

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

二維地電阻影像探測之 3D 效應研究

3D Effect Study of 2D Electrical Resistivity  
Tomography Method

研究生：楊光程

指導教授：林志平 博士

中華民國九十八年十一月

# 二維地電阻影像探測之 3D 效應研究

3D Effect Study of 2D Electrical Resistivity Tomography Method

研究生：楊光程

Student: Kuang-Chen Yang

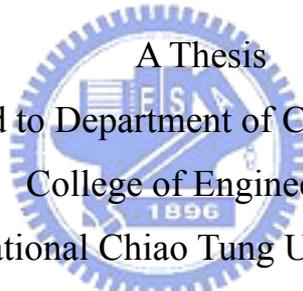
指導教授：林志平 博士

Advisor: Dr. Chih-Ping Lin

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文



A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Civil Engineering

November 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年十一月

# 二維地電阻影像探測之 3D 效應研究

學生：楊光程

指導教授：林志平 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

## 摘 要

地電阻影像探測法(Electrical Resistivity Tomography (ERT)屬於非破壞性探測技術，為傳統地球物理探測技術之一，廣泛地應用在地質、地下水文及環境地工調查方面以及隧道工程、尋找地下水、溫泉、地熱測勘等能源開發之領域，是工程界最常利用的地球物理方法之一。

目前地電阻影像探測的實務主要以 2D 探測為主，不過在應用上常忽略了三維效應的影響。所謂三維效應，即二維地電阻剖面外的地質結構，其電阻率映射於二維地電阻剖面上所造成的探測誤差。由於 3D 探測需要有空曠無障礙的施測面，且儀器需要大數量的頻道數，因此一般施測仍以線性二維電探為主。

線性二維電探係假設地層電阻率性質在垂直測線方向為均質，在施測結果的判讀上常忽略此一假設可能造成的失真，當地層不符合在垂直測線方向為均質的條件時，二維電探結果可能造成的誤差不詳。

本研究將利用數值模擬及現地試驗探討不同 3D 條件下，二維電探可能造成的失真現象。前半部將利用 AGI 公司(2003)所發展之正算

(EarthImager3DMOD) 與反算 (EarthImager3DINV) 的分析軟體，將每種

不同的排列、適用情形，利用數值模型做一明顯的介紹與區別。後半部再利用現地施測成果做比對分析，以了解當地層具有 3D 變化時可能造成的影響範圍。

根據本研究數值模擬，在測線與斷層走向非平行或垂直時，會有 3D 效應產生，其影響主要是在高電阻率側，隨著所夾角度增加，3D 效應的影響程度會下降，當角度大於 45 度後，3D 效應可予以忽略。若測線與斷層走向平行時，當測線在低電阻率側時，不論  $n$  值，3D 效應之影響範圍至多為 3 公尺，而當測線在高電阻率側時，3D 效應之影響範圍至多為 6 公尺。

對管線地層而言，其 3D 效應之主要影響因子有電阻率比值  $n$  以及管線尺寸，其兩者間具有加乘作用，不易量化兩者之影響情形，但由已完成之數值模擬顯示，不論在什麼地層中，3D 效應之影響空間至多不超過 6 公尺。

關鍵字：地電阻影像法，三維效應，數值模擬，電阻率

# 3D Effect Study of 2D Electrical Resistivity Tomography Method

student : Kuang-Chen Yang

Advisors : Dr. Chih-Ping Lin

Department of Civil Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

Electrical Resistivity Tomography (ERT) is a non-destructive geophysical technique. Being the most popular geophysical method in engineering field, ERT has been widely applied in site characterization of geology, underground hydrology, environmental geotechnics, and tunnel engineering and investigations of the groundwater, hot spring and geothermal power.

ERT can be conducted in 1D, 2D and 3D survey. Considering 3D ERT survey requires a sufficient large open area to spread the survey lines in matrix form and also needs the expansive data acquisition equipment with a lot of channels (usually 48 channels are the minimum requirement), 2D ERT survey is mainly executed in practice. However, in the application of 2D ERT survey, 3D effect is usually ignored when interpreting the results. The so called 3D effect means the errors of conducting 2D ERT caused by the earth structure outside the 2D survey line.

The 3D effect is originally from the basic assumption of 2D ERT survey that the earth structure is to be homogeneous in the direction perpendicular to survey line direction. When the site condition does not agree with this assumption, errors would come out. However, usually, we did not take the possible error caused by 3D effect into account and even seriously, we have less knowledge about how critical the error would influence the 2D ERT result.

Numerical simulation and case study are performed in different 3D earth structures to investigate the possible errors caused by 3D effect. Commercial

softwares (EarthImager 3D MOD and EarthImager 3D INV) developed by AGI Ltd. are aimed to simulate the data acquisition and to invert the acquired data. At first, earth models with different situations and alignments were simulated to examine the possible influence caused by 3D effect and to figure out the possible influencing range. Further, a real case was presented to verify the finding from simulations.

According to the results of numerical simulations, 3D effect can be observed when the survey line is not perpendicular or parallel to the strike of faults. The main influence is in the ground with high resistivity. With increasing the angle between survey line and the strike of a fault, the influence of 3D effect decreases and can be ignore if the angle is larger than 45 degrees. When the survey line is parallel to the strike of faults, the influencing distance of 3D effect is no more than 3 meters if the survey line is in the ground with lower resistivity, while it is no more than 6 meters if the survey line is in the ground with higher resistivity.

For the ground buried metal pipe, 3D effect is mainly affected by the ratio of resistivity of pipe and ground ( $n$ ) and the size of metal pipe. However, the behavior of  $n$  and the size of metal pipe are complicated. It is difficult to isolate the influence caused by both. Even so, the influencing distance of 3D effect in the ground buried metal pipe is no more than 6 meters from the edge of the pipe according to the results of numerical simulations.

Key Words : electrical resistivity tomography, 3D effect, numerical simulation, resistivity

## 誌 謝

本論文得以完成承蒙指導教授 林志平博士於研究所求學期間悉心指導，給予學生在論文研究、專業知識上的指導，幫助學生突破研究瓶頸以及獲得學識上的成長，在思考邏輯也給予學生有很大的啟發，讓我在研究所兩年更加成長，在此致上萬分敬意。

能進入交大研究所就讀，最要感謝的是博士班學長明萬的鼓勵與鞭策，得以有勇氣再度拾起書本進修。求學期間，承蒙廖志中教授、潘以文教授、黃安斌教授、方永壽教授與單信瑜教授給予學識上的指導，在此致上萬分敬意。

口試期間，良受廖志中教授、潘以文教授、林志平教授與蔡道賜博士給予本論文指正與建議，使得本文更加完善，於此由衷感謝。

在學研究期間，承蒙博士班學長俊宏及碩士班學長偉晉等給予諸多協助，並給予研究上的經驗分享，感激不盡。野外試驗承蒙同學哲毅、永政的幫忙，使一切工作得以順利進行，辛苦大家了。很高興與大家共度兩年時光，以此謝文獻上致意。

未來將以所學應用在工作領域上，提昇研究規劃之品質，今後我將更努力，重新發心、日新又新，下定決意，用新的心情去出發。如此，才不會讓自己停頓，以回報關心、愛護我的家人及師長。

最後，最要感謝的是我那可愛的家人們，尤其內人旭喻，在求學期間的鼓勵與支持，我愛你們，謹以此文獻給我最親愛的家人。

# 目 錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	iii
誌 謝.....	v
目 錄.....	vi
表 目 錄.....	ix
圖 目 錄.....	x
一、前言.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	1
二、文獻回顧.....	3
2.1 地電阻發展歷史.....	3
2.2 地電阻法基本原理.....	5
2.3 地電阻影像法(ERT).....	15
2.3.1 二維地電阻探測方法.....	16
2.3.2 三維地電阻探測方法.....	27
2.3.3 二維地電阻探測之三維效應.....	31
三、二維地電阻之 3D 效應數值模擬.....	35
3.1 研究方法.....	35
3.2 應用程式介紹.....	35
3.3 正算模擬建立.....	36

3.4 反算模擬建立 .....	38
3.5 數值模擬 .....	40
3.6 斷層之地層 .....	40
3.6.1 地層模型與施測參數.....	40
3.6.2 地層電阻率及測線與斷層走向夾角之影響.....	45
3.6.3 階梯地層厚度之影響.....	65
3.6.4 電阻率比與電阻率之影響.....	70
3.6.5 電極棒間距之影響.....	73
3.6.6 具斷層地層之 3D 效應小結 .....	77
3.7 管線之地層 .....	79
3.7.1 地層模型與施測參數.....	79
3.7.2 管線尺寸之影響.....	80
3.7.3 埋設深度影響.....	92
3.7.4 電阻率比與電阻率之影響.....	102
3.7.5 電極棒間距之影響.....	106
3.7.6 具管線地層之 3D 效應影響小結 .....	112
四、現地試驗.....	113
4.1 試驗儀器介紹 .....	113
4.2 施測方法的選用 .....	116
4.3 金屬管線案例 .....	118
4.3.1 試驗場址概述.....	118

4.3.2 測線規劃與現地作業 .....	120
4.3.3 試驗結果與討論 .....	123
五、綜合討論 .....	125
5.1 數值模擬案例討論 .....	125
5.1.1 具斷層地層 .....	125
5.1.2 金屬管線地層 .....	134
5.2 映射模型 .....	142
5.3 現地試驗案例討論 .....	144
5.3.1 金屬管線地層 .....	144
六、結論與建議 .....	145
6.1 結論 .....	145
6.1.1 斷層地層 .....	145
6.1.2 金屬管線地層 .....	145
6.1.3 探測前的數值模擬有以下之優點:.....	146
6.2 建議 .....	146
參考文獻 .....	148



## 表 目 錄

表 2-1	各施測電極排列方式綜合表現 .....	20
表 2-2	一般佈線注意事項 (SEGJ, 2004) .....	22
表 3-1	測線與斷層走向夾角地層模型與施測參數 .....	44
表 3-2	P 類地層模型與施測參數 .....	81
表 3-3	D 類地層模型與施測參數 .....	92
表 3-4	N 類地層模型與施測參數 .....	103
表 3-5	DX 類地層模型與施測參數 .....	107
表 4-1	SYSCAL Pro Switch 48 儀器規格 (IRIS, 2005) .....	116
表 4-2	3D LY-1 測線施測參數 .....	122
表 4-3	2D LY-1 測線施測參數 .....	122
表 5-1	P 類地層模型與施測參數 .....	135
表 5-2	D 類地層模型與施測參數 .....	137
表 5-3	DX 類地層模型與施測參數 .....	141

## 圖 目 錄

圖 2-1	單點電極電流與電位分佈 (修改自 Loke, 2003)	7
圖 2-2	雙點電極排列示意圖 (修改自 Reynolds, 1997)	8
圖 2-3	雙點電極電流與電位分佈變化 (Telford, 1990)	9
圖 2-4	均質地層下雙點電極水平電流密度幾何參數 (Telford, 1990)	10
圖 2-5	電流極間距和深度的改變與 P 點的水平電流密度變化 (Telford, 1990)	10
圖 2-6	均質地層電流通過百分比 (Nostrand and Cook, 1966)	11
圖 2-7	非均質地層電流折射 (Hall, 1992)	12
圖 2-8	非均質地層電流密度分佈 (Hall, 1992)	13
圖 2-9	單一水平界面空間參數 (Nostrand and Cook, 1966)	14
圖 2-10	單一水平界面電流百分比示意圖 (Nostrand and Cook, 1966)	14
圖 2-11	Wenner 地電阻探測量測示意圖 (摘自尤仁弘, 2006)	16
圖 2-12	一般常見電極排列方式	17
圖 2-13	電極排列施測流程 (Wenner 為例) (修改自尤仁弘, 2006)	18
圖 2-14	彎曲隧道調查工程佈線規劃 (SEGJ, 2004)	22
圖 2-15	正算模型網格 (Loke, 2003)	23
圖 2-16	反算基本流程圖	27
圖 2-17	一般三維電探佈線方式(a)沿 Y 軸, (b)沿 X 軸	28
圖 2-18	擬 3D 與真 3D 反算結果 (數值模擬) (a) 真 3D (b) 擬 3D, 測線間距等於兩倍電極間距 (c) 擬 3D, 測線間距大於兩倍電極間距	

	( Yang and Lagmanson, 2006 ) .....	29
圖 2-19	擬 3D 與真 3D 反算結果 ( 現地試驗 ) ( a ) 真 3D ( b ) 擬 3D , 測 線間距等於兩倍電極間距 ( c ) 擬 3D , 測線間距大於兩倍電極間距 ( Yang and Lagmanson, 2006 ) .....	30
圖 2-20	三維地電阻探測與擬三維地電阻探測之差異示意圖 : a) 三維地電 阻探測 ; b) 擬 3D 地電阻探測 .....	31
圖 2-21	三維效應探討之數值模型 ( Yang and Lagmanson, 2006 ) .....	33
圖 2-22	數值模形反算結果 ( a ) 三維電探反算 ( b ) 二維電探反算 ( Yang and Lagmanson, 2006 ) .....	33
圖 2-23	現地試驗反算結果 ( a ) 三維電探反算 ( b ) 二維電探反算 ( Yang and Lagmanson, 2006 ) .....	34
圖 3-1	正算模型的建立 .....	37
圖 3-2	二維&三維探測剖面 .....	39
圖 3-3	數值模擬流程圖 .....	41
圖 3-4	地層模形與施測參數說明圖 .....	42
圖 3-5	電極棒佈置圖 .....	44
圖 3-6	數值模型立體圖 .....	45
圖 3-7	A 類測線電阻率剖面結果 .....	46
圖 3-8	B 類測線電阻率剖面結果 .....	51
圖 3-9	C 類測線電阻率剖面結果 .....	55
圖 3-10	D 類測線電阻率剖面結果 .....	59

圖 3-11	E 類測線電阻率剖面結果.....	63
圖 3-12	B-T 類測線佈設平面圖.....	66
圖 3-13	B-T 類測線電阻率剖面結果.....	68
圖 3-14	A 類地層 $n=0.05$ 測線電阻率剖面結果.....	72
圖 3-15	B 類地層 $n=0.1$ 測線電阻率剖面結果.....	73
圖 3-16	A-P 類測線電阻率剖面結果.....	75
圖 3-17	B 類 L1 與 E 類 L2 測線電阻率剖面結果比較.....	78
圖 3-18	模擬概念構想圖(管線).....	79
圖 3-19	具管線地層模型.....	80
圖 3-20	P-1 類測線電阻率剖面結果.....	83
圖 3-21	P-2 類測線電阻率剖面結果.....	88
圖 3-22	D-1 類測線電阻率剖面結果.....	94
圖 3-23	D-2 類測線電阻率剖面結果.....	99
圖 3-24	N 類測線電阻率剖面結果.....	105
圖 3-25	DX 類測線電阻率剖面結果.....	108
圖 4-1	試驗主機-SYSCAL PRO Switch 48.....	114
圖 4-2	試驗主機-SYSCAL PRO Switch Pro box.....	114
圖 4-3	ELECTRE II 軟體施測排程設定視窗.....	115
圖 4-4	現地量測流程圖.....	115
圖 4-5	電極排列方式特性比較.....	118
圖 4-6	鯉魚潭給水廠管路現況圖(中社段).....	118

圖 4-7	測線規劃佈置圖 .....	120
圖 4-8	地電阻測線位置圖 .....	121
圖 4-9	金屬管線地層 2D 與 3D 地電阻探測結果 .....	124
圖 5-1	斷層數值模擬地層 .....	126
圖 5-2	具斷層地層模型-角度影響 .....	127
圖 5-3	具斷層地層模型-電阻比率影響(所夾角度 30 度) .....	129
圖 5-4	3D 效應影響範圍數值模擬地層 .....	130
圖 5-5	具斷層地層模型-3D 效應影響範圍 .....	131
圖 5-6	具斷層地層模型-3D 效應影響範圍控制因子 .....	133
圖 5-7	具管線地層模型 .....	134
圖 5-8	具管線地層模型-尺寸影響 .....	136
圖 5-9	具管線地層模型-埋入深度影響 .....	138
圖 5-10	具管線地層模型-電阻率比之影響 .....	139
圖 5-11	具管線地層模型-3D 效應影響範圍 .....	140
圖 5-12	具管線地層模型-3D 效應影響範圍控制因子 .....	142
圖 5-13	斷層地層映射模型示意圖 .....	144

# 一、前言

## 1.1 研究動機

地電阻影像探測法(Electrical Resistivity Imaging Profile, RIP)屬於非破壞性探測技術，為傳統地球物理探測技術之一，由於對導電率佳的水有一定的敏感度，且對於地下水分佈判釋的狀況又能得到不錯的結果。傳統上 RIP 法廣泛地應用在地質、地下水文及環境地工調查方面以及隧道工程、尋找地下水、溫泉、地熱測勘等能源開發之領域，是工程界最常利用的地球物理方法之一。目前地電阻影像探測的實務主要以 2D 探測為主，雖然 3D 地電阻影像探測已漸趨成熟，但由於 3D 探測需要有空曠無障礙的施測面，且儀器需要大數量的頻道數，因此一般施測仍以線性二維電探為主。

線性二維電探得到的是地層下二度空間剖面的電阻率分佈；然而在真實世界中則是三度空間的立體型態，因此為了使電探的結果更符合真實的地層狀態並進一步提高電探的解析度，有必要對二維與三維地電阻探測進行相關的研究與探討。

## 1.2 研究目的

線性二維電探係假設地層電阻率性質在垂直測線方向為均質，在施測結果的判讀上常忽略此一假設可能造成的失真，當地層不符合在垂直測線方向為均質的條件時，二維電探結果可能造成的誤差不詳。

因此，本研究的目的即在於探討二維地電阻影像探測之 3D 效應，了解當地層具有 3D 變化時可能造成的影響範圍，根據上述研究提出電探施測實務的注意事項與改良方案。

本研究將利用數值模擬及現地試驗探討不同 3D 條件下，二維電探可能造成的失真現象，並研擬可能對策。研究前半部將利用 AGI 公司 (2003) 所發展之 EarthImager3D 與 EarthImager2D 的分析軟體，將不同的排列、適用情形，利用數值模型做一明顯的介紹與區別。後半部再利用現地施測成果做比對分析，以了解當地層具有 3D 變化時可能造成的影響範圍。



## 二、文獻回顧

### 2.1 地電阻發展歷史

地電阻影像剖面法為傳統地球物理探測技術之一，其發展已行之多年；由於地電阻法對水的敏感度極大且對於地下異狀物分佈判釋的狀況能得到不錯的結果，自 1912 年 Schlumberger 首先作電阻量測迄今，國內外也有多位學者相互研究，反算分析也隨著計算機的進步也更加快速；在地層圖形上的描繪(geological mapping)判釋雖然已發展的較為便利，但是如遇大地工程問題如灌漿品質鑑定、斷樁完整性檢測、隧道位置確認以及地下管線探測時，必須倚靠精度更高之三維模型來處理；所以應用在大地工程的領域是一塊新的領域。

其順推理論以往常用 Mooney 等人的計算法則，雖然該法則可以得到不錯的結果，但是需要較長的計算時間，且僅針對一些理論上特定的電極排列方式。而在 1971 年 Ghosh 將濾波理論應用於地電阻法(DC method)的順推問題(forward problem)上，大大縮短了計算所需的時間，且亦能達到相當高的精確度，然而 Ghosh 所提出的亦是針對某些特定的電極排列，因此 Ghosh 的濾波理論並無法適用於任何電極排列狀況下所量測到的野外資料。

Dey and Morrison 將數值電阻模型分成有限的網格，再利用有限差分和有限元素等方法，即可對任一形狀體作分析。而 O' nell 等人提出一般電極排列的觀念，將濾波理論應用於一般的四極排列(four

electrodes configuration)，用同一組濾波加權係數(filter weighting coefficient)可以計算任何一種四極排列時的理論視電阻係數(apparent resistivity)。直到近年來隨著計算機功能的進步，計算時間效率上也大幅的提高。

由於在順推的計算過程中，所推求出來的電阻率僅為代表地層綜合效應的視電阻率(apparent resistivity)，並不為實際地層上的電阻率(Loke)。所以必須再利用所求得的視電阻率作為初始值(initial value)做一反算分析。而以觀測資料推求地層組態的作業稱為解釋。然而推求地層參數首先要知道電位函數，但電位函數由地層構造決定，但地層構造通常是未知。所以較進一步的解釋事先假設地層構造，依設定的地層模型求出電位函數，並計算對應於觀測值的模型值；再計算觀測值與模型值的差異，並適度地調整差異直到誤差小到可以接受。此方法稱為逆推法。

在 1970 年之前，逆推解釋法未完全建立，彼時先繪製許多不同模型的理論曲線(通常繪成視電阻率曲線，稱為標準曲線)將實際觀測結果與模型的結果做比較以作解釋。除了極少的例子，此種方法無法顯示擬合程度的高低，對地層參數(如地電阻率)的可信度也不高。而最早將其電阻資料，利用探測排列和等高線的安排作成擬投影剖面

(pseudo-section)的，為 1957 年的 Hallof。不過那時只是用少數近似電阻率的圖去估計，數量不多且可信度也不高；然而，反算剖面是需要更多且更符合實際模型電阻資料的。進而許多的學著也相繼地推出一些自動化反算逆推 技術，目的也是希望利用大量的試誤(trial-and-error)方

法資料，去求得最佳化的解(optimization)。如：Smith and Vozoff，Tripp 等人利用非線性最佳(nonlinear optimization method)技巧，證明了可解一些簡單的模型；deGroot-Hedlin and Constable，Sasaki 也說明高斯—牛頓最小平方最佳化方式(Gauss-Newton least-square optimization)可快速收斂資料。但由於在最佳化的過程中，計算偏導函數(partial derivative)需要消耗時間，所以還是擺脫不了其運算時間過於龐大的缺點(Lines and Treitel)。

直到 Loke，將其順推過程(forward problem)及逆推理論(inverse problem)，利用以最平滑最小平方法(smoothness-constrained least-square method)為基礎，並在反算的過程中利用半牛頓法(quasi-Newton method)等方法做為運算過程中的偏導函數(partial derivatives)，因此加快了運算時間，並寫成套裝軟體後，更大幅提升其使用效率及可讀性。

## 2.2 地電阻法基本原理

根據歐姆定律，以及電阻率基本假設，如式 2-1 與式 2-2：

$$\text{resistance } R \text{ (ohms)} = \frac{\text{voltage difference (volts)}}{\text{current (amps)}} = \frac{\Delta V}{I} \quad (2-1)$$

$$\text{resistivity } \rho \text{ (ohm - m)} = \frac{\text{resistance} \times \text{length}}{\text{area of cross - section}} = \frac{RL}{A} = \frac{\Delta V L}{IA} \quad (2-2)$$

經過移項以後可得到式 2-3：

$$\frac{\Delta V}{L} = \frac{\rho I}{A} \quad (2-3)$$

將式 2-3 中的長度 L 趨近於零，並且假設此微小的元素中其電阻率

值 $\rho$ 均一致，則式 2-3 可以再改寫為梯度的形式如下：

$$-\text{grad}V = \rho i \quad (2-4)$$

其中  $i$  為每單位橫斷面積中的電流密度。

現假設現地地層為一個等向均質的半無限域空間，若於地表設置一個單點電極  $C_1$  並且輸入強度為  $+I$  的電流，如圖 2-1 所示，則電流將從電極端以半圓形放射狀向外射出，距電極端任意  $r$  處的電流密度為：

$$i = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2-5)$$

此時的電位梯度為  $-\partial V / \partial r$ ，若將式 2-5 的電流密度  $i$  帶入式 2-4，則可以將式 2-4 改寫如下：

$$-\frac{\partial V}{\partial r} = \rho i = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (2-6)$$

因此距離  $C_1$  為  $r$  處的電位可以經由積分式 2-6 而得到：

$$V_r = \int \left( \frac{\rho I}{2\pi r^2} \right) dr = \frac{\rho I}{2\pi r} + C \quad (2-7)$$

式 2-7 即為半無限域中，求取單點電極距離  $r$  處之電位的基本公式，式中的  $C$  為積分所得積分常數，不過當  $r = \infty$  時， $V_r = 0$ ，所以得到  $C=0$ 。下節將依據此概念導入雙點電極所產生的電流場分佈。

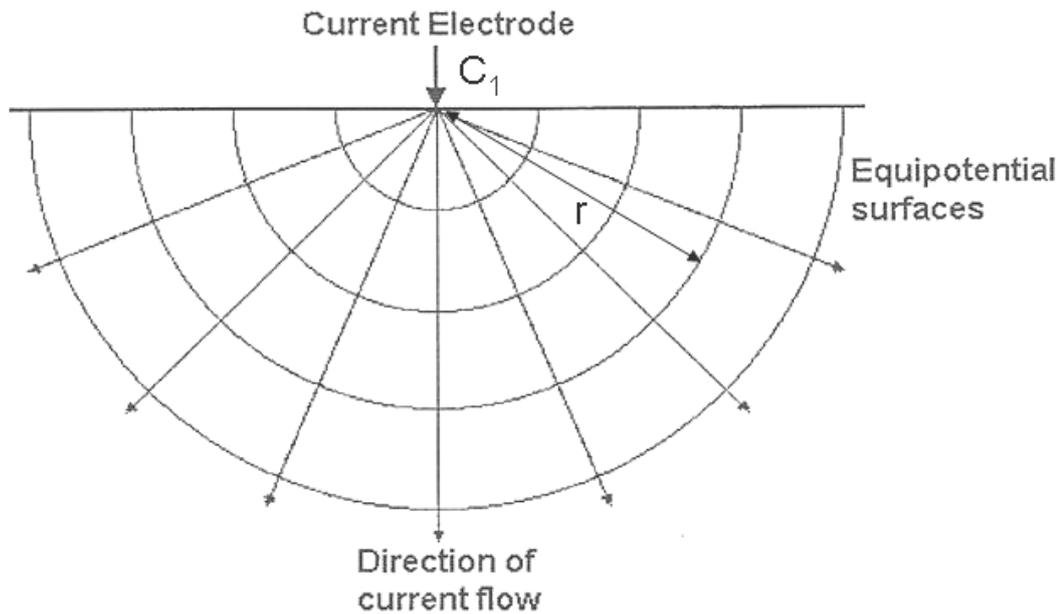


圖 2-1 單點電極電流與電位分佈 (修改自 Loke, 2003)

若假設地表佈設兩個電流極 C1、C2，如圖 2-2 所示，並且在兩電流極之間佈設兩個電位極 P1、P2 以量取 C1、C2 之間的電位差值。C1 為輸入端電流極以 +I 表示，C2 則為輸出端電流極 -I，其中 C1 和 P1 的距離為  $R_1$ ，P1 和 C2 的距離為  $R_2$ ，C1 和 P2 的距離為  $R_3$ ，P2 和 C2 的距離為  $R_4$ 。根據式 2-7 所得關係，C1 以及 C2 對 P1 的電位貢獻分別為：

$$V_{C1} = \frac{\rho I}{2\pi R_1}$$

$$V_{C2} = \frac{-\rho I}{2\pi R_2} \quad (2-8)$$

由靜電學原理得知，多點電荷對某點產生的電荷大小，會等於每一個電荷對該點的電位加總，所以 P1 的電位等於  $V_{C1} + V_{C2}$ ，即：

$$V_{P1} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2-9)$$

同理可得 C1 以及 C2 對 P2 的電位貢獻，即為：

$$V_{P_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right) \quad (2-10)$$

所以將  $V_{P_1}$  與  $V_{P_2}$  相減，便得到 P1 與 P2 兩點的電位差值：

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) - \left( \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right) \right] \quad (2-11)$$

將式 2-11 重新整理，可得電阻率  $\rho$  為：

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \cdot \frac{I}{\left[ \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) - \left( \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right) \right]} = \frac{2\pi\Delta V}{I} \cdot \frac{1}{G} \quad (2-12)$$

其中  $2\pi/G$  為幾何排列參數  $K$ ，因不同的電極排列方式而異，在此需注意的是真實地層並非理想均質狀況，所以在此處所得到的電阻率不是地層真實的電阻率，而是經由不同幾何排列因子所測得的視電阻率值  $\rho_A$  (Apparent Resistivity)，需經過反算分析才能得到真實的地層電阻率值。

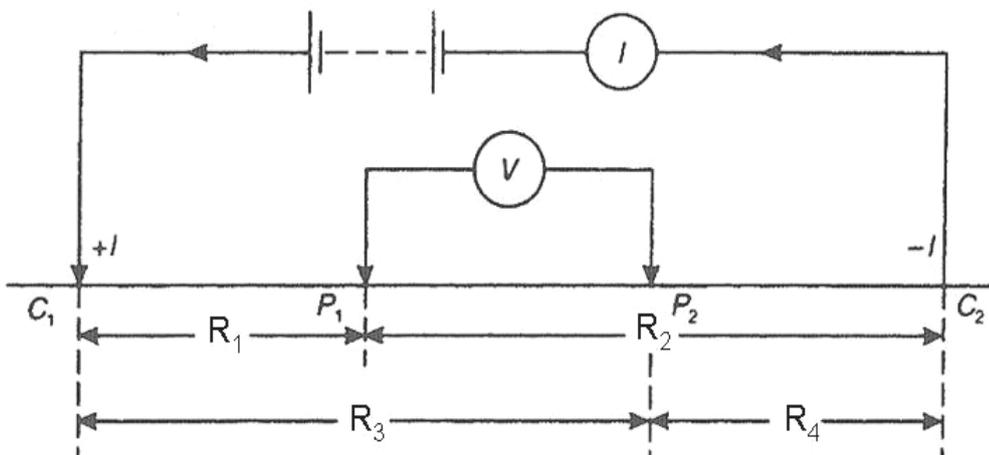


圖 2-2 雙點電極排列示意圖 (修改自 Reynolds, 1997)

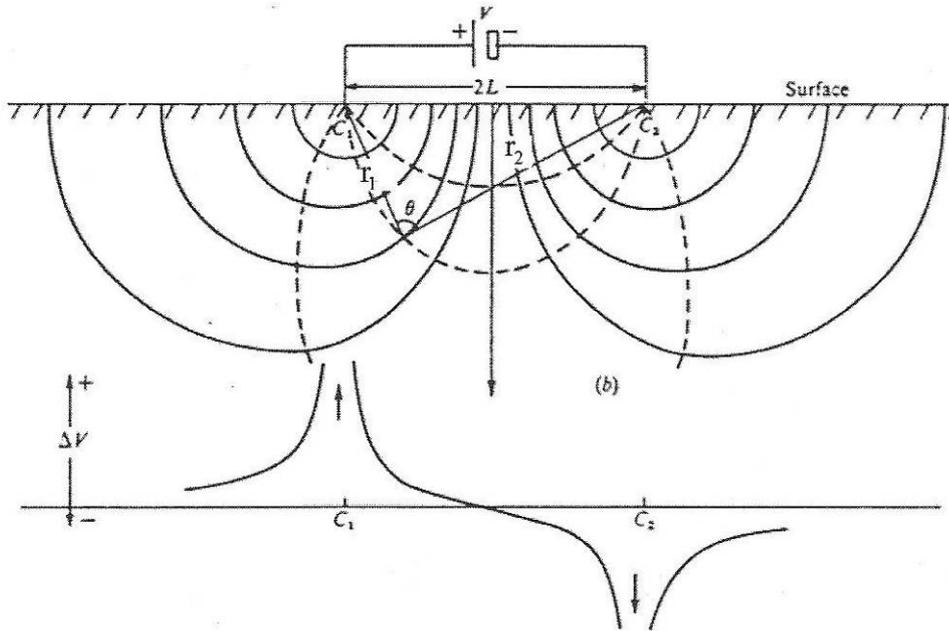


圖 2-3 雙點電極電流與電位分佈變化 (Telford, 1990)

Telford (1990) 以電流極間距與深度的變化關係，對均質地層的水平電流密度做相關探討，如圖 2-4 所示，其中  $L$  為兩電流極  $C_1$ 、 $C_2$  的距離， $x$  是  $P$  點投影至地表與  $C_1$  的距離， $z$  為  $P$  點深度， $r_1$  與  $r_2$  則分別為  $C_1$ 、 $C_2$  和  $P$  點的距離，假設  $P$  點的水平電流密度為  $J_x$ ，則  $J_x$  即為：

$$J_x = -\frac{I}{\rho} \frac{\partial V}{\partial X} = -\frac{I}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{I}{2\pi} \left[ \frac{x}{r_1^3} - \frac{(x-L)}{r_2^3} \right] \quad (2-13)$$

若  $r_1 = r_2$  時，2-13 式可以在簡化如下：

$$J_x = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{L}{\left( z^2 + \frac{L^2}{4} \right)^{3/2}} \quad (2-14)$$

根據式 2-14，將電流極間距和深度的改變與  $P$  點的水平電流密度變化關係如圖 2-5 所示，實線為固定某電流極間距時，隨著  $P$  點的深度增加，其水平電流密度  $J_x$  逐漸遞減；而虛線則表示固定  $P$  點於某一個深度

$z$ ，當電流極間距變大的時候， $P$  點水平電流密度  $J_x$  漸增，且當電流極間距  $L = \sqrt{2z}$  時得  $J_x$  的最大值。

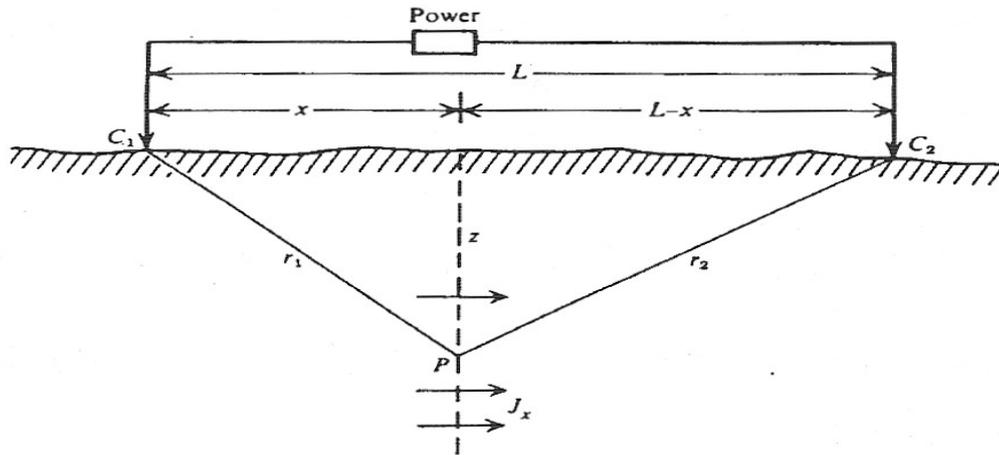


圖 2-4 均質地層下雙點電極水平電流密度幾何參數 (Telford, 1990)

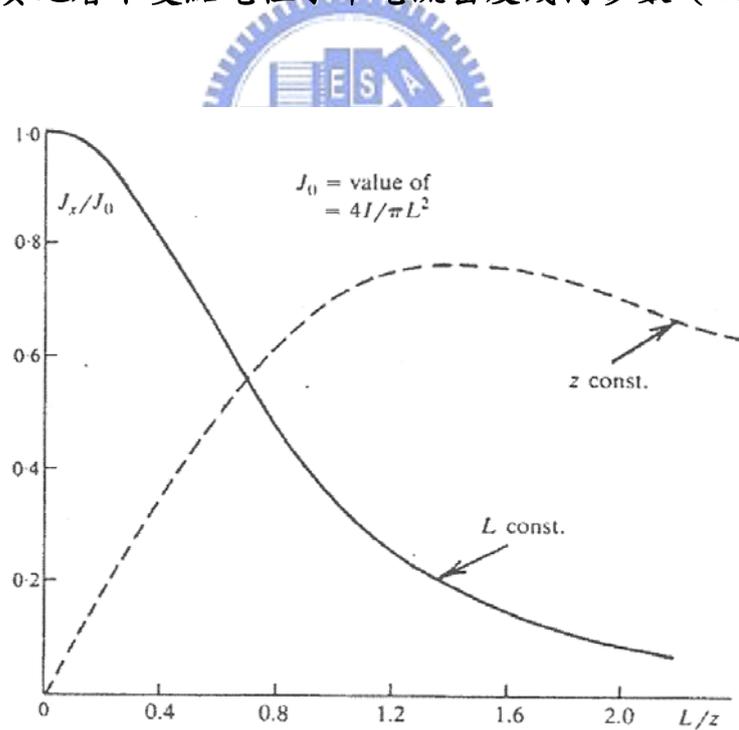


圖 2-5 電流極間距和深度的改變與  $P$  點的水平電流密度變化 (Telford, 1990)

Nostrand 與 Cook (1966) 提出了一個可計算雙電流極均質地層下的電流通過百分比，如式 2-15：

$$i = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{2z}{L} \right) \quad (2-15)$$

利用式 2-15 的關係，可求得均質地層下的電流通過百分比  $i$  如圖 2-6 所示，當  $z = L/2$  時，只有 50% 的電流到達其深度，但是當  $Z = L$  時，則有到達 70% 的電流通過，因此當電極間距越大時，會有較多的電流貫入較深的地層內。

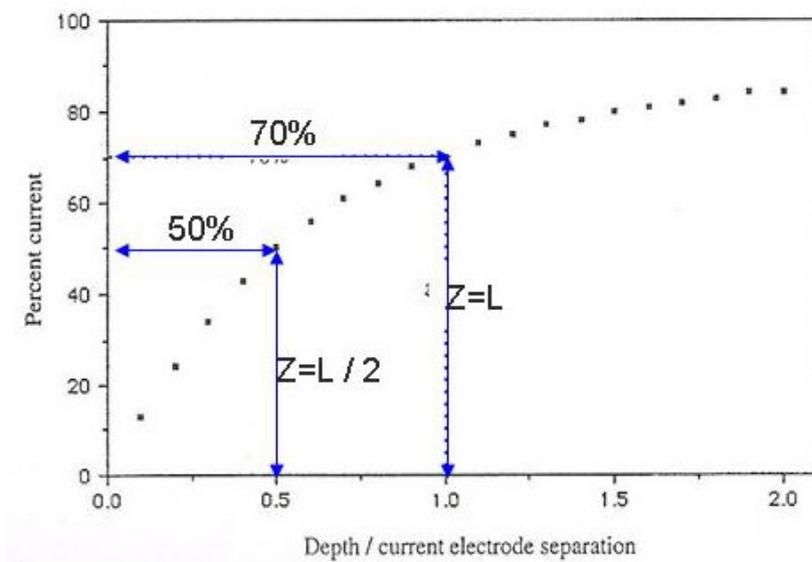


圖 2-6 均質地層電流通過百分比 (Nostrand and Cook, 1966)

在非均質地層情況下，Hubbert (1940) 提出一個位於兩不同材料界面處的電流折射關係，來解釋地層的電阻率在非單一均質的地質條件之下，所產生的電阻率變化，如式 2-16：

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (2-16)$$

如圖 2-7 (a)，式中  $\theta$  為電流方向與法線所夾角度， $\rho$  為不同地層的電阻率；若下層電阻率  $\rho_2$  大於上層電阻率  $\rho_1$ ，當電流流入下層介質時電

流方向會趨向法線，如圖 2-7 (b)；反之若下層電阻率 $\rho_2$ 小於上層電阻率 $\rho_1$ ，則電流方向在下層介質內會遠離法線，如圖 2-7 (c)。依照上述所得關係，我們可以發現電流流過非均質地層時的電流密度分佈變化，如圖 2-8。在圖 2-8 (a) 中所顯示的是均質地層情況下，即 $\rho_2 = \rho_1$ 時的電流密度分佈，不過當增加了 $\rho_2$ 值使 $\rho_2 > \rho_1$ ，此時的電流密度變成較集中於上層的介質中，如圖 2-8 (b)，反之當 $\rho_2 < \rho_1$ ，電流密度則較集中在下層介質，如圖 2-8 (c)。

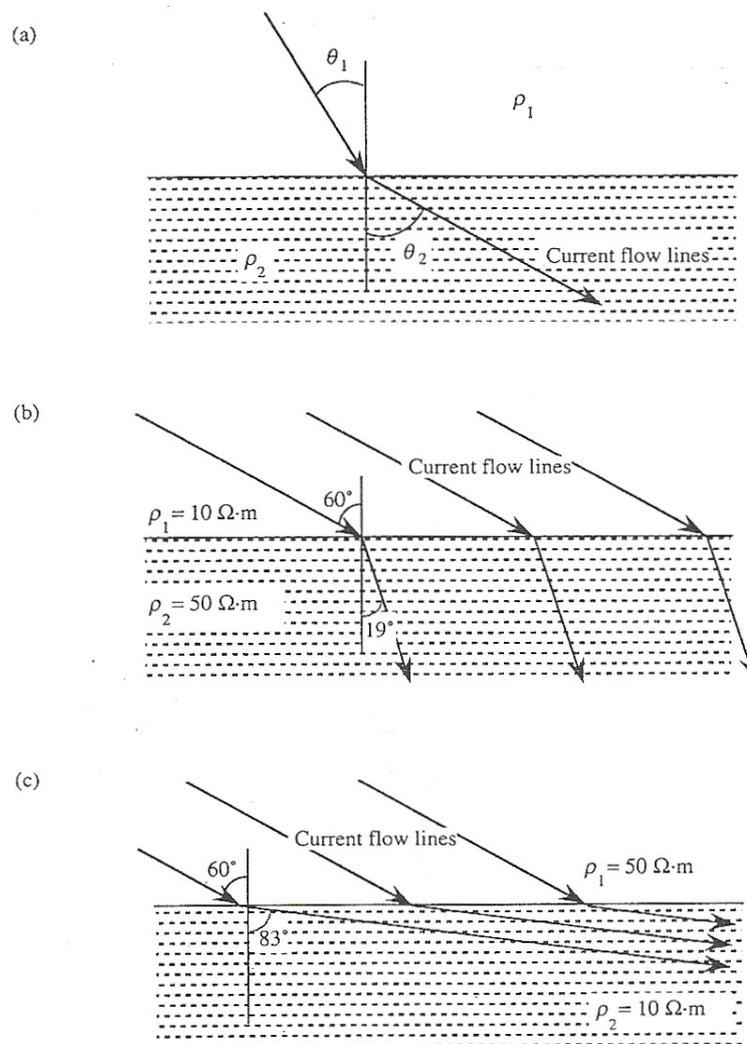


圖 2-7 非均質地層電流折射 (Hall, 1992)

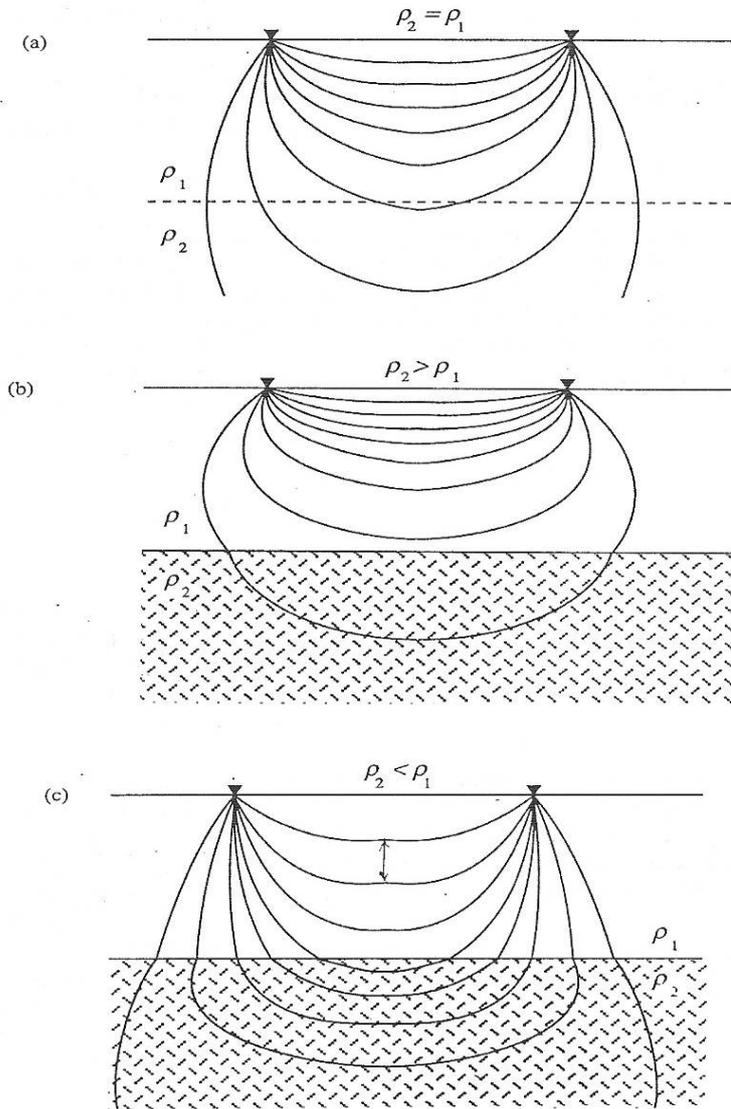


圖 2-8 非均質地層電流密度分佈 (Hall, 1992)

Nostrand 與 Cook (1966) 提出另一個可計算雙電流極於非均質地層下的電流通過百分比公式，如式 2-17：

$$i = \frac{2\rho_1}{\pi\rho_2} (1+k) \sum_{n=0}^{\infty} k^n \left\{ \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left[ \frac{2(2n+1)z}{L} \right] \right\} \quad (2-17)$$

式中參數如圖 2-9 所示， $L$  為兩電流極間距， $a$  為單位電極間距， $z$  則為介面位置深度， $k = \rho_2 - \rho_1 / \rho_2 + \rho_1$ ，定義為介面反射係數。根據式

2-17，圖 2-10 為電流在兩層地質結構下所佔的電流百分比示意圖，以  $Z=3a$  為例說明，當  $k=0.4$  時，電流位於界面下佔全部比例約 20%，但  $k=-0.4$  時，則將近 20%，因此表示  $k$  大於 0 時下層介質電阻率大於上層，電流會選擇上層較低的電阻率通過，反之當  $k$  小於 0 時電流向下層較低的電阻率介值集中，此結果與 Hubbert (1940) 的結論相呼應。

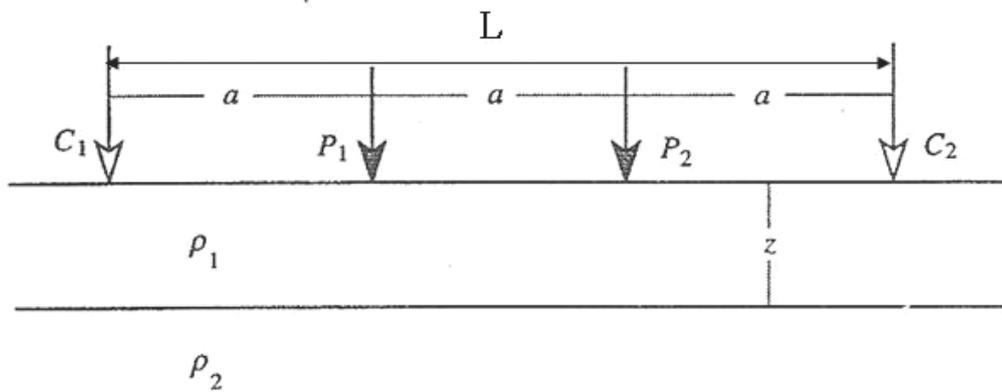


圖 2-9 單一水平界面空間參數 (Nostrand and Cook, 1966)

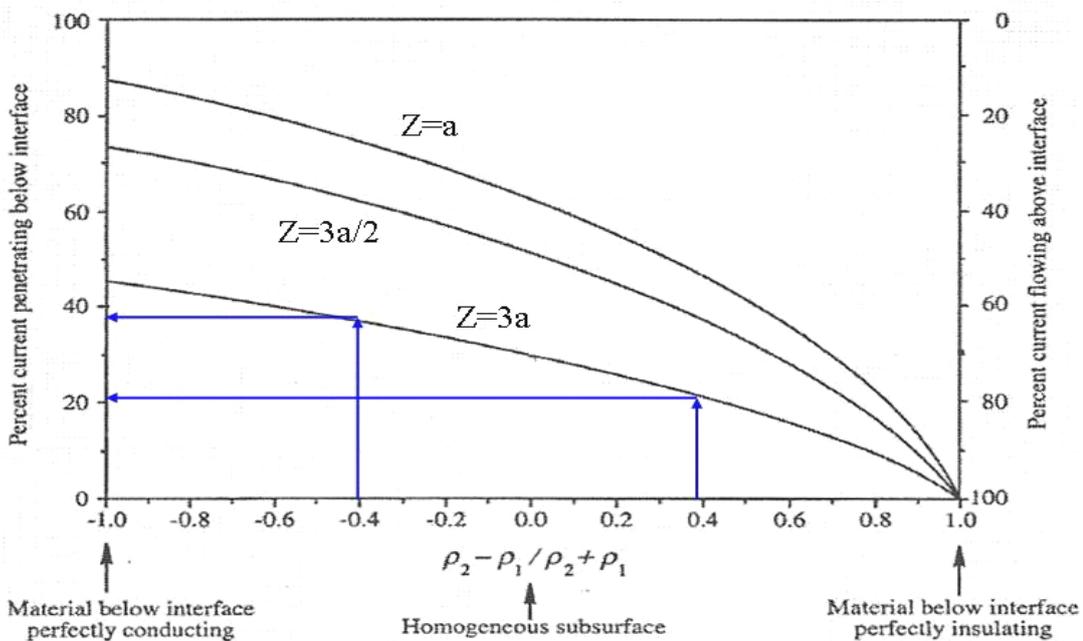


圖 2-10 單一水平界面電流百分比示意圖 (Nostrand and Cook, 1966)

### 2.3 地電阻影像法(ERT)

地電阻影像法由過去的一維探測逐漸發展到二維與三維的大範圍剖面，所能提供的空間資訊也因而隨之增多，目前工程實務上則以二維地電阻探測的應用較為廣泛。二維地電阻影像剖面法(electrical resistivity tomography, ERT)，是綜合一維探測的垂直與橫向探測結果組成電阻率剖面，適用於大範圍的地表下地層電阻率分佈情形，而影響電阻率的變化因子包含了地質材料的導電特性、孔隙率、含水量、飽和度、地層構造、地層所含離子濃度等等。由於地層內部常由粉土、砂土、黏土、礫石層、母岩以及含水層等組合成不同層次，各層次有其特有之電阻率，便可利用不同的電阻率厚度和層次，進而推定各層之水文地質狀態。



地電阻影像探測的量測原理，乃藉由外加低頻電流經由圖 2-11 中電流極 C1、C2 流入地層中，再利用電位極 P1、P2 量測地層所反應的電位差值，由該量測的電壓值與電流值，再經由靜電學理論計算受測土層之視電阻率 (apparent resistivity)。地電阻量測空間影響範圍視電極間距而定，間距越大其探測深度越深，不過相對地解析能力便會有所降低，所以必須根據探測目的，在探測深度與解析度兩者之間取得平衡，以獲得較佳結果。而一般實務上在進行地電阻探測時，於地表佈設數十根的電極棒，以 Wenner 為例的話，量測過程中每次選取等間距的四根電極棒作為電流極 C1、C2 與電位極 P1、P2 來量取一筆資料 (如圖 2-11 所示)，再藉由改變不同電極間距與位置，即電極間距不斷增大，獲得

不同幾何空間位置上的視電阻率值，稱為擬似電阻率剖面 (Pseudo-Section)。最後經由反算分析獲得真實地電阻影像剖面，藉以了解地層構造 (Loke, 2003；尤仁弘, 2006)。

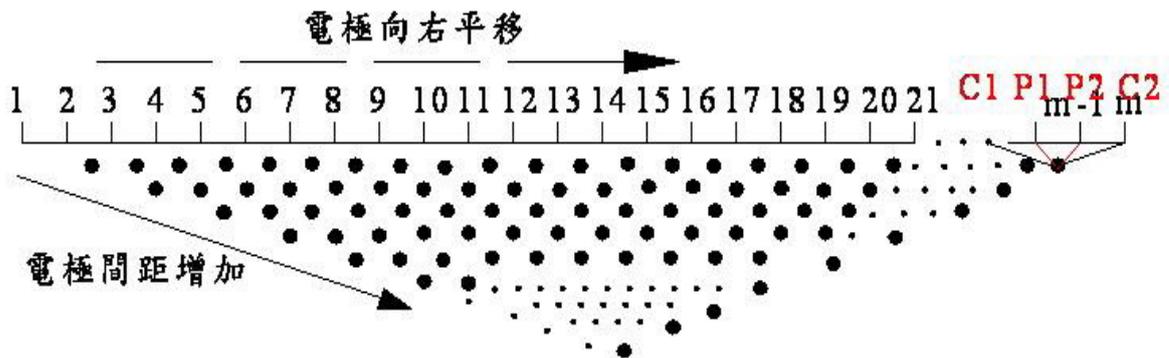


圖 2-11 Wenner 地電阻探測量測示意圖 (摘自尤仁弘，2006)

### 2.3.1 二維地電阻探測方法

#### 2.3.1.1 施測原理

二維地電阻影像法於現地施測時，依照探測目的所需要的探測深度與解析度，在地表佈設數十根等間距的電極棒後，根據前述文獻所指出雙點電極電流場下，可求出地層中某深度與位置的視電阻率  $\rho_a$ ：

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \cdot \frac{I}{\left[ \left( \frac{I}{R_1} - \frac{I}{R_2} \right) - \left( \frac{I}{R_3} - \frac{I}{R_4} \right) \right]} = \frac{2\pi\Delta V}{I} \cdot \frac{I}{G} \quad (2-18)$$

其中  $2\pi/G$  為幾何排列參數 K，因不同的電極排列方式而異。一般常見的電極排列方式如圖 2-12 所示，而每種排列方式探測的解析度方向優劣與最大可探測深度也有所差異，所以在工程實務上常會

施作各種不同的電極排列法，以便於對每種排列方式的分析結果做互相比對與解釋，互補各排列方式所不足的地方。

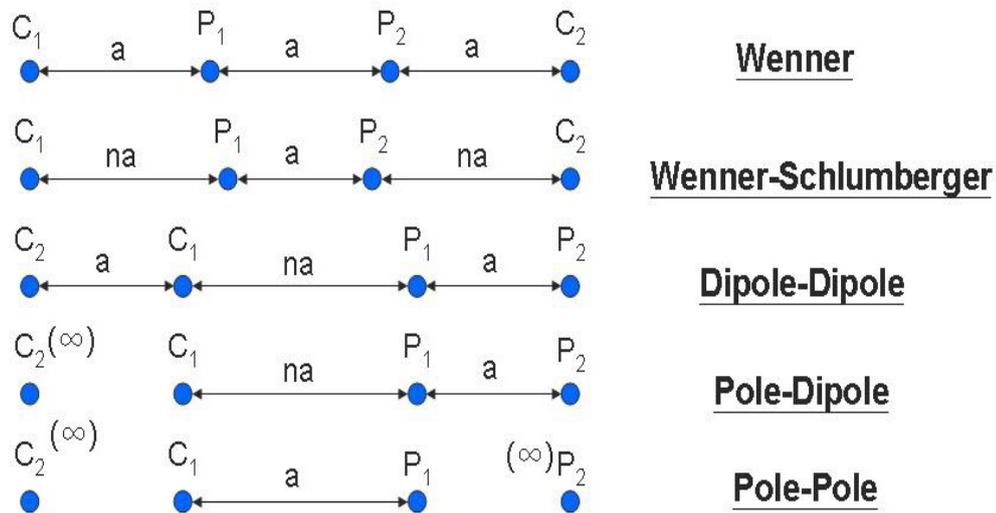


圖 2-12 一般常見電極排列方式

以 Wenner 為例，施測過程如圖 2-13 所示，首先在一倍電極間距下，先以第一支與第四支電極為電流極  $C_1$  和  $C_2$ ，在以第二支與第三支為電位極  $P_1$  和  $P_2$ ，並根據式 2-31 於 Wenner 排列方式下的幾何量測原理，如此即可量測到第一個位置的視電阻率值。而在固定為一倍電極間距之下，向右不斷平移選擇四根電極棒，也就是以第二支與第五支電極為電流極  $C_1$  和  $C_2$ ，以第三支與第四支電極為電位極  $P_1$  和  $P_2$ ，以此類推，即可量測到第一層視電阻率值，接著再藉由改變電極間距的大小，如兩倍、三倍、四倍等等的等電極間距，即可量測到不同深度層面的視電阻率值。如此反覆施做，以得到完整擬似電阻率影像剖面(Pseudo-Section)。地電阻量測之測擬似電阻率影像剖面表示每一施測幾何（電

極配置) 所得到之視電阻率，必須透過反算分析方能獲得地層真實的電阻率分佈。反算分析之方法主要以正算模式為基礎，通常假設一電阻率分佈，其量測之視電阻率可依據靜電學理論與有限元素法 (finite element) 或有限差分法 (finite difference) 來模擬預測，接著設法改變電阻率分佈，使得預測的視電阻率值盡量逼近量測值，則可估計出地層之真實電阻率分佈，現地由於資料量大，反算分析通常以結合正算模式之最佳化方法來進行。

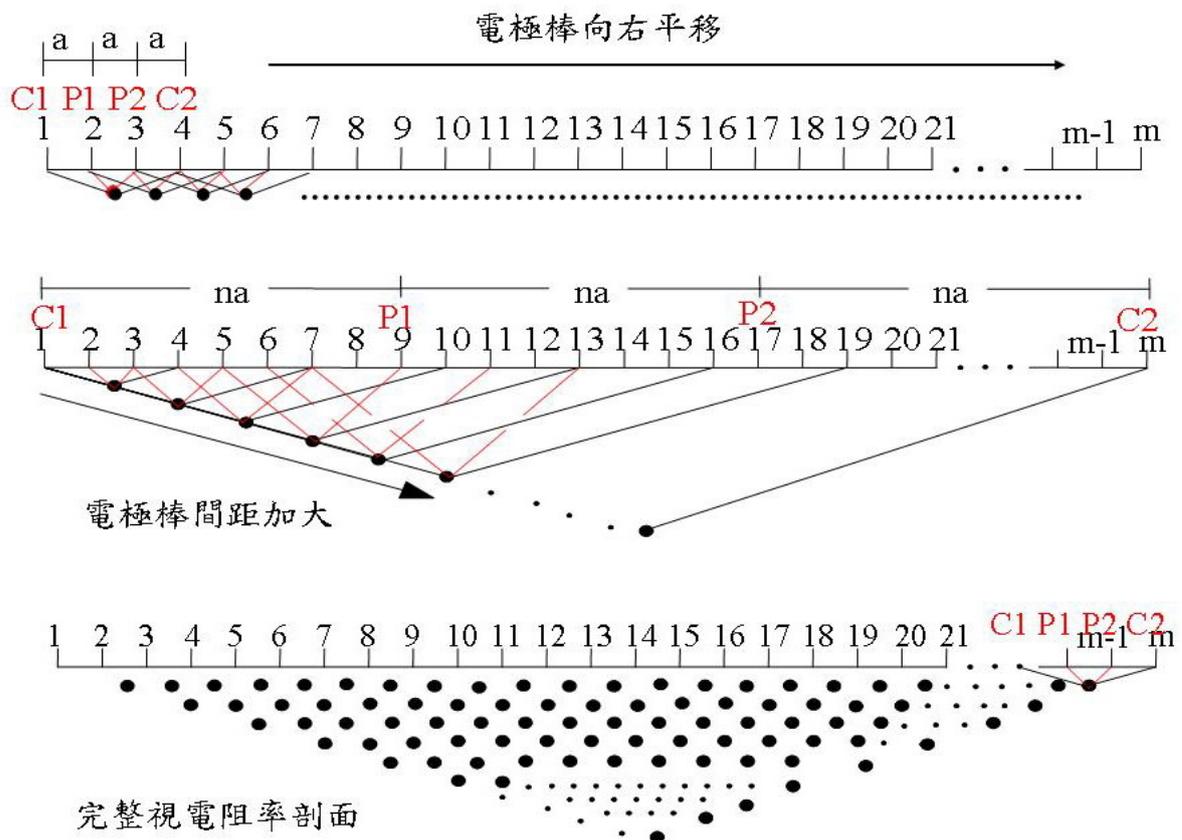


圖 2-13 電極排列施測流程 (Wenner 為例) (修改自尤仁弘，2006)

### 2.3.1.2 電極排列方式比較

在現地施作地電阻探測時，會依照所預期達到的工程探測目的

來選擇施測的電極排列法，而影響電極排列方式探測結果的優缺點，通常會以下列三個因素來做探討：(1) 訊號強度 (2) 可探測深度 (3) 垂直與橫向解析能力。

訊號強度除了會受週遭雜訊影響以外，在一般情況下會與電極幾何排列參數  $K$  成反比關係，且訊號強度衰減係數為幾何排列參數的倒數，即  $1/K$ 。Edwards (1977) 提出一測深參數為  $Z_e/L$ ，其中  $Z_e$  是探測深度， $L$  則是測線展距，以推估各電極排列方式的最大探測深度。至於在解析度方面，則是將測線展距正規化為 1 公尺，深度由 0.025 公尺到 1 公尺的各電極排列下靈敏度剖面，來探討其解析能力 (楊證傑，2005)。



根據以上各電極排列方式下所展現出的三種量測特性，可以對常見的電極施測方法的綜合表現有所了解。以 Wenner 為例來說，其電極排列法如圖 2-13，電流極  $C1$ 、 $C2$  在外，電位極  $P1$ 、 $P2$  在內，四根電極成等間距排列，其電極排列幾何參數  $k=2\pi a$ ，故訊號強度衰減係數是  $1/k$ ，即為  $1/2\pi a$ ，與其他的電極排列法比較起來相對訊號衰減程度低，故訊號強度較強。因此 Wenner 適合用在以監測為目的之工址，以降低背景雜訊大時所造成的影響。根據 Edwards (1977) 提出的測深參數，Wenner 的探測深度約為展距的 0.173 倍，相對適用於淺層的調查。依照靈敏度剖面的結果分析，Wenner 排列下的電阻率值對於垂直方向靈敏度較高，電阻率值變化明顯，但是在水平方向卻不顯著，因此垂直方向解析度優於水平方向，若當地質狀態

為垂直向下的水平層狀變化時，以 Wenner 來施測會得到較佳的探測結果。

依據上述分析方法，我們將一般常見的各施測方式所表示出的三種量測特性整理如表 2-1：

表 2-1 各施測電極排列方式綜合表現

電極排列方式	訊號衰減係數	測深參數 $Z_e/L$ ( $Z_e$ :測深, $L$ :展距)	較佳解析方向
Wenner	$1/2 \pi a$ (A)	0.17 (D)	垂直向
Wenner-Schlumberger	$1/n^2$ (B)	0.17 (D)	垂直向 側向
Dipole-Dipole	$1/n^3$ (C)	0.22 (C)	側向
Pole-Dipole	$1/n^2$ (B)	0.36 (B)	側向
Pole-Pole	$1/2 \pi a$ (A)	0.86 (A)	較差

【註】等級 A 最佳，等級 D 最差

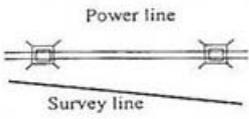
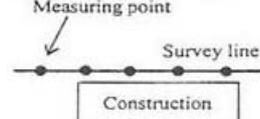
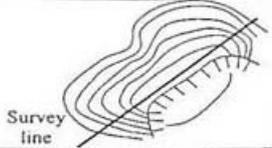
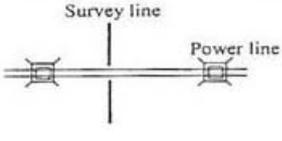
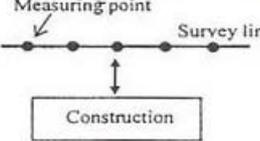
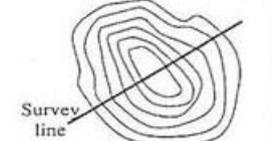
結果顯示，Wenner array 和 Pole-Pole array 衰減程度最小，相對訊號強度最強，但因為 Pole-Pole array 的電流極 C2 和電位極 P2 為遠電極，故兩者之間可能會涵蓋較多雜訊，所以實際上訊號強度不及 Wenner，所以 Wenner 較適用於以監測為目的之工程作為施測方法；探測深度部份以 Pole-Pole array 的探測深度最佳，測深參數  $Z_e/L$  達 0.86，而以 Wenner array 與 Wenner-Schlumberger array 為最差，故

適用於淺層地質探測，深層探測則以 Pole-Pole array 為主；至於各排列下對地層的解析能力，在垂直向與水平向各有其優缺點，則須依不同的工程探測目的來選擇最佳的排列方式。

### 2.3.1.3 佈線注意事項

為了避免地形效應對於地層下的電流場所產生的影響，在測線位置的選擇上應儘可能的挑選地形高低起伏較為平緩的區域進行量測，如表 2-2 所列；若地形起伏過大，則在後續的反算處理中須對地形效應加以修正 (Loke,2003)；此外，測線位置應避免通過障礙物，如現有結構物、鋼鐵柵欄、鋼結構地下基樁或基礎、高壓電塔、高壓電纜線、鐵路、道路、圍籬等等，盡量使測線遠離該障礙物大於所需探測深度的距離，但若是測線仍必須要通過該區域，則應儘可能使測線橫跨該障礙物的區域範圍為最小，並且將測線橫跨的位置記錄下來，以便於後續剖面分析的辨識工作。在一些特殊的需求下，對於該工址會分成多段測線來進行調查的工作，如圖 2-14，為一個彎曲隧道調查工程，因此利用分為測線 1 與測線 2 來佈設，且為了考量已知鄰近斷層處對該隧道所產生的影響，更增加佈設了輔助測線 1，來對該工程的整體地質情況有更通盤與全面的了解。(SEGJ, 2004)

表 2-2 一般佈線注意事項 (SEGJ, 2004)

Undesirable layout			
Desirable Layout	 <p data-bbox="392 607 715 674">A survey line should run perpendicular to a power line, keeping away from the pylons.</p>	 <p data-bbox="735 607 1110 674">A survey line should run keeping larger distance than designed target depth away from existing constructions</p>	 <p data-bbox="1134 607 1406 651">A survey line should run through gentle topography</p>

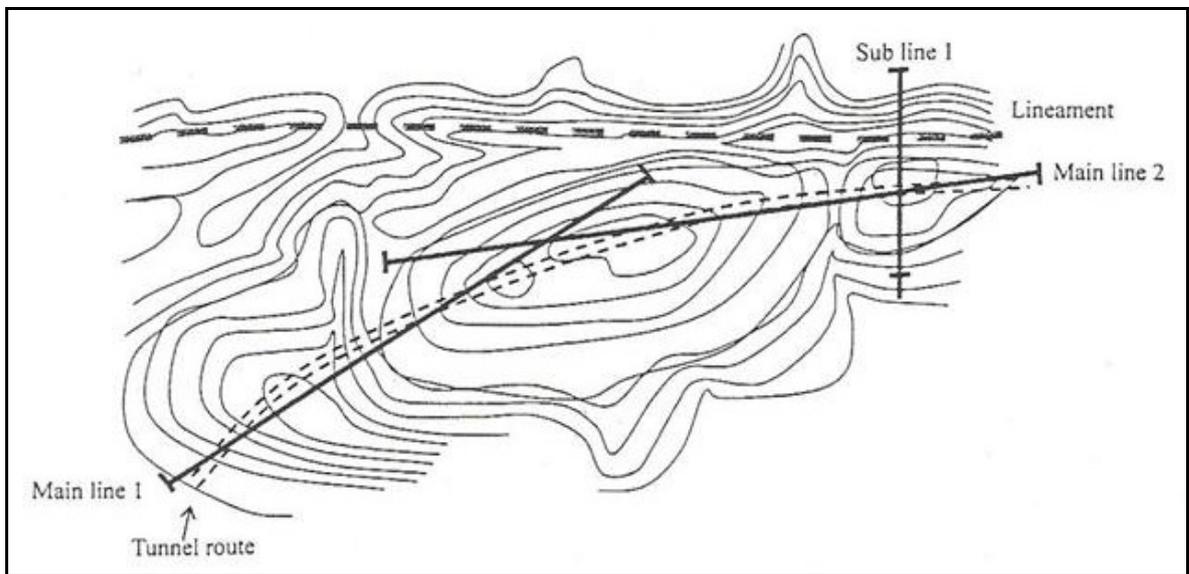


圖 2-14 彎曲隧道調查工程佈線規劃 (SEGJ, 2004)

#### 2.3.1.4 ERT 正算模擬

利用有限元素法 (finite element) 或有限差分法 (finite difference) 求解 ERT 控制方程式，可以進行 ERT 試驗的模擬；Loke (2003) 的正算模擬方法主要將地表下的大範圍區域切割成大量長方形網格，且網格大小由上而下逐漸增大，如圖 2-15 (b)；假定各網格的電阻率值後，選擇有限元素法或有限差分法進行正算，得到理論視電阻率剖面分佈如圖 2-15 (a)。

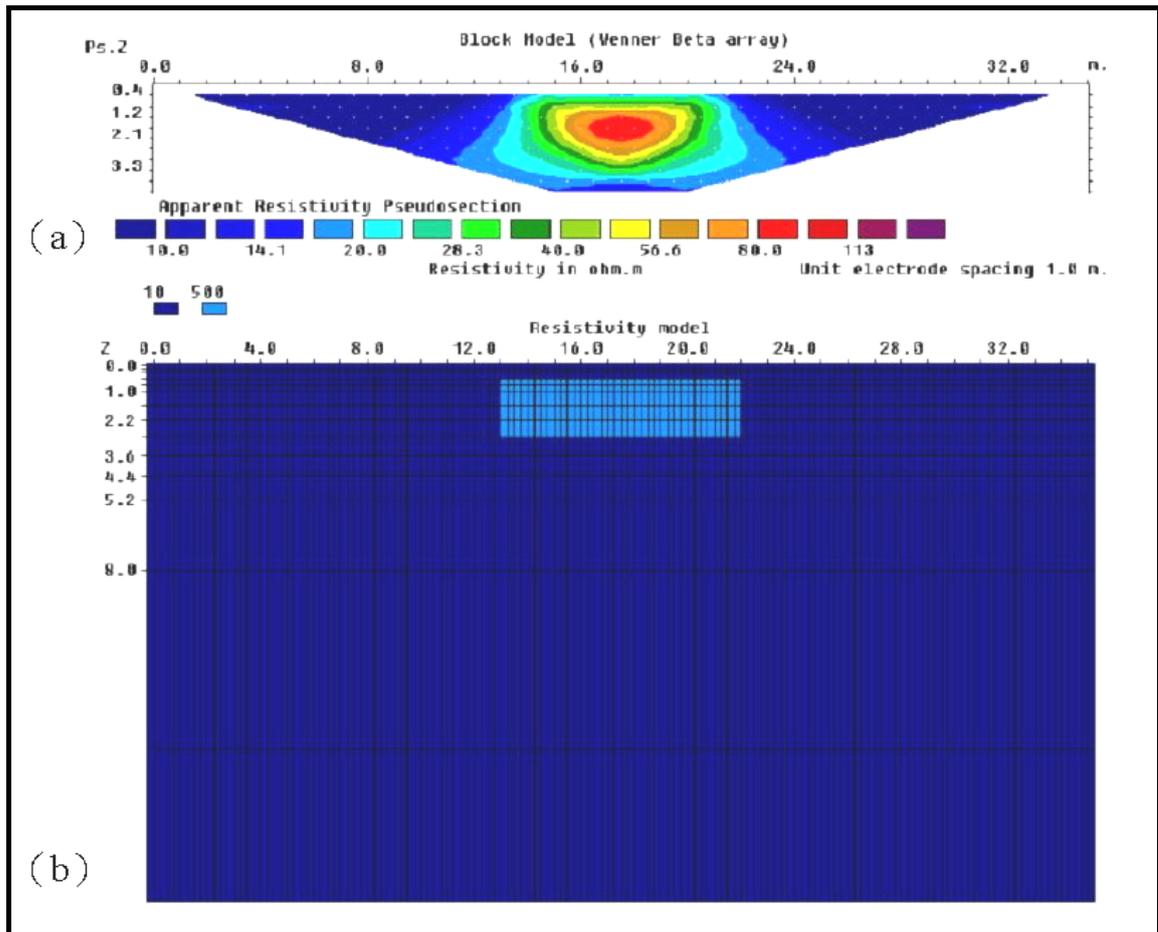


圖 2-15 正算模型網格 (Loke, 2003)

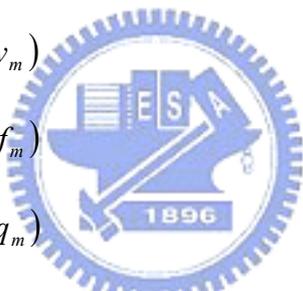
經由正算模擬，可以在已知現地地層的地質條件情況下，於正算模型內設定電阻值，經計算得到理論視電阻率剖面，以預期不同電極排列方法與電極間距的情況下於現地所可能產生的量測情形。而在反算分析的模式中，其最佳化過程則是藉由正算模擬的理論視電阻率值來與現地的量測值做誤差比對，以收斂出最後的反算結果。此外正算還可以對反算的結果正確性做進一步探討，也就是對於重點調查區域做更精確的假設正算模型，討論現地量測資料所反算結果與假設模型的接近程度以評估其準確性。

電探的空間解析度探討，將利用正算數值模擬方式，在預先假設的地層模型下，對不同的量測電極間距與地質條件等所展現之解析度做相關的評估。

### 2.3.1.5 ERT 反算原理

ERT 量測所得不同位置深度之視電阻率值，稱為擬似電阻率剖面 (pseudo-section)，必須經過反算分析才可以得當真實地層的電阻率剖面，所以此節將探討反算分析的原理與過程。

定義反算最佳化過程中，量測資料行向量  $y$ 、模型反應函數行向量  $f$ 、模型參數行向量  $q$ ，分別以下列的型式表示：(Loke, 2003)

$$\begin{aligned} y &= \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ f &= \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_m) \\ q &= \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_m) \end{aligned} \quad (2-19)$$


其中  $m$  表示向量中有  $m$  個量測資料值。若反應函數為一個線性系統，則我們將量測資料向量  $y$  與模型參數向量  $q$  帶入反應函數後，所得到的反應函數向量  $f$  的差值定義為向量  $d$ ，即：

$$d = y - f \quad (2-20)$$

#### 1. 最佳化最小平方反算法

在最小平方法的最佳化過程中，最終目標是希望使式 2-20 中  $d$  的誤差平方和  $E$  (如式 2-21 所示)，能減低到最小。因此利用高斯牛頓法來求取模型參數向量  $q$  所應改變的向量值  $\Delta q$ ，如 2-22 式，其中  $J$  即為 Jacobian 矩陣；由此得到第  $i+1$  次的模型參

數  $q_{i+1} = q_i + \Delta q_i$ ，從而進行疊代計算。

$$E = d^T d = \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (2-21)$$

$$J^T J \Delta q_i = J^T d ; J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad (2-22)$$

由於初始資料不佳常會使得  $J^T J$  接近奇異矩陣，而使得  $\Delta q$  的變異量過大，故 Inman (1975) 以 Marquardt-Levenberg 方法，加入一個阻尼係數  $\lambda$  (damping factor) 來修正式 2-22 為式 2-23，以避免  $\Delta q$  過大的改變量。

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q = J^T d \quad (2-23)$$

## 2. 平滑束制最小平方反算法

此方法又稱為 smoothness-constrained least-squares inversion，或 L2 norm inversion。Constable et al. (1987) 認為以 2-36 式的反算方法進行二維或三維的反算問題時，在模型參數過多時常會出現太高或太低的錯誤值，因此 deGroot-Headlin 與 Constable (1990) 加入了粗操係數  $W$  (roughness filter) 來降低模型參數變異的平方和，如 2-24 式。

$$(J_i^T J_i + \lambda_i W^T W) \Delta q_i = J_i^T d_i - \lambda_i W^T W q_{i-1} \quad (2-24)$$

此法為一般較常見的反算方式，當地層條件變化較為平滑的情況下，也就是土壤的變化條件為漸變帶時，則以此種反算方法可得到較為合理的結果，反算後誤差則以均方根相對誤差 RMS (Root Mean Square Relative Error) (2-25) 來表示。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{(q_i - f_i)^2}{q_i \bullet q_i}} \times 100\% \quad (2-25)$$

### 3. 重複再加權最小平方反算法

此法又稱為 Robust inversion，或 L1 norm inversion。Wolke 與 Schwetlick (1988) 為了使資料差異量  $d$  與粗操係數  $W$  達接近的權重，故在 2-21 式中加入了權重矩陣  $R_d$ 、 $R_m$ ，如 2-26 式：

$$(J_i^T R_d J_i + \lambda_i W^T R_m W) \Delta q_i = J_i^T R_d d_i - \lambda_i W^T R_m W q_{i-1} \quad (2-26)$$

當遇到電阻率為急遽變化的邊界時，若以 L2 norm 來進行反算時，為求最平滑化的模型而會出現過高或過低的電阻率值，因此常建議改以 L1 norm 來對其進行反算，可以顯示出較為顯著的電阻率邊界 (Olayinka and Yaramanic, 2000；Loke, Acwroth and Dahlin, 2003)。Clarebout 與 Muir (1973) 認為對於此種急遽變化的電阻率邊界分佈應求取其最小絕對差異量較合適，因此 L1 norm 的反算誤差以絕對值誤差表示。

上述為常見的三種反算最佳化法，而整體的反算基本流程則如圖 2-16 所示。

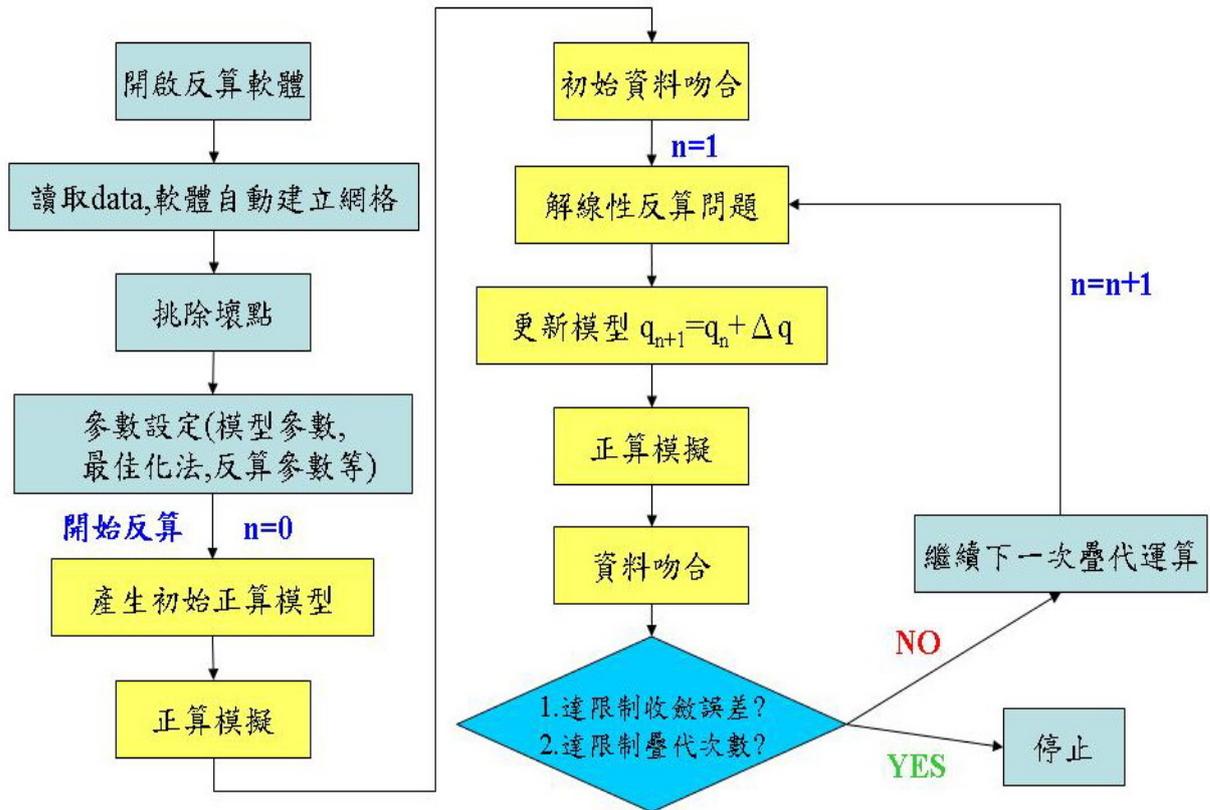


圖 2-16 反算基本流程圖

### 2.3.2 三維地電阻探測方法

在工程實務以二維地電阻探測的使用較為經濟而廣泛，而二維地電阻影像法得到的是地層下二度空間剖面的電阻率分佈；然而在真實世界中則是三度空間的立體型態，因此為了使電探的結果更符合真實的地層狀態並進一步提高電探的解析度，有越來越多的研究人員對三維地電阻探測進行相關的研究與探討。

三維電探的施測原理與電極排列方式等，基本上都與二維電探相同，唯一的不同是現場的測線佈設方法較為繁瑣。三維電探將測線佈成一個長方形或矩形的網格（如圖 2-17），因不同的探測範圍或深度所設定 x 方向與 y 方向的電極棒間距而異。電極棒位置確定以後，測

線以 S 型的佈線方式將每一根電極棒串聯起來，以進行資料的擷取。至於在電極排列方式的選擇上，Wenner array、Wenner-Schlumberger array 對於調查區域邊界的資料涵蓋範圍較差，因此在三維施測上較常使用 Dipole-Dipole array、Pole-Dipole array 與 Pole-Pole array 的電極排列法 (Loke and Baker, 1996)。

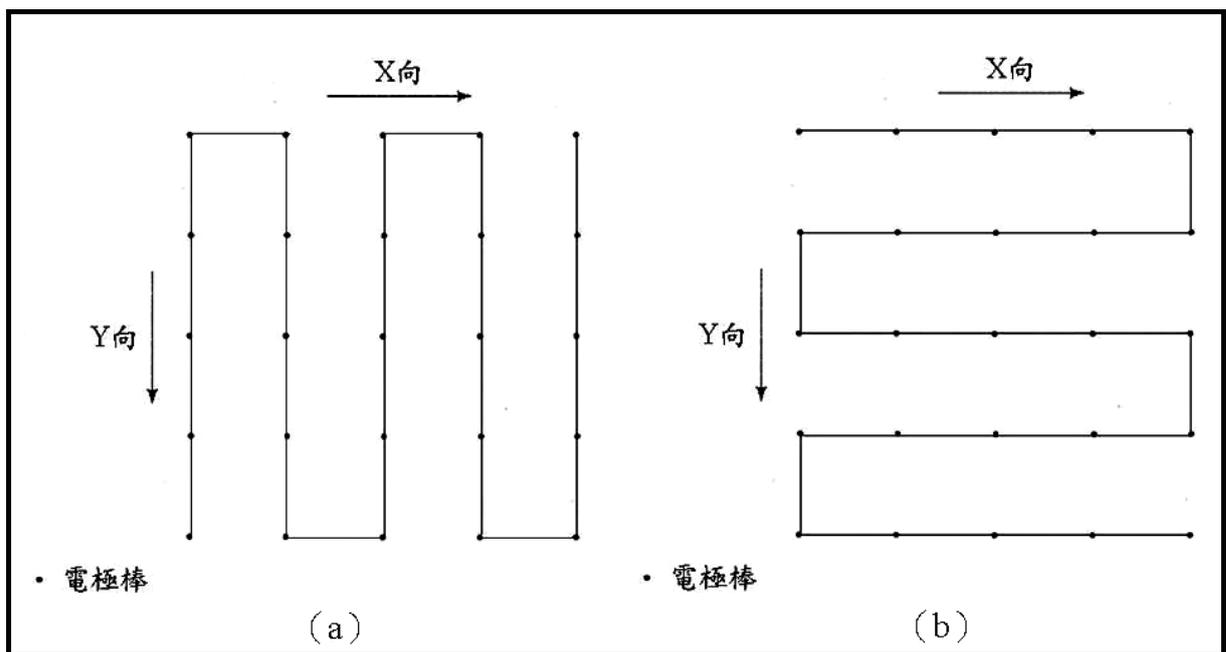


圖 2-17 一般三維電探佈線方式(a)沿 Y 軸，(b)沿 X 軸

由於一般的三維電探佈線方式需要使用大量的電極棒，較為耗時與不經濟，因此工程實務上仍以二維地電阻探測為主要探測方法；Yang 與 Lagmanson (2006) 則提出了擬 3D (pseudo 3D) 的施測方法，期望在電極棒數量不足時仍能得到三維的探測結果。所謂擬 3D 法是藉由聯合使用數條互相平行且測線長度相等、電極棒間距相等之二維地電阻施測結果進行三維之反算分析。而擬 3D 法的佈線方式，則是

將圖 2-17 (a) 中 Y 向或圖 2-17 (b) 中 X 向每條個別施以二維電探的剖面量測資料，利用三維反算來獲得三維的電阻率分佈結果，在該研究中使用了數值模擬以及現地施測的方式進一步驗證擬 3D 的適用性，如圖 2-18 與圖 2-19，其結果指出，當二維測線之間的間距小於兩倍最小電極棒間距時，擬 3D 的反算結果與真 3D 的結果趨勢非常接近。

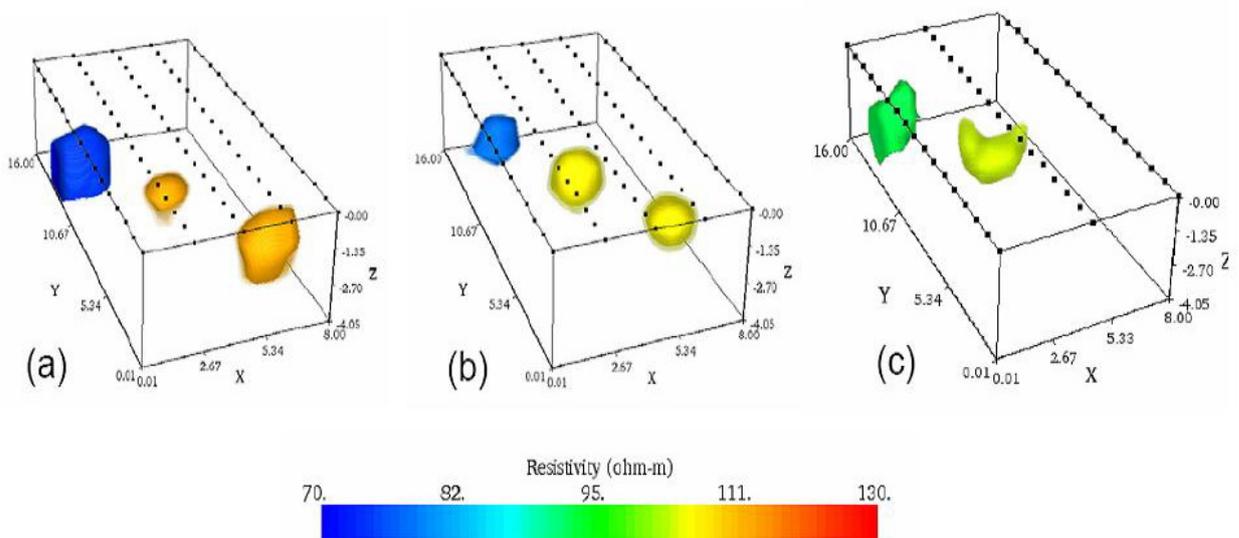


圖 2-18 擬 3D 與真 3D 反算結果 (數值模擬) (a) 真 3D (b) 擬 3D，測線間距等於兩倍電極間距 (c) 擬 3D，測線間距大於兩倍電極間距 (Yang and Lagmanson, 2006)

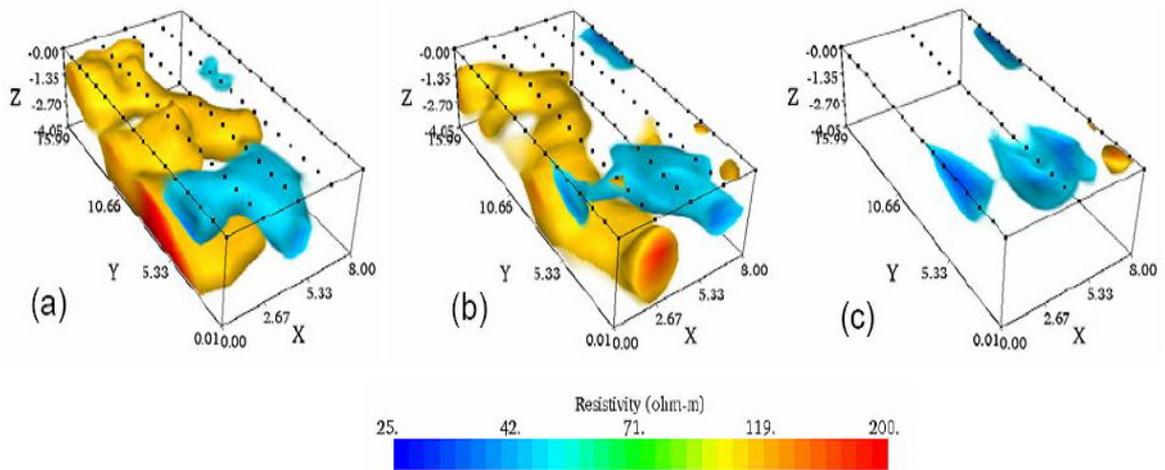


圖 2-19 擬 3D 與真 3D 反算結果 (現地試驗) (a) 真 3D (b) 擬 3D, 測線間距等於兩倍電極間距 (c) 擬 3D, 測線間距大於兩倍電極間距 (Yang and Lagmanson, 2006)

有關 pseudo 3D 擬進一步來探討, 以欲探測由 y 方向 10 根以及 x 方向上 5 個電極棒所圍起之區域為例, 如圖 2-20 所示, 在施作 3 維地電阻探測時, 所有的電極棒由一條訊號傳輸線以 s 型連接, 由一台至少需具備可量測收錄 50 個頻道之電探儀所控制。在量測中, 由於所有電極棒皆可受到電探儀的控制, 因此可以收錄有不同長向測線上的交互量測資料(亦即每筆量測所用的四根量測電極棒可位於不同的 x, 如圖 2-20a 中淺色圓圈所示); 而當所採用的電探儀無法提供有至少 50 個頻道的收錄能力時, 則可採用擬 3D 的施測, 每一次的施測主要以長向(y 方向)佈設, 採用 10 個電極棒, 共要移動測線 5 次(如圖 2-20b 所示), 而由於每次僅有 10 根電極棒可供控制, 因此其量測所得的資料將都只維持在同一個 x 點的 y 方向上, 而無法有不同 x 位置交互間的量測資料。

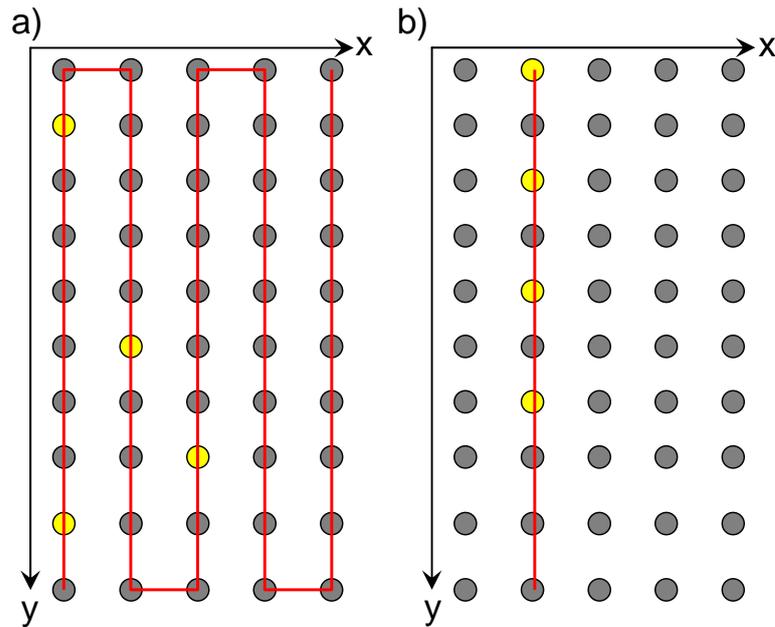


圖 2-20 三維地電阻探測與擬三維地電阻探測之差異示意圖：a) 三維地電阻探測；b) 擬 3D 地電阻探測

由上述可知，三維地電阻探測法，在量測過程中其電場之分佈可完全涵蓋欲探測區域，因此其量測結果自然包含欲探測區域下方之材料物質訊息，而適用三維反算；反觀擬三維地電阻探測法，在量測過程中其電場分佈主要在一直線上，即使透過多條測線聯合進行反算，亦僅是有多條測線下方的訊息，仍無法得知測線與測線之間的材料分佈情形。其之所以得以符合三維反算所需而成功達到近似三維地電阻探測結果之主要原因在於施作二維地電阻探測時所受到的三維效應影響(亦即表示，即使採用二維地電阻探測，其所量測之結果仍包含有測線兩旁的地層材料訊息)。

### 2.3.3 二維地電阻探測之三維效應

目前工程實務上主要以二維地電阻探測為主，不過在應用上常忽

略了三維效應的影響。所謂三維效應，即二維地電阻剖面外的地質結構，其電阻率映射於二維地電阻剖面上所造成的探測誤差。Yang 與 Lagmanson (2006) 認為因二維地電阻探測將地層假設為二維 (x,y) 的半無限域空間分佈，不過在真實的地質狀態中，電流卻是在三維的方向 (x,y,z) 流動，因而造成非二維剖面上的物體對地電阻電場產生一定程度的擾動，而造成二維剖面上部份不規則電阻率與雜訊。

Yang 與 Lagmanson (2006) 更進一步透過數值模擬以及現地施測資料分析，對三維效應做相關探討驗證。其數值模型表層佈設二維與三維地電阻測線，如圖 2-21。而在測線下方相同深度位置分別假設三個不同的電阻率區塊。反算後的結果如圖 2-22 所示，圖 2-22 (a) 為數值模型進行三維反算後取中間位置測線的地電阻剖面，圖 2-22 (b) 則為中間二維測線測線經二維反算的剖面結果，比較兩圖後，發現在中間二維測線外相同深度的兩個電阻率區塊，有明顯映射到二維地電阻剖面上的現象，但在相同位置的三維地電阻反算剖面則沒有這樣的趨勢；在現地試驗的方面，則於野外佈設與數值模擬相同方式。圖 2-23 (a) 為三維地電阻施測後的反算剖面，圖 2-23 (b) 則為相同位置的二維地電阻施測之反算剖面，兩圖整體趨勢一致，不過二維電探剖面電阻率值的對比度分佈較三維電探結果來得複雜，與數值模擬的結果相符，故由以上的實驗結果，顯示二維地電阻探測法的確有某種程度的三維效應產生。

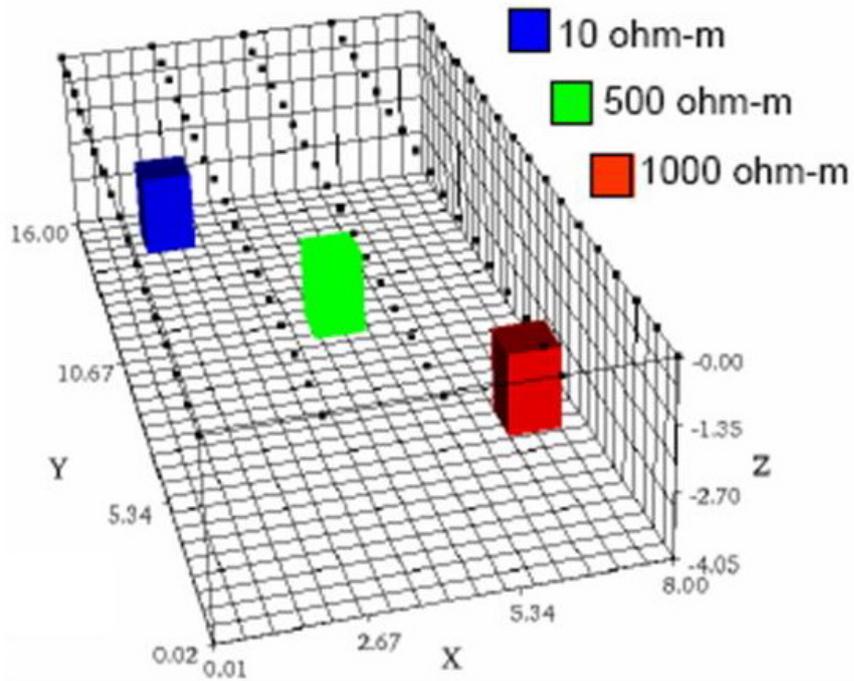


圖 2-21 三維效應探討之數值模型 (Yang and Lagmanson, 2006)

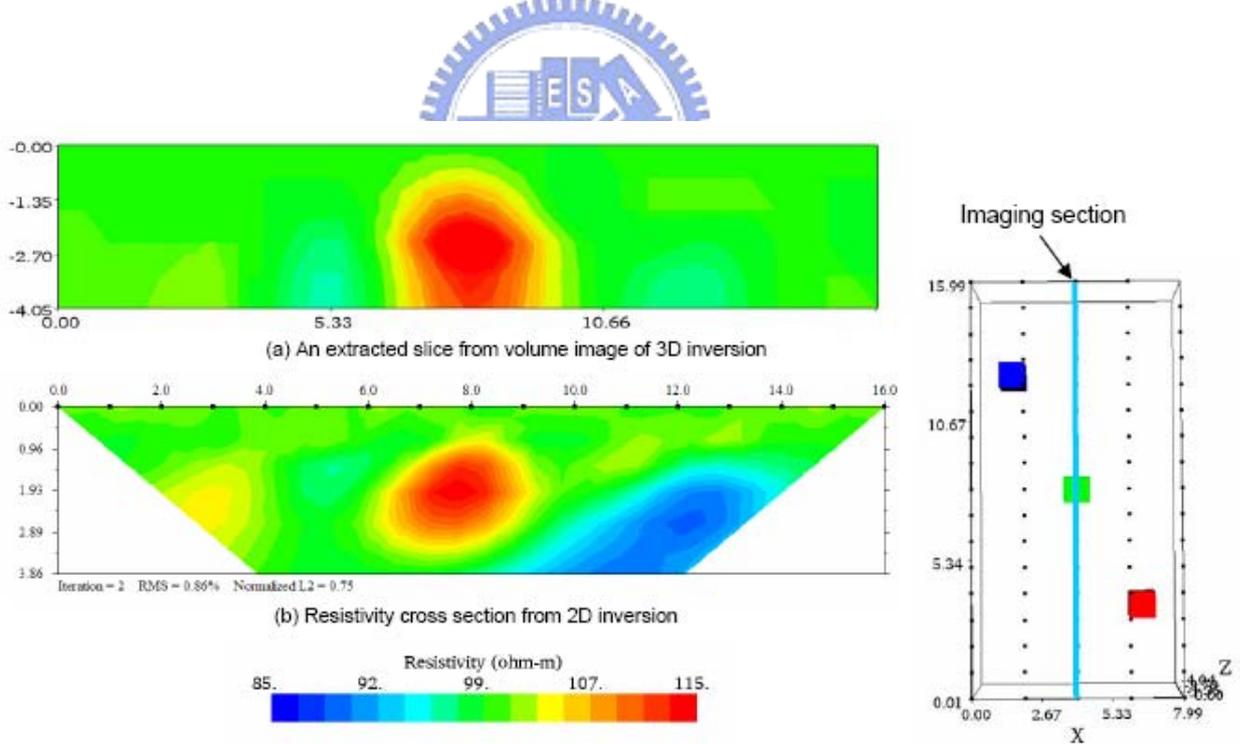


圖 2-22 數值模型反算結果(a)三維電探反算(b)二維電探反算 (Yang and Lagmanson, 2006)

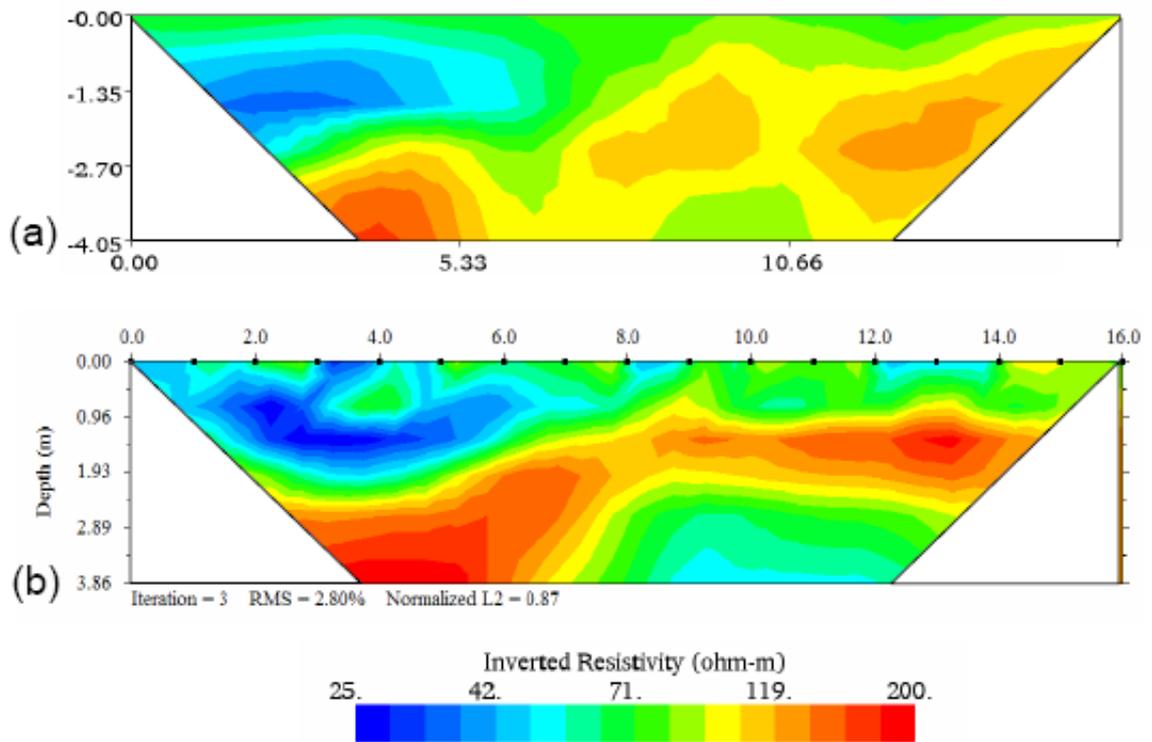


圖 2-23 現地試驗反算結果(a)三維電探反算(b)二維電探反算(Yang and Lagmanson, 2006)



## 三、二維地電阻之 3D 效應數值模擬

### 3.1 研究方法

本研究將利用數值模擬及現地試驗探討不同 3D 條件下，二維電探可能造成的失真現象，並研擬可能對策。研究前半部將利用 AGI 公司 (2003) 所發展之 EarthImager3D 與 EarthImager2D 的分析軟體，將不同的排列方法，利用數值模型設計幾種情境模擬，如斷層、金屬管線等常見例子，來進行參數變化之研究。

### 3.2 應用程式介紹

本研究所採用的數值軟體為 AGI, Advanced Geosciences Inc, EarthImager 3D (Dr. Yang, 2003) 所開發出之三維地電阻影像正算及反算程式。分析流程分為 EarthImager 3D MOD ver.1.5.3 之三維地電正算 (forward modelling) 程式及 EarthImager 3D INV ver 1.5.3 之三維反算 (inversion) 程式及 EarthImager 2D INV ver 2.3.0 之二維反算 (inversion) 程式。其正算程式功能與特性主要計算模型之視電阻率。使用者可自行假設一三維半平面 (subsurface) 之數值模型，根據所選的排列 (array)，計算出模型的視電阻率。其好處是由於程式的視窗化能將其計算結果展現在三維地電擬投影面 (pseudo-section) 上，使使用者能快速得知在所定模型下，每種排列之優缺點及探勘深度，作為現地施測與實驗的參考；另一方面也可利用所得結果，代入反算程式得出 RIP 剖面，有助於作一般數

值過程中的正算驗證。其輸入檔(input File)為其\*.MOD，而算出之視電阻率時，可將其轉換為\*.DAT 檔以供反算程式計算；Earthlmager 3DINV 之反算程式(Dr.Yang,2003)，可自動計算出半平面空間中的三維地電阻模型，並產生地電阻影像剖面。

AGI Earthlmager 3D 軟體具備功能特色，分述如下：

- 1) True 3D data visualization 真正三維立體顯示。
- 2) Processing data collected in a sandbox and water tank 可運算砂箱或水箱所得電阻率資料。
- 3) Parallel processing on multi-core/CPU for rapid data processing 可在多 CPU 電腦快速運算。
- 4) Inversion of 3D surface resistivity data 陸上電阻率資料三維逆推。
- 5) Inversion of 3D borehole resistivity data 孔內電阻率資料三維逆推。
- 6) Inversion of 3D IP data.IP 資料三維逆推。
- 7) Topographic correction and printout of resistivity section with topographical features.地貌修正及可列印含地貌特性電阻率剖面
- 8) Multilingual Support. 含中文及英文介面
- 9) Ability to print or save images that are report ready.影像可供報告之列印或儲存

### 3.3 正算模擬建立

建立正算模型的目的在於與現地量測結果交互比對。現地量測資料

反算結果，藉由所收集相關文獻對於「異常區域」或「感興趣區域」做合理解釋後，可進一步利用正算模擬給予各個地下結構物適當電阻率值，並繪製於網格中，建立合理的現地正算模型，如圖 3-1。由反算軟體分析後，比對模擬地下結構物分佈情形是否和現地量測結果一致，確認問題點是否確實存在。

## Synthetic Resistivity Model

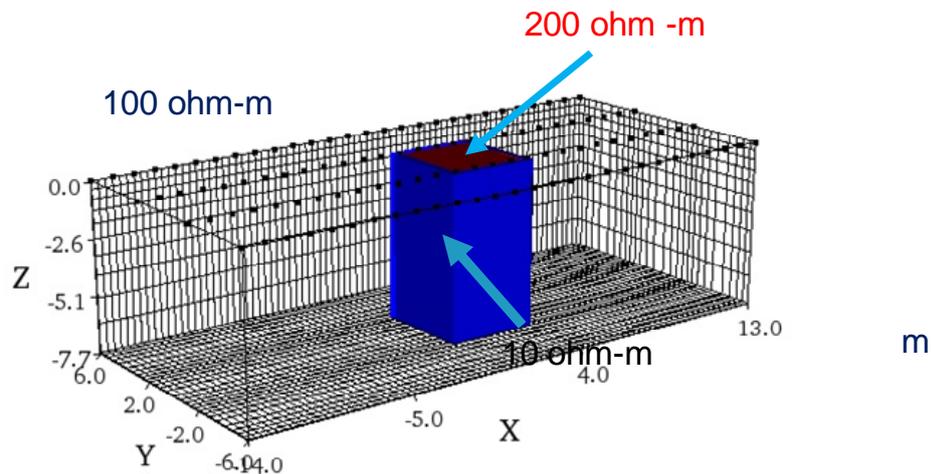


圖 3-1 正算模型的建立

正算模型設定程式如下：

步驟 1：開啟（Tool—3D Command Creator）

步驟 2：建立網格(4\*12)，模擬現地施測情形中電極數目，電極間距。

步驟 3：設定參數(施測排列方式，探測深度等參數)。

步驟 4：Create（正算排列間距）

步驟 5：Start Simulation（正算排列順序）

步驟 6：Save Command（存 Command 檔）

步驟 7：File / 開啟 Command File 選擇檔案

步驟 8：設定地下結構物合理電阻率

步驟 9：進行分析(Survey Planner)

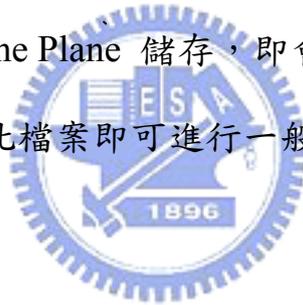
步驟 10：分析完成，進行 2D 剖面選取

步驟 11：先選擇剛分析後所自動儲存之檔案

步驟 12：選擇想要取出之 2D 剖面

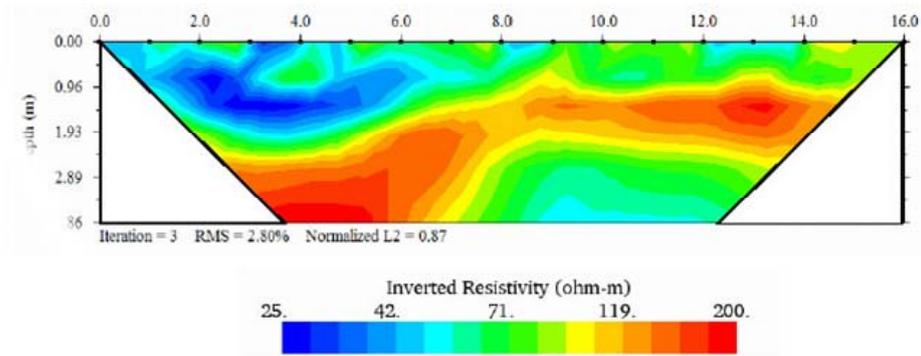
選擇完後按 Extract One Plane 儲存，即會自動儲成一個(.stg)檔

再利用 AGI 2D 開啟此檔案即可進行一般 2D 反算流程

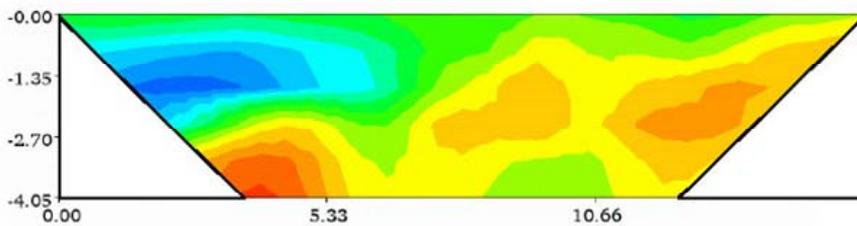


### 3.4 反算模擬建立

本研究所採用的反算程式為 Earthmager 3D INV ver. 1.5.3(Dr. Yang, 2003)，現地量測資料與正算模型資料皆需要利用反算軟體來獲得對應地下結構物電阻率分佈。由反算軟體得到的輸出結果如圖 3-2 所示，圖(a)二維探測剖面，圖(b)三維探測剖面。



LINE3  
二維探測剖面



LINE3  
三維探測剖面

圖 3-2 二維&三維探測剖面

反算程式 Earthlmager 2D INV 及 Earthlmager 3D INV 的流程及其分析步驟如下：

步驟 1：開啟 AGI 3D 軟體

步驟 2：讀取 data 檔案（File—Read a Data File）

步驟 3：設定反算參數設定（Inversion Setting）這些參數設定包含了初始設定、正算模型設定及電阻反算設定，此部分建議可以做適度的修改和設定，例如：反算疊帶次數、砂箱模式或一般模式。

步驟 4：進行反算（Run Inversion）選取功能鍵（Inversion—Start Inversion）後即可進行反算。

步驟 5：反算結果展示（View Images）

註：AGI 3D 反算後的色階有可能產生過大的情況因此建議反算次

數為 3 次，實際次數可因應每次情況做調整。

有關 Combine Parallel 2D Lines（擬 3D）的分析步驟如下：

步驟 1：開啟（Tool—Combine Parallel 2D Lines）

步驟 2：加入 2D Data 檔案

步驟 3：輸入 Data 檔座標位置

步驟 4：選取 Combine 鍵，將每個 2D Data 檔結合成一個 3D Data 檔

步驟 5：存取 3D Data 檔

步驟 6：讀取 3D Data 檔，進行 3D 反算

### 3.5 數值模擬

基於本研究所設定之情境，斷層及金屬管線，進行數值模擬。透過不同的電阻率比及環境空間的變化進行數值模擬。有關數值模擬流程圖詳圖 3-3。



### 3.6 斷層之地層

由數值模擬了解當測線與斷層走向不垂直時，其對地電阻影像所造成之影響。藉由控制測線之夾角來了解各種角度下之影響。

#### 3.6.1 地層模型與施測參數

為了解具有斷層存在之地層所可能造成之 3D 效應問題，本研究以較單純之一階地層進行斷層模擬，如圖 3-4(f)所示，從斷層土層電阻率比、測線與斷層走向夾角以及階梯地層厚度 3 方向進行地層模型與施測參數之建立與規劃。

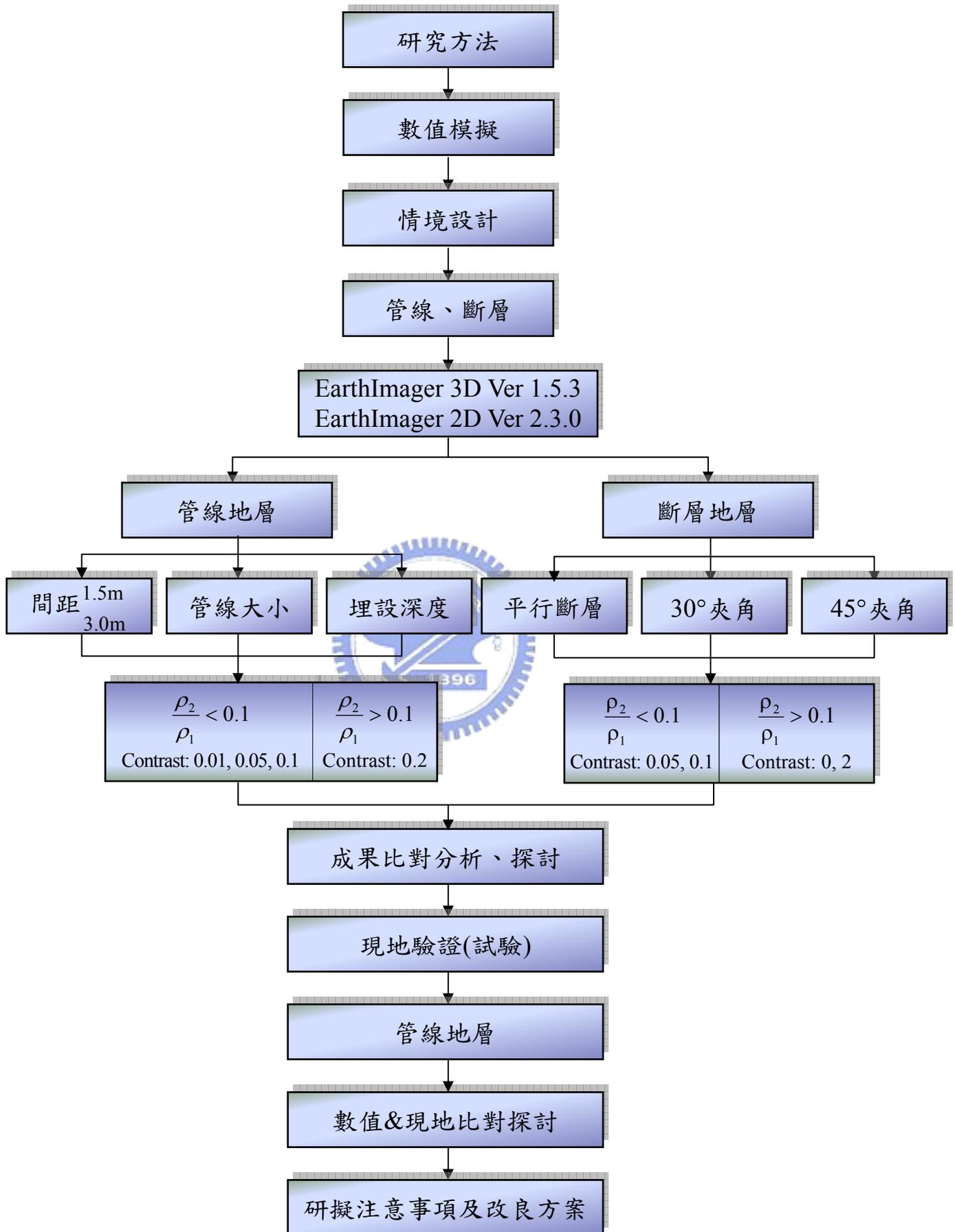


圖 3-3 數值模擬流程圖

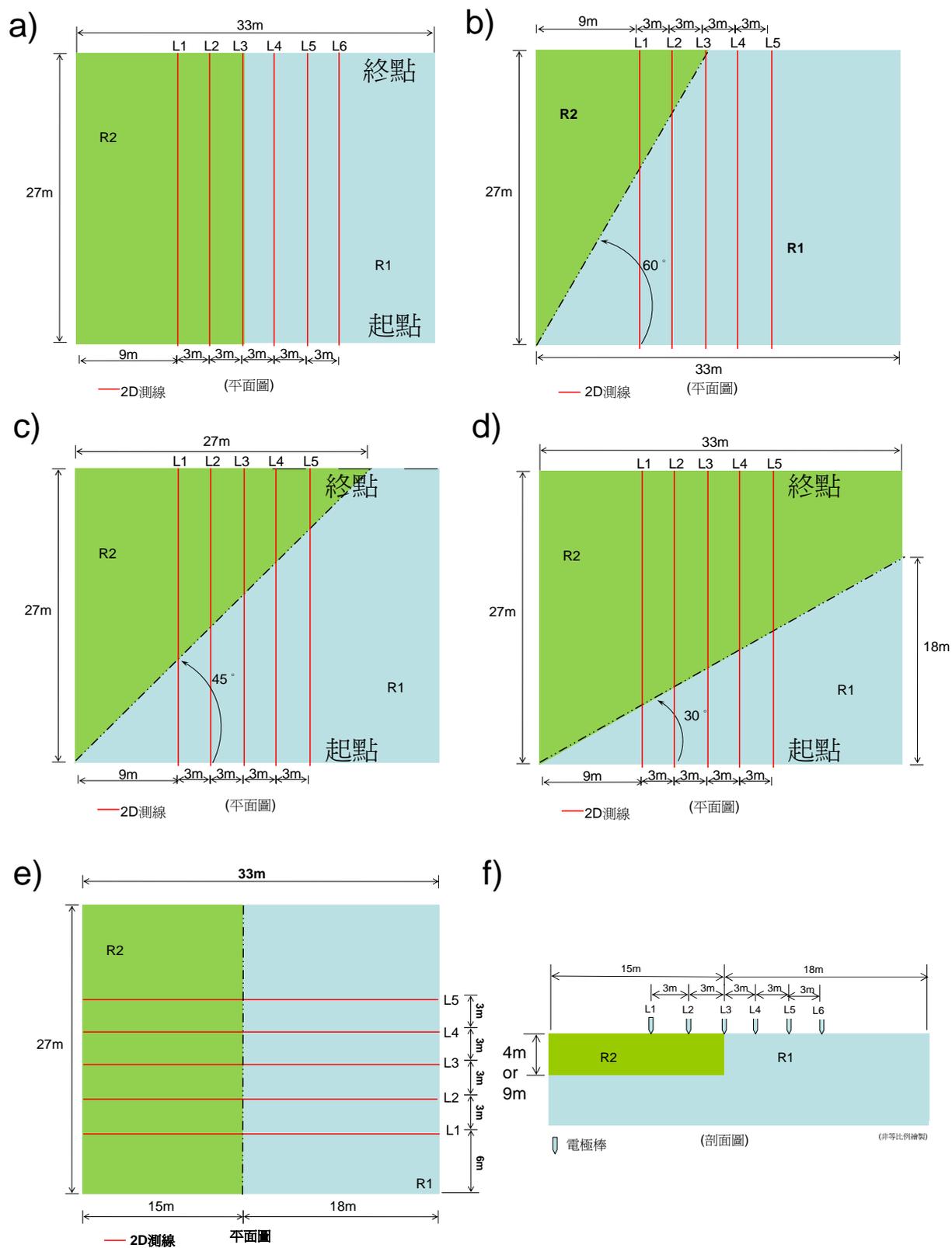


圖 3-4 地層模形與施測參數說明圖

如圖 3-4(f)所示，本研究以較單純之一階地層進行斷層模擬，在此段層中採用兩種不同電阻率之土層，其中 R1 之電阻率較 R2 之電阻率為大，R2 土層之厚度設定為 4 公尺，於探討中將 R1 皆設為 1000 ohm-m，並控制 R2 與 R1 之比值  $n$  分別為 0.05、0.1 以及 0.2，亦即 R2 之電阻率分別為 50、100 以及 200 ohm-m。

而在測線與斷層走向夾角上規劃五種 2D 地電阻探測之測線，如圖 3-4 所示，A 類測線使測線與斷層之走向平行，如圖 3-4(a)所示，B 類測線與斷層走向夾 30 度角，如圖 3-4(b)所示，C 類測線與斷層走向夾 45 度角，如圖 3-4(c)所示，D 類測線與斷層走向夾 60 度角，如圖 3-4(d)所示，E 類測線與斷層走向夾 90 度角，如圖 3-4(e)所示，相關施測參數整理如表 3-1 所示，而除此之外，為了解測線位置與斷層側向變化位置所可能造成的影響，在 A 類測線中，於斷層側向變化之位置的左右共布設有 6 條測線，如圖 3-4(a)所示，每條測線相距 3 公尺；在 B 至 E 類測線中，各佈設 5 條測線，各測線相距 3 公尺，如圖 3-4(b,c,d,e)所示，使得測線下方 R1 與 R2 的比例有所不同。在此斷層中，R2 之土層厚度皆為 4 公尺，各條測線皆採用 10 根電極棒，電極棒間距 3 公尺，組成 27 公尺長之測線，如圖 3-5 所示，以 dipole-dipole 施測法進行模擬，數值模型立體圖如圖 3-6 所示。另為探討土層厚度之影響，規劃有 B-T 地層，其使用 B 類地層之測線與斷層角度之佈設方式，但採用 R2 土層厚度為 9 公尺。

表 3-1 測線與斷層走向夾角地層模型與施測參數

	n	R1 (ohm-m)	R2 (ohm-m)	angle (度)	dx (m)	dy (m)	L (m)
A 類	0.05	50	1000	0	3	3	27
	0.1	100					
	0.20	200					
B 類	0.05	50		30	3	3	27
	0.1	100					
	0.20	200					
C 類	0.05	50		45	3	3	27
	0.1	100					
	0.20	200					
D 類	0.05	50		60	3	3	27
	0.1	100					
	0.20	200					
E 類	0.05	50	90	3	3	33	
	0.1	100					
	0.20	200					

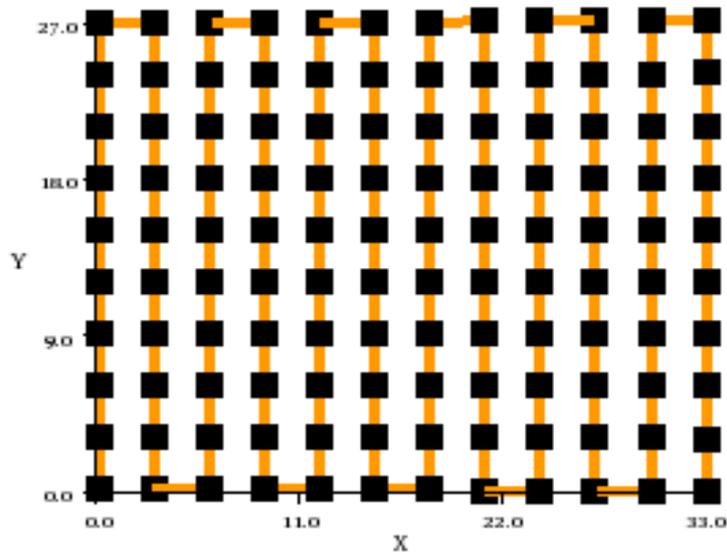


圖 3-5 電極棒佈置圖

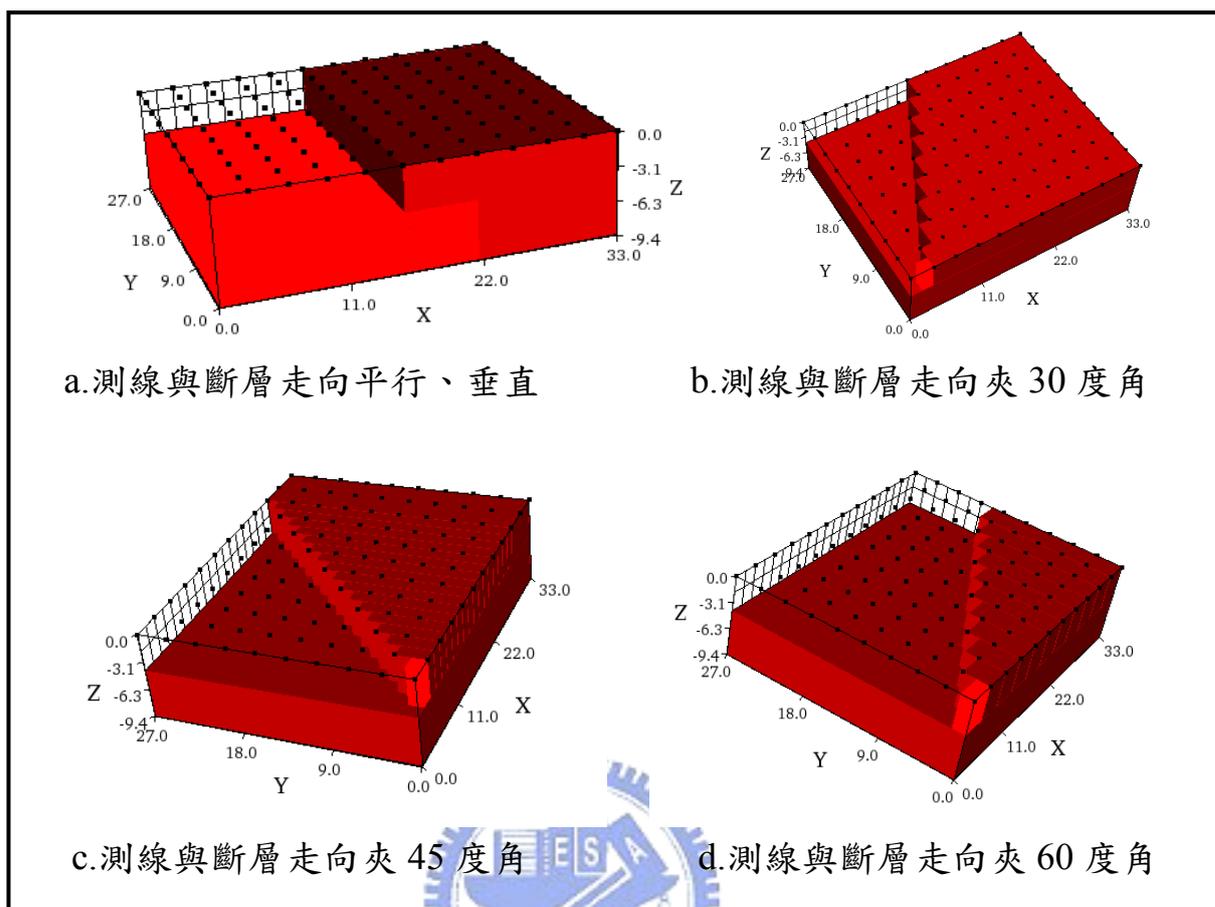
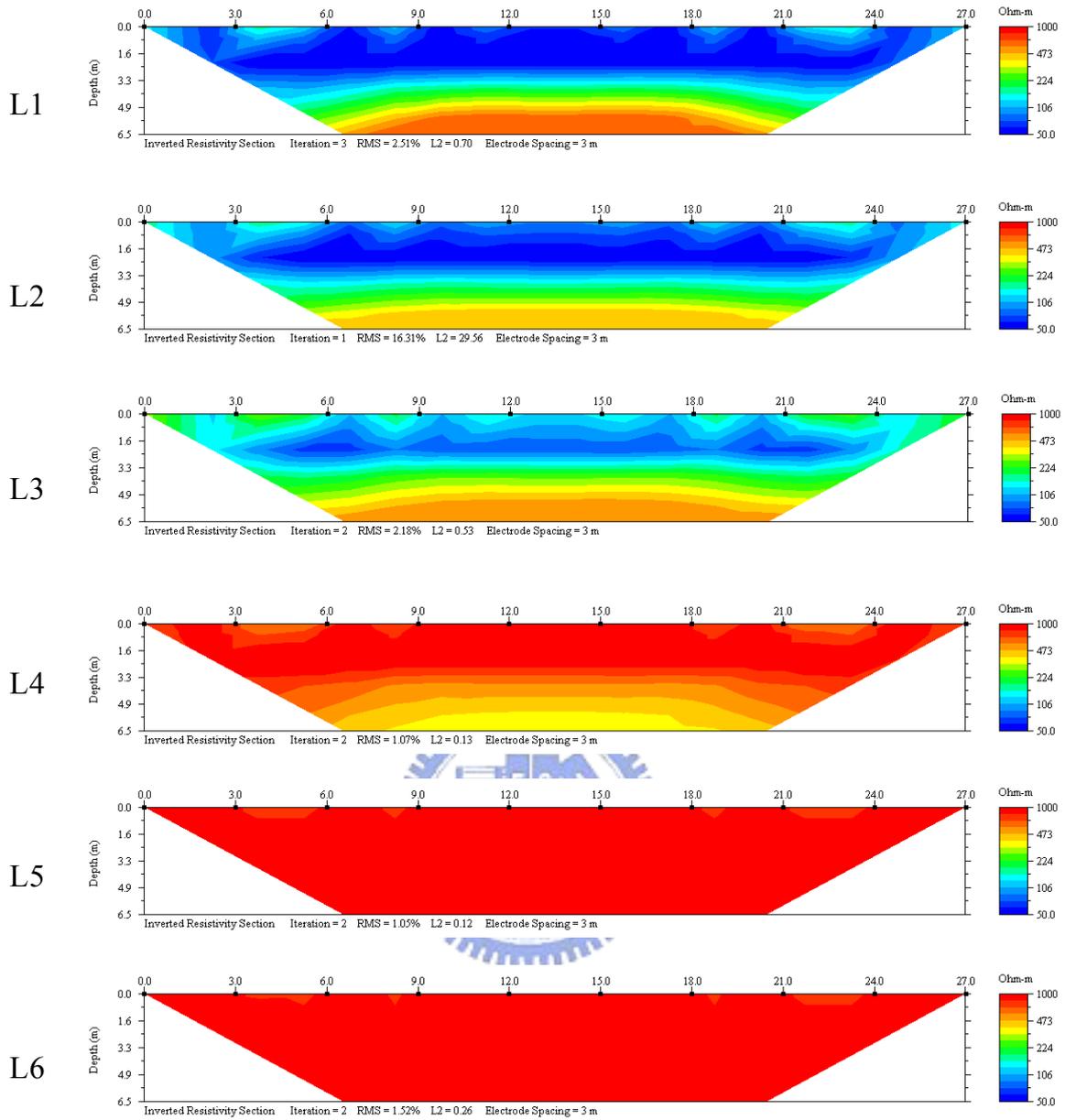


圖 3-6 數值模型立體圖

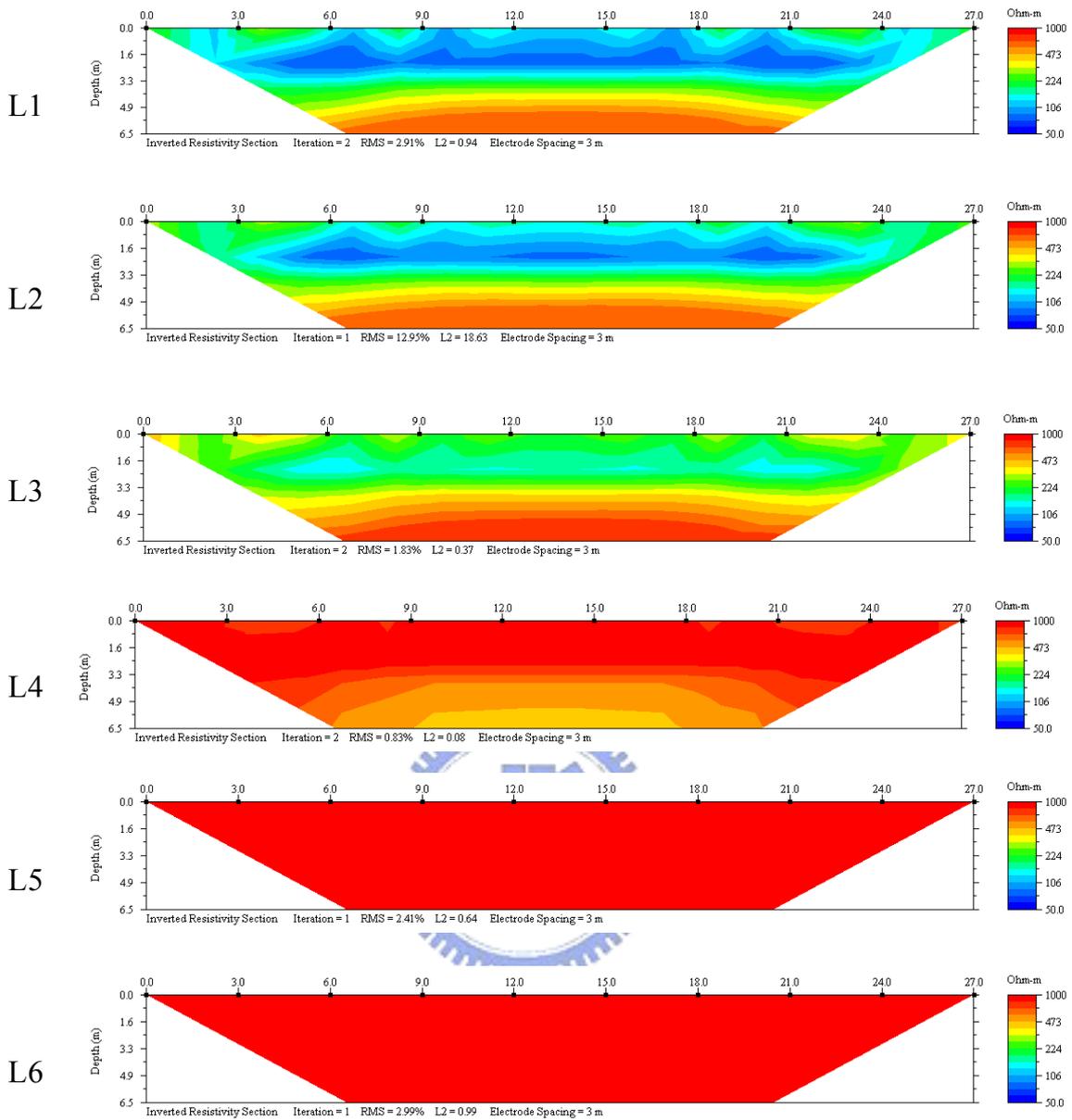
### 3.6.2 地層電阻率及測線與斷層走向夾角之影響

A 類測線之地層電阻率剖面結果如圖 3-7 所示，圖 3-7a,b,c 分別表示不同地層電阻率比值  $n$  ( $n=0.05, 0.1, 0.2$ ) 之結果，由圖 3-4 之規劃中可知 L3 位於斷層側向變化之處，其數值結果顯示，在該處所測得之結果主要是反應偏低電阻側之地層情形。而在低電阻側之結果顯示，與 L3 相鄰 3 公尺之 L2 在地表下約 3.5 公尺處有明顯之高低電阻界面存在，幾乎不受 3D 效應的影響，且在不同  $n$  值下皆有相同的結果。



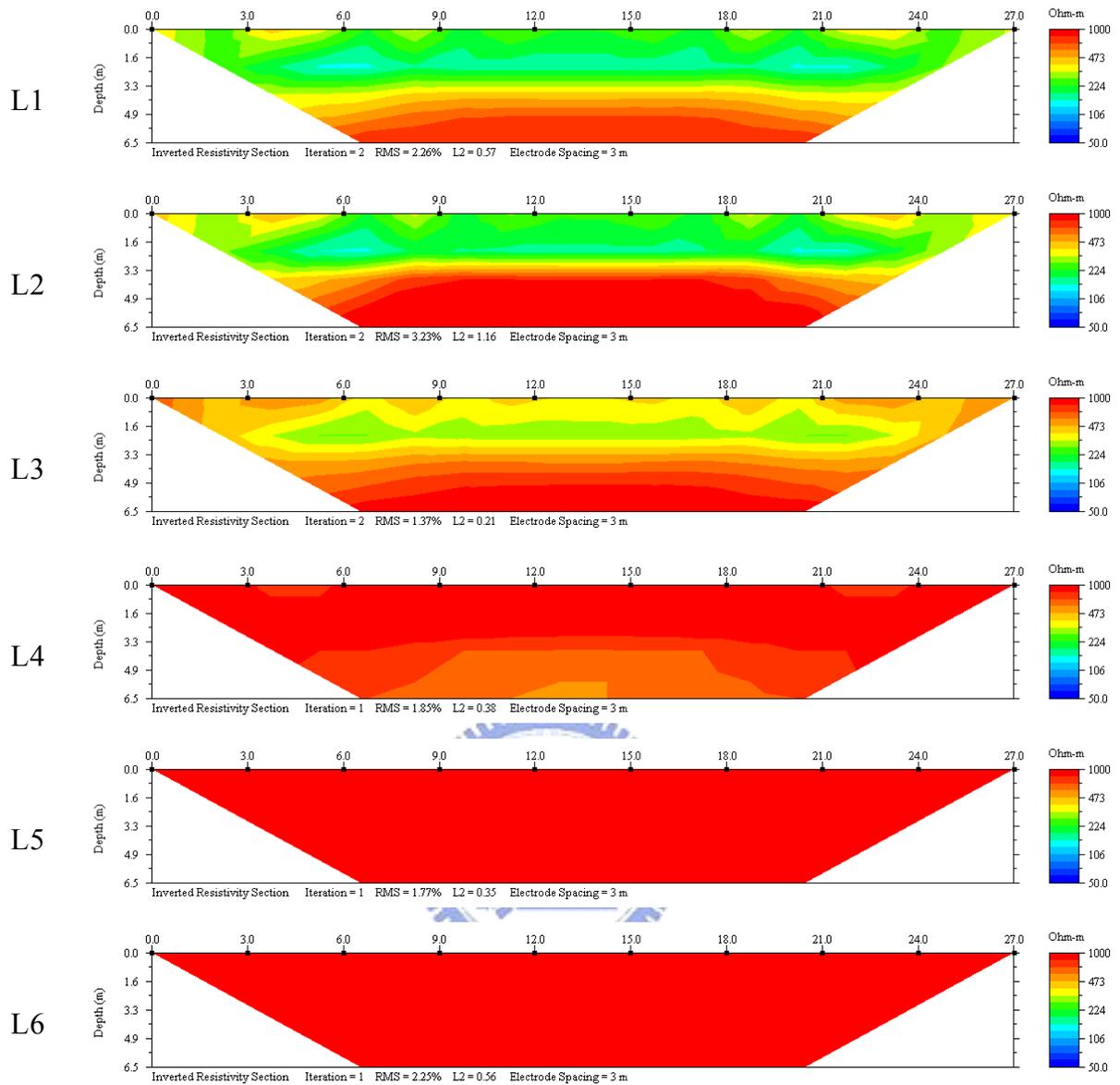
R2=50 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-7(a) A 類測線電阻率剖面結果



R2=100 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-7(b) A 類測線電阻率剖面結果



R2=200 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-7(c) A 類測線電阻率剖面結果

再觀察於高電阻側之結果，距 L3 測線 3 公尺遠之 L4 測線，其電阻率剖面顯示，在地表下 3.5 公尺處有低電阻存在，使得該處地層為上有高電阻而下有低電阻之地層結果，與應是全為高電阻之地層模型不同，此結果之差異主要便是來自於 2D 地電阻探測之 3D 效應造成。

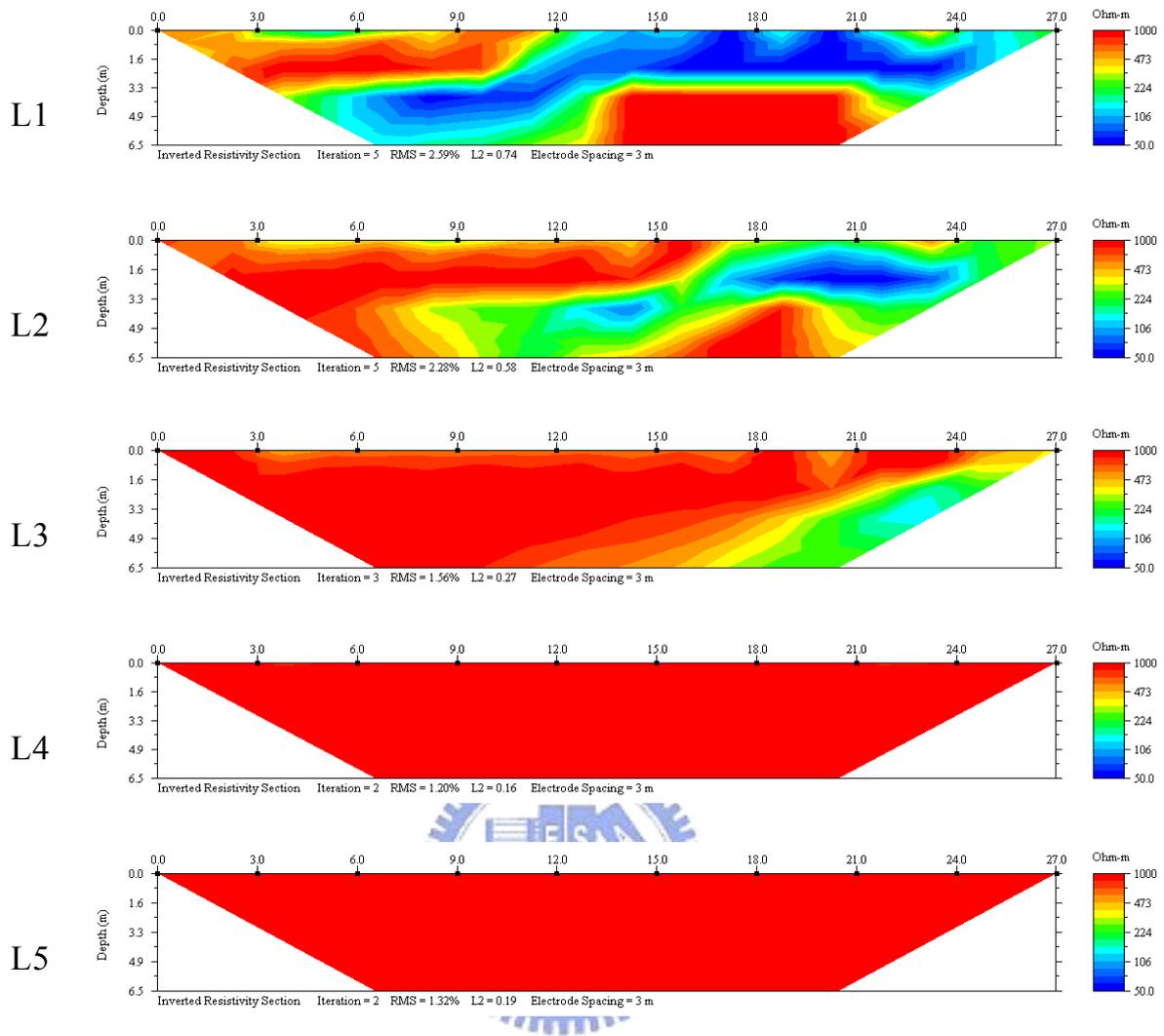
當電場在地層中發散時，雖能量主要是在測線上，但亦有相當能量分佈在測線側向的低電阻率土層處，而使得在側向上的距離所造成的較低電阻情形於反算中解算為在深度上的低電阻存在。當測線距離遠離至 6 公尺之 L5 時，3D 效應所造成之影響已不明顯，此結果在不同的三種  $n$  值地層中皆可觀察到。

由上述結果可發現，在高電阻率土層側與低電阻率土層測之測線結果對於 3D 效應之影響範圍有所不同，在高電阻率側 3D 效應之影響較低電阻率側明顯，且影響之空間較大，造成此差異之主要原因應是在於低電阻率之土層較高電阻率之土層更易吸引電場能量，當測線於低電阻側進行施測時，電場於側向上之發散主要集中於低電阻側，高電阻率側之電場分布相對較少，因此受到鄰近高電阻之影響不明顯，而當測線於高電阻率側進行施測時，電場於側向上之發散將有相當能量往低電阻率分佈，而使得高電阻側之結果易受到低電阻率側土壤之影響，而有較大的 3D 效應影響空間。

B 類測線之結果如圖 3-8 所示，由圖 3-4 之規劃中可知 L1 至 L5 其高電阻率段的長度分別是 15.6 公尺、20.8 公尺、26 公尺、27 公尺以及 27 公尺，先由  $n=0.05$  之圖 3-8(a) 結果看起，於深度之界面上，5 條測線在地表下約 3.5 公尺處皆有明顯電阻率變化，顯示其上下不同電阻率土層的存在；而在測線方向上，L1 至 L3 在高低電阻率土層之分界處有明顯的電阻率變化顯示土層界面的存在，但其分界處之位置較實際位置向高電阻側偏移了約 2 至 3 公尺不等，此一問題之原因可

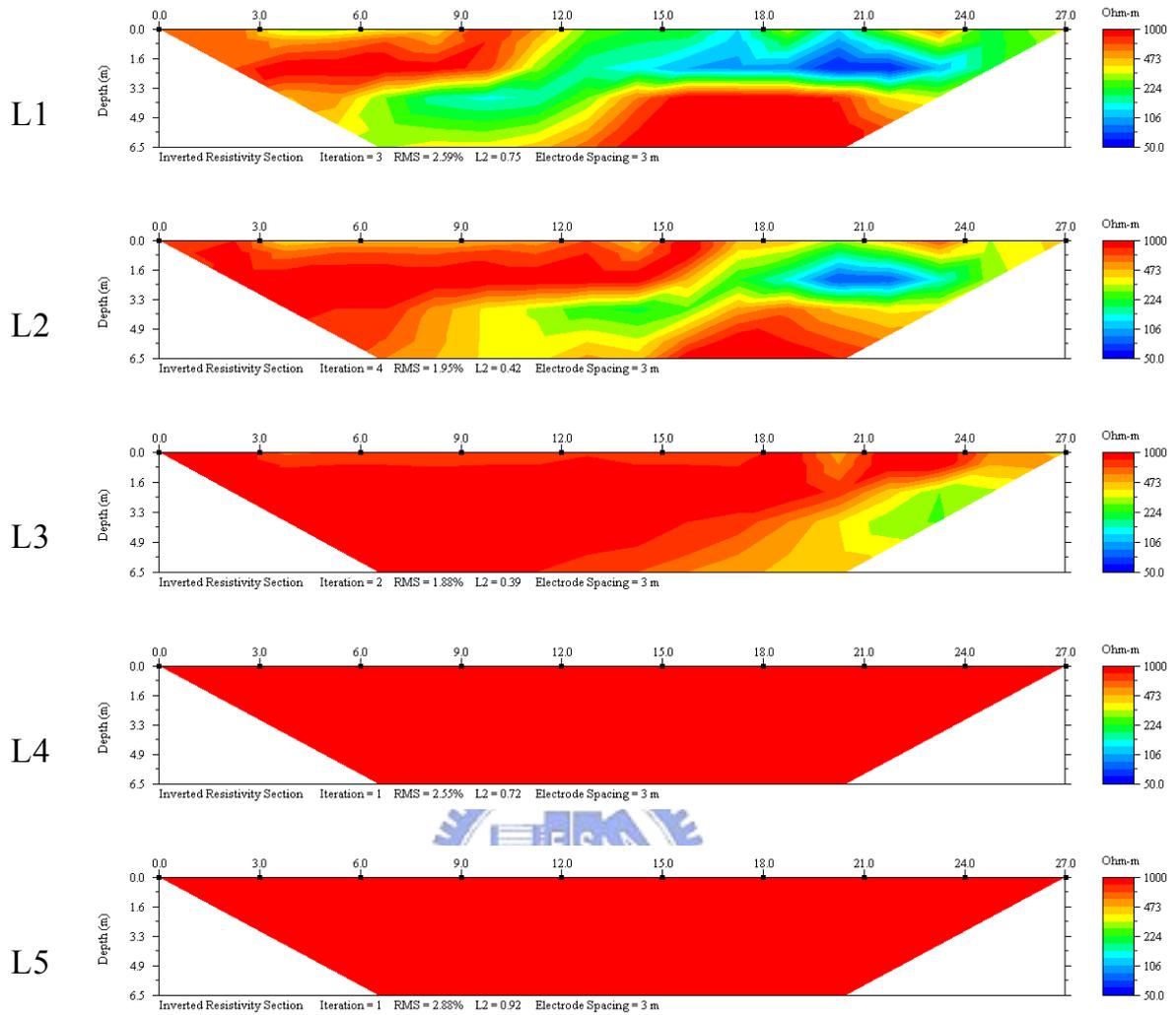
能是在於 L1-L3 測線在高低電阻率交界處距離低電阻率區太近，而使得有大部份之電流流向低電阻率區，造成低電阻率區有擴大的情形。此情況隨著  $n$  值的增加有減少的情形。

再觀察圖中之電阻率剖面結果亦可發現，在側向變化處地表下 3.5 公尺後的深度偏高電阻側會有一帶狀之低電阻率存在，在 L1 至 L3 測線結果中，該帶狀隨著斷層側向變化處的位置不同而隨之不同。此帶狀可能與 3D 效應有關，在測線側向上的低電阻位置映射至測線高電阻段的深度上，而因為低電阻區在測線高電阻段側向上為非等距，且有漸遠的情形，因而使得此帶狀自斷層側向變化處往左下的方向發展，而由 A 類測線之結果可知，在高電阻側其受低電阻所受之 3D 效應影響空間至多為 2 倍電擊棒間距，因此，在圖 3-8(a)之結果中可見帶狀之影響範圍，於探測到的深處中也約略是在 2 倍電極棒間距的範圍中(測線與斷層走向夾 30 度角，因此在測線側向上的影響距離約 10 公尺)。圖 3-8(b)與圖 3-8(c)之結果為  $n=0.1$  以及  $n=0.2$  的電阻率剖面，由圖中可知兩者結果與上述  $n=0.05$  之結果幾乎相同。然而，此一現象亦可能是為反算過程所造成之誤差，此問題將待後續模擬結果再進一步說明。



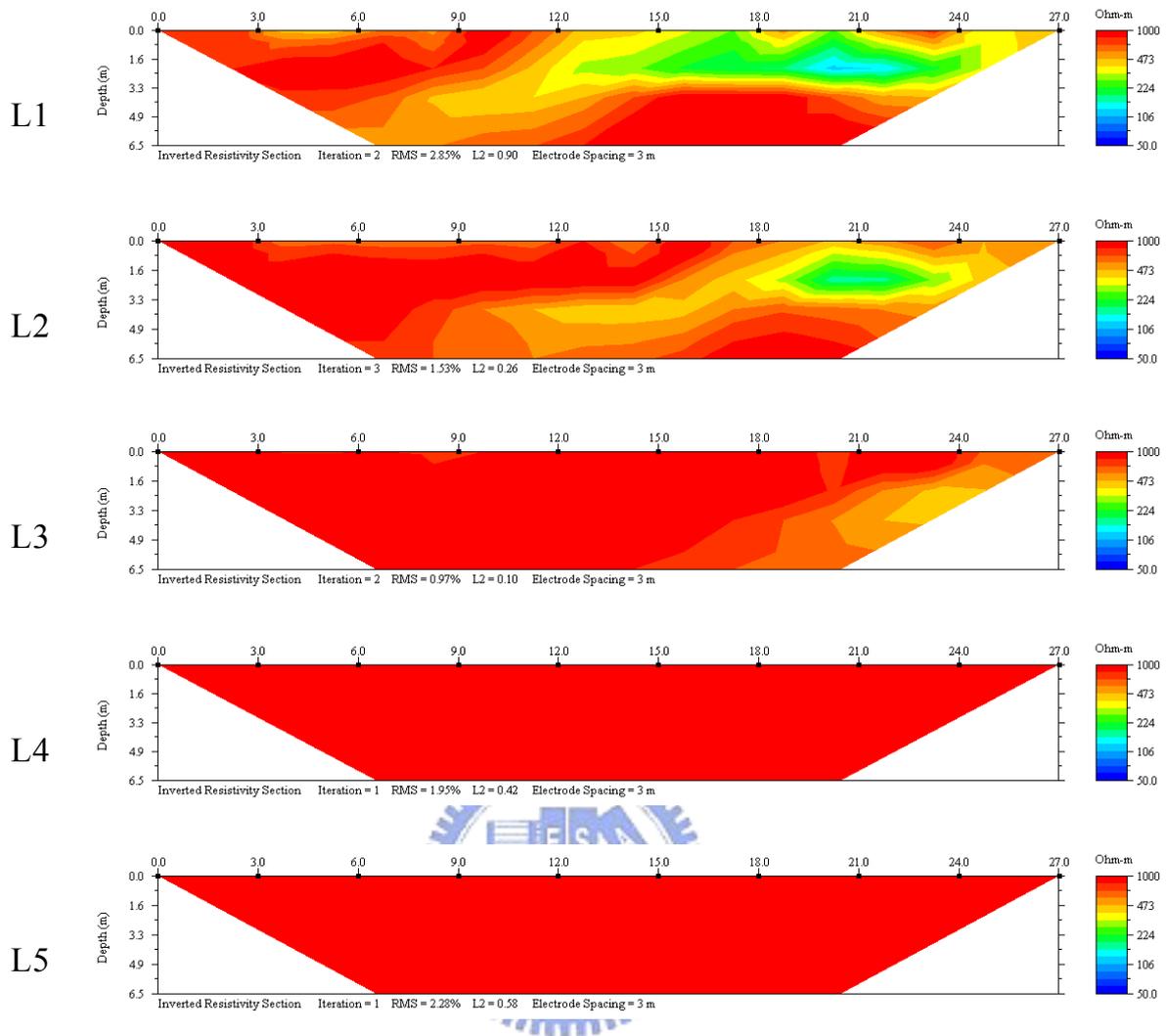
R2=50 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-8(a) B 類測線電阻率剖面結果



R2=100 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-8(b) B 類測線電阻率剖面結果



R2=200 ohm-m, R1=1000 ohm-m

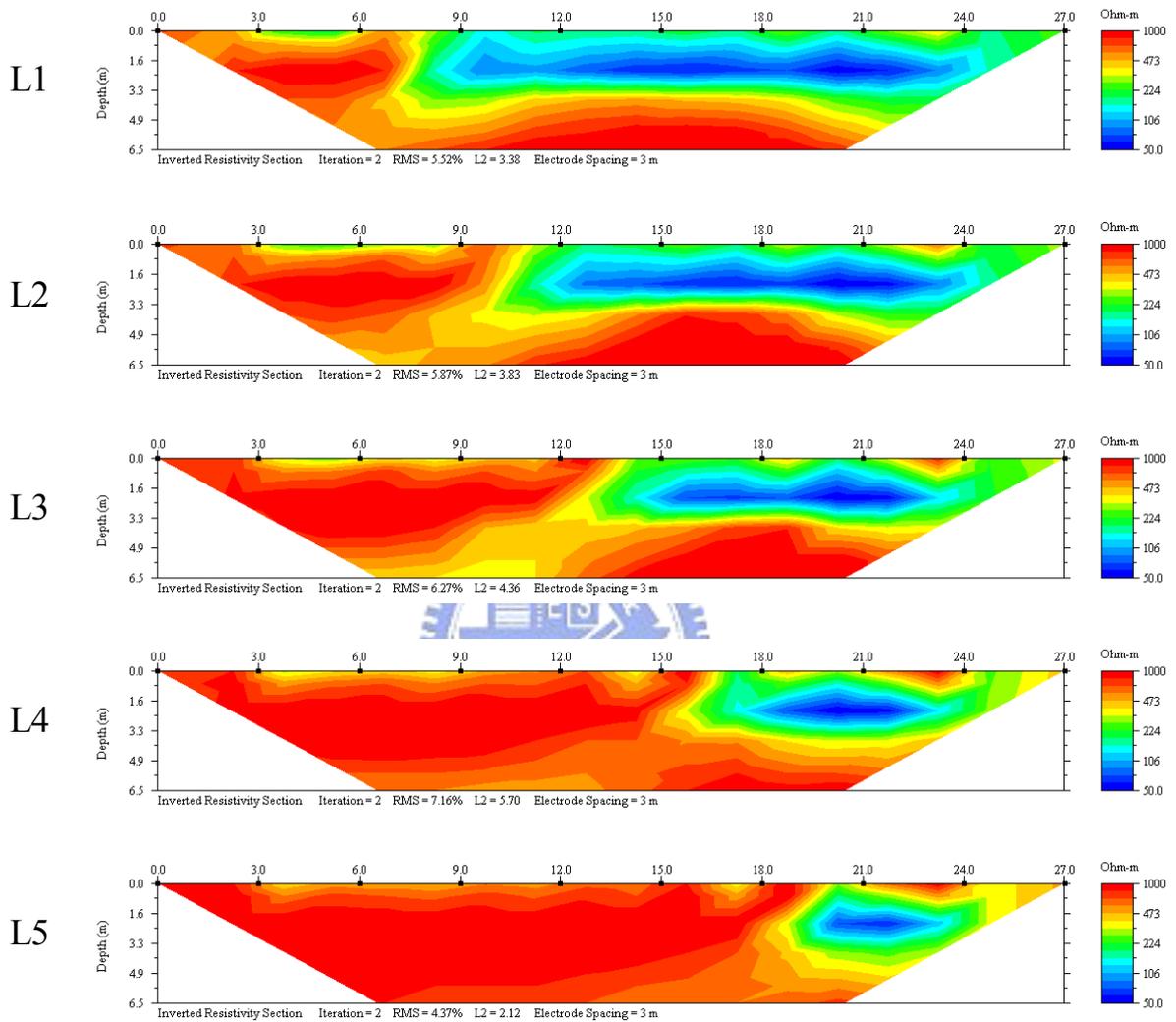
圖 3-8(c) B 類測線電阻率剖面結果

C 類測線之結果如圖 3-9 所示，由圖 3-4 之規劃中可知 L1 至 L5 其高電阻率段的長度分別是 9 公尺、12 公尺、15 公尺、18 公尺以及 21 公尺，先由  $n=0.05$  之圖 3-9(a) 結果看起，於深度之界面上，5 條測線在地表下約 3.5 公尺處皆有明顯電阻率變化，顯示其上下不同電阻率土層的存在；而在測線方向上，L1 至 L4 在高低電阻率土層之分界處有明顯的電阻率變化顯示土層界面的存在，而在 L5 測線之結果，

在測線方向上，顯示出之土層界面位置較實際位置向高電阻側偏移了約 1.5 公尺，此一問題之原因可能是在於 L5 測線在低電阻率處之電極棒僅有 2 根，但是地電阻探測之施測一次量測需使用 4 根電極棒，因此雖然測得該處有低電阻之存在，但在測線方向上之位置有所偏移。

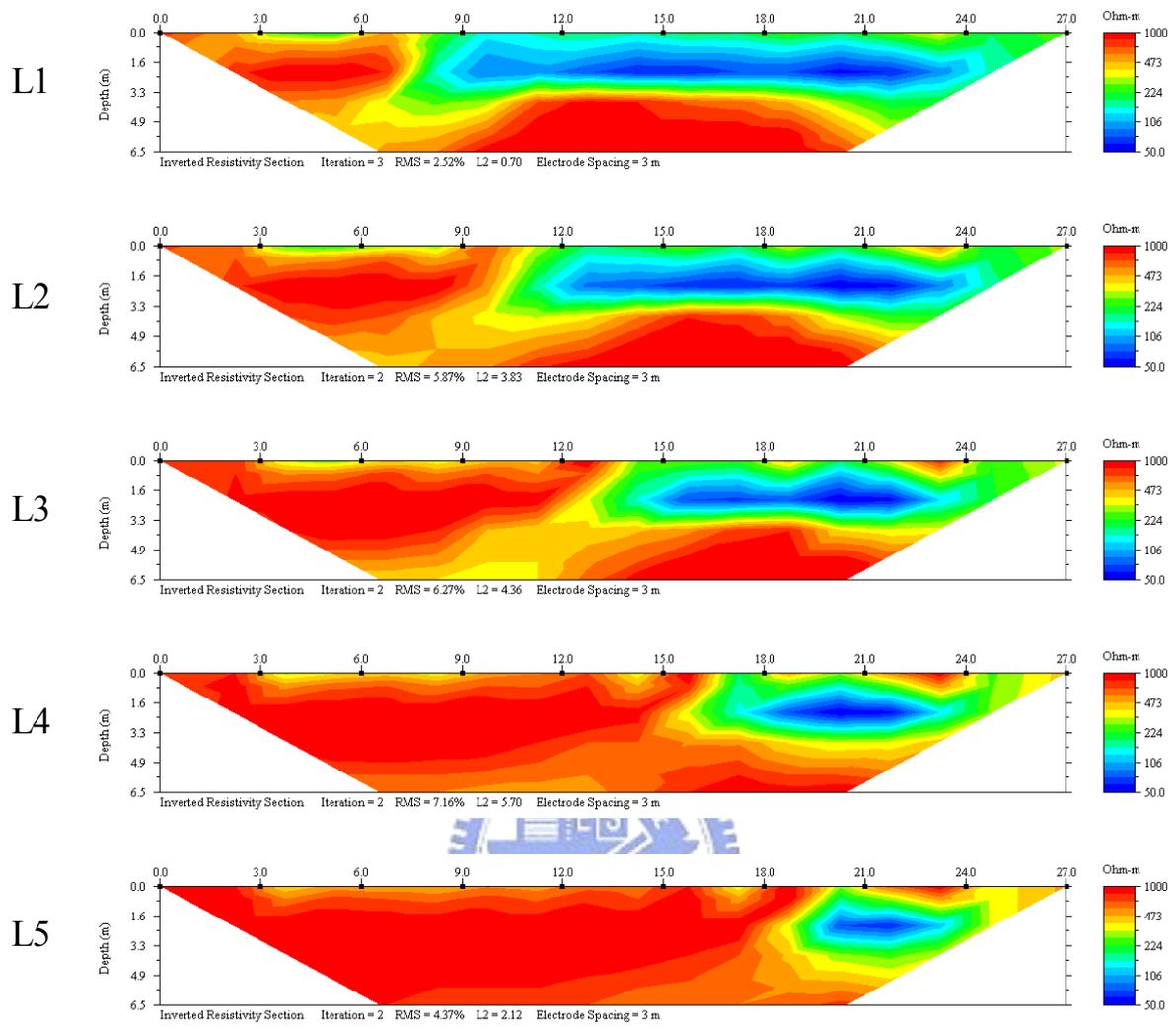
再觀察圖中之電阻率剖面結果亦可發現，在側向變化處地表下 3 公尺後的深度偏高電阻側會有一帶狀之低電阻率存在，在 L1 至 L5 測線結果中，該帶狀隨著斷層側向變化處的位置不同而隨之不同。此帶狀可能與 3D 效應有關，在測線側向上的低電阻位置映射至測線高電阻段的深度上，而因為低電阻區在測線高電阻段側向上為非等距，且有漸遠的情形，因而使得此帶狀自斷層側向變化處往左下的方向發展，而由 A 類測線之結果可知，在高電阻側其受低電阻所受之 3D 效應影響空間至多為 2 倍電極棒間距，因此，在圖 3-9(a)之結果中可見帶狀之影響範圍，於探測到的深處中也約略是在 2 倍電極棒間距的範圍中(測線與斷層走向夾 45 度角，因此在測線側向上的影響距離與測線方向上相同)。圖 3-9(b)與圖 3-9(c)之結果為  $n=0.1$  以及  $n=0.2$  的電阻率剖面，由圖中可知兩者結果與上述  $n=0.05$  之結果幾乎相同。然而，此一現象亦可能是為反算過程所造成之誤差，持此說法之原因是在於由結果中顯示，當測線下方地層以高電阻率段比例較多或低電阻率段較多使得地層情況貼近水平層狀之情形時，該帶狀較不明顯(如 L1、L4 以及 L5)，而在兩者比例相近的 L2 及 L3 測線中則十分明顯，

此與反算過程中對於地層推算之邏輯有關，偏離本研究之目的，僅先就現象做此說明。



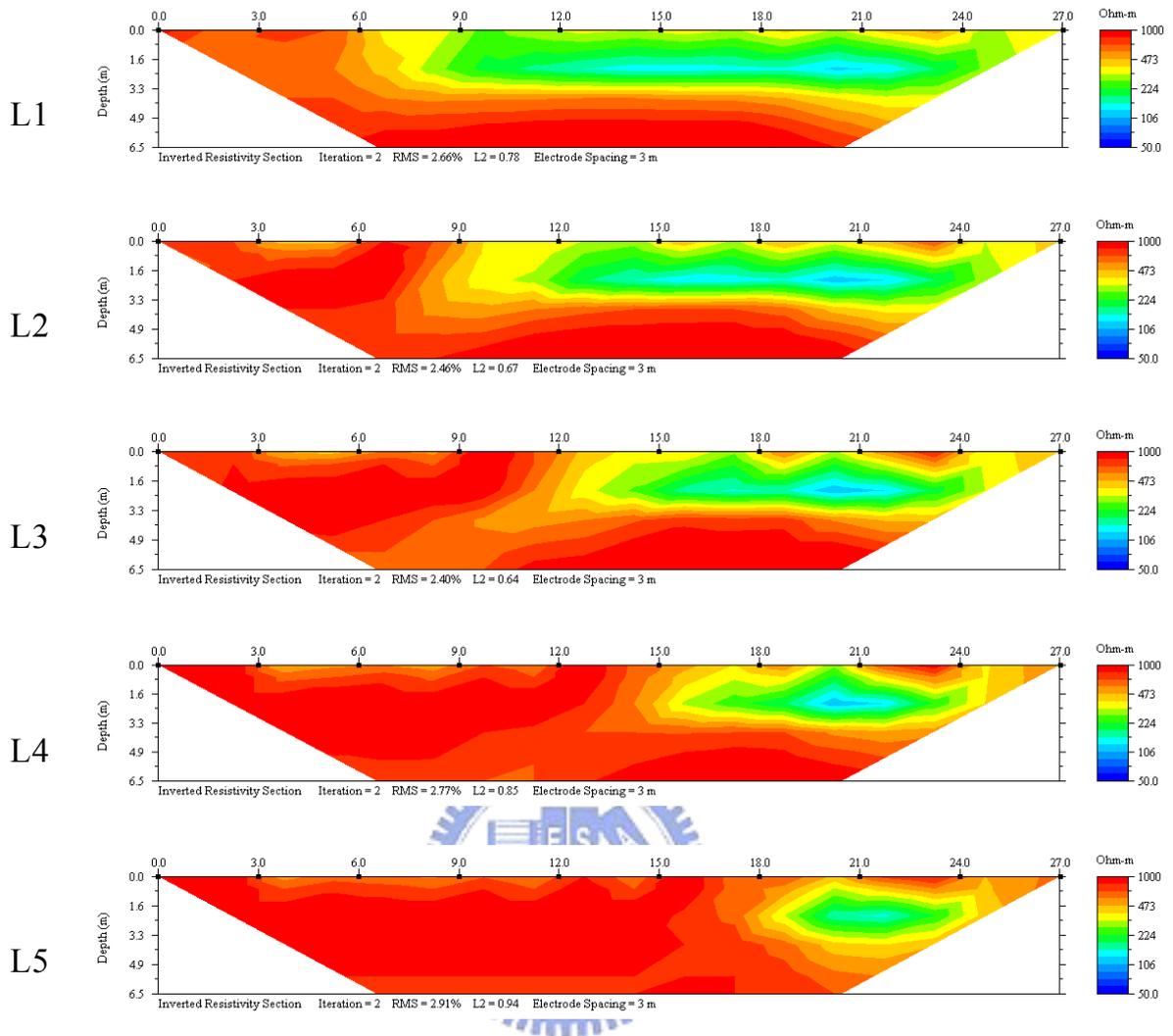
R2=50 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-9(a) C 類測線電阻率剖面結果



R2=100 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-9(b) C 類測線電阻率剖面結果



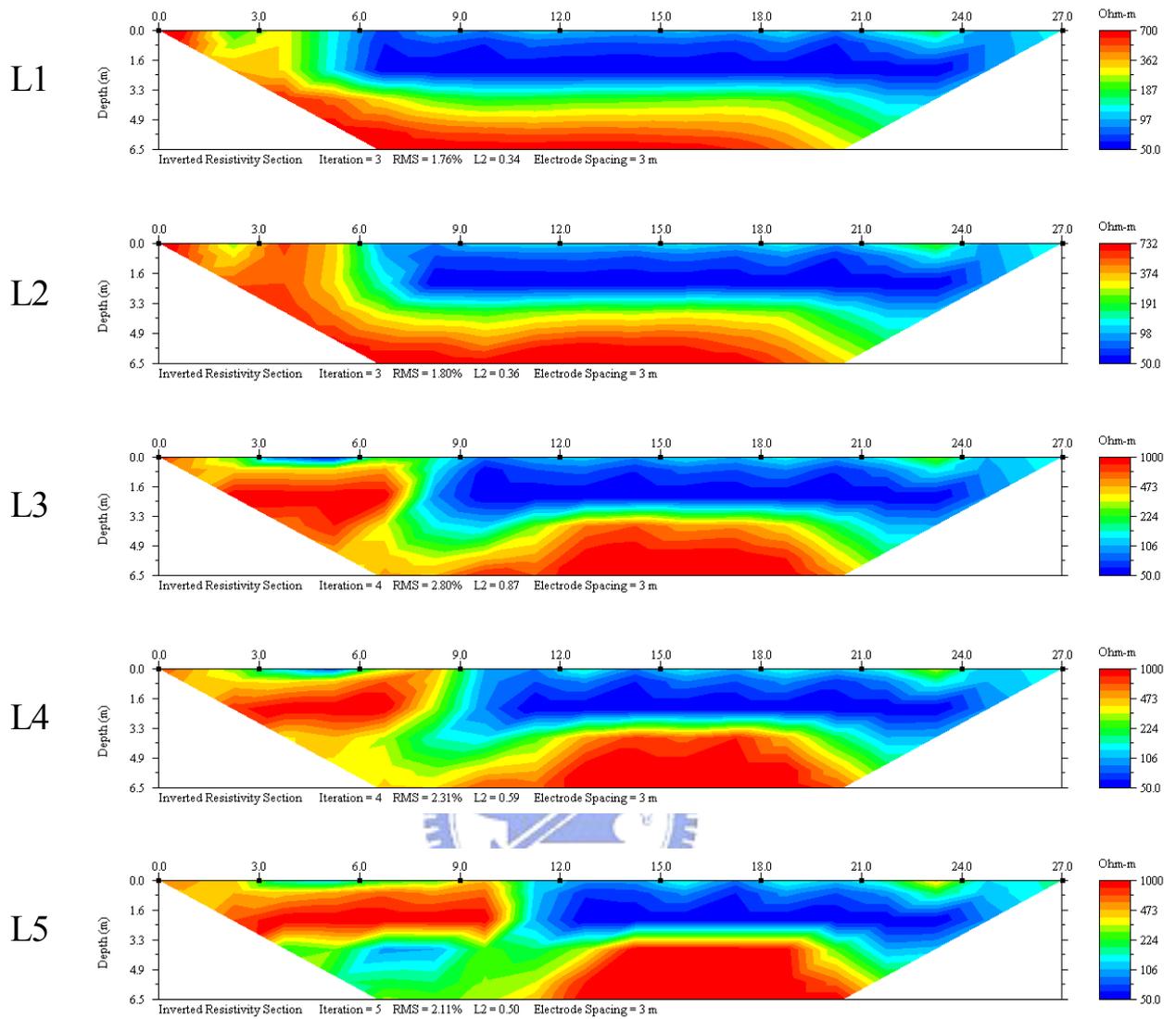
R2=200 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-9(c) C 類測線電阻率剖面結果

D 類測線之結果如圖 3-10 所示，由圖 3-4 之規劃中可知 L1 至 L5 其高電阻率段的長度分別是 5.2 公尺、6.9 公尺、8.7 公尺、10.4 公尺以及 12.1 公尺，先由  $n=0.05$  之圖 3-10(a) 結果看起，於深度之界面上，5 條測線在地表下約 3.5 公尺處皆有明顯電阻率變化，顯示其上下不同電阻率土層的存在；而在測線方向上，L1 至 L5 在高低電阻率土層之分界處有明顯的電阻率變化顯示土層界面的存在。

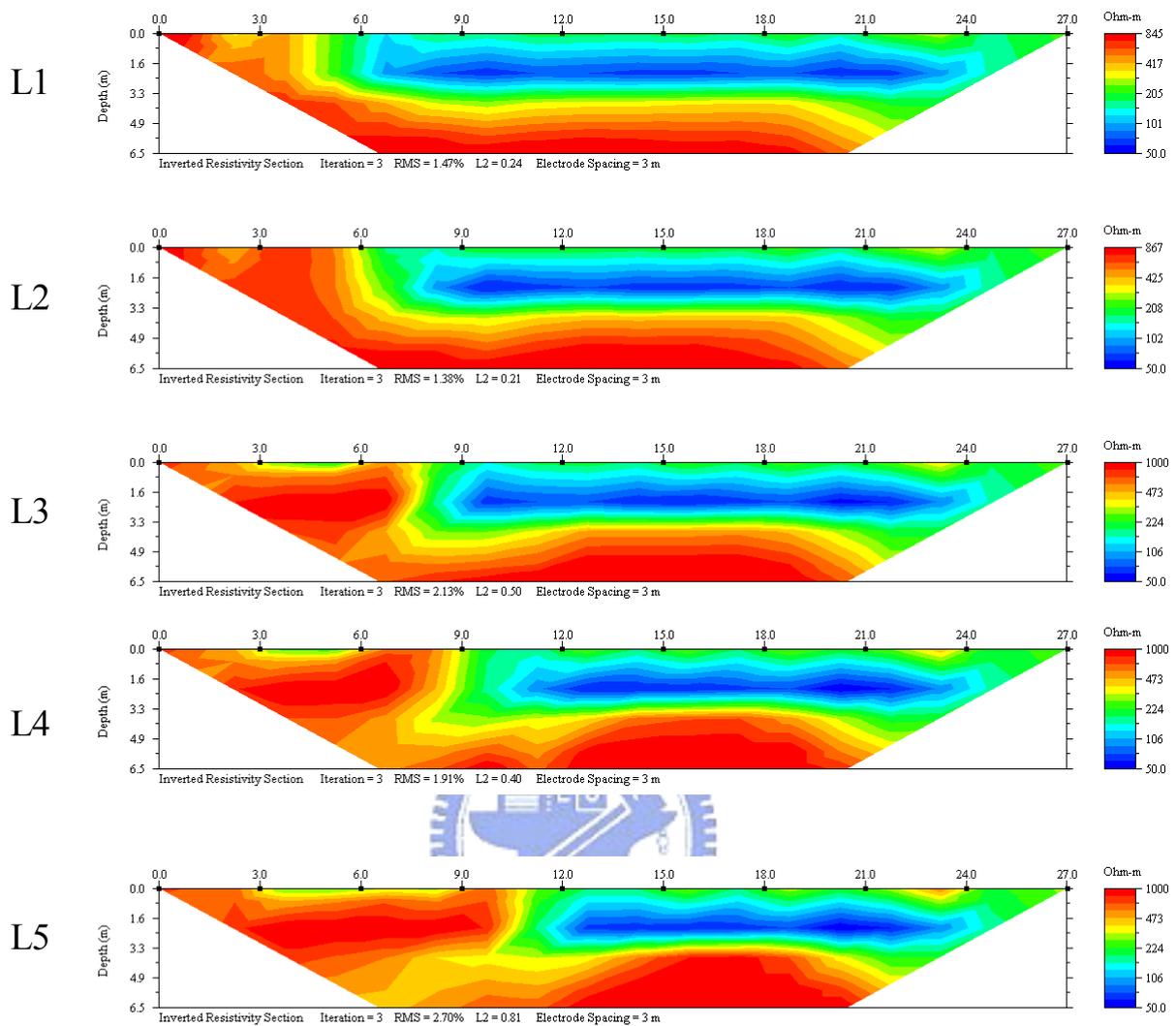
再觀察圖中之電阻率剖面結果亦可發現，在側向變化處地表下 3 公尺後的深度偏高電阻側會有一帶狀之低電阻率存在，與 C 類測線結果相似，在 L1 至 L5 測線結果中，該帶狀隨著斷層側向變化處的位置不同而隨之不同。此帶狀之原因已於 C 類測線結果中推測其可能是為 3D 效應以及反算過程之影響，由此圖中之結果 L1-L3 主要以低電阻率土層為主，帶狀較不明顯，而在 L4 以及 L5 之結果則有相當明顯的低電阻帶狀產生，尤以 L5 之結果為最。為進一步討論此一帶狀之問題，圖 3-10(a)中之 L5 測線的高低電阻率土層在測線中的比例與 C 類測線圖 3-9(a)之 L2 測線相近，因此將此兩者做進一步比對。

圖 3-9(a)之 L2 測線與圖 3-10(a)中之 L5 測線下方之土層幾乎一樣，主要差異在於地層於側向變化上的不同，然而兩者所得之帶狀影響並不相同，圖 3-10(a)中之 L5 測線之低電阻率帶狀不但範圍較廣，其所得之電阻率亦較圖 3-9(a)之 L2 測線所得為低。此結果驗證其述所提此帶狀是受到 3D 效應以及反算過程之影響造成，然而其圖 3-10(a)中之 L5 測線中會有較廣以及電阻率較低的原因因牽涉到反算過程，因此無法確認，只是同時比較 B 類與 C 類不同  $n$  值之結果，其間之差異較沒有  $n=0.05$  時的那麼大，所以初步認為是因為高低電阻率土層差異大，右上區較低電阻的存在使得左下角的土層在演算中受到該區電阻的影響而產生有較低的電阻率。



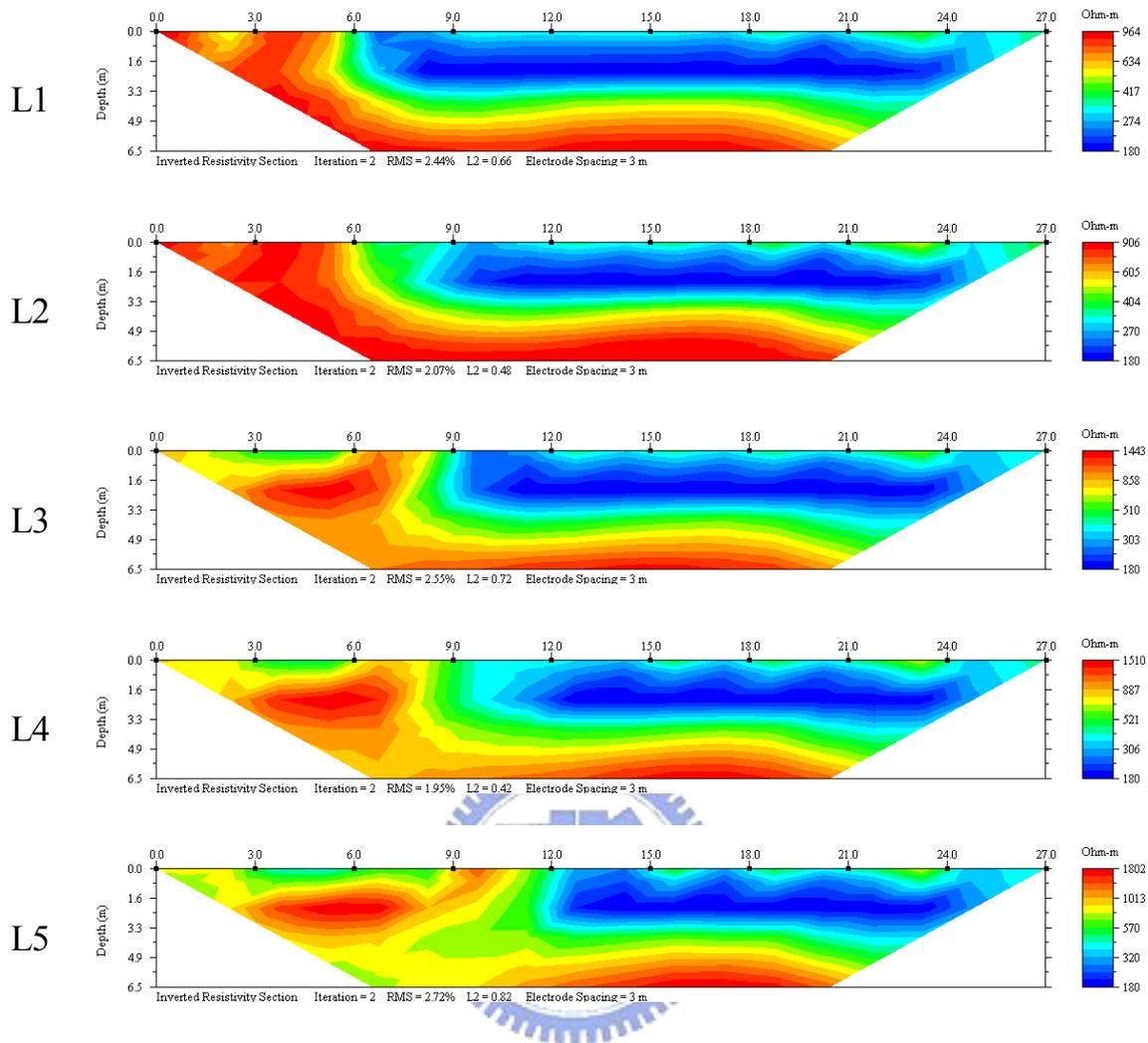
R2=50 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-10(a) D類測線電阻率剖面結果



R2=100 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-10(b) D 類測線電阻率剖面結果



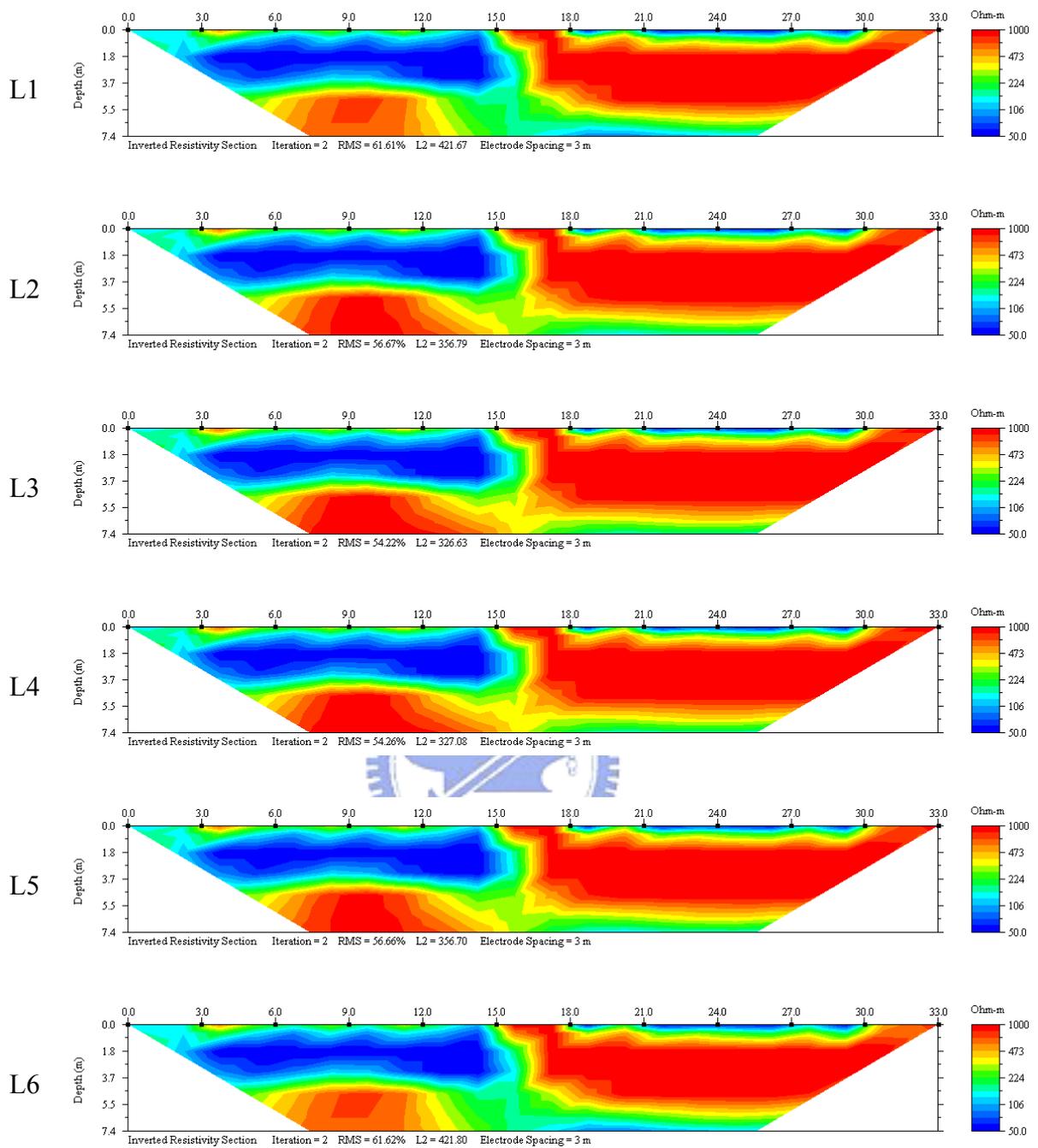
R2=200 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-10(c) D 類測線電阻率剖面結果

E 類測線之結果如圖 3-11 所示，由圖 3-4 之規劃中可知 L1 至 L5 其低電阻率段的長度是 15 公尺，先由  $n=0.05$  之圖 3-11a 結果看起，於深度之界面上，5 條測線在地表下約 3.7 公尺處皆有明顯電阻率變化，顯示其上下不同電阻率土層的存在；而在測線方向上，L1 至 L5 在高低電阻率土層之分界處有明顯的電阻率變化顯示土層界面的存在。

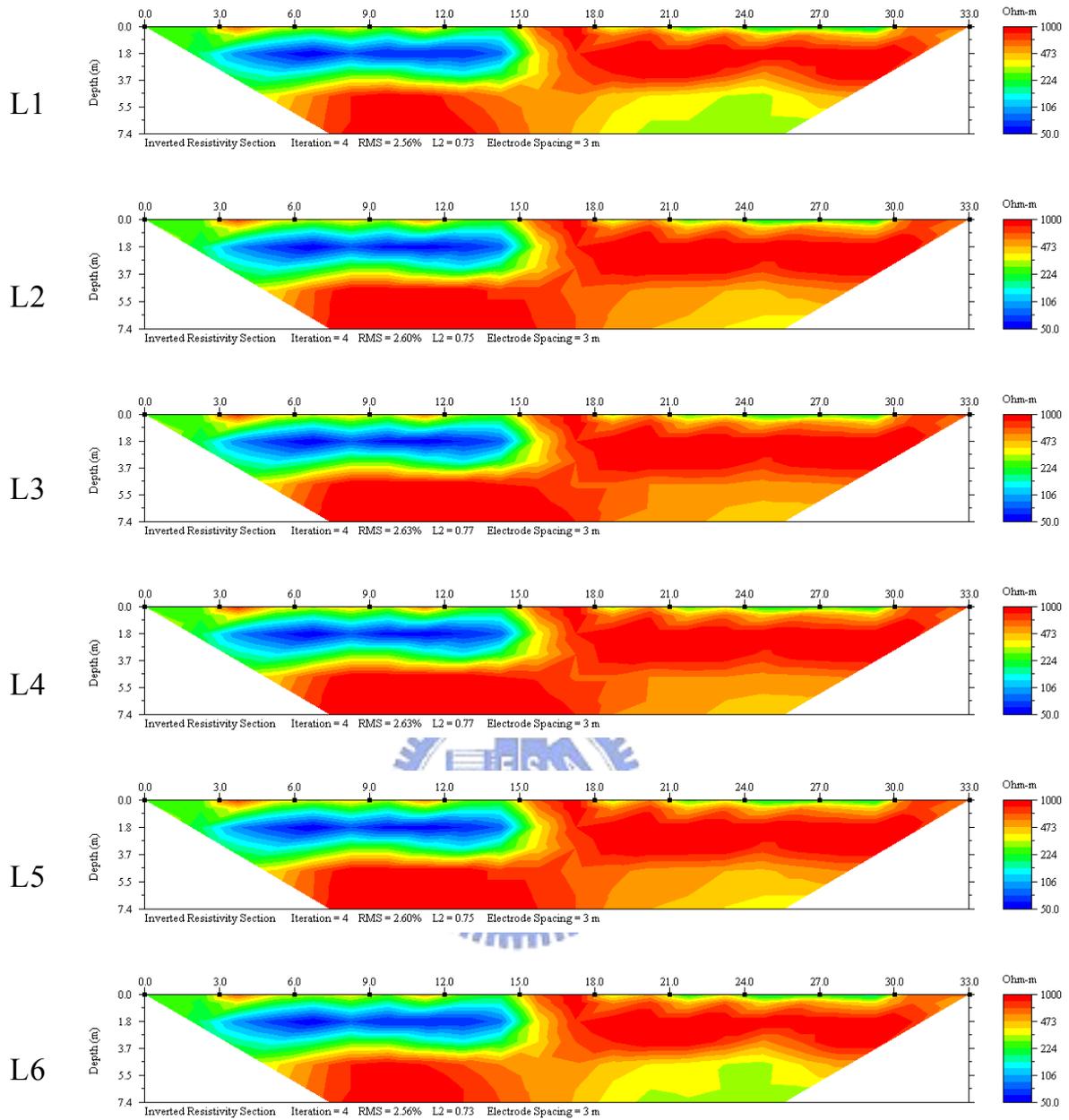
再觀察圖中之電阻率剖面結果亦可發現，在側向變化處地表下 3.7 公尺後的深度偏高電阻側會有一帶狀之低電阻率存在，與 B、C、D 類測線結果相似。此帶狀之原因於 B 類測線結果中推測其可能是為 3D 效應以及反算過程之影響，由此地層之結果可確定，該帶狀受反算過程之影響較為明顯，可做此一結果推論之理由是因為在此地層模型中，其基本滿足 2D 的假設，亦即在垂直測線方向上並沒有地層的變化。而隨著  $n$  值的增加，高低電阻間的差異降低後，於反算時所造成的不連續差異降低，也使得帶狀的影響降低。





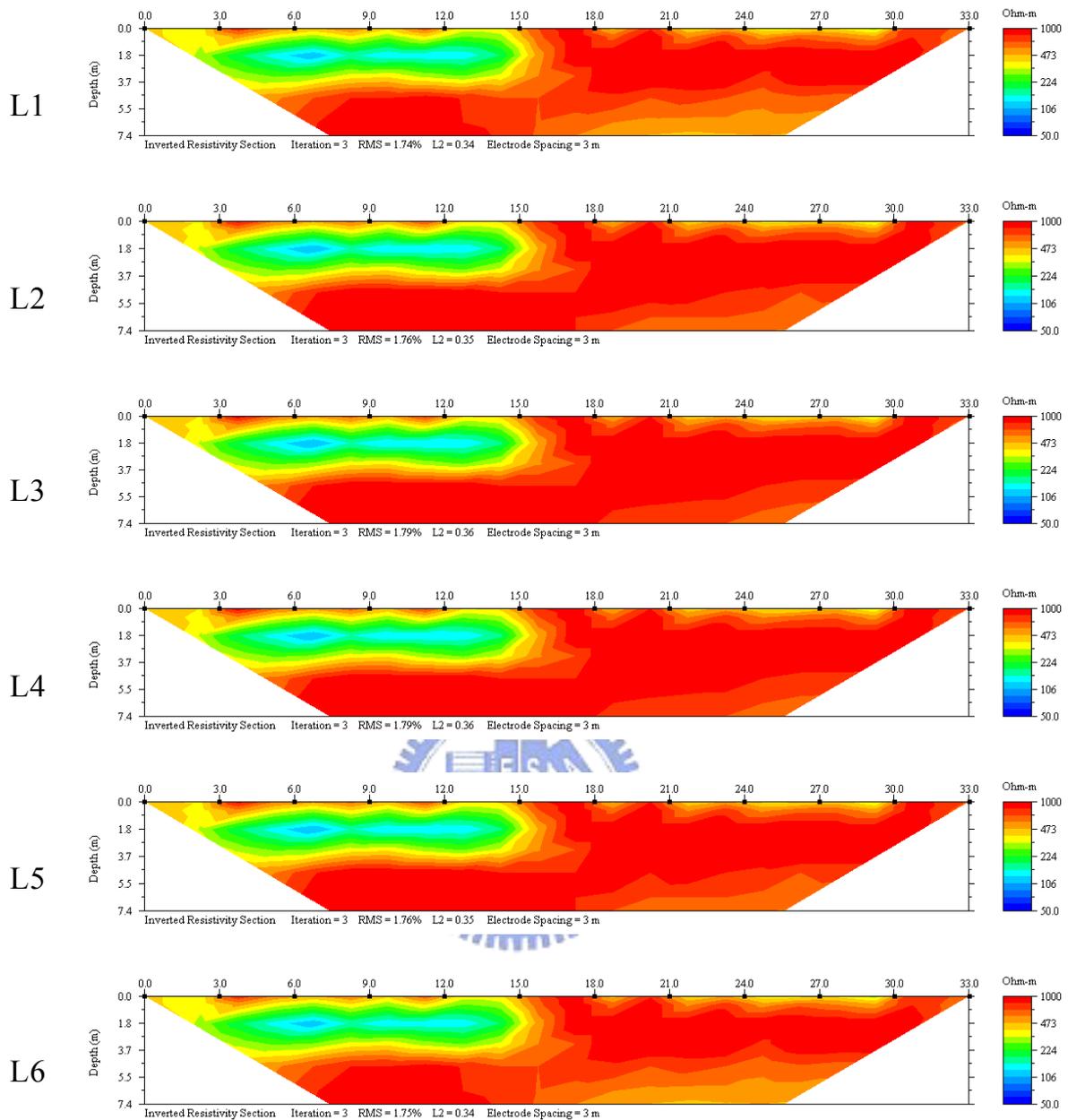
R2=50 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-11(a) E 類測線電阻率剖面結果



R2=100 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-11(b) E 類測線電阻率剖面結果



R2=200 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-11(c) E 類測線電阻率剖面結果

### 3.6.3 階梯地層厚度之影響

為探討階梯地層厚度之影響，規劃有 B-T 地層模形，如圖 3-12 所示，其測線佈設方式與 B 類地層模型相同，R2 之地層厚度改為 9 公尺，而為儘量能使探測達 9 公尺之深度，將其測現長度增為 42 公

尺，電極棒間距仍維持 3 公尺。

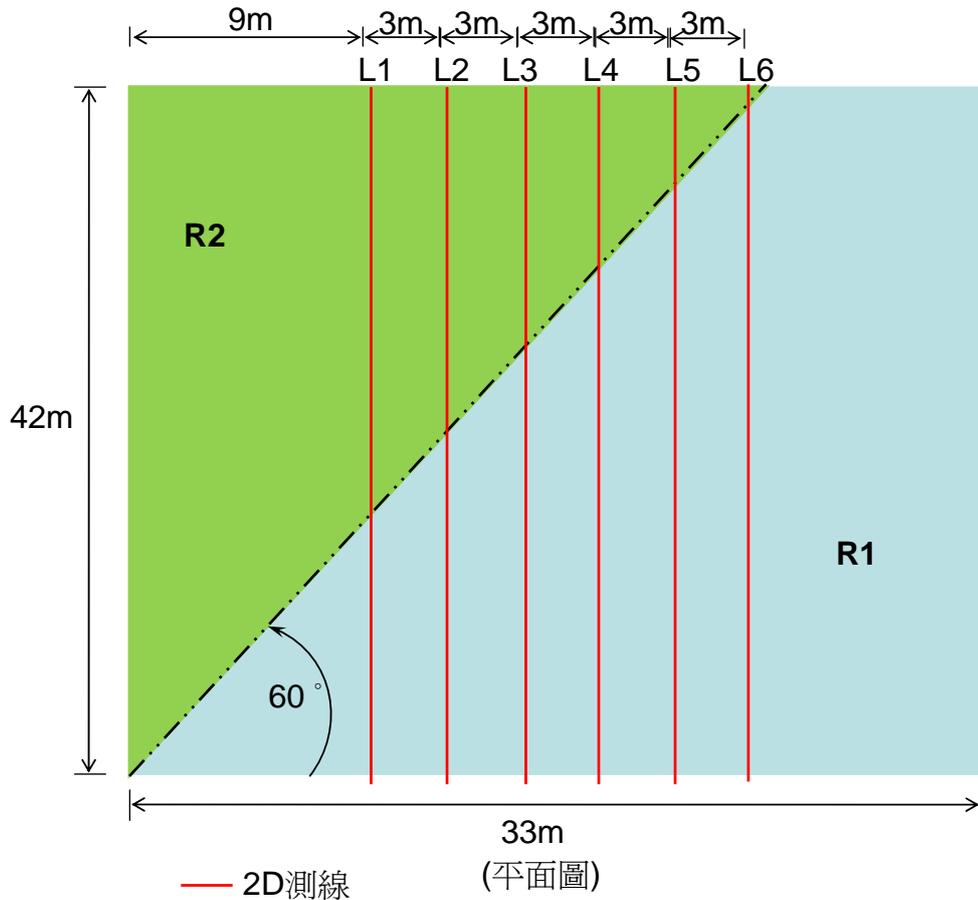


圖 3-12 B-T 類測線佈設平面圖

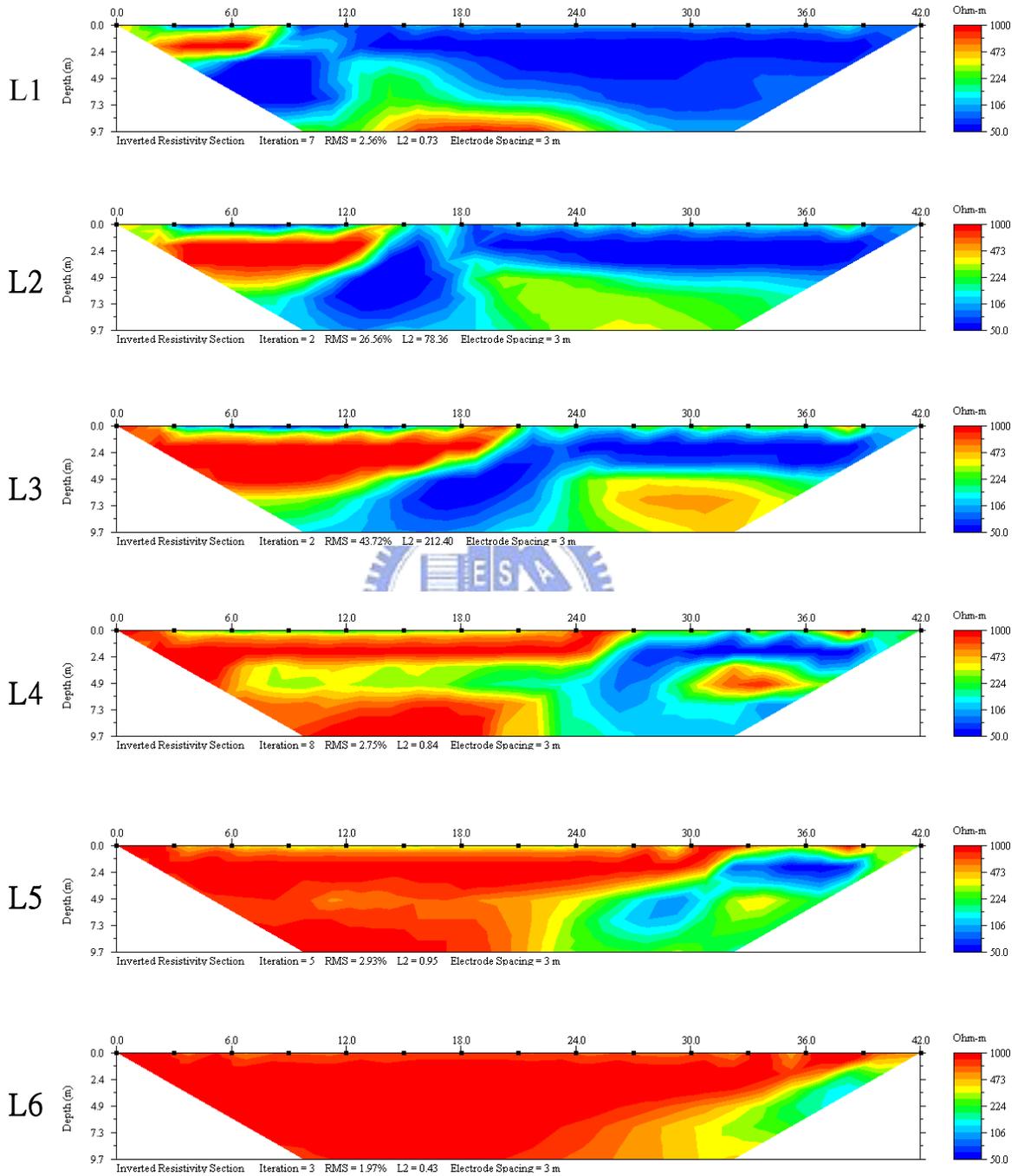
B-T 類測線之結果如圖 3-13 所示，採用 42 公尺之測線長度能探測到地表下約 9.7 公尺之深度，由圖 3-12 之規劃中可知 L1 至 L6 其高電阻率段的長度分別是 15.6 公尺、20.8 公尺、26 公尺、31 公尺、36.4 公尺以及 41.6 公尺，先由  $n=0.05$  之圖 3-13(a) 結果看起，於深度之界面上，在 L1-L3 測線的結果中，在地表下約 4 公尺處皆有電阻率提升之情形，此情形顯示，位於低電阻區中的電極棒其量測時受到高電阻區的影響，而使其下方地層之電阻值有提升之情形；而在測線方向上，L1 至 L5 在高低電阻率土層之分界處有明顯的電阻率變化顯示土

層界面的存在，但其分界處之位置較實際位置向高電阻側偏移了約 4 至 6 公尺不等，此一問題之原因可能是在於 L1-L5 測線在高低電阻率交界處距離低電阻率區太近，而使得有大部份之電流流向低電阻率區，造成低電阻率區有擴大的情形。此情況隨著  $n$  值的增加有減少的情形。

再觀察圖中之電阻率剖面結果亦可發現，在側向變化處地表下約 4 公尺後的深度偏高電阻側會有一帶狀之低電阻率存在，在 L1 至 L3 測線結果中，該帶狀隨著斷層側向變化處的位置不同而隨之不同。此帶狀可能與 3D 效應有關，在測線側向上的低電阻位置映射至測線高電阻段的深度上，而因為低電阻區在測線高電阻段側向上為非等距，且有漸遠的情形，因而使得此帶狀自斷層側向變化處往左下的方向發展，而由 A 類測線之結果可知，在高電阻側其受低電阻所受之 3D 效應影響空間至多為 2 倍電擊棒間距，因此，在圖 3-13 之結果中可見帶狀之影響範圍，於探測到的深處中也約略是在 2 倍電極棒間距的範圍中(測線與斷層走向夾 30 度角，因此在測線側向上的影響距離約 10 公尺)。圖 3-13(b)與圖 3-13(c)之結果為  $n=0.1$  以及  $n=0.2$  的電阻率剖面，由圖中可知兩者結果與上述  $n=0.05$  之結果幾乎相同。然而，此一現象亦可能是為反算過程所造成之誤差，此問題將待後續模擬結果再進一步說明。

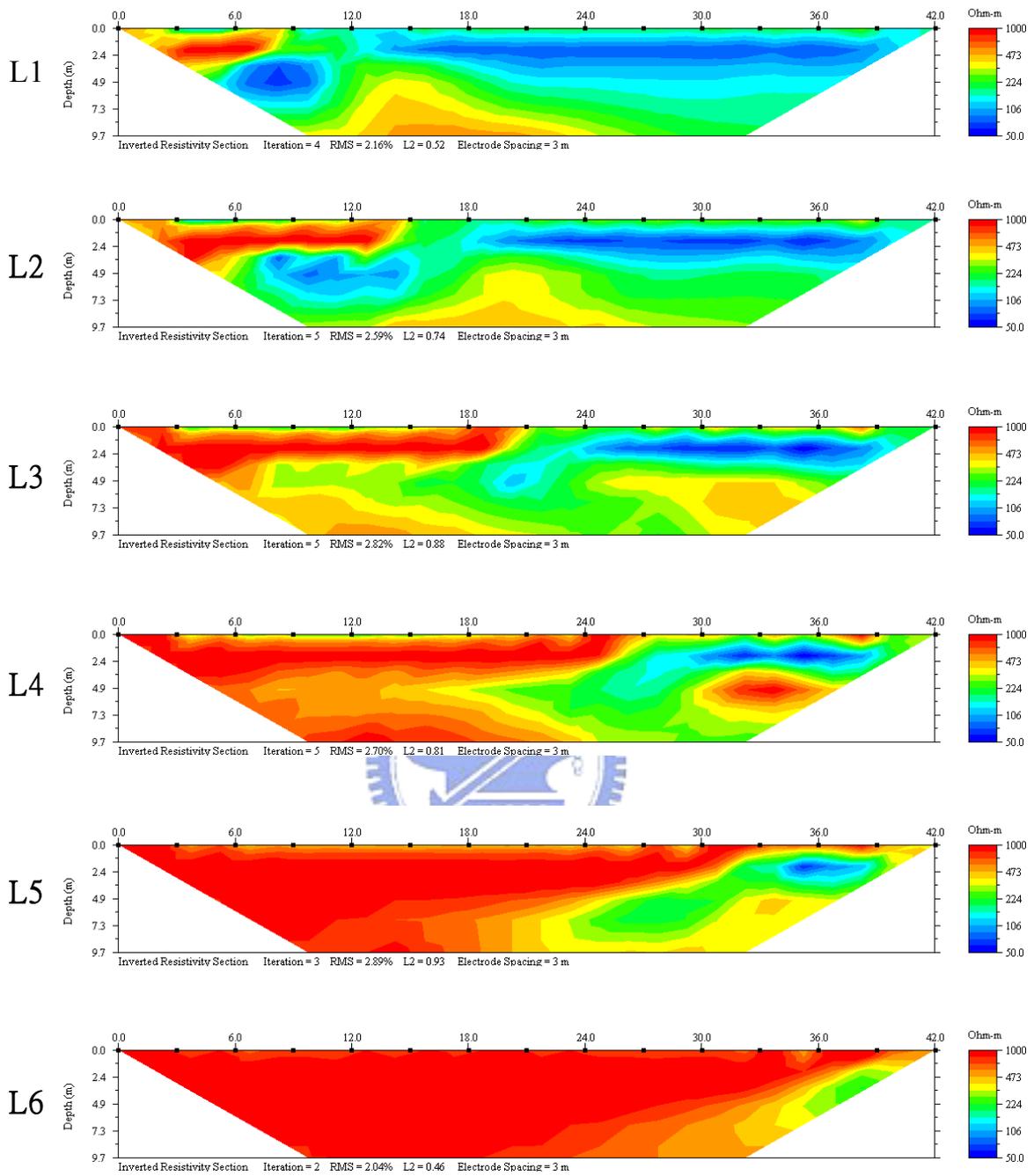
此結果與 B 類地層之結果約略一致，但更進一步顯示，當低電阻層之厚度足夠時，位於低電阻側之結果同樣會受到高電阻側的影響，但在高電阻率土層側與低電阻率土層測之測線結果對於 3D 效應之影響範圍有所不同，在高電阻率側 3D 效應之影響較低電阻率側明顯，

且影響之空間較大。比較 B 與 B-T 地層之結果可知，在電極棒間距同為 3 公尺的情形下，階梯地層之厚度將影響 3D 效應的影響範圍。



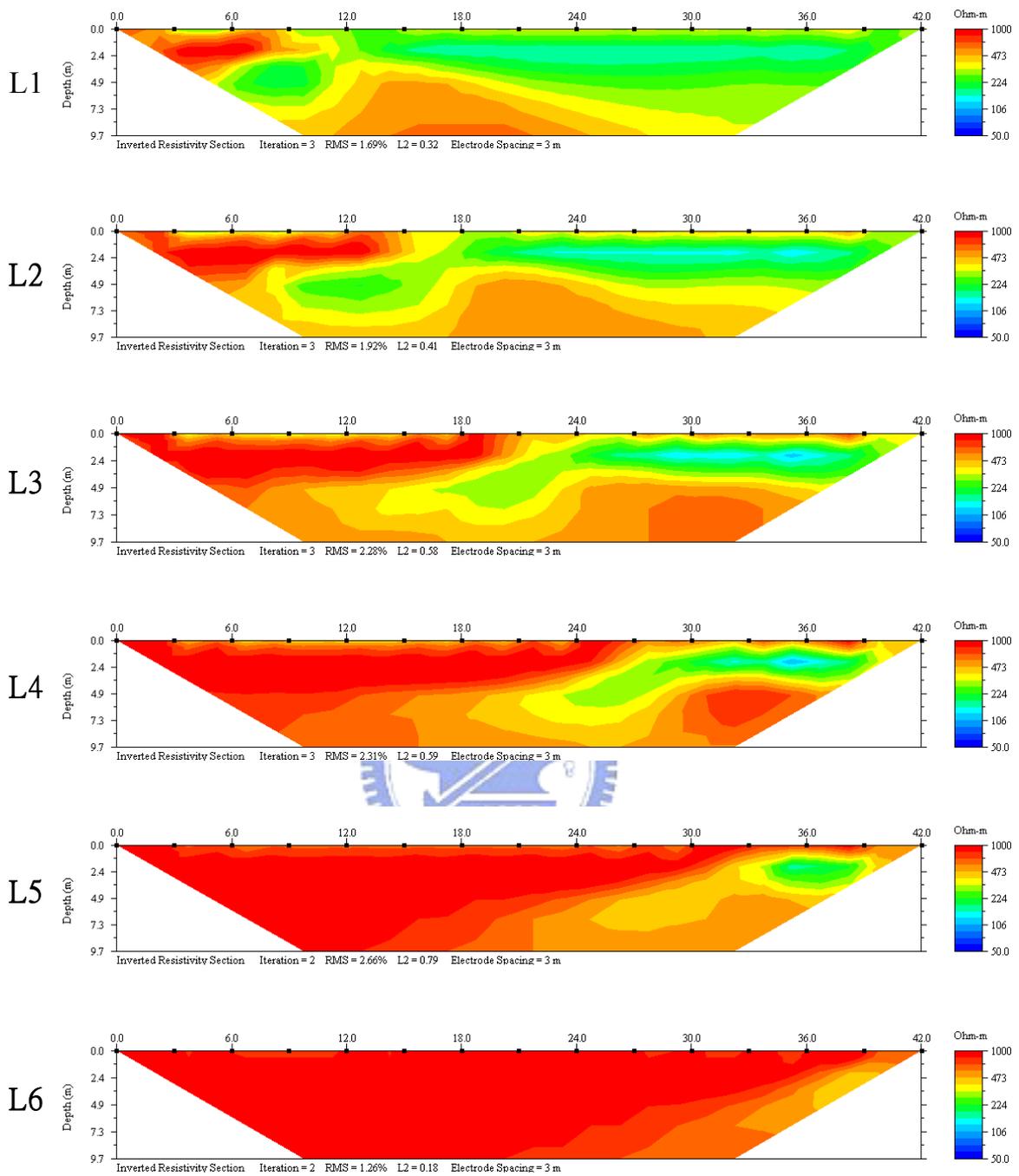
R2=50 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-13(a) B-T 類測線電阻率剖面結果



R2=100 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-13(b) B-T 類測線電阻率剖面結果



R2=200 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-13(c) B-T 類測線電阻率剖面結果

### 3.6.4 電阻率比與電阻率之影響

於上述之探討中，地層中 R1 以及 R2 電阻率之不同對於 3D 效應

之影響是以其比率  $n$  做為其 3D 效應行為推論之參數，然而採用  $n$  值是否可做為推論參數並不確定，在此將對電阻率之實際值才是其 3D 效應行為之參數做一探討。

在此將使用 A 類與 B 類地層進行兩個地層模型之模擬。在 A 類地層中，固定兩種 A 類地層電阻率比  $n = 0.05$ ，其中設定一個的  $R1$  為 1000 ohm-m (則其  $R2$  為 50 ohm-m)，另一個設定為 500 (則其  $R2$  為 25 ohm-m)， $R2$  地層厚度為 4 公尺，電極棒間距為 3 公尺，測線長 27 公尺，使用 dipole-dipole 法施測；而在 B 類地層中，固定兩種 B 類地層電阻率比  $n = 0.1$ ，其中設定一個的  $R1$  為 1000 ohm-m (則其  $R2$  為 100 ohm-m)，另一個設定為 2000 (則其  $R2$  為 200 ohm-m)， $R2$  地層厚度為 4 公尺，電極棒間距為 3 公尺，測線長 27 公尺，使用 dipole-dipole 法施測。

A 類地層之結果如圖 3-14 所示，圖 3-14(a)之結果已於 A 類地層中談過，於此不再贅述；圖 3-14(b)之結果顯示位於斷層側向變化之處的  $L3$ ，在該處所測得之結果主要是反應偏低電阻側之地層情形。而在低電阻側之結果顯示，與  $L3$  相鄰 3 公尺之  $L2$  在地表下約 3.5 公尺處有明顯之高低電阻界面存在，幾乎不受 3D 效應的影響，且在不同  $n$  值下皆有相同的結果。再觀察於高電阻側之結果，距  $L3$  測線 3 公尺遠之  $L4$  測線，其電阻率剖面顯示，在地表下 3.5 公尺處有低電阻存在，使得該處地層為上有高電阻而下有低電阻之地層結果，與應是全為高電阻之地層模型不同，此結果之差異主要便是來自於 2D 地電

阻探測之 3D 效應造成，此一結果與圖 1.9a 之結果一致。

B 類地層之結果如圖 3-15 所示，圖 3-15(a)之結果已於 B 類地層中談過，於此不再贅述；圖 3-15(b)之結果與圖 3-15(a)幾乎完全一樣。由此可初步獲知電阻值率比  $n$  確實可做為 3D 效應之行為參數，而不需採用其實際電阻率值。

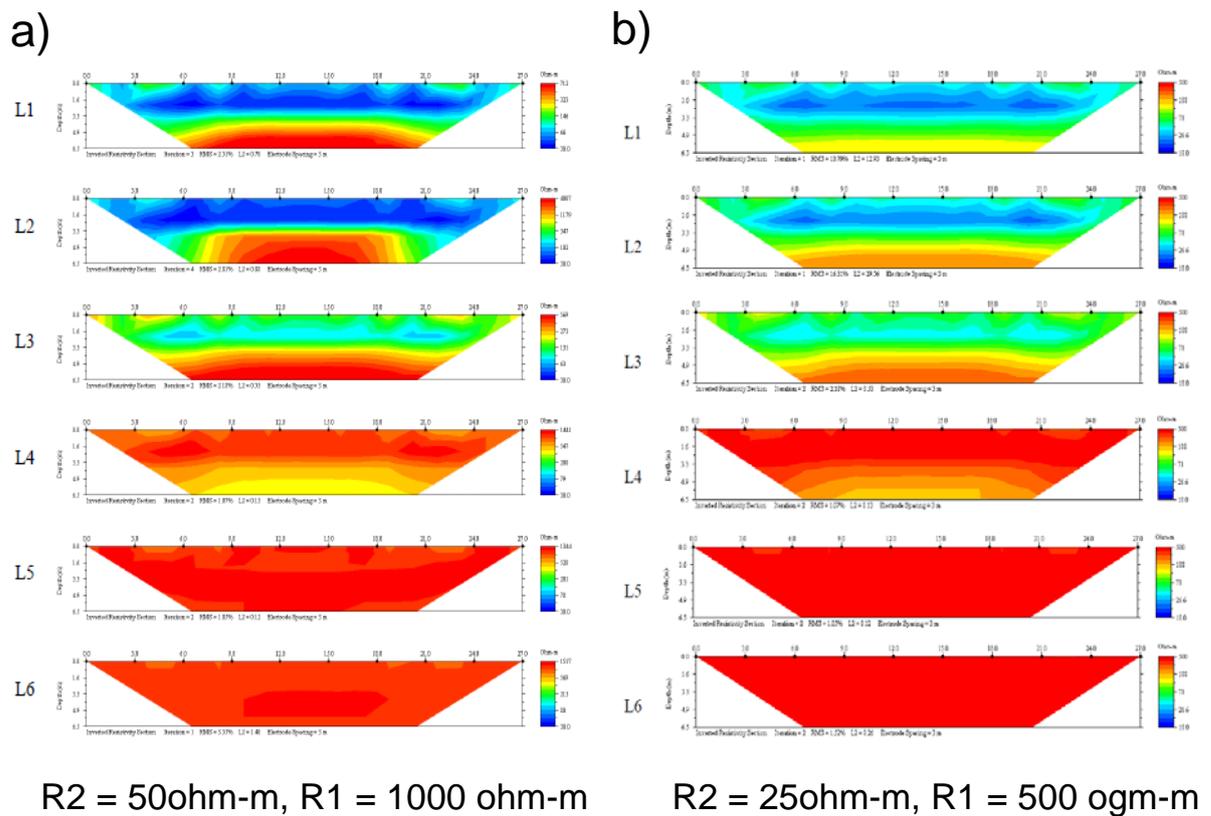


圖 3-14 A 類地層  $n=0.05$  測線電阻率剖面結果

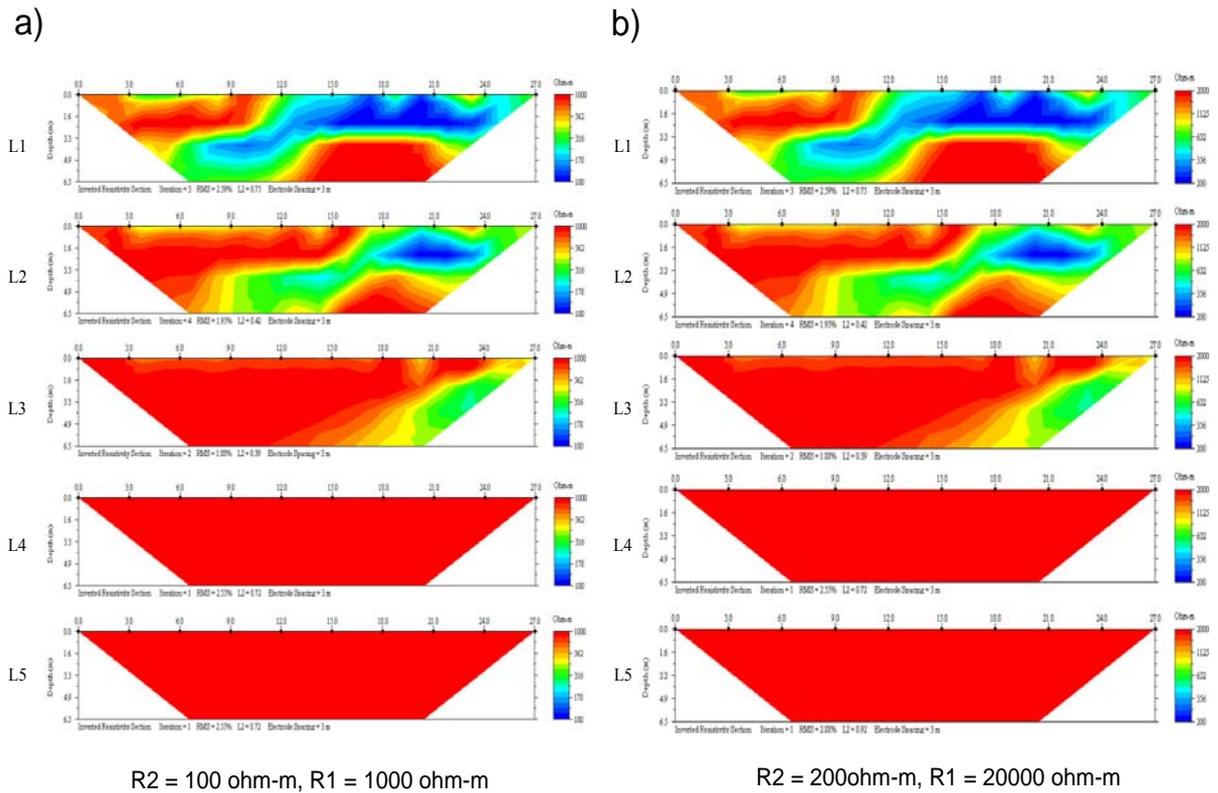


圖 3-15 B 類地層  $n=0.1$  測線電阻率剖面結果

### 3.6.5 電極棒間距之影響

在上述探討 3D 效應之影響中，為儘可能參數化結果，以電極棒間距做為 3D 效應影響範圍之正規化基底，為了解電極棒間距是否確實可做為正規化之參數，規劃有 A-P 類地層，該類地層與 A 類地層模型僅在電極棒間距上有差異，採用三種不同  $n$  值之地層電阻率比 ( $n = 0.05, 0.1, 0.2$ )，固定  $R_2$  為 1000 ohm-m，其  $R_1$  分別為 50、100 以及 200 ohm-m。在 A-P 地層中，共佈有六條測線，測線與測線間距為 3 公尺，電極棒間距為 1.5 公尺，測線長 27 公尺。

A-P 類測線之地層電阻率剖面結果如圖 3-16 所示，圖 3-16(a), (b), (c) 分別表示不同地層電阻率比值  $n$  ( $n=0.05, 0.1, 0.2$ ) 之結果，由圖 3-4

之規劃中可知 L3 位於斷層側向變化之處，其數值結果顯示，在該處所測得之結果主要是反應偏低電阻側之地層情形。而在低電阻側之結果顯示，與 L3 相鄰 3 公尺之 L2 在地表下約 3.5 公尺處有明顯之高低電阻界面存在，幾乎不受 3D 效應的影響，且在不同 n 值下皆有相同的結果。

再觀察於高電阻側之結果，距 L3 測線 3 公尺遠之 L4 測線，其電阻率剖面顯示，在地表下 3.5 公尺處有低電阻存在，使得該處地層為上有高電阻而下有低電阻之地層結果，與應是全為高電阻之地層模型不同，此結果之差異主要便是來自於 2D 地電阻探測之 3D 效應造成。當電場在地層中發散時，雖能量主要是在測線上，但亦有相當能量分佈在測線側向的低電阻率土層處，而使得在側向上的距離所造成的較低電阻情形於反算中解算為在深度上的低電阻存在。當測線距離遠離至 6 公尺之 L5 時，3D 效應所造成之影響已不明顯，此結果在不同的三種 n 值地層中皆可觀察到。

再將此結果與圖 3-5 之 A 類地層結果比較，可發現兩者除 A-P 因為使用較小的電極棒間距而有較佳的解析度外，兩者在 3D 效應之影響空間上幾乎一樣，在低電阻側，大約在距離斷層側向變化處至 3 公尺遠，可不受 3D 效應之影響，而在高電阻側，則是要到達距約 6 公尺之 L4 才不受 3D 效應的影響，此結果顯示，以電極棒間距做為 3D 效應影響空間的正規化參數並不恰當，因為其影響的距離並不隨著電極棒間距變小而變小。

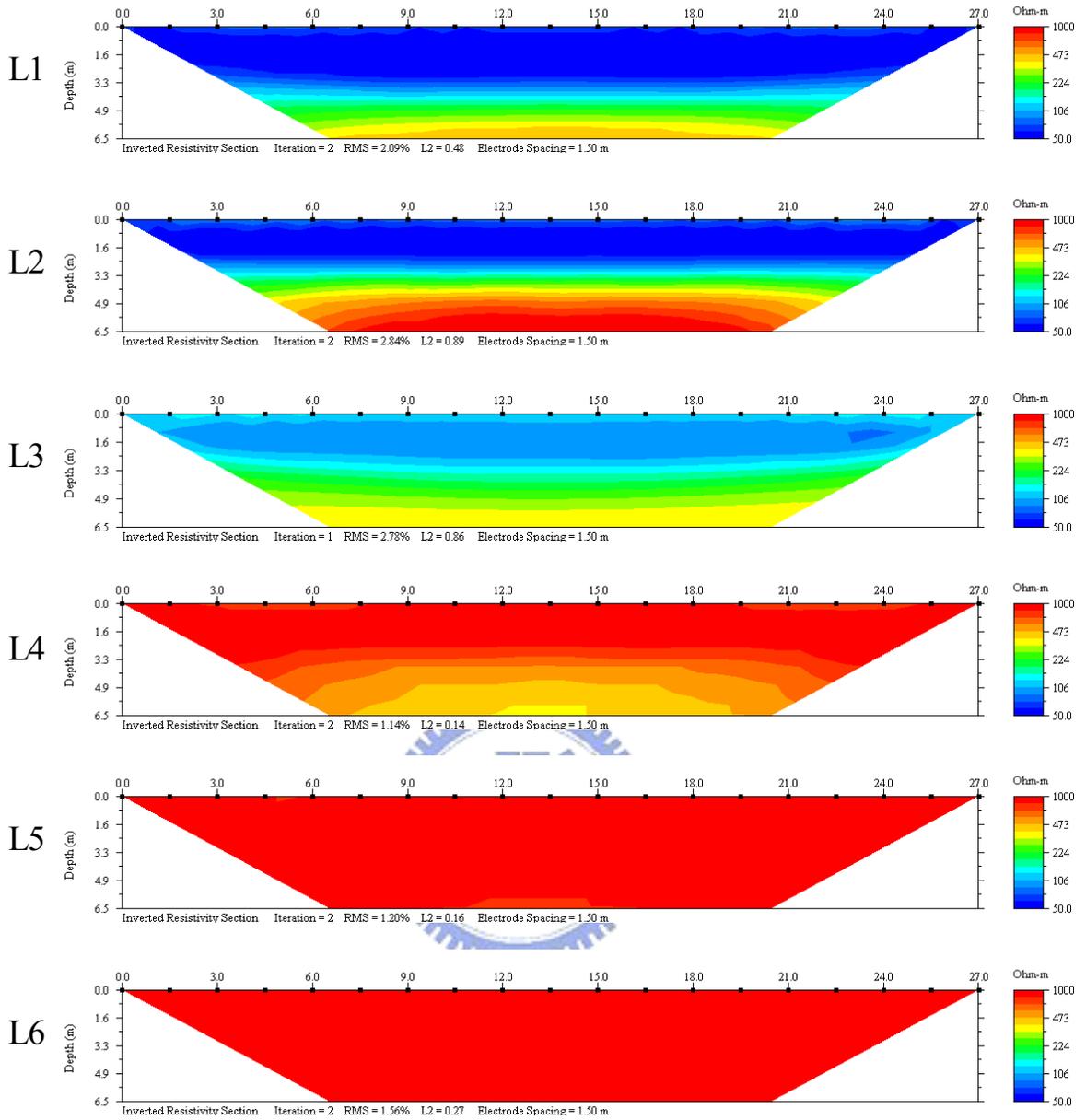


圖 3-16(a) A-P 類測線電阻率剖面結果

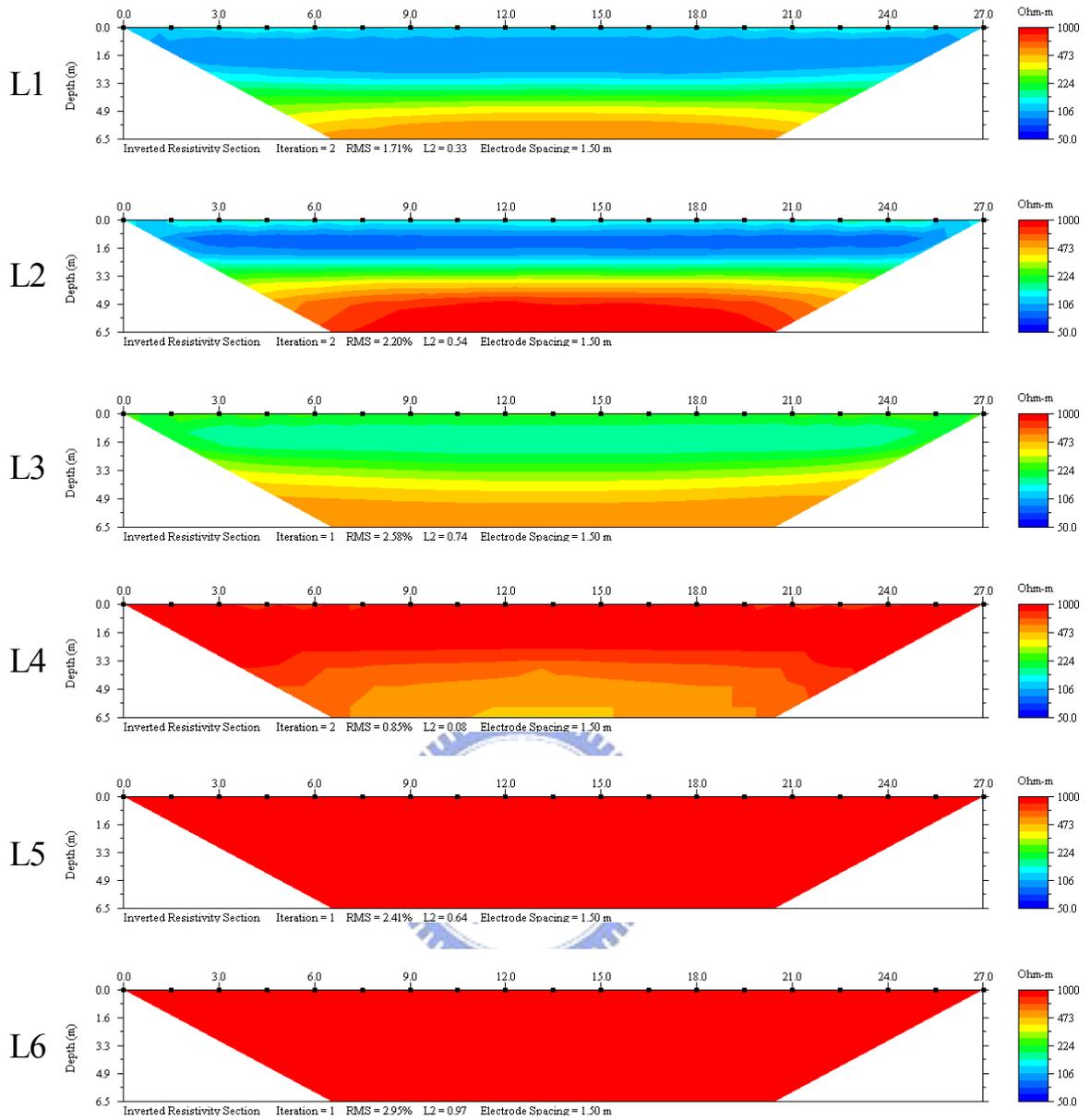


圖 3-16(b) A-P 類測線電阻率剖面結果

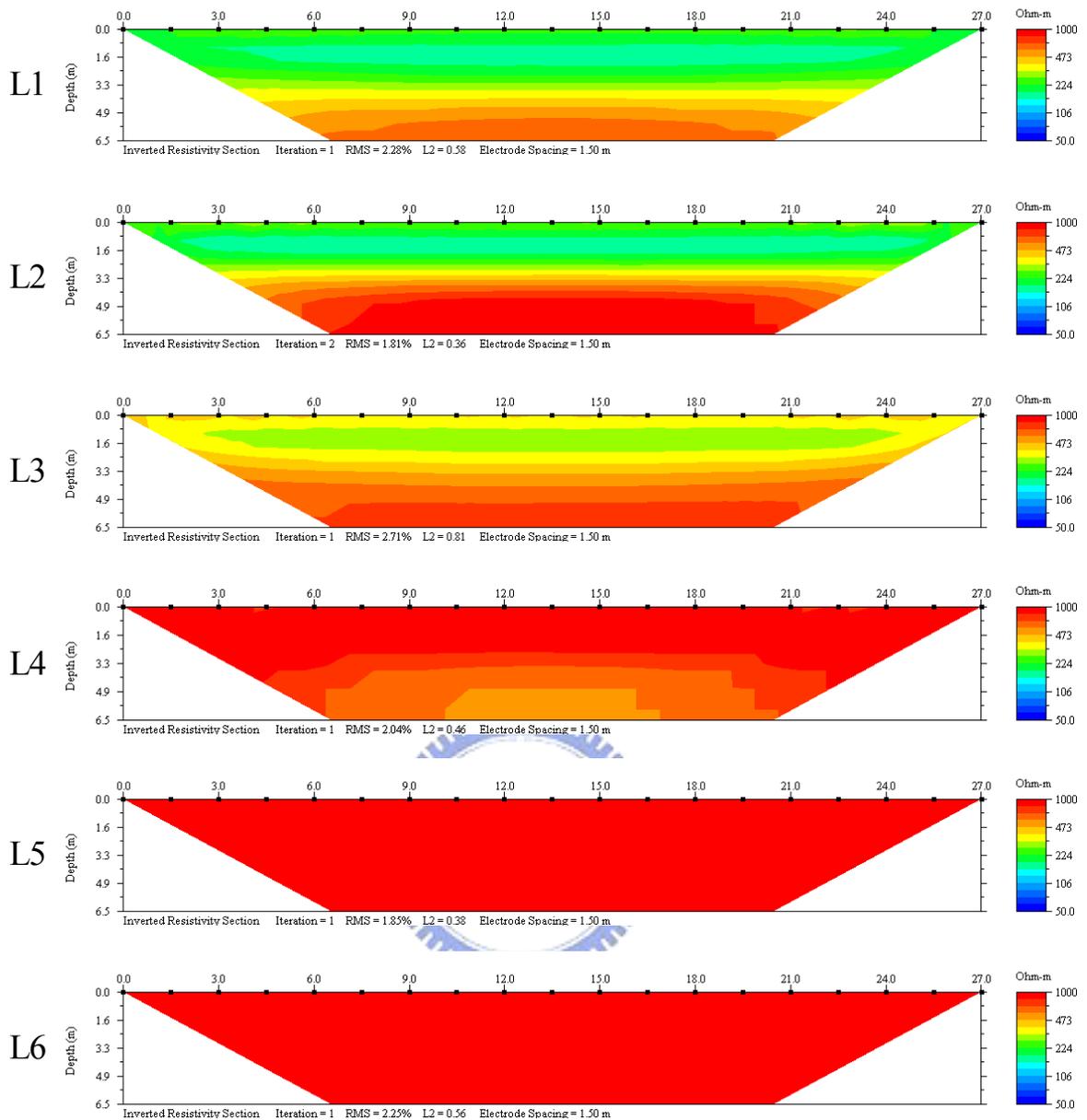


圖 3-16(c) A-P 類測線電阻率剖面結果

### 3.6.6 具斷層地層之 3D 效應小結

在前述之數值模擬與比較下，3D 效應與反算誤差間有共同作用而使得兩者不易分離之問題，為進一步了解 3D 效應與反算間共同影響地電阻探測結果之情形，在此，將已確定是由反算造成之 E 類地層與有小角度相交之 B 類地層進行比較。為確保兩者間的比較無其它影

響因素存在(如高電阻與低電阻在測線上的存在比例；數值模擬可能因邊界造成之影響等)，選用幾何與施測參數皆較為接近的 E 類地層 L2 測線與 B 類地層 L1 測線進行比較，兩者結果之比較如圖 3-17 所示，仔細比較兩者之結果可發現，在 B 類地層處的結果，於相同 n 值下其高電阻處的低電阻帶狀不僅範圍較大，且其電阻值亦較低。該帶狀區已於前些段落中提過其可能是為 3D 效應與反算所造成，由上段對 E 類地層結果的討論中可知 E 類地層可將其視為無 3D 效應影響的案例，在  $n=0.05$  與  $0.1$  中皆為反算所造成，而當  $n=0.2$  時，反算可能造成之錯誤已可忽略；反觀 B 類地層，即使在可忽略反算造成之錯誤的  $n=0.2$  的地層中依然尚有低電阻的帶狀區存在，已說明了在測線與斷層走向非 90 度交角而是有一小角度交角的情況下，3D 效應同樣會造成該帶狀區的存在，而此結果亦說明了在 B 類地層中， $n=0.05$  與  $0.1$  的情況下，會有更明顯的低電阻帶狀區存在的原因。

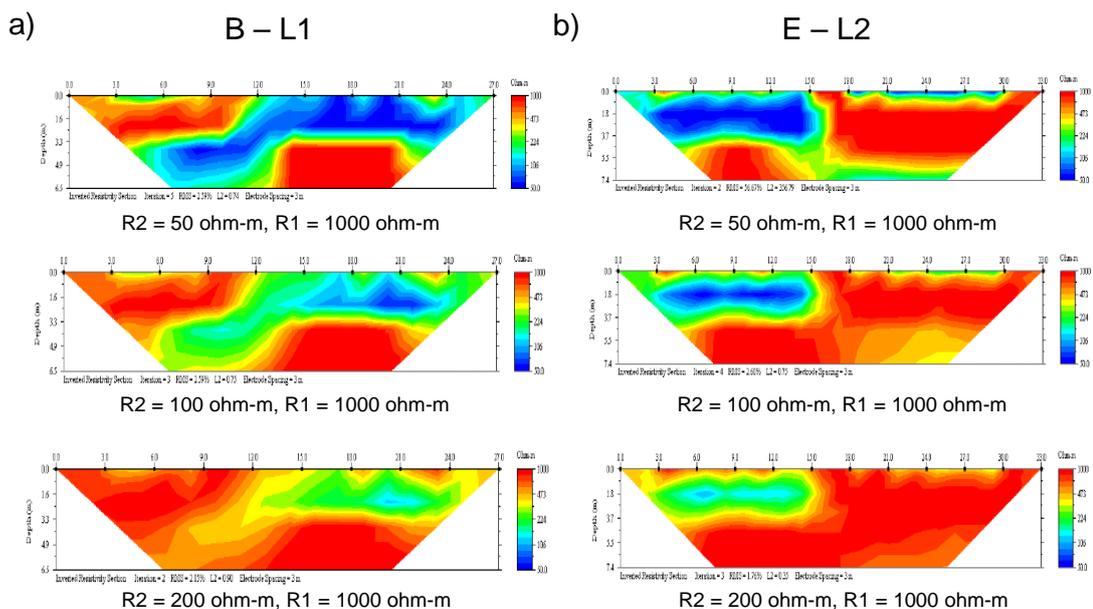


圖 3-17 B 類 L1 與 E 類 L2 測線電阻率剖面結果比較

隨著所夾角度增加，3D 效應的影響程度會下降，當角度大於 45 度後，3D 效應可予以忽略；而根據測線與斷層走向平行之結果顯示，當測線在低電阻率側時，不論  $n$  值，3D 效應之影響範圍至多為 3 公尺，而當測線在高電阻率側時，3D 效應之影響範圍至多為 6 公尺；此外，當探測深度可超越階梯地層之厚度時，於相同的電極棒間距下，該厚度並不影響 3D 效應之影響空間範圍。

### 3.7 管線之地層

為了釐清地下金屬管線對測線所造成的 3D 效應，因此透過數值模擬的方式模擬不同地下構造物與測線間之距離 ( $d$ ) 來進行探討，並透過現地試驗來驗證，如圖 3-18。

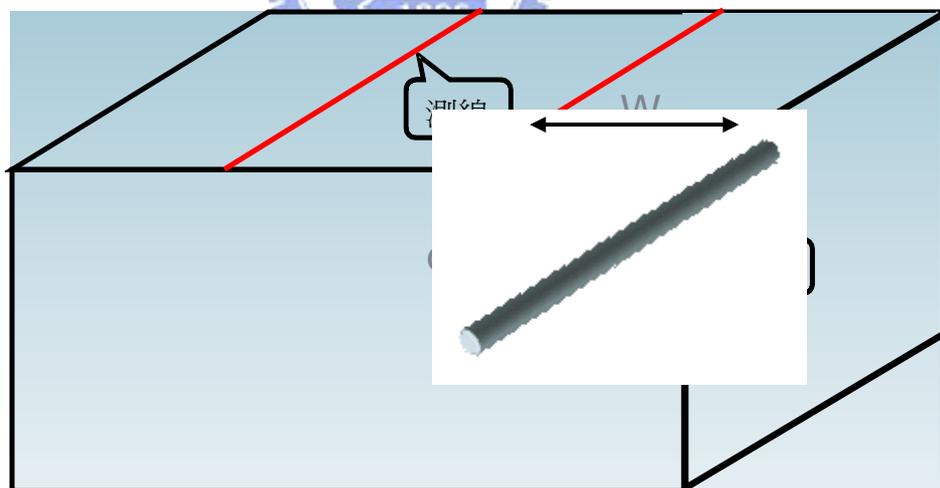


圖 3-18 模擬概念構想圖(管線)

#### 3.7.1 地層模型與施測參數

為了解具有管線存在之地層所可能造成之 3D 效應問題，本研究

從管線與地層之電阻率比、測線與管線距離、管線埋設深度以及管線大小 4 個方向進行地層模型與施測參數之建立與規劃。

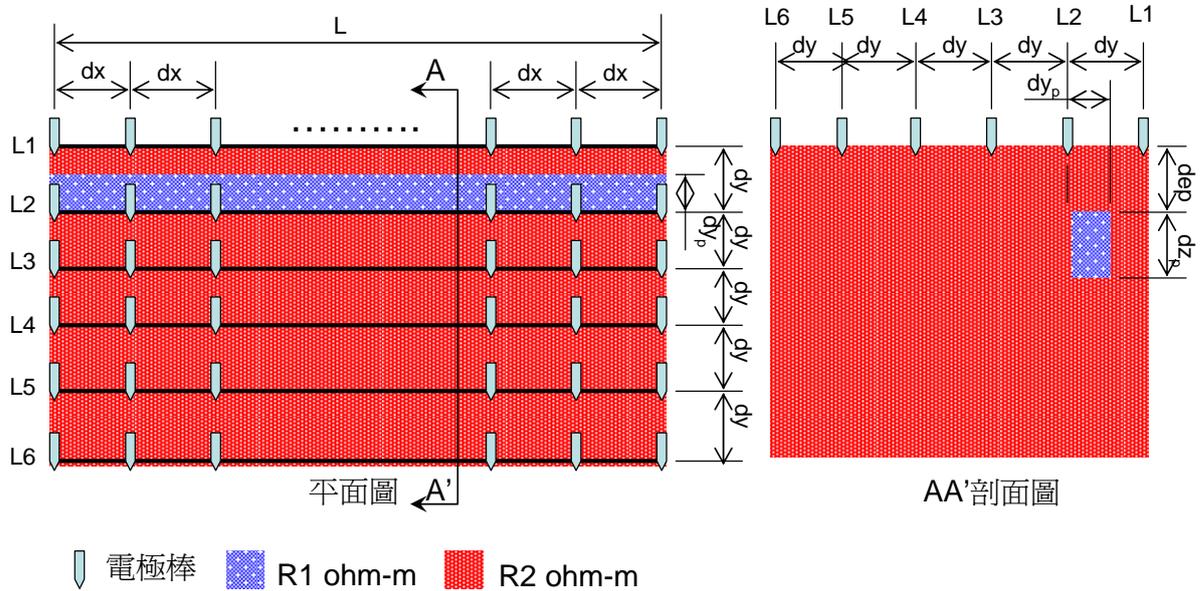


圖 3-19 具管線地層模型

如圖 3-19 所示，在模擬具管線之規劃中，地層中有電阻率設為  $R_1$  之管線，該管線埋設在電阻率為  $R_2$  之土層中，且此中  $R_2 > R_1$ ，兩者之比值稱為  $n$ ，管線之斷面大小為  $dy_p \times dz_p$ ，埋設深度為  $dep$  (管線最頂端)，在管線周邊平行管線佈有 5 條或 6 條測線，各測線相距  $dy$ ，每條測線隨測深需求對於測線長度  $L$  有些許調整，電極棒間距為  $dx$ ，施測時採用 dipole-dipole 施測法進行。為使閱讀便利，實際之地層模型電阻率值及各施測參數將於各項探討之結果中列出。

### 3.7.2 管線尺寸之影響

在探討管線尺寸之影響中，規劃兩類不同管線尺寸之地層模型與施測參數：P-1 與 P-2，整理如表 3-2 所示，在每一類中採用四種不同

n 值之地層電阻率比( $n = 0.01、0.05、0.1、0.25$ )，固定  $R_2$  為 1000 ohm-m，其  $R_1$  分別為 10、50、100 以及 250 ohm-m。在 P-1 地層中，管線斷面尺寸為 1.5(寬) x 2(深) 公尺，埋設深度為 2 公尺(管線最頂端)，佈有五條測線，測線與測線間距為 3 公尺，電極棒間距為 3 公尺，測線長 42 公尺；在 P-2 地層中，管線斷面尺寸為 3(寬) x 4(深) 公尺，埋設深度為 4 公尺(管線最頂端)，佈有六條測線，測線與測線間距為 3 公尺，電極棒間距為 3 公尺，為有足夠探測深度，測線長 51 公尺。

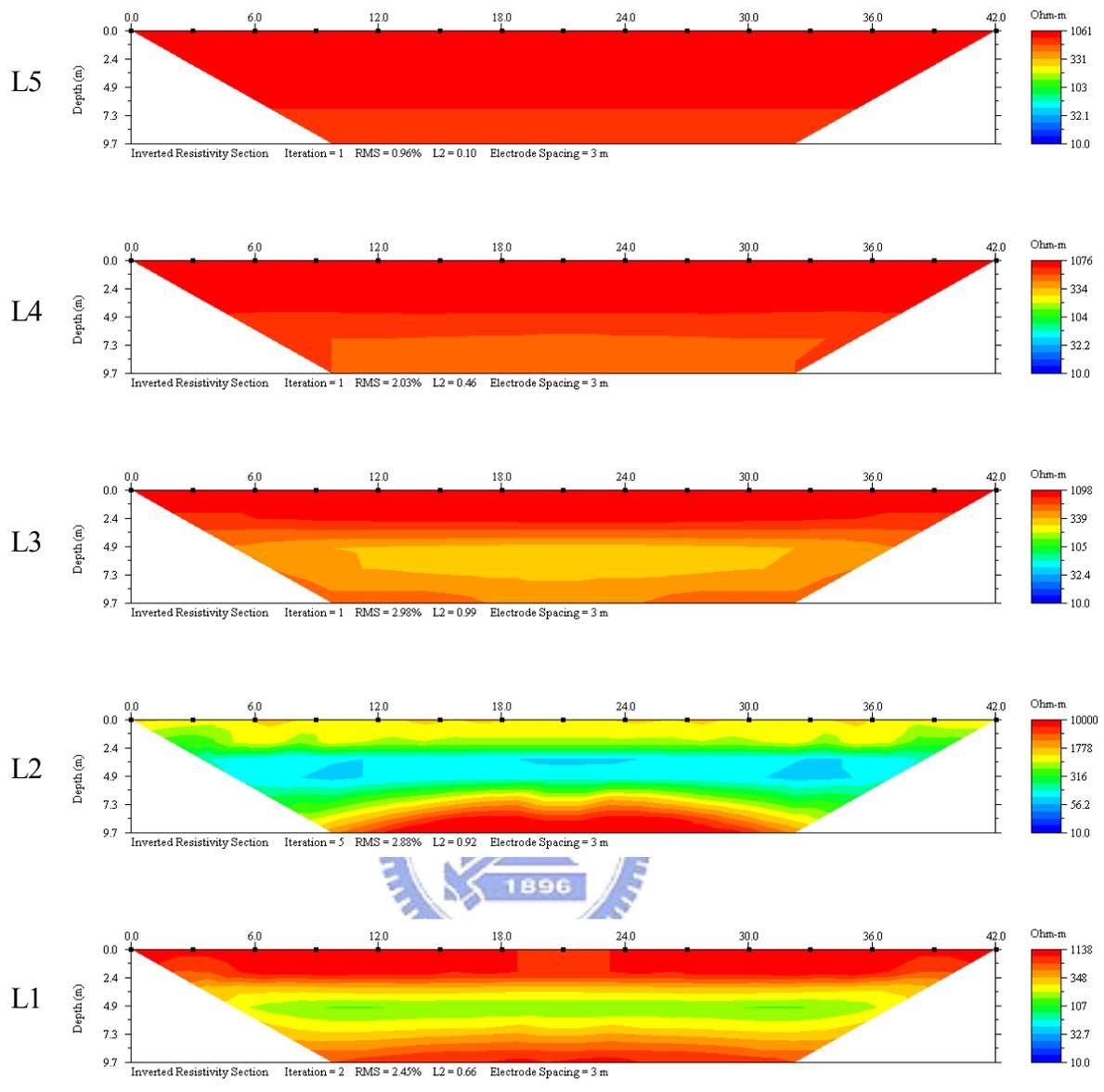
表 3-2 P 類地層模型與施測參數

	n	R1 (ohm-m)	R2 (ohm-m)	$dy_p$ (m)	$dz_p$ (m)	dep (m)	dx (m)	dy (m)	L (m)
P-1	0.01	10	1000	1.5	2	2	3	3	42
	0.05	50							
	0.1	100							
	0.20	200							
P-2	0.01	10		3	4	2	3	3	51
	0.05	50							
	0.1	100							
	0.20	200							

P-1 之結果如圖 3-20 所示，先行觀察  $n = 0.01$  地層電阻率剖面，如圖 3-20(a)所示，L2 測線位於管線邊緣，L1 距管線邊緣 1.5 公尺，L3-L5 測線分別距管線邊緣 3 公尺、6 公尺以及 9 公尺，L1 之結果顯示在深度約 2.5 至 6.5 公尺有低電阻存在，根據所設定之地層模型，

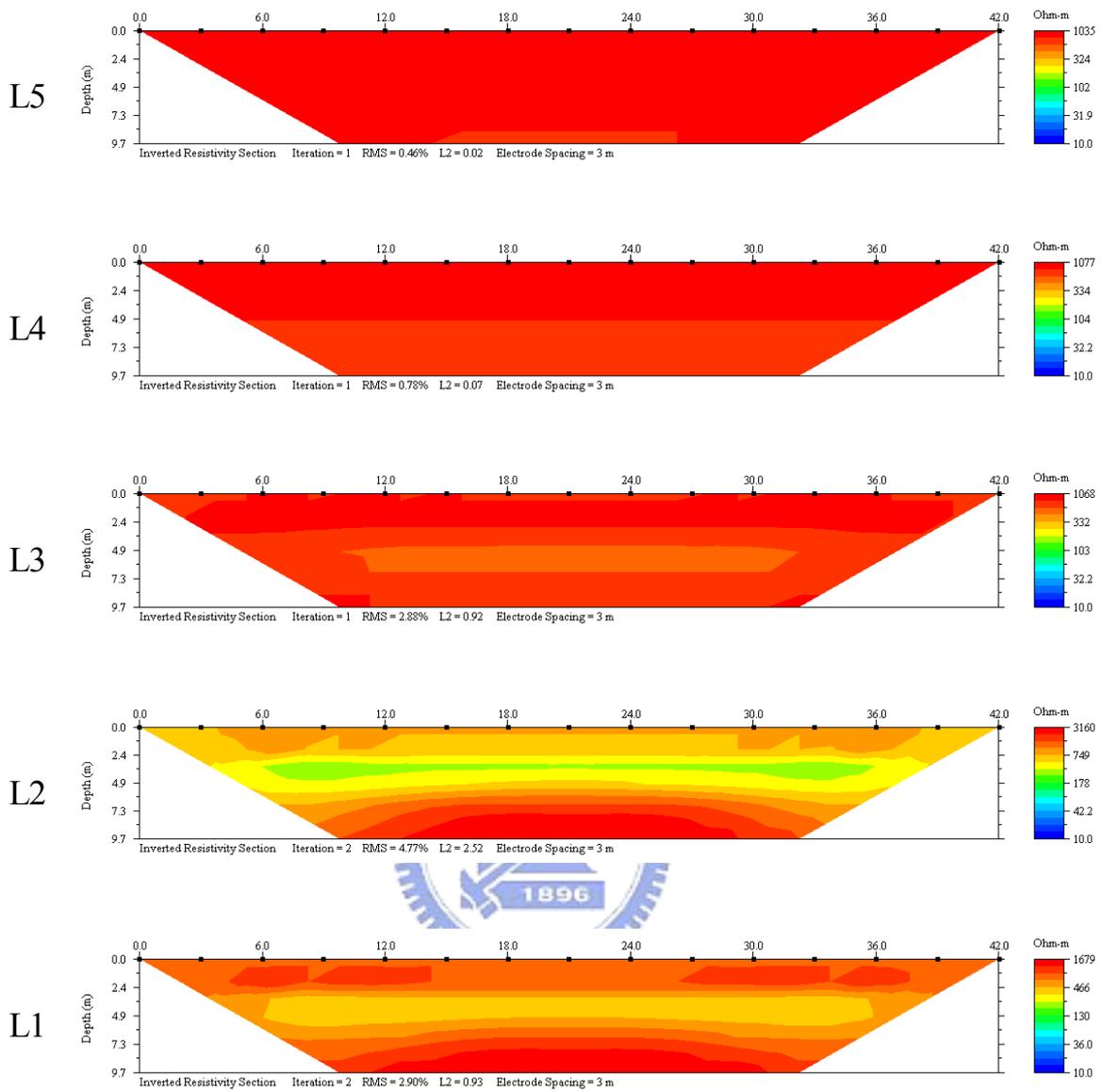
管線是位於地表下 2 至 4 公尺，於 4 公尺以下所測得之低電阻推測可能是 3D 效應的影響，管線另一端之低電阻映射至測線的深度上；而至距管線邊緣 1.5 公尺之 L1，其所顯示之低電阻區約在地表下約 5 公尺處，明顯是受到 3D 效應之影響，隨著與管線邊緣距離增加至 6 公尺之 L4，已幾乎不受 3D 效應之影響。再觀查其它不同  $n$  值之結果，在  $n = 0.05$  之圖 3-20(b) 中，位於管線邊緣之 L2 受到的 3D 效應影響已降低，其低電阻主要在地表下 2 至 4 公尺處，而當與管線邊緣距離增加，3D 效應的影響降低的很快，於 L3 已不甚明顯，至 L4 時已幾乎沒有影響，而當  $n = 0.1$  以及  $n = 0.20$  時，L1 至 L5 皆不受 3D 效應之影響。





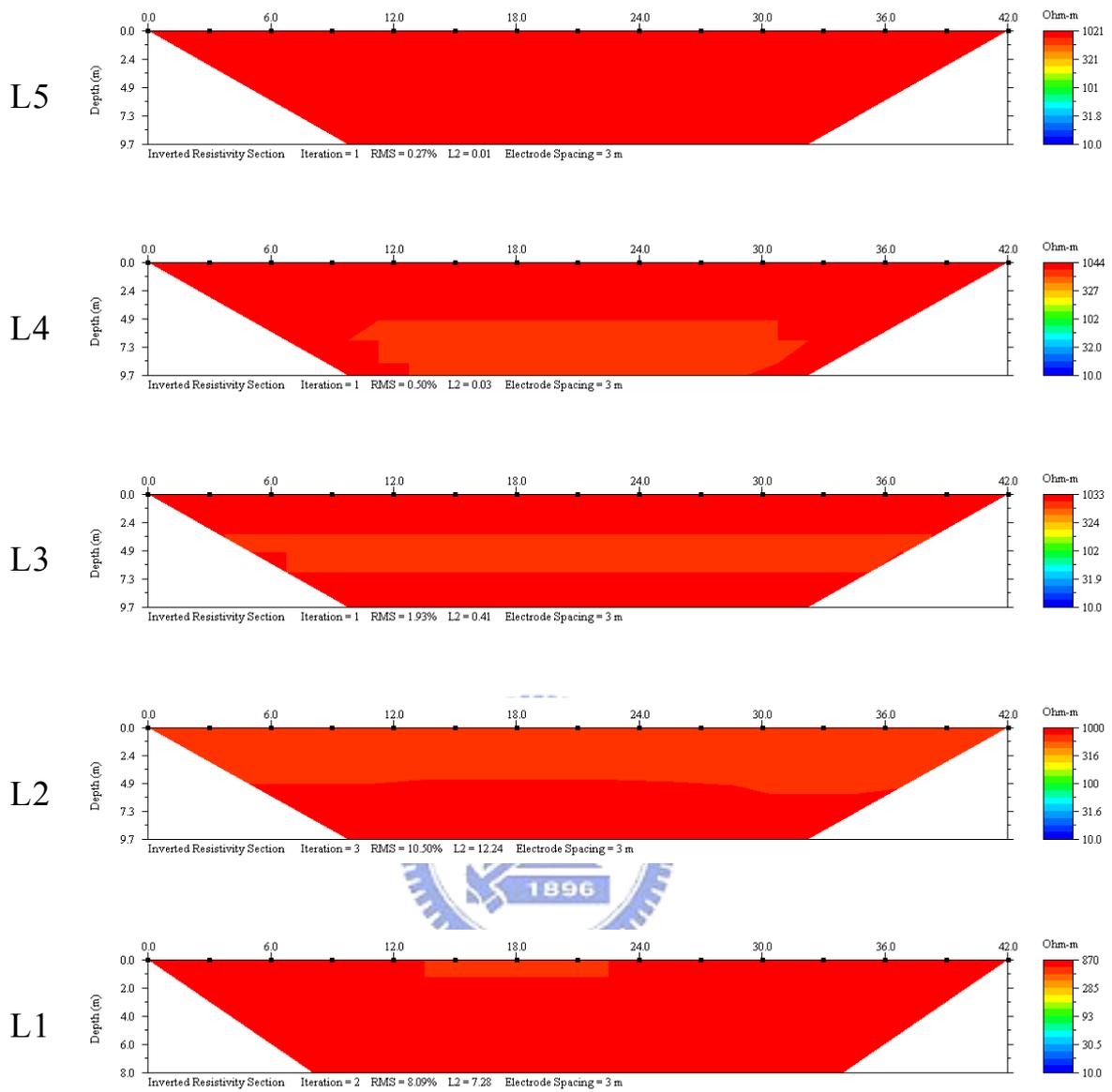
R2=10 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-20(a) P-1 類測線電阻率剖面結果



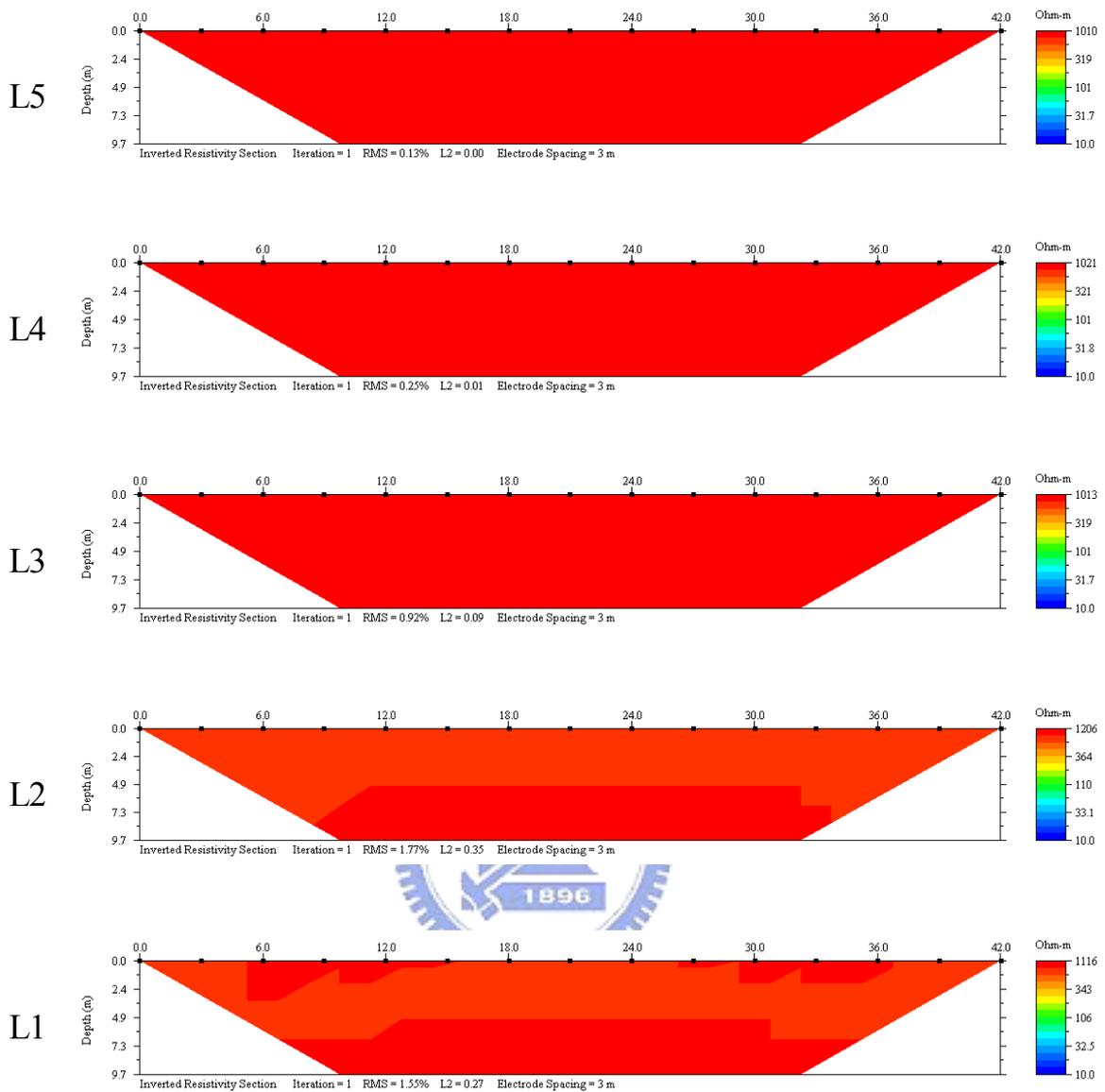
R2=50 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-20(b) P-1 類測線電阻率剖面結果



R2=100 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-20(c) P-1 類測線電阻率剖面結果

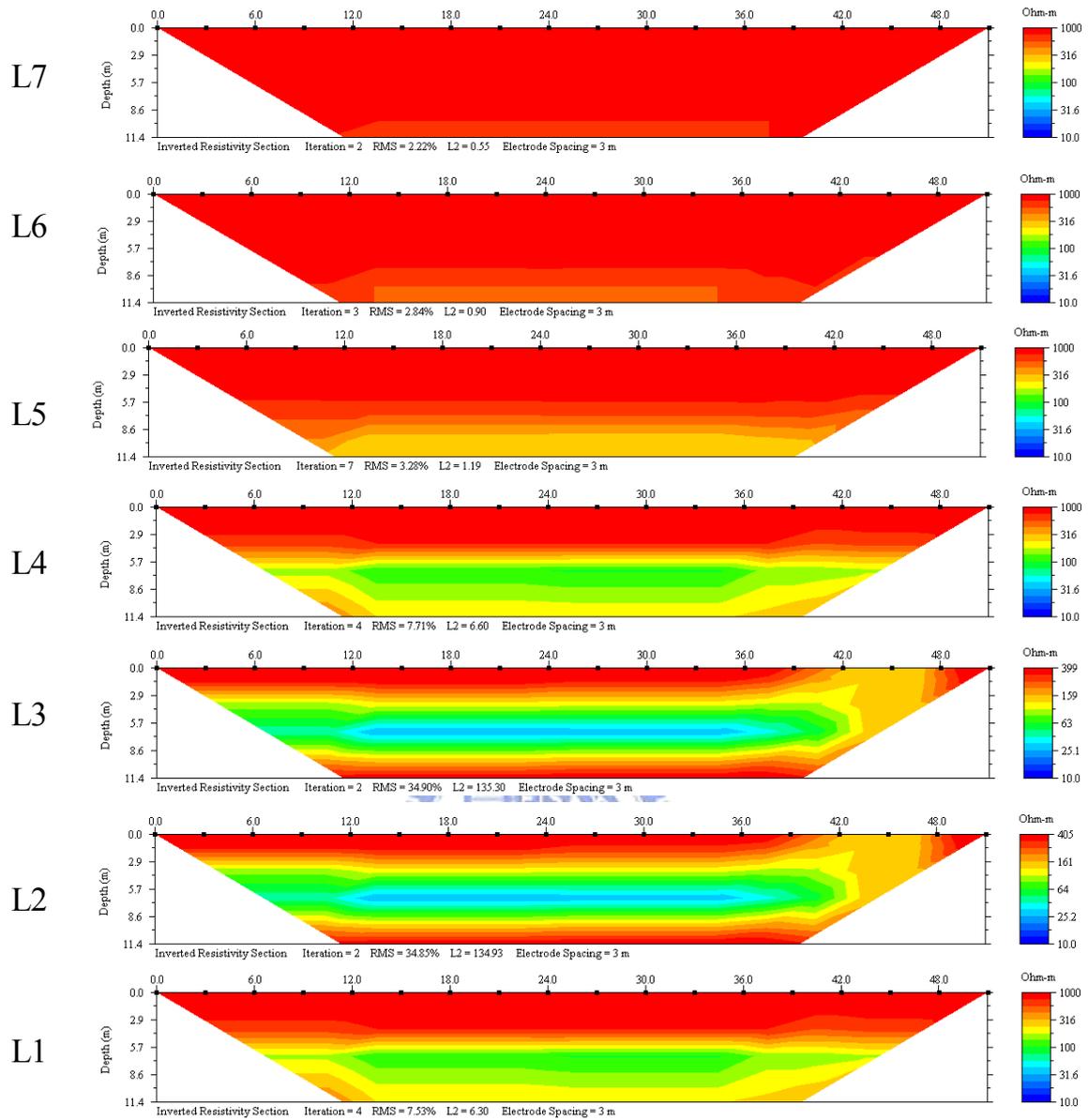


R2=200 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-20(d) P-1 類測線電阻率剖面結果

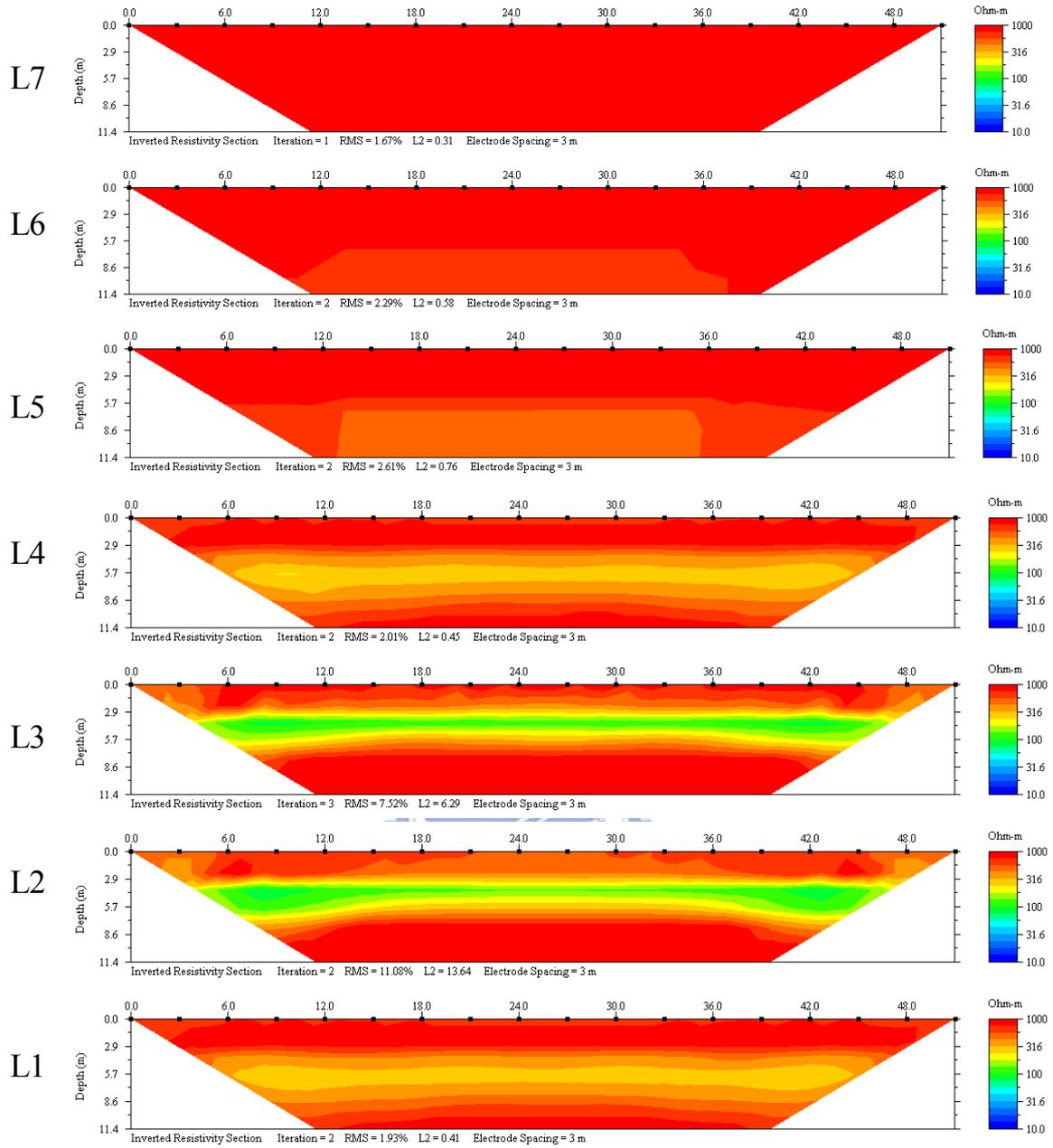
P-2 之結果如圖 3-21 所示，先行觀察  $n = 0.01$  地層電阻率剖面，如圖 3-21(a)所示，L1 及 L2 測線位於管線邊緣，L3-L5 測線分別距管線邊緣 3 公尺、6 公尺以及 9 公尺，L1 及 L2 之結果顯示在深度約 3 至 8.6 公尺有低電阻存在，根據所設定之地層模型，管線是位於地表

下 2 至 6 公尺，於 6 公尺以下所測得之低電阻推測可能是 3D 效應的影響，管線另一端之低電阻映射至測線的深度上；隨著與管線邊緣距離增加至 9 公尺之 L5，已幾乎不受 3D 效應之影響。再觀查其它不同  $n$  值之結果，在  $n = 0.05$  之圖 3-21(b) 中，位於管線邊緣之 L1 及 L2 受到的 3D 效應影響已降低，其低電阻主要在地表下 3 至 6 公尺處，而當與管線邊緣距離增加，3D 效應的影響降低的很快，於 L4 已不甚明顯，至 L5 時已幾乎沒有影響，而當  $n = 0.1$  時，雖已沒有明顯低電阻層存在之情形，但在 L1-L3 測線間有受到些微 3D 效應影響而顯示該處地層有與地層極接近之低電阻土層存在之現象，至 L4 測線才幾乎不受 3D 效應之影響；而對於  $n = 0.20$  時，L1 至 L5 皆不受 3D 效應之影響。由此可知，當管線與周邊地層之電阻率比大於 0.1 時，管線的存在幾乎不致對測線結果產生影響。



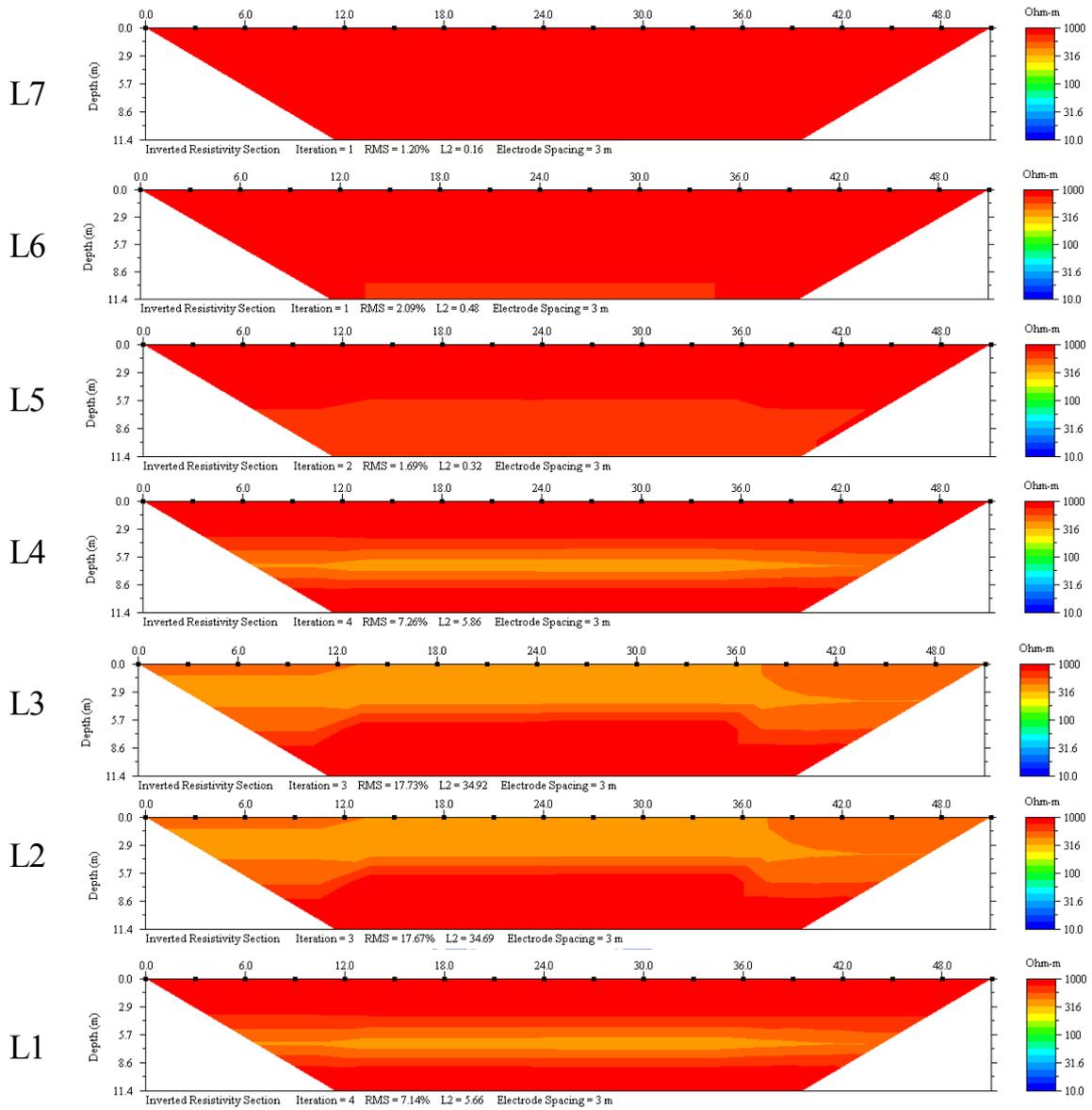
R2=10 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-21(a) P-2 類測線電阻率剖面結果



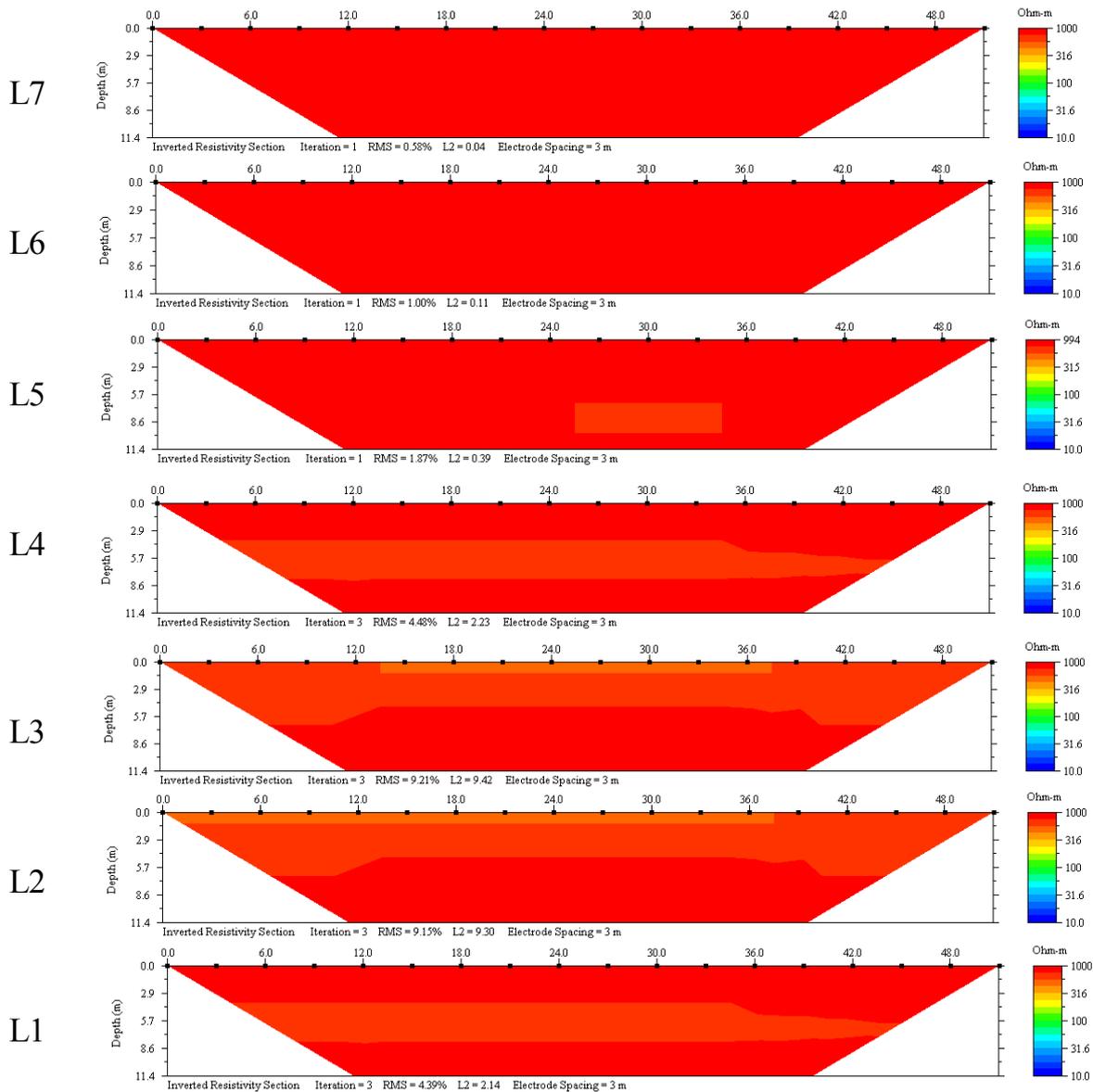
R2=50 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-21(b) P-2 類測線電阻率剖面結果



R2=100 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-21(c) P-2 類測線電阻率剖面結果



R2=200 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-21(d) P-2 類測線電阻率剖面結果

由 P-1 以及 P-2 之結果顯示，在相同之  $n$  值下，管線尺寸增大將使 3D 效應之影響範圍增加；在同一管線尺寸下，當  $n$  值增加(即地層與管線之電阻率差異變小)，3D 效應之影響範圍將降低；而當管線尺寸變化時，因為  $n$  值增加而降低的 3D 影響範圍亦將隨之改變。

### 3.7.3 埋設深度影響

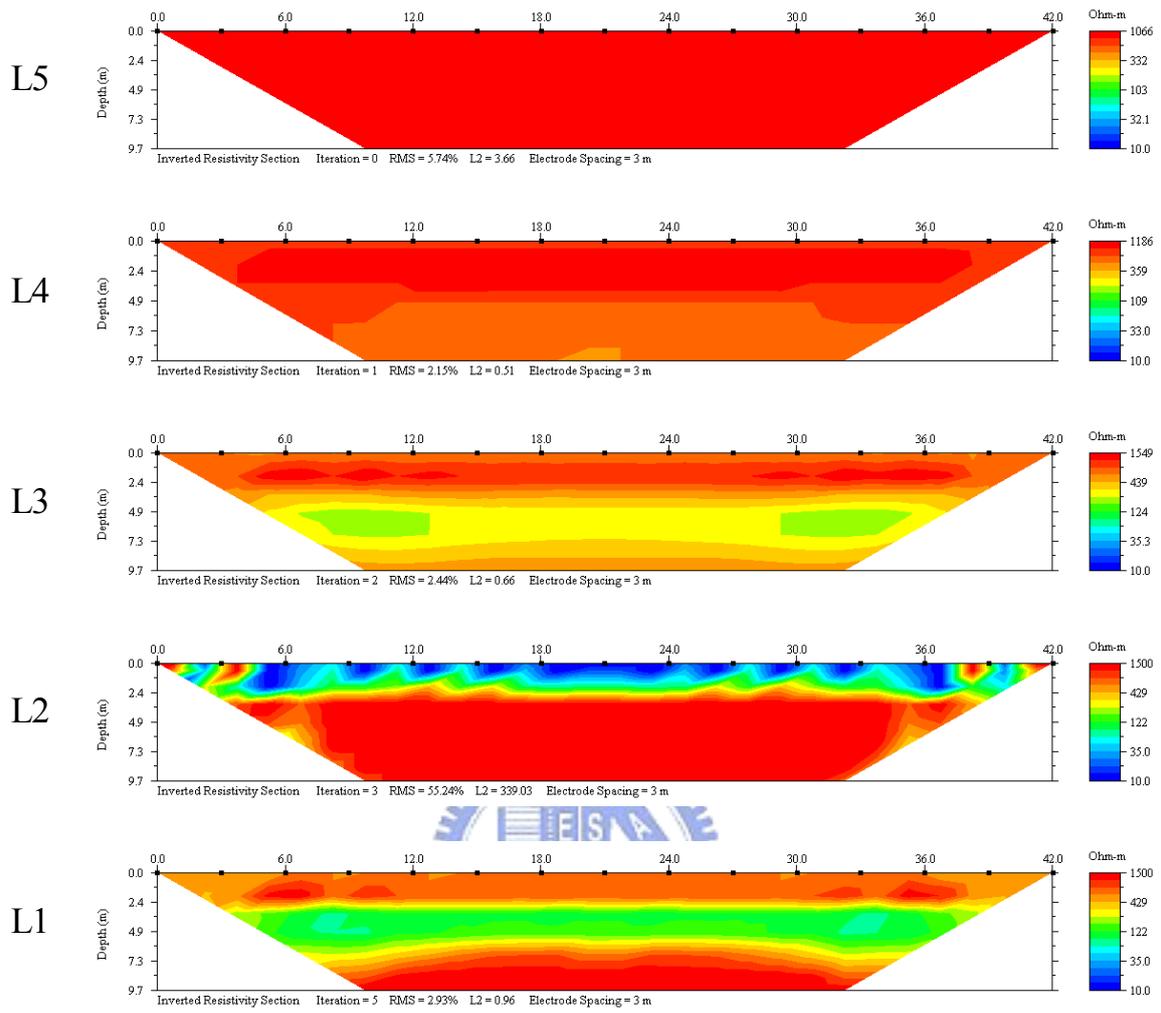
在探討管線埋設深度之影響中，規劃兩類不同管線尺寸之地層模型與施測參數：D-1 與 D-2，整理如表 3-3 所示。在每一類中採用四種不同  $n$  值之地層電阻率比( $n = 0.01$ 、 $0.05$ 、 $0.1$ 、 $0.20$ )，固定  $R_2$  為  $1000 \text{ ohm-m}$ ，其  $R_1$  分別為  $10$ 、 $50$ 、 $100$  以及  $200 \text{ ohm-m}$ 。在 D-1 地層中，管線斷面尺寸為  $1.5(\text{寬}) \times 2(\text{深})$  公尺，埋設地表(管線最頂端)，佈有五條測線，測線與測線間距為  $3$  公尺，電極棒間距為  $3$  公尺，測線長  $42$  公尺；在 D-2 地層中，管線斷面尺寸為  $1.5(\text{寬}) \times 2(\text{深})$  公尺，埋設深度為  $4$  公尺(管線最頂端)，佈有五條測線，測線與測線間距為  $3$  公尺，電極棒間距為  $3$  公尺，為有足夠探測深度，測線長  $51$  公尺。

表 3-3 D 類地層模型與施測參數

	$n$	$R_1$ (ohm-m)	$R_2$ (ohm-m)	$dy_p$ (m)	$dz_p$ (m)	Dep (m)	$D_x$ (m)	$D_y$ (m)	$L$ (m)
D-1	0.01	10	1000	1.5	2	0	3	3	42
	0.05	50							
	0.1	100							
	0.20	200							
D-2	0.01	10		1.5	2	4	3	3	51
	0.05	50							
	0.1	100							
	0.20	200							

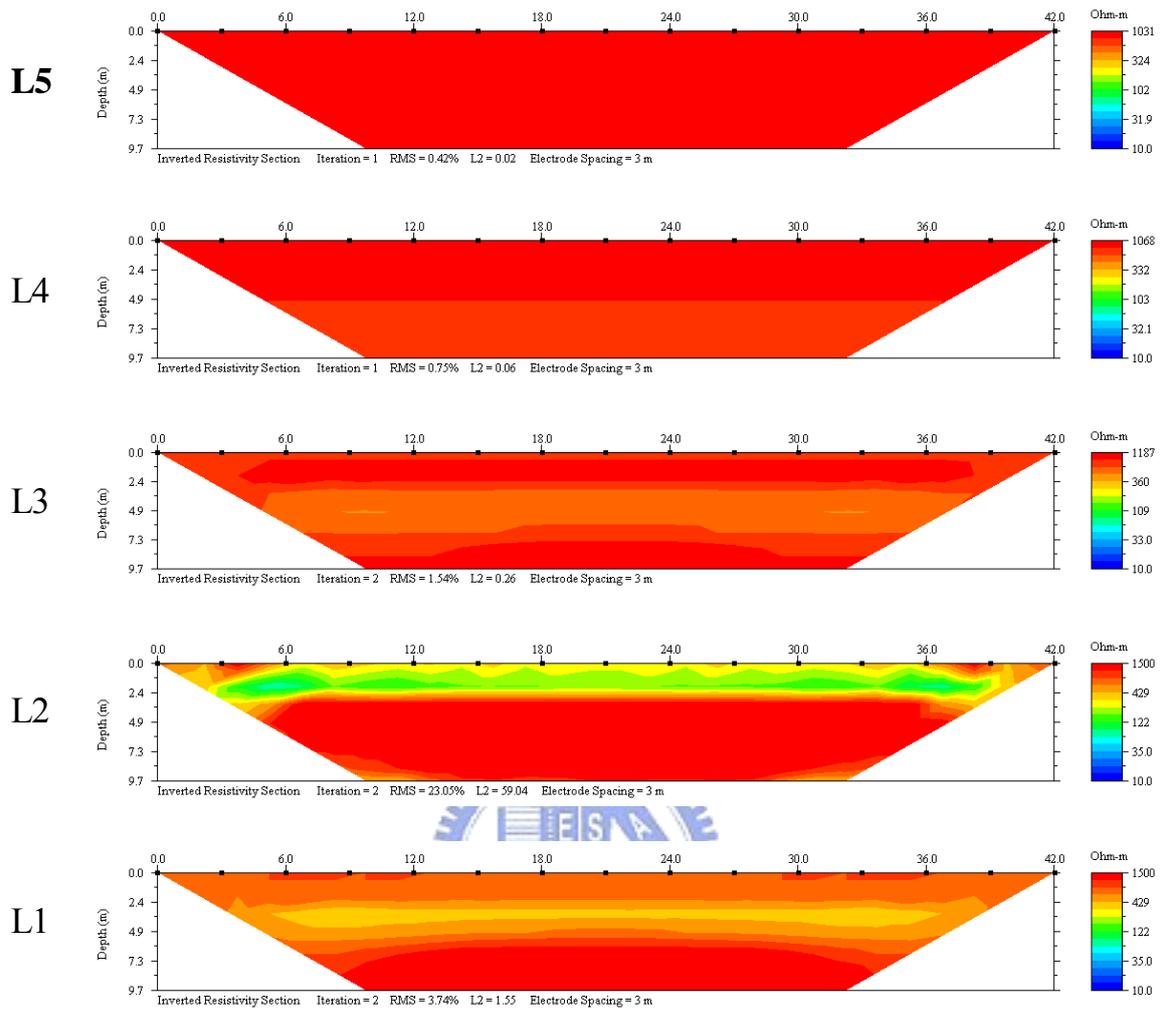
D-1 之結果如圖 3-22 所示，先行觀察  $n = 0.01$  地層電阻率剖面，如圖 3-22(a)所示， $L_2$  測線位於管線邊緣， $L_1$  距管線邊緣  $1.5$  公尺， $L_3$ - $L_5$  測線分別距管線邊緣  $3$  公尺、 $6$  公尺以及  $9$  公尺， $L_1$  之結果顯

示在地表至深度約 2.5 有低電阻存在，根據所設定之地層模型，管線是位於地表下 0 至 2 公尺，於 2 公尺以下所測得之低電阻推測可能是 3D 效應的影響，管線另一端之低電阻映射至測線的深度上，亦可能是解析度不足造成(電極棒間距 3 公尺，最佳解析度約 1.5 公尺，隨深度增加將有所降低)；而至距管線邊緣 1.5 公尺之 L1，其所顯示之低電阻區約在地表下約 2.5 公尺至 6 公尺處，明顯是受到 3D 效應之影響，隨著與管線邊緣距離增加至 6 公尺之 L4，已幾乎不受 3D 效應之影響。再觀查其它不同  $n$  值之結果，在  $n=0.05$  之圖 3-22(b)中，位於管線邊緣之 L2 受到的 3D 效應影響已降低，其低電阻主要在地表至地表下 2.5 公尺處，雖同是低電阻，但電阻值已較  $n=0.01$  中為高，而當與管線邊緣距離增加，3D 效應的影響降低的很快，於 L3 已不甚明顯，至 L4 時已幾乎沒有影響，而當  $n=0.1$  以及  $n=0.20$  時，距離已大於 0.5 倍電極棒(1.5 公尺)之 L1、L3、L4 至 L5 已幾乎不受 3D 效應影響。



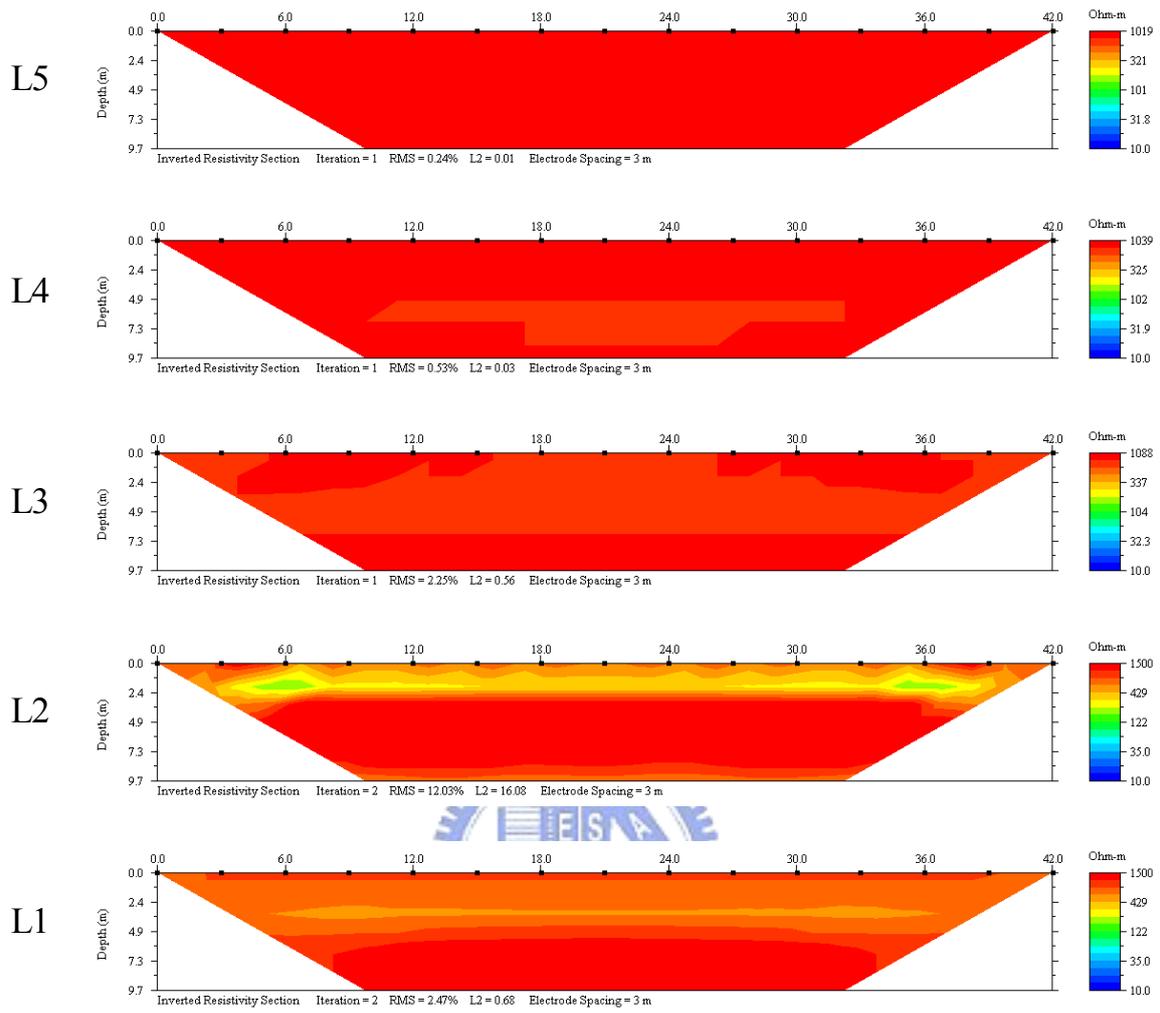
R2=10 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-22(a) D-1 類測線電阻率剖面結果



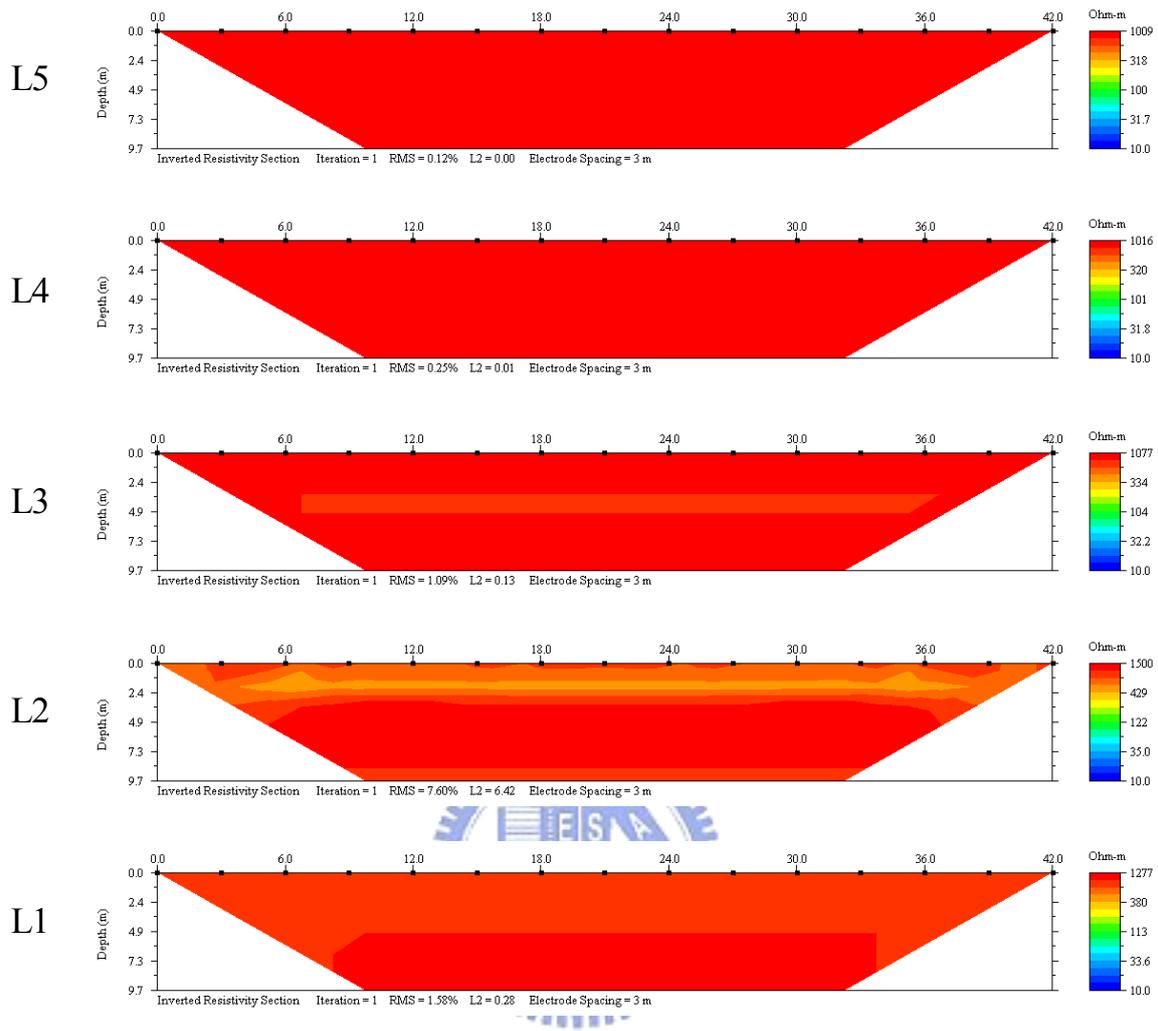
R2=50 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-22(b) D-1 類測線電阻率剖面結果



R2=100 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-22(c) D-1 類測線電阻率剖面結果



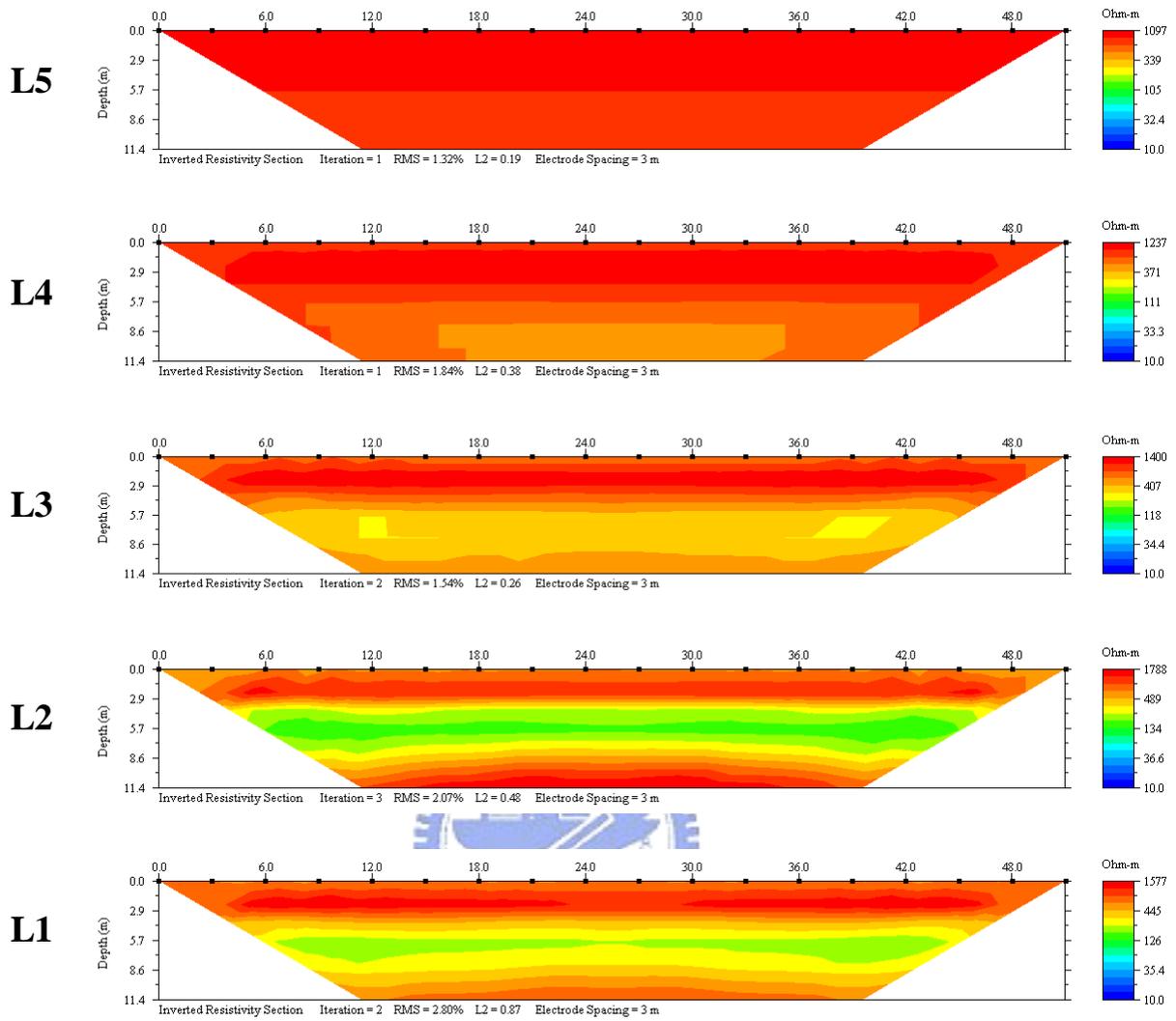
R2=200 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-22(d) D-1 類測線電阻率剖面結果

D-2 之結果如圖 3-23 所示，先行觀察  $n = 0.01$  地層電阻率剖面，如圖 3-23(a)所示。L2 測線位於管線邊緣，L1 距管線邊緣 1.5 公尺，L3-L5 測線分別距管線邊緣 3 公尺、6 公尺以及 9 公尺，L1 之結果顯示在地表下約 3 至 8 公尺有低電阻存在，根據所設定之地層模型，管線是位於地表下 4 至 6 公尺，於 6 公尺以下所測得之低電阻推測可能

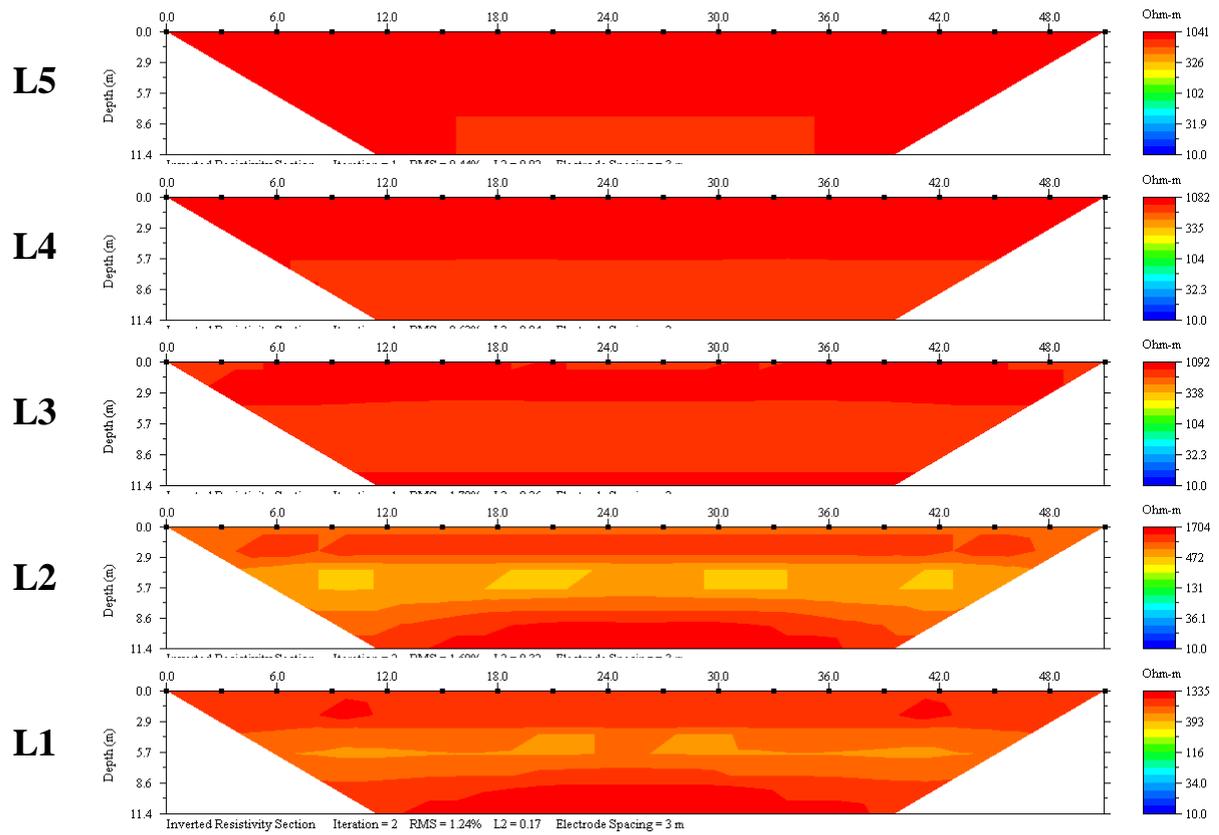
是 3D 效應的影響，管線另一端之低電阻映射至測線的深度上；而至距管線邊緣 1.5 公尺之 L1，其所顯示之低電阻區約在地表下約 5 公尺至 7 公尺處，明顯是受到 3D 效應之影響，隨著與管線邊緣距離增加至 6 公尺之 L4，3D 效應之影響已不明顯，至 L5 測線已幾乎不受 3D 效應影響。再觀察其它不同  $n$  值之結果，在  $n = 0.05$  之圖 3-23(b) 中，位於管線邊緣之 L2 受到的 3D 效應影響已降低，僅顯示有較地層電阻稍低之低電阻存在，而當與管線邊緣距離增加，3D 效應的影響降低的很快，於 L1 已不甚明顯，至 L3 時已幾乎沒有影響，而當  $n = 0.1$  以及  $n = 0.20$  時，L1-L5 已幾乎不受 3D 效應影響。





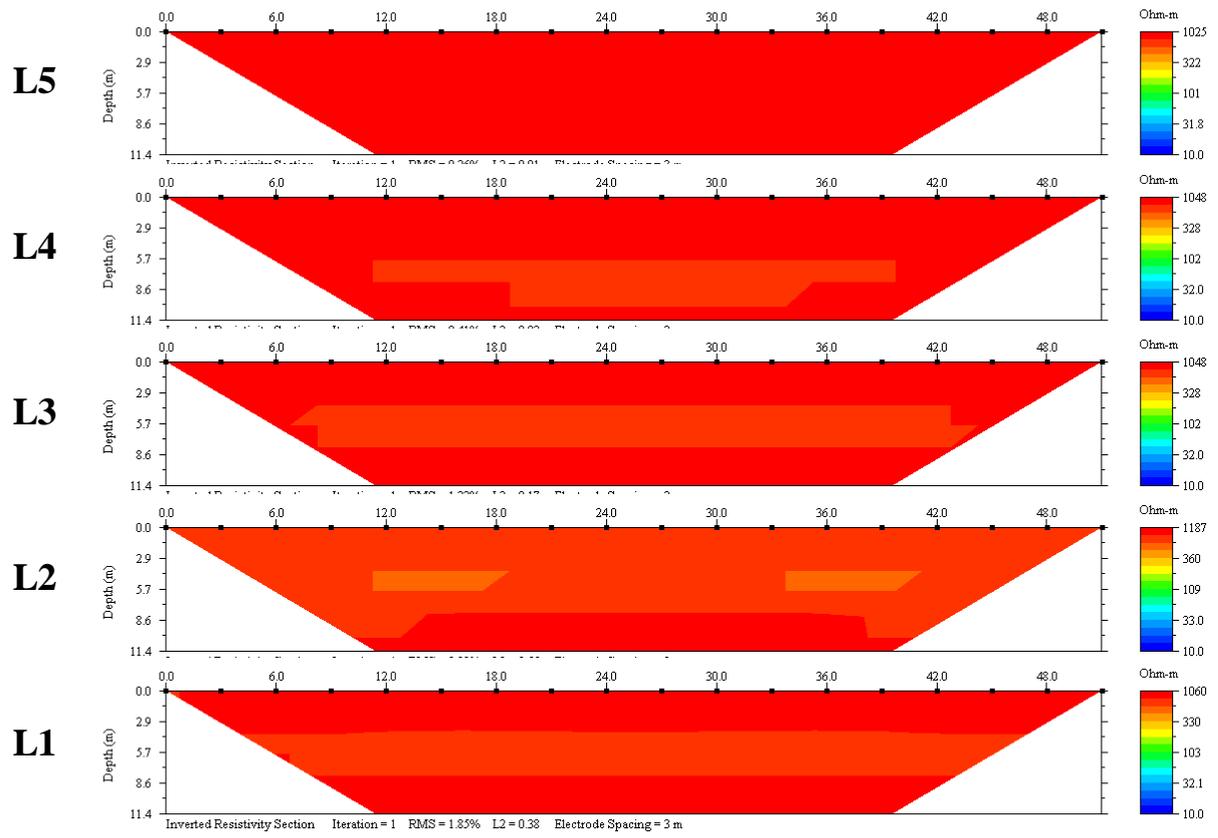
R2=10 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-23(a) D-2 類測線電阻率剖面結果



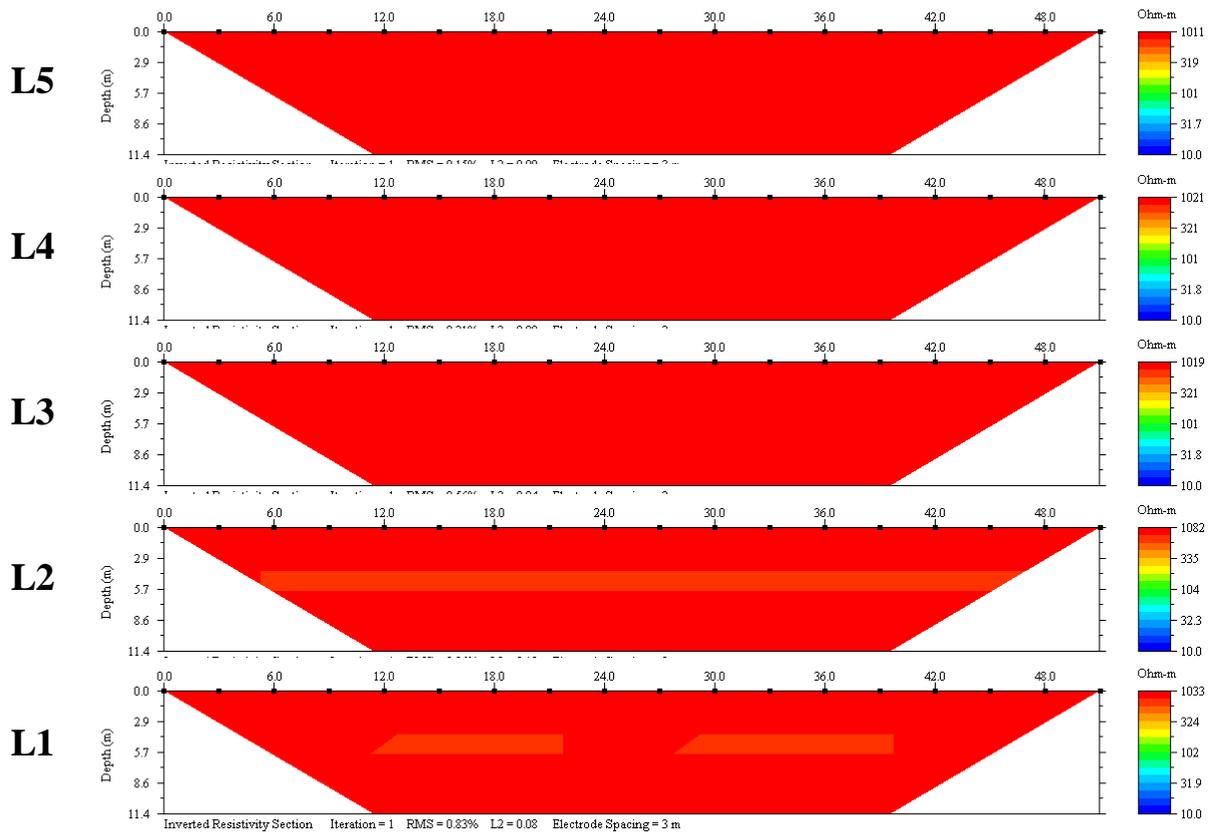
R2=50 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-23(b) D-2 類測線電阻率剖面結果



R2=100 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-23(c) D-2 類測線電阻率剖面結果



$R_2=200 \text{ ohm-m}$ ,  $R_1=1000 \text{ ohm-m}$

圖 3-23(d) D-2 類測線電阻率剖面結果

比較 D-1、P-1 及 D-2 之結果(其埋設深度分別為地表、地表下 2 公尺以及地表下 4 公尺)可知，於  $n$  相同的情況下，除緊鄰在管線邊緣之 L1 測線外，同樣尺寸之管線的深度對 3D 效應之影響差異不大，亦即，在地電阻探測之測深中，3D 效應主要之影響範圍是與管線映射在地表處之位置與測線的距離有關。

### 3.7.4 電阻率比與電阻率之影響

於管線尺寸以及埋設深度之探討中，地層電阻率與管線電阻率之不同對於 3D 效應之影響是以其比率  $n$  做為其 3D 效應行為推論之參

數，然而採用  $n$  值是否可做為推論參數並不確定，在此將對電阻率之實際值才是其 3D 效應行為之參數做一探討。

在此將使用兩種地層模型進行模擬，參數整理於表 3-4，固定兩種地層電阻率比  $n = 0.05$ ，其中設定 N-1 之 R2 為 1000 ohm-m (則其 R1 為 50 ohm-m)，另一 N-2 之 R2 設定為 500 (則其 R1 為 50 ohm-m)。在兩者地層中，管線斷面尺寸為 1.5(寬) x 2(深) 公尺，埋設深度為 2 公尺(管線最頂端)，佈有五條測線，測線與測線間距為 3 公尺，電極棒間距為 3 公尺，測線長 42 公尺。

表 3-4 N 類地層模型與施測參數

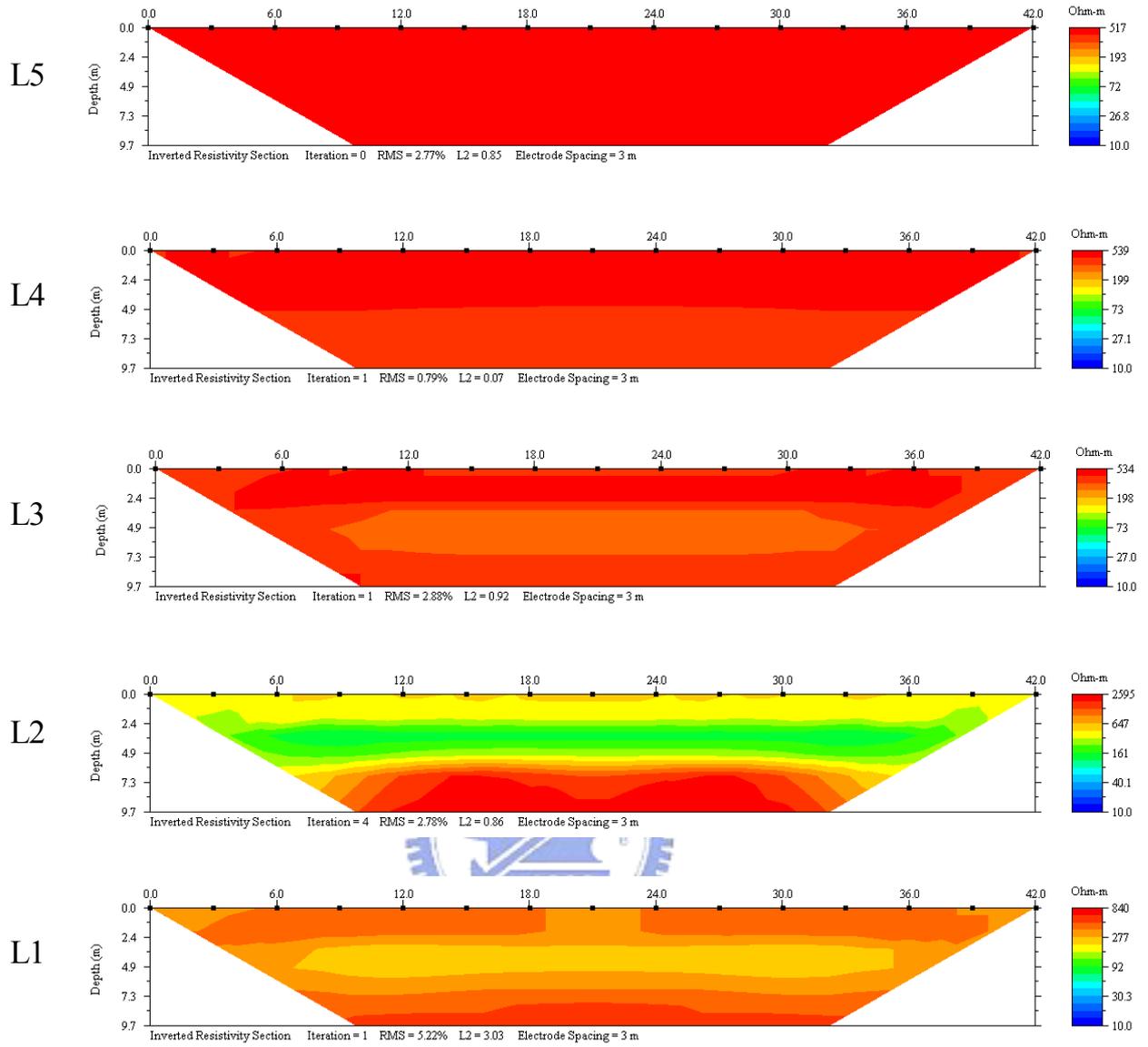
	n	R1 (ohm-m)	R2 (ohm-m)	$dy_p$ (m)	$dz_p$ (m)	Dep (m)	Dx (m)	Dy (m)	L (m)
N-1	0.05	25	500	1.5	2	2	3	3	42
N-2	0.05	50	1000						

N-1 與 N-2 之結果如圖 3-24 所示，先行觀察 N-1 地層電阻率剖面，如圖 3-24(a)所示。L2 測線位於管線邊緣，L1 距管線邊緣 1.5 公尺，L3-L5 測線分別距管線邊緣 3 公尺、6 公尺以及 9 公尺，L1 之結果顯示在地表至地表下 6 公尺有低電阻存在，根據所設定之地層模型，管線是位於地表下 2 至 4 公尺，於 4 公尺以下所測得之低電阻推測可能是 3D 效應的影響，管線另一端之低電阻映射至測線的深度上；而至距管線邊緣 1.5 公尺之 L1，其所顯示之低電阻區約在地表下約 5 公尺至 7 公尺處，明顯是受到 3D 效應之影響，隨著與管線邊緣

距離增加至 6 公尺之 L4，3D 效應之影響已不明顯，至 L5 測線已幾乎不受 3D 效應影響。再觀察其它不同  $n$  值之結果，在  $n = 0.05$  之圖 3-24(b) 中，位於管線邊緣之 L2 受到的 3D 效應影響已降低，僅顯示有較地層電阻稍低之低電阻存在，而當與管線邊緣距離增加，3D 效應的影響降低的很快，於 L1 已不甚明顯，至 L3 時已幾乎沒有影響，而當  $n = 0.1$  以及  $n = 0.20$ ，L1-L5 已幾乎不受 3D 效應影響。

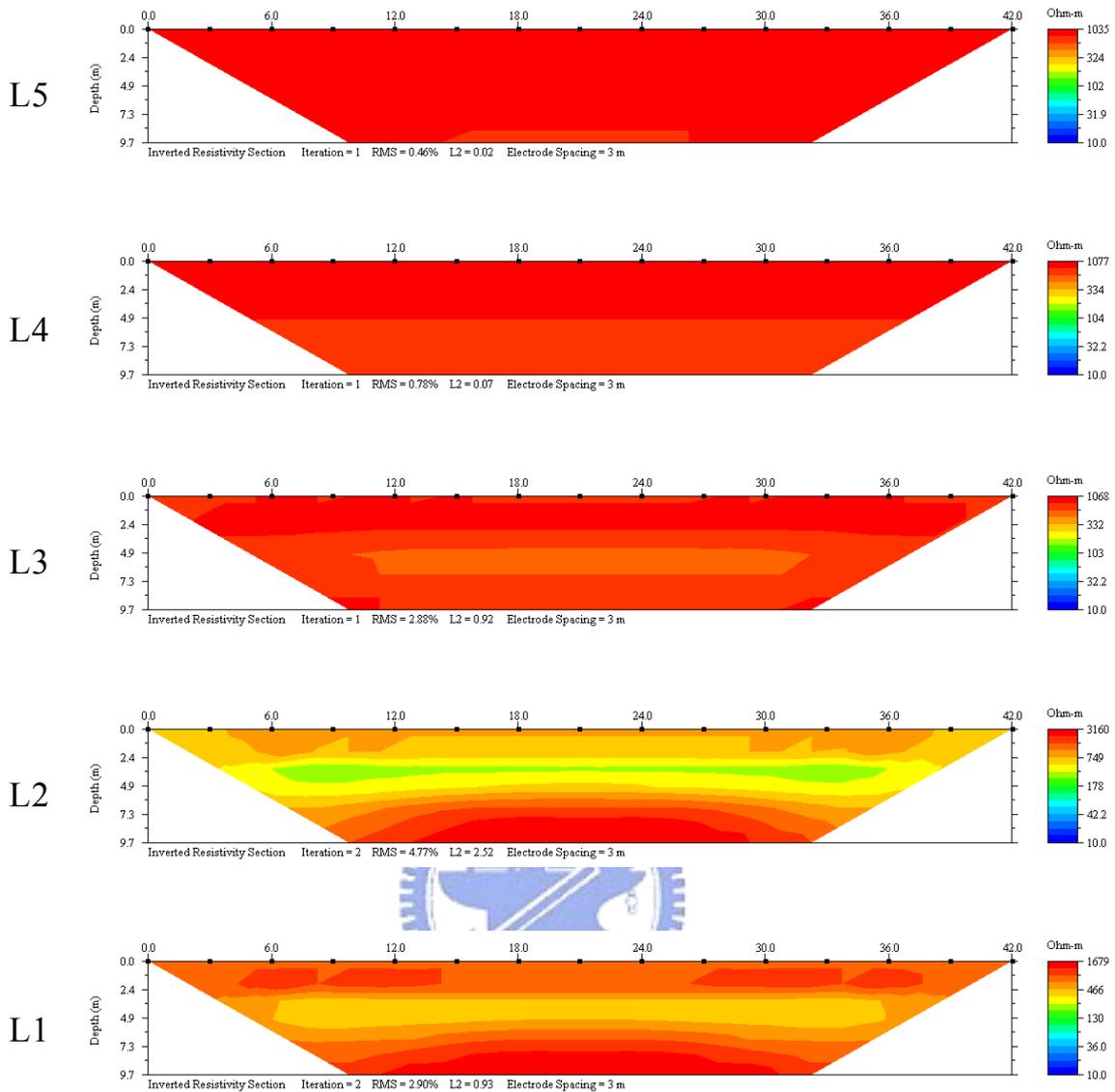
N-2 之結果與 P-1 之  $n=0.05$  之結果相同，在此不再贅述。比較圖 3-24(a) 與 (b) 兩者結果可發現，除了在管線邊緣之 L1 測線有較不同的結果外，其餘測線盡皆類似，此結果初步顯示，電阻值率比  $n$  確實可做為 3D 效應之行為參數，而不需採用其實際電阻率值。





R2=25 ohm-m, R1=500 ohm-m

圖 3-24(a) N類測線電阻率剖面結果



R2=50 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-24(b) N類測線電阻率剖面結果

### 3.7.5 電極棒間距之影響

在探討 3D 效應之影響中，為了解電極棒間距是否可做為正規化之參數，規劃了與 P-1 模型僅在電極棒間距上有差異之地層模型進行比較，施測參數整理如表 3-5。採用四種不同 n 值之地層電阻率比(n = 0.01、0.05、0.1、0.25)，固定 R2 為 1000 ohm-m，其 R1 分別為 10、

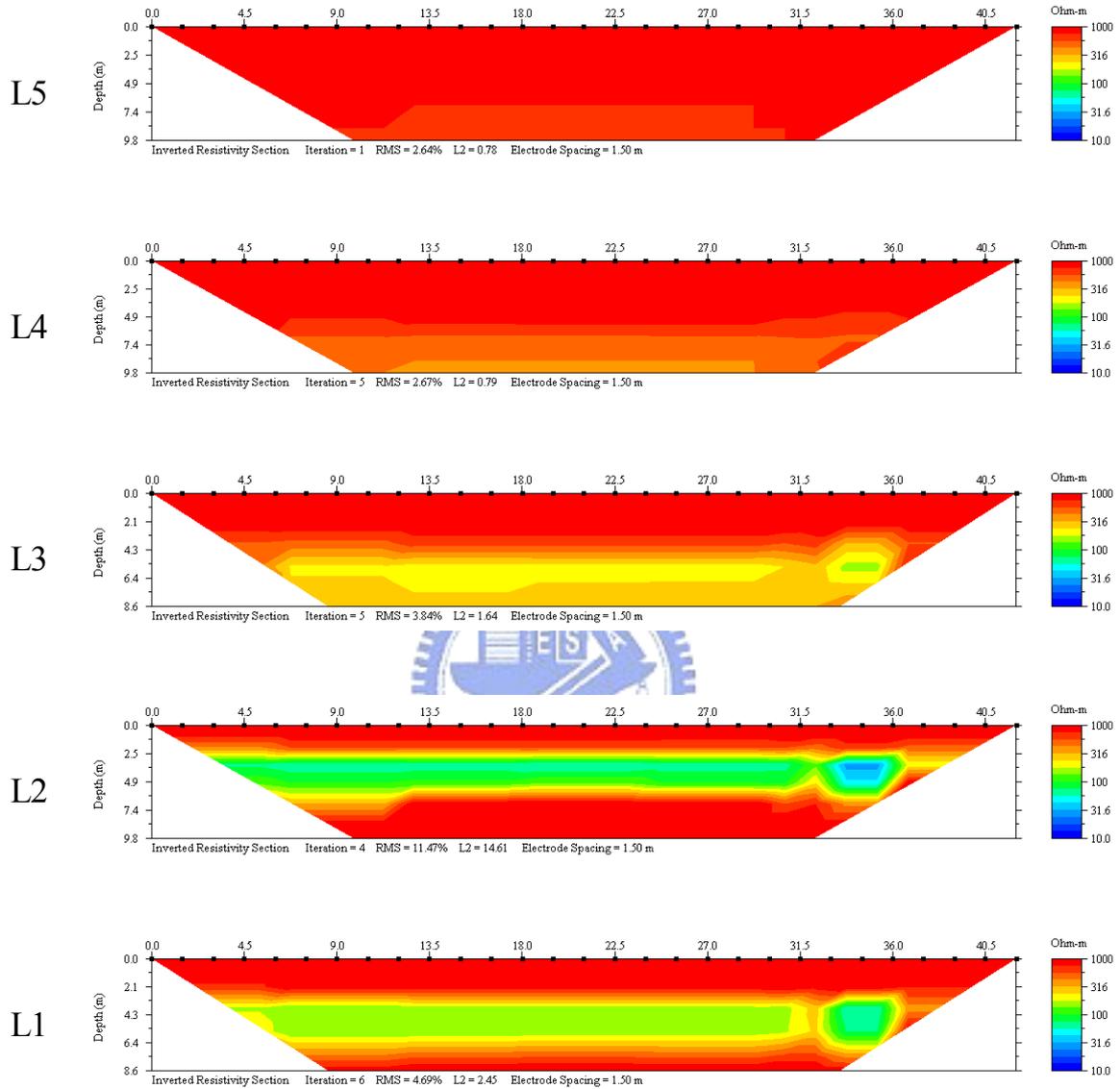
50、100 以及 250 ohm-m。在 P-1 地層中，管線斷面尺寸為 1.5(寬) x 2(深) 公尺，埋設深度為 2 公尺(管線最頂端)，佈有五條測線，測線與測線間距為 3 公尺，電極棒間距為 1.5 公尺，測線長 42 公尺。

表 3-5 DX 類地層模型與施測參數

	n	R1 (ohm-m)	R2 (ohm-m)	dy <sub>p</sub> (m)	dz <sub>p</sub> (m)	Dep (m)	Dx (m)	Dy (m)	L (m)
DX	0.01	10	1000	1.5	2	2	1.5	3	42
	0.05	50							
	0.1	100							
	0.20	200							

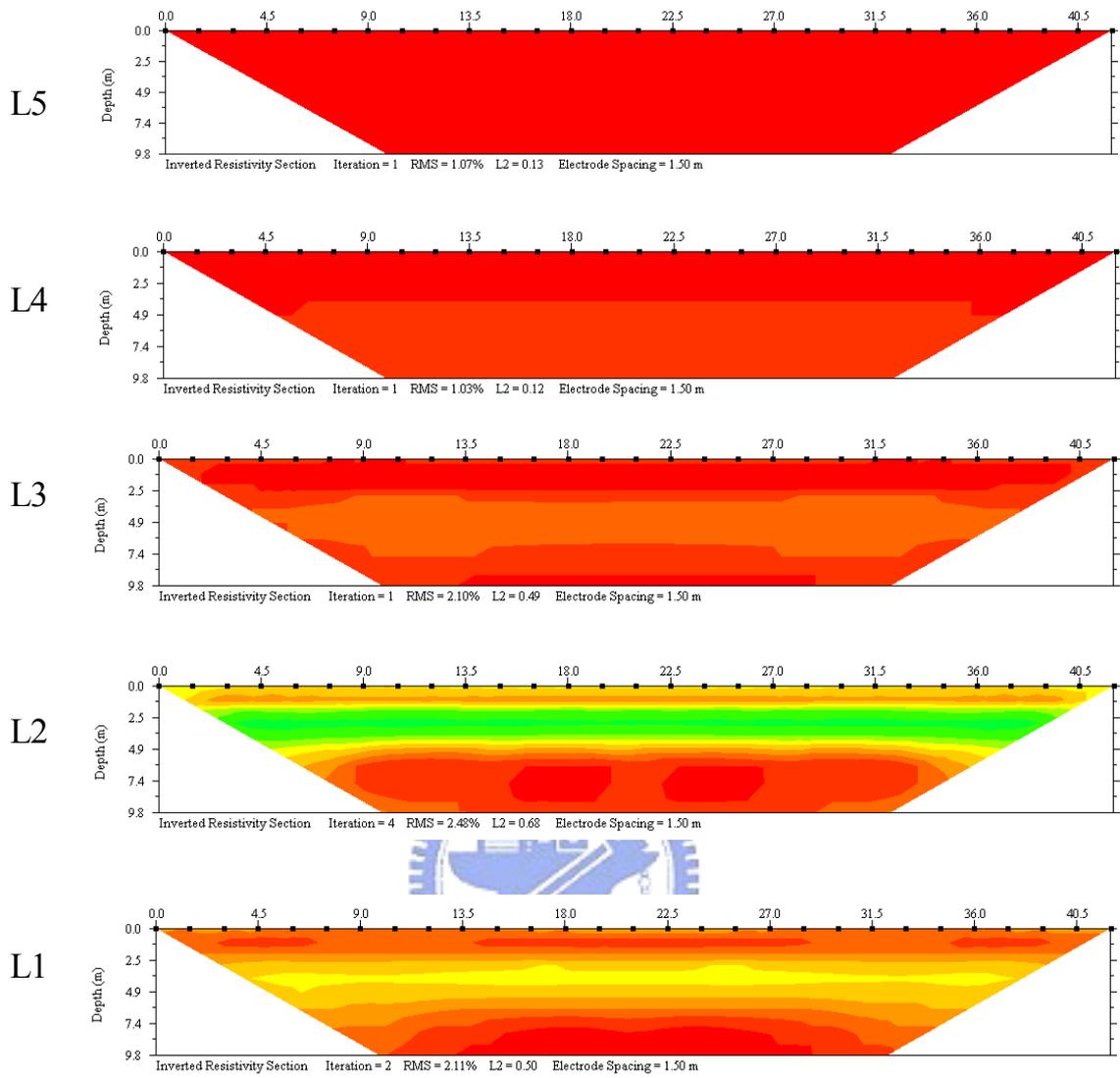
DX 之結果如圖 3-25 所示，先行觀察 n = 0.01 地層電阻率剖面，如圖 3-25(a)所示，L2 測線位於管線邊緣，L1 距管線邊緣 1.5 公尺，L3-L5 測線分別距管線邊緣 3 公尺、6 公尺以及 9 公尺，L1 之結果顯示在深度約 2.5 至 6 公尺有低電阻存在，根據所設定之地層模型，管線是位於地表下 2 至 4 公尺，於 4 公尺以下所測得之低電阻推測可能是 3D 效應的影響，管線另一端之低電阻映射至測線的深度上；而至距管線邊緣 1.5 公尺之 L1，其所顯示之低電阻區約在地表下約 3 至 7 公尺處，明顯是受到 3D 效應之影響，隨著與管線邊緣距離增加至 6 公尺之 L4，已幾乎不受 3D 效應之影響。再觀查其它不同 n 值之結果，在 n = 0.05 之圖 3-25(b)中，位於管線邊緣之 L2 受到的 3D 效應影響已降低，其低電阻主要在地表下 2 至 4 公尺處，而當與管線邊緣距離增加，3D 效應的影響降低的很快，於 L3 已不甚明顯，至 L4 時已幾

乎沒有影響，而當  $n = 0.1$  以及  $n = 0.20$  時，L1 至 L5 皆不受 3D 效應之影響。



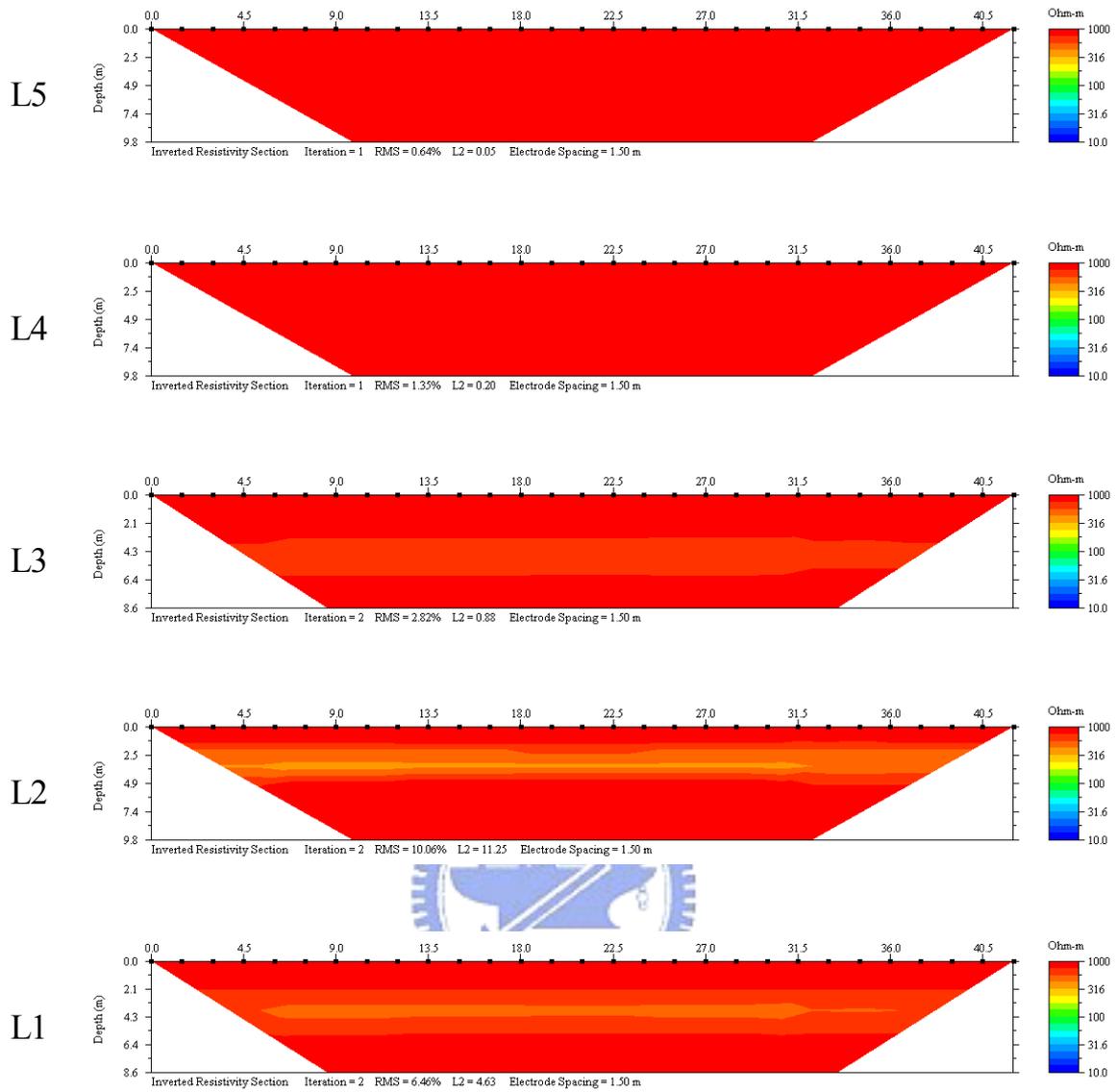
$R_2 = 10 \text{ ohm-m}$ ,  $R_1 = 1000 \text{ ohm-m}$

圖 3-25(a) DX 類測線電阻率剖面結果



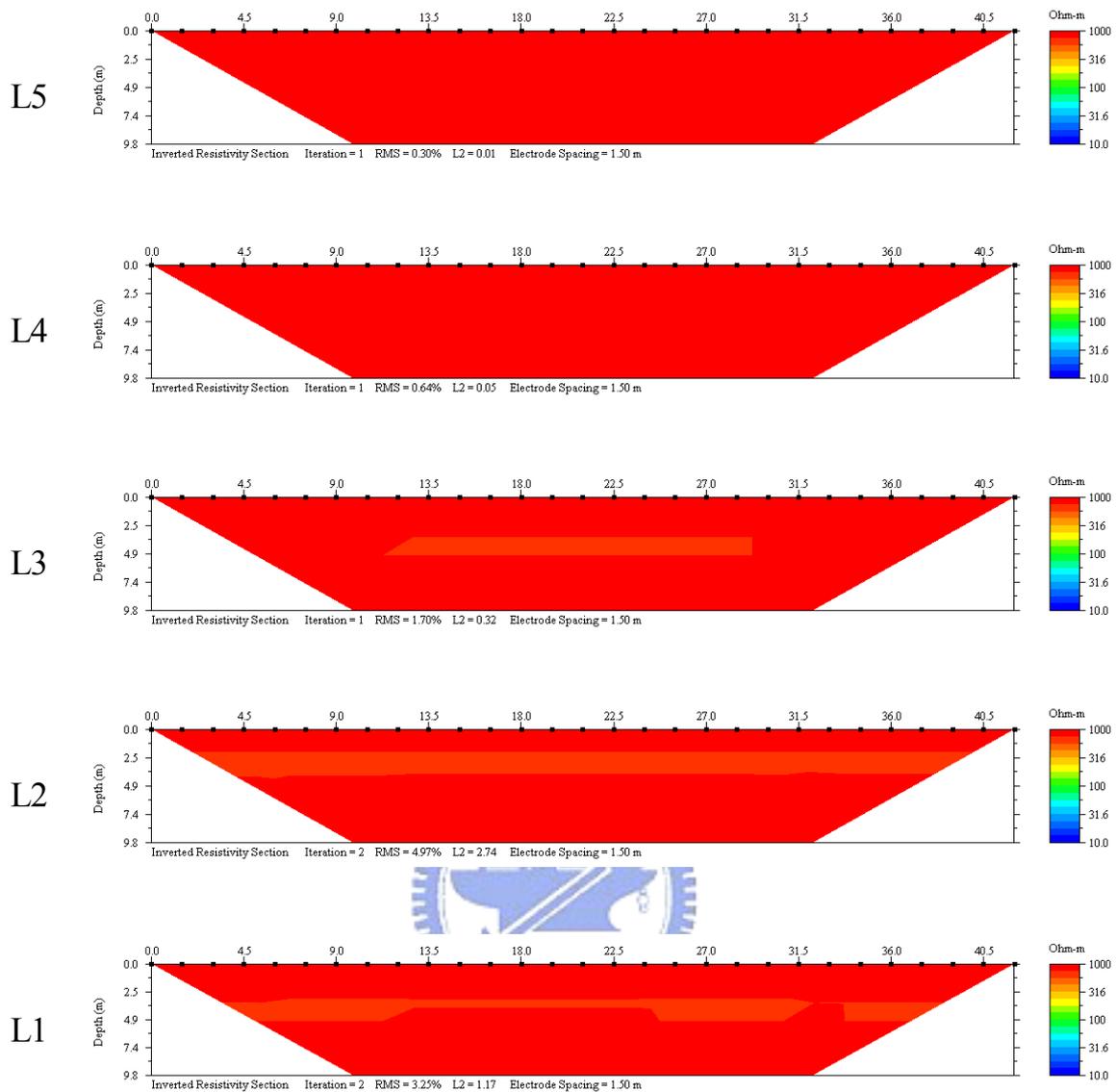
R2=50 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-25(b) DX 類測線電阻率剖面結果



R2=100 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-25(c) DX 類測線電阻率剖面結果



R2=200 ohm-m, R1=1000 ohm-m

圖 3-25(d) DX 類測線電阻率剖面結果

將此結果與圖 3-20 的 P-1 結果比較可知，DX 因為使用較小的電極棒間距而有較佳的解析度，然而就此之外，兩者在 3D 效應之影響空間上幾乎一樣，皆是要到達距管線邊緣約 6 公尺之 L4 才不受 3D 效應的影響，此結果顯示，以電極棒間距做為 3D 效應影響空間的正規化參數並不恰當，因為其影響的距離並不隨著電極棒間距變小而變小。

### 3.7.6 具管線地層之 3D 效應影響小結

根據前三小節之數值模擬結果顯示，地層電阻率與管線電阻率之比值  $n$  會影響 3D 效應的影響空間，當  $n$  值增加時，影響範圍會快速的降低；在管線尺寸之影響中，當管線尺寸變大，3D 效應的影響空間將增加；而在相同管線尺寸之情況下，初步結果顯示，在地電阻探測之測深中，管線之埋設深度對 3D 效應的影響空間影響不大，主要還是在於測線與管線的水平距離。此外，對於  $n$  值相同之地層模型，初步結果顯示，其 3D 效應之影響相同，不受其實際電阻率值之影響，而在其影響距離上，並不適合使用電極棒間距做為距離正規化之參數。

因此，對管線地層而言，其 3D 效應之主要影響因子有電阻率比值  $n$  以及管線尺寸，其兩者間具有加乘作用，不易量化兩者之影響情形，但由已完成之數值模擬顯示，不論在什麼地層中，3D 效應之影響空間至多不超過 6 公尺。

## 四、現地試驗

### 4.1 試驗儀器介紹

本研究試驗所採用儀器為法國 IRIS 公司所生產的 SYSCAL PRO Switch 48，如圖 4-1 所示，主機內含有電源傳送器 (transmitter)，訊號接收器 (receiver) 與電源供應器 (booster)，在電源供應部分可視施測的需求外接直流式電源提供更大電流，另外為了達到需求範圍的二維 (三維) 施測配置，可以利用 Switch Pro box，如圖 4-2 所示，外接更多電極纜線達到需求。儀器與電腦以 RS232 接連，先於電腦上利用 ELECTRE II 設定所需量測程式，上傳至主機即可進行量測。主機除了量測地層電阻率之外，還具備誘發極化量測功能 (induced polarization)，此外還可已利用 Comsys Pro 來控制主機進行監測量測。儀器主要規格如表 4-1 所示。

本研究採用 ELECTRE III、ELECTRE II 軟體進行施測排程設定，視窗如圖 4-3 所示，可設定資料疊代次數、輸出電壓大小、排列方法選擇、電極間距與探測深度等，使用上依照試驗目的設定完成後上傳至儀器即可。而施作完成的數據利用 SYSCAL Pro 軟體進行下載，並可藉由擬視剖面 (pseudo-section) 初步過濾不良資料，若有地形高差可在此軟體進行地形修正，並將檔案由 .bin 轉換成 .dat。整體流程如圖 4-4 所示。



圖 4-1 試驗主機-SYSCAL PRO Switch 48



圖 4-2 試驗主機-SYSCAL PRO Switch Pro box

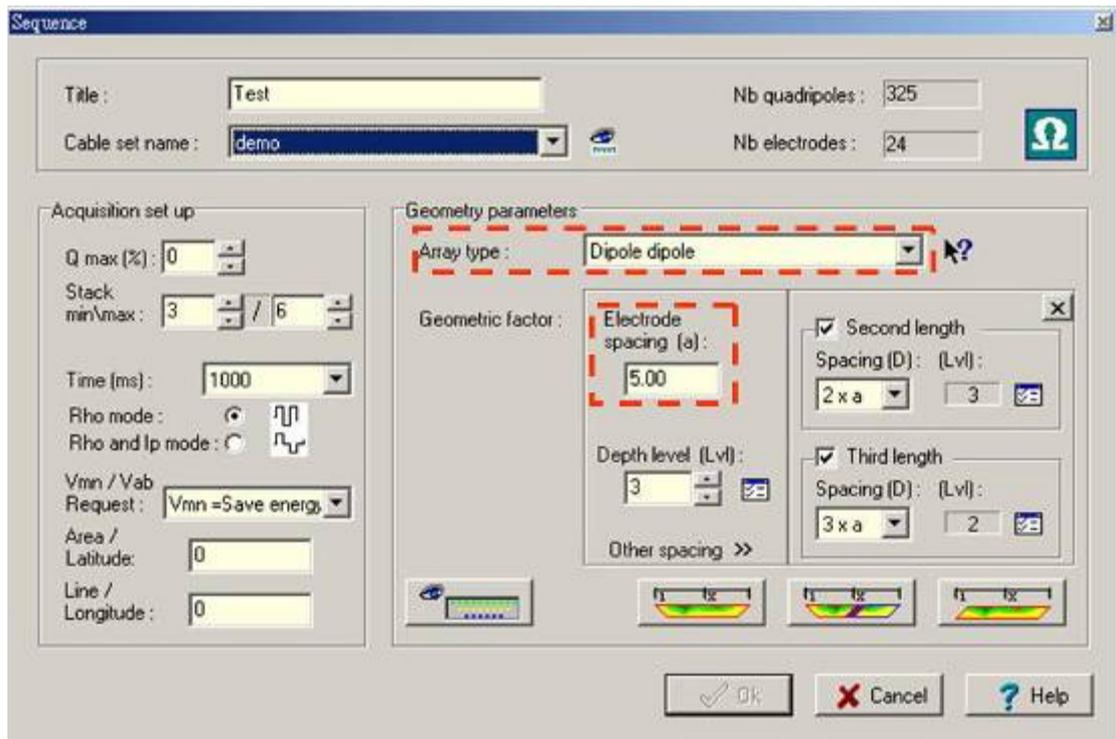


圖 4-3 ELECTRE II 軟體施測排程設定視窗

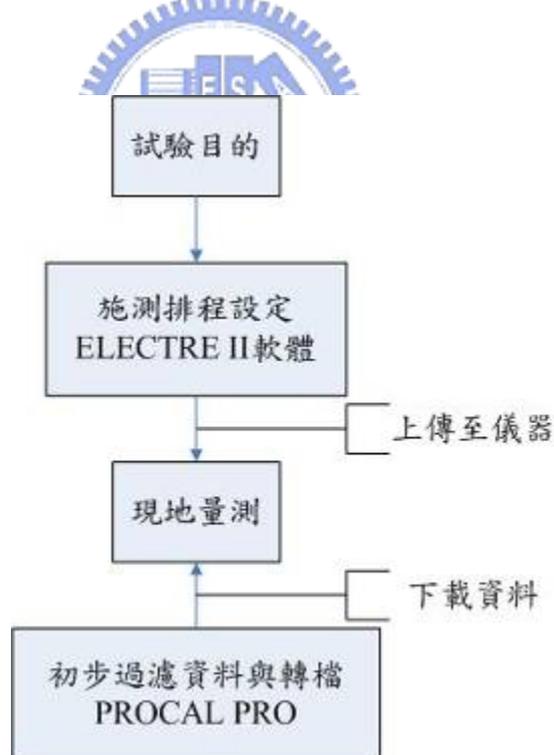


圖 4-4 現地量測流程圖

表 4-1 SYSCAL Pro Switch 48 儀器規格 (IRIS, 2005)

輸出規格	自動排序量測系統 最大輸出電流: 2.5A      最大輸出電壓: 800V 最大輸出功率: 250W(500W: 外接式電源 DC/DC 整流器)、可外接 1200W AC/DC 整流器 電流脈波延時: 0.2、0.25、0.5、1、2、4、8 秒 電流量測準確率: 0.2%
擷取訊號規格	輸入阻抗: 100M-Ohm 接收電壓: 最大 15V (10 channel) Protection Voltage up to 1000V 50Hz~60Hz 濾波 (Power line rejection) 電壓量測準確率: 0.2% 電壓最小值: 1 $\mu$ V 疊加多次量測, 統計標準偏差 IP 量測可達到 20 組切片資料
一般規格	儲存 21000 筆資料 RS-232 連接電腦上傳/下載資料 電源供應: 內部 12V/7.2Ah 電池, 外接 12V 車用電瓶 操作溫度: -20°C ~ 70°C 儀器大小: 31 X 23 X 36 cm 重量: 13Kg

#### 4.2 施測方法的選用

利用程式提供各種電極；Wenner、Wenner-Schlumberger、pole-pole、pole-dipole 和 dipole-dipole 的選擇，假設一三維半平面(subsurface)之數值模型，根據所選的排列(Array)，計算出模型的視電阻率；再放入反算程式中求出三維地電剖面。其結果可知：如利用程式所建立的水平均質或水平模型下，給與不同的地下結構物時，代入反算程式均能得到不錯的地電阻剖面影像。其非均質體的位置也幾可辨認。但總括來說：在垂

直斷層數值模擬時，可知 Wenner 法對於地下垂直結構物時，其判釋能力不是很好；而如要加強其調查深度時，可使用 Pole-Pole 排列法，因為此法的調查深度是最深的。但由於此法使用時，是將兩電極拉至二至三倍展距遠，所以施測時更容易獲得背景雜訊，在資料的處理上，必須更小心。在現地施測時，必須根據不同的情形，採用不同之方法，整理如下：(1)背景雜訊強,需要明顯的垂直方向的收斂變化時，適用於地下非均質體為水平結構；可採用 Wenner array。(2)需要明顯的水平方向收斂變化時，適用於地下非均質體為垂直結構，儀器需靈敏有良好的地面接觸時，可採用 dipole-dipole array。(3)如地下非均質體為水平和垂直結構相互交錯時，可使用具有水平以及垂直良好收斂的 Wenner-Schlumberger array。(4)在系統之電極數少時，可採用水平收斂比 dipole-dipole 還好的 pole-dipole。但因為施測時為三極，必須交叉施作才能提高解的正確性。(5)如遇現地地形崎嶇難行的狀況下，可採用電極間距小，測深較深的 pole-pole array。(梅興泰 2001)

排列方式	探測深度	訊號衰減強度	解析能力
Wenner	3	$1/2 \pi a$	垂直方向
Dipole-Dipole	4	$1/n^3$	側向變化
Wenner-Schlumberger	3	$1/n^2$	垂直方向 側向變化
Pole-Dipole	2	$1/n^2$	側向變化
Pole-Pole	1	$1/2 \pi a$	最差

【註】等級1為最佳，等級2為位次佳以此類推



圖 4-5 電極排列方式特性比較

### 4.3 金屬管線案例

#### 4.3.1 試驗場址概述



本次試驗場地選定位於自來水公司鯉魚潭給水廠所屬管路(中社段)。中社段為鯉魚潭水庫至鯉魚潭給水廠之間，全程唯一未埋在道路底下的路段，因此選擇此路段做為試驗場址。



圖 4-6 鯉魚潭給水廠管路現況圖(中社段)

#### 4.3.1.1 區域地質

本研究試驗場區位於中央地調所 1/50,000 大甲圖幅內，在地質分區上屬於台灣西部麓山帶地質區之西緣及其以西之濱海地質區。依據大甲地質圖圖幅說明書，本區域出露地層主要包括第四紀之頭嵙山層及未固結之紅土台地堆積層、階地堆積層、沖積層等。

#### 4.3.1.2 地層

##### 1. 頭嵙山層

本層主要由砂岩、砂質泥岩、礫石質砂岩及厚層狀礫岩所組成，由其出現層位可再細分為二段，下段為香山相 (Tks)，上段為火炎山相 (Tkh)。

香山相岩性主要為厚層砂岩夾砂頁岩互層或頁岩層或粉砂岩層，局部地方含凸鏡狀礫石質砂岩或礫岩。火炎山相岩性以礫岩夾透鏡狀砂岩為主，局部地區砂岩及泥岩較發達。

##### 2. 紅土台地堆積層

本研究試驗場后里台地位於紅土堆積台地，本層為古河道出口扇狀堆積物，因地殼上升及河流下切作用而形成台地，其時代約當更新世中期，由紅土、礫石、砂、泥等組成。紅土呈深紅棕色，厚由 1 至 6 公尺，為溫暖時期之產物，含黏土礦物和氧化鐵及含水氧化鋁等。本層中所夾礫石層厚度 30 至 80 公尺(張憲卿，1994)，礫石主要為中粒砂岩構成，淘選極差，礫徑一般 10 至 20 公分，但有時達 1 公尺以上。本層廣泛分佈於后

里台地及南部之大肚台地，不整合覆於頭嵙山層以及局部其他新第三紀地層之上，其厚度各地不一，由 30 至 80 公尺，大肚台地及后里台地上者較厚，一般約在 80 公尺。

#### 4.3.2 測線規劃與現地作業

於自來水公司鯉魚潭給水廠現場進行地電阻探測之測線佈設如圖 4-7 所示，施測地點詳如圖 4-8 所示，在此處共進行一組 3D 地電阻探測與三條 2D 地電阻探測，本探測將以 3D 地電阻探測之結果做為接近現場實際狀況之真值，以其與 2D 測線之探測結果進行比對。

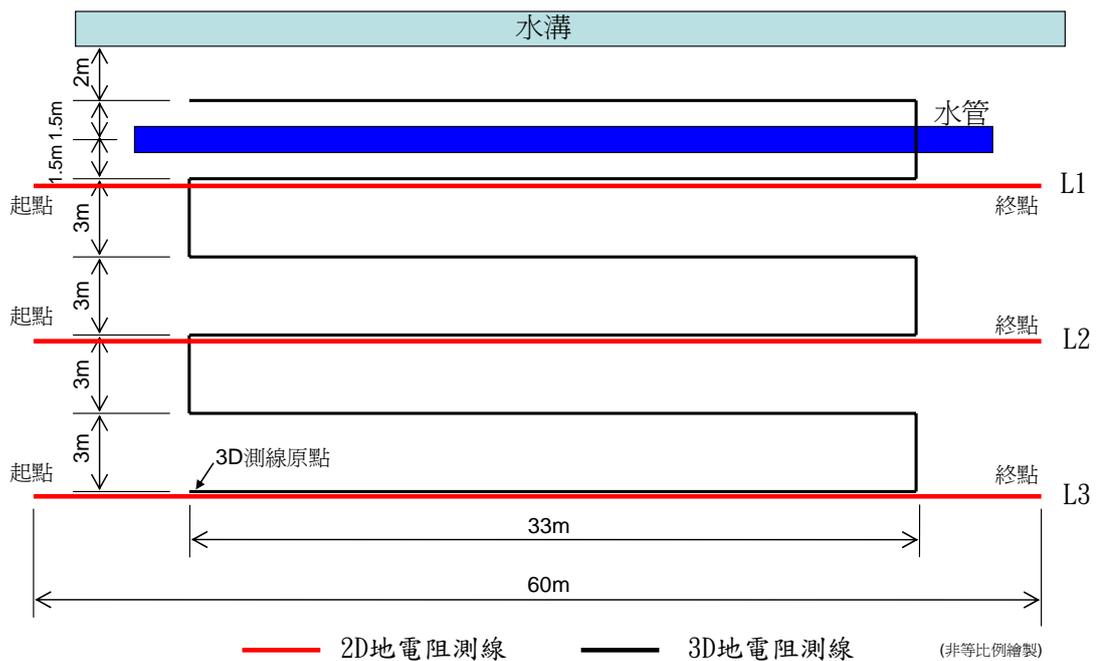


圖 4-7 測線規劃佈置圖



圖 4-8 地電阻測線位置圖

3D 地電阻之測線共使用 72 根電極棒，使其排列成平行水管方向 33 公尺、垂直水管方向 15 公尺的長方型陣列，各電極棒間距取 3 公尺，以繞 S 型方式連接各電極棒，座標原點訂於左下角處，水管之中心點位於垂直水管方向 13.5 公尺位置，水管整體涵蓋在 3D 測線的最上緣，以 dipole-dipole 方式施測。2D 地電阻探測共佈設 3 條：L1、L2 以及 L3，L1 測線位於距水管中心 1.5 公尺處，L2 測線位於距水管中心 7.5 公尺處，L3 測線位於距水管中心 13.5 公尺處，測線皆長 60 公尺，採用 21 根電極棒，電極棒間距 3 公尺，測線 9-42 公尺與 3D 測線重疊，使用 dipole-dipole 方式進行施測，如表 4-2、表 4-3。

表 4-2 3D LY-1 測線施測參數

測線名稱	3LY-1
電極間距 (公尺)	X=3.0 公尺 Y=3.0 公尺
電極數目	72 支
測線展距 (公尺)	157.5 公尺
施測方式	Dipole-Dipole

表 4-3 2D LY-1 測線施測參數

測線名稱	2LY-1
電極間距(m)	3.0 公尺
電極數目	20 支
測線展距(m)	60 公尺
施測方式	Dipole-Dipole

### 4.3.3 試驗結果與討論

2D 與 3D 地電阻探測之結果如圖 4-9 所示，由圖中可知，由 3D 測線所得之結果顯示，於 L1 至 L3 測線區間除 L1 測線起點地表下 4 公尺後有局部低電阻率(約 200ohm-m，測深達 10.3 公尺)外，並無明顯低電阻材料存在的情形；反觀 2D 測線之結果，距水管邊緣約 0.25 公尺的 L1 測線於約地表下 2.5 公尺處(水管頂部約在地表下 2 公尺)有電阻率明顯下降變化的情形，然而其下方之電阻率直至地表下 10.3 公尺皆未有較高電阻率出現，對於水管之底部並無法明顯反應。此現象有可能是因為低電阻率材料的存在，降低其下方材料之感測靈敏度，而於反算時無法明確反應其電阻率的變化，也可能是現場之管線存在有漏水問題，使得管線下方土壤極為濕潤，而有較低的電阻值。由於 L1 測線與水管極為相近(距水管邊緣 0.25 公尺)，因此其雖不在水管上方，但依舊可良好反應水管的位置，但隨著測線與管線距離的增加，L2 測線 (距水管邊緣 6.25 公尺) 之結果僅於地表下 9 公尺後有電阻率降低的明顯變化，比對 3D 測線之結果可知該低電阻率是由於水管映射於 L2 剖面之 3D 效應所造成，當測線至 L3 測線時，於探測深度內已沒有觀察到電阻率明顯的降低變化情形。

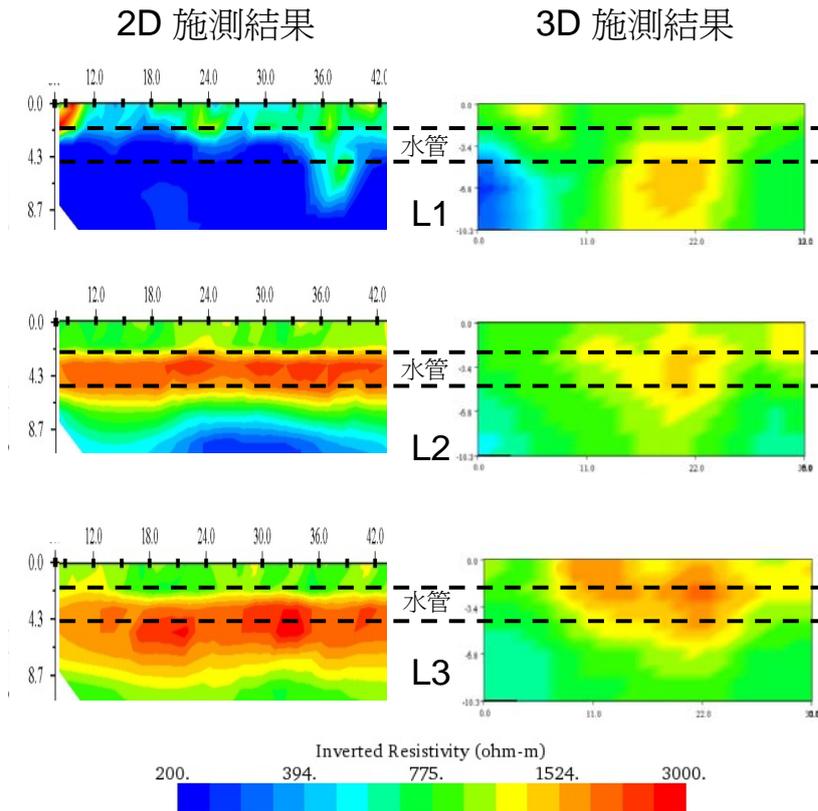


圖 4-9 金屬管線地層 2D 與 3D 地電阻探測結果

此管線直徑 2 公尺埋設深度約 2 公尺，採用 3 公尺電極棒間距，與數值模擬之 P-1 相似，將現地結果與 P-1  $n=0.001$  之結果進行比對，由於現場土壤非均質，因此其結果不若數值模擬中明確，以現地之 L1 測線結果而言，數值模擬之結果可明確探得管線底部而不受低電阻材料存在的遮蔽，因此，現地 L1 結果可能是受現地土壤情形之影響，而使得管線下部邊界無法測得。撇開現地土壤不均質所可能造成的差異，就 3D 效應的影響而言，兩者之結果尚屬吻合，在約 6 公尺的距離，3D 效應的影響已不明顯。

## 五、綜合討論

### 5.1 數值模擬案例討論

本章節將針對本次研究的數值模擬做一有系統之回顧與整理。

#### 5.1.1 具斷層地層

##### 5.1.1.1 斷層(傾斜層面)模型

為了解具有斷層存在之地層所可能造成之 3D 效應問題，本研究以較單純之一階地層進行斷層模擬，如圖 5-1(e)所示，從斷層土層電阻率比、測線與斷層走向夾角以及階梯地層厚度 3 方向進行地層模型與施測參數之建立與規劃。

##### 5.1.1.2 測線與斷層走向夾角之影響

在測線與斷層走向夾角上規劃四種 2D 地電阻探測之測線，如圖 5-1 所示，A 類測線使測線與斷層之走向平行，如圖 5-1(a)所示，B 類測線與斷層走向夾 30 度角如圖 5-1(b)所示，C 類測線與斷層走向夾 45 度角，如圖 5-1(c)所示，D 類測線與斷層走向夾 60 度角，如圖 5-1(d)所示。在此斷層中， $R_2/R_1$  固定為 0.2， $R_1$  之電阻率設為 1000 ohm-m， $R_2$  之土層厚度皆為 4 公尺，各條測線皆採用 10 根電極棒，電極棒間距 3 公尺，組成 27 公尺長之測線，以 dipole-dipole 施測法進行施測。

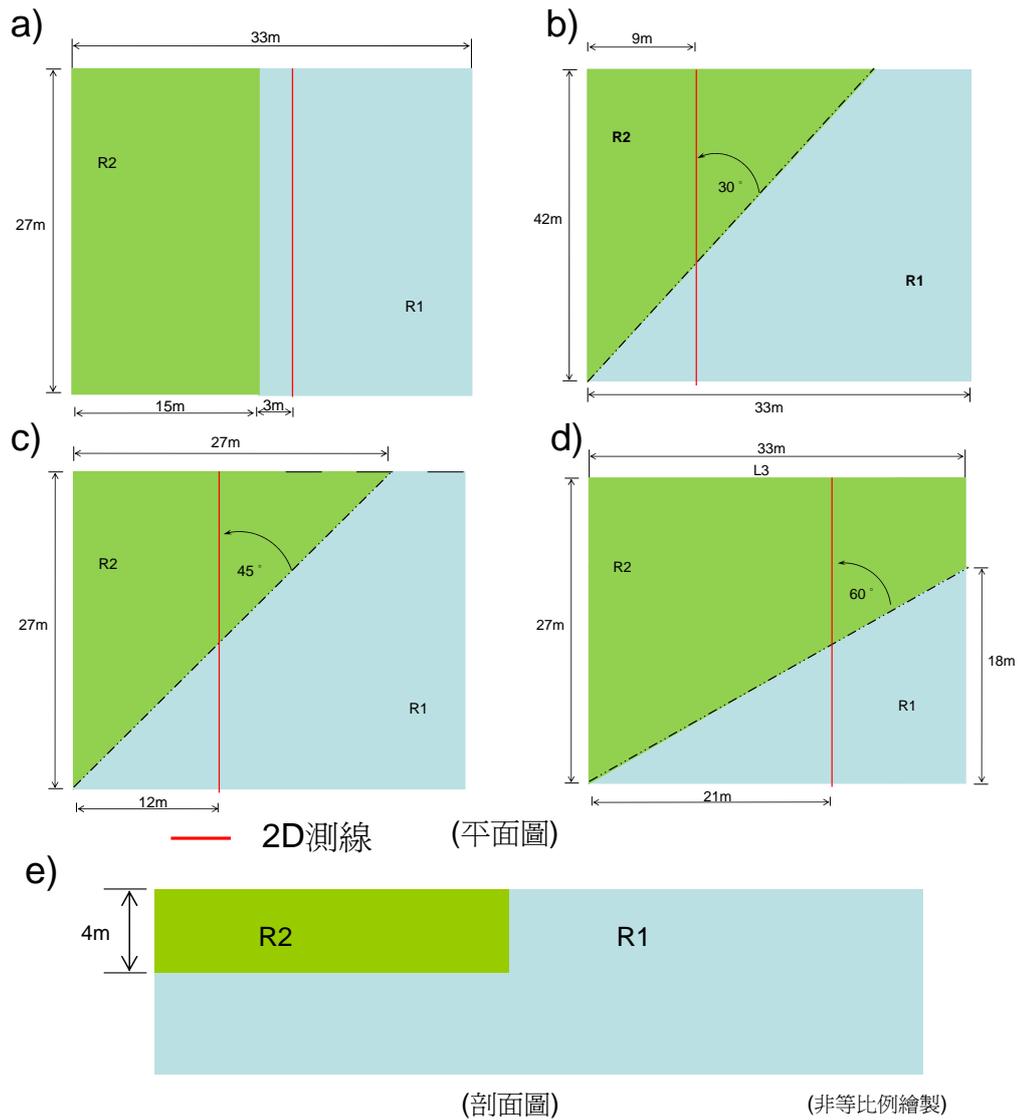


圖 5-1 斷層數值模擬地層

如圖 5-2 所示，在所夾角度為 0 度之測線距斷層位置 3 公尺遠，其電阻率剖面顯示，在地表下約 3.5 公尺處有低電阻存在，使得該處地層為上有高電阻而下有低電阻之地層結果，與應是全為高電阻之地層模型不同；而所夾角度為 30 度之測線結果，於深度之界面上，在地表下約 3.5 公尺處有明顯電阻率變化，其分界處之位置較實際位置向高電阻側偏移了約 3 公尺，再觀察圖中之電阻率剖面結果亦可

發現，在側向變化處地表下 3.5 公尺後的深度偏高電阻側會有一帶狀之低電阻率存在；所夾角度為 45 度之測線結果，於深度之界面上，在地表下約 3.5 公尺處有明顯電阻率變化，在測線方向上，在高低電阻率土層之分界處有明顯的電阻率變化顯示土層界面的存在，位置較實際位置向高電阻側偏移約 3 公尺，再觀察圖中之電阻率剖面結果亦可發現，在側向變化處地表下 3.5 公尺後的深度偏高電阻側會有一帶狀之低電阻率存在；所夾角度為 60 度之測線結果，於深度之界面上，在地表下約 3.5 公尺處有明顯電阻率變化，在測線方向上，在高低電阻率土層之分界處有明顯的電阻率變化顯示土層界面的存在，位置與實際位置接近，而在側向變化處地表下 3 公尺後的深度偏高電阻側雖會有一帶狀之低電阻率存在但已不明顯。

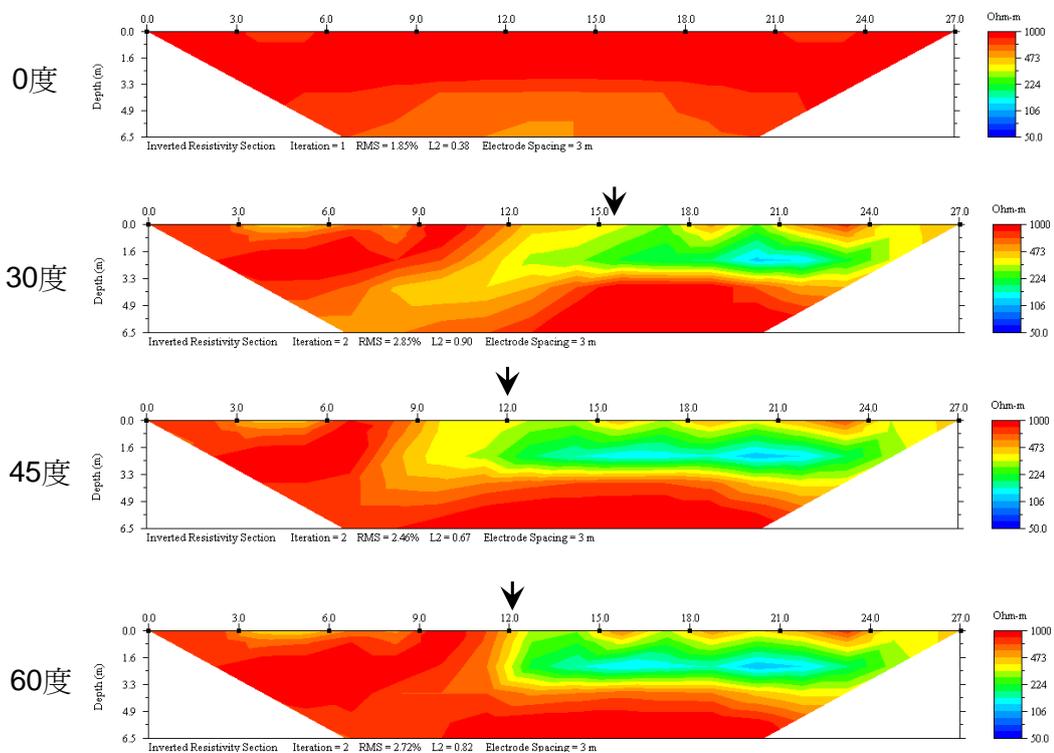


圖 5-2 具斷層地層模型-角度影響

造成所夾角度在 0 至 45 度間所得反算剖面與地層模型不同，其主要是受到 3D 效應之影響，當電場在地層中發散時，雖能量主要是在測線上，但亦有相當能量分佈在測線側向的低電阻率土層處，在測線側向上的低電阻位置映射至測線高電阻段的深度上，而隨著所夾角度的不同，低電阻區在測線高電阻段側向上為非等距，且有漸遠的情形，因而使得此帶狀自斷層側向變化處往左下的方向發展，但此 3D 效應對所夾角度達 60 度的測線影響已不明顯。

#### 5.1.1.3 電阻率比之影響 ( $n=R1/R2$ )

為了解地層電阻率比值之影響，採用夾 30 度之地層模形(如圖 5-1(b)所示，將 R1 皆設為 1000ohm-m，並控制 R2 與 R1 之比值 n 分別為 0.05、0.1 以及 0.2，亦及 R2 之電阻率分別為 50、100 以及 200ohm-m，各條測線皆採用 10 根電極棒，電極棒間距 3 公尺，組成 27 公尺長之測線，以 dipole-dipole 施測法進行施測。

如圖 5-3 所示，三個不同之電阻率比結果於深度之界面上，在地表下約 3.5 公尺處皆有明顯電阻率變化，在測線方向上，在高低電阻率土層之分界處有明顯的電阻率變化顯示土層界面的存在，三者分界處之位置皆較實際位置向高電阻側偏移了約 3 公尺，再觀察圖中之電阻率剖面結果亦可發現，在側向變化處地表下 3.5 公尺後的深度偏高電阻側會有一帶狀之低電阻率存在，此低電阻率之值隨著電阻率比增加而使得影響程度有所降低，但其影響範圍維持不變。如前所述，此帶狀主要受到 3D 效應之影響，當電場在地層中發散時，雖

能量主要是在測線上，但亦有相當能量分佈在測線側向的低電阻率土層處，在測線側向上的低電阻位置映射至測線高電阻段的深度上，當兩個地層之電阻率差異較大時，流向低電阻率區之能量將增加，而使其有較大之權重獲得較低之綜合電阻率。

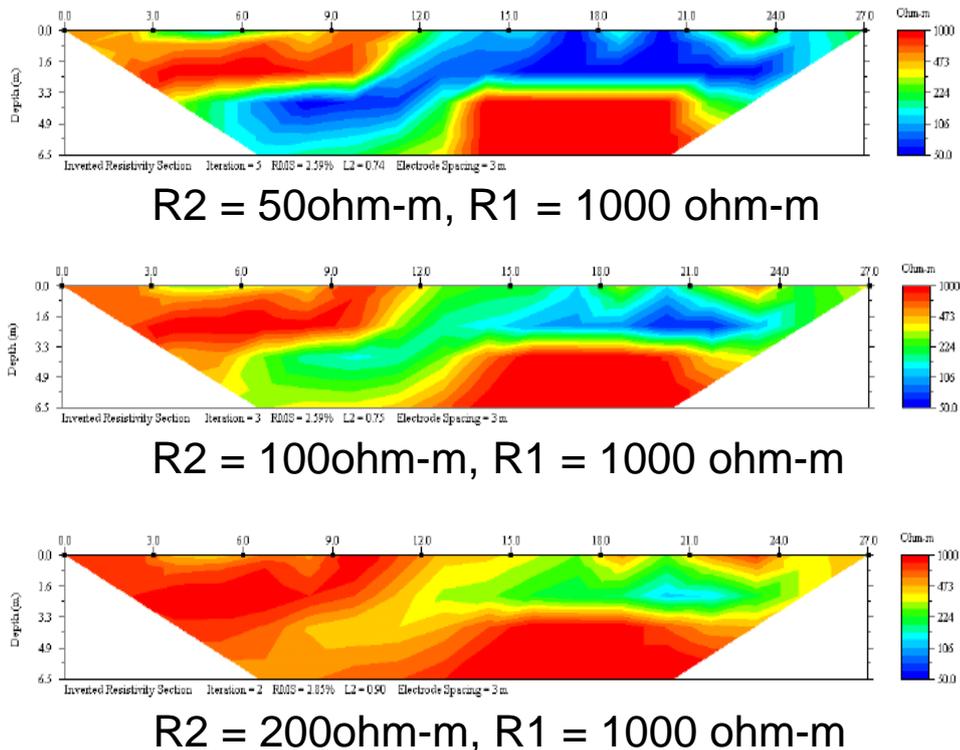


圖 5-3 具斷層地層模型-電阻比率影響(所夾角度 30 度)

#### 5.1.1.4 三維效應影響之距離

為了解 3D 效應所可能的影響範圍，採用夾零度之地層，改變 6 條測線與斷層之距離(如圖 5-4 所示)進行了解，各條測線皆採用 10 根電極棒，電極棒間距 3 公尺，組成 27 公尺長之測線，以 dipole-dipole 施測法進行施測。

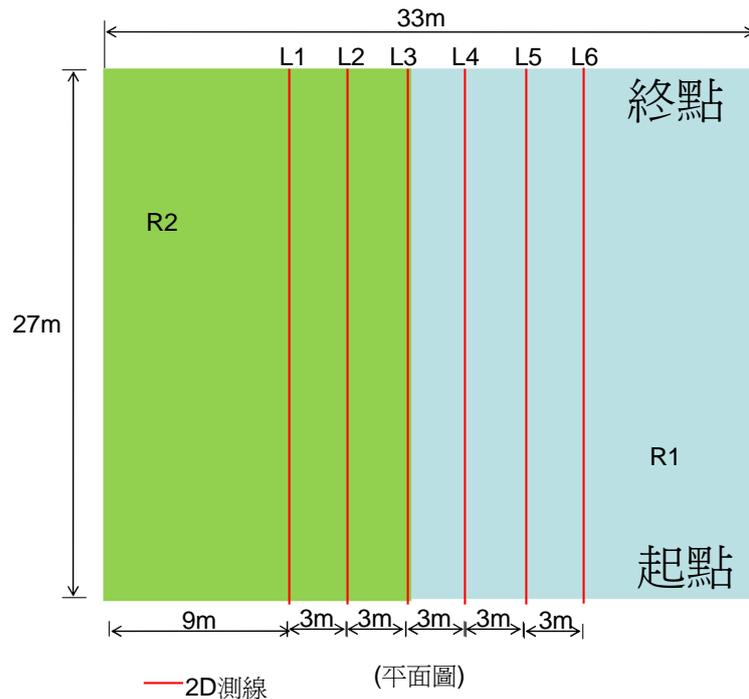


圖 5-4 3D 效應影響範圍數值模擬地層

如圖 5-5 所示，由圖 5-4 之規劃中可知 L3 位於斷層側向變化之處，其數值結果顯示，在該處所測得之結果主要是反應偏低電阻側之地層情形。而在低電阻側之結果顯示，與 L3 相鄰 3 公尺之 L2 在地表下約 3.5 公尺處有明顯之高低電阻界面存在，幾乎不受 3D 效應的影響，再觀察於高電阻側之結果，距 L3 測線 3 公尺遠之 L4 測線，其電阻率剖面顯示，在地表下 3.5 公尺處有低電阻存在，使得該處地層為上有高電阻而下有低電阻之地層結果，與應是全為高電阻之地層模型不同，此結果之差異主要便是來自於 2D 地電阻探測之 3D 效應造成，當測線距離遠離至 6 公尺之 L5 時，3D 效應所造成之影響已不明顯。

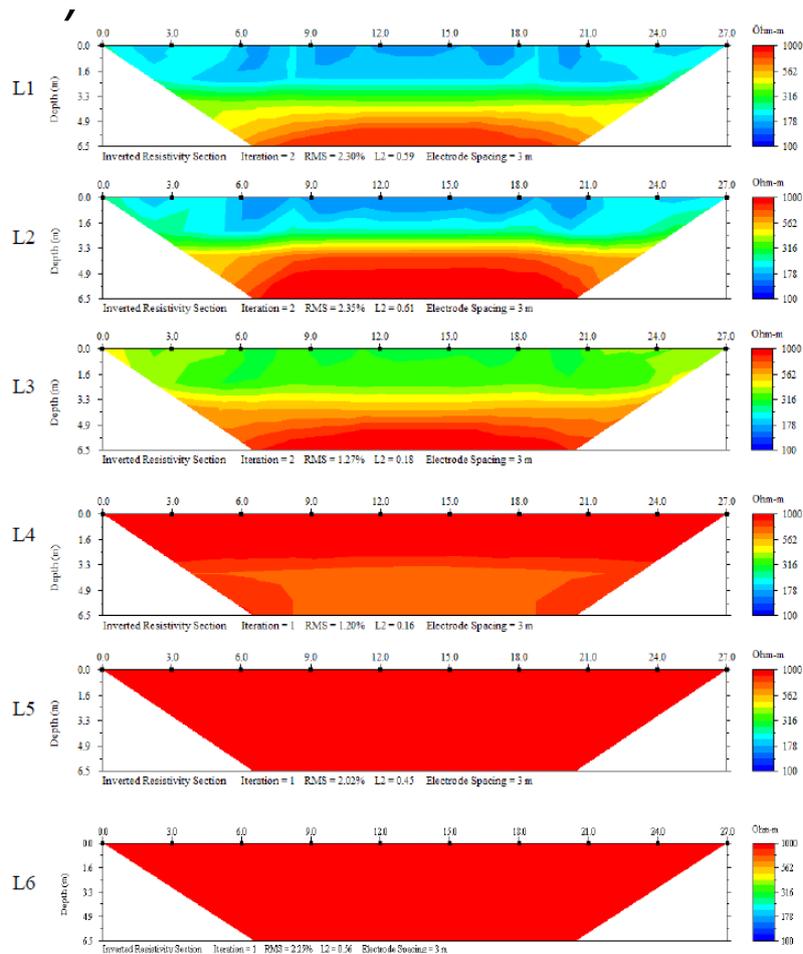


圖 5-5 具斷層地層模型-3D 效應影響範圍

由上述結果可發現，在高電阻率土層側與低電阻率土層側之測線結果對於 3D 效應之影響範圍有所不同，在高電阻率側 3D 效應之影響較低電阻率側明顯，且影響之空間較大，造成此差異之主要原因應是在於低電阻率之土層較高電阻率之土層更易吸引電場能量，當測線於低電阻側進行施測時，電場於側向上之發散主要集中於低電阻側，高電阻率側之電場分布相對較少，因此受到鄰近高電阻之影響不明顯，而當測線於高電阻率側進行施測時，電場於側向上之發散將有相當能量往低電阻率分佈，而使得高電阻側之結果易受到

低電阻率側土壤之影響，而有較大的 3D 效應影響空間。而由此一結果可解釋在所夾角度有所差異時，其 3D 效應在映射後的影響範圍，由角度影響之結果可知 3D 效應在深度之影響主要在高電阻側，其影響範圍約略是在垂直測線方向與斷層相距 6 公尺之位置（測線與斷層走向夾 30 度角，因此在測線側向上的影響距離約 10 公尺）。

#### 5.1.1.5 電極棒間距之影響

在探討 3D 效應之影響中，為儘可能參數化結果，會嘗試以電極棒間距做為 3D 效應影響範圍之正規化基底，但電極棒間距是否確實可做為正規化之參數，或其影響是一固定之距離而與電極棒間距無關？規劃在夾零度之地層模型下，佈有六條測線，測線與測線間距為 3 公尺，電極棒間距為 1.5 公尺，測線長 27 公尺，將此結果與電極棒間距為 3 公尺者相比較。

在探討 3D 效應之影響中，為儘可能參數化結果，以電極棒間距做為 3D 效應影響範圍之正規化基底似乎是一合理參數，但其是否確實符合實際狀態卻不為所知，在此將對其進行探討了解。如圖 5-6 所示，由圖 5-4 之規劃中可知 L3 位於斷層側向變化之處，其數值結果顯示，在該處所測得之結果主要是反應偏低電阻側之地層情形，而在低電阻側之結果顯示，與 L3 相鄰 3 公尺之 L2 在地表下約 3.5 公尺處有明顯之高低電阻界面存在，再觀察於高電阻側之結果，距 L3 測線 3 公尺遠之 L4 測線，其電阻率剖面顯示，在地表下 3.5 公尺處有低電阻存在，使得該處地層為上有高電阻而下有低電阻之地層

結果，與應是全為高電阻之地層模型不同，此結果之差異主要便是來自於 2D 地電阻探測之 3D 效應造成。將此結果與 Fig.6 比較，可發現兩者除因為 Fig.7 使用較小的電極棒間距而有較佳的解析度外，兩者在 3D 效應之影響空間上幾乎一樣，在低電阻側，大約在距離斷層側向變化處至 3 公尺遠，可不受 3D 效應之影響，而在高電阻側，則是要到達距約 6 公尺之 L4 才不受 3D 效應的影響，此結果顯示，以電極棒間距做為 3D 效應影響空間的正規化參數並不恰當，因為其影響的距離並不隨著電極棒間距變小而變小。

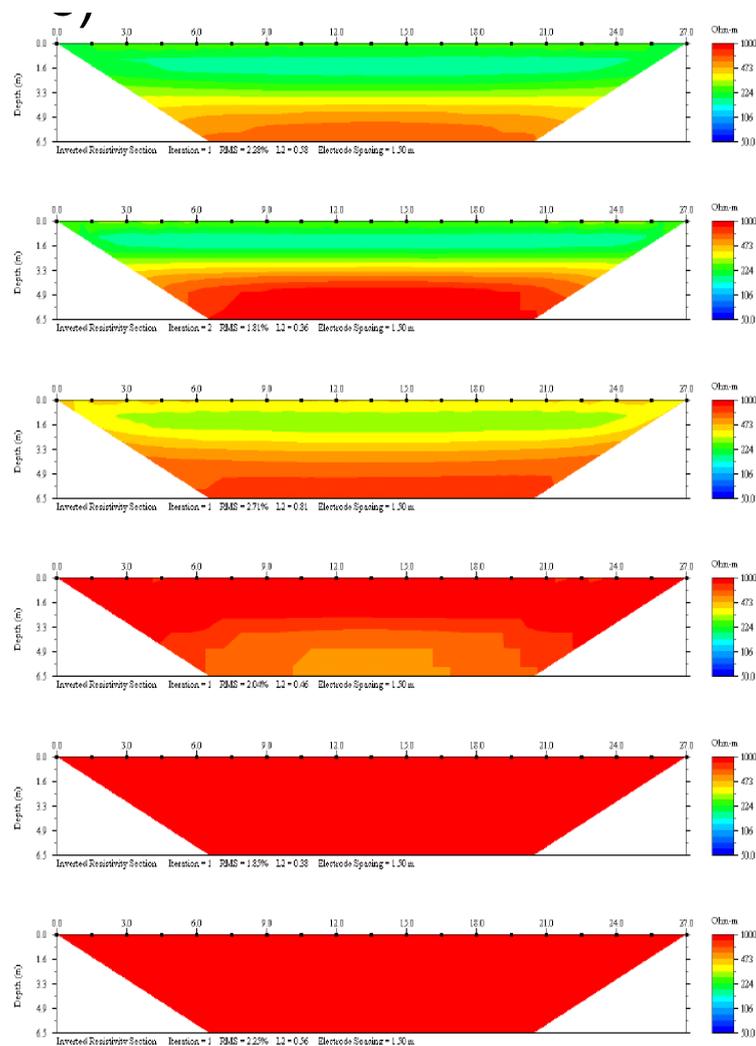


圖 5-6 具斷層地層模型-3D 效應影響範圍控制因子

## 5.1.2 金屬管線地層

### 5.1.2.1 管線地層模型

為了解具有管線存在之地層所可能造成之 3D 效應問題，從管線與地層之電阻率比、測線與管線距離、管線埋設深度以及管線大小 4 個方向進行地層模型與施測參數之建立與規劃。

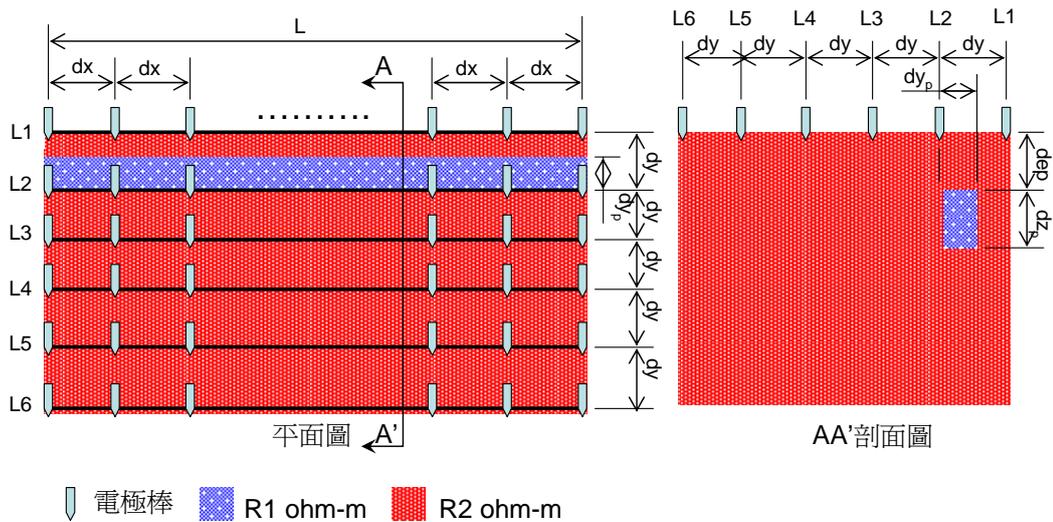


圖 5-7 具管線地層模型

如圖 5-7 所示，在模擬具管線之規劃中，地層中有電阻率設為  $R1$  之管線，該管線埋設在電阻率為  $R2$  之土層中，且此中  $R2 > R1$ ，兩者之比值稱為  $n$ ，管線之斷面大小為  $dyp \times dzp$ ，埋設深度為  $dep$  (管線最頂端)，在管線周邊平行管線佈有 5 條或 6 條測線，各測線相距  $dy$ ，每條測線隨測深需求對於測線長度  $L$  有些許調整，電極棒間距為  $dx$ ，施測時採用 dipole-dipole 施測法進行。為使閱讀便利，實際之地層模型電阻率值及各施測參數將於各項探討之結果中列出。

### 5.1.2.2 管線尺寸之影響

在探討管線尺寸之影響中，規劃兩類不同管線尺寸之地層模型與施測參數：P-1 與 P-2，整理如表 5-1 所示，在每一類中採用  $n$  值為 0.1 之地層電阻率比， $R_2$  為 1000 ohm-m， $R_1$  為 100。在 P-1 地層中，管線斷面尺寸為 1.5(寬) x 2(深) 公尺，埋設深度為 2 公尺(管線最頂端)，佈有五條測線，測線與測線間距為 3 公尺，電極棒間距為 3 公尺，測線長 42 公尺；在 P-2 地層中，管線斷面尺寸為 3(寬) x 4(深) 公尺，埋設深度為 4 公尺(管線最頂端)，佈有六條測線，測線與測線間距為 3 公尺，電極棒間距為 3 公尺，為有足夠探測深度，測線長 51 公尺。

表 5-1 P 類地層模型與施測參數

	$n$	$R_1$ (ohm-m)	$R_2$ (ohm-m)	$dy_p$ (m)	$dz_p$ (m)	dep (m)	$dx$ (m)	$dy$ (m)	$L$ (m)
P-1	0.1	100	1000	1.5	2	2	3	3	42
P-2	0.1	100		3	4	2	3	3	51

如圖 5-8 所示，小尺寸之管線結果中，L2 測線位於管線邊緣，L1 距管線邊緣 1.5 公尺，L3-L5 測線分別距管線邊緣 3 公尺、6 公尺以及 9 公尺，L1 至 L5 幾乎不受 3D 效應之影響；大尺寸之管線結果中，L1 及 L2 測線位於管線邊緣，L3-L5 測線分別距管線邊緣 3 公尺、6 公尺以及 9 公尺，L1 及 L2 之結果顯示在深度約 3 至 8.6 公尺有低

電阻存在，根據所設定之地層模型，管線是位於地表下 2 至 6 公尺，於 6 公尺以下所測得之低電阻推測可能是 3D 效應的影響，管線另一端之低電阻映射至測線的深度上；隨著與管線邊緣距離增加至 9 公尺之 L5，已幾乎不受 3D 效應之影響。由此兩者結果可知，管線所造成之 3D 效應並不明顯，但隨著管線尺寸之增加，其 3D 效應之影響會隨之增加。

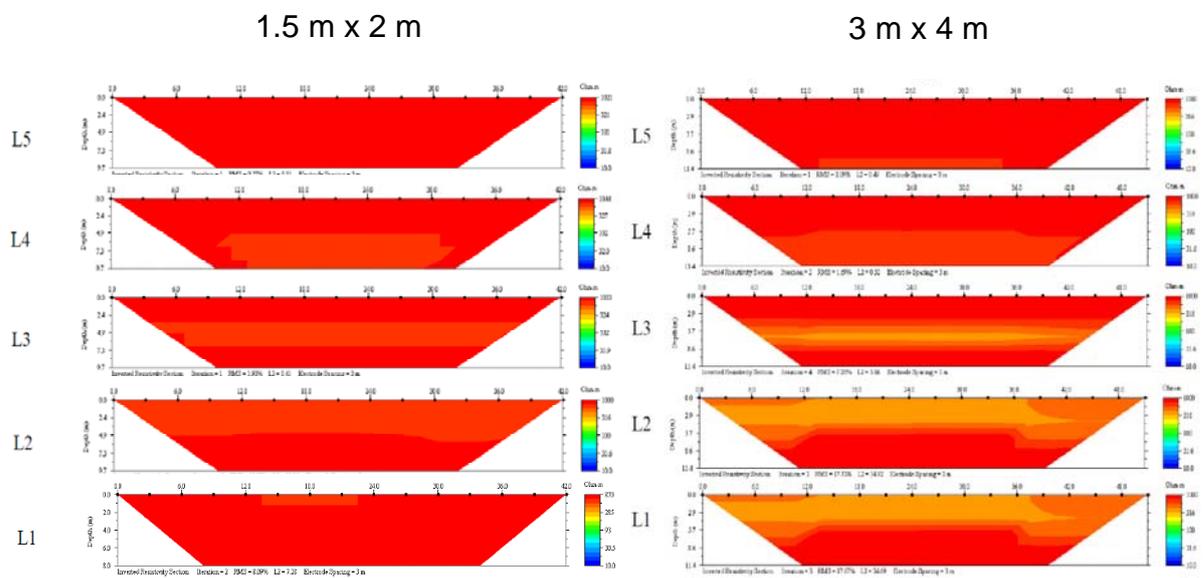


圖 5-8 具管線地層模型-尺寸影響

### 5.1.2.3 管線埋設深度之影響

在探討管線埋設深度之影響中，規劃兩類不同管線尺寸之地層模型與施測參數：D-1 與 D-2，整理如表 5-2 所示，採用 n 值為 0.1 之地層電阻率比，R2 為 1000 ohm-m，R1 為 100。在 D-1 地層中，管線斷面尺寸為 1.5(寬) x 2(深) 公尺，埋設地表(管線最頂端)，佈有五條測線，測線與測線間距為 3 公尺，電極棒間距為 3 公尺，測線

長 42 公尺；在 D-2 地層中，管線斷面尺寸為 1.5(寬) x 2(深) 公尺，埋設深度為 4 公尺(管線最頂端)，佈有五條測線，測線與測線間距為 3 公尺，電極棒間距為 3 公尺，為有足夠探測深度，測線長 51 公尺。

表 5-2 D 類地層模型與施測參數

	n	R1 (ohm-m)	R2 (ohm-m)	dy <sub>p</sub> (m)	dz <sub>p</sub> (m)	Dep (m)	Dx (m)	Dy (m)	L (m)
D-1	0.1	100	1000	1.5	2	0	3	3	42
D-2	0.1	100		1.5	2	4	3	3	51

如圖 5-9 所示，管線埋入深度為 0m 之地層，L2 測線位於管線邊緣，L1 距管線邊緣 1.5 公尺，L3-L5 測線分別距管線邊緣 3 公尺、6 公尺以及 9 公尺，L1 之結果顯示在地表至深度約 2.5 有低電阻存在，根據所設定之地層模型，管線是位於地表下 0 至 2 公尺，於 2 公尺以下所測得之低電阻推測可能是 3D 效應的影響。管線另一端之低電阻映射至測線的深度上，亦可能是解析度不足造成(電極棒間距 3 公尺，最佳解析度約 1.5 公尺，隨深度增加將有所降低)；而至距管線邊緣 1.5 公尺之 L1，其所顯示之低電阻區約在地表下約 2.5 公尺至 6 公尺處，明顯是受到 3D 效應之影響，隨著與管線邊緣距離增加至 6 公尺之 L4，已幾乎不受 3D 效應之影響。

管線埋入深度為 4m 之地層，位於管線邊緣之 L2 受到的 3D 效應影響已降低，僅顯示有較地層電阻稍低之低電阻存在，而當與管

線邊緣距離增加，3D 效應的影響降低的很快，於 L1 已不甚明顯，至 L3 時已幾乎沒有影響。

比較兩者之結果可知，於電阻率比相同的情況下，除緊鄰在管線邊緣之 L1 測線外，同樣尺寸之管線的深度對 3D 效應之影響差異不大，亦即，在地電阻探測中，3D 效應主要之影響範圍是管線與測線的水平距離有關。

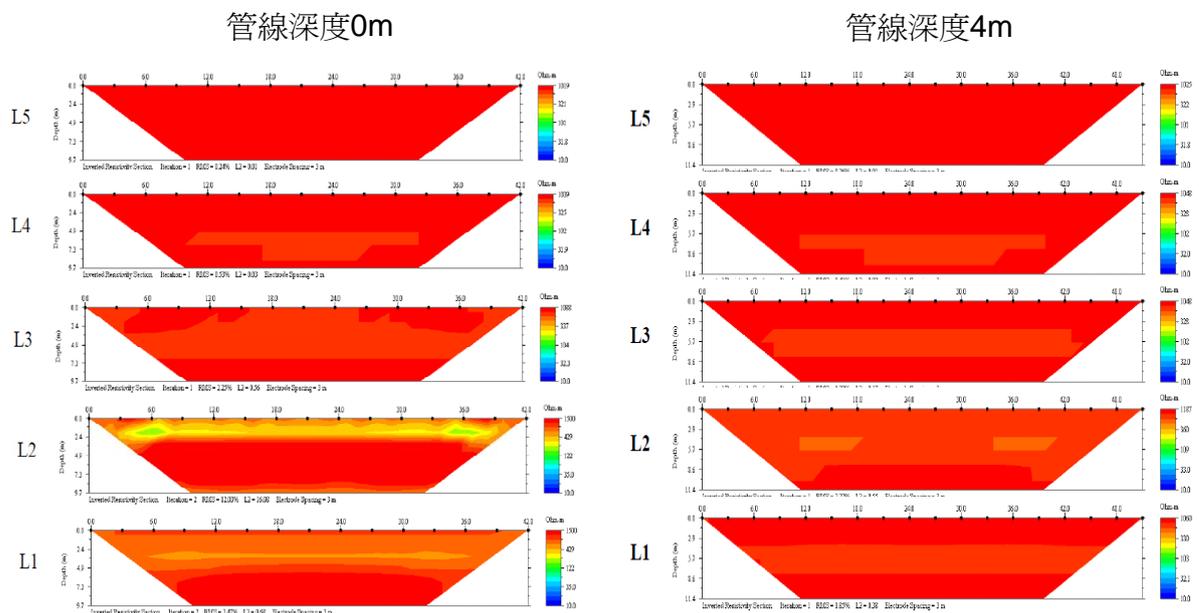


圖 5-9 具管線地層模型-埋入深度影響

#### 5.1.2.4 電阻率比之影響( $n=R1/R2$ )

在 P-1 地層中之 L3 測線中採用四種不同  $n$  值之地層電阻率比( $n = 0.01$ 、 $0.05$ 、 $0.1$ 、 $0.25$ )，固定  $R2$  為  $1000 \text{ ohm-m}$ ，其  $R1$  分別為  $10$ 、 $50$ 、 $100$  以及  $250 \text{ ohm-m}$  進行比較。

採用 P-1 地層之 L-3 調整其電阻率比之結果如圖 5-10 所示，當兩者電阻率比為  $0.01$  時，距離管線邊緣 3 公尺之 L3 測線其所顯示之

低電阻區約在地表下約 5 公尺處，根據所設定之地層模型，管線是位於地表下 2 至 4 公尺，於 4 公尺以下所測得之低電阻推測可能是 3D 效應的影響，隨著與測線距離的增加而映射至測線下方，隨著電阻率比的增加，此 3D 效應之影響越不明顯，至電阻率比為 0.2 時，已幾乎沒有影響。

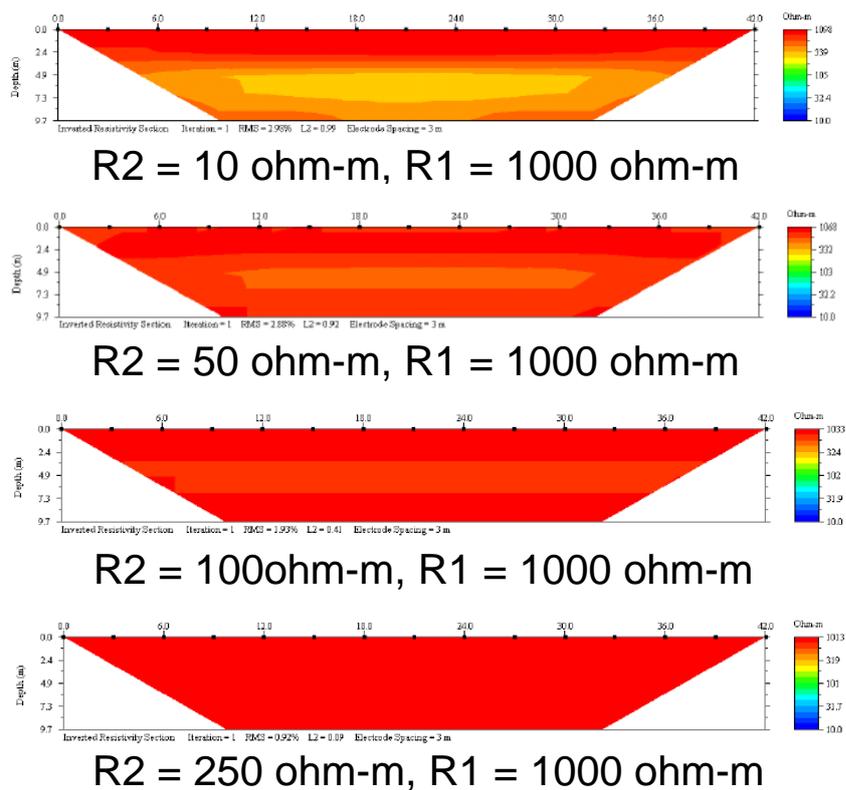


圖 5-10 具管線地層模型-電阻率比之影響

### 5.1.2.5 三維效應影響之距離

為了解具管線地層之 3D 效應影響範圍，在距管線邊緣不同距離下佈設測線，如圖 5-7 所示，採用 P-1 地層，電阻率比設為 0.05，將加以比較在不同距離時之影響範圍。

結果如圖 5-11 所示，L2 測線位於管線邊緣，L1 距管線邊緣 1.5

公尺，L3-L5 測線分別距管線邊緣 3 公尺、6 公尺以及 9 公尺，L1 之結果顯示在深度約 2.5 至 6.5 公尺有低電阻存在，根據所設定之地層模型，管線是位於地表下 2 至 4 公尺，於 4 公尺以下所測得之低電阻推測可能是 3D 效應的影響，管線另一端之低電阻映射至測線的深度上；而至距管線邊緣 1.5 公尺之 L1，其所顯示之低電阻區約在地表下約 5 公尺處，明顯是受到 3D 效應之影響，隨著與管線邊緣距離增加至 6 公尺之 L4，已幾乎不受 3D 效應之影響。

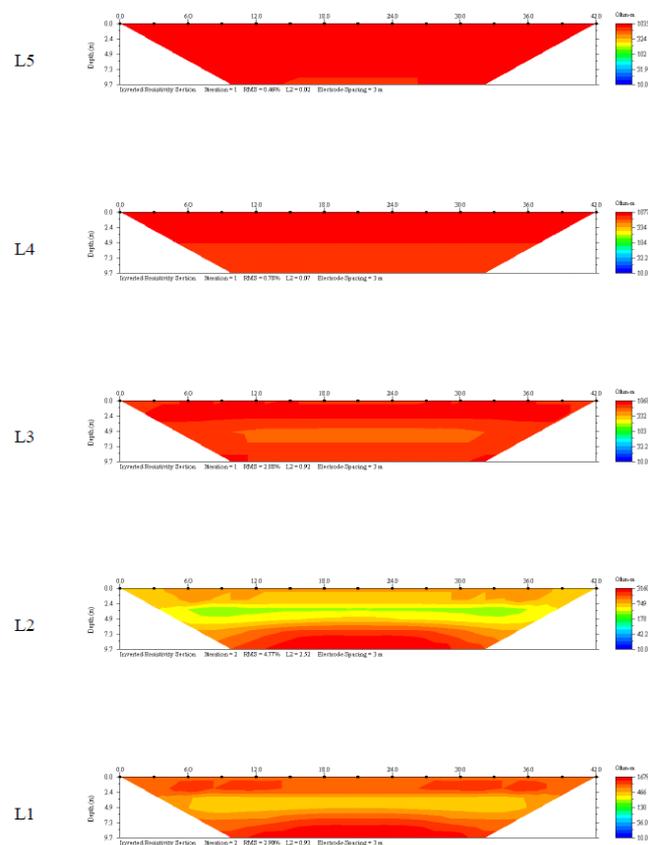


圖 5-11 具管線地層模型-3D 效應影響範圍

### 5.1.2.6 電極棒間距之影響

為了解在管線地層中電極棒間距做為 3D 效應影響範圍之正規

化參數是否可行，規劃了與 P-1 模型僅在電極棒間距上有差異之地層模型進行比較，施測參數整理如表 5-3，採用 n 值為 0.1 之地層電阻率比，R2 為 1000 ohm-m，R1 為 100ohm-m。在 P-1 地層中，管線斷面尺寸為 1.5(寬) x 2(深) 公尺，埋設深度為 2 公尺(管線最頂端)，佈有五條測線，測線與測線間距為 3 公尺，電極棒間距為 1.5 公尺，測線長 42 公尺。

表 5-3 DX 類地層模型與施測參數

	n	R1 (ohm-m)	R2 (ohm-m)	dy <sub>p</sub> (m)	dz <sub>p</sub> (m)	Dep (m)	Dx (m)	Dy (m)	L (m)
DX	0.1	100	1000	1.5	2	2	1.5	3	42

結果如圖 5-12 所示，L2 測線位於管線邊緣，L1 距管線邊緣 1.5 公尺，L3-L5 測線分別距管線邊緣 3 公尺、6 公尺以及 9 公尺，在電極棒間距為 3 公尺之 L1 結果顯示在深度約 2.5 至 6.5 公尺有低電阻存在，根據所設定之地層模型，管線是位於地表下 2 至 4 公尺，於 4 公尺以下所測得之低電阻推測可能是 3D 效應的影響，管線另一端之低電阻映射至測線的深度上；而至距管線邊緣 1.5 公尺之 L3，其所顯示之低電阻區約在地表下約 5 公尺處，明顯是受到 3D 效應之影響，隨著與管線邊緣距離增加至 6 公尺之 L4，已幾乎不受 3D 效應之影響。而電極棒間距為 1.5 公尺之結果與電極棒間距為 3 公尺之結果相比，除因使用較小的電極棒間距而有較佳的解析度之外，兩者

在 3D 效應之影響空間上幾乎一樣，皆是要到達距管線邊緣約 6 公尺之 L4 才不受 3D 效應的影響，此結果與斷層地形所得結果相同，其顯示以電極棒間距做為 3D 效應影響空間的正規化參數並不恰當，因為其影響的距離並不隨著電極棒間距變小而變小。

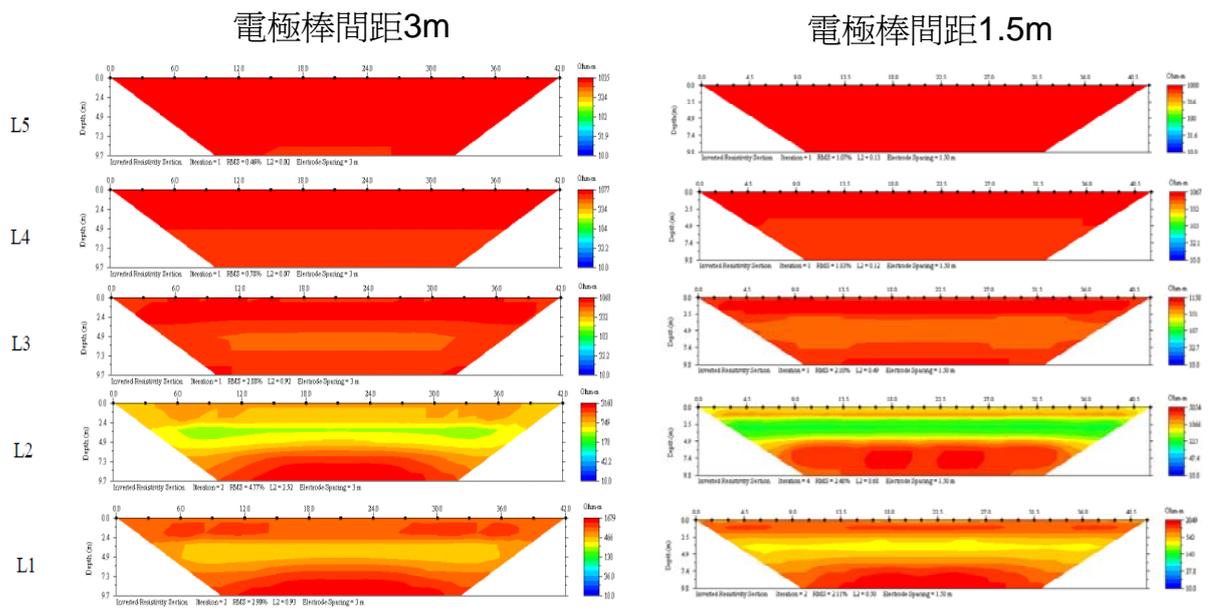


圖 5-12 具管線地層模型-3D 效應影響範圍控制因子

## 5.2 映射模型

由上述綜合之討論結果，可知 3D 效應可視為是在垂直側線方向上映射在側線上的結果，因此在此針對測線與斷層走向夾一小角度(<45 度)之情形提出一簡單之映射模型。

如圖 5-13(c)所示，假設有一與斷層夾  $\theta$  角之 2D 地電阻測線欲進行施作，原來測線下方之剖面圖如圖 5-13(d)所示，則以映射模型對此地層進行模擬可得圖 5-13(b)之推測受 3D 效應影響之地層剖面圖。此映射

模型主要是將高電阻區視為 3D 效應之影響區域，此區域之範圍的訂定是由高低電阻交界處至垂直測線至斷層為 6 公尺之處止，如圖 5-13(c) 所示)，此一 3D 效應影響區可區分為兩部份，一部份是近地表影響區，另一部份是深處影響區，在近地表影響區中，低電阻與高電阻交界位置會往高電阻側移動 3 公尺，如圖 5-13(b)所示，而在深處影響區處，其影響範圍是與測線位置處垂直測線方向之剖面有關，如圖 5-13(a)所示，在深處影響區中測線上某一處的垂直測線方向剖面 AA'，在此剖面上之低電阻構造將會以距離轉換為深度的方式映射至測線下方，而其映射之距離是在 3 公尺後至最深探測深度的範圍，如 Fig.13a 所示，將在此範圍內的低電阻換為深度表示即可，如圖 5-13(b)所示。在此要特別說明，此映射模型可簡單將測線與斷層走向夾一小角度之地層所可能遭遇的 3D 效應影響進行模擬，惟此模擬結果主要是在範圍之定義上，並未考慮其影響之強弱考慮進去，一般而言，在深度影響區內。低電阻所在與測線距離越遠其會造成的電阻下降情況會越低。

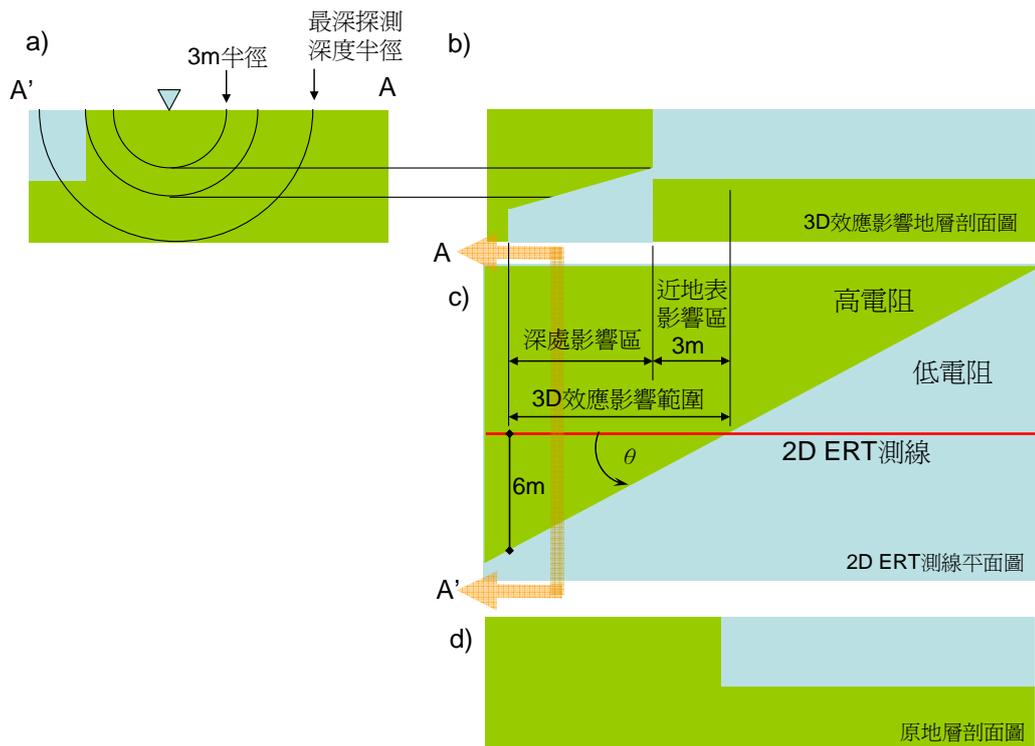


圖 5-13 斷層地層映射模型示意圖

### 5.3 現地試驗案例討論

#### 5.3.1 金屬管線地層

現地試驗位於鯉魚潭給水廠中社段，此管線直徑 2 公尺埋設深度約 2 公尺，採用 3 公尺電極棒間距，與數值模擬之 P-1 相似，將現地結果與 P-1  $n=0.001$  之結果進行比對，由於現場土壤非均質，因此其結果不若數值模擬中明確，以現地之 L1 測線結果而言，數值模擬之結果可明確探得管線底部而不受低電阻材料存在的遮蔽，因此，現地 L1 結果可能是受現地土壤情形之影響，而使得管線下部邊界無法測得。撇開現地土壤不均質所可能造成的差異，就 3D 效應的影響而言，兩者之結果尚屬吻合，在約 6 公尺的距離，3D 效應的影響已不明顯。

## 六、結論與建議

### 6.1 結論

#### 6.1.1 斷層地層

1. 當電場在地層中發散時，雖能量主要是在測線上，但亦有相當能量分佈在測線側向的低電阻率土層處，而使得在側向上的距離所造成的較低電阻情形於反算中解算為在深度上的低電阻存在。因此，當測線距離遠離至 6 公尺之  $L5$  時，3D 效應所造成之影響已不明顯，此結果在不同的三種  $n$  值地層中皆可觀察到。
2. 測線與斷層走向夾角於 45 度至 60 度之間時，會有 3D 效應產生，且其影響主要是在高電阻率側，且夾角度並不影響 3D 效應的影響程度，主要影響其程度者是測線下方高低電阻率土層之比例。
3. 隨著所夾角度增加，3D 效應的影響程度會下降，當角度大於 45 度後，3D 效應可予以忽略；而根據測線與斷層走向平行之結果顯示，當測線在低電阻率側時，不論  $n$  值，3D 效應之影響範圍至多為 3 公尺，而當測線在高電阻率側時，3D 效應之影響範圍至多為 6 公尺；此外，當探測深度可超越階梯地層之厚度時，於相同的電極棒間距下，該厚度並不影響 3D 效應之影響空間範圍。

#### 6.1.2 金屬管線地層

1. 地層電阻率與管線電阻率之比值  $n$  會影響 3D 效應的影響空間，當  $n$  值增加時，影響範圍會快速的降低。

2. 電阻率比相同的情況下，除緊鄰在管線邊緣之測線外，同樣尺寸之管線的深度對 3D 效應之影響差異不大，亦即，在地電阻探測之測深中，3D 效應主要之影響範圍是與管線映射在地表處之位置與測線的距離有關。
3. 對管線地層而言，其 3D 效應之主要影響因子有電阻率比值  $n$  以及管線尺寸。綜合本次研究案例，在任何地層中，3D 效應之影響空間至多不超過 6 公尺。

### 6.1.3 探測前的數值模擬有以下之優點:

1. 得知較佳排列方式、探測深度及解析的能力。如雙極法探深能力高，但對淺層相對解析力較差，深層探勘時不宜採用。
2. 在現場限制之下，可以透過模擬找到可行的探測方式。
3. 瞭解地電阻方法的能力，不過份解釋。同時可以充份的利用其優點。
4. 對於測點的空間分佈，可以透過事先的模擬，提昇探查的效率及結果的信心。

## 6.2 建議

1. 以數值模擬探討 3D 效應方面，應可模擬更為複雜的地質分佈型態，並考慮其他電極排列下的模擬成果，更能清楚了解不同排列方法之適用性。
2. 數值模擬有賴現地試驗之驗證，然而試驗場址的地層資料取得不易，若時間許可，應增加蒐集現地資料，以提昇數值模擬與現地試驗資

料之比對數，更能印證數值模擬的可靠度。

3 國內目前沒有一座標準地球物理探測試驗場，以進行各種調查試驗方法的比較和檢核，因此標準地球物理探測試驗場的推動刻不容緩。



## 參考文獻

1. 尤仁弘，「應用地電阻影像法於壩體潛在滲漏調查之研究」，國立交通大學，碩士論文，民國 95 年 7 月。
2. 姚奕全，「應用地電阻法於崩積層含水特性調查與監測之初探」，國立交通大學，碩士論文，民國 96 年 7 月。
3. 梅興泰、鄭富書、蔡道賜，「地電阻影像剖面法對非均質地下實體之模擬分析」，技術學刊第二十一卷第四期，民國 95 年。
4. 楊証傑，「ERT 在地工調查應用之問題評析與空間解析度探討」，國立交通大學，碩士論文，民國 94 年 7 月。
5. Barker, R. and Moore, J., 1998, "Application of Time-Lapse Electrical Tomography in Groundwater Studies," *Leading Edge*, Vol. 17, No. 10, pp. 1454-1458.
6. Constable et al., 1987, "Occam's Inversion A Practical Algorithm for Generating Smooth Models from Electromagnetic Sounding Data," *Geophysics*, Vol. 52, No. 3, pp. 289-300.
7. deGroot-Headlin and Constable, S., 1990, "Occam's Inversion to Generate Smooth, Two-Dimensional Models from Magnetotelluric Data," *Geophysics*, Vol. 55, No. 12, pp. 1613-1624.
8. Dey, A., and Morrison, H. F., 1979, "Resistivity Modeling for Arbitrarily Two-dimensional Structures," *Geophysical Prospecting* 27, pp. 106-136.

9. deGroot-Hedlin,C., and Constable,S., 1990,"Occam's Inver- sion to Generate Smooth,Two-dimensional Models From Magnetotelluric Data,"Geophysics 55,pp.1613-1624.
- 10.Ghosh, D.P, 1971,"The Application of Linear Filter Theory to the Direct Interpretation of Geoelectrical Resistivity Sounding Measurement," Geophysical Prospecting 19, pp.192- 217.
- 11.Ghosh,D.P., 1971,"Inverse Filter Coefficients for the Com- putation of Apparent Resistivity Standard Curves for a Horizontally Stratified Earth," Geophysical Prospecting 19, pp. 769-775.
- 12.Hallof, P. G.,Reconnaissance and detailed geophysical results, Granite Mountain Area Pershing Country, Nevada. In Fink, J. B., McAlister, E. O., Sternberg, B. K., Wiedu- wilt,W. G. and Ward, S. H. (Eds),1990,"Induced Po- larization : Application and Case Histories : Investigations in Geophysics 4,SEG, pp.325-353.
- 13.Inman, J.R, 1975 ,"Resistivity Inversion with Ridge Regression," Geophysics, Vol. 40, No. 5, pp. 798-817.
- 14.Jupp,D.L.B.,and Vozoff,K., 1975 ,"Stable Iterative Methods for Geophysical Inversion,"Geophysical J.Royal astr.Soc.42, pp. 957-976.
- 15.Loke, M. H., 2003 ,"Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys," Geotomo Software, Malaysia.

16. Loke, M. H., Acworth I. and Dahlin, T., 2003, "A Comparison of Smooth and Blocky Inversion Method in 2D Electrical Imaging Surveys," *Exploration Geophysics*, Vol. 34, pp. 182-187.
17. Loke, M. H., and Barker, R. D., 1996, "Rapid Least –squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections," *Geo- physical Prospecting* 44, pp. 499-523.
18. Loke, M.H., 1999, RES2DMOD ver.2.2, Geometrics, Inc.
19. Loke, M.H., 2001, Tutorial : 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys, Geometrics, Inc
20. Lines, L.R., and Treitel, S., 1984, Tutorial : A review of Least-squares Inversion and Its Application to Geophysical Problems," *Geophysical Prospecting* 32, pp. 159-186.
21. Mooney, H.M, Orellana, E , Pickett, H , and Tornheim, L, 1966, "A Resistivity Computation Method for Layered Earth Models," *Geophysics* 21, pp. 192-203.
22. Nostrand, van, R. G. and Cook K. L, 1966 , USGC Professional Paper No. 49.
23. Olayinka, A. I. and Yaramanic, U., 2000, "Use of Block Inversion in the 2D Interpretation of Apparent Resistivity Data and its Comparison with Smooth Inversion," *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 45, pp. 63-81.
24. O'neil, D. J., and Merrick, N. P., 1984, "A Digital Linear Filter for

- Resistivity Sounding with a Generalized Electrode Array,” *Geophysical Prospecting* 32, pp. 105-123.
- 25.Reynolds, J. M., 1997, “An Introduction to Applied and Environmental Geophysics,” Wiley.
- 26.SEGJ, 2004, “Application of Geophysical Methods to Engineering and Environmental Problems,” The Advisory Committee on the Standardization.
- 27.Schlumberger,C, 1920,Etude sur la Prospection electrique du sous-sol, Gauthier-Villars et.Cie,Paris.
- 28.Smith, N. C., and Vozoff, K., 1984,“Two-dimension DC Resistivity Inversion for Dipole-dipole Data,”*IEEE Transaction.Geoscience and Rem. Sens.*, GE-22, pp. 21-28.
- 29.Sasaki,Y., 1992,“Resolution of Resistivity Tomography Inferred From Numerical Simulation,” *Geophysical Prospecting* 40, pp.453-464.
- 30.Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E., 1990, “Applied Geophysics 2<sup>nd</sup>,” Cambridge University Press.
- 31.Yang, X. and Lagmanson, M., 2006, “Comparison of 2D and 3D Electrical Resistivity Imaging Methods,” *Advanced Geosciences*.