從三芝根德吊橋塌落談鋼橋之防蝕

陳正平技師

一、三芝根德吊橋塌落原因初步探討

新北市三芝區位於三芝區台 2 線約 18.5 公里處的的「根德水車公園生態園區」民國 96 年 10 月 20 日開幕，公園旁限重 20 人之根德人行吊橋，於民國 102 年 11 月 17 日下午 4 點 27 分左右橋上僅有 4 人之情況下傳出人行吊橋上之垂直吊索竟然硬聲全部斷裂，整座吊橋扭曲變形(見照片 1)，橋面上的木板也嚴重鬆脫，一家 3 口，和 1 名同行的男子正好行經吊橋，當時橋上的 4 名遊客，從九公尺的高度的橋面直墜八連溪淺灘石塊間， 4 傷者其中一名女子頸椎受傷傷勢較重，幸好沒有生命危險。該吊橋才蓋好 6 年，三芝區公所表示，根德橋每年固定 1 次安全檢測，最近在民國 102 年 9 月 26 日檢測，根據新北市三芝區 102 年度轄內橋梁巡檢工作檢測報告之檢測項目有：整體穩定性、上部結構(RC、PC、鋼構)、橋墩、橋台、基礎、引道擋土牆、引道、支承、伸縮縫、河道、橋墩保護設施、附屬設施等，但檢測損壞狀況內容均無「銹蝕」相關項目，評估等級亦均為「安全」，僅發現部分水泥基座出現裂縫並已修復。但限重 20 人、估計可承載 1500 公斤的吊橋，由相關資料顯示，垂吊索為 7×19φ10mm 鍍鋅鋼索 PVC 披覆(披覆後 φ14mm)，抗拉強度 6 噸以上，垂吊索組含二端壓接整組裝置抗拉強度 6 噸以上(壓接處須無異狀)，垂吊索裝置整組須經公家單位認證之測試合格報告，垂吊索須附原廠材質檢驗證明，垂吊索懸吊桿、垂吊索高拉力螺桿、垂吊索連接桿、垂吊索調節器等均為 SUS 304#不銹鋼。以此材料規格照理來說，垂吊索應該要堅固耐用，怎麼會鏽蝕得這麼嚴重，為何才容納 4 名遊客走上去卻發生垂吊索鋼繩斷裂。斷橋原因到底是什麼？筆者與林俊雄土木技師當時一同接受新北市政府工務局邀請赴事故現場進行初步勘查，現場檢視結果發現吊橋之垂吊索全部銹蝕殆盡而斷裂(見照片 2)，經以刀片剖開吊橋鋼索的 PVC 披覆發現鋼索裡面早已嚴

重銹蝕 (見照片 3)內部結構從肉眼上觀察，垂吊索與下端套管間已嚴重銹蝕至近乎斷裂，所有垂吊索均有類似現象，初步研判可能係以 PVC 披覆之鍍鋅鋼索於下端與套管壓接處，須割除 PVC 披覆，露出吊索金屬部分供套管壓接時，不慎損壞熱侵鍍鋅之鍍層，而套管壓接完成後又未以防水塑膠套環圍阻保護，經長期雨水浸入，三芝地區又濱臨北海岸，鹽分容易侵入導致銹蝕現象在內部發生而未能及時發現。因此只要其中 1 根垂吊索斷裂，便會形成「連鎖效應」，牽一髮動全身，但真正損壞原因仍需進一步後續調查鑑定。

二、腐蝕的定義

腐蝕的定義係指材料在使用的環境，諸如，水、水蒸氣、潮濕空氣、高溫氣體、或具腐蝕性之氣體或液體中，由於受到化學或電化學的作用而導致其性質退化的現象，稱為腐蝕。金屬在自然界中最穩定的狀態通常是以化合物型態存在，例如，氧化物、硫化物、碳酸鹽等。故大部分的金屬在空氣中會逐漸從金屬態轉化成化合物或離子態，而失去金屬原有的特性，這種現象即為腐蝕。在這種轉化過程中，會釋出能量，使金屬在環境系統中趨於較低能階的穩定態，腐蝕現象亦即大自然依循熱力學定律自發的反應之必然結果。鋼鐵在潮濕空氣中的氧化，或者鋅溶解於酸中，皆是腐蝕的現象。鑄鐵、碳鋼、合金鋼等鐵系金屬材料的腐蝕產物就是「銹」。其他非鐵材料的腐蝕，並不一定會產生肉眼可見的銹。鋼材的腐蝕無時無刻不在發生或進行中，鋼材腐蝕會減低效用或甚至不堪使用，除會造成困擾外，嚴重者，如工業廠房構材腐蝕，導致颱風時產生局部破壞，而造成設備或貨物損失(見照片 4 及 5)；尤有甚者，產生工業廠房倒塌或橋梁塌落，例如新北市三芝區根德吊橋之垂吊索全部銹蝕斷裂塌落(見照片 1 至 3)，造成人員傷亡或設備財產之損失。在工業發達的今日，腐蝕對人類的影響仍然既深且鉅(見照片 6：基礎錨栓銹蝕嚴重)，而土木工程師須具備鋼材腐蝕及防蝕的基本常識，才能在結構物除因結構力學行為之破壞模式以外，尚能因應因防蝕方法不當所產生之破壞模式，如此才能達到真正符合經濟性、耐久性及安全性的需求。

三、鋼材腐蝕類型

腐蝕現象非常複雜，吾人經常會發現，在正常狀況下有較佳耐蝕性的材料，卻在某些特殊的條件下發生腐蝕現象。相反地，吾人認為耐蝕性較差的材料，卻有時表現出有良好的耐蝕性。譬如，鐵在稀硝酸溶液中，會發生嚴重的腐蝕；而鐵在濃硝酸溶液中，其腐蝕程度卻非常輕微。又鐵如在自來水中，如果與銅或白金接觸，則鐵會加速腐蝕；但鐵如與鋅或鎂接觸，則會抑制鐵的腐蝕現象。因為材料以及其所使用的環境差異很大，故腐蝕的類型也有顯著的不同。同一地點大氣腐蝕性會隨著氣候變遷與周邊之人文及工業發展而改變。因此於鋼材防蝕設計前，應查詢最新之腐蝕環境資料。若無相關資料，或資料調查時的氣象、地理、人文背景條件與現況已有差異時，應進行大氣腐蝕性分類之評定。調查項目應包括調查地點之氣象、地形地物、土地區分與人文背景條件等資料。

鋼材之腐蝕類型，依其細部設計、斷面形狀、材料、使用條件及工址環境，約可分為：大氣腐蝕、浸泡腐蝕、間隙腐蝕、加凡尼腐蝕、孔蝕、應力腐蝕破裂、腐蝕疲勞、氫脆破壞、氣體腐蝕、鋼筋混凝土腐蝕及其他等型態：

1. 大氣腐蝕：

大氣中的濕度(或水分)、溫度、鹽分、酸度、灰塵(或固體浮懸物)、風速或風向等，會引起鋼材不同程度的腐蝕。

2. 浸泡腐蝕：

鋼橋若有構件長期浸泡或曝露在水中，則水溶液的各種腐蝕型態，皆可能顯現。以混凝土或鋼材作為橋墩，鋼筋或樑柱可能遭遇的腐蝕即為一例。

3. 間隙腐蝕：

鋼橋許多液體不易流動的接縫（或接觸面）都是發生間隙腐蝕的可能位置，這種腐蝕不易由目視檢測，所以會造成保固上的困擾。接觸面的兩側可能都是金屬，但也有可能僅有一面是金屬。

4. 伽凡尼腐蝕：

不同金屬的直接接觸，若有電解質（如：水膜等）存在，則因其電化學電位的差異，較活潑的金屬發生腐蝕，這種腐蝕稱為加凡尼腐蝕。通常只要有化學元素或成分或材料上有任何能量的差異時，就會有電化學的電位差。例如：鋼樑之螺栓接合處由不同的鋼材組成，就會有電位差。通常化學組成差異愈大，電位差就愈大，加凡尼腐蝕的現象更明顯。

5. 孔蝕：

孔蝕是發生在局部位置（非全面性），滲透甚至穿孔的一種腐蝕現象。通常材料表面之局部材質、幾何形狀、或塗裝等不均勻因素，皆有可能發生孔蝕。

一旦發生孔蝕，常會發生自我催化反應的作用，所以孔蝕的速率較一般所謂的均勻腐蝕速率更快。氯離子是自然環境中普遍存在且最容易促進孔蝕的一種物質，制氯離子的存在或是其濃度，是抑制孔蝕的主要方法之一。不銹鋼等具有鈍化耐蝕特性的鋼料，較一般碳鋼容易發生孔蝕。

6. 應力腐蝕破裂：

當鋼料可發生腐蝕且其位置有應力集中的現象時，容易發生應力腐蝕破裂。一旦發生應力腐蝕，其初始裂縫常不易被偵測到。這種裂縫通常是活潑且會持續成長，其至鋼料破裂前的伸長率及所需應力值，遠小於一般過負載破壞之值，不易被感知，因此容易造成非預期的橋梁斷裂。

7. 腐蝕疲勞：

與應力腐蝕破裂相似，腐蝕反應可造成疲勞初始裂縫的生成，促進加速鋼材的疲勞敏感性，甚至加速疲勞裂縫生長速率，大幅減少橋梁壽命而發生非預期的災難性破壞。純粹考慮機械疲勞強度，在腐蝕性強的環境下，其設計強度常不敷需求。

8. 氫脆破壞：

強度愈高的鋼鐵，發生氫脆破壞比一般強度的鋼鐵更為敏感。經過酸洗、電鍍等表面處理，或是銲道位置，可能會有較高的氫含量，應注意除氫並使用低氫素系銲條。若高強度合金鋼施以陰極防蝕處理，也應注意避免引起氫脆破裂的發生。

9. 氣體腐蝕：車輛排放的氣體會直接或間接的引起鋼橋的腐蝕，例如：廢氣中的硫，可能造成鋼鐵或銅合金的硫化反應，或者會引起潮濕空氣的酸化等現象。特別是密閉式的橋梁，這方面的腐蝕不能忽視。

10. 鋼筋混凝土腐蝕：

鋼橋在橋墩或橋座部分，仍有鋼筋混凝土的結構物，其所包含的鋼筋若發生腐蝕，則會影響橋墩的安全性與耐久性。影響鋼筋混凝土腐蝕的因素，包括：水滲透、含氯量、中性化等。

11. 其他：

腐蝕的發生與材料所處的環境有關，是非常複雜的反應現象，微生物腐蝕、雜散電流引起的電蝕均為其例。所以不同的材料（化學組成不同），在不同的使用環境中，可能發生的腐蝕型態與嚴重性可能都不相同，瞭解其特

徵是防蝕的要點之一。有關腐蝕型態的介紹與說明可參考許多文獻、手冊與資料庫，例如：中華民國防蝕工程學會出版之防蝕工程學刊、美國金屬學會所出版的「金屬手冊」第九版第十三卷，即有豐富詳盡的資料。

四、腐蝕之防制，基本上只要將構成腐蝕電池之四要素：

陽極、陰極、物理性接觸及電解質中，去除其中之一要素即可達成腐蝕之防制。鋼材之防蝕方法應依據腐蝕環境及防蝕目標，選擇最合適之方法，且不限使用單一方法，可從結構設計、鋼材選擇、表面防蝕及陰極防蝕等方式進行之。鋼材表面之防蝕方法，主要以油漆塗裝或熱浸鍍鋅、熔射、電鍍等方式將金屬材料作為表面被覆，其中以油漆塗裝為最常採用之防蝕方法。以廣義的防蝕設計來講，適當而足夠抗蝕的材料不但可節省經費，而且可以延長結構物的使用年限。抗蝕的材料在實務應用上，不一定是最貴的材料效果最好，尤其是對材料與環境之互制影響下，例如應力腐蝕就是如此，不銹鋼在海水環境下就不一定比碳鋼來得好。不當的選擇將可能產生嚴重的腐蝕現象，因此選擇適當的防蝕方法是工程師防蝕設計最重要的課題。

常用之防蝕方法例舉如下：

1、耐蝕鋼材的選擇：

耐候低合金鋼的抗大氣腐蝕能力，主要是來自其化學成分中含有低比例的銅、鉻、鎳等合金，由於這些合金成分的影響，使得鋼鐵在與大氣接觸腐蝕時生成具有緻密性，穩定不易剝落的銹層，也由於這些銹層的隔絕作用使得主要腐蝕因子-水氣無法直接與鋼材表面接觸，進而發生腐蝕電池作用。耐候鋼之所以能夠耐候是建立在表面腐蝕生成物是否穩固的建立在鋼材表面，而以台灣潮濕尤其是鹽害地區或硫害地區都是很難達到預期的效果。不銹鋼：不銹鋼不是只有一種，常用的有304不銹鋼與316不銹鋼，同屬沃斯田鐵

系不銹鋼。在不銹鋼中添加鉬，可有效提高抗蝕性，尤其是有硫酸根離子或氯離子的情況。316不銹鋼比304不銹鋼有高數倍之抗蝕能力，為了更有效發揮不銹鋼的耐蝕效果，應充分了解其性質，才能作適當的選用。

2、表面防蝕處理：

使用碳鋼或低合金鋼作為橋梁的結構材料時，表面防蝕處理是必要的。表面防蝕處理的技術很多，幾種常用的方法簡要介紹如下：

(1)、化成皮膜處理：

最常見的有磷酸鹽皮膜處理及鉻酸鹽皮膜處理，後者因有環保的考量，已避免採用。化成皮膜處理僅用於暫時性的防蝕，不宜用於橋梁鋼構最後防蝕處理。 (化成：在過磷酸鈣或重過磷酸鈣生產中，從混合反應器流出來的反應物料是一種相當濃稠的半流體，落入一個稱之為化成室的設備中繼續進行反應，磷酸二氫鈣較快從過飽和溶液中結晶出來，先形成不能流動的物料，後形成像麵包那樣的鬆軟固體物料。這個過程稱為“化成”或“陳化”，化成時間為0.5～4.0h。)

(2)、塗料塗裝：

塗裝可隔絕鋼構與環境電解質之接觸，為最普遍與方便的防蝕方法。依防蝕與美觀的需求，可選擇不同的塗裝系統。塗裝包括：前處理、施工程序、塗裝系統等，都會影響塗裝的可靠性與耐久性。

(3)、有機及無機被覆：

有別於塗裝，有機或無機被覆之厚度大都超過1 mm。將樹脂、橡膠、瀝青、壓克力等有機物質，或氧化物、無機鹽類、水泥砂漿等無機物，利用浸塗、滾壓、熱噴塗、甚至刷塗於鋼鐵或其他金屬表面，以隔絕腐蝕性的環境，

達到防蝕的效果。

(4)、熱浸鍍：

將鋼鐵材料浸置於低熔點的液態金屬中，附著於鋼材表面之該金屬於取出後經冷卻可以形成一附著性良好的表面金屬層，此熱浸鍍金屬層一方面可以隔絕腐蝕性環境的侵蝕，另一方面對於特定金屬（如鋅或鋁等）的熱浸鍍層也可提供陰極防蝕的效果。最普遍的熱浸鍍金屬是熔點低的鋅、鋁或鋅鋁合金；鍍錫的馬口鐵則不適用於一般大氣環境。

(5)、金屬熔射：

以火燄、電弧、電漿或雷射等銲接或塗覆的工作程序，將細狀的金屬或非金屬材料以熔融或半熔融狀態形成塗覆層。此塗覆之材料可為粉末、陶瓷棒線或熔融材料。金屬熔射又稱為熱噴覆、噴銲或熱熔射。

(6)、電鍍：

將非鐵金屬，如鋅、錫、銅、鎳、鉻或鎘等以電鍍的方式析鍍在鋼鐵材料表面，達到防蝕的效果，通常使用於精度要求較高的零件。

(7)、無電鍍（或化學鍍）：

有別於電鍍方法，無電鍍是利用鍍液中還原劑，將欲析鍍的金屬還原後析鍍於鋼鐵表面，因為不需外加電源，故稱為無電鍍。最常見的無電鍍層有鎳、銅、鈷等金屬。

(8)、鈍化處理：

是陽極處理的一種方式，將鋼鐵表面加以氧化，形成一層氧化膜，以阻絕大氣腐蝕環境的侵蝕。鈍化處理最常用於不銹鋼及鋁合金等。

3、陰極防蝕：

利用外加電流或連接另一較活性之金屬，使鋼構成為電化學電池的陰極，以降低金屬腐蝕速率的一種技術。陰極防蝕適用潮濕的環境，對鋼構浸泡腐蝕的防制最為有效。

五、鋼橋結構設計之防蝕考量

鋼橋防蝕方法應依腐蝕環境及防蝕目標，選擇最合適方法，且不限使用單一方法，可從結構設計、鋼材選擇、表面防蝕及陰極防蝕等方式進行之。鋼橋於規劃與結構設計時，應兼顧初期及後續防蝕維護需求成本，針對所處腐蝕環境進行整體設計，包括採用合適之防蝕方法與防蝕構造細部。以下為規劃設計時應考慮的方向：

1.防蝕考量因素

應包括橋梁使用年限、橋梁設置地點之大氣腐蝕環境分類、橋梁特性、規模與施工方式、相關防蝕技術有效性、施工性與耐久性、維護管理方法、制度及生命週期成本等。

鋼橋之防蝕設計應就橋梁之重要性、影響性、使用性、使用條件、外觀要求、橋址條件、腐蝕環境、結構型式、橋梁特性、橋梁規模、施工困難性、防蝕效果、維修難易度、防蝕耐久性、管理單位之維護制度與經費、使用年限與生命周期之成本等因素，作通盤性考量，選擇最合適、可行之防蝕方法，及辦理橋梁結構之各項防蝕構造細部設計，使在滿足橋梁之建設目的，並兼顧短期施工經費和長期維護成本之條件下，儘可能延長橋梁使用年限。

2.耐候鋼材之使用

每種耐候鋼材均有其防蝕特性及適用環境，使用時應謹慎選擇，必要時得與表面防蝕塗料或被覆共同使用。與耐候鋼材結合或接觸之構件或材料，如螺栓或銲材等，應使用與耐候鋼材之電化學電位相近之材質，以避免因電位差過大而產生加速腐蝕。

耐候性鋼材如ASTM A588、CNS 4269、JIS G3114及不銹鋼等鋼材，耐候性鋼材因其成分中含有銅、鉻、磷等元素，在濕度低、常有日曬的大氣中會形成緻密性高之穩定鐵銹層，被覆於鋼材表面，可阻止鋼材繼續氧化，而達到防蝕的功能。惟耐候性鋼材如無塗裝處理，在緻密銹層形成前，將會產生銹水或浮銹而影響外觀，故一般亦常加做塗裂或被覆。依相關研究顯示，耐候性鋼材如採用防蝕塗裝，其塗膜壽命約為普通鋼材之二倍以上。使用不銹鋼鋼材則無此顧慮，但造價較高。

3. 鋼材之最小厚度

鋼橋中各鋼材之最小厚度應符合設計規範規定。曝露於嚴重腐蝕環境之鋼材，除採用適當防蝕方法保護外，其厚度亦應酌量增加。

依交通部頒布之「公路橋梁設計規範」第8.1.8節規定，各項鋼材之最小厚度為：

(1) 結構鋼材(包括支撐、橫構架及各種連接板等)除熱軋型鋼之腹板及鋼橋之面板之閉合肋條、填板與欄杆外，其厚度不得小於8mm。

(2) 熱軋型鋼梁或槽型鋼之腹板厚度不得小於6mm。

(3) 鋼橋面板之閉合肋條厚度不得小於5mm。

至於曝露於嚴重腐蝕環境而須增加之鋼材厚度，應依所在之腐蝕環境，

考量腐蝕速率，預估使用年限及未來維修情況等決定之。

4.橋梁規劃之防蝕要點

橋梁規劃應從路線選擇、橋址位置、橋梁高度、橋梁型式、橋梁基本構造等審慎規劃，使鋼橋能降低受腐蝕環境之影響，並減少橋梁曝露在腐蝕環境下之表面積。

橋梁防蝕問題於規劃階段即須注意，應儘量降低腐蝕環境對橋梁之影響，以減少腐蝕機會。例如，在選擇路線與決定橋梁位置時，應在滿足交通運輸需求下儘量使鋼橋遠離惡劣之腐蝕環境；並藉由注意自然條件之影響情況，以減輕橋梁受腐蝕環境之影響程度，例如，注意橋梁與風向之關係、橋梁與海岸之關係等惡劣腐蝕環境之遠近關係、橋梁受地形與地物之阻隔關係等。

5.橋梁結構之防蝕設計

鋼橋應儘量減少腐蝕物質接觸到或停留在鋼材上，以降低腐蝕機會。腐蝕物質較可能長期滯留之部位，應加強防蝕塗裝保護。鋼橋之構材設置、斷面形狀與附屬設施等各項構造細部應依規定進行設計。

橋梁結構之防蝕設計須考量(1)橋梁結構之構造細部。(2)橋面板構造。(3)螺栓接頭。(4)雨水可能滯留部位。(5)排水需求。(6)附屬設施(伸縮縫、支承構造及其附近鋼橋構造應避免水分塵土等腐蝕因子停留或堆積)。

6. 檢修設施之設置

為方便後續維護工作，對檢修較不易之橋梁，應考慮於橋梁上設置檢修步道等設施。

六、結語

土木工程師須具備鋼材腐蝕及防蝕的基本常識，才能在結構物除因結構力學行為之破壞模式以外，尚能因應因防蝕方法不當所產生之破壞模式，如此才能達到真正符合經濟性、耐久性及安全性的需求。

臺灣地區鋼結構橋梁數量日益增多，橋齡亦逐年增加，後續維護管理，尤其是防蝕塗裝更成為重要課題。降低鋼橋塗裝維護頻率及成本與鋼橋興建時的防蝕規畫設計與施工有密切的關連，妥善事前調查、合理規劃、正確設計與確實施工，一直都是橋梁興建與維護管理的重點工作。

鋼橋如發生腐蝕，不僅影響觀瞻，且將造成有效受力斷面積減少，降低構材強度，進而影響橋梁之安全性與耐久性，更將增加後續維護工作與費用。因此，鋼橋在規劃與設計階段，除須就橋梁型式、結構系統、構材強度、構造斷面等詳加考量與計算外，防蝕對策亦應列為設計重點，深入探討，採用合適防蝕方法，及審慎設計防蝕構造細部，以增長橋梁使用年限。

鋼橋在規劃與結構設計時應在兼顧初期及後續防蝕維護需求之成本下，針對所處之腐蝕環境進行整體設計，包含採用合適之防蝕方法與防蝕構造細部，以避免鋼橋發生腐蝕，提升鋼橋之耐久性及安全性與美觀性。

【參考資料】

[1]“鋼鐵材料手冊”中國材料科學學會，西元1998年。

[2]“鋼結構橋梁防蝕塗裝技術手冊”中華民國鋼結構協會。

圖 1：吊橋塌落掉入河床

圖 2：垂吊索斷裂口下端垂吊索調節器處垂吊索之銹蝕狀況

圖 3：垂吊索斷裂口上端索端去除包覆材後之銹蝕狀況

圖 4：廠房牆面圍梁銹蝕狀況

圖 5：廠房牆面圍梁銹蝕颱風災損狀況

照片 6：基礎錨栓銹蝕嚴重。