

111年度 防蝕工程年會暨論文發表會 論壇-離岸風電防蝕策略

主題一

離岸風機支撐結構防蝕規範與案例探討

報告者：財團法人船舶暨海洋產業研發中心 許淑雯 工程師

日期：2022/08/26

主辦單位：中華民國防蝕工程學會、中國鋼鐵股份有限公司

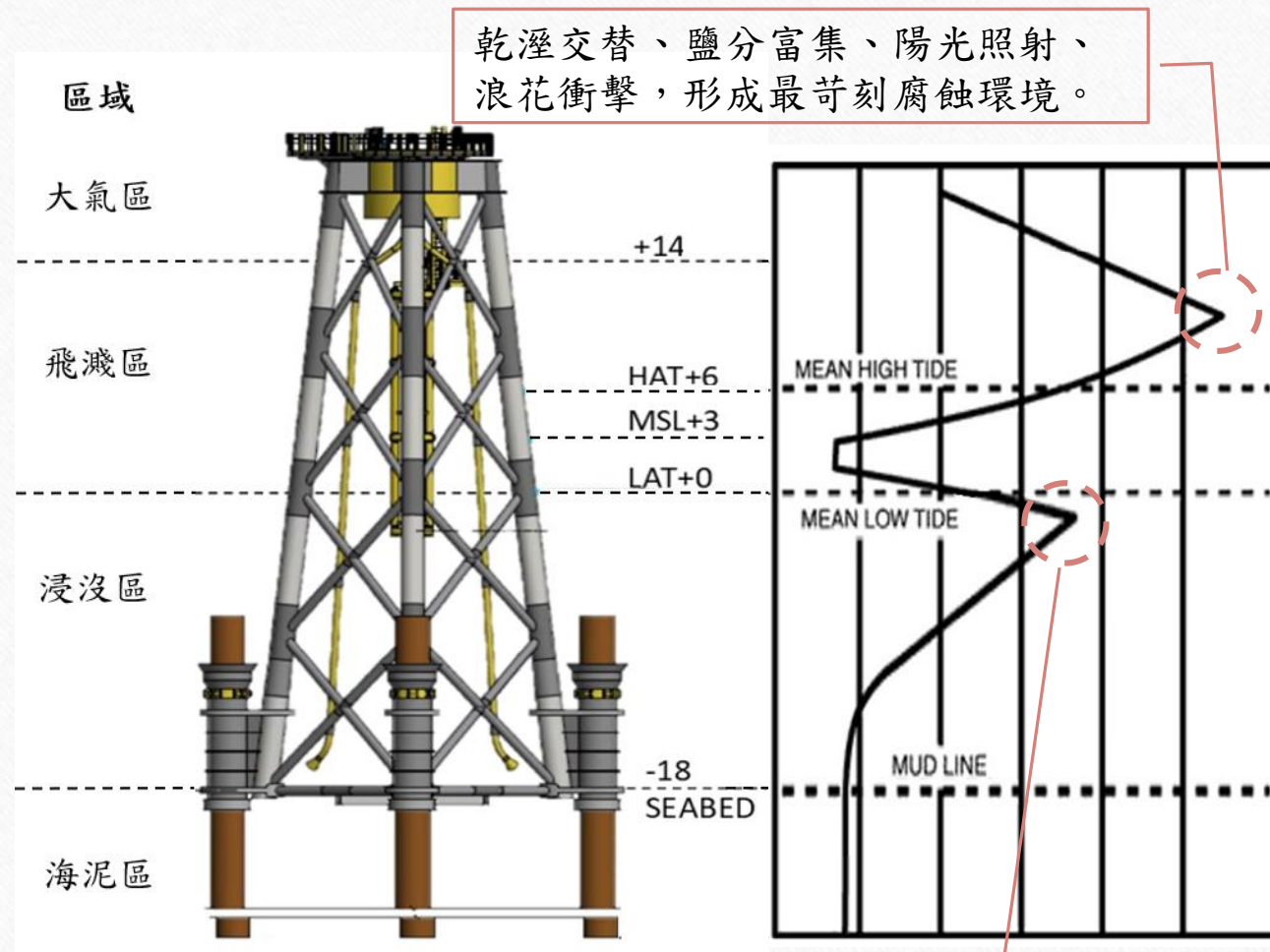
協辦單位：臺灣大學、國防大學、臺灣科技大學、臺灣海洋大學、陽明交通大學、宜蘭大學、清華大學、明志科技大學、臺北醫學大學、高雄科技大學、中興大學、中央大學、公路總局、台電公司、台灣中油公司、工研院材化所、交通部港研中心、金屬工業研發中心、國家海洋研究院、資商貿易公司、力鋼工業公司、永記造漆公司、柏林公司、臺鍍科技公司、王強科技公司

綱要

- 前言
- 腐蝕性分類
- 目前國內離岸風場常見的標準或規範
- 防蝕策略
- 防蝕措施-腐蝕容許量、塗裝系統、陰極保護
- 結語

前言

- 離岸支撐結構經歷大氣、海水和土壤三種不同的腐蝕環境，此處以大氣區、飛濺區、浸沒區和海泥區來劃分曝露區域。
- 離岸結構長期受到強烈的腐蝕影響，而維修的環境條件很差，所以腐蝕保護系統必須滿足最高要求。
- 結構橫跨不同的腐蝕環境，這意味著，因應離岸結構不同區域所承受的腐蝕環境來選擇適合的保護措施。
- 國內離岸風場支撐結構多為鋼構造物，因此此處的主要內容為**鋼構造物**的防腐蝕策略和措施。



受溶解氧、流速、溫度、鹽度、pH值，以及汙染和生物因素等共同作用之影響。

圖片出處:ECN

綱要

- 前言
- 腐蝕性分類
- 目前國內離岸風場常見的標準或規範
- 防蝕策略
- 防蝕措施-腐蝕容許量、塗裝系統、陰極保護
- 結語

ISO 12944-2 大氣環境腐蝕性分類與典型環境案例

腐蝕 級別	單位面積上質量和厚度損失 (經1年暴露後)				溫帶氣候下的典型環境案例(僅供參考)	
	低碳鋼		鋅板		外部	內部
	質量損失 g/m ²	厚度損失 μm	質量損失 g/m ²	厚度損失 μm	大氣腐蝕的相關因素： 大氣腐蝕是在鋼結構表面上一層溼膜內發生的過程，溼膜層可能太薄以至於肉眼看不到。相對溼度的上升、表面溫度等於或低於露點、大氣汙染物總量上升都會導致腐蝕速率上升。經驗顯示，嚴重腐蝕多發生在相對溼度大於80%且溫度高於0℃。如果有汙染物質、吸溼鹽份單獨存在或同時存在的情況時，更低的溼度情況之下腐蝕也會發生。	
C1 很低	≤10	≤1.3	≤0.7	≤0.1		
C2 低	>10-200	>1.3-25	>0.7-5	>0.1-0.7		
C3 中	>200-300	>25-50	>5-15	>0.7-2.1		
C4 高	>400-650	>50-80	>15-30	>2.1-4.2	中等含鹽度的工業區和沿海區域	化工廠、游泳池、沿海船舶和造船廠等。
C5 很高	>650-1500	>80-200	>30-60	>4.2-8.4	高溼度和惡劣大氣的工業區域和高含鹽度的沿海區域。	冷凝和高污染持續發生和存在的建築和區域。
CX 極端	>1500-5500	>200-700	>60-180	>8.4-25	具有高含鹽度的海上區域以及具有極高溼度和侵蝕性大氣的熱帶亞熱帶工業區域。	具有極高溼度和侵蝕性大氣的工業區域。

腐蝕性分類-2/3

- 對於浸沒在水中或埋在土壤中的鋼結構，實際上，腐蝕通常是局部的，而且腐蝕性級別是很難定義的。ISO 12944-2這份文獻的目的是各種環境都能被描述，因此歸納出3種不同的環境分別為淡水、海水或微鹹水和土壤，共有Im1~Im4、4個分類。

- 淡水、微鹹水和海水腐蝕的相關因素：

淡水、微鹹水(鹹淡相交水)和海水對鋼材的腐蝕有嚴重的影響。腐蝕性也受水中**氧含量**、**溶解物質的類型和數量**及**水溫**的影響。

- 土壤腐蝕的相關因素：

土壤的腐蝕性與土壤中**礦物含量和性質**、**有機物的含量**、**水含量**和**氧氣含量**相關。土壤的腐蝕性受通氣程度的影響很大。

ISO 12944-2 水和土壤的腐蝕分類		
分類	環境	環境和結構的案例
Im1	淡水	河流上安裝的設施，水力發電站
Im2	海水或微鹹水	沒有陰極保護的浸入式結構(例如:閘門、水閘或防波堤)
Im3	土壤	埋地儲罐、鋼樁和鋼管
Im4	海水或微鹹水	帶有陰極保護的浸入式結構(例如海上結構)

腐蝕性分類-3/3

- 離岸結構適用的腐蝕級別或分類：C4、C5、CX、Im2、Im3和Im4。

單樁式離岸風機支撐結構 腐蝕級別或分類的例示		
區域	結構的內部環境	結構的外部環境
大氣區	C4	C5或CX
飛濺區-平均水位以上	CX或Im2	
飛濺區-平均水位以下	Im2或Im4	
浸沒區	Im2或Im4	
海泥區	Im3或Im4	

資料出處:VGB/BAW、DNV-RP-0416

綱要

- 前言
- 腐蝕性分類
- 目前國內離岸風場常見的標準或規範
- 防蝕策略
- 防蝕措施-腐蝕容許量、塗裝系統、陰極保護
- 結語

目前國內離岸風場常選用的標準與規範

防蝕策略 DNV-RP-0416		
腐蝕容許量	塗裝系統	陰極保護
• DNV-RP-0416 • DNV-ST-0126	• DNV-RP-0416 • NORSOK M-501 • EN 1090-2 • ISO 12944系列 • ISO 1461 • ISO 2063系列	• DNV-RP-B401 • EN 12495

綱要

- 前言
- 腐蝕性分類
- 目前國內離岸風場常見的標準或規範
- 防蝕策略
- 防蝕措施-腐蝕容許量、塗裝系統、陰極保護
- 結語

防蝕策略

- 離岸結構的防蝕策略**依標準或規範進行規劃**。

區域	結構的 內/外部表面	可能採取的 防蝕措施	例示 (僅供參考)
大氣區	內部	塗裝系統、 腐蝕容許量	轉階段：塗裝系統 J-tube：腐蝕容許量
飛濺區-平均 水位以下	外部	陰極保護、塗裝系統 、腐蝕容許量	套筒式的腿部： 陰極保護+塗裝系統+腐蝕容許量
海泥區	外部	陰極保護、塗裝系統 、腐蝕容許量	樁：陰極保護+腐蝕容許量

參考資料:DNV-RP-0416 、 ISO 24656 、 業者

綱要

- 前言
- 腐蝕性分類
- 目前國內離岸風場常見的標準或規範
- 防蝕策略
- 防蝕措施-腐蝕容許量、塗裝系統、陰極保護
- 結語

防蝕措施-腐蝕容許量

- 腐蝕容許量是因應腐蝕導致鋼壁厚度減少而做補償。
- 腐蝕容許量(Corrosion Allowance, CA)計算式為：

$$CA = V_{\text{corr}} \times (T_D - T_C)$$

- V_{corr} 為預期的最大腐蝕速率
- T_D 為結構物設計年限
- T_C 為塗裝系統的設計年限

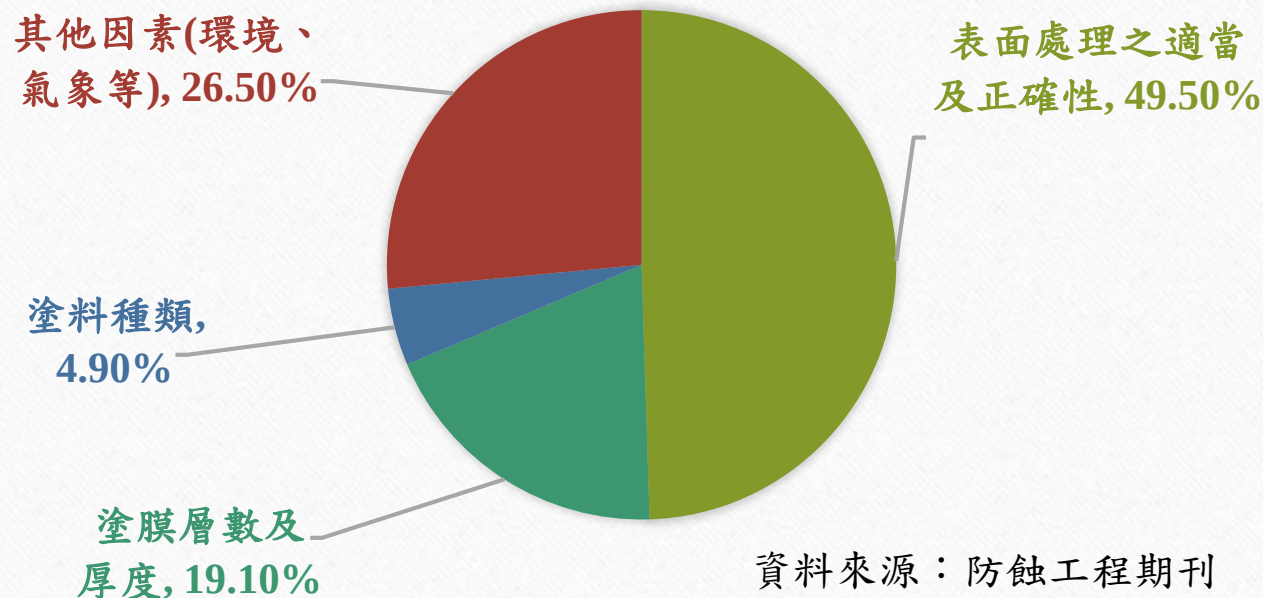
DNV-RP-0416 飛濺區主要結構件的設計腐蝕速率(V_{corr})最小值		
氣候類型	V_{corr} 外表面	V_{corr} 內表面
溫帶氣候(海水年平均 表面溫度 $\leq 12^\circ\text{C}$)	0.30 mm/yr	0.10 mm/yr
亞熱帶和熱帶氣候	0.40 mm/yr	0.20 mm/yr

- 塗裝系統的設計年限依塗裝性能的類型和文獻內容進行適當的假設，例如：符合NORSOK M-501塗裝系統No 7A，最小乾膜厚度600 μm 的環氧樹脂系統，在飛濺區的使用壽命可假設為15年。

防蝕措施-塗裝系統-1/2

- 塗裝系統主要是利用塗層來隔離水、氧、及其他腐蝕性物質，達到防蝕效果。
- 塗裝系統常用的形成方法有油漆塗裝、金屬熔射和熱浸鍍鋅。油漆塗裝的部分比較多，這裡的主要內容為油漆塗裝。
- 油漆塗料業者海虹老人集團 (Hempel A/S) 風電部門經理 Anders Voldsgaard Clausen 指出：
 - 在油漆工場 (paint shop) 塗佈離岸風電結構的成本為 €15~25/m²。
 - 如果必須在海上進行維修工作時，成本可能會增加到 €1000/m²，此數值是在油漆工場進行作業的 **40~60 倍**。
- 若在油漆工場作業時期獲得良好的塗裝品質，減少海上維修次數，可以顯著降低費用，有益於風場經營。

影響油漆塗裝效果之要因



表面處理清潔度與塗層壽命(同種油漆塗裝)

表面處理方法與處理程度		平均塗層壽命
磨料噴射清理 (abrasive blast-cleaning)	Sa 2 1/2	6.3年
酸洗		4.6年
手工具除鏽	St 2	1.2年

防蝕措施-塗裝系統-2/2

- 油漆塗裝前的鋼表面狀態依文獻內容要求來執行，例示：

- 表面瑕疵：依瑕疵類型處理到ISO 8501-3的P2、P3等級
- 表面處理清潔度：ISO 8501-1 磨料噴射清理Sa 2 ½
- 灰塵清潔度：ISO 8502-3 粉塵數量等級2和粒徑等級2
- 可溶性鹽份：ISO 8502-9 鹽含量小於等於20 mg/m²

表面處理清潔度、相對費用和防護效果比較關係		
表面處理清潔度	相對費用	防護效果
Sa 1	1	2
Sa 2	2+	5
Sa 2 1/2	3.5	6.5
Sa 3	5+	7

資料出處：水工金屬結構防腐蝕規範

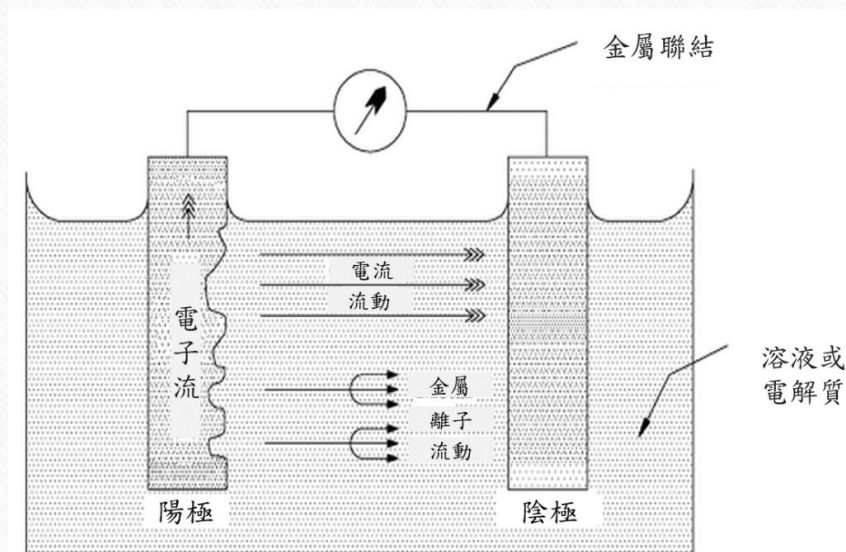
- NORSOK M-501油漆塗裝系統例示

應用範圍	底塗層	中間塗層	面塗層	最小膜厚 (Minimum DFT,μm)
大氣區	富鋅底漆(最小膜厚60μm)	環氧中間漆+聚氨酯面漆		280
飛濺區	最少2層雙組份環氧或聚酯漆			600
浸沒區	最少2層雙組份環氧或聚酯漆			350

資料出處：NORSOK M-501

防蝕措施-陰極保護-1/3

- 陰極保護(Cathodic Protection, CP)方法屬於電化學防蝕，以電化學的方法來控制或抑制腐蝕的發生。
- 陰極保護系統的組成要件為陰極、陽極、電解質，以及陰極與陽極間電子流通的線路。
- 陰極保護依照保護電流提供的方式不同而分為**犧牲陽極法**和**外加電流陰極保護法**。
- 被保護的結構物是陰極。犧牲陽極法以對氧活性大、更容易被氧化腐蝕的犧牲金屬作為陽極，形成電位差、放出電流，保護結構；而外加電流法是利用外在電源提供適當的電流來保護結構。



防蝕措施-陰極保護-2/3

- 進行陰極保護設計時，**保護電流密度**是非常重要的參數，不同時期、不同位置的鋼結構所需的保護電流密度會有所不同。

DNV-RP-B401 暴露於海水的裸露金屬之設計電流密度(A/m ²)						
深度(m)	熱帶 (表面水溫>20°C)			亞熱帶 (表面水溫12~20°C)		
	初期	平均	末期	初期	平均	末期
0~30	0.15	0.07	0.1	0.17	0.08	0.11
>30~100	0.12	0.06	0.08	0.14	0.07	0.09
>100~300	0.14	0.07	0.09	0.16	0.08	0.11
>300	0.18	0.09	0.13	0.20	0.10	0.15

防蝕措施-陰極保護-3/3

- 對於陰極保護設計，塗層的使用可以降低陰極保護電流需求。
- 與陰極保護結合使用的塗層應與陰極保護相容，相容性可通過在適用的陰極保護電位限制內對塗層產品進行資格預審測試來確定，例如：ISO 15711。
- 塗層的電絕緣性能評估會考量：
 - 塗裝失效係數(coating breakdown factors)
 - 塗裝損傷係數(coating damage factors)

DNV-RP-B401 計算塗裝失效係數的常數推薦值				
深度(m)	塗層類別 I、II、III 和 IV 的 a 和 b 常數推薦值			
	I (a = 0.10)	II (a = 0.05)	III (a = 0.02)	IV (a = 0.02)
0~30	b = 0.10	b = 0.025	b = 0.012	b = 0.008
>30	b = 0.05	b = 0.015	b = 0.008	b = 0.005

綱要

- 前言
- 腐蝕性分類
- 目前國內離岸風場常見的標準或規範
- 防蝕策略
- 防蝕措施-腐蝕容許量、塗裝系統、陰極保護
- 結語

結語

- 離岸風機結構的腐蝕環境經歷大氣、海水和土壤，防蝕策略和措施依**標準或規範**執行。
- 常用於離岸鋼結構的防蝕措施有腐蝕容許量、塗裝系統和陰極保護。
- 設計規劃與製造檢驗相輔相成，完善結構腐蝕防護能力。



- 持續瞭解國內外的標準、規範或研究文獻，與時俱進。

~謝謝聆聽~