



離岸風機防蝕塗料系統實証與模擬 Demonstration and simulation of anti-corrosion coating system for off-shore wind turbines

樊耀鴻¹、劉彥甫²、潘宜明²、溫志中³、林明源⁴、李弘彬*¹

Yao-Hung Fan¹, Yen-Fu Liu², I-Ming Pan², Chih-Chung Wen³, Ming-Yuan Lin⁴,
Hung-Bin Lee*¹

中文摘要

本研究探討永記公司塗料分別在大氣區、潮差區、全浸區的腐蝕情形，建立塗裝防蝕系統，觀察防蝕系統塗裝基樁的腐蝕情形，海水吊掛試片結果調查水域環境以及附著生物造成的腐蝕影響，並利用 BEASY 模擬軟體模擬基樁陰極防蝕系統，建立系統化的防蝕塗料資料庫。研究結果顯示，大氣區試片塗料無明顯腐蝕現象出現，潮差區試片有大量藻類的附著且無法輕易擦拭，在漆面連接處有鏽蝕的現象，全浸區的試片塗層有起泡的情形，塗裝基樁的犧牲陽極消耗極少，表面塗層無劣化破損情形，模擬結果與現場量測結果相同，模擬結果正確且具可靠性。

關鍵詞：塗料、海水吊掛、離岸風機、模擬分析。

Abstract

This study investigated the corrosion of coatings in the atmospheric zone, tidal zone, and total immersion zone, and established a coating anti-corrosion system to observe the corrosion of the substrate coated with the anti-corrosion system. The results of the study showed that there was no significant corrosion in the atmospheric area, a large amount of algae in the damp area and could not be easily wiped off, rusting in the paint joints, surface coating no degradation and damage, simulation results and field measurement results are the same, simulation results are correct and reliable.

收到日期：112 年 07 月 29 日

修訂日期：112 年 10 月 03 日

接受日期：112 年 11 月 27 日

¹ 國立台灣海洋大學 光電與材料科技學系

¹ Department of Optoelectronics and Materials Technology, National Taiwan Ocean University

² 永記造漆股份有限公司

² Yung Chi Paint & Varnish MFG. CO., LTD.

³ 弘光科技大學 環境與安全衛生工程系

³ Department of Safety, Health and Environmental Engineering, Hungkuang University

⁴ 陸軍專科學校 機械工程科

⁴ Department of Mechanical Engineering, Army Academy

*聯絡作者：lhb6018@mail.ntou.edu.tw

bubbling in the submerged area, minimal consumption of anodes in the painted pile, and no deterioration of the surface coating. The simulation results were the same as the field measurement results, and the simulation results were correct and reliable.

Keywords: Coating; seawater hanging; offshore wind turbine; simulation analysis.

1. 前言

1.1 離岸風機台灣發展

近年離岸風力發電產業在媒體大量的報導下，成為大家對於綠色能源首要矚目的目標，台灣的能源有 98% 來自進口，開發自給自足的替代能源刻不容緩，是台灣人在未來共同的目標，所以政府設定在 2025 年前將再生能源提升至 20%，其中風電能源的發展絕對是首要之重。根據 4C Offshore 的研究報告，全球前 20 風力發電最良好的觀測地，台灣就佔據了 80% 所以台灣在發展風電產業的先天條件下，擁有獨一無二的優勢^[1, 2]。

1.2 海洋環境

海洋的環境非常惡劣，暴露於紫外線輻射且富含氯化物的鹽分環境，頻繁的潮濕與乾燥的循環，還會有海上漂流物造成的汙染與損耗，因此保護塗層的選擇很大程度上取決於暴露區域的特性，並且必須抵抗暴露區域的特殊環境以確保塗裝下底材的耐用性^[3-5]。

大氣區(Atmospheric Zone)：

大氣區位於海平面以上，海上結構物暴露於大氣中各種介質，其腐蝕特性：強紫外線、海洋大氣中的高濕度、晝夜溫差大、表面容易凝結，腐蝕的嚴重程度與潮溼的時間有關。

潮差區(Tidal Zone)：

潮差區處在大海潮汐的高潮位與低潮位中，頻繁的受到海水與太陽交替帶來的影響，溫差相當巨大，還需抵抗海浪所帶來的海上漂流物造成的衝擊，腐蝕速率會受到潮汐更替的頻繁程度造成影響。

全浸區(Submerged Zone)：

全浸區自始至終浸泡在海水裡，腐蝕速率會受到海水中深度、鹽度、酸鹼值與溶氧量等參數的影響。

離岸風機所處在的環境，是由 ISO 12944-9^[6]訂定之 C5M 與 Im2 的環境，針對此種環境訂定所需的塗層規範，依照此種規範下實驗與開發出更好的抗腐蝕塗料，以此為目標去努力。

1.3 海洋附著生物

台灣位處亞熱帶海洋生物繁殖旺盛，海洋結構物因為海洋附著生物的依附生長，加速水下材料、結構物腐蝕或局部破壞。海洋附著生物種類與繁殖會隨著季節、海水溫度、光度、水深、溫度、潮汐而有所不同，亦須考量季節性消長與生物群特徵等相關影響，附著生物會引起附著層內外之氧濃度差電池腐蝕，部分海生物生長會破壞金屬表層的塗層，若再加上水流與浪潮有機會導致塗層的剝落與劣化的產生^[7, 8]。

1.4 陰極防蝕與模擬

CP (Cathodic Protection)陰極防蝕^[9, 10]可分為兩種，犧牲陽極法與外加電流法，本篇文章所使用的方法為犧牲陽極法，此方法依靠兩種不同的金屬，在相同的電解質下有不同的電位，較高電位的金屬成為陰極，較低電位的金屬成為陽極，當兩種金屬導通時，陽極會被犧牲同時陰極的腐蝕會被抑制。犧牲陽極的選用都是以其化學電位相較鋼鐵低，有鋅、鋁、鎂不等。

在設計一個犧牲陽極系統，需要考慮到陰極保護電路電阻的計算，犧牲陽極和結構之間的電

位差，犧牲陽極的輸出，犧牲陽極的數量及犧牲陽極預計使用壽命等。陰極防蝕系統通常與塗層防蝕法一起使用，能夠在塗層遭到破壞的區域提供保護，延長使用的壽命。

陰極防蝕系統的模擬^[11]，能夠在設計完整個系統實施前，提供系統性能上的預測，能夠降低系統設計上的缺陷，也減少工程經驗上的要求，此外模擬結果提供相當多有用的數據，腐蝕速率、防蝕系統保護程度、保護電位等，提高整體陰極防蝕的設計效率。其中 BEASY 是專門提供工程專業上，陰極防蝕系統建模的軟體，所使用數值方法 BEM (Boundary Element Method) 邊界元素法相較 FEM (Finite Element Method) 有限元素法更具優勢，原因在於腐蝕與陰極防蝕是發生在物體表面的電化學現象，邊界元素法在處理這方面的問題更為合適。

2. 實驗方法

本研究分為兩部分，在基隆市國立台灣海洋大學小艇碼頭進行海水吊掛及塗裝基樁實驗，使用永記公司指定九種塗料進行測試，以離岸風機海上暴露區域進行區分，分別為大氣區、潮差區、全浸區，將試片放置於上述三種區域來進行塗層耐蝕研究。

海水吊掛實驗試片，各試片的塗料系統，表 1 所示。實驗試片的底材為 S45C 中碳鋼，試片尺寸 100 mm × 150 mm × 5mm，塗裝材料以永記公司(Yung Chi Paint & Varnish Mfg. Co. Ltd. KAOHSIUNG, Taiwan)，全部皆通過 NORSOK M501 認證。在試片上製造人工破損處完全通過塗層直至底材，確保充分暴露於測試場所，利用光學顯微鏡觀察塗層表面的形貌變化，初始試片試架如圖 1a 所示，並使用多參數水質儀如圖 1b，針對基樁與試架周邊水域，建立各次採樣間之海域水質溫度、鹽度、酸鹼度、溶氧、濁度基礎水質數據資料，以利瞭解區域性水質環境變動特性。

表 1 塗層系統。
Table 1 Coating systems.

System number	Total DFT in μm	Norsok M-501 Certificate
YCP-1	350	TAK000004K
YCP-2	285	TAK00000TK
YCP-3	1340	TAK00000WE
YCP-4	1280	TAK00000W8
YCP-5	600	TAK00001R7
YCP-6	600	TAK00001WB
YCP-7	360	TAK00001R4
YCP-8	360	TAK00001R6
YCP-9	600	TAK00001R5



圖 1 (a) 海水吊掛實驗初始試片分佈圖，(b) 多參數水質儀。
Figure 1 The initial distribution of specimens in the seawater hanging experiment, (b) water quality testing instrument.

塗裝基樁實驗以模擬離岸風機鋼樁，在海上所遭受腐蝕情形建立基樁防蝕系統，使用陰極防蝕法與防腐塗層法為主要防蝕方法，防腐塗層法以 YCP-1、YCP-5、YCP-8 分別為基樁大氣區塗層、潮差區塗層、全浸區塗層，陰極防蝕法選用符合 ISO 9001 標準之犧牲鋁合金陽極塊，對基樁進行目視檢查與保護電位量測。使用 BEASY 模擬軟體建立陰極防蝕系統，幾何模型，塗裝基樁邊界條件使用極化曲線，如表 2。海洋邊界條件參照水質檢測海水條件參數設定邊界條件，犧牲陽極使用鋁合金陽極塊，尺寸 48 mm (W) × 74 mm (H) × 790 mm (L)，陽極重量(Wa) 6.92 kg，海水比電阻 20 Ω·cm，防蝕電流密度選用為海水中 0.1 A/m²，陰極防蝕設計年限為 3 年，保護面積為 4.6 m²，所需陰極保護電流量 I_{mean} = 0.46 A，Q = 0.46 (A) × 3 (年) × 1.2 (設計裕度) = 1.656 A.yr，陽極最小重量 = 5.63 kg，鋁合金陽極消耗率(C) = 3.4 kg/A-yr，鋁合金陽極使用效率為 0.8，鋁合金陽極使用年限 3.5 yr，得到模擬分析結果後比對實際現場量測水下電位。

表 3 海水水質調查。

Table 3 Seawater Quality Survey.

日期	溫度(°C)	鹽度	酸鹼度	溶氧(g/L)	濁度(NTU)
2021/11/2	23.81	33.77	7.86	5.24	2.39
2021/12/2	20.51	31.67	7.87	6.91	1.46
2022/2/22	19.75	33.83	7.90	6.88	1.97
2022/5/13	26.87	15.83	7.98	5.35	0.47

表 2 塗裝基樁極化曲線。

Table 2 Polarisation data for coating steel.

Potential (mV/Ag/AgCl/seawater)	Current Density (mA/m ²)
-620	0
-661.79	103.58
-680	110
-702.39	113.35
-732.24	114.65
-764.48	113.67
-800.3	108.79
-867.16	101.62
-893.43	100.32
-938.81	99.994
-980.6	102.92
-1006.9	107.16
-1043.9	117.58
-1080.9	135.17

3. 結果與討論

3.1 海水吊掛實驗

實驗場址基隆小艇碼頭水質數據如表 3，量測時間從 2021 年 11 月至 2022 年 5 月，溫度 19.75 °C ~ 26.87 °C，鹽度 15.83 ~ 33.83，酸鹼度 7.86 ~ 7.9，溶氧量 5.24 ~ 6.91 (g/L)，濁度 0.47 ~ 2.39。

YCP-1 號塗料試片，如圖 2a,b 與 YCP-2 號塗料試片如圖 3a,b，放置在大氣區經過 10 個月試片無明顯鏽蝕，塗漆與底材的連結處無剝落的現象。

YCP-3 號塗料試片放置在大氣區經過 6 個月在人工破損處開始有鏽蝕的現象。第 10 個月觀察到塗層有起泡的現象，人工破損處的鏽蝕範圍逐漸擴大，如圖 4a,b。



圖 2 (a) YCP-1 試片第 10 個月，(b) 光學顯微鏡觀察。
Figure 2 (a) YCP-1 test pieces for the tenth month, (b) Optical microscopy observation.



圖 3 (a) YCP-2 試片第 10 個月，(b) 光學顯微鏡觀察。
Figure 3 (a) YCP-2 test pieces for the tenth month, (b) Optical microscopy observation.

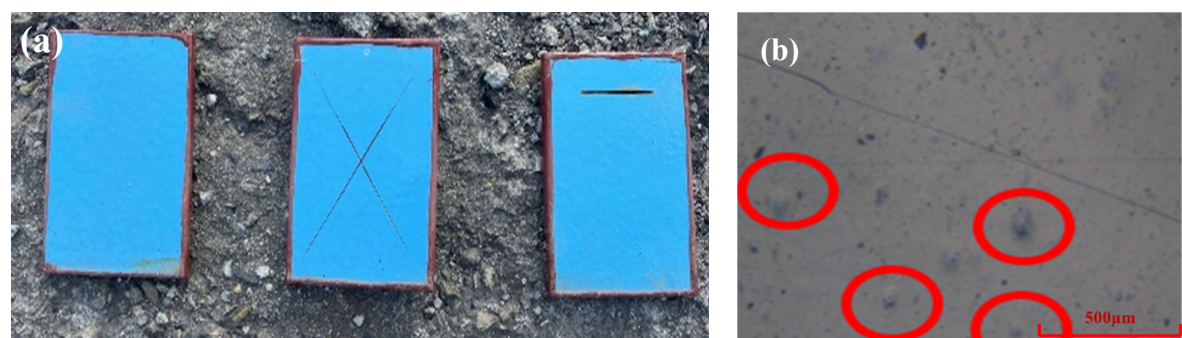


圖 4 (a) YCP-3 試片第 10 個月，(b) YCP-3 光學顯微鏡下塗層起泡。
Figure 4 (a) YCP-3 test pieces for the tenth month, (b) YCP-3 test piece bubbling.

YCP-4 號塗料試片，放置在潮差區經過 2 個月後試片表面有藻類附著，輕微擦拭可以清除。第 3 個月從光學顯微鏡觀察下，試片表面與人工破損處有藻類和少許貝類的附著。第 10 個月從光學顯微鏡觀察下人工破損處有鏽蝕的現象，但不影響漆面本身，塗漆與底材的連結處也無剝落的現象如圖 5a,b。

YCP-5 號塗料試片，放置在潮差區試片第 3 個月表面有藻類附著，輕微的擦拭可以清除掉。表面有貝類附著。第 10 個月人工破損處開始出現鏽蝕。表面增加大面積的藻類，貝類附著減少。從光學顯微鏡觀察下，鏽蝕處的塗漆與表面的連結處沒有剝落的情形。藻類的附著已無法擦拭清除，鏽蝕處擴大，但無影響到漆料，如圖 6a,b。

YCP-6 號塗料試片，放置在潮差區試片表面有藻類的附著，輕微擦拭無法清除。人工破損處與試片表面有藻類與貝類附著，塗漆與底材的連結處無剝落的現象。表面藻類減少，人工破損處

開始出現鏽蝕。表面增生大量藻類，貝類附著減少。第 10 個月從光學顯微鏡觀察下，人工破損處的鏽蝕擴大，但不影響漆面本身，塗漆與底材的連結處也無剝落的現象，如圖 7a,b。



圖 5 (a) YCP-4 試片第 10 個月，(b) 光學顯微鏡觀察。

Figure 5 (a) YCP-4 test pieces for the tenth month, (b) Optical microscopy observation.



圖 6 (a) YCP-5 試片第 10 個月，(b) 光學顯微鏡觀察。

Figure 6 (a) YCP-5 test pieces for the tenth month, (b) Optical microscopy observation.



圖 7 (a) YCP-6 試片第 10 個月，(b) 光學顯微鏡觀察。

Figure 7 (a) YCP-6 test pieces for the tenth month, (b) Optical microscopy observation.

YCP-7 號塗料試片，片放置在全浸區觀察人工破損處附近藻類的增生特別密集，並有少許貝類附著在表面。第 10 個月試片表面有大面積藻

類，從光學顯微鏡觀察下塗漆與底材的連結處無剝落的現象，如圖 8a,b。

YCP-8 號塗料試片，放置在全浸區觀察人工破損處開始鏽蝕並有藻類的附著。第 10 個月試片表面增生大量藻類，無法輕易擦拭清除。從光學顯微鏡觀察下塗漆與底材的連結處無剝落的現象，如圖 9a,b。

YCP-9 號塗料試片，放置在全浸區經過從光學顯微鏡觀察下，在人工破損處有藻類的附著。第 10 個月塗層表面增生大量藻類且出現起泡的現象，從光學顯微鏡觀察下塗層與底材的連結處並無剝落的現象，如圖 10a,b。



圖 8 (a) YCP-7 試片第 10 個月，(b) 光學顯微鏡觀察。
Figure 8 (a) YCP-7 test pieces for the tenth month, (b) Optical microscopy observation.



圖 9 (a) YCP-8 試片第 10 個月，(b) 光學顯微鏡觀察。
Figure 9 (a) YCP-8 test pieces for the tenth month, (b) Optical microscopy observation.

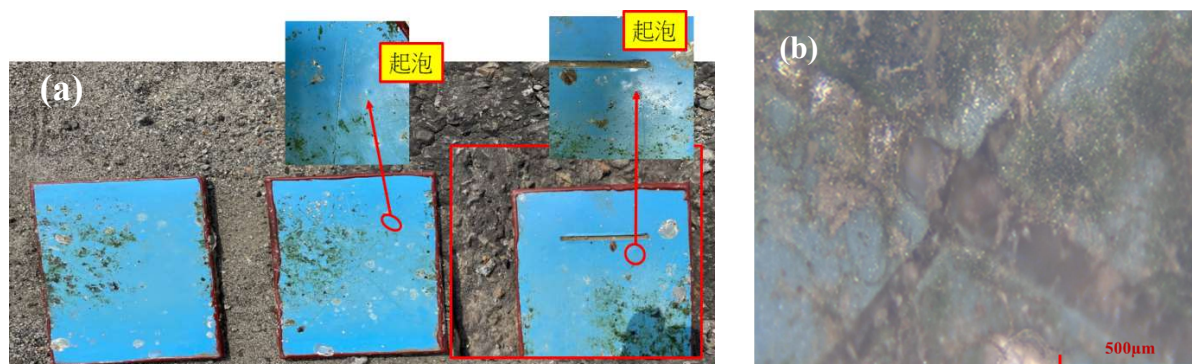


圖 10 (a) YCP-9 試片第 10 個月，(b) 光學顯微鏡觀察。
Figure 10 (a) YCP-9 test pieces for the tenth month, (b) Optical microscopy observation.

3.2 塗裝基樁實驗

基樁犧牲陽極塊損失極少，防蝕系統設計正確保護基樁不被海洋腐蝕。得到陰極防蝕水下基樁模擬結果-1077 mV 如圖 11a 與量測結果陽極塊保護電位-1053 mV 如圖 11b，符合 DNV-RP-B401 [12]所描述正確設計的陰極防蝕系統，在距離陽極塊越遠的基樁結構電位越小，相較靠近犧牲陽極塊基樁結構電位大。塗裝基樁實驗的模

擬，在電位分析中模擬電位與測量電位會因為一些因素而造成誤差，在構件模型時作為邊界條件的極化曲線沒有確實代表幾何結構的極化過程，測量上的隨機誤差等，從分析結果圖上能看到與陽極位置距離越遠電位越小，而基樁塗裝性能良好未有可見的塗層劣化情形，也導致其模擬結果與實際量測尚未有腐蝕與陽極消耗情形發生[13]。

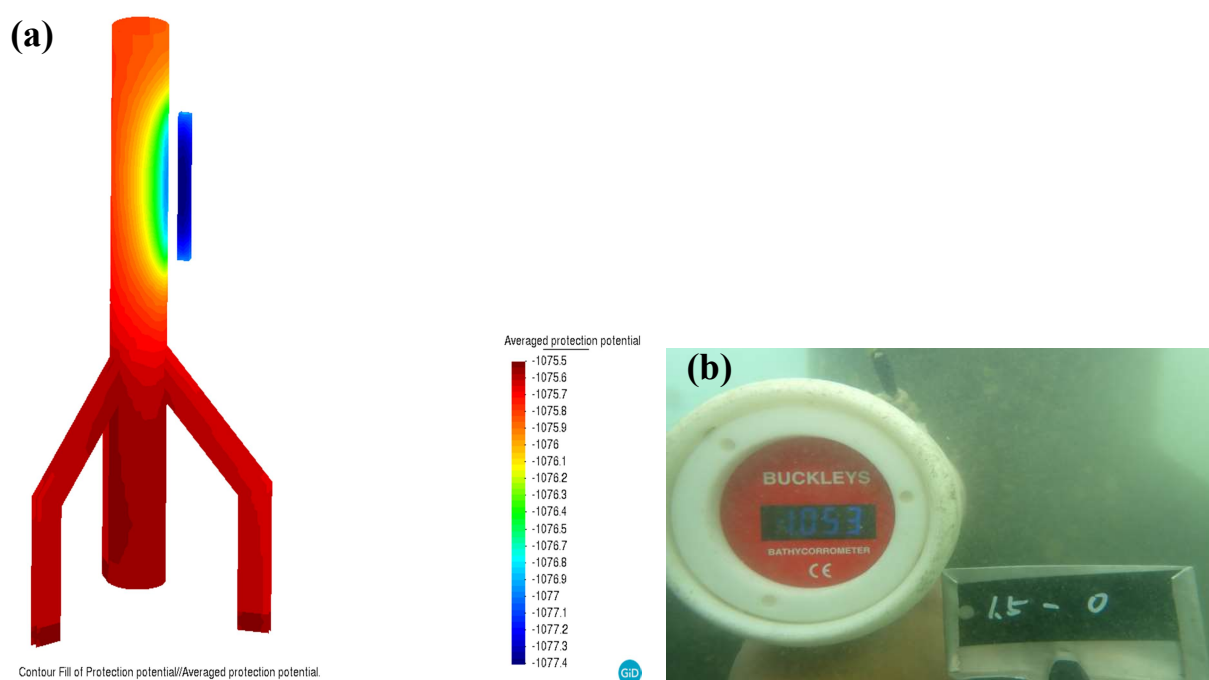


圖 11 (a) 模擬分析平均保護電位，(b) 量測基樁腐蝕電位。

Figure 11 (a) Simulation analysis of average protection potential, (b) Measurement of corrosion potential for steel plates.

3.3 海洋附著生物

海水吊掛實驗中，觀察到在潮差區的試片在經過第五個月後已經無法使用棉質抹布以手去擦拭清除表面藻類，而在第七個月增加大面積藻類的附著，是由於生長週期鄰近以及優勢藻類的附著導致。相對在全浸區的試片經過第四個月藻類的附著已經無法使用棉質抹布以手去擦拭清除，在第七個月出現大面積的藻類附著與貝類的附著，此種附著藻類的吸附能力與固化能力被更甚之的貝類接續附著[7, 8]。

塗裝基樁實驗經過 5 個月的海水浸泡(圖 12)，基樁塗層外觀無明顯劣化、剝落、起泡、破損、鏽蝕情形產生，結構沒有形變受損情形。塗裝基樁表面附著生物以藻類及二枚貝類為主如圖 12a，附著生物可以依照暴露區域大致劃分為潮差區及水下區。潮差區多附著藻類及牡蠣幼體如圖 12b，牡蠣約 2 cm，另有少量的藤壺出現，最大尺寸約 0.8 cm；水下區則以大量藻類附著為主。犧牲陽極整體皆被藻類覆蓋，覆蓋面積達 70%。

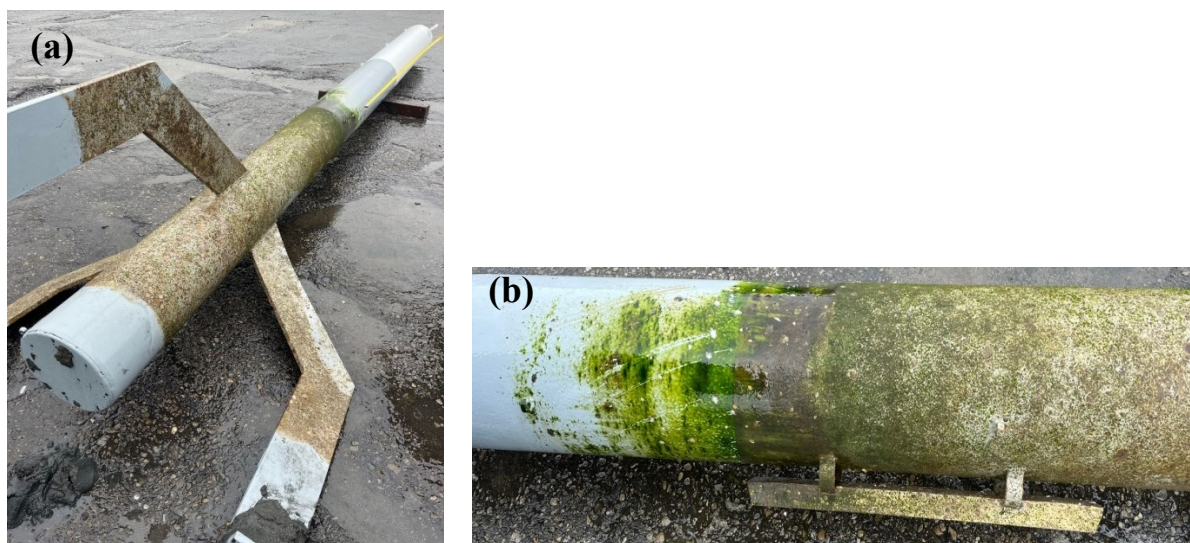


圖 12 塗裝基樁附著生物第 4 個月(a) 整體圖，(b) 放大圖。
Figure 12 Monopile biofouling (a) Overall picture, (b) Enlarge picture.

4. 結論

本研究以九種塗層於離岸風機基礎塗裝進行防蝕測試，大氣區：YCP-1、YCP-2 號塗層無明顯鏽蝕。YCP-3 人工破損處鏽蝕範圍有逐漸擴大的趨勢，塗層表面有起泡情形發生。潮差區：YCP-4 人工破損處處有鏽蝕的現象。YCP-5 人工破損處有鏽蝕的現象，且有大量藻類附著無法輕易擦拭。YCP-6 大面積藻類附著且無法輕易擦拭，人工破損處有鏽蝕的產生。全浸區：YCP-7 試片表面有大面積藻類，貝類附著減少，藻類無法輕易擦拭去除。YCP-8 人工破損處有鏽蝕的現象，試片表面有大面積藻類無法輕易去除。YCP-9 塗層表面有起泡的情形發生。

基樁塗層浸泡海水四個月後沒有劣化情形發生，結構也無形便受損，陰極防蝕系統正常運作。基樁陰極防蝕模型模擬結果與實際量測符合，驗證陰極防蝕系統設計正確，模型分析的結果能反映基樁實際情形。

致謝

本研究感謝國科會補助經費 MOST 111-2622-E-019-005 及永記造漆公司實驗設備之支援，使本實驗得以順利完成，特此一併致謝。

參考文獻

- [1] Global Wind Energy Council (GWEC), "Global Wind Report 2020", 2021.
- [2] 張哲偉、黃千倫、邱子慈、王幸君，「離岸風電產業介紹」，產業發展研究報告，2016。
- [3] "Evaluation of Protective Coatings for High-Corrosivity Category Atmospheres in Offshore Applications", A. López-Ortega, R. Bayón, and J. L. Arana, *Materials*, 12 (2019) p. 1325.
- [4] 詹子寬、樊耀鴻、吳宗峯、吳興練、李弘彬，「離岸風機水下基礎塗裝耐蝕性及耐海水沖蝕性研究」，110 年度防蝕工程年會，台灣南投，2021.11.26-27。
- [5] 吳興練，「離岸風機塔架塗裝系統耐蝕性評估」，106 年度防蝕工程年會，台灣台中，2017.8.31-9.1。

- [6] ISO 12944-9: Paints & Varnishes, Corrosion Protection of Steel Structures by protective paint systems Part 9: Protective paint systems and laboratory performance test methods for offshore and related structures, 2018.
- [7] 羅建民、黃宇謙，「離岸風電基地母港與鄰近海域的腐蝕因子調查」，交通部運輸研究所研究報告，2019。
- [8] 「離岸風機金屬腐蝕調查研究」，溫志中，林鳳嬌，羅建民，柯正龍，葉秀貞，港灣技術季刊，2019，第 88-109 頁。
- [9] 「陰極防蝕電化學基本原理」，蔡文達，防蝕工程，第 2 卷第 1 期，1988，第 1-11 頁。
- [10] M. Kutz, in: Handbook of Environmental Degradation of Materials, 2nd ed. (Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2005).
- [11] C. A. Brebbia, J. C. F. Telles, and L. C. Wrobel, in: Boundary Element Techniques – Theory and Application in Engineering (Springer Verlag Berlin, Heidelberg NY, Tokyo, 1984).
- [12] DNV-RP-B401: Cathodic Protection, 2016.
- [13] “Simulation of sacrificial anode protection for steel platform using boundary element method”, Z. Lan, X. Wang, B. Hou, Z. Wang, J. Song, and S. Chen, Engineering Analysis with Boundary Elements, 36 (2012) pp. 903-906.