

跨孔式地電阻法於深埋管探查之應用

蔡道賜／三合技術工程有限公司總經理

黃富郎／三合技術工程有限公司經理

柯瑞祥／三合技術工程有限公司工程師

摘要

近年來台灣工程業蓬勃發展，到處許多工程基礎、管道和各種隧道，均往地表下發展，由於早期埋設管線尚未有詳細記載的設計圖與資料庫，導致資料欠缺，事隔多年之後，部分工程必須更動既有的管線或可能開挖到鄰近的管線，施工之前都需要管線詳細的資料。大部份管線之調查為使用透地雷達探測，以調查管線的分佈情形及位置等，但是由於雷達波傳遞能力有限，常受到地層電阻率的影響，大幅降低雷達波的穿透深度，使得大部份在台灣地區，使用透地雷達探測比較適合在淺地層的管線調查。幾年前，作者在台灣已經多次使用跨孔式地電阻法探查深埋管線，並於本文中提出兩個實測的例子，證實二維及三維地電阻法，均適用於深埋管線的調查。

前言

管線調查主要目的為得知：(1) 管線的位置及分佈的情形，(2) 管線大小，(3) 管線的健康程度，有無破損或腐蝕等，(4) 有無滲漏或污染情況。管線調查在土木工程的主要用途為得知既有管路的分佈情形，以便後續近接工程規劃、設計及施工。尤其是已經開發許久的市區及工業區，地下管線三度空間分佈非常複雜，事先的調查是非常必要的。由於管線和相鄰的地層材料之物理性質會有程度上的差異，將透過地球物理方面的檢測，以瞭解地層之物理性質的分佈情形，並從資料中找到異常（和周圍地層特異之處），進而判釋地下管線的位置。

地球物理方法於管線探查方法很多，主要有透地雷達、電磁法（Electromagnetic Method）、地電阻法等，一般都應用於地表附近的管線。其中以透地雷達的應用最多，但是電磁波傳遞能力受到介質的電阻率的影響，電阻率越低其衰減越大，通常本島很多地方近地表處的地層含泥量高且潮濕，有些地下水位高，因此地層電阻率均很低，大幅降低探查的深度。因此大部份透地雷達的探查深度均限制在 4 公尺以內，而且反射的雷達波均很微弱，不確定因素很高，最好同時使用多種方法同時施測，以提高準確度，必要時應在適當位置進行試挖，交叉比對解釋，進而提高其可信度。由於有些管線因安全顧慮，使得施工位置不方便開挖，有些管線因施工因素，使得埋設位置太深無法開挖，再加上地表透地雷達常受到地層的電阻率影響，無法探查管線之深度，導致不易獲得管線位置與深度。

本文建議在調查低電阻率地層區域的管線，或探查深埋之管線時，使用二維或三維跨孔式地電阻法（cross hole electrical resistivity tomography），將電極設置到管線目標的附近，以提高探查解析度。地下管線通常是以金屬為材質，使得在量測時造成特異的現象，甚至於無法量測，一般使用二極法可能量測到較高的假電阻率，導致無法量測到正確的電阻率，此為假電阻率響應，但足以得知管線的位置，必竟調查管線的位置才是主要探查目標。

對於埋深管線調查方法必須有所調整，必須將檢測設備下移至探查目標物附近，大部份必須於管線位置設置探查孔，並再進行檢測，以提高探查的精度。

跨孔式地電阻法簡介

跨孔式地電阻影像剖面法，電極排列利用雙極法（pole-pole array）。此種探勘方法其原理主要將直流電藉由插於地表和探測孔內之一對電極（電流極）通入地下，電流流經地層造成人工電場，由地表上和探測孔內之另一對電極（電位極）量測此電場之電位差，此電位差因地層之導電性及兩個探測孔間異常物質之不同而有異常不均之分佈。由通入地下之電流強度、量測得之電位差及電流極間之相對位置，依歐姆定律求出地層之視電阻值及電性地層之構造，進而推估探測孔間異常帶之分布狀況，跨孔式地電阻影像剖面法探測電極設置方式示意圖如圖 1 所示，電極排列方式，可用雙偶極（dipole-dipole）、雙極法（pole-pole）、雙二極法（bipole-bipole）或混合排列（mixed array）等等，通常在低電阻率的測區，建議採用雙極法。

本文所用之儀器為美國 AGI 公司製造的 SuperSting R8 電探儀，在儀器主體量測部份是經由微電腦全自動控制（包含全自動自然電位修正、自動調整輸出電流、訊號加強之數位化累計及施測過程錯誤訊息顯示），能於資料收集過程，適時顯示各項資訊，以確保資料之正確性。其電探儀本身可連接在一智慧型控制網絡上，以多電極自動切換系統運作，同時該儀器是針對二維及三維地電阻測勘設計的，可依所設定的電極變換、電流值、放大器增益、疊加數目等施測條件自動操作儲存於硬碟，具有大幅縮短量測時間，並獲得高品質資料的優點。原則上孔內探測電纜由地下 1 公尺開始佈設，每隔 1 公尺（依現場狀況及探測精度要求而定）佈設一個電極，每個孔內佈設 28 個電極至地下 -28 公尺為止。電阻探測儀有信號疊加及貯存等功能，其規格如下所示：

- a. 輸出電流：1mA ~ 2A
- b. 輸出電壓：可達 400V
- c. 輸出功率：200W
- d. 量測範圍：±10V
- e. 量測解析度：最高可達 30nV

計算各量測點之視電阻為將輸出之電流強度及量得之電壓，以下述公式計算該展距之視電阻。假設 C_1 電極與 P_1 電極分別位於電源極 (x_1, z_1) 和電位極 (x_2, z_2) ，幾何因子 K 如下：

$$K = 4\pi / \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_1'} \right)$$

其中， r_1 為 C_1 和 P_1 間的距離， r_1' 為 C_1 對地表之影像點（image point）和 P_1 間的距離。

$$r_1 = \sqrt{d_x^2 + d_z^2}$$

$$r_1' = \sqrt{d_x^2 + D_z^2}$$

$$d_x = x_1 - x_2 \quad d_z = z_1 - z_2 \quad D_z = z_1 + z_2$$

雙極法：

$$\rho_a = K * V / I$$

$$V = \text{電位 (mV)}$$

$$I = \text{電流 (mA)}$$

計算電性地層構造：由現場收集到之量測資料，二維資料以二維電腦解析軟體（如 EarthImager 2D / Res2DInv）進行逆推，求得兩個探測孔間之電性地層構造，利用電性地層構造上之異常分布狀況檢測地下物體狀況分佈。至於三維資料則以三維電腦解析軟體（如 EarthImager 3D / Res3DInv）進行反算，求得孔間包圍空間之電性地層。

地電阻法主要是探查地層的電阻率分佈，通常地層內之電阻率和地層的材料、含水量、水質、破碎程度，風化程度，顆粒大小、溫度及膠結程度等等有關，但除了有地質構造以外，大致上變化平順。當有管線埋入即有可能造成電阻率的差異，即所謂的異常。異常通常是管線本身或是其相關設施或擾動所造成。因此只有再配合現有的管線資料，或試挖資料，即可判釋管線。在比較複雜的地區，則仍然需要試挖等等資料，更進一步的配合判釋。

而我們所關心的是地層的電阻率分布情形，地層的電阻率與地層水的含量、鹽度及分佈狀態有關，也與組成地層的固體顆粒的導電性有關。一般的地層，其固體顆粒為普通造岩礦物的組合體，導電性很低，可視為絕緣體，所以一般地層的電阻率主要決定於地層中水的含量、鹽度及分佈狀態。一般而言，水的含量愈高，鹽度愈高，水的連通性愈佳，其電阻率愈低。地層的粒度愈細，其可交換離子（exchangeable

ions) 愈多，電阻率愈低。因此可以由地層的電阻率來研判地層的含水程度、粒度及岩性，藉以研判地層形貌及構造，表 1 為各種不同地層材料之地電阻率概值；但相同岩性在不同的區域所顯現的地電阻值差異非常大，故表 1 之數據僅能作一參考依據。

在一般說來，其地電阻影像剖面只能代表地地下地電阻的相對性，通常相對地電阻高者（一般剖面表示顏色為紅色區域），有可能為孔洞、不透水岩層（一般岩層電阻率均高）或地盤改良固結區；相對低者（一般剖面表示顏色為藍色區域），可能為含水帶、斷層泥或直接為地下水、海水等。但實際情形，還必須配合當地地質鑽探資料和地層狀況加以比對。

表 1 各種不同地層材料之電阻率概值 (Keller and Frisknecht, 1966)

地質材料	電阻率 ρ ($\Omega\cdot m$)
砂岩 Sandstone (in general)	100 ~ 8,000
花崗岩 Granite、片麻岩 Gneiss	7,000 ~ 15,000
輝長岩 Gabbro	10,000 ~ 40,000
石英岩 Quartzite	5,000 ~ 10,000
粗砂 Coarse Sand、礫石 Gravel (乾燥)	20,000 ~ 80,000
砂 Sand (乾燥)	5,000 ~ 20,000
粉砂 Silt (乾燥)	400 ~ 2,000
純水 Fresh Water	10,000
海水 Sea Water	0.2 ~ 1
粗砂 Coarse Sand、礫石 Gravel (飽和)	1,000 ~ 5,000
砂 Sand (飽和)	200 ~ 1,000
粉砂 Silt (飽和)	30 ~ 200
黏土 Clay (飽和)	15 ~ 30

二維跨孔式地電阻探查實例

首先本文提出二維跨孔式地電阻方法的實例，本實例的主要為瞭解某單位天然氣管線位置，依據初步訊息得知天然氣管設置深度可能達地下 10 公尺，因探測目標為深層管線，故考量各種地球物理探測方法之優缺點及探測精度等因素，進行相關現地調查規劃，並依現場之狀態及計畫需求提出地下深層管線探測計畫，於探測計畫內選定施作二維跨孔式地電阻影像剖面探測，藉由探測兩個探查孔間異常電阻率分佈位置，找出地下管線的確切位置與深度，以利於後續工程針對管線位置進行相關規劃處理，避免誤觸管線。

BH-2、BH-3 剖面剖面二維跨孔式地電阻影像剖面探測成果如圖 2。依據圖 2 顯示於地下 5 ~ 8.5 公尺

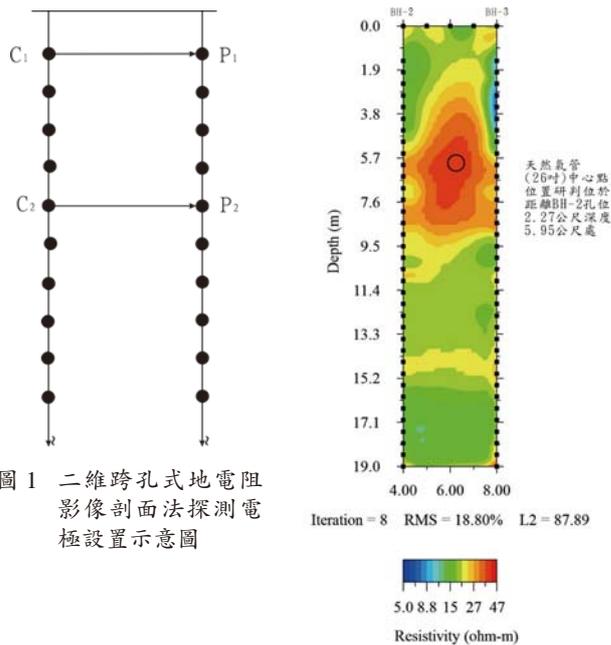


圖 1 二維跨孔式地電阻影像剖面法探測電極設置示意圖

圖 2 BH-2、BH-3 剖面二維跨孔式地電阻影像剖面探測成果

範圍為異常電阻率分佈區，此異常區研判為受到推進坑及中油天然氣管所造成之影響，研判天然氣管（26 吋）位於異常區之中心點，位於 BH-2、BH-3 剖面中間，距離 BH-2 孔位 2.27 公尺處，深度 5.95 公尺。

對地電阻法及感應極化法而言，地下金屬管線常會是探查的雜訊 (Parra, 1984)，但是也供了管線位置、深度，甚至絕緣的狀況 (Ryjov and Shevin, 2001)。由於天然氣管材質為鑄鐵，若絕緣不良，其高導電率為幾乎相等於電極，和地層相去甚遠，將會造成電壓降特異的現象，以致於無法用電探法（尤其是以雙極排列），得到正確的電阻率，反而會呈特高電阻的表徵，經反算，即可得到電阻率的分佈圖，找到高電阻率的異常區，循高電阻率的區域便可找到天然氣管的蹤跡。本文即是以此法推估管線的位置。由於此高電阻率並非真的，實際上是一種雜訊，因此會無法配適很好，但參考已知的資料，可以推估管的位置。

二維跨孔式地電阻影像剖面法為一高解析度探測方法，其有效探測範圍為以 2 個探查孔為一組之剖面上，依據本計畫之探測成果研判天然氣管（26 吋）座落於 BH-2、BH-3 探測範圍內，天然氣管（26 吋）中心點位置位於 BH-2、BH-3 剖面中間，距離 BH-2 孔位 2.27 公尺處，深度 5.95 公尺，因本探測方法屬間接性探查，藉由二維跨孔式地電阻影像剖面法探測成果雖

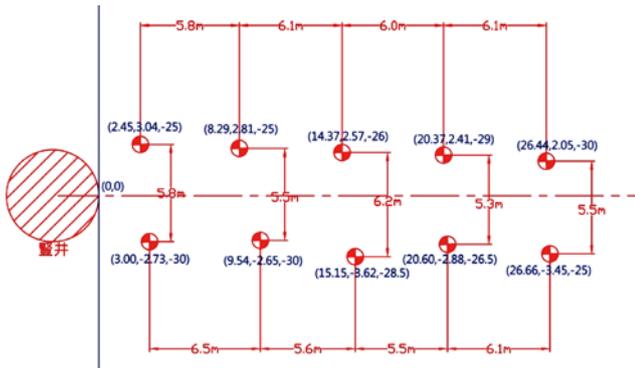


圖 3 三維跨孔地電阻探查佈設圖

已能清楚顯示管線位置，但此法並非如試挖直接性探查，仍有誤差及不確定性存在，故於現場施工時仍需非常小心並保持一定之安全距離，同時依據探測成果顯示天然氣管之位置並未如探測前預測達地下十公尺以上，依據探測成果顯示管線上部邊緣位置約位於地下 5 公尺，建議後續應進行管線試挖，找出管線實際位置，避免施工過程之震動或誤觸管線，造成工安事件及損失。

三維跨孔式地電阻例子

由二維跨孔式地電阻的方式探查是假設和剖面垂直方向沒變化，除非測線剖面和管路正交，否則必有相當的誤差，但是通常地下管道複雜，最好採用三維的方式。

本文中三維地電阻法的例子是施工中受損管路檢測，共鑽設 10 個探查孔如圖 3 所示，探查成果如圖 4 所示，圖中黑點之電極位置。因為測區接近海邊，地層中含鹽量較高，測區整體的電阻率很低，可以清楚看到相對高電阻率的異常體，黃色等值面約略為管路的位置，推測可能是管路受壓變形，以供後續維修的參考。

結論

由實例可以清楚辨識深埋管線的位置，可見跨孔式地電阻法的實用性，值得再推廣此法於深埋管線的探查。其成果解釋，仍需依其管線材質，及現有資料交叉比對，始可得到可靠的資料，另外因為必須先鑽設探查孔，除需要成本之外，鑽孔的風險也不能免，但為了精確成果，仍然建議多加採用。

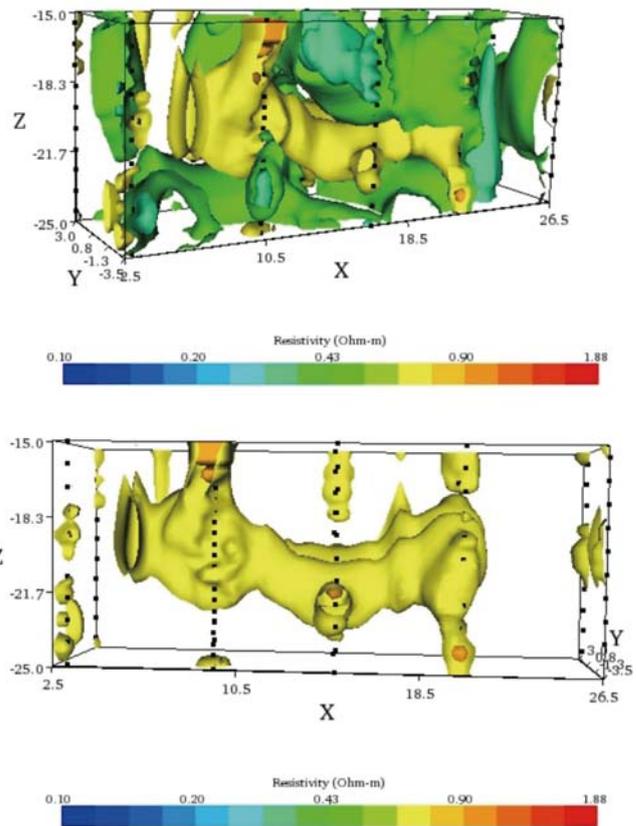


圖 4 跨孔式三維地電阻成果圖

管線探查在淺層可用透地雷達、電磁法，而深層管線可以用跨孔式地電阻法來探查。一般高電阻率的管材可用一般的解釋方式，找出相對的地電阻的異常，而對於金屬材質的管材，導電率特高，造成電壓降降低，而造成高電阻率的假象。反算之後呈現高電阻率的區域，雖然不是真的電阻率，但卻可指出金屬管的位置，實際是相當實用的方式。

參考文獻

1. Keller, G. V. and Frischknecht, F. C. (1966). Electrical methods in geophysical prospecting. Oxford, Pergamon.
2. Parra, J. O. (1984). Effects of pipelines on spectral induced-polarization surveys. Geophysics. Vol. 49, pp. 1979-1972.
3. Ryjov, A. and Shevin, V. (2001). Anomalies from horizontal metal pipes in resistivity and IP field. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2001, SAGEEP. 