

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 開發透地雷達電磁波於混凝土與腐蝕鋼筋介面之非破壞性 檢測技術 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 98-2221-E-216-043-  
執行期間：98年08月01日至99年07月31日  
執行單位：中華大學土木工程學系

計畫主持人：張奇偉

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：盧駿朋  
博士班研究生-兼任助理人員：林鎮華

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，1年後可公開查詢

中華民國 99年10月07日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

## 開發透地雷達電磁波於混凝土與腐蝕鋼筋介面之非破壞性檢測技術

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 98-2221-E-216-043-

執行期間：98年8月1日至99年7月31日

執行機構及系所：中華大學土木與工程資訊學系

計畫主持人：張奇偉

共同主持人：

計畫參與人員：林鎮華、盧駿朋

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本計畫除繳交成果報告外，另須繳交以下出國心得報告：

赴國外出差或研習心得報告

赴大陸地區出差或研習心得報告

出席國際學術會議心得報告

國際合作研究計畫國外研究報告

處理方式：除列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年  二年後可公開查詢

中華民國 99 年 7 月 31 日

## 前言

台灣環境多屬於臨海區域或海洋性氣候，在高濕度與高腐蝕環境中對於鋼筋混凝土結構構件發生腐蝕現象機率極為顯著。而大多數有關鋼筋混凝土腐蝕檢測的方法皆採用半電池腐蝕電位或腐蝕電流量測鋼筋腐蝕的發生機率，腐蝕電位法主要是以電化學通路(參考電極，如銅、銀)及材料阻抗特性來評估混凝土內鋼筋腐蝕程度。而上述腐蝕檢測方法皆只能定性預測鋼筋腐蝕的機率，其檢測的過程中皆須將混凝土構件表面作局部的敲開破壞形成電化學通路完成檢測鋼筋腐蝕電位與腐蝕電流量測。本技術的開發，將可提供工程品質鑑定與評估的參考依據，並可有效改善電化學腐蝕電位法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。

## 研究目的

近年來國外透地雷達的專家學者相關研究以圖像比對、訊號處理、數值模擬、數位影像處理、半自動化分析以及電磁波波傳理論分析等方式來提高透地雷達剖面圖的判讀準確性。但對於混凝土內鋼筋腐蝕程度研判與分析技術也相當少見。因此，建立透地雷達非破壞性檢測技術於混凝土結構構件內鋼筋腐蝕程度辨識與定性或定量物理模式是有其研究價值與發展的需求。運用透地雷達的高穿透性與高解析度進行量測鋼筋腐蝕程度與訊號特徵擷取分析是可行的。在以不破壞鋼筋混凝土結構物材料、強度與結構體受二次傷害的前提下來評估混凝土結構構件內部鋼筋腐蝕及損傷程度。因此本研究將應用電磁波訊號特性與電磁波波傳行為之基本理論為基礎及數位影像編碼運算處理技術來建立透地雷達量測腐蝕鋼筋判讀準則。

## 文獻探討

國內外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<sup>[1-12]</sup>。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檢測方法，皆屬於定性的判定，而較少有定量的量測。

## 研究方法

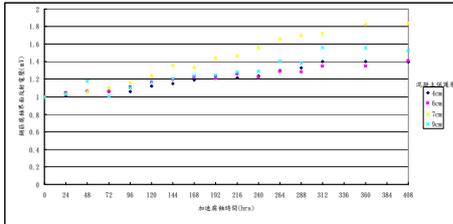
本研究應用透地雷達電磁波波傳理論與電磁特性建立電磁波於腐蝕鋼筋混凝土介面反射能量、振幅、波形、介電常數、阻抗等電磁波特徵參數之關係物理模式。實驗內容主要以不同水灰比、不同保護層深度、不同鋼筋號數混凝土試體等組合，並配合鋼筋加速腐蝕試驗與高頻透地雷達探頭(1<sup>GHz</sup>、2.3<sup>GHz</sup>)進行掃描。並以電磁波訊號特性與電磁波波傳行為之基本理論為基礎，並配合數位影像編碼運算技術，擷取腐蝕生成物之波譜軌跡與反射訊號特徵，建立混凝土內含不同鋼筋腐蝕程度的判讀準則。而一般檢測混凝土鋼筋腐蝕狀態皆採用半電池腐蝕電位與腐蝕電流來評估鋼筋發生腐蝕機率，其方法是利用電化學通路量測混凝土腐蝕鋼筋與參考電極之間電位差，再與 ASTM C876 標準及相關腐蝕標準進行預測，而此方法能夠定性的判定鋼筋發生腐蝕機率的高低，而無法定量的判別鋼筋腐蝕程度。

## 結果與討論

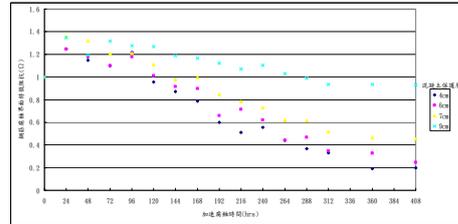
### 電磁波在不同腐蝕程度下之特徵參數

由電磁波在鋼筋腐蝕界面中的特徵參數與物理現象，將實驗所得之電磁波入射至不同混

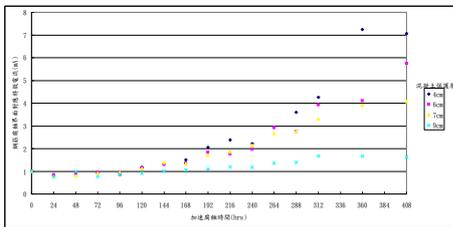
混凝土保護層厚度之鋼筋腐蝕界面的特徵參數進行正規化探討與分析。分析結果顯示，鋼筋腐蝕界面保護層越深阻抗越大，其反射電壓越大、對應特徵電流越小，如圖 1 所示；此現象表示，不同混凝土保護層厚度之鋼筋腐蝕界面物理現象一致。將不同保護層厚度/腐蝕程度的反射電壓、特徵阻抗、對應特徵電流等電磁性材料參數正規化後，可了解不同保護層厚度所反應鋼筋界面腐蝕現象是相同的。且反射電壓以正向斜率持續成長、特徵阻抗以負向斜率持續下降，而對應特徵電流為上述兩者比值，其結果以曲線持續變化，更能顯現出不同保護層厚度鋼筋界面腐蝕的對應特徵電流現象。



(a)不同保護層厚度/腐蝕程度/反射電壓



(b)不同保護層厚度/腐蝕程度/特徵阻抗

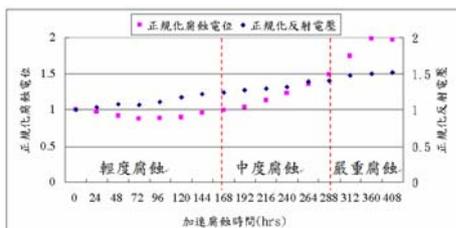


(c)不同保護層厚度/腐蝕程度/對應特徵電流

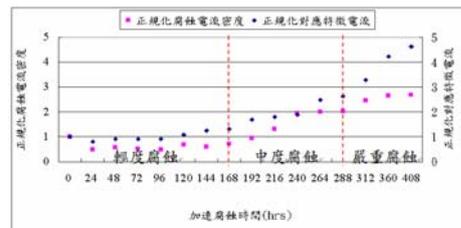
圖 1 鋼筋腐蝕界面的特徵參數正規化分析

### 電磁波特徵參數與鋼筋界面腐蝕程度

將電磁性材料參數與腐蝕電位/電流密度進行相對正規化，進行整體定性的鋼筋腐蝕程度比較，判定不同時間點所擷取鋼筋腐蝕界面特徵參數於輕度腐蝕、中度腐蝕至嚴重腐蝕階段的透地雷達電磁性材料參數範圍。由圖 2(a)界定電磁性材料參數的輕度/中度/嚴重腐蝕結果顯示，在 168 小時前以腐蝕電位量測結果會因鋼筋鈍態模影響腐蝕電位結果，而透地雷達反射電壓量測結果不受鋼筋鈍態模影響，可提早反應鋼筋腐蝕狀態。在圖 2(b)顯示 168 小時前以腐蝕電流密度量測鋼筋腐蝕速率會受鋼筋鈍態模的影響，而以透地雷達對應特徵電流所量測結果與腐蝕電流密度量測現象相似，但以透地雷達電磁波的對應特徵電流較電流密度來得靈敏，因對應特徵電流已在 96 小時後已顯示鋼筋腐蝕現象。在加速腐蝕時間 168 小時之後，鋼筋皆已達到中度腐蝕狀態、288 小時之後屬於嚴重腐蝕狀態。如果以整體鋼筋腐蝕現象來界定其電壓與電流範圍與電化學所量測結果比較，如表 1、表 2 所示。



(a)腐蝕電位與反射電壓範圍



(b)腐蝕電流密度與對應特徵電流範圍

圖 2 電磁材料參數之鋼筋腐蝕程度範圍

表 1 鋼筋腐蝕機率評估參考標準/反射電壓對照表

腐蝕狀態	保護層厚度	銅/硫酸銅 參考電極	透地雷達 反射電壓
低於 10%腐蝕機率	4 <sup>cm</sup> ~9 <sup>cm</sup>	>-200mV	0~79mV
10%~90%腐蝕機率	4 <sup>cm</sup> ~9 <sup>cm</sup>	-200~-350mV	79~148mV
高於 90%腐蝕機率	4 <sup>cm</sup> ~9 <sup>cm</sup>	<-350mV	>148mV

表 2 腐蝕電流密度對腐蝕速率評估參考標準/對應特徵電流對照表

腐蝕狀態	保護層厚度	腐蝕電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	對應特徵電流 (mA)
鈍態狀況	4 <sup>cm</sup> ~9 <sup>cm</sup>	$i_{\text{corr}} < 0.1$	$I < 0.06$
中低腐蝕速率	4 <sup>cm</sup> ~9 <sup>cm</sup>	$0.1 < i_{\text{corr}} < 0.5$	$0.06 < I < 0.15$
中高腐蝕速率	4 <sup>cm</sup> ~9 <sup>cm</sup>	$0.5 < i_{\text{corr}} < 1.0$	$0.15 < I < 0.58$
高腐蝕速率	4 <sup>cm</sup> ~9 <sup>cm</sup>	$i_{\text{corr}} > 1.0$	$I > 0.58$

## 結論

- 1.本研究以透地雷達電磁波入射於鋼筋腐蝕界面，在不同混凝土保護層厚度與腐蝕程度下的電磁性材料特徵參數量測，同時量測電化學腐蝕電位與腐蝕電流密度，進行混凝土內含鋼筋界面腐蝕物理現象的相關性比較，可判定電磁波的特徵參數(反射電壓、特徵阻抗、對應特徵電流)等，在鋼筋腐蝕界面輕度、中度、嚴重腐蝕的範圍。
- 2.本研究以透地雷達電磁波掃瞄混凝土內含鋼筋腐蝕界面之反射電壓較電化學半電池電位法之腐蝕電位較早量測到鋼筋腐蝕界面現象，而電磁波反射對應特徵電流參數較腐蝕電流密度較早量測到鋼筋腐蝕現象，此結果表示透地雷達電磁波在鋼筋腐蝕界面反射訊號特徵參數的靈敏度較腐蝕電位與電流密度來的靈敏。
- 3.數位化透地雷達健康檢測系統可不需局部敲開破壞混凝土構件表面，即可量測鋼筋界面腐蝕狀態。

## 建議

透地雷達電磁波特徵參數，可定性與界面特徵範圍解析鋼筋界面腐蝕程度，但還是無法定量表示腐蝕大小，若能建立電磁波入射鋼筋界面腐蝕中的電磁場物理量特徵與電化學腐蝕電位與電流密度相關式，將可提高透地雷達電磁波特徵參數量測鋼筋腐蝕的準確性。

## 參考文獻

- [1]. Narayanan, R.M., Hudson, S.G., Kumke, C.J., "Detection of rebar corrosion in bridge decks using statistical variance of radar reflected pulses," Proceedings of the Seventh International Conference on Ground-Penetrating Radar, GPR'98, Lawrence, Kansas, May 27-30 1998.
- [2]. L. Barnes.; Jean-Francois Trottier., "Ground-Penetrating Radar for Network-Level Concrete Deck Repair Management", Journal of Transportation Engineering, Volume 126, Issue 3, pp. 257-262, 2000.

- [3]. Huston, D., Pelczarski, N., Esser, B., Maser, K., Weedon, W., “Damage assessment in roadways with Ground Penetrating Radar”, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, v 3995, 2000, p 483-491.
- [4]. Narayanan, R.M., Hudson, S.G., Kumke, C.J., Beacham, M.W., Hall, D.D., “Nebraska DOR Tests GPR to Find Bridge Corrosion,” Better Roads, Vol. 73, pp. 70-73, February 2003.
- [5]. I.L. AL-Qadi, S. Lahouar, “Measuring layer thicknesses with GPR – Theory to practice”, Construction and Building Materials 19, 2005.
- [6]. Jamal Rhazi., “A NEW APPLICATION OF THE GPR TECHNIQUE TO REINFORCED CONCRETE BRIDGE DECKS”, 4th Middle East NDT Conference and Exhibition, Kingdom of Bahrain, 2007.
- [7]. Jamal Rhazi., “CONDITION ASSESSMENT OF EXISTING CONCRETE BRIDGE DECKS: THE GPR VERSUS THE HALF-CELL POTENTIAL”, Université de Sherbrooke, Department of Civil Engineering, 2007.
- [8]. 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。
- [9]. Barnes, C.L., Trottier, J.F., Forgeron, D. “Improved concrete bridge deck evaluation using GPR by accounting for signal depth-amplitude effects”, NDT and E International, v 41, n6, September, 2008, p 427-433.
- [10]. 張奇偉，陳炳煌，林鎮華，「透地雷達法於橋梁鋼筋腐蝕非破壞性檢測之應用」，土木水利期刊，第五期，第三十五卷，2008。
- [11]. Chang, C.W., Chen, P.H., “Investigation The Behaviors of Ferroconcrete by Ground Penetrating Radar” , Chung Hua University Doctor of Engineering in Civil Engineering and Engineering Informatics, July 2009, Hsinchu, Taiwan, Republic of China.
- [12]. Romero; Gucunski; Kruschwitz; Feldmann; Rascoe; Parvardeh; Anderson., “Multiple NDE Technologies for Condition Assessment of Bridge Decks”, Technical Presentations, 2009.

無研發成果推廣資料

98 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：張奇偉		計畫編號：98-2221-E-216-043-					
計畫名稱：開發透地雷達電磁波於混凝土與腐蝕鋼筋介面之非破壞性檢測技術							
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	2	0	100%		
		研討會論文	3	0	100%		
		專書	2	0	100%		
	專利	申請中件數	1	2	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	1	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	2	0	100%	人次	
		博士生	1	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	1	1	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	1	0	100%		
		專書	0	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果</p> <p>(無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>1. 已在國內外之國際性研討論以及相關土木工程實際驗證及相關論文期刊發表成果。</p> <p>2. 在國內 99 年 9 月 24 日、25 日承辦海峽兩岸第十屆破壞科學研討會。</p> <p>3. 研究成果獲得 2010 台北國際發明展金牌獎。</p>
---	--

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科教處計畫加填項目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	



# 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表  未發表之文稿  撰寫中  無

專利： 已獲得  申請中  無

技轉： 已技轉  洽談中  無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

透地雷達電磁波入射於鋼筋腐蝕界面，在不同混凝土保護層厚度與腐蝕程度下的電磁性材料特徵參數量測，同時量測電化學腐蝕電位與腐蝕電流密度，進行混凝土內含鋼筋界面腐蝕物理現象的相關性比較，可判定電磁波的特徵參數（反射電壓、對應特徵電流）等，在鋼筋腐蝕界面輕度、中度、嚴重腐蝕的範圍之研究成果。而研究價值與影響為開發透地雷達電磁波特徵參數於鋼筋腐蝕界面量測技術，不須破壞混凝土表面進行不同混凝土保護層深度下，鋼筋腐蝕程度量測，可進行整體混凝土斷面內鋼筋腐蝕的分佈；若以電化學方式進行量測，只能進行局部量測，且需局部敲除混凝土表面至鋼筋上緣（屬於半破壞方式），有此可知，以透地雷達鋼筋腐蝕的施測效率與範圍較電化學腐蝕電位/電流法量測快速及簡便。此鋼筋腐蝕非破壞檢測技術開發改善電化學量測缺點與提昇檢測效率，其後續發展可將電化學論理與電磁波波傳理論（麥斯威爾方程）進行相對理論或腐蝕層量測技術之方法。