

## 透地雷達探測技術於卑南遺址之應用

蕭承龍

國立台灣史前文化博物館籌備處

董倫道

工業技術研究院能源與資源研究所

### 壹、前言

透地雷達(Ground Penetrating Radar；簡稱GPR)技術係以雷達波(高頻電磁波)為波源之地球物理探勘方法。其在淺層探測之解析度是目前考古遺址應用之地球物理方法中最佳者(Kong, *et al.*, 1992)。本處因史前研究需要，於民國八十四年間引進美國 G.S.S.I.公司之 SIR-2(Subsurface Interface Radar 2)透地雷達設備，其設計符合考古遺址探測需要，施測中即可同時顯示待測物影像，供初步研判，具操作簡易、資料獲取迅速之優點。本處研究典藏組負責 GPR之研展，為推廣此一技術，為文介紹 GPR之基本概念，並利用實際使用之結果，說明其在考古遺址上之應用，以為處內同仁之參考。

使用電磁波作為探勘工具之概念，最早由美國人Melton與 Donaldson在本世紀中期建立。最初使用無線電波作為波源，量測其回響，似聲納技術。其後應用在極地冰下地貌之研究，對冰層厚度之探測獲得良好結果(Cook, 1960; Harrison, 1970)。電磁波探勘類似小規模反射震測，惟因波源能量不大，且在介質快速衰減，可探測深度遠比反射震為淺，但淺層解析度則大幅增加，適可彌補淺層震測之不及。GRP探測技術應用在地下洞穴探查(Morey, 1974)、及工程地質調查(Stewart, 1976)考古遺址探測(Kong, *et al.*, 1992)等，均獲得令人滿意之結果。GPR一詞出現於1970年代中期，俟1980年代中期國際透地雷達會議成立後，方告標準化，成為專指

以雷達波作地下探測之方法。近年來 GPR 設備逐漸成熟，美國 G.S.S.I.、Pulse Radar Inc.、英國 Era Technology、加拿大 Sensor & Software 等公司均推出商業化產品，其硬體設備之改良、施測方式及資料處理技術大量利用震測之模式等，已使 GRP 探勘能力大增，逐漸為工程界、考古界所廣用(葛文忠等，1994)。目前 GPR 技術較先進之國家有北歐三國、美、英、加、日、中國大陸等，多應用在淺層地質調查、冰層探勘、礦藏探勘、工程探查、環境污染調查、古蹟探查 (Fisher, 1991) 等方面。台灣最早於民國八十一年由工研院能資所引進 G.S.S.I. 之雷達波偵測系統，偵測工業區內之地下管線 (董倫道，1992)，繼之有中央大學、中興工程、成功大學陸續引進，應用在地質調查研究 (楊潔豪等，1993)、都市地下公共管線調查 (俞旗文等，1993) 等，已建立應用基礎。

台東市卑南地區因興建火車站，埋在地下數千年的石板棺因大規模的挖掘而出露，引起國內各界對此文化遺產的重視，由於古蹟埋在地下，未經挖掘實不易瞭解其分佈範圍，但為避免對此文化遺產造成過大的破壞，又不宜盲目地挖掘。因此，如何以非破壞的方式對此遺址古蹟進行調查，是一項重要的課題。本處在此前提下，以期對此文化遺產進行更仔細的調查與保護，乃引進此項系統，進行遺址之調查研究。

## 貳、研究區域及實施方法

### (一) 研究區域

本次調查於卑南火車站鐵路西側的果園內，主要針對一寬約25公尺、長 200公尺的道路預定地，由於現場所在地過去是私人果園，因此遍佈疊石、果林及雜林，雖經清除雜草，但仍有部份區域因地形及雜林影響而無法施測，為便於說明調查過程與成果，本計畫乃將調查範圍劃分成五個場址，進行施測 (圖 1)。

### (二) 實施方法

#### 1. 儀器設備

本次調查以透地雷達法施測，使用美國G.S.S.I.公司製造的透地雷達探測系統，現場施測儀器安置於車內，以利即時監控量測資料的品質。由於探測深度不大，且現場仍有部份雜草等障礙，因此本次調查使用較為輕便的500MEZ雷達天線進行探測。

## 2. 施測原理與步驟：

圖 2 所示為透地雷達系統施測原理示意圖，基本上可以分為八個步驟，說明如下：

- 步驟1. 儀器控制單元根據使用者預設之頻率產生激發訊號。
- 步驟2. 激發訊號經電纜線傳送至雷達天線。
- 步驟3. 激發訊號被轉換成高頻雷達波。
- 步驟4. 雷達天線向下發射高頻率雷達波。
- 步驟5. 雷達波遭遇界面時產生反射現象。
- 步驟6. 雷達天線接收經界面反射回來的雷達波。
- 步驟7. 雷達波訊號經電纜線傳回儀器控制單元。
- 步驟8. 雷達波訊號經處理後儲存於磁帶機並在螢幕上即時顯示雷達影像。

## 3. 調查程序

根據以考古調查的背景資料，顯示調查範圍內古蹟的可能的埋藏深度約在 1.5 公尺以上；因此本計畫乃依據過去在其它類似地質狀況下的施測經驗，設定記錄範圍為 45~60ns 間。此外，透地雷達探測必需沿一既定的測線施測，但由於調查範圍內各場址的面積與形狀各不相同，調查程序與資料處理方式說明如下：

如場址-5、6、7、8、10，測線配置如圖 3 所示；在以木樁標示的四個控制點所圍成範圍內，先以塑膠繩連接四個邊，並在 BC、DA 及 DC 等三個邊每一公尺間距，以不同顏色膠帶做記號。施測時以 BC 邊為基準線，使用皮尺使其兩端沿 BC 及 DA（或 DC）邊固定間格移動（本調查每一公尺移動一次），該皮尺亦為透地雷達測線，雷達天線固定地自 BC 至 DA（或 DC）邊施測。為獲得此四邊形的座標，現場除實際量測各邊長度外，亦分別在 B、D 兩控制點，使用羅盤儀分別量測 A、C 兩控制點的方位角，供室內資料處理繪製振幅圖時使用。

## 4. 資料處理

依本次調查的資料特性，資料處理的流程如圖 4，略述如下：

初級處理使用 G.S.S.I. 公司發展的『RADAN-III 透地雷達資料處理軟體』進行初步處理；基於本次調查的資料特性，也為保留較多原始資料的特性，本計畫所使用的處理僅包括：比例調整、濾波與放大倍率調整等步驟。圖幅輸出使用工業技術研究院能源與資源研究所發展的『透地雷達資料檔案轉換軟體』，將量測記錄轉換

成影像格式後，使用『PhotoStyler 影像處理軟體』進行影像加強與轉換，再使用『PowerPoint軟體』進行圖檔輸出；所經處理後的雷達波影像剖面圖存於本處研究典藏組。

#### 5. 雷達波速度估算

當進行深度估算時必需掌握調查範圍內土壤的雷達波傳送速度，因此，本計畫利用場址-7中檔案8的測線經過一條地下管線，根據當地農夫表示該地下管線的深度為0.5公尺，依據雷達波影像圖上讀出來自該管線的來回走時為7.045ns（圖5），則可以計算出土壤的傳波速度為： $0.1419\text{ m/ns}$ ，本計畫便應用此速度來換算雷達波影像圖中間軸所對應的深度。

### 參、研究方法：

雷達波資料解釋，提供了一種完全新穎的方法，使雷達波反射和地下埋藏物與地質密切關連。其確實步驟如下：

1. 收集研究區域的雷達波資料，並對資料的施測方式及處理過程進行了解。以確定資料的品質和特性。

2. 雷達波剖面所展現的反射訊號，是由地下地層間的物性差異所造成，由於沈積岩層也隨著地層的界面延展，形成一個連續的反射面。反射面基本上可代表同一時間面(Vail *et al.*, 1977)，由於地層常有水平方向的相變，同一反射面的強弱也隨著變化。所以反射面的波形可反映地層界面的岩性差(Mitchum *et al.*, 1977)。

3. 自然地層層面的反射形貌大致上較平緩，少變化，其形貌主要有平行的、次平行、波浪狀、發散型(圖6)；而地下埋藏物或一些特殊的地質狀況，則呈現一些變形的反射形貌如：叢丘狀的、透鏡狀的、分裂的、扭歪的等等(圖7)不同型貌，再依據各種不同的反射形貌，配合各種實物的模擬，可推斷出各種地下的埋藏物或特殊的地質狀況(蕭承龍等, 1991, 1993)。

4. 將各雷達波反射相的分布繪於地圖上，並據之繪出地下埋藏物及地質現象圖。

### 肆、結果與討論：

依場址的位置，順序描述雷達波測勘之測線分佈及其結果：

1. 場址—5如圖1所示，位於產業道路預定地上；因受地形影響，本場址的形狀為平行四邊形，共計在本場址施測50條平行測線，每條測線的長度平均為30公尺，記錄長度為45ns，測線分佈如圖8所示。由雷達影像剖面圖上顯示，1.5公尺以下的影像平順，應屬於自然地層的反應；本場址內可發現許多明顯的地下埋藏物異常反射（圖 9.10），呈局部連續分佈。

2. 場址—6如圖1所示，位於產業道路預定地上；因受地形影響，本場址的形狀為平行四邊形，共計在本場址施測64條平行測線，每條測線的長度平均為24公尺，記錄長度為45ns，測線分佈如圖 11所示。由雷達影像剖面圖上顯示，1.2公尺以下的影像平順，應屬於自然地層的反應；本場址內疑似地下埋藏物異常反射的區域不多，且呈零散分佈（圖 12），在測線42以西區域更幾乎無任何明顯的異常。

3. 場址—7：如圖1所示，位於產業道路預定地上；因受地形影響，本場址的形狀為三角形，共計在本場施測26條平行測線，每條測線的長度介於14~30公尺間，記錄長度為45ns，測線分佈如圖 13所示。由雷達影像剖面圖上顯示，1.5公尺以下的影像平順，應屬於自然地層的反應；本場址內疑似地下埋藏物異常反射的區域且呈零散分佈（圖 14），主要集中在測線5以東區域。

4. 場址—8：如圖1所示，位於產業道路預定地上；因受地形影響，本場址的形狀為不規則四邊形，共計在本場址施測34條平行測線，每條測線的長度介於 4~30公尺間，記錄長度為45ns，測線分佈如圖 15所示。由雷達影像剖面圖上顯示，1.5公尺以下的影像平順，應屬於自然地層的反應；本場址內可發現許多明顯的地下埋藏物異常反射（圖 16），呈局部連續分佈。

5. 場址—10 如圖1所示，位於產業道路預定地上；因受地形影響，本場址的形狀為三角形，共計在本場址施測18條平行測線，每條測線的長度介於14~30公尺間，記錄長度為45ns，測線分佈如圖 17所示。由雷達影像剖面圖上顯示，1.2公尺以下的影像平順，應屬於自然地層的反應；本場址內疑似地下埋藏物異常反射的區域不多（圖 18）；僅在測線35、37、39有局部發現。

比較五個場址之雷達波測勘結果，場址—6、7、10由雷達波反射顯示其地下埋藏物異常反射區域不多，呈零散分佈，而場址—5及場址—8其地下埋藏物異常反射多明顯可見，呈局部連續分佈；為配合卑南文化公園現地展示及考古棚架安置之需

要，綜合評估當地地形，測勘面積及異常反射分佈狀況，認為場址-5，是其中最佳的位置；並針對場址-5，將深度0.9到1.1m之各雷達波反射相的分佈繪於地圖上，並據之繪出地下埋藏物之分佈圖(圖 19)。

GPR 操作簡易、施測快速、資料解析度高，為極佳之地球物理量詮釋地層地下埋藏物分佈。但此等數字不易直接為人所接受，有時不符精度需要而造成運用之困難。因此實際應用時必須與其它方式探查所得資料，如現地試掘之資料共同印證評估，方能使雷達波探測剖面更具考古實用性。

## 伍、結論：

雷達波測勘技術為一對地下掩埋物偵檢頗為有效的方法。由本研究顯示五個場址之雷達波測勘顯示其埋藏物深度主要分佈於 0.5~1.5m之間，場址-6、7、10由雷達波反射顯示其地下埋藏物呈零散分佈，而場址-5及場址-8其地下埋藏物異常反射多明顯可見，呈局部連續分佈；為配合卑南文化公園現地展示及考古棚架安置之需要，綜合評估當地地形，測勘面積及異常反射分佈狀況，認為場址-5，是其中最佳的位置。

## 參考文獻

- Cook, J. C. 1960, Proposed Monocycle-Pulse VHF Radar for Airvone Ice and Snow Measurement, AIEE Comm. and Elec., 51:588-594.
- Donaldson, C. A., 1953, Underground Prospecting System, U. S. Patent, 2, 657, 380.
- Fisher, E., Mcmechan, G. A., Annan, A. P., 1992, Acquisition and Processing of Wide Aperture Ground Penetrating Radar, Geophysics, 57 : 495-504.
- Harrison, C. H. 1970, Reconstruction of Subglacial Relief from Radio Sounding Echoes, Geophysics, 35:1099-1115.
- Kong, F-N., Kristiansen, J. & By, T. L. 1992. A Radar investigation of pyramids. Geological Survey of Finland, Special Paper 16 : 345-349.
- Melton, B. S. 1937, Electromagnetic Prospecting Method, U. S. Patent, 2,

- Mitchum, R. M. Jr., and Vail, P. R., 1977, Seismic stratigraphic interpretation procedure: in Payton, C. E., ed., Seismic Stratigraphy Applications to Hydrocarbon Exploration: AAPG Mem. 26, p. 135-144.
- Morey, R. M. 1974, Detection of Subsurface Cavities by Ground Penetrating Radar, Highway Geology Symposium Proceedings, 27:28-30.
- Stewart, R. D., Unterberger, R. R., 1976, Seeing Through Rock with Radar, Geophysics, 41:123-132.
- Vail, P. R., Mitchum, R. M., and Thompson, S., III, 1977, The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis: in Payton, C. E., (ed), Seismic stratigraphy-Applications to Hydrocarbon Exploration: AAPG Mem. 26, p.53-62.
- 董倫道，1992，地表探測雷達技術應用實例，第四屆台灣地區地球物理研討論文集，315-323頁。
- 楊潔豪等，1993，應用透地雷達研究淺地層電性地層，國科會82年研究成報告。
- 俞旗文等，1993，應用透地雷達於台北市捷運系統地下管線調查，中國地球物理學會八十三年度學術研討會。
- 葛文忠等，1994，透地雷達探勘技術之工程應用，中興工程，第43期，114-125頁。
- 蕭承龍、丁信修、陳瑞瓊、李妍慧、梅文威，1991，台南盆地震測層序與震相分析；探探研究彙報，第14期，第36-52頁。
- 蕭承龍、丁信修、邱翠雲，1993，新竹苗栗外海之震測相及沈積環境分析；探探研究彙報，第16期，第16-32頁。

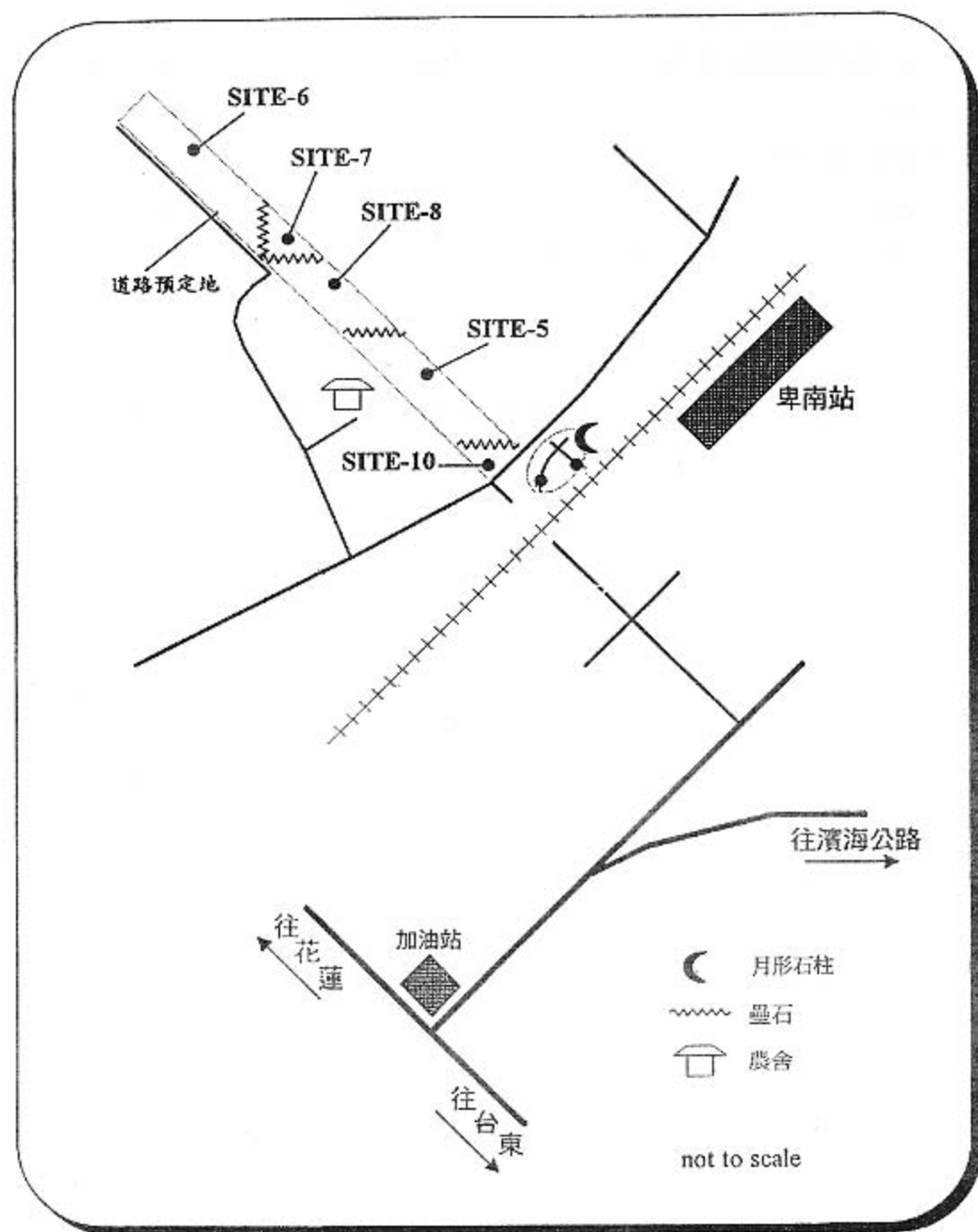


圖 1. 調查場址分布示意圖



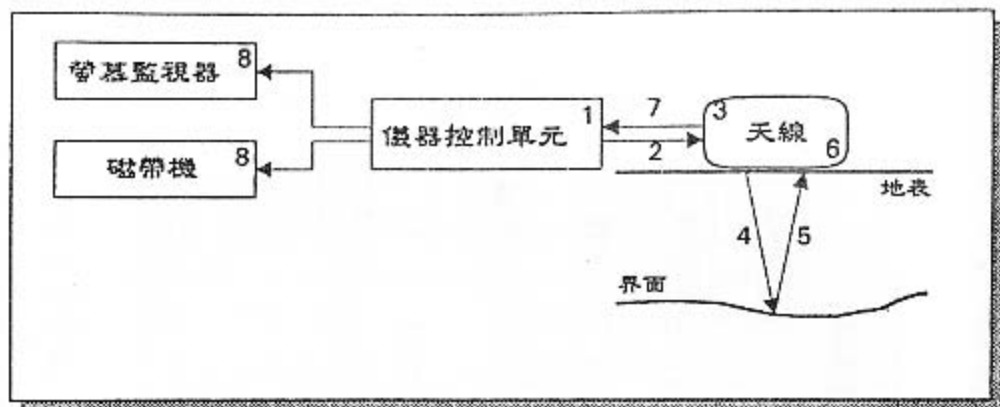


圖 2. 透地雷達施測原理示意圖

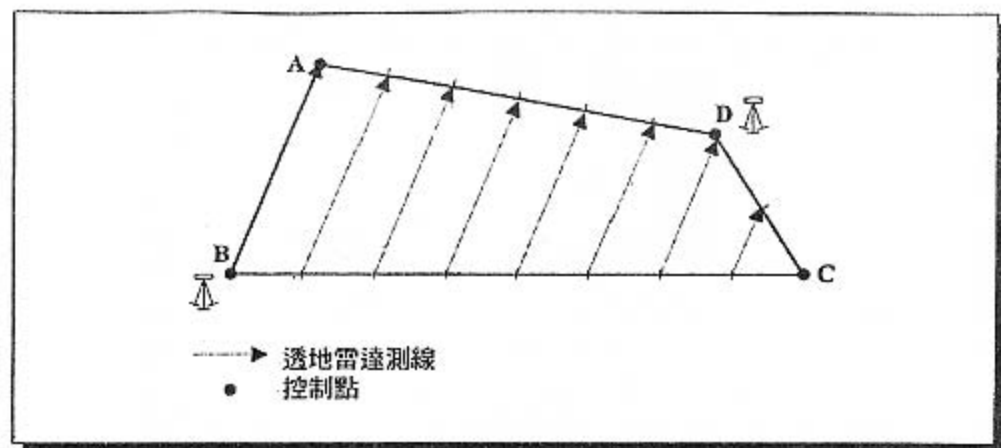


圖 3. 四邊形場址透地雷達測線分布示意圖

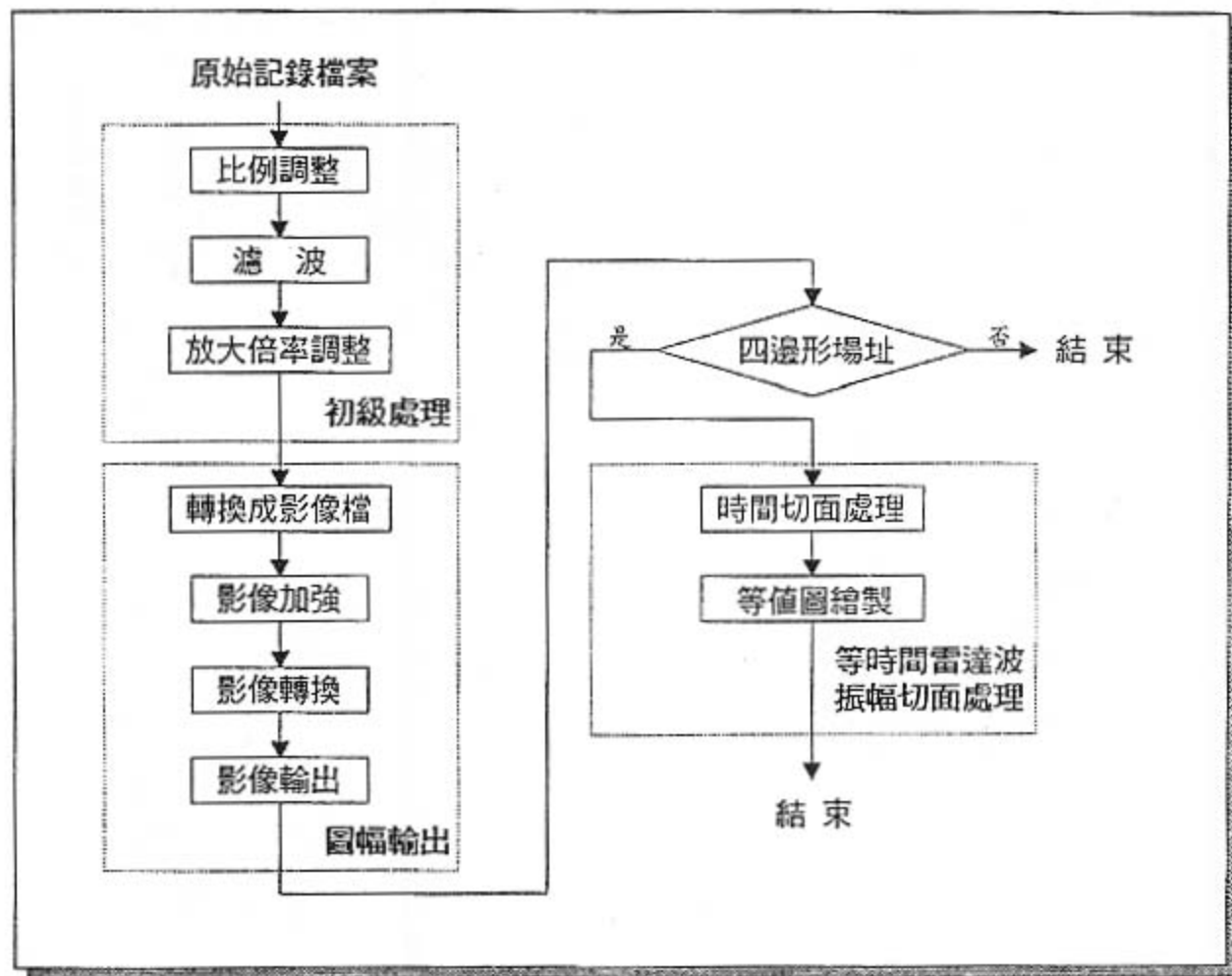


圖 4. 資料處理流程圖

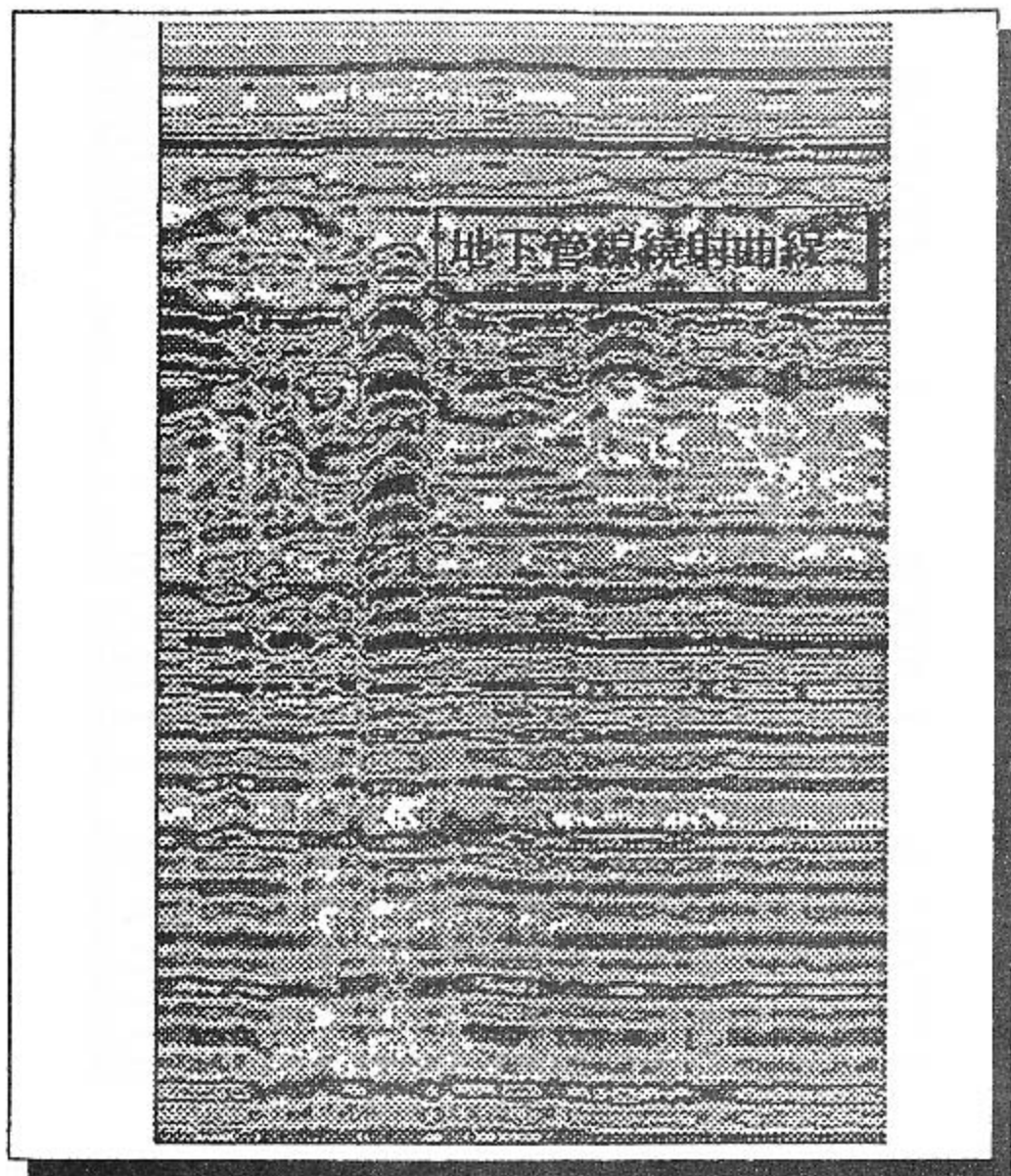


圖 5. 測線通過已知深度地下管線雷達波影像剖面圖

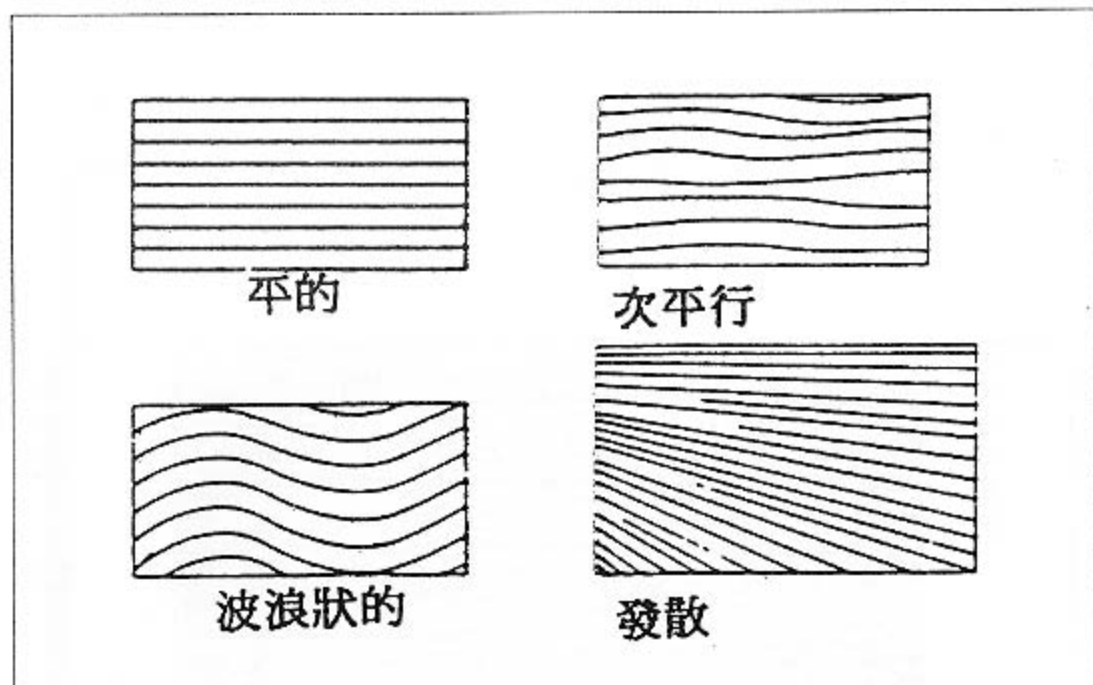


圖 6. 自然地層層面的反射形貌圖

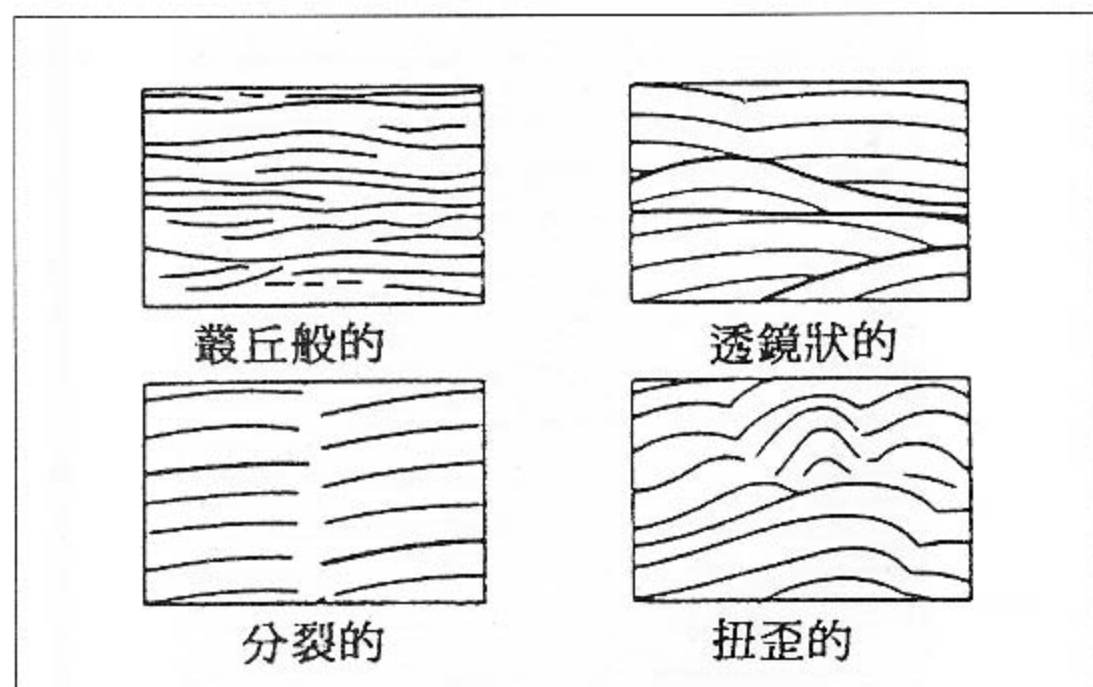


圖 7. 地下埋藏物或一些特殊的地質狀況的反射形貌圖

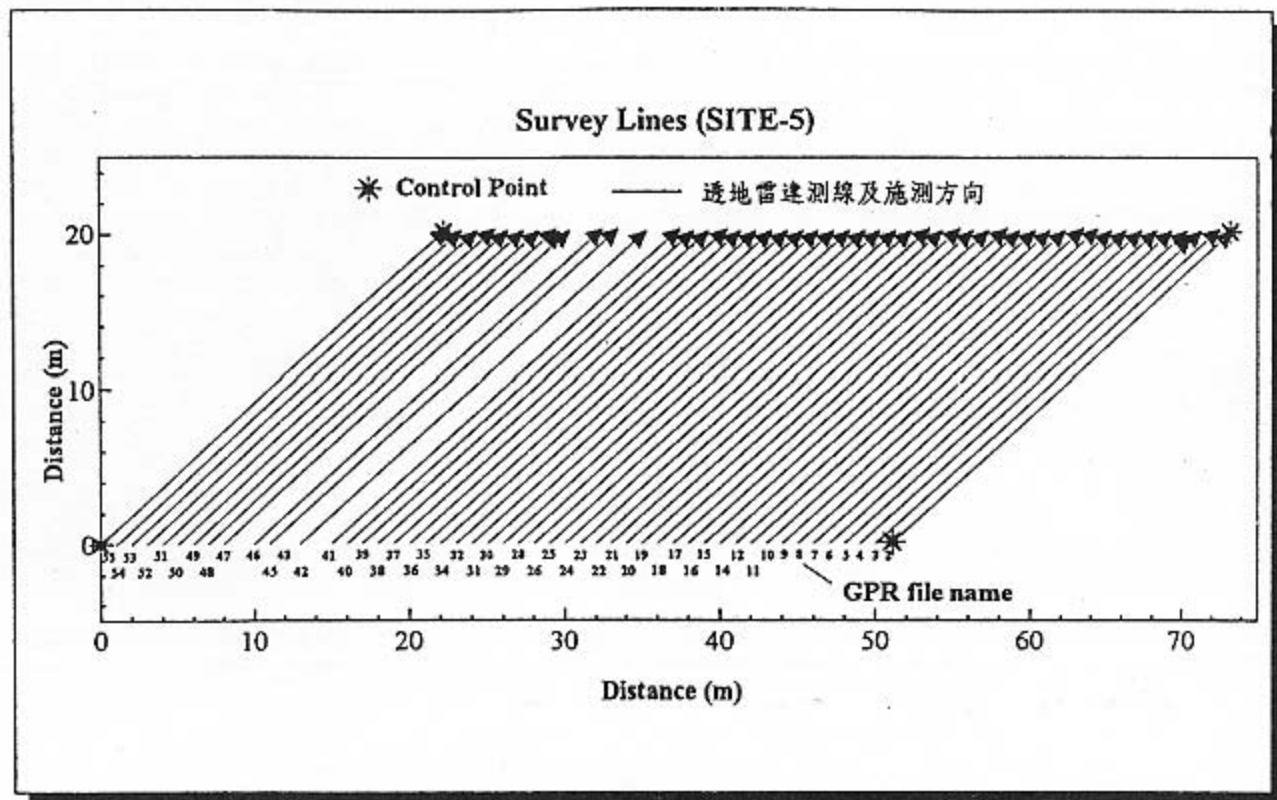


圖 8. 場址—5測線分布圖

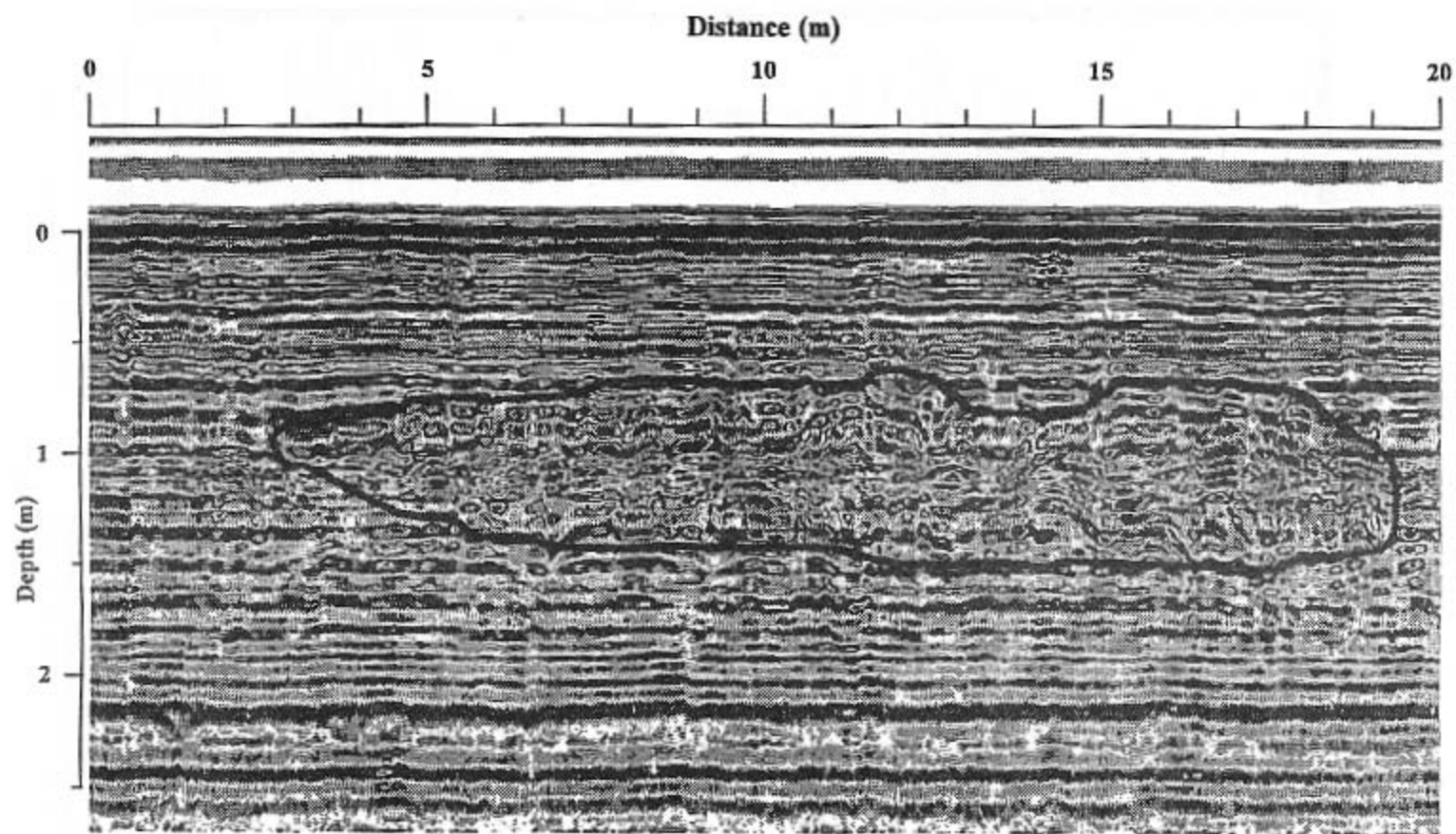


圖 9. 場址—5測線3-1雷達波剖面顯示地下埋藏物異常反射分布圖

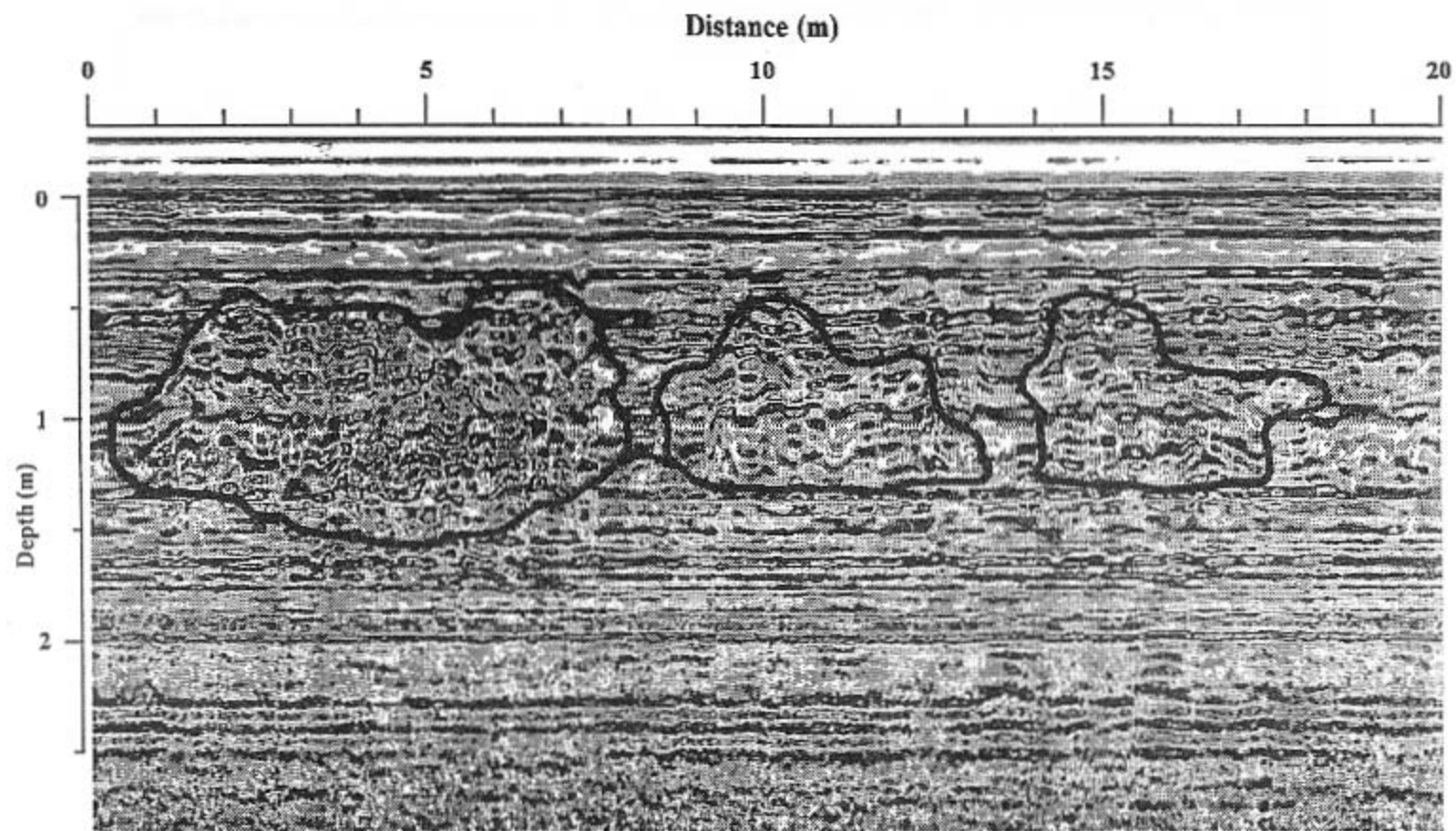


圖 10. 場址—5測線50-1雷達波剖面顯示地下埋藏物異常反射分布圖

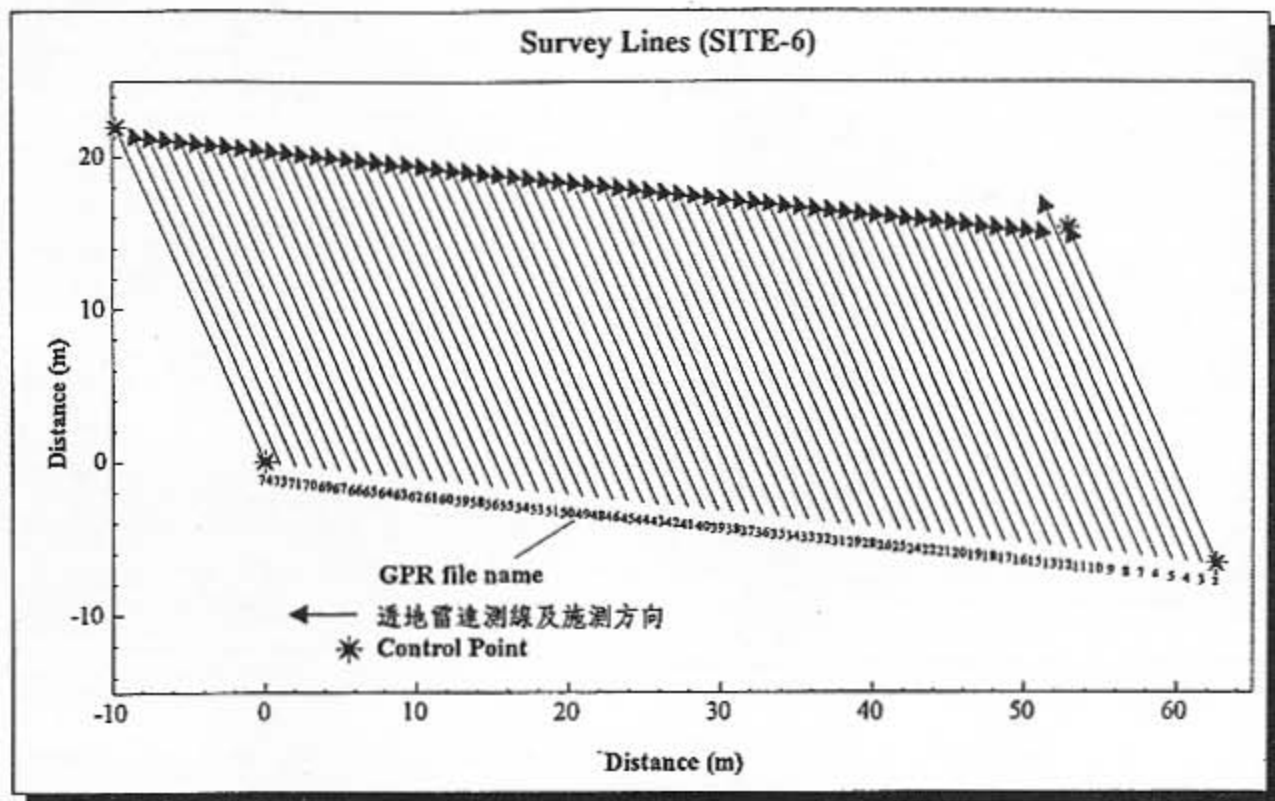


圖 11. 場址—6測線分布圖



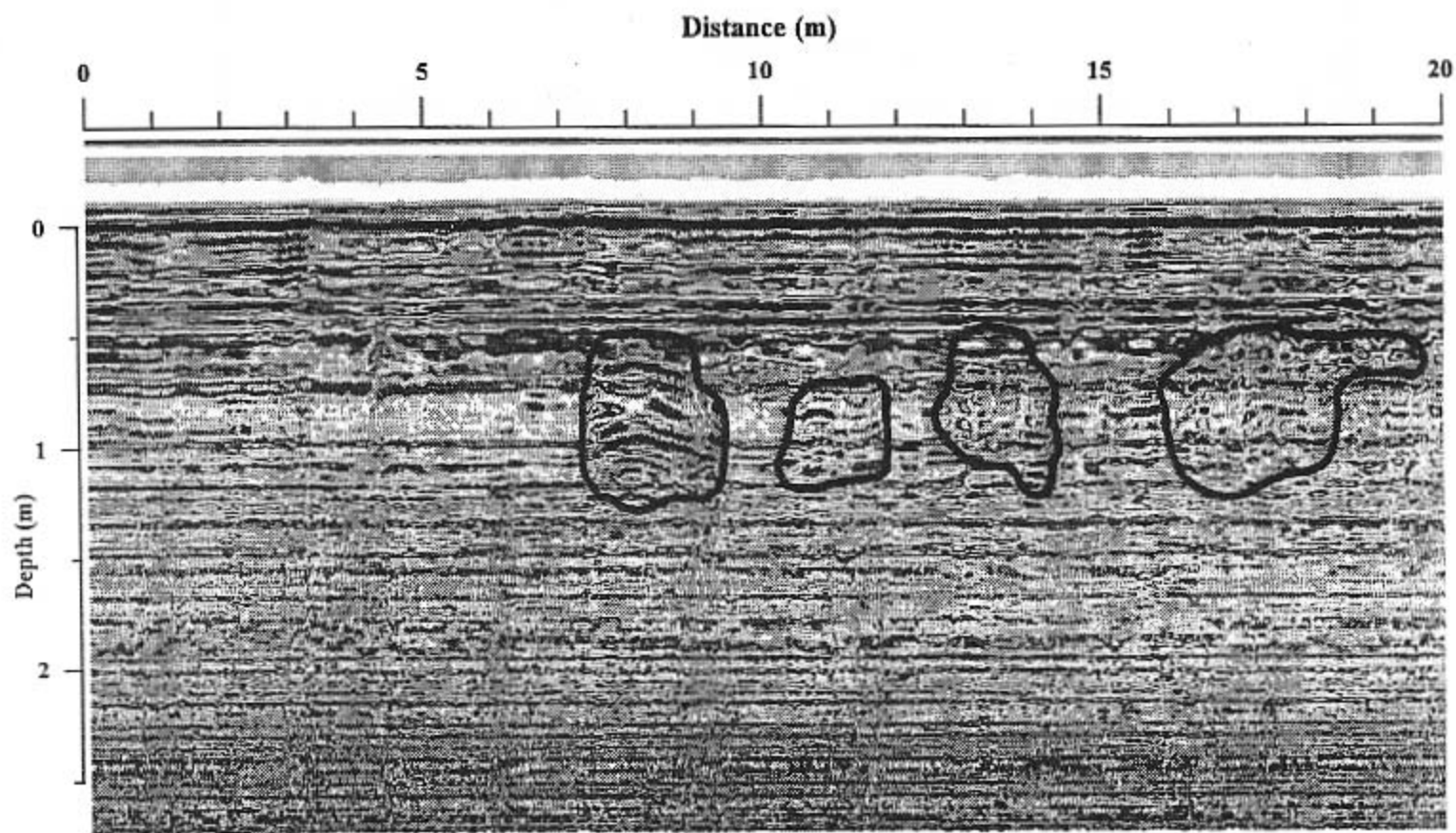


圖 12. 場址一6測線7-1雷達波剖面顯示地下埋藏物異常反射分布圖

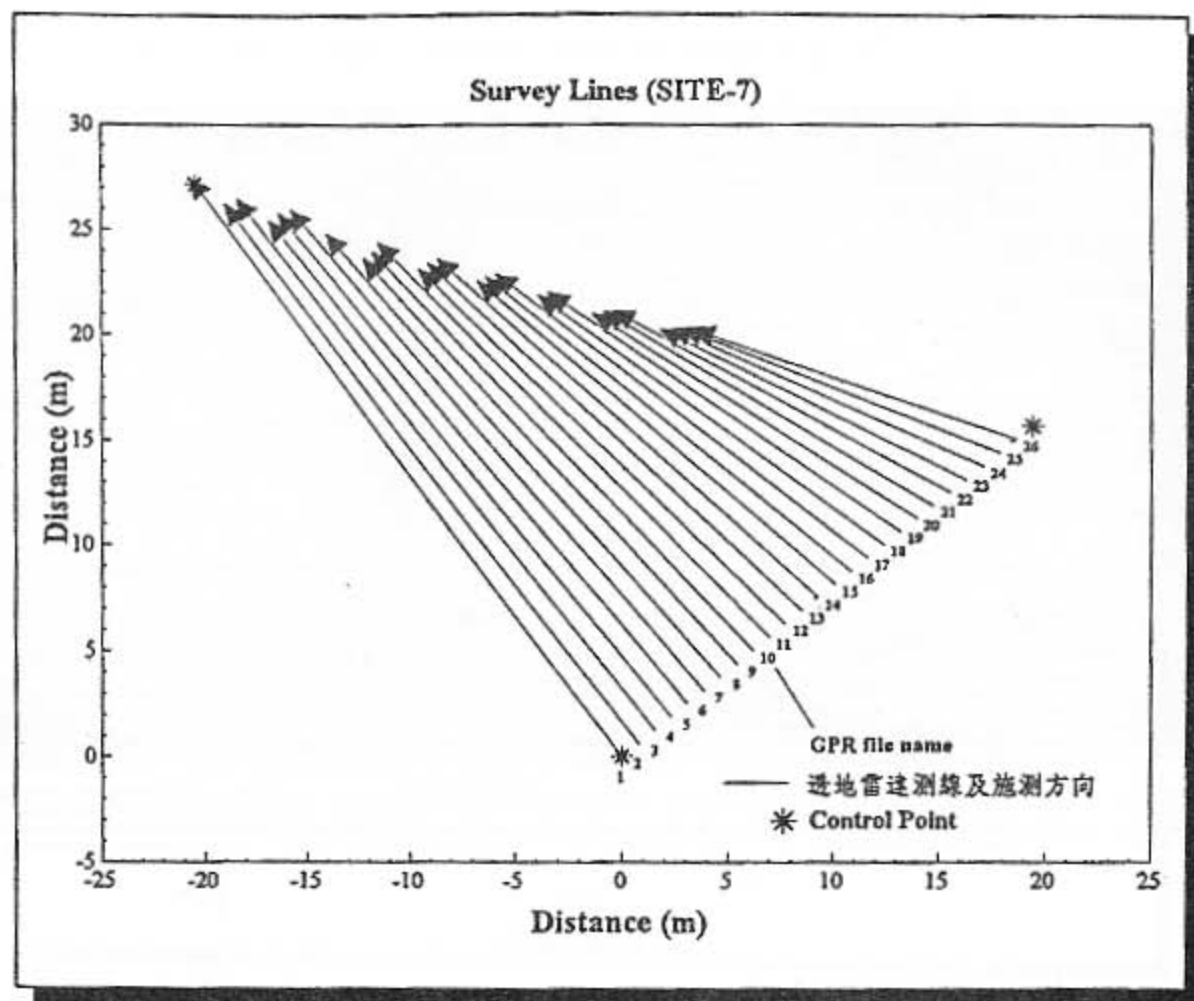


圖 13. 場址一7測線分布圖

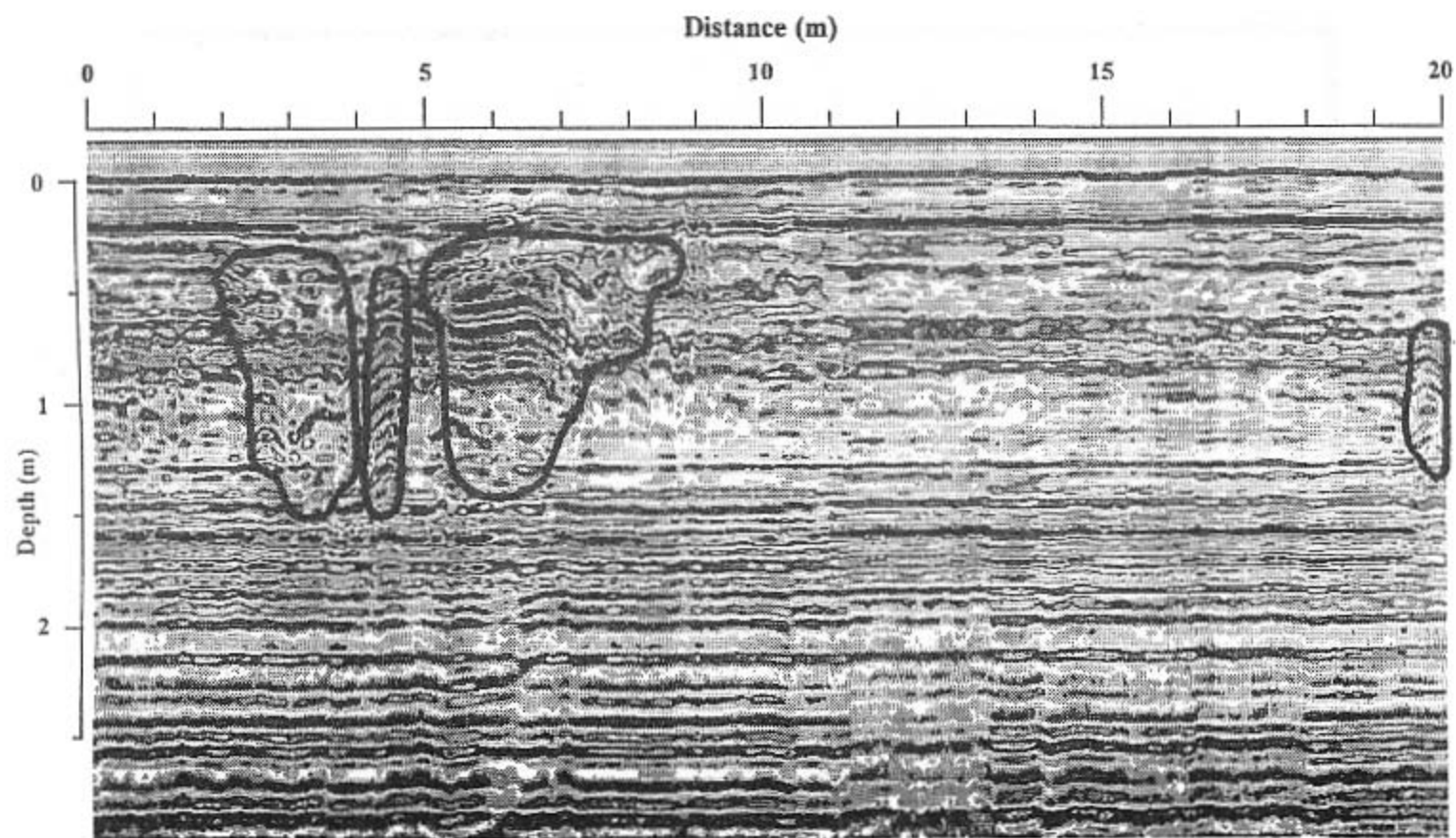


圖 14. 場址一7測線11-1雷達波剖面顯示地下埋藏物異常反射分布圖

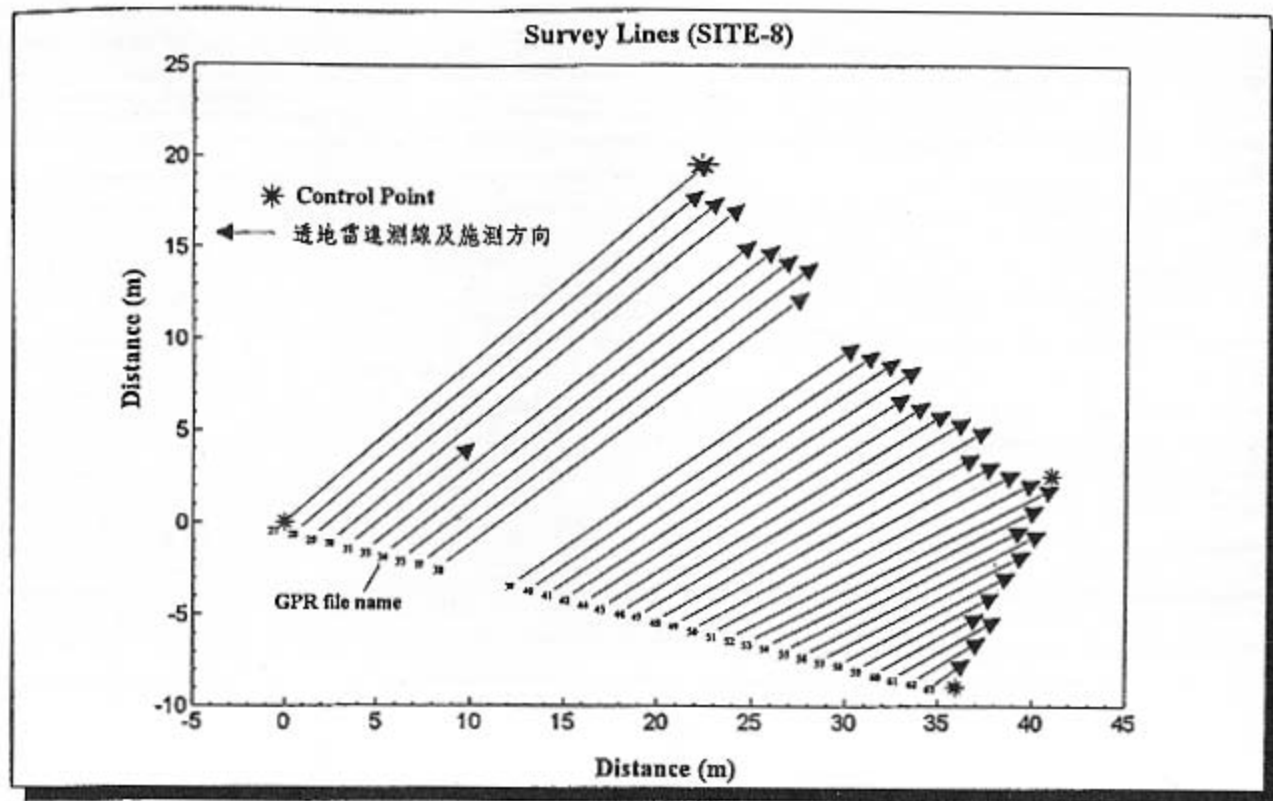


圖 15. 場址—8測線分布圖

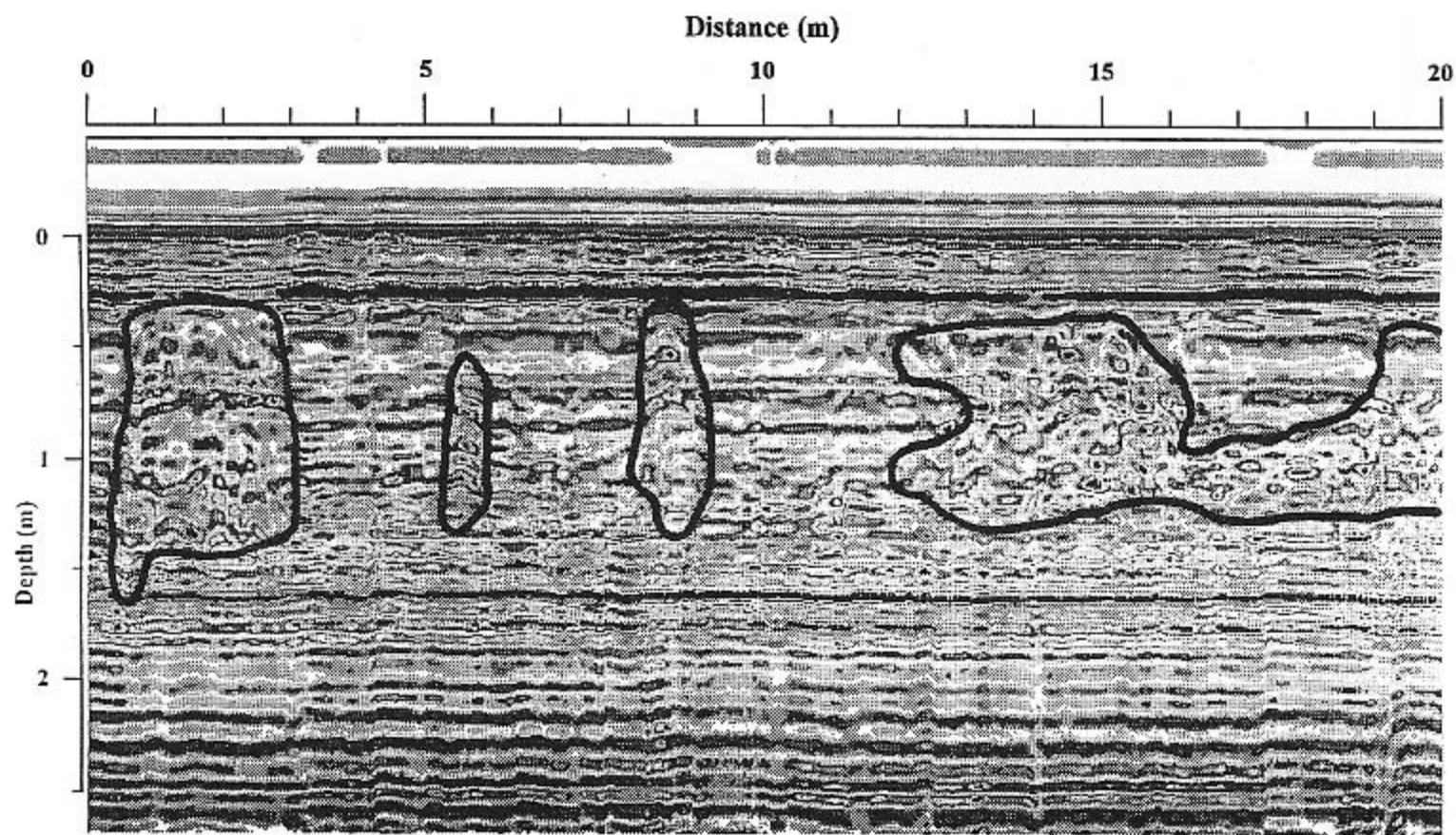


圖 16. 場址—8測線38-1雷達波剖面顯示地下埋藏物異常反射分布圖

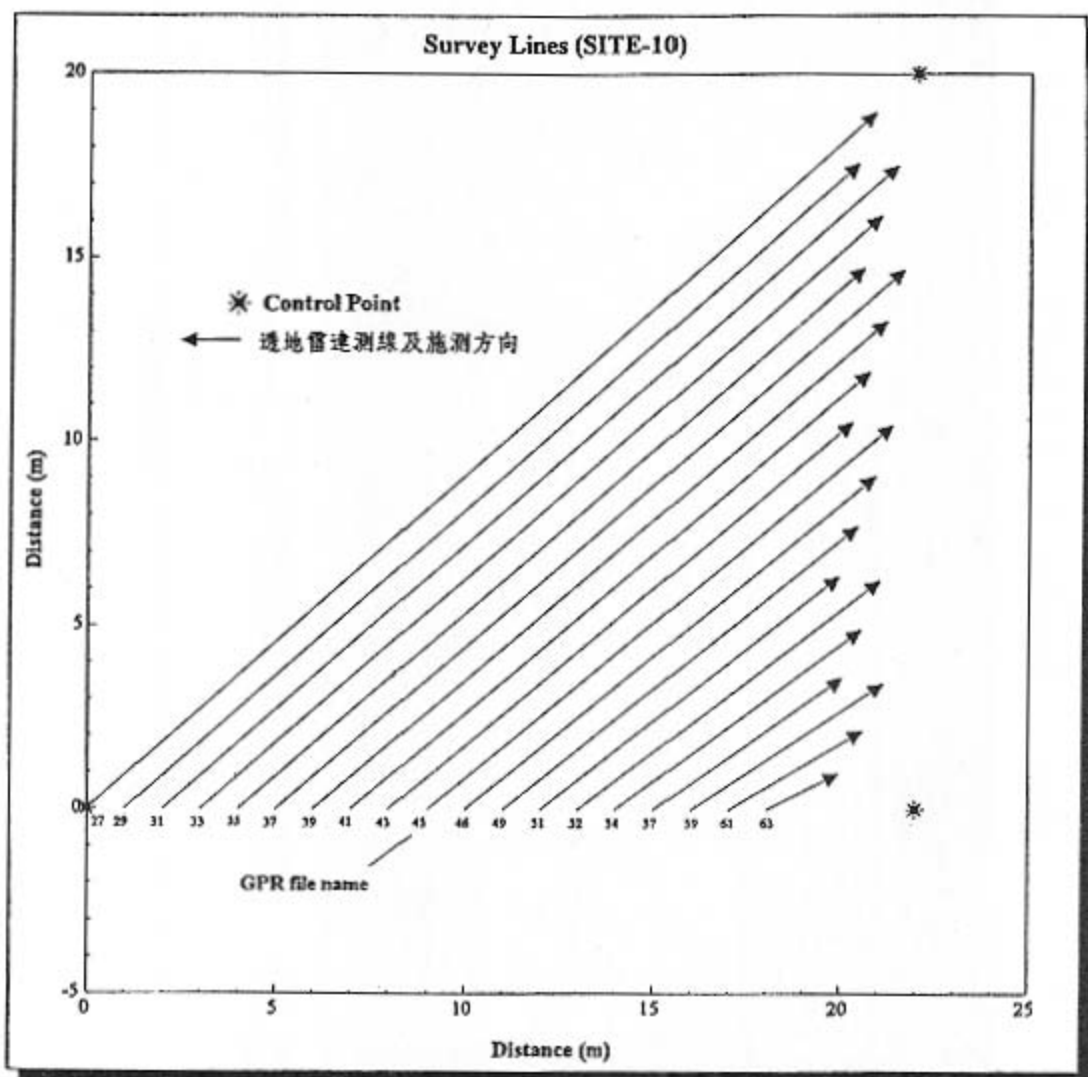


圖 17. 場址-10測線分布圖

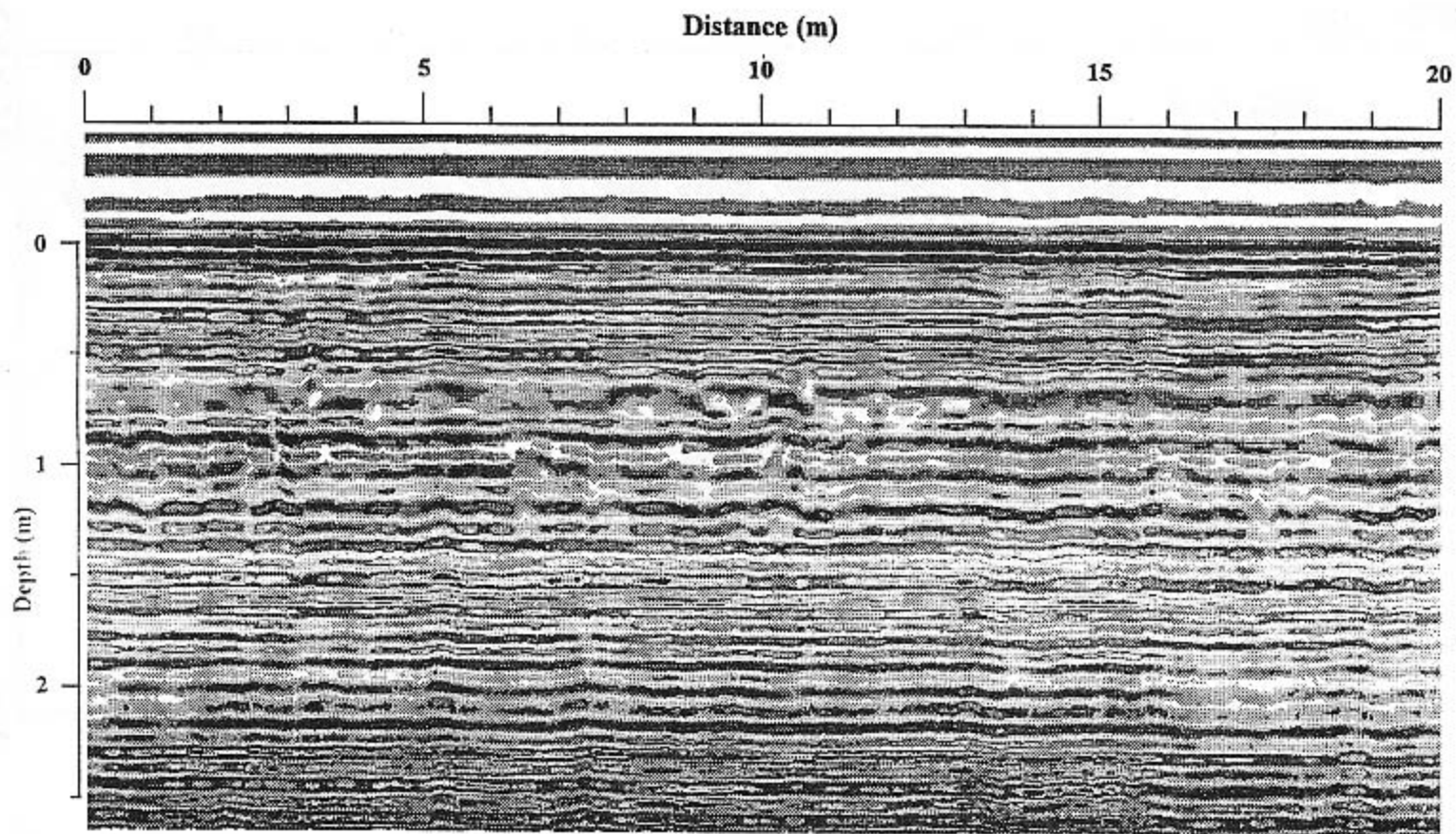


圖 18. 場址—10測線29-1雷達波剖面顯示無異常反射現象

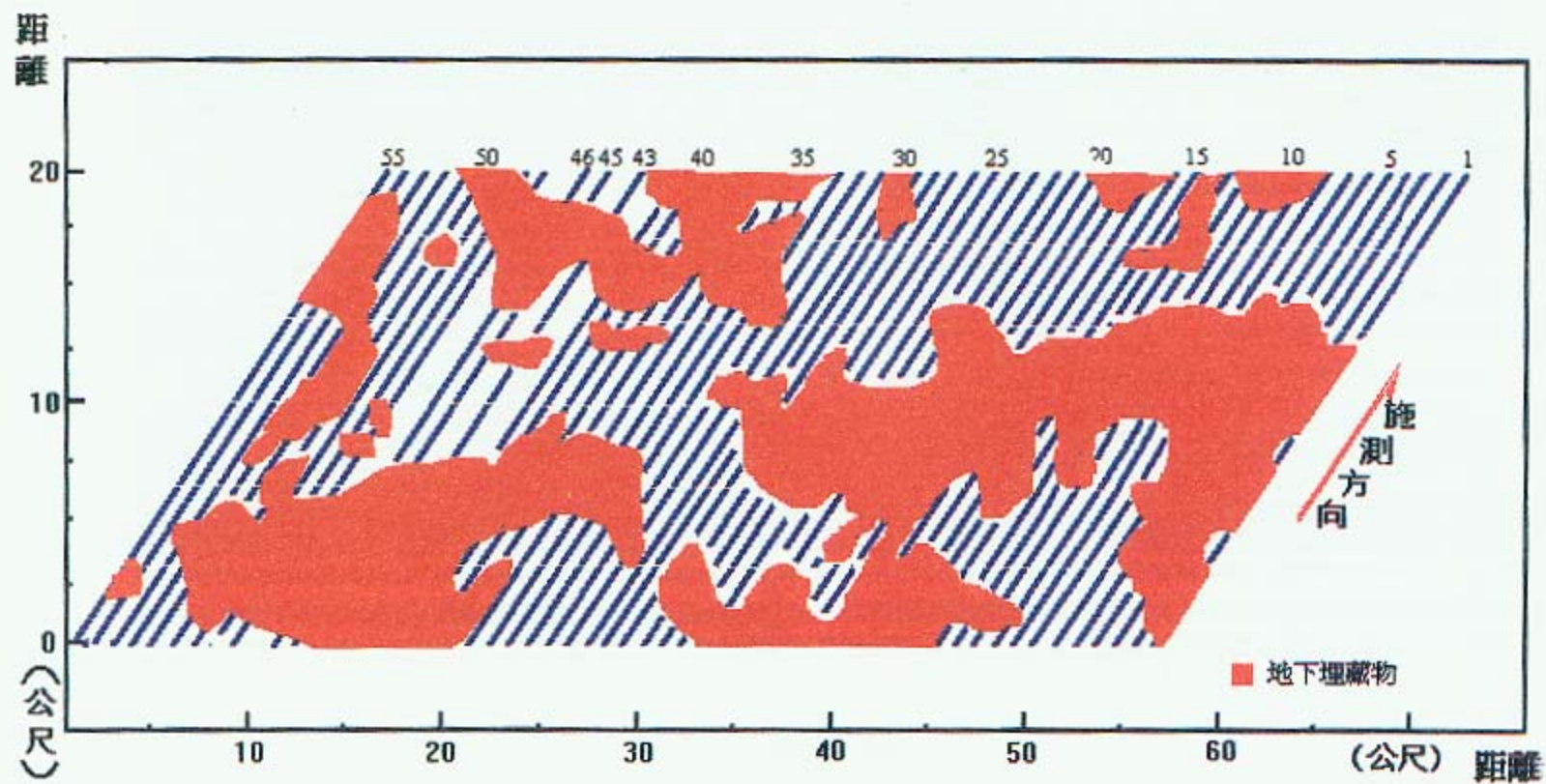


圖 19. 場址—5雷達波反射相顯示地下埋藏物之分布圖