

鋼橋常見非破壞檢測方法及注意事項

彭朋畿¹、李家順²

¹ 中華民國鋼結構協會 副秘書長

² 交通部公路總局 工程師

摘要

橋梁是交通系統的重要設施，因此必須注重建造時之施工品管與營運階段定期維護檢測，以充分瞭解橋梁現況。近年隨鋼結構橋梁數目增加，相關非破壞檢測技術之需求亦日益殷切，其中放射線檢測法與超音波檢測法是最常用於檢測鋼材及鐸道內部品質之方法。

由於鋼材及鐸道瑕疵方向對上述兩種方法影響很大，其中放射線檢測法對瑕疵方向與射線平行效果最佳，而超音波檢測法對瑕疵面與音波方向垂直效果最佳，因此檢測技術之選用與配合非常重要。本文將簡介此兩種方法與注意事項，以供工程業界參考。

1. 前言

橋梁對人類文明之進步扮演非常重要的角色，而鋼結構橋梁的優勢亦逐漸被重視。其中鋼結構橋梁之製作應符合相關規範，以確保橋梁工程之品質。國內新建鐵公路鋼結構橋梁之非破壞檢測法規，一般以 CNS 國家標準及美國鐸接協會 AWS 鐸接法規為主，以提供相關規定供業界參考，相關法規名稱分述如下：

(1) 中華民國 CNS 國家標準：

包括 CNS 11049 [射線檢測法通則]、CNS 13020 [鋼結構鐸道射線檢測法]、CNS 11226 [碳鋼熔接件射線檢測法]、CNS 13341 [鋼結構鐸道磁粒檢測法]、CNS 11378 [鐸道磁粒檢測法]、CNS 12618 [鋼結構鐸道超音波檢測法]、

CNS 11401 [鋼對接銲道超音波檢測法]、CNS 12845[結構用鋼板超音波直束檢測法]等標準。

(2) 美國銲接協會 AWS 銲接標準：

包括 AWS D1.1 [Structural Welding Code-Steel]、AWS D1.5[Bridge Welding Code]等標準。

本文參考交通部公路總局施工說明書技術規定第 05121 章「鋼橋製作及架設」規定，19mm 以上厚度之鋼板，應依 CNS 12845 之超音波探傷檢測鋼板內有無不符合規定之夾層 (Lamination)。同時一般全滲透銲接接頭於對接時，銲道內部缺陷應使用放射線透過試驗及超音波探傷試驗，另 T 型及角隅接頭採超音波探傷試驗，應依 CNS 12618 [鋼結構銲道超音波檢測法]之規定辦理，以上檢查結果亦依相關 CNS 之規定判定。下列將說明放射線檢測法及超音波檢測法之相關注意事項。

2. 放射線檢測法

2.1 基本原理

放射線檢測法是利用具穿透能力之射線穿透試件，再達於底片或螢幕等介質，以生成影像之紀錄，最後研判影像，以了解試件品質。一般可使用 γ 射線或 X 射線作為射源檢測銲道品質(如圖 1 及圖 2 所示)，這兩種射源產生之放射線均以直線照射檢測工件，當射線到達檢測工件時，部分射線穿透檢測工件，部分射線則被檢測工件吸收，而吸收量之大小則隨檢測工件之密度、厚度和原子序等因素而有所不同。由於底片成像之檢測結果可直接呈現且較無爭議，因此放射線檢測法已廣泛地應用在現代工業上，並成功地應用於檢測金屬或非金屬材料[1-3]。

強度、距離及時間為放射線現場檢測最重要參數，若能量確定不變，則決定所需曝光量之因素有： γ 射線之射源強度(或 X 射線管內之毫安培電流)、時間(照

相曝露時間)及距離(射源至底片之距離)等。以上三個因素中任一因素的變動量，均可藉由計算得之。由於伽瑪射線之射源會隨時間衰變(如 Ir-192 之半衰期為 75 天)，因此在實際施照鋼結構銲道時，可考量輻射需管制範圍，可適當調整或選用射源強度、照相時間及照相距離等參數，並以得到清晰之銲道底片成像為檢測原則[4-5]。



圖 1 放射線檢測銲道品質(γ 射線)



圖 2 放射線檢測鐸道品質(X 射線)

2.2 品質要求

一般放射線檢測之品質可確認「三度」，包括黑度、靈敏度與幾何模糊度，以確保相關品質符合規範要求[6]。

2.2.1 黑度

黑度為底片黑暗程度，為入射於底片與透過底片的光線強度對數比，通常以黑度計量測。底片黑度之形成為當射線撞擊底片之銀化物粒子時，粒子之結構將產生變化，並經由底片顯影之作用後，感光乳劑內之銀化合物可析出金屬銀粒子，並產生黑色影像之記錄。顯影完畢後將底片置入中止液，再置入定影液中，並去除為感光之乳化劑，最後再經水洗及乾燥，即可由判片燈評估底片之黑度，黑白對比之差異提供判讀之依據。依據國家標準 CNS 11049 [射線檢測法通則]，黑度值定為 1.5~4.0。

2.2.2 靈敏度

底片品質可用標準試片來檢視靈敏度，此標準試片稱為像質計。依據國家標準 CNS 11049 [射線檢測法通則]像質計可為孔洞型或線條型(如圖 3 所示)，其中

孔洞型之必要孔洞應於底片顯現出來(如圖 4 所示)，線條型之線條影像必須研判可識別之最小線徑(如圖 5 所示)，以下列公式計算，像質計靈敏度應在 2% 以下。

$$\text{像質計靈敏度} = (\text{可識別之最小線徑} / \text{照相厚度}) * 100\%$$

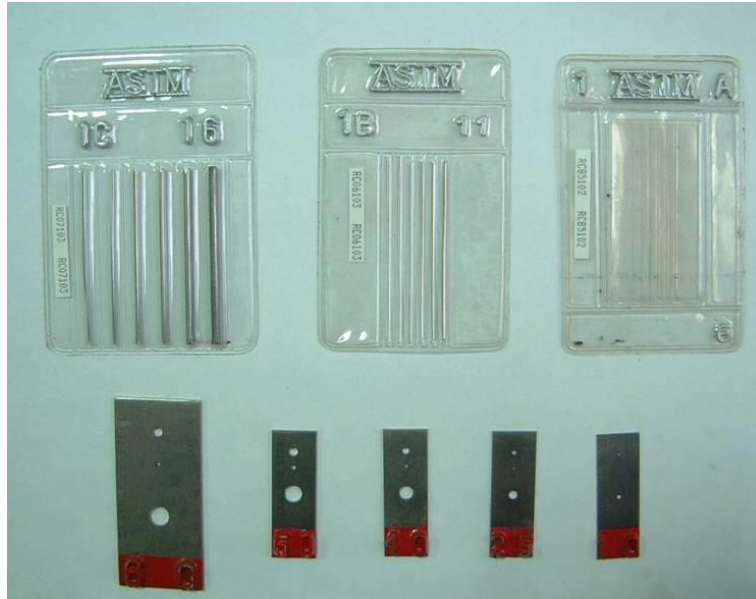


圖 3 線條型及孔洞型像質計[10]

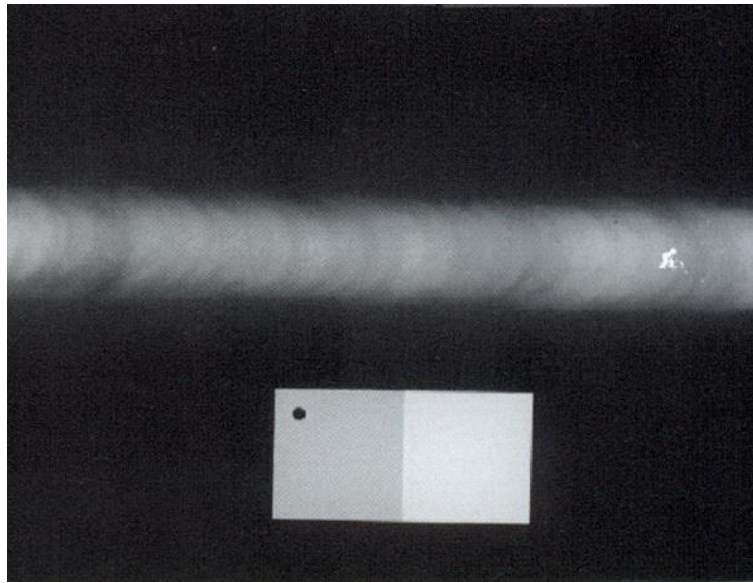


圖 4 孔洞型像質計之影像

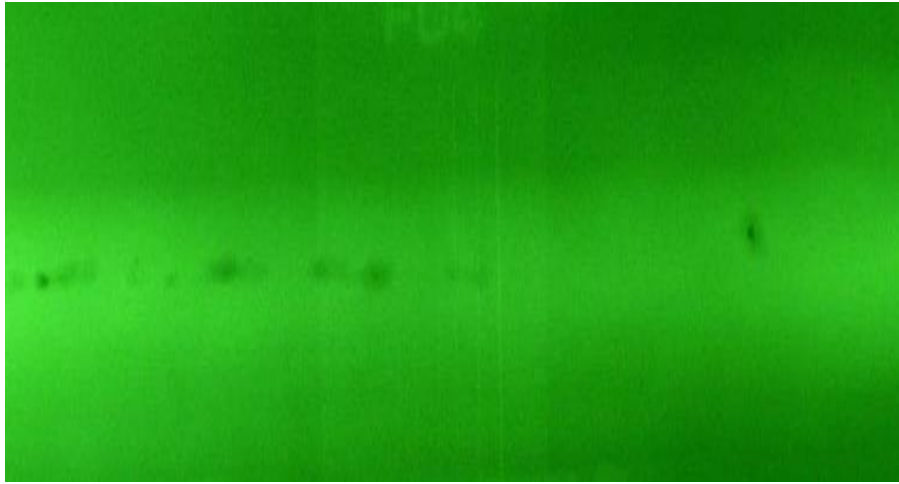


圖 5 線條型像質計之線條影像

2.2.3 幾何模糊度

幾何模糊度是由於射線源尺寸有一定的大小，而並非只有一點(例如 X 射線之焦點為 1~5mm， γ 射線則依同位素的種類而有所不同)。由於幾何形狀因素及射源並非一點之關係，檢測工件在底片上會呈現半陰影之地區，而半陰影地區之寬度稱為幾何模糊度 U_g (如圖 6 所示)。依據相似三角形之關係，幾何模糊度公式計算如下所示：

$$\frac{U_g}{F} = \frac{D_2}{D_1}$$

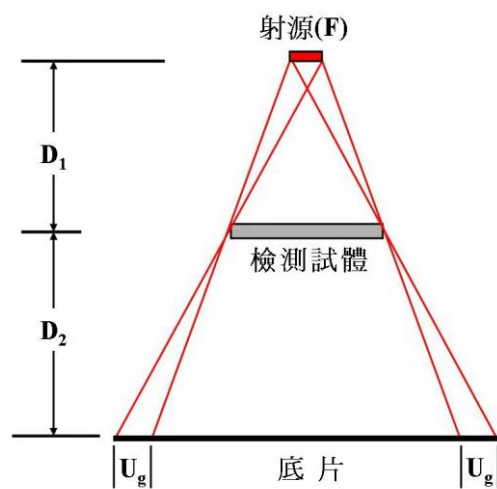


圖 6 幾何模糊度 U_g

其中 F 表示射源尺寸、D2 表示檢測試體至底片距離(一般為照相厚度)、D1 表示射源至檢測試體表面之距離。

2.3 鋼結構鐸道射線檢測法(CNS 13020)

2.3.1 人員資格

執行射線檢測至少須有一人具備行政院原子能委員會所核發之操作執照，且執行底片結果判讀應取得中級檢測師(Level II)以上資格，相關檢測人員資格之取得應依據 CNS 13588 規定 [非破壞檢測人員資格檢定與授證]。

2.3.2 表面處理

鐸件兩面的表面鐸渣應儘可能清除乾淨，鐸冠厚度或鐸蝕情況應先處理至有關合約規範所允許範圍內。表面不規則程度以不會蒙蔽或混淆瑕疵之顯示為原則。另除合約另有規定外，鐸件每面的鐸冠補強厚度不得超過 3mm，且鐸件每面的鐸蝕深度不得超過 CNS 13021[鋼結構鐸道目視檢測法]之有關規定。

2.3.3 顯示評估

底片應能檢出被檢物影像，因此必須經過適當地照相與處理後始得評估。判讀環境必須有柔和之背景，其它光源不得造成底片之反射陰影或強光以致干擾判讀。且判片燈應有足夠的光度，以便在規定之黑度範圍內看清物件影像之顯示。其中底片影像品質非常重要，相關靈敏度、黑度、模糊度等應符合 CNS 11049[射線檢測法通則]之規定。若底片影像經評估為物件瑕疵者，應依相關規定加以分類判讀。

2.3.4 瑕疵種類

瑕疵分為三種，包括第一種圓形瑕疵、第二種長形瑕疵及第三種裂縫。上述圓形瑕疵為長度未滿寬度的三倍者，其為圓形或不規則形狀之氣孔、夾鎢或類似圓形之瑕疵(本標準將圓形瑕疵之長度稱為長徑)。長形瑕疵為長度達寬度的三倍

以上者，其為長形夾渣、熔合不良，滲透不足或類似線形之瑕疵。裂縫包含任何形式及方向或類似裂縫之瑕疵。

2.3.5 接受基準

接受基準區分為受靜態力、受動態力及管狀結構三種，其中鋼橋係屬受動態力結構，若有裂縫或下列任何瑕疵者為不合格(T =板厚)，內容分述如下：

2.3.5.1 靜態力結構

- (1)長形瑕疵其長度超過 $2T/3$ 或 19mm 取較小值。
- (2)圓形瑕疵其長徑超過 $T/3$ 或 6mm 取較小值;若板厚超過 50mm，圓形瑕疵可達 10mm。
- (3)大於 2mm 之相鄰瑕疵其間距小於較大瑕疵之 3 倍時，應視為單一瑕疵，而長度為該等瑕疵之長度或長徑加其間距，總和若超過第(1)節之值者。另大於 2mm 單一瑕疵與鐸道端緣或鐸道交叉點之距離小於該瑕疵之 3 倍者。
- (4)群集的大於 2mm 之圓形瑕疵其長徑之總和超過 $2T/3$ 或 19mm 取較小值。其與相鄰瑕疵、鐸道端緣或鐸道交叉點之距離小於較大瑕疵之 3 倍者。
- (5)在 25mm 長鐸道內若有小於 2mm 之任何瑕疵，其長度與長徑之總和超過 $2T/3$ 或 10mm 取較小值。在 6T 長鐸道內若有成線形排列之任何瑕疵，其長度與長徑之總和超過 T 者;如果檢測鐸道長小於 6T，則應依比例減小。

2.3.5.2 動態力結構

2.3.5.2.1 承受張應力之鐸道

- (1)任何瑕疵之長度或長徑超過 $T/3$ 或 13mm 取較小值。
- (2)大於 1.6 mm 之相鄰瑕疵其間距小於較大瑕疵之 9 倍時，應視為單一瑕疵，而長度為此等瑕疵之長度或長徑加其間距，總和若超過第(1)節之值者。另大於 1.6 mm 單一瑕疵與鐸道端緣或翼板與腹板的接台鐸道之距離小於該瑕疵之 9

倍者。

(3)在 25mm 長鐸道內若有小於 1.6mm 之任何瑕疵，其長度與長徑之總和超過 10 mm 者。

2.3.5.2.2 承受壓應力之鐸道

(1)任何瑕疵之長度或長徑超過 $T/2$ 或 19mm 之較小值。

(2)大於 3mm 相鄰瑕疵之間距小於較大瑕疵尺寸之 6 倍時，應視為單一瑕疵，而長度為此等瑕疵之長度或長徑加其間距，總和若超過第(1)節之值者。

(3)瑕疵尺寸 1.6mm 以上至 3mm 瑕疵與其相鄰瑕疵之間距小於較大瑕疵尺寸之 2 倍，應視為單一瑕疵，而長度為此等瑕疵之長度、長徑加其間距，總和若超過第(1)節之值者。

(4)在距離鐸道端緣或鐸道交叉點 6mm 範圍內，有任何瑕疵尺寸超過 3mm 者，或在此範圍內所有瑕疵尺寸總和超過 5mm 者。

(5)在 25mm 長鐸道內若有小於 1.6mm 之任何瑕疵，其長度與長徑之總和超過 10mm 者。

3. 超音波檢測法

3.1 基本原理

一般人耳可聽到之頻率範圍是 16Hz 至 20KHz，若超過 20KHz 即稱為超音波。超音波檢測法是利用音波振動導入材料內部，檢測表面或內部缺陷之非破壞檢測方法之一。一般金屬超音波檢測之頻率範圍由 1MHz 至 25MHz，其中以 1MHz 至 5MHz 最常使用。其原理主要是將壓電材料所製造之探頭(又稱換能器)，應用壓電效應達成能量轉換以產生超音波，並經由耦合劑傳入工件。在工件內超音波的傳遞速率需視材料而定，當傳至不同介面時，超音波會有反射或折射現象，因此藉由分析反射或透射所呈現的訊號，可檢測出材料瑕疵及其性質，如圖 7 及圖 8 分別為鋼橋製造之鋼板夾層及鐸道超音波檢測[7-8]。



圖 7 鋼板夾層超音波檢測



圖 8 鋼橋銲道超音波檢測

3.2 反射與折射

超音波為應力波之一種，因此需藉由介質才能傳遞，然而不同之介質其音阻抗亦不同（音阻抗為波速 V 與材料密度之乘積）。在不同的物質中，音阻抗與物質之密度成正比。所以當超音波經過兩種不同介質時(如 V_1 與 V_2)，入射波形成部分反射波及部分折射波之狀態，而超音波的傳遞受衰減、反射及折射的影響，

其能量將愈來愈弱。且入射角 (α) 與折射角 (β) 關係遵循 Snell's 定律：

$$\sin\alpha/\sin\beta = V1/V2$$

假設有兩種材料相接，其音阻抗分別為 $Z1$ 及 $Z2$ 。當超音波音壓 Pe ，由材料甲垂直入射於介面時，反射波之波式與入射波相同但方向相反，其音壓為 Pr 。而傳送入材料乙之折射波之波式和方向均與入射波相同，音壓為 Pd 。其音壓間之關係如下：

$$Pr/Pe = R$$

$$Pd/Pe = D$$

其中 R 及 D 為音壓之反射係數與透過係數，其與音阻抗(Z)間之關係如下：

$$R = Z2 - Z1 / Z2 + Z1$$

$$D = 2Z2 / Z2 + Z1$$

超音波音束影響的範圍稱為音場，超音波音束本身隨壓電晶片的距離而改變，其音壓並非均勻性的變化。音場分為兩個區域，包括近場與遠場。一般近場受到壓電晶片相互干涉較為明顯，音壓變化較為複雜。而遠場為近場之後的區域，其音壓變化較均勻。音束的發散角其與壓電晶體的直徑 d 及超音波之波長 λ 有關，而頻率愈高其音束發散角也愈大，發散角(γ)之公式如下所示：

$$\text{Sin}\gamma = 1.22\lambda / d$$

3.3 鋼結構鐳道超音波檢測法(CNS 12618)

3.3.1 人員資格

執行瑕疵結果判定應取得中級檢測師(Level II)以上資格，相關檢測人員資格之取得應依據 CNS 13588 規定 [非破壞檢測人員資格檢定與授證]。

3.3.2 表面處理

檢測面上任何妨礙掃描及音波傳送之濺渣、鬆脫銹皮等應予清除，必要時得以研磨或以適當的方式處理之。使用直束法檢測焊道，必要時鉸冠處理至與母材齊平。

3.3.3 儀器校正與系統查核

使用檢測儀器，至少應依 CNS 11224 規定[脈波反射式超音波檢測儀器系統評鑑]實施校正，包括螢幕水平線性、螢幕垂直線性、增幅線性、鑑別力等。

系統查核時機包括連續工作時至少每 4 小時一次、更換任一部份之檢測系統（如電源、換能器、同軸電纜或接觸媒質等）、更換檢測人員之時、每次檢測完成之後。查核實施分為射束路程及靈敏度兩種，可利用 A1 型標準規塊或 RB-1 型比較規塊實施(如圖 9 及圖 10 所示)。



圖 9 STB-A1 標準規塊[9]



圖 10 比較規塊[9]

3.4 檢測方式

3.4.1 直束法

依超音波進入檢測面的方向不同，檢測方法可分為直束檢測及斜束檢測。使用直束法之情況為鋼板夾層探傷及斜束檢測之前(如圖 11 由丙面掃描)，其掃描範圍應先以直束法檢查母材內部有無瑕疵會影響斜束檢測之評估。另必要時得使用直束法檢測溶接道及其熱影響區，以輔助斜束檢測(如圖 11 甲面或乙面掃描斜束檢測範圍)。其中換能器頻率之選擇如表 1 所示。

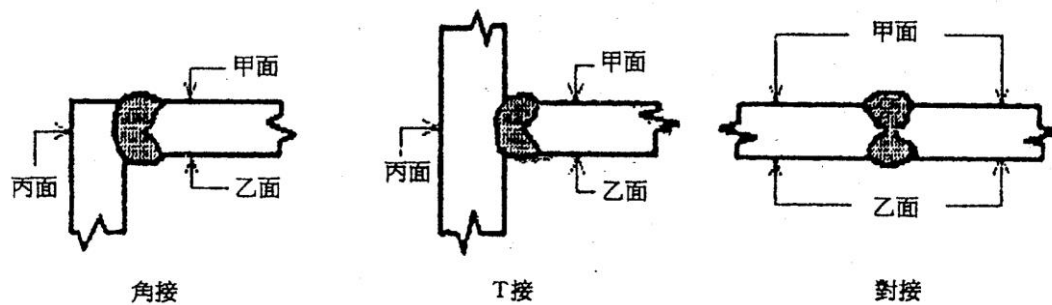


圖 11 換能器掃描位置

表 1 換能器頻率之選擇

板厚(mm)	換能器頻率
8~38	4(5) MHz 單晶
超過 38~200	2(2.25) MHz 單晶

3.4.2 斜束法

銲道及其熱影響區之全體積必須以斜束法檢測之，檢測以直射法為主(0.5 跨距法)，但現場狀況無法接近掃描時，得使用一次反射法(1 跨距法)。若一次反射法亦無法完全掃描時方可使用二次反射法(1.5 跨距法)如圖 12 所示。

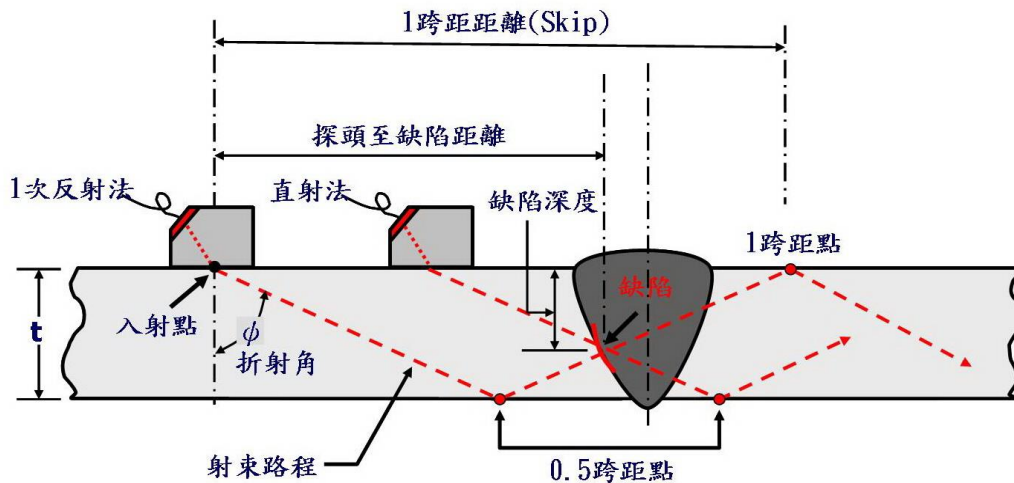


圖 12 音束路徑示意圖

另必要時可將銲冠磨至母材平齊，並可以不同角度之換能器檢測，使音束垂直於瑕疵。其中換能器折射角之選擇如表 2 所示。

表 2 換能器折射角之選擇

板厚(mm)	8 ~ 38	超過 38 ~ 200
折 射 角	70°	70°及 45° / 70°及 60°

3.4.3 掃描規定

換能器移動的掃描速率不得超過 150 mm/秒，超過時必須經程序檢定且證明有效方法可在檢定速率範圍內實施掃描。同時每道掃描間距至少須有換能器晶体尺寸之 10%的重疊區，以確保全面檢測。

3.5 檢測方法

3.5.1 母材直束檢測法

首先應將探頭置於母材面，且螢幕水平全尺度至少可調出第二個底面回波。再將探頭置於母材正常部，將第一個底面回波調至 50%~80%全螢幕高度(如圖 13 所示)。同時在檢測母材時，若任何區域有造成底面回波完全消失或瑕疵回波大於等於原來背面回波時，將會影響斜束探頭執行鐸道檢測，則須記錄此瑕疵之尺寸、位置、深度，以作為斜束檢測鐸道時之參考。

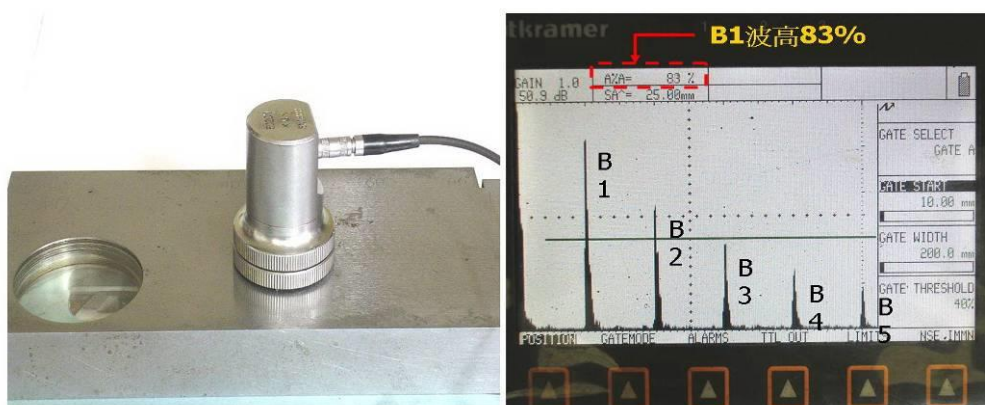


圖 13 直束檢測法靈敏度設定[10]

3.5.2 鐸道斜束檢測

儀器之水平全尺度應依實際超音波之行走路徑距離，並利用美國 STB-A1 規塊或其它規塊調整，視檢測需要可在螢幕上調整 125mm 或 250mm 之水平距離。然而如果由於鐸道幾何形狀之限制，上述之兩種水平距離設定仍無法涵蓋鐸道全部範圍，則可設定為 380mm 或 500mm。

檢測時所用之比較位準感度(zero reference level sensitivity)b 值，其調整方法

是將探頭置於 STB-A1 規塊上，使 1.5mm 校孔之最大反射回波高度約 50% 至 80% 垂直全尺度，記錄實際波高作為比較波高，此時儀器之 dB 值即為比較位準 b 值 (如圖 14 所示)。

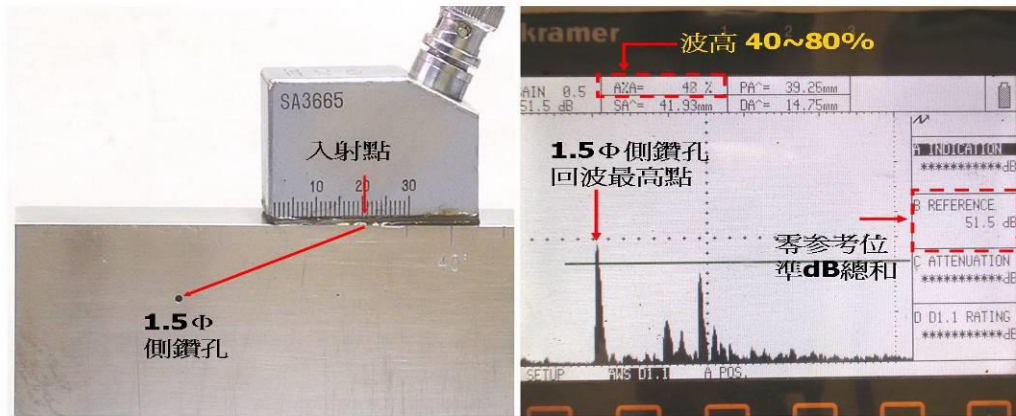


圖 14 斜束檢測法靈敏度設定[10]

當發現瑕疵回波顯示時，應移動探頭使瑕疵回波為最高值，並調整增益鈕使瑕疵回波達比較波高值，此時之儀器 dB 值即為瑕疵位準 a 值。衰減係數 c 值可依下列公式計算之：

$$c = (\text{音波所走之距離} - 1) \times 2$$

其中音波所走之距離以吋為單位，所算出之結果依四捨五入法取整數之 dB 值。最後瑕疵評估值 d 值可依下列公式計算之：

$$d = a - b - c$$

其中掃描感度以 b 值應依規定靜動態負荷結構掃描基準，並應根據不同之射束路程增加 dB 值如表 3 所示。

表 3 靜動態負荷結構掃描基準

射束路程	增加之 dB 數	射束路程	增加之 dB 數
65 mm 以下(含)	14	65 mm 以下(含)	20
大於 65 mm 至 125 mm	19	大於 65 mm 至 125 mm	25
大於 125 mm 至 250 mm	29	大於 125 mm 至 250 mm	35
大於 250 mm 至 380 mm	39	大於 250 mm 至 380 mm	45

3.6 缺陷大小評估

3.6.1 直束檢測法

一般層狀缺陷(lamellar discontinuity)評估其大小並不容易，尤其是比探頭面積還小者。如果缺陷之面積比探頭還大，則底面回波會完全消失，可以利用降 6dB 法評估缺陷大小。但如果缺陷比探頭面積還小，則可從缺陷外邊移近缺陷，當螢幕開始出現缺陷回波時，則探頭之邊緣即缺陷之邊緣。

3.6.2 斜束檢測法

顯示之長度乃是以探頭平行瑕疵左右掃描時，瑕疵最高回波左右降 50%(6dB) 時，探頭中心線之距離即為瑕疵之長度。

3.7 接受標準

顯示區分應將執行檢測所得的瑕疵評估 d 值，依表 5 靜態結構物之瑕疵分類或表 6 動態接構之瑕疵分類予以分類。

表 5 超音波檢測之接受別退標準

間斷等級	銲道厚度 t(mm) 和探頭角度												
	8 < t ≤ 20		20 < t ≤ 38		38 < t ≤ 65			65 < t ≤ 100			100 < t ≤ 200		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°		
A 類	5 及以下	2 及以下	-2 以下	1 以下	3 以下	-5 以下	-2 以下	0 以下	-7 以下	-4 以下	-1 以下		
B 類	6	3	-1 及 0	2 及 3	4 及 5	-4 及 -3	-1 及 0	1 及 2	-6 及 -5	-3 及 -2	0 及 1		
C 類	7	4	1 及 2	4 及 5	6 及 7	-2 至 2	1 及 2	3 及 4	-4 至 2	-1 至 2	2 及 3		
D 類	8 及以上	5 及以上	3 以上	6 以上	8 以上	3 以上	3 以上	5 以上	3 以上	3 以上	4 以上		

其中 A 類(大瑕疵)：不計長度，一律不合格。B 類(中瑕疵)：長度大於 3/4 吋(19mm)者為不合格。C 類(小瑕疵)：長度大於 2 吋(51mm)者為不合格。D 類(細

小瑕疵)：不計長度和瑕疵位置一律為可接受。

表 6 超音波檢測之接受剔退標準

間斷等級	銲道厚度 t(mm) 和 探頭角度										
	8<t≤20	20<t≤38	38<t≤65		65<t≤100			100<t≤200			
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
A 類	10 及以下	8 及以下	4 以下	7 以下	9 以下	1 以下	4 以下	6 以下	-2 以下	1 以下	3 以下
B 類	11	9	5 及 6	8 及 9	10 及 11	2 及 3	5 及 6	7 及 8	-1 及 0	2 及 3	4 及 5
C 類	12	10	7 及 8	10 及 11	12 及 13	4 及 5	7 及 8	9 及 10	1 及 2	4 及 5	6 及 7
D 類	13 及以上	11 及以上	9 及以上	12 以上	14 以上	6 以上	9 以上	11 以上	3 以上	6 以上	8 以上

其中 A 類(大瑕疵)：不計長度，一律不合格。B 類(中瑕疵)：長度大於 3/4 吋(19mm)者為不合格。C 類(小瑕疵)：瑕疵位置在銲道中央 1/2 區域內者長度大於 2 吋(50mm)或上方和下方 1/4 及區域內者，長度大於 3/4 吋(19mm)者為不合格。D 類(細小瑕疵)：不計長度和瑕疵位置一律為可接受。

4. 結論與建議

鋼橋非破壞檢測是重要品保技術之一，相關檢測技術應遵循相關規範與標準。由於銲道瑕疵方向對非破壞檢測技術影響很大，例如放射線檢測法對瑕疵方向與射線平行效果最佳，超音波檢測法對瑕疵面與音波垂直效果最佳，而磁力檢測法之磁力線須和瑕疵方向垂直效果最佳，因此檢測技術之配合非常重要。

檢測方法之互相搭配是提高檢測準確度之趨勢，因此建議檢測者在執行鋼結構橋梁檢測時，可搭配相關方法針對檢測結果較嚴重或較重要之部位進行再確認之工作，以達到有效檢測之目的。

5. 參考文獻

- [1] 鄭銘文、紀隆盛，放射線檢測法(初級)，中華民國非破壞檢測協會，台北 (1992)。
- [2] 鄭銘文、紀隆盛，放射線檢測法(中級)，中華民國非破壞檢測協會 (1988)。
- [3] 黃評，射線照相檢測法，核能研究所，桃園 (1977)。
- [4] 財團法人中華民國輻射防護協會，游離輻射防護彙萃，財團法人中華民國輻射防護協會，新竹 (2005)。
- [5] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, “ ASME Sec. V Nondestructive Examination,” American Society of Mechanical Engineers (1998).
- [6] AWS Structural Welding Committee, “ Structural Welding Code-Steel, “ American Welding Society (1990).
- [7] 吳學文、黃啟貞、陳必貫、葉競榮，超音波檢測法 (初級)，中華民國非破壞檢測協會(1988)。
- [8] 葉競榮、徐鴻發，超音波檢測法 (中級)，中華民國非破壞檢測協會(1990)。
- [9] 中國非破壞檢驗有限公司，超音波檢測資料。
- [10] 全國非破壞檢驗有限公司，超音波及射線檢測資料。