

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 應用透地雷達電磁波於混凝土強度品質鑑定技術之開發 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 97-2221-E-216-016-  
執行期間：97年08月01日至98年07月31日  
執行單位：中華大學土木與工程資訊學系

計畫主持人：張奇偉

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，2年後可公開查詢

中華民國 98年09月30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

應用透地雷達電磁波於混凝土強度品質鑑定技術之開發

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 97-2221-E-216-016

執行期間：97年8月1日至98年7月31日

計畫主持人：張奇偉

共同主持人：

計畫參與人員：林鎮華、連泓勝

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

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、  
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

執行單位：中華大學土木與工程資訊學系

中華民國 98 年 7 月 31 日

## 前言

台灣經過數十年的經濟發展及開發建設，許多老舊與新建公共工程混凝土結構經過幾次重大地震及自然災害後，結構安全的問題逐一浮現，此時許多橋樑、房屋面臨是否能夠繼續安全使用的問題？就以目前傳統破壞性檢測方法會損傷原設計強度與完整性，而如何檢驗混凝土結構構件之工程品質與強度鑑定，且又不破壞其原設計強度與結構行為之原則下。則仰賴工程上常用的非破壞性檢測方法，包括透地雷達法、磁感應法、超音波檢測法、敲擊回音法、衝擊錘檢測法及紅外線影像法等，分別應用在土木工程相關的領域上。而每種非破壞檢測技術都有其優缺點，須根據其檢測對象、環境特性及需求下檢測結構物，並搭配不同檢測儀器來取得混凝土結構構件內部的訊息，並利用這些物理量來做進一步的研究與評估。因此，近年來非破壞性檢測技術在工程業界逐漸被國人所重視，並成為許多橋樑、房屋結構構件檢驗查核工程品質與鑑定其混凝土強度是否能夠繼續使用的主要評估技術。

## 研究目的

本研究採用透地雷達電磁波頻率為1GHz 天線探頭進行檢測實驗，其特點為高解析度、高穿透能力，且具有施測快速、操作方便等優點，符合土木工程非破壞性檢測需求。本研究是利用電磁波入射到介質材料(新鮮混凝土/硬化混凝土)產生全反射或部分反射之物理現象，將接收反射訊號進行數位影像編碼運算處理後，分析其介電常數、功率反射係數、能量振幅之變異性，來分析混凝土初凝前(0~10)小時及養護過程28 天材料特性，如強度、齡期、水灰比、骨材性質等參數變化。經由上述物理參數來建立透地雷達量測混凝土強度之檢測技術，同時建立不同水灰比及不同時間下之混凝土抗壓強度與電性材料之相對介電常數關係。此技術建立，將可評估混凝土初凝前與養護過程中混凝土強度變化，且立即成效將比其他非破壞性等相關檢測技術來得顯著。

## 文獻探討

國內應用透地雷達電磁波研究混凝土材料之電性參數與工程品質鑑定相關的學者，學者張奇偉以透地雷達探討混凝土構件內含不同齡期、不同介電性質材料及不同保護層深度之電磁波波傳行為，並運用數位影像編碼運算分析其反射訊號能量、反射係數、反射功率等物理特性[1-2]。學者張達德探討混凝土耐久性與安全性的評估，透過各種非破壞檢測技術分析混凝土損傷對耐久性之影響，以及各種現地檢測方法之特性與檢測範圍進行深入的評估說明，並藉由案例中受震後新澆置混凝土結構，透過現地檢測所得之結果與分析，結合各種檢測技術，最後提出鋼筋混凝土結構物[3]。學者黃玉華應用探地雷達量測混凝土強度檢測上的應用，分析混凝土相對介電常數與混凝土齡期、含水量、水灰比、砂率及粗骨料等因素，發現透過相對介電常數的測定值，可以定性判定混凝土強度大致範圍[4]。而國外透地雷達的專家學者對於混凝土強度檢測技術的相關研究也相當少。採用電磁波波傳行為與反射訊號特徵與混凝土強度相關研究，如學者Shroff應用遙測、紅外線及透地雷達技術評估橋梁結構，由鑽心取樣結果比對非破壞性檢測結果，其結果顯示紅外線與透地雷達檢測現象與實際鑽心取樣結果相吻合。將原設計之混凝土強度與28天之混凝土抗壓試體進行混凝土強度品質量測與比較探討[5]。學者S.Laurens採用1.5 GHz雷達天線量測混凝土板內含不同程度含水量，並將反射訊號所記錄之振幅、速度、反應譜、波形等資訊進行探討。同時，研究混凝土在不同含水量之電磁波反射訊號變化會導致混凝土電磁屬性的改變，並針對混凝土水化過程中之反射振幅變化程度進行探討。而應用透地雷達電磁波量測混凝土溼度變化，可判定透地雷達檢測時混凝土溼氣減少時的影響[6,7]。學者I.L. AL-Qadi應用反射係數法量測路面各介質層之介電常數，經透地雷達反射訊號擷取，並計算其相對介電常數。其結果顯示在不同粗、細級配之路面層的厚度計算，會得到較準確的結果；相對的，路面層越薄，其結果誤差較大[8]。學者Snyder及Wesley提出三維影像演算法，以雙偶極天線基本電磁散射訊號波形與波速、振幅特徵進行研究，並以實驗結果所得影像屬性與不同

測量方式進行探討;並應用透地雷達影像變化程度來判斷管線可能的位置,並以貝氏演算法則重建透地雷達剖面圖初始物件形狀之探討[9,10]。學者R.Yelf主要探討透地雷達剖面圖在不同環境條件下,反射訊號歸零位置與適用範圍[11]。學者Lampe應用時間域有限差分法分析空氣、土壤與微小尺度異介質材料屬性,以透地雷達反射訊號特性的描述,如頻帶脈衝、圖樣、阻抗、導磁率等參數。這些異介質反射特徵是一種不規則幾何波動參數[12]。學者Ivashov, S. I. 應用雷達高解析影像圖分析建築結構內部構件及缺陷狀態,並評估其建築結構之混凝土強度是否能繼續使用與進行修復補強探討[13]。學者Shaw, M. R. 應用透地雷達頻譜透視混凝土結構內之介電常數與導電率變化程度,並以傳輸線方式進行掃瞄,其探測頻率最大為1GHz,探測其混凝土結構狀態並由頻域反射訊號進行分析,同時進行標準混凝土測試在高含水量與養護後之雷達訊號形狀變化可評估混凝土強度差異性[14]。學者M. Bernabini探討透地雷達於不同地質材料反射訊號與波形現象,並根據理論估計和數字類比訊號進行電磁波傳播特性探討[15]。學者Saarenketo應用透地雷達量測骨材孔隙含水量,在夯實試驗中使空氣含量減少時,相對介電常數或密度會降低,由相對介電常數之變化可判定空氣含量變化[16]。學者M. Jr. Beres應用介電常數差異探討地下水位置研究,因水的介電常數較高,大約在80左右,有別於乾砂介電常數約為4及黏土介電常數5~40,應用其介電常數差異性來評估地下水位置之探測[17]。由上述中可瞭解目前國內外透地雷達量測混凝土強度之檢測技術相關研究較少非破壞性,因此進行開發透地雷達於混凝土強度之檢測技術是有相當研究空間與價值。

## 研究方法

本研究應用透地雷達電磁波檢測技術,針對混凝土試體進行電磁波掃瞄量測,以數位影像編碼運算擷取技術轉換透地雷達剖面圖之類比訊號波譜圖為數位編碼圖再擷取純混凝土介質材料層之反射訊號特徵與波傳現象。將電磁波入射在不同水灰比之混凝土試體中之電磁波在混凝土介質傳播時,根據電磁波波動理論可描述電磁波在混凝土介質中傳播速度為 $V=C/\sqrt{\epsilon}$ ,其中 $\epsilon$ 為相對介電常數、 $C$ 為光速。由上述公式關係,可推導出混凝土結構構件厚度 $D$ ,其傳遞速度 $V$ 與相對介電常數之關係為 $D=C/\sqrt{\epsilon} * \Delta T/2$ ,其中 $\Delta T$ 為電磁波在不同混凝土強度中所傳波的時間差,藉此瞭解電磁波波傳與混凝土介電常數之間基本關係。由於混凝土材料內含水之多寡會影響電磁屬性,因此,新鮮混凝土為半固態之材料時,其介電常數與硬固混凝土有相當大的差異。因應力波傳導進入半固態與硬化混凝土材料較難以波速差異作波傳行為的探討,但是電磁波因其介電常數的差異性很大,其反射波訊號與振幅在半固態與硬化混凝土就有明顯的不同,經由反射訊號能量、時間差、波形、頻譜特性等參數,採用高頻電磁波特性評估混凝土品質與強度是相當可行的。在不同水灰比(0.4~0.7)於不同養護齡期下(1天、5天、7天、14天、21天、28天),經由透地雷達電磁波掃瞄擷取反射訊號,建立混凝土不同強度、齡期、水灰比等混凝土強度變化與相對介電常數關係,如圖1所示。藉由電磁波波動理論及數位影像編碼擷取技術來開發透地雷達量測混凝土強度之檢測技術。

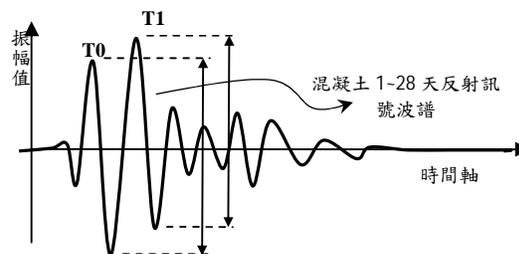


圖 1 電磁波反射訊號波譜圖

## 結果與討論

不同水灰比(0.4、0.5、0.6、0.7)之混凝土反射訊號探討電磁波反射能量與傳播速度差異

性，其混凝土齡期與介電常數關係，如圖 2 所示。

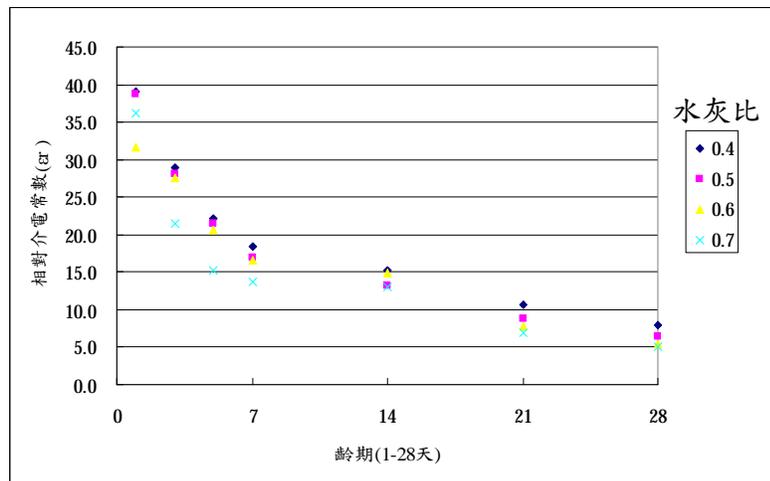


圖 2 不同混凝土齡期與相對介電常數關係圖

由圖 2 結果顯示，隨著混凝土養護時間增加，其相對介電常數也隨之下降。其水灰比 (0.4、0.5、0.6、0.7) 相對於電磁材料參數結果，如表 1 所示。

表 1 不同齡期/水灰比與相對介電常數

水灰比 養護時間	0.4/(ε <sub>r</sub> )	0.5/(ε <sub>r</sub> )	0.6/(ε <sub>r</sub> )	0.7/(ε <sub>r</sub> )
1 天	39.0	38.7	31.7	36.2
3 天	28.9	28.1	27.5	21.4
5 天	22.1	21.4	20.7	15.3
7 天	18.4	16.9	16.5	13.7
14 天	15.3	13.1	14.9	13.0
21 天	10.7	8.7	7.7	6.9
28 天	8.0	6.4	5.4	5.0

由透地雷達電磁波進入混凝土介質材料層之反射訊號擷取反射電磁波速度、時間差與已知混凝土試體厚度來計算混凝土相對介電常數差異，再與標準圓柱試體抗壓結果進行比較，藉此瞭解混凝土抗壓強度與相對介電常數關係，如圖 3 所示。

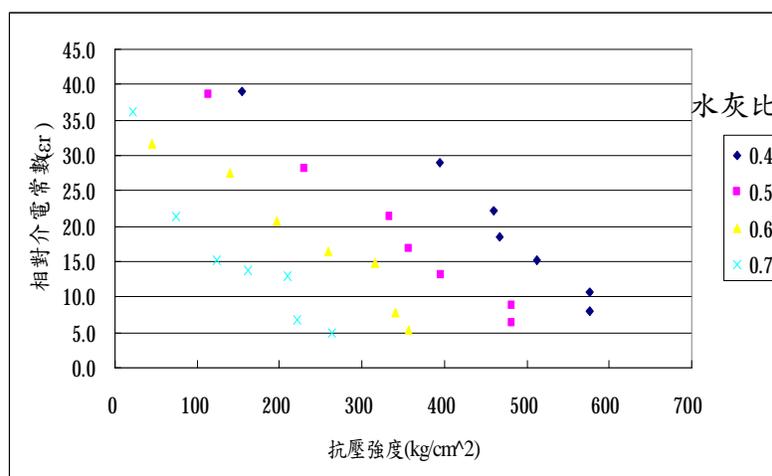


圖 3 混凝土強度與介電常數關係

由圖 3 結果顯示，混凝土 1~28 天之混凝土抗壓強度增加，其相對介電常數也隨之下降。其水灰比(0.4、0.5、0.6、0.7)相對於混凝土抗壓強度與相對介電常數結果，如表 2 所示。

表 2 混凝土抗壓強度與相對介電常數

水灰比	0.4		0.5		0.6		0.7	
	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	相對介電常數 ( $\epsilon_r$ )	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	相對介電常數 ( $\epsilon_r$ )	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	相對介電常數 ( $\epsilon_r$ )	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	相對介電常數 ( $\epsilon_r$ )
1 天	154	39.0	113	38.7	45	31.7	21	36.2
3 天	395	28.9	230	28.1	140	27.5	75	21.4
5 天	460	22.1	333	21.4	196	20.7	123	15.3
7 天	467	18.4	356	16.9	260	16.5	161	13.7
14 天	512	15.3	396	13.1	315	14.9	209	13.0
21 天	577	10.7	482	8.7	341	7.7	221	6.9
28 天	576	8.0	482	6.4	357	5.4	263	5.0

## 結論

透地雷達電磁波入射到不同水灰比、不同齡期之混凝土材料其相對介電常數與混凝土抗壓強度關係，可定性或定量出不同混凝土強度的反射行為。本研究之混凝土強度量測技術開發可由電磁波於不同電性材料(1~28 天內，在不同強度混凝土)之介質材料所反應出來的電磁材料屬性(相對介電常數)混凝土強度。

## 建議

目前研究成果較偏於理想化(純混凝土抗壓強度預測)，若能建立 1~28 天不同水灰比之混凝土內含不同鋼筋、管線或損傷之形態，使此實驗之預測模型更接近實際狀況，以利於此技術發展的完整性。其成效將提升整個鋼筋混凝土結構之健康檢測系統準確性與普遍性。

## 參考文獻

- [1] 張奇偉、林鎮華，「透地雷達電磁波於混凝土內含不同介質材料之電性參數探討」，中華建築學刊，2007。
- [2] 張奇偉、林鎮華，「透地雷達於混凝土內含不同(保護層/間距/尺寸/齡期)鋼筋數位編碼訊號之探討」，第八屆結構工程研討會，2006。
- [3] 張達德、龔永健，「受震後新築混凝土現地檢測技術評估與案例探討」，中原大學土木工程研究所碩士論文，2006。
- [4] 黃玉華、李超，「用探地雷達法評估混凝土強度」，國外建材科技，第 26 卷，第 2 期，2005。
- [5] Shroff, A.C, “Remote sensing techniques for bridge deck evaluation” , Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Management, pp. 628-637, 2005.
- [6] S. Laurens, J.-P. Balayssac, J. Rhazi, G. Klysz, G. Arliguie, “Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modeling” , Materials and Structures, 2005.
- [7] S. Laurens, J.-P. Balayssac, J. Rhazi, G. Arliguie, ” Influence of concrete relative humidity on the amplitude of Ground-Penetrating Radar (GPR) signal” , Materials and Structures, Vol. 35, no. 248, pp.198-203, 2002.
- [8] I.L. AL-Qadi, S. Lahouar, “Measuring layer thicknesses with GPR – Theory to practice” , Construction and Building Materials 19, 2005.
- [9] Snyder, Wesley, Snyder, Wesley, ” Three-dimensional imaging of multi-component ground-penetrating radar data” , 2004.
- [10] Snyder, Wesley, Bernold, Leonhard, “Reconstruction of ground-penetrating radar images using techniques based on optimization” , 2004.
- [11] R.Yelf, ” Where is True Time Zero ?” , Proceedings of the Tenth International Conference Ground Penetrating Radar, GPR 2004, v 1, p 279-282, 2004.

- [12] Lampe, Bernhard, "Finite-difference time-domain modeling of ground-penetrating radar antenna systems", 2003.
- [13] Ivashov, S.I, Makarenkov, V.I, "Concrete floor inspection with help of subsurface radar", Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, v 4084, pp.552-555, 2000.
- [14] Shaw, M.R, "Permittivity and conductivity of concretes at ground-penetrating radar frequencies", Advances in Cement Research, v 10, n 4, pp.187-194, 1998.
- [15] M. Bernabini, E. Pettinelli, N. Pierdicca, S. Piro, L. Versino. "Field experiments for characterization of GPR antenna and pulse propagation", Journal of Applied Geophysics Vol.33, pp.63-76, 1995.
- [16] Scullion, T. and Saarenketo, T. "Using suction and dielectric measurements as performance indicators for aggregate base materials", Transportation Research Board Record 1577, pp. 37-44, 1997.
- [17] M.Jr, Beres, F.P, Haeni, "Application of Ground-Penetrating-Radar Methods in Hydrogeologic Studies" GroundWater, Vol.29,NO.3, pp.375-386, 1991.

### 計畫成果自評

應用非破壞性的透地雷達檢測技術應用於 1~28 天混凝土抗壓強度預測之可行性相當高，若能整合透地雷達的訊號處理以及數位影像處理，將可準確評估混凝土結構構件內之材料品質、損傷、尺寸大小等缺陷，必能節省大量的檢測成本與維修經費，對整個建築結構與公共工程品質提升，增加不可預計的安全保障。由本研究發展混凝土強度預測型模之研究成果相當良好。而此項技術的開發也能夠做為日後維修、補強與重建提供科學與量化的數據，更由於本項技術的開發可帶動透地雷達非破壞性技術的應用與推廣。藉此研究可將介質材料反射訊號數位化後，進行非圖像比對外的判讀方法外；更可瞭解各類新興建設與舊有公共工程及混凝土結構內部構件狀況，如鋼筋、管線、裂縫、孔洞、腐蝕等缺陷分佈。

## 可供推廣之研發成果資料表

 可申請專利 可技術移轉

日期：98年7月31日

<b>國科會補助計畫</b>	計畫名稱：應用透地雷達電磁波於混凝土強度品質鑑定技術之開發 計畫主持人：張奇偉 計畫編號：NSC 97-2221-E-216-016 學門領域：E0901
<b>技術/創作名稱</b>	透地雷達電磁波檢測混凝土強度技術
<b>發明人/創作人</b>	張奇偉、林鎮華
<b>技術說明</b>	<p>中文：</p> <p>本研究運用電磁波遇到不同介電常數材料時會產生反射和折射現象，由於混凝土材料內含水之多寡會影響電磁屬性，因此，新鮮混凝土為半固態之材料時，其介電常數與硬固混凝土有相當大的差異，而一般的應力波傳導進入半固態與硬化混凝土材料較難以波速上作波傳行為的探討，但是電磁波因其介電常數的差異性很大，其反射波訊號與振幅就有明顯的不同，經由反射訊號能量、時間差、波形、頻譜特性等參數，採用高頻電磁波特性來預測與評估混凝土品質與強度是相當可行的。本研究所進行之實驗，採用高頻電磁波來擷取混凝土初凝前(0~10)小時及養護過程1天至28天不同時間點之反射訊號與不同養護時間之抗壓強度，利用電磁波反射訊號能量、時間差、波形、頻譜特性等參數來解析相關訊號特徵，由這些物理量參數來建立透地雷達電磁波與混凝土強度之相對應關係，同時建立不同水灰比及不同養護時間下之混凝土抗壓強度與電性材料之相對介電常數關係。此技術建立，將可評估混凝土初凝前與養護過程中混凝土強度變化，且立即成效將比由應力波、波速或能量消滅等相關檢測技術來得顯著。藉此開發量測混凝土強度新檢測技術，由新混凝土強度檢測技術結果，可提供檢驗查核工程品質鑑定與評估參考依據。</p>

	<p>英文：</p> <p>Ground penetrating radar (GPR) Technology has been used to assess structural performance for the past twenty year in a variety of ways. The increasing demand for ground penetrating radar a non-destructive subsurface detection Ground penetrating radar is one of significant technology for locating embedded targets in concrete. GPR non-destructive method allows a reliable and efficient inspection of the reinforced concrete structural integrity. In recently, is becoming critically important to define the size, depth, and material strength of buried objects. The degree of accuracy with which strength of concrete can be defined is one of the major considerations for GPR measurement. In general, GPR utilizes the vector characteristics of the electromagnetic field in the time domain and retrieves a sequence of traces representing the reflected waves. These traces are stacked and processed to obtain a radar gram. As we know the GPR signatures of rebar in reinforced concrete is characterized by different parameters, most notably the depth concrete coverage relative permittivity, dielectric constant, diameter of the rebar, as well as the of the concrete surrounding of the rebar. The other significant issue is GPR data pre-processing before making assessment. Unfortunate this step is one of the major obstacles in developing the final GPR radar gram. However, ground penetrating radar is one of these methods that have recently gained a wide acceptance in the civil infrastructure.</p>
<p>可利用之產業 及 可開發之產品</p>	<p>可利用之產業及可開發之產品：</p> <p>目前一般業界對於透地雷達法於工程應用範圍如下所示：</p> <p><b>結構方面</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 鋼筋混凝土結構內部檢測(鋼筋、腐蝕、裂縫、管線、孔洞等定位...)</li> <li>2. 橋梁結構體之檢測(橋墩、柱、梁、基礎...)</li> <li>3. 隧道結構主體檢測(襯砌、裂損、接頭、裂縫的滲漏水質...)</li> <li>4. 堤岸結構內部檢測(鋼筋腐蝕、土層掏空...)</li> <li>5. 水壩壩體結構之檢測(壩心材料及其內部材料掏空處或裂隙之偵測)</li> </ol> <p><b>大地方面</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 地下埋設物或其它之調查(管線、沉陷、孔洞...)</li> <li>2. 淺地層探測(土壤或土層構造之探測)</li> <li>3. 地下岩盤之偵測(定位與探測岩盤中斷層)</li> <li>4. 地下水位評估(深度及水份變化)</li> <li>5. 冰層厚度量測</li> <li>6. 礦場之探測</li> <li>7. 河床、湖底之地形描繪</li> </ol> <p><b>交通運輸方面</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 道路品質之調查(材料、鋪面厚度量測、空洞、孔穴...)</li> <li>2. 機場跑道路基檢測</li> <li>3. 隧道中岩體之檢測</li> <li>4. 襯砌或基礎背面掏空檢測</li> </ol> <p><b>環境保護方面</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 地下油槽定位</li> </ol>

	<p>2. 地下污染擴散範圍偵測 3. 管線滲漏偵測 4. 油槽漏油偵測 5. 受鹽害影響之土壤的探測</p> <p><b>農業方面</b> 1. 表土特徵分析 2. 腐植土(泥炭土)的調查</p> <p><b>軍事方面</b> 地下掩體探測</p> <p><b>考古方面</b> 古蹟遺址探測</p> <p>可開發之方向與產品 本檢測系統可開發之產品有:鋼筋混凝土結構構件品質與強度判定,並整合相關透地雷達檢測技術之方法,以達成快速便利之結構安全健康檢測系統,以利於老舊、劣化結構物之殘餘壽命評估之參考依據。</p>
<p><b>技術特點</b></p>	<p>此透地雷達電磁波於混凝土強度品質鑑定技術之開發,是以電磁波波傳理論與訊號特徵辨識與數位影像編碼運算處理技術結合,以達成預測混凝土於1天至28天不同養護過程時間之電磁波反射訊號與不同養護時間之抗壓強度之關係,藉此瞭解各類新興建設與舊有公共工程及混凝土結構內部構件品質與強度狀況。</p>
<p><b>推廣及運用的價值</b></p>	<p>對於公共工程的建設與一般的民生基礎建設,應用非破壞性檢測技術來進行結構物的安全性、耐久性與功能性的評估,對於人民的聲明財產將有莫大的幫助。而在近年來,應用非破壞性的透地雷達檢測技術進行地下管線的定位、結構物的損傷檢測,以證明該技術應用於土木工程之可行性非常高,若能夠整合透地雷達反射訊號處理以及影像處理,將可準確地將待測物所須資料判讀,必能節省大量的檢測與維修經費,對整個社會帶來的安全保障更是不可計數。同時,此項技術的開發也能夠為日後維修、補強與重建提供科學與量化的數據,且本項技術的開發可帶動透地雷達非破壞性技術的應用與推廣,同時也對數位影像編碼運算處理的基本理論實際應用於實務上,更可對實際的透地雷達檢測提供更強而有力的驗證與理論支持。</p>

※ 1. 每項研發成果請填寫一式二份,一份隨成果報告送繳本會,一份送 貴單位研發成果推廣單位(如技術移轉中心)。

※ 2. 本項研發成果若尚未申請專利,請勿揭露可申請專利之主要內容。

※ 3. 本表若不敷使用,請自行影印使用。