

# 透地雷達/光測力學於土木/營建工程檢測之應用

張奇偉 (Che-Way Chang)

中華大學土木工程學系

張祐嘉 (Yu-Chia Chen)

中華大學非破壞檢測與安全評估中心

程冠銘 (Kuan-Ming Cheng)

中華大學非破壞檢測與安全評估中心

劉捷仔 (Chieh-Yu Liu)

中華大學非破壞檢測與安全評估中心

## 摘要

目前台灣工程業界常應用非破壞性檢測技術於老舊劣化之土木/建築鋼筋混凝土結構健康檢測，包括混凝土保護層/尺寸、混凝土材料裂縫/蜂窩、管線滲漏、鋼筋腐蝕、鋼構/材料殘留應力等檢測，並將非破壞檢測方法作為相關土木/建築工程安全檢查工作為品質檢核項目之一。本文將介紹透地雷達電磁波、光測力學與數位化影像處理技術應用於土木/營建工程結構檢測與診斷；將以台灣地區相關非破壞性檢測工程實際案例進行說明與探討分享，提供給相關土木/營建工程業界作為工程結構安全評估與健康狀態良窳之參考依據。

**關鍵詞：**非破壞檢測、鋼筋尺寸、腐蝕、滲漏、電磁波、光測力學

## Application of Ground Penetrating Radar / Photomechanics in Civil/Construction Engineering

### Abstract

This study will integrate and integrate algorithm of electromagnetic wave propagation and the digital coded of signal of ground- -penetrating radar electromagnetic wave scanning to explore the application of the reflected wave of the medium interface of steel reinforcement and asphalt paviag to the detection of corroded steel bars in concrete components and beneath of hollow in the underground. Application of electromagnetics, the reflected wave characteristics of various dielectrics constant materials can identify the different stntes between interface of analytes.

**Keywords :** ground penetrating radar 、electromagnetic wave 、steel bars corrosion 、leakage 、Photomechanics.

### 一、前言

因台灣屬於海島地形，且又位於歐亞及菲律賓板塊間，因此，許多舊有公共建設與建築結構已使用超過二、三十年以上，且都經歷相當多震災與天然災害。同時，在各類新建與舊有公共工程及房屋結構品質、安全、檢測的要求也因應大

眾日益增加的危機意識而隨之提高，因此欲達成工程結構物與工程品管的安全檢測目的，則有賴於準確、有效的非破壞性檢測技術進行檢測與安全評估。一般工程實務常使用的非破壞檢測方法包括超音波法、透地雷達法、反射式光彈法、腐蝕電位檢測法等，非破壞性檢測技術都有其適用性，依據其特性及應用於不同環境條件下，檢測不同的待測物。本文將介紹透地雷達電磁波、光測力學、超音波與數位化影像處理技術應用於土木/營建工程結構檢測與診斷;本文將以台灣地區相關非破壞性檢測工程實際案例進行說明與探討分享，提供給相關土木/營建工程業界作為工程結構安全評估與健康狀態良窳之參考依據。

## 二、非破壞檢測理論

### 2.1 透地雷達電磁波理論

#### 2.2.1 鋼筋深度/尺寸檢測分析

雙排鋼筋半徑物理模型基本假設與單一鋼筋分析模式一樣，但因為雙排鋼筋之間會產生訊號疊加、偏移以及遮避效應，其反射訊號所能行走路徑較短。此外，天線能量寬帶(視材料介電性質而異)與接收、發射天線距離固定，其反射行為互相對稱，同時產生訊號特徵偏移，此為多重反射現象。因此假設其功率反射係數於雙排鋼筋上緣所行走路徑為L/2，其特徵點擷取 如圖1所示。

反射電磁波所傳遞的路徑為鋼筋周長S;因此，電磁波對鋼筋影響的範圍等於能量寬帶的範圍加上鋼筋的周長，則鋼筋半徑如公式1所示：

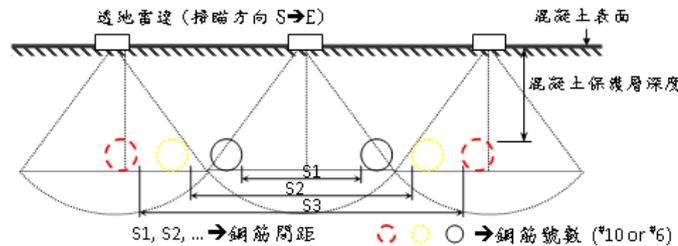


圖1 雙排鋼筋反射功率路徑

$$R = \frac{S}{2\pi} = \frac{\left(\frac{L}{2}\right) * 2 - E}{2\pi} \quad (1)$$

式中: S=鋼筋周長、L=電磁波反射訊號對鋼筋影響範圍、E=反射能量涵蓋範圍 (第一菲涅耳波帶)。

#### 2.1.2 鋼筋腐蝕檢測分析

透地雷達發射電磁波於介質中傳播時，其待測物界面之反射電壓，會因受介質的阻抗特性、電阻大小所影響。當電磁波入射混凝土介質層，混凝土與鋼筋交界面之反射係數為反射電壓與入射電壓之比值關係，故混凝土介質

中所入射波至界面II(鋼筋或腐蝕鋼筋)處會產生另一反射波，如圖2所示。

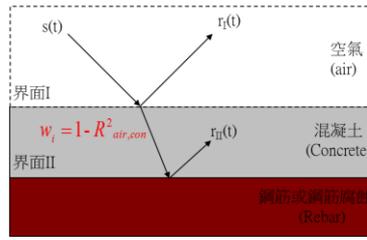


圖2 界面I、II入射與反射波波傳行為

鋼筋或腐蝕鋼筋界面II之反射電壓公式如(2)所示：

$$r_{II}(t) = R_{II} \cdot s(t) \cdot w_i \quad (2)$$

式中:s(t)為入射訊號電壓函數;RI為界面I之反射係數;R<sub>II</sub>為界面II之反射係數。

### 2.1.3 滲漏檢測分析

透地雷達電磁波入射介質中之速度大小，主要受所材料介質之介電常數所影響，由電磁波入射不同介質所產生之波速時間差異進行乾濕界面之分析，如圖3所示。其假設透地雷達反射訊號擷取時是包含乾/濕界面合成訊號，因此標準砂內乾溼界面差異可將材料乾濕標準砂深度關係式如下：

$$D_d = S_d \times \Delta T \times V_d \quad (3)$$

式中：D<sub>d</sub>為乾介質深度，S<sub>d</sub>為乾介質狀態之取樣點數，V<sub>d</sub>為乾介質狀態之電磁波，為等效時間間隔。



圖3 乾濕界面分析示意圖

## 2.2 光測力學檢測

鑽孔法量測殘留內應力之基本原理是依據材料已受外力作用下，在材料表面予以鑽孔，使其應力場重新分配，而產生材料應變，利用光彈貼片量測構件的應力釋放，進而推導構件表面的殘留內應力，如圖4所示。

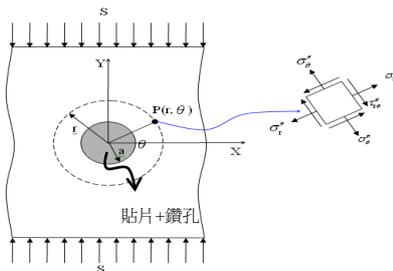


圖4 混凝土材料表面貼片鑽孔後之應力場

於試體受壓後貼上光彈貼片，再進行鑽孔，光彈貼片上所釋放的最大剪應力

$\tau_{\max}$  為：

$$\tau_{\max} = \frac{E^s}{2(1+\nu^s)} \cdot N \cdot f_{\epsilon} \quad (4)$$

### 三、台灣地區土木/營建工程實際案例探討

#### 3.1 橋梁墩柱鋼筋尺寸檢測

案例中鋼筋混凝土橋梁使用迄今 25 餘年之久，經過歷次颱風豪雨的沖刷，12 座橋墩沉箱出現裸露現象，尤其在行水區的橋墩沉箱基礎裸露 7 公尺，甚為嚴重，為確保其結構全與否，須進行墩柱結構安全評估工作。因此針對行水區之墩柱進行透地雷達檢測，判定橋塔結構鋼筋尺寸、間距、排列狀況，橋塔構件之安全性與耐久性分析評估。本案例採用透地雷達進行橋塔結構探測，其檢測結果顯示主筋為#8、箍筋為#5，並對一處開孔驗證比對結果吻合，其結果如圖 5 所示。

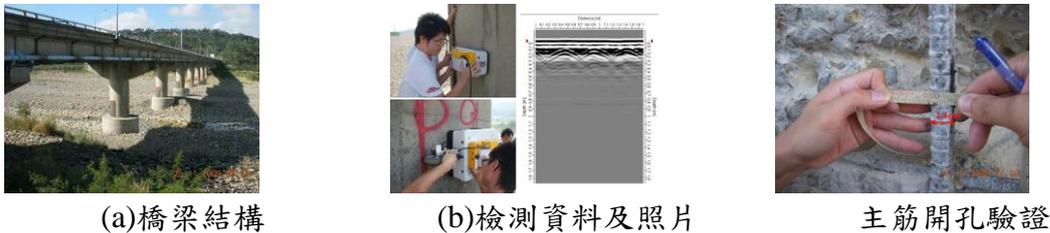


圖 5 鋼筋混凝土橋梁墩柱鋼筋尺寸分析與驗證

#### 3.2 瀝青路面下方空洞檢測

本案例針對瀝青鋪面下方損傷(空洞/鬆動)之空洞位置與深度進行檢測，採用透地雷達進行掃描，透地雷達電磁波檢測依不同程度之洩空訊號反應，判定洩空範圍與深度位置，將透地雷達檢測結果以洩空程度表示，如圖 6 所示。

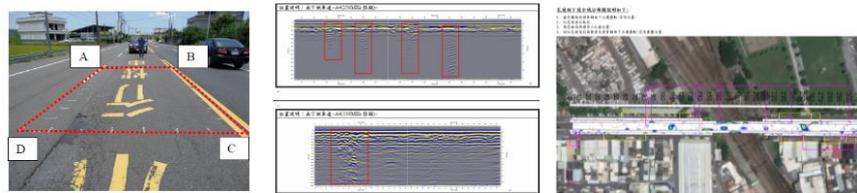
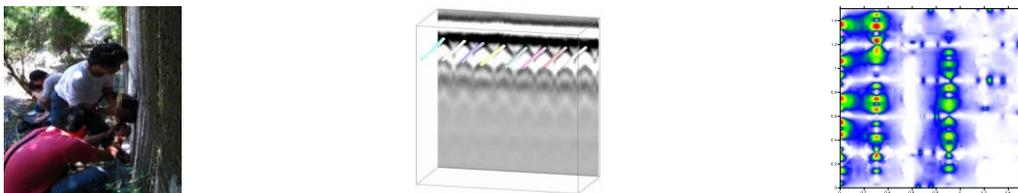


圖 6 瀝青鋪面空洞/鬆動透地雷達圖

#### 3.3 鋼筋混凝土建築物鋼筋腐蝕檢測

本案例針對混凝土構件內鋼筋腐蝕程度之反射電壓結果進行比較與探討，採用透地雷達天線探頭(頻率為 1GHz)進行掃描，經由透地雷達電磁波反射電壓分析結果顯示，此區域大部分鋼筋屬於輕度腐蝕之狀態，如圖 7 及表 1 所示。



(a)鋼筋混凝土結構 (b)擷取每根鋼筋腐蝕 (c)鋼筋腐蝕分佈圖

圖 7 鋼筋腐蝕檢測結果

表1 鋼筋腐蝕機率與反射電壓腐蝕狀態對照表

腐蝕狀態	銅/硫酸銅 參考電極	透地雷達 反射電壓
低於 10% 腐蝕變化率	>-200mV	79mV
10%~90% 腐蝕變化率	-200~-350mV	79~148mV
高於 90% 腐蝕變化率	<-350mV	>148mV

註：ASTM C876-91, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncosted Reinforcing Steel in Concrete.

### 3.4 建築物鋼筋混凝土滲漏檢測

某建築物鋼筋混凝土版電梯間有嚴重滲水情形，並抽驗水質為污水，但不知從何找出滲漏源，故沿著污水管線路徑進行透地雷達樓版掃描，經由乾濕界面方法及相對介電常數分析，結果得知在流理台及樓版間有高度含水狀況，故由防水工程人員進行敲除確認，其結果如圖 8 所示。



圖 8 民宅樓版污水管滲漏源檢測結果驗證

本研究將針對長鉚鋼軌之殘留應力進行量測分析，將長鉚鋼軌下翼版處黏貼光彈貼片，進行鑽孔，再以反射式光彈儀配合數位相機擷取光彈應力條紋級次圖，如圖 9 所示。



(a)鋼軌下翼版處黏貼光彈貼片



(b)光彈貼片鑽孔



(c)光彈貼片在不動區彎曲段

圖 9 長鉚鋼軌下翼版處黏貼光彈貼片及鑽孔

## 四、結語

本研究探討透地雷達電磁波(腐蝕、裂縫、滲漏、尺寸)理論、超音波混凝土握裹力弱化原理、光測力學殘留應力量測理論與數位化影像運算分析混凝土構件內含不同材料介質狀況。並配合數位影像編碼運算技術，擷取介質材料層反射訊號特徵與波傳現象，由訊號特徵，如介電常數(靈敏性)、

導電率(阻抗特性)、波速(快慢)、頻率(大小)、時間(差)進行探討。以實際工程案例進行探討與驗證，提供日後相關工程分析與修復補強之參考依據。

### 參考文獻

1. C.W.Chang, C.A. Tsai, Y.C Shiau, Appl.SCI 2022, 12,5567.
2. C. W. Chang,C. H. Lin, C. C. Jen,C. A. Tsai,H. Y. Chien andP. S. Huang, (2015), “Quantitative inspection of ferroconcrete damage by using ground-penetrating radar,” *Advanced Materials and Structural Engineering*, CRC Press 2016, Pages 281–284.
3. C. W. Chang et al., (2014) “Non-Destructive Evaluation of Reinforcing Rebar Radius by Digital Image GPR Technique,”*Applied Mechanics and Materials*, Vols. 501-504, pp. 847-851.
4. 張奇偉、林鎮華、簡孝宜、吳振愷、黃品勳、蕭文慈(2014)，「應用透地雷達法於管線滲漏之檢測」，2014年海峽兩岸破壞科學與材料試驗學術會議暨第十二屆破壞科學研討會(2014)。
5. 鄭家齊，「以鋼筋透地雷達影像檢測混凝土內滲漏狀態」，朝陽科技大學營建工程系碩士班論文(2012)。
6. D. Ayala-Cabrera, E. Campbell, E.P. Carreño-Alvarado, J. Izquierdo, R. Pérez-García., (2014), “Water Leakage Evolution Based on GPR Interpretations, *Procedia Engineering*,” Volume 89, Pages 304–310.
7. Lin S.K., Lin Y.\*, Hsu, K.T., and Yen T., (2010), “Use of the normalized impact-echo spectrum to monitor the setting process of mortar,” *NDT&E International*, vol.5, no.43, pp.385-393.
8. Chang, C.W., Lien, H.S., Lin, C.H., (2010), “Determination of the stress intensity factors due to corrosion cracking in ferroconcrete by digital image processing reflection photoelasticity,” *Corrosion Science* , v 52, n 5, p 1570-5.
9. Chang, C.W., Lin, C.H., Lien, H.S., (2009), “Measurement radius of reinforcing steel bar in concrete using digital image GPR,”*Construction and Building Materials*, Vol. 23, No.2, p.1057-p.1063.
10. C.W. Chang, H.S. Lien, 2007/6, “Expansion stress analysis of ferroconcrete corrosion by digital reflection photoelasticity”, *NDT&E International*, Vol.40, No.4, p.309-p.314.
11. I.L. AL-Qadia, S. Lahouarb, (2005), “Measuring layer thicknesses with GPR – Theory to practice,”*Construction and Building Materials*, Volume 19, Issue 10, Pages 763–772.
12. D. Daniels, (2004), “Ground-Penetrating Radar, 2nd Edition,”*Institution of Engineering and Technology*.
13. Narayanan, R.M., Hudson, S.G., Kumke, C.J., Beacham, M.W., Hall., D.D.,

(2003), “Nebraska DOR Tests GPR to Find Bridge Corrosion,” Better Roads, Vol. 73, pp. 70-73.