

# 熱浸鍍鋅鋼結構耐磨性及濱海地區防蝕設計

蔡明達/臺鍍科技股份有限公司副總經理

## 一、前言

鋼結構不僅可快速建造也可增加造型及空間，且是耐震、綠色建材的最佳選擇，對於現代建築可說是一大福音，但是它在環境嚴苛的台灣中防蝕是一大考驗，必須選擇經濟又安全的防蝕系統以減少維修次數及經費。一個好的腐蝕防蝕系統之基本需求不僅要有長的壽命且要儘可能的具有經濟性。所以，防蝕系統不僅要講求防蝕性也要講求其耐候性、耐機械性，也就是需考量其耐撞性、耐磨性、耐劣化性等。

近年來，台灣大型工業區越來越往濱海地區發展，工廠設立也大量採用鋼結構，但是台灣每年十月至隔年四月是東北季風吹襲的季節，如圖一，濱海地區像林口發電廠附近、台中港、麥寮等區域，東北季風吹襲下對鋼結構產生細砂噴砂的行爲，對鋼結構防蝕系統之耐磨耗性是一大考驗，所以防蝕系統是否具有相當的耐衝擊性等也應在鋼結構評估項目中。



圖一 濁水溪出海口附近 3 月份沙塵暴情形

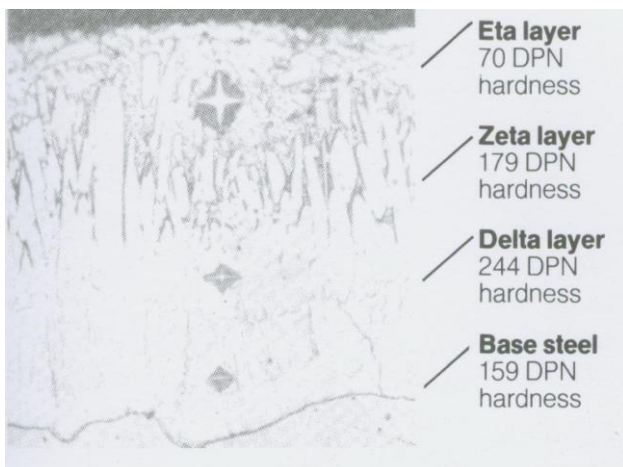
## 二、熱浸鍍鋅層

熱浸鍍鋅，就是將鋼鐵材料表面處理乾淨後浸入約 450°C 的熔融純鋅液中，讓鋼鐵與鋅液產生冶金反應(metallurgy reaction)，形成鐵-鋅合金層，如圖二。圖中之鍍鋅層顯示了從鋼鐵底材成長的各種鐵-鋅合金和覆蓋在外層純鋅層。此鍍

鋅層可以比喻為一個緩衝停止層，因為最外層軟的鋅可以吸收大部分的最初衝擊能量，而下層的鐵-鋅合金比底材的碳鋼還硬，可防止或大大降低穿透鍍層的可能性和曝露裸鋼，如圖三。圖三為熱浸鍍鋅鋼構吊裝時產生撞擊後的刮痕，撞擊後只刮傷外層的純鋅層並未穿透鋅鐵合金層，也未使底材露出生銹。

熱浸鍍鋅鍍層包含裡面的鋅鐵合金層及外層的純鋅層，雖然鋅鐵合金層堅硬，但因其表層純鋅層充分具有韌性，使熱浸鍍鋅適合於組合或使用上可能有磨損的環境，例如砂石場開採的桶車和煤車漏斗的輸送系統等，甚至可能被車或砂石撞擊的道路護欄板、防撞鋼板等。

為了解熱浸鍍鋅層之耐磨性，德國 Dresden Institute 參考 BS/EN 438. Part 2

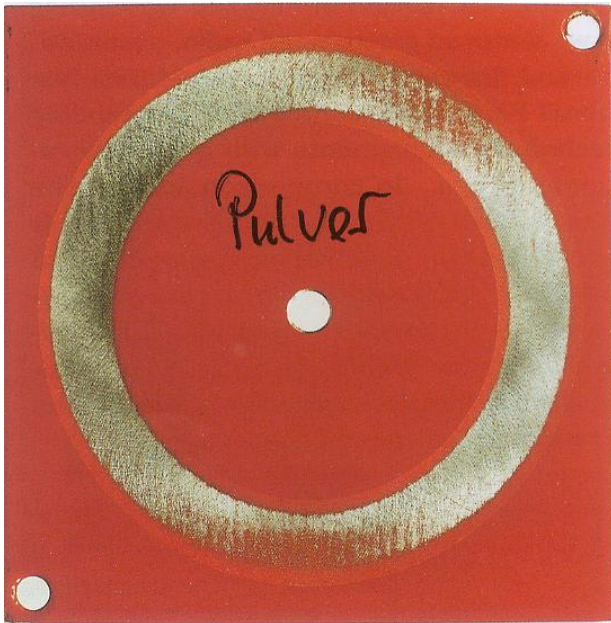


圖二 鋼鐵之熱浸鍍鋅層及其硬度



圖三 熱浸鍍鋅層刮傷情形

[1] 試驗之修正方法，針對(1)醇酸樹脂漆、(2)PVC漆、(3)環氧樹脂漆、(4)PU聚胺基甲酸樹脂漆、(5)粉體烤漆板(未鍍鋅)、(6)BS/EN 10142熱浸鍍鋅+粉體塗裝之連續式鍍鋅鋼板及(7) ISO 1461熱浸鍍鋅等七種防蝕系統之試片進行耐磨耗試驗，其試驗結果如表一。圖四、五為粉體塗裝及熱浸鍍鋅經磨耗試驗後試片，發現熱浸鍍鋅鍍層的耐磨性最佳，其磨耗率僅為 $0.02\mu\text{ m/轉}$ ，約為有機塗料的十分之一。



圖四 粉體塗裝試驗樣品



圖五 熱浸鍍鋅試驗樣品

另外，德國 Dresden Institute 同時也依據 DIN 55996-Part 1 標準針對 (1)BS/EN 10142 熱浸鍍鋅鋼片、(2)ISO 1461 熱浸鍍鋅(兩種不同膜厚)、(3)環氧樹脂漆、(4)PVC 漆、(5)環氧樹脂粉體烤漆、(6)ISO 1461 熱浸鍍鋅+PVC 粉體烤漆等七種防蝕系統之試片進行碎石噴砂試驗(stone chip resistance test)，之後，再依據 DIN 50018 標準將噴砂後試片放入含體積百分比 0.2%濃度之二氧化硫氣室中進行耐候試驗，其結果如表二，發現熱浸鍍鋅試片最佳，經 30 天後並無生銹，而塗裝試片(底材未經熱浸鍍鋅)在 1~12 天後生銹面積達 1%。

表一 試驗結果

防蝕系統	磨耗終點轉數	磨耗量( $\mu$ m/轉)	耐磨係數(t)
醇酸樹脂漆	178	0.11	2.3
PVC漆	247	0.08	3
環氧樹脂漆	140	0.25	1
PU漆	118	0.16	1.6
粉體烤漆鋼板 (未鍍鋅)	910	0.17	1.5
熱浸鍍鋅+粉體 塗裝	1188	0.10	2.5
熱浸鍍鋅 (ISO 1461)	500轉消耗10 $\mu$ m	0.02	12.5

表二 碎石噴砂試驗結果

防蝕系統	平均膜厚 ( $\mu\text{ m}$ )	噴砂後評 估值	鋼材開始生銹 (30天後停止)	
			Ri 1	Ri 3
BS/EN 10142熱浸鍍鋅鋼片	20	--*	>30天	--
ISO 1461熱浸鍍鋅	70	--*	>30天	--
ISO 1461熱浸鍍鋅	110	--*	>30天	--
環氧樹脂漆	120	5	4天	12天
PVC漆	110	3	1天	2天
環氧樹脂粉體烤漆	70	3	--	1天
熱浸鍍鋅+PVC粉體烤漆	70/100	3.5**	>30天	

備註：1. \*：無穿透至底材而不分類 \*\*：烤漆層自鍍鋅層剝離

2. Ri 1：生銹面積0.01%；Ri 3：生銹面積1%

台灣為海島型氣候，各地濱海地區在東北季風吹襲下細砂對鋼結構之防蝕系統產生噴砂撞擊現象，且自海上帶來的鹽分氯離子對防蝕系統侵蝕，這些區域或離島地區對鋼結構之防蝕系統選擇是一大考驗。而具有韌性的熱浸鍍鋅層正可以滿足這些需求，以簡化鋼結構後續嚴重的處理減少任何補修及費用。

台塑公司六輕之公共管架工程應是一的明顯的案例，建廠時公共管架工程之鋼結構採用熱浸鍍鋅(附著量 $610\text{g/m}^2$ )外加三道油漆(環氧樹脂合金底漆 $50\mu\text{ m}$ 、PU面漆 $25\mu\text{ m}$ 及PU面漆 $35\mu\text{ m}$ )之防蝕系統。但是，公共管架鋼結構之高強度螺栓因施工方便採用無熱浸鍍鋅之扭斷型F10T高強度螺栓經鋅鉻酸鹽處理(烘覆型)再塗裝，建廠完成經過3~5年後，在主結構未生銹情形下螺栓部分已逐漸開始生銹，如圖六。此現象可能是因油漆劣化、邊角膜厚不足、噴塗不易、噴砂作用、銹層引起等單一或複合因素造成，加上銹層產生後在無立即塗刷油漆隔絕情形下因銹層疏鬆容易含水分，如圖七，更促使銹層反覆形成而剝離。



圖六 公共管架之扭斷型 F10T 高強度螺栓無熱浸鍍鋅下已生銹



圖七 銹層間隙容易含水反覆生銹

### 三、熱浸鍍鋅鋼結構濱海地區之防蝕設計建議

熱浸鍍鋅於大氣中，表面純鋅層在不同時間下與空氣中氧、水及二氧化碳逐漸氧化形成氧化鋅( $ZnO$ )、氫氧化鋅( $Zn(OH)_2$ )、碳酸鋅( $ZnCO_3$ )腐蝕生成物，成為緻密的薄膜保護鋅及底材。但是，熱浸鍍鋅在空氣中的耐蝕性依使用環境而有差異。熱浸鍍鋅耐蝕性除了受氣溫、濕度、雨量等氣象因素影響之外，空氣中的二氧化硫、氮氧化物、鹽份、落塵等污染物均會影響。所以，在濱海地區即使熱浸鍍鋅具有抗風沙耐磨性，但因鹽份、氯離子仍容易侵蝕熱浸鍍鋅層，加速其反應消耗。所以在台灣濱海地區熱浸鍍鋅層外面最好再用其他方法保護，例如油漆。

目前國際標準組織(ISO)利用鐵、鋅、銅、鋁之年腐蝕速率將環境做大氣腐蝕性分類制定成ISO 9223標準，台灣也根據ISO 9223制定成CNS 13401標準將環境區分為C1、C2、C3、C4及C5五個腐蝕性分類。而台灣有關熱浸鍍鋅腐蝕速率資料現正由中華民國防蝕工程學會蒐集制定中，但若依據日本熱浸鍍鋅協會大氣暴露試驗之熱浸鍍鋅耐蝕性資料，如表三，離海岸100m~2,000m處之腐蝕速率為 $10\sim 30\text{g/m}^2/\text{年}$ ，其 $600\text{g/m}^2$ 鍍鋅附著量之耐用年限約為18~55年；而離海岸100m內之耐用年限為2~18年。

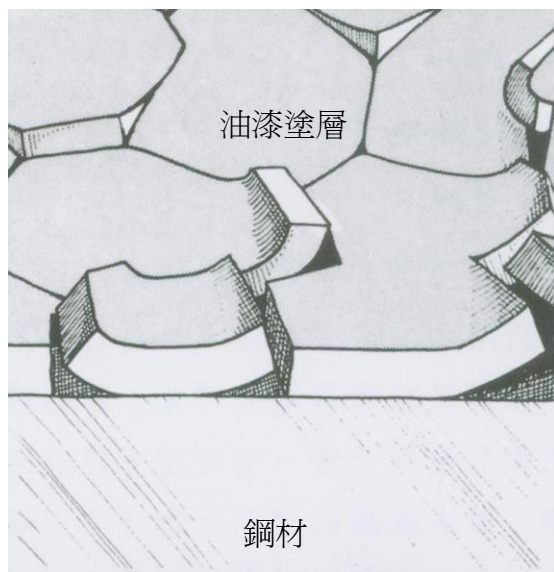
所以，離海岸300m內受風面之熱浸鍍鋅鋼結構應採用雙重防蝕系統方法，也就是熱浸鍍鋅鋼結構再加上塗裝處理。離海岸100公尺內之戶外熱浸鍍鋅鋼結構採用一道MIO中塗漆、兩道氟素樹脂面漆，如表四，而離海岸100~300公尺之戶外熱浸鍍鋅鋼結構採用兩道聚胺脂面漆(PU)。

熱浸鍍鋅鋼結構與面漆之界面利用鍍鋅用環氧樹脂底漆加強其附著性。而在噴塗底漆前，鍍鋅鋼結構表面一定須先去除粉塵、污染物等方可得到良好之附著性。至於鋼結構處於背風處或廠房內，根據日本永井武等研究得知熱浸鍍鋅在濱海地區室內之腐蝕速率約為室外之1/1000，所以應可單獨採用熱浸鍍鋅。

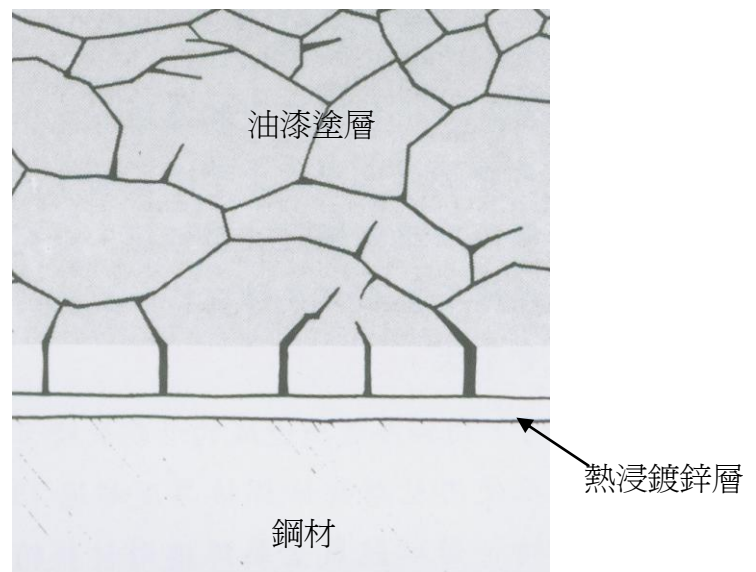
在國內外，早期熱浸鍍鋅鋼結構之塗裝皆採用伐銹底漆(washer primer)當作底漆，但多年前都已成功開發適用於鍍鋅表面之環氧樹脂底漆(日本稱為變性環氧樹脂底漆)，且認為鍍鋅用環氧樹脂底漆比伐銹底漆之附著性更佳。

防蝕設計系統採用熱浸鍍鋅再加上塗裝之方式，稱為雙重系統(Duplex systems)。熱浸鍍鋅表面受到塗裝的保護，因而隔絕空氣中水、氧、污染物等之接觸反應，降低熱浸鍍鋅的腐蝕速率，尤其是在海洋性、工業性氣候中降低氯離子、硫化物等之衝擊而使其腐蝕速率有加速下降之情形；同時，雙重系統中的塗裝若開始劣化時會因為熱浸鍍鋅而隔絕鋼結構基材之疏鬆鐵銹產生，不像未經熱浸鍍鋅之鋼構件因為鐵銹產生而促使塗層剝落，如圖八。

另外，塗裝若劣化開始產生微小裂縫時，熱浸鍍鋅之鋅腐蝕生成物會填滿裂縫且不易使塗層產生剝離，如圖九。所以，熱浸鍍鋅之雙重系統可以延長熱浸鍍鋅之耐用年限，而其耐用年限(D)一般以  $[D_{\text{鍍鋅}} + D_{\text{塗裝}}] \times K$  之公式推算，K值是環境影響因數為1.5~2.3，環境之腐蝕性分類越低(C1)則K值越高，而環境之腐蝕性分類越高(C5)則K值越低。



圖八 鋼構件生銹導致塗層剝離示意圖



圖九 熱浸鍍鋅鋼構件塗層劣化示意圖

表三 鍍鋅層在日本各種使用環境下之腐蝕速率

環境類別		每年之腐蝕速率 (g/m <sup>2</sup> /年)	多數代表值 (g/m <sup>2</sup> /年)		推算耐用年限*(年)
低空氣污染之山區、田園地區		3~10	5		110
都市地區或工業地區		7~20	都市地區	8	68
			工業地區	10	55
海岸地區 海岸地區	平時不受海水潑濺之地區	10~30	距海岸0.5~2.0 km之地區	10	55
			距海岸0.3~0.5 km之地區	20	27
			距海岸0.1~0.3km之地區	30	18
經常受到海浪浸潤之地區		30~200	50		11

\*：推算耐用年限之計算方式為(600-50)÷多數代表值

表四 熱浸鍍鋅鋼結構在離海 100 公尺內之防蝕設計建議

鍍層及塗層	規格	乾膜厚 ( $\mu\text{m}$ )	鍍鋅附著 量	備註
熱浸鍍鋅	熱浸式鍍鋅法(CNS 8503)	---	600g/m <sup>2</sup>	
底漆	鍍鋅用環氧樹脂底漆	50	---	環氧樹脂系
中塗漆	環氧樹脂MIO中塗漆(CNS 4938第1種)	50	---	環氧樹脂系
第一道面漆	氟素樹脂中塗漆(JIS 5659;2008)	30	---	氟素樹脂系、聚胺酯系或環氧樹脂系
第二道面漆	氟素樹脂面漆(JIS 5659;2008第1級)	30	---	氟素樹脂系

#### 四、國內外濱海地區熱浸鍍鋅鋼結構案例

鋼結構在世界各國利用熱浸鍍鋅作防蝕是很普遍的，尤其是歐美國家，歐洲每年約有 700 萬噸鋼鐵製品採用熱浸鍍鋅，南美洲約有 82 萬噸，而日本約有 100 萬噸，皆用在各式各樣的鋼構、配件、螺栓等，也有部分採用熱浸鍍鋅與塗裝之雙重防蝕系統，其原因為加強蝕久性、識別、美觀等，從歐美及日本的熱浸鍍鋅案例來看，發現採用雙重防蝕系統大多以美觀因素為多，甚少以耐久性為出發點，因為大多認為熱浸鍍鋅就足以達到防蝕效果，即使位於濱海環境亦是如此，甚至我們認為是同屬海島型氣候的日本也一樣，大多數熱浸鍍鋅鋼結構就直接使用直到達到耐蝕年限後再採塗裝作維護，綜觀歐美、日本的案例中即使在濱海環境裏仍可達到 50 年以上之耐蝕壽命。此點與台灣有點不同，這或許是台灣的面

幅比歐美、日本各國小而東北季風容易將海鹽粒子吹至陸上所以環境更加嚴苛。以下簡單介紹四個熱浸鍍鋅與塗裝之雙重防蝕系統的案例。

### 1.台塑企業六輕工程

六輕工程位於雲林縣麥寮鄉，是離島式基礎工業區，也是台塑公司投資興建的麥寮及海豐區六輕工業園區，如圖十。於1997年台塑大舉進行抽砂填海工程向外4公里與海爭地，地質改良並鞏固基地將「滄海變桑田」，海岸線長達8公里。六輕計劃的規劃包括了約十大項分類：一、營建工程；二、麥寮港；三、獨立發電廠；四、煉油廠；五、輕油裂解廠；六、汽電共生廠；七、機械廠和鍋爐廠；八、矽晶圓廠；九、彈性纖維廠；十、輕油裂解廠三階擴建，投資金額達5,420億元，其中鋼結構採用熱浸鍍鋅處理者有公共管架、石化廠、部分配管及儲油槽等，共超過30萬噸以上，而這些熱浸鍍鋅鋼構件皆再塗裝處理，其塗裝系統為環氧樹脂合金底漆 $50\mu\text{m}$ 、PU面漆 $25\mu\text{m}$ 及PU面漆 $35\mu\text{m}$ 。

### 2.日本沖繩潮上橋

潮上橋位於日本沖繩東北部平良灣附近的縣道，如圖十一，跨越福川跨距為20.9m，離河面約2公尺高，於1975年5月建造完成。由於位於平良灣，平時自海上吹來的海風及沙子含高濃度氯離子，所以熱浸鍍鋅橋梁及護欄板外面再加兩道氯化橡膠漆。



圖十 台塑六輕工程公共管架



圖十一 日本沖繩潮上橋

### 3.淡水漁人碼頭情人橋

2003年2月14日啓用之情人橋為人字形單塔斜張橋設計，是以流線之彎曲造型與帆船之風帆意象相呼應，橋跨距164.9米、橋面平均寬5



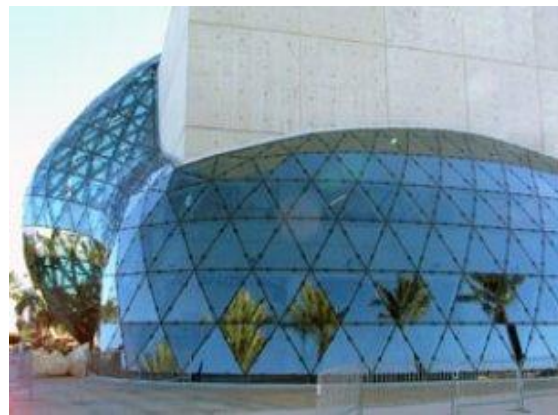
米、橋塔高 49 米，橋底距港內常時水位水面高約 12 米，主橋體與橋塔皆為鋼製結構，且經熱浸鍍鋅及塗裝之雙重處理，塗裝系統為合金用底漆 30 $\mu$  m、聚胺基甲酸脂面漆(PU)面漆 50~75 $\mu$  m，如圖十二。

#### 4.美國佛羅里達 Salvador Dali Museum

Salvador Dali Museum 是由 Yann Weymouth 和 Novum Structures 公司所設計，以波浪和抽象的玻璃結構環繞廣場和博物館。由於博物館坐落在佛羅里達海邊，鋼結構處於高腐蝕的環境中面臨一些挑戰，所以博物館的鋼構件需要一個耐久且維護少的防蝕系統，以防止不安全的和難看的腐蝕。鋼結構採用熱浸鍍鋅再粉體烤漆之雙重防蝕系統，如圖十三。



圖十二 淡水漁人碼頭情人橋



圖十三 美國佛羅里達 Salvador Dali Museum

#### 四、結論

一個好的防蝕系統，應該提供一個在維修前具較低費用的服務壽命。假如防蝕系統之耐機械損傷性、耐吹襲性等方面佳，防蝕系統在鋼構件運輸到現場、搬運和安裝、使用中等時受到相當大的機械應力，則防蝕系統不被破壞，鋼結構將不被腐蝕。然而，熱浸鍍鋅正可以提供此項要求的一理想方法。

熱浸鍍鋅不僅可以提供長期保護的考驗，且熱浸鍍鋅層經過合金化反應後緊緊貼在鋼鐵上，具有極強的耐磨性及耐風沙吹襲性，但在濱海地區還具有鹽分容易侵蝕熱浸鍍鋅，所以在台灣濱海地區 300 公尺內的戶外熱浸鍍鋅鋼結構，建議採用再經塗裝之雙重防蝕系統，而在戶內之熱浸鍍鋅鋼結構則直接使用。

參考文獻：

1. ZALAS, 「Hot Dip Galvanizing」, 1982, p13
2. Galvanizers Association, 「HOT DIP GALVANIZING」, Vol.11, No.4, Dec.,2001
3. Galvanizers Association, 「HOT DIP GALVANIZING」, Vol.12, No.1, Dec.,2002
4. 台灣塑膠股份有限公司「油漆工程規範」, Oct.,2005
5. Galvanizers Association, 「CORROSION PROTECTION BY HOT DIP GALVANIZING」, Aug.,1992, p43
6. 日本鉛亞鉛需要研究會, 「鉛と亞鉛」 Vol.104, Nov.,1981
7. Internation Zinc Association, 「galvanize」, Vol.60, Apr.,2004
8. 永井 武、有働康夫、邊見善三, 「各種表面處理鋼板の屋外および室内における腐食」, 日本金屬學會誌, 第 49 卷, 第 10 號(1985), p864