



防蝕工程學會

防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>



10.6376/JCCE.202006_34(2).0003

非破壞性透地雷達法於鋼筋腐蝕檢測之應用 Application of Non-destructive Ground Penetrating Radar Method in Rebar Corrosion Inspection

張奇偉*¹、蔡哲安¹、林鎮華¹

Chang, Che-Way*¹, Tsai Che An¹, Lin Chen Hua¹

中文摘要

本研究將推導整合透地雷達電磁波掃描數位編碼訊號及電磁波波傳理論探討鋼筋腐蝕生成物界面反射電壓應用於混凝土構件腐蝕鋼筋檢測並與腐蝕鋼筋之腐蝕化學電位比較。應用電磁波於不同介電常數材料之反射電壓特徵識別鋼筋腐蝕程度，同時透地雷達法不須局部破壞混凝土表面與鋼筋形成通路的限制，可以直接檢測混凝土內鋼筋腐蝕程度。

關鍵詞：透地雷達、電磁波、反射電壓、鋼筋腐蝕。

Abstract

This study will derive and integrate the digital coded signal of ground- -penetrating radar electromagnetic wave scanning and electromagnetic wave transmission theory to explore the application of the reflected voltage of the corrosion product interface of steel reinforcement to the detection of corroded steel bars in concrete components and compare it with the corrosion chemical potential of corroded steel bars. Application of electromagnetic waves, the reflected voltage characteristics of various dielectrics constant materials identify the corrosion degree of steel bars, and the ground-penetrating radar method does not need to locally destroy the restriction of the concrete surface and the channel formed by the steel bars, and can directly detect the corrosion degree of the steel bars in the concrete.

Keywords: Ground Penetrating Radar; Rebar Corrosion; Reflection Voltage.

收到日期：108 年 09 月 17 日

修訂日期：109 年 03 月 25 日

接受日期：109 年 03 月 26 日

¹ 中華大學土木系

¹ Department of Civil Engineering of Chung Hua University

*聯絡作者：ccw@chu.edu.tw

1. 前言

台灣境內環境多屬於臨海區域或海洋性氣候，在高濕度高腐蝕因子環境中對於鋼筋混凝土橋梁結構腐蝕現象極為嚴苛。而大多數皆採用腐蝕電位或腐蝕電流法量測鋼筋腐蝕的程度，而上述之腐蝕量測方法皆必須破壞混凝土構件表面建立電化學通路來進行鋼筋腐蝕電位與電流資料量測。若能建立一種不破壞混凝土結構體之檢測技術，則可降低結構損傷程度並提昇檢測效率。就目前國內外透地雷達對混凝土內鋼筋腐蝕檢測相關研究利用地電阻法與腐蝕電位法來檢測鋼筋鏽蝕程度^[1,2]。近期，學者應用透地雷達電磁波反射訊號之波傳行為來探討不同時間與保護層深度(不同腐蝕程度)下混凝土構件內鋼筋腐蝕現象，並與腐蝕電位進行相關定性比較^[3]。而外國相關研究則應用透地雷達法針對橋梁腐蝕進行檢測與研判，發現鋼筋腐蝕生成物與透地雷達電磁波波傳訊號相關。而透地雷達電磁波反射可有效判定鋼筋混凝土缺陷和惡化的區域，在良好和有缺陷的鋼筋混凝土各自不同特徵的反射波，比較這兩種特徵可以辨識缺陷並且可知其惡化的程度^[4,5]。同時，應用透地雷達檢測不同鋼筋混凝土橋梁之鋼筋腐蝕問題與腐蝕電位量測的方法進行比較，亦有其相關聯性。但上述的各種鋼筋腐蝕殘測方法，皆屬於定性的判定，而較少有定量的量測。本研究將探討透地雷達電磁波於混凝土內腐蝕鋼筋界面檢測與分析，其內容包含：

- (1) 電磁波波傳行為與反射電壓原理
- (2) 不同混凝土保護層厚度鋼筋加速腐蝕試驗
- (3) 不同腐蝕程度鋼筋電磁波反射電壓
- (4) 不同腐蝕程度鋼筋電化學腐蝕電位量測
- (5) 建立電磁波反射電壓腐蝕程度判定參考標

2. 電磁波波傳行為與反射電壓原理

2.1 電磁波基本理論

電磁波是電場與磁場交互作用之傳遞現象，亦即是在空間上任意一點，隨時間變化的電場將產生隨時間變化的磁場，隨時間變化的磁場將產生隨時間變化的電場兩者相輔相成向前傳播，如圖 1 所示。

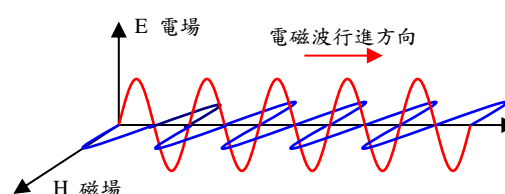


圖 1 電磁波在理想介質中波傳方向。
Figure 1 Electromagnetic Wave Propagation in Medium

2.2 電磁波解析度

電磁波入射於介質時，主要反射波訊號頻率將略小於中心頻率，因此在透地雷達施測過程中，其解析極限為中心頻率的二分之一波長。當電磁波頻率越高時衰減係數也越快，其所能探測深度也越淺，其解析度可分為：

(1) 垂直解析度

透地雷達所能解析出之最小長度為電磁波於該介質中波長的 1/4。其垂直解析度與透地雷達量測深度有關。

(2) 水平解析度

透地雷達電磁波之水平解析度與第一菲涅耳能量波帶(Fresnel zone)的大小有關，若第此波帶無法提供足夠的反射能量，則待測物尺度是無法解析，如圖 2 所示。

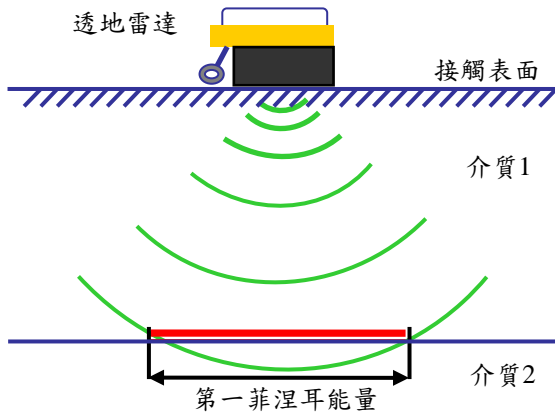


圖 2 第一菲涅耳能量波帶。
Figure 2 First Fresnel Energy Wave Band

2.3 相對介電常數

相對介電常數即為任一種材料的絕對介電常數與真空中的介電常數之比值，其關係式如下所示：

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1)$$

式中， ϵ 為電介質之相對介電常數； ϵ_0 為真空中介電常數。而電磁波在各種介質中會有不同的介電常數，而不同的介電常數，則會產生不同的反射能量，如表 1 所示。

表 1 一般常見介電常數。
Table 1 Dielectric Constant

介質	導電度 $\sigma(\text{mS/m})$	相對介電常數 ϵ_r	速度 $v(\text{m/ns})$
空氣	0	1	0.3
混凝土	1	4~10	0.09~0.15
鐵	1010	300	0.017
鋼筋	0.6×10^7	2600	-
氧化鐵 (腐蝕生成物)	-	14.2	-

2.4 反射係數與功率反射係數

由反射係數法擷取混凝土表面與混凝土內材料之相對介電常數電性參數，藉此瞭解電磁波於

各介質界面層中之反射係數與功率反射係數變化 [6,7]。由透地雷達入射電磁波至空氣中之相對介電常數求取，如公式(2)所示：

$$\epsilon_{air} = \left(\frac{1 - [A_{air} / A_{max}]}{1 + [A_{air} / A_{max}]} \right)^2 \quad (2)$$

上式中， ϵ_{air} 為空氣層之相對介電常數； A_{air} 為空氣界面之反射電壓； A_{max} 為最大反射電壓。

因反射係數法為各介質界面中之入射與反射之間比值關係。因反射訊號累加特性，其第二層空氣至混凝土介質中之相對介電常數分析，可由公式(3)表示：

$$\epsilon_{con} = \epsilon_{air} \left(\frac{1 - [A_{air} / A_{max}]^2 - [A_{con} / A_{max}]}{1 - [A_{air} / A_{max}]^2 + [A_{con} / A_{max}]} \right)^2 \quad (3)$$

上式中， ϵ_{con} 為混凝土層之相對介電常數； A_{con} 為混凝土界面之反射電壓。

其第三層混凝土至腐蝕生成物之相對介電常數分析，可由公式(4)表示：

$$\epsilon_{ferro} = \epsilon_{con} \left(\frac{1 - [A_{air} / A_{max}]^2 - R_1 [A_{con} / A_{max}] - [A_{ferro} / A_{max}]}{1 - [A_{air} / A_{max}]^2 - R_1 [A_{con} / A_{max}] + [A_{ferro} / A_{max}]} \right)^2 \quad (4)$$

上式中， ϵ_{ferro} 為腐蝕生成物之相對介電常數； A_{ferro} 為腐蝕生成物界面之反射電壓。

經由透地雷達剖面圖中擷取混凝土內含不同介質界面之電磁波反射訊號方式，如圖 3 所示。

透地雷達檢測技術內容包括待測介質之位置、深度、形狀以及大小等判定，皆由透地雷達電磁波反射訊號中之波形變化進行分析。經由反射係數法分析訊號強度變化，可判定介質界面中之相對介電常數，而介質相對介電常數擷取反映出介質界面中之反射能量大小與相位變化，藉此關係分析介質界面中之反射係數，如公式(5)所示：

$$R_{mn} = \frac{\sqrt{\epsilon_m} - \sqrt{\epsilon_n}}{\sqrt{\epsilon_m} + \sqrt{\epsilon_n}} \quad (5)$$

上式中， R_{mn} 為介質界面中之反射係數； ϵ_m 為介質 1 之相對介電常數； ϵ_n 為介質 2 之相對介電常數。

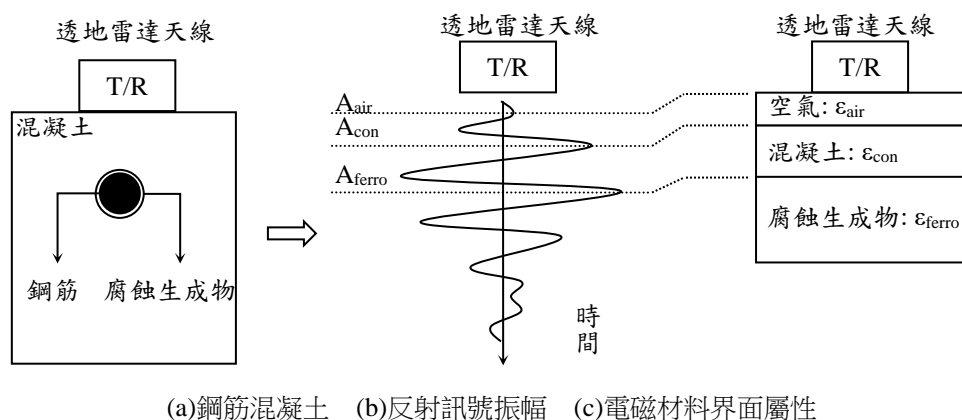


圖 3 透地雷達電磁波反射訊號介質界面擷取方法。
Figure 3 Electromagnetic Wave Reflection Signal in GPR

功率反射係數 P_r 為反射係數平方，其功率反射大小，反映介質界面中電磁波反射強弱，如公式(6)所示：

$$P_r = R_{mn}^2 = \left| \frac{\sqrt{\epsilon_m} - \sqrt{\epsilon_n}}{\sqrt{\epsilon_m} + \sqrt{\epsilon_n}} \right|^2 \quad (6)$$

2.5 電磁波反射訊號電壓模式

透地雷達發射電磁波於介質中傳播時，其目標體反射電壓功率可用來衡量是否產生足夠反射信號的一個指標，其大小主要受目標體與介質的阻抗特性、電阻大小所影響。當電磁波入射介質層 A:空氣與介質交界面之反射係數為反射電壓與入射電壓之比值，其公式如(7)所示。

$$R_I = \frac{r_I(t)}{s(t)} \quad (7)$$

上式中 $r_I(t)$ 為空氣至混凝土界面之反射電壓； $s(t)$ 為界面 I 入射電壓，故空氣與介質 A 中之界面 I 之反射電壓如公式(8)所示：

$$r_I(t) = R_I \cdot s(t) \quad (8)$$

而空氣至混凝土中之介質界面反射行為，如圖 4 所示。

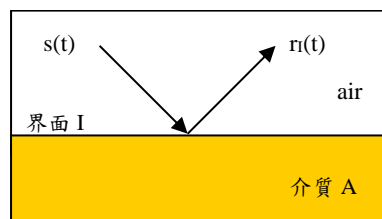


圖 4 電磁波入射界面 I 之反射波波傳行為。
Figure 4 Electromagnetic Wave Reflection Behavior in Media I

在雙層介質時，介質 A 中之折射波於界面 II 處會產生另一反射波，如圖 5 所示。

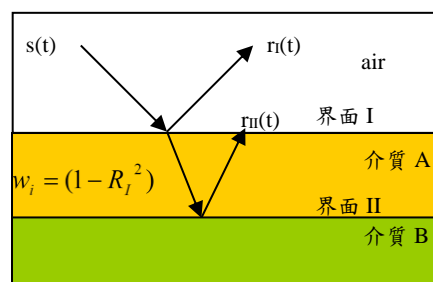


圖 5 界面 II 入射與反射波波傳行為。
Figure 5 Electromagnetic Wave Reflection Behavior in Media I

界面 II 之反射係數如公式(9)所示：

$$R_{II} = \frac{r_{II}(t)}{s(t) \cdot w_i} \quad (9)$$

界面 II 之反射電壓公式如(10)所示：

$$r_{II}(t) = R_{II} \cdot s(t) \cdot w_i \quad (10)$$

其中， $r_{II}(t)$ 為介質 A 與 B 界面之反射電壓； $s(t)$ 為界面 II 入射電壓； w_i 為入射功率($w_i=1-R_i^2$)； R_i^2 為界面 I 之反射功率。

透地雷達電磁波總反射電壓如公式(11)所示：

$$r(t) = r_I(t) + r_{II}(t) \quad (11)$$

將公式展開後，得：

$$\sum r(t) = R_I s(t-t_A) + R_{II}(1-R_I^2)s(t-t_A-t_B) \quad (12)$$

式中， $s(t)$ 為入射訊號電壓函數； R_I 為界面 I 之反射係數； R_{II} 為界面 II 之反射係數； t_A 為介質 A 之雙層走時； t_B 為介質 B 之雙層走時。

3. 不同混凝土保護層厚度鋼筋加速腐蝕試驗

3.1 實驗內容

本研究是利用透地雷達電磁波入射於鋼筋混凝土內鋼筋不同腐蝕程度進行施測，並搭配腐蝕電位儀同時進行量測，將實驗所得結果進行分析及比較。

3.2 鋼筋加速腐蝕試驗

利用直流電源供應器外加電流以加速鋼筋之腐蝕速率。其試驗方法是將試體浸於水中，但鋼筋不與水接觸，電源供應器上之陽極接於鋼筋，陰極接於鈦網，調整電源供應器之外加電流，如圖 6 所示。



圖 6 加速腐蝕試驗。
Figure 6 Speeding Corrosion Test.

3.3 透地雷達鋼筋腐蝕試驗

本研究將不同加速腐蝕時間(0~408hrs)與不同混凝土保護層厚度(4cm、6cm、7cm、9cm)放置在長 165cm×寬 15cm×高 60cm 之混凝土中，內埋#6 鋼筋進行透地雷達掃描，如圖 7 所示。

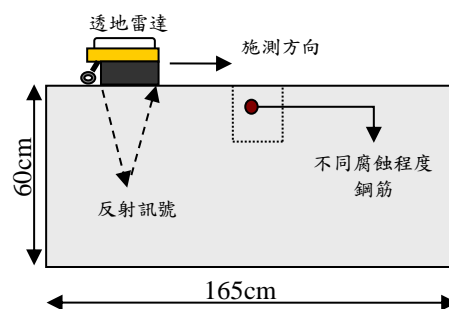


圖 7 透地雷達掃描不同鋼筋腐蝕程度。
Figure 7 Degree of Corrosion by GPR Scanning

3.4 半電池電位儀鋼筋腐蝕試驗

本實驗是利用一半電池電位儀，以(銅/硫酸銅)作為參考電極，量測鋼筋腐蝕之電位，如圖 8 所示。

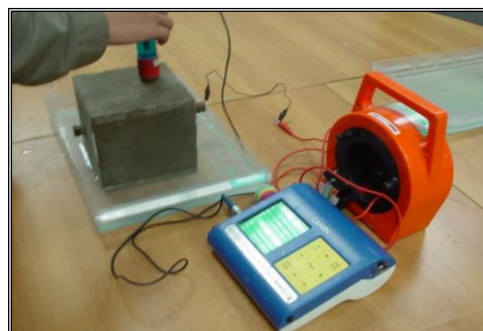


圖 8 腐蝕電位量測。
Figure 8 Measurement of Corrosion Voltage

3.5 不同腐蝕程度鋼筋透地雷達剖面圖

將混凝土內含單一鋼筋(#6)進行加速腐蝕試驗，並在不同保護層(4cm、6cm、7cm、9cm)、不同加速腐蝕時間(0~408hrs)於輕度、中度及嚴重腐蝕程度下進行透地雷達掃描，其透地雷達剖面圖，如圖 9~12 所示。

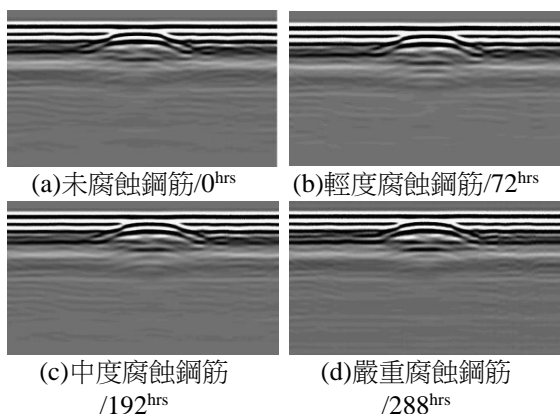


圖 9 保護層 4cm 腐蝕鋼筋透地雷達剖面圖。
Figure 9 GPR Profile for Rebar Corrosion(4cm)

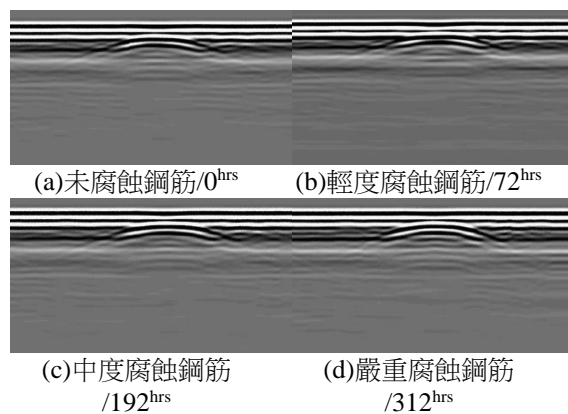


圖 12 保護層 9cm 腐蝕鋼筋透地雷達剖面圖。
Figure 12 GPR Profile for Rebar Corrosion(9cm).

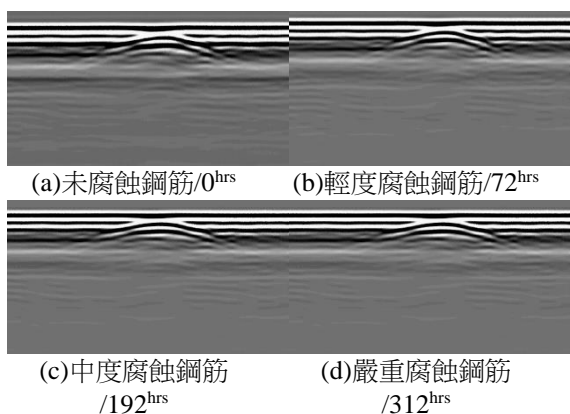


圖 10 保護層 6cm 腐蝕鋼筋透地雷達剖面圖。
Figure 10 GPR Profile for Rebar Corrosion(6cm)

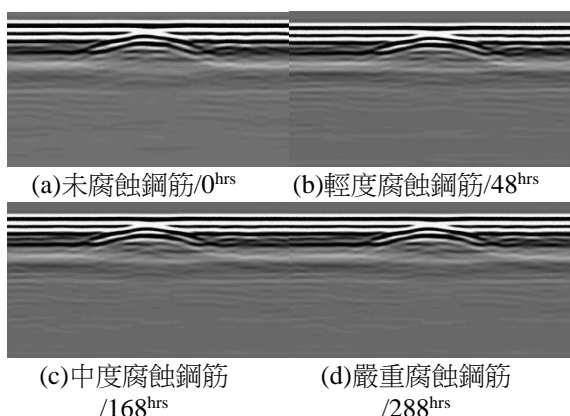


圖 11 保護層 7cm 腐蝕鋼筋透地雷達剖面圖。
Figure 11 GPR Profile for Rebar Corrosion(7cm)

3.6 不同腐蝕程度鋼筋電磁波反射電壓

判定混凝土內鋼筋於不同保護層厚度(4^{cm}、6^{cm}、7^{cm}、9^{cm})及不同加速腐蝕時間(0~408^{hrs})下之電磁波反射電壓量測與解析:

(1) 保護層厚度 4cm 時之反射電壓解析

由透地雷達反射電壓結果顯示，在三個不同加速腐蝕時間 72hrs、192hrs、288hrs 分別有不同腐蝕程度的反射電壓之變化，如圖 13 所示。鋼筋隨著加速腐蝕時間增加(腐蝕程度增加)，透地雷達電磁波反射電壓之變化於 72hrs 時會產生明顯之變化，顯示鋼筋在外加電流 72hrs 後開始發生腐蝕的現象，當加速腐蝕時間為 288hrs，其反射電壓之變化已趨於平緩。

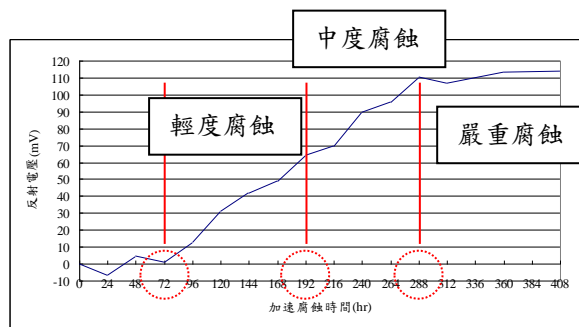


圖 13 保護層 4cm 之反射電壓之變化。
Figure 13 Reflection Voltage for Concrete Coverage(4cm).

(2) 保護層厚度 6^{cm} 時之反射電壓解析

由透地雷達反射電壓結果顯示，在三個不同加速腐蝕時間 72^{hrs}、192^{hrs}、312^{hrs} 分別有不同腐蝕程度的反射電壓之變化，如圖 14 所示。與保護層厚度 4^{cm} 之透地雷達電磁波反射電壓之變化皆在 72^{hrs} 時會產生明顯之變化，顯示與保護層厚度 4^{cm}、6^{cm} 之鋼筋在外加電流 72^{hrs} 後開始發生腐蝕的現象，當加速腐蝕時間為 312^{hrs}，其反射電壓之變化已平緩上升。

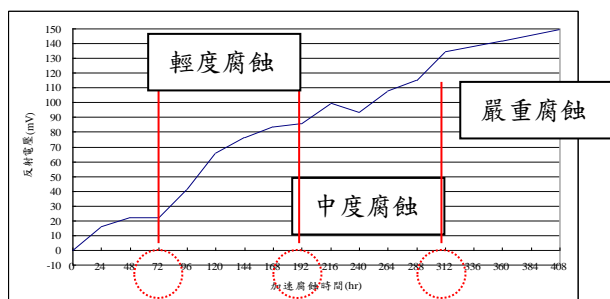


圖 14 保護層 6^{cm} 之反射電壓之變化。
Figure 14 Reflection Voltage for Concrete Coverage (6cm).

(3) 保護層厚度 7^{cm} 時之反射電壓解析

由透地雷達反射電壓結果顯示，在三個不同加速腐蝕時間 48^{hrs}、168^{hrs}、288^{hrs} 分別有不同腐蝕程度的反射電壓之變化，如圖 15 所示。與保護層厚度 4^{cm}、6^{cm} 比較後，保護層 7^{cm} 之透地雷達電磁波反射電壓之變化在 48^{hrs} 時會產生明顯之變化，與保護層厚度 4^{cm}、6^{cm} 之反射電壓變化提早 24 發生腐蝕現象，在鋼筋外加電流 48^{hrs} 後開始發生腐蝕現象，當加速腐蝕時間為 288^{hrs}，其反射電壓之變化逐漸平緩上升。而在中度與嚴重腐蝕程度而言，腐蝕電位與透地雷達反射電壓皆相差 24 小時，其原因是鋼筋保護層 7^{cm} 為泡水面，其鋼筋腐蝕生成的速度也較其它保護層來的快，藉此證明腐蝕電位無法反映鋼筋是否為均勻腐蝕，但以透地雷達電磁波反射電壓可反映出加速腐蝕時之不均勻腐蝕現象。

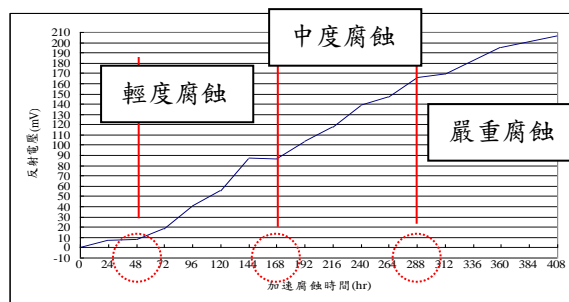


圖 15 保護層 7^{cm} 之反射電壓之變化。
Figure 15 Reflection Voltage for Concrete Coverage (7cm).

(4) 保護層厚度 9^{cm} 時之反射電壓解析

由透地雷達反射電壓結果顯示，在三個不同加速腐蝕時間 72^{hrs}、192^{hrs}、312^{hrs} 分別有不同腐蝕程度的反射電壓之變化，如圖 16 所示。再與保護層厚度 4^{cm}、6^{cm} 之透地雷達電磁波反射電壓之變化皆在 72^{hrs} 時會產生明顯之變化，顯示與保護層厚度 4^{cm}、6^{cm} 之鋼筋在外加電流 72^{hrs} 後，皆開始發生腐蝕的現象，當加速腐蝕時間為 312^{hrs} 後，其反射電壓之變化逐漸下降。

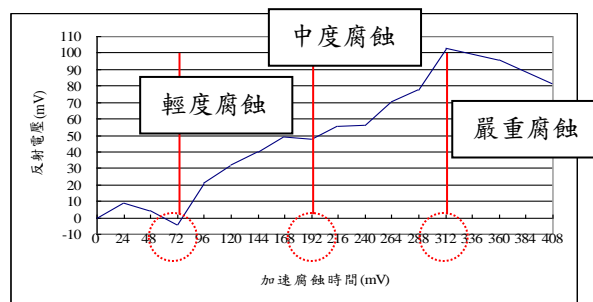


圖 16 保護層 9^{cm} 之反射電壓之變化。
Figure 16 Reflection Voltage for Concrete Coverage (9cm).

3.7 不同腐蝕程度筋電化學腐蝕電位量測

混凝土內鋼筋於不同保護層厚度(4^{cm}、6^{cm}、7^{cm}、9^{cm})及不同加速腐蝕時間(0~408^{hrs})下量測鋼筋腐蝕之電位量測:

(1) 保護層厚度 4^{cm} 時之腐蝕電位

依據 ASTM C876 之鋼筋腐蝕電位參考標準，

本試驗結果之腐蝕電位在保護層 4^{cm}、加速腐蝕時間 192^{hrs} 與 312^{hrs} 為輕度、中度、嚴重腐蝕之臨界，如圖 17 所示。而電磁波反射電壓之輕度腐蝕反映在透地雷達初期反射電壓在 72^{hrs} 時已有明顯變化，相對於腐蝕電位量測提早約 120^{hrs}，可顯示透地雷達電磁波反射電壓可更敏感量測鋼筋腐蝕現象，當腐蝕生成物(氧化鐵)產生時，其透地雷達反射電壓反映腐蝕現象敏感度大於腐蝕電位。

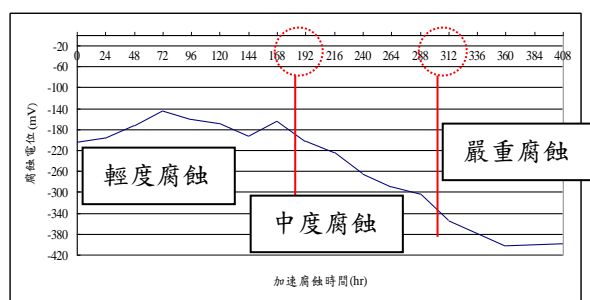


圖 17 保護層 4^{cm} 之腐蝕電位之變化。
Figure 17 Corrosion Voltage for Concrete Coverage(4cm)

(2) 保護層厚度 6^{cm} 時之腐蝕電位解析

依據 ASTM C876 之鋼筋腐蝕電位參考標準，本試驗結果之腐蝕電位在保護層 6^{cm}、加速腐蝕時間 192^{hrs} 與 312^{hrs} 為輕度、中度、嚴重腐蝕之臨界，如圖 18 所示。而電磁波反射電壓之輕度腐蝕反映在透地雷達初期反射電壓與保護層 4^{cm} 結果相同，皆在加速腐蝕在 72^{hrs} 時已有明顯變化，相對於腐蝕電位量測提早約 120^{hrs}。其結果顯示透地雷達電磁波反射電壓變化在保護層 4^{cm}、6^{cm} 時，皆可敏感量測鋼筋腐蝕現象。

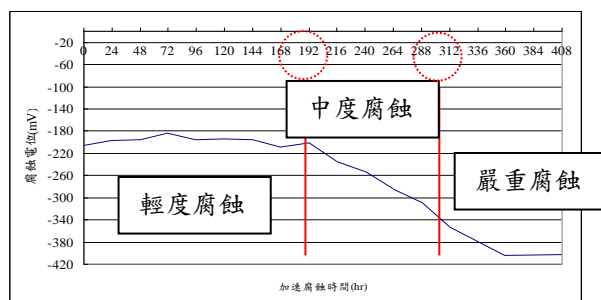


圖 18 保護層 6^{cm} 之腐蝕電位之變化。
Figure 18 Corrosion Voltage for Concrete Coverage(6cm)

(3) 保護層厚度 7^{cm} 時之腐蝕電位解析

依據 ASTM C876 之鋼筋腐蝕電位參考標準，本試驗結果之腐蝕電位在保護層 7^{cm}、加速腐蝕時間 144^{hrs} 與 312^{hrs} 為輕度、中度、嚴重腐蝕之臨界，如圖 19 所示。而電磁波反射電壓之輕度腐蝕反映在透地雷達初期反射電壓在 48^{hrs} 時已有明顯變化，相對於腐蝕電位量測提早約 96^{hrs}，其結果顯示透地雷達電磁波反射電壓變化在保護層 7^{cm} 時，較保護層 4^{cm}、6^{cm} 提早 24^{hrs} 量測鋼筋腐蝕現象。其原因是鋼筋保護層 7^{cm} 為泡水面，其鋼筋腐蝕生成的速度也較其它保護層來的快，但腐蝕電位並無法反映出鋼筋是否為均勻腐蝕，但以透地雷達電磁波反射電壓可反映出加速腐蝕時之不均勻腐蝕現象。

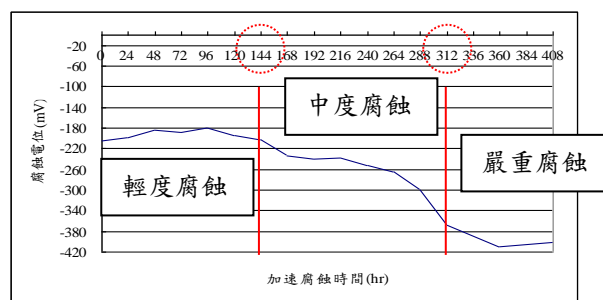


圖 19 保護層 7^{cm} 之腐蝕電位之變化。
Figure 19 Corrosion Voltage for Concrete Coverage(7cm).

(4) 保護層厚度 9^{cm} 時之腐蝕電位解析

依據 ASTM C876 之鋼筋腐蝕電位參考標準，本試驗結果之腐蝕電位在保護層 6^{cm}、加速腐蝕時間 192^{hrs} 與 312^{hrs} 為輕度、中度、嚴重腐蝕之臨界，如圖 20 所示。而電磁波反射電壓之輕度腐蝕反映在透地雷達初期反射電壓與保護層 4^{cm}、6^{cm} 結果相同，皆在加速腐蝕在 72^{hrs} 時已有明顯變化，相對於腐蝕電位量測提早約 120^{hrs}。其結果顯示透地雷達電磁波反射電壓變化在保護層 4^{cm}、6^{cm}、9^{cm} 時，皆可敏感量測鋼筋腐蝕現象。

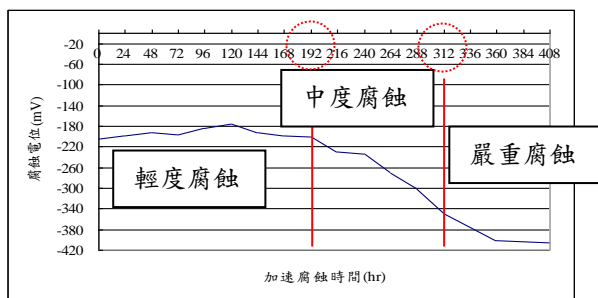


圖 20 保護層 9cm 之腐蝕電位之變化。
Figure 20 Corrosion Voltage for Concrete Coverage(9cm)

3.8 建立電磁波反射電壓腐蝕程度判定參考標準

由電磁波反射訊號擷取圖像數位化編碼，經由相對介電常數、反射係數反功率反射係數計算反射電壓之變化，並與腐蝕電位之電壓值建立鋼筋腐蝕程度之相關性。將不同保護層之透地雷達電磁波反射電壓之變化與由 ASTM C876 之標準值進行比較與探討，如表 2 所示。

表 2 鋼筋腐蝕機率與反射電壓之對照表。
Table2 Comparison Degree of Corrosion by Potential and Voltage.

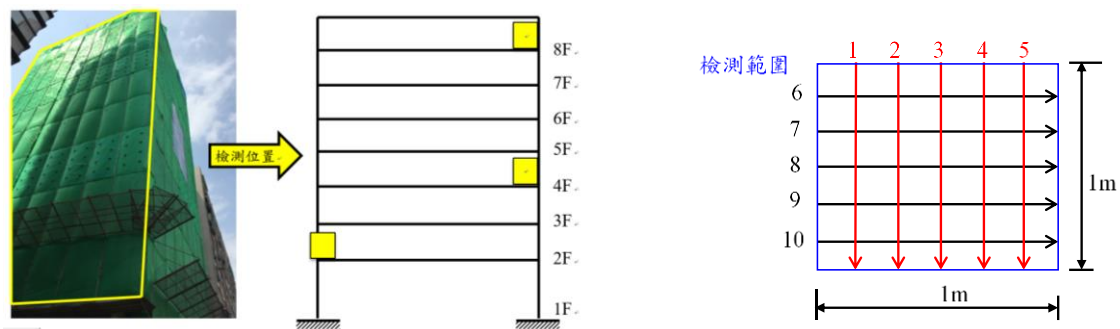
腐蝕狀態	電化學腐蝕電位	電磁波反射電壓	
低於 10% 腐蝕機率 (輕度腐蝕)	>-200mV	4 ^{cm}	1~64mV
		6 ^{cm}	23~69mV
		7 ^{cm}	8~87mV (泡水面/腐蝕較嚴重)
		9 ^{cm}	0~12mV
10%~90% 腐蝕機率 (中度腐蝕)	-200~-350mV	4 ^{cm}	64~107mV
		6 ^{cm}	69~118mV
		7 ^{cm}	87~169mV (泡水面/腐蝕較嚴重)
		9 ^{cm}	12~71mV
高於 90% 腐蝕機率 (嚴重腐蝕)	<-350mV	4 ^{cm}	<107mV
		6 ^{cm}	<118mV
		7 ^{cm}	<169mV (泡水面/腐蝕較嚴重)
		9 ^{cm}	<71mV

4. 不同混凝土保護層厚度鋼筋加速腐蝕試驗

4.1 鋼筋混凝土大樓柱內鋼筋腐蝕檢測

本案例針對北部某大樓，透地雷達檢測鋼筋腐蝕位置共 4 處(2F、4F、8F 柱各一處)，其檢測

位置示意圖，如圖 21 所示。以透地雷達電磁波反射電壓分析結果顯示，電磁波反射電壓比對依據 ASTM C876 判定混凝土內鋼筋腐蝕程度分佈如，如圖 22 所示。

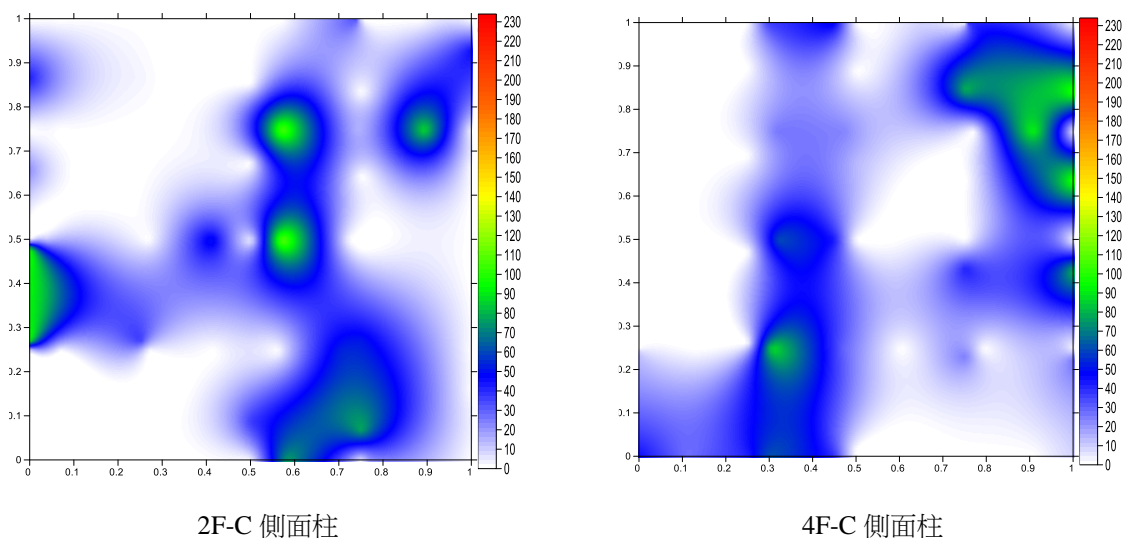


透地雷達檢測位置及測線示意圖



2F透地雷達檢測照片

圖 21 建築大樓柱構件內腐蝕檢測。
Figure 21 Building Corrosion Inspection.



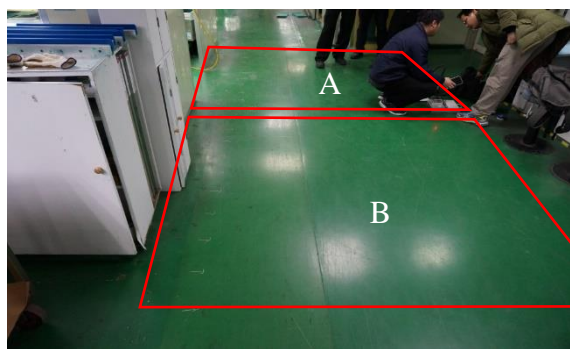
■ 藍色：輕度腐蝕、■ 綠色：中度腐蝕、■ 紅色：嚴重腐蝕。

圖 22 柱構件內鋼筋腐蝕檢測結果。
Figure 22 Rebar Corrosion in Column

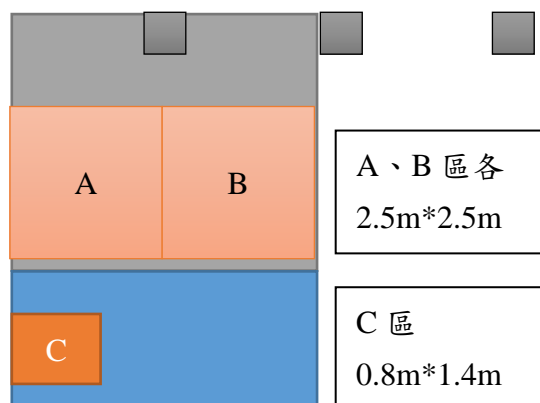
4.1 鋼筋混凝土樓版內鋼筋腐蝕檢測

本案例針對鋼筋混凝土版內鋼筋腐蝕程度之反射電壓結果進行腐蝕電位及反射電壓比較與探討，採用透地雷達天線探頭(頻率為 1GHz)進行掃瞄，經由透地雷達電磁波反射電壓分析結果顯示，

在 3F 已開裂之底版腐蝕電位平均為 -280mV(C 區)，依據 ASTM C876 判定混凝土內鋼筋已達中度腐蝕程度，A 區及 B 區以電磁波反射電壓分析結果為中度腐蝕程度，故結果與 ASTM C876 判定相符合，如圖 23 所示。



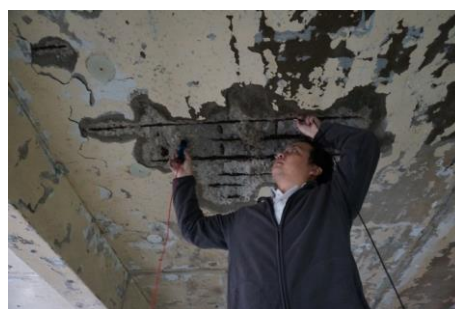
(a)現場檢測位置



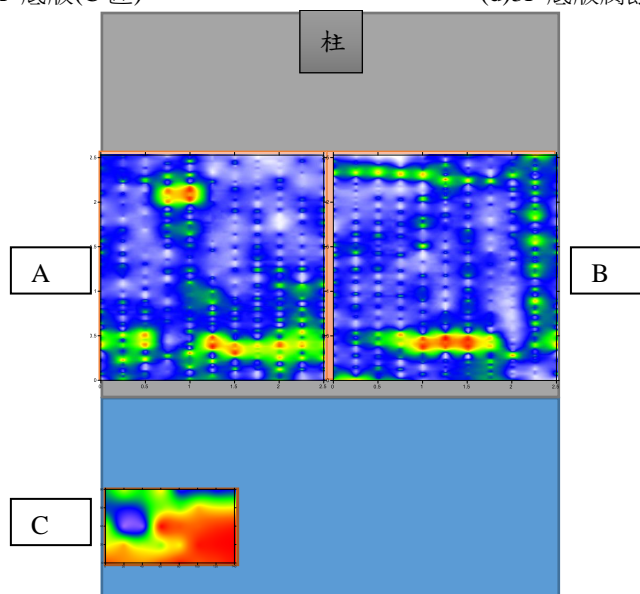
(b)檢測位置示意圖



(c)3F 底版(C 區)



(d)3F 底版腐蝕電位量測(C 區)



■ 藍色：輕度腐蝕、■ 綠色：中度腐蝕、■ 紅色：嚴重腐蝕。

圖 23 版構件內鋼筋腐蝕檢測結果。
Figure 23 Rebar Corrosion in Plate

5. 結論

- (1) 透地雷達電磁波反射電壓之變化可反映不同腐蝕時間及不同保護層深度下之混凝土與鋼筋腐蝕界面之變化。
- (2) 透地雷達電磁波反射電壓變化對鋼筋腐蝕之敏感性大於電化學腐蝕電位之量測，透地雷達法可早期偵測到鋼筋腐蝕程度。
- (3) 透地雷達法可依據 ASTM C876 鋼筋腐蝕狀態判別參考標準，建立其相對應之定量鋼筋腐蝕程度之判定值。
- (4) 電磁波反射電壓腐蝕程度判定參考標準與反射電壓分析技術，可有效改善電化學腐蝕電位量測破壞混凝土表面之限制，且更快速及有效的判定鋼筋腐蝕程度。

參考文獻

- [1] 楊潔豪、陳平護、劉衍宏，「地電法應用於混凝土中鋼筋鏽蝕研究」，國立中央大學地球物理研究所，2000。
- [2] 「熔射鋼筋混凝土之腐蝕行為與握裹強度之研究」，張奇偉、翁榮洲、羅俊雄、連泓勝、劉文彬，防蝕工程，第19卷第4期，2005，第551~560頁。
- [3] 張奇偉、林鎮華、陳裕典，「透地雷達電磁波於腐蝕鋼筋混凝土之行為探討」，台灣混凝土學會2007年混凝土工程研討會，2007。
- [4] "Detection of rebar corrosion in bridge decks using statistical variance of radar reflected pulses", Narayanan, R.M., Hudson, S.G., Kumke, C.J., Proceedings of the Seventh International Conference on Ground-Penetrating Radar, GPR'98, Lawrence, Kansas, May 27-30 (1998) pp. 601-605.
- [5] "Nebraska DOR Tests GPR to Find Bridge Corrosion", Narayanan, R.M., Hudson, S.G., Kumke, C.J., Beacham, M.W., Hall, D.D., Better Roads, Vol. 73, February (2003) pp. 70-73.
- [6] "Measuring layer thicknesses with GPR—Theory to practice.", Al-Qadi, Imad L., and S. Lahouar. Construction and building materials 19.10 (2005) pp. 763-772.
- [7] "Measurement radius of reinforcing steel bar in concrete using digital image GPR." , Chang, Che Way, Chen Hua Lin, and Hung Sheng Lien. Construction and Building Materials 23.2 (2009) pp. 1057-1063.