

熱浸鍍鋅高強度螺栓

蔡明達/臺鍍科技股份有限公司副總經理

一、前言

高強度螺栓(High Strength Bolt、High Tension Bolt)常用於鋼橋、鋼結構大樓、廠房等工程，但在台灣工程上似乎無統一之名稱，工程上稱呼有高張力螺栓、高拉力螺栓、強力螺栓等，而依據中國國家標準(CNS)則稱為高強度六角螺栓(適用於摩擦接合用)。高強度螺栓作為鋼結構工程之續接，續接部之防蝕處理大多於高強度螺栓接鎖緊作業後現場施以噴塗油漆。但是，我們常發現大多數的工程之銹蝕都是從高強度螺栓開始生銹。

熱浸鍍鋅，是利用鋅金屬披覆於鋼鐵表面，讓鋅金屬自己慢慢消耗保護鋼鐵不致銹蝕，藉由熱浸鍍鋅防蝕方法的長久耐蝕性而可減少維修次數及費用。熱浸鍍鋅防蝕技術亦可運用於高強度螺栓，利用熱浸鍍鋅作為油漆系統之底漆之一以減少鋼結構續接處銹蝕之情形。

二、高強度螺栓

高強度螺栓係指其強度較普通螺栓(機械螺栓)為大者。高強度螺栓起源於1934年英國C. Batho開始使用60kgf/mm²螺栓，之後世界各國再以美國為中心開始研究高強度螺栓，而美國於1950年代制定A325標準，鋼骨結構開始使用90 kgf/mm²摩擦接合高強度螺栓，1964年完成100公斤級標準。日本，1957年東京Bridgestone大樓增建工程中開始使用高強度螺栓，而其螺栓鋼材係採用S35C~S50C碳鋼。以日本工業標準(JIS)而言，普通螺栓的抗拉強度為400N/mm²以上，而高強度螺栓之抗拉強度1. 第一種F8T抗拉強度為800~1,000 N/mm² 2. 第二種F10T抗拉強度為1,000~1,200N/mm² 3. 第三種F11T抗拉強度為1,200~1,300 N/mm²，其抗拉強度較普通螺栓高2~3倍。

國內高強度螺栓大致可分美國與日本系統兩種，美國系統主要以ASTM A325及A490為主，而日本系統則以JIS B1186及CNS 11328之F8T及F10T為主，其鋼種材料除ASTM有對材料成分做明確規定外，其餘則是各家廠商自行選用鋼種，但鋼種仍以為硼鋼、中碳鋼、耐候鋼等為主。高強度螺栓之機械性質，如表一所示，JIS F8T之F表示摩擦接合用、8表示抗拉強度80~100 kgf/mm²、T為抗拉強度。

三、高強度螺栓的銹蝕與延遲破壞

日常生活中，鋼材或鋼結構生銹似乎是很平常的事，尤其是無油漆的狀態下特別顯著。鋼鐵生銹(腐蝕)是一種電化學反應的現象，只要在表面有電解質水溶

液存在，加上陰陽極反應就形成腐蝕的現象。以鋼結構(鋼鐵)為例，當鐵發生氧化反應(陽極反應)形成鐵離子溶解在水中，同時溶解在水(或水膜)中的氧氣會獲得鐵金屬氧化所釋出的電子後而發生還原反應(陰極反應)產生氫氧根離

表一 高強度螺栓機械性質

國家標準	種類	直徑(英吋)	降伏強度 kgf/mm ²	抗拉強度 kgf/mm ²	伸長率 (%)	斷面收縮率 (%)	硬度 HRC
ASTM	A325	1/2~1	64.4 以上	84.4 以上	-	-	25~34
	A490	1/4~1 1/2	91.0 以上	105~119	-	-	
	A449	1/4~1	64.4 以上	84.4 以上	-	-	
JIS B1186	F8T	--	64 以上	80~100	16 以上	45 以上	18~31
	F10T	--	90 以上	100~120	14 以上	40 以上	27~38
	(F11T)	--	95 以上	110~130	14 以上	40 以上	30~40
CNS 11328	F8T	--	64 以上	80~100	16 以上	45 以上	18~31
	F10T	--	90 以上	100~120	14 以上	40 以上	27~38
	(F11T)	--	95 以上	110~130	14 以上	40 以上	30~40

註：(F11T)表示儘量避免使用

子，這種現象就是腐蝕、生鏽。同樣，鋼結構在有油漆保護狀態下，由於油漆老化龜裂或邊角因表面張力關係造成保護性不佳而開始生鏽，尤其是螺栓接合部份之螺栓，因螺栓表面油漬去除不完全、噴塗角度不佳或膜厚不足而容易生鏽，如圖一，若再不注意未及時修補則更加嚴重，形成如圖二之嚴重情形。



圖一 螺栓表面油漆保護有缺陷而容易生鏽



圖二 螺栓未即時補修而導致螺帽生銹開花

鋼構或螺栓生銹，除受濕度、水分影響外，亦受大氣中氯離子、硫酸根離子、風向、交通狀況、環境變遷等影響，例如鋼結構位置距離海邊遠近不同而受到海上吹來的海鹽粒子影響不同，則對鋼結構螺栓生銹影響就不同，表二為海岸距離與鋼鐵生銹速率關係，由表中得知鋼結構離海邊越近鋼材生銹就越容易、嚴重。鋼結構之栓接工作都在工地現場且大部分在高空中作業，雖然鋼結構或高強度螺栓一般皆受油漆保護，但常因油漆表面張力、噴塗角度、前處理不佳、油漆間隔時間不足、濕度、氯離子濃度高等因素而造成油漆缺乏保護力。

表二 海岸距離與鋼鐵生銹速率

離海岸距離	生銹速率(mil./年)	備註
50 碼	37.7	mil. 為 1/1000 英吋。生銹速率為無黑皮鋼材於 1 年中損失之厚度。
200 碼	17.9	
400 碼	2.2	
1300 碼	1.6	
37 英哩	0.2	

延遲破壞(delayed fracture)，為高強度鋼在負荷狀態(一般為拉應力)下長時間使用中突然斷裂破壞，也可說是應力腐蝕破壞(SCC, Stress Corrosion Crack)的一種，尤其常發生於鋼結構接合用之高強度螺栓，如圖三及圖四。延遲破壞，是從損傷、螺牙、腐蝕處等應力集中地方開始產生微小裂縫而慢慢延伸，然後突然斷裂，其發生的過程如圖五所示。日本鋼構造協會亦於 1968 年至 1972 年針對高強度螺栓進行延遲破壞的暴露試驗以了解螺栓破壞的位置，結果如圖六所顯

示，螺栓斷裂處不管是濱海工業區或田園區環境都是以螺牙之頂部處斷裂最多。高強度螺栓，是由鉚釘逐漸發展出來的，由於鉚釘需要現場熱鍛高超技術且容易產生噪音，加上鋼結構物大型化續接處需要更強的接合強度，所以日本高強度螺栓於1954年開發非調質型 60 kg/mm^2 級螺栓，分別於1956、1962年開發出8T及11T隨後於1964年發展出13T高強度螺栓，並於1964年制定JIS B1186「摩擦接合用高強度六角螺栓、六角螺帽及平墊圈組件」標準。1964年日本制定為標準之同時，日本橋梁也於當年開始使用F13T高強度螺栓(F13T於1967年改版時廢止)。但是，不幸的是高強度螺栓竟然於F13T級使用幾個月後即發生延遲破壞的情形，並且於1973年(昭和48年)道路橋示方書中明確禁止使用F13T高強度螺栓。

日本於禁止使用F13T高強度螺栓後，工程採用F11T螺栓的案例及數量逐漸增多，雖然F11T級螺栓之抗拉強度介於 $110\sim 130\text{ kg/mm}^2$ 之間而有 20 kg/mm^2 上下限範圍。但是，自1977年以後F11T螺栓仍有部分發生延遲破壞之案例，所以，於1979年JIS B1186再次改版時雖然未將F11T廢止但仍建議盡量避免使用F11T。



圖三 螺栓延遲破壞由牙部斷裂

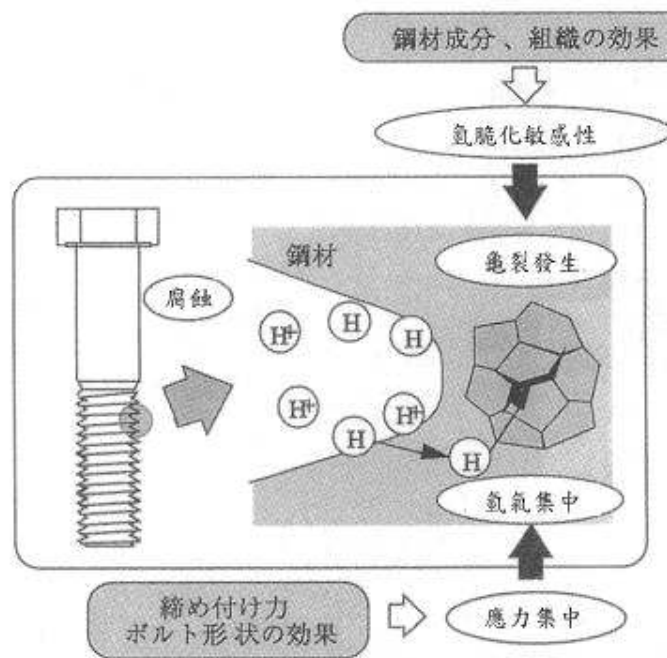


圖四 螺栓延遲破壞由頸部斷裂

四、熱浸鍍鋅高強度螺栓

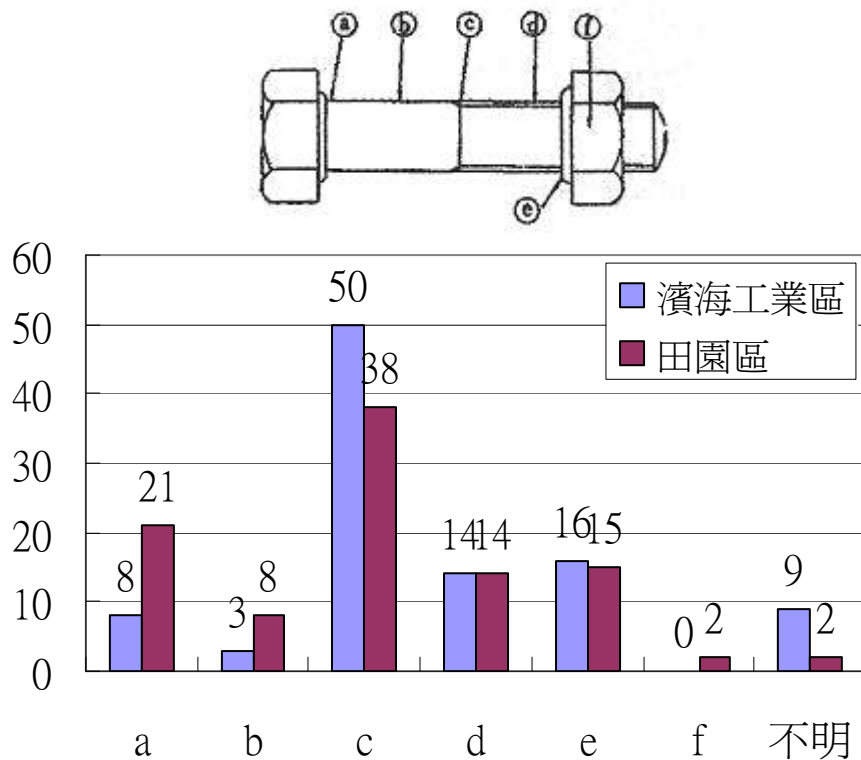
熱浸鍍鋅，是鋼結構在大氣中良好的防蝕方法，也可以當作油漆的底漆以供鋼結構作為雙重防護的油漆系統。因此，熱浸鍍鋅也運用在鋼結構方面，也是高強度螺栓防護方法之未來趨勢。熱浸鍍鋅，顧名思義是在較高溫的狀態下進行鍍鋅作業，利用鋅金屬加高溫使鋅金屬成為液體狀態，再將鋼構或高強度螺栓浸入鋅液中，使鋅金屬自然擴散附著於鋼構或高強度螺栓上。由於是在較高溫度下進行，所以常令使用者或工程人員誤以為因此而會影響高強度螺栓之機械性質，其實不然，熱浸鍍鋅處理溫度 $450\sim 500^\circ\text{C}$ 將不會影響常用的高強度螺栓及鋼構之機械性質，如表三及表四。況且，高強度螺栓經熱浸鍍鋅處理後之鍍鋅層有隔絕作用，可防止氫氣被高強鍍鋅螺栓吸收而產生延遲破壞，較其他未經任何處理之高強

度螺栓可抗拒氫脆化。其他防蝕處理方法同樣具有隔絕作用，但是熱浸鍍鋅較其他防蝕具有更長期之防蝕能力，熱浸鍍鋅高強度螺栓之鋼材會延遲被腐蝕的時間而更延遲高強度螺栓吸收氫產生氫脆化而造成延遲破壞，如圖七。同時，熱浸鍍鋅相較於其於邊角處不效應，不會關係降低塗而因鋅是擴高強度螺栓較厚之鍍鋅熱浸鍍鋅高會於邊角處

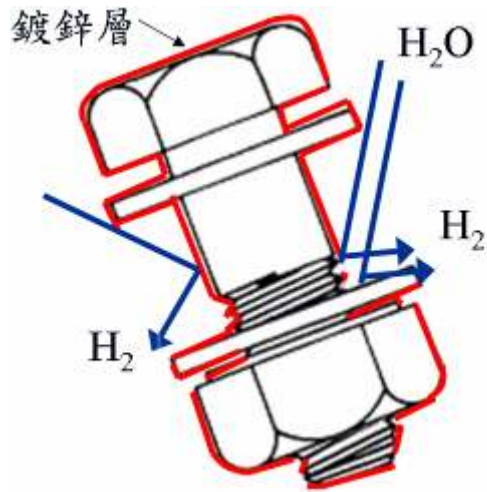


他防蝕方式會產生邊角因表面張力覆厚度，反散附著而於邊角上附著層。因此，強度螺栓不開始生銹。

圖五 高強度螺栓行程延遲破壞的過程



圖六 高強度螺栓延遲破壞試驗



圖七、熱浸鍍鋅層可抗拒氫脆化

表三 熱浸鍍鋅 A325 高強度螺機械性質

直徑 (mm)	材料	抗拉強度 (kgf/mm ²)		心部硬度 (HRC)
		規定	84.4 以上	
A325 7/8" UNC×2 1/2"	100B35	規定	84.4 以上	25~34
		鍍鋅後	100.5	30.5

表四 熱浸鍍鋅 F8T 與 F10T 高強度螺栓機械性質

直徑 (mm)	降伏強度 (kgf/mm ²)	抗拉強度 (kgf/mm ²)	伸長率 (%)	硬度 (HRC)	斷裂位置	
						規定
F8T M22× 80	規定	64 以上	80~100	16 以上	18~31	--
	鍍鋅前	82.3	88.5	21.9	27.3	螺紋
	鍍鋅後	81.8	88.5	21.9	25.5	螺紋
F10T M22× 80	規定	90 以上	100~120	14 以上	27~38	--
	鍍鋅前	106.6	113.7	19.8	34.8	螺紋
	鍍鋅後	101.7	107.5	22.9	31.7	螺紋

高強度螺栓經熱浸鍍鋅處理時，ASTM A325(M)之品質要求依其內文之規定為依照 ASTM A153 之 C 級 381g/m² 辦理，而 F8T 之品質要求則依照 CNS 10007 第 2 種 HDZ55 之 550g/m² 規定辦理，但由於 A325(M)之附著量品質要求較低而須提高

時亦可參照 CNS 10007 第 2 種 HDZ55 之 $550\text{g}/\text{m}^2$ 規定辦理。雖然，熱浸鍍鋅處理時溫度並不影響高強度螺栓之規定機械性質，但為提高安全係數因素下目前只建議採用 A325(M)、F8T 高強度螺栓，而在螺栓製作商未研究出新鋼材前暫不建議 A490(M) 或 F10T 高強度螺栓經熱浸鍍鋅處理。熱浸鍍鋅高強度螺栓之組合搭配方式則參照表五及表六，A325(M) 高強度螺栓搭配 A563(或 A194) 螺帽與 F436 墊圈，F8T 高強度螺栓則搭配 F10 螺帽與 F35 墊圈。至於栓接時栓接部位之熱浸鍍鋅續接版與熱浸鍍鋅構件接觸面區域皆需打粗處理，力求續接面之摩擦係數達 0.33 以上。打粗處理係利用噴砂或鋼刷研磨將鍍鋅層表面打粗，而並非將鍍鋅層全部噴除。另外，栓接時熱浸鍍鋅構件之螺栓孔徑應需考慮螺栓孔徑因鍍鋅層而縮小孔徑及螺栓鍍鋅層加大直徑，因此螺栓孔徑應較無鍍鋅構件者加大 0.5mm。

表五 熱浸鍍鋅 ASTM A325 螺栓組合

螺栓	螺帽	墊圈
A325 type1 (英制)	A563 DH	F436
	A194 2H	
A325M type1 (公制)	A563M 10S	F436M

註：品質要求依照 ASTM A153 之 C 級 $381\text{g}/\text{m}^2$ 辦理。

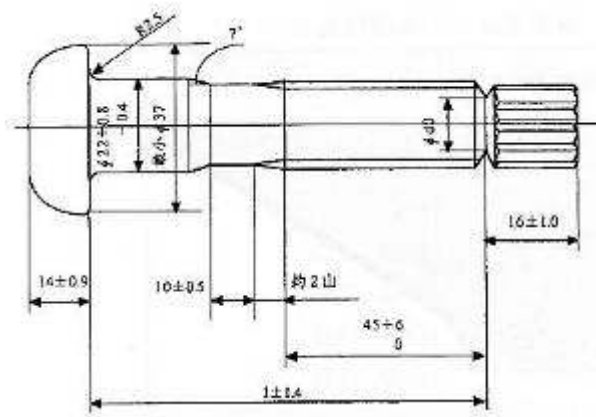
表六 熱浸鍍鋅 F8T 螺栓組合

機械性質種類	扭矩係數 (k)	螺栓	螺帽	墊圈
1 種	A 種 (0.11~0.15)	F8T	F10	F35

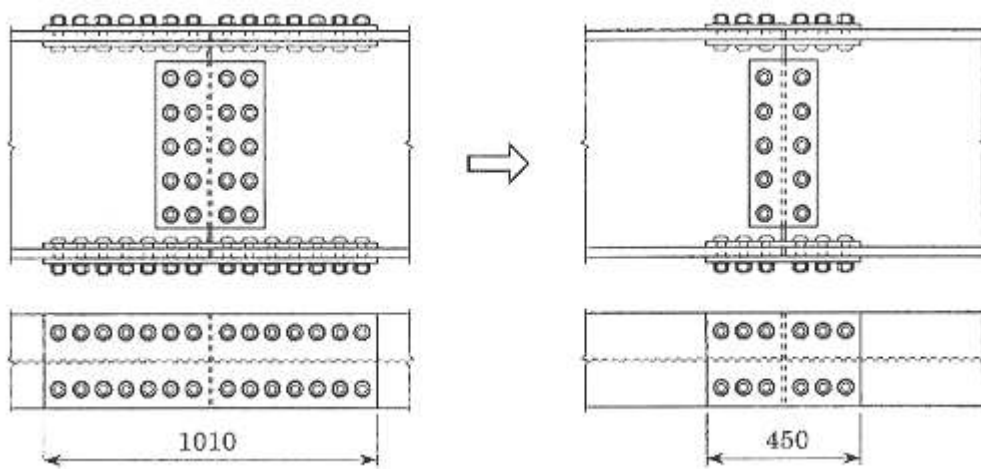
註：品質要求依照 CNS 10007 第 2 種 HDZ55 之 $550\text{g}/\text{m}^2$ 辦理。

現代大樓都在追逐超高層鋼材的使用也朝厚板化、高強度化、耐震等，相對地在接合方面也希望能朝螺栓更高強度及數量減少方向，但是前述高強度螺栓之強度等級越高時越會產生延遲破壞的現象，所以對鋼構的發展似乎會遇到阻力。日本為克服 F11T 以上高強度螺栓發生延遲破壞現象，已與煉鋼公司合作研發新材料降低氫氣之吸收，且就螺栓之螺牙形狀及頸部之曲率半徑進行改善以減少應力集中之發生，如圖八，並且就腐蝕之環境研究適合之表面處理方式。目前日本已有公司研發出耐延遲破壞的 F14T 高強度螺栓，稱為超高強度螺栓

(SHTB, Super High Tension Bolt)，由於螺栓強度較高所以接頭螺栓用量就降低，圖九是以 SN490 鋼材之 $600 \times 250 \times 12 \times 25\text{H}$ 型鋼接頭做比較，左圖需使用 76 支 M22F10T 螺栓，而右圖僅需 34 支 M22F14T 螺栓。而且超高強度螺栓亦研發出 F12T 可經熱浸鍍鋅處理而不會降低機械性質，如圖十。



圖八 日本 M22 F12T 超高強度螺栓形狀尺寸



圖九 接頭採用 F10T(左)與 F14T(右)之比較



圖十 12G 熱浸鍍鋅超高強度螺栓

另外，一般的觀念認為氫脆化(hydrogen embrittlement)是熱浸鍍鋅防蝕處理時的產物和專利，只要鋼結構經熱浸鍍鋅處理就會產生氫脆化。事實上，這是不對的觀念，氫脆化是因鋼材吸收原子狀態的氫氣，當少量的氫在鋼材中慢慢集中達到某含量或壓力時而脆裂，而產生氫脆化的敏感性則視鋼種、鋼材先前之熱處理及冷加工程度而定。鋼材經熱浸鍍鋅處理若要產生氫脆化之情形，只可能發生於鍍鋅前之酸洗作業，假若前處理作業避開酸洗作業而以其他方式處理則可防止氫脆化之現象，也就是說高強度螺栓之熱浸鍍鋅前處理作業不採用酸洗方式就不會發生氫脆化之現象。同時，因熱浸鍍鋅時熱浸的溫度達450~500°C，此時高強度螺栓內若有氫氣潛藏在其中則溫度會將部分潛藏的氫氣逐出鋼材。所以，就高強度螺栓而言，熱浸鍍鋅處理並不會造成高強度螺栓產生氫脆化的現象。

五、結論

熱浸鍍鋅防蝕處理具有良好的防蝕能力，只要高強度螺栓經熱浸鍍鋅處理時避開酸洗作業以其他方式去除銹層則熱浸鍍鋅可提供良好的服務年限，並且高強度螺栓因外層受鍍鋅層之隔絕而降低吸收氫氣之機率而減少應力腐蝕改善高強度螺栓之延遲破壞的現象。熱浸鍍鋅層之隔絕作用亦可用作油漆之底漆，增強油漆系統之防蝕能力，減少油漆系統之維修次數及費用，延長鋼結構之使用壽命。

六、參考文獻

- 1.日本建築學會(1993)，“熱浸鍍鋅高強度螺栓接合” Recommendations for the design fabrication of high strength bolted joints, pp91~116
- 2.脇山廣山(2007)，“高力ボルトの歴史”，鉛鉛與亞鉛，pp9-19
- 3.鐵道總合技術研究所(1996)，“ボルト継手”鐵道構造物等設計標準·同解說，pp341-348
4. CNS 11328 摩擦接合用高強度六角螺栓、六角螺帽及平墊圈組套件
5. CNS 4237 熱浸鍍鋅螺栓及螺帽
- 6.ASTM A325 Standard Specification for Structural Bolts, Steel, Heat Treated, 120/105 ksi Minimum Tensile Strength
- 7.ASTM A325M Standard Specification for Structural Bolts, Steel, Heat Treated 830 MPa Minimum Tensile Strength [Metric]
- 8.ASTM A143 Standard Practice for Safeguarding Against Embrittlement of Hot-Dip Galvanized Structural Steel Products and Procedure for Detecting Embrittlement
- 9.ISO 7413 Hexagon nuts for structural bolting, style 1, hot-dip galvanized(oversize tapped)-Product grades A and B-Property classes 5,6 and 8
- 10.ISO 7414 Hexagon nuts for structural bolting with large width across flats, style 1-Product grade B-Property class 10

8.ISO 7417 Hexagon nuts for structural bolting, style 2,hot-dip
galvanized(oversize tapped)-Product grade A -Property
classes 9