定義：

$$R_{12} = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(\tau)S_2(\tau+t)d\tau \dots\dots\dots(4.6)$$

上式中 S_1 代表聲源發射的訊號， $S_2(\tau+t)$ 代表接收器所收到的訊號。自相關函數即為一個訊號其自身在不同時間點之間的相關性，因此相關性積分即利用此特性，將聲源訊號與接收器所收到的實測資料隨著時間 t 增加做相乘並加總。當兩者的乘積加總與聲源訊號本身的平方的總和相同時，即為目標訊號出現的位置，此時能量會被凸顯出來，因此能在相關性高的時間點觀察到一能量相對較大的脈衝；反之，當雜訊存在且嚴重干擾實測資料的位置則因相關性低而不會有加成作用。經由這樣的過程，能有效的提升實測資料的訊雜比，使的訊號能量從噪音中被分離出來。以上三個步驟

- (1) 解調(Demodulation)
- (2) 濾波(Filter)
- (3) 相關性積分(Auto-Correlation)

即為脈衝壓縮處理的完整過程，圖 4.16(a)為原始實測資料，其經過相關性積分之結果如圖 4.16(b)所示。而透過以上的訊號處理，可以將海床聲學探測系統之時間解析度表示成下式：

$$t_{res} = \frac{1}{(bw/2)} \dots\dots\dots(4.7)$$

其中 bw 代表海床聲學探測系統所使用的訊號頻寬。舉例來說，若該系統若選用 10kHz 的訊號頻寬，而當地現場聲速為 1500m/s，則表示該系統可以量測到 1.5 公分之空間解析度。

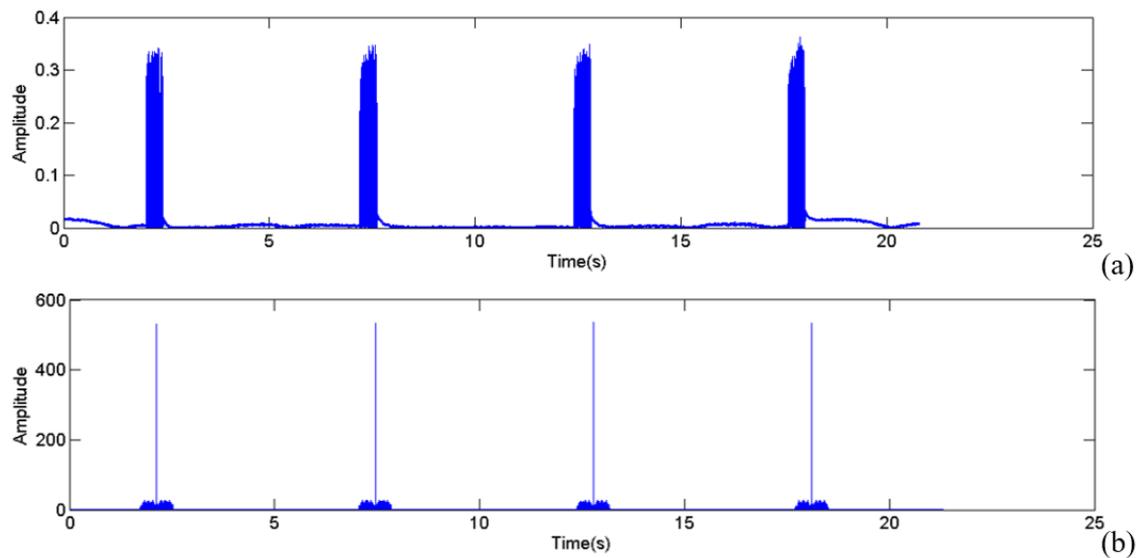


圖 4.16 原始實測資料與經過脈衝壓縮處理之結果圖 (a)原始實測接收資料(b)經脈衝壓縮後的結果

4.1.4 底質/岩心樣本資料分析介紹

除了以聲學的方式來調查底床外，實驗中也使用旋轉式採泥器 (Shipek Grab，圖 4.17)以及重力岩心採樣器，所採集到的底質或岩心樣本，並透過海軍官校海洋科學系-羅建育老師的底質分析儀器(多重感應元岩心記錄儀、雷射粒徑分析儀)，進行底質參數分析。透過取樣所得到的底質參數，除了能了解當地的底質性質，亦能夠進一步的幫助聲學實驗所取得的資料進行驗證。



圖 4.17 沉積物採樣器(SHIPEK Grab Sampler)

1. 多重感應元岩心記錄儀

英國 GEOTEK 公司生產之多重感應元岩心記錄器 (Multi-Sensor Core Logger, 簡稱"MSCL"), 以非破壞檢驗方式直接量測岩心之各項物理性質, 不會擾動與破壞沉積物之結構組織, 提高量測品質。可設定以 0.1~2 公分間隔讀取 1 組資料, 能獲得高解析度之垂直剖面, 提供聲學與物理參數如: 壓縮波速、統體密度 (及孔隙率)、磁感率、電阻抗值等。

2. 多重感應元岩心紀錄器主要功能介紹

英國 GEOTEK 公司生產之「多重感應元岩心紀錄器」(Multi-Sensor Core Logger, 簡稱"MSCL"), 其設計原理乃將多個感測器或探頭 (Sensors) 裝設於電子載台上, 包括位移感測器、溫度感測器、P 波感測器、電阻率探頭、磁感率探頭、伽瑪(γ)射線感測器、線條數位攝影機等 (圖 4.18)。操作者可以利用電腦程式控制馬達推動沉積物岩心, 使其經過感測器, 同時量取多組數據, 量測過程全部自動化, 其位移間隔可精確至 1mm, 近似連續量測的效果。所測得之參數包括岩心厚度、溫度、磁感率、電阻率、伽瑪射線衰減率和 P 波穿過時間, 經程式運算可得含水率、滲透率、P 波速率與 P 波衰減率、統體密度, 甚至生物殼屑含量、平均粒徑或砂/粉砂之比例等。

此外, 因 MSCL 系統裝備輕便、具備易拆解也易組裝等優點, 能隨時由實驗室移置至研究船上使用。國外一些知名的研究船, 如協助執行海洋鑽探計畫 (Ocean Drilling Program) 的 JOIDES 鑽探船, 船上即裝設 MSCL 系統。裝設在研究船最大好處是, 一旦取得新鮮岩心即可立即量測, 以取得高品質之數據。在量測過程中, 若發現沈積物有特殊變化或重要訊息, 即可提醒科學家注意, 作為現場修正採樣計畫之依據。由於該儀器配備的電子載台, 可隨時調整軌道寬窄, 適用於口徑 50mm~15mm 之全岩心 (whole core) 或半片岩心 (split core), 岩心管外殼以塑膠或壓克力材質較佳, 不宜金屬外殼。由於電子載台軌

道長度之限制，每段岩心長度不能超過 150cm，但可一段接一段量測如圖 4.19，自動將資料連結。

GEOTEK公司之多重感應元岩心記錄器主要感測器功能如下：

- (1) 溫度感測器：利用白金電阻溫度計PRT (platinum resistance thermometer) 精確量測實驗室溫度，或插入岩心的底部量測溫度，解析度達 0.01°C 。主要目的為記錄量測時之溫度，以利修正P波速率回原來海床條件。P波速率明顯受溫度影響，溫度愈高時，波速愈快。實驗室的溫度大約是 25°C ，一般比海底水溫高許多，所以實驗室測量值要比實際海床下的聲速稍高。
- (2) 波速率 (velocity of compressional waves ;PWV) 感測器：包含超音波發射器與超音波接收器二部份，先量測 P波通過岩心所需時間，將岩心直徑與行徑時間 (travel time) 相除，即是P波速率。若選用量測剖半的岩心時，需以上下垂直擺置，下為固定型的超音波接收器，上為可利用馬達調整高度之超音波發射器，每次量測時需下降至半岩心表面，直接接觸沉積物，每量完一次就暫時升高，待半片岩心移至下一測點後再下降量測，如此雖較耗時，但可獲得較可靠之數據。而當量測全岩心時，可選擇水平或垂直擺設，超音波發射器與接收器均可以固定。收/發音器利用中心頻率約 230 kHz的ARC (acoustic rolling contact)來量測，依岩心的厚度及狀況，量測誤差在 $\pm 0.5\%$ 範圍之內。接收器感測元件以柔性橡皮膜包住，其間充滿油液 (圖 4.20)，此設計使接收器能自由轉動，以增大與岩心管之接觸面積，對於口徑50~ 150mm之岩心均具良好量測效果。由於具有較高的訊/噪比 (signal to noise ratio) 和較廣的頻寬，可提高時間量測之精度，並大幅減低操作誤差，即使對於粗砂樣品亦能得到可信度高的測值。當岩心品質不佳或置放過久流失水份，導致岩心外徑與塑膠管內壁間未能緊密貼合時，空隙使P波經過時衰減過大，而產生不良訊號。此時以不污染樣品的原則下，可考慮用純水或其它液體注入補滿，以改善所收到的P波訊號。

- (3) 岩心直徑或厚度感測器：岩心直徑或厚度量測乃在量取兩個P波感測器之距離。利用裝置在PWT上的一組位差聲源DT (displacement transducer) 所量取之訊號與標準厚度試塊訊號比對而得，解析度可達 0.01mm。因岩心管的材質良莠不齊，有時採樣過程遭受彎曲而變形，量測正確的 P波行徑距離，以準確計算 P波速率。
- (4) γ 射線密度 (GD) 感測器：利用銫¹³⁷(¹³⁷Cs)作為 γ 射源，乃測量 γ 射線穿過岩心後之減少量。可以求得岩心中沉積物之統體密度與孔隙率，量測誤差在 $\pm 1\%$ 以內。此輻射源為銫-137 (¹³⁷Cs)，其活度約為10毫居里 (輻射強度，1毫居里相當於37百萬貝克，而1貝克代表每秒鐘蛻變放出一個粒子之放射性活度)，固定於厚重的鉛屏蔽中。為了安全起見，伽瑪輻射源出口有一柵門隨時上鎖，俟射源安置於岩心記錄器上固定位置後，使用前方可開啟柵門。
- (5) 磁感率 (magnetic susceptibility) 感測器：磁感率感測器配備有兩種磁感探頭，一為環型磁感探頭 (MS2C, loop sensor)，另一為單點磁感探頭 (MS2E, point sensor)。環型磁感探頭適用於全支岩心 (whole core)，或半片岩心 (splited core)；單點磁感探頭則適用於半片岩心，因操作上更為接近待測物表面，所以可得到更高的解析度，量測誤差均在 $\pm 5\%$ 以內。當環型感測頭之直徑與受測岩心直徑比值愈小，即岩心外徑與MS2C感測頭內徑愈近，則解析度愈佳。由於感測器相當靈敏，無論何種磁感探頭均須遠離金屬，或帶有磁性之物體。操作人員身上也不可有金屬物品(如手錶、原子筆等) 靠近感測器，以免干擾測值。
- (6) 同步監看系統：MSCL統整所有感測器量測資料，隨著測量進行，可即時展現各項參數，能協助操作者快速辨識沉積物之物理性變化。顯示的參數有 P波振幅 (P-wave amplitude)、P波速率 (P-wave velocity)、 γ 密度 (gamma density, 近似濕統體密度)、磁感率 (magnetic susceptibility)、波阻抗 (impedance)、孔隙率

(fractional porosity)如圖4.21。

3.應用實例與討論-沉積物孔隙率與統體密度之推估

利用 MSCL系統量測之P波走時 (travel time)、 γ 射線之衰減率等參數，可用以逆推計算沉積物之孔隙率 (porosity)、含水率、乾/濕統體密度 (bulk density)、甚至是粒徑分佈，並能同時適用於沈積環境截然不同之沈積物，包括濁流沈積物、深海泥或富含矽質生物殼之沈積物。

為了利於計算孔隙率和密度，以及與其他實驗室間之數據比對，Best 與 Gunn (1999) 建立一套標準的校正方法，乃設計一支校準管 (calibration tube)，首先取一段內徑6.6cm透明壓克力管，內部放入不同粗細之實心鋁圓柱體，其口徑分別為 0.6, 1.6, 2.6, 3.6, 4.6, 5.6與 6.6cm共7層，每層長度4cm，再注滿純水，最後將壓克力管兩端密封。由於石英和方解石這兩種礦物在海洋沉積物中很常見，而鋁的密度 (2.70 g/cm^3)和石英(2.65 g/cm^3)或方解石(2.71 g/cm^3)均很接近，因此可用鋁替代沉積物，不同粗細實心鋁圓柱體代表不同孔隙率之沉積物。經過 γ 射線與 P波量測，可得透過每層之 γ 射線強度與P波走時。由於鋁圓柱體(或沉積物)對 γ 射線之吸收率較水為高，所以隨著管內鋁圓柱體口徑愈大，通過的 γ 射線強度就愈低，從管內完全充滿水的4400 cps (cps:放射性強度，每秒感測到之粒子數) 逐段降低至充滿鋁之2000 cps。另一方面，由於聲波在鋁圓柱體(或沉積物)中的傳送速率比在水中快很多，所以隨管內鋁圓柱體口徑愈大，相對而言水體的距離就愈大，通過所需時間愈短，由52 μs (微秒) 減低至約18 μs 。 γ 射線之康普敦質量衰減係數 (Compton mass attenuation coefficient)，以水而言為 $0.0863 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，鋁為 $0.0751 \text{ cm}^2/\text{g}$ 。統體密度與孔隙率呈負相關，當孔隙率為0時，純粹是鋁圓柱體密度等於 2.7g/cm^3 ；而孔隙率為100%時，100%純水密度等於 1.0g/cm^3 。統體密度與P波速率之誤差範圍分別在 $\pm 0.07\text{g/cm}^3$ 與 $\pm 0.3\%$ 之內如圖4.22。

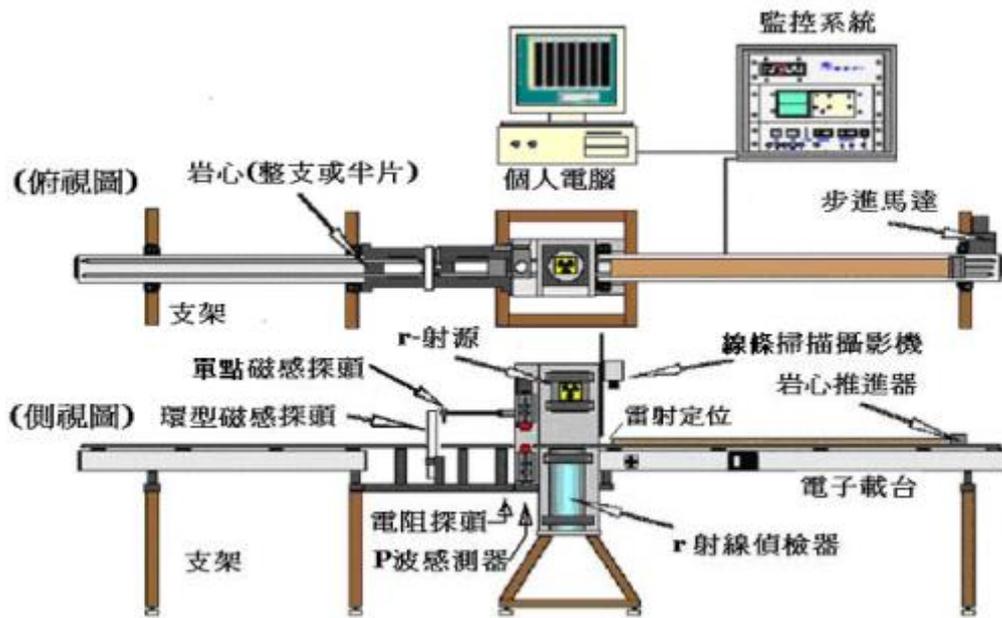


圖 4.18 英國 GEOTEK 公司製造之多重感應元岩心記錄器 (MSCL) 各種探頭與感測器之組合：上為俯視圖、下為側視圖。(修改自 <http://www.geotek.co.uk/site/index.php>)



圖 4.19 多重感應元岩心紀錄器量測岩心。

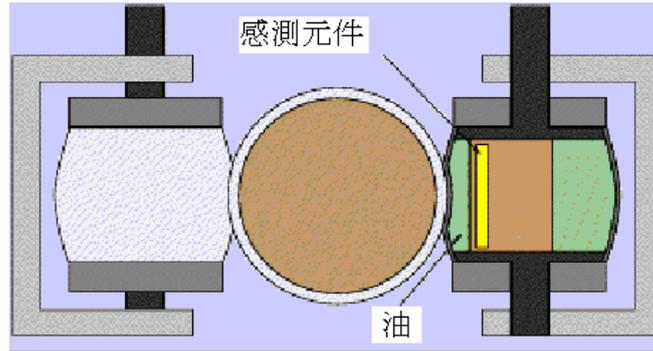


圖 4.20 P 波接收器之感測元件以柔性橡皮膜包住，其間充滿油液，此設計使接收器能自由轉動，以增大與岩心管之接觸面積，口徑介於 50~150mm 之岩心，均可得到良好效果。(修改自

<http://www.geotek.co.uk/site/index.php>)

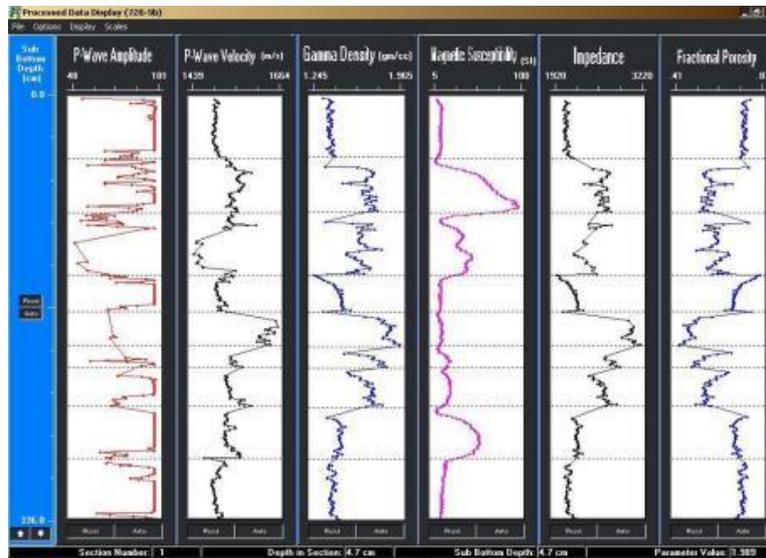


圖 4.21 MSCL 系統隨著岩心量測進行，可同步展現各項量測到或運算後的參數。圖中展示海研一號 9 支箱型岩心資料，每支岩心以橫虛線劃分，展示運算後的參數有 P 波振幅(P-wave amplitude)、P 波速率 (P-wave velocity)、 γ 密度 (gamma density, 近似濕統體密度)、磁感率(magnetic susceptibility)、波阻抗(impedance)、孔隙率 (fractional porosity)。

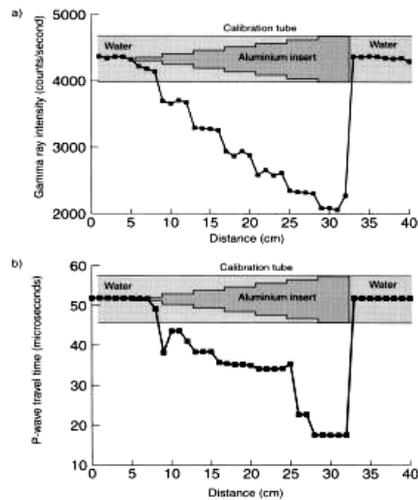


圖 4.22 透過不同粗細實心鋁圓柱體之(a) γ 射線強度；與(b)P 波走時
。 (取自 Best & Gunn, 1999)

4. 雷射粒徑分析儀

英國 Coulter LS-230 型雷射粒徑分析儀能快速量測沉積物提供沉積學參數-平均粒徑、標準差(淘選度)、峰態、偏態、砂-粉砂與黏土比例；粒徑範圍 0.04~2000 μm ，如圖 4.23。

Coulter LS-230 雷射粒徑分析儀能快速量測沉積物或粉末之粒徑分佈，底泥粒度測量範圍：0.04~ 2,000 μm 。雙鏡頭專利技術：主光路同時設置二個鏡頭，全量程測量一次完成。並使小顆粒測量消除相同顆粒平行光誤差。具偏振光強度差值量測 (PIDS 技術)：接收水平和垂直散射光的光強差值，從而可以得到更好的粒度分辨能力，以保證小顆粒的檢測獲得真正的測量值。光源：固態雷射：750nm (紅光)，多波長偏振光：450nm(藍光),600nm (橙光), 900nm (近紅外) 內置超聲波分散器，功率可無段式變化，最大功率 100W。離心泵：速度範圍可調。材質：聚四氟乙烯高聚物和 316 不銹鋼。可適用於較強的酸鹼性液體或有機溶劑。分析時間：常規 15-90 秒。對於特殊要求，可以更快或更慢採用光纖光路準直系統，可以使光源出來的光直接通過光纖導入樣品池和準直到檢測器上，點光源出來的光被光纖轉化為規則的平行光，克服了傳統的針孔+透鏡式光路的許多缺點。檢測器：132 枚

檢測器，在四個象限及背向交叉排列，每個檢測器均配獨立的放大器，可以得到更加真實的測量結果。具高解析度之 116 個通道，與檢測器成對數關係，能精細和準確表現樣品的真實結果。

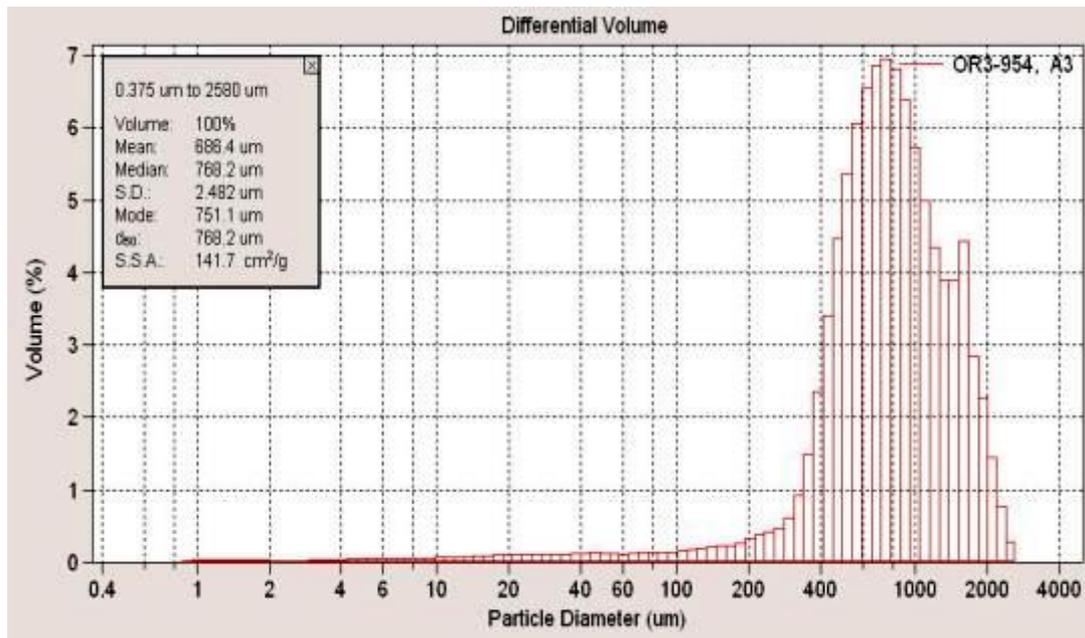


圖 4.23 雷射粒徑分析儀

本研究對實海域採泥的海床底質以 Folk(1954,1974)的沈積物分類法，對樣本以黏土、砂、粉砂的百分比組成進行分類，如圖 4.24。本實驗以 OR3-2084B 航次為例，四個測站的採樣樣本分析皆為 sandy silt(砂質粉砂)，如圖 4.24 中標示的紅點所示，”silt”在土木工程界稱為沉泥，在海洋及地質界稱為粉砂。

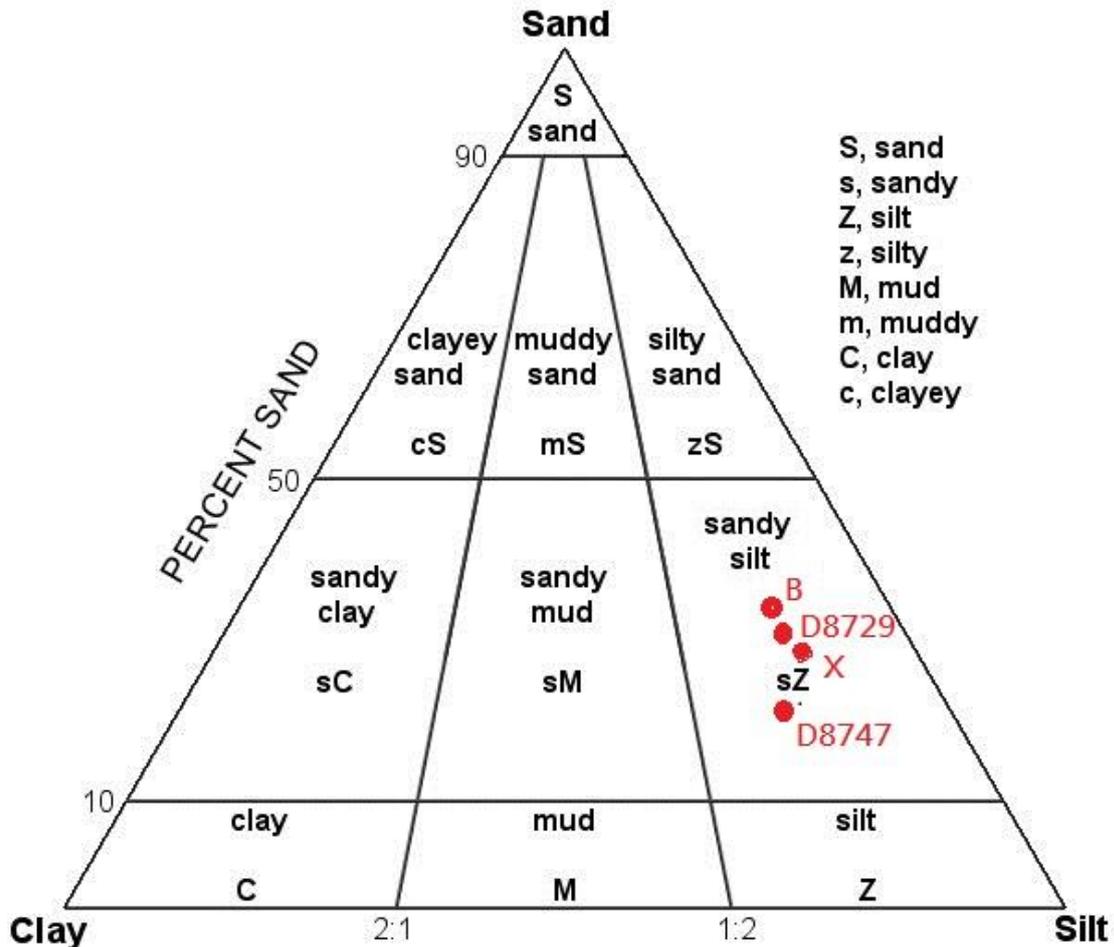


圖 4.24 沉積物分類表

4.2 多頻率海床探測實驗彙整

本小節將介紹本團隊在計畫執行中於高雄港內外、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。同時本計畫也在海洋研究船(OR2、OR3)的協助之下，使用旋轉式採泥器進行海床底質採樣，詳情參考表 4-10 所彙整的探測實驗表。而實驗中取得的海床底質採樣本，經底質分析後能夠清楚的得到統體密度、平均粒(μm)、成分百分比(黏土、粉砂、砂、礫石)等數值如表 4-11 及圖 4.25。其中圖 4.25 為將所有執行過的底床採樣分析結果製於臺灣週邊地圖上的情形，從圖上能清楚的觀察出臺北觀測樁以及

基隆碧砂漁港外的底質特性為中砂質特性，基隆碧砂漁港內甚至為礁石特性，而在高雄港內外則偏向為粉砂質特性。基於上述的實驗地底性質不同，在後續的 4.3、4.4 章節中的資料處理分析結果，為了以較清楚的呈現，將使用中砂質與粉砂質兩大特性來作為分類。

表 4-10 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	臺北港外(臺北氣象樁)	✓	✓	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	臺北港外(臺北氣象樁)	✓	✓	中砂質

表 4-11 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/cm ³	平均粒 徑 μm
GI01	粗砂含礫石	N25°09.353	E121°46.856	40.9	1.99	257.8
GI02	泥細礫	N25°09.382	E121°46.870	42.1	2.10	241.4
GI03	粗砂含礫石, 大量貝屑 2CM	N25°09.341	E121°46.812	38.5	2.07	491.4
GI04	大量礫石,礁 塊,最大 5cm	N25°09.670	E121°46.607	61.0	1.95	1067
GI05	灰黃色粗砂	N25°09.440	E121°46.766	41.0	2.00	477.1
GI06	灰黃色粗砂	N25°09.675	E121°47.196	74.0	1.84	278
GI07(港內)	大礫石,礁塊	N25°14.869	E121°78.613	16.02	-	
OR2-2321	臺北觀測樁					
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



圖 4.25 海床底質採樣位置與底質特性初步分類示意圖

4.2.1 實驗地點與過程介紹

第一組實驗於 2018 年 5 月 30 號進行，此次實驗目的為第一次的系統測試實驗，並且透過該次實驗來確認本團隊所建置的多頻率海床探測聲學系統，確實能夠有效的量測到海床深度之資訊。測試海域內之定點測試實驗為在多頻率海床面地形探測技術測試之初進行較嚴格之控制實驗，本計畫首先規劃在高雄港港區內，以錨泊式搭載吊放式多頻率海床量測系統進行定點測試實驗。在此實驗中將透過定點重複採樣方式，獲得多筆多頻段之海床回波資料，以進行多頻段海床面地形分析，並測試驗證上述多頻率海床聲學探測技術之可行性與強健性。在此實驗中，使用 2k 至 24kHz 聲源訊號，進行底床深度的量測，並挑選至少三個頻段進行表示。而此次的實驗結果能提供後續進行的實驗基礎，並提供驗證與參考。

實驗地點如圖 4.26(a)為 Google 衛星所拍攝的中山大學海洋研究船-海研三號旗津碼頭停泊處，當時海研船停靠實際情形如圖 4.26(b)。其中固定鐵架以及儀器實際擺設方式如圖 4.27(a)，固定鐵架的兩端分別為聲源發射端以及訊號接收端，兩者間距為 1 公尺，而其中的 1 公尺也是市面上，換能器在進行聲源強度量測時的距離。接著讓接收端朝下進行佈放，下放至聲源端完全沒入水中並緊貼水面，即完成佈放，如圖 4.27(b)為當時佈放儀器之過程。當時實驗現場以重錘繩索的方式進行量測，所得到的實際水深為 7.5 公尺。

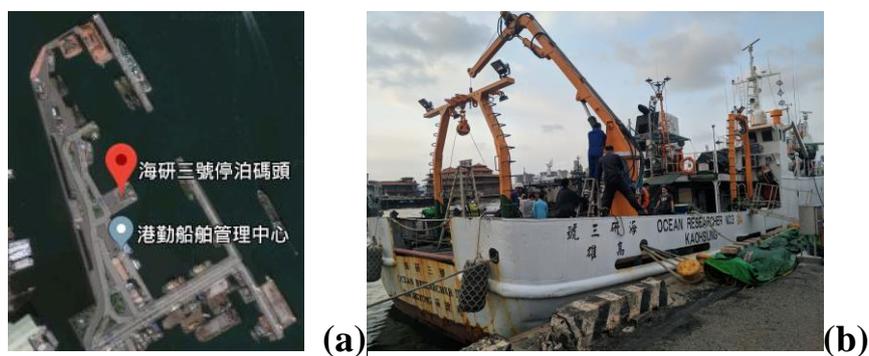


圖 4.26 第一組實驗位置圖，(a)Google 衛星拍攝、(b)海研三號位置現場實際拍攝

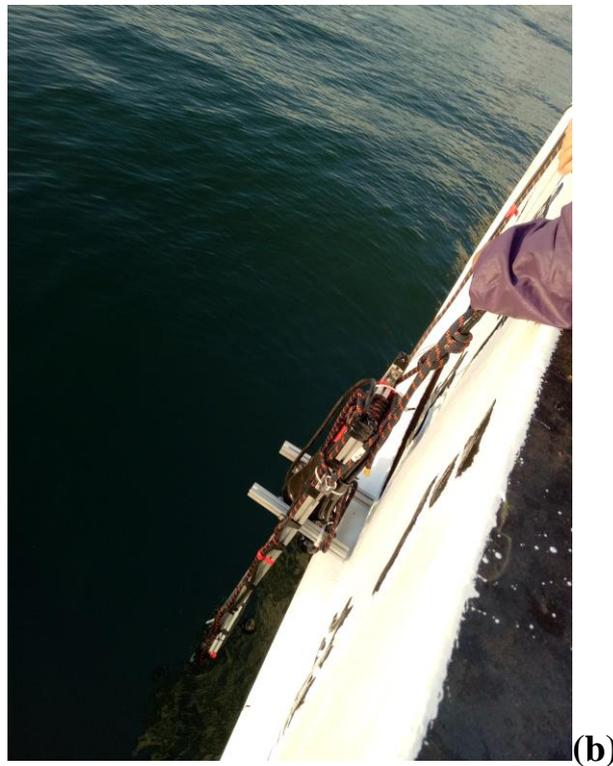


圖 4.27 第一組實驗儀器佈放情形，(a)儀器架子與發收換能器架設、
(b)儀器下放過程

第二組實驗於 2018 年 7 月 22 至 23 日，透過第一組實驗的經驗，我們確定能透過多頻率海床探測聲學系統的方式來量測到海床回波能量，因此本次實驗主要目的為在臺北觀測樁周圍以測線式的方式，來取得多頻率海床下土層分佈調查。實驗地點為臺北港外海-臺北觀測

樁，如圖 4.28(a)所示為臺灣周邊海域示意圖，圖上所框選出的位置為此次實驗以及臺北氣象觀測樁所在處，也是本次實驗主要作業區域。實際衛星圖以及臺北氣象觀測樁點位如圖 4.28 (b)，從圖上可觀察到臺北氣象觀測樁位置在臺北港外附近，實際點位為[北緯 25.181767°，東經 121.375650°]。在海床量測部分，使用多頻率海床探測聲學系統，以測線式的方式進行臺北氣象樁周圍探測量測。量測到的海床能量回波訊號後續可以透過前面所介紹的訊號處理方式與分析，來取得海床深度資訊以及海床下土層分佈調查。當天現場所拍攝到的臺北氣象觀測樁實際情形如圖 4.29 所示。實驗當天除了利用拖曳式自收發聲納系統進行實驗外，也使用海洋研究船上的旋轉式採泥器進行底質採樣，如圖 4.30 為當天實驗所紀錄之實驗軌跡，其中包含聲學測線軌跡以及 6 個站位的底質採樣點位。

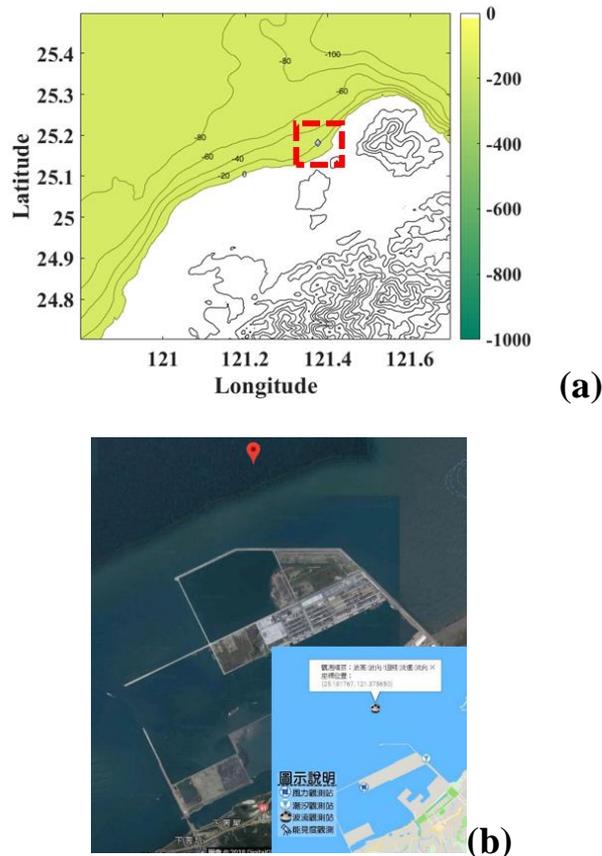


圖 4.28 第二組實驗位置圖，(a)臺灣周邊海域地形、(b)臺北氣象觀測樁點位



圖 4.29 臺北氣象觀測樁

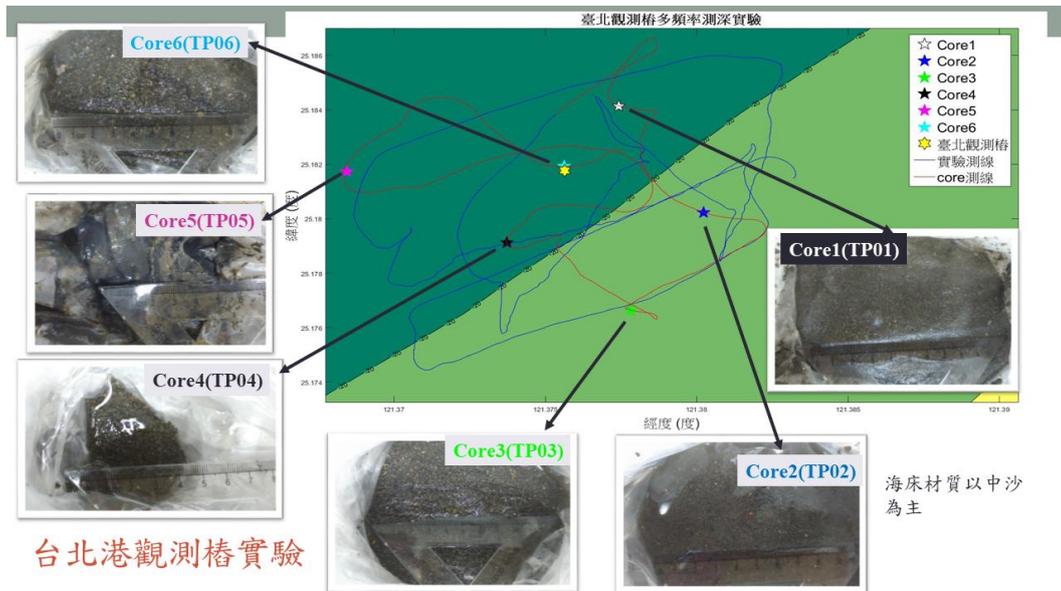


圖 4.30 第二組實驗軌跡(實線為船軌跡、星號為底質採樣位置)

第三組實驗於 2018 年 7 月 22 至 23 日。本次實驗主要目的為透過測線式的方式，利用拖曳式多頻率海床探測聲學系統，來收集海床能量回波資訊，並用以分析此實驗區之海床表層沉積物參數。實驗地點為基隆碧砂漁港外如圖 4.31(a)，當時透過拖曳式自收發聲納系統如圖 4.31(b)，進行底床探測資料收集。該實驗中所記錄到之測線軌跡以及 6 個站位的底質採樣點位如圖 4.32 所示。



圖 4.31 第三組實驗位置圖，(a)基隆碧砂漁港外實驗位置圖、(b)拖曳式多頻率海床探測聲學系統

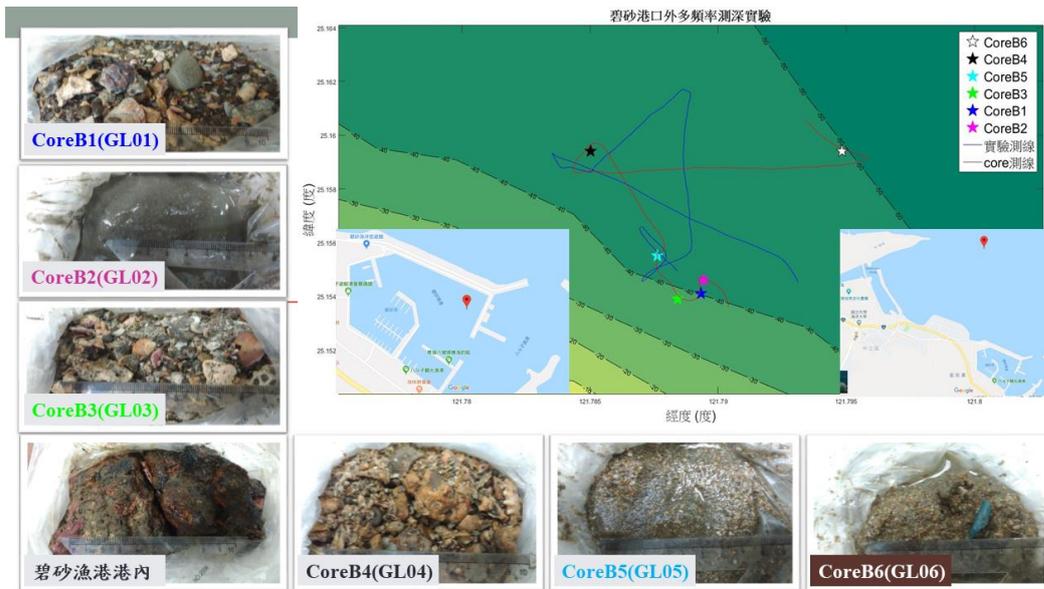


圖 4.32 第三組實驗軌跡(實線為船軌跡、星號為底質採樣位置)

第四組實驗於 2018 年 9 月 25 日，透過在第三次實驗以及第四次實驗(臺北觀測樁周圍以及碧砂漁港)中，所採樣的海床樣本來看，我們觀察到當地的海床環境為較硬的材質(中質砂)。因此，在第四次實驗中，主要目的為針對在粉砂質的海床環境下，來探討多頻率海床探測聲學系統所量測到的海床回波能量與水深量測的差異。實驗地點為高雄港外-北邊如圖 4.33(a)、圖 4.33(b)，當天使用拖曳式多頻率海床探測聲學系統，進行海床資料的探測，並且在透過聲學探測方式量測後，也進行底質採樣的收集，以便後續資料的比對。圖 4.34(a)為當天抵達站位後，進行載臺下放前的整備情形。而在完成聲學實驗後，並在該站位進行底質採樣如圖 4.34 (b)為採樣過程，圖 4.34 (c)則為在該站位所採集到的海床樣本。

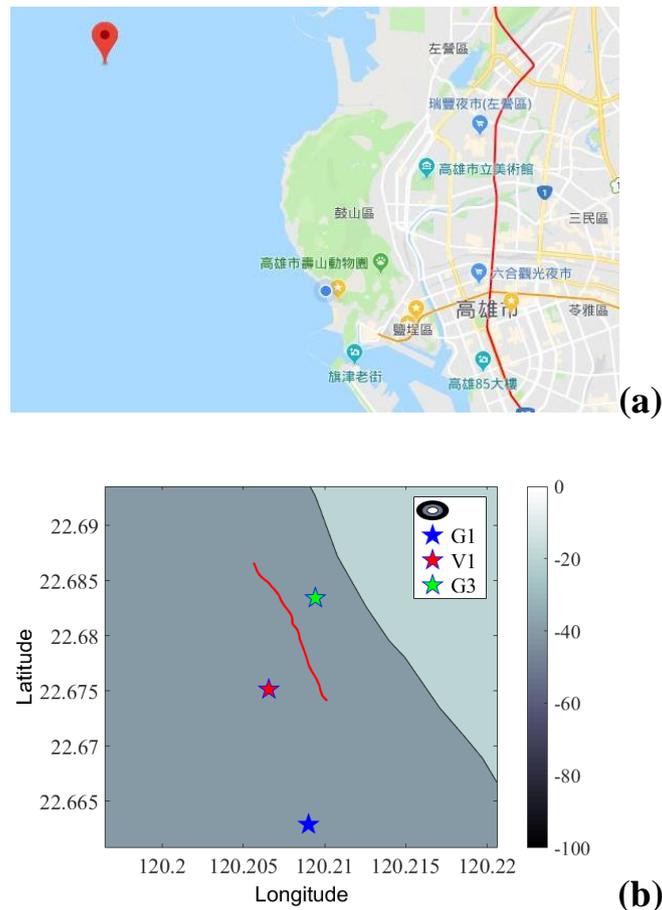


圖 4.33 第四組實驗位置圖，(a)高雄港外-北邊實驗位置圖、(b)實驗測線軌跡圖(實線為船軌跡、星號為底質採樣位置)

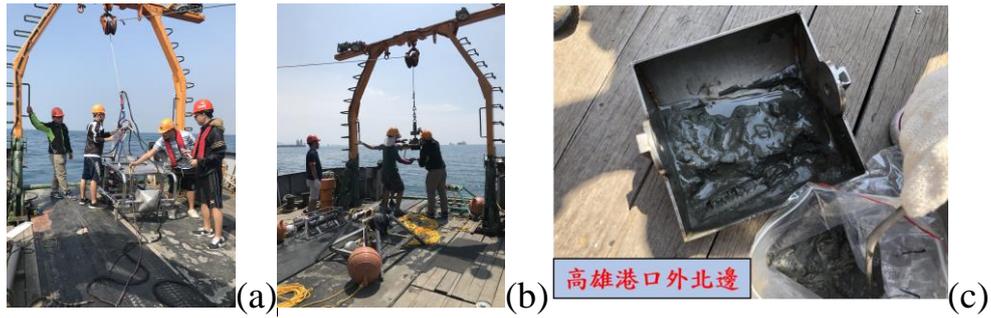
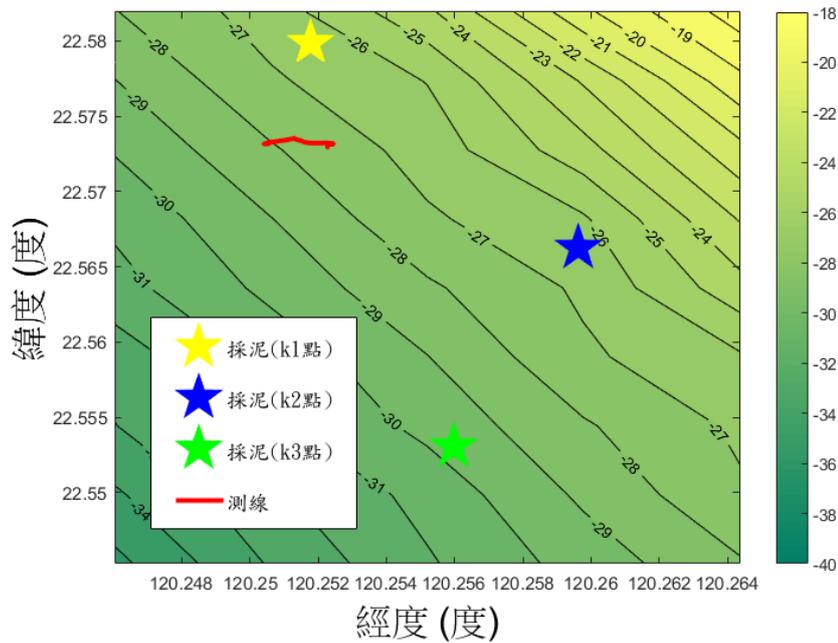


圖 4.34 第四組實驗過程圖，(a)拖曳式自收發聲納系統整備情形、(b)底質採樣過程、(c)海床樣本

第五組實驗於 9 月 26 日，此次的實驗目的與第四次實驗一樣，主要目的為在粉砂質的海床環境下，來探討多頻率海床探測聲學系統所量測到的海床回波能量的差異。實驗地點為高雄港外-南邊如圖 4.35(a)、圖 4.35(b)為實驗位置以及實驗測線圖。當天使用拖曳式自收發聲納系統，進行海床資料的探測，並且在透過聲學探測方式量測後，接續進行底質採樣的收集，以便後續資料的比對。圖 4.36 (a)為當天抵達站位後，進行載台下放前的整備情形。而在完成聲學實驗後，並在該站位進行底質採樣如圖 4.36(b)為採樣過程，圖 4.36 (c)則為在該站位所採集到的海床樣本。





(b)

圖 4.35 第四組實驗位置圖，(a)高雄港外-南邊實驗位置圖、(b)實驗測線軌跡圖(實線為船軌跡、星號為底質採樣位置)



圖 4.36 第五組實驗過程圖，(a)拖曳式自收發聲納系統佈放情形、(b)底質採樣過程、(c)海床樣本

第六組實驗於 2018 年 10 月 08 日，經過了前五次的實海域探測經驗，此次主要目的為重新返回到臺北觀測樁，利用小型的工作船，來進行極近臺北觀測樁的多頻率海床探測。實驗地點為臺北港外(臺北氣象樁)，當天搭乘昭伸公司所提供的工作船進行臺北氣象樁週邊的海床聲學探測如圖 4.37(a)。而為了考量工作船上，沒有大型的絞機以及吊臂，因此我們在量測的聲學儀器上，選擇使用輕量以及簡便的吊放式多頻率海床量測系統如圖 4.37(b)為將該系統置於工作船上之甲板情形。實驗過程為將工作船行駛至相當靠近臺北氣象樁後如圖 4.38(a)所

示，再將聲學儀器在工作船側邊進行佈放，佈放過程如圖 4.38(b)。



圖 4.37 第六組實驗情形，(a)昭伸公司-工作船、(b)漂流式多頻率海床量測系統



圖 4.38 第六組實驗過程，(a)工作船行駛至靠近臺北氣象樁、(b)漂流式多頻率海床量測系統佈放過程

4.3 多頻率海床面地形變動測量實驗及資料分析

本節將針對海床面地形之聲學探測進行資料分析以及結果彙整。根據第 4.2 節之實海域實驗整理中可知，本計畫在碧砂漁港以及高雄港有進行較完整的海床面地形探測實驗，因此以下將依續針對這兩個實驗區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)

本節將延續前面所提到的實海域實驗，針對中砂質海床環境進行聲學深度量測以及資料的分析與探討。其中在資料的比對上，透過海洋研究船所使用的多頻道科學漁探儀以及我們團隊所建置的多頻率海床探測聲學系統，各別來觀察所量到的深度變化。

首先透過使用海洋研究船上所使用的多頻道科學漁探儀量測，我們能觀察到 38kHz 以及 120kHz 對於砂質環境的深度量測變化如圖 4.39，從資料上來看兩者所量測到的深度非常接近，若回顧本計畫之參考文獻蒐集結果，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。而在此以中砂為主之海床環境中，通常不存在浮泥層，因此可見到 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 4-11，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。

接著探討本團隊所使用多頻率海床探測聲學系統取得之資料情形。透過前面在 4.1.2 以及 4.1.3 所提到的訊號設計以及訊號處理方式，可以讓我們取得各個頻率對於海床深度的能量回波變化如圖 4.40、圖 4.41。從圖 4.40、圖 4.41 中，清楚的觀察到 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 4.42 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，從該圖中能清楚的觀察到，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，因此可見到其量測得之深度較深；而在 35kHz 以上之聲波容易懸浮粒子以及海床表面之過度層影響，因此其量測得之深度會微幅小於實際水深。由此可知，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。

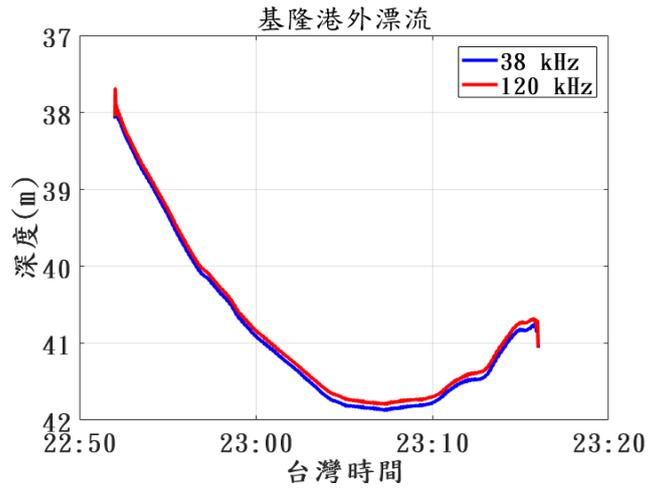


圖 4.39 海洋研究船 EK 38k、120kHz 深度量測資料

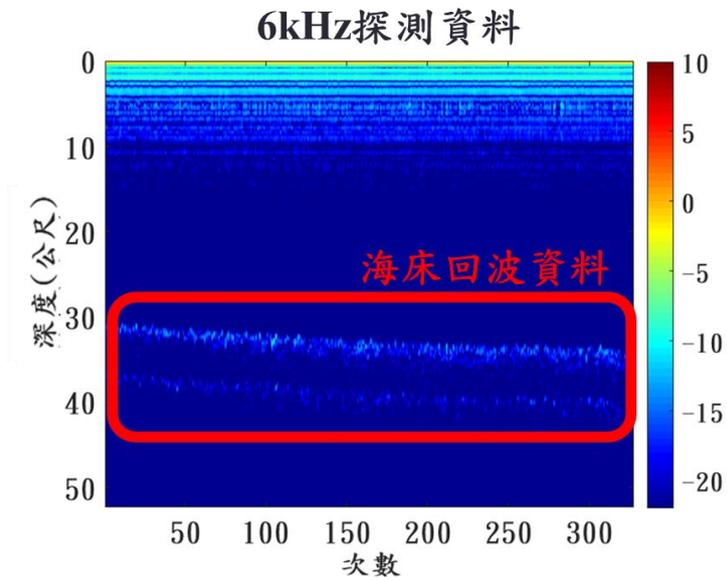


圖 4.40 多頻率海床探測聲學系統量測資料(6kHz)

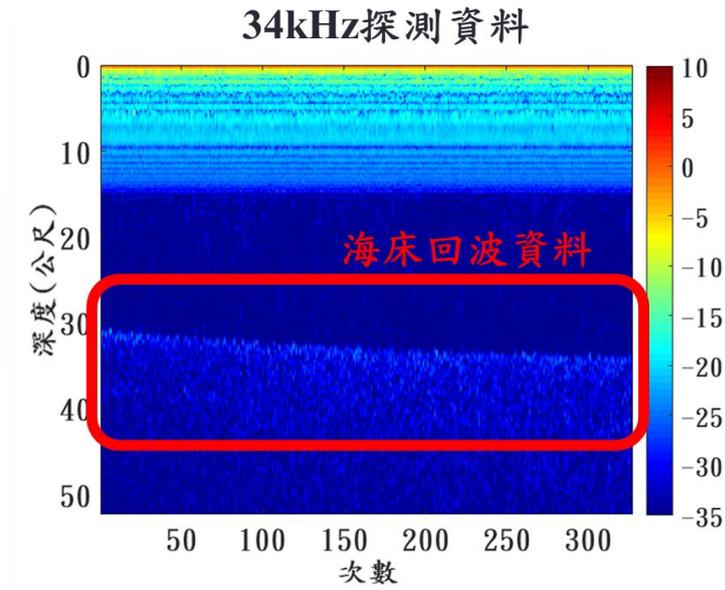


圖 4.41 多頻率海床探測聲學系統量測資料(34kHz)

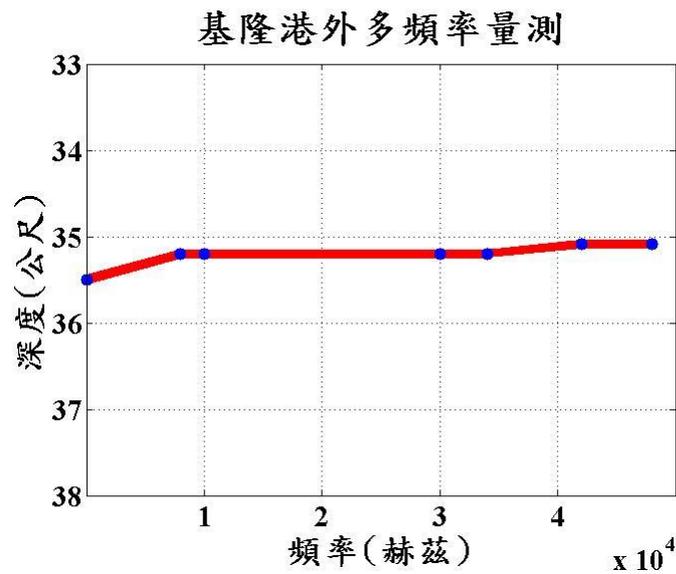


圖 4.42 多頻率海床探測聲學系統取得之深度-頻率變化(2kHz 至 48kHz)

4.3.2 粉砂質環境(高雄港週邊)

相較於上一節的硬質海床，本節將探討在軟質環境下之多頻率水深探測資料特性。其中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(第一組)主要目的為確認我們團隊中，

所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。首先，第一組水深量測測試實驗在高雄港內進行，測試地點之海床主要為泥，圖 4.43 至圖 4.45 即為在此泥質環境實驗現場所接收到之聲學底床反射資料，從各頻率的時序列來看(圖 4.43(a)、圖 4.44(a)、圖 4.45(a))，能觀察到各頻率的能量變化，而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而成。在各頻率的頻譜圖中(圖 4.43(b)、圖 4.44(b)、圖 4.45(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我們所設計的聲源訊號。

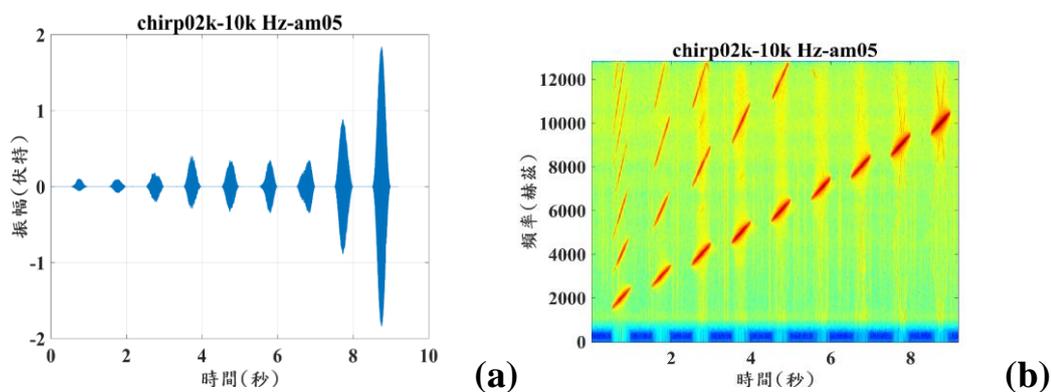


圖 4.43 2k 至 10kHz 訊號接收情形，(a)時序列圖、(b)頻譜圖

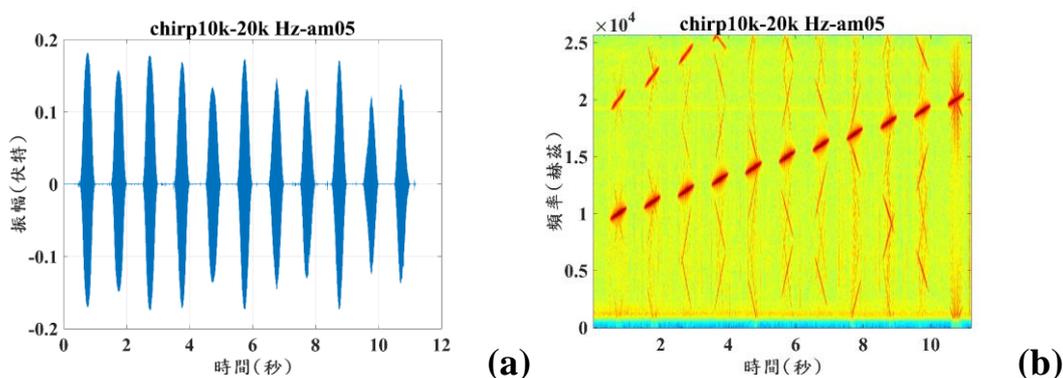


圖 4.44 10k 至 20kHz 訊號接收情形，(a)時序列圖、(b)頻譜圖

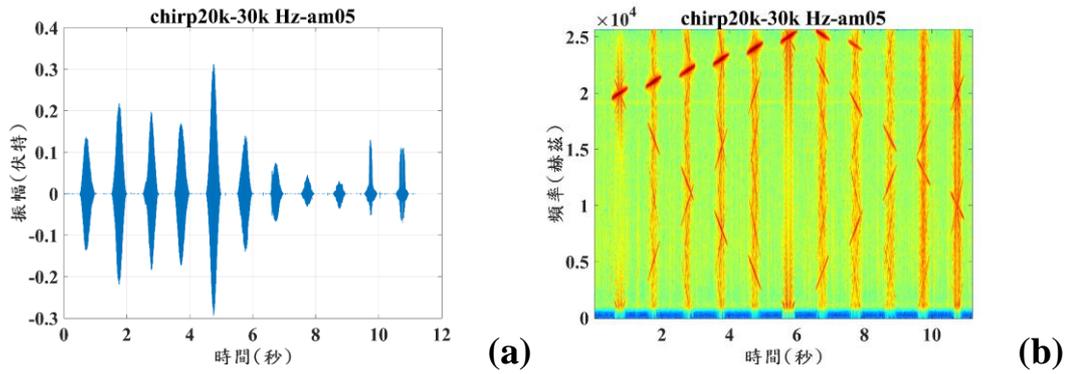


圖 4.45 20k 至 24kHz 訊號接收情形，(a)時序列圖、(b)頻譜圖

透過訊號處理方法能夠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 4.46、圖 4.47 所示。當能夠清楚觀察到底床回波訊號後，便能計算各個頻率對於深度的變化如圖 4.48、圖 4.49，並將所得到的資訊透過基礎聲速的換算能夠整理成表 4-12 以及圖 4.50 的頻率-水深曲線圖。從圖 4.50 中觀察到當頻率上升所量測到的水深會有下降的趨勢，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。此結果顯示出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。如本報告第三章之文獻蒐集結果所述，高頻聲波在浮泥層中會在不同等密度深度被反射，因此會出現越高頻其量測深度值越小之情形。

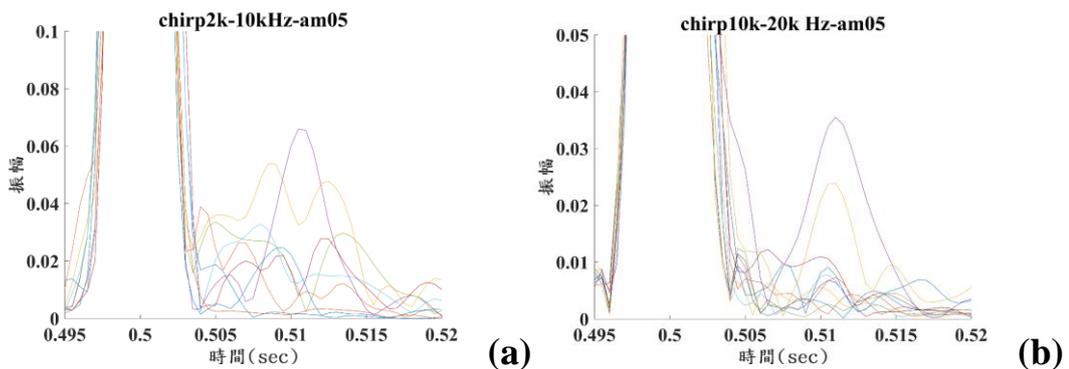


圖 4.46 接收訊號進行訊號處理後結果，(a) 2k 至 10kHz 資料、(b) 10k 至 20kHz 資料

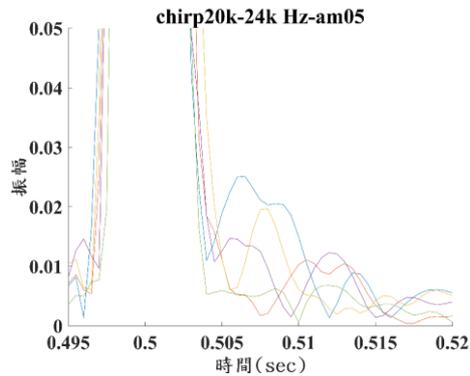


圖 4.47 接收訊號進行訊號處理後結果，20k 至 24kHz 資料

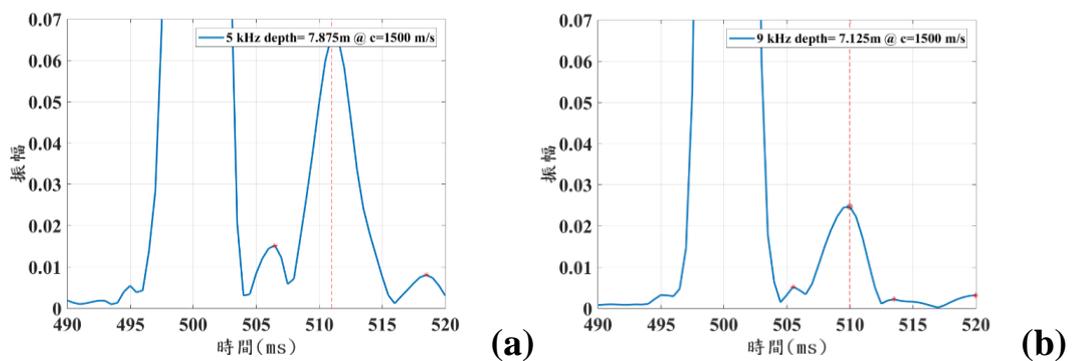


圖 4.48 接收訊號進行訊號處理後結果，(a)5kHz 資料情形、(b)9kHz 資料情形

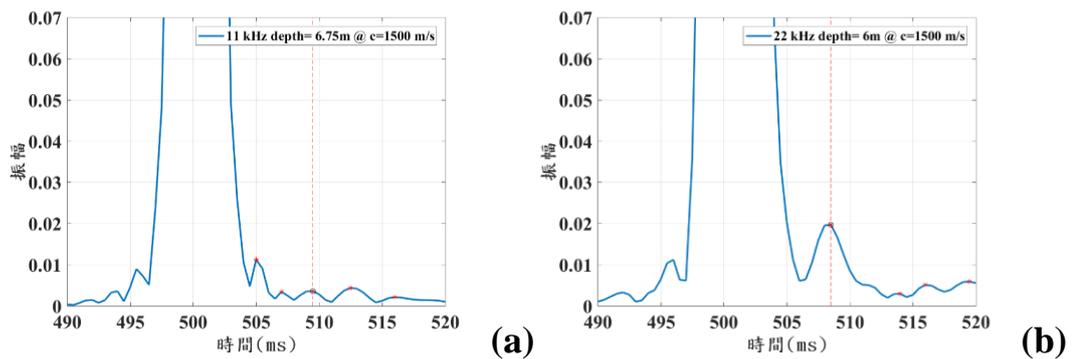


圖 4.49 接收訊號進行訊號處理後結果，(a)11kHz 資料情形、(b)22kHz 資料情形

為取得現場實際水深資料，本計畫以重錘繩索的方式進行量測，所得到的實際水深為 7.5 公尺，與表 4-12 之量測數值比較可發現，在此

環境中使用 15-20kHz 頻段之聲波可獲得與實體泥層深度較接近之結果。

表 4-12 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

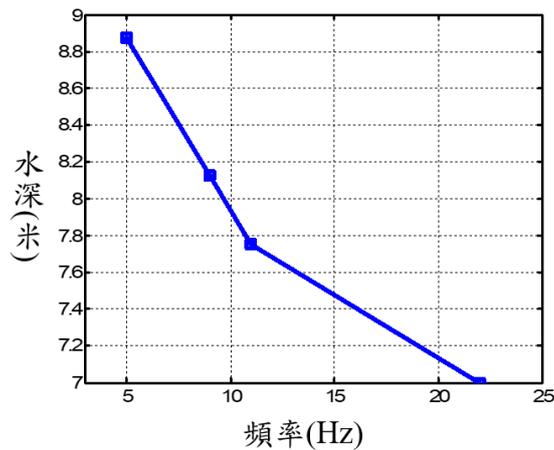


圖 4.50 頻率與量測水深趨勢圖

經過港內的儀器測試實驗以及資料分析後，本計畫對於海床面地形之深度量測建立了適當的量測方式與訊號處理方式，接著則繼續進行港外的漂流海床深度量測(第四、五組實驗)。此實驗中使用拖曳式多頻率海床探測聲學系統進行量測，當時載台佈放深度如圖 4.51，能觀察到透過水下壓力計，我們記錄到載台在水下時的深度變化，而載台的深度變化落在 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(4.1.2、4.1.3)所介紹的訊號處理方式，得到圖 4.52(a)、圖 4.52(b)，從圖上能發現 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。接著透過連續時間的排列，能夠得到連續時間的海床能量回波(圖 4.53、圖 4.54)。從圖 4.53、圖 4.54 我們可以觀察到，在 5kHz 以及 35kHz 所量測到的聲波傳播深度(載台離海床的深度)在約 15 公尺處被觀察到。然而，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，因此目前初步

的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，即較高頻率的聲學量測系統在此種環境較容易受到干擾。接下來透過載台本身所記錄到的深度(SBE39)資訊對深度上進行補正，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 4.55 所示。

圖 4.55 中包含有 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，而其中圖上所使用之 Ping Numbe 代表在進行探測量測時的資料筆數。首先由於本計畫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，可見到在同樣的水深變化趨勢下，本計畫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，在此先不予討論。在頻率由 5kHz 變化至 38kHz 之過程中，可見到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。此外，由此量測結果可觀察到 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 38Hz 之量測結果則明顯小於前兩者，在 4.3.1 節中了解到即使在硬質海床環境中，35kHz 以上聲波會受到懸浮粒子以及過度層之影響，因此出現圖 4.55 中明顯小於 25kHz 探測結果之現象。

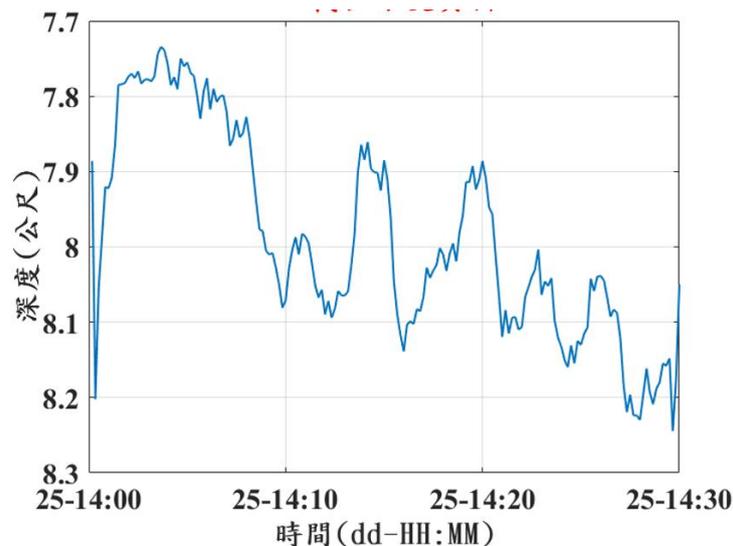


圖 4.51 載台深度資訊(SBE39)

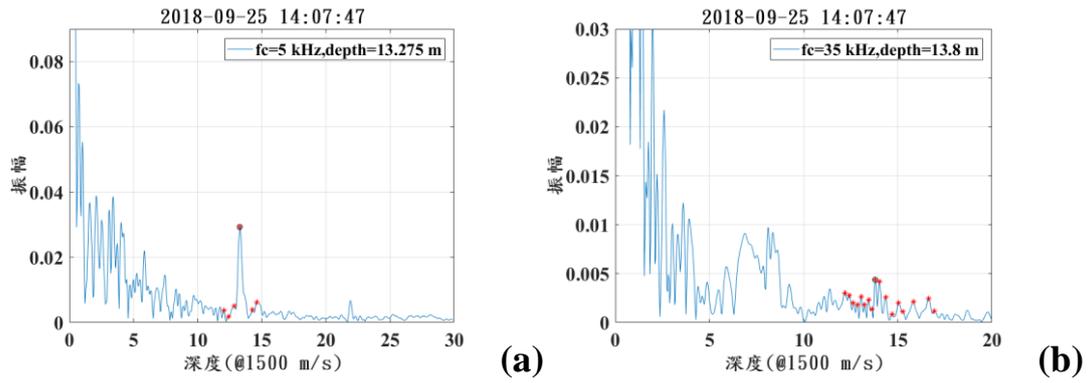


圖 4.52 信號處理後之情形，(a)5kHz 海床探測量測(b)35kHz 海床探測量測

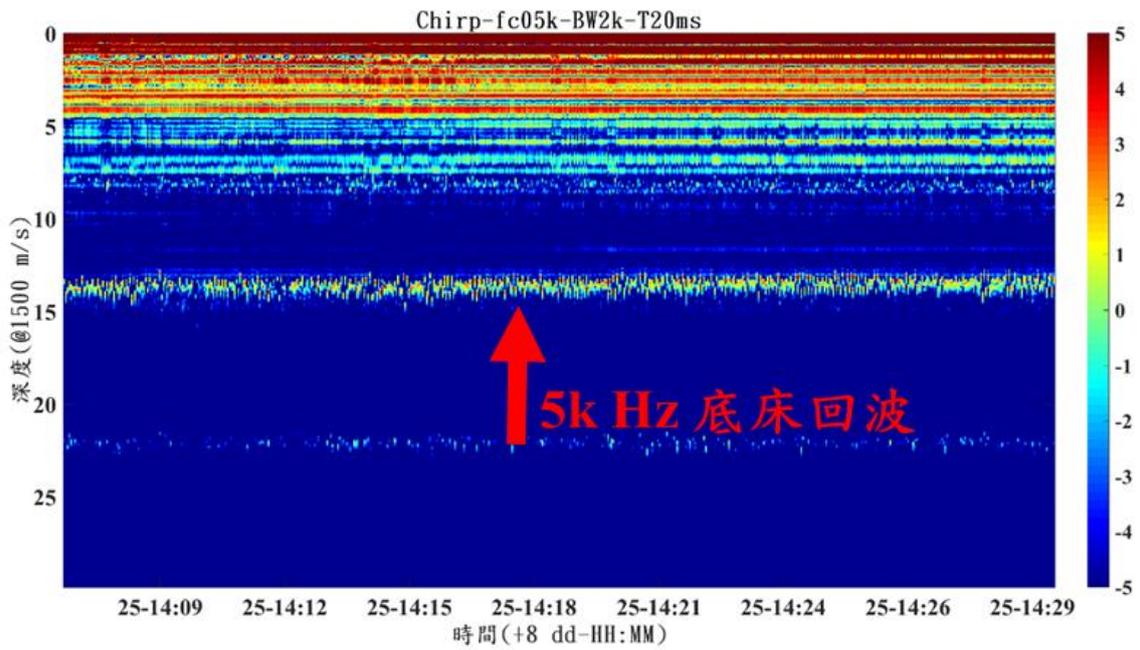


圖 4.53 多頻率海床探測聲學系統量測資料(5kHz)

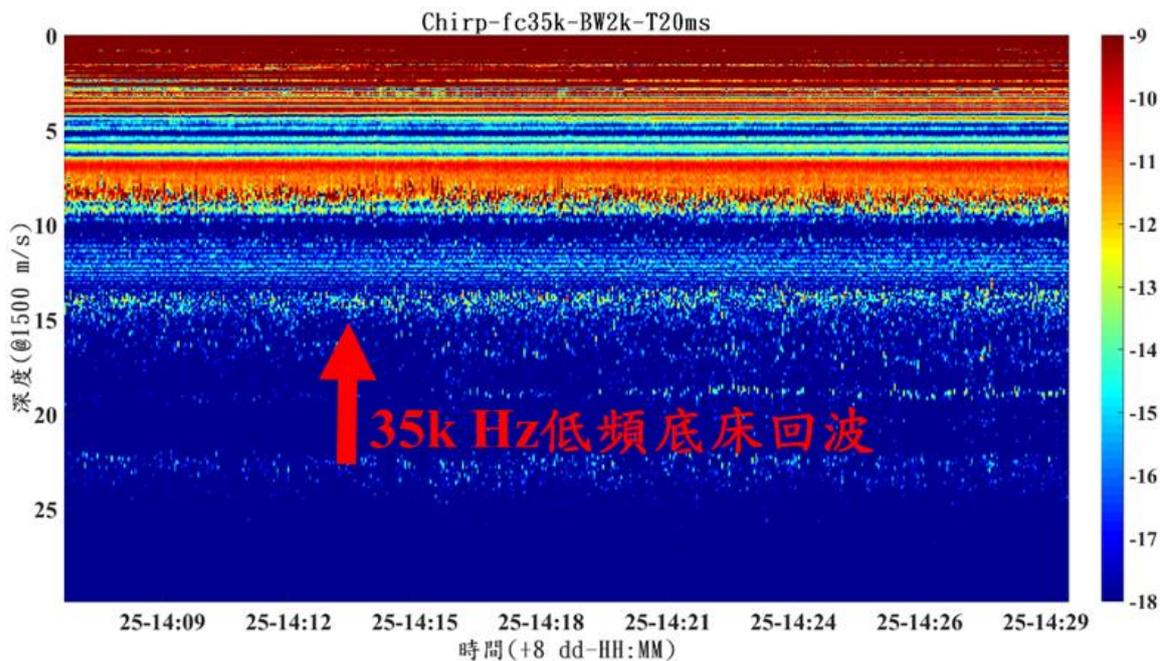


圖 4.54 多頻率海床探測聲學系統量測資料(35kHz)

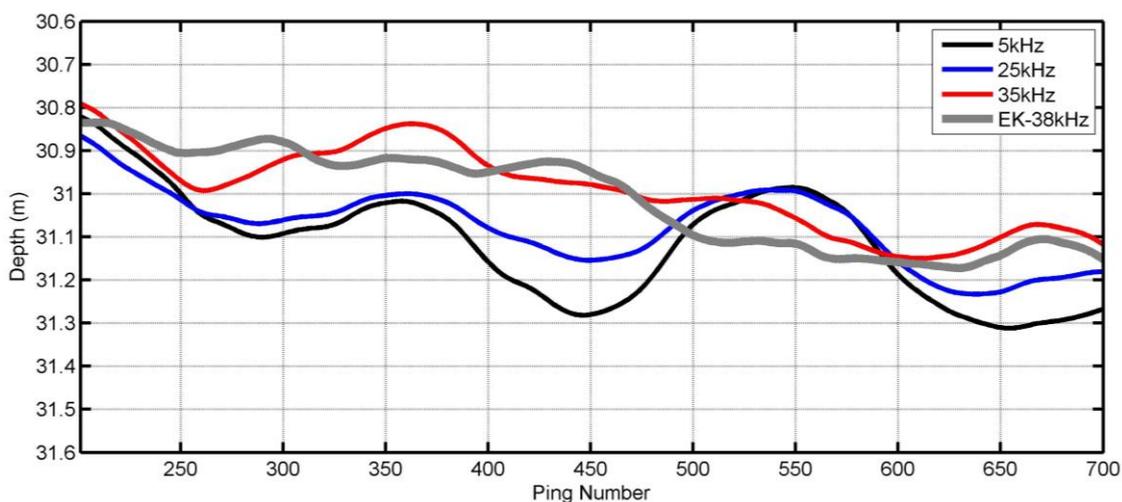


圖 4.55 多頻率海床探測聲學系統量測資料(5kHz、25kHz、及 35kHz)與科學魚探機資料(38kHz)之比對

彙整上述基隆碧砂漁港與高雄港之多頻率海床探測分析結果，可歸納出以下重要結論

1. 碧砂漁港外之海床表層沉積物材質以中砂為主，而此種環境通常不存在浮泥層，因此從多頻道科學漁探儀上的 38kHz 以及 120kHz 有非常接近的深度探測結果。
2. 使用本計畫發展之多頻率海床探測技術與深度量測計算，能觀察到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，因此可見到其量測得之深度較深；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. 接續上述論點，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。而此種環境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。

4.3.3 臺北樁附近實驗區之表層沉積物探測

本計畫除了於砂質環境及粉砂質環境進行多頻率海床聲學探測以外，為了能夠獲得樁體下方的海床土層結構特性，本計畫特別規劃於距臺北氣象觀測樁極近的狀態下也相同得進行了多頻率海床聲學探測實驗，量測基樁周圍的海床表層沉積物。

本次實驗地點如圖 4.28 所示，因受限於工作船上並沒有大型的絞機及吊臂，選擇使用較輕量型的吊放式多頻率海床量測系統進行實驗探測，使用之探測訊號同樣設定為頻寬 5kHz，中心頻率分別為 5kHz、10kHz、25kHz、30kHz、35kHz、40kHz、以及 45kHz，實驗過程請參見本章第 4.2 節。

圖 4.56 至圖 4.59 分別為 5 kHz、10 kHz、35 kHz 以及 40 kHz 之海床回波探測圖，當天之實驗過程以及實驗照片請參見本報告第 4.2 節之

說明。由於實驗當天之海況極差，原規劃接近到觀測樁附近 1 公尺內進行探測，但礙於海況，工作船最近只能在離觀測樁 2-3 公尺處進行海床探測。然而根據港研中心所提供的氣象觀測樁設計圖，只有在樁附近 50 公分內為拋石其餘區域為水泥材質，因此我們的探測過程會一直接收到水泥材質。而在回波圖上看到一個一個能量聚焦點，但考量到風浪很大受到很大的噪音影響，後續要再進行分析。

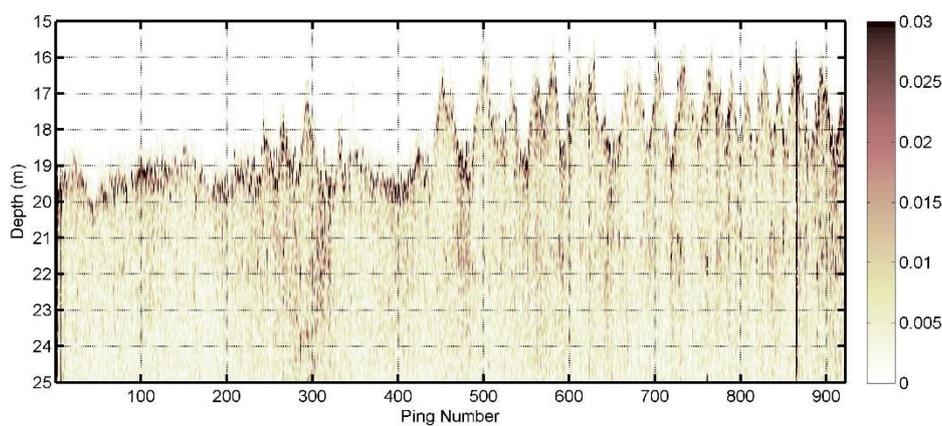


圖 4.56 臺北港觀測樁近距離量測之 5kHz 回波能量圖

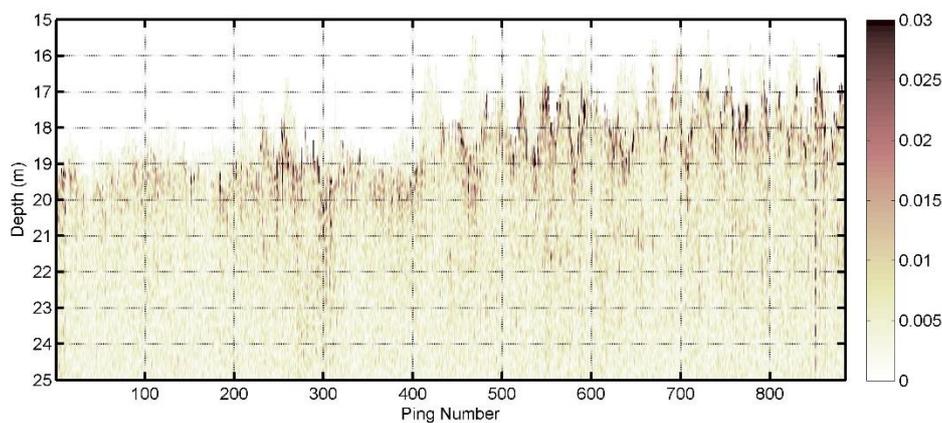


圖 4.57 臺北港觀測樁近距離量測之 10kHz 回波能量圖

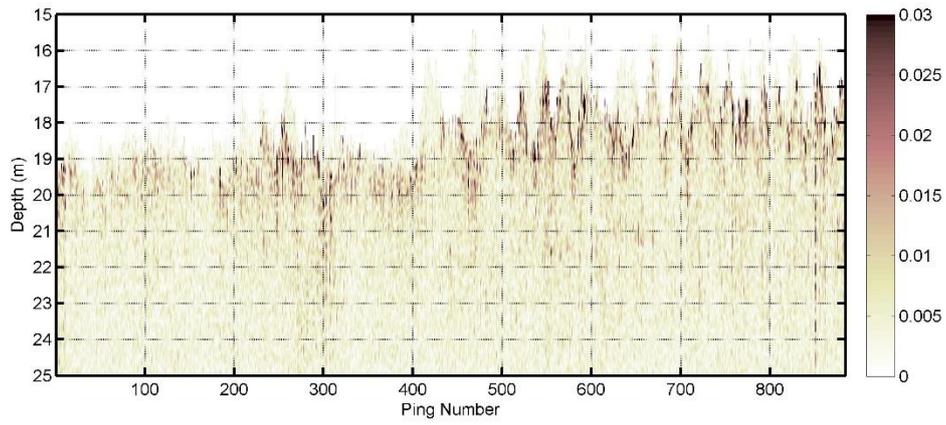


圖 4.58 臺北港觀測樁近距離量測之 35kHz 回波能量圖

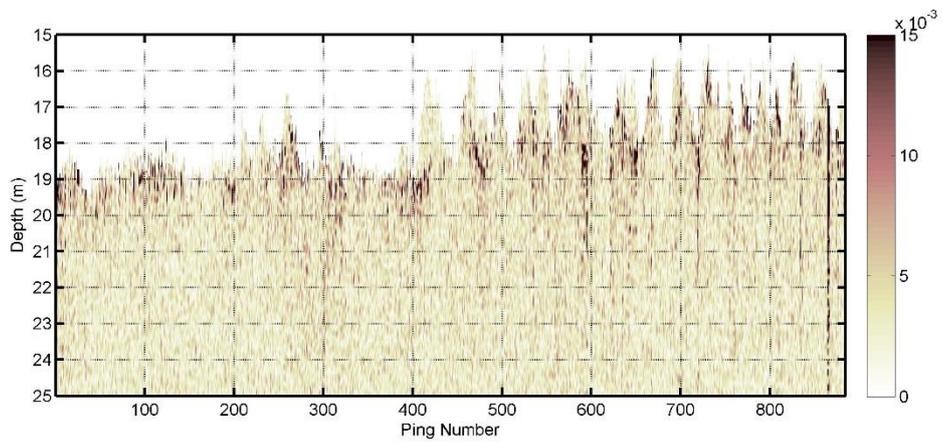


圖 4.59 臺北港觀測樁近距離量測之 40kHz 回波能量圖

4.4 多頻率海床下土層分佈調查實驗及資料分析

本節針對海床下土層穩定性之聲學探測進行資料分析以及結果彙整。根據第 4.2 節之實海域實驗整理中可知，本計畫在臺北港以及高雄港有進行較完整的海床下土層探測實驗，因此以下將依續針對這兩個實驗區之實驗資料分析結果進行介紹。

4.4.1 砂質環境(臺北港實驗區之表層沉積物探測)

為了解臺北港觀測樁附近之海床表層沉積物參數，以及了解多頻率海床探測之可行性，本計畫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，拖曳之實驗測線如圖 4.30 中之藍色實線條所示。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，實驗過程請參見本章第 4.2 節。

下列至圖 4.60 分別為 4kHz、6kHz、8kHz、10kHz 之海床探測回波圖，由於本計畫已建置多頻率海床探測聲學系統，因此在同一個拖曳過程中即可獲得不同頻率之探測結果。根據圖 4.30 之拖曳測線可知，海床聲學探測是在水深約 15 公尺至 27 公尺之範圍間來回進行，圖 4.64 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 4.60 至圖 4.63 之縱軸標示的為由探測系統所測量到的回波深度。

為計算多頻率海床反射係數，本計畫首先進行海床表面回波擷取，在回波訊號擷取上本計畫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 4.64 及圖 4.65 為 38kHz 測深儀之探測結果及 8kHz 海床回波訊號之擷取範例，本計畫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。

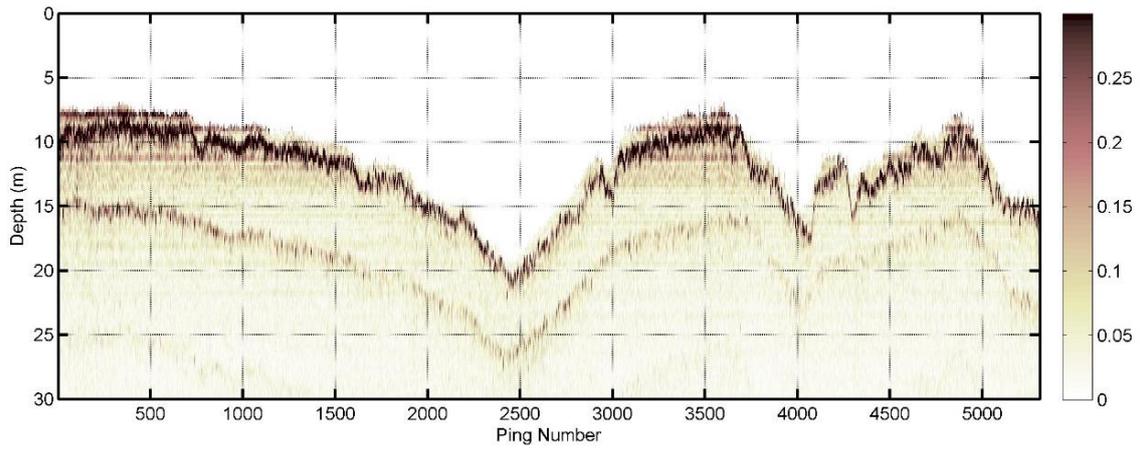


圖 4.60 臺北港觀測樁附近 4kHz 聲波之海床探測回波圖

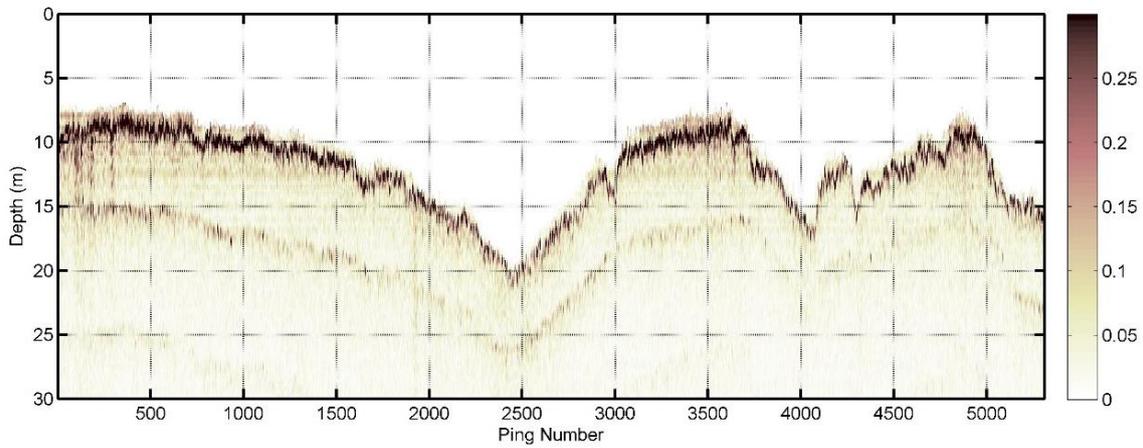


圖 4.61 臺北港觀測樁附近 6kHz 聲波之海床探測回波圖

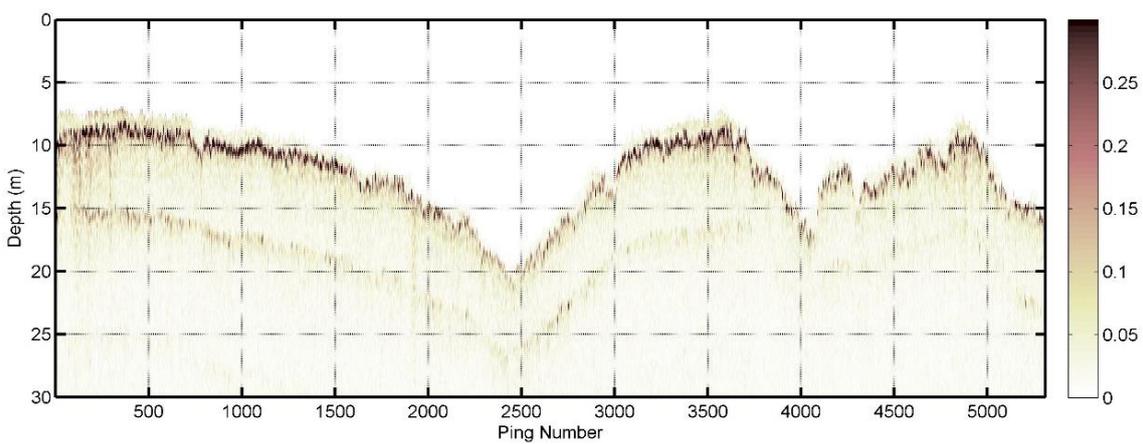


圖 4.62 臺北港觀測樁附近 8kHz 聲波之海床探測回波圖

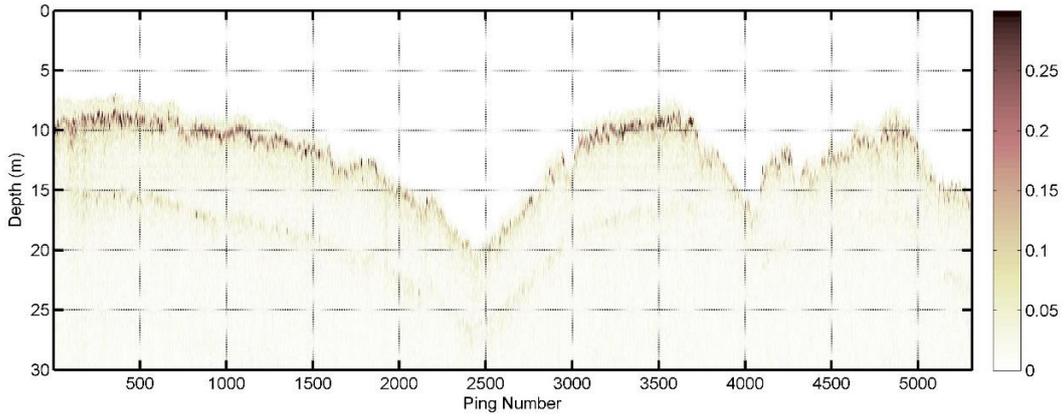


圖 4.63 臺北港觀測樁附近 10kHz 聲波之海床探測回波圖

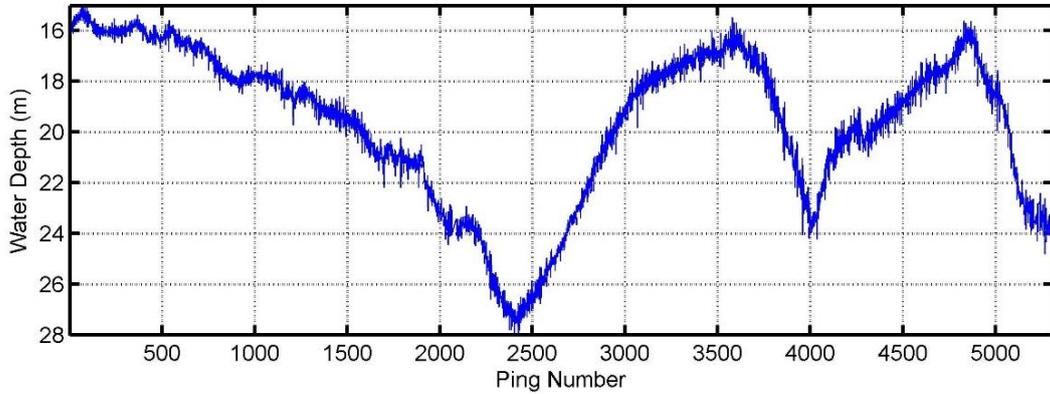


圖 4.64 臺北港實驗區於實驗測線上之水深變化，此為海研二號 38kHz 測深儀之探測結果

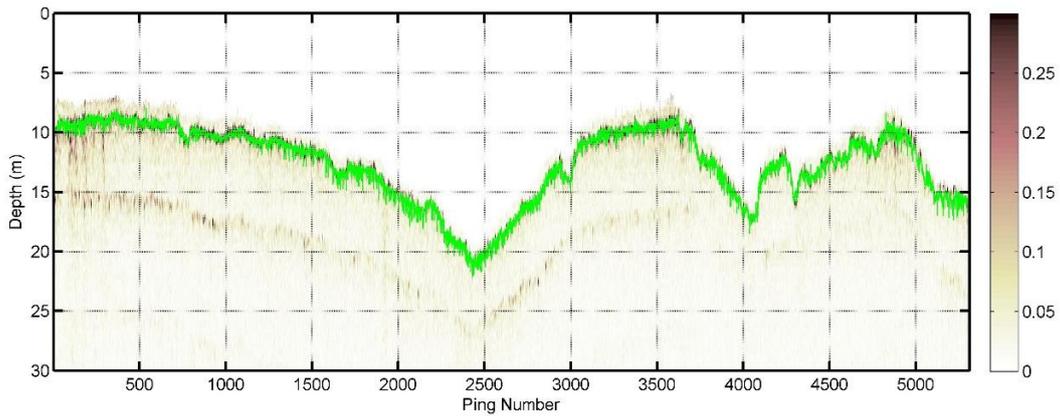


圖 4.65 海床回波訊號擷取範例，此為臺北港實驗區 8kHz 之海床回波訊號

更詳細地來說明，在反射係數的計算上，由於在本計畫所建置之多頻率海床探測系統中設置有獨立聲學接收器，因此可完全掌握聲源拍發強度以及海床反射波強度，圖 4.66 即為 6kHz 接收資料經脈波壓縮處理後之範例，由此圖可見到在經過脈波處理後，本系統可以清楚擷取聲源拍發訊號振幅(紅色星號標示處)、海床直接反射波振幅(紅色方框標示處)、以及後續回波訊號振幅。本計畫分別計算拍發訊號與接收訊號之聲壓強度 \bar{P}_s 與 \bar{P}_r ，並以測深儀及深度計資料計算各探測時間下之聲波傳播距離 r ，則可依下式獲得反射係數強度

$$R(f) = P_2(f) - P_1(f) + 20\log(r_1) \dots\dots\dots(4.8)$$

在獲得各頻段之反射係數後，即可依照本計畫所建置之海床表層沉積物特性反算模式(請參考本報告第 3.3 節)進行海床下土層特性估算。根據 EDF 模式之原理^[88]，運用 EDFM 所得到之有效密度(Effective Density, 式(3.39))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 4.67 之有效密度曲線範例所示。由圖 4.67 中可見到，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/m³，此乃該環境中之實際統體密度大小；另一方面，在頻率不停增加時，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，因此本計畫之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 4.68 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如圖 4.69 所示，如上所述，有效密度隨頻率增加而降低，為獲得海床表層參數以及統體密度，使用有效密度之變化曲線並與反算模式之正向預估結果做比較，則可得到反算結果。在此取探測過程中第 1000、2000、3000、以及 4000 筆探測值為例，在此四處之多頻率探測反算結果可獲得四條有效密度曲線，如圖 4.70 所示。由圖 4.70 可發現在頻率

趨近於 0Hz 時，其有效密度約在 1950kg/m^3 至 2200kg/m^3 間變動，亦即此海域統體密度約介於 1950kg/m^3 至 2200kg/m^3 間，若回顧第 4.2 節之表 4-11，可發現此海床表層統體密度估算結果與岩心本分析結果一致。

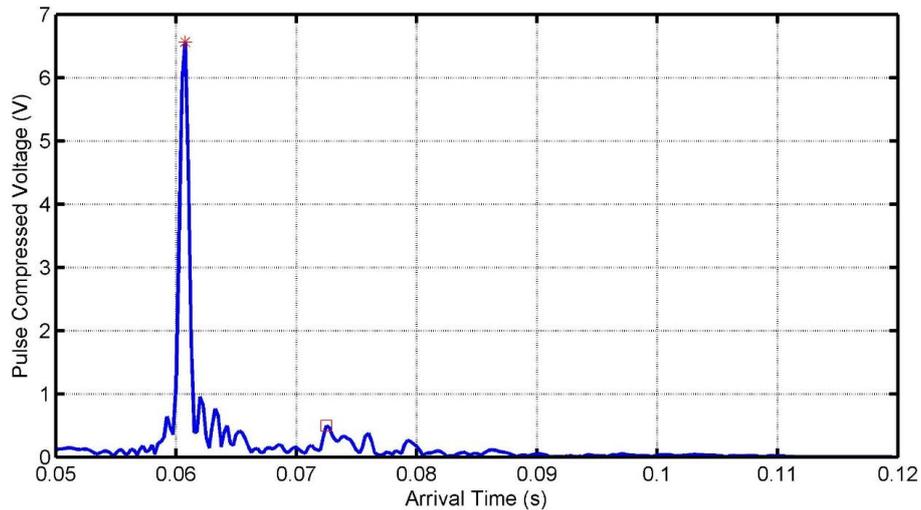


圖 4.66 臺北港實驗區 6kHz 接收資料經脈波壓縮處理後之範例，紅色星號與紅色方框分別標示拍發訊號與接收訊號之抵達波峰值

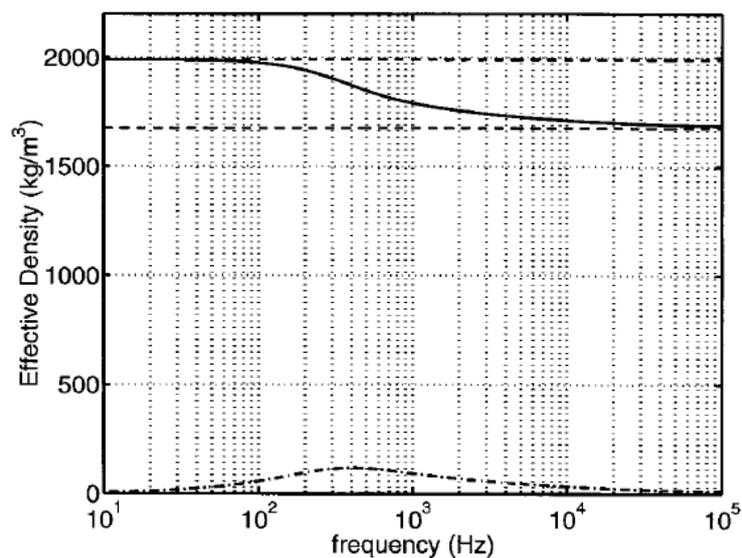


圖 4.67 EDF 模式所得之有效密度曲線範例(圖片來源：[88, William])

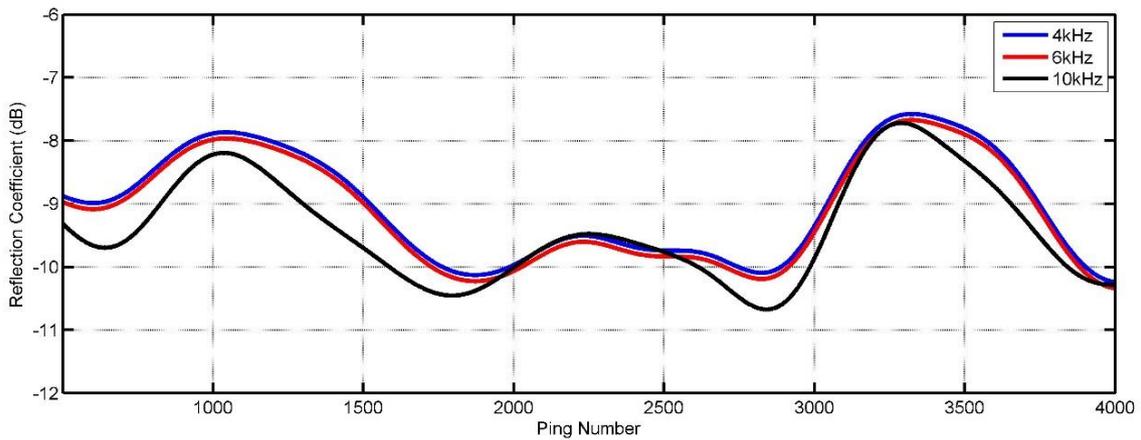


圖 4.68 臺北港實驗區 4kHz、6kHz、以及 10kHz 頻段聲波探測所得之海床反射係數

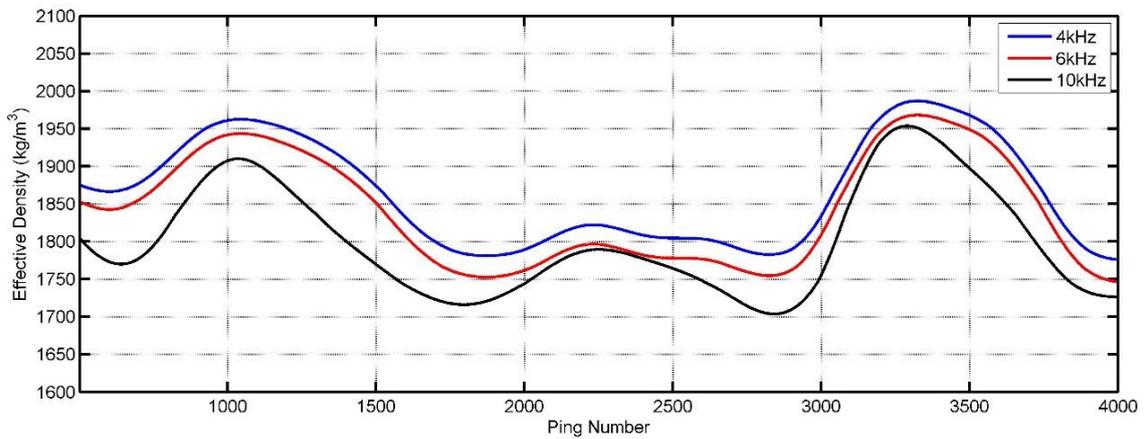


圖 4.69 臺北港實驗區 4kHz、6kHz、以及 10kHz 頻段聲波反算得之有效密度(Effective Density)

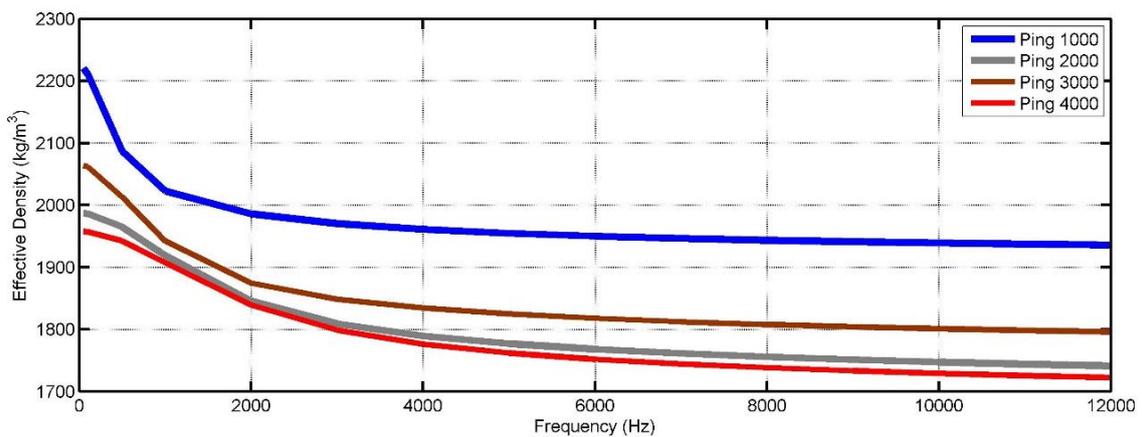


圖 4.70 臺北港實驗區之有效密度正向計算結果，四組資料分別為第 1000、2000、3000、以及 4000 筆探測值之有效密度曲線

接著，除了掌握統體密度外，透過上述多頻率有效密度曲線以及本計畫之反算模式，本計畫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 4.71 與圖 4.72 所示。首先在粒徑部分，由圖 4.71 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 μm 以及 100-200 μm ，同樣與第 4.2 節表 4-11 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，顯示本計畫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。在孔隙率部分，圖 4.72 同樣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，本計畫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 4.73 所示，可發現所估算得之統體密度與岩心採樣分析結果(表 4-11)同樣相當吻合，且同樣分成 2000-2150 kg/m^3 以及 1900-1950 kg/m^3 兩種主要密度範圍。

本計畫對於臺北港之多頻率海床聲學探測以及參數反算獲得很好的結果，首先是聲學反射係數可以忠實地反映出探測當地之海床特性差異，因此當海床表層土層產聲擾動或是特性改變時，此變化將反映在聲學資料上。再來是透過多頻率探測結果與聲學反算模式結合，可成功估算出統體密度、平均粒徑、以及孔隙率等參數，且與岩心採樣之分析結果相符。最後，多頻率海床探測結果可提供海床面地形資訊，以及海床次表層介面深度資訊(若有沉積物特性明顯變動之邊界存在)，可用以觀測海床下土層之變形與否。

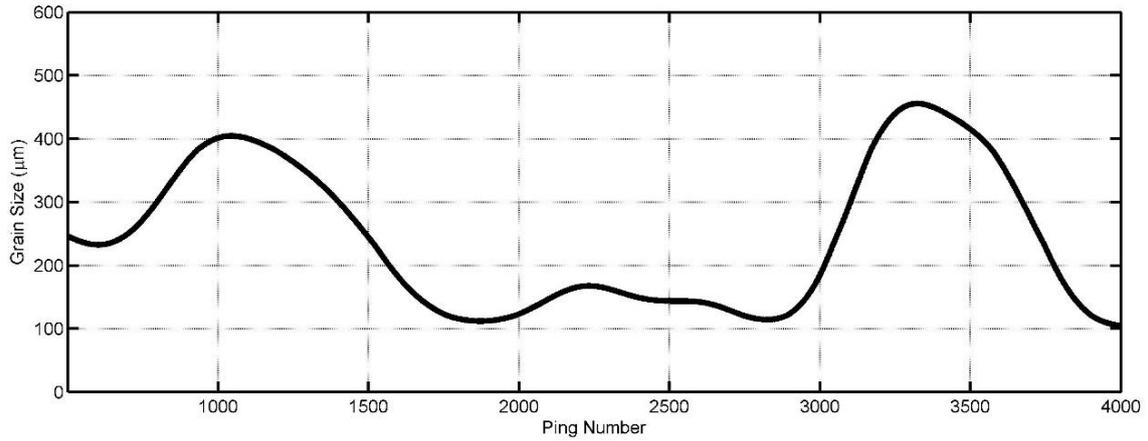


圖 4.71 臺北港實驗區之海床表層沉積物平均粒徑反算結果

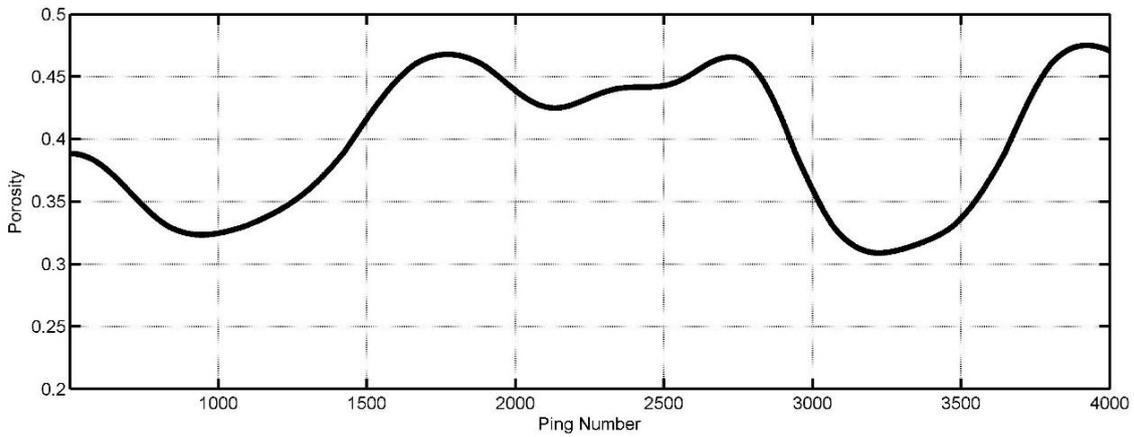


圖 4.72 臺北港實驗區之海床表層沉積物孔隙率反算結果

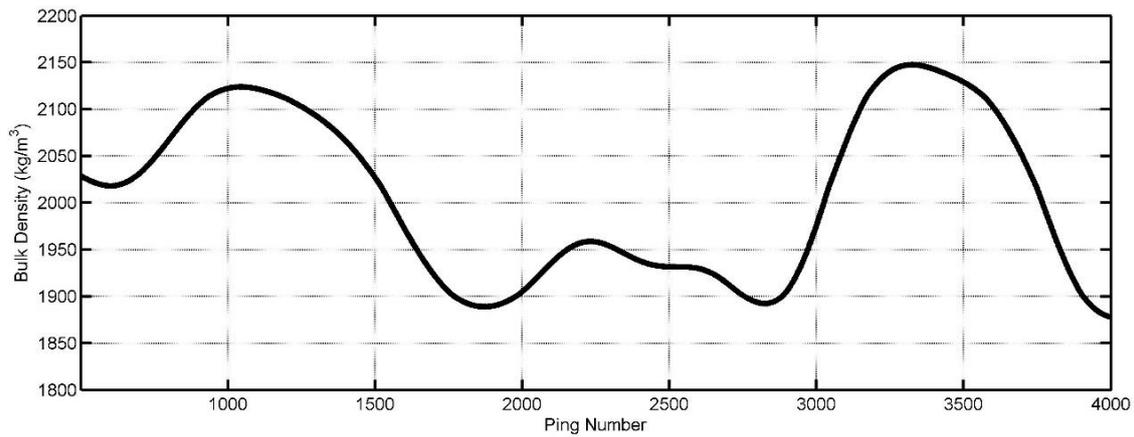


圖 4.73 臺北港實驗區之海床表層沉積物統體密度反算結果

4.4.2 粉砂質環境(高雄港實驗區之表層沉積物探測)

接續臺北港實驗區之海床探測，本計畫於高雄港亦進行了多頻率海床聲學探測，除了希望在不同海床特性之區域進行實驗驗證外，亦希望透過此機會累積港口區域資料，以對於我國各重要港口之海床特性有更多了解與掌握。

本計畫於高雄港南邊海域以拖曳式多頻率海床探測聲學系統進行實驗，實驗地點如圖 4.35 所示。本實驗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，實驗過程請參見本章第 4.2 節。

下列圖 4.74 至圖 4.75 分別為 5kHz 與 10kHz 之海床探測回波圖，圖 4.76 為探測過程之水深資料，此資料由海研三號上之測深儀探測而得，由於 38kHz 之聲波訊號仍容易受海床附近之懸浮粒子散射，因此在此探測得之深度資料有較劇烈的震盪，在此以移動平均處理，可獲得圖中黑色線條之平均水深。根據圖 4.76，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 4.74 至圖 4.75 之縱軸標示的同樣為由探測系統所測量到的回波深度。

與臺北港實驗區之量測資料處理相同，本計畫對於高雄港實驗區要先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 4.77 為 5kHz 及 10kHz 聲波訊號所得之海床反射係數，在此與臺北港實驗區所量測得之反射係數有明顯不同，若比較圖 4.77 與圖 4.68，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，在此為說明臺北港與高雄港之探測結果差異，特別將岩心樣本分析結果再次列於表 4-13 中並進行比較。由表 4-13 可明顯觀察到臺北港之海床表層材質組成相當集中，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，因此反射係數一致；相反的，高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，也就形成了圖 4.77 之反射係數差異。

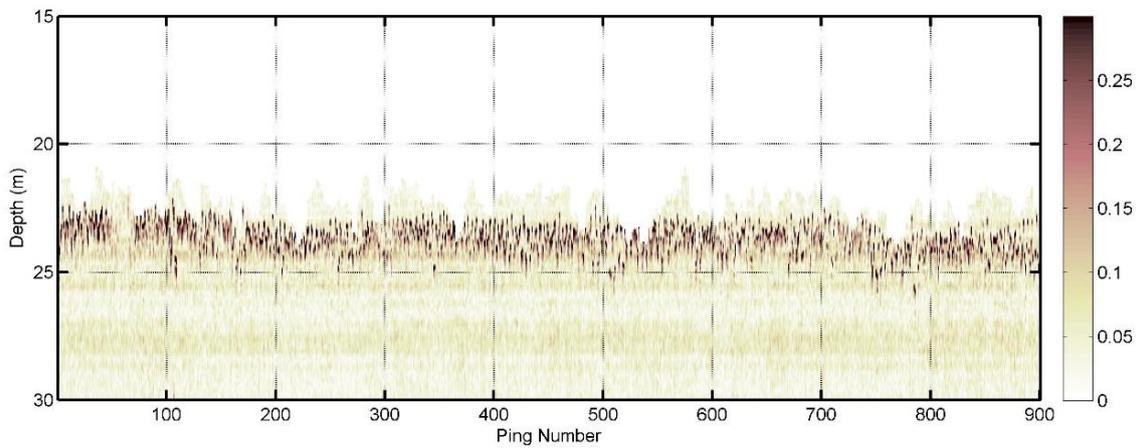


圖 4.74 高雄港實驗區 5kHz 頻段聲波之海床探測回波圖

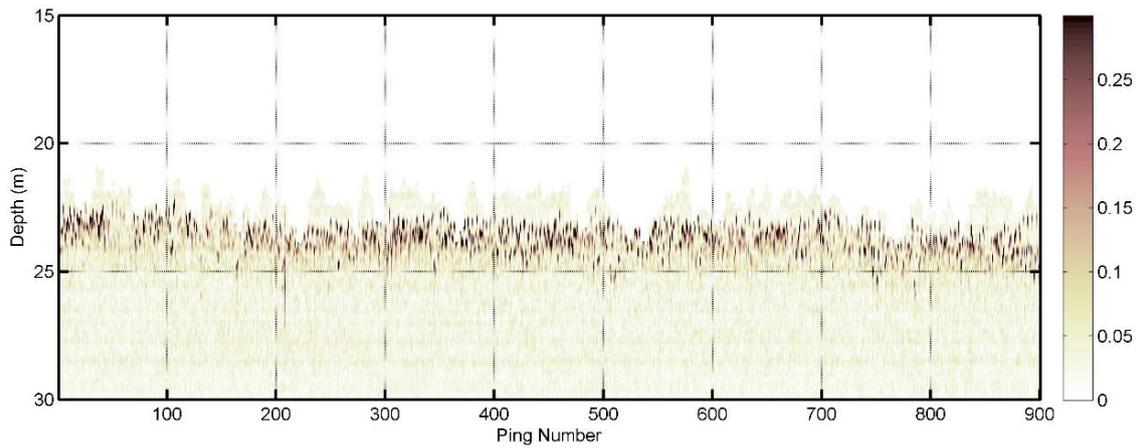


圖 4.75 高雄港實驗區 10kHz 頻段聲波之海床探測回波圖

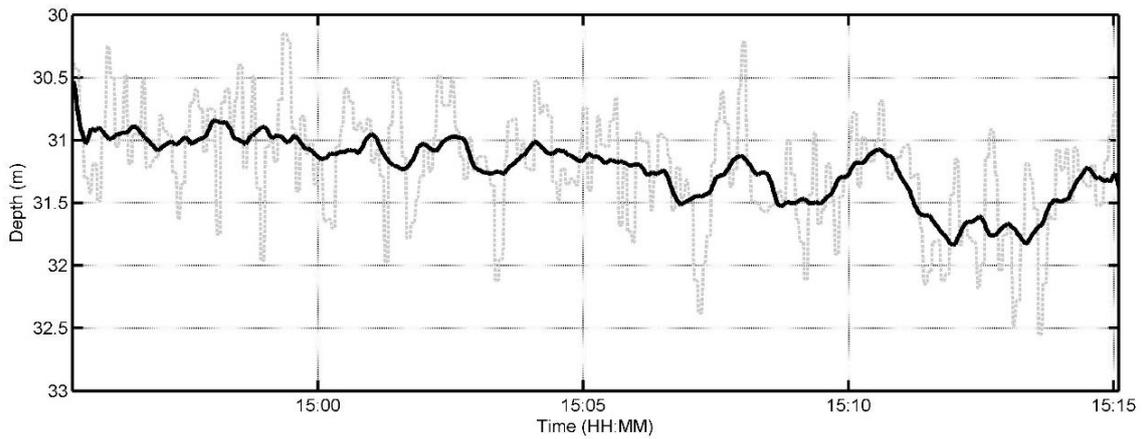


圖 4.76 高雄港實驗區於實驗測線上之水深變化，此為海研三號 38kHz 測深儀之探測結果

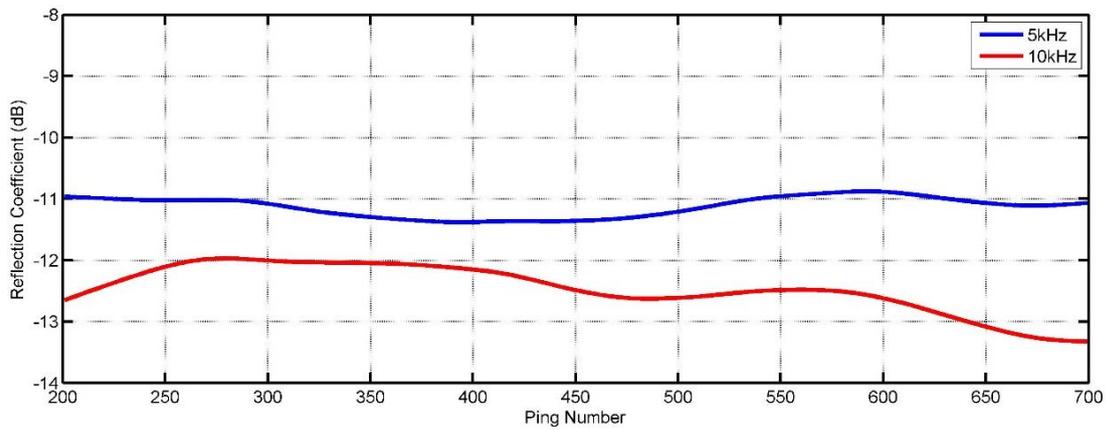


圖 4.77 高雄港實驗區 5kHz 與 10kHz 頻段聲波探測所得之海床反射係數

表 4-13 臺北港及高雄港底質特性分析彙整表

OR2-2321	臺北觀測 樁	水深 (m)	統體密 度	平均粒 徑(μm)	黏土 (%)	粉砂 (%)	砂(%)	礫石 (%)
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 B	高雄港-南 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

接著，若進一步以聲學量測結果反算其粒徑與透水率，表 4-14 為高雄港海床岩心樣本之粒徑分佈分析結果，可發現最主要的粒徑分佈範圍為 3.9-31.3 μm 間，其次為 31.3-125 μm 間，而圖 4.78 為本計畫在高雄港實驗區之平均粒徑反算結果，可發現兩頻段所反算得之平均粒徑結果與岩心樣本分析結果，10kHz 之探測結果主要落在 3.9-31.3 μm 區間，5kHz 之探測結果則主要落在 31.3-125 μm 區間，兩頻段彙整起來則表達了此實驗區海床表層沉積物材質之平均粒徑主要範圍。另一方面，在孔隙率部分，反算所得之孔隙率平均值為 0.5，若以此孔隙率搭配海水密度(1023 kg/m^3)與沉積物粒子密度(2670 kg/m^3)進行計算，則可得統體密度為 1846.5 kg/m^3 ，與樣本分析結果符合。

表 4-14 高雄港底質粒徑分佈表

OR3-2084B	高雄港-南邊	<3.9 μm	<31.3 μm	<62.5 μm	<125 μm	<250 μm	<500 μm	<1000 μm
B	砂質粉砂	15.6	53.5	70.7	89.9	99.6	100	100.0
D8729	砂質粉砂	15.9	56.8	72.8	83.3	92.2	97.7	100.0
D8747	砂質粉砂	17.6	60.3	79.4	94	99.9	100	100.0
X	砂質粉砂	16.5	58.9	75.2	84.5	90.6	97.1	100.0

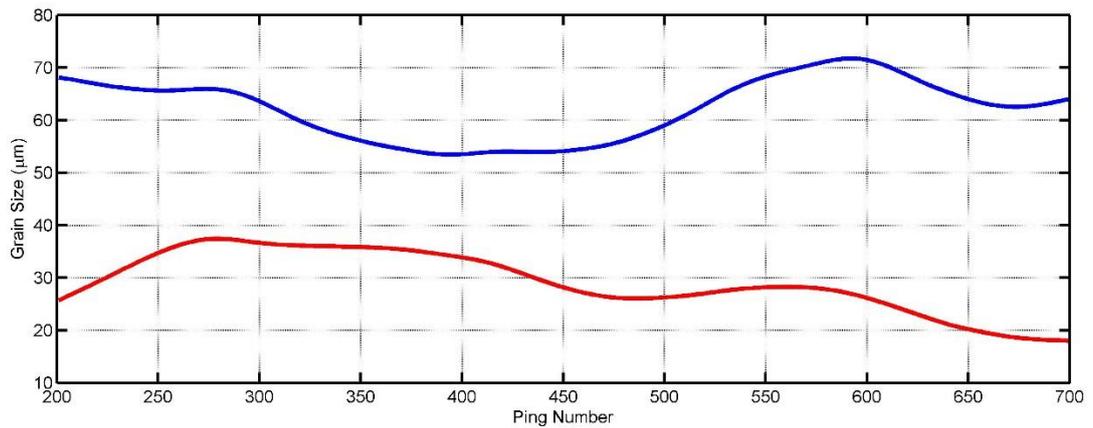


圖 4.78 高雄港實驗區 5kHz(藍)與 10kHz(紅)頻段聲波之海床表層沉積物平均粒徑反算結果

彙整上述臺北港與高雄港之多頻率海床探測分析結果，可歸納出以下重要結論

1. 臺北港之海床表層沉積物材質分佈集中，且以砂質為主，因此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，因此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. 使用本計畫發展之多頻率海床探測技術與反算技術可準確獲得海床參數，並且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，因此若海床表層土層產生擾動且密度及孔隙率產生變化，則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，因此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. 接續上點結論，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，因此可用以估算不同海床沉積物材質之參數，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，此外，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，因此未來亦可持續使用此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. 由於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，因此本計畫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。

4.5 多頻率海床探測系統及實驗水槽控制型環境建置

4.5.1 實驗動機及目的

由於離岸風機之基樁振動、外力作用(地震、風浪、與海流)等因素均可能造成基樁附近土層之擾動與不穩定，為了瞭解不同材質海床土層產生擾動或受到破壞時，是否能夠以聲學方式探測得知並掌握其變化，本計畫於室內建置了小形水下土層環境。本計畫於室內建置了與臺灣地區海床相似材質的環境，利用聲學方式量測土層未受擾動時的相關土層參數，其後以外力使土層擾動後再以相同方式量測其參數，並觀察前後差異及特性。

4.5.2 實驗設置及理論方法

為測試是否可利用聲學方式獲得土層受擾動前後的差異與特性，本計畫利用自行建置之多頻率海床探測聲學系統來進行量測，以得到海床沉積物結構圖及海床反射係數，多頻率海床探測聲學系統之硬體組成架構請參考本報告第 4.1 節。本小節將會詳細介紹本實驗之實驗環境、實驗方式、以及反射係數計算理論方法。

1. 實驗環境建置

為模擬實際海床環境，本實驗模擬了砂質土層及泥質土層兩種材質的海床，並分別比較兩種材質的海床經擾動前後的反射係數以及物理參數差異。臺灣週圍海床的砂質皆為石英砂(矽砂)，因此在砂質土層

建置方面，實驗用砂選用粒徑大小與實際海床相近的石英砂，粒徑分佈圖如圖 4.79 所示。海上採樣時多為海床表面的砂質，相較於較深的砂質粒徑較為細小，而為使實驗建置更接近於實際海床的土層粒徑結構，鋪砂時選用 3 號砂(600um)於底部第一層，第二層砂鋪上粒徑較小之 9 號砂(180um)。為了使砂土能夠自由貫落鋪排於試驗載體，利用砂漏的方式將其漏斗嘴鑽上相同孔徑的孔洞，將砂土裝於漏斗內後始其傾斜，以重力自由貫落的方式進行鋪排。另外，因於較小尺度的水槽進行實驗，利用聲學進行實驗時勢必會遇到邊界反射的問題，為了使邊界反射對實驗的影響降至最低，因此將聲納四週圍的邊界貼上吸音棉。本實驗所選用之吸音棉為具有吸震及防震效果的波浪狀吸音棉，可以有效降低邊界反射的噪音。

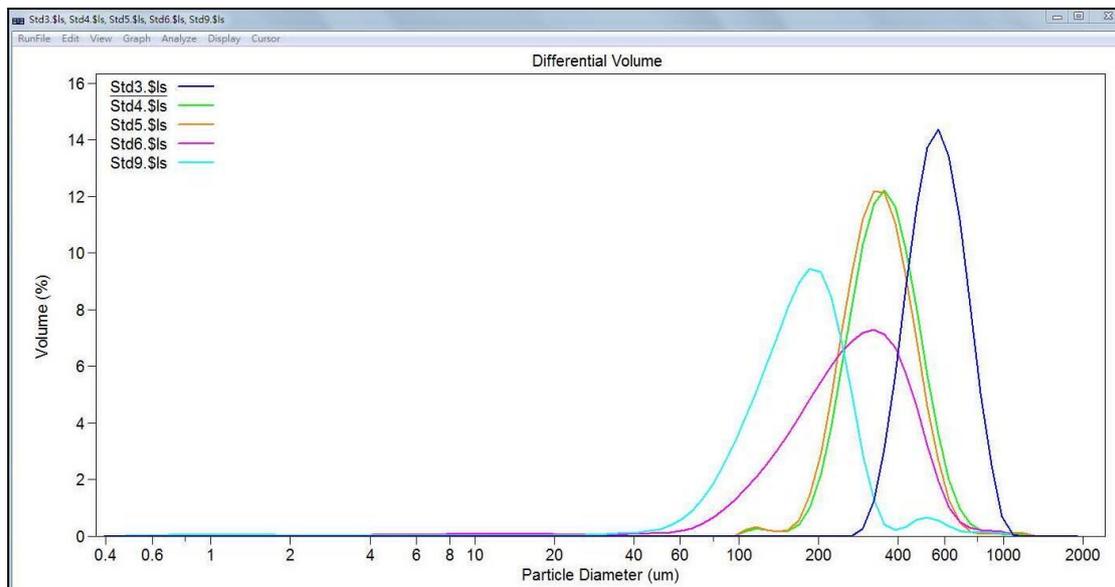


圖 4.79 砂粒徑分佈

由於實驗目的為量測受擾動前後的土層狀態，聲納距底床須有一定的距離才能在後續訊號處理時將聲納發出的主訊號與回訊號分離出來，因此初步將試驗砂填裝於大型塑膠桶內，大塑膠桶的直徑 48 公分，高 62 公分。為使聲納盡可能與砂質土層的距離增加，除了將試驗砂填於較高之大型塑膠桶外，將大型塑膠桶放置於水槽內(長寬皆 180 公分，高 100 公分)，不僅將聲納與試驗砂離得更遠，使得訊號解析時可

以更清楚的分離出回波訊號，也可以有效控制砂土鋪排的情形及使用的砂量大小。為得知實驗環境的砂土密度，在每一層實驗用砂間放置體積固定之密度盒，於實驗結束後將密度盒取出，將突出部分的砂土刮平後再量測其加之重量，可換算出當時土壤的統體密度。

在泥底床的建置中，使用的泥巴為實際海底採樣的海底泥，如圖 4.80 所示，由於泥土於實驗室靜至已一段時間，為模擬於實際海床的泥巴特性，先將泥巴加入水後進行攪拌，如圖 4.81，使其可以均勻沉澱，使實驗進行時可以降低實驗誤差。



圖 4.80 實驗選用之海底泥

在實驗進行過程中，利用與本實驗室開發之多頻率海床深度量測系統進行量測，將聲源垂直往底床方向發射，接收的聲納也垂直朝向底床，接收來自底床的回波訊號，如圖 4.82 所示



圖 4.81 攪拌均勻後的海底泥

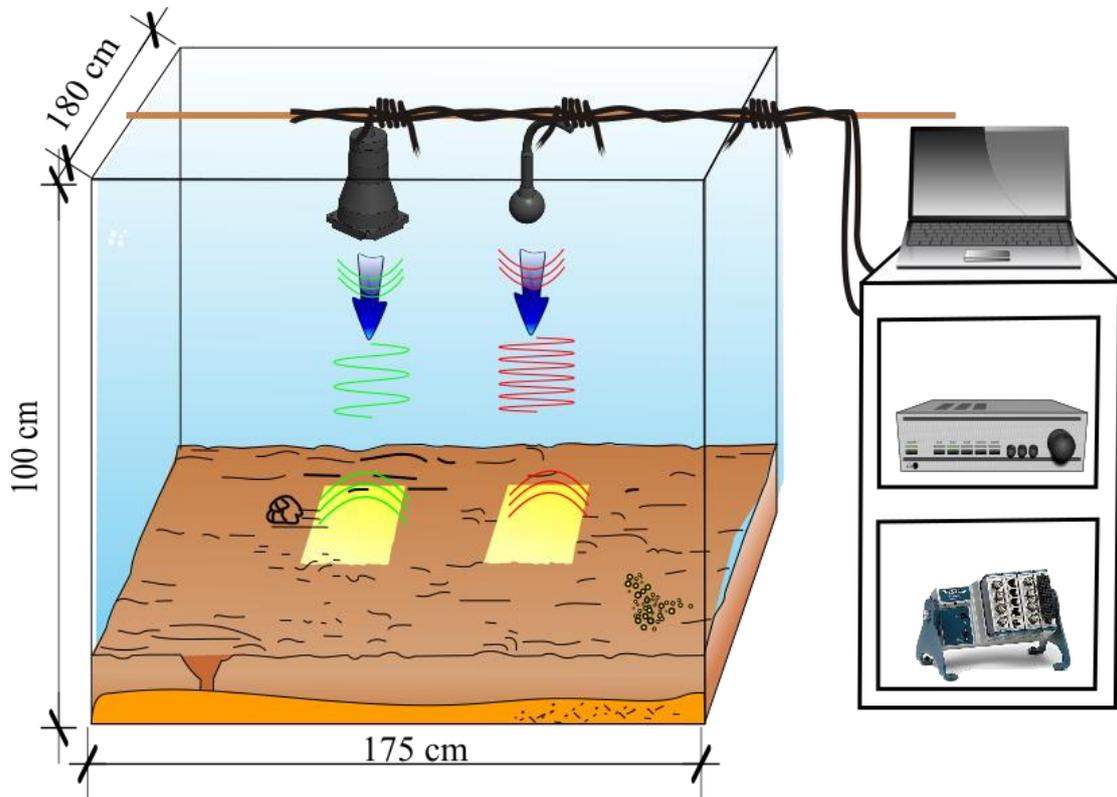


圖 4.82 實驗配置示意圖

2. 理論方法

聲波在傳輸過程中，能量會以幾何擴散的方式散佈於水中，因此造成能量分散而降低聲壓位準，這種幾何擴散損失是造成水中聲波傳輸損失的重要因素，而聲波隨傳輸距離損失的變化又依不同的聲波幾何形狀有不同表示方式，本研究主要針對球型擴散損失進行探討。首先傳輸損失的定義為，在聲源特定距離範圍內的訊號強度與距離聲源一碼處的訊號強度的比值，因此方程式可以表示成下式，其中 $I(1yd)$ 為距離聲源一碼處的強度， $I(r)$ 為距離聲源 r 處的訊號強度

$$TL = 10 \log \frac{I(1yd)}{I(r)} \dots\dots\dots(4.9)$$

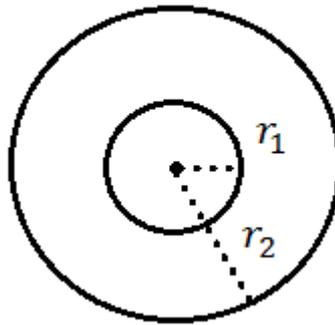


圖 4.83 球面波擴散示意圖

接著假設一個全向性的點聲源，此聲源產生的波為球面擴散，並且不考慮波的能量被吸收，波前能量可以表示成

$$P = IA = I(4\pi r^2) \dots\dots\dots(4.10)$$

由於所有球面的波前能量是相同的，因此在圖 4.83 中 r_1 與 r_2 處波前能量可以表示成

$$P_1 = P_2 \dots\dots\dots(4.11)$$

$$I_1 4\pi r_1^2 = I_2 4\pi r_2^2 \dots\dots\dots(4.12)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{4\pi r_2^2}{4\pi r_1^2} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 \dots\dots\dots(4.13)$$

最後根據傳輸損耗的定義，將一碼處與 r 處的訊號強度帶入式(4.13)，即可得到聲波隨距離 r 改變的傳輸損耗 TL 為(4.16)

$$\frac{I(1yd)}{I(r)} = \frac{4\pi d}{4\pi(1yd)^2} = \frac{r^2}{(1yd)^2} \dots\dots\dots(4.14)$$

$$TL = 10\log \frac{r^2}{1^2} \dots\dots\dots(4.15)$$

$$TL = 20\log(r) \dots\dots\dots(4.16)$$

由於反射係數為反射聲壓與入射聲壓之比值，但由於聲源與海床有一距離，因此必須考慮到海水層中聲波之衰減，假設聲源發出聲壓為 P_1 而垂直入射海床，接收器所接收到的聲壓為 P_2 ，聲源到海床距離為 r_1 ，海床反射係數為 R ，如圖 4.84 所示，當聲源發出聲壓 P_1 經由海水層中傳播，假設海水中聲波衰減為球面波擴散損失，因此乘上 $\frac{1}{2r_2}$ ，聲波經由海床反射因此乘上反射係數為 R ，可以得到接收到聲壓如式(4.17)

$$P_1 \times \frac{1}{2r_1} \times R = P_2 \dots\dots\dots(4.17)$$

如使用聲壓位準的方式來進行計算反射係數可得

$$20\log_{10}(R) = 20\log_{10}(P_2) - 20\log_{10}(P_1) + 20\log_{10}(2r_1) \dots\dots\dots(4.18)$$

利用(4.12)式即可用來計算反射係數，而本研究計算上由於 P_1 是聲源聲壓，因此使用校正實驗的結果來計算聲源拍發聲壓 P_1 ，而 P_2 是經由海床反射回來所接收的聲壓，再來計算反射係數時 P_1 及 P_2 是使用脈衝壓縮處理過後的數值計算，因為脈衝壓縮即是將訊號加一個增益值，而經由一樣的處理後 P_1 及 P_2 加的增益值會相同，因此計算上可以抵消，且使用同一系統其接收器靈敏度及系統響應也可以抵消，因此本研究會使用式(4.12)來進行反射係數計算。

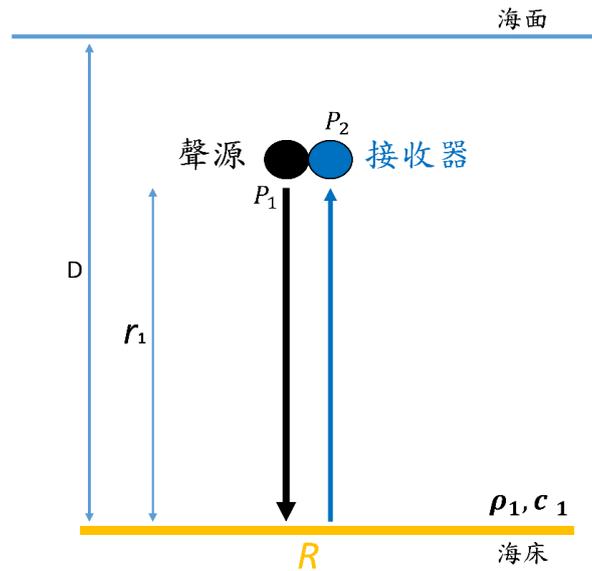


圖 4.84 計算垂直入射反射係數示意圖

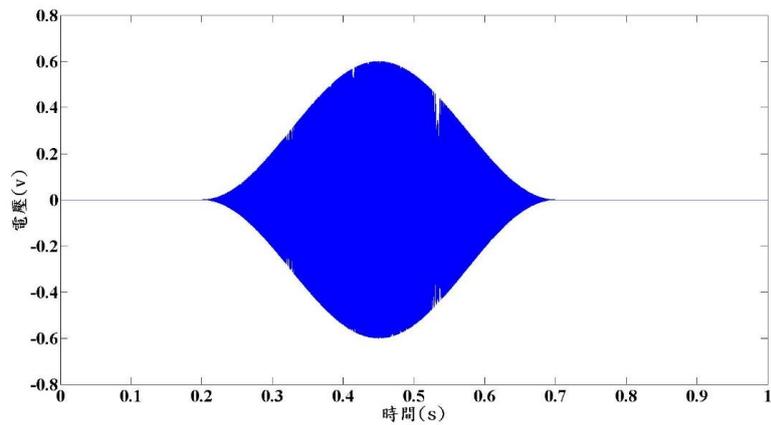
4.5.3 實驗過程

本實驗的首要任務為建置出實驗環境，本實驗利用大型塑膠桶為裝填式樣砂的載具，分別於下層及上層鋪排 3 號及 9 號砂，為使聲波能夠穿越土層，土層厚度必需大於聲波波長，因此鋪排厚度以一層 20 公分為基準利用自由震落法進行鋪排。本實驗執行自由震落的作法為利用事先設計好的漏斗裝填滿欲鋪排的砂土後，將漏斗傾斜讓砂子以重力方式自由落下，並且漏斗的移動方式皆為一致，確保砂子平均落於整個大型塑膠桶內，如圖 4.85 所示。

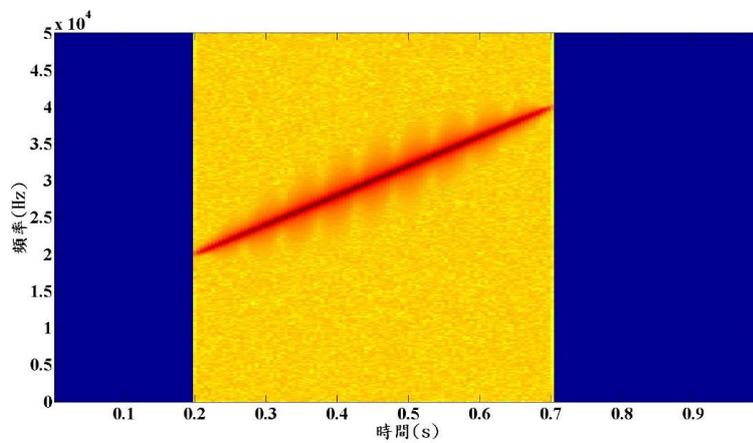


圖 4.85 砂子以自由貫落法鋪設過程

為量測土層振動前後之反射係數的差異，因此需清楚的分離出聲納拍發與回波的訊號。因實驗環境尺度較小，聲納距底床僅僅數十公分，為了可以使我們訊號處理進行脈衝壓縮時可以成功分離出主訊號與回波訊號，在設計訊號時必須將頻寬增大，因此設計中心頻率為 30000Hz，頻寬為 20000Hz 的線性調頻訊號(圖 4.86)，並對此訊號進行測試，觀察在此尺度下是否可以成功利用脈衝壓縮分離出回波訊號。實驗方法為自行模擬一聲納距砂質土層約 45 公分的回波訊號，將其與原拍發訊號疊加後進行脈衝壓縮，實驗結果如圖 4.87，證實本實驗室的訊號處理技術可以解析出聲納距砂質土層 45 公分以上之回波訊號。



(a)



(b)

圖 4.86 (a)使用訊號之時閾圖 (b)使用訊號之頻譜圖。

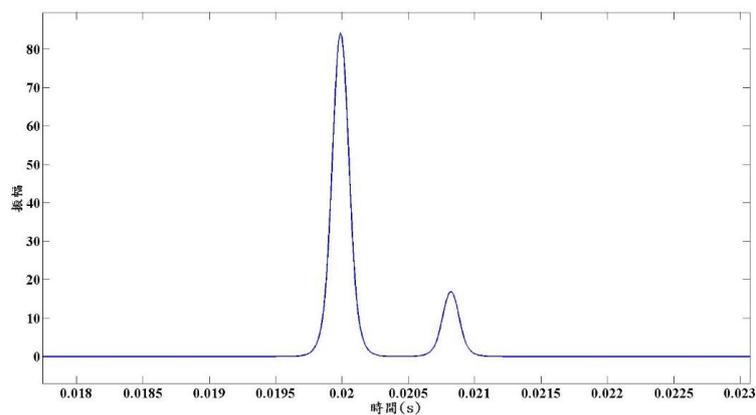


圖 4.87 本實驗訊號處理能力成功解析出深度 45 公分的回波訊號

於砂質土層聲學量測方面使用本實驗室開發之多頻率海床深度量測系統進行量測，實驗配置如圖 4.88 至圖 4.89，兩顆換能器皆垂直向

下，兩換能器高度一致，兩者間距離 12cm。換能器僅入水 9 公分，距砂質土層約 46 公分，且為避免邊界反射對量測到的回波訊號資料造成誤差，在換能器右側的邊界上貼上吸音棉(圖 4.90)，防止其反射的訊號造成實驗量測誤差，而除了右側邊界之外其他三個方向的邊界反射因與我們所要觀察的回波訊號有較大的時間差，並不影響實驗所量測之回波訊號，因此不需為這三個邊界方向貼上吸音棉，於此環境下量測反射係數，為土層未受擾動時之聲學資料。

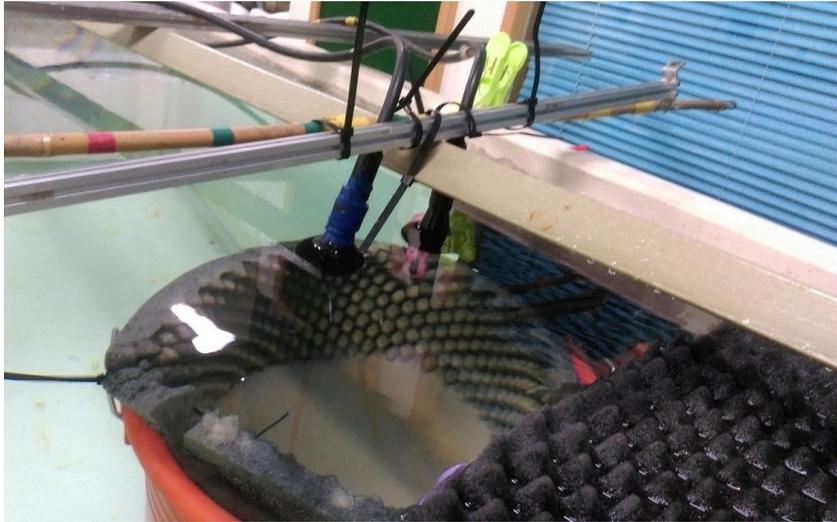


圖 4.88 砂質土壤振動前之實驗配置圖

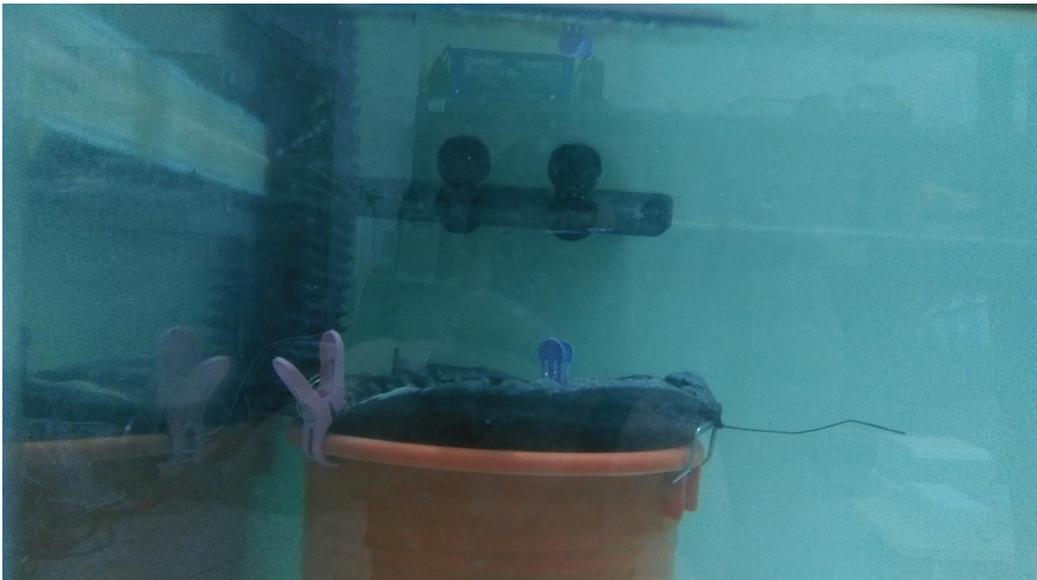


圖 4.89 砂質土壤振動前之實驗配置圖

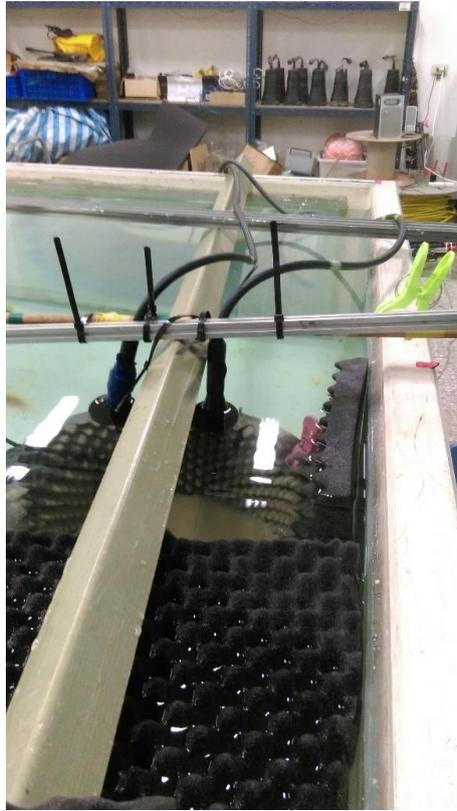


圖 4.90 於邊界貼上吸音棉，降低邊界反射的噪音

為得到較精準的實驗資料，在土層受擾動前後各自收發了 30 筆資料計算後進行比較。而本實驗擾動土層的作法為於砂土正中央插入一直徑 5.2 公分之圓柱體，再以均勻敲打的方式使基樁擾動土層，敲打的方式為垂直向下及水平方向四個方向進行規律地敲打，如圖 4.91，整個過程持續約 20 分鐘後將鐵棒抽起，此時將換能器架設回原本未進行擾動時的位置，確保除土層外其於條件皆相同之後，再進行反射係數量測。圖 4.92 以及圖 4.93 為模擬基樁振動前後量測到的資料頻譜圖。



圖 4.91 擾動及破壞土層之情形

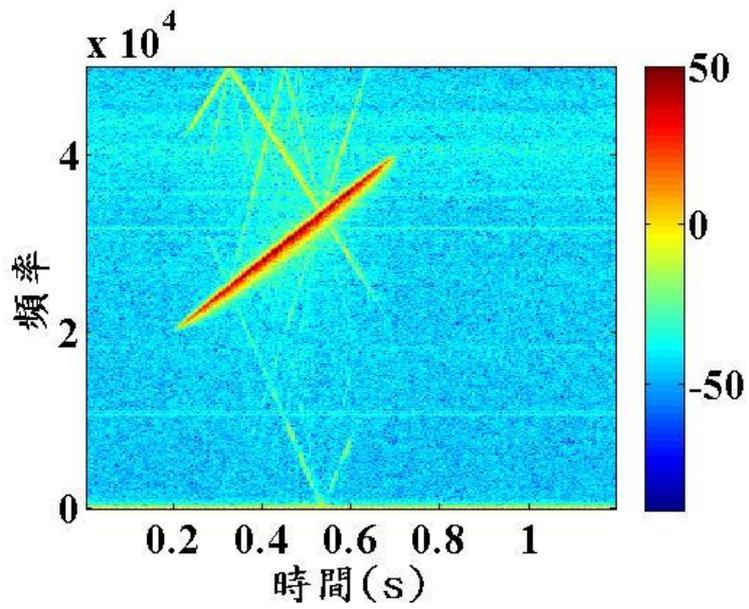


圖 4.92 土壤受擾動前量測到之頻譜圖

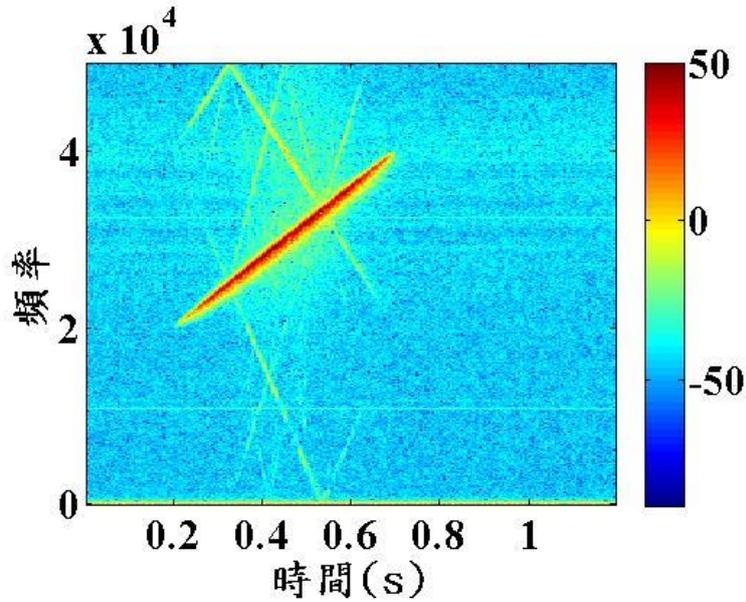


圖 4.93 土壤受擾動後量測到之頻譜圖

砂質土層實驗結束後本計畫接續進行泥質土層實驗。本實驗所建置的泥質土層厚度為 15 公分，而建至此實驗環境時為了降低人為擾動，先使攪拌後的泥巴靜至一段時間後再緩緩加水，使其漸漸沉入水槽內。此泥底實驗的擾動方式與上述砂質土層實驗相同，插入直徑 5.2 公分之圓柱體，再以垂直向下以及水平的四個方向均勻敲打，並於擾動前後各自收發 30 筆資料，再進行反射係數比較，實驗過程如圖 4.94。

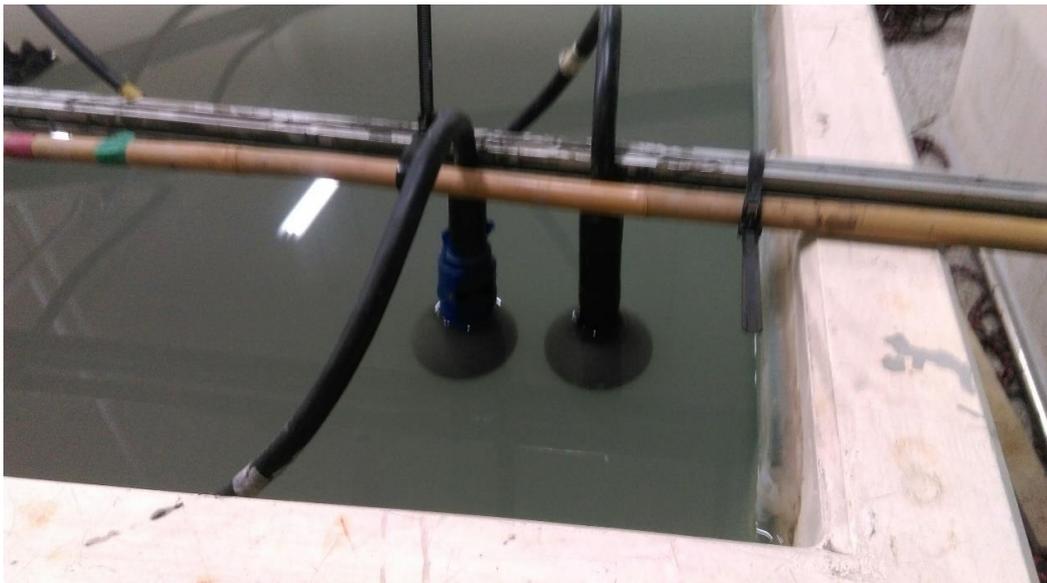


圖 4.94 於泥質土層進行收發實驗

在密度實際量測方面，以放置密度盒方式進行量測。每一個密度盒的質量與體積都已定量。定量方式如圖 4.95 以攝氏 25°C 純水進行體積定量，水在攝氏 25°C 時密度為 $0.9971(\text{g}/\text{cm}^3)$ ，利用密度盒加滿水的前後重量差量測出來，便可以反算每一密度盒之體積，經過量測本實驗所使用之密度盒之體積為 $52.1512(\text{cm}^3)$ 。本實驗每一層鋪砂的厚度為 20 公分，為能準確量測每一層砂進行聲學實驗時的密度，每一層砂在鋪排 10 公分時先放置一密度盒於大型塑膠桶內，放置完畢後再以相同的自由質落方式將砂完整鋪置 20 公分，並且每一密度盒放置的位置為統一靠置大型塑膠桶的邊界，避免於學實驗時造成反射。待實驗完成後，輕輕的將原先放置的密度盒取出，取出後利用直尺將其上方突出的部分刮平，確保載體上之砂子體積與事前量測空密度盒體積一致，如圖 4.96、圖 4.97 所示，將刮平後的砂載體進行量測，由此得知實驗中的砂密度。



圖 4.95 (a)空密度盒之質量。(b)裝滿攝氏 25°C 純水時的質量



圖 4.96 (a)將密度盒取出時的情形。(b)將密度盒上方突出的部分刮平，再進行質量量測



圖 4.97 砂子密度量測情形

4.5.4 實驗結果

本實驗進行了土層受擾動前後之反射係數計算，圖 4.98 分別為砂質土層受擾動前後，各取所收到的第十筆資料進行脈衝壓縮處理，可以清楚發現當土壤受擾動後之回波訊號能量略低於土壤擾動之前前。為確保量測之數據準確性，本實驗分別於土層擾動前後量測 30 筆資料進行計算，計算結果如圖 4.99，藍色曲線為當砂子鋪設完畢後，未受擾動情況下的反射係數，而紅色曲線為受擾動後的反射係數。圖 4.99 可以發現，土壤受擾動前後之反射係數有明顯的差異，當土層遭受擾動或破壞時，土壤結構產生鬆動孔隙率增加，其反射係數相較於未擾動前會較小。

圖 4.100、圖 4.101 為泥質土層在模擬風機振動前後的反射係數比較。同樣地，藍色曲線為未受擾動前，紅色曲線為受擾動後，由圖 4.101 可以明顯觀察出受擾動後的泥質土層反射係數明顯較未受擾動時要小，且其反射係數變化量較砂質土層來得大。綜合以上兩種不同材質底床的結果證實，可透由聲學量測之反射係數，觀察土層受風機擾動之情形。而在統體密度量測部分，量測結果如表 4-15，此量測結果與反算結果相符，上層土壤受擾動後密度變大，下層土壤則變小。

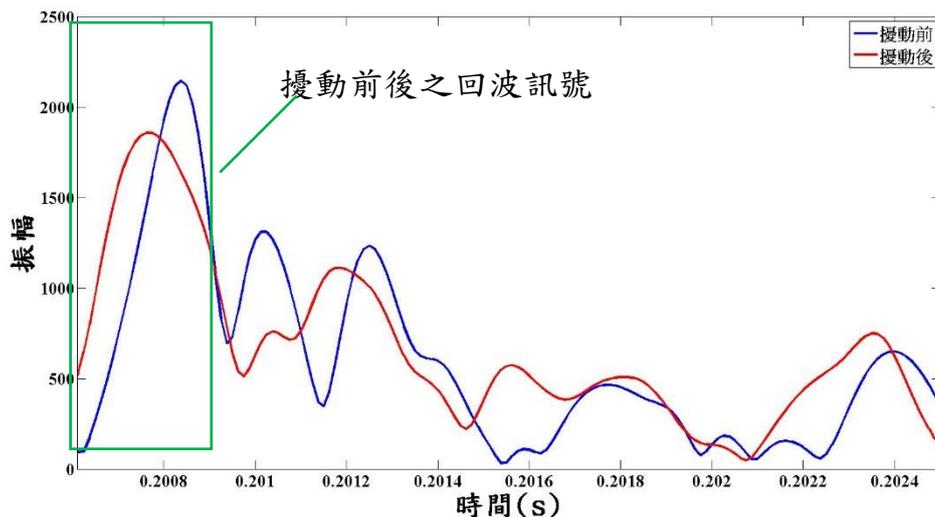


圖 4.98 砂質土層受擾動前後之脈衝壓縮後的回波訊號

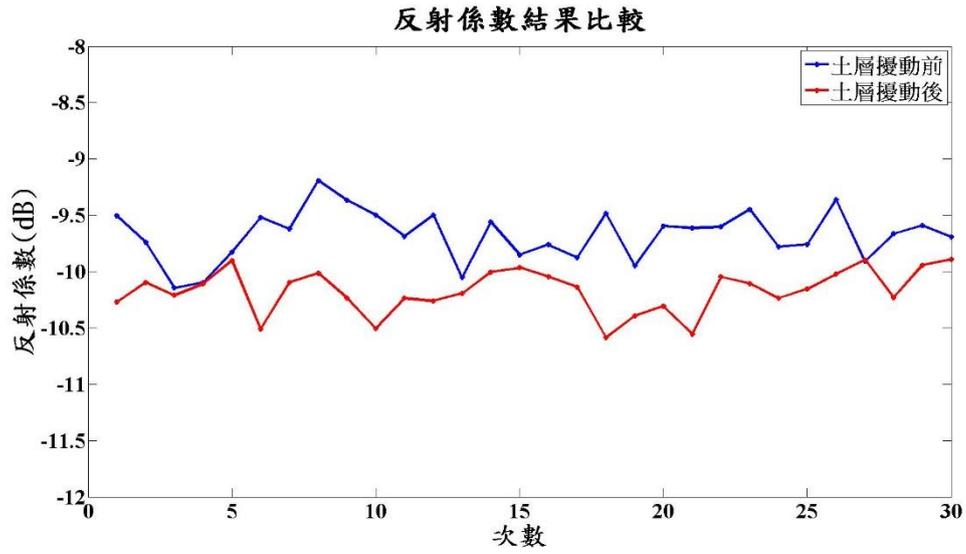


圖 4.99 砂質土層擾動前後反射係數比較曲線圖

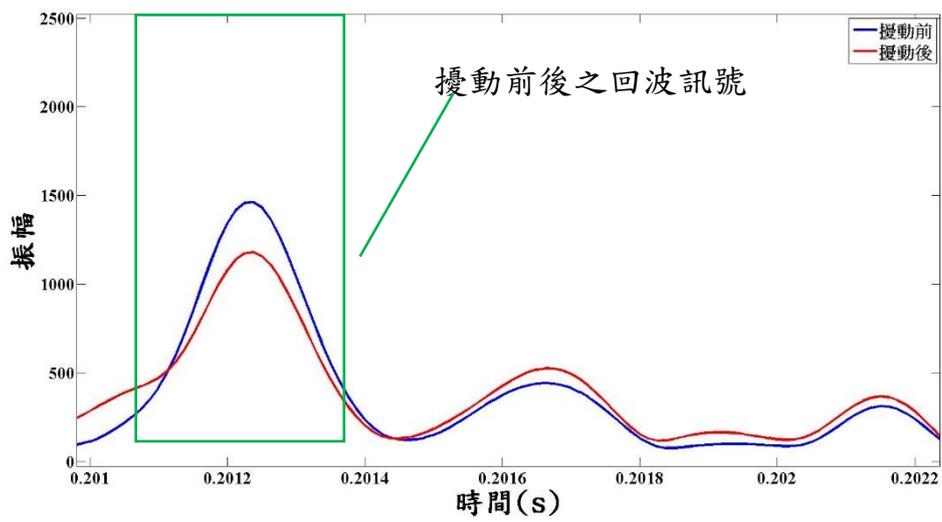


圖 4.100 泥質土層受擾動前後之脈衝壓縮後的回波訊號

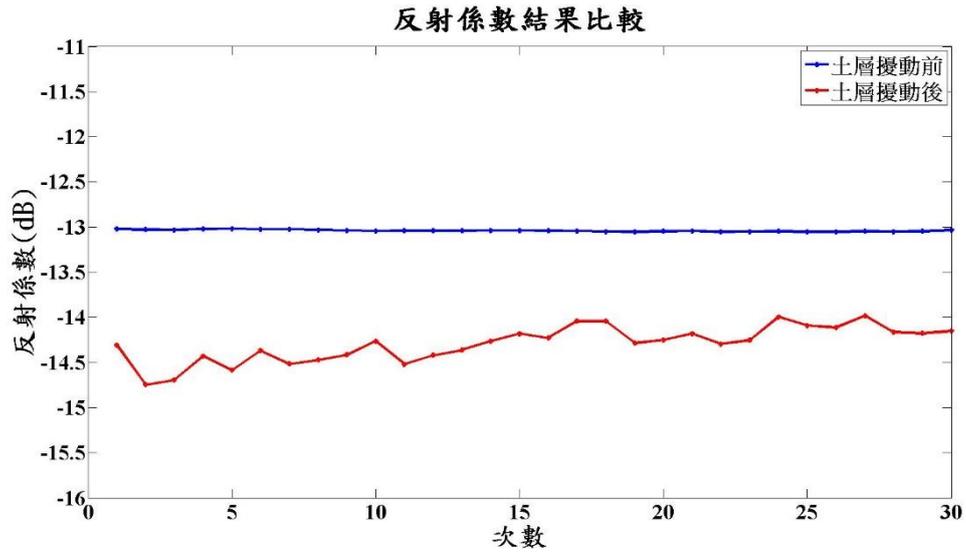


圖 4.101 泥質土層擾動前後反射係數比較曲線圖

表 4-15 統層之擾動前後之統體密度量表

土層狀態	土層擾動前		土層擾動後	
	上層砂	下層砂	上層砂	下層砂
量測圖片				
統體密度 (g/cm ³)	1.975	2.1668	2.0326	2.1093

4.5.5 小結

綜合上述實驗，本實驗室證實了砂子或泥受擾動或破壞後之情形，可透由聲學量測的反射係數觀察之。無論是砂質土層或泥質土層受到擾動後，所量測到的反射係數皆比受到擾動之前更小，顯示其結構鬆

動，若離岸風機之基樁振動或其他外力作用(地震、風浪、與海流)造成基樁附近土層之擾動與不穩定，在最節省成本及人力的情況之下，可藉由量測基樁周圍之海床反射係數，判斷其海床面土層之情形。

第五章 計畫成果綜整

5.1 計畫工作成果

本計畫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，表 5-1 為本計畫執行研究工作項目及其所獲成果。

表 5-1 本計畫執行研究工作項目及其所獲成果

研究工作項目	所獲成果
離岸風機相關文獻蒐集	<ol style="list-style-type: none">1. 了解離岸風機基樁周圍土層可能遭遇之破壞種類與性質2. 了解表達離岸風機基樁周圍土層穩定性之相關參數3. 了解現行離岸風機基樁安全性之檢監測技術與施作方式4. 了解世界各國之離岸風機維運方案
不同頻率海床聲學探測相關文獻蒐集	<ol style="list-style-type: none">1. 了解水深之定義以及安全航行深度之定義2. 了解幾個常用頻段之水深探測效能3. 了解現行測深技術與施作方式發展情形4. 了解現行海床下土層參數調查之聲學技術發展情形
不同頻率海床聲學探測數值模擬	<ol style="list-style-type: none">1. 掌握不同頻率聲波受浮泥層不同懸浮粒子濃度之反射強度2. 了解不同海床土層材質之實體海床深度探測適用頻段

	3. 了解多孔彈性地音模式之參數輸出具有頻率相依性，可用以發展多頻率海床參數反算技術
不同頻率海床聲學探測之可行性分析	1. 定義出本計畫對於不同頻率海床面深度探測研究之可行性範圍 2. 定義出本計畫對於不同頻率海床下土層檢測研究之可行性範圍
多頻率海床聲學探測實海域實驗	1. 建置完成多頻率海床聲學探測系統 2. 完成六組實海域探測實驗 3. 完成多頻率海床面地形探測技術之實驗驗證 4. 完成多頻率海床下土層檢測技術之實驗驗證
多頻率海床聲學探測實驗室實驗	1. 完成海床表層土層參數聲學反算之強健度驗證 2. 完成兩種砂及泥兩種不同材質土層於受擾動前後之聲學探測
土層浚挖前後聲納測量標準(概念)研擬	完成土層浚挖前後聲納測量概念整理及施作流程建議
研提離岸風機場址土層穩定性檢監測技術手冊	完成土層穩定性檢監測技術之概念原型手冊

5.2 土層浚挖前後聲納測量標準(概念)研擬

1. 研擬目標

- (1) 本聲納測量標準(概念)研擬之目標為獲得高準確度的水深測量結果，提供給土層浚挖前後水深估算使用。
- (2) 本聲納測量標準(概念)研擬乃是基於本計畫之文獻蒐集彙整結

果、數值模擬結果、以及實海域實驗結果所得，由於各海域之海床與海域環境不同，因此此聲納測量標準(概念)需再進一步於欲測量之海域進行驗證及修正。

- (3) 本聲納測量標準(概念)研擬主要針對聲納之操作研擬相關標準，包含聲納頻率範圍、聲納訊號處理標準、以及與聲納訊號處理相關之量測設置等，在此不包含聲納系統之定位與測線規劃、交錯檢核線規劃等標準規劃。

2. 聲納標準定義

- (1) 本聲納測量標準(概念)中所指的聲納定義為水下主動聲學系統，此聲學系統須包含訊號控制模組、聲波發射換能器、聲波接收換能器、類比數位轉換模組、訊號處理及顯示模組等，且在固定的電力供給條件下，可發射出聲源強度穩定之聲波訊號，在同樣設定條件下，聲源強度變動需小於 $\pm 0.5\text{dB}$ 。
- (2) 聲納在進行探測過程中，聲波發射換能器拍發出之聲壓強度必須足以及在經過水層傳播衰減以及海床反射衰減後，使聲波接收換能器仍可接收到 $80\text{ dB (re } 1\mu\text{Pa)}$ 以上之均方根聲壓強度，以確保在後續訊號處理及水深判讀過程中有夠高的訊雜比，避免。在此定義聲納發射出來的均方根聲壓強度為 SL ，假設聲納系統距離海床 r 公尺，海床反射吸收係數為 R_b ，則 SL 須滿足以下條件

$$SL \geq 20\log_{10} r - 20\log_{10} R_b + 80 \dots\dots\dots(5.1)$$

- (3) 聲納之訊號設計與訊號處理模組需可達到高於 $1.0000\text{e-}05$ 秒之時間解析度，亦即須可清楚分離出相距 $1.0000\text{e-}05$ 秒以下之不同回波訊號，如此可達到 1.5 公分之空間解析度。
- (4) 聲納之操作頻率範圍必須包含三個頻段，分別為 1) $120\text{-}250\text{kHz}$ 、

2)33-38kHz、以及 3)10-25kHz，此三頻段分別用以探測浮泥層上緣水深、浮泥層中水深、以及實體泥層水深。

3. 水深標準定義

本聲納測量標準(概念)中所牽涉之水深包含下列幾項

- (1) 浮泥層上緣水深：指海床上方浮泥層上緣之水深，通常指密度達到 1060 kg/m^3 之深度^[91]。
- (2) 浮泥層中水深：安全航行水深與實體泥層水深間之水深，通常為雙頻率測深聲納系統中以低頻頻段(33-38kHz)探測得之水深。
- (3) 安全航行水深：指海床上方浮泥層之密度與黏性足以使船隻航行通過且不對船體造成損害之深度，通常定義為密度達到 1200 kg/m^3 之深度^[92]。
- (4) 實體泥層水深：指海床附近統體密度達到 1500 kg/m^3 處之水深^[93]，此水深代表浮泥層的結束，結構緊密之實體沉積層的開始。

4. 聲納系統校正

- (1) 聲納系統在進行水深量測前須先進行系統校正並提出校正報告。
- (2) 校正時需於海床表層沉積物材質為中砂至粗砂(佔 90% 以上)、水深 20-30 公尺間之平坦海床海域進行系統測試
- (3) 測試前三天及測試過程均無外力導致海水混濁或海床表層沉積物劇烈攪動。
- (4) 無論是定點式測試或是拖曳測線式測試，均須重複執行，定點式測試需獲得 20 筆以上之重複量測資料，拖曳測線式測試則需獲得 5 趟重複的量測資料。
- (5) 以重錘式繩索測量法量測實際水深作為參考。

- (6) 測試結果須符合以下三項標準
- (7) 120kHz-250kHz 頻段之探測深度與 33-38kHz 之探測結果平均差異須小於 8 公分，且 33-38kHz 之探測結果不小於 120kHz-250kHz 之探測結果。
- (8) 10-25kHz 頻段之探測深度與 33-38kHz 之探測結果平均差異須小於 5 公分，且 10-25kHz 之探測結果不小於 33-38kHz 之探測結果。
- (9) 10-25kHz 頻段內各頻率之探測結果差異需小於 3 公分。

5. 土層浚挖前後聲納測量標準

- (1) 下列土層浚挖前後聲納測量實施過程均需全程記錄聲納系統之晃動與傾角資料，並依此修正聲納量測資料。
- (2) 以下所提聲納測量實施過程中需每隔三小時量測海水聲速剖面，並以此聲速時測值修正聲納量測資料。
- (3) 以下所列聲納測量標準(概念)適用於單音束及多音束測深聲納系統。
- (4) 以下所列聲納測量均需以經校正測試通過之聲納系統進行。
- (5) 土層浚挖前針對規劃浚挖之範圍進行定期大範圍聲納量測，量測須包含 1)120-250kHz、2)33-38kHz、以及 3)10-25kHz 三個頻段範圍內之資料，並進行晃動修正、傾角修正、以及聲速修正。
- (6) 以三個頻段各自之探測結果計算出浮泥層上緣水深等深線分佈、浮泥層中水深等深線分佈、以及實體泥層水深等深線分佈，藉此掌握浚挖前之實體泥層深度分佈以及浮泥層厚度分佈情形。
- (7) 土層浚挖後由於土層被翻攪增加浮泥層厚度及海床上方之懸浮粒子濃度，建議土層浚挖後於浚挖範圍進行三次水深量測，分

別間隔 24 小時，同樣進行 1)120-250kHz、2)33-38kHz、以及 3)10-25kHz 三個頻段範圍內之資料，並進行晃動修正、傾角修正、以及聲速修正。

- (8) 以三個頻段各自之探測結果計算出浚挖後浮泥層上緣水深等深線分佈、浮泥層中水深等深線分佈、以及實體泥層水深等深線分佈，並觀察三次探測之水深變化，以掌握浚挖後之實體泥層水深分佈以及浮泥層厚度分佈情形。
- (9) 若浮泥層厚度趨於穩定，亦即三頻段各自之探測結果趨於穩定，則此實體泥層水深即可視為是浚挖後之水深。

6. 備註

- (1) 由於各港口之海床表層沉積物種類不同，粒徑亦不同，因此對於各頻率聲波之反應亦有差異。本計畫在此提出之三個主要頻段涵蓋可能之反應頻段範圍，若要縮小各頻段之頻率範圍並且獲得最佳探測頻率，則需針對各港口之沉積物特性與浮泥層特性進行研究。
- (2) 一般對於安全航行水深之定義為密度約 1200 kg/m^3 之深度，此深度之主要反射聲波頻率亦隨各港口而異，需於各港口進一步量測探討以訂定適當之探測聲波頻率。

5.3 土層穩定性檢監測技術（概念及原型）研發與測試

本節將整合本計畫對於海床下土層穩定性研究之文獻蒐集結果、數值模擬結果、以及實驗資料分析結果，討論土層穩定性檢監測技術(概念及原型)之研發，本計畫對於概念及原形之研發不侷限於離岸風機場域之土層穩定性，而是針對淺水海域之海床表層土層之探測需要，討論通用之土層特性聲學檢監測技術。

首先，如本報告第二章之文獻回顧所述，無論是砂質、泥質、或黏土組成之海床土層，當受外力作用而產生結構不穩定時，這個不穩

定將表現在土層層次介面走勢、統體密度、孔隙率等物理參數上，以及剪應模數、楊式模數等力學參數上。而隨著海床聲學技術之發展，多孔彈性海床地音模式越發成熟，上述物理參數均可直接連結到聲波之傳播特性上，也就是可透過聲波受海床作用後之特性來回估海床物理參數值。

在這當中連結海床物理參數與聲波傳播特性的關鍵角色就是一個準確有效的海床地音模式，如同第 2.3 節所述，目前被公認最準確的地音模式為多孔彈性底床地音模式(Biot Model)，以及其流體近似化所得到的有效密度模式(EDF Model)，海床物理參數為 Biot Model 或 EDF Model 之輸入，而聲學反射特性則為這兩模式輸出。基於此概念，本計畫可運用聲學反射特性與海床地音模式進行海床物理參數之反算。

無論是 Biot Model 或 EDF Model，均需要多項海床物理參數及力學參數作為輸入，因此若欲以單一聲學反射值來反算海床物理參數將遭遇較大的阻礙。在輸入參數上，Biot Model 的需要 13 個輸入參數，EDF Model 則需要 8 個輸入參數，圖 5.1 為 EDF Model 之輸入與輸出架構，在輸入這 8 個底床物理及力學參數後，透過多孔彈性底床地音波動方程式之計算，即可獲得等效密度(Effect Density)、等效聲速(Effective Sound Speed)、以及吸收係數(Attenuation)等三個輸出參數，而此三參數則代表了聲學反射特性。

為了解上述反算之可行性以及發展適切之反算技術，本計畫先使用聲學模擬的方式來了解海床地音模式之運用特性，如本報告第 3.3 節。而由此模擬工作，本計畫觀察到可透過結合多頻率之聲學反射特性來進行反算，因此若能夠整合多頻率之聲學反射量測結果，以及圖 5.2 中的反算流程，即可進行海床物理參數反算，也就可以了解海床下土層之結構特性以及是否產生變動。上述海床物理及力學參數之反算過程可表達如圖 5.3，亦即此反算技術是以多孔彈性海床地音模式為核心，以多頻率聲學反射量測值、估算各海床物理參數之反算模式、以及重新計算聲學反射特性之正向模式三者為遞迴處理項目，最終獲得收斂的海床物理參數值。

綜合上述研發背景，本計畫在以聲學方式檢測土層穩定性之技術開發上逐漸收斂為幾個明確的討論項目

1. 當海床土層性質不同時，是否的確可以清楚反應在聲學反射資料上？
2. 當同一地點之海床土層產生結構變化時，是否也能夠將此變化反應在聲學反射資料上？
3. 本計畫所發展之反算模式是否能從聲學反射資料正確估算海床物理參數？

若上述三個討論項目都能夠獲得正面結論，則本計畫所提出之土層穩定性聲學檢監測概念(原型)即有可參考價值。

輸入參數	多孔底床地音運算	輸出參數
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> 孔隙率	<input type="checkbox"/> 忽略底質剪力模數	<input type="checkbox"/> 等效密度
<input type="checkbox"/> 透水率	<input type="checkbox"/> 忽略底質體積模數	<input type="checkbox"/> 等效聲速
<input type="checkbox"/> 海水密度	<input type="checkbox"/> 以等效流體方式描述彈性體	<input type="checkbox"/> 吸收係數
<input type="checkbox"/> 顆粒密度		
<input type="checkbox"/> 海水體彈性模數		
<input type="checkbox"/> 顆粒體彈性模數		
<input type="checkbox"/> 海水黏性		
<input type="checkbox"/> 顆粒曲度		

圖 5.1 多孔彈性底床地音數值模式之發展介面圖

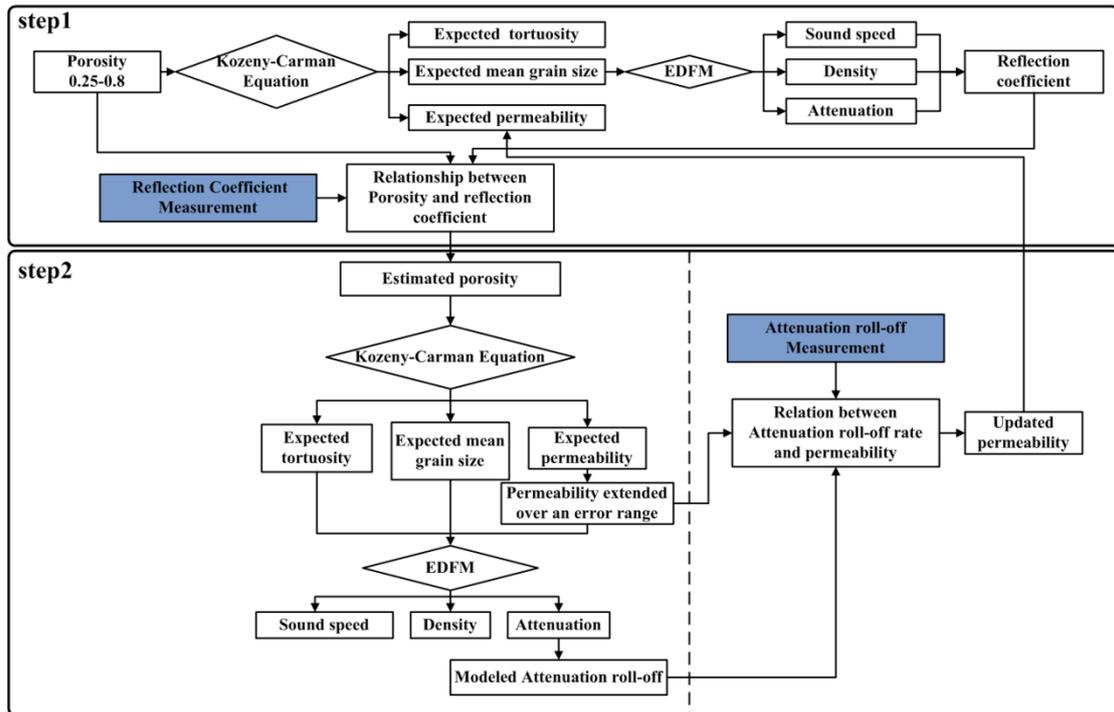


圖 5.2 海床物理參數反算流程圖

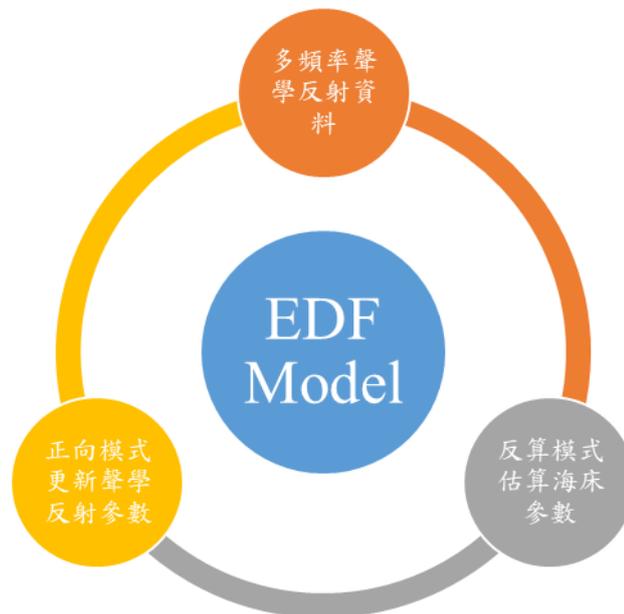


圖 5.3 海床物理及力學參數之反算過程示意圖

為回答上述三個討論項目，並驗證此反算模式之可行性，本計畫

進行了多組海上實驗以及實驗室實驗，如本報告 3.44 所述，從這些實驗資料分析結果中本計畫均獲得了相當肯定的結論，在此簡單整理如下

1. 首先，根據過去在泥質海床所作的聲納量測實驗資料，聲納探測資料可清楚呈現出海床面以及海床下次表層介面之深度與走勢，如圖 5.4 所示。圖 5.4 中以紫色線條所標示的為經海床與海水面反射之抵達回波，以回波抵達時間計算聲波之傳播距離，可發現此探測結果包含了海床面以下 37 公尺內之層次結構。在本計畫之各組海上實驗中，由於實驗區域之海床土層材質均以砂為主，砂的聲阻抗高因此阻擋了聲波能量繼續往海床傳遞，因此較難觀察到海床面下此表層之存在。由上可知，針對海床下土層受外力擾動而產生介面變形之現象，聲納可在軟質海床條件下觀察到海床面以及海床下之變形情形，也可在硬質海床條件下觀察到海床面之抬昇或下陷。

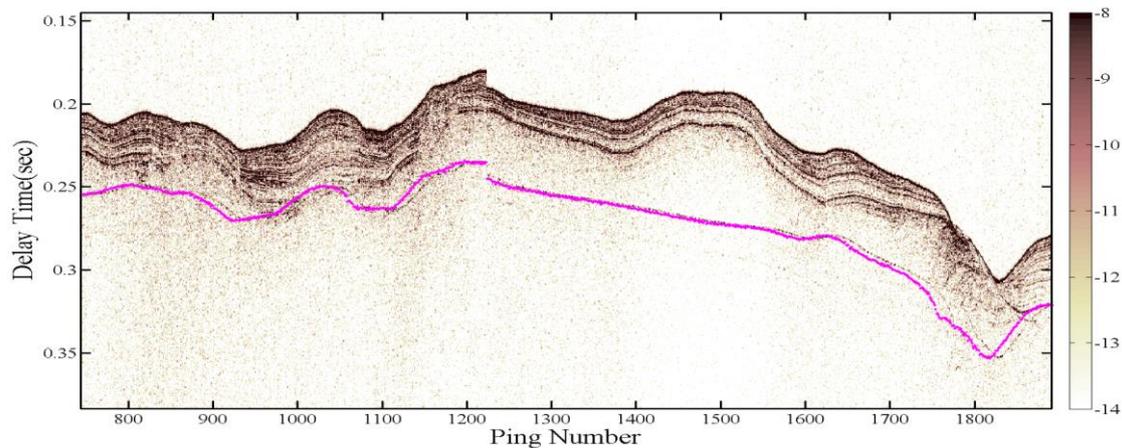


圖 5.4 過去在泥質海床所蒐集的聲納量測實驗資料

2. 透過實驗室實驗以及實海域實驗均可清楚觀察到，聲學反射資料可清楚反映出海床表層土層的不同，亦即聲學反射係數明顯受土層材質與結構不同影響。以實驗室實驗為例，在土層被擾動前，砂質土層之反射係數落在-9.7dB 左右，而泥質土層之反射係數則落在-13dB 左右，顯示聲波受海床土層作用明顯。

3. 接著，透過實驗室實驗可清楚觀察到，當土層被外力作用而產生不穩定時，此不穩定亦將反映在聲學反射資料上。再次以實驗室資料為例，當砂質土層受到外力擾動時，其反射係數由-9.7dB 降低為-10.3dB，而泥質土層受到外力擾動時，反射係數則由-13dB 降至約-14.5dB。由此可知，對於同一位置之海床土層，只要定期量測其聲學反射資料，即可掌握該海床土層特性，並可在土層穩定性產生變化時快速看到其變化。
4. 另一方面，透過實驗室實驗以及實海域實驗可知，聲學反射資料經本計畫之反算模式處理後，所得到的海床物理參數(包含孔隙率、統體密度、以及平均粒徑等)與岩心樣本分析結果相符，顯示本計畫反算模式與聲學量測之正確性。
5. 經本計畫之實海域實驗可發現，12kHz 以上聲波較容易受海水吸收影響，在海床下土層探測上較不適用，因此本計畫將多頻率海床聲學探測頻率範圍調整為 2-12kHz。
6. 根據實海域實驗之資料分析結果，整合多頻率聲學量測資料可提高海床表層物理參數之估算準確度，此外，藉由各頻率之海床反射響應，可清楚獲得海床土層之組成特性(參閱第 4.4 節)。

第六章 結論與建議

我國離岸風電時代即將蒞臨，西海岸淺海區域將迎接數百架離岸風機之架設，其設計、施工及營運維護等皆所費不貲，在離岸風機設立之後如何保持穩定營運是相當重要的課題，故維護管理計畫須確實擬定並執行；另外離岸風機受風、浪、海流、颱風及地震之影響，基礎是否因海床淘刷而導致穩定性不足，相關問題宜運用檢監測設備及技術以達到早期預警功能。因此，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。

本計畫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。

本計畫綜合上述做以下結論與建議：

6.1 結論

本計畫結論如下

1. 根據過去在泥質海床所作的聲納量測實驗資料，聲納探測資料可清楚呈現出海床面以及海床下次表層介面之深度與走勢，在本計畫之各組海上實驗中，由於實驗區域之海床土層材質均以砂為主，砂的聲阻抗高因此阻擋了聲波能量繼續往海床傳遞，因此較難觀察到海床面下此表層之存在。由上可知，針對海床下土層受外力擾動而產生介面變形之現象，聲納可在軟質海床條件下觀察到海床面以及海床下之變形情形，也可在硬質海床條件下觀察到海床面之抬昇或下陷。
2. 透過實驗室實驗以及實海域實驗均可清楚觀察到，聲學反射資料可

清楚反映出海床表層土層的不同，亦即聲學反射係數明顯受土層材質與結構不同影響。以實驗室實驗為例，在土層被擾動前，砂質土層之反射係數落在-9.7dB 左右，而泥質土層之反射係數則落在-13dB 左右，顯示聲波受海床土層作用明顯。

3. 透過實驗室實驗可清楚觀察到，當土層被外力作用而產生不穩定時，此不穩定亦將反映在聲學反射資料上。再次以實驗室資料為例，當砂質土層受到外力擾動時，其反射係數由-9.7dB 降低為-10.3dB，而泥質土層受到外力擾動時，反射係數則由-13dB 降至約-14.5dB。由此可知，對於同一位置之海床土層，只要定期量測其聲學反射資料，即可掌握該海床土層特性，並可在土層穩定性產生變化時快速看到其變化。
4. 透過實驗室實驗以及實海域實驗可知，聲學反射資料經本計畫之反算模式處理後，所得到的海床物理參數(包含孔隙率、統體密度、以及平均粒徑等)與岩心樣本分析結果相符，顯示本計畫反算模式與聲學量測之正確性。
5. 經實海域實驗可發現 12kHz 以上聲波較容易受海水吸收影響，在海床下土層探測上較不適用，因此本計畫將多頻率海床聲學探測頻率範圍調整為 2-12kHz。
6. 根據實海域實驗之資料分析結果，整合多頻率聲學量測資料可提高海床表層物理參數之估算準確度，此外，藉由各頻率之海床反射響應，可清楚獲得海床土層之組成特性。

6.2 建議

1. 由於各港口之海床表層沉積物種類不同，粒徑亦不同，因此對於各頻率聲波之反應亦有差異。本計畫在此提出之三個主要頻段涵蓋可能之反應頻段範圍，若要縮小各頻段之頻率範圍並且獲得最佳探測頻率，則需針對各港口之沉積物特性與浮泥層特性進行研究。

2. 一般對於安全航行水深之定義為密度約 1200 kg/m^3 之深度，此深度之主要反射聲波頻率亦隨各港口而異，需於各港口進一步量測探討以訂定適當之探測聲波頻率。
3. 當海床土層性質不同及海床土層產生結構變化時，由聲學反射資料反算模式正確估算海床物理參數，並驗證其不同，值得更進一步深入研究。

6.3 預期效益與應用情形

本計畫之預期效益及應用如下所述：

1. 本土化離岸風機基礎周圍土層穩定性檢監測技術研發，包括檢監測設備及系統。
2. 提出我國離岸風機基礎周圍土層穩定性檢監測技術手冊，建立本土化技術及人才。
3. 可提供交通部、經濟部及風電相關產業在離岸風電基礎維護管理及基礎穩定性檢監測執行策略之參考。

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.Sarah, V.E., Mieke, M., Piet, H., Michiel, S., Marc, S., “Offshore wind farms: sand as indispensable as wind” , 2014.
- 3.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.
- 4.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.
- 5.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.
- 6.Adhikari and Bhattacharya, “Vibrations of wind-turbines considering soil-structure interaction.” *Wind and Structures*, vol. 14, pp. 85-112, 2011.
- 7.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.
- 8.Dean, “Wind turbine mechanical vibrations: Potential environmental threat.” *Energy and Environment*. Vol. 19, pp. 303-307, 2008.
- 9.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。

- 10.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沖刷之試驗研究」，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。
- 11.<http://pansci.asia/archives/132708>, 2018.
- 12.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。
- 13.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。
- 14.邱俊翔、柯永彥，「飽和砂土層中模型樁振動台試驗」，國家地震工程研究中心簡訊，第 70 期，2009 年 6 月。
- 15.Michalis, P., Saafi, M., Judd, M.D., “Capacitive sensors for offshore scour monitoring.” Energy, vol. 166, Issue EN4, 2012.
- 16.“Scour Moniotring-Acoustic measurement of Sediment Erosion and Desposition”, Nortek AS, www.nortek-as.com, 2018.
- 17.Bhattacharya, S., Nikitas, N., Garnsey, J., Alexander, N.A., Cox, J., Wood, D.M., Nash, D.F.T., “Observed Dynamic Soil-Structure Interaction in scale testing of Offshore Wind Turbine Foundations.” Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 54, pp. 47-60, 2013
- 18.Devriendt, C., Magalhaes, F., Weijtjens, W., Sitter, G.D., Cunha, A. and Guillaume, P., “Structural health monitoring of offshore wind turbines using automated operational modal analysis.” Structural Health Monitoring, vol. 13, 2014.
- 19.Carroll, B., Cooper, B., Dewey, N., Whitehead, P., “A Further Review of Sediment Monitoring Data.” Commissioned by COWRIE Ltd (project reference ScourSed-09), 2010.

20. Versteijlen, W.G., Metrikine, A.V., Hoving, J.S., Smid, E., Vries, W.E., “Estimation of the Vibration Decrement of an Offshore Wind Turbine Support Structure Caused by its Interaction with Soil.” Knowledge, Technology, and Policy, 2011.
21. 臺灣電力股份有限公司, 「離岸海氣象觀測塔監測資料庫建置與應用模組開發 (I) (期末報告)」, 2017 年 3 月。
22. 鍾琦峯、傅喬、李坤彥、宋家驥、陳昭宏, 「水下非破壞性檢測離岸風力機樁柱基礎」, 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。
23. 江允智、方惠民、宋家驥、周逸儒、王星宇, 「海象觀測即時監測預警系統研發」, 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。
24. 蔡進發、蔡國忠、王昭男、趙修武、葉柏廷、楊其昌、詹勳智、陳泰瑜、湯耀期、秦正宇, 「預兆式離岸風機營運維修系統之開發」, 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。
25. 黃心豪、林輝政、林招松、薛文証、陳洵毅、李岳聯、鄭錦榮、陳凱琳、劉珊杉、邱培菡、吳柏均、林詩珊、陳昱儒、林彥廷、李忠縈、沈宗翰、林育全、陳長鴻, 「整合離岸風機材料與結構之安全性、腐蝕防治及損壞監測研究」, 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。
26. 劉百育、馬克、宋家驥、黃心豪, 「離岸風機水下樁柱之非破壞性檢測方法」, 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。
27. 經濟部, 「離岸風力發電第一期計畫海岸利用管理說明書」, 2016 年 6 月。
28. Magalen, Jones and Roberts, “Offshore Wind Guidance

Document:Oecanography and Sediment Stability Development of a conceptual Site Model.” SANDIA REPORT, pp. 43-56, 2014.

- 29.周承志、鄭孟寧，「英國離岸風電發展趨勢分析」，第 34 屆海洋工程研討會論文集，國立成功大學，2012 年 11 月。
- 30.財團法人臺灣經濟研究院，「離岸風力運維產業之介紹」，103 年 9 月。
- 31.魏豐義，離岸風電產業的發展與挑戰，中鋼公司簡報，2017。
- 32.方端言，「日本風力發電變遷與展望」，工業技術研究院綠能與環境研究所，2012.
- 33.Alberto Pliego Marugán, Fausto Pedro García Márquez and Jesús María Pinar Pérez, “Optimal Maintenance Management of Offshore Wind Farms.” Energies 2016, vol. 9, 46.
34. “Maintenance strategies for offshore wind farms.” Jan Erik Salomonsen, Trondheim 2015.
35. Ahmad Ghanbari, Muhydeen Oyelakin, “Management System for Operations and Maintenance in Offshore Wind Turbine Plant”, Halmstad University School of Business and Engineering Technical Project and Business Management, June 2011.
- 36.Van Bussel, G.J.W., Henderson, A.R., Morgan, C.A., Smith, B., Barthelmie, R., Argyriadis, K., Arena, A., Niklasson, G., and Peltola, E., “State of the art and technology trends for offshore wind energy.” Operation and Maintenance issues, 2001.
- 37.陳冠廷、郭玉樹、許泰文，「海床土壤緊密程度對波浪引致海床淘刷之影響」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩博士班碩士論文，2013 年 6 月。
- 38.周志傑、方永壽，「以實驗方法探討靜態及反復載重對砂土夯實之影響」，國立交通大學土木工程系所碩士論文，2017 年 8 月。

- 39.林慶祐、方永壽，「不同尺寸風機安裝船支撐基腳貫入浸水疏鬆砂土之承载力模型試驗」，國立交通大學土木工程系所碩士論文，2014年10月。
- 40.鍾繼賢、方永壽，「砂土密度對風機安裝船支撐基腳承载力之影響」，國立交通大學土木工程系所碩士論文，2015年11月。
- 41.Lee, K.F., Seong, W., “Wave reflection from porous ocean sediment with depth-dependent properties.” OCEANS 2003, San Diego, CA, USA, vol. 2, pp. 1076-1081, 2003.
- 42.Han, X., Fang, H., He, G., and Reible, D., “Effects of roughness and permeability on solute transfer at sediment water interface.” Water Research, vol. 129, pp. 39-50, 2018.
- 43.LeBlanc, L.R., Schock, S.G., DeBruin, D.L., Jenkins, M., Munro, L., “High-resolution sonar volume scattering measurements in marine sediments.” J. Acoust. Soc. Amer, vol. 97, pp. 2979-2986, 1995.
- 44.Holland, C.W., Dettmer, J., Dosso, E., “Remote sensing of sediment density and velocity gradients in the transition layer.” J. Acoust. Soc. Amer, vol. 118, pp. 163-177, 2005.
- 45.Masao Kimura and Takuya Tsurumi, “Acoustic reflection from transition layer of surficial marine sediment.” Acoust. Sci. & Tech., vol. 25, pp. 188-195, 2004.
- 46.DemcoNV
http://users.telenet.be/demco1/English/rheocable_english.html, 2018.
- 47.Buchanan, L.A., “Using a dual frequency echo sounder for the determination of suspended sediment in the water column.” Odom Hydrographic Systems, Inc, USA.,
- 48.Nasner, H., “Maintenance work in harbours with fluid-mud.” Third Chinese-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering, 2006.
- 49.Fontein, W., Byrd, R.W., “The nautical depth approach, a review for implementation.” Wodcon XVIII Annual Dredging Seminar, Florida,

USA, MAY 27-JUNE 1, 2007.

50. Marc, D., Peteralv, B., Jason, E., “The Rheocable Method: Determining Nautical Depth in the Presence of Fluid Mud.” T.H.V. Nautic, 2017.
51. Pieter, J.D.B., Coen, J.W., “Provide end users with the most accurate nautical depth measurement by using the combination of echo sounders and density measurement equipment.” HYDRO 2016, Rostock-Warnemünde, Germany, 2016.
52. 交通部運輸研究所, 「港灣構造物功能性設計分析方法之研究」, 2004年。
53. 蔡文富、蕭松山、薛憲文, 「港灣浚渫測量範例探討」, 第27屆海洋工程研討會論文集, 2005年。
54. 交通部運輸研究所, 「淺水域多音束量側水深技術研究 1-4」, 2004年。
55. 薛憲文、史天元、徐佳筠, 「水域測深方法暨原理探討」, 航測及遙測學刊, 第十六卷, 第3期, 第203-217頁, 2014年8月。
56. Lu, B., and Liang, Y., “Statistical correlation of physical parameters with sound velocity in marine sediments of South and East China Sea.” Science in China, B vol. 38, pp. 613–618, 1995.
57. Gaiser, J.E., “Multicomponent Vp/Vs correlation analysis.” Geophysics, vol. 61, pp. 1137–1149, 1996.
58. Ayres, A., and Theilen, F., “Relationship between P- and S-wave velocities and geological properties of near-surface sediments of the continental slope of the Barents Sea,” Geophysical Prospecting, vol. 47, pp. 431–441, 1999.
59. Versteijlen, W.G., Dalen, K.N.V., Metrikine, A.V., and Hamre, L., “Assessing the small-strain soil stiffness for offshore wind turbines based on in situ seismic measurements.” Journal of Physics: Conference Series, vol. 524, 2014.

60. Kim, D.S., and Park, H.C., "Evaluation of Ground Densification Using SASW and Resonant Column Tests." *Can. Geotech. J.*, vol. 36, pp. 291–299, 1999.
61. Lin, C.P., Chang, C.C., and Chang, T.S., "The use of MASW method in the assessment of soil liquefaction potential." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 24, pp. 689–698, 2004.
62. Fratta, D., Alshibli, K., Tanner, W., and Roussel, L., "Combined TDR and P-wave velocity measurements for the determination of in situ soil density-experimental study." *Geotechnical Testing Journal*, vol. 28, pp. 553–563, 2005.
63. David, W.C., "Some Comments on the Signal Processing Used By Chirp Subbottom Profilers." Monterey Bay Aquarium Research Institute, 2010.
64. Damuth, J.E., "Use of high-frequency (3.5-12 kHz) echograms in the study of near-bottom sedimentation processes in the deep-sea - a review." *Marine Geology*, vol. 38, 1-3, pp. 51-75, 1980.
65. Damuth, J.E., "Quaternary sedimentation processes in the South China Basin as revealed by echo-character mapping and piston-core studies." *Amer. Geophys. Union Geophysical Monograph*, vol. 23, pp. 105-126, 1980.
66. Schock, S.G., LeBlanc, L.R., and Mayer, L.A., "Chirp sub-bottom profiler for quantitative sediment analysis." *Geophysics*, vol. 54 (4), pp. 445-450, 1989.
67. Schock, S.G., "Remote estimates of physical and acoustic sediment properties in the South China Sea using chirp sonar data and the biot model." *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 29, pp. 1218-1230, 2004.
68. Chiu, Y.S., Chang, A., Lin, Y.T., and Liu, C.S., "Estimating geoacoustic properties of surficial sediments in the North Mien-Hua Canyon region with a chirp sonar profiler." *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 40, pp. 222-236, 2015.
69. Mosher, D.C., Simpkin, P., "Status and trends of marine high-resolution

- seismic reflection profiling: data acquisition.” *Geoscience Canada*, vol. 26, pp. 174–188, 1999.
- 70.邱永盛、陳琪芳、陳思宇、范盛詮，「地質聲學探測系統開發研究」，第二十六屆臺灣聲學學會學術研討會，2013。
- 71.Hamilton, E.L., “Geoacoustic modeling of the sea floor.” *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 68, pp. 1313–1340, 1980.
- 72.Buckingham, M.J., “Wave propagation, stress relaxation and grain-to-grain shearing in saturated, unconsolidated marine sediments.” *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 108, pp. 2796–2815, 2000.
- 73.Biot, M.A., “Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media.” *J. Appl. Phys.*, vol. 33, pp. 1482–1498, 1962.
- 74.Holland, C.W., and Brunson, B.A., “The Biot-Stoll sediment model: an experimental assessment.” *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 84, no. 4, pp. 1437–1531, 1988.
- 75.Williams, K.L., Jackson, D.R., Thorsos, E.I., Tang, D., and Schock, S.G., “Comparison of sound speed and attenuation measured in a sandy sediment to predictions based on the Biot theory of porous media.” *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 27, pp. 413–428, July 2002.
- 76.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.
- 77.Chotiros, N.P., “Biot model of sound propagation in water-saturated sediment.” *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 97, no. 1, pp. 199–214, 1995.
- 78.Lee, K., and Seong, W., “A simplified pseudo-fluid model derived from Biot theory through low grazing angle approximation.” *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 30, pp. 651–659, 2005.
- 79.Stoll, R.D., and Kan, T.K., “Reflection of acoustic waves at a water–sediment interface.” *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 70, no. 1, pp. 149–156, 1981.

- 80.Schock, S.G., “A method for estimating the physical and acoustic properties of the seabed using chirp sonar data.” *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 29, pp. 1200–1217, 2004.
- 81.Thorne, P.D., Hanes, D., “A review of acoustic measurement of small scale sediment processes.” *Continental Shelf Research*, vol.22, pp. 603–632, 2002.
- 82.Betteridge, K.F.E., Thorne, D., Cooke, R.D., “Calibrating multi-frequency acoustic backscatter systems for studying near-bed suspended sediment transport processes.” *Continental Shelf Research*, vol. 28, pp. 227–235, 2008.
- 83.Mahafza, B.R., *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB-Chapter 7 Pulse Compression*. ISBN 1-58488-182-8, CHAPMAN & HALL/CRC, 2000.
- 84.Wentworth, C.K., “A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments.” *The Journal of Geology*, vol. 30, pp. 377–392, 1992.
- 85.Hamilton, E.L., “Geoacoustic modeling of the sea floor.” *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 68, pp. 1313–1340, 1980.
- 86.Chotiros, N.P., “Biot model of sound propagation in water-saturated sediment.” *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 97, pp. 199–214, 1995.
- 87.Allard, J.F., Champoux, Y., and Depollier, C., “Modelization of layered sound absorbing materials with transfer matrices.” *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 82, pp. 1792-1796, 1987.
- 88.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.
- 89.Chiu, Y.S., Chang, A., Lin, Y.T., and Liu, C.S., “Estimating geoacoustic properties of surficial sediments in the North Mien-Hua Canyon region with a chirp sonar profiler.” *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 40, pp. 222-236, 2014.

90. Chiu, Y.S., and Chang, A., "Normal incidence measurement in a subaqueous sand dune field in the South China Sea." *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 135, EL376-EL382, 2014.
91. Fluid mud density measurement saves harbour dredging costs, *Subsea & Seismic- Hydrographic survey*, Engineer Live Magazine, 2013.
92. 馮俊，浮泥發育時雙頻回聲測深誤差及其對適航水深監測的影響，*水運工程期刊*，第8期，2011年8月。
93. Ashish J. Mehta, M.ASCE; Farzin Samsami; Yogesh P. Khare; and Cihan Sahin, "Fluid Mud Properties in Nautical Depth Estimation," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 140, 2014.

附錄一

期中報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫(具委託性質)

期中報告審查意見處理情形表

計畫名稱：離岸風機基礎穩定性檢監測技術研發

合作研究單位：國立中山大學

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>一、林倣寬委員</p> <p>1. 風力機機組自然振動頻率通常介於0.30~0.36附近，與報告所述 p.12 第二段有所不同，請澄清。</p> <p>2. 淘刷保護工通常以淘刷深度為準，並以砂包或地工袋為優，本研究在此方面之應用請再做說明。</p> <p>3. Biot 模式在本研究之應用情形請再多補充。</p>	<p>1. 謝謝委員指正。期中報告內之敘述已修正，請參考期中報告第 2.1 節(第 7 頁)。</p> <p>2. 本研究所發展技術主要用以檢監測掏刷情形及深度，並將量測資料提供給相關單位，由相關單位進行施工措施判定。因此本技術可應用於尚未進行掏刷保護工程之各式海上觀測樁或其他基樁之周圍土層監測。此部分說明已加入期中報告第 1.2 節-計畫目標中(第 3-4 頁)。</p> <p>3. Biot 模式在本研究中是用來進行海床物理參數反算之主要模式，透過 Biot 模式可連結海床物理參數和聲學參數，因此本</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>

<p>4. 聲波正向反射係數學理中如何將頻率提高所衰減的問題進行處理，請再說明。</p>	<p>計畫以量測得之聲學參數，配合相關經驗公式，可以遞迴分析出海床物理參數。此部分說明已加入期中報告第 3.3 節-<u>多頻率地音反算模式建置與模擬分析</u>中(第 63 頁)。</p> <p>4. 本計畫在聲波正向反射係數計算中，針對聲波在海水及海床中的傳播均考量其吸收衰減。此部分說明已加入期中報告第 3.3 節-<u>多頻率地音反算模式建置與模擬分析</u>中(第 73-74 頁)。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>5. 實驗水槽控制型環境模型，砂層係用貫落法，但二層砂層間之密度、孔隙如何量測，請說明。</p>	<p>5. 實際密度採用在不同深度置入的密度盒(已知空盒重量與容積)進行量測。此部分說明已加入期中報告第 4.3 節-<u>實驗水槽控制型環境建置</u>中(第 113 頁)。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>6. 測深的規範中對校正有所規定，除繩索外，亦有用到反射板，建議可利用此方法執行校正。</p>	<p>6. 謝謝委員建議與提醒，本計畫將在測深實驗中加入重錘繩索之量測，以作為參考水深使用。此部分說明已加入期中報告第 3.2 節以及第 4.2 節中(第 60-61、85 頁)。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>7. 研究的頻率與 3.5kHz 之比較為何？與參考文獻作比較。</p>	<p>7. 本計畫在進行海床下土層探測時規劃使用 2-20kHz 間掃頻訊號，其中涵蓋了市售系統常用的 3.5kHz。參考文獻中可見到海床剖面儀之掃頻訊號亦大多在 1-20kHz 範圍內，為表層海床探</p>	<p>同意辦理</p>

<p>二、林佑任委員</p> <p>1. 海床底質為連續漸變變化性，因此泥水層、漸變層及穩定硬層之邊界，建議能針對航行需要之浚挖需求有一可為標準之定義。</p> <p>2. 港口航道及船席浚挖的需求，是為滿足船舶航行安全，避免船坐底觸底擱淺，航商為節省成本都會盡量爭取港口同意更大吃水更深的船能進港，而為能讓更大的船能安全進港，可能以非滿載進港或先靠卸部份在其他更深港口的方式或候潮水方式，但是針對臺灣西部沉積形浮泥泥質的海床如何利用其特性厚度來增加進港實際的安</p>	<p>測之市用頻段。此部分說明已加入期中報告第 3.4 節-<u>多頻率海床下土層分佈調查之可行性分析</u>中(第 79 頁)。</p> <p>1. 根據文獻資料，國際上針對航行安全需求訂定了 Nautical Depth 此安全航行深度，港口是否需要進行浚挖是依此深度為準。而國際上通常將 Nautical Depth 定義為浮泥層中統體密度為 1200kg/m³ 之等密度深度。此部分說明已加入期中報告第 2.2 節-<u>海床面地形變動量測聲納技術相關文獻</u>中(第 38 頁)。</p> <p>2. 承續上題回應，國際上各大港口對於 Nautical Depth 之維持有高度重視，因此均定期進行 Nautical Profile 之量測，亦即量測整個港口範圍之 1200kg/m³ 之等密度深度面，若有淺於預定 Nautical Depth 之區域，則需進行浚挖。而由於各港口海域環境不同，在此定期監測計畫以先，需先整合密度剖面量測、黏度剖面量測、以及寬頻聲學量測等方式，了解各港口之海水與浮泥層特性，以訂定適合之 Nautical Depth 標準，以及相對應之聲學探測措施。此部分說明已補充入</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>
---	--	-------------------------

<p>全餘裕的瞭解掌握也很重要，因此有必要實際掌握泥層厚度，還有他的探測方式及相關參數，並且也要參考國外類似海床的港口的船舶進港情形，建議要多蒐集這些資料還有國外港口測量的方式實際案例及比較先進的做法及測量方式案例來參考比較，再進一步研究建立國內測量的方式技術及施工規範。</p>	<p>期中報告第 2.2 節-<u>海床面地形變動量測聲納技術相關文獻</u>中(第 38 頁)。</p>	
<p>3. 雖然在實驗室採二種不同砂質及緊密程度性質的試體去做多頻試驗，但實際情形態樣及土層種類繁多，宜利用實驗室條件控制較單純環境盡量能涵蓋各種情形。</p>	<p>3. 謝謝委員建議。如委員所說，海床實際情形態樣及土層種類繁多，無法窮盡，本研究在今年計畫中主要著重在技術之發展以及方法論之建立，後續再針對特定海域及海床條件進行本研究成果之適用性測試。此部分說明已補充入期中報告第 1.2 節-<u>計畫目標</u>中(第 3-4 頁)。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>4. 由於海床表土層容易擾動取樣相當不易，現場多頻實測時應配合水下確認海床實際情形，建議搭配潛水作業實際觀察土層分布，並且潛水觀察同時再搭配實際採土樣</p>	<p>4. 謝謝委員建議與提醒。本研究進行現場多頻實測時，皆利用探測船探採當地土樣(岩心)，並利用後續岩心感測進行比對，以達成聲學量測與實際樣本精準度比較，此為本研究案基本流程。此部分說明已補充入期中報告第 3.4 節以及第 4.2 節中(第 78、85 頁)</p>	<p>同意辦理</p>

<p>去分析，否則聲納探測間接的推估要研究海床的一些力學物理性質，若無實際土層觀察很容易與實際有出入。</p>	<p>。</p>	
<p>5. 緊實度等物理性質最好能與 SPT-N 值建立關係，以更容易瞭解其土壤力學性質及有利於應用。</p>	<p>5. 謝謝委員建議。目前現地 SPT-N 值多屬海事工程公司商業機密資料，取得並不容易。本研究對於土壤力學性質的應用分析採用現地岩心採樣分析及土壤力學實驗，並於實驗室內可控制環境給定特定性質的土壤進行聲學實驗，可以清清楚楚了解聲學與土壤參數之關係。此部分說明已補充入期中報告第 3.4 節-<u>多頻率海床下土層分佈調查之可行性分析</u>中(第 78 頁)。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>6. 本研究水深測量發展的實際推廣應用性如何，以多頻的儀器在實務應用推廣時，可以使用目前一般使用的測量儀器就可以做到或市面已有，還是要另使用新開發測量儀器?</p>	<p>6. 根據國內外文獻，一般實務應用為使用單頻(粗估底床深度，38kHz)與雙頻(粗估底床深度與泥水混合層上層邊界，38 與 128 kHz)兩種方式，但就港灣浚挖問題，對於船隻航行問題需要考慮的是介於實際底床與泥水層上邊界中的航行深度(Nautical Depth)。目前該深度由密度與黏性來定義，但就聲學量測方式而言須將頻率提至</p>	<p>同意辦理</p>

<p>7. 頻率等標準採用的一致性在整個測量的過程包含設計以及施工浚挖前後的測量很重要，不允許在測量過程中調整或同一個測量地點不同時期的測量去調整更動頻率，會影響測量的實際結果，因此採用多頻的方式也應該訂出一個標準，不能有測量過程還在調整或需要調整的情形。</p> <p>8. 建議也可發展一些配套的實務又簡單可行校驗檢視方式互相呼應，例如搭配錘測校驗，測錘的形狀、重量、測繩及測法。</p>	<p>38 與 128k 之間，為多頻聲學系統，本研究案有能力進行該系統開發，期待應用在未來港灣實務。</p> <p>7. 謝謝委員建議。本研究案並非更動既有一般施工常用的測量頻率，但透過本案想了解不同頻率的聲波量測是否可以對於施工設計與量測過程得到更多、更有用的施工資訊，如浮泥層分層結構與底床分層結構等。本計畫之目標為深入了解海床面反射特性與海床下土層探測之頻率相依性，由於不同海域之海水與環境特性皆不同，未來此研究成果即可作為立基，有助於針對不同港口、或不同應用目標訂定適用之探測標準。此部分說明已補充入期中報告第 1.2 節-<u>計畫目標</u>中(第 4 頁)。</p> <p>8. 謝謝委員建議。水深校驗檢視對於本計畫之多頻率水深探測結果之比對來說的確很重要，本研究現階段礙於有限的研究期程，將採用一般垂測校驗方式，未來若有延續研究之機會，亦可考量進行水深校驗檢視方式之比較與研究。</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>
--	--	-------------------------

<p>9. 本計畫除了要測海床下之地層外，水深測量標準建立也是重點之一，但計畫所使用的測深儀器頻率均採用穿透性強的低頻均於 50kHz 內，與實務上水深測量一般單音束 200kHz 以上及多音束 125kHz 以上有所不同。</p>	<p>9. 謝謝委員建議。本研究案並無捨棄一般測深聲納常使用的頻率，反倒是在這些常用頻率外增加更多種頻率的使用性，對於水深測量提供更多的資訊，以完整了解海床附近組成對於各頻段海床探測準確度之影響。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>10. 建議一併探討水深測量奇異點產生原因及排除方式。</p>	<p>10. 謝謝委員建議。水深測量奇異點產生的原因便是聲納頻率與當地泥水層濃度之間的聲波散射問題，正是本研究案的重點。排除方式便是利用不同種頻率以定出所需深度，如 nautical depth 或真實深度或特定泥水深度等。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>三、郭玉樹委員</p> <p>1. 本研究報告文獻格式混亂，煩請統一。</p> <p>2. 文獻 18 與 20 重複，請調整。</p>	<p>1. 謝謝委員指正，本計畫已詳細檢查期中報告之參考文獻格式並進行修正(第 118-127 頁)。</p> <p>2. 謝謝委員指正，期中報告之參考文獻已進行修正(第 118-127 頁)。</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>

<p>3. 本報告使用大量符號，建議增加符號表。</p>	<p>3. 謝謝委員指正，期中報告中已新增符號表來彙整所使用的符號。新增符號表請參閱期中報告第 XI-XIII 頁。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>4. 建議將「掬」刷更改為「淘」刷。</p>	<p>4. 謝謝委員指正，期中報告已進行修正。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>5. 報告 p.12 倒數第 4 行指離岸風機樁基礎鄰近土壤於樁土界面於基礎受反覆作用力時將產生間隙，此一現象主要發生於粘性土壤，此與我國離風場環境條件不同，宜審慎引用。</p>	<p>5. 謝謝委員指正與建議。由於本計畫於技術開發之初希望較廣泛的了解國內外離岸風機基樁附近土層可能面對的挑戰，因此雖然與我國環境條件不同，但仍將其列為參考文獻之一。本計畫已於期中報告中補充說明此現象在我國離岸風場較不易發生，請參閱期中報告第 2.1.1 節-<u>風機振動與土壤穩定性之影響</u>(第 8 頁)。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>6. 本計畫目標為監測大口徑單樁基礎防淘刷保護工失效行為或套管基礎淘刷深度，還是離岸風場地形變遷，宜釐清工程目標。</p>	<p>6. 謝謝委員建議與提醒。本計畫主要開發技術雛形，著力的點在與水深量測、土壤參數與聲學的關係，計畫目標為 1)發展多頻率海床面地形探測技術，以及 2)發展寬頻海床下土層結構與參數特性估算技術，此兩技術之應用範圍廣泛，不侷限於特定用途，只要有海床面地形或是海床表層沉積物(30 公尺以內)之探測需求，均可進一步</p>	<p>同意辦理</p>

<p>7. 一般離岸風機樁基礎設計埋置樁長多超過臨界樁長，同時多已將基礎淘刷及土壤液化納入設計考量，即使基樁受反覆作用力擾動樁週土壤，亦不可影響其承載行為及服務性能，因此針對本計畫第 1 個工作項目應用目標(p.8)宜審慎檢討。</p> <p>8. 報告 p.16 及 p.17 所示之維護管理架構較類似環境影響評估調查內容，是否適合應用於離岸風機維運，煩請確認。</p> <p>9. 報告 p.37 說明海床底質聲學調查需給定海床土壤孔隙率，煩請說明如何給定現地土壤之孔隙率。</p>	<p>發展應用。此部分說明已補充入期中報告第 1.2 節-計畫目標中(第 3-4 頁)。</p> <p>7. 謝謝委員建議與提醒。相信目前施工工法已相當安全，但本案研究目標為利用聲學技術快速地了解海洋土壤參數的變動，期望未來可用其他需求的監測，並非僅針對離岸風機樁。</p> <p>8. 謝謝委員建議與提醒。期中報告已針對離岸風機維管計畫文獻蒐集部分進行修正，請參考期中報告第 2.1.5 節-維管計畫(第 22-30 頁)。</p> <p>9. 根據聲學研究，海床表層沉積物孔隙率與海床正向聲學反射係數有高度相關，因此本計畫對於大範圍之孔隙率初始值乃是以聲學反射係數進行估算，後續透過遞迴方式收斂出最中</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>
---	--	-------------------------------------

<p>10. 報告 p.51 表 4.2 所示採用之試驗土壤與目前離岸風場潛力場址特徵粒徑不符，宜採用粒徑更小之土壤試體進行試驗，且應說明控制土壤緊密程度之鋪設方法。</p> <p>11. 建議本計畫選定國內前期離岸風場調查取得之地形及地工資料比對(如淺層土壤震測、SPT-N、CPT.U 等)，以確認研究成果正確性。</p>	<p>孔隙率大小。為驗證估算結果，本計畫亦於實驗中採集岩心樣本並進行分析，以進行比對。本計畫已於期中報告第 3.3 節-<u>多頻率地反算模式建置與模擬分析</u>中修正說明(第 69 頁)。</p> <p>10. 本實驗購買之標準砂粒徑範圍涵蓋粗粉砂、極細砂、細砂、中砂、粗砂。由於基址附近可能有更細粒的底質，所以也將採集臺灣西岸更細粒之土壤試樣，依不同配比進行多組測試，過程中試樣之粒徑分佈由雷射粒徑分析儀檢測。以上補充說明及土壤鋪設方法說明均以補充入期中報告第 4.3 節-<u>實驗水槽控制型環境建置</u>(第 114-116 頁)中。</p> <p>11. 謝謝委員建議。目前現地 SPT-N、CPT.U 值多屬海事工程公司商業機密資料，取得並不容易。本研究目前確認研究成果正確性是利用現地岩心採樣分析及土壤力學實驗，並於實驗室內可控制環境給定特定性質的土壤進行聲學實驗，可以更清楚了解聲學與土壤參數之關係。此部分說明已補充入期中報告第 3.4 節-<u>多頻率海床下土層分佈調查之可行性分析</u>中(第 78 頁)。</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>
---	--	-------------------------

<p>四、簡連貴委員</p> <p>1. 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，提升海床下土層結構與參數之掌握度，具有創新與重要性；本研究嘗試應用海床下土層結構與參數之掌握度，尤其提供離岸風機基礎穩定分析，因係間接推估相關參數，受海域環境(波潮流)，與海床土壤及監測調查儀器性能與採用頻率有關與影響，有其挑戰性與難度，科學研究與施工或維運精度需求不一，建議應先考量基礎穩走分析之參數及離岸風機基礎運維需求與精度。另補充參考文獻具有參考價值，建議應有綜合評估。</p> <p>2. 請說明本研究如何整合多頻率聲學系統及其功能特性(如頻率範</p>	<p>1. 謝謝委員建議。本計畫已依委員建議，經彙整參考文獻、數值模擬結果、以及海床探測經驗後，於期中報告第3.2節及第3.4節分別針對多頻率海床面地形探測與多頻率海床下土層變動探測兩部分進行可行性綜合評估，並於此兩節內針對相關探測參數進行說明。</p> <p>2. 謝謝委員建議。本計畫在多頻率聲學探測上的整合分為硬體及軟體兩大部分，在硬體部分</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>
--	---	-------------------------

<p>圍(尤其低頻 1kHz、海床沉積穿越深度)? 與目前常採用地層剖面儀之差異分析，以利評估。</p>	<p>，本計畫分別在吊放式載台與拖曳式載台上整合自 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。其次在軟體上，本計畫之整合乃是指整合運用多頻率聲波之探測結果，來獲得較精細的海床探測結果。對於海床面地形探測而言，多頻率聲波探測可應用於估算 Nautical Depth、固體海床面、或其他浮泥層中等密度深度面；對於海床下土層探測而言，整合多頻率聲波之探測結果可提高海床表層沉積物之物理參數反算準確度。目前常採用之底層剖面儀頻率範圍大多在 1-20kHz，與本計畫在海床下土層探測使用之頻率範圍相近，但由於本計畫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計畫需求，因此本計畫需使用自行開發之儀器設備進行量測與研究。本說明已補充入期中報告第 1.2 節-計畫目標中(第 3-4 頁)。</p>	
<p>3. 本研究包括海床面地形探測準確度提升，及海床下土層結構與參數特性估算準確度提升，工作項目有八項，1.3 節執行進度</p>	<p>3. 謝謝委員建議。本計畫已於期中報告第 3.2 節與第 3.4 節中針對海床面地形探測準確度提升，及海床下土層結構與參數特性估算準確度提升兩大工作項目進行可行性評估，並於評估</p>	<p>同意辦理</p>

<p>規劃，大致符合需求。建議應明確說明探測準確度與土壤參數估算準確度提升之具體規劃(如配合離岸風機基礎穩定性檢監測所對應之土層結構與參數特性參數如土層表面分布、土壤孔隙及顆粒大小)及如何考量臺灣海域環境(颱風波浪、東北季風長浪)及海床土壤特性，應有說明，以彰顯在地化之特性。</p>	<p>中明確說明欲探討之參數、欲使用之頻率範圍、基於理論分析解析度大小、探測深度等項目，以定義本計畫於此計畫期限內之執行目標。本計畫規劃了實海域實驗，即希望能夠蒐集臺灣海域環境之實際資料，以因應臺灣海域環境發展與精進海床探測技術，此部分成果將於期末成果報告中彙整說明。</p>	
<p>4. 第二章文獻蒐集與彙整，應加強蒐集離岸風場風機完成後，有關離岸風機基礎穩定維運之檢監項目與方式，及相關研究，以做後續推動參考。</p>	<p>4. 謝謝委員建議與提醒，已加強國內外離岸風機基礎穩定的相關文獻。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>5. 維管計畫，除美國外應收集歐洲風場之案例研析，以利參考。</p>	<p>5. 謝謝委員建議與提醒，期中報告中已加入歐洲風場的案例研析。請參閱期中報告第 2.1.5 節-<u>維管計畫</u>(第 22-30 頁)。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>6. 第三章多頻率海床面地形變動量測及海床</p>	<p>6. 謝謝委員建議與提醒，原文是說明本研究所發展的技術已成</p>	<p>同意辦理</p>

<p>下土層分布調查之可行性分析，p.38，第一行"爾後於南海觀察到砂波環境對地因參數的影響，本研究將利用 EDFM 及量測正向反射係數的方法計算海床砂波環境底床聲學特性，並估算其誤差量。"因南海海域環境及海床土壤性質，與臺灣離岸風場環境與海床土壤地質不一樣，請補充說明在離岸風場場址之實際應用及作法如何？</p>	<p>功運用於臺灣東北海域以及南海海域，而本團隊也因執行科技部國防科技〔臺灣海域周邊底質探測與地音資料庫建立〕收集臺灣周邊海域資料。同樣的技術將運用至較淺海域，本計畫針對臺灣西部較淺海域之探測，將使用岩心採樣與分析結果來驗證聲學探測結果，並用以調校反算模式中之經驗公式與相關係數，以發展適用於臺灣離岸風場環境之反算模式。本說明已補充入期中報告第 3.3 節-<u>頻率地音反算模式建置與模擬分析</u>中(第 69 頁)。</p>	
<p>7. 本研究擬以反算表層沉積物之力學參數值，包括剪力模數、剪力波速、透水率、粒徑大小，以及對聲波傳播重要的聲速、密度、以及吸收係數等，並結合 Biot 與相關經驗公式進行剪力模數、剪力波速、透水率、粒徑大小反算，因聲波特性受到不同海域環境及海床介質影響大，是否適合於臺灣離岸風場海床土</p>	<p>7. 謝謝委員建議與提醒，本研究所有聲納遙測的參數將利用現場土壤調查成果(實際海域岩心採樣)比對與實驗室實驗進行驗證，除了驗證聲學探測結果外，也精進反算模式，提升反算模式在臺灣離岸風場環境之適用性。</p>	<p>同意辦理</p>

<p>壤特性應有現場土壤調查成果之驗證比對分析。</p> <p>8. 第四章多頻率海床探測試驗，規劃進行三階段測試試驗，第一階段為港口海域之定點測試實驗，第二階段離岸場域之測試實驗，第三階段為實驗水槽控制環境之探測試驗，一般測試都先規劃在實驗水槽控制環境試驗完成才進現場實驗，請說明本研究之考量因素？另第二階段測試建議利用離岸風場遴選、競價後之風場環境或測風塔鄰近海域作為測試較能反映離岸風場海域環境與海床地質特性，較有意義。</p> <p>9. 表 4-1 頻率與量測水深關係表，水深介於 8.875~7m 間，一般離岸風場廠址海域水深 -15m~50m 之間，後續如何應用？</p>	<p>8. 謝謝委員建議與提醒，一般測試都先規劃在實驗水槽控制環境試驗完成才進現場實驗，但因海洋研究船上有許多精密設備(如岩心採樣等)並非一般租賃漁船所有，而研究船統一由科技部海洋學門配額，無法控制日期，因此本研究案將先行出海量測、收集風場環境土壤與聲學資料，較精細部分的實驗如參數的調教於實驗內進行。此外，由於實驗室試驗環境之預備與建置需要較長之時間，因此本計畫在建置實驗室試驗環境之期間內，先行進行實海域量測，以因應計畫期限限制。</p> <p>9. 謝謝委員建議與提醒，原期中報告之表 4-1 為本計畫初步測試實驗之結果，主要在於表達在同一測站，水深量測結果隨聲波頻率改變，且可用於觀測聲波反射深度之頻率相依性。聲</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>
---	--	-------------------------

<p>10. p.50，實驗水槽控制型環境建置，請說明實驗環境為 5×5×2m 之方形水槽，實驗水槽模型大小為 1.75×1.45×1.5m，請說明如何準備不同特性海床土層？模擬海床土層厚度為何？是否能反映研究需求及模擬海域環境？及研究成果如何運用現場海域，請說明。</p>	<p>納探測深度與發射功率高度相關，探測深度加深僅需增加聲納發射功率即可，目前本研究所發展的聲納系統，調整功率後可涵蓋深度範圍於 5 米至 1 千 2 百米水深。</p> <p>10. 謝謝委員建議與提醒。本研究主要著重在技術之發展以及方法論之建立，以密度為海床土層之主要差異特性進行試體準備，考量邊界影響，選用適當頻段，單層土層採用 30 公分厚，可滿足本研究需求。由於採用砂性土壤作為試驗用土，因此主要以砂質海床為目前成果的主要對象，未來現場海用之應用僅需於海面進行聲納探測，即可將其結果透過本研究成果進行相關參數之量化。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>11. 建議日本研究應可收集目前離岸風場現場調查結果比較研析。</p>	<p>11. 本計畫已開始收集日本對於離岸風場之維管相關文獻，並補充於期中報告中(第26頁)。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>五、賴瑞應委員</p> <p>1. 本計畫很有挑戰性，肯定研究團隊勇於接受挑戰。</p>	<p>1. 謝謝委員肯定。</p>	<p>同意辦理</p>

<p>2. 有關本計畫後續工作項目包括「研提離岸風機場址土層穩定性檢監測技術手冊」，依規劃預定進度甘梯圖顯示僅需 0.5 個工作月，是否足夠，預期成果內容建議與主辦單位釐清。另外，建議研提過程可邀集海域測量相關業界來參與討論，以利未來之落實應用。</p>	<p>2. 謝謝委員建議，本研究團隊會進一步與主辦單位釐清技術手冊內容增減與撰寫所著重的部分，若有必要會提前工作月份開始撰寫。針對委員提醒第二點，計劃主辦單位也會積極邀集海域測量相關業界來參與討論，以利未來之落實應用。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>3. 第四章針對高雄港內之海床進行實測，但內容只顯示不同頻率之水深量測值，並未提到本計畫另一重點反算推估土壤參數，請說明。</p>	<p>3. 謝謝委員提醒與建議，本計畫另一重點反算推估土壤參數的資料將於 9 月份航次進行，屆時便會加入成果報告中。此外，期中報告內亦包含有海床下土層探測實驗之規劃，請參考期中報告第 4.2 節(第 85-111 頁)。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>4. 未來海域土壤的取樣，是否會擾動到土壤，如何避免請說明。</p>	<p>4. 謝謝委員提醒與建議。由於研究船岩心採樣管徑僅約 8 公分，對海床而言僅是一小點，對整體的影響極微。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>六、臺灣港務公司臺中分公司</p>		
<p>1. 本次實驗成果可了解土層結構深度，浮泥</p>	<p>1. 謝謝委員肯定本案的研究貢獻與應用建議。</p>	<p>同意辦理</p>

<p>影響船舶的範圍，不同水深、船型級距可接受浮泥影響範圍提供建議。</p> <p>2. 風機基礎分為 monopile、Jacket、Floating 等型式，未來監測技術發展之關連性？未來計畫結果係以何種基礎為主。</p>	<p>2. 謝謝委員提醒與建議。本案研究目標為利用聲學技術快速了解海洋土壤參數的變動，期望未來可用各型風機基礎環境的監測，並非僅針對單一型離岸風機樁。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>七、本所港研中心第一科謝明志科長</p> <p>1. 本計畫工作項目第一項「蒐集並探討國內外離岸風機基礎維管計畫、基礎周圍土層穩定性、基樁受振動後周圍土層緊密分佈、受擾動影響範圍及檢監測技術相關文獻」建議再補充完整。</p> <p>2. 本計畫工作項目第三項「提出利用不同頻率之聲納進行基礎周圍海床面地形變動測量、海床下土層分佈及受擾動或振動影響後土層分佈調查之可</p>	<p>1. 謝謝科長提醒與建議，已將科長建議相關文獻納入完整報告中。請參考期中報告第 2.1 節。</p> <p>2. 謝謝科長提醒與建議，已將可行性分析報告納入完整報告中。請參考期中報告第 3.2 節及第 3.4 節。</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>

<p>行性分析」請納於期中報告。</p> <p>3. 本計畫工作項目第一至第四項皆為期中報告應撰寫的內容。</p> <p>4. 土層浚挖深度請蒐集國外 Nautical Depth 相關文獻、粘稠度及聲納頻率之相關性，以決定港區不影響船隻運作之代表性水深。</p> <p>5. 海研 3 號以 33kHz 以下低頻聲納探測，港區代表性水深是否在 33kHz 以上，建議再以 33kHz 以上聲納探測。</p> <p>6. 本研究重點以聲納探測海床面淘刷深度及海床下土壤鬆動情形，藉以推論基樁穩定性，水槽實驗設計尺寸之合理性請考量，土層中如夾軟弱層如何以聲納探測及土層液化後之土壤性質可</p>	<p>3. 謝謝科長提醒與建議，已將須完成項目補充至期中報告。</p> <p>4. 謝謝科長提醒與建議，本案執行過程中了解了國外 Nautical Depth 的議題，因而修正研究方向，所收集的文獻已納入了本案文獻重點，然目前尚未有聲納頻率與 Nautical Depth 相關性研究，期待可列入未來研究發展重點之一。此部分文獻蒐集結果已補充入期中報告第 2.2 節中。</p> <p>5. 謝謝科長提醒與建議，本研究團隊今年七月底已於台北港及基隆碧砂港成功進行 33kHz 以上頻率收發，資料成果將於期末報告呈現。</p> <p>6. 謝謝科長建議，在一般聲納震測實驗中，係用低頻頻率可穿透較深的聲波進入底床土層，而夾軟弱層會因其聲波阻抗反應與其他層次不同而造成強反射，最常見的應用為地殼深層甲烷水合物的冰漬反射，稱為 Bottom Simulating Reflection (BSR)。因此，運用聲波激發較</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>
--	--	---

<p>納入判斷基樁之穩定性。</p> <p>八、本所港研中心第一科林雅雯研究員</p> <p>1. 期中報告針對國內外離岸風機基礎維管計畫、基礎周圍土層穩定性、基樁受振動後周圍土層緊密分佈、受擾動影響範圍及檢測技術相關文獻蒐集並探討著墨太少，期中報告審查時提供之補充文獻請納入期中修正報告，並做出綜合分析及小結。</p> <p>2. 報告第 18 頁泥水層及過度層指的是何處？圖 2.7 沒標示。</p> <p>3. 聲納探測可得到土壤剪力波速的文獻請提供？實務上有否案例可參考？</p>	<p>低頻高功率的聲波是可以判定夾軟弱層的位置。</p> <p>1. 謝謝林研究員提醒與建議，已將須完成項目補充至期中報告。</p> <p>2. 圖 2.7 中水層與沉積層(sediment)之間為泥水層(或稱浮泥層)，此圖並沒有表達過度層，過度層存在於沉積層上緣，可由圖 2.9 觀測得過度層特性。此部分說明已補充入期中報告第 2.2 節中(第 33-34 頁)。</p> <p>3. 根據 Biot 理論(期中報告中參考文獻第 79 篇)，在給定海水及土層相關參數後，即可計算得剪力波速，而土層相關參數又可使用聲學技術獲得，因此理論上可由</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>
--	---	-------------------------------------

	<p>聲納探測逐步推估得土層剪力波速，但實務上需經詳細實驗驗證，目前尚無實務應用範例可供參考。</p>	
<p>4. 第 51 頁自由沉落如何得到兩種緊密度不同的沉積物?</p>	<p>4. 不同大小的土壤顆粒在沉降過程中形成之密度即會有所差異，本研究採用之砂樣為粒徑集中的砂砂，透過對顆粒大小的選擇，可在試體準備上使其有密度差異。若兩者之密度差異不夠明顯，將針對底層之砂層施以振動，增加其密度。此部分說明已補充入期中報告第 4.3 節中(第 115 頁)。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>5. 水槽試驗的目的求的是何數值?剪力波速?</p>	<p>5. 水槽試驗的目的包含 1)量測土層層次界面在擾動前後之差異、2)驗證聲波反算孔隙率以及統體密度之準確度、以及 3)比較聲學反算與直接量測之剪力波速差異。此部分說明已補充入期中報告第 4.3 節當中(第 112 頁)。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>6. 利用反算得到密度及剪力波速，再計算土壤楊氏係數 E 及剪力模數 G 其準確性為何?之後數值如何應用?</p>	<p>6. 準確性仍有待實驗量測以了解。獲得之密度與剪力波速可作為土層狀態改變之指標性質，透過監測之方式可反映土層在此環境狀態下的變化是否朝負面方向發展。例如，非砂性土壤是否有剪力波速下降之情形(土壤強度弱化)，或是砂性土壤是否有密度增加</p>	<p>同意辦理</p>

<p>7. 第 54 頁台北港觀測樁已完成，台中港觀測樁今年才打樁。</p>	<p>之情形(沉陷發生)。</p> <p>7. 謝謝林研究員提醒，今年度 7 月份本研究團隊已前往台北港觀測樁進行實驗，實驗成果將於計畫成果報告中說明。</p>	<p>同意辦理</p>
--	--	-------------

附錄二

期末報告審查意見處理情形表

交通部運輸研究所合作研究計畫(具委託性質)

期末報告審查意見處理情形表

計畫名稱：離岸風機基礎穩定性檢監測技術研發

合作研究單位：國立中山大學

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位處理情形	本所計畫承辦單位審查意見
<p>一、邱永芳委員</p> <p>1. 量測結果如何確定，其驗證說明請加強。</p> <p>2. 如何克服各地不同的土壤特性，應定出可依據的方法。</p>	<p>1. 謝謝委員提問。本案主要有兩類量測結果，分別為水深量測結果與海床表層土層參數量測結果，在水深量測結果的驗證上，本計畫採用垂測式測深來獲得實際水深資料，以確定本案對於水深之聲學量測結果。在海床表層土層參數部分，本案則是以採集土層樣本並進行精密分析之方式獲得實際土層資料，並用以驗證本案之聲學反算結果。上述水深驗證可參考本案報告第 4.3.2 節(第 4-47 頁)，土層參數驗證可參考本案報告第 4.4 節(第 4-60 頁、第 4-65 頁)。</p> <p>2. 謝謝委員提問。由於土壤特性對於水深量測的最佳頻率有影響，因此針對各地不同的土壤特性，本案的建議為先規劃出數個重點監測海域，例如各大港口，針對各監測海域先執行一次前期背景環境調查，整合岩心採</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>

<p>3. 如何從聲納結果的比較來判定土壤的孔隙變化。</p>	<p>樣、多頻率聲波量測、以及密度分佈量測，獲得完整的背景環境資訊，並訂定出各別海域適用之最佳探測頻率組合，如此即可進行後續定期量測與檢監測。</p> <p>3. 感謝委員提問。本案利用聲納量測結果判定土壤孔隙率的流程簡單說明如下。首先可由聲納量測結果計算海床反射係數，由於聲學正向反射係數與孔隙率有高度相關，因此在給定當地水層相關資訊後，可透過 BIOT 模式或 EDFM 模式獲得反射細數與孔隙率之關係曲線，接著使用量測得之反射係數即可得到孔隙率初始值，此初始值經過本案所發展之遞迴反算後，即可逐漸收斂於孔隙率真值。此土壤參數反算過程與 BIOT 模式介紹可參見本案報告第 3.3 節(第 3-9 頁)。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>4. 本研究執行績效良好，成果值得肯定。</p>	<p>4. 謝謝委員肯定本案的研究貢獻，也期待未來可以繼續投入此議題之研究。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>二、林佑任委員</p>		
<p>1. 研究海床浮泥層分層結構與底床分層結構很有意義，除了離岸風電基礎應用也協助各港進一步瞭解港口水域海床的組成情形</p>	<p>1. 謝謝委員肯定本案的研究貢獻，本團隊對於此研究題目亦有高度興趣，未來若有機會也期待可以更進一步進行相關研究，以獲得更實用的成果。</p>	<p>同意辦理</p>

<p>及各物理量，協助維持航安及供營運使用。</p> <p>2. 感謝研究團隊就航行水深蒐集彙整國內外相關研究資料，並說明其意義。有關港口水深公告水深的功能是為了提供航行依據，而浚挖水深的設計的採用則除浚挖要滿足航行水深之需求外，另須預留部分深度是回淤的餘裕。回淤的速度各港環境不同而有差異，如何預留回淤餘裕預留多？請團隊在進一步蒐集國際之標準或規範，可以做為執行之依據或參考。例如歐洲有些河口國際商港，其底質條件可能較接近西部港口。</p> <p>3. 有關 nautical depth 所提到航行深度由密度及黏性來定義，但內容描述則只有談統體密度以於 1200kg/m^3 作為 nautical depth 標準，有關黏性部分請也納入說明。另請問</p>	<p>2. 感謝委員提問。此問題為相當實用且關鍵的問題，本團隊非常樂意也很期待可以繼續探討浚挖深度之相關議題，但礙於本案執行期間有限，暫時無法於本案執行期間內完整這部份文獻蒐集與討論，未來若有機會，本團隊會繼續進行這部分的資料蒐集與彙整，並與委員分享彙整結果。</p> <p>3. 感謝委員提問。由於以黏性判斷 Nautical Depth 的研究尚在進行中，相關應用較少，目前研究成果僅能夠提出黏性剖面在到達 Nautical Depth 時會出現明顯的不連續面，且有大幅提高的現象^[50]。世界各國目前大多仍使用密度作為 Nautical Depth 之判斷標</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>
---	---	-------------------------

<p>就此密度其最適合的測量頻率為何?可否有一標準或區間可以參考。</p>	<p>準，且海水中年性剖面量測較困難，因此本計畫在此暫不討論黏性的相關議題。本敘述已補充入本案報告第 2.2.1 節(第 2-32 頁)。其次，由於各港口之海床表層土層材質不一，浮泥層中的懸浮粒子顆粒亦不同，即時密度同樣為 1200 kg/m³，其最佳測量聲學頻率亦會有差異，依據本案今年度之研究成果，可使用 40-50kHz 間之聲波頻率進行探測，但若要更進一步訂出最佳探測頻率，則須針對欲探測海域先進行背景環境調查，整合岩心採樣、多頻率聲波量測、以及密度分佈量測，獲得完整的背景環境資訊，並訂定出各別海域適用之最佳探測頻率。</p>	
<p>4. 另外水深測量有關統體密度以於 1200kg/m³ 作為 nautical depth 標準，請說明或建議其適合採用的頻率或區間。</p>	<p>4. 感謝委員提問。請參考上一個意見之回覆，由於各海域 1200kg/m³ 等密度深度之聲學反應不同(由不同材質顆粒造成)，因此需先進行前期量測才能夠訂出最適合頻率，但大多落於 40-50kHz 間。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>5. 針對台灣的港口水深測量，就目前實務執行測量的頻率的設定，研究團隊的建議為何?可否提出建議作為未來施工綱要規範的基準。</p>	<p>5. 感謝委員提問。請參考上兩個意見之回覆。本案目前已將今年度之研究成果彙整為「土層浚挖前後聲納測量標準(概念)」，請參考本案報告第 5.2 節(第 5-4 頁)。本團隊也希望未來可以繼續投入進行此議題之研究，以提出更</p>	<p>同意辦理</p>

<p>6. 垂測可以作為現地執行測量時校驗，而一般單音束用圓的鐵板來做 bar check 率定，穩定性佳且既然已經有此輔助工具，以此也來作為垂測的工具的可行性請問研究團隊的看法。</p> <p>7. 由於海水海床交界面的說明與引用之圖示說明並未完全一致，建議可以再補充搭配內容所附的結構圖去說明，或直接以</p> <p>8. 圖 2.30 之左右二小圖請於內容說明以區分頻率及其對應之小圖。另有關其右小圖似乎同時有二條線？請問原因？另讀數之為置於何處？</p> <p>9. 圖 2.31 之三張小圖中，各圖之粗線最上面邊緣的物理意義為和(所對照浮泥的位置</p>	<p>具體之研究成果與實作建議。</p> <p>6. 感謝委員寶貴的建議，本案未來將納入鐵板量測法作為輔助，與垂測資料整合作為水深量測之參考資料。</p> <p>7. 感謝委員的建議。本案已按照此建議修改報告第 2.27 圖，並刪掉不必要之圖片(圖 2.26)以免造成混淆。請參考本案報告第 2-29 頁。</p> <p>8. 感謝委員提問。圖 2.30 之說明已於內容進行說明(第 2-30 頁)。有關其右小圖的二條所產生的原因，即是本案中所探討的高、低頻的聲波所探測到的差異，詳細解說請參考本案報告第 2-30 頁。而關於讀數之位置，會以聲波所探測到的最短路徑(最短回波時間)，亦即探測資料結果的上緣來進行判讀。</p> <p>9. 感謝委員提問。圖 2.31 之三張小圖中，各圖之粗線最上面邊緣的物理意義為當聲波在遇到介質改變時所產生的第一個回</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>
--	---	---

<p>) ? 粗線中有顏色深淺之物理意義為何? 線條厚度 (粗細) 的物理意義為何? 電腦擷取之數據記錄之位置在粗線的何處(即粗線的何處為電腦擷取水深數據之點)?</p>	<p>波反應。粗線中顏色深淺之物理意義為反應回波能量之大小，線條厚度則表達了回波的多寡，通常在砂質海床進行探測時，由於鄰近的海床都會反射聲波，加上砂質海床不易穿透且回波強，因此就會看到很粗的回波線條，這乃是探測點鄰近海床回波所造成的。而電腦一般在判別深度資訊時，常會以數據記錄之上緣來進行判讀。</p>	
<p>10. 圖 2.32 雙頻測深儀量測結果中，33kHz 範圍大如何從圖上判別擷取數據位置(高度)? 另請說明 210kHz 線條與 33kHz 粗細差別大之造成原因。</p>	<p>10. 承上兩題，通常在判別數據時，會以數據上緣的部分，來當作探測之深度。關於 210kHz 線條與 33kHz 粗細差別之說明，已加入期末報告第 2-30 頁。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>11. 圖 2.33 中第三小圖高低頻之高度均超過航行水深之原因? 為何會有此現象。</p>	<p>11. 感謝委員提問。由於浮泥層中懸浮粒子顆粒的不同會造成不同的聲學效應，因此圖 2.33 中第三小圖之背景環境與海床材質應與其他環境不同，造成 33kHz 聲波在密度小於 1200kg/m³ 時即產生強反射回波，造成其探測深度較航行水深淺的現象。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>12. 表 4.11 有關高雄港各區的平均粒徑有些已低於#200 號篩，似已為沉泥質但仍稱為砂質粉砂是採用何種分</p>	<p>12. 謝謝委員提醒，已在報告 4.1.4 小節，4-28 頁中對海床採樣的分類法進行說明。</p>	<p>同意辦理</p>

<p>類法之名稱請釐清。</p> <p>三、林倣寬委員</p> <p>1. 錯字部份：p.25 表 2.3 表頭「封」應為「風」，p.33 第 4 行「備置」應為「配置」，p.33 第 7 行「置」應為「至」，p.58 倒數第 2 行「含」蓋應為「涵」蓋。</p> <p>2. 文章內容重覆部份：p.13 第 2 行「臺灣處於環太平洋…失去支撐基礎能力」與 p.14 倒數第 5 行重覆;p.59 倒數第 3 行「對於黏土為主…判斷錯誤」與 p.61 倒數第 4 行重覆。</p> <p>3. p.25 及 p.26 錯誤表頭表 2.3 及表 2.4 多「表 2」，表 2.4 及表 2.5 資料來源寫本研究彙整並不恰當。</p> <p>4. 風機維護管理的參考文獻內容部份與本研究內容無關之處請刪</p>	<p>1. 謝謝委員指正，期末報告已完成修正。</p> <p>2. 謝謝委員指正，已將報告中重複的地方進行修正。至於原報告中第 61 頁出現與第 59 頁相同的字句，由於第 61 頁是新的一個小節，主要是要進行多頻率海床面地形變動測量之可行性分析，為了歸納本案對於文獻彙整與數值模式之重要結論並進行可行性分析，本案需要在此將關鍵結論重覆一次，在此跟委員說明。</p> <p>3. 謝謝委員提醒與指正，已將格式及資料來源進行修正。</p> <p>4. 謝謝委員建議，由於本案原訂之執行內容包含蒐集國內外離岸風機維管計畫之相關文獻並彙</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>
---	---	---

<p>除。</p> <p>5. p.30 倒數第 5 行風力發電機組的維護「實踐」用語建議修正。</p> <p>6. 第三章公式(3.2)(3.5)(3.6c)(3.7)內容皆有重覆。</p> <p>7. p.57 利用(3.6)式 $V_{rms}=RTvP$ 代入(3.5)式，$RTvP$ 從何而來應交代。</p> <p>8. p.60 圖.34 ϕ 表示平均粒徑？單位為何？為何有 $\phi=0$。</p> <p>9. p.61 文字排版「較」。</p>	<p>整，因此雖然這部分與本案研究內容無直接相關，但為完成本案之計畫工作，仍將這部分成果保留於報告內，在此向委員說明。</p> <p>5. 謝謝委員指正，期末報告用語已修改。</p> <p>6. 謝謝委員提醒與指正，已將公式重複的部分修改。</p> <p>7. 感謝委員建議。$V_{rms}=RTvP$ 主要是透過傳感器靈敏度 R 與電壓轉換方程式 Tv 兩者將接收聲壓 P 轉換為接收電壓。各參數說明在同一頁第(3.7 式)下方之參數說明中(第 3-3 頁)。</p> <p>8. 謝謝委員提問。一般顆粒粒徑常使用兩種單位表達，一種是直觀粒子粒徑(mm)，另一種則是對數單位 $\phi = -\log_2(\text{顆粒大小(mm)})$，由於粒子粒徑分佈範圍很大，因此本案在此選擇使用對數單位 ϕ 來呈現。當顆粒大小為 1mm 時，其對數單位值則為 0。上述說明已補充入本案報告第 3-5 頁中。</p> <p>9. 謝謝委員指正，已將報告格式修改完成。</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>
---	---	---

<p>10. p.92 中 2-50kHz”Hz”、2kHz”Hz”之”Hz”重複。</p>	<p>10. 謝謝委員提醒與指正，已將報告內容修改。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>11. p.134~p.143 多頻率海床下土層調查，台北港中心頻率為 4、6、8、10、12kHz，高雄港中心頻率為 5、10、25、30、35、40、45kHz，為何使用不同頻率？又進行比較調查成果基準不同，結果當然不同，差異部份請再說明。</p>	<p>11. 謝謝委員的提問。首先本案之實驗執行順序為先進行台北港實驗，後進行高雄港實驗，並且本案在實驗過程與資料分析過程中，亦隨著產出的實驗結果而進行下一組實驗之調整，希望能獲得更好的實驗資料。本案在執行完台北港實驗以及資料分析後，希望能夠透過提高訊號頻寬來增加解析度，因此在高雄港實驗中，將訊號頻寬由原本的 2kHz 提高為 5kHz，但整體涵蓋聲波頻率範圍仍與台北港相同，因此可分析之頻率亦相同。其次，本案雖然先後於台北港及高雄港驗證本案之海床探測技術，但並未將兩組不同區域之實驗資料作比較，而是分別於台北港及高雄港進行多頻率的探測、分析、與驗證，因此並沒有將不同的設定的實驗資料擺在一起比較而進行分析，請委員放心。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>12. Ping Number 請定義，包括圖 4.54~圖 4.76。</p>	<p>12. 謝謝委員建議與提醒，關於 Ping Number 的定義為在進行探測量測時的資料筆數。此部分已加入期末報告中第 4-48 頁第二段。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>13. 土壤受擾動試驗用人</p>	<p>13. 謝謝委員建議與提醒，本實驗主</p>	<p>同意辦理</p>

<p>工方式進行垂直、水平方向敲打是否恰當，因用力方式不一，方向不易控制。圖 4.91 及 4.92 為擾動前之頻譜，結果相同為何？</p>	<p>要目的為量測土層受擾動、破壞前後的差異，因此僅需破壞土層的結構即可。土層受擾動前後的差異主要在回波的能量大小，圖 4.91 與圖 4.92 之頻譜圖無法明顯看出回波訊號差異，須由後續處理如圖 4.97 與圖 4.99 方能明顯看出其差異。</p>	
<p>14. p.165 之上層砂密度擾動後>擾動前，下層砂密度擾動後<擾動前，故文章內容之說明應再修正。</p>	<p>14. 謝謝委員提醒與建議，已將文章內容修改於 4.5.4 節(第 4-82 頁)。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>15. 聲納訊號 1.0000e-05 秒之結論在前面分析中應補充說明。</p>	<p>15. 謝謝委員建議與提醒，此部分說明已加入期末報告第 4.1.3 節中(第 4-18 頁)。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>四、賴瑞應委員</p>		
<p>1. 計畫以聲納來探測海床地形及土層參數之技術已獲致初步成果，研究團隊的努力予以肯定。</p>	<p>1. 感謝委員肯定!</p>	<p>同意辦理</p>
<p>2. 本計畫雖以研發離岸風機基礎穩定性檢監測技術為目的，但延伸的海床量測技術可提供各港未來地形測量的重要參考依據，但誠如報告所言，不同底床質的港區，所需使用的頻率可能不</p>	<p>2. 感謝委員肯定! 本團隊對於此議題亦有高度興趣，期待可以繼續投入此研究，產出實用的成果提供予相關單位使用。</p>	<p>同意辦理</p>

<p>同，若未來能幫各港訂定測量的頻率供各港水深測量的參考，會是很大的貢獻。</p> <p>3. 目前的檢測成果對試驗對象的表層土壤已能獲取相關參數，請問此技術有何限制，能測量到深度為何？對多層土層是否也適用。</p> <p>4. 目前土層是否受擾動已可量測，建議後續可以再加值到能判定擾動之土壤對結構物之穩定是否有影響，以利未來落實應用。</p> <p>5. 報告第 151 頁 4.81 實驗配置示意圖，建議標示深度及寬度等尺寸，以瞭解實驗之實際配置。</p> <p>五、台中港務公司台中分公司</p>	<p>3. 感謝委員提問。本團隊之海床表層土層探測技術過去有多次驗證與量測經驗，在泥質海床可量測到海床下近 40 公尺，在砂質海床則可量測到海床下約 10 公尺。目前的技術仍限制於反算海床中的平均參數值，而多層海床各別參數的反算技術本團隊目前正在發展中，國際上亦尚未有研究成果，因此此為本團隊的未來目標之一。</p> <p>4. 謝謝委員建議。本團隊會將此應用需求列入未來研究項目之一，期待能有好的成果與委員分享。</p> <p>5. 謝謝委員建議。此部分已在期末報告 4-17 頁中的圖 4.81 增加尺寸標示。</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>
---	---	-------------------------------------

<p>1. 水深測量前後使用相同頻率 200kHz，由本計畫可知頻率高得到較保守的水深。</p>	<p>1. 感謝委員肯定!</p>	<p>同意辦理</p>
<p>2. 統體密度部份，實際海床在哪？由本研究可知結構物海床水深測量要用低頻。</p>	<p>2. 感謝委員提問。依據本案所蒐集之文獻資料，固體海床通常定義於統體密度達到 1500kg/m³ 之深度。由本案成果可知，若要獲得固體海床上緣深度，可使用 15-25kHz 之聲波進行探測。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>3. 本案研究成果實用。</p>	<p>3. 感謝委員肯定!</p>	<p>同意辦理</p>
<p>4. 各港統體密度 1200kg/m³ 處可否定義出。</p>	<p>4. 感謝委員提問。由於各港口之海床表層土層材質不一，浮泥層中的懸浮粒子顆粒亦不同，即時密度同樣為 1200 kg/m³，其最佳測量聲學頻率亦會有差異，依據本案今年度之研究成果，可使用 40-50kHz 間之聲波頻率進行探測，但若要更進一步訂出最佳探測頻率，則須針對欲探測海域先進行背景環境調查，整合岩心採樣、多頻率聲波量測、以及密度分佈量測，獲得完整的背景環境資訊，並訂定出各別海域適用之最佳探測頻率。</p>	<p>同意辦理</p>
<p>5. 深度與統體密度關係建議建立，結構物附近密度如有變化則需注意。</p>	<p>5. 謝謝委員建議，此為極具實用價值的研究題目，本團隊希望未來能有機會進行相關研究。</p>	<p>同意辦理</p>

<p>六、林雅雯研究員</p> <p>1. 報告格式請依照本所出版品規定辦理，如表用 2-3 非 2.3，頁碼用 2-1 非頁數 7。</p> <p>2. 4.3.3p.132 台北樁附近水泥材質能量聚焦點，可測到樁周圍土層分佈嗎？建議補充側視圖(含樁位置、距離)，並補充是否有鬆動、密度及分佈為何？</p> <p>3. 本案主題與重點工作項目「研提離岸風機場址土層穩定性檢監測技術手冊」請依規定提交。</p> <p>4. 高雄港統體密度 1200kg/m^3 之深度 Nautical depth 為何？為頻率多少 kHz？</p>	<p>1. 謝謝林研究員提醒，已將表與頁碼之標號進行修正。</p> <p>2. 謝謝林研究員提問。由於台北樁實驗當天海況較差，基於安全性考量無法接近樁體進行探測，目前蒐集到的探測資料有嚴重的石塊回波干擾，雖然資料品質不好，但是本團隊仍將繼續運用其他訊號處理方式，希望可以由資料中提取出有效資料並進行土層分析，若有獲得任何進一步的資料結果，亦將提供給林研究員作參考。</p> <p>3. 謝謝林研究員提醒，手冊將依規定提交。</p> <p>4. 謝謝林研究員提問。由於本團隊目前沒有密度量測儀器系統，因此在本案中的海床探測實驗僅能執行聲學探測的部分，並由多頻率探測結果與錘測式測深結果比較以了解固體海床的適用探測頻段。若要進一步了解高雄港之 Nautical Depth，則須搭配密度量測系統進行實驗，本團隊已開始</p>	<p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p> <p>同意辦理</p>
---	--	---

	規劃採購此系統，希望未來可以回答此問題。	
--	----------------------	--

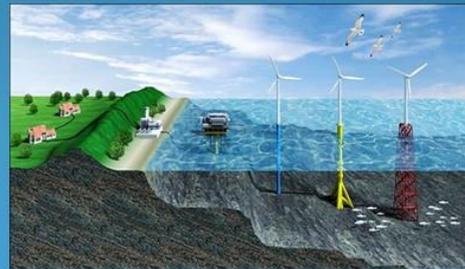
附錄三

期末報告簡報資料

離岸風機基礎穩定性聲學檢監測技術研發 期末報告

邱永盛、羅建育、林俊宏、薛憲文

國立中山大學 海下科技研究所 海下音傳實驗室
海洋環境及工程學系
海軍官校 海洋科學系



圖片來源：上緯官方網站

1

研究動機與需求

- 離岸風電時代即將來臨，離岸風機設立之後須能保持穩定營運
 - 須擬定並執行風機基礎土層維護管理計畫
 - 須發展檢監測技術與設備，以早期預警風機基礎土層之穩定性問題
- 離岸風機架設前後或港口浚挖實施前後之海床面地形監測需求
 - 深度精準度需求達公分級
 - 各市售系統量測結果不一
 - 需掌握誤差來源並研發有效量測方案
- 研究並提出海床面地形聲納測量技術建議—聚焦於聲納頻率
- 研發土層穩定性聲學檢監測技術之概念及原型

2

研究內容與工作項目

一

海床面地形探測
準確度提升研究

- 離岸風機基礎土層穩定度相關文獻蒐集與彙整
- 不同頻率海床聲學探測相關文獻蒐集與彙整
- 不同頻率海床聲學探測可行性分析

二

海床下土層結構
與參數特性估算
準確度提升研究

- 多頻率海床聲學探測技術研發
- 多頻率海床聲學探測技術實驗測試驗證
- 土層浚挖前後聲納測量標準研擬
- 離岸風機場址土層穩定性檢監測技術（概念及原型）研發與測試

3

報告架構

一

• 海床面地形聲納測量技術主要研究成果

二

• 土層穩定性聲學檢監測技術主要研究成果

三

• 實驗室海床下土層聲納測量實驗

四

• 台北樁週圍海床表層土層探測實驗



海床面地形聲納測量技術

文獻蒐集
與彙整

數值模擬
分析

實海域多
頻量測

5

主要執行成果彙整

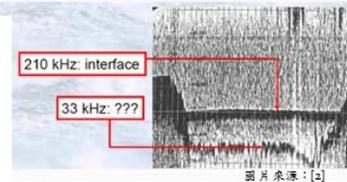
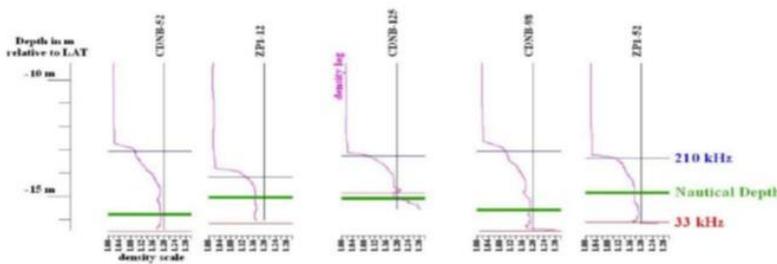
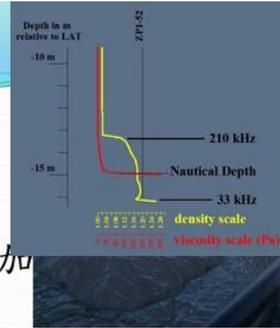
● 海床面地形聲納測量技術

- 完成海床常見垂直結構分佈特性研究
- 完成一般市售雙頻段測深儀之探測限制研究
- 完成適航深度(Nautical Depth)之定義研究
- 完成多頻段海床面地形探測之可行性分析
- 完成多頻段海床反射模擬→掌握海床面地形量測適用頻段
- 完成實海域多頻段海床面地形量測
 - 掌握不同海床條件下之多頻段探測效能
 - 驗證實體海床面地形量測適用頻段
- 完成土層浚挖前後聲納測量標準(概念)研擬

6

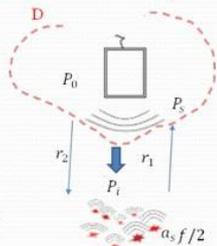
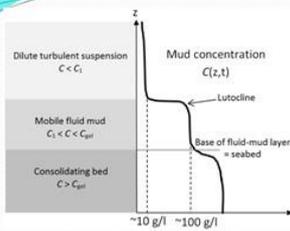
文獻蒐集—海床面結構特性

- 水層與土層間存在有浮泥層 (Fluid Mud)
- 浮泥層中孔隙率逐漸降低，統體密度逐漸增加
 - 高頻波會在浮泥層上方反射 (120 kHz) [3]
 - 低頻波直接穿透泥水層，在浮泥層至實體海床面之間反射 (10-50 kHz) [3]
 - Nautical Depth 大多定義為密度 1200 kg/m³ 左右之等密度深度
 - 30-40 kHz 之間聲波反射深度多為 Nautical Depth 至實體海床面間
- 以數值模擬與實海域實驗探討水深探測之頻率變化趨勢



7

多頻率海床面聲學反射聲場模擬分析

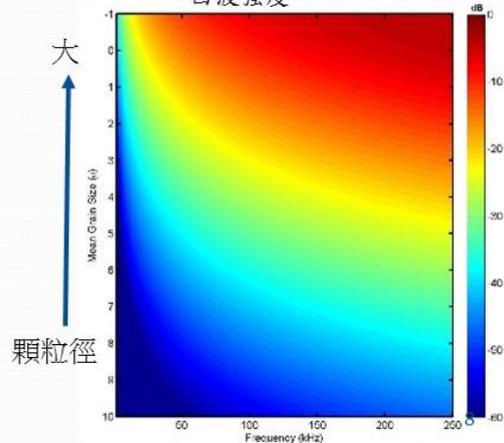
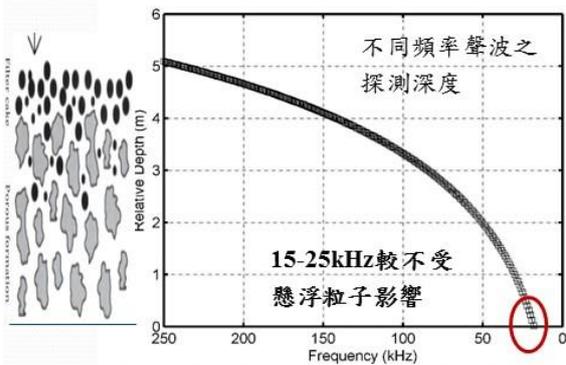


- 計算不同頻率聲波在泥水層裡的回波強度
- 可推估不同頻率聲波探測深度

$$P = \frac{a_s f P_0 r_0 D^2 e^{i(\omega t - 2r(k - i\alpha\omega))}}{2r^2}$$

$$P_{rms} = P_0 r_0(f) \left\{ \frac{3M}{16\pi(a_s)P_3} \right\}^{1/2} \left\{ \int_{r-\tau c/4}^{r+\tau c/4} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-4\alpha r}}{r^2} D^4(\theta) d\theta d\phi dr \right\}^{1/2}$$

$$V_{rms} = \frac{k_s k_t}{\phi r} M^{1/2} e^{2ra} \quad \text{獲得不同頻率聲波之單位回波強度}$$



實海域多頻率海床聲學探測實驗及設備

- 多頻率海床探測系統開發
- 實海域實驗彙整
- 岩心樣本蒐集與分析

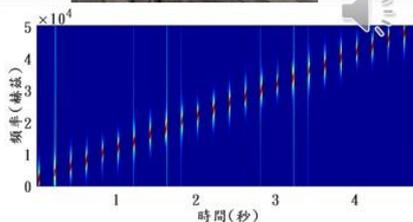
9

多頻率海床探測聲學系統開發

- 一般系統無法進行多頻率海床探測
 - 整合硬體系統、控制系統、以及訊號處理模組
 - 在同一載台上進行由500Hz-50kHz間之多頻率聲學訊號發收

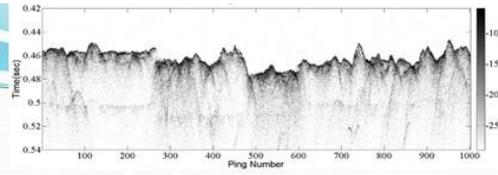


- 中控模組可控制多頻率聲波拍發
- 可彈性調整欲拍發之聲波频段



10

實海域多頻率海床探測實驗



名稱	日期	地點	海床面地形變動測量實驗	海床下土層分佈調查實驗	樣本組成
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	✓	✓	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	台北氣象橋	✓	✓	中砂質



11

碧砂港口外多頻率測深實驗



12

實海域海床面地形量測實驗

中砂海床

- 實驗地點：碧砂漁港外
- 量測頻率：2-48kHz



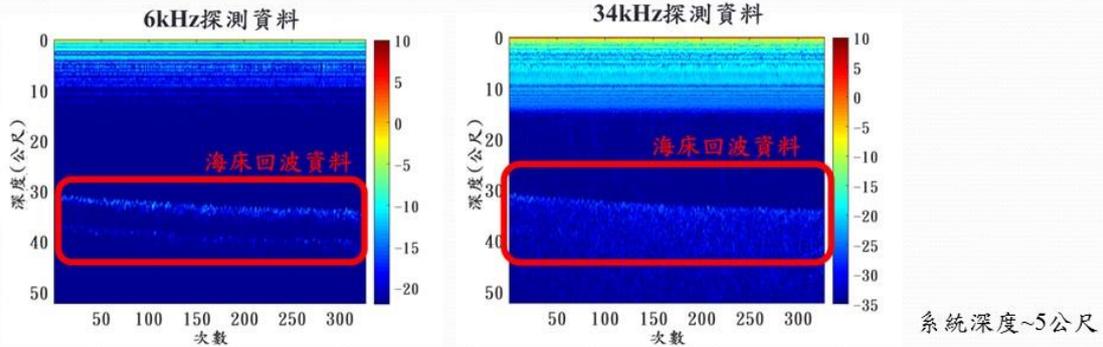
粉砂混泥海床

- 實驗地點：高雄港週邊
- 量測頻率：2-48kHz

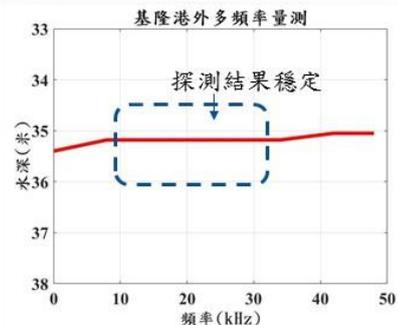


13

中砂海床實驗環境結果(台北港、碧砂港)



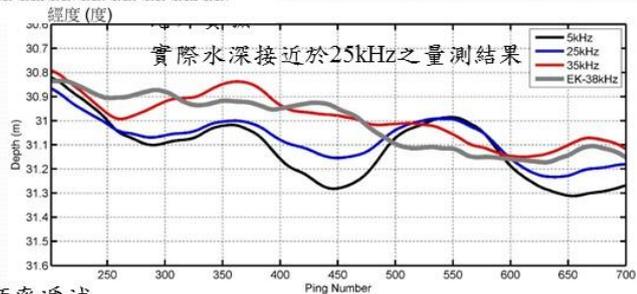
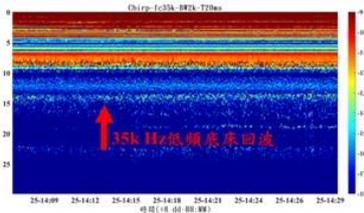
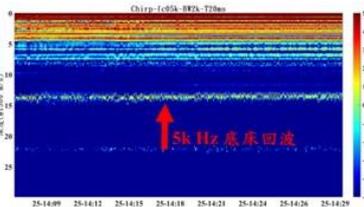
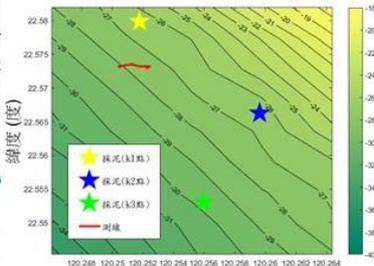
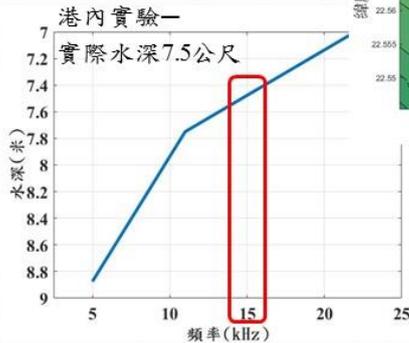
- 10kHz-30kHz之間探測結果穩定
- 30kHz以上頻率較易受懸浮粒子影響
- 10kHz以下頻率海床穿透力高
- 中砂海床較不存在測深之頻率差異
 - 10-30kHz間可獲得準確探測結果(與重錘量測結果比較)



粉砂混泥實驗環境結果

(高雄港)

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



- 相對於中砂海床，量測水深明顯隨頻率遞減
- 以重錘方式實際量測水深，與15-25kHz之聲學量測結果較接近

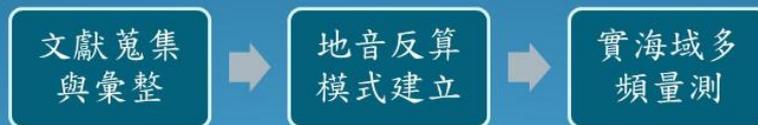
15

多頻率海床面地形聲納測量彙整

- 市售雙頻率測深系統
 - 高頻(120-250kHz)主要用以探測浮泥層上緣深度
 - 中高频(30-40kHz)主要可用以獲得Nautical Depth與實體海床間之深度
- 依據文獻資料、數值模擬、與實海域量測結果
 - 15-25kHz間為量測實體海床之最佳頻段
 - 中砂海床—水深量測隨頻率變化小，10-32kHz間探測結果穩定
 - 粉砂混泥海床—容易有浮泥層存在，水深量測隨頻率變化大

16

土層穩定性聲學檢監測技術



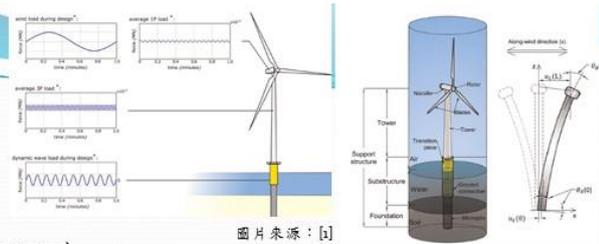
17

主要執行成果彙整

- 土層穩定性聲學檢監測技術
 - 完成土層穩定性之關鍵參數研究
 - 完成多頻率海床表層參數聲學反算模式開發
 - 完成多頻率海床聲學探測可行性分析
 - 完成多頻率海床聲學探測技術研發
 - 完成海床聲學探測技術之實驗室測試
 - 完成實海域多頻段海床表層聲學量測
 - 掌握不同港口之海床表層沉積物特性
 - 驗證多頻率海床表層參數聲學反算效能
 - 完成離岸風機場址土層穩定性檢監測技術（概念及原型）研發

18

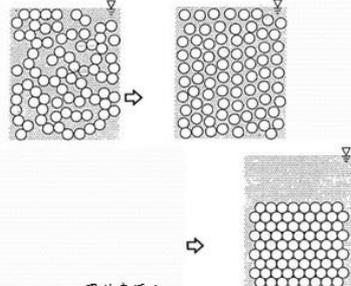
文獻蒐集一 海床土層穩定性



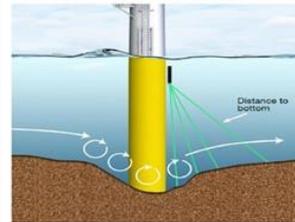
圖片來源：[1]

• Offshore Wind Turbine (OWT)

- 受風、浪、流、以及運轉影響產生振動
- 基樁振動可能造成基底土層的結構變化
- 地震與其它外力亦造成淘刷與土壤液化
- 主要發生於土壤表層，可透過統體密度(孔隙率)、土層層次介面來監測
- 亦可使用shear modulus, Poisson's ratio, 等工程參數來監測土(泥)層變化
- 尚無針對基樁周圍基礎土層結構、物理與工程參數之大範圍高效率監測方式



圖片來源：
<https://www.weam.com/bbs/t375844.html>



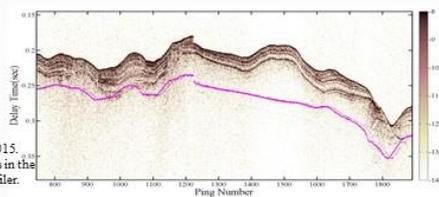
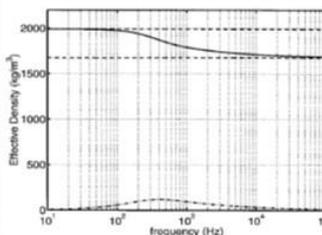
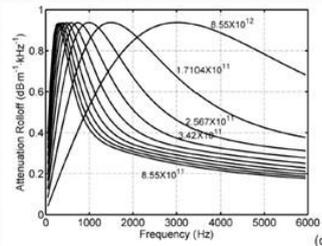
圖片來源：[16]

多頻率海床聲學反算模式建立

- 以多孔彈性海床地音模式(EDFM)為核心
 - 吸收曲線及有效密度均隨頻率改變
 - 結合多頻率資料，可遞迴反算物理參數
 - 可獲得孔隙率、透水率、統體密度、平均粒徑等

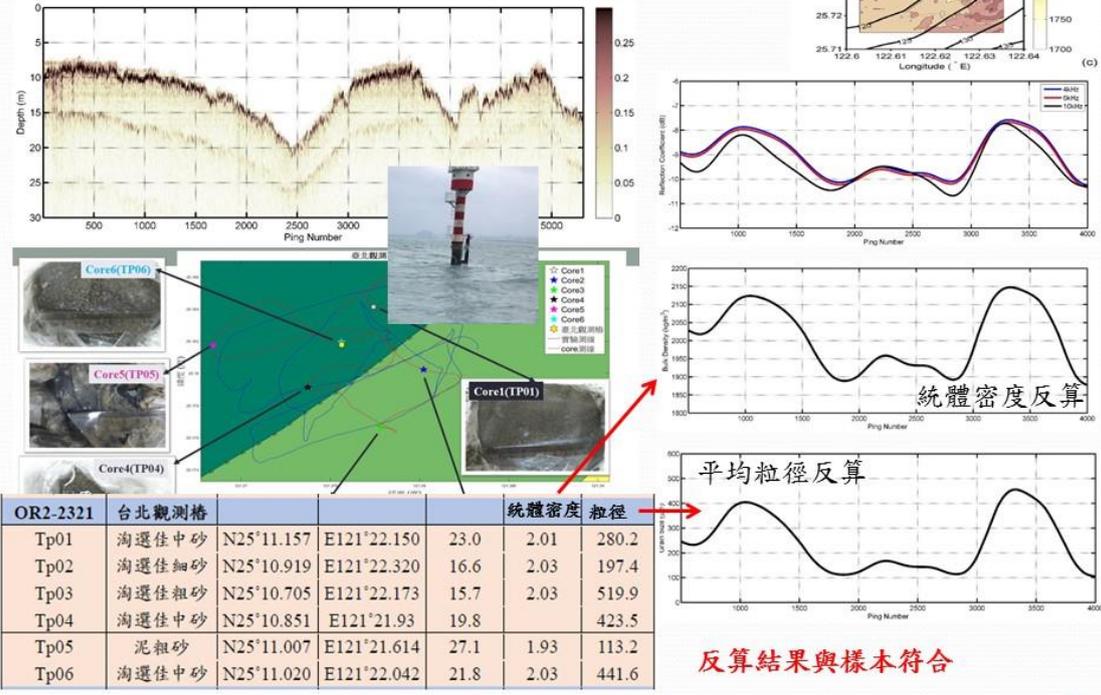
Parameter	Units
Bulk properties	
β , porosity	...
ρ_s , grain density	kg/m ³
ρ_f , fluid density	kg/m ³
K_s , grain bulk modulus	GPa
K_f , fluid bulk modulus	GPa
Fluid motion	
η , fluid viscosity	kg/m-s
κ , permeability	μ^2
α , pore size	μ
c , added mass coefficient	...
Frame response	
μ_s , frame shear modulus	GPa
δ_s , shear log decrement	...
K_s , frame bulk modulus	GPa
δ , bulk log decrement	...

• 未來可用以進一步估算工程參數(剪應模數等)



Chiu, L. Y. S., Chang, A., Lin, Y.-T., and Liu, C.-S., 2015. Estimating geoaoustic properties of surficial sediments in the North Mien-Hua Canyon region with a chirp sonar profiler. IEEE J. Ocean. Eng. 40, 222-236.

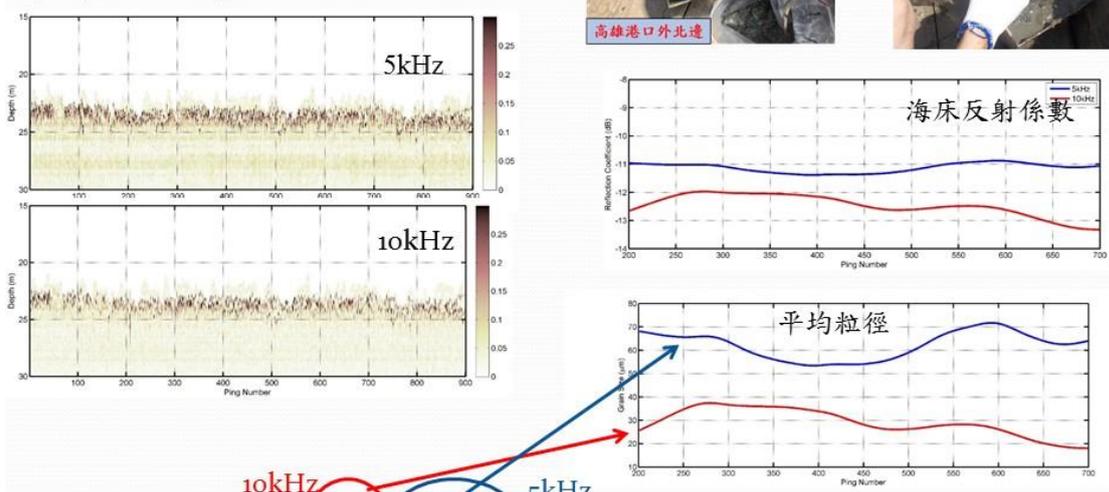
中砂實驗環境(台北港)結果



OR2-2321	台北觀測格				統體密度	粒徑
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

反算結果與樣本符合

粉砂混泥實驗環境結果(高雄港)



OR3-2084B	高雄港-南邊	<3.9µm	<31.3µm	<62.5µm	<125µm	<250µm	<500µm	<1000µm
B	砂質粉砂	15.6	53.5	70.7	89.9	99.6	100	100.0
D8729	砂質粉砂	15.9	56.8	72.8	83.3	92.2	97.7	100.0
D8747	砂質粉砂	17.6	60.3	79.4	94	99.9	100	100.0
X	砂質粉砂	16.5	58.9	75.2	84.5	90.6	97.1	100.0

多頻率海床下土層聲納測量彙整

彙整上述台北港與高雄港之分析結果，可歸納出以下重要結論—

中砂環境(台北樁周圍)-

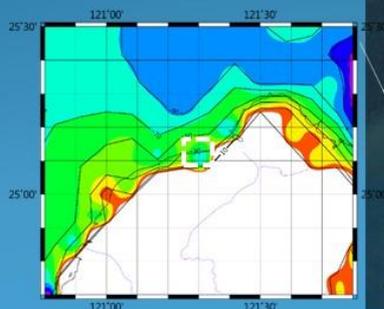
1. 各頻段聲波之反射均同樣受砂質作用，反射係數一致，且其隨頻率之變化符合有效密度曲線，因此可直接使用有效密度曲線之遞迴演算獲得海床表層沉積物參數。
2. 使用本計畫發展之多頻率海床探測技術與反算技術可準確獲得海床參數，並且與岩心樣本分析結果吻合，包含統體密度、孔隙率、粒徑分佈等參數，因此若海床表層土層產生擾動且密度及孔隙率產生變化，則可使用此技術來監測得到變化情形。

粉砂環境-

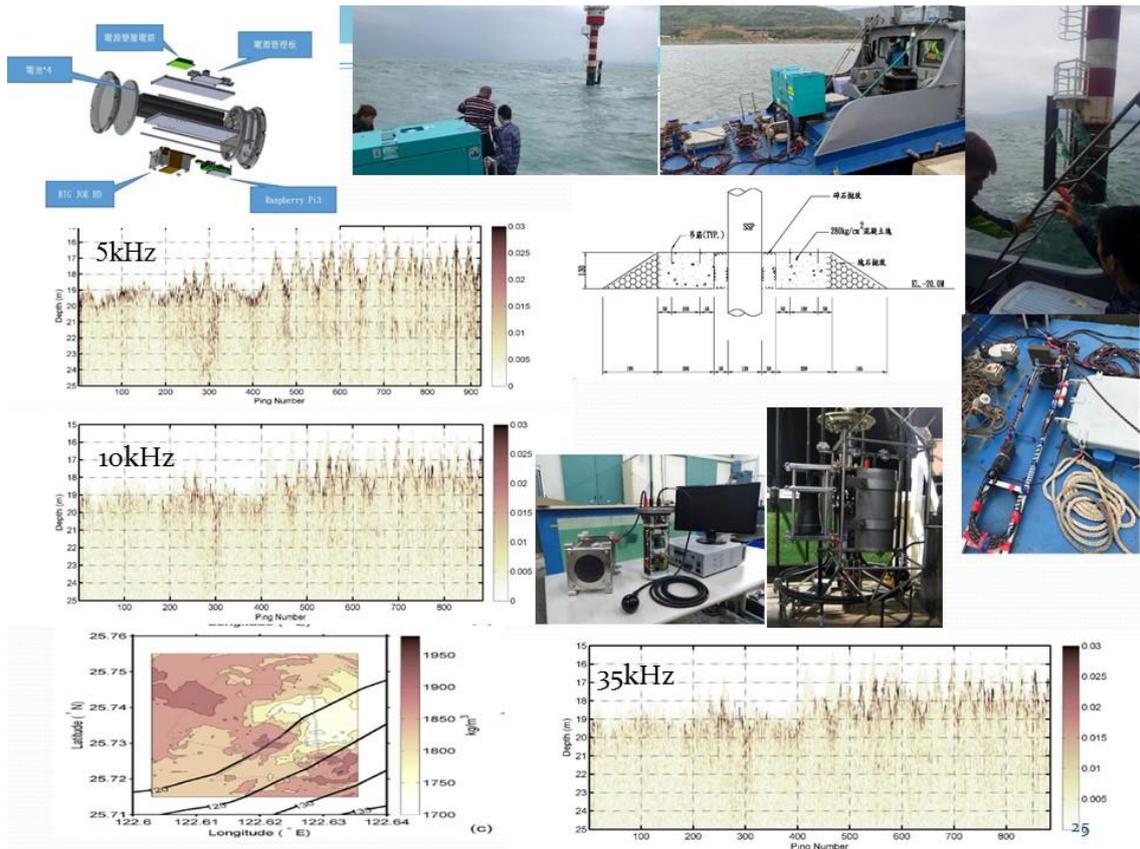
1. 不可忽略的黏土、粉砂、以及砂，對於不同頻段之聲波反射造成不同之作用，且黏土以及粉砂主導了高頻聲波之反射，形成反射係數在頻率上的差異。
2. 不同頻段聲波反射受不同材質之反射作用主導，因此可用以估算不同海床沉積物材質之參數，在此實驗中5kHz與10kHz分別可反算出主要的平均粒徑分佈範圍。
3. 使用計算得之孔隙率來估算統體密度亦與岩心樣本分析結果相符，因此未來亦可持續使用此多頻率海床聲學探測技術監測此實驗區之海床表層沉積物特性變動情形。

23

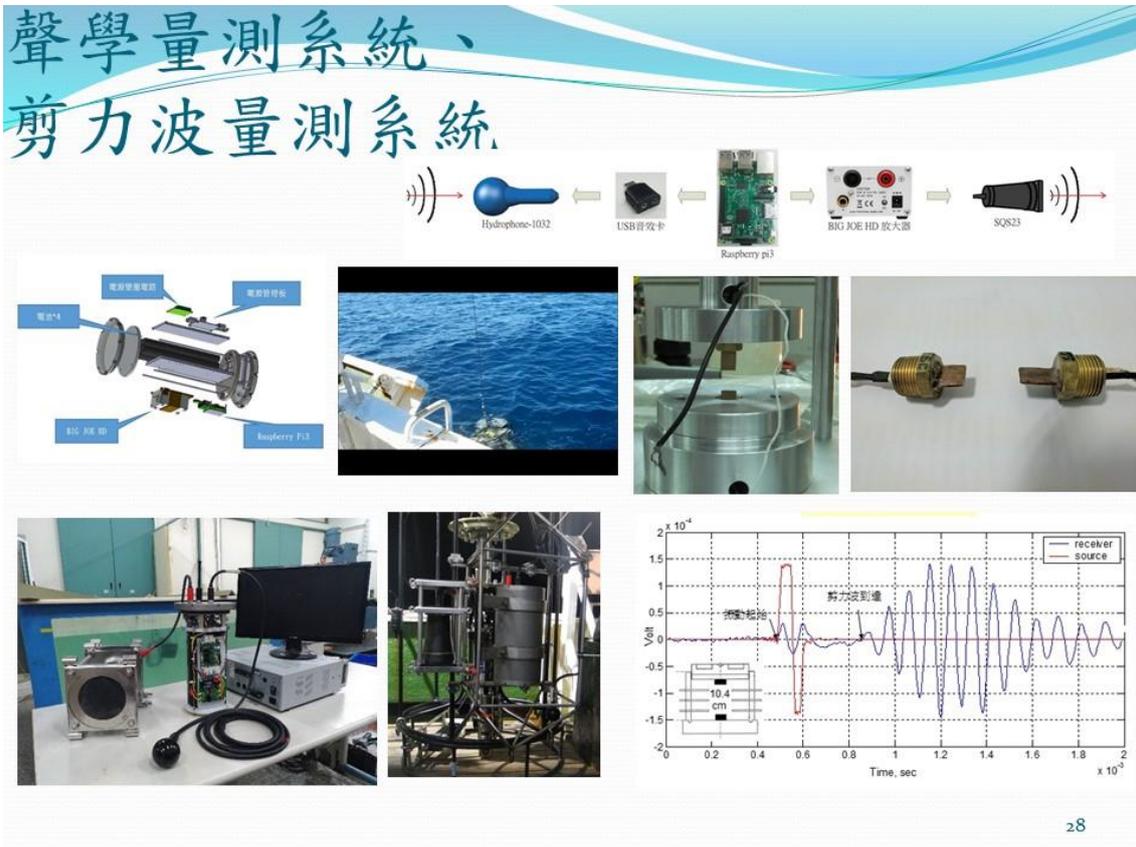
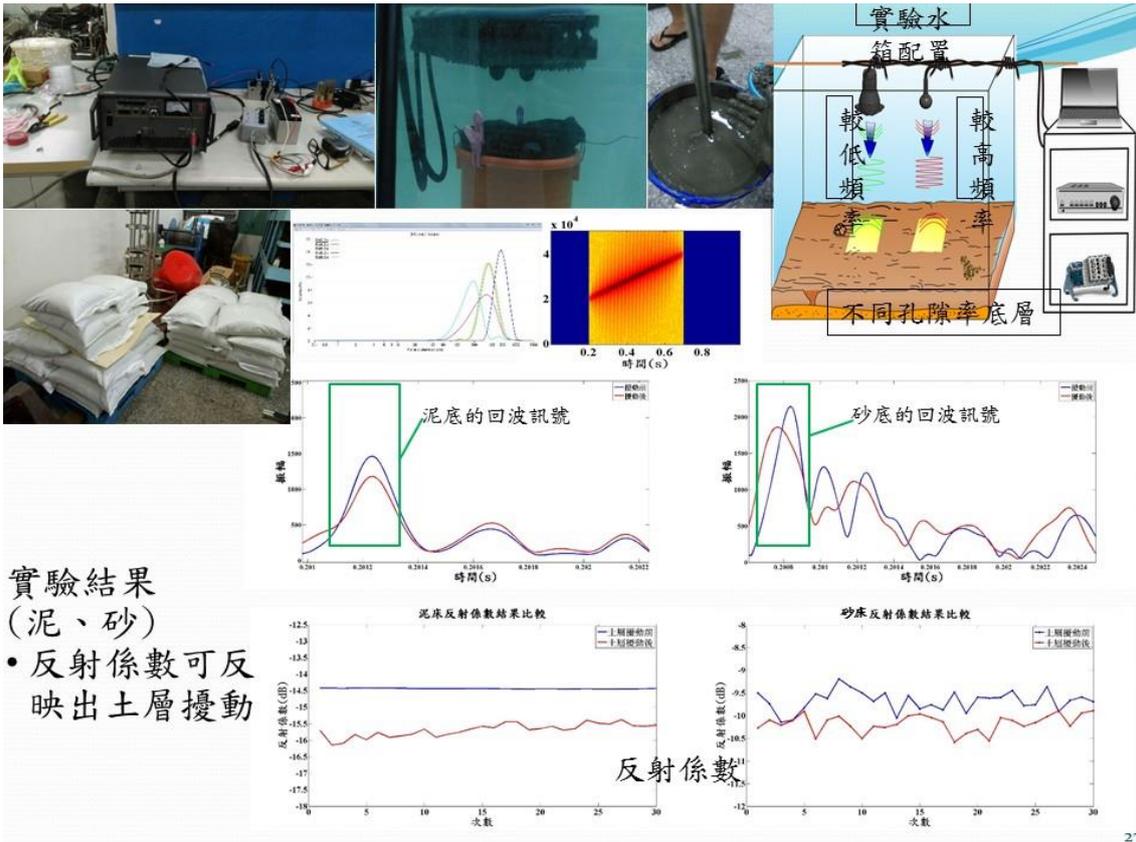
台北樁週圍海床表層 土層探測實驗介紹



24



實驗室底床探測實驗



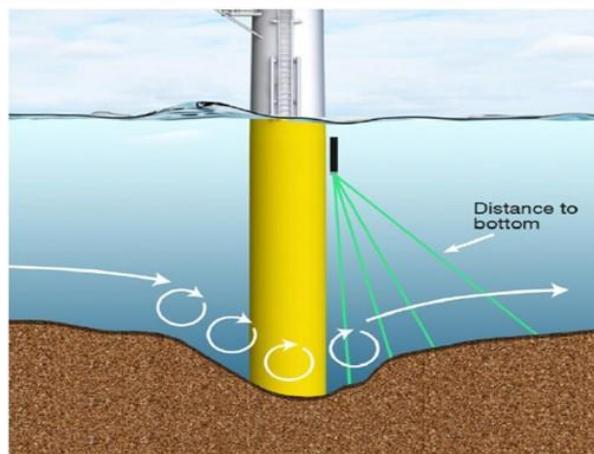
完成工作項目綜整

- 離岸風機基礎維管計畫、土層穩定性、與檢監測技術相關文獻蒐集與探討
- 不同頻率聲納進行海床探測之相關文獻蒐集與探討
- 利用不同頻率之聲納進行海床探測調查之可行性分析與評估
- 多頻率海床面聲學反射聲場模擬分析
- 多頻率地音反算模式建置與模擬分析
- 多頻率海床聲學探測實海域實驗
- 多頻率海床聲學探測實驗室實驗
- 土層浚挖前後聲納測量標準(概念)研擬
- 研提離岸風機場址土層穩定性檢監測技術手冊

29

未來發展方向

- 發展與基樁結合之自主式聲學探測系統
 - 直接監測基樁位置地形與土層變化



30