

113-013-7D52

MOTC-IOT-112-H1CA001b

透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識可行性 之初步探討



交通部運輸研究所

中華民國 113 年 3 月

113-013-7D52

MOTC-IOT-112-H1CA001b

透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識可行性 之初步探討

著 者：賴俊呈、胡啟文

交通部運輸研究所

中華民國 113 年 3 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識
可行性之初步探討 / 賴俊呈, 胡啟文著. -- 初
版. -- 臺北市 : 交通部運輸研究所, 民 113.03
面 ; 公分
ISBN 978-986-531-563-4(平裝)

1.CST: 道路工程 2.CST: 公路管理 3.CST:
人工智慧

442.1

113001471

透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識可行性之初步探討

著 者：賴俊呈、胡啟文

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：105004 臺北市松山區敦化北路 240 號

網 址：www.iot.gov.tw (中文版>數位典藏>本所出版品)

電 話：(04)2658-7200

出版年月：中華民國 113 年 3 月

印 刷 者：綠凌興業社

版(刷)次冊數：初版一刷 48 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價：200 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組• 電話：(02)2349-6789

國家書店松江門市:104472 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02)2518-0207

五南文化廣場：400002 臺中市中山路 6 號 • 電話：(04)2226-0330

GPN：1011300227

ISBN：978-986-531-563-4 (平裝)

著作財產權人：中華民國(代表機關：交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部份內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

GPN：1011300227

定價 200 元

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識可行性之初步探討			
國際標準書號(或叢刊號) ISBN 978-986-531-563-4(平裝)	政府出版品統一編號 1011300227	運輸研究所出版品編號 113-013-7D52	計畫編號 MOTC-IOT-112-H1CA001b
本所主辦單位：運輸技術研究中心 主管：蔡立宏 計畫主持人：賴俊呈 研究人員：胡啟文 聯絡電話：(04)2658-7200 傳真號碼：(04)2657-1329			研究期間 自 112 年 1 月 至 112 年 12 月
關鍵詞：透地雷達、省道養護巡查、人工智慧 (AI)			
摘要： 省道一般道路柔性鋪面養護巡查，目前不論日常經常巡查或特別巡查，還是以目力檢視為主，目力檢視僅能發現道路鋪面的表面狀況，再對損壞鋪面進行修補，然而，道路鋪面之損壞常來自道路下方發生問題（路床、路基材料不良或因故被掏空、地下水影響等）所造成的，因此，常發生修補過的鋪面又重複損壞，而「特別檢查」一般常採用破壞性的現場開挖方式，探查經常性或重複性損壞的路段，但因現場開挖受限於僅有單點及淺層開挖，往往探查不出鋪面損壞成因，爰此，建議「特別檢查」應用透地雷達進行檢測，其能以面（大面積地毯式）的方式並針對不同深度進行非破壞檢測，相較以現場開挖，可較為迅速、安全、低風險、節能減碳及低汙染，且更確實、有效的檢測出經常性或重複性路段鋪面損壞的成因。 本計畫訪談公路局及學者專家均對發展AI辨識系統辨識透地雷達訊號圖像之可行性持正面的看法，惟發展AI辨識前需要建立相關的數據資料庫，尤其是本土化的數據資料，如何蒐集到足夠且正確的數據資料是關鍵課題。			
研究成果效益： 1. 完成透地雷達應用於省道養護巡查可行性評估。 2. 完成AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像可行性評估。			
提供應用情形： 1. 提供公路局、高速公路局及各地方政府道路管理機關道路養護巡查之應用參考。 2. 提供本所後續辦理透地雷達、人工智慧辨識等相關研究之應用。			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
113 年 3 月	220	200	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: Preliminary Exploration of the Feasibility of Applying Ground Penetrating Radar to Provincial Highways Maintenance Inspection and AI Intelligent Recognition

ISBN (OR ISSN) 978-986-531-563-4 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1011300227	IOT SERIAL NUMBER 113-013-7D52	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-112-H1CA001b
---	--	-----------------------------------	---

DIVISION: Transportation Technology Center DIVISION DIRECTOR: Li-Hung Tsai PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chun-Cheng Lai, PROJECT STAFF: Chi-Wen Hu PHONE: (04)2658-7200 FAX: (04)2657-1329	PROJECT PERIOD From January 2023 To December 2023
---	---

KEY WORDS: Ground-Penetrating Radar 、Provincial Highway Maintenance Inspection 、Artificial Intelligence (AI)

Abstract:

The maintenance inspection of the general flexible pavement of provincial highways, currently whether regular daily inspections or special inspections, are mainly based on visual inspection. Visual inspection can only discover the surface condition of the road pavement, and then repair the damaged pavement. However, the damage to the road pavement often comes from problems occurring below the road (poor subgrade, subbase materials, or being hollowed out for some reason, groundwater impact, etc.), therefore, it often happens that the repaired pavement is damaged again. And ‘special inspections’ usually adopt destructive on-site excavation methods to investigate frequently or repeatedly damaged sections, but because on-site excavation is limited to only single point and shallow excavation, it often fails to detect the cause of pavement damage. Therefore, it is suggested that ‘special inspection’ should use ground penetrating radar for detection, which can carry out non-destructive testing for different depths in a surface (large area carpet style) manner. Compared with on-site excavation, it can be more rapid, safe, low-risk, energy-saving, carbon-reducing and less polluting, and more accurately and effectively detect the cause of frequent or repeated section pavement damage.

Both the Highway Bureau and academic experts interviewed in this project hold positive views on the feasibility of developing an AI recognition system to identify ground penetrating radar signal images. However, before developing AI recognition, it is necessary to establish a relevant database, especially localized data. How to collect sufficient and accurate data is a key issue.

Benefits of Research Results:

1. Complete the feasibility assessment of applying ground penetrating radar to provincial highway maintenance inspections.
2. Complete the feasibility assessment of AI intelligent recognition of ground penetrating radar signal images.

Application Availability:

1. Provide application references for road maintenance inspections to the Highway Bureau, the Freeway Bureau, and local government road management agencies.
2. Provide applications for subsequent studies related to ground penetrating radar and artificial intelligence recognition conducted by our institute.

DATE OF PUBLICATION Mar. 2024	NUMBER OF PAGES 220	PRICE 200
--------------------------------------	----------------------------	------------------

The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.

透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識 可行性之初步探討

目 錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目 錄.....	III
圖目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
第一章 前 言.....	1-1
1.1 研究緣起.....	1-1
1.2 研究目的.....	1-2
1.3 研究方法.....	1-2
1.4 研究內容與流程.....	1-3
第二章 文獻回顧.....	2-1
2.1 非破壞性檢測透地雷達之概述.....	2-1
2.2 透地雷達應用範疇.....	2-3
2.2.1 地下埋設物及不明物體調查.....	2-3
2.2.2 地下水位深度及含水量變化探測.....	2-6
2.3 人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之研究.....	2-9
第三章 透地雷達基本原理及相關理論.....	3-1
3.1 透地雷達基本原理.....	3-1
3.2 電磁理論.....	3-3
3.2.1 電磁波基本原理.....	3-3
3.2.2 馬克斯威爾方程式.....	3-4

3.3 介質的電磁特性	3-6
3.3.1 導電度	3-7
3.3.2 低耗損與高耗損介質	3-7
3.3.3 相對介電常數	3-9
3.3.4 反射係數	3-9
3.3.5 衰減度	3-10
3.4 儀器參數之設定	3-11
第四章 透地雷達應用於省道養護巡查之可行性	4-1
4.1 省道養護之作業規定	4-1
4.1.1 省道養護巡查作業規定	4-1
4.1.2 省道鋪面養護巡查作業規定	4-2
4.1.3 省道柔性鋪面之損壞分類、現象及原因	4-3
4.1.4 省道柔性鋪面養護措施	4-5
4.1.5 省道一般道路柔性鋪面養護巡查及辦理養護措施流程	4-9
4.2 透地雷達如何應用於省道一般道路柔性鋪面養護巡查	4-11
4.2.1 透地雷達應用於道路檢測及相關案例實績之探討 ...	4-12
4.2.2 研究對象對於透地雷達應用在省道一般道路柔性鋪面 的需求、應用方式及時機	4-22
4.3 透地雷達應用於特別檢查之優點及可行性探討	4-25
4.3.1 透地雷達應用於特別檢查之優點	4-25
4.3.2 透地雷達應用於特別檢查之可行性探討	4-27
第五章 AI 智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性	5-1
5.1 人工智慧應用於影像辨識技術基本探討	5-1
5.1.1 機械學習和深度學習之差異	5-2
5.1.2 人工神經網路及深度神經網路	5-3

5.1.3 卷積神經網路	5-6
5.2 AI 辨識透地雷達訊號圖像案例實績之探討	5-8
5.3 AI 辨識透地雷達訊號圖像可行性之初步探討	5-12
5.3.1 透地雷達資料（數據）的前處理（包含資料庫的建立）	5-13
5.3.2 AI 深度學習方法與模型研擬、建構與套用	5-16
5.4 小結	5-17
第六章 合作計畫之芻議.....	6-1
6.1 合作計畫說明.....	6-2
6.2 預期成果、效益及應用.....	6-3
第七章 結論與建議.....	7-1
7.1 結論.....	7-1
7.2 建議.....	7-3
7.3 研究成果效益.....	7-4
7.4 提供政府單位應用情形.....	7-4
參考文獻.....	參-1
附錄一 研究對象及專家學者訪談紀錄.....	附 1-1
附錄二 專家學者座談會會議紀錄.....	附 2-1
附錄三 第 1 次工作會議紀要.....	附 3-1
附錄四 第 2 次工作會議紀要.....	附 4-1
附錄五 第 3 次工作會議紀要.....	附 5-1
附錄六 期末報告審查意見處理情形表.....	附 6-1
附錄七 期末報告簡報資料.....	附 7-1

圖 目 錄

圖 1.1 研究流程圖	1-5
圖 2.1 非破壞性檢測之流程	2-2
圖 3.1 異質物影響繪製示意圖	3-2
圖 3.2 透地雷達基本原理示意圖	3-2
圖 3.3 透地雷達現場施測法	3-3
圖 3.4 電磁波傳播之形態	3-4
圖 4.1 養護巡查及養護措施實際執行流程示意圖	4-10
圖 4.2 透地雷達檢測道路下方情形之示意圖	4-12
圖 4.3 2016 年日本福岡 JR 博多站前道路塌陷	4-13
圖 4.4 新竹縣竹北市工地旁道路塌陷後施作透地雷達檢測	4-13
圖 4.5 造成道路塌陷破壞機制	4-14
圖 4.6 高雄市政府以透地雷達檢測地下孔洞處理流程	4-15
圖 4.7 三維透地雷達檢測現場作業情形	4-16
圖 4.8 山區道路凹陷段影像	4-17
圖 4.9 市區道路凹陷段影像	4-18
圖 4.10 鄉間道路龜裂凹陷段影像	4-19
圖 4.11 鄉間道路深度切面影像	4-19
圖 4.12 國道 3 號 24.5K 北上景美隧道口滲水檢測範圍圖	4-20
圖 4.13 AC 路面下 40 公分位置處滲漏分佈圖	4-21
圖 4.14 透地雷達應用於省道一般道路柔性鋪面養護巡查方式及時機..	4-24
圖 4.15 透地雷達檢測網示意圖	4-27
圖 5.1 AI、機械學習及深度學習關聯	5-3
圖 5.2 神經網路架構圖	5-5

圖 5.3 (A) 淺及 (B) 深度神經網路示意圖	5-5
圖 5.4 卷積神經網路架構示意圖	5-7
圖 5.5 Malå Vision 軟體網頁	5-8
圖 5.6 Malå Vision AI 辨識雙曲線	5-9
圖 5.7 AI 初判、人員複判示意圖	5-10
圖 5.8 透地雷達 AI 輔助系統架構	5-10
圖 5.9 GEO SEARCH 株式會社透地雷達檢設之成就	5-15
圖 5.10 日本過去 5 年來防止塌方的地區示意圖	5-15

表 目 錄

表 3-1 100MHz 電磁波在各種介質中的電性與波速之關係.....	3-11
表 3-2 天線頻率與探測深度關係表	3-12
表 4-1 柔性鋪面損壞型態的現象及主要原因	4-4
表 4-2 柔性鋪面單項損壞之養護措施	4-7
表 5-1 機器學習與深度學習之比較	5-3

第一章 前言

1.1 研究緣起

臺灣道路鋪面維護不易，常因人為或自然因素等造成鋪面損壞，而影響用路人安全，尤其近年來因極端氣候影響，在短時強降雨作用下較為鬆軟之路基土壤會因大量的雨水入滲而帶走土壤粒料產生路基掏空現象，此外，路基土壤亦會因地震、工程施工、地下管線或雨水箱涵破損等因素使得道路鋪面產生沉陷、孔洞甚至是大型天坑等無預警之災害。有鑑於此，若能將非破壞檢測方式應用於道路養護巡查上，在還未致災前先檢測出道路下潛在的孔洞或造成潛在孔洞的因素（如地下管線或雨水箱涵破損漏水），並先行進行修補維護處置，防患未然，以確保用路人安全。

目前應用聲、光、電、熱、磁等之非破壞檢測技術及方法眾多，各有其精確性及適用性，國內對於道路檢測所使用的非破壞檢測技術，以透地雷達居多，本所於前（110）年針對透地雷達檢測道路孔洞方法進行初步探討，初步探討結果透地雷達係可應用於道路下潛在損壞風險因素（孔洞、管線或箱涵漏水等）的檢測，故本計畫將探討透地雷達如何應用於道路養護巡查及其可行性。目前道路養護巡查只對道路鋪面狀況進行目視巡查，巡查發現道路鋪面有下陷或孔洞等缺失後才進行修補維護作業，但道路鋪面產生下陷或孔洞不一定能馬上能被巡查到，此時就會造成用路人的危險，若能將透地雷達應用於道路維護巡查上，可先檢測出道路下是否有潛在的損壞風險因素，先一步進行維護處置，由被動轉化為主動。

透地雷達檢測後所輸出的訊號圖像，是需要專業及經驗的人員進行判釋，為本所自辦計畫「透地雷達檢測道路孔洞方法之初步探討」訪談的道路管理機關對於透地雷達目前無法廣泛被應用在道路養護巡查的主要原因之一，道路管理機關如自行購買透地雷達進行道路檢測，需要有會使用操作透地雷達及判釋輸出訊號圖像的人員，惟一般公務人

員多數無接受過相關的訓練，再者發包給專業廠商進行施作，其施測後的成果報告若無實際開挖就無法驗證檢測結果之準確度或正確性，故訪談單位希望能有相關方式、工具及系統來協助單位判釋透地雷達所輸出的訊號圖像，以解決第一線道路養護人員無相關專業及經驗的問題，將有助於透地雷達應用於道路養護巡查上。

為協助道路管理機關判釋透地雷達所輸出的訊號圖像，本計畫將探討以人工智慧（AI）辨識透地雷達訊號圖像的可行性，希冀能以智慧化的辨識方法來輔助道路管理機關人員的專業及經驗不足的部分，讓透地雷達能廣泛應用於道路養護巡查作業上，以主動預防的方式來確保道路品質及用路人安全。

1.2 研究目的

本計畫為 114 年度預計辦理「透地雷達落實應用於省道養護巡查之研究」合作研究計畫之先期研究，研究目的如下：

- (1)應用新興科技輔助省道養護業務，提升自主巡查檢測能力。
- (2)相關研究成果將可提供公路局（公路總局已於 112 年 9 月 15 日改制更名為公路局）、高速公路局及各縣市政府之道路管理單位等未來施政之參考，以確保道路品質及用路人安全。
- (3)提供本所後續辦理透地雷達、人工智慧辨識等相關研究之應用。

1.3 研究方法

本計畫之主要研究方法說明如下：

(1) 資料蒐集及文獻回顧

蒐集相關的文獻及資料，以瞭解研究對象公路局現行省道養護巡查之規定、流程、實際執行情形及國內外使用人工智慧辨識透地雷達訊

號圖像的成熟度及普遍性等，據以研析探討。

(2) 研究對象及專家學者探訪

訪談研究對象及專家學者，以瞭解研究對象及專家學者對於透地雷達應用於省道養護巡查及AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像的看法並請其提供相關的意見，據以研析探討。

(3) 透地雷達應用於省道養護巡查可行性探討

探討如何將透地雷達檢測應用於省道養護巡查作業上，期望能以主動預防的方式進行養護巡查作業，更積極的確保道路品質及用路人安全。

(4) AI 智慧化辨識透地雷達訊號圖像可行性探討

探討以人工智慧的方式來辨識透地雷達訊號圖像，期望以該方式來輔助省道養護人員專業及經驗不足的部分，並減輕其負擔，讓透地雷達能廣泛應用於省道養護巡查作業上。

1.4 研究內容與流程

本計畫之主要研究內容說明如下，其工作流程如圖 1.1 所示。

(1) 資料蒐集及文獻回顧

透過「交通部公總路局公路養護手冊」彙整出公路局現行的道路養護巡查相關規定、流程並拜訪公路局辦理第一線養護作業的工務段進行蒐集實際執行養護巡查及後續維護處置等相關資料。

透過各大論文典藏系統、資料庫及期刊文獻等蒐集國內外使用人工智慧辨識透地雷達訊號圖像等相關的論文及資料。

(2) 研究對象及專家學者探訪

辦理研究對象的訪談，訪談公路局及其轄下的養護工程分局、工務

段，從政策面、管理面及執行面上，瞭解研究對象對於透地雷達應用於省道養護巡查及AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像的看法並請其提供相關的意見。

辦理專家學者的訪談，訪談透地雷達及人工智慧的專家學者，以瞭解專家學者對於透地雷達應用於省道養護巡查及AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像的看法並請其提供相關的意見。

(3)透地雷達應用於省道養護巡查可行性探討

依據所蒐集、彙整的省道養護巡查相關資料、研究對象及專家學者訪談紀錄和提供的相關意見等，進行研析探討透地雷達如何應用在省道養護巡查上及其可行性。

(4)AI 智慧化辨識透地雷達訊號圖像可行性探討

依據所蒐集、彙整的國內外使用人工智慧辨識透地雷達訊號圖像相關文獻、資料及研究對象、專家學者訪談紀錄和提供的相關意見，研析探討 AI 智慧化辨識透地雷達訊號圖像的可行性。

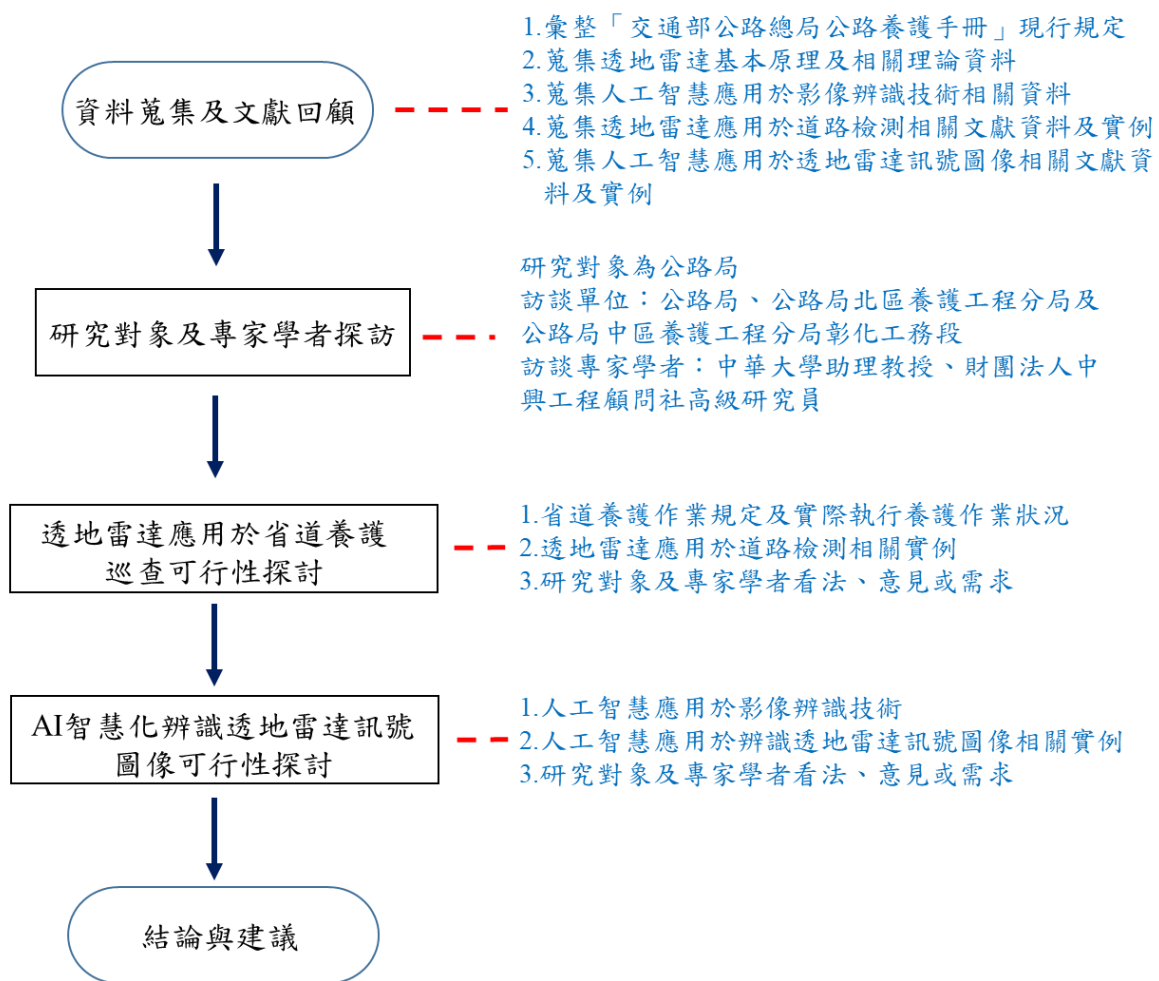


圖 1.1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

2.1 非破壞性檢測透地雷達之概述

透地雷達係為於非破壞檢測（non-destructive testing，NDT）方式之一，非破壞檢測又稱無損檢測，是利用物理或機械方法、技術，在不影響受測物未來使用功能或現在運行狀態下，檢測受測物表面、內部與隱蔽之缺陷、瑕疵或探測受測物之物理或機械性質的檢測技術。

非破壞性檢測和傳統破壞性檢測的不同係非破壞性檢測著重於預防性檢測以及缺陷（瑕疵）檢測為主，具有快速與經濟的優點，並符合淨零碳排精神，因此受到各界廣泛的應用。

非破壞檢測的技術基本組成可概分為檢測訊號產生、受測對象及訊號處理等三部分。而一般非破壞檢測之流程，如圖 2.1 所示。

非破壞檢測以檢測能源作為分類，可分為：（1）利用光學檢測：如目測檢測法、工業內視鏡檢測、光學全像術等（2）利用輻射能檢測：如 X 射線照相、 γ 射線照相、中子射線照相術、電腦斷層掃描等（3）利用音波傳遞檢測：超音波檢測、聲射檢測、超音波影像掃描、超音波電腦斷層及全像術等（4）利用電磁能檢測：如磁粒檢測、磁場偵測法、磁共振測試、渦電流檢測法、微波材料分析等（5）其他：如液滲檢測、熱能檢測等，而透地雷達係藉由電磁波天線（罩）發射電磁波束作為檢測能源，故屬於電磁能檢測的一種。

隨著科技的日新月異，各種不同中心頻率、脈衝型態的電磁波天線及相關測量、定位等工具的擴充模組相繼開發問世，配合高速擷取系統、筆記型電腦及搭配不同的載體等，透地雷達應用的範疇逐漸擴展並被廣泛應用於土木、水利及環境等工程。

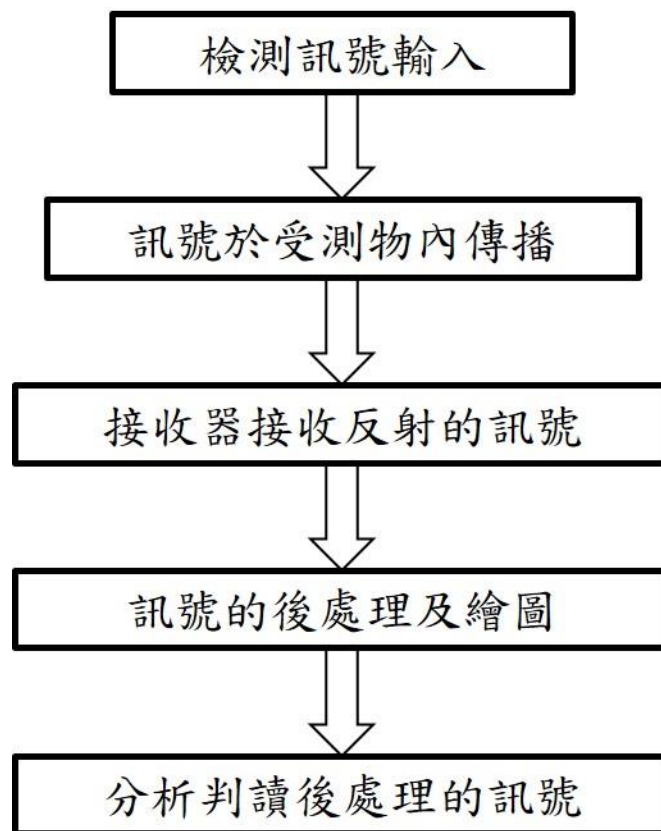


圖 2.1 非破壞性檢測之流程^[38]

2.2 透地雷達應用範疇

參照蒐集的研究文獻、期刊等列舉出透地雷達應用實例^[38]：

- (1) 地下埋設物及不明物體的調查（如管線、洞穴、孔洞、人造地下構造物及掩埋物等）
- (2) 地下水位深度及含水量變化探測
- (3) 混凝土構造物、鋼筋混凝土構造物檢測
- (4) 樓版的檢測
- (5) 壩體掏空及孔洞的探測
- (6) 隧道工程襯砌檢測
- (7) 河道斷面沖蝕、水底淤積物探測及河床、湖底之地形測繪
- (8) 岩體裂縫與斷層探測
- (9) 遺址與考古探測
- (10) 其他方面的探測（如土壤液化、地層沉積構造等）

以上應用範疇雖然多，但是歸納起來是利用電磁波束在不同介質下的反射特性及其剖面圖所顯示出訊號推估目標物的特性、幾何形狀及位置等，與本計畫相關的檢測道路品質之應用以下列各小節分別敘述。

2.2.1 地下埋設物及不明物體調查

臺灣道路的下方除了電信、電力、瓦斯（天然氣）及自來水等維生管線外，還有下水道系統、油管等埋設物，尤其在人口稠密的都市計畫區，其道路下方的管線更是層層疊疊，因此後續無論是管線的維修、道路的維修甚至拓寬或是要再埋設新管線等相關工程，都需要先了解道路下有什麼埋設物，以免誤損而造成災害，另外道路下的管線損壞也會直接或間接影響道路的功能性及安全性等，並降低道路的服務品質及水準。

過去許多學者、專家們應用透地雷達探測調查地下埋設物及不明物體都有顯著的研究成果，因此透地雷達常被用於探測道路下方的管線及孔洞等，相關研究如下所述。

Kovas^[2] (1991) 研究顯示透地雷達對於找出地下不明物體的大概位置持肯定的態度，且管線在透地雷達的影像圖中會造成“倒 V”字型的反射圖樣。之後，Tong (1993) 也應用透地雷達來探測地下埋設管線，其結果顯示管線在透地雷達的掃描下會造成“倒 V”字型的反射影像，地下電纜亦會產生類似形狀得繞射。

周治國^[17] (1993) 研究顯示透地雷達對管線反應靈敏，尤其是金屬管，定位時可以利用剖面上反應的繞射高點定出管線實際位置。

李德河等人^[19] (1999) 在透地雷達應用於並排管線與地下孔洞之探測結論，孔洞的位置可由雷達剖面影像雙曲線頂點決定，但孔洞尺寸需由其頂點附近異常平緩段決定其橫向寬度。

葛其民^[20] (2000) 研究透地雷達探測柔性鋪面瀝青混凝土面層、底層、基層之厚度及可能之裂縫及孔洞之鑑別、新舊材料厚度之鑑別，證實透地雷達具有鋪面結構描繪及空隙定位能力，另利用透地雷達所得之厚度資料，配合撓度儀施測求得結構數 (SN)，可得鋪面之剩餘承載力及壽年資訊，進一步規劃公路維修養護時程，提升公路之品質。

林明寬^[21] (2001) 研究透地雷達在探測地下管線方面，直徑大於等於 10cm 管線部分，對其平面位置、深度及管徑大小 (群管範圍) 的判定可提供良好的結果，其平均誤差約公分等級；而在小於 10 公分管線部分，受限於天線最小解析度及地層環境影響，其平面位置及深度部分，判定效果與前者相近，但管徑大小 (群管範圍) 的辨別，其誤差均大 10 公分效果不佳。在不明廢棄物探測方面，由透地雷達圖像可提供良好的廢棄物掩埋深度和範圍，且可利用介電常數差異做簡單的物質分類，此外，亦可明顯的辨識出地下水位。在地層判定方面，可看出粗略地層的變化趨勢，且由透地雷達圖像可判定地層視傾角約為 25 度。故由研究之結果可知透地雷達法是一種方便而快速的非破壞性方法適合用來進行地下環境探測。

紀昭銘^[22] (2001) 應用透地雷達對土中的異物進行探測，發現孔洞或者管線中是否有水，對於其探測結果有極大的影響，可能是因水的介電常數與砂相差甚大，電磁波反射較明顯易被測出。

黃建二^[23] (2004) 應用透地雷達來探測路面下之地下廢棄掩埋物，藉由雷達剖面圖中，可得知地層未受擾動或開挖前，其圖像會是連續且平整之反射訊號，反之，若地層曾受到擾動或開挖則影像會出現凌亂且不連續之反射訊號，另外建立三維雷達剖面，可快速剖析各個不同深度中廢棄掩埋物之分佈情形。

Chen 等人^[3] (2007) 透地雷達發射電磁波於地下孔洞產生駐波，主要用來探測孔洞及裂縫，檢測後續判釋找到地下孔洞的最大寬度及電磁波半波長的關係，藉由室內和室外小規模實驗驗證電磁駐波的產生，當駐波的振幅在相對極小的位置時，此時又稱為駐波的節點。走時雙曲線若沒有出現節點，表示地下繞射體洞內或實心物體的最大寬度小於電磁波半波長。地下孔洞可藉由雷達剖面中走時雙曲線或拱形曲線上所出現的節點來認定此孔洞之存在及其位置。節點間的距離可用來估算電磁波波長，雷達剖面中走時雙曲線或拱形曲線上節點的認定，可用來判釋地下孔洞、裂隙或實心物體。

黃志銘^[26] (2008) 研究成果顯示，瀝青混凝土鋪面厚度較混凝土鋪面厚度更易辨識，掏空狀況下，瀝青鋪面下方預埋的缺陷都有明顯反應辨(判)識，而掏空含水狀況下，由於水使得電磁波速變慢，由壓克力箱底部反射的訊號延遲，並造成圖像中瀝青底部與水的介面層會有不清楚得狀況產生；混凝土鋪面 1000MHz 天線之底層反應無法清楚由影像剖面看出，代表在到達混凝土下方掏空缺陷位置時，其能量已經消散而不足以穿透；而 500MHz 天線之結果，其不論是掏空或是掏空含水皆可以看出各掏空缺陷的位置。

陳俊廷^[31] (2011) 研究結果顯示，差異面積平均值會隨著孔洞高度的增加而遞增，但到了某高度之後，隨著孔洞高度增加開始遞減；在相同孔洞深度狀況下，孔洞寬度的增加對於反射訊號有明顯的影響。

Thitimakorn^[4] 等人 (2016) 在車水馬龍的市中心，道路維護是一件

不容易的事，利用透地雷達檢測道路下方狀況，從檢測資訊得知埋設民生使用管線、道路之前維護過的痕跡及可能產生孔洞的位置等各資訊做一個整合，利於分析後續道路維護程序，減少道路鑽心取樣及工程成本的支出。

林啟鈞^[34]（2016）研究探討鋪面破壞類型與面層及基底層之關聯性，利用交通量、平坦度、歷年壞位置、透地雷達、落重式撓度試驗、圓錐貫入試驗及鑽心取樣等試驗調查破壞之原因，由數據結果可知鋪面損壞與基底層軟弱具有絕對的相關性，因基底層軟弱承载力不足，導致瀝青鋪面無法承受輾壓而變形，故道路瀝青鋪面在重新鋪築前，亦須考慮基底層強弱，防止鋪面因承载力不足而產生持續性得破壞。

葛文忠等人^[37]（2020）應用二維透地雷達進行地下管線已有多年歷史，然開挖回填與路基材料組成複雜，且管線多起伏轉折交錯，僅憑藉少量二維剖面推定三維地下管線的位置與深度，難度相當高。近年來發展完成的三維透地雷達，結合空氣耦合天線、多頻道與多重頻率及全球衛星定位等技術，並採車載方式進行快速掃描，一次掃描可獲得多頻道且涵蓋範圍更大的三維探查資料，所得的龐大立體方塊資料可進行三方向，包含道路方向、側向與深度方向的剖面，提供多面向且高精度的探查資料。

2.2.2 地下水位深度及含水量變化探測

道路下（塌）陷就是俗稱的天坑，主要是因為路基被掏空所造成，路基掏空與地表水和地下水浸濕和沖刷等破壞作用有關，臺灣身處亞熱帶，氣溫高雨季長，在降雨宣洩不及時，雨水會由路面裂縫滲入瀝青混凝土內部，經泡水及反覆荷重下，瀝青混凝土會剝離脫落產生坑洞，除此之外，因為連續降雨可能會加速土壤流失使得路基掏空，導致路面下（塌）陷。

今(112)年5月竹北及臺北陸續發生建築工地旁的道路塌陷事件，其原因除了開挖地下室時，因抽取地下水導致道路下的土砂一同被帶出，造成路基被掏空形成道路塌陷外，當地下室開挖深度低於地下水

位，且地下擋土連續壁接縫處可能因施工不確實又或是水壓力超過連續壁所能抵擋的強度，導致泥砂隨著地下水由連續壁接縫或是破口滲出，也會造成路基被掏空形成道路塌陷。

道路下（塌）陷對於民眾通行及安全造成極大的影響，透地雷達除了可以檢測道路下被掏空的孔洞外，也能探測地下水位及含水量變化，是可預防道路下（塌）陷的非破壞性檢測方式之一。

透地雷達應用於探測地下水位及含水量變化相關研究如下所述。

Shih 和 Dolittle^[5]（1984）應用透地雷達偵測地下水位時，提出必須考慮的兩個因素，第一是電磁波通過地下水面的反射係數；第二是毛細管緣的高度。孔隙越大時，毛細管液面越低，反之則相反。此外，因為水的介電常數（Dielectric Constant）約在 80 左右，和一般的乾砂 3~5 和黏土 8~12 不同，則透地雷達的電磁波碰到地下水面時就會反射回來，故可用來偵測地下水面的位置。

梁昇^[16]（1990）曾提出，透地雷達回波最大值的反射區，應是土層下之地下水毛細管帶，而非地下水位面，故判釋時需多加注意。

Beres 和 Haeni^[6]（1991）由介電常數的計算得知，地下水面在砂土層中比在黏土層中更容易測知，主要是因其反射的回波較大之故。

周治國^[17]（1993）亦研究顯示粗顆粒、非凝聚性沈積物，其地下水面反射特性為平整、連續性佳的強反射訊號，可探測之地下水面深度約 5 至 20 公尺不等；而細顆粒沈積物如沈泥、黏土，反射訊號因能量衰減較大，導致穿透深度不深且訊號雜亂；至於成岩地層因裂隙或孔洞含水，則地下水賦存帶為高能量之強反射區。

廖國彰^[18]（1993）研究顯示透地雷達對地下水會反映出一平整界面，可利用此特性定出地下水面的位置。

Hunaidi 和 Giamou^[7]（1998）應用透地雷達探查埋在地下塑膠配水管是否漏水，漏水時能由漏水管附近造成之孔洞或含滲漏水土壤傳播速度之雷達影像差異來判釋其大概情況。

Kim^[8] (2005) 根據實驗所施測的透地雷達漏水區域之數據與邊緣未受到漏水影響之區域數據做比對，即可判斷出漏水區域所產生的變化，但應用在現實領域層面，會有更複雜的介質及雜訊。

Eyuboglu^[9] (2008) 利用透地雷達檢測於砂箱內之 PVC 管材與金屬管材之滲漏比較，發現滲漏前與滲漏後之管訊息會產生時間上的誤差而造成訊號接收時之深度產生誤差。研究結果為滲漏之範圍於較深層，其檢測出來的物體尺寸及形狀上會產生改變因而造成誤判。

王和文^[27] (2009) 水是自然界中介常數最大，電磁波速低的介質，如果探測目標體含水，將使得含水區的電磁波能大量耗損，其傳播速度急遽減小，傳播距離大幅縮短。且含水區的電磁反射訊號非常強，將減弱其他物質的反射訊號，如果目標物體中含水水量偏高，水的電磁反射訊號往往會干擾甚至完成屏蔽目標體內其他物體的電磁反射訊號。

方慧等人^[28] (2009) 利用三維數值模擬計算研究介質含水率變化對雷達波傳波特性的影響規律，得知介質中含水率變化會使介質的等效相對介電常數、雷達波的傳播速度均發生明顯的改變。

邱曉明^[29] (2010) 以電磁波波傳理論為基礎，配合數位訊號處理技術，可明確判斷管線位置、深度與材質，更發現於標準砂內雷達波波速隨含水量增加而減緩。

劉信邦^[30] (2011) 利用透地雷達 800MHz 天線量測材料介電常數及波速，當河堤含水率 0% 時，介電常數為 3.52，當河堤含水率為 17% 時，介電常數為 19.98，當河堤含水率為 40% 時，介電常數為 46.07，所以當河堤含水率越高時，介電常數也相對比較高。

蔡盛宇^[32] (2012) 使用透地雷達對於地下水位進行檢測，在施測後圖像判斷精確度因判圖人員之經驗有所誤差。因此，研究蒐集研究地區地質剖面資料，使用 Matlab 工具軟體，進行時域有限差分 (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) 模擬透地雷達剖面過程和結果。將 Matlab 模擬結果和地質剖面、透地雷達施測結果相互比對，以增加圖像判斷精確度和數值模擬可信度。

林子堯^[33] (2013) 利用 1GHz 透地雷達檢測標準砂與水泥砂漿內單/雙排鋼筋管線定點漏水之實驗，並應用透地雷達基本理論及數位訊號擷取技術，探討標準砂及水泥砂漿材料內含鋼筋的條件下，管線漏水的等效相對介電常數之變化，並根據電磁波反射訊號、時間差及等效相對介電常數等解析相關漏水訊號特徵及變化，且利用等效相對介電常數於乾溼標準砂及水泥砂漿材料內之差異，判斷其漏水分佈範圍，研究顯示由透地雷達電磁波掃描分析之漏水分佈範圍與管線之實際漏水區域相似。

鄭哲鴻^[35] (2019) 利用透地雷達掃描路面結構，分析路面底下滲水流量及滲水路徑資訊，採取截流或引流對症下藥的工法，徹底解決鋪面底下滲水問題，藉以提升道路品質。

2.3 人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之研究

近年來，人工智慧技術應用於影像辨識有大幅度的進步，該技術亦被應用於透地雷達訊號圖像辨識，惟目前透地雷達訊號圖像還是由人工進行判釋檢測的結（成）果居多，故判釋的人員需要有相當的專業及經驗，否則會影響到檢測結（成）果的準確性。

在 1990 年二維透地雷達引進臺灣後，隨著科技進步及應用上的需求，已逐步發展至三維透地雷達，並採車載方式進行施測相較使用人工拖曳方式更為快速且安全，惟其三維透地雷達所得的資料量是二維透地雷達的百倍以上，採人工逐一判釋訊號圖像除了非常耗時外，也會有人為誤判、疏失等錯誤發生的可能性，如能採用人工智慧辨識技術將可大幅縮短判釋時間並提升結(成)果的準確性。

在第三波人工智慧浪潮中，圖形處理器（Graphics Processing Unit，GPU）比過去的中央處理處（Central Processing Unit，CPU）更適合執行「深度學習」，以多層次的巨大神經網路搭配更進步的訓練技術、計算能力，能學習更複雜的圖像辨識，因此，國內外發展人工智慧辨識圖像技術方興未艾。

人工智慧辨識透地雷達訊號圖像之相關研究如下所述：

Molyneaux 等人^[10] (1995) 研究顯示，使用神經網路方法來辨識透地雷達檢測鋼筋混凝土內部鋼筋之結果（訊號圖像）是可行的，幾乎在所有情況下，神經網路方式都可以成功地有一定深度的範圍定位鋼筋，此外，還可以成功地將每根鋼筋的深度進行分類。

Al-Nuaimy 等人^[11] (2000) 探討使用透地雷達探測地下設施和固體物，並提出一種適用於現場成像的新型計算處理技術，所開發的系統採用神經網路、信號和圖像處理技術的組合，已幾乎即時的方式提供地下的高分辨率圖像，便於直接的判釋並提供準確的深度和方位信息，經由預處理、圖像分割和模式識別，研究顯示，可以幾乎即時對此類結構自動有效的檢測和繪圖。

Shaw 等人^[12] (2005) 利用多層感知器 (MLP) 網路檢測顯示雙曲線圖像格式的鋼筋反射訊號，網路的訓練和測試是利用模擬槽模擬混凝土的特性及真實的混凝土樣本來進行，研究顯示，使用 MLP 神經網路方法可以有效的自動辨識和定位透地雷達訊號中的鋼筋。

王文郁^[25] (2006) 利用透地雷達探查地下管線及材質，透地雷達雖能判斷地下訊號，但地下介質複雜，因此需要仰賴人員長期經驗得以正確判斷，因此研究搭配類神經網路學習與儲存經驗知識之功能。由實驗室之模擬分析結果，辨識管線訊號之種類僅有 9.4% 之誤判率，由此可證明結合類神經網路之技術是可行的，在現地管線驗證部分，因地下水之流動可能導致雷達波之能量分散，故使得檢測之振幅經濾波後，其數值有可能與實驗室模擬有所差異。

Liu 等人^[13] (2020) 因透地雷達已廣泛用於非破壞性檢測和定位混凝土中的鋼筋。然而，人工解讀（判釋）大量透地雷達圖像非常耗時，而且高度依賴於從業者的經驗和可用的先驗信息，因此提出一種利用深度學習和遷移的自動檢測和定位方法。首先，建立單次拍攝多盒檢測器 (SSD) 模型以識別透地雷達圖像，這種深度學習模型使用真實的透地雷達數據進行訓練，該數據集包含 3,992 幅圖像中的 13,026 根鋼筋目標，這些圖像是由在建設中的住宅所收集而來的。其次，將每個目標區域遷移並轉化為二值（維）圖像找到鋼筋。二值（維）化後，可獲得

聚焦簇的頂點並用於估計鋼筋的水平位置和深度。研究顯示，所提出的人工智慧方法的檢測準確率為 90.9%，處理尺寸為 300×300 像素的透地雷達所需計算的時間僅為 0.47 秒。實驗室實驗中的深度估計誤差 < 1.5mm (5%)，橫向位置誤差 < 7mm。因此，得出結論是，當手持透地雷達以步行速度運行時，所提出的方法可以即時自動檢測透地雷達圖像中的鋼筋，並且深度估計精度是可以接受的。

徐亦呈^[36] (2022) 嘗試以機器學習所延伸的深度學習概念，與土木工程的非破壞性檢測進行跨領域的結合，將原先人工判釋透地雷達圖缺陷位置與缺陷損傷類別自動化。因此將透地雷達剖面圖轉成數位編碼矩陣，並應用數位編碼矩陣分析數值來判斷波速、振幅等數據，進而得知其結構物的內部狀況。再利用 Azure (custom vision) 進行透地雷達圖的圖面分析，利用人工智慧來判斷透地雷達圖面上的損傷位置及損傷類別，讓原有的人工判釋過程自動化，將大量透地雷達圖檔案資料能快速的完成解析，進而節省時間與人力成本，以達成分析自動化和更好的工作效率及準確性。最後針對透地雷達圖中的損傷位置與損傷類別做判讀，在研究驗證後，使用人工智慧判讀與數位編碼運算分析結果大致相同，因為人工智慧可以自動判釋，當處理大量數據時效率可以提高。

Barkataki 等人^[14] (2022) 提出一種用於透地雷達 B 掃描預測埋藏物體尺寸的捲積神經網路 (Convolutional Neural Network, CNN) 模型。作為預處理步驟，Sobel、Laplacian、Scharr 及 Canny 運算元 (濾波器) 用於雙曲線特徵的邊緣檢測，其 CNN 架構在模型的初始階段提取高級特徵，並在輸入數據通過神經網路時學習額外的低級特徵，最終對所需參數進行評估。人工生成的透地雷達 B 掃描 (B-Scan) 用於訓練模型，所提出的方法在預測埋藏物體尺寸方面表現出良好的性能，經過比較，使用 Scharr 運算元可讓 CNN 模型表現出最佳性能，在新的、未見過的數據上進行測試時，其平均絕對百分比誤差最小。

Barkataki 等人^[15] (2023) 提出了一種用於估算地下桿 (實心) 和管 (空心) 的直徑的人工神經網路 (Artificial Neural Network, ANN) 模

型。將時域中捕獲透地雷達數據轉換為頻域，使用快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT) 進行轉換，然後使用 ANN 進行特徵提取。使用基於現場可程式化邏輯閘陣列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 的原型透地雷達系統收集鋁、不銹鋼、螺紋鋼筋和塑膠 (Polyvinyl Chloride, PVC) 製成的各種目標的透地雷達 A 掃描 (A-Scan) 數據。所提出的模型的平均絕對百分比誤差為 1.89%。實驗結果證實了所提出方法在從透地雷達數據中提取與尺寸相關信息方面的有效性。

第三章 透地雷達基本原理及相關理論

3.1 透地雷達基本原理^[38]

透地雷達係以高頻的電磁波(UHF/VHF)反射的原理來探測目標物，其原理是以發射天線(或稱發波器)不斷發射固定中心頻率之電磁波至欲偵測之標的上，利用電磁波遇到不同電磁性質(如相對介電常數、導電度等)的介質界面產生反射訊號再藉由接收天線(或稱收波器)接收，沿著測線上每一軌跡作取樣，如圖 3.1 所示，按幾何關係排列並將訊號放大、數位化後儲存於主機中，且可即時由操作軟體顯示成圖形資料檔案據以分析受測物體的剖面排列方式或判別標的物之特性，其基本原理示意圖如圖 3.2 所示。

當透地雷達發射天線的中心頻率越高，波長越短，解析度相對提高但探測深度則較小；反之，發射天線的中心頻率越低。波長越長，則探測深度加深，但解析度較低，其中心頻率約自 1MHz 至 2.5GHz。

一般透地雷達探測法可分為兩種方法，如圖 3.3 所示，其分述如下：

- (1) 水平剖面法：又稱為等支距法，此法為透地雷達施測最常用的方法，其方法為發射天線和接收天線間的距離是固定不變，所以施測時整組天線組(發射天線和接收天線)是一起沿著測線方向移動。
- (2) 同中點施測法(CMP 法)：CMP 法的施測方法是發射天線和接收天線同時對一中點作對稱式展開施測，因反射點不會隨接收天線的移動而改變，故可推測發射天線與接收天線中點下之介質速度，並可提供水平剖面法計算深度時所需之介質波速。但在實際施測時，隨著測線展開越大電磁波能量衰減越快，使得到的反射信號不佳，而造成誤判的情況。

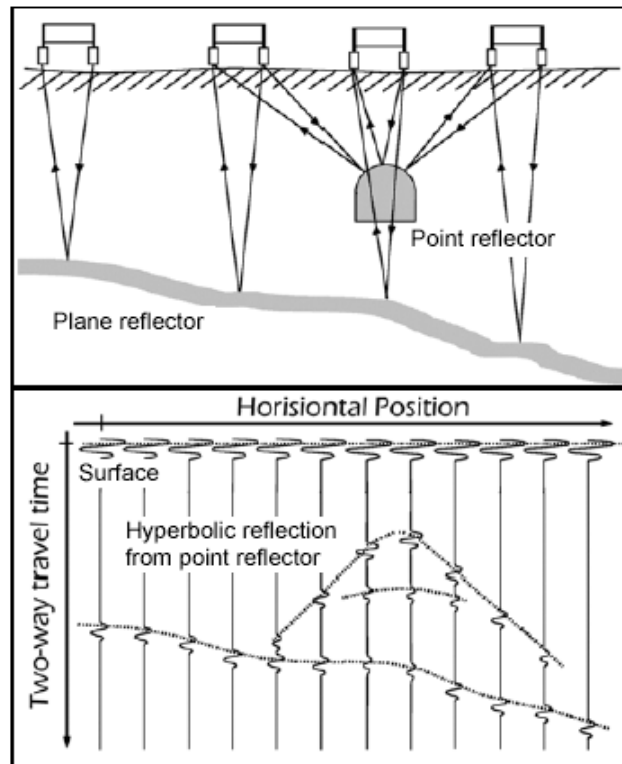


圖 3.1 異質物影響繪製示意圖(Malå GeoScience GroundVision)

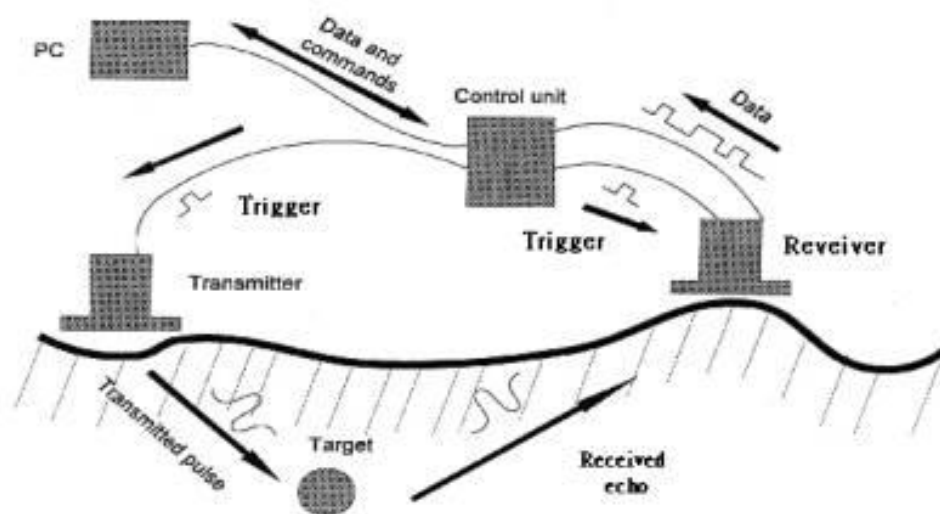


圖 3.2 透地雷達基本原理示意圖

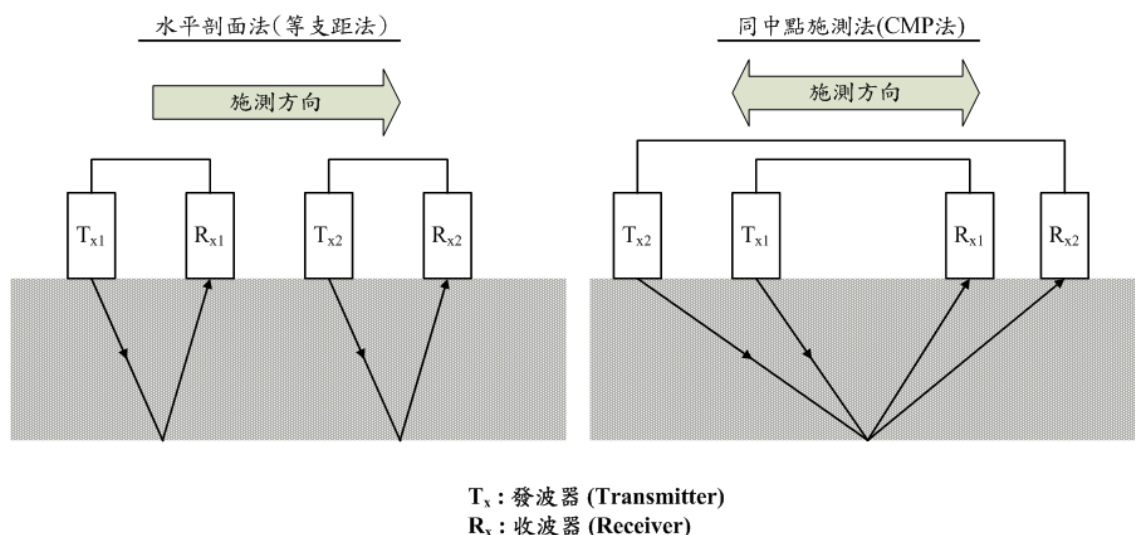


圖 3.3 透地雷達現場施測法

3.2 電磁理論^[38]

3.2.1 電磁波基本原理

電磁波是電磁場的一種傳播型態，這種傳播以光速在空間中行進，如圖 3.4 所示。由於交變場中電場與磁場互相依賴而同時存在，所以電磁波也常被稱為電波。

1864 年，馬克斯威爾（James Clerk Maxwell）建立關於電磁場的方程式，首次從理論上預言了電磁波的存在，同時也提出光的電磁波理論而電磁波的運動規則，可由馬克斯威爾的方程式來描述，其方程式表示，變化的磁場會產生電場，而位移電流造成變化的電場，又會產生磁場；如此反覆不斷，在空間中形成電磁波。由此可知，位移電流的概念是電磁波理論的前提。

證明電磁波存在的科學家，卻是赫茲。1887 年，赫茲首先用實驗方法證實了電磁波的存在。赫茲使用電感和電容充放電的高頻振盪，成功的產生了電磁波。他的發射器其實就是一組高壓放電裝置，這是個開路的導線迴路，放電時可以看到兩金屬圓球間有電荷穿過空氣，產生火花；接收器也是個開路的導線迴路，兩端都是黃銅製的圓頭，當發射器做高壓放電

的同時，接收器端出現了微弱的火花，就可以知道檢測到了從發射器射來的電磁波。

赫茲還模擬各種光學設備，將電磁波聚焦，確定其極化方向，使電磁波反射和折射，進行干涉、繞射等實驗，並測量波長等等。赫茲的實驗不僅證實了電磁波的存在，而且顯示了光和電磁波的同源性。

電磁波的頻率 f (MHz) 即電震盪電流的頻率，其單位為赫茲 (Hertz)，可由公式 $v = f \times \lambda$ 求得，其中 λ 為波長、 v 為波速，電磁波在空氣中的波速為 c 。

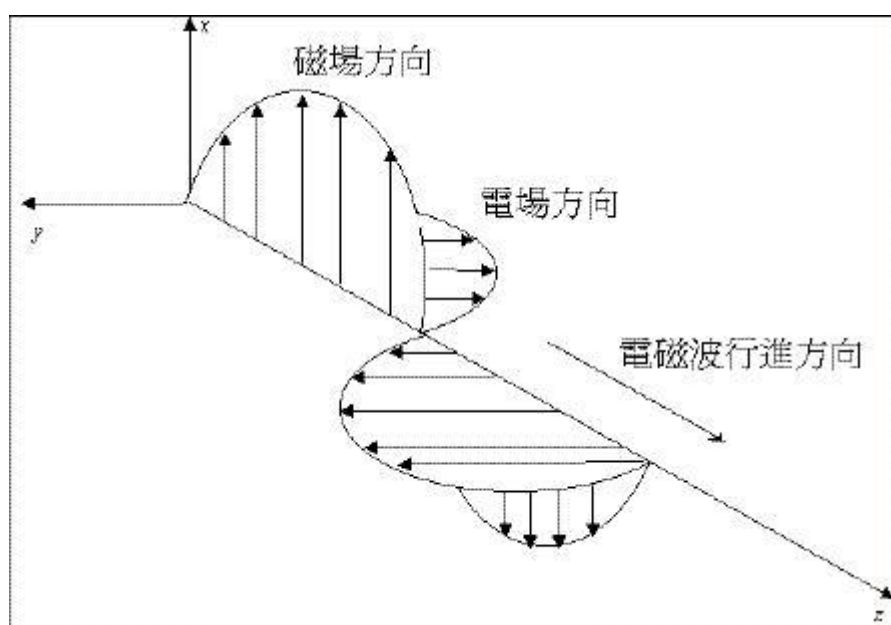


圖 3.4 電磁波傳播之形態

3.2.2 馬克斯威爾方程式

透地雷達的基礎來自於電磁波理論；而電磁波理論基礎導源於馬克斯威爾方程式，所以要對馬克斯威爾方程式有基本的瞭解，敘述如下：

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3.1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.4)$$

以上 4 式中

D ：電位移向量 (electric displacement vector, C/m²)

ρ ：自由電荷體密度 (free electric charge density, C/m³)

E ：電場強度 (electric field intensity, V/m)

B ：磁通量密度 (magnetic flux density, T)

H ：磁場強度 (magnetic field intensity, A/m)

J ：電流密度 (current density, A/m²)

t ：時間 (time, sec)

式 3.1 為高斯定律用於電場的微分形式，高斯定律指出了流出封閉表面的電通量等同於封閉表面內電荷電量間的關係。式 3.2 為法拉第定律的微分形式，法拉第定律指出電路中感應電動勢的大小等於穿過這一封閉電路磁通量的變化率。式 3.3 為高斯定律用於磁場的微分形式，式 3.4 為安培定律的微分形式，安培定律說明環繞一封閉曲線對磁場強度進行線積分的結果，等於此封閉曲線所包含之電流。

馬克斯威爾發現本是獨立存在彼此互不相關的上述 4 式，是聯立存在的並有交互關係，其對於電磁波假設之區域為一無電荷存在，即 $\rho=0$ 且此區域之介質為線性及等向性，即 $D=\epsilon E$ ， $B=\mu H$ ， $J=\sigma E$ ，將這些關係帶入馬克斯威爾方程式可得：

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (3.5)$$

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot H = 0 \quad (3.7)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3.8)$$

由此 4 式可推出電磁波之波速為：

$$V = \lambda f = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon/2 \left(\sqrt{1 + \left(\sigma/\omega\varepsilon \right)^2} + 1 \right)}} \quad (3.9)$$

上式中

μ ：導磁率 (magnetic permeability, H/ m²)

ω ：角頻率 (angular frequency, rad/sec)

σ ：導電度 (conductivity, S/m)

由於在真空中的 $\sigma = 0$ 且 $\varepsilon = \varepsilon_0$ ， $\mu = \mu_0$ ，故電磁波於真空中之波速為：

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \quad (3.10)$$

上式中

μ_0 ：真空中之磁導率 (magnetic permeability, H/m²)

ε_0 ：真空之電容率， 8.854×10^{-12} F/m

3.3 介質的電磁特性^[38]

影響透地雷達電磁波的反射情形，可以簡單分為電性和磁性，而大部分介質之電性變化較磁性變化大，故介質中電性變化決定透地雷達施測成果，表 3-1 為電磁波 100MHz 在各種介質中的電性與波速之關係。

3.3.1 導電度 (Electrical Conductivity)

導電度為介質傳導電流的能力，其倒數為電阻率，定義如式 3.11 所示：

$$\sigma = \frac{1}{\rho'} \quad (3.11)$$

上式中

σ ：導電度 (Siemens/m)

ρ' ：電阻率 (Ω -m)

導電度與介質的含水量及黏土含量成正比，且在飽和沈積層土壤中導電度與孔隙率成正比。當介質的導電度越大時，會不利於透地雷達的探測，因為導電度與電磁波的衰減成正比。

在透地雷達應用上依雷達探測適用與否，大致將導電度分以下 3 級：

- (1) 高導電度 ($\sigma \geq 10^{-2} S/m$)：為不佳的透地雷達探測介質。如海水、濕頁岩濕黏土等。
- (2) 中導電度 ($10^{-7} \leq \sigma \leq 10^{-2} S/m$)：為中等的透地雷達探測介質。如純冰水、乾黏土、砂、粉土等。
- (3) 低導電度 ($\sigma \leq 10^{-7} S/m$)：為絕佳的透地雷達探測介質。如空氣、瀝青、混凝土。

3.3.2 低耗損與高耗損介質 (Low-loss and High-loss Material)

物質在電場的作用下，將產生兩種電流磁效應，分別為傳導電流與位移電流。

- (1) 傳導電流：自由電子在電場作用移動，產生傳導電流 (conduction current)， J_C ，如式 3.12 所示：

$$J_C = \sigma E \quad (3.12)$$

(2) 位移電流：當時變電場作用在極性物質（如水等）時，會產生位移電流（displace current），則電通量密度（electric flux density）， D_e ，如式 3.13 所示：

$$D_e = \varepsilon E \quad (3.13)$$

其位移電流密度，如式 3.14 所示：

$$J_D = \frac{dD_e}{dt} = \frac{dE}{dt} \quad (3.14)$$

其總電流密度， J ，即以傳導電流與位移電流之和如式 3.15 所示：

$$J = J_C + J_D = (\sigma + i\omega\varepsilon)E \quad (3.15)$$

上式中

E ：電場強度（V/m）

σ ：導電度（S/m）

ω ：角頻率（radians/s）； $\omega = 2\pi\nu$ ； ν ：天線頻率

ε ：介質的電容率（F/m）； $\varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r$

傳導電流密度不會因頻率的變動而產生變動，但是位移電流密度卻會隨著頻率的增加而增加，因此，在高頻率時總電流密度中的位移電流密度扮演重要的角色。

在電磁學上，將材料以傳導電流密度及位移電流密度之比值 $\frac{|J_C|}{|J_D|}$ 來做界定，分為：低耗損介質（ $\frac{|J_C|}{|J_D|} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \ll 1$ ）及高耗損介質（ $\frac{|J_C|}{|J_D|} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \gg 1$ ），由於在高耗損介質中電磁波衰減快速難以得到回波訊號，且會產生散頻效應（dispersion），故透地雷達適合之施測環境為低耗損介質，雖有此限制，但由於透地雷達所發射之頻率相當高，故對於

大多數地質材料而言均視為低耗損介質。

3.3.3 相對介電常數 (Relative Dielectric Constant)

相對介電常數為有電介質時之電容與無電介質時之電容的比值，定義如式 3.16 所示：

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.16)$$

上式中

ϵ_r ：相對介電常數

ϵ ：材料之電容率 (permittivity, F/m)

ϵ_0 ：真空之電容率 (F/m)，約為 8.85×10^{-12}

3.3.4 反射係數 (Reflection Coefficient)

當電磁波遇到不同介質的交界面，其入射波振幅與反射波振幅間的比值為反射係數，而反射係數又因各地層介電常數之不同而影響其值大小，故其表示如式 3.17 所示：

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_a} - \sqrt{\epsilon_b}}{\sqrt{\epsilon_a} + \sqrt{\epsilon_b}} \quad (3.17)$$

上式中

ϵ_a ：在地層 a 的介質常數

ϵ_b ：在地層 b 的介質常數

3.3.5 衰減度 (Attenuation)

衰減度為電磁波在介質中衰減的程度，其值越大則電磁波振幅衰減幅度越大，能量也衰減越多。衰減度， α (dB/m)，如式 3.18 所示：

$$\alpha = 1.64 \frac{\sigma}{\sqrt{\epsilon}} \quad (3.18)$$

由上式可知衰減度和導電度成正比且與介質之介電常數的根號成反比，而衰減損失的原因歸納出下列 3 種(Beres and Haeni, 1991)：

- (1) 電磁波能量因為穿越導電介質而部分轉成熱能。
- (2) 在水中的介電衰減 (dielectric relaxation)。
- (3) 黏土礦物化學離子的擴散。

故電磁波於良好導電度土層中（如飽和土壤），衰減常數越大，其能量衰減越快，透地雷達能探測到的深度也越淺。

表 3-1 100MHz 電磁波在各種介質中的電性與波速之關係

介質名稱	導電度 (S/m)	介電常數	衰減係數 (dB/m)	波速 (m/ns)
空氣	0	1	0	0.3
純水	0.5	81	0.1	0.033
海水	30000	81	1000	0.01
乾雪	0.001~0.01	1.4	-	0.25
永凍土	0.01~0.01	4~8	-	0.12
花崗岩	0.01~1	4~6	0.01	0.13
濕玄武岩	10	8	-	0.11
乾石灰岩	0.5~2	4~8	0.04	0.12
濕石灰岩	25	8	-	0.11
頁岩	1~100	5~15	1~100	0.09
濕砂岩	40	6	-	0.12
乾鹽	0.01~1	5~6	0.01	0.13
乾砂	0.01	3~5	0.01	0.15
飽和濕砂	0.1~1	20~30	0.03	0.06
黏土	2~1000	5~40	1~300	0.06
沈泥粉土	1~100	5~30	1~100	0.07
砂質乾土	0.14	2.6	-	0.19
砂質濕土	6.9	25	-	0.06
壤質乾土	0.11	2.5	-	0.19
壤質濕土	21	19	-	0.07
黏質乾土	0.27	2.4	-	0.19
黏質濕土	50	15	-	0.08
混凝土	-	6~11	-	0.10
瀝青	-	3~6	-	0.12
PVC	0.0013	3.3	0.16	-

(改自 Ulriksen, 1982; Davis and Aannan, 1989^[1])

3.4 儀器參數之設定^[39]

在透地雷達施測時之參數設定包含了以下幾種參數之設定，天線頻率設定、搭配天線施測所需之測距輪、取樣間距、疊加次數、取樣頻率、時間視窗設定等。

(1) 天線頻率

天線頻率（antenna frequency）與穿透深度關係，針對不同使用目的（探測深度或解析度）及檢測環境限制，採用中心頻率不同之電磁波天線，而土木檢測較常見之天線，其中心頻率範圍為 25～1000MHz，檢測解析度隨頻率增加而漸佳，如輸出功率相同，探測深度則隨頻率增加而減少，見表 3-2。

表 3-2 天線頻率與探測深度關係表

天線頻率	檢測深度(m)
25 MHz	5～30
50 MHz	5～20
100 MHz	2～15
250 MHz	1～10
500 MHz	1～5
800 MHz	1
1 GHz	0.5

(2) 取樣間距

取樣間距（measuring wheel）為量測拖曳盒拖行之距離，以拖曳方式啟動接受天線接收資料，即雷達波形軌跡(Trace)之間的實際長度，其取樣間距範圍為 0.2 cm～99.99 cm，此設定值會改變影像解析度。一般由現場所需探測之待測物寬度決定，假如待測物之寬度較微小，則需較低的取樣間距，如此才能有較佳的解析圖形；換言之，待測物之寬度較寬大，則需較高的取樣間距，如此才能增加圖形的判讀效率。

(3) 疊加次數

疊加次數（Number of Stacks）為發射天線在同一測點發射訊號的次數，此參數可以用來將訊號加強並且消除隨機雜訊，其方法

就是將同測點中所接收的振幅資料加以疊加然後平均，藉以消除雜訊提高訊號品質，而此平均後的振幅資料表示成一條軌跡。

(4) 取樣數目

取樣數目 (number of samples) 為接收完整一條軌跡 (trace)，所設定之擷取點數的多寡，即處理轉化後之矩陣大小，最低取樣點數為 40；最高至 1024，可依不同的現況環境，判斷選擇最佳的取樣點數。

(5) 取樣頻率

取樣頻率 (Sampling Frequency) 為檢測時之時間範圍，在軌跡中之連續取樣，如果取樣頻率設的過高，訊號衰減愈快，訊號走時愈短，則所測深度愈淺；反之所設定取樣頻率愈低，則探測的深度愈深。

(6) 時間視窗

時間視窗 (Time Window) 為透地雷達接收天線接受訊號之時間間隔，其時間零點以接收天線開始接收雷達波算起，時間視窗如果愈大，使接收天線接受訊號的時間愈長，則所得之訊號可達到探測體較深的部分；反之，若時間視窗開的愈小，使接收天線接受訊號的時間愈短，則所得之訊號只達到探測體較淺的部分。

對於時間視窗的大小與天線的頻率和待測物體的電性有關，若使用的天線頻率較高或導電度越大的探測物，雷達波的衰減較快，導致透地雷達探測深度變淺，因此時間視窗不適合用太大，因為時間視窗調整的再大，雷達波穿透深度不深，對深處的探測沒有效果，反而影響探測的結果；相對的，若使用較低天線頻率或導電度小的探測物，由於雷達波衰減係數小，探測深度較深，因此時間視窗可調整到較大數值，使得將接收天線可接受到較深的訊號，增加探測深度的結果。選擇適當的時間視窗大小，必須考慮到天線頻率、探測物的導電度及探測的深度，調整適當的時間視窗數值，來獲得透地雷達檢測的最佳效果。

第四章 透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

本章主要探討透地雷達如何應用於省道一般道路柔性鋪面養護巡查及其可行性，藉由交通部公路總局公路養護手冊^[40]（以下簡稱公路養護手冊）瞭解現行省道一般道路柔性鋪面養護巡查及養護措施作業等相關規定，並對研究對象公路局進行訪談以瞭解省道一般道路柔性鋪面養護巡查及養護措施等實際執行狀況，同時瞭解公路局對於透地雷達應用於省道一般道路柔性鋪面養護巡查的想法、意見及需求等，除外，本計畫也訪談學者專家，其以不同的角度、思維給予專業上的想法及意見。

綜合整理公路養護手冊相關規定、訪談紀錄，並透過應用透地雷達檢測相關實例等探討分析透地雷達如何應用於省道一般道路柔性鋪面養護巡查及其可行性。

4.1 省道養護之作業規定

公路養護手冊係依據「公路修建養護管理規則」第 34 條規定及交通部頒布「公路養護規範」，針對公路局所轄養之省道公路所制定，其適用於公路局所轄養省道公路之養護作業。

公路養護手冊訂明各項公路設施之巡查方式、頻率、項目、注意事項與各類參考表格，分別就路基及邊坡、鋪面、橋梁、隧道、排水設施、交通工程設施、交控設施、沿線路權內附屬設施、景觀設施及植栽、養路車輛機械等各項設施及其分類構造物，敘明其內容、養護注意事項、檢測或巡查作業及相應之養護方法等，供公路養護人員有所依循。

4.1.1 省道養護巡查作業規定

公路養護之目的，在確保公路、橋梁、隧道及其附屬設施等原有功能、良好行車及安全狀態並維持路容整潔美觀，養護單位必須確實執行巡查工作，隨時瞭解公路狀況，並填具巡查報告表陳報。若有重大特殊情況，應以專案或緊急案件處理，以確保行車安全。

依據最新修訂的公路養護手冊「第二章養路巡查」說明，「巡查」係指養護單位就轄區公路之巡視與檢查，巡查方式分為：

- (1) 經常巡查：日間經常巡查，由指定工程司辦理，從車上以目力檢視公路各種狀況。若發現有疑惑時，應下車詳查，有關鋪面、橋面、伸縮縫等之檢查，可憑車輛駕駛時之操作性、衝擊響聲及震動等判斷公路之實況。夜間巡查，由養護單位正、副主任或指派專人辦理。
- (2) 定期巡查：在設定期間內，以目力或輔以簡單器具巡查轄區內公路，以維護公路應有之功能。個別設施得以定期檢查（測）為之。
- (3) 特別巡查：在颱風來臨前後，豪雨、洪水、震度 5 弱級以上之震區或重大交通事故後，立即巡查公路構造物、特別照顧喬木及邊坡（震度 5 弱級免巡查橋梁）。另震度 4 級立即巡查震區內優先關注邊坡；震度 5 強級以上立即巡查震區內橋梁。
- (4) 朝巡：原則屬於特別巡查之一種，針對轄區內特別列管易落石、坍方路段，當豪雨或地震設定條件達到啟動標準時，於該特定路段須於每日上午規定時間前完成巡查作業，並持續 7 天，各養護單位得視情形延長辦理天數。

巡查如發現缺失應於巡查報告或相關電子系統上登載，並於缺失位置依該性質辦理特別檢查（測），紀錄於相關檢查表。其餘無缺失位置得依公路養護手冊設定的頻率辦理定期檢查（測）。

養護單位得視實際情況依電子媒體形式記錄或酌予調整公路養護手冊附錄之表格內容以符實需，並報上級單位核備。

4.1.2 省道鋪面養護巡查作業規定

公路於建造完成開放通車後，因車輛載重、交通量變化、鋪築材料老劣化、天候、周圍自然環境、人為施工及管線單位所埋設的管線或箱涵因故滲（漏）水等因素，可能造成鋪面各結構層變形及損壞。因此經

常性的鋪面巡查、調查及養護係公路養護的重要工作之一，以確保鋪面之服務水準及用路人安全。

公路養護手冊巡查鋪面的分類，可分為柔性鋪面、剛性鋪面及挖掘路面，一般公路柔性、剛性鋪面的「日間經常巡查」頻率為 1 次/週，並依交通量狀況予以增加；挖掘路面的「日間經常巡查」頻率為 1 次/週，若為快速公路，其「日間經常巡查」頻率則為一般公路的 2 倍。柔性鋪面、剛性鋪面及挖掘路面可視必要時辦理「特別巡查」，另公路管理單位也可視需要時實施「特別檢查」。

「日間經常巡查」、「特別巡查」係從車上以目力檢視，必要時應下車詳查，「特別檢查」係以目力或輔以簡單器具進行檢查。

公路養護手冊「第四章鋪面」4.3.2 鋪面巡查，公路管理單位視需要時實施「鋪面調查」，據以作為公路改善及養護等規劃之參考。鋪面損壞調查可分成兩類：第一類為人工調查法，調查員在現地觀察與紀錄；依車行方向調查鋪面損壞為原則，觀察調查路段之鋪面損壞並填表或儀器紀錄之。第二類為自動化調查法，利用儀器在現地錄製鋪面影像，在室內進行自動化或人工之鋪面損壞分析。

4.1.3 省道柔性鋪面之損壞分類、現象及原因

柔性鋪面會因人為、自然等因素造成損壞，依據公路養護手冊「第四章鋪面」及其附錄表 A4-3「柔性鋪面損壞分類、原因、程度與養護措施」顯現於柔性鋪面面層的損壞可區分為裂縫、變形、表面損壞及其他等 4 類，各類損壞的內容及項目如下：

- (1) 裂縫：有橫向裂縫、縱向裂縫及龜裂（塊狀裂縫）等 3 項。
- (2) 變形：有車轍、表面滑動、波浪紋、隆起及沉陷等 5 項。
- (3) 表面損壞：有坑洞、冒油、薄層剝離及修補或修補變壞等 4 項。
- (4) 其他：主要為段差，段差破壞鋪面於結構物兩端發生縱坡不順現象。

柔性鋪面損壞型態之相關的損壞現象及主要原因，如表 4-1 所示。

表 4-1 柔性鋪面損壞型態的現象及主要原因

損壞型態		損壞現象	主要原因
裂	線狀裂縫：	裂縫主要走向約略與行車方向平行或垂直，裂縫型態為線狀，分叉情況尚未達全面龜裂情形(即尚未完全連結成多邊形)	1.施工不良 2.填挖路段不均勻沉陷 3.路基或基底層裂縫所衍生之反射裂縫 4.拓寬車道與舊鋪面銜接處產生縱向接縫裂縫
	橫向裂縫 縱向裂縫		
縫	龜裂	鋪面普遍呈龜殼花紋狀小多邊形裂縫	1.不適之瀝青混凝土、路基、路床材料 2.軸重、軸次超過設計值 3.地下水影響
變	車轍	鋪面在車輪反復輾壓下所產生之縱向凹陷，通常在下過雨後較為明顯，輕微的車轍在輪跡處有光亮、輪印等現象，嚴重者可觀測到縱向槽形凹陷	1.重載交通行車壓密、磨耗 2.瀝青混凝土品質不良、流動
	表層滑動	鋪面表層在輪胎之摩擦力或煞車作用下，前後滑動，嚴重時會發生新月型開裂	1.黏層施工不良 2.瀝青混合料品質不良 3.含油量不當
	波浪紋	行車縱向呈規則週期性起伏波浪現象	1.瀝青混凝土品質不良 2.路基路床承载力不均勻 3.黏層施工不良
	隆起	鋪面局部擠壓呈凸出原鋪築高度現象	1.瀝青混凝土品質不良 2.路基路床承载力不均勻 3.粒料具高度膨脹性 4.黏層施工不良
	沉陷	鋪面局部呈沉陷現象	1.鋪面下層材料流失、淘空 2.施工時局部性壓實不足
形	坑洞	局部性，大小不等略成碗狀之不規則凹洞，通常源於嚴重之裂縫及表面粒料流失。坑洞形成後其四週在交通情況下粒料更易被帶離，下雨時坑洞中常積水，導致破壞擴大	1.瀝青混合料品質不良 2.滾壓不足 3.局部龜裂加速
表面破壞			

損壞型態		損壞現象	主要原因
表面破壞	冒油	鋪面有瀝青油膜滲出，使鋪面光滑，多發生在較熱的氣候下	1.黏層施工不良 2.含油量不當 3.瀝青混合料品質不良
	薄層剝離	原有鋪面上加鋪之薄層呈荷葉片狀大小的淺層剝落現象	1.黏層施工不良 2.瀝青混合料品質不良
	修補或修補變壞	修補區域出現平坦度欠佳、剝落或與四周銜接之介面產生高低差、裂縫等現象	既有鋪面曾以新材料予以修補，而又變為損壞之致因，常因粗糙度或平坦度不良又再度損壞
其它	段差	鋪面於結構物兩端發生縱坡不順現象	1.路基或基底層、面層之滾壓不足 2.地盤之不均勻沉陷

4.1.4 省道柔性鋪面養護措施

柔性鋪面之養護可區分為「緊急養護」、「一般養護」及「大型養護」三類，「緊急養護」係鋪面損壞若其損壞程度較嚴重或出現位置可能危及行車安全時，儘速進行養護，施工方法為熱拌混合料填補法及常溫混合料填補法；「一般養護」在鋪面損壞狀況並不複雜，或影響範圍不大，可採單項或局部範圍養護時執行之，主要方法為部分厚度修補及全厚度修補；緊急養護及一般養護可採用公路養護手冊附錄表 A4-3「柔性鋪面損壞分類、原因、程度與養護措施」所建議之單項養護措施或以主管單位曾經實施且績效良好之方法進行養護，其單項養護措施詳表 4-2 所示。

「大型養護」為改正鋪面嚴重缺失之養護作業，適用於路段中有多項損壞類型或損壞影響範圍龐大時，經審慎評估其損壞狀況、養護效益與財經可行後，可採用大型養護方法改正鋪面損壞，其方法包括刨除回鋪與重建，說明如下：

(1) 刨除回鋪：基於鋪面高程受限，未能繼續加鋪或作表面處理等

修修復時，必須先行刨除到需要之深度再回鋪者稱為刨除回鋪。

- (2) 重建：當鋪面損壞情況嚴重，無法以加鋪或刨除回鋪方式改善時，應考慮重建鋪面，即將整體鋪面結構挖除，再以新材料置換。

表 4-2 柔性鋪面單項損壞之養護措施

損壞型態		損壞程度		養護措施
裂 縫	線狀裂縫： 橫向裂縫 縱向裂縫	L 級	裂縫平均寬度 ≤ 6 公厘	可暫不處理。 若裂縫寬度 $> 3\text{mm}$ 則填封處理
		M 級	$6 \text{ 公厘} < \text{裂縫平均寬度} \leq 20 \text{ 公厘}$	密封裂縫
		H 級	裂縫平均寬度 > 20 公厘	填封裂縫或部分厚度修補
	龜裂	L 級	縱向未連接之髮裂亦相互平行及剝落	可暫不處理或作封層
		M 級	從 L 級演變而成為圖樣之塊狀，表面有些輕微剝落，可予以薄層處理	局部或全厚度修補
		H 級	從 M 級進展到每塊鬆散、剝落、唧水發生	全厚度修補或加鋪或翻修
變 形	車轍	L 級	高低差： $6 \sim 13$ 公厘	可暫不處理或刨除回鋪
		M 級	高低差： $13 \sim 25$ 公厘	修補或刨除回鋪
		H 級	高低差：大於 25 公厘	修補或刨除回鋪
	表層滑動	L 級	粒料與瀝青有脫離現象，惟尚未進行主要分離，有些細粒料脫離	可暫不處理
		M 級	粒料與瀝青破舊分離，表面組織粗糙凹陷，損失粗細粒料	部分厚度修補
		H 級	粒料與瀝青破舊分離，表面組織非常粗糙凹陷，粗粒料損失，發生新月型開裂	部分厚度修補或刨除回鋪
	波浪紋	L 級	車輛震動而造成，無不舒服感	可暫不處理
		M 級	車輛震動而造成些許不舒服感	修補或刨除回鋪
		H 級	車輛過分震動而造成重大的不舒服，或危險或車輛損壞，需要降低速率才安全	修補或刨除回鋪

損壞型態		損壞程度		養護措施
變形	隆起	L 級	車輛震動而造成，無不舒服感	可暫不處理
		M 級	車輛震動而造成些許不舒服感	可暫不處理或翻修
		H 級	車輛過分震動而造成重大的不舒服，或危險或車輛損壞，需要降低速率才安全	翻修
	沉陷	L 級	可目視察覺，輕度影響行車品質	可暫不處理
		M 級	可目視察覺，中度影響行車品質	修補
		H 級	可目視察覺，重度影響行車品質	修補或翻修
表面破壞	坑洞	L 級	面積少於 1/3 平方公尺，深度少於 25 公厘	部分厚度修補
		M 級	面積：1/3～1 平方公尺，深度：25～50 公厘或面積小於 1/3 平方公尺，深度大於 50 公厘	部分厚度修補
		H 級	面積：大於 1 平方公尺，深度：大於 50 公厘或面積：1/3～1 平方公尺	全厚度修補
	冒油	L 級	鋪面表面有些變色	可暫不處理
		M 級	鋪面因瀝青含量過多而失去表面組織	使用砂或粗粒料撒布後滾壓
		H 級	因瀝青含量過多而發光，天熱時產生輪跡	刨除多餘瀝青後使用廠拌碎石砂(9.5mm)鋪築(150℃)或用封層處理
	薄層剝離	L 級	加鋪狀況很好，績效滿意	可暫不處理
		M 級	有些地區變壞，有中度損壞型態	表面封層或刨除回鋪
		H 級	加鋪已變壞，亟需予加更修。	刨除回鋪或翻修

損壞型態		損壞程度		養護措施
表面破壞	修補或修補變壞	L 級	修補狀況良好，績效滿意	可暫不處理
		M 級	有些修補區塊具 L~M 級損壞	可暫不處理或重新修補
		H 級	修補區域已變壞，亟需再行修補	重新修補
其他	段差	L 級	落差 ≤ 6 公厘	可暫不處理或修補
		M 級	$6 \text{ 公厘} < \text{落差} \leq 20 \text{ 公厘}$	端部刨除全段鋪築
		H 級	落差 > 20 公厘	端部刨除全段鋪築

備註：L 級為損壞程度輕度；M 級為損壞程度中度；H 級為損壞程度重度

4.1.5 省道一般道路柔性鋪面養護巡查及辦理養護措施流程

本計畫係探討透地雷達要如何應用於省道一般道路柔性鋪面養護巡查及其可行性，因此必須瞭解養護巡查及養護措施的實際執行流程，瞭解流程中實際執行的情況，是否有遭遇什麼樣的問題、困難，可否應用透地雷達協助解決所遭遇的問題、困難，或者在實際執行流程中可否介入應用透地雷達協助檢測道路鋪面下方之情況，以主動預防的方式先行處理道路下潛在損壞風險因素，若是被動的等到道路下的問題反應至鋪面上，造成鋪面的損壞才進行處理，往往都是慢一步，因為道路下潛在損壞風險因素通常會無預警的造成道路或道路鋪面損壞。

依據公路養護手冊相關規定及透過訪談公路總局第一線執行養護巡查及辦理相關養護措施的工務段，以瞭解省道一般道路柔性鋪面養護巡查及辦理養護措施的實際執行流程，其實際執行流程如圖 4.1 所示。

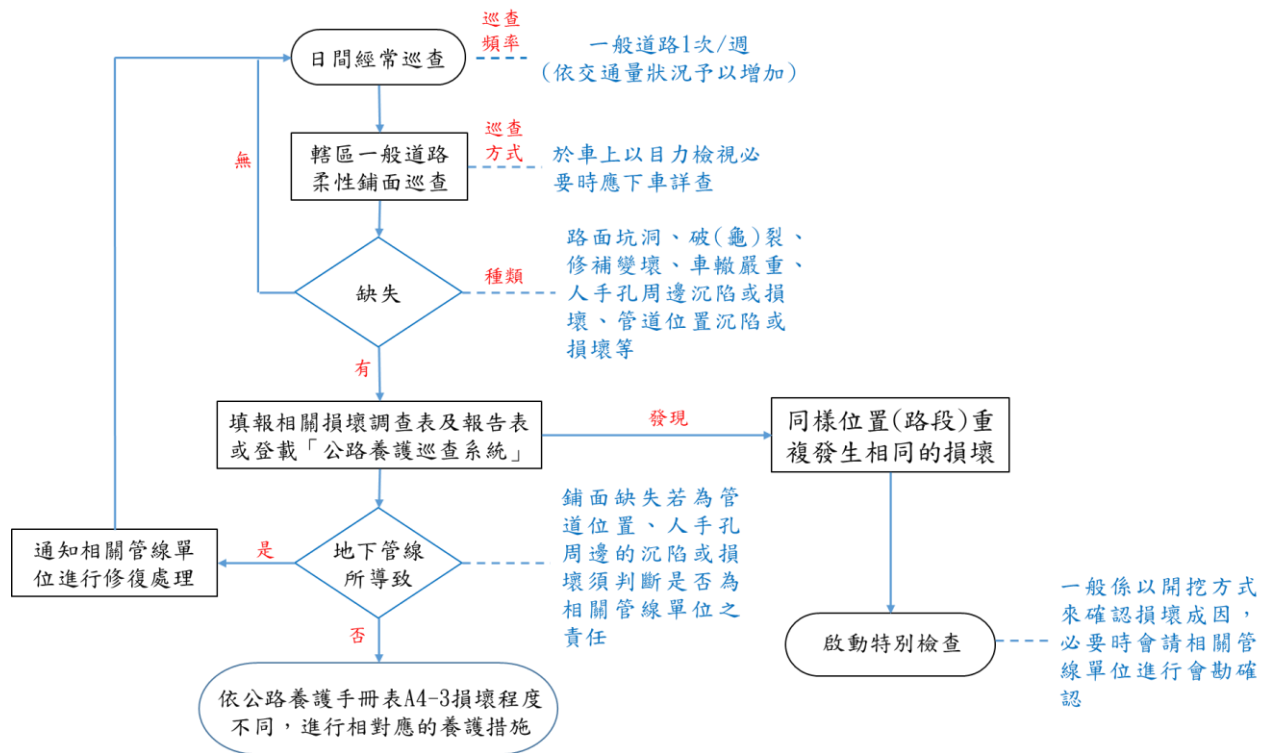


圖 4.1 養護巡查及養護措施實際執行流程示意圖

公路局在一般道路柔性鋪面養護巡查時，發現道路鋪面缺失除了填報登載紀錄外，也會於現場判斷該缺失是否跟管線單位有關，比如管線單位所設置的人手孔周邊破損、沉陷或是管線單位埋設於道路的管道間上有破損、沉陷等，若經判斷該缺失與管線單位有關，便通知相關管線單位進行修復處理，否則係依公路養護手冊表 A4-3 損壞程度不同，進行相對應的養護措施。

於訪談公路局轄下養護工程分局及工務段時，受訪者均有提到在一般道路柔性鋪面養護巡查，常會發現同樣位置或路段的鋪面有重複發生相同的損壞，這樣的情況下，工務段會依需要確認鋪面重複損壞成因之需求辦理特別檢查，工務段最常使用的特別檢查方式係對損壞位置進行開挖，開挖深度大約 80~150 公分來確認道路下的狀況，又若損壞位置附近有埋設地下管線，工務段於開挖時會召集相關管線單位會勘，於開挖時一同釐清確認鋪面損壞是否跟地下管線有關。

4.2 透地雷達如何應用於省道一般道路柔性鋪面養護巡查

省道養護巡查係對省道路基、邊坡、鋪面、橋梁、隧道、排水設施、交通工程設施、交通控制設施、路權維護及路容景觀等進行巡查，隨時瞭解省道狀況，以確保用路人行車之安全。

省道主要分為一般道路及快速道路，其道路的鋪面依使用材料可分為剛性鋪面及柔性鋪面；剛性鋪面係為水泥混凝土造的鋪面，柔性鋪面係為瀝青混凝土造的鋪面，而本計畫主要係探討透地雷達如何應用在省道一般道路柔性鋪面養護巡查。

依公路養護手冊之規定「日間經常巡查」、「特別巡查」係從車上以目力檢視，必要時應下車詳查，「特別檢查」也是以目力或輔以簡單器具進行檢查，在公路養護手冊「第二章養路巡查」「2.5 巡查時攜帶之器具」說明在「經常巡查」攜帶適當之器具為攝影機（行車紀錄器）、照相機、卷尺、粉筆、手電筒等；在「特別巡查」除應具備「經常巡查」所攜帶器具外，應視情形斟酌攜帶其他檢驗量測之儀器以備應用，因此原則上公路總局在進行一般道路柔性鋪面養護巡查僅能以目力或簡單器具針對道路鋪面的表面進行巡視檢查並填寫相關損壞調查表、報告表或登打於「公路養護巡查系統」。

然而，由表 4-1 所示的柔性鋪面損壞的成因並非都是能由目力巡視檢查能夠得知的，比如造成鋪面龜裂的成因有可能是來自路基、路床材料的問題或是地下水的影響等，而非瀝青混凝土材料本身的問題，或是鋪面沉陷的成因有可能是來自鋪面下層材料因故流失、掏空所致。這些鋪面損壞的現象可以用目力檢查得出來，但是損壞的成因就無法單用目力或簡單器具可以檢查的出來，若無法檢查出鋪面損壞的成因就無法採取適當的維修養護措施，而導致同樣的鋪面損壞在同樣的路段重複的出現，就像醫生沒找出病患生病的真正原因，就無法對症下藥，根除病因，病患還是一樣重複生一樣的病。

透地雷達是非破壞的檢測方法之一，其透過電磁波能探測道路下方的埋設物（維生管線、下水道設施等）、孔洞、地下水位、地層沉陷

鬆動及不同地層的交界等（如圖 4.2 所示），甚至透過透地雷達檢測訊號的後處理技術可以得知更多的道路下方情形的資訊如地下管線是否有在漏水、滲漏的範圍或是掏空孔洞的大小等，所以如果能將透地雷達應用在省道一般道路柔性鋪面的養護巡查上，將能幫助公路局的第一線養護工程司瞭解道路下的情形，檢測道路下潛在損壞風險因素如孔洞、路基鬆動等，除此之外，也能找出因道路下的問題而反應至鋪面損壞的成因，因此，不但能以主動預防的方式處理道路下潛在損壞風險因素，也可以較準確地找出鋪面損壞的真正成因，對症下藥的辦理養護相關措施，以維護省道品質及確保用路人安全。

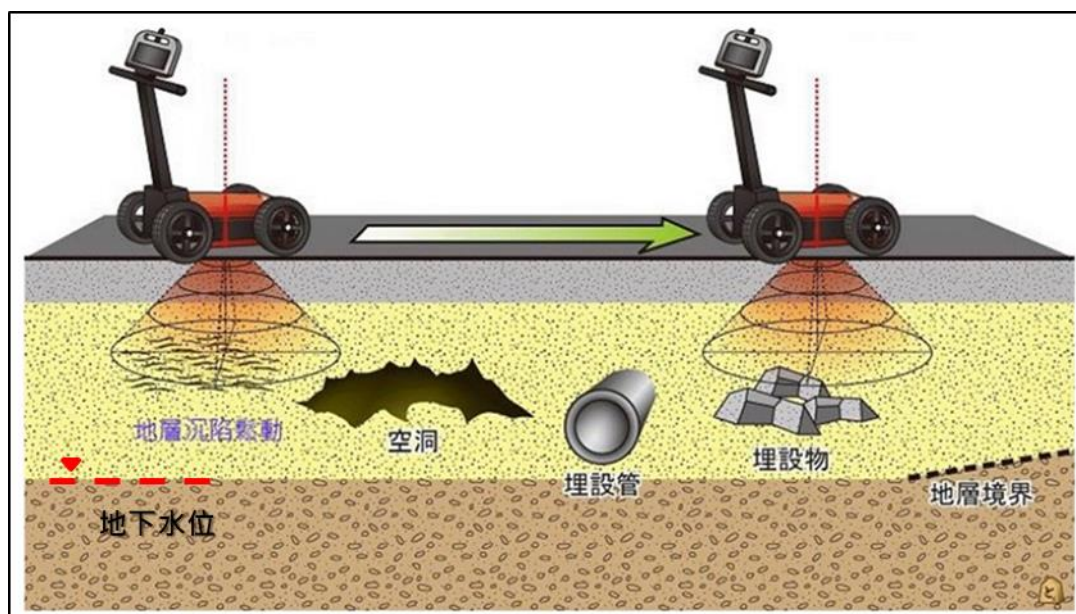


圖 4.2 透地雷達檢測道路下方情形之示意圖 (改繪經濟部水利署第 0535 期電子報)

4.2.1 透地雷達應用於道路檢測及相關案例實績之探討

上述有概要說明透地雷達能以非破壞的方式檢測道路下的情形，可以檢測出是否有潛在損壞風險因素，孔洞、路基下陷、回填料回填不實等這些道路下的潛在損壞風險因素會對於道路鋪面造成損壞情形，尤其是孔洞，當孔洞於道路下方持續擴大直到上方路面結構不足以支撐荷重時，就會造成道路無預警地突然塌陷破壞就是俗稱的「天坑」(如圖 4.3)，道路塌陷不僅僅造成用路人的危險，也會破壞道路下的維生管線，甚至造成道路鄰房的損壞，對於民生影響甚巨。



圖 4.3 2016 年日本福岡 JR 博多站前道路塌陷(圖片取自網路)

臺灣道路因人為或自然等因素造成道路塌陷破壞時有所聞，今（112）年在新竹縣竹北市及臺北市信義區有因建築工地施工不慎造成道路塌陷，在臺北市大同區也有因地下污水管線破損造成道路塌陷，道路塌陷後相關單位有應用透地雷達進行檢測調查原因外（如圖 4.4），也確認是否還有其他孔洞預先進行處理，以防再發生道路塌陷，造成二次傷害。



圖 4.4 新竹縣竹北市工地旁道路塌陷後施作透地雷達檢測(圖片取自中國時報)

行政院公共工程委員會（以下簡稱工程會）於 108 年 3 月因應 107 年南部連續降雨發生大量坑洞及道路塌陷事件召開「107 年 8 月下旬造成臺南及高雄地區道路坑洞之成因與因應對策」研商會議，依據該會議的紀錄資料「臺南高雄 823 水患瀝青混凝土道路坑洞及塌陷之成因與建議對策」、工程會第 135 次委員會議簡報「道路坑洞及塌陷之成因與預防改善措施」及其新聞稿「防杜道路塌陷 工程會找原因、提對策」等資料^[41]，其中說明道路塌陷發生機制，如圖 4.5 所示並如下所述：

- (1) 路基掏空係地下水流挾帶基底層土砂流失，逐漸形成孔洞。
- (2) 地下管線（雨、污水或自來水）老舊破損或施工不良（接頭開裂、錯位及鬆脫），漏水形成地下水路而土砂流失。
- (3) 大型箱涵老舊或施工不良導致頂版及側牆產生裂縫，容易造成大規模之路基掏空及塌陷。

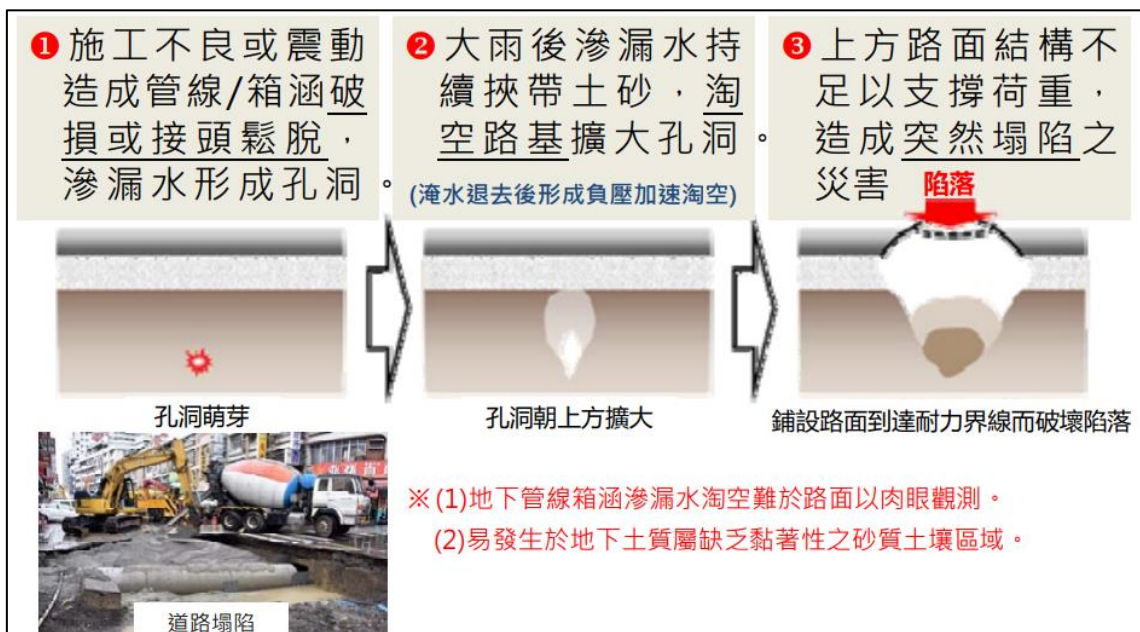


圖 4.5 造成道路塌陷破壞機制^[41]

道路因地下水或是地下管線、箱涵因故滲漏水形成孔洞，因為孔洞在道路下方，又現行的道路養護巡查係以目力做巡視檢查，故難以查覺，孔洞持續擴大到上方路面結構不足以支撐荷重時就會突然塌陷造成災害，因此工程會第 135 次委員會議簡報「道路坑洞及塌陷之成因與預

防改善措施」及其新聞稿「防杜道路塌陷 工程會找原因、提對策」建議下水道及管線在營運中既有設施之維護管理應「針對潛在坍塌區域輔以透地雷達探測」，另外在「107 年 8 月下旬造成臺南及高雄地區道路坑洞之成因與因應對策」會議記錄，臺南市政府針對所轄道路坑洞發生原因、改善狀況及後續因應作為中，有說明洽日本 Geo Search 株式會社以車載式透地雷達協助檢測道路下孔洞（9 路段道路長度約 8.3 km），共檢測 42 處可能孔洞，並已就較嚴重部分進行挖掘填補灌漿改善。

高雄市政府在 110 年試辦、111~112 年正式執行，以透地雷達檢測因下水道管線銜接處漏水而產生孔洞（如圖 4.6），並對於檢測到的孔洞進行處理等級的分類，對於有立即致災的孔洞會馬上進行填補相關的處置作業，尚無致災性的孔洞會進行列管定期檢測，以主動預防的方式避免因下水道管線漏水導致的孔洞造成道路塌陷。



圖 4.6 高雄市政府以透地雷達檢測地下孔洞處理流程(高雄市智慧城市推動平台網站)

財團法人中興工程顧問社(以下簡稱中興顧問社)應用三維透地雷達於道路地下管線定位與路面凹陷檢測^[37]，三維透地雷達天線採用空氣耦合性(Air Coupled)設計，天線不需要接觸路面，可用車載方式進行快速掃描；此外，天線含有 20 組頻道，一次檢測資料為立體方塊，資料精度為公分等級，可用於了解地下結構的三維分布。歐美、日本等地區採用三維透地雷達有多年經驗，除應用於地下管線探查，亦廣泛用於檢測道路下方孔洞及公速公路鋪面品質、機場跑道完整性等。

中興顧問社應用三維透地雷達檢測路面凹陷(如圖 4.7)，案例一、山區道路路面凹陷，檢測路段位於南部山區陵線，道路左側維緩坡，右側為邊坡擋土牆，該路段歷年來持續出現路面凹陷，已進行多次路面修補，圖 4.8 為透地雷達掃描影像，其中(a)平行道路剖面圖中，瀝青混凝土(以下簡稱 AC)與控制性低強度回填材料(以下簡稱 CLSM)介面反射波出現在深度 10~20 公分，惟訊號在水平距離約 125~145 公尺中斷，中斷長度約 20 公尺。反射波在中斷位置有明顯凹陷現象，凹陷幅度隨著深度增加更為顯著，推估深處(大於 1.5 公尺)有局部空(孔)洞，造成路基材料向下陷落。(b)深度切面圖顯示僅道路外側出現局部漩渦狀的凹陷訊號，推估應為鄰近邊坡擋土牆局部背填掏空造成，道路主管機關已經進行開挖補強。



圖 4.7 三維透地雷達檢測現場作業情形^[37]

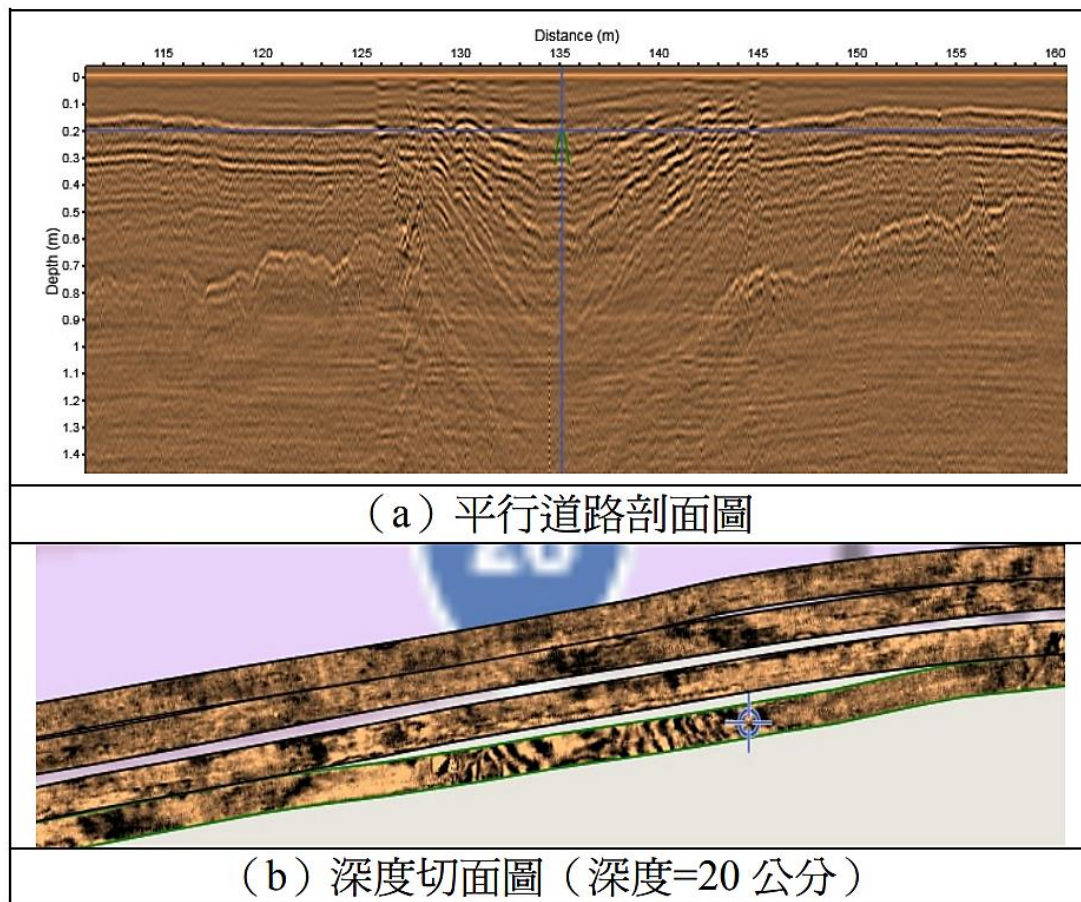


圖 4.8 山區道路凹陷段影像^[37]

案例二、市區道路路面凹陷，檢測路段位於南部某市區，係為瞭解路面凹陷原因，圖 4.9 係沿快車道內側進行透地雷達檢測掃描的影像，其中 (a) 平行道路剖面圖中左側（水平距離約 5~44 公尺）CLSM 界面反射波深度約 10~16 公分，右側（水平距離約 70~107 公尺）則小於 10 公分，此部分 AC 層較薄，應為局部刨除重鋪範圍。在水平距離約 44~70 公尺，訊號有明顯凹陷現象，凹陷幅度隨著深度增加更為顯著，推估深度（大於 1 公尺）有局部空（孔）洞，造成路基材料向下陷落，路基明顯下陷位置出現在距離約 59 公尺處。(b) 深度切面圖出現局部漩渦的凹陷訊號，明顯下陷範圍出現在車道中央偏右側局部範圍（圖中線段交叉處）。道路主管機關進行槽溝開挖，開挖位置約為上述路面凹陷位置，開挖長度 3 公尺、寬度 1 公尺、深度 1.8 公尺，發現開挖底部出現混凝土箱涵頂蓋，頂蓋上有局部裂縫，推估路基材料經由此裂縫流失，造成路基陷落與路面凹陷。

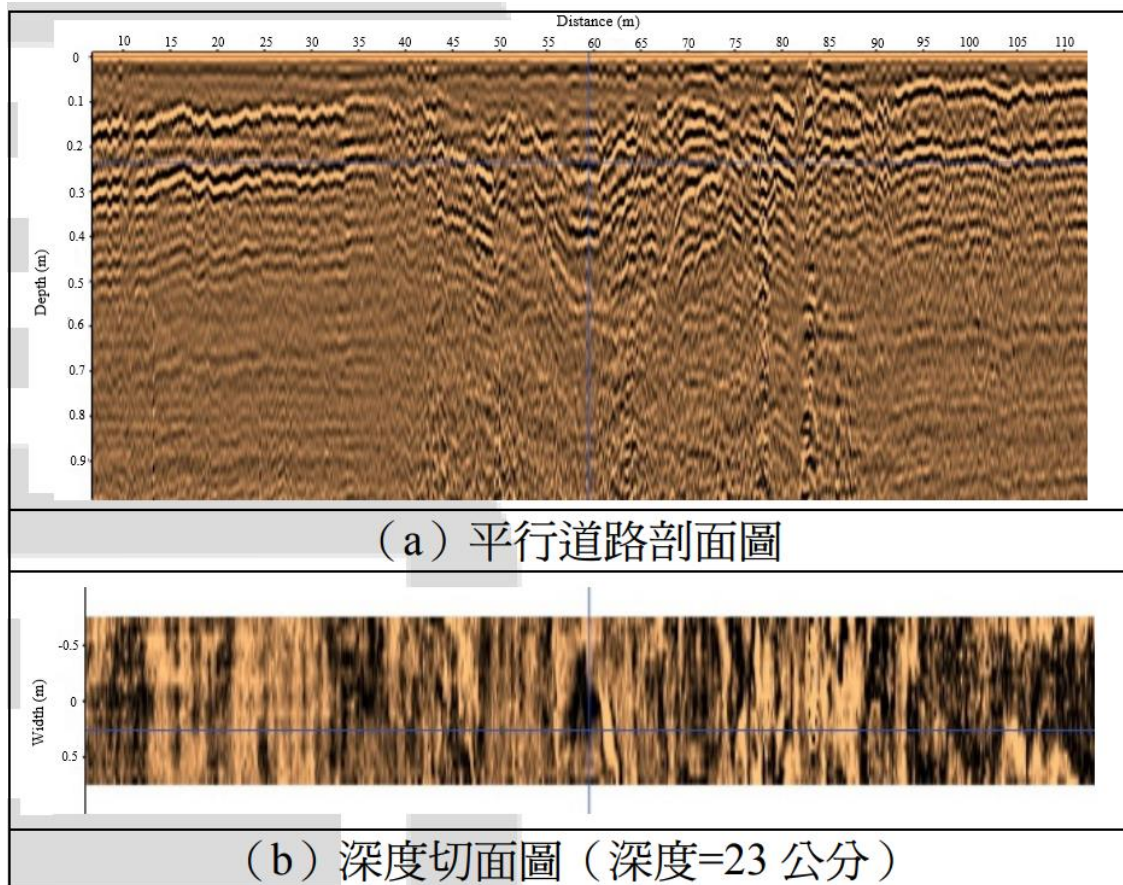


圖 4.9 市區道路凹陷段影像^[37]

案例三、鄉間道路路面龜裂凹陷，檢測路段位於南部鄉間道路，該路段為雙向單車道，兩側路面有平行道路方向凹陷，推估應為管線埋設回填不實造成，內側路面亦有不規則凹陷龜裂現象。圖 4.10 係沿車道內側進行透地雷達檢測掃描的影像，其中 (a) 平行道路剖面圖中，並未出現 CLSM 界面反射波，惟深度約 15 公分以下，出現不規則分布的繞射訊號，此深度約在 AC 層下方。(b) 深度切面圖顯示不規則分布的塊狀物（顆粒狀），最大的尺寸約為 30 公分。圖 4.11 為 4 次掃描的深度切面影像，其中道路兩側線形管線影像明顯，而道路內側則有分布散亂的塊狀物體影像，尺寸、形狀不一。推估塊狀物體可能是用於路基回填的塊石、混凝土塊或是建築廢棄材料，因此使路基承载力不均勻，導致路面不規則龜裂凹陷。

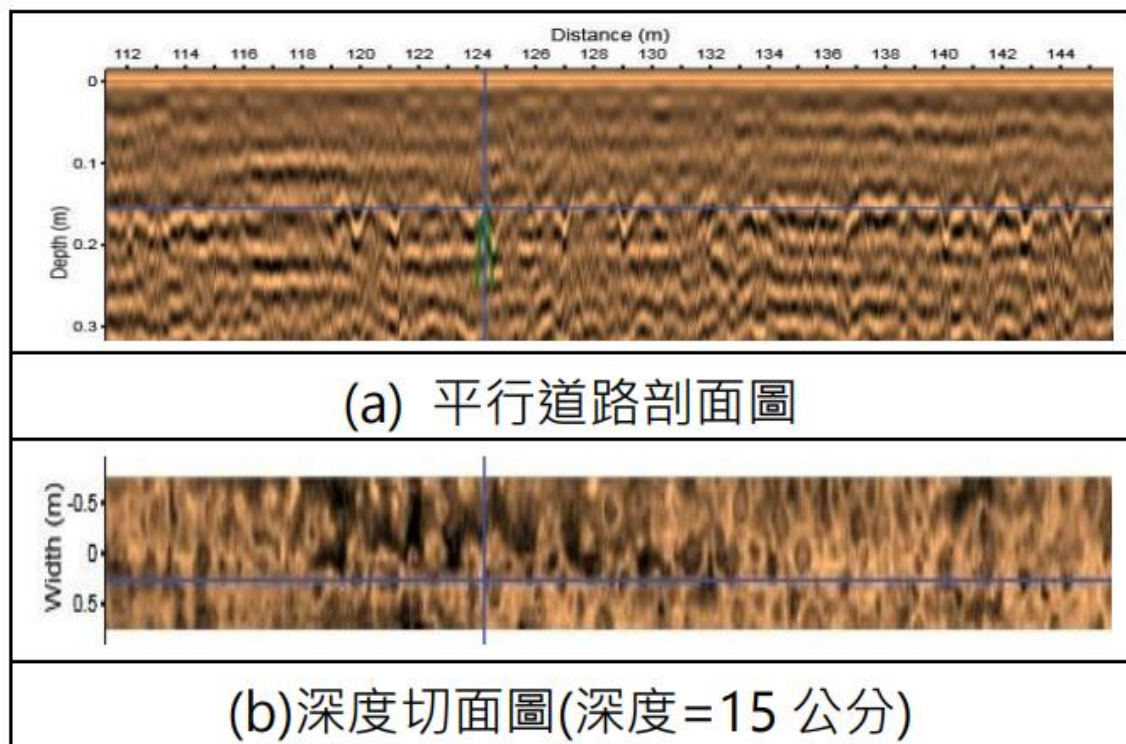


圖 4.10 鄉間道路龜裂凹陷段影像^[37]

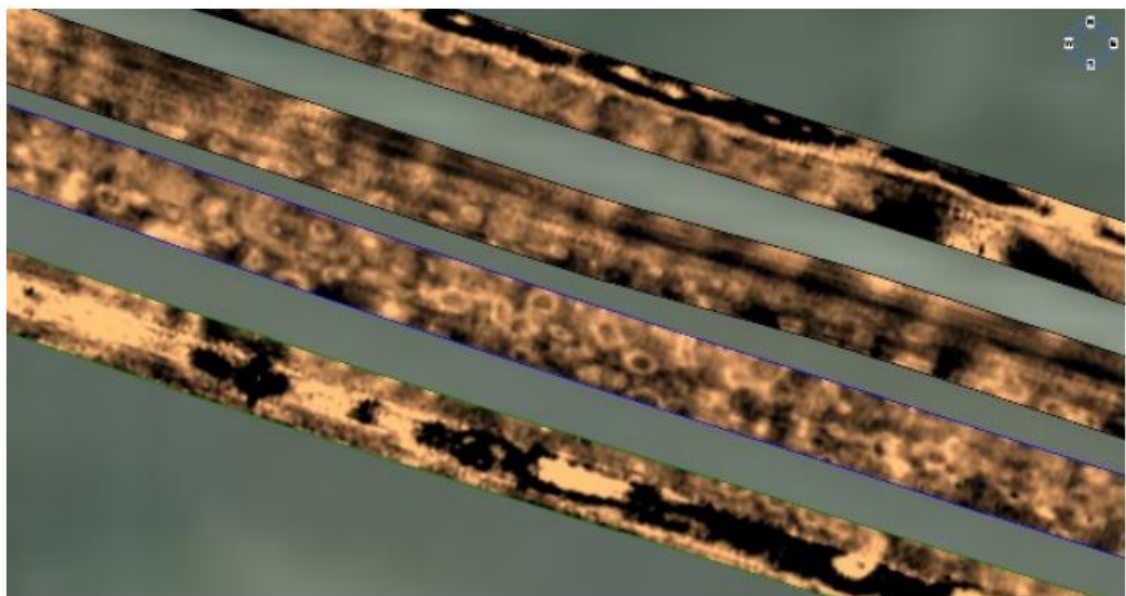


圖 4.11 鄉間道路深度切面影像（深度=15 公分）^[37]

透地雷達除了可以檢測孔洞、路基下陷、回填料回填不實等道路下方情形外，亦可檢測道路下方滲水的情形，案例為國道 3 號景美隧道北上 24K+500 外車道一處，該處經常在車道 AC 車輪跡處凹陷往兩旁

側擠，因外邊線 AC 結構較鬆散，常帶有黃色細泥含骨材溢出擴散，依現況研判為地下滲水引起路基結構軟化，無法負荷重車輾壓，因無法得知地下水文之前道路主管機關只有不斷補丁^[35]，後來中華大學土木系檢測中心應用透地雷達進行檢測(如圖 4.12 所示，黑色虛線為檢測區、粉紅色粗線為預測滲水集中位置)，掃描道路下 60 公分內水量分布多寡及水文路徑，得知滲水來自隧道內，沿剛性板塊底部往隧道外滲流。改善工法係以截水為先、導流為後及最短路徑改善工法，自 103 年 11 月解決滲水問題後至 106 年 8 月週期性整修路面，該處 AC 結構未再損壞。

圖 4.13 係中華大學土木系檢測中心分別 103 年 9 月(第一次檢測，尚未進行改善工程)、12 月(第二次檢測，已完成改善工程)檢測 AC 路面下 40 公分位置處滲漏分佈圖，比對改善前後滲漏的情形(白色無水分、淺藍色微濕、深藍色為含有水分)，A、B 修補處第一次檢測含水量結果為藍色分佈，在 A 處進行施工改善後，A、B、C、D 修補處第二次檢測含水量結果已下降至淺藍色及白色分佈，則 A、B、C、D 修補處有明顯改善^[42]。

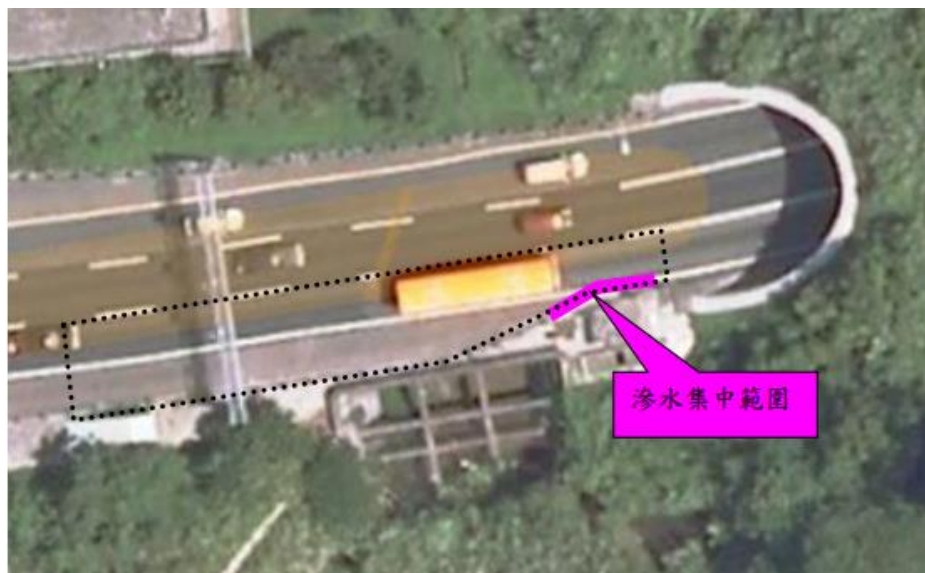


圖 4.12 國道 3 號 24.5K 北上景美隧道口滲水檢測範圍圖^[42]

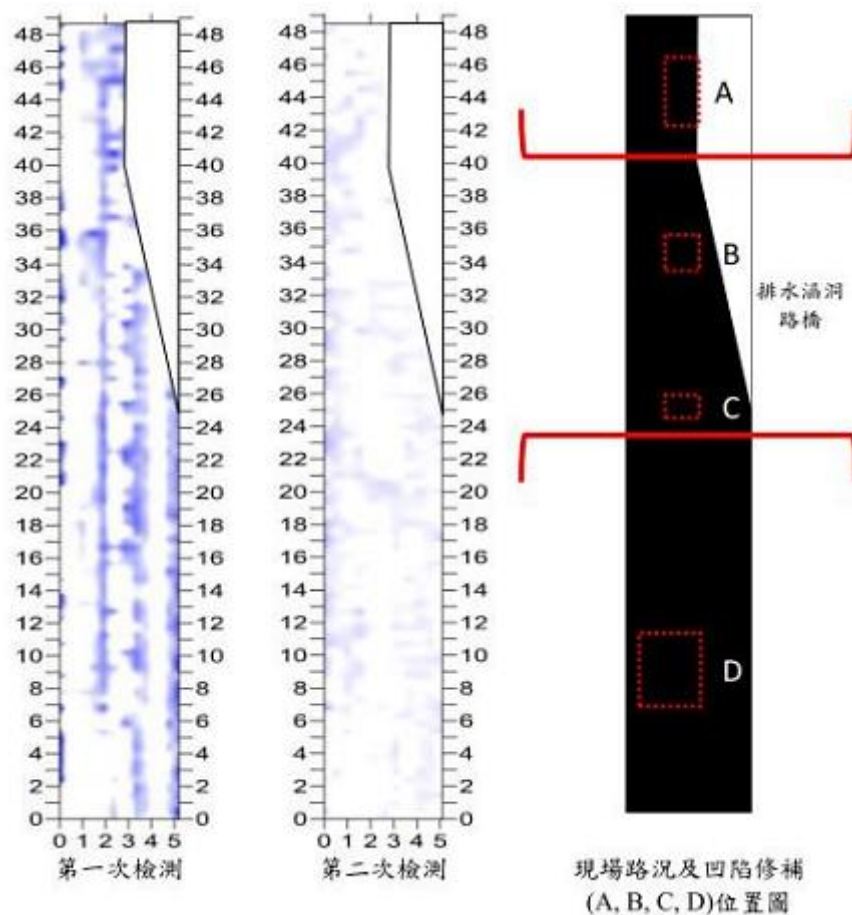


圖 4.13 AC 路面下 40 公分位置處滲漏分佈圖^[35]

本計畫探討透地雷達應用於道路檢測主要著重在檢測道路下方的情形，因為公路局現行省道一般道路柔性鋪面養護巡查係採目力檢視，目力檢視僅能瞭解道路鋪面表面的現狀，無法瞭解道路鋪面下方的情形，又鋪面上的損壞有可能是來自道路下的問題，若無相關的儀器設備進行檢測，則無法找到鋪面損壞的成因，上述案例在應用透地雷達檢測找出鋪面損壞的成因，並擬定對症下藥的維護處置方式才能使相同損壞的狀況不再重複發生，所以無論是主動預防道路損壞及災害的發生或是在道路損壞及災害發生後進行檢測成因，均可應用透地雷達來達成，爰此，如能應用透地雷達於省道一般道路柔性鋪面養護巡查，對於維護省道品質及用路人安全有一定的助益。

4.2.2 研究對象對於透地雷達應用在省道一般道路柔性鋪面的需求、應用方式及時機

本計畫進行研究對象訪談，除了訪談公路局外，也對公路局轄下養護工程分局及第一線執行養護作業的工務段進行訪談，主要由政策面（公路局的觀點）、管理面（養護工程分局的觀點）及執行面（工務段的觀點）瞭解研究對象對於透地雷達應用在省道一般道路柔性鋪面養護巡查的想法、意見及需求。

省道一般道路柔性鋪面的巡視、檢查主要係由日間經常巡查來執行，其巡查方式係以目力檢視，以目力方式僅能檢視道路鋪面表面的狀況，並無法瞭解道路下是否有潛在損壞風險因素，以主動預防的概念、方式，本計畫擬以車載式透地雷達應用於日間經常巡查輔助檢測道路下潛在損壞風險因素，對於有致災性的損壞風險因素先行處置，以免發生道路損壞，造成用路人危險。惟經由訪談瞭解，公路局應用透地雷達主要係進行隧道、橋梁的檢測，較少應用在道路上。就公路局而言，要在日間經常巡查應用透地雷達輔助檢測省道一般道路柔性鋪面下潛在損壞風險因素是較為不易執行且目前尚無迫切的需求，依訪談紀錄彙整原因如下：

- (1) 法規及機關權責：道路下出現孔洞進而發生道路塌陷，大部分都是因為地下管線、箱涵等滲漏水掏刷路基而產生孔洞，依據公路法第 30-1 條第 7 項「管線機構於工程完工後應定期巡檢，維護安全。」，故管線單位需定期巡檢以維道路安全，管線單位有一定的責任。
- (2) 現行養護巡查制度：依據公路養護手冊，日間經常巡查由工程司從車上以目力檢視公路各種狀況，公路管理單位是需要時，實施特別檢查。日常經常巡查是無需使用儀器設備進行巡查，要到特別檢查（巡查）才有視情形酌加應用其他檢驗量測儀器。
- (3) 經費及效益：透地雷達應用在橋梁、隧道是有特別專用的經費，但是沒有相應經費可以把透地雷達應用在道路上的檢測。又依據公路局中區養護工程分局 112 年公路維修工程委外參考單

價，「道路巡查及坑洞緊急修補費」1 公里單價為新臺幣（以下同幣制）70~120 元（請各段依路況辦理調整），而透地雷達檢測價格大約 1 公里約為 10 萬元（1 公尺約為 100 元），相較下所需費用及效益來說，不會將透地雷達應用於日間經常巡查。

不過，於訪談養護工程分局及工務段時，受訪者均有提到在執行一般道路柔性鋪面養護巡查會發現有些路段鋪面損壞狀況會經常性或重複性的發生，比如說這路段上週有發現鋪面沉陷缺失，在進行填補後，這週巡查時同樣位置又發生鋪面沉陷的缺失，又或者不在同一個位置沉陷，但是卻是在其附近的位置發生沉陷，持續進行修補，卻持續沉陷，工務段雖然會啟動特別檢查（如圖 4.1 之流程），進行開挖作業，但是開挖後有時仍找不出原因。除此之外，養護工程分局的受訪者特別提到地下水的問題，地下水有可能是道路損壞的成因之一，所以探查地下水是有其必要性，受訪的養護工程分局及工務段會希望透地雷達是可以提供解決上述問題的方法，這是他們的需求。

透地雷達在檢測道路下方潛在損壞風險因素包含地下水，在國內外的研究、案例及實績上都有相當的成效，依受訪的養護工程分局及工務段的需求，可以在啟動特別檢查時，應用透地雷達對經常性或重複性發生相同損壞情形的問題路段（鋪面）進行檢測找出可能的成因，針對可能的成因辦理相對應的養護措施，才能根除重複損壞的問題。

另外訪談專家學者時，專家學者對於經常性或重複性損壞的路段建議可以先針對這些有問題的路段進行透地雷達的檢測，在後續巡查這些有問題的路段時，有發現經常性或重複性的損壞沉陷（以鋪面沉陷損壞為例），就可以再進行一次透地雷達的檢測，如果檢測後的一週又發生沉陷，就再進行一次地雷達的檢測，這是為了區分這個沉陷損壞是車載的沉陷或是壓密的沉陷還是路面下土石被掏空的沉陷，就可以依據這幾次檢測後的訊號圖像來進行判斷，若是只在道路沉陷後才來做透地雷達的檢測，而沒有沉陷前的檢測資料，就只能判斷當下沉陷的情形，無法得知這個沉陷損壞更多的相關資訊，就無法做出較嚴謹、準確的判斷。

綜整訪談公路局、養護工程分局及工務段的意見、需求及專家學者的意見，本計畫建議公路局工務段先行盤點轄區有哪一些鋪面是經常性或重複性沉陷的路段，針對鋪面沉陷的路段先行處理是因為道路沉陷主要原因都來自道路下的問題如有地下孔洞、路基鬆軟或地下水等，這些問題都會讓道路產生塌陷之虞且這些問題可應用透地雷達檢測出來，故對這些問題路段進行第一次的透地雷達檢測，並建立透地雷達檢測資料庫，工務段可以依檢測後已找出成因的問題路段，先行辦理養護措施，若找出不成因問題者，則繼續觀察（日間經常檢查），若後續再發生沉陷，則以特別檢查再次進行透地雷達檢測，來比對前後（多時期）檢測資料，研判沉陷成因。而在養護巡查及養護措施實際執行流程中係將透地雷達應用在特別檢查的時候，以取代現地開挖方式來探查鋪面經常性或重複性損壞的成因，如圖 4.14 所示。

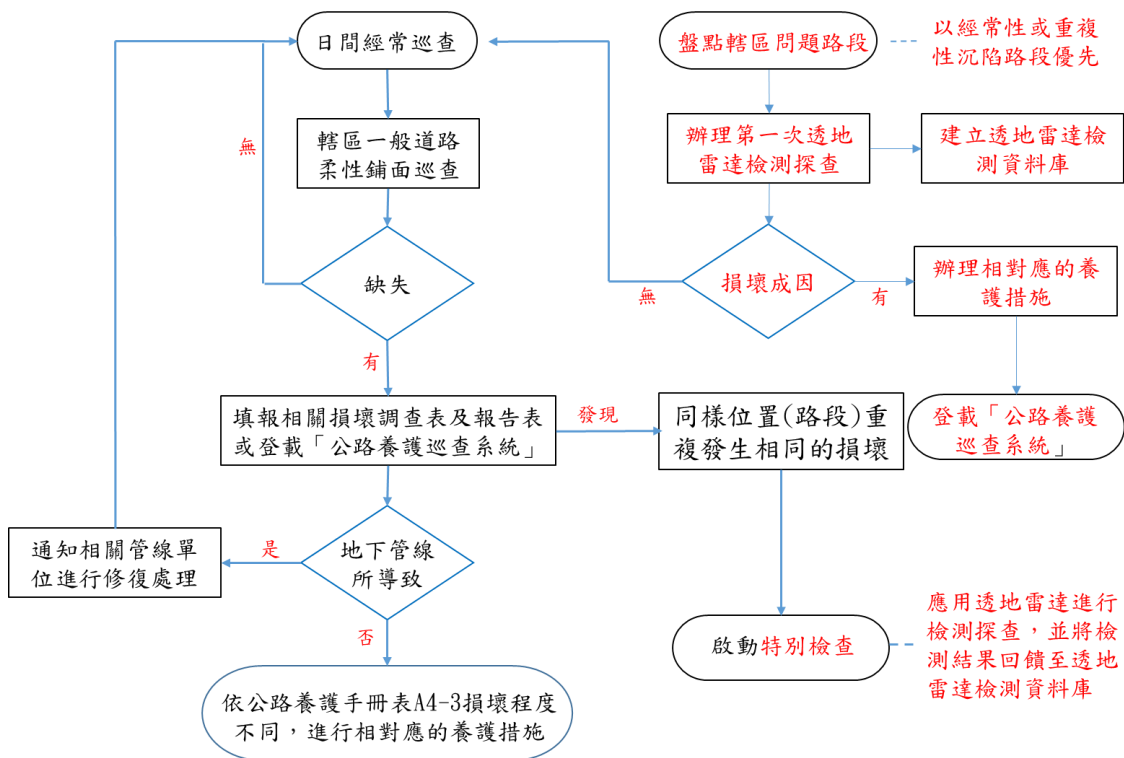


圖 4.14 透地雷達應用於省道一般道路柔性鋪面養護巡查方式及時機

4.3 透地雷達應用於特別檢查之優點及可行性探討

4.3.1 透地雷達應用於特別檢查之優點

透地雷達應用於省道一般道路柔性鋪面的特別檢查，主要係為了檢測經常性或重複性鋪面損壞的成因，而這個成因有可能來自道路下方的問題。依據表 4.1 柔性鋪面損壞型態主要成因可能來自道路下方的問題有「裂縫（線狀裂縫、龜裂）」、「變形（波浪紋、隆起及沉陷）」及「段差」，上述這些柔性鋪面損壞型態的成因，可能來自道路下方的問題如「路基或基底層使用不當材料或滾壓不足」、「路基路床承载力不均勻」、「地下水的影響」、「鋪面下層材料因故流失、淘空」及「地盤之不均勻沉陷」等。

針對上述來自道路下方的問題均可應用透地雷達進行檢測，應用透地雷達進行檢測相較於現場開挖方式有下列優點，因此，能比現場開挖方式更確實、有效及迅速的檢測出柔性鋪面經常性或重複性鋪面損壞的成因：

- (1) 以面的方式進行檢測：一般透地雷達檢測是以線方式進行，但可以依檢測區域（問題路段）及檢測目標等，規劃成網狀也就是「面狀」方式進行，如圖 4.15 所示，相對於現地開挖僅對損壞位置進行「點」的方式檢測而言，有時候損壞位置不一定是造成損壞成因之處，而透地雷達能以大面積地毯式的進行檢測，故較能掌握問題路段下方的狀況也就可以較有效的找出問題所在。
- (2) 以不同深度進行檢測：透地雷達可以藉由不同頻率的發射天線進行不同深度的檢測，檢測的深度可由 10 幾公分～10 幾公尺，相對於現場開挖而言（一般開挖的深度約 80～120 公分），透地雷達可檢測的深度範圍較現地開挖要大，因此可得到的資訊也較多，故較能確實的找出問題所在。
- (3) 以非破壞的方式進行檢測：透地雷達是以非破壞的方式進行檢測與現場開挖破壞的方式不同，相較下，非破壞方式較為迅速、

安全、低風險、節能減碳及低汙染。

- A. 迅速：透地雷達可採用不同的載具進行檢測，最常用的是人力拖曳式及車載式，無論是人力拖曳式或是車載式，其檢測都是移動式，而現場開挖則是固定式檢測。現場開挖前需要進行交通維持設施的設置以及調派相關的機具如挖土機、卡車等，開挖至預定深度後進行確認探查，確認探查結束後，須清除運送挖出的土石並使用 CLSM 進行回填，待 CLSM 達到強度後在進行瀝青混凝土的鋪設，現場開挖至預定深度後進行檢測的時間只有大約 30 分鐘~1 小時，但是從開挖路面至瀝青混凝土的鋪設卻要花超過 1 天的時間，且僅進行一個點的檢測，應用透地雷達不但可以大面積檢測而且還有不同深度的資訊，其所花費的時間大約半天，若是使用車載式的透地雷達甚至幾個小時即可完成不需要半天的時間，相對來說迅速很多。
- B. 安全、低風險：現場開挖方式需要有進行開挖作業空間的交通維持，除了會佔據道路的空間外，因須要清除運送開挖的 AC 廢料及土石會有土車（傾卸卡車）出入以及回填使用的 CLSM 需要預拌混凝土車的運送，這都會影響用路人通行及安全，又在回填完 CLSM 後並無法馬上鋪設 AC 開放通行，需要等 CLSM 產生強度才能進行鋪設 AC 作業，一般而言，都是要到隔天才能鋪設 AC，因此開挖的位置會需要進行夜間的交通維持設施，不論夜間交通維持設施設置的好或壞，道路上有一處這樣的障礙，就會提高用路人受傷的風險，故相對於透地雷達檢測而言，因為其為移動式，檢測完後不會對道路有所破壞，所以對於用路人較為安全及低風險。
- C. 節能減碳、低汙染：現場開挖方式需要機具先進行開挖，開挖後的 AC 廢料及土石須要清除運送，之後還須使用 CLSM 進行回填及鋪設 AC，而透地雷達因為非破壞檢測，故無需

破壞路面便能檢測道路下方的情況，因此，無需機具、車輛進行開挖、清除、回填 CLSM 及鋪設 AC，相較之下，應用透地雷達檢測檢查是節能減碳、低污染的方式。

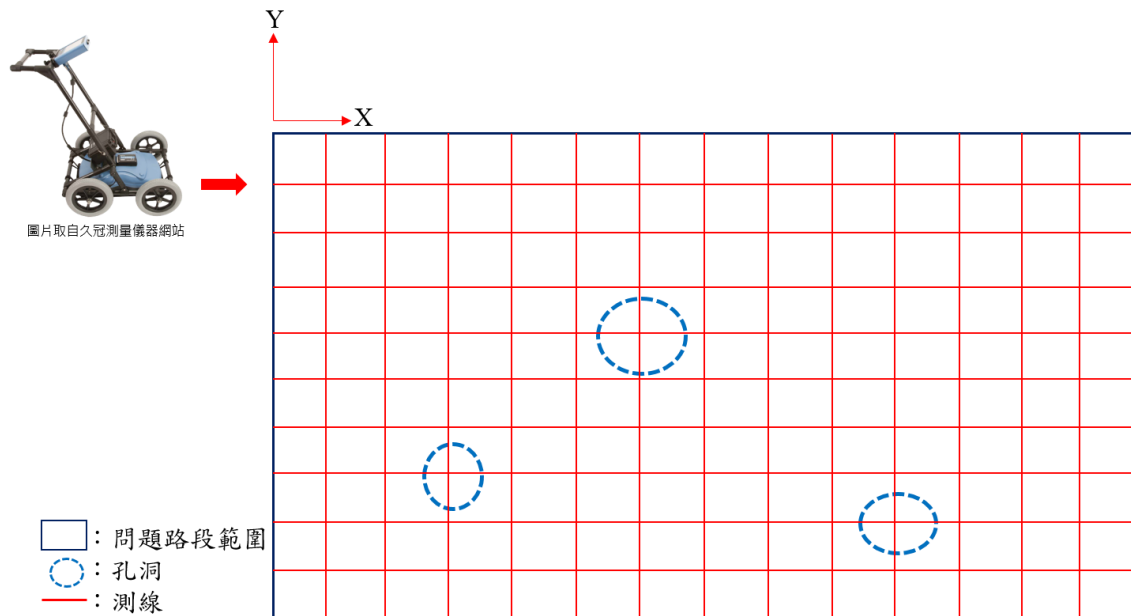


圖 4.15 透地雷達檢測網示意圖

4.3.2 透地雷達應用於特別檢查之可行性探討

訪談財團法人中興工程顧問社的業界專家時，其表示：「公路局高雄工務段曾以小型採購委託本社辦理道路空洞探查，雖檢測報告正確性獲該段工程人員肯定，因為現場工程人員最清楚哪些路段持續下陷破損，所以 3D 透地雷達探查結果推估地下材料與空洞的分布，結合他們的經驗，可以讓他們更清楚道路下方可能的狀況，但是負責長官清楚表示並無法編列經費進行例行性探查。」由此可知，應用透地雷達於省道一般道路柔性鋪面檢測是可行的，惟礙於經費等因素，目前無法應用於全轄區一般柔性路面道路的「日間經常巡查」，但就對於局部有經常性或重複性損壞情形的路段是可以應用透地雷達來辦理「特別檢查」以及「鋪面（損壞）調查」，尤其是「特別檢查」，目前公路局辦理一般道路柔性鋪面損壞之「特別檢查」方式大多以現地開挖辦理，不過，養護工程分局及工務段受訪者表示，現地開挖方式很多時候是找不出一般

道路柔性鋪面損壞的成因，而應用透地雷達檢測相較現場開挖方式能更確實、有效及迅速的檢測出一般道路柔性鋪面經常性或重複性損壞的成因，其能回應養護工程分局及工務段需求。

「特別檢查」是公路管理單位視需求時實施，所以特別檢查是依需求及有選擇性的實施檢查，比如有經常性或重複性鋪面損壞情形的路段，這樣的路段是對於全轄區道路而言，是局部、少數且是有需求要去改善的，本計畫建議可將損壞情形分為嚴重（立即致災）、中等、輕微等級別，以分等級分期程方式實施特別檢測，甚至也可以分析柔性鋪面損壞型態中，哪一種損壞類型對於用路人而言是較危險的，就優先處理比如圖 4.14 所示的經常性或重複性沉陷損壞，如此，對於有問題的路段可以依輕重緩急進行處理。

單就養護工程分局及工務段對於有效確實地找出省道一般道路柔性鋪面經常性或重複性損壞的成因的需求而言，應用透地雷達進行「特別檢查」的檢測是可行的且能滿足需求，惟真正要落實應用透地雷達於「特別檢查」則尚有待解決的問題，依據訪談公路局及其轄下養護工程分局、工務段整理出研究對象對於應用透地雷達檢測的疑慮及問題：

- (1) 經費問題：沒有相應的經費可以應用透地雷達於道路上的檢測。
- (2) 缺乏對透地雷達的基本瞭解：多數的基層工程司不清楚透地雷達檢測基本原理、功能及如何應用於道路養護巡查上。
- (3) 對於透地雷達檢測後的成果有疑慮：這可以分成 2 個部分，一是透地雷達檢測後的訊號圖像是需要有專業及經驗的人員進行判釋，公路局（道路管理單位）如沒有相關專業及經驗的人員是無法針對檢測後的成果進行檢核，除非辦理現場實際開挖確認亦或者須要再請有該方面專業的第三方進行檢核，所以會希望能有什麼樣的方式、工具及系統等來協助檢核檢測後的成果，以解除對於其成果的正確性或準確性之疑慮。其二是業界承攬辦理透地雷達檢測的廠商素質良莠不齊，又有低價搶標現象，以至於業主（道路管理單位）對於檢測後的結果有所疑慮

而不信任。

對於以上的疑慮及問題，本計畫依據訪談專家學者給予的相關意見整理成對應的建議對策說明如下：

- (1) 經費問題之建議對策：據悉工務段每年都會編列關於「省道公路、橋梁維修及災害搶修工程」開口契約的經費，其可用於省道公路分隔島、鋪面、排水設施等相關的養護維修之作業，其中包括了「道路巡查及坑洞緊急修補費」及辦理「特別檢查」現場開挖作業的相關費用。本計畫建議可先從「省道公路、橋梁維修及災害搶修工程」開口契約中增列透地雷達檢測工項，並可依上述建議將轄區有問題路段以分級分期程的方式來處理，在有限的經費情況下，做有效的運用。
- (2) 缺乏對透地雷達的基本瞭解之建議對策：公路局雖然對於透地雷達不陌生，但其主要應用透地雷達於橋梁及隧道，尤其是隧道居多。然多數基層的工程司還是對於透地雷達檢測基本原理、功能及如何應用於道路養護巡查上不甚瞭解，專家學者建議可以利用教育訓練的方式，讓公路局的工程司瞭解透地雷達檢測的基本原理、功能以及能夠在省道養護巡查這方面提供什麼樣的協助，同時也可以透過教育訓練來瞭解公路局進一步的需求之回饋。
- (3) 對於透地雷達檢測後的成果有疑慮之建議對策：在沒有專業及經驗的人員可以對透地雷達檢測成果進行檢核的部分，同樣可以透過教育訓練方式，讓公路局的工程司能有基本的判釋能力或概念，以增加本職學能，此外，本計畫也研究評估應用人工智慧辨識透地雷達檢測後所輸出之訊號圖像的可行性來協助進行檢核。另外在業界承攬辦理透地雷達檢測的廠商素質良莠不齊以及低價搶標現象的部分，須要制定遴選廠商的方式（發包方式）、檢測規範、合理價格及驗收規定等，以遴選出優良合適的廠商及遏制低價搶標的現象，如此，才不會對檢測後的成果產生疑慮、不信任。訪談業界專家時，其提及：「在日本某道

路檢測計畫發包時，主管機關會提供某段道路供廠商測試（主管機關已經很瞭解該道路下方狀況），請投標廠商在簡報時，說明該道路的探查成果，因此主管機關就可以很清楚知道廠商的能力。…」這就是一種可以參考的遴選廠商方法，至於檢測規範、合理價格及驗收規定等則需依照公路總局欲應用透地雷達檢測什麼樣的目標物（標的）（比如道路下的孔洞）進行研討分析後制定，以符合檢測之需求。

透地雷達應用於檢測道路下孔洞、地下水位及地層沉陷鬆動等問題，在國內均有相關成功的實績案例，所以應用透地雷達於特別檢查檢測省道一般道路柔性鋪面經常性或重複性損壞的成因是可行的，惟對於透地雷達檢測原理、功能以及檢測後訊號圖像的判釋是需要有基本的專業知識去瞭解及經驗上的堆積，因此，建議公路局可以定期辦理教育訓練，以增加工程司的本職學能，工程司有相應的知識及經驗就能制定出合宜的發包方式、檢測規範、合理價格及驗收規定等來遴選出合適廠商，獲得到信任、有用的檢測成果。

第五章 AI 智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性

透地雷達檢測後的訊號圖像目前主要還是由人工進行判釋，而判釋者需要有其專業及經驗，惟研究對象公路局較缺乏有專業及經驗的判釋者，因此會希望能有工具（系統）來協助判釋，甚至檢核透地雷達檢測案發包執行後的成果等。近年來得利於圖形處理器(GPU)的運用，使得人工智慧能在影像處理技術上有所突破並日趨於成熟，因此，本計畫透過人工智慧辨識透地雷達訊號圖像案例、實績以及公路局、專家學者訪談的想法、意見及需求等進行應用人工智慧辨識透地雷達訊號圖像的可行性探討，希冀應用人工智慧輔助人工協助判釋。

5.1 人工智慧應用於影像辨識技術基本探討

人工智慧（Artificial Intelligence，簡稱 AI），又稱人工智能，其名稱的確立可追溯自 1956 年，是計算機科學領域的部分範疇，意指讓機器具備和人類一樣的思考邏輯與行為模式。其後「機器學習」(Machine Learning) 推進了 AI 的發展，近年隨著科技的進步，電腦運算速度增加，網路傳輸速度變快，資料儲存空間變大，加上「深度學習」(Deep Learning) 的突破發展，更推進 AI 的爆炸性成長及應用（如：語音辨識、文字辨識、影像辨識、機器翻譯、推薦演算法、智慧投顧、信用評分及自動摘要等...）。

「機器學習」與「深度學習」等關鍵技術，皆促成影像辨識技術越趨成熟。目前，影像辨識已可實現人臉辨識、入侵者偵測、車牌辨識等功能，而隨著相關資源的投入與技術的演進，未來也將發展出更多創新的應用。

對於影像辨識大多數人可能會想到人臉辨識，但事實上除了人臉辨識外，圖像檢查也廣泛應用於許多領域，如協助醫生判讀包括診斷糖尿病視網膜病變、乳腺癌腫瘤轉移等醫學成像、工廠中的不良品判斷以及在道路養護巡查上協助辨識道路鋪面缺失等。

5.1.1 機器學習和深度學習之差異^[43]

「機器學習」(Machine Learning)和「深度學習」(Deep Learning)，這兩個彼此有緊密相關性的名詞經常被混淆，但其實意思有點差別。AI 涵蓋整個機器學習領域，如圖 5.1，所以機器學習範圍比較狹窄。機器學習基本定義是「不需要經過程式導引下，機器就具備學習能力」；就是將大量資料輸入電腦消化，讓電腦產出分析或執行的結果。而機器學習中的特徵檢測（特徵擷取）功能，需要由程式設計師告訴電腦尋找「有助於人類做決策」的資訊。

深度學習是機器學習研究領域中的分支，目標在於拉近機器學習與 AI 之間的距離。深度學習（深度神經網路）是讓電腦可以自行分析資料找出「特徵值」，而不是由人類來決定特徵值，就好像電腦可以「深度」的「學習」一樣。深度學習使用多層神經網路，理論上隱藏層愈多，自由度與精確度愈高。在深度學習系統中，機器會透過處理大量資料和演算法，來學會如何完成特定工作。當資料被輸入人工類神經網路之後，系統會詢問一連串的是非題或數值題，並且根據獲得的答案來對資料分類。透過深度學習原理來建構的影像辨識系統，目前多應用在自駕車、人臉識別、車輛識別、機器人開發等應用的「訓練」上。

機械學習與深度學習之比較，如表 5-1 所示，另以對狗的判斷方式舉例說明機器學習和深度學習的差異性；機器學習方面，希望能有一組包含狗所有特徵的資料，形狀、顏色、花紋等，種類愈多愈好，然後經由人類知識，從資料中選取一些特徵，再從選取資料所訓練出的模型，對狗做出判斷。深度學習方面，捨去人類知識作的特徵提取，而是多層結構神經網路自行由大量的資料中學習如何做特徵擷取；也就是狗的特徵是根據所給的資料組成模型，由模型自己學習狗在特徵擷取上的差異。

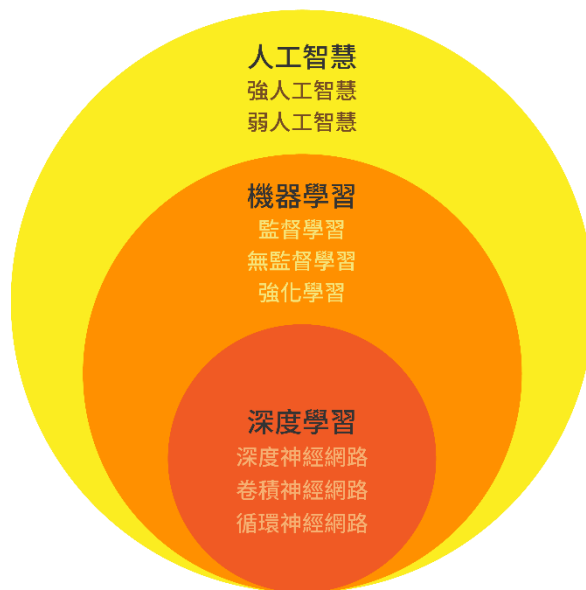


圖 5.1 AI、機器學習及深度學習關聯^[43]

表 5-1 機器學習與深度學習之比較^[43]

機器學習	深度學習
機器學習演算法：非類器 Support Vector Machine(SVM) Random Forests、KNN	完全用圖片無差別訓練 CNN Tensor Flow
無法處理複雜照片	專門處理複雜照片
車牌辨識、簽名辨識	用圖片訓練辨識狗、貓
少量資料即可訓練	需要大量的圖片訓練
成本低：筆電就可應付有餘	成本高：需特殊規格(GPU)的 電腦
訓練時間點	訓練時間長

5.1.2 人工神經網路（Artificial Neural Network，ANN）及深度神經網路（Deep Neural Network，DNN）

由上述可知，在機器學習中，需要讓演算法知道如何藉由取用更多資訊（例如，藉由執行特徵擷取）來進行精確的預測。在深度學習中，由於有人工神經網路結構，演算法可以學習如何透過自己的資料處理來進行精確的預測。

微軟（Microsoft）Learn 網頁「Azure Machine Learning 中的深度學習與機器學習」的內容中提到深度學習是以人工神經網路為基礎的機

器學習子集。此學習程序有很大的深度，因為人工神經網路結構包含了多個輸入層、輸出層和隱藏層。每一層都包含轉換單位，可將輸入資料轉換成資訊，以供下一層用於特定預測工作。由於有此結構，機器可以透過自己的資料處理進行學習。因此需先瞭解何謂人工神經網路。

TIBCO 軟體公司 (TIBCO Software Inc) 網頁「什麼是神經網路？」中說明人工神經網路通常稱為神經網路 (Neural Network, NN)，是受到構成人類大腦的生物神經網路所啟發的運算系統，其以類似於生物神經網路的方式，使用例子進行學習，以與人腦相同的方式接收、處理、執行外部輸入。人類大腦經由神經線路連結以處理各種資訊，大腦的這些部分按層級分層排列，當有資訊進入大腦時，每一層或每一層級的神經元就會完成其本身的特殊工作，即處理傳入的資訊、獲得洞察見解，並將洞察見解傳遞給下一個更高層級。而人工神經網路也以類似的方式工作，神經網路會試圖模擬這種多層方法來處理各種資訊輸入，然後根據它們做出決策。

最基本形式的人工神經網路具有 3 層神經元，如圖 5.2 所示，較複雜的人工神經網路可以有很多層，資訊會從一個流向另一個，就像在人腦中一樣：

- (1) 輸入層 (Input Layer)：資料進入系統的入口
- (2) 隱藏層 (Hidden Layer)：處理資訊的地方
- (3) 輸出層 (Output Layer)：系統根據資料決定如何處理的地方

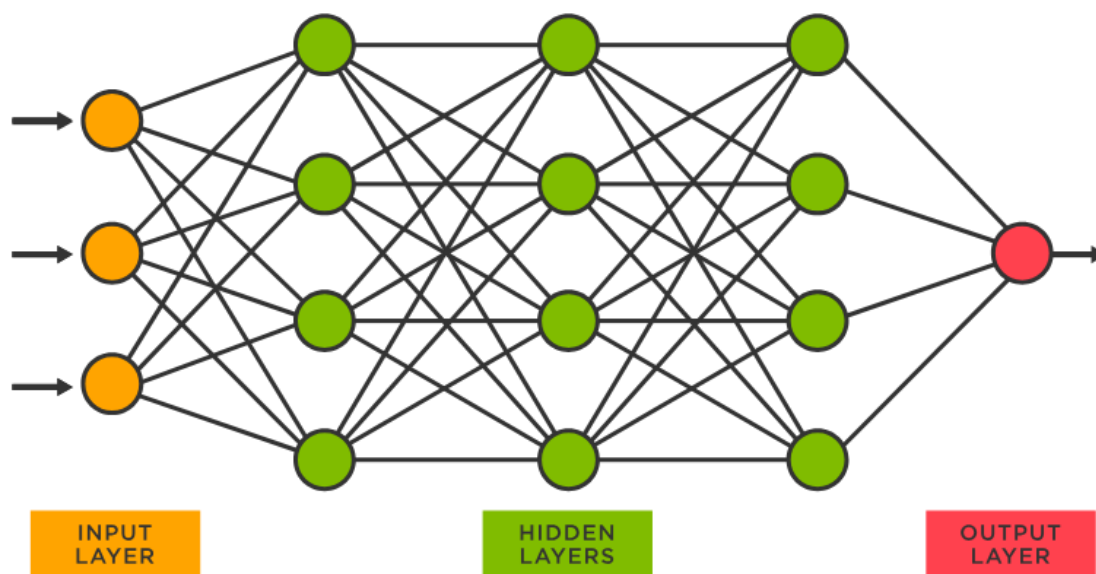


圖 5.2 神經網路架構圖 圖片來源：<https://www.tibco.com>

國立臺灣大學科學教育發展中心 CASE 報科學網頁「機器學習與人工神經網路（二）：深度學習（Deep Learning）」提到，廣泛地說，深度學習是指具有層次性的機器學習法，能透過層層處理將大量無序的訊號漸漸轉為有用的資訊並解決問題。但通常提到深度學習，人們指的是一種特定的機器學習法-「深度神經網路」。神經網路包含 3 層神經元，除了輸入和輸出層外，中間有一層隱藏層（意指不參與輸入或輸出，隱藏於內部），傳遞並處理資料。其實，隱藏層可以有一層以上，而複數個隱藏層的神經網路通常被稱為深度神經網路，如圖 5.3 是一個深度神經網路示意圖，也許只有 2 個隱藏層看起並沒有很深，但在實務上神經網路可以高達數十層至數百層，非常具有「深度」。

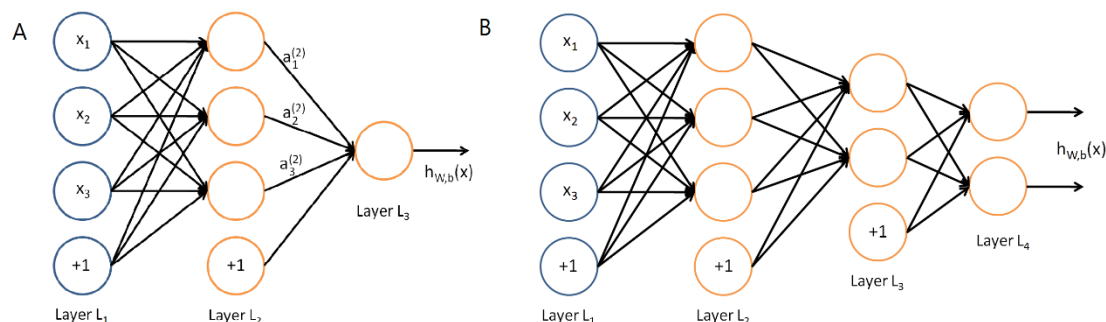


圖 5.3 (A)淺及(B)深度神經網路示意圖 圖片來源: Stanford Deep Learning Lab

5.1.3 卷積神經網路 (Convolutional Neural Network, CNN)

卷積神經網路常被用於處理大型圖像，可謂處理影像的利器，依據 UFLDL Tutorial 網頁：「卷積神經網路由一個或多個卷積層和頂端的全連通層（對應經典的神經網路）組成，同時也包括關聯權重和池化層。這一結構使得卷積神經網路能夠利用輸入資料的二維結構。與其他深度學習結構相比，卷積神經網路在圖像和語音辨識方面能夠給出更好的結果。這一模型也可以使用反向傳播演算法進行訓練。相比較其他深度、前饋神經網路，卷積神經網路需要考量的參數更少，使之成為一種頗具吸引力的深度學習結構。」

整個卷積神經網路結構主要分為：卷積層（Convolution Layer）、池化層（Pooling Layer）以及最後一個全連接層（Fully Connected Layer）。

卷積層主要的功能是以卷積運算方式，在保留原輸入影像結構下，對其進行特徵擷取。就好比在辨識某物體時亦是從其鮮明特徵開始去認識，以人為例，可能會從髮色、臉型、五官比例等特徵進行擷取，卷積層的工作即可與此相類比。

池化層主要的功能是壓縮影像以減少資料量，同時能保有該影像重要資訊，使卷積神經網路能專注判斷影像特徵而不受特徵位置所干擾，此過程亦稱次取樣（Subsampling）。常見方法有最大池化（Max Pooling）或平均池化（Average Pooling）。

全連接層即是一般神經網路，主要的功能是輸入影像，藉由隱藏層中大量神經元進行聯結及計算，最後輸出分類、預測結果。

圖 5.4 為卷積神經網路架構示意圖，輸入圖片後，先做 Convolution（卷積運算）再做 Max Pooling（最大池化壓縮影像），Convolution（卷積運算）搭配 Pooling（池化）的次數與細節是可以設計的，圖 5.4 係以兩次為例，做完後的結果攤平“Flatten”成一個一維的 Vector 然後丟到傳統的 DNN 架構（Fully Connected Feedforward network）裡面，最後得到輸出結果。

The whole CNN

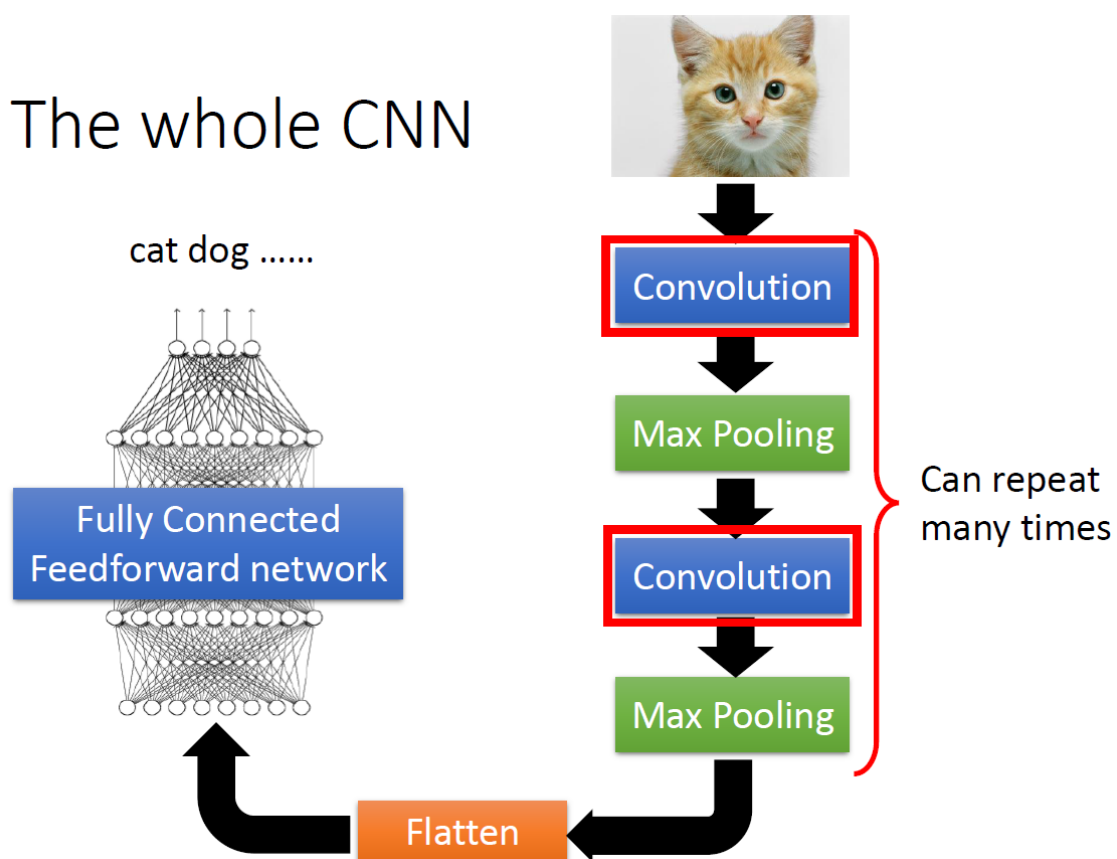


圖 5.4 卷積神經網路架構示意圖 圖片來源：Machine Learning (2017) 第十講，李宏毅

5.2 AI 辨識透地雷達訊號圖像案例實績之探討

依據本計畫於文獻回顧蒐集的資料，發現 AI 在透地雷達領域上的應用並不多，近年雖然有增加的趨勢，但研究規模還是相對較小，就目前來說係以研究辨識地面下的管線或是鋼筋混凝土構造物裡面的鋼筋居多。

於訪談專家學者得知，瑞典地球物理儀器的製造商 Malå GeoScience 公司有開發線上（雲端）軟體 Malå Vision（如圖 5.5），其可支援 AI 辨識透地雷達號圖像，該軟體是以訂閱的方式使用，依等級之分有上傳數據的限制，目前該軟體可以讀取 Malå、GSSI 及 ImpulseRader 三家廠商透地雷達的數據資料，其 AI 主要是辨識雙曲線圖像也就是辨識地下管線並且可進行標記（如圖 5.6）。

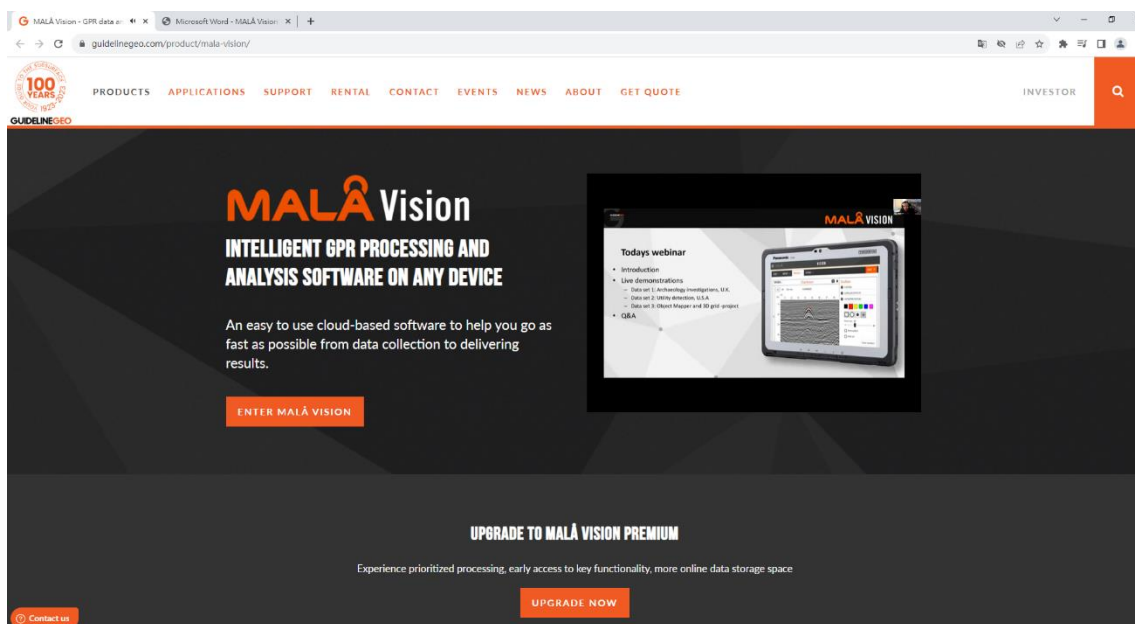


圖 5.5 Malå Vision 軟體網頁 圖片擷取自 Malå 官方網站

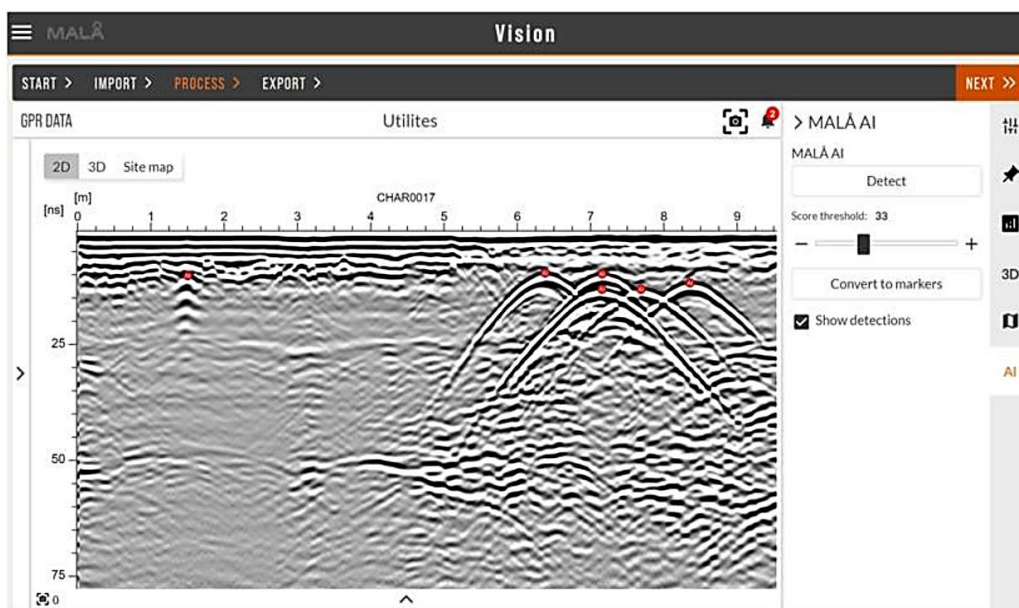


圖 5.6 Malå Vision AI 辨識雙曲線 圖片擷取自 Malå Vision 快速指南

經濟部水利署委託國家中山科學研究院辦理為期 3 年（109～111 年）「無人載具搭載透地雷達執行堤坡結構非破壞檢測研究計畫」，該計畫係為開發一款可搭載透地雷達執行非破壞檢測作業之無人載具，並結合定位、自走、透地雷達影像（圖像）資料即時初步判讀（釋）等功能，達到降低人力作業危險性及縮短透地雷達影像（圖像）資料初步判讀（釋）所需時間之目標。

上述計畫為了縮短透地雷達資料即時初步判讀（釋）時間。開發透地雷達資料即時初步判讀（釋）系統係透過透地雷達影像（圖像）資料庫建立、AI 深度學習模型建構與先期影像（圖像）特徵學習訓練，逐步提升輔助辨識之準確度。透過 AI 技術可先找出可疑影像（圖像），再由專業人員進行複判如，圖 5.7 所示，可有效減輕專業人員判讀（釋）大量影像（圖像）資料的負荷，搭配單機離線程式開發，可於現地完成影像（圖像）資訊收集後，當場輸入並即時判斷（辨識）出 30 公分（含）以上孔洞，作為緊急作業時之參考，圖 5.8 為透地雷達 AI 輔助系統架構圖。

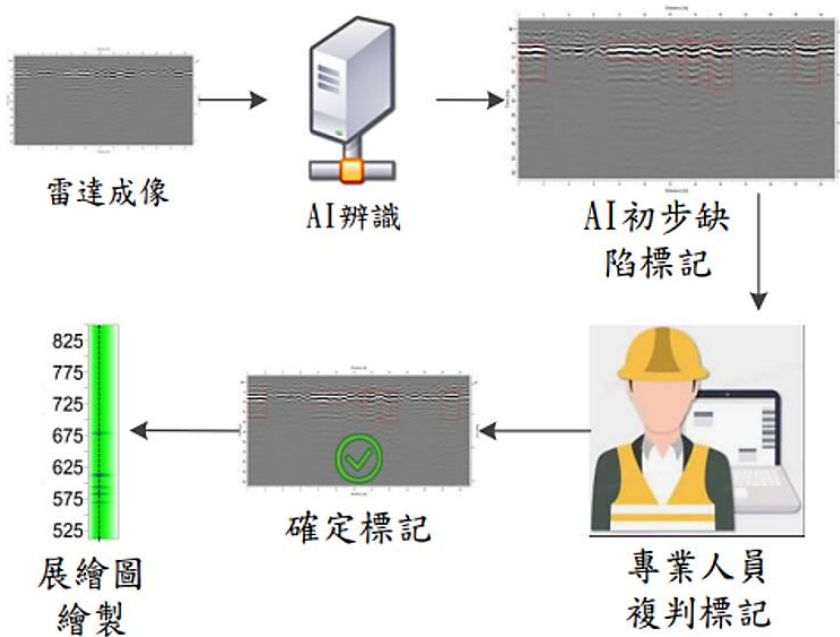


圖 5.7 AI 初判、人員複判示意圖^[46]

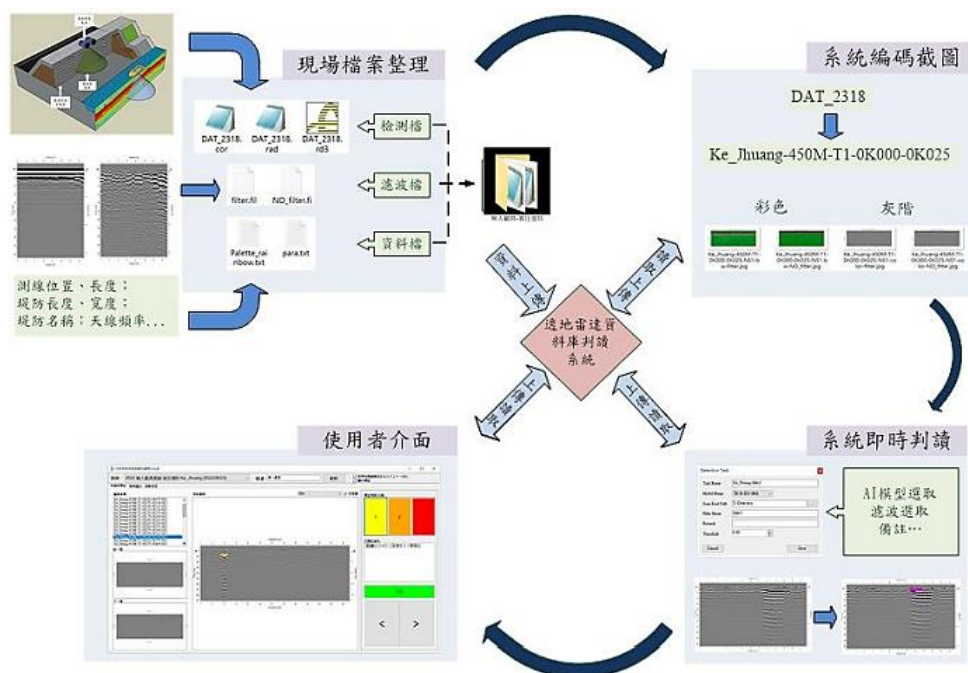


圖 5.8 透地雷達 AI 輔助系統架構^[45]

國內也有學術研究單位（機構）在研究應用 AI 辨識透地雷達檢測後的訊號圖像，不過尚未到可以實際應用的階段，而上述 2 個案例係已達實際應用階段，一是由透地雷達製造商所開發的商業線上軟體，另

一是政府機關委託研究機構依其需求量身訂做開發的 AI 辨識輔助系統可視為「專案研發」。這 2 個案例雖然都是應用 AI 協助辨識透地雷達訊號圖像，不過因為兩者（商業軟體、專案研發）在經濟性、便利性、限制性及實用性等區別，故對於欲使用 AI 協助辨識透地雷達訊號圖像者而言就有不同的選擇考量，以下就以使用商業軟體還是專案研發進行探討：

- (1) 經濟性：使用商業軟體，以 Malå Vision 線上軟體為例，其採訂閱制，以 100GB 上傳空間一年的訂閱金額為美金 828 元（折合新臺幣約為 28,980 元）。使用專案研發方式係以新臺幣百萬元為單位的經費預算進行開發，開發完成後尚需經費預算進行維護管理或擴充等作業，相較下使用商業軟體較為經濟。
- (2) 便利性：商業軟體係已開發至一定的成熟度才上市提供使用，使用者只要支付相關費用後即可使用，而專案研發係要從頭開始；瞭解使用者需求、透地雷達原始資料（數據）前處理、建立資料庫、AI 深度學習方法與模型研擬及建構、進行 AI 訓練及測試等，其所要花費的時間是以年為單位計算，除此之外，專案研發還需花費後續系統維護管理的時間、精神及金錢等，而使用商業軟體，其系統維護管理則由軟體開發商負責，相較下使用商業軟體較為便利。
- (3) 限制性：使用商業軟體會有讀取透地雷達廠牌、辨識訊號圖像、調整參數值、後續擴充等限制，也就是會限縮在該軟體開發商給的條件下使用，換句話說，使用者需要去找到符合所需的商業軟體，但是目前市面上的商業軟體並不多，所以選擇性會比較少。使用專案研發方式係可以依使用者需求進行研發，就不會有上述的限制條件，相較下使用專案研發限制較少。
- (4) 實用性：商業軟體本身受限於商業軟體廠商給定的條件在實用性一定會比客制化的專案研發來的差，再者訓練 AI 的資料會影響到辨識的準確率，商業軟體採用的訓練資料是否符合使用者需求是待商榷的問題，而專案研發會依據使用者需求建立訓

練 AI 的資料庫，相較下使用專案研發較為實用。

透過上述 2 個案例，可知應用 AI 辨識透地雷達檢測後的訊號圖像是可行的，以目前來說，欲使用者可以依需求找尋市面上商業軟體使用亦或者以專案研發的方式客制化開發。商業軟體雖較經濟及便利，不過現在市面上的商業軟體不多選擇性少且有較多的限制，而採用專案研發的方式雖可依使用者需求進行客製化研發有較高的實用性，但需要花費較多的經費及時間進行研發，也需有後續維護管理或擴充的相關經費預算。

5.3 AI 辨識透地雷達訊號圖像可行性之初步探討

由 5.2 節的案例、實績可知，應用 AI 辨識透地雷達訊號影像是具可行性的，使用「商業軟體」或是「專案研發」是目前使用者的選項，這兩個選項各有優缺點，使用者可依自身需求進行選擇，但無論是商業軟體或是專案研發，於開發執行過程一般可分為 3 個步驟：

- (1) 透地雷達資料（數據）的前處理（包含資料庫的建立）
- (2) AI 深度學習方法與模型研擬、建構與套用
- (3) 輸出結果的整合與後處理

經訪談專家學者瞭解要開發 AI 辨識的首要條件是訓練 AI 模型的資料，其資料是非常大量的。以基礎的手寫辨識為例，其用於深度學習的資料筆數達到 6 萬筆，更複雜的物件圖像辨識則需要更多深度學習的資料約數萬筆至數十萬筆不等，所以本計畫訪談的專家學者認為應用 AI 辨識透地雷達訊號影像的癥結點在於 AI 學習過程有沒有足夠正確的資料進行學習。

受訪的專家學者認為透地雷達是以反射電磁波來探測（查）目標物，這與探測周圍的區域相關，所以無論目標物是地下管線或是要更深入的探究各像素點的情況，可利用能合理考量區域特徵的演算法，這樣的演算法便是 AI 深度學習方法與模型首要的選擇。除了 AI 深度學習方

法與模型的選擇以外，尚有誤差函數的選定、模型效能及可解釋性評估等等，這也是開發成功的關鍵、技術的訣竅。

因此，可瞭解應用 AI 辨識透地雷達訊號影像雖然可行，但能否開發成功並實際落地應用的關鍵重點係為上述的前 2 個步驟，尤其是採用專案研發的方式，勢必要能夠突破這 2 個關鍵步驟，才能有成果的產出。以下本計畫針對步驟 (1)、(2) 會遇到的問題、困難進行初步探討。

5.3.1 透地雷達資料（數據）的前處理（包含資料庫的建立）

在 AI 訓練（辨識）前必須對檔案資料做系統分類整理才能導入訓練（辨識），因此會先對透地雷達檔案資料進行解讀、標準化編碼、標註及截圖等再匯入資料庫，這就是透地雷達資料（數據）的前處理作業，同時也包括資料庫的建立。

在進行透地雷達資料（數據）的前處理及資料庫的建立之前，須要收集「足夠」、「正確」的資料，「足夠」、「正確」的定義會依據使用者需求辨識的標的不同而有所不同，而依受訪專家學者表示：「透地雷達在市面上有不同的廠牌，雖然透地雷達的原理一樣，儀器都類似，但差別在於程式畫面，處理程序與圖形（圖像）輸出等人為過程。國內有些公司或專家喜歡過度處理資料（將訊號進行人為的處理）或再加值應用（譬如反射訊號等級畫分）...。所以各系統（各廠牌透地雷達）的原始資料（Raw Data）是最重要的，就是純粹沒加值過的，應該是用這種資料作為 AI 輸入（訓練）資料才不會誤導。」

另受訪專家學者也有說明市面上各廠牌的透地雷達並非都能將檢測後的檔案資料輸出，即使能輸出檔案資料也並一定是就是可使用的原始資料，所以在收集資料上會遇到的困難是要如何才能收集到足夠而且能夠使用（正確）的資料，在收集到資料之後，才能進行前處理並建立資料庫。

本計畫研提以下方式來取得透地雷達檔案資料，以供參考：

- (1) 嘗試請公家機關、學術研究機構、業界檢測公司及工程顧問公

司等提供所擁有的透地雷達檢測相關檔案資料

(2) 自行於相關場域進行施測作業取得檔案資料

(3) 自行於實驗（試驗）室模擬場域（或需求）環境（狀況）進行施測作業取得檔案資料

但是，上述取得透地雷達檔案資料方式要符合能夠使用（正確）的條件，也就是取得透地雷達檢測的原始檔案資料，還須進行挑選及規定；要從方式（1）取得的檔案資料中挑選出有原始檔案可使用的檢測資料，在方式（2）、（3）進行施測作業前，須規定使用的透地雷達廠牌要能輸出施測後的檔案資料（最好能輸出原始的檔案資料）。

曾在民國 107 年免費幫花蓮市、高雄市及臺南市進行道路健檢的日本 GEO SEARCH 株式會社，依據該公司官方網站上的資料，截至目前使用透地雷達檢測的距離長度為 27 萬 5,339 公里，發現路面下的空洞數量為 12 萬 8,477 個地點，該公司空洞檢測、劣化檢測為日本市佔率 90%以上（如圖 5.9 所示），說明了該公司擁有日本境內的透地雷達檢測數據資料，而 GEO SEARCH 株式會社為了保存管理這些龐大的數據資料成立了數據中心，也因為這些數據資料該公司可以繪製出日本過去 5 年來防止塌方的地區示意圖（如圖 5.10 所示）並發展 AI 智慧化辨識系統，在臺灣目前並沒有像 GEO SEARCH 株式會社這樣的公司或是有公家機關、學術研究單位（機構）能夠收集如此龐大的透地雷達數據資料並保存管理，因此，受訪專家學者認為如果要發展 AI 辨識透地雷達訊號影像，就必須建立臺灣本土的數據資料庫，起步雖然很難，但是對於未來道路巡查、養護管理等是有長遠、永續的經濟價值。



圖 5.9 GEO SEARCH 株式會社透地雷達檢測之成就 圖片擷取自官方網站



圖 5.10 日本過去 5 年來防止塌方的地區示意圖 圖片擷取自官方網站

5.3.2 AI 深度學習方法與模型研擬、建構與套用

深度學習是機械學習方法之一，而影像的分析與辨識，正是深度學習最擅長的領域。近幾年，深度學習在影像生成、風格轉移與醫學影像辨識等進階領域有突破性的成果，然深度學習方法能否適用於透地雷達圖（影）像之辨識，受訪業界專家表示：「依據本公司在 108 年的研究，我們已建立初步 AI 辨識模型，在經過許多廣泛使用的評估標準驗證之後，證明其辨識能力，能在相對初步的設定下，達到一定水平，且具備一定泛化性，足以說明其存在繼續發展的可行性，以及成為業界正式應用的發展潛力。」時至今日，市面確實已有相關 AI 商業軟體以及公家機關依需求委外自行開發出來的 AI 輔助系統。

對於 AI 深度學習方法與模型的選擇，首先要定義需求及目的，想解決什麼問題，比如需要 AI 辨識透地雷達圖像的是地下管線位置、大小還是地下孔洞位置、大小亦或是地下水位位置等等，因為需求及目的的不同所選擇的 AI 深度學習方式與模型可能就會不同。可從簡單的演算法開始嘗試到複雜、全面的演算法，選擇演算法必須考慮準確度、定型時間、線性、參數數目及特徵數目等方面。目前深度學習使用的演算法最受歡迎的有下 10 個類型：1.卷積神經網路（CNN）、2.長短期記憶網路（LSTM）、3.遞迴神經網路（RUN）、4.生成對抗網路（GAN）、5.徑向基函數網路（RBFN）、6.多層感知器（MLPs）、7.自組織地圖（SOM）、8.深度信念網路（DBN）、9.受限玻爾茲曼機（RBM）及 10.自動編碼器（Auto-Encoder），其中，卷積神經網路由於其萃取區域特徵的性質，在深度學習演算法中，是影像辨識的首選，近年來許多特殊架構的提出均以其為基礎比如 DenseNet、EfficientNet、YOLO 等，而在深度學習模型訓練的過程中，由於模型的優化方向基本是由誤差函數決定的，所以選擇的誤差函數也決定了模型的成敗。

所以 AI 深度學習方法與模型研擬、建構與套用是一連串的選擇並進行試誤法（Trial And Error），對演算法、模型架構、誤差函數及相關參數進行選擇、驗證、設定及校調等等，這都需要耗費相當的人力、時間成本，因此，為開發成功的關鍵、技術的訣竅，也是困難之處。

5.4 小結

在臺灣透地雷達是被廣泛的應用於各個領域範疇，於業界或學術研究單位（機構）能辦理透地雷達檢測這樣業務的為數不少，公家機關也常利用透地雷達對所養護管理的設施進行非破壞的檢測或調查，不過，臺灣目前無論是業界的公司、研究的學術單位（機構）或是養護管理的公家機關均沒有像日本 GEO SEARCH 株式會社一樣，建立國內透地雷達相關的數據資料庫。

受訪的公路局、學者專家對於應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像均正面表示贊同，專家學者也認為具有可行性，但是發展 AI 前需要建立相關的數據資料庫，尤其是本土化的數據資料，如何收集到足夠且正確的數據資料會是個關鍵課題，所以在第四章圖 4.14 會有建立「透地雷達檢測資料庫」的項目，公路局若能在經常性或重複性鋪面損壞的路段採用透地雷達進行特別檢查並建立相關檢測資料庫，除了可以比對分析前後資料找出經常性或重複性鋪面損壞的成因以外，也能作為往後開發 AI 智慧化辨識的訓練資料，並在使用透地雷達檢測-建立資料庫-開發 AI 辨識系統-精進 AI 辨識系統之間能形成「善循環」，俾利於 AI 辨識之良好發展。

目前市面上的 AI 辨識透地雷達訊號圖像的商業軟體大多以辨識地下管線為主，若是應用 AI 來辨識地下孔洞等道路下潛在損壞風險因素就需採用專案研發方式如同經濟部水利署「無人載具搭載透地雷達執行堤坡結構非破壞檢測研究計畫」自行研開發，值得一提的是經濟部水利署開發 AI 辨識系統主要目的係協助專業人員進行判釋，提高人工判釋的效率，所以是「輔助而非取代」，另一方面讓 AI 辨識系統在檢測成果上採用「寧可錯殺不可錯放」的方式^[46]。因此，可以瞭解目前應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像係以輔助為主尚未能取代人工判釋，但可以提升人工判釋的效率，減輕專業人員的負擔，並在有時效性的搶救災緊急情況下，發揮針對檢測成果進行即時初步快篩辨識的作用。

第六章 合作計畫之芻議

經過第四章的初步探討，可以瞭解公路局的需求在於能夠確實、有效及迅速的檢測出省道一般道路柔性鋪面經常性或重複性鋪面損壞的成因，並以對症下藥的養護措施來根除經常性或重複性鋪面的柔性鋪面損壞，公路局以往常使用現場開挖方式辦理「特別檢查」來檢測經常性或重複性鋪面損壞的成因，但大多數是找不出其成因，主要是因為現場開挖的方式是「單點」（僅對損壞位置）的檢測又其檢測深度有限，相較下，應用透地雷達進行檢測，可對於問題路段（鋪面）以「面」的形式進行大面積地毯式的檢測且利用不同的發射天線頻率進行不同深度的檢測，故應用透地雷達辦理特別檢查較使用現場開挖方式要確實、有效且迅速。

除此之外，透地雷達也可以應用於「鋪面調查」，鋪面調查是據以作為公路改善及養護等規劃之參考，若只有採用人工調查方式只能僅於道路鋪面的表面調查，然鋪面損壞有些是來自道路下方的潛在損壞風險因素所造成的，因此，應用透地雷達可以檢測道路下方的情況，能對於公路改善及養護等做更為全面性的規劃。

公路局要落實應用透地雷達於省道養護巡查上，尚有經費、基層工程司缺乏對透地雷達的基本瞭解及對於透地雷達檢測後的成果有疑慮等問題待解決，依據第四章所建議的對策，經費問題可先從「省道公路、橋梁維修及災害搶修工程」開口契約中增列透地雷達檢測工項，並將轄區有問題路段以分級分期程的方式來處理，於有限的經費情況下，做有效的運用。其餘問題可透過定期辦理「教育訓練」的方式，讓基層工程司瞭解透地雷達相關原理、功能及如何應用於道路養護巡查上，以增進其本職學能，基層工程司有相應的知識及經驗就能制定出合宜的發包方式、檢測規範、合理價格及驗收規定等來遴選出合適廠商，以獲得到信任、有用的檢測成果。

上述除了經費問題之外，本所可透過與業界或學界合作研究的方

式，辦理「合作計畫」協助公路局解決排除基層工程司缺乏對透地雷達的基本瞭解及對於透地雷達檢測後的成果有疑慮不信任等問題，以加快推動透地雷達實際落實應用於省道養護巡查的速度。另外，第五章初步探討應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像是具可行性，AI 辨識透地雷達訊號圖像可以協助人員進行辨識或協助檢核檢測之成果等，惟發展 AI 辨識前需要建立相關的數據資料庫，尤其是本土化的數據資料，如何收集到足夠且正確的數據資料會是個關鍵課題，故將這個關鍵課題一併納入合作計畫執行，為後續發展 AI 辨識系統預作準備。

6.1 合作計畫說明

合作計畫名稱為「透地雷達落實應用於省道養護巡查之研究」，預定執行期程為 1 年，該計畫主要執行 3 項主軸工作：1.制定透地雷達應用於省道養護巡查檢測的發包方式、檢測規範、合理價格及驗收規定等範本。2.擬定透地雷達教育訓練相關內容並辦理教育訓練。3.規劃建立透地雷達數據資料庫方法。透過這 3 項主軸工作來解決排除公路局對於透地雷達應用在省道養護巡查的疑慮及問題，讓透地雷達能實際落實應用，確保省道品質及用路人安全。以下為 3 項主軸工作的工作項目：

(1) 制定透地雷達應用於省道養護巡查檢測的發包方式、檢測規範、合理價格及驗收規定等範本

- A.蒐集國內/外應用透雷達檢測道路相關的發包案件。
- B.分析國內/外應用透雷達檢測道路相關的發包案件之優缺點，萃取並借鏡合宜可用的資料。
- C.調查確認公路局省道養護巡查時道路常見損壞類型，並瞭解公路局檢測標的需求，以利制定透地雷達檢測規範及驗收規定。
- D.辦理透地雷達訪價作業。

(2) 擬定透地雷達教育訓練相關內容並辦理教育訓練

A.擬定透地雷達教育訓練教材。

B.規劃教育訓練期程、場次、方式、地點...等並執行。

(3) 規劃建立透地雷達數據資料庫方法

A.研擬收集、篩選透地雷達數據資料的方法，以確保能收集到足夠且正確的數據資料。

B.初步規劃透地雷達數據資料庫的建立方法，比如：如何儲存、管理維護、擴充等。

C.初步評估跨系統的可行性。

6.2 預期成果、效益及應用

(一)預期成果

(1) 完成制定透地雷達應用於省道養護巡查之檢測發包方式、檢測規範、合理價格及驗收規定等範本。

(2) 完成擬定透地雷達教育訓練相關內容並辦理教育訓練。

(3) 完成建立透地雷達數據資料庫方法。

(二)預期效益

(1) 協助公路局落實應用透地雷達於省道養護巡查並為後續發展AI智慧化辨識系統預作準備。

(2) 提升公路局基層工程司本職學能。

(3) 提升省道檢測效率及品質，確保用路人安全。

(三)預期應用

- (1) 提供公路局應用透地雷達於省道養護巡查發包、執行及驗收等參考。
- (2) 提供本所及公路局建立透地雷達數據資料庫之方法。

第七章 結論與建議

近年來，臺灣道路發生天坑事件頻傳，無論發生的起因是人為因素或是自然因素，是可以應用透地雷達進行檢測來主動預防災害的發生，公路局所轄管的省道係為聯絡各縣市的主要普通公路系統，分為一般省道及省道快速公路，應用透地雷達於省道一般道路柔性鋪面的養護巡查，有助於檢測道路下潛在損壞風險因素及探查鋪面經常性或重複性損壞的成因，在未致災前進行主動預防方式進行養護並對損壞鋪面對症下藥採取正確適當的修補措施，以維護道路品質及用路人安全。

判釋透地雷達訊號圖像需要專業及經驗的人員，在面對大量訊號圖像需判釋時，人工判釋的效率及正確性會降低，除此之外，道路管理單位較缺乏判釋訊號圖像的專業人員，故會期望能有相關方式、工具及系統來協助判釋訊號圖像，在科技的日新月異下，應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像是具可行性，目前市面上已有 AI 辨識相關的商業軟體，國內也有政府機關依其業務需求委外研發相關的 AI 辨識系統。

以下為本計畫對於透地雷達應用於一般省道柔性鋪面養護巡及 AI 智慧化辨識可行性初步探討的結論與建議。

7.1 結論

1. 經由訪談公路局及其轄下養護工程分局及工務段瞭解，公路局應用透地雷達主要係進行隧道、橋梁的檢測，較少應用在道路上。對於公路局而言，礙於法規及機關權責、現行養護巡查制度、經費及效益等原因，要在「日間經常巡查」應用透地雷達輔助檢測省道一般道路柔性鋪面下潛在損壞風險因素是較為不易執行且目前尚無迫切的需求，比較有需求的則是如何確實、有效及迅速的檢測出柔性鋪面經常性或重複性鋪面損壞的成因。
2. 公路局於執行省道一般道路柔性鋪面養護巡查時，會發現有些路段

的鋪面有經常性或重複性損壞的情形，在反覆修補無效後，公路局一般都會使用現場開挖的方式辦理特別檢查來探查其損壞的成因，但往往無法探查出損壞之成因。應用透地雷達檢測不同於現場開挖是以點（僅對損壞位置）、固定深度（80~150 公分）的方式探查，而是以面（大面積地毯式）及不同深度方式進行檢測，又透地雷達是非破壞的方式進行檢測相較現場開挖是以破壞方式來說，較為迅速、安全、低風險、節能減碳及低汙染，因此，應用透地雷達進行特別檢查能更確實、有效及迅速的檢測出柔性鋪面經常性或重複性鋪面損壞的成因。

3. 就公路局對於有效確實地找出省道一般道路柔性鋪面經常性或重複性損壞成因的需求而言，應用透地雷達進行「特別檢查」的檢測是可行的且能滿足需求，惟真正要落實應用透地雷達於特別檢查則尚有經費、基層工程司缺乏對透地雷達的基本瞭解及對於透地雷達檢測後的成果有疑慮等問題待解決，本計畫依據訪談專家學者給予的相關意見彙整對策如下：經費問題可先從「省道公路、橋梁維修及災害搶修工程」開口契約中增列透地雷達檢測工項，並將轄區有問題路段以分級分期程的方式來處理，於有限的經費情況下，做有效的運用。而基層工程司缺乏對透地雷達的基本瞭解及對於透地雷達檢測後的成果有疑慮可以透過定期辦理「教育訓練」，以增加基層工程司的本職學能，基層工程司有相應的知識及經驗就能制定出合宜的發包方式、檢測規範、合理價格及驗收規定等來遴選出合適廠商，獲得到信任、有用的檢測成果。
4. 關於應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像，依據相關研究文獻及實際案例顯示係較常採用捲積神經網路模型架構進行開發，而目前市面上已有 AI 辨識相關的商業軟體，國內也有政府機關依其業務需求委外研發相關的 AI 辨識系統，因此，使用者可以選擇採用商用軟體或是專案研發這 2 種方式，不過這 2 種方式在經濟性、便利性、限制性及實用性上有所區別，若要應用 AI 來辨識地下孔洞等道路下潛在損壞風險因素就需採用客製化的專案研發方式，因目前市面上

商業軟體大多僅能辨識地下管線。

5. 受訪的研究對象公路局、學者專家對於應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像均正面表示贊同，專家學者也認為具有可行性，但是發展 AI 辨識前需要建立相關的數據資料庫，尤其是本土化的數據資料，如何收集到足夠且正確的數據資料是關鍵課題，因此，需要在使用透地雷達檢測-建立資料庫-開發 AI 辨識系統-精進 AI 辨識系統之間形成「善循環」，俾利 AI 辨識透地雷達的發展。
6. 目前應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像是以輔助為主尚未能取代人工判釋，但透過 AI 先行即時初步辨識檢測成果後，再由專業人員進行複判，可以提升人工判釋的效率，減輕專業人員的負擔，並在有時效性的搶救災緊急情況下，發揮即時初步快篩辨識的作用。因此，在 AI 辨識尚未完全取代人工判釋前，還是需要先透過「教育訓練」來增加、提升公路局基層工程司的本職學能。

7.2 建議

1. 為協助使透地雷達能落實應用於公路局省道一般道路鋪面養護巡查的特別檢查，建議可透過合作計畫訂定透地雷達檢測發包方式、檢測規範、合理預算價格及驗收規定等範本來協助遴選合適廠商；擬定透地雷達教育訓練相關內容，甚至可直接辦理透地雷達教育訓練來增加、提升公路局基層工程司的本職學能；規劃建立透地雷達數據資料庫的方法，俾利於後續應用 AI 辨識之發展。
2. 為了使檢測後的透地雷達訊號更為清晰易判釋或是想由訊號中得到更多的資訊比如：管線直徑、孔洞大小等等，則會對檢測後的透地雷達訊號進行「後處理」的作業程序。依據研究文獻表示在 AI 辨識的問題上，比起對 AI 模型及相關參數進行調整，對訊號進行後處理，反而更能提升準確率，因此，對於訊號進行後處理與 AI 辨識之間的關係，在後續的研究是值得探討的問題及方向。

7.3 研究成果效益

1. 完成透地雷達應用於省道養護巡查可行性評估。
2. 完成 AI 智慧化辨識透地雷達訊號圖像可行性評估。
3. 產出「透地雷達落實應用於省道養護巡查之研究」合作研究計畫之「研究主題及重點」（草案）。

7.4 提供政府單位應用情形

1. 提供公路局、高速公路局及各地方政府道路管理機關道路養護巡查之應用參考。
2. 提供本所後續辦理透地雷達、人工智慧辨識等相關研究之應用。

參考文獻

1. Davis, L., and Annan, A.P., “Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy,” *Geophysical Prospecting*, Vol. 37, pp. 531-551, 1989.
2. Kovas, J. E., “Survey application of ground-penetrating radar,” *Surveying and Land Information Systems*, Vol. 51, No. 3, pp. 144-148, 1991.
3. Chen,Y.L, Chow,J.J.,and Chen,H.W. ,” Analysis of Standing Waves on GPR Hyperbolic Travel-Time Responses - Case Studies in a Fractured Granitic Rock and a Deteriorating Coastal Structure”, *TAO Journal:Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, Vol. 18, No. 5, 879-900, 2007.
4. Thitimakorn,T. ,Kampananon,N. ,Jongjaiwanichkit,N. ,and Kupongsak,S. “Subsurface void detection under the road surface using ground penetrating radar (GPR), a case study in the Bangkok metropolitan area, Thailand”, *International Journal of Geo-Engineering* , DOI 10.1186/s40703-016-0017-8,2016.
5. Shih, S. F., and Doolittle, J. A., “Using radar to investigate organic thickness in the florida everglades,” *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 48, No. 3, pp. 651-656, 1984.
6. Beres,M.Jr., and Haeni,F.P., “Application of ground penetrating radar methods in hydrogeologic studies”, *Ground Water*, vol. 29, no. 3, pp. 375-386,1991.
7. Hunaidi,O. and Giamou,P.,” Ground-penetrating radar for detection of leaks in buried plastic w ater distribution pipes”, *7th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR’98)*, pp. 783-786,1998.
8. Kim,S.W.,“Comparison of FMCW and Pulse Type Ground-Penetrating Radar(GPR) for Water Leakage Detection” *Korea Institute of Science and Technology*,2005.

9. Eyuboglu,S.,“Detection of Water Leaks Using Ground Penetrating Radar” Department of Applied Science University,2008.
- 10.Molyneaux,T .C. K .,Millard,S .G .,Bungey,J .H .,and Zhou,J .Q. ,“Radar assessment of structural concrete using neural networks”, *HDT&E Internatiomal*,vol.28,PP.281-288,1995.
- 11.Al-Nuaimy, W .,Huang, Y .,Nakhkash, M . ,Fang, M. T. C. ,and Eriksen, A .,”Automatic detectuon of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition,”*Journal of Applied geophysics*,vol.43,pp.157-165,2000.
- 12.Shaw, M. R , Millard, S . G ., Molyneaux, T. C . K ., Taylor, M . J ., and Bungey, J. H . ,“Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks”, *HDT&E Internatiomal*, vol.38,PP.203-212,2005.
- 13.Liu, H.,Lin, C.,Cui, J.,Fan, L.,Xie, X.,and Spencer, B. F.,“Detection and localization of rebar in concrete by deep learning using ground penetrating radar”,*Automation in Construction*,vol.118,2020.
- 14.Barkataki , N .,Tiru , B .,and Sarma , U .,“A CNN model for predicting size of buried objects from GPR B-Scans”,*Journal of Applied Geophysics*,vol.200,2022.
- 15.Barkataki , N .,Tiru , B .,and Sarma , U . “Detection and localization of rebar in concrete by deep learning using ground penetrating radar” ,*Journal of Applied Geophysics*,vol.213,2023.
- 16.梁昇，「穿地雷達回波的原理及其應用於地下水水位之偵測」，*農林學報*，第 39 卷，第 2 期，第 201-219 頁，1990。
- 17.周治國，「透地雷達於地下水調查之研究」，碩士論文，國立中央大學應用地質研究所，1993。
- 18.廖國彰，「透地雷達應用於淺地層之個案分析」，碩士論文，國立中央大學地球物理研究所，1993。
- 19.李德河、林宏明、羅經書、王耀德，「透地雷達應用於並排管線

與地下孔洞之探測」，第八屆大地工程學術研究討論會論文集，第 2257-2270 頁，1999。

20. 葛其民，「透地雷達於鋪面之應用」，碩士論文，國立中央大學應用地質研究所，2000。
21. 林明寬，「透地雷達在地下掩埋物探測之應用」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2001。
22. 紀昭明，「應用透地雷達法在土中異物探測之初步研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2001。
23. 黃建二，「應用透地雷達法於地下廢棄埋物檢測之研究」，碩士論文，中華大學土木研究所，2004。
24. 林宏明，「透地雷達應用於地下空洞調查之研究」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2000。
25. 王文郁，「透地雷達結合類神經網路辨識地下管線種類之研究」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程研究所，2006。
26. 黃志銘，「以透地雷達法檢測鋪面厚度及其下方掏空狀況」，碩士論文，朝陽科技大學土木工程研究所，2008。
27. 王和文，「影響地質雷達探測效果的不利因素分析」，勘探地球物理進展第 32 卷第 5 期，第 351-355 頁，2009。
28. 方慧、魏文博、李玉堂，「介質含水率與透地雷達信號關係數值模擬」，物探與化探第 33 卷第 5 期，第 533-535 頁，2009。
29. 邱曉明，「不同管材在標準砂內之電磁波電磁參數研究」，碩士論文，中華大學土木工程研究所，2010。
30. 劉信邦，「透地雷達應用於堤防掏空及版體潮濕檢測之研究」，碩士論文，朝陽科技大學營建工程研究所，2011。
31. 陳俊廷，「使用有限差分程式 GprMax2D 模擬透地雷達檢測海

- 堤孔洞之研究」，碩士論文，逢甲大學土木工程研究所，2011。
32. 蔡盛宇，「影像模擬地下水位分析之研究」，碩士論文，國立臺北科技大學土木與防災研究所，2012。
33. 林子堯，「應用透地雷達電磁波法檢測管線漏水之研究」，碩士論文，中華大學土木工程研究所，2013。
34. 林啟鈞，「道路鋪面調查之研究以中山路為例」，碩士論文，義守大學材料科學與工程學研究所，2016。
35. 鄭哲鴻，「利用透地雷達掃描資訊改善滲水鋪面經驗分享」，鋪面工程第十七卷第四期，第 9-16 頁，2019。
36. 徐亦呈，「探討人工智慧深度學習系統與透地雷達於瀝青鋪面損傷診斷之研究」，碩士論文，中華大學土木工程研究所，2022。
37. 葛文忠、張孟孔、陳泓幃、高憲彰，「三維透地雷達應用於道路地下管線定位與路面凹陷探查」，中興工程季刊第 148 期，第 23-31 頁，2020。
38. 賴俊呈，「希伯特轉換於透地雷達信號之應用分析」，碩士論文，國立成功大學土木工程研究所，2008。
39. 莊凱迪，「透地雷達檢測道路孔洞方法之初步探討」，交通部運輸研究所，2022。
40. 公路總局，「公路養護手冊」，交通部，2020。
41. 公共工程委員會，「臺南高雄 823 水患瀝青混凝土道路坑洞及塌陷之成因與建議對策」、第 135 次委員會議「道路坑洞及塌陷之成因與預防改善措施」簡報及「防杜道路塌陷 工程會找原因、提對策」新聞稿，行政院，2019。
42. 中華大學土木系檢測中心，「景美隧道北上 24.5K 瀝青路面下材料乾濕界面之滲漏範圍檢測」，透地雷達檢測結果分析報告書，2014。

- 43.趙建勳，「以 AI 構築工程新智慧-影像辨識技術之工程應用」，中鼎集團電子報第 459 期，2019。
- 44.黃宇謙，「多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(1/2)-影像蒐集及辨識演算法架構探討」，交通部運輸研究所，2023。
- 45.經濟部水利署，「無人載具搭載透地雷達執行堤坡結構非破壞檢測研究計畫」，總結報告，2022。
- 46.經濟部水利署，「無人載具搭載透地雷達執行堤坡結構非破壞檢測研究計畫（3/3）」，2022。

附錄一

研究對象及專家學者訪談紀錄

1.1 交通部公路局

陳總工程司進發

時間：112 年 3 月 31 日（星期五）下午 4 時～6 時

地點：運輸技術研究中心 5F 第二會議室

參與訪談人員：賴瑞應科長、胡啟文研究員、黃宇謙助理研究員

紀錄：賴俊呈助理研究員

壹、計畫緣由說明：(略)

貳、陳總工程司進發綜合回應

我們就先談高潛勢能的路段，會發生孔洞的好發區，有幾種類型，橫向管涵尤其是 RCP（鋼筋混凝土），可以從道路的左側有一個集水井、右側有一個放流口，可以看得出來，60 公分（直徑）的管涵，約 3 米一支，道路斷面假設是 15 米的話，那起碼要 6 支，會有 5 個伸縮接頭的地方，接合處早期的作法是橡膠壓條，管涵有公母接頭就壓進去，施作（工）速度很快，道路很快就開通了，開通了會發生甚麼事，因為管涵有重量、道路經過開挖就會產生下陷，下陷並不會馬上反應出來，管涵是接山溝的水讓它流出去，之後就會慢慢滲水（接合處滲水），不曉得什麼時候會反射（反應）到路面來，往往在大雨過後的二、三天後，一個天坑就出來了，這是在台 7 乙往復興鄉一工處的案例，在土城台 3 線也曾經有區公所施作的箱涵，因為強度不夠而導致天坑。

所以在政策面上，目前的機制是省道的道路巡查（車巡），快速道路每天一次，一般道路一周一次，因為是車巡（人力目視巡查）無法做預防性的養護（對於道路下的孔洞而言），所謂的預防性的養護是說不要等災害發生了在做傳統反應式的養

護，應該要在還沒壞掉之前（災害來沒發生前）就先去做（養護）。問題是沒有人知道發生（天坑）的熱區在哪裡。

整過機制是要透過巡查發現異狀後，會進入詳細檢測；就是在目視巡查後發現異狀進行紀錄，回去跟副段長、段長報告，經過判斷後需要進入詳細檢測。所以會先有定期巡查、特別巡查之後有異狀的情形就會進入詳細檢測，詳細檢測又分為好幾個等級；有用簡單的器具去檢測或者用非破壞性的透地雷達或者用破壞性的直接挖開來看等等。透地雷達使用的時機就是在詳細檢測，可是重點在於前面要有巡查的到，但是很難，因為這凹陷的形成的原因有很多種，有可能回填不實等等，道路上常看到的裂縫、凹陷，但是不等於底下有空洞。

在公路管理單位有一個困難點就是沒有辦法把透地雷達掛在嘴邊，無法全面性的採用，道路鋪面表現出（損壞）的表徵，無法只靠透地雷達能夠找出成因。

經過剛才引導（說明），透地雷達是要尋找道路下孔洞，那孔洞的形成原因把它聚焦在管線的漏水，在橫向的部分於巡查機制可以加上去（透地雷達的檢測），在集水井和出水口橫向廊帶（範圍）上有凹陷的話，就要進入特別檢測等。

但是縱向的自來水（管線）才是真正的麻煩，自來水管線在地底下的結構我們（公路管理單位）不知道且是不收租金的房客（自來水為民生必需管線一定要讓其埋設於道路下），數據的佐證，在中壢段每年的搶修案件都是第一名的，搶修案件代表漏水，可以讓你們研究有一個啟發，橫向的涵管可以由集水井跟出水口辨識出涵管位置範圍，在這範圍若有凹陷就可做個掃描（透地雷達檢測）做預防性的養護，對於縱向是我們最擔心，橫向涵管只影響一小區域，但是縱向影響就不是一小區域，尤其台 3 線南化水庫越域引水整條路坍塌一半好幾次，其發生是驟然性的，不像橫向管涵是潛移默化的，因為滲水不會很快，但是自來水因為水壓的關係，1、2 個小時就坍塌了，滲水的機

制（情形）是否是慢慢滲，我們可以預防，這也是一個議題，要了解自來水滲水的機制。但是對於 RCP 的管涵現在我們一律禁止，再有新建時就禁止使用，因為一定會漏水，所以現在要求用箱涵的方式施作。用箱涵施作才能保持生命週期，道路才不會有致命性的孔洞，如果持續用 RCP，那透地雷達就有應用的餘地，省道是如此，但縣鄉道沒有這樣的概念，縣鄉道還在使用 RCP，所以路面常會有坑洞等等，省道不一樣之處是省道對於災害有在反省、有在回饋，然後作修正比如說不再使用 RCP。

所以政策面，我們使用透地雷達是用在 1.戰備跑道（佳冬戰備跑道），在民國 94 年飛機要降落，便使用透地雷達去檢測道路（跑道）的厚度，確認是否符合軍方規格（承載力），但這不是找孔洞。2.找孔洞是用在管溝回填，不過這不是公路總局（訪談時尚未改制，改制前為公路總局）在做的，因為管溝是事業單位要向公路管理單位負責的，所以會要求事業單位提送相關報告。雖然道路是公路總局在管理的，但是它是房客，要依照申挖的要點要做品質保證，品質保證有疑慮就會使用透地雷達去掃（檢測），去驗證沒問題（國賠事件等）。3.在台 2 線鋪面的問題，使用透地雷達驗證地下水位及地下的狀態等等。

但是透地雷在掃管線、孔洞，其實我們很少用在路面，都用在重要設施如橋梁、隧道，尤其是隧道，用在路面上的比較少，以上供你們作參考。

參、訪談問題

一、 G.P.R 是國內常用於檢測道路的非破壞性檢測方法，請問貴局目前對於 G.P.R 了解的程度或者對於 G.P.R 的想（看）法。

我們透地雷達最常用在隧道，因為隧道在使用非破壞檢測後，影像經專家解說後是最讓我們能夠接受的，在隧道應用很多，橋梁上有沒有很多，要在查證一下，還有在地質調查也會使用透地雷達，在台 11 線、台 9 線蘇花公路有一個大坍方的

地方，用透地雷達去檢測地質狀況，要知道坍方土到底堆積到哪裡、基樁要打多深，還有地下水也探測。

孔洞的部分，在作八卦山隧道時，透地雷達用很多，主要探測孔洞，孔洞在另外一方面的意義叫作水包（孔洞裡有水），水包對隧道很傷，因為若刺破水包，水就會跑進隧道。

透地雷達會用在隧道、邊坡（緊急搶修）、設計規劃的地質調查，在橋梁的部分應不是用透地雷達，是用 3D 多音束因為介質是水要探測河床變化，同樣道理都是用反射的，坐船使用 3D 多音束探測方式探測橋墩周邊的孔洞（河床的狀況）。

大概是這樣，透地雷達的技術已經非常成熟，從 2、30 年前就引進在使用，我們對這個技術不存疑，但它是要在可以解決問題的方法，問題是你要解決什麼問題，我一直在強調你要解決什麼問題，所以回歸到剛剛的鋪面，你要解決什麼問題，其實在我們的本質業務上，我們要探查就是橫向 RCP 管，尤其是很久以前埋設的，至於自來水管，自來水事業單位我們不會主動去接觸（不會去幫他們檢測），因為我們認為自來水是一個防災事業單位要對我們負責（自來水公司要自己去巡檢哪裡有漏水等等）。

補充說明（針對自來水管漏水以透地雷達去檢測一事）

在人民眼光（看來）不論是公路總局或是自來水公司等，他們都是政府，可是在政府跟政府之間其實是分工的，各有各的權責，這個權責若是做過頭了，在基層而言就是全部都是他的事情，今天沒有去做反而是他的錯。但是在法令規定上，確實是事業單位的事情，依據事業相關法來申請挖埋，例如高雄氣爆事件，經濟部主管的事業單位在他們相關的事業法裡有規定，對於管線的滲漏、壓力還有管線的汰換其實都規定得很嚴格，尤其是滲漏都要定期巡檢，巡檢壓力、滲漏，自來水公司不關心道路是否會損壞，他們只關心管線是否漏水，所以他們（管線單位）是要依規定進行相關巡檢保養，如果都有依規定

進行保養汰換那就不會發生氣爆事件。

他們（管線單位）因為沒有依規巡檢而導致一連串的錯誤（災害），要後端的房東公路總局來做（負責），這不符合公路法，依公路法第 30 條之一，管線單位在申請挖埋後要對其定期巡檢、對其（安全）負責。

這給你做一個參考，如果你的研究方向是要要求公路總局去做這件事情、去認知這件事情，是很難的，這樣的報告端出來是會受公路總局的挑戰，會用法規跟你挑戰。

管線單位的管線是管線單位要依他們的相關的事業法去走（執行），而公路總局是監理機關對管線單位在道路（省道）所埋設的設施（不論是地上或地下）只要有違反公路法相關規定者，就進行開罰。

二、近年來，天坑事件頻傳，各地方政府機關紛紛採用 G.P.R 來檢測有問題的路段，以主動預防方式來防止天坑的發生。目前省道柔性鋪面巡查還是以人力目視為主，請問貴局是否有研商過要使用 G.P.R 來檢測省道潛在損壞風險因素或者是將 G.P.R 應用在省道養護巡查作業上？

公路總局要面對的問題大小小有好幾種，根據我們的經驗具有急迫性的前幾名，都輪不到天坑，因為天坑好發的頻率並不大，省道發生天坑約莫 10 年前的事情，而天坑不是所謂的天坑，其發生的原因是自來水管線爆裂所導致的，不是真正天坑要去注意的（因為不是道路本身的問題，如路基承載力不足造成坍塌等），所以既然發生的機率不高，自然就不會有機制去處理。

在 61 線中壢路段 2、30 公里的路面滿滿水坑，我們就一直在研究有沒有什麼預防性養護作為，有沒有什麼儀器去檢測預防，不然一場大雨就會變成滿滿的水坑，我們現在需要的是這個，現在我們請材試所、請專家學者來幫我們找預防性方法，

就是你講的這個概念，但是不會是透地雷達。

透地雷達我們還是應用在隧道及地質調查居多，我們用在路面並不多，尤其是掃道路孔洞之類的更是少之又少。

三、道路主管機關一直以來的痛點係埋在道路裡面的管線、箱涵，道路鋪面產生塌陷、孔洞甚至天坑，大多來自管道間的回填不實、管線或箱涵漏水掏空路基等導致而成，再者管線、箱涵埋設位置、深度，道路主管機關無法全盤準確的掌握，對於道路主管機關來說有如芒刺在背。G.P.R 除了檢測道路裡的孔洞外，還可以檢測道路裡的管線、箱涵位置及深度以比對管線單位提供的圖資，甚至建立屬於道路主管機關的管線圖資系統，在這方面營建署（已於 112 年 9 月 20 日改制為國土管理署）於 110 年為探測地下管線，推動透地雷達技術檢測（110 年「提升道路品質計畫」地方政府補助案件管線圖資非破壞性檢測研究試辦案），另外高雄市政府工務局也有推動非破壞檢測技術（G.P.R）應用於地下管線探測與三維圖資建構深耕研究計畫（優先針對前鎮、小港及林園區）。對此，請問是否也有運用非破壞檢測方式來探測地下管線的相關規劃，藉由科技技術來協助提升省道的品質？

在高雄氣爆發生後，經濟部有要成立（建置）地下管線分布，尤其是危險管線，但是建置的不是那麼的順利，對於營建署也有搭配這個計畫要來建立，同樣部（交通部）裡面的政策，對於省道的鋪面管理也是要求要有地下管線的建立，先說主從關係，我們現在已經有這樣的鋪面管理系統，記得養路組養管科有一個鋪面管理系統，在中壢地區有一段約莫 3 公里 3D 管線，在管理系統裡面，不僅僅可以看出是深度是多少、是甚麼管線，然後可以看出道路的剖面在什麼位置，但是這僅止於 DEMO（示範）。

這要做何其困難，不要說全局，就連管線單位都不知道自己老舊廢棄管線長在哪裡，怎麼提供給你，雖然好幾年前，我

們就有在逐步的嚴令請他們（管線單位）一、二月內提供 3 種圖資、GPS 等等都要有，要納入管線圖資（在氣爆後，工程會有列管這件事情），雖然有建置但是還是零零散散的，你說為了要讓管線圖資完整，而我們要花錢來自己探測這管線，我是覺得不可能，因為太龐大了，營建署有在做，營建署他們道路品質有一半以上是地方政府拜託他們做，所以他們可以去處理那一些管線，那他們為甚麼要處理那一些管線？因為要知道管線在哪裡，然後道路拓寬等等之類的，他才有辦法去分配，就像我們道路在拓寬的時候，召開管線協調會，大家都去探測了，然後要新埋管時我就分配了，但往往一挖下就有舊管在那裡，舊管在那裡大家也不敢廢掉它，因為不知道它還有沒有在用，就是如此，很多廢棄管線不可考，然後你說政府有沒有在做 3D 管線管理的事情，道路管理單位跟事業單位都有，但是欠缺的就是老舊管線的資料，那目前還是在持續進行，你說我們是不是用 G.P.R 去做，就又回到剛剛的雞生蛋、蛋生雞的問題，我們不是事業單位，這是事業單位要做給我們的。

工程會要求我們，我們就要求事業單位，我們不可能幫他們做，因為事業單位是房客，依據契約關係，你就是要做給我，不能說你做不出來，就叫我花錢去做。

但是管線單位也做不來，因為根本就不知道老舊管線在哪裡，你要叫他們花這些錢，最後就會轉嫁到民眾身上，比如說自來水一度的水費就增加了，所以這件事情（建立管線圖資）進展比較慢，但是危險管線是有必要的。

營建署跟公路總局最大的不同就是一個是都計內（都市計畫區內）、一個是都計外的，都計內的它有人，所以管線就很多而且錯綜複雜，管線一多不僅對道路是個傷害，對於其鄰接的房舍也是一個傷害，所以他們（營建署）對這個東西會比較去重視，但是在都計外的，相對的，它的聚落比較少，一個是市區一個是郊區，所以業務的屬性也會有不同，管線圖資的業務

也就交辦給營建署而不會是公路總局。

四、本所於 110 年自辦研究計畫「透地雷達檢測道路孔洞方法之初步探討」訪談相關道路主管機關對於 G.P.R 檢測較有疑慮的是檢測後的訊號圖像是需要專業及經驗的人員進行判讀(釋)，故一般未受過訓練的承辦同仁是不易判讀(釋)及檢核成果報告的正確性，除非辦理開挖，所以會希望能有相關工具或方法來協助判讀(釋)透地雷達所輸出的訊號圖像，以解決承辦同仁無相關專業及經驗的問題。為此本計畫將探討 AI 智慧化辨識 G.P.R 檢測後所輸出之訊號圖像可行性來解決上述問題以及達到提升自主巡查檢測能力，初步訪談請教國內學者專家，其認為利用 AI 智慧化辨識 G.P.R 檢測後所輸出之訊號圖像是可行的，國外的 G.P.R 廠商也已有相關的軟體，但為適用臺灣道路屬性、資料庫擴充的便利性及需依使用單位回饋意見優化 AI 辨識系統等因素，故建議自行開發屬於國內道路專用的 AI 辨識系統，後續本所也會朝這方向進行研究，請問貴局對於開發 AI 辨識系統想法及意見。

我 5 年前（107 年）開始推 UAV，最主要是影像、建模，是一個數位的，為甚麼要做這個？是為解決問題找方法，我最主要就是要判斷它（邊坡）的浮落石、裂縫甚至是它的位態，要把這個抓出來進入詳細檢測，評估是否會掉下來，進一步做處理。

這是我在廣大的山域中快篩的方法，現在我是用目視的，我們用目視 catch 下來的數位資料，比如說它有倒懸的石頭在那裡，這是有危害的，我會用軟體去做一個標記，把它 close 起來，用 4k 的高解析度把它存在雲端裡面，然後用獎勵的方式，每半年你只要超過幾組第一名第二名發給獎金，我為什麼做這個事？

因為廠商告訴我，一個圖像只要超過 1000 組，我就有辦法幫你做深度訓練（AI 辨識），就能靠 AI 做影像的辨識，但是

你沒有這本土化的資料，你說要用 AI 那就是騙局一場，所以它這個異常的資料庫一定要有而且要分類，這就是專家系統。

我今天用邊坡來講這個，我邊坡首先要分類什麼危石、危岩、什麼是裂縫，什麼是浮落石等等，比如說分了 12 類出來，我的工務段人員必需要有專門技術去辨識我今天 catch 下來的影像是第幾類，每一類都有 1000 組了，我就交給軟體公司，這個對他們來說小事一樁，就開始做訓練，完成後就開始做精準度、捕抓率等等。

然後在 UAV 升空拍攝以 5G 方式傳送影像至 AI 進行演算辨識，馬上就能夠用千分之微秒的時間傳給我的控制中心告訴你要做什麼事。

同樣的，你剛剛講的 G.P.R 也是同樣的道理，必需要有異常的分類影像，必需要有這一步才能走到下一步，談 AI 之前要先建立資料庫，資料庫或許要花 3~5 年，若有商業利益的話，國外就會去做，但是有些是沒有商業利益（如邊坡）就要靠政府來做，所以這是我的看法。那這個 G.P.R 應用在路面也許有它的商業利益，需要有系統性的商業利益而不是 single 單一的，所以你的 G.P.R 或許要搭配 LIDAR 多機一體之類的，一次把路面狀況掃出來，那當然你異常影像的資料庫要有的，要能夠做訓練，這樣你的 solution 才會出來，我公路總局正在做這件事情，但是不是 for 路面是 for 邊坡，橋梁運研所在做，我公路總局 3 大設施邊坡、橋梁及隧道，只剩隧道。

五、隨著科技的日新月異，請問貴局對於應用新興的科技來輔助提升省道自主巡查檢測能力的看法如何？以減少甚至代替現行的人力目視的方式，以更自動、全面及有效率進行省道養護巡查。推行上是否會造成基層排斥之問題？

對於路面的話，我們的一工處（已於 112 年 9 月 15 日改制公路局北區養護工程分局）走的比較前面，有一套運用科技檢查路面，也許你可以去找找陳俊堯處長，也是那一套就是把

一些儀器裝在車上，經由車巡的時候就能了解到道路狀況，因為中壢天坑（水坑）事件，他們（一工處）現在的養護制度已經有在做你講的這個東西（預防性養護），我們對於科技、尤其是我個人對於科技絕對不排斥，非常的喜歡以科技去減災或是去防災。

就是那一套，一定會經過驗證，而驗證了以後我們會去探討它解決了我們什麼問題，這些問題可能是解決了人力或者是增進了效能等等，但是這不可是以前人工沒有做過，要科技幫我做，我一直強調科技一定是做你人工所作過的事情，你以前是人工做的，你現在可以部份或是全部轉移給科技去做，而它一定是對於你的效率或者是替代性有很大的幫助，這才叫做效能。這一點一定要把持住，有一些廠商來推銷說這很好很好為什麼你們都不用，我就反問這能夠幫助我們甚麼？我根本沒用這個，要試用做什麼，我整個機制沒有在用，所以一定要有這個主軸在（要解決什麼問題）。

一工處跟我說這個(養護制度)可以取代巡檢，但是一定要經過驗證，驗證了以後才能逐步去推廣，慢慢把它複製到二工、三工、四工、五工，所以在整個科技的應用是如此。

1.2 交通部公路局北區養護工程分局

陳分局長俊堯

時間：112 年 5 月 24 日（星期五）下午 2 時 30 分～5 時 30 分

地點：公路局北區養護工程分局 分局長室

參與訪談人員：胡啟文研究員、黃宇謙助理研究員

紀錄：賴俊呈助理研究員

壹、計畫緣由說明：(略)

貳、陳分局長俊堯綜合回應

對於透地雷達的需求性，我是覺得非常有需要，透地雷達運用在道路底下看不到的地方，所謂的非破壞檢測非常重要，我也覺得要來發展這樣的一個技術，你們在 110 年有一個相關的自辦研究計畫，也有一些研究成果。

透地雷達是透過雷達波在不同介質中傳遞，會產生不同波形的反射，所以可以知道不連續的介質。在道路路面下的地下水水位是很重要的，雷達波在經過地下水層時有沒有得到反射波？（回答：使用透地雷達檢測地下水層，主要是看雷達波的傳播速度來判斷，這部分有相關的研究。），那準確度如何？（回答：原則是是有一定的準確度）

我們工程處（訪談時尚未改制，改制前為第一區養護工程處）運用過透地雷達有 2 個案例，一個是探測橋樑基礎深度，因為雷達波在混凝土的傳播速度跟在岩石土壤中的速度不同，所以運用透地雷達來檢測淺基礎的深度是蠻準確的。另外是檢測隧道襯砌的孔洞，當初施作襯砌灌漿的時候沒有灌好、灌飽，所以會產生孔洞，運用透地雷達檢測隧道襯砌的孔洞也是蠻準確的。

依據我的經驗，道路底下會產生孔洞的原因，大多數跟管線漏水有關，因為漏水把土石帶走造成掏空形成孔洞。掏空跟水一定有關，有水產生流動才會把土石帶走，比如說地下水位比較深，（地下水水位上）上面的土層是乾的那沒問題，但下面（地下水水位下）有水，那土石就會被帶走，那帶去哪裡？有時候附近有河，從河的下邊坡掏走，有時候附近在挖連續壁造成 piping（管湧）就帶走（土石），但是（地下水水位上）上面的土是乾的，上面沒有動，進入地下水位很高的話，就會慢慢、慢慢沉陷，它不會出現突然的擾動。對於這種掏空，地下水位的高度探查其實很重要，所以要找到主要掏空的這些孔洞，就要知道地下水位在那裡，需要測到地下水位以下才有用，如果地下水位是在地下 5 米，那透地雷達要能探測到 5 米以下。水的來源有地下水、自來水管線漏水、下水道（雨水下水道、污水下水道）的漏水，還有建築工地開挖時抽地下水等，這都是會造成道路下方土石被掏空，所以說我在當工務段段長時，發生道路下陷，我一定是找水從那裡來、土去了那裡。

回到透地雷達的部分，今天如果地下水位比較高的時候，透過透地雷達找到不連續面、介質傳遞不連續波形的回傳圖（影）像，如果能使用人工智慧（AI）進行辨識就更好了。以前我們每次施測透地雷達後都一定要請專家來看，因為我們看不懂，而且我們也曾經委託顧問公司來施作透地雷達，做完後的成果報告我們也看不懂，我還特別找成大的李德河教授來幫忙判釋。這個透地雷達所探測出來的成果，不是我們一般人能夠解讀，所以我很高興運研所這邊要用 AI 來協助我們做這件事情。

但是，既然要做 AI，那就一定要有夠多的資料，我們在做路面影像辨識、偵測落實的微地動等，都需要很多很多的訊號（影像）跟實際狀況進行比對，問題是掏空案例其實不多，要在事前能偵測到，在事後開挖又能發現到，其實很難，我要提醒做透地雷達訊號影像的 AI 辨識是需要大量的資料來讓 AI 學

習。

今天的訪談，我主要提供一個想法就是地下水位，地下水有可能是造成道路損壞下陷的成因之一，所以探測地下水位是有其必要性。

參、訪談問題

一、G.P.R 是國內常用於檢測道路的非破壞性檢測方法，請問貴處目前對於 G.P.R 了解的程度或者對於 G.P.R 的想（看）法。

透地雷達是一種非破壞檢測方式，公路總局一工處目前有運用透地雷達探測橋梁淺基礎的深度及檢測隧道襯砌有孔洞的部分，目前我們使用透地雷達，在知道孔洞的深度情況下，探測出來的可信度非常高，所以對於透地雷達在道路底下的運用，其實我們是充滿期待。

二、近年來，天坑事件頻傳，各地方政府機關紛紛採用 G.P.R 來檢測有問題的路段，以主動預防方式來防止天坑的發生。目前省道柔性鋪面巡查還是以人力目視為主，請問貴處是否有研商過要使用 G.P.R 來檢測省道潛在損壞風險因素或者是將 G.P.R 應用在省道養護巡查作業上？

我們在道路養護巡查上，常常會出現一些坑洞，有部分坑洞會下陷，有時候坑洞較深，我們會先使用瀝青冷料去進行回填，回填後還會繼續下陷，就會使用混凝土去把它灌起來，但是還是下陷的話，就表示下方有孔洞，但是孔洞要開挖的時候，會面臨開挖的位置無法確定，往往都是挖了以後路上會開了好幾個洞，一直去找這個孔洞通到那裡。

那如果說今天能運用透地雷達去檢測孔洞在地下大概那個位置，對我們開挖找問題會是很大的幫助，這個部分是我覺得透地雷達在道路養護上面，對於知道掏空（孔洞）產生的位置跟我們去開挖的一個方向，是很有幫助。

但是對於透地雷達檢測後的訊號影像這部分，就是要專家去判釋，一般的養護工程司是沒有這樣的能力，就算是試（實）驗室施作的透地雷達，經他們進行判釋，我們也不知道他們判釋的準不準，因為他們不是專家學者，再者，試（實）驗室使用透地雷達做的檢測項目不一定專精於道路下孔洞，所以他們不一定能準確地去判釋其訊號影像，所以我覺得這個需要一個專家系統或是一個專門的 AI 系統來協助我們進行判釋。

延續問題:本計畫在今年 3 月 31 日本所訪談公路總局陳總工程司時，陳總工程司有提到中壢工務段每年的搶修案件都是公路總局的第一名，搶修案件大都是道路有坑洞或者下陷的情形，處長您有提到道路有坑洞或下陷，處理的方式就是用 AC 冷料先填平，如果還有持續下陷的情形，則會開挖回填，感覺上這方式只是治標的方法，因為沒有找出坑洞或下陷成因，就無法治本的去解決，而透地雷達是可以提供一個方向找出成因，以治本的方式解決坑洞或下陷的問題。請問處長省道上的坑洞或下陷的主要成因為何？及養護的困難處。

在道路養護上，常常因為管線單位施工沒做好，所以造成路面損壞，會有幾種情形，一種是所謂的管溝下陷，在有管溝下陷時，我們都會依照管溝的位置，找出之前有什麼管線單位來申請開挖過，然後請該管線單位進行維護，那有時候管線單位不認帳，我們就會現場開挖看看是那個管線單位的管線，我們就會要求那個管線單位負責。

掏空的部分，原則上絕大部分都是因為水的關係，水的部分有二個來源，一個是自來水管漏水，所以通常自來水公司都是我們第一個找來現場會勘的管線單位，不過自來水公司都先用試紙來測試漏出來的水體是否有含氯，如果沒有，自來水公司就認為不是他們的管線漏水，另外一個是所謂的下水道的水或者是地下水，這就是我們比較難以掌握的，因為地下水不一定從地下冒出來而是藉由電力、電信的管道（線），每次要開人

手孔蓋時，電力、電信管道（線）間都是水，管線單位都要進行抽水後才能去維修管道（線），那代表說水有可能從很遠的地方來，因為遠處的地下水位線比較高，透過這個管道（線）跑到下游來，從這邊冒出來，如果電力、電信的管道（線）有裂縫或破損，水就會滲出來，久而久之就會形成掏空而導致路面下陷，所以只要不是自來水，要找水的源頭其實是比較困難的。

所以有時候都不知道這個孔洞或是下陷是什麼原因造成的，只能先用 CLSM 或是混凝土回填掉，持續觀察是否會再下陷，這個部分就是我們在養護上面的一個不確定、一個困難。

要治本的解決路面下陷的問題，一是要知道掏空的位置及大小，有時候我們會發現路面下陷處跟被掏空的地方其實離蠻遠的，有可能差一個路口或是相差 10 幾 20 米，我們如果無法掌握掏空的確切位置及大小，盲目的開挖只會讓整條道路面目全非。二是要知道水從那裡來，因為水在地底下竄流會造成掏空，我們要從水的源頭進行阻斷，所以不管水是從電力、電信管道（線）或是雨水箱涵出來的，要能知道水的來源，才能消滅掏空的成因。

三、道路主管機關一直以來的痛點係埋在道路裡面的管線、箱涵，道路鋪面產生塌陷、孔洞甚至天坑，大多來自管道間的回填不實、管線或箱涵漏水掏空路基等導致而成，再者管線、箱涵埋設位置、深度，道路主管機關無法全盤準確的掌握，對於道路主管機關來說有如芒刺在背。G.P.R 除了檢測道路裡的孔洞外，還可以檢測道路裡的管線、箱涵位置及深度以比對管線單位提供的圖資，甚至建立屬於道路主管機關的管線圖資系統，在這方面營建署於 110 年為探測地下管線，推動透地雷達技術檢測（110 年「提升道路品質計畫」地方政府補助案件管線圖資非破壞性檢測研究試辦案），另外高雄市政府工務局也有推動非破壞檢測技術（G.P.R）應用於地下管線探測與三維圖資建構深耕研究計畫（優先針對前鎮、小港及林園區）。對此，請問是否

貴處也有運用非破壞檢測方式來探測地下管線的相關規劃，藉由科技技術來協助提升省道的品質？

省道是交通要道而且歷史其實都蠻久的，所以有些省道在四、五十年代就存在的道路，道路下面的管線密密麻麻，經過五、六十年後，新舊管線那些有在用，那些沒有在用，其實管線單位自己都不清楚，所以對於管線實際 3D 的位置，我們也很想知道，因為不管是在維修、管線的開挖或是埋設，甚至我們有時要做道路拓寬比如說橫向管函的埋設等施工，最常遇到的困擾就是管線單位提供的位置不正確，所以我覺得真的是有必要全面去建立臺灣地下管線圖資而且是要 3D 的，不是現在這種平面的（2D），平面的圖資有的只記載管線在那一個車道比如說內車道下，但是內車道這麼寬，確切的位置在那不知道，而且有些管線為了要閃避管障（管線的障礙），管線就會一下在內車道一下在外車道，所以說往往造成每次我們要查修的時候很難去確定管線確切的位置。所以我覺得真的有需要建立管線圖資或者平台，不只是讓管線單位、道路主管機關使用，一般民眾如果需要時，也可以了解相關管線的位置在那裡。

四、本所於 110 年自辦研究計畫「透地雷達檢測道路孔洞方法之初步探討」訪談相關道路主管機關對於 G.P.R 檢測較有疑慮的是檢測後的訊號圖像是需要專業及經驗的人員進行判讀（釋），故一般未受過訓練的承辦同仁是不易判讀（釋）及檢核成果報告的正確性，除非辦理開挖，所以會希望能有相關工具或方法來協助判讀（釋）透地雷達所輸出的訊號圖像，以解決承辦同仁無相關專業及經驗的問題。為此本計畫將探討 AI 智慧化辨識 G.P.R 檢測後所輸出之訊號圖像可行性來解決上述問題以及達到提升自主巡查檢測能力，初步訪談請教國內學者專家，其認為利用 AI 智慧化辨識 G.P.R 檢測後所輸出之訊號圖像是可行的，國外的 G.P.R 廠商也已有相關的軟體，但為適用臺灣道路屬性、資料庫擴充的便利性及需依使用單位回饋意見優化 AI 辨識系統等因素，故建議自行開發屬於國內道路專用的 AI 辨

識系統，後續本所也會朝這方向進行研究，請問貴處對於開發 AI 辨識系統想法及意見。

透地雷達成果的判釋，一般養護工程司是無法做的，因為沒有這樣的專業及經驗，所以會需要一個專家系統，如果可以透過 AI 來協助辨識透地雷達的成果，我覺得這是非常好的，對於在透地雷達的應用上是必要的也是非常重要的。我們之前也執行過 AI 相關的業務，提供一些執行的意見給大家做參考。

我們在道路巡查時使用巡查車拍攝記錄路面的影像，10 公尺會拍一張，這些道路路面的影像，會由 AI 進行辨識道路路面是不是有缺失，會標記成坑洞、裂縫、龜裂、下陷及補丁（路面臨時填補）等，這些紀錄會放在巡查結果裡面，然後派工進行修復作業。

我們都是在目視可見的情況下，由養護工程司去做標記，在示範的一年內完成了 3 萬多張影像，也就說有 3 萬多張的資料，所以我們 AI 辨識出來的準確度都超過九成。但是有所謂的捕捉率就是在道路巡查時道路缺失被遮蔽、在路肩或是較遠的地方等，在攝影機的像素不足的情形下有些缺失沒有被捕抓到。所以這個捕抓率乘上準確度大概都在八、九成以上。

我這邊補充回答，我們做的科技巡查其影像是即時傳輸，在巡查車內的工業電腦會先做初步篩選，把有問題（缺失）的照片篩選再出來送到後端讓 AI 進行辨識分類，所以前面其實已經經過一次辨識。有關 AI 辨識的部分，我覺得資料的多寡是很重要的，因為會影響到 AI 深度學習及辨識的準確度。

五、隨著科技的日新月異，請問貴處對於應用新興的科技來輔助提升省道自主巡查檢測能力的看法如何？以減少甚至代替現行的人力目視的方式，以更自動、全面及有效率進行省道養護巡查。推行上是否會造成基層排斥之問題？

在這資訊化的社會，民眾對於公部門的服務其實意見很多，

所以我們公務員在第一線服務民眾壓力其實很大，公務業務繁雜、人力不足，土木高考每年都不足額，報到率也不高，所以在這事情越來越多又缺人的情形下，用科技輔助是非常重要的。以前派人巡查，遇到坑洞等路面缺失，養護工程司就要下車拍照記錄，那後來運研所發展所謂的平板（巡查系統），在車上看到缺失就直接拍照，回到辦公室後再整理資料，這樣的業務量還是太大，我今天可能要巡查 100 公里，從早上 8 點開始、中午休息吃飯 1 個小時，巡查到下午 4 點回到辦公室，還要整理今天巡查的缺失資料然後進行派工，這樣的業務量一定要加班才有可能做完。

那運用高科技自動巡查完後，AI 自動辨識然後系統進行派工作作業，這才能大量的節省人力，我們委外的巡查廠商只要在巡查車上裝上規定的攝影機及工業電腦，就可以取代養護工程司進行巡查，這樣一個科技巡查（檢）的應用，是我們現在公部門所需要的。

因為應用新興的科技可以減輕同仁的業務負擔，所以同仁並不會排斥，反而樂意為之。

六、本計畫於 112 年 3 月 30 日訪談公路總局陳總工程司進發時，陳總工有提到貴處目前正在研究「道路鋪面全生命週期管理」，是運用新興科技檢查路面，故是否能說明目前研究情形及運用何種新興科技檢查路面。

簡單來說就是用巡查的影像去做影像判釋、用 AI 進行標籤路面的缺失及派工進行路面的維護改善，還有就是我們針對所謂的鋪面服務指數（PCI）及國際糙度指數（IRI）可量化的鋪面服務績效，然後去紀錄道路單元（100 公尺為一單元），依照其服務績效，若到達該維修的情形，我們適時做預防性的維修。

鋪面的服務生命週期，從興建或是刨除加封開始，道路鋪面經過使用後會老劣化，之後就會開始出現裂縫，因為怕水跑

進去會用瀝青膠去補裂縫，跳料剝脫產生坑洞就會進行修補，當鋪面損壞到一定程度後，我們會去方正切割做修復，當路上這樣方正切割的補丁越來越多後，鋪面就會有比較大規模的損壞，我們就會進行刨除加封，這就是鋪面的生命週期。

那我們什麼時候應該去做刨除加封，這牽涉到我們的經費跟需求，如果經費是無限，那我每 2 年全部都刨除加封一次就沒事了，但是經費一定是有限的，所以我們如何在這個路面鋪面損壞到必要維修的時候，提前去編列經費，如果今天經費不足的時候，就會選擇最差的鋪面進行維修。我們把道路切割成 100 公尺、一個車道為一個單元，經由科技巡檢（查）後會自動去判斷 PCI 及 IRI，藉由 PCI 及 IRI 組成一個績效分數，我們就會針對績效分數最差的單元進行維修，如果在經費不足的情形下，可能就只能維修績效分數 75 分以下的單元，經費多一點，就維修績效分數 85 分以下的單元，依照經費的多寡，做最有效的運用，把工程處轄管道路的鋪面維持在一定的分數上，維持在一定的服務品質。

1.3 交通部公路局中區養護工程分局彰化工務段

陳段長禎康

時間：112 年 7 月 7 日（星期五）上午 9 時 30 分～12 時 30 分

地點：公路局中區養護工程分局彰化工務段 會議室

參與訪談人員：胡啟文研究員、黃宇謙助理研究員

紀錄：賴俊呈助理研究員

壹、計畫緣由說明：(略)

貳、陳段長禎康綜合回應

我們現在遇到比較麻煩的問題是道路下陷處修補完後又再下陷，而且找不出下陷原因，我們會希望有相關的工具（非破壞性檢測）來幫忙找出原因，造成道路下陷的原因很多，有可能是 AC 材料本身的問題，有可能是道路下管線滲漏水造成或是土層壓密不足等原因，那透地雷達只對地下有孔洞才有效果嗎？（回答：透地雷達除了可以檢測出地下孔洞外，還可檢測地下水以及路基因施工不確實、沒確實滾壓而造成的沉陷等），我們想應用透地雷達來檢測這樣的問題，不久前，在台 61 線（路堤段、高填方路段）莫名出現一個坑洞，就會想要使用非破壞檢測的方法來找出現坑洞的原因。另外我在苗栗段時，在白沙屯的路段有發生過不均勻的沉陷，推斷有可能是施工不確實或是地下水位過高而導致，在像這不確定路面地下的情形就會想應用透地雷達來進行檢測。

我們在道路發生沉陷或者由 AC 鋪面看下去有孔洞（掏空）的情形下，會進行開挖回填的修補作業，開挖深度會到路基層確認路基是否沒問題後再進行回填作業。

我先講需求，我們在道路的養護上會經常發現有坑洞或者突然冒出一個大洞，但我們不知道是什麼原因，我們需要快速、方便及經濟性的方法來找出造成道路坑洞的原因，我想透地雷達是否能提供我們答案或方向。（回答：是可以的）

之前在台 3 線發生過天坑，這是發生在我們清理道路箱涵後，為什麼？因為箱涵錯位有破損，水由破損地方流出造成掏空而發生天坑，不清理沒事是因為錯位破損處被堵住，清理後經過一段時間沖刷，水就流出造成長 7 公尺、深 6 公尺的天坑，平常巡查道路表面並無異狀，在事件發生的前一天，巡查路面也無異狀，隔一天下午就突然無預警的下陷成天坑，這是找得出原因的天坑，但很多是找不出原因的下陷，我們需要的是要能找出下陷的原因的工具，來徹底地解決下陷這個問題。

參、訪談問題

一、G.P.R 是國內常用於檢測道路的非破壞性檢測方法，請問貴段目前對於 G.P.R 了解的程度或者對於 G.P.R 的想（看）法。

彰化段有應用過透地雷達是用來檢測橋梁基礎形式或者是深度等，但是沒有使用透地雷達檢測道路。以前較老舊的橋梁因為沒有竣工圖，所以會使用透地雷達來檢測。

二、近年來，天坑事件頻傳，各地方政府機關紛紛採用 G.P.R 來檢測有問題的路段，以主動預防方式來防止天坑的發生。目前省道柔性鋪面巡查還是以人力目視為主，請問貴段是否有研商過要使用 G.P.R 來檢測省道潛在損壞風險因素或者是將 G.P.R 應用在省道養護巡查作業上？

沒有將透地雷達應用在道路上主要是經費上以及效益的問題，透地雷達應用在橋梁的檢測上，是有特別專用的經費，但是沒有相應的經費可以把透地雷達應用在道路上的檢測。另外是不瞭解透地雷達檢測道路的功能有哪些？能怎麼幫助道路的養護巡查。

回答：應用透地雷達進行道路的檢測，是可以了解道路路面下目前的情形，比如可以探測出道路下的有什麼埋設物（像管線或是箱涵等）、地下水的水位、孔（空）洞、地層（路基）沉陷鬆動、地層界線，甚至可以檢測出管線或箱涵是否有在漏水等。也因為透地雷達可以檢（探）測出上述道路路面下的情形，故能幫助道路主管機關找出道路鋪面的損壞真正的原因；道路的下陷的成因是地下的管線漏水造成掏空所致，而非 AC 鋪面材料本身強度不足的問題，若可以使用透地雷達來檢測，就可以知道地下管線哪裡在漏水，找到問題的所在，道路主管機關就可以對症下藥來根除道路下陷的問題，而非只是治標性的針對 AC 鋪面進行修補。

延續問題：鋪面巡查主要是以「日間經查巡查」、「特別巡查」，如有需要才會進行「特別檢查」及「鋪面（損壞）調查」，請問工務段巡查的流程，什麼時候會啟動「特別檢查」、「鋪面（損壞）調查」？

一般而言，我們在編列相關的養護預算時，會進行鋪面調查，因為經費有限，會優先維修相對比較差的路段鋪面，所以會進行鋪面損壞調查以了解工務段轄區道路哪些路段是損壞較為嚴重，優先來維修，以維護用路人安全。

提問：所以工務段在進行鋪面調查時也只都是用目視的方式？有想過要應用透地雷達來檢測道路下的情形做為養護改善或編列養護預算的依據？

鋪面調查也是目視進行，一般的鋪面損壞後，即便是鋪面損壞調查也不會去使用透地雷達，除非像白沙屯那樣修過然後又壞掉，就會想要使用透地雷達，不然一般情形是不會想使用透地雷達。

提問：所以段長的意思是如果某一段道路出現問題，工務段進行修補後，問題一樣再出現，那就會想應用透地雷達來找出造成問題的原因？

沒錯，會想用透地雷達來探查事故或損壞原因，檢測隱蔽部分的情形，例行性的道路巡查上是不需要使用透地雷達，除非在使用的程序非常簡便、經濟性、容易判讀成果、容易執行，我們還是要先了解透地雷達檢測性能、價格、相關的規範甚至契約要如何編列等，才能評估是否應用透地雷達來進行檢測。

回應：工務段對於透地雷達檢測的價格、相關的規範、契約的編列等有需求的話，後續本所如有成立合辦計畫，將會對上述編製出一套發包透地雷達的相關資料提供給工務段參考。

提問：若道路鋪面出現損壞如坑洞、下陷等，工務段的處理(置)流程？

原則上我們的作業流程都依據「交通部公路總局公路養護手冊」來辦理，我就簡單說明一下，若巡查到鋪面的損壞如鋪面的坑洞，為維護用路人安全，廠商就會先進行坑洞的修補。如果修補完後，在同樣位置又再次產生坑洞，我們就會進行開挖該處來找造成坑洞原因，如果是像天坑那一種路面下的孔洞就會直接進行開挖找尋事故原因，而開挖深度會到路基層確認路基是否沒問題後再進行回填作業。

三、道路主管機關一直以來的痛點係埋在道路裡面的管線、箱涵，道路鋪面產生塌陷、孔洞甚至天坑，大多來自管道間的回填不實、管線或箱涵漏水掏空路基等導致而成，再者管線、箱涵埋設位置、深度，道路主管機關無法全盤準確的掌握，對於道路主管機關來說有如芒刺在背。G.P.R 除了檢測道路裡的孔洞外，還可以檢測道路裡的管線、箱涵位置及深度以比對管線單位提供的圖資，甚至建立屬於道路主管機關的管線圖資系統，在這方面營建署於 110 年為探測地下管線，推動透地雷達技術檢測（110 年「提升道路品質計畫」地方政府補助案件管線圖資非破壞性檢測研究試辦案），另外高雄市政府工務局也有推動非破壞檢測技術(G.P.R)應用於地下管線探測與三維圖資建構深耕研究計畫（優先針對前鎮、小港及林園區）。對此，請問是否

貴段也有運用非破壞檢測方式來探測地下管線的相關規劃，藉由科技技術來協助提升省道的品質？

路面發生問題，我們才會想探測是否跟地面下管線有關，因為地面下的管線也是會造成路面鋪面損壞的原因之一。

然而管線圖資建立是一件很大的工程，是需要有一個單位來統整，因為管線單位很多，圖資也會持續的建置或更新，這是需要持續進行管理的，所以要建立屬於工務段的管線圖資，是比較沒有意願，但是利用透地雷達來檢測道路鋪面的損壞是不是因為地下管線所造成的，這是我們需要的，更精確一點講，如果透地雷達檢測費用夠低、夠方便，這樣我們會更有意願使用透地雷達來進行檢測。

四、本所於 110 年自辦研究計畫「透地雷達檢測道路孔洞方法之初步探討」訪談相關道路主管機關對於 G.P.R 檢測較有疑慮的是檢測後的訊號圖像是需要專業及經驗的人員進行判讀（釋），故一般未受過訓練的承辦同仁是不易判讀（釋）及檢核成果報告的正確性，除非辦理開挖，所以會希望能有相關工具或方法來協助判讀（釋）透地雷達所輸出的訊號圖像，以解決承辦同仁無相關專業及經驗的問題。為此本計畫將探討 AI 智慧化辨識 G.P.R 檢測後所輸出之訊號圖像可行性來解決上述問題以及達到提升自主巡查檢測能力，初步訪談請教國內學者專家，其認為利用 AI 智慧化辨識 G.P.R 檢測後所輸出之訊號圖像是可行的，國外的 G.P.R 廠商也已有相關的軟體，但為適用臺灣道路屬性、資料庫擴充的便利性及需依使用單位回饋意見優化 AI 辨識系統等因素，故建議自行開發屬於國內道路專用的 AI 辨識系統，後續本所也會朝這方向進行研究，請問貴段對於開發 AI 辨識系統想法及意見。

透地雷達的圖像判釋是需要有專業及經驗的人員進行，如果能有 AI 來協助辨識，我們是樂見其成。

五、隨著科技的日新月異，請問貴段對於應用新興的科技來輔助提

升省道自主巡查檢測能力的看法如何?以減少甚至代替現行的人力目視的方式,以更自動、全面及有效率進行省道養護巡查。推行上是否會造成基層排斥之問題?

以現在來說,經費、人力較為缺乏的情況,我們也是希望能多應用一些新興科技來補助巡查作業,來取代部分人力並撙節一些經費,甚至在一些危險場所或是密閉空間可以使用機械取代人力去巡檢,比如我們現在在橋梁檢測上,有使用 UAV 來進行檢測,另外在道路巡查也有使用 APP 進行紀錄,這些新興科技如果都是可以協助第一線工程人員解決問題,以更經濟、更便利及更有效率的方式,我相信不會有人會排斥。

1.4 中華大學土木工程學系

林助理教授鎮華

時間：112 年 7 月 18 日（星期二）上午 9 時 30 分～12 時 30 分

地點：中華大學土木工程學系

紀錄：賴俊呈助理研究員

壹、計畫緣由說明：(略)

貳、訪談問題

- 一、在訪談公路總局第二區養護工程處彰化工務段時，第一線的養護工程單位認為透地雷達的檢測費用很高，第一次訪談老師的時候，老師有說貴校的透地雷達檢測基本收費是 2 萬元（含檢測報告），一般道路 100 元/M、高速公路 100~200 元/M，另外之前有跟中興顧問社葛組長通過電話，他說業界的透地雷達檢測費用都削價競爭且品質良莠不齊，故想再跟老師進一步討論透地雷達檢測費用相關的問題。

透地雷達檢測費用一般可以分人力、時間、內業的處理（訊號的後處理、撰寫報告等）及利潤，若是單純以社會責任或是以研究性質為主的情況下，主要就是人力費用，以學校來說就是學生的工讀費，拿我們以學校來說，可以以約 10~15 萬的費用檢測 1 處有潛在問題（損壞）的路段，那就不是以公尺（m）來計價，我們會可以由相對物理量來探討出材料潛在狀況及問題（損壞）的原因來推測與評估，使用不同的天線（低頻到高频）來進行不同深度的檢測，如果是外面的業界就只會用一種天線進行檢測，而使用不同的天線頻率可以檢測出不同深度地面下的狀況，比如使用 800MHz 可以檢測淺層的孔洞或者民生管線是否有漏水，使用 500MHz 可以檢測路基的情形等。

一般外面業界透地雷達的檢測費用是公尺(m)來計價，另外還有分析報告的費用等等，其實判釋分析檢測後的訊號是重要的，業界有削價競爭的問題，在判釋分析檢測後的訊號大多都是先射箭後畫靶，意思是說已經知道現場是下陷問題，在使用透地雷達檢測後就將訊號異常處圈出來說這裡的異常處可能就是造成下陷的原因，但是這個異常處是什麼他不會告訴你，業界大多都會使用儀器但在判釋分析這部分還不夠專業，分析報告也只是在檢測後訊號圖上標出訊號異常位置，不會告訴你這異常處是什麼，是什麼原因造成這裡的訊號異常等，所以也衍生出道路管理機關會於透地雷達分析報告的不信任。

- 二、因應淨零碳排的議題，透地雷達係為非破壞檢測方式的一種，就以要了解道路路面下的情形來舉例，傳統的方式是透過直接開挖的方式來了解道路路面下的情形，開挖時需要進行交維（交通錐、連桿、告示牌等）、機具（破碎機、挖土機、山貓等）、臨時擋土設施、人力（觀察人員（手）、義交等）等，開挖完後要回填（使用 CLSM 或原土回填），回填後還要重鋪 AC 及重繪標線，相較下使用透地雷達進行檢測，會節省經費、能源、人力以及減少碳排，也會減少在開挖施工時的風險（無論是用路人或是施工人員），請問老師是否有做過這方面相關的研究或是有相關資料可以參考，這也會讓公家機關能多使用透地雷達的理由。

這是屬於傳統修補道路相對人力、成本及時間數據量化的分析，我這邊是沒有做過類似的研究，不過，我可以幫忙問一下業界開挖、回填等作業所須的費用，至於公部門方面可以跟道路主管機關(公路總局)去要一下他們的預算編列的參考單價來做分析。

- 三、經訪談公路總局陳進發總工程司、公路總局第一區養護工程處陳俊堯處長及公路總局第二區養護工程處彰化工務段陳禎康段長，從總局的政策面向、工程處管理面向及工務段執行面向，

整理得知對於應用透地雷達於鋪面的養護巡查上，以快篩方式進行省道鋪面巡查（車載透地雷達方式於公路總局轄管的一般省道上，進行鋪面巡檢），在現階段是有困難的，主要原因係(1)法令規定（公路法第 30 條之一規定），(2)機關單位之權責，(3)道路天坑目前不是公路總局的重點問題，(4)經費。但是對於應用透地雷達檢測局部有問題的路段，來找尋問題的原因，這是有需求的，因為目前不論是鋪面的經常巡查、特別巡查或特別檢查甚至鋪面（損壞）調查，主要都是以目視的方式辦理，目視只能檢視鋪面表面，並無法了解鋪面損壞的原因是否是路面下孔（空）洞、地下水、地下管線滲漏水、路基沉陷等所引起的，這時候是可以應用透地雷達來協助找出鋪面損壞的成因，以擬定正確有效的修復方法來根除問題的來源，而非只是一直開挖回填或是補平 AC 鋪面。經分析透地雷達切入鋪面養護巡查的時機點，一是在鋪面巡查時若有發現鋪面損壞，就應用透地雷達來確認損壞的成因後再依「公路總局公路養護手冊」或者養護開口契約相關規定進行修補，二是鋪面巡查時發現損壞處，先依「公路總局公路養護手冊」或者養護開口契約相關規定進行修補後，持續觀察，若再次發生一樣的損壞問題時，再應用透地雷達來確認損壞的成因後再一次進行修補，請教老師認為這二個時機點哪一個較為恰當或是有其他想法。

這樣說好了，道路主管機關歷年都有進行轄區道路巡查，就會知道哪些路段是有問題的，這時候就可以先針對這些有問題的路段進行透地雷達的檢測，在後續巡查這些有問題的路段時，有發現經常性的沉陷（以鋪面沉陷損壞為例）時，就可以再進行一次透地雷達的檢測，如果檢測後的一周又發生沉陷，就再進行一次地雷達的檢測，這是為了區分這個沉陷損壞是車載的沉陷或是壓密的沉陷還是路面下土石被掏空的沉陷，就依據這 2 次的檢測後的訊號圖像來進行判斷，若是道路沉陷後才來做透地雷達的檢測，而沒有沉陷前的檢測資料，就只能判斷當下沉陷的情形，無法知道這個沉陷損壞更多的資訊，做較嚴

謹的判斷這沉陷損壞的成因。

回應：

老師的想（做）法感覺上是以研究態度或思維來了解問題路段沉陷損壞的成因，但是就站在道路主管機關的角度來說，他們想以簡便、經濟、快速、容易執行及容易便是成果的方法來找出沉陷損壞（AC 鋪面損壞）的成因（訪談彰化工務段段長有提及其需求），若以老師的想（做）法要做到 2~3 次的透地雷達檢測，除了判釋分析訊號圖像外，還須比對前後檢測的訊號圖像，這對道路主管機關而言，除了增加經費外，對於判釋分析比對資料的專業程度又提升了一個層次。

依據本計畫訪談公路總局總工程司、一工處處長及二工處彰化段段長，透地雷達檢測對公路總局而言並不陌生，只是公路總局沒有把透地雷達應用在道路鋪面這一部份，另外公路總局會覺得透地雷達檢測所須的費用較為昂貴，係因公路總局現階段養護巡查開口契約的工項「道路巡查及坑洞緊急修補費」1 公里為 70~120 元（資料來源：交通部公路總局第二區養護工程處 112 年參考單價）對比透地雷達檢測費用 1 公里為 10 萬（100 元/公尺）就相對昂貴許多，再者因為法令規定、機關權責的關係，還有公路總局在政策面上認為天坑不是他們急迫要解決的重要問題，所以不會有相應的經費來辦理透地雷達的檢測，但是在於有問題的路段，尤其是相同鋪面損壞問題經常性、重複性出現的路段，公路總局就會有意願要來使用透地雷達進行檢測找出鋪面損壞的成因，像老師這樣的想（做）法，現階段的公路總局是應該不太可能會接受。

因此本計畫經分析透地雷達切入鋪面養護巡查的時機點，一是在鋪面巡查時若有發現鋪面損壞，就應用透地雷達來確認損壞的成因後再依「公路總局公路養護手冊」或者養護開口契約相關規定進行修補，二是鋪面巡查時發現損壞處，先依「公路總局公路養護手冊」或養護開口契約相關規定進行修補後，

持續觀察，若再次發生一樣的損壞問題時，再應用透地雷達來確認損壞的成因後再一次進行修補。依「公路總局公路養護手冊」規定；鋪面發生輕微局部損壞時，為避免損壞快速擴大，儘速辦理修補工作，會是第二個時機點切入較為恰當。

林助理教授鎮華接續回答：在發現經常性、持續性的鋪面損壞後，進行透地雷達的檢測，要立即找出損壞成因也是可以，只是要看處理到什麼樣的深度、處理什麼樣的問題，若以沉陷來說，沉陷造成的因素是壓密的話，第一次進行透地雷達的檢測是檢測不出什麼異常的。

另外先不管他們（公路總局）能不能接受這個，就先辦一場教育訓練，讓他們知道透地雷達可以做什麼，因為聽你這樣講，感覺公務體系還不知道透地雷達可以做什麼（對於檢測道路），比如貴所可以召集公路總局來參加教育訓練來告訴他們透地雷達可以做什麼，若他們有需求自然就會跟貴所提出他們的需求是什麼，再來就是說（透地雷達）什麼時候介入，就像剛剛說的，他們已經有巡查相關的資料及記錄，那他們就可以整理出轄區內那一些是有問題的路段，假設這個單位有 10 處、那個單位有 20 處…，這些有問題的路段，那就看要透過委外給顧問公司或是學校或是貴所進行研究，研究出來的成果，再以開研討會或討論會等方式召集回來，讓大家看看研究成果，那到時候當面對到這樣類似的問題時，可以用什麼樣的方式做處理，這樣可以達到互惠互惠，你們提供問題，我們做研究幫你們解決問題，就算沒辦法解決也可以提出加強改善這問題的方式。

四、以檢（探）測孔洞為例，請教老師要讓 AI 深度學習需要多少張數的訊號圖像？另外老師有相關使用 AI 辨識孔（空）洞案例（水利署堤防空洞的案例？）

AI 的訓練基本至少需要 1000 張的訊號圖像資料，「無人載具搭載透地雷達執行提坡結構非破壞檢測研究計畫」是經濟

部水利署執行的 3 年計畫，該計畫係以無人載具搭載透地雷達於人力無法到達的堤坡或者有危險的堤坡進行檢測，至於利用 AI 自動辨識孔（空）洞的部分，我在審查時有給一些意見，但實際能不能使用，我並不是很清楚，一般而言，我們用 AI 辨識給它一個特徵去辨識，水利署是以直徑 30 公分的孔（空）洞（有危險性）為主要的辨識，在去年審查時還是 NG 的狀況，至於現場實際檢測，AI 辨識只是輔助，還是需要人員來判釋，AI 的辨識還沒到精確或是可靠。

五、有關透地雷達廠商開發的 AI 辨識系統發展至什麼樣的情形，是否有相關資料可以了解。

目前就我所知有在開發 AI 辨識的透地雷達廠商是馬拉（Malå），他們有給我 DEMO，我覺得還不是很 OK，他們的 AI 辨識主要是辨識管線，不過是否適用全部的環境(訓練 AI 辨識的資料是否適用於臺灣道路的條件)還是個問題，他們很聰明，這是 AI 辨識系統是使用網路註冊方式，首先你要註冊一個會員，他們會給你一個容量，你就可以把你的檢測資料傳輸上去，他們會有一個基本處理（辨識）的模板，這樣 Malå 也會間接地收集到會員的檢測資料，也許 Malå 未來會有更適用的產品推出，但現階段是沒有。

日本 GEO SEARCH 公司的透地雷達檢測車有來臺灣幫忙檢測花蓮市、高雄市及臺南市，這台透地雷達檢測車是陣列式的，陣列式的透地雷達所掃出來的資料是非常多的，所以他們是用 AI 進行辨識，在臺灣檢測完後的資料要回傳到日本進行運算，也許他們的伺服器前，有專業人員看 AI 辨識的跟他們專業人員判釋的是不是有落差。運算完後把異常處框選出來，框選出來後他們還是會去現地做 local 的掃瞄做 double check，並以微鑽孔方式進行驗證，他們是這樣做的。

重點是他們為甚麼可以這樣做，是因為他們繞了地球好幾圈，收集了許多的資料，還有他們自己日本本土的資料，而我

這邊都沒有，所以要開始建立臺灣本土的資料，起步雖然很難，但對未來道路巡查、養護管理是有長遠價值及永續經濟價值。

六、在訪談公路總局第二區養護工程處彰化工務段時，副段長有一個不錯的建議，他建議中心如果後續有辦理透地雷達的合辦（作）計畫，可以找尋公路總局有要辦理道路拓寬、道路路基改善等相關的工程場域，在工程進行前先作透地雷達的檢測，一方面可以得到訓練 AI 的數據資料，另一面在工程開始進行後開挖時可以驗證透地雷達的成果，請教老師上述建議方法的可行性以及老師認為在合辦（作）計畫中可以以何種方式收集訓練 AI 的數據資料？其收集建立訓練 AI 的資料庫初期所需要預算大約是多少？

這建議是可行的，如果有這樣的場域那很好，除了可以收集 AI 訓練的資料，也可以驗證檢測的準確性。

提問：在如何收集訓練 AI 的資料，之前有研析過的方式為 1. 函文給做過透地雷達檢測的公家機關提供相關檢測資料，2. 於現場施作檢測，3. 於試驗室模擬現場(或需求)環境後施作檢測，除了上述 3 種，老師還有別種方法可以來收集訓練 AI 的資料嗎？

除了跟公家機關要檢測資料外，也可以嘗試跟透地雷達開發廠商或是民間有做透地雷達檢測的檢測公司或顧問公司等去要資料，你跟公家機關要資料或許只有檢測後成果報告、只有訊號圖像（紙本），沒有檢測的原始訊號檔案（raw data），跟民間的公司或顧問公司要比較有機會得到原始訊號檔案（raw data）。

提問：老師認為收集建立訓練 AI 的資料庫初期所需要預算大約是多少？如果以上述這幾種方式來收集訓練 AI 的資料的話。

預算就看使用多少人力去外業的現場、試驗室進行檢測、內業的資料收集、資料整理等，還有就是試驗室模擬現場環境

的材料費用，但是應該還是人力的費用為主。

如果以合辦計畫為考量，合辦計畫有一定的預算、有預計要辦理的工作項目(工作清單)，那要先扣除其他不是收集 AI 訓練資料的工作項目之費用後，再來檢視還剩多少預算，來思考我們能利用這些預算怎麼樣來收集資料、能收集多少資料等，這樣或許比較準確些。

1.5 財團法人中興工程顧問社

葛組長文忠

大地工程研究中心海域探勘組高級研究員兼組長

時間：112 年 9 月 8 日（星期五）上午 9 時 30 分～12 時 30 分

地點：財團法人中興顧問社

紀錄：賴俊呈助理研究員

壹、計畫緣由說明：(略)

貳、訪談問題

一、請問葛組長就您在業界的經驗來看，目前臺灣的道路主管機關應用 G.P.R 在道路鋪面養護巡查這方面的普遍性如何？

G.P.R 應用在道路鋪面養護巡查不普遍，可能是地方政府的權責劃分有模糊地帶，不能確認是養護或水利單位。但是地方政府都有過應用經驗，本社曾前往桃園市與臺南市政府養護單位簡報 3D G.P.R 應用道路空洞探查，其中桃園市在數年前辦理地下管線圖資電腦化計劃，曾採傳統 G.P.R 方法協助釐清管線幾何位置（臺北市也辦過類似案件），上述桃園應用成果似乎成效有限，且探查結果圖像需專家解釋，很多人看不懂，對應用探查結果的信心不足，本社簡報 3D G.P.R 雖引起少數科員興趣，但是與會長官認為效益不大。之前日本 3D G.P.R 公司（日本 GEO SEARCH 公司）來臺南免費協助探查地下空洞，臺南市政府相關單位也邀請本社探查相同路段，惟本社簡報探查成果後，臺南市政府仍興趣缺缺。公路總局高雄工務段曾以小型採購委託本社辦理道路空洞探查，雖檢測報告正確性獲該段工程人員肯定，因為現地工程人員最清楚哪些路段持續下陷

破損，所以 3D G.P.R 探查結果推估地下材料與空洞的分布，結合他們的經驗，可以讓他們更清楚道路下方可能的狀況。但是負責長官清楚表示並無法編列經費進行例行性探查。據了解，道路維護方式已是成規，仍是聽通報或人員巡查，發現道路凹陷破洞等異狀，並有合約廠商即刻進行維修填補。

此外，G.P.R 引進國內 30 年左右，目前有上百套傳統 G.P.R 設備，擁有設備的單位能力參差不齊，累積的應用風評並不是很好，舉例而言，數年前，北部核電廠執行土壤鑽探工作，鑽探前某大顧問公司的子公司採 G.P.R 釐清鑽探點的地下管線，探查報告說沒有，後來竟然鑽破核電廠的冷卻水管，險造成大禍。個人認為地方或中央政府工程單位或多或少都有過應用 G.P.R 的經驗，很多時候探查結果出錯、無法定量的探查結果或探查結果無法滿足需求，可能是很多工程人員的印象。所以非不得已，想不到其他辦法，政府機關或一般單位才會應用 G.P.R，如近期的臺北南京西路天坑案例等。

二、據了解 G.P.R 的道路檢測費用大約是 100 元/公尺，經訪談公路總局，其認為 G.P.R 的檢測費用有點太高，請問葛組長您認為這樣的價錢是否調整的空間？此外，檢測費用高是否跟判讀（釋）G.P.R 的訊號圖像需要有專業和經驗的人員有關？還是有其他的原因？

我知道傳統 G.P.R 單價是一公尺自幾十元到數百元不等，簡易的探查環境如河堤檢測可能只有幾十元，營運中隧道探查需機具協助及較多人力，又每日探查時間少，所以單價需數百元。本社規劃的道路探查費用大約是 3 萬元/公里，另有動員費一式 20 萬。如果某計畫探查長度以 20 公里計，單價約每公尺 40 元。我們著眼點是因為道路探查採車載方式，每小時最高時速約 30 公里，我們希望在午夜後，道路車少的時候進行，預估每晚可以至少完成 60 公里探查長度，探查過程一般是 2 輛車 3 個人，60 公里探查長度資料處理與報告撰寫需一個月。

本社應用 G.P.R 近 30 年，累積經豐富經驗，資料研判應無疑問。

事實上，我們比較不在意單價，而是總價，我們希望探查長度能夠越大越好。當初規劃單價時，考慮到曾經有營造廠希望我們去做幾百公尺探查,實作探查費用才 1 萬多元，不夠 3 個探查人員與機具折舊費，所以會再加上動員費。

三、G.P.R 係以非破壞進行檢測道路下的情形，檢測後的結果大多是以有專業和經驗的人員進行判讀（釋），惟人員判讀（釋）還是會有誤判的情事發生，請問葛組長貴公司（社）是否有怎樣方式或機制來防止誤判並提高判讀（釋）的準確度，再者因為業主看不懂 G.P.R 的訊號圖像，貴公司(社)會以怎樣的方式來加強或提升業主對於 G.P.R 檢測成果的信心？

除中興社專業人員進行資料處理與判釋，我們也與國內業界及日本專業公司持續合作，故探查資料均會經過重複檢驗。我們會先用過往案例說明 G.P.R 資料與現況比對，讓業主更加了解 G.P.R 的資料型態。關於信心，我覺得可以從另一方向思考。日本某道路檢測計畫發包時，主管機關會提供某段道路供廠商測試（他們已經很瞭解該道路下方狀況），請投標廠商在簡報時，說明該道路的探查成果，所以主管機關就可以很清楚知道廠商的能力。一旦相信該廠商能力，日後如果有疑點，主管機關也可以協助釐清解決問題，而不是站在敵對方。

四、臺灣市面上有許多家廠牌的透地雷達，像貴公司（社）使用的是挪威 3D-radar（現改名為 Kontūr），雖然 G.P.R 的原理都一樣，設定的參數也大多都相同，可是檢測後所呈現的訊號圖像有所不同，請問葛組長這會影響判讀（釋）？也就是說您習慣看 3D-radar 的訊號圖像可以快速明確的指出異常的情況，若是換成 Malå 的 G.P.R 訊號圖像是否也能看出異常的情況？

市售傳統 G.P.R 原理一樣，儀器都類似。我用過 GSSI 與 Malå 的傳統 G.P.R,探深與解析能力都差不多，差別在於程式畫

面，處理程序與圖形輸出等人為過程。國內有些公司或專家喜歡過度處理資料或再加值應用（譬如反射訊號等級畫分）那就另當別論嘞（有時候看不懂）。所以各系統的 RAW DATA 是最重要的，就是純粹沒加值過的，應該是用這種資料作為 AI 輸入資料才不會誤導。中興社執行 AI 相關計畫也是採用 3D G.P.R 的 RAW DATA，但是因為該儀器公司的 RAW DATA 有經過特殊壓縮，且包含定位其他資料，也不提供 DATA FORMAT，我們試很久仍無法直接讀取原始檔案，所以仍需藉助其處理程式輸出 2 進位循序資料檔案（無任何訊號處理程序），才能給 AI 應用。

目前國外比較多的 AI 應用是採單一 G.P.R 剖面進行處理（就是傳統 GPR 的探查剖面，一般是垂直道路），橫軸是距離，縱軸是深度。我們的研發計畫也僅用到上述單一 G.P.R 剖面。所以在剖面上，平行道路的管線的特徵圖形就是雙曲線型式。但是 3D G.P.R 提供的是 3 維資料，可得到不同切面，其他切面的管線特徵圖形就不一樣，但是目前似乎沒看到 AI 應用。

五、三維透地雷達在臺灣除了貴公司（社）在使用外，就葛組長您所知還有哪些公司、機關單位及學術單位在使用？三維透地雷達相較二維透地雷達的優缺點，三維透地雷達施測的費用？三維透地雷達是否能夠主流化、普遍化？

國震中心在二高用過 3D G.P.R 探查鋪面厚度，水利署在某水庫溢洪道用過 3D G.P.R 探查面層厚度與背填充洞，雲科大用過中興社設備在鐵路道碴完整性探查，SGS 有用過 3D GPR 在完工道路檢測（聽 SGS 說過）。

日商巨設地工透視科技有一套 Malå 的 3D G.P.R，智統科技是 Malå 的代理商，他們似乎也有一套（不知道是否自購）。

做過傳統 G.P.R 的人都知道，掃描過一條測線時，掃描剖面會出現很多訊號，常常是出乎意料外的，所以探查人員懷疑是側邊來的，所以會往側向一點再掃描一次，釐清疑問。3D

G.P.R 最大好處是一次獲得多頻道訊號，不用多花時間。當然有人說把多組傳統 G.P.R 組合在一起就可以辦到，當然可以，但是個別系統要同時操測，組裝後體積龐大，有實際執行的困難。第 2 個好處是天線的特殊設計，可以離開待測物表面 50 公分，所以車載大規模探查成為可行，一天可以簡易完成數十公里，傳統人推的 G.P.R 不可能辦到。第 3 個好處也是天線的特殊設計，可以包含一定頻寬，所以深度 15 公分到 1.5 公尺的資料一樣清晰，傳統人推的 G.P.R 要換天線，要做很多次。

最近美國墾務局來台參加水利署年度工作會議。它們局裡常應用 G.P.R 做設施的完整性檢測，同時有傳統與 3D G.P.R。因為案件太多而工作人數有限，執行時還是先考慮簡便的傳統 G.P.R。所以我認為 3D G.P.R 還無法普遍化，因為儀器很貴、重量大、操測繁複，資料量倍數多等因素。

六、本所於 110 年自辦研究計畫「透地雷達檢測道路孔洞方法之初步探討」訪談相關道路主管機關對於 G.P.R 檢測較有疑慮的是檢測後的訊號圖像是需要專業及經驗的人員進行判讀(釋)，故一般未受過訓練的承辦同仁是不易判讀(釋)及檢核成果報告的正確性，除非辦理開挖，所以會希望能有相關工具或方法來協助判讀(釋)透地雷達所輸出的訊號圖像，以解決承辦同仁無相關專業及經驗的問題。為此本計畫將探討 AI 智慧化辨識 G.P.R 檢測後所輸出之訊號圖像可行性來解決上述問題以及達到提升自主巡查檢測能力，初步訪談請教國內學者專家，其認為利用 AI 智慧化辨識 G.P.R 檢測後所輸出之訊號圖像是可行的，國外的 G.P.R 廠商也已有相關的軟體，但為適用臺灣道路屬性、資料庫擴充的便利性及需依使用單位回饋意見優化 AI 辨識系統等因素，故建議自行開發屬於國內道路專用的 AI 辨識系統，後續本所也會朝這方向進行研究，請問葛組長對於開發 AI 辨識系統想法及意見。

AI 自動辨識當然是最客觀的方式，但是我認為癥結點在於

AI 學習過程有沒有足夠的正確資料，有些論文說需要幾萬筆正確資料，實際上可能近期無法得到這麼龐大的資料。另請參考研發構想與 AI 報告。

七、貴公司(社)有「三維透地雷達結合 AI 判釋技術之方法初探」的研發報告，請問葛組長如何收集訓練 AI 模型的資料以及如何建立資料庫?上述的研發報告所採用的 AI 模型是 CNN (捲積神經網路) 模型，可否說明為何採用 CNN 模型。

請參考研發構想與 AI 報告。

附錄二

專家學者座談會會議紀錄

交通部運輸研究所臺灣技術研究中心會議紀錄

壹、會議名稱：本所臺灣技術研究中心第一科 112 年自行研究計畫專家學者座談會議

貳、時間：112 年 4 月 24 日(星期一) 下午 2 時

參、地點：本所臺灣技術研究中心 2 樓簡報室

肆、主持人：蔡立宏主任

紀錄：賴俊呈

伍、出單位及人員：如簽到表

陸、與會委員意見：

一、林委員鎮華

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析

1. 鼎型塊排列方式亦會影響沖刷深度，建議可探討。
2. 是否有設置現場水位及流速監測設備？
3. 本工法設置於橋墩 P24L 有淤積之效果，保護成效如何量化？

(二) 透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識可行性之初步探討

1. 透地雷達 AI 辨識，需要大量資料進行訓練、測試。
2. 目前深度學習以 CNN 為主，故可做圖像識別。
3. 若要即時識別，建議需建置雲端運算。

(三) 多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異辨識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

1. 邊坡多尺度主要針對那些圖像？將會影響其適用性、實務應用。
2. 邊坡影像是以處理前/後為基準資料進行學習？

(四) 112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

1. 本計畫以碳鋼金屬於大氣曝露下做腐蝕關聯性探討，如何應用於鋼筋混凝土及鋼構。
 2. 腐蝕劣化因子如何回饋至實務構件？
- (五) 港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業
- 港區為地上物、水中物如何即時回饋、即時影像？
- (六) 港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進
- 港區大多為回填土層，是否有相關監測如水位計、地下土壤含水量及土壤層次監測。

二、 謝委員明志

港研中心一科 112 年 6 項自辦計畫，在計畫書裡每個計畫的緣起、目的、研究範圍、利害關係人、工作內容及作業時程，都有詳實的描述，是一份架構完整，描述清晰的計畫書。

- (一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析
- 本計畫是橋梁沖刷數值模型建置分析，分 4 年執行，是個循序漸進的計畫，規劃完整，且計畫完成後產出之三維水理分析模型具有實用性。
- (二) 透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識可行性之初步探討
- 本計畫是透地雷達應用於省道巡查及 AI 辨識應用，為未來合作計畫的先期研究，藉此可先打下後續研究需求，更能明確知道目的及預期成效。
- (三) 多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討
- 本計畫是空拍影像、深度學習在邊坡地貌變異判識之應用，符合交通部年度施政重點，引進新興科技，值得鼓勵。
- (四) 112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

腐蝕環境與碳鋼金屬關聯性，為本土環境資料的調查，全臺灣只有港研中心有這類資料庫的建置，應持續推動。

(五) 港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

本計畫是港灣構造物巡查檢測作業精進，也引入新興科技，應用於巡檢及風險判識，是個值得鼓勵的研究業務。

(六) 港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

本計畫是港區地震液化風險評估模式精進，針對臺北港進行評估，除了進行地工資料庫更新，也新增了這幾年國內外的液化分析方法，應會更加精確的推估，值得持續推動。

三、 何委員鴻文

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估 (2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析

本計畫成果產出之技術指引具有實用性，另地工織布之耐久性為何？

(二) 透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識可行性之初步探討

本計畫期待可擴及使用範圍至省道以外道路。

(三) 多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

本計畫之利害關係人建議增列各縣市政府。

(四) 112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

本計畫建議其成果提供交通部技監室辦理橋梁相關設計規範訂定之參考。

四、 吳委員松旺

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估 (2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析

1. 本計畫是多年期的計畫，在第 1 年的計畫即與高公局中

區分局大甲工務段密切的配合，在國道3號大甲溪橋現場設置鼎型塊織布橋基保護工法，目前已初步驗證有效減緩向下沖刷作用，尚待長期性觀測及超大豪雨事件來驗證，大甲工務段會持續配合本計畫。

2. 建議本計畫能擬訂鼎型塊織布橋基保護工法現場佈設的標準作業程序，讓現場佈設時有所依循。

(二) 透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化辨識可行性之初步探討

無論省道或者是國道都是線型的，都有一定的長度，標的物很大，所以建議目標要收斂，比如說在行車舒適度不佳的路段做試驗，要收斂調查，這樣對道路主管機關來說會更有幫助。

(三) 多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異辨識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

1. 無論是省道或是國道尚需注意路權以外的邊坡，路權外的邊坡產生變異(開發行為)間接影響到省道或國道的邊坡，因為邊坡是一體的，不會說崩塌到國道的路權內就不崩塌，所以建議本計畫需把路權外的邊坡狀況納入探討。
2. 另大甲工務段轄區亦有邊坡場址，例如：後龍至苑裡路段，可提供本計畫做為探討的標的，或是若需要相關空拍圖資進行分析和訓練，也可洽詢大甲工務段提供、合作。

(四) 112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

大甲工務段所轄管國道是最靠近海邊，若是本計畫有需要到大甲工務段的轄區來設置觀測站(點)，大甲工務段樂意配合。

柒、 結論：

感謝各位委員提供本所相當寶貴之專業建議，請案關業務同仁將委員意見納入參採，以符合實際應用面，並提升研究成果之廣度及實用性。

捌、散會：下午4時10分

會議簽到表

壹、會議名稱：本所港灣技術研究中心第一科 112 年自行研究計畫專家學者座談會議

貳、時間：112 年 4 月 24 日(星期一)下午 2 時

參、地點：本所港灣技術研究中心 2樓簡報室

肆、主持人：蔡立宏主任 蔡立宏

伍、出席單位及人員：

出席單位及人員	簽名
王委員錦榮	請假
林委員鎮華	林鎮華
吳委員松旺	吳松旺
何委員鴻文	何鴻文
謝委員明志	謝明志

出席單位及人員	簽名
本所臺灣技術研究中心 柯正龍副主任	柯正龍
本所臺灣技術研究中心 第一科	賴瑞惠 胡鴻 張道光 鄭建 黃子強 謝幼屏 曾文傑 賴俊呈
本所臺灣技術研究中心 第二科	李俊穎
本所臺灣技術研究中心 第三科	林雅雯

附錄三

第 1 次工作會議紀要

112 年 6 月工作會議紀要

會議名稱：「本所港灣技術研究中心第一科 112 年自行研究計畫」第 1 次工作會議

時間：112 年 6 月 28 日(星期三)上午 9 時至 12 時 30 分

地點：本所港灣技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(2/4)-橋基冲刷數值模型建置與分析

1. 三維數值水理分析及文獻蒐集情形說明。
2. 本年度試驗區 UAV 第 1 次地形觀測辦理情形說明。
3. FLOW 3D 教育訓練辦理情形，及三維數值模型初步建置情形說明。

(二)透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探討

1. 蒐集並研析交通部公路總局(研究對象)省道養護巡查作業相關規定、柔性路面鋪面損壞分類、現象及原因。
2. 透地雷達應用於「地下埋設物及不明物體調查」、「地下水位深度及含水量變化探測」及「人工智慧辨識透地雷達訊號圖像」相關研究之文獻回顧。
3. 112 年 3 月 21 日訪談交通部公路總局陳進發總工程司，瞭解研究對象在政策面上對本計畫的看法及提供相關意見。
4. 112 年 5 月 24 日訪談交通部公路總局第一區養護工程處陳俊

堯處長，瞭解研究對象在管理面上對本計畫的看法及提供相關意見。

(三)多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探
(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

1. 蒐集彙整國內外 AI 應用於邊坡之相關文獻。
2. 辦理本案專家學者訪談。

(四)112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

1. 大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗，完成第 1、2 季大氣腐蝕劣化因子調查與現地暴露試驗取樣維護作業，完成 111 年第 4 季、全年與 112 年第 1 季大氣腐蝕劣化因子化學分析及金屬試樣酸洗工作。
2. 精進及擴充臺灣腐蝕環境分類資訊系統資料庫，完成 111 年度大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗資料綜整分析並繪製等位圖，並將相關資料擴增於「臺灣腐蝕環境分類資訊系統」資料庫，並公開於本中心網站供外界查詢。
3. 完成撰寫及出版「2022 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報」工作，提供相關單位選用金屬材料與防蝕工法應用。

(五)港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

1. 彙整港區各型式碼頭的巡檢項目。
2. 彙整與探討碼頭常見的劣化項目。

(六)港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

1. 彙整液化評估法相關文獻。
2. 蒐集臺灣港務股份有限公司於臺北港近 10 年新建工程所增加之地質鑽探資料。
3. 蒐集經濟部中央地質調查所於臺北港之地質鑽探資料。
4. 初步完成臺北港地質鑽探資料盤點。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

- (一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(2/4)-橋基冲刷數值模型建置與分析
1. 討論文獻所提數模參數敏感性分析，其背景條件與本計畫之差異及適用性。
 2. 討論渠槽試驗除規劃使用 GoPro 縮時攝影外，可增加其它監測設備，如流速計。
- (二)透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探
1. 討論訪談透地雷達領域之業界專家，蒐集業界對於本計畫執行及 AI 智慧化判識應用之看法。
 2. 討論後續於「AI 智慧化辨識透地雷達訊號圖像可行性探討」章節中，如何蒐集 AI 訓練之相關資料及建立 AI 訓練資料庫。
- (三)多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討
1. 討論邊坡原始資料取得、資料處理方法及 AI 模型建置於後續的實務應用。
 2. 討論 AI 監督式學習、非監督式學習及半監督式學習優缺點。
- (四)112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究
1. 討論工業區碳鋼金屬腐蝕與二氧化硫關聯性。
 2. 討論金屬腐蝕與腐蝕因子關聯性相關文獻。
- (五)港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業
1. 討論碼頭維護管理機制、巡查檢測項目與劣化判定標準。
 2. 討論各港之碼頭構件劣化項目。
- (六)港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進
1. 討論土壤液化評估相關方法。
 2. 討論地質鑽探資料盤點、篩選。
 3. 討論後續報告內容的加強與補充。

貳、重點紀要/主要結論

一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析

(一)試驗區 UAV 觀測航拍活動於今年度 4 月初獲民航局申請許可，申請期間一次為 3 個月，迄今即將到期，請提醒委外廠商儘早再提出下一段申請，以避免下次豪大雨事件後，無法進場航拍觀測，影響計畫執行。

(二)請依所規劃之後續研究事項積極辦理。

二、透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探討

本計畫係為後續合作研究計畫的先期研究，需確認應用單位的需求、想法且要能落地應用。

三、多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

(一)建議依專家訪談提供之意見，於本計畫探討未來何種邊坡型式或破壞類型應用 AI 介入判識較具可行性和實務應用性，以利後續再以此為基礎進行深入探究。

(二)若時間允許建議可針對公路總局及轄下工程處、工務段、高速公路局和相關利害關係人等皆安排進行訪談，藉以瞭解實務需求和後續研究著力點，達以終為始之目的。

四、112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

(一)建議找出金屬腐蝕與大氣腐蝕因子氯鹽、二氧化硫間的關聯性。

(二)後續建立碳鋼金屬與環境因子迴歸模式時，建議說明模式中各環境因子對金屬腐蝕的影響是否符合腐蝕理論。

五、港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

(一)建議統計並分類各型式碼頭構件的劣化項目，瞭解碼頭常見的損壞構件，提供後續碼頭維護的參考數據。

(二)建議彙整各港區特別巡查的構造物遭撞損的意外事故資料與劣

化項目。

六、港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

- (一)今年針對臺北港進行液化評估，除進行地工資料庫更新，也建議運用近年來國內、外的液化分析方法，推估臺北港液化範圍及深度，提供地震速報之應用。
- (二)請於第 2 次工作報告時，呈現今年新增臺北港區的地質鑽探資料，其新、舊資料之分佈區域，以利瞭解其分佈是否能滿足臺北港區液化評估之需求。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所港灣技術研究中心第一科 112 年自行研究計畫」第 1 次工作會議

貳、時間：112 年 6 月 28 日(星期三) 上午 9 時

參、地點：本所港灣技術研究中心5樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所港灣技術研究中心第一科	研究員 研究員 副研究員 研究員 研究員 副研究員 助理研究員	謝幼屏 胡哲了 黃子遠 曾文傑 張道光 鄭登鍵 賴俊星 王浩翔 顏碩香
本所港灣技術研究中心第二科	科長	李信賴
本所港灣技術研究中心第三科	科長	林雅雯

附錄四

第 2 次工作會議紀要

112 年 8 月工作會議紀要

採購/自辦案件編號：

會議名稱：「本所港灣技術研究中心第一科 112 年自行研究計畫」第 2 次工作會議

時間：112 年 8 月 28 日(星期一)上午 9 時至 12 時 30 分

地點：本所港灣技術研究中心 2 樓簡報室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(2/4)-橋基冲刷數值模型建置與分析

1. 112 年度前 3 季現場試驗觀測結果說明。
2. 三維數值模型建置情形。
3. 後續工作項目說明。

(二)透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探討

1. 探討透地雷達如何應用於省道一般道路柔性鋪面養護巡查及其可行性。
2. 訪談交通部公路總局(以下簡稱公路總局)第二區養護工程處彰化工務段陳禎康段長及中華大學土木工程系林鎮華助理教授之摘要說明。
3. 後續工作項目說明。

(三)多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探

(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

1. 探討邊坡破壞類型及遙測技術適用性。
2. 彙整公路邊坡維管機制與訪談公路邊坡維管單位。
3. 後續工作項目說明。

(四)112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

1. 完成第 1、2 季大氣腐蝕劣化因子調查與現地暴露試驗的取樣維護、化學分析及金屬試樣酸洗工作。
2. 進行碳鋼金屬腐蝕關聯性統計分析。
3. 後續工作項目說明。

(五)港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

1. 檢討碼頭設施維護管理制度與構件劣化標準。
2. 新興科技行動應用程式應用於碼頭巡檢作業。
3. 後續工作項目說明。

(六)港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

1. 建置臺北港地質鑽探資料，並盤點、篩選可用資料共 148 筆地質鑽探資料。
2. 完成不同地震情境下液化潛勢比較。
3. 後續工作項目說明。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析

1. 討論三維數值分析結果，提供橋梁維管單位應用之方式。
2. 補充三維數值模型建置之模型尺寸及穩定沖刷時間說明。

(二)透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探

1. 討論透地雷達可以檢測探查之道路下潛在損壞因素，除了孔洞外，尚可檢測探查路基問題、回填材料問題、地下水及滲漏水等問題。

2. 討論不同廠牌透地雷達檢測後所輸出的訊號圖像，對於後續 AI 智慧化辨識的影響。
- (三)多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討
 1. 討論訪談公路邊坡之實務單位看法及需求。
 2. 討論後續 AI 切入實務應用之方向及目標。
- (四)112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究
 1. 討論以迴歸分析法進行碳鋼金屬腐蝕與環境因子關聯性分析過程中的相關考量。
 2. 討論教育訓練辦理方式，以及在網站上展示的腐蝕成果。
- (五)港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業
 1. 有關維護管理制度定期檢測與詳細檢測的探討。
 2. 討論行動應用程式應用在碼頭巡檢作業。
- (六)港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進
 1. 討論土壤液化評估相關方法。
 2. 討論後續報告內容的加強與補充。

貳、重點紀要/主要結論

- 一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析
 - (一)請儘速辦理部務會報相關資料簽報作業，另創新提案請妥為準備以爭取佳績。
 - (二)請依所規劃之後續研究事項積極辦理。
- 二、透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探討
 - (一)透地雷達可以檢測探查道路下潛在損壞因素不只有孔洞，建議可以針對公路養護手冊所列的柔性鋪面損壞樣態進行探討，探討透地雷達檢測切入的可行性。
 - (二)本計畫研究對象是公路總局，主要應用對象是道路主管機關，建

議可以將研究成果投稿至公路相關的期刊。

三、多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)- 影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

(一)過去訪談多針對公路總局，亦可針對交通部高速公路局進行訪談，藉以瞭解實務需求和應用遙測技術於邊坡巡查之機制。

(二)本研究可針對不同尺度空拍影像後續如何結合 AI 應用之方向進行整理探討和適用性分類。

四、112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

(一)在建立碳鋼金屬與環境因子迴歸模式的分析過程中，若模式配適度不佳，可考慮同時納入氯鹽、二氧化硫，或採用分季資料分析等不同方法來改善模式。

(二)進行迴歸模式校正時，可補充說明變數轉換、模式轉換的理由依據。

五、港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

後續請再探討新興科技應用於碼頭巡檢作業之設施構件劣化度判定標準之適用性，並增加與比較新興科技之應用案例。

六、港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

(一)請使用最新的臺北港配置現況圖資，以利後續臺北港液化風險評估分析。

(二)下次工作會議請補充液化風險評估 Cetin 機率法，以利瞭解機率分析與定值分析之差異處。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所港灣技術研究中心第一科 112 年自行研究計畫」第 2 次工作會議

貳、時間：112 年 8 月 28 日(星期一) 上午 9 時

參、地點：本所港灣技術研究中心2樓簡報室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所港灣技術研究中心	副主任	柯正光
本所港灣技術研究中心第一科	研究員 研究員 助理研究員 副研究員 副研究員 研究員 研究員	曾文輝 胡啟文 賴俊星 鄭登輝 黃育瑞 張道光 謝必昇
本所港灣技術研究中心第二科	科長	李俊穎
本所港灣技術研究中心第三科	科長	林雅雯

附錄五

第 3 次工作會議紀要

112 年 10 月工作會議紀要

採購/自辦案件編號：

會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 112 年自行研究計畫」第 3 次工作會議

時間：112 年 10 月 27 日(星期五)下午 2 時至 5 時

地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

主持人：賴瑞應科長

出席者：如後附簽到表

紀錄：鄭登鍵

壹、討論議題/計畫名稱

一、工作進度說明

(一)鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(2/4)-橋基冲刷數值模型建置與分析

1. 112 年度前 3 季現場試驗觀測結果。
2. 三維數值模型建置情形-矩形樁基礎+鼎型塊，矩形樁基礎+鼎型塊+織布。
3. 階段性成果應用。

(二)透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探討

1. 透地雷達應用於省道一般道路柔性鋪面養護巡查可行性及落地應用對策。
2. 應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像的可行性。

(三)多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

1. 公路邊坡維管機制與流程彙整。

2. 公路邊坡結合 AI 之加值應用。

3. 空拍影像處理技術。

(四) 112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

1. 112 年第 1~3 季大氣腐蝕因子調查與金屬材料現地暴露試驗工作。

2. 碳鋼金屬腐蝕關聯性統計分析。

(五) 港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

1. 依維護管理制度執行碼頭巡檢作業時所遭遇之問題。

2. 新興科技行動應用程式與水下無人載具應用於碼頭巡檢作業。

(六) 港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

1. 臺北港不同地震情境下液化潛勢分析。

2. 臺北港不同地震情境下地震沉陷潛勢分布。

二、針對目前研究方向與執行情形進行討論

(一) 鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(2/4)-橋基冲刷數值模型建置與分析

1. 織布具透水性，建議可將織布分離成幾小塊來模擬透水性。

2. 數值軟體雖無對應之保護工模組可應用，但利用土中應力增加方式來近似模擬，其模擬結果與試驗結果接近，說明具有其可行性，後續可再諮詢相關專家。

(二) 透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探

1. 透地雷達檢測省道柔性鋪面於經常性或重複性損壞路段之成因，相較採用現場直接開挖方式有其優勢。

2. 應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像，在市售商業軟體及客製化專案研發方式之區別。

(三) 多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

1. 訪談公路邊坡之實務單位看法及後續切入方向。

2. 後續年度工作內容及目標。

(四)112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

1. 碳鋼金屬腐蝕與腐蝕因子關聯模式建立後的模式說明、應用與推廣。

2. 探討臺灣不同環境下金屬腐蝕差異性的方法。

(五)港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

1. 碼頭巡檢作業時所遭遇問題。

2. 應用新興科技強化港灣構造物之巡查與檢測作業。

(六)港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

1. 臺北港不同地震情境下地震沉陷潛勢。

2. 後續報告內容的加強與補充。

貳、重點紀要/主要結論

一、鼎型塊織布橋基保護工法之現地試驗與成效評估(2/4)-橋基沖刷數值模型建置與分析

(一)國道 3 號大甲溪橋橋墩 UAV 航拍勞務案，若 11 月中旬時無預期之颱風消息，可於 11 月下旬著手辦理相關結案驗收事宜，以利主計年度結算作業執行。

(二)請依所規劃之後續研究事項積極辦理，並如期完成提交期末報告初稿。

二、透地雷達應用於省道養護巡查及 AI 智慧化判識可行性之初步探討

(一)透地雷達檢測省道柔性鋪面經常性或重複性損壞的成因具有一定的成效及優點，因此應用於省道養護巡查的「特別檢查」是具可行的且符合交通部公路局之需求。

(二)應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像，目前在臺灣市面上有相關的商業軟體可使用，但選擇性不多，也有依使用者需求進行客製化專案研發的方式，若要應用 AI 辨識道路下潛在損壞因素，則使用客製化專案研發的方式較為合適。

(三)本計畫為後續合作計畫的先期計畫，故對於後續合作計畫時程、內容等需詳加規劃考量，俾利能落地應用。

三、多期多尺度影像結合深度學習於邊坡地貌變異判識之初探(2/2)-影像處理方法及公路邊坡影像類型適用性探討

(一)針對空拍影像之處理方法應考量不同尺度載具及其搭載儀器間的區別，並對本案欲蒐集之公路邊坡影像進行適用性探討。

(二)經處理之邊坡空拍影像如何挑選適當之 AI 深度學習模型進行訓練，以獲得較佳的結果，係本研究之精隨所在，建議於期末報告中強化敘述。

(三)今年度已針對交通部公路局和交通部高速公路局進行實務單位訪談，建議後續可依實務單位意見延續相關研究課題，以配合實務需求並結合現行邊坡巡檢之機制。

四、112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查與碳鋼金屬關聯性研究

後續研究可分區進行關聯性統計分析，探討臺灣各地區不同大氣環境、不同污染特性區域間的腐蝕差異性。

五、港灣構造物巡查檢測作業精進(2/4)-新興科技應用於碼頭設施巡查檢測作業

請加強新興科技應用於碼頭的檢測與維護管理作業的精進說明，並請掌握時效撰寫研究成果報告。

六、港區地震液化風險評估模式精進(2/5)-臺北港模式精進

請依據觸發門檻加速度及高潛勢區面積分析成果，推估臺北港區之分區地震沉陷量，俾提供更新臺北港地震簡訊災況初評內容。

會議簽到表

壹、會議名稱：「本所運輸技術研究中心第一科 112 年自行研究計畫」第 3 次工作會議

貳、時間：112 年 10 月 27 日(星期五) 下午 2 時

參、地點：本所運輸技術研究中心 5 樓第一會議室

肆、主持人：賴瑞應科長 賴瑞應

伍、出席單位及人員：

出席單位	職稱	姓名
本所運輸技術研究中心第一科	副研究員 副研究員 副研究員 副研究員 副研究員 助理研究員	黃子謙 謝少屏 張道光 曾文偉 胡哲文 賴俊呈
本所運輸技術研究中心第二科	副研究員	李俊穎
本所運輸技術研究中心第三科	科長	林雅雯

附錄六

期末報告審查委員意見處理情形表

期末報告審查委員意見處理情形表

項次	委員意見	處理情形
林鎮華委員		
1	本報告前五章節非常完善，有國內外相關實務面也有研究面向之收集及探討。	感謝委員肯定。
2	第六章節內容較少，建議依據訪談內容，可進行初步擬訂合作計畫方案，以供後續研究參考。	感謝委員建議，本計畫第六章合作計畫之芻議即是依據訪談研究對象公路局對於應用透地雷達於省道一般道路柔性鋪面養護巡查的問題、疑問，再參採專家學者的建議後所提出的合作計畫方案。
3	表 4.2 在柔性鋪面單項損壞養護措施，皆針對表面維護，較無針對道路路基品質養護措施，也許本研究後續成果，可提供此方面的研究建議及探討。	感謝委員建議，本計畫報告中的表 4-2 係依據「交通部公路總局公路養護手冊」附錄表 A4-3 內容所製作的柔性鋪面單項損壞養護措施表格，因為目前省道一般道路柔性鋪面養護巡查主要是以人力目視方式進行巡查，所以表格上的損壞程度也僅是目視對鋪面表面損壞狀況的描述，因為人力目視無法瞭解道路下路基的情形，故公路局採用的養護措施也僅是對鋪面表面進行養護。後續公路局如能應用透地雷達進行省道一般道路柔性鋪面養護巡查，對鋪面損壞處進行道路下方的檢測，以瞭解損壞的原因是鋪面本身的問題還是來自路基的問題，如此才能針對路基進行相應的養護措施。
4	圖 4.6 國內已有初步孔洞處理流程，值得做為借鏡，如執行狀況、遇到問題、需待改善...等參考。	感謝委員意見，本計畫報告中的圖 4.6 係高雄市政府應用透地雷達探測下水道管線銜接處因漏水而產生地下孔洞的處理流程，是以主動預

		防的方式避免因下水道管線漏水產生孔洞導致道路塌陷，確實是值得借鏡參考，所以本計畫將之列入透地雷達應用於道路檢測的實績案例。
5	圖 4.7~圖 4.11 為三維陣列影像判讀之定性結果，並無明顯道路品質量化分析，若能更有效應用，將會更有實務應用價值。	感謝委員建議，本計畫報告中的圖 4.7~圖 4.11 係來自中興工程季刊「三維透地雷達應用於道路地下管線定位與路面凹陷探查」這篇期刊，其內容僅說明應用透地雷達檢測後的成果，至於道路品質量化分析會涉及各道路主管機關對於其轄管的道路是依據甚麼方式進行品質量化，比如省道是以鋪面服務指數(PCI)及國際糙度指數(IRI)量化道路鋪面品質等。委員的建議是個方向，後續將研析透地雷達檢測的成果是否能扣合道路主管機關的道路品質量化分析的方式。
6	圖 4.14 提及盤點問題路段時，進行檢測資料樣態是目前最能直接掌握，且符合柔性鋪面所需，後續計畫可針對此項進行資料收集及相關土壤品質檢驗，以建議相應之資料庫。	感謝委員建議，本計畫在於後續合作計畫的芻議中，有「規劃建立透地雷達數據資料庫」的工作項目，屆時將納入委員意見進行評估。
7	圖 5.9 日本資料庫顯示 128,477 個/275,339km，表示在日本 1 公里就潛在孔洞或不良道路狀況約 47 個/km，相對於臺灣道路不論在施工品質或是養護作業等沒有比日本好的情形下，本研究成果將有利於道路安全預防與持續開發價值存在。	感謝委員肯定。
8	建議於後續合作計畫評估合理檢測價格，如一工作天或一個月可以檢測量體、品質、要求，與人力成本、內業成本、利潤進行測試估算，可界定一個符合道路品質基本價格，以利相關機關編排預算之用。	感謝委員建議，本計畫在於後續合作計畫的芻議中，有「制定透地雷達應用於省道養護巡查檢查的合理價格」的工作項目，屆時會進行相關的訪價作業來評估透地雷達檢測價格，俾利應用單位編排預算之應用。

9	相關 AI 學習、或輔助分析軟件開發皆在國外較為先進，國內還處於起步研究階段，若後續有專門研究單位或執行單位共同收集不同資料彙整、分享，這有助於本計畫後續發展。	感謝委員意見，依據本計畫蒐集應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像相關資料，國外 AI 辨識系統主要是由透地雷達製造廠商所開發，透地雷達製造商因已擁有(蒐集)大量透地雷達的檢測資料，故有足夠的資料讓 AI 模型進行訓練，得以開發 AI 辨識系統，再者其 AI 辨識系統採用線上收費方式，使用者需要將資料上傳至雲端，讓 AI 進行辨識，因此，透地雷達製造廠商能得到更多資料，精進 AI 辨識系統。 在國內雖然透地雷達常被用來檢測隧道、橋梁、堤坡及道路等，但目前並沒有相關的研究機關、政府單位、學術單位、民間公司在蒐集彙整、分享透地雷達檢測資料，故要發展 AI 辨識透地雷達訊號圖像系統，需要先克服如何蒐集足夠且完整的訓練資料及建立本土化資料庫這個關鍵課題。
何鴻文委員		
1	應用透地雷達於道路養護巡查可事先偵測地下管線狀況以防範未然，亦可協助檢測柔性鋪面重複性損壞原因，若再配合 AI 技術協助辨識將可減輕道路養護單位人力負擔，確有持續研究發展必要。	感謝委員肯定。
2	透地雷達過去主要係應用於橋梁基礎或隧道襯砌檢測，如要進一步應用於道路養護巡查，必須如第六章所述透過與道路養護相關單位、業界或學術界共同合作研訂發包、檢測、價格及驗收等相關規範，並辦理教育訓練以增進各級道路養護人員對透地雷達技術之了解，進而收集	感謝委員建議，本計畫在於後續合作計畫的芻議中，有「制定透地雷達應用於省道養護巡查檢查的檢測規範」的工作項目，屆時會對於透地雷達應用有相關的規範，以避免發生資料誤用誤判之情事。

	足夠且正確之本土化資料俾利後續 AI 辨識發展，惟合作計畫內容建議增列說明透地雷達應用限制，以避免資料誤用誤判風險。	
3	7.1 節結論 2 如有納入道路養護巡查開口契約，建議可請道路養護單位於現場開挖前先辦理透地雷達檢測再進行開挖檢測，俾與實際開挖結果比對校正。	感謝委員建議，公路局一般會採用現場開挖方式進行道路鋪面經常性或重複性損壞成因的探查，但常常徒勞無功找不到損壞成因，應用透地雷達可以對於道路進行面(大面積地毯式)及不同深度的檢測，不同於現場開挖方式僅以單點及固定深度的探查，故應用透地雷達能更確實、有效及迅速的檢測損壞成因。本計畫建議公路局以透地雷達檢測方式代替現場開挖方式，在應用透地雷達檢測到造成鋪面損壞之成因後，再進行相應的養護處理措施，舉例來說，透地雷達檢測到道路下方有一孔洞是造成道路鋪面沉陷的成因，公路局可以進行開挖，一方面進行確認一方面進行修補灌漿 (CLSM)，但要確認透地雷達檢測成果的準確性，不一定都要進行開挖，如本計畫報告圖 4.6 所示，高雄市政府利用鑽孔放進 CCTV(內視鏡頭)來確認是否有孔洞及孔洞大小，再擬定處置措施。
陳禎康委員		
1	P.4-26 道路下方破壞型態非常多，有「路基或底層使用材料不當」、「路基路床承载力不均勻」、「地下水影響」、「鋪面材料流失、掏空等」，計畫內容建議可在詳述透地雷達可應用範圍，上述類型的破壞模式或是原因是否都適用？	感謝委員建議，本計畫報告 P.4-25 所述的來自道路下方造成柔性鋪面損壞型態主要成因，如「路基或底層使用材料不當」、「路基路床承载力不均勻」、「地下水影響」、「鋪面材料流失、掏空」等等，於該頁(P.4-25)的第二段已有說明上述損壞成因均可應用透地雷達檢測並較現場開挖方

		式更確實、有效、迅速的檢測出其損壞成因。
2	本計畫是探討使用透地雷達探查並使用 AI 智慧化辨識，計畫內有提到需要 1000 張左右圖像訓練，是每一種類型需要 1000 張或是綜合各類型 1000 張。	本計畫所提到至少需要 1000 張訊號圖像進行 AI 模型訓練，這 1000 張訊號圖像係指有異常訊號之圖像，依委員的意思就是綜合各類型異常訊號圖像 1000 張，尚未到各分類之異常訊號圖像，事實上，在本計畫報告 P.5-12 有提到，需要多少數量的 AI 訓練資料是取決於物件圖像辨識的難易，其辨識困難度越高者，需要的訓練資料就越多。
3	建議補充產出成果時效性，若路面已有跡象下方有掏空跡象，養護單位會希望能儘速知道結果，才能因應，最好檢視完即能當下辨識完成。	感謝委員建議，在本計畫報告 P.3-1「透地雷達基本原理」中，有說明透地雷達在接收到反射的訊號後，可「即時」由操作軟體顯示成圖形資料檔案據以分析受測物的排列方式或判別標的物之特性等，所以應用透地雷達檢測後是可以立即由人員進行判釋道路下方的情況。
4	P.4-23 有提到透地雷達檢測價格 1 公里約 10 萬元，省道大部分已使用多年，路況大致都穩定，非常少機會需大規模檢測，比較有機會用到是單點或小範圍破壞路況檢測，建議列出單點式檢測費用。	感謝委員建議，本計畫在於後續合作計畫的芻議中，有「制定透地雷達應用於省道養護巡查檢查的合理價格」的工作項目，屆時會進行相關的訪價作業來評估透地雷達檢測價格，俾利應用單位編列預算之應用。
5	透地雷達廠牌種類多，建議可列出一些常用機型、軟體品牌及特點說明。	感謝委員建議，本計畫主要以透地雷達原理(各廠牌都一樣)應用於省道養護巡查的可行性，至於介紹透地雷達常用機型、軟體品牌及特性等說明將於後續合作計畫中「制定透地雷達應用於省道養護巡查檢查的檢測規範」的工作項目進行介紹分析，俾利應用單位瞭解選擇使用。
6	明年度彰化台 61 線伸港路段會做路基改良，有機會可與本計畫結合探討。	感謝委員提議，後續會研析合作的可能性。

本所運輸技術研究中心第二科李政達副科長		
1	報告書專有名詞使用英文縮寫建議中文、英文原文與縮寫要呈現清晰，例如：P.2-12，FPGA、P.2-11，B 掃描。	感謝建議，已修正詳 P.2-12、P.2-11。
2	表 4-8，L 級、M 級、H 級（柔性鋪面單項損壞之養護措施表）代表損壞程度為何，建議改善補充。	感謝建議。已改善補充詳 P.4-9。
3	有關結論 1 (P.7-1) 經由訪談公路局應用透地雷達日間經常巡查省道一般道路柔性鋪面不易執行且目前尚無迫切需求，重點在透地雷達信心度、普及性與推廣度不足、門檻高，如何利用透地雷達達到目標，以突顯可行性。	關於公路局對於應用透地雷達於省道一般道路柔性鋪面的檢測信心度、普及型與推廣度不足、門檻高等，在 P.7-1、P.7-2 結論 2、結論 3 分析透地雷達之優點及可行性、提出相關的對策解決公路局對於應用透地雷達的疑慮，並在 P.7-3 建議 1 建議透過合作計畫加速推動透地雷達實際落實應用於省道養護巡查的速度。
本所運輸技術研究中心第三科林雅雯科長		
1	建議針對未來如成立合作研究計畫，如何執行研究目標、期程、經費規模，提供實務單位應用之研究成果為何。	感謝建議，已於 P.6-2~P.6-4 補充如何執行目標、期程及提供實務單位應用之研究成果，至於經費規模將列於本所「合作研究計畫研究主題與重點」中。
2	目前透地雷達對道路孔洞辨識及 AI 辨識的準確度為何？臺南市政府、高雄市政府等孔洞辨識資料建議納入資料庫，水利署 AI 辨識系統是否有在應用？	依據臺灣普遍應用透地雷達檢測道路下孔洞而言，其人員(力)的判釋具有一定的準確度，讓使用者有一定信任度，惟目前市面上尚未有可以辨識道路下孔洞的 AI 辨識系統或軟體，故無法得知其準確度。 感謝建議，本計畫報告 P.5-13 研提取得(蒐集)透地雷達檔案資料方式中會「嘗試請公家機關、學術研究機構、業界檢測公司及工程顧問公司等提供所擁有的透地雷達檢測相關

		檔案資料」。 依據電洽經濟部水利署承辦人員表示，水利署這套無人載具搭載透地雷達的設備及 AI 辨識系統已在其轄下的河川局進行使用，並會將所檢測的資料回饋資料庫，以利 AI 辨識系統的精進。
3	外單位的配合，簡報 P.27 公路局會配合執行嗎？或者由巡查結果資料表來分析？重複性經常性損壞路段成因建議進行了解。	簡報 P.27 的圖係本計畫建議公路局應用透地雷達於省道一般道路柔性鋪面養護巡查方式及時機。公路局原本的巡查資料可以應用來盤點轄管區域內的經常性或重複性鋪面損壞的路段，甚至可以將損壞態樣進行分類並將損壞情況分為嚴重、中等、輕微等級別，以利於判斷輕重緩急進行透地雷達檢測，亦可依其分年分期編列預算辦理透地雷達檢測，在有限的預算下做最有效的運用。
4	地下管線辨識有雙曲線圖像可查覺，地下孔洞有什麼特徵？	本計畫報告 P.4-16~P.4-18 的 2 件實際案例都是道路下方有局部的孔洞造成道路鋪面凹陷，其透地雷達訊號圖像會反射出類似 V 或者類似 U 的訊號圖像如圖 4.8 及圖 4.9 所示。
5	報告書有時會以「吾人」來敘述，建議以本所立場來撰寫。	感謝建議，已檢視並修正刪除本計畫全本報告書的「吾人」。

附錄七

期末報告簡報資料



運輸技術研究中心

112年度一科自辦研究計畫 透地雷達應用於省道養護巡查及 AI智慧化辨識可行性之初步探討 期末報告審查會議 112.12.21



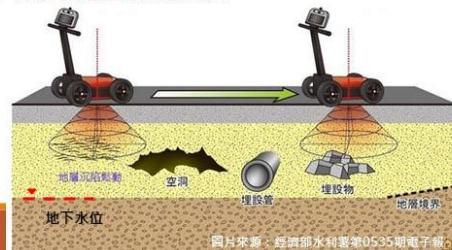
報告人：賴俊呈 助理研究員

大綱

- 01 前言
- 02 文獻回顧
- 03 透地雷達基本原理及相關理論
- 04 透地雷達應用於省道養護巡查之可行性
- 05 AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性
- 06 合作計畫之芻議
- 07 結論與建議

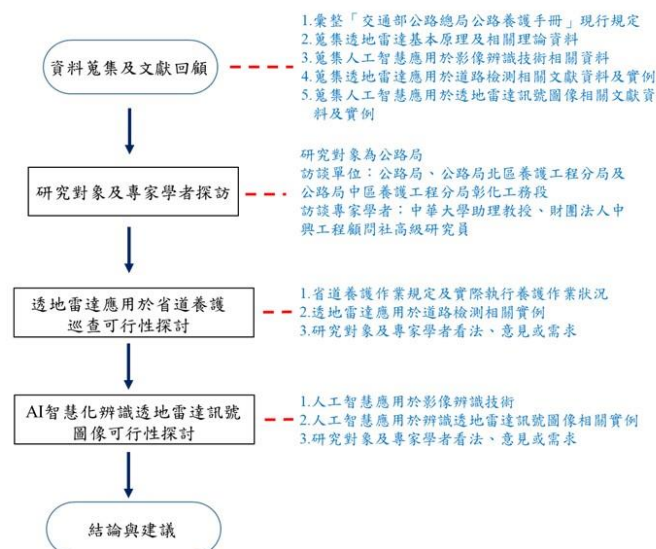
01-前言 研究緣起與目的

- 臺灣道路常因人為或自然因素造成路面沉陷、孔洞甚至是大型天坑等無預警之災害，如能將透地雷達應用於道路養護巡查上，在還未致災前先檢測出道路下潛在的損壞風險因素，並先行進行修補維護處置，以主動預防的方式維護道路品質及確保用路人安全。
- 判讀(釋)透地雷達檢測後所輸出的訊號圖像是需要有專業跟經驗的人員，惟道路管理機關缺乏其專業及經驗人員而對應用透地雷達進行檢測有所卻步，故本計畫將探討使用人工智慧(AI)方式辨識透地雷達訊號圖像的可行性，以有助於透地雷達廣泛應用於道路養護巡查作業上。
- 應用新興科技輔助省道養護業務，提升自主巡查檢測能力。



1

01-前言 研究內容與流程



2

02-文獻回顧 地下埋設物及不明物體調查

- 1991 Kovas 研究顯示管線在透地雷達的影像圖中會造成“倒V”字型的反射圖樣。
- 1993 周治國 研究顯示透地雷達對管線反應靈敏，尤其是金屬管。
- 1999 李德河等人 地下孔洞的位置可由雷達剖面影像雙曲線頂點決定，孔洞尺寸需由其頂點附近異常平緩段決定其橫向寬度。
- 2000 葛其民 研究透地雷達探測柔性鋪面瀝青混凝土面層、底層、基層之厚度及可能之裂縫及孔洞之鑑別、新舊材料厚度之鑑別，證實透地雷達具有鋪面結構描繪及空隙定位能力。
- 2001 紀昭銘 應用透地雷達對土中的異物進行探測，發現孔洞或者管線中是否有水。
- 2004 黃建二 藉由雷達剖面圖中，可得知地層未受擾動或開挖前，其圖像會是連續且平整之反射訊號，地層曾受到擾動或開挖則影像會出現凌亂且不連續之反射訊號。
- 2007 Chen等人 雷達剖面中走時雙曲線或拱形曲線上節點的認定，可用來判釋地下孔洞、裂隙或實心物體。
- 2020 葛文忠等人 三維透地雷達結合空氣耦合天線、多頻道與多重頻率及全球衛星定位等技術，並採車載方式進行快速掃描，一次掃描可獲得道路方向、側向與深度方向(三方向)的切剖面，提供多面向且高精度的探查資料。

3

02-文獻回顧 地下水位深度及含水量變化探測

- 1984 Shih 和 Dolitte 因為水的介電常數 (dielectric constant) 和一般的乾砂、黏土不同，則透地雷達的電磁波碰到地下水面時就會反射回來，故可用來偵測地下水面的位置。
- 1993 廖國彰 研究顯示透地雷達對地下水會反映出一平整界面，可利用此特性定出地下水面的位置。
- 1998 Hunaidi 和 Giamou 應用透地雷達探查埋在地下塑膠配水管是否漏水，漏水時能由漏水管附近造成之孔洞或含滲漏水土壤傳播速度之雷達影像差異來判釋其大概情況。
- 2013 林子堯 利用1GHz透地雷達檢測標準砂與水泥砂漿內單/雙排鋼筋管線定點漏水之實驗，研究顯示由透地雷達電磁波掃描分析之漏水分佈範圍與管線之實際漏水區域相似。
- 2019 鄭哲鴻 利用透地雷達掃描路面結構，分析路面底下滲水流量及滲水路徑資訊，採取截流或引流對症下藥的工法，徹底解決鋪面底下滲水問題，藉以提升道路品質。

4

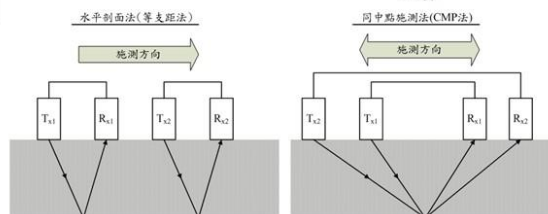
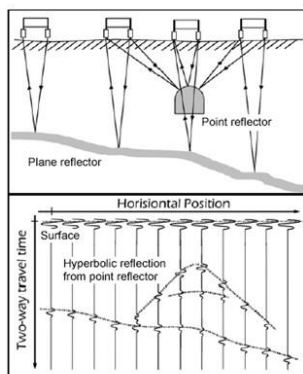
02-文獻回顧 人工智慧辨識透地雷達訊號圖像

- 1995 Molyneaux等人 研究顯示，使用神經網路方法來辨識透地雷達檢測鋼筋混凝土內部鋼筋之結果（訊號圖像）是可行的，可以成功地在一定深度的範圍定位鋼筋，此外，還可以成功地將每根鋼筋的深度進行分類。
- 2006 王文郁 由實驗室之模擬分析結果，類神經網路技術辨識管線訊號之種類僅有9.4%之誤判率，由此可證明是可行的，在現地管線驗證部分，因地下水之流動可能導致雷達波之能量分散，故使得檢測之振幅經濾波後，其數值有可能與實驗室模擬有所差異。
- 2020 Lue等人 提出一種利用深度學習和遷移的自動檢測和定位方法進行辨識並定位混凝土中的鋼筋，得出結論是，當手持透地雷達以步行速度運行時，所提出的方法可以即時自動檢測透地雷達圖像中的鋼筋，並且深度估計精度是可以接受的。
- 2023 Barkataki等人 提出了一種用於估算地下桿（實心）和管（空心）的直徑的人工神經網路(ANN)模型。將時域中捕獲透地雷達數據轉換為頻域，使用快速傅立葉轉換（FFT）進行轉換，然後使用ANN進行特徵提取。所提出的模型的平均絕對百分比誤差為1.89%。實驗結果證實了所提出方法在從透地雷達數據中提取與尺寸相關信息方面的有效性。

5

03-透地雷達基本原理及相關理論 基本原理

透地雷達係以高頻的電磁波（UHF/VHF）反射的原理來探測目標物，其原理是以發射天線（或稱發波器）不斷發射固定中心頻率之電磁波至欲偵測之標的上，利用電磁波遇到不同電磁性質（如相對介電常數、導電度等）的介質界面產生反射訊號再藉由接收天線（或稱收波器）接收，沿著測線上每一軌跡作取樣，按幾何關係排列並將訊號放大、數位化後儲存於主機中，且可即時由操作軟體顯示成圖形資料檔案據以分析受測物體的剖面排列方式或判別標的物之特性。



T_x : 發波器 (Transmitter)
R_x : 收波器 (Receiver)

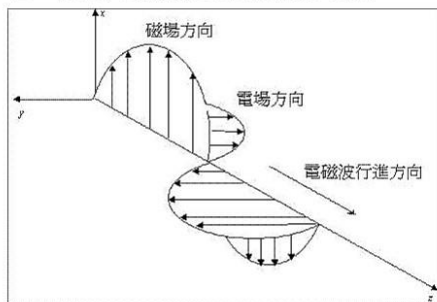
6

03-透地雷達基本原理及相關理論

相關理論

透地雷達的基礎來自於**電磁理論**；而電磁理論基礎導源於**馬克斯威爾方程式**。

電磁波是**電磁場**的一種傳播型態，這種傳播以**光速**在空間中行進。由於交變場中電場與磁場互相依賴而同時存在，所以電磁波也常被稱為電波。



電磁波傳播之形態

介質的電磁特性

大部分介質之**電性變化較磁性變化大**，故介質中**電性變化**決定透地雷達施測成果。

100MHz 電磁波在各種介質中的電性情形

介質名稱	介電常數	導電度 (S/m)	波速 (m/ns)	衰減係數 (dB/m)
空氣	1	0	0.3	0
純水	81	0.5	0.033	0.1
海水	81	30000	0.01	1000
乾雪	1.4	0.001~0.01	0.25	-
永凍土	4~8	0.01~0.01	0.12	-
花崗岩	4~6	0.01~1	0.13	0.01
濕玄武岩	8	10	0.11	-
乾石灰岩	4~8	0.5~2	0.12	0.04
濕石灰岩	8	25	0.11	-
頁岩	5~15	1~100	0.09	1~100
濕砂岩	6	40	0.12	-
乾鹽	5~6	0.01~1	0.13	0.01
乾砂	3~5	0.01	0.15	0.01
濕和濕砂	20~30	0.1~1	0.06	0.03
黏土	5~40	2~1000	0.06	1~300
沈泥粉土	5~30	1~100	0.07	1~100
砂質乾土	2.6	0.14	0.19	-
砂質濕土	25	6.9	0.06	-
壤質乾土	2.5	0.11	0.19	-
壤質濕土	19	21	0.07	-
黏質乾土	2.4	0.27	0.19	-
黏質濕土	15	50	0.08	-
混凝土	6~11	-	0.10	-
瀝青	3~6	-	0.12	-
PVC	3.3	0.0013	-	0.16

(改自Ulriksen, 1982; Davis and Annan, 1989)

7

03-透地雷達基本原理及相關理論

儀器參數之設定

在透地雷達施測時之參數設定包含了以下幾種參數之設定，**天線頻率設定**、**搭配天線施測所需之測距輪**、**取樣間距**、**疊加次數**、**取樣頻率**、**時間視窗**設定等。

- ✓ **天線頻率 (antenna frequency)** 與穿透深度關係，針對不同使用目的 (探測深度或解析度) 及檢測環境限制，採用中心頻率不同之電磁波天線，而土木檢測較常見之天線，其中心頻率範圍為25~1000MHz，檢測解析度隨頻率增加而漸佳，如輸出功率相同，探測深度則隨頻率增加而減少

天線頻率	檢測深度(m)
25 MHz	5~30
50 MHz	5~20
100 MHz	2~15
250 MHz	1~10
500 MHz	1~5
800 MHz	1
1 GHz	0.5

8

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

藉由交通部公路總局公路養護手冊瞭解現行省道養護巡查及養護措施作業等相關規定，以利探討透地雷達在什麼情況、什麼時機可以介入輔助養護巡查。

以國內相關案例、實績來探討透地雷達如何應用於道路檢測並借鏡於本計畫。

透過訪談對研究對象公路局以瞭解省道養護巡查及養護措施等實際執行狀況，同時瞭解公路局對於透地雷達應用於省道養護巡查的想法、意見及需求等，除外，也訪談學者專家，其以不同的角度、思維給予專業上的想法及意見，這些想法、意見及需求為本計畫探討的相關依據。

養護巡查規定



案例、實績



訪談需求意見



如何應用
及可行性
探討

9

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

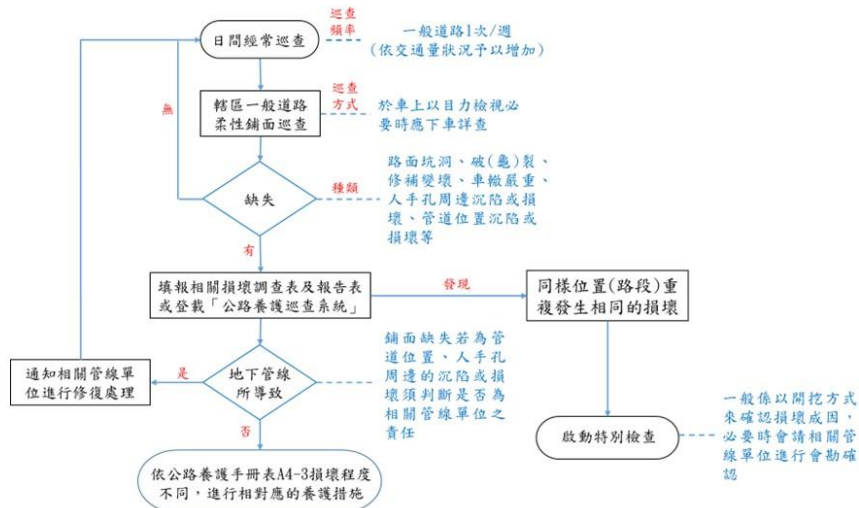
省道養護之作業規定

- 公路養護手冊係依據「公路修建養護管理規則」第34條規定及交通部頒布「公路養護規範」，針對公路局所轄養之省道公路所制定，其適用於公路局所轄養省道公路之養護作業。
- 省道養護巡查係對省道路基、邊坡、鋪面、橋梁、隧道、排水設施、交通工程設施、交通控制設施、路權維護及路容景觀等進行巡視與查看，隨時瞭解省道狀況，以確保用路人行車之安全。
- 省道主要分為一般道路及快速道路，其道路的鋪面依使用材料可分為剛性鋪面及柔性鋪面；剛性鋪面係為水泥混凝土造的鋪面，柔性鋪面係為瀝青混凝土造的鋪面，而本計畫係探討透地雷達如何應用在省道一般道路柔性鋪面的養護巡查。
- 本計畫主要依據交通部公路總局公路養護手冊的「第二章 養路巡查」及「第四章 鋪面」的相關規定進行探討。
- 「日間經常巡查」、「特別巡查」係從車上以目力檢視，必要時應下車詳查。公路管理單位也可視需要時實施「特別檢查」，其以目力或輔以簡單器具進行檢查。

10

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

省道養護之作業規定 養護巡查及養護措施實際執行流程示意圖



11

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

案例、實績



透地雷達能以**非破壞的方式**檢測道路下的情形，探查出是否有潛在損壞風險因素，孔洞、路基下陷、回填料回填不實等這些道路下的潛在損壞風險因素會對於道路鋪面造成損壞情形，尤其是**孔洞**，當孔洞於道路下方持續擴大直到上方路面結構不足以支撐荷重時，就會造成道路無預警地突然塌陷破壞就是俗稱的「**天坑**」。

臺灣道路因人為或自然等因素造成道路塌陷破壞時有所聞，今年在竹北及臺北市信義區有因建築工地施工不慎造成道路塌陷，在臺北市大同區也有因地下污水管線破損造成道路塌陷，道路塌陷後相關單位應應用透地雷達進行檢測調查原因外，也同時確認是否還有其他孔洞預先進行處理，以防再發生道路塌陷，造成**二次傷害**。



竹北工地旁道路坍塌後施作透地雷達檢測
(圖片取自中國時報/羅凌攝)

12

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

案例、實績

行政院公共工程委員會（簡稱：工程會）於108年3月因應107年南部連續降雨發生大量坑洞及道路塌陷事件召開「107年8月下旬造成臺南及高雄地區道路坑洞之成因與因應對策」研商會議，在該會議的紀錄資料中說明**道路塌陷**發生機制如下：

- (1)路基掏空係**地下水流**挾帶基底層土砂流失，逐漸形成孔洞。
- (2)**地下管線**（雨、污水或自來水）老舊破損或施工不良（接頭開裂、錯位及鬆脫），漏水形成地下水路而土砂流失。
- (3)**大型箱涵**老舊或施工不良導致頂版及側牆產生裂縫，容易造成大規模之路基掏空及塌陷。



13

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

案例、實績

該會議提出解決對策其中建議下水道及管線在營運中既有設施之維護管理應「**針對潛在坍塌區域輔以透地雷達探測**」，另外在會議記錄，臺南市政府針對所轄道路坑洞發生原因、改善狀況及後續因應作為中，有說明洽日本Geo Search株式會社以**車載式透地雷達**協助檢測道路下孔洞（9路段道路長度約8.3 km），共檢測42處可能孔洞，並已就較嚴重部分進行挖掘填補灌漿改善。



圖片取自自由時報電子新聞

14

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

案例、實績

高雄市政府在110年試辦、111~112年正式執行，以**透地雷達**檢測探查因**下水道管線銜接處**漏水而產生的孔洞，並對於探測到的孔洞進行處理等級的分類，對於有立即致災的孔洞會馬上進行填補相關的處置作業，尚無致災性的孔洞會進行列管定期檢測，以主動預防的方式避免因下水道管線漏水導致的孔洞造成道路塌陷。



圖片取自高雄市智慧城市推動平台網站

15

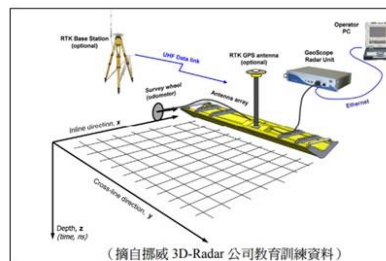
04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

案例、實績

財團法人中興工程顧問社（簡稱：中興顧問社）應用**三維透地雷達**於道路地下管線定位與**路面凹陷**檢測，三維透地雷達天線採用空氣耦合性（Air Coupled）設計，天線不需要接觸路面，可用**車載方式**進行快速掃描；此外，天線含有20組頻道，間距7.5公分，側向涵蓋範圍約150公分，2次施測約略涵蓋一個車道寬度，一次探查資料為立體方塊，資料精度為公分等級，可用於了解地下結構的三維分布。除應用於地下管線探查，亦廣泛用於檢測**道路下方孔洞**及高速公路鋪面品質、機場跑道完整性等。



圖片取自中興工程技術第148期,中興工程顧問社



16

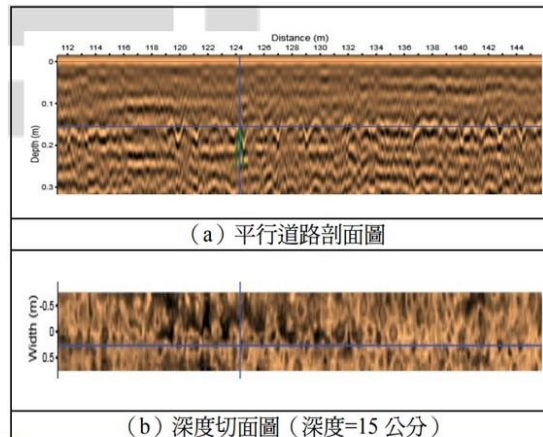
04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

案例、實績

案例-鄉間道路路面龜裂凹陷

檢測路段位於南部鄉間道路，該路段為雙向單車道，兩側路面有平行道路方向凹陷，推估應為管線埋設回填不實造成，內側路面亦有不規則凹陷龜裂現象。

右圖係沿車道內側進行透地雷達檢測掃描的影像，其中 (a) 平行道路剖面圖中，並未出現 CLSM 界面反射波，惟深度約15公分以下，出現不規則分布的繞射訊號，此深度約在AC層下方。(b) 深度切面圖顯示不規則分布的塊狀物 (顆粒狀)

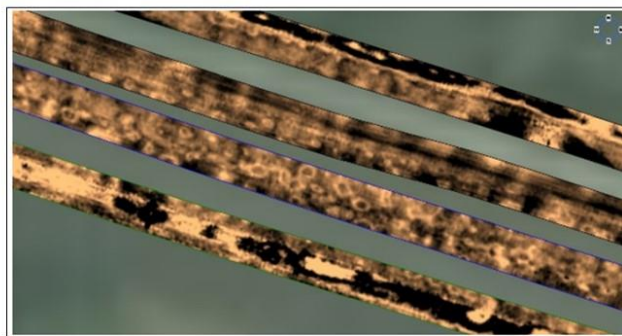


17

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

案例、實績

下圖為4次掃描的深度切面影像(深度15公分)，其中道路兩側線形管線影像明顯，而道路內側則有分布散亂的塊狀物體影像，尺寸、形狀不一。推估塊狀物體可能是用於路基回填的塊石、混凝土塊或是建築廢棄材料，因此使路基承載力不均勻，導致路面不規則龜裂凹陷。



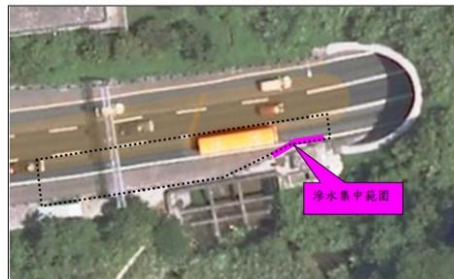
18

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

案例、實績

案例-國道3號景美隧道北上24K+500外車道一處，該處經常在車道AC車輪跡處凹陷往兩旁側擠，因外邊緣AC結構較鬆散，常帶有黃色細泥含骨材溢出擴散，依現況研判為地下滲水引起路基結構軟化，無法負荷重車輾壓，因無法得知地下水文之前道路主管機關只有不斷補丁。

中華大學土木系檢測中心應用透地雷達進行檢測，掃描道路下60公分內水量分布多寡及水文路徑，得知滲水來自隧道內，沿剛性板塊底部往隧道外滲流。改善工法係以截水為先、導流為後及最短路徑改善工法，自103年11月解決滲水問題後至106年8月週期性整修路面，該處AC結構未再損壞。



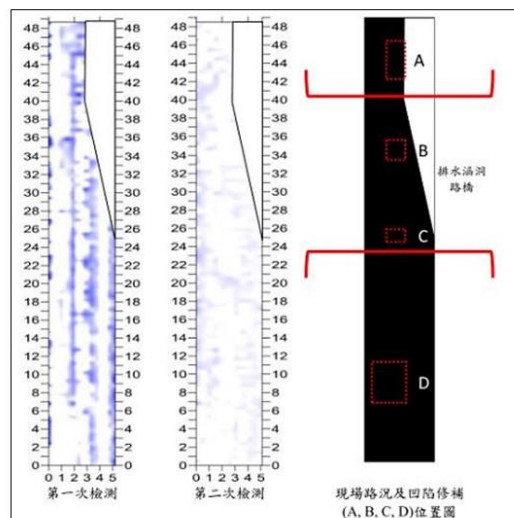
黑色虛線為檢測區、粉紅色粗線為預測滲水集中位置

19

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

案例、實績

中華大學土木系檢測中心分別103年9月（第一次檢測，尚未進行改善工程）、12月（第二次檢測，已完成改善工程）檢測AC路面下40公分位置處滲漏分佈圖，比對改善前後滲漏的情形（白色無水分、淺藍色微濕、深藍色為含有水分），A、B修補處第一次檢測含水量結果為藍色分佈，在A處進行施工改善後，A、B、C、D修補處第二次檢測含水量結果已下降至淺藍色及白色分佈，則A、B、C、D修補處有明顯改善。



20

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

訪談需求及意見

- 本計畫進行研究對象訪談，除了訪談公路局外，也對公路局轄下**養護工程分局**及第一線執行養護作業的**工務段**進行訪談，主要由**政策面**（公路局的觀點）、**管理面**（養護工程分局的觀點）及**執行面**（工務段的觀點）瞭解研究對象對於透地雷達應用在省道一般道路柔性鋪面養護巡查的想法、意見及需求。
- 省道一般道路柔性鋪面的巡視、檢查主要係由**日間經常巡查**來執行，其巡查方式係以目力檢視，以目力方式僅能檢視道路鋪面表面的狀況並無法瞭解道路下是否有潛在損壞風險因素，以**主動預防**的概念、方式，本計畫擬以**車載式透地雷達**應用於日間經常巡查輔助檢測探查道路下潛在損壞風險因素，對於**有致災性的孔洞**先行處置，以免發生**道路塌陷**。
- 惟經由訪談瞭解，公路局應用透地雷達主要係進行**隧道、橋梁**的檢測，較少應用在道路上。以目前公路局而言，在**日間經常巡查**要應用透地雷達輔助檢測探查省道一般道路柔性鋪面下的狀況，以主動預防道路下潛在損壞風險因素是較為**不易執行且尚無迫切的需求**。

21

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

訪談需求及意見

依訪談紀錄彙整原因如下：

- ◆ **法規及機關權責**：道路下出現孔洞進而發生道路塌陷，大部分都是因為**地下管線、箱涵**等滲漏水掏刷路基所造成，依據**公路法第30-1條第7項**「**管線機構於工程完工後應定期巡檢，維護安全。**」，故管線單位需定期巡檢以維道路安全，管線單位有一定的責任。
- ◆ **現行養護巡查制度**：依據公路養護手冊，日間經常巡查由工程司（巡查人員）從車上以目力檢視公路各種狀況，公路管理單位有需要時，可實施特別檢查。日間經常巡查是無需使用儀器設備進行巡查，要到特別檢查（巡查）才有視情形酌加應用其他檢驗量測儀器。
- ◆ **經費及效益**：透地雷達應用在橋梁、隧道是有特別專用的經費，但是沒有相應經費可以把透地雷達應用在道路上的檢測。又依據公路總局第二區養護工程處（組改後為中區養護工程分局）112年公路維修工程委外參考單價，「**道路巡查及坑洞緊急修補費**」1公里單價為新臺幣（以下同幣制）**70~120元**（請各段依路況辦理調整），透地雷達檢測價格**1公里約為10萬元（1公尺約為100元）**，相較下所需費用及效益來說，不會將透地雷達應用於日間經常巡查。

22

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

訪談需求及意見

- ✓ 需求-能有效的檢測探查到經常性或重複性柔性鋪面損壞路段的成因



23

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

訪談需求及意見

- ✓ 專家學者意見

建議可以先針對有問題的路段進行透地雷達的檢測，在後續巡查這些有問題的路段時，如有發現經常性或重複性的損壞沉陷(以鋪面沉陷損壞為例)，就可以再進行一次透地雷達的檢測，如果檢測後的一週又發生沉陷，就再進行一次地雷達的檢測，這是為了區分這個沉陷損壞是車載的沉陷或是壓密沉陷還是路面下土石被掏空的沉陷，係依據多時期的檢測後的訊號圖像來進行判斷，若是道路沉陷後才來做透地雷達的檢測，而沒有沉陷前的檢測資料，就只能判斷當下沉陷的情形，無法知道這個沉陷損壞更多的資訊，來做較嚴謹的判斷。



24

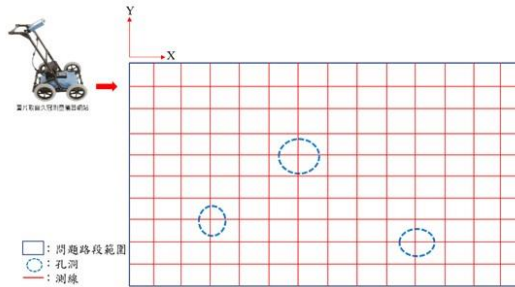
04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

如何應用及可行性探討

依據養護巡查規定及公路局的意見、需求，本計畫建議可以將**透地雷達**應用在「**特別檢查**」，**取代現場開挖方式**來檢測經常性或重複性鋪面損壞的成因，因國內應用透地雷達檢測道路相關案例、實績都有一定的成效，故具有可行性。

應用透地雷達檢測經常性或重複性鋪面損壞相較以現場開挖方式的優點如下：

- ◆ 以面的方式進行檢測
- ◆ 以不同深度進行檢測
- ◆ 以非破壞的方式進行檢測，迅速、安全、低風險、節能、低汙染



因此使用地雷達比現場開挖方式**更確實**、**有效**及**迅速**的檢測出柔性鋪面經常性或重複性損壞的成因。

25

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

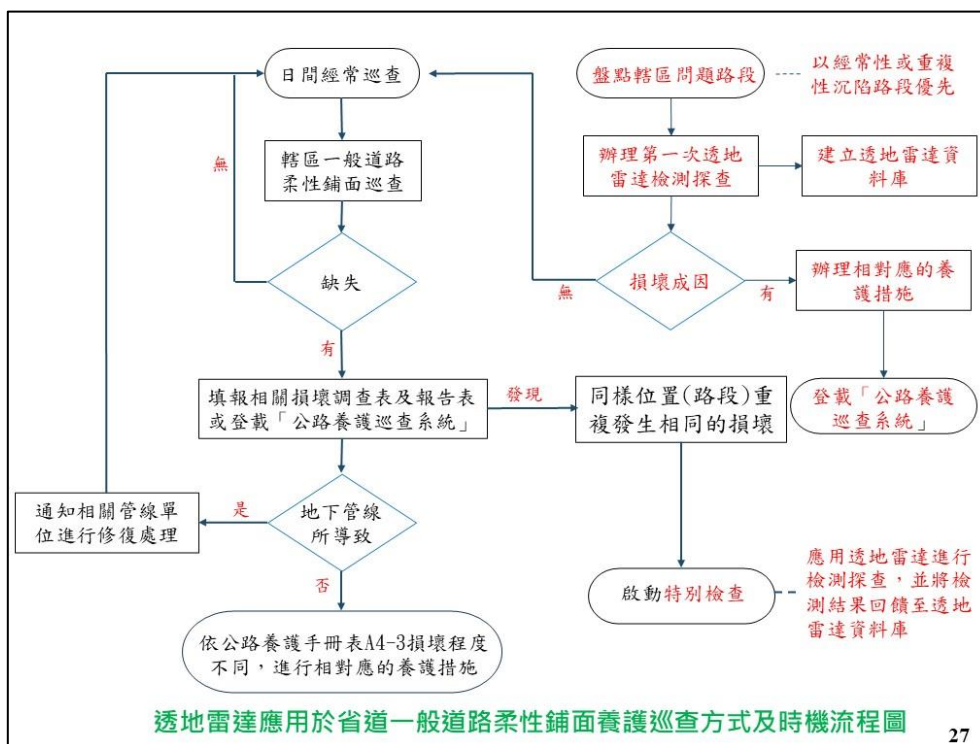
如何應用及可行性探討

參採學者專家意見，本計畫建議公路局先行盤點轄區有哪一些鋪面是經常性或重複性沈陷的路段，先找**鋪面沉陷**的路段是因為道路沉陷主要原因都來自道路下的問題如有地下孔洞、路基鬆軟或地下水等，且又有可能發展成**道路塌陷**之虞，對於民眾有較大危害性。

對這些路段進行第一次的透地雷達檢查，並建立**透地雷達資料庫**，工務段可以依檢測後有找出成因問題的路段進行養護措施，若找出不成因問題者，則繼續觀察，若再次發生沈陷，以**特別檢查**再次進行透地雷達檢測，來**比對前後檢測資料研判沈陷成因**。而在養護巡查及養護措施實際執行流程中係將透地雷達應用在特別檢查的時候，以取代現地開挖方式來探查鋪面經常性或重複性損壞的成因。

此外，在公路管理單位視需要實施「**鋪面（損壞）調查**」，據以作為**公路改善及養護等規劃之參考**時，建議應用透地雷達進行檢測，以瞭解鋪面下的狀況，以**全面性**的考量來規劃公路改善及養護等相關作業。

26



27

04-透地雷達應用於省道養護巡查之可行性

如何應用及可行性探討

就公路局對於有效確實地找出省道一般道路柔性鋪面經常性或重複性損壞的成因的需求而言，應用透地雷達進行「特別檢查」的檢測是可行的且能滿足需求，惟真正要落實應用透地雷達於「特別檢查」則尚有待解決的問題。

問題	建議對策
經費問題	可先從「省道公路、橋梁維修及災害搶修工程」開口契約中增列透地雷達檢測工項，並將轄區有問題路段以分級分期程的方式來處理，在有限的經費情況下，做有效的運用。
缺乏對透地雷達的基本瞭解	利用教育訓練的方式，讓公路局的基層工程司瞭解透地雷達檢測的基本原理、功能以及能夠在省道養護巡查這方面提供什麼樣的協助，同時也可以透過教育訓練來瞭解公路局進一步的需求。
對於透地雷達檢測後的成果有疑慮	利用教育訓練方式，讓公路局的基層工程司能有基本的判釋能力或概念，以增加本職學能，此外本計畫也研究評估使用人工智慧來辨識透地雷達檢測後所輸出之訊號圖像的可行性來協助進行檢核。另外在業界承攬辦理透地雷達檢測的廠商素質良莠不齊以及低價搶標現象的部分，須要制定遴選廠商的方式(發包方式)、檢測規範、合理價格及驗收規定等，以遴選出優良合適的廠商及遏制低價搶標的現象，如此才不會對檢測後的成果產生疑慮、不信任。

28

05-AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性

人工智慧應用於影像辨識技術基本探討

影像辨識技術



國內外應用人工智慧辨識透地雷達訊號圖像的相關案例、實績

案例、實績



對研究對象公路局、專家學者進行訪談以瞭解其對於人工智慧辨識透地雷達訊號圖像的想法、意見及需求

訪談需求意見

可行性探討

29

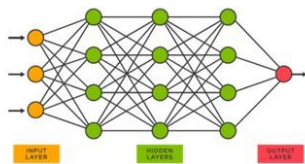
05-AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性

人工智慧應用於影像辨識技術基本探討

人工智慧 (Artificial Intelligence, 簡稱AI), 又稱人工智能, 其名稱的確立可追溯自1956年, 是計算機科學領域的部分範疇, 意指讓機器具備和人類一樣的**思考邏輯與行為模式**。其後「**機器學習**」(Machine Learning) 推進了AI的發展, 近年隨著科技的進步, 電腦運算速度增加, 網路傳輸速度變快, 資料儲存空間變大, 加上「**深度學習**」(Deep Learning) 的突破發展, 更推進AI的爆炸性成長及應用 (如: 語音辨識、文字辨識、影像辨識、機器翻譯、推薦演算法、智慧投顧、信用評分及自動摘要等...)。



AI、機器學習及深度學習關聯
圖片來源: 中興美國電子報第400期



神經網路架構圖

圖片來源: <https://www.tbco.com>

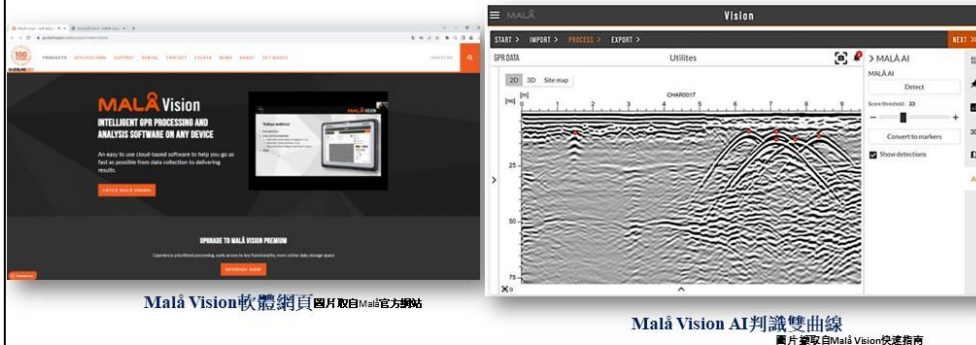
深度學習是以**人工神經網路**為基礎的機器學習子集, 故機械學習方法之一, 而**影像的分析與辨識**, 正是深度學習最擅長的領域, 其中又以**卷積神經網路** (Convolutional Neural Network, CNN) 常被用於處理大型圖像, 可謂處理影像的利器。

30

05-AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性

案例、實績

瑞典地球物理儀器的製造商Malå GeoScience公司有開發線上（雲端）軟體Malå Vision，其可支援AI辨識透地雷達號圖像，該軟體是以訂閱的方式使用，依等級之分有上傳數據的限制，目前該軟體可以讀取Malå、GSSI及ImpulseRader三家廠商透地雷達的數據資料，其AI主要是辨識雙曲線圖像也就是辨識地下管線並且可進行標記。



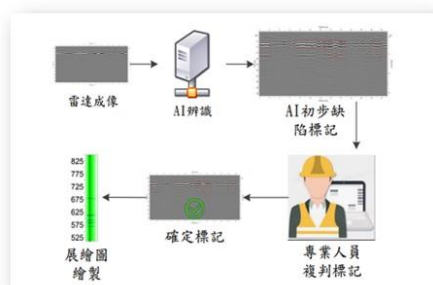
31

05-AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性

案例、實績

經濟部水利署委託國家中山科學研究院進行為期3年(109~111年)的「無人載具搭載透地雷達執行堤坡結構非破壞檢測研究計畫」，其中的工作項目係「結合 AI 技術完成透地雷達資料即時初步判讀系統開發」：為縮短透地雷達資料即時初步判讀時間，透過AI技術可先找出可疑圖像，再由專業人員進行複判，可有效減輕專業人員判釋大量圖像資料的負荷。

開發透地雷達資料即時初步判釋系統係透過透地雷達影像資料庫建立、AI 深度學習模型建構與先期影像特徵學習訓練，逐步提升輔助判讀之準確度。搭配單機離線程式開發，可於現地完成影像資料收集後當場輸入並即時辨識出 30 公分(含)以上孔洞，作為緊急作業時之參考。



AI初判人員複判示意圖

圖片來自無人載具搭載透地雷達執行堤坡結構非破壞檢測研究計畫(93)

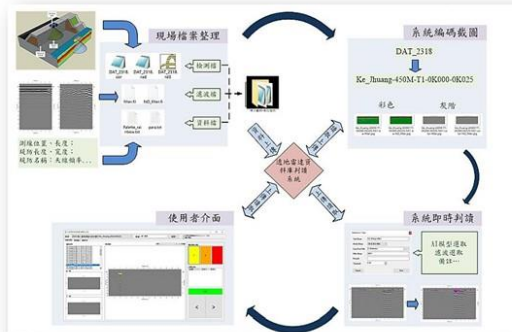
32

05-AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性

案例、實績

未來發展芻議

目前透地雷達影像資料即時初步判讀已納入**初步 AI 模型協助**，針對**30 公分(含)以上之孔洞能於現地完成判斷**，做為是否進行緊急修整之參考。但 AI 模型仍須持續提供較多影像資料以逐步提升其判讀之精準度，未來可增加更多資料或納入深度學習(Deep learning)等演算法精進透地雷達影像資料即時初步判讀成果。



透地雷達 AI 輔助系統架構

圖片來自無人軍用搭載遙測地面達執行埋設結構非破壞檢測研究計畫總結報告書

05-AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性

案例、實績

上述2個案例都是**實際應用**的案例，一是由透地雷達製造商所開發的商業線上軟體，另一是政府機關委託研究機構依其需求量身訂做開發的AI辨識輔助系統可視為「專案研發」。這2個案例雖然都是應用AI協助辨識透地雷達訊號圖像，不過因為兩者（商業軟體、專案研發）在**經濟性、便利性、限制性及實用性**等區別，故對於使用者而言就有不同的選擇考量。

區別	說明
經濟性	使用商業軟體，以Malá Vision線上軟體為例，其採訂閱制，以100GB上傳空間一年的訂閱金額為美金828元（折合新臺幣約為28,980元）。使用專案研發方式係以新臺幣百萬元為單位的經費預算進行開發，開發完成後尚需經費預算進行維護管理或擴充等作業，相較下使用商業軟體較為經濟。
便利性	商業軟體係已開發至一定的成熟度才上市提供使用，使用者只要支付相關費用後即可使用，而專案研發係要從頭開始；瞭解使用者需求、透地雷達原始資料（數據）前處理、建立資料庫、AI深度學習方法與模型擬建及建構、進行AI訓練及測試等，其所要花費的時間是以年為單位計算，除此之外，專案研發還需花費後續系統維護管理的時間、精神及金錢等，而使用商業軟體，其系統維護管理則由軟體開發商負責，相較下使用商業軟體較為便利。

05-AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性

案例、實績

區別	說明
限制性	使用商業軟體會有讀取透地雷達廠牌、辨識訊號圖像、調整參數值、後續擴充等限制，也就是會限縮在該軟體開發商給的條件下使用，換句話說，使用者需要去找到符合所需的商業軟體，但是目前市面上的商業軟體並不多，所以選擇性會比較少。使用專案研發方式係可以依使用者需求進行研發，就不會有上述的限制條件，相較下使用專案研發限制較少。
實用性	商業軟體本身受限於商業軟體廠商給定的條件在實用性一定會比客制化的專案研發來的差，再者訓練AI的資料會影響到辨識的準確率，商業軟體採用的訓練資料是否符合使用者需求是待商榷的問題，而專案研發會依據使用者需求建立訓練AI的資料庫，相較下使用專案研發較為實用。

採用商業軟體雖較經濟及便利，不過現在市面上的商業軟體不多選擇性少且有較多的限制，而採用專案研發的方式雖可依使用者需求進行客製化研發有較高的實用性，但需要花費較多的經費及時間進行研發，也需有後續維護管理或擴充的相關經費預算。

目前市面上的AI辨識透地雷達訊號圖像的商業軟體大多以辨識地下管線為主，若是應用AI來辨識地下孔洞等道路下潛在損壞風險因素就需採用專案研發方式(如同經濟部水利署「無人載具搭載透地雷達執行堤坡結構非破壞檢測研究計畫」)。

35

05-AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性

訪談需求、意見及可行性評估

「商業軟體」、「專案研發」是目前使用者的選項，這兩個選項各有優缺點，使用者可依自身需求進行選擇，但無論是商業軟體或是專案研發，於開發執行過程一般可分為三個步驟：

- ◆ 透地雷達資料（數據）的前處理（包含資料庫的建立）
- ◆ AI深度學習方法與模型研擬、建構與套用
- ◆ 輸出結果的整合與後處理

應用AI辨識透地雷達訊號影像雖然可行，但能否開發成功並實際落地應用的關鍵重點係為上述的前2個步驟，尤其是採用專案研發的方式，勢必要能夠突破這2個關鍵步驟，才能有成果的產出。

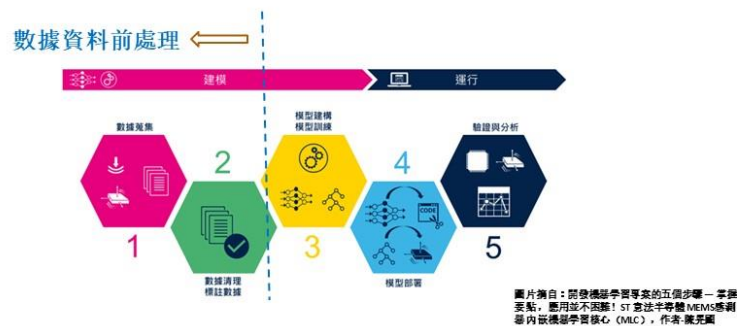
36

05-AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性

訪談需求、意見及可行性評估

➤ 透地雷達資料（數據）的前處理（包含資料庫的建立）

在AI訓練前必須對檔案資料做系統分類整理才能導入訓練，因此會先對透地雷達檔案資料進行解讀、標準化編碼、標註及截圖等再匯入資料庫，這就是透地雷達資料（數據）的前處理作業，同時也包含資料庫的建立。



37

05-AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性

訪談需求、意見及可行性評估

➤ 透地雷達資料（數據）的前處理（包含資料庫的建立）

應用AI辨識透地雷達訊號影像的癥結點在於AI學習過程有沒有**足夠**和**正確**的資料進行學習。



依據學者專家意見，研提以下方式來取得透地雷達檔案資料：

- 1.嘗試請公家機關、學術研究機構、業界檢測公司及工程顧問公司等提供所擁有的透地雷達檢測相關檔案資料-資料適用性問題-篩選
- 2.自行於現場施作檢測-透地雷達廠牌的選擇（規定）
- 3.自行於試驗室模擬現場(或需求)環境後施作檢測-透地雷達廠牌的選擇（規定）

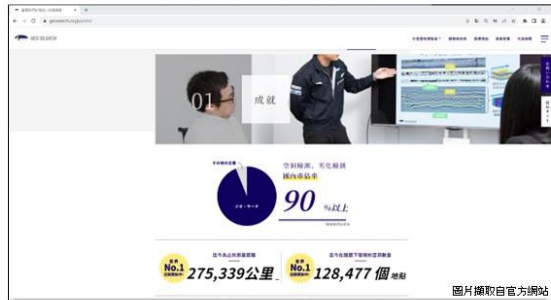
38

05-AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性

訪談需求、意見及可行性評估

➤ 透地雷達資料（數據）的前處理（包含資料庫的建立）

GEO SEARCH株式會社透地雷達檢測之成就



目前在臺灣並沒有像GEO SEARCH株式會社這樣的公司或是有公家機關、學術研究單位（機構）能夠收集如此龐大的透地雷達數據資料並保存管理，因此，受訪專家學者認為如果要發展AI辨識透地雷達訊號影像，就必須先建立**臺灣本土的數據資料庫**，起步雖然很難，但是對於未來道路巡查、養護管理等是有**長遠、永續的經濟價值**。

39

05-AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性

訪談需求、意見及可行性評估

➤ AI深度學習方法與模型研擬、建構與套用

受訪業界專家表示：「依據本公司在108年的研究，我們已建立初步AI辨識模型，在經過許多廣泛使用的**評估標準驗證**之後，證明其辨識能力，能在相對初步的**設定**下，達到一定水平，且具備一定泛化性，足以說明其存在繼續發展的可行性，以及成為業界正式應用的發展潛力。」

AI深度學習方法與模型研擬、建構與套用是**一連串的選擇**並進行**試誤法（trial and error）**，對演算法、模型架構、誤差函數及相關參數等進行**選擇、驗證、設定及校調**，這都需要耗費相當的人力、時間成本，因此，為開發成功的關鍵、技術的訣竅，也是開發困難之處。



圖片摘自：開發機器學習專家的五個步驟——掌握要點，應用並不困難！ST 意法半導體 MEMS 感測器內嵌機器學習核心（MLC），作者：陳亮國

40

05-AI智慧化辨識透地雷達訊號圖像之可行性

小結

受訪的公路局、學者專家對於應用AI辨識透地雷達訊號圖像均正面表示贊同，專家學者也認為具有可行性，但是發展AI前需要建立相關的數據資料庫，尤其是**本土化的數據資料**，如何收集到**足夠且正確**的數據資料會是個關鍵課題，所以在「透地雷達應用於省道一般道路柔性鋪面養護巡查方式及時機」流程圖（P29）中會有建立「**透地雷達檢測資料庫**」的項目，公路局若能在經常性或重複性鋪面損壞的路段採用透地雷達進行特別檢查並建立相關檢測資料庫，除了可以比對分析前後資料找出經常性或重複性鋪面損壞的成因外，也能作為往後開發AI智慧化辨識的訓練資料，並在**使用透地雷達檢測-建立檢測資料庫-開發AI辨識系統-精進AI辨識系統**之間能形成「**善循環**」，俾利於AI辨識之良好發展。



41

06-合作計畫之芻議 合作計畫說明

合作計畫名稱為「**透地雷達落實應用於省道養護巡查之研究**」，該計畫主要執行3項主軸工作：

- (1) 制定透地雷達應用於省道養護巡查檢測的**發包方式、檢測規範、合理價格及驗收規定**等範本
 - A. 蒐集國內/外應用透地雷達檢測道路相關的發包案件。
 - B. 分析國內/外應用透地雷達檢測道路相關的發包案件之優缺點，萃取並借鏡合宜可用的資料。
 - C. 調查確認公路局省道養護巡查時道路常見損壞類型，並瞭解公路局檢測標的需求，以利制定透地雷達檢測規範及驗收規定。。
 - D. 辦理透地雷達訪價作業。
- (2) 擬定透地雷達**教育訓練**相關內容並辦理教育訓練
 - A. 擬定透地雷達教育訓練教材。
 - B. 規劃教育訓練期程、場次、方式、地點...等並執行。
- (3) 規劃建立**透地雷達數據資料庫**
 - A. 研擬收集、篩選透地雷達數據資料的方式，以確保能收集到足夠且正確的數據資料。
 - B. 初步規劃透地雷達數據資料庫的建立，比如：如何儲存、管理維護、擴充等。

42

07-結論與建議 結論

1. 經由訪談研究對象公路局瞭解，對於公路局而言，因礙於法規及機關權責、現行養護巡查制度、經費及效益等原因，要在「日間經常巡查」應用透地雷達輔助檢測省道一般道路柔性鋪面下潛在損壞風險因素是較為不易執行且目前尚無迫切的需求，有需求的則是如何確實、有效及迅速的檢測出柔性鋪面經常性或重複性損壞的成因。
2. 公路局於執行省道一般道路柔性鋪面養護巡查時，會發現有些路段的鋪面有經常性或重複性損壞的情形，在反覆修補無效後，公路局一般都會使用現場開挖的方式辦理特別檢查，檢測其損壞的成因，但往往無法檢測出損壞之成因。應用透地雷達檢測則不同於現場開挖是以點、固定深度的方式檢測，而是以面及不同深度方式進行檢視，又透地雷達是非破壞的方式進行檢測相較現場開挖是以破壞方式來說，較為迅速、安全、低風險、節能減碳及低汙染，因此，應用透地雷達進行特別檢查能更確實、有效及迅速的檢測出柔性鋪面經常性或重複性鋪面損壞的成因。
3. 就公路局對於有效確實地找出省道一般道路柔性鋪面經常性或重複性損壞的成因的需求而言，應用透地雷達進行「特別檢查」的檢測是可行的且能滿足需求，惟真正要落實應用透地雷達於特別檢查則尚有經費、基層工程司缺乏對透地雷達的基本瞭解及對於透地雷達檢測後的成果有疑慮等問題待解決，經費問題可先從「省道公路、橋梁維修及災害搶修工程」開口契約中增列透地雷達檢測工項，並將轄區有問題路段以分級分期程的方式來處理，於有限的經費情況下，做有效的運用。而基層工程司缺乏對透地雷達的基本瞭解及對於透地雷達檢測後的成果有疑慮可以透過定期辦理「教育訓練」，以增加基層工程司的本職學能，基層工程司有相應的知識及經驗就能制定出合宜的發包方式、檢測規範、合理價格及驗收規定等來遴選出合適廠商，獲得到信任、有用的檢測成果。

43

07-結論與建議 結論

4. 關於應用AI辨識透地雷達訊號圖像，依據相關研究文獻及實際案例顯示係較常採用捲積神經網路模型架構進行開發，而目前市面上已有AI辨識相關的商業軟體，國內也有政府機關依其業務需求委外研發相關的AI辨識系統，因此，使用者可以選擇採用商用軟體或是專案研發這2種方式，不過這2種方式在經濟性、便利性、限制性及實用性上有所區別。因目前市面上商業軟體大多僅能辨識地下管線，若要應用 AI 來辨識地下孔洞等道路下潛在損壞風險因素就需採用客製化的專案研發方式。
5. 受訪的研究對象公路局、學者專家對於應用 AI 辨識透地雷達訊號圖像均正面表示贊同，專家學者也認為具有可行性，但是發展AI 辨識前需要建立相關的數據資料庫，尤其是本土化的數據資料，如何收集到足夠且正確的數據資料會是個關鍵課題，因此，需要在使用透地雷達檢測-建立資料庫-開發AI辨識系統-精進AI辨識系統之間形成「善循環」，俾利AI辨識透地雷達訊號圖像的發展。
6. 目前應用AI 辨識透地雷達訊號圖像是以輔助為主尚未能取代人工判釋，但透過AI先行即時初步辨識檢測成果後，再由專業人員進行複判，可以提升人工判釋的效率，減輕專業人員的負擔，並在有時效性的搶救災緊急情況下，發揮即時初步快篩辨識的作用。因此，AI辨識是輔助而非取代人工辨識的現在而言，是需要先透過「教育訓練」來增加、提升公路局基層工程司的本職學能。

44

07-結論與建議 建議

1. 為協助使透地雷達能落實應用於公路局省道一般道路鋪面養護巡查的特別檢查，建議可透過**合作計畫**訂定透地雷達檢測發包方式、檢測規範、合理預算價格及驗收規定等範本來協助遴選合適廠商；擬定透地雷達教育訓練相關內容，甚至可直接辦理透地雷達教育訓練來增加、提升公路局基層工程司的本職學能；規劃建立透地雷達數據資料庫，俾利於後續應用AI辨識之發展。
2. 吾人為了使檢測後的透地雷達訊號更為清晰易判釋或是想由訊號中得到更多的資訊比如：管線直徑、孔洞大小等等，則會對檢測後的透地雷達訊號進行「**後處理**」的作業程序。依據研究文獻表示在AI辨識的問題上，有時比起對AI模型及進行相關參數調整，對訊號進行後處理，反而更能提升準確率，因此，對於訊號進行後處理與AI辨識之間的關係，在後續的研究是值得探討的問題及方向。

45

