

以透地雷達量測河川斷面

Ground Penetrating Radar for Measuring Stream Cross Section

國立台北科技大學
土木系
副教授

陳彥璋*

Yen-Chang Chen

中國文化大學
土地資源學系
副教授

葉惠中

Hui-Chung Yeh

國立台北科技大學
土木系
博士後研究

高蘇白

Su-Pai Kao

國立台北科技大學
土木系
碩士班研究生

陳彥霖

Yen-Lin Chen

摘 要

河川流量的資料為水工構造物設計、水資源規劃及水資源管理等之根本，因此長期且確實掌握河川流量實為國人研究之首要目標。河川流量量測的關鍵因子之一為河川通水斷面積之估算。此外河川通水斷面積亦為一重要水文因子，不論是流量推估、各項水利工程、各類型模式演算，其都為必要參數。長久以來河川斷面量測必須耗費大量人力、金錢、時間，洪水過程河川底床變動劇烈，流況不佳且量測危險，更加深通水斷面積量測的困難度。憑藉透地雷達經濟、快速有效率、且非接觸水體等優點，本研究利用透地雷達量測河川斷面，以期達到節省經費並增加施測頻率之效果。本研究中以北勢河流域河川為主，建立透地雷達量測流程，已期達到快速量測之效果。經由各種處理功能率定河川底床波形以增加資料判釋準確性，與傳統鉛錘法比較後結果顯示河川斷面積差異不大，證實此法能夠運用於實際河川通水斷面量測。

關鍵詞：通水斷面積，流量，透地雷達，河川。

ABSTRACT

Discharge is the basic data used in hydraulic structure design, water resources planning, and water management. Therefore discharge measurement become more and more important for the water management. Good water management is founded on the reliability of discharge measurement depends on the initial field measurement. Stream cross section is the key data to accurately estimate discharge. By the way, hydraulic and hydrological models always need stream cross section data. The conventional method

*通訊作者，國立台北科技大學土木系副教授，10608 台北市忠孝東路三段 1 號，yenchen@ntut.edu.tw

used to measure stream cross section is costly, time-consuming, and dangerous. It is necessary to develop a new method to measure stream cross section. Field experiments were conducted to test the ability of ground penetrating radar (GPR) to measure stream cross section without placing instruments in the stream. Experiments were conducted in three gaging stations in the Beishih River. The results show that GPR is a viable technology for mapping stream cross section geometry and computing discharge.

Keywords: Discharge, Geometry, Ground penetrating radar, River, Stream cross section.

一、前言

台灣四面環海雨量豐沛水資源豐富，唯地勢陡峭河川短且流急，冬、夏水量豐枯懸殊。因此形成台灣有如此豐富之水利資源，但實際運用不易之特殊環境。近年來由於媒體、網際網路蓬勃發展，加上水土防災、生態保育、環保意識抬頭，社會大眾對水土資源有效利用及各項水利設施之建成關注程度日益提高。而河川、湖泊為水土資源與水利設施之根本，因此長期且確實掌握河川動態實為國人研究之首要目標。河川斷面資訊是應用在各類水利研究、工程、監測當中一項重要參數，舉凡流量、水質、河道沖淤變化、橋墩淘刷、各類模式運算及各項水利工程，河川斷面資訊皆為不可缺少之必要參數。通常於防汛期過後進行斷面量測，量測週期為一年一度，而依目前斷面量測方式危險性高，且需耗費大量人力、金錢與時間，而所獲得之資料時效性有限。因此找尋更經濟、安全、高效率之量測方式，必然為時勢所趨。

透地雷達(Ground Penetrating Radar, GPR)已大量且成功運用於大地工程及地下水，於地下埋設物調查、地下水位深度、含水量變化偵測、土壤或土層構造調查、壩體淘空偵測等檢測項目中皆有相當之成就(Delaney and Arcone, 1992; Parry and Davis, 1996; Chamberlain *et al.*, 2000; Olimlio, 2000; Costa *et al.*, 2006)。90年代初期美國地質調查所(USGS)也首度將透地雷達應用於斷面量測中，並有相當之成效(Kurt *et al.*, 1996)。傳統方法通常以測深錘、測深桿及其他接觸性儀器量測河

川通水斷面，其耗時、費力且花費不貲；此外傳統方法亦受到許多條件的限制，如於水流快速時，量測不易且準確性較不高。相較於以傳統方法量測通水斷面，透地雷達具有經濟、穩定、施測效率高、施測時不需接觸水體等優點，且所獲得資料為連續剖面等特性。

本研究嘗試建立一套以 GPR 量測河川斷面，並於北勢流域的三個水文站實地進行通水斷面的測量，同時以傳統鉛錘法施測。GPR 施測完畢後，亦將所獲得之河川斷面訊號進行影像及資料分析，濾除多餘雜訊後已獲得通水斷面，並與鉛錘法進行比較，分析 GPR 的準確度與可靠度。因此本研究的目的乃嘗試利用透地雷達觀測水面下之河川斷面，並評估其應用於台灣河川通水斷面量測之可行性。

二、透地雷達基本理論

透地雷達乃利用電磁學，藉由發射器發出訊號後，再紀錄回波訊號的時間及強度，經資料處理後，以分析水面及渠底的位置，因此水深即為此二值的差。

電磁波是電振盪(electrical oscillation)時，部分能量以輻射的方式傳播於空間所形成的電波和磁波的總稱。在低頻率的電振盪中，磁電互變緩慢，且無熱能產生，能量全部返回原電路因此無電磁波產生。在高頻率的電振盪中，磁電互變快速，使能量無法全數返回原電路之中，於是電能和磁能分別在電場與磁場的週期變化下，傳佈於空間而分別形成電波和磁波。電磁波為橫波(transverse wave)，具波動和粒子射線兩種特性，

波動呈面放射，粒子呈直線放射。電磁波面放射屬磁場的特性，直線放射屬電場的特性，故電磁場屬電磁波行進時產生的混合型態。電磁波的傳播速度與光速(c)相同，約為 3×10^8 m/s。其反射和折射符合光學原理，對於一般波能量在兩介質間的反射和繞射的現象也與光波相同。電磁波的頻率 f，單位為赫茲(Hz)。波長 $\lambda = c/f$ ，當電磁波頻率高時，波長短，直進性強、衰減性高；反之頻率較低，波長較長，繞過性強、衰減性低。

GPR 建立在利用電磁波之發射與接收上，因此基本理論源於電磁波基礎理論，導源於 1864 年之馬克斯威爾(Maxwell)方程式。馬克斯威爾方程式統整和修正了原有磁學中的方程式，包含電磁學的四個基礎方程式，用以解釋不同領域的現象。其中 Maxwell 第一方程式，即安培定律：

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad \dots\dots\dots(1)$$

Maxwell 第二方程式，即法拉第定律：

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(2)$$

Maxwell 第三方程式，即電場的高斯定律：

$$\nabla \cdot D = \rho \quad \dots\dots\dots(3)$$

Maxwell 第四方程式，即磁場的高斯定律：

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

其中 H 為磁場強度(A/m)； J 為電流密度(A/m²)； D 為電通量(C/m²)； E 為電場強度(V/m)； B 為磁通量密度(T)； ρ 為體電荷密度(C/m³)。導電度(Conductivity)是表示物質傳輸電流能力的強弱，電阻率為其倒數。

導電度定義如下：

$$\sigma = \frac{1}{\gamma} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中， σ 為導電度(S/m)； γ 為電阻率(Ω /m)。在應用上依照介質特性，將介質分成三類(GSSI, 1999)；(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

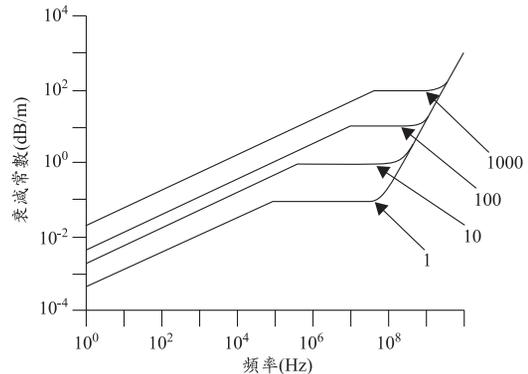


圖 1 頻率與衰減常數關係(裴廣智，2000)

雷達探測介質，如純淡水、乾黏土、砂、粉土等。(3)低導電度($\sigma \leq 10^{-7}$ S/m)：為優良的透地雷達探測介質，如空氣、瀝青、混凝土等。

介電常數是靜電場加在一個介質上時，儲存在其中的電能相對於真空時(其介電常數為 1)的比值。

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中， ϵ_r 為相對介電常數； ϵ 為材料之電容率； ϵ_0 為真空電容率。在透地雷達中回傳訊號強度取決於介質間介電常數的差異，介質間介電常數差異越大則回傳訊號越強。

衰減度表示電磁波在介質中行進時能量損耗的程度，主要與導電度及介電常數有關。

$$\alpha = \frac{1635\sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中， α 為衰減度。水為中導電度介質，當電磁波行進其中時，能量衰減快速，所以當透地雷達進行探測時探測深度受到限制。電磁波衰減主要分成三種(Beres, 1991)；(1)電磁波穿越良導體時部分能量轉為熱能。(2)黏土礦物中離子的擴散(chemical diffusion)。(3)水中的介電衰減(dielectric relaxation)。水為中導電度介質，當電磁波行進其中時，能量衰減快速，所以當透地雷達進行探測時探測深度受到限制。圖 1 為頻率與衰減常數關係。

當電磁波自介質 A 入射至介質 B 時，在 AB 交界產生反射。反射係數定義如下：

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_A} - \sqrt{\epsilon_B}}{\sqrt{\epsilon_A} + \sqrt{\epsilon_B}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中， ϵ_A 為物質 A 的相對介電常數； ϵ_B 為物質 B 的相對介電常數。當介質 A 介電常數較介質 B 大時，透地雷達接收到之回波能量應較強烈。反之，當介質 A 介電常數較介質 B 小時，透地雷達接收到之回波較微弱。若介質為低耗損介質時 $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1$ ，則電磁波波速約為：

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

若介質為高耗損介質時 $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1$ ，則電磁波波速約為：

$$V = \sqrt{\frac{8\omega}{\mu\sigma}} \quad \dots\dots\dots(10)$$

其中， μ 為導磁率； ω 為角頻率。求得雷達波波速之後，深度的求法可用雙程走時法。

$$d = \frac{Vt}{2} \quad \dots\dots\dots(11)$$

其中， d 為欲求反射面之距離(m)； V 為介質中之波速(m/ns)； t 為雙程走時，發射源至目標物之往返時間(ns)。

解析度為辨別兩相鄰訊號的能力。一般來說解析度為透地雷達中心頻率之二分之一波長。透地雷達中心頻率越高波長越短解析度越高，反之當中心頻率越短波長越長解析度變越低。但穿透能力卻相反，當中心頻率越高時，穿透能力卻降低。所以在選擇天線頻率時需考慮解析度與穿透力。

2.1 垂直解析度

透地雷達所能解析出之最小厚度為雷達波於該介質中波長的 1/4。因此理論上能解析之最小厚度為

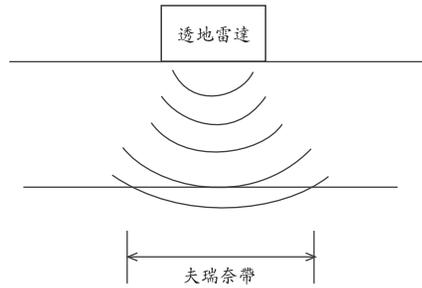


圖 2 夫瑞奈帶

$$r = \frac{c \times 10^3}{4 \times f \times \sqrt{\epsilon_r}} \quad \dots\dots\dots(12)$$

其中， r 為可解析之最小厚度(m)。

2.2 水平解析度

雷達波與物體之接觸並非單點接觸，而是以球面波的方式與接觸面產生反射。產生反射的面積範圍稱做夫瑞奈帶(Fresnel zone)，如圖 2。水平解析度與夫瑞奈帶的大小有關。夫瑞奈帶為

$$Fr = \frac{v}{4} \left(\frac{t}{f} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(13)$$

三、以 GPR 量測北勢溪流域流量站河川斷面

3.1 試驗區域

本試驗研究場址選定於台北水源特定區內之北勢溪。北勢溪主流長度 48.51 公里，集水區面積約 153.02 平方公里，源頭標高 650 公尺，河口標高 68 公尺，整體落差 552 公尺，平均坡度約 1/87.88。在北勢溪上游渡南橋，以 RADA 所出產的 System Zond-12e GPR 量測北勢溪的通水斷面，詳細規格如表 1 所示。圖 3 為渡南橋之位置。本試驗分為兩個部分，分別以透地雷達法與鉛錘法量測上述三流量站之河川斷面，將試驗所得結果進行分析與比較。

3.2 透地雷達法

透地雷達技術是以雷達波(高頻電磁波)為波

表 1 儀器規格

項目	描述	備註
型號	RADA System Zond-12e	
性能	單通或雙通	
時間間距	1-2000 ns/step	
傳輸率	115 KHz	
掃描速率	56 scans/sec (單通系統) 80 scans/sec (雙通系統)	另可選擇進階系統 320/160/80/40 scans/sec.
每秒取樣速率	512 sampling/sec (單通或雙通系統)	另可選擇進階系統 128/256/512/1024 sampling/sec
解析度	16 bit	
濾波器	可由使用者選擇內建濾波種類	
數據轉換顯示	經由 Wi-Fi 傳輸至電腦	
輸入電源	10.5-13 V DC 0.4 A	
尺寸	35 × 50 × 5.5 cm	

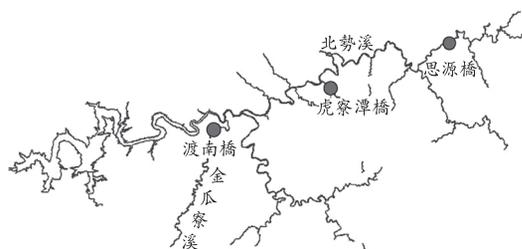


圖 3 流量站位置示意圖



圖 4 透地雷達量測河川通水斷面

源之地球物理勘測方法。其基本原理為利用高電壓發射線圈，產生高頻率(10 MHz 至 1500 MHz) 歷時為幾十億分之一秒(ns)的電磁波反應待測物介質之差異，由反射訊號來加以判斷待測物結構，原理類似震測法，不同之處在於震測法為利用物質之力學差異為理論基礎，而透地雷達法則利用待測物之電性差異為施測基礎。透地雷達法施測時由天線發射電磁波至待測物體中，待測物中之結構或組成會導致電磁波訊號反射、折射、或散射，然後由接收之電磁波推測待測物之結構變化。本試驗利用懸吊系統將透地雷達天線懸吊於選定之測線上，啟動透地雷達並以貨車慢慢拖曳，保持緩慢且等速狀態進行施測。施測完成後將雷達掃描資料儲存並利用軟體分析。如圖 4 所示。

由於探測場所中內含介質不同或堆積方式不同，導致施測後獲得之反射訊號極為複雜。因此了解一些基本的透地雷達反射訊號，可以初步

地判讀施測地區的基本組成。反射類型與地層關係主要可以分為自由反射訊號(Reflection free configuration type)、層狀反射訊號(Layered reflection configuration type)、渾沌反射訊號(Chaotic reflection configuration type)等三大類型。自由反射訊號類型又分為自由反射訊號及自由反射中有繞射訊號等兩種次類型，此類型之地層組成多為粉土質湖積土、塊狀體或厚層狀砂體、沉積物、不同大小之礫石，此類型地層容易造成能量衰減。層狀反射訊號類型分為簡單地層、複雜地層等兩種次類型，並在區分為平行型態、波浪型態、圓丘型態、傾斜型態、蛇狀型態等類型。此類型岩性組成粉土及砂、並可能夾雜些許礫石，其沉積可分為薄地層到紋層狀、層狀、薄地層到後層等。渾沌反射訊號類型又可分為渾沌型態及渾沌中有繞射訊號等兩種次類

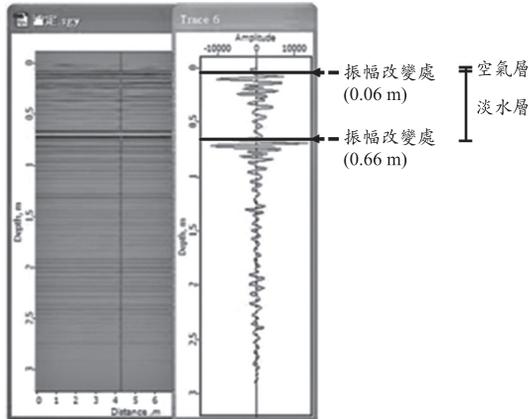


圖 5 濾定結果

型，此類型的岩性組成爲砂石與礫石的交錯層、冰磧沉積物、塊體與大量巨石等。

施測完成後將雷達掃描資料儲存於筆記型電腦中，如此便完成透地雷達法野外施測部分。雷達資料後處理部分則依以下步驟處理

3.2.1 背景值移除(Background removal)

所謂背景值即在圖形中持續出現之水平訊號，此訊號其強度及延遲位置不會改變。背景值通常較真實訊號強烈，往往會覆蓋住真實訊號若不將其消除則會造成圖形判釋錯誤。

3.2.2 濾波處理(Horizontal filter)

將不必要之高頻及低頻訊號移除保留所需之訊號是爲濾波處理，分爲高通濾波(High-pass filter)、低通濾波(Low-pass filter)、帶通濾波(bandpass filter)。高通濾波主要濾除低於截斷頻率的訊號。低通濾波則濾除高於截斷頻率的訊號。帶通濾波保留截斷頻率兩側一頻帶寬度內的訊號。

3.2.3 增益控制(Gain)

加強或減弱反射訊號，但反射訊號增強同時，雜訊也相對增強，視需求將兩者達到一平衡值。

3.2.4 時深轉換(Time-depth conversion)

利用雷達波在各介質中傳播速度，將單位走時轉換爲單位深度，如此於視窗中即可立即得知相應深度。



圖 6 以鉛錘測取河川斷面

3.2.5 間距插補(X-interpolation)

利用刪除或插補重複訊號，將各標註與標註之間距離統一，以方便計算距離。使用此功能時應注意插補時精度應越高越好以免圖形失真。

3.2.6 圖形判釋

圖形判釋其主要目標爲判定河川底床位置，此步驟應與後處理同步進行。透過各種後處理方式呈現底床圖形。

用以濾定透地雷達施測中，雷達波所接觸到之介質概括爲三種：空氣層、淡水層、底床。於透地雷達施測時，固定一點以雷達掃描，再與鉛錘法施測後交叉比對，用以濾定空氣層與淡水層波形。鉛錘法施測結果淡水層爲 0.6 m。圖 5 爲濾定結果。

3.3 鉛錘法

鉛錘法係利用重物(鉛錘)於水面垂降至河床底部，垂降深度即爲水深。利用多點量測以達到量測河川斷面之目的。本試驗將捲揚器與鉛錘組裝完成後架設於橋邊欄杆上，將鉛錘垂降至鉛錘底部觸碰水面時停止並將讀數計歸零，接著將鉛錘垂降至河床底部。定位完成後記錄捲揚器上讀數計之讀值，並重複以上步驟於測線上各點位。紀錄完成後使用繪圖軟體繪出河川斷面圖形即完成量測。如圖 6 所示。

3.4 試驗結果

渡南橋底床組成爲小顆粒卵石及砂石，原預

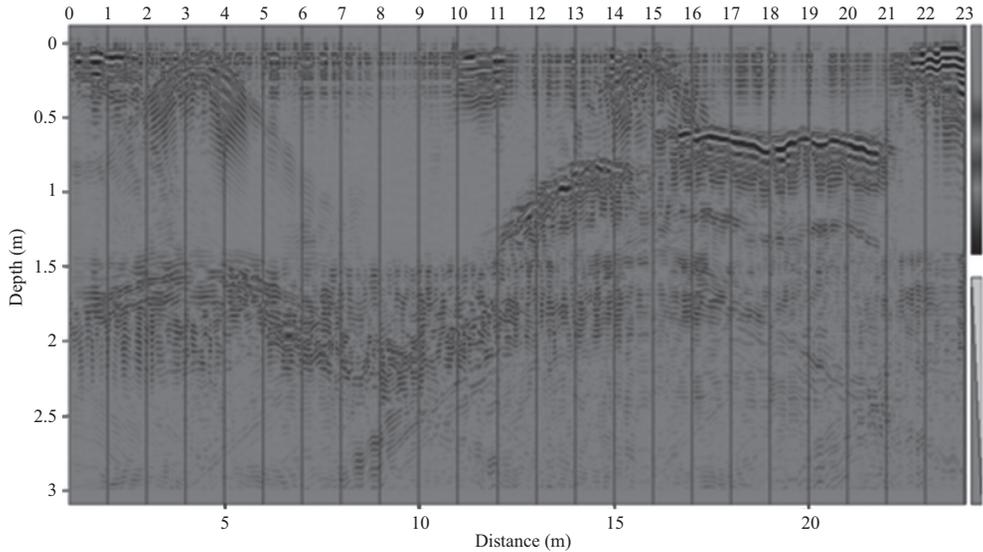


圖 7 2009 年 2 月 24 日北勢溪渡南橋 GPR 測得原始資料

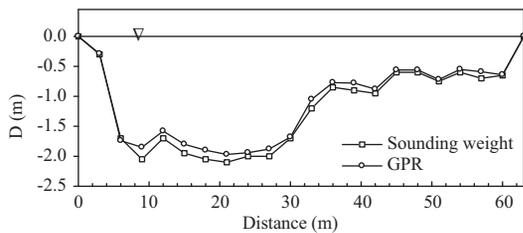


圖 8 2009 年 2 月 24 日北勢溪渡南橋鉛錘法與 GPR 法斷面量測結果比較

期施測效果相當良好，但渡南橋橋墩設計較為突出，因此施測時為了閃避橋墩，無法將雷達天線接近水面，造成接收之訊號干擾較為嚴重，且因橋墩訊號強烈進而影響底床訊號之判斷。

2009 年 2 月 24 日第一次試驗時，北勢溪斷面寬 63 m，最大水深 2 m 左右。氣層厚度約 20~50 cm，渡南橋斷面較為寬廣，因此透地雷達標註(Mark)時以 3 m 為單位。比較鉛錘法與透地雷達各點位平均差異 8.55%，整體面積差異 GPR 法較鉛錘法減少 6.39%，圖 7 為 GPR 所測得的原始結果。圖 8 為鉛錘法與 GPR 法斷面比較，其中 GPR 所得到的水深，則是由原始的資料經過上述的訊號處理後所得到。

北勢溪渡南橋第二次試驗時之河川斷面寬

48 m，最大水深 1.6 m 左右。氣層厚度約 0.5~1.3 m，比較鉛錘法與透地雷達各點平均差異 3.61%，整體面積差異 GPR 法較鉛錘法少 1.97%。圖 9 為渡南橋第二次試驗之 GPR 原始資料，圖 10 則為第二次試驗之鉛錘法與 GPR 法斷面量測結果比較。

目前研究以建立可行性與測試儀器設備、建立量測可行性為主，經由研究驗證在台灣可以在平常時期以 GPR 進行河川斷面量測。河川斷面發生劇烈變化通常在流速較大的颱風時期伴隨較大的雨勢，而目前所使用之儀器未有任何防水設備，如要再惡劣天氣狀況下進行量測，則需進一步修改儀器以達到防水效果，方可得到颱風時期河床高程沖淤變化之相關資料。

四、結論與建議

水理及水文分析中，河川通水斷面為一非常重要的參數，以往河川斷面量測大多數採用傳統方法量測，因此需耗費大量時間、物力與人力，且危險性高。本研究利用 GPR 進行河川通水斷面量測之研究，傳統方法需將儀器置入水體，於高流速時期量測水深，易受強烈水流影響，較不易精確測得水深；GPR 以非接觸性之方式量測通水

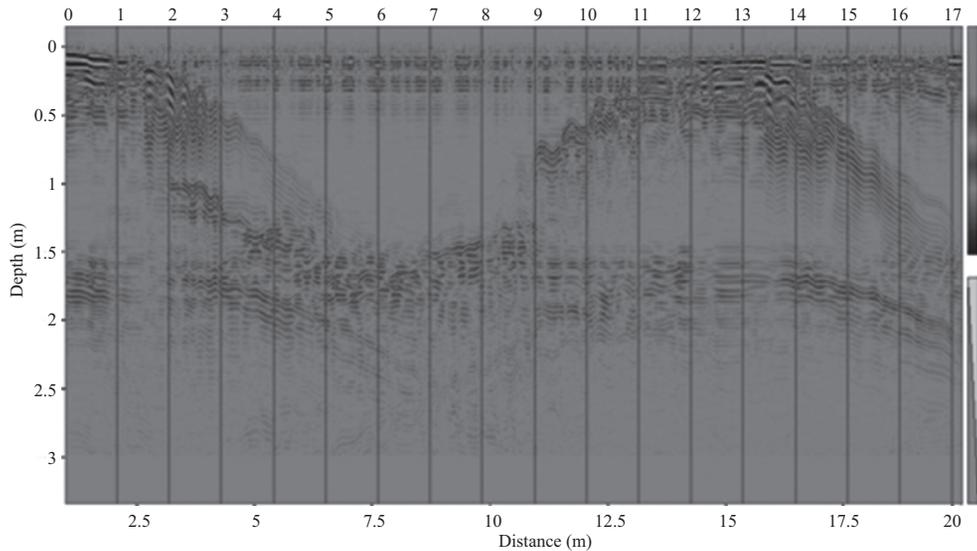


圖 9 2009 年 2 月 27 日北勢溪渡南橋 GPR 測得原始資料

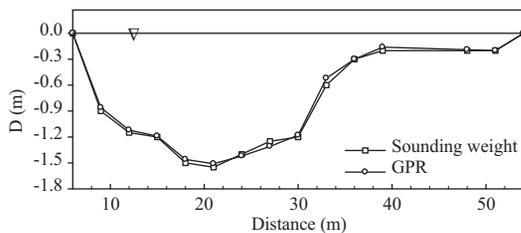


圖 10 2009 年 2 月 27 日北勢溪渡南橋鉛錘法與 GPR 法斷面量測結果比較

斷面，量測速度快且安全性高。此外，以傳統方法所測得之通水斷面為非連續性之斷面，而運用 GPR 所測得之斷面為連續性之通水斷面，因此可明確看出河床斷面之連續性變化。然 GPR 施測結果隨著施測地點本身地形、周邊環境等因素而受到干擾，所以使用透地雷達法前應對施測地點環境(基本地形、底床顆粒組成、周邊障礙物等)有相當程度之認識，以增加後處理時圖層判釋準確度。此外，本研究之水深最深約在 2 m 左右，所使用為 300 Mhz 雷達天線，往後可使用較低頻天線(如 100 Mhz、75 Mhz 雷達天線)施測水深更深之河川。但使用低頻天線時，應須考慮解析度之精度。本研究將 GPR 應用北勢溪渡南橋斷面之量測，其結果顯示與傳統方法相較下，其平均水深與通水斷面積之差異約為 5.50%及 4.18%，

兩種方法之差異並不大，證明 GPR 可運用於實際之河川通水斷面之量測。

參考文獻

1. Beres, M.J. and Haeni, F.P. 1991. Application of ground-penetrating-radar methods in hydro-geologic studies. *Ground Water* **29**(3): 375-386.
2. Chamberlain, A.T., William, S., Chris, P., and Roslyn, C. 2000. Cave Detection in Limestone using Ground Penetrating Radar. *Journal of Archaeological Science* **27**: 957-964.
3. Costa, J.E., Cheng, R.T., Melcher, N., Spicer, K.R., Hayes, E., Plant, W., Hayes, K., Teague, C., and Barrick, D. 2006. Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods. *Water Resources Research*, **42**, W07422. DOI: 10.1029/2005WR004430.
4. Delaney, A.J. and Arcone, S.A. 1992. Sub-Bottom Profiling: a Comparison of Short-Pulse Radar and Acoustic Data, *Geological Survey of Finland, Special Paper* **16**: 149-157.
5. Olimpio, J.R. 2000. Use of a Ground Penetrating Radar System to Detect Pre- and Post-Flood Scour at Selected Bridge Sites in New Hampshire,

- 1996-98. Report 00-4035. United States Geological Survey.
6. Parry, N. and Davis, J.L. 1992. GPR Systems for Roads and Bridges. *Geological Survey of Finland, Special Paper 16*: 247-257.
7. Spicer, K.R., Costa, J.E., and Placzek, G. 1996. Measure stream-channel cross sections with Ground-Penetrating Radar. *Geology* **25**(5): 423-426.
8. 裴廣智、謝智正、白耀東。2000。透地雷達檢測技術在土木工程應用。核研季刊 35: 20~26。

收稿日期：民國 100 年 7 月 18 日

修正日期：民國 100 年 10 月 3 日

接受日期：民國 100 年 11 月 23 日