

# 螺絲緊固失效以及其預防方式

~第三集：環境因素的螺栓失效~(上半部)

文/西田新一

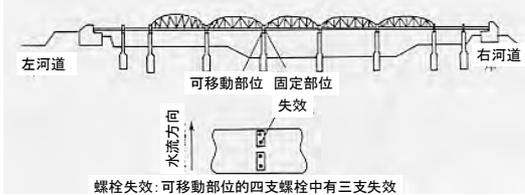


圖3.1 失效的狀況 (見圖3.2)

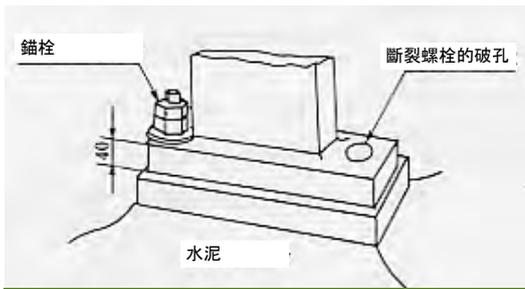


圖3.2 安置好的錨栓

## 2.2 調查事項

- (1) 分析化學成分並以光學顯微鏡觀測結構
- (2) 外觀檢測
- (3) 力學特性(硬度分布)
- (4) 以掃描式電子顯微鏡觀測破裂的表面採樣的程序如圖3.3所示。

## 2.3 調查與討論結果

### (1) 斷裂螺絲的外觀

圖3.4是斷裂螺絲的外觀。失效的發生位置是距離螺帽尾部約47mm的一個點上。此距離正好是被緊固零件的厚度(40mm)和墊片厚度(6mm)兩者相加的總和。此斷裂螺絲的腐蝕狀況相當嚴重，腐蝕的鏽屑使破裂的表面看起來模糊。但仔細觀測後發現了有一道淡淡的紋路從a到b的方向延伸出去，看似是裂痕擴散的紋路(參照圖3.4(e))。此方向可視為是圖3.4中的標準斷裂方向。與標準斷裂方向的垂直方向相比，標準斷裂方向上的直徑短了3mm。

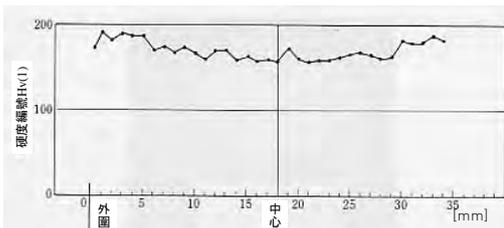


圖3.6 硬度分布

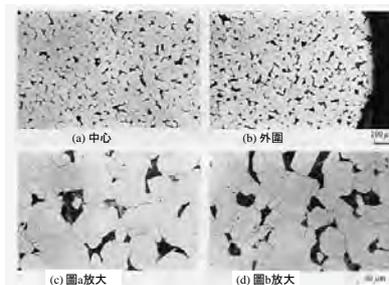


圖3.5 橫切面的顯微結構

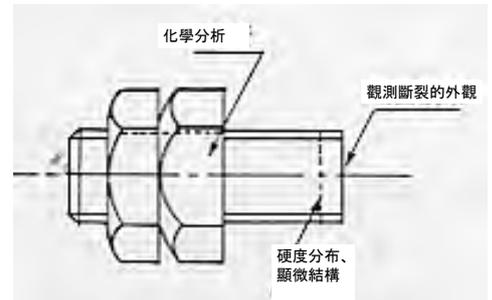


圖3.3 採樣的程序

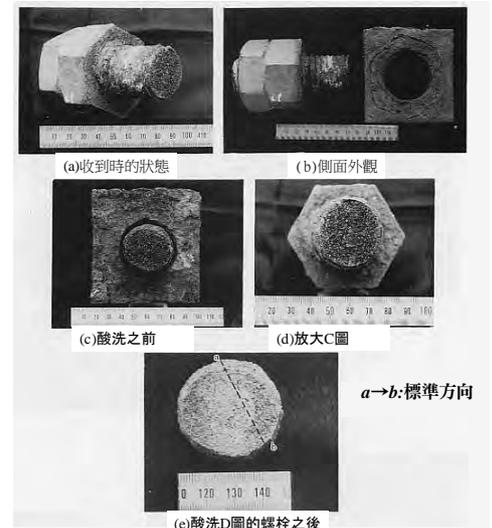


圖3.4 斷裂螺絲的外觀

表 3.1 化學成分

(質量%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	B	Al
0.13	0.29	0.36	0.029	0.034	0.11	0.10	0.34	0.01	0.0001	0.004

### (2) 斷裂螺絲的鋼材等級

表3.1和圖3.5分別顯示斷裂螺絲的化學成分和光學顯微

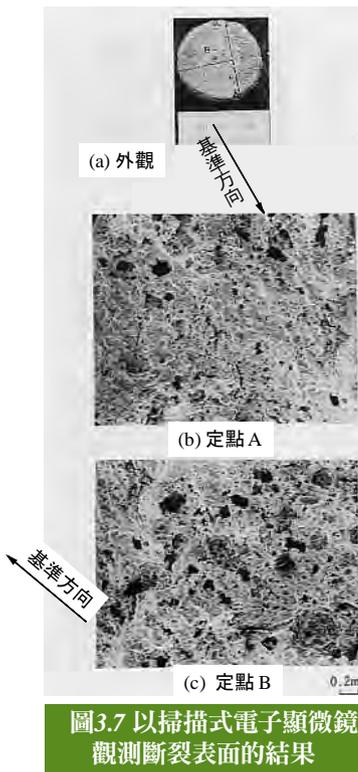


圖3.7 以掃描式電子顯微鏡觀測斷裂表面的結果

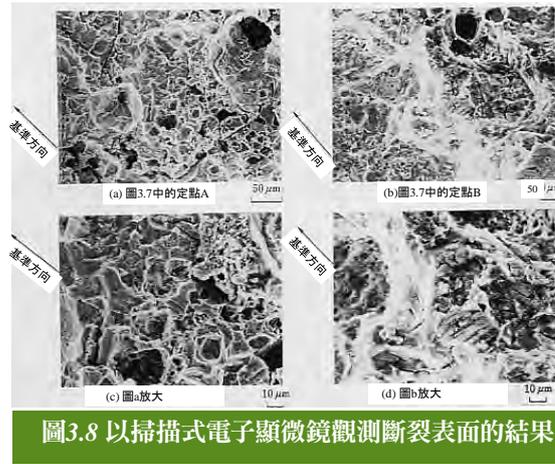


圖3.8 以掃描式電子顯微鏡觀測斷裂表面的結果

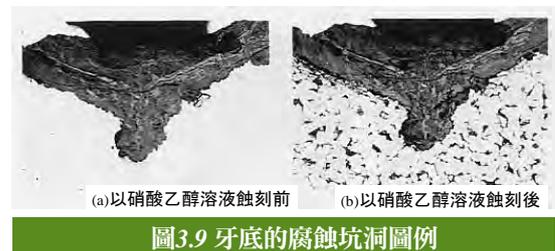


圖3.9 牙底的腐蝕坑洞圖例

## 2.4 總結

此螺栓是以SS400鋼材製成，在其斷裂的表面上未觀測到肉眼可見的塑性變形的跡象。裂縫蔓延方向上的直徑比起蔓延方向之垂直方向上的直徑短了3mm左右。失效的發生位置是在被緊固部件的底端，而不是通常會產生最大應力的螺帽尾端。在斷裂的表面上可以看到不太明顯的條紋狀紋路和裂縫。基於以上的觀測結果，過去15年以來橋墩的伸縮除了伴隨張力之外，也產生了剪切力並進而形成循環剪切應力，估計該螺栓失效的起因就是循環剪切應力所導致的疲勞失效。此外，腐蝕性的大氣環境也是一項誘因。因此側面的直徑會短3mm左右，這也是被施加剪切力的部位。

論對策，應考量到橋墩的熱膨脹，將錨栓的孔洞加大；或者應將錨栓設置在螺栓孔的中心，如此就不會被橋墩的熱膨脹影響到。

## 3. 高爐之鐘形棒法蘭專用螺栓的失效

### 3.1 失效概況

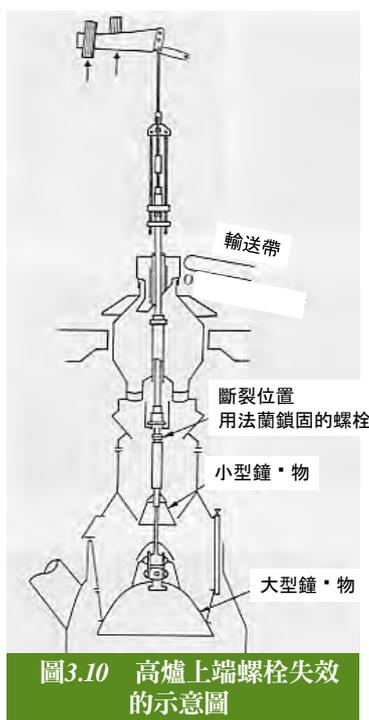


圖3.10 高爐上端螺栓失效的示意圖



圖3.11 螺栓破裂表面的外觀

照片。圖3.6是螺栓內的硬度分布。基於這些數據，鋼材的等級應等同於JIS, SS400 (典型的軟鋼)。其結構是一般在低碳鋼中會觀測到的典型鐵素體 - 珠光體結構。

### (3) 斷裂表面的觀測

圖3.7和3.8是斷裂表面的觀測結果。該螺栓已長期暴露在腐蝕性環境中，所以會觀測到數不盡的腐蝕坑洞。似乎是因為有一層鏽形成了，使得斷裂的表面內部產生了變化。有一條不清晰的條紋狀紋路(見圖3.8(d))，而且會在疲勞斷裂的表面上頻繁觀測到裂縫(見圖3.8(a))。

### (4) 牙底的腐蝕坑洞圖例

圖3.9是牙底的腐蝕坑洞圖。圖3.9(a)是蝕刻前的結構，(b)是以硝酸乙醇溶液蝕刻後的結構。牙底的腐蝕坑洞的深度約0.2mm，寬度也約0.2mm。

某台高爐頂部的鐘形棒法蘭專用的20支螺栓在使用了6個月之後全部都斷裂了。該螺栓的細節如下：鋼材等級為SCM435 (調質鋼)、長度M42×190mm、螺紋長度87mm、應力是直接施加在螺栓上、重複應力振幅 $\sigma_a=2.9 \text{ kgf/mm}^2$ 、平均應力 $\sigma_m=10.4 \text{ kgf/mm}^2$ 。此外也有對它施加彎折應力(見圖3.10)。

### 3.2 調查事項

大多如同本文第二大段的第二項所述。

### 3.3 調查與討論的結果

#### (1) 斷裂的螺栓外觀

20支螺栓當中有18支的頭部下方斷裂(R半徑=0.7 mm)，剩下2支是斷在螺帽的尾端。(可收集到的斷裂螺栓數量是15支)。斷裂螺栓的表面大致都已腐蝕。其中有些螺栓的牙底被偵測到軸向彎折和裂縫。(見圖3.11)

#### (2) 化學成分和硬度分布

表3.2顯示該螺栓的化學成分，此成分符合了日本JIS標準。圖3.11顯示其硬度分布。由於螺栓的橫切面會有25%的硬度落差，所以推定螺栓的回火作業不足，導致表面脆化。

表 3.2 化學成分

(質量%)

成分標記	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Al
A螺絲	0.36	0.25	0.79	0.027	0.013	0.03	1.00	0.18	0.054
規格	0.32 ~0.39	0.15 ~0.35	0.55 ~0.90	≥0.030	≤0.030	≤0.030	0.85 ~1.25	0.15 ~0.35	—

### (3) 觀測斷裂的表面

圖3.11、圖3.13和圖3.14顯示觀測的結果。在斷裂的表面出現失效現象的位置上，同時存在了穿晶斷裂失效和晶間斷裂失效的現象，其中以前者為最顯著。穿晶斷裂的表面近似高強度鋼的失效表面，但沒有偵測到條紋狀紋路。

在距離失效發生點約5~10mm遠的位置上，同時存在著穿晶斷裂失效和晶間斷裂失效的現象，但晶間斷裂的比例較高(見圖3.13和圖3.14)。最終的斷裂表面則同時存在了淺凹洞和河狀的紋路。

### 3.4 總結

基於上述的結果，推定裂縫是因為螺絲頭部下方的應力集中而產生，而腐蝕性的環境加速了裂縫的擴散，最終導致失效。

為了避免發生失效，建議採用以下方法：

- (1) 增加頭部下方的半徑(以M42螺紋來說就是 $R=0.7 \rightarrow 5.0\text{mm}$ )
- (2) 透過控制扭力來均化螺絲的軸向張力，使其達到合適的數值。
- (3) 透過攝氏550~650度的回火溫度來減少表面硬度，並施加防鏽處理。

## 4. 螺絲延遲斷裂所導致的失效

### 4.1 延遲斷裂的機制

如同一般的認知，延遲斷裂的現象會在螺絲使用後不久或經過某段時間後發生。換句話說，在斷裂發生之前會出現時間的延遲，包括(1) 發生腐蝕之前的一段時間、(2) 氫分子入侵鋼材時、(3) 氫分子匯聚在裂縫發生點時。

圖3.15顯示延遲斷裂的發生條件。如圖所示，當材質、應力和環境滿足某項條件時，就會發生延遲斷裂。最常見的模型如圖3.16所示。

當材質、應力和環境滿足某項條件時，就會發生延遲斷裂

圖3.16 延遲斷裂的示意模型 (5)

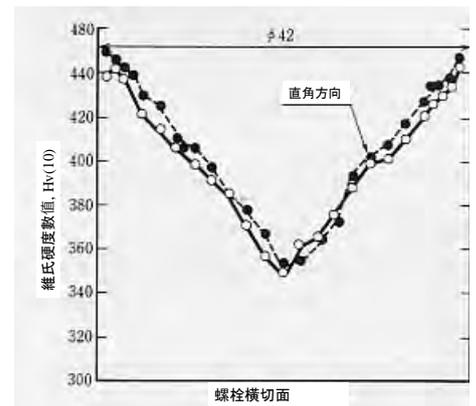


圖3.12 螺絲橫切面的硬度分布

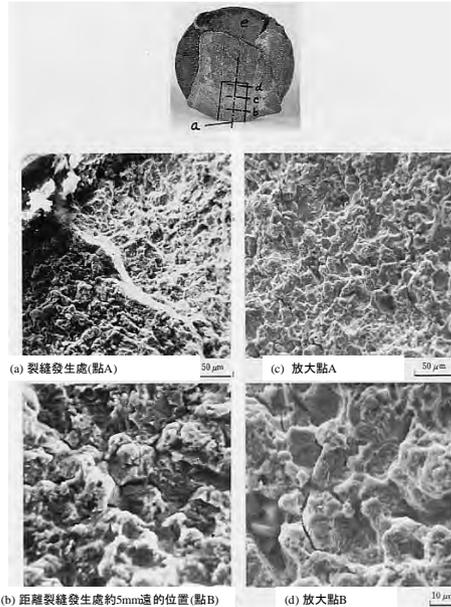


圖3.13 以掃描式電子顯微鏡觀測螺絲A之斷裂表面的結果

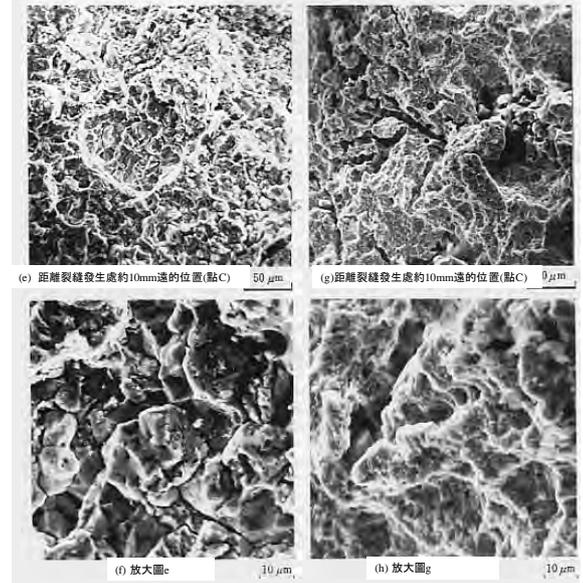


圖3.14 以掃描式電子顯微鏡觀測螺絲A之斷裂表面的結果

在自然腐蝕狀態中：陽極反應， $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^- \dots\dots(1)$

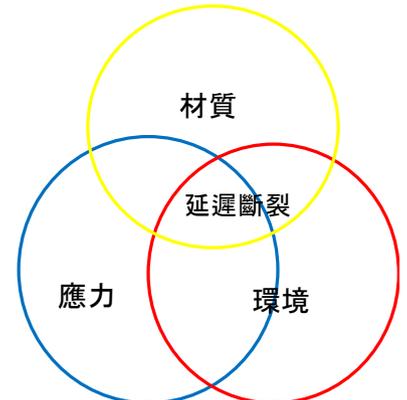
陰極反應，

酸性腐蝕， $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow \dots\dots(2)$

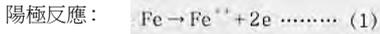
酸性或鹼性腐蝕，

$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow + 2\text{OH}^- \dots\dots(3)$

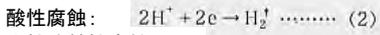
在上述的等式中，氫離子轉變成氫氣體的變化反應發生在晶界。推定裂縫發生在氫氣壓超越極限值的時侯。



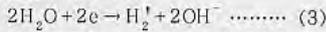
[自然腐蝕]



陰極反應：



中性或鹼性腐蝕



出現腐蝕坑洞時，不穩定的腐蝕性構成物質會自行氫化，並增加氫密度和加速坑洞內的酸性腐蝕(即使位處在中性的環境)

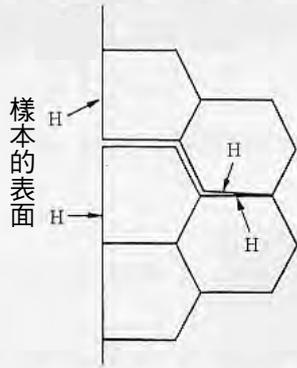


圖3.16 延遲斷裂的示意模型 (5)

### 4.2 高張力螺栓延遲斷裂的例子

某棟以兩側墊板支撐的建築物內的鋼結構接合部位使用了大量的螺栓，這是高張力螺栓很典型的用途。鋼結構的軸向荷載抵擋墊板和被緊固物之間的摩擦荷載，高張力螺栓則施予緊固應力。以F10T的頭部編碼為例，F代表「摩擦夾緊式接合件」，10代表拉伸強度100 kgf/mm<sup>2</sup>，T代表「拉伸強度」，這代表了力學特性的等級。此外，高張力螺栓有以下優點：(1)可產生高度可靠的接合部位，(2)即使在位置很高的環境也能用簡易的緊固工具來簡單操作，(3)緊固部位上不殘留應變力。基於以上諸多優點，高張力螺栓的重量比佔整個鋼結構的2.5%到3%。

圖3.17是螺栓延遲斷裂的斷裂表面。雖然目前仍不清楚這支螺栓的使用紀錄，但它仍是螺栓延遲斷裂的一個典型例子。由於該螺栓的邊緣是外螺紋，所以斷裂的現象發生在螺帽的尾部。圖3.17裡的定點A是第一個裂縫產生處，它蔓延到定點B，形成最終的裂縫。此例的裂縫產生處距離牙底約0.5mm遠。圖3.18是圖3.17裡定點A的放大圖。如圖所示，產生裂縫的定點A左右兩邊的孔穴就是在腐蝕氣體中形成的腐蝕穴。圖3.18裡的(b)是(a)的放大圖，其中可在裂縫產生處觀測到晶間斷裂的表面。此外，圖3.19裡的點B是形成最終裂縫的過渡區域。雖然穿晶斷裂的現象幾乎佔據了所有區域，但晶間斷裂的現象也佔了一些比例。晶間斷裂就像是融化到一半的糖果，也稱為「糖果塊」。以上預測的延遲斷裂可以透過圖3.16的模型來理解。



圖.3.17 高張力螺栓延遲斷裂 ( $\sigma_B=1,100MPa$ )

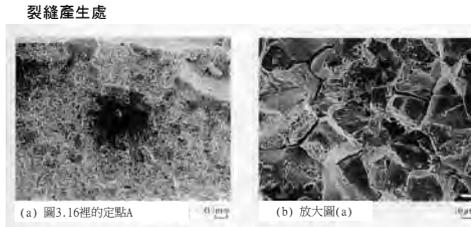


圖.3.18 高張力螺栓延遲斷裂 (圖3.16 中的定點A放大圖)

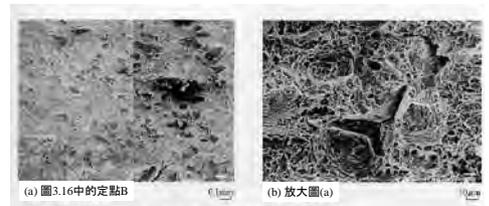


圖.3.19 高張力螺栓延遲斷裂 (圖3.16 中的定點B放大圖)

圖3.20是高張力螺栓延遲斷裂的另一個例子。此螺栓的公稱直徑是M22，成分含有硼(B)，拉伸強度1,250MPa。此外，該螺栓已在海岸旁的工業區被使用了近19年。圖3.21和圖3.22分別顯示SEM顯微鏡下的破裂表面，其中可觀測到晶間斷裂的表面。在暴露於工業區的腐蝕性大氣並發生延遲斷裂之後，腐蝕穴就會生成在晶間斷裂的表面上。以延遲斷裂的螺栓來說，裂縫主要是從不完整的螺紋上以及頭部下方生成。頭部下方的裂縫，可以解釋成螺栓頭部倒置時水滴聚積在此區域上，或者是頭部下方接觸到水滴形成的應力集中所造成的。



圖3.20 高張力螺栓延遲斷裂的外觀

尺寸:M22、成分含硼、調質過、張力 $\sigma_B=1,250MPa$   
環境：海邊、工業區、使用時間：19年內(第19年發現到螺栓斷裂)



圖3.21 掃描式電子顯微鏡下延遲斷裂的觀測結果 (6)

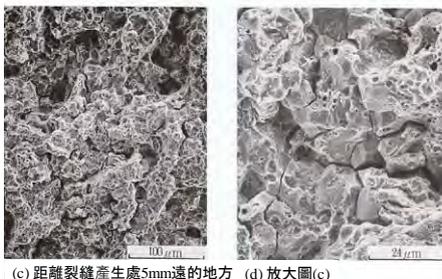
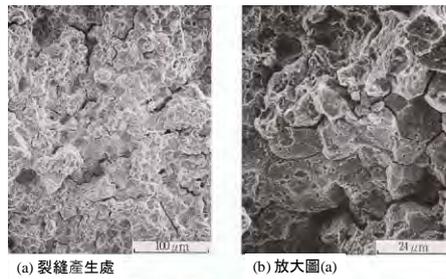


圖3.21 掃描式電子顯微鏡下延遲斷裂的觀測結果 (6)

圖3.22 是掃描式電子顯微鏡下延遲斷裂的觀測結果 (6)(圖3.20的放大版)。

不論何種狀況，一般認為延遲斷裂跟氫分子有關，就是所謂延遲斷裂的發生條件，又稱為「氫脆化」。日本鋼結構協會已禁止或建議勿使用級別高於F11T的高張力螺栓。此外，基於減少不完整螺紋上的應力集中現象以及改良化學成分，製造商已研發了抗延遲失效的新型F12T和F14T高張力螺栓。

## 5. 結論

- (1) 基於上述結果，螺栓失效的成因，估計就是過去15年以來橋墩伸縮產生的循環剪切應力導致了疲勞失效。此外，腐蝕性的大氣環境也是起因。
- (2) 作為對策，需考量到橋墩的熱膨脹現象並將螺栓孔加大，或是將錨栓設置在螺栓孔中心的附近，使錨栓不受到橋墩熱膨脹的影響。
- (3) 基於上述的結論，一般認為失效時產生的裂縫是起因於螺栓頭部下方集中的應力，腐蝕性的環境則加速了裂縫的蔓延，最終導致失效。
- (4) 為了避免失效，建議採用以下方式：
  - ① 增加頭部下方的半徑(以M42螺紋為例， $R=0.7 \rightarrow 5.0\text{mm}$ )
  - ② 透過控制緊固扭力來均化螺栓的軸向張力
  - ③ 透過550—650°C回火來減少表面硬度，並施予防鏽表面處理。
- (5) 以螺栓的延遲斷裂來說，裂縫的發生位置就在牙底，且伴隨產生腐蝕穴。在裂縫的發生位置也可觀測到晶間斷裂。此外，晶間斷裂的紋路看起來就像融化到一半的糖果，又稱為「糖塊」。

不論何種情況，一般認為延遲斷裂與氫分子有關，此種斷裂稱為「氫脆化」。

## 參考文獻

- (1) S. Nishida, Failure Analysis of Machine Parts & Equipment, (1993), pp.85 and 122, Nikkan Kogyo News Paper Co. Ltd, (in Japanese)
- (2) S. Nishida, Failure Analysis in Engineering Applications, (1993), pp.71 and 103, Butterworth Heinemann Co. Ltd. UK
- (3) S. Nishida, Failure Analysis of Machines & Components, (1995), pp.85 and 122, Kinkado Co. Ltd, (in Japanese)
- (4) S. Nishida, Fractography and Collection of Photographs for Failure Analysis, (1998), pp.22, Sogo-techno-center, (in Japanese)
- (5) S. Matsuyama, Delayed Fracture, (1982), pp.25, Nikkan Kogyo News Paper Co. Ltd, (in Japanese)
- (6) C. Urashima, Reference (4), pp.104, (in Japanese)

FASTENER WORLD  
Good Design

茂異 [TUZ] MAUDLE HIGH TENSILE SCREW

CHONG CHENG FASTENER CORP.

網頁設計  
架站管理  
後台規劃

廣告  
目錄  
海報  
名片

FASTENER WORLD

相關訊息請洽 業務部  
TEL : 06-295 4000