

離岸風機扣件於不同荷重頻率之腐蝕疲勞行為研究 Effect of Loading Frequency on Corrosion Fatigue of Bolts Using in Offshore Wind Turbine Tower

羅亦旋^{*1}、吳興練¹、吳宗峯¹、陳國銘¹、吳美惠¹
I-Hsuang Lo^{*1}, Hsing-Lien Wu¹, Tsung-Feng Wu¹, Kuo-Ming Chen¹, Mei-Hui Wu¹

中文摘要

本研究主要針對鎖附風力發電機塔筒間之大型扣件，於離岸環境使用時之腐蝕疲勞行為研究。比較離岸式與陸域風機於操作時之差異，前者所承受的力源較複雜且環境亦更為嚴苛。離岸式風機受力主要來自風、海波及海流的交互作用；腐蝕源主要來自於海水飛沫區之鹽霧環境。利用拉伸試驗機以 Tension-Tension 週期式荷重模式，設定不同應力及荷重頻率參數，並加置鹽水噴霧系統進行其腐蝕疲勞行為解析。研究結果顯示，鹽霧環境相對於空氣環境會使扣件之疲勞壽命下降，原因為扣件表面因 Cl⁻ 侵蝕發生局部腐蝕，導致應力集中誘發疲勞裂紋；荷重頻率對腐蝕疲勞壽命下降之影響則以低荷重頻率更為明顯，原因為低荷重頻率之疲勞裂紋前端之 pump-effect 較高荷重頻率更為明顯，故於單次荷重週期條件下，腐蝕源對裂紋前端之塑性變形區之腐蝕時間較長，腐蝕現象對應力之加成作用致使低荷重頻率之腐蝕疲勞壽命明顯下降。綜合研究結果顯示，扣件在腐蝕性環境中承受週期式應力作用下，低荷重頻率之環境腐蝕作用對疲勞影響較大，高荷重頻率則以應力作用相對明顯。

關鍵詞：扣件、腐蝕疲勞、荷重頻率。

Abstract

Offshore wind turbines suffer more aggressive corrosion environment than onshore types due to the salt-fog attack in splash zone. Besides, bolts connect offshore turbine tower bear more complicated loading than that of onshore types. In this study, corrosion fatigue behaviors of offshore using bolt, loading frequencies and salt-fog environment were set with different loading stresses in cyclic tension-tension mode fatigue were investigated. The results show bolt fatigue life downgraded obviously in salt-fog as compare with that in air, which was due to

收到日期：108 年 02 月 10 日

修訂日期：108 年 03 月 17 日

接受日期：108 年 10 月 23 日

¹ 中國鋼鐵股份有限公司 綠能及系統整合研究發展處

¹ Green Energy & System Integration Research & Development Department, China Steel Corp., Co.

*聯絡作者：172858@mail.csc.com.tw

Cl- attack bolt surface and resulted in stress concentration sites. Corrosion fatigue life of bolt decreases evidently while lower loading frequency applied, the stress concentrated sites sustain corrosive attack. As a result, Cl- would penetrate through micro-crack and corrode the plastic zone apparently at maximum loading especially. On the contrary, corrosive attack at high loading frequency corrodes the stress concentrated sites would not be as apparent as lower loading frequency under one cycle fatigue. Therefore, salt-fog would damage corrosion fatigue life of bolts, and environment factor would dominate fatigue at lower loading frequency while mechanical factor dominates corrosion fatigue at higher loading frequency.

Keywords: Bolts; Corrosion Fatigue; Loading Frequency.

1. 前言

風機塔體結構乃先藉由鋼板銲接成塔筒，各塔筒間則利用法蘭定位並由扣件進行鎖附^[1]；根據文獻報導，扣件於不同應力狀態之有限元素分析結果顯示，陸域風機基座承受彎曲應力之扣件^[2]，或是機艙處同時承受扭力及疲勞應力之扣件^[3]，扣件實為風力發電機系統發生破裂之敏感區域^[4]。

根據 Ishihara^[2]研究指出，一旦鎖附風機塔筒間的部分扣件發生斷裂，將導致未發生斷裂之扣件承受之應力增加，亦即殘餘扣件承受的疲勞應力將明顯上昇；根據模擬研究分析結果顯示，當鎖附於法蘭的 17/60 扣件發生斷裂時，風機結構的使用壽命將由 27.5 年劇烈下降至 0.09 年。因此，由各研究結果顯示，主導風機結構壽命之主要因素乃扣件之使用壽命。

目前文獻探討以模擬有限元素分析扣件之受力狀態及其對塔架結構影響，或於大氣環境中進行疲勞試驗，試驗則針對預力及扣件構造對疲勞行為之影響。由於離岸風機之使用環境相對較陸域嚴苛，主要腐蝕源為海水飛沫區之鹽霧；然而，當扣件使用於離岸環境時，鹽霧對疲勞行為之影響則較少著墨。

本研究將針對鹽霧對扣件的腐蝕疲勞行為進行分析，並施加不同荷重應力及頻率解析其對扣件之腐蝕疲勞行為影響。

2. 實驗方法

2.1 材料

本研究選用目前風機使用之強度 10.9T(降伏強度約為 936 MPa)扣件為材料，並依 ASTM E8M 製作疲勞試棒。試棒平行部(Gauge)直徑及長度分別為 6.0 ± 0.1 及 25.0 ± 0.1 mm。

2.2 疲勞極限分析

於大氣環境中進行分析，最大疲勞應力中值(Mean-Level)設定為 0.9 降伏應力(Yield Stress, YS)並往下遞減，測試至疲勞週期數 $>10^7$ 次且試棒未發生斷裂即疲勞極限應力值；最小/最大應力值比(R-ratio)設為 0.5，荷重頻率為 30 Hz。

2.3 腐蝕疲勞試驗

鹽霧環境依 ASTM B117-16 進行，鹽水濃度為 50 ± 5 g/L，鹽霧溫度為 35 ± 2 °C，落霧量為 1.0 - 2.0 mL / 80cm² / h。施加荷重應力需參考疲勞極限分析結果進行設定，R-ratio 為 0.5；荷重頻率設定為 1、10 及 30 Hz。為觀察腐蝕疲勞裂紋萌芽，分別於 0.1、0.5 及 0.7 腐蝕疲勞週期數(Numbers of corrosion fatigue, N_{cf})進行中斷試驗，中斷試驗之樣品以設備直接施力拉斷並以光學顯微鏡觀察破斷面。

3. 結果與討論

3.1 扣件疲勞極限分析

圖 1 為扣件於空氣中施加應力中值為 0.9

~0.7 YS 之疲勞極限分析結果。施加應力中值為 0.9 YS 時，疲勞壽命僅為 10^2 次且藉由破斷面觀察並無明顯疲勞起始特徵且有頸縮(Necking)現象，如圖 2(a)；由於在此荷重應力中值設定下，最大及最小荷重應力分別為 1.2 及 0.6 YS，顯示在此荷重應力範圍材料有塑性變形發生。當荷重應力中值設定為 0.75 YS 時，扣件疲勞壽命為 10^5 週期，此時最大及最小荷重應力分別為 1.0 與 0.5 YS，此應力範圍屬於彈性與塑性變形交界區，觀察破斷面發現有疲勞特徵，如圖 2(b) 箭頭標示，且已無明顯的頸縮但仍未達到疲勞極限。圖 2(c) 為應力中值設定為 0.725 YS 之試棒，經疲勞試驗其週期數已大於 10^7 次，試棒並無斷裂及頸縮之形貌，顯示扣件承受此應力作用已達疲勞極限；此應力設定條件下之最大荷重應力為 0.97 YS 仍屬彈性變形區。

為避免材料因製程因素而衍生之機性上下限影響，後續之腐蝕疲勞測試之最大應力中值設定為 0.7 YS(最大荷重應力為 0.95 YS)；同時為比較荷重大小對腐蝕疲勞之影響，將應力中值分別遞減為 0.5 及 0.35 YS。

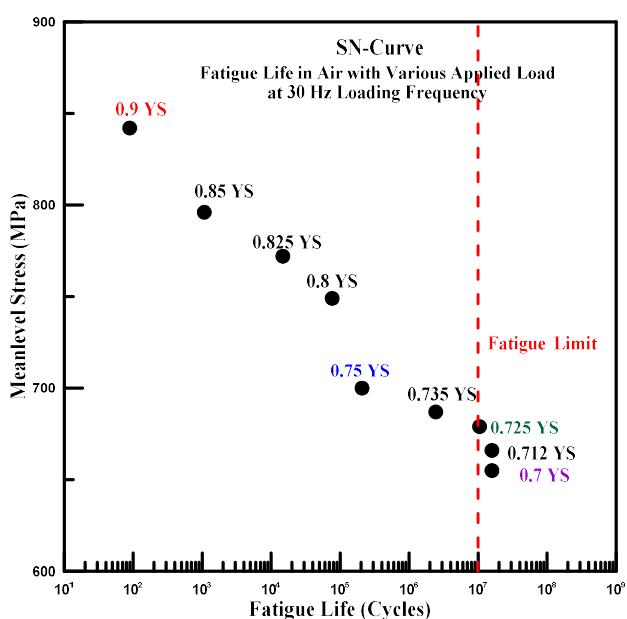
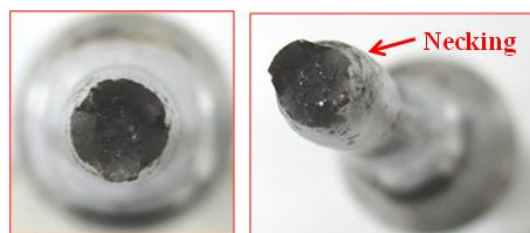


圖 1 扣件疲勞極限分析。
Figure 1 Fatigue limit analysis of bolts.



(a) 施加應力中值為 0.9 降伏應力
(a) Apply 0.9 YS as mean-level



(b) 施加應力中值為 0.75 降伏應力
(b) Apply 0.75 YS as mean-level



(c) 施加應力中值為 0.725 降伏應力
(c) Apply 0.725 YS as mean level

圖 2 不同應力中值之疲勞試驗結果。
Figure 2 Observations after fatigue test with different applied mean-level stress.

3.2 鹽霧環境對扣件疲勞影響

圖 3 為施加不同應力中值與荷重頻率之腐蝕疲勞壽命結果，同時列入應力中值為 0.7 YS 之疲勞極限(以 ◆ 標示)進行比較。於應力中值為 0.7 YS 及荷重頻率為 30Hz 之腐蝕疲勞試驗結果顯示其腐蝕疲勞壽命為 105 週期，試驗後外觀如圖 4 所示，表面已發生嚴重腐蝕且斷裂但無頸縮現象；然而，在空氣中進行相同參數之疲勞試驗，疲勞週期 107 次且樣品並未發生斷裂，如圖 2(c)，顯示扣件表面遭受鹽霧環境之侵蝕明顯劣化疲勞壽命。

由試驗結果可知，環境中腐蝕源的侵蝕可能使材料表面因銹蝕作用而產生應力集中現象，加上週期式的應力作用下，應力集中區則成為疲勞裂紋萌芽的敏感區域；故環境腐蝕成為誘發裂紋成核及劣化材料疲勞壽命之因素。

由鹽霧環境對疲勞壽命影響結果發現，在

相同疲勞參數設定之條件下，鹽霧對扣件之疲勞影響甚鉅。圖 5(a)為模擬扣件於空氣環境中進行疲勞之示意圖，圖中虛線表示試棒平行部在承受彈性應變作用下之虛擬應力流線分佈；在最大荷重應力低於降伏應力作用下，理論上並未發生差排滑移現象，故在到達疲勞極限之條件時，試棒不致發生變形及斷裂。圖 5(b)為模擬扣件於鹽霧環境之腐蝕疲勞示意圖，由於扣件表面因 Cl⁻易侵蝕發生局部腐蝕，導致應力集中並誘發腐蝕疲勞裂紋萌芽；另一方面，若材料表面發生均勻腐蝕致使受力面積縮小，在承受相同的荷重下，則導致承受之應力上升並誘發腐蝕疲勞裂紋萌芽，如圖 5(c)所示。

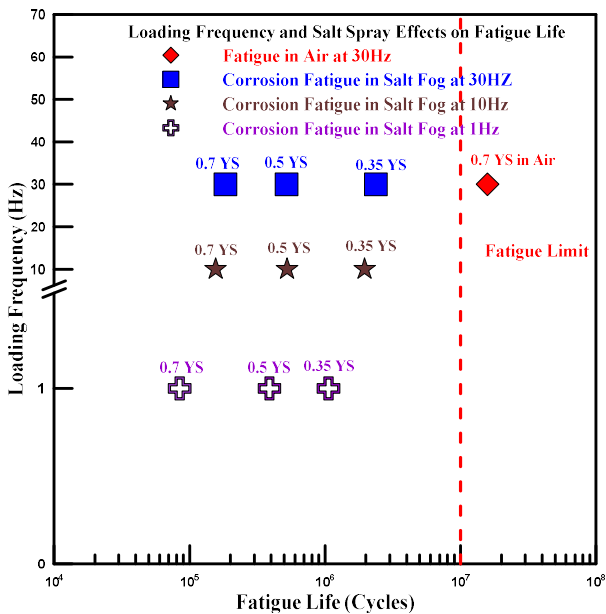
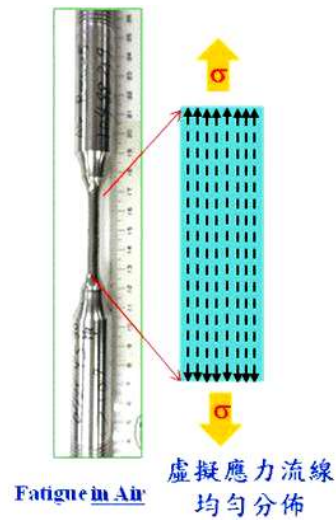


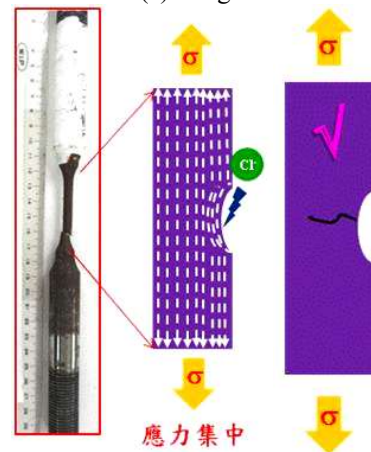
圖 3 扣件腐蝕疲勞壽命分析。
Figure 3 Corrosion fatigue life of bolts.



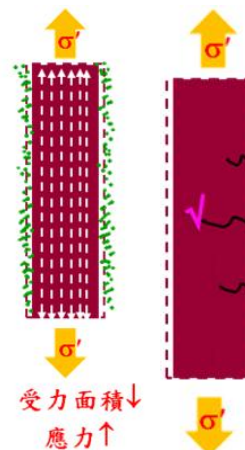
圖 4 施加應力中值為 0.7 YS 於 30Hz 荷重頻率之腐蝕疲勞試驗後外觀。
Figure 4 Corrosion fatigue at 0.7 YS mean-level stress and 30 Hz loading frequency.



(a) 空氣中疲勞
(a) Fatigue in air



(b) 應力集中誘發裂紋
(b) Stress concentration induce crack



(c) 均勻腐蝕誘發腐蝕疲勞
(c) Uniform corrosion induce crack

圖 5 環境腐蝕對疲勞行為影響示意圖。
Figure 5 Schematics of environment effect on corrosion fatigue behaviors.

3.3 荷重應力對腐蝕疲勞行為影響

由圖 3 腐蝕疲勞試驗結果可知，固定荷重頻率為 30 Hz 條件下，扣件的腐蝕疲勞壽命隨著應力中值由 0.7 YS 下降至 0.35 YS 有增加之趨勢；此一結果在荷重頻率 10 及 1 Hz 亦有相同之趨勢。換言之，扣件於相同之荷重頻率條件下，荷重應力對腐蝕疲勞壽命之影響皆為承受高荷重應力具較低之腐蝕疲勞壽命之結果。圖 6 ~ 8 分別為扣件承受不同荷重應力之試驗後結果，所有樣品斷裂處皆無頸縮現象均屬疲勞誘發破裂。

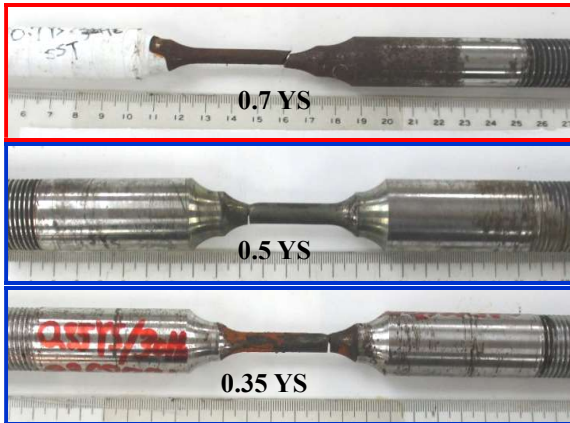


圖 6 施加不同應力中值於荷重頻率 30 Hz 之腐蝕疲勞試驗後外觀。
Figure 6 Corrosion fatigue at 30 Hz loading frequency with various loading stresses.

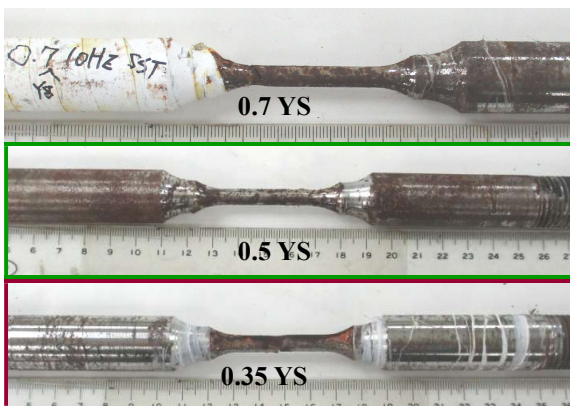


圖 7 施加不同應力中值於荷重頻率 10 Hz 之腐蝕疲勞試驗後外觀。
Figure 7 Corrosion fatigue at 10 Hz loading frequency with various loading stresses.

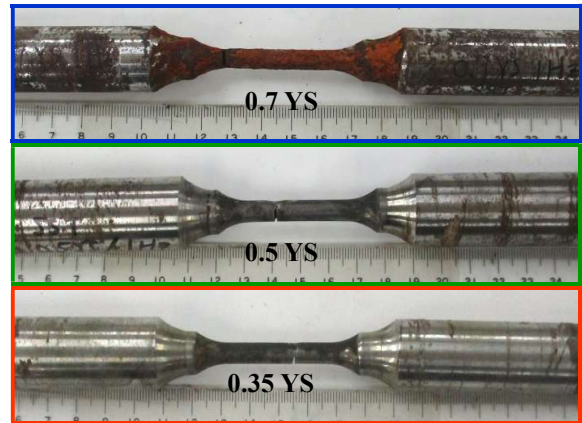


圖 8 施加不同應力中值於荷重頻率 1 Hz 之腐蝕疲勞試驗後外觀。
Figure 8 Corrosion fatigue at 1 Hz loading frequency with various loading stresses.

3.4 荷重頻率對腐蝕疲勞行為影響

由圖 3 腐蝕疲勞試驗結果可知，施加應力中值為 0.7 YS 時，扣件之腐蝕疲勞壽命隨著荷重頻率下降而有下降之趨勢；此一現象在應力中值為 0.5 YS 及 0.35 YS 亦有相同之趨勢。影響扣件之腐蝕疲勞壽命兩大因素分別為應力與腐蝕性侵蝕力，當扣件承受荷重及腐蝕性環境環境中，荷重頻率則為唯一變異數。圖 9 為假設扣件表面已因腐蝕而形成表面微缺陷狀態時，腐蝕源分別於最大荷重(σ_{max})及最小荷重(σ_{min})狀態之侵蝕作用示意圖。當試棒承受最大荷重應力作用時，微裂紋開口處會因相對大應力作用而變大且前端之塑性變形區面積亦相對增加；腐蝕源因虹吸作用進入微裂紋處且侵蝕承受大應變之塑性變形區。反之，當試棒承受 σ_{min} 時，裂紋前端之塑性變形區面積縮小，腐蝕源亦因 pump-effect 排出微裂紋，導致侵蝕現象相對減弱。此外，因荷重頻率與時間成反比，扣件於不同荷重頻率所對應之試驗時間如圖 10 所示；故在低荷重頻率條件下，腐蝕源於單次荷重週期時間內對微裂紋內部侵蝕作用較高荷重頻率增加。因此，當扣件於低荷重頻率且承受高荷重應力條件下，其對應之腐蝕疲勞壽命

最短(如圖 3 所示);反之,當荷重頻率增加且承受低荷重應力時,腐蝕源之侵蝕與裂紋前端塑性變形區較小,兩者之加成作用效果相對較不明顯,故扣件之腐蝕疲勞壽命則相對較長。

3.5 腐蝕疲勞裂紋萌芽分析

圖 11 為扣件經不同腐蝕疲勞參數試驗後之破斷面形貌,其中 0.1、0.5 及 0.7 N_{cf} 為到達中斷疲勞週期數後以外力直接拉斷之破斷面,標示腐蝕疲勞週期數 1.0 N_{cf} 者則為自然發生斷裂之破斷面形貌。中斷試驗之應力中值設定為 0.7 YS,目的為模擬相對嚴苛之應力條件對腐蝕疲勞裂紋萌芽之影響。

圖 11(a)為荷重頻率為 30 Hz 之斷面觀察,結果顯示於中斷試驗之樣品斷面並未發生腐蝕疲勞裂紋起始特徵,皆為以外力拉斷後具頸縮之延性破斷形貌;腐蝕疲勞最終破斷面(1.0 N_{cf})則無頸縮外觀且具明顯的疲勞裂紋起始特徵(如箭頭標示)。圖 11(b)及(c)為扣件分別於 10 與 1 Hz 荷重頻率之斷面觀察結果且和 30 Hz 之試驗結果類似;亦即中斷試驗之試棒皆無明顯之疲勞裂紋萌芽特徵,但兩者之 1.0 N_{cf} 腐蝕疲勞破斷面皆有明顯之疲勞裂紋萌芽區(如箭頭標示。)

經腐蝕疲勞中斷試驗及最終破斷面觀察結果顯示,當腐蝕疲勞週期數小於 0.7 N_{cf} 時,疲勞裂紋萌芽現象並未發生。

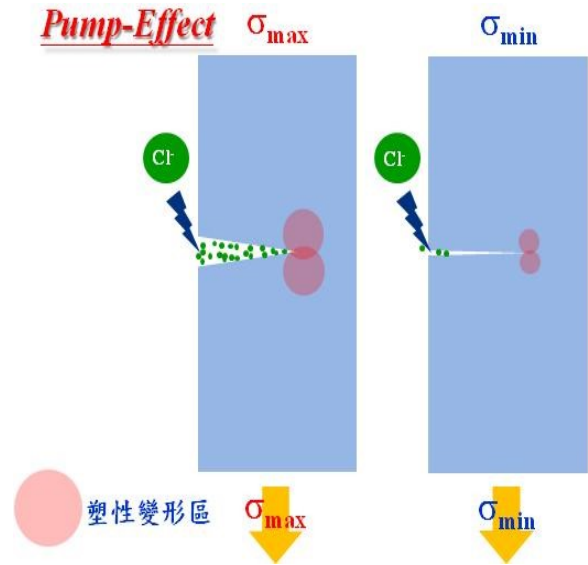


圖 9 腐蝕源對單次荷重應力之影響示意圖。

Figure 9 Schematics of corrosion effect on single cyclic loading stress.

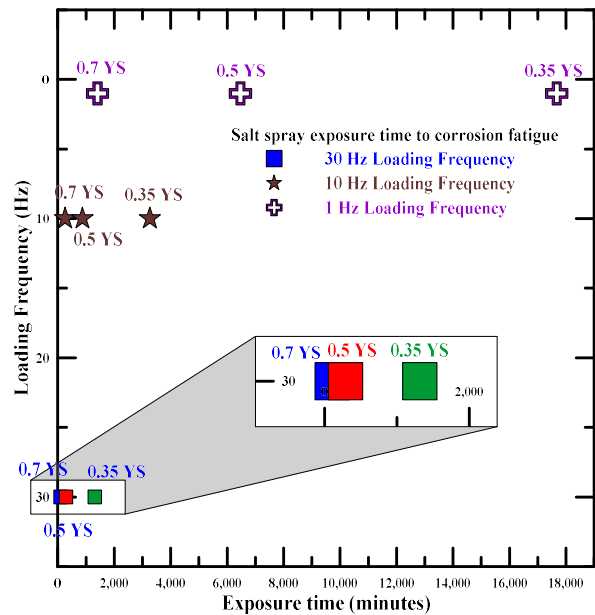
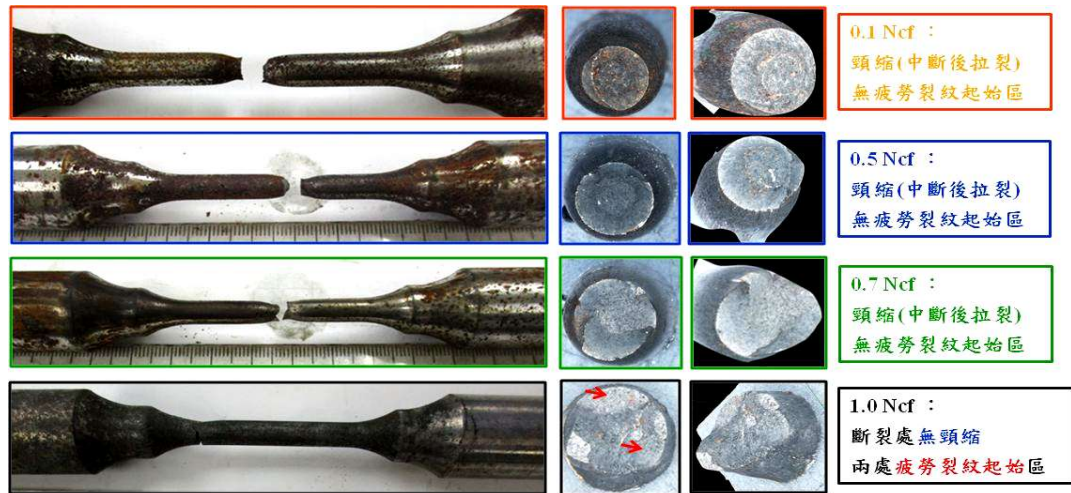


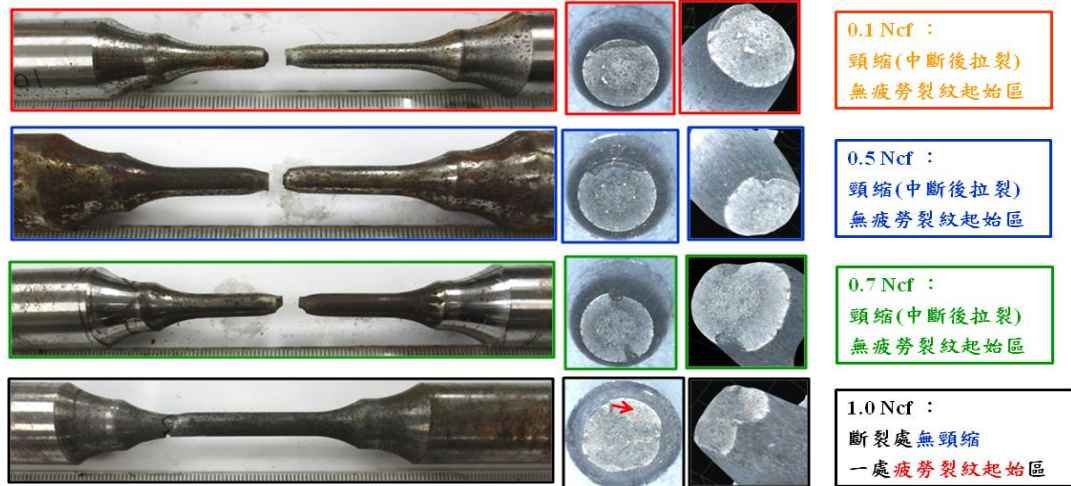
圖 10 扣件於腐蝕疲勞試驗中之試驗時間。

Figure 10 Exposure time of bolts during corrosion fatigue tests.



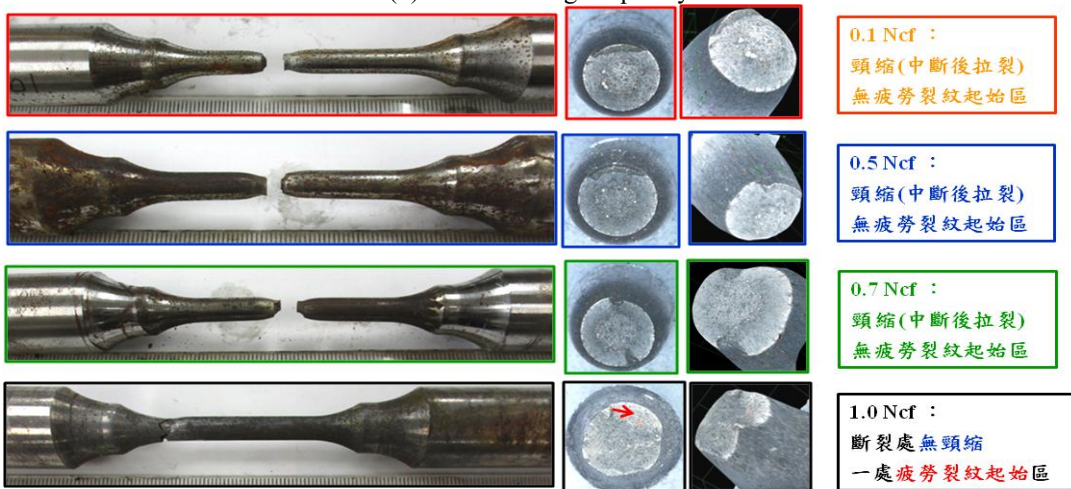
(a) 30 Hz 荷重頻率

(a) 30 Hz loading frequency.



(b) 10 Hz 荷重頻率

(b) 10 Hz loading frequency.



(c) 1 Hz 荷重頻率

(c) 1 Hz loading frequency.

圖 11 荷重應力為 0.7 YS 之腐蝕疲勞中斷試驗及最終破斷面形貌。

Figure 11 Fracture morphology observations of corrosion fatigue with 0.7 YS applied at various loading frequency with different interrupt loading cycles and final fracture.

4. 結論

1. 空氣中進行之扣件疲勞極限應力中值為 0.725 降伏應力，對應之最大與最小荷重應力分別為 0.970 及 0.485 降伏應力；扣件於此應力條件作用下仍屬彈性變形。
2. 扣件於空氣中進行應力中值為 0.7 降伏應力及荷重頻率為 30 Hz 之疲勞試驗，荷重週期數達 10^7 次時仍未發生變形及斷裂；在相同疲勞參數但鹽霧環境中進行腐蝕疲勞時，扣件之壽命下降為 10^5 次。顯示 Cl⁻ 侵蝕扣件表面並誘發應力集中，經持續週期式應力及腐蝕作用加成下致使腐蝕疲勞壽命下降。
3. 扣件於相同荷重頻率下，當承受之應力中值越大，其相對腐蝕疲勞壽命越短。
4. 荷重頻率與扣件曝露於鹽霧環境中的時間成反比，在單次荷重週期及 σ_{\max} 條件下，腐蝕源因虹吸現象進入缺陷處並侵蝕高應變區；反之，在 σ_{\min} 時缺陷之受力應變區面積縮小且部分腐蝕源因 pump-effect 作用而離開缺陷內部，腐蝕源與應力之加成作用下降。此一現象尤以在低荷重頻率最為明顯，故扣件於低荷重頻率及高應力作用下之腐蝕疲勞壽命相對較短。
5. 扣件於 0.7 腐蝕疲勞壽命中斷尚無疲勞裂紋起始特徵，顯示疲勞裂紋萌芽現象應於 0.7 腐蝕疲勞壽命之後。

參考文獻

- [1] Schaumann, Peter, and Rasmus Eichstädt., "Fatigue assessment of high-strength bolts with very large diameters in substructures for offshore wind turbines", Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference, Kona, Big Island, Hawaii, USA 21-26 June, 2015, Vol. 1, pp.260.
- [2] K. Yonetsu, C. Fujiyama, Report of Low-Cycle Fatigue Failure Mechanism of Wind Turbine Foundation Due to Vibration of Upper Structure, Civil and Environmental Engineering, Hosei University, Japan, 2013.
- [3] Yin Liu, Takeshi Ishuhara, Report of Fatigue Failure Accident of Wind Turbine Tower in Taikoyama Wind Farm, Department of Civil Engineering, School of Engineering, the University of Tokyo, Japan, 2013.
- [4] Jianping Liu, Yanhui Ma, Junping Chen, Changguo Ji, Derui Su, "Research on fatigue assessment of the Flange Bolts Connection of Wind Turbine based on Finite Element Analysis.", Proceedings of the 2nd Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications, Dalian, China, 14-15 May, 2016, pp. 435-440.