



防蝕工程學會

防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>

防蝕工程



10.6376/JCCE.201612_30(4).0002

離岸鋼材現場腐蝕速率監測 On Site Corrosion Rate Monitoring of Offshore Steel

陳國銘*、吳興練、吳美惠、羅亦旋

K. M. Chen*, H. L. Wu, M. H. Wu, I. H. Lo

摘要

為了解不同強度等級之裸鋼材在台灣海峽環境下之腐蝕速率，配合台電離岸觀測塔興建工程，進行現場腐蝕監測設備之安裝建立，藉由腐蝕資料之蒐集分析，了解三種材料於海洋環境下之腐蝕速率及氣候條件之影響。研究方法包括腐蝕監測設備現場安裝方案及測試、腐蝕探針製作與測試、腐蝕監測設備於離岸觀測塔之安裝、監測數據之下載整理分析與設備維護等。經試驗結果顯示：1.平台上及潮間帶之 metal loss (μm)均以 S690 較低。S355 次之，A36 較高。2. A36、S355、S690 三種不同材質在平台上每個月之腐蝕速率變化程度相當大，變化趨勢一致，與環境中之相對濕度有較高之關聯性。3.潮間帶三種不同材質每個月之腐蝕速率以 S690 較低。可能由於 S690 具有緻密內層銹較具保護性。變化趨勢亦一致，經比對結果與環境中之溫度因子較為相近。所建立之腐蝕速率監測技術，未來可應用於監測離岸結構物鋼材於不同高程下之腐蝕性數據，做為發展鋼材與離岸結構物設計之基本數據。

關鍵詞：離岸；腐蝕監測；腐蝕速率；潮間帶。

Abstract

In order to understand the corrosion rates of bare steels with different strength grades in the environment of Taiwan Strait, the corrosion monitoring equipment was established on site on the platform of Tai-Power offshore observation tower. Through collection and analysis of the monitoring data, corrosion rates and environmental effects of three kinds of materials were found. The research methods included on-site installation plan of corrosion monitoring equipments, corrosion probe preparation and testing, corrosion monitoring equipment installed on the offshore observation tower, monitoring data download and analysis, equipment maintenance and so on. The results showed as follows: 1. Metal loss (μm) of S690 on the platform and in the tidal zone is the lowest, S355 followed, and A36 was the highest. 2. Corrosion rates variation of A36, S355, S690 on the platform were quite large every month, but they possessed consistent trends, and had a higher correlation with the relative humidity.

收到日期：2017 年 8 月 10 日

修訂日期：2017 年 9 月 28 日

接受日期：2018 年 09 月 30 日

中鋼公司綠能與系統整合研究發展處產品應用技術組

Green Energy & System Integration Research & Development Dept., China Steel Corp.

*聯絡作者：t113@mail.csc.com.tw

3. The corrosion rate of S690 in tidal zone was lowest per month. Probably due to the S690 has a dense and protective inner rust layer. The trends of corrosion rates of the three materials were also similar, when compared with the variations of the climate factors, it was similar with the temperature factor. The corrosion data of offshore structures under different elevations can be monitored with the established corrosion rate monitoring technology, and be used for the development and design of steel and offshore structures in the future.

Keywords: Offshore; Corrosion Monitoring; Corrosion Rate; Tidal Area.

1. 前言

離岸結構物由於所處之環境屬於高腐蝕性之海洋環境，除了安裝較陸地上困難外，材料腐蝕問題亦是結構物運轉壽命關鍵所在。為了使離岸結構物運轉壽命可達到預期之目標，在結構物運轉期間必須引入適當的腐蝕現場檢測、遠端監測與結構安全監診等定期維護機制，即時監控並了解結構的防蝕效果，以及防蝕系統劣化與結構劣化之情況，可預防早期失效發生。以離岸風機腐蝕防制而言，一般認為須要從風機設計發展階段就須考慮進去，不同階段應有腐蝕預防控制措施。例如在設計開發階段必須將腐蝕速率、腐蝕類型、腐蝕防制材料與方法等進行考慮，並進行加速性腐蝕測試或現場模擬監測以確認材料之適用性；而在風機製作階段則須對腐蝕防制措施之品質進行監控與確保；最後在風機運轉階段則須進行腐蝕狀況監控以確保防制措施沒有失效狀況。但腐蝕防制措施設計及安裝再怎麼良好，亦會有疏忽或不慎之處，可能由此引起底材之銹蝕，由於離岸不易修護，如果底材具有較好耐蝕性，將可降低結構物與塗層受損程度。另外海洋環境中影響

材料腐蝕因子相當多，藉由現場之監測與環境因子變化進行比對，可了解那些因子對材料腐蝕速率有較最大影響。所獲得之數據可提供未來在離岸風機或結構物設計時的參考。

2. 實驗方法與監測設備建立安裝

由於台電公司擬於彰化芳苑外海建立一觀測塔以蒐集相關之風波流數據，此一工程由中鋼公司得標，因此配合此一工程之進行，提出本研究進行不同風機材料現場腐蝕監測相關技術建立，了解風機材料於海洋環境下之腐蝕速率，蒐集相關數據並建立未來應用於實際風機上之腐蝕監測技術。本研究之研究方法如下所示：

2.1 腐蝕監測裝置之選用

腐蝕監測系統之選用必須考慮腐蝕因子種類與濃度、溫度、流速、壓力等。目前有許多直接與間接量測技術，但每一種都有其適用狀況。在某些狀況下，有些特定技術可能完全無法使用，某些技術可實行線上即時監測，但有些只能進行離線量測。表 1^[1]為常見四種腐蝕監測方法之比較。

表 1 線上腐蝕監測方法之特性與比較。

Table 1 The applicable scope of different on-line corrosion monitoring methods.

| | 電阻法 | 線性極化阻抗法 | 電感法 | 試片法 |
|-------|----------------|------------------|----------------|----------------|
| 適用性 | 所有腐蝕介質(測量金屬損耗) | 僅適用於連續電解質(電化學反應) | 所有腐蝕介質(測量金屬損耗) | 所有腐蝕介質(測量金屬損耗) |
| 反應時間 | 反應慢 | 快 | 反應快，1小時 | 反應很慢 |
| 腐蝕速度 | 平均腐蝕速率 | 瞬間腐蝕速率 | 平均腐蝕速率 | 平均腐蝕速率 |
| 靈敏度 | 較低 | 高 | 較高 | 低 |
| 外界影響 | 溫度系數大 | 較大 | 溫度系數小 | — |
| 價格/選材 | 較貴 | 比較便宜/靈活 | 貴 | 便宜/靈活 |
| 應用領域 | 實驗室/現場/線上 | 實驗室/現場 | 實驗室/現場/線上 | 實驗室/現場 |

經與腐蝕監測設備公司工程師討論結果，在觀測塔上進行腐蝕監測以電阻式探針(ER probe)較為合適，因為此種探針可使用在大氣環境下，不須要浸入電解液中，且其探針可消耗之厚度較大，在高腐蝕性環境下能使用較長時間，對於不易到達之場所較適合。因此在整體監測系統之規劃上主要以 RDC4 為資料蒐集器，如圖 1 所示，



(a) RDC 與 Checkmate



(b) Mate II



(c) 620HD 型號探頭

圖 1 電阻探針資料蒐集器與攜帶型數據下載設備及探針外觀。

Figure 1 The data collector and portable data transfer equipment and appearance of the probe.

由於此種監測設備尚無遠距離傳輸設備配合，因此只能定期前往讀取數據。所選擇之 RDC4 可儲存 2048 個電阻探針之數據，一個 RDC4 可同時接 4 支探針，假如設定每天量測一次數據，其數據容量可使用約 500 天，對於預計約 3 個月下載一次數據之頻率而言，數據容量足夠使用。RDC4 之電池公稱容量為 14 Ah，每支探針每小時量測一次可使用 177 天，4 支探針每小時量測一次則可使用 44 天，由此計算每天量測一次則可使用約 800 天以上，因此電池容量應夠使用。另外其操作溫度在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ ，可耐離岸觀測塔之溫度變化。

RDC4 監測數據之下載必須使用手持式資料下載設備讀取，主要有兩種，一為 Checkmate (如圖 1(a))，另一種為 Mate II(如圖 1(b))，本研究採用後者進行數據下載。

探針部份擬使用 model 620HD，金屬探頭為不規則形狀，鑲埋在樹脂中，其特性為防水性好，重量輕且容易安裝(如圖 1(c))。本研究擬在高潮帶上方約 1m 及觀測塔平台上各安裝 A36、S355、S690 等 3 種不同材質之探針，以監測其長期之腐蝕速率。

2.2 監測設備軟硬體之建立

RDC4 進行腐蝕速率監測，其配置圖如圖 2 所示。RDC4 為數據蒐集器，從 RDC4 內部之端子接延長纜線，再將探針纜線以快速接頭與延長纜線

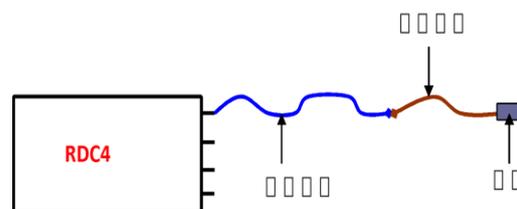


圖 2 RDC4 腐蝕監測系統之配置示意圖。
Figure 2 Schematic diagram of the RDC4 corrosion monitoring assemble.

相接即可。RDC4 內部整體之構造圖如圖 3 所示，雖可直接接 110V 交流電，但離岸環境無穩定交流電來源，因此只能使用電池組。電池組下方有三列端子排，包含 Channel 1~Channel 4 及設定用之端子排，每一 Channel 可連接個別之腐蝕探針並可獨立進行監測。另外由於監測設備欲安裝之環境腐蝕性高，為避免內部線路與端子受侵蝕導致失效，乃製作電氣箱以將 RDC4 安裝於內部。

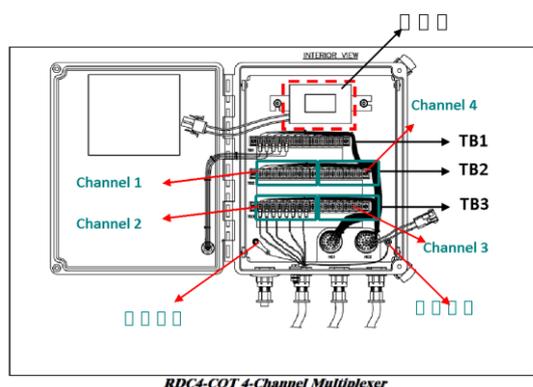


圖 3 RDC4 內部配置圖。
Figure 3 Schematic diagrams of the components of RDC4 interior.

RDC4 硬體建立完成後必須進行組態設定才能進行監測及蒐集資料。所謂組態設定即是告知 RDC4 那個 Channel 安裝什麼探針，多久時間量測一次等等相關信息與動作指令。組態設定方式有三種，一為直接使用 MateII 進行設定，第二種為使用廠商提供之 Corrdata Plus^[2]軟體進行設定，第三種為在 Corrdata Plus 軟體內設定完成後將組態傳給 Mate II，再以 Mate II 對 RDC4 進行組態設定。由於離岸不易到達且允許安裝時間短，設備必須

於實驗室確認功能正常及熟悉安裝與設定步驟，以期能順利完成安裝。

2.3 指定材質探針之訂製與實驗室之安裝測試

本研究擬在潮汐區與平台上各安裝 A36、S355、S690 等 3 種不同材質之探針，以監測其腐蝕速率。由於此三種材質非探針常用之規格品，乃提供材料請腐蝕監測設備公司進行製作。三種材質中的 S690 為實驗室煉製產品^[3]，另兩種為生產線產品，成分與機性如表 2^[4,5]所示。為製造 620HD 探針，我方提供尺寸為 35mm x 85mm x 2mm 三種材料進行製造，由安裝位置之高度估計所需探針纜線長度為 6 m。

2.4 離岸觀測塔現場安裝

觀測塔(圖 4(a))場址位於彰化芳苑外海，主柱中心之座標 N2655320、E176028(北緯 24°0'3.44"、東經 120°16'22.62")，由中國鋼鐵股份有限公司風電工程處承包，整體興建工程於 104 年 11 月 13 日完成。在監測系統現場安裝作業上，由人員先行登上平台，再以繩索吊掛方式將所有設備、工具等分批由船上吊起。在安裝方面，由於 RDC4 及延長纜線在出發前即已安裝妥當，因此在現場主要工作為將電氣箱安裝於欄杆上，其次為安裝腐蝕探針。本次規劃安裝兩組 RDC4，一組腐蝕探針以束帶固定在爬梯孔之欄杆上，如圖 4(b)所示，用來監測平台環境下三種不同鋼材之腐蝕速率，另外一組安裝在離最高潮位 1 m 處，腐蝕探針以束帶綁在爬梯旁。

表 2 三種探針材質主要成分與機性。

Table 2 The compositions and mechanical properties of the three probe materials.

| | C | Si | Mn | P | S | Cu | Cr | Ni | Al | N | 降伏強度(MPa) | 抗拉強度(MPa) |
|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-----------|-----------|
| S690 | 0.11 | 0.27 | 0.97 | - | - | 0.22 | 0.62 | 0.83 | 0.71 | 0.004 | 581 | 774 |
| S355 | 0.27 | 0.60 | 1.70 | 0.045 | 0.045 | 0.60 | - | - | - | 0.014 | 355 | 470~630 |
| A36 | 0.25 | 0.40 | - | 0.04 | 0.05 | 0.20 | - | - | - | - | 250 | 400~550 |

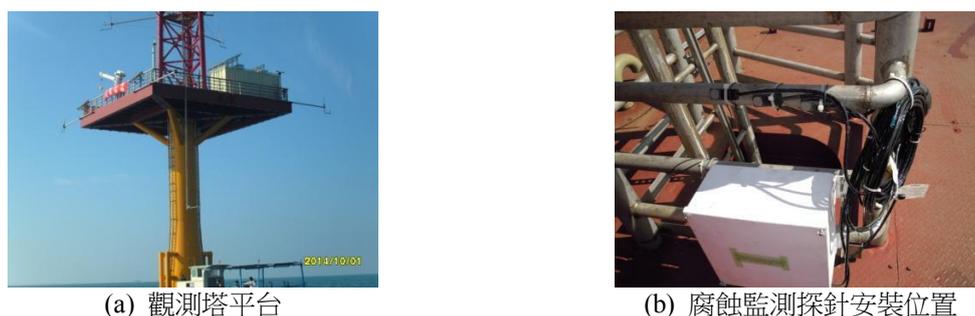


圖 4 觀測塔與腐蝕監測裝置安裝位置。

Figure 4 The platform of the wind observations tower and the installation position of corrosion monitoring system.

2.5 監測數據下載、更換探針及電池

腐蝕監測系統因為非遠距監測系統且使用電池做為電源，因此須要間隔一段時間前往下載數據、更換電池及腐蝕探針。本研究總共兩次前往觀測塔進行數據之下載、更換探針及電池。但第一次因海流潮汐原因，致使潮間帶之腐蝕探針則無法更換。

2.6 數據整理與分析

以 Mate II 從 RDC4 蒐集探針監測數據後儲存其內部，再傳輸至 corrddata plus 中儲存、作圖與計算腐蝕速率，其結果將與氣象局監測之天氣資

料進行比較，以了解那些環境因子影響腐蝕速率最大。

3. 結果與討論

3.1 監測數據分析

腐蝕監測數據經以 Mate II 下載後，依照步驟將數據傳輸到 Corrddata plus 中進行處理圖 5 為平台上腐蝕探針之 metal loss (μm) 隨日期之變化狀況，此處之 metal loss 為厚度減薄，非重量損失。在 2016.04.22 因更換探針，因此 metal loss 重新計算，另外各曲線之材質亦標示於圖中，同顏色曲線新舊探針材質不同，主要因安裝時未標示清楚。

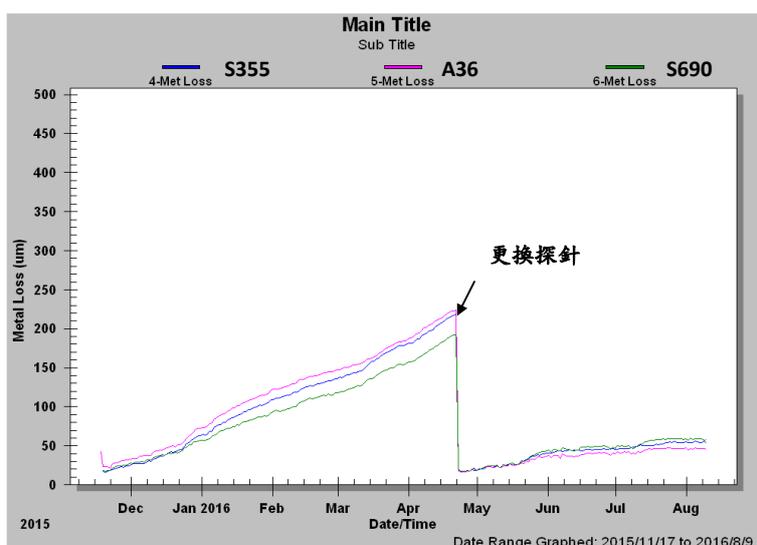


圖 5 平台上腐蝕探針 metal loss(μm)隨時間變化。

Figure 5 The metal loss (μm) of the three probes change with time on the platform.

上述 metal loss 非腐蝕速率，進一步以 Corrddata plus 計算腐蝕速率之功能進行每個月之腐蝕速率計算，所得結果再對月份作圖，結果如圖 6 所示，可看到三種材質不同月份其腐蝕速率之變化蠻大，最高達到約 700 $\mu\text{m}/\text{year}$ 。另外，三種材質其腐蝕速率走勢一致，研判可能為外在環境影響所致。S690 在 105 年 2 月前腐蝕速率最低，105 年 2 月至 4 月與 A36 一樣，使用新探針後其腐蝕速率略高於 S355，低於 A36，但其差距不大。

同樣對潮間帶兩次蒐集之數據進行處理，其 metal loss 數據隨時間之變化關係圖如圖 7 所示。由於未更換探針，因此其 metal loss 數據為連續性。圖 7 中可看出 S690 之 metal loss 較低。同樣以 Corrddata plus 計算腐蝕速率之功能進行每個月之腐蝕速率計算，所得結果再對月份作圖，結果如圖 8 所示，圖中顯示三種材質在 105 年 6 月前腐蝕速率變化約在 200~400 $\mu\text{m}/\text{year}$ 區間震盪，105 年 6 月後突然增加至 500~700 $\mu\text{m}/\text{year}$ ，顯示可能

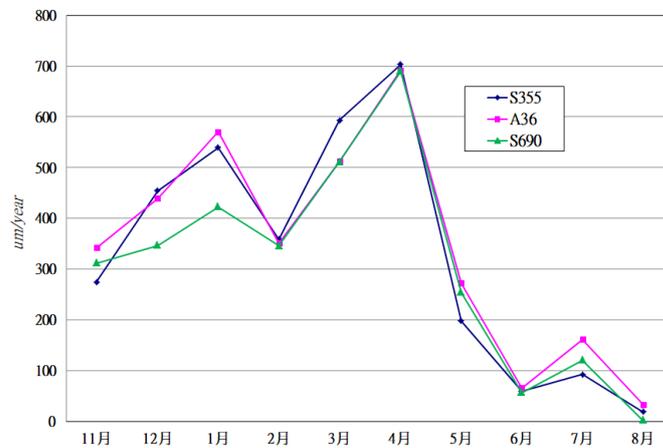


圖 6 平台上三種腐蝕探針 104 年 11 月至 105 年 8 月各月份之腐蝕速率變化圖。
Figure 6 The trends of the three probes corrosion rates on the platform from Nov. 2015 to Aug. 2016.

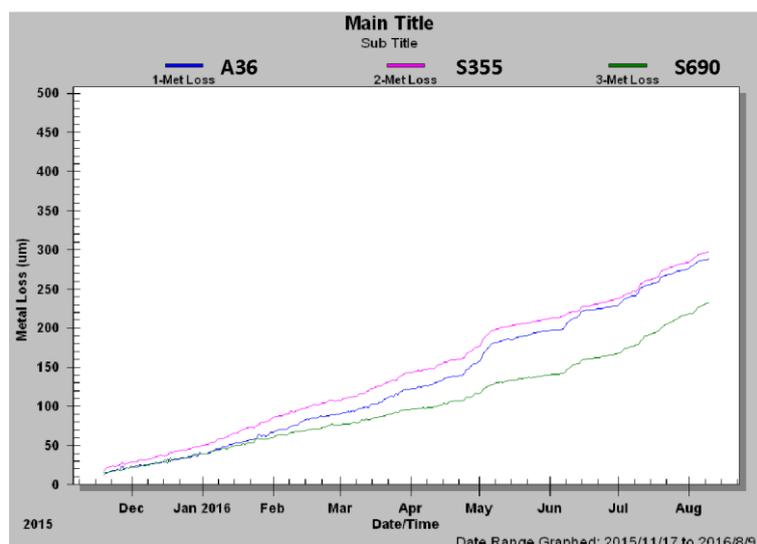


圖 7 潮間帶腐蝕探針之 metal loss(μm)隨時間變化。
Figure 7 The metal loss (μm) of the three probes change with time at the tidal zone.



圖 8 潮間帶三種腐蝕探針 104 年 11 月至 105 年 8 月各月份之腐蝕速率變化圖。
Figure 8 The trends of the three probes corrosion rates at the tidal zone from Nov. 2015 to Aug. 2016.

有某種因素使其腐蝕速率驟增。三種材質在 105 年 6 月之前腐蝕速率以 S690 較低，105 年 6 月後突然變成腐蝕速率最高，由於 S690 含有少量 Cu、Ni、Cr、Al 合金元素，其銹層由鬆散外層銹及緻密內層銹構成，因此較具保護性，而 A36 鋼只有鬆散外層銹，沒有緻密內層銹保護，因此研判 105 年 6 月後腐蝕速率突增可能因探頭內銹層潮濕且含有過量氯離子，使得 S690 內層銹無法保持緻密性，產生加速腐蝕現象。A36 與 S355 兩種鋼材其腐蝕速率互有高低，且變化趨勢一致。以 ISO 9223 依腐蝕速率分類，對碳鋼而言其 C5 等級為 80~200 $\mu\text{m}/\text{year}$ ^[6]，上述監測數據顯示除了平台上 6~8 月份之腐蝕速率外，其餘不論潮間帶或平台上環境腐蝕性皆遠超過 C5 等級。

3.2 腐蝕速率影響因子分析

對於在海洋環境下材料腐蝕速率之影響因子，在文獻中^[7]提出主要有下列幾項：水氣、空氣夾帶之污染物、地點、方向、氣溫、日照、風、曝露時間、開始日期、合金成分等，可見材料在海洋環境下影響其腐蝕速率因子錯綜複雜，有些因子

又互有關聯，要完全釐清不是容易之事。本研究中三種材質腐蝕探針分別安裝於平台上與潮間帶，基本上有些因子已固定，例如地點、方向、曝露時間等，而且其腐蝕速率分析結果顯示，三種材質變化趨勢有一致性，此說明環境可能是影響腐蝕速率變化之主要因素，此一環境因素最主要為氣候之各項參數變化。相關氣候數據由中央氣象局網站查得最接近觀測塔之氣象站為梧棲，蒐集梧棲氣象站從 104 年 11 月至 105 年 7 月之各種氣象資料並對月份作圖^[8]，結果如圖 9，將平台上三種探針之腐蝕趨勢圖(圖 6)，與圖 9 各種氣象參數變化圖對照，顯示平台上腐蝕探針之腐蝕趨勢與相對濕度之變更趨勢一致，亦即相對濕度可能是影響平台上探針材質腐蝕之最大因素。同樣將潮間帶監測之腐蝕數據走勢(圖 8)，對照圖 9，所列之氣象資料與圖 8 沒有走勢類似之現象，比較相近的是溫度與日照時數兩項，研判可能潮間帶之探針由於平台之遮蔽及接近海面，其雨量與相對濕度變化可能與平台上不一樣，因此推測潮間帶腐蝕走勢可能受海水潑濺濕潤與溫度兩者共同影響所致。

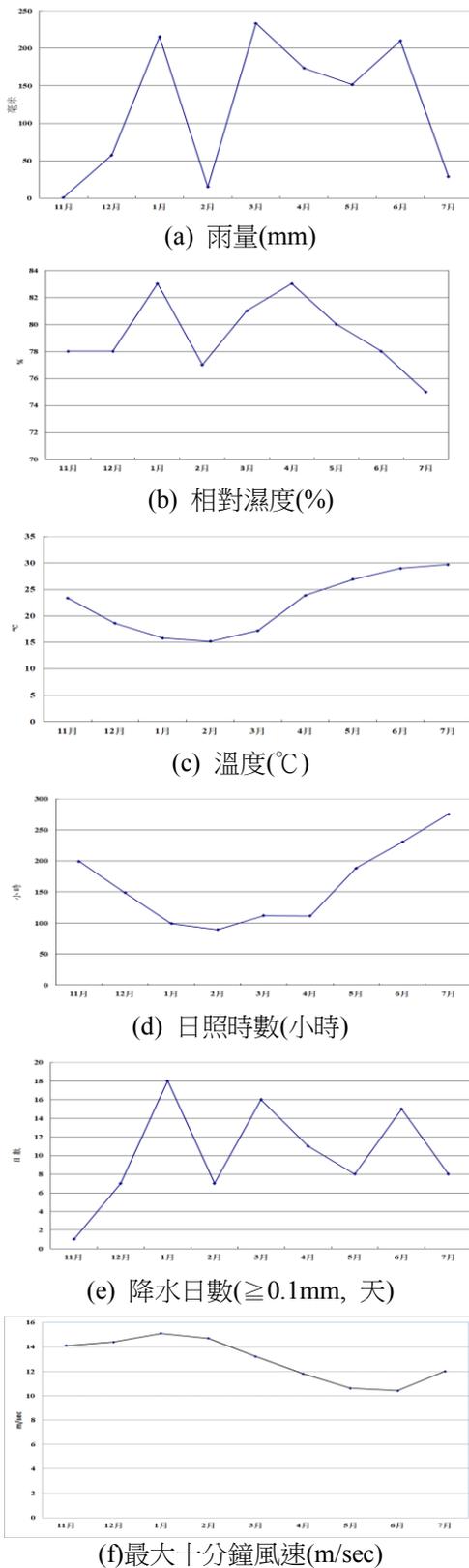


圖 9 梧棲氣象站各種氣象數據隨月份變化。
Figure 9 The various weather data change with the month at Wuqi weather station.

除了蒐集下載數據外，亦對監測裝置腐蝕劣化狀況進行觀察，因為位於海上，海風及日照可能對儀器設備之接頭與線路等造成劣化腐蝕。經過約9個月之曝露，電氣箱無明顯銹蝕劣化，RDC4 腐蝕監測系統主機內部線路與接點亦完好如初，如圖 10 所示，但腐蝕監測導線之快速接頭已嚴重銹蝕。



(a) 平台上腐蝕探針銹蝕狀況



(b) 導線未劣化，接頭已嚴重銹蝕



(c) RDC4 內部接頭、導線狀況良好

圖 10 腐蝕探針與 RDC4 內部狀況。
Figure 10 The degradation of corrosion probes, connectors and RDC4 interior.

4. 結論

1. 以 metal loss (μm) 而言，平台上及潮間帶均以 S690 較低，S355 次之，A36 較高。
2. A36、S355、S690 三種不同材質在平台上每個月之腐蝕速率最高可達 $700\ \mu\text{m}/\text{year}$ ，最低趨近於 0，變化程度相當大，且三種材質之腐蝕速率互有高低，且變化趨勢一致，經比較結果與環境中之相對濕度有較高之關聯性。
3. 潮間帶三種不同材質每個月之腐蝕速率，初期約在 $200\sim 400\ \mu\text{m}/\text{year}$ 區間震盪且以 S690 較低，105 年 6 月後突然增加至 $500\sim 700\ \mu\text{m}/\text{year}$ ，可能由於 S690 內銹層潮濕且含有過量氯離子，使得 S690 內層銹無法保持緻密性，產生加速腐蝕現象。A36 與 S355 兩種鋼材其腐蝕速率互有高低，且變化趨勢一致，經比對結果與環境中之溫度因子較為相近。
4. 監測數據顯示潮間帶或平台上大部份時間環境腐蝕性皆遠超過 ISO 9223 C5 等級。
5. 本研究為台灣首次針對離岸環境進行鋼材腐蝕速率監測，所使用之監測方法成功應用於離岸嚴苛環境之腐蝕性評估。

參考文獻

- [1] “淺談腐蝕監測技術及其應用”，程子萍，工業材料雜誌，第 253 期，2008，第 135~137 頁。
- [2] Rohback Cosasco Systems Inc, Corrdata Plus Software Manual, 2004.
- [3] 張耀南、楊子青、吳美惠，“離岸風機塔架用鋼耐蝕合金設計技術建立”，中鋼內部研究報告(編號：PJ102061)，2013。
- [4] DIN EN 10225: Weldable Structural Steels for Fixed Offshore Structures –Technical Delivery Conditions, 2009.
- [5] ASTM A36/A36M-14: Standard Specification for Carbon Structural Steel, 2014.
- [6] Richard B.Griffin, in: Corrosion in Marine Atmosphere, ASM Handbook Vol. 13C (ASM International, Ohio, USA, 2006) p.55.
- [7] Richard B.Griffin, in: Corrosion in Marine Atmosphere, ASM Handbook, Vol. 13C (ASM International, Ohio, USA, 2006), pp.42~43.
- [8] 交通部中央氣象局，梧棲站氣候統計資料，取自 <https://www.cwb.gov.tw/V7/climate/daily/Precipitation/dP.htm>。