

行政院國家科學委員會專題計畫成果報告

透地雷達於鋼筋保護層厚度及間距之應用

Application of GPR on Spacing and Depth Detection of Steel Bar in Concrete

計畫編號：NSC88-2625-Z-002-011

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：郭茂坤 國立台灣大學應用力學研究所

一、中文摘要：

透地雷達(Ground Penetrating Radar; GPR)可在極短的時間內，得到大量且詳細的物體內部資料，因此十分適合大型土木結構，如：橋樑、道路等之非破壞檢測。透地雷達非破壞檢測技術包含：(1) 電磁波理論計算與分析、(2) 電磁波量測技術、(3) 訊號處理及判讀、(4) 實際應用、(5) 電磁波傳反算方法等五大部分。本計畫利用時域有限差分(Finite Difference Time Domain)來模擬電磁波在鋼筋混凝土結構物的波傳行為，針對鋼筋在混凝土中之保護層厚度及間距，進行三維時間域電磁波理論計算、分析與大型試體實驗，期能改進目前透地雷達技術，進一步擴展透地雷達功能。

關鍵詞：透地雷達、非破壞檢測、正算模擬

Abstract

The NonDestructive Evaluation (NDE) can be used to ensure the quality of new-constructed structures, to evaluate the residual life of damaged structures, and to monitor the safety of infrastructures. Ground Penetrating Radar (GPR) can quickly obtain lots of detail information of the body, so it is very suitable for the NDE of large scale of infrastructures

such as bridges and highway. The NDE techniques of GPR include: (1) simulation and modeling of the propagation of electromagnetic waves; (2) the measurement techniques of electromagnetic waves; (3) the signal processing and judgment; (4) the real application; and (5) the inversion formulation of the propagation of electromagnetic waves. The principle objective of this project, based on the method of Finite Difference Time Domain (FDTD), is to analyze three-dimensional time domain electromagnetic wave propagation, and to perform the measurements. Hopefully, it can build the foundation of GPR's measurement techniques on reinforced concrete and explores the further ability of GPR.

Keywords: Ground Penetrating Radar; GPR, NonDestructive Evaluation, Forward modeling,

二、緣由與目的：

近年來透地雷達，探討物體內部在近表面處的情況上，有極大的進展。透地雷達最大的特點是：可在極短的時間內，得到極大量且詳細的物體內部近表面處大範圍的影像，此特性是傳統的超音波，或傳統的暫態彈

性波等方法，所無法比擬的。透地雷達在地質學、考古學以及土木工程上已有很多應用：

1. 土壤、岩層、道路鋪面的深度、厚度以及特性 [1]；
2. 地下儲槽、地下渠溝、地下廢棄物或污染物的定位 [2]；
3. 飛機跑道、水壩、基礎等結構物內部空洞的偵測 [3]。

本計畫，以 87 年度主持人執行之計畫（透地雷達在鋼筋混凝土結構非破壞檢測之應用，NSC 87-2211-E-002-012）所發展的二維時間域電磁波傳播有限差分為基礎，針對鋼筋在混凝土中之保護層厚度及間距，進行三維時間域電磁波理論計算、分析與大型試體實驗，期能改進目前透地雷達技術，進一步擴展透地雷達功能。

三、研究方法：

透地雷達的訊號分析，主要利用平面電磁波，在簡單幾何界面上反射、折射等現象，可用簡單理論公式描述的特性，並配合傳統的地球物理分析方法（如：反射法、移位法等）來進行；然而透地雷達在土木結構非破壞檢測的研究與應用時，遭遇了複雜幾何外形，以及內部複雜幾何形狀界面（如鋼筋、空洞、裂縫）等，這些界面所引致之繞射現象，須由較複雜的電磁波繞射理論來分析。

電磁波傳播的理論，與彈性波的理論有很多類似相通之處。彈性波在物體內變化的控制方程式為 Navier 方程式，

$$\sigma_{ij,j} + f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

式中， σ_{ij} 以及 u_i 分別為物體內的應力張量以及位移向量，而 f_i 以及 ρ 則為微

體力以及質量密度。而電磁波在物體內的變化，其控制方程式則為 Maxwell 方程式

$$-\nabla \times H + J + \partial_t D = -J_e \quad (2)$$

$$\nabla \times E + \partial_t B = 0 \quad (3)$$

式中， E 及 H 分別為電場及磁場強度， D 及 B 分別為電通勢密度及磁通勢密度， J 及 J_e 則分別為電流密度以及外電流源。在彈性波中，Navier 方程式內 σ_{ij} 以及 u_i 可藉由物體的組成方程式來關連。在電磁波中，Maxwell 方程式內 J, D, B 與 E, H 亦可透過類似的組成方程式來關連。彈性波傳播與電磁波傳播，有很大的相似性。

電磁波在物體內的傳播、反射、繞射等現象，數十年來已有很多的研究，近二、三十年來，更進一步考慮物體內部消散性對電磁波傳播的影響 [4]。然而大部分積分方程的方法，往往只能用於 contrasts 小的情況，當 contrasts 大時，大部分的積分方程法，均有收斂性的問題 [5]。由於鋼筋混凝土結構內部的複雜性，電磁波在鋼筋混凝土結構內的波傳，一般而言並無解析解，因此為能考慮實際情況，本計畫直接以時間域有限差分法來分析透地雷達中電磁波的波傳行為，期能與實驗訊號相比較，進而改進訊號的判讀與分析。

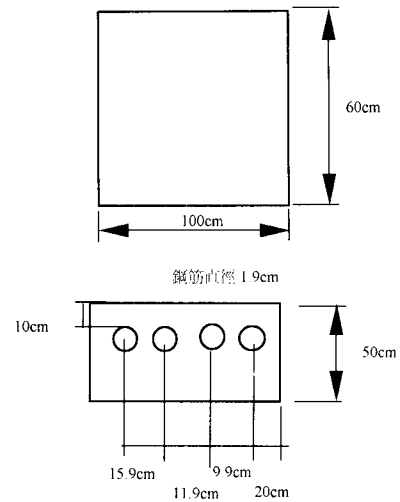
四、研究成果與結論：

本年度之計畫以三維大型試體進行理論與實驗分析，發展透地雷達於工程界之實際應用。其中，在 6 號鋼筋不等間距與垂直間距的透地雷達實驗中（示意圖分別為圖一、三），所得實驗描線圖（圖二）與影像圖（圖四）可發現電磁波繞射鋼筋回來的訊號形

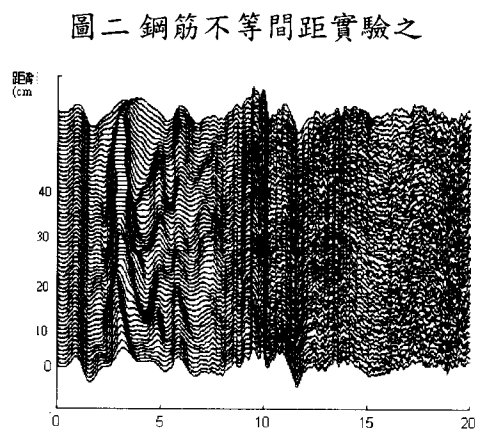
式為雙曲線圖形，與數值模擬吻合。在一般鋼筋混凝土結構物中（如樓板），都是鋼筋與鋼筋物相交錯並排著，分辨鋼筋間距為工程中重要的課題之一。同時，本計畫亦就鋼筋深度、波速、以及鋼筋尺寸進行量測分析，結果如表一～四，有著不錯的結果。

五、文獻參考

- [1] R. Maser, Ground penetrating radar studies to characterize pavement layer thickness variations at GPS sites, Strategic Highway Research Program, Report SHRP-P-397, Washington, D. C. 1994.
- [2] D. Goodman, Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology, Geophysics, 59, 224-232, 1994.
- [3] K. Park, T. Uomoto and M. Yoshizawa, Nondestructive test for concrete structures using radar (1) & (2), Journal of Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 47, 1995.
- [4] E. C. Slob and P.M. van den Berg, A new integral equation method for solving transient diffusive electromagnetic scattering problem, Symposium of 3D/E held at Ridgefield, CT, USA, 1995.
- [5] W. E. Wannamaker, G. W. Hohmann and W. A. SanFilipo, Electromagnetic modeling of three dimensional bodies in layered earths using integral equations, Geophysics, 49, 60-74, 1984.

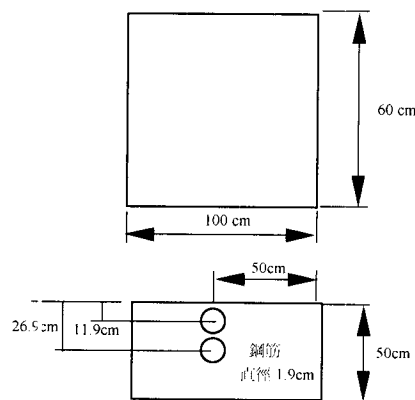


圖一 鋼筋不等間距示意圖

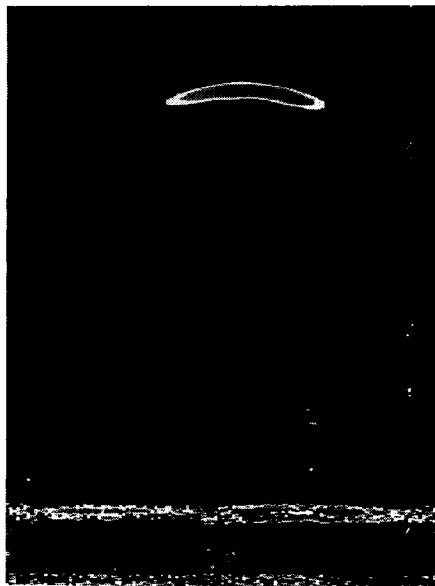


圖二 鋼筋不等間距實驗之

描線圖



圖三 鋼筋垂直間距示意圖



圖四 鋼筋垂直間距實驗之透地雷達影像圖

7	0.561	13.60	0.871	8.25
8	0.588	9.47	0.891	6.15
9	0.602	7.24	0.904	4.85
水平距離 (cm)	8號鋼筋半徑 (cm)	誤差%	10號鋼筋半徑 (cm)	誤差%
2	1.167	6.68	1.439	10.05
3	1.252	0.14	1.520	4.97
4	1.223	2.15	1.557	2.68
5	1.190	4.76	1.547	3.28
6	1.177	5.80	1.550	3.14
7	1.200	4.00	1.548	3.21
8	1.210	3.19	1.545	3.39
9	1.219	2.52	1.548	3.24

表一 6號鋼筋半徑量測結果

距離 (cm)	量測半徑 (cm)	誤差
2	0.91	3.74
3	0.88	7.09
4	0.84	11.45
5	0.86	9.49
6	0.87	8.11
7	0.87	8.25
8	0.89	6.15
9	0.90	4.85

表二 不同尺寸的鋼筋測量結果

水平距離 (cm)	4號鋼筋半徑 (cm)	誤差%	6號鋼筋半徑 (cm)	誤差%
2	0.462	28.79	0.914	3.74
3	0.548	15.63	0.883	7.09
4	0.560	13.79	0.841	11.45
5	0.552	15.04	0.859	9.49
6	0.546	15.95	0.872	8.11

表三 波速量測結果

深度 (cm)	測的 t_0 (s) $\times 10^{-8}$	測的波速 v (m/s) $\times 10^8$	誤差 %
3	5.016	1.196	2.28
4	6.650	1.203	1.72
5	8.284	1.207	1.38
6	9.919	1.210	1.15
7	11.553	1.212	0.99

表四 保護層厚度的量測結果

實際保護層厚度 (cm)	計算之保護層厚度 (cm)	誤差 %
3	3.07	2.33
4	4.07	1.75
5	5.07	1.40
6	6.07	1.17
7	7.07	1.00