

放射線應用於鐸道之檢測

彭朋畿¹，張沛倫²，王東安³

¹中龍鋼鐵股份有限公司 冶金技術處 課長 (國立中央大學 工學博士)

²中龍鋼鐵股份有限公司 冶金技術處 NDT 中級檢測師

³國立中興大學 精密工程研究所 副教授

摘要

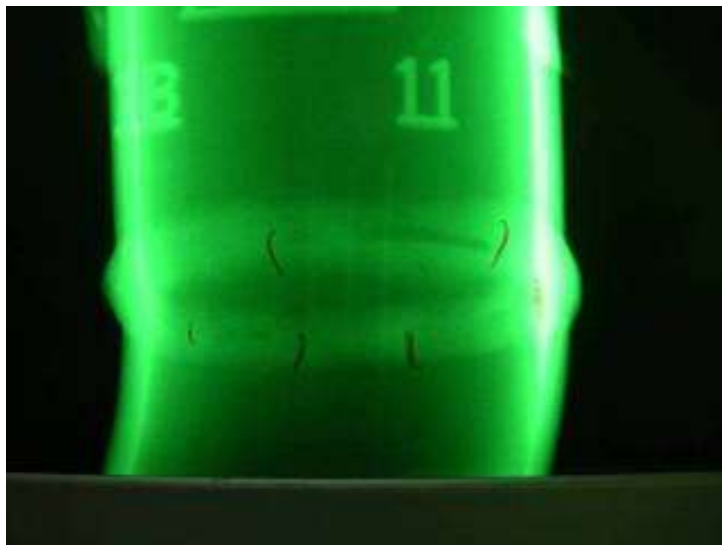
放射線檢測法是利用具有穿透能力之射線 (如 X 射線、伽瑪(γ)射線)，穿透檢測工件，達於底片或螢幕等介質，並生成影像之記錄，以利工程之檢測。目前放射線檢測法主要應用於鋼結構及管線鐸道內部品質之檢測，本文將簡介鐸道放射線檢測法之基本原理及程序，以利工程人員參考。

一、前言

放射線檢測法主要應用於工業界鋼結構及管線銲道內部品質之檢測(如圖一所示)，一般銲道內部瑕疵包括氣孔、夾渣、裂縫、銲蝕、熔合不良及熔入不足等缺陷。例如氣孔為銲接中較常見之銲接瑕疵，其產生原因可能為銲條被覆銲藥脫落、銲條潮濕、保護氣體壓力不足等因素。其他如裂縫或熔合不良在銲道中均屬於較嚴重之瑕疵(如圖二所示)，所以若能事先經由放射線檢測發現銲道瑕疵缺陷，經剷修而重新銲補改善，將可增加結構安全及使用性能。



圖一 管線銲道放射線檢測



圖二 銲道熔合不良之瑕疵

二、檢測設備

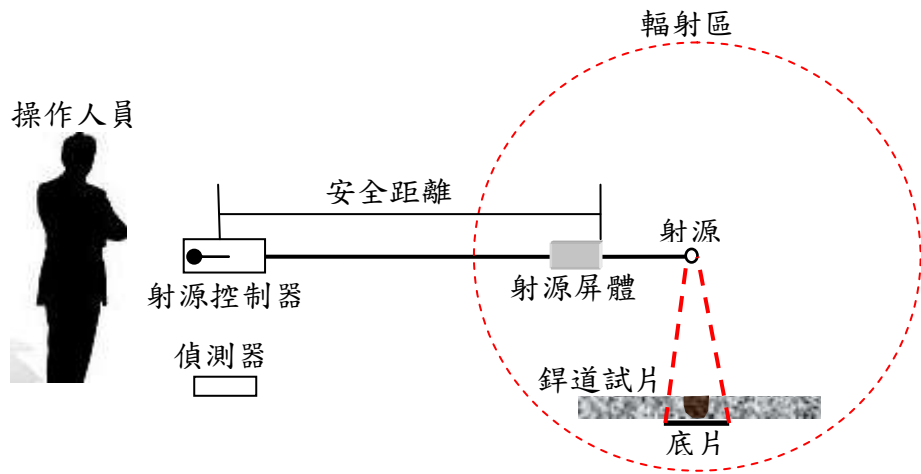
目前針對鋼結構鉚道之放射線檢測法以 γ 射線為主，但放射線檢測法依射源之種類可分為兩種，分別為 X 射線及 γ 射線。X 射線是由高速電子流撞擊物質陽極靶而產生，陽極靶之材料原子序愈高，產生之 X 光效應愈好。其能量依管電壓大小而定，亦即由正極靶與負極燈絲間的電壓差而定，若 X 射線能量愈高則代表其穿透能力愈強 [1-3]。

γ 射線是由不穩定同位素之衰變所產生的高能量電磁波，這些同位素可以是天然的(如鐳、鈾等會產生自發性之衰變)，也可以是人造的，而每種同位素具有不同之光譜。目前工程界放射線檢測法較常使用之同位素為 Ir-192 (銥 Iridium - 192)、Co-60 (鈷 Cobalt - 60)及鈉-137 (銻 Cesium - 137)等三種 γ 射線裝備。由於 γ 射線具有製造取得容易，價錢便宜等優點，因此建議執行本技術時使用 γ 射線，以增加檢測法之適用性 [4-5]。

伽瑪射線檢測鋼筋混凝土結構物內部之鋼筋及缺陷尺寸，試驗用之伽瑪設備包括 γ 射源(Ir-192)、射源屏體、射源導管、射源遙控器及底片等五個部份(如圖三所示)。其中 Ir-192 儲存在具有良好屏蔽效應之射源屏體中，並使用射源遙控器控制射源進出射源屏體，射源經過射源導管可到達預定照射之位置放射高能量之射線，最後即可穿透工件並於底片成像。而檢測人員所控制的射源遙控器的鋼索套管具有相當之長度，再加上其他適當之屏蔽件，使現場檢測人員能與施照射源保持適當之距離與屏蔽，以維護輻射安全(如圖四所示)。



圖三 伽瑪射線設備



圖四 檢測人員施照位置圖

三、檢測原理

3-1 基本原理

放射線檢測法可使用 X 射線或 γ 射線作為射源，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。

一般情況 γ 射線的能量較攜帶式 X 射線的能量為高，因此可檢測較厚物體，且無須電力、冷卻水的問題，所以較適用於現場檢測(如圖五所示)。X 射線的影像對比品質較佳，對光焦點小，無連續產生輻射及衰變的問題，因此輻射防護之措施相對較簡單，所以較適用於實驗室。 γ 射線和 X 射線皆為波長 $10^{-12}\sim 10^{-6}$ m 的電磁波，其影響穿透能力最重要因素為 X 射線的峰值能量或 γ 射線的平均能量，因此照像射源可選用連續能譜的制動輻射(X 射線)或源自核轉換之特性輻射(γ 射線)。故理論上以穿透為目的之物理性質， γ 射線及 X 射線均稱為放射線。



圖五 γ 射線

3-2 放射線之穿透

放射線檢測法所使用之放射線是以直線照射檢測工件，並在底片成像。由於可直接呈現檢測結果，降低檢測結果的爭議(如訊號分析)，因此放射線檢測法除在混凝土結構物之應用較少外，目前已廣泛地應用於現代工業上，如鉚道檢測、

管線壁厚檢測等。有關放射性對物質的穿透能力可由下式表示(Weng, 1984)。

$$I = I_0 e^{(-\mu T)} [B(x, h\nu, A, L)] \quad (1)$$

其中

I_0 ：為穿透前之能量(MeV)。

I ：為穿透後之剩餘能量(MeV)。

T ：為穿透厚度(cm)。

μ ：為被穿透物對放射線的吸收係數(cm^{-1})。

x ：工件厚度(cm)

$h\nu$ ：能量(MeV)

A ：面積(cm^2)

L ：射源至底片之距離(cm)

不同物質吸收係數不同，密度較高的物質可吸收較多的放射線(如鋼筋或金屬物質等)，相對在底片接受放射線照射量即較少，故底片上呈現較白色，而接受放射線較多者則呈現較黑之顏色。例如能量由 0.5 至-10MeV 時，常態混凝土的吸收係數 $\mu \doteq 0.204-0.054(\text{cm}^{-1})$ ，鋼筋為 $\mu \doteq 0.651-0.321(\text{cm}^{-1})$ 。兩者的吸收係數比約為 3.2-4.3 倍，因此可明顯比對底片黑度之差異，此特性反應在底片上就是感光程度的差別(黑白對比)，在醫學上即依此情況來判斷人體器官狀況(Weng, 1984)。

一般底片可依被照體的對放射線的透光性分為五類：1.非常不透光(very radiopaque)：如鉛、鐵等。2.較不透光(moderately radiopaque)：如骨骼、混凝土。3.中間值(intermediate)：如肌肉、軟組織。4.較透光(moderately radiolucent)：如脂肪組織。5.非常透光(very radiolucent)：如空氣、混凝土的孔洞等。因此只

要將攝影底片放在判片燈上即可在底片圖像上評估。而放射線之非破壞檢測即是利用底片上的透光程度，加上工程專業知識及現場狀況做正確的診斷判讀 (Cardarelli 等，2001)。公式(1)中 B 為增建因素，主要是考慮真實狀況下被穿透物的散射(scatter)，括弧內表示增建因子是依穿透之工件厚度(x)、能量(hv)、面積(A)、射源至底片之距離(L)而定，其數值可由 1-100，因此有時並不容易經由計算來決定照射之強度(Weng，1984)。

四、強度、距離及時間

4-1 強度半衰期

放射性物質之強度會隨時間衰變而減少，若經一定時間剩下原來強度之壹半，而其所需之時間稱為半衰期 [2]。放射性物質之半衰期不受溫度、壓力及其他作用影響(本文所使用之射源 Ir- 192 半衰期為 75 天)。下列為半衰期計算隨時間衰變而減少之射源強度：

$$A = A_0 / 2^N \quad (2)$$

其中 A 為任意時間之放射性強度， A_0 為初始之放射性強度，N 為半化期個數(即 A_0 至 A 所經時間除以半衰期)。而放射性核種之強度單位為貝克(Bq)，舊制為居禮(Ci)，1 居禮的放射性核種每秒產生 3.7×10^{10} 個衰變量。由式(3-7)可知放射性物質之強度將隨時間漸漸衰變而減少，因此本文在使用放射性物質(Ir- 192)須先求得射源強度，以利計算所需照射之時間。

4-2 強度、距離及時間

在放射線檢測法中，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，均可藉由下面公式(3~5)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)，因此在實際施照鋼筋混凝土時，可適當調整強度、時間及距離等參數，並以得到清晰之鋼筋底片成像為檢測原則。下列為強度、距離及時間三者之相互關係〔2〕：

(1) 強度與距離的關係

一定曝光量所需強度(M)與射源至底片之間的距離(D)平方成正比，如下式所示：

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (3)$$

其中

M_1, M_2 ：射源照射之強度。

D_1, D_2 ：射源至底片之間的距離。

(2) 時間與距離之關係

一定曝光量所需曝光時間(T)與射源至底片之間的距離(D)平方成正比，如下式所示：

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (4)$$

其中

T_1, T_2 ：射源照射之曝光時間。

D_1, D_2 ：射源至底片之間的距離。

(3) 強度與時間之關係

一定曝光量所需之強度(M)與曝光時間(T)成反比，如下式所示：

$$M_1 \times T_1 = M_2 \times T_2 = C \quad (\text{constant}) \quad (4-4)$$

其中

M_1, M_2 ：射源照射之強度。

T_1, T_2 ：射源照射之曝光時間。

五、底片性質

5-1 底片黑度

一般工業用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)。

依據放射線檢測原理，當射線穿透過檢測工件，由於檢測工件內部結構之不同，使到達底片之射線強度不同，並得到一不同黑度(d)所形成之底片影像。其中黑度是指底片之黑暗程度，其定義為入射於底片之光線強度為 I_0 ，透射過底片之光線強度為 I_t ，以 I_0/I_t 取 10 為底的對數值稱之為黑度，如下式所示 [2-3]：

$$d = \log(I_0 / I_t) \quad (6)$$

放射線檢測法通常會規定黑度範圍，因為假如黑度太小(即底片太白)，則底片對比不佳，而若黑度太大(即底片太黑)則判片燈將無法清楚顯像。美國機械工

程師學會 (ASME) 在法規(ASME SEC.V Article 2)中有明確之規定，當單片判讀時，X 光黑度規定須在 1.8~4.0、 γ 射線須在 2.0~4.0。而當雙片判讀時則(X 或 γ 射線)每張黑度規定須在 1.3 以上，且合起來須在 2.6~4.0(ASME SEC.V，1998；AWS D1.1，1990)。

由於本文主要目的是求得鋼筋於底片之成像，因此判讀底片之黑度值，將以能使鋼筋清晰成像，同時須參考 ASME SEC.V Article 2 之規定，本論文即依據 ASME SEC.V Article 2，當單片判讀時， γ 射線之黑度須在 2.0~4.0。

5-2 底片幾何模糊度

底片影像的幾何模糊度是由於射線源的尺寸有一定的大小，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(如圖六所示)。依據相似三角形之關係，幾何模糊度(Geometric Unsharpness, U_g) 如下式所示 [2]：

$$\frac{U_g}{F} = \frac{D_2}{D_1} \quad (5-2)$$

其中

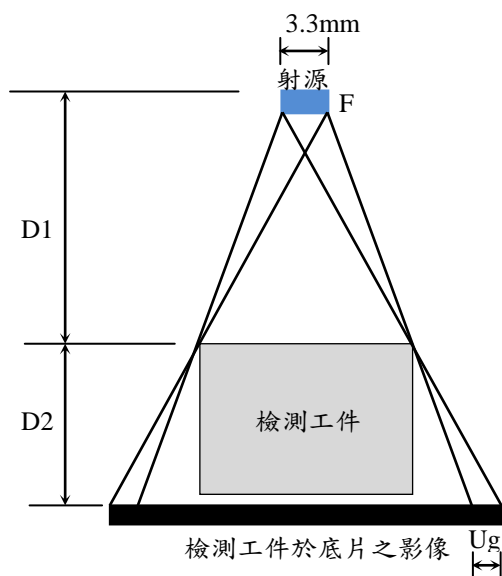
F：射源尺寸(本論文之射源使用 Ir-192，射源尺寸為 3.3mm* 3.3mm)。

D_2 ：檢測試體至底片距離。

D_1 ：射源至檢測試體之距離。

最佳底片影像之幾何模糊度是當射源尺寸最小、射源至檢測工件距離增加和檢測工件至底片距離愈短時，但一般法規如 ASME 等對於幾何模糊度有嚴格之

要求，期能確實判讀檢測工件之缺陷大小，並作為底片品質是否合格之依據。本文將依法規(ASME SEC.V Article 2)之要求規定幾何模糊度，因此當鋼筋直徑在 5.08cm 以下時，幾何模糊度應小於 0.0508cm (如表 1 所示)，以準確評估鋼筋尺寸。



圖六 幾何模糊度(Ug)之幾何位置

表 1 ASME 最大幾何模糊度 (ASME SEC.V Article 2)

物件厚度 t 英吋(mm)	最大幾何模糊度 英吋(mm)
$t < 2(50.8)$	0.02(0.51)
$2 \leq t \leq 3(76.2)$	0.03(0.76)
$3 < t \leq 4(101.6)$	0.04(1.02)
$t > 4(101.6)$	0.07(1.78)

5-2 底片品質

放射線檢測法中，底片之選擇及使用須考慮下列因素，以獲得最佳檢測結果。(1)檢測工件之材料、位置及形狀。(2)射源之型式。(3)曝露之時間。(4)靈敏度之需求。而為滿足現場實際應用之效果及底片上之要求時，應考慮以高品質及曝露時間短等重要條件。當以高品質為條件時，應選擇較慢且較細微粒之底片。

但若以曝露時間短為條件時，則放射線檢測之靈敏度在允許範圍內，應選擇較快速之底片。考慮上述兩條件後，選擇適當底片型式，以符合現場實際需求。

六、瑕疵介紹

本文以鋼結構銲道常用之美國 AWS D1.1(Structural Welding Code-Steel)法規作介紹，並簡述一般鋼結構之瑕疵分類與接受標準。

6-1 瑕疵種類

AWS D1.1 中規定瑕疵種類依照表 2 分為三種，分別為圓形瑕疵、線形瑕疵及群聚瑕疵，如圖七為熔合不良之線形瑕疵。

表 2 瑕疵種類

瑕 疵 種 類	說 明
圓 形 瑕 疵	瑕疵長徑未滿寬度的三倍者
線 形 瑕 疵	瑕疵長徑達寬度的三倍以上者
群 聚 瑕 疵	瑕疵密集分佈者



圖七 熔合不良瑕疵

6-2 接受標準

AWS D1.1 中規定接受標準分為受靜力及動態力之一般結構物和管結構物，最大允許瑕疵尺寸可查圖或分述如下：

(1)一般鋼結構(靜態結構)

A.線形瑕疵

最大允許尺寸：瑕疵尺寸大於 2mm 之最大允許尺寸應小於鐸道尺寸(E；即鐸道厚度或有效喉深)之 2/3 倍或 19mm，取上述結果之較小值。

B.圓形瑕疵

最大允許尺寸：圓形瑕疵其長徑之最大允許尺寸應小於鐸道尺寸(E)之 1/3 倍或 6mm 取較小值。但若板厚超過 50mm，圓形瑕疵可達 10mm。

(2)一般鋼結構(動態結構)

A.承受張應力之鐸道

最大允許尺寸：瑕疵尺寸大於 2mm 之最大允許尺寸應小於鐸道尺寸(即鐸道厚度或有效喉深)之 1/3 倍或 13mm，取上述結果之較小值。

B.承受壓應力之鐸道

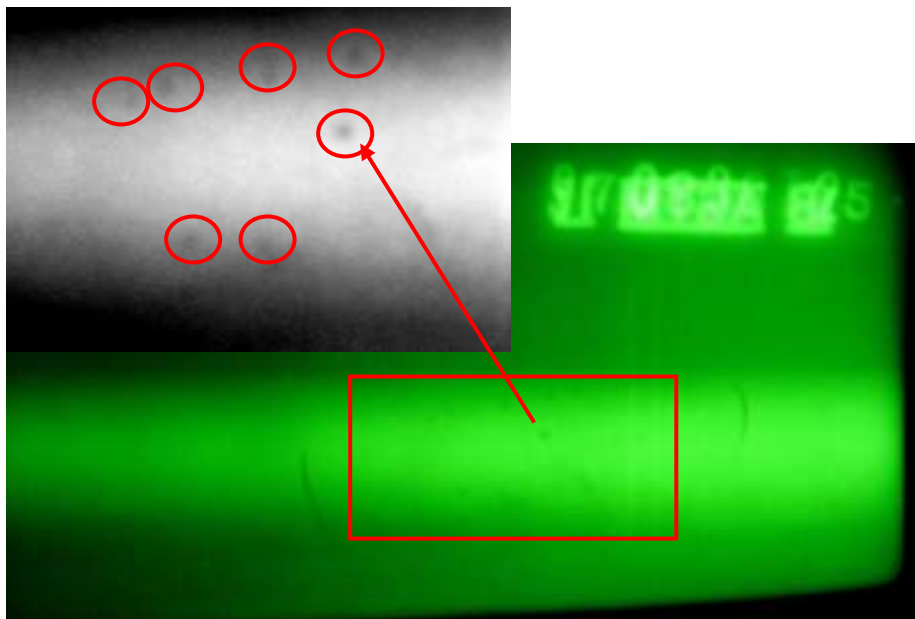
最大允許尺寸：瑕疵尺寸大於 3mm 之最大允許尺寸應小於鐸道尺寸(即鐸道厚度或有效喉深)之 1/2 倍或 19mm，取上述結果之較小值。

6-3 實際案例

本文介紹一實際鋼結構之放射線檢測案例，其相關參數包括射源強度、照相距離及曝光時間等(如表三所示)。本案依據法規為 AWS D1.1，檢測結果有氣孔等不合格之瑕疵(如圖八所示)。

表三 放射線檢測相關參數

射源形式 Source Model	γ Ray	照相方法 Exam. Method	單壁照相、單壁判片
射源強度(Ci) Source Intensity	60 Ci	照相距離 SFD	16 吋
射源焦點尺寸 Source Size	3.3 mm	曝光時間 Exposure Time	73 Sec
底片形式/尺寸 Film Type Size	愛克發 D7 3 $\frac{1}{3}$ ×12 "	像質計編號 Penny Type	ASTM- 1B
底片黑度 Film Density	2.0~4.0	增感屏 Intensify Screen	前後 0.005"
顯像劑種類 Developr	愛克發	顯像時間 Developing Time	4 Min



圖八 氣孔瑕疵

七、結論

放射線檢測法具有瑕疵影像較易辨識及底片可作為永久記錄等優勢，但亦有不適合穿透太厚的檢測物件、有輻射危險等缺點。因此檢測技術之互相搭配是提

高檢測準確度之不二法門，故建議執行非破壞檢測法時，可利用兩種檢測技術互相比較確認，以求得更準確之結果。由本文可知，放射線檢測法可提供一有效之鐸道檢驗方法，並對鋼結構品質發揮相當之績效。

八、參考文獻

1. 黃純夫，非破壞檢測概論，核能研究所，桃園 (1980)。
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，台北 (1992)。
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)。
4. 黃評，射線照相檢測法，核能研究所，桃園 (1977)。
5. 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)。
6. ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, “ ASME Sec.V Nondestructive Examination,” American Society of Mechanical Engineers (1998).
7. AWS Structural Welding Committee, “ Structural Welding Code-Steel, “ American Welding Society (1990).
8. E. Cardarelli, and D.E. Nardis, “Seismic refraction, isotropic anisotropic seismic tomography on an ancient monument (Antonino and faustina Temple AD 141) ” , Geophysical Prospecting, Vol. 49(2001).
9. P.S. Weng, Introduction to Health Physics, Li-Ming publishing house(1984).