

# 鋼結構非破壞檢測技術之發展

彭朋畿<sup>1</sup>，程彥嘉<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中龍鋼鐵公司 冶金技術處 組長/高級檢測師

<sup>2</sup> 中龍鋼鐵公司 冶金技術處 高級檢測師

## 摘要

近年由於鋼結構建築之耐震效果佳，故已廣為工程業界所接受，並大量生產與製造。針對鋼結構建築，目前非破壞檢測主要應用於鋼板、銲道與螺栓，其中較常見之四種非破壞檢測方法，包括放射線檢測法(RT)、超音波檢測法(UT)、磁粒檢測法(MT)、液滲檢測法(PT)。本文將介紹上述四種方法近期技術之發展現況，以提供工程業界參考與評估。

此外由於台灣氣候潮濕且位於環太平洋地震帶，因此結構物深受腐蝕劣化及地震災害的威脅，而非破壞檢測對結構物之安全偵測，如同醫生對人體建康的看診所扮演的角色一般。隨著檢測技術與設備之科技發展不斷更新，逐步走向電腦化、影像化與自動化，並大幅提昇了檢測可靠度。所以相關非破壞檢測技術除了應用在新建工程外，亦可應用在老劣化結構之評估(如房屋耐震)。故若能善加利用非破壞檢測各項技術，預期將可有效消弭工件存在瑕疵所造成之風險，並提高整體結構本身之安全。

## 1. 前言

美國北嶺大地震(1994年)及日本阪神大地震(1995年)發生後，鋼結構建築物耐震性能進行全面性重新評估，除了在鋼材規格、設計型式及施工細節有所改善外，由於地震後大部分損壞處發生於銲道或其

周圍熱影響區，因此近期對於銲道及母材完整性檢測格外重視。

執行銲道及母材完整性評估時，為避免對材料或結構產生破壞，可藉由聲、光、電、磁等基本物理原理之運用，進行非破壞檢測(Non-destructive Testing, NDT)，並獲取其表面或內部品質資訊，以避免構件於施作或使用中發生破壞失效。以下針對鋼板與銲道之非破壞檢測進行發展簡介：

### 1.1 鋼板之 NDT

為避免鋼板承受厚度方向之拉力時(如樑柱接頭之柱板)發生層狀撕裂，可利用直束超音波於鋼板表面進行掃描檢測(原理如圖 1 所示)，以確保鋼板心部品質。

國內鋼結構用鋼板普遍採用 CNS、JIS 或 ASTM 之鋼種，其中 CNS 與 JIS 將超音波檢測列為 SN-C 之鋼板必要項目，所採用規範為 CNS 12845 或 JIS G0901，針對瑕疵訊號進行強度與分布密度(佔積率)進行評估，對於鋼板內部品質要求嚴謹度較高。而 ASTM 鋼種對於超音波檢測則皆為非強制性之協議項目，若協議加作超音波檢測，一般以 ASTM A435(Steel Plates) 或 A578(Steel Plates for Special Applications)作為選用之規範，兩者皆以檢測較大型之夾層缺陷為主要目的。

### 1.2 銲道之 NDT

鋼結構銲接過程中，可能會因為參數不當、前清理未落實、人員技藝變異、環境未管控等因素，而在銲道或熱影響區產生銲接瑕疵，常見瑕疵如：裂縫、滲透不足、熔合不良、銲蝕、氣孔、夾渣，若這些缺陷未經過合理評估，並將超出設計允許範圍者去除，則可能會增加結構失效風險。因此必須透過適當之非破壞檢測，有效檢出銲接瑕

疵，並予以評估，以避免嚴重缺陷殘留而影響構件完整性。一般針對鋼結構銲道表面可藉由目視、液滲或磁粒等方法進行檢測，而銲道內部瑕疵則必須藉由超音波或放射線檢測方能檢出。

一般國內鋼結構銲道非破壞檢測最常見之規範為 AWS D1.1 鋼結構銲接規範(CNS 參考其相關規定編撰而成)，其最早源自於 1928 年初版 AWS Code1 Part A，並於 1972 年與公路及鐵路橋樑規範合併成為 AWS D1.1，後續於 1988 年將建築及橋梁之區分更改為靜態及動態承載力結構，以擴大應用範圍。其中第 6 章節內容，包括目視、液滲、磁粒、超音波及放射線檢測之檢測方式與接受基準[1]。

## 2. 放射線檢測法

### 2.1 放射線檢測法原理

一般工業放射線檢測法主要應用於鋼結構及管線銲道內部品質之檢測，放射線檢測法依射源之種類可分為兩種，分別為 X 射線及伽瑪( $\gamma$ )射線。X 射線是由高速電子流撞擊物質陽極靶而產生，而伽瑪( $\gamma$ )射線是由不穩定同位素之衰變所產生的高能量電磁波，目前工程界放射線檢測法較常使用之同位素為 Ir-192、Co-60 及銻-137 等三種伽瑪( $\gamma$ )射線裝備。

鋼結構銲道之放射線檢測法是利用具有穿透能力之射線，穿透檢測工件，並達於底片或螢幕等介質，以生成影像之記錄(如圖 1 所示)。過去工業放射線檢測法仍多數採用傳統底片執行檢測，但底片之保存及管理仍衍生相關困難[2]。

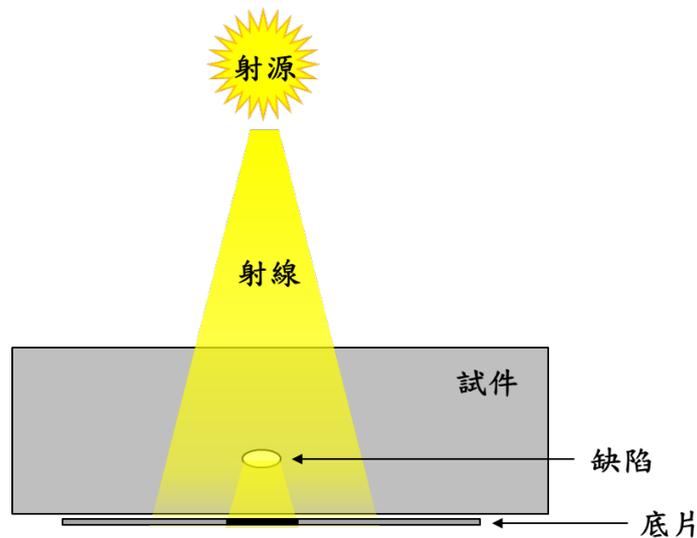


圖 1 放射線檢測原理示意圖

放射線檢測中需藉底片來顯示檢測工件內部之品質狀況，當射線撞擊底片銀化物粒子時，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即可析出金屬銀粒子，並產生黑色影像之記錄。顯影完畢將底片置入中止液(顯影作用停止)，再置入定影液中，以去除為感光(變黑)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白對比[3]。

## 2.2 放射線檢測法發展

由於重要結構或設備經施照完放射線檢測後將以底片方式呈現，底片為檢測報告最重要之依據。然底片須經相關溫濕度之控制，以避免底片變質而影響後續儲存，另若底片數量較多，相關追蹤管理將變成非常複雜，甚至難以管理。因此近期已能將底片數位化後，利用電腦資料庫之方式儲存與管理，預計將減少底片變質及管理上之盲點，此舉將大幅提高工程業界之便利與效益。其中數位化方式有兩種，包括利用現有底片直接於掃描系統掃描，以及即時射線檢測法(利用射線轉化成可見光幕屏)。

掃描器基本原理就是將實際物理空間中的「光資訊」轉換成「電子資訊」，再透過轉換器將電子的「類比資訊」轉換成電腦可以處理的「數位資訊」，掃描過程可由圖 2 說明。

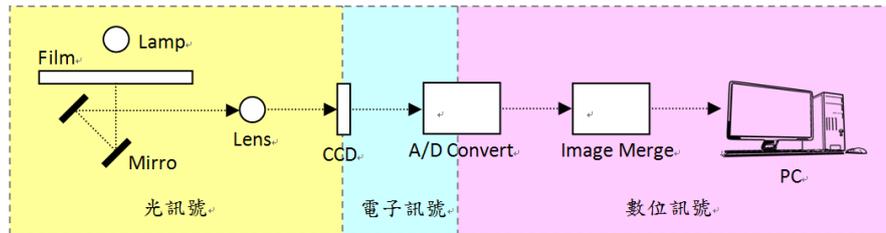


圖 2 掃描流程

目前鐳道放射線檢測法之底片數位化技術已日趨成熟，其可提供一有效之鐳道底片保存與管理之方法，並對鋼結構及設備鐳道品質發揮相當可信之績效。數位化是時代的趨勢，人類透過數位的方式進行溝通，以滿足生活上的需求。預計未來非破壞檢測方法將會大量使用數位工具或藉由數位輔助工具，以取得更正確與可靠的檢測結果。

### 2.3 放射線檢測法特殊應用

過去鋼筋混凝土之非破壞檢測技術包括量測混凝土結構的強度、裂縫深度、鋼筋腐蝕狀況、氯離子含量等。同時檢測設備也隨著科技發展不斷更新，而提昇了檢測可靠度。但由於混凝土是由水泥、砂、骨材及水所組合而成之複合非均質材料，且通常尺寸較龐大，因此混凝土結構的非破壞檢測技術通常較金屬材料構件之檢測困難。其中鋼筋之存在位置、數量及混凝土之缺陷等，對於鋼筋混凝土結構物之承載力與安全性有著極密切之關係。在工程實務中常須對於鋼筋(缺陷)之尺寸及位置進行非破壞性之檢測，以作為詳細評估結構之功用。目

前用於探測結構中鋼筋分佈及尺寸之非破壞性檢測法主要有應力波與透地雷達(電磁波)等，但由於混凝土屬於高度非均質物體，因此彈性應力波在傳遞過程中會有嚴重的散射效應，導致能量快速衰減。同時對於鋼筋排列較密集時，訊號解析能力將大受影響。

近期已有利用伽瑪射線檢測之方法與原理，研究分析在鋼筋混凝土結構物之應用，以了解伽瑪射線檢測之適用範圍與應用限制，同時達到有效檢測評估之目的(如圖 3 所示)。

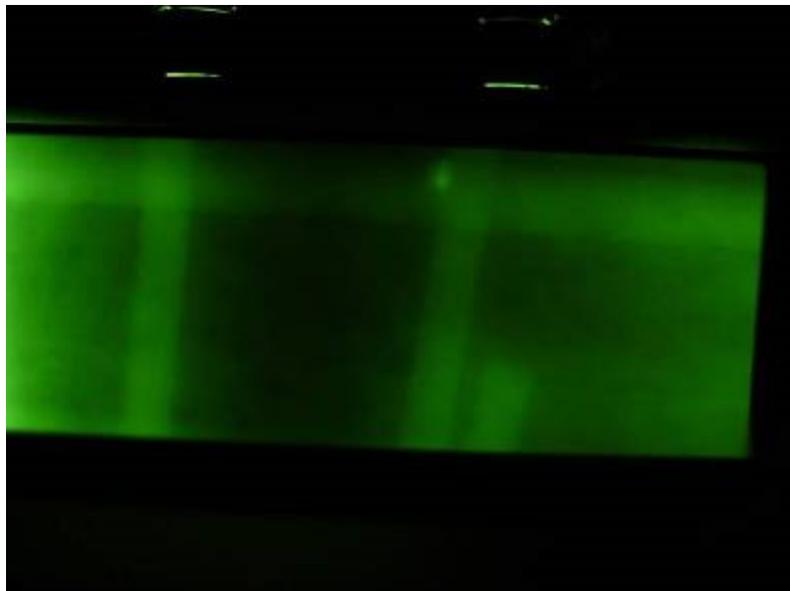


圖 3 鋼筋混凝土結構物之檢測

### 3. 超音波檢測法

#### 3.1 超音波檢測法原理

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，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[4]。

超音波原理主要是將壓電材料所製造之探頭，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[5]。直束超音波基本檢測原理如圖 4 所示，其主要應用於鋼板檢測，以評估鋼板內部品質。

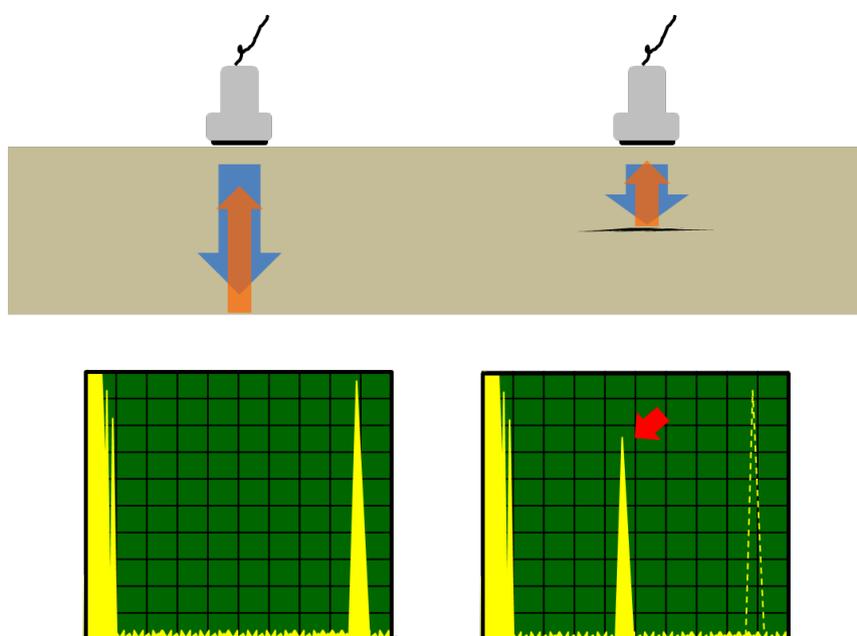


圖 4 直束超音波檢測原理示意圖

### 3.1 超音波檢測法發展

近期由於相位陣列式(Phased Array)的發展，促使工業用超音波檢測法在檢測能力與效率皆邁向新的世代。相位陣列式超音波與傳統超音波單一晶片檢測法最主要差異為相位陣列法使用多晶片，並以不同激發與接收之延遲時間，依據豪更斯原理(Huygen's Principle)產生不同波前(wave front)行進波式，並藉由波的干涉作用而發射出不同大小、角度、聚焦距離之音束，以進行扇形掃描或線性掃描等檢測方式。

相位陣列式超音波除可有效提升檢測效率(如圖 5)，並可透過其多角度掃描特性，使音束與各類型缺陷性質皆有某一適當角度能與方向性成垂直，以獲得最佳反射信號與檢出能力，同時其可藉由電子式聚焦波束，對於可能存在缺陷之位置能更有效檢出。透過相位陣列式超音波所具備之優勢，可使超音波檢測速度、瑕疵檢出、訊號判讀以及檢測適用性大幅提升，故其將成為未來超音波檢測技術之趨勢。

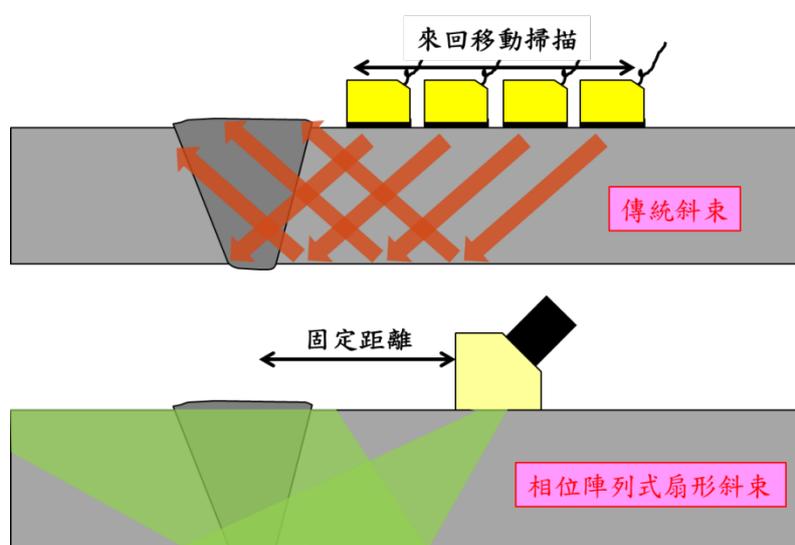


圖 5 傳統式及相位陣列式超音波銲道檢測比較示意圖

### 3.3 超音波檢測法特殊應用

螺栓是鋼結構工程之重要組件，近期已有研究高階超音波檢測法中之相位陣列式超音波檢測技術，利用具多樣訊號種類與掃描角度，以提供螺栓較佳之檢測效率及準確度(如圖 6 與圖 7 所示)。同時其利用距離振幅校正曲線法(DAC)，建立螺栓瑕疵大小之評估方法。以上有效結合陣列式超音波與距離振幅校正曲線等技術，預期可協助工程人員評估新建或使用中螺栓之品質，以降低營運鋼結構失效之風險。



圖 6 相位陣列式超音波檢測螺栓

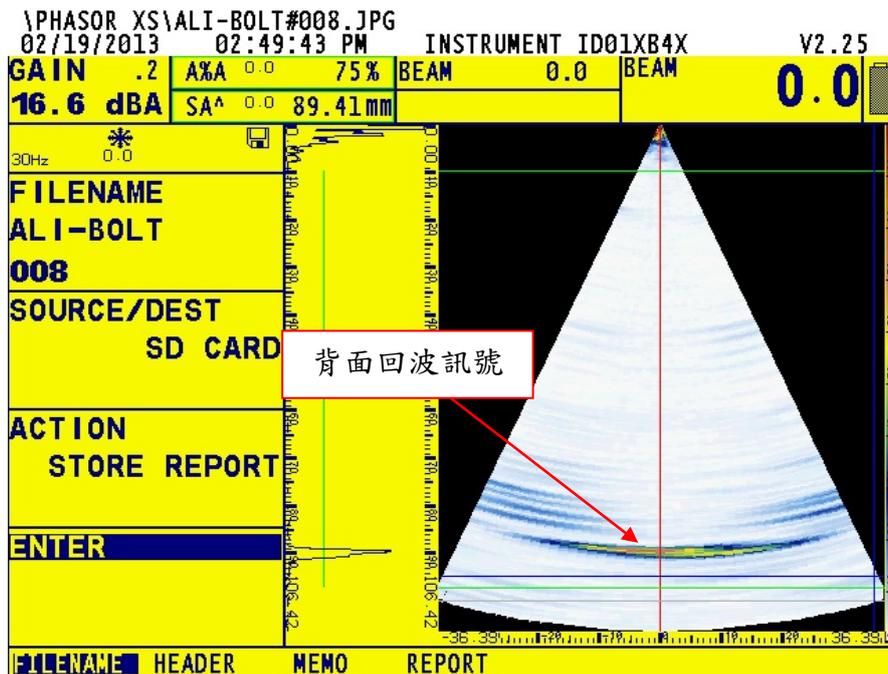


圖 7 扇形掃描之結果

#### 4. 磁粒檢測法

##### 4.1 磁粒檢測法原理

磁粒檢測主要原理是利用磁漏現象，其將磁粒(粉)施加於經過磁化工件之表面，以檢測該工件表面或次表面的瑕疵。當工件表面上有

瑕疵，則瑕疵處之截面積減少，而受磁化工件之磁力線會尋求最低磁阻路徑而自行扭曲變形。若作用之磁場強度夠強，便產生部分磁力線受排擠跳出工件表面，形成磁漏現象[6]。此磁漏現象將導致成對磁極的形成而吸引磁粒，因此檢測人員可檢視磁粒聚集現象而做出適當之評估。

由於須將工件適當地磁化方能實施，因此磁粒檢測只適用於鐵磁性材料的工件(如碳鋼)，同時其方法操作簡便且後清理容易，故廣泛應用於鋼結構銲道表面之檢測，可檢測如銲道裂縫或銲蝕等缺陷[7]。

#### 4.2 磁粒檢測法發展

一般鐵磁性物質在施加磁場後會暫時保有磁性，磁性的大小藉由磁通量的多寡來表示(磁通量即磁力線之總數)。由法拉第定律中可知，當線圈的磁通量變化時，會在線圈上產生感應電動勢(電壓)，其大小等於通過此線圈之磁通量的時間變化率。而霍爾效應(hall effect)是指當固體導體放置在一個磁場內且有電流通過時，導體內的電荷載子受到勞倫斯力(Lorentz force)而偏向一邊，因而產生電壓之現象。故目前磁粒檢測法可由磁通量變化，藉霍爾效被相對應的感測元件量測記錄，即可進行即時檢監測，並由電腦做訊號處理與輸出，最後可評估與判釋，如鋼纜檢測(如圖 8 所示)或地下管線檢測(如圖 9 所示)。

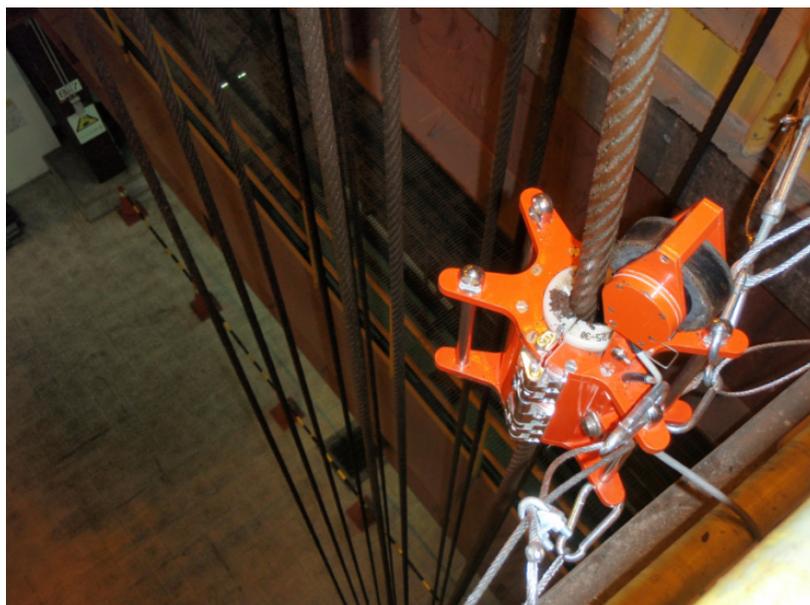


圖 8 天車鋼纜之檢測



圖 9 地下管線之檢測

## 5. 液滲檢測法

### 5.1 液滲檢測法原理

液滲檢測法主要利用兩次毛細現象之原理執行檢測，當滲透液施加於工件表面時，表面間斷相當於一端封閉之毛細管，滲透液藉由毛細作用逐漸滲入工件表面間斷內，當滲透完成後，將工件表面多餘滲

透液清除乾淨，再施加顯像劑於被檢區，以形成類似海棉組織的薄層覆蓋在工件表面上。此時在工件表面各處都有細小毛細孔洞產生，使間斷中殘留之滲透液藉毛細作用從間斷中吸出，同時在顯像劑上擴散放大，此時便可進行間斷顯示觀察與瑕疵評估（如圖 10 所示）[8]。

## 5.2 液滲檢測法發展

目前液滲檢測法除持續提高靈敏度外，主要朝向增加適用溫度範圍與降低環保汙染發展。另由於液滲檢測法操作容易且設備較便宜，因此未來仍是鋼結構檢測非常普及之方法。

## 6. 結論

一般工程業界，非破壞檢測技術主要扮演兩種角色，包括新建工程品質檢驗與老劣化結構殘餘壽命評估，因此結構完整生命週期，均可藉由非破壞檢測技術之參與而發揮效益。目前非破壞檢測技術不斷擴展適用範圍，以扮演好醫生診斷之功能，如近期地震後之鋼筋混凝土房屋結構檢測，可參考鋼筋位置儀與透地雷達等檢測技術，或利用具有穿透能力的放射線，穿透鋼筋混凝土結構物至底片，以生成鋼筋及缺陷影像之紀錄，並評估鋼筋及缺陷之實際尺寸與位置。

未來非破壞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檢測時，可搭配不同之非破壞技術，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。

## 7. 參考文獻

- (1) AWS D1 Committee, “Structural Welding Code-Steel”, American Welding Society (2008).
- (2) 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，1992年。

- (3) 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年。
- (4) 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年。
- (5) 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年。
- (6) 金崇勳，機械材料，復文書局，台南，1995年。
- (7) 陳春長，磁粒檢測法(初級)，中華民國非破壞檢測協會，1986年。
- (8) 錢宗廣，液滲檢測法(初級)，中華民國非破壞檢測協會，1986年。