

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文



ERT 在地工調查應用
之問題評析與空間解析度探討
Evaluation and Spatial Resolution of ERT
for Geotechnical Investigation

研究生：楊証傑

指導教授：林志平 博士

中華民國九十四年七月

ERT 在地工調查應用之問題評析與空間解析度探討

Evaluation and Spatial Resolution of ERT for Geotechnical Investigation

研究生：楊証傑

Student： Cheng-Chien 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
July 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年七月

ERT 在地工調查應用之問題評析與空間解析度探討

研究生：楊証傑

指導教授：林志平 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

中文摘要

直流電阻法在過去幾年來，由於地電阻儀器設備改進與反算方法發展成熟，探測方式從一維度進入二維與三維度，施測快速有效率。ERT 施測可獲得大範圍二維電阻率影像剖面，呈現地層電阻率變化情形，因水的電阻率值與地質材料電阻率質差異甚大，而時常應用在環境水文之方面調查，例如地下水位與土壤污染探測，近年來 ERT 在地工調查案例也逐漸增加，如斷層調查、崩塌區調查、土壩滲漏調查與垃圾掩埋場滲漏監，但 ERT 之空間解析度仍存在許多疑慮，調查資料反算所得到之電阻率影像剖面受到雜訊與空間靈敏度之影響，常為真實電阻率剖面經某種程度模糊化之結果。本研究在不同地質構造條件下進行 ERT 施測調查地質構造，探討 ERT 之潛在問題，案例分析結果指出，ERT 影像之色階呈現會影響資料判識，深層解析度較不理想，且邊界條件與三維效應也可能影響施測結果。本研究進而以 Res2dmod 軟體模擬五種地層模型之電探資料，以探討一維垂直解析度、一維側向解析度與二維空間解析度，由模擬結果可以定性瞭解空間解析度如何受到深度、幾何變化與電阻率變化之影響。

關鍵字：地電阻影像法、視電阻率、空間解析度

Evaluation and Spatial Resolution of ERT for Geotechnical Investigation

Student : Cheng-Cheng Yang

Advisor : Dr. Chih-Ping Lin

Department of Civil Engineering
National Chaio Tung University

Abstract

In the last few years, the measurements from 1-D to 2-D or 3-D have been more rapid and effective due to the improvement of electrical instrument, and the development of inversion method is getting maturity. ERT provides the continuous image of the subsurface in 2-D and it gives an overview of the variations of the ground resistivity. As water is low resistivity material and the resistivity difference between water and soil material is large, ERT has been using in detecting ground water and environmental pollution. It also applies in finding fault, landslide zone, dam leakage and landfill leakage monitoring. However, the spatial resolution of ERT still has a lot of doubts. The inversion of the measurement data usually shows some cloudy true-resistivity affected by noise and spatial sensitivity. Four ERT investigating cases are studied to discuss the potential problem, as the results shows, the different color map of ERT results will affect the judgments. The deeper the depth is, the worse the sensitivity performing the change of the subsurface is. The boundary condition and 3D effect also affect the measurement data. So we use Res2dmod as the software to simulate five numerical earth models and study the relations between the earth model and 1D vertical, lateral resolution and 2D spatial resolution. It shows that spatial resolution qualitative change due to depth, geometry size and different resistivity.

Key words: ERT, apparent resistivity, spatial resolution

誌謝

承蒙指導教授 林志平博士於研究所求學期間悉心指導，使本論文得以順利完成，除了在論文研究、專業知識上的教誨及指導，幫助學生突破研究的瓶頸及獲得學識的增長，在求學的方法及平常待人處世的態度上也給予學生許多深刻的啟發，讓學生得以在研究所兩年的求學過程中更加成長、茁壯，在此致上最誠摯的敬意及感謝。

於求學期間，承蒙廖志中教授、潘以文教授、黃安斌教授、單信瑜教授以及方永壽教授在學識上的指導，在此致上萬分謝意。

口試期間，良受蔡光榮教授、陳昭旭教授及古志生教授撥冗審閱本論文並提供許多寶貴的意見及建議，使本文得以更加完善，於此表示由衷感謝。

研究期間，幸蒙宗盛、志中、士弘、瑛鈞等博士班學長，育嘉、仁弘學弟等，以及同窗好友和翰、俊宏、秀隆、瑞廷、志偉等諸多同學給予研究上的協助及經驗分享，僅以此謝文獻上致謝意。

好友永瑞、師毅、桐樺、博鈞等，交大土木系壘的學長學弟妹們，很高興在交大的六年裡有你們的陪伴。

最後，感謝家人對我的栽培，一路走來若沒有你們的包容及關心，就沒有今日的我，僅以此文獻給我最親愛的家人。

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vii
圖目錄.....	viii
一、緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
二、文獻回顧.....	3
2.1 電學性質.....	3
2.2 地質材料導電特性.....	11
2.3 直流地電阻法原理.....	17
2.3.1 電位場於均質均向物質分佈.....	18
2.3.2 非均質地層影響.....	25
2.3.3 電極排列施測方法.....	31
2.4 地電阻影像剖面法.....	36
2.4.1 擬似深度.....	36
2.4.2 擬似地電阻率剖面.....	39
2.4.3 電極排列方式優缺點.....	41
2.5 正算模擬理論發展.....	51
2.6 反算分析理論.....	52
2.6.1 最佳化最小平方法(least-squares optimization).....	53
2.6.2 平滑束制最小平方法.....	54
2.6.3 重複再加權最小平方法.....	55
三、案例研究.....	57
3.1 寶山二號水庫-交大試驗場址.....	58
3.1.1 試驗儀器介紹.....	58
3.1.2 寶山二號水庫地質狀況.....	59
3.1.3 測線位置與施測參數.....	65

3.1.4 試驗結果.....	67
3.1.5 試驗討論.....	71
3.2 國立交通大學博愛校區.....	73
3.2.1 交通大學博愛校區地質狀況.....	73
3.2.2 測線位置與施測參數.....	74
3.2.3 試驗結果.....	79
3.2.4 試驗討論.....	86
3.3 恆春赤牛嶺東門溪.....	90
3.3.1 赤牛嶺地質狀況.....	90
3.3.2 測線位置與施測參數.....	92
3.3.3 試驗結果.....	96
3.3.4 試驗討論.....	100
3.4 三姓橋.....	101
3.4.1 香山區地質背景.....	101
3.4.2 測線位置與施測參數.....	102
3.4.3 試驗結果.....	105
3.4.4 試驗討論.....	107
3.5 地電阻影像剖面法問題評析.....	108
3.5.1 影像色階不同對於判識影響.....	108
3.5.2 層面位置辨識問題.....	109
3.5.3 側向涵蓋範圍不全.....	109
3.5.4 現地情況不符二維假設.....	110
四、地電阻影像解析度探討.....	111
4.1 正算模型參數.....	113
4.2 垂直解析度探討.....	115
4.2.1 單一水平界面構造模型.....	115
4.2.2 水平夾層界面構造模型.....	131
4.3 側向解析度探討.....	144
4.3.1 垂直界面構造模型.....	144
4.3.2 垂直夾層界面構造模型.....	146
4.4 二維解析度探討.....	150
4.4.1 模型參數.....	150
4.4.2 二維度模型反算結果探討.....	150
五、結論與建議.....	153

5.1 結論	153
5.2 建議	158
參考文獻	159
附錄A-資料反算分析流程	164
附錄B-試驗場址鑽孔柱狀圖	168
附錄C-單一水平界面靈敏度分析	183
附錄D-單一水平界面Wenner反算結果	191
附錄E-單一水平界面Pole-Pole反算結果	197
附錄F-水平夾層界面靈敏度探討	203
附錄G-水平夾層界面最大靈敏度影像圖	227
附錄H-水平夾層界面反算結果	241
附錄I-垂直界面解析度探討	249
附錄J-垂直夾層界面解析度探討	255
附錄K-二維解析度探討	271



表目錄

表 2.1	材料介電係數(修改自Keller,1966)	5
表 2.2	相對導磁係數表(修改自Keller,1996、Cheng,1989).....	8
表 2.3	一些常見的離子移動率(Keller,1966)	10
表 2.4	不同電極排列的擬似深度參數(Edwards 1977) 。	38
表 2.5	電極排列法之橫向資料涵蓋範圍比較(最小單位電極間距等於a)	48
表 2.6	電極排列幾何參數	50
表 3.1	SYSCAL Pro Switch 48 儀器功能規格	60
表 3.2	地質剖面線A-A'的側向岩層變化	62
表 3.3	地質剖面線B-B'的垂直岩層變化	62
表 3.4	寶山二號水庫試驗場址施測參數	65
表 3.5	交大博愛校區測線 1 施測參數	78
表 3.6	交大博愛校區測線 2 施測參數	78
表 3.7	恆春東門溪赤牛嶺水位監測資料	93
表 3.8	恆春東門溪場址施測參數	93
表 3.9	新竹市三姓公溪北岸階地鑽探內容列表(中央地質調查所，2003)	103
表 3.10	三姓橋地電阻測線參數	104
表 4.1	模型網格深度值	114
表 4.2	反射係數與電阻率參數表	116
表 4.3	施測模型Wenner與Pole-Pole擬似深度值	118
表 4.4	反算模型層數之深度位置	119
表 4.5	夾層中心位置與厚度參數表	132

圖目錄

圖 2.1	外加電場造成電荷重新排列產生表面電荷(Cheng,1989)	6
圖 2.2	電流頻率對導電度與介電常數影響簡圖(Keller,1966)	6
圖 2.3	影響電阻的幾何因子(Burger, 1992)	11
圖 2.4	地質材料電阻率值範圍(摘自Loke, 2003)	12
圖 2.5	飛白石中黃鐵礦含量對電阻率的關係(Keller,1966)	13
圖 2.6	多孔隙介質電流傳遞路徑示意圖	14
圖 2.7	(a)未飽和但高於臨界飽和度之土壤；(b)未飽和且低於臨界飽和度之土壤，減少孔隙水連接通路(Keller,1966)。	16
圖 2.8	溫度對電阻率影響圖(Keller, 1966)	17
圖 2.9	點電流源於地表產生的電位分布與電流方向(Telford, 1990)	20
圖 2.10	地表佈設雙電流極與雙電位極示意圖(Telford, 1990)	22
圖 2.11	雙電流極產生的電位變化(Telford, 1990)	22
圖 2.12	決定水平方向電流密度空間參數(Telford, 1990)	23
圖 2.13	水平電流密度與電流極間距和深度變化關係(Telford, 1990)	24
圖 2.14	通過 z_1 以下之電流百分比(Telford, 1990)	25
圖 2.15	介質 ρ_1 大於 ρ_2 ，電流在邊界上的方向改變	26
圖 2.16	電位受邊界影響的計算參數	27
圖 2.17	假設電源於A位置上，在三種不同介質下，(a)求M位置的參數與(b)反射路徑(Keller, 1966)	28
圖 2.18	計算M位置電位考慮的其他四種反射路徑(Keller, 1966)	29
圖 2.19	電流百分比在單一水平界面下的變化，電流百分比與反射係數、界面位置的關係圖(Burger, 1992)	31

圖 2.20 常見地表施測電極排列法.....	35
圖 2.21 靈敏度方程式推導的參數，以Pole-Pole電極排列推導。(Loke 2003)	37
圖 2.22 一維靈敏度曲線，(a)Pole-Pole電極排列(b)Wenner電極排列(Loke 2003).....	37
圖 2.23 Wenner電極排列施測流程	40
圖 2.24 Pole-Pole電極排列施測方法(游峻一 2003)	41
圖 2.25 Wenner 2D-靈敏度剖面(Loke, 2003)	43
圖 2.26 Pole-Pole 2D-靈敏度剖面(Loke, 2003).....	43
圖 2.27 Wenner-Schlumberger 2D-靈敏度剖面(Loke, 2003)	44
圖 2.28 順、反Pole-Dipole施測示意圖(Loke, 2003)	45
圖 2.29 Pole-Dipole 2D-靈敏度剖面(Loke, 2003).....	46
圖 2.30 Dipole-Dipole 2D-靈敏度剖面(Loke, 2003)	47
圖 2.31 Dipole-Dipole 不同n，a參數，展距相同(Loke, 2003).....	51
圖 3.1 寶山二號水庫交大試驗場址位置.....	63
圖 3.2 寶二水庫交大試驗場址地質圖.....	64
圖 3.3 地質剖面圖A-A'和B-B'.....	64
圖 3.4 地電阻測線與鑽探孔位置.....	66
圖 3.5 寶山二號水庫測線 1 電阻率影像剖面.....	69
圖 3.6 寶山水庫測線 2 電阻率影像剖面.....	70
圖 3.7 交大博愛校區區域地質圖(中央地質調查所-地質資料整合查詢系 統).....	76
圖 3.8 交大博愛校區測線位置圖.....	77
圖 3.9 交大博愛校區測線 1-1 電阻率影像剖面	82

圖 3.10 交大博愛校區測線 1-2 電阻率影像剖面	83
圖 3.11 交大博愛校區測線 2-1 電阻率影像剖面	84
圖 3.12 交大博愛校區測線 2-2 電阻率影像剖面	85
圖 3.13 測深參數n從 10 降為 7(單位電極間距等於 5 公尺).....	89
圖 3.14 恆春東門溪區域地質圖(中央地質調查所).....	90
圖 3.15 東門溪場址測線和鑽孔位置圖(水利規劃試驗所, 2004).....	94
圖 3.16 東門溪調查區域柵狀地質示意圖(水利規劃試驗所, 2004).....	94
圖 3.17 恆春赤牛嶺地質剖面圖 (a) A-A' (b) B-B' (c) C-C' (水利規劃試驗所, 2004).....	95
圖 3.18 恆春赤牛嶺測線 1 電阻率影像剖面.....	98
圖 3.19 恆春赤牛嶺測線 2 電阻率影像剖面.....	98
圖 3.20 測線 3 電阻率影像剖面.....	99
圖 3.21 測線 4 電阻率影像剖面.....	99
圖 3.22 香山區域地質圖與新竹斷層位置(中央地質調查所, 2003).....	103
圖 3.23 三姓公溪谷口於FT1 台階處之鑽孔與測線位置圖(中央地質調查所)	104
圖 3.24 三姓橋 Wenner 電阻率影像剖面圖	106
圖 3.25 三姓橋 Pole-Pole 電阻率影像剖面圖	106
圖 4.1 空間解析度探討流程圖	112
圖 4.2 正算模型網格示意圖.....	114
圖 4.3 單一水平界面構造示意圖.....	116
圖 4.4 界面於深度 10 公尺之 Wenner 靈敏度與擬似深度曲線圖	123
圖 4.5 界面於深度 20 公尺之 Wenner 靈敏度與擬似深度曲線圖	123
圖 4.6 Wenner 最大靈敏度影像圖	124

圖 4.7 Wenner最大正規化靈敏度影像圖	124
圖 4.8 Wenner最大靈敏度隨深度降低趨勢圖($k=0.6,0.9,-0.6,-0.9$).....	125
圖 4.9 Wenner最大靈敏度隨反射係數變化($Z_i=2,5,10,15,20m$).....	125
圖 4.10 Wenner最大正規化靈敏度與反射係數關係	126
圖 4.11 界面位於深度 10 公尺，Wenner反算模型結果	129
圖 4.12 界面位於深度 20 公尺，Wenner反算模型結果	130
圖 4.13 水平夾層構造模型示意圖	131
圖 4.14 Wenner靈敏度曲線(夾層中心等於 25 公尺，厚度等於 12 公尺)	136
圖 4.15 Wenner最大正規化靈敏度影像圖($t=12m$)	137
圖 4.16 Wenner最大正規化靈敏度影像圖($Z_c=25m$)	137
圖 4.17 Wenner夾層反算分析結果(Z_c 等於 10 公尺， t 等於 8 公尺).....	141
圖 4.18 Wenner夾層反算分析結果(與圖 4.17 比較在相同 k 值之下，改變 Z_c 或 t 參數之差異)	142
圖 4.19 Wenner靈敏度分析，當反射係數等於 0.6	143
圖 4.20 垂直界面示意圖	144
圖 4.21 垂直界面反算結果($k=0.6$).....	145
圖 4.22 垂直夾層界面	146
圖 4.23 垂直夾層界面反算分析側向變化圖	149
圖 4.24 ρ_2 方形介質於均勻介質 ρ_1 中示意圖	150
圖 4.25 方形介質與水平夾層及垂直夾層反算結果比較.....	152

一、緒論

1.1 研究動機

數十年以來，直流電阻法之發展從一維度探測開始，應用在調查地下水位、探礦等問題上，隨著科技迅速進步，儀器上改良使得量測更有效率之外，電腦運算速度大幅提升，造就二維度探測(或稱地電阻影像法, ERT)為目前常見於探查大地工程問題上之方法，例如斷層、崩塌地、礦坑、土石壩滲漏、現地透水係數等，此外環境汙染調查、垃圾掩埋場滲漏、海水入侵等環境工程課題上也常用電探方法進行調查或監測。

傳統地工調查上以鑽孔方式獲取地質真實資訊，其缺點為獲得資訊為點資訊，且價格昂貴，反觀地球物理探勘方法多屬非破壞性，用不同探測原理與方法，能快速而且經濟地獲得線或面之地層物理特性，如震測法得到地質材料力學參數，電探法獲得地質電學性質分佈，但其空間解析度有某種程度上的限制。各取兩者優點，以鑽探點資料輔助解釋地球物理探勘方法所得地質材料性質，獲取大範圍資訊進而提供工程問題上所需解決方案。

電阻率值受多種因素影響，變化範圍廣，無法以單一參數定量描述電阻率值變化行為，也致使 ERT 施測結果之地電阻率影像剖面圖在未知地質構造與性質之下，無法明確獲知空間解析能力受何種因素影響。有鑑於此，本研究將探討 ERT 於地工調查上空間解析度受不同地質構造、電阻率參數影響產生的問題。

1.2 研究目的

本研究首先藉由四種不同地層條件下以五種不等進行 ERT 施測，從其電阻率剖面結果發現在判識電阻率變化界面上，產生對空間解析度能力受何種因素影響為主之問題。

藉由改變反射係數、界面位置與夾層厚度等參數，進行正算模擬及反算分析步驟，瞭解以 Wenner 與 Pole-Pole 兩種電極排列法之垂直空間解析度與側向解析度隨電阻率值大小、電阻率變化界面及電阻率夾層厚度參數變化行為，並在探討垂直空間解析度時加入靈敏度分析；進而再以方形介質模型探討其二維度空間解析能力。



二、文獻回顧

地球物理探測可應用於工程地質調查之地層構造探測、岩盤探測、地下埋設物探測及地下水調查各方面，依其探測物質性質不同可分為電探法、震測法與重力法等；電探法為探測地質材料電學性質，其中地電阻影像剖面法乃量測電阻率性質的電探方法之一。

2.1 電學性質

物質的電學性質包含三大類，分別為介電常數或電容率(dielectric constant)、導磁係數(permeability)以及導電度(conductivity)。以下分別介紹其特性：

(1) 介電常數：

理想介電質不存在自由電荷(free charge)，當外加一電場 E 於理想電介質，內部電荷不移動至表面產生自由電荷，也就是不改變電荷密度。一般介質電荷受到邊界束制，電場使內部電荷產生位移量，導致正負電荷重新排列，於表面形成表面電荷(bound charges)，形成極化現象(polarization)。

電荷位移量 D 稱為電通密度(electric flux density)或電位移(electric displacement)，與電場相關式為

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (2-1)$$

其中真空狀態下介電係數 ϵ_0 (permittivity)等於 8.85×10^{-12} F/m，單位為法拉第(Farad)每公尺；一般物質的介電係數與 ϵ_0 之比稱為介電常數或相對介

電係數 ϵ_r (Relative permittivity)。

一般常見的造岩礦物矽酸鹽類之介電常數範圍(如表 2.1)通常在 1~10 之間；純水介電常數則達 80，而含有金屬礦物材料例如鉛、鐵、錫等因含有多價數離子金屬，造成的電位移量大於低價離子電荷，多數的介電常數大於 10。

圖 2.1 表示電位移現象，於巨觀角度此電介質雖視為電中性，但受到外在電場影響，造成極化現象，形成一相反方向的內部電場，在微觀上對電介質內部和外部的電場會有所影響。

Abu-Hassanein 等(1996)認為直流電源會產生電勢能(electrokinetic)現象，進而改變土壤結構、含水量，以及孔隙水化學性質。

電荷極化現象之外，以離子鍵形成的材料，亦會產生離子極化；外加電場，使陽離子朝向負極移動，陰離子往正極移動。大部分造岩礦物主要以離子鍵結組成，例如矽酸鹽類礦物的石英、雲母、輝石等，因此地質材料所產生的電位移以離子極化現象為主(Keller and Frischknecht, 1966)。

介電常數與外加電流頻率的關係成反比。當頻率非常低時，可視為物質的表面呈現極化現象；頻率增加到高頻時，只剩下內部電子極化情形如圖 2.2 表示於不同頻率下物質之極化現象，由高頻率到低頻率包含以下四種極化現象，分別為電荷極化、離子極化、分子極化以及介面極化，其介電常數隨電流頻率增加而降低。因為在高頻率下之極化作用無法使電荷分離完全，並使電荷來回快速移動，進而增加導電度。

表 2.1 材料介電係數(修改自 Keller,1966)

材料名稱	化學成分	介電常數
空氣		1.0
純水	H ₂ O	81
方鉛礦(Galena)	PbS	17.85
閃鋅礦(Sphalerite)	ZnS	7.88
剛石(Corundum)	Al ₂ O ₃	10.98~13.22
錫石(cassiterite)	SnO ₂	23.39~23.95
赤鐵礦(Hematite)	Fe ₂ O ₃	24.97
白雲石(Dolomite)	CaMg(CO ₃) ₂	6.78~7.98
磷灰石(Apatite)	Ca ₅ (F,Cl)(PO ₄) ₃	7.40~10.49
硫酸鉛礦(Anglesite)	PbSO ₄	72.77~497.18
石膏(Gypsum)	CaSO ₄ ·2H ₂ O	5.39~11.97
輝石(Augite)	Ca(Mg,Fe,Al)(Al,Si) ₂ O ₆	6.89~8.59
黑雲母(Biotite)	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	6.19~9.30
白雲母(Muscovite)	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	6.19~7.99
正長石(Orthoclase)	KAlSi ₃ O ₈	4.50~5.80
斜長石(Plagioclase)	(Ca,Na)(Al,Si)AlSi ₂ O ₈	5.45~7.23
石英(Quartz)	SiO ₂	4.11~4.27

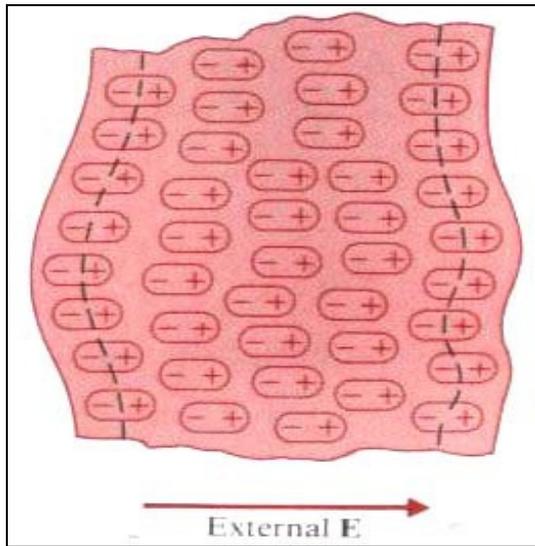


圖 2.1 外加電場造成電荷重新排列產生表面電荷(Cheng,1989)

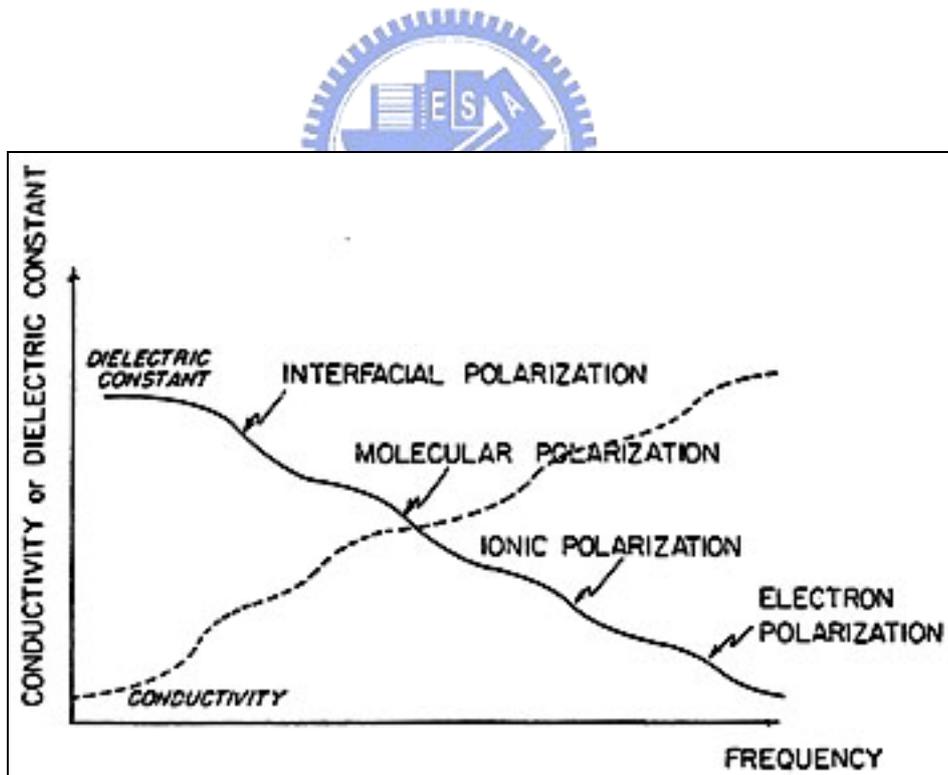


圖 2.2 電流頻率對導電度與介電常數影響簡圖(Keller,1966)

(2) 導磁係數:

導磁係數 μ 的定義是磁通密度 B (magnetic flux density)與磁場強度 H (magnetic field intensity)之比。2-2 式代表磁性材料被磁化的容易程度

$$\mu = \frac{B}{H} \quad ; \quad \mu = \mu_0 \mu_r \quad (2-2)$$

其中真空導磁係數 μ_0 等於 $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)單位為亨利(Henry)每公尺。相對導磁係數 μ_r 之值可將磁性材料分為以下三類；包含反磁性(diamagnetic)、順磁性(paramagnetic)以及強磁性(ferromagnetic)(如表 2.2)。當物質與外在磁場產生相反方向磁場稱為反磁性；若為相同方向則為順磁性。通常原子由於冷次效應(Lenz's Law)都具有反磁性，反磁性材料不存在永久磁性之特性，磁場移去同時則誘導磁場便消失。但部份材料因無完全消磁，於外加電場時產生微弱反磁效應(diamagnetic effect)而使分子磁偶極距(magnetic dipole moment)排列方向與外加磁場相同，呈現順磁效果，例如鋁、鈦金屬。順磁性與反磁性的感應磁場通常為外加磁場的萬分之一。強磁性材料具有永有磁性特性，如磁鐵。

表 2.2 相對導磁係數表(修改自 Keller,1996、Cheng,1989)

	材料名稱	相對導磁係數
強 磁 性	純鐵(Iron)	4000
	鎳(Nickel)	250
	磁鐵礦(Magnetite)	5
	磁黃鐵礦(Pyrrhotite)	2.25
	鈦鐵礦(Ilmenite)	1.55
順 磁 性	赤鐵礦(Hematite)	1.053
	黃鐵礦(Pyrite)	1.0015
	鋁(Aluminum)	1.000021
	鎂(Magnesium)	1.000012
	鈦(Titanium)	1.00018
	輝石(Augite)	1.00167
	角閃石(Hornblende)	1.00015
反 磁 性	金(Gold)	0.99996
	銅(Copper)	0.99999
	銀(Silver)	0.99998
	石英(Quartz)	0.999985
	鉀鹽(Sylvite)	0.999986
	方解石(Calcite)	0.999987

(3) 導電度:

傳遞電流的能力以導電度 σ 定義之，單位為 S/m；電阻率 ρ 為導電度的倒數，單位為 ohm-m；物質能夠具有導電特性是由於自由電荷的移動，產生電流。依照電流形成方式不同分為傳導電流(Conduction currents)，以電子移動產生電流，此類材料稱為導體，而以電子與電洞形成之傳導電流，稱為半導體。另一種稱為電解電流(Electrolytic currents)，由離子鍵結合的化合物於溶液中，經由電解作用，以陰陽離子的移動形成電流傳導。在真空或惰性氣體下電子或離子的漂移運動形成電流之現象為對流電流(Convection currents)。

導體的導電度與電子移動率 μ_e 之相關性可以(2-3)式表示， μ_e 依材料不同而有所差異；例如銅的電子移動率等於 $3.2 \times 10^{-3} (\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s})$ ；鋁為 $1.4 \times 10^{-4} (\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s})$ ，單位是公尺平方每伏特秒。

$$\sigma = -\rho_e \mu_e \quad (2-3)$$

其中 ρ_e 為電子體積電荷密度；半導體材料的導電度需要考慮電洞移動率與電子移動率。

影響離子移動率的因素為溫度與離子濃度。溫度上升降低液體的黏滯係數(viscosity)，在相同電位差之下離子移動率上升；在高離子濃度時因離子之間互相碰撞而降低離子移動率。(2-4)式表示由不同離子所貢獻的離子移動率與離子濃度形成之總和。

$$\sigma = F(c_1 \mu_1 + c_2 \mu_2 + c_3 \mu_3 + \dots) \quad (2-4)$$

其中 F 為法拉第常數等於 96500 庫倫電子量， c_i 等於 i 離子濃度， μ_i 為 i 離子移動率。導電度溫度 25°C 下低濃度離子的移動率如表 2.3 所示。

電阻率(resistivity)不隨著物質的幾何形狀而變異，電阻(resistance)則隨物質幾何形狀改變；圖 2.3 代表一長度為 l ，與電流方向垂直之表面積 A ，電阻率為 ρ 的物質，其電阻率與電阻的關係式如(2-4)式。

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2-4)$$

其中電阻 R 之單位為歐姆(ohm)，其值與面積成反比，而與電流路徑成正比。

表 2.3 一些常見的離子移動率(Keller,1966)

離子	離子移動率 (m ² /V·s)
H ⁺	36.2×10 ⁻⁸
OH ⁻	20.5×10 ⁻⁸
SO ₄ ⁻	8.3×10 ⁻⁸
Na ⁺	5.2×10 ⁻⁸
Cl ⁻	7.9×10 ⁻⁸
K ⁺	7.6×10 ⁻⁸
NO ₃ ⁻	7.4×10 ⁻⁸

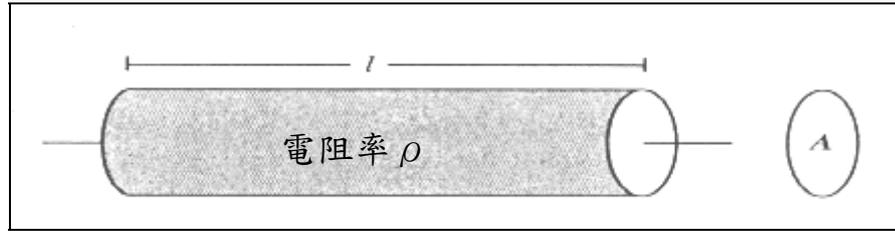


圖 2.3 影響電阻的幾何因子(Burger, 1992)

2.2 地質材料導電特性

地質材料構成的基本元素為造岩礦物(rock-forming minerals)，構成元素主要為氧及矽，因此百分之九十以上之地質材料由矽氧四面體為基本單位所構成的矽酸鹽類造岩礦物，不到百分之十的非矽酸鹽類造岩礦物包含碳酸類礦物、氧化物、硫化物等，非矽酸鹽類又可分為金屬礦物與非金屬分矽酸鹽類兩大類。常見地質材料電阻率值如圖 2.4，可知同一種地質材料因乾濕程度不同，電阻率值分布範圍甚廣。

地質材料的導電性是透過孔隙水的導電性提供，除非地質材料含足夠的金屬造岩礦物，如磁鐵礦、鏡鐵礦、石墨、黃鐵礦等，才使得地質材料具備有高導電能力；金屬造岩礦物常以樹突狀的方式存在岩石中，以至於含有少量的金屬礦物造成電阻率大幅降低。圖 2.5 以飛白石中含有的黃鐵礦含量為例，當黃鐵礦含量大於百分之五以上，其電阻率大幅降低。

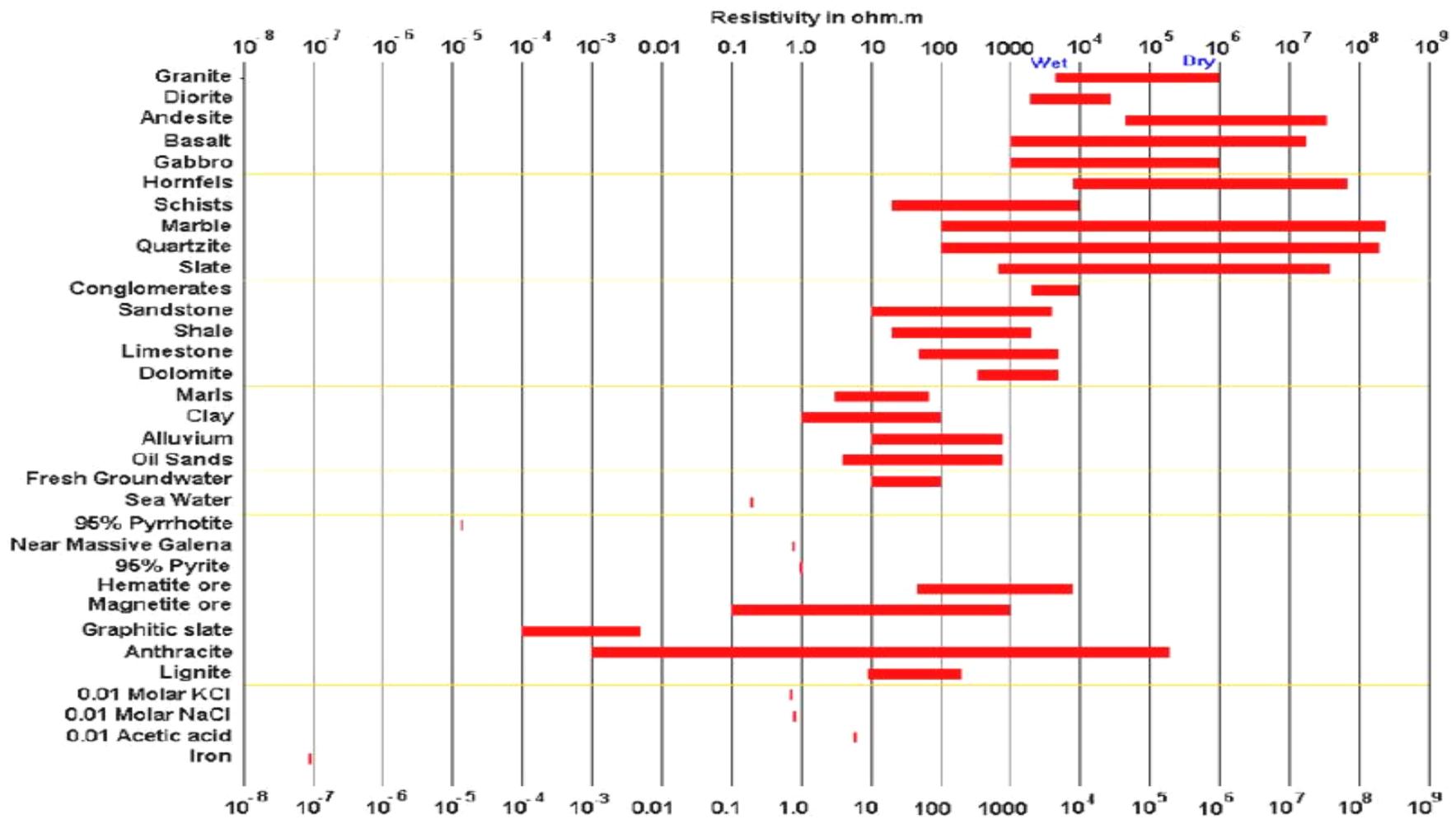


圖 2.4 地質材料電阻率值範圍(摘自 Loke, 2003)

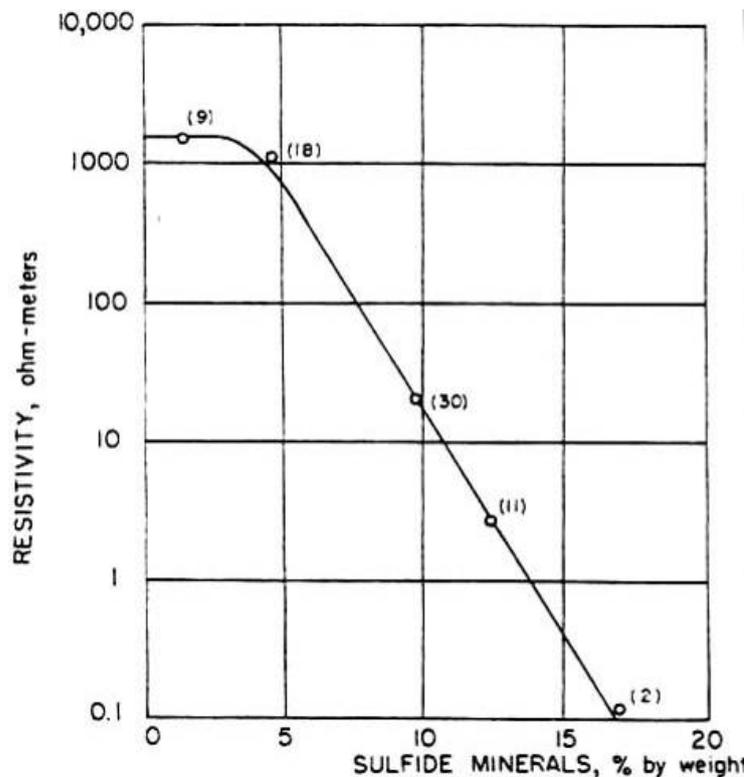


圖 2.5 飛白石中黃鐵礦含量對電阻率的關係(Keller,1966)

地質材料的孔隙形狀可以分為三類:間粒狀(intergranular)孔隙、晶形狀(vugular)孔隙與節理孔隙。因顆粒與顆粒之間被壓緊後遺留下的空隙為間粒狀孔隙，沉積岩多為間粒狀孔隙；晶形狀孔隙包含較大且不規則形狀的空隙，如石灰岩、火山岩；火成岩的孔隙常為節理與間粒狀孔隙，地質材料孔隙與孔隙之間相連稱為連接孔隙(connecting pore)。

Sauer(1955)提出電流在非均質之多孔隙介質傳導，包含三種電流路徑導電模式；土壤顆粒與土壤之間孔隙溶液交錯而成的路徑 1、土壤顆粒之間相互接觸構成的路徑 2，以及孔隙溶液所構成之路徑 3，如圖 2.6 表示於 1 立

方公分正立方土體內，電流可能傳導之路徑。Arulanandan與Smith於 1973 年提出路徑 2 之導電路徑對於整體導電度之影響不大；因土壤顆粒相互接觸的面積極小，電流主要是依連接孔隙溶液路徑傳導。無細粒料砂土與礫石導電路徑是以孔隙水傳導(Jackson 1975)，黏土土壤與含細粒料砂土、岩石的導電路徑以孔隙水與粘土礦物表面電荷傳導(Rhodes 等 1976; Urish 1981)。

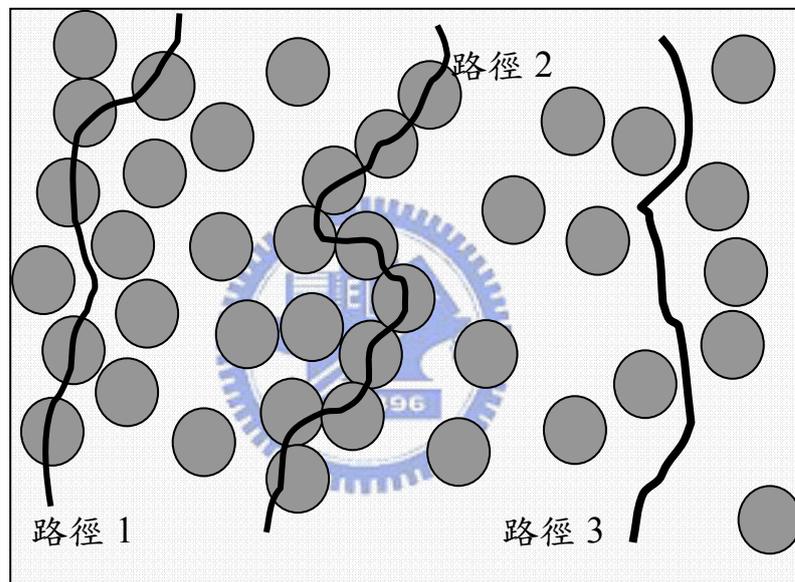


圖 2.6 多孔隙介質電流傳遞路徑示意圖

Archie(1942)提出飽和狀態下，岩石電阻率與孔隙率、孔隙水電阻率的關係式，

$$\rho = a\rho_w n^{-m} \quad (2-5)$$

ρ_w 為孔隙水的電阻率， n 為孔隙率； a 、 m 為待定係數，取決於岩石孔隙種類與含細料成分(Parkhomenko, 1967)。間粒狀孔隙的岩石，其 a 小於 1；

節理狀孔隙岩石，其 a 值大於 1。孔隙間細粒料含量多的岩石， m 大於 2；細粒料含量少者， m 小於 2。通常孔隙率在 10%~30% 之間岩石 a 等於 1， m 等於 2；(2-5) 式稱為 Archie's Law，由此式可得知電阻率與孔隙率約略成平反比關係。孔隙水的電阻率受到含鹽類成分影響之外，黏土礦物和水之間的離子交換作用，其電阻率之降低程度達 10 ohm-m 以下。

非飽和狀態下的電阻率 ρ 與飽和狀態下的電阻率 ρ_{sat} 關係式為(Keller 與 Frischknecht, 1966; McNeill, 1990)

$$\frac{\rho}{\rho_{sat}} = S^{-n_1} ; S > S_{cr}$$

$$\frac{\rho}{\rho_{sat}} = a_s S^{-n_2} ; S < S_{cr}$$
(2-6)

其中為 S 飽和度， S_{cr} 為臨界飽和度， n_1 、 n_2 為經驗係數；飽和度 S 大於臨界飽和度， n_1 值接近 2；小於臨界飽和度， n_2 值 4~5。砂岩到火成岩， a_s 值從 0.05 增加到 0.5。對砂岩與滲透性高岩石， S_{cr} 等於 25%；對火成岩， S_{cr} 等於 70%~80%。(2-6) 式顯示飽和度一旦低於臨界飽和度，孔隙水通路減少(如圖 2.7)，電阻率值迅速增大。

McCarter(1984)以赤郡黏土(Cheshire)和倫敦黏土(London Clay)為試驗土樣，以土樣飽和度、孔隙比與含水量為實驗之控制變數，進行電阻率之量測。McCarter 試驗結果將這三種變數以一個含水體積量(fraction volume of water)參數表示，含水體積量定義為水體積與試體總體積之比值。當含水體積值在 30%(飽和度約為 70%)時，電阻率值趨於穩定，變化不大。

Screedeeep, Reshma and Singh(2004)利用 ERB(Electrical Resistivity Box)和 ERP(Electrical Resistivity Probe)兩種方式量測土壤電阻率；試驗以粉土(Silty Soil)和白黏土(White clay)為試體，並得到電阻率與飽和度為對數反比關係。其中飽和度小於 15%的電阻率無法量取，飽和度大於 60%電阻率則趨於穩定。

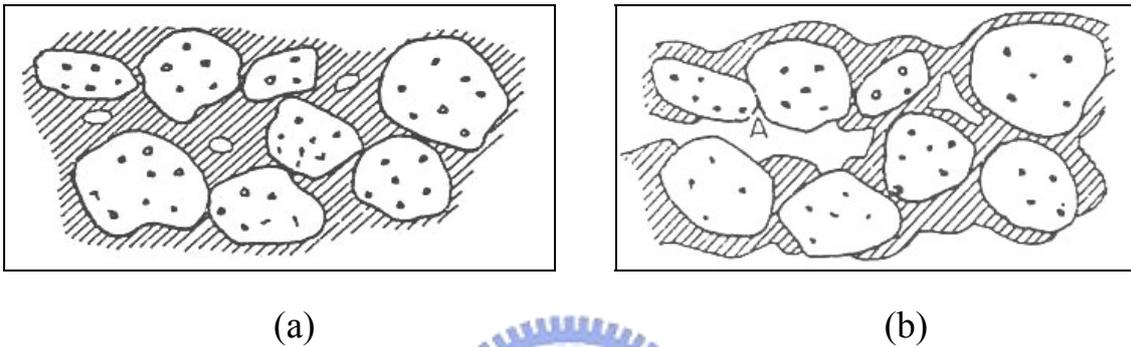


圖 2.7 (a)未飽和但高於臨界飽和度之土壤；(b)未飽和且低於臨界飽和度之土壤，減少孔隙水連接通路(Keller,1966)。

溫度影響到離子的移動速度與液體黏滯係數，因而電阻率也會受到溫度影響。Keller and Frischknecht (1966)提出孔隙水或電解溶液會因溫度改變導電度，可以(2-7)式表示之。

$$\rho_t = \frac{\rho_{18^\circ}}{1 + \alpha_t(T - 18^\circ)} \quad (2-7)$$

其中 ρ_{18° 是 18°C 之下的電阻率做為參考值， T 為溫度， α_t 等於 0.025，此式不適用於岩石產生熱熔狀態和孔隙水結冰之情形。孔隙水冰凍狀態下，電阻率因無孔隙水離子的傳導，電阻率上升為 ρ_{18° 的 10~100 倍，如圖

2.8，分別表示粗顆粒與細顆粒岩石受到低溫影響，電阻率增高現象。

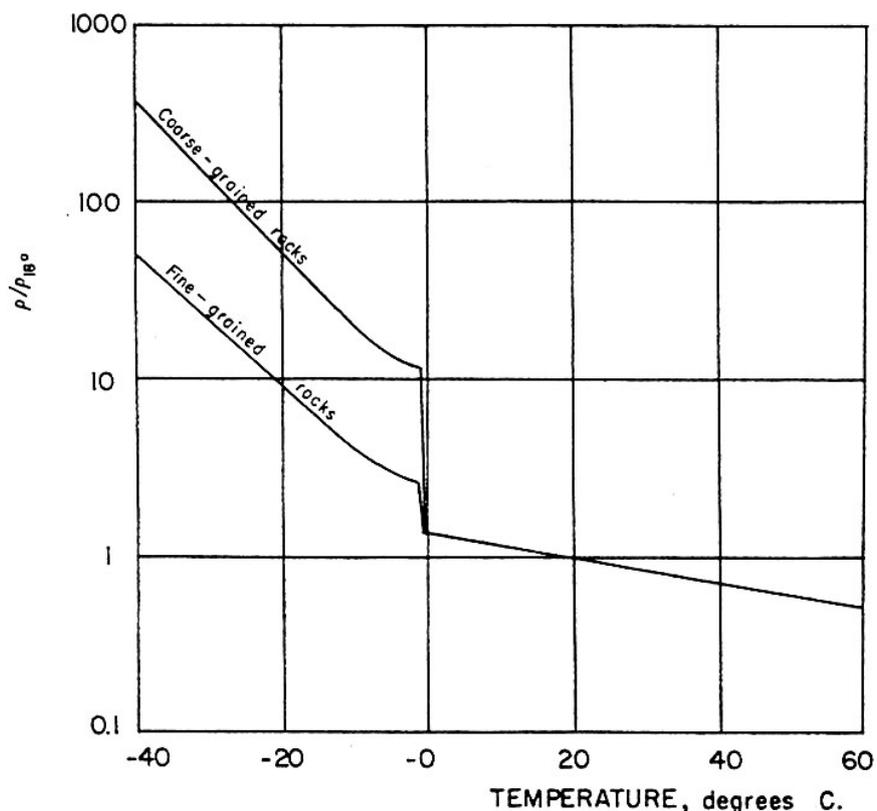


圖 2.8 溫度對電阻率影響圖(Keller, 1966)

2.3 直流地電阻法原理

量測地質材料電阻率、導磁率與電容率三種電學性質係利用電磁場或電場對於地質材料的電學性質不同，產生的反應資料加以分析得到。量測地電阻率方法包含直流電法、電磁法方式與透地雷達。直流地電阻法的施測方法是將電極插入地表，傳導直流電或非常低頻交流電進入地底產生人為電場，經由額外電位極量測電位差，依據電極排列方式不同，對應到不同的空間幾何因子，得到的電阻率稱為視電阻率(apparent resistivity)，經由反算分析獲得接近實際的電阻率值。電磁法與透地雷達則是利用電磁波原

理，利用不同頻率以探測不同深度土層。電磁法使用的電磁波頻率在幾赫茲(Hz)到幾千赫茲(kHz)；透地雷達的電磁波頻率則高於百萬赫茲(MHz)，用於淺層探測。

直流電地電阻法依探測方式有一維、二維、三維形式，一維探測可分為垂直探測(vertical sounding)與橫向探測(profiling)；二維探測或稱為地電阻影像剖面法(electrical resistivity tomography, ERT)是綜合一維探測的垂直與橫向探測結果組成擬似剖面(pseudo-depth)；三維探測是佈設一矩型陣列的電極，得到 3D 似電阻剖面。地表施測於深層解析度上有所限制，井測或跨孔施測可以加深層解析度。



2.3.1 電位場於均質均向物質分佈

(1) 單電流極電位場

假設輸出電流極在無窮遠處，於輸入電流極以一個直流電注入(視為點電源)在均質均向物質傳導，符合歐姆定律(Ohm's Law)(2-8)式，電流密度與電場強度比值為導電度值。

$$J = \sigma E \quad (2-8)$$

(2-9)式為電荷連續方程式(equation of continuity)，在穩態電流(steady current)狀態，電荷密度不隨時間改變，(2-9)式等號右邊與時間無關，改寫成(2-10)式

$$\nabla \cdot J = \frac{\partial q}{\partial t} \quad (2-9)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (2-10)$$

其中 q 為電荷密度， J 為電流密度， σ 為導電率， E 為電場強度。(2-11)

式為電位與電場的關係。由(2-10)式與(2-11)式可推導出電位的 Laplace 控制方程式，(2-12)式，其中 V 為電場。

$$E = -\nabla V \quad (2-11)$$

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2-12)$$

於單電流極之電場分佈為輻射狀，具有對稱性，其等電位線與電場垂直。在球座標系統之下，不考慮 θ 、 ϕ 方向，(2-12)式可以寫成(2-13)式求解得到(2-14)式，假設在無窮遠處電位為零，則(2-14)式中的常數 $B=0$ ，改寫成(2-15)式

$$\frac{\partial V}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial V}{\partial R} = 0 \quad (2-13)$$

$$V = \frac{-A}{R} + B \quad (2-14)$$

$$V = \frac{-A}{R} \quad (2-15)$$

其中 R 等於球半徑， A 、 B 為常數項。

若入電流極注入外加電流強度為 I ， I 等於垂直電流方向之表面積與電流密度的乘積。入電流極位於地表處，視為點電流源，以該點為球體中心，假設空氣的電阻率無限大，則電流以徑射方向所通過的半球體面積為 $2\pi R^2$ ；電流強度與電流密度的關係式如(2-16)式。(2-8)式帶入(2-11)式得到(2-17)式，從(2-17)和(2-16)式，得到(2-18)式

$$I = 2\pi R^2 J \quad (2-16)$$

$$J = -\sigma \nabla V \quad (2-17)$$

$$I = -2\pi R^2 \sigma \frac{\partial V}{\partial R} \quad (2-18)$$

將(2-13)式乘上 R^2 之後對 R 積分一次得到(2-19)式，帶入(2-18)式，求解得到 A 值(2-20)式。由(2-15)式和(2-20)式得到單一電極位於地表之電位分佈如(2-21)式所示

$$\frac{\partial V}{\partial R} = \frac{A}{R^2} \quad (2-19)$$

$$A = -\frac{\rho I}{2\pi} \quad (2-20)$$

$$V = \frac{\rho I}{2\pi R} \quad (2-21)$$

圖 2.9 表示(2-21)式的電位分布， C_1 為入電流極， C_2 在無窮遠處為出電流極，電位大小與距離 R 為反比關係。

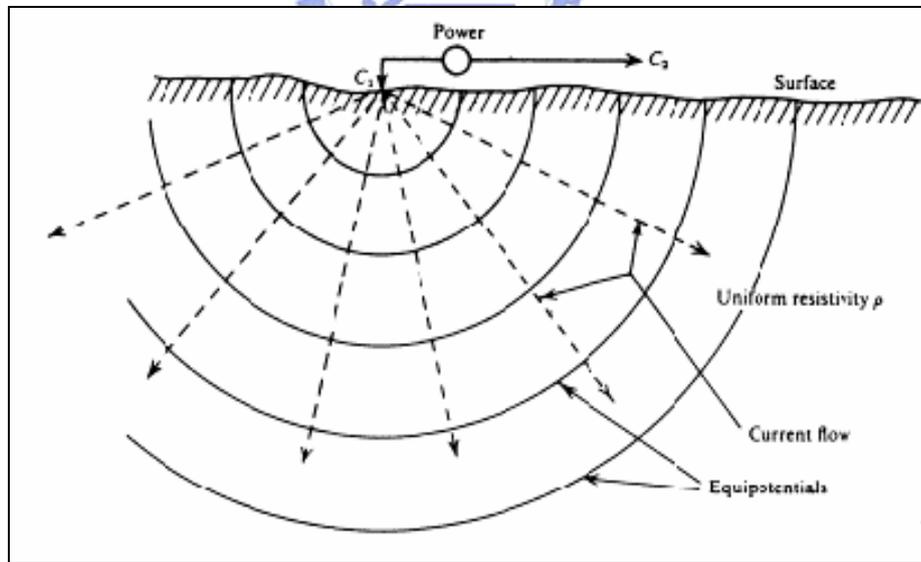


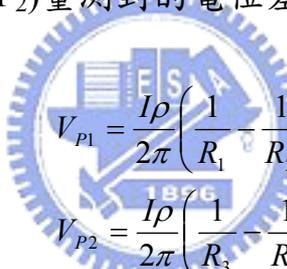
圖 2.9 點電流源於地表產生的電位分布與電流方向(Telford, 1990)

(2) 雙電流極電位場

圖 2.10 中電位極(P₁、P₂)位於電流極之間，P₁ 電位極位置上由C₁ 電流極產生的電位為V_{C1}，由C₂ 電流極產生的電位為V_{C2}，假設輸入電流極之電流為正，輸出電流極之電流為負。(2-22)式表示V_{C1}、V_{C2}與距離成反比關係，

$$\begin{aligned} V_{C1} &= \frac{I\rho}{2\pi R_1} \\ V_{C2} &= -\frac{I\rho}{2\pi R_2} \end{aligned} \quad (2-22)$$

根據靜電學原理，多個電荷對某一點產生的電位大小，等於將每一個電荷對該點的電位加總；將 V_{C1} 與 V_{C2} 電位相加得到 P₁ 的電位 V_{P1}，P₂ 的電位 V_{P2} 受到 C₁、C₂，算法與 V_{P1} 相同。(2-23)式表示 V_{P1} 與 V_{P2} 大小；V_{P1} 與 V_{P2} 相減成為電位極(P₁、P₂)量測到的電位差值 ΔV，如(2-24)式



$$\begin{aligned} V_{P1} &= \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \\ V_{P2} &= \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right) \end{aligned} \quad (2-23)$$

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) \quad (2-24)$$

其中R₁等於C₁與P₁距離、R₂等於C₂與P₁距離、R₃等於C₁與P₂距離、R₄等於C₂與P₂距離，此雙電流極所產生的扭曲等電位線如圖 2.11 所示，實線為等電位線，虛線代表電流線，兩者保持正交，(2-25)式為扭曲等電位線

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} &= \text{Constant} \\ r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos\theta &= 4L^2 \end{aligned} \quad (2-25)$$

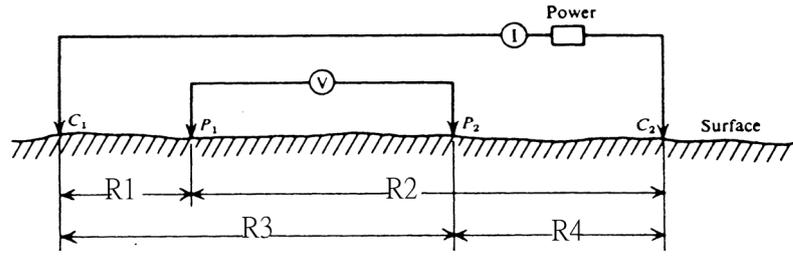


圖 2.10 地表佈設雙電流極與雙電位極示意圖(Telford, 1990)

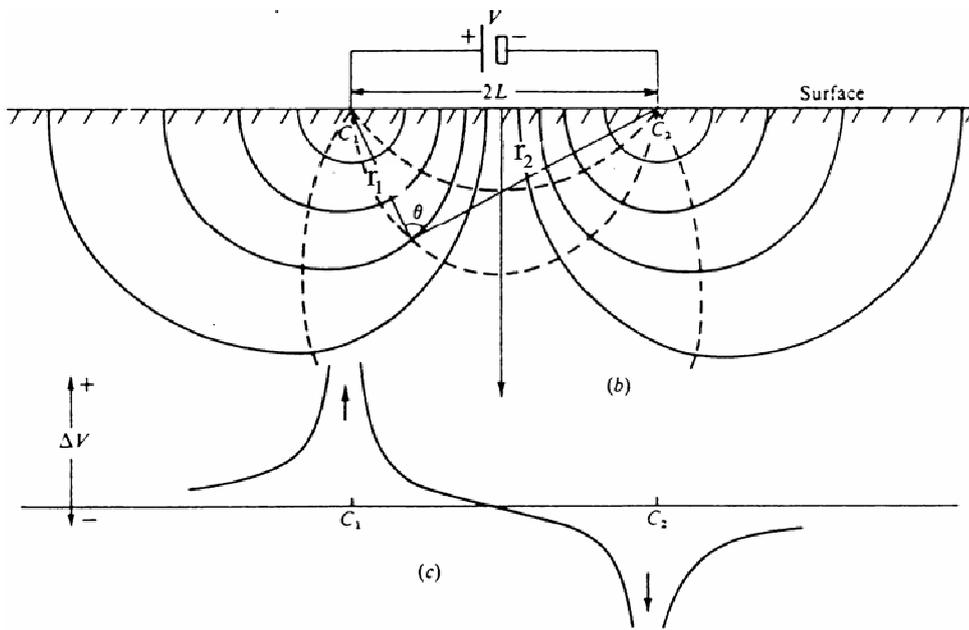


圖 2.11 雙電流極產生的電位變化(Telford, 1990)

(3) 電流分佈情形

考慮 圖 2.12 中的參數， L 等於電流極間距， x 表示 C_1 到 p 點水平距離， r_1 等於 C_1 到 p 點距離， r_2 等於 C_2 到 p 點距離；水平方向電流密度 J_x 可以(2-26)式表示之，當 $r_1=r_2$ ，則(2-26)式可簡化成(2-27)式。

$$J_x = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial X} = -\frac{I}{2\pi} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2-26)$$

$$= \frac{I}{2\pi} \left[\frac{x}{r_1^3} - \frac{(x-L)}{r_2^3} \right]$$

$$J_x = \frac{I}{2\pi} \frac{L}{\left(z^2 + \frac{L^2}{4} \right)^{3/2}} \quad (2-27)$$

圖 2.13 為水平電流密度 J_x 和電流極間距 L 與深度 z 之比關係圖。圖中虛線代表固定於某一個深度 z ，改變電流極間距對應 J_x 的改變，隨著電流間距變大， J_x 漸漸增加， J_x 最大值出現在電流極間距 $L = \sqrt{2}z$ 。實線表示電流極間距固定，當深度增加，則 J_x 遞減。

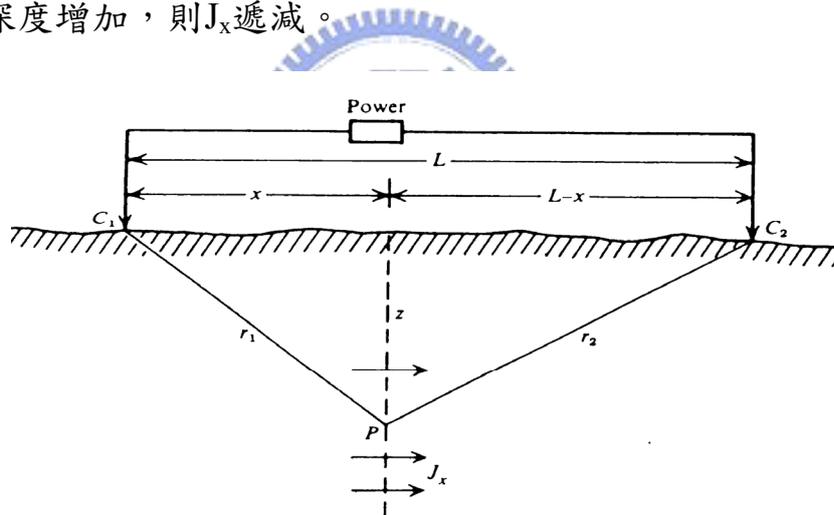


圖 2.12 決定水平方向電流密度空間參數(Telford, 1990)

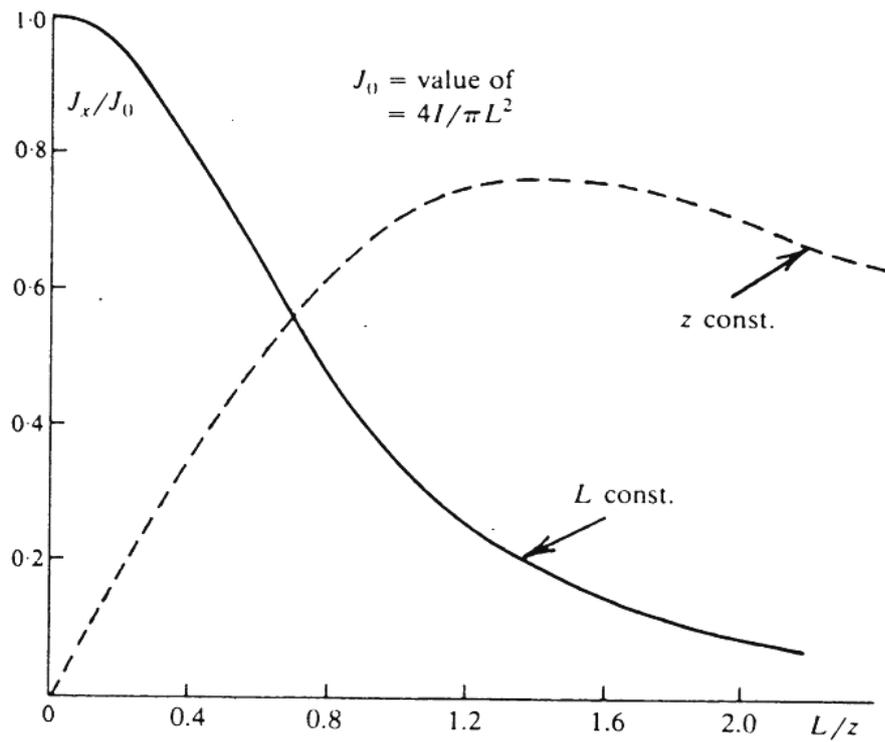


圖 2.13 水平電流密度與電流極間距和深度變化關係(Telford, 1990)

(2-28)式可計算雙電流極中心位置在深度 z_1 與 z_2 之間通過的電流量，所佔全部電流之百分比。當深度 z_2 趨近無窮深，(2-28)式可以簡化成為(2-29)式，表示通過 z_1 深度以下電流百分比(Van Norstrand and Cook, 1966)，

$$\begin{aligned} \frac{I_x}{I} &= \frac{L}{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} dz \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dy}{\left[\left(\frac{L}{2}\right)^2 + y^2 + z^2\right]^{3/2}} \\ &= \frac{2}{\pi} \left(\tan^{-1} \frac{2z_2}{L} - \tan^{-1} \frac{2z_1}{L} \right) \end{aligned} \quad (2-28)$$

$$\frac{I_x}{I} = 1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{2z_1}{L} \quad (2-29)$$

如圖 2.14 顯示當 L 等於 $2z_1$ 時，有百分之五十電流量在 z_1 以上； $L=z_1$ 時，百分之七十電流量在 z_1 以上。

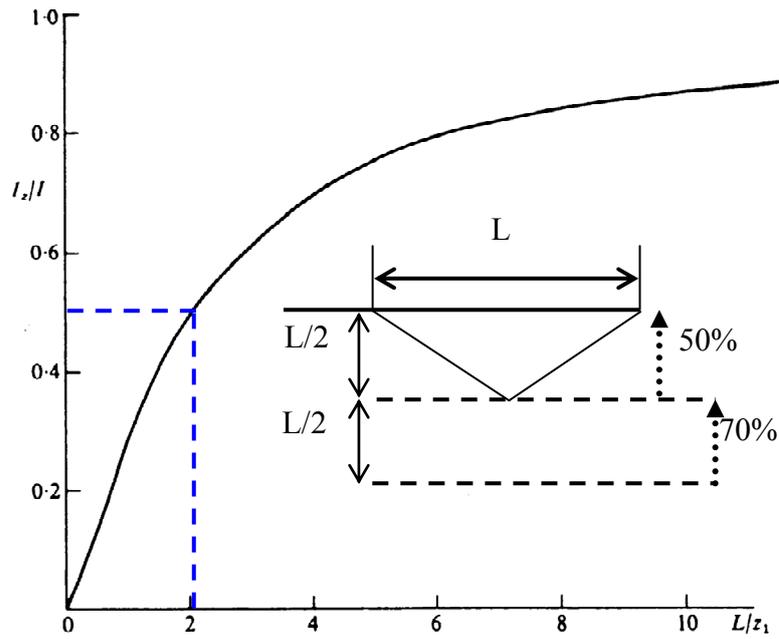


圖 2.14 通過 z_1 以下之電流百分比(Telford, 1990)

2.3.2 非均質地層影響

(1) 電流於邊界之變化

界面上電流與電位變化需符合兩邊界條件，一是與界面平行方向的電場需要相同，符合電場 curl-free 定理，如(2-30)式所示；另一是與界面垂直方向上的電流密度需要相同，符合電流連續定理(divergence-less)，如(2-31)式所示。

$$\nabla \times \left(\frac{J}{\sigma} \right) = 0 \text{ or } \nabla \times E = 0 \quad (2-30)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (2-31)$$

假設二均勻介質，其電阻率分別為 ρ_1 與 ρ_2 ，電流從 ρ_1 流進 ρ_2 介質，

factor), 穿透係數為 $1-k$; C_1' 為 C_1 鏡像, 強度為 kI ; P 位置上的電位強度為受到點電源 C_1 與鏡像點電源 C_1' 產生電位之總和。 P' 位置上的電位強度, 只有點電源 C_1 經由邊界透射之後的強度 $(1-k)I$ 所產生。 P 與 P' 可以(2-35)式表示。若 P 點位於邊界上, 則 $R_1=R_2=R_3$, V_P 等於 $V_{P'}$, 反射係數 k 為(2-36)式。

$$V_P = \frac{\rho_1 I}{4\pi} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{k}{R_2} \right) \quad (2-35)$$

$$V_{P'} = \frac{\rho_2 I}{4\pi} \left(\frac{1-k}{R_3} \right)$$

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} ; -1 < k < 1 \quad (2-36)$$

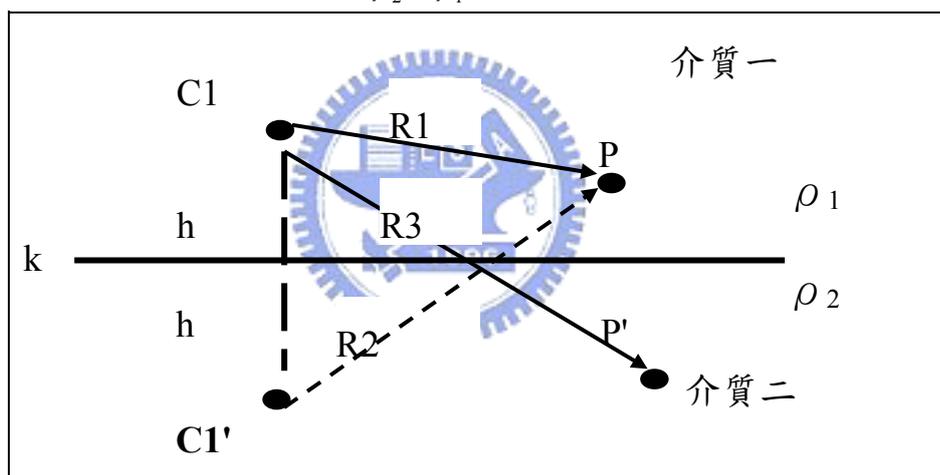


圖 2.16 電位受邊界影響的計算參數

若考慮三種不同介質其電阻率分別為 ρ_0 、 ρ_1 、 ρ_2 , 其中 A 為位於 ρ_0 與 ρ_1 界面下距離 h 之點電流源, 假設 ρ_1 層厚度等於 t , ρ_0 與 ρ_2 層之厚度無窮大, A 與測點 M 距離為 a , 見圖 2.17。當測點 M 受到主電流 A , 令 A 鏡像於 ρ_0 之電流強度 $A_1^{(0)}$, A 鏡像於 ρ_2 之電流強度為 $A_1^{(2)}$, 則電流源於 M 點產生的電位由公式(2-37)描述之, 其中 V_0 為點電流源 A 在介質 ρ_1 之內位於 M 點之

電位差， $Ik_{1,0}$ 為 $A_1^{(0)}$ 於第一次出現在 ρ_0 介質內的鏡像電流源強度， $Ik_{1,2}$ 為 $A_1^{(2)}$ 第一次出現在 ρ_2 介質內的鏡像電流源強度。

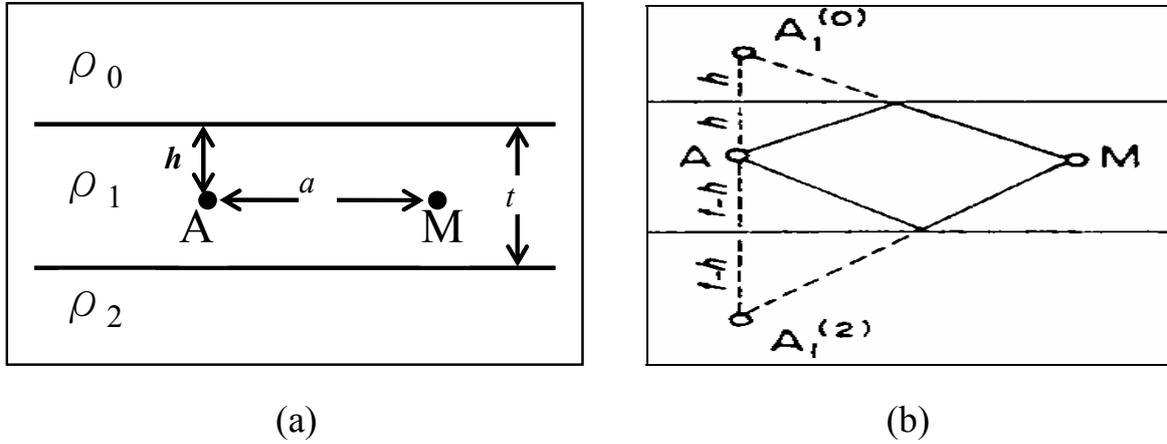


圖 2.17 假設電源於 A 位置上，在三種不同介質下，(a)求 M 位置的參數與 (b)反射路徑(Keller, 1966)

$$\begin{aligned}
 V_0 &= \frac{\rho_1 I}{4\pi a} \\
 V_1^{(0)} &= \frac{\rho_1 I k_{1,0}}{4\pi(a^2 + 4h^2)^{1/2}} \quad ; \quad k_{1,0} = \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_0 + \rho_1} \\
 V_1^{(2)} &= \frac{\rho_1 I k_{1,2}}{4\pi[a^2 + 4(t-h)^2]^{1/2}} \quad ; \quad k_{1,2} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}
 \end{aligned} \tag{2-37}$$

界面猶如鏡子一般，具有光於兩面平行鏡中有無窮多的路徑，電流路徑亦是如此；以下列四種情形來描述所有組合，如 圖 2.18 所示；(I)第一個反射從下邊界出發，最後一次反射在上邊界，(II)第一次與最後一次反射在下邊界，(III)第一個反射從上邊界出發，最後一次反射在上邊界，(IV)第一次與最後一次反射在上邊界。四種反射路徑計算的電位級數總和如(2-38)式。

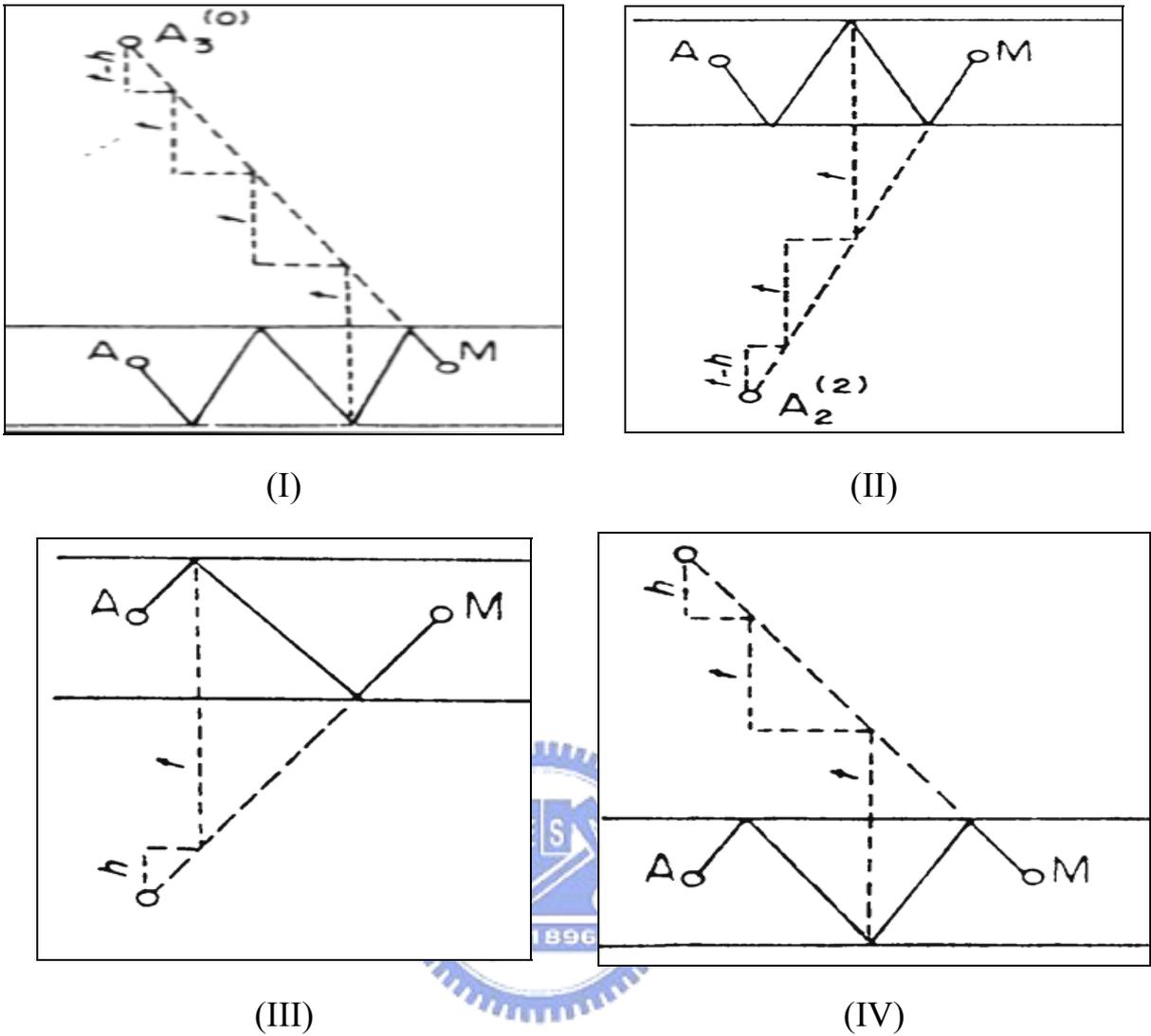


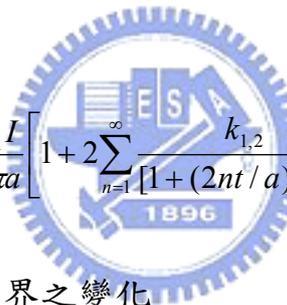
圖 2.18 計算 M 位置電位考慮的其他四種反射路徑(Keller, 1966)

$$\begin{aligned}
 V_I &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\rho_1 I k_{1,2}^n k_{1,0}^n}{4\pi [a^2 + (2nt)^2]^{1/2}} \\
 V_{II} &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\rho_1 I k_{1,2}^{n+1} k_{1,0}^n}{4\pi \{a^2 + [2nt + 2(t-h)]^2\}^{1/2}} \\
 V_{III} &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\rho_1 I k_{1,2}^n k_{1,0}^n}{4\pi [a^2 + (2nt)^2]^{1/2}} \\
 V_{IV} &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\rho_1 I k_{1,2}^n k_{1,0}^{n+1}}{4\pi [a^2 + (2nt + 2h)^2]^{1/2}}
 \end{aligned} \tag{2-38}$$

則測點 M 上的電位 V_M 為(2-37)式與(2-38)式的總和

$$\begin{aligned}
V_M = & \frac{\rho_1 I}{4\pi a} \left\{ 1 + \frac{k_{1,0}}{[1+(2h/a)^2]^{1/2}} + \frac{k_{1,2}}{\{1+[2(t-h)/a]^2\}^{1/2}} \right. \\
& + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{1,2}^n k_{1,0}^n}{[1+(2nt/a)^2]^{1/2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{1,2}^{n+1} k_{1,0}^n}{\{1+[2nt/a+2(t-h)/a]^2\}^{1/2}} \\
& \left. + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{1,2}^n k_{1,0}^n}{[1+(2nt/a)^2]^{1/2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{1,2}^{n+1} k_{1,0}^{n+1}}{[1+(2nt/a+2h/a)^2]^{1/2}} \right\} \quad (2-39)
\end{aligned}$$

若 A 與 M 位於上邊界，也就是 h 等於 0 的位置，等同於在地表的情形， ρ_0 視為空氣，電阻率無限大， $k_{1,0}$ 趨近於 1，因此(2-39)式可簡化成(2-40)式。其中(2-40)式等號右半邊，1 值代表在均質均向半無限域物質中的電位函數，稱為正規電位(normal potential)；第二項無窮級數稱為擾動電位(disturbing potential)。



$$V_M = \frac{\rho_1 I}{2\pi a} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{1,2}^n}{[1+(2nt/a)^2]^{1/2}} \right] \quad (2-40)$$

(3) 電流分布於平面邊界之變化

電流通過界面因介質電阻率大小影響其分布行為，其以下所佔的總電流量百分比可由 Van Nostrand 與 Cook 於 1966 年之關係式得知，

$$I_F = \frac{2\rho_1}{\pi\rho_2} (1+k_{1,2}) \sum_{n=0}^{\infty} k_{1,2}^n \left\{ \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left[\frac{2(2n+1)t}{d} \right] \right\} \quad (2-41)$$

根據(2-41)式，圖 2.19 為電流於二層結構，其電流所佔百分比之示意圖。圖中 L 等於電流極間距，a 表示單位電極間距，Zi 為界面位置；曲線說明當反射係數 k 大於 0，下層介質電阻率比上層大，電流選擇上層電阻率低的路徑；反之，k 小於 0，電流則往下層集中，其行為與電學的電阻並聯類似，

例如當層面深度位於測線展距 $3a$ ， $k=0.6$ 時其電流位於界面下佔全部比例約為 15%，倘若 $k=-0.6$ 時， I_F 則為 40%。

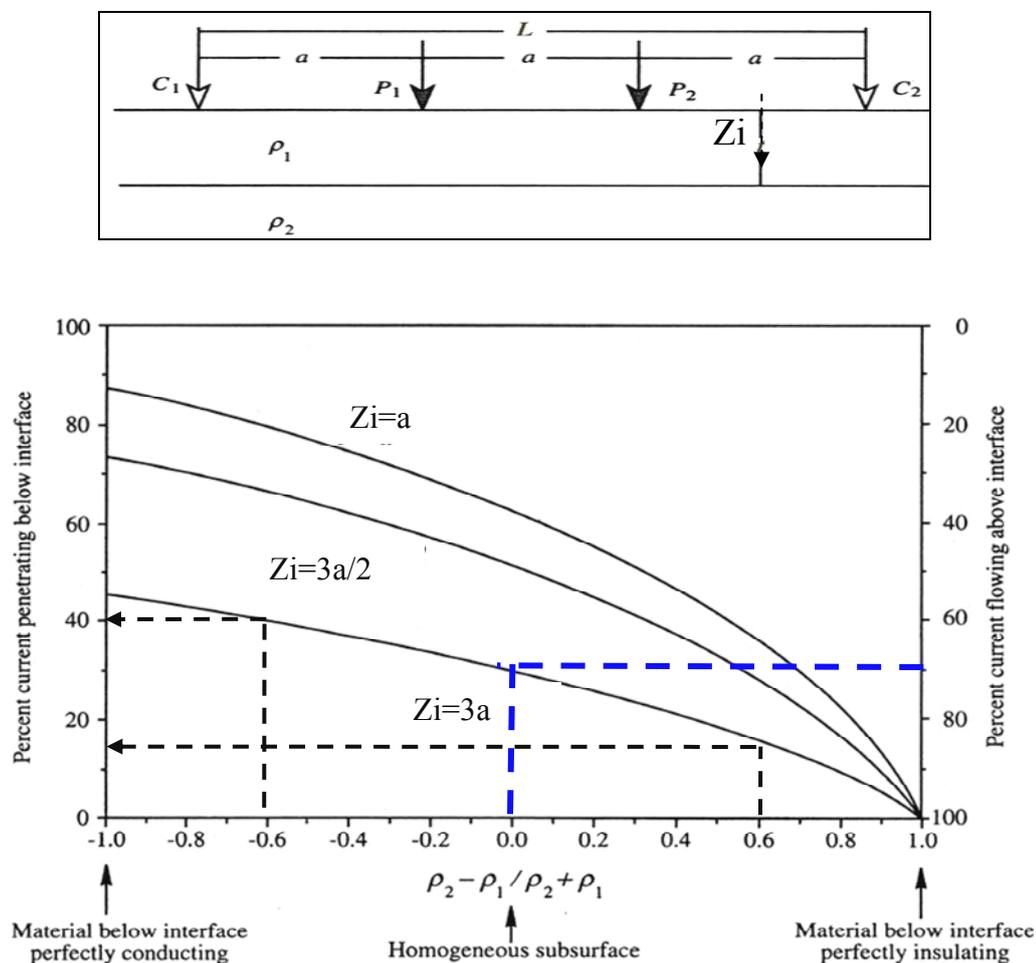


圖 2.19 電流百分比在單一水平界面下的變化，電流百分比與反射係數、界面位置的關係圖(Burger, 1992)

2.3.3 電極排列施測方法

在均質均向的物質中通常以四極法施測量測電阻率，如圖 2.10 的佈設方法，所得到的電阻率為；

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad ; \quad \Delta V = V_{P1} - V_{P2}$$

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)} \quad (2.42)$$

其中 K 電極排列的幾何參數， ΔV 等於電位極量測的電位差， I 等於輸入電流強度，電阻率與材料幾何形狀無關。

若於均質材料施測，以不同電極排列方法量測，得到電阻率值會相同。然而地層常為非均質材料，量測之電阻率含有許多不同電阻率材料的綜合效應；以不同電極排列方法或在同一種電極排列方法，改變電極間距，量測的電阻率會改變，並不能代表實際電阻率值，這非真實電阻率稱為視電阻率(apparent resistivity)，資料需透過反算分析得到代表地質非均質材料的電阻率及厚度分布(Koefoed, 1979)。

常見的地表電極排列方法如 圖 2.20，固定一種電極排列方式以中心點為基準，改變單位電極間距 a 或測線展距，以增加探測深度，稱為垂直探測，量測結果以視電阻資料和電極間距的關係圖表示；固定電極間距或測線展距，橫向移動量測側向變化，稱為橫向探測，以視電阻率資料和展距中心位置關係圖表示施測結果。這兩種方法得到的視電阻率曲線，經由反算得到一維地電阻率分布(Keller and Frischknecht, 1966; Telford et. al., 1990; Burger 1992; Robinson and Coruh, 1998; Dahlin, 2001; Takahashi, 2004)。

Wenner alpha電極排列常以Wenner簡稱，電流極在外側，電位極在內側，單位電極距離皆等於 a ，測線展距等於 $3a$ ，如 圖 2.20a。當電極間距增

加 n 倍，測線展距變成 $3na$ 。Wenner-Schlumberger電極排列與Wenner相似，測深參數 n 定義為電流極 C_1 與電位極 P_1 以及 C_2 與 P_2 兩間距與電位極(P_1 、 P_2)間距 a (最小單位電極間距)之比值，若 n 等於 1 時，Wenner可視為Schlumberger的特例，因此稱為Wenner-Schlumberger，如 圖 2.20d。

Dipole-Dipole電極排列方式的電極順序分別為 C_2 、 C_1 、 P_1 、 P_2 ，如 圖 2.20e，測深參數 n 為內側電流極與電位極間距和電流極間距(或電位極間距)之比值； n 等於 1 時，為Wenner Bata電極排列(如 圖 2.20b)。

Pole-Dipole 電極排列法又稱三極法，假設電流極 C_2 位於無窮遠處；測深參數為電流極 C_1 與鄰近電位極 P_1 間距和電位極間距之比值。一般在現地施測不可能達到 C_2 於無窮遠之理想狀況，Loke(2003)與 Takahashi(2004)認為只能盡量使 C_2 與 C_1 間距以及 C_2 與 P_1 間距，大於 10 倍(理想為 20 倍)的測深展距(C_1 與 P_1 間距, na)。

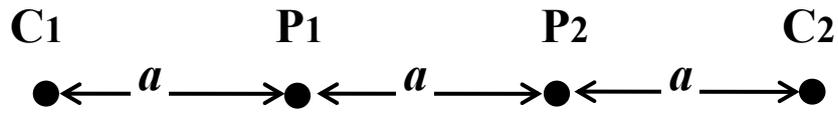
Pole-Pole 電極排列法又稱雙極法，假設電流極 C_2 和電位極 P_2 位於無窮遠，電極間距增加 n 倍，展距變為 na 。與 Pole-Dipole 相同遇到無理想遠電極之限制，因此 C_2 、 P_2 分別和 C_1 、 P_1 間距大於 10 倍(理想為 20 倍)的 C_1P_1 間距(na)之外， C_2 與 P_2 距離最少為 2.5 倍(理想為 3 倍)的 C_1P_1 間距。避免有負值或零值錯誤出現。(Loke ,2003、Robian et al. 1997)

Takahashi(2004)認為垂直探測常以 Wenner 或 Schlumberger 電極排列法施測；橫向探測常以 Wenner、Pole-Pole、Pole-Dipole、Dipole-Dipole 電極排列法施測；電極若與地面接觸電阻大，可以多加幾根電極，電極貫入深

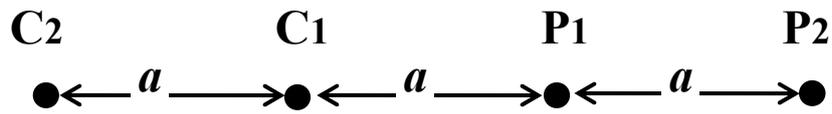
度加深，或加鹽水方式改進。提供測線選擇概要如下：

- (1)選擇地勢平坦或是略為緩坡地形，使地形效應降低(Tsourles et al., 1999)。
- (2)遠離地下管線、金屬導電物質等，減少造成的雜訊。
- (3)選擇測線與層面走向或斷層方向垂直為主。
- (5)考慮測深和測線展距比例關係，與橫向涵蓋範圍。
- (6)測線盡量避免彎曲，最好保持直線。

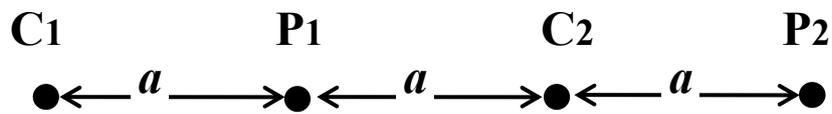
Zhou and Dahlin(2003)認為影響施測資料品質兩個主要因素分別為(a)電極間距的誤差，(b)電位誤差(potential error)與(c)正測(normal)與反測(reciprocity)兩次之間量測電位誤差，其中若正測是從測線起點至測線終點進行施測，則反測為測線終點至測線起點進行施測。Dipole-Dipole 電極排列施測受 x 方向電極間距(in-line spacing)誤差影響最大，電極間距 10%差值，影響視電阻率值 20%，受 y,z 方向偏移誤差(off-line)只有 2%；電位誤差和電勢能值成常數次方反比關係，意即量得之電位差值小，電位誤差大。



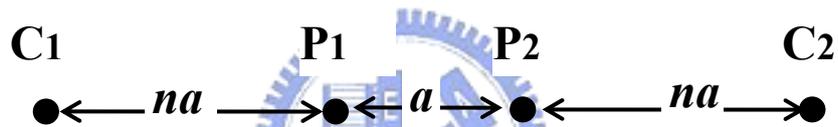
(a) Wenner Alpha Array



(b) Wenner Beta Array



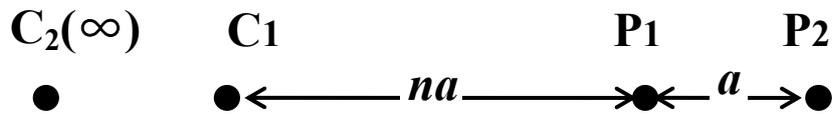
(c) Wenner Gamma Array



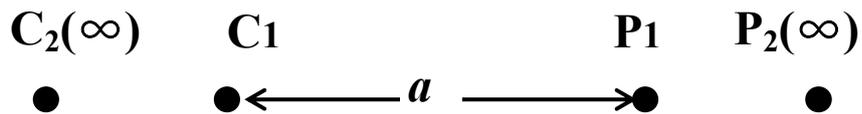
(d) Wenner-Schlumberger Array



(e) Dipole-Dipole Array



(f) Pole-Dipole Array



(g) Pole-Pole Array

圖 2.20 常見地表施測電極排列法

2.4 地電阻影像剖面法

測線上佈設等間距(最小單位間距,a)多數電極棒，改變測深參數 n ，獲得代表不同深度位置的視電阻資料，且進行橫向施測；隨電極排列方法不同，視電阻率資料點深度位置不同，稱為中等靈敏測深(median depth of investigation)或擬似深度(pseudo-depth)。此結合一維的垂直與橫向探測方法所構成的視電阻率剖面，為擬似電阻剖面(pseudo-section)；經由反算分析，可得到地電阻影像剖面。

2.4.1 擬似深度

不同電極排列方法及測線展距對於影響深度範圍不同，擬似深度的參數是以Frechet derivative靈敏度方程式決定，如(2.43)式，並非以外側電極傾角 45° 斜線交點為測深位置。Frechet derivative靈敏度方程式推導假設為均質均向介質的半無限域內，電流極 C_1 位在(0,0,0)，電位極 $P_1(a,0,0)$ ，電流極 C_2 與電位極 P_2 在無窮遠處，任意一個點(x,y,z)上 $d\tau$ 小體積內的電阻率做微量的改變 $\delta\rho$ ，如圖 2.21。產生的電位變化 δV 與電阻率變化的比值定義為靈敏度方程式(Roy and Apparao,1971、McGillivray and Oldenburg, 1990、Loke and Barker, 1995)。

$$\frac{\delta V}{\delta\rho} = \int_V \frac{1}{4\pi^2} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{[x^2 + y^2 + z^2]^{1.5} [(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{1.5}} dx dy dz \quad (2.43)$$

Edward(1977)提出於特定深度之上，在一維的靈敏度曲線下所包含的面

積佔整體的一半，見 圖 2.22，稱為有效深度或擬似深度(pseudo-depth)；不同電極排列的擬似深度值如 表 2.4，其中a為電極間距，L為測線展距。以 Dipole-Dipole電極排列为例，a等於 1 公尺，n等於 5，L測線展距等於 7 公尺，其量測有效之深度在 1.476 公尺。

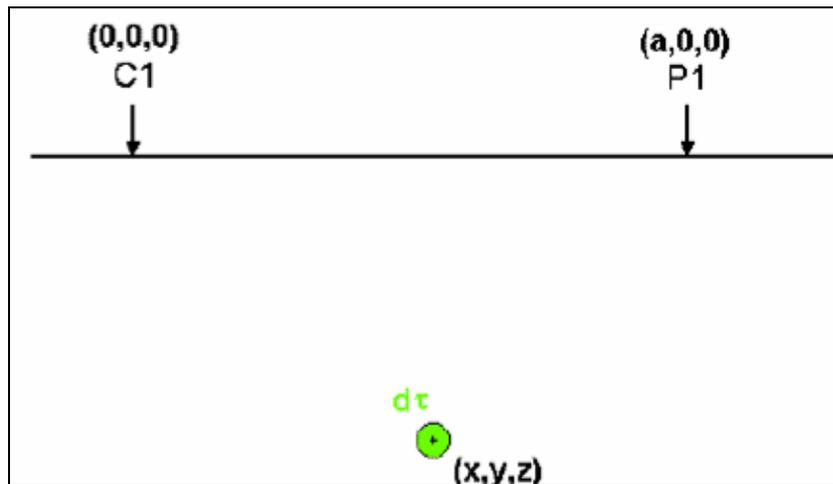


圖 2.21 靈敏度方程式推導的參數，以 Pole-Pole 電極排列推導。(Loke 2003)

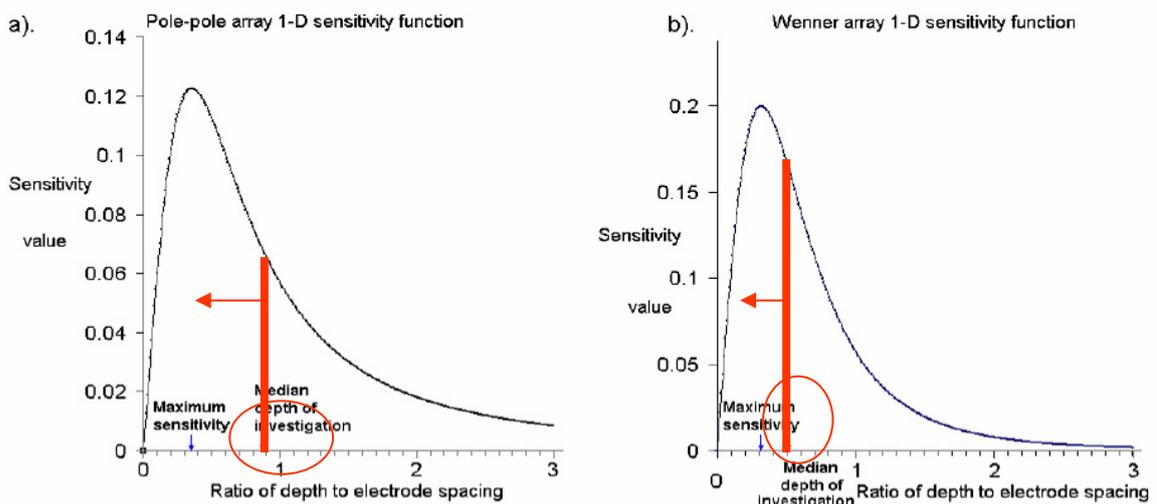


圖 2.22 一維靈敏度曲線，(a)Pole-Pole 電極排列(b)Wenner 電極排列(Loke 2003)

表 2.4 不同電極排列的擬似深度參數(Edwards 1977)。

Array type	Z_e/a	Z_e/L
Wenner	0.519	0.173
Pole-Pole	0.867	
Dipole-Dipole		
n=1	0.416	0.139
n=2	0.697	0.174
n=3	0.962	0.192
n=4	1.220	0.203
n=5	1.476	0.211
n=6	1.730	0.216
n=7	1.983	0.220
n=8	2.236	0.224
Pole-Dipole		
n=1	0.519	
n=2	0.925	
n=3	1.318	
n=4	1.706	
n=5	2.093	
n=6	2.478	
n=7	2.863	
n=8	3.247	
Wenner-Schlumberger		
n=1	0.519	0.173
n=2	0.925	0.186
n=3	1.318	0.189
n=4	1.706	0.190
n=5	2.093	0.190
n=6	2.478	0.191
n=7	2.863	0.191

2.4.2 擬似地電阻率剖面

擬似電阻率剖面的施測流程以 Wenner 與 Pole-Pole 電極排列方法說明之。首先在地表面佈設 m 隻電極棒，電極之間距離相等，最小單位間距 a 。施測步驟一，以第一根電極為電流極 C_1 ，電極 (P_1 、 P_2 、 C_2) 等間距增加到第 $(3n+1)$ 的電極為電流極 C_2 (n 為測深參數)，其探測深度由淺至深。步驟二，以第二根當為電流極 C_1 ，電極 (P_1 、 P_2 、 C_2) 等間距增加到第 $(3n+2)$ 支電極為電流極 C_2 ，重複步驟一，直到第 $m-3$ 支電極為電流極 C_1 。重覆上述步驟，完成施測，如 [圖 2.23](#)。

以 Pole-Pole 電極排列法施測為例，以第 1 支做 C_1 電流極，第 2 支、第 3 支...，第 $n+1$ 支逐次切換做 P_1 電位極 (n 為設定之目標測深參數)，就可測得第 1 支 C_1 電流極，由淺至深地層訊號；接著，以第 2 支做 C_1 電流極，第 3 支，第 4 支...，第 $n+2$ 支逐次切換做 P_1 電位極，就可測得第 2 支 C_1 電流極，由淺至深之量測訊號。接遞操作，即可獲得由淺至深二維地層剖面資料，如 [圖 2.24](#)。

其他三種電極排列 (Dipole-Dipole、Wenner-Schlumberger、Pole-Dipole) 施測流程與上述方法差異不大，差別在於測深參數 n 值定義不同，量測一資料點時，所用的電極數也不同。

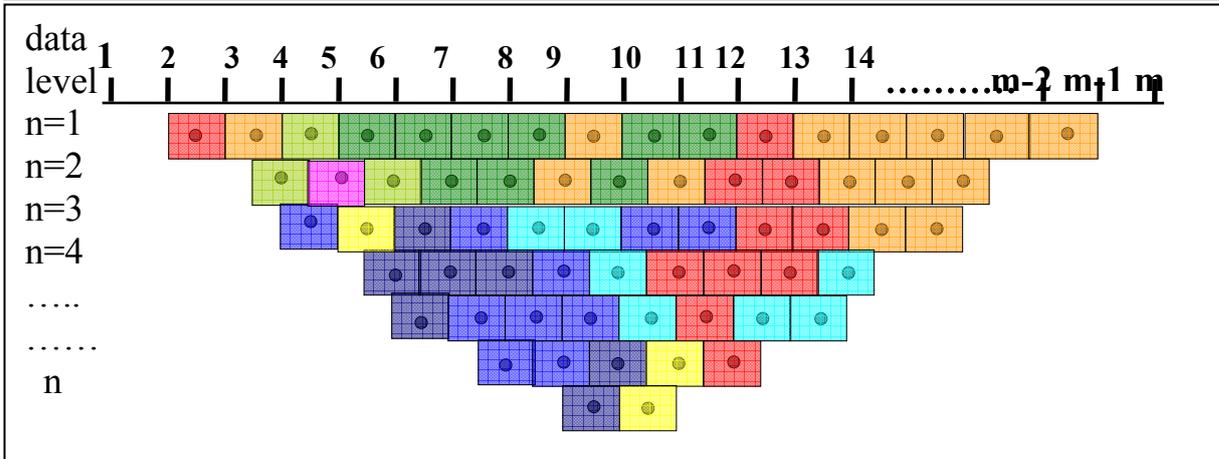
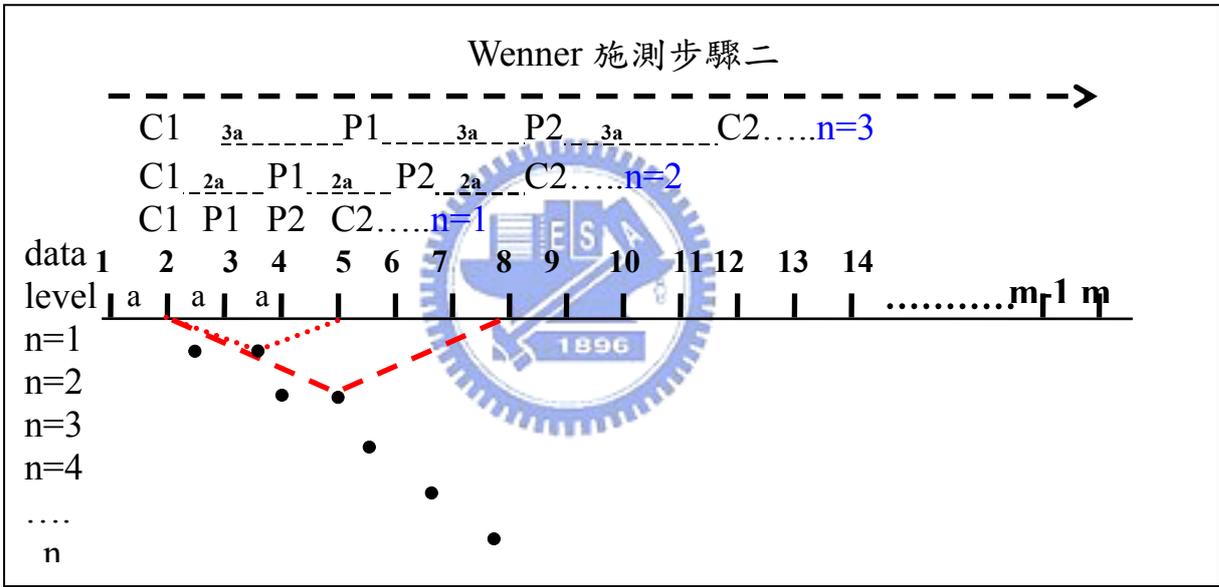
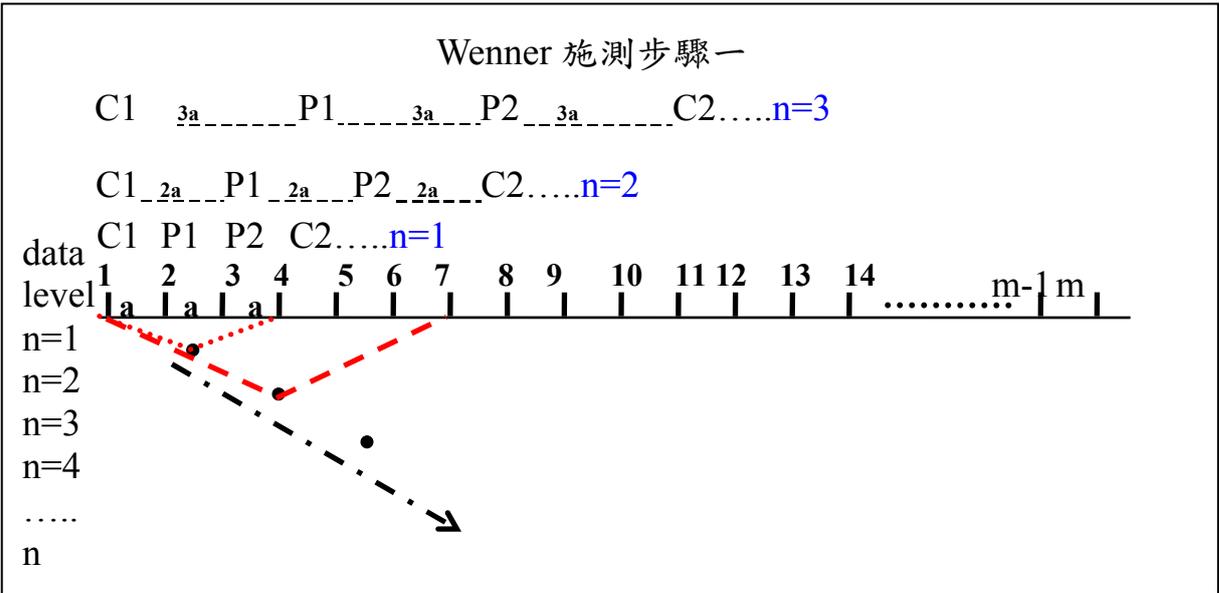


圖 2.23 Wenner 電極排列施測流程

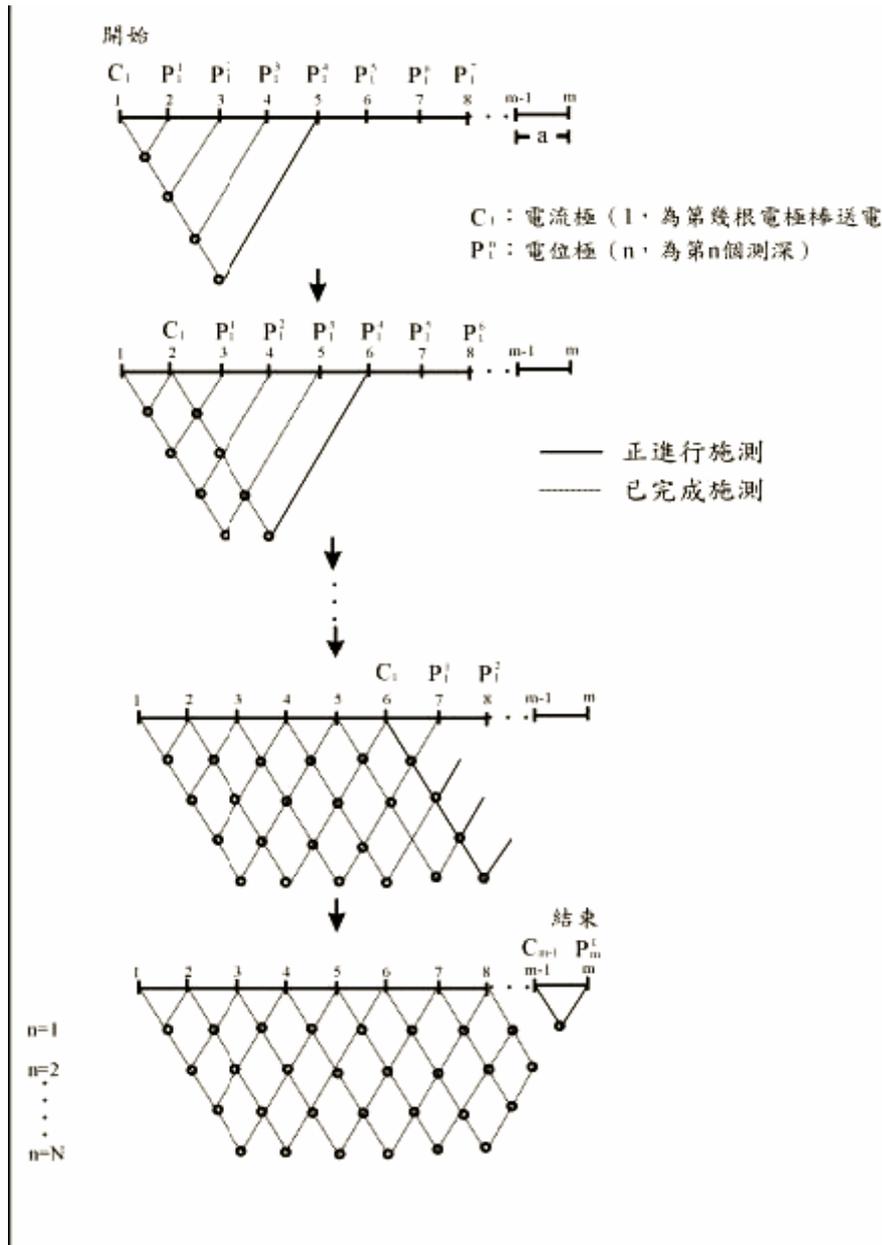


圖 2.24 Pole-Pole 電極排列施測方法(游峻一 2003)

2.4.3 電極排列方式優缺點

選擇測線的施測方法，從不同電極排列方法優缺點從四個因素討論:(1) 探測深度(2)垂直與橫向解析度(3)橫向涵蓋範圍(4)訊號強度。

(1)探測深度(Edwards,1977)所定的測深參數比較，係在等長的測線展距

之下，Pole-Pole 探測最深深度約為 0.86 倍的測線展距，資料層數(data level) 的間格固定為 0.86 倍的電極間距；其次為 Pole-Dipole 測深深度為 0.36 倍展距，Pole-Dipole 的 Z_e/a 比值隨 n 值增加而增加，實際上 n 值增加代表展距增加，但資料層愈深其厚度遞減，從 n 等於 8 與 Z_e/a 等於 3.247，計算測深約近似 0.36 倍的測線展距($Z_e/L=0.36$)。接著為 Dipole-Dipole 的 0.22 倍；最後為 Wenner、Wenner-Schlumberger，約為 0.17 倍。

(2)垂直與側向解析度

Loke 與 Baker(1995)以(2-43)式的二維方程式 $F(x,z)$ ，求其解析解，討論各種電極排列的靈敏度；測線展距正規化為 1 公尺，深度由 0.025 公尺到 1 公尺。



(a) Wenner 電極排列法的 2D-靈敏度剖面如 圖 2.25 所示，方框內的黑點為擬似深度(0.179)，靈敏度值為 128%。負靈敏度值出現在 C_1 與 P_1 之間及 C_2 與 P_2 之間，其負靈敏度值表示量測之視電阻率將會下降；測線中心點深度以下的靈敏度變化為垂直方向遞減，其變化程度大於水平方向。因此 Wenner 的垂直解析度比測向解析度佳，適用於探測水平層狀構造。

(b) Pole-Pole 電極排列法雖有最深探測的優點，但擬似深度(0.89 公尺)靈敏度值只有 2%，垂直和測向解析度皆是最差，見 圖 2.26。

(c) Wenner-Schlumberger 電極排列法之量測靈敏度如 圖 2.27，當 n 等於 1 時和 Wenner 的靈敏度剖面相同， n 增加到 6 時，中心高靈敏度區域與 C_1 、

C_2 分離，集中在 P_1P_2 以下，方框中的擬似深度位置在 0.19 公尺，零敏
 度值從 128% 降到 32%。結果表示 n 值小時，對垂直方向變化感受大；
 值大時，對水平方向變化感受大。

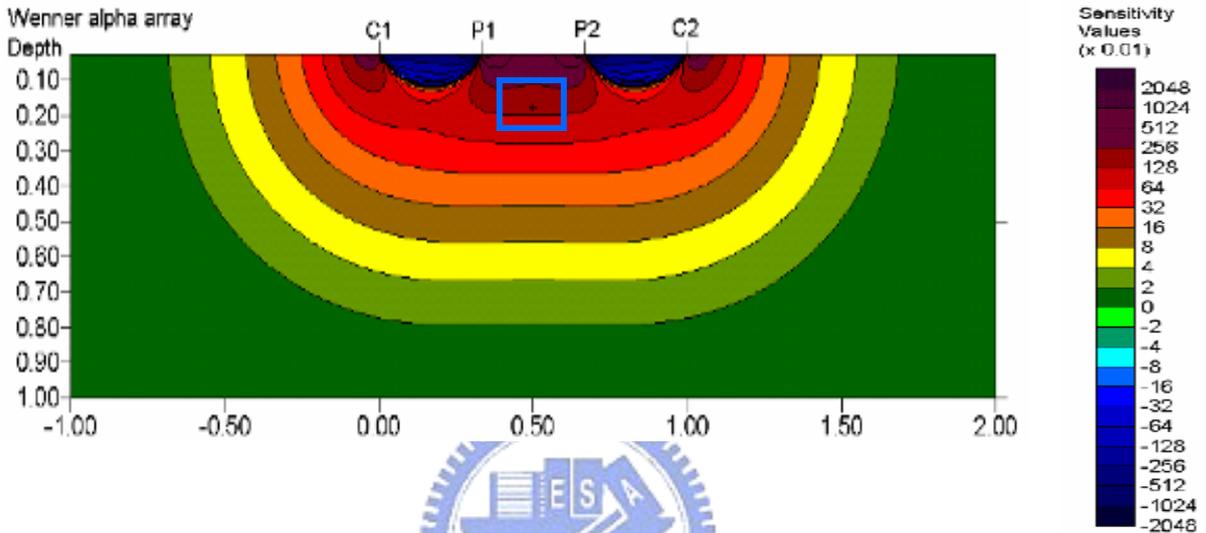


圖 2.25 Wenner 2D-靈敏度剖面(Loke, 2003)

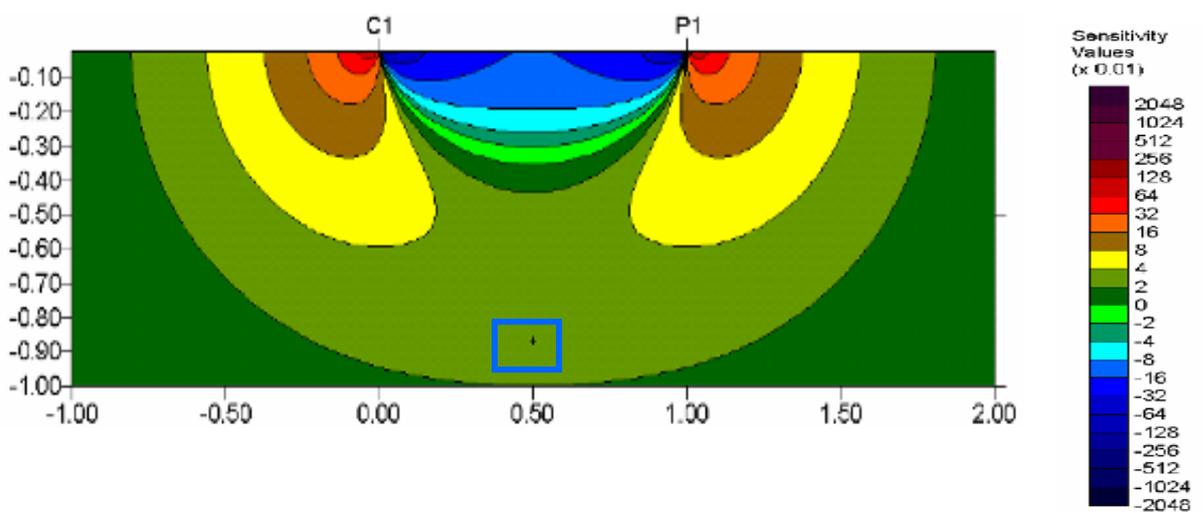


圖 2.26 Pole-Pole 2D-靈敏度剖面(Loke, 2003)

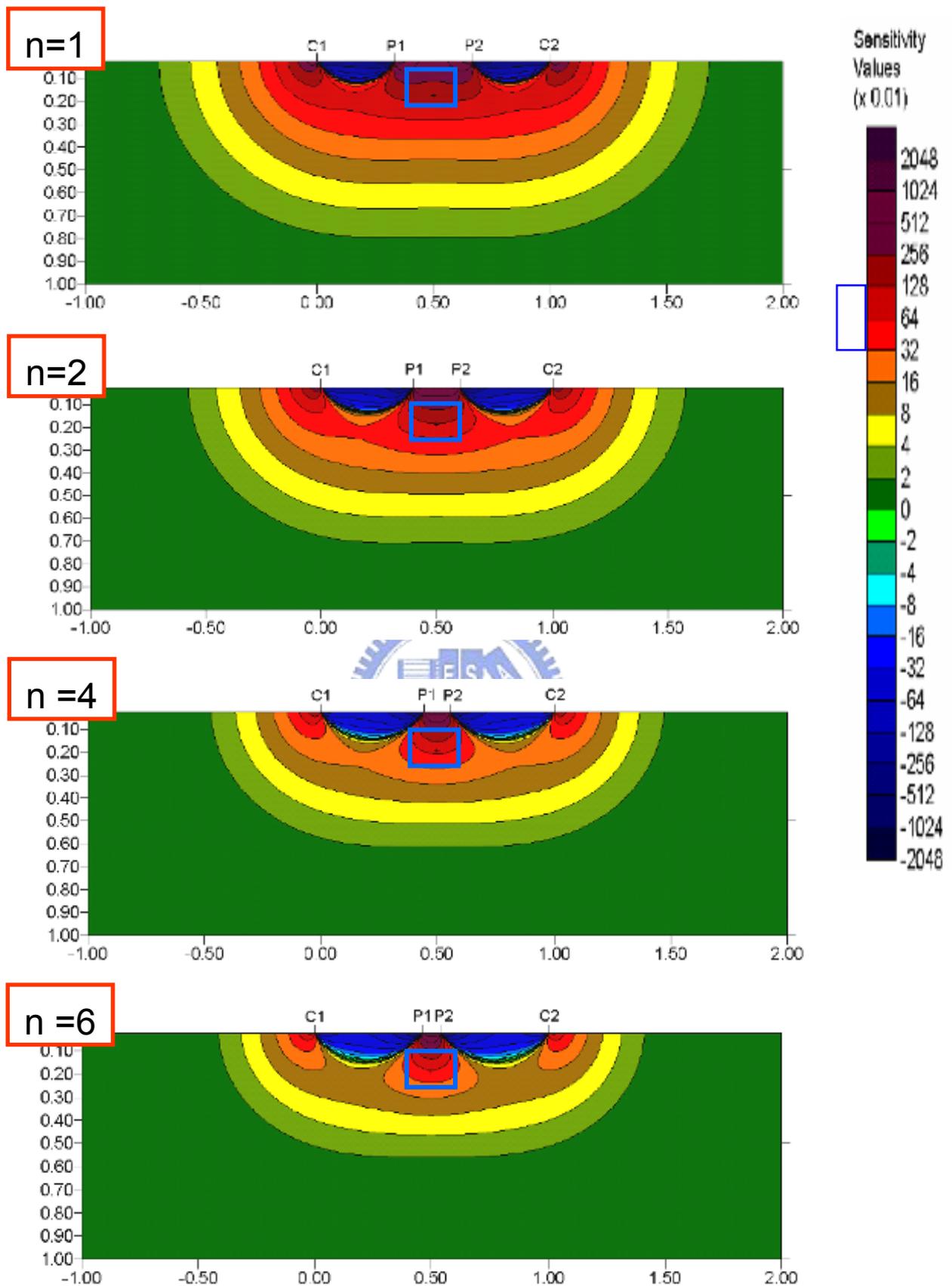


圖 2.27 Wenner-Schlumberger 2D-靈敏度剖面(Loke, 2003)

(d) Pole-Dipole電極排列法屬非對稱性量測系統，由靈敏度剖面圖亦可以看出，為了消除非對稱性，常以順、反Pole-Dipole電極排列施測，如圖 2.28，兩種差別在順測為原先 C_1 起點位於右側，反測的 C_1 起點在左側。圖 2.29 靈敏度剖面圖當 n 等於 1，擬似深度(0.259 公尺)處的靈敏度為 64%， n 增加到 6，擬似深度(0.36 公尺) 處的靈敏度降低為 2%，與 Dipole-Dipole類似的是高靈敏度位於電位極之間，因此Pole-Dipole也對水平方向變化較敏感。

(e) Dipole-Dipole電極排列法之量測靈敏度如圖 2.30。當 n 等於 1 時，最大值出現在電流極 C_1 與 C_2 之間及電位極 P_1 與 P_2 之間，擬似深度(0.139 公尺)處的靈敏度等於 64%。 n 值增加到 6，其擬似深度等於 0.22 公尺，靈敏度值等於 2%。高靈敏度集中在電流極之間及電位極之間，代表對於水平方向變化容易感受，而垂直方向變化幾乎不能感受到，因此當 n 大於 2 的量測深度資料比較不具備有代表性。

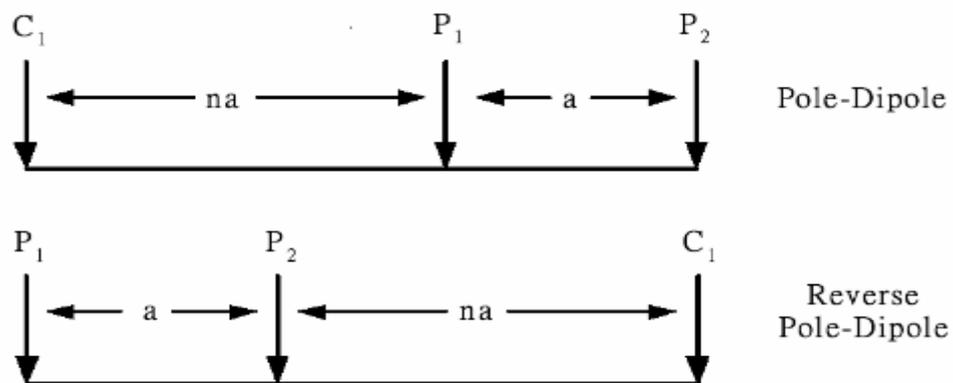


圖 2.28 順、反 Pole-Dipole 施測示意圖(Loke, 2003)

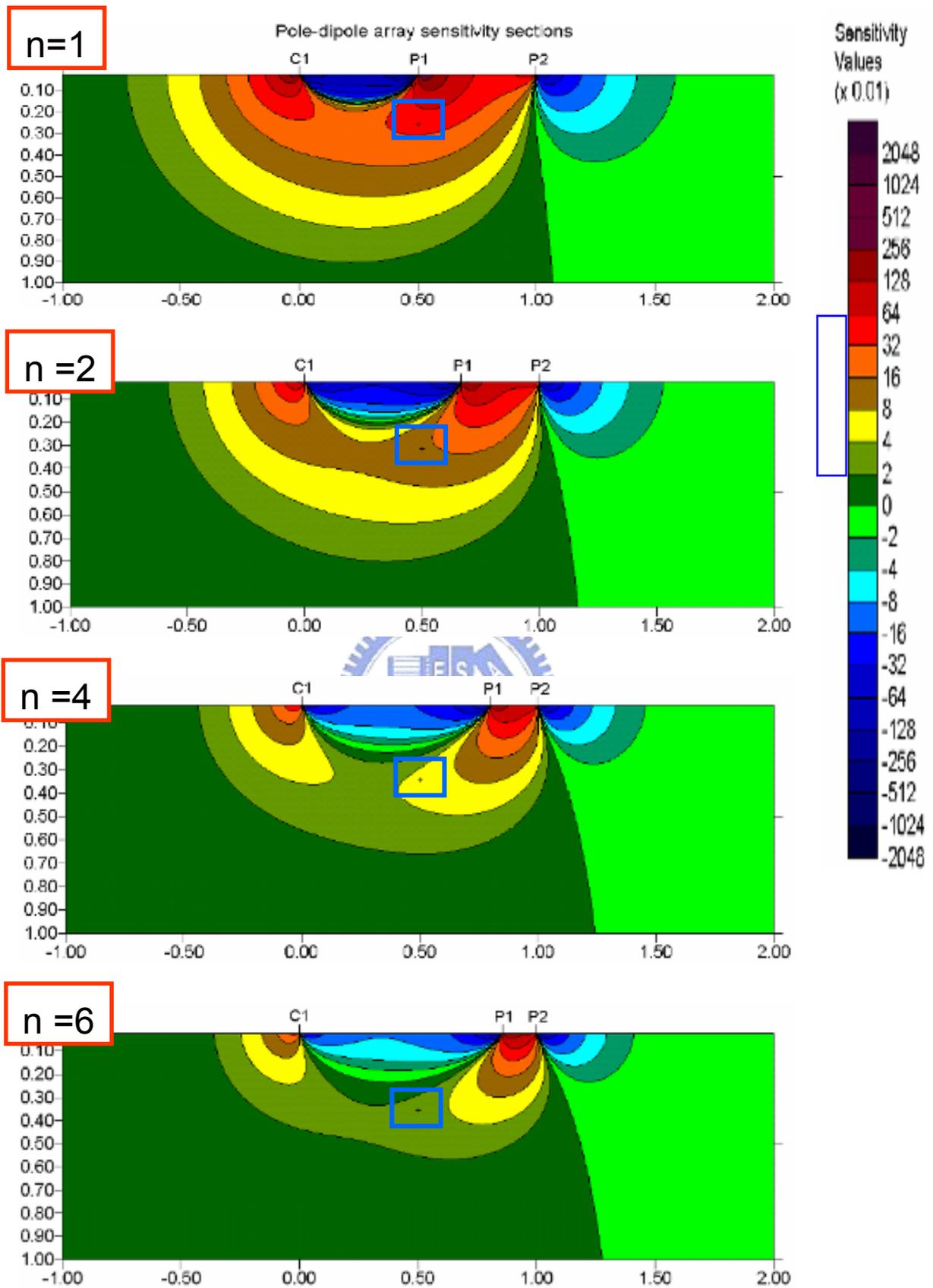


圖 2.29 Pole-Dipole 2D-靈敏度剖面(Loke, 2003)

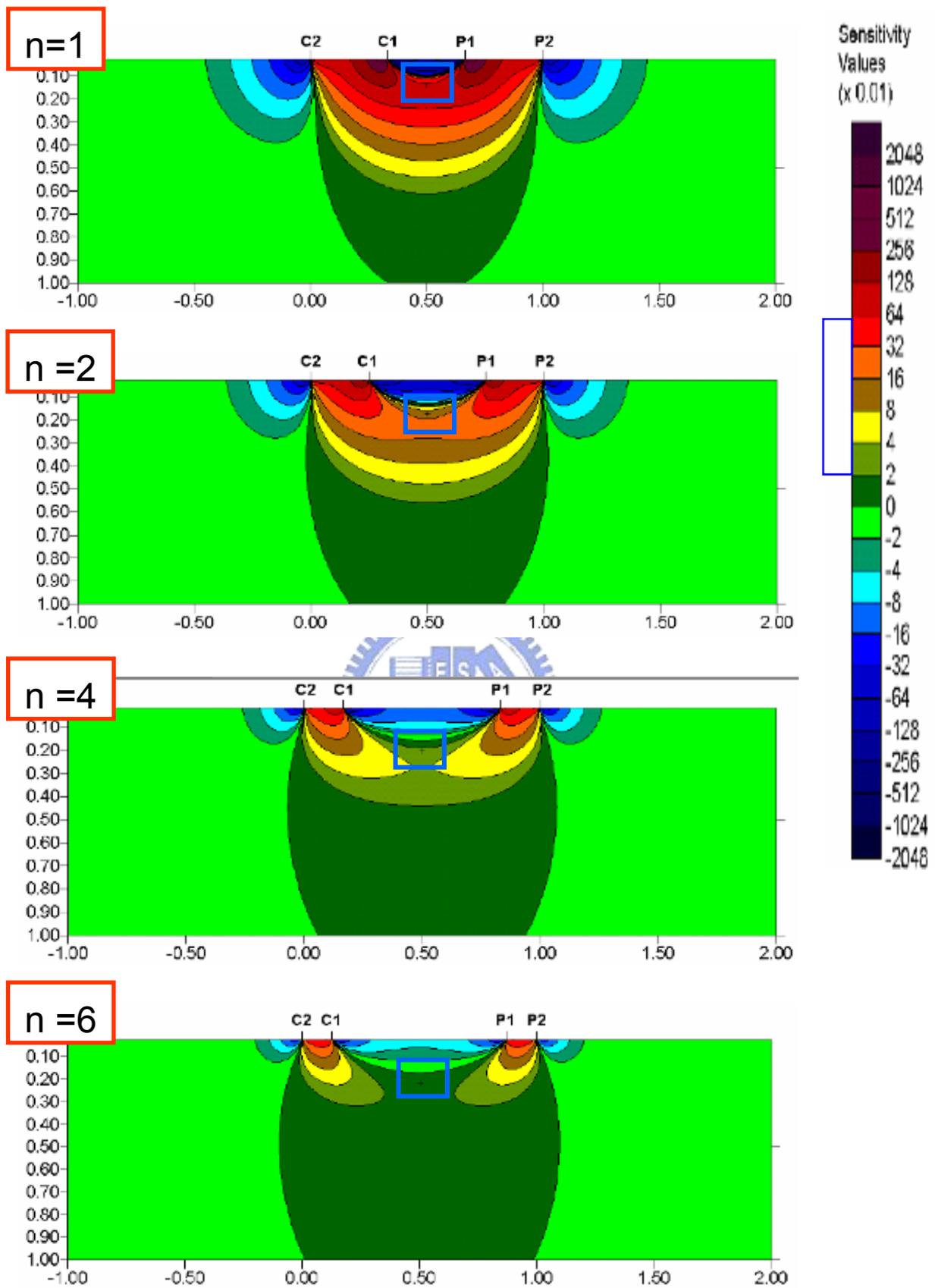


圖 2.30 Dipole-Dipole 2D-靈敏度剖面(Loke, 2003)

(3) 橫向涵蓋範圍

依照各電極排列在相同電極數目(N_e)資料點數涵蓋範圍討論，整理成表 2.5，其中第一層資料點數是指測深參數 n 等於 1 時的資料點數。結果顯示以橫向量測區域最廣的為 Pole-Pole，最小為 Wenner 排列法。於野外做施測的時候，常因為佈設測線空間有限，無法獲得測線邊緣兩側的資料；若施測空間足夠，可利用橫向平移(Roll-along)，補足邊緣資料。

表 2.5 電極排列法之橫向資料涵蓋範圍比較(最小單位電極間距等於 a)

電極排列法	使用電極數	每層減少點數	第一層資料點
Wenner	4	3	$N_e - 3$
Wenner-Schlumberger	4	2	$N_e - 3$
Dipole-Dipole	4	1	$N_e - 3$
Pole-Dipole	3	1	$N_e - 2$
Pole-Pole	2	1	$N_e - 1$

(4) 訊號強度

訊號強度除了受週遭雜訊影響外，如地球自然電位、地層下的金屬導體與高電阻率絕緣體、地形效應等，還與電極排列的幾何參數(K)成反比關係。若固定最小單位電極間距 a ，視電阻率 ρ_a ，電流強度為 I ，則由(2.42)式的電位差訊號大小與幾何參數成反比關係，如表 2.6 所示。不考慮遠電極方法，Wenner 的訊號強度減弱係數為常數($1/K_w$)，Wenner-Schlumberger 約為($1/n^2$)，訊號衰減最快為 Dipole-Dipole，衰減係數約為($1/n^3$)(Zhou 與 Dahlin,

2003)。

Pole-Pole 和 Pole-Dipole 的訊號受到遠電極到測線之間雜訊以及遠電極的非理想狀態而造成訊號的衰減(Dahlin 與 Zhou, 2004; Zhou 與 Dahlin, 2003); Pole-Dipole 的幾何衰減係數約為 $(1/n^2)$ ，且和 C_1P_1 與 C_2P_1 比值(C_1P_1/C_2P_1 小於 1)成平方關係；Pole-Pole 衰減係數雖然和 Wenner 相同為常數關係，但是遠電位極和遠電流極到測線間的雜訊涵蓋了較多的地球自然電流，且和 C_1P_1 與 C_2P_1 比值成正比關係，因此訊號比 Pole-Dipole 還弱。

Dahlin and Zhou(2004)以幾種特定之地質條件情況，探討不同電極排列方法的雜訊比值以及施測的異常反應效果(anomaly effect)。異常反應效果是指以非均質條件的資料和均質條件資料平均差異值，表示電極排列對不同地質條件的反應能力。結果顯示 Pole-Pole 對於傾斜構造地層反應大，但 Pole-Pole 雜訊比值與異常反應效果隨著地層構造不同，會出現較高或較低之值，空間解析能力仍為之中最差。Pole-Dipole 屬於高雜訊比和中等異常反應效果，空間解析度卻比 Pole-Pole、Schlumberger 與 Wenner 佳。

Wenner 與 Schlumberger 兩種電極排列方法之垂直解析度皆是優於其他方法，從幾何參數上比較 Pole-Pole、Wenner 以及 Schlumberger 之電位訊號強度，訊號較 Dipole-dipole 與 Pole-Dipole 電極排列法佳(Zhou and Dahlin, 2003)，但 Pole-Pole 空間解析度卻比不上 Schlumberger、Pole-Dipole、Dipole-Dipole 與 Wenner。

Dipole-Dipole 相對上具有高異常反應效果，但容易受到雜訊影響，空間

解析度與 Pole-Dipole 相同；對於垂直或傾斜構造物的水平位置解析能力非常高，但深度位置解析不是最佳；測深常數 n 建議最大等於 6。

整體上，Wenner 因具有高電勢能差訊號強度，最適合在背景雜訊大的區域施測，以最小單位電極間距 a 施測之 n 值增加到某一個程度時(6~10 之間)，靈敏度低且訊號很小，其中提高靈敏度施測方法為單位間距(D)以 '2a' 施測，可以增加深層靈敏度因 n 過大而降低(Loke, 2003)。以 圖 2.31 Dipole-Dipole 為例，展距 7 公尺，以 D 等於 a ， n 等於 7 和 D 等於 $3a$ ， n 等於 1 的訊號強度比較，後者訊號強度比前者大。

表 2.6 電極排列幾何參數

電極排列法	展距 L	幾何參數 K
Wenner	$3na$	$2\pi a$
Wenner-Schlumberger	$(2n+1)a$	$\pi n(n+1)a$
Dipole-Dipole	$(n+2)a$	$\pi n(n+1)(n+2)a$
Pole-Dipole	$(n+1)a$	$2\pi n(n+1)a$
Pole-Pole	na	$2\pi a$

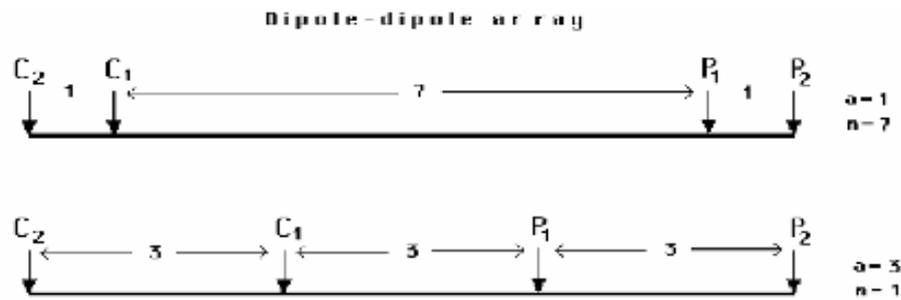


圖 2.31 Dipole-Dipole 不同 n ， a 參數，展距相同(Loke, 2003)

因此當測深需要較深時，Wenner-Schlumberger、Dipole-Dipole、Pole-Dipole 首先可以由最小單位電極間距 a ， n 等於 1~5，接著大於 n 等於 5 時之測深展距，其單位電極間距 D 等於兩倍最小單位間距 ($2a$)， n 等於 1~5，然後 D 等於 $3a$ ， n 等於 1~5 之方式施測，以得到不同單位電極間距和測深參數所形成的似電阻率剖面。因資料層數的間距與測線展距有關(表 2.4)，而這三種電極排列之測線展距與單位電極間距相關(表 2.6)，因此在單位電極間距 D 增加，對於較深層資料點的間距相對提高，進而降低空間解析度，但此施測方式具有降低周遭雜訊、提高靈敏度之優點(Sasaki, 1992; Loke, 2003)。本研究於現地施測時，採用此法提高測深且兼備資料訊號品質。

2.5 正算模擬理論發展

Apparao(1969), Van Nostand and Cook(1966), McPhar Geophysics(1967), Dey(1967) 等人以漸近行為類比於簡單二維、三維非均質模型來模擬電阻率變化，這些模擬的方法只適合在某些電阻率對比高的物理量。

Jepsen(1969), Aiken(1973), Coggon(1971), Madden(1967, 1971)用數值方法模擬一般電阻率比與不同幾何形狀。

Dey and Morrison(1979)模擬點電流源在地表，地表以上的電位為 0 以及無窮遠處電位等於 0 的邊界條件，以顯性有限差分法求解在任意二維、三維電阻率形狀的電位分布。Loke(1994)改進 Dey and Morrison(1979)方法，使得正算視電阻率更正確；並加入有限元素法模擬。

2.6 反算分析理論

反算方法包含四大元素:量測的資料(observed data)， y 、預設的模型(model)、模型參數(model parameter)， q 、模型反應函數(model response)， f ；反應函數是模型參數的變數，模型參數等於模型電阻率之對數值($\log \rho_a$)，其反算結果並非只有唯一解之下，比對經由反應函數計算的電阻率值和量測電阻率值，計算其最小均方根誤差(root-mean-square)；改變模型，重複疊代計算，獲得收斂值得到最佳化解(Lines and Treitel, 1984)，

應用在地球物理之反算方法包含最小平方法(least-squares)(Inman, 1975)，共軛梯度法(conjugate-gradient)(Rodi and Mackie, 2001)，最大熵法(maximum entropy)(Bassrei and Quezada, 2001)、模擬控溫(simulated annealing)(Sharma and Kaikkonen, 1998)，人工類神經網路(artificial neural networks)(Zhang and Zhou, 2002)，奇異值分解法(singular value decomposition)(Muiuane and Pedersen, 2001)等多種方法。常使用於二維、三維地電阻率反算方法為正規最佳化最小平方法(regularized least-squares

optimization)(deGroot-Hedlin and Constable, 1990 ; Loke and Barker, 1996), 以下將介紹 Res2dinv 反算軟體的分析方法，包含最佳化最小平方法、平滑束制最小平方法以及重複再加權最小平方法：

2.6.1 最佳化最小平方法(least-squares optimization)

假設現地量測的視電阻率資料等於行向量 y ，模型參數行向量等於 q ，反應函數行向量等於 f ，如(2.44)式所表示

$$\begin{aligned} y &= \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m) \\ q &= \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_n) \\ f &= \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_m) \end{aligned} \quad (2.44)$$

其中 m 為資料數目， n 為模型參數數量。

若反應函數是線性系統，初始模型參數行向量 q^0 帶入反應函數，將會得到 f^0 與一階泰勒級數的擾動反應值。 f^0 等於 q^0 帶入反應函數得到之初始模型反應值(initial model response)，如(2.45)式，其中 J 等於 Jacobian 矩陣， Δq 等於參數變異向量(parameter change vector)。

$$\begin{aligned} f &= f^0 + \sum_j^n \left. \frac{\partial f}{\partial q_j} \right|_{q=q^0} (q_j - q_j^0) \\ \text{or} & \\ f &= f^0 + J \Delta q \quad ; \quad J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \end{aligned} \quad (2.45)$$

(2.46)式定義反應函數 f 與量測值 y 之差值 e ，量測值與初始模型反應之差值稱為差異向量(discrepancy) g 。以高斯牛頓法求解當 e 平方為最小時的 Δq 值，其過程中得到正規方程式(normal equation)，如(2.47)式，解出 Δq 值。

而第 $i+1$ 次的初始模型參數 q_{i+1} 等於 $q_i + \Delta q_i$ ，進行疊代計算。

$$\begin{aligned} y - f &= e \\ y - f^0 &= g \quad ; \quad e = g - J\Delta q \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$J^T J \Delta q = J^T g \quad (2.47)$$

若初始資料不佳常造成 $J^T J$ 成為接近奇異矩陣，造成 Δq 變異量太大不符合實際。Inman(1975)以馬奎特-李文柏格(Marquardt-Levenberg)方法，加入一阻尼係數 λ (damping factor)或稱 Lagrange 乘數(Lagrange multiplier)，將參數變異向量限制在 Δq_0^2 之內，其中 Δq_0^2 等於 $\Delta q_0^T * \Delta q_0$ 如(2.48)式所示，其中 I 為單位矩陣。(2.48)式可避免變異向量改變過大，此方法也稱為脊回歸法(ridge regression)。

$$(J^T J + \lambda I) \Delta q = J^T g \quad (2.48)$$

2.6.2 平滑束制最小平方法

Constable et al. (1987)認為以脊回歸法反算二維或三維的問題，當模型參數很多時，會造成某些位置會出現太高或太低的錯誤值。

deGroot-Headlin and Constable(1990)，Ellis and Oldenburg(1994)加入粗糙係數(roughness filter)降低模型參數變異的平方和，如(2.49)式，此方法稱為 smoothness-constrained least-squares，或 L_2 norm。

$$(J_i^T J_i + \lambda_i W^T W) \Delta q_i = J_i^T g_i - \lambda_i W^T W q_{i-1}$$

$$W = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ & & & & \dots & & & \\ & & & & & \dots & & \\ & & & & & & \dots & \\ & & & & & & & \dots & \\ & & & & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

其中 i 為第 i 次疊代， W 為一階有限差分運算元，或稱粗操係數、平滑係數。

Sasaki(1992)認為阻尼係數 λ 是影響 L_2 方法反算效果主要參數；適當大小的阻尼係數值，會將高斯雜訊影響反算結果降到最低。

2.6.3 重複再加權最小平方法

Clarebout 與 Muir(1973)認為遇到急遽改變之邊界，需求取最小絕對差異量較為適合。

Wolke and Schwetlick(1988)以最小平方法為基準，加入權重矩陣 R_d 、 R_m ，達到資料差異量(g)與模型粗糙係數(W)在反算過程達到接近相同權重。此方法稱為 iteratively reweighted least-squares method inversion，或 blocky inversion、 L_1 norm，如(2.50)式

$$(J_i^T R_d J_i + \lambda_i W^T R_m W) \Delta q_i = J_i^T R_d g_i - \lambda_i W^T R_m W q_{i-1} \quad (2.50)$$

L_2 norm 適合用於地層的阻率性質是漸變模式(Ellis 與 Oldenburg, 1994)，對於電阻率急遽改變的邊界，為了尋求最平滑化的模型，而造成出

現過高及過低的電阻率；以 L_1 norm 方法較為適合於急遽變化之模式 (Loke, Acworth and Dahlin, 2003; Olayinka and Yaramanic, 2000) 。

Zhou and Dahlin(2003)認為電位誤差大於 5%，以 L_1 反算方法比 L_2 反算方法可得到較佳影像；也就是受到背景雜訊大影響的資料，以 L_1 反算方法較不受雜訊影響。



三、案例研究

本研究試驗案例包含下列場址試驗資料，場址分別為(1)寶山二號水庫-交大試驗場址，(2)交通大學博愛校區，(3)恆春東門溪-赤牛嶺以及(4)新竹市三姓公溪扇口-三姓橋。文中首先對各場址之區域地質情況資料蒐集簡述，並將測區內鑽孔地質資料視為試驗場址之基本地質分層資料。

ERT 試驗於四種案例，分別使用一至五種不等之電極排列法進行試驗；其中 Wenner 電極排列法測深參數 n 設定為 1~10，Pole-Pole 測深參數依據測深、最小單位電極間距 a 與遠電極距測線之空間大小而定，約在 1~20 之間。Dipole-Dipole、Pole-Pole 以及 Wenner-Schlumberger 單位電極間距分別以 $1a$ 、 $2a$ 或 $3a$ ，其測線展距依序以單位電極間距 $1a$ ，測深參數 1~8 施測，接續以單位電極間距 $2a$ ，測深參數 $8/2$ ~ $15/2$ ，最後再以單位電極間距 $3a$ ，測深參數 $15/3$ ~ $22/3$ 進行最深層施測(Loke, 2003)；其中單位電極間距 $2a$ 施測測深大於單位電極間距 $1a$ ，單位電極間距 $3a$ 施測測深大於單位電極間距 $2a$ 。

視電阻率資料反算分析流程及反算參數選定見附錄 A；其模型網格厚度隨深度增加，以有限元素法進行正算分析。反算方法分別以平滑束制最小平方法(L2 norm.)以及重複再加權最小平方法(L1 norm.)進行分析，案例研究中取此二法之反算誤差最小者為案例分析中之地電組影像剖面結果。並於各案例中最後提出地電阻影像法用於土工調查之空間解析能力與問題。

3.1 寶山二號水庫-交大試驗場址

3.1.1 試驗儀器介紹

本研究試驗儀器採用SYSCAL PRO Switch 48 為法國IRIS公司生產之地電阻儀，該儀器將傳送電源器(transmitter)、接收器(receiver)與電源供應器(booster)結合為一體，具備外接式直流電源，可視需求提供更大的電流源，並可外接Switch Pro Box達到二維或三維施測。除使用直流電法量測地電阻率值之外，儀器並具備誘發極化(induced polarization, IP)量測功能。透過RS232 連接線與電腦相連，經由程式控制儀器，將使儀器達到監測系統之功能，表 3.1 為SYSCAL Pro Switch 48 儀器功能規格表。

本研究案例試驗施測用之電極為不鏽鋼電極，分別為大電極棒，直徑 1.6cm，長 60cm與小電極棒直徑 1.0cm，長 30cm，傳導纜線(12 組電極接頭一捆，間距 10m)計 4 捆，電極夾線連接傳導纜線與電極，纜線連接盒兩組，遠電極線(長度 500 公尺)兩捆，如 照片 3.1。

儀器內部可設定簡單施測參數，例如最小單位間距為 a ，測深參數 n ，若單位間距大於 $2a$ 以上，則可測得較深的資料，但需藉由 Electre II 設定施測程序進行施測。量測完畢後，由 Prosys 程式將資料下載到電腦，進行資料管理、轉檔成為 Res2dinv 反算軟體格式(*.dat)檔。

反算分析軟體為 Geotomo 公司開發的 Res2dinv(version 3.54z)地電阻影像反算軟體；Res2dinv 反算分析基本方法採用最佳化最小平方法，其中正

算模擬程序是將地層模型分為多個矩形方塊，以有限差分法或是有限元素法計算反應之視電阻率值，當此計算視電阻率值與量測視電阻率值之誤差達到最小，獲得一組最佳化解，則該模型為代表地層電阻率分布情形。



照片 3.1 IRIS 地電阻儀器設備

3.1.2 寶山二號水庫地質狀況

寶山二號水庫位於新竹縣寶山鄉竹東丘陵區，鄰近區域之地層屬台灣西部麓山帶地質區，出露之地層以甚為年輕之上新世卓蘭層及更新世之楊梅層(或頭嵛山層)為主。本場址基本地質資料說明如下：

(1)地質背景介紹

交大試驗場址位於寶山二號水庫右壩軸連接道路，距離右壩軸約 200 公尺處之淹沒區附近，與壩址之相關位置見 圖 3.1 寶二水庫地形全圖。水利署或其他單位曾對該區域地質進行露頭調查並配合鑽探調查繪製細部地質圖，並透過光學測站儀量測地層面露頭以及地質羅盤量測層面之走向傾角，得知此區域地層走向為 $N48^{\circ}E$ ，傾角為 29° ，傾斜方向為東南方向；最

後配合現況地形測量繪製出試驗場址的細部地質圖，如圖 3.2。試驗場址之地質為厚砂岩層及泥岩層所構成，鑽探方式採取旋鑽，並取岩心；鑽探調查發現於地表面下 30 公尺以上無地下水。鑽探柱狀見附錄B。

表 3.1 SYSCAL Pro Switch 48 儀器功能規格

輸出規格	<p>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%</p>
擷取訊號規格	<p>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 μV 疊加多次量測，統計標準偏差 IP 量測可達到 20 組切片資料</p>
一般規格	<p>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</p>

(2) 岩層描述

根據鑽探孔B1、B2 和B3 鑽探柱狀圖與露頭調查資料，鑽探孔位分佈如圖 3.4，將該區域地質狀況大致上分為三種，分別描述如下：

a.黃棕色砂岩(SS)：依據露頭及配合鑽探岩心判識成果，黃棕色砂岩(SS)為本區域主要地質構成材料，其顆粒較粗大，膠結不良，遇水極易軟化，有少數地方夾有植物化石、煤炭以及小脆石等雜質。於本層中偶有夾橘紅色鏽染砂岩，其質地非常堅硬。

b.灰色泥岩(MS)：灰色泥岩(MS)分佈少，其顆粒細小，膠結良好，遇水軟化時間較長，且岩性大致不會因不同岩層而差異太大。

c.薄砂泥岩互層(MS/SS)：薄砂泥岩互層(MS/SS)為厚度不超過3公分之砂岩夾有厚度約2公分灰色泥岩，如圖 3.2，其層面膠結普遍不良，層面光滑平坦。



圖 3.2 中A-A'地質剖面線通過鑽孔B1 和B_CHT_1，與岩層走向垂直。如圖 3.3a，1m處為測線1起點，48m處為測線終點位置，測線起點位於A-A'剖面線17公尺處。A到A'方向岩層變化，通過的不同岩層性質，其層面厚度分別為9公尺砂岩、2.8公尺的砂泥岩互層、4公尺砂岩、5.5公尺泥岩、1.7公尺砂岩、5.5公尺泥岩、4.1公尺砂岩與9公尺泥岩，整理如表 3.2。

B-B'剖面線通過鑽孔B3 和B_CHT_1，與岩層走向平行。其中1m處和36m處分別為測線2起點與終點(見圖 3.3b)，由淺到深地質分層厚度為1.5公尺砂岩、2.7公尺泥岩、3公尺砂岩、0.7公尺砂泥岩互層以及超過10公尺的砂岩層，整理如表 3.3。

表 3.2 地質剖面線 A-A' 的側向岩層變化

層面 編號	a	b	c	d	e	f	g	h
地質 剖面 位置	17m~ 26m	26.0m~ 28.8m	28.8m~ 32.8m	32.8m~ 38.3m	38.3m~ 40.0m	40.0m~ 45.5m	45.5m~ 49.6m	49.6m~ 58.6m
測線 位置	0m~ 9.0m	9.00m~ 11.8m	11.8m~ 15.8m	15.8m~ 21.3m	21.3m~ 23.0m	23.0m~ 28.5m	28.5m~ 32.6m	32.6m~ 41.6m
岩層 性質	砂岩	砂泥 岩互 層	砂岩	泥岩	砂岩	泥岩	砂岩	泥岩

表 3.3 地質剖面線 B-B' 的垂直岩層變化

層面編號	岩層深度(m)	岩層性質
a	0.0~1.5	砂岩
b	1.5~4.2	泥岩
c	4.2~7.2	砂岩
d	7.2~7.9	砂泥岩互層
e	7.9~17.9 以上	砂岩

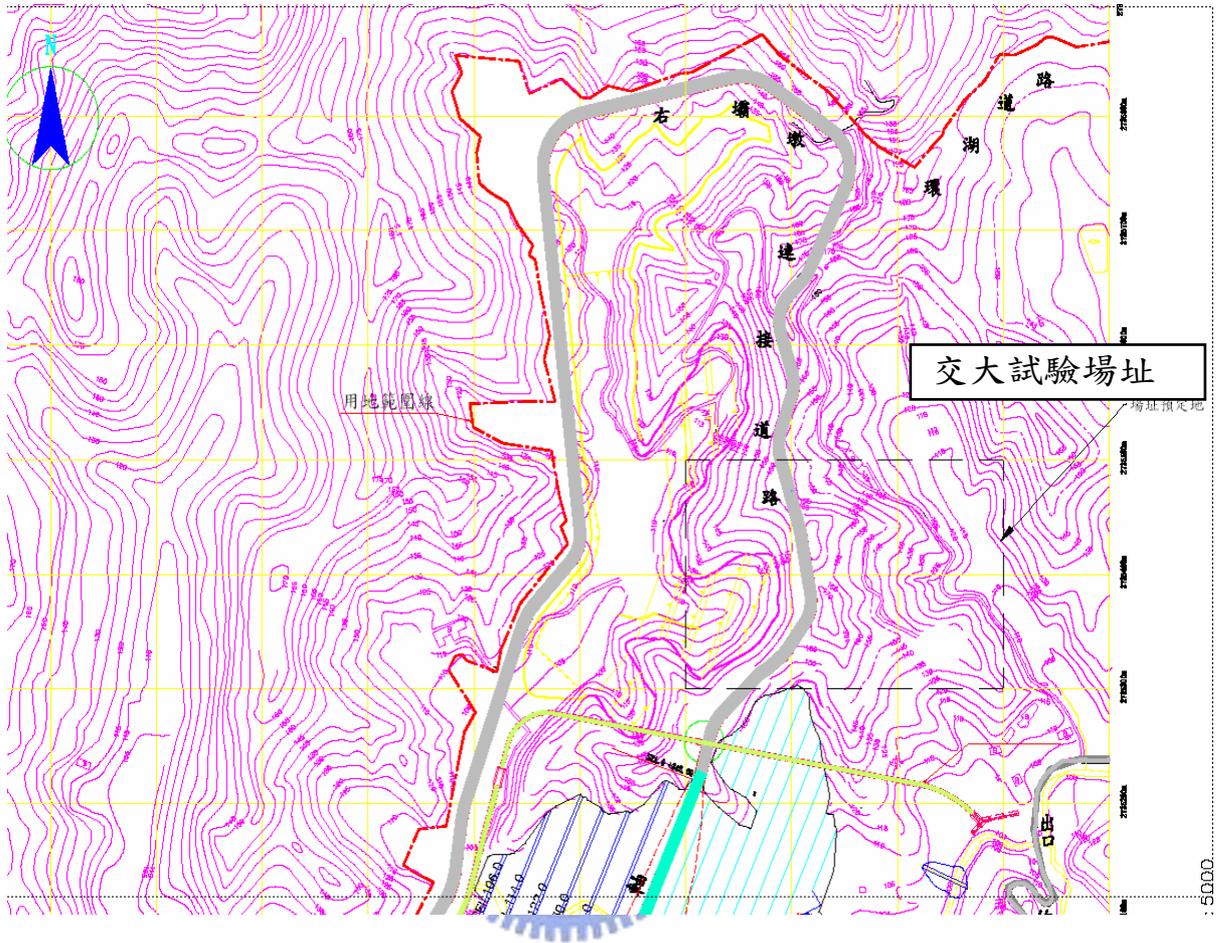


圖 3.1 寶山二號水庫交大試驗場址位置

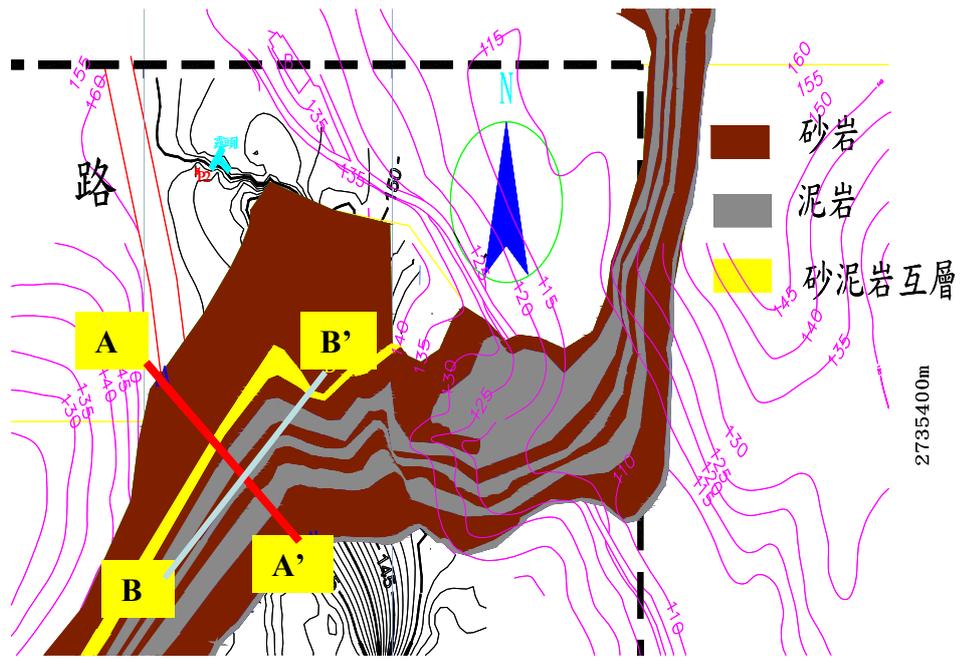
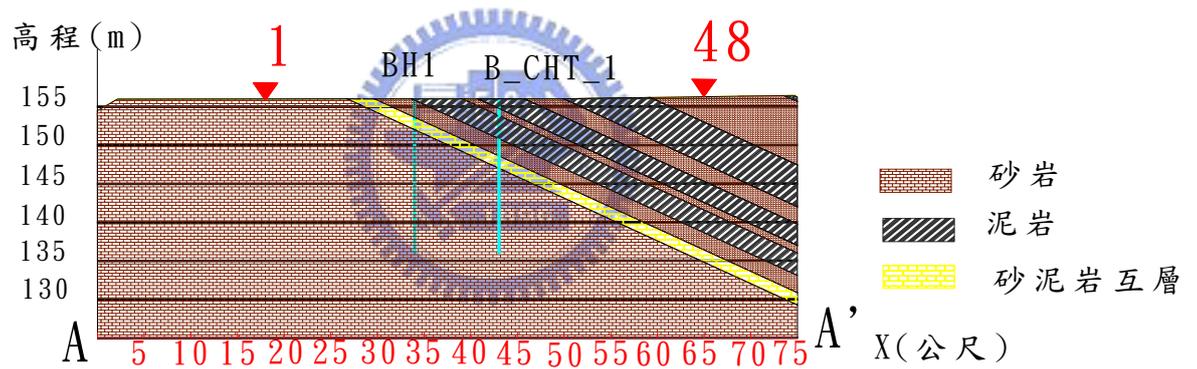
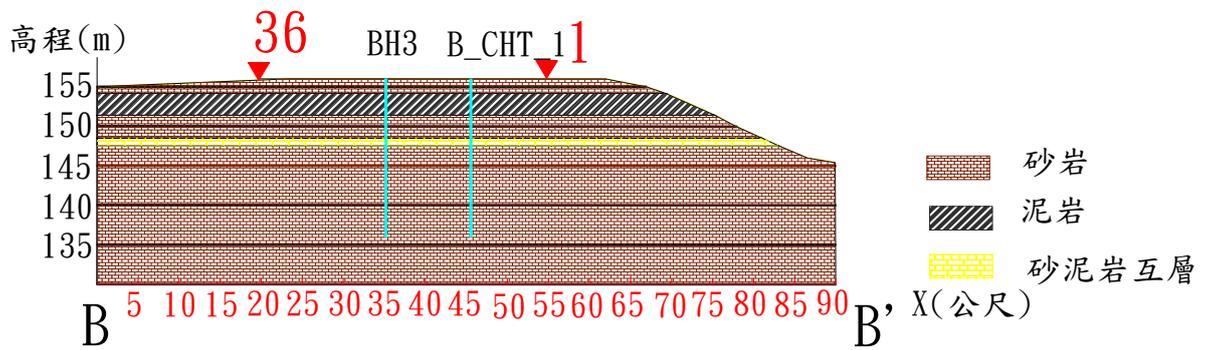


圖 3.2 寶二水庫交大試驗場址地質圖



(a) 垂直岩層走向地質剖面圖



(b) 平行岩層走向地質剖面圖

圖 3.3 地質剖面圖 A-A'和 B-B'

3.1.3 測線位置與施測參數

試驗場址佈設兩條測線，其中測線 1 位於A-A'剖面線上，垂直岩層走向，測線展距計 47 公尺。測線 2 位於B-B'剖面線上，平行岩層走向，測線展距計 35 公尺，最小單位電極間距皆為 1 公尺；測線皆以Dipole-Dipole、Pole-Dipole以及Pole-Pole三種電極排列方式施測，測線施測參數如 表 3.4。照片 3.2 為測線 2 施測情形，西側靠近道路為測線終點，照片 3.3 為現場地質調查量測露頭。

表 3.4 寶山二號水庫試驗場址施測參數

測線名稱	測線 1	測線 2
測線方向	S42°E(垂直岩層走向)	N48°E
電極間距, m	1	1
電極數目	48	36
測線展距, m	47	35
施測方式	Dipole-Dipole、Pole-Dipole、Pole-Pole	
測線(起/終點)座標	(253708,2735410)	(253737,2735392)
	(253741,2735370)	(253711,2735371)
遠電流極(C2)座標	(253623,2735268)	(253623,2735268)
遠電位極(P2)座標	(253708,2735446)	(253708,2735446)

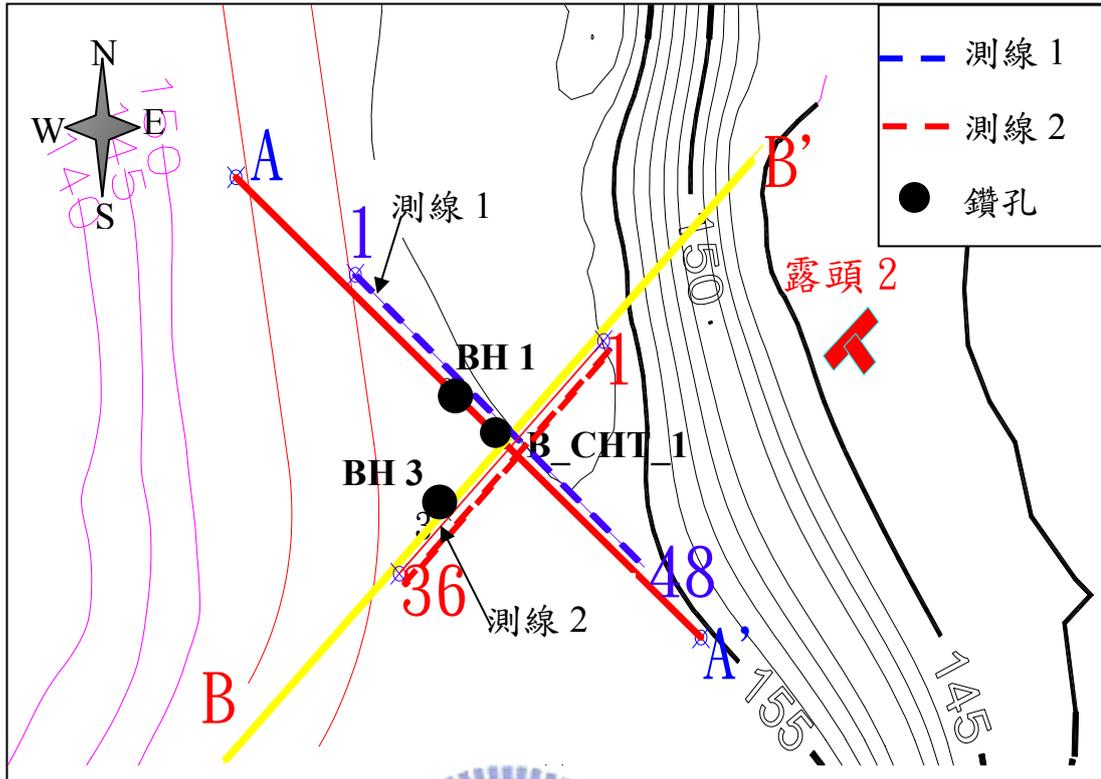
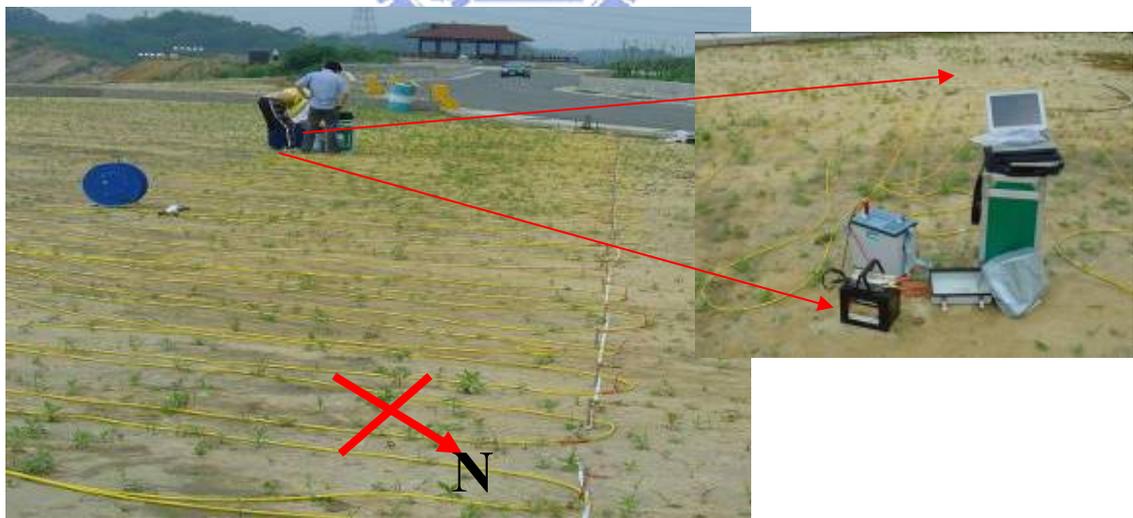


圖 3.4 地電阻測線與鑽探孔位置



照片 3.2 測線 2 現場地電阻施測照片

3.1.4 試驗結果

(1)測線 1 電阻率影像剖面

Dipole-Dipole(以下簡稱DD)地電阻影像剖面(如 圖 3.5a)，斜虛線表示層面位置(如 表 3.2)；測線起點位於地質剖面圖距原點 17 公尺處，如 圖 3.3a。其中測線上 0~7 公尺電阻率等於 70 ohm-m，7~15.8 公尺電阻率等於 150 ohm-m，15.8~24 公尺以及 26~28 公尺電阻率等於 50 ohm-m，24~26 公尺電阻率等於 100 ohm-m，28~34 公尺電阻率等於 90 ohm-m，34~47 公尺電阻率高達 200 ohm-m以上。

Pole-Dipole(以下簡稱PD)及Pole-Pole(以下簡稱PP)地電阻影像剖面測深 3 公尺以上和DD結果類似，電阻率有側向變化，較深的深度無法明顯呈現側向電阻率變化，如 圖 3.5b,c試驗結果，與Dahlin與Zhou(2003)分別以 Wenner(以下簡稱WN)、Wenner-Schlumberger(以下簡稱WS)、PP、PD與DD模擬傾斜電阻率地層結果一致；接近地表且厚度較厚的傾斜構造能顯現出，厚度較薄、深度較深位置則無法明顯呈現出傾斜變化構造的地電阻率變化。

(2)測線 2 電阻率影像剖面

DD地電阻影像剖面於測深 2 公尺以上電阻率無明顯差異，電阻率約為 50 ohm-m如 圖 3.6a。PD影像剖面於深度 8.5 公尺以上地電阻率為 50 ohm-m~70 ohm-m，深度 8.5 公尺以下，深度增加至 12 公尺電阻率漸增為

100 ohm-m，如 圖 3.6b。PP 影像剖面(如 圖 3.6c)位於深度 15.3 公尺以上，電阻率等於 50 ohm-m~70 ohm-m，深度 15.3 公尺以下，電阻率漸增到 200 ohm-m。B-B' 地質剖面與測線 2 電阻率影像剖面比對，深度 7.9 公尺以上有岩層性質改變，電阻率在深度 12 公尺以上沒有明顯變化。



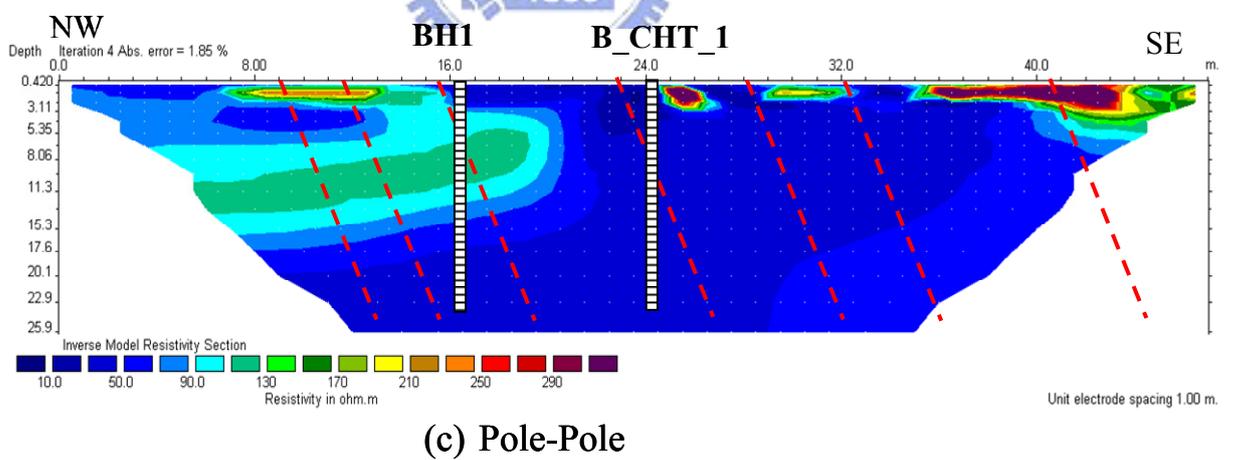
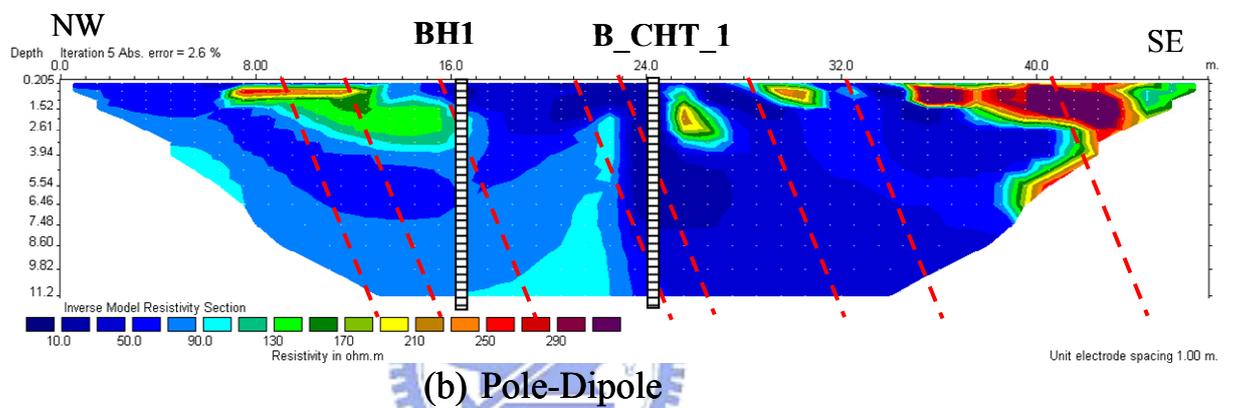
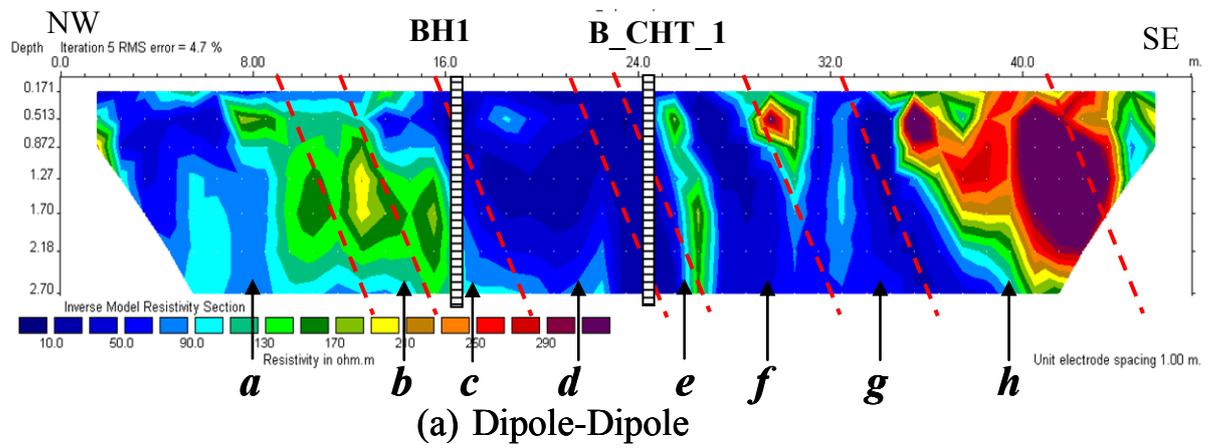
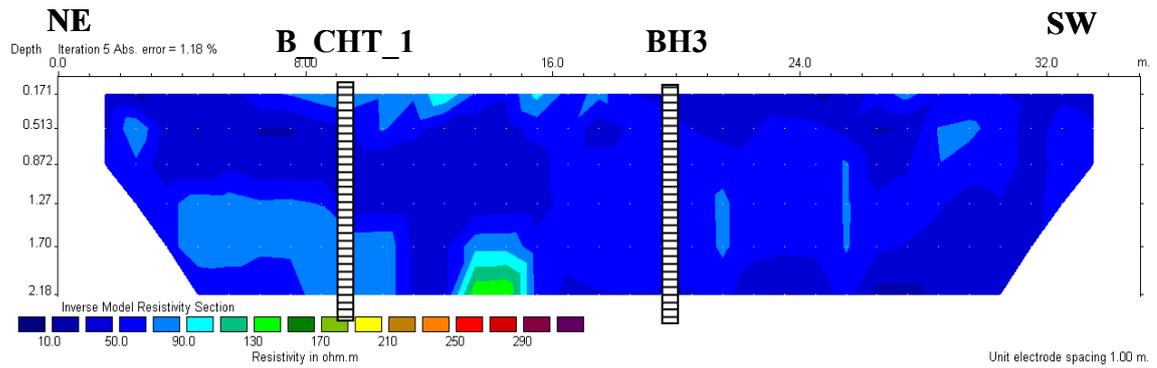
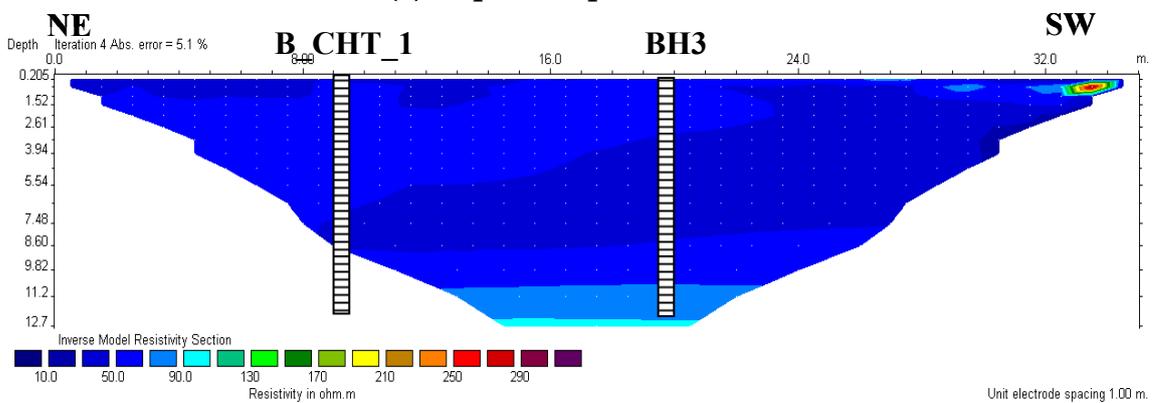


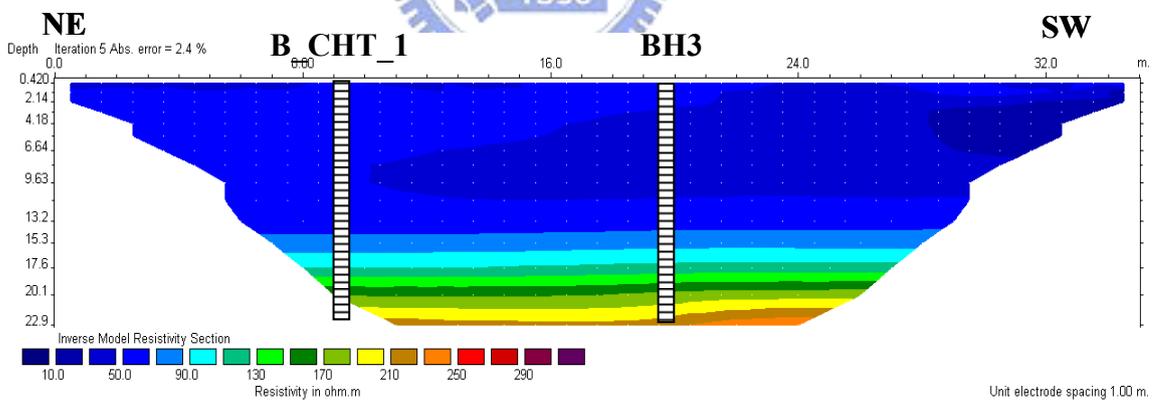
圖 3.5 寶山二號水庫測線 1 電阻率影像剖面



(a) Dipole-Dipole



(b) Pole-Dipole



(c) Pole-Pole

圖 3.6 寶山水庫測線 2 電阻率影像剖面

3.1.5 試驗討論

(1) 空間解析能力

垂直岩層走向之測線 1，其測線下地層屬於傾斜構造，若依電學性質之電阻率差異界面為地層分界，其結果與地質分層層面位置略有不同，然在 DD、PD、PP 影像剖面深度於 3 公尺以上，側向變化有明顯呈現；但傾斜構造特性遭扭曲，無法從影像剖面中推得真實的傾斜角度，由此可知愈深層其解析度為降低趨勢。

Dahlin and Zhou(2003)以十種不同電極排列法數值模擬傾斜構造，認為影響的因素為邊緣資料點缺少(edge effects)造成兩側邊緣影像無法獲得傾斜構造特性，以及岩層厚度小，降低空間解析能力。

測線 2 電阻率影像剖面，其層面位置與電阻率界面位置有所誤差，無法直接由電阻率界面決定地層層面，但其顯示電阻率垂直變化方向(水平構造性質)與實際地層水平構造相似。

(2) 非真實二維條件影響

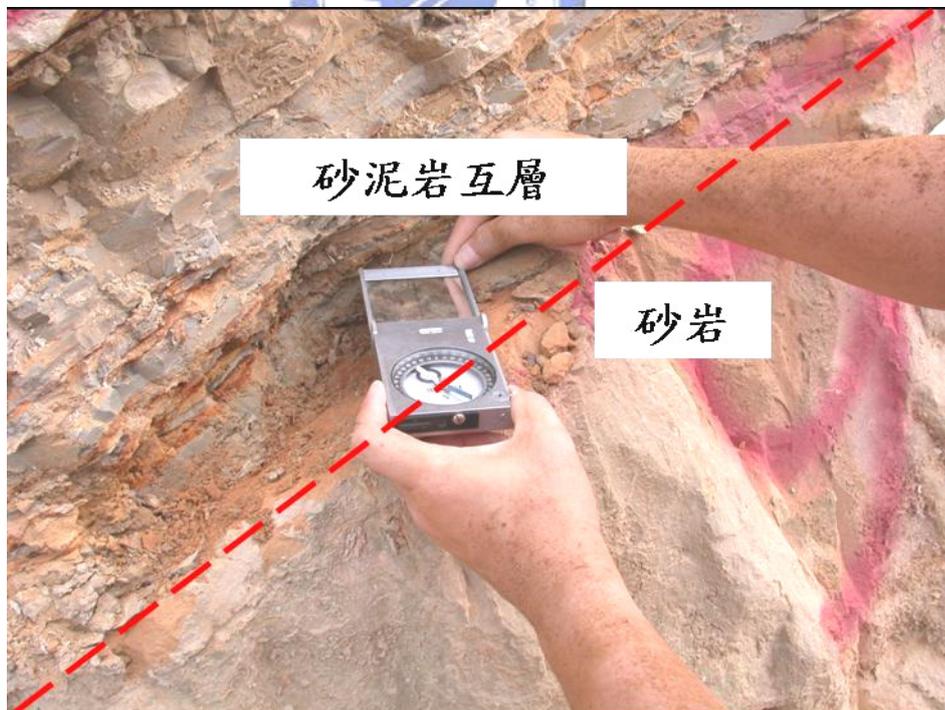
測線 1 與測線 2 相交點在鑽孔 B_CHT_1 位置上，其中兩者的 PP 影像剖面位在 B_CHT_1 附近結果，於深度 15 公尺以下不同；測線 1 維持電阻率等於 50 ohm-m，測線 2 電阻率隨深度愈深而增至 200 ohm-m。研判造成此結果應與地層層面構造干擾電流路徑，造成電位場改變。

另測線 1 與測線 2 之起點和終點外側地勢與測區內地勢高低落差達到

30 公尺以上，屬於非真實二維介質情形，此空氣介質等同於在邊界上加了絕緣介質，限制電流傳遞，造成電位場改變，此結果與真實二維推導原理不同所謂真實二維條件為沿著垂直測線方向(y-direction)之介質為均質均向無限延伸，介質只在測線方向(x-direction)與深度方向(z-direction)產生變化。探討邊界條件以及傾斜構造如何影響三維電流分佈，造成電場之改變，未來可透過數值分析詳細探討。

(3)傳統表面施測深度受限於空間大小

由鑽探資料顯示該地區地下水位位於 30 公尺以下，於測線 2 深度到達 15 公尺之後電阻率值增加，測線 1 無太多差異變化；因測區空間小，限制測線展距，測深無法獲得 30 公尺以上資料點，無法探測地下水位。



照片 3.3 調查露頭走向傾角

3.2 國立交通大學博愛校區

3.2.1 交通大學博愛校區地質狀況

(1) 區域地質背景介紹

交通大學博愛校區位在新竹市博愛街，由中央地質調查所五萬分之一數位地質圖資料顯示，附近出露岩層性質為沖積層、頭嵙山層、店子湖層(如圖 3.7)。

沖積層主要由礫石、泥砂所組成，其中以砂、泥所占比例較多。頭嵙山層(張麗旭，1948，1955)分為兩相，較為下部以砂頁岩為主者稱為香山相，較為上部以礫岩為主者稱為火炎山相。本區屬於頭嵙山層香山相(鳥居敬造、吉田要，1931)，砂岩呈淡灰色或黃棕色，顆粒為細粒至中粒，膠結相當疏鬆，膠結物主要為黏土；少數礫石薄層偶夾在砂岩和泥岩之中。

店子湖層(林朝榮，1963)主要由下部礫石和上部紅土所組成，礫石組成主要為白色石英岩、深灰色矽質砂岩、深青色至黃棕色之鈣質砂岩及含少量的玄武岩和輝綠岩，礫徑在 10 到 20 公分之間，礫石層厚度從數公尺到 5、60 公尺不等，與上部覆蓋紅土成漸移關係；紅土層厚度在 1 至 2 公尺之間。

店子湖層與下伏頭嵙山層成不整合接觸，頭嵙山層整合覆蓋在卓蘭層之上，與其上覆之沖積物為不整合接觸。

(2) 鑽探資料

S32 鑽孔位在交通大學博愛校區足球場升旗台前(如圖 3.7)，深度計 18.5

公尺，於深度 0~4.3 公尺為棕黃色粉土質砂土，4.3~6.6 公尺為粉土質細砂偶夾礫石，6.6~15.8 公尺為砂質礫石偶夾卵石，15.8~18.25 公尺為深灰色粉砂岩，其中深度 11.95 公尺以下 SPT N 值大於 50，見附錄 B。依岩性判斷，6.6 公尺以上屬於沖積層，以下屬頭嵙山層香山相。S33 鑽孔位於校區大門東側，計深度 5.9 公尺，0~2.55 公尺為黃棕色砂質粘土，夾雜紅色灰色粉土；2.5~5.9 公尺為黃棕色砂質泥岩，其中深度 5.9 公尺處 SPT N 值大於 50。

鑽孔資料顯示兩孔位之間承載層(N 值大於 50)高程差達 6 公尺；本區域內依中央地質調查所-新竹斷層研究報告，校區南側疑似為新竹斷層通過位置(見圖 3.7)。

3.2.2 測線位置與施測參數



測線 1-1 位於交大博愛校區操場升旗台前，展距長計 220 公尺，其中鑽孔位於測線 77.5 公尺。考量設置遠電流極(C2)與遠電位極(C1)於本校區內空間有限，分別以 Dipole-Dipole、Wenner(WN)以及 Wenner-Schlumberger(WS) 於測線 1-1 進行施測，用於瞭解深度小於 30 公尺以上電阻率分佈性質；其中 1 和 45 分別為測線 1-1 的起點和終點。Pole-Dipole(PD)、Pole-Pole(PP) 於測線 1-2 進行施測，以瞭解足球場東南側深層電阻率性質；其中 1、24 分別為測線 1-2 的起點和終點位置，施測參數見表 3.5，遠電極位置見圖 3.8。

測線 2-1 位於竹銘館旁西側草皮，展距共計 70 公尺；測線 2-2 涵蓋壘

球場以及足球場南側，展距為 108 公尺，測線位置如 圖 3.8 所示，其中起點位於圖中 1 處。透過Dipole-Dipole與Wenner電極排列方式施測，以瞭解淺層電阻率垂直與橫向變化情形，配合Pole-Pole瞭解深度 30 公尺處電阻率性質，施測參數見 表 3.6。



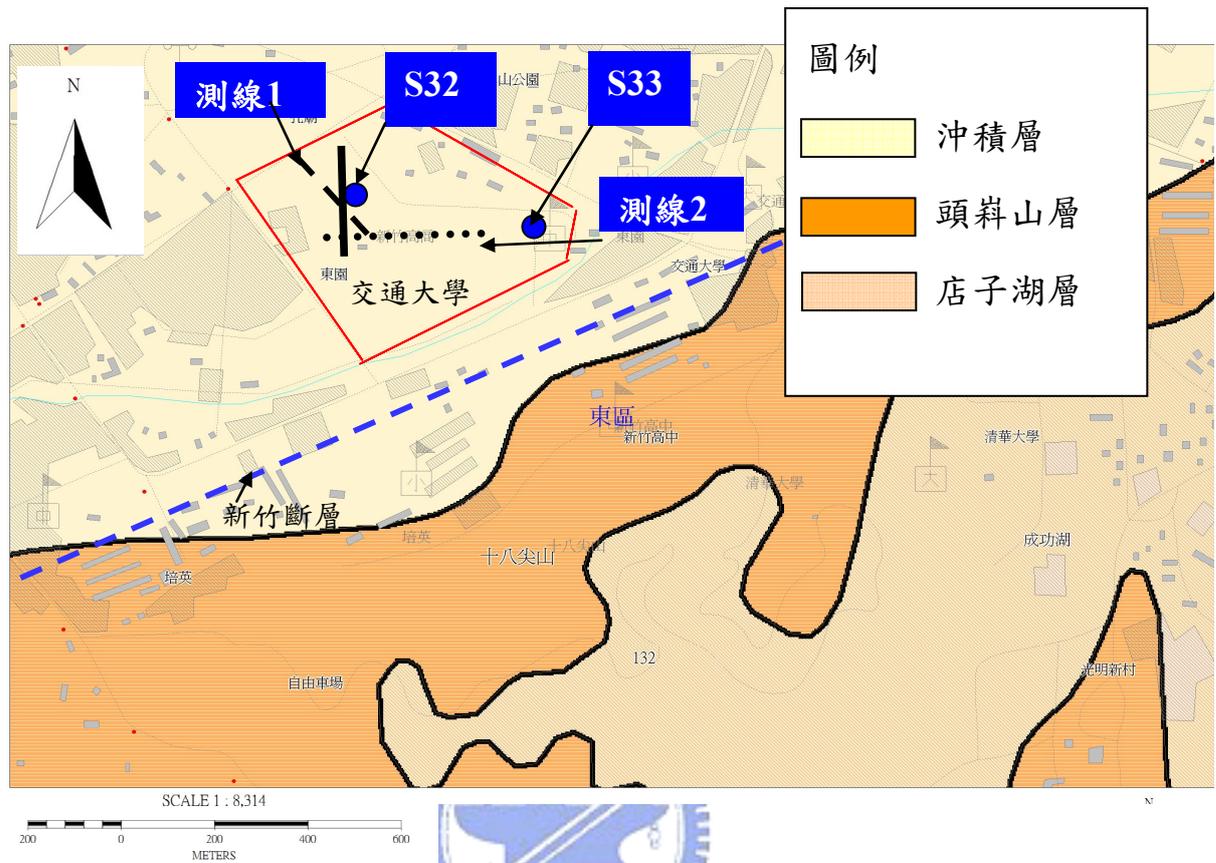


圖 3.7 交大博愛校區區域地質圖(中央地質調查所-地質資料整合查詢系統)

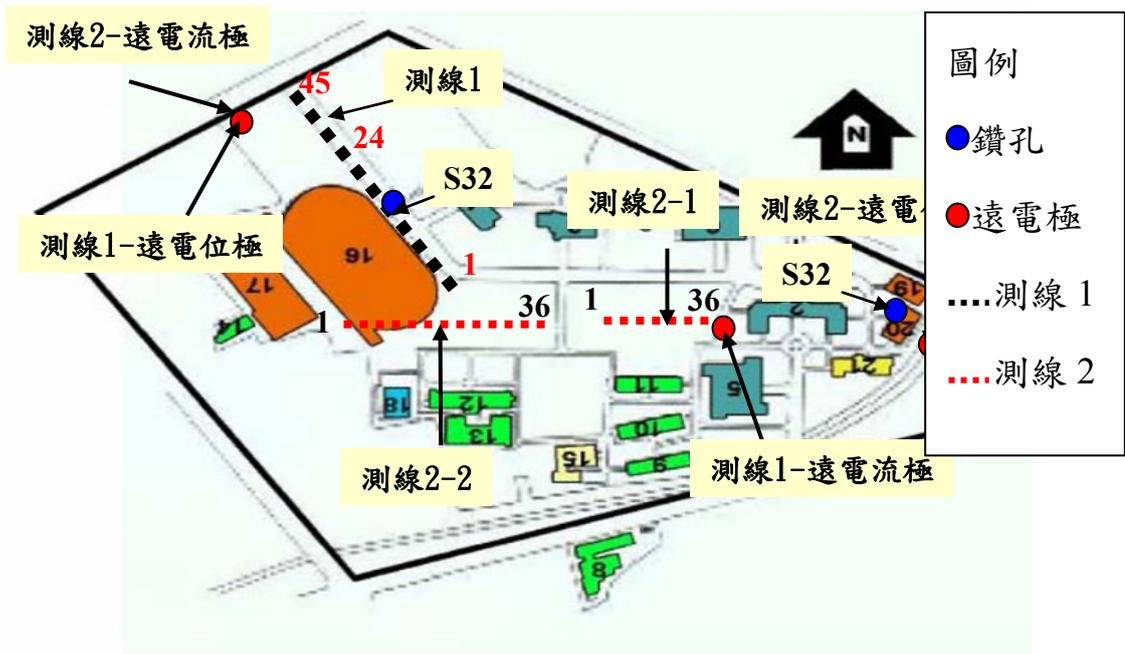


圖 3.8 交大博愛校區測線位置圖



表 3.5 交大博愛校區測線 1 施測參數

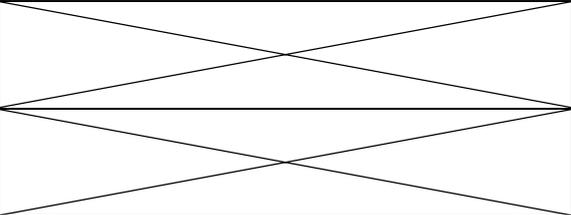
測線名稱	測線 1-1	測線 1-2
測線方向	N30°W	N30°W
電極間距, m	5	5
電極數目	45	24
測線展距, m	220	175
施測方式	Dipole-Dipole、Wenner、Wen.-Sch.	Pole-Dipole、Pole-Pole
測線(起/終點)座標	(248101,2743360)	(248101,2743360)
	(247971,2743540)	(248031,2743454)
遠電流極(C2)座標		
遠電位極(P2)座標		
		(248254,2743326)
		(247939,2743515)

表 3.6 交大博愛校區測線 2 施測參數

測線名稱	測線 2-1	測線 2-2
測線方向	N90°W	N90°W
電極間距, m	2	3
電極數目	36	36
測線展距, m	70	108
施測方式	Dipole-Dipole、Wenner、Pole-Pole	
測線(起/終點)座標	(248187,2743340)	(248036,2743336)
	(248253,2743337)	(248141,2743334)
遠電流極(C2)座標	(247946,2743513)	
遠電位極(P2)座標	(248396,2743327)	

3.2.3 試驗結果

於測線 1 之 77.5 公尺鑽孔S32 處，深度 0~6 公尺以上，電阻率值等於 50 ohm-m，6~28 公尺電阻率值等於 100 ohm-m以上；五種不同施測方法所得影像剖面圖呈現相似結果，如 圖 3.9、圖 3.10。

(1)測線 1-1 電阻率影像剖面

80~120 公尺電阻率界面有稍微向下傾斜，測線 120 公尺處電阻率界面出現急劇降低，其中DD影像剖面降到 13 公尺，見 圖 3.9 之實線方框。位於測線東南方，深度 3.8~13.5 公尺之處，DD與WN、WS影像剖面顯示高電阻率區域 90~150 ohm-m，見 圖 3.9 之虛線方框；WN、WS之高電阻率區往西北方向厚度明顯向下增加達 20 公尺；其中於測線 120 公尺位置，接近地表之電阻率變化之上界面深度降至 12 公尺。

WS影像剖面於測線 50~80 公尺，深度 16~28 公尺，電阻率隨深度與測線位置增加而減少至 50 ohm-m，及WN影像剖面於測線 80 公尺，深度 28 公尺以下，深度愈深，電阻率減少至 50 ohm-m，見 圖 3.9 之點線位置。

(2)測線 1-2 電阻率影像剖面

測線 1-2 展距長 115 公尺，屬於測線 1-1 的一部份，以PD、PP施測提供較深的資料點。PD影像剖面顯視電阻率性質變化與測線 1-1 一致；深度 3.8~13.5 公尺高電阻率區和測線 1-1 之DD、WN、WS電阻率變化情形相似，並且呈現深度 20 公尺以下出現低電阻率 50 ohm-m區域。於深度 20 公尺以

下，電阻率變化下界面與測線 1-1 有所差異；PD下界面較WN及WS下界面上升於 5 公尺，見 圖 3.10a點線。PP影像剖面於測線 25~110 公尺之間與測線 1-1 的結果較不相符合，該區域內的電阻率界面相對上較淺，於深度 33.2 公尺以下明顯出現一高電阻率區域；其中出現夾層之低電阻率區域，見 圖 3.10b。

(3)測線 2-1 電阻率影像剖面

測線 2-1 以WN、DD與PP之電阻率影像剖面如 圖 3.11，測線位置 0~70 公尺，地表面從低電阻率(小於 30 ohm-m)至高電阻率(大於 70 ohm-m)變化之上界面皆顯示在深度 3.5 公尺處。

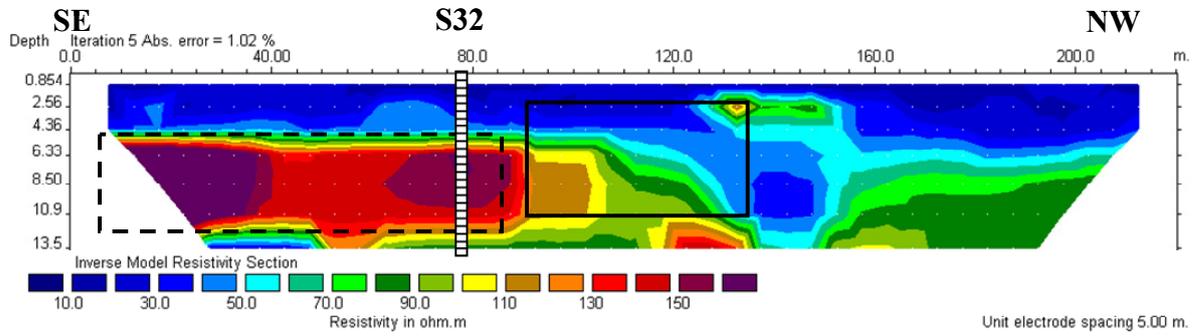
於深度 3.5~7.0 公尺，WN、DD與PP電阻率影像剖面電阻率分別大於 70 ohm-m、150 ohm-m以及 90 ohm-m，其中DD電阻率影像剖面於測線 44~48 公尺，電阻率值介於 100~150 ohm-m之間，PP電阻率影像剖面於測線 37~48 公尺，電阻率值介於 80~90 ohm-m，見 圖 3.11b,c中方框內，初步研判該區域內相對於兩側高電阻率較為低之因素，為該區域內較為疏鬆，含水量高或存在易導電物質。WN與PP深度 7.0 公尺以下，皆為低電阻率(小於 70 ohm-m)。

(4)測線 2-2 電阻率影像剖面

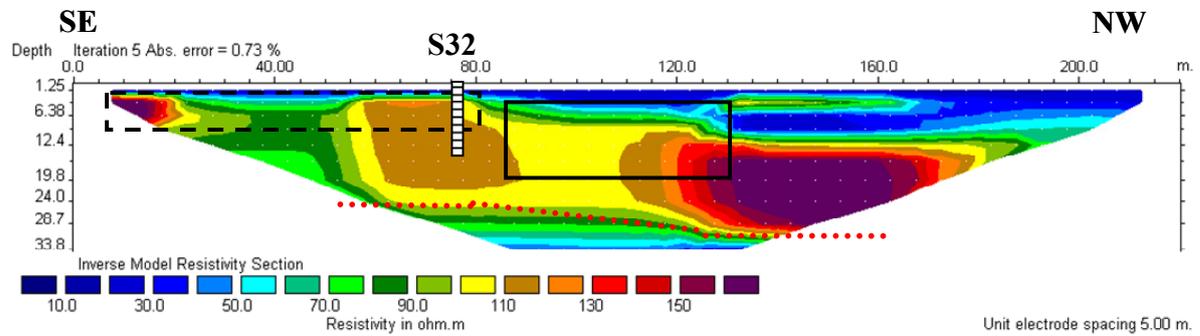
測線 2-2 以WN、DD與PP之電阻率影像剖面如 圖 3.12，測線位置 0~108 公尺，地表面從低電阻率(小於 30 ohm-m)至高電阻率(大於 70 ohm-m)之上界面顯示在深度 3.5 公尺處。

於深度 3.5~9.8 公尺區域，WN和DD電阻率影像剖面，如 圖 3.12a,b，電阻率分別大於 70 ohm-m與 150 ohm-m，而PP電阻率影像剖面(如 圖 3.12c)於深度 3.5~12.5m公尺內，電阻率值大於 90 ohm-m。高電阻率區之下電阻率降為 70 ohm-m，其電阻率隨深度增加而降低至 10 ohm-m之下。

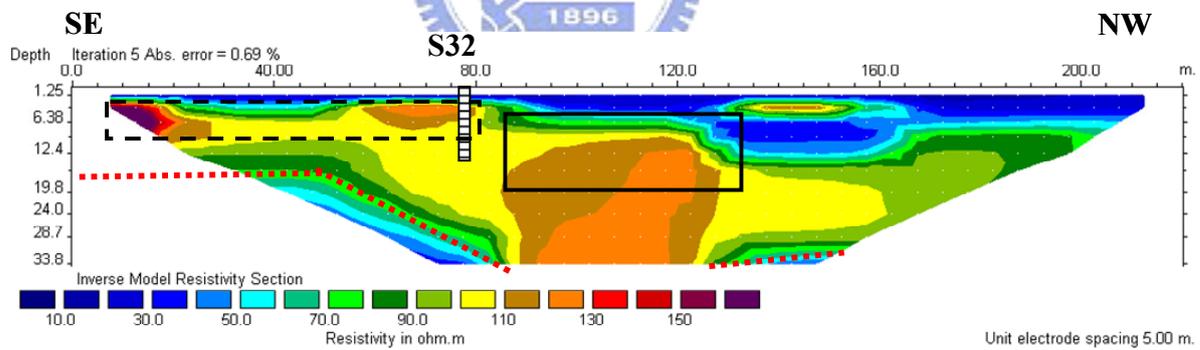




(a) Dipole-Dipole

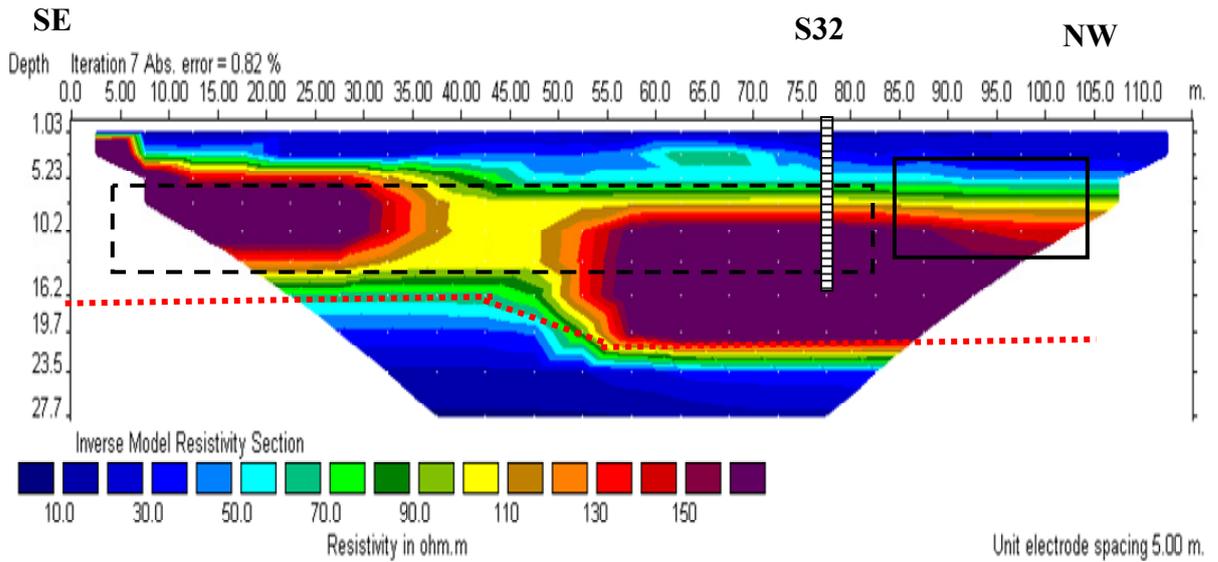


(b) Wenner

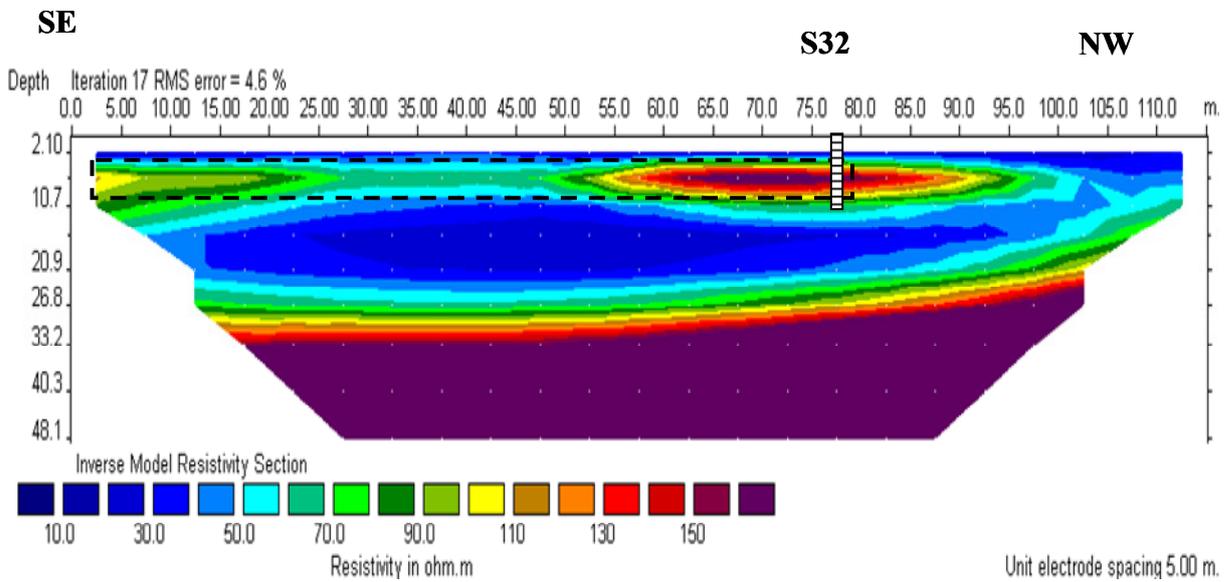


(c) Wenner-Schlumberger

圖 3.9 交大博愛校區測線 1-1 電阻率影像剖面

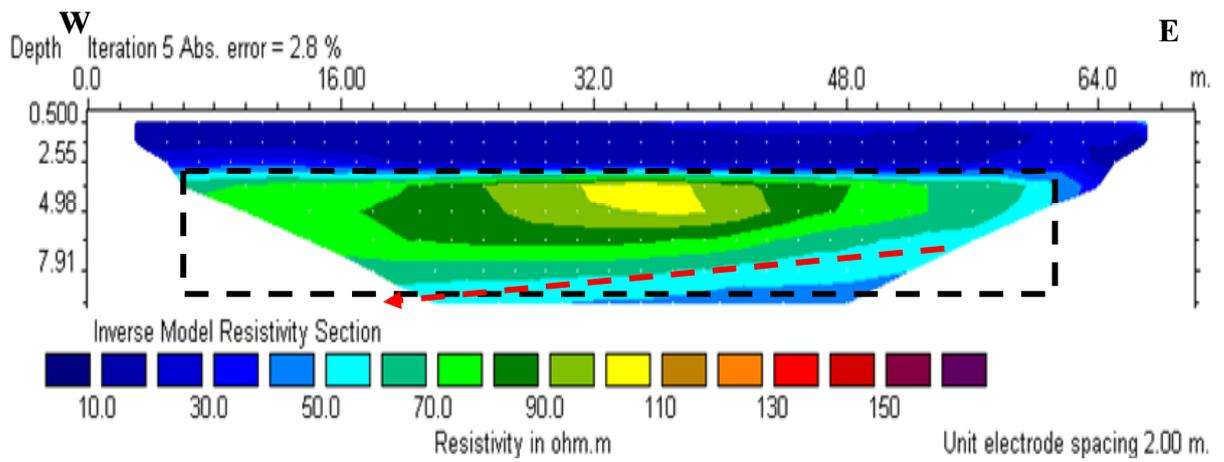


(a) Pole-Dipole

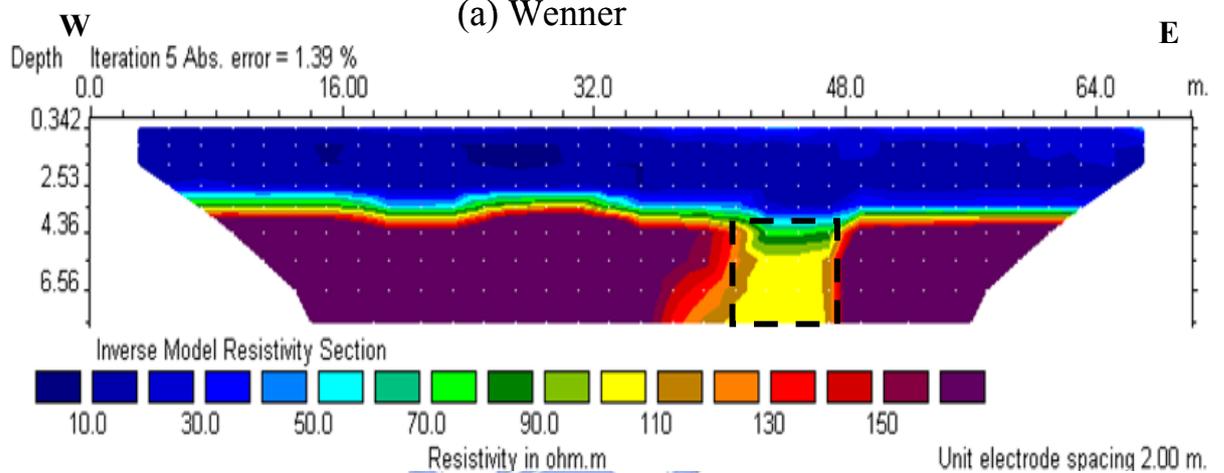


(b) Pole-Pole

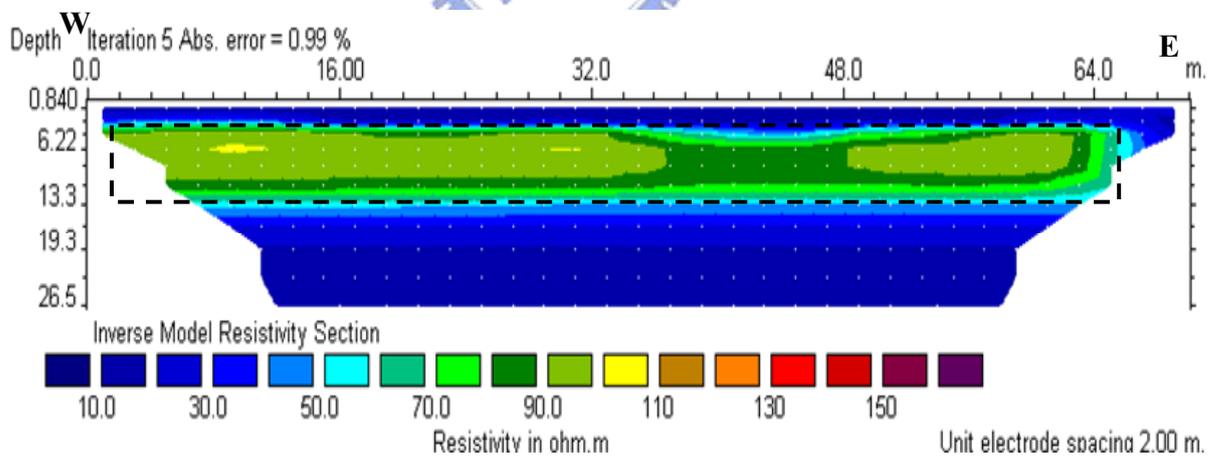
圖 3.10 交大博愛校區測線 1-2 電阻率影像剖面



(a) Wenner

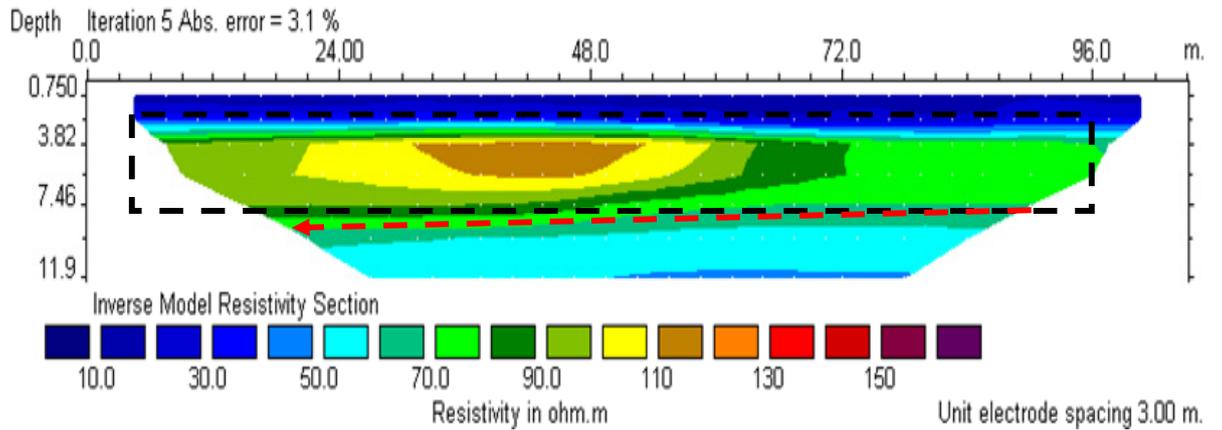


(b) Dipole-Dipole

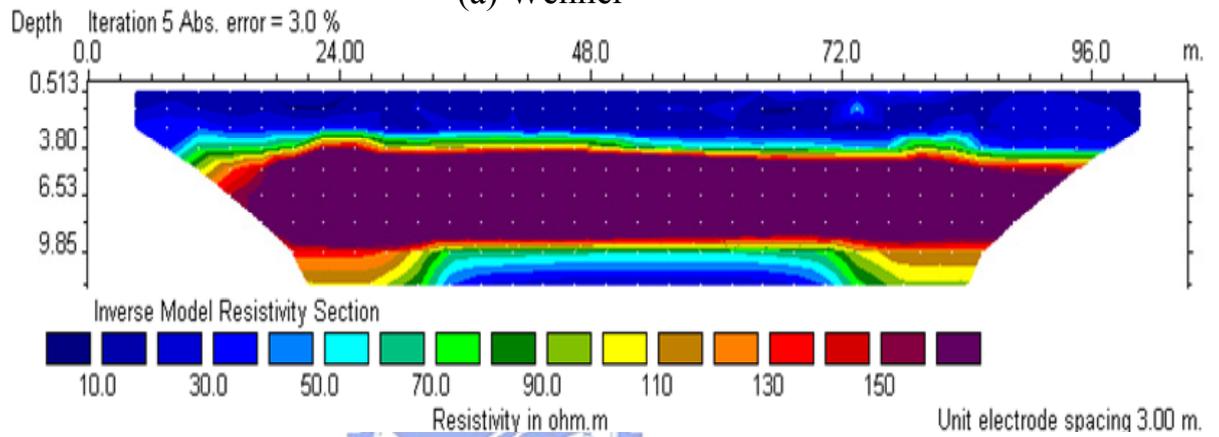


(c) Pole-Pole

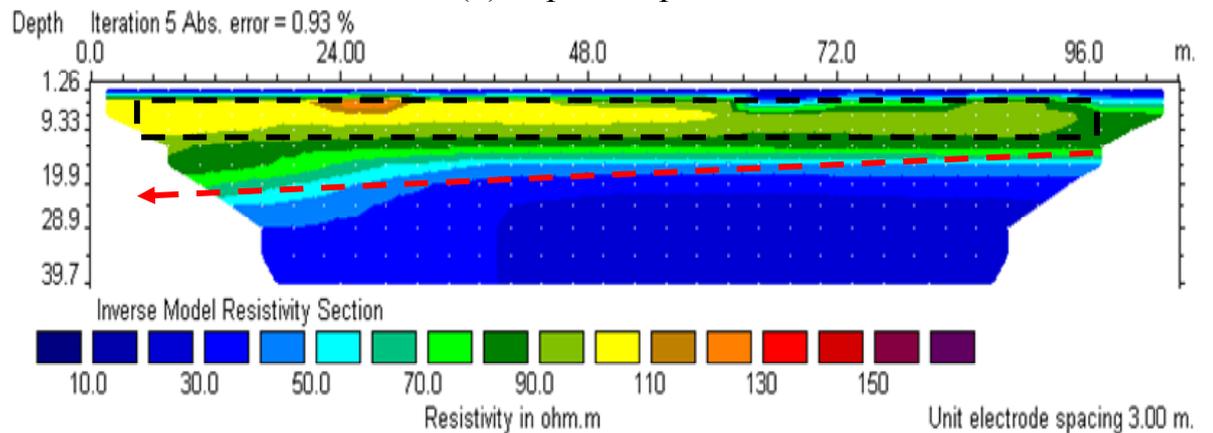
圖 3.11 交大博愛校區測線 2-1 電阻率影像剖面



(a) Wenner



(b) Dipole-Dipole



(c) Pole-Pole

圖 3.12 交大博愛校區測線 2-2 電阻率影像剖面

3.2.4 試驗討論

(1)測線 1 試驗討論

WN、WS 和 PD 影像剖面在深度 13 公尺以上，電阻率性質變化分佈與 DD 的影像剖面一致，接近地表的電阻率垂直和側向變化位置相同；推測愈往西北方向，其沖積層之粉土質細砂堆積愈厚。其中高電阻率區域屬於棕黃色砂質礫石層以及粉砂岩，見附錄圖 B-10,11 鑽探資料。

橫向涵蓋範圍區域 WS、PD 大於 WN，因此在測線 50 公尺，深度 20 公尺處電阻率值變化區段，WS、PD 有顯著趨勢，而 WN 雖稍有變化趨勢，因缺少資料點，無明顯呈現；另在 WS 影像剖面測線 50~120 公尺處高電阻率區厚度較 PD、WN 影像剖面大；以 WN 之高垂直空間解析度能力(Loke, 2003)，決定電阻率界面深度位置為基準，則 WS 影像顯示深層電阻率界面較深。

PP與其他四種方法結果差異甚大，研判為遠電極位置受空間限制，遠電極和測線電極之距離無法大於 10 倍測深距離(C_1P_1 距離)，雖於反算過程考慮修正遠電極位置，但PP影像剖面解析度還是不如其他四種方法。因此施測PP方法時，(a)需考慮遠電極配置空間是否足夠達到預期測深最基本要求，(b)縮短電極間距、測線展距，增強資料點數，以提高淺層空間解析度，或(c)減少測深參數(n)，以符合空間配置遠電極需求，見圖 3.13，測深參數 n 從 10 降為 7，絕對誤差從 4.9%降至 0.83%，而使PP影像剖面與其他四種

方法剖面則有相似性。

(2)測線 2 試驗討論

測線 2-1 終點距鑽孔S33 約等於 50 公尺，其中高電阻率區屬於灰色泥岩(見圖B-11)高電阻率區厚度呈現往西側漸增趨勢，見WN影像剖面(圖 3.11a)點斜線處；經過道路區段之後，銜接至側線 2-2 終點，其高電阻率區厚度亦是向西側漸增，見WN與PP影像剖面(圖 3.12a,c)點斜線處。

測線 1 起點與測線 2-2 中點相距 20 公尺，其中測線 1 起點處電阻率變化上界面位於深度 3.8 公尺，測線 2 中點處電阻率變化上界面位於深度 3.5 公尺，由測線 1 與測線 2 電阻率影像剖面結果得到從地表面下低電阻率至高電阻率之上界面，上界面往北偏西 30 度方向，深度從 3.5 公尺下降至 12 公尺，表示沖積層厚度增加；上界面於東西方向深度未改變，仍位於 3.5m。

接著隨深度增加，從高電阻率降為低電阻率變化之下界面，往北偏西 30 度方向，深度從 10 公尺降至 30 公尺，研判可能是棕黃色砂岩厚度增加；下界面深度從東往西方向由 7.0 公尺增至 9.8 公尺。

由電阻率影像剖面呈現地面下地層電阻率變化趨勢，推測測區南方應是受逆衝之新竹斷層產生的剪裂帶影響，使得測區南側地層受剪而有抬升；根據潘宏璋(2003)於交大博愛校區足球場以直流地電阻法研究新竹斷層位置，認為斷層位置應於測線起點更南方處，其測線如 圖 3.7 中南北向實線位置。

經由幾種不同施測方式比較結果，提供現地施測選擇電極排列方法準

則，(a)當空間足夠設置遠電位極與遠電流極，PP 電極排列，搭配 WS 或 WN 方法兼顧淺層解析度是最好選擇；(b)若空間只能設置遠電流極，選擇 PD 搭配 WS 或 WN 也能得到好的效果；(c)如果需要淺層側向解析能力，以 DD 取代 WS 或 WN。



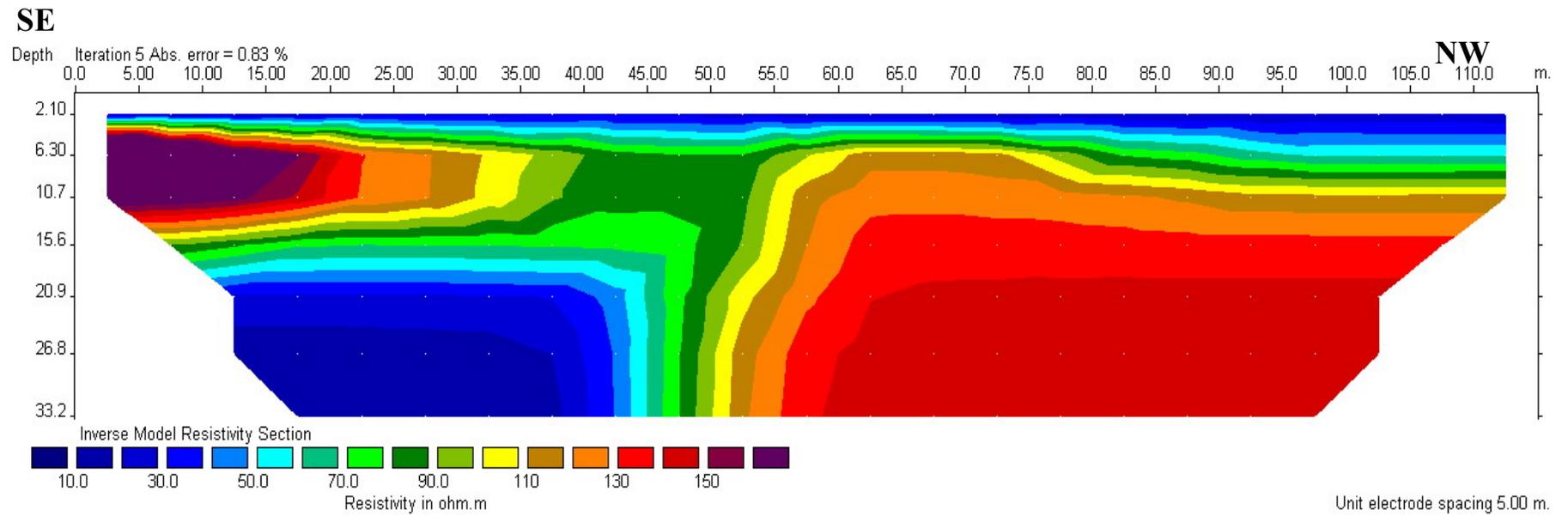


圖 3.13 測深參數 n 從 10 降為 7(單位電極間距等於 5 公尺)

3.3 恆春赤牛嶺東門溪

本區位於恆春鎮東門往東沿著 199 號縣道約 1 公里處，赤牛嶺三軍聯合訓練基地，本場址是未來滯洪池預定地，預期藉由地電阻法探測地下水位以下阻水層位置。地質調查部分參考經濟部水利署水工試驗所調查報告。

3.3.1 赤牛嶺地質狀況

(1) 區域地質

恆春半島地質岩層分布由第三紀碎岩屑沉積岩層構成，出露最早地層始於中新世中期。地層由老至新可依次劃分為潮州層、牡丹層、墾丁層和馬鞍山層、恆春石灰岩、鵝鑾鼻層至全新世的隆起珊瑚礁、階地堆積層、現代沖積層。由恆春半島五萬分之一數位地質圖(經濟部中央地質調查所)顯示，本調查區所出露岩性屬階地堆積層，階地堆積層主要由黏土、砂、礫石所組成，厚度約數公尺，見圖 3.14。



圖 3.14 恆春東門溪區域地質圖(中央地質調查所)

(2) 鑽探資料

鑽孔相關位置見圖 3.15，DH1 地面標高為 23.39 公尺，計鑽探 20.00 公尺，地層分布為 0~2.60 公尺，主要為卵石及粗砂，2.60~9.60 公尺為沈泥質黏土，9.60 公尺以下至 20 公尺為礫石層。DH2 孔地面標高為 24.44 公尺，計鑽探 20.00 公尺，地層分布為 0~3.25 公尺為表土層(黏土)，3.25-6.70 公尺為沈泥質黏土，6.70-15.90 公尺為礫石層，15.90-20.00 公尺為灰色泥岩，夾外來岩塊。DH3 孔地面標高為 27.32 公尺，計鑽探 15.00 公尺，地層分布為 0.00-1.50 公尺為表土層；1.50 公尺以下至 15 公尺皆為灰色泥岩夾外來岩塊。DH4 孔地面標高為 29.51 公尺，計鑽探 15.00 公尺，地層分布為 0.00-5.35 公尺為表土層，5.35 公尺以下至 15 公尺皆為灰色泥岩夾外來岩塊，屬墾丁層。DH5 孔地面標高為 23.50 公尺，計鑽探 25.00 公尺，地層分布為 0.00-3.40 公尺為沈泥質黏土，3.40-11.60 公尺為沈泥質黏土，11.60 公尺以下至 25.00 公尺為礫石層。DH6 孔地面標高為 28.44 公尺，計鑽探 20.00 公尺，地層分布為 0.00-3.80 公尺覆蓋層，0.00~1.85 公尺為黏土，1.85~3.80 公尺為礫石層，3.80-7.80 公尺為沈泥質黏土，7.80-14.50 公尺為礫石層，14.50 公尺以下至 20.00 公尺為泥岩，本岩段屬墾丁層。各鑽孔位置如圖 3.15 鑽孔柱狀圖見附錄B。

依各孔鑽探資料繪制柵狀地質圖(如圖 3.16)，從柵狀地質圖可見下游面的DH1 及DH5 二者在現代沖積層下的沈泥質黏土之層厚相當，以下接礫石層。DH2 的沈泥質黏土層厚減少，而下層的礫石層標高則往上提升，並且在標高 8.54 公尺出露泥岩層(似墾丁層)，至DH6 孔礫石層標高又略提升，至DH3、DH4 則不見沉泥土層及礫石層。

A-A'斷面的地質剖面圖(如圖 3.17a)，可明顯看出本調查區的地層，共

分為四層，最上層表土或現代沖積層，主要由卵礫石或黏土層所組成，厚度因為標高及位置不同而有所差異，大約介於 2.6 公尺~3.8 公尺之間，下一層為沉泥質黏土，厚度由下游往上游減少，而且沉積的標高愈往上游愈高，在DH3 孔時並未出現此層，沉泥質黏土層厚度有往東側縮小的趨勢；DH1 孔的沉泥土層終點與DH6 孔沉泥土層終點聯線往上游延伸，則發現確實在DH3 孔之前已尖滅。B-B'斷面的地質剖面顯示，沉泥土層在DH1 孔至DH4 孔間尖滅，但其確實位置由於資料不足並無法確定；DH1 至DH5 間沉泥質泥土層厚度往南側有增加趨勢，如圖 3.17b。由圖 3.17c中C-C'斷面的地質剖面顯示，第二層的沉泥土層底部由DH2 孔標高 17.75 公尺至DH6 孔標高 19.7 公尺，若以二者連結線延伸至DH4 孔，則與DH4 孔的剖面未出現沉泥土層相吻合，但下一層的礫石層殲滅位置則較難判斷。

此區域內地下水位監測資料如表 3.7 所示，DH1 與DH5 孔地下水位面在地表下 1.5~1.6 公尺；DH2 與DH3 地下水位面於地表下 2~2.5 公尺；DH6 與DH4 地下水位於地表下 4.5~5 公尺；顯示本區地下水位地表下於 5 公尺以內。

3.3.2 測線位置與施測參數

顧及深度、橫向資料涵蓋範圍及施測時間限制，施測方法選擇WS方法，無PP或PD施測。本區共計設置四條測線，測線 1 和測線 4 電極間距為 5 公尺，展距分別等於 220 公尺與 115 公尺；測線 2 與測線 3 電極間距為 3 公尺，展距分別等於 138 公尺與 141 公尺。測線位置如圖 3.15，測線參數如表 3.8。

表 3.7 恆春東門溪赤牛嶺水位監測資料

觀測井 水位(m) 日期	民用井	DH1	DH2	DH3	DH4	DH5	DH6
93/11/8	18.21	21.94	22.14	24.89	25.38		
93/11/9	18.12	22	22.12	24.89	24.74		
93/11/10	16.13	21.89	22.06	24.88	24.72	21.85	
93/11/11	16.63	21.85	22.02	24.88	24.72	21.79	23.97
93/11/17	21.32	21.61	21.8	24.74	24.67	21.56	23.79

表 3.8 恆春東門溪場址施測參數

測線名稱	測線方 向	電極間距 (m)	電極數 目	展距 (m)	測線起/終點
測線 1	N30°E	5	45	220	(224446,2434313)
					(224523,2434463)
測線 2	N45°E	3	47	138	(224485,2434270)
					(224591,2434352)
測線 3	N45°E	3	48	141	(224628,2434510)
					(224710,2434586)
測線 4	N45°W	5	24	115	(224705,2434514)
					(224641,2434581)

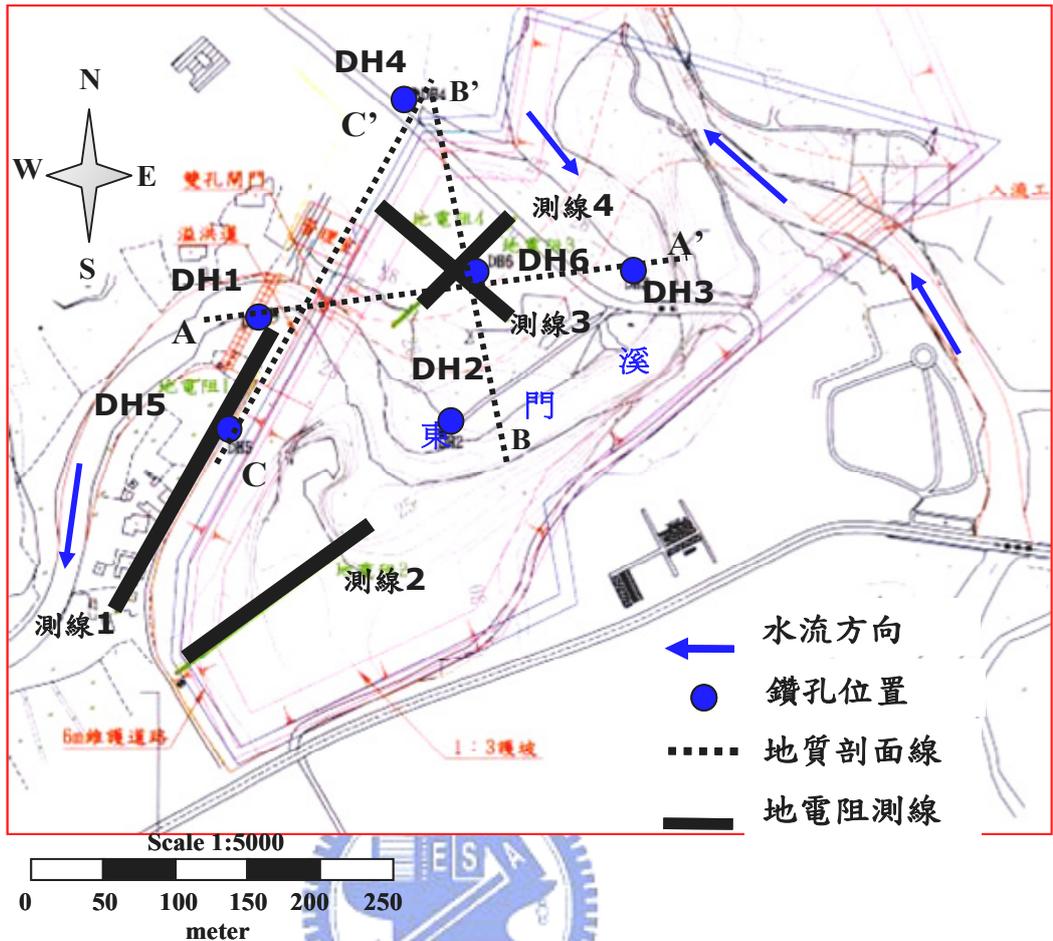


圖 3.15 東門溪場址測線和鑽孔位置圖(水利規劃試驗所, 2004)

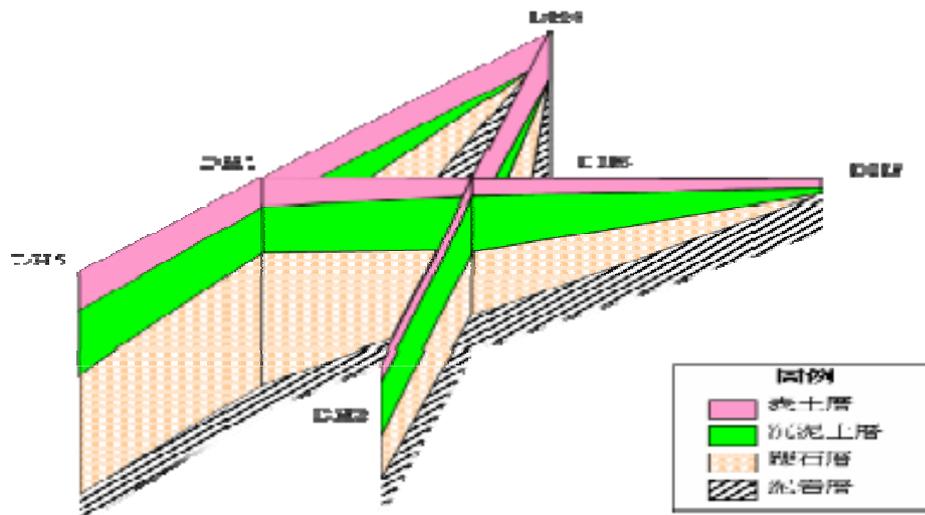


圖 3.16 東門溪調查區域柵狀地質示意圖(水利規劃試驗所, 2004)

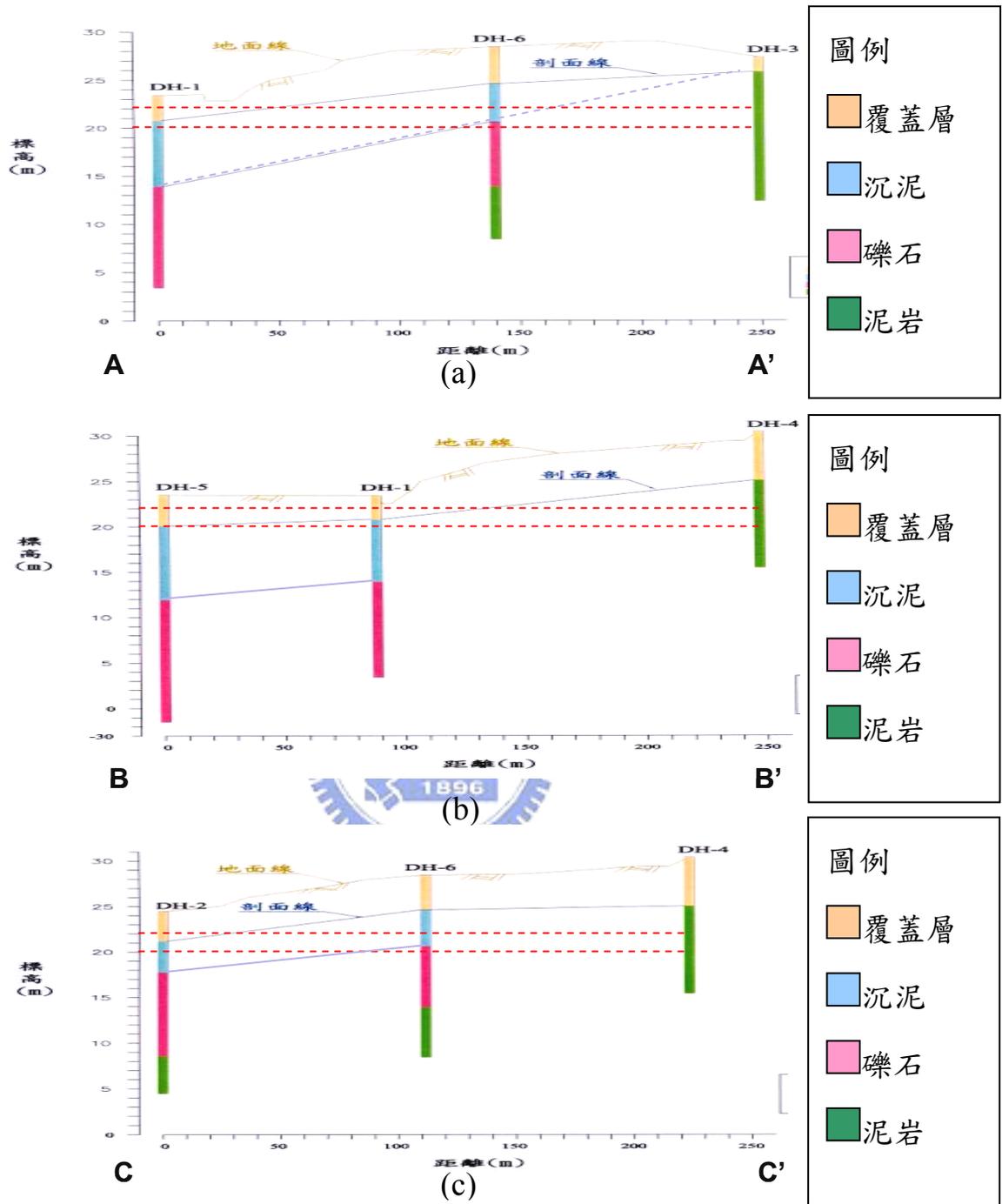


圖 3.17 恆春赤牛領地質剖面圖 (a) A-A' (b) B-B' (c) C-C' (水利規劃試驗所, 2004)

3.3.3 試驗結果

(1)測線 1 電阻率影像剖面

鑽孔DH1 位於河床邊，與測線起點相距 5 公尺；地下水位於地表下 1.5 公尺處。DH5 孔位於測線 80 公尺處，地下水位於地表下 1.65 公尺。由 [圖 3.18](#) 中測線 0~85 公尺區間，深度 1.25 公尺區域內電阻率等於 20~40 ohm-m，與地下水位面接近；85~200 公尺於深度 5 公尺以上，電阻率等於 70~100 ohm-m([圖 3.18](#) 中實線)。測線 50~80 公尺，深度 10~28 公尺區域，電阻率略增加達 40~50 ohm-m，見 [圖 3.18](#) 中方框；深度 30 公尺以下，電阻率降為 20 ohm-m 以下。

(2)測線 2 電阻率影像剖面

測線 0~48 公尺，深度 5 公尺以上出現電阻率 40~70 ohm-m 不等區域；測線 48~130 公尺，深度 5 公尺以上區域，電阻率等於 70 ohm-m 區域居多數深度，與測線一終點側結果一致，其中深度 14 公尺以下區域，電阻率等於 20 ohm-m 以下，如 [圖 3.19](#)。

(3)測線 3 電阻率影像剖面

鑽孔DH6 水位資料顯示地下水位於地表下 4.5 公尺，於深度 3.8 公尺以上，電阻率達 70~130 ohm-m；其中測線起點距離溪邊不到 20 公尺，電阻率等於 50 ohm~100 ohm-m；深度 3.8~7.5 公尺區域，電阻率等於 20~30 ohm-m；下一區域 7.5~15 公尺，電阻率等於 30~40 ohm-m；15~20 公尺區

域，電阻率隨深度增加降低至 20 ohm-m 以下，見 圖 3.20。

(4) 測線 4 影像剖面

圖 3.21 中鑽孔 DH6 位於測線 65 公尺處，深度 3.8 公尺以上區域，電阻率等於 50~100 ohm-m；深度 3.8~9.3 公尺，電阻率降至 20 ohm-m；接著深度 9.3~17 公尺之區域，電阻率增加至 30~50 ohm-m；深度 17~24 公尺以下，電阻率減至 20 ohm-m。



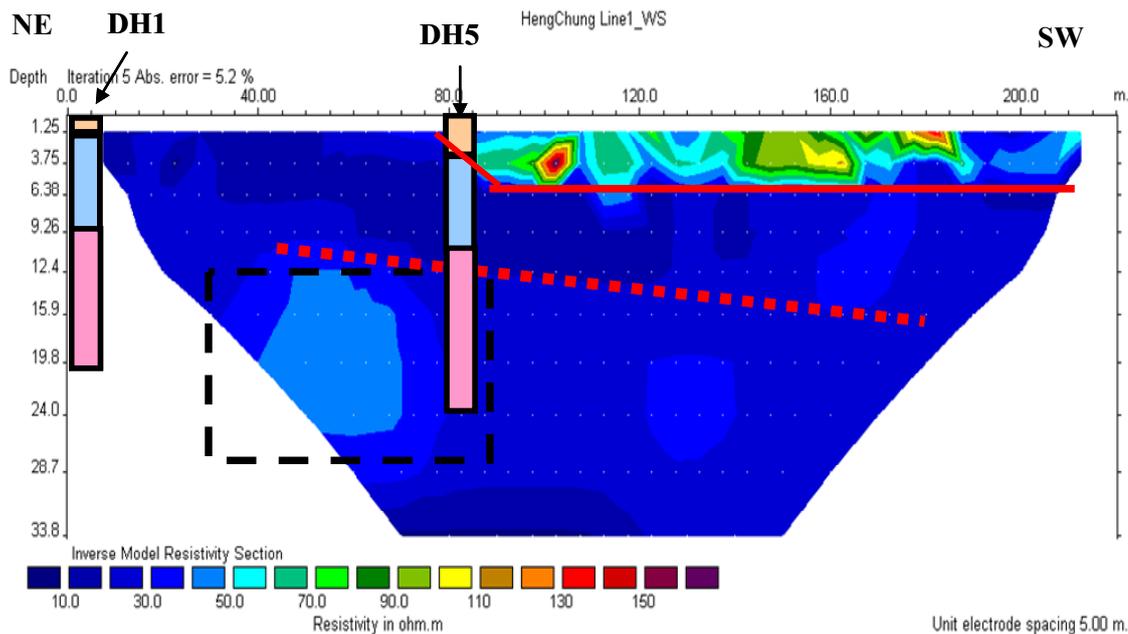


圖 3.18 恆春赤牛嶺測線 1 電阻率影像剖面

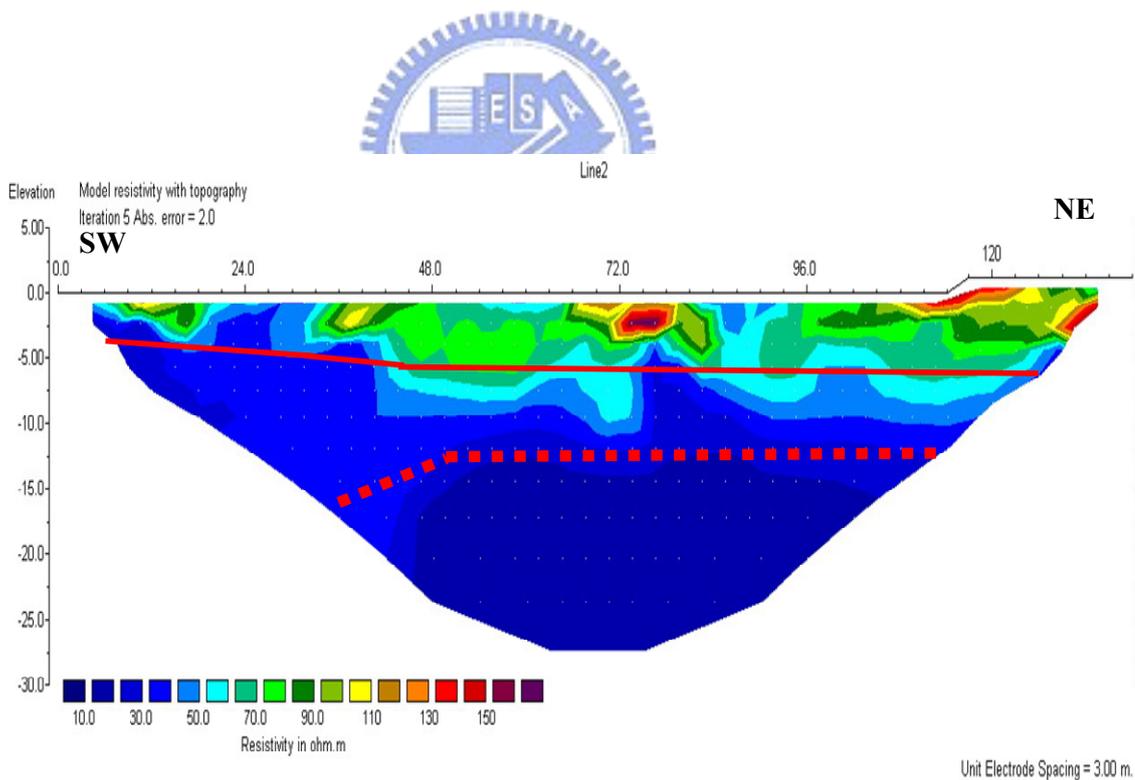


圖 3.19 恆春赤牛嶺測線 2 電阻率影像剖面

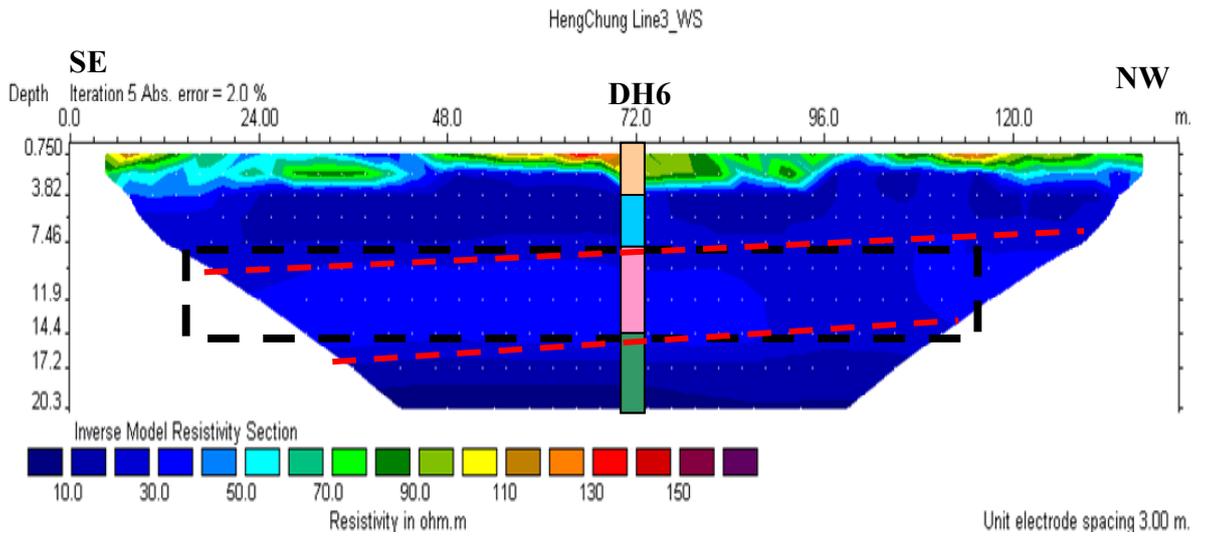


圖 3.20 測線 3 電阻率影像剖面

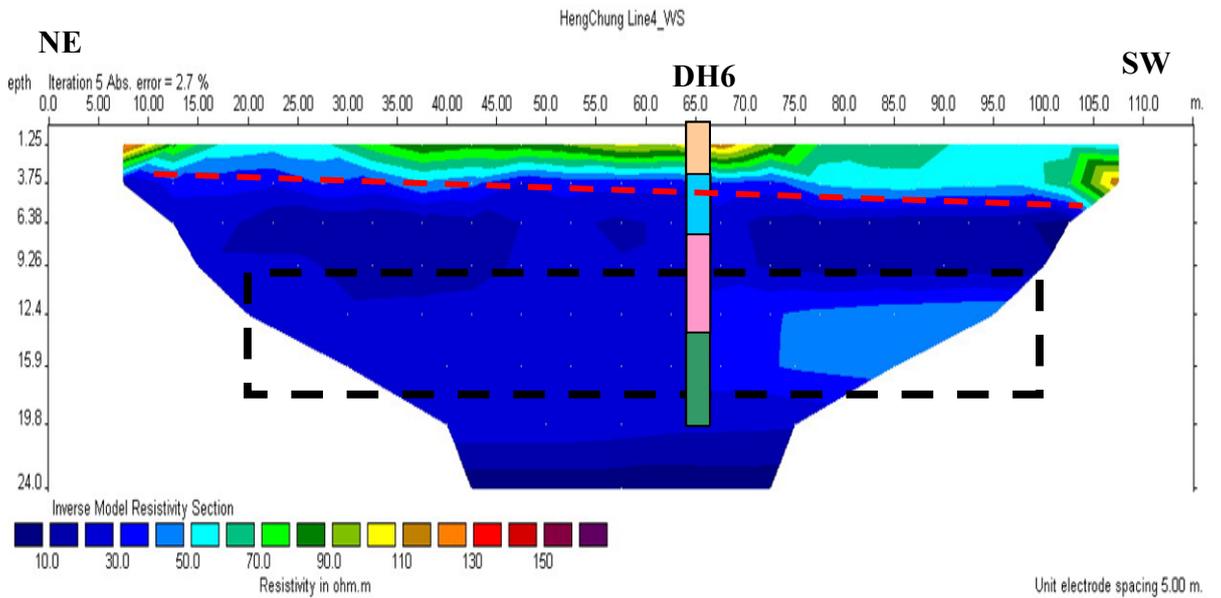


圖 3.21 測線 4 電阻率影像剖面

3.3.4 試驗討論

(1)地層變化與影像剖面關係

赤牛嶺東門溪此區域地層變化趨勢為愈接近上游側(東北方)，沉泥和礫石厚度愈薄至消失，見圖 3.17 中 A-A', B-B' 剖面，由測線 3 影像剖面中，深度 7.5~15 公尺處電阻率等於 30~40 ohm-m，往東南側傾斜與礫石厚度減少趨勢一致，見圖 3.20 點線傾斜趨勢。由 B-B' 地質剖面圖(如圖 3.17)、柵狀地質圖(如圖 3.16)與測線 1 電阻率影像剖面(如圖 3.18)，呈現往西南側沉泥厚度增加趨勢一致。

測線 2 電阻率影像剖面無鑽探孔資料，然測線 2 起點與測線 1 相近，鑽探 DH2 孔位於測線 2 終點跨越河道處；由測線 1 影像剖面得知測線 2 起點位置附近的地質應屬於沉泥，由下游往上游，沈泥厚度減少；而從鑽探 DH2 孔礫石層位置，推估礫石層出現在測線 2 深度 15 公尺處。

(2)地下水位高影響辨識

測區位於東門溪河床且地下水位高，河床堆積行為複雜，其地下水位以下地層材料電阻率差異不超過 30 ohm-m；由測線 1,3 和 4 三條測線影像剖面顯示，於深度 7.5~20 公尺之間與上下層電阻率差異不到 20 ohm-m 的結果，見圖 3.18，圖 3.20, 圖 3.21 之方框內與上下層之差異，無鑽探資料輔助之下，將無法明顯區別層面與地層變化趨勢，更無法找出阻水層位置。

3.4 三姓橋

3.4.1 香山區地質背景

(1) 區域地質

本區內由中央地質調查所五萬分之一數位地質圖顯示，出露岩性為沖積層、頭嵙山層與店子湖層，見圖 3.22，與博愛校區案例中出露岩性相同(如圖 3.7)。

出露在本區南端整合於卓蘭層之上岩層的岩性主要由厚層砂岩和砂岩與泥岩互層所組成，屬於香山相或頭嵙山層香山砂岩。沖積層主要為泥、砂、礫石。店子湖層與下伏頭嵙山層成不整合接觸，頭嵙山層整合覆蓋在卓蘭層之上，與其上覆之沖積物為不整合接觸。

(2) 鑽探資料

鑽探資料參考經濟部中央地質調查所於九十二年度活動斷層鑽探計畫資料見表 3.9。鑽井位置位在新竹市西南方三姓公溪北岸階地(FT1)上，離斷層崖面約 7 米處鑽一孔井，另在其附近的菜園裡，有一個約數十公分高差的疑似反斜小崖，此反斜的地形面造成水流方向與三姓公溪流向相反的情況，故於此反斜小崖上鑽取一孔 30 公尺淺井。

三姓橋 1 號井位於反斜小崖上，上部 27.5 公尺均位於河階礫石層內，餘下 2.5 公尺為基盤的泥，無法確認小崖是否為構造活動所致。

三姓橋 3 號井位於反斜小崖下方(南側)，整口井為階地礫石。

三姓橋 2 號井與 4 號井位置相近，所見狀況亦相似，上部均披覆厚約 6 至 7 公尺後的階地礫石，下方的疏鬆細砂頂部遭紅化，細砂中可見傾角 50 至 60 度的微斷層，岩層由 30 度變至 60 度。

三姓橋 5 號井長 200 公尺，1 至 2.4 公尺為地表礫石，2.4 至 4.3 公尺為紅土礫石，紅土礫石有受剪切特徵，4.3 公尺至 5.3 為受剪切的砂質泥與近乎水平的疏鬆細砂斷層接觸，受剪切的砂質泥於 35.1 公尺處逆衝至礫石層之上，礫石層厚 16.1 公尺，以下又見到受剪切的泥質砂與疏鬆細砂斷層接觸，自 53.8 公尺至 200 公尺均為近乎水平，夾有薄泥層的細砂，見附錄 B。

3.4.2 測線位置與施測參數



測線位於三姓公溪北岸階地(FT1)上，見圖 3.23，現地踏勘之後，附近的菜園裡，有一個約數十公分高差的疑似反斜小崖；蔡怡真(2002)指出新竹斷層將三姓公溪谷口北岸扇階FT1 及FT2 截切，分別形成 3.7 公尺與 0.7 公尺的斷層崖，FT1 面的隆起側以開闢為梯田。測線佈設於中華路四段 567 巷 83 號民宅門前道路與梯田內，以單位電極間距 5 公尺，展距長 220 公尺。施測方法以 Wenner 施測得到深度 30 公尺以上的地層資料，瞭解淺層資料，並以 Pole-Pole 施測得到深度 100 公尺以上地層資料，獲得 30 公尺以下的資訊。

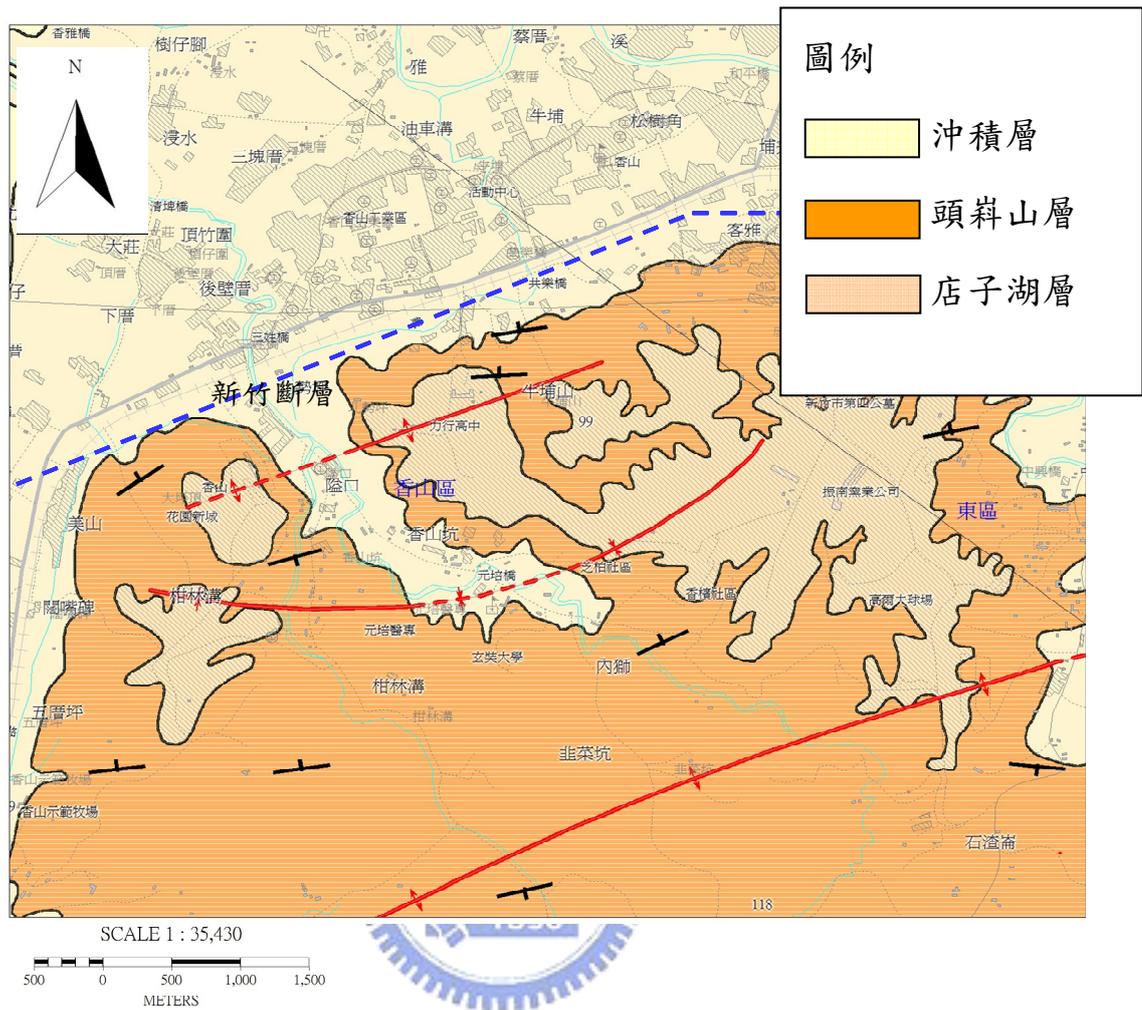


圖 3.22 香山區域地質圖與新竹斷層位置(中央地質調查所，2003)

表 3.9 新竹市三姓公溪北岸階地鑽探內容列表(中央地質調查所，2003)

斷層名稱	井名稱及編號	x 座標	y 座標	鑽探深度
新竹斷層	三姓橋 BH-1	242072	2742453	30m
	三姓橋 BH-2	242078	2742402	50m
	三姓橋 BH-3	242071	2742445	30m
	三姓橋 BH-4	242074	2742410	30m
	三姓橋 BH-5	242058	2742414	200m



圖 3.23 三姓公溪谷口於 FTI 台階處之鑽孔與測線位置圖(中央地質調查所)

表 3.10 三姓橋地電阻測線參數

三姓橋測線	
測線方向	N30°W
電極間距,m	5
電極數目	45
測線展距,m	220
施測方式	Pole-Pole、Wenner
測線(起/終點)座標	起點 1(242924,2742275)
	終點 45(243009,2742074)
遠電流極(C2)座標	(243187,2742326)
遠電位極(P2)座標	(243188,2742374)

3.4.3 試驗結果

(1) Wenner 電阻率影像剖面

位於測線 0~40 公尺出現高電阻率區 200~300 ohm-m，屬於沖積層礫石堆積。40~200 公尺，高電阻率區 150~250 ohm-m，出現在深度 5 公尺以上的區域內；除這些高電阻率區外，其他區域為低電阻率區 60Ohm-m 以下，如圖 3.24

(2) Pole-Pole 電阻率影像剖面

圖 3.25 中測線 0~40 公尺，深度 0~20 公尺電阻率等 250 ohm-m 以上；40~200 公尺，深度 5 公尺以上，電阻率等於 150~250 ohm-m；電阻率變化和 WN 影像剖面一致。

於測線 40 公尺，深度 20~30 公尺之區域，電阻率等於 200Ohm-m；愈往東南方向，測線 70 公尺處，深度達 40~50 公尺區域，電阻率等於 250 ohm-m；測線 100 公尺，深度 60~80 公尺處，電阻率等於 200 ohm-m，其中傾斜角度約為 40°。

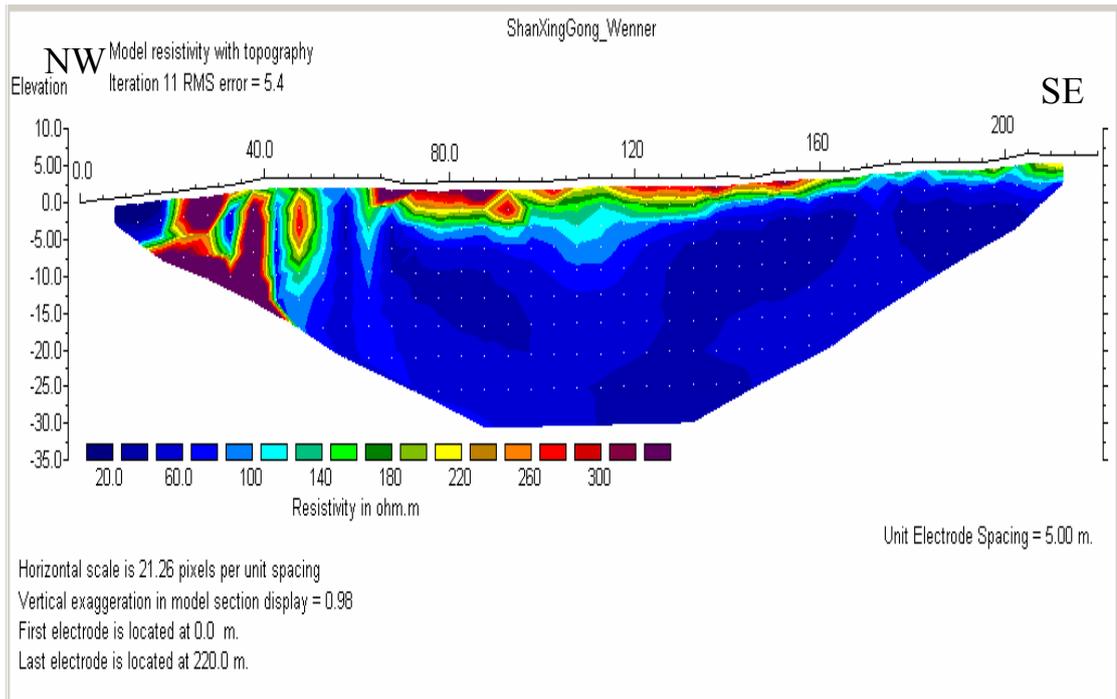


圖 3.24 三姓橋 Wenner 電阻率影像剖面圖

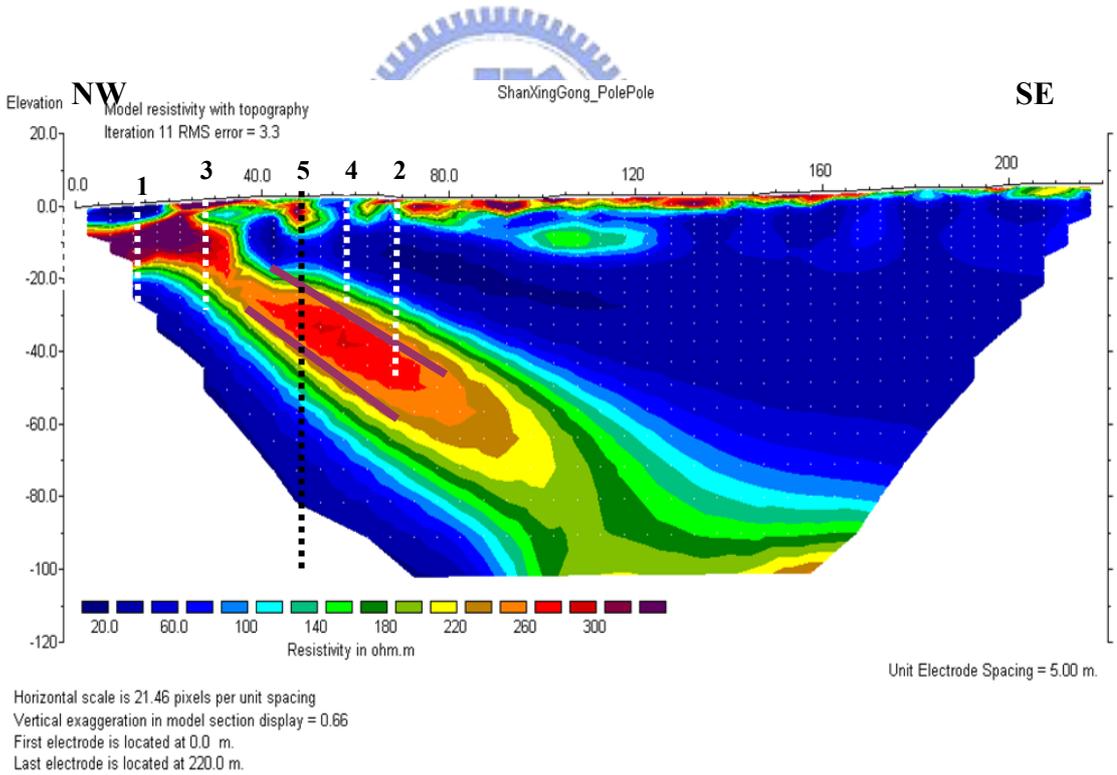


圖 3.25 三姓橋 Pole-Pole 電阻率影像剖面圖

3.4.4 試驗討論

三姓橋 1 號、3 號鑽井位置在測線西側 50 公尺處，平移至測線上，1 號井在測線 15 公尺處；3 號井在 30 公尺處。1 號鑽井資料顯示深度 27.5 公尺以上為礫石，3 號井資料顯示，深度 30 公尺以上為階地礫石；由於礫石層的孔隙大，造成高電阻率。地電阻影像剖面顯示高電阻率區域與 1 號、3 號鑽井資料符合。

三姓橋 5 號井位於測線西側 65 公尺處，平移至測線，5 號井在測線 50 公尺處。鑽井資料顯示受剪切的砂質泥，於 35.1 公尺處逆衝至礫石層之上，礫石層厚 16.1 公尺，以下又見到受剪切的泥質砂與疏鬆細砂斷層接觸，自 53.8 公尺至 200 公尺均為近乎水平，夾有薄泥層的細砂。圖 3.25 顯示在深度約 30~50 公尺出現高電阻率 260Ohm-m 區域，與鑽井資料相符合。

潘宏璋(2003)研究指出上盤位於測線西北方，屬高電阻率；下盤屬於頭嵙山層香山相砂岩，位於測線東南方，屬於低電阻率，其中高低電阻相差不超過 30 ohm-m。本試驗顯示高低電阻率差異達 100 ohm-m，新竹斷層位置可能位於測線 50 公尺處，其位置與潘宏璋(2003)指出位置相近。

與寶二水庫試驗場址測線 1 之 PP 影像相比較，此結果尤佳；其厚度大於電阻率差異達 100 ohm-m，明顯呈現構造變化，而寶二水庫試驗場址因互層厚度小，且電阻率差異只在 50 ohm-m 以內，無明顯呈現深層構造變化；顯示厚度大者，解析效果佳。

3.5 地電阻影像剖面法問題評析

本研究案例於四種不同地質構造條件進行地電阻法試驗，以 WN、WS、DD、PD 以及 PP 五種電極排列方法量測，在不同場址之下，效果亦有所不同。歸納前述所遭遇問題如下：

3.5.1 影像色階不同對於判識影響

反算軟體(Res2dinv)分析量測值得到電阻率影像剖面，依其電阻率最大值與最小值之差，將色階區塊分為 17 種不同顏色，計 16 個色階值；其中色階值間距最常使用為對數間隔(logarithmic interval)，每間隔之值比為一常數，等倍數間隔增加，另一種為線性間隔(linear interval)，其間隔為一常數。上述兩項方法決定色階值大小之外，可由使用者依其所需自行輸入 16 個色階值。影像剖面之電阻率值變化大小乃為吾人所關心，而影像分布情只是易於判識電阻率變化特性，因此常在判識影像分佈容易導致誤判及差異。

另一方面需以觀察目標之電阻率大小判識為基準；如常利用地電阻法探測地下水位界面，應鎖定低電阻率值 10 ~50ohm-m 區，其未飽和層(vadose zone)之高飽和度電阻率，因達臨界飽和度，電阻率維持一定值，與地下水位面之電阻率值差異不大，難以判識水位位置，但明顯可以界定出非飽和層之高電阻率區，高電阻率區域內電阻率變化分界不需理會。因此電阻率值代表的層面性質，於地質調查上需藉由定量以描述岩層性質，其方法有

井測、取樣量測、RCPT(Dahlin, 2004)等方法。

3.5.2 層面位置辨識問題

研究案例中影像剖面出現隨深度加深，垂直方向(z-direction)電阻率變化性質於四個場址分別出現(1)單一層面情形：低電阻率變化至高電阻率(如圖 3.6)；(2)單一層面情形：高電阻率變化至低電阻率(如圖 3.19、圖 3.24)，(3)夾層情形：低電阻率中間夾有一層高電阻率區，如博愛校區測線 1 影像剖面圖(如圖 3.9、圖 3.10)；(4)淺層為高電阻率，接著為低電阻率區，其中低電阻率區域出現差異 20 ohm-m 以內的電阻率區域(如圖 3.18、圖 3.20、圖 3.21)。其中(1)與(2)較為單純情況；而(3)的夾層厚度因施測方法不同，有所變化，缺乏鑽探資料無法定論；(4)的夾層在電阻率值差異不到 20 ohm-m，若無鑽探資料難以辨識岩層性質不同之存在。

本研究擬進一步以 Loke 博士正算軟體(Res2dmod)，探討業界常使用 Wenner 與 Pole-Pole 方法於上述四種電阻率分佈情形下，分別依反射係數(Reflection factor, k)、界面位置(Z_i)、夾層厚度(t)與夾層中心位置(Z_c)等參數，更進一步探討這四種參數對於垂直解析度與側向解析度能力之影響，方法詳敘於第四章。

3.5.3 側向涵蓋範圍不全

測線兩側往往因空間不足，無法將測線平移(Roll along)，補足測線兩邊緣資料，使接近邊緣的構造無法呈現在影像剖面上，例如三姓橋案例中，

WN 影像剖面於測線起點處出現高電阻率，由於側向資料點涵蓋範圍較 PP 小，無法顯示出如 PP 一致有明顯斷層通過之高電阻率區；博愛校區測線 1 結果亦顯示 PD 與 WS 影像剖面位於測線 50 公尺，深度 16 公尺處有電阻率產生變化，而 WN 無法顯示變化。

3.5.4 現地情況不符二維假設

所謂真實二維條件是電阻率變化只發生在測線方向(x)與深度方向(z)，且與測線垂直方向(y)為一無窮遠均質條件；而現地常不符合真實二維條件，x 方向測線外與 y 方向電阻率常有變異，或有邊界限制；例如懸崖、溪流... 等。這些條件未在正算分析中考慮邊界條件，因而產生誤差。



四、地電阻影像解析度探討

案例研究中影像剖面圖於單一界面或水平夾層情況下，不同電極排列法施測所獲得地質電阻率性質隨深度與測線方向變化，顯示雖有一致趨勢特性，但對電阻率變化界面位置及夾層厚度判識上有所差異，尤其當深度愈深之處，其電阻率變化界面愈難以決定；若無鑽探資料輔助分析，難以決定電阻率變化界面位置或夾層厚度。

本章節將使用 Res2dmod 軟體模擬 Wenner 和 Pole-Pole 電極排列法於已知模型施測所獲得之視電阻率，稱為正算模擬，及包含 Res2dinv 軟體反算分析正算視電阻率資料值，獲取最佳反算模型；本研究模擬模型均假設為理想二維條件下，地表面無高程變化條件。解析度探討首先探討一維度空間解析度，分為垂直解析度與側向解析度；垂直解析度探討將模型分為單一水平界面與水平夾層界面二種，側向解析度模型設為垂直界面以及垂直夾層界面，模擬斷層或溝渠(dyke)構造。最後以方形均質介質埋沒於另一均質介質中，探討二維空間解析度。

垂直解析度探討中增加計算正算視電阻率分別對單一界面位置 Z_i 或夾層中心位置 Z_c 與夾層厚度 t 之靈敏度與擬似深度(pseudo-depth)之間變化關係，進而將最大絕對靈敏度值分別對反射係數、單一界面位置、夾層中心及夾層厚度等參數變化關係以影像圖呈現。最後藉由真實模型與反算模型電阻率值差異用於探討Wenner與Pole-Pole兩種電極排列法之空間解析能力，

並定性描述空間解析度受反射係數、層面位置以及夾層厚度參數影響行為。本章空間解析度探討流程見圖 4.1。

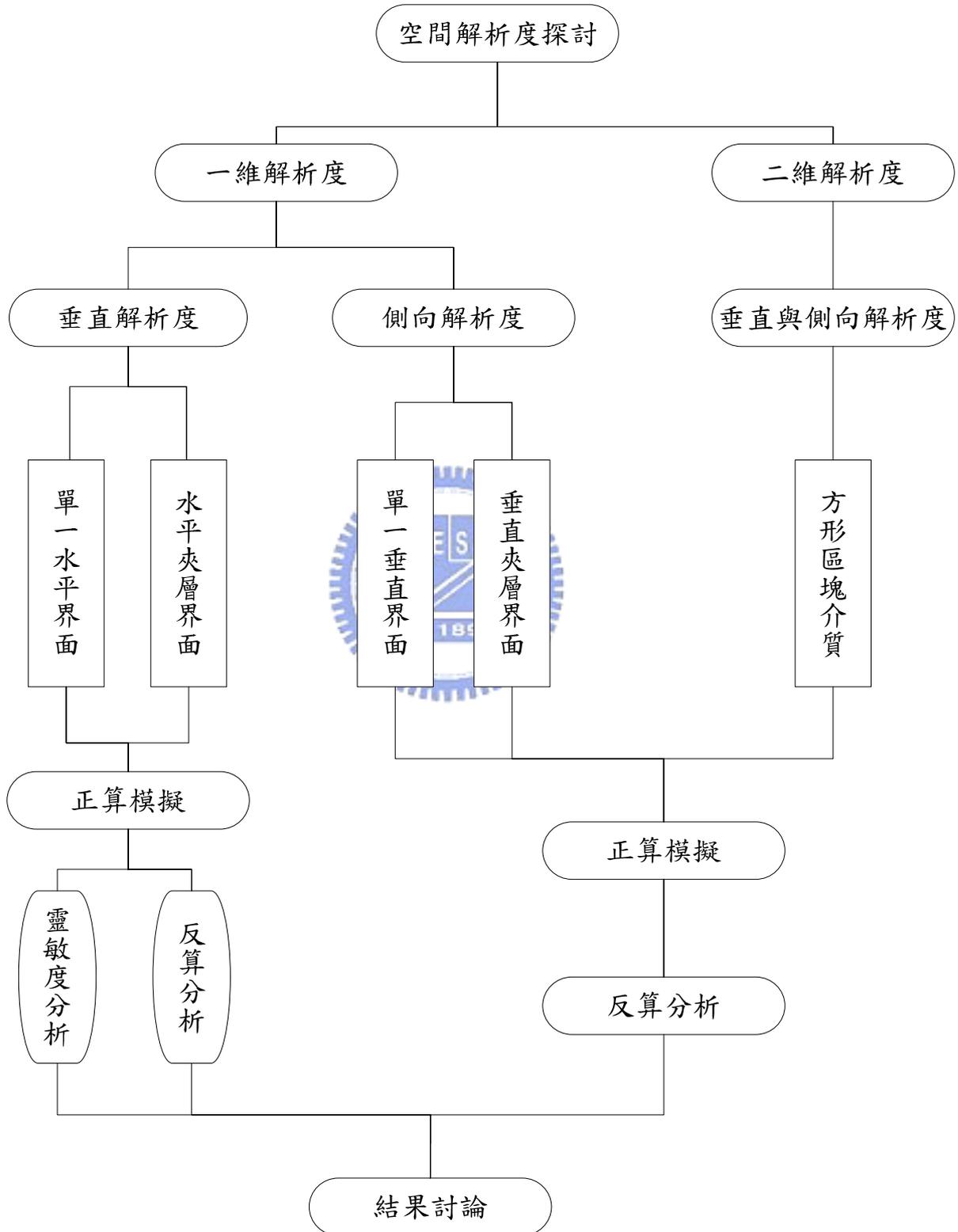


圖 4.1 空間解析度探討流程圖

4.1 正算模型參數

本研究使用 Loke 博士撰寫的正算模擬程式 Res2dmod，分別選定 Wenner 與 Pole-Pole 方式以有限元素法計算其控制方程式數值解，求取正算視電阻率數值，並選擇視電阻率正規化功能，以減低電位值誤差；其中模擬資料不考慮高斯雜訊誤差。

垂直解析度探討分為兩種情況：單一水平界面與水平夾層界面；側向解析度探討包含單一垂直界面與垂直夾層界面，最後為二維方形介質於均質介質中之解析能力探討。其測深參數 n 、反射係數 k 、單一水平層面深度 Z_i 、夾層中心 Z_c 、夾層厚度 t 、方形介質幾何大小、位置與反算模型參數將分別於各節中介紹。

基本正算模型網格參數如下：模型最小單位電極間距 a 等於 4 公尺，電極數目設為 96，測線展距共計 380 公尺，水平方向(x-direction)網格寬度為最小單位電極間距 a 之一半(等於 2 公尺)，垂直方向(z-direction)網格厚度隨深度漸增，共計 40 層(layers)，見表 4.1，其上/下層界面深度定義為上層網格(第 $i-1$)與下層(第 i)網格界面位置處，見圖 4.2，例如模型層數 10 與 11 之界面位於深度 9 公尺。

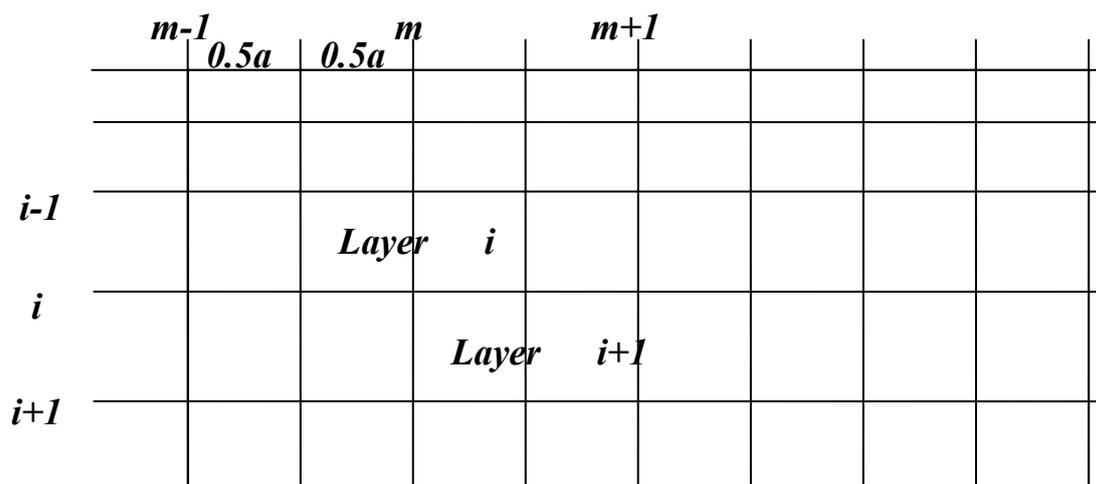


圖 4.2 正算模型網格示意圖

表 4.1 模型網格深度值

模型層數	上/下層界面深度, m	模型層數	上/下層界面深度, m
1	0.5	21	20
2	1	22	21
3	2	23	22
4	3	24	23
5	4	25	24
6	5	26	26 (25) ¹
7	6	27	28 (27) [26] ²
8	7	28	30 (29)
9	8	29	40 (31)
10	9	30	50 (40)
11	10	31	60 (50)
12	11	32	70 (60)
13	12	33	80 (70)
14	13	34	90 (80)
15	14	35	100 (90)
16	15	36	120 (100)
17	16	37	150
18	17	38	200
19	18	39	250
20	19	40	300

註 1. 模型層數 26 至 36 之上/下層界面深度值其括弧內為夾層模型網格深度不同於單一水平層面網格深度

註 2. 此深度為符合夾層中心於 15 公尺，厚度為 12 公尺而改變。

4.2 垂直解析度探討

4.2.1 單一水平界面構造模型

4.2.1.1 模型參數

(1) 正算模擬

(a) 反射係數與電阻率值參數

假設有二均質之電阻率分別為 ρ_1 與 ρ_2 於之間形成一水平界面；其中 ρ_1 介質在 ρ_2 介質之上，見 圖 4.3，兩介質之間電阻率值大小不同，致使電流路徑改變行為相異，以反射係數(Reflection factor ,k)定義之，如 2-36 式，k值介於-1 至 1。

以下將k分為大於零，以正反射係數稱之，表示電流從低電阻率進入高電阻率，以及反射係數小於零(負反射係數)兩部分探討，其反射係數與 ρ_1 及 ρ_2 之對應值如 表 4.2；反射係數介於 0.1 至 0.9 之間，表示上層 ρ_1 電阻率值低於下層 ρ_2 ，其中假設 ρ_1 固定為 50 ohm-m，隨k值從 0.1 增至 0.9， ρ_2 電阻率由 61.11 ohm-m增至 950 ohm-m，其上下層電阻率比值增至 19。反之，反射係數介於-0.1 至-0.9，其 ρ_2 等於 50 ohm-m， ρ_1 電阻率變化亦是從 61.11 ohm-m至 950 ohm-m。

表 4.2 反射係數與電阻率參數表

電阻率比值 ($\rho_1/50\Omega\text{-m}$)	$k>0, \rho_1=50\Omega\text{-m}$		$k<0, \rho_2=50\Omega\text{-m}$	
	k	$\rho_2, \Omega\text{-m}$	k	$\rho_1, \Omega\text{-m}$
1.22	0.1	61.11	-0.1	61.11
1.5	0.2	75	-0.2	75
1.86	0.3	92.86	-0.3	92.86
2.33	0.4	116.67	-0.4	116.67
3	0.5	150	-0.5	150
4	0.6	200	-0.6	200
5.67	0.7	283.33	-0.7	283.33
9	0.8	450	-0.8	450
19	0.9	950	-0.9	950

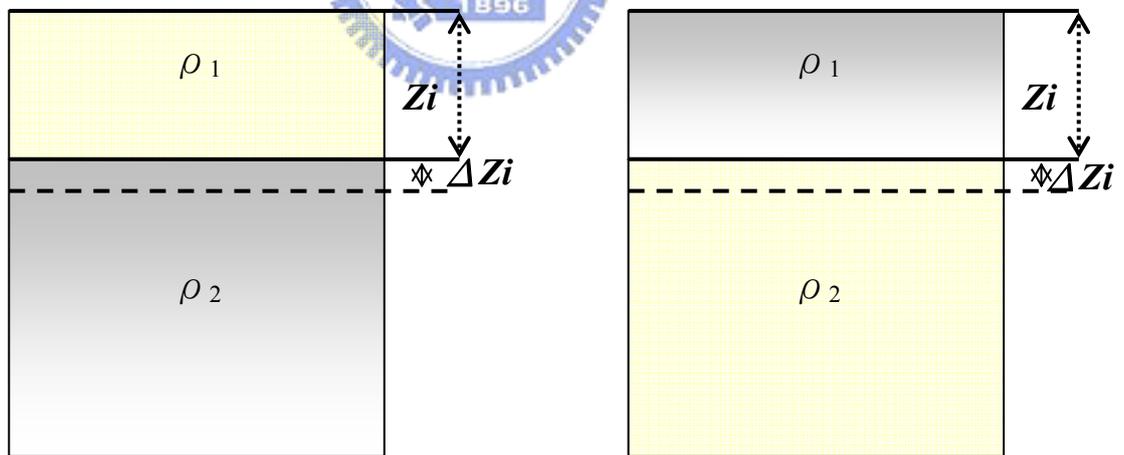


圖 4.3 單一水平界面構造示意圖

(b)水平界面位置 Z_i 參數

界面位置 Z_i 分別於地表下 2、5、10、15 以及 20 公尺，見 圖 4.3，此外，於探討靈敏度分析中，界面位置往下移動一微小變量 ΔZ_i ，將產生另一組模型，其界面位置位於地表下 $Z_i+\Delta Z_i$ ，其中 ΔZ_i 等於 0.1，見 圖 4.3 虛線位置。

(c)測深參數 n 與擬似深度(pseudo-depth)

Wenner電極排列，測深參數設定為 1 至 16，Pole-Pole電極排列，測深參數設定為 1 至 10，使兩者側深接近；擬似深度採用Edward於 1977 年提出之擬似深度與單位電極相關係數，其中Wenner測深相關係數等於 0.519，Pole-Pole測深相關係數等於 0.867，擬似深度分別如 表 4.3 所示。

給予一組 (k, Z_i) 參數模型，經正算所得視電阻率為 ρ_{a0} ，將此視電阻率資料帶入 Res2dinv 進行反算分析。

(2)反算分析

本研究反算步驟，所有模型皆以 Res2dinv 軟體進行分析，其中設定以有限元素法計算視電阻率，因模型屬於急遽變化邊界，參考 Loke, Acworth 與 Dahlin(2003)、Olayinka 與 Yaramanic(2000)以及 Zhou 與 Dahlin(2003)文獻，反算方法以 L1 norm.(Blocky inversion)對於急遽變化界面會較 L2 norm.(Smoothness constrained)能夠求得最佳化之解。

(a)反算模型層厚度

Wenner反算模型第一層厚度等於 0.5 倍最小單位電極間距 a ，Pole-Pole

反算模型第一層厚度為 0.867 倍之最小單位電極間距。其模型厚度隨深度愈深，下層厚度增加為上層厚度 1.1 倍，上層與下層界面深度與層之平均深度，如表 4.4 所示。

表 4.3 施測模型 Wenner 與 Pole-Pole 擬似深度值

測深參數 n	Wenner 擬似深度(m)	Pole-Pole 擬似深度(m)
1	2.076	3.468
2	4.152	6.936
3	6.228	10.404
4	8.304	13.872
5	10.38	17.34
6	12.456	20.808
7	14.532	24.276
8	16.608	27.744
9	18.684	31.212
10	20.76	34.68
11	22.836	38.148
12	24.912	41.616
13	26.988	45.084
14	29.064	48.552
15	31.14	52.02
16	33.216	55.488
17	35.292	58.956
18	37.368	62.424
19	39.444	65.892
20	41.52	69.36

(b)反算模型層數

Wenner 反算模型層數設定為 11 層，最深層中心深度為 33.9 公尺，Pole-Pole 反算模型層數為 8 層，最深層中心深度 32.25 公尺，使得兩者測

深相近；水平方向網格寬度皆等於最小單位電極間距 4 公尺。

表 4.4 反算模型層數之深度位置

反算模型層數	Wenner 模型上/下層界面深度, m	Wenner 模型層平均深度, m	Pole-Pole 模型上/下層界面深度, m	Pole-Pole 模型層平均深度, m
1	2(0.5a)	1	3.36(0.867a)	1.68
2	4	3	6.72	5.04
3	6.2	5.1	10.4	8.56
4	8.6	7.4	14.5	12.45
5	11.3	9.95	19	16.75
6	14.2	12.75	23.9	21.45
7	17.4	15.8	29.3	26.6
8	21	19.2	35.2	32.25
9	24.9	22.95	41.8	38.5
10	29.2	27.05	49	45.4
11	33.9	31.55	56.9	52.95
12	39.1	36.5	65.6	61.25
13	44.8	41.95	75.2	70.4

(3) 靈敏度分析

獲得一組 k 及 Z_i 之視電阻率資料 ρ_{a0} 之後，界面位置向下增加 ΔZ_i ，層面位置位於深度 $Z_i + \Delta Z_i$ ，其中 ΔZ_i 等於 0.1 公尺，再進行 $(k, Z_i + \Delta Z_i)$ 正算模擬得到一組視電阻率資料 ρ_{a1} ，將靈敏度定義為 ρ_{a1} 和 ρ_{a0} 之差值與界面變化量之比，代表視電阻率對參數變動之敏感程度，

$$S_{\Delta Z_i} = \frac{\rho_{a1} - \rho_{a0}}{\Delta Z_i} = \frac{\Delta \rho_a}{\Delta Z_i} \quad (4-1)$$

其中 $S_{\Delta Z_i}$ 為視電阻率對界面位置變化之靈敏度， $\Delta \rho_a$ 等於 ρ_{a1} 與 ρ_{a0}

之差值，若 $S_{\Delta Zi}$ 出現負值，則取絕對值表示之；再以 $S_{N,\Delta Zi}$ 定義為 $S_{\Delta Zi}$ 對 ρ_{a0} 與 Zi 之正規化靈敏度，

$$S_{N,\Delta Zi} = \frac{(\rho_{a1} - \rho_{a0}) / \rho_{a0}}{\Delta Zi / Zi} = \frac{\Delta \rho_a}{\Delta Zi} \frac{Zi}{\rho_{a0}} \quad (4-2)$$

4.2.1.2 單一水平界面靈敏度分析

(1) Wenner 靈敏度探討

分別以層面位於 2、5、10、15 以及 20 公尺處探討靈敏度，截錄界面位於 10 公尺與 20 公尺之結果探討，其餘詳見附錄圖 C-1~5。

(a) 界面深度相同，k 值改變

以水平界面位於深度 10 公尺之靈敏度與擬似深度曲線圖為例，靈敏度變化趨勢，見圖 4.4a，反射係數小於零以虛線表示，靈敏度曲線在擬似深度小於 10 公尺之區域內逐漸增加，於接近 10 公尺處出現最大值，之後降低趨近於 0，見圖 4.4a 中 Tz 區；其中靈敏度值最大出現在反射係數等於 -0.9；正反射係數以實線表示，靈敏度隨著擬似深度愈深緩慢增加至最大值之後，靈敏度值再降低趨勢相對於反射係數小於零時較不明顯，其最大值亦隨著 k 值增加而出現在較深的擬似深度，有往下遲緩趨勢，正反射係數靈敏度量小且變化量不如負反射係數大；低電阻率層在高電阻率層之上，最大靈敏度為 20%，反之，最大靈敏度為 60%。

正規化靈敏度，見圖 4.4b，當高電阻率層在低電阻率層之上，正規化靈敏度變化趨勢與靈敏度趨勢相似，差異在於最大正規化靈敏度值出現在

層面附近，最後降低趨近值隨 k 從-0.1至-0.9而逐漸升高。若為低電阻率在低電阻率之上時，在面下方才出現最大值。

(b) 界面深度改變

界面深度下移至深度 20 公尺處，靈敏度曲線如圖 4.5a 所示，其最大靈敏度值因深度增加而降低，且高電阻率在低電阻率之上時，深度小於 20 公尺之前即達到最大靈敏度值；若低電阻率在高電阻率之上，其最大靈敏度愈深才達到，其中漸變帶(Tz區域)也擴大。正規化靈敏度曲線則因層面深度增加，漸變帶區域增大；除反射係數等於-0.8及-0.9時，最大靈敏度出現於深度 24 公尺之後，其於皆在深度 18~22 公尺之間。

上述靈敏度變化結果顯示，地層界面隨深度由淺至深，Wenner 電阻率由高電阻率變為低電阻率，最大靈敏度值位於層面位置附近，Pole-Pole 則低於層面位置，若為相反情形，由低電阻率變化至高電阻率，最大靈敏度值遠深於層面位置。當高電阻率在低電阻率上或者在低電阻率之下，隨著電阻率差異愈大，其靈敏度皆為上升，若層面位於更深處，其靈敏度值皆降低。

(c) 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖

將界面分別位於五種不同深度位置之最大靈敏度值與最大正規化靈敏度值，藉由 surfer 軟體中 Triangulation/Linear Interpolation 方法分別畫成對反射係數(x-axis)與層面深度位置(y-axis)關係影像圖，如圖 4.6 和圖 4.7 所示，可知當反射係數固定於一常數時，最大靈敏度值隨深度遞減，如圖 4.8 中 k

值分別等於 0.6、0.9、-0.6 以及 -0.9；若固定於某一層面深度位置處，見圖 4.9，最大靈敏度隨 k 值從 -0.1 至 -0.9 (或 0.1 至 0.9) 有增加趨勢，其中界面愈接近地表靈敏度值愈大，意味著其界面愈接近地表面，地電阻量測之視電阻率愈容易呈現因界面造成的電位場改變。

最大正規化靈敏度曲線值不隨著界面深度改變，見圖 4.10 中於反射係數為 0.6 時，其最大正規化靈敏度值相當接近，分別將 k 大於零與 k 小於零兩部份資料作回歸，得到最大正規化靈敏度值隨 k 從 -0.1 至 -0.9 為指數增加趨勢；0.1 至 0.9 為線性增加趨勢，由此可知高電阻率在低電阻率之上較高電阻率在低電阻率之下易於獲得界面產生之視電阻率變化。

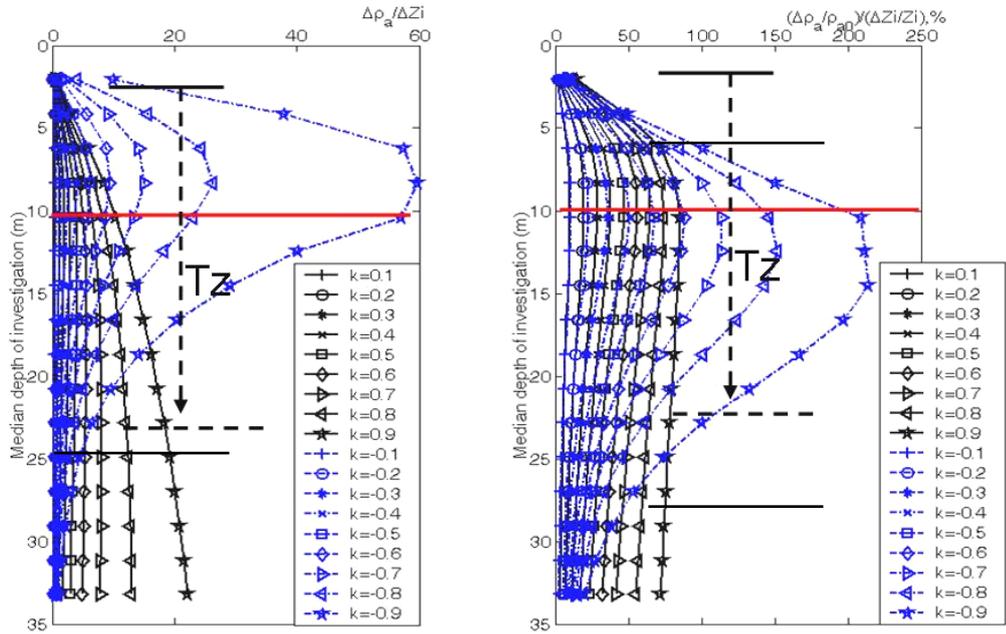
由影像圖可得知，最大靈敏度與最大正規化靈敏度，於高電阻率往低電阻率之界面變化與低電阻率往高電阻率之界面變化皆因高低電阻率差值大，其值愈大，差異在前者隨界面深度愈深，靈敏度降低，後者不受層面深度影響。

(2) Pole-Pole 靈敏度探討

靈敏度與正規化靈敏度曲線圖見附錄圖 C-6~10，與 Wenner 靈敏度曲線變化趨勢相似，差異在於 Pole-Pole 靈敏度值與正規化靈敏度值皆比 Wenner 靈敏度值及正規化靈敏度值小，且 Pole-Pole 的 Tz 區較 Wenner 的 Tz 區大，隨深度愈深，其前者增加量也會較後者變化大。

Pole-Pole 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖見附錄圖 C-11,12，其最大靈敏度與最大正規化靈敏度隨深度與 k 值變化趨勢與 Wenner 一致，

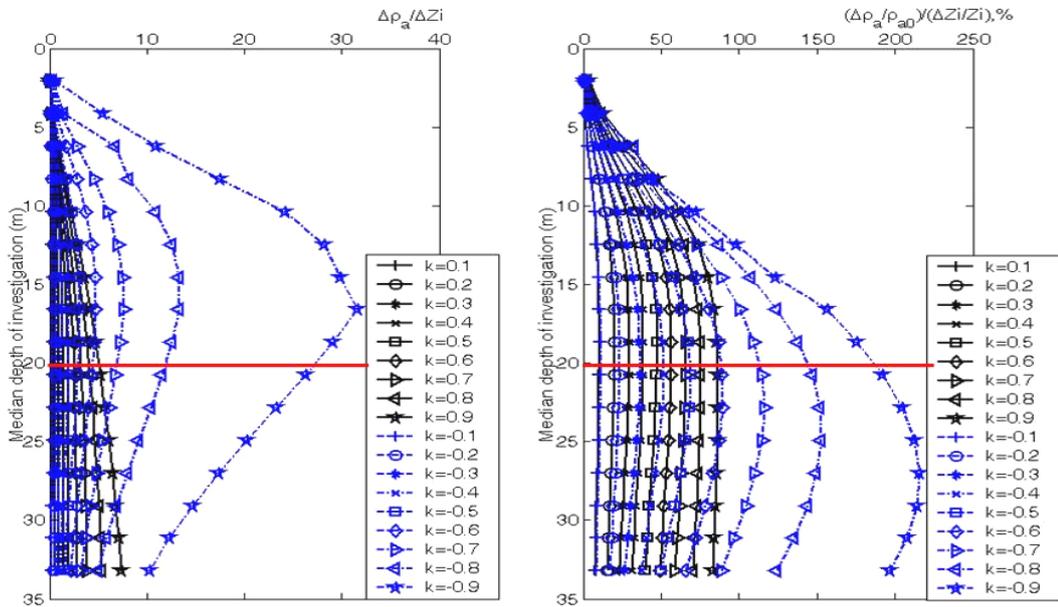
見附錄圖 C-13~15，其中最大正規化靈敏度出現在低於真實層面位置。



(a) $S_{\Delta Zi}$ vs. Pseudo-depth

(b) $S_{N\Delta Zi}$ vs. Pseudo-depth

圖 4.4 界面於深度 10 公尺之 Wenner 靈敏度與擬似深度曲線圖



(a) $S_{\Delta Zi}$ vs. Pseudo-depth

(b) $S_{N\Delta Zi}$ vs. Pseudo-depth

圖 4.5 界面於深度 20 公尺之 Wenner 靈敏度與擬似深度曲線圖

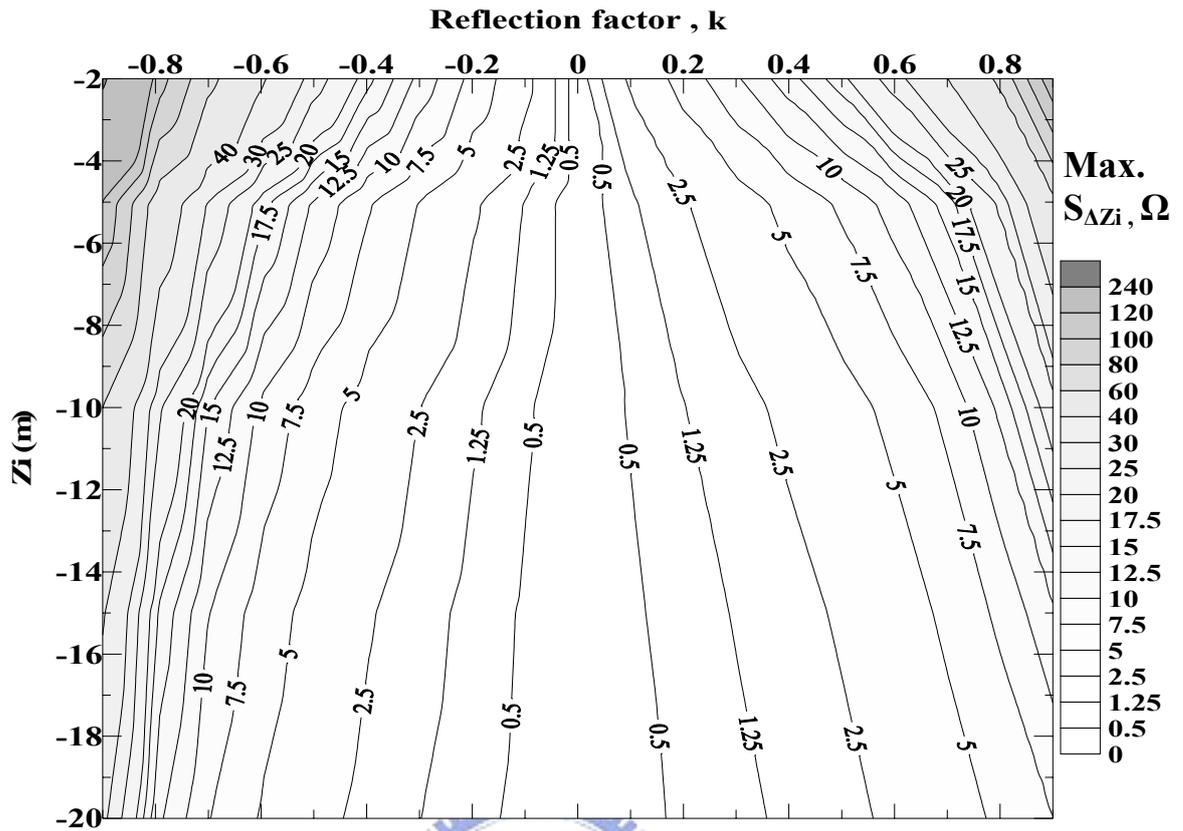


圖 4.6 Wenner 最大靈敏度影像圖

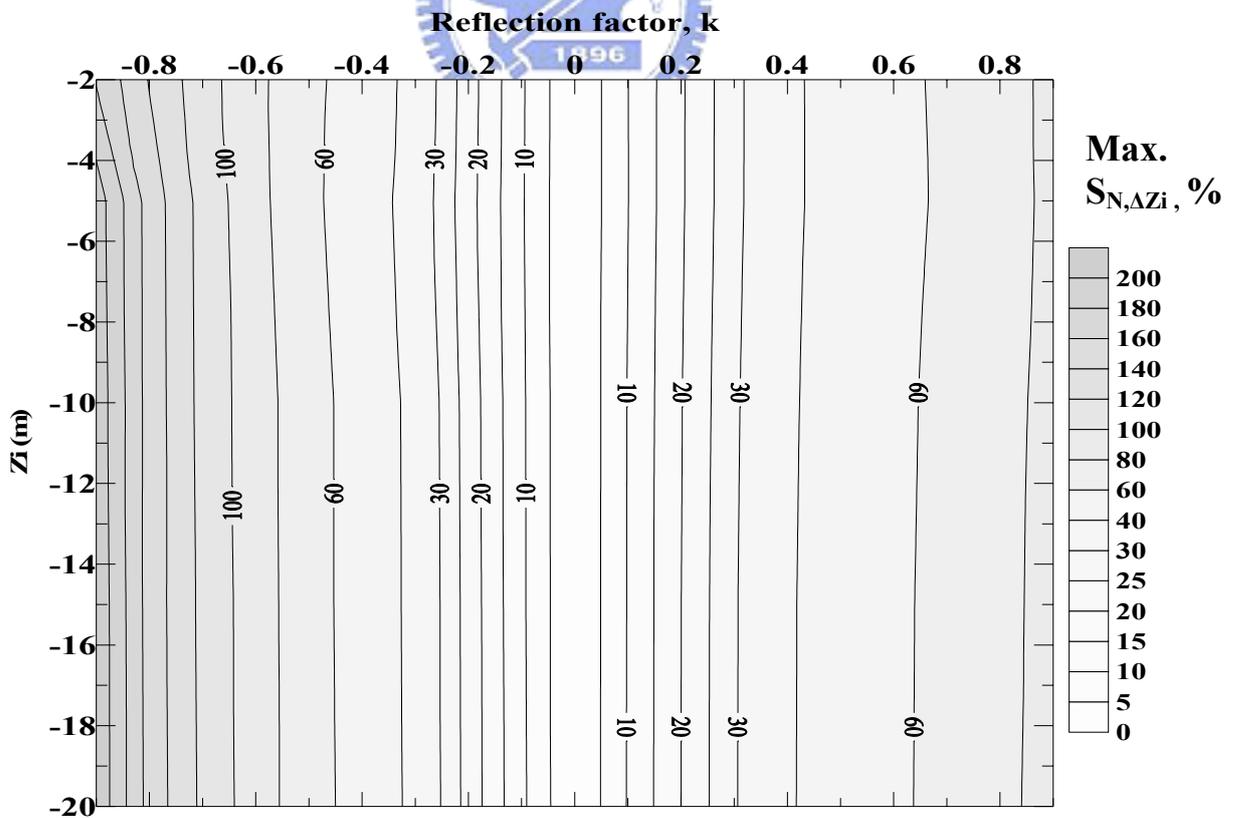


圖 4.7 Wenner 最大正規化靈敏度影像圖

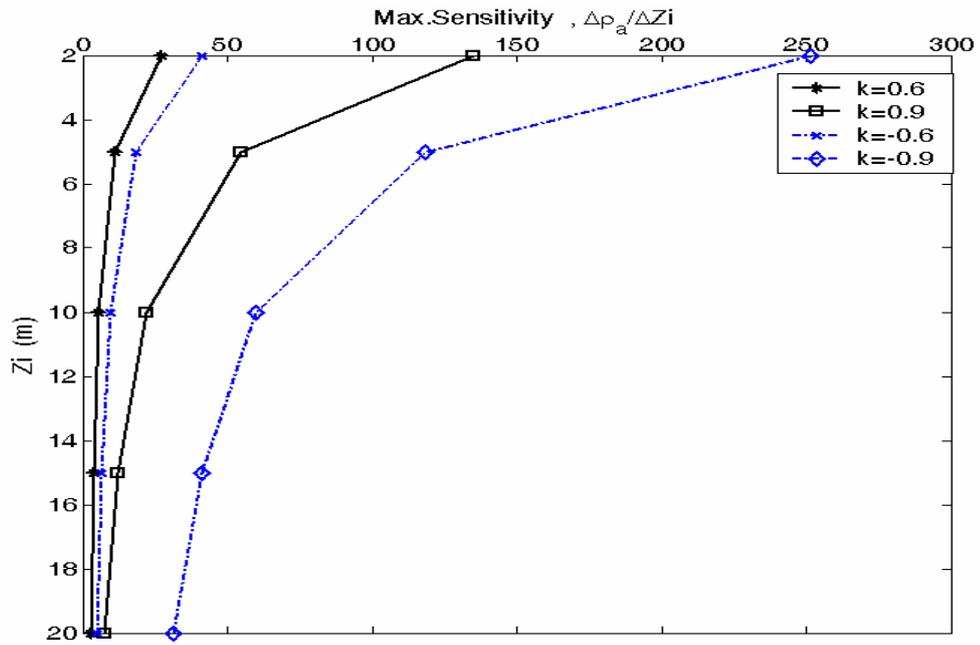


圖 4.8 Wenner 最大靈敏度隨深度降低趨勢圖(k=0.6,0.9,-0.6,-0.9)

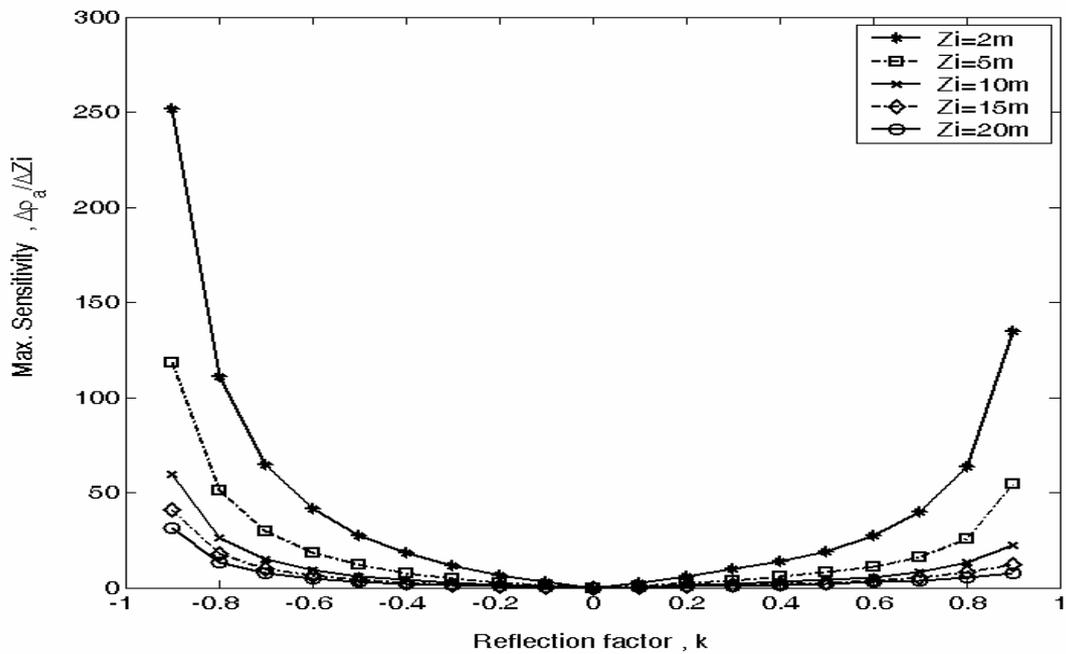


圖 4.9 Wenner 最大靈敏度隨反射係數變化(Zi=2,5,10,15,20m)

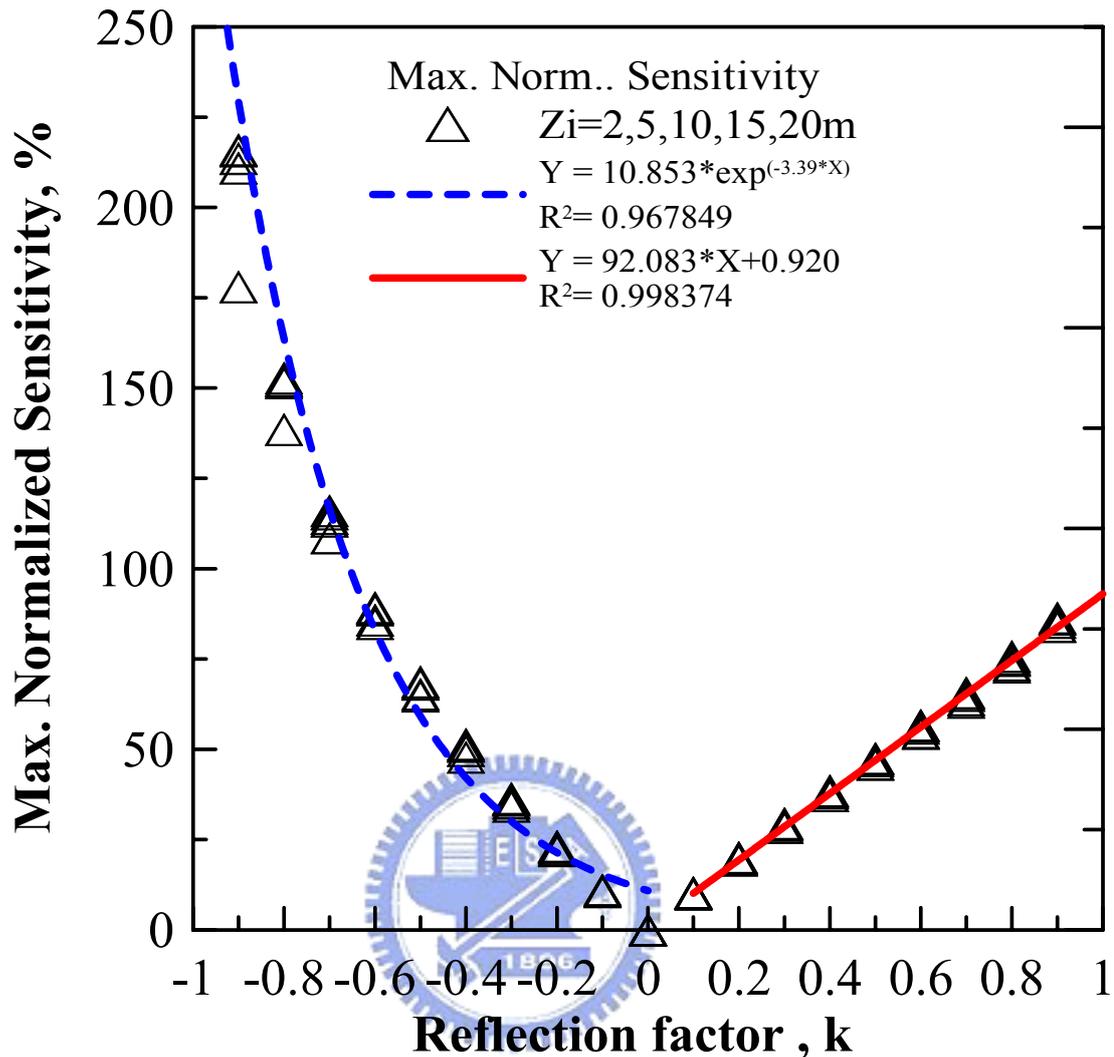


圖 4.10 Wenner 最大正規化靈敏度與反射係數關係

4.2.1.3 單一水平界面反算分析探討

(1) Wenner 反算結果

每組層面資料分別於深度 10 公尺與 20 公尺處視電阻率 ρ_{a0} 經由反算分析，得到反算模型影像圖，取位於測線中心(x-direction)192 公尺處之模型層(model layers)垂直方向(z-direction)反算模型電阻率值變化，如圖 4.11 圖 4.12 分別為 $k=0.4\sim 0.6, -0.4\sim -0.6$ ， $Z_i=10$ 與 20 公尺之反算結果，其餘 k 值之結果見附錄圖 D-1~12，其絕對誤差(Abs. error)小於 1%，除 $Z_i=10m$,

$k=-0.9$ (Abs. error =13%)與 $Z_i=20\text{m}$, $k=-0.8$ 及 -0.9 除外，其中實線為真實模型，虛線階梯狀為模型層值，另一條以模型層之平均深度(見表 4.4)表示；反算結果出現如圖 4.11 與圖 4.12 中①~③區域，這些區域隨反射係數與層面深度位置改變而有所變化，以下討論 k 與 Z_i 改變對①~③區域變化情形。

見圖 4.11 中， k 從 0.4 增至 0.6(或-0.4~-0.6)，①區寬帶不隨 k 值改變，表示在這些模型層數之間為漸變帶；其中低電阻率在高電阻率之上，①區域內位於 10 公尺之上厚度分別約為 1 倍單位電極間距 a ，位於 10 公尺以下，厚度約等於 $1.5a$ ，若為高電阻率在低電阻率之上，漸變帶寬度與上述接近約為 $2.5a$ 。若層面深度下移至 20 公尺，低電阻率位於高電阻率之上，漸變帶寬度位於 20 公尺以上與 20 公尺之下分別增加為 $2a$ 與 $3a$ ，高電阻率在低電阻率之上，則漸變帶寬度與前者相似，如圖 4.12。

②表示兩層之間電阻率最大差值， Z_i 等於 10 公尺，②區間寬度隨絕對 k 值增加而變寬，但 $k=0.9,-0.9$ 例外，若 Z_i 下移至 20 公尺，與上述變化一致，($k=-0.8,-0.9$ 除外)，但②區間差異量不如在 10 公尺處。由觀察可知最大差異量出現位置在低電阻率層。

③區表示下層反算模型電阻率值與真實模型電阻率值之差異大小，由圖 4.11 與圖 4.12 比較得知，③區厚度在正反射係數時，隨深度增加而降低，而在層面深度等於 10 公尺處，其差異量因 k 值增加而漸增，見附錄圖 D-1~3；層面下移至 20 公尺，差異值增加趨勢小，只在 $k=0.8\sim 0.9$ 有較大的差異值，若負反射係數時，幾乎和真實模型無差異量。由結果觀察出，低

電率層反算結果逼近真實模型電阻率值，相反的，高電阻率與真實電阻率值略有差異。

(2) Pole-Pole 反算結果

Pole-Pole 反算結果中三個變異區與上述 Wenner 變異區隨層面深度與反射係數影響情形相似，其中 Pole-Pole 與 Wenner 之間差異為，①區厚度較大，約為 4~5 單位電極間距之間，②區寬度較小。

(3) 反算結果與靈敏度關係

$S_{\Delta Z_i}$ 隨深度愈深而以一係數衰減，表示解析度於愈深深層能力逐漸減低；反算結果中①和②區域變化，隨著 Z_i 增加，分別呈現增加與減少趨勢(最大靈敏度值大反應出②區域差異值大)，表示上下層電阻率間變化之漸變帶愈小，且②區愈大，其解析能力愈好，更易於判識層面位置。

在此反算模型層數之下(WN=11 層，PP=8 層)，由此二區域決定單一水平界面實際位置，在垂直解析度上 PP 稍微比 WN 差一些，但兩者皆可以獲得接近界面深度(約在實際模型深度正負 1~2 倍單位電極間距)。

其反算結果出現界面之漸變帶區域，造成解析度之模糊化，更一進步從反算結果與真實模型比對知道，低電阻率區域不論在高電阻率層上或其下方，低電阻率反算模型值相對於高電阻率區反算模型值，低電阻率反算結果為佳，其原因可由文獻知道電流會集中在較低電阻率層，進而具有較高靈敏度值。

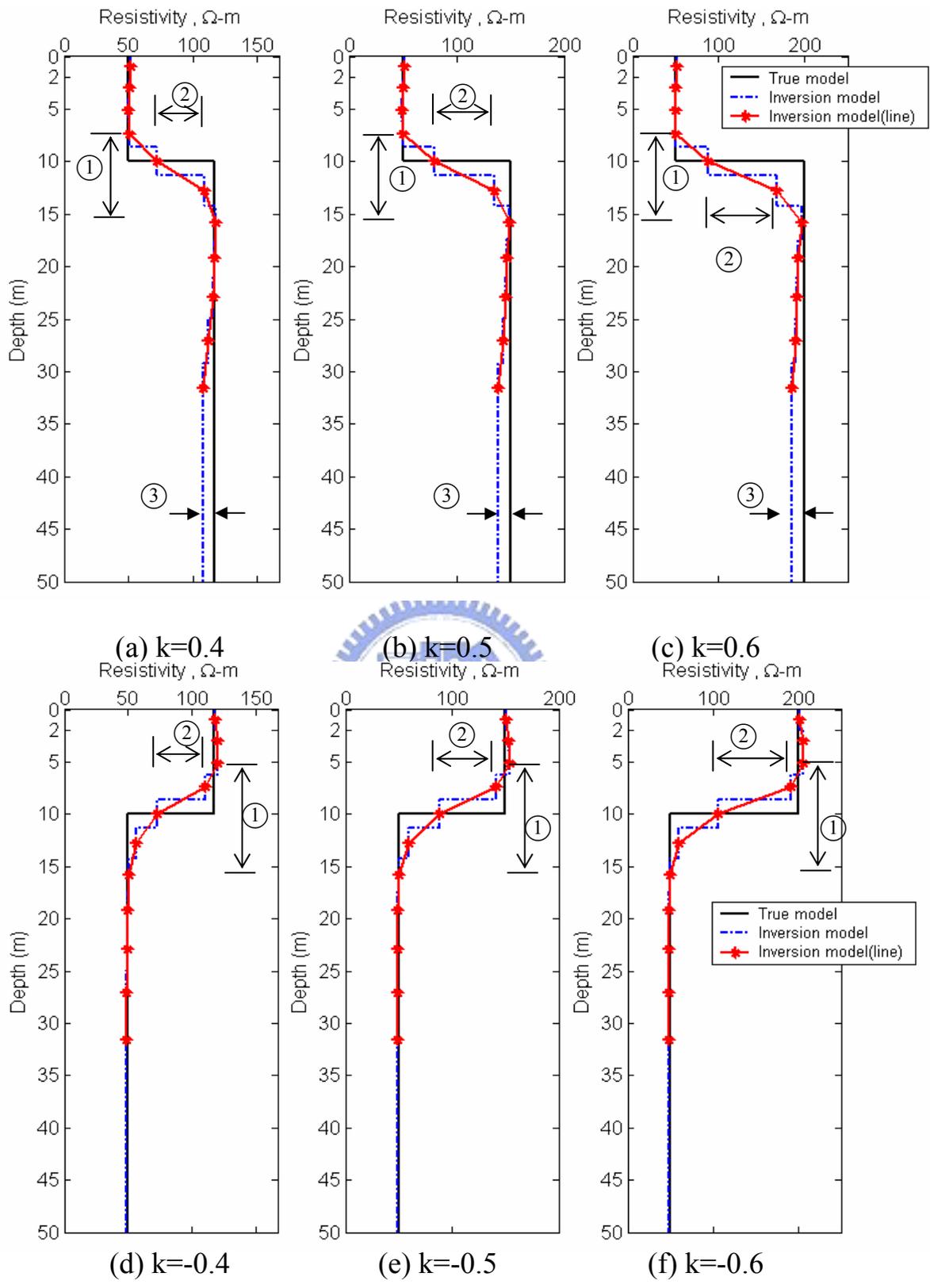
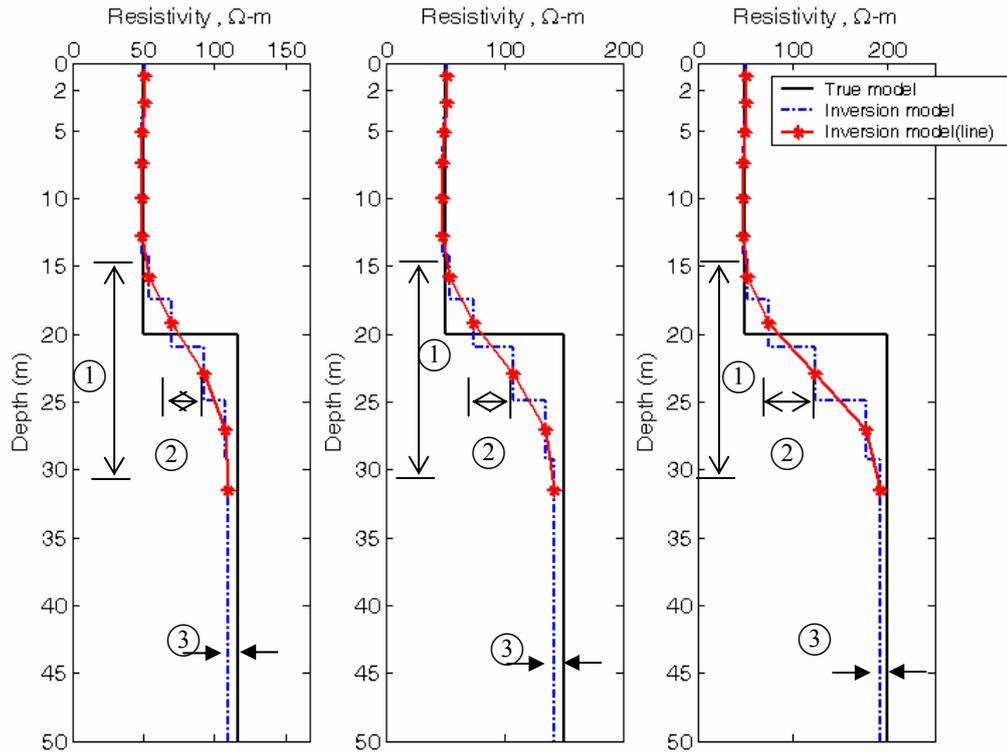


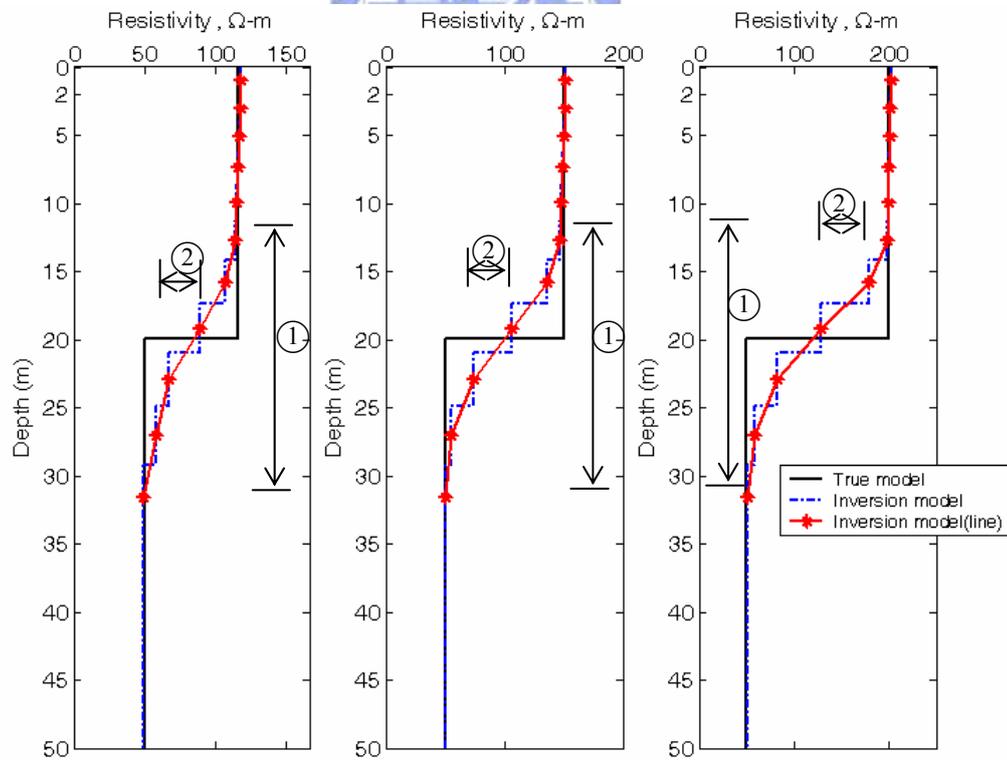
圖 4.11 界面位於深度 10 公尺，Wenner 反算模型結果



(a) $k=0.4$

(b) $k=0.5$

(c) $k=0.6$



(d) $k=-0.4$

(e) $k=-0.5$

(f) $k=-0.6$

圖 4.12 界面位於深度 20 公尺，Wenner 反算模型結果

4.2.2 水平夾層界面構造模型

4.2.2.1 模型參數

(1) 正算模擬

(a) 反射係數與電阻率值參數

假設有二均質之電阻率分別為 ρ_1 與 ρ_2 ， ρ_2 於 ρ_1 介質之間形成厚度為 t ，中心在深度 Z_c 之水平夾層，見 圖 4.13。反射係數絕對值考慮 0.1, 0.3, 0.6 與 0.9，其參數如 表 4.2。

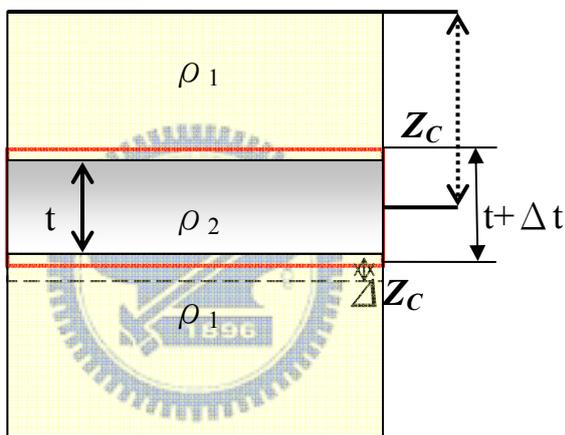


圖 4.13 水平夾層構造模型示意圖

(b) 夾層中心位置 Z_c 與夾層厚度 t 參數

夾層中心位置分別設定於深度 10、15、20 以及 25 公尺，夾層厚度分別選定 4、8 與 12 公尺，其水平界面位置分為上界面及下界面，見 表 4.5。

(c) 測深參數 n 與擬似深度

Wenner與Pole-Pole測深參數皆設為 1 至 20，擬似深度見 表 4.3。

(2) 反算分析

反算分析方法與單一界面水平構造相同，以L1 norm.求取最佳解，差別於反算層數數目，WN與PP皆設為13層，其模型深度見表4.4。

表 4.5 夾層中心位置與厚度參數表

	t=4m	t=8m	t=12m
上界面 ,m	8	6	4
Z_c ,m	10		
下界面 ,m	12	14	16
上界面 ,m	13	11	9
Z_c ,m	15		
下界面 ,m	17	19	21
上界面 ,m	18	16	14
Z_c ,m	20		
下界面 ,m	22	24	26
上界面 ,m	23	21	19
Z_c ,m	25		
下界面 ,m	27	29	31

(3)靈敏度分析

反射係數 k 、夾層中心位置 Z_c 以及厚度 t 三參數正算獲得一組視電阻率資料 ρ_{a0} ，分別對厚度以及夾層中心位置計算靈敏度；(a)中心位置固定之下，微小變異厚度為 Δt 等於 0.1 公尺，使夾層厚度增為 $t+\Delta t$ ，正算模擬出另一組 $(k, Z_c, t+\Delta t)$ 視電阻率 ρ_{at} ，(b)於厚度固定之下，下移 ΔZ_c 等於 0.1 公尺，中心位置位下移至深度 $Z_c+\Delta Z_c$ ，模擬 $(k, Z_c+\Delta Z_c, t)$ 視電阻率為 ρ_{az} ，

$$S_{\Delta t} = \frac{\rho_{at} - \rho_{a0}}{\Delta t} = \frac{\Delta \rho_{at}}{\Delta t} \quad (4-3)$$

$$S_{\Delta Z_c} = \frac{\rho_{az} - \rho_{a0}}{\Delta Z_c} = \frac{\Delta \rho_{az}}{\Delta Z_c} \quad (4-4)$$

其 $S_{\Delta t}$ 與 $S_{\Delta Z_c}$ 分別為視電阻率對夾層厚度與中心位置變化之靈敏度，若為負值，取其絕對值； $\Delta \rho_{at}$ 等於 ρ_{a0} 和 ρ_{at} 之差值， $\Delta \rho_{az}$ 等於 ρ_{a0} 和 ρ_{az} 之差值。此外，並求取正規化靈敏度值，比較差異性，如下式，

$$S_{N,\Delta t} = \frac{\Delta \rho_{at} / \rho_{a0}}{\Delta t / t} \quad (4.5)$$

$$S_{N,\Delta Z_c} = \frac{\Delta \rho_{az} / \rho_{a0}}{\Delta Z_c / Z_c} \quad (4.6)$$

其中 $S_{N,\Delta t}$ 為 $S_{\Delta t}$ 對 t 及 ρ_{a0} 之正規化值， $S_{N,\Delta Z_c}$ 為 $S_{\Delta Z_c}$ 對 Z_c 及 ρ_{a0} 之正規化靈敏度值。

4.2.2.2 水平夾層界面靈敏度探討

以夾層厚度 12 公尺，夾層中心位於 25 公尺處為例，探討 $S_{\Delta t}$ 、 $S_{\Delta Z_c}$ 、 $S_{N,\Delta t}$ 與 $S_{\Delta t}$ 曲線變化，其餘不同夾層中心位置與厚度參數之靈敏度曲線見附錄 F。

(1) Wenner 靈敏度探討

如圖 4.14a,b 分別為 $S_{\Delta Z_c}$ 及 $S_{N,\Delta Z_c}$ 隨擬似深度變化曲線，其變化趨勢隨著擬似深度愈深，其值先增至極大值，再降至極小值(圖中 Sz 區)，趨於穩定，但對於層面中心位於深度較淺及反射係數絕對值大者，則於極小值之後會再出現稍微增加之趨勢。由夾層厚度固定時，觀察夾層中心深度下移時，得知最大 $S_{N,\Delta Z_c}$ 值出現在上界面，最大 $S_{\Delta Z_c}$ 值則在上界面之前達到，其中在厚度等於 8 與 12 公尺時，在夾層中心接近地表為 10 公尺時，下界面的 $S_{N,\Delta Z_c}$

ΔZ_c 值則迅速從上界面之最大值降低至趨於穩定值。

圖 4.14c,d 分別為 $S_{\Delta t}$ 及 $S_{N,\Delta t}$ 隨擬似深度變化曲線，隨著擬似深度增加， $S_{N,\Delta t}$ 極大值出現於夾層位置附近，然後趨於平穩或緩慢減少，若為低電阻率夾層，更為明顯，見圖 F-5,6,9~11。觀察夾層中心深度下移時，得到當反射係數絕對值在 0.1~0.6 範圍內，最大 $S_{N,\Delta t}$ 值則約在夾層中心位置出現；反射係數絕對值於 0.9 時有些例外。

由觀察得知，反射係數絕對值愈大，靈敏度值愈大，若高低電阻率值差異大時(如 $|k|=0.6$)，低電阻率夾層靈敏度值明顯大於高電阻率夾層靈敏度值，反之，其靈敏度值差異不明顯。

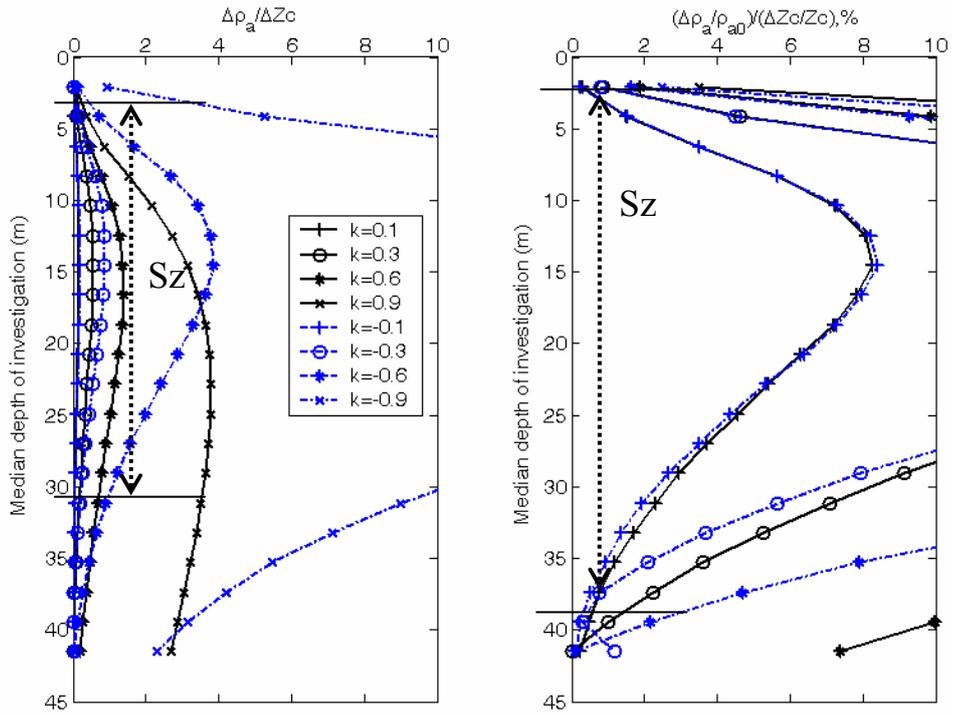
取各靈敏度曲線之最大值畫成影像圖，以瞭解 Z_c 與 t 影響靈敏度值變化，見附錄 G，取最大正規化靈敏度影像圖 $S_{N,\Delta Z_c}$ 以及 $S_{N,\Delta t}$ 說明，如圖 4.15 為厚度等於 12 公尺，反射係數與層面深度之最大靈敏度與最大正規化影像圖， $\text{Max. } S_{N,\Delta Z_c}$ 與 $\text{Max. } S_{N,\Delta t}$ 在固定反射係數下，皆隨著層面深度愈深而降低。圖 4.16 層面位於深度 25 公尺處， $\text{Max. } S_{N,\Delta Z_c}$ 與 $\text{Max. } S_{N,\Delta t}$ 在固定反射係數下，隨層面厚度愈厚而上升；其中 $\text{Max. } S_{N,\Delta t}$ 值比 $\text{Max. } S_{N,\Delta Z_c}$ 值稍微小一點。

(2) Pole-Pole

Pole-Pole 靈敏度曲線變化趨勢和 Wenner 靈敏度曲線變化一致，差異在 Pole-Pole 的最大 $S_{\Delta Z_c}$ 值出現於上界面位置，若在相同條件下，Pole-Pole 靈敏度值小於 Wenner 靈敏度值，表示 Pole-Pole 量測視電阻率值較 Wenner 視電

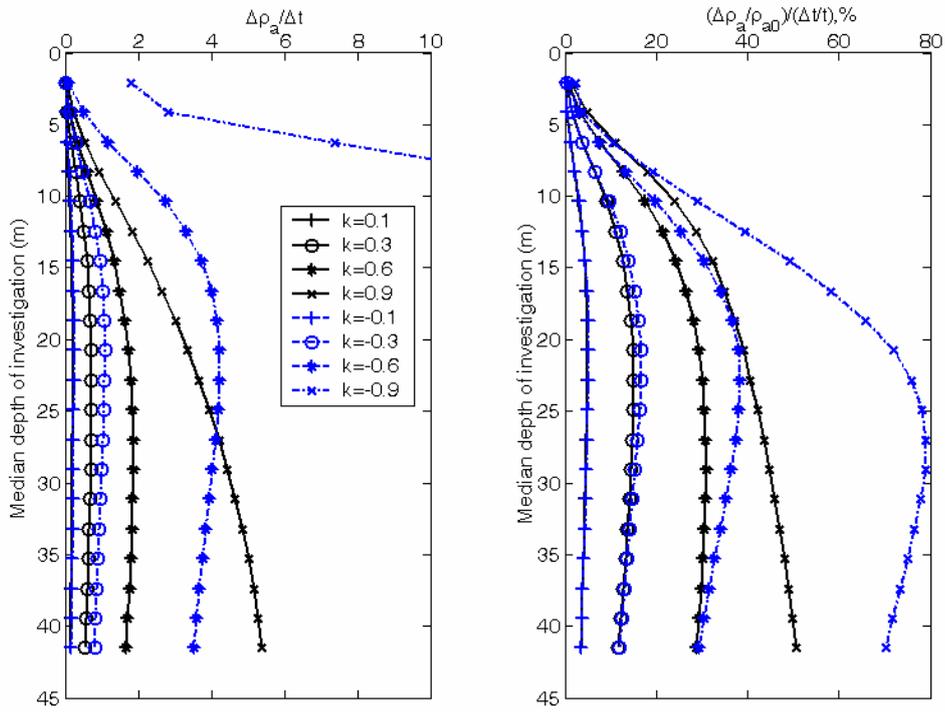
阻率值不易感受變化量造成之影響；此外，圖 4.14a 中的水平夾層靈敏度變化(Sz區)，於 Pole-Pole 靈敏度影像圖形中，靈敏度變化區帶寬更加為大。其最大靈敏度影像與最大正規化影像圖見附錄 G，受反射係數、厚度與夾層中心位置影響行為與 Wenner 一致。

夾層靈敏度影像圖和單一層面靈敏度影像圖(圖 4.6 圖 4.7)變化趨勢相似，靈敏度隨反射係數從 -0.9 至 0.9 為非對稱性變化，於低電阻率夾層(或者高電阻率層在低電阻率層之上)時，靈敏度增加趨勢大於高電阻率夾層(或是低電阻率在高電阻率上方)，例如 -0.6 與 0.6。更進一步觀察其靈敏度值在反射係數絕對值約於 0.7 至 0.1 之間，其值相當接近，其中在反射係數絕對值相同時，低電阻率夾層靈敏度大於高電阻率夾層，甚者，正規化靈敏度更接近；而在 $k=-0.9$ ，其靈敏度值遠大於其他值，單一水平界面靈敏度變化趨勢亦是如此。



(a) $S_{\Delta Zc}$

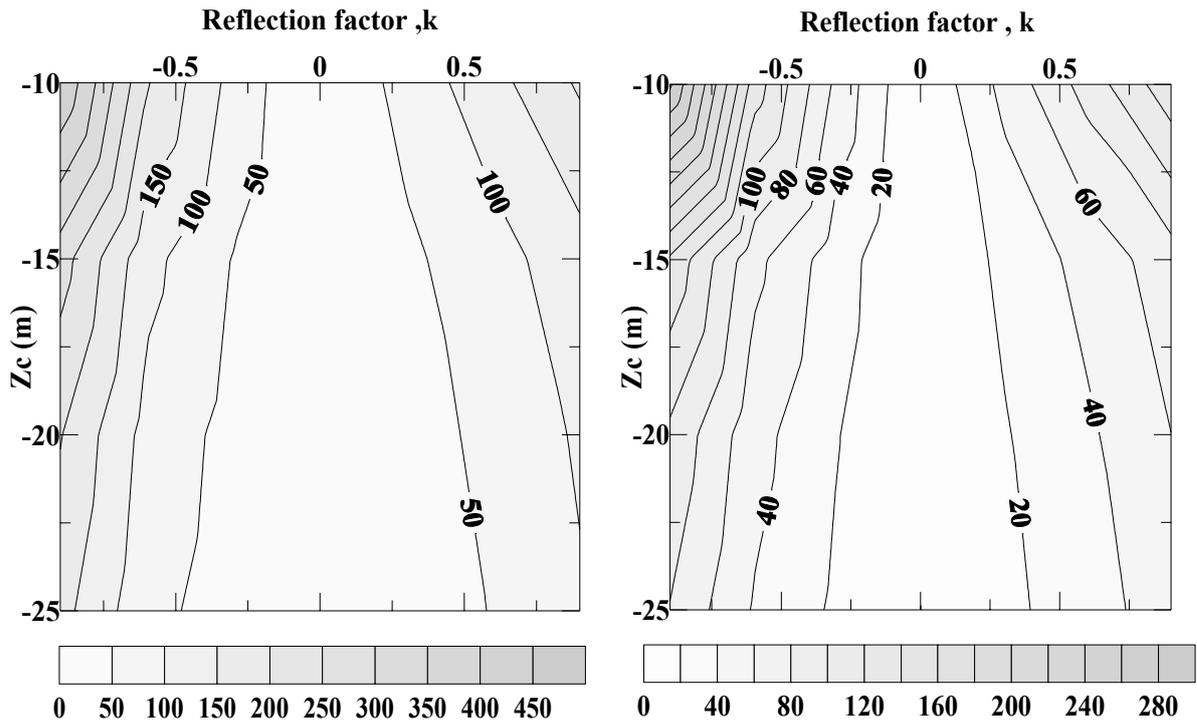
(b) $S_{N, \Delta Zc}$



(c) $S_{\Delta t}$

(d) $S_{N, \Delta Zc}$

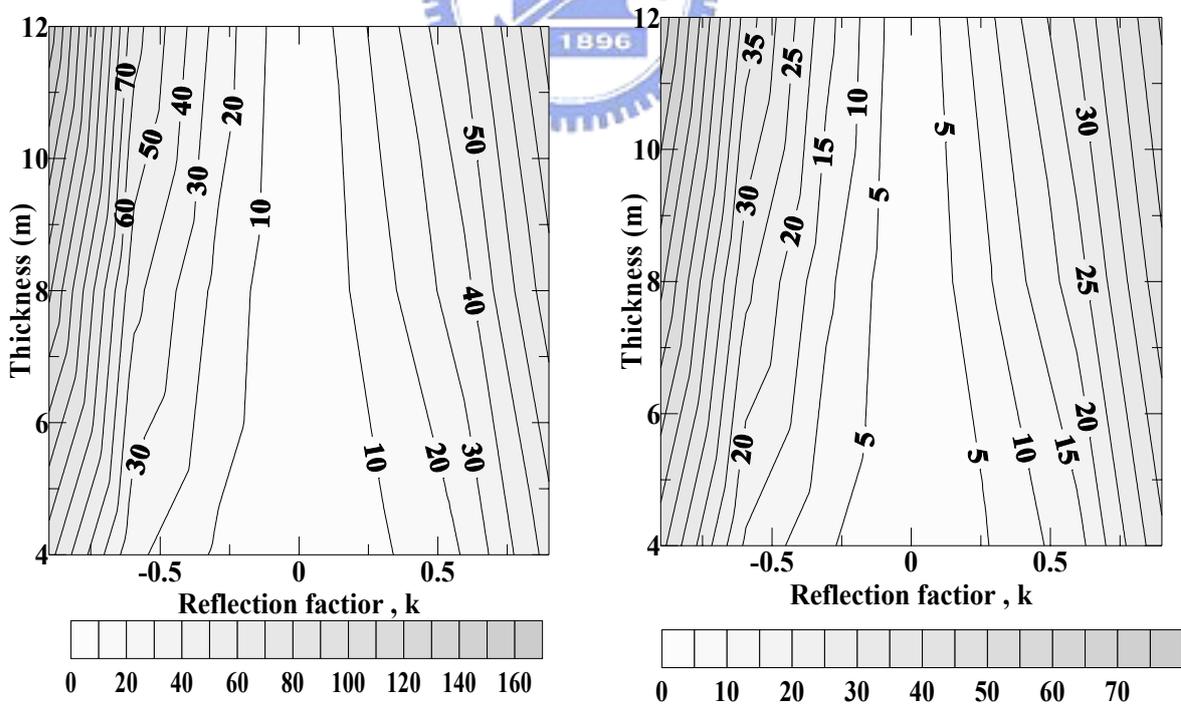
圖 4.14 Wenner 靈敏度曲線(夾層中心等於 25 公尺，厚度等於 12 公尺)



(a) Max. $S_{N,\Delta Z_c}$

(b) Max. $S_{N,\Delta t}$

圖 4.15 Wenner 最大正規化靈敏度影像圖($t=12\text{m}$)



(a) Max. $S_{N,\Delta Z_c}$

(b) Max. $S_{N,\Delta t}$

圖 4.16 Wenner 最大正規化靈敏度影像圖($Z_c=25\text{m}$)

4.2.2.3 反算分析結果

Wenner 與 Pole-Pole 反算分析於夾層中心 10 公尺與 20 公尺處之結果詳見附錄 H，以下擷取部份說明結果：

(1) Wenner

夾層中心在深度 10 公尺處，厚度為 8 公尺，不同反射係數下之反算分析結果如圖 4.17，電阻率隨著深度經過夾層上界面與單一層面變化相同，電阻率於未達上界面之前稍有上升趨勢，且兩層之間有一最大電阻率差值。進入高電阻率夾層，高電阻率值比模型電阻率小(圖中 Ir 寬帶)，其中可觀察出在相同深度與厚度條件下，夾層的高電阻率與上下低電阻率層差異愈大時(如圖 4.17a~c)，夾層內反算高電阻率值與模型高電阻率差值愈大，表示反算電阻率值無法達真實高電阻率值，因此具有高電阻率夾層，愈不易呈現真值；反觀在低電阻率夾層時，反算模型電阻率達到真實低電阻率值趨於吻合(如圖 4.17d~f)。

經過夾層後，電阻率值逐漸降低至真實電阻率值，從上界面電阻率變化開始至下界面之後吻合真時模型之電阻率值之區域稱為漸變帶(Rz)，該區內在下界面以下與單一水平界面漸變帶下方區同樣佔有較寬的區帶，當高電阻率夾層條件下，隨電阻率值差異愈大，漸變帶似乎有增加趨勢；若為低電阻率夾層，其漸變帶小於高電阻率夾層漸變帶，從結果顯現，高電阻率區反算結果有誤差，可知低電阻率層的反算結果優於高電阻率層的反算結果。

漸變帶與夾層內反算與模型電阻率差值，隨著夾層中心深度下移與夾層增厚變化情形，見附錄H，比對反算結果顯示，漸變帶隨著夾層厚度增大，無明顯變異情形，其夾層模型內反算與模型電阻率差值減小，如圖 4.18a,b與圖 4.17b,d兩者k分別於 0.6 和 -0.6、 $Z_c=10\text{m}$ ，厚度增加至 12 公尺，可見漸變帶沒有太多的差異，但夾層內差值明顯減小。若將夾層中心往下移動，造成漸變帶明顯變大，且電阻率值有降低趨勢，見圖 4.18c,d與圖 4.17b,d，其漸變帶由約從 16 公尺增至 25 公尺，顯示上下界面深度位置愈深，厚度愈薄者，解析能力低。

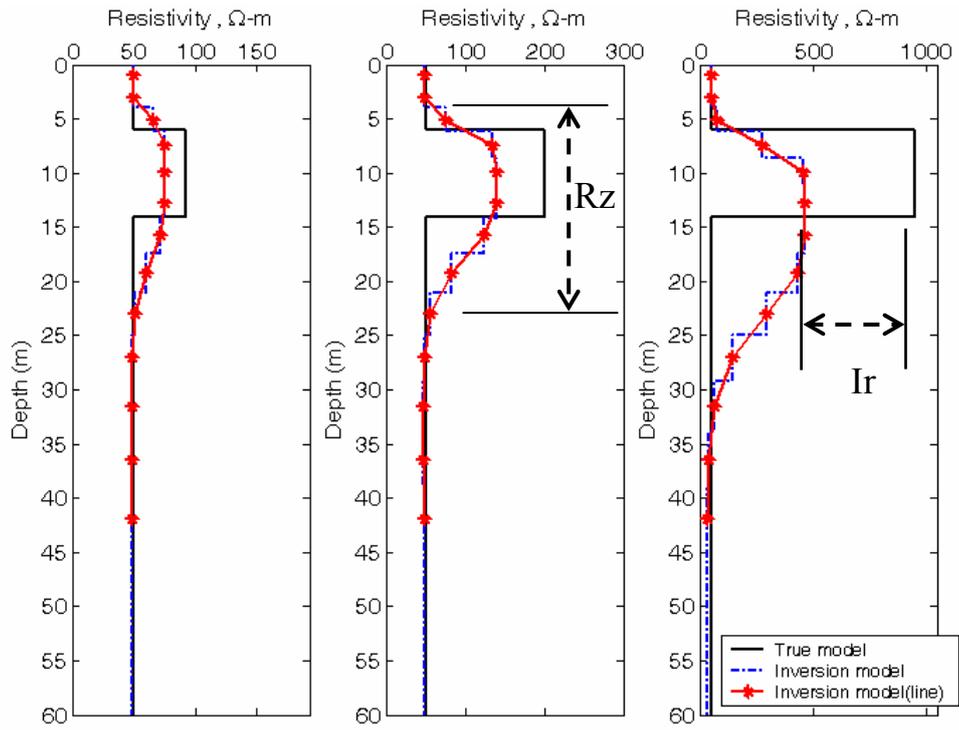
(2) Pole-Pole

Pole-Pole 反算模型電阻率值比 Wenner 反算模型電阻率值略為小，其在層面中心位於淺層時，其漸變帶和 Wenner 的漸變帶相對上為略大一些(如層面中心在 10 公尺)，層面中心下移至深層時，Pole-Pole 的漸變帶寬明顯比 Wenner 的漸變帶寬增加。

由上述討論，從反算分析漸變帶隨層面中心愈深愈大的趨勢，以及反算模型電阻率值與真實電阻率值差異隨夾層厚度增加而有降低趨勢，藉由靈敏度分析的結果，如圖 4.19 所示，當反射係數等於 0.6 時，以夾層中心深度 10 公尺，厚度為 8 公尺與深度 10 公尺，厚度等於 12 公尺之靈敏度曲線比較得知，除最大靈敏度值增大外，靈敏度曲線形狀變異不大。若將厚度 8 公尺的高電阻率夾層下移至深度 20 公尺， $S_{\Delta Z_c}$ 與 $S_{N,\Delta Z_c}$ 的靈敏度變化區帶明顯增寬，且靈敏度值下降， $S_{\Delta t}$ 與 $S_{N,\Delta t}$ 的靈敏度明顯降低，但其變化

區帶略微改變；其中夾層深度位於深度 10 公尺的靈敏度曲線有反折，是因將負值取絕對值。

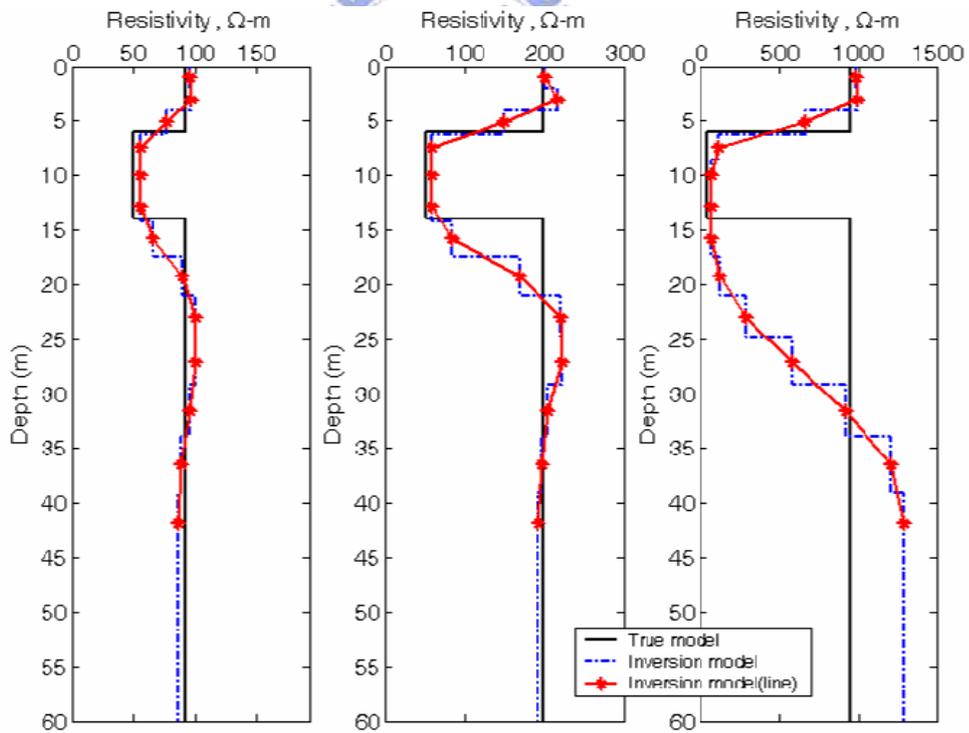
從反算結果(見圖 4.17b、圖 4.18a,c)與靈敏度分析(見圖 4.19)雙方面探討，夾層深度由淺至深變化，反算結果漸變帶寬度增加，夾層電阻率與模型電阻率值差異大，代表垂直空間解析度低，與 $S_{N,\Delta Z_c}$ 的靈敏度變化區帶明顯增寬，和 $S_{N,\Delta Z_c}$ 與 $S_{N,\Delta t}$ 靈敏度值下降趨勢相似；若夾層位置固定，夾層由薄增厚，反算結果顯示漸變帶變異不明顯，夾層電阻率與模型電阻率值差異變小，與 $S_{N,\Delta Z_c}$ 的靈敏度變化區帶無明顯改變，和 $S_{N,\Delta Z_c}$ 與 $S_{N,\Delta t}$ 靈敏度值上升趨勢相似。推測層面深度位置愈深，會致使靈敏度降低之外，亦使得反算結果之漸變帶增加，夾層電阻率值差異增加，迅速降低垂直解析度，若為厚度增加，致使靈敏度提高外，亦使得夾層電阻率值差異減少，增加垂直解析能力，因此當夾層位於淺層，厚度愈大，表示愈能探測其界面位置與夾層厚度。



(a) $k=0.3$

(b) $k=0.6$

(c) $k=0.9$

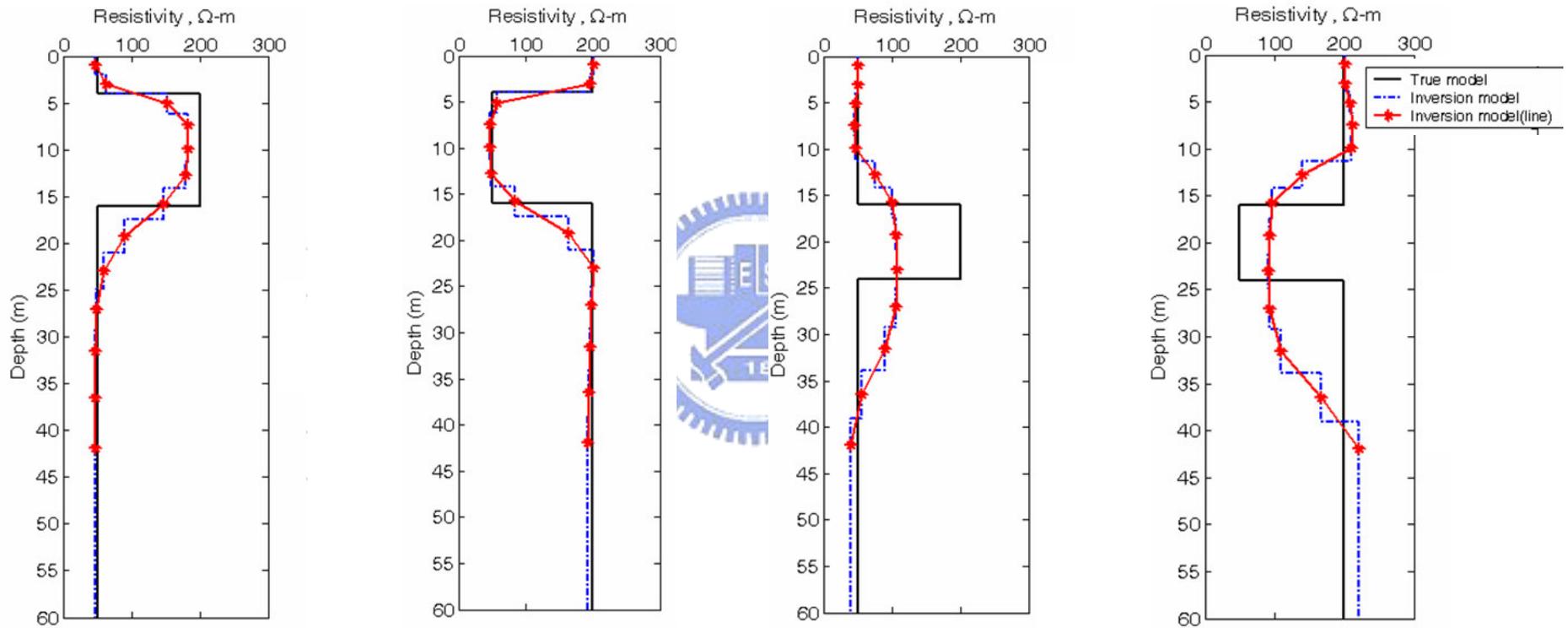


(d) $k=-0.3$

(e) $k=-0.6$

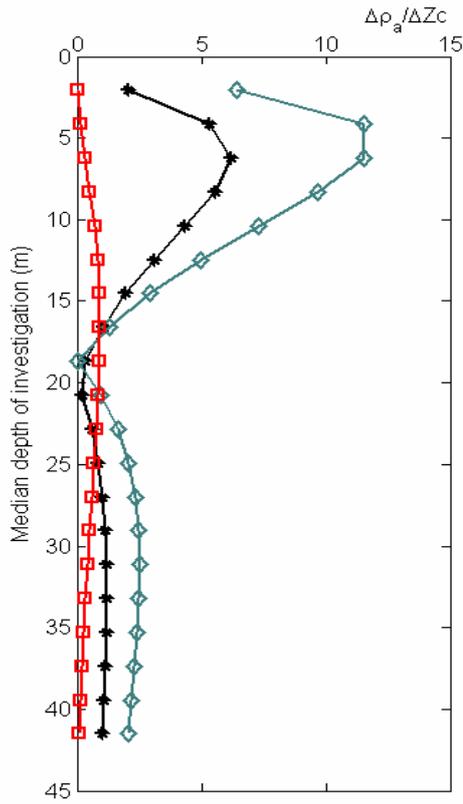
(f) $k=-0.9$

圖 4.17 Wenner 夾層反算分析結果(Z_c 等於 10 公尺, t 等於 8 公尺)

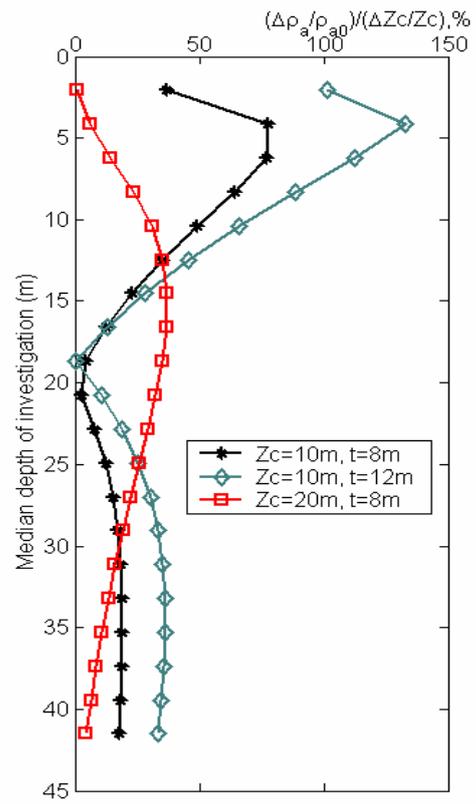


(a) $k=0.6, Z_c=10m, t=12m$ (b) $k=-0.6, Z_c=10m, t=12m$ (c) $k=0.6, Z_c=20m, t=8m$ (d) $k=-0.6, Z_c=20m, t=8m$

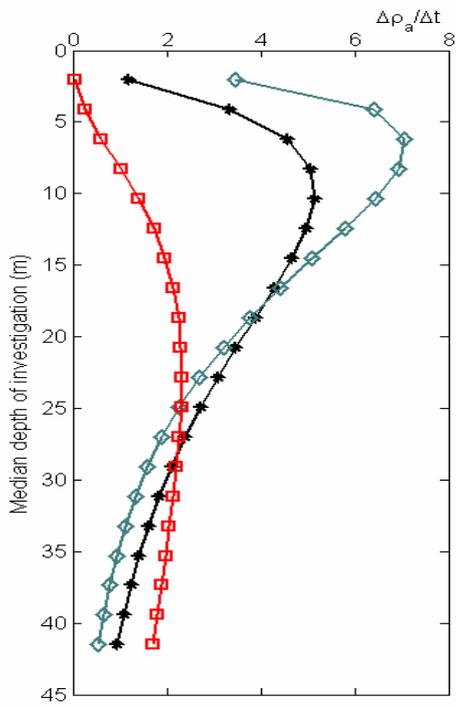
圖 4.18 Wenner 夾層反算分析結果(與 圖 4.17 比較在相同 k 值之下，改變 Z_c 或 t 參數之差異)



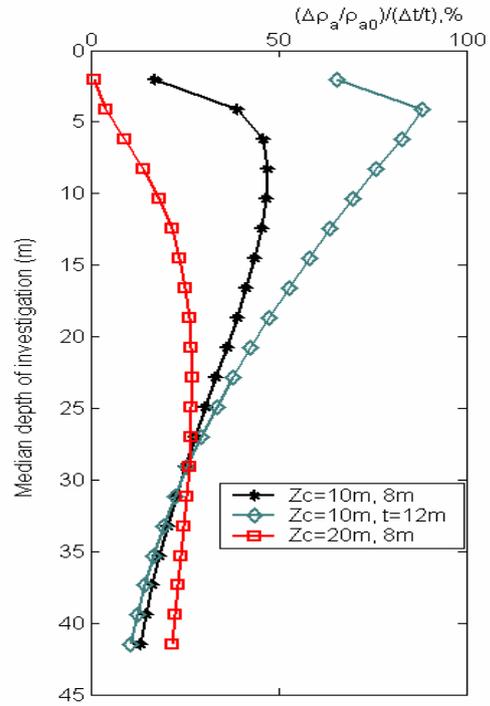
(a) $S_{\Delta Zc}$



(b) $S_{N, \Delta Zc}$



(c) $S_{\Delta t}$



(d) $S_{N, \Delta t}$

圖 4.19 Wenner 靈敏度分析，當反射係數等於 0.6

4.3 側向解析度探討

4.3.1 垂直界面構造模型

4.3.1.1 模型參數

垂直界面(Vertical fault)位於測線中心 192 公尺，反射係數 k 分別等於 0.2、0.4、0.6 及 0.8， ρ_1 與 ρ_2 分別位在界面左側與右側，見圖 4.20，其電阻率值請查表 4.2；Wenner與Pole-Pole測深參數皆設定 1 至 16，其擬似深度值見表 4.3，反算層數皆等於 11 層，反算參數如 4.2.1.1 節中相同。

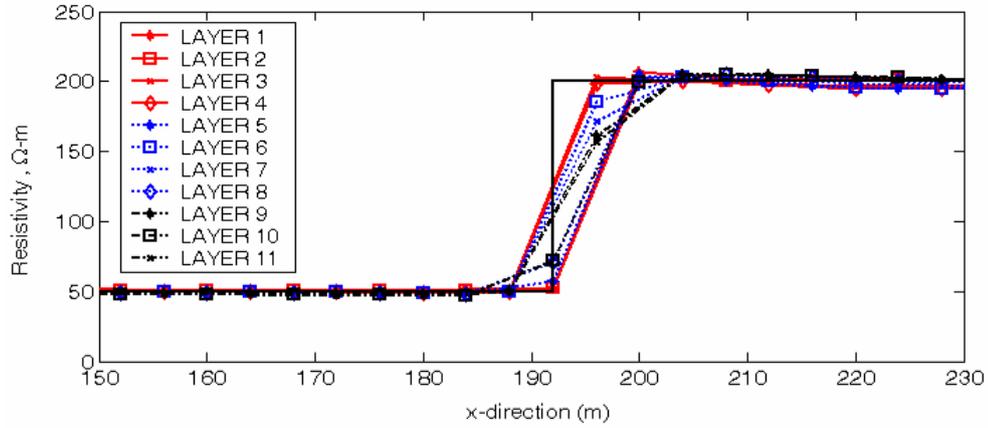


圖 4.20 垂直界面示意圖

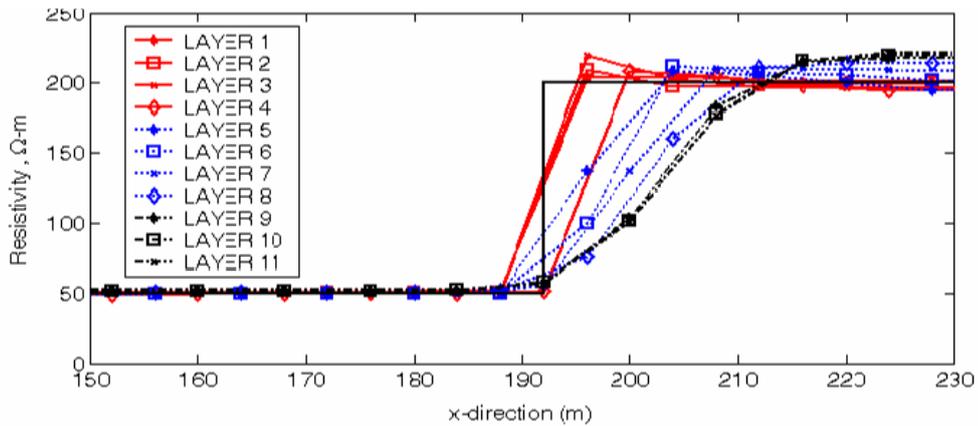
4.3.1.2 垂直界面反算分析探討

反射係數 k 等於 0.6 時，取各模型層反算結果與真實模型之值比較，如圖 4.21 所見為各模型層之側向(x-direction)電阻率變化值，於 150~230 公尺(x-direction)內觀察電阻率變化，以 Wenner 結果來看，低電阻率至界面之間每層的反算模型電阻率值完全合於真實模型，經過界面之後，愈深層處，界面已有開始向高電阻率區暈開，出現漸變帶，此現象於 Pole-Pole 更明顯(如圖 4.21b,d)。其中反算結果在 $k=0.8$ 時，界面右側結果顯示高電阻率值出現跳動之錯誤情形，其餘反算結果見附錄 I，經由這幾個反算結果，側向

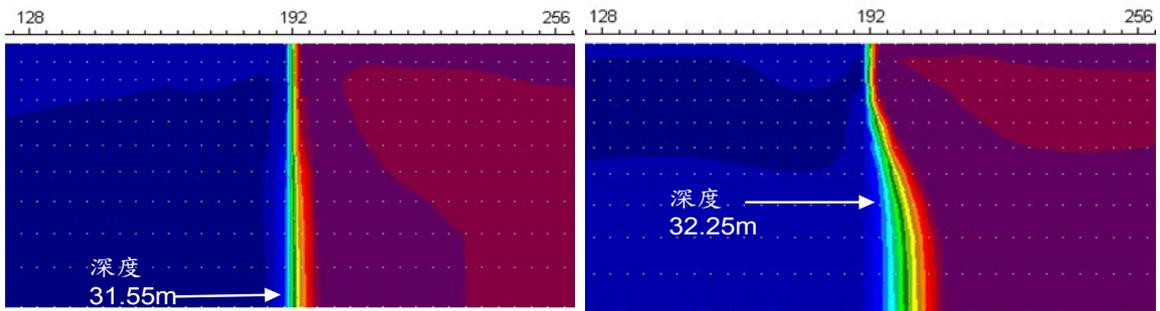
垂直界面位置解析能力上，淺層效果皆佳，其深層(約在深度 25 公尺以後)逐漸降低，亦可發現在低電阻率區反算結果較佳。



(a) Wenner 垂直界面反算結果(k=0.6)



(b) Pole-Pole 垂直界面反算結果(k=0.6)



(c) Wenner 反算結果

(d) Pole-Pole 反算結果

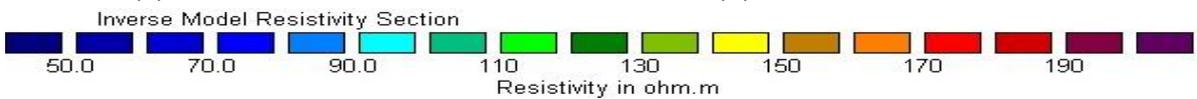


圖 4.21 垂直界面反算結果(k=0.6)

4.3.2 垂直夾層界面構造模型

4.3.2.1 模型參數

ρ_2 位於 ρ_1 之間，形成一垂直夾層構造(如 圖 4.22)，其中心位置在測線 192 公尺處， ρ_2 厚度等於 12 公尺，反射係數設為 0.2、0.4、0.6、0.8、-0.2、-0.4、0.6 及 -0.8，探討正反射係數與負反射係數影響側向解析度；其次在反射係數等於 0.6 與 -0.6 條件下，探討側向解析能力於夾層厚度分別設為 8、12、24 與 64 公尺之下變化情形。其反算分析參數、反算模型層數與 4.3.1 節相同。

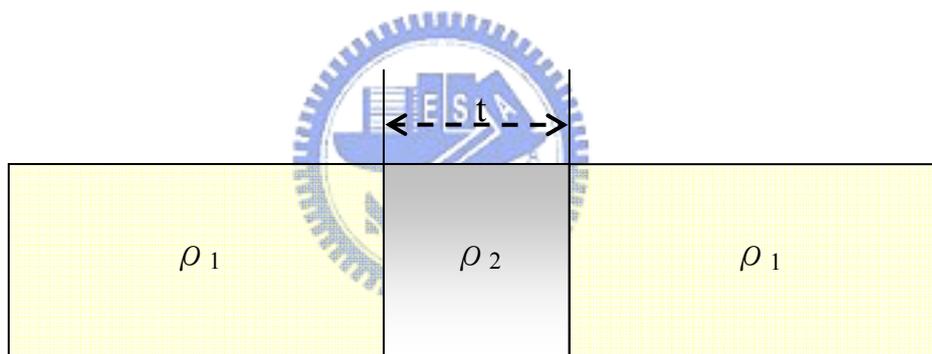


圖 4.22 垂直夾層界面

4.3.2.2 垂直夾層界面反算分析結果

(1) Wenner-夾層為高電阻率

夾層所形成的垂直界面反算分析結果見附錄J，圖J-1~4 為探討Wenner於夾層厚度固定在 12 公尺時，正反射係數影響解析度變化情形，其結果顯示反射係數值等於 0.2 時出現，如 圖 4.23a 中 Xz 區比真實模型厚度稍微寬，夾層區反算電阻率與模型電阻率差異量(Yz 區)愈深層愈偏離真實電阻率

值。當反射係數從 0.2 增加至 0.8，其差異量幾乎等於零，表示愈深層反算結果，電阻率值仍反應出實際電阻率值。

(2) Wenner-夾層為低電阻率

見圖 J-5~8，其夾層區差異量變化亦為降低至幾乎為零，表示在低電阻率夾層情形之下，反算結果較高電阻率夾層為佳。

(3) Wenner-厚度增加

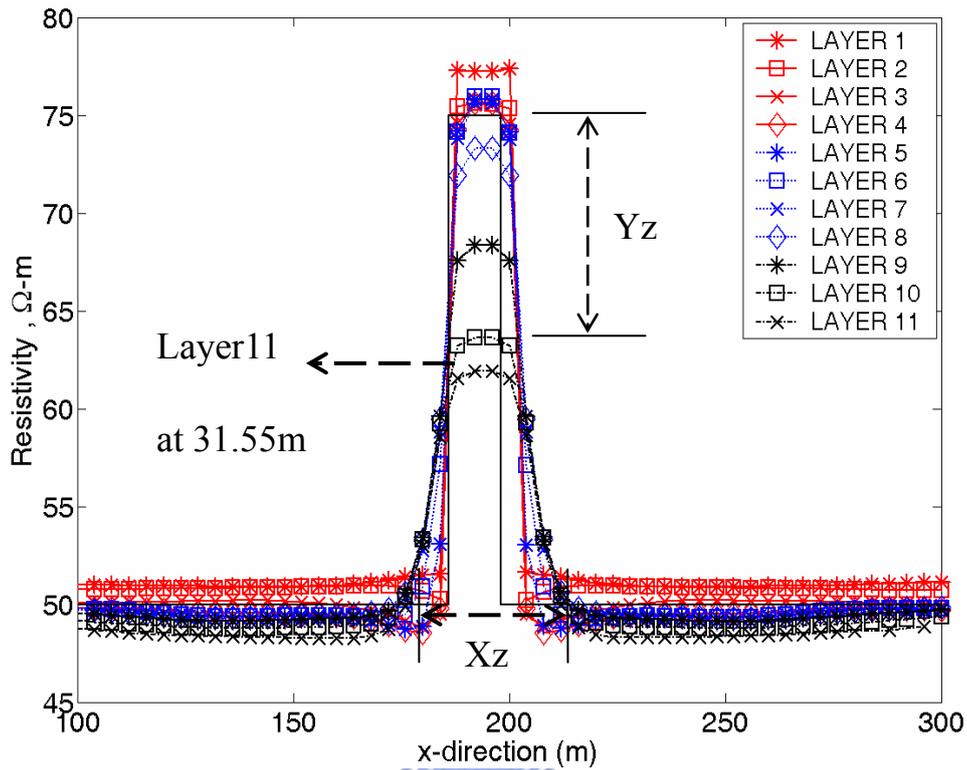
圖 J-17~24 分別為高電阻率夾層與低電阻率夾層，厚度從 8 公尺增加至 64 公尺，其反算模型電阻率值接近實際值，由厚度增加趨勢得知，高電阻率夾層或是低電阻率夾層，厚度對於夾層側向解析能力具有高影響力。

(4) Pole-Pole

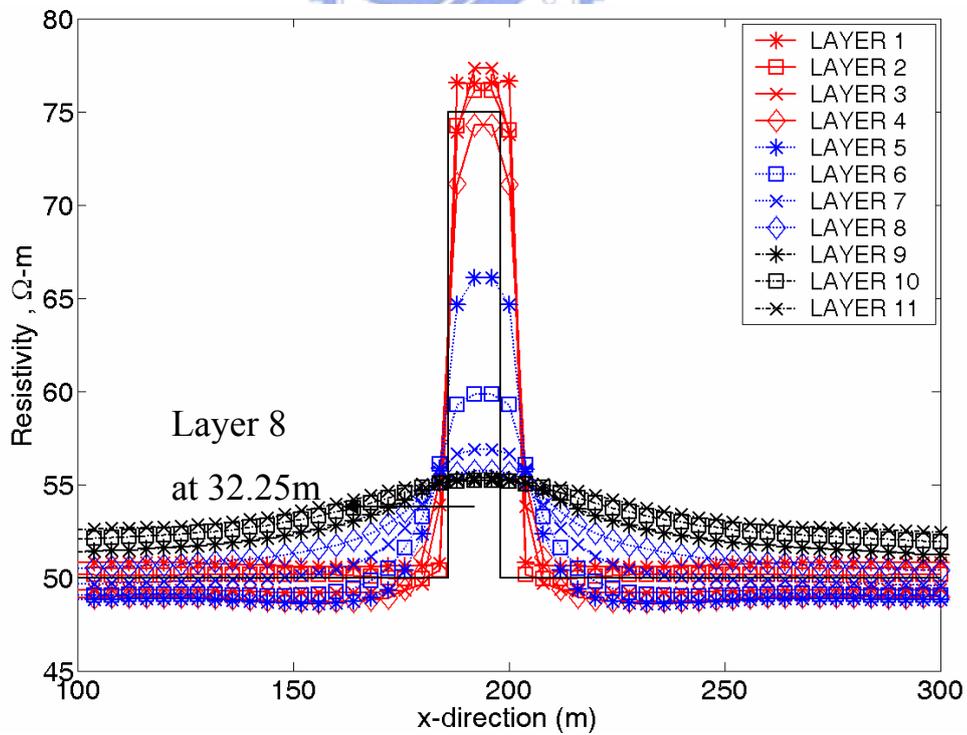
從附錄J中 Pole-Pole 結果顯示，與 Wenner 相同參數條件之下，在愈深處其 Yz 區域與 Xz 區域皆比 Wenner 的 Yz 及 Xz 區較為大，見圖 4.23b；在深度 32 公尺左右，Pole-Pole 反算模型 (Layer 8) 電阻率值與 Wenner 反算模型 (Layer 11) 相比，其前者電阻率值較後者為小。若進而觀察正反射係數增加情形(如圖 J-9~12)，發現在深度 32 公尺 (Layer 8) 與 Wenner 之增加趨勢相比，Pole-Pole 電阻率值增加趨勢不明顯，且深度 32 公尺以下電阻率幾乎無法接近真值；反觀在夾層為低電阻率情形下，還是有接近真值趨勢(如圖 J-13~16)。見圖 J-25~32，夾層厚度增加致使深層模型電阻率值接近真值 (Yz 區減小)，但與 Wenner 因厚度增加，夾層區差異量減少趨勢相比，Pole-Pole 差異量減少程度還是不如 Wenner 之差異量。

綜合上述結果，若以差異量表示其解析能力好壞，此現象表示 Pole-Pole 雖具有較大的測深，但隨著測深增加，其側向解析能力比 Wenner 降的快。Wenner 於垂直夾層構造空間解析能力較 Pole-Pole 佳，且夾層厚度影響甚鉅，空間解析度於與夾層厚度成正相關，且於低電阻率夾層狀況獲得尤佳反算結果。





(a) Wenner ($k=0.2, t=12m$)



(b) Pole-Pole ($k=0.2, t=12m$)

圖 4.23 垂直夾層界面反算分析側向變化圖

4.4 二維解析度探討

4.4.1 模型參數

考慮幾何形狀為 12 公尺 x 12 公尺之均勻介質 ρ_2 位於 ρ_1 之中，其 x 方向中點位在測線中心，z 方向位置分別位於 10、15 及 20 公尺三位置，選定反射係數等於 0.6 與 -0.6 探討垂直與側向解析度。測深參數、反算層數，反算方法皆和 4.3 節相同。

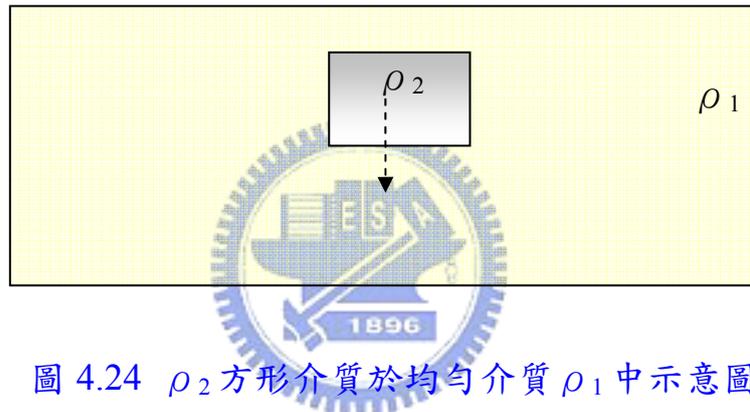


圖 4.24 ρ_2 方形介質於均勻介質 ρ_1 中示意圖

4.4.2 二維度模型反算結果探討

參考附錄 K 反算結果，影像圖顯示其方形介質往 z 方向增長，x 方向寬度隨深度增逐漸擴大，但其影像圖之色階值差為對數間隔，使得電阻率差距小之間隔能呈現變化，如圖 K-8 中 Pole-Pole 顯示方形區域明顯，實際上其側向變化方向電阻率值不明顯(如圖 K-8b)，即與 ρ_1 差值小。

舉 Wenner 方法的結果為例，在 $k=0.6$ 、 $t=12$ 公尺與 Z_c 各別等於 10m 與 20m 條件，比較前面垂直夾層界面與水平夾層界面之反算結果，見圖 4.25a,b 可知，(1)Z 方向中心位置相同時，其方形介質反算模型電阻率值較夾層狀

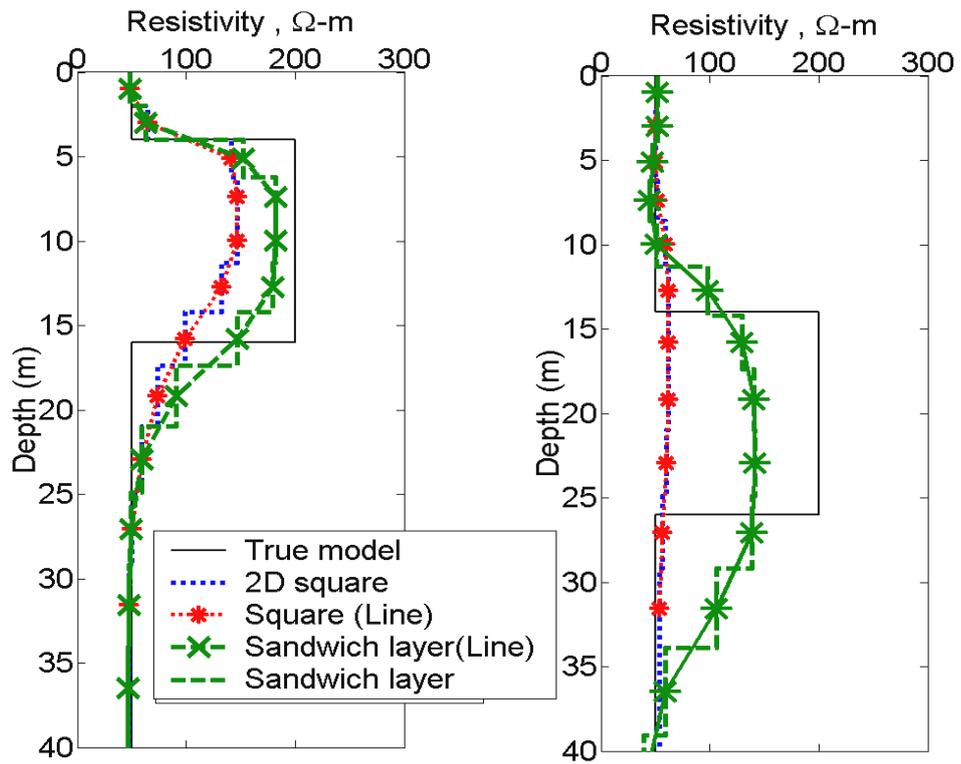
況下低，(2)中心深度降至 20 公尺處，其反算模型接近與 ρ_1 值同，無明顯變化。見 圖 4.25c,d，(3)方形介質電阻率側向變化量最大值不如其垂直夾層界面時最深層(Layer 11)之電阻率值，但仍於深度 4~15 公尺有凸顯方形介質存在趨勢，(4)中心降至 20 公尺時，其凸顯方形介質趨勢降低，各層之間電阻率值相接近。

若為低電阻率方形介質時，變化趨勢亦相似，但凸顯方形介質趨勢較大，而側向漸變帶寬也較模型大。Pole-Pole 在淺層處反算結果與 Wenner 淺層處雷同，但方形介質中心深度降至 20 公尺，其反算模型電阻率值幾乎無明顯凸顯趨勢。

由此反算結果得知，且方形介質中心位置愈深時，Pole-Pole 空間解析度衰減程度遠大於 Wenner 空間解析度，低電阻率區空間解析度仍是比高電阻率區空間解析度為佳。比對上述四種模型構造，其二維空間解析度確實較一維空間解析度來的不顯著。

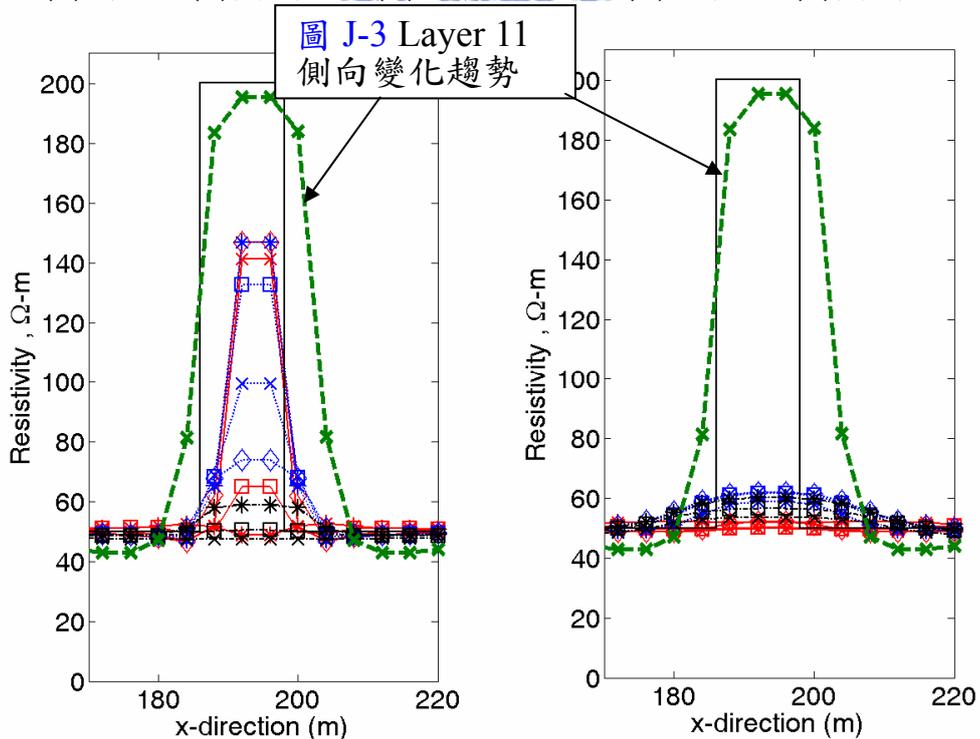
$Z_c=10\text{m}$, thickness=12m, $k=0.6$

$Z_c=20\text{m}$, thickness=12m, $k=0.6$



(a)圖 K-1(c)與圖 H-2(b)比較

(b) 圖 K-3(c)與圖 H-4(b)比較



(c)圖 K-1(b)與圖 J-3 比較

(d) 圖 K-3(b)與圖 J-3 比較

圖 4.25 方形介質與水平夾層及垂直夾層反算結果比較

五、結論與建議

地表面地電阻影像剖面法為結合傳統一維探測之垂直探測(vertical sounding)與橫向探測(horizontal profiling)兩者探測方式所獲得之視電阻率資料點，進行二維度的反算分析；其探測結果依其使用電極排列方法不同，空間解析能力各有優缺點。近年來常應用於環境汙染調查、地下水資源調查、礦物調查、垃圾掩埋場滲漏調查、土壩滲漏監測等案例，更有學者以 ERT 方法應用在地工調查上例如斷層、崩塌、海水入侵等問題。

本研究將 ERT 方法分別以不同電極排列法於四種不同案例上進行調查，其空間解析能力問題仍需要鑽孔資料與區域內地層變化比對，使影像剖面能更加配合土層性質解釋，並以正算之視電阻率結果探討 ERT 空間解析能力變化行為，從研究案例與空間解析度探討獲得的結論以下說明之：

5.1 結論

過去幾年以來，地電阻法應用在地下水位與含水岩層破碎帶調查方面，因地下水電阻率與地質材料電阻率差異甚大，時常獲得顯著結果。作者將地電阻法輔助應用在一般地質調查，有些案例在 30 公尺以上的探測，似乎沒有顯著的效果，進而以數值模擬成果列於下述，以輔助未來實際案例的電阻率影像判識，避免電探資料之過度解釋其解析能力。主要結論分數述下，

(1) 案例研究

1. 寶山二號水庫的案例顯示在地層具有傾斜構造時，若測線為垂直岩層走向，結果顯示因岩層厚度較薄，電阻率影像剖面位於淺層(約 5 公尺)結果顯示岩層互層且傾斜特徵，影像剖面於更深者；測線位於平行岩層走向測線，影像剖面的結果顯示，對於水平層狀地層在淺層變化，電阻率值沒有明顯改變，直到深度十五公尺，電阻率值由低電阻率值漸漸升至高電阻率，且電阻率變化為水平界面。其結果似乎受到層面厚度不足，電阻率對比值低，測線邊界為陡坡因素影響，無法彰顯岩層特徵。

2. 恆春東門溪案例，位於溪邊河床以 Wenner-Schlumberger 進行施測欲獲得阻水層位置，影像剖面結果顯示上部高低電阻率界面與實際地下水位相近，其地下水位面以下沉質泥土層、礫石層與泥岩的電阻率差異不大，似乎無法得知阻水層位置，因沒有更深於 35 公尺電阻率分佈資料，推測施測的測深不足為主要因素。

3. 交大博愛校區案例中，鑽探孔資料顯示兩孔之間岩盤深度從東南方往西北方由淺至深，高差約為 6 公尺，從電阻率影像剖面得知電阻率分佈性質與岩盤變化方向相同。藉由鑽探資料得知，砂質礫石層與砂岩顯示為高電阻率區，但可能因其電阻率差一小，無法準確判識岩盤界面位置。

4. 三姓橋案例之電探結果彰顯出地層傾斜構造特性，推測原因為高低電阻率差值大，探測深度與夾層厚度足夠顯示高電阻率特性，若以 Wenner 施測，正好顯示其盲點為側向涵蓋範圍與測深不如 Pole-Pole，進而無法得知傾斜構造，然而其淺層結果提供給 Pole-Pole 比對的輔助。

5.當以地電阻率進行資料影像判識時，其色階值的設定會影響肉眼上的判識，需藉由電阻率值大小或調查目標之電阻率值判識，才能避免判識上的錯誤。

6.當現地狀況不符合真實二維條件或有特殊邊界條件之干擾，若未能在反算分析中合理考慮，將使得反算結果效果不佳。

7.由不同案例結果的電阻率影像剖面顯示，電阻率界面側向變化趨勢似乎常較垂直變化顯著。

(2)空間解析度探討

適度的正算模擬與相對應之反算分析，常有助於了解空間解析特性，正算模擬之反算結果顯示在電阻率變化界面出現電阻率漸變帶，反算電阻率值與模型電阻率值會出現差異，本研究空間解析度探討分為五種模型：

1.在單一水平界面靈敏度分析中，當高電阻率層在低電阻率層之上時，得知最大靈敏度值位於真實層面位置附近，當為相反情形時，最大靈敏度值遠深於界面位置。若界面位置固定深度時，高低電阻率值差異愈大，其靈敏度皆愈高。模擬資料之反算結果在層面位置會出現漸變帶，隨深度下移，漸變帶增寬，在界面附近電阻率之變化率減少；高低電阻率值差異愈大，漸變帶似乎無明顯改變，在界面附近電阻率之變化率減少，又從反算模型高低電阻率層結果得知，低電阻率層的反算結果皆逼近模型電阻率值，高電阻率層在下方則出現差異。

2.在水平夾層界面探討中，綜合靈敏度分析與反算結果兩者，推測層

面深度位置愈深，會致使靈敏度降低之外，亦使得反算結果之漸變帶增加，夾層內電阻率值差異增加，迅速降低垂直解析度；若為厚度增加，致使靈敏度提高外，亦使得夾層電阻率值差異減少，增加垂直解析能力，因此當夾層位於淺層，厚度愈大，表示愈能探測其界面位置與夾層厚度。倘若夾層為低電阻率，反算結果相較於高電阻率夾層，得到不錯的反算低電阻率夾層區，但低電阻率層下方之高電阻率層之反算結果將受到影響。

3. 垂直界面(Vertical fault)反算結果顯示深度愈深側向漸變帶愈寬，其寬度漸增，代表隨深度增加，側向解析能力降低；其中漸變帶出現在高電阻率區內，反算結果亦顯示電阻率在高電阻率區有所跳動，在低電阻率區則接近模型值，此彰顯出低電阻率區反算結果佳。

4. 垂直夾層界面探討中，Wenner 的漸變帶寬不因深度愈深而有明顯增加，Pole-Pole 則與 Wenner 相反，其漸變帶隨著深度增加而有顯著的擴大；此外，愈深層反算電阻率值與模型電阻率值差異愈大，若夾層厚度增加或高低電阻率差值增大，將使得反算電阻率值與模型電阻率值差異減小，但 Pole-Pole 在深層不明顯，當高電阻率夾層時，Pole-Pole 的反算電阻率值與模型電阻率值差異甚大，表示其側向解析能力因測深愈深，迅速降低。

5. 均質均向 ρ_1 介質內含有方形介質 ρ_2 情況下，反算結果顯示，若 ρ_2 為低電阻率介質，其解析能力較高電阻率介質佳；但兩側與下方高電阻率之結果會造成誤差。隨著 ρ_2 介質深度位置愈深，其垂直解析度與側像解析度皆降低甚多。

6.綜合五種模型結果，若在相同條件下，Wenner 的靈敏度、界面之漸變帶誤差、反算模型電阻率值誤差皆優於 Pole-Pole，可知 Wenner 在垂直解析度或者是側向解析度皆比 Pole-Pole 為佳。探測目標愈淺，幾何形狀愈大，高低電阻率差值大者，具有較佳的空間解析能力，其中若欲探測目標為低電阻率者，效果更為顯著。由此探討可知，影響二維空間解析度能力因素簡單歸納如下：

- a. 探測目標深度位置：目標愈深，影像愈失真。
- b. 探測目標幾何形狀：目標幾何形狀愈大，愈能凸顯目標的電阻率值。
- c. 探測目標電阻率值：若為低電阻率介質，反算效果佳。
- d. 電阻率差值(反射係數)：從反算結果得知，反射係數絕對值在 0.3~0.8 範圍內，隨著反射係數絕對值增加似乎會得到不錯效果，當高電阻率層在低電阻率層之上或低電阻率夾層時，反射係數高達-0.9 時，在高電阻率層易出現反算錯誤結果；若反射係數絕對值為 0.1, 0.2 時，反算結果無法明顯區別其差異。

5.2 建議

1. 未來若於現地實驗欲獲得較佳深層資料，可透過跨孔電探施測進行。

2. 現地試驗若以 Pole-Pole 進行施測，須加以注意遠電極能佈設距離是否足夠達到預期測深所需。

3. 影像剖面判識時需注意研判電阻率值大小，或色階值須符合判識要求，以降低因視覺判識上誤差；對於判識層面位置須知其反算模型厚度大小及層數，才不會過度解釋地電阻影像剖面資料。

4. 對於現地常有不符合真實二維條件，如周圍地下埋有涵管等情形，甚至是存在有邊界效應，例如測線起點與終點外側為懸崖(高電阻率邊界)或是溪水(低電阻率邊界)，造成施測上的影響，需進一步透過數值方式模擬瞭解。

5. 未來可透過電阻率探頭(如 RCPT, Borehole resistivity probe)，量測鑽孔內電阻率值變化，可將隨深度變化之電阻率值、地質柱狀圖與 ERT 資料結合，進行地質分層判識，提高 ERT 功效。

參考文獻

1. 蔡怡真，「新竹地區活斷層之地形學研究」，國立彰化師範大學，碩士論文，民國九十一年六月。
2. 潘宏璋，「應用地電阻影像剖面法於新竹斷層之研究」，國立中央大學，碩士論文，民國九十二年六月。
3. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「東門溪上游滯洪池地質探查結果報告」，民國九十三年十月。
4. 經濟部中央地質調查所-地質資料整合查詢系統：
(<http://210.69.81.69/geo/frame/gsb88.cfm>)
5. 經濟部中央地質調查所-活動斷層研究九十二年度鑽井報告
(<http://cgsweb.moeacgs.gov.tw/result/Fault/web/91A.htm>)
6. Geotomo Software, “Res2dmod”, “Res2dinv”
(<http://www.geoelectrical.com/>)
7. Abu-Hassanein Z.S., Benson C.H. and Blotz L.R., 1996, “Electrical resistivity of compacted clayed”, Journal of geotechnical engineering, Vol. 122, No. 5, pp.397-406.
8. Archie G., 1942, “Electrical-resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics.”Trans. Am. Inst. of Min. Engrg. Vol. 146, pp.318-319.
9. Archie G., 1942, “Electrical-resistivity log as an as in determining some reservoir characteristics”, Trans. Am. Inst. of Min. Engrg., Vol. 146, pp. 318-319.
10. Batayneh A.T., 2001, “Resistivity imaging for near-surface resistivity dyke using two-dimensional DC resistivity techniques”, Journal of applied geophysics, Vol. 48, pp.25-32.

11. Burger H.R., 1992, "Exploration geophysics of the shallow subsurface", Prentice Hall.
12. Dahlin T. and Loke M.H., 1998, "Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling", Journal of applied geophysics, Vol. 38, pp. 237-249.
13. Dahlin T. and Zhou B., 2004, "A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays", Geophysical prospecting, Vol. 52, pp.379-398.
14. Dahlin T., 2000, "Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity acquisition using multi-electrode arrays", Geophysical prospecting ,Vol. 48, pp.181-187.
15. Dahlin T., Palm M. and Grain H., 2004, "Combined resistivity imaging and RCPT for geotechnical pre-investigation' Procs. NGM 2004, Ystad, Sweden, pp.18-20 .
16. Dahlin T., Palm M., and Grain H., 2004, "Combined resistivity imaging and RCPT for geotechnical pre-investigation", Procs. NGM 2004, Ystad, Sweden, 9p..
17. Dey A. and Morrison H.F., 1979a, "Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures", Geophysical prospecting, Vol. 27 No. 1, pp.106-136.
18. Dey A. and Morrison H.F., 1979b, "Resistivity modelling for arbitrarily shaped three-dimensional structures", Geophysics, Vol.44 No. 4, pp.753-780.
19. Edwards L.S., 1977, "A modified pseudosection for resistivity and ip ", Geophysics, Vol. 42, No.5, pp.1020-1036.
20. Ellis R.G. and Oldenburg D.W., 1994a, "Applied geophysical inversion",

- Geophysical journal international, Vol. 116, pp.5-11.
21. Ellis R. G. and Oldenburg D.W., 1994b, "The pole-pole 3D Dc-resistivity inverse problem : a conjugate-gradient approach", Geophysical journal international, Vol. 119, pp.187-194.
 22. Griffiths D.H. and Barker R.D., 1993, "Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology", Journal of applied geophysics, Vol. 29, pp. 211-226.
 23. Keller G.V. and Frischknecht F.C., 1966, "Electrical methods in geophysical prospecting ", Pergamon Press, Oxford.
 24. Koefoed O., 1979, "Geosounding Principles", Elsevier scientific publishing company.
 25. Lines L.R. and Treitel S., 1984, "Tutorial : A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems", Geophysical prospecting, Vol. 32, pp.159-186.
 26. Loke M.H. and Dahlin T., 1997, "A combined Gauss-Newton and Quasi-Newton inversion method for the interpretation of apparent resistivity pseudosections", EEGS.
 27. Loke M.H., 2000, "Topographic modelling in electrical imaging inversion", EAGE 62nd Conference and Technical Exhibition.
 28. Loke M.H., 2002, "RES2DMOD ver.3.01", Geotomo Software, Malaysia.
 29. Loke M.H., 2002, "The use of constraints in 2D and 3D resistivity modelling", EEGS-ES Meeting, Portugal.
 30. Loke M.H., 2003, "RES2DINV ver.3.52", Geotomo Software, Malaysia.
 31. Loke M.H., 2003, "Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys", Geotomo Software, Malaysia.
 32. 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.
33. McCarter W.J., 1984, “The electrical resistivity characteristics of compacted clays”, *Geotechnique*, Vol. 34, No. 2, pp.263-267.
 34. McGillivray F. R. and Oldenburg D.W., 1990, “Methods for calculating Fréchet derivatives and sensitivities for the non-linear inversion problem: A comparative study”, *Geophysical prospecting*, Vol. 38, pp.449-524.
 35. Olayinka A.I. and Yaramanci U., 2000, “Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion”, *Journal of applied geophysics*, Vol.45, pp.63-81.
 36. Oldenburg D.W. and Li Y., 1999, “Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys”, *Geophysics*, Vol.64, pp.403-416.
 37. Sasaki Y., 1992, “Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation”, *Geophysical prospecting*, Vol.40, pp.453-463.
 38. Sauer M.C., et al., 1955, “Electrical conductance of porous plugs ion exchange resin-solution system”, *Industrial and engineering chemistry*, Vol. 47, No.10, pp 2187-2193.
 39. Screedeep S., Reshma A.C., and Singh D.N., 2004, “Measuring soil electrical resistivity using a resistivity box and a resistivity probe”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, No. 4, pp.411-415.
 40. Takahashi T., 2004, “ISRM Suggested Methods for land geophysics in rock engineering”, *International journal of rock mechanics & mining sciences*, Vol. 41, pp.885-914.
 41. Takahashi T., 2004, “ISRM suggested methods for land geophysics in rock engineering”, *International journal of rock mechanics & mining sciences*, Vol. 41, pp.885-914.

42. Zhou B. and Dahlin T., 2003, “Properties and effects of measurement errors on 2D resistivity imaging surveying”, Near surface geophysics, Vol.1, pp.105-117.
43. Robinson E. S. and Coruh C., 1988, “Basic Exploration Geophysics,” John Wiley & Sons.
44. Telford W.M., Geldart L.P. and Sheriff R.E., 1990, “Applied Geophysics 2nd”, Cambridge University Press.
45. Zhadnov M.S. and Keller G.V., 1994, “The geoelectrical methods in geophysical exploration”, Elsevier Science.



附錄 A-資料反算分析流程

現地資料反算分析流程步驟如下，流程圖見圖 A-1

(1)首先，現地收錄資料品質好壞為影響反算結果之主因(Garbage in , Garbage out.)，以 Prosys 軟體剔除量測錯誤之負電阻率值與電壓差值小於 1mV 之不良資料點之後，轉成 RES2DINV 格式檔；通常在現地收錄完資料必須先檢查是否有量測錯誤情形，例如有短路(short circuit)、電極夾線掉落行程開路(open circuit)，確保資料品質。

(2)反算軟體 RES2DINV 讀取檔案之後，再一次進行挑除壞點動作，此踢除壞點動作是觀察每一層資料側向變化趨勢是否具有的一致性，若有瞬間單點，非連續性變化差異大之資料，則需剔除(Loke,2003)。

(3)接著對反算參數中的阻尼係數(damping factor)(Inman,1975)作設定。阻尼係數能使反算結果減低因週遭雜訊而產生異常電阻率變化，因此當資料受到雜訊影響大時，可提高阻尼係數值。其阻尼係數分成初始阻尼係數、最小阻尼係數與阻尼係數隨深度放大常數，初始阻尼係數預設值為 0.16，可設定範圍從 0.25 至 0.05，最小阻尼係數預設值為 0.015，可設定範圍從 0.1~0.01，另一個阻尼係數隨深度增加常數預設值等於 1.05；本研究反算分析過程，阻尼係數為軟體內預設值。

(4)選擇正算模擬方法為有限元素法，亦可選有限差分法計算，其差異在於有限差分法計算時間較有限元素法省時。

(5)模型格網分割設定參數為(a)第一層厚度依電極排列方法而定；其中 Wenner 與 Wenner-Schlumberger 等於 0.5 倍最小單位電極間距 a ，Pole-Pole 等於 $0.86a$ ，Pole-Dipole 等 $0.41a$ 以及 Dipole-Dipole 等於 $0.342a$ ，(b)模型厚度隨深度增加係數為 1.10；其下層厚度為上層厚度 1.1 倍，(c)增加模型深度係數為 1.0，以及(d)兩邊緣不使用延伸網格；其模型為梯形狀。反算模型層數決定於最深深度與每層厚度，而此軟體限制最大層數為 24 層；其中最深視電阻率資料值位於模型最底層內。若設定增加深度係數大於 1.0，則深度增加；雖深度增加，但最底層模型內卻有可能發生無視電阻率資料，使深層資料產生較大誤差。

(6)求解方式設定為標準高斯牛頓法，以及每次疊代後重新計算 Jacobian 矩陣，減少誤差。若要增加計算速度，可選擇似牛頓法 (quasi-Newton)(Loke 與 Barker 1996a)，若資料大於 2000 點，可選擇非完整高斯牛頓(incomplete Gauss-Newton)法降低計算時間。

(7)若於施測場址地表有變化，需加入地形修正。其中 Trend Removal 是對地表變化做修正，方法包含平均高程(average elevation)、最小平方直線(least-square straight line)以及兩端點同高(end-to-end straight line)三種修正方法。地形模型網格地形變化而扭曲(distortion)，其網格變化選擇有三種方式，分別為均勻扭曲(uniform distortion)，阻尼扭曲(damped distortion)及 Schwarz-Christoffel transformation。

(8)反算方法分為 L1 norm.與 L2 norm.兩種方法，L1 反算得到絕對誤差

(Abs. error)，L2 反算得到為均方根誤差(R.M.S.)；分別以這兩種誤差代表其模型正算視電阻率剖面與現地量測視電阻率剖面吻合度是否良好，其值常以小於 5%代表反算結果為佳。

若大於 5%可以將其視電阻率統計誤差大於 20%(或更大)的資料點移除，重新反算分析，增加其正確性；視電阻率統計誤差為計算之視電阻率資料點與現地量測視電阻率資料點各別之差值，於反算分析完成之後，其中會有一統計誤差分佈範圍，可藉由移除高誤差之資料點，作者常以 20%為標準，可視資料品質而定。



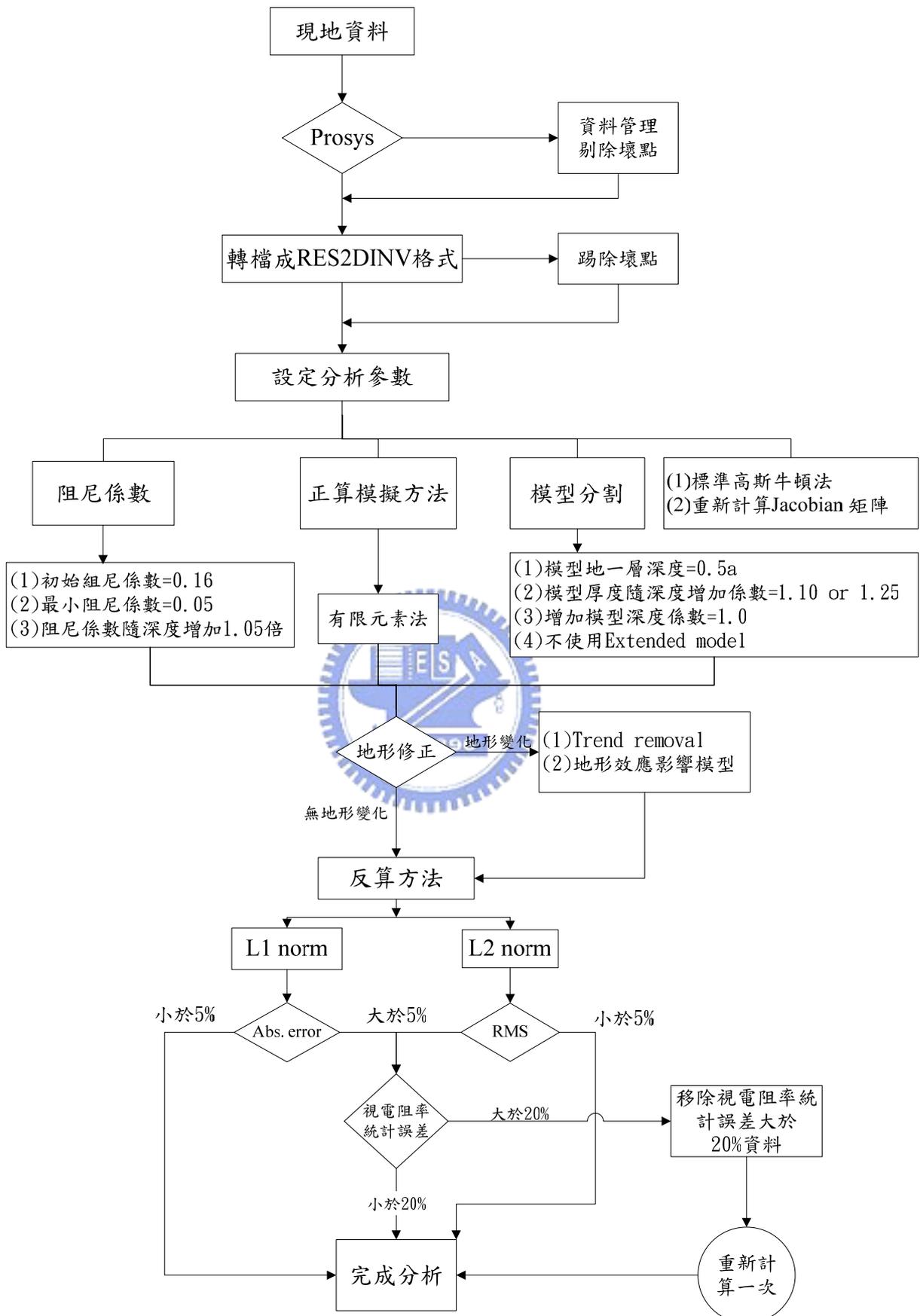


圖 A-1 反算分析流程圖

附錄 B-試驗場址鑽孔柱狀圖

取樣地點：新竹縣寶山鄉寶二水庫試驗場址			孔 深：20 m	
孔 號：BH-1		方 法：旋轉式/三套管鑽頭(壓克力管取樣)		地面高程：159.3 m
開始日期：92.06.17		傾 角：90°		地下水位：30 m 以下
完成日期：92.06.19		座 標：N：2735389.639 / E：253732.458		頁 次： 1
深度 (m)	RQD (m)	提取率 %	柱狀圖	地 層 描 述
1	—	—		0.00~1.45 黃棕色砂土
2	100	100		1.45~20.00 黃棕色砂岩
3	100	100		(1.45~2.60 夾薄層泥岩)
4	100	100		(4.66~4.80 夾薄層泥岩)
5	100	100		
6	100	100		
7	95	100		(7.78~7.96 橘紅色繡染砂岩)
8	80	100		
9	100	100		(9.60~10.96 夾薄層橘紅色繡染砂岩)
10	85	100		
11	100	100		(11.42~11.62 夾薄層橘紅色繡染砂岩) (11.67~12.20 夾薄層泥岩)
12	96	100		
13	74	100		
14	100	99		
15	100	99		
16	100	99		
17	98	99		(17.26~17.29 橘紅色繡染砂岩)
18	100	94		
19	100	94		
20	100	100		(19.13~19.31 橘紅色繡染砂岩)

圖 B-1 寶二水庫交大試驗場址 BH1 鑽孔柱狀圖

取樣地點：新竹縣寶山鄉寶二水庫試驗場址			孔 深：30 m	
孔 號：BH-2		方 法：旋轉式/三套管鑽頭(壓力管取樣)		地面高程：159.4 m
開始日期：92.06.26		傾 角：90°		地下水位：30 m 以下
完成日期：92.06.30		座 標：N：2735350.178 / E：253746.038		頁 次： 1
深度 (m)	RQD (m)	提取率 %	柱狀圖	地 層 描 述
1	—	—		0.00~1.23 黃棕色砂土
2	—	—		1.23~2.23 黃棕色砂岩
3	100	100		2.23~4.11 灰色泥岩
4	100	91		
5	100	97		4.11~12.93 黃棕色砂岩
6	100	92		
7	100	95		(7.15~8.27 偶夾橘紅色燻染砂岩及煤層)
8	100	98		(8.27~8.50 橘紅色燻染砂岩)
9	100	98		
10	83	100		(9.39~9.70 夾雜煤層) (9.70~10.20 偶夾泥岩)
11	85	100		(11.05~11.48 偶夾泥岩)
12	100	100		
13	100	100		
14	100	100		
15	100	100		12.93~15.96 灰色泥岩
16	91	99		
17	100	100		15.96~18.29 黃棕色砂岩
18	100	100		
19	100	100		18.29~19.43 灰色泥岩
20	96	100		19.43~20.46 黃棕色砂岩

圖 B-2 寶二水庫交大試驗場址 BH2 鑽孔柱狀圖

取樣地點：新竹縣寶山鄉寶二水庫試驗場址				孔 深：20 m
孔 號：BH-3		方 法：旋轉式/三套管鑽頭(壓力管取樣)		地面高程：158.9 m
開始日期：92.06.20		傾 角：90°		地下水位：30 m 以下
完成日期：92.06.25		座 標：N：2735377.036 / E：253731.909		頁 次： 1
深度 (m)	RQD (m)	提取率 %	柱狀圖	地 層 描 述
1	—	—		0.00~1.26 黃棕色砂土
2	—	—		1.26~2.10 黃棕色砂岩(夾薄層橘紅色繡染砂岩)
3	100	100		2.10~2.60 砂泥岩互層
				2.60~2.95 泥岩層
4	100	100		2.95~4.43 砂岩層
				(3.15~3.27 橘紅色繡染砂岩)
5	100	100		4.43~7.15 泥岩層
6	100	100		
7	100	100		
8	80	100		7.15~10.19 砂岩層
				(7.63~7.92 夾煤層)
9	100	100		
10	100	100		
11	85	100		10.19~10.90 砂泥岩互層
12	96	100		10.90~20.00 砂岩層
13	74	100		
14	100	99		
				(14.59~14.85 橘紅色繡染砂岩)
				(14.85~15.81 夾薄層泥岩)
15	100	99		
16	81	100		
17	100	100		(17.48~18.46 橘紅色繡染砂岩)
18	98	99		
				(18.46~18.60 夾薄層泥岩)
				(18.60~18.70 橘紅色繡染砂岩)
19	100	94		
20	100	100		(18.70~20.00 偶夾泥岩)

圖 B-3 寶二水庫交大試驗場址 BH3 鑽孔柱狀圖

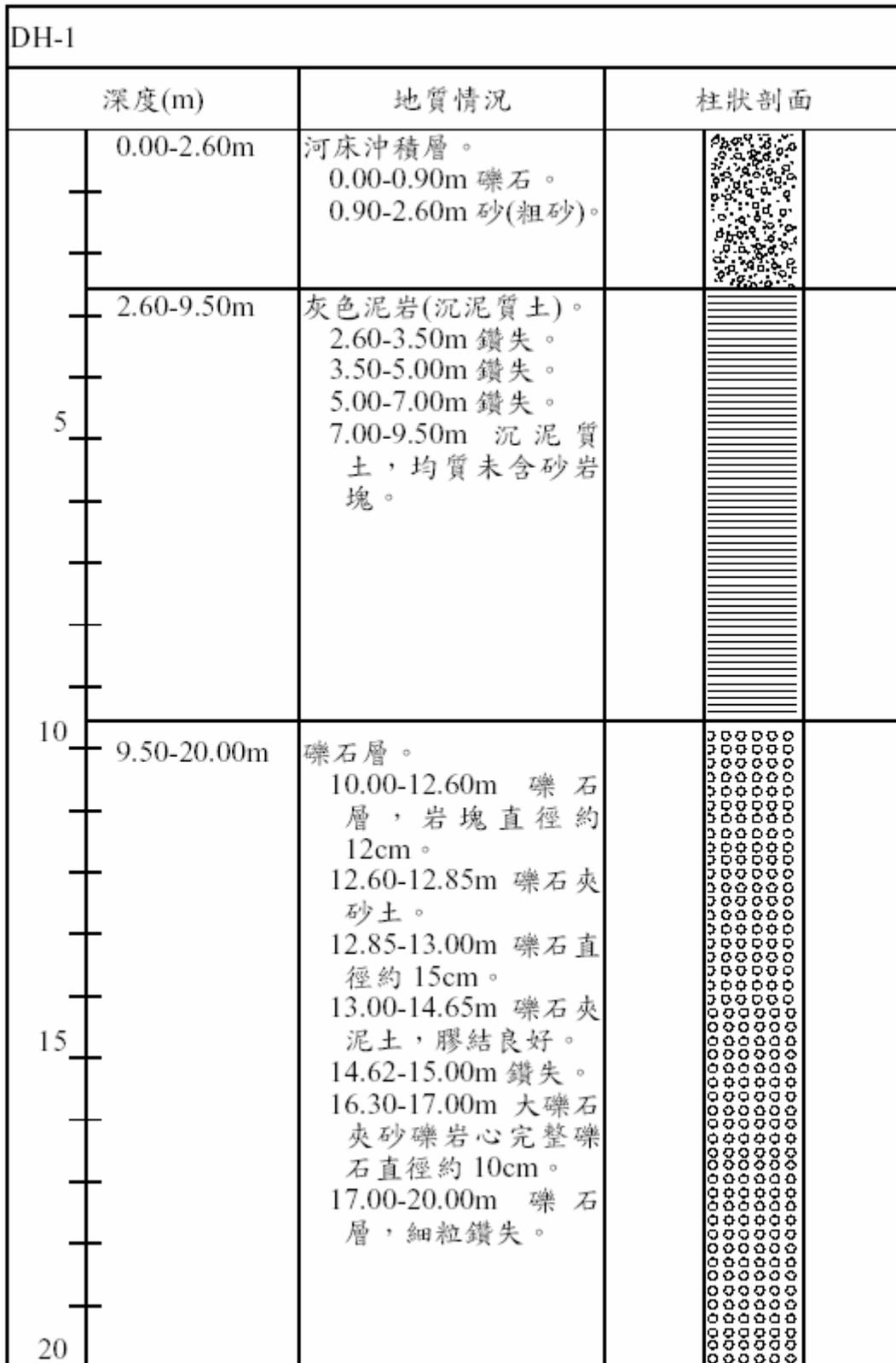


圖 B-4 東門溪 DH1 鑽孔柱狀圖

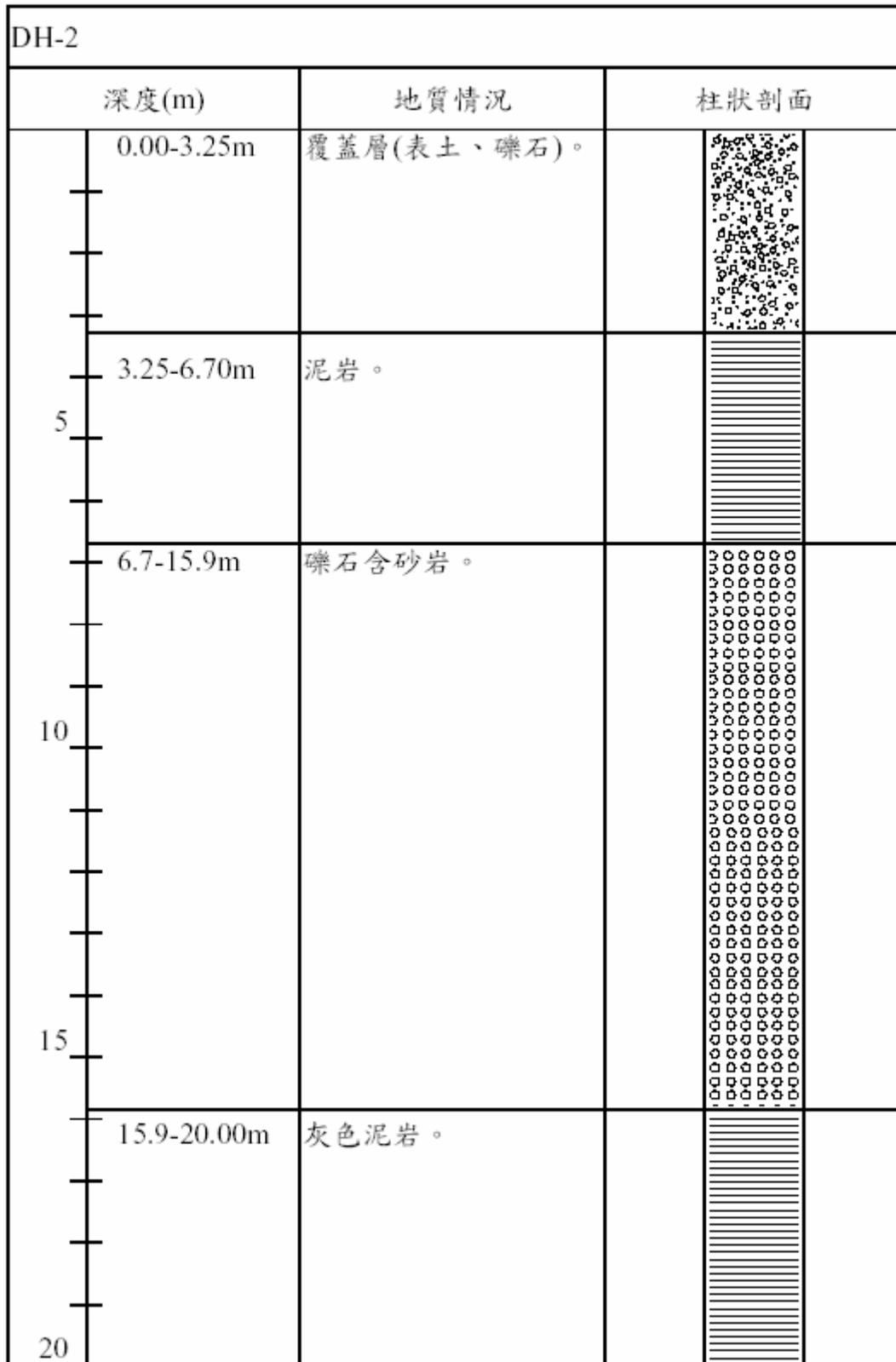


圖 B-5 東門溪 DH2 鑽孔柱狀圖

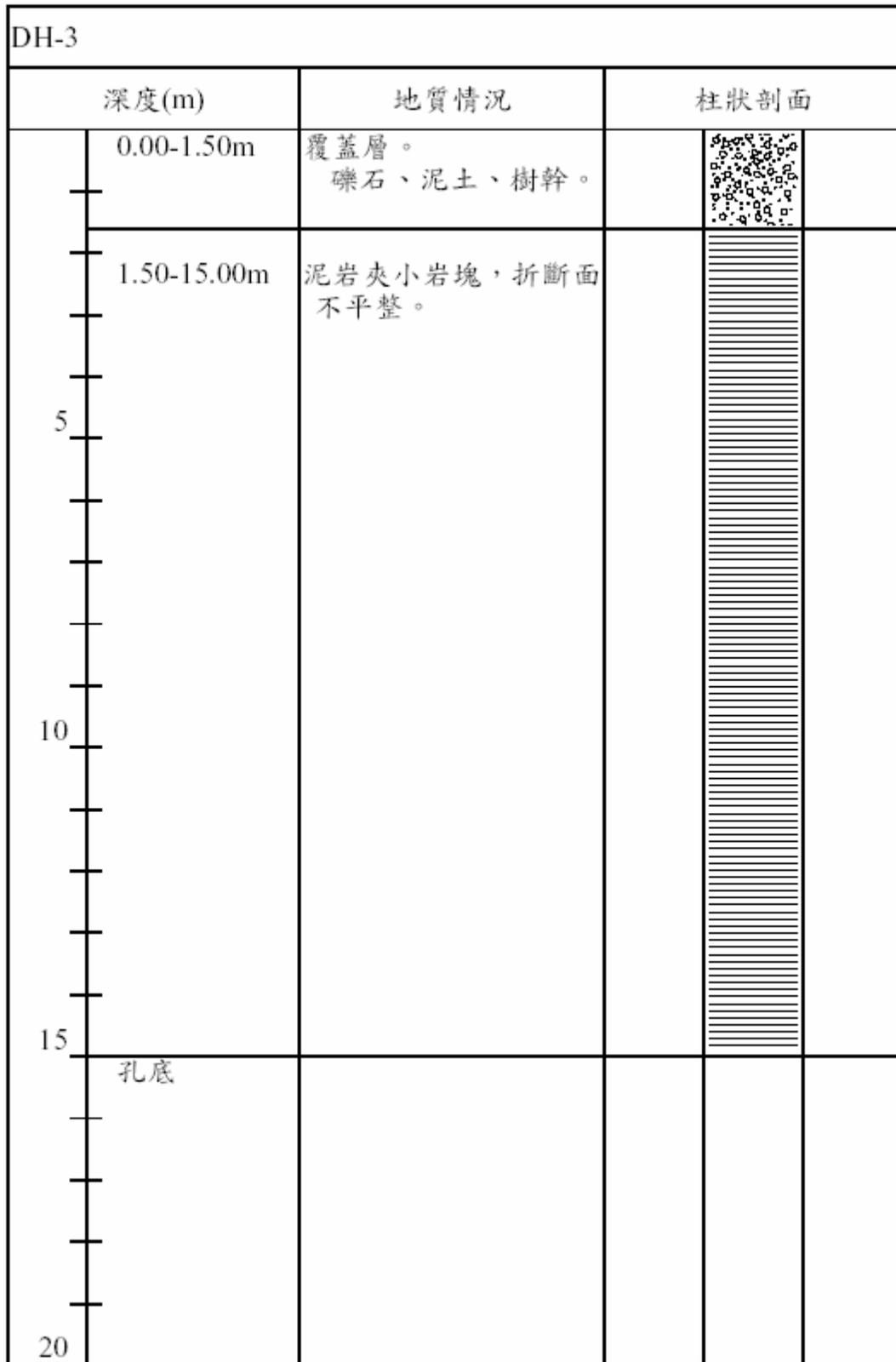


圖 B-6 東門溪 DH3 鑽孔柱狀圖

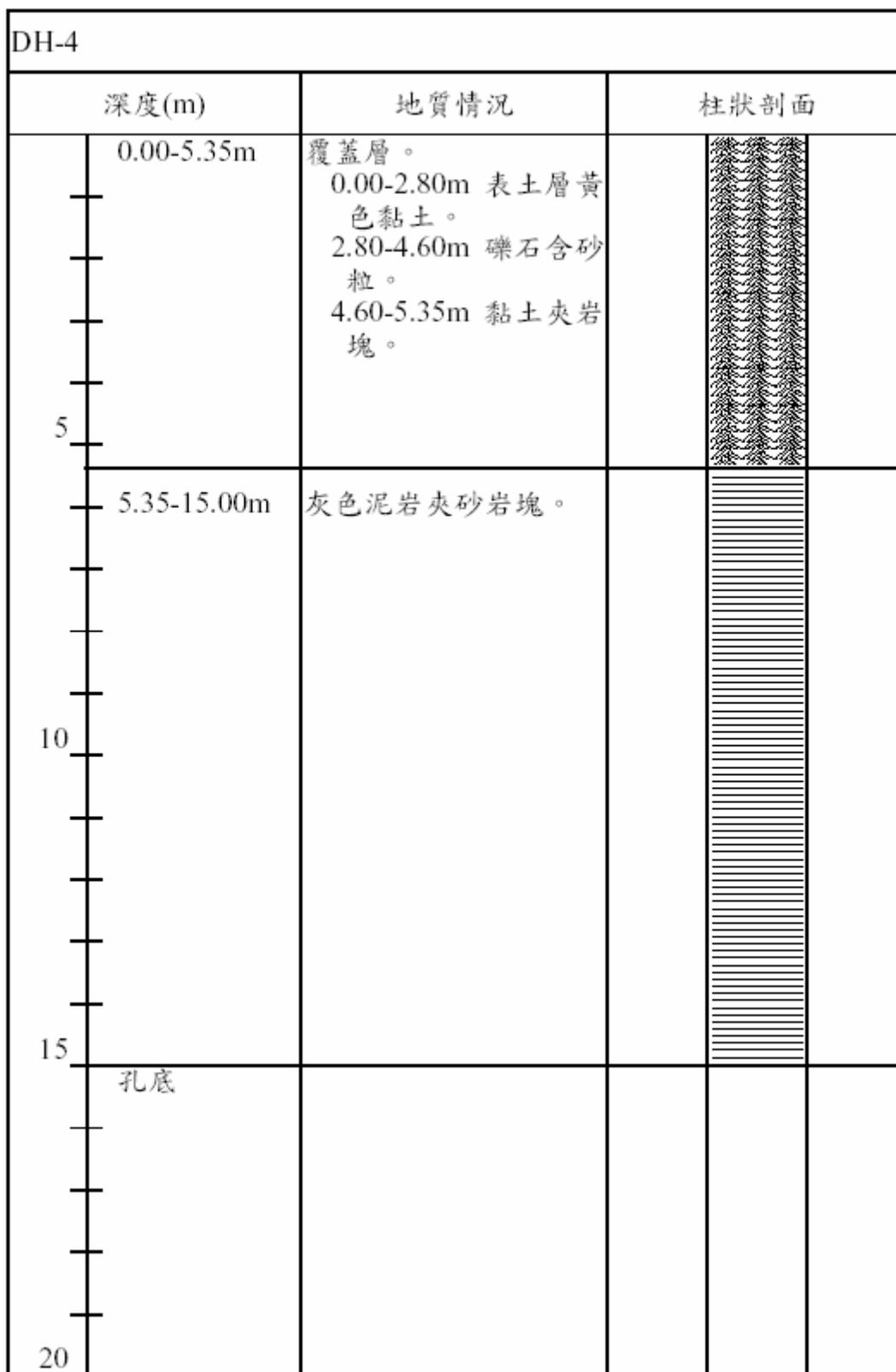


圖 B-7 東門溪 DH4 鑽孔柱狀圖

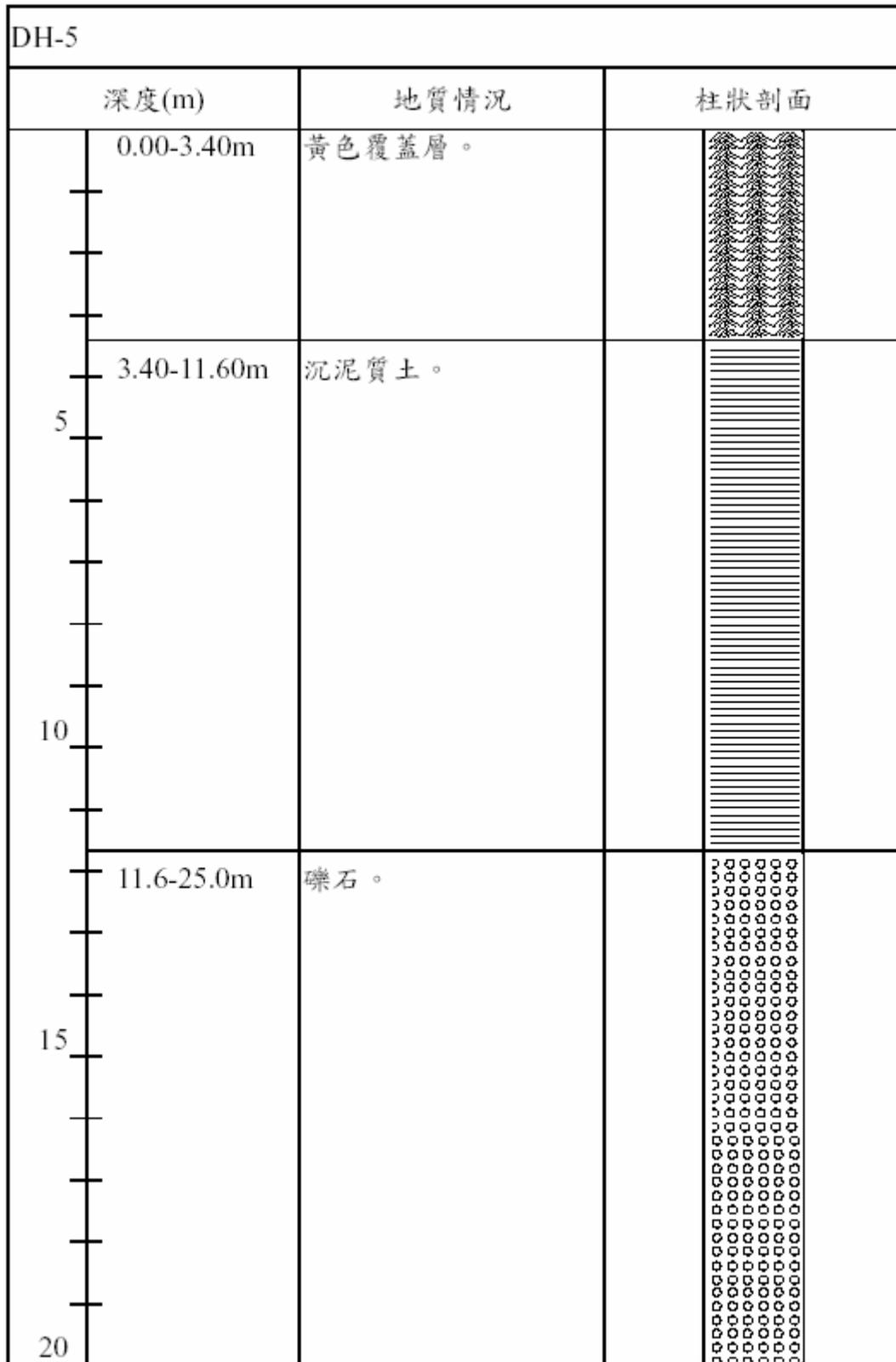


圖 B-8 東門溪 DH5 鑽孔柱狀圖

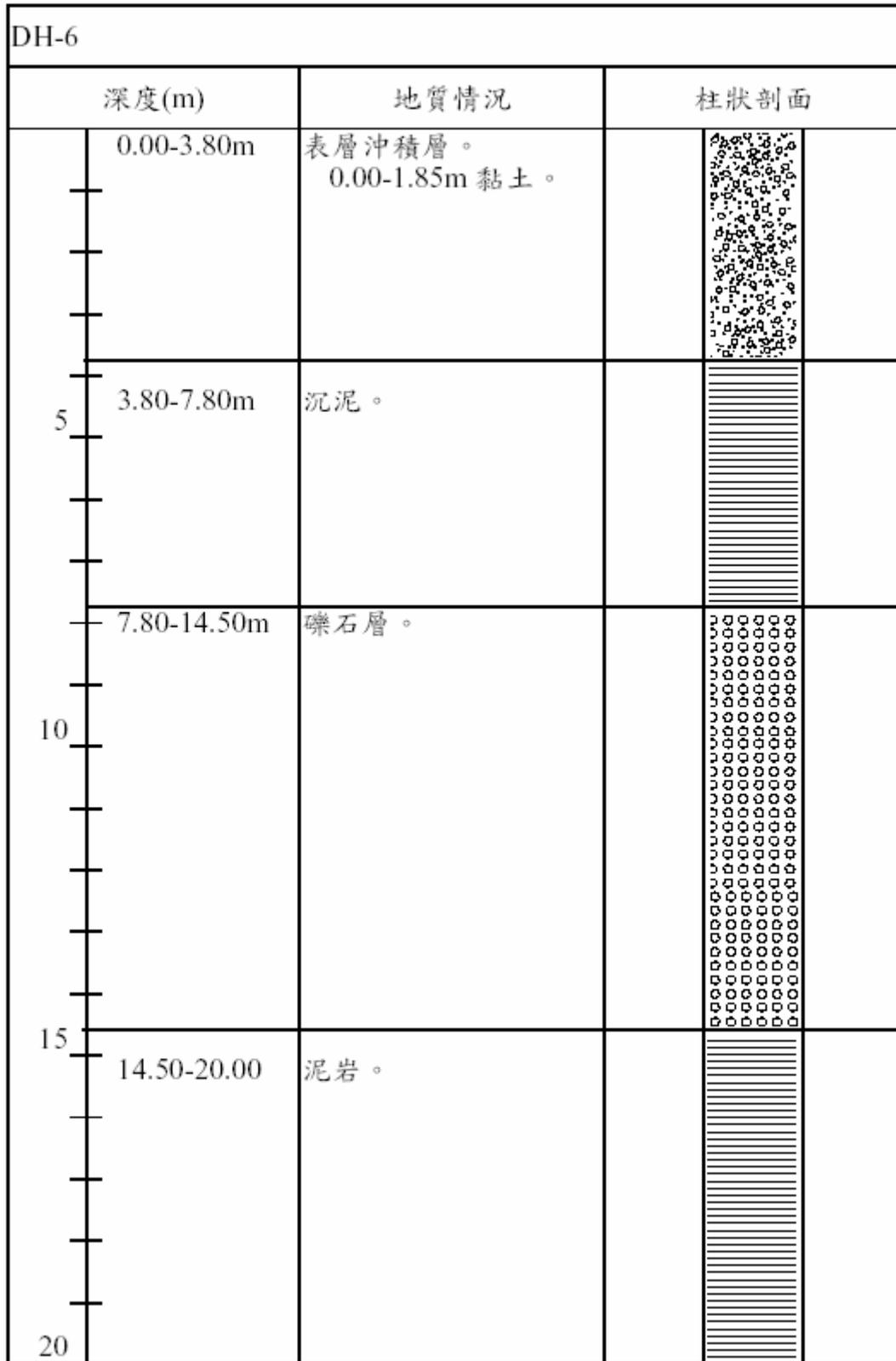


圖 B-9 東門溪 DH6 鑽孔柱狀圖

鑽探地點：新竹市交通大學博愛校區操場升旗台前		孔 深：18.25 m	
孔 號：S32		方 法：鑽堡/標準貫入試驗(劈管取樣)	
開始日期：93.10.18		傾 角：90°	
完成日期：93.10.19		座 標：E：247225 / N：2743637	
		頁 次： 1	
深度 (m)	SPT N 值	柱 狀 圖	地 層 描 述
1			0.00m~4.3m 棕黃色粉土質砂土 約 3m 處土層為棕紅色至棕黃色
2			
3	(3.95m) 36		
4			4.3m~6.6m 棕黃色粉土質細砂、偶夾微量礫石
5	(5.95m) 20		
6			6.6m~15.8m 棕黃色砂質礫石、偶夾卵石
7	(7.95m) 19		
8			11.4m~12.25m 夾卵石
9	(9.95m) 33		
10			
11	(11.95m) 50/14cm		
12			15.8m~18.25m 深灰色粉砂岩(岩盤)
13	(13.6m) 50/10cm		
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

圖 B-10 交大博愛校區 S32 孔鑽探柱狀圖

鑽探地點：新竹市交通大學博愛校區大門左側球場旁樹下			孔 深：5.9 m
孔 號：S33		方 法：水洗/標準貫入試驗(劈管取樣)	地面高程：
開始日期：93.10.24		傾 角：90°	地下水位：
完成日期：93.10.24		座 標：E：247537/ N：2743573	頁 次： 1
深度 (m)	SPT N 值	柱 狀 圖	地 層 描 述
1	(1.5m) 13.5		0.00m~2.55m 黃棕色砂質粘土，夾紅、灰色粉土
2	(3.0m) 21		2.55m~5.9m 黃棕色砂質泥岩
3	(4.5m) 18		2.55m~2.8m 灰色泥岩
4	(5.9m) 56/24cm		
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

圖 B-11 交大博愛校區 S33 孔鑽探柱狀圖



圖 B-12 三姓橋 2 號井，井中疏鬆細砂受高角度微斷層切過，岩層位態由近 30 度變化至近 60 度(經濟部中央地質調查所)。



圖 B-13 三姓橋 4 號井，上部的疏鬆細砂遭紅化，砂岩中可見傾角約 50 至 60 度的微斷層(經濟部中央地質調查所)。



圖 B-14 三姓橋 5 號井 0~8 公尺，1 至 2.4 公尺為地表礫石，2.4 至 4.3 公尺為紅土礫石，紅土礫石有受剪切特徵，4.3 公尺至 5.3 為受剪切的砂質泥與近乎水平的疏鬆細砂斷層接觸(經濟部中央地質調查所)。



圖 B-15 三姓橋 5 號井 32~40 公尺，受剪切的砂質泥於 35.1 公尺處與礫石層斷層接觸(經濟部中央地質調查所)。

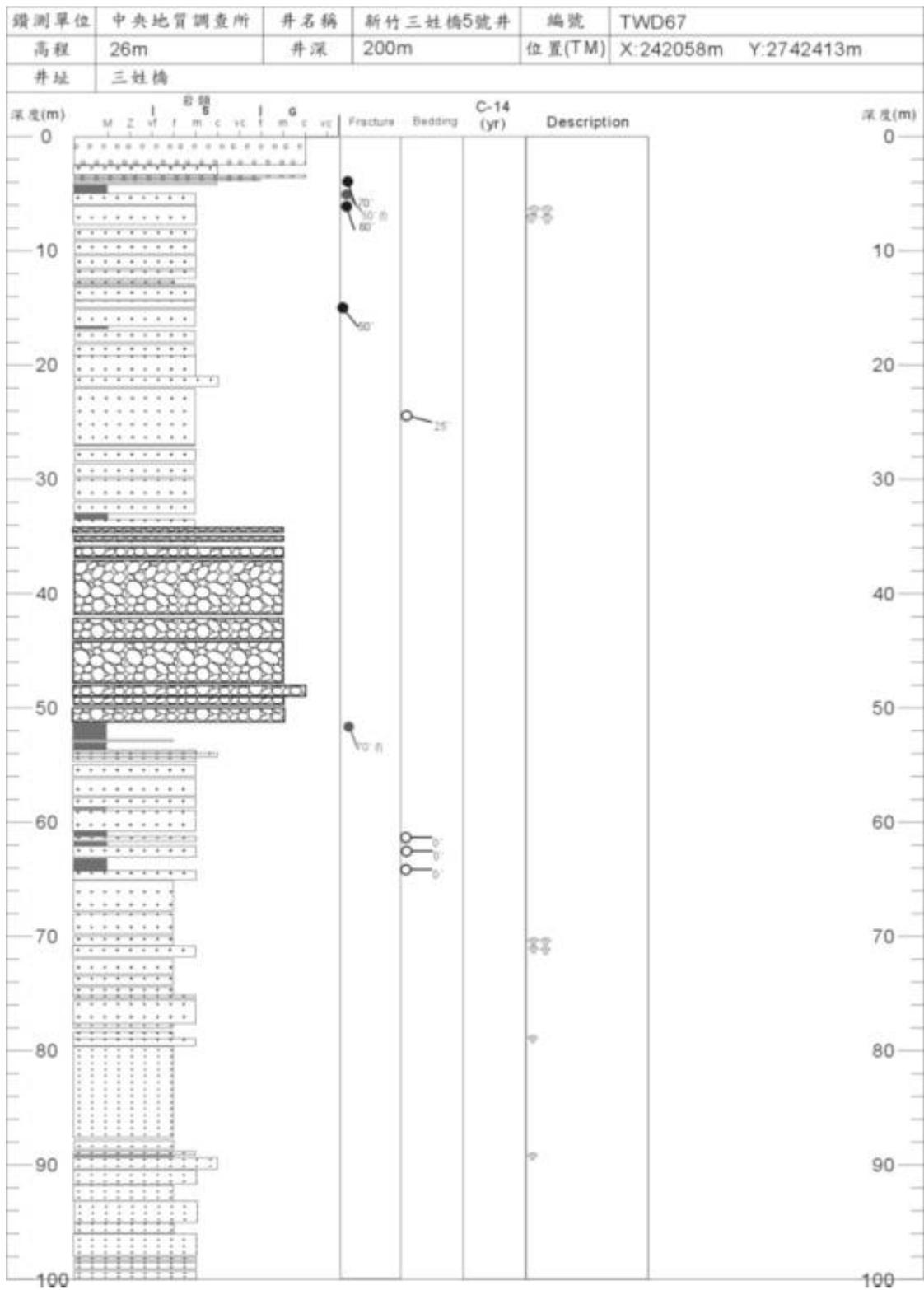


圖 B-16a 三姓橋 5 號井岩心紀錄 0~100 公尺。

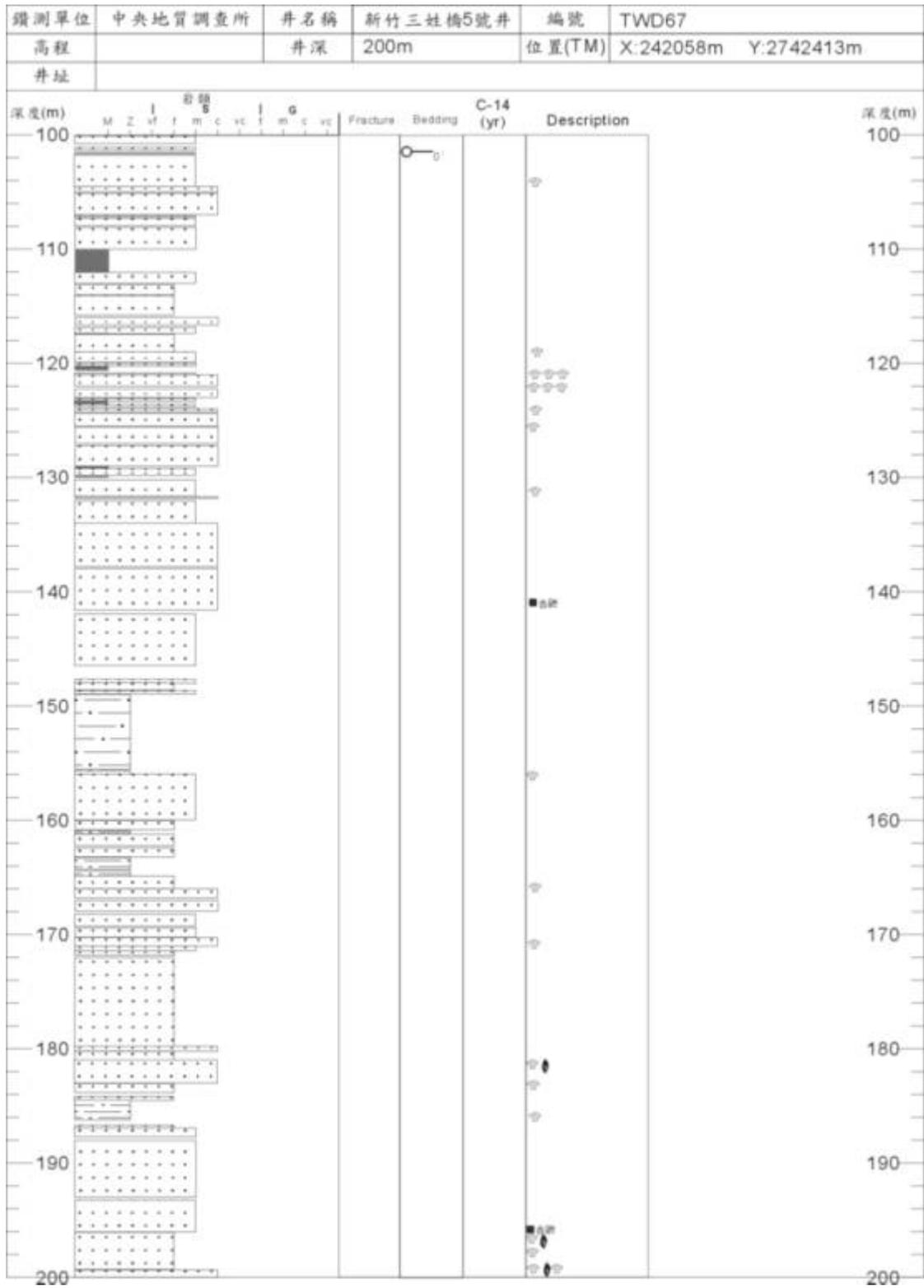


圖 B-16b 三姓橋 5 號井岩心紀錄 100~200 公尺。

附錄 C-單一水平界面靈敏度分析

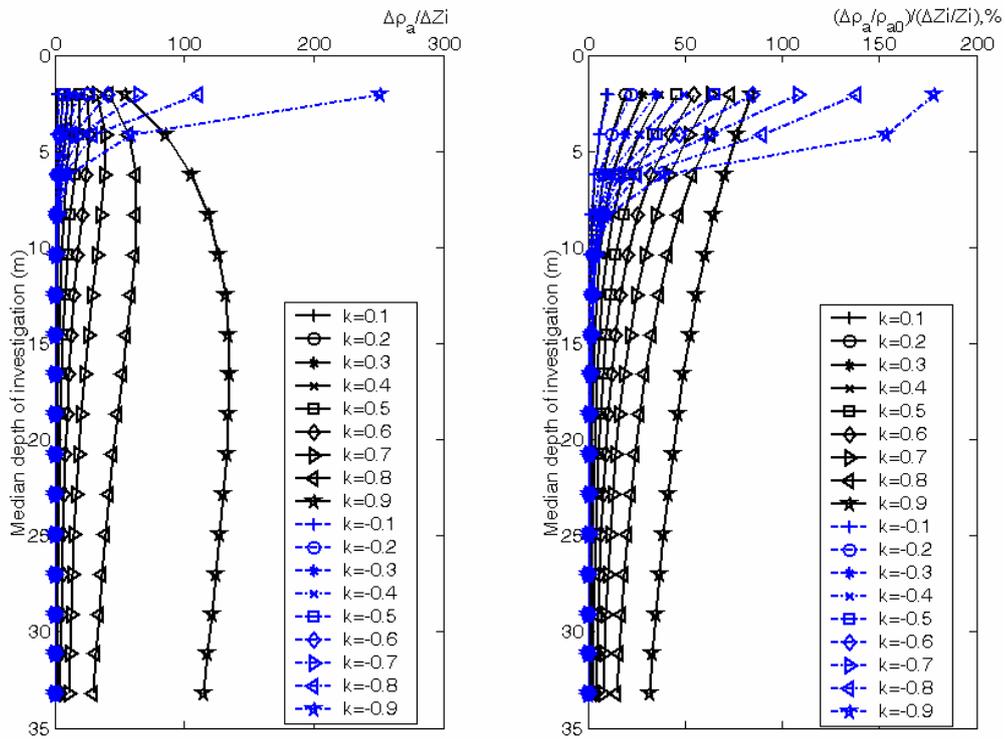


圖 C-1 Zi 在 2 公尺，Wenner 之靈敏度與正規化靈敏度

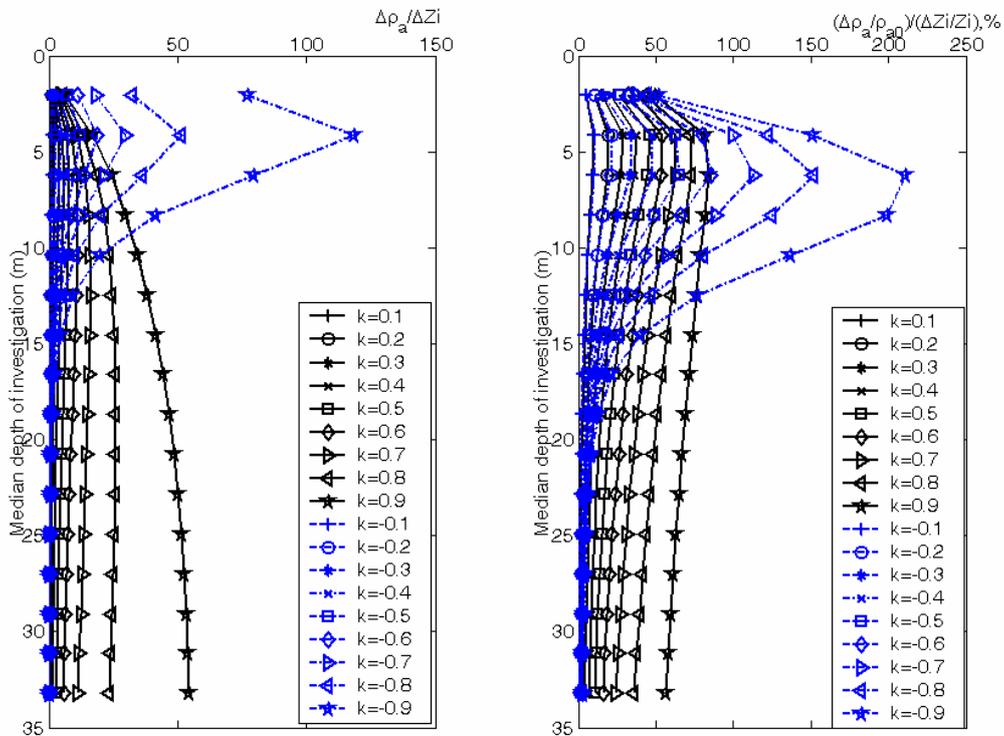


圖 C-2 Zi 在 5 公尺，Wenner 之靈敏度與正規化靈敏度

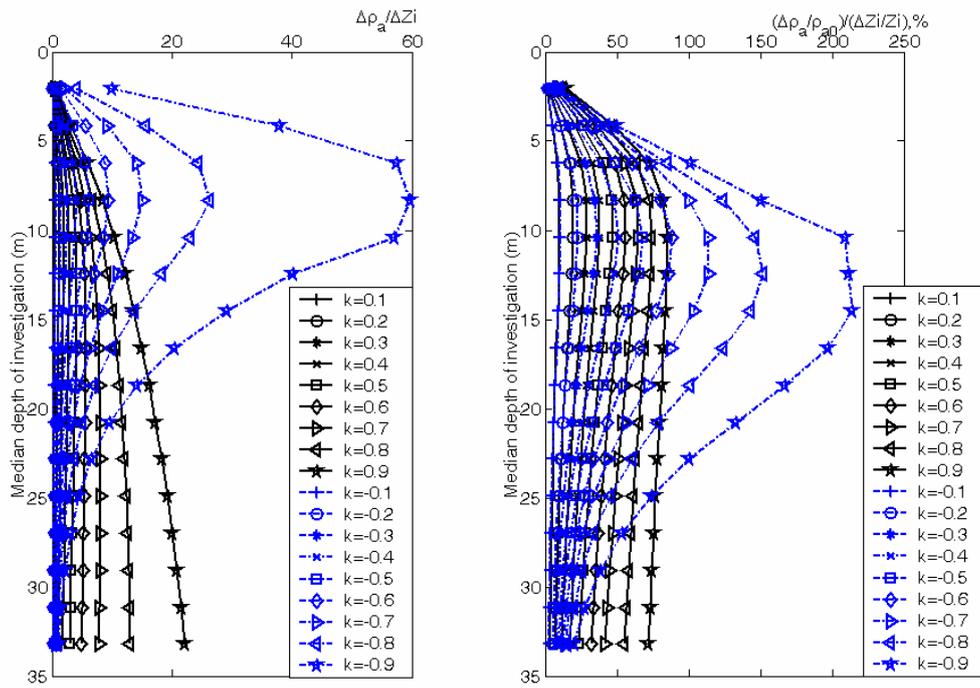


圖 C-3 Zi 在 10 公尺，Wenner 之靈敏度與正規化靈敏度

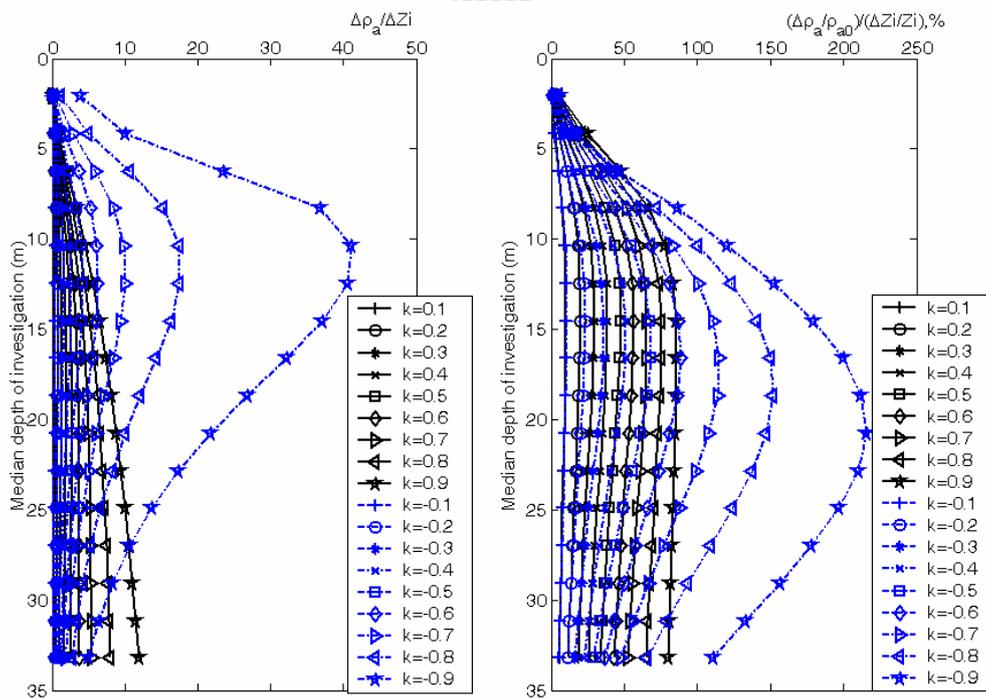


圖 C-4 Zi 在 15 公尺，Wenner 之靈敏度與正規化靈敏度

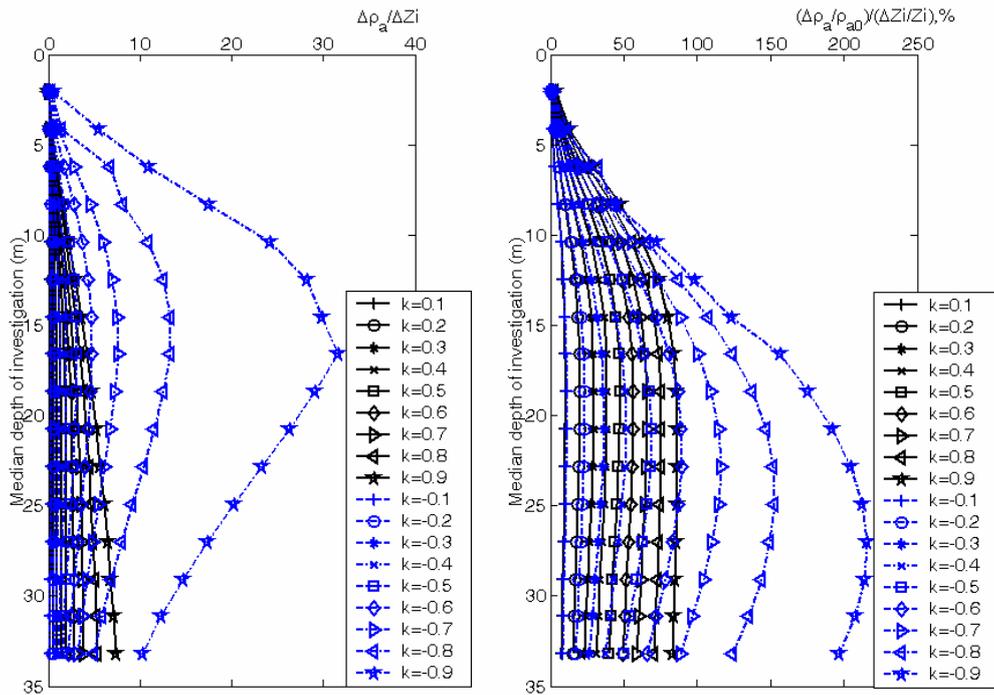


圖 C-5 Zi 在 20 公尺，Wenner 之靈敏度與正規化靈敏度

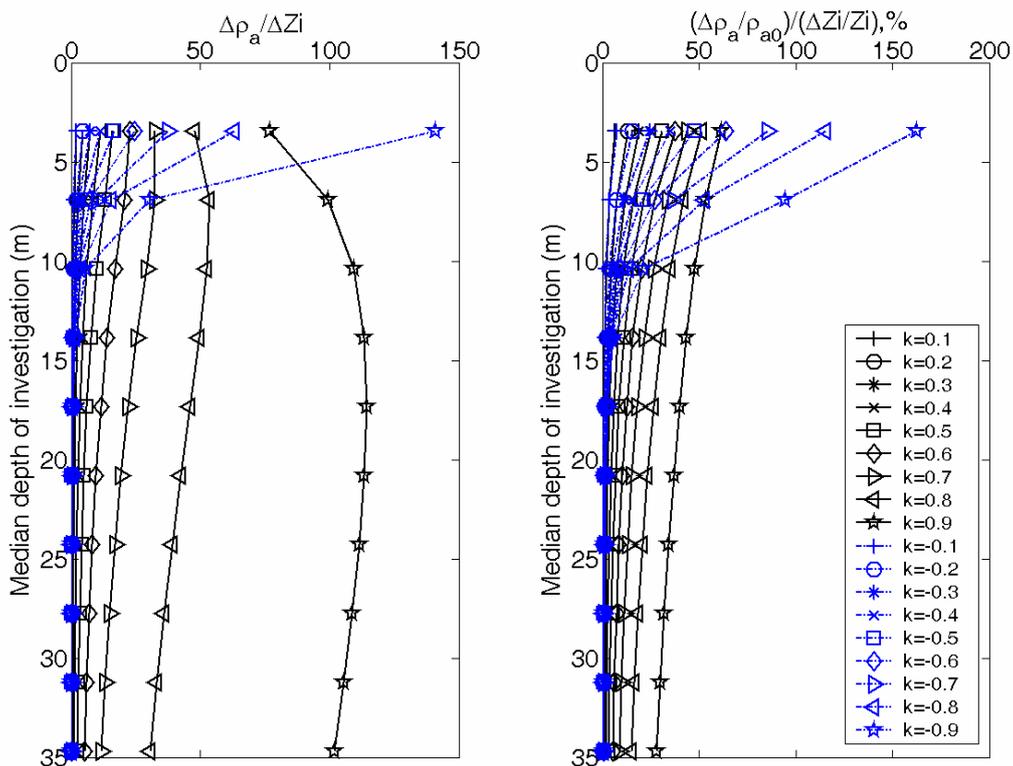


圖 C-6 Zi 在 2 公尺，Pole-Pole 之靈敏度與正規化靈敏度

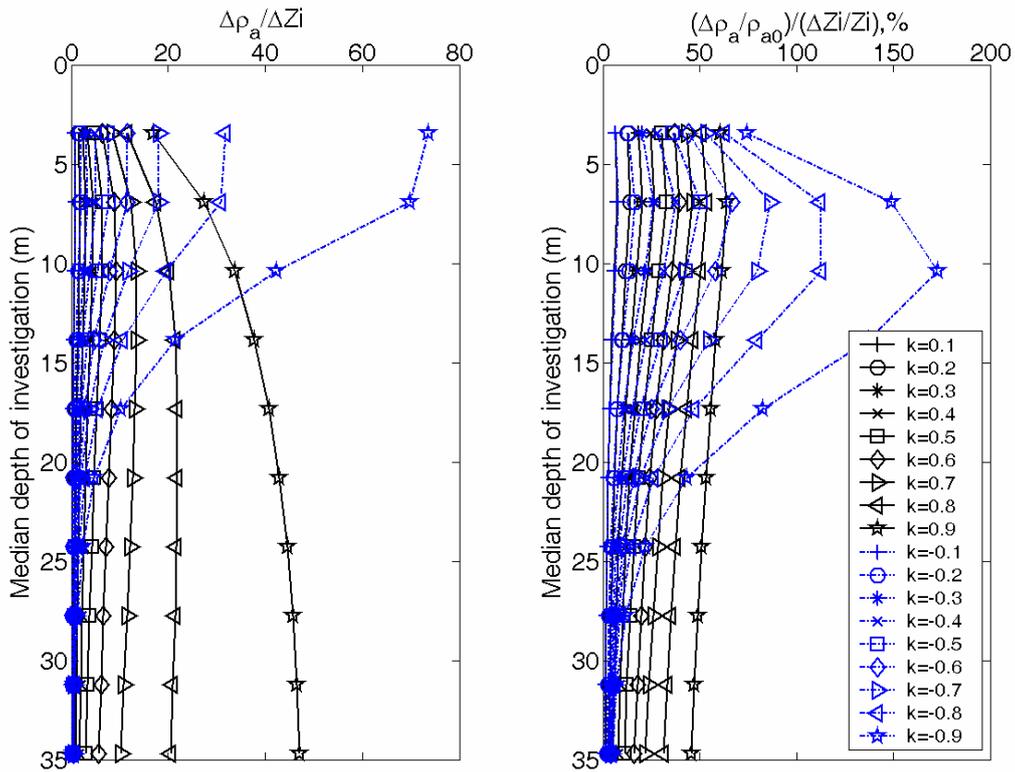


圖 C-7 Zi 在 5 公尺，Pole-Pole 之靈敏度與正規化靈敏度

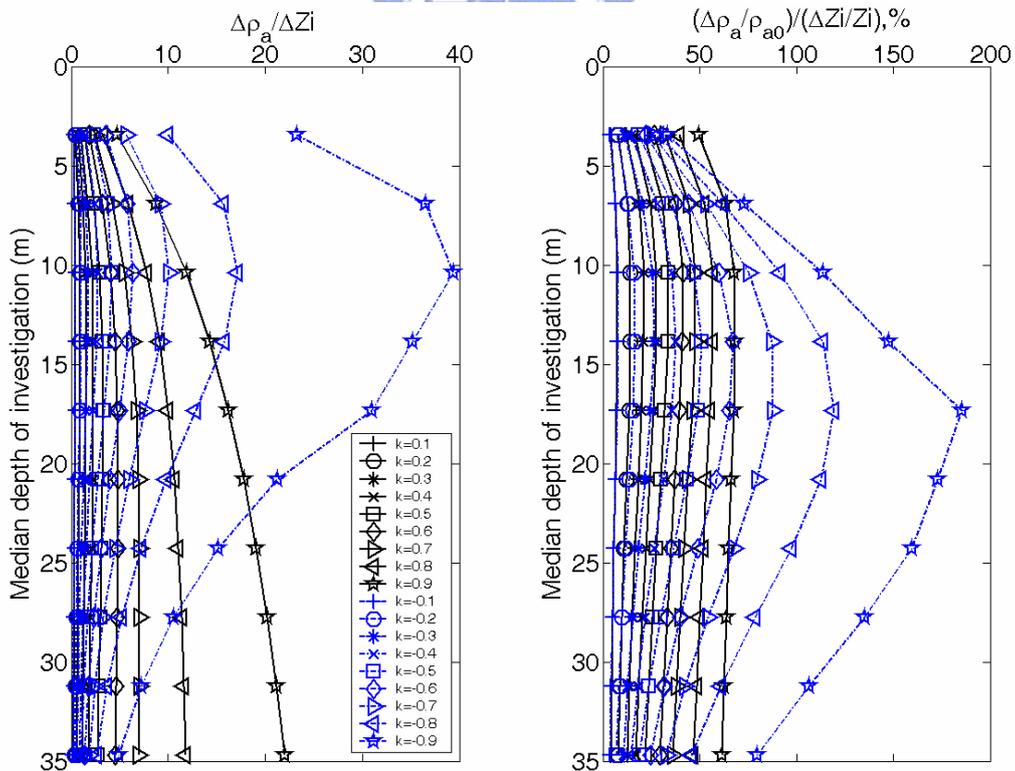


圖 C-8 Zi 在 10 公尺，Pole-Pole 之靈敏度與正規化靈敏度

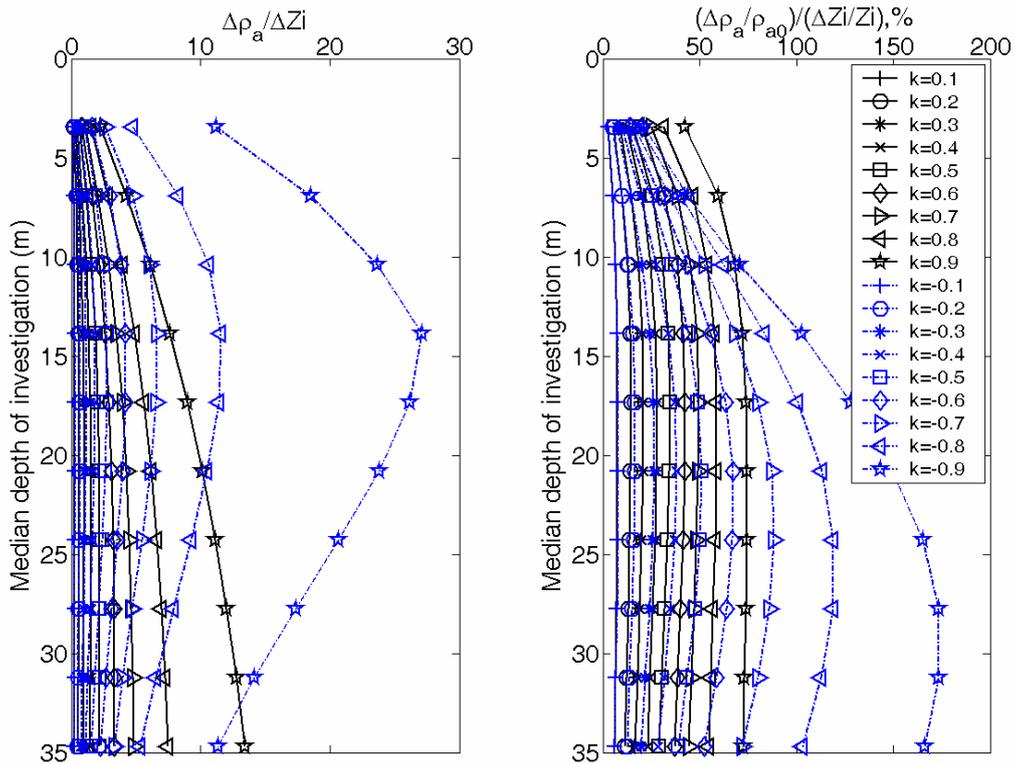


圖 C-9 Zi 在 15 公尺，Pole-Pole 之靈敏度與正規化靈敏度

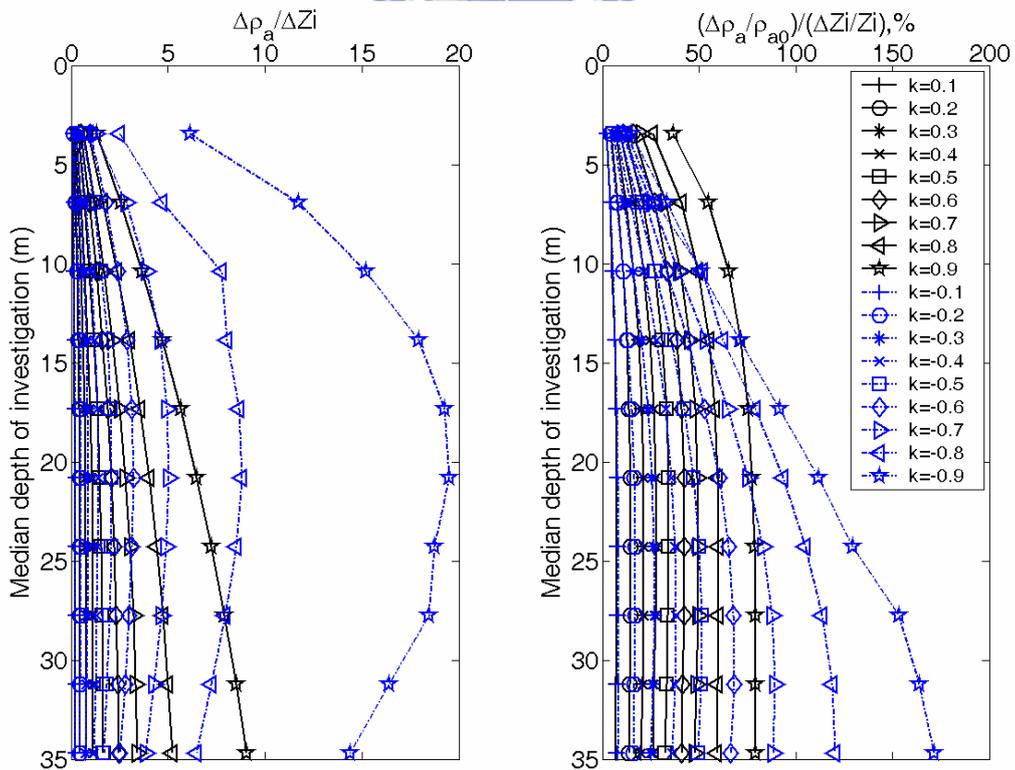


圖 C-10 Zi 在 20 公尺，Pole-Pole 之靈敏度與正規化靈敏度

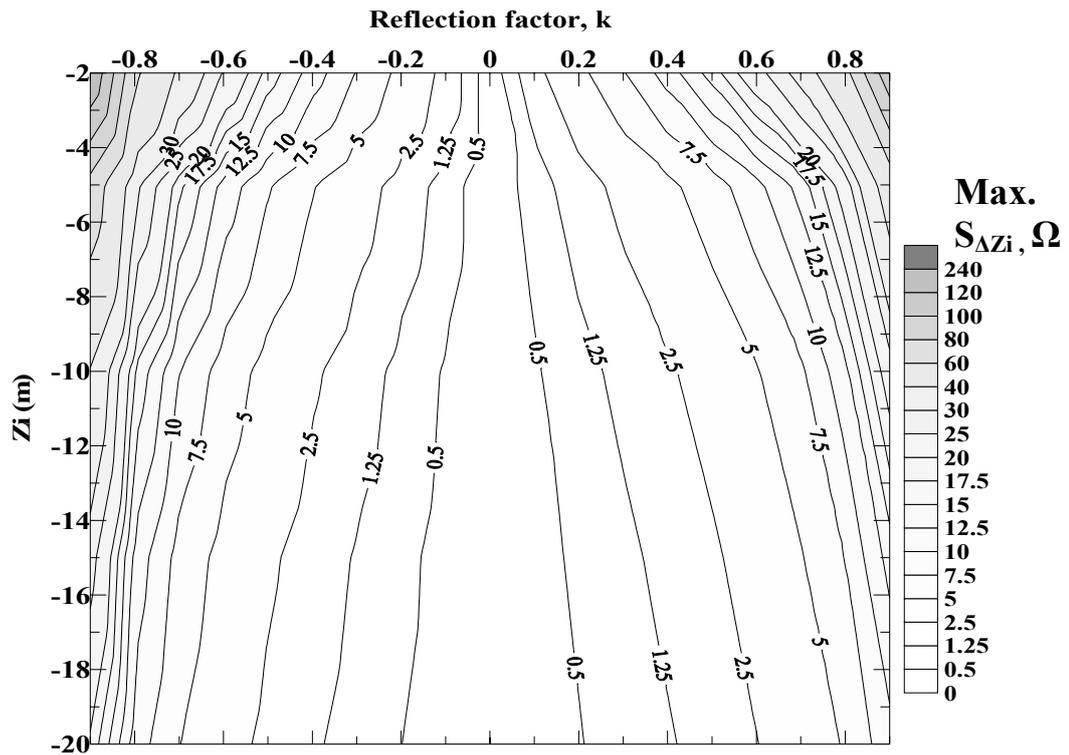


圖 C-11 Pole-Pole 最大靈敏度影像圖

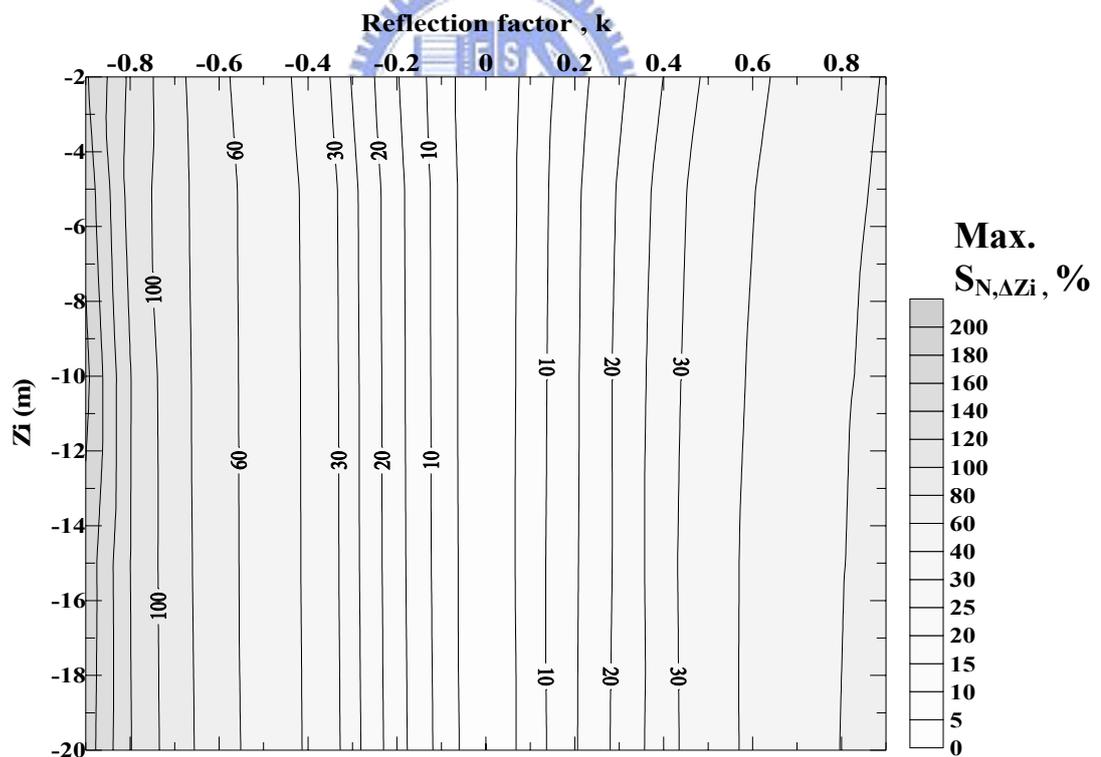


圖 C-12 Pole-Pole 最大正規化靈敏度影像圖

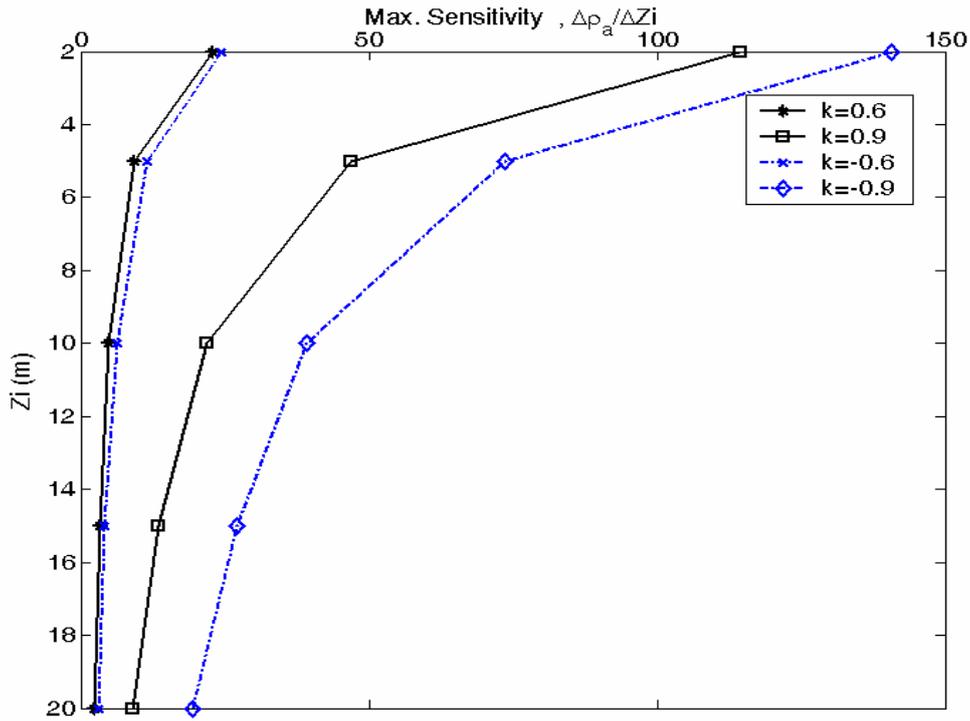


圖 C-13 Pole-Pole 最大靈敏度隨深度降低趨勢圖($k=0.6,0.9,-0.6,-0.9$)

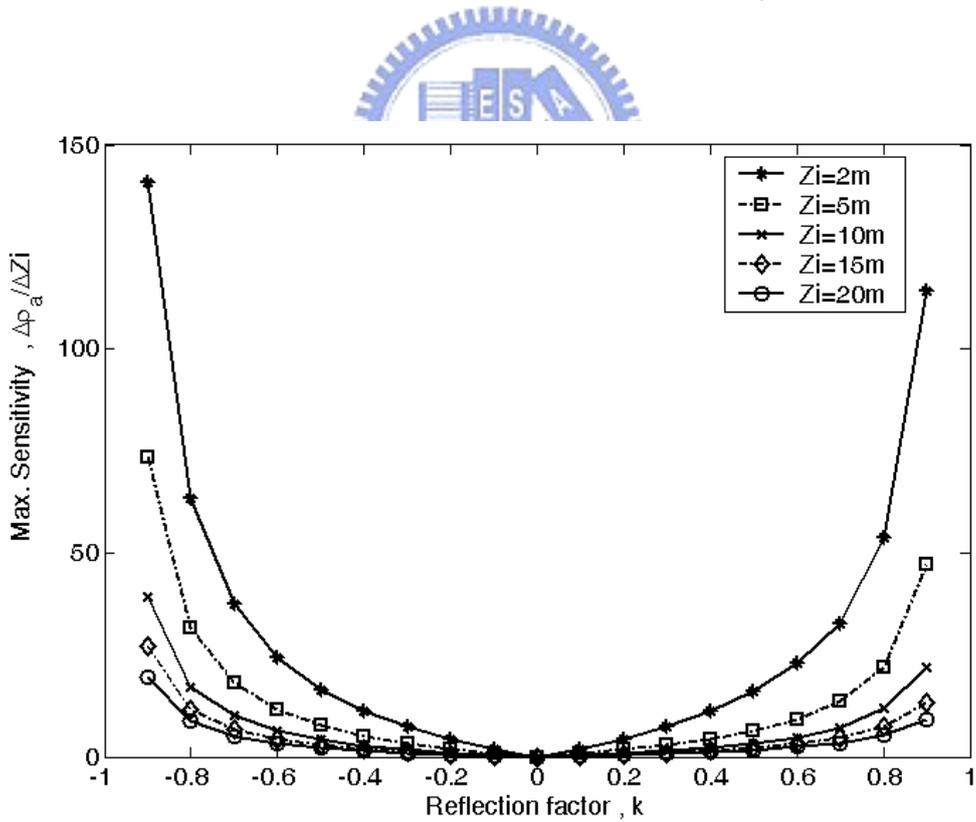


圖 C-14 Pole-Pole 最大靈敏度隨反射係數變化($Z_i=2,5,10,15,20m$)

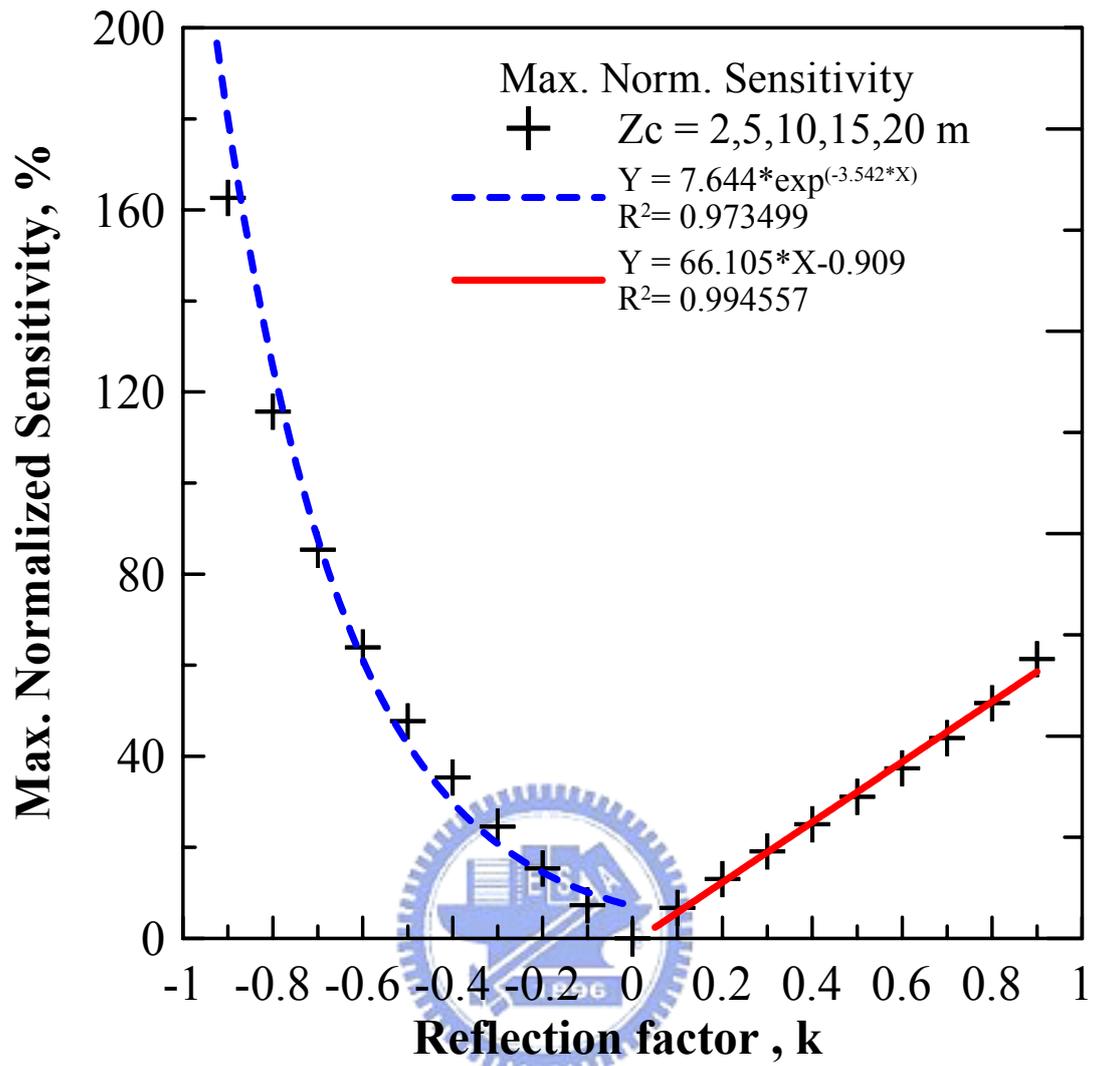
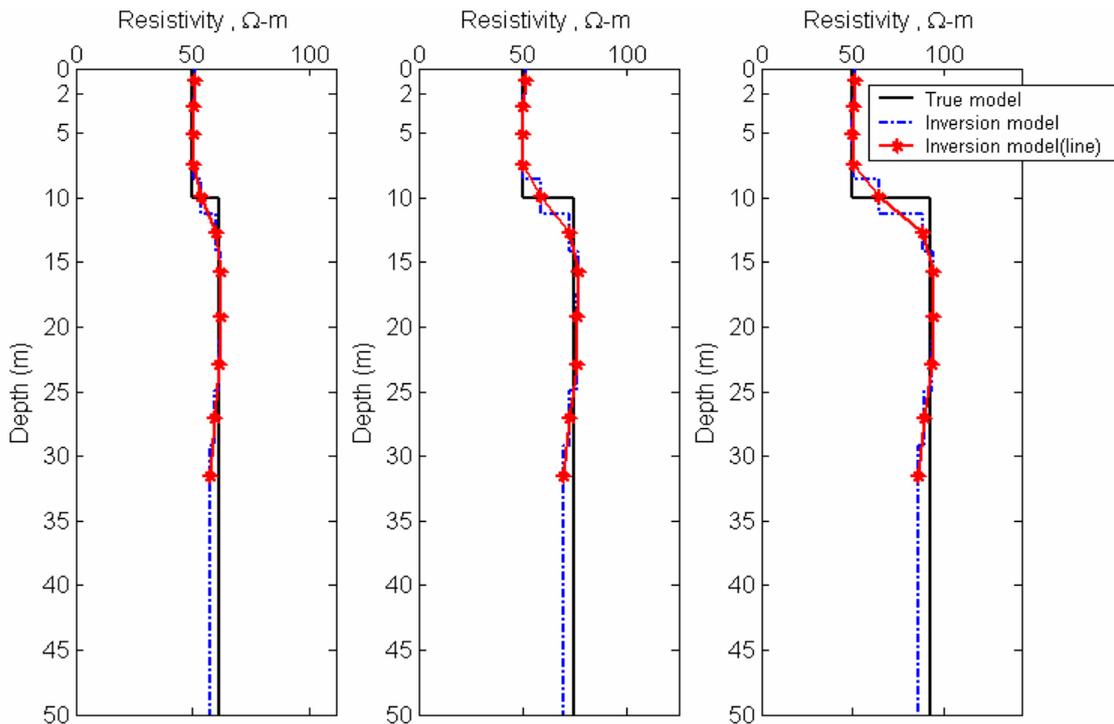


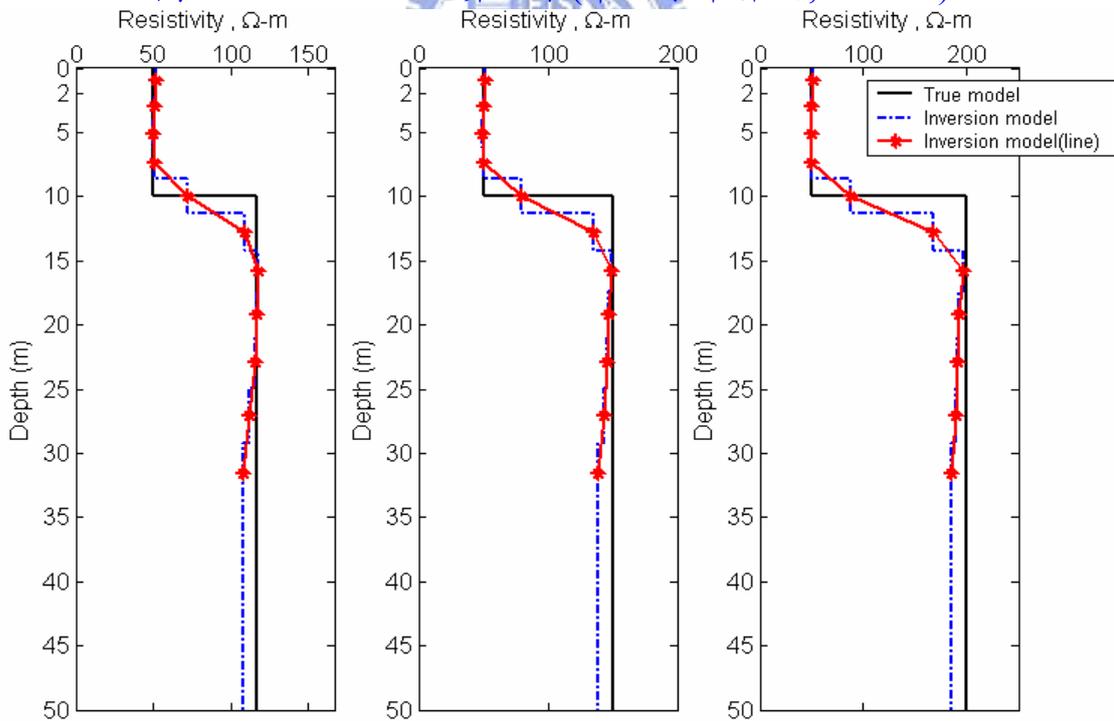
圖 C-15 Pole-Pole 最大正規化靈敏度與反射係數關係

附錄 D-單一水平界面 Wenner 反算結果



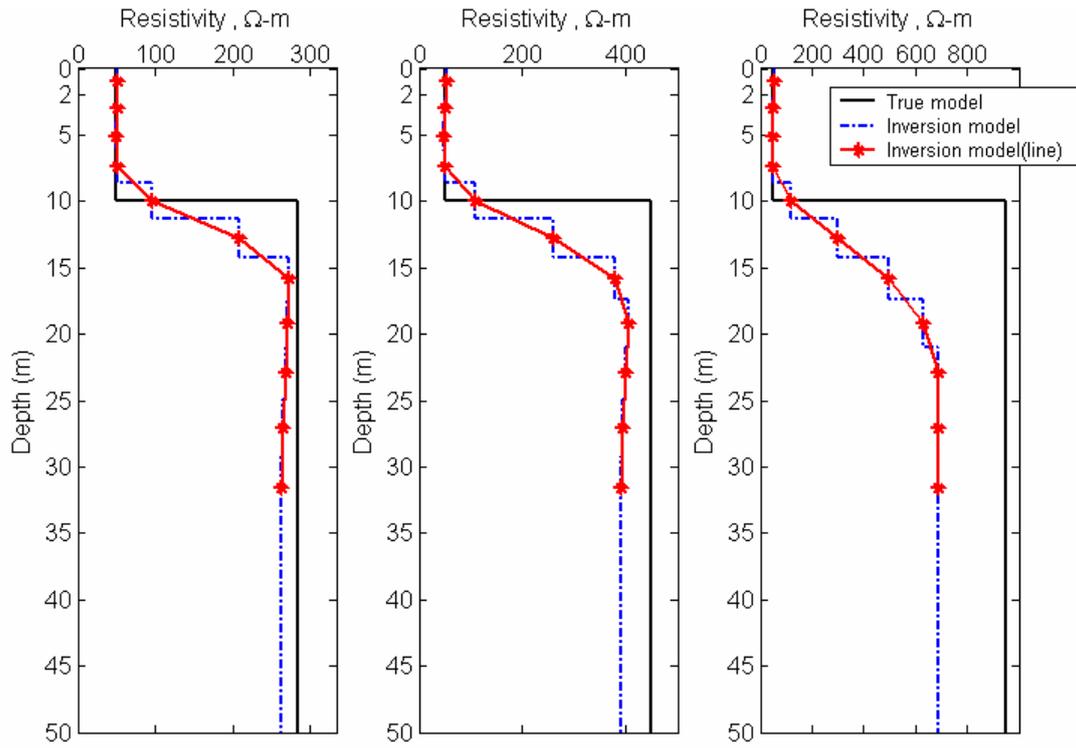
(a) $k=0.1$ (Abs. error = 0.242%) (b) $k=0.2$ (0.254%) (c) $k=0.3$ (0.288%)

圖 D-1 Wenner 反算結果(單一水平界面, $Z_i=10\text{m}$)



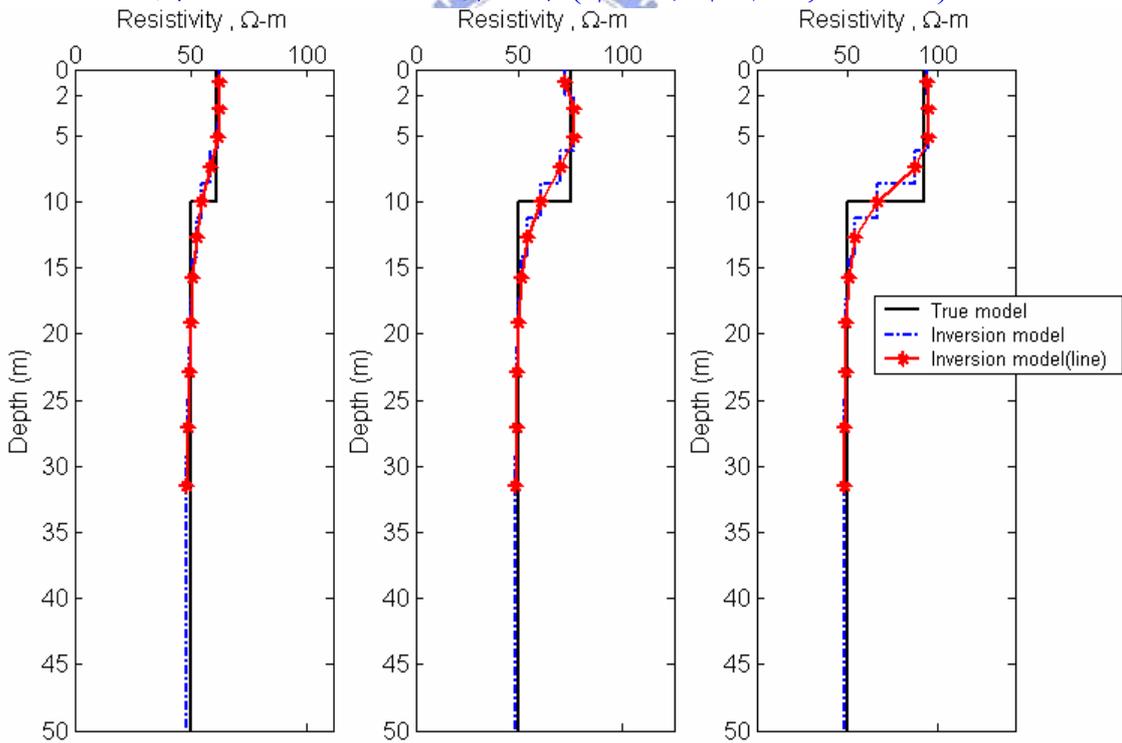
(a) $k=0.4$ (0.297%) (b) $k=0.5$ (0.305%) (c) $k=0.6$ (0.342%)

圖 D-2 Wenner 反算結果(單一水平界面, $Z_i=10\text{m}$)



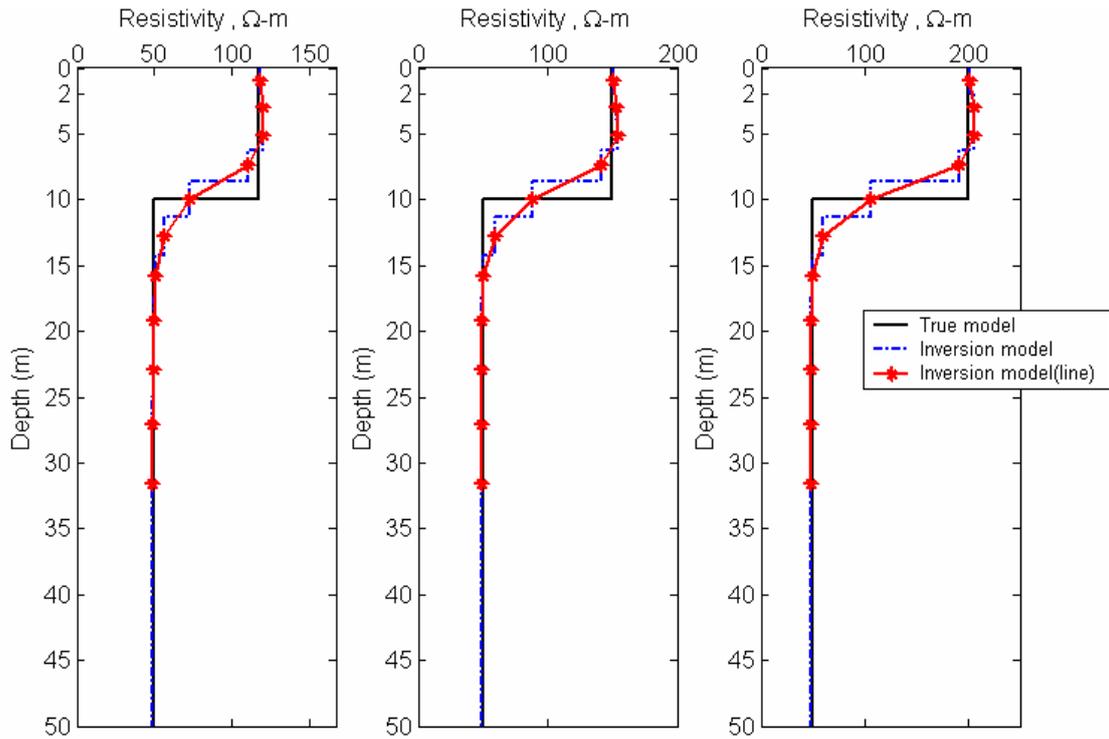
(a) $k=0.7$ (0.370%) (b) $k=0.8$ (0.443%) (c) $k=0.9$ (0.383%)

圖 D-3 Wenner 反算結果(單一水平界面, $Z_i=10$ m)



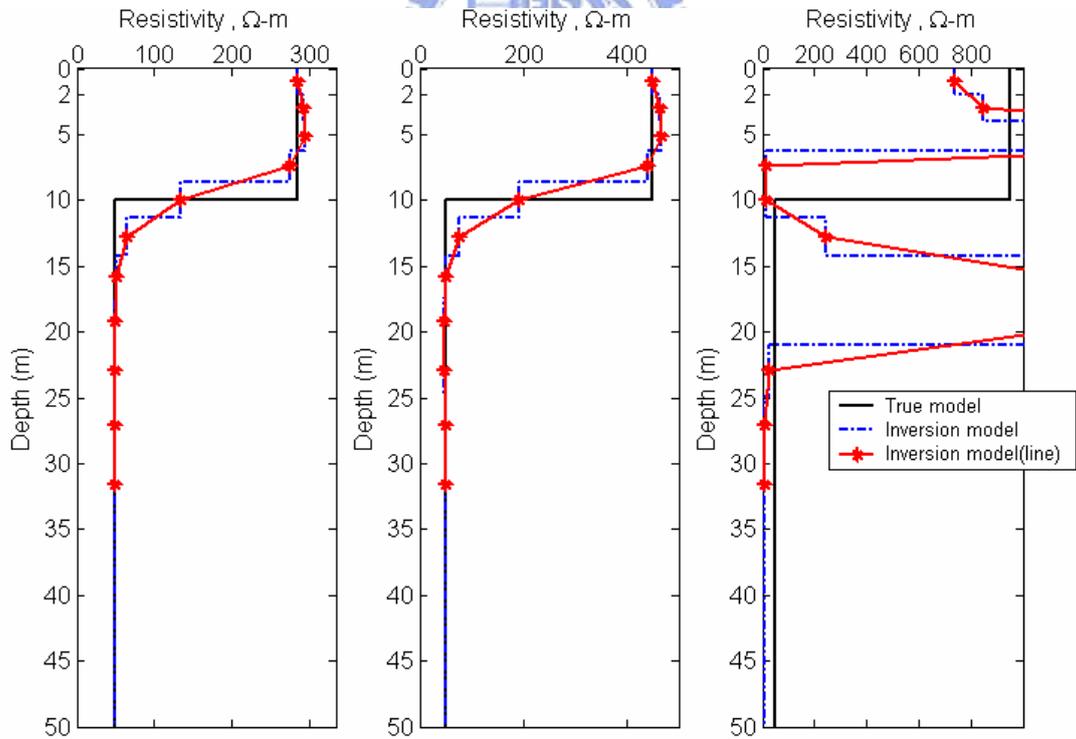
(a) $k = -0.1$ (0.168%) (b) $k = -0.2$ (0.177%) (c) $k = -0.3$ (0.183%)

圖 D-4 Wenner 反算結果(單一水平界面, $Z_i=10$ m)



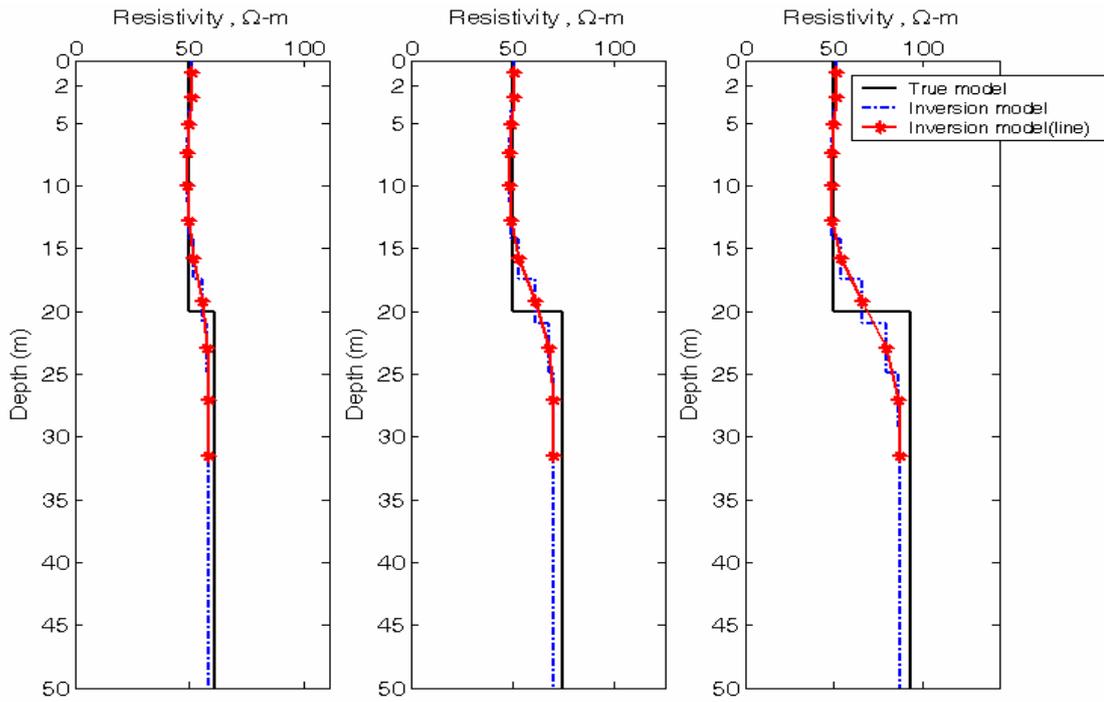
(a) $k = -0.4$ (0.261%) (b) $k = -0.5$ (0.239%) (c) $k = -0.6$ (0.240%)

圖 D-5 Wenner 反算結果(單一水平界面, $Z_i=10\text{m}$)



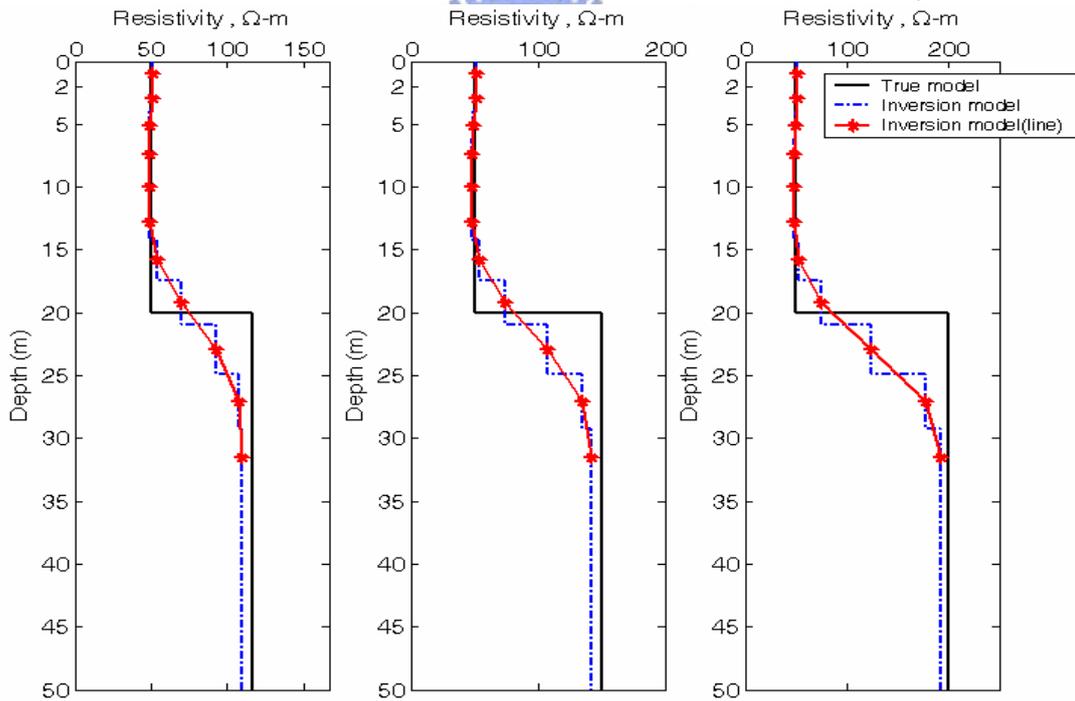
(a) $k = -0.7$ (0.256%) (b) $k = -0.8$ (0.344%) (c) $k = -0.9$ (13.817%)

圖 D-6 Wenner 反算結果(單一水平界面, $Z_i=10\text{m}$)



(a) $k=0.1$ (Abs. error = 0.191%) (b) $k=0.2$ (0.201%) (c) $k=0.3$ (0.217%)

圖 D-7 Wenner 反算結果(單一水平界面, $Z_i=20\text{m}$)



(a) $k=0.4$ (0.217%) (b) $k=0.5$ (0.227%) (c) $k=0.6$ (0.244%)

圖 D-8 Wenner 反算結果(單一水平界面, $Z_i=20\text{m}$)

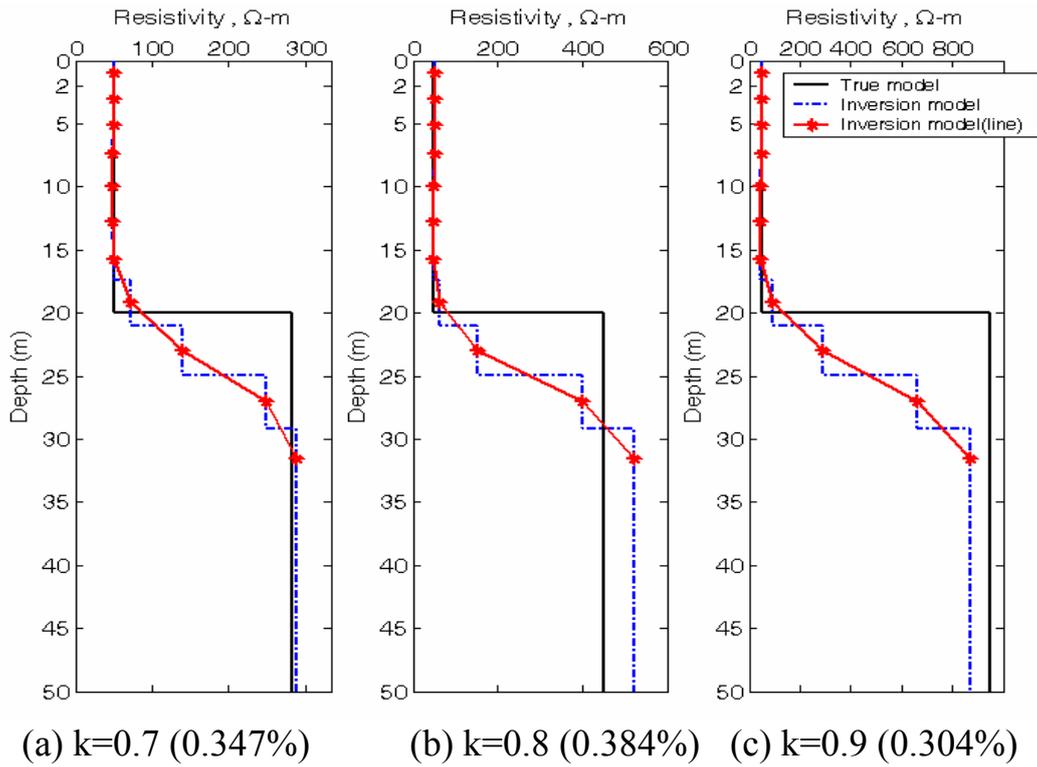


圖 D-9 Wenner 反算結果(單一水平界面, $Z_i=20m$)

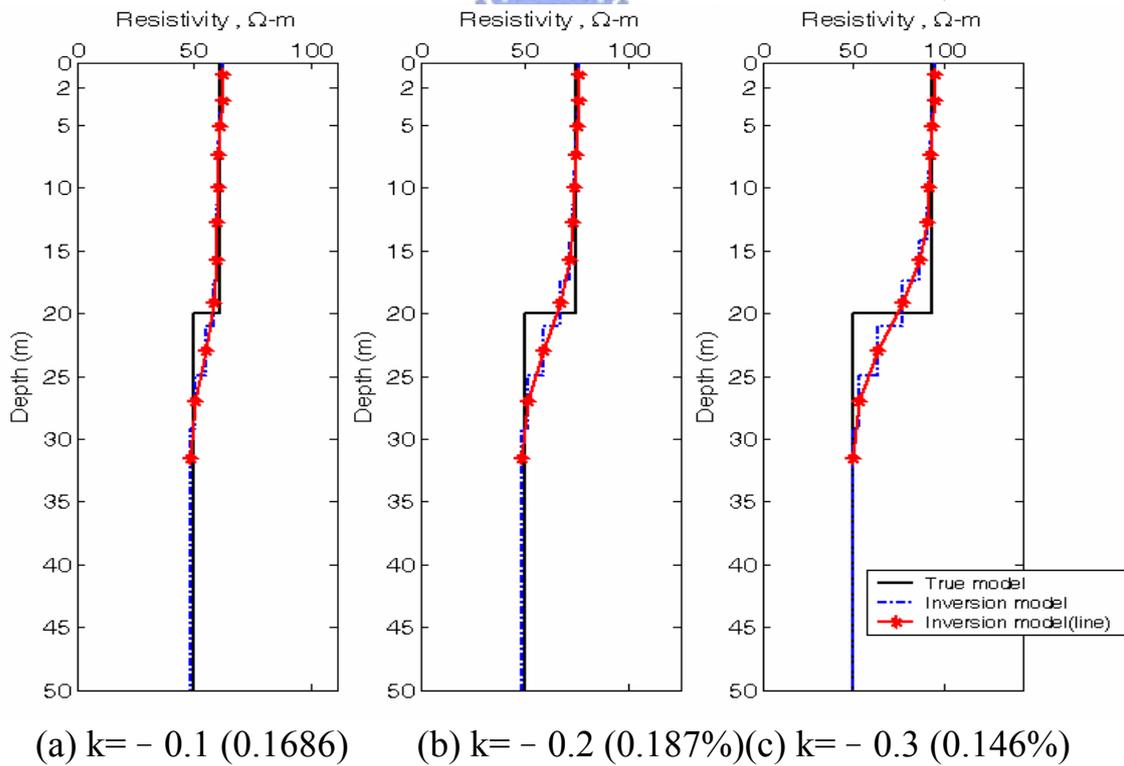
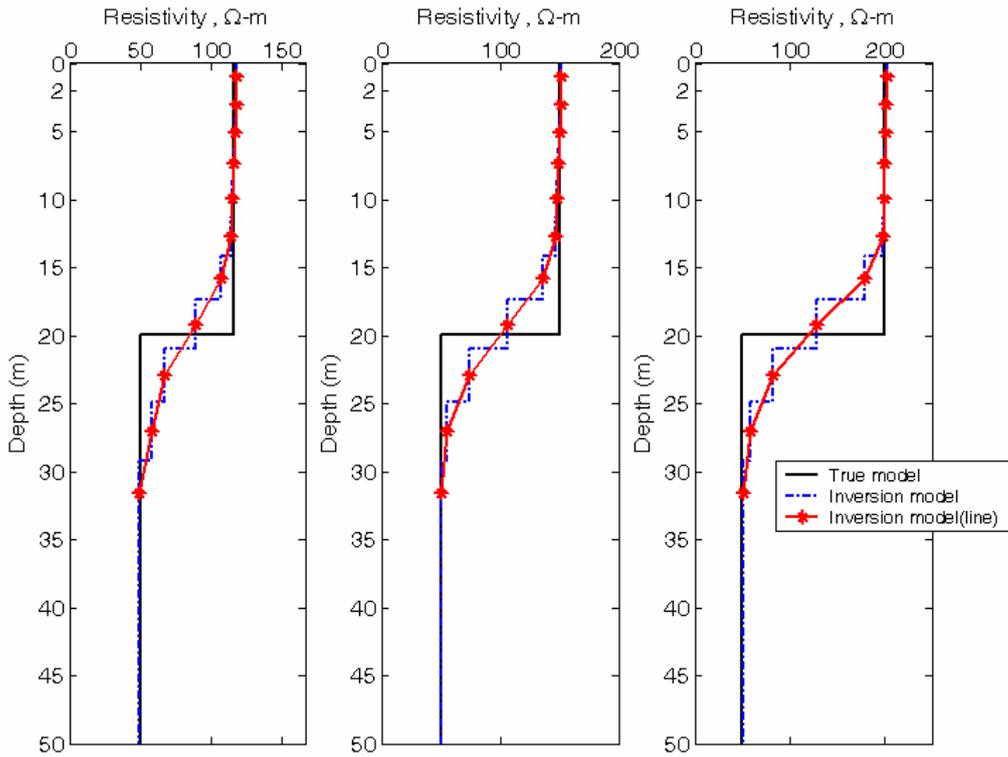
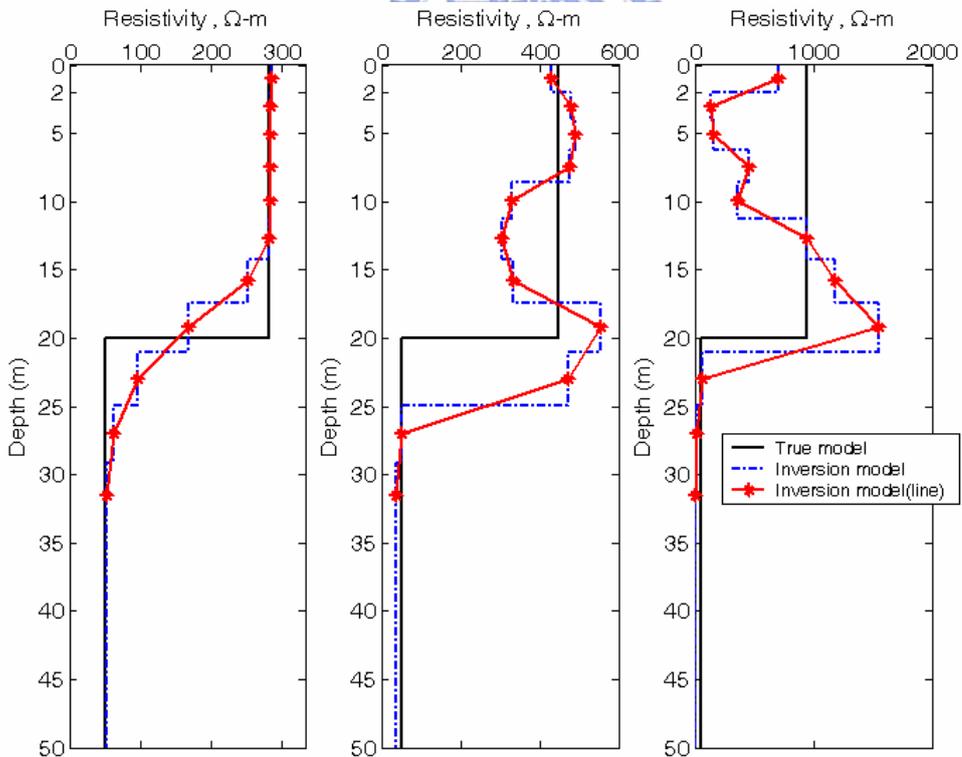


圖 D-10 Wenner 反算結果(單一水平界面, $Z_i=20m$)



(a) $k = -0.4$ (0.185%) (b) $k = -0.5$ (0.263%) (c) $k = -0.6$ (0.350%)

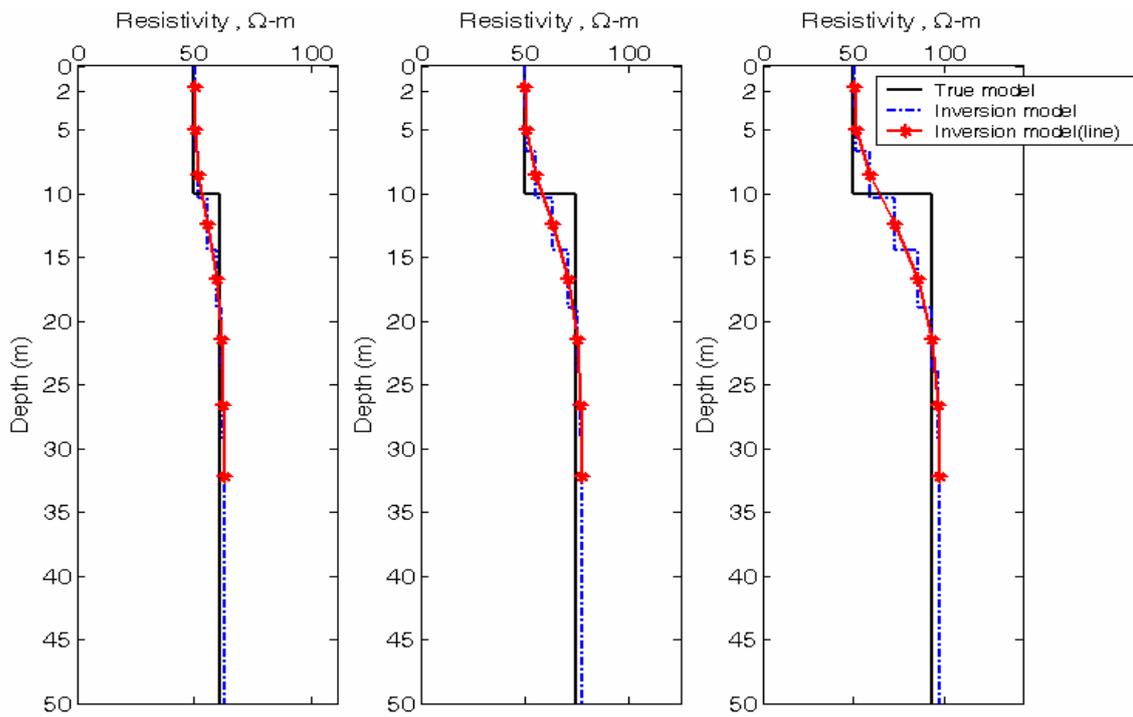
圖 D-11 Wenner 反算結果(單一水平界面, $Z_i=20\text{m}$)



(a) $k = -0.7$ (0.651%) (b) $k = -0.8$ (4.909%) (c) $k = -0.9$ (7.574%)

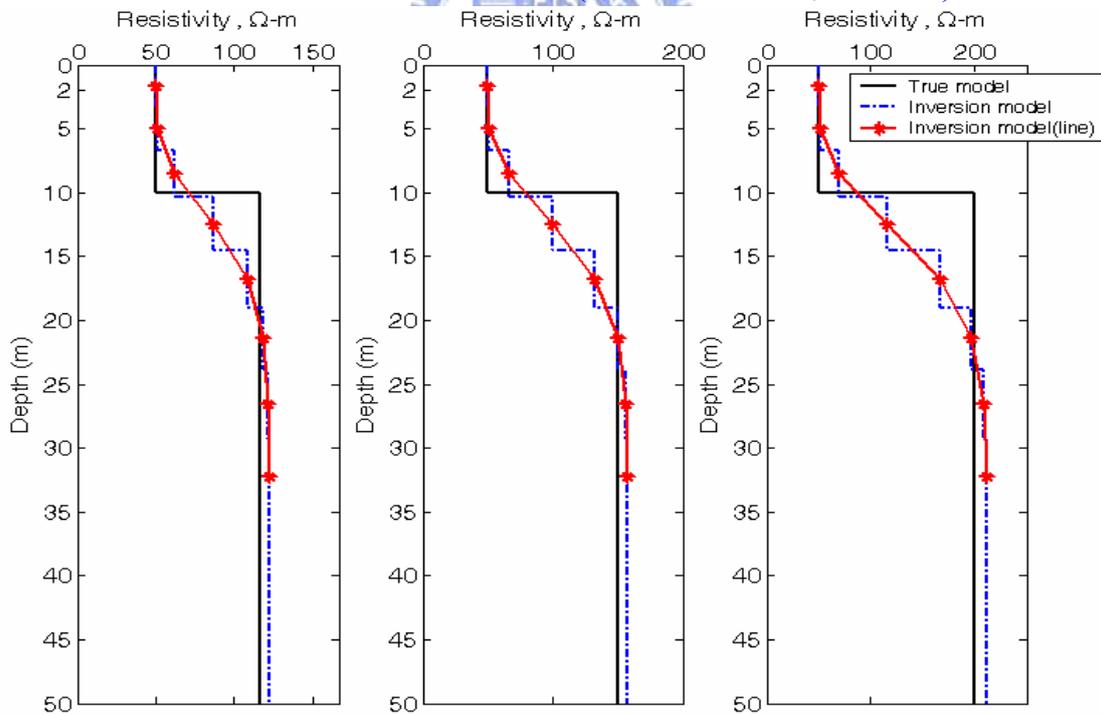
圖 D-12 Wenner 反算結果(單一水平界面, $Z_i=10\text{m}$)

附錄 E-單一水平界面 Pole-Pole 反算結果



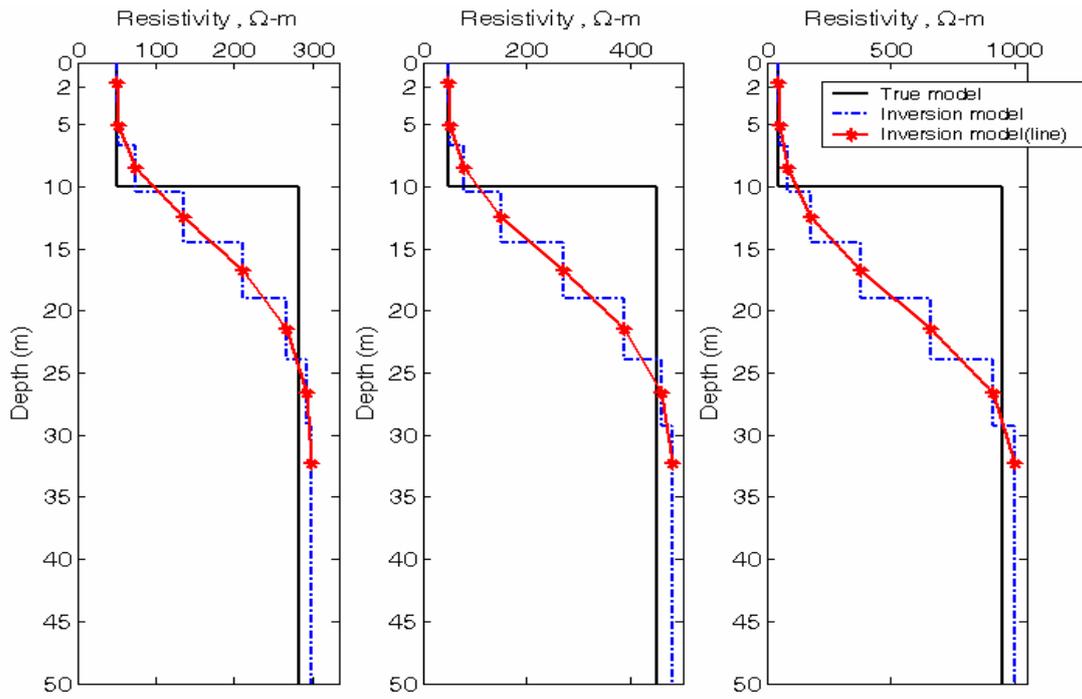
(a) $k=0.1$ (Abs. error = 0.04%) (b) $k=0.2$ (0.098%) (c) $k=0.3$ (0.156%)

圖 E-1 Pole-Pole 反算結果(單一水平界面, $Z_i=10\text{m}$)

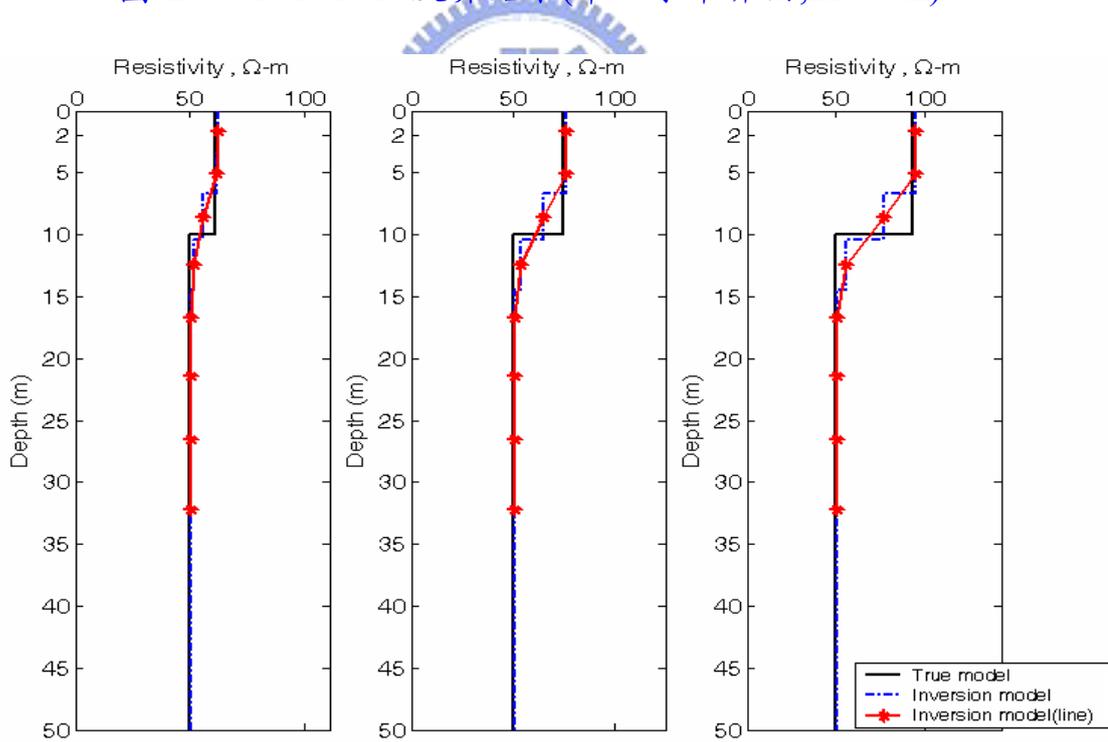


(a) $k=0.4$ (0.100%) (b) $k=0.5$ (0.216%) (c) $k=0.6$ (0.196%)

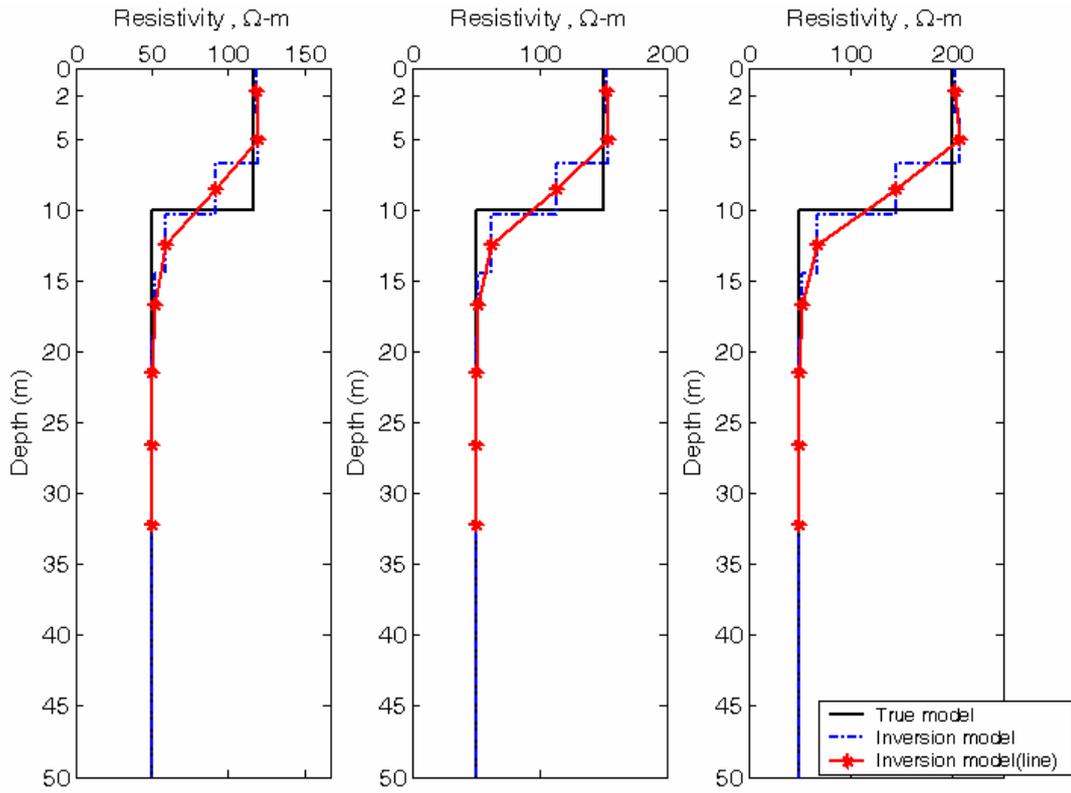
圖 E-2 Pole-Pole 反算結果(單一水平界面, $Z_i=10\text{m}$)



(a) $k=0.7(0.250\%)$ (b) $k=0.8(0.522\%)$ (c) $k=0.9(0.360\%)$
 圖 E-3 Pole-Pole 反算結果(單一水平界面, $Z_i=10m$)

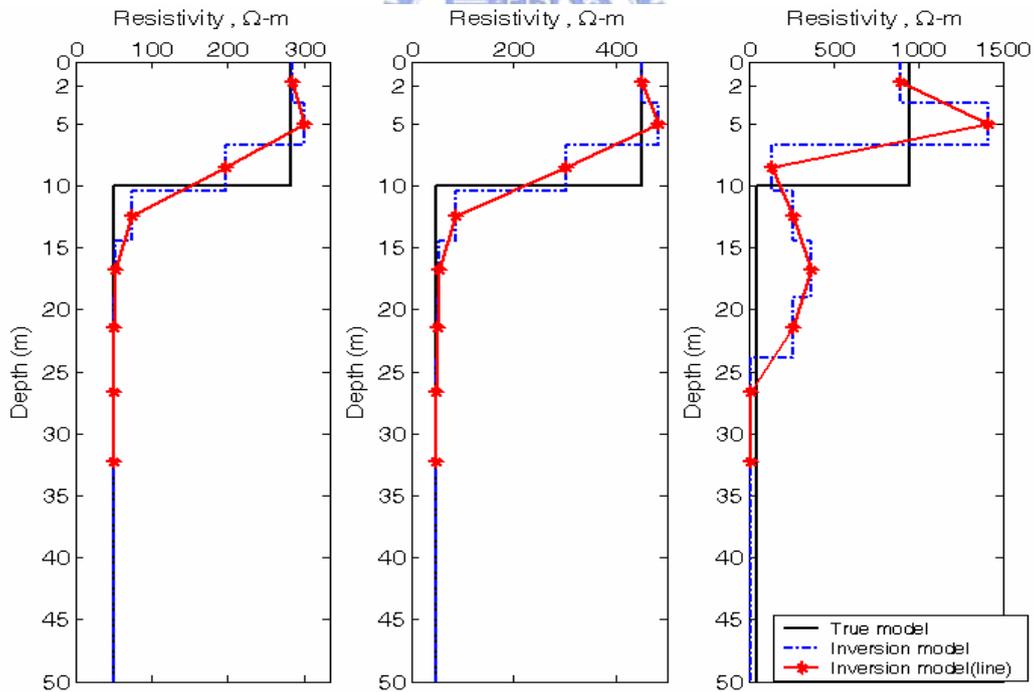


(a) $k=-0.1(0.159\%)$ (b) $k=-0.2(0.234\%)$ (c) $k=-0.3(0.312\%)$
 圖 E-4 Pole-Pole 反算結果(單一水平界面, $Z_i=10m$)



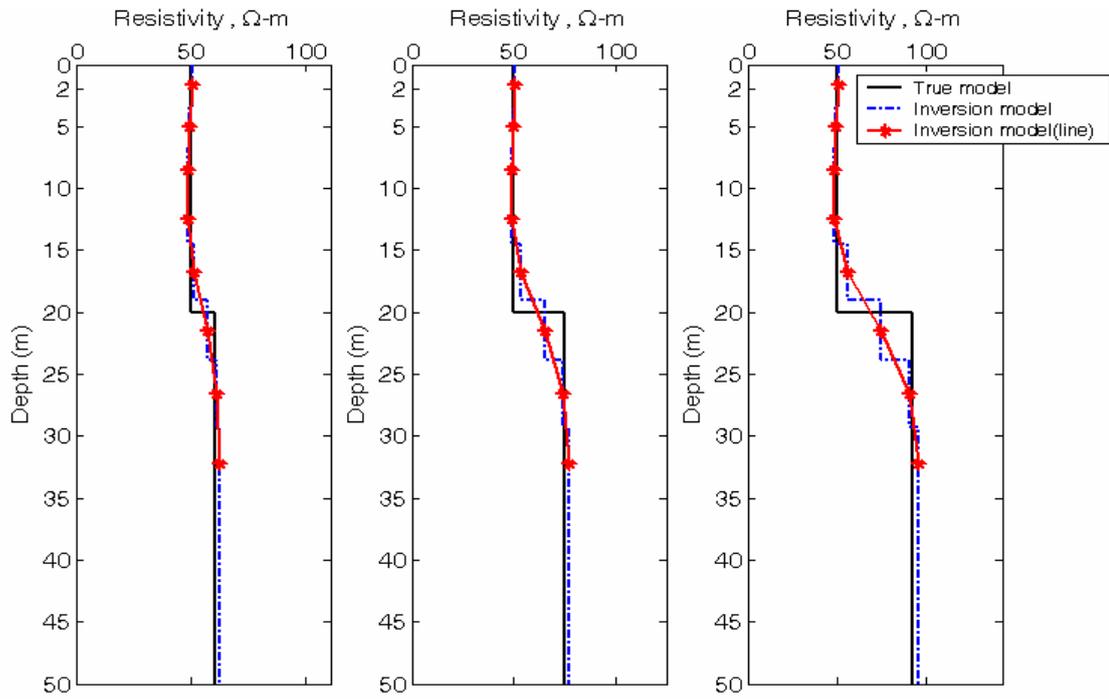
(a) $k=-0.4(0.370\%)$ (b) $k=-0.5(0.444\%)$ (c) $k=-0.6(0.522\%)$

圖 E-5 Pole-Pole 反算結果(單一水平界面, $Z_i=10m$)



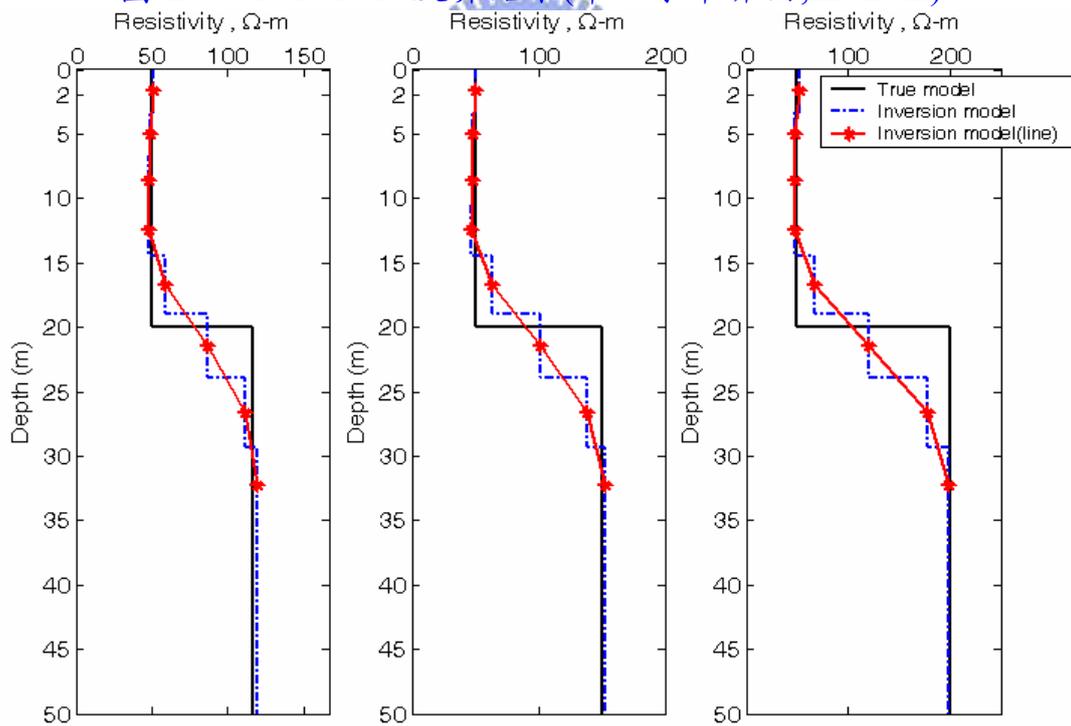
(a) $k=-0.7(0.610\%)$ (b) $k=-0.8(0.735\%)$ (c) $k=-0.9(8.739\%)$

圖 E-6 Pole-Pole 反算結果(單一水平界面, $Z_i=10m$)



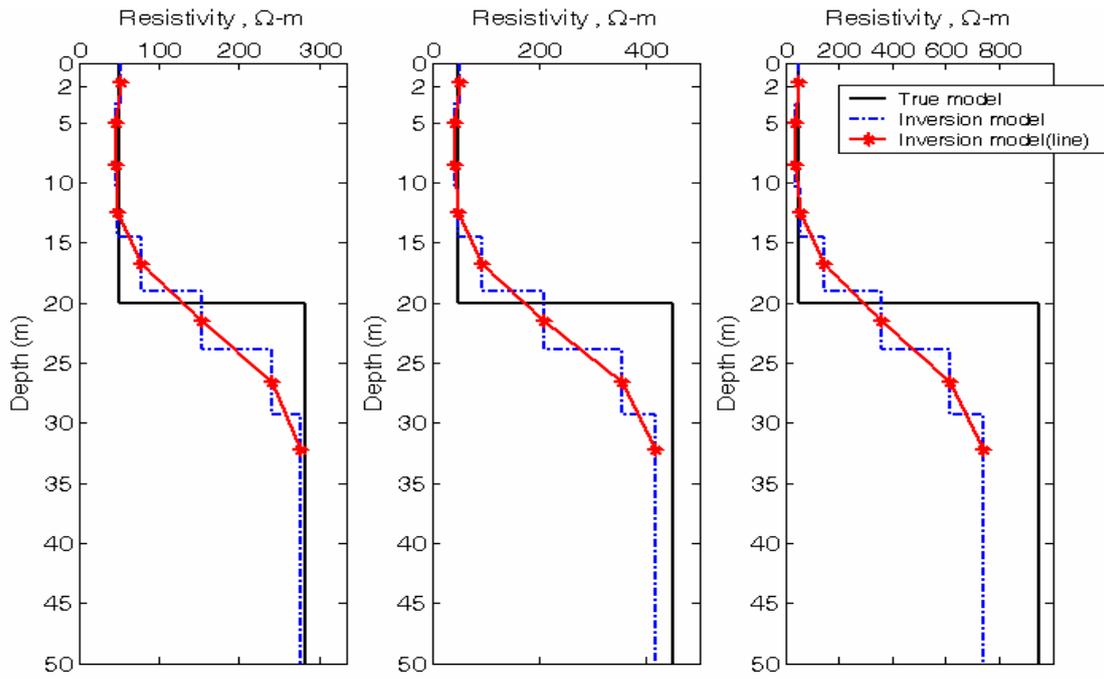
(a) $k=0.1(0.188\%)$ (b) $k=0.2(0.244\%)$ (c) $k=0.3(0.208\%)$

圖 E-7 Pole-Pole 反算結果(單一水平界面, $Z_i=20m$)

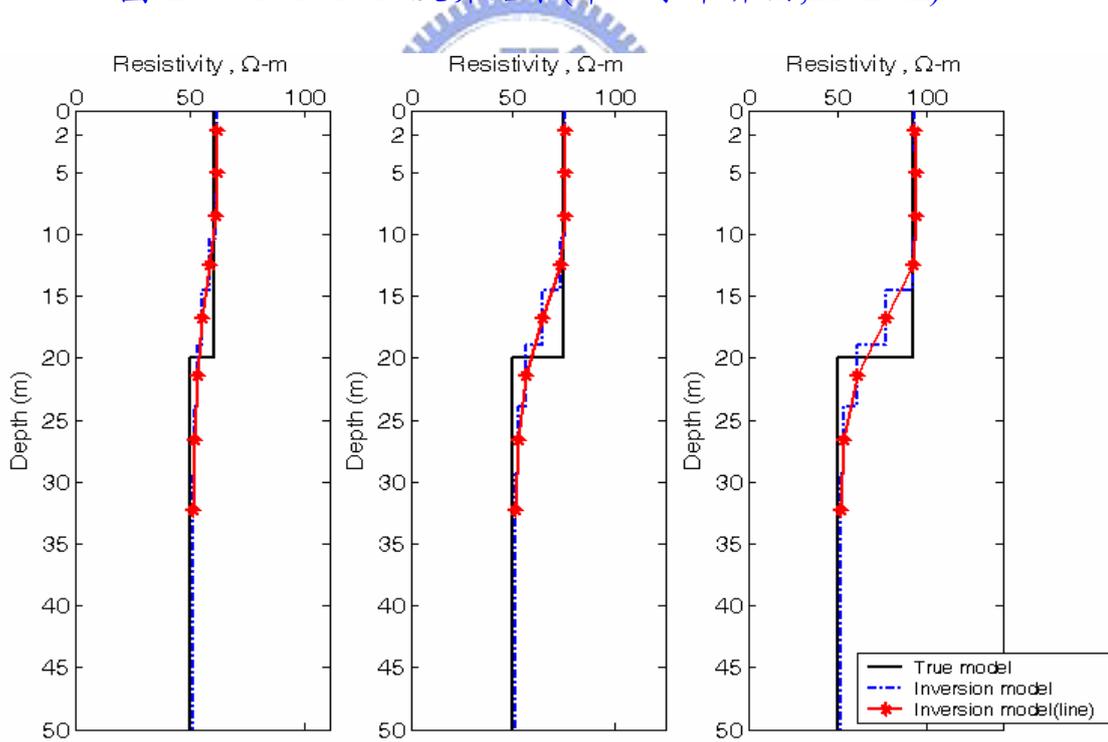


(a) $k=0.4(0.173\%)$ (b) $k=0.5(0.281\%)$ (c) $k=0.6(0.249\%)$

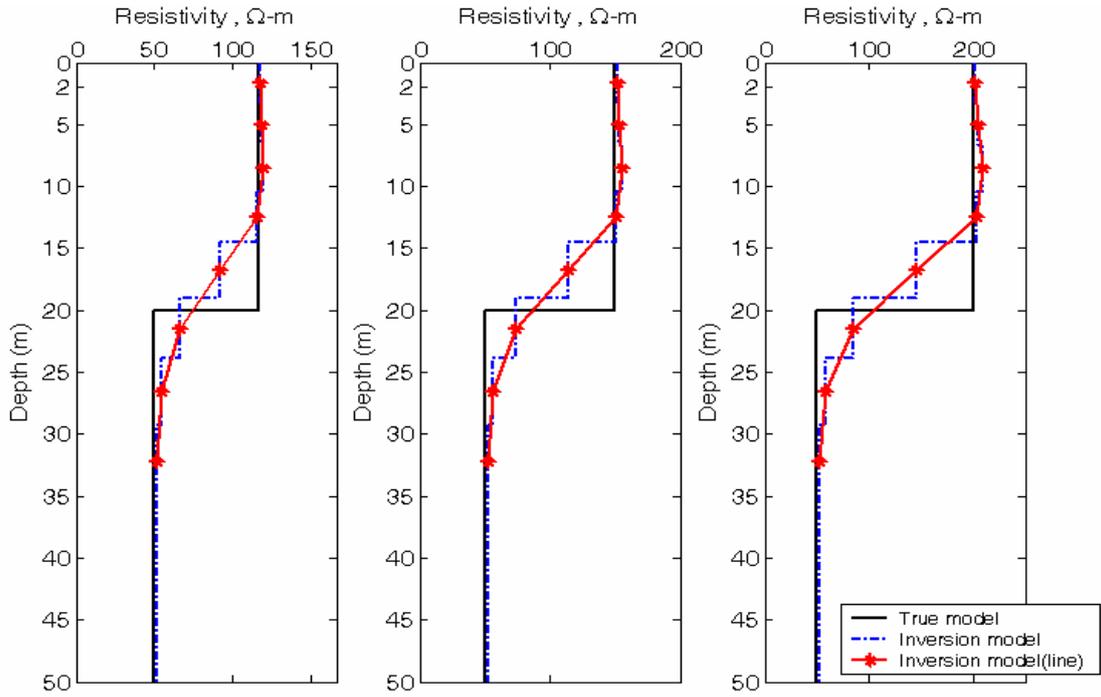
圖 E-8 Pole-Pole 反算結果(單一水平界面, $Z_i=20m$)



(a) $k=0.7(0.483\%)$ (b) $k=0.8(0.866\%)$ (c) $k=0.9(1.977\%)$
 圖 E-9 Pole-Pole 反算結果(單一水平界面, $Z_i=20m$)

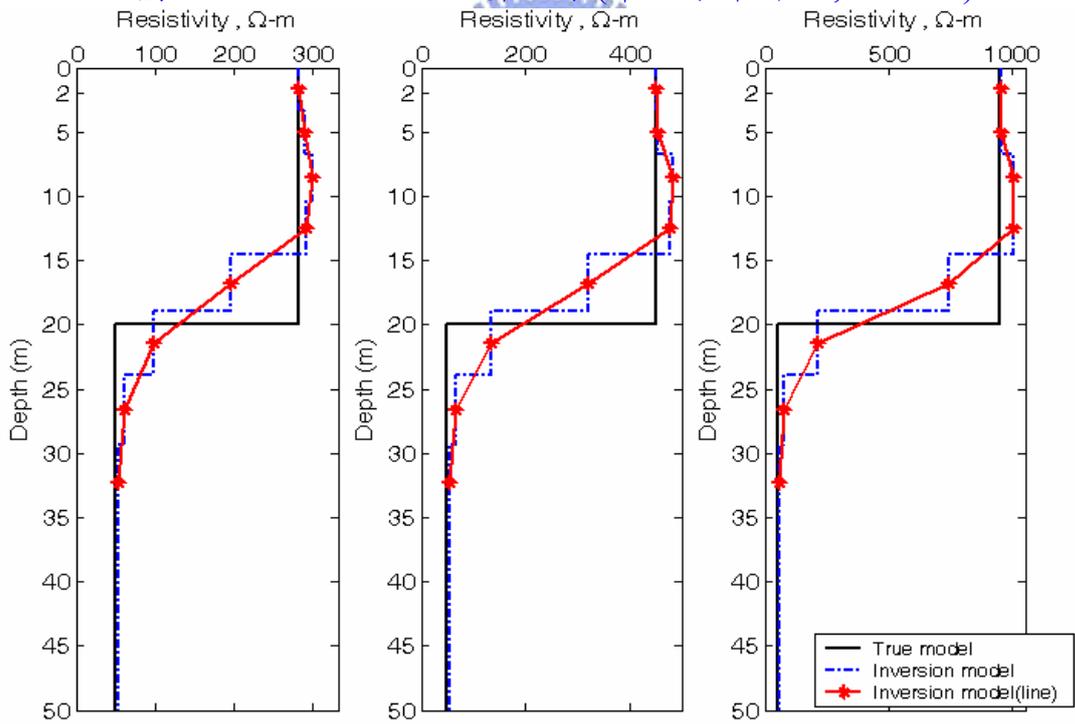


(a) $k=-0.1(0.048\%)$ (b) $k=-0.2(0.078\%)$ (c) $k=-0.3(0.183\%)$
 圖 E-10 Pole-Pole 反算結果(單一水平界面, $Z_i=20m$)



(a) $k=-0.4(0.261\%)$ (b) $k=-0.5(0.342\%)$ (c) $k=-0.6(0.448\%)$

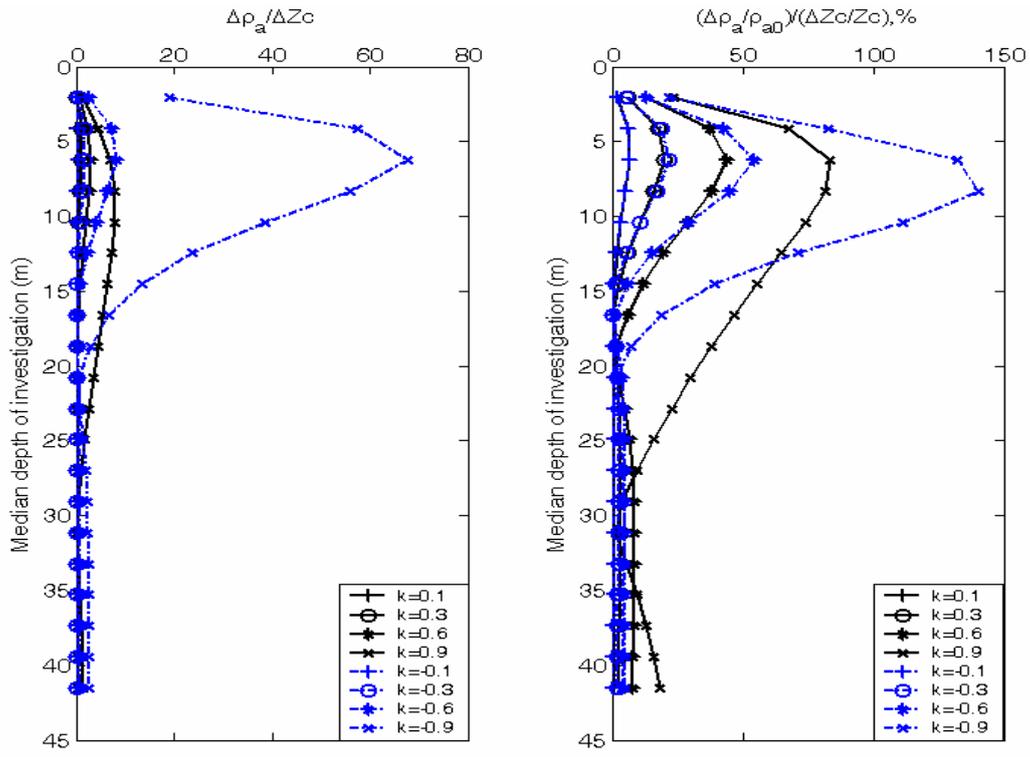
圖 E-11 Pole-Pole 反算結果(單一水平界面, $Z_i=20\text{m}$)



(a) $k=-0.7(0.548\%)$ (b) $k=-0.8(0.272\%)$ (c) $k=-0.9(0.241\%)$

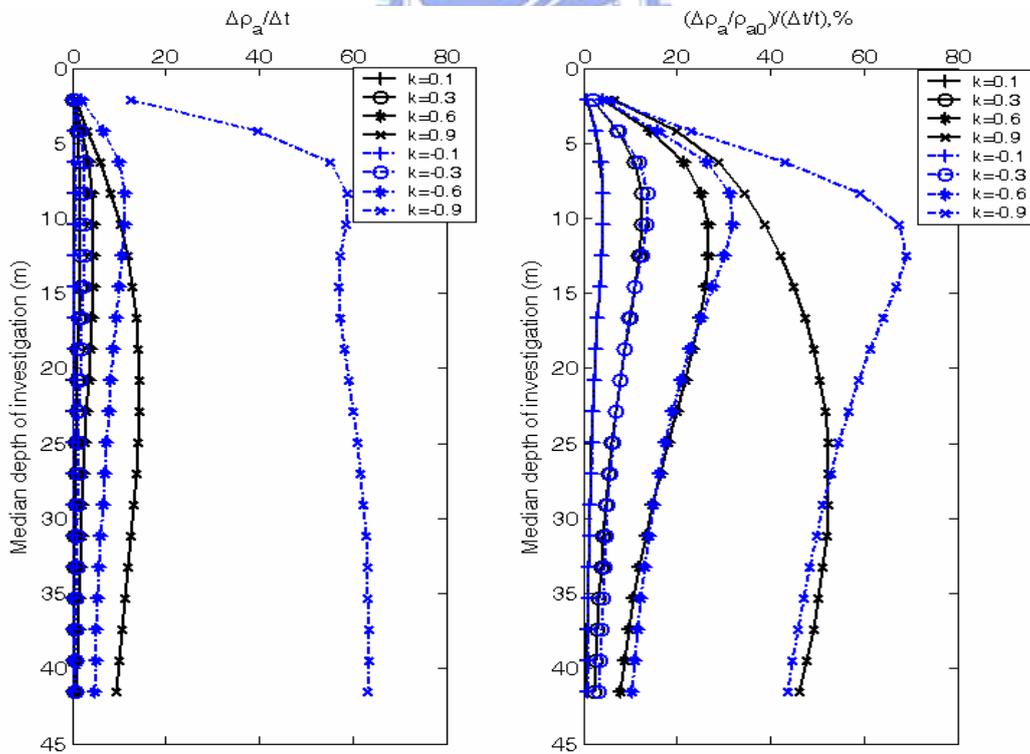
圖 E-12 Pole-Pole 反算結果(單一水平界面, $Z_i=20\text{m}$)

附錄 F-水平夾層界面靈敏度探討



(a) $S_{\Delta Zc}$

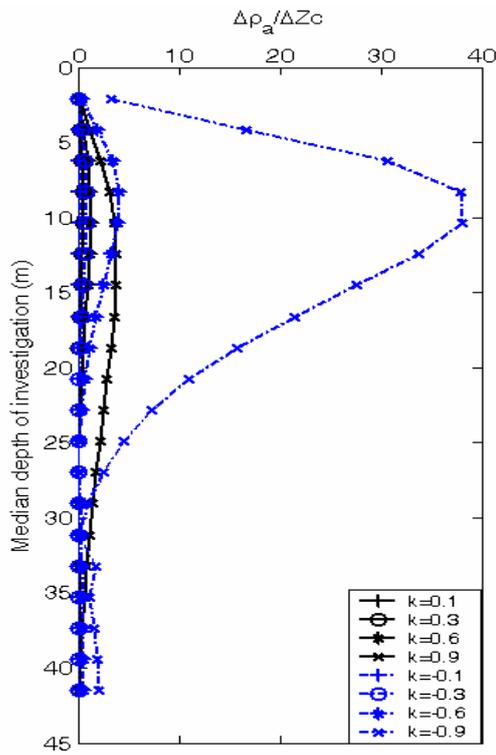
(b) $S_{N, \Delta Zc}$



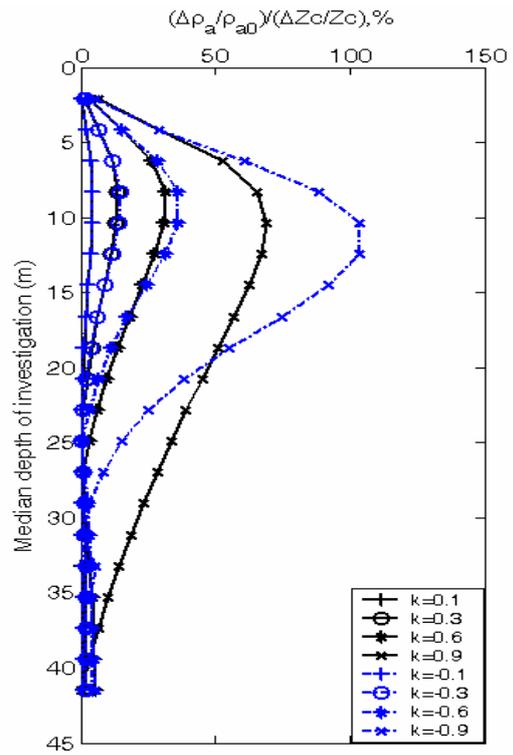
(c) $S_{\Delta t}$

(d) $S_{N, \Delta t}$

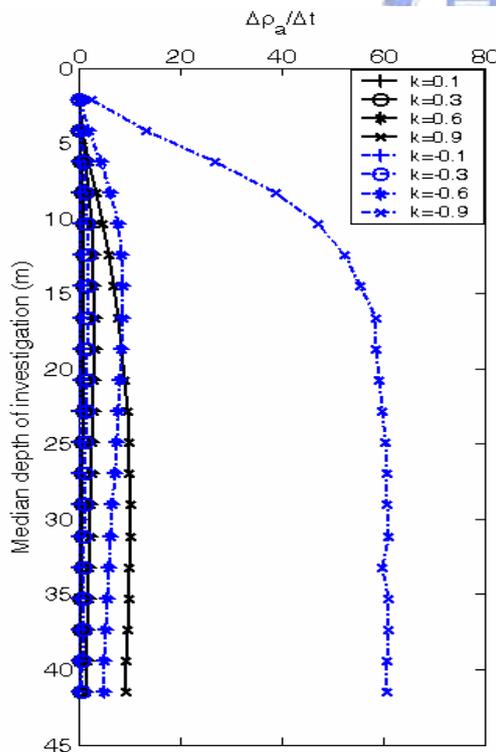
圖 F-1 Wenner 靈敏度(夾層中心等於 10 公尺，厚度等於 4 公尺)



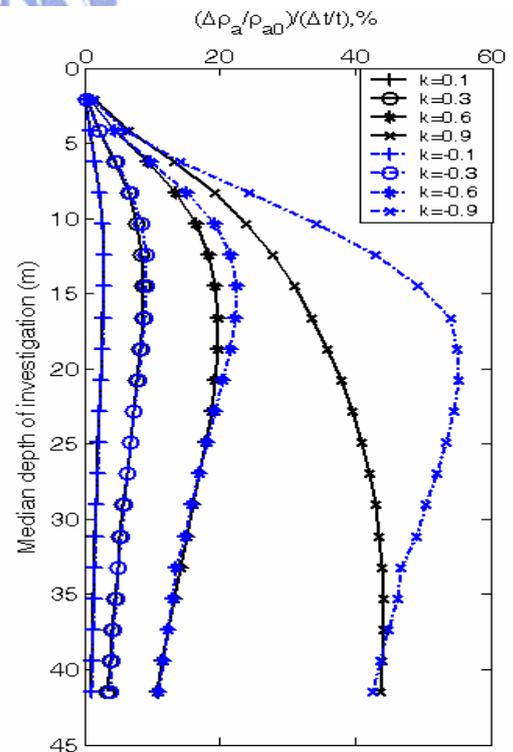
(a) $S_{\Delta Zc}$



(b) $S_{N, \Delta Zc}$

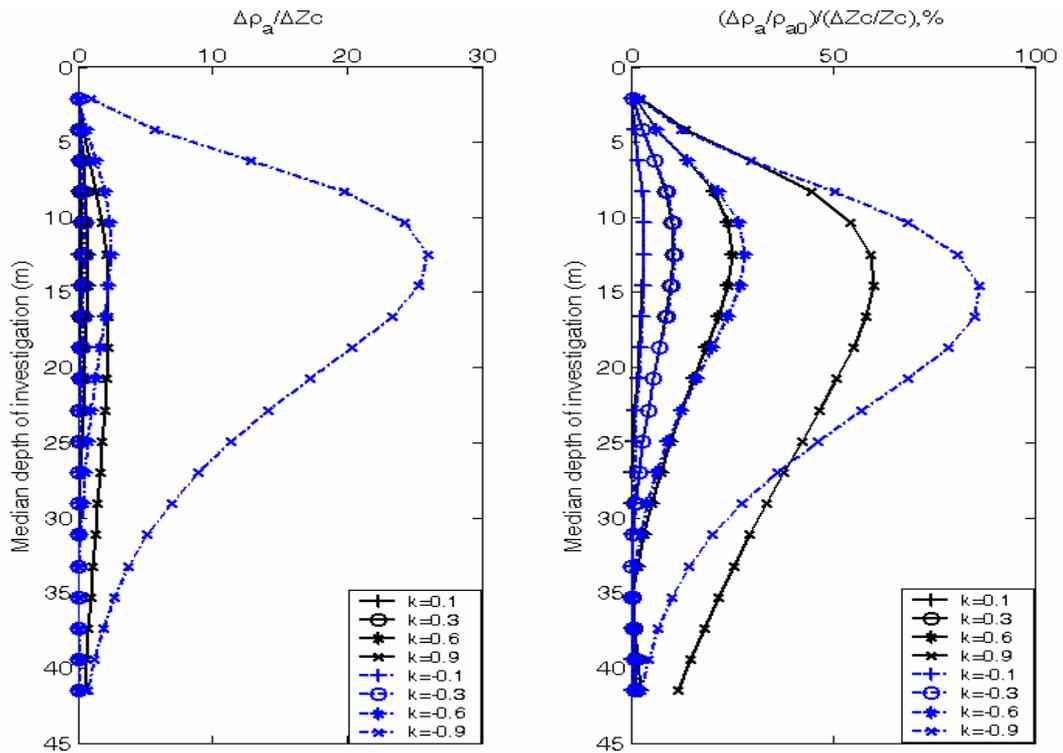


(c) $S_{\Delta t}$



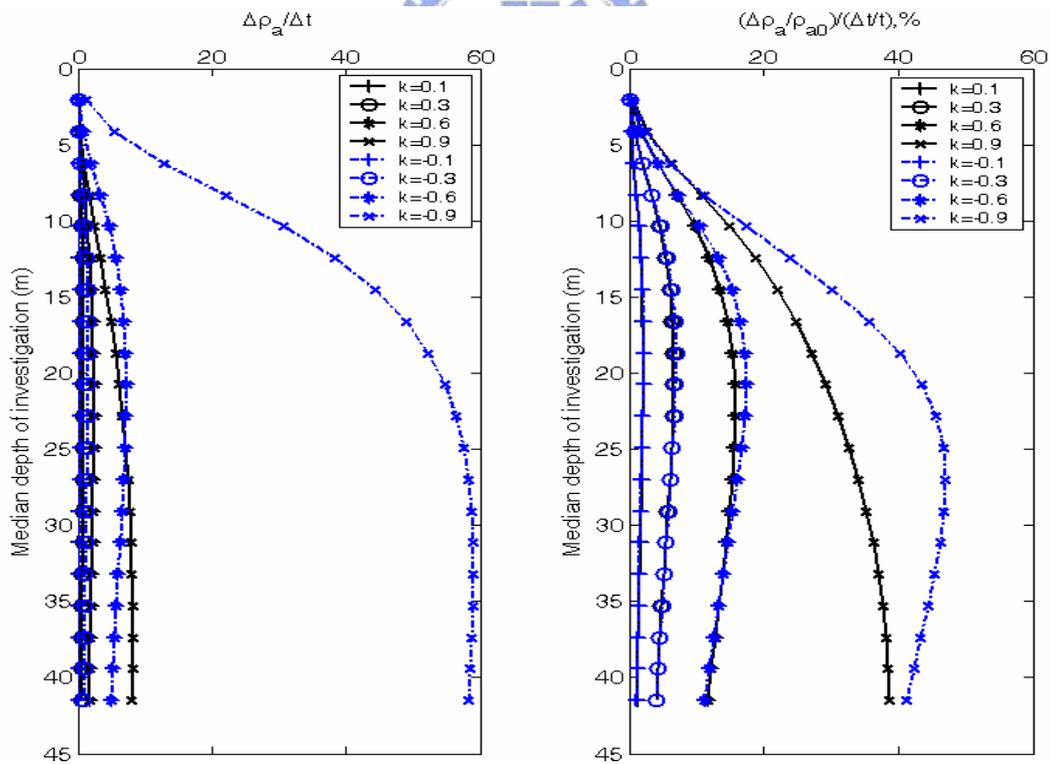
(d) $S_{N, \Delta t}$

圖 F-2 Wenner 靈敏度(夾層中心等於 15 公尺，厚度等於 4 公尺)



(a) $S_{\Delta Zc}$

(b) $S_{N, \Delta Zc}$



(c) $S_{\Delta t}$

(d) $S_{N, \Delta t}$

圖 F-3 Wenner 靈敏度(夾層中心等於 20 公尺，厚度等於 4 公尺)

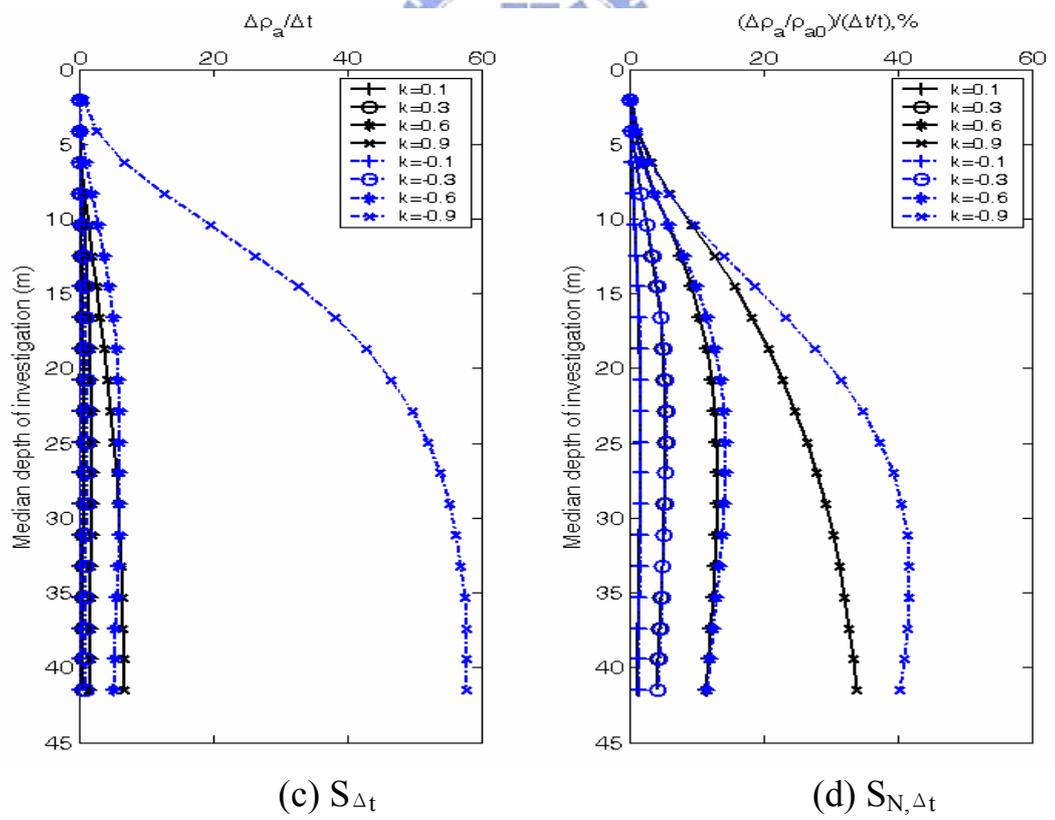
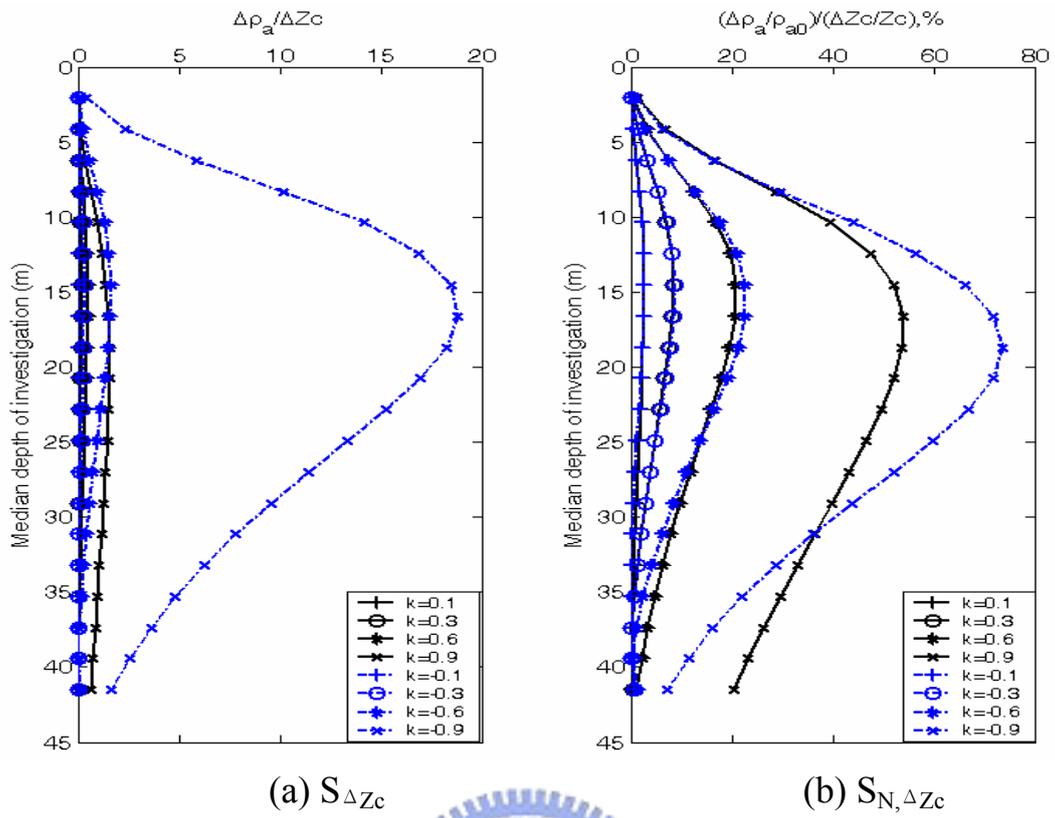


圖 F-4 Wenner 靈敏度(夾層中心等於 25 公尺，厚度等於 4 公尺)

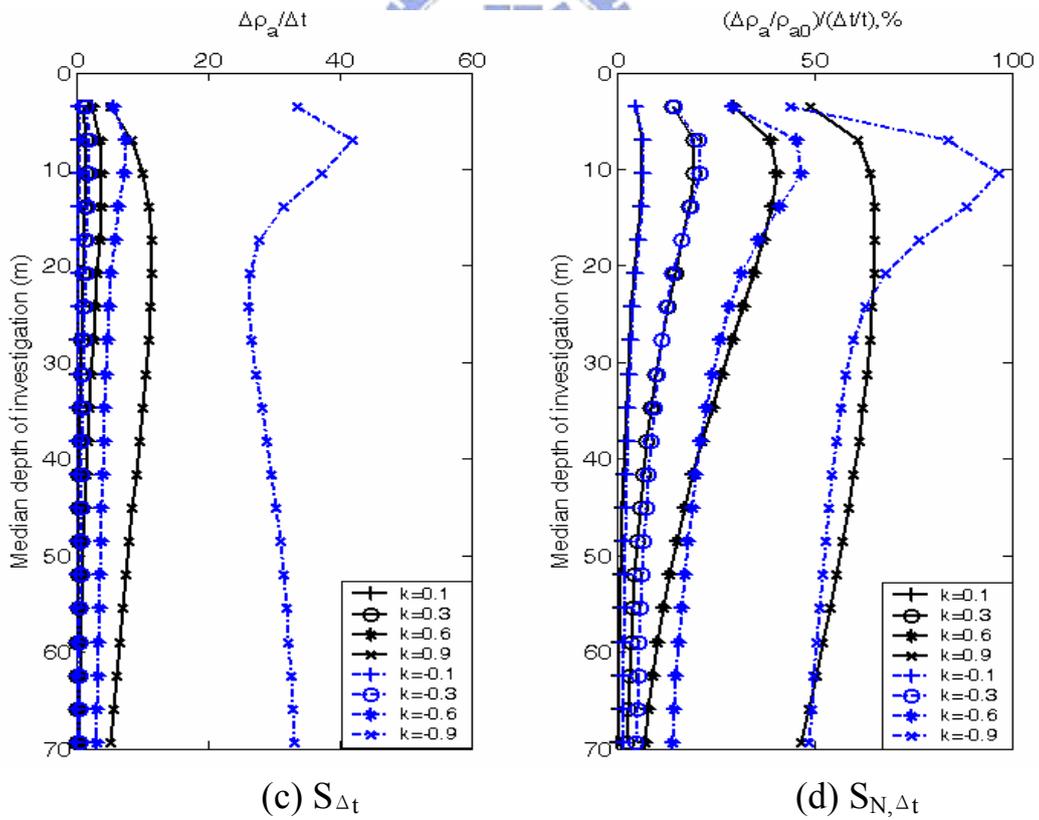
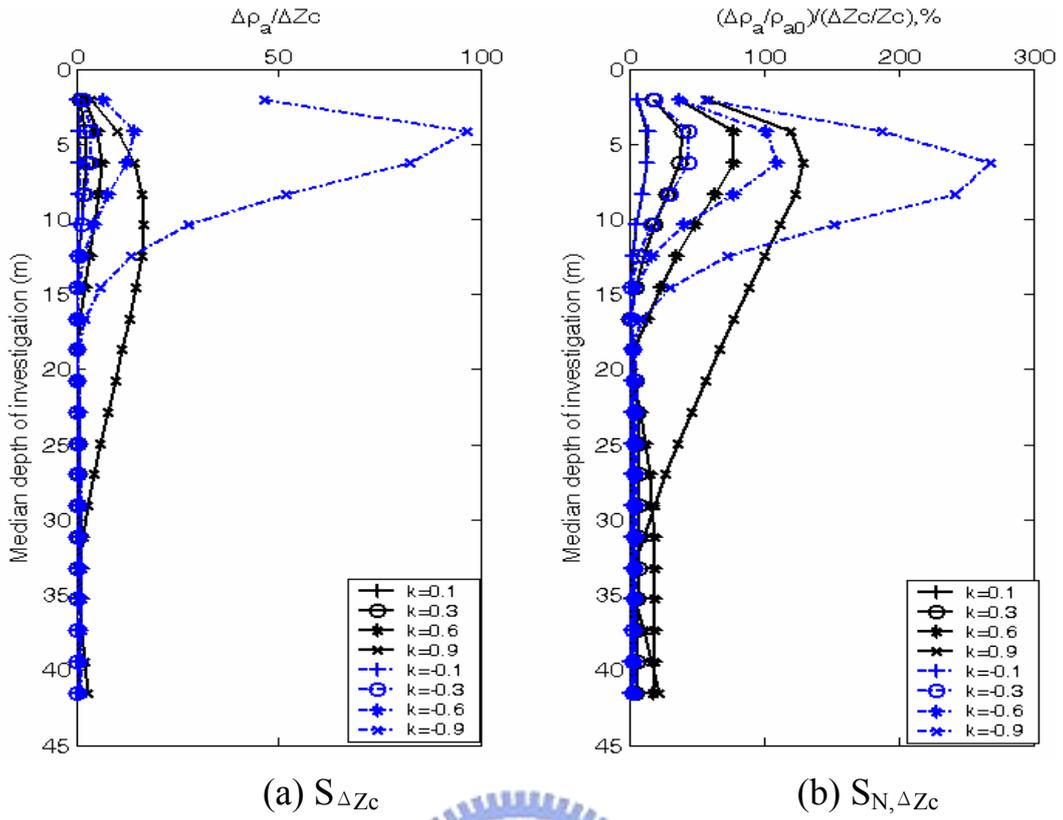


圖 F-5 Wenner 靈敏度(夾層中心等於 10 公尺，厚度等於 8 公尺)

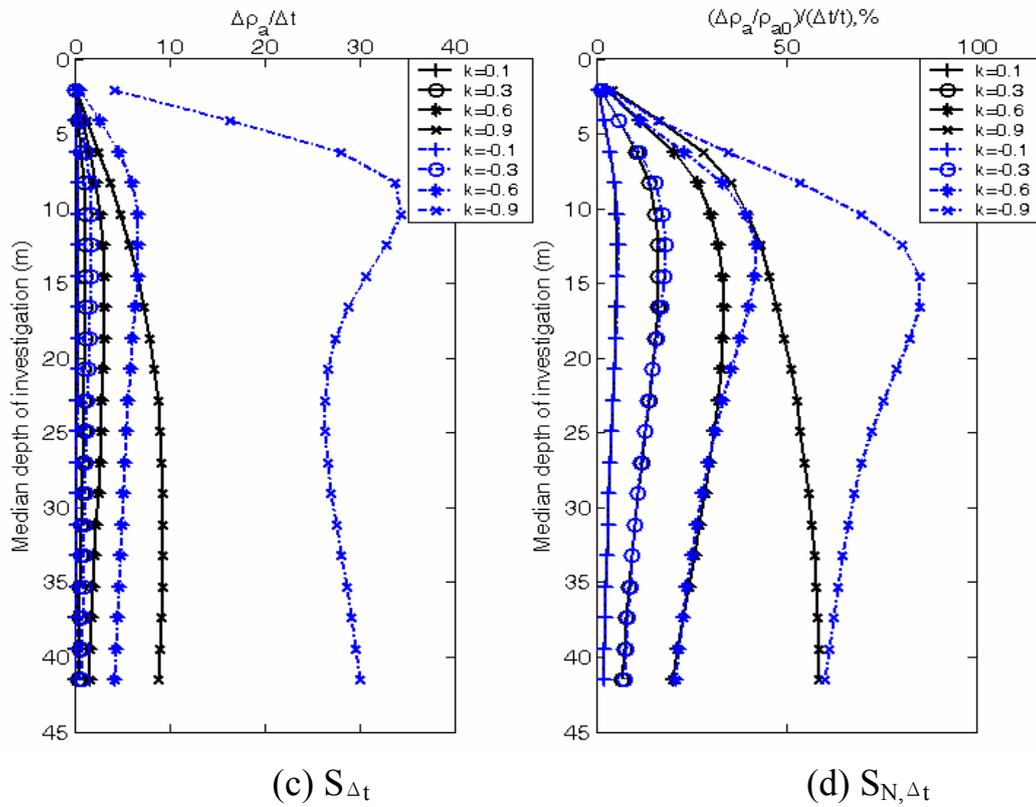
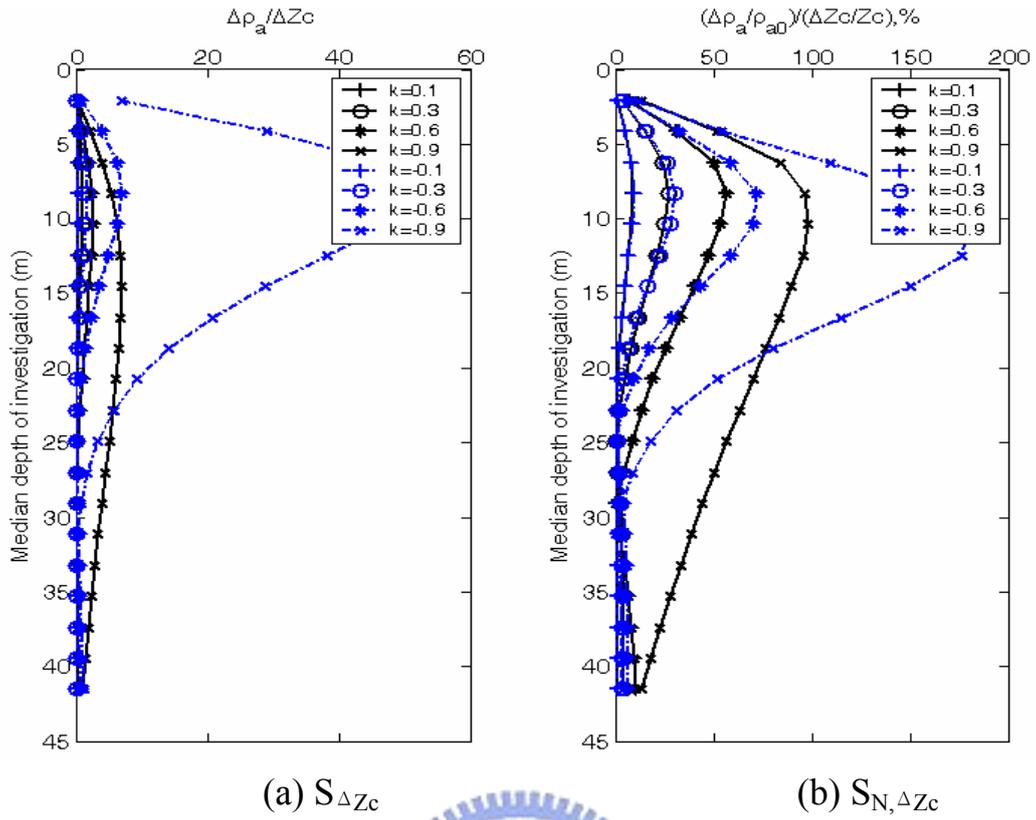


圖 F-6 Wenner 靈敏度(夾層中心等於 15 公尺，厚度等於 8 公尺)

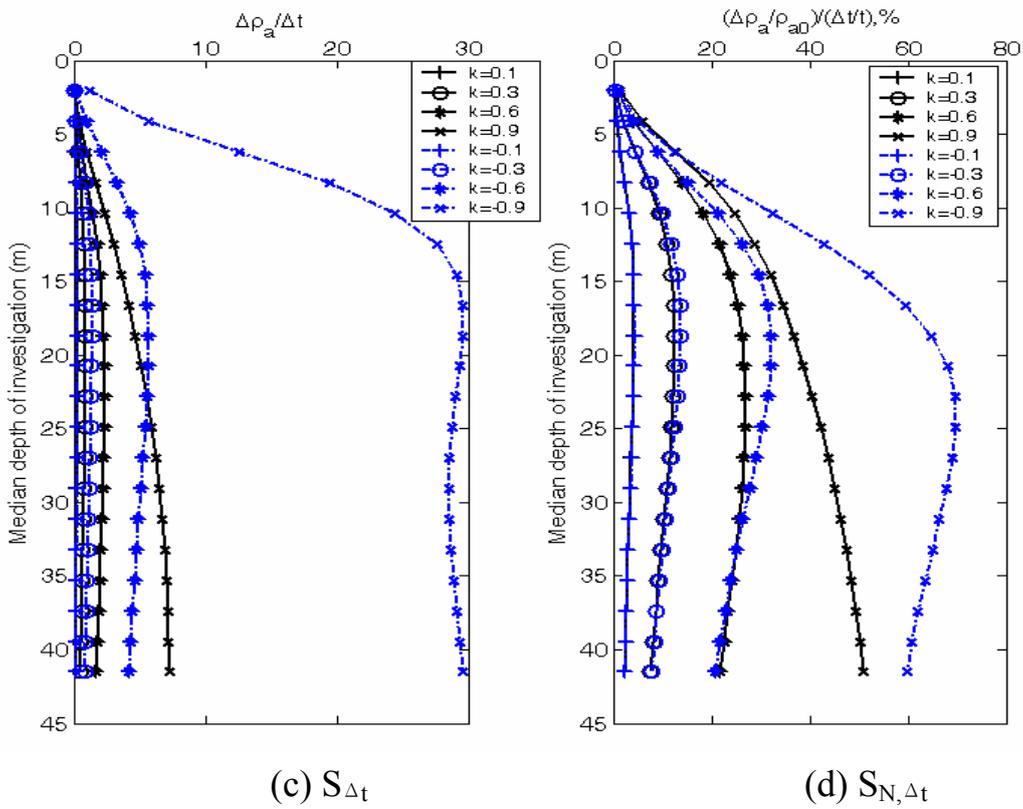
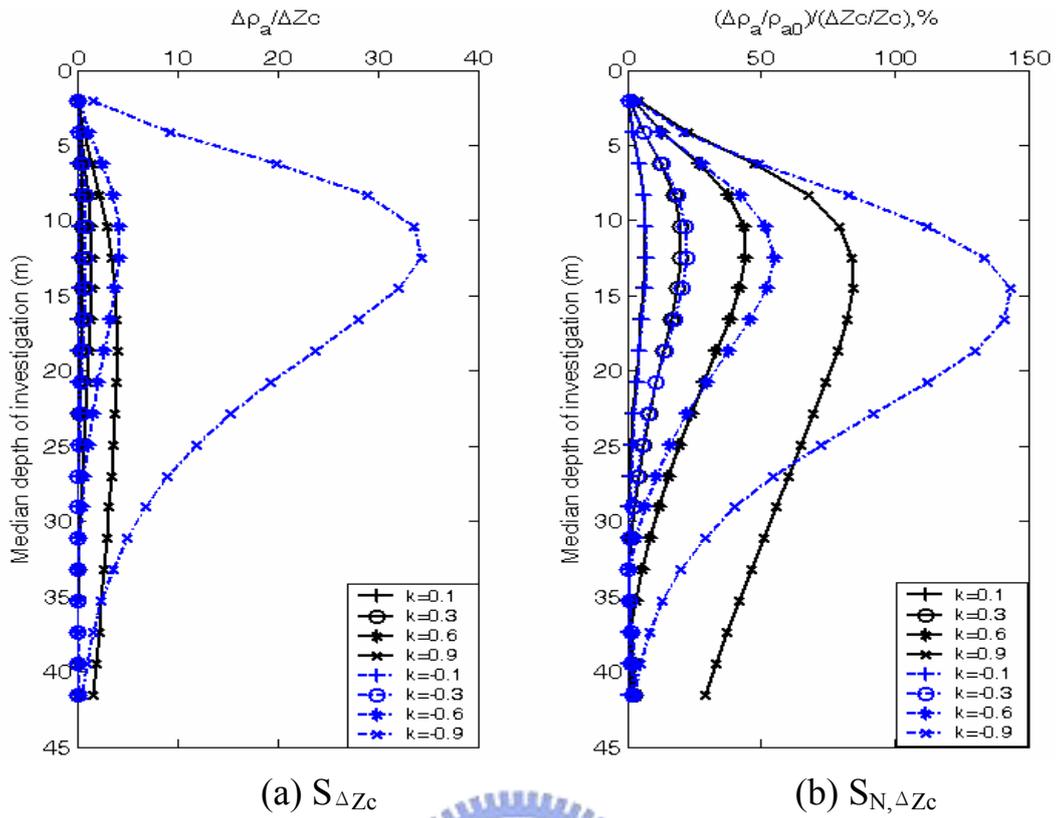


圖 F-7 Wenner 靈敏度(夾層中心等於 20 公尺，厚度等於 8 公尺)

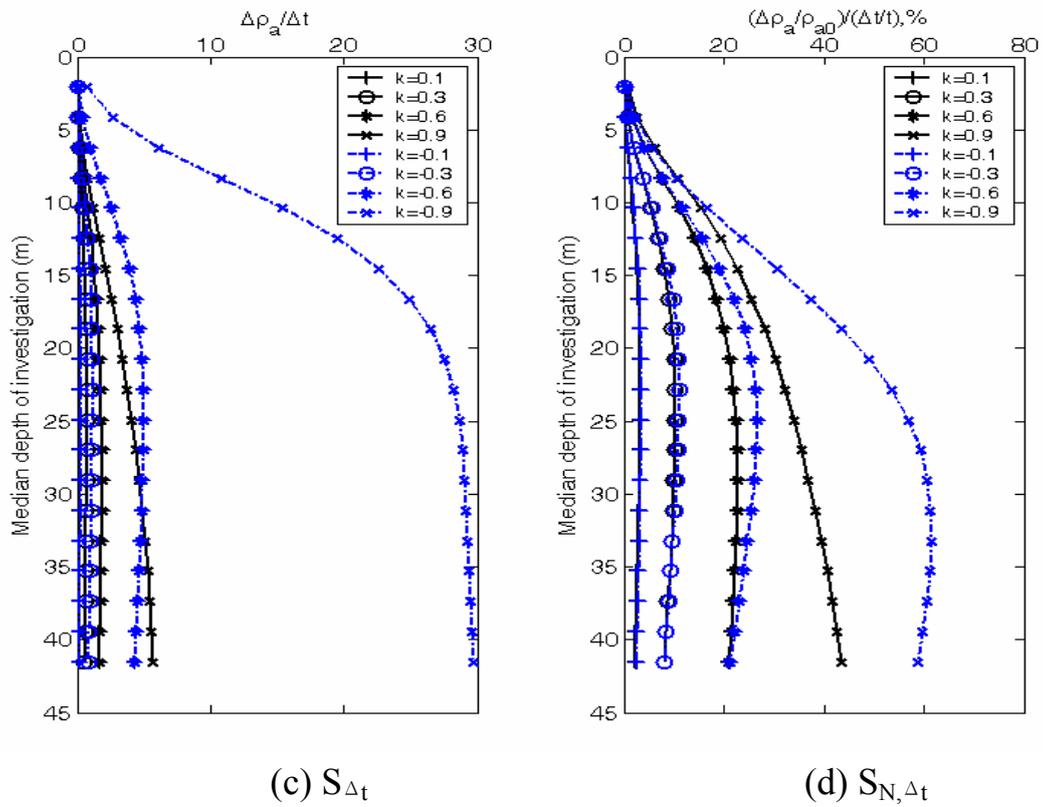
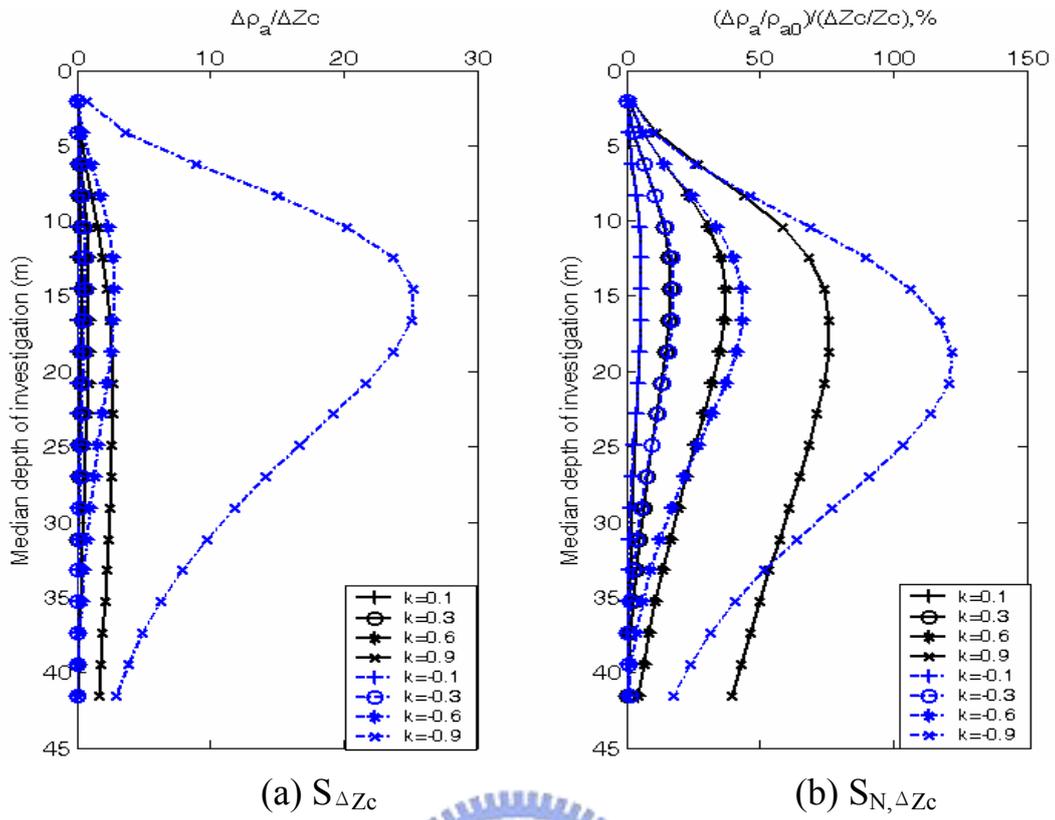
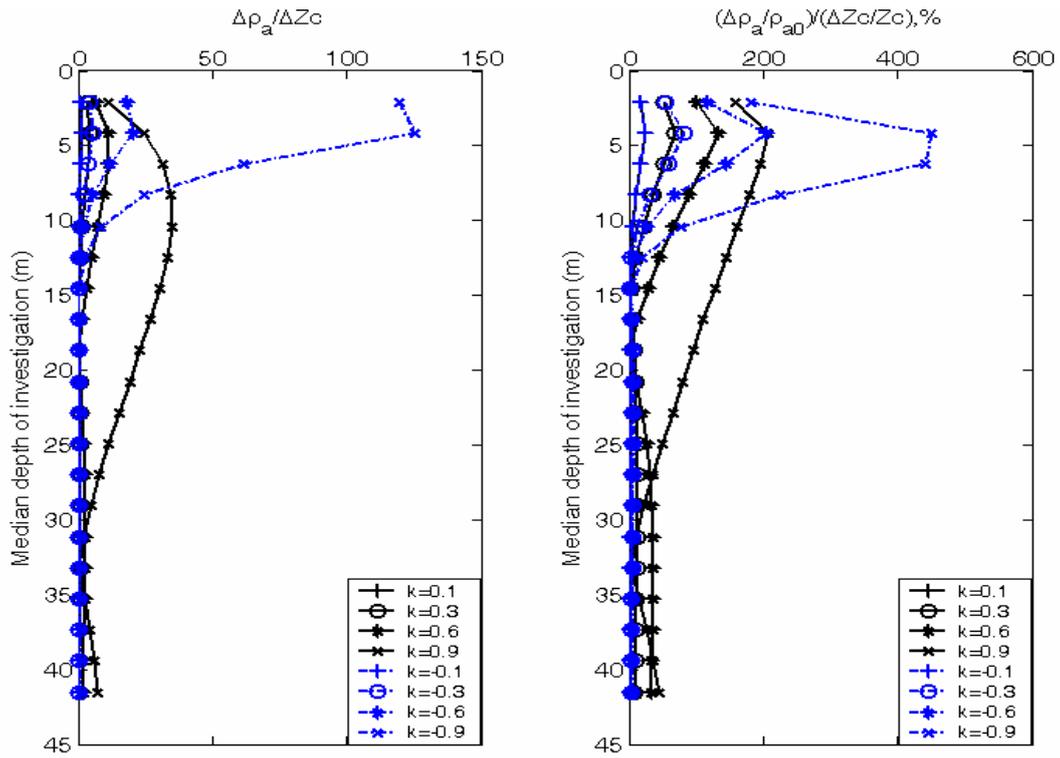
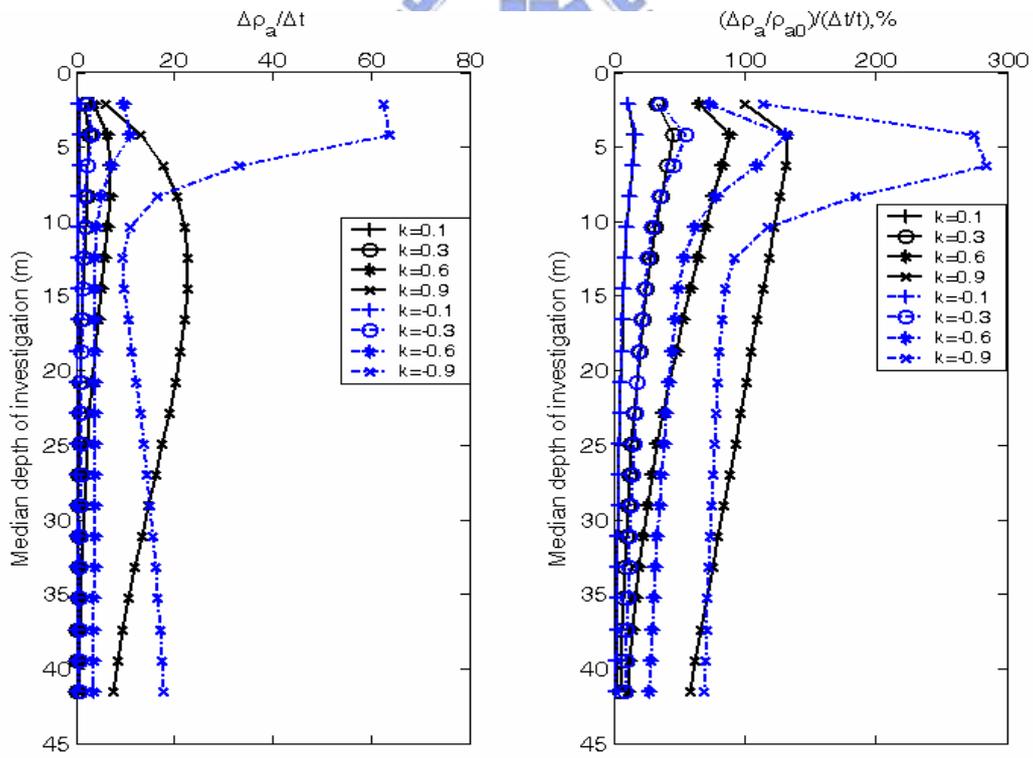


圖 F-8 Wenner 靈敏度(夾層中心等於 25 公尺，厚度等於 8 公尺)



(a) $S_{\Delta Zc}$

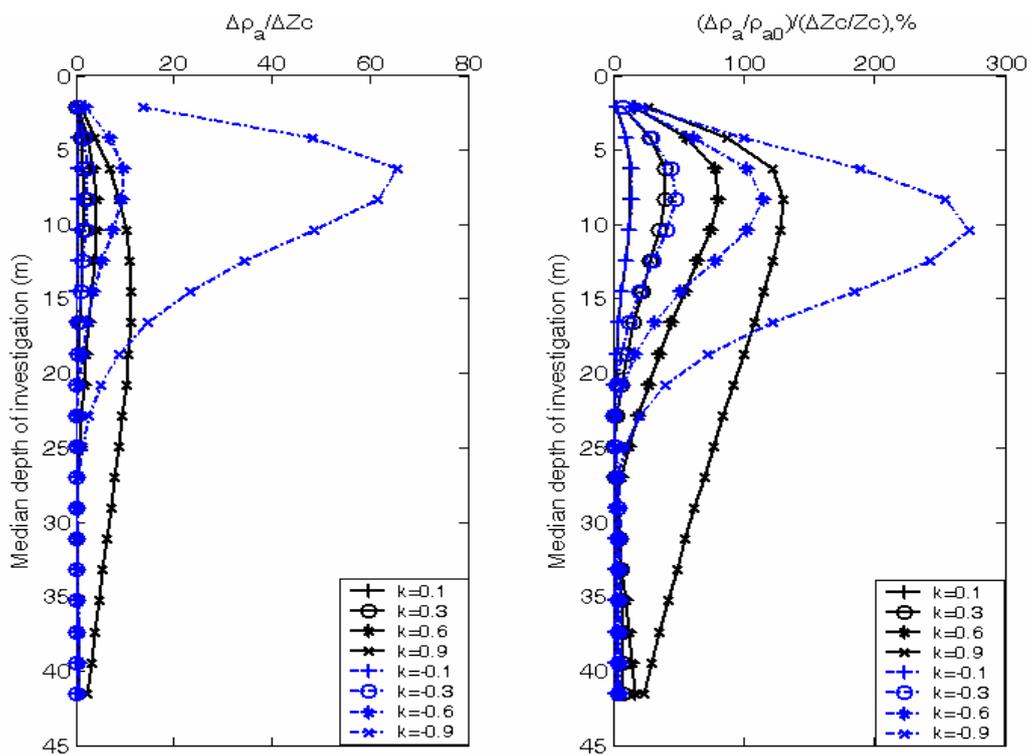
(b) $S_{N, \Delta Zc}$



(c) $S_{\Delta t}$

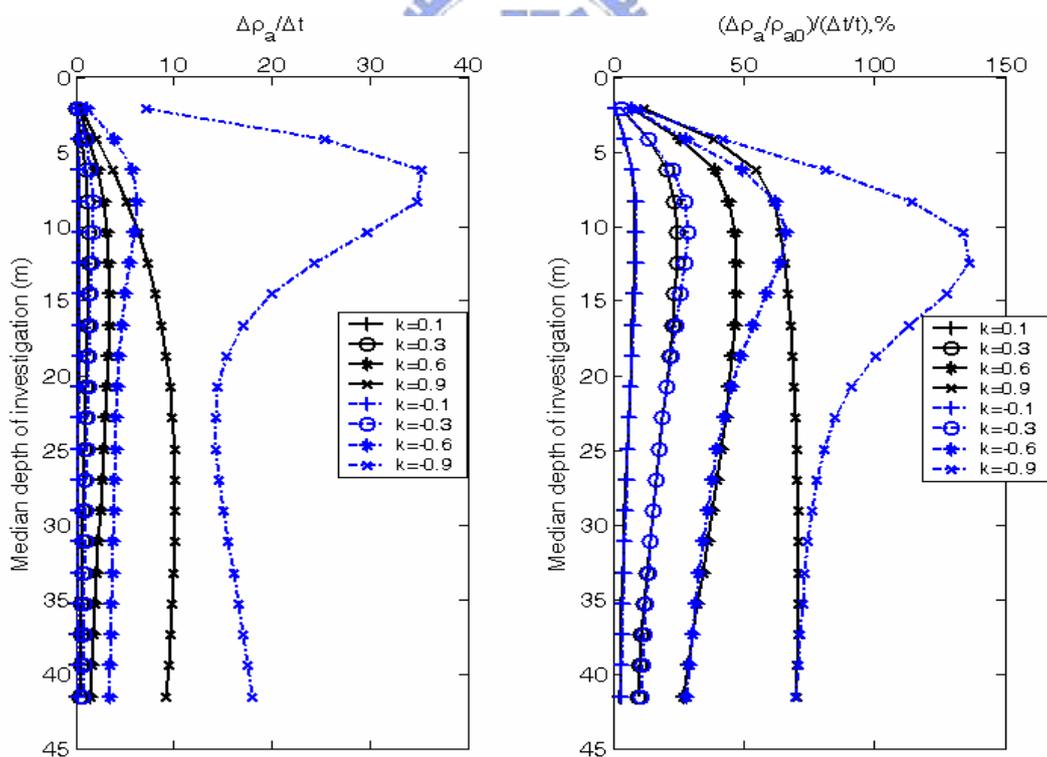
(d) $S_{N, \Delta t}$

圖 F-9 Wenner 靈敏度(夾層中心等於 10 公尺，厚度等於 12 公尺)



(a) $S_{\Delta Zc}$

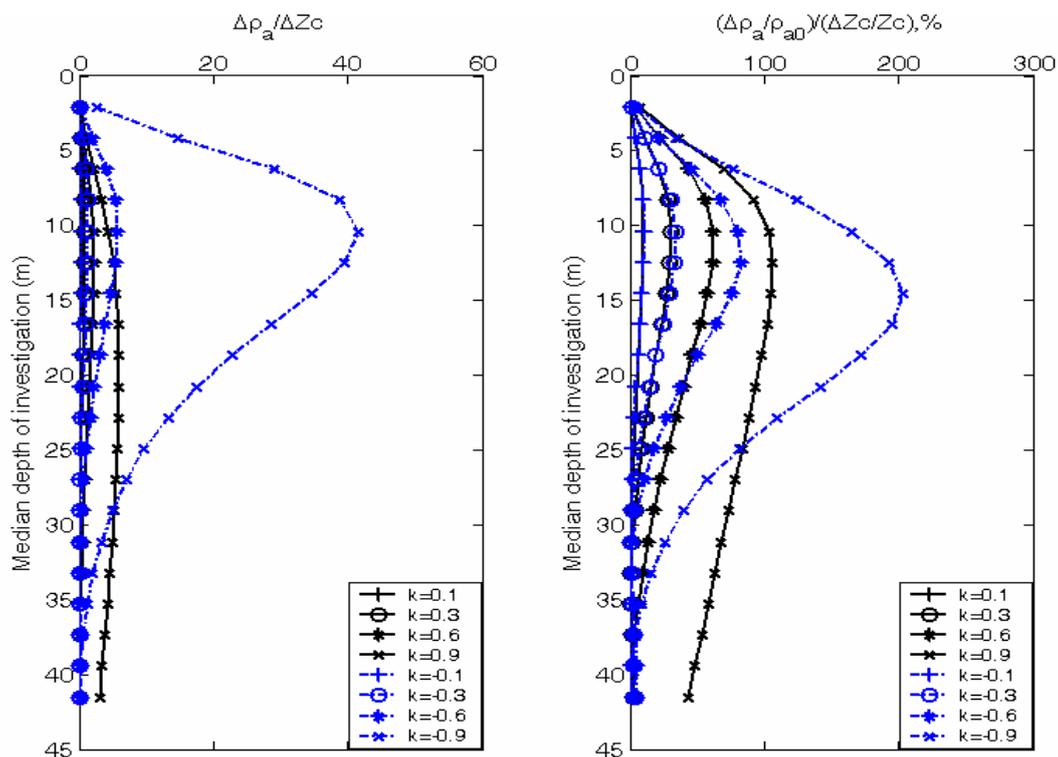
(b) $S_{N, \Delta Zc}$



(c) $S_{\Delta t}$

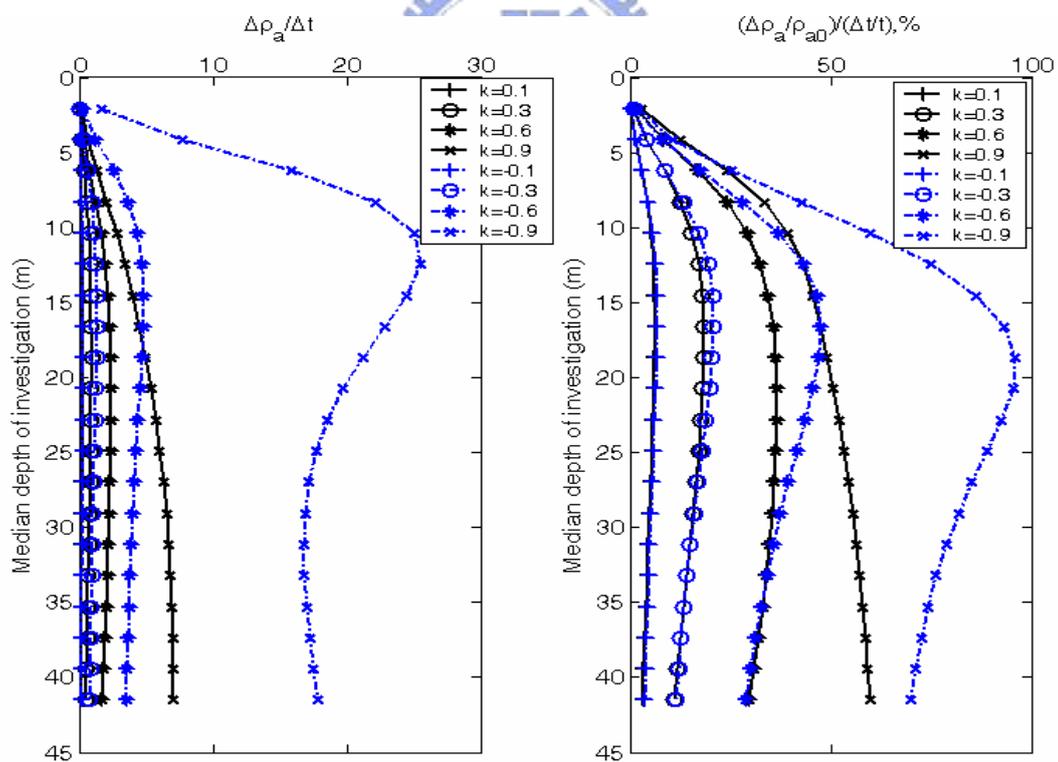
(d) $S_{N, \Delta t}$

圖 F-10 Wenner 靈敏度(夾層中心等於 15 公尺，厚度等於 12 公尺)



(a) $S_{\Delta Zc}$

(b) $S_{N, \Delta Zc}$



(c) $S_{\Delta t}$

(d) $S_{N, \Delta t}$

圖 F-11 Wenner 靈敏度(夾層中心等於 20 公尺，厚度等於 12 公尺)

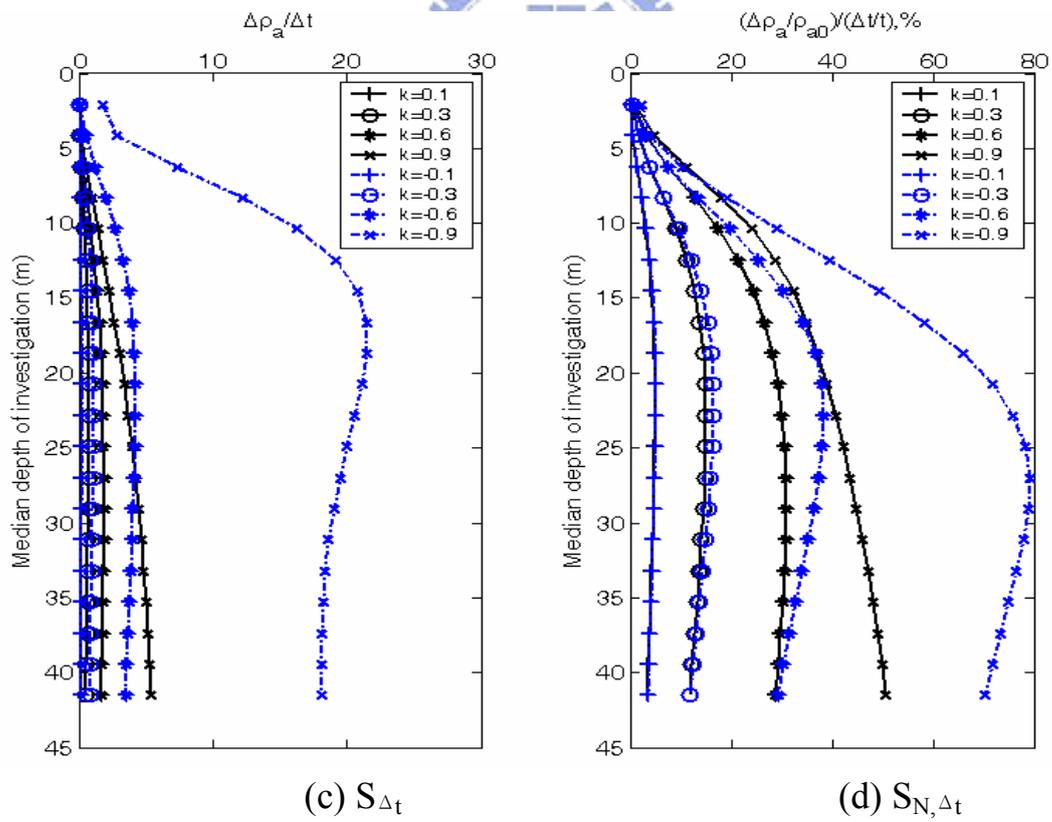
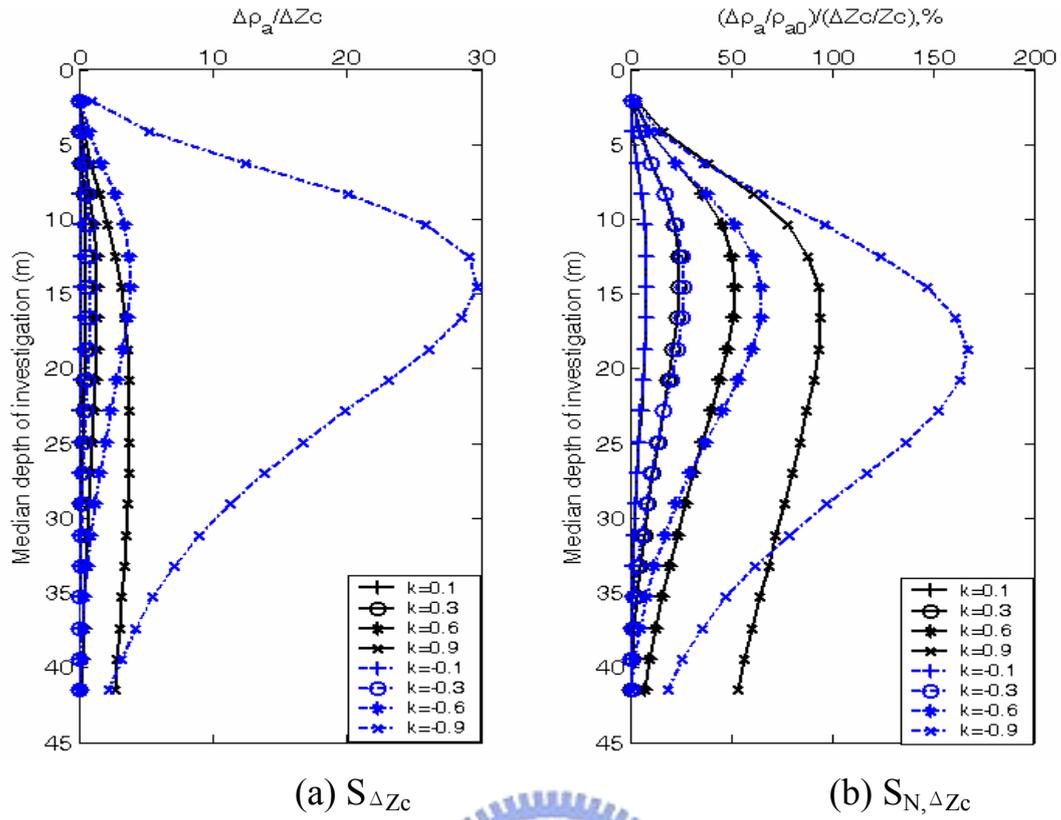
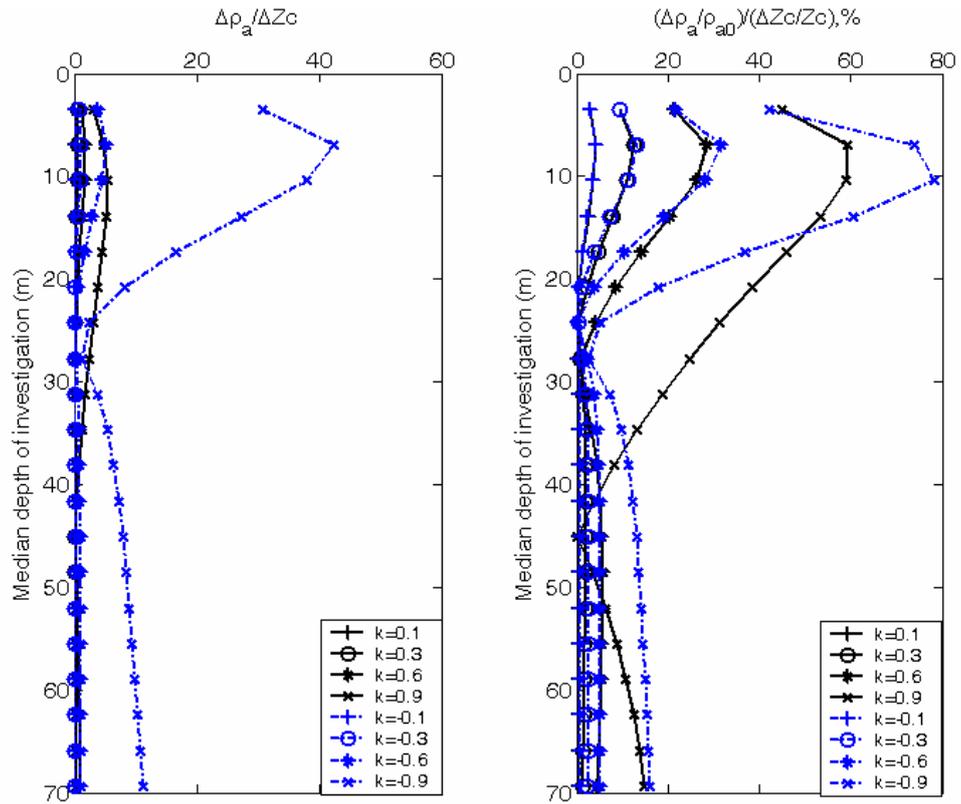
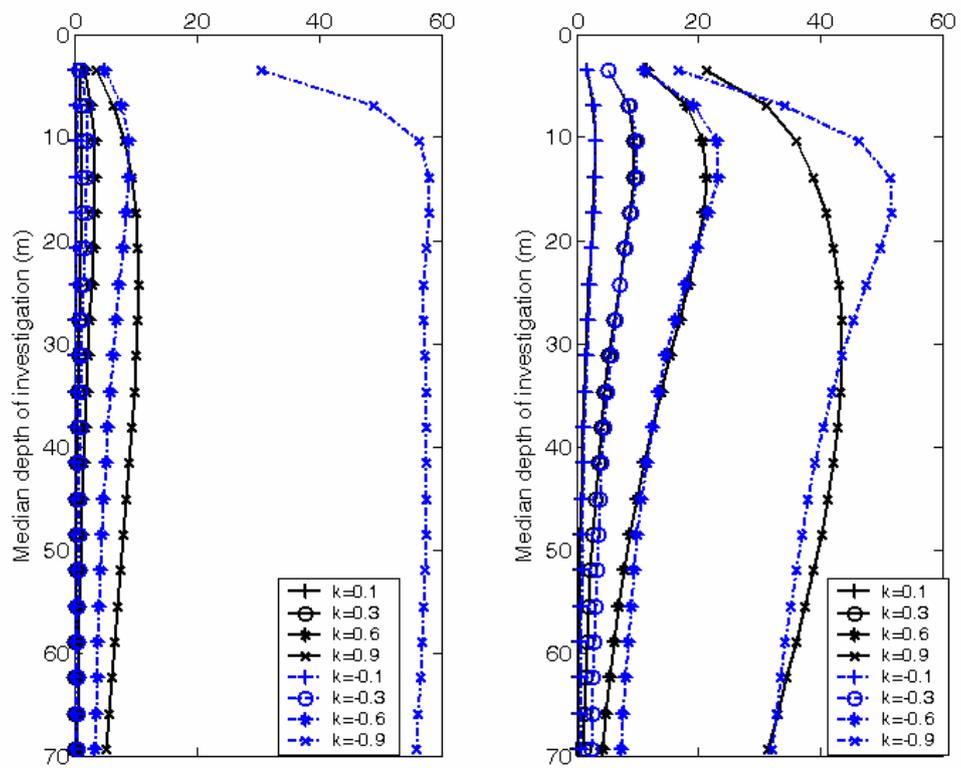


圖 F-12 Wenner 靈敏度(夾層中心等於 25 公尺，厚度等於 12 公尺)



(a) $S_{\Delta Zc}$

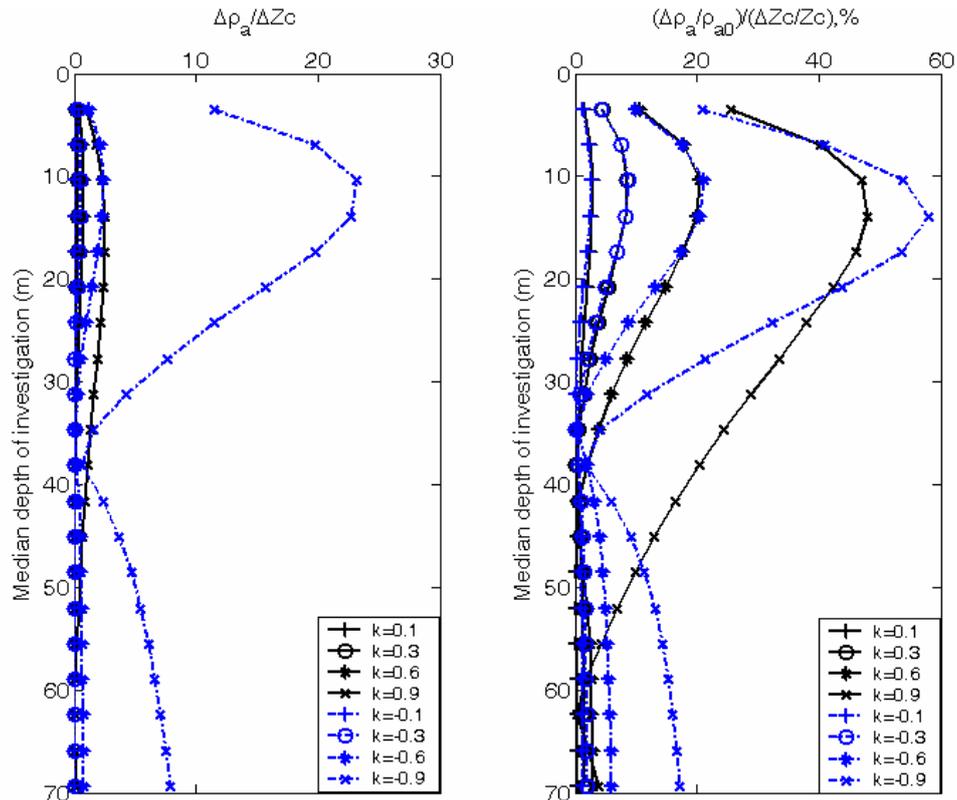
(b) $S_{N, \Delta Zc}$



(c) $S_{\Delta t}$

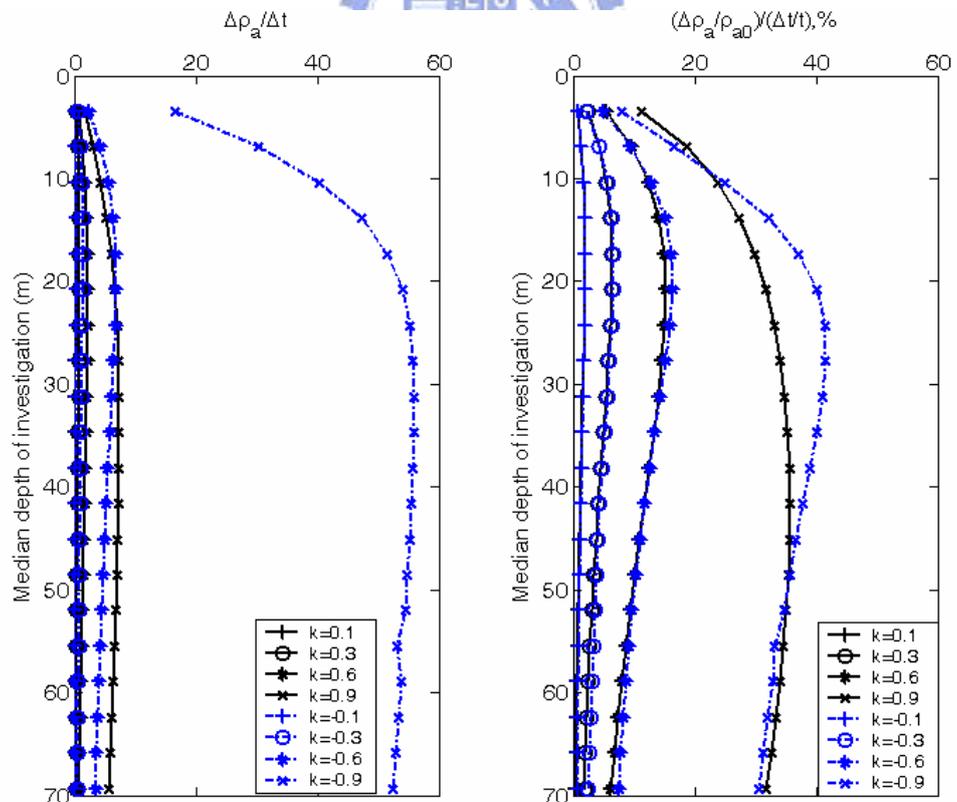
(d) $S_{N, \Delta t}$

圖 F-13 Pole-Pole 靈敏度(夾層中心等於 10 公尺，厚度等於 4 公尺)



(a) $S_{\Delta Zc}$

(b) $S_{N,\Delta Zc}$



(c) $S_{\Delta t}$

(d) $S_{N,\Delta t}$

圖 F-14 Pole-Pole 靈敏度(夾層中心等於 15 公尺，厚度等於 4 公尺)

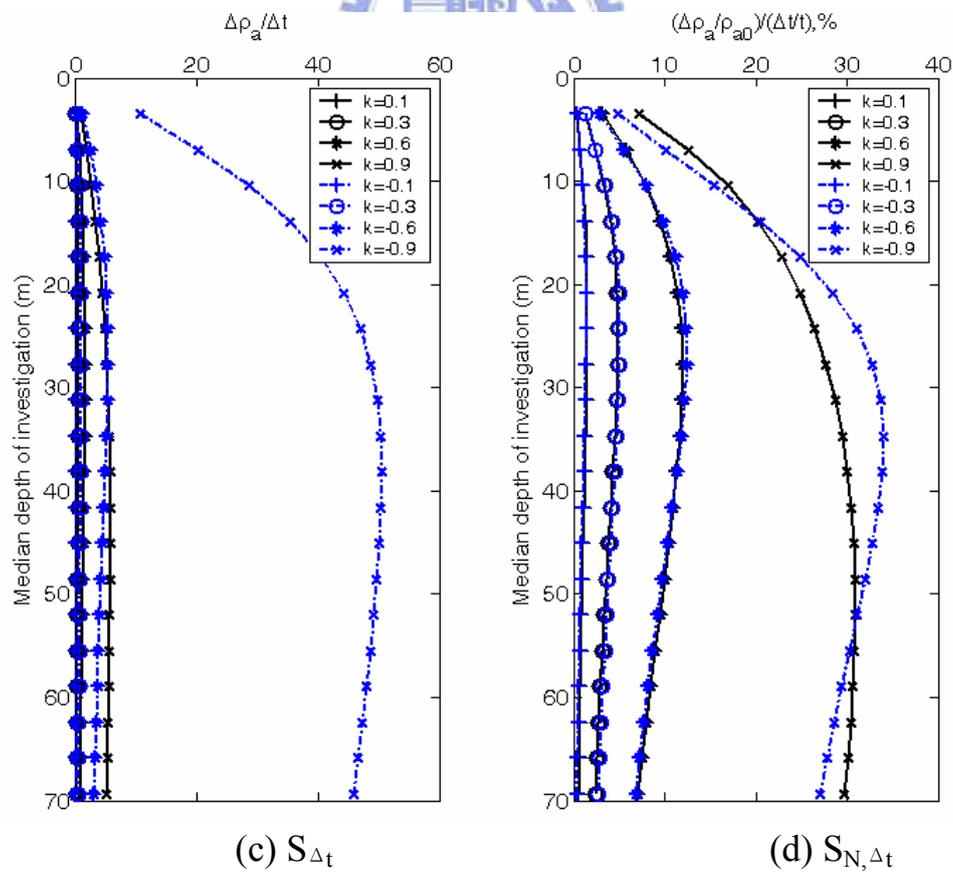
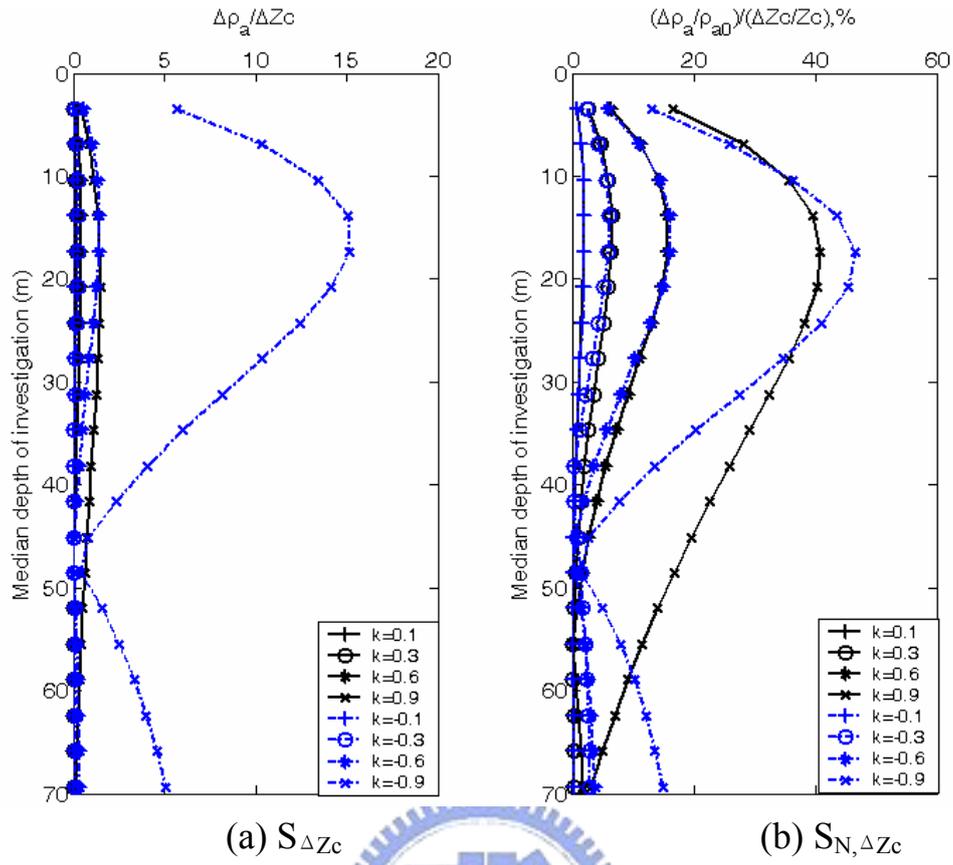
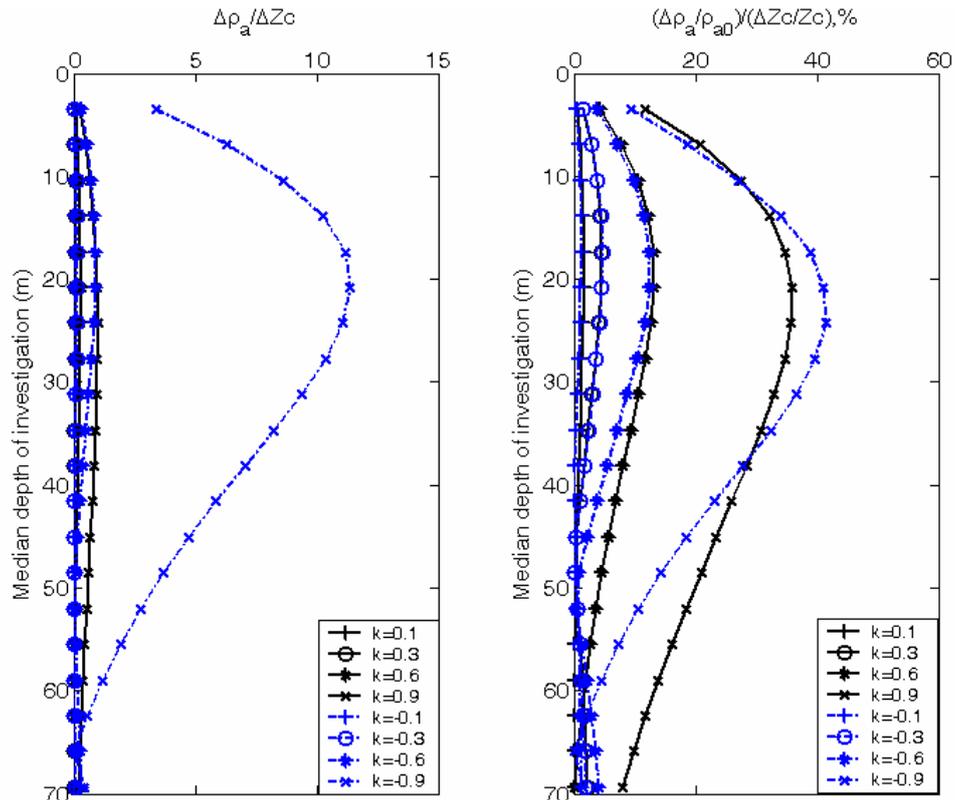
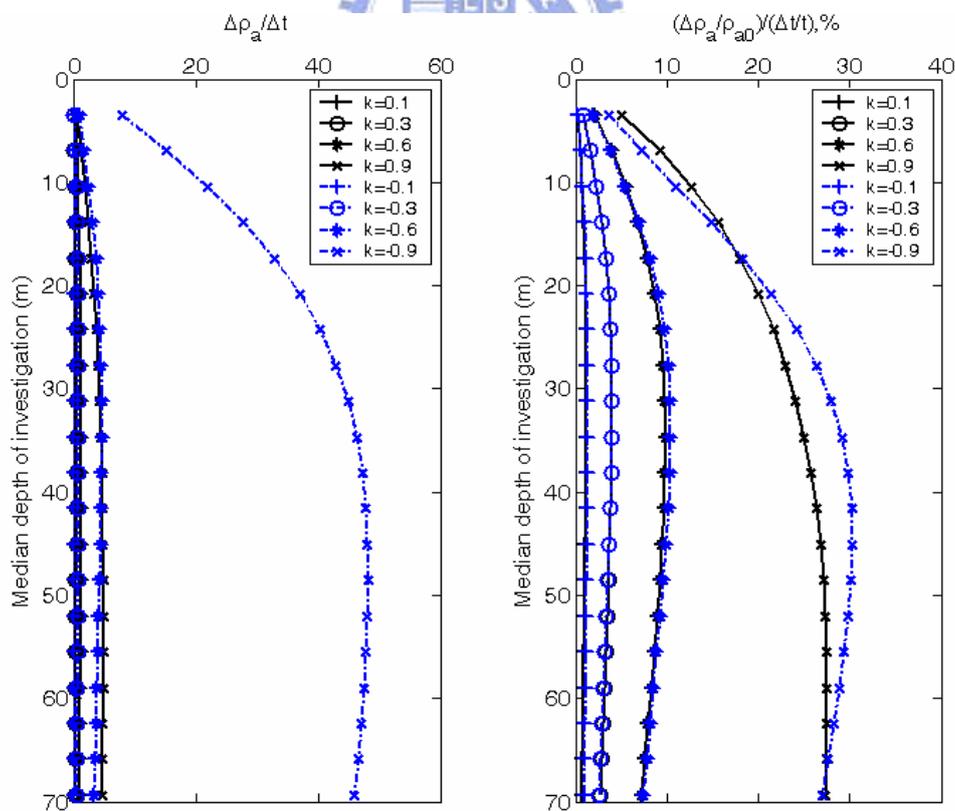


圖 F-15 Pole-Pole 靈敏度(夾層中心等於 20 公尺，厚度等於 4 公尺)



(a) $S_{\Delta Zc}$

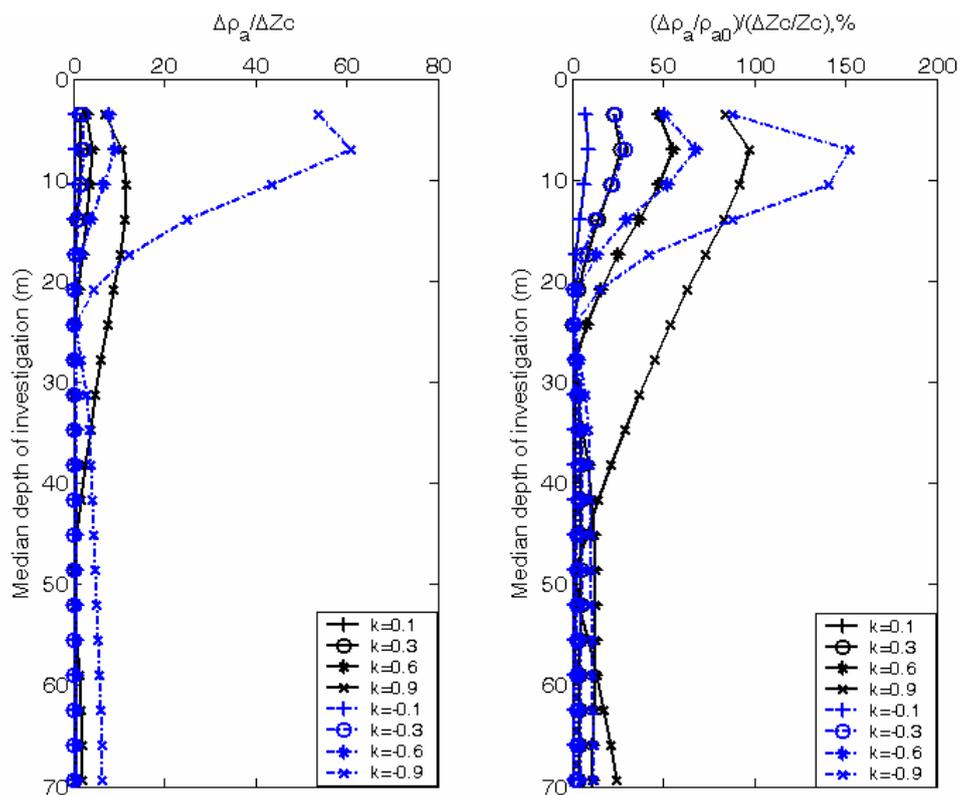
(b) $S_{N, \Delta Zc}$



(c) $S_{\Delta t}$

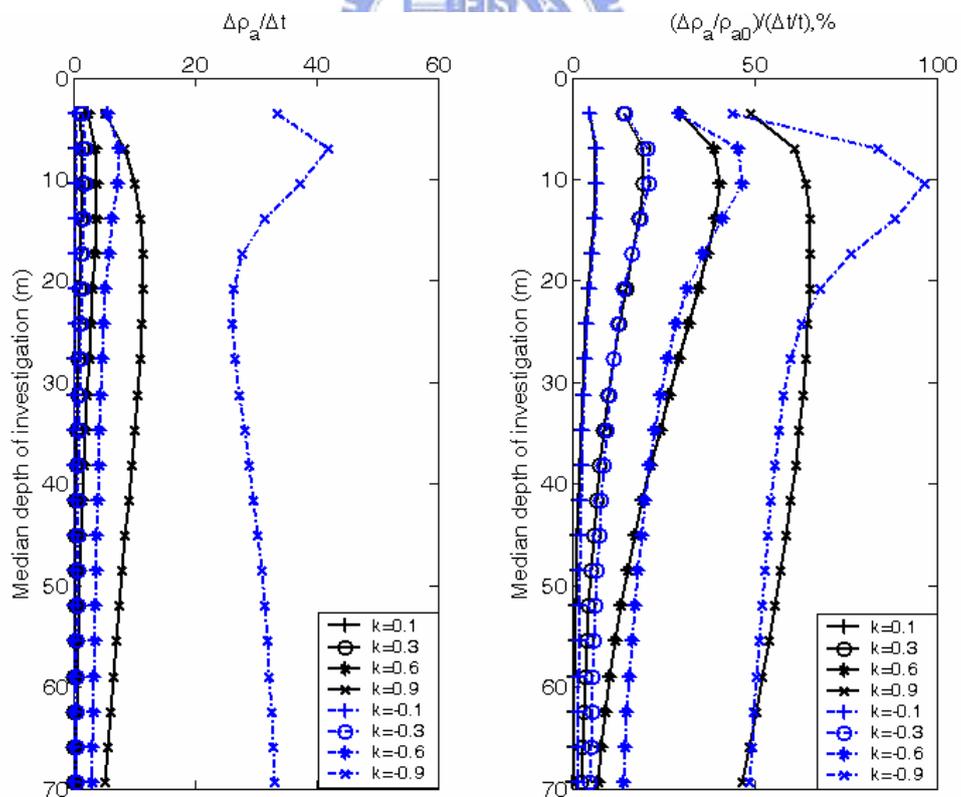
(d) $S_{N, \Delta t}$

圖 F-16 Pole-Pole 靈敏度(夾層中心等於 25 公尺，厚度等於 4 公尺)



(a) $S_{\Delta Zc}$

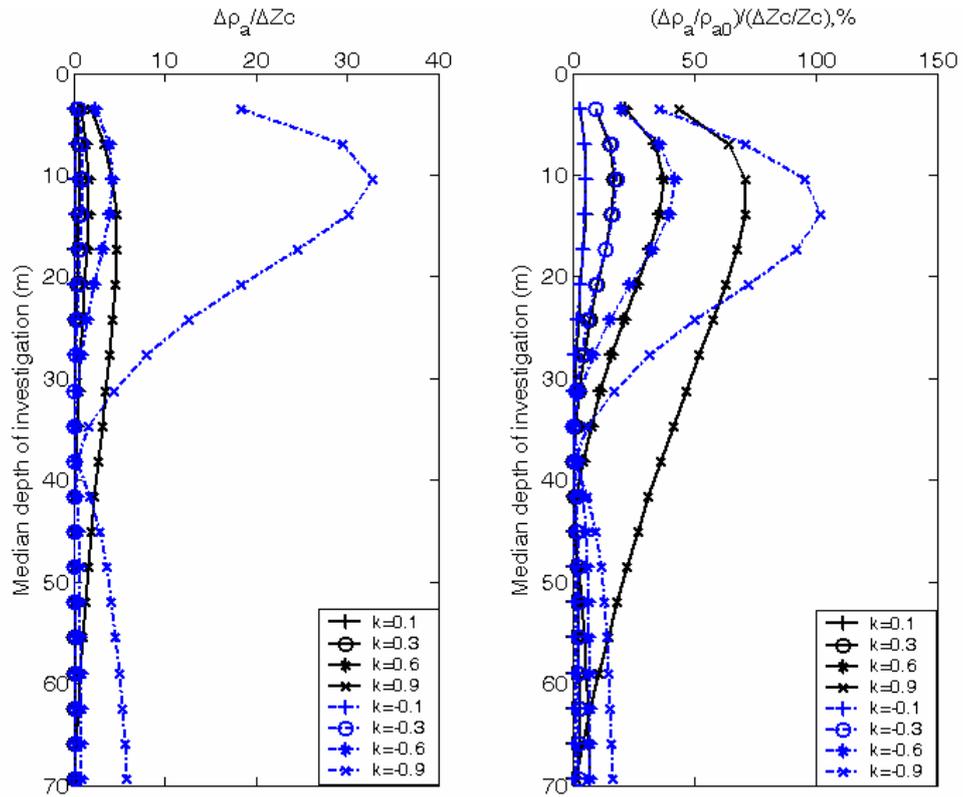
(b) $S_{N, \Delta Zc}$



(c) $S_{\Delta t}$

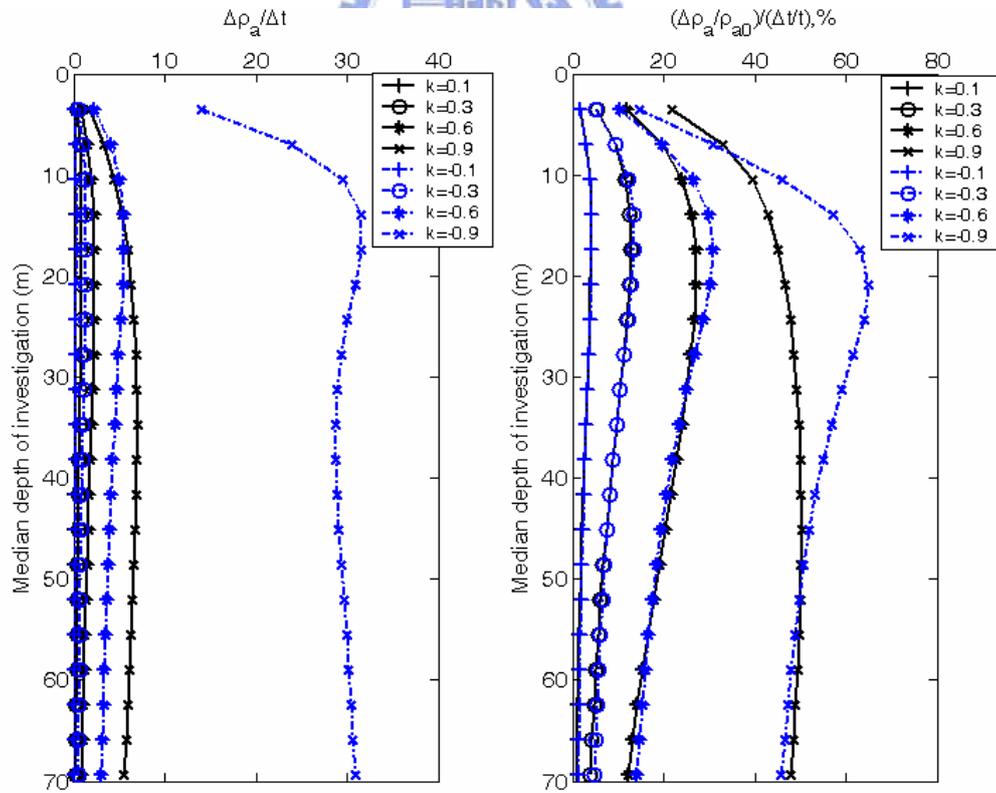
(d) $S_{N, \Delta t}$

圖 F-17 Pole-Pole 靈敏度(夾層中心等於 10 公尺，厚度等於 8 公尺)



(a) $S_{\Delta Zc}$

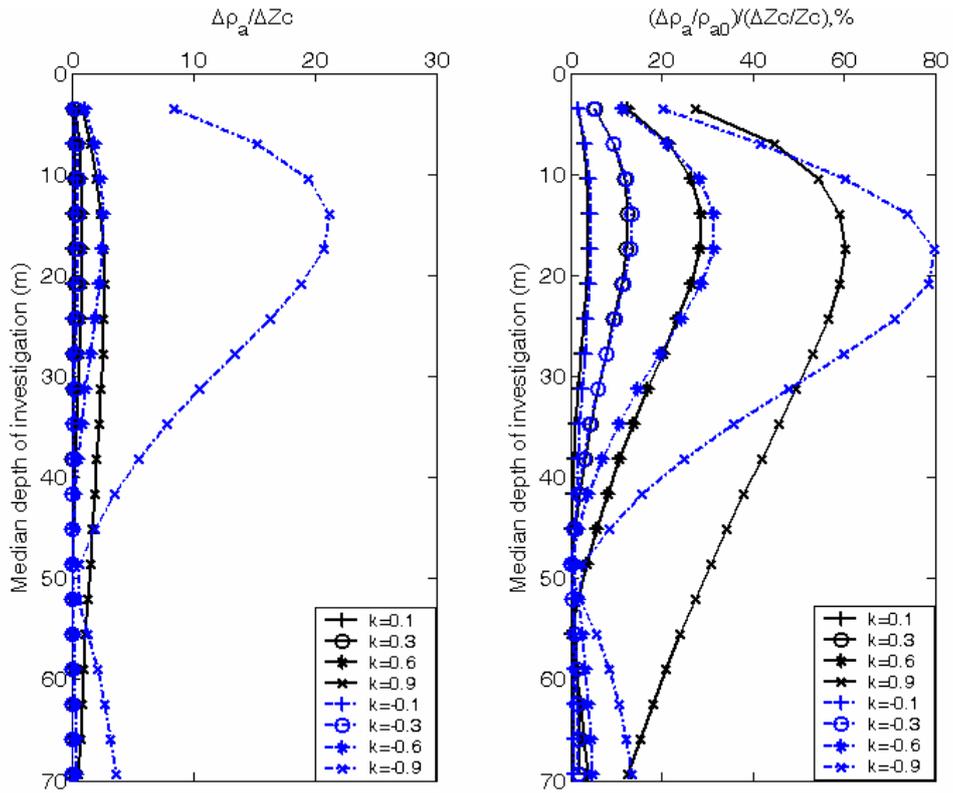
(b) $S_{N, \Delta Zc}$



(c) $S_{\Delta t}$

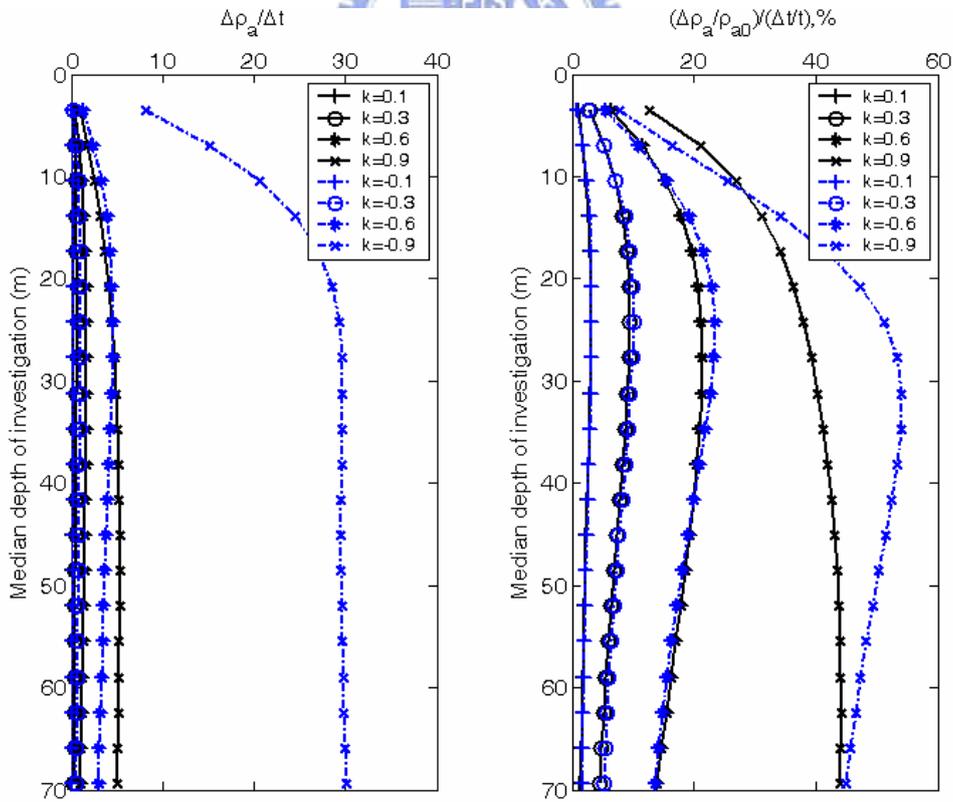
(d) $S_{N, \Delta t}$

圖 F-18 Pole-Pole 靈敏度(夾層中心等於 15 公尺，厚度等於 8 公尺)



(a) $S_{\Delta Zc}$

(b) $S_{N, \Delta Zc}$



(c) $S_{\Delta t}$

(d) $S_{N, \Delta t}$

圖 F-19 Pole-Pole 靈敏度(夾層中心等於 20 公尺，厚度等於 8 公尺)

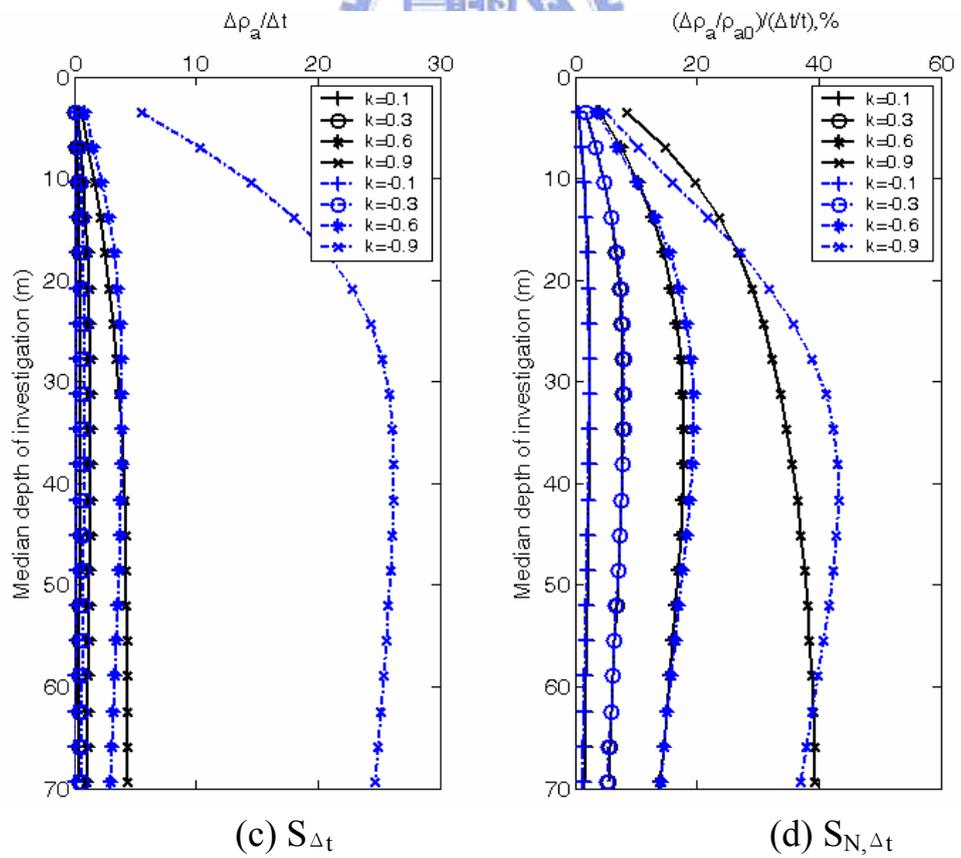
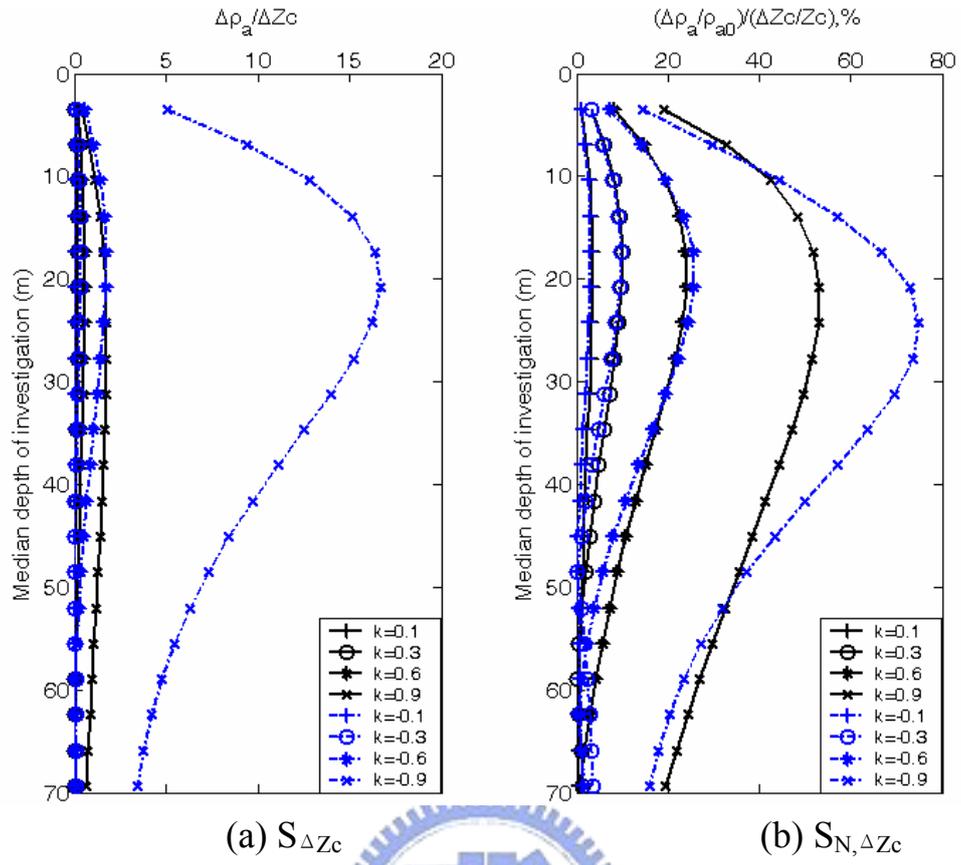


圖 F-20 Pole-Pole 靈敏度(夾層中心等於 25 公尺，厚度等於 8 公尺)

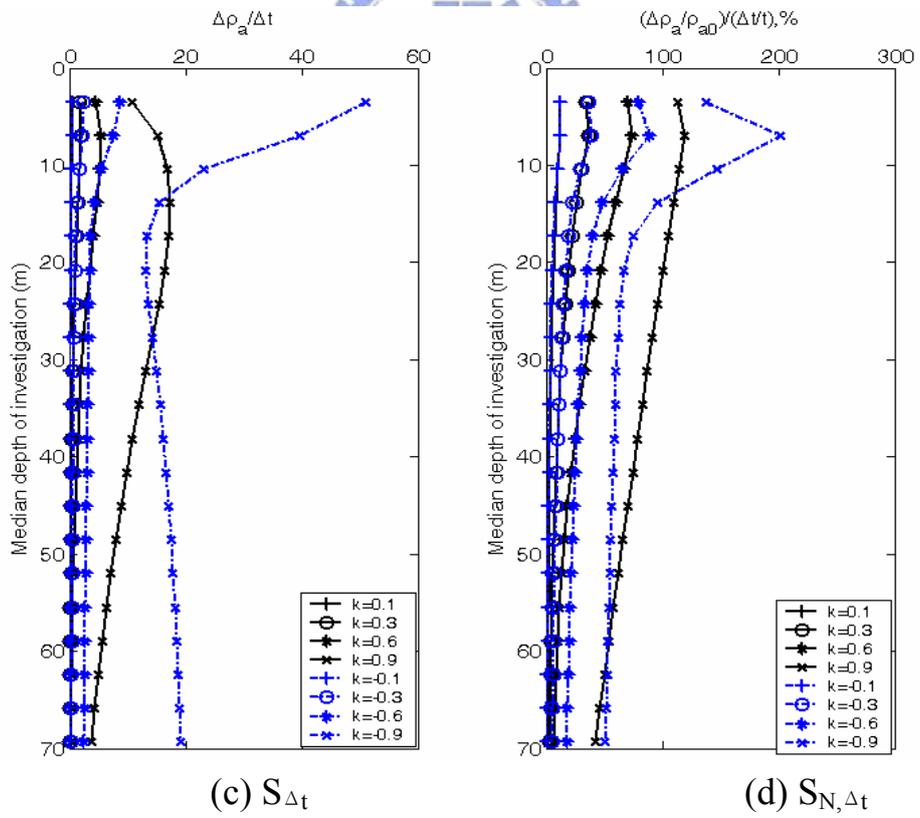
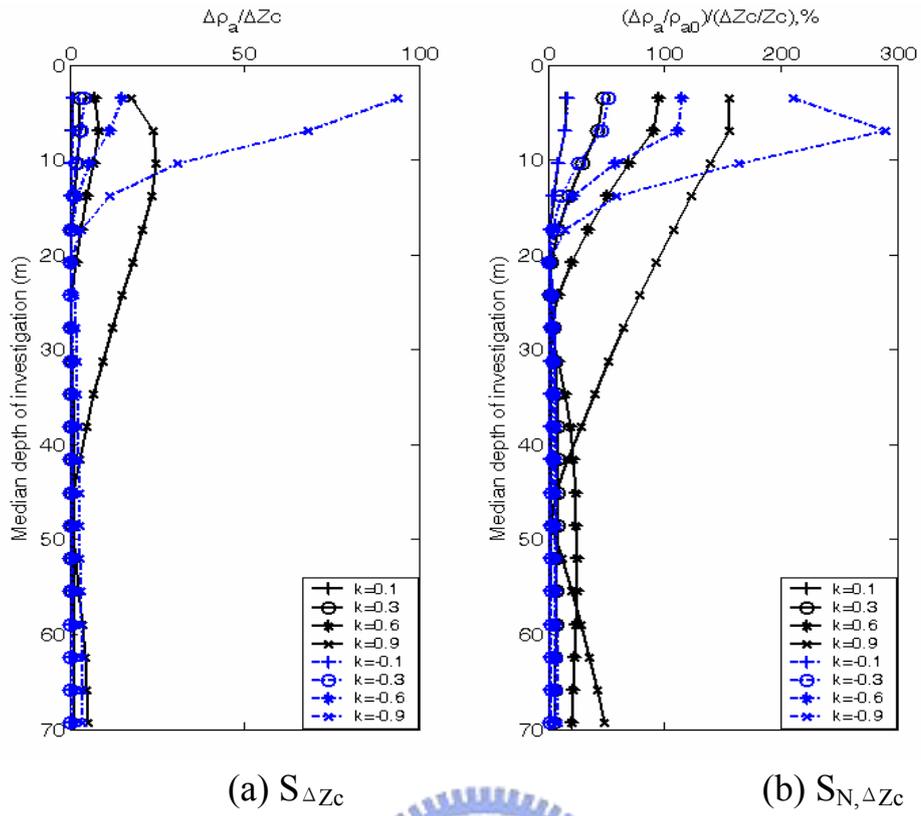
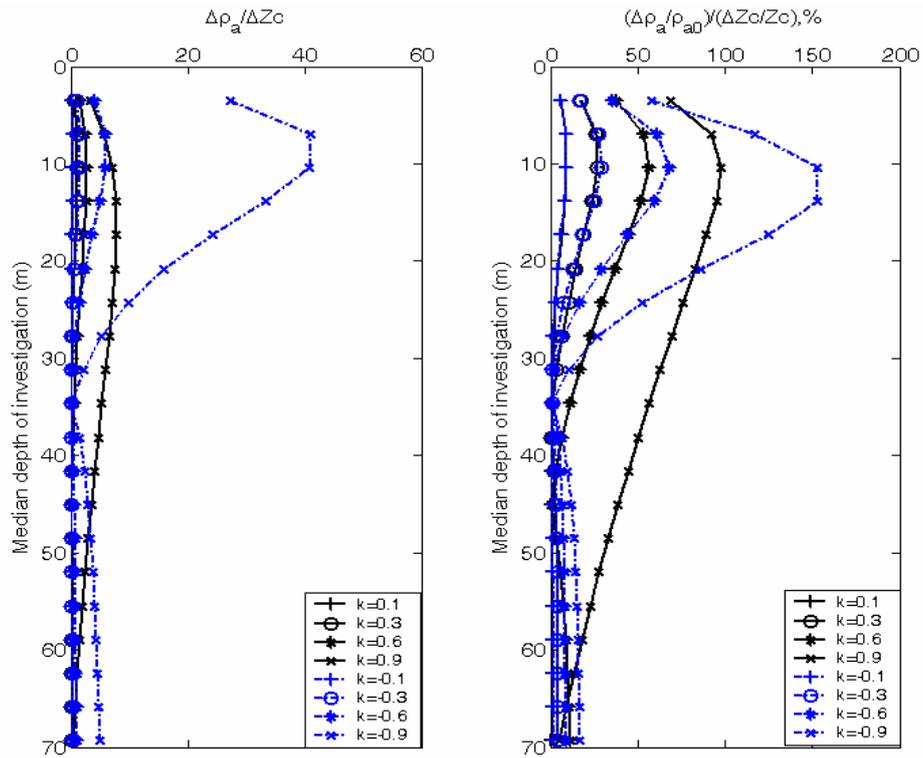
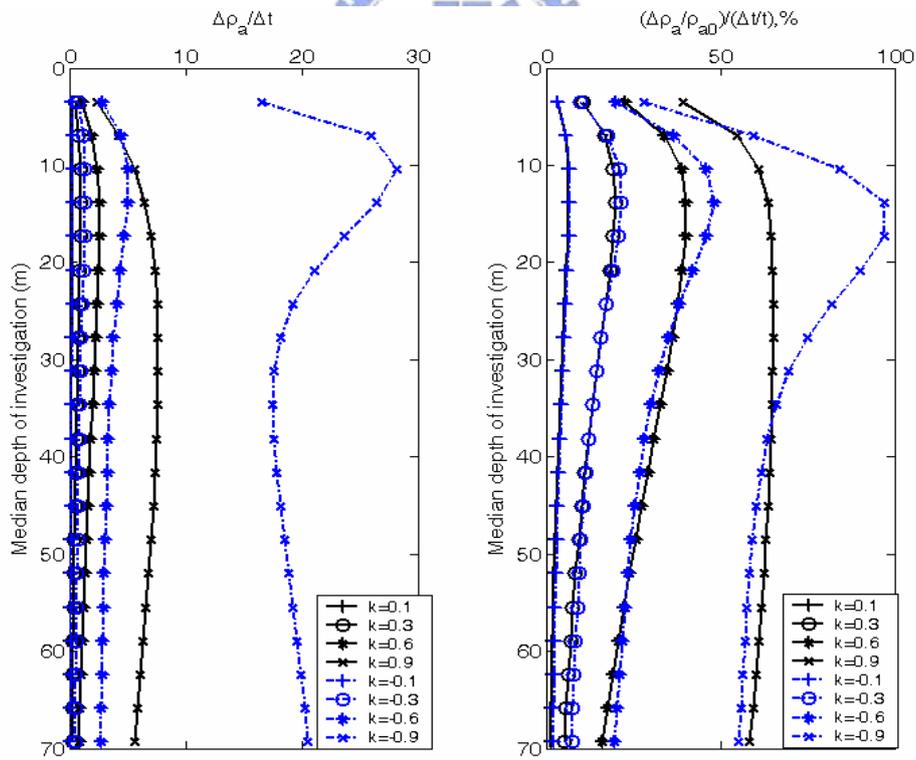


圖 F-21 Pole-Pole 靈敏度(夾層中心等於 10 公尺，厚度等於 12 公尺)



(a) $S_{\Delta Zc}$

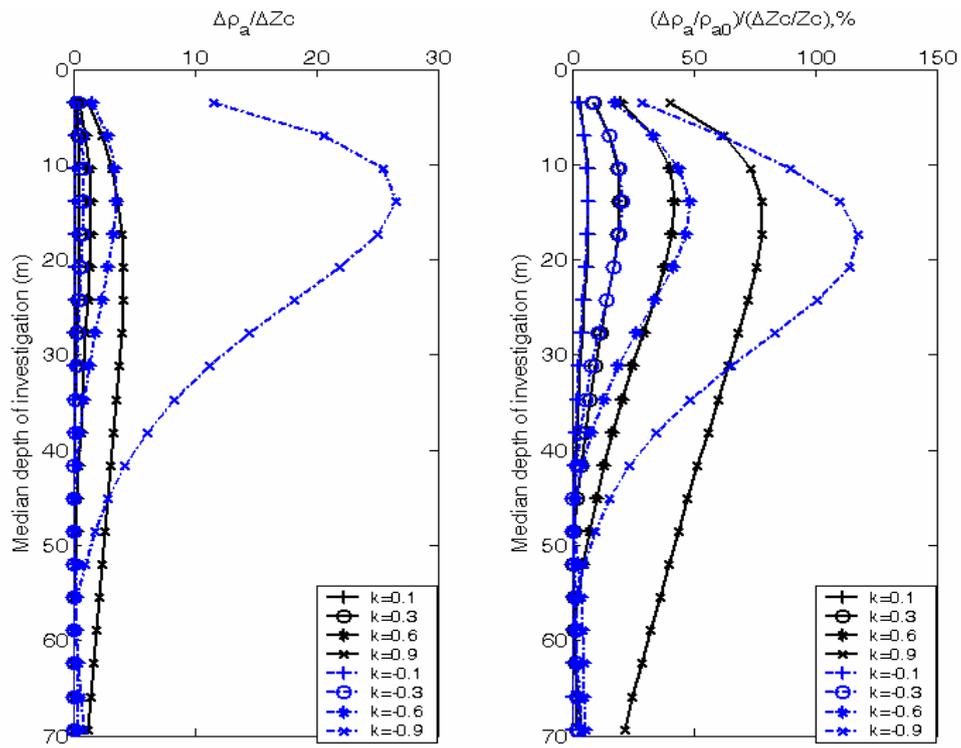
(b) $S_{N, \Delta Zc}$



(c) $S_{\Delta t}$

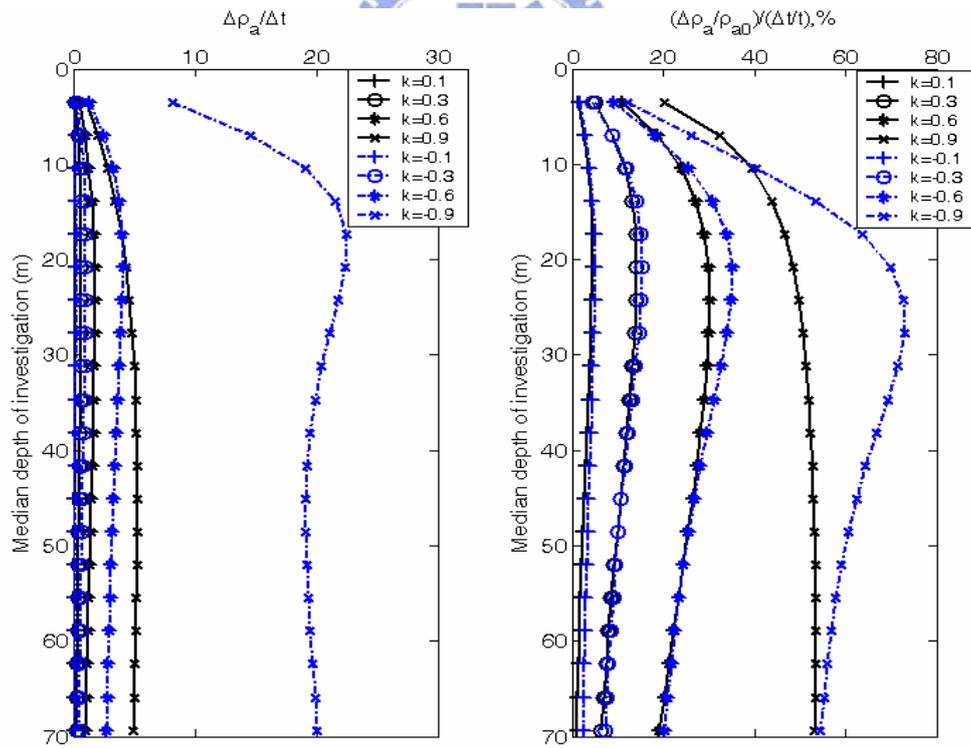
(d) $S_{N, \Delta t}$

圖 F-22 Pole-Pole 靈敏度(夾層中心等於 15 公尺，厚度等於 12 公尺)



(a) $S_{\Delta Zc}$

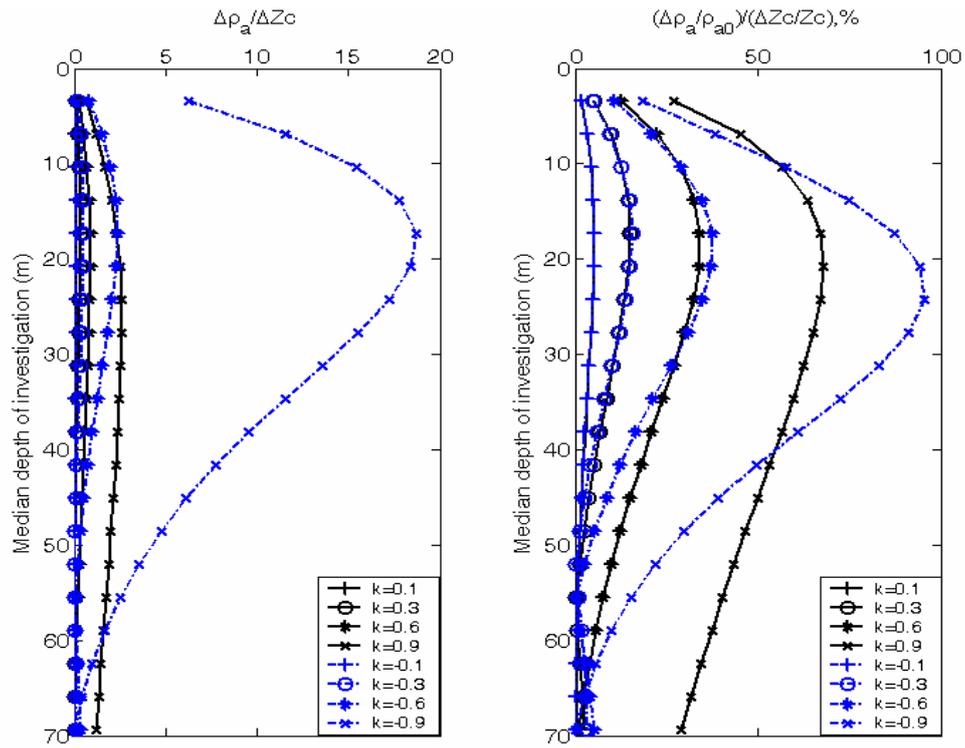
(b) $S_{N, \Delta Zc}$



(c) $S_{\Delta t}$

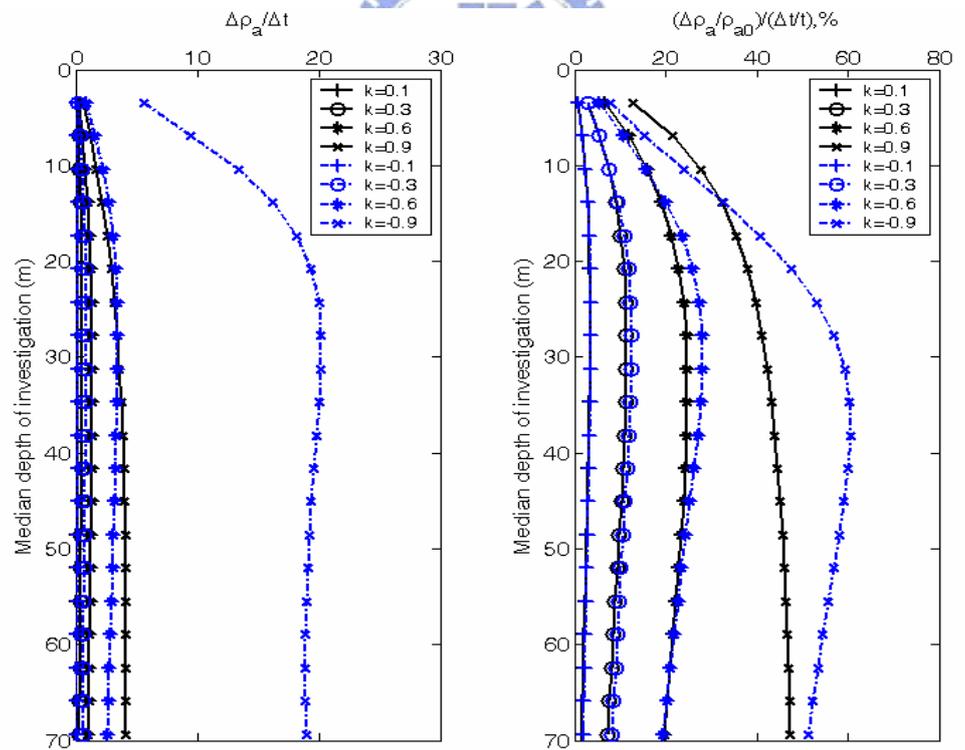
(d) $S_{N, \Delta t}$

圖 F-23 Pole-Pole 靈敏度(夾層中心等於 20 公尺，厚度等於 12 公尺)



(a) $S_{\Delta Zc}$

(b) $S_{N, \Delta Zc}$

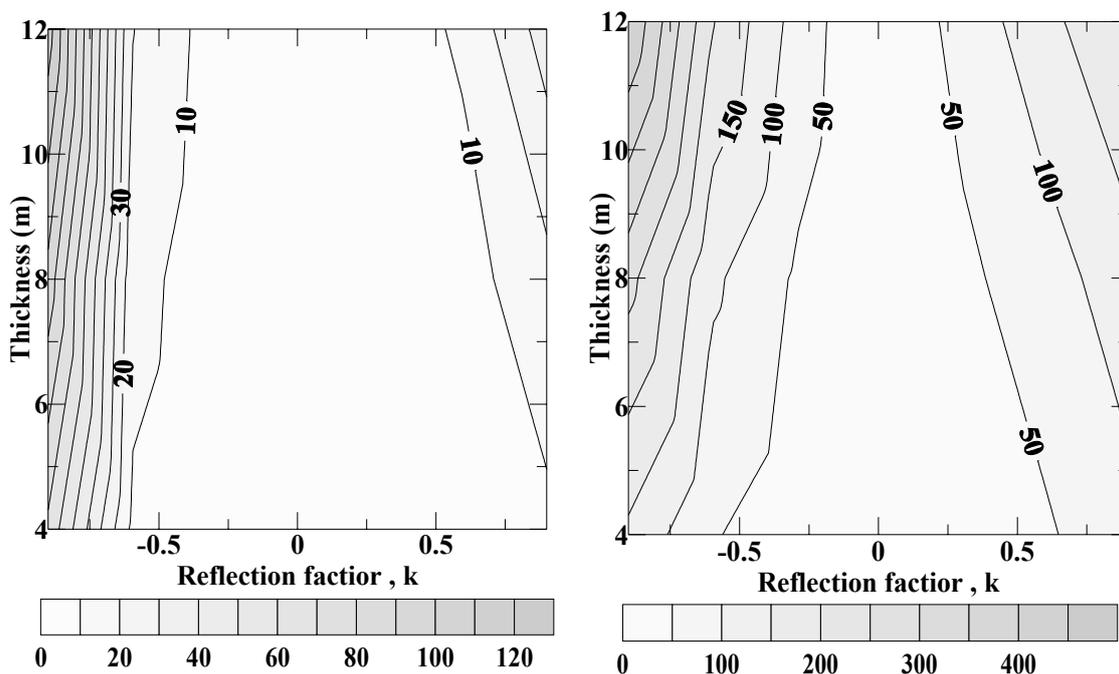


(c) $S_{\Delta t}$

(d) $S_{N, \Delta t}$

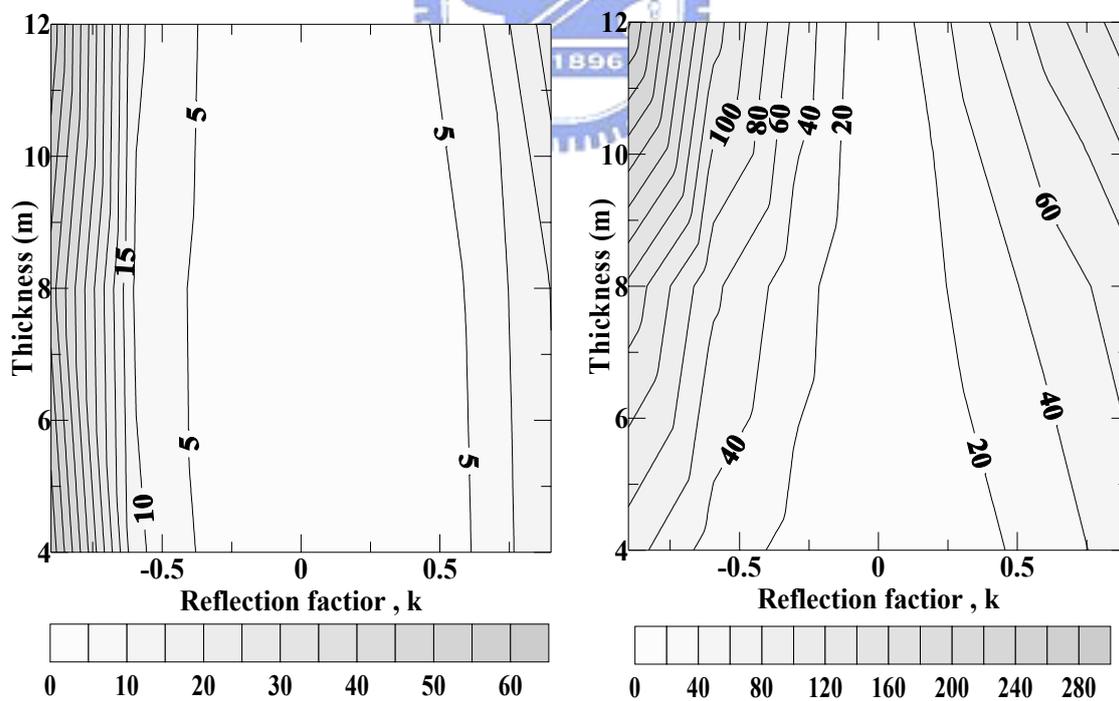
圖 F-24 Pole-Pole 靈敏度(夾層中心等於 25 公尺，厚度等於 12 公尺)

附錄 G-水平夾層界面最大靈敏度影像圖



(a)Max. $S_{\Delta Z_c}$

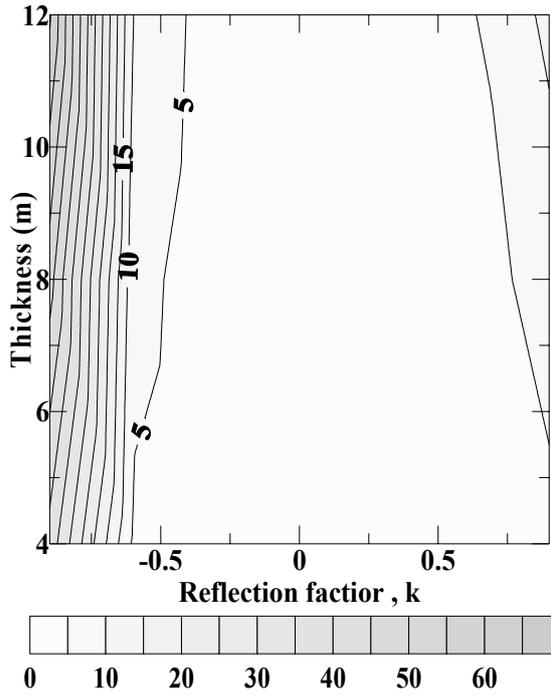
(b)Max. $S_{N, \Delta Z_c}$



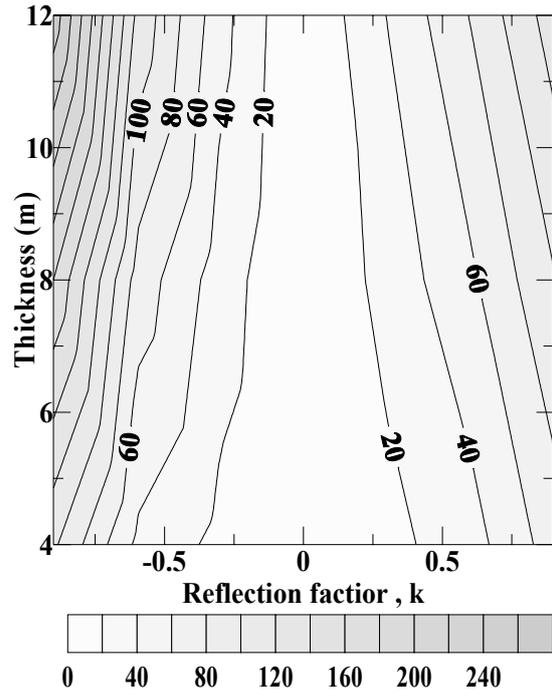
(c)Max. $S_{\Delta t}$

(d)Max. $S_{N, \Delta t}$

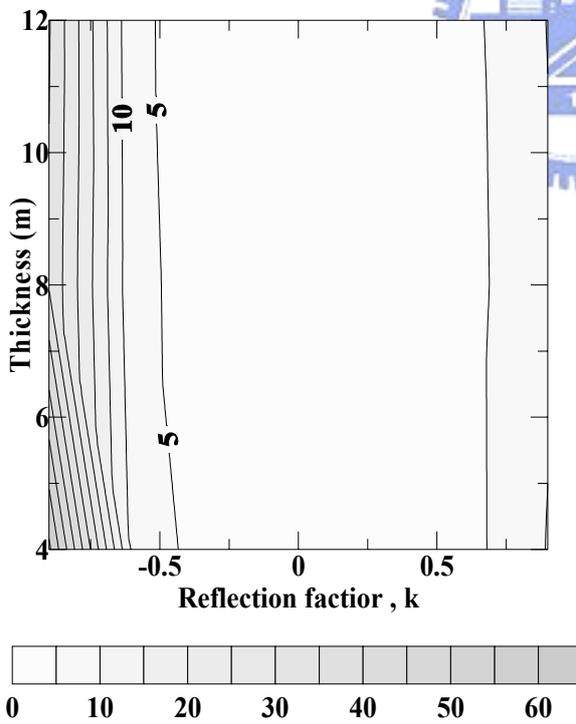
圖 G-1 Wenner 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖($Z_c=10m$)



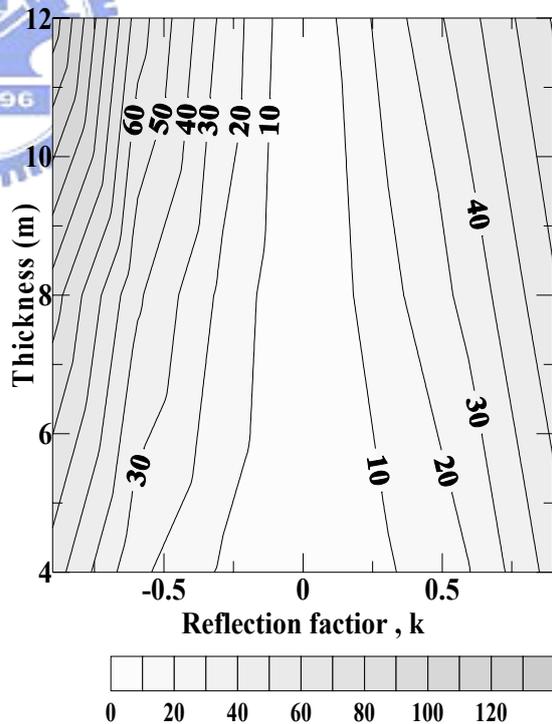
(a) Max. $S_{\Delta z_c}$



(b) Max. $S_{N, \Delta z_c}$

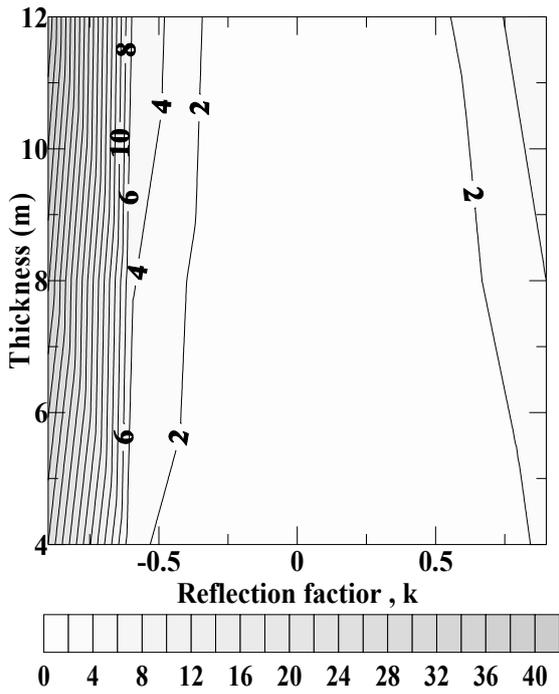


(c) Max. $S_{\Delta t}$

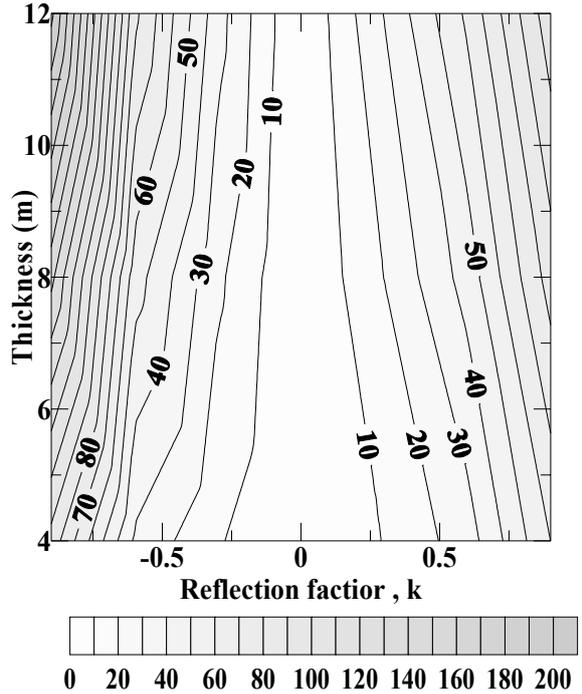


(d) Max. $S_{N, \Delta t}$

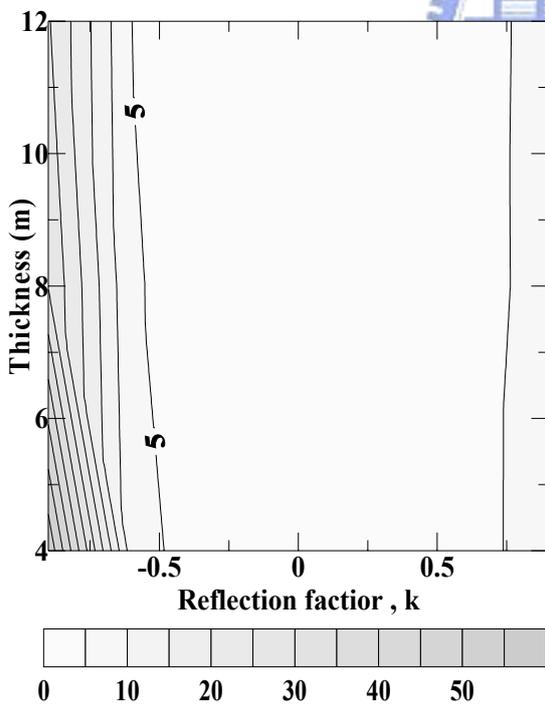
圖 G-2 Wenner 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖($Z_c=15m$)



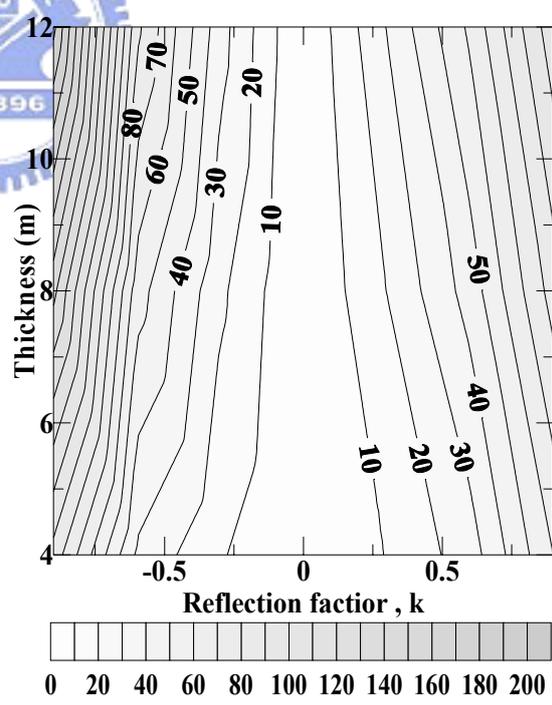
(a) Max. $S_{\Delta Z_c}$



(b) Max. $S_{N, \Delta Z_c}$

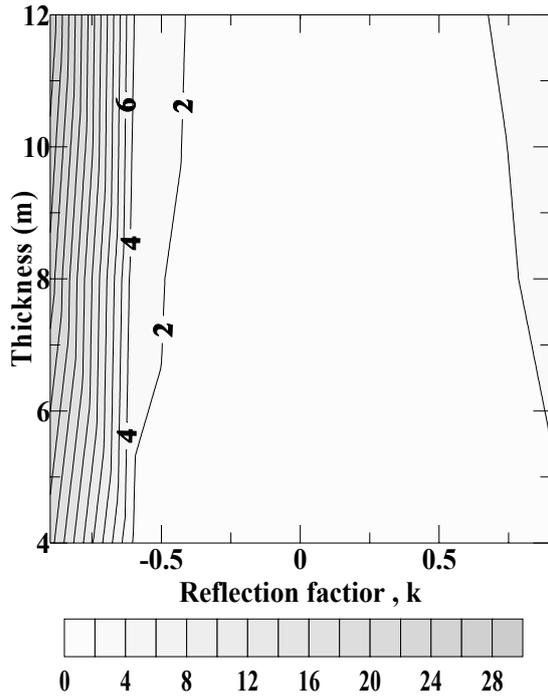


(c) Max. $S_{\Delta t}$

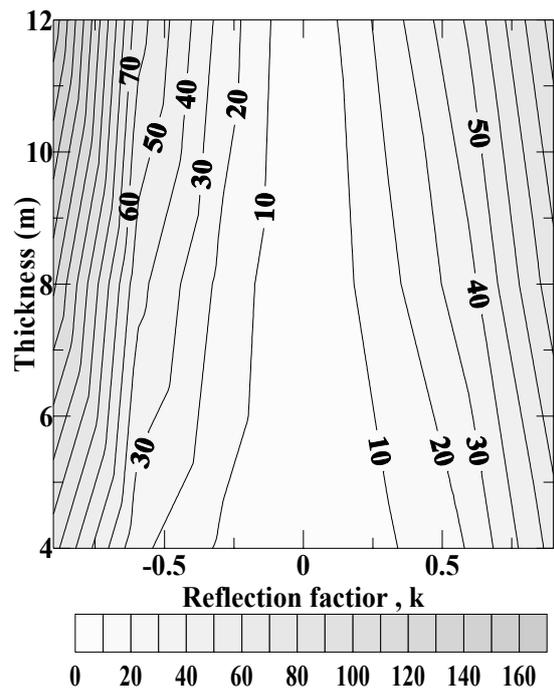


(d) Max. $S_{N, \Delta t}$

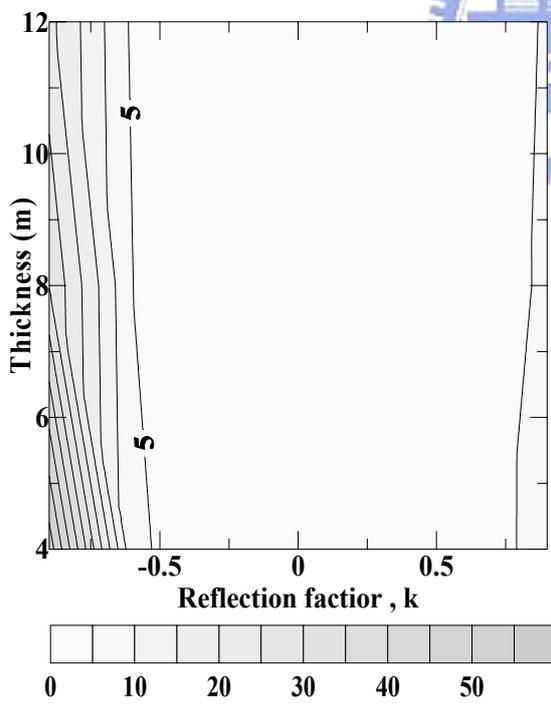
圖 G-3 Wenner 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖($Z_c=20m$)



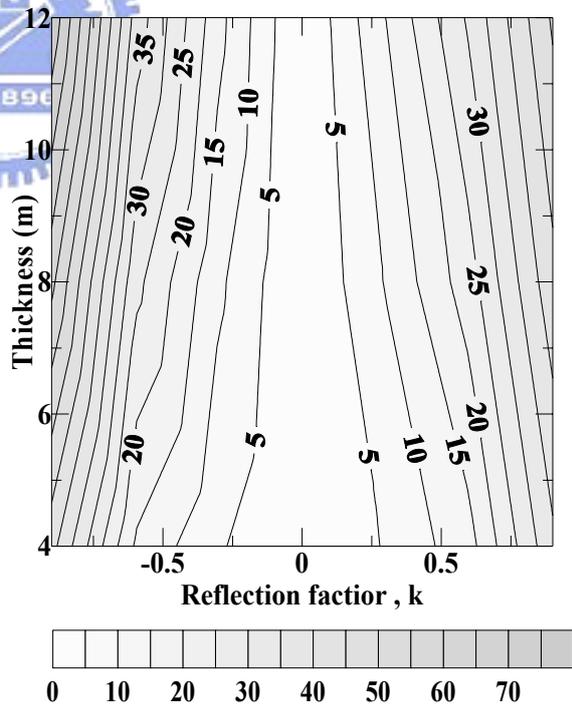
(a) Max. $S_{\Delta Z_c}$



(b) Max. $S_{N, \Delta Z_c}$

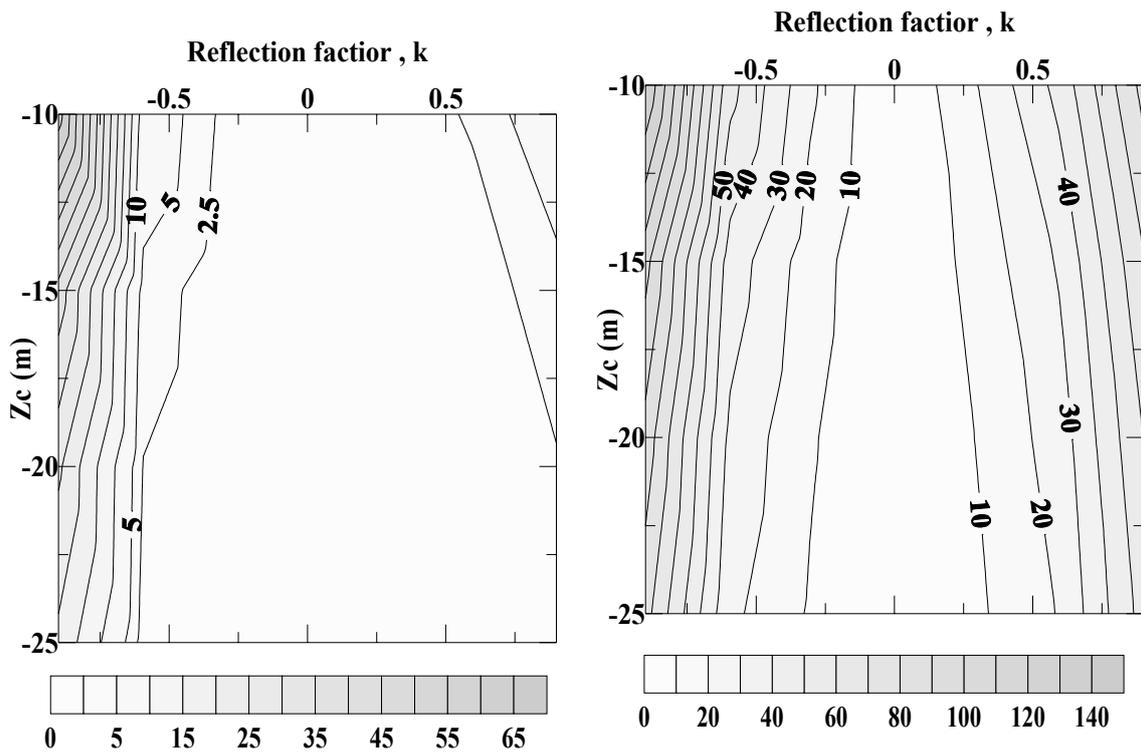


(c) Max. $S_{\Delta t}$



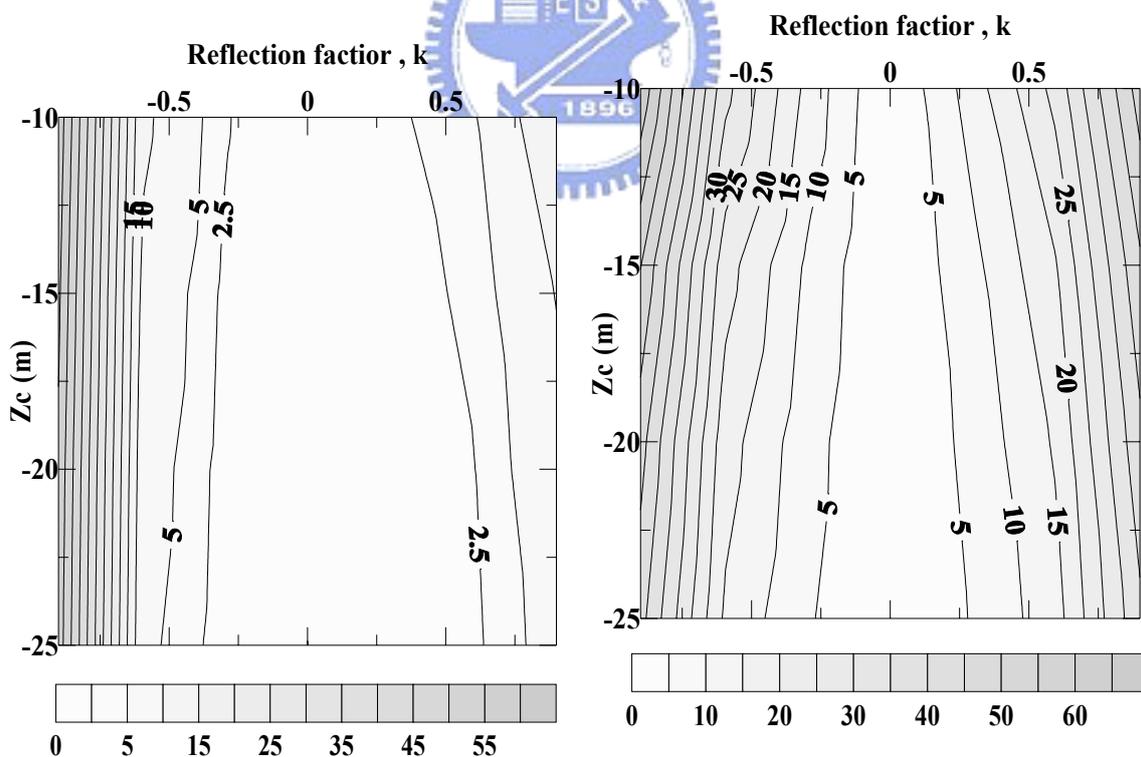
(d) Max. $S_{N, \Delta t}$

圖 G-4 Wenner 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖($Z_c=25m$)



(a)Max. $S_{\Delta Zc}$

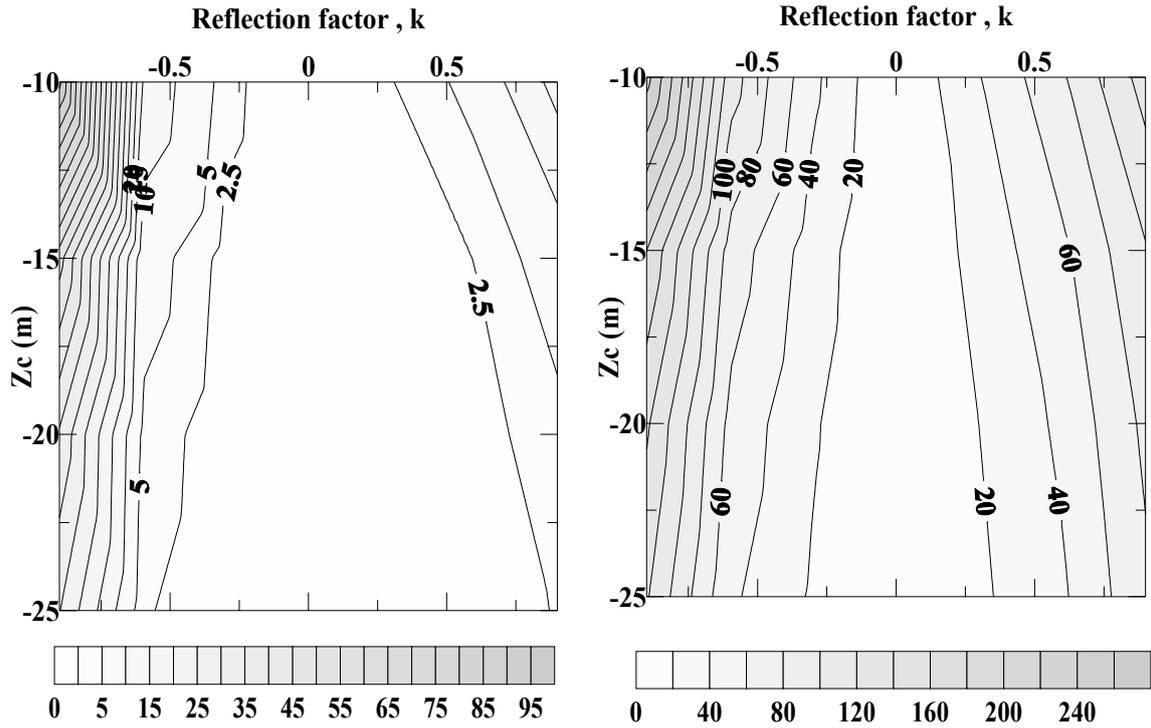
(b)Max. $S_{N, \Delta Zc}$



(c)Max. $S_{\Delta t}$

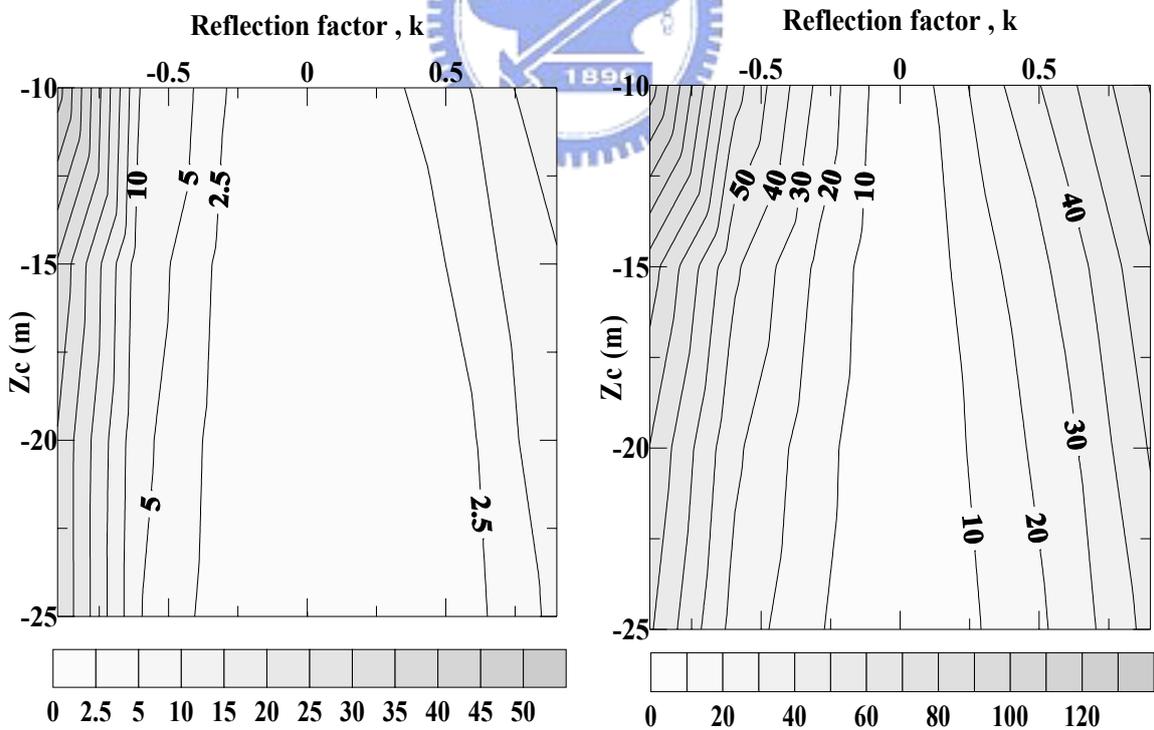
(d)Max. $S_{N, \Delta t}$

圖 G-5 Wenner 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖($t=4m$)



(a)Max. $S_{\Delta Zc}$

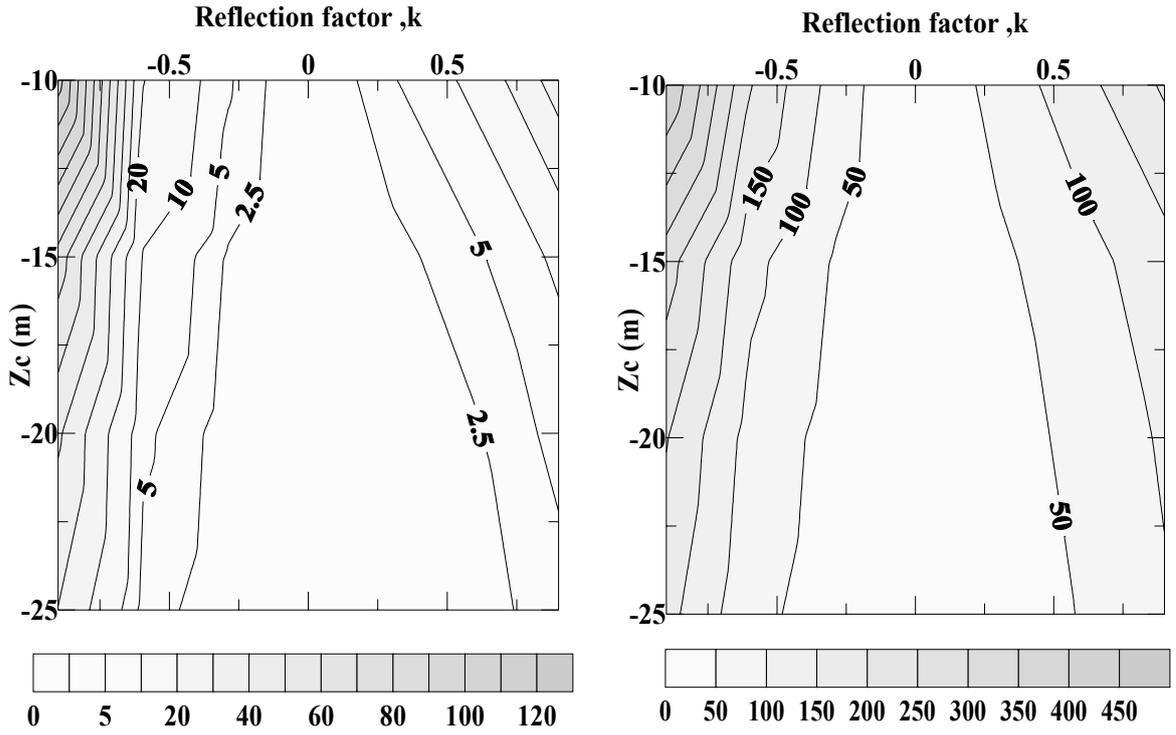
(b)Max. $S_{N, \Delta Zc}$



(c)Max. $S_{\Delta t}$

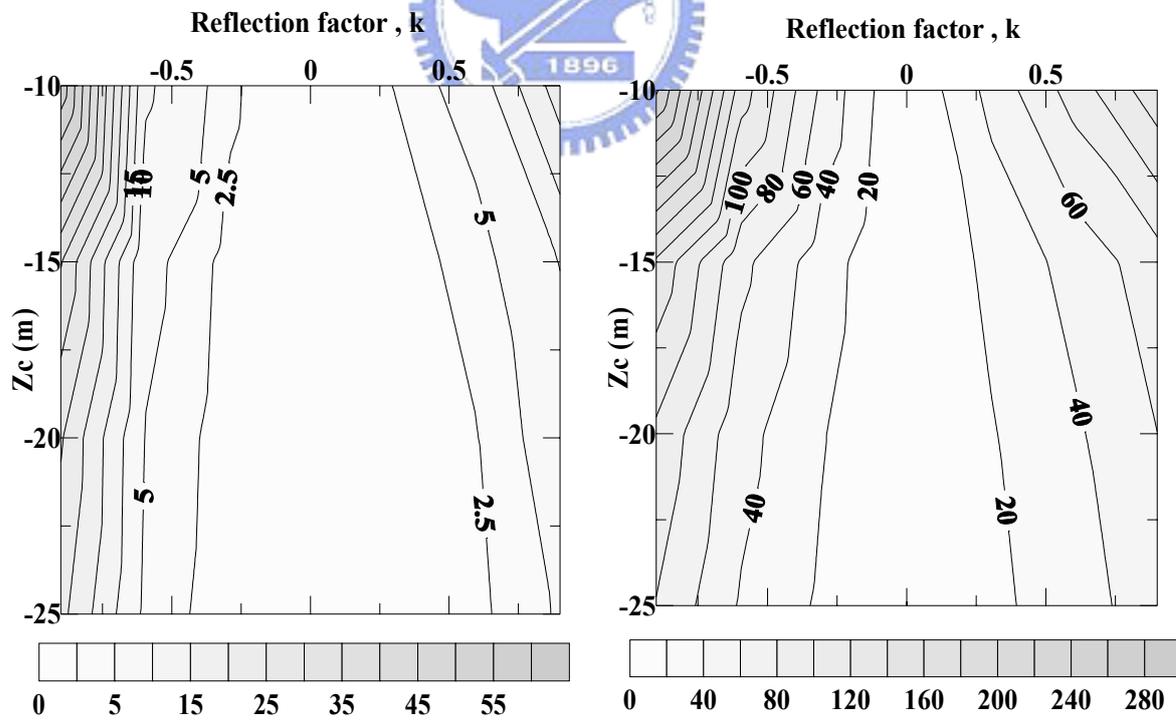
(d)Max. $S_{N, \Delta t}$

圖 G-6 Wenner 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖($t=8m$)



(a) Max. $S_{\Delta Zc}$

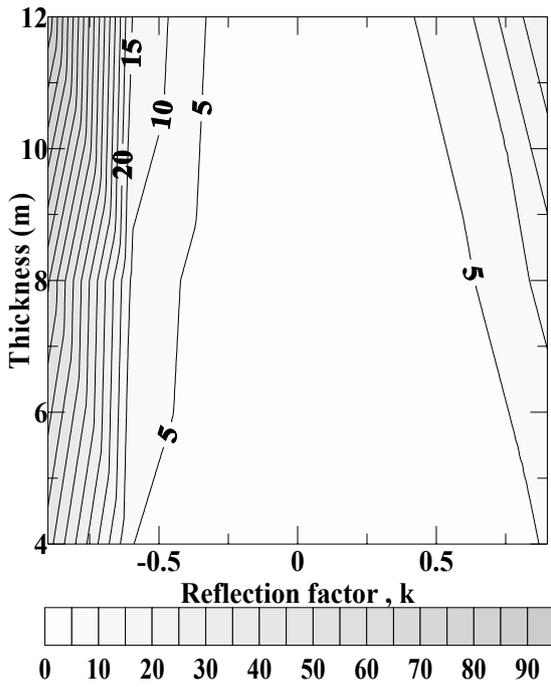
(b) Max. $S_{N, \Delta Zc}$



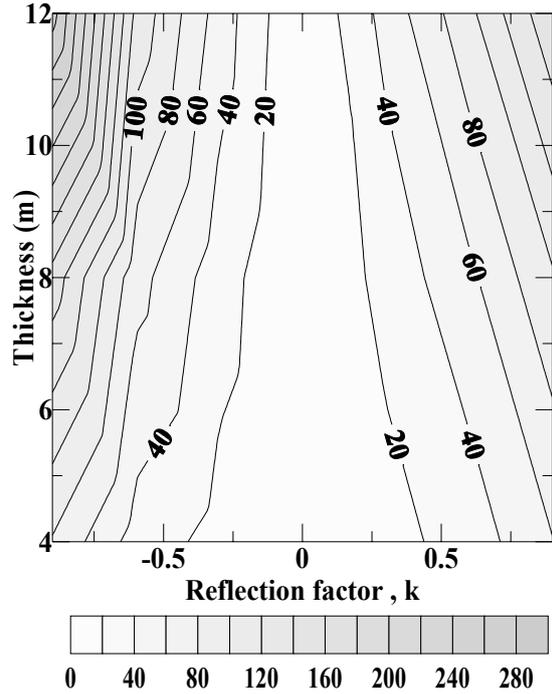
(c) Max. $S_{\Delta t}$

(d) Max. $S_{N, \Delta t}$

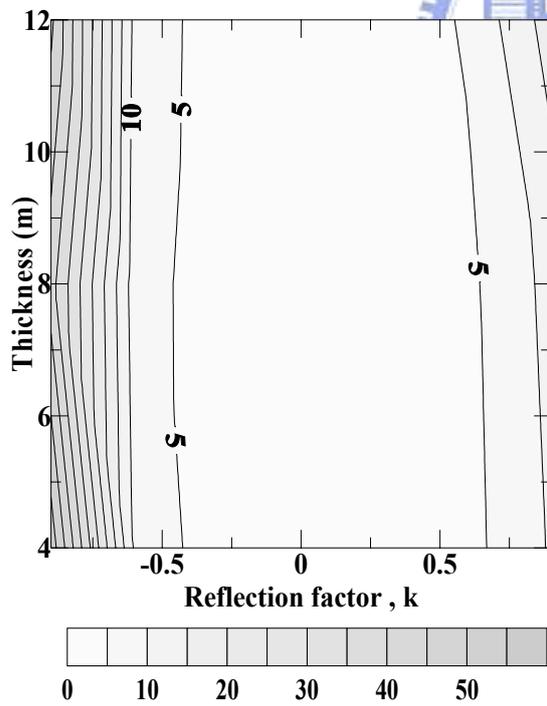
圖 G-7 Wenner 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖(t=12m)



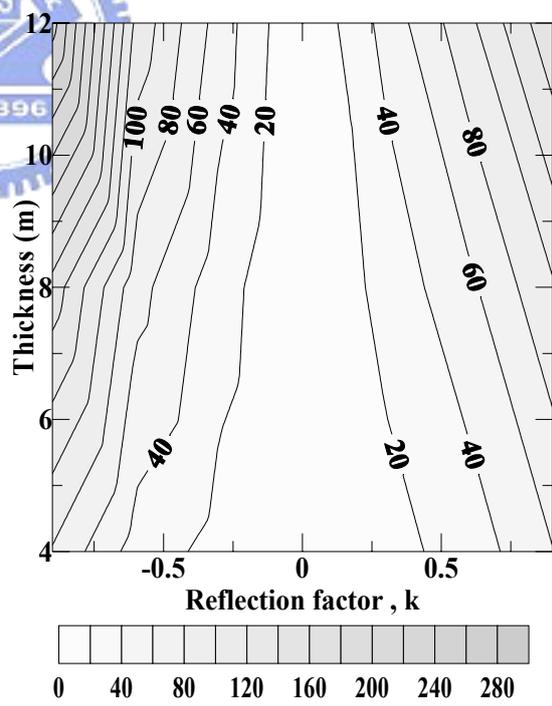
(a) Max. $S_{\Delta Z_c}$



(b) Max. $S_{N, \Delta Z_c}$

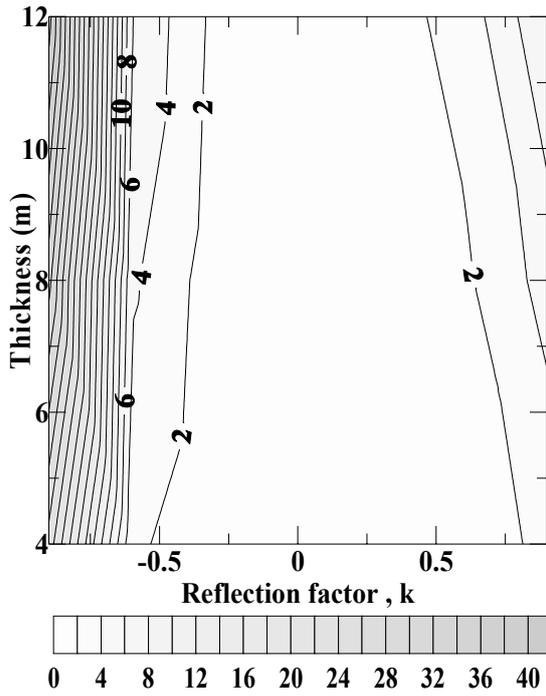


(c) Max. $S_{\Delta t}$

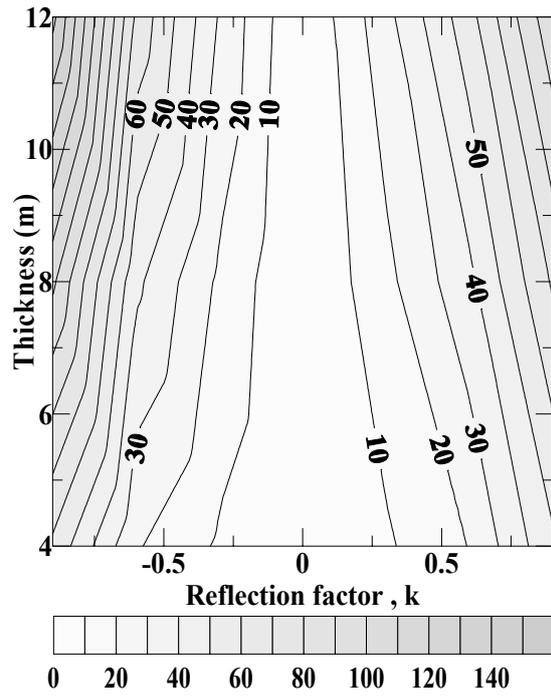


(d) Max. $S_{N, \Delta t}$

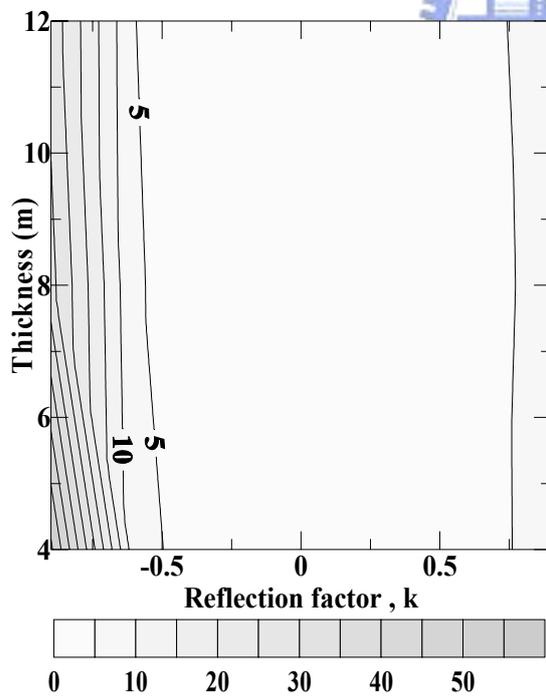
圖 G-8 Pole-Pole 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖($Z_c=10m$)



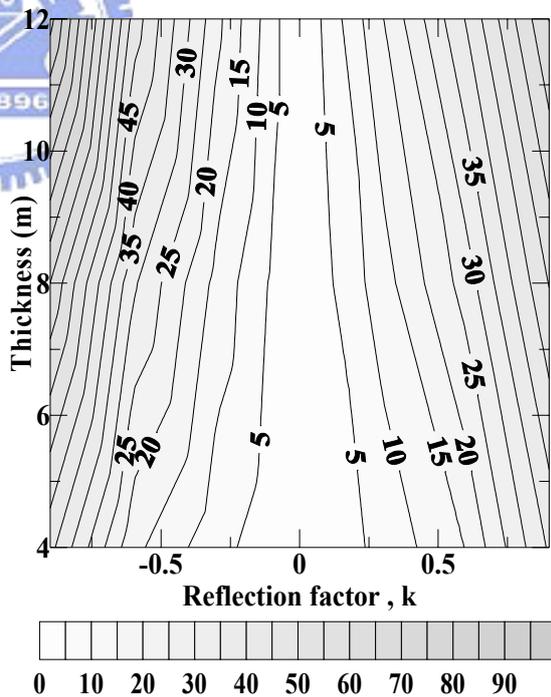
(a) Max. $S_{\Delta Z_c}$



(b) Max. $S_{N, \Delta Z_c}$

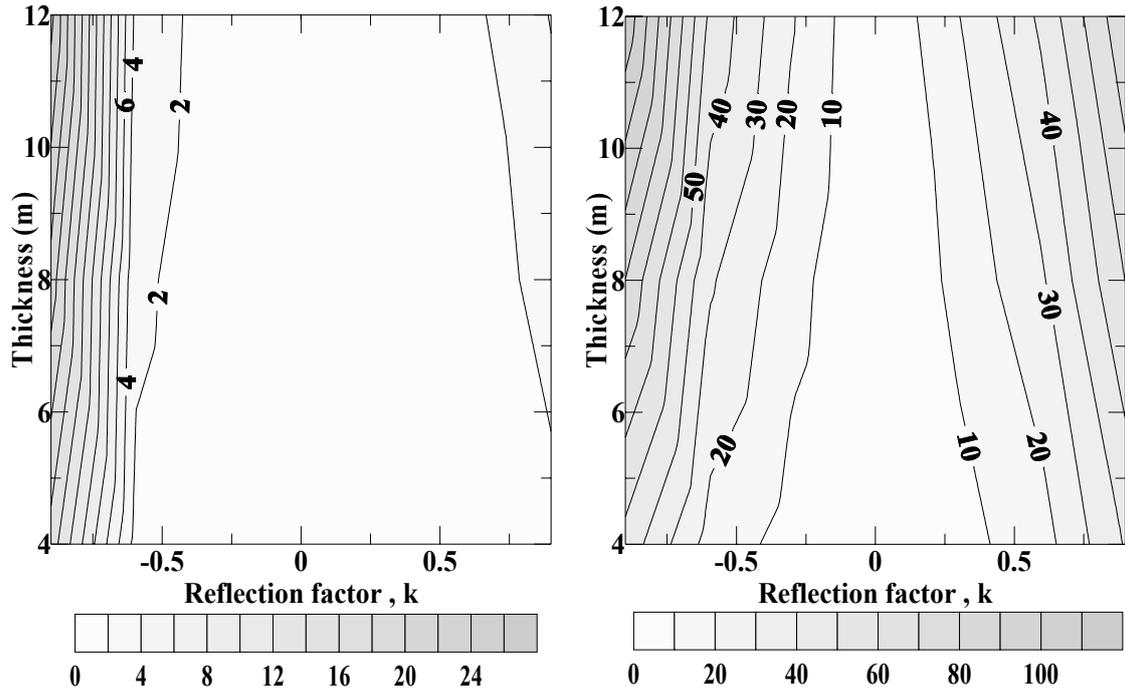


(c) Max. $S_{\Delta t}$



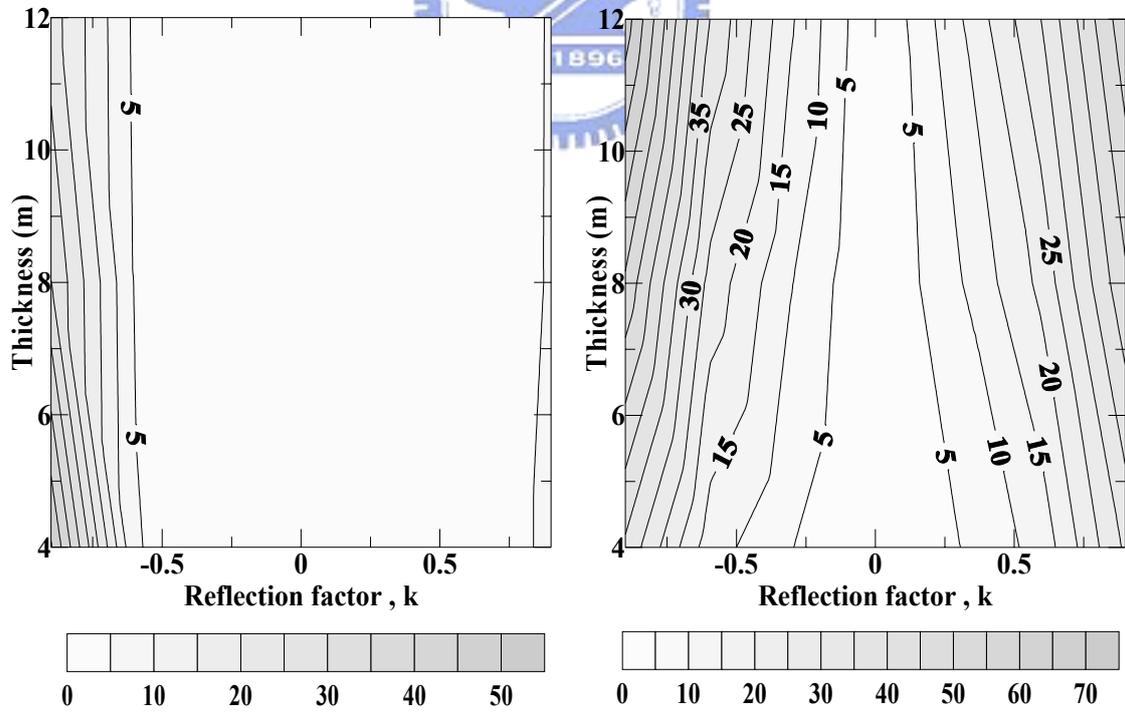
(d) Max. $S_{N, \Delta t}$

圖 G-9 Pole-Pole 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖($Z_c=15m$)



(a)Max. $S_{\Delta Z_c}$

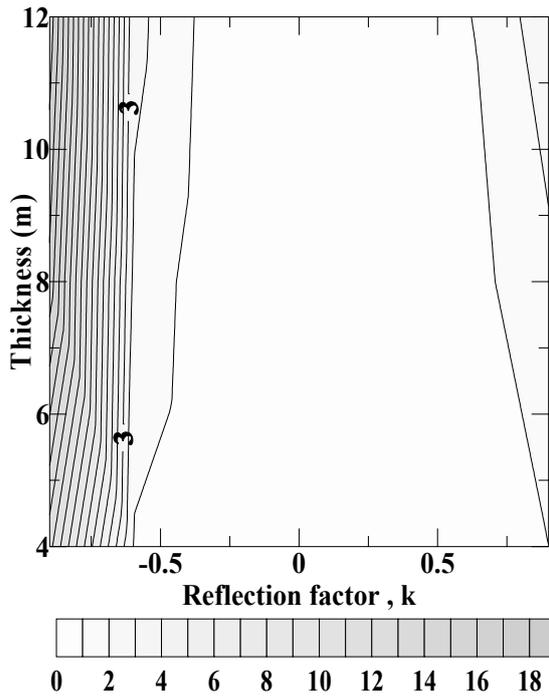
(b)Max. $S_{N, \Delta Z_c}$



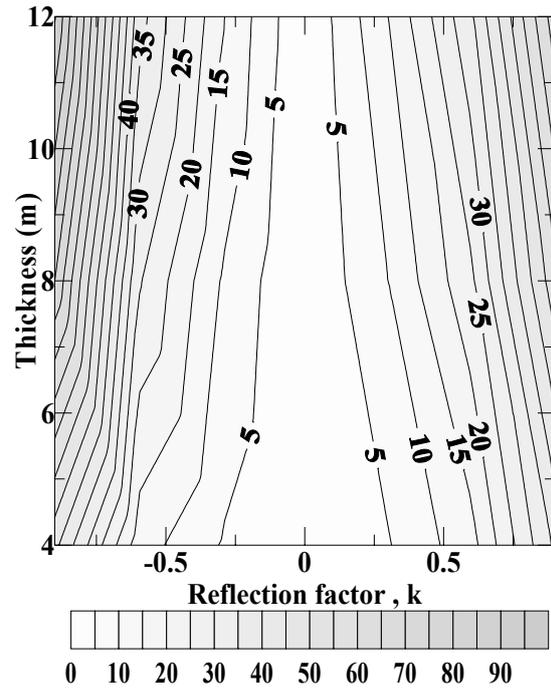
(c)Max. $S_{\Delta t}$

(d)Max. $S_{N, \Delta t}$

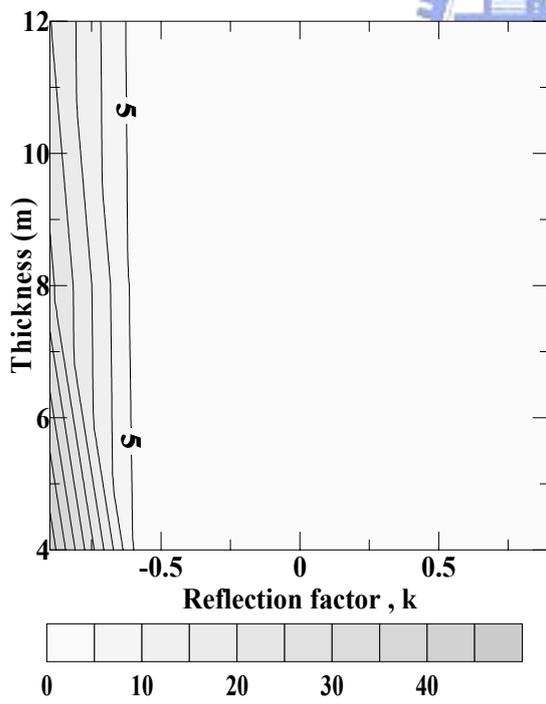
圖 G-10 Pole-Pole 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖($Z_c=20m$)



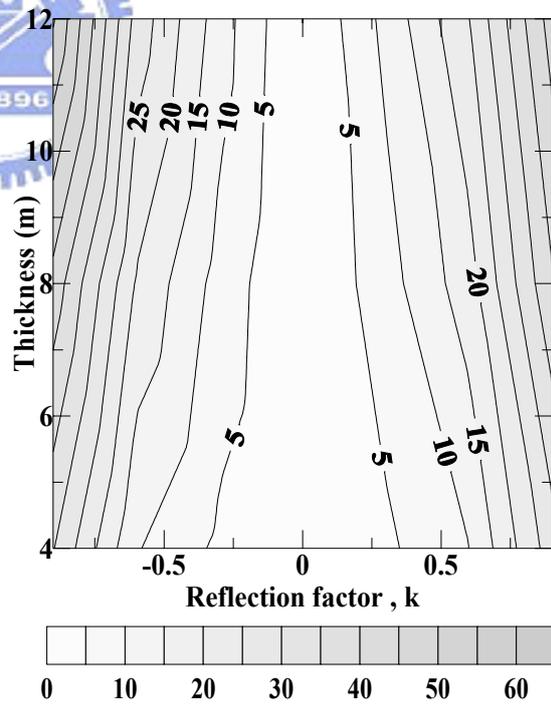
(a) Max. $S_{\Delta Z_c}$



(b) Max. $S_{N, \Delta Z_c}$

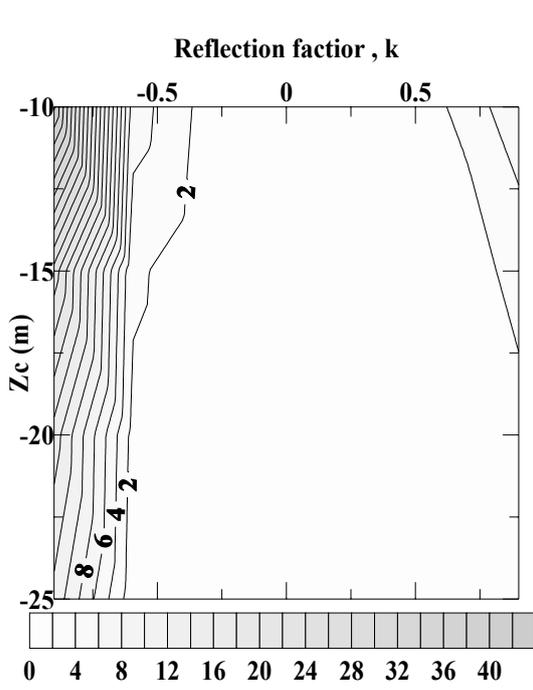


(c) Max. $S_{\Delta t}$

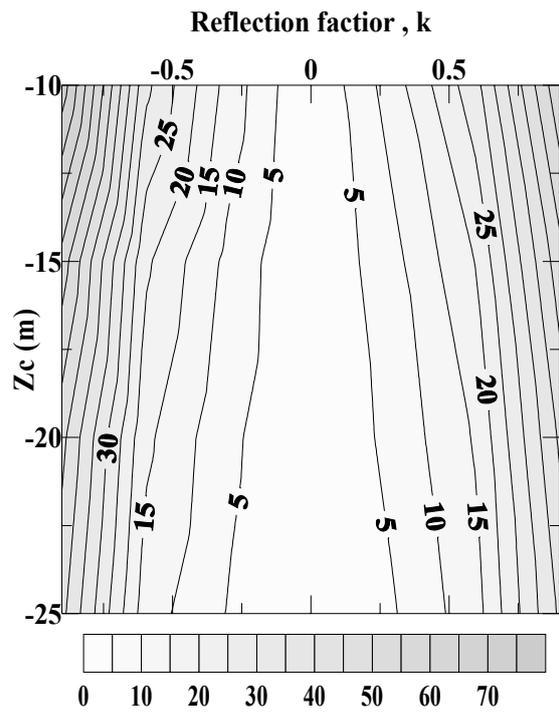


(d) Max. $S_{N, \Delta t}$

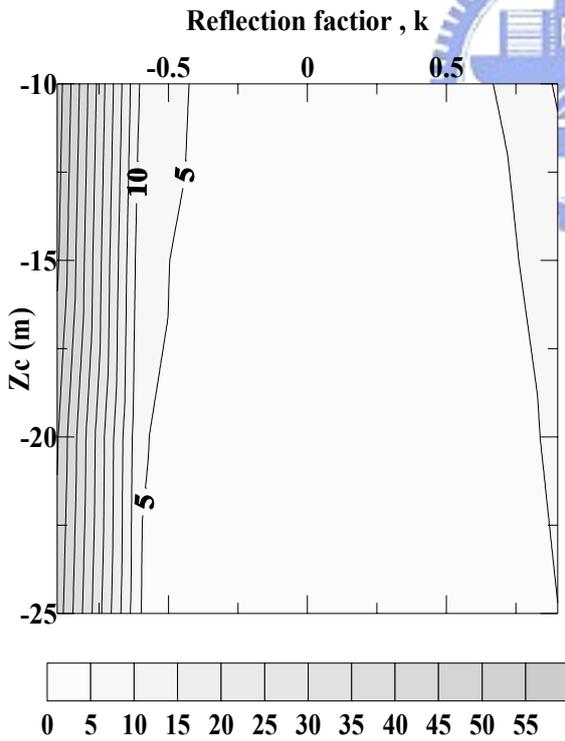
圖 G-11 Pole-Pole 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖($Z_c=25m$)



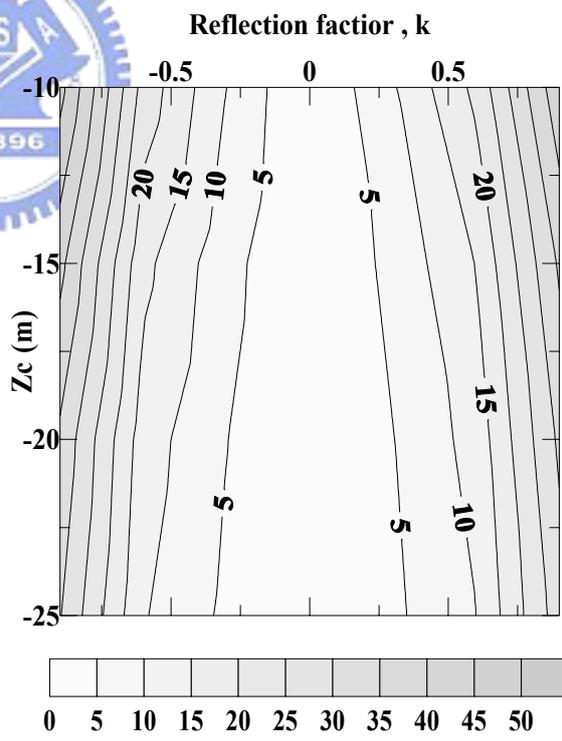
(a) Max. $S_{\Delta Z_c}$



(b) Max. $S_{N, \Delta Z_c}$

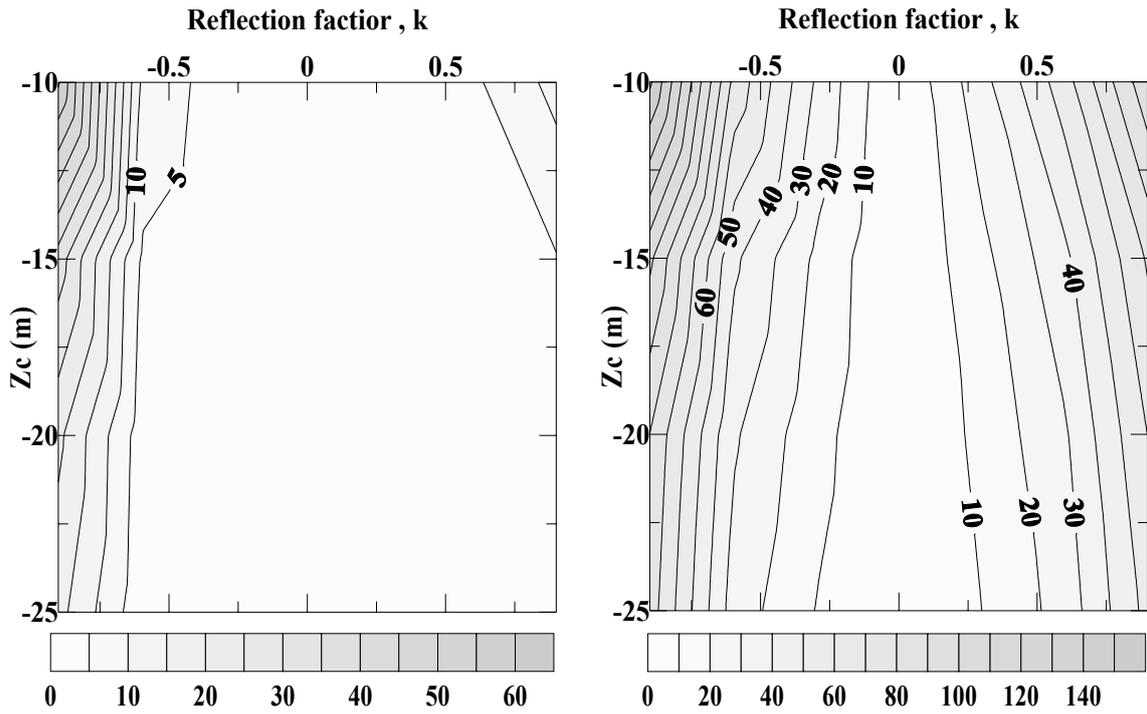


(c) Max. $S_{\Delta t}$



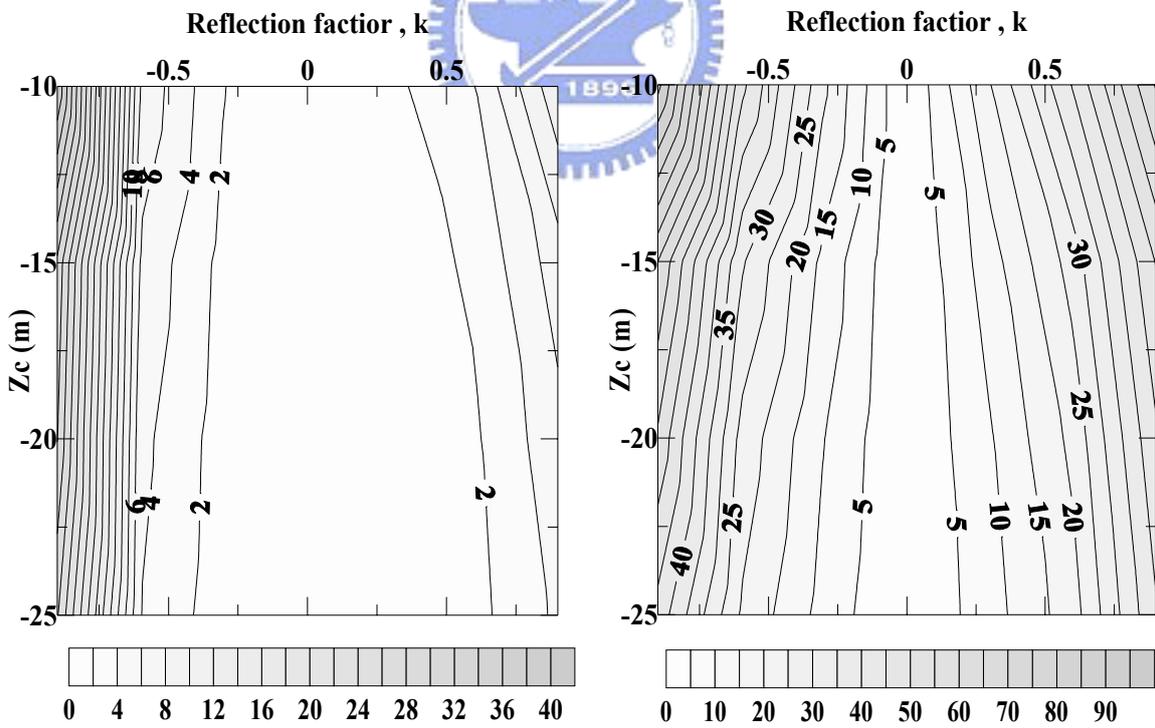
(d) Max. $S_{N, \Delta t}$

圖 G-12 Pole-Pole 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖($t=4m$)



(a) Max. $S_{\Delta Zc}$

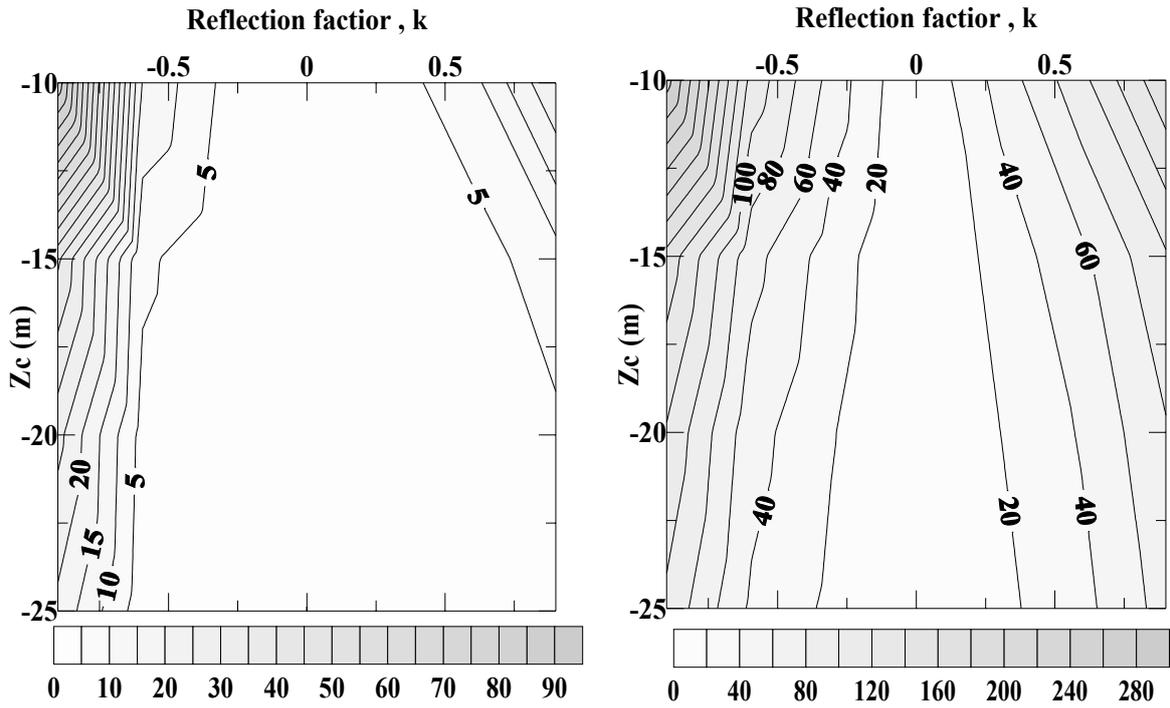
(b) Max. $S_{N, \Delta Zc}$



(c) Max. $S_{\Delta t}$

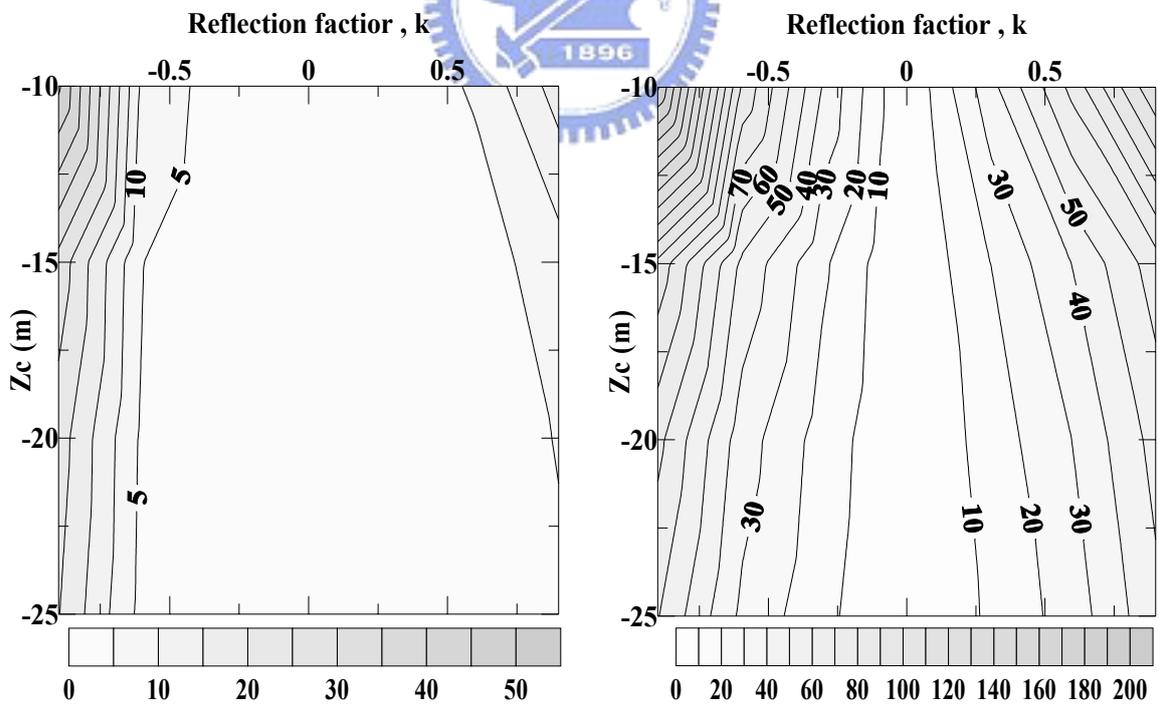
(d) Max. $S_{N, \Delta t}$

圖 G-13 Pole-Pole 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖(t=8m)



(a) Max. $S_{\Delta Zc}$

(b) Max. $S_{N, \Delta Zc}$

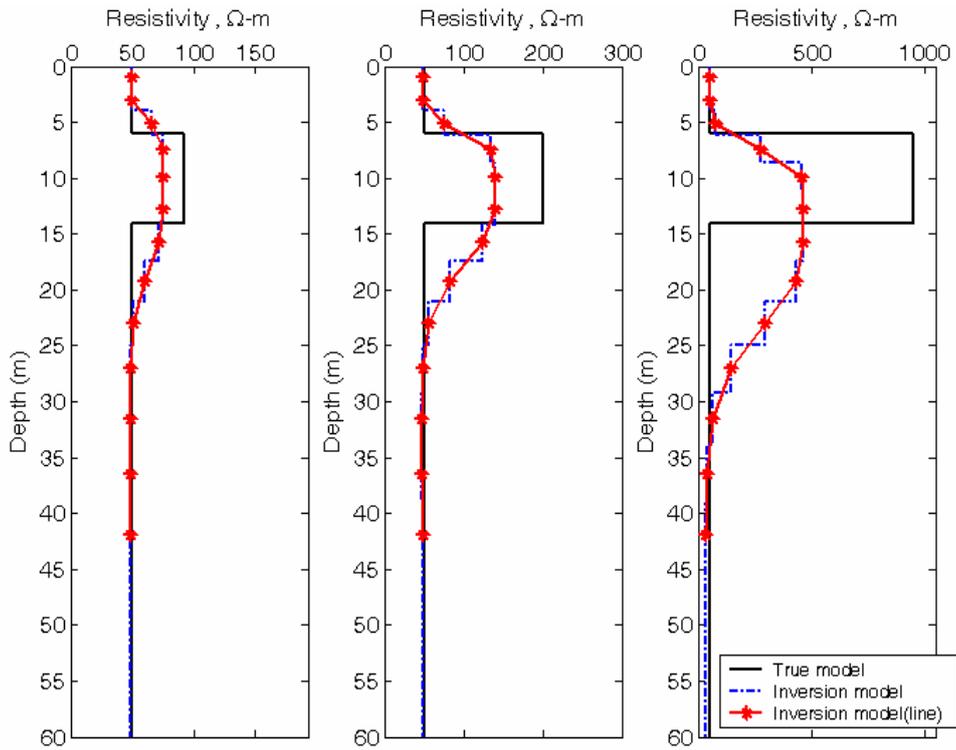


(c) Max. $S_{\Delta t}$

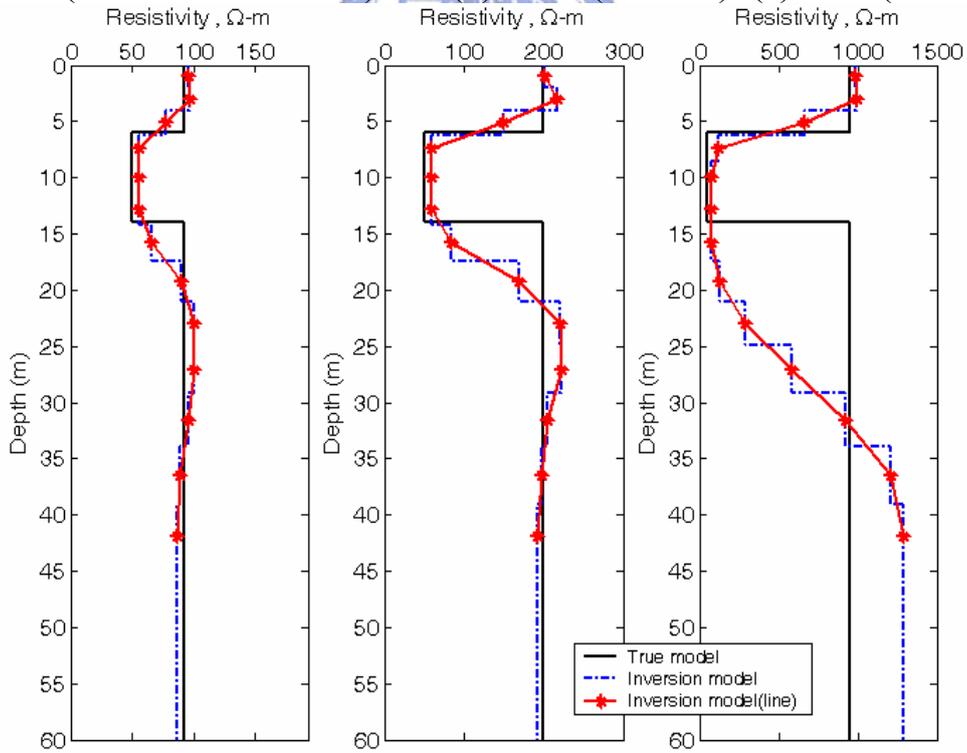
(d) Max. $S_{N, \Delta t}$

圖 G-14 Pole-Pole 最大靈敏度與最大正規化靈敏度影像圖(t=12m)

附錄 H-水平夾層界面反算結果

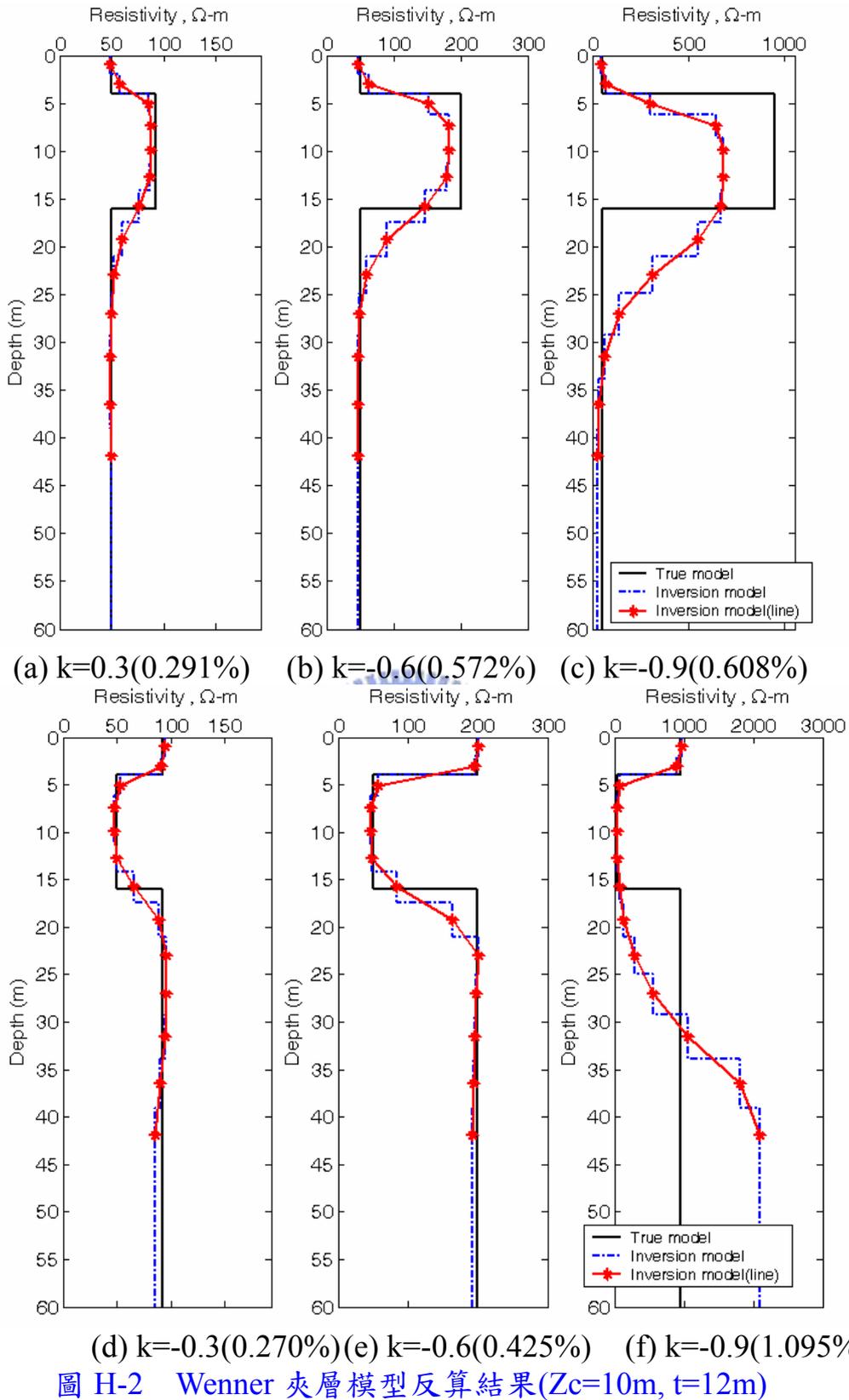


(a) $k=0.3$ (Abs. error=0.304%) (b) $k=0.6$ (0.349%) (c) $k=0.9$ (0.800%)



(d) $k=-0.3$ (0.372%) (e) $k=-0.6$ (0.656%) (f) $k=-0.9$ (0.985%)

圖 H-1 Wenner 夾層模型反算結果($Z_c=10m$, $t=8m$)



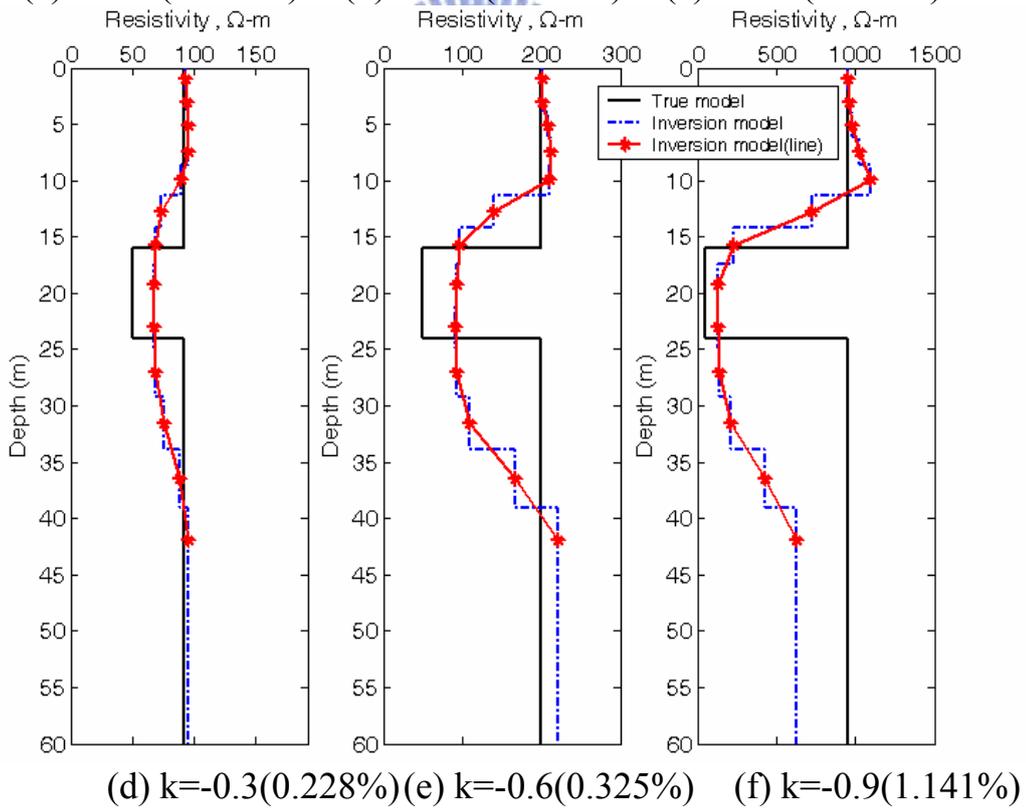
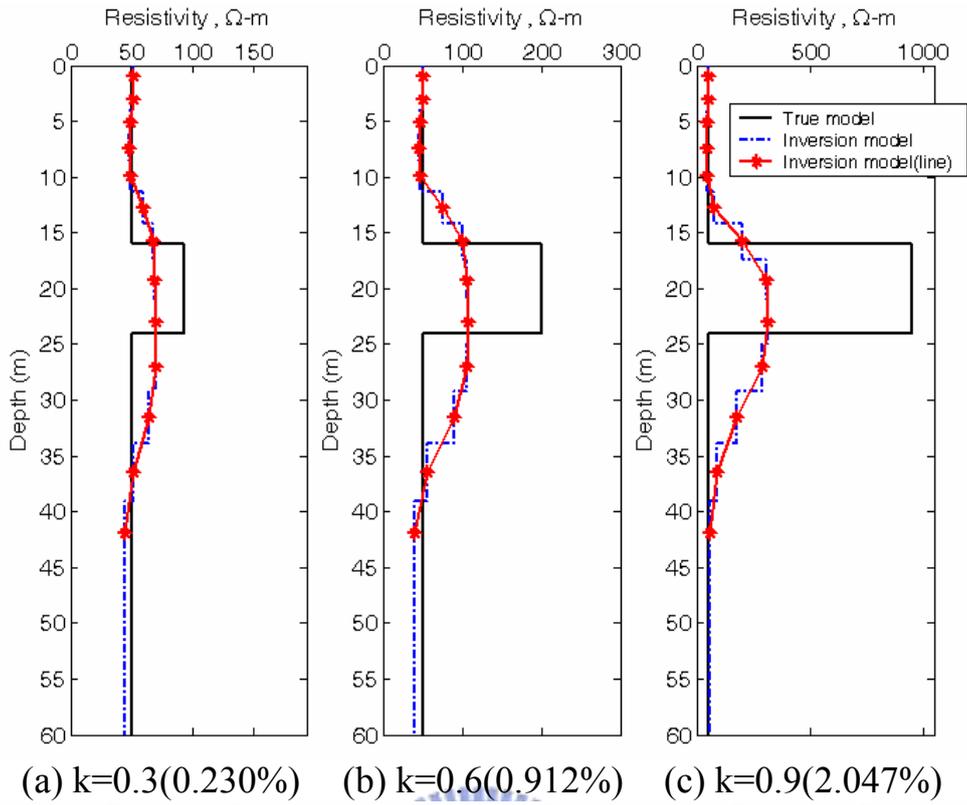
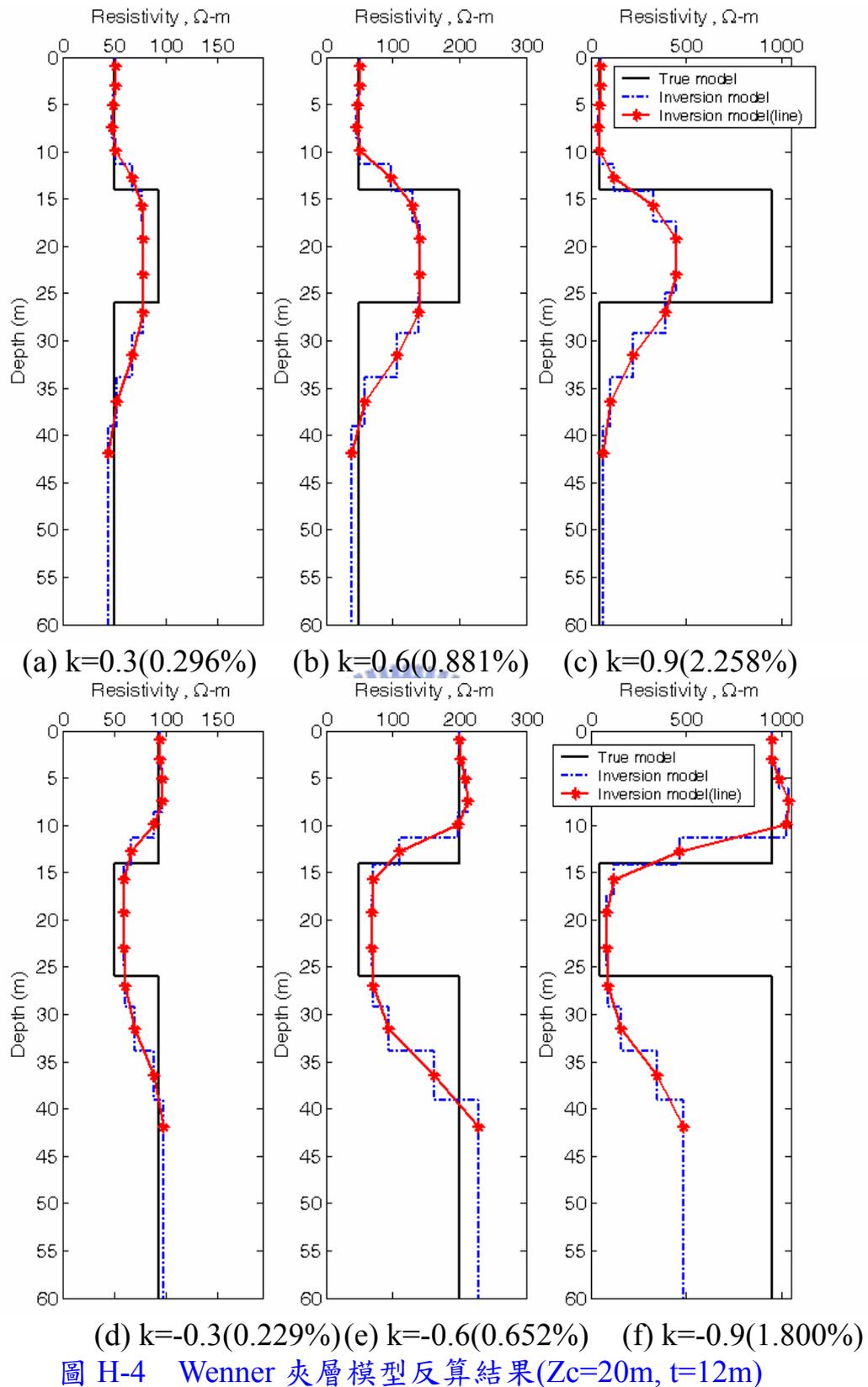
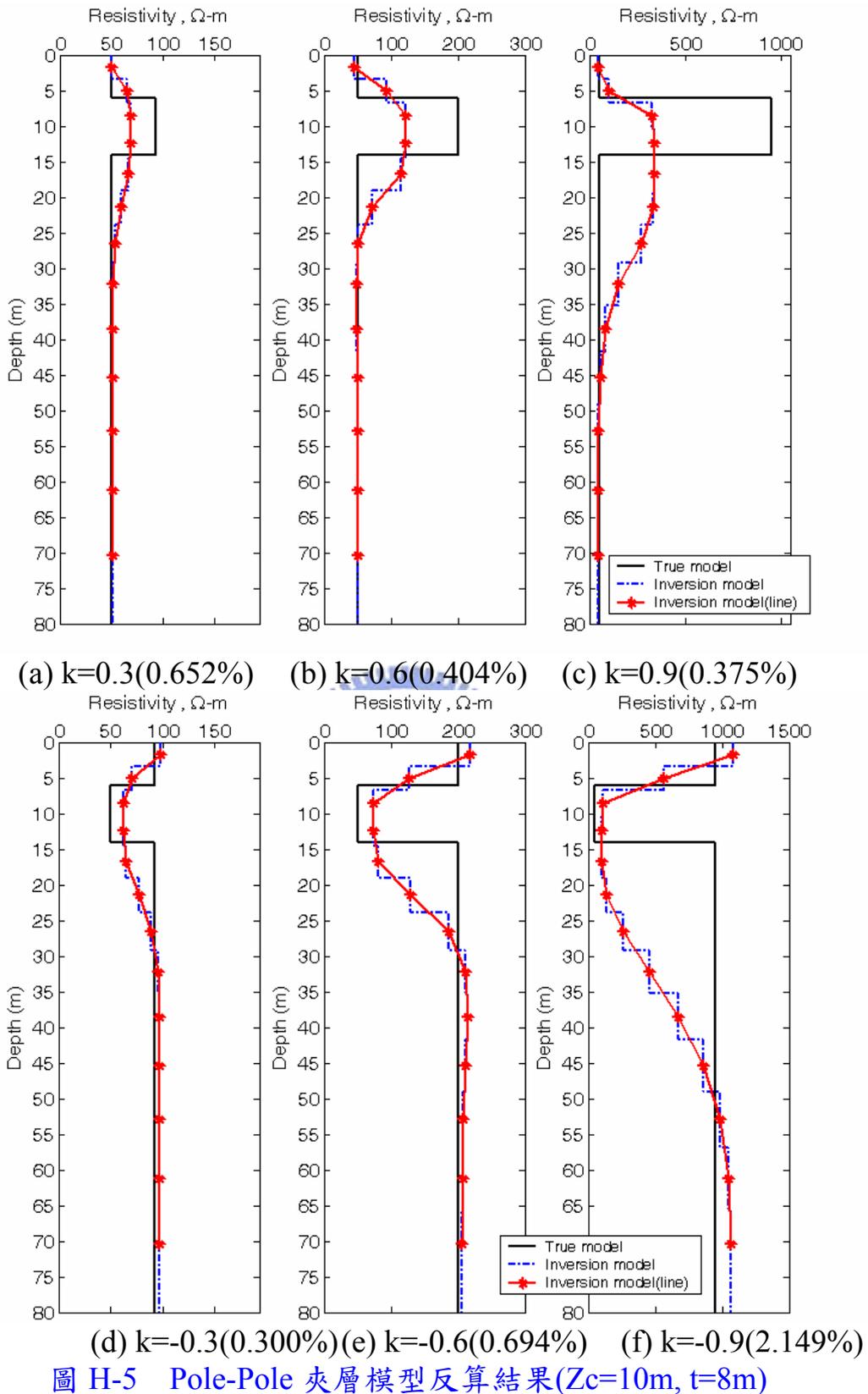


圖 H-3 Wenner 夾層模型反算結果($Z_c=20m, t=8m$)





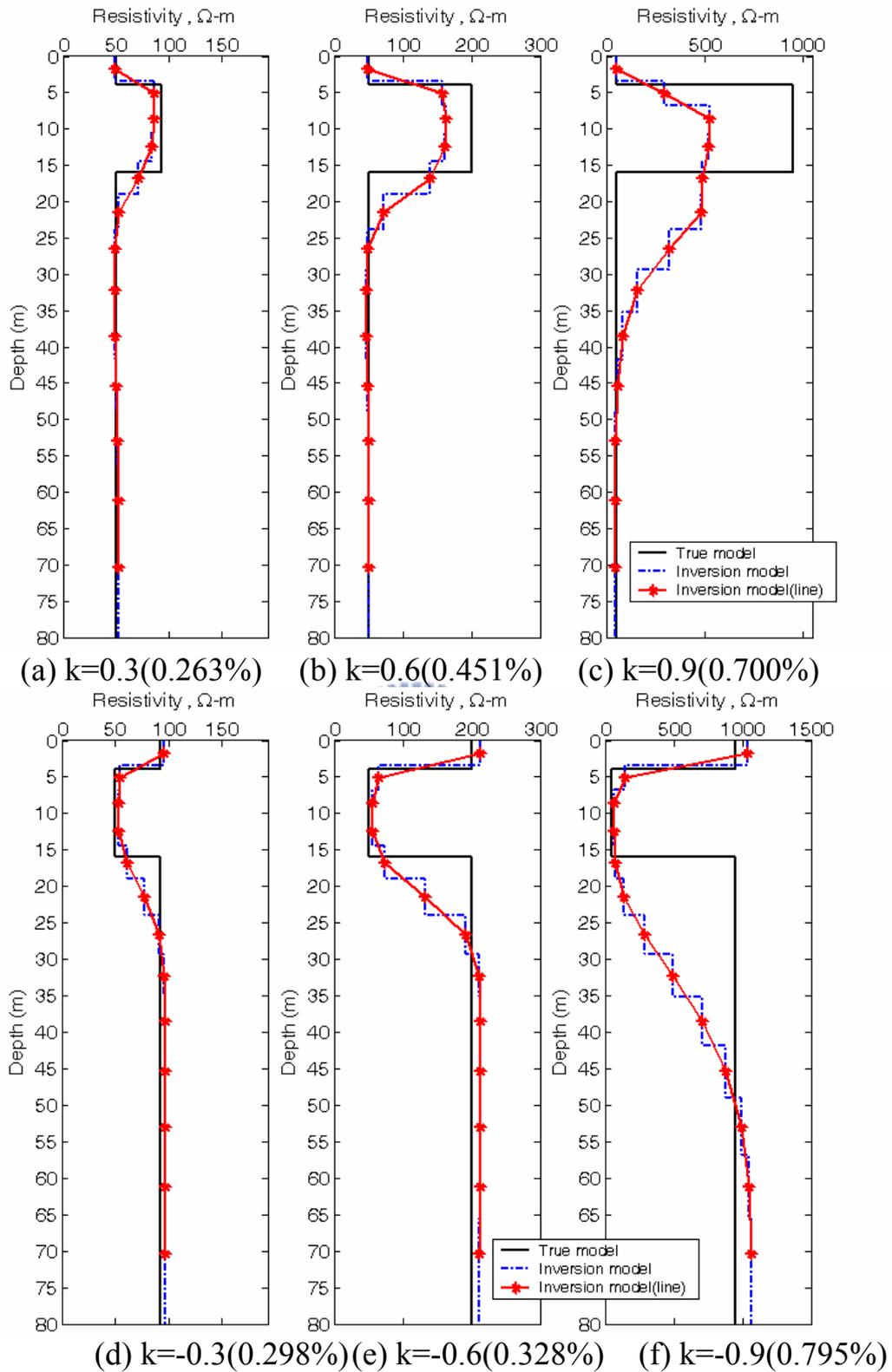


圖 H-6 Pole-Pole 夾層模型反算結果($Z_c=10\text{m}$, $t=12\text{m}$)

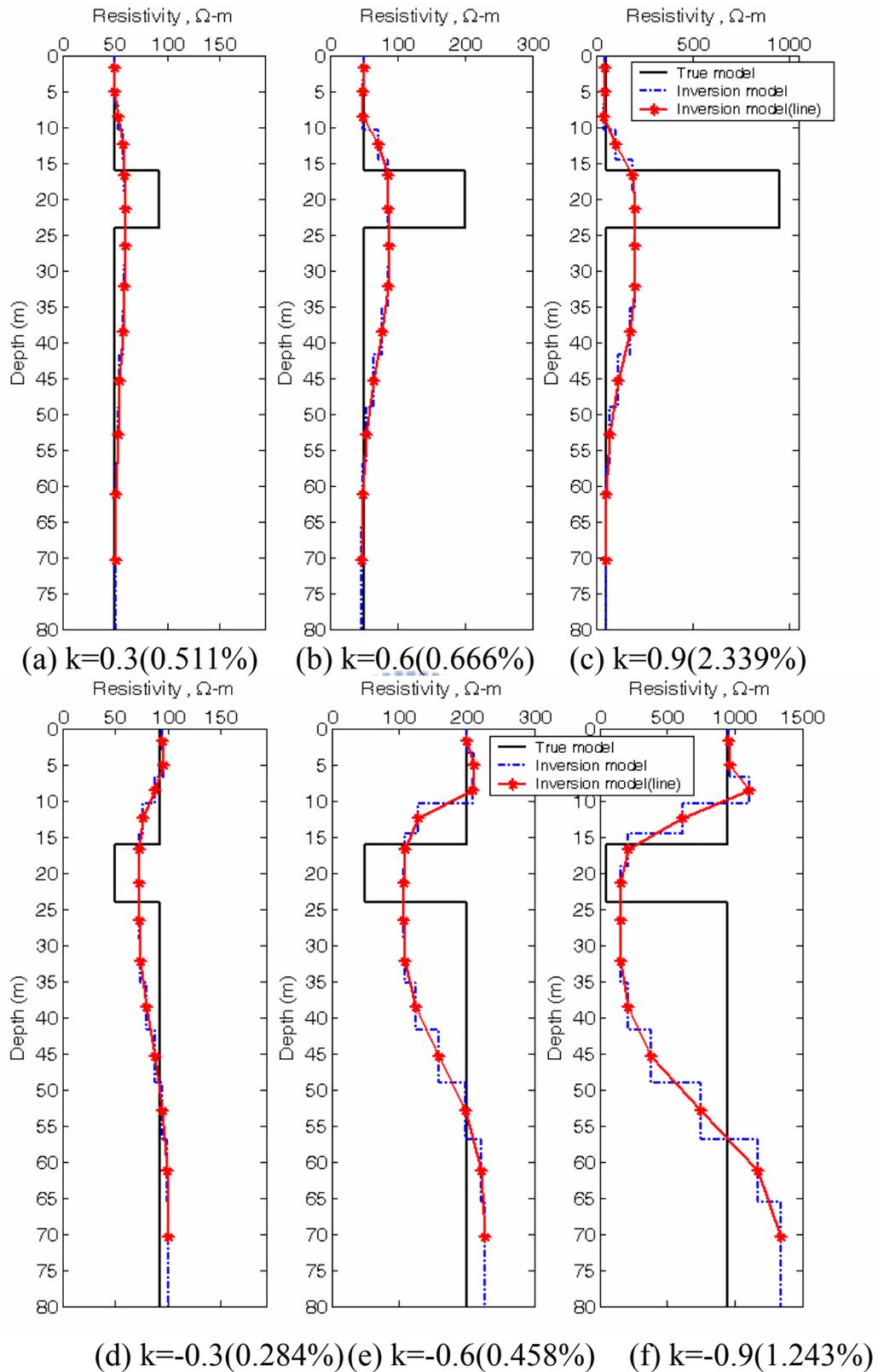


圖 H-7 Pole-Pole 夾層模型反算結果($Z_c=20\text{m}$, $t=8\text{m}$)

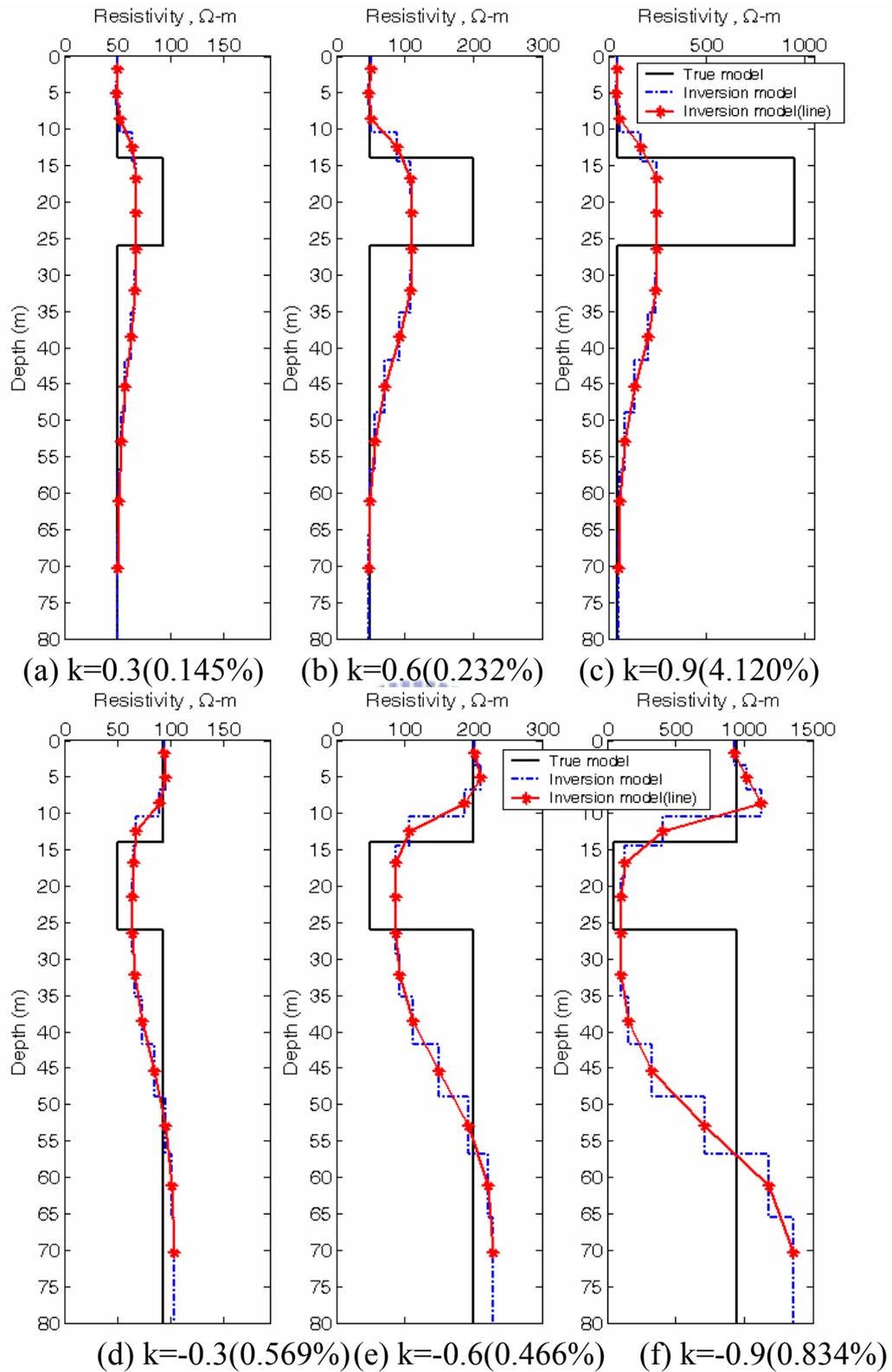


圖 H-8 Pole-Pole 夾層模型反算結果($Z_c=20\text{m}$, $t=12\text{m}$)

附錄 I-垂直界面解析度探討

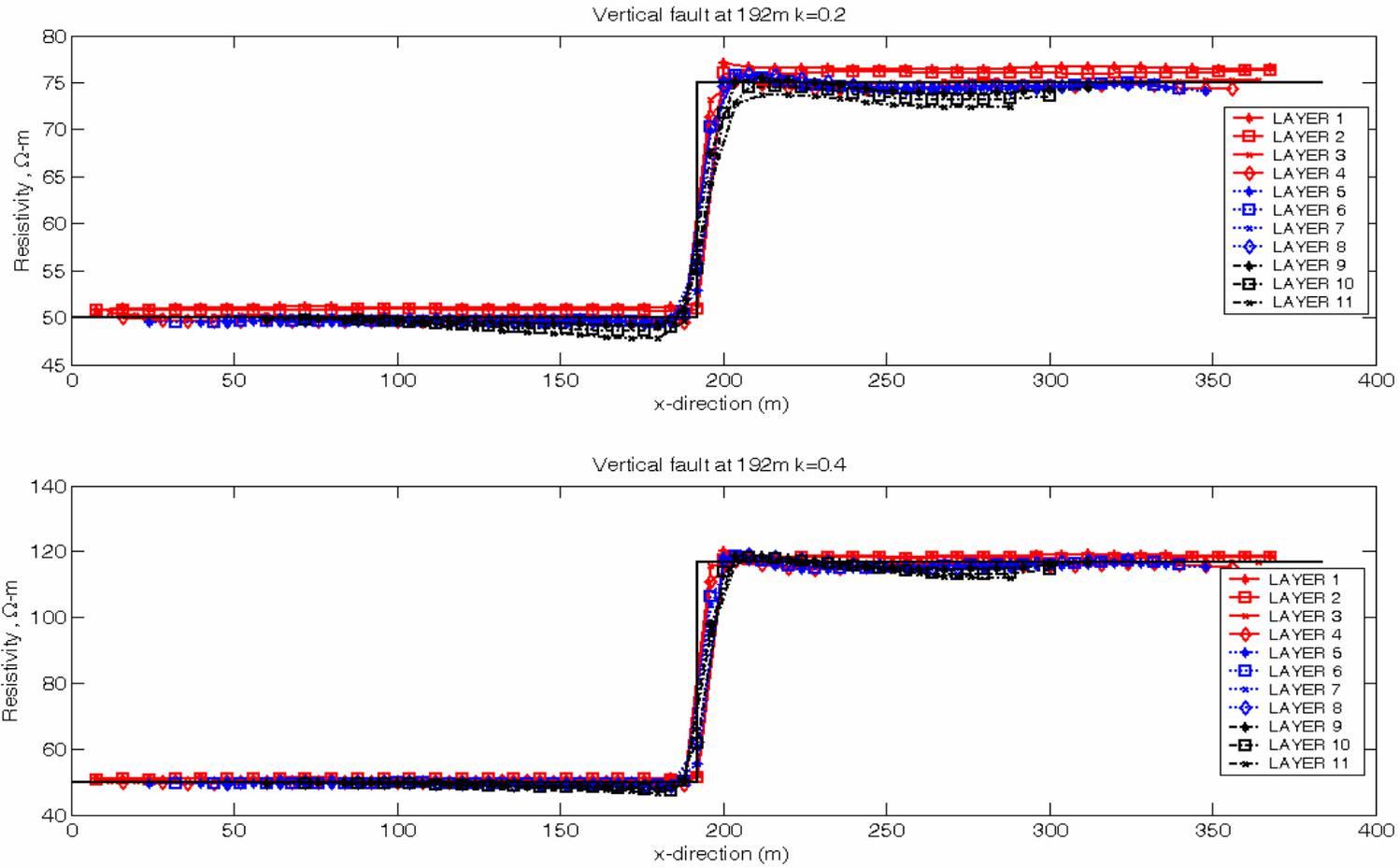


圖 I-1 Wenner 垂直界面反算結果之側向變化圖(k=0.2 與 k=0.4)

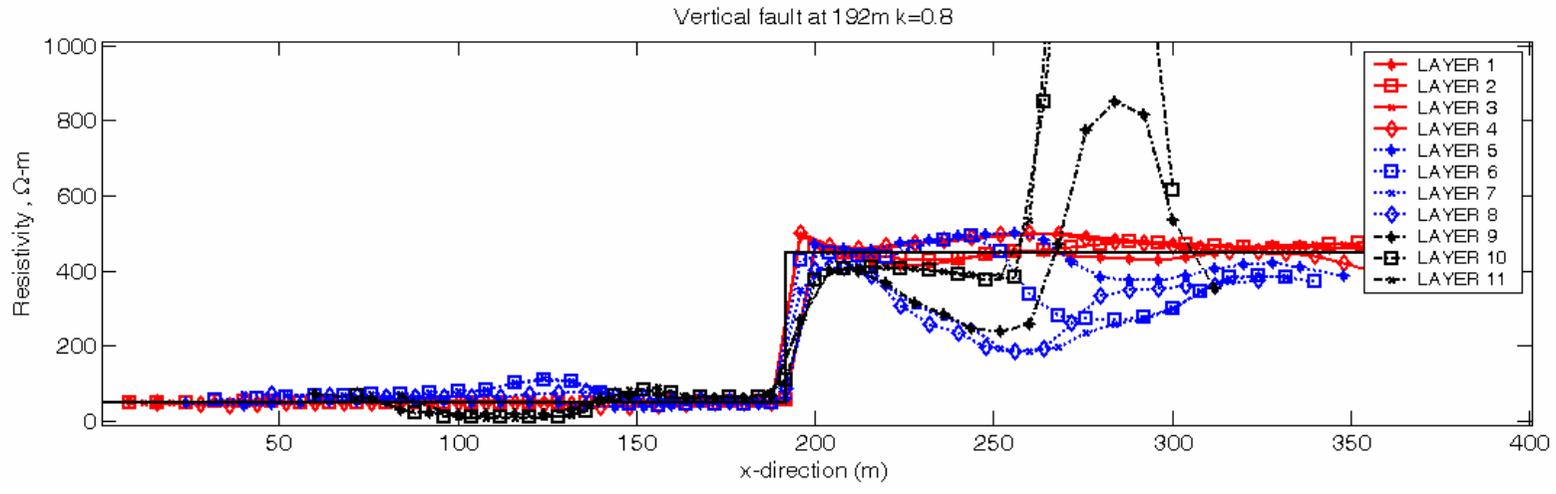
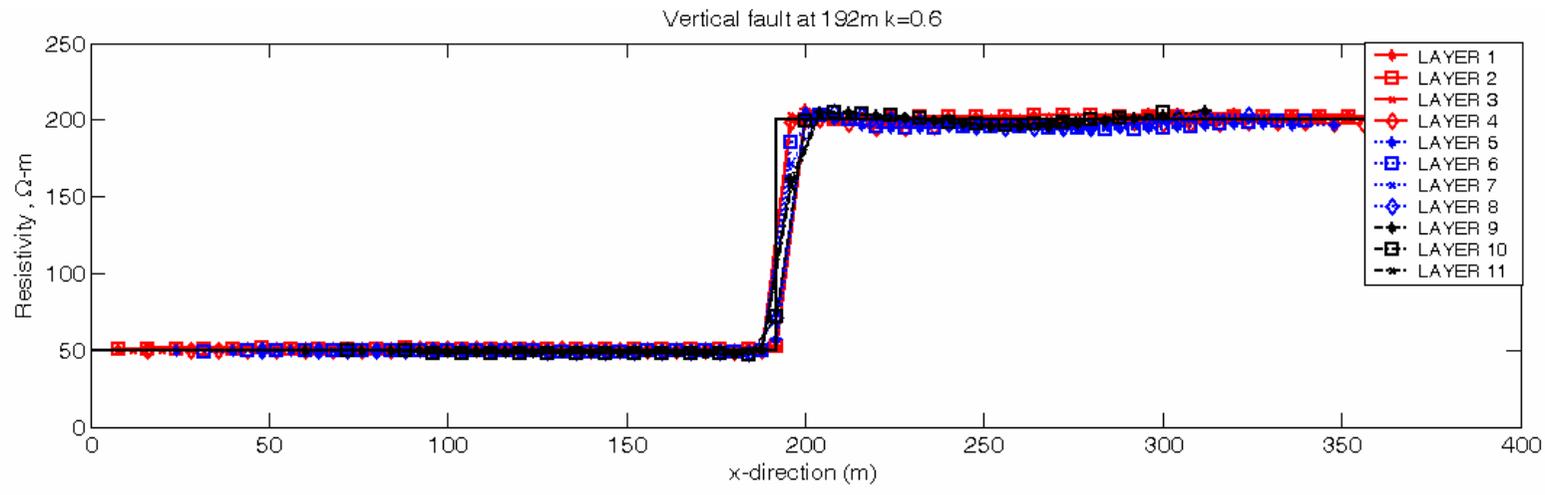


圖 I-2 Wenner 垂直界面反算結果側向變化圖(k=0.6 與 k=0.8)

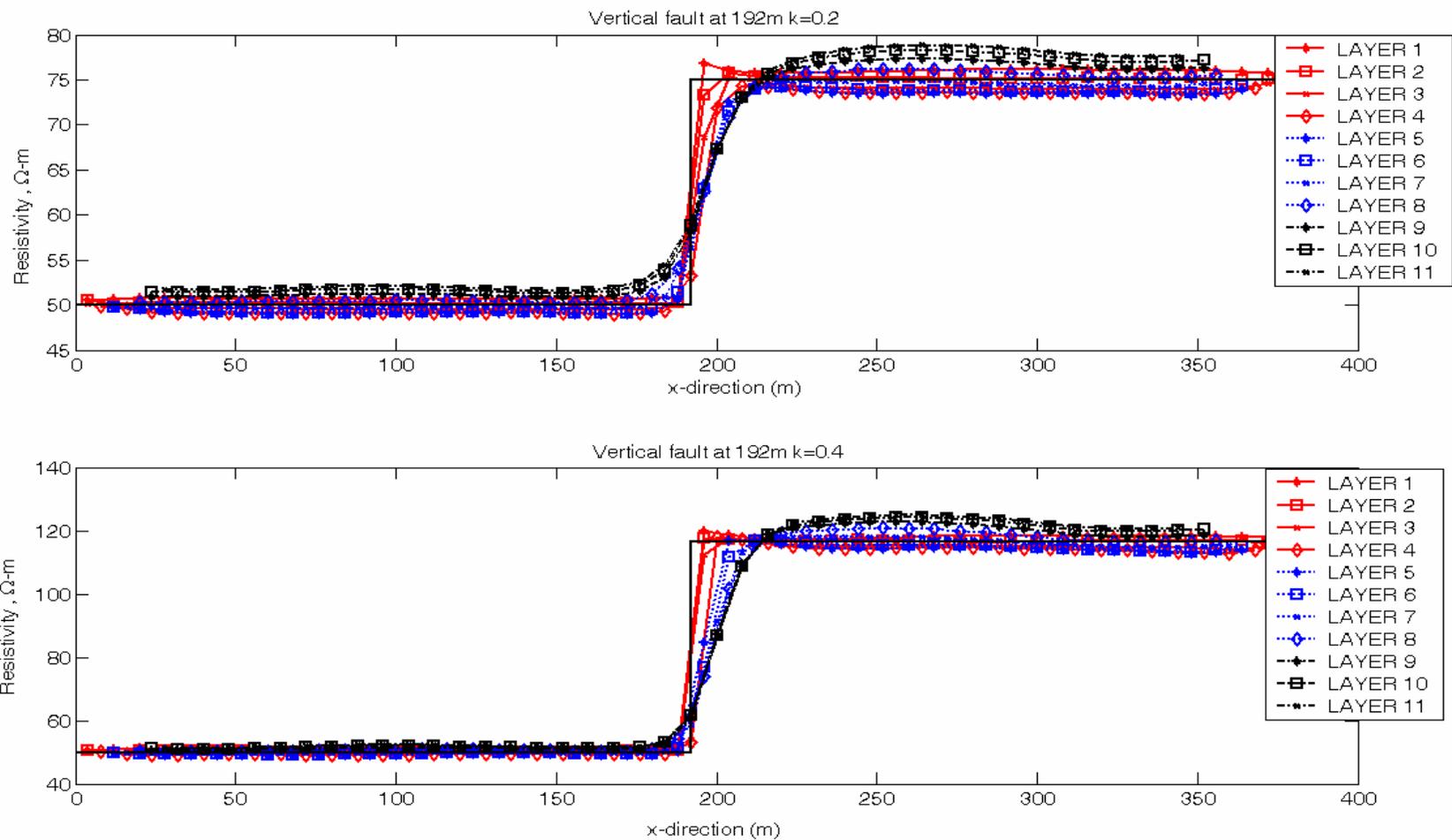


圖 I-3 Pole-Pole 垂直界面反算結果側向變化圖(k=0.2 與 k=0.4)

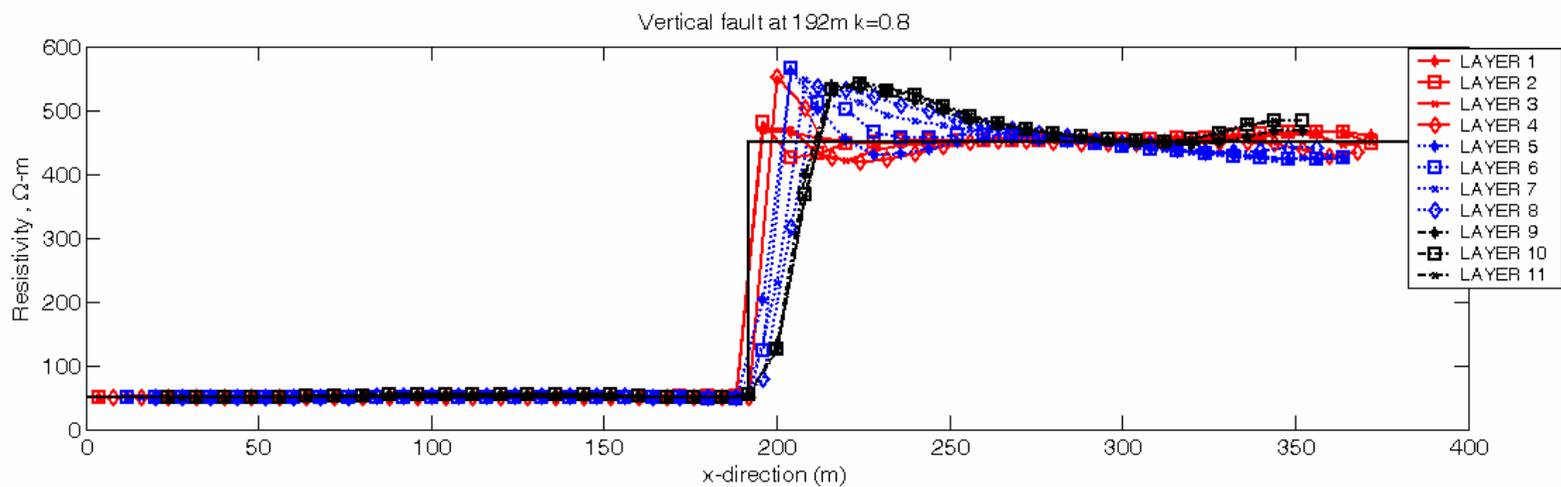
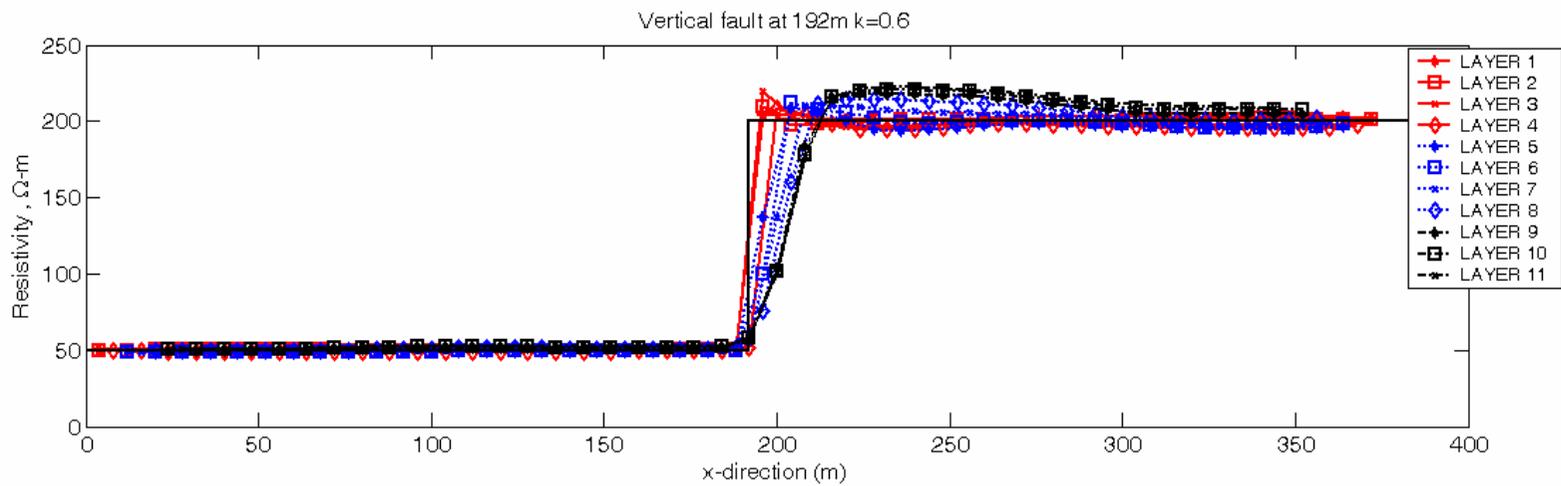
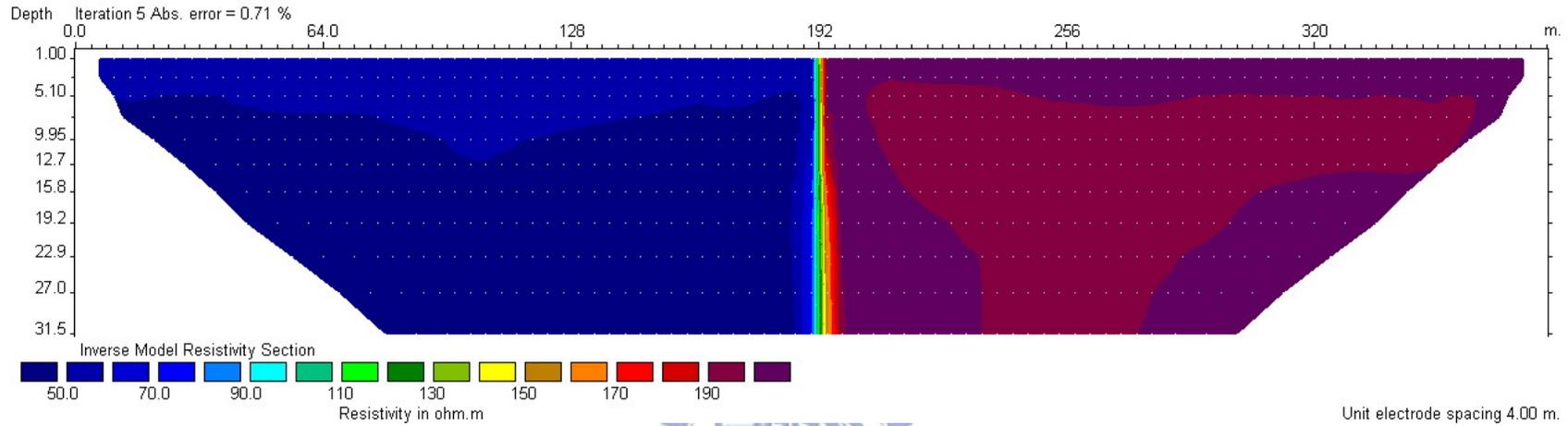
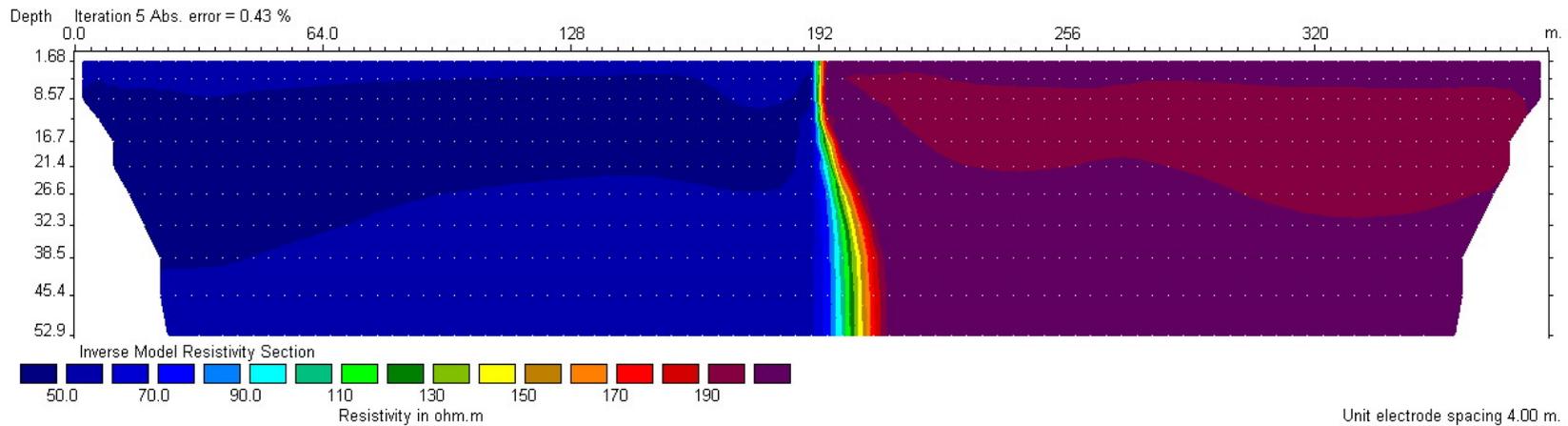


圖 I-4 Pole-Pole 垂直界面反算結果側向變化圖(k=0.2 與 k=0.4)



(a) Wenner 垂直界面反算結果之影像圖



(b) Pole-Pole 垂直界面反算結果之影像圖

圖 I-5 垂直界面反算結果影像圖(k=0.6，界面位於 192m)

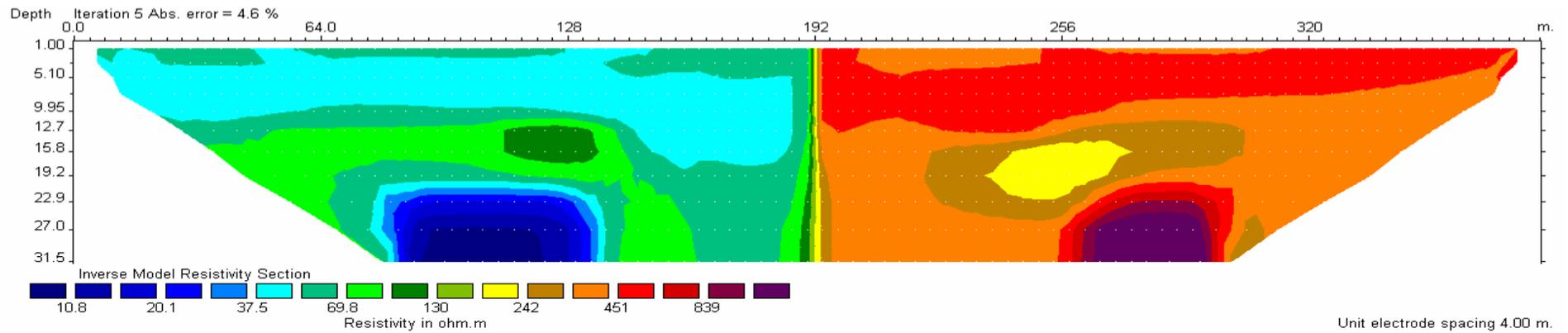


圖 I-6 垂直界面反算結果影像圖(k=-0.8，界面位於192m)



附錄 J-垂直夾層界面解析度探討

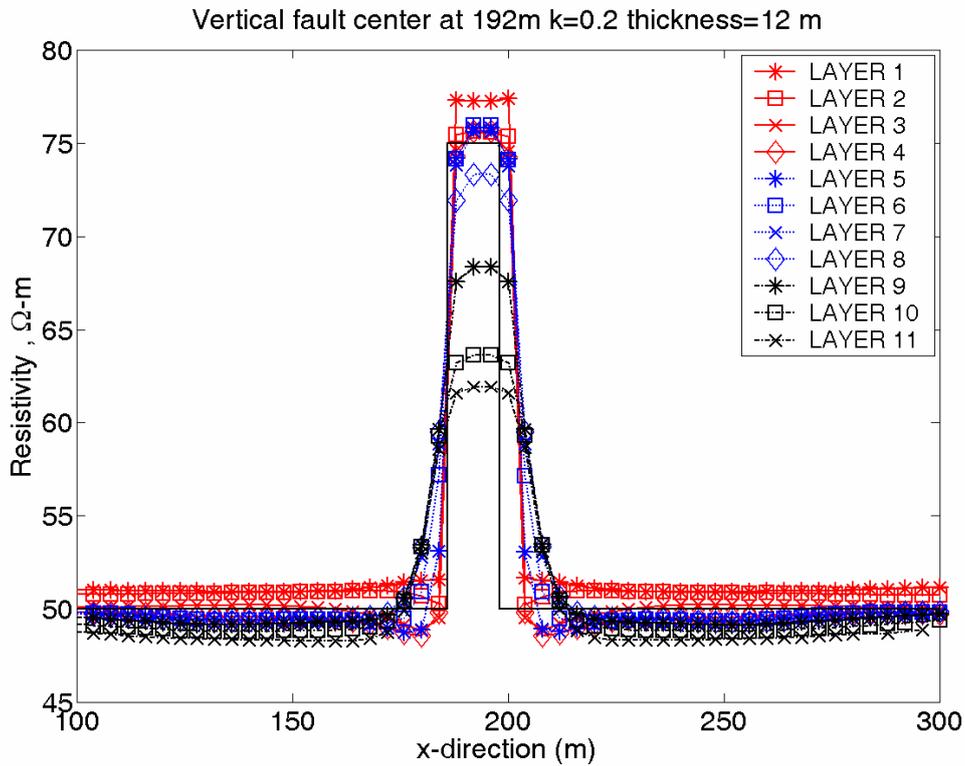


圖 J-1 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=0.2)

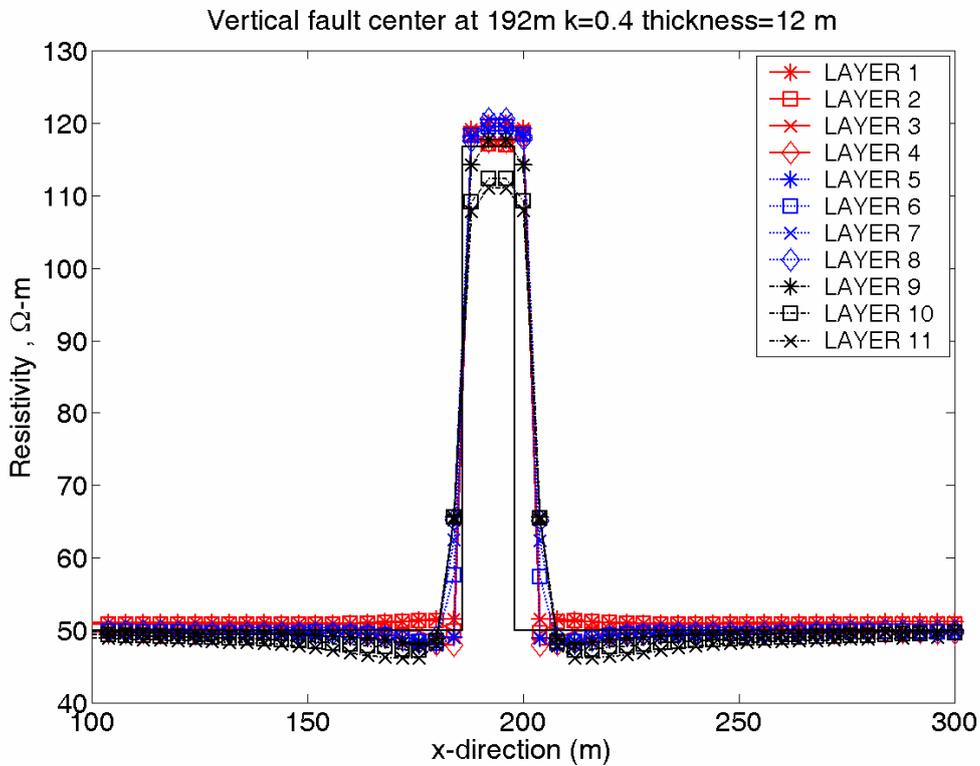


圖 J-2 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=0.4)

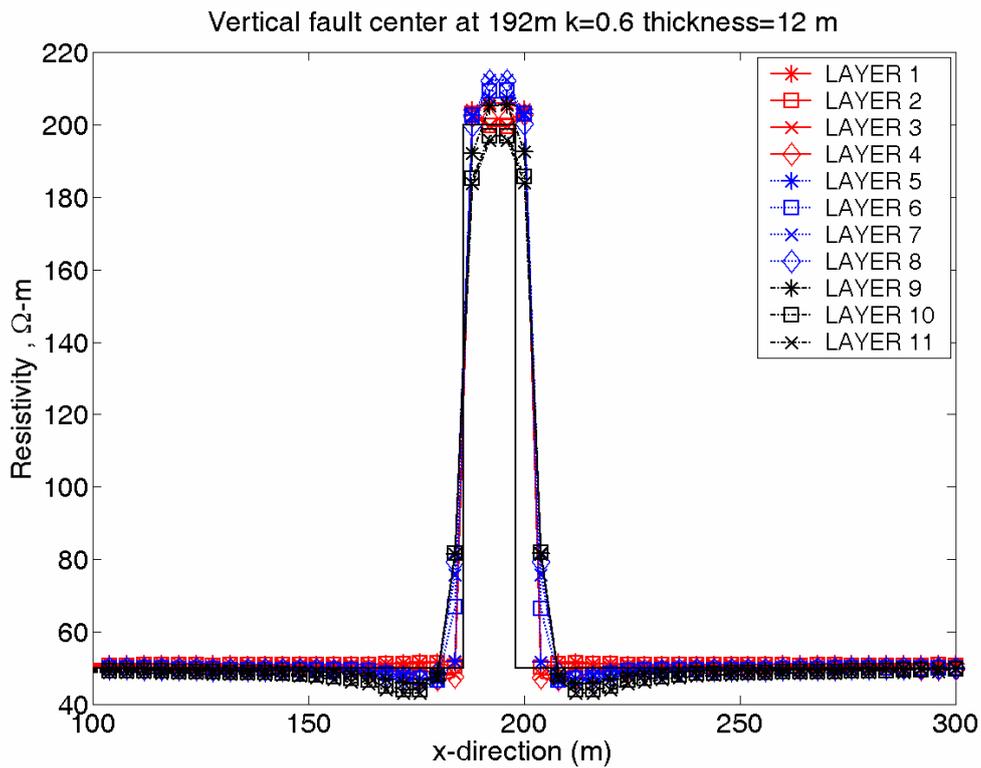


圖 J-3 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=0.6)

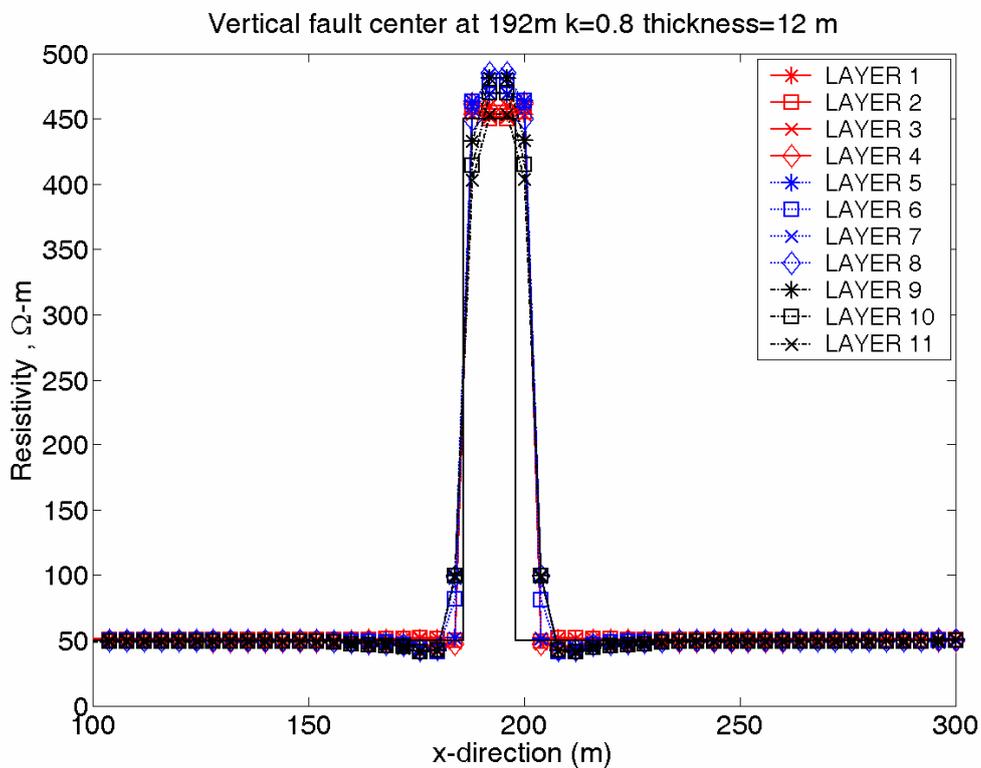


圖 J-4 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=0.8)

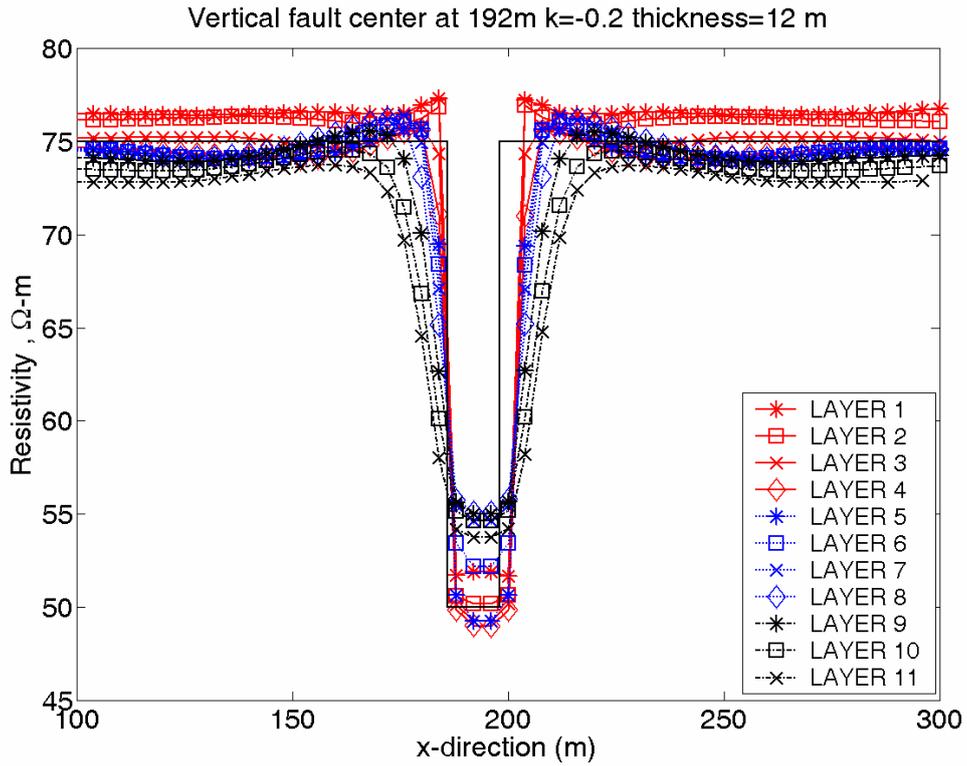


圖 J-5 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=-0.2)

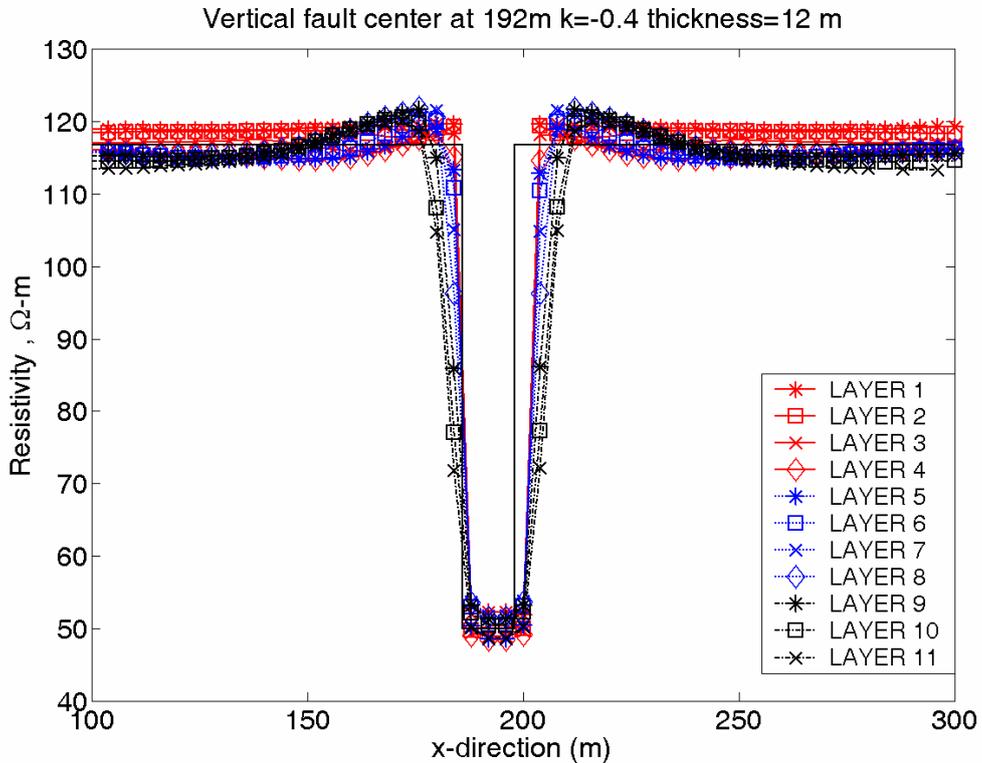


圖 J-6 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=-0.4)

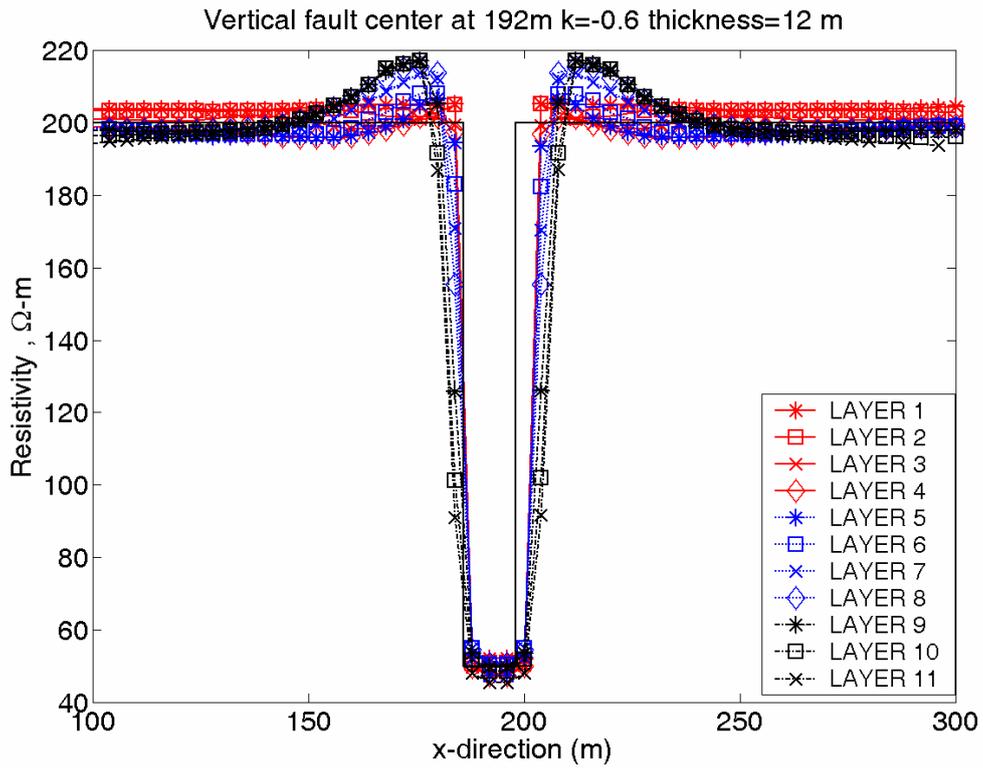


圖 J-7 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=-0.6)

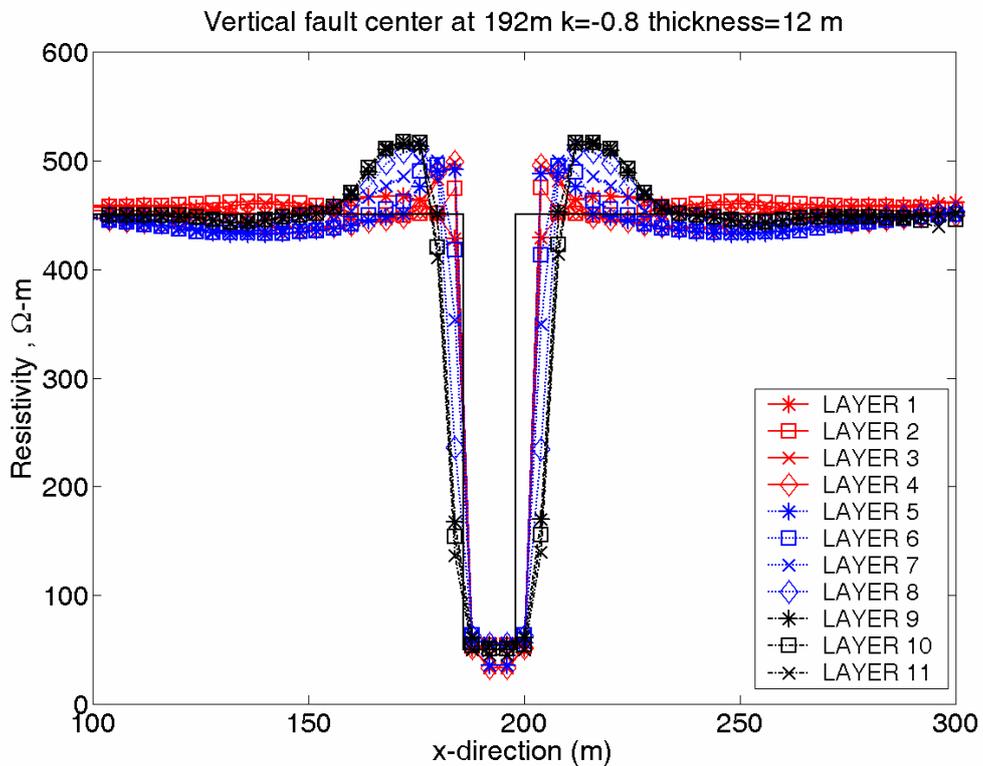


圖 J-8 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=-0.8)

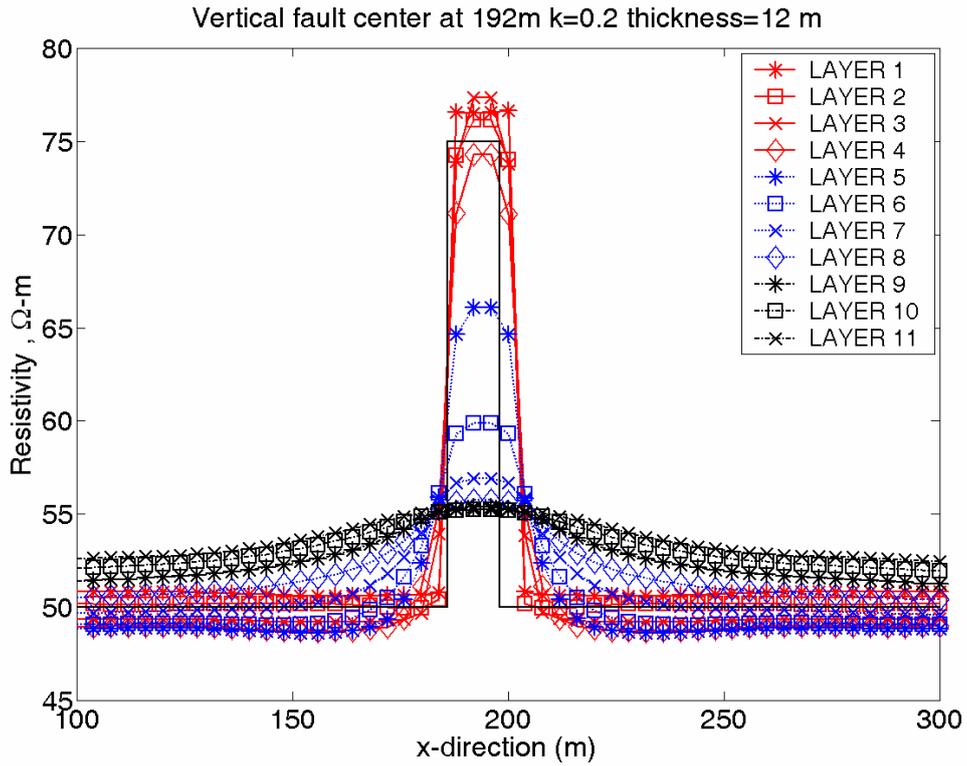


圖 J-9 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=0.2)

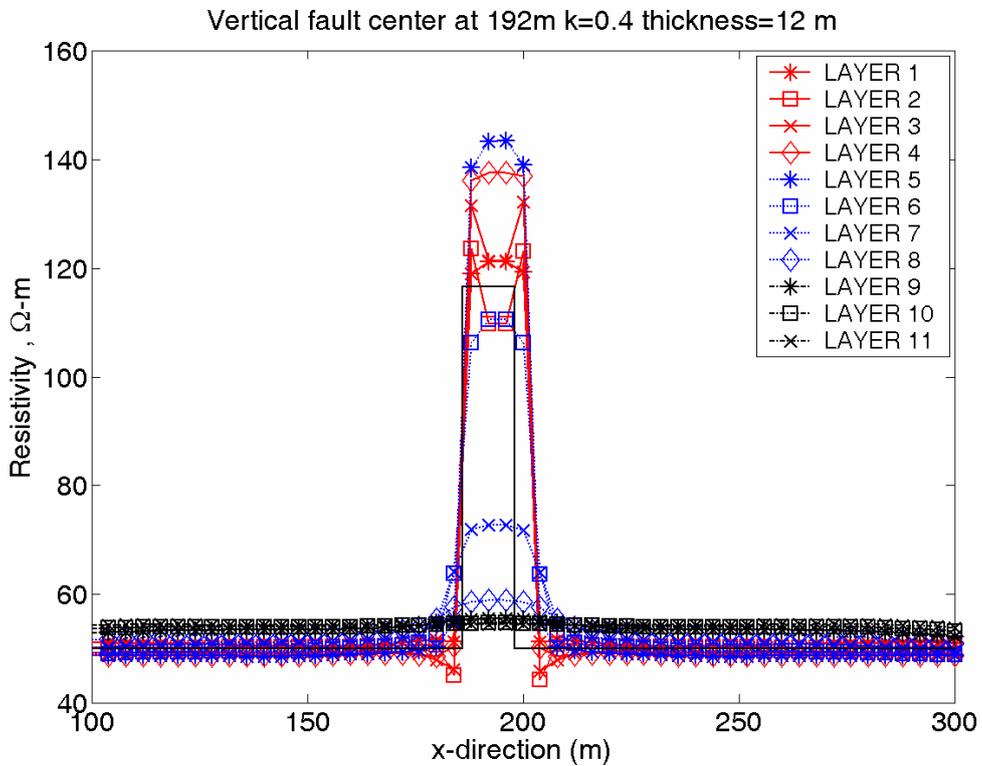


圖 J-10 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=0.4)

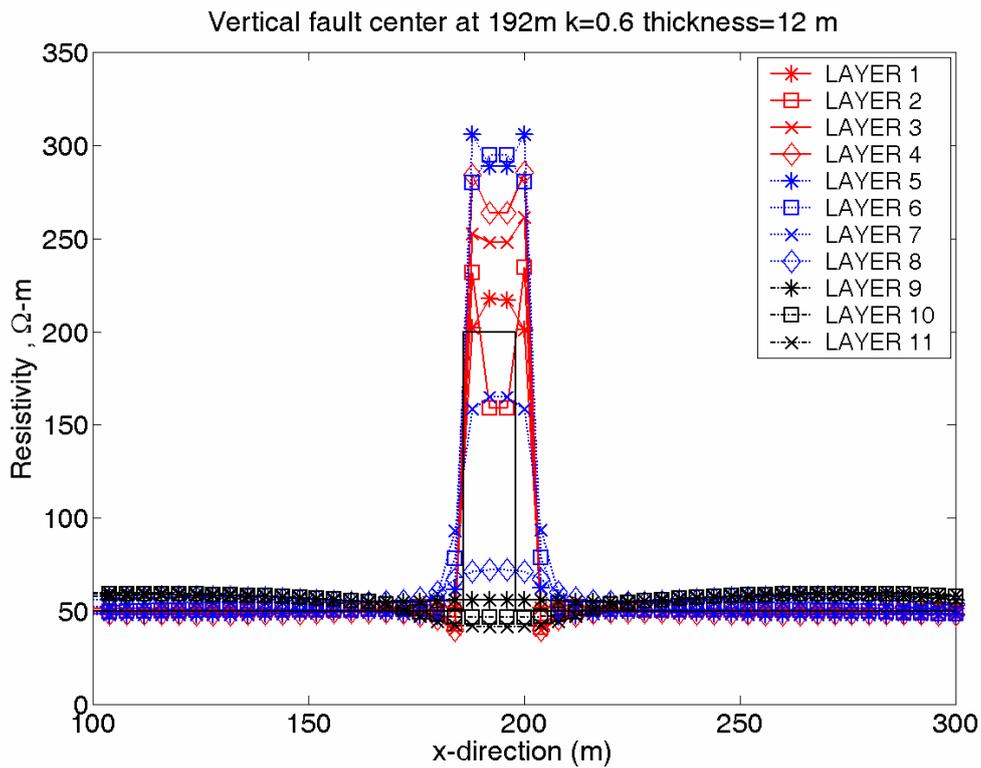


圖 J-11 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=0.6)

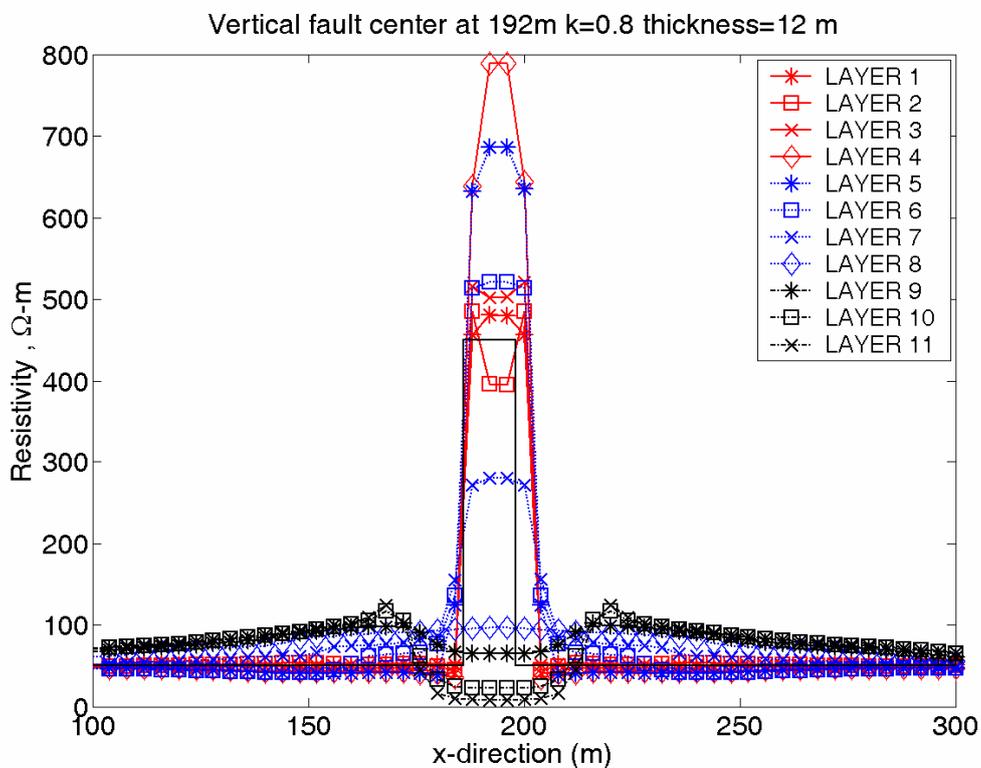


圖 J-12 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=0.8)

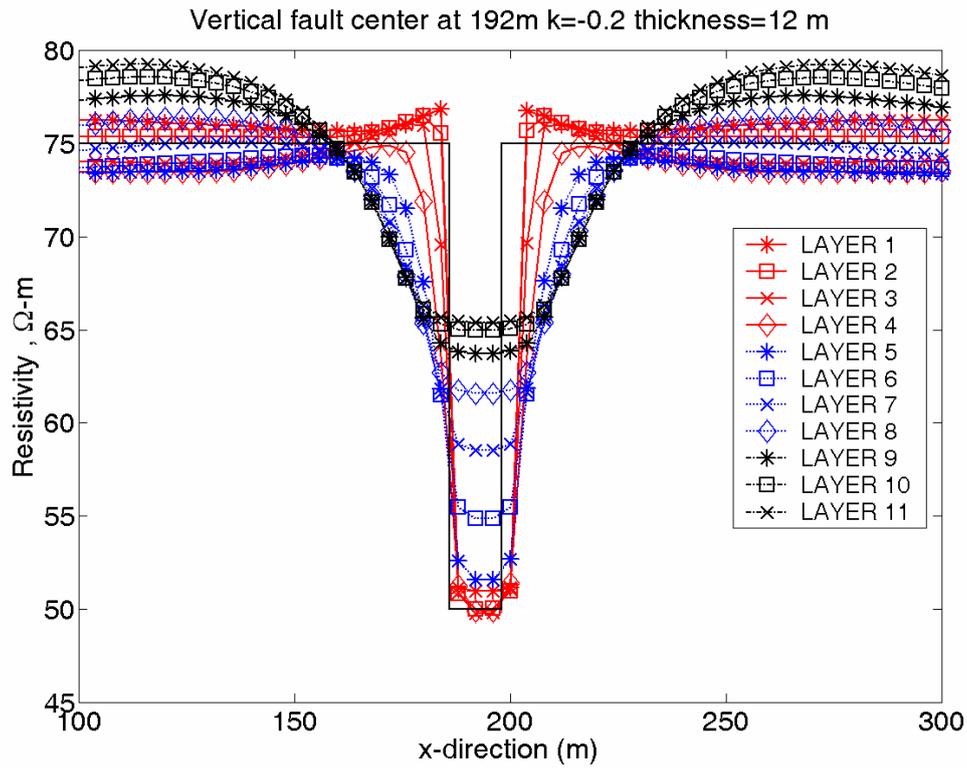


圖 J-13 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=-0.2)

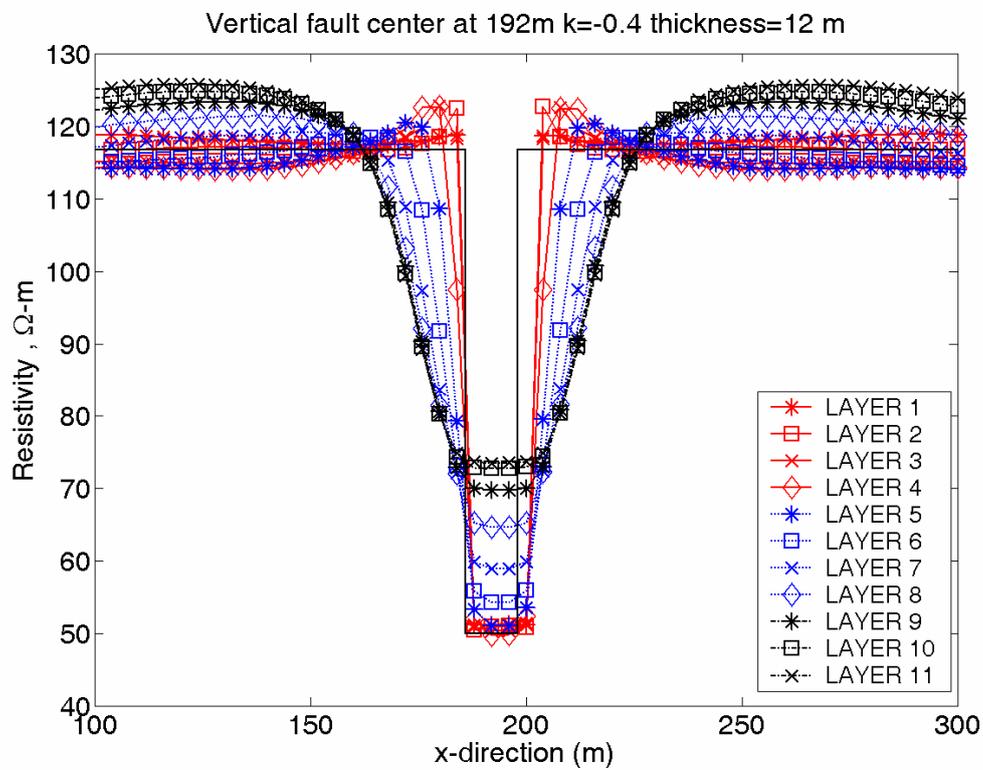


圖 J-14 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=-0.4)

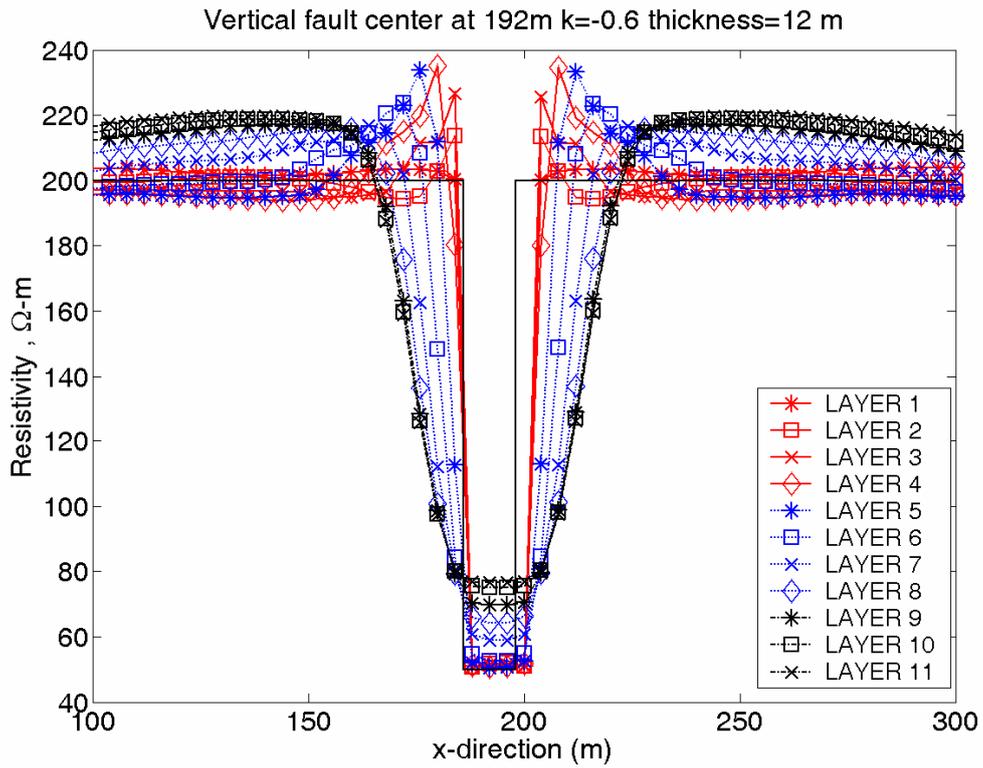


圖 J-15 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=-0.6)

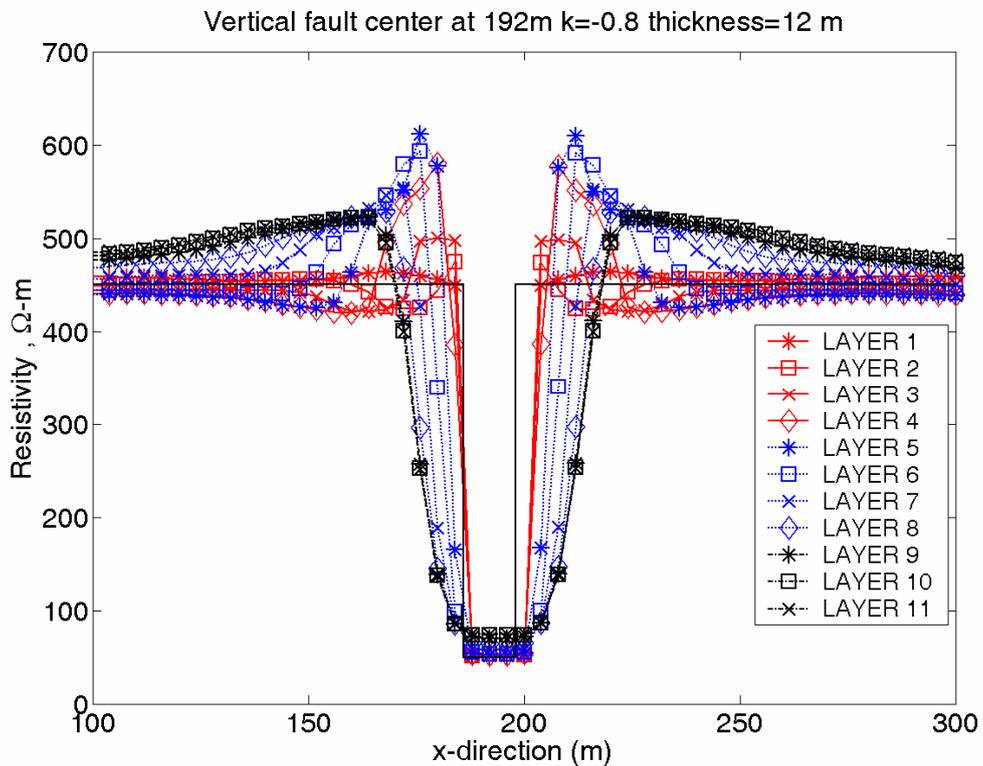


圖 J-16 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=-0.8)

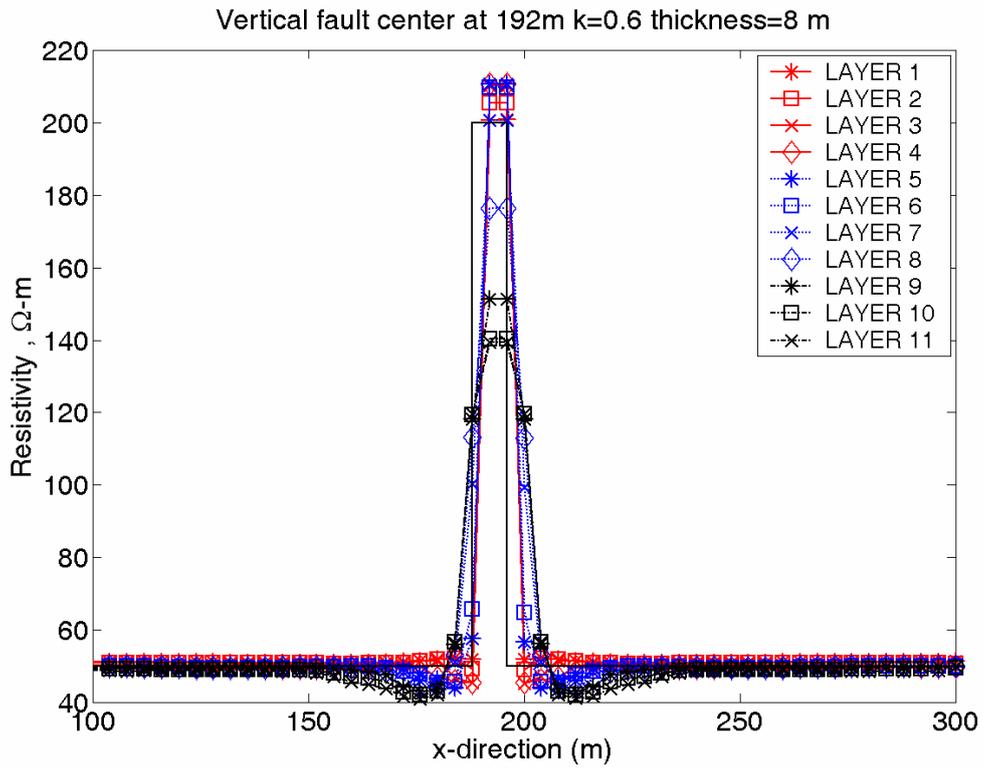


圖 J-17 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=8 公尺,k=0.6)

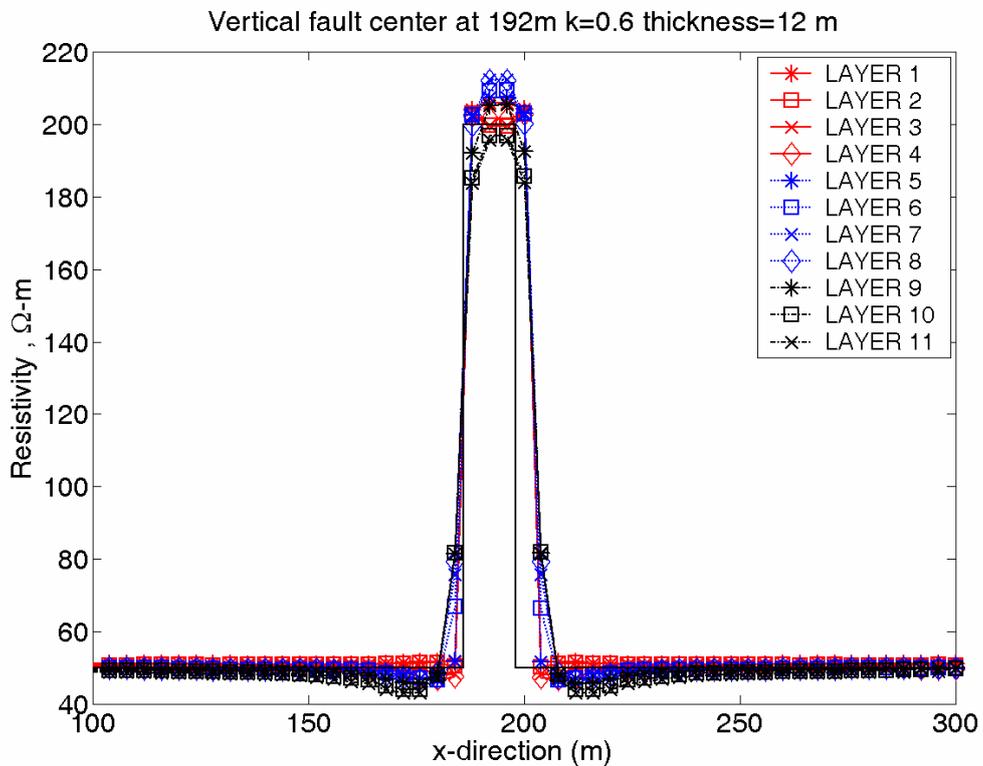


圖 J-18 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=0.6)

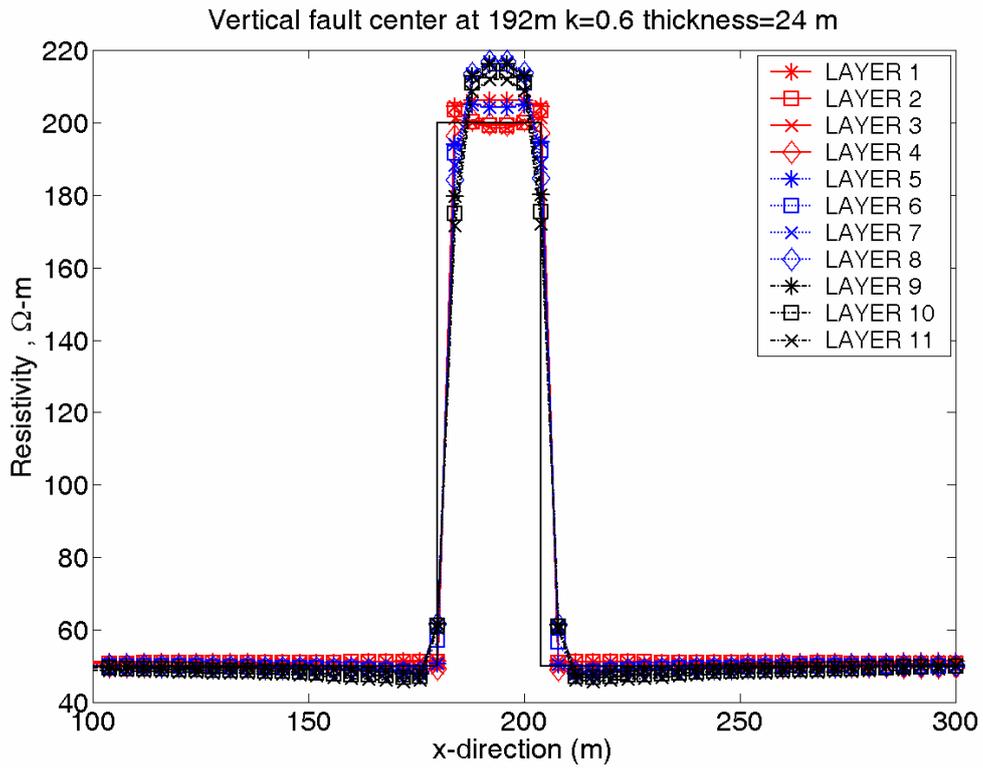


圖 J-19 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=24 公尺,k=0.6)

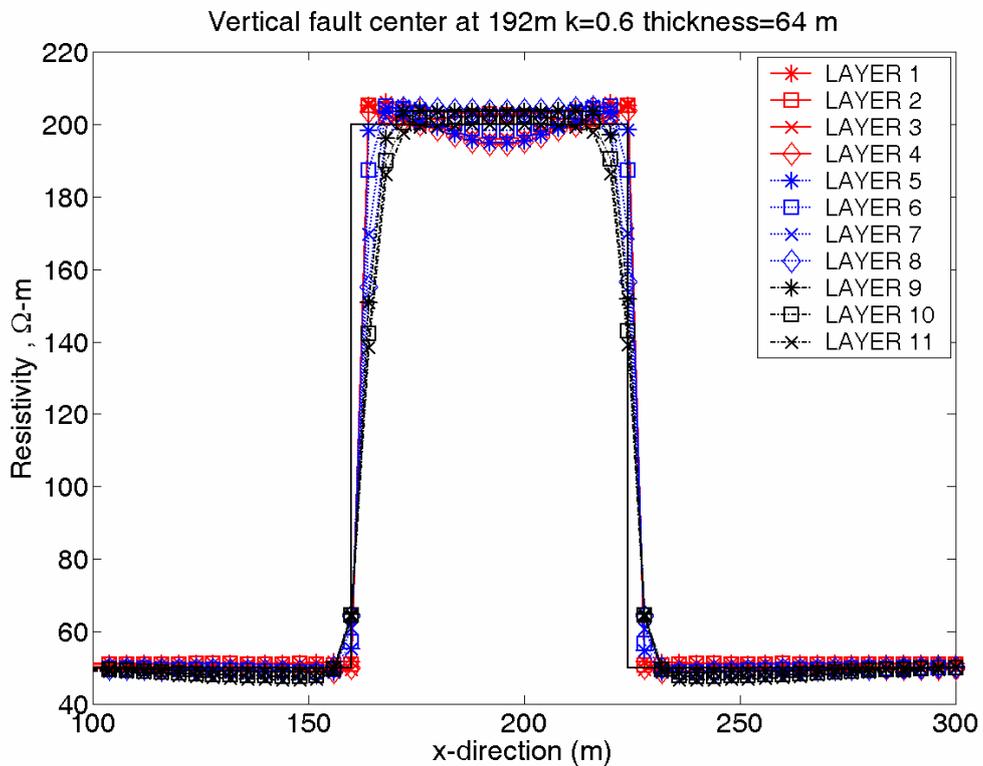


圖 J-20 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=64 公尺,k=0.6)

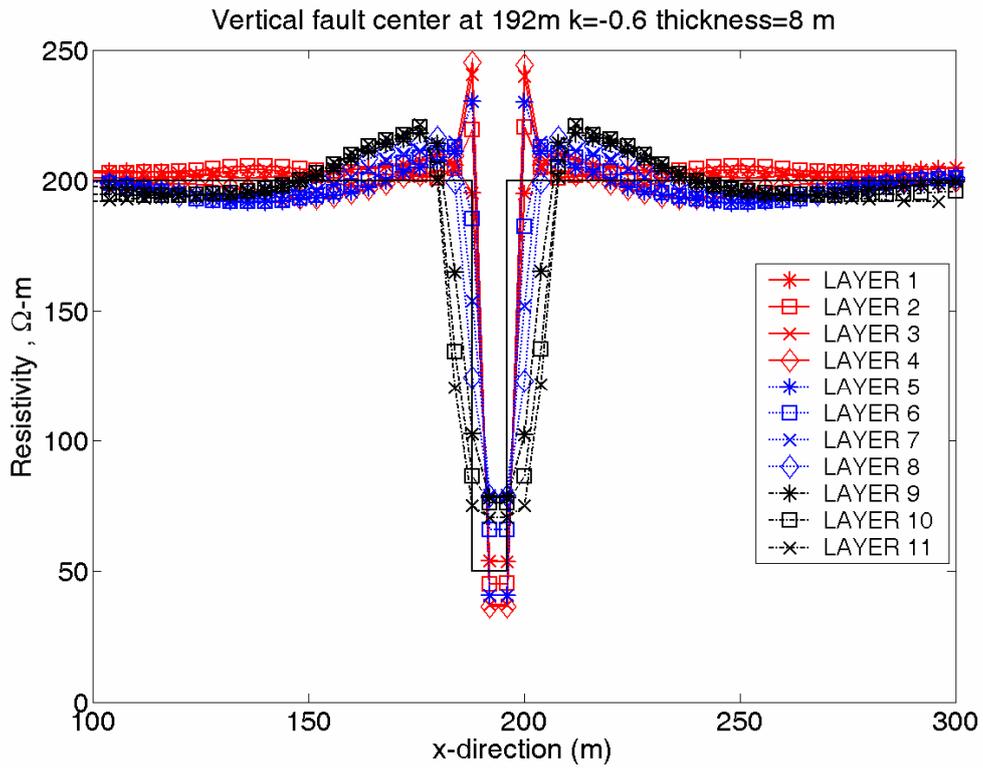


圖 J-21 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=8 公尺,k=-0.6)

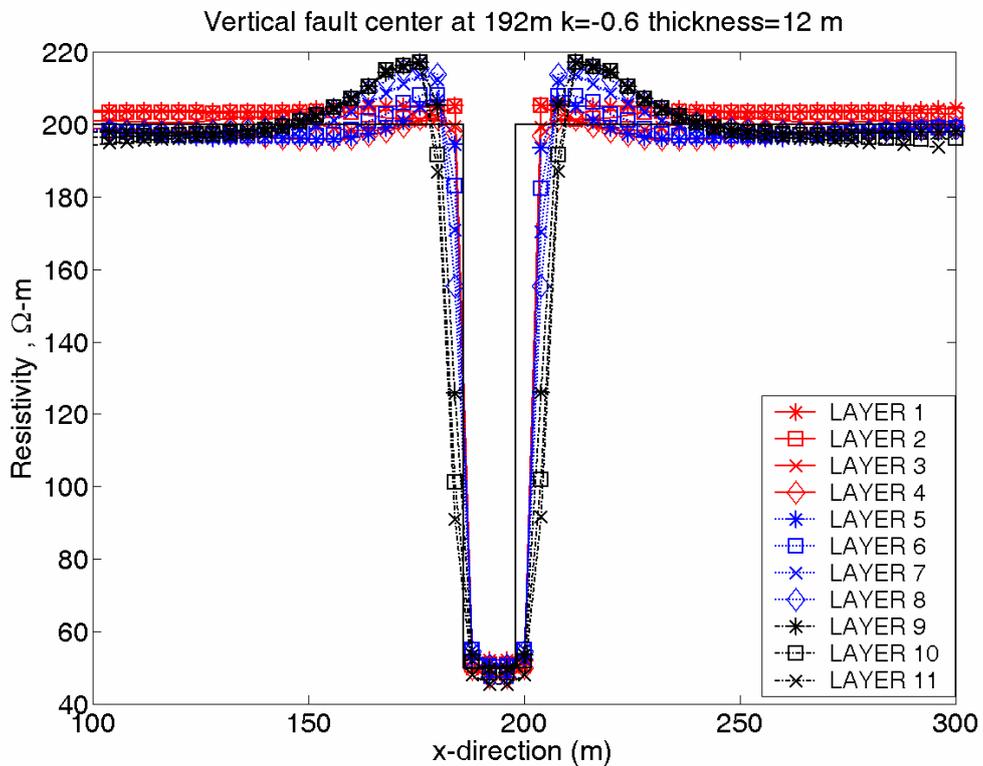


圖 J-22 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=-0.6)

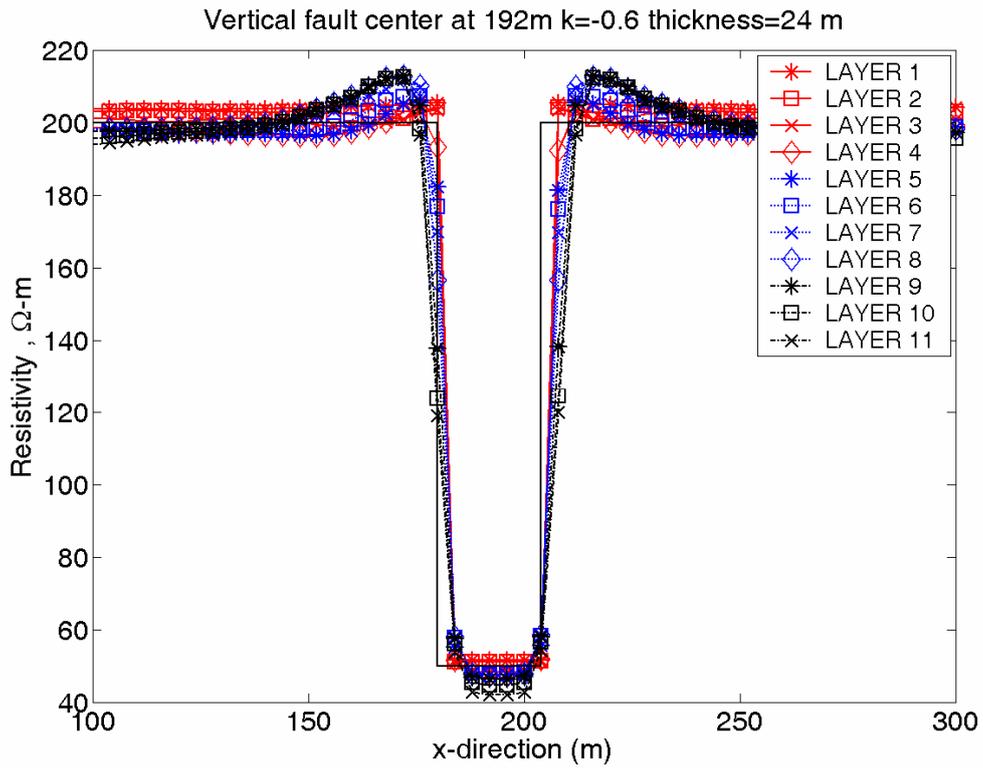


圖 J-23 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=24 公尺,k=-0.6)

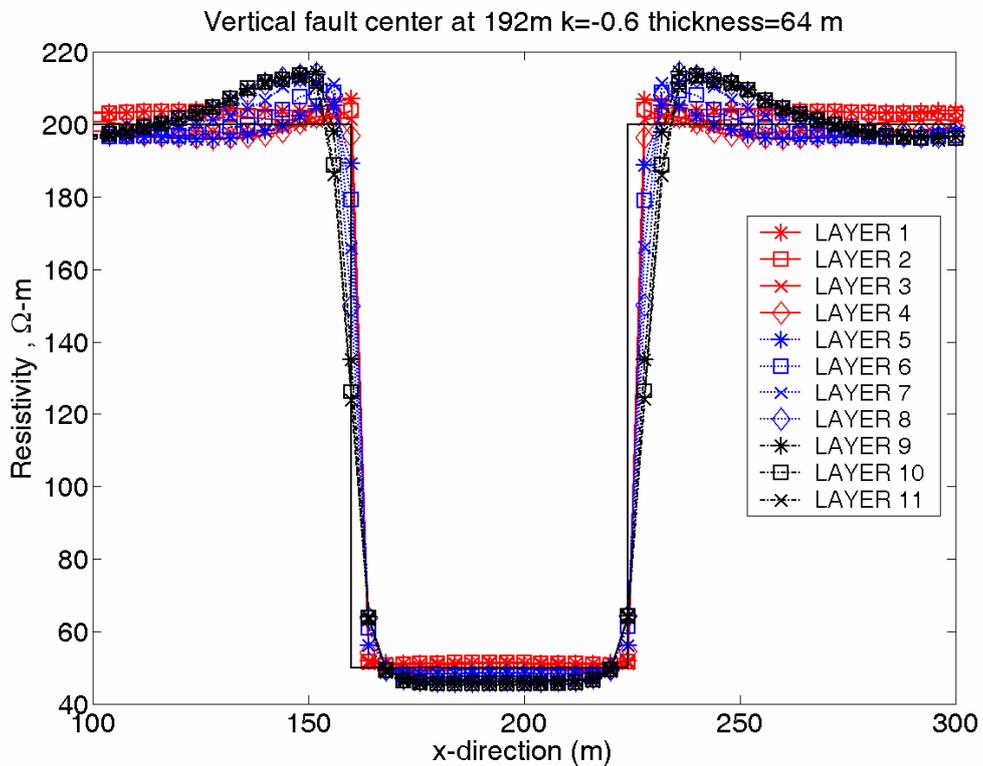


圖 J-24 Wenner 夾層垂直界面側向變化圖(t=64 公尺,k=-0.6)

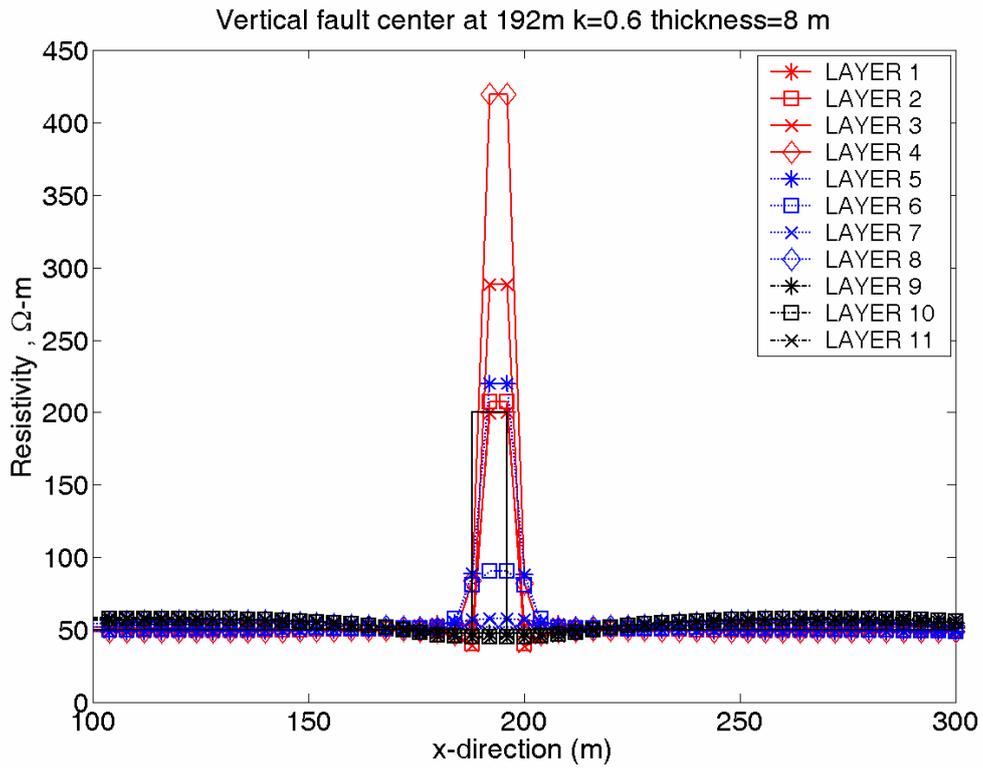


圖 J-25 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=8 公尺,k=0.6)

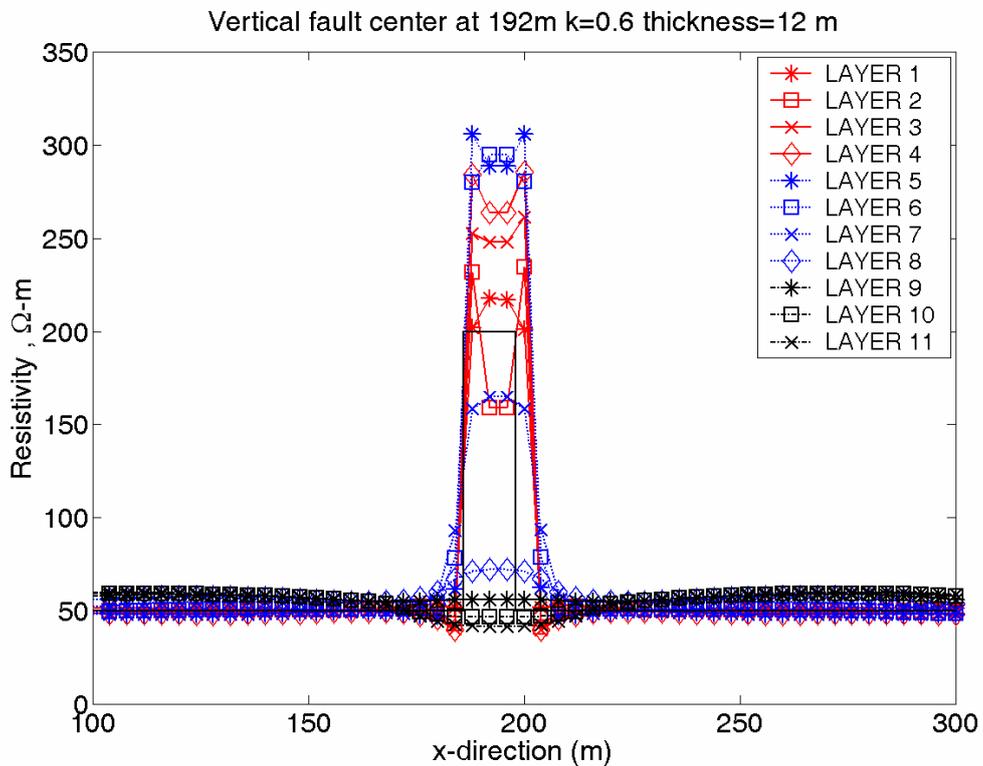


圖 J-26 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=0.6)

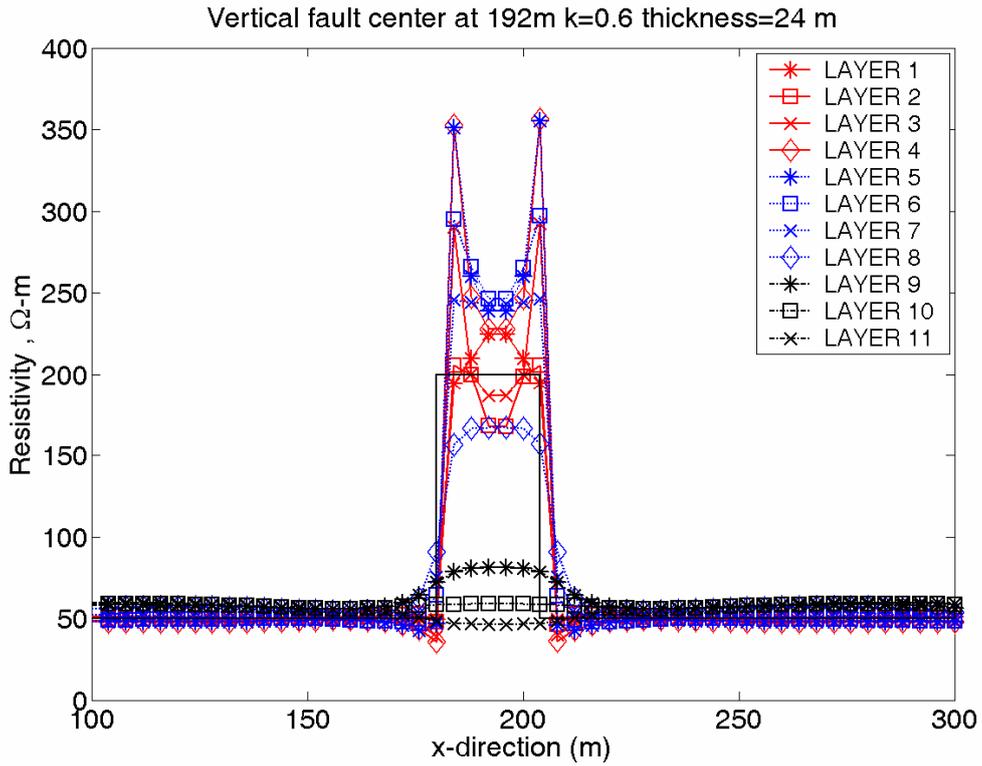


圖 J-27 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=24 公尺,k=0.6)

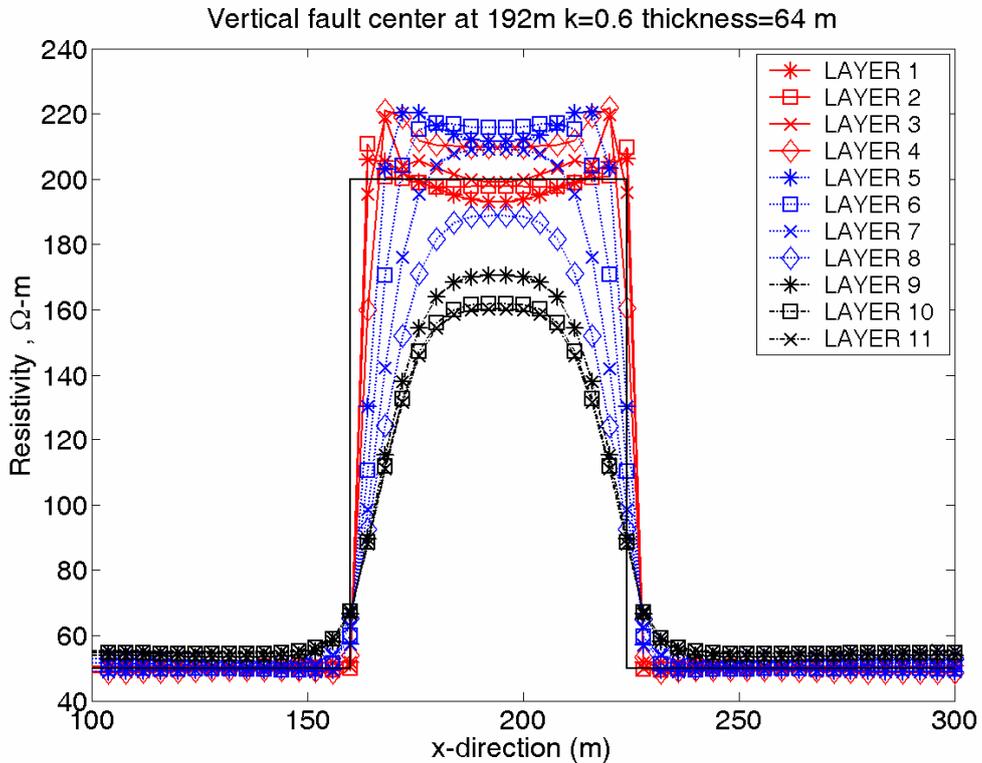


圖 J-28 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=64 公尺,k=0.6)

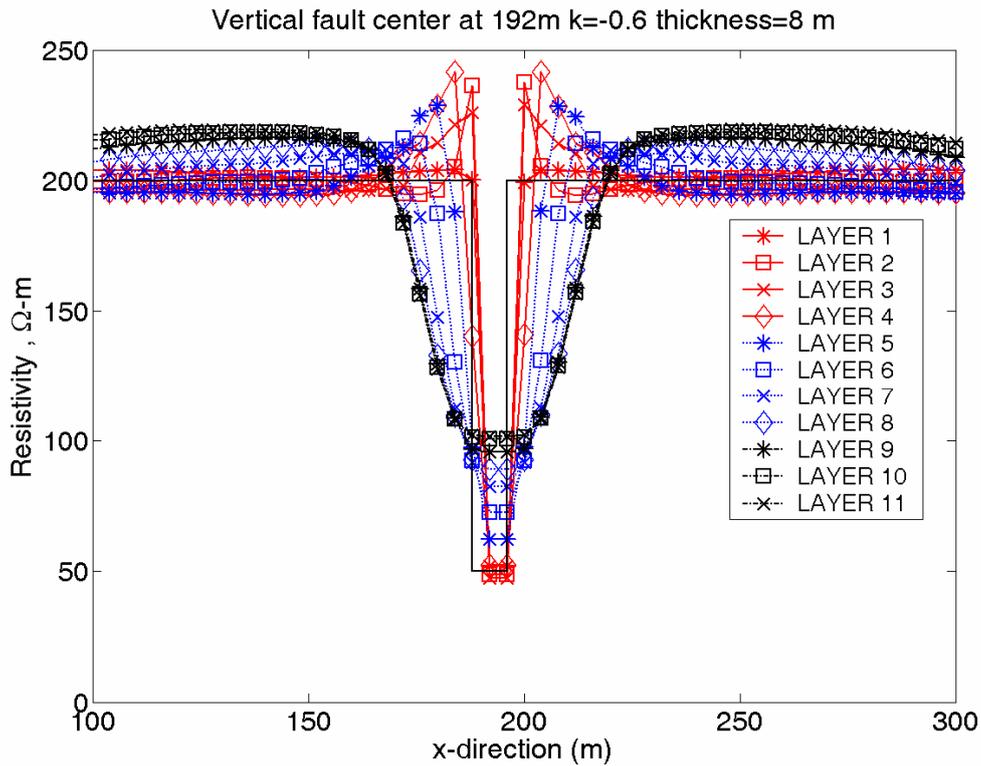


圖 J-29 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=8 公尺,k=-0.6)

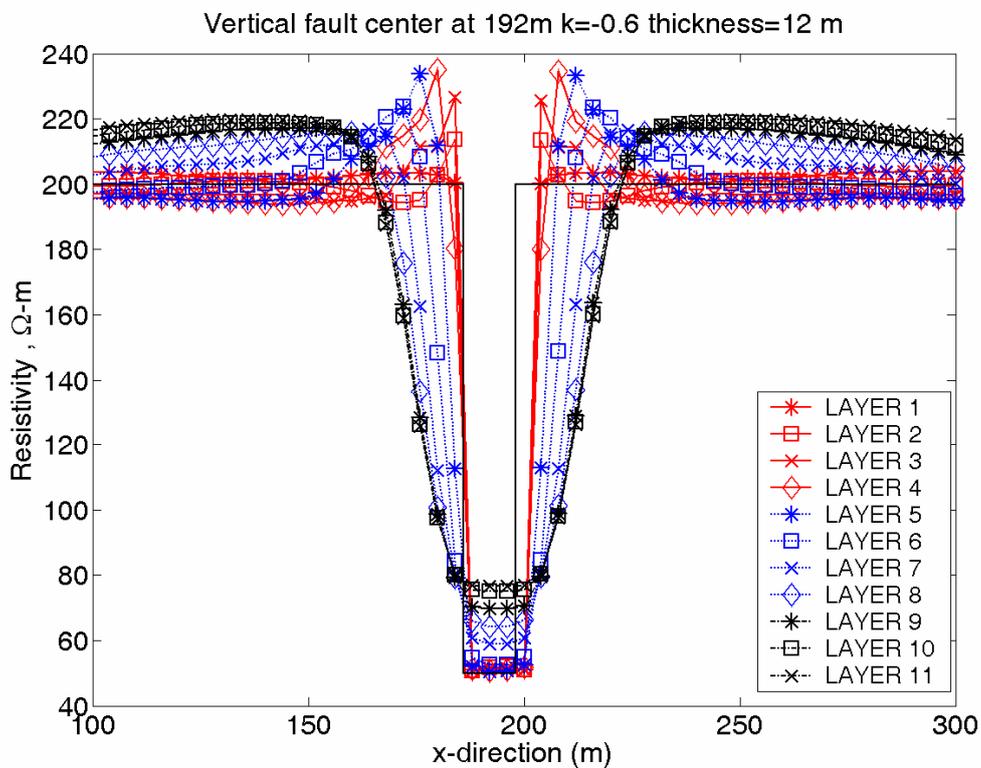


圖 J-30 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=12 公尺,k=0.6)

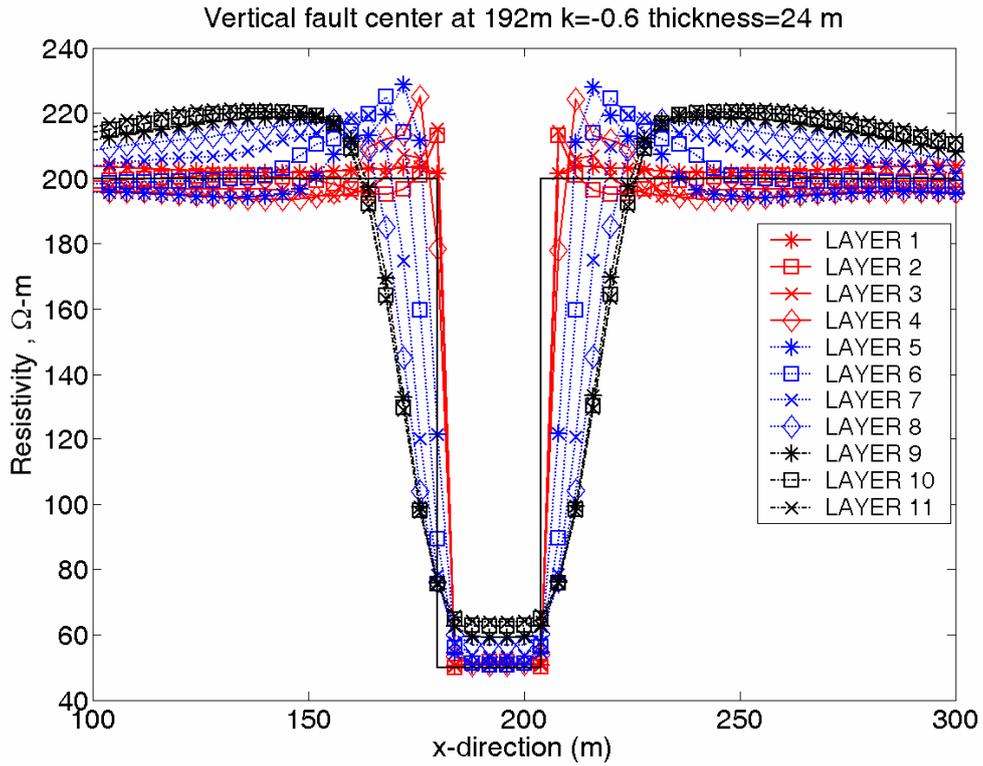


圖 J-31 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=24 公尺,k=-0.6)

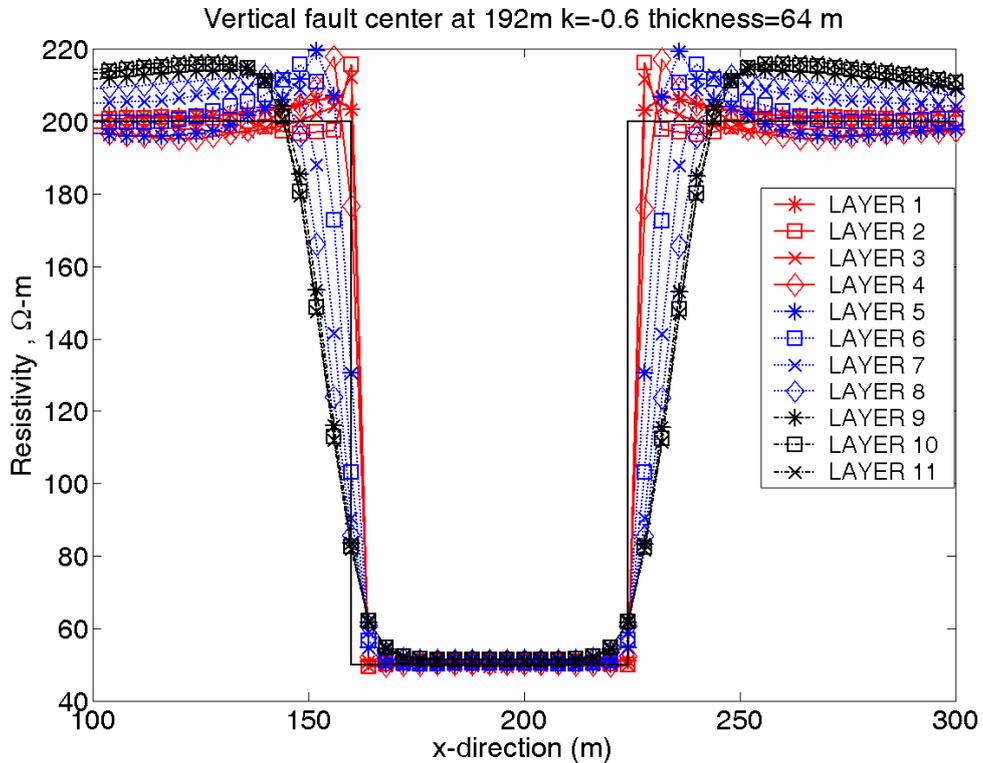
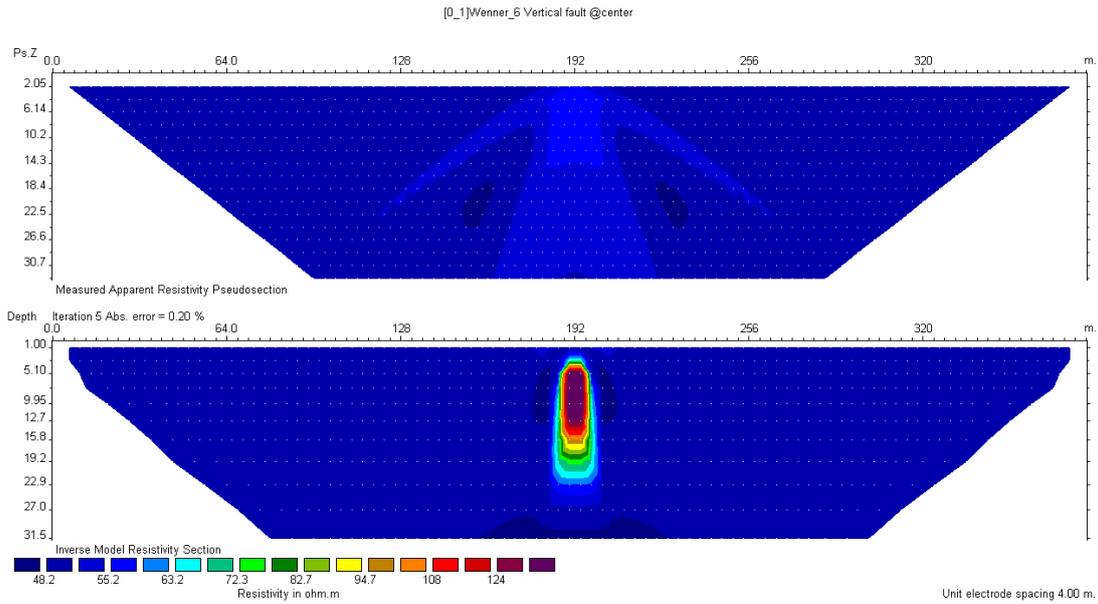
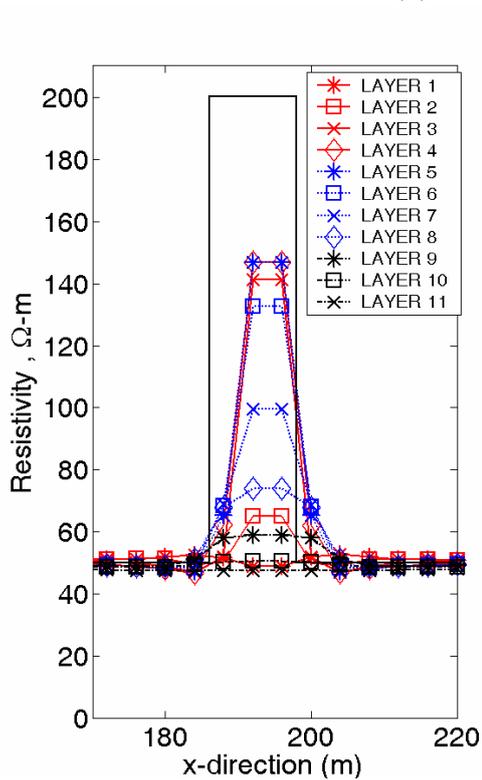


圖 J-32 Pole-Pole 夾層垂直界面側向變化圖(t=64 公尺,k=-0.8)

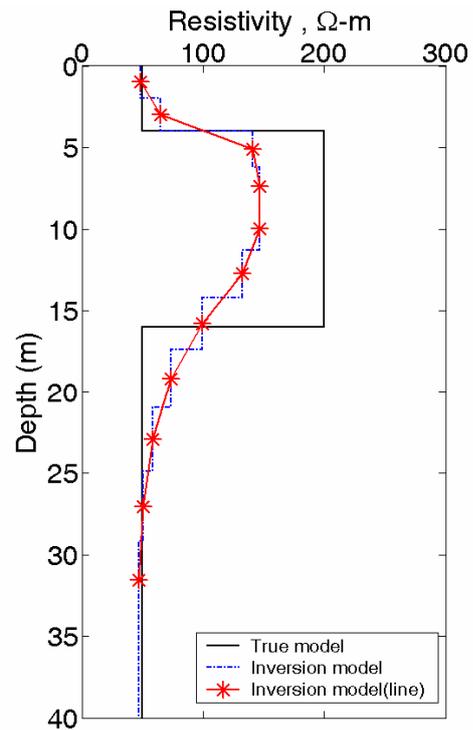
附錄 K-二維解析度探討



(a) 影像剖面圖

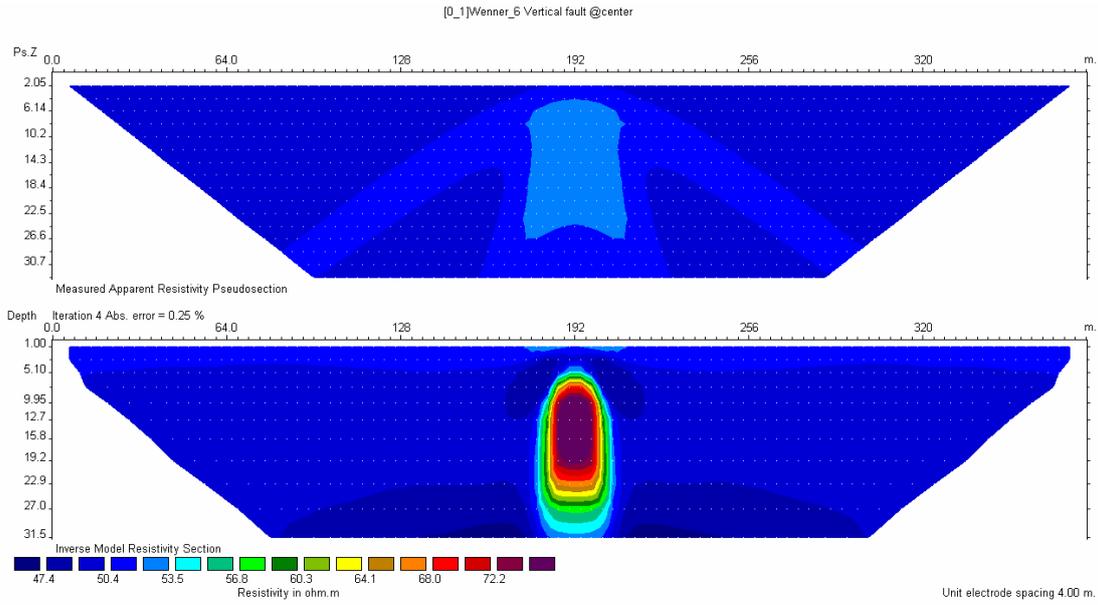


(b) 各層電阻率側向變化

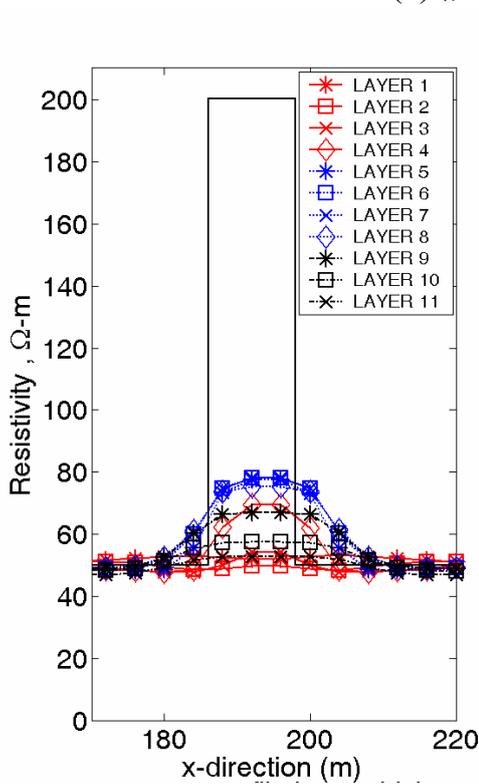


(c) 測線中心垂直方向變化

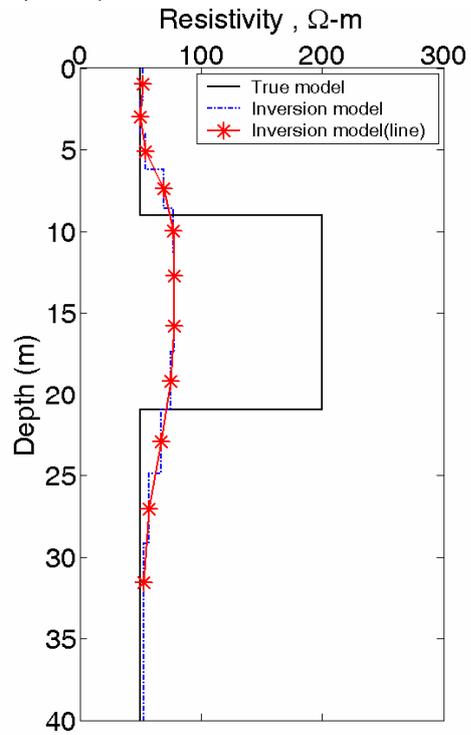
圖 K-1 Wenner-2D 方形介質反算結果(12m X 12m, k=0.6, Zc=10m)



(a) 影像剖面圖

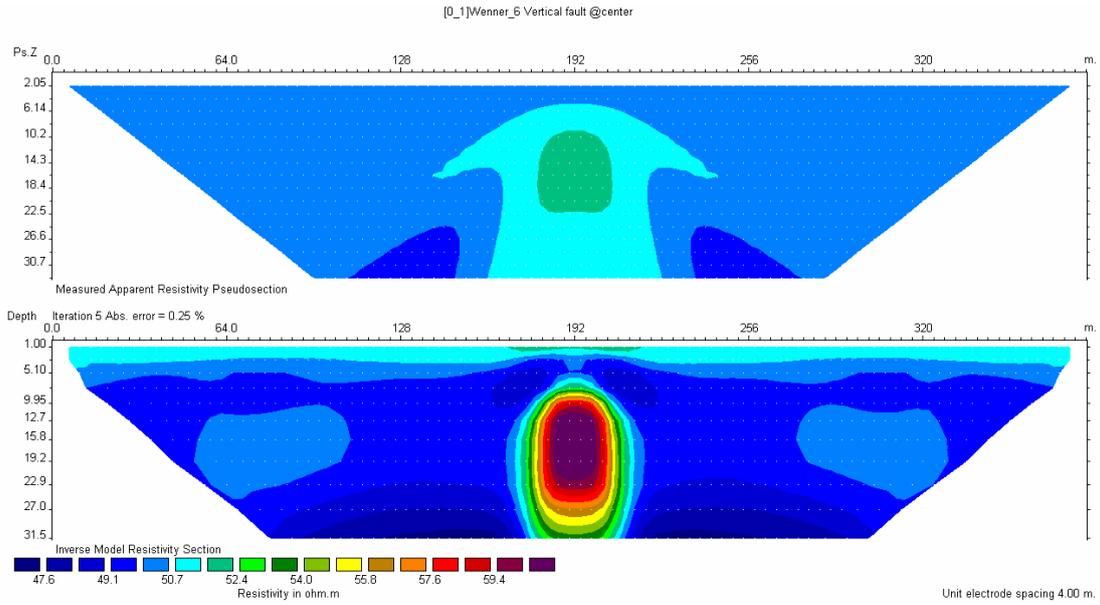


(b) 各層電阻率側向變化

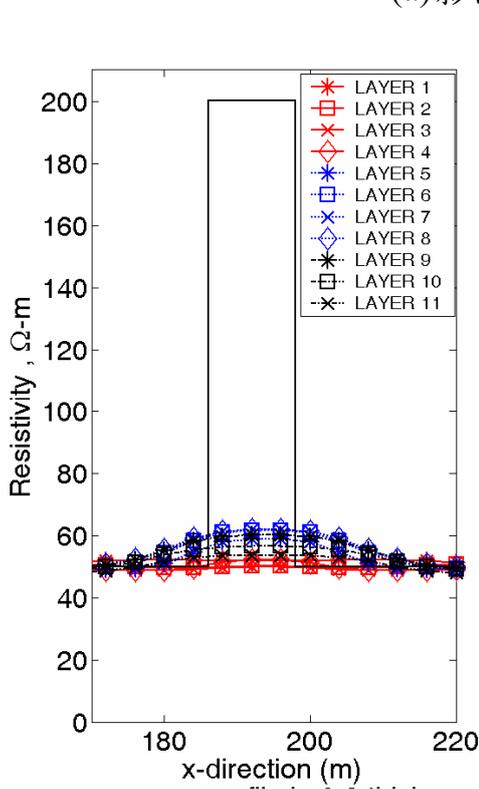


(c) 測線中心垂直方向變化

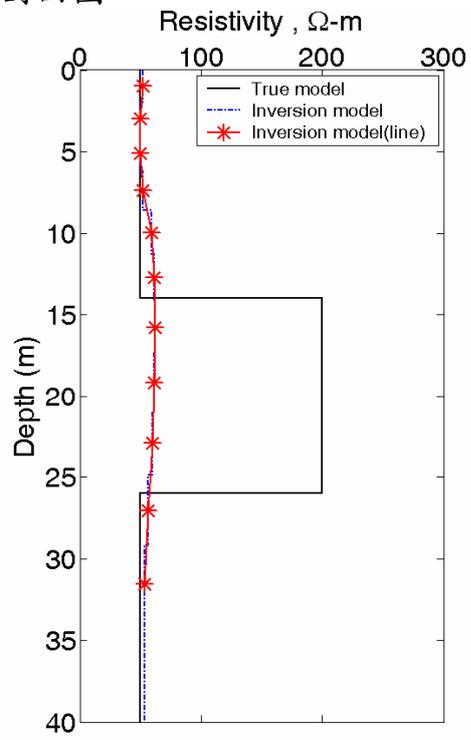
圖 K-2 Wenner-2D 方形介質反算結果(12m X 12m ,k=0.6, Zc=15m)



(a) 影像剖面圖

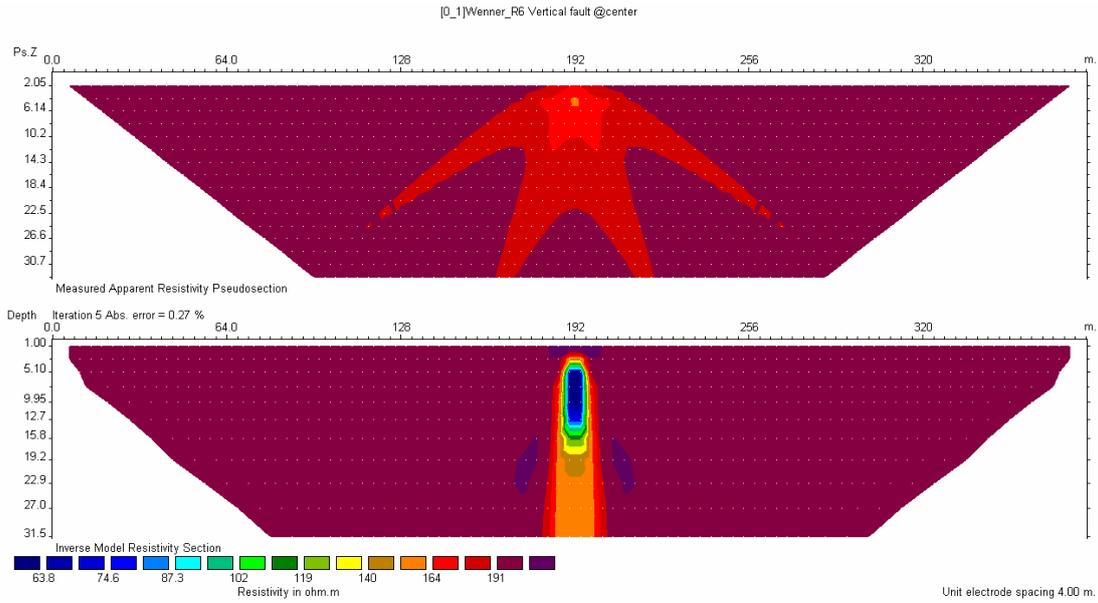


(b) 各層電阻率側向變化

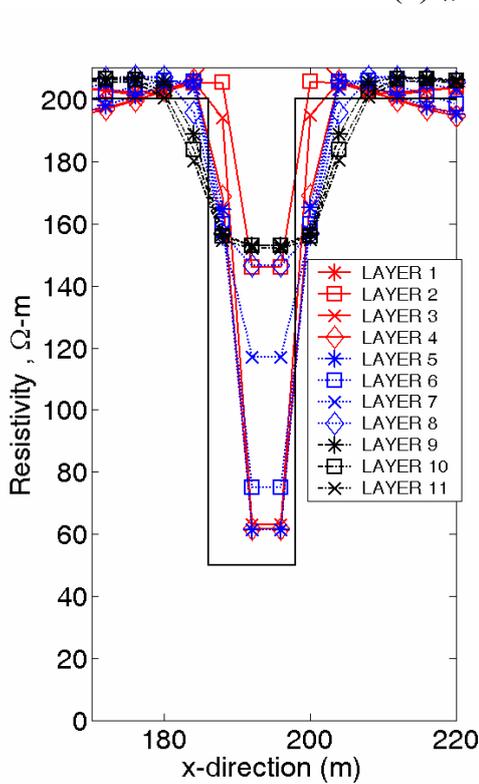


(c) 測線中心垂直方向變化

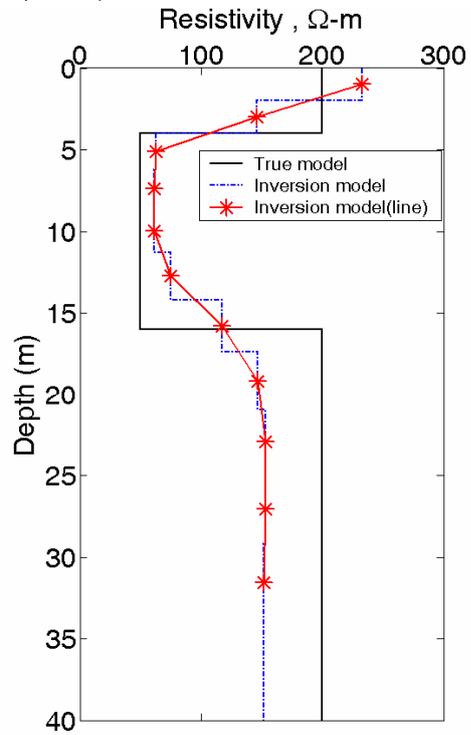
圖 K-3 Wenner-2D 方形介質反算結果(12m X 12m, k=0.6, Zc=20m)



(a) 影像剖面圖

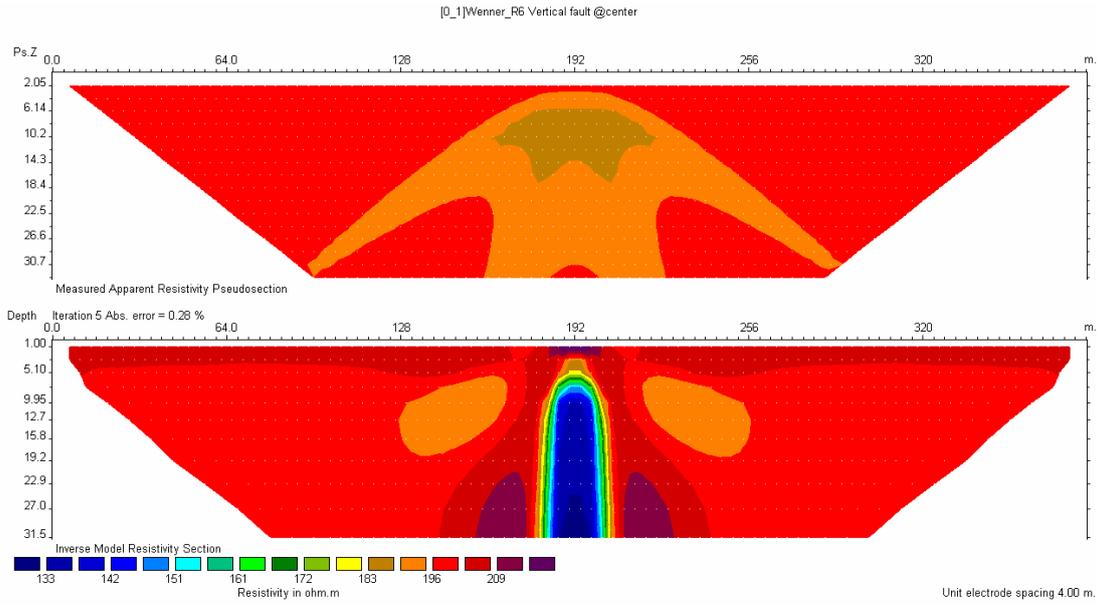


(b) 各層電阻率側向變化

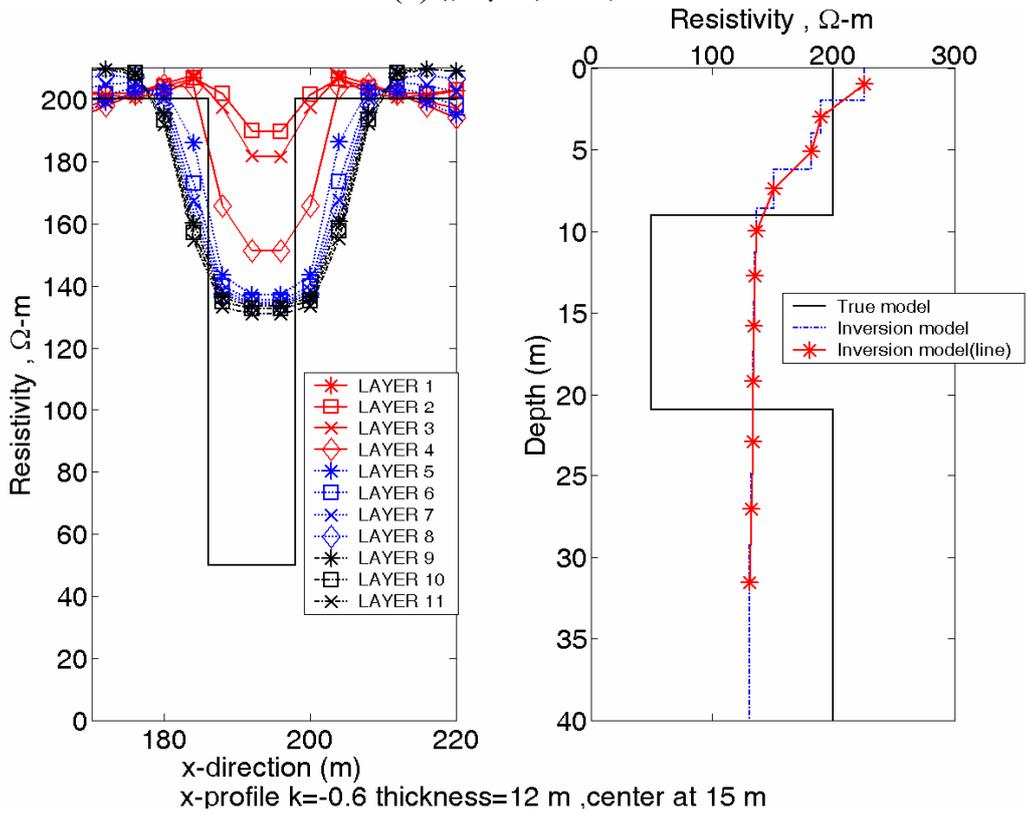


(c) 測線中心垂直方向變化

圖 K-4 Wenner-2D 方形介質反算結果(12m X 12m, k=-0.6, Zc=10m)



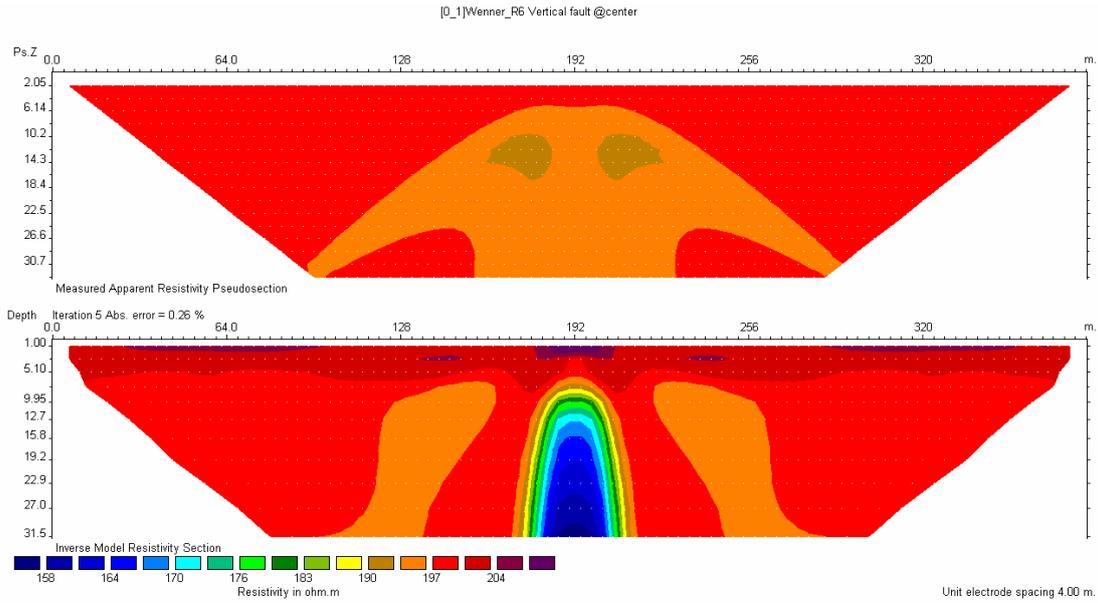
(a) 影像剖面圖



(b) 各層電阻率側向變化

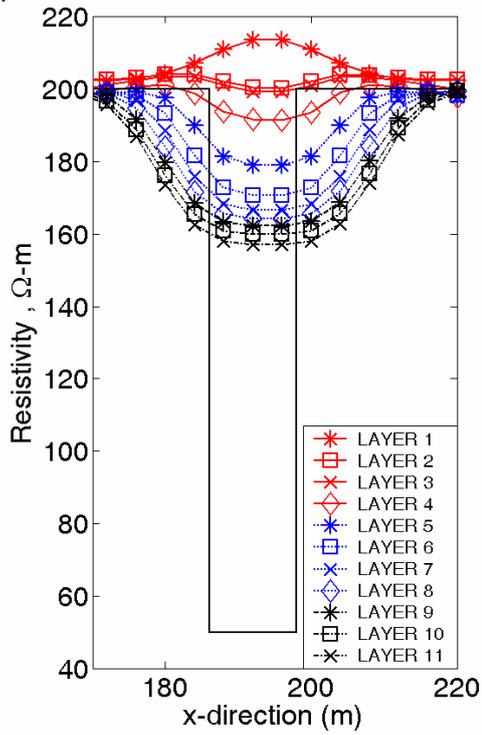
(c) 測線中心垂直方向變化

圖 K-5 Wenner-2D 方形介質反算結果(12m X 12m, k=-0.6, Zc=15m)

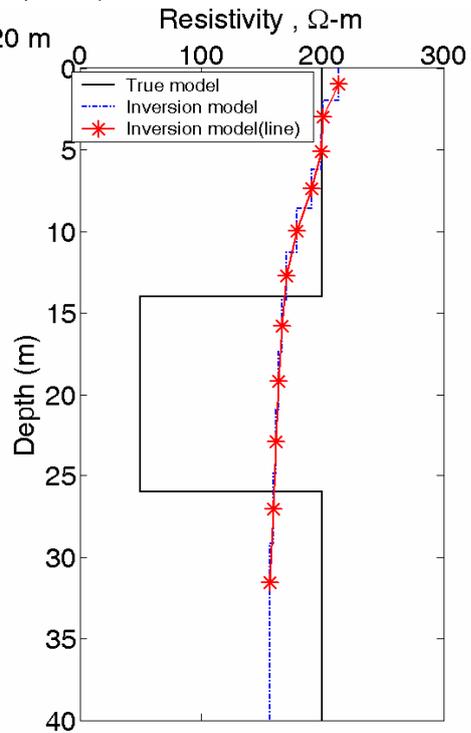


(a) 影像剖面圖

x-profile $k=-0.6$ thickness=12 m ,center at 20 m

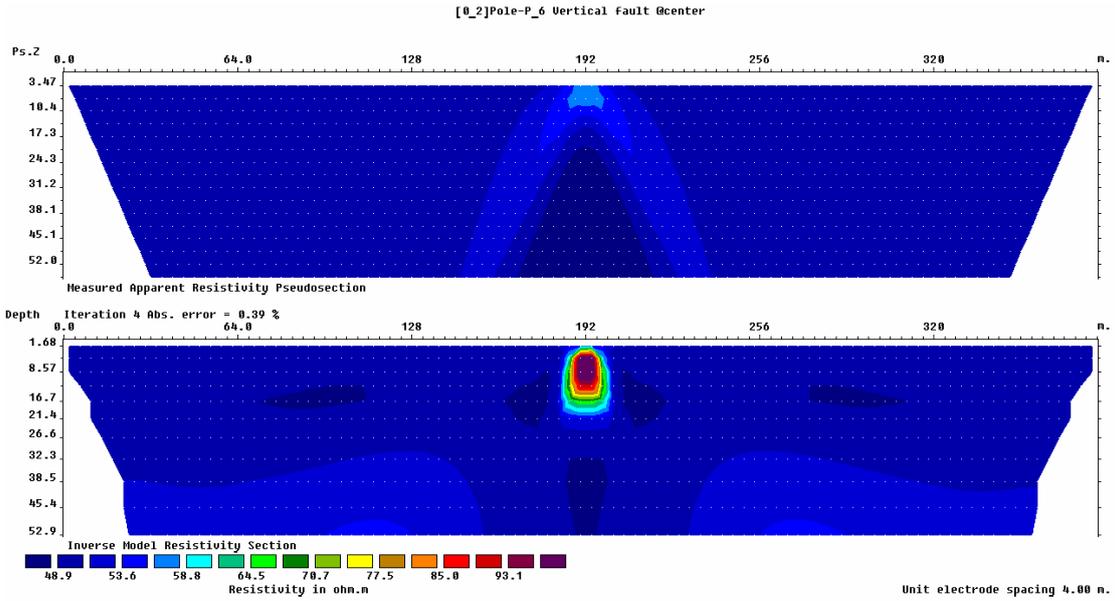


(b) 各層電阻率側向變化

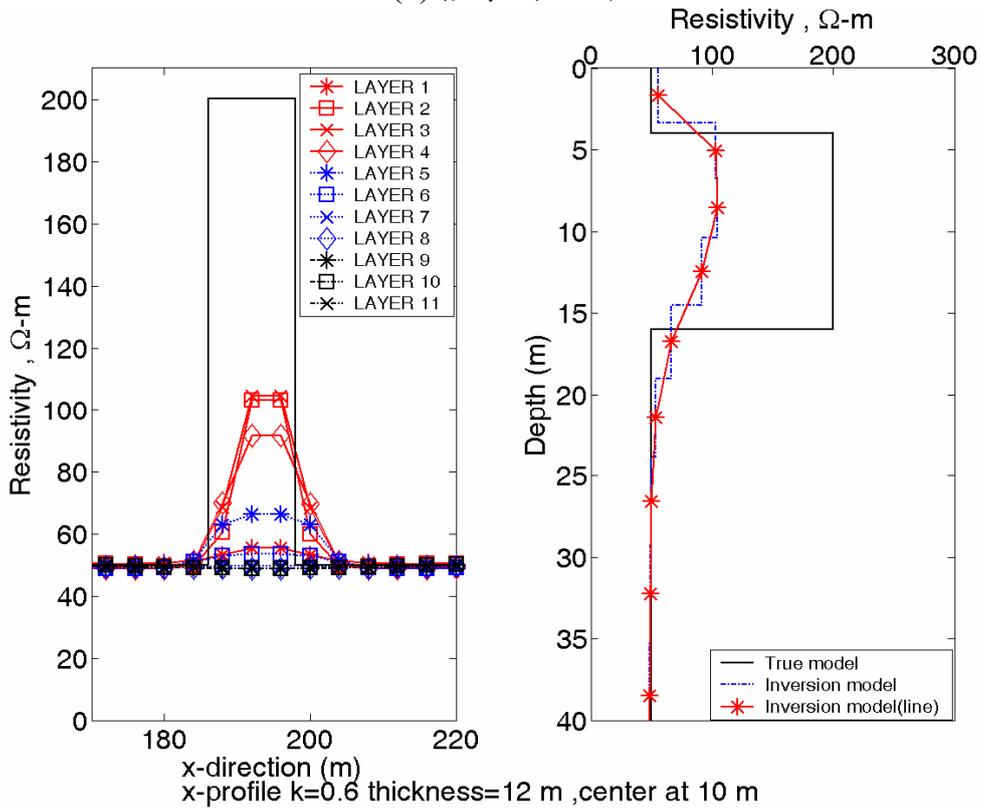


(c) 測線中心垂直方向變化

圖 K-6 Wenner-2D 方形介質反算結果(12m X 12m, $k=-0.6$, $Z_c=20$ m)



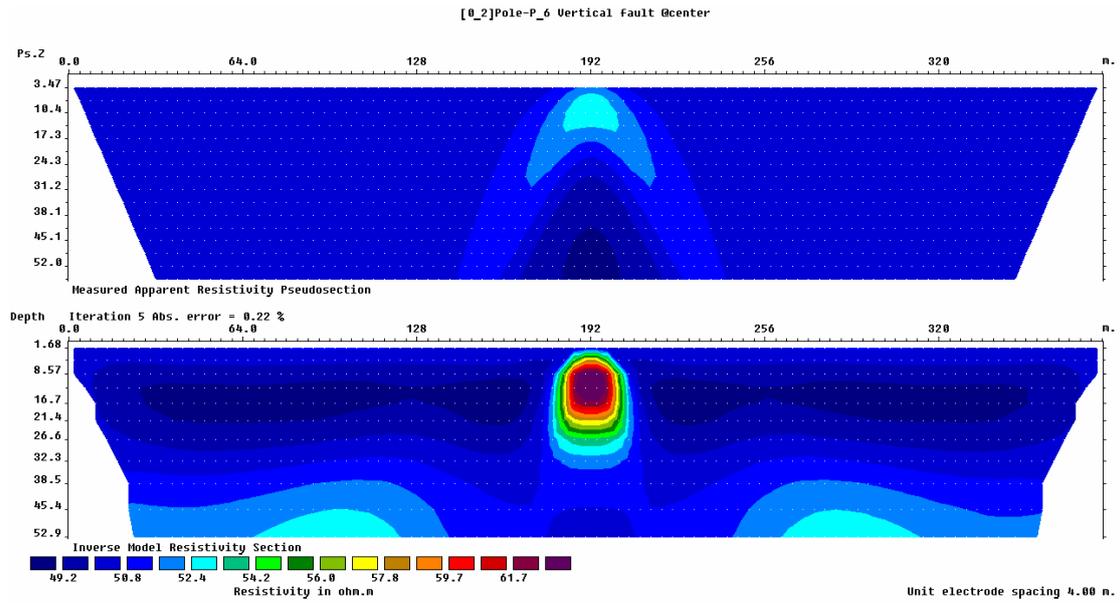
(a) 影像剖面圖



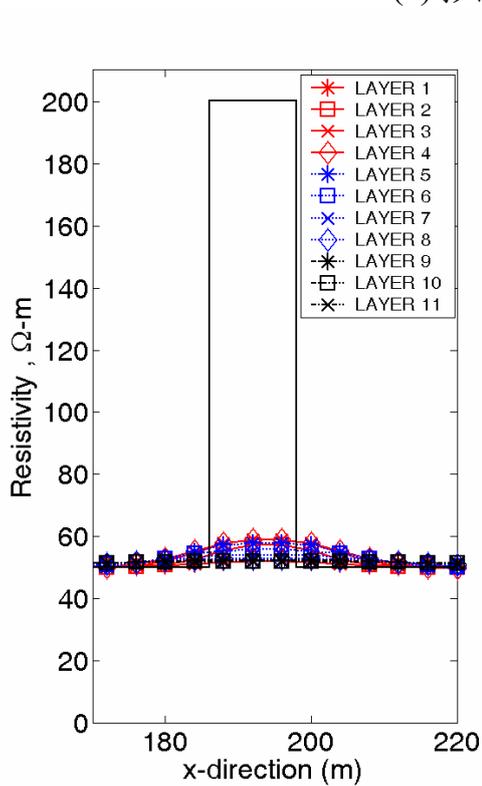
(b) 各層電阻率側向變化

(c) 測線中心垂直方向變化

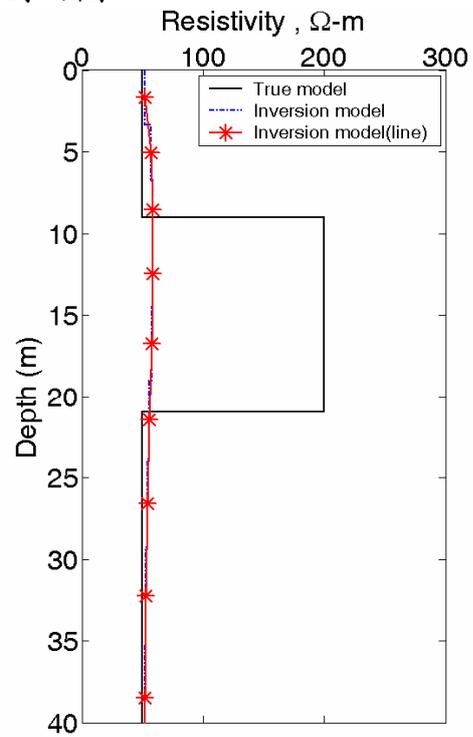
圖 K-7 PolePole-2D 方形介質反算結果(12m X 12m, $k=0.6$, $Z_c=10m$)



(a) 影像剖面圖

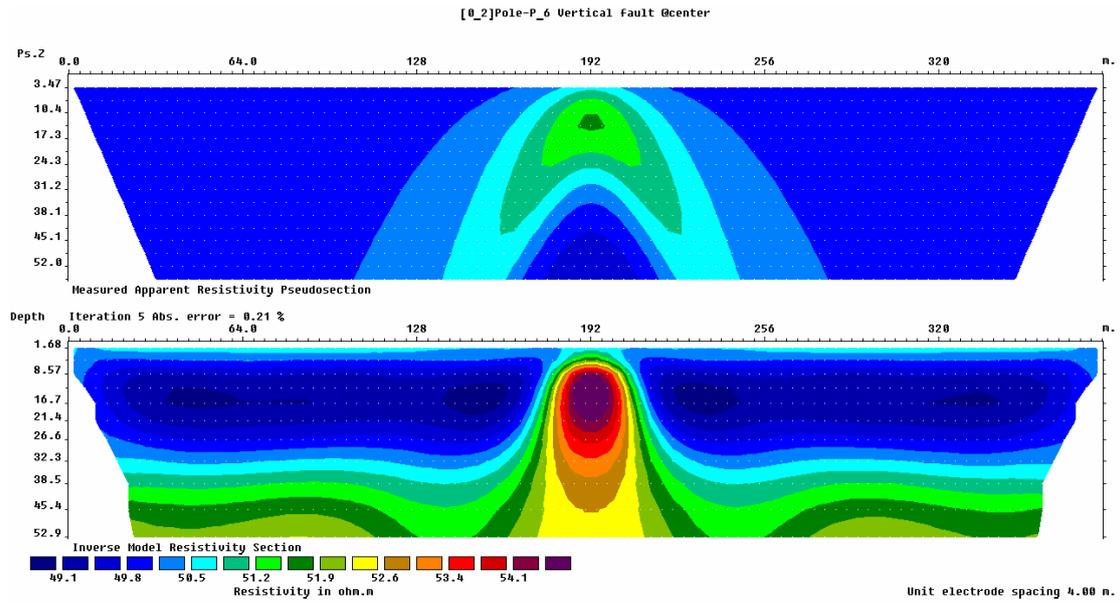


(b) 各層電阻率側向變化

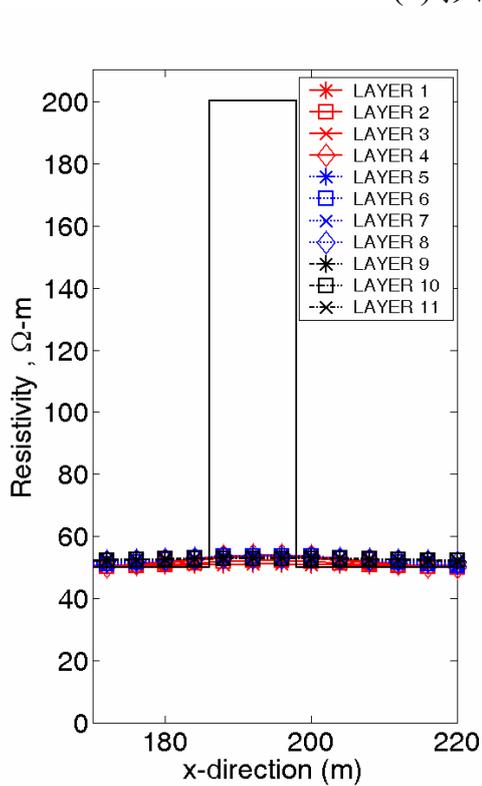


(c) 測線中心垂直方向變化

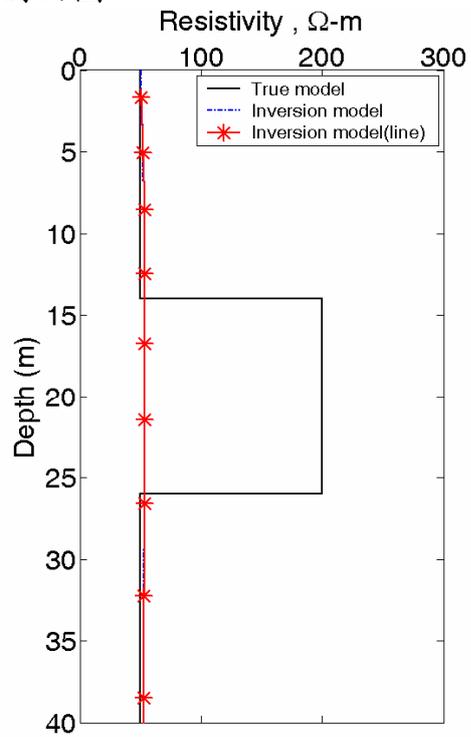
圖 K-8 PolePole-2D 方形介質反算結果(12m X 12m, k=0.6, Zc=15m)



(a) 影像剖面圖

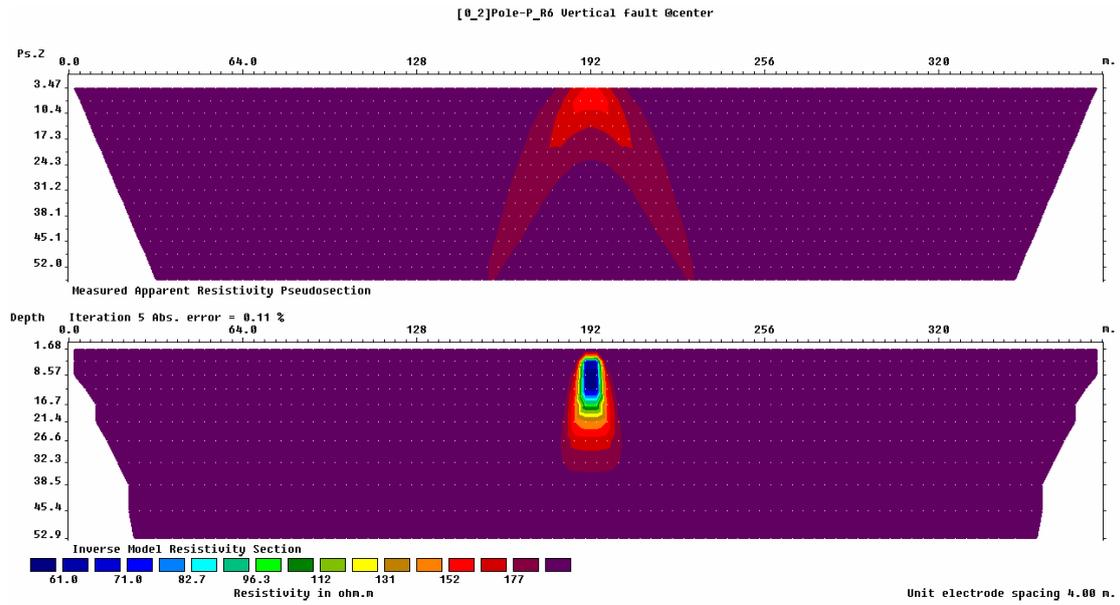


(b) 各層電阻率側向變化

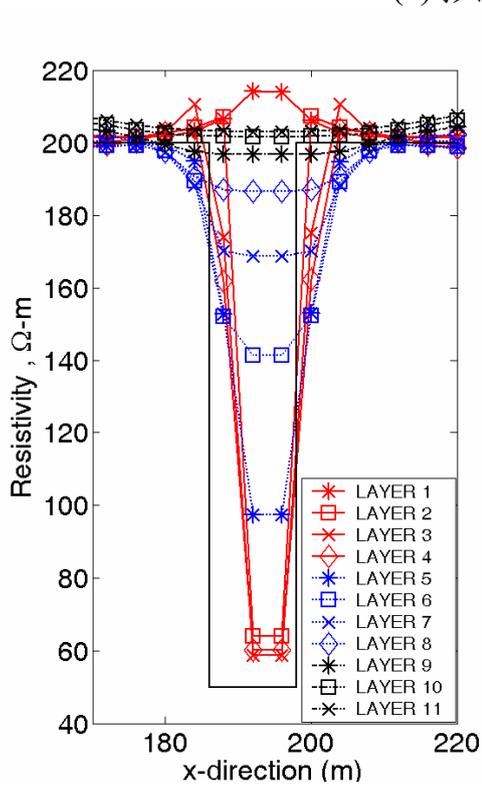


(c) 測線中心垂直方向變化

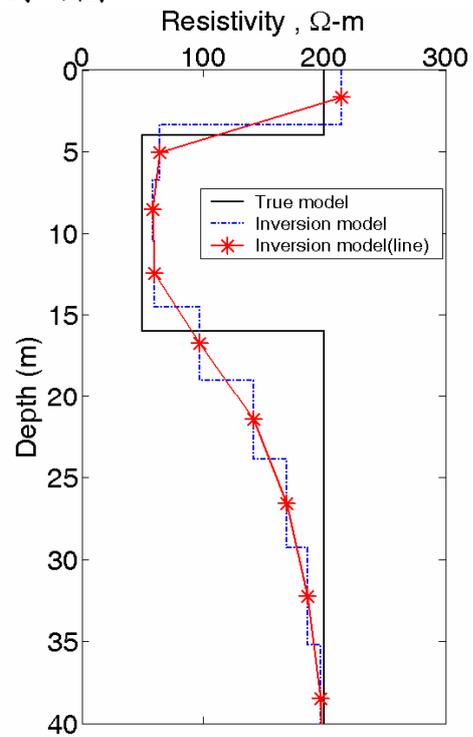
圖 K-9 PolePole-2D 方形介質反算結果(12m X 12m, k=0.6, Zc=20m)



(a) 影像剖面圖

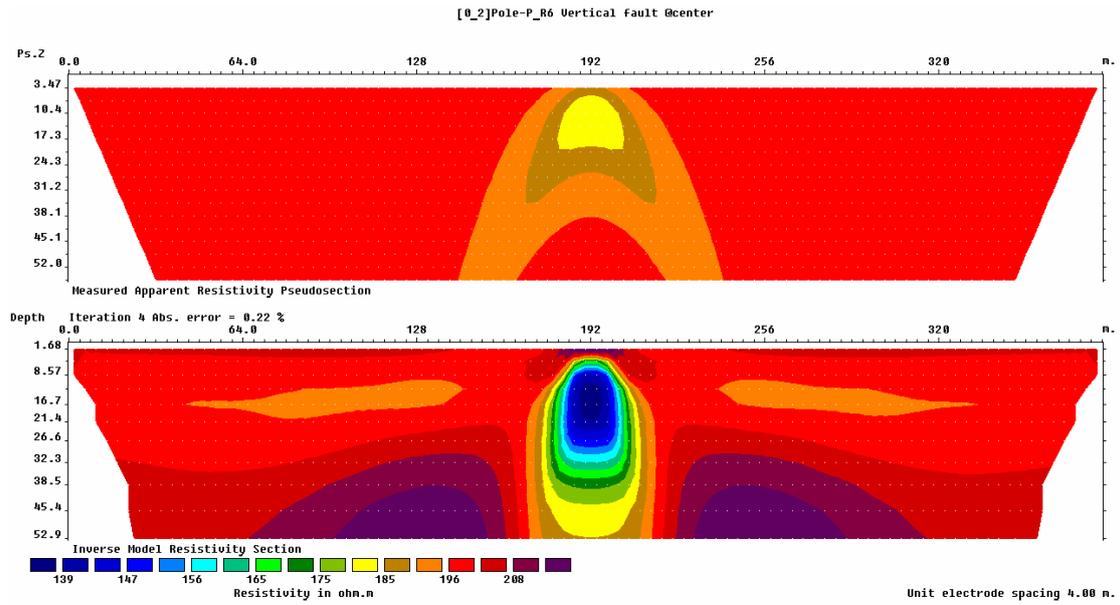


(b) 各層電阻率側向變化

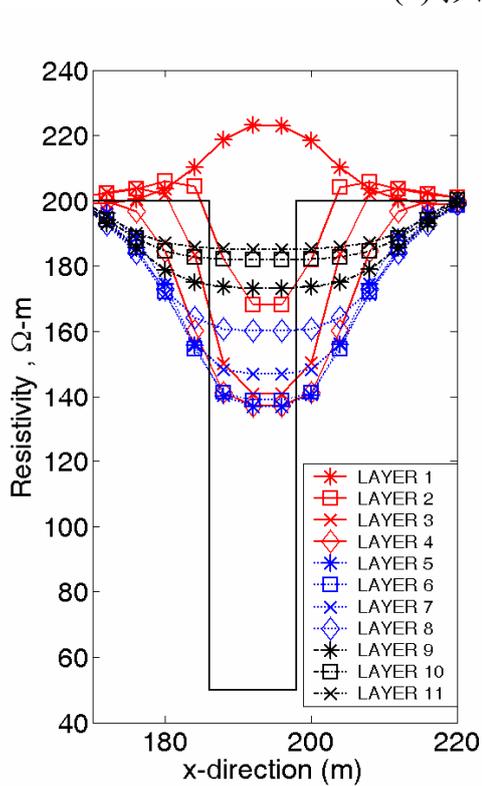


(c) 測線中心垂直方向變化

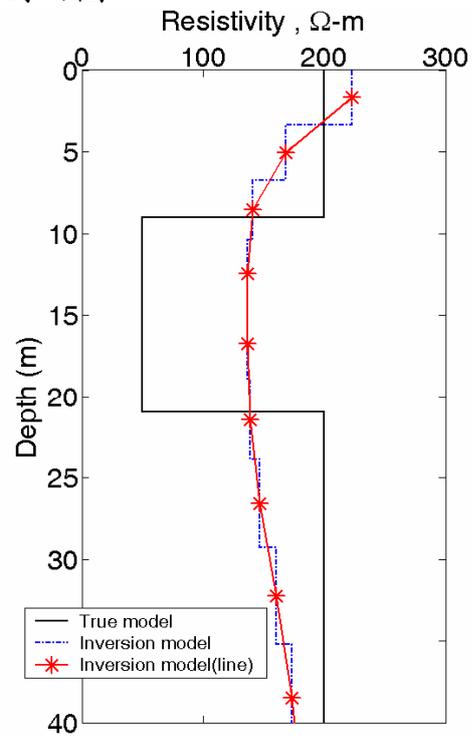
圖 K-10 PolePole-2D 方形介質反算結果(12m X 12m, k=-0.6, Zc=10m)



(a) 影像剖面圖

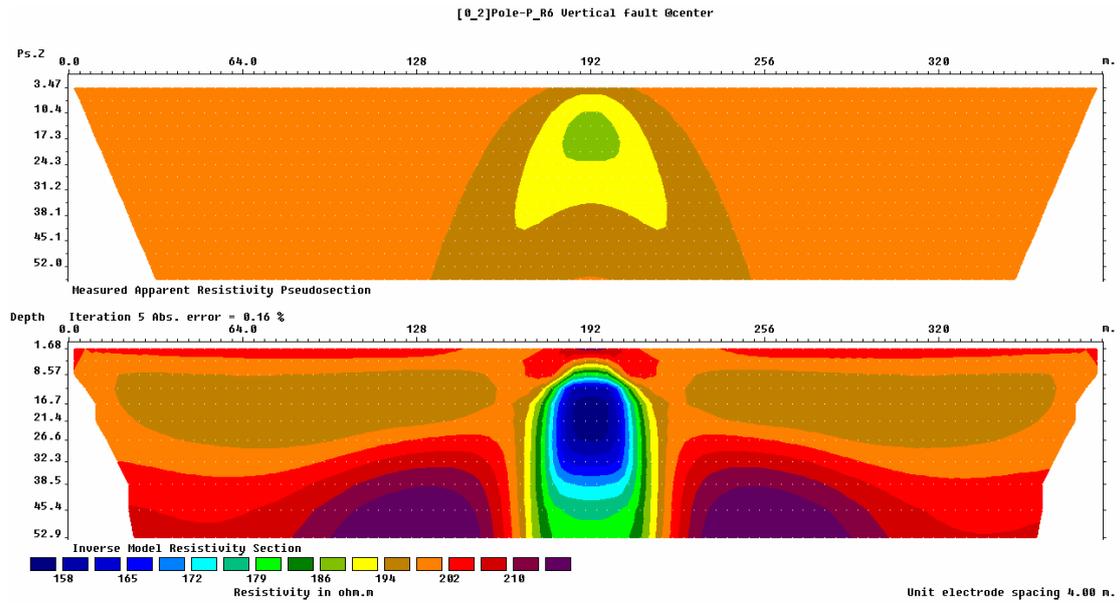


(b) 各層電阻率側向變化

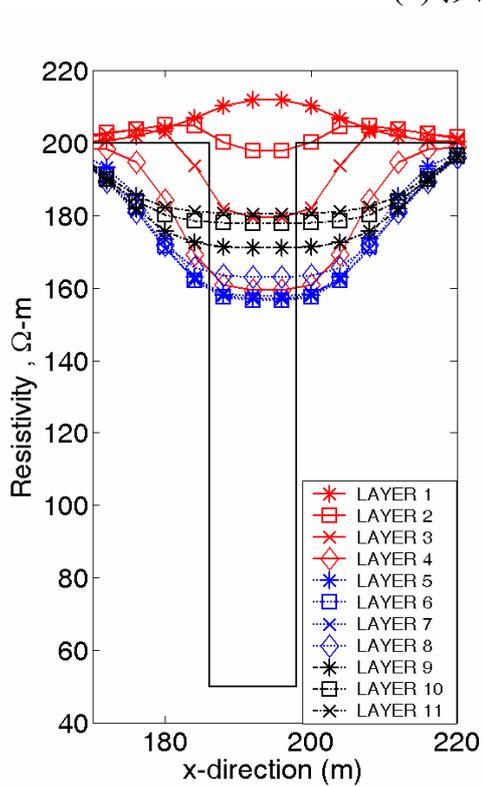


(c) 測線中心垂直方向變化

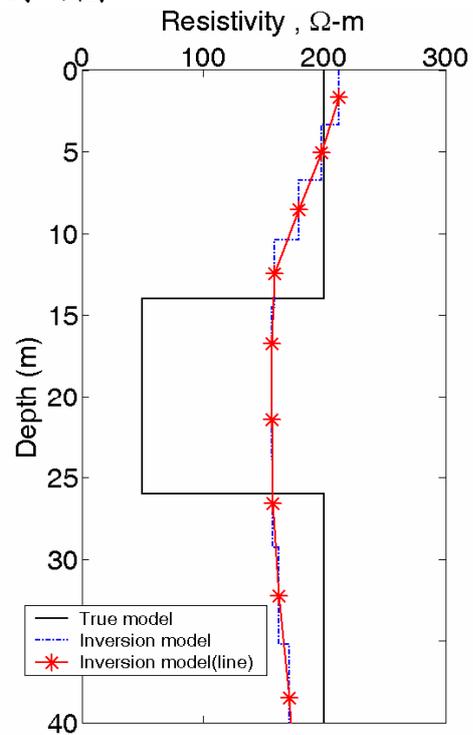
圖 K-11 PolePole-2D 方形介質反算結果(12m X 12m, $k=-0.6$, $Z_c=15m$)



(a) 影像剖面圖



(b) 各層電阻率側向變化



(c) 測線中心垂直方向變化

圖 K-12 PolePole-2D 方形介質反算結果(12m X 12m, $k=-0.6$, $Z_c=20$ m)