



海事工程機具之測試與確證方法

Joost Remmers / 荷蘭商欽務德工程設計有限公司 資深工程師

丁柏村* / 荷蘭商欽務德工程設計有限公司台灣分公司 業務經理

姜炎璋 / 荷蘭商欽務德工程設計有限公司台灣分公司 工程師

因應淨零碳排政策，各國政府皆致力發展綠色能源，而離岸風能亦於近年迅速發展。而海事工程更是離岸風能產業鏈中不可或缺的一環，如何使用適當的機具來建置風場，除了需要再前期進行設備之設計與優化，仍需進行測試來對機具進行驗證，並須確保機具在專案進行中有無損壞的發生以防範可能的事故，因此本文將介紹如何在海事工程的前、中、後期進行設計、測試及確證，以期讀者對海事機具如何運作於離岸風場能有更深入的了解。

關鍵詞：海事工程、設計確證與優化、採購流程協助、損壞偵測與防範

In response to the Net Zero Carbon Emission Policy, governments are committed to the development of green energy, and offshore wind energy has been developing rapidly in recent years. Among the industry, marine engineering plays an indispensable role in the supply chain. To adopt the appropriate equipment for windfarm construction, design and optimization would be applied in the early stage. While it is still necessary to carry out testing to validate the equipment and ensure the integrity of equipment to prevent possible accidents. Therefore, this paper will introduce how to design, test and validate the equipment in marine engineering to offer an understanding of how marine equipment operates in offshore windfarms.

Keyword: Marine Engineering, Validation & Optimization, Procurement Assistance, Damage Detection & Prevention

前言

根據國際能源署 (International Energy Agency, IEA) 報告指出^[1]，隨著技術快速發展，離岸風機將愈趨大型化，如下圖 1 所示。因此在風場規模逐漸擴大之趨勢下，若在設計、製造和運轉的過程中存在不確定性皆可能會帶來安全風險或導致經濟效益不彰。

而目前市場上可取得的解決方法，通常包括現有資料研究 (desk studies)、設計規範 (design codes) 和常規規則 (conventional rules) 等，並無法適用於世界上各種

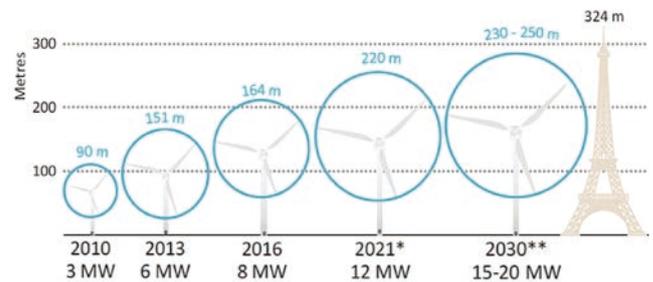


圖 1 風機大型化趨勢示意圖^[2]

環境條件例如風速、水深、地形及地質條件的案場，除了無法達到最佳經濟效益外，亦可能帶來安全風險。

因此面對各式案場，在海事工程的機具設計及專案運作過程中皆須面對不同的挑戰，因此須根據常規並針對個案條件來進行設計及優化，再導入測試來進行相關驗證，固本司將透過以下幾個相關案例來分享過往的實務經驗。

設計確證與優化

即便不同的案場對於機具的需求皆有所不同，需要再視情況進行調整及優化，但依據本司從事參與海事工程的過往經驗中，許多機具結構的原理皆是藉由兩個介面之間的摩擦力方能進行運轉。舉例如：

* 通訊作者，wtng@twd.nl

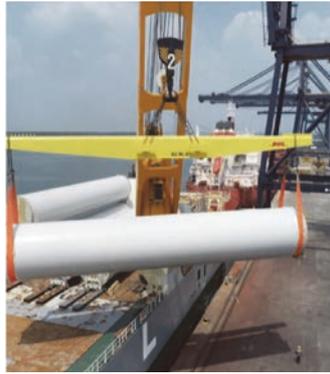
單樁海上繫固

(Monopile Seafastening)



塔架吊掛裝備

(Tower Handling Tools)



吊掛裝備

(Lifting Tools)



螺栓連接

(Bolted Connections)



同上所述，隨著時間的推移及產業技術的迅速發展，本司注意到離岸風能產業的共同趨勢即為風機尺寸的增加。近日中國更是在福建省外海建置目前世界上第一支裝置容量高達 16 MW 之離岸風機。由此可知，風場建置中對於海事工程的需求將不斷攀升，同時也需要更堅固的機具設計方能順利運作。而摩擦力在機具之運作中更是至關重要，若在摩擦係數上出現誤算除了導致額外的製作時間，降低工作效率外，最糟糕的情況下還可能產生安全上的疑慮。

因此，必須要對介面之間的摩擦力有更深入的了解及良好的掌握，如此一來方能在摩擦力的可行範圍內確保機具運作的工作效率，並可適當對機具進行優化及調整，以適應更嚴苛的海況及環境條件並延長使用壽命。

系統特性與材料特性

從過去海洋結構方面設計的經驗中，本司發覺在市場上現有的設計規範與實際操作之間仍存在一定的落差。由於遵循規範所產生的「標準化」摩擦力值並不一定正確且可能並不符合實際使用需求。摩擦力值可以受到許多因子之影響，例如接觸壓力 (contact

pressure)、粗糙度 (roughness)、濕度 (wetness) 和接觸面 (counter surface) 等。因此，我們將摩擦力視為一種系統特性 (system property)，而非單一的材料性質 (material property)。

案例：粗糙度對摩擦值的影響

如圖 2 範例所示，摩擦係數在某種程度上取決於接觸面的材料粗糙度。圖中展示了四種不同粗糙度的接觸面材料，從中可以檢測到不同的摩擦係數。由此可知，當專案運作過程中涉及運輸或吊掛物品時，若物品表面有烤漆或者產生鏽蝕時，皆會對摩擦係數造成影響，因此也需要在設計時納入考量。

案例：接觸壓力對摩擦值的影響

接觸壓力亦是影響摩擦力的另一因素。當兩種材料之間的接觸壓力增加時，摩擦係數則會相對減少 (如圖 3)。因此，接觸壓力在許多設計中都是需要被納入考慮的重要因素，如前所述之單樁海上繫固、塔架吊掛裝備和吊掛裝備等。而本司執行縮尺試驗與全尺寸試驗交互。結果如圖 3 所示，縮尺模型的測量與全尺寸的試驗結果有相同之趨勢。

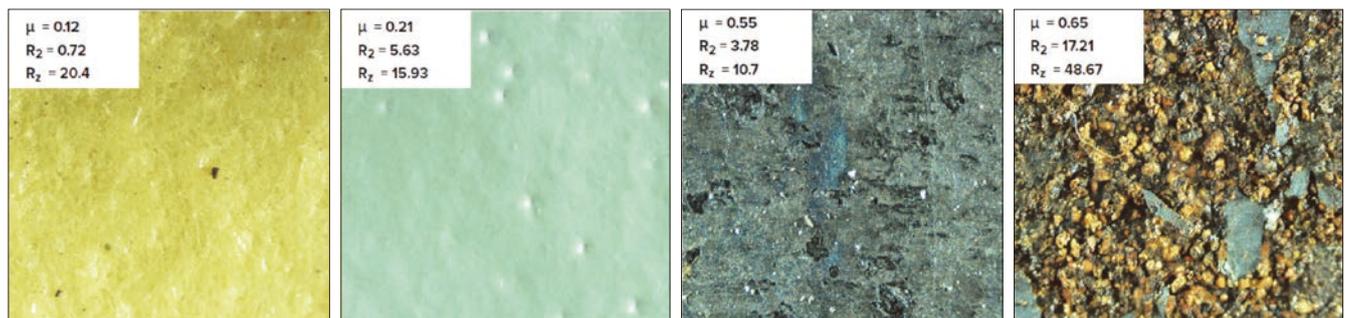


圖 2 不同表面類型對應的摩擦係數和粗糙度 [3]

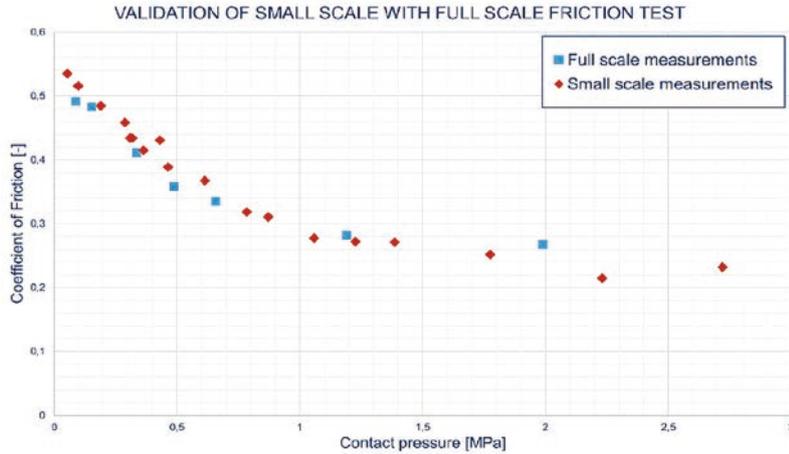


圖 3 通過接觸壓力減少摩擦之全尺寸與縮尺試驗驗證 [3]



圖 4 摩擦測試儀器 [3]

案例：摩擦力實驗

為了確保設計的安全性並優化工作效能，本司與台夫特理工大學（TU Delft）合作開發一套摩擦測試方法並已獲得 DNV 之第三方單位認證，能夠藉此測試方法獲取適用於不同作業條件的摩擦係數，如圖 4 所示。

摩擦機率測試

除了執行摩擦測試外，另有一種基於機率的摩擦確證方法。此方法藉由統計隨機試次之靜摩擦係數得出摩擦係數之機率分佈，在透過分析得出其位於 95% 信賴區間下之摩擦係數值。因此能夠將測量到的摩擦值直接納入設計計算中，從而提供更安全且具更佳的操作能力之設計。如圖 5 展示了在單樁運輸操作中使用的機率分析之一的範例。

採購流程協助

雖然大多數的海事工程設備都是由鋼鐵製成，但令人驚訝的是，這些結構中的關鍵接觸面（例如支撐墊、滾輪和滑動接觸面）往往由不同的異質材料製成。這些異質材料（例如聚合物、水密物和塑料）與鋼鐵並不相同，並不一定總是符合特定的材料標準和製造規範。

因此，當施加較大負載於關鍵接觸面並非鋼鐵的機具時，機具本身和接觸面的完整性將可能受損。因此，在採購過程中也須將此影響納入考量。

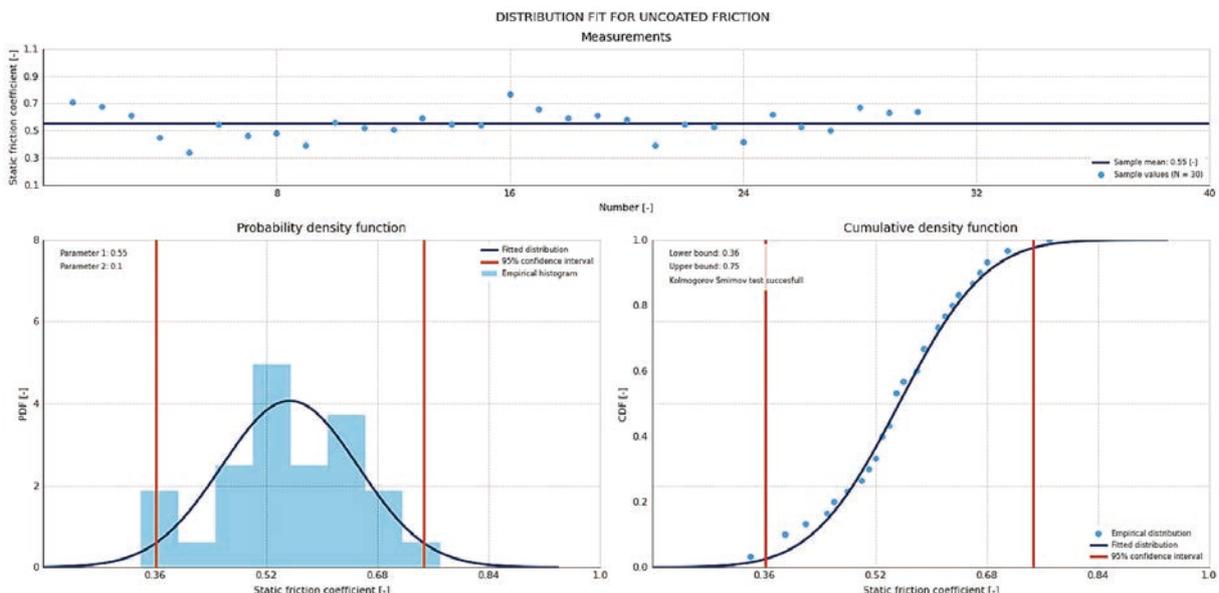


圖 5 單樁運輸中使用的摩擦係數的機率確證 [3]

縮尺測試

為了協助採購流程，一般來說，較直接且省時的方法即為進行縮尺試驗（如圖 6），如此方能在短時間之內驗證並比較所選擇的異質材料。

通過縮尺試驗將得出各種設計負載的性能表現，方能抉擇出最適合不同結構設計與作業條件下強度和剛性。由得出之結果可進一步協助採購流程，採購團隊可以根據上述數據做出最具經濟效益的採購方案。

案例：聚合物測試

在海事安裝中聚合物材料經常被用來支撐或引導風機組件（例如，通過繫固 / 吊掛葉片和單樁）。這些組件體積龐大而且通常較為脆弱。在安裝過程中，為確保組件的結構完整性，必須運用聚合物元素的剛性和強度之間的特性來進行確證。

在縮尺試驗中（如圖 7），可在短時間內運用設計負載來量測聚合物之正向力、剪力、隨時間之形變量和溫度效應。其結果可以用來確證在有限元素法下適當之材料模型。基於這些縮尺試驗的材料模型數據，可以預估全尺寸設計組件的於實際情況下之極限變形，以提高作業效能和安全性。

損壞偵測與防範

在海事工程的安裝和運輸過程中，若有任何損壞和延誤往往會導致高昂的成本，因此應盡可能避免。然而，離岸風力發電機組組件的介面負載更高，表面在風吹日曬下除了可能發生鏽蝕以外，也可能產生生物附着的情形，將有更高機率導致組件產生損壞（如圖 8）。



圖 6 全尺寸單樁支撐墊及縮尺模型^[3]

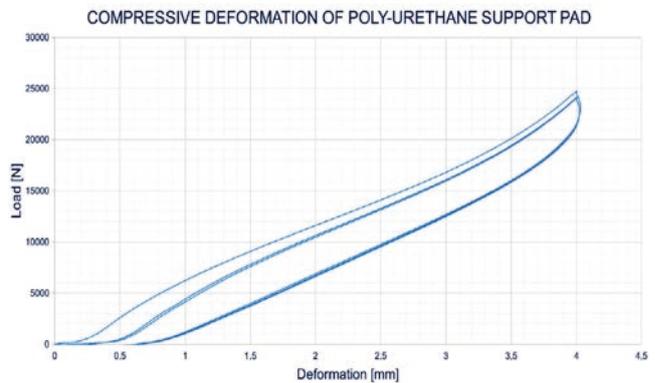


圖 7 材料變形與負載呈非線性之測試結果^[3]

雖然因為這些微小的材料損壞而導致機組失效的案例並不常見，但要再次修復塗層損壞的成本可能非常高。因此，通常需要更深入的調查來了解損壞的原因，方能在事前訂定適宜的預防措施，減少事後修復的成本，以下將介紹調查之方法。

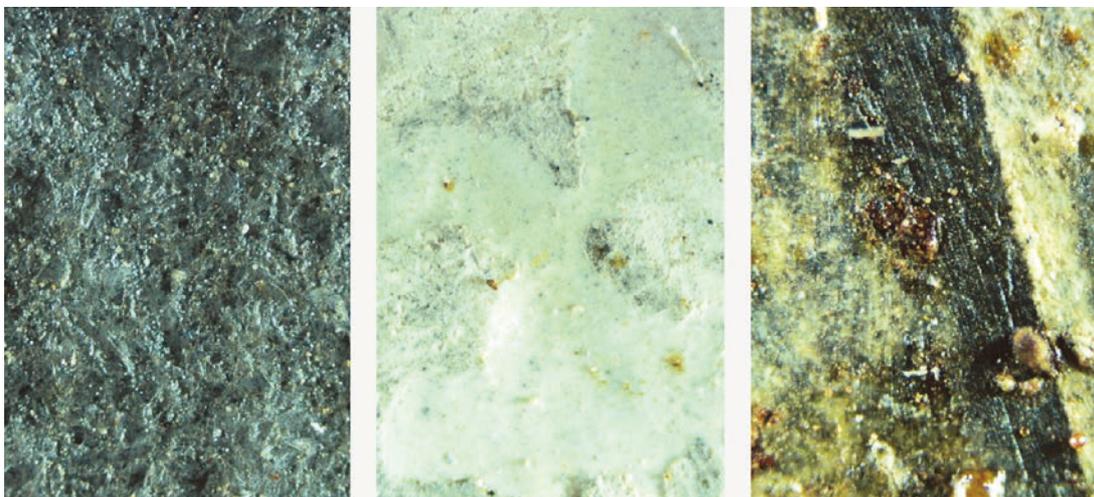


圖 8 通過微觀尺度下觀察到的材料損壞^[3]

鑑識工程學 Forensic Engineering

為了解決並對抗塗層損壞的問題，通過鑑識工程學的方法及測試設施，可以評估指定項目之失效機制，以便從根本解決問題。

鑑識工程學將模擬在實際運營條件下預期的失效情況，並提供符合 ISO-4628 標準的測試結果。所有的測試都是通過小尺寸模型，並且可以在短時間內完成。在此過程中亦經常會出現各種不同的可能性成因。

由於鑑識工程學的做法會將所有方面即成因接納入考量，因此，藉由完整的調查過程，可以根據鑑識之結果進行有效的修正和調整。

案例：塗層測試

在海事工程之運輸和安裝過程中，經常會發生界面塗層的損壞。通過模擬負載週期（如圖 9），可研究如何有效防止或緩解塗層持續損壞的方法。

每個測試項目通常只能從現有資料研究或現地調查著手。因此需將專業知識與現地數據相結合，以推導出可能的失效機制假設。再藉由鑑識設施進行縮尺試驗、即可快速且反覆地檢查表面壓力、剪力等。

然而如果發生塗層損壞，則會根據處理期間的設計負載，進行數個循環的壓縮和摩擦測試。方能找到損壞的根本原因。

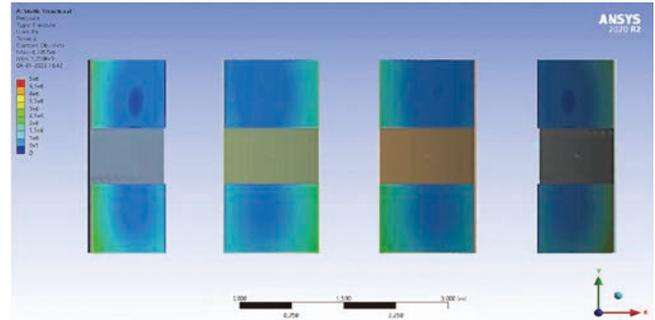


圖 9 有限元素法下單樁支撐墊之壓力分布分析 [3]

結論

如本文一開始所言，隨著風能產業日漸蓬勃，如何有效率地生產綠色環保能源已是國際上共同之課題。因此設計的過程若能對於可能風險的理解更高，便能夠有效降低意外發生以及損害發生時所引致的成本。

故本文先是介紹如何將摩擦力運用在海事工程機之設計，再闡述如何挑選適合的機具材料來完善採購流程，最後介紹損壞偵測之重要性，以期能把損害的可能性及傷害降到最低。

參考資料

1. Offshore Wind Outlook 2019 World. (n.d.). International Energy Agency. <https://www.iea.org/t&c/>
2. Lewis, M. (2023, June 29). The World's Largest Wind Turbine Is Now Installed in China. Electrek. <https://electrek.co/2023/06/29/the-worlds-largest-wind-turbine-is-now-being-installed-in-china/>
3. Remmers, J. (n.d.). TWD_Testing & Validation.

50 周年系列活動報導 — 112 年 7 月 21 日 臺灣鐵道發展史研討會



宋裕祺理事長開幕致詞



伍勝園局長致歡迎詞



胡政務次長宋理事長與主持人合影



主持人與貴賓於鐵道光廊合影