

# 濱海工業區鋼結構防蝕塗裝系統建議

柏林股份有限公司/吳忠民

## 一、前言：

鋼鐵材料為目前全球使用量第二高建築材料，具備高強度、質輕、易加工等優點且可百分之百收回再利用，是符合當前世界趨勢及環保需求之綠建材。另外鋼鐵材料與混凝土比較更能達到節能減碳、減緩地球氣候高溫化問題，但鋼鐵材料伴隨而來的腐蝕問題，進而造成表面外觀不佳，嚴重時甚至影響鋼鐵強度，也常令人詬病，不似混凝土結構，一般人觀念都認為並需維護問題。雖然鋼結構無法擺脫腐蝕宿命，但在防蝕專家努力下，也開發出各種防蝕措施，能有效降低金屬腐蝕速率。所以，如能依所處環境之腐蝕嚴重性，選擇適當防蝕材料與工法，再安排定期維護，也可確保鋼鐵結構設施之使用壽命。混凝土材料本身雖無腐蝕問題，但內部所包覆之鋼筋材料，初期腐蝕問題常因被混凝土包覆無法明顯從外觀察覺，故一直被忽略。一旦混凝土厚度不足或產生劣化，鋼筋便容易腐蝕，如此一來便無法採用有效維護工法，嚴重者甚至可能造成坍塌，最後只有拆除重建一途。

台灣地區位於亞熱帶，高溫多濕且四面環海，腐蝕現象尤其明顯，某些特定濱海工業地區，如麥寮、彰濱、林口等，其腐蝕環境甚至比 ISO 9223 環境分類中最嚴重的 C5 等級還要嚴重，故台灣地區因腐蝕而造成的每年經濟損失應高於歐、美、日等先進國家統計，約佔其國內生產毛額(GDP) 3~5%。近年來，因科技發達，防蝕對策日新月異，所以鋼結構防蝕系統達到長期免維護是確實可達成。所以提昇現行鋼結構塗料塗裝系統之總膜厚或採用特殊防蝕工法以強化鋼結構防蝕效果，以達到長期免維護需求，是必要之對策。

## 二、金屬腐蝕要因與台灣腐蝕環境說明：

金屬腐蝕現象是金屬本身與外在環境的交互作用，其反應機構以電化學作用最廣為接受。電化學反應發生須具備陰極、陽極、金屬通路及電解

質，四者缺一不可，而目前腐蝕防治技術，不外乎從如何阻斷此四個要素條件之一著手。大氣環境中腐蝕因子種類與多寡，有如電化學反應中存在的電解質角色，能加速腐蝕發生，包括環境溫度、濕度、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>及海鹽粒子濃度等。歸類大氣中主要腐蝕因子影響程度，說明如下：

1. **大氣相對濕度**：水膜形成與大氣中相對濕度密切相關。如鐵的腐蝕臨界相對濕度為 65%。依美國腐蝕專家 W.H.Ailor 針對相對濕度與溫度對金屬腐蝕速度影響，提出布魯克斯(BROOKS)公式。當相對濕度低於 65%時則，則溫度對金屬腐蝕劣化度不產生影響。另外，當金屬表面有較薄的水膜存在時，大氣中氧容易擴散至金屬表面會加速腐蝕；反之當水膜變厚時氧的擴散阻力增加腐蝕速率下降。

布魯克斯(BROOKS)公式：

$$A = \frac{(H-65)}{10} \times (1.054)^t$$

A=金屬腐蝕劣化度

H=空氣相對濕度(%)

t=空氣的溫度(°C)

2. **表面濕潤時間**：表面濕潤時間是指產生大氣腐蝕的電解質膜以吸附或液態膜型式覆蓋在金屬表面時間。濕潤時間愈長，腐蝕總量愈大。

3. **日照時間**：陽光中紫外線會促使高分子材料及塗層老化，而降低其保護效果進而造成金屬腐蝕。

4. **氣溫**：當相對溫度達到金屬臨界相對濕度時，溫度每升高 10°C 反應速率增加原來 2 倍。

5. **降雨**：因降雨造成大氣中相對濕度增加，加速腐蝕，但也可能因降雨沖洗減少液膜腐蝕。

6. **風向與風速**：風速過大對物件表面有磨耗作用，而風向亦會影響污染物傳播。

7. 降塵：塵粒本身如具腐蝕性，當溶解於液膜時會成為腐蝕性介質。如本身無腐蝕性與吸附性則容易在沙粒與金屬表面形成縫隙產生局部腐蝕。

8. NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、Cl<sup>-</sup>：配合濕度條件，形成酸性環境及濃度差而加速腐蝕進行。

台灣腐蝕環境分類依國際標準組織(ISO) 9223 腐蝕環境分類中(見表一)，沿海區域其腐蝕等級皆在 C4(含)以上(見圖一)，尤其部份特定沿海工業區，如麥寮、林口、彰濱等工業區其腐蝕速率更超出 ISO 9223 腐蝕分類最嚴重等級 C5 範圍，而經國內學術研究單位定義為 C5+，台塑企業更明確定義麥寮六輕腐蝕環境分類為 C5x+，其中 x 為國際標準 C5 鐵腐蝕量上限倍數。目前 ISO 組織技術小組也注意到此一問題，已著手準備修正腐蝕環境分類等級，計畫新增 C5X 等級，以補現行 C5 等級不足。

表 1 各種標準金屬在不同分類之大氣腐蝕性第一年曝露的腐蝕速率 ( $\gamma_{\text{corr}}$ )

腐蝕性分類	金屬的腐蝕速率				
	單位	碳鋼	鋅	銅	鋁
C1	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$\gamma_{\text{corr}} \leq 10$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.7$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.9$	-
	μm/a	$\gamma_{\text{corr}} \leq 1.3$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.1$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.1$	-
C2	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$10 < \gamma_{\text{corr}} \leq 200$	$0.7 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$	$0.9 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$	$\gamma_{\text{corr}} \leq 0.6$
	μm/a	$1.3 < \gamma_{\text{corr}} \leq 25$	$0.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 0.7$	$0.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 0.6$	-
C3	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$200 < \gamma_{\text{corr}} \leq 400$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 15$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 12$	$0.6 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2$
	μm/a	$25 < \gamma_{\text{corr}} \leq 50$	$0.7 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2.1$	$0.6 < \gamma_{\text{corr}} \leq 1.3$	-
C4	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$400 < \gamma_{\text{corr}} \leq 650$	$15 < \gamma_{\text{corr}} \leq 30$	$12 < \gamma_{\text{corr}} \leq 25$	$2 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5$
	μm/a	$50 < \gamma_{\text{corr}} \leq 80$	$2.1 < \gamma_{\text{corr}} \leq 4.2$	$1.3 < \gamma_{\text{corr}} \leq 2.8$	-
C5	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$650 < \gamma_{\text{corr}} \leq 1500$	$30 < \gamma_{\text{corr}} \leq 60$	$25 < \gamma_{\text{corr}} \leq 50$	$5 < \gamma_{\text{corr}} \leq 10$
	μm/a	$80 < \gamma_{\text{corr}} \leq 200$	$4.2 < \gamma_{\text{corr}} \leq 8.4$	$2.8 < \gamma_{\text{corr}} \leq 5.6$	-

圖 1 台灣腐蝕環境分類圖

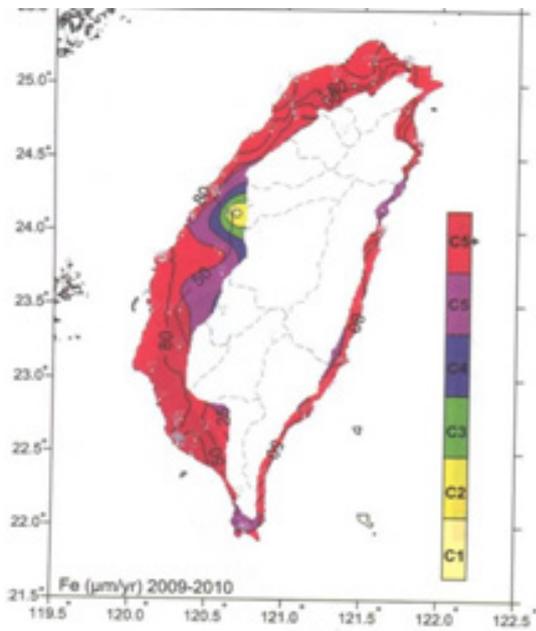


圖 6-25 2009-2010 碳鋼年腐蝕速率 ISO 分類圖

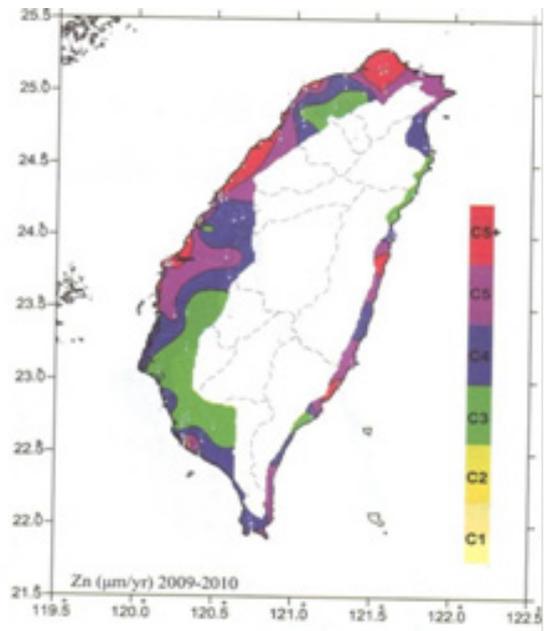


圖 6-26 2009-2010 鋅年腐蝕速率 ISO 分類圖

資料來源：交通部運輸研究所-台灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報  
(2009~2010)

### 三、塗膜防蝕機構：

目前被覆材料防蝕方式，主要分為陰極保護及阻絕效應。而陰極保護技術下，犧牲陽極法是常用之防蝕對策。犧牲陽極法是指將被保護金屬與電位更負的活潑金屬相偶接，由於兩者電極電位不同，所以構成原電池，從而產生起陰極保護作用的陰極電流，這種比被保護金屬電位更負的活潑金屬即為犧牲陽極。目前廣泛採用的犧牲陽極材料主要有：鋅、鋅合金、鋁合金、鎂及鎂合金等。而目前大氣防蝕中因鋅金屬價格較低，故使用率高。鋅金屬犧牲保護時效與其重量成正比，如要延長 1 倍保護年限則需增加 1 倍重量。而被覆層阻絕效果，依 Fick 第二定律(質能擴散定率)，其擴散總量與距離平方成反比，故膜厚愈厚阻絕效果愈佳，其腐蝕因子透過量愈低，防蝕效果愈佳，且此效益成平方遞增，眾所皆知，一般被覆材料防

蝕效果主要來至於其對腐蝕因子之阻絕性。兩者比較之下，增加阻絕效果佳之被覆材料厚度其經濟效應優於增加犧牲陽極保護之金屬材料厚度。

Fick's 2<sup>nd</sup> law

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}$$

- $\phi$  is the concentration in dimensions of [(amount of substance) length<sup>-3</sup>], example ( $\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$ )
- $t$  is time [s]
- $D$  is the diffusion coefficient in dimensions of [length<sup>2</sup> time<sup>-1</sup>], example ( $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ )
- $x$  is the position [length], example [m]

從被覆塗層吸水過程圖中，示意图 I 是 Fick 擴散過程，II 是擴散平衡階段，即水的含量達到平衡；III 為重量急劇增加階段，即宏觀滲透，這是由於水對底材的腐蝕所造成的，此時塗層已開始劣化。塗層的壽命一般算到第二個階段結束。由該圖可明顯觀察到由滲透至宏觀滲透這一過渡期，依據過渡期的長短可對塗層性能進行綜合評價。腐蝕電化學參數電解質溶液滲入有機塗層的難易程度，即有機塗層的耐滲水性又是一個與有機塗層防護性能密切相觀的性能指標。

圖 2 塗層吸水過程示意圖

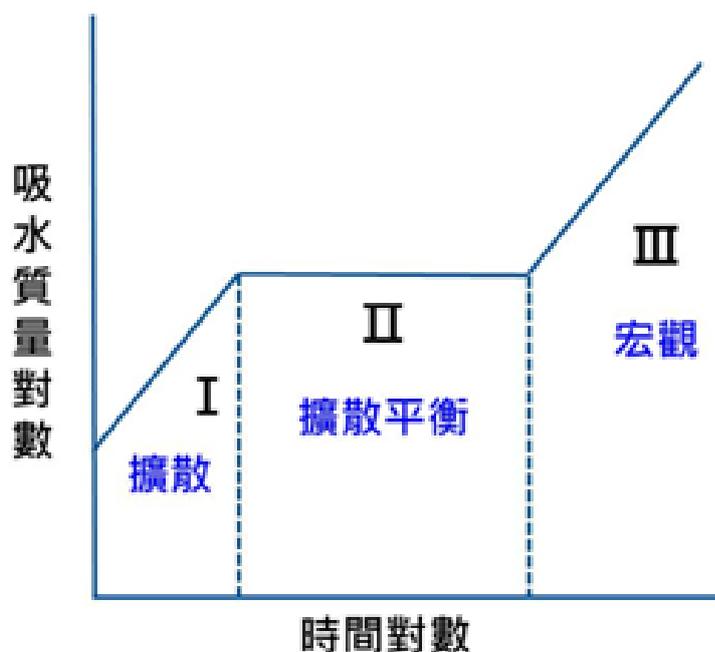


表 2 各種塗膜對氧氣與水蒸氣滲透率

塗膜類型		氧氣滲透率 (1atm,23°C,RH85%) cm <sup>3</sup> · 100µm/cm <sup>2</sup> · d	水蒸汽滲透率 (1atm,38°C,RH95%) g · 10µm/cm <sup>2</sup> · d
清漆	VG VDC 共聚乳液	22±9	28±10
	溶劑型含氟聚合物	82±19	100±20
	環氧/聚醯胺	130±33	155±20
	氟化橡膠	183±7	95±5
	苯丙乳液	1464±54	2300
色漆	VG VDC 共聚乳液	12±5	68±12
	氟化橡膠	30±7	50±8
	溶劑型含氟聚合物	33±2	65±12
	環氧鋁漿	110±37	105±15
	環氧瀝青	213±28	75±3
	水性丙烯酸	500	1800±92
	醇酸-二氧化鈦	595±49	645±15
	紅丹油性底漆	734±72	535±8

資料來源: Thomas N L. The protective actions of coating on rusty steel [J]. Journal of protective coatings and linings, 1989.6(12):63-71

### 三、濱海工業區防蝕塗裝系統建議：

目前，台灣濱海工業區塗料防蝕塗裝系統設計，一般所要求之總乾膜厚平均約在 200~250 µm 之間，其開始維護週期約 2~5 年。有關 C5+環境的防蝕塗裝系統，因實際上國外沒有如此嚴苛的環境故找不到可參考引用的塗裝系統。在 ISO-12944 標準規範中也沒有針對 C5+環境提出建議的系統。但參考 ISO 12944-2，在 C5-M 環境中，一般碳鋼腐蝕率約為 80-200 µm/年，但在潮汐帶(Splash Zone)的碳鋼腐蝕率約為 200-520 µm/年，此環境類似於台灣的 C5+環境。故針對 C5+的環境，建議可參考國外 Offshore，海外平台的潮汐帶塗裝系統。國外海外平台的潮汐帶塗裝系統之大多為評估規範，如 NACE 的 NACE/SP0108 規範標準為評估適用於此環境下之塗裝系統之評估準則。在評估適用於海外平台的潮汐帶塗裝系統時，NACE/SP0108 明訂塗裝系統必須通過：NACE/TM0104，Wet Adhesion、Dimensional Stability 及 Aging Stability；NACE/TM0304，Flexibility 與 edge retention 評估；NACE/TEG#349X，陰極剝離(Cathodic Disbondment) 等後方能被考慮使用。ISO 20340 也同樣明訂所評估的方法而非直接建議

塗裝系統。針對 C5+腐蝕性環境之塗裝系統，筆者依腐蝕因子之特性，建議下列三種型態塗裝系統，提供參考應用。

- A. 塗膜增厚建議之塗裝系統；
- B. 含高酸鹼或高含氯量等腐蝕因子建議之塗裝系統；
- C. 熔射塗裝建議之塗裝系統。

**1. 防蝕塗裝系統 A (塗膜增厚塗裝系統, 膜厚增厚至 320  $\mu\text{m}$  以上):**

a. **系統說明：**搭配環氧樹脂玻璃鱗片中塗漆，增加塗膜厚度建議之塗裝系統。在 C5+環境之鋼結構橋梁之防蝕設計，採用環氧樹脂玻璃鱗片中塗漆，以增加塗膜厚度並藉由環氧樹脂及玻璃鱗片之高阻絕特性，以提昇整體塗膜阻絕能力，但因中塗與面漆為絕緣性高之塗層，故當中塗漆及面漆之總厚度過厚時，如採用鋅粉底塗則犧牲保護鋼材之效果可能會降低，故建議面塗與中塗漆之設計總厚度不宜超過 400  $\mu\text{m}$ ，但特殊防蝕需求則不在此限。(塗裝系統如表一)

**2. 防蝕塗裝系統 B (高膜厚彈性防蝕被覆塗裝系統):**

a. **系統說明：**若環境為含高酸鹼或高含氯量等腐蝕因子時，則底漆不建議使用含鋅粉系列，因鋅粉會與高酸鹼產生化學反應，快速消耗鋅粉，而失去防蝕功能。建議厚塗無溶劑型高膜厚彈性聚胺酯塗裝系統。此類無溶劑型聚胺酯(PU)材料，塗膜具備堅韌性及適當伸長率，一次可厚塗 1mm 以上之優越施工特性，達到真正有效阻絕腐蝕因子滲入底材之功能。此類型的塗料因為具有快速成膜的特性，在垂直面或倒吊面亦可施工不垂流，施作後一小時內可達到 90%以上的強度，其 100%固成份的特性將不會對環境造成 VOC 污染，符合環保之趨勢，更可一次施工達到設計的厚度，避免以往多道塗裝所產生的缺陷，而所形成的塗膜連續無接縫、緻密，可大大提高對構件的保護能力，延長耐蝕年限。如有必要可上塗耐候型面漆保護，可確保防蝕性及美觀(塗裝系統如表二)。在北海及美國的墨西哥灣中大部分的海外平台的潮汐帶塗

裝系統均採用彈性 PU(Urethane Elastomers)，Epoxy 或 polyester 內襯型塗裝系統，大部份的厚度至少 1mm 以上，平均約 1.5mm。在日本，海外平台的潮汐帶塗裝系統的規範有建議使用 PU(Polyurethane)或 Polyester 塗層，其塗層至少 2mm。

### 3. 防蝕塗裝系統 C (鋅鋁熔射塗裝系統)：

- a. 系統說明：在非因高酸、高鹼形成之 C5+環境(海域平台)國外較有實績佐證的工法為採用鋅鋁或鋁合金熔射替代鋅底塗，因為鋅鋁與鋁合金之防蝕效果優於鋅，約為鋅的 3~6 倍。同樣的，在北歐，如 Norsok 的標準規範中，僅有熔射系統是不需經過事先評估測試的，其它的塗裝系統均仍必須經過嚴謹的測試後才能必考慮使用。其防蝕功能主要藉由鋅鋁金屬塗層犧牲保護作用並搭配阻絕性佳環氧樹脂雲母狀氧化鐵(MIO)中塗漆及耐候型面漆雙重保護作用，以期達到長期免維護防蝕需求。(塗裝系統如表三)

## 四、免維護年限說明：

一般免維護年限與材料材料可使用壽命並不相同，材料要達到所預估的耐用年限是須要定期維護方可達到。而所謂免維護，也僅指防蝕部分，面漆顏色變化，甚至有粉化現象並無法避免。雖然所建議塗裝系統採用之面漆皆為耐候型，甚至是現行耐候性最佳之氟素樹脂漆，但畢竟還是有機塗膜無法免除最後褪色及粉化結果。

## 五、結論：

台灣目前鋼結構防蝕設計仍以塗料塗裝為主流，但因現行塗料塗裝系統膜厚較薄，塗裝道數多及塗裝作業時間較長，相對容易使外在大氣環境及腐蝕因子，於塗裝作業期間影響塗膜品質及防蝕功能。材料可使用壽命與結構物所處環境有明顯關連，故採用防蝕對策前須先調查瞭解所處環境腐蝕分類。本文所推薦的三種 C5+環境防蝕塗裝系統，就塗裝系統 A 而言，僅在環

氧樹脂中塗漆增加膜厚至 480  $\mu\text{m}$ ，雖能提昇其整體防蝕效果，但仍存在傳統油漆工法，塗裝道數多、作業時間長之問題。而塗裝系統 B，高膜厚彈性 PU 防蝕被覆塗裝系統，因塗裝厚度可達 2mm 以上且施工效率高、塗裝作業期短，塗膜具彈性可抵抗應力變化，普遍使用於鋼管樁及鋼板樁，防蝕效果相當優越。塗裝系統 C，鋅鋁熔射防蝕系統，在國外有相當優越之防蝕效果，常使用於高腐蝕環境之濱海設施。但值得注意的是，雖然材料具備優越防蝕效果，但施工品質與管理亦是影響防蝕效果成敗關鍵。

表一 防蝕塗裝系統 A (塗料塗裝系統，膜厚增厚至 480  $\mu\text{m}$ )

工作項目	塗料規格	最小乾膜厚度	塗裝間隔	調薄劑	備註
表面處理	噴砂除銹至 SSPC-SP-10 以上，表面粗度 25~75 $\mu\text{m}$ 。				
底漆	厚塗型環氧樹脂防銹漆 (CNS 4938)	60 $\mu\text{m}$	8 小時以上，30 日以內	環氧樹脂系	
第一道中塗漆	環氧樹脂玻璃鱗片中塗塗料 (CNS 4938 第一種)	160 $\mu\text{m}$	8 小時以上，30 日以內	環氧樹脂 flake 系	
第二道中塗漆		200 $\mu\text{m}$	8 小時以上，30 日以內	環氧樹脂 flake 系	
第一道面漆	氟樹脂中塗漆 (CNS 15665)	30 $\mu\text{m}$	1 日以上，10 日 以內	氟素樹脂系	
第二道面漆	氟樹脂面漆(註 1) (CNS 15665 第 1 種)	30 $\mu\text{m}$	--	氟素樹脂系	
補漆作業	銲縫預留未漆處及漆膜損壞處，應先用電動砂磨做表面處理至 SIS St3 (SSPC-SP-3) 以上，再依其損壞之塗層依序修補至面漆為止。				
註 1. 氟樹脂漆又名氟碳樹脂漆皆指符合耐候型面漆 CNS 15665 第 1 種。					

表二 重防蝕塗裝系統 C (高膜厚彈性 PU 防蝕被覆塗裝系統)

工作項目	塗料規格	最少乾膜厚度	塗裝間隔	調薄劑	備註
表面處理	表面噴砂處理至 SSPC-SP-10 以上。				
底漆	兩液型聚胺酯底漆	30 $\mu$ m	2 小時以上，24 小時以內	-	
PU 內襯	無溶劑型高膜厚聚胺酯塗料	2mm	2 日以內	-	
第一道面漆	氟樹脂中塗漆 (CNS 15665)	30 $\mu$ m	1 日以上，10 日以內	氟樹脂系	
第二道面漆	氟樹脂面漆(註 1) (CNS 15665 第 1 種)	30 $\mu$ m	--	氟樹脂系	
補漆	工地安裝完成後，對於銲縫預留未漆處及因運輸等原因造成漆膜損壞處，應先用電動砂磨做表面處理至 SSPC-SP-3 以上，再施以底漆後用工廠塗裝塗裝系統實施塗裝工作。				

表三 重防蝕塗裝系統 C (鋅鋁熔射塗裝系統)

工作項目	塗料規格	最小乾膜厚度	塗裝間隔	調薄劑	備註
表面處理	表面粗糙度需達 $60 \mu\text{m}$ 以上， $SM/Rz \leq 3$ 。(註 1)				
熔射層	鋅鋁或鋁合金熔射 (CNS 7797)	$100 \mu\text{m}$	4 小時以上，10 日 以內	-	
封孔薄塗	封孔薄塗漆	--	--	環氧樹脂系	
中塗漆	環氧樹脂中塗塗料 (CNS 4938 第一種) 或改質型環氧樹脂中塗漆 (CNS 4935)	$100 \mu\text{m}$	12 個月以內	環氧樹脂系	
第一道面漆	氟樹脂中塗漆 (CNS 15665)	$30 \mu\text{m}$	1 日以上，10 日 以內	氟樹脂系	
第二道面漆	氟樹脂面漆 (CNS 15665 第 1 種)	$30 \mu\text{m}$	--	氟樹脂系	
補漆作業	銲縫預留未漆處及漆膜損壞處，應先用電動砂磨做表面處理至 SIS St3 (SSPC-SP-3) 以上，再依其損壞之塗層依序修補至面漆為止。如傷及熔射層則須以高鋅漆修補再依系統塗裝層補漆				
註 1. Rz: 依 CNS 7868 檢測法檢測， $SM/Rz \leq 3$ 。					