

應用三維時間域電磁探測技術於基礎工程構造物之研究

邱維宣⁽¹⁾ 陳洲生⁽²⁾ 李準勝⁽¹⁾ 林慶仁⁽¹⁾ 姜智文⁽¹⁾

摘要

本文旨在介紹一種對探測超過 10m 以下含有金屬的構造物相當有效的地球物理探測技術，稱為「時間域電磁法」，除了介紹理論依據之外，並以二個實際的案例來說明如何在地面對地下含金屬的構造物實施平面定位，以及在井內探測其垂直深度，甚至在高雜訊的場址仍然有很好的效果。本研究認為未來以時間域電磁探測技術應用在坡地基礎工程中是可行的，例如應用在遭遇掩埋或位於地下深處而無法確知其位置、深度或形狀(含變形或扯斷)的各種含金屬基礎構造物的探測。

(**關鍵字**：時間域電磁法、工程構造物、工址調查)

Application of 3-D Time Domain Electromagnetic Methods on Foundation Construction Detection

Wei-Hsuan Chiu⁽¹⁾ Chun-Sheng Lee⁽¹⁾ Ching-Ren Lin⁽¹⁾ Chih-Wen Chiang⁽¹⁾

Graduate Student⁽¹⁾, Institute of Earth Science, National Central University, Jhongli, Taiwan, R.O.C.

Chow-Son Chen⁽²⁾

Professor⁽²⁾, Institute of Earth Science, National Central University, Jhongli, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to introduce an efficient engineering geophysical technology, Time Domain Electromagnetic Method (TEM), for underground metal detection at depth more than 10 meters. Other than the theoretical bases, two practical examples are employed to show how TEM works on ground surface or in drill hole. It is evident that TEM not only efficient in the engineering environment with high noise, but also operated in the field with time saving. We believe with confidence that TEM can apply to more difficult engineering site, such as high mountains or deep valleys.

(**keywords** : Time Domain Electromagnetic Method (TEM), engineering constructions, site

⁽¹⁾ 國立中央大學 地球物理研究所 研究生

⁽²⁾ 國立中央大學 地球物理研究所 教授

investigation)

前言

探測的主要目的在確認待測物是否存在，最直接的方法是「看」見待測的物體，一般而言，人類藉可見光與眼睛作為工具，可以在空間當中看見物體，但是要「看」見地下深處的含金屬的構造物，如基樁、鋼板樁、地錨、各種基礎構造物、橋墩(座)或擋土牆等，甚至是早期的貴金屬埋藏物等，則必須藉助儀器以及特殊的「光源」，例如高頻電磁波、超音波、電流與磁場等，由於金屬構造物存在的深度不同，探測與定位的難易度也不同。

一般而言，地表下數公尺以內的構造物較容易探測，可以選用的方法也比較多，例如金屬探測器可探測的深度約達地表下 2m，透地雷達可探測的深度約達地表下 10m，除操作便利之外，探測與定位的效果也很好。一旦目標物深度超過 10m，探測與定位的困難度立即大幅增加。時間域電磁法是偵測金屬構造物在儀器所建構近似靜磁場的環境下所反應出來的特殊物理性質，使其不會受水或黏土等物質干擾而可以被探測與定位。

本文以兩個實際的案例說明與展示時間域電磁法對金屬構造物平面定位與垂直深度測定的方式，第一例是在大面積的測區中探測不確定是否存在的金屬構造物，透過不同的測點分佈方式，分別在地面與井內進行多次的探測，並且於地面上標定其座標與形狀(平面尺寸大小)，另外從井內的探測結果判斷區域內的金屬構造物向下延伸的深度。

第二例則是針對已知位置、數量與尺寸的

公路橋樑基樁進行探測，目的在驗證時間域電磁法對深度超過 10m 以下的金屬構造物的探測效果，探測工作首先在地面上進行高密度的方格測點探測，待確定其平面座標後再以多匝小線圈單獨激發的方式於遠距離的井內探測其深度。

以上二個案例的探測結果可以充分展示出時間域電磁法使用在不同條件的場址與不同探測目的下所達成的效果。

研究理論

時間域電磁法主要的原理是在地面上的封閉線圈內通入電流，以瞬間切斷電流方式來建構近似於靜磁場的變動磁場，因為電流的瞬間變化會導致磁場發生變化，依據法拉第感應定律(Faraday's Induction Law)，導體在時變磁場中會被感應而產生電位，下式即為法拉第感應定律：

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt} = -N \frac{d(B \cdot A)}{dt} \dots\dots(1)$$

其中 N 為圈數， ε 為感應電位，以伏特(V)為單位， ϕ_B 為磁通量，即垂直於面積 A 與通過該面積的磁場強度 B 的內積，其前面的負號與冷次定律(Lenz's law)有關，若通過某線圈迴路的磁通量往正值增加，則感應電位將在線圈內感應形成電流，且伴隨產生方向相反的磁場，以產生負值的磁通量。

導體在隨時間變化的磁場環境條件下會產生感應電位，此感應電位會在地下導體上產生渦電流(eddy currents)，此電流所引發的二次

磁場再於接收線圈上產生感應電位。量測接收線圈上的感應電位值與極性可據以判斷地下導體的性質。

時間域電磁法在地面可探測地下數十公尺的金屬構造物，在井內可探測的深度更大，實際的探測深度達一百公尺。圖 1 是時間域電磁法常用的二種配置方式（上圖用於地面探測，下圖用於井內探測）。若地下構造物是由金屬所構成，可在地面上發射二個方向相反的磁場，之後會在接收線圈中量到二個極性相反的感應電位，若構造物不是金屬就沒有這種現象，舉一個探測的實際案例說明如何判斷地下構造物是由金屬所構成。圖 2 為台北市某道路的衛工管探測結果圖，在地面上以二個相反方向的電流通入發射線圈以產生方向相反的磁場（稱為一次磁場），該磁場會激發地下的衛工管對應產生相反方向的磁場（稱為二次磁場），當位於井內的接收線圈向下通過衛工管所在的深度時，衛工管所產生的二次磁場就會在線圈上感應出二個極性相反的感應電位，衛工管為金屬材質且位置低於地下水水面，因為所產生的感應電位值大於背景地層與地下水所產生的感應電位值，而且極性會隨電流方向相反而改變，形成二個對稱的電位異常值，據此特性才可以探測出衛工管的深度。

案例介紹

3.1 案例一

本場址位於台灣南部地區，屬於平坦的農地，場址的東南角因為開挖大型儲水池而設置鋼板樁構成擋土牆，分為內、外兩層，外層鋼板樁由地面延伸到地下約 25m，內層則延伸至地下約 40m 處，探測區域的面積尺寸約為

60m×60m。由於無資料可據以判斷場址內是否仍埋藏有未被清除的金屬構造物，選擇以時間域電磁法進行地面探測，目的在地面測定地下金屬構造物的平面座標。

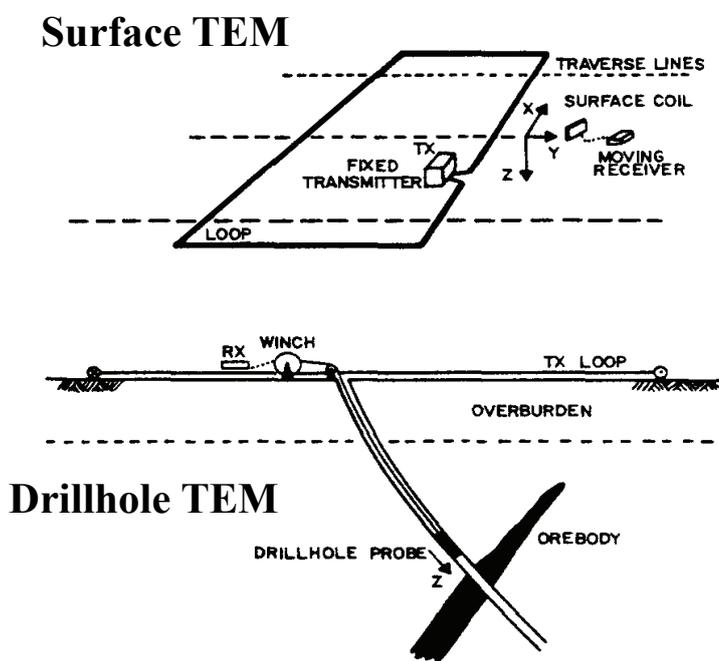
由於探測的區域面積很大，需要先進行初步探測排除無金屬構造物存在的區域，以有效縮小需要進行高密度探測的範圍，為兼顧定位的準確度，所以先以方位角為參數的極座標測點配置進行初步探測，在大略測出金屬構造物的存在區域後，再以方格測點的配置進行高密度的探測，以便測定金屬構造物所在的確實位置座標與形狀(平面尺寸大小)，地面探測完成後，接著進行大發射線圈井內探測，以大面積的發射線圈涵蓋水池在內的全部區域，此探測結果可以測出區域內所有的金屬構造物在垂

3.1.1 地面探測

首先在探測區域的中央作為參考點，由方位角 0°開始，以長 30m，每公尺皆有記號的塑膠繩由中央點向外拉出，並在距參考點 30m 處固定，先以 20°角為間隔，依序在各半徑間加入 10°與 5°的分角線，固定全部共 72 個點後，便可以將電線沿著外圍的固定點形成一個正 72 邊形的發射線圈，雖然是正多邊形線圈，但是形狀已經非常接近圓形。

開始探測時，在距離圓心 10m 的範圍內，以 20°的角度間距，到達距離圓心 10m 處後，各測線的角度間距縮減為 10°，俟到達距離圓心 20m 處，再使測線間角度間距縮減為 5°，直到直方向的綜合分佈情形。距圓心 30m 處結束，詳細圖解可參考圖 3(a)所示。

由於使用放射狀的型態佈置測點，隨著距離圓心越遠則各線間的橫向距離越大，的橫向間距所以必須在一定距離加入分角線，以保持



一般時間域電磁探測方法的探測配置圖 (Nabighian and Macnae, 1991)，上圖為地面探測模式，下圖為井內探測模式。

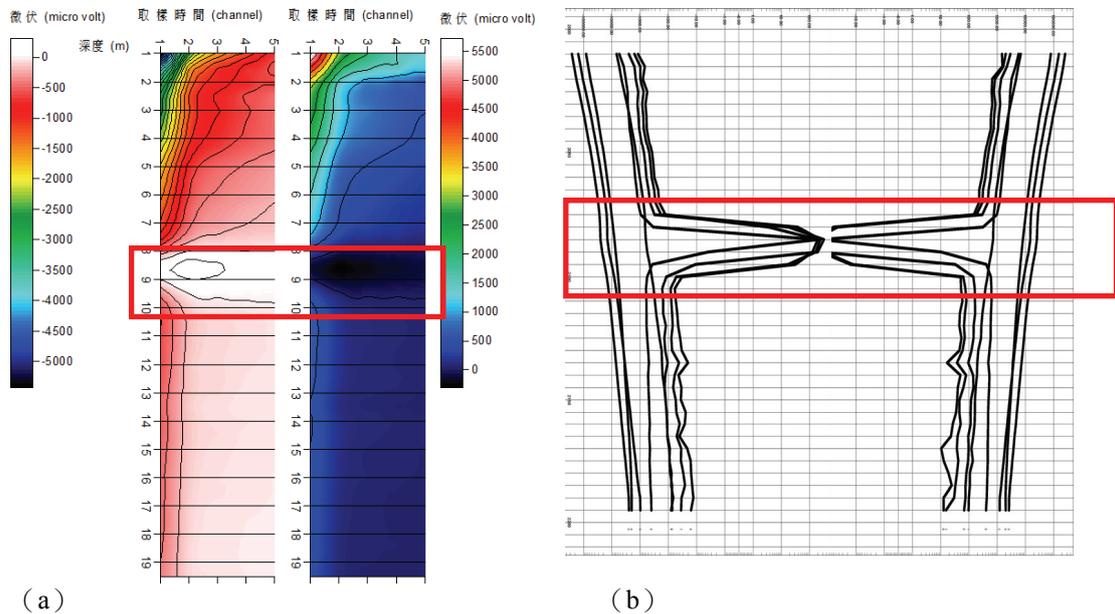
圖1. 探測配置示意圖

Figure 1. Deployed map of TEM detection.

測點不至於過大。以一塊長、寬各為 60m，面積為 3600m² 的場址為例，若全部以 1m 為間距作方格的測點配置共需要 3600 點，若改以極座標的測點配置則僅需 1260 點即可完成探測，大約可減少 2/3 的測點數，在大面積的場址進行初步探測時，可以大幅減少探測所需之人力與時間。本例中因為受限於探測時間，距離中心 20m 以後所加入的徑向測線上，測點間距為 2m，比較圖 3(b)與圖 4(b)的探測結果，東南角的感應電位異常區的形狀很類似。

完成極座標配置的初步探測後，將探測結果以感應電位值呈現如圖 3(b)所示，圖中圓圈處為感應電位異常區，場址的東南方向靠近邊界處可以觀察到有明顯的電位異常現

象，顯示該處地下有金屬構造物存在，根據此一結果，我們選定東南角的電位異常區附近進行高密度的方格測點配置探測，以確定該地下金屬構造物的座標與形狀，極座標探測配置的另一項效益，就是探測結果可對中心點以一定距離的圓周展開，可得到與發射線圈等距離的剖面，減少因為與發射線圈距離遠近不同所造成的磁場不均勻的影響，另一個對探測工作相當重要的功能，就是平面定位精確，再現性佳，因為只要中心點固定，任何時刻只要測出方位角，即可找到探測結果的異常點的精確位置。圖 4(a)為地面上以一定的測點間距進行方格測點探測示意圖，外圍置以正方形或長方形發射線圈，發射線圈範圍內以接收線圈在固定間距測點上探測



(a)由井內探測所得一組極性相反的對稱感應電位影像圖（縱軸為深度，單位為 m，橫軸為取樣時間，單位為 channel），紅框中感應電位的異常處為衛工管位置所在。

(b)極性相反的對稱感應電位曲線圖（縱軸為深度，單位為 m，橫軸為感應電位，單位為 μV ），紅框中感應電位的異常處為衛工管位置所在。

圖 2. 垂直向探測成果圖

Figure 2. The results of vertical detection.

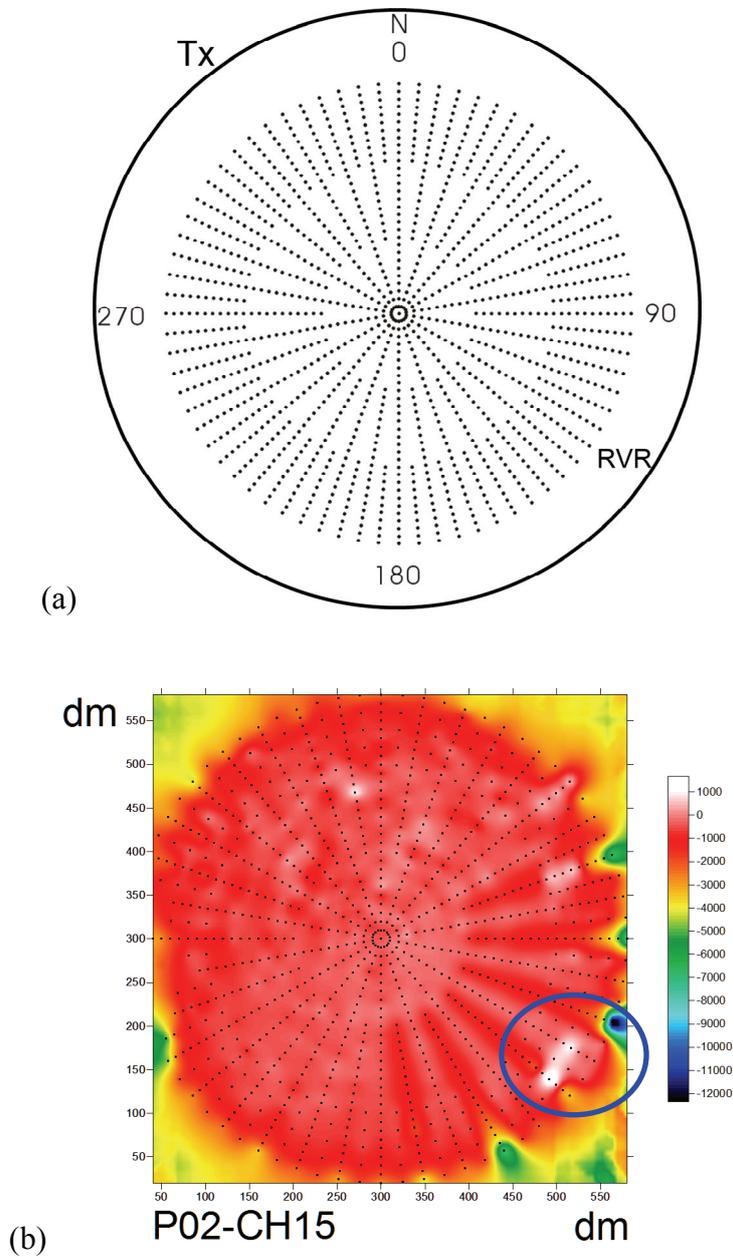
，此測點間距可以視需要調整，這種發射線圈構造簡單，容易佈置與探測，測點間距相同，可以避免因測點間距不同造成電位異常區域的形狀被扭曲，所測得之結果比較能呈現出地下異常區的形狀，如果選擇的測點間距較小，雖然解析度會提高，相對也會增加探測時間，所以一般都會在同一區域內以不同的測點間距呈現，只有在重點或粗測所得的可能異常區進行小間距的方格測點精測。

為驗證極座標配置探測所得的結果以確認該電位異常是否為金屬構造物所造成，圖 4(b)即是方格測點在接收線圈所量到的感應電位值與極性圖，圓圈所圈之處為感應電位異常區的地面座標與尺寸大小，該異常區的感應

電位極性由負轉正，此一電位極性反轉且強度增加的現象顯示該處確實有金屬構造物存在，經過實地開挖後發現有一片水池施工前放置於地面避免吊卸鋼板樁的吊車下陷的鋼板，因受重壓而埋入地下約 1m 深的鋼板。

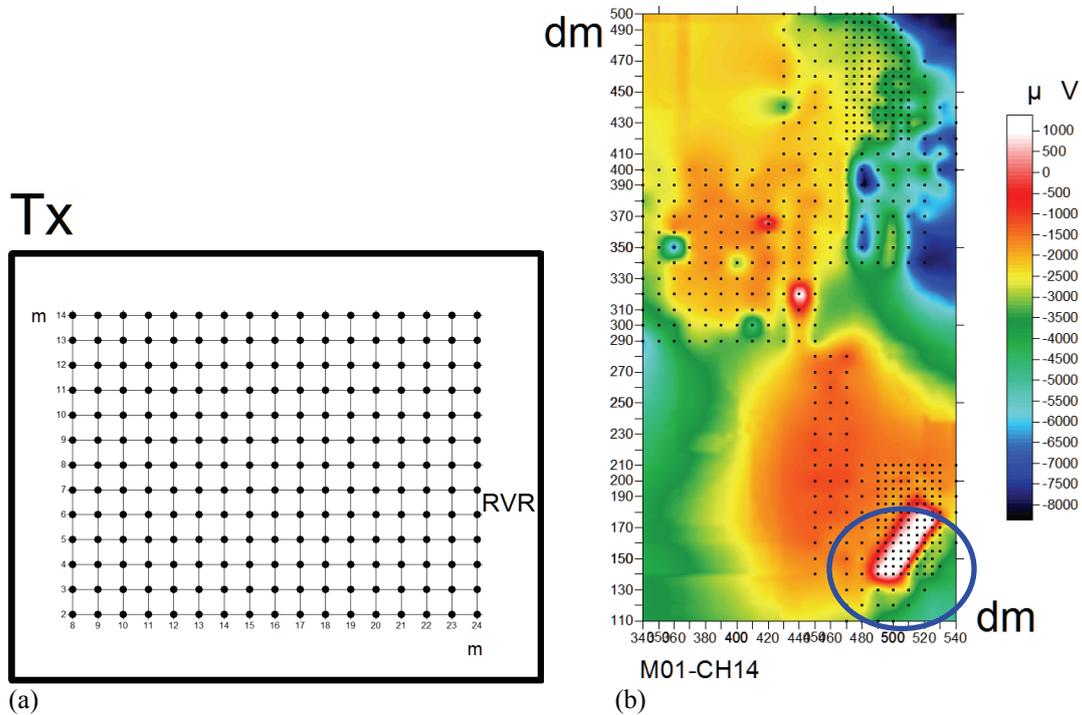
3.1.2 井內探測

地面探測完成並將鋼板移除後，需要確認是否尚有地面無法探測到但仍存在地下的金屬構造物？於是在區域內的 50m 垂直井內進行大發射線圈井內探測，藉由包圍整個區域的發射線圈激發地下所有的金屬構造物產生二次磁場，再由接收線圈在井內以 1m 為間距向下接收來自全區域的二次磁場，探測方式如圖 5(a)所示，如果區域內有鉛直豎立的導體，可



(a) 接近圓形的正多邊形發射線圈內的極座標探測模式示意圖。
(b) 為接收線圈所量得之感應電位值與極性（縱軸與橫軸皆為距離，單位為公分），圓圈所圈之處為感應電位值與極性變化的異常點，在右下方可觀察到感應電位極性由負轉正的異常現象。

圖 3. 平面初步探測成果圖
Figure 3. The results of preliminary plane detection.



- (a) 方型發射線圈，1m 為間距之方格測點分佈示意圖，實際探測時，在重點區域可以調整到最小的測點間距為 0.5m。
- (b) 為選擇在前圖中之感應電位值與極性異常處以方形發射線圈進行方格測點探測所獲得的感應電位與極性結果圖（縱軸與橫軸皆為距離，單位為公分），目的在確認該異常是否為金屬構造物所造成，圓圈所圈之處為感應電位值與極性異常之平面座標與尺寸大小。

圖 4. 平面詳細探測成果圖

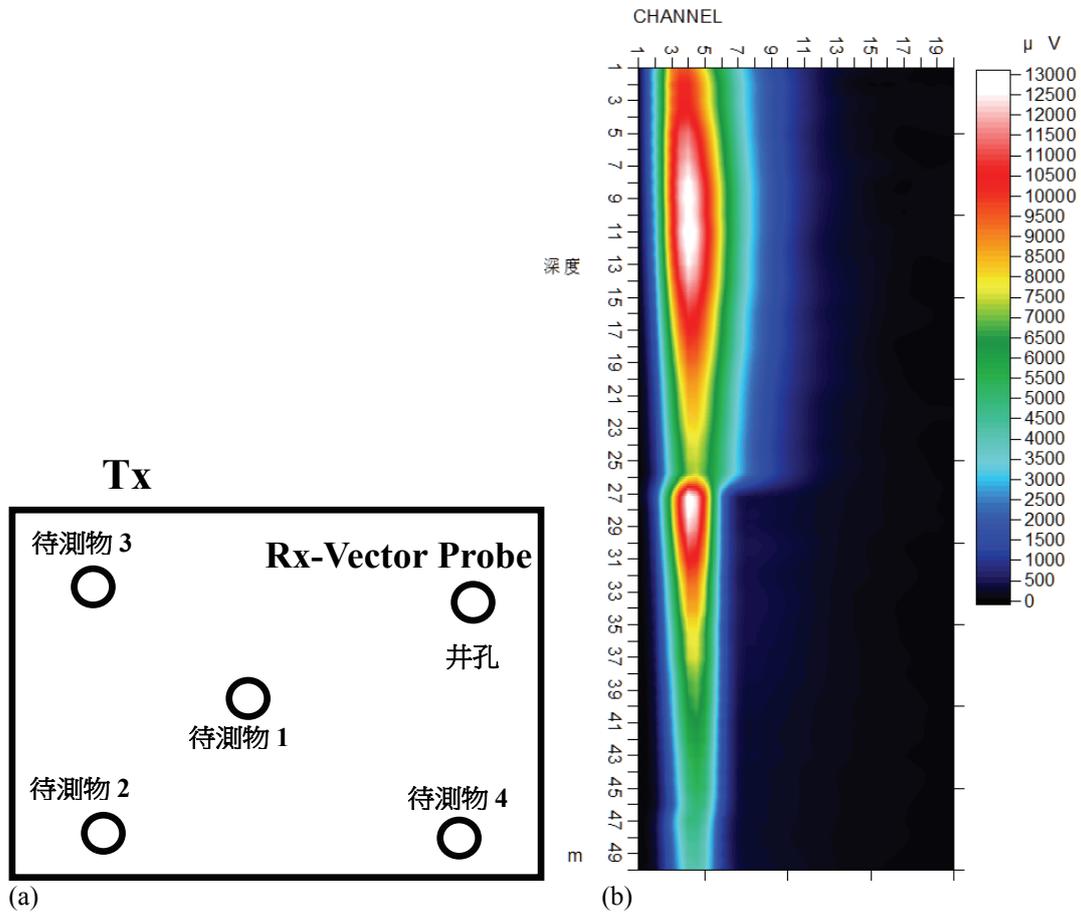
Figure 4. The detail results of plane detection.

以藉垂直井內向下移動的接收線圈量測到，此方式雖然無法對個別導體作精確的深度定位，但是可以量測到區域內地下各深度所有導體的綜合分佈，據以判斷地下是否仍有金屬導體存在，因此也稱為大線圈井內探測。

大線圈井內探測的結果如圖 5(b)所示，

圖中所出現的電位異常明顯分為上下二段，第一段由地面延伸至地下約 25m，第二段則向下延伸至地下約 40m 處，除此之外便無其他金屬構造，上述結果與水池外層鋼板樁由地面延伸至地下約 25m，內層的鋼板樁由地面延伸至地下約 40m 處的結果完全吻合，上述的電位異常應該是由水池鋼板樁所產生。

3.1.3 討論



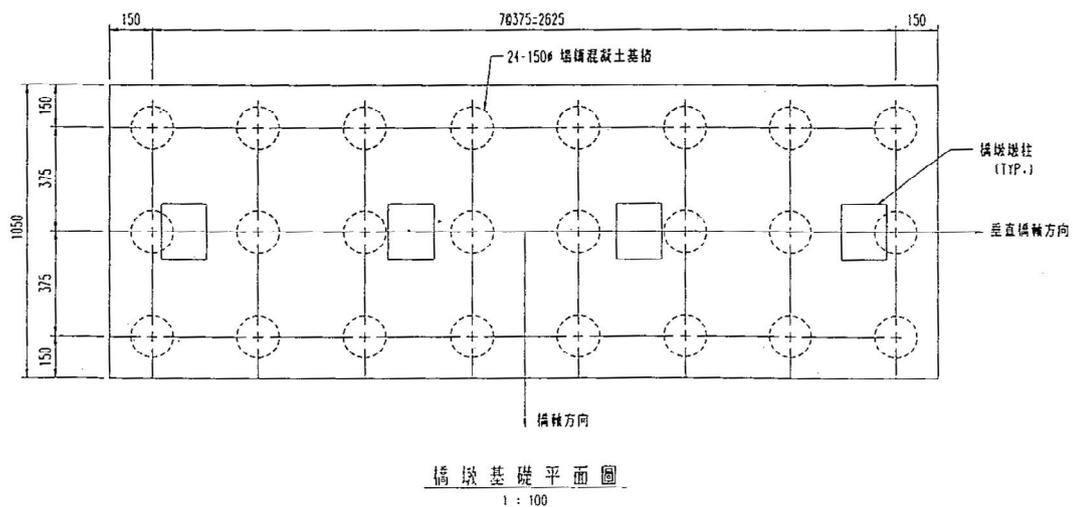
(a) 大面積井內探測線圈與井位示意圖，探測井是包圍在發射線圈內。
(b) 井內接收線圈所量到之感應電位值（縱軸為深度，單位為 m，橫軸為取樣時間間隔，各間隔約為數 ms 不等，數值越大代表距離接收線圈越遠），圖中明顯分為二段，其一由地面延伸至地下約 25m，另一段則繼續延伸至地下約 40m 處，恰好符合水池外層鋼板樁由地面延伸至地下約 25m，內層鋼板樁由地面延伸至地下約 40m 處的事實。

圖 5. 垂直詳細探測成果圖

Figure 5. The detail results of vertical detection.

本案例的探測的過程與結果，可用以展示在一個大面積場址內，對於不確定是否存在的地下金屬構造物的探測流程與效果，首先以測點數目較少的極座標探測模式進行初步探測，以便大幅縮減需要進行高密度探測的區域面積，再依探測結果判斷目標物的可能尺

寸選擇適當的方格測點間距進行高密度探測，以便測定地下金屬構造物的平面座標、尺寸與形狀，大線圈井內探測則可以在一次探測中描繪出大區域內所有的地下金屬在各不同深度的垂直分佈，以作為有否繼續探測的需求依據。



- (b)
- (a) 本場址位於台灣中部國道第二高速公路的一處穿越橋下的現況照片。
- (b) 廢棄的全套管基樁原始設計的俯視圖，相鄰基樁中心相距 3.75m。

圖 5. 現況照片及全套管基樁原始設計的俯視圖

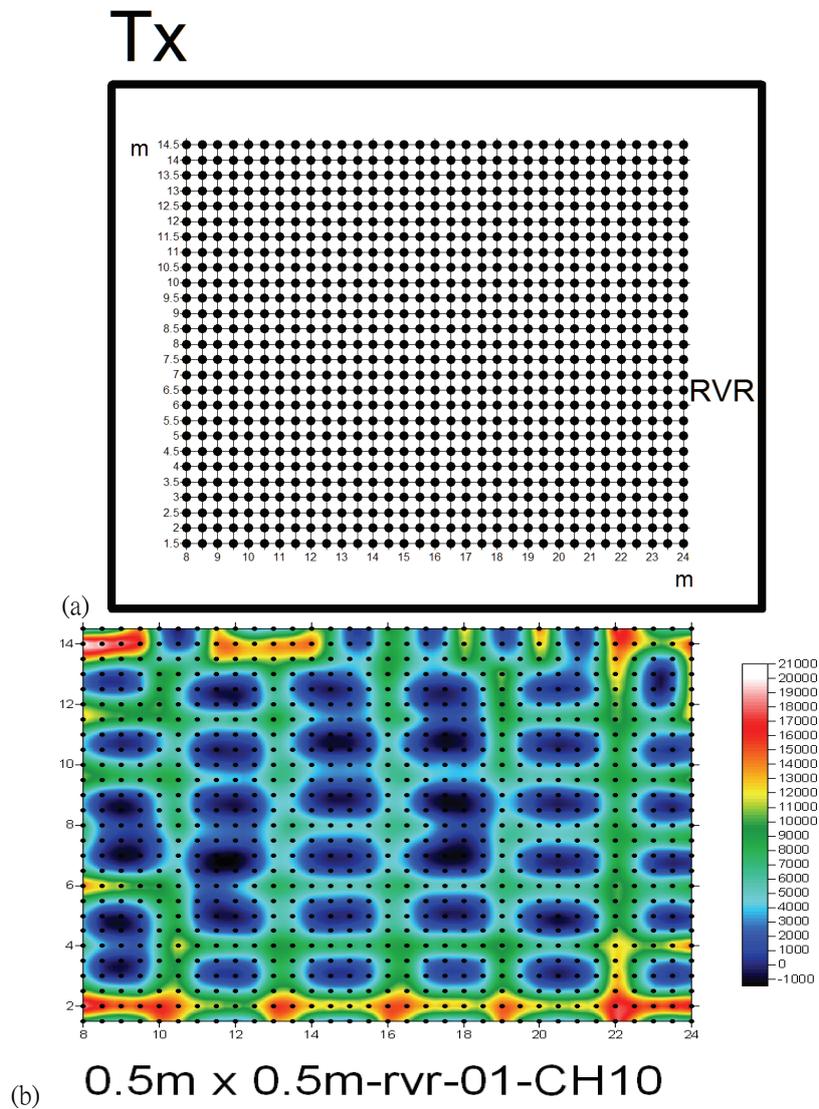
Figure 5. The picture of present situation and top view of the designed full casing piles.

3.2 案例二

本案例是在已知有金屬構造物存在的資料可比對的前提下進行的探測，目的在驗證時間域電磁法是否可以對地下深度超過 10m

以下的金屬構造物進行精確的三維定位。

本場址位於台灣中部國道三號高速公路的一處穿越橋下，本場址內因為有逆斷層通過，在九二一集集大地震發生後，先前已



(a) 高密度的方格測點分佈示意圖，相鄰二個方格測點間距為 0.5m，故可以接收線圈將測區作全面性覆蓋以接收來自地下金屬構造物的磁場。

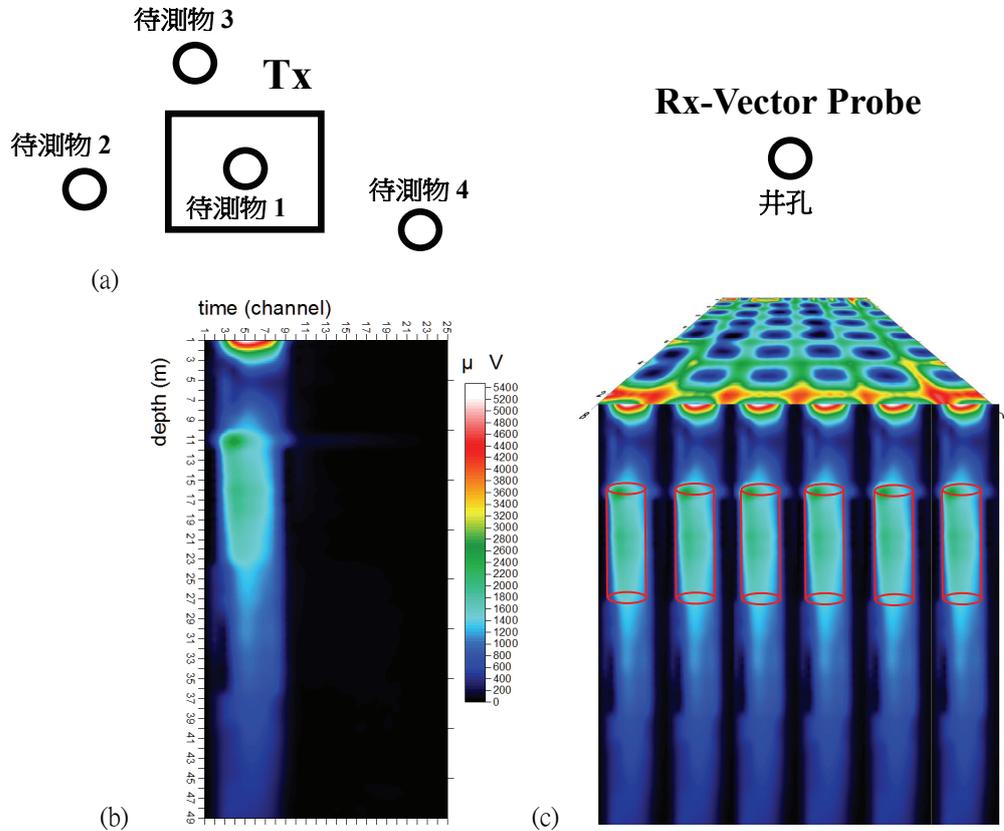
(b) 感應電位分佈圖（縱軸與橫軸皆為距離，單位為公尺），圖中背景區域電位極性為正，其中與背景電位極性相反的電位負值區域上下一組為一支基樁的反應。

圖 6. 平面詳細探測成果圖

Figure 6. The results of detail plane detection.

鑄完成的全套管基樁因而傾斜遭廢棄（周鴻昇等，1999），目前廢棄基樁上方地表經整理後地勢平坦，且已改建成一處籃球場，如圖

6(a)所示。從地表上已無法得知地下尚存在有許多廢棄基樁，如圖 6(b)所示，因為全套管基樁內含鋼筋籠，如果要進行三維定位，可



- (a) 以小線圈所激發單一基樁在遠距離井內的探測示意圖。
- (b) 接收線圈量得的感應電位值（縱軸為深度，單位為 m，橫軸為取樣時間間隔，各間隔約為數 ms 不等，數值越大代表距離接收線圈越遠），圖中自地面以下，至地下 10m 之間並無相對較大的感應電位值出現，而自地下 10m 以下，至 25m 之間的感應電位值較大，這種深部電位值大於淺部電位值的現象說明在 10m 至 25m 之間有金屬構造物存在，而這個區間與廢棄基樁原始設計長度相吻合。
- (c) 將地面與井內所量到的感應電位值加以組合所得的基樁三維分佈圖。

圖 8. 垂直詳細探測成果圖

Figure 8. The results of detail vertical detection.

先選擇在地面上以時間域電磁法精確測定基樁的平面位置座標，再將發射線圈放置在單一基樁座標上直接發射一次磁場激發該基樁，再於一定距離外的鉛直井內，以接收線

圈量測不同深度的二次磁場，當取得基樁的平面座標與垂直深度分佈後，即可對地下廢棄全套管基樁作三維定位。

3.2.1 地面探測

圖 7(a)是在地面上高密度方格測點分佈示意圖，因為接收線圈的尺寸僅有 $0.5\text{m}\times 0.5\text{m}$ ，任二個測點間距也是 0.5m ，接收線圈可將整個區域完全覆蓋，以接收所有來自地下金屬構造物的二次磁場，所以稱為高密度的方格測點探測，因為測點間的區域都被接收線圈所覆蓋，完全沒有漏失，除非訊號無法解析，否則一定可以求出感應電位異常區域的幾何中心位置座標，因此可以在地面上精確定出地下金屬構造物幾何中心的位置座標，也因為測點間距甚小，所以測點數量很大，非常耗費探測時間，所以不適合在大面積的探測區域使用，一般都是先在探測區域初步的標定金屬結構物的可能位置，縮小需要實施高密度探測範圍，再進行探測。圖 7(b)為高密度方格測點的探測結果感應電位分佈圖，其中大部分背景區域的正值的區域就是廢棄的全套管基樁的位置，而由感應電位異常區間距與圖 6(b)的設計圖比對後，研判上下二個電位異常區應該視為同一組，屬於同一基樁造成的反應，因為設計圖中任何相鄰的基樁中心間距為 3.75m ，而圖 7(b)中相鄰的二組電位異常區中心距離約為 4m ，距離相當吻合。

3.2.2 井內探測

由高密度方格測點探測的結果可以在地面上取得地下廢棄的基樁精確的平面位置座標，但是地下基樁上下端點所在的位置與基樁長度無法在地面直接探測，有別於 3.1.2 節所使用的大線圈井測，我們將尺寸 $6\text{m}\times 6\text{m}$ 的發射線圈放置在單一基樁的座標處地面，如圖 8(a)所示，小線圈的目的在單獨激發該

基樁的鋼筋籠產生二次磁場，而不是同時激發區域內所有基樁產生綜合的磁場，並於 31m 外的井內測量二次磁場，以測定基樁上下端點所在的位置，因為小線圈可以將磁場的能量集中傳遞給單一基樁，所以才可以在遠距離的井內接收到足夠強度的磁場，不僅可以進行精確的三維定位，甚至可以量測體積。

圖 8(b)是在基樁位置座標 31m 外的井內接收線圈所測得感應電位影像圖，縱座標代表深度，圖中可見自地面至地下 10m 間並無明顯的感應電位異常出現，自地下 10m 以下至 25m 卻出現感應電位值增加的現象，因為發射線圈放置於基樁上方的地面，一般地層中，在地面產生向下擴散的磁場強度會隨深度增加而遞減，但是井內接收線圈所測得的感應電位值卻在地下 10m 處突然開始出現強度值增加的現象，直到 25m 處為止，從地面到地下 10m 間反而無明顯感應電位增加的現象，說明從地面到地下 10m 間應該沒有金屬構造物，但自地下 10m 到 25m 處則有金屬構造物存在，此結果與廢棄基樁原始設計長度 15m 相吻合。

3.1.3 結果與討論

從這個探測案例中可以歸納出以下幾個結果：

- (1) 時間域電磁法確實可以探測出地下廢棄全套管基樁。
- (2) 應用高密度的方格測點探測，可以在地面對地下的基樁作精確平面定位。
- (3) 以小線圈激發單獨基樁可以在距離 31m 外的井內，量測出基樁的上下端點位置，並

據以決定基樁長度。

(4) 就目前的探測結果至少可以求出地面以下 10m 的金屬構造物的幾何中心的位置座標。

(5) 一口井至少可以對半徑 31m 以內的範圍進行井內探測，此一結果可以大幅節省鑽井費用，提升探測效率。

(6) 透過時間域電磁法繪製感應電位圖形可以將地下埋藏的金屬構造物加以視覺化呈現，如圖 8(c)所示。

結論與展望

經過理論的探討以及二個實際案例的探測結果分析，可以獲致以下三點結論：

(1) 依據法拉第感應定律與冷次定律，並且善用金屬在磁場中的物理特性，利用時間域電磁法確實可以探測出地下 10m 以下的金屬構造物。

(2) 在不同條件的場址實施時間域電磁法時，必須選擇適當的探測方式以獲得較佳的探測結果，例如在大面積的場址先選擇較少的測點數的極座標測點配置或測點間距較大的方格測點配置，先縮小需要探測的範圍後再進行高密度探測。大線圈井測可用以初步探測場址內金屬構造物的垂直分佈，高密度方格測點探測與小線圈的井內探測等方式可以對金屬構造物作精確的三維定位。經由實際測試結果顯示，上述方法適當搭配使用時，甚至在高速公路下方等高雜訊的場址(鋼筋結構體多而複雜環境下)，也可以有效獲得地下的三維深部訊息。

(3) 應用時間域電磁法時，若可以先在地面實

施測點間距 0.5m 的高密度方格測點探測以確認地下金屬構造物精確位置，再以小線圈單獨激發該金屬構造物，則可以在不超過 31m 範圍的井內探測其深度分佈情形，可以對地下至少 10 m 直徑 1.5m 的金屬構造物作三維定位，最小平面誤差 0.5m，垂直深度定位最小誤差為 1m，一口井即可探測半徑 31m 範圍內的地下金屬構造物，可大幅減少鑽井的經費支出。

由以上結果，時間域電磁法應用在地下金屬構造物的探測是相當有效的。除可對地下未知金屬構造物進行平面定位之外，也可對延伸至地下的鋼板樁、基樁進行深度探測，也可應用在例如捷運、鐵路或地下電纜等隧道潛盾工程預定經過的地區先行作初步的三維探測，可提早獲得例如舊橋墩地下基樁等工程前端的地下金屬構造物的三維資訊，減少因撞擊地下障礙物所造成的損害風險。

另外在坡地基礎工程中，當遭掩埋或地下深處而無法確知其位置、深度或形狀(含變形)的各種含金屬基礎構造物，如遭廢棄未回收的地錨和鋼板樁，地錨拉斷變形，遭掩埋或折斷的基樁，深回填區豎井和地下涵管，遭掩埋和破壞的防砂壩等等，可以間接且快速瞭解坡地各種基礎工程設施的狀況。

誌謝

本文承蒙三合技術工程公司蔡道賜博士、周友信先生鼎力協助野外實測工作，以順利取得案例一之實測資料，以及極座標測點陣列探測示意圖之繪製工作，謹此致謝。另外，台灣營建研究院提供鑽孔以供實驗，使本文實驗內容更豐富，在此一併致謝。

水土保持學報 41(4) : 357-370 (2009)

Journal of Soil and Water Conservation, 41(4) : 357-370 (2009)

參考文獻

1. 周鴻昇、楊清源、謝百鍾、余明山、高耀宏 (1990), 「南投地區地工震災調查與分析」, 地工技術, 第 81 期, 第 69-84 頁。
2. 李維峰、張嘉峰、梅興泰、邱維宣、蔡道賜(2007), 「以暫態電磁法偵測受損基樁」, 營建知訊, 第 297 期, 第 70-79 頁。
3. Grant, F. S., and West, G. F. (1965), Interpretation theory in applied geophysics: McGraw-Hill, New York.
4. Nabighian, M. N., and Macnae, J. C.(1991),

Time Domain Electromagnetic Prospecting
Methods: Electromagnetic Methods In
Applied Geophysics-Applications, : Society of
Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma,
27-520.

98 年 05 月 24 日收稿

98 年 06 月 03 日修改

98 年 06 月 10 日接受