



臺灣西部海域 應用 重力式安裝錨 的可行性評估

張宏駿／國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 碩士生

劉怡秀／國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 碩士生

林俊宏*／國立中山大學海洋環境及工程學系 助理教授

馬開東／國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系 教授

葛宇甯／國立臺灣大學土木工程學系 教授

近年來，風電開發商將重心轉向深海域發展浮動式離岸風機。浮動式風機主要以繫泊系統中之錨碇固定於海床上，相關可行之錨碇技術眾多，其中重力式安裝錨中，魚雷錨除了具備經濟及安裝快速的優點外，也有容易導入本土化產業鏈的優勢。如今魚雷錨的應用案例已經有上千個，但是皆於巴西深海，水深大約 500 至 1,000 公尺，且海床為黏土之環境條件下安裝成功。本研究透過理論計算衝擊海床速度，並搭配縮尺模型錨的空氣投放試驗，以與海床土壤種類相關的經驗式，針對重力式安裝錨在臺灣海峽 70 公尺水深及海床為粉土質砂土之環境條件下的貫入深度進行可行性評估。評估結果顯示，在此水深內，重力式安裝錨具有整體貫入海床的能力，可達到基本需求，但由於其仍有錨碇力以及錨鍊反覆作用對重力式安裝錨於砂層中的影響等不確定因素，因此仍有待進一步的探討，期待未來可實際應用於臺灣西部海域的浮式風機場址中。

ABSTRACT

In recent years, offshore wind energy developers have shifted their focus towards the development of floating offshore wind turbines in deep-sea areas. Floating wind turbines are primarily anchored to the seabed using various feasible anchoring technologies. Among these, the torpedo anchor, in addition to its economic advantages and rapid installation, also offers the advantage of easy integration into the local industrial chain. Currently, over 1,000 torpedo anchors have been installed offshore Brazil. They are installed in environments with water depths around 500 ~ 1,000 meters and clayey seabed. This study conducts feasibility assessments of seabed impact velocity and penetration depth for gravity-based torpedo anchors in the Taiwan Strait under environmental conditions with a water depth of 70 meters and the seabed composed of silt and sandy soil, using scaled model air-drop tests and theoretical calculations. The results show that the torpedo anchors have the ability to

fully penetrating into the seafloor but some uncertainty are still remain, for example, the holding capacity in sands, the influence of oscillations caused by the mooring lines to the sandy seabed and etc. It would be confidential to apply the torpedo anchoring technology in floating windfarm after the improvement in the understanding of the behavior of the torpedo anchor in sandy seabed.

浮式風力發電之發展現況

全球離岸浮式風機安裝示範計劃發展至今，至少有 13 個裝置容量超過 2 MW 的浮式風機示範計劃，其設計主要來自 7 個國家：挪威、美國、日本、法國、中國、丹麥及西班牙。近年來國內亦積極投入自行開發的行列，財團法人船舶暨海洋產業研發中心、台灣國際造船股份有限公司與臺灣大學馬開東教授博士帶領之離岸結構與繫泊系統研究團隊致力於設計適合臺灣產業供應鏈，並且能夠承載 15 MW 風力發電機的半潛式浮臺（Semi-submersible）—臺大浮臺（Taida Float）。

* 通訊作者，chlin.geo@mail.nsysu.edu.tw

臺大浮臺之浮臺結構和繫泊系統的設計已於今年 10 月，獲得美國船級社（ABS）的原則認可證書，此浮臺繫泊系統之設計條件為水深 70 公尺，預計使用 3×3 的垂鍊式（Catenary system）繫泊系統，可能部署於新竹、彰化或基隆外海，且底質為砂土或硬質黏土的環境條件，如圖 1 所示。

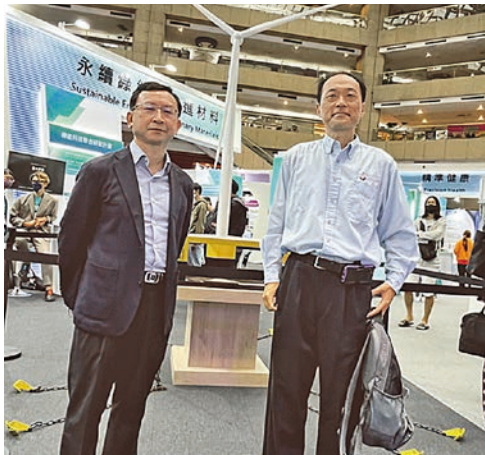
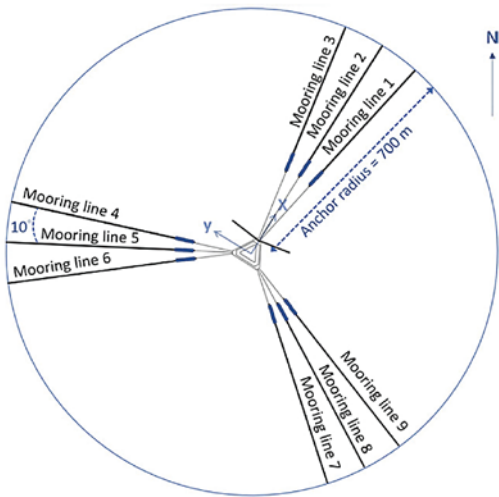


圖 1 臺大浮台模型參展（左為臺灣大學江茂雄教授，右為馬開東教授），以及其繫泊系統的示意圖（上）^[1]

常見之錨碇技術

繫泊系統基本是由錨碇（Anchor）以及繫纜（mooring lines）所組成，浮臺之受力（風、波、浪、流、風機等力）會經過繫纜轉移到錨碇上，透過錨碇將浮臺固定在設計的位置不發生漂流。選擇合適的錨碇除須考量其可提供足夠的錨碇力外，亦同時需要兼顧經濟性與可靠性。目前常見之錨碇種類（如圖 2 所示）根據其錨碇力來源、錨碇力方向性以及安裝方式的不同有重力式（dead weight）、打擊式基樁（Driven pile）、拖曳錨（Drag embedded anchor）、吸力樁（Suction anchor）、重

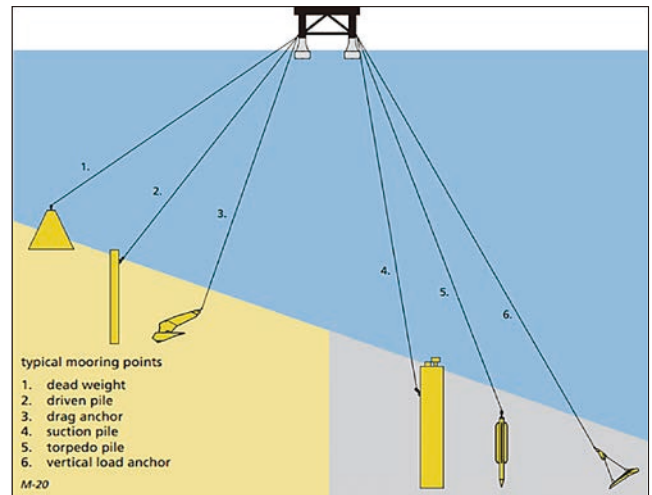


圖 2 各式常見之錨碇總類^[2]，作者於巴西外海安裝吸力錨

力式安裝錨（或稱魚雷錨，torpedo anchor）等多種，各技術之優缺點比較如表 1 所示。錨碇選用會依據錨碇力需求、安裝場址水深，土壤條件不同等而有所差異，為了選擇符合臺大浮臺繫泊系統之應用需求，對於各種錨碇技術於臺灣海峽應用可行性的議題在馬開東教授的推動下逐步展開。本文後續將針對重力式安裝錨於台灣海峽海域應用的安裝可行性評估進行說明。

重力式安裝錨介紹

重力式安裝錨是在 20 多年前由巴西國家石油公司所發明的，發明的過程非常戲劇化，其實是因為在巴西外海鑽探油井時發生事故而意外發現的新技術，當時海上鑽井船不小心把一根油井鋼管掉落到海底，之後嘗試各種辦法想要取回鋼管，只能發現鋼管已經牢牢的插入海床之中，無法取回。回報總公司之後，反而讓系泊部門運用巧思，宣佈發現了一種最快速安置海錨的全新方法，並且將這一種海錨命名為「魚雷錨」。到目前為止，巴西石油公司已經在巴西的深水海域，成功地安裝了超過 1,000 支的魚雷錨。

表 1 各式錨碇總類優缺點比較 [3,4]

特性	重力式錨碇	拖曳錨	板錨	樁（打擊樁、吸力樁）	重力式安裝錨（魚雷錨）
錨碇力方向	無特定方向	水平特定方向	無特定方向	無特定方向	無特定方向
安裝複雜性	中等	易	易	複雜（吸力樁中等）	易
可回收性	可	可	可	不可（吸力樁可）	不可
經費	低	中	中～高	高	低
優點	- 單位費用低 - 可提供垂直向錨碇力 - 可搭配拖曳錨作為沉塊	- 高度成熟之技術 - 具有完整之尺寸與型式 - 高水平錨碇力 - 安裝失敗可重新進行	- 較高之單位重量錨碇力 - 重量較輕 - 較正確之錨碇位置定位	- 可提供較大之垂直與水平向錨碇力 - 可有較小的錨碇半徑	- 可提供較大之垂直與水平向錨碇力 - 可有較小的錨碇半徑 - 安裝過程相對單純
缺點	- 可能須有較大尺寸，但會受限於運輸與起吊設備 - 相較其他錨碇法，水平錨碇力較低 - 錨碇力受海床坡度影響嚴重	- 無法提供垂直錨碇力 - 不適合較堅硬的海床 - 可能會因海床沖刷而錨碇失敗 - 須較大的錨碇半徑 - 可能產生非等量之錨碇系統受力 - 不易控制最後錨碇點	- 須詳細之海床土層資料 - 可能受板錨本身金屬疲勞或磨損的破壞	- 需要特定設備進行安裝 - 須詳細之海床土層資料 - 較昂貴 - 打擊樁受限於擊打設備 - 一旦錨碇力不足產生拉出破壞，錨碇力將降為零	- 受水深及土壤條件限制安裝可行性 - 一旦錨碇力不足產生拉出破壞，錨碇力將降為零 - 須詳細之海床土層資料

重力式安裝錨具有安裝快速且經濟的優勢。重力式安裝錨安裝過程是由安錨船將重力式安裝錨運至投放點並進行自由落體投放，透過錨本身的重量在下落過程中所獲得的動能衝擊海床並貫入土層，透過其貫入土層形成如同樁的構造提供繫泊系統所需的負載，由於其可提供水平與垂直的錨碇力，因此可適用於懸鏈式與張緊式繫泊系統。重力式安裝錨貫入土層深度受到外部海床土壤種類、釋放高度以及其自身質量、長徑比（與衝擊海床速度有關）、鰭片長寬比、鼻端形狀等因素影響，最常見之重力式安裝錨為魚雷錨，典型外觀如圖 3 所示，整體呈現細長幾何外觀，鼻端具尖錐狀，為保持其下落過程中的穩定，通常具有三或四個鰭片。其是由巴西石油公司所發想之一個創新概念，具有安裝快速、經濟的優勢，資料顯示，魚雷錨與吸力錨（suction pile）相比約可減少 40% 之成本。目前在巴西外海已安裝有許多魚雷錨作為永久繫泊之錨碇使用。美國驗船協會（ABS）已針對黏土質海床發表魚雷錨之安裝與設計技術規範。

由重力式安裝錨的錨碇力來源可知，貫入海床足夠的深度為此錨碇技術之最基本需求，因此在對於重力式安裝錨的可行性評估中，本文著重在探討魚雷錨在台灣西部

70 公尺水深之海域，針對砂質、粉土質類海床評估魚雷錨在投放後之衝擊海床速度及貫入深度。在方法上，首先藉由理論水動力分析方式求得魚雷錨衝擊海床之速度，並進一步探討鰭片面積相同下，鰭片長寬比對衝擊速度造成的影響。貫入深度部分則探討 5 種不同鼻端形狀對於貫入深度的影響，由於尚未有詳細的預計安裝浮臺海域的海床地質資料，因此粗略以土壤種類的不同，根據空氣投放結果整合文獻結果推估經驗公式，藉此評估貫入海床深度。

重力式安裝錨於台灣海峽海域之海床衝擊速度估算

魚雷錨在水中自由落體時的運動情形，得力於計算流體力學的發展，可有效採用數值模擬方式進行計算 [6]，然而在魚雷錨後端具有錨眼（padeye）以與繫泊纜繩連接，實際安裝時繫泊纜繩材質會採用以鋼鐵製作之錨鍊，魚雷錨在自由落體時後端的錨鍊同時下落，若要將此一併納入數值模擬中計算則會十分困難，因此在此將透過理論計算的方式進行估算。

假定魚雷錨在水中自由落體時作用於錨上之力包括重力、浮力及阻力，則在初始速度為零的情況下，其垂直下落速度 v 與時間 t 之關係可以下式獲得

$$v = k \frac{1 - \exp\left[\frac{-2kb}{m}t\right]}{1 + \exp\left[\frac{-2kb}{m}t\right]}$$

(1)

$$u = \int v dt$$

(2)

其中， $k = \frac{2W}{Cd \cdot \rho \cdot A_{ip}}$ 、 W 為錨碇塊水中重量、 ρ 為水



圖 3 典型之魚雷錨 [5]

的密度、 $b = \frac{Cd * \rho * A_{ip}}{2}$ ， u 為位移， A_{ip} 為魚雷錨截面積， ρ 為海水單位重， C_d 為魚雷錨水中阻力係數。魚雷錨本身之單位阻力係數可透過數值模擬結果與上式比對後獲得 [6]，而透過文獻 [7-9] 可蒐集到不同錨鍊尺寸與其單位阻力係數之關係得知其在 0.015 ~ 0.02 間，透過已知採用之錨鍊長度則可將錨鍊整體之阻力影響納入。為了解考慮錨鍊與否對於衝擊海床速度的影響，以及確認此概念的可靠性，採用巴西石油公司實際使用之魚雷錨 T-98 實際投放案例 [10] 進行比對，如圖 4 所示，圖中黃線為魚雷錨在水中自由落下之速度隨著時間增加的現場觀測數據，綠線為不考慮錨鍊阻力，採用數值模擬所得到的落下曲線，在投放 6 秒後，兩者間的速度有明顯差距存在。若將錨鍊阻力係數設為 0.02 後，與單純魚雷錨之阻力係數加總後，以公式 (1) 計算，結果如圖中藍線所示，其投放後 6 秒的速度較單純僅考慮魚雷錨之速度更為接近現場量測結果，但仍有差異，為更進一步了解現場觀測到之速度偏低的原因，根據案例 [10] 中觀測到投放過程中魚雷錨的下降角度偏移狀況，假設魚雷錨釋放後持續受到 15 度之傾斜角度，數值模擬計算獲得其阻力係數後加上錨鍊之阻力係數影響，則可獲得藍色虛線。雖然在整體下降過程的速度變化曲線非完成吻合，但在衝擊海床前的投放後第 6 秒時的速度已與現場觀測接近，顯示，魚雷錨釋放過程中的旋轉擺盪，是另一項可能影響衝擊海床速度的因子。

在透過案例獲得可靠之計算成果後，將此方法用於考量在臺灣海峽海域進行施放的衝擊海床速度估算。由文獻 [11-13] 參考魚雷錨之尺寸與幾何形狀，除考量 T-98 的設計外，另設計出 T-120、T-120.ver 兩種鰭片面積相同，但鰭片長寬不同的魚雷錨進行比較（相關尺寸如表 2 所示）。由於臺大浮臺設計水深為 70 公

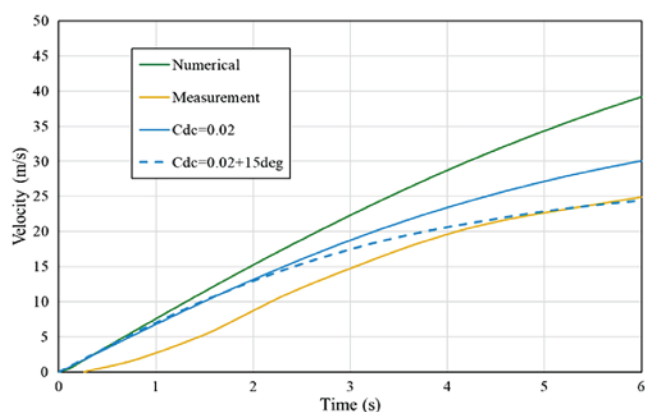


圖 4 T-98 實際投放與理論計算速度變化圖

尺，扣除其佈放時所需的起吊深度以及避浪深度，假定其水下自由落下之落距為 50 公尺，此外，假定採用 100 公尺長，單位阻抗係數為 0.02 之錨鍊，其落距與速度之關係如圖 5 所示，T-98、T-120、T-120.ver 在 50 公尺的落距下達到衝擊海床速度分別為 17.4、17.1、16.9 公尺/秒，差異並不顯著。透過此處獲得之衝擊海床速度將可進一步估算其貫入深度。

表 2 各式魚雷錨尺寸

錨型	質量 m	直徑 D	總長度 L	尖端角度 θ	鰭片 (長×寬)
T-98	98 噸	1.07 公尺	17 公尺	60 度	10 × 0.9 公尺
T-120	120 噸	1.2 公尺	20 公尺	30 度	11.4 × 1 公尺
T-120.ver	120 噸	1.2 公尺	20 公尺	30 度	8.3 × 1.5 公尺

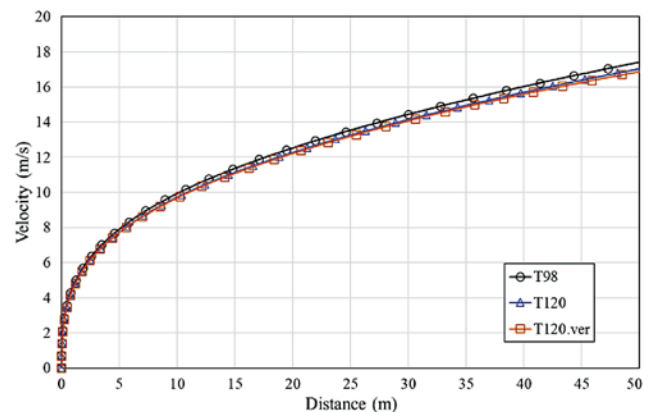


圖 5 落距 50 公尺（錨頭部距海床距離）時速度與距離之關係

重力式安裝錨於台灣海峽海域之貫入深度估算

對於魚雷錨在貫入海床深度的估算上，當有詳細的安裝位置海床資料時，可採用 True [14] 的估算法，亦可透過大地工程承载力理論以及樁身摩擦理論為基礎的數值模擬方法 [7,15] 進行估算。但有鑑於目前對於安裝海域之海床並未有詳細的鑽探資料，僅由既有台電一期、二期離岸風場之海床鑽探結果推估，台灣海峽之海床土壤有大概率由砂或粉土所組成，因此在對於貫入海床深度的估算上將採用僅考慮土壤種類的經驗法 [16] 進行。為了解經驗法中相關數據與國內砂樣數據的差異，規劃有縮尺模型錨的空氣投放試驗做為比對參考。

空氣投放試驗

為了解魚雷錨在海床中的貫入行為，主要是其衝擊速度與貫入深度的關係，本室內模型錨試驗目的主要是透過已知的土壤種類，驗證文獻與貫入深度的估算方式具可行性。由於貫入土層之行為牽涉到土壤材

料，土壤材料有其顆粒大小的物理作用與化學作用並存，並無法進行縮尺，一般在水工模型中的縮尺概念較不適用，通常會需要採用離心機以加大 G 值的方式進行縮尺模型，但受限於國內並無大型離心機設備，因此只能在 $1G$ 的環境下，採用不同頭部形狀之模型錨進行比較。空氣投放試驗之實驗配置如圖 6 所示，所用砂樣之平均粒徑中值 (D_{50}) 為 0.5 mm ，採用 MIT 土壤分類為中砂 (Medium sand)。

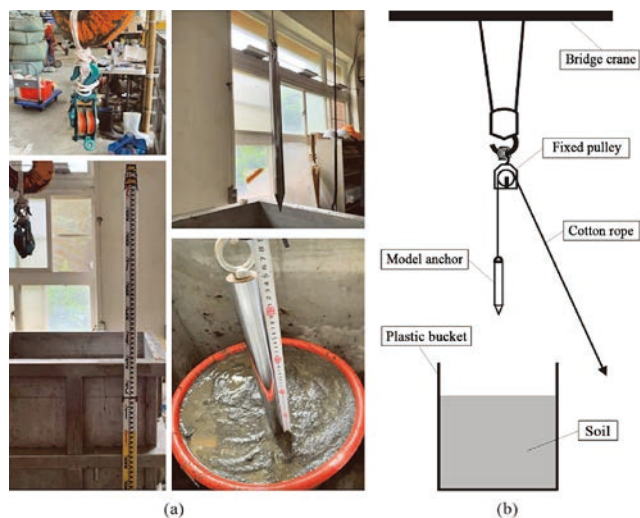


圖 6 空氣投放試驗：(a) 使用設備；(b) 實驗配置

此試驗中選擇了五種頭部形狀不同的模型錨幾何形狀分別為橢圓型、拋物線型、子彈型及圓錐型，模型錨之原型是參考 Fernandes, *et al.* [17] 所討論的錨長徑比 (L/D) 為 15，縮尺比例約 1:25，材料使用 304 不鏽鋼製造，模型錨之錨型如圖 7 所示。空氣投放試驗中所有錨型貫入深度整合結果如圖 8 所示，可發現尖型前端（子彈型、30 度圓錐型 60 度圓錐型）整體來說，比起鈍型前端（橢圓型、拋物線型）之頭部形狀具有更優良的貫入能力，而 60 度圓錐型與拋物線型表現的貫入趨勢相當接近。綜合實驗結果，當頭部形狀為 30 度圓錐型時可明顯達到較深的土壤深度，故為使魚雷錨衝擊海床後得到較高的錨碇能力，將頭部形狀設計為 30 度圓錐型是最佳選擇。

貫入深度估算

將上述試驗結果整合入 Zhang and Evans [16] 以數值模擬、室內試驗以及現地實尺寸試驗之資料整理方式，可得到圖 9。由圖中可見，在此圖中，先不考量本次試驗成果，過壓密黏土 (OC clay) 與砂的資料是在同一趨勢線上，而粉土 (silt) 則是另一個趨勢，且圖中顯示粉土為最難以貫入的土壤種類。若將本次試驗



圖 7 試驗用縮尺模型錨

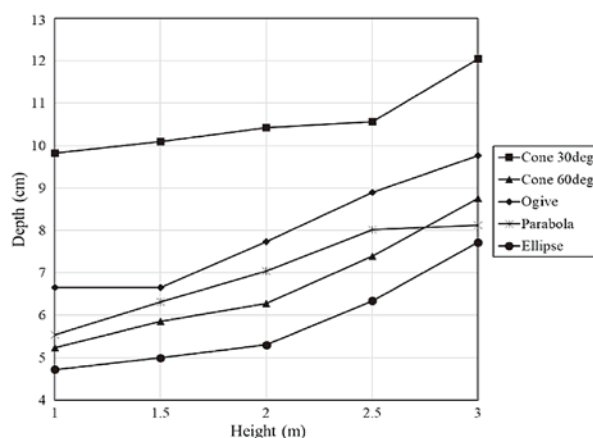


圖 8 模型錨之土壤貫入趨勢

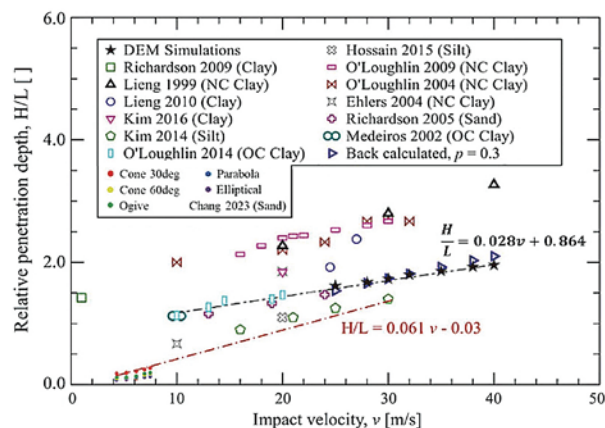


圖 9 模型錨試驗衝擊速度與貫入深度之關係
(改繪自 Zhang and Evans [16])

成果一併觀察，本次試驗採用試驗土樣為中砂，其落於接近粉土的貫入趨勢上，但顯然更低，在此尚無法說明此狀況是否是因為在縮尺模型錨 $1G$ 的試驗情況下所造成的尺寸效應，但就保守的評估可言，可將此資料一併納入後，進行回歸得到貫入深度的下邊界，而過壓密黏土與砂的趨勢線則為貫入深度的上邊界（假定台灣海峽海域並無厚黏土層的海床）。

則在此經驗式的上邊界趨勢線為，

$$\frac{H}{L} = 0.028v + 0.864 \quad (3)$$

其中 H 為貫入深度， L 為錨長， v 為衝擊速度。在此狀況下，T-98、T-120、T-120.ver 在 50 公尺的落距下所能達到的衝擊海床速度，可分別貫入 22.98、26.86、26.74 公尺，表示此三種錨型在偏向砂質海床土壤中能夠完整貫入，且魚雷錨最末端上方尚具有 5.98、6.86、6.74 公尺的土壤覆蓋。而在此經驗式的下邊界趨勢線為

$$\frac{H}{L} = 0.061v - 0.03 \quad (4)$$

T-98、T-120、T-120.ver 在粉土質分別可貫入 17.53、20.26、20.02 公尺，雖然在錨身之端部上方尚有 0.5 公尺的覆土存在，勉強達到可行性的標準，但由於此處並未考量鰭片與土壤間的摩擦力影響，很可能最後無法整根沒入海床中。

結論

台灣離岸風場之開發朝大水深邁進，浮式風機之系統為可能之考量，臺灣目前已有自行開發之臺大浮臺可做為浮式風機系統之浮臺使用，而其中，其配合之錨碇技術為一關鍵考量重點。本文章針對具本土化潛力之魚雷錨，先行針對在 70 米水深，落距 50 公尺之砂性土壤海床進行安裝可行性評估，在考量魚雷錨末端繫掛有錨鍊的情況下，以單純與土壤相關之經驗式方式進行貫入海床深度推估，魚雷錨具有整體沒入海床之能力，具有高度可行性。但目前為考量穩定魚雷錨用之鰭片可能產生的貫入深度影響，需進一步試驗以獲得更為肯定之成果；另方面，本研究下一步將針對魚雷錨於砂質土壤中貫入後所具有之錨碇力，以及魚雷錨受錨鍊反覆作用下，對其在砂層中錨碇力的影響。惟繫纜系統在錨碇技術的選擇上除須達到功能性以及經濟性外，其可靠性亦須一併納入考量，前述中對於魚雷錨的不確定性，仍有待時間進行改善提升，在具有執行期程壓力下，雖然魚雷錨之使用仍具潛力，但在採用臺大浮臺的實海域測試計畫中，將先行採用拖曳錨技術。

希冀後續可進一步完善魚雷錨在台灣海峽海域之應用探討，收集桃竹苗外海深水區的實際海床土壤資料，以了解沙層的存在及厚度所造成的影響，來進行正式的可行性分析，並最終提供開發商和工程顧問公司，做為未來台灣海峽大水深浮式風機錨碇選擇之一。

誌謝

本研究由教育部的玉山學者（Yushan Fellow），以及科技部計畫編號 NSTC112-2218-E002-049 之我國浮

動式離岸風機 TRL5-7 實海域測試機組設計分析及場域規劃 (I) 計畫提供研究資金。

作者群感謝感謝美國海洋工程業界的專家吳哲芳博士和陳東輝博士提供寶貴的意見與評論。另外，感謝巴西魚雷錨 DELP 公司 Thomas Agnevall 提供的資料及指導。最後，也感謝荷蘭 Vryhof Anchors 海錨公司 Leo Bello 的長期技術諮詢。

參考文獻

1. Chen, C.A. and others. (2023). Specification of Mooring & Anchor System Ver. 1.1.1. Energy Research Center, National Taiwan University, January 2023.
2. Vryhof Anchors B.V. (2015). VRYHOF MANUAL–The Guide to Anchoring.
3. Oregon Wave Energy Trust (OWET). (2009). Advanced Anchoring and Mooring Study.
4. Rodriguez, R., Gorrochategui, I., Vidal, C., Guanche, R., Cañizal, J., Fraguera, J.A., and Diaz, V. (2011). Anchoring Systems for Marine Renewable Energies Offshore Platforms. OCEANS 2011 IEEE-Spain.
5. de Aguiar, C.S., de Sousa, J.R.M., Ellwanger, G.B., Porto, E.C., Junior, C.J., and Foppa, D. (2009). Undrained load capacity of torpedo anchor in cohesive soils. Proc., 28th Int. Conf. *Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME, New York, 2009-79465.
6. 張宏駿 (2023)，重力式安裝錨於臺灣海峽之可行性評估，國立臺灣大學碩士論文。
7. O'Beirne, C., O'Loughlin, C., and Gaudin, C. (2017). A release-to-rest model for dynamically installed anchors. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **143**(9), 04017052p.
8. Liu, J., et al. (2018). Experimental investigation on hydrodynamic characteristics of gravity installed anchors with a booster. *Ocean Engineering*, **158**, pp. 38-53.
9. Blake, A. and O'Loughlin, C. (2015). Installation of dynamically embedded plate anchors as assessed through field tests. *Canadian Geotechnical Journal*, **52**(9), pp. 1270-1282.
10. Brandão, F., et al. (2006). Albacora Leste field development-FPSO P-50 mooring system concept and installation. Offshore Technology Conference. OnePetro.
11. Anchortec. (n.d.). Anchortec Torpedo Piles. Retrieved from <https://anchortecsolutions.com/torpedo-piles/>
12. de Araujo, J.B., Machado, R.D., and Medeiros Junior, C.J. (2004). High holding power torpedo pile: results for the first long term application. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.
13. American Petroleum Institute. (2005). Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures. API Recommended Practice 2SK.
14. True DG. (1975). Penetration of projectiles into seafloor soils. DTIC Document.
15. NACFAC. (2011). Handbook for marine geotechnical engineering. Naval Facilities Engineering Command Port Hueneme CA Engineering Service Center.
16. Zhang, N. and Evans, T.M. (2019). Discrete numerical simulations of torpedo anchor installation in granular soils. *Computers and Geotechnics*, **108**, pp. 40-52.
17. Fernandes, A.C., Araújo, J.B., Almeida, J.C.L., Machado, R.D., and Matos, V. (2006). Torpedo Anchor Installation Hydrodynamics. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, **128**(4), 286-293.