

國立中央大學

應用地質研究所

碩士論文

以離散元素法模擬苗栗出磺坑地區構造演育與
裂隙分布評估

**Study of Structural Evolution and Fracture
Distribution through Distinct Element Method
in Chuhuangkeng Area, Miaoli**

研究生：陳彥如

指導教授：黃文正 博士

中華民國一百零八年一月



國立中央大學圖書館 碩博士論文電子檔授權書

(104 年 5 月最新修正版)

本授權書授權本人撰寫之碩/博士學位論文全文電子檔(不包含紙本、詳備註 1 說明), 在「國立中央大學圖書館博碩士論文系統」。(以下請擇一勾選)

(☒)同意 (立即開放)

(☐)同意 (請於西元 _____ 年 _____ 月 _____ 日開放)

(☐)不同意, 原因是: _____

在國家圖書館「臺灣博碩士論文知識加值系統」

(☒)同意 (立即開放)

(☐)同意 (請於西元 _____ 年 _____ 月 _____ 日開放)

(☐)不同意, 原因是: _____

以非專屬、無償授權國立中央大學、台灣聯合大學系統圖書館與國家圖書館, 基於推動「資源共享、互惠合作」之理念, 於回饋社會與學術研究之目的, 得不限地域、時間與次數, 以紙本、微縮、光碟及其它各種方法將上列論文收錄、重製、與利用, 並得將數位化之上列論文與論文電子檔以上載網路方式, 提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

研究生簽名: 陳育如 學號: 105624011

論文名稱: 以離散元素法模擬苗栗出磺坑地區構造演育與裂隙分布評估

指導教授姓名: 黃文正

系所: 應用地質研究所 ☐ 博士班 ☒ 碩士班

填單日期: 2019.1.2

備註:

1. 本授權書之授權範圍僅限電子檔, 紙本論文部分依著作權法第 15 條第 3 款之規定, 採推定原則即預設同意圖書館得公開上架閱覽, 如您有申請專利或投稿等考量, 不同意紙本上架陳列, 須另行加填申請書, 詳細說明與紙本申請書下載請至本館數位博碩士論文網頁。
2. 本授權書請填寫並親筆簽名後, 裝訂於各紙本論文封面後之次頁(全文電子檔內之授權書簽名, 可用電腦打字代替)。
3. 讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文, 應遵守著作權法規定。

國立中央大學碩士班研究生

論文指導教授推薦書

____應用地質____學系/研究所____陳彥如____研究生
所提之論文

以離散元素法模擬苗栗出磺坑地區構造演育與裂隙

分布評估係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 黃文正 (簽章)

2019年1月2日

國立中央大學碩士班研究生
論文口試委員審定書

____應用地質____學系/研究所__陳彥如__研究生
所提之論文
以離散元素法模擬苗栗出磺坑地區構造演育與裂隙分
布評估

經本委員會審議，認定符合碩士資格標準。

學位考試委員會召集人

委

員

賴光弘

張有毅

趙文正

中華民國 107 年 11 月 30 日

以離散元素法模擬苗栗出磺坑地區構造演育與裂隙分布評估

中文摘要

苗栗地區由東至西三個並列之背斜構造分別為八卦力構造、出磺坑背斜及錦水背斜。其中出磺坑背斜及錦水背斜已生產大量的天然氣以及凝結油，台灣中油公司推測八卦力構造亦有產油潛能。然而，八卦力構造位於內麓山帶，難以進行地物探勘及野外調查工作，在地質資料甚為缺乏的狀況下，無法直接評估其產油氣的潛能。油氣的探勘之故，過去已於出磺坑背斜區域，累積豐富地下地質資料及密集的地質構造剖面，本研究藉此優勢，進行本區之構造分析，以出磺坑背斜為檢核標的，進而針對八卦力地區地質構造的形成機制及裂隙分布的情形進行評估。其中以軟體—Move 檢核所繪製剖面之合理性，同時帶入力學分層之觀念修繪此構造剖面，及以數值分析方法—顆粒流程式(Particle Flow Code, PFC)，模擬出磺坑背斜與八卦力構造，進而分析裂隙之分布，並推算目標儲集層之孔隙率。

研究結果顯示，苗栗西部麓山帶之向斜與背斜構造特徵與拱彎作用產生的褶皺特徵相符，可依此機制以數值模擬的方式模擬其形貌。透過彙整五指山層至卓蘭層地層柱，本研究依各地層岩性組成與力學特性將地層重新劃分為由老至年輕 A、B、C、D、E、F、G 及 H 層，共 8 個力學層。根據複層褶皺理論中，褶皺軸部軟硬層形貌特徵對地質構造剖面進行修繪。研究結果顯示，硬層強度分別為軟層強度之 25 倍與 50 倍且水平應變量達 38% 時，可成功模擬出八卦力構造與出磺坑背斜之構造形貌，同時顯示區域內之裂隙生成與水平應變量值呈正相關。根據不同硬軟層強度比進行模擬結果顯示，當硬層強度為軟層強度之 25 倍時，裂隙集中發育於錦水背斜西翼與八卦力構造西翼，於出磺坑背斜兩翼亦有零星裂隙發育，出磺坑背斜東翼孔隙率高於西翼，東翼木山層孔隙率達 4.7~4.9%；八卦力構造區域，八卦力

構造西翼孔隙率高於東翼，西翼木山層孔隙率達 4.3~9.9%。當硬層強度為軟層強度之 50 倍時，裂隙發育於八卦力構造之西翼、軸部 A 層與出磺坑背斜背斜兩翼，且東翼裂隙較為密集，出磺坑背斜東翼孔隙率高於西翼，東翼木山層孔隙率達 6.0~7.1%；八卦力構造區域，八卦力構造西翼孔隙率高於東翼，西翼木山層孔隙率達 4.8~9.6%。將數值模擬中孔隙率分析結果與岩心孔隙率進行比較顯示二維模擬計算出之孔隙率皆小於岩心試驗與 NMR 試驗得到之孔隙率。

關鍵字：出磺坑背斜、離散元素法、構造演育

Study of Structural Evolution and Fracture Distribution through Distinct Element Method in Chuhuangkeng Area, Miaoli

Abstract

The main oil and gas production structure is a series of parallel anticlines in NNE-SSW orientation in western foothills. Chinshui and Chuhuangkeng anticlines are the most productive structures among them. The CPC (Chinese Petroleum Corporation) surmises that Pakuali structure, which is east of Chuhuangkeng anticline, could also have the potential to be a production structure. Nevertheless, it is inefficient to carry out geophysical exploration and field investigation in the inner western foothills where Pakuali structure is located. Taking advantage of the abundant surface and subsurface geological data of anticlines west of the Pakuali structure, it is legitimate to reason the tectonic characteristics and structural evolution of Chuhuangkeng-Pakuali area. The aim of this study is to construct a geological cross-section which can be balanced kinematically and simulated mechanically by MOVE commercial software and PFC^{2D} simulation software, respectively. Furthermore, fracture distribution analysis and porosity assessment are performed based on the simulation results.

Based on my cross-section, the structural characteristics of crustal folds in the western foothills in Miaoli are similar to the folds produced by the mechanism of buckling. Accordingly, the numerical simulation of this study are founded on the buckling mechanism. The stratigraphic assemblage of the oldest Wuchishan Formation to Cholan Formation are collated and divided into eight structural lithic units, re-named as layer A to H, based on the difference of lithology and mechanical properties. According to the theory of multi-layer folding, the geological cross-section is modified as lobate and cusped shapes for the contacts of the soft and hard layers at the fold axis, and the structural section is then used

as a reference for the successful simulation of the Chuhuangkeng anticline and the Pakuali structure.

The results show that when the hard layer strength is 25 times and 50 times greater than the soft layer strength and the horizontal shortening is 38%, the structural configuration of the Pakuali structure and the Chuhuangkeng anticline can be successfully simulated. For the case of layer strength ratio of 25 times, the cracks are concentrated in the western limb of the Chinshui anticline and the western limb of the Pakuali structure. There are also sporadic cracks in the both limb of the Chuhuangkeng anticline. The porosity of the eastern limb of the Chuhuangkeng anticline is higher than that of the western limb, and the porosity of the B layer in the eastern limb is about 4.7 to 4.9%. The porosity of the west limb of the Pakuali structure is higher than that of the east limb, and the porosity of the B layer in the west limb is about 8.8 to 9.6%. For the case of layer strength ratio of 50 times, cracks develop in the western limb of the Pakuali structure, both limbs of the Chuhuangkeng anticline and the cores of two structures at the A layer. The porosity of B layer at the eastern limb of the Chuhuangkeng anticline is about 6.0 to 7.1% while the porosity of B layer at the western limb of Pakuali structure is about 4.8 to 9.6%. Comparing the values of porosity from the numerical simulation with the values of porosity from the tests, the porosity values derived from the two-dimensional simulation are, in general, few percentages less than the porosity values obtained from the core test and the NMR test.

Keywords: Chuhuangkeng anticline, Distinct element method, Structural evolution

誌謝

這篇論文能夠完成首先要感謝我的指導教授黃文正老師。在地質力學研究室老師提供了我許多資源與機會不斷學習、精進自己，並不吝花費大把時間和我討論、給予我建議。研究需要繪製地質剖面、平衡剖面並進行數值模擬，不管哪一部分對我而言都是第一次嘗試，也面臨了許多挑戰。感謝中油公司提供我這個機會進行這麼有趣的研究。感謝賴光胤博士、黃旭燦專案在我到中油的時候的指導，那幾個月的期間我學到了很多。謝謝陳怡如學姐連續好多天到車站接送我。在模擬方面感謝有毅學長、徐家祥學長以及機械系的鍾雲吉老師願意和我討論、給予我建議，讓我在處處碰壁的時候感受到我還有希望。特別感謝賴光胤博士和有毅學長擔任我的口試委員，給予珍貴的建議。

研究所期間經常犧牲睡眠時間趕東西，熬夜通宵也變成了常態，還好研究室中大家的感情很好，休息時間打屁聊天成了日常最大的滋潤。謝謝助理 Vicky 協助了研究室的各種事務，謝謝一勤學長的建議，謝謝學長 Mike、奕維每次我去煩你們問問題的時候都會回應我，謝謝同學以及學弟妹于鈞、Hadis、雅筑、毓呈、廷瑜、智偉、Tri、新翰、冠華、納米、中威等人和我討論研究的東西、和我出野外，謝謝我們的貓 Shiro 來到研究室陪伴我們，在無數通宵的夜晚陪伴我工作。謝謝我最好的朋友茶茶和成什麼都聊什麼都願意聽我說。謝謝我的好室友易慧和亞璇，深夜回到房間看到妳們，讓我感覺自己有了歸屬。謝謝咖啡社的夥伴、應地所同學們不時的相約。

謝謝于鈞總是陪伴在我身邊支持、鼓勵著我。感謝我的家人爸爸、媽媽、阿嬤、哥哥對我的信任與理解，給予我最強的後盾讓我自由飛翔。謝謝湮知道的各位不管什麼事情都為我慶祝，給了我溫暖也給了我前進的力量。

目錄

中文摘要	i
Abstract	iii
誌謝	v
目錄	vi
圖目錄	ix
表目錄	xii
符號說明	xiii
一、緒論	1
1-1 前言	1
1-2 研究流程	4
1-3 論文架構	5
二、前人研究	6
2-1 西部麓山帶構造特徵	6
2-2 地質剖面與平衡剖面	7
2-3 區域性滑脫面特徵	12
2-4 地質單位力學層區分	14
2-5 數值模擬區域構造演育	17
2-6 岩石力學性質	19
三、地質背景	23
3-1 地質概況	23
3-2 地質構造	28
3-2-1 主要斷層	28
3-2-2 主要褶皺	29

四、研究方法	32
4-1 野外地質調查	32
4-2 地質構造剖面	34
4-2-1 剖面的建構	34
4-2-2 剖面的回復	41
4-3 離散元素法	45
4-3-1 二維顆粒流程式	45
4-3-2 顆粒接觸模式	48
4-3-3 參數選定	54
五、研究成果	55
5-1 野外地質調查	55
5-1-1 後龍溪	55
5-1-2 汶水溪	63
5-2 地質構造剖面	65
5-2-1 地層層厚	65
5-2-2 地質構造剖面	67
5-3 平衡剖面	70
5-4 力學層及剖面修繪	80
5-4-1 力學性質分層	80
5-4-2 剖面修繪	82
5-5 區域構造演育數值模擬	84
5-5-1 區域構造演化模擬成果	84
5-5-2 裂隙分布與孔隙率分析結果	92
六、討論	106
6-1 地質構造剖面與模擬成果比較	106

6-1-1 褶皺形貌	106
6-1-2 裂隙分布位置	110
6-2 各力學層之孔隙率與現地採樣之岩心孔隙率比較 ..	111
6-3 以 PFC ^{2D} 模擬地質構造剖面之限制	115
七、結論與建議	116
參考文獻	119
附錄一 監測圓座標、半徑與孔隙率	124

圖目錄

圖 1	台灣地區主要油氣田位置圖。.....	3
圖 2	本研究與前人研究於本區建立的剖面位置。.....	5
圖 3	Namson (1981) 於苗栗通霄至汶水地區建立之 1-1'剖面。.....	9
圖 4	Namson (1981) 於苗栗後龍至獅潭地區建立之 4-4'剖面。.....	9
圖 5	Namson (1983) 於苗栗後龍至獅潭地區建立之 6-6' 剖面。.....	9
圖 6	Hung and Wiltchko (1993) 於苗栗地區建立之 A-A' 剖面。.....	10
圖 7	鍾開增 (1996) 於苗栗後龍至獅潭地區建立之 C-C' 剖面。.....	10
圖 8	林慶偉和楊耿明 (2009) 於苗栗地區建立之 Line 3 剖面。.....	11
圖 9	林慶偉和楊耿明 (2009) 於苗栗地區建立之 Line 4 剖面。.....	11
圖 10	陳采蔚 (2016) 於苗栗地區建立之剖面。.....	11
圖 11	由微震及餘震序列資料繪製之震源剖面。.....	13
圖 12	複層褶皺理論概念模型圖。.....	16
圖 13	三角剪切模式於出磺坑背斜之應變橢圓分布。.....	18
圖 14	顆粒離散元素法模擬細道邦構造形貌演育與裂縫分布。.....	18
圖 15	研究區域主要地質構造分布圖。.....	31
圖 16	研究區域之地質圖與野外調查位置。.....	33
圖 17	四臂井徑電測判釋竹苗地區最大水平應力方位結果。.....	38
圖 18	本研究使用之剖面沿線資料彙整。.....	39
圖 19	急折法繪製地質剖面步驟示意圖。.....	40
圖 20	構造剖面平衡示意圖。.....	43
圖 21	等長度回復示意圖。.....	43
圖 22	曲滑褶皺回復法示意圖。.....	44
圖 23	斷層平行回復法示意圖。.....	44
圖 24	軟球模型中簡化正向與切向接觸之模型。.....	47

圖 25	力—位移法則於每一時間步下的計算循環。	47
圖 26	顆粒與顆粒及顆粒與邊界接觸示意圖。	51
圖 27	各接觸模式與其需設定之模擬參數。	52
圖 28	接觸鍵結與平行鍵結示意圖。	52
圖 29	接觸鍵結所能承受之張力與剪力門檻值。	53
圖 30	後龍溪沿岸野外露頭位置。	57
圖 31	後龍溪沿岸地質圖。	57
圖 32	出磺坑吊橋下方出露厚層塊狀砂岩。	58
圖 33	出磺坑橋下方出露青灰色至灰白色厚層砂岩。	58
圖 34	露頭 HL-9.2 處出露具共軛節理的暗灰色厚砂。	59
圖 35	露頭 HL-9.2 的混濁砂岩中含有生痕化石與貝殼。	59
圖 36	露頭 HL-12 出露之暗灰色厚砂。	60
圖 37	露頭 HL-4 出露之層理明顯的中至薄層的砂岩。	60
圖 38	露頭 HL-6 出露之砂頁互層。	61
圖 39	後龍溪北岸為防波堤覆蓋未見岩層出露。	61
圖 40	後龍溪北岸之河床及沿岸礫石遍佈。	62
圖 41	汶水溪沿岸調查地點位置圖。	63
圖 42	日出溫泉度假飯店正門口鹿場斷層露頭 WS-04。	64
圖 43	露頭 WS-05 出露之岩層受劇烈褶曲。	64
圖 44	本研究繪製之地質構造剖面圖。	69
圖 45	剖面回復步驟一：斧頭坑斷層的回復。	73
圖 46	剖面回復步驟二：大東河斷層的回復。	74
圖 47	剖面回復步驟三：紅毛館斷層的回復。	75
圖 48	剖面回復步驟四：陸家斷層的回復。	76
圖 49	剖面回復步驟五：初期大東河斷層的回復。	77

圖 50	剖面回復步驟六：神桌山斷層的回復。	78
圖 51	剖面回復步驟七：八卦力、出磺坑與錦水背斜的回復。	79
圖 52	本研究所採用之地層柱及力學分層。	81
圖 53	岩性差異所致之不同構造及形貌。	82
圖 54	力學分層後編修之地質構造剖面。	83
圖 55	本研究採用之 PFC2D 數值模擬模型。	87
圖 56	數值模擬成果—Case 1。	88
圖 57	數值模擬成果—Case 2。	89
圖 58	數值模擬成果 Case 1 與地質構造剖面力學分層結果重合圖。	90
圖 59	數值模擬成果 Case 2 與地質構造剖面力學分層結果重合圖。	91
圖 60	Case 1 模擬成果裂隙分佈與剖面力學層修繪結果重合圖。	95
圖 61	Case 2 模擬成果裂隙分佈與剖面力學層修繪結果重合圖。	96
圖 62	Case 1 監測圓位置。	97
圖 63	Case 2 監測圓位置。	97
圖 64	Case 1 出磺坑背斜軸部與翼部孔隙率變化。	98
圖 65	Case 1 八卦力構造軸部與翼部孔隙率變化。	100
圖 66	Case 2 出磺坑背斜軸部與翼部孔隙率變化。	102
圖 67	Case 2 八卦力構造軸部與翼部孔隙率變化。	104
圖 68	比較出磺坑背斜半波長與振幅修於繪剖面與模擬成果之差異。 108	
圖 69	比較八卦力構造半波長與振幅修於繪剖面與模擬成果之差異。 109	
圖 70	中油岩心試驗與 NMR 試驗使用之鑽井位置。	113

表目錄

表 1	一般常見的沉積岩的抗壓、抗剪與抗拉強度。.....	21
表 2	研究區內於各構造出露地層的單軸抗壓強度範圍。.....	21
表 3	工程上常根據岩石的抗壓強度的分類。.....	22
表 4	研究區域之地層比對表。.....	27
表 5	探井 S-2 地層厚度表。.....	37
表 6	探井 C-143 地層厚度表。.....	37
表 7	探井 P-3 地層厚度表。.....	38
表 8	地層層厚彙整表。.....	66
表 9	PFC ^{2D} 模擬所選用之參數。.....	86
表 10	PFC ^{2D} 模擬所選用之鍵結參數。.....	86
表 11	Case 1 中出磺坑背斜軸部與翼部於各時階之孔隙率。.....	99
表 12	Case 1 中八卦力構造軸部與翼部於各時階之孔隙率。.....	101
表 13	Case 2 中出磺坑背斜軸部與翼部於各時階之孔隙率。.....	103
表 14	Case 2 中八卦力構造軸部與翼部於各時階之孔隙率。.....	105
表 15	地質構造剖面與模擬成果之褶皺形貌比較。.....	107
表 16	中油岩心試驗與 NMR 試驗之孔隙率及滲透率結果。.....	113
表 17	現地採樣試驗量測之孔隙率與數值模擬成果比較表。.....	114
表 18	數值模擬成果 Case 1 監測圓座標。.....	124
表 19	數值模擬成果 Case 2 監測圓座標。.....	125

符號說明

d	岩層的厚度(thickness)。
μ	岩層的黏滯係數(viscosity)。
W_i	岩層初始的褶皺波長(initial wavelengths)。
F_c	岩石抗壓強度，單位為單位為 MPa。
Φ	內摩擦角，單位為度。
c	凝聚力，單位為 MPa。
R_m	岩石抗拉強度，單位為單位為 MPa。
T	褶皺西翼地層厚度。
T'	褶皺東翼地層厚度。
a	褶皺西翼與樞紐軸之間夾角的角度，單位為度。
a'	褶皺東翼與樞紐軸之間夾角的角度，單位為度。
K_n	軟球模型中彈簧之正向彈性係數。
K_s	軟球模型中彈簧之切向彈性係數。
η_n	軟球模型中阻尼器之正向阻尼係數。
η_s	軟球模型中阻尼器之切向阻尼係數。
k_n	PFC ^{2D} 中顆粒之正向接觸勁度(normal stiffness)，單位為 N/m。
k_s	PFC ^{2D} 中顆粒之切向接觸勁度(shear stiffness)，單位為 N/m。
F_n	正向力，單位為 N。
U_n	PFC ^{2D} 中總正向重疊量的變形參數。
F_s	切向力，單位為 N。
ΔF_s	切向力之增量。
ΔU_s	PFC ^{2D} 中切向位移增量的變形參數。
μ_f	PFC ^{2D} 中的摩擦係數。
σ_n	PFC ^{2D} 中平行鍵結的正向強度，單位為 MPa。

σ_s	PFC ^{2D} 中平行鍵結的切向強度，單位為 MPa。
k_{np}	PFC ^{2D} 中平行鍵結之鍵結材料的正向勁度，單位為 N/m。
k_{sp}	PFC ^{2D} 中平行鍵結之鍵結材料的切向勁度，單位為 N/m。
$\bar{R}$	顆粒之膠結半徑。
λ	PFC ^{2D} 中平行鍵結的半徑放大係數，沒有單位。
ρ	顆粒密度，單位為 kg/m ³ 。
γ	模擬模型中顆粒的粒徑，單位為 m。
$\sigma_{\text{強}}$	力學分層中的硬層於 PFC ^{2D} 中的鍵結強度，單位為 MPa。
$\sigma_{\text{弱}}$	力學分層中的軟層於 PFC ^{2D} 中的鍵結強度，單位為 MPa。

一、緒論

1-1 前言

台灣中油公司歷年來的探勘結果顯示台灣陸上頗具儲油氣潛能，但已發現的油氣田有一部分的油井經多年開採進入產量驟減階段，需進一步進行激發生產作業（黃旭燦和陳耀輝，2017）。故本研究以產學合作方式，結合數值模擬的方式協助評估新油田的儲油潛能，期望未來能對新舊油田儲油潛能評估工作有所助益。目前台灣陸上生產中的油氣田有錦水、鐵砧山、出磺坑、青草湖、永和山、新營、八掌溪、白沙屯等（黃旭燦和陳耀輝，2017）（圖 1），除新營及八掌溪外，其餘油氣生產構造皆位於竹苗地區，並且以苗栗的鐵砧山、出磺坑兩氣田最為重要。

苗栗地區的出磺坑背斜為一北北東—南南西走向之狹長背斜構造，軸向延伸約 25 公里，背斜之兩翼傾角極陡，東翼達 40 至 80 度，西翼略緩，約為 38 至 60 度（吳偉智等人，1998）。出磺坑背斜為全台灣最古老的油礦，自西元 1861 年開始開採，於日據時代達到生產高峰，西元 1928 年後，油田逐日枯竭，如今自然生產已告一段落。根據吳偉智等人（1998）的淺層地層資料分析，出磺坑背斜縱橫為多道斷層所切，橫向有兩條主要斷層，將產油區域分割為北、中、南三地塊。其縱向的主要斷層在背斜軸以東 300 公尺處，南北延伸約 17 公里，另一縱斷層在構造之東翼距背斜軸甚近，為一順軸向之逆斷層，並將構造縱割為兩半，使西翼地層上升東翼下降，狹長而破碎。除此狹長破碎外，自然裂隙可能非常發達，此可由現場岩心得知裂隙確實存在此淺層地區（吳柏裕，1986），且由岩心薄片可得知出磺坑油氣田之儲集岩特性係以緻密的次生孔隙、裂隙與微裂縫為主（羅仕榮，2003），而這些因構造作用影響而發育的次生裂隙越多，儲集層的孔隙率或滲透率即有增加的可能性，進而增加油氣的儲集量。

由於油田的開採，過去於本研究區針對出磺坑背斜與其鄰近地區已累積相對豐碩的地下地質資料及地質剖面的繪製成果。因此若能藉此優勢，對出磺坑背斜的形成機制、裂隙的分布情況有進階的瞭解，將有助於其他背斜構造之油氣潛能評估，尤其是與出磺坑背斜緊鄰的八卦力構造，故本研究將研究對象鎖定在出磺坑背斜與八卦力構造上。八卦力構造於過去雖未進行大量開採，但在構造特徵上與苗栗地區之其他背斜構造相似，台灣中油公司推測八卦力構造亦有產油潛能。然而，八卦力構造位於內麓山帶，難以進行地物探勘及野外調查工作，在地質資料甚為缺乏的狀況下，無法直接評估其產油氣的潛能，僅能以間接的方式取得更多資料。任何方法原理(如：有限元素法、邊界元素法、離散元素法...等)的數值模擬力學分析之可靠性，皆仰賴於對標的地質構造瞭解之充份性，以背斜構造而言，包括該背斜的幾何形貌及其組成岩層的力學性質等資訊皆可提升模擬的可靠性，因此本研究欲於建立本區之地質構造剖面掌握本研究區背斜構造的幾何形貌後，再以數值模擬的方式了解本研究區構造之形成機制，進而分析八卦力構造內裂隙分布狀況，以期本模型未來能對八卦力背斜油氣潛能評估有所助益。

台灣油氣田位置圖

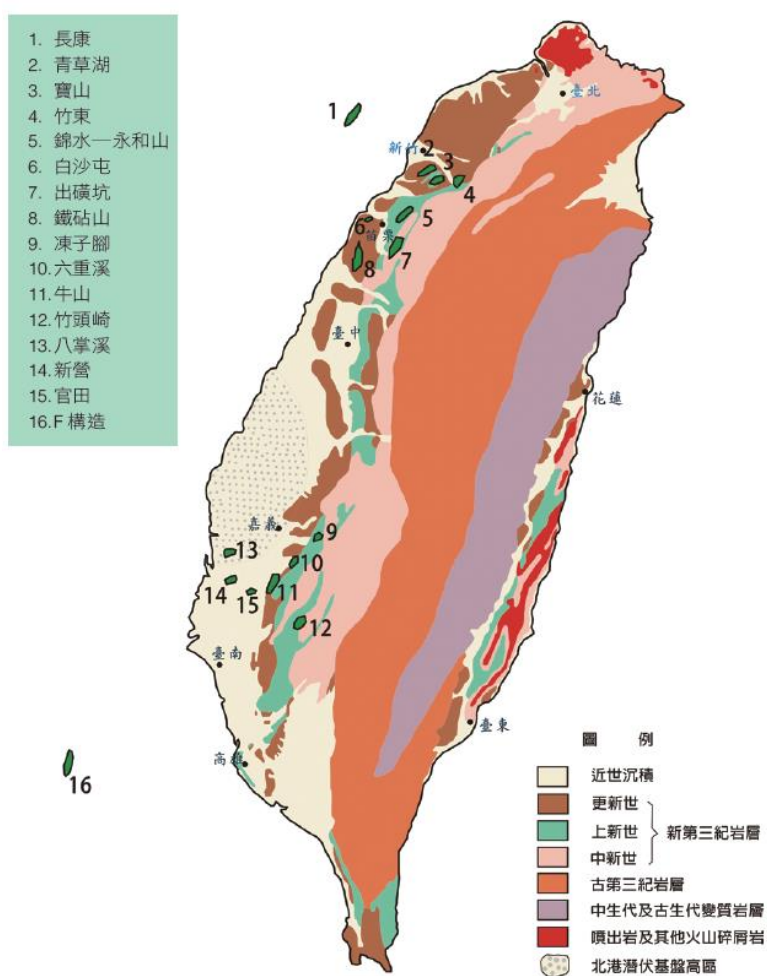


圖 1 台灣地區主要油氣田位置圖。台灣陸上主要的油氣田分布在台灣地質分區中的西部平原與西部麓山帶，並集中於竹苗以及嘉南地區。(摘自黃旭燦和陳耀輝，2017)

1-2 研究流程

本研究之流程主要可分為兩階段進行，第一階段藉由出磺坑背斜以及其鄰近區域過去累積之豐碩的地表及地下地質資料繪製一條東西向的地質構造剖面（剖面位置如圖 2，紅線位置），以了解本研究區之區域構造特性及演育。並使用 Move 軟體依平衡剖面法(Balanced cross section)將剖面進行回復，以檢視本剖面之合理性。Move 為應用於建立橫截剖面與三維建模的商用軟體，可將地形、地質圖、地層位態、鑽井位置與井偏等資訊以三維的形式匯入程式檢視剖面是否符合真實情形，並提供數個斷層與褶皺回復機制進行剖面回復，於回復的過程中可呈現各構造事件造成的地層變形、層厚變化狀況以及水平縮短量。欲以一合理的地質構造剖面做為基礎建立數值模擬模型之前需掌握欲模擬材料的力學性質以及欲模擬環境之邊界條件，故本研究結合褶皺理論並搭配力學層的概念（Currie et al., 1962；Lin et al., 1996；Woodward et al., 1989），對各地層的岩性組成進行力學分層及對剖面進行修繪，進而進入第二階段的數值模擬工作。

第二階段的數值模擬力學分析採用以離散元素法為理論基礎的二維顆粒流程式(Particle Flow Code in 2 Dimensions, PFC^{2D})。此數值方法的重點在於程式將模擬的對象拆解成各自獨立的顆粒 (particle)來分析，顆粒各自獨立，並可以記錄任意顆粒的位置、速度、旋轉、接觸力等資訊，且沒有變形上的限制，故除可模擬岩層的褶曲外，不連續面的發育，如斷層破裂等問題亦可以本方法進行分析。本研究透過參考地質剖面修繪成果於程式中建立模型，以正推的方式模擬構造演化，並針對模擬成果進行裂隙分布與孔隙率分析。在已控制材料性質、邊界條件以及構造形貌的前提下，若以此數值方法模擬出與出磺坑背斜形貌相似且與八卦力構造形貌相去不遠之結果，則判定本模擬成果對標的地層或特定構造部份的孔隙率進行的估算有一定的參考價值。

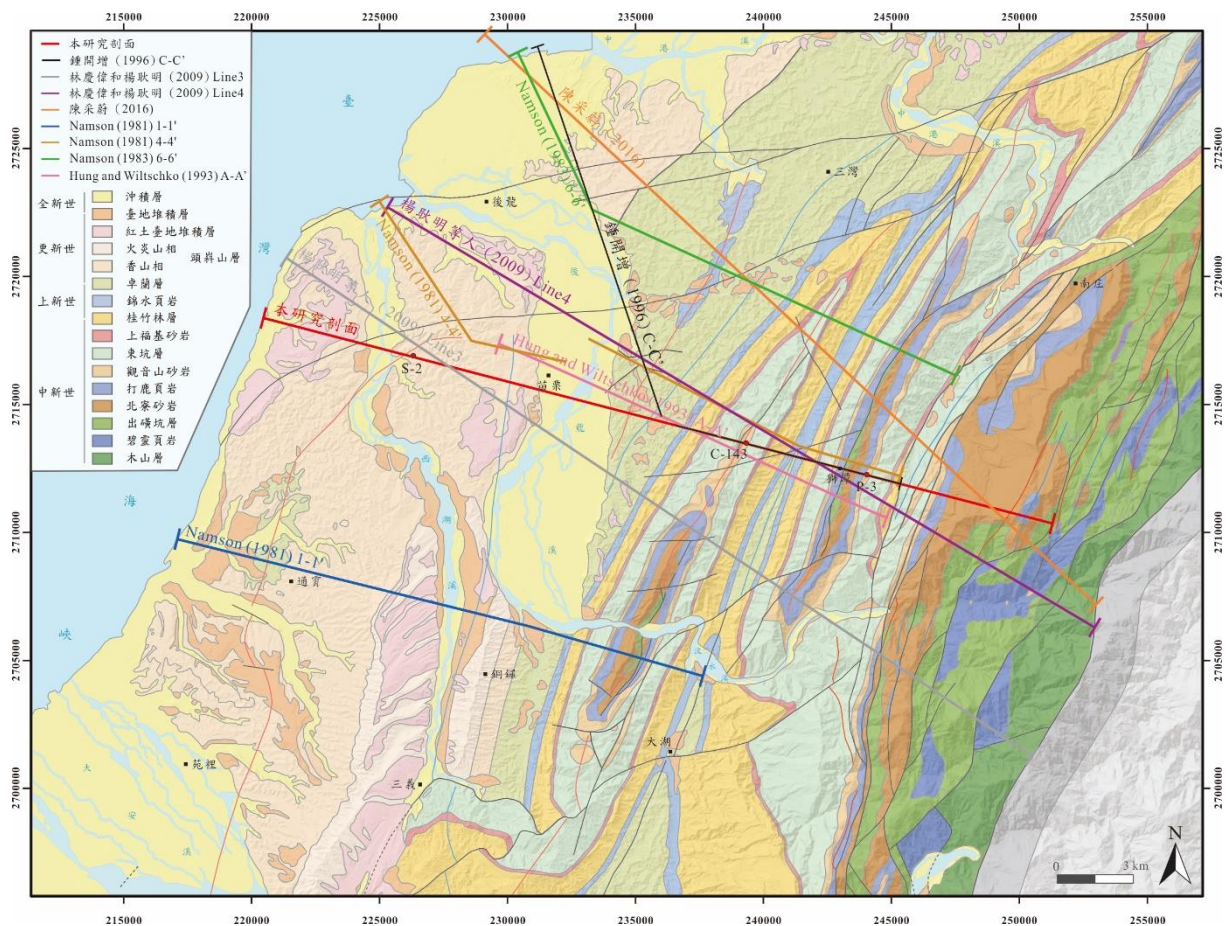


圖 2 本研究與前人研究於本區建立的剖面位置。(改自中油十萬分之一地質圖苗栗圖幅，1994)

1-3 論文架構

本文共有七章，第一章為緒論，旨在說明本研究背景與研究流程。第二章為前人研究，針對本研究區內與本研究相關的研究內容稍做提要，並於第三章中說明本研究區之地質背景與地質構造。第四章為研究方法，其中包含野外調查工作、剖面繪製與平衡方法，以及數值模擬方法—離散元素法之基本理論。包含地質剖面、力學層分層以及數值模擬結果等研究成果將於第五章中呈現。第六章將針對數值模擬成果中的褶皺形貌、裂隙分佈與地質構造剖面比較；數值模擬成果中的孔隙率與現地採樣之岩心比較。並對模擬之限制進行討論。最後，以第七章作為本研究之結論與建議。

二、前人研究

2-1 西部麓山帶構造特徵

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界，為一活躍的活動構造區，根據地層與構造特性可分為海岸山脈、中央山脈、西部麓山帶及海岸平原四個地質區，其中西部麓山帶介於海岸平原與中央山脈之間，岩層雖有褶曲，但尚未變質，主要由未變質的新第三紀沉積岩層構成。依據地層年代、構造與地形等特性又可將西部麓山帶細分為內麓山帶與外麓山帶，東側的內麓山帶屬於較早形成的褶皺山脈，有山脈與深谷地形，主要出露中新世地層；西側的外麓山帶地形較為平緩，以低緩的丘陵與台地為主，主要出露上新世至更新世地層。於苗栗地區兩者以出磺坑背斜為界，背斜西翼以西為外麓山帶，東翼以東為內麓山帶（何春蓀，1986；陳文山，2016；鄧屬予，1997）。

蓬萊造山運動前，台灣西北部麓山帶為中央山脈前緣的前陸盆地，隨著造山運動的發展於更新世初期盆地內沉積的岩層經褶曲、斷移造成本地質區內一系列的褶皺與逆衝斷層，沿北北東—南南西方向排列，故本地質區被視為一典型的褶皺—逆衝斷層帶（fold-and-thrust belt）。而許多早期形成深入底部基盤的正斷層則在造山運動壓縮應力向西傳遞之過程中，重新活化成為高角度的逆斷層。褶皺—逆衝斷層帶中的逆衝斷層由造山帶往前陸方向發育，陳振華 (1993)由晚期新生代沉積物之岩象學與構造地層學分析，認為台灣中部褶皺逆衝帶活動與前陸盆地形成之起始時間應為上新世早期。此後，水長流斷層向西傳播，斷層的發育為由東向西逐漸發育。

2-2 地質剖面與平衡剖面

出磺坑地區過去雖已累積大量的地表與地下調查資料，背斜深部區域仍受限於地物探勘方法與鑽井能抵達的深度限制，較清楚的資料僅能到達地表以下四公里之背斜軸部的五指山層，四公里以下的軸部以及褶皺兩翼的形貌無從得知，因此本區產生許多不同構造解釋之剖面。本研究彙整前人於苗栗地區所繪製的剖面共八道，其位置請參見圖 2 上各不同顏色線段所示。紅色線段為本研究剖面位置，深藍色線段為 Namson (1981) 建立的 1-1' 剖面(圖 3)；棕色線段為 Namson (1981)建立的 4-4'剖面(圖 4)；綠色線段為 Namson (1983)建立的 6-6'剖面(圖 5)；粉紅色線段為 Hung and Wiltschko (1993)建立的 A-A'剖面(圖 6)；黑色線段為鍾開增 (1996)建立的 C-C'剖面(圖 7)；灰色線段林慶偉和楊耿明 (2009)建立的 Line 3 剖面(圖 8)；紫色線段林慶偉和楊耿明 (2009)建立的 Line 4 剖面(圖 9)；橘色線段為陳采蔚 (2016)建立的剖面(圖 10)。

而根據本研究彙整之剖面，可將出磺坑背斜以及八卦力構造此二區域之地質構造發育模式區分出四種基本型，各剖面中所採用的模式可為此四種中任兩種或多種的結合，針對這四種基本型的說明如下：

1. 上舉褶皺(lift-off fold)與疊置斷層作用(duplex faulting)

上舉褶皺 (Mitra & Namson, 1989) 為滑脫面於褶皺的中心部以等角度褶曲形成之褶皺，位於褶皺軸部鄰近滑脫面的岩層垂直。疊置斷層作用乃斷層發育的過程中，後期發育的斷層於先發生之斷層下方生長，並將既存的斷層撓曲，並使斷層上盤的岩層褶曲形成褶皺。隨著疊置斷層的增加，前期褶皺的振幅及波長亦隨之增大。上舉褶皺與疊置斷層作用構成岩層變形的力皆為由下往上的力。彙整之八道剖面中，Namson (圖 3、圖 4、圖 5)認為研究區域內的出磺坑背斜為組成背斜之岩層沿下伏的基底滑脫面，因上舉褶皺作用(lift-off fold)形成背斜構造，而八

卦力構造則由前五指山層的部分岩段之疊置作用使五指山層以上的岩層被撐起。

2. 基底滑脫面上的拱彎作用 (buckling)

地質上的因拱彎作用生成褶皺之機制乃由側向擠壓加上岩層間發生層間滑動產生的岩層褶曲，因拱彎作用生成的褶皺構造通常為一系列連續且振幅向遠離外力來源方向遞減的向斜與背斜構成。彙整之八道剖面中，Hung and Wiltschko (圖 6)即認為出磺坑背斜及八卦力構造的形成，主要是因其組成的岩層，沿一存在於先五指山層的基底滑脫面，往西滑動推進的同時受到拱彎作用，而造成褶曲，形成兩翼岩層皆為高角度之對稱(symmetric)或近乎對稱的褶皺。

3. 斷層彎曲褶皺作用 (fault-bend folding)

斷層彎曲褶皺 (Suppe, 1983) 之斷層面分為斷坪(flat)與斷坡(ramp)，斷層上盤地層沿斷坪滑移，經斷坡處產生急折，形成褶皺。鍾開增(圖 7)認為滑脫面上方岩層，因其下伏岩層沿斷坡逆衝而拱起，如此的作用使出磺坑背斜發育於斷坡之上，並認為八卦力構造與出磺坑背斜形成之原因相同。

4. 斷塊楔形體逆衝推擠 (thrust wedge intruding)

陳采蔚(圖 10)以逆衝楔形體的模式，搭配平衡剖面繪製剖面，模擬研究區域內地質構造演育的情形，認為出磺坑背斜與八卦力構造為逆衝斷塊楔形體推擠演育而成。

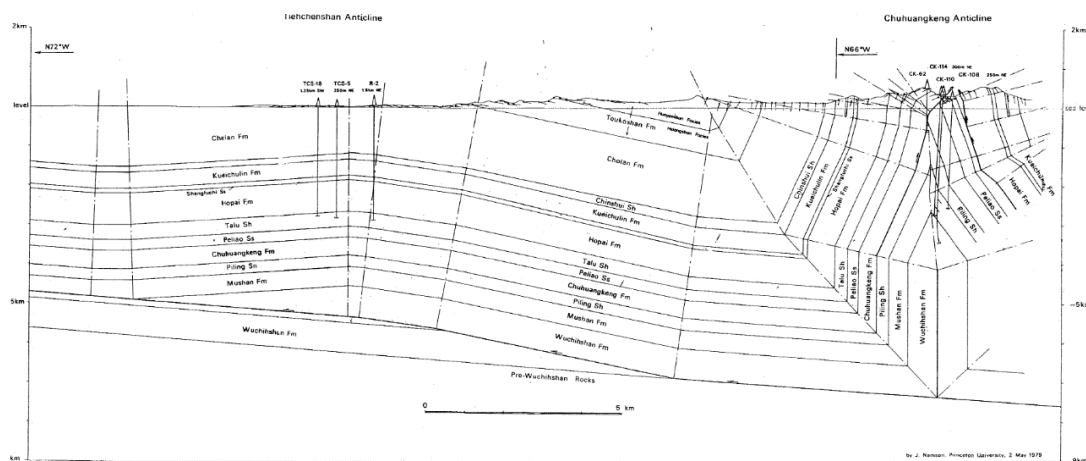


圖 3 Namson (1981) 於苗栗通霄至汶水地區建立之 1-1' 剖面。(摘自 Namson, 1981)

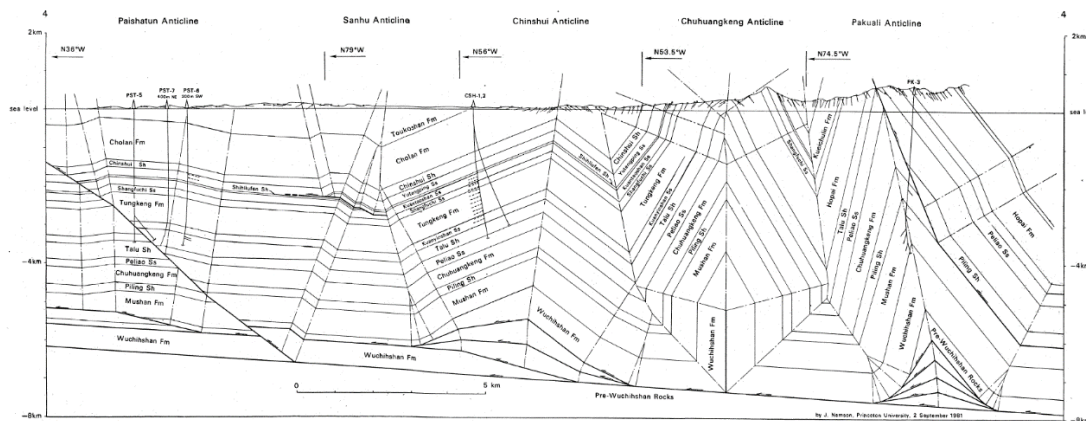


圖 4 Namson (1981) 於苗栗後龍至獅潭地區建立之 4-4' 剖面。(摘自 Namson, 1981)

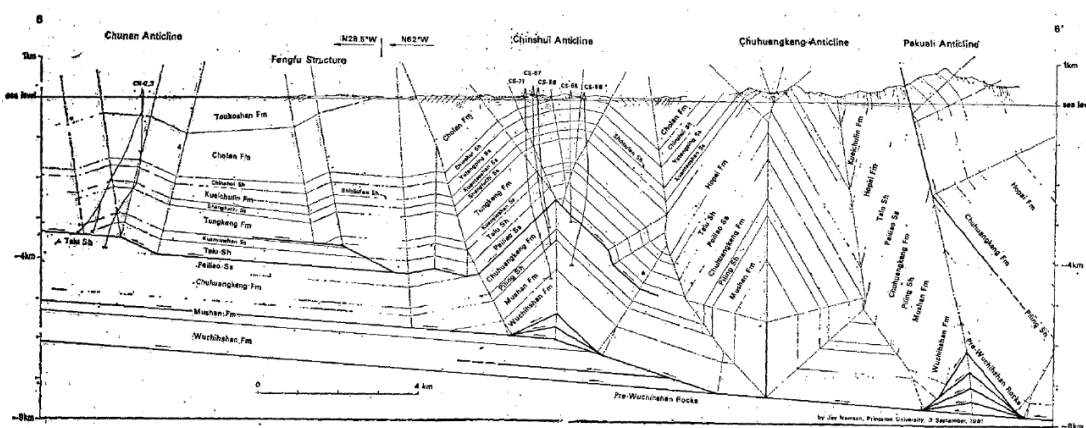


圖 5 Namson (1983) 於苗栗後龍至獅潭地區建立之 6-6' 剖面。(摘自 Namson, 1983)

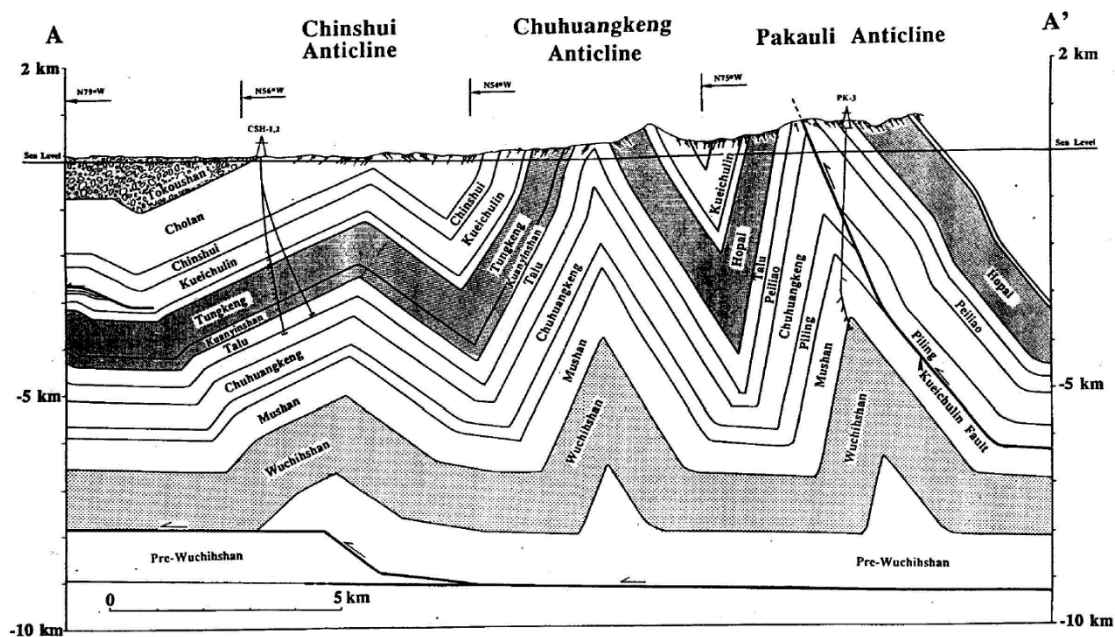


圖 6 Hung and Wiltschko (1993) 於苗栗地區建立之 A-A' 剖面。(摘自 Hung & Wiltschko, 1993)

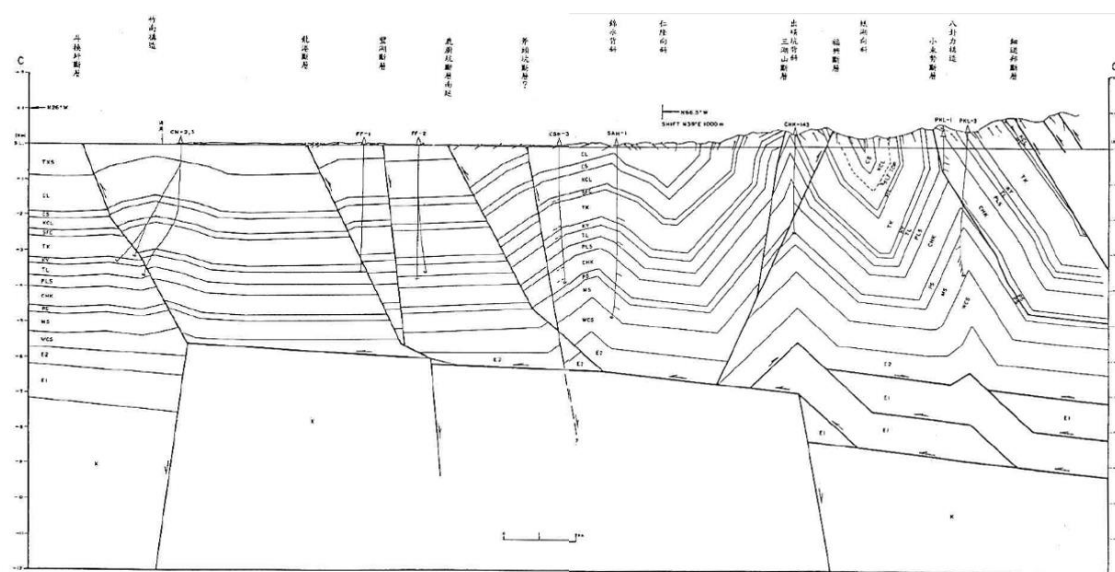


圖 7 鍾開增 (1996) 於苗栗後龍至獅潭地區建立之 C-C' 剖面。(摘自鍾開增, 1996)

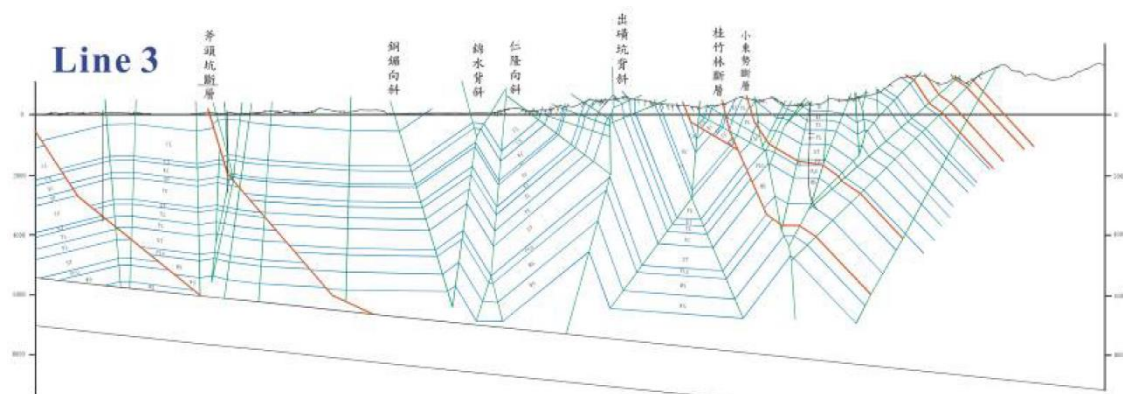


圖 8 林慶偉和楊耿明 (2009) 於苗栗地區建立之 Line 3 剖面。(摘自林慶偉和楊耿明，2009)

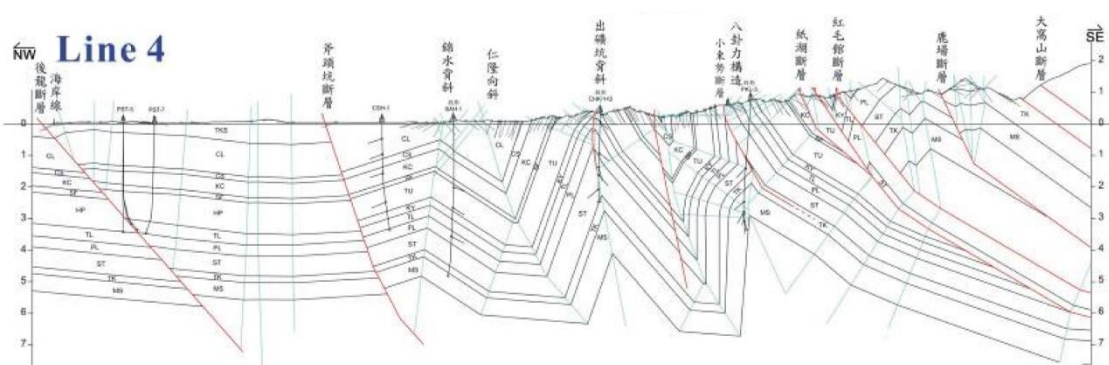


圖 9 林慶偉和楊耿明 (2009) 於苗栗地區建立之 Line 4 剖面。(摘自林慶偉和楊耿明，2009)

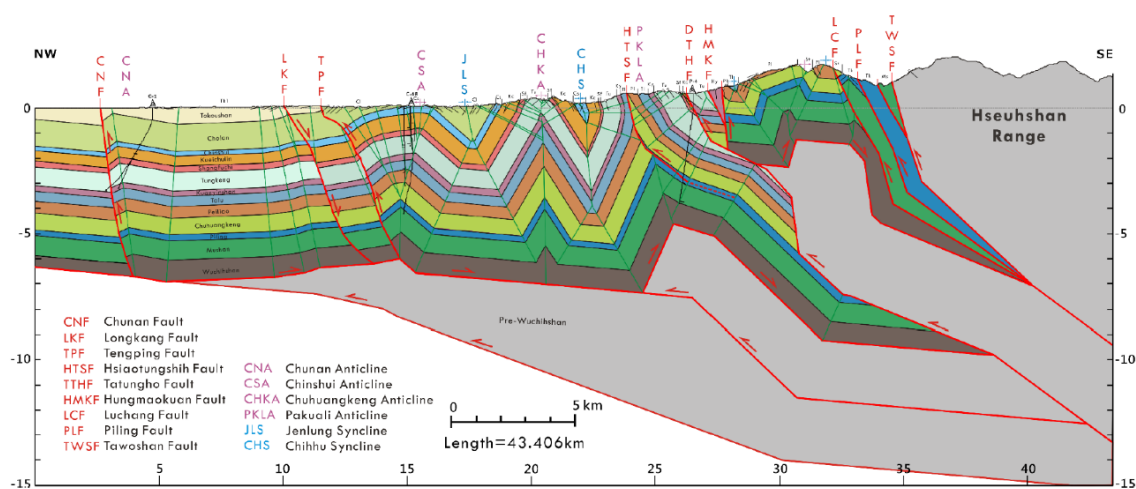


圖 10 陳采蔚 (2016) 於苗栗地區建立之剖面。(摘自陳采蔚，2016)

2-3 區域性滑脫面特徵

Suppe (1981)認為台灣西部之變形主要變形發生在 15 公里以上的淺層，為薄皮式構造變形。其後，Davis et al. (1983)透過砂箱試驗重建滑脫面上一系列褶皺與斷層發育情形，結果與台灣的地質觀測吻合。Carena et al. (2002)利用 11 萬筆芮氏規模小於 4 之微震以及餘震序列資料建立震源剖面(圖 11)，結果顯示台灣西部地下 10 公里處有一近水平的小地震密集帶，認為此一密集帶為台灣主要滑脫面(Taiwan main detachment)位置。前一節中彙整的八道剖面中，滑脫面位置皆位於地下 5 至 15 公里處，微向東傾，角度介於 0 至 6.5 度之間，並以 4 至 5 度居多。由於鑽井資料中於五指山層內未見滑脫面，Namson (1981, 1983)判斷滑脫面位於五指山層與基盤之層面邊界。Hung and Wiltschko (1993) 與鍾開增 (1996)則認為基底滑脫面的位置位於五指山層底部之前五指山層中。陳采蔚 (2016)參考 Mouthereau et al. (2002)修改 Chapple (1978)和 Davis et al. (1983)的薄皮逆衝楔形體模型，將淺層滑脫面設於五指山層底部，並認為台灣在深部應存在另一滑脫面。

本研究中，基底滑脫面位置參考 Hung and Wiltschko (1993) A-A'剖面中基底滑脫面的位置，將滑脫面置於五指山層底部之前五指山層中，選定此位置之原因有三：1. 五指山層從外麓山帶進入內麓山帶時由於相變的發生，不再和底部岩層有明顯的岩性差異，無法提供滑脫面發育的有力條件(何春蓀，1986)；2. 三義斷層鄰近地區的地震資料顯示滑脫面應位於地下 9~10 公里處，較五指山層底部更低 (Hung & Wiltschko, 1993；Lin et al., 1989)；3. 位於鐵鈷山背斜的鑽井 TCS-34 中並未確認到五指山層與前五指山層的邊界有斷層存在 (Chou & Yeh, 1987)。

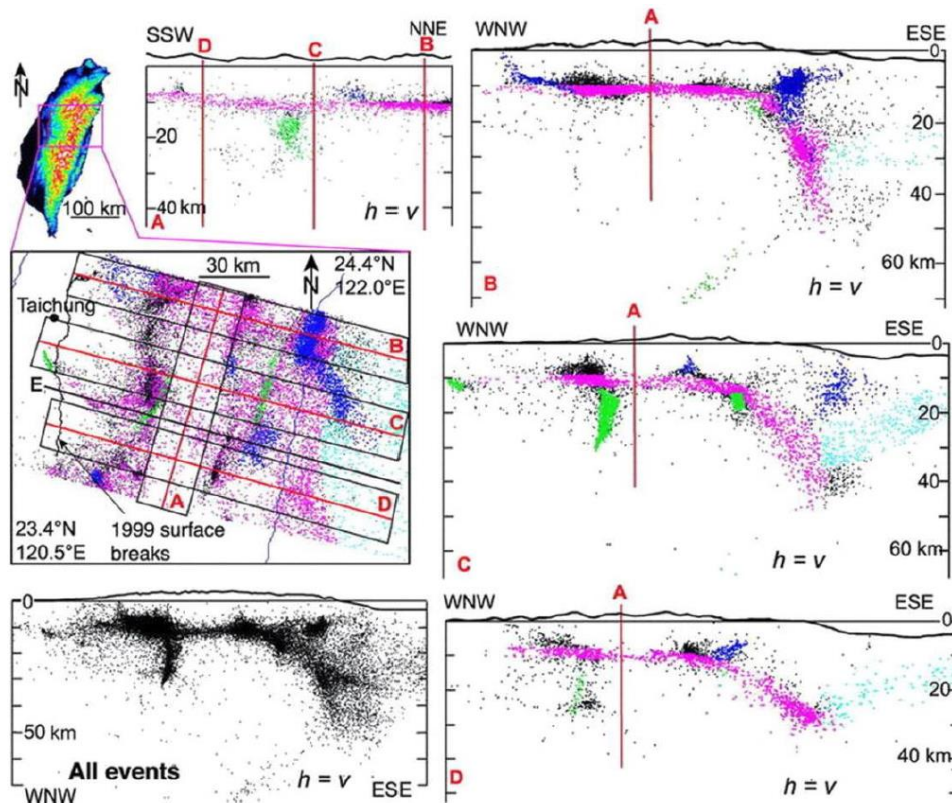


圖 11 由微震及餘震序列資料繪製之震源剖面。Carena et al. (2002)利用 11 萬筆芮氏規模小於 4 之微震以及餘震序列資料建立震源剖面，結果顯示台灣西部地下 10 公里處有一近水平的小地震密集帶，認為此一密集帶為台灣主要滑脫面(Taiwan main detachment)位置。(摘自 Carena et al., 2002)

2-4 地質單位力學層區分

地質學的研究中普遍以生物地層或時代地層做為區分地層之依據，但在建立數值模擬模型時這些分層方式皆無法反映地層之變形狀況，因此本研究採用得以反映岩層變形行為之方式來建立簡化模型。Currie et al. (1962) 提出構造岩性單位(structural lithic unit)的概念，考慮到岩石的岩性、力學性質、幾何形貌、排列方式、與圍岩之間的關係等種種因素皆會影響岩石之變形行為，而在一系列的岩層在承受大地應力的作用後將其中具有相似變形行為者可視為同一單位，以此單位為基礎區分岩層的學問則為構造地層學(structural stratigraphy)。魏聲焜 (1994)綜合其區域性地質資料透過野外調查、岩石力學試驗得到岩石強度及其相對應之變形行為，將苗栗地區出露之上新世至中新世地層分成三個單位，每一單位所包含之地層及其所對應之巨視構造現象分別為：單位 A 包含卓蘭層、錦水頁岩，出露位置位於剖面最西側，以平緩寬廣的褶皺為主；單位 B 有桂竹林層、南莊層、觀音山砂岩、打鹿頁岩、北寮砂岩，以較緊密的褶皺及斷層為主；單位 C 位於剖面最東邊，以不同波長得小型褶皺為主，其中有出磺坑層、碧靈頁岩(大寮層)、木山層。然而，若要考慮各層單獨之力學性質建立數值模型，則無法採用魏聲焜 (1994)綜合各地層中的岩石強度及其相對應之變形行為而建立出的分層。於此，本研究參考 Ramsay and Huber (1987)之複層褶皺理論中，對於不同性質之複層岩層受側向力作用產生不同樣貌的褶皺分類進行探討。

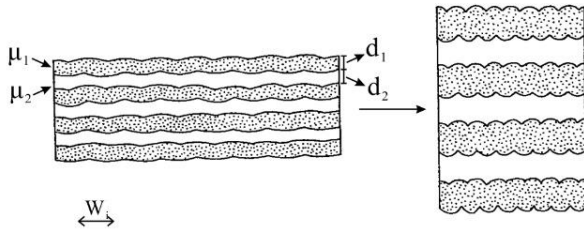
複層褶皺理論將複層岩層的協調褶皺視為單一岩體分析，而此複層岩層中的協調褶皺之形貌(fold styles in multilayers)，受控於不同岩層的厚度(thickness, d)、各岩層的黏滯係數(viscosity, μ)以及各岩層初始的褶皺波長(initial wavelengths, W_i)。而於分析中，拱彎作用(buckling)為載荷(load)方式下，大致可將試驗結果，分成六種類型，如圖 12。假設模型中灰色岩層為強岩；白色岩層微弱岩，而 μ_1/μ_2 為二岩層的黏滯係數比值，亦稱為韌度

比(ductility contrast)； d_2/d_1 代表二岩層層厚的比值，以此二參數做為分類之參考依據。

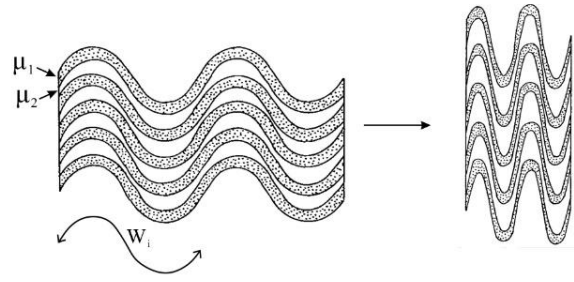
1. Model A：強岩與弱岩黏滯系數相近(μ_1/μ_2 值小)，且兩岩層厚度相當(d_2/d_1 值高)，則產生之褶皺振幅小，並於強岩和弱岩間形成尖瓣圓弧褶皺(cusate-lobate fold)形式。
2. Model B：強岩與弱岩黏滯系數相近(μ_1/μ_2 值小)，且強岩厚度大於弱岩(d_2/d_1 值適中)，形成相似褶皺貌，褶皺翼部之岩層厚度急劇縮減。
3. Model C：強岩與弱岩黏滯系數相近(μ_1/μ_2 值小)，且強岩厚度遠大於弱岩(d_2/d_1 值小)，岩層幾乎不褶曲，形成平緩且幾乎無振幅產生的褶皺。
4. Model D：強岩與弱岩黏滯系數差異大(μ_1/μ_2 值大)，且兩岩層厚度相當(d_2/d_1 值高)，形成褶曲強烈，各岩層於褶皺翼部之岩層厚度縮減之褶皺形貌，且褶皺之振幅更為強烈。
5. Model E：強岩與弱岩黏滯系數差異大(μ_1/μ_2 值大)，且強岩厚度大於弱岩(d_2/d_1 值適中)，形成褶曲強烈，各岩層於褶皺翼部厚度縮減，其中岩層較薄者於褶皺軸部厚度較厚，翼部的岩層厚度緊縮，弱岩層形成尖頂褶皺。
6. Model F：強岩與弱岩黏滯系數差異大(μ_1/μ_2 值大)，且強岩厚度遠大於弱岩(d_2/d_1 值小)，原為類似急折褶皺之形貌，隨著水平縮短量增加，形成類似非對稱尖頂褶皺 (irregular chevron model)，岩層層厚變化並不顯著。

由以上六種模型，可知彎曲作用下由強岩與弱岩組合的複層岩層，若強岩與弱岩的力學強度差異甚巨，且各別之厚度差異不大時，所形成之褶皺形貌，於褶皺軸部厚度相較為厚；於翼部相較變薄，褶曲更緊密。反之，若強岩與弱岩的力學強度相當，且各別之厚度差異甚巨時，岩層不易受到褶曲、層厚亦無變化，不易形成褶皺。

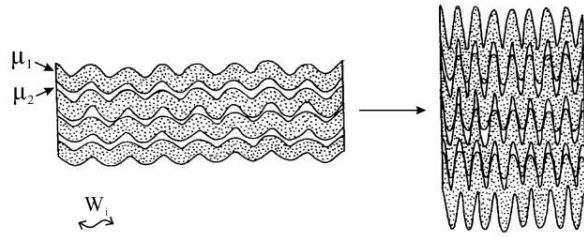
◆ Model A: μ_1/μ_2 low, d_2/d_1 high



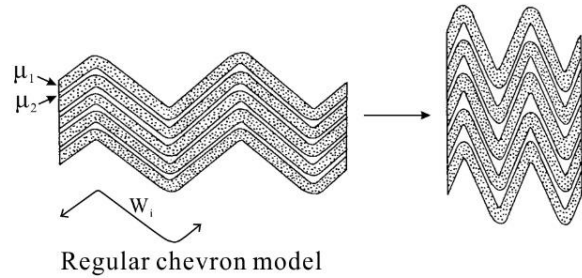
◆ Model D: μ_1/μ_2 high, d_2/d_1 high



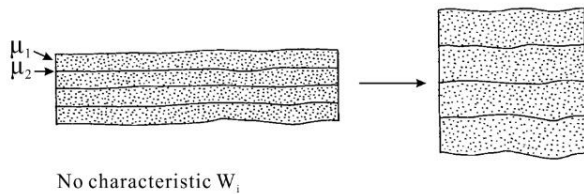
◆ Model B: μ_1/μ_2 low, d_2/d_1 moderate



◆ Model E: μ_1/μ_2 high, d_2/d_1 moderate



◆ Model C: μ_1/μ_2 low, d_2/d_1 low



◆ Model F: μ_1/μ_2 high, d_2/d_1 low

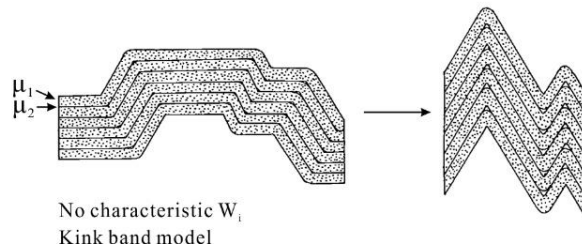


圖 12 複層褶皺理論概念模型圖。模型圖中， μ_1/μ_2 為二岩層的黏滯係數比值； d_2/d_1 代表二岩層層厚的比值，以此二參數做為分類之參考依據將試驗結果分成六種類型。Model A 中強岩和弱岩間形成尖瓣圓弧褶皺；Model B 形成相似褶皺；Model C 之褶皺平緩且振幅非常小；Model D 形成褶曲強烈，形成褶皺翼部岩層厚度縮減之褶皺形貌；Model E 形成褶曲強烈，翼部的岩層厚度緊縮，弱岩層形成尖頂褶皺；Model F 原為類似急折褶皺之形貌。(改自 Ramsay & Huber, 1987)

2-5 數值模擬區域構造演育

現地調查、物理試驗及理論方法(解析與數值模擬)為解決地質上問題的三大方法。在現地調查中能掌握近地表的地層出露狀況與觀察其岩性、地質構造，再加上地球物理方法可進一步推敲出一定深度內的地下資訊，然而人類無法抵達或者就目前技術而言無法觸及的地下深處的狀況仍無法知悉。若以物理試驗透過實驗的方式進行可得到地質材料之力學性質，並有希望重現一定程度的構造演育，然而受限於材料與尺度問題，對於中大尺度、不均質材料以及複雜的構造活動欲以實驗的方式研究將遇到瓶頸，欲突破該瓶頸可以結合理論方法(數學上的解析與數值模擬)將彼此的結果互相參照與修正。因此，於本研究中結合數值模擬方法透過理論結合於現地調查與物理試驗中得到的資訊進行模擬將得以更有效的理解本研究區構造之形成機制並作出更進一步的評估。

在數值模擬這個方法中，過去周佳儀 (2008)曾利用三角剪切模式(Trishear model)嘗試模擬出礮坑背斜之形貌，根據她的模型欲模擬如出礮坑背斜之斷層滑脫褶皺形貌，則必須在斷層末端假設一高角度斷層，且斷層傾角必須為 50 度，斷層滑移量 3700 公尺，三角剪切頂角角度 60 度，基底滑脫面深度為 8.6 公里。其結果顯示，褶皺兩翼的地層傾角及厚度，會隨深度改變而明顯改變，雖以三角剪切模式模擬之成果符合地表資料，但地下形貌仍與前人對出礮坑背斜幾何形貌的描述略有差異(圖 13)。楊宜蓉和胡植慶(2013)以顆粒離散元素法模擬苗栗東南方的細道邦構造形貌演育的過程並分析構造中裂縫的幾何分布。結果顯示，斷層彎曲褶皺裂隙分布不完全集中在背斜軸部位置，而是以斷坡後方的褶皺東翼為主要裂隙分布區，褶皺軸部則是以剪切破壞形成的裂隙為主(圖 14)。本研究亦採用與楊宜蓉和胡植慶相同的數值方法——以離散元素法為理論基礎的顆粒流程式(Particle Flow Code, PFC)，本文將於第四章研究方法中對本數值方法作進一步的說明。

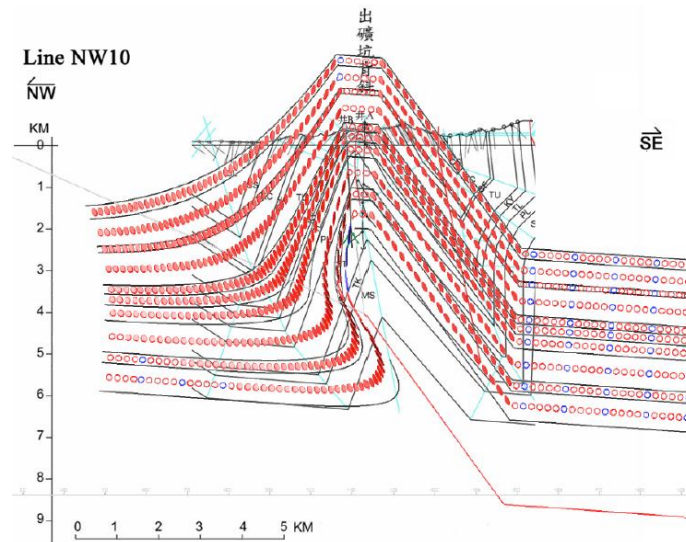


圖 13 三角剪切模式於出礦坑背斜之應變橢圓分布。周佳儀 (2008)以三角剪切模式(Trishear model)模擬出礦坑背斜形貌之成果，岩層變形狀況以應變橢圓表示，其中紅色越深表示應變量顯著。(摘自周佳儀，2008)

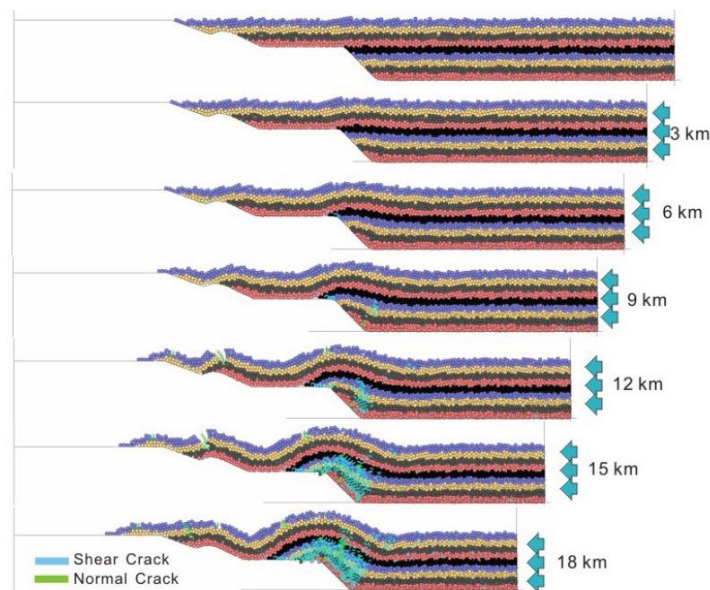


圖 14 顆粒離散元素法模擬細道邦構造形貌演育與裂縫分布。楊宜蓉和胡植慶 (2013)以顆粒離散元素法模擬苗栗東南方的細道邦構造形貌演育與裂隙分佈之結果。其中，藍色線段為剪力造成之裂隙：綠色線段為張力造成之裂隙。(摘自楊宜蓉和胡植慶，2013)

2-6 岩石力學性質

為評估數值模擬模型中材料力學性質與分類，本研究參考前人根據物理試驗得到之岩石強度作為區分模擬中軟硬層之依據。岩石的強度即岩石受外力作用達到破壞前所能抵抗外力的能力，可分為壓力、剪力、拉力三種類型，三者對應到的強度分別為岩石的抗壓強度、抗剪強度、抗拉強度。受大地應力作用，本研究區內的岩層所承受的外力以壓力為主，於物理試驗中岩石之抗壓強度可透過單向度壓密試驗獲得。岩石在單向壓力的作用下，抵抗破壞的能力，稱為其抗壓強度，亦即應力—應變曲線上的峰值強度(潘國樑，2007)。一般常見的沉積岩的抗壓、抗剪與抗拉強度如表 1 所示。砂岩之抗壓強度介於 20~200MPa 之間；頁岩之抗壓強度介於 10~100MPa 之間。除了岩石本身的礦物成分、結構與發育於岩石上的次生構造外，外在環境中的水與風的作用亦會大大的影響岩石強度。一般而言，礦物或顆粒粒徑小者，其接觸面積較大，連結力較強，所以岩石的抗壓強度較高。又孔隙率越大的岩石，其抗壓強度越低；因此岩石的抗壓強度常與其密度成正相關的關係。然而，岩石的抗壓強度卻與其含水量成負相關的關係，即含水量越高，強度越低(潘國樑，2007)。魏聲焜 (1994)針對出磺坑背斜、八卦力構造、虎山一帶與上島地區出露之砂岩進行單壓試驗，結果顯示各砂岩層單軸抗壓強度由西至東漸增，抗壓強度以出磺坑背斜之上福基砂岩的 7.24~12.76MPa 最低；上島地區之木山層的 133.10~166.07MPa 最高(表 2)。此依結果亦可映證現地狀況對岩石強度的影響。

除了根據岩石種類的分類方法外，工程上常根據岩石的抗壓強度而分成硬岩(strong rock)與軟岩(soft rock)兩大類。國際岩石力學學會(ISRM)依據完整岩石(intact rock)的單軸抗壓強度將單壓強度分佈在 0.5MPa 至 25MPa 之間的岩石歸類為軟岩。由於一般黏土的單壓強度皆低於 0.5MPa，工程上大多將此作微軟岩強度之下限；而上限並無明確依據，不過考慮到材料的工

程行為以及其他學者的分類方式，25MPa 為各學者公認之軟岩單壓強度上限值。以軟岩的上界作為硬岩之下限，硬岩單壓強度在 25MPa 至 250MPa 之間或大於 250MPa。Hoek (2006)將軟岩與硬岩依其單壓強度進一步細分如表 3 所示。由此可以假定，物理試驗中一般認為砂岩強度介於 20 至 200MPa 之間；頁岩強度介於 10 至 100MPa 之間，考慮到現地地層並非由單一岩性構成，且岩體深埋程度、岩體內之流體與裂隙以及岩石本身膠結程度皆會使其強度高於或低於該數值。

表 1 一般常見的沉積岩的抗壓、抗剪與抗拉強度。

岩石名稱		抗壓強度 (F_c , MPa)	抗剪強度		抗拉強度 (R_m , MPa)
			內摩擦角 Φ (度)	凝聚力 c (MPa)	
沉 積 岩	砂岩	20~200	35~50	4~40	4~25
	頁岩	10~100	20~35	2~30	7~20
	石灰岩	30~250	5~50	4~40	3~5
	白雲岩	80~250	5~50	10~40	--
	泥灰岩	13~100	--	--	--
	凝灰岩	60~170	--	--	--
	煤	5~50	--	--	--

資料來源：潘國樑 (2007)

表 2 研究區內於各構造出露地層的單軸抗壓強度範圍。

地層名稱	單軸抗壓強度 (MPa)			
	出磺坑背斜	八卦力構造	虎山一帶	上島地區
關刀山砂岩	37.54~92.13	24.18~48.14		
上福基砂岩	7.24~12.76			
東坑層	8.74~31.59	19.44~27.03		
觀音山砂岩	36.93~49.53	37.89~65.59		
北寮層	38.92~61.90	49.98~84.30	52.45~91.30	
石底層	32.89~59.82		63.03~153.07	
碧靈頁岩				59.32~121.33
木山層				133.10~166.07

資料來源：魏聲焜 (1994)

表 3 工程上常根據岩石的抗壓強度的分類。

Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Field estimate of strength	Examples
Extremely Strong	> 250	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
Very Strong	100 - 250	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff
Strong	50 - 100	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale
Medium Strong	25 - 50	Can be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone
Weak	5 - 25	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Chalk, rocksalt, potash
Very Weak	1 - 5	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife	Highly weathered or altered rock
Extremely Weak	0.25 - 1	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

資料來源：Hoek (2006)

三、地質背景

3-1 地質概況

本研究區位於台灣苗栗地區之西部麓山帶及內麓山帶，出露地層以鄰近海岸平原之頭嵙山層最為年輕，越接近內麓山帶越老，最老之地層為中新世木山層。由老至年輕依序為：中新世木山層、碧靈頁岩、出磺坑層、北寮砂岩、打鹿頁岩、觀音山砂岩、東坑層、上福基砂岩、桂竹林層與上新世錦水頁岩、更新世卓蘭層及頭嵙山層。

這一系列的地層主要由砂、頁岩互層組成，且為連續沉積，地層間並未發現不整合面，僅更新世晚期未固結之沉積物以不整合之形式覆於頭嵙山層之上。本區出露地層及與鄰近地區對應地層之關係如表 4 所示。

A. 木山層 (Mushan Formation, Ms)

相當於本研究上島地區的汶水層，為本研究區出露最老的地層，亦為台灣北部三個含煤地層的最下層。木山層岩性以厚層灰白色石英砂岩為主，偶夾薄層泥岩，上部夾炭質頁岩與煤層（陳文山，2016），進入苗栗地區轉為由淺灰色至深灰色薄砂岩與灰色至深灰色薄頁岩或砂質頁岩組成（李錦發，2000），主要出露於內麓山帶大窩山斷層東側，由於出露之邊界皆為斷層截切且地層受到劇烈褶皺作用，難以確定本層之正確層厚。

B. 碧靈頁岩 (Piling Shale, Pi)

本層以黑色緻密頁岩為主，間夾薄層灰色砂岩與頁岩互層或砂頁岩帶狀層，大致可以分為三段，上下段為頁岩，中段為砂岩與砂頁互層組成。緻密頁岩中含有少許鐵石結核及化石，泥質砂岩中含有貝類及有孔蟲化石砂岩頁岩互層以砂岩為主，砂岩風化後呈現棕黃色厚約 5 至 20 公分；頁岩部分含砂質厚約 3 至 15 公分（李錦發，2000）。本層厚度約為 450 至 500 公尺之間。

C. 出磺坑層 (Chuhuangkeng Formation, Ch)

本層相當於北部之石底層，於苗栗地區稱為出磺坑層。由青灰色細粒砂岩及砂頁薄互層所組成，頂部黑灰色頁岩發育良好，由下往上頁岩的比例漸增，最上部出現 30 至 60 公尺之灰色頁岩，其中夾少許薄層砂岩（何信昌，1994）。野外調查時常以此頁岩頂部作為本層與北寮砂岩的界線。於本研究區出露於出磺坑背斜軸部以及內麓山帶紅毛館斷層以東至大窩山斷層的範圍間。

D. 北寮砂岩 (Peiliao Sandstone, Pl)

青灰色至淺灰色細粒塊狀至厚層細致泥質砂岩為主，夾有砂質頁岩及砂、頁岩質薄互層（李錦發，2000）。砂岩常因風化而成淺棕色或黃棕色，且質地堅硬，常形成陡峭的懸崖地形。砂岩與頁岩互層於本層上部較為發達，常含化石密集帶；下部則較常出現厚層或是塊狀的砂岩。本層下部為一層厚約 40 至 50 公尺的泥質砂岩，且其底部含大量的有孔蟲化石（何信昌，1994）。本層最頂部為一層厚約 10 至 20 公尺富含化石的鈣質砂岩，此砂岩層可為與打鹿頁岩的分界。

E. 打鹿頁岩 (Talu Shale, Tl)

以青灰色或暗灰色頁岩及泥質粉砂岩為主，時夾 10 至 20 公分之鈣質砂岩（李錦發，2000），由於其岩性特徵於野外較易於辨識，可做為野外的指標地層。其岩性軟弱、易風化，在野外常形成低窪地形，頁岩風化後呈棕灰色或黃棕色。於出磺坑背斜區域出露之打鹿頁岩以暗灰色頁岩為主，夾有數層厚度約為 1 至 3 公尺之泥質粉砂岩。頁岩中偶夾泥質砂岩或砂質泥岩（何信昌，1994）。本層於八卦力一帶層厚約 250 公尺。

F. 觀音山砂岩 (Kuanyinshan Sandstone, Ky)

厚層或塊狀青灰色至灰色鈣質混濁砂岩組成（何信昌，1994），岩性上可分為上下段，上段以砂岩與頁岩之互層為主，偶夾厚層泥質砂岩；下段則以青灰色或淡灰色細粒塊狀泥質砂岩為主（李錦發，2000）。由於上段為砂頁互層，覆於其上之東坑層不易辨識，但仍可以東坑層下部一厚約為 20 至 30 公尺之灰白色中粒至粗粒砂岩層作為觀音山砂岩與東坑層之界線。

G. 東坑層 (Tungkeng Formation, Tu)

本層在台灣北部與上福基砂岩合稱為南莊層。岩性以白色砂岩與深灰色頁互層為主，間夾數層厚層塊狀砂岩，並含有數層煤層，然於本研究區其煤層厚度因地而異、延續性不佳。本層之砂頁互層和厚層砂岩的比例約為 7:3，下部之砂岩比例較高且向上漸減。砂岩之顆粒細緻，風化後為棕灰色至棕黃色，偶見淺灰色至灰白色（何信昌，1994）。本層於八卦力與南庄一帶地層厚度略增，於八卦力一帶約 650 公尺。

H. 上福基砂岩 (Shangfuchi Sandstone, Sf)

岩性以白色中粒至粗粒厚層塊狀砂岩為主，新鮮面呈純白色，風化後呈現黃褐色，膠結疏鬆。為台灣中北部中新世地層之良好指示層，與東坑層合稱為南莊層。本層頂部之白色砂岩層厚約 1 至 5 公尺，由粗粒石英砂組成並含灰白色礫石，粒徑約 1 公分以下，一般以此砂岩層為上福基砂岩之上界。本層所夾之煤層煤質尚佳，共計 4 層厚度約為 20 至 50 公分（何信昌，1994）。於八卦力附近厚度約為 115 公尺。

I. 桂竹林層 (Kueichulin Formation, Kc)

以砂岩及頁岩互層為主，因間夾一頁岩層，於本研究區可將其由下而上分為三個岩段，分別為下段之關刀山砂岩、中段之十六份頁岩及上段之魚藤

坪砂岩。關刀山砂岩岩性以青灰色至暗灰色細粒至中粒泥質砂岩為主，底部附近常有白色粗粒砂岩（何信昌，1994），外觀上與上福基砂岩相似，頂部則漸變為十六份頁岩。十六份頁岩由暗灰色或青灰色砂質頁岩組成，其發育狀況於各處情況不一（何信昌，1994）。而最頂部之魚藤坪砂岩則以青灰色或灰色泥質砂岩為主要岩性，風化後呈黃色或黃灰色，膠結較關刀山砂岩疏鬆。本層於出磺坑背斜兩翼約為 410 公尺，八卦力一帶增厚，約為 600 公尺。

J. 錦水頁岩 (Chinshui Shale, Cs)

以暗色的頁岩及砂質頁岩為主，頁岩呈深灰色，具有發育良好的球狀剝離構造，通常夾有暗灰色凸鏡狀砂岩層，以及粉砂岩和泥岩的薄層（何信昌，1994）。於出磺坑背斜西翼一帶，錦水頁岩於距其底部約 150 公尺處，出現一層約厚 20 公尺之粉砂岩或含砂質較高的頁岩層。錦水頁岩於野外容易辨識，因此常為地質調查中的指示層。本層厚度約為 300 公尺，紙湖一帶厚度約為 340 公尺，後龍溪剖面約為 317 公尺（台灣油礦探勘總處，1986）。

K. 卓蘭層 (Cholan Formation, Cl)

由砂岩、粉砂岩、泥岩和頁岩互層組成。其砂岩為細粒至粗粒混濁砂岩及類混濁砂岩為主，顏色呈青灰色至和灰色。由於砂岩和頁岩的抗侵蝕力不等，本層出露之區域地形常發育為同斜構造(homocline)，或稱豬背嶺地形，與上覆之頭嵙山層所形成的丘陵地形有所區別（何信昌，1994）。此外，由於岩性單調重複無顯著之指準層可將其細分，故本層層厚達 1000 至 2000 公尺。

L. 頭嵛山層 (Toukoshan Formation, Tk)

一般呈灰色至青灰色，通常以砂質泥岩或粉砂質泥岩出現，顆粒組成由粗粒至粉砂，甚至粘土，膠結甚為疏鬆。砂岩中偶夾礫石薄層，粒徑多為數公分以下，並呈圓形或次圓形。局部含貝類或海膽化石以及漂木炭物質。部分地區出現較厚的砂岩層夾於泥岩中，厚度可達 10 公尺以上（何信昌，1994）。紅土台地堆積層、階地堆積層及沖積層不整合於其上。本層僅下部出露，厚度約為 200 公尺。

表 4 研究區域之地層比對表。

時代				台灣中北部(何春蓀, 1986)			出磺坑		本研究		
				基隆 台北 桃園		新竹 苗栗	(油礦探勘處, 1986)				
0.46	第四紀	更新世	中期	頭嵙山層		通霄(楊梅)層		頭嵙山層		頭嵙山層	
			早期								
2.58		上新世	晚期	錦水頁岩		錦水頁岩		錦水頁岩		錦水頁岩	
			早期	二閣層	桂竹林層		桂竹林層	魚藤坪砂岩	桂竹林層		
三峽群	大埔層							關刀山砂岩			
			晚期	南莊層		上福基砂岩			上福基砂岩		上福基砂岩
中期	南港砂岩					南港層		東坑層		東坑層	
			瑞芳群	湊合層				北寮砂岩		北寮層	
早期	石底層					出磺坑層				石底層	
			野柳群	大寮層		碧靈頁岩		大寮層		碧靈頁岩	
凝灰岩		汶水層						木山層		木山層	
				23.03	古近紀	漸新世	晚期				
早期											
28.1	Ma	漸新世	早期								

資料來源：何春蓀（1986）、台灣油礦探勘總處（1986）

3-2 地質構造

本區主要斷層包含：1、斧頭坑斷層；2、神桌山斷層；3、大東河斷層；4、小南勢斷層；5、紅毛館斷層；6、鹿場斷層；7、碧靈斷層；8、大窩山斷層；9、羅山斷層。主要褶皺包括：A、通霄背斜；B、錦水背斜；C、出磺坑背斜；D、八卦力背斜；E、橫龍山背斜；F、銅鑼向斜；G、仁隆向斜；H、紙湖向斜；I、向天湖向斜；J、石門向斜(圖 15)。

3-2-1 主要斷層

1. 斧頭坑斷層：又稱東勢窩斷層，為一兼具走向滑移分量之高角度逆斷層，大致呈東西走向，過後龍溪後漸轉向南北向。由於斷層兩側皆出露頭嵙山層，未有明顯岩性變化，難以於地表找到直接證據。根據震測及鑽探資料，研判斷距約為 200 公尺（黃富文和周青，1985），且南側地盤相對上升之斷層。
2. 神桌山斷層：為一高角度逆衝斷層，東南側相對抬升，於本研究區走向約為 N30°E，大致平行出磺坑背斜，並截切八卦力背斜軸部。
3. 大東河斷層：東側相對抬升之高角度逆斷層，斷層面傾角約 75 度向東南傾，走向大致平行於神桌山斷層，東側出露出磺坑層與北寮砂岩，西側為北寮砂岩，西側岩層大多為倒轉地層。
4. 小南勢斷層：為帶有右移分量的逆衝斷層，斷層走向為北偏東 45 度至 75 度，斷層面位態為約 60 至 70 度向東南傾（李錦發，2000）。
5. 紅毛館斷層：於南庄東南約三公里處與大東河斷層相交，為高角度逆斷層，由地表露頭推測斷層面傾角約為 65 度向東南傾。走向與神桌山斷層大致平行，總長約 5.5 公里（李錦發，2000）。
6. 鹿場斷層：高角度逆斷層，呈北北東走向，斷層上盤出露出磺坑層，下盤出露出磺坑層及北寮砂岩，層位落差約 150 公尺。

7. 碧靈斷層：高角度逆斷層，斷層兩側岩層劇烈褶曲，斷距難以估計。
8. 大窩山斷層：為高角度逆斷層，自大窩山至鹿場坑一帶呈北走向，於鹿場坑以南則向東南凸出成弧形（塗明寬和陳文政，1991），斷層面向東南傾約 70 至 80 度，東側主要出露木山層，西側為出礮坑層與碧靈頁岩。
9. 羅山斷層：本斷層於台灣北部及東北部稱為屈尺斷層，被認為是縱貫全島的斷裂線，且為西部麓山帶地質區與雪山山脈地質區的分界線（何春蓀，1987）。本斷層為高角度向東傾斜之上衝斷層，由南到北，走向約略由北北東走向轉為東西走向。

3-2-2 主要褶皺

- A. 通霄背斜：約呈南北向，全長約 15 公里，褶皺兩翼平緩，皆出露頭嵙山層，傾角在 10 度以下，北翼為斧頭坑斷層截切，於背斜南延部分蘊藏油氣，為台灣重要儲油構造之一。
- B. 錦水背斜：台灣重要儲油構造之一，長約 19 公里，為一不對稱背斜構造，軸部地層平緩，東翼陡於西翼，且東翼傾角向東逐漸增大，由 20 餘度增加至 40 度左右（何信昌，1994），而西部傾角則大致在 20 度以下。軸部出露錦水頁岩。
- C. 出礮坑背斜：褶皺軸約呈南北走向，向北傾沒約在 18 至 20 度（李錦發，2000）。長約 25 公里，為一狹長而緊密的褶皺，兩翼陡峭，傾角約 50 至 80 度間，且東翼地層略陡於西翼。軸部出露最老地層為出礮坑層，兩翼依序出露北寮砂岩至頭嵙山層，由於組成之岩層抗風化程度不同，抗風化程度較強者常形成稜線，於地形上可判釋。為台灣最早開始開採之產油構造，在國內自然能源天然氣的市場體系中一直扮演著重要角色（黃旭燦和陳耀輝，2017）。
- D. 八卦力背斜：背斜長約 3.5 公里，東翼較寬，地層傾角約 45 至 60 度，西翼受到神桌山斷層截切因而較為狹窄，且有地層倒轉的現象。軸部被

桂竹林斷層截切而右移約 150 公尺，而本背斜軸部南、北兩端皆斷裂，形成斷層背斜（李錦發，2000）。

- E. 橫龍山背斜：軸部呈北北東走向，為對稱褶皺，兩翼傾角平均約在 22 度左右（塗明寬和陳文政，1991）。軸部出露出礮坑層與北寮砂岩，東側與石門向斜相鄰。
- F. 銅鑼向斜：為緊鄰出礮坑背斜西側之向斜構造，為一南北方向之不對稱向斜，西翼地層傾角略大於東翼，兩翼地層傾角平緩，多小於 10 度（何信昌，1994），近地表出露頭嵛山層以及更年輕的紅土礫石層。
- G. 仁隆向斜：位於錦水背斜與出礮坑背斜之間，為不對稱之向斜構造，褶皺二翼出露的地層均為卓蘭層。於仁隆向斜之西側岩層較為平緩約 20 至 30 度向西傾，靠近軸部之岩層傾角約為 30 至 40 度；東翼之岩層平均傾角約為 65 度（何信昌，1994）。
- H. 紙湖向斜：位於出礮坑背斜與八卦力背斜之間，褶皺軸走向為北北東，約沿著獅潭縱谷延伸，西北翼岩層傾角約為 50 至 70 度，東翼岩層更為陡峭，傾角多為 70 度以上且常見倒轉現象（何信昌，1994），為不對稱向斜構造，軸部出露卓蘭層，兩翼依序出露錦水頁岩、桂竹林層、上福基砂岩、東坑層、觀音山砂岩、打鹿頁岩與北寮砂岩。
- I. 向天湖向斜：本向斜軸部成北北東走向，軸部出露地層為北寮砂岩與打鹿頁岩，地層傾角約在 25 度上下，並造成一面積甚為廣闊之順向坡地形（何信昌，1994）。
- J. 石門向斜：位於橫龍山背斜東南側，西北翼即該背斜之東南翼，南端為鹿場斷層所截切，兩翼出露地層以北寮砂岩為主，軸部可見打鹿頁岩出露，向斜軸走向約北 30 度東，東南翼地層傾角約在 20 至 30 度之間（何信昌，1994）。

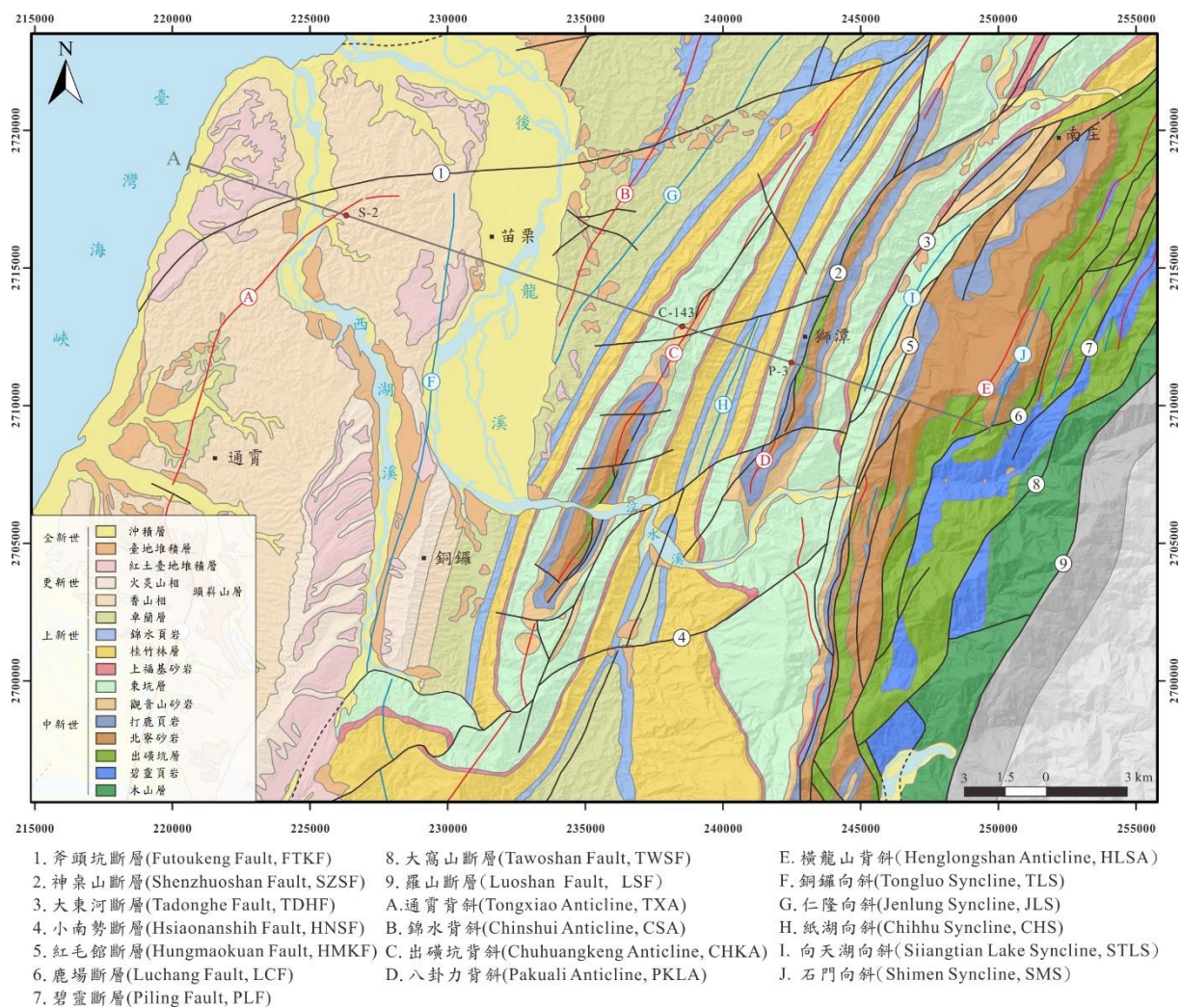


圖 15 研究區域主要地質構造分布圖。(改自中油公司十萬分之一地質圖苗栗圖幅，1994)

四、研究方法

4-1 野外地質調查

本研究之野外地質調查的主要目的為確認本研究區地層出露狀況以及其岩性、位態與裂隙分布等資訊，以輔助力學分層作業，並檢核文獻中前人描述之野外露頭是否仍存在，故野外調查針對露頭出露狀況最為良好處：流經苗栗縣公館鄉上福基南側的後龍溪至苗栗縣泰安鄉八卦力南側的汶水溪沿岸。

汶水溪發源於雪山山脈中的鹿場大山，於汶水與大湖溪匯合後改稱後龍溪，為苗栗縣重要的水利河川之一。由於後龍溪於苗栗公館鄉至大湖鄉橫貫出磺坑及八卦力構造，汶水溪之流向亦與該區主要斷層構造大致垂直，台灣油礦探勘總處 (1986)與 Hung and Yang (1991)曾於本區之後龍溪沿岸進行詳細的地質調查，針對各地層出露狀況及其岩性做出詳細的描述，上島附近汶水溪沿岸則由 Ku (1962)進行不和諧褶皺之研究。此野外調查位置如圖 16 中的方框所示。

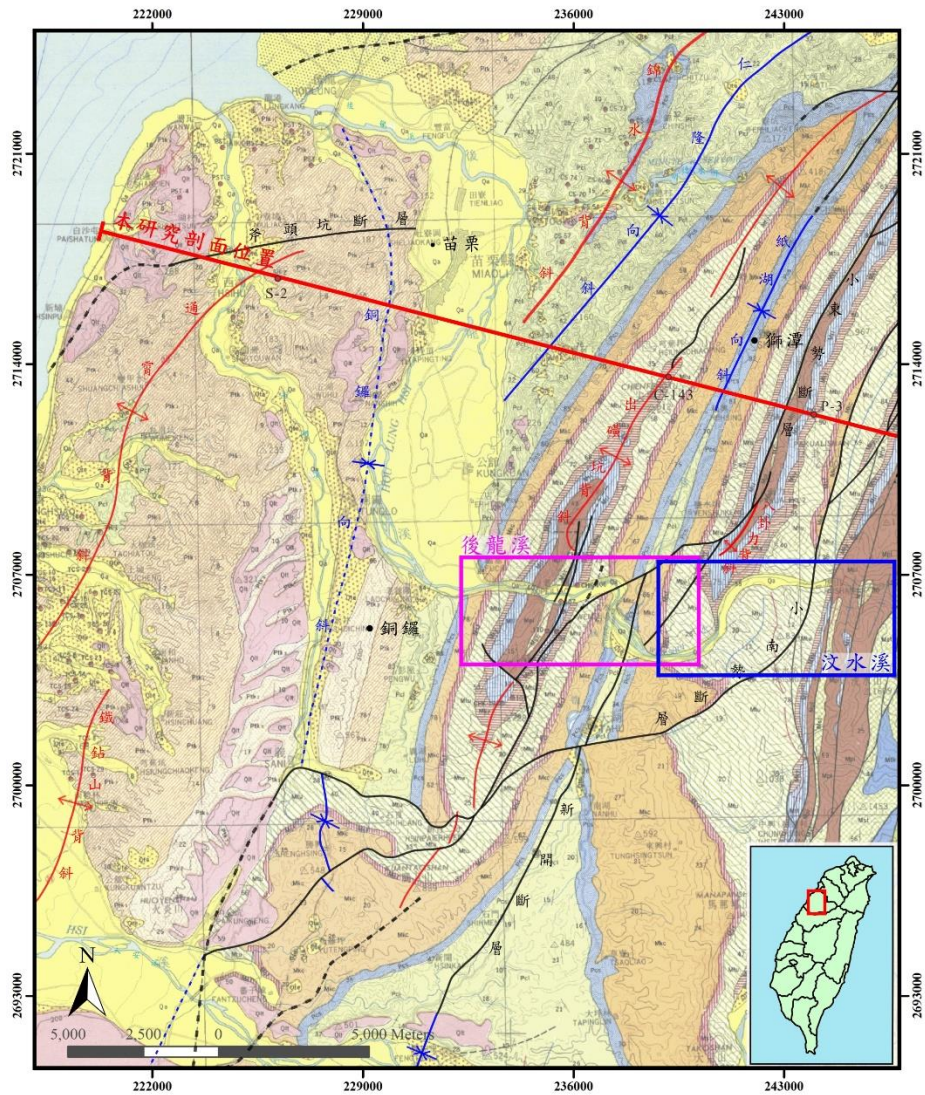


圖 16 研究區域之地質圖與野外調查位置。紅線為本研究剖面位置，粉紅色框內之後龍溪沿岸為後龍溪野外調查範圍，深藍色框內道路沿線為汶水溪野外調查範圍。(改自中油公司十萬分之一地質圖苗栗圖幅，1994)

4-2 地質構造剖面

4-2-1 剖面的建構

繪製地質剖面的流程大致可分為三個步驟，分別為：(1) 選定剖面位置；(2) 彙整地層資料；(3) 地質製圖。以下將依序為此三個步驟做說明。

(1) 選定剖面位置

剖面位置的選擇除了要通過標的構造外，另外一個重點在於剖面方向要平行構造活動方向。嚴珮綺 (2012)彙整的井孔崩落的資料顯示竹苗地區最大水平應力的優勢方位(西北—東南向)與區域的構造線(東北—西南向)大致呈現高角度或相互垂直。且於 K-145 井以四臂井徑電測判釋結果顯示出磺坑地區最大水平應力梯度為 17.31 MPa/km，最大水平應力方位為 $N80^{\circ}W \pm 20^{\circ}$ (圖 17)。考慮到大地應力方向以及通過最多資料的位置，本研究選定之方向為 $N78^{\circ}W—S78^{\circ}E$ ，大致與出磺坑背斜及八卦力構造之褶皺軸垂直 (圖 2)。

(2) 彙整地層資料

本研究利用國土測繪中心經建版地形圖讀取剖面沿線之高層資料後，自中油地質圖與野外調查資料來讀取剖面上地層邊界、斷層與褶皺軸位置，地層位態資訊則篩選自剖面沿線距離剖面一公里內、未經過斷層與褶皺軸者，將之換算成視傾角投影至剖面上。本研究亦參考剖面通過的三口鑽井(S-2、C-143、P-3)之鑽井資料控制的層厚度與井下地層位態進行繪製(圖 18)。鑽井位置見圖 16，各鑽井鑽遇各地層之深度及厚度如表 5、表 6、表 7 所示。

其中，S-2 探井鑽深 3680 公尺，鑽遇頭嵙山層至打鹿頁岩間的地層，並分別於鑽深 600 公尺及 2005 公尺處鑽遇東勢窩斷層(斧頭坑斷層)，於深度 0 至 1592 公尺的地層傾角低緩，多小於 15 度，於鄰近斷層處受斷層活動影響，出現較高傾角之地層，並根據 2005 公尺處鄰近地層傾角判斷，該

處通過之斷層傾角約為 71 度；C-143 探井鑽深 2814 公尺，鑽遇觀音山砂岩至碧靈頁岩間的地層，其間並無斷層通過，根據採集到之岩屑推測本井自出磺坑背斜東翼經過出磺坑層鑽至出磺坑背斜西翼，地層傾角大約介於 50 度至 72 度左右；P-3 探井鑽深 4102.6 公尺，鑽遇觀音山砂岩至木山層間的地層，並於 2023 公尺處鑽遇斷層，造成鑽井資料中碧靈頁岩與石底層(出磺坑層)重複出現，於鑽深 3164 公尺處取出的岩心傾角為 38 度，然而於鑽深 3500 公尺至 4102.6 公尺之間出現傾角 79 至 83 度的高角度地層，此一現象與 C-142 深部出現高於 80 度地層的狀況一致。

(3) 地質製圖

本研究的剖面繪製以急折褶皺法(kink method)為原則，岩層位態在短距離內有急遽變化之地區較適用此方法，而出磺坑背斜正符合此特徵，由此方法繪製之褶皺兩翼筆直且樞紐軸(hinge)角度明顯、銳利，可假設此種褶皺兩翼傾角由岩層傾角主控，並僅於樞紐軸部繪出轉折點，而樞紐軸的位置可由兩翼岩層厚度之異同而有不同的繪製方式 (Marshak & Mitra, 1988)。

在岩層厚度相等的情況下，將相鄰地層傾角交點之角平分線畫為樞紐軸，以圖 19 為例。根據圖 19a 中的地形、岩層位態以及地表岩性，我們可將 Sh 岩層的邊界分別沿著傾角 B 和傾角 C 的作延伸，並於通過兩傾角延長線之交點處繪製角平分線 Hinge1，如圖 19b，將 Hinge1 作為岩層傾角改變的分界線繪出 Sh 岩層，接著再利用傾角 A 與傾角 B 得到分角線 Hinge2 繪出其餘岩層，當 Hinge1 與 Hinge2 相交則依其相鄰之傾角繪製新的分角線即可延伸繪出沉積於 Ls 岩層以下的其他岩層(圖 19 c)。而在岩層厚度不等的情況下，則依照三角函數合角公式計算樞紐軸與不同地層分別夾的角度來繪製，已知褶皺兩翼地層厚度分別為 T 與 T' ，且兩者夾角角度為 $a+a'$ 度(圖 19)，則兩翼地層厚度與兩翼分別與 Hinge 之夾角(a 與 a')間的關係如(1)式所示。

$$\frac{T}{\sin a} = \frac{T'}{\sin a'} \quad (1)$$

依據上述方法繪製之構造剖面中，有些地區可能因為有較完整的資料而具有較高的可信度，然而對於其他資料量匱乏的區域則較有較高的不確定性，為此需建立平衡剖面做為檢核。

表 5 探井 S-2 地層厚度表。

地層		深度(公尺)	鑽厚(公尺)	真厚(公尺)	地層傾角	備註
頭嵙山層		0-222	222	221.7	3°	真厚與地層傾角係由本井地質構造剖面圖推測
卓蘭層		222-1404	1182	1170	8°	
東勢窩斷層		600				
錦水頁岩		1404-1592	188	181.6	15°	
桂竹林層	魚藤坪砂岩段	1592-1845	253	219	30°	
	十六份頁岩段	1845-1990	145	45	71°	
	關刀山砂岩段	1990-2005	15	5	71°	
	東勢窩斷層	2005				
	十六份頁岩段	2005-2050	45	43.5	15°	
	關刀山砂岩段	2050-2230	180	174	15°	
上福基砂岩		2230-2388	158	154.5	12°	
河排層	東坑層	2388-3135	747	739.7	8°	地層傾角由 C.D.M 得之 3021.2 公尺 3146 公尺 3521.2 公尺 其傾角均為 8°
	觀音山砂岩段	3135-3320	185	183.2	8°	
打鹿頁岩		3320-3680	360 ⁺ (未鑽穿)	356.5	8°	
打鹿砂層		3452-3659	207	205	8°	

資料來源：台灣中油公司。

表 6 探井 C-143 地層厚度表。

鑽遇地層	鑽遇深度	海面下垂深
觀音山砂岩	0	+339.96
打鹿頁岩	276	+64
打鹿砂層	626	-285
北寮砂層	740	-399
出磺坑層	1364	-1023
出磺坑第一層	1892	-1550
出磺坑第二層	2205	-1863
出磺坑第二A層	2410	-2067
出磺坑第三層	2682	-2340
碧靈頁岩	2814	-2472

資料來源：台灣中油公司。

表 7 探井 P-3 地層厚度表。

地層		深度(公尺)	鑽厚(公尺)	真厚(公尺)
斷層上盤	觀音山砂岩	22-199	177	114+
	打鹿頁岩	199-426	227	146
	北寮層	426-1240	814	545
	石底層	1240-1965	725	513
	碧靈頁岩	1965-2023(Fault)	58	42+
斷層下盤	石底層	2023-2813(Fault)	160	100+
	碧靈頁岩	2183-2813	630	350
	木山層	2813-4102.6	1289.6	300+

資料來源：台灣中油公司。

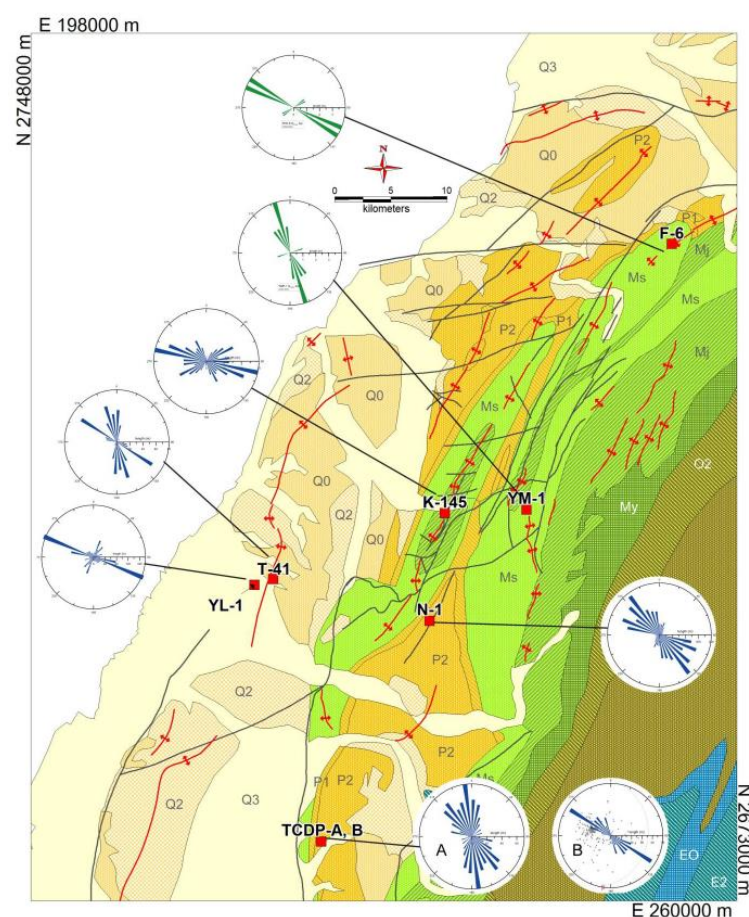


圖 17 四臂井徑電測判釋竹苗地區最大水平應力方位結果。以四臂井徑電測判釋結果顯示，位於出磺坑背斜軸部的鑽井 K-145 之最大水平應力方位為 $N80^{\circ}W \pm 20^{\circ}$ 。(摘自嚴珮綺，2012)

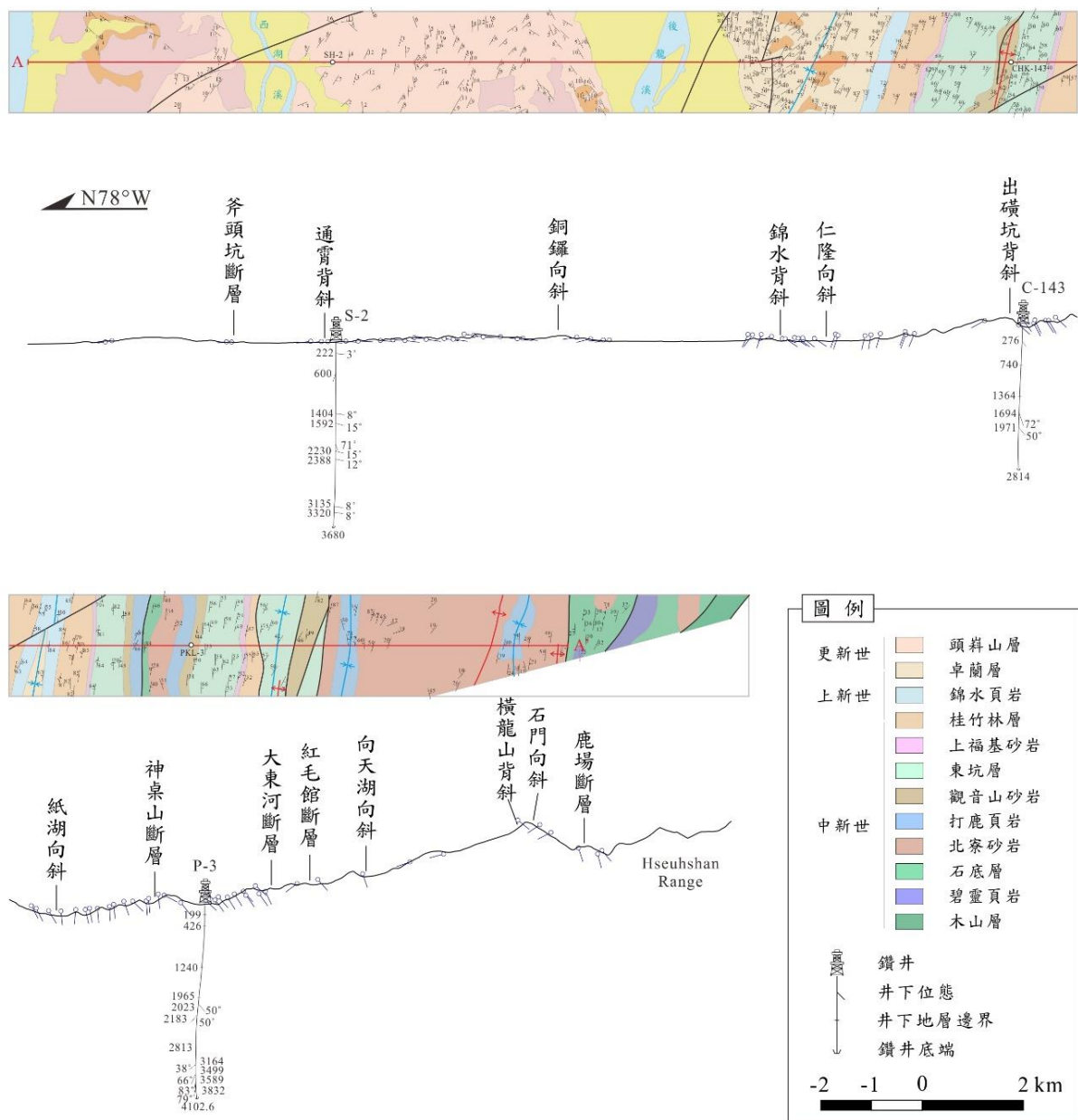


圖 18 本研究使用之剖面沿線資料彙整。本研究彙整國土測繪中心經建版地形圖、中油地質圖、野外調查資料以及剖面通過的三口鑽井(S-2、C-143、P-3)資料作為繪製地質構造剖面之基礎。

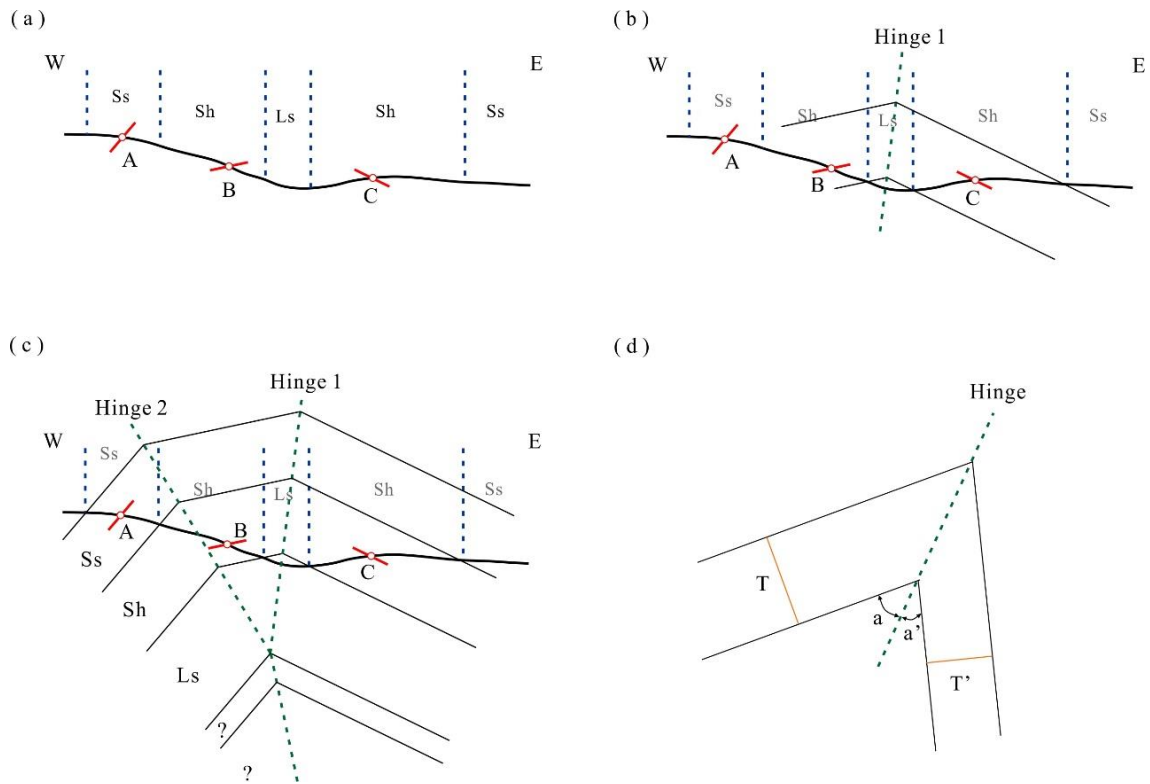


圖 19 急折法繪製地質剖面步驟示意圖。已知地形、岩層位態以及地表岩性；
 (b) 將 Sh 岩層的邊界分別沿著傾角 B 和傾角 C 作延伸，並於通過兩傾角延長線之交點處繪製角平分線 Hinge1；
 (c) 利用傾角 A 與傾角 B 得到分角線 Hinge2 繪出其餘岩層；
 (d) 褶皺兩翼地層厚度相異時，兩翼地層厚度分別為 T 與 T'，且兩者夾角角度為 $a+a'$ 度。(改自 Marshak & Mitra, 1988)

4-2-2 剖面的回復

平衡剖面係指剖面上的構造變形、變位可通過幾何準則復原至原始岩層水平狀態的剖面。此法遵循在封閉體系中體積守恆、面積守恆和線長守恆三項基本原則，旨在檢驗已滿足多項限制但仍具不確定性之剖面在幾何上之合理性以及可回復性。回推平衡剖面的過程可推估構造活動之先後順序、各構造活動造成之地層縮短量，並藉此推測本研究區之構造演育。繪製平衡剖面時須先決定該區域的固定端(pin line, 前陸側)與疏鬆端(loose line, 腹地側)(圖 20 a)，接著建構一系列水平、互相平行之地層做為模板，測量每個單位的長度並將之轉移至恢復的部分，並以虛線連接截斷點代表未來斷層發育之位置(圖 20 b，虛線位置)，由於每個位於上盤的斷坡(hanging wall ramp, HWR)或斷坪在下盤都需要有一個與之相對應的斷坪或斷坡(footwall ramp or flat, FWR)，因此上盤斷坡應該與下盤斷坡的長度相同，且上盤斷坪應該與下盤斷坪的長度相同，依此調整的層長度即完成剖面之平衡。若將地層回復後各地層長度相等則代表該剖面達到平衡；相對的，若地層回復後地層長度有很大的差異則代表該剖面尚未平衡(圖 20 c)。

平衡剖面的原則中假設剖面中的岩層於變形前後總體積不變，若再假設變形過程中所有的應變量皆由平行於剖面方向的力造成，則可將三維問題簡化為二維問題，即岩層於變形前後總面積不變，此時可利用等面積法(equal-area method)將剖面回復。由於上部地殼中岩層普遍遵循脆性變形機制，岩層內部的變形甚小，產生褶皺時多以曲滑變形(flexural-slip)機制為主，故變形前後各岩層厚度不變 (Suppe, 1983)，排除層厚變化的問題後則可將面積問題進一步簡化至長度問題—各岩層於變形前後長度不變，稱為等長度法(equal-line length method)。

本研究所使用的軟體—Move 即根據上述原則進行剖面回復，此軟體可幫助評估地質剖面是否符合等面積法與等長度法之原則，並推估各構造活

動造成之地層縮短量，惟構造回復之順序並不對應到實際構造活動之先後順序。於本研究使用的構造回復功能有等長度回復(line-length unfolding algorithm)、曲滑褶皺回復(flexural unfolding algorithm)以及斷層平行回復(fault parallel flow)三種。等長度回復法適用於變形機制為層間滑動的平行褶皺(parallel fold)，其概念如圖 21 所示，根據是否有指定固定線(pin)會有不同的結果，在沒有固定線的情況下(圖 21 a)程式將預設一垂直固定線將地層回復到水平狀態，若使用者有指定固定線位置(圖 21 b)則地層將以固定線為準將地層回復至垂直固定線的方向上。

曲滑褶皺回復法為一種等面積回復的方法，在進行回復前需選定指定層(template line)、固定線、目標位置(target)以及被動物件(passive objects)(圖 22 a)，程式會於指定層中的每個分角線間建立平行於指定層的滑移系統(slip system)(圖 22 b)，根據固定線將指定層回復到指定位置，被動物件則依照其層厚利用與指定層相同的計算過程移動到程式計算出的位置上(圖 22 c)，回復完成後各地層之層厚與長度不變，適用於受逆衝作用複雜的變形行為。最後，斷層平行回復為針對斷層活動的回復方法(圖 23)，利用連接斷層上下盤或給予指定滑移距離的方式將使用者指定的斷層與斷層上盤地層以回復平行於斷層的剪切作用以及斷層上盤地層的層間滑動，回復後同樣會滿足等長度法與等面積法。

在地質解釋上，平衡剖面具有較高的合理性，有機會符合真實情形，但該結果並不會是唯一解，其原因為雖然平衡剖面的過程符合幾何學的概念，但實際上構造活動以及岩層的變形行為極為複雜，欲探究其成因與形貌僅能透過一定程度的簡化與大量的假設來進行，這樣的過程導致根據繪圖者的不同對相同現象將產生多種不同的解釋方式。

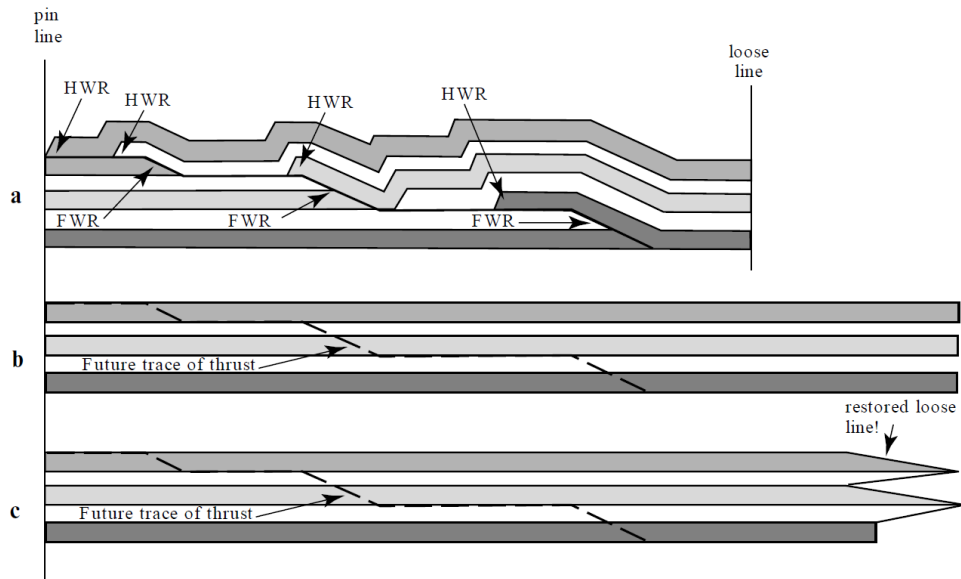


圖 20 構造剖面平衡示意圖。(a) 所繪製變形狀態的構造剖面；(b) 地層的原始狀態，虛線連接截斷點代表未來斷層發育之位置；(c) 圖 a 變形地層回復後的狀態。說明:圖 c 與圖 b 不符，代表圖 a 剖面未平衡。(摘自 Rowland et al., 1986)

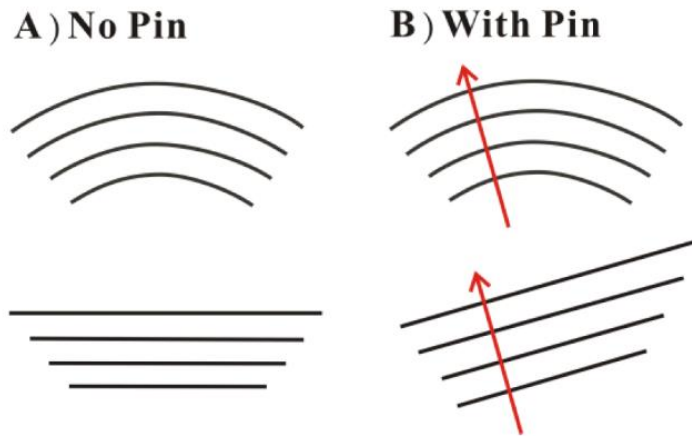


圖 21 等長度回復示意圖。等長度回復法中，若沒有指定固定線程式將預設一垂直固定線將地層回復到水平狀態；若有指定固定線位置則地層將以固定線為準將地層回復至垂直固定線的方向上。(摘自陳采蔚 (2016)，改自 Move 說明書)

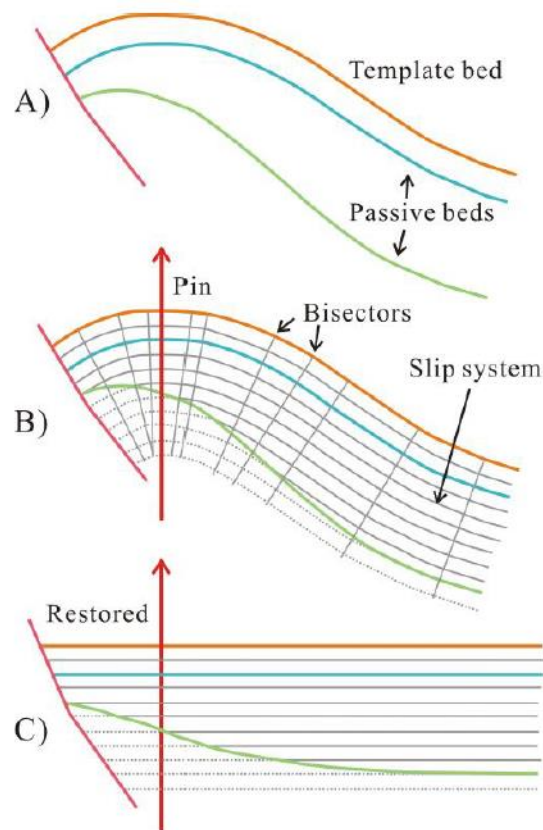


圖 22 曲滑褶皺回復法示意圖。(摘自陳采蔚(2016)，改自 Move 說明書)

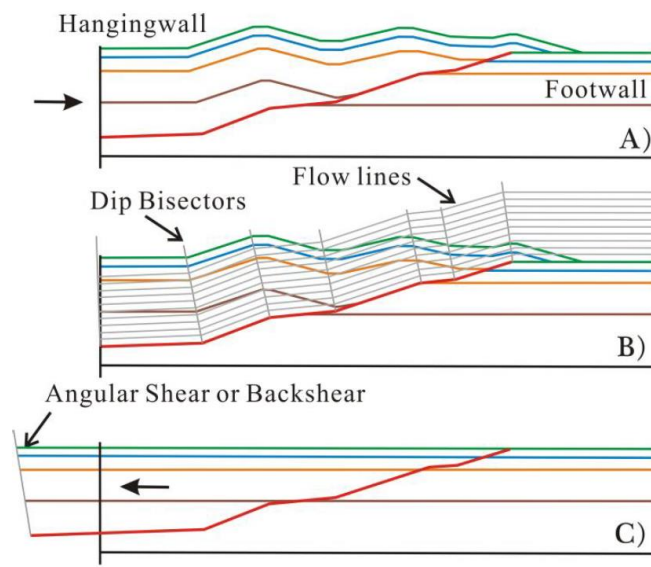


圖 23 斷層平行回復法示意圖。(摘自陳采蔚(2016)，改自 Move 說明書)

4-3 離散元素法

離散元素法 (Distinct Element Method、DEM) 為 Cundall and Strack (1979)提出的一種用於模擬非連續體的力學行為的演算法。其模擬對象為顆粒材料，主要用於模擬顆粒系統中顆粒材料的交互作用及運動行為。相對於連續體的數值分析方法(如：有限元素法，Finite Element Method)，離散元素法的顆粒各自獨立，未使用網格進行運算，因此在分析不連續性問題時本模擬方法可計算任意位置任意數量顆粒的位移、速度、旋轉和作用力等資訊，且在無變形量的限制。於本研究中除了可以模擬岩層的褶曲之外，亦可用來分析不連續面的發育，如斷層破裂等問題。然而不同於邊界元素法(Boundary Element Method)，離散元素法模型中不連續面不須事先設定，斷層及破裂將自行生成與擴展。因此在構造演化與裂隙分布評估上，優於其它的數值分析方法，除可分析裂隙的分布外，亦可進一步對標的地層或特定構造部份的孔隙率進行估算。

4-3-1 二維顆粒流程式

二維顆粒流程式(Particle Flow Code in 2 Dimensions, PFC^{2D})是由美國 Itasca Consulting Group Inc.以離散元素法為基礎發展出的數值分析軟體，其模擬對象為包含圓形顆粒(球)與邊界(牆)之顆粒系統，並且設有 6 條基本假設 (Itasca, 2002)：

- (1) 將顆粒視為剛體。
- (2) 顆粒間或顆粒與邊界的接觸發生在極小的面積上，可視為一個點予以簡化。
- (3) 接觸行為採用顆粒力學中的「軟球模型(soft-contact approach)」，接觸發生時允許顆粒於接觸點發生重疊。

- (4) 在接觸發生時根據力—位移法則(force-displacement law)計算接觸力的大小。
- (5) 顆粒間可以鍵結連接。
- (6) 所有顆粒皆為圓形，欲模擬非圓形顆粒可使用 clump 指令將複數顆粒組合成任意形狀進行模擬。

軟球模型又稱為阻尼接觸力模型，在球形顆粒接觸理論中，由於求解過程過於繁鎖，在不產生顯著誤差的條件下，有必要予以簡化，而軟球模型則為其中一種簡化模型。軟球模型把顆粒間的法向力簡化為彈簧和阻尼，切向力簡化為彈簧、阻尼與滑動器，引入彈性係數(K_n, K_s)與阻尼係數(η_n, η_s)等參數（孫其誠和王光謙，2009）（圖 24）。

根據離散元素法的理論，PFC^{2D} 中的顆粒運動需遵循牛頓第二運動定律，並採用顯性時間積分法(explicit finite difference method)進行計算，在演算上將整個模擬過程切割為許多時階(time step)。程式於每個時階開始時皆會先偵測顆粒系統內所有顆粒及邊界位置、計算顆粒間或顆粒與邊界的重疊量，並根據力—位移法則計算每個接觸發生位置產生之接觸力大小，再由系統內所有顆粒各自承受的合力以牛頓第二運動定律計算其速度與位置，更新顆粒與邊界位置後進入下一個時階，反覆迭代計算直到用戶設定條件完成(圖 25)。

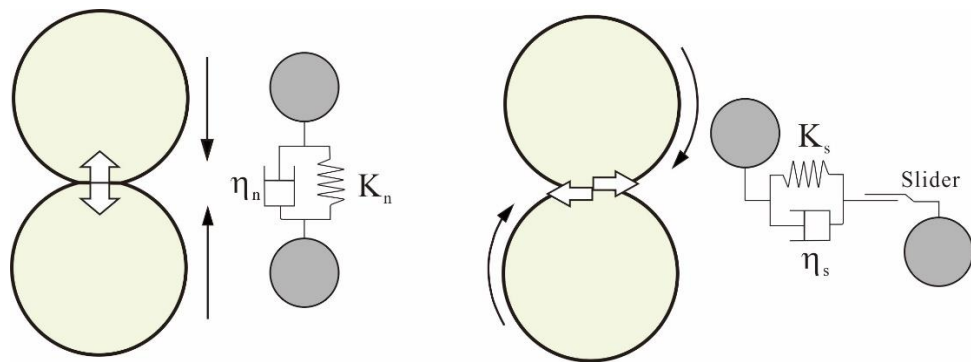


圖 24 軟球模型中簡化正向與切向接觸之模型。軟球模型把顆粒間的法向力簡化為彈簧和阻尼，切向力簡化為彈簧、阻尼與滑動器，引入參數彈性係數與阻尼係數。

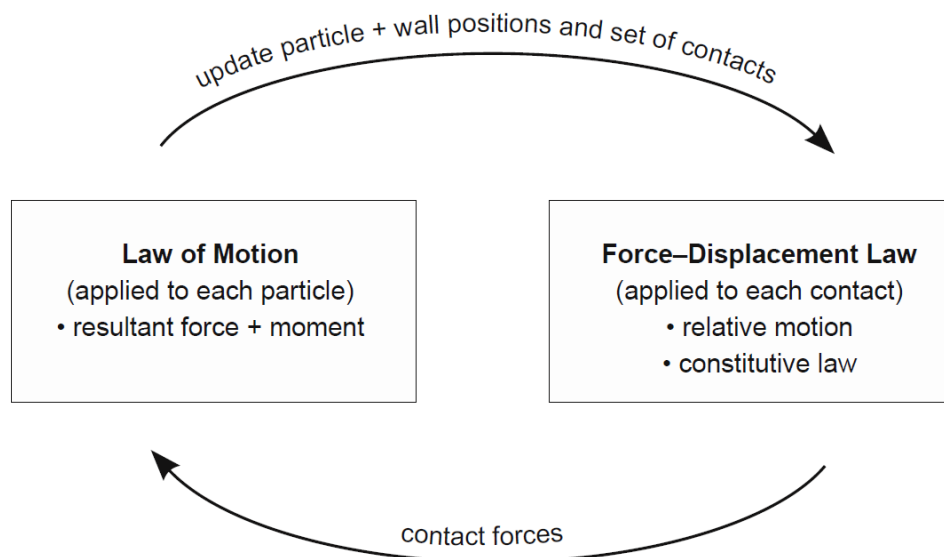


圖 25 力—位移法則於每一時間步下的計算循環。程式於每個時階開始時根據力—位移法則計算每個接觸發生位置產生之接觸力大小，再由系統內所有顆粒各自承受的合力以牛頓第二運動定律計算其速度與位置，更新顆粒與邊界位置後進入下一個時階。(摘自 Itasca, 2002)

4-3-2 顆粒接觸模式

在 PFC^{2D} 中，「接觸」會發生在顆粒與顆粒或顆粒與邊界這兩種情況，接觸模式即為描述在接觸發生處材料的物理表現的模式。在顆粒與顆粒接觸的情況下，假設兩顆粒分別為顆粒 A 與顆粒 B，於接觸面上兩顆粒球心連線方向上產生重疊量 U_n ，兩顆粒分別承受之反作用力方向如藍色箭頭所示(圖 26 a)；在顆粒與牆接觸的情況下，假設顆粒 B 與牆 W 接觸，牆的法線方向產生重疊量 U_n ，且反作用力方向亦平行於此方向(圖 26 b)。儘管顆粒體表現出複雜的非線性行為，我們仍然可以利用相對簡單的接觸模型來呈現 (Itasca, 2002)，故程式內建了三種接觸模式，分別為：接觸勁度模式 (contact-stiffness models)、滑移模式 (slip model) 與鍵結模式 (bonding models)。其中，接觸勁度模式與滑移模式主要模擬顆粒與顆粒或顆粒與邊界接觸時的碰撞、磨擦與滑動行為，而鍵結模式則針對顆粒與顆粒接觸且顆粒之間有鍵結存在的情況，適用於模擬具有膠結或具凝聚力的材料。以下將針對這三種接觸模式分別做說明，各接觸模式於程式中所需設定的參數如圖 27 所示。

1. 接觸勁度模式

接觸勁度模式透過設定材料之正向接觸勁度(normal stiffness, k_n)及切向接觸勁度(shear stiffness, k_s)來連接材料發生接觸時產生的正向與切向接觸力分量和相對位移的關係，在 PFC^{2D} 中，正向勁度為總正向力 F_n 和總正向重疊量 U_n 的變形參數(2)式；切向勁度為切向力之增量 ΔF_s 和切向位移增量 ΔU_s 的變形參數(3)式。

$$F_n = k_n U_n \quad (2)$$

$$\Delta F_s = k_s \Delta U_s \quad (3)$$

PFC^{2D} 提供兩種勁度模式：線性接觸模型(linear contact model)和赫茲接觸模型(Hertz–Mindlin contact model)。在線性接觸模型中，接觸力的計算方

式符合虎克定律(Hooke's law)，接觸勁度(k_n, k_s)在物理上的意義可對應到彈簧的彈性係數，接觸發生後產生的重疊量相當於彈簧的變形量，於這個模型中接觸勁度為定值且接觸力與重疊量呈線性關係。赫茲接觸模型中，接觸力的計算方式依據接觸力學中的赫茲理論(Hertz contact theory)，該理論認為當兩個物體接觸時於接觸位置會發生產生局部的應力和應變分布變化，因此該接觸問題變得非常複雜，且接觸應力和應變關係通常是非線性的，接觸勁度於此模式中僅為接觸力與重疊量的變形參數，而非彈性係數。

2. 滑移模式

滑移模式為限制兩接觸物體相對滑動能力的模式，於接觸發生時會在切向產生與切向力(F_s)反向的抵抗力，若物體承受的切向力大於顆粒間所容許的最大切向接觸力時會產生相對滑動(4)式，顆粒間所容許的最大切向接觸力相當於物理學中的最大靜摩擦力，而其數值由正向力(F_n)和摩擦係數(μ_f)決定。

$$F_s \geq \mu_f F_n \quad (4)$$

3. 鍵結模式

對於顆粒與顆粒接觸且顆粒之間有鍵結存在的情況，程式透過鍵結模式給予顆粒接觸點一黏著力將顆粒接合起來，根據接合形式的不同 PFC^{2D} 提供了兩種模式，分別為接觸鍵結(contact-bond model)與平行鍵結(parallel-bond model)。

接觸鍵結於顆粒的接觸點提供黏著力，又稱為接觸點鍵結(圖 28 a)。接觸點之膠結面積趨近於零(點接觸)，程式中需設定該鍵結正向與切向鍵結力，於鍵結存在的情況下顆粒不會產生相對滑動，且無法產生力偶來抵抗彎矩作用，當顆粒受到的外力大於顆粒間所設定的鍵結力時鍵結會被破壞，兩顆粒會回到各自獨立的狀況，不再受鍵結影響。

平行鍵結提供額外的膠結材料於兩接觸顆粒之間，顆粒以膠結(cement)的方式連接(圖 28 b)，因膠結材料的勁度方向與顆粒的接觸勁度方向平行而得名。可將平行鍵結的膠結想像為均勻彈性彈簧體設置在顆粒接觸的矩形斷面上，於程式中需設定平行鍵結之正向強度(σ_n)、切向強度(σ_s)和鍵結材料的正向勁度(k_{np})、切向勁度(k_{sp})以及影響膠結半徑($\bar{R}$)的鍵結半徑放大係數(λ)其中半徑放大係數與顆粒半徑(γ_A, γ_B)之間的關係如(5)式所示。相較於接觸鍵結，平行鍵結不但限制了顆粒的正向力與切向力還限制了顆粒的彎矩能力。

$$\bar{R} = \lambda \cdot \min(\gamma_A, \gamma_B) \quad (5)$$

於 PFC^{2D} 的設定中，鍵結僅有受張力與剪力超過使用者設定之門檻值的情況下才會發生破壞。顆粒重疊量小於零時，正向力大於指定接觸鍵結所能承受之張力時發生張力破壞(圖 29 a)。於滑移模式與鍵結模式同時存在的情況下，剪力大於指定接觸鍵結所能承受之剪力時發生剪力破壞(圖 29 b)。

(a) 球與球的接觸

(b) 球與牆的接觸

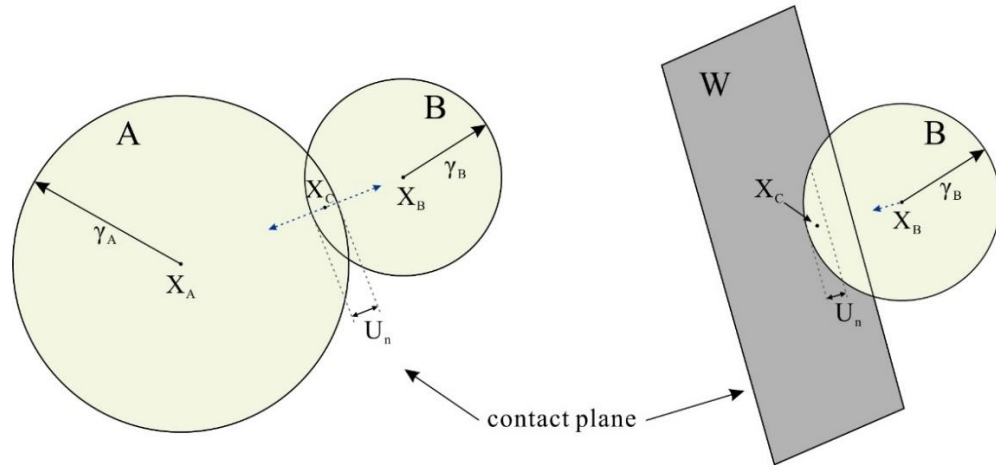


圖 26 顆粒與顆粒及顆粒與邊界接觸示意圖。(a) 顆粒 A 與顆粒 B 接觸，並於接觸面上接觸產生重疊量 U_n 之情況下，顆粒 A 之球心位置為 X_A ，半徑為 γ_A ；顆粒 B 之球心位置為 X_B ，半徑為 γ_B ，兩顆粒接觸點為 X_C 。藍色箭頭指示顆粒所受反作用力方向，此方向平行於兩顆粒球心連線；(b) 顆粒 B 與牆 W 接觸，並於接觸面上接觸產生重疊量 U_n 之情況下，反作用力方向平行於牆的法線方向。(改自 Itasca, 2002)

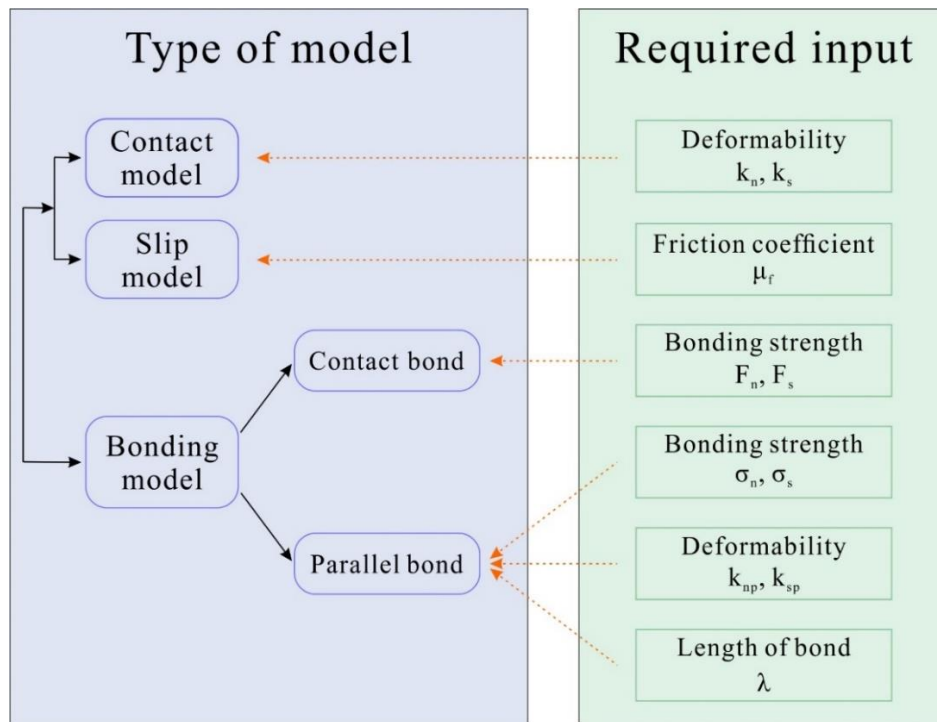
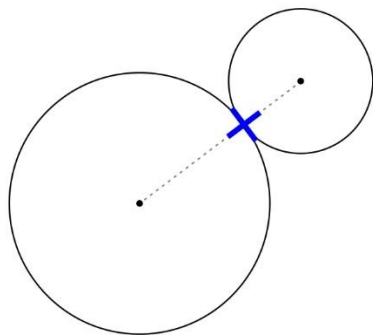


圖 27 各接觸模式與其需設定之模擬參數。PFC^{2D} 中，接觸勁度模式需指定顆粒之正向與切向勁度(k_n, k_s)；滑移模式需指定材料之摩擦係數(μ_f)；鍵結模式分為接觸鍵結與平行鍵結兩種，接觸鍵結需指定鍵結之正向與切向強度(σ_n, σ_s)，平行鍵結需指定鍵結材料之正向強度(σ_n)、切向強度(σ_s)和鍵結材料的正向勁度(k_{np})、切向勁度(k_{sp})。(改自 Itasca, 2002)

(a) contact bond



(b) parallel bond

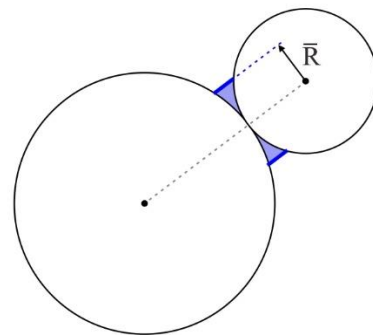
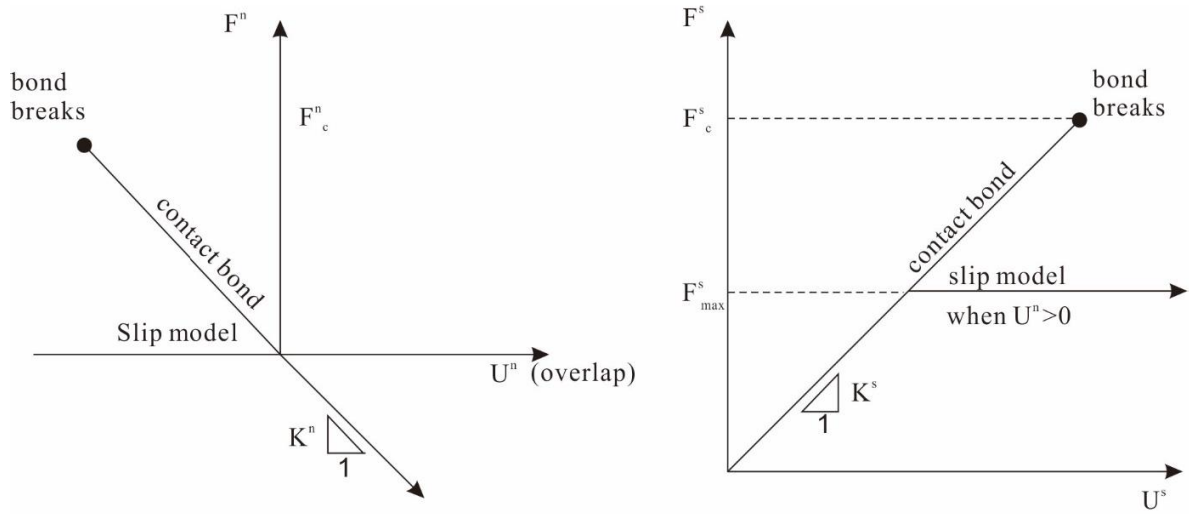


圖 28 接觸鍵結與平行鍵結示意圖。接觸鍵結於顆粒的接觸點提供黏著力，接觸點之膠結面積趨近於零(點接觸)；(b) 平行鍵結提供額外的膠結材料於兩接觸顆粒之間，顆粒以膠結的方式連接。(改自 Itasca, 2002)



(a) normal component of contact force

(b) shear component of contact force

圖 29 接觸鍵結所能承受之張力與剪力門檻值。於滑移模式與鍵結模式同時存在的情況下：(a) 顆粒重疊量小於零時，正向力大於指定接觸鍵結所能承受之張力時發生張力破壞；(b) 克服最大靜磨擦力後，剪力大於指定接觸鍵結所能承受之剪力時發生剪力破壞。(摘自 Itasca, 2002)

4-3-3 參數選定

由於 PFC 的運算過程依循牛頓第二運動定律以及力—位移法，且二維環境的運算過程中並未考慮垂直平面的應力或應變，使得 PFC^{2D} 所建構的模型難以與真實材料的力學行為作連結 (Itasca, 2002)。再加上模擬材料為顆粒材料，不同於一般物理試驗中所求得之材料的楊氏係數與柏松比等力學參數，PFC^{2D} 中的模擬材料參數要為微觀參數，目前尚無完整的理論可以表示微觀參數與巨觀參數之間的關係，因此微觀參數主要以試誤法(trial-and-error)獲得。

然而模擬參數的調整方向並非無跡可尋，透過建立直剪試驗、雙軸試驗以及砂箱試驗等物理試驗的數值模型可以找到微觀參數與力學參數的關係，例如：顆粒本身的正向勁度與楊氏係數呈正相關、正向勁度與切向勁度的比值與柏松比呈正相關等。但即使數值模型可以參考物理試驗的標準流程進行模擬，由於尺度以及模型假設的問題，並非所有模型都適用同一種試驗方法，且根據撰寫程式的人的不同，數值模型得到的微觀參數與物理試驗間的關係也不一定可以套用到其他人的數值模型中，但可以做為試誤法調整參數的參考依據。

五、研究成果

5-1 野外地質調查

5-1-1 後龍溪

本次野外沿後龍溪南北岸之河床與道路進行調查，露頭位置如圖 30 與圖 31 所示，其中自 HL-7 至 HL-12 為河床南北岸，自 HL-3 至 HL-6 為後龍溪南岸道路。

後龍溪南岸出礮坑吊橋正下方(圖 31，HL-1.2)出露青灰色細粒至中粒厚砂層，風化後呈淺棕色至橘黃色，質地堅硬，層理明顯且裂隙方向與層理一致，岩層位態為 $N32^{\circ}E/61^{\circ}N$ (圖 32)，比照地質圖及李錦發 (2000)對本區岩性的描述，本研究判定此處露頭為北寮砂岩的部分岩段。於出礮坑橋下方(圖 31，HL-8)同樣於南岸出露青灰色至灰白色厚層砂岩，岩層傾角約為 $65\sim75^{\circ}N$ (圖 33)，於地質圖上此處應為北寮砂岩與出礮坑層之交界，由於野外未能辨識代表兩者交界之灰色頁岩層，因此判定此處岩層仍屬北寮砂岩，而出礮坑層之露頭很有可能已被防波堤覆蓋。

於轉溝水至汶水間(圖 31，HL-2 處至 HL-12 處)後龍溪之流向有急遽變化，本區出露岩層為桂竹林層的部分岩段，河流流向急遽變化的原因，可能為流經該地層岩性較軟弱之十六份頁岩段。出露的暗灰色厚砂(圖 34)，難以辨識層面，層間有發現生痕化石與貝殼(圖 35)，裂隙多並有數組共軛節理，節理面之方向分別為 $N82^{\circ}E/37^{\circ}S$ 與 $N80^{\circ}W/45^{\circ}N$ ，此岩層出露可追跡至 HL-12 之高角度立面(圖 36)，且此立面之傾向與地層傾向一致，約為 $80^{\circ}E$ ，比對地質圖與野外露頭狀況判斷此岩層，應屬關刀山砂岩段。

清安道路旁 HL-4 處出露厚砂岩層，其裂隙方向與層面一致，風化較嚴重處呈橘黃色，未風化呈灰白色，位態為 $N12^{\circ}W/38^{\circ}W$ (圖 37)，越往東走灰黑色頁岩比例漸增，可見交錯層、結核與生痕化石，至 HL-6 處砂頁岩比例約為 1：1，位態為 $N49^{\circ}W/22^{\circ}S$ (圖 38)。

自福基村以南約 600 公尺處之工地下河床(圖 31,HL-7)可見北岸由長達 400 公尺以上之防波堤覆蓋(圖 39)，無完好地層出露，自 HL-1 向上游走至 HL-8，期間斷斷續續有岩層出露，但過了 HL-8 再往東至 HL-2 前，皆為礫石堆與防波堤，無露頭出露(圖 40)。野外成果顯示後龍溪沿岸北寮砂岩、桂竹林層、東坑層這些以厚砂岩層或砂頁互層為主之地層於野外出露狀況良好且較為連續，而較軟弱之地層如錦水頁岩與卓蘭層皆已被植被或防波堤等人工建物覆蓋。

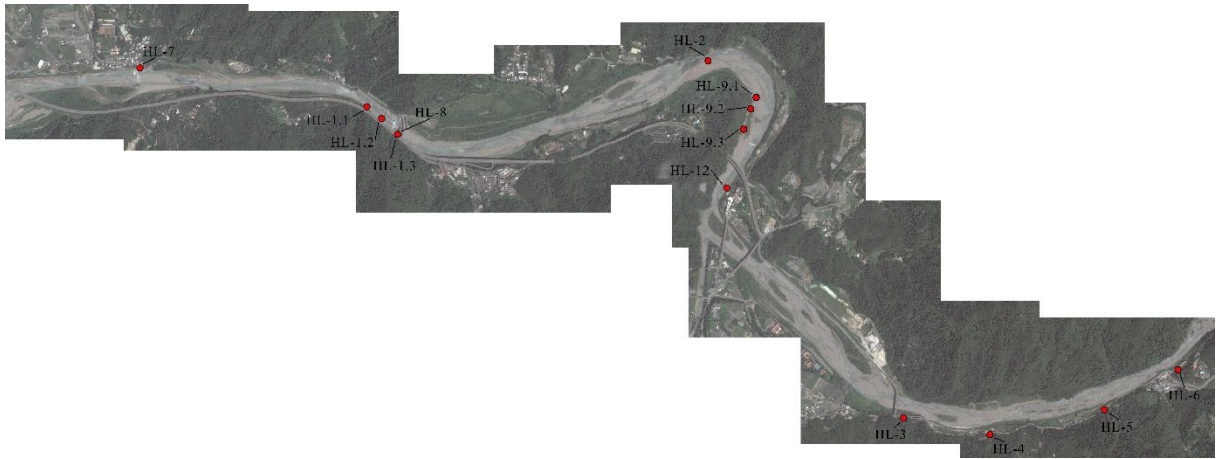


圖 30 後龍溪沿岸野外露頭位置。後龍溪沿岸野外露頭中，自 HL-7 至 HL-12 為河床南北岸，自 HL-3 至 HL-6 為後龍溪南岸道路。於轉溝水至汶水間後龍溪之流向有急遽變化。

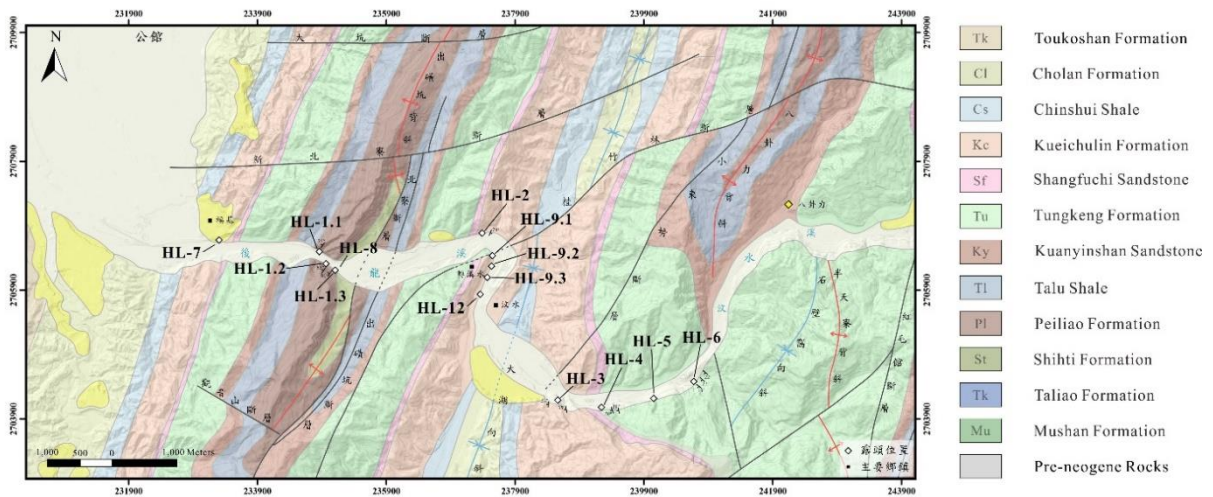


圖 31 後龍溪沿岸地質圖。(改自中油十萬分之一地質圖苗栗圖幅，1994)



圖 32 出磺坑吊橋下方出露厚層塊狀砂岩。根據出露位置及岩性，於露頭 HL-1.2 出露(位置參照圖 31)之厚層塊狀砂岩應屬北寮砂岩之部分岩段。



圖 33 出磺坑橋下方出露青灰色至灰白色厚層砂岩。根據出露位置及岩性，於露頭 HL-8 出露(位置參照圖 31)之厚層塊狀砂岩應為北寮砂岩。



圖 34 露頭 HL-9.2 處出露具共軛節理的暗灰色厚砂。露頭 HL-9.2(位置參照圖 31)出露岩層具數組共軛節理，岩性相當於十六分頁岩。



圖 35 露頭 HL-9.2 的混濁砂岩中含有生痕化石與貝殼。露頭 HL-9.2 位置參照圖 31。



圖 36 露頭 HL-12 出露之暗灰色厚砂。露頭位置參照圖 31。

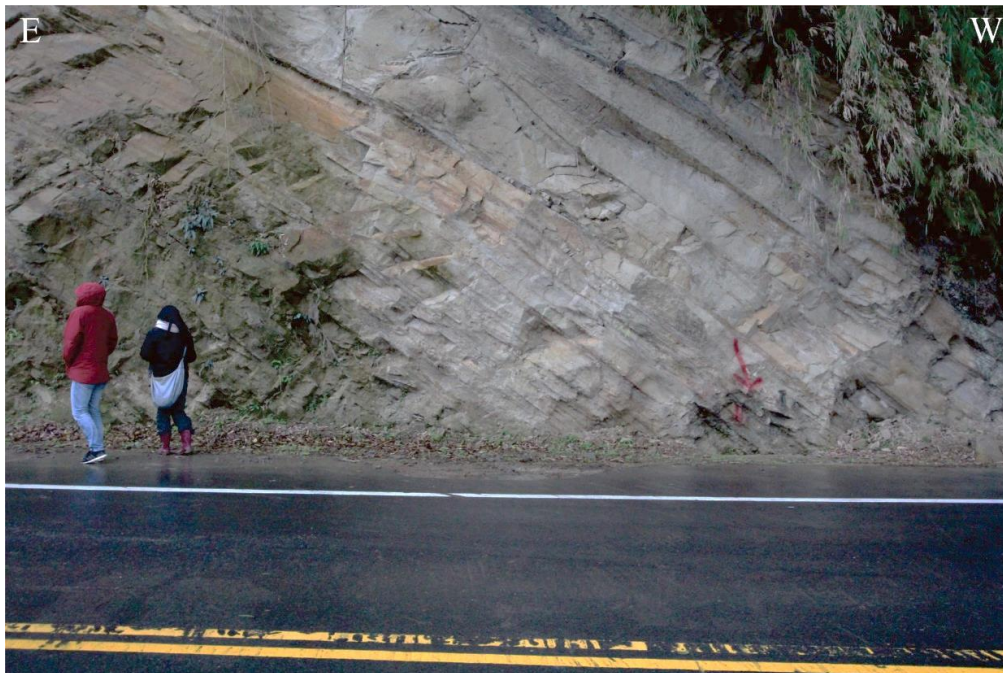


圖 37 露頭 HL-4 出露之層理明顯的中至薄層的砂岩。露頭位置參照圖 31。



圖 38 露頭 HL-6 出露之砂頁互層。砂頁互層之砂頁岩比例約為 1 : 1，根據出露位置及岩性判斷此岩層對應至東坑層，露頭位置參照圖 31。



圖 39 後龍溪北岸為防波堤覆蓋未見岩層出露。自露頭 HL-7 處向西拍攝，露頭位置參照圖 31。



圖 40 後龍溪北岸之河床及沿岸礫石遍佈。後龍溪北岸露頭 HL-8 往東至 HL-2(露頭位置參照圖 31)之河床礫石遍佈無露頭出露。

5-1-2 汶水溪

繪製地質剖面時，發現採用之地質圖中資料顯示八卦力構造以東之岩層傾角於短距離內有劇烈變化，欲確認該資料是否正確，並尋求造成此現象之可能原因，因而前往剖面南側之汶水溪進行調查。結果顯示小南勢斷層以東岩層位態開始有劇烈變化，並於日出溫泉度假飯店正門口(圖 41，WS-4 處)發現可能為鹿場斷層之露頭，斷層以西之岩層為灰白至暗灰色砂岩，傾角接近垂直，然而斷層以東的岩層為低傾角之灰黑色頁岩層(圖 42)，由於斷層兩側岩層岩性及位態差異極大，推測鹿場斷層之斷距頗大，根據地質圖與露頭岩性判斷此斷層兩側出露之岩層分別屬於出磺坑層及碧靈頁岩。岩層於位置點 WS-04 處尚為水平，然而僅數公尺之距的頁岩層(圖 41，WS-05)，則呈垂直狀態(圖 43)，顯示本區受構造作用變形嚴重，若以急折剖面繪製法繪製地質剖面，應作適當之修繪。

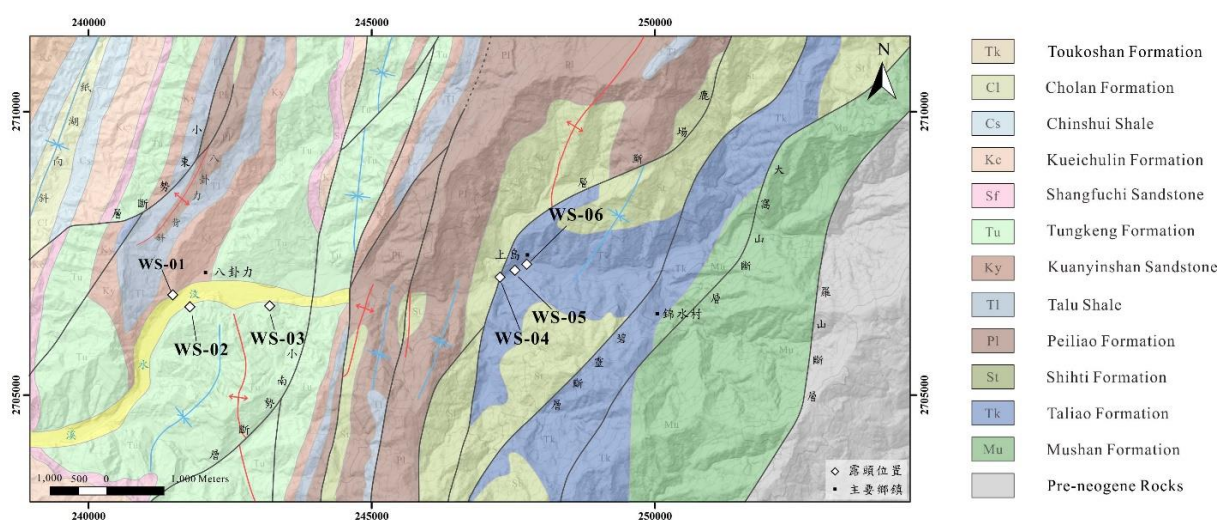


圖 41 汶水溪沿岸調查地點位置圖。(改自中油十萬分之一地質圖苗栗圖幅，1994)



圖 42 日出溫泉度假飯店正門口鹿場斷層露頭 WS-04。日出溫泉度假飯店正門口之斷層露頭，斷層以西之岩層為灰白至暗灰色砂岩，傾角接近垂直，然而斷層以東的岩層為低傾角之灰黑色頁岩層。

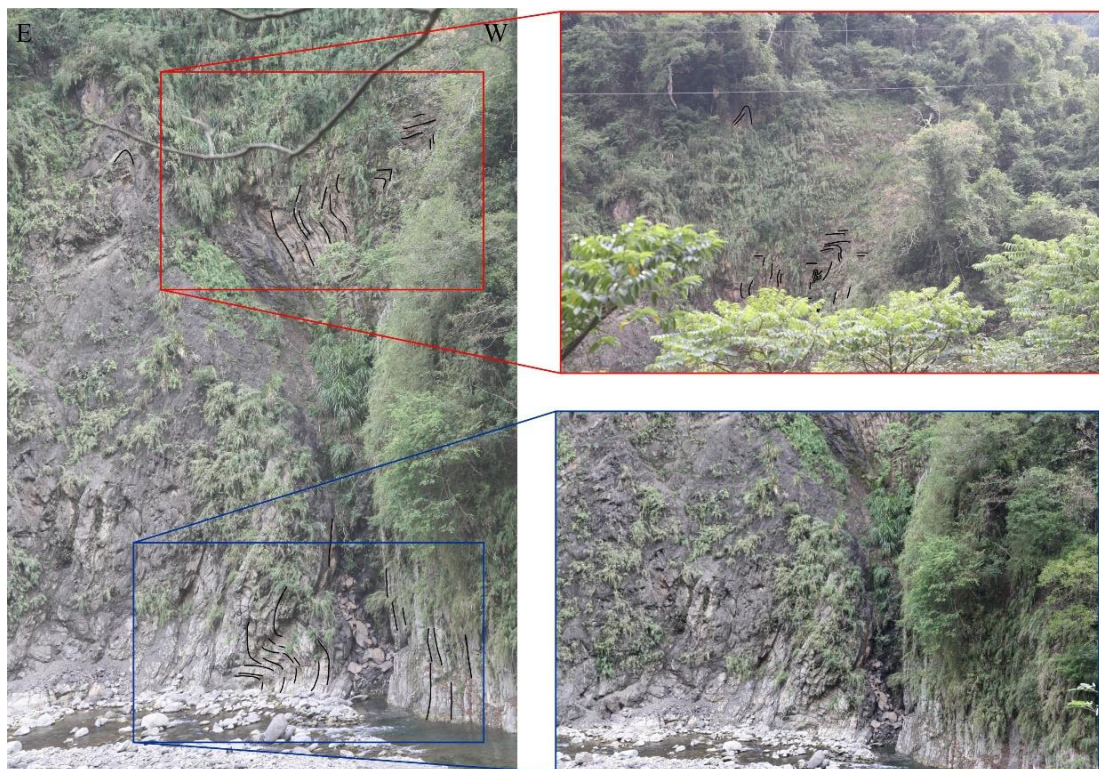


圖 43 露頭 WS-05 出露之岩層受劇烈褶曲。

5-2 地質構造剖面

5-2-1 地層層厚

本研究彙整研究區及鄰近區域既有之地層厚度資料，參見表 8。其中包括地調所苗栗圖幅及東勢圖幅說明書中報導的地層層厚及本研究繪製剖面通過的三口中油的鑽井(S-2, C-143, P-3)之資料。鑽井資料欄位中的厚度，為由鑽井鑽遇地層的總長度及岩層傾角，換算所得的真層厚。此外，表中紅色底線表示鑽井鑽遇斷層，層厚數字右上角之「+」表示該地層未完全出露，受斷層截切導致岩段重複出現之地層層厚表示方式為「斷層上盤鑽遇層厚/斷層下盤鑽遇層厚」。

本研究採用之層厚中，由於頭嵙山層未完全於本區出露故層厚為 1000⁺，由於剖面通過之三口鑽井皆位於褶皺軸部，岩層於褶皺軸部有增厚的可能，故卓蘭層至觀音山砂岩之層厚參考井 S-2 的資料，然而井 S-2 未打穿打鹿頁岩底界。打鹿頁岩及更老的地層層厚則參考其他兩口井的資料，及鄰近地區的既有資料推估，然以頁岩為主之地層(錦水頁岩、十六份頁岩、打鹿頁岩、碧靈頁岩)層厚，各資料似有較大的差異。五指山層未於本研究區及鄰近處出露，鑽井資料亦缺虞，因此本研究採用 Tai and Teng (1994)報導的台灣北部五指山層層厚，約 800 公尺。

表 8 地層層厚彙整表。

	時代			超微化石 生物地層	基隆 台北 桃園	苗栗	S-2	C-143	P-3	苗栗圖福	東勢圖福	本研究					
0.46	第四紀	更新世	中期	NN19	林口層	頭嵙山層	222 ⁺			500 ⁺	1000-1500	1000 ⁺					
			早期		大南灣層												
				NN18	卓蘭層	卓蘭層	1170 ⁺		1100-1500	2000	1170						
2.58	新近紀	上新世	晚期	NN16	錦水頁岩	錦水頁岩	131.6 ⁺			230-340	90	180-260					
			早期	NN15	二閣層	桂竹林層	魚藤坪砂岩	219		270-350	271	500-550					
NN14-NN13				十六份頁岩			45/43.5 ⁺	20-50	38								
NN12		大埔層	關刀山砂岩	5 ⁺ /174			250-300	176									
NN11			南莊層	上福基砂岩	154.5	80-180	102	154									
NN10 NN9-NN8		東坑層							739.7	550-750	586	740					
11.63		中新世	中期	NN7 NN6	南港層	觀音山砂岩	183.2	199 ⁺	114 ⁺	150-220	300	183					
				NN5									打鹿頁岩	136 ⁺	283.3	146	200-340
15.97			早期	NN4									北寮砂岩		400.5	545	300-400
		NN3		石底層	出磺坑層		685.75	513/100 ⁺	200 ⁺	220	680						
				NN2	大寮層	碧靈頁岩		511.5	42 ⁺ /350		325	390-453					
	23.03	NN1		木山層	汶水層			300 ⁺		550 ⁺	780						
古近紀			漸新世	晚期	Np25	五指山層					800						
	早期	Np24															

註：表中紅色底線表示鑽井鑽過斷層，層厚數字右上角之「+」表示該地層未完全出露，受斷層截切導致岩段重複出現之地層層厚表示方式為「斷層上盤鑽過層厚/斷層下盤鑽過層厚」。

資料來源：台灣中油公司、何信昌（1994）、李錦發（2000）

5-2-2 地質構造剖面

本研究所繪製的地質剖面位於台灣西北部，沿 N78°W-S78°E 方向，西起西起苗栗白沙屯陸海交界處東至鹿場斷層長約 34.9 公里(圖 15)。繪製剖面所參考的資料包含中油地質圖、地調所五萬分之一地質圖白沙屯、苗栗、東勢、竹東圖幅，以及國土測繪中心經建版地形圖、野外調查資料和剖面沿線通過的三口鑽井(S-2, C-143, P-3)資料進行繪製。剖面沿線通過的地質構造由西至東分別為斧頭坑斷層、通霄背斜、銅鑼向斜、錦水背斜、仁隆向斜、出磺坑背斜、紙湖向斜、神桌山斷層、大東河斷層、紅毛館斷層、陸家斷層、向天湖向斜、橫龍山背斜、石門向斜與鹿場斷層。

基底滑脫面位置參考 Hung and Wiltschko (1993) A-A'剖面中基底滑脫面的位置位於五指山層底部之前五指山層中，向東傾斜約 4 度。剖面繪製成果如圖 44 所示。以出磺坑背斜西翼為界可將剖面分為東、西兩段。剖面西段的地質構造由東至西包含仁隆向斜、錦水背斜、銅鑼向斜、通霄背斜及斧頭坑斷層。斧頭坑主斷層為本段唯一的斷層構造，該斷層切穿通霄背斜軸部並通過鑽井 S-2 鑽深 2005 公尺及 600 公尺處，通過鑽深 2005 公尺處的斷層為主斷層，傾角約 71 度向東，而位於鑽深 600 公尺者其背衝斷層，本斷層於此區並未造成明顯的地層錯動。通霄背斜與銅鑼向斜兩翼平緩，地層傾角皆為 10 度左右，為寬展褶皺，造就了剖面西段平緩的地形。由於後龍溪通過銅鑼向斜與仁隆向斜之間的地層，地表位態資料缺乏且出露岩層單一，出露地層為卓蘭層，且錦水頁岩並未出露地表，應伏於地表之下，透過後龍溪東西兩岸的變化可發現於短短兩公里的距離間地層傾角由銅鑼向斜東翼 10 度轉為 40 至 50 度，推測該高角度地層即為錦水背斜西翼，且背斜軸部緊臨仁隆向斜西翼，可知本背斜為一不對稱背斜，半波長約三公里，西翼至地下 1.5 公里處轉緩，東翼即為仁隆向斜西翼，地層傾角為 40 度上下。由於錦水背斜於本區已向南傾沒，其背斜形貌並未延續至深部地層，並於地下

三公里處轉為寬展褶皺，至地底波長漸增。剖面西段的褶皺構造由一系列連續且振幅向遠離外力來源方向遞減的向斜與背斜構成，與拱彎作用產生的褶皺特徵相符，故推測本段的褶皺生成機制以基底滑脫面上的拱彎作用為主。

剖面東段由西向東包含出磧坑背斜、紙湖向斜、神桌山斷層、大東河斷層、紅毛館斷層、陸家斷層、向天湖向斜、橫龍山背斜、石門向斜與鹿場斷層。出磧坑背斜對稱褶皺，且為兩翼平直、陡峭的尖頂褶皺，軸部較為平緩，傾角約 30 至 40 度，出露觀音山砂岩，兩翼轉陡，約為 50 至 70 度，半波長約為 5 公里，振幅約為三至四公里，褶皺深部角度轉緩。與出磧坑背斜相鄰的八卦力構造兩構造組成之岩層、褶曲的形貌相似，唯八卦力構造軸部被神桌山斷層截切，東翼出露的地層為神桌山斷層上盤地層，傾角約 40 至 60 度，西翼地表地層倒轉，往地下深部有轉緩的趨勢，再於地下三至四公里處轉陡至 80 度。神桌山斷層以東的構造較為複雜，有許多高角度、大錯距之斷層，且岩層褶曲更為劇烈，大東河斷層、紅毛館斷層即陸家斷層皆為高角度逆斷層。

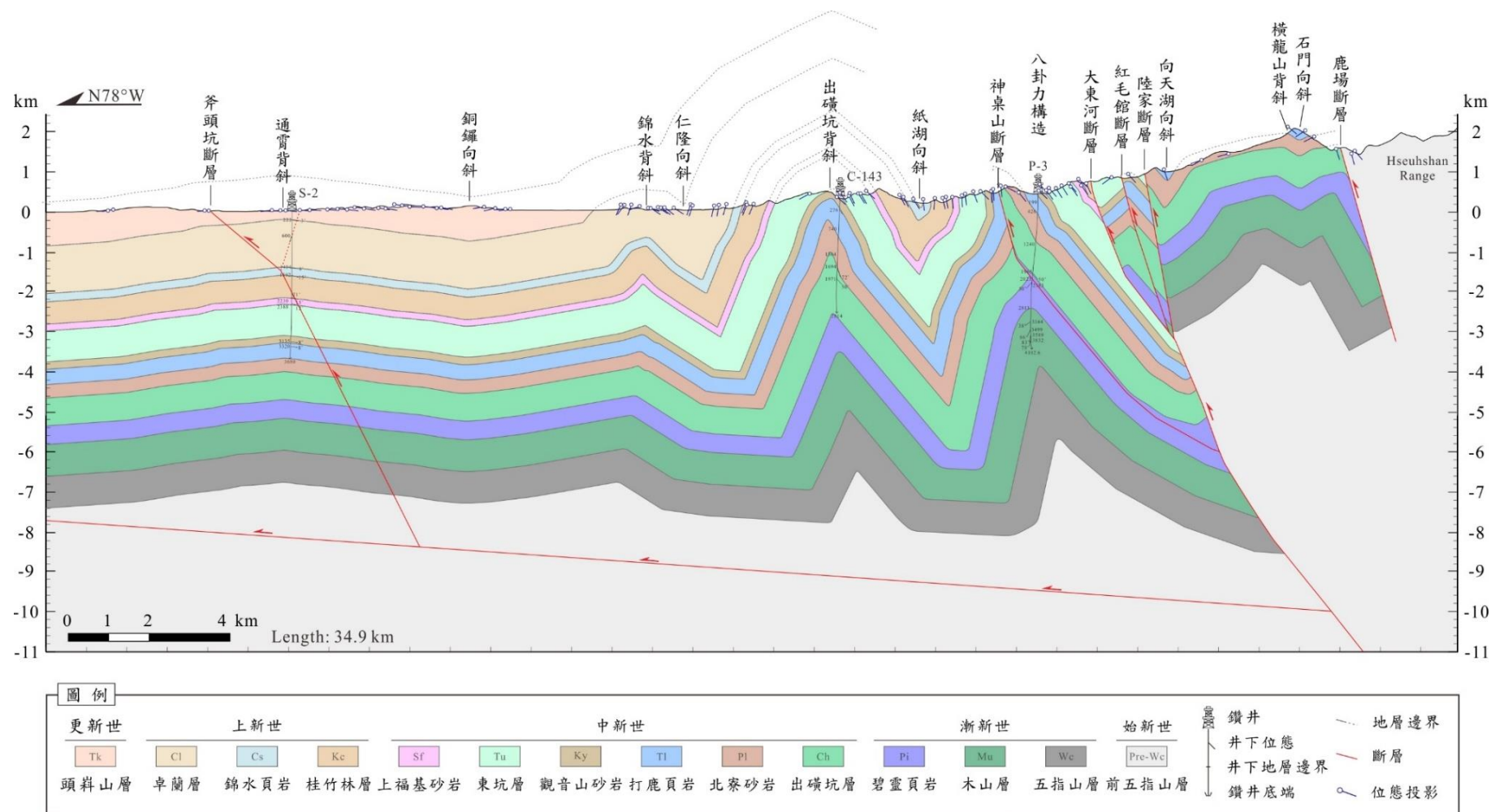


圖 44 本研究繪製之地質構造剖面圖。結合地表地質、井下資料建立之地質構造剖面。剖面總長 34.9 公里，剖面西段的褶皺構造由一系列連續且振幅向遠離外力來源方向遞減的向斜與背斜構成，與拱彎作用產生的褶皺特徵相符。

5-3 平衡剖面

回復剖面時使用 Move 軟體作為輔助，由於一個地質構造(如：斷層、褶皺)通常不會只是一次事件造成，現今的形貌多為多次事件的疊加造成，且疊加的過程中每一個新發生的事件都有可能對既存的構造造成影響。剖面回復的工作可透過去除一個事件或是去除一個構造造成的影響來了解該事件或是該構造對於地層的影響範圍及推測地層在發生變形前的形貌，並檢視各構造活動造成地層水平縮短量。本研究以逆推的方式進行回復，即自地層現今的形貌回推至造山運動開始造成地層變形前的初始水平狀態。根據前人研究（陳振華，1993）台灣的構造發育順序為由東向西發展，以此為原則同時考量各別構造的特性後，本研究西側的構造開始回復，並將整個回復過程劃分為七個步驟：

- ◆ 步驟一、斧頭坑斷層的回復：本研究首先回復剖面位於最西側的斧頭坑斷層，由於本斷層並未造成明顯的地層錯動，以斷層平行回復法平衡後剖面長度並無變化（圖 45）。
- ◆ 步驟二、大東河斷層的回復：大東河斷層為一高角度逆斷層，本研究以斷層平行回復法將斷層上盤錯移的地層沿大東河斷層向下拉回原始位置，與下盤地層連結，此步驟可看出大東河斷層的活動並非一次事件造成，在此之前應已有初期大東河斷層活動造成地層褶曲，而本次事件造成地層沿斷層錯動約 4.2 公里。根據剖面回復結果，剖面總長由 34.9 公里增長為 36.9 公里，故大東河斷層活動所造成的地層水平縮短量為 2 公里（圖 46）。
- ◆ 步驟三、紅毛館斷層的回復：紅毛館斷層為一逆斷層，為初期大東河斷層的分支斷層之一，以斷層平行回復法將其上盤錯移的地層沿紅毛館斷層與初期大東河斷層向下拉回原始位置後得知兩斷層造成地層錯動的

錯動量為大約 0.3 公里，並可看到紅毛館斷層截切的位置原為一褶皺之軸部。根據剖面回復結果，剖面總長由 36.9 公里增長為 37.0 公里，故紅毛館斷層與初期大東河斷層活動所造成的地層水平縮短量為 0.1 公里（圖 47）。

- ◆ 步驟四、陸家斷層的回復：陸家斷層為一高角度逆斷層，為初期大東河斷層的分支斷層之一，以斷層平行回復法將其上盤錯移的地層沿陸家斷層與初期大東河斷層向下拉約 1.6 公里後上盤地層回到原始位置，與下盤地層連結，至此步驟為止剖面東段的地層皆已連接，可看到剖面東段的地層在受斷層截切前即有劇烈的褶曲。根據剖面回復結果，剖面總長由 37.0 公里增長為 37.3 公里，故陸家斷層與初期大東河斷層活動所造成的地層水平縮短量為 0.3 公里（圖 48）。
- ◆ 步驟五、初期大東河斷層的回復：受初期大東河斷層的影響，斷層尖端及斷層東側的地層褶曲形成向天湖向斜、橫龍山背斜以及石門向斜等褶皺構造，將這些褶皺以等長度法回復後初期大東河斷層上盤的岩層與下盤的岩層互相平行，越往東側角度漸緩，大致平行於滑脫面。根據剖面回復結果，剖面總長由 37.3 公里增長為 38.7 公里，故初期大東河與斷層上盤的褶皺所造成的地層水平縮短量為 1.4 公里（圖 49）。
- ◆ 步驟六、神桌山斷層的回復：神桌山斷層截切八卦力構造，位於碧靈頁岩內的層間斷層，透過斷層平行回復法將神桌山斷層上盤地層回復後出礫坑層、北寮砂岩與打鹿頁岩長度大致相等，地層沿斷層滑移的量約為 1.4 公里，由於本斷層的活動紙湖向斜東翼倒轉的地層亦恢復為地層倒轉前的高角度地層（圖 50）。
- ◆ 步驟七、八卦力、出礫坑與錦水背斜的回復：八卦力、出礫坑與錦水背斜為本研究區的主要三個背斜構造，其變形為底滑脫面上的拱彎作用構成，本研究以等長度法回復剖面達到初始水平狀態，位於基底滑脫面與

五指山層底部之間的地層為由西向東增厚楔形體，五指山層至碧靈頁岩在變形期間曾受剪切作用影響，地層長度以一固定的梯度漸減，而出礪坑層、北寮砂岩與打鹿頁岩長度大致相同，達到平衡。根據剖面回復結果，剖面總長由 38.7 公里增長為 47.0 公里，八卦力、出礪坑與錦水背斜共同造成的地層水平縮短量為 8.3 公里（圖 51）。

本研究剖面回復結果顯示褶皺構造的生成早於斷層活動，但由於製圖方法的限制，呈現結果時僅將一個構造歸為一次事件造成，實際上斷層可能為褶皺構造發育到一半的時候發生。此處構造演化的時序應為：初期八卦力背斜、初期出礪坑背斜、初期錦水背斜、神桌山斷層、初期大東河斷層、石門向斜、橫龍山背斜與向天湖向斜、陸家斷層、紅毛館斷層、大東河斷層、斧頭坑斷層，且初期褶皺構造(八卦力背斜、出礪坑背斜、錦水背斜)形成後仍不斷受大地應力以及斷層作用影響而增加振幅、縮短波長，形成今日的形貌。各個構造活動造成的水平縮短量分別為：八卦力背斜、出礪坑背斜、錦水背斜共 8.3 公里，初期大東河斷層 1.4 公里，陸家斷層 0.3 公里，紅毛館斷層 0.1 公里，大東河斷層 2 公里，由於大東河斷層、紅毛館斷層與陸家斷層彼此為分支斷層，回復結果呈現的縮短量可能為三者互相影響之結果。

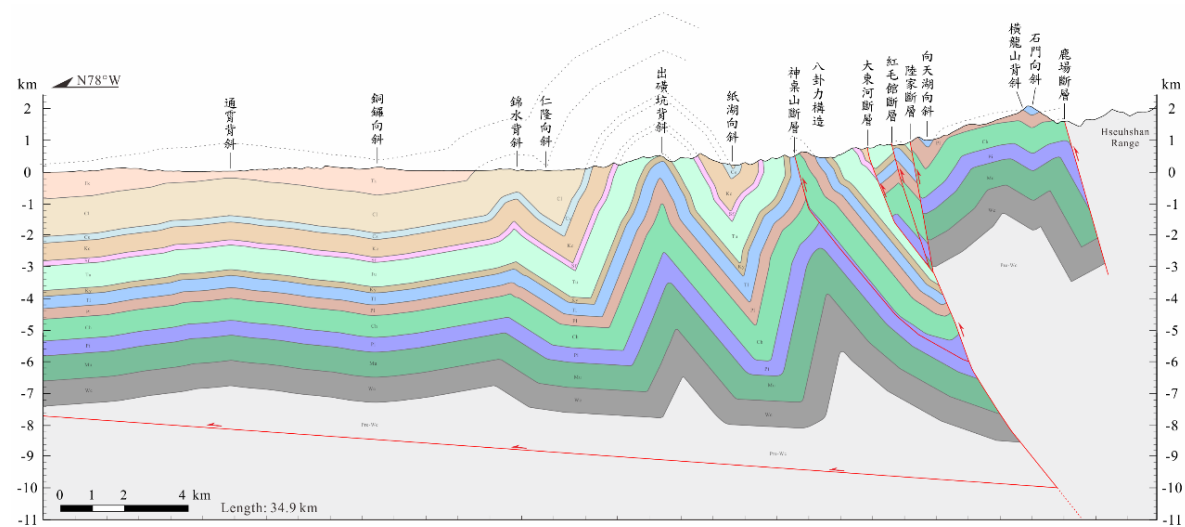
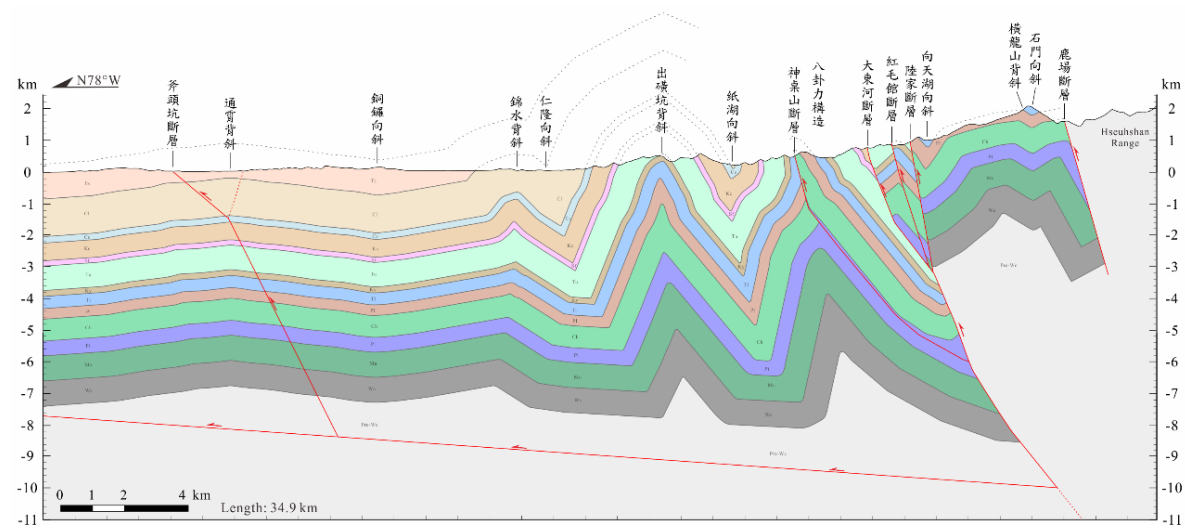


圖 45 剖面回復步驟一：斧頭坑斷層的回復。因該斷層並未造成明顯地層錯動，因此剖面總長度並無顯著改變。

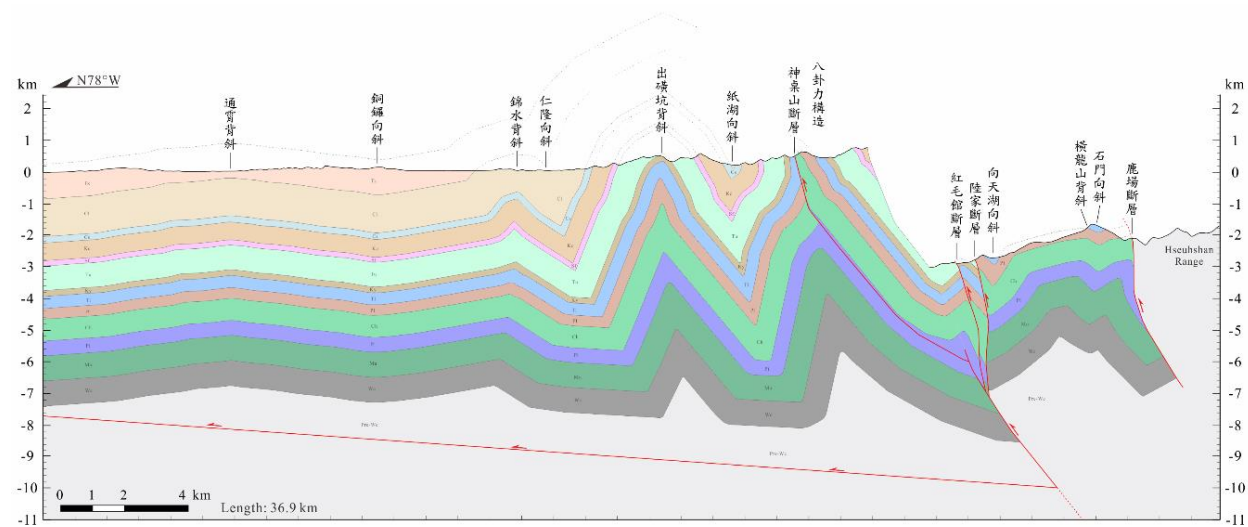
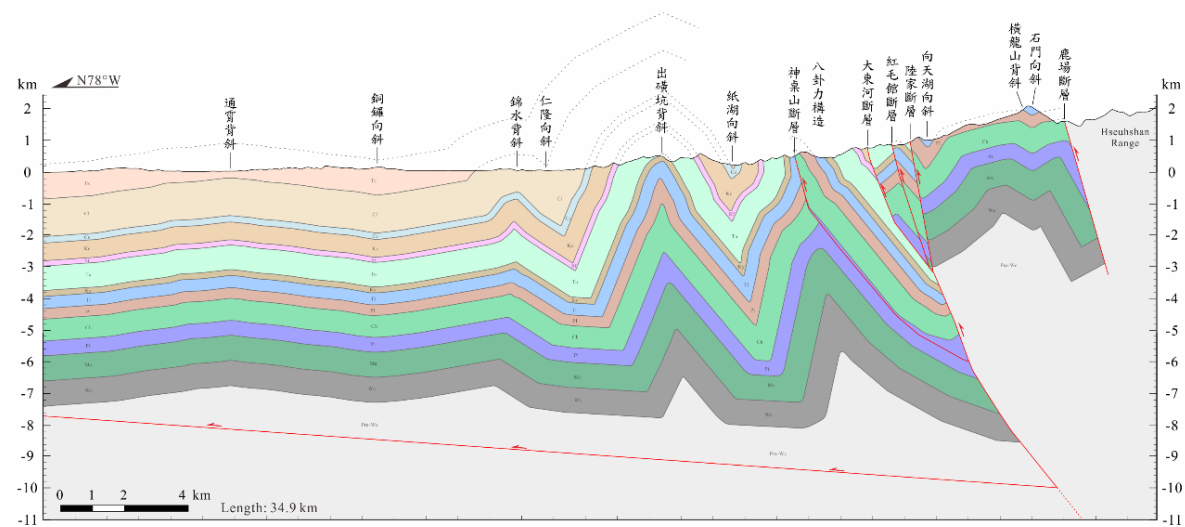


圖 46 剖面回復步驟二：大東河斷層的回復。該斷層的活動並非一次事件造成，在此之前應已有更早期之斷層活動造成地層褶曲，剖面總長增為 36.9 公里。

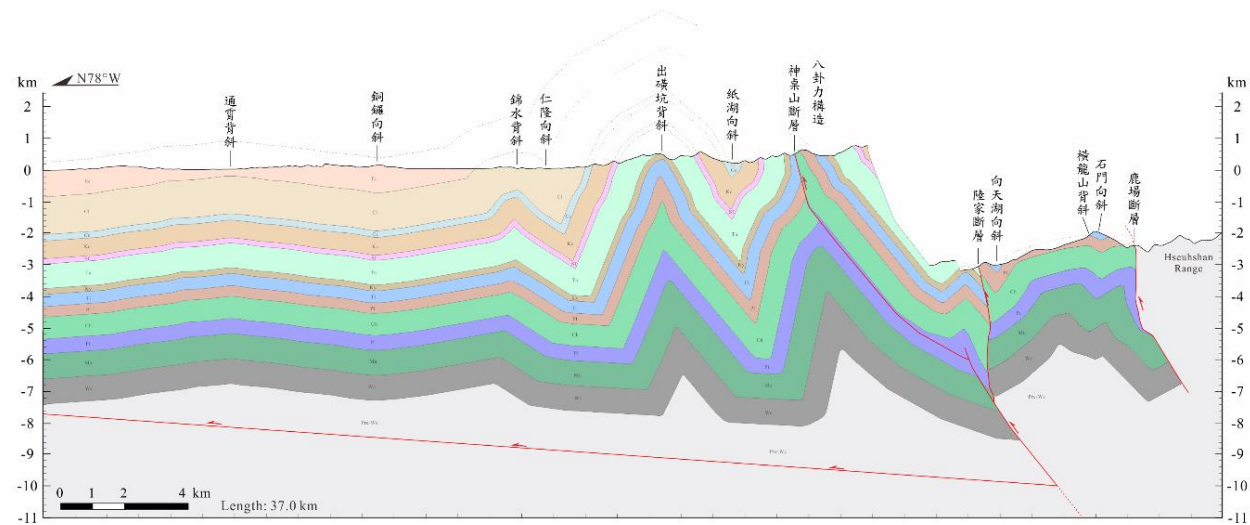
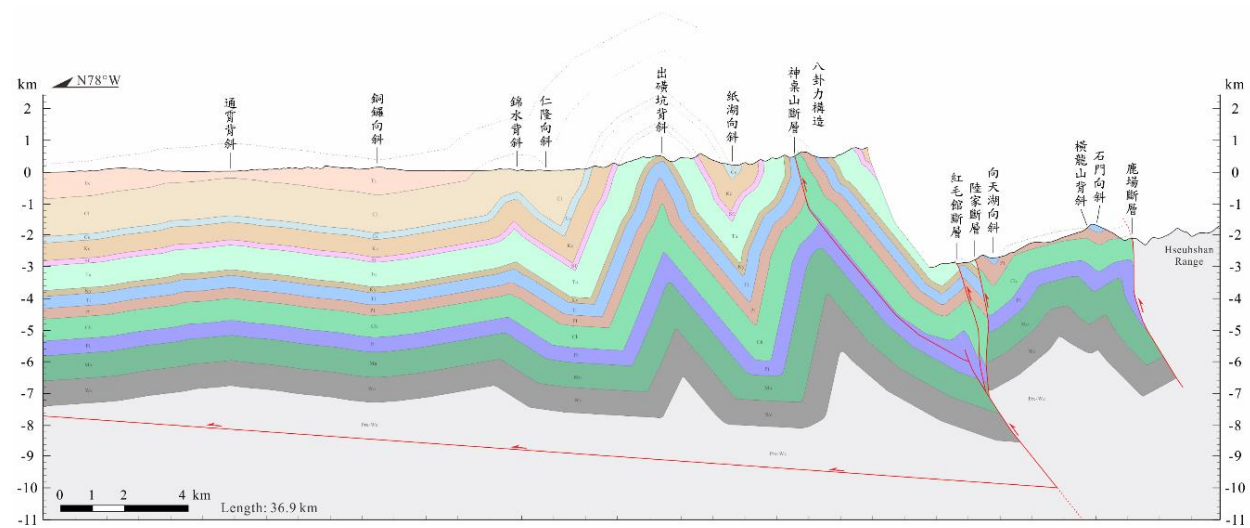


圖 47 剖面回復步驟三：紅毛館斷層的回復。紅毛館、大東河斷層共造成地層錯動之錯動量為大約 0.3 公里，回復後剖面總長 37 公里。

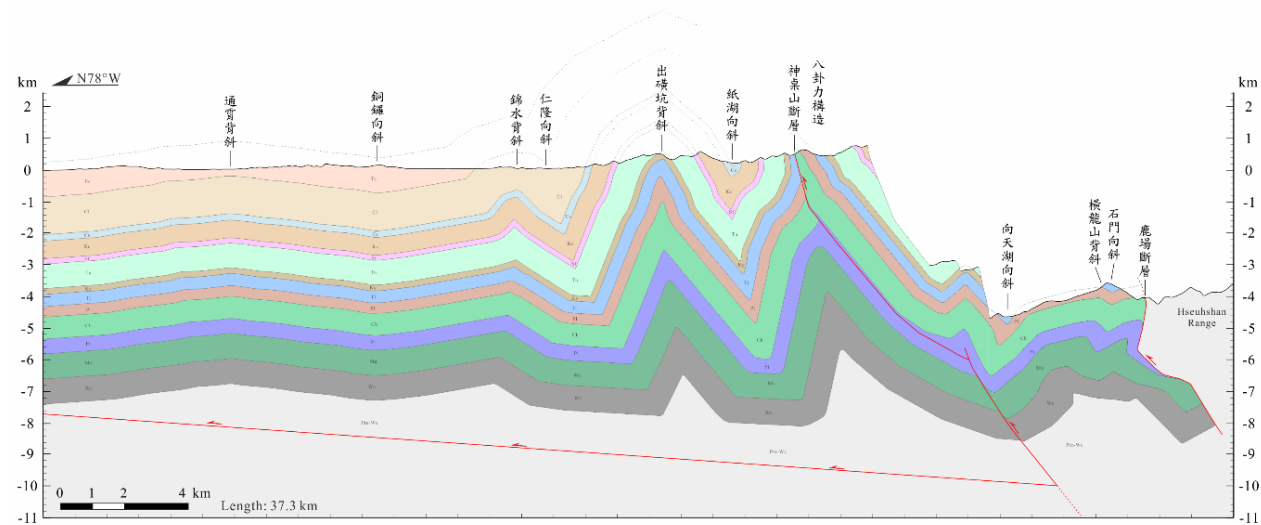
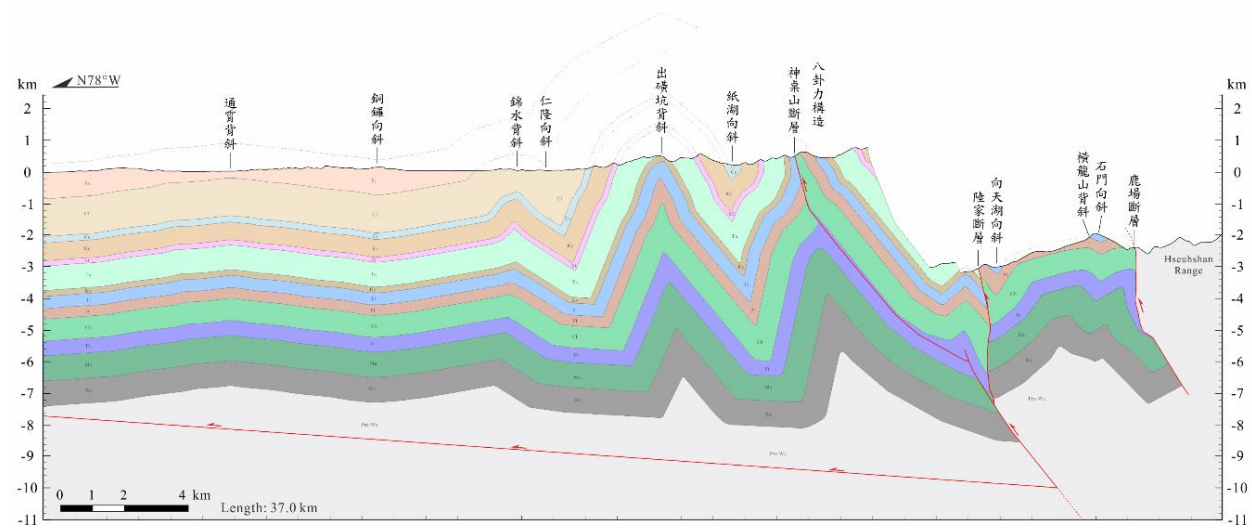


圖 48 剖面回復步驟四：陸家斷層的回復。至此步驟為止剖面東段地層已連接，顯見剖面東段地層受斷層截切前即有劇烈褶曲，剖面總長 37.3 公里。

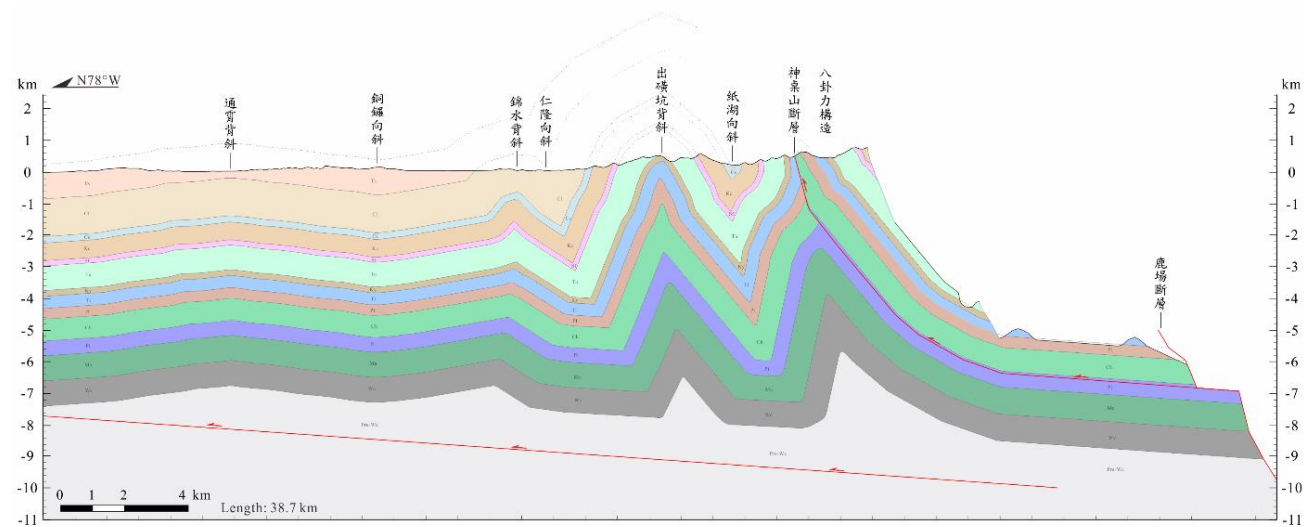
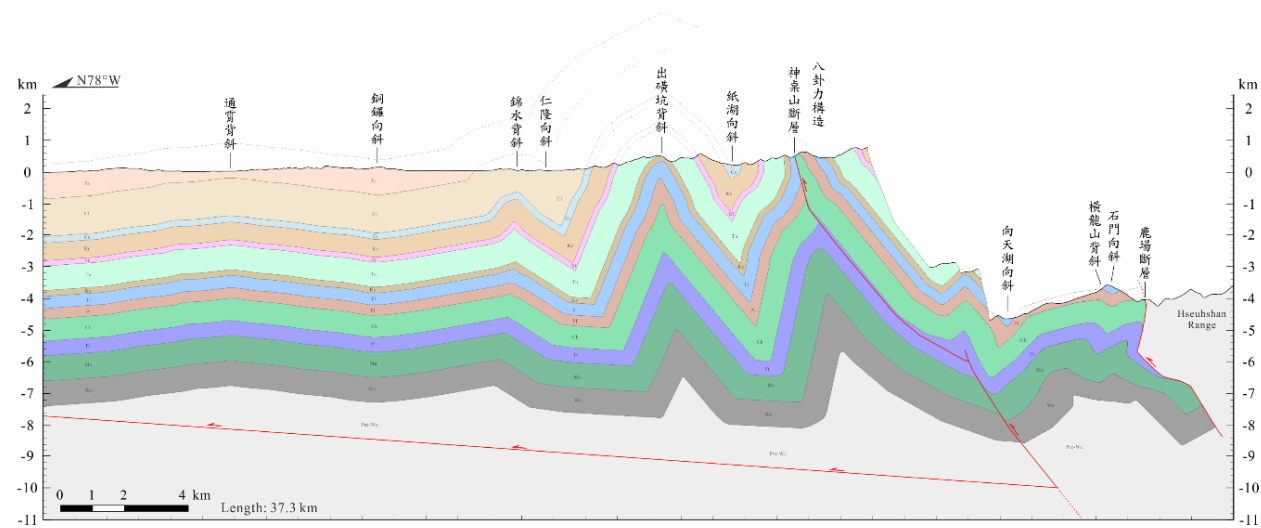


圖 49 剖面回復步驟五：初期大東河斷層的回復。以等長度法回復後大東河斷層上下盤岩層互相平行，東側岩層角度漸緩大致平行於滑脫面。剖面總長 38.7 公里。

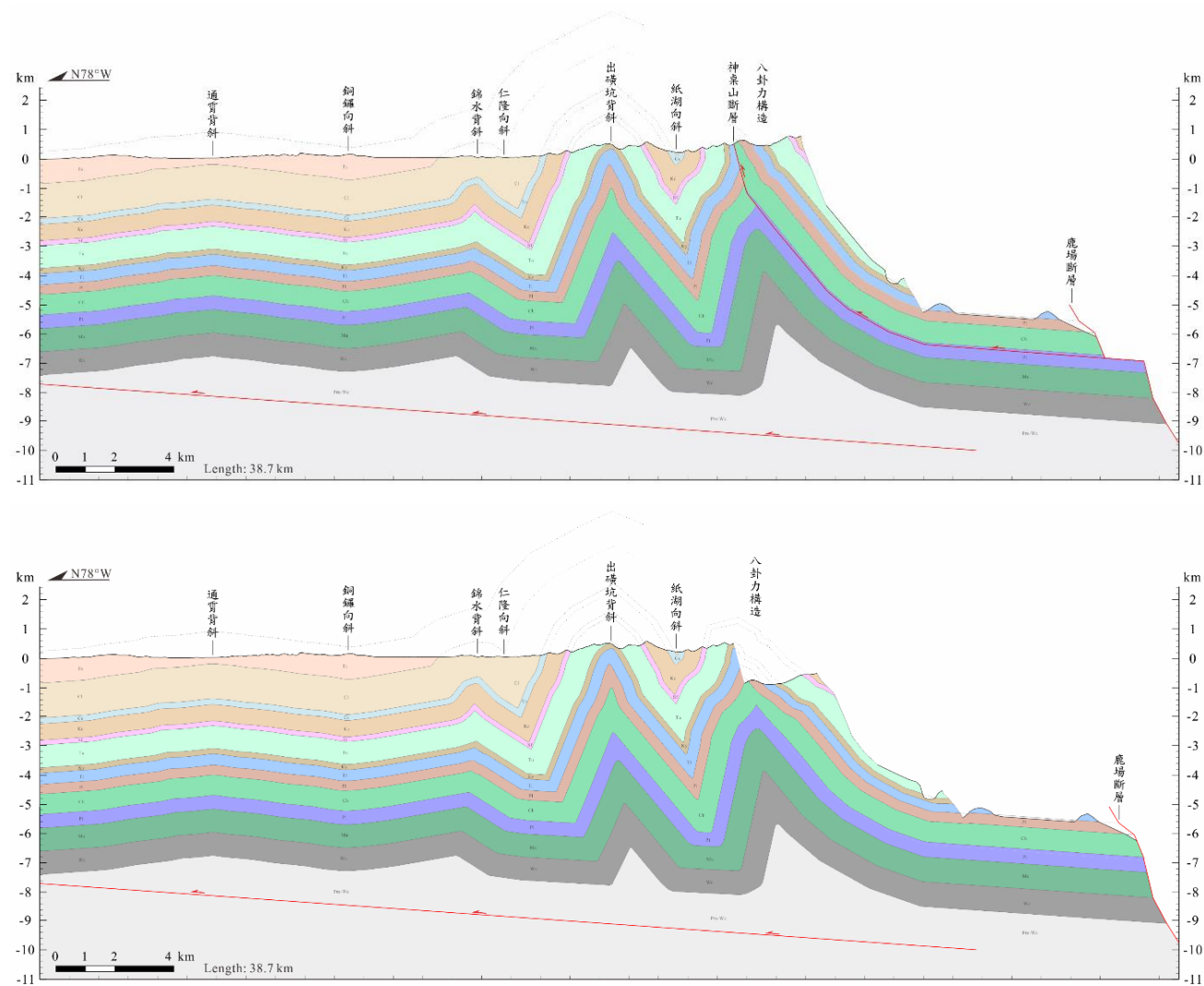


圖 50 剖面回復步驟六：神桌山斷層的回復。回復後出磺坑層、北寮砂岩與打鹿頁岩長度大致相等，地層沿斷層滑移的量約為 1.4 公里，剖面總長 38.7 公里。

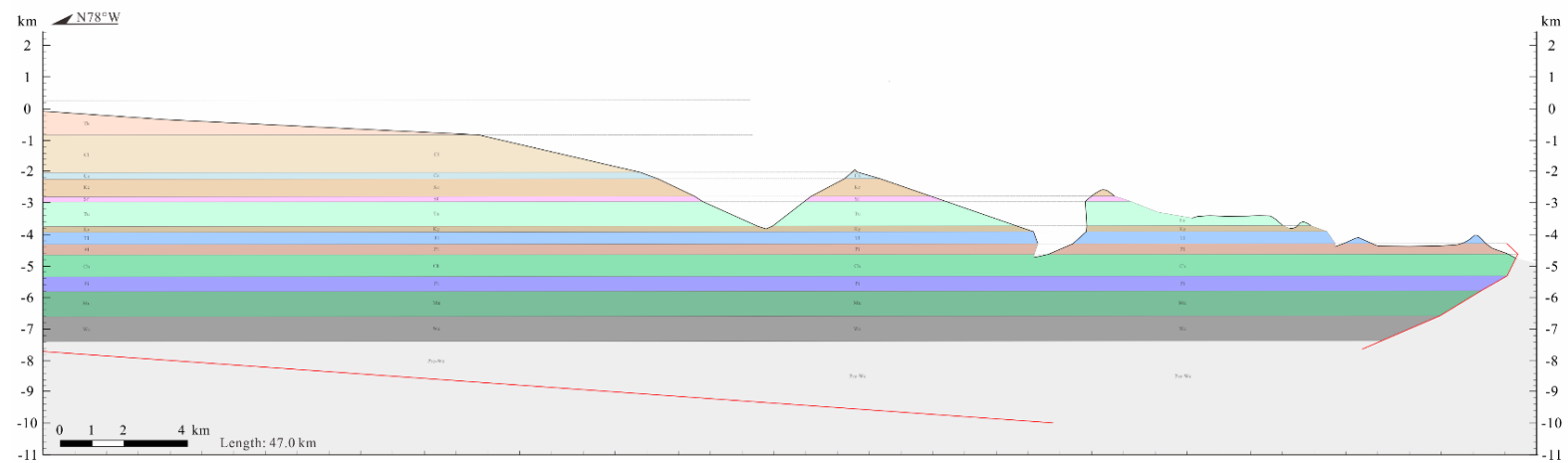
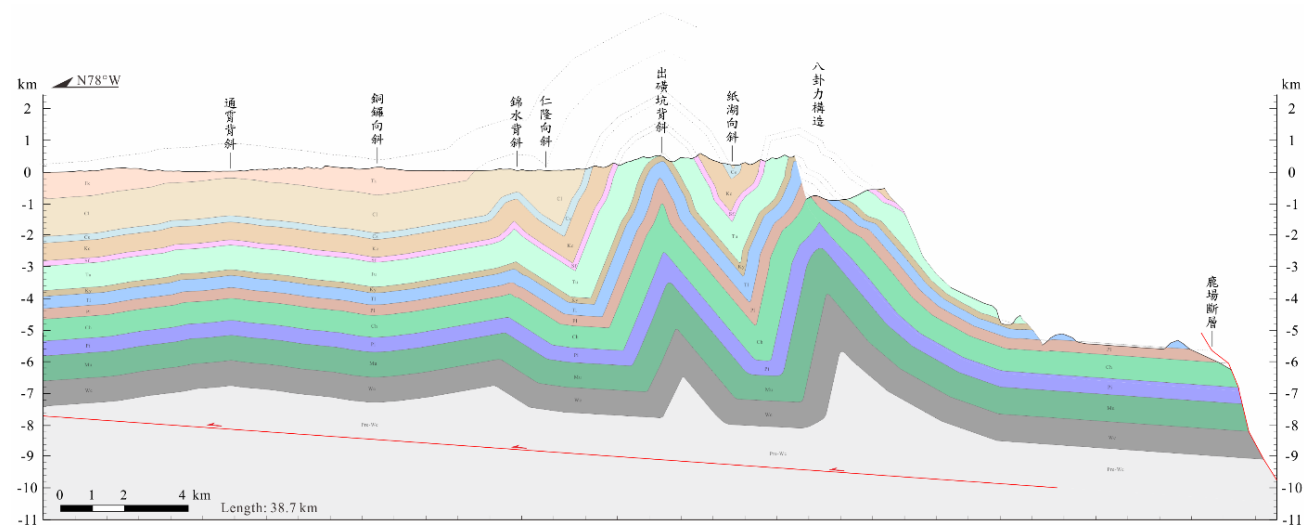


圖 51 剖面回復步驟七：八卦力、出磺坑與錦水背斜的回復。八卦力、出磺坑與錦水背斜共同造成的地層水平縮短量為 8.3 公里。剖面總長增長為 47.0 公里。

5-4 力學層及剖面修繪

5-4-1 力學性質分層

本研究彙整前人所繪製自五指山層至卓蘭層各地層的地層柱，由於五指山層未出露於本研究區，地層柱採用 Tai and Teng (1994)於台灣北部所繪製之地層柱；木山層與碧靈頁岩採用李錦發 (2000)於調查苗栗汶水上島地區者，出磺坑層採用游能悌和鄧屬予 (1995)調查苗栗銅鑼至汶水間者；北寮砂岩採用何信昌 (1994)於苗栗出磺坑後龍溪所繪製者；打鹿頁岩與觀音山砂岩採用李錦發 (2000)參考洪奕星 (1988)修繪者；東坑層、上福基砂岩、桂竹林層以及錦水頁岩採用李錦發 (2000)於苗栗出磺坑後龍溪所繪製者；最後，卓蘭層採用慧美麗 (2018)於台中大甲溪之調查成果。根據各岩層之岩性以及力學特性將上述地層由老至年輕分為 A、B、C、D、E、F、G、H 共 8 個力學層(圖 52)。

A、B、C 層皆為受過深埋的較老岩層，其中 A 層為五指山層，層厚約 800 公尺，由於其岩性以砂頁互層為主，砂岩中夾頁岩將導致岩層強度降低，且，於數值模擬中設為軟層。B 層是為以砂岩為主的木山層，層厚約 780 公尺，於數值模擬中設為硬層。C 層為岩性以頁岩為主的碧靈頁岩，層厚約 410 公尺，於數值模擬中設為軟層。D 層為以砂岩為主的出磺坑層與北寮砂岩層厚約 1010 公尺，於數值模擬中設為硬層。E 層以頁岩為主且質地較為軟弱岩層(打鹿頁岩)層厚約 300 公尺，於數值模擬中設為軟層。F 層為中新世中晚期之砂岩為主的地層(觀音山砂岩、東坑層、上福基砂岩、桂竹林層)強度中等，層厚為約 1600 公尺，於數值模擬中設為硬層。G 層為較軟弱之頁岩地層(錦水頁岩)層厚約為 220 公尺，於數值模擬中設為軟層。H 層為更新世之後較年輕且含砂頁互層，強度中弱的岩層(卓蘭層、頭嵙山層)層厚約為 2000 公尺，於數值模擬中設為硬層。

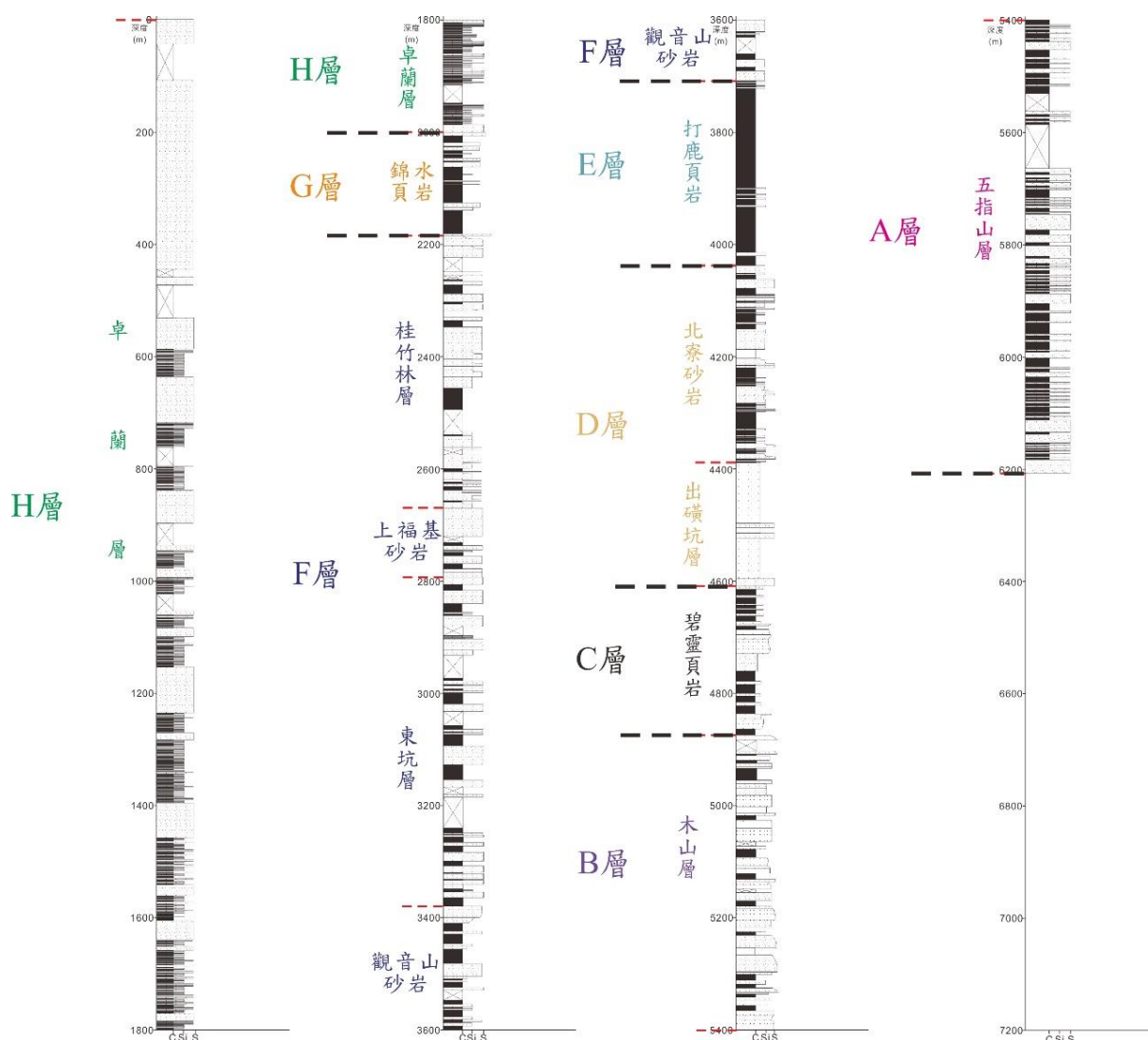


圖 52 本研究所採用之地層柱及力學分層。根據各岩層之岩性以及力學特性將上述地層由老至年輕分為 A、B、C、D、E、F、G、H 共 8 個力學層。其中，A 層對應到五指山層；B 層對應到木山層；C 層對應到碧靈頁岩；D 層對應到出磺坑層與北寮砂岩；E 層對應到打鹿頁岩；F 層對應到觀音山砂岩、東坑層、上福基砂岩與桂竹林層；G 層對應到錦水頁岩；H 層對應到卓蘭層與頭嵙山層。

5-4-2 剖面修繪

初始之地質構造剖面對於岩石之力學特性以地質構造剖面之繪圖方法無法表現，為此改以力學分層之 8 層結果編修錦水背斜、出磺坑背斜以及八卦力構造區域受拱彎作用之岩層。根據力學層之分層，對第一階的平衡剖面進行調整修繪以將此結果與數值模擬成果進行比對。力學分層結果之 8 層不同軟硬岩分層顯示，硬層厚度大於軟層，平均而言硬層厚度約為軟層的三倍， d_2/d_1 值適中。又本研究區地層主要由砂岩與頁岩組成，根據表 1，砂岩之強度至少為頁岩之 2 至 20 倍，對應到之 μ_1/μ_2 值高，故於此適用 Ramsay and Huber (1987) 提出之六種模型中的 Model E。當兩相鄰岩層之力學性質差異較大時較硬的岩層主控褶皺形貌，褶皺之樞紐部呈弧狀，而較軟的岩層以尖角擠進其樞紐部，形成尖頂褶皺。褶皺翼部厚度縮減，其中較軟的岩層於褶皺軸部厚度較厚，其樣貌如圖 53 所示。依此概念於軟硬層之岩性交界處進行修繪，結果如圖 54 所示。



圖 53 岩性差異所致的不同構造及形貌。砂岩(棕色)內有節理的發育，板岩(灰色)具板劈理，砂岩層褶曲處外緣圓滑，內緣破裂，與板岩呈尖頂狀接觸。

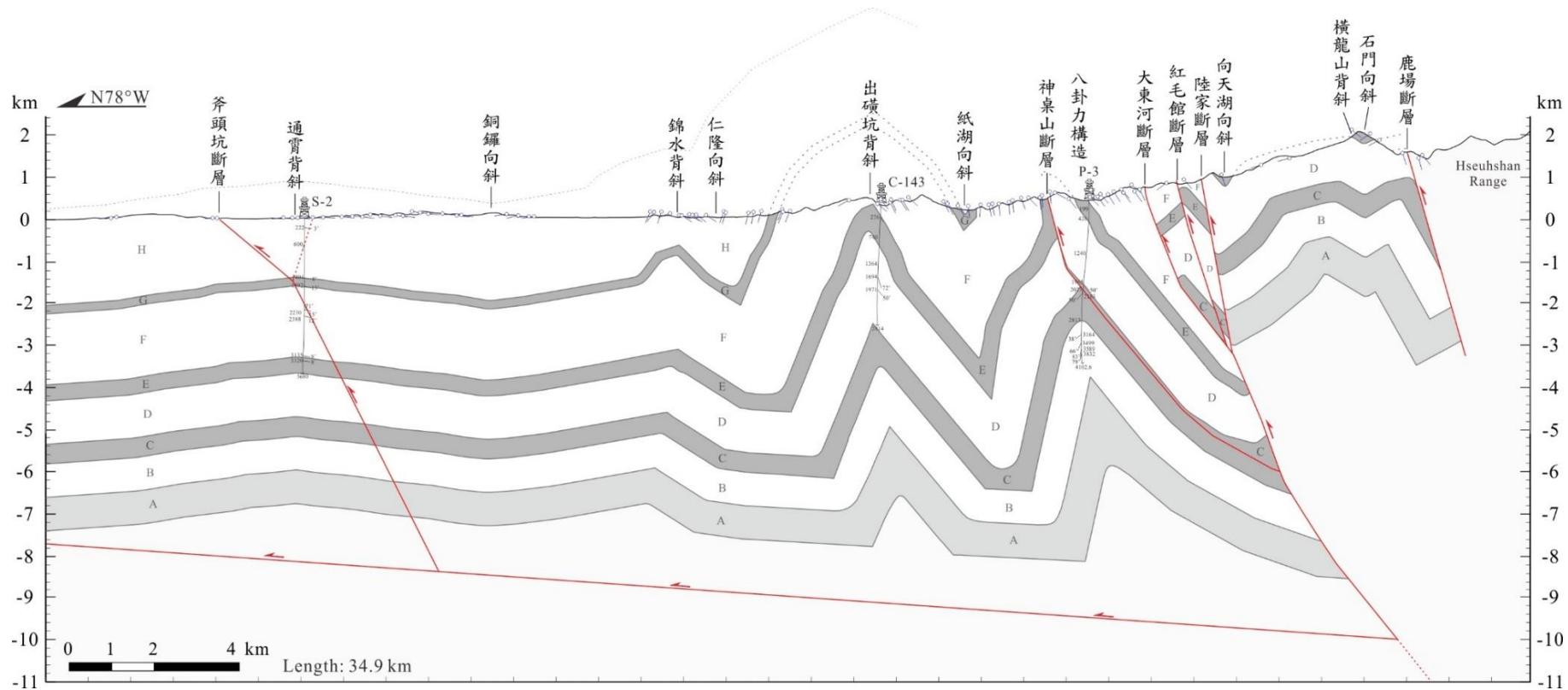


圖 54 力學分層後編修之地質構造剖面。根據 Model E 中的褶皺特徵修繪錦水背斜、出磺坑背斜以及八卦力構造區域受拱彎作用之岩層。將褶皺之樞紐部修為弧狀，而較軟的岩層以尖角擠進其樞紐部，形成尖頂褶皺。

5-5 區域構造演育數值模擬

5-5-1 區域構造演化模擬成果

本節利用前一節所劃分的力學層為基準建立數值模型，模型設置如圖 55 所示。研究將實際的地質架構等比例縮小為 1:1000 的數值模型，模型寬 40 公尺、高 15 公尺，總顆粒厚度 7.12 公尺。力學層 A~H 層的層厚分別為 A 層 0.8 公尺；B 層 0.78 公尺；C 層 0.41 公尺；D 層 1.01 公尺；E 層 0.3 公尺；F 層 1.6 公尺；G 層 0.22 公尺；H 層 2.0 公尺，其中 B、D、F、H 層為硬層，A、C、E、G 層為軟層。顆粒接觸模式採用接觸勁度模式，顆粒密度為 2200kg/m^3 ，模擬材料由 0.0596、0.042、0.0296 公尺這三種半徑之顆粒組成，顆粒正向勁度為 $2.4 \times 10^7 \text{ N/m}$ ，顆粒勁度比大約為 0.4(表 10)。各層的鍵結採用平行鍵結，根據前人研究，微觀參數中的鍵結強度大約為材料強度的 10^5 倍，考慮到一般砂岩之抗壓強度為 20~200 MPa，而頁岩抗壓強度為 10~100 MPa，砂岩的抗壓強度至少為頁岩的 2 至 20 倍，且考慮到現地狀況砂頁岩之抗壓強度下限可能更低，本研究採用兩組不同的硬軟層強度比($\sigma_{\text{強}}/\sigma_{\text{弱}}$)進行模擬，兩者分別為：Case 1，硬層強度為軟層強度的 25 倍；Case 2，硬層強度為軟層強度的 50 倍。兩組模擬之鍵結參數如表 11 所示。模型中的顆粒堆積方式採用沉積法進行，於建模初期生成顆粒使其以自重賈降以模仿沉積作用。受到重力影響，上覆顆粒較多者承受之圍壓越大，強度較高。達到平衡後可透過監測圓得到各層之初始孔隙率。模擬時左牆與底牆固定，右牆以等速度向左方移動來模擬來自東側的大地應力作用，模擬過程中每隔一萬個時階紀錄一次資料，共記錄 30 萬時階，其中每 1 萬時階產生的應變量為 0.5 至 0.59 公尺，即 1.25~1.48%的水平應變量。

Case 1 與 Case 2 的模擬成果以及裂隙分布狀況如圖 56、圖 57 所示。為方便模擬成果的解釋將整個模擬過程中生成的褶皺依序命名為褶皺 F1 至 F5，模擬模型中的左側為西；右側為東。Case 1 的模擬成果顯示，於 5 萬時

階時水平應變量為 7.4%，位於模型最東側的地層開始褶曲，形成褶皺 F1(圖 56 1a)，接著於圖 56 1b，水平應變量為 14%時(10 萬時階)，於褶皺 F1 之西側發育出了一個振幅較大的背斜(褶皺 F2)，之後褶皺 F2 西側之地層亦開始發育褶皺 F3 與 F4，當水平應變量增加到 20%時，F2 與 F3 的形貌相似(圖 56 1c)，並可看出最西側的地層雖有變形但振幅極小並不明顯(褶皺 F5)。當水平應變量達 30%時，褶皺 F3 與 F4 之底部開始匯合為一個褶皺，而褶皺 F2 中 A 層中發育了兩條方向相反的破裂帶，導致 A 層形成類似箱型褶皺的形貌(圖 56 1d)。隨著應變量的增加，既存的褶皺波長越來越短，且各褶皺之振幅越來越大(圖 56 1e)，最終於水平應變量達 38%時模擬出與力學層修繪剖面中近地表處形貌最為相似之成果。於水平應變量小於 30%時，Case 1 與 Case 2 中褶皺形貌與褶皺發育順序相似，但於 Case 2 中隨著水平應變量增加，褶皺 F3 與 F4 並未匯合，且褶皺 F2 於 A 層僅發生一條破裂帶，形成尖頂褶皺的形貌(圖 57 圖 57 1d)。最終於水平應變量達 38%時，得到與力學層修繪剖面最相似之結果，其中 F2 及 F3 為兩個緊密的尖頂褶皺，F4 為一不對稱褶皺，褶皺 F5 則僅有輕微折彎並未形成明顯之褶皺形貌(圖 57 1e)。

將本結果與地質構造剖面作結合可發現數值模擬結果中褶皺軸部軟硬岩層交界處與力學層修繪結果一致，褶皺形貌由硬層主控，且位於樞紐部的硬層呈弧狀、軟層以尖角擠進其樞紐部(圖 58、圖 59)。並可由褶皺形貌及褶皺發生的位置發現 Case 1 模型中的褶皺 F4 不對稱背斜半波長約 3 公里，西翼至地下 1.5 公里處轉緩，並於地下 3 公里處與其東部的褶皺匯合；Case 2 模型中的褶皺 F4 為不對稱背斜，其半波長約 4 公里，西翼至地下 1 公里處轉緩，並於地下 3 公里處轉為寬展褶皺，判斷本褶皺相當於地質構造剖面中的錦水背斜。而 Case 1 模型中的褶皺 F3 的半波長約 4 公里，振幅約 5 公里，兩翼平直，於地下兩公里以上的部分為一對稱褶皺，和 F4 匯合後形

成一寬約 5 公里，振幅約 4 公里的箱型褶皺；於 Case 2 模型中半波長約 7 公里，振幅約 8 公里，兩翼平直且緊密為一對稱褶皺，相當於地質構造剖面中的出磺坑背斜。F2 的褶皺開始發育時間略早於 F3，在 Case 1 當中兩者皆於地下轉為箱型褶皺，然而於 Case 2 中儘管兩者的半波長與振幅幾乎相同，F2 形貌並非對稱褶皺，褶皺東翼角度較緩，褶皺西翼至地下三至四公里左右的位置開始變陡，相當於八卦力背斜。兩組模擬成果與力學層修繪剖面皆有一定的相似度，唯錦水背斜與八卦力構造近地表的部分有較大的差異，由於本數值模型並未考慮到地質構造剖面最東側的斷層影響，八卦力構造於地表附近的形貌與數值模型並不一致。

表 9 PFC^{2D} 模擬所選用之參數。

參數項目	符號	參數數值
顆粒密度(kg/m ³)	ρ	2200
顆粒粒徑(m)	γ	0.0596、0.042、0.0296
顆粒正向勁度(N/m)	k_n	2.4×10^7
顆粒之勁度比	k_s/k_n	0.4

表 10 PFC^{2D} 模擬所選用之鍵結參數。

		鍵結勁度		鍵結強度		半徑放大係數 (λ)	硬軟層 強度比 ($\sigma_{\text{強}}/\sigma_{\text{弱}}$)
		正向 (k_{np})	切向 (k_{sp})	正向 (σ_n)	切向 (σ_s)		
Case 1	硬層	1×10^6	1×10^6	2.5×10^5	2.5×10^5	1.0	25
	軟層	1×10^4	1×10^4	1×10^4	1×10^4	0.8	
Case 2	硬層	1×10^6	1×10^6	5.0×10^5	5.0×10^5	1.0	50
	軟層	1×10^4	1×10^4	1×10^4	1×10^4	0.8	

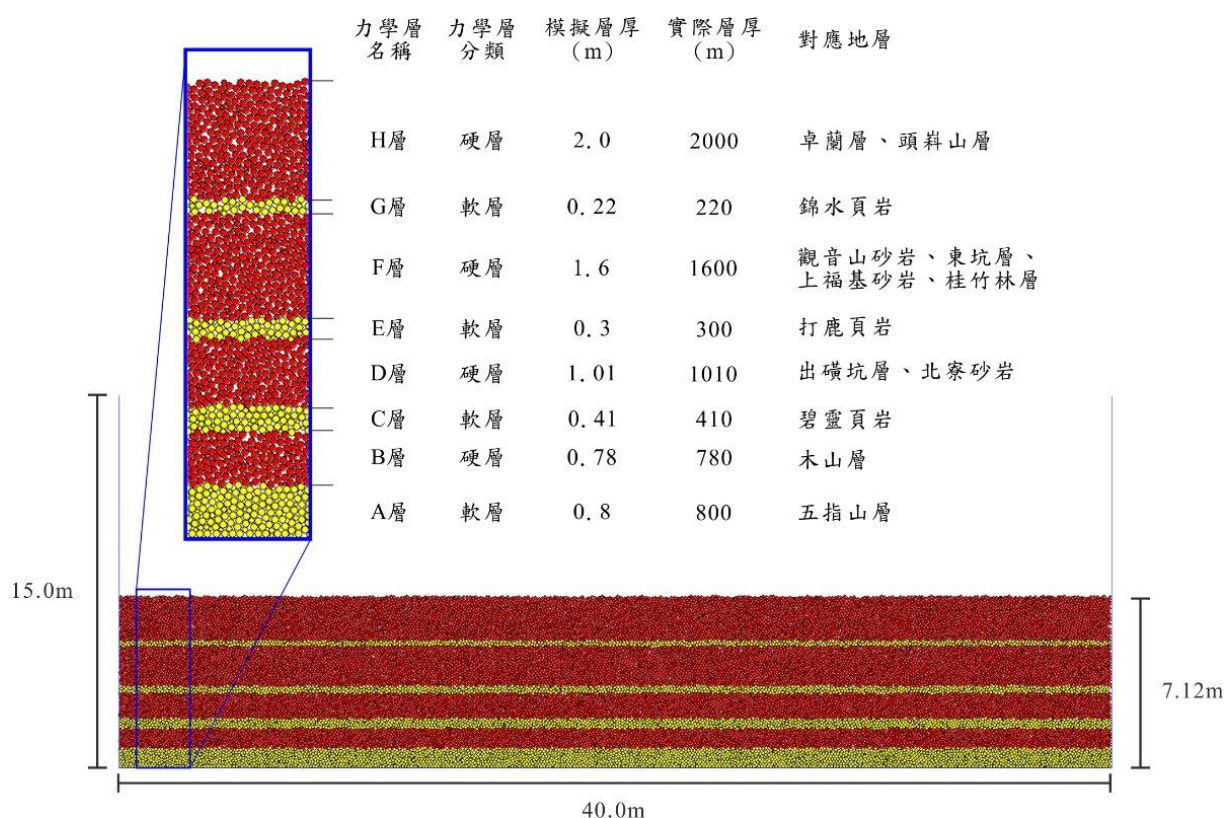


圖 55 本研究採用之 PFC^{2D} 數值模擬模型。黃色表軟層，紅色表硬層，軟硬層分布根據力學分層之結果設定。其中，A 層對應到五指山層；B 層對應到木山層；C 層對應到碧靈頁岩；D 層對應到出磺坑層與北寮砂岩；E 層對應到打鹿頁岩；F 層對應到觀音山砂岩、東坑層、上福基砂岩與桂竹林層；G 層對應到錦水頁岩；H 層對應到卓蘭層與頭嵙山層。

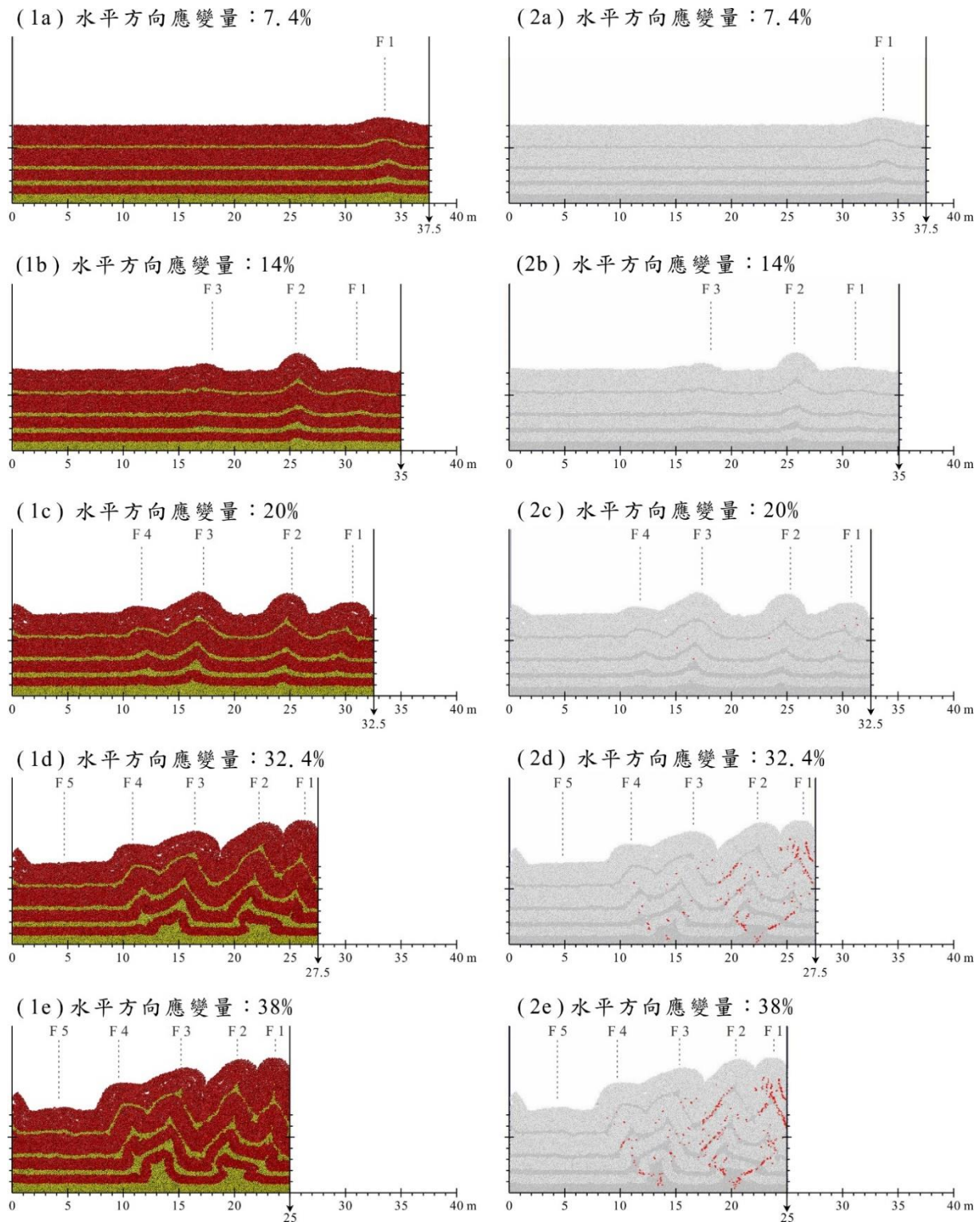


圖 56 數值模擬成果—Case 1。Case 1 模擬過程於不同應變量下之褶皺形貌 (1a~1e) 以及與之相對應之裂隙分布情形 (2a~2e)，裂隙位置以紅色線段標示。

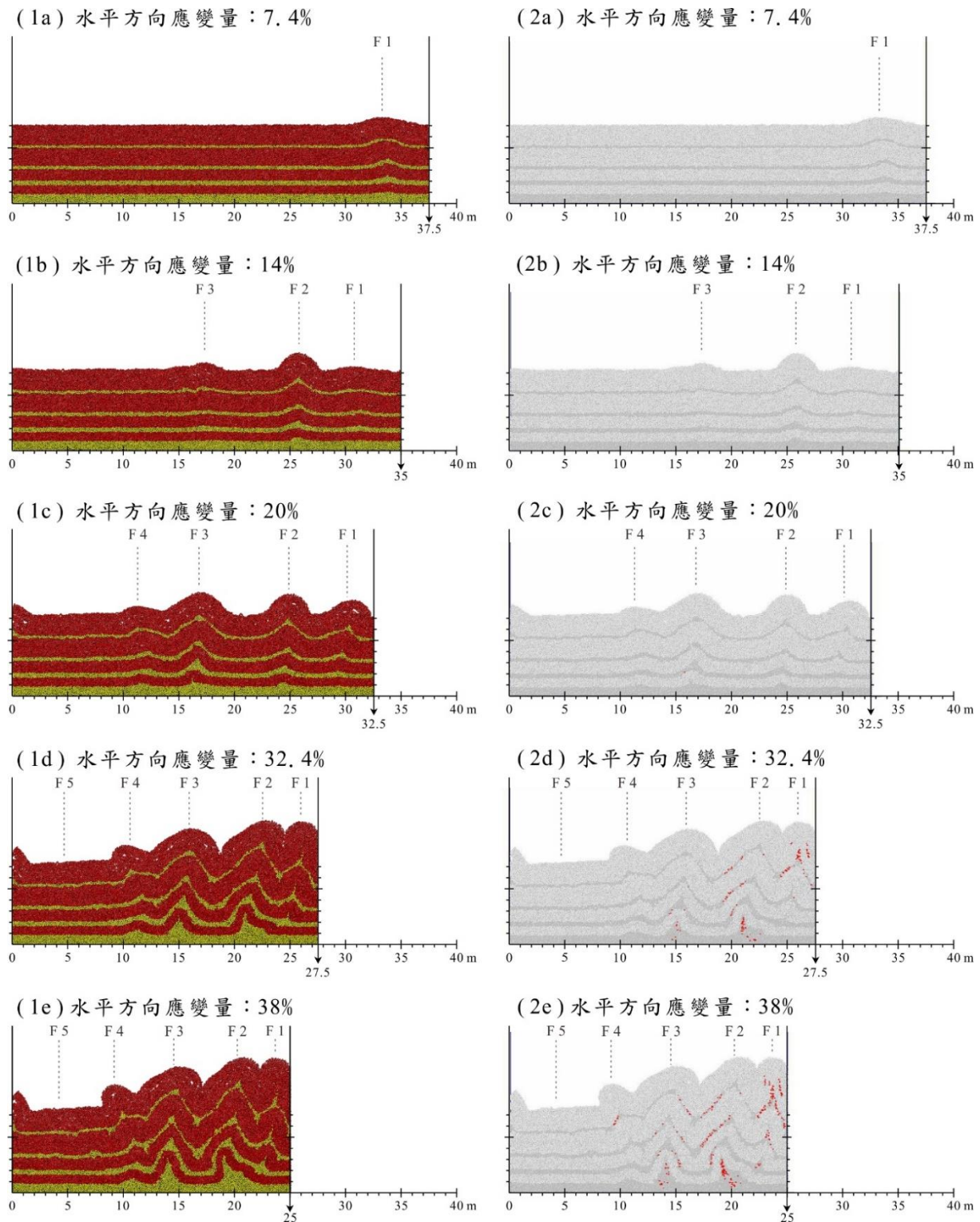


圖 57 數值模擬成果—Case 2。Case 2 模擬過程於不同應變量下之褶皺形貌 (1a~1e) 以及與之相對應之裂隙分布情形 (2a~2e)，裂隙位置以紅色線段標示。

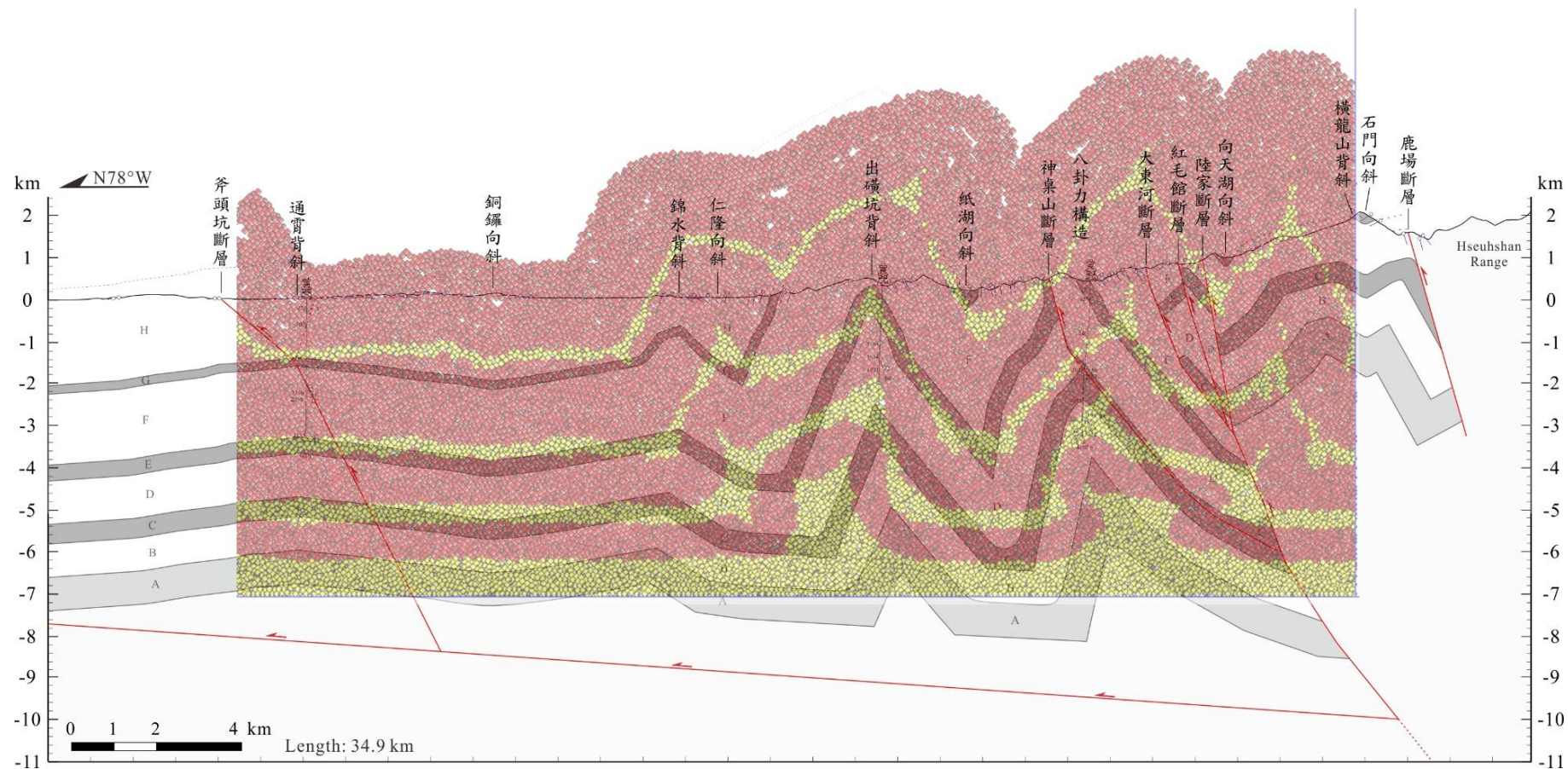


圖 58 數值模擬成果 Case 1 與地質構造剖面力學分層結果重合圖。水平應變量達 38%時，模擬出與力學層修繪剖面中近地表處形貌最為相似之成果。其中，錦水背斜對應到褶皺 F4，為不對稱褶皺；出磺坑背斜對應到褶皺 F3，於地下兩公里以上的部分為一對稱褶皺，和褶皺 F4 匯合後形成箱型褶皺；八卦力構造對應到褶皺 F2。

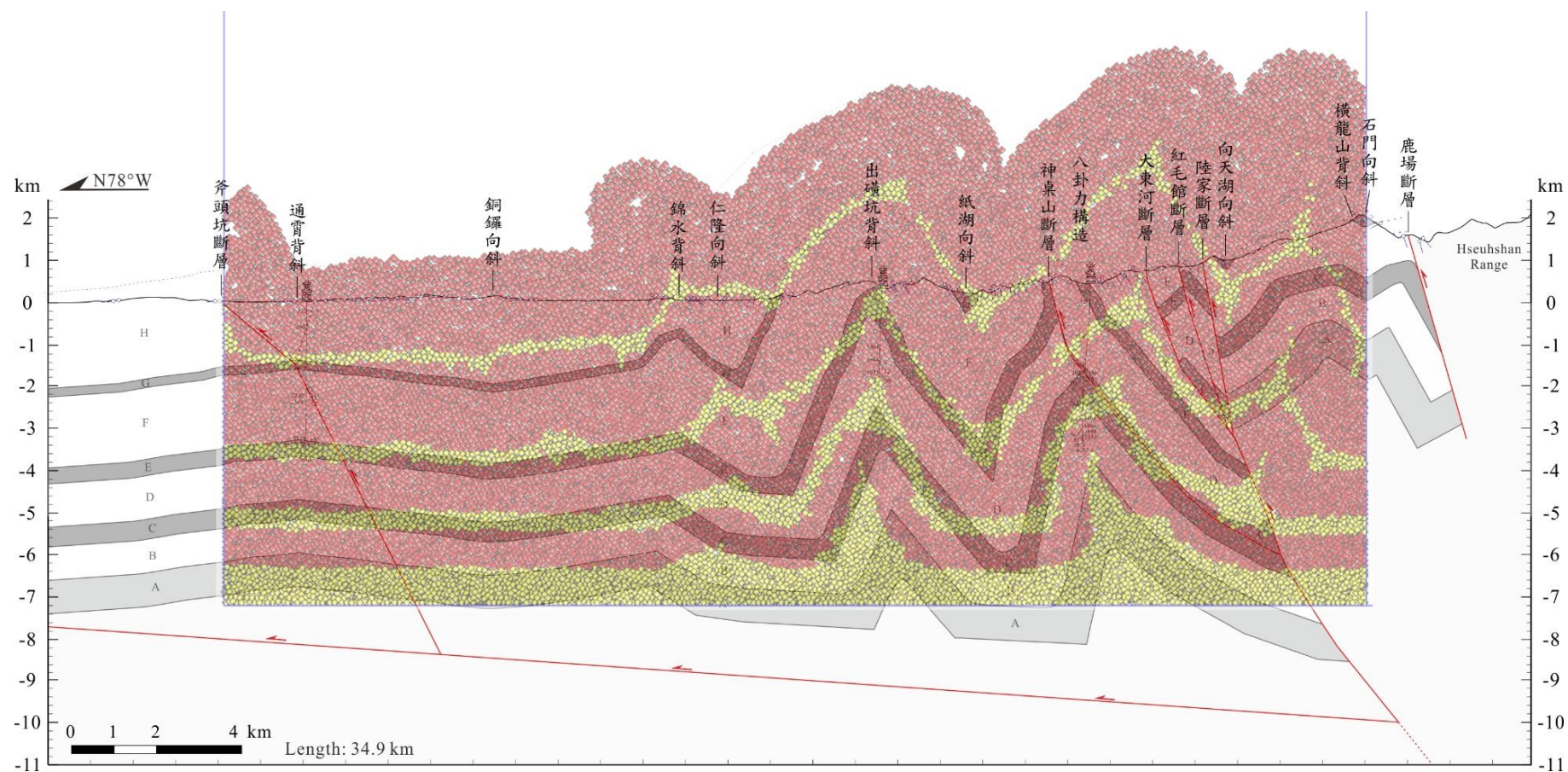


圖 59 數值模擬成果 Case 2 與地質構造剖面力學分層結果重合圖。水平應變量達 38%時，得到與力學層修繪剖面最相似之結果。其中，錦水背斜對應到褶皺 F4，為不對稱褶皺；出磺坑背斜對應到褶皺 F3；八卦力構造對應到褶皺 F2，褶皺 F3 與 F2 為形貌相似之尖頂褶皺。模擬結果顯示該區域構造幾何形貌與繪製之地質構造剖面相似度極高。

5-5-2 裂隙分布與孔隙率分析結果

於 PFC 程式中，顆粒間的鍵結破壞後兩顆粒間的鍵結消失，顆粒恢復為各自獨立的狀態，此現象相當於材料失去凝聚力、發生破壞，因此可將鍵結破壞視為岩石材料內部產生裂隙。孔隙率(porosity, n)的定義為材料內孔隙體積與材料總體積的比率，於二維模擬環境下則為材料內孔隙面積與總面積的比率，故其數值介於 0 到 1 之間，以百分數表示則為 0 到 100%之間。由於 PFC^{2D} 中無法直接計算材料內所有位置之孔隙率數值，程式提供監測圓(measure circle)供使用者圈定一特定圓形範圍，計算該監測圓涵蓋之面積中的孔隙面積作為該範圍內材料之孔隙率。由於本研究採用二維模擬，程式計算之孔隙率並不同於實際三維情況下量測到之孔隙率，需參照現地資料比對。

本研究於模擬過程透過監測鍵結破壞位置來判斷模擬材料破壞產生裂隙之位置，圖 56 2a~2e 與圖 57 2a~2e 中紅線位置即代表發生破壞的鍵結的位置。結果顯示，模擬初期當水平應變量小於 15%時，模型中的岩層拱彎形成除了褶皺 F4(相當於錦水背斜)外的三個主要褶皺構造，期間顆粒鍵結並未破壞，意即褶皺發生初期沒有產生裂隙。當硬層強度為軟層強度的 25 倍時(Case 1)，裂隙發生位置大多位於軟層硬層交界以及硬層當中，其中以褶皺 F1 中的 G 和 H 層、褶皺 F2 軸部的 A 層與褶皺西翼、褶皺 F2 東翼延伸至褶皺 F1 的 A、B 與 C 層、F4 褶皺西翼最為密集(圖 60)。當硬層強度為軟層強度的 50 倍時(Case 2)，不利於裂隙發育，且裂隙發生位置大多位於軟層硬層交界與軟層當中，其中以褶皺 F1 的 G 層、褶皺 F2 軸部的 A 層與褶皺西翼以及 F3 褶皺軸部的 A 層與褶皺東翼最為密集，該位置相當於八卦力構造西翼、出磺坑背斜東翼，軸部的地層相當於五指山層(圖 61)。

為偵測模擬過程中出磺坑與八卦力構造演育過程中孔隙率的變化，本研究於八卦力背斜和出磺坑背斜之軸部與兩翼分別設置了十二個監測圓以

計算各監測圓內部孔隙所占的面積得到孔隙率，監測圓位置如圖 62、圖 63 所示，詳細座標請參見附錄一。監測圓命名方式為：褶皺名稱—力學層名稱，並以下標標示該監測圓位於褶皺的軸部或東西翼再加上編號。位於出磺坑背斜的監測圓以「C」開頭，其中 C-A_{C1}、C-A_{C2}、C-B_C、C-C_C、C-D_C、C-E_C 位於背斜軸部，C-B_{W1}、C-B_{W2}、C-D_W 位於背斜西翼，C-B_{E1}、C-B_{E2}、C-D_E 位於背斜東翼；位於八卦力構造的監測圓以「P」開頭，其中 P-A_{C1}、P-A_{C2}、P-B_C、P-C_C、P-D_C、P-E_C 位於背斜軸部，P-B_{W1}、P-B_{W2}、P-D_W 位於背斜西翼，P-B_{E1}、P-B_{E2}、P-D_E 位於背斜東翼。孔隙率分析結果顯示，整個模擬過程中孔隙率變化曲線可分為三個階段：壓密、褶皺發育、平衡。監測褶皺軸部軟硬層內之孔隙率變化曲線顯示，硬層於岩層受壓密褶曲之情況下，孔隙率受褶皺發育影響並不顯著，與之相對，軟層對於褶皺發育造成之孔隙率變化較為敏感，相鄰褶皺構造發育期間孔隙率會互相影響。透過整個模擬過程中對孔隙率的監測可大致歸納褶皺 F2 於水平應變量達 7.4%時開始發育，褶皺 F3 則於水平應變量達約 12.68%時開始發育，其後褶皺 F1 至 F4 相互影響，於水平應變量達 30%時孔隙率達平衡。

當地層尚未開始變形時孔隙率介於 11 至 16%之間。於模擬初期，水平應變量小於 7.4%時不論是出磺坑背斜還是八卦力構造內的任何位置地層皆受擠壓(圖 64~圖 67)，孔隙率下降，各岩層皆處於壓密狀態下。於水平應變量達 7.4%時八卦力構造開始發育，進入褶皺發育階段，除了 B 層以及位於褶皺軸部的 D 層外其他位置的孔隙率於褶皺發育期間有明顯提升，接著再受壓密作用而下降。然而，相鄰褶皺構造發育之交互影響，導致孔隙率變化曲線開始出現不規則跳動。於水平應變量達 28.7%時八卦力構造西翼的 B 層可能受出磺坑背斜發育影響孔隙率有再次提升的狀況，東翼則不受影響，孔隙率沒有明顯的波動，於水平應變量達 38%時，Case 1 中背斜東翼的 B 層孔隙率介於 0.022 至 0.032 之間，西翼的 B 層孔隙率介於 0.088 至 0.096

之間(圖 65、表 12)；Case 2 東翼則是介於 0.032 至 0.039 之間，西翼介於 0.048 至 0.096 之間(圖 67、表 14)。

相較於八卦力構造，出磺坑背斜開始發育時孔隙率的增加速度較慢，於水平應變量達 12.68%時開始發育，並於水平應變量 12.68%至 26%的期間除了位於 B 層東翼的地層外孔隙率皆有所提升，接著再受壓密作用而下降，背斜西翼的孔隙率於水平應變量達 20%之後呈現穩定狀態，東翼則於水平應變量達 32%後漸漸趨向穩定。於水平應變量達 38%時，Case 1 中背斜東翼的 B 層孔隙率介於 0.047 至 0.049 之間，西翼的 B 層孔隙率介於 0.035 至 0.036 之間(圖 64、表 11)；Case 2 東翼則是介於 0.06 至 0.071 之間，西翼介於 0.043 至 0.07 之間(圖 66、表 13)。

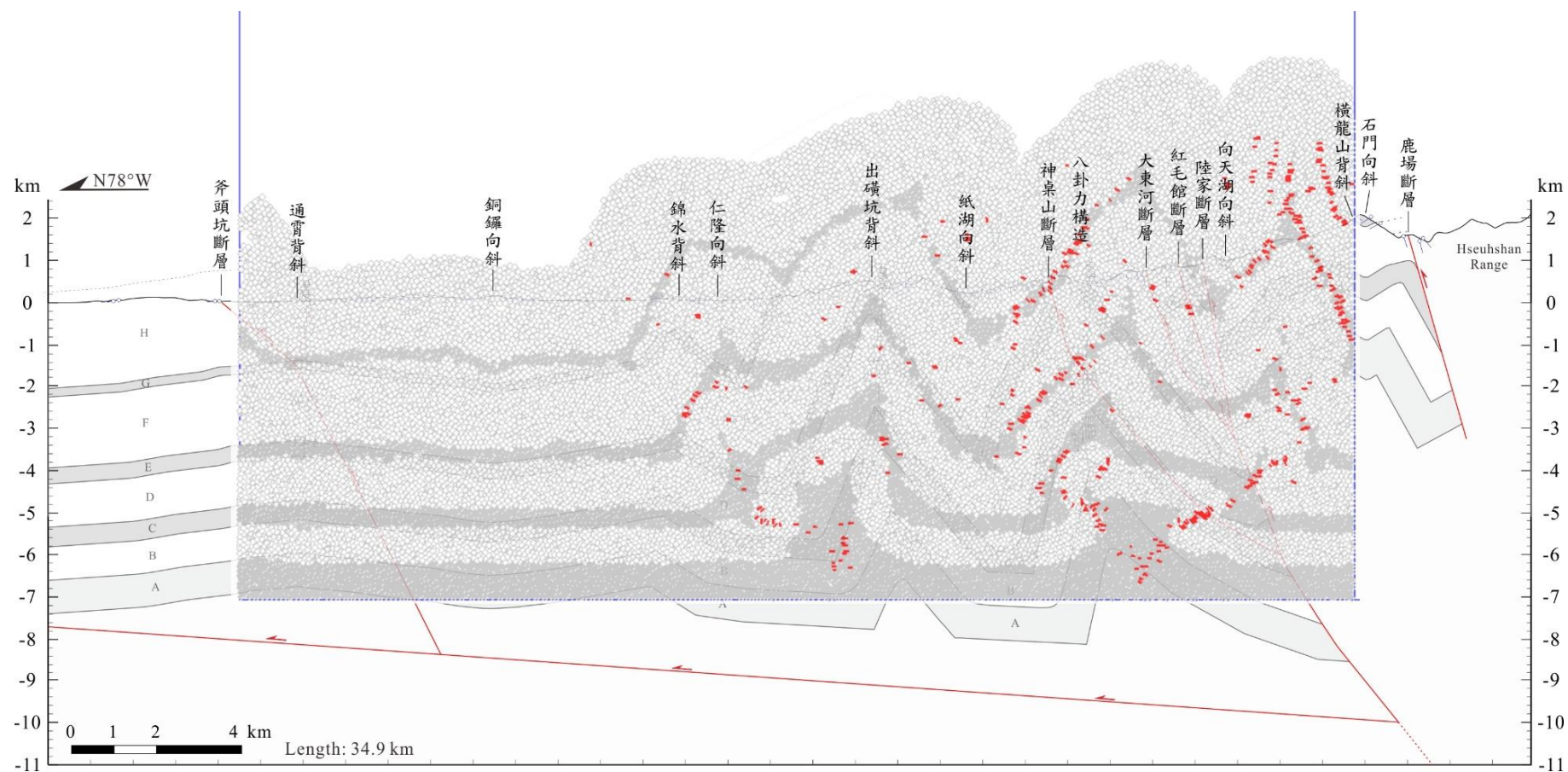


圖 60 Case 1 模擬成果裂隙分佈與剖面力學層修繪結果重合圖。裂隙發生位置大多位於軟層硬層交界以及硬層當中，其中以褶皺 F1 中的 G 和 H 層、褶皺 F2 軸部的 A 層與褶皺西翼、褶皺 F2 東翼延伸至褶皺 F1 的 A、B 與 C 層、F4 褶皺西翼最為密集。

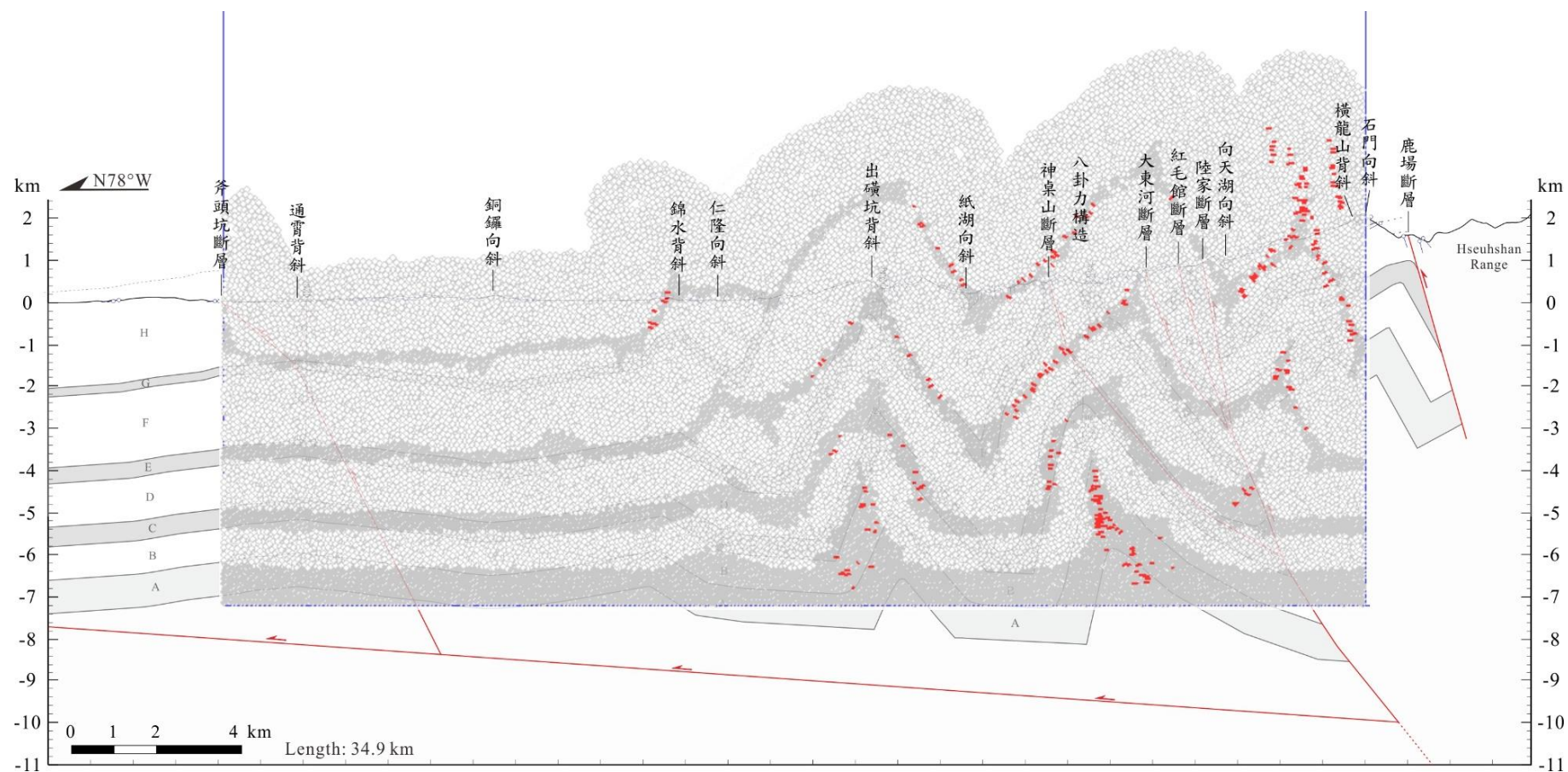


圖 61 Case 2 模擬成果裂隙分佈與剖面力學層修繪結果重合圖。裂隙發生位置大多位於軟層硬層交界與軟層當中，其中以褶皺 F1 的 G 層、褶皺 F2 軸部的 A 層與褶皺西翼以及 F3 褶皺軸部的 A 層與褶皺東翼最為密集，該位置相當於八卦力構造西翼、出磺坑背斜東翼，軸部的地層相當於五指山層。

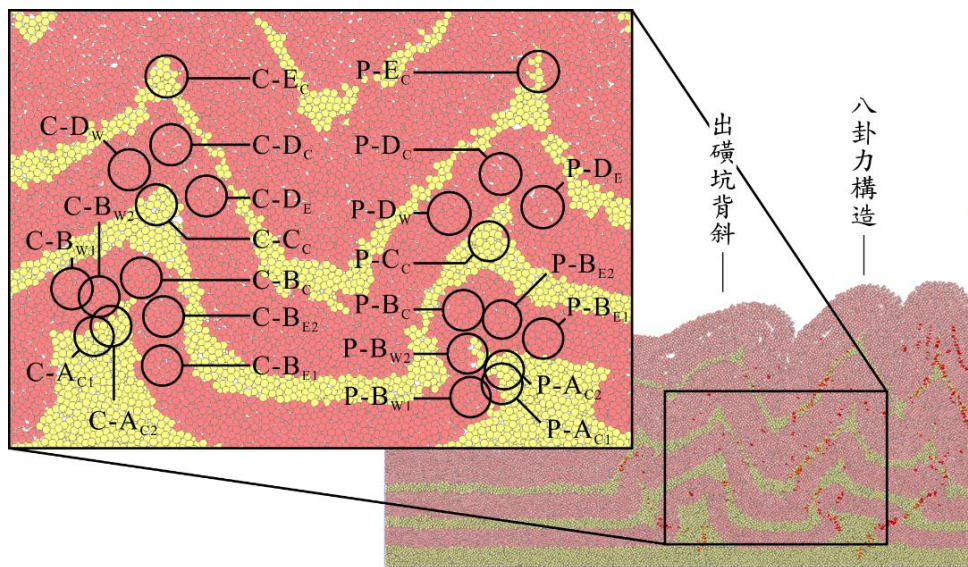


圖 62 Case 1 監測圓位置。監測區域集中於褶皺軸部以及兩翼位置。監測圓命名方式為：褶皺名稱-力學層名稱加位於軸皺的軸部或東西翼再加上編號。

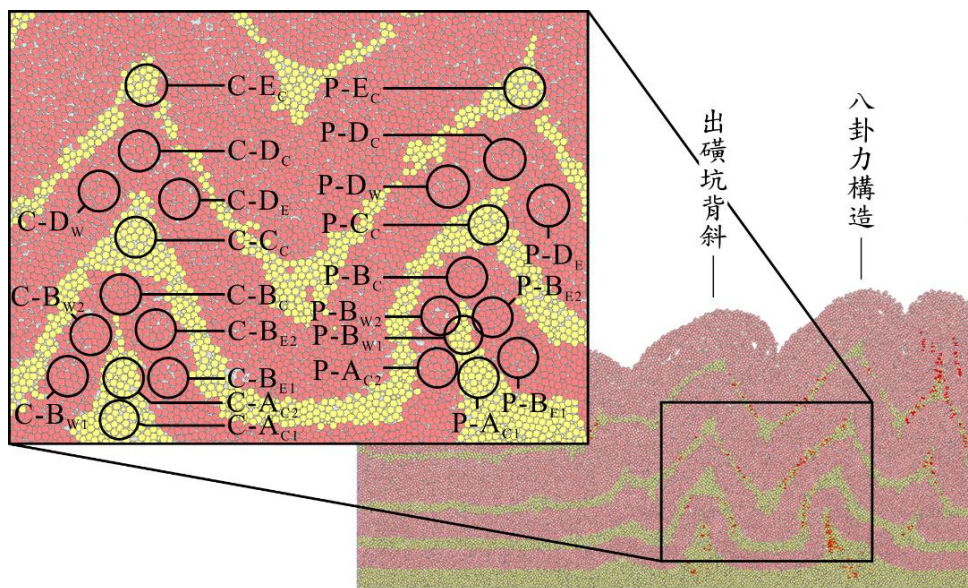
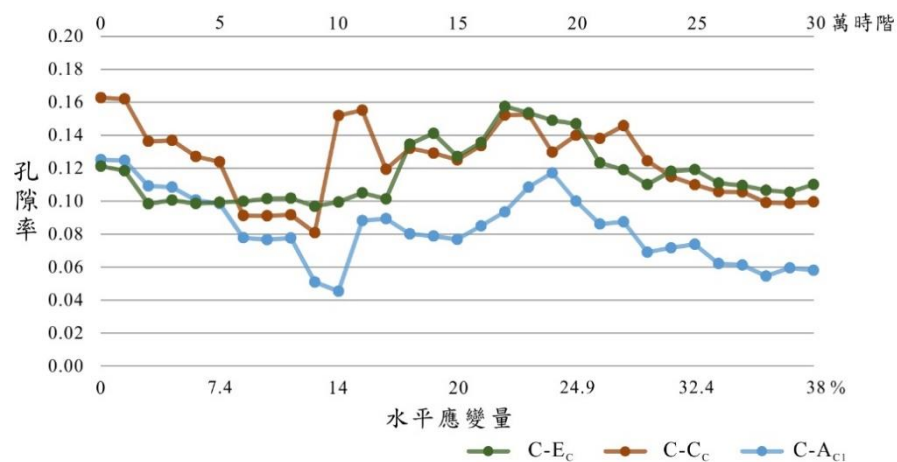
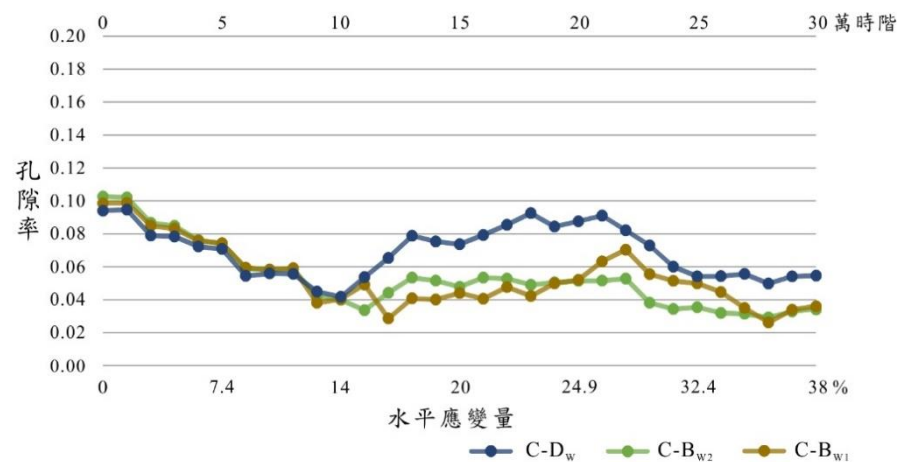


圖 63 Case 2 監測圓位置。監測區域集中於褶皺軸部以及兩翼位置。監測圓命名方式為：褶皺名稱-力學層名稱加位於軸皺的軸部或東西翼再加上編號。

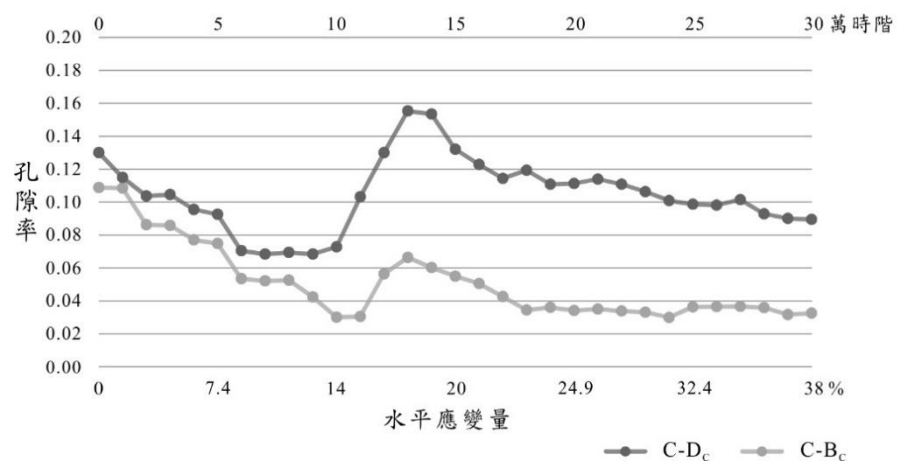
出磺坑背斜軸部孔隙率變化(軟層)



出磺坑背斜西翼孔隙率變化



出磺坑背斜軸部孔隙率變化(硬層)



出磺坑背斜東翼孔隙率變化

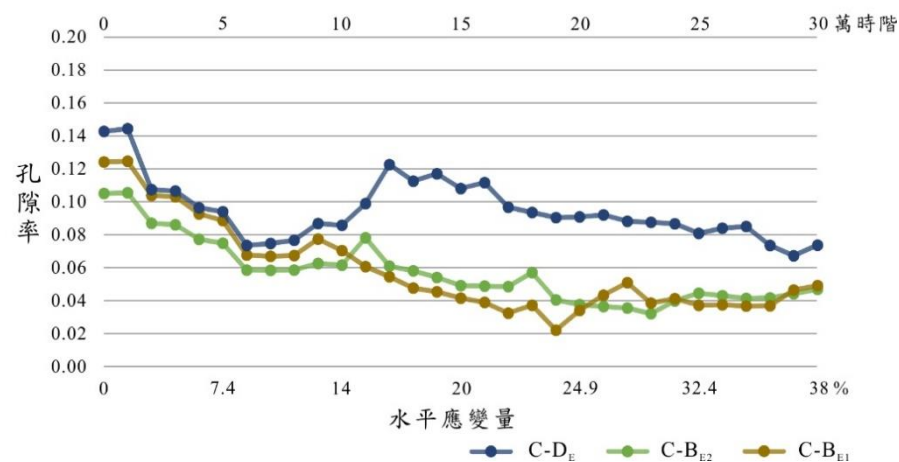


圖 64 Case 1 出磺坑背斜軸部與翼部孔隙率變化。

表 11 Case 1 中出磺坑背斜軸部與翼部於各時階之孔隙率。

時 階 (萬)	水平應 變量 (%)	C- Ac1	C- Ac2	C- Bc	C- Bw2	C- Bw1	C- BE2	C- BE1	C- Cc	C- Dc	C- Dw	C- DE	C- Ec
0	0	0.125	0.112	0.109	0.103	0.099	0.105	0.124	0.163	0.130	0.094	0.143	0.121
1	1.48	0.125	0.112	0.109	0.102	0.099	0.105	0.125	0.162	0.115	0.095	0.144	0.119
2	2.96	0.109	0.096	0.086	0.087	0.085	0.087	0.104	0.136	0.104	0.079	0.107	0.099
3	4.44	0.109	0.095	0.086	0.085	0.083	0.086	0.103	0.137	0.105	0.078	0.106	0.101
4	5.92	0.101	0.087	0.077	0.076	0.076	0.077	0.093	0.127	0.096	0.072	0.096	0.099
5	7.4	0.099	0.085	0.075	0.074	0.074	0.075	0.088	0.124	0.093	0.071	0.094	0.100
6	8.72	0.078	0.065	0.054	0.059	0.060	0.058	0.068	0.091	0.071	0.055	0.073	0.100
7	10.04	0.077	0.064	0.052	0.058	0.058	0.058	0.067	0.091	0.069	0.056	0.075	0.102
8	11.36	0.078	0.065	0.053	0.059	0.059	0.058	0.067	0.092	0.070	0.056	0.076	0.102
9	12.68	0.051	0.045	0.043	0.042	0.038	0.062	0.077	0.081	0.069	0.045	0.087	0.097
10	14	0.046	0.039	0.030	0.040	0.040	0.061	0.070	0.152	0.073	0.042	0.086	0.100
11	15.20	0.088	0.042	0.031	0.034	0.049	0.078	0.060	0.155	0.103	0.054	0.099	0.105
12	16.40	0.090	0.062	0.057	0.044	0.029	0.061	0.054	0.119	0.130	0.065	0.123	0.101
13	17.60	0.080	0.075	0.067	0.054	0.041	0.058	0.047	0.132	0.155	0.079	0.112	0.135
14	18.80	0.079	0.074	0.060	0.052	0.040	0.054	0.045	0.129	0.153	0.075	0.117	0.141
15	20	0.077	0.066	0.055	0.048	0.044	0.049	0.041	0.125	0.132	0.074	0.108	0.127
16	21.24	0.085	0.076	0.051	0.053	0.041	0.049	0.039	0.134	0.123	0.079	0.112	0.136
17	22.48	0.094	0.079	0.043	0.053	0.048	0.048	0.032	0.152	0.114	0.085	0.097	0.158
18	23.72	0.109	0.074	0.035	0.049	0.042	0.057	0.037	0.153	0.119	0.093	0.093	0.154
19	24.96	0.117	0.076	0.036	0.051	0.050	0.040	0.022	0.130	0.111	0.084	0.090	0.149
20	26.20	0.100	0.083	0.035	0.051	0.052	0.037	0.034	0.140	0.111	0.088	0.091	0.147
21	27.44	0.086	0.076	0.035	0.052	0.063	0.036	0.043	0.138	0.114	0.091	0.092	0.123
22	28.68	0.088	0.084	0.034	0.053	0.070	0.035	0.051	0.146	0.111	0.082	0.088	0.119
23	29.92	0.069	0.082	0.033	0.038	0.056	0.032	0.038	0.124	0.106	0.073	0.087	0.110
24	31.16	0.072	0.074	0.030	0.034	0.052	0.040	0.041	0.115	0.101	0.060	0.087	0.118
25	32.4	0.074	0.068	0.037	0.036	0.050	0.044	0.037	0.110	0.099	0.054	0.081	0.119
26	33.52	0.062	0.070	0.037	0.032	0.045	0.043	0.037	0.106	0.098	0.054	0.084	0.111
27	34.64	0.061	0.062	0.037	0.032	0.035	0.041	0.036	0.106	0.102	0.056	0.085	0.110
28	35.76	0.055	0.065	0.036	0.029	0.026	0.041	0.037	0.099	0.093	0.050	0.073	0.107
29	36.88	0.060	0.079	0.032	0.033	0.034	0.044	0.046	0.099	0.090	0.054	0.067	0.106
30	38	0.058	0.074	0.033	0.035	0.036	0.047	0.049	0.100	0.090	0.055	0.074	0.110

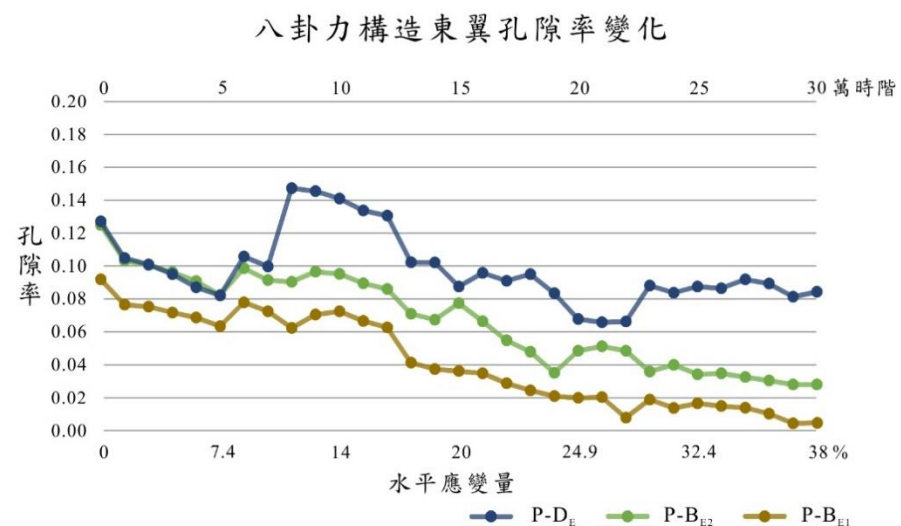
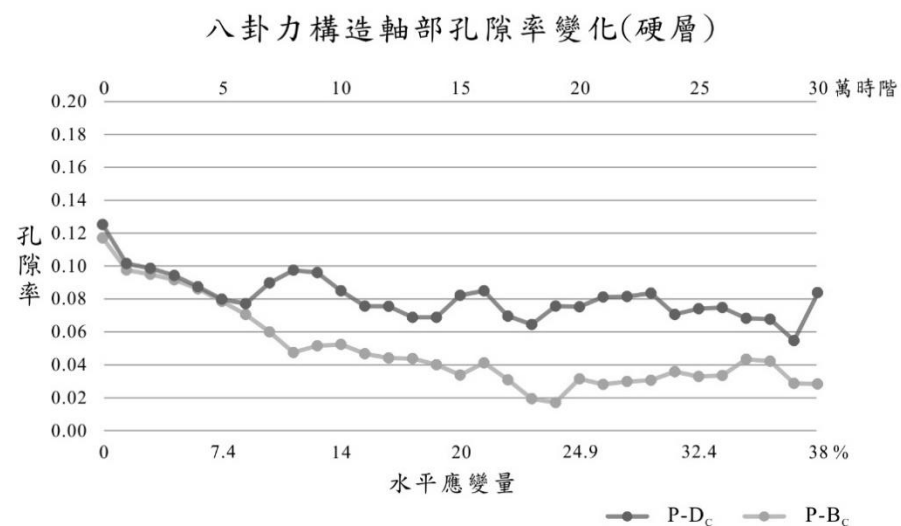
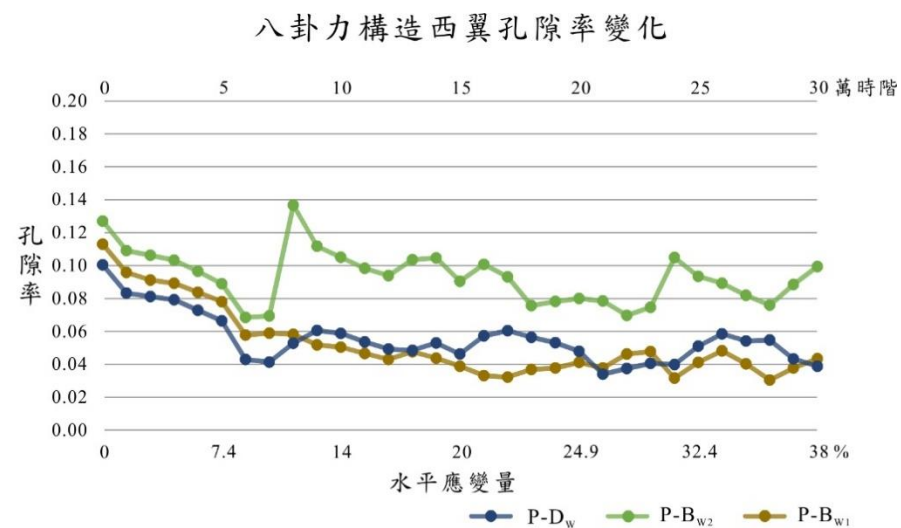
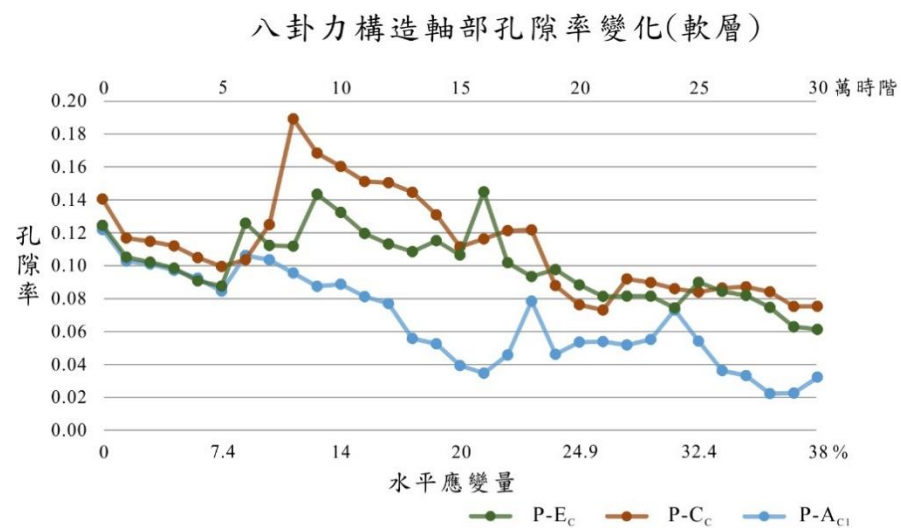
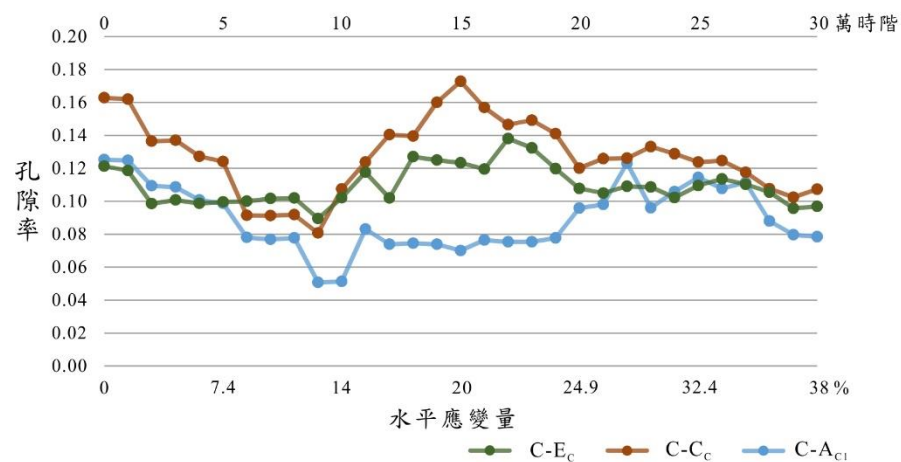


圖 65 Case 1 八卦力構造軸部與翼部孔隙率變化。

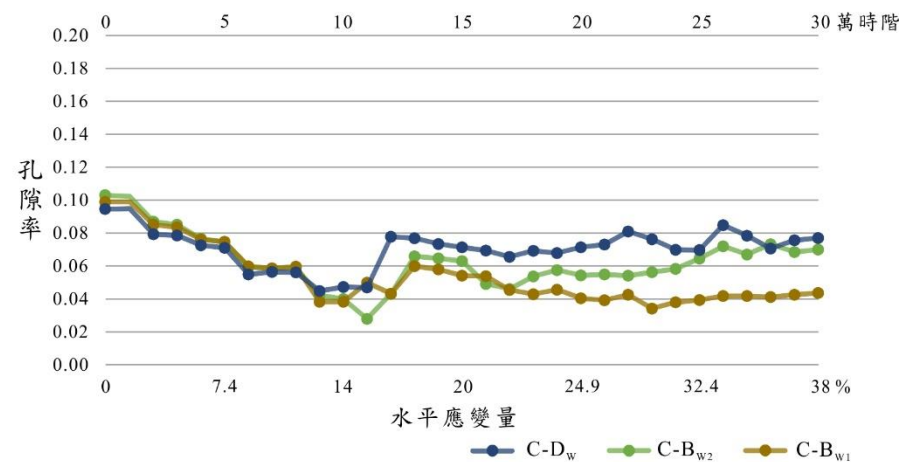
表 12 Case 1 中八卦力構造軸部與翼部於各時階之孔隙率。

時 階 (萬)	水平應 變量 (%)	P- Ac1	P- Ac2	P- Bc	P- Bw2	P- Bw1	P- BE2	P- BE1	P- Cc	P- Dc	P- Dw	P- DE	P- Ec
0	0	0.122	0.107	0.117	0.127	0.113	0.125	0.092	0.141	0.126	0.100	0.127	0.125
1	1.48	0.103	0.092	0.098	0.109	0.096	0.103	0.076	0.117	0.102	0.083	0.105	0.105
2	2.96	0.101	0.090	0.095	0.106	0.091	0.100	0.075	0.115	0.099	0.081	0.101	0.102
3	4.44	0.097	0.088	0.092	0.103	0.089	0.096	0.071	0.112	0.095	0.079	0.095	0.099
4	5.92	0.093	0.083	0.086	0.097	0.084	0.091	0.068	0.105	0.088	0.073	0.087	0.091
5	7.4	0.085	0.076	0.079	0.089	0.078	0.082	0.063	0.100	0.080	0.066	0.082	0.088
6	8.72	0.107	0.088	0.071	0.068	0.058	0.098	0.077	0.104	0.077	0.043	0.106	0.126
7	10.04	0.104	0.089	0.060	0.069	0.059	0.091	0.072	0.125	0.090	0.041	0.099	0.113
8	11.36	0.096	0.098	0.048	0.137	0.058	0.090	0.062	0.190	0.098	0.053	0.147	0.112
9	12.68	0.088	0.084	0.052	0.112	0.052	0.096	0.070	0.169	0.096	0.060	0.146	0.144
10	14	0.089	0.082	0.053	0.105	0.050	0.095	0.072	0.161	0.085	0.059	0.141	0.133
11	15.20	0.081	0.075	0.047	0.098	0.046	0.089	0.066	0.152	0.076	0.053	0.134	0.120
12	16.40	0.077	0.072	0.044	0.094	0.043	0.086	0.062	0.151	0.076	0.049	0.131	0.113
13	17.60	0.056	0.062	0.044	0.104	0.047	0.071	0.041	0.145	0.069	0.048	0.102	0.109
14	18.80	0.053	0.062	0.040	0.105	0.044	0.067	0.037	0.131	0.069	0.053	0.102	0.116
15	20	0.040	0.057	0.034	0.090	0.039	0.077	0.036	0.112	0.082	0.046	0.087	0.107
16	21.24	0.035	0.049	0.041	0.101	0.033	0.066	0.034	0.117	0.085	0.057	0.096	0.145
17	22.48	0.046	0.056	0.031	0.093	0.032	0.054	0.028	0.122	0.070	0.060	0.091	0.102
18	23.72	0.079	0.075	0.020	0.076	0.037	0.047	0.024	0.122	0.065	0.056	0.095	0.094
19	24.96	0.046	0.077	0.017	0.078	0.038	0.034	0.020	0.088	0.076	0.053	0.083	0.098
20	26.20	0.054	0.122	0.032	0.080	0.041	0.048	0.019	0.077	0.075	0.048	0.067	0.089
21	27.44	0.054	0.120	0.028	0.078	0.038	0.051	0.020	0.073	0.081	0.034	0.065	0.082
22	28.68	0.052	0.069	0.030	0.070	0.046	0.048	0.007	0.092	0.082	0.037	0.066	0.082
23	29.92	0.055	0.085	0.031	0.075	0.048	0.035	0.018	0.090	0.084	0.040	0.088	0.082
24	31.16	0.073	0.080	0.036	0.105	0.031	0.039	0.013	0.086	0.071	0.040	0.083	0.075
25	32.4	0.054	0.070	0.033	0.093	0.041	0.034	0.016	0.084	0.074	0.051	0.087	0.090
26	33.52	0.036	0.050	0.034	0.089	0.048	0.034	0.014	0.087	0.075	0.058	0.086	0.085
27	34.64	0.033	0.047	0.044	0.082	0.040	0.032	0.013	0.087	0.069	0.054	0.092	0.082
28	35.76	0.022	0.042	0.042	0.076	0.030	0.030	0.010	0.084	0.068	0.055	0.089	0.075
29	36.88	0.023	0.036	0.029	0.088	0.038	0.027	0.004	0.075	0.055	0.043	0.081	0.063
30	38	0.032	0.041	0.028	0.099	0.043	0.027	0.004	0.076	0.084	0.039	0.084	0.062

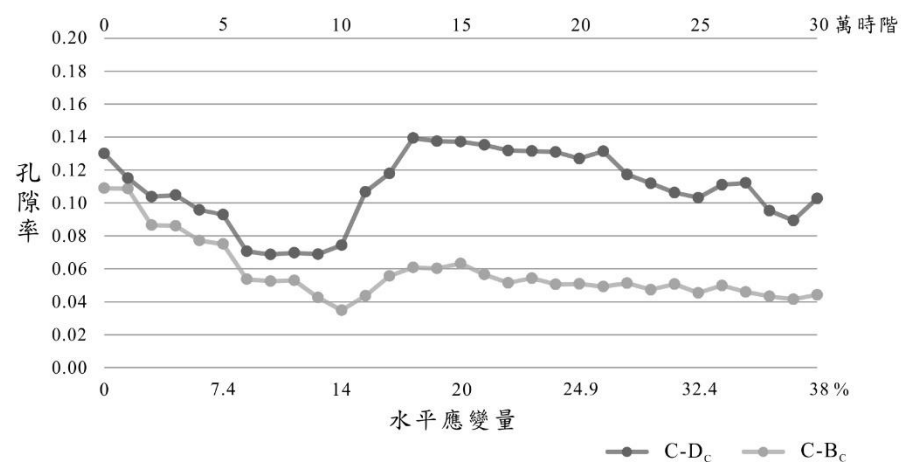
出磺坑背斜軸部孔隙率變化(軟層)



出磺坑背斜西翼孔隙率變化



出磺坑背斜軸部孔隙率變化(硬層)



出磺坑背斜東翼孔隙率變化

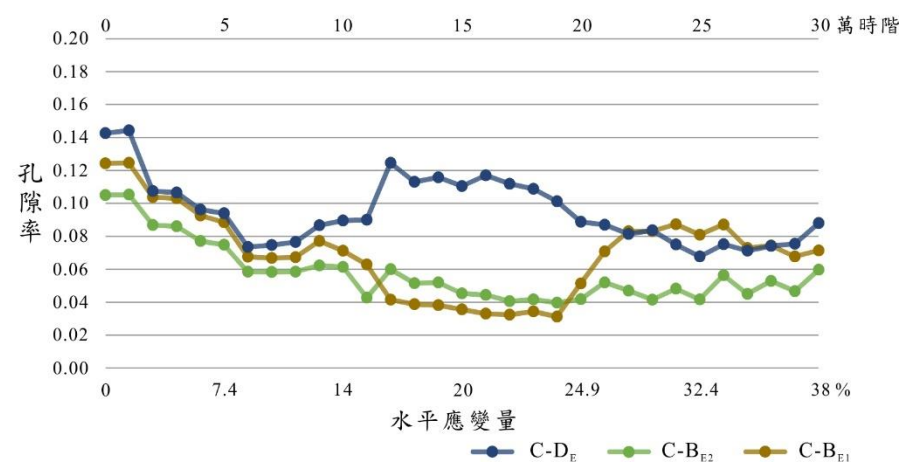


圖 66 Case 2 出磺坑背斜軸部與翼部孔隙率變化。

表 13 Case 2 中出礮坑背斜軸部與翼部於各時階之孔隙率。

時 階 (萬)	水平應 變量 (%)	C- Ac1	C- Ac2	C- Bc	C- Bw2	C- Bw1	C- BE2	C- BE1	C- Cc	C- Dc	C- Dw	C- DE	C- Ec
0	0	0.125	0.112	0.109	0.103	0.099	0.105	0.124	0.163	0.130	0.094	0.143	0.121
1	1.48	0.125	0.112	0.109	0.102	0.099	0.105	0.125	0.162	0.115	0.095	0.144	0.119
2	2.96	0.109	0.096	0.086	0.087	0.085	0.087	0.104	0.136	0.104	0.079	0.107	0.099
3	4.44	0.109	0.095	0.086	0.085	0.083	0.086	0.103	0.137	0.105	0.078	0.106	0.101
4	5.92	0.101	0.087	0.077	0.076	0.076	0.077	0.093	0.127	0.096	0.072	0.096	0.099
5	7.4	0.099	0.085	0.075	0.074	0.074	0.075	0.088	0.124	0.093	0.071	0.094	0.100
6	8.72	0.078	0.065	0.054	0.059	0.060	0.058	0.068	0.091	0.071	0.055	0.073	0.100
7	10.04	0.077	0.064	0.052	0.058	0.058	0.058	0.067	0.091	0.069	0.056	0.075	0.102
8	11.36	0.078	0.065	0.053	0.059	0.059	0.058	0.067	0.092	0.070	0.056	0.076	0.102
9	12.68	0.051	0.045	0.042	0.042	0.038	0.062	0.077	0.081	0.069	0.044	0.087	0.090
10	14	0.051	0.038	0.035	0.040	0.038	0.061	0.071	0.107	0.074	0.047	0.090	0.102
11	15.20	0.083	0.043	0.044	0.028	0.049	0.043	0.063	0.124	0.107	0.047	0.090	0.118
12	16.40	0.074	0.061	0.056	0.043	0.043	0.060	0.041	0.140	0.118	0.077	0.125	0.102
13	17.60	0.074	0.067	0.061	0.066	0.060	0.051	0.039	0.140	0.139	0.077	0.113	0.127
14	18.80	0.074	0.064	0.060	0.064	0.058	0.052	0.038	0.160	0.137	0.073	0.116	0.125
15	20	0.070	0.054	0.063	0.063	0.054	0.045	0.035	0.173	0.137	0.071	0.110	0.123
16	21.24	0.076	0.088	0.056	0.049	0.053	0.044	0.033	0.157	0.135	0.069	0.117	0.119
17	22.48	0.075	0.109	0.051	0.046	0.045	0.040	0.032	0.146	0.132	0.065	0.112	0.138
18	23.72	0.075	0.108	0.054	0.053	0.042	0.042	0.034	0.149	0.131	0.069	0.109	0.132
19	24.96	0.078	0.094	0.050	0.057	0.045	0.039	0.031	0.141	0.131	0.068	0.101	0.120
20	26.20	0.096	0.083	0.051	0.054	0.040	0.042	0.051	0.120	0.127	0.071	0.089	0.108
21	27.44	0.098	0.102	0.049	0.055	0.039	0.052	0.071	0.126	0.131	0.073	0.087	0.105
22	28.68	0.123	0.104	0.051	0.054	0.042	0.047	0.083	0.126	0.117	0.081	0.081	0.109
23	29.92	0.096	0.117	0.047	0.056	0.034	0.041	0.083	0.133	0.112	0.076	0.084	0.109
24	31.16	0.106	0.102	0.051	0.058	0.038	0.048	0.087	0.129	0.106	0.070	0.075	0.102
25	32.4	0.114	0.110	0.045	0.064	0.039	0.041	0.081	0.124	0.103	0.069	0.068	0.110
26	33.52	0.108	0.083	0.050	0.072	0.041	0.056	0.087	0.125	0.111	0.085	0.075	0.113
27	34.64	0.111	0.086	0.046	0.067	0.041	0.045	0.073	0.118	0.112	0.078	0.071	0.110
28	35.76	0.088	0.083	0.043	0.073	0.041	0.053	0.074	0.108	0.095	0.070	0.074	0.106
29	36.88	0.080	0.073	0.042	0.068	0.042	0.046	0.068	0.102	0.089	0.075	0.075	0.096
30	38	0.078	0.079	0.044	0.070	0.043	0.060	0.071	0.107	0.103	0.077	0.088	0.097

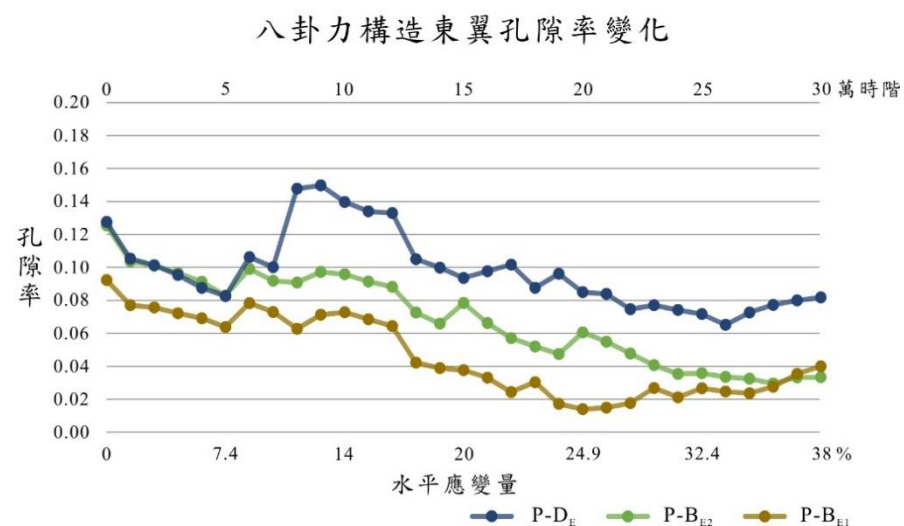
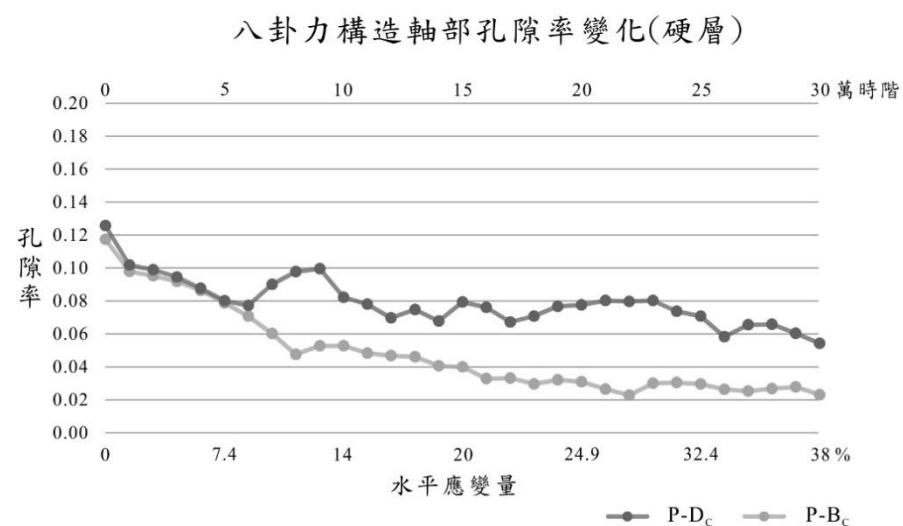
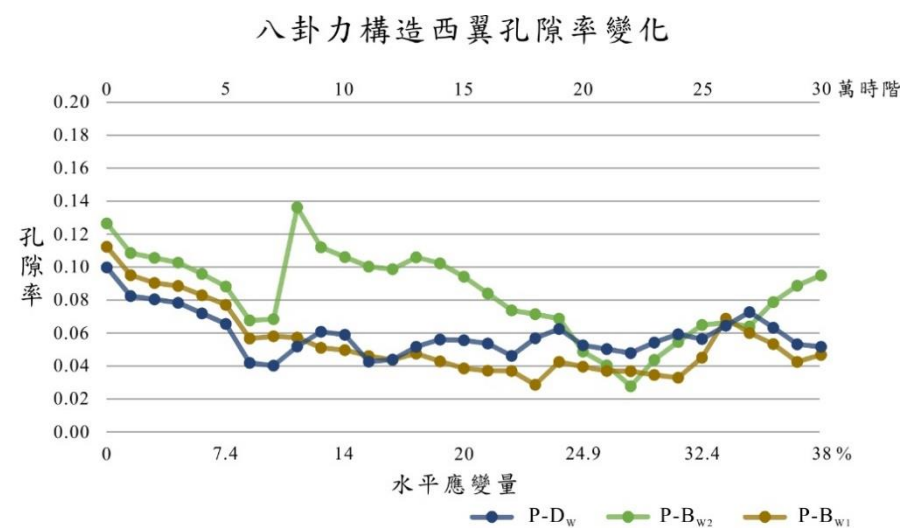
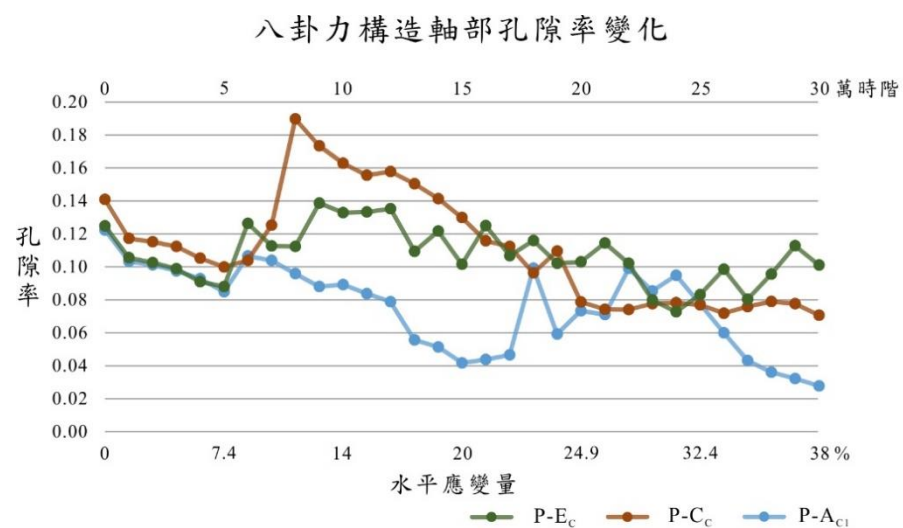


圖 67 Case 2 八卦力構造軸部與翼部孔隙率變化。

表 14 Case 2 中八卦力構造軸部與翼部於各時階之孔隙率。

時 階 (萬)	水平應 變量 (%)	P- Ac1	P- Ac2	P- Bc	P- Bw2	P- Bw1	P- BE2	P- BE1	P- Cc	P- Dc	P- Dw	P- DE	P- Ec
0	0	0.122	0.107	0.117	0.127	0.113	0.125	0.092	0.141	0.126	0.100	0.127	0.125
1	1.48	0.103	0.092	0.098	0.109	0.096	0.103	0.076	0.117	0.102	0.083	0.105	0.105
2	2.96	0.101	0.090	0.095	0.106	0.091	0.100	0.075	0.115	0.099	0.081	0.101	0.102
3	4.44	0.097	0.088	0.092	0.103	0.089	0.096	0.071	0.112	0.095	0.079	0.095	0.099
4	5.92	0.093	0.083	0.086	0.097	0.084	0.091	0.068	0.105	0.088	0.073	0.087	0.091
5	7.4	0.085	0.076	0.079	0.089	0.078	0.082	0.063	0.100	0.080	0.066	0.082	0.088
6	8.72	0.107	0.088	0.071	0.068	0.058	0.098	0.077	0.104	0.077	0.043	0.106	0.126
7	10.04	0.104	0.089	0.060	0.069	0.059	0.091	0.072	0.125	0.090	0.041	0.099	0.113
8	11.36	0.096	0.098	0.048	0.137	0.058	0.090	0.062	0.190	0.098	0.053	0.147	0.112
9	12.68	0.088	0.084	0.053	0.113	0.052	0.097	0.070	0.173	0.100	0.062	0.149	0.138
10	14	0.089	0.083	0.053	0.107	0.051	0.095	0.072	0.163	0.082	0.060	0.139	0.133
11	15.20	0.084	0.077	0.048	0.101	0.047	0.091	0.068	0.155	0.078	0.044	0.134	0.133
12	16.40	0.079	0.074	0.047	0.099	0.045	0.088	0.064	0.158	0.070	0.045	0.133	0.135
13	17.60	0.056	0.063	0.046	0.107	0.048	0.072	0.041	0.150	0.075	0.053	0.104	0.109
14	18.80	0.051	0.066	0.041	0.103	0.044	0.065	0.038	0.141	0.068	0.057	0.099	0.122
15	20	0.042	0.058	0.040	0.095	0.039	0.078	0.037	0.130	0.079	0.056	0.093	0.102
16	21.24	0.044	0.081	0.033	0.085	0.038	0.065	0.032	0.116	0.076	0.055	0.097	0.125
17	22.48	0.047	0.084	0.033	0.075	0.038	0.056	0.023	0.112	0.067	0.047	0.101	0.107
18	23.72	0.099	0.101	0.030	0.072	0.030	0.051	0.029	0.096	0.071	0.058	0.087	0.116
19	24.96	0.059	0.074	0.032	0.069	0.043	0.047	0.016	0.109	0.077	0.063	0.095	0.102
20	26.20	0.073	0.095	0.031	0.050	0.041	0.060	0.013	0.079	0.078	0.053	0.084	0.103
21	27.44	0.071	0.064	0.027	0.041	0.038	0.054	0.014	0.074	0.080	0.051	0.083	0.114
22	28.68	0.099	0.049	0.023	0.029	0.038	0.047	0.017	0.074	0.080	0.049	0.074	0.102
23	29.92	0.085	0.046	0.030	0.045	0.036	0.040	0.026	0.078	0.080	0.055	0.076	0.080
24	31.16	0.095	0.044	0.031	0.055	0.034	0.034	0.020	0.078	0.074	0.060	0.073	0.073
25	32.4	0.077	0.036	0.030	0.066	0.046	0.035	0.026	0.077	0.071	0.057	0.071	0.083
26	33.52	0.060	0.032	0.026	0.067	0.069	0.033	0.024	0.072	0.058	0.065	0.064	0.099
27	34.64	0.043	0.027	0.025	0.065	0.061	0.032	0.023	0.076	0.065	0.073	0.072	0.080
28	35.76	0.036	0.029	0.027	0.080	0.054	0.029	0.027	0.079	0.066	0.064	0.077	0.096
29	36.88	0.032	0.042	0.028	0.089	0.043	0.032	0.034	0.078	0.060	0.054	0.079	0.113
30	38	0.028	0.042	0.023	0.096	0.048	0.032	0.039	0.071	0.054	0.053	0.081	0.101

六、討論

6-1 地質構造剖面與模擬成果比較

6-1-1 褶皺形貌

力學層修繪剖面與數值模擬成果於褶皺形貌上的比較如圖 68、圖 69 與表 15 所示。為將褶皺形貌以數化的方式呈現，本研究分別量測力學層修繪剖面與數值模擬成果中錦水背斜、出磺坑背斜以及八卦力構造之半波長以及於 B 層與 D 層之振幅進行比較。力學層修繪剖面中錦水背斜為一不對稱背斜，半波長約 3 公里，西翼至地下 1.5 公里處轉緩，並於地下三公里處轉為寬展褶皺，至地底波長漸增。對應到數值模擬成果中的褶皺 F4。Case 1 中，褶皺 F4 東翼岩層傾角小於力學層修繪剖面中的錦水背斜，考慮到褶皺半波長與振幅，判斷褶皺 F4 於地下 3 公里的範圍內形貌與力學層修繪剖面中之褶皺結果一致，惟深於地下 3 公里處與其東部的褶皺 F3 匯合，形成類似箱型褶皺的形貌；Case 2 中，褶皺 F4 東翼亦緩於力學層修繪剖面中的錦水背斜，且其半波長略大於剖面，約為 4 公里，西翼至地下轉緩深度亦略淺，約為地下 1 公里處，但於地下 3 公里以下與力學層修繪剖面相同，波長增加、振幅降低，轉為寬展褶皺。

力學層修繪剖面中出磺坑背斜為一對稱褶皺，且為兩翼平直、陡峭的尖頂褶皺，半波長約為 5.3 公里，振幅約為 3.6 至 5.0 公里，褶皺深部角度轉緩。對應到數值模擬成果中的褶皺 F3。數值模擬成果 Case 2 中的褶皺 F3 之褶皺形貌、半波長以及振幅皆與剖面相近，半波長約為 5.2 公里，振幅約為 3.4 至 4.6 公里。Case 1 中，褶皺 F3 西翼岩層傾角小於力學層修繪剖面中的出磺坑背斜，半波長與振幅皆略小於剖面，地下 2 公里以上的部分為一對稱褶皺，並於地下 2 公里其西部的褶皺 F4 匯合，形成類似箱型褶皺的形貌。

最後，力學層修繪剖面中八卦力構造為一對稱褶皺，軸部受神桌山斷層截切，半波長約為 6.5 公里，振幅約為 4.8 至 5.4 公里，西翼地表地層倒轉，往地下深部有轉緩的趨勢。對應到數值模擬成果中的褶皺 F2。於數值模擬中皆無法模擬出切過其軸部之層間斷層神桌山斷層，且西翼岩層亦無到轉。除此之外，Case 2 之褶皺 F2 雖為一非對稱褶皺，其半波長以及振幅皆與與剖面相近，半波長約為 6.1 公里，振幅約為 3.8 至 4.8 公里。Case 1 中，褶皺 F2 於地下 3 公里以上的部分為對稱褶皺，半波長與振幅皆小於力學層修繪剖面，並於地下 4 公里轉為箱型褶皺。整體而言，Case 1 的褶皺 F4 地下 3 公里的範圍內、褶皺 F4 地下 2 公里的範圍內之褶皺形貌與力學層修繪剖面接近。Case 2 的褶皺 F4 地下 3 公里以下、褶皺 F3 與 F2 微體形貌皆與力學層修繪剖面一致。

表 15 地質構造剖面與模擬成果之褶皺形貌比較。

		錦水背斜	出磺坑背斜	八卦力構造
力學層 修繪剖面		不對稱背斜，西翼至地下 1.5 公里處轉緩，並於地下 3 公里處轉為寬展褶皺。	對稱褶皺，且為兩翼平直、陡峭的尖頂褶皺，褶皺深部角度轉緩。	對稱褶皺，軸部被神桌山斷層截切，西翼地表地層倒轉，往地下深部有轉緩的趨勢。
數值 模擬	Case 1	不對稱背斜，西翼至地下 1.5 公里處轉緩，並於地下 3 公里處與其東部的褶皺 F3 匯合。	兩翼平直，於地下 2 公里以上的部分為一對稱褶皺，以下則與其西部的褶皺 F4 匯合。	於地下 3 公里以上的部分為對稱褶皺，於地下 4 公里轉為箱型褶皺。
	Case 2	不對稱背斜，西翼至地下 1 公里處轉緩，並於地下 3 公里處轉為寬展褶皺。	兩翼平直且緊密為一對稱褶皺。	非對稱褶皺，東翼角度較緩，西翼至地下 3 至 4 公里左右的位置開始變陡。

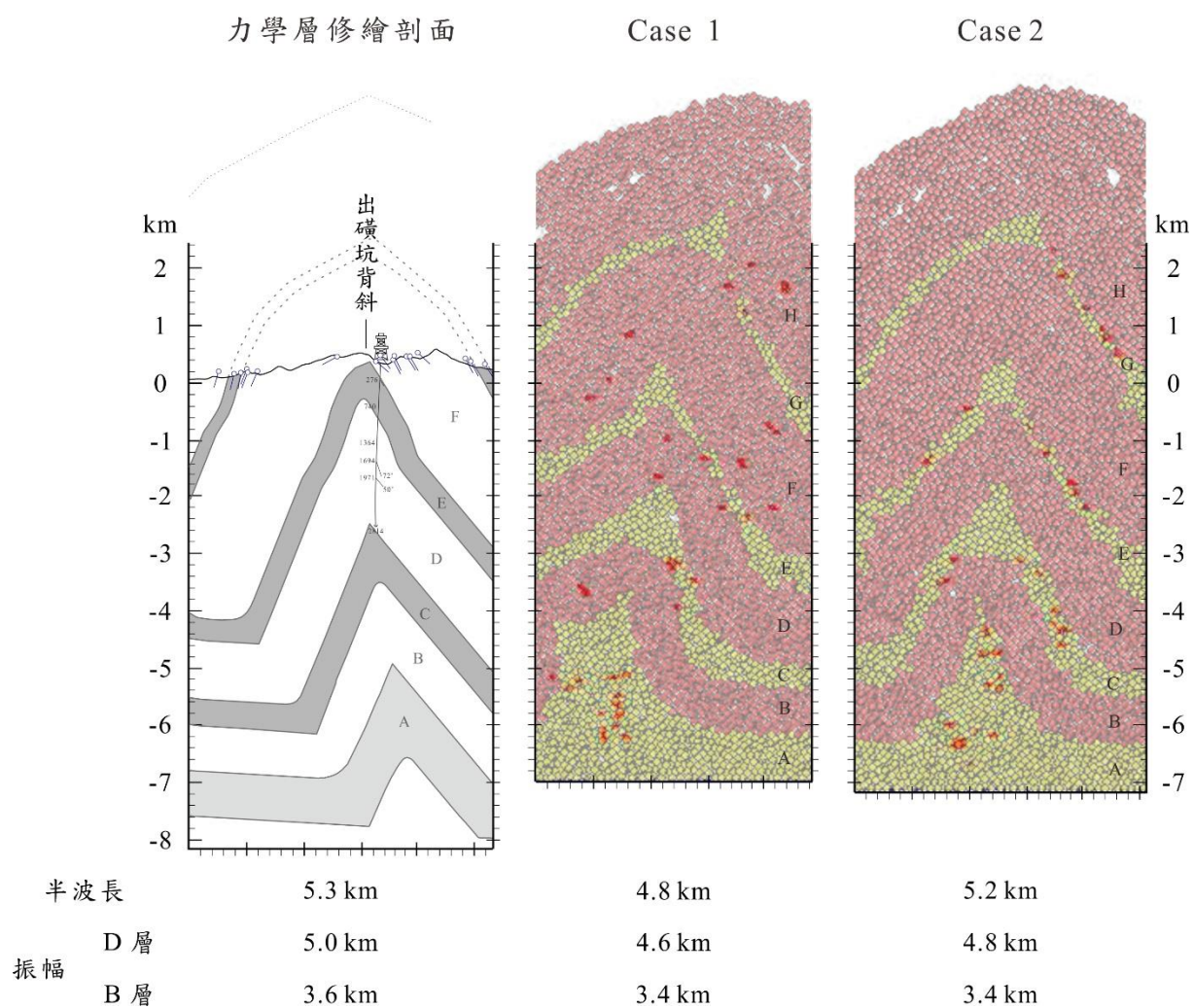


圖 68 比較出磺坑背斜半波長與振幅修於繪剖面與模擬成果之差異。截取力學層修繪剖面以及數值模擬成果中出磺坑背斜之部分計算其半波長與振幅，結果顯示 Case 2 在形貌上與力學層修繪剖面較為相近。

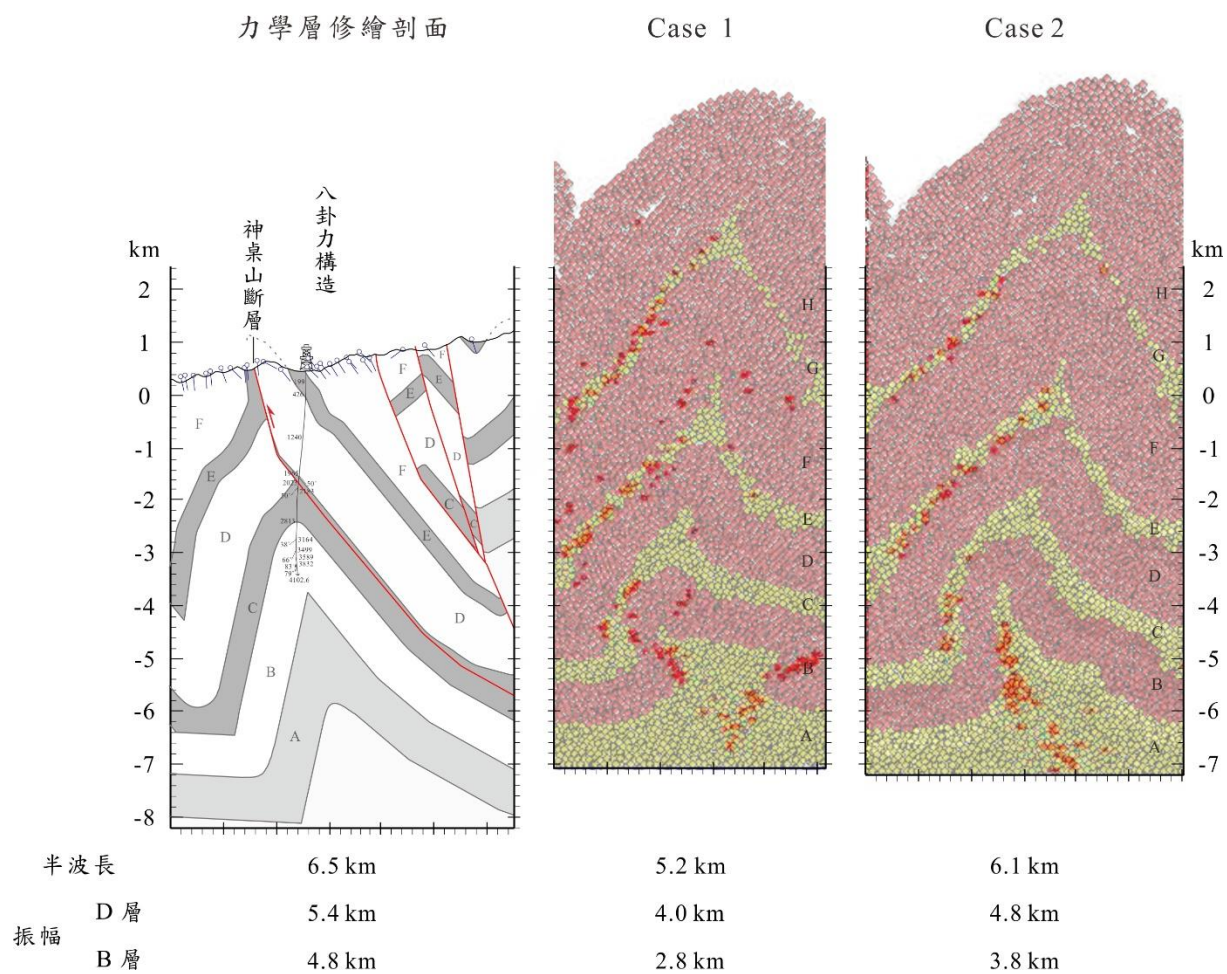


圖 69 比較八卦力構造半波長與振幅修於繪剖面與模擬成果之差異。截取力學層修繪剖面以及數值模擬成果中八卦力構造之部分計算其半波長與振幅，結果顯示 Case 2 在形貌上與力學層修繪剖面較為相近。

6-1-2 裂隙分布位置

本研究比較二不同鍵結強度下，於水平方向應變 38% 下之裂隙分布情形，結果如圖 68 與圖 69 所示。首先觀察 Case 1 結果，顯示錦水背斜深部有較密集的裂隙分布於軟層與硬層中，於 A、B、C 層中可見其連續性；出磺坑背斜區域則顯示裂隙分布於兩翼，其中東翼裂隙分布數量較多但分布分散；八卦力構造區域，裂隙集中發育於背斜西翼之軟層與硬層交界處，此外東側深部亦發育裂隙，此區裂隙不僅發育於軟硬層交界處，也發育於軟層與硬層之中。Case 2 之裂隙分布較 Case 1 疏，錦水背斜僅於 G 層與 H 層間發育裂隙；出磺坑背斜區域，裂隙發育於兩翼軟層與硬層之間，相較 Case 1 軟層與硬層皆有裂隙發育之狀態有所不同；八卦力背斜區域，裂隙發育於軟層與硬層之間，僅東側深部較無裂隙發育，與 Case 1 結果顯示大部分裂隙發育於軟硬層交界區域。

6-2 各力學層之孔隙率與現地採樣之岩心孔隙率比較

本研究採用中油公司提供的現地採樣之岩心經過岩心試驗與 NMR 試驗得到之孔隙率(表 16)與本研究之數值模擬成果進行比較(表 17)。針對各鑽井進行岩心試驗與 NMR 試驗結果如表 16 所示，試驗對象以出磺坑背斜和八卦力構造軸部之木山層和五指山層為主，試驗所採用的鑽井位置如圖 70 所示。

結果顯示於出磺坑背斜軸部地下 2218.1~3743.7 公尺處的木山層以岩心試驗得到之孔隙率為 5.9~11.7%，其中以 C-145 的孔隙率最低且該處的木山層為非產層，並以 C-114 中的木山層孔隙率最高；於出磺坑背斜軸部地下 2330.4~2744.6 公尺處的木山層以 NMR 試驗得到之孔隙率為 8.8~9.9%，各鑽井內的孔隙率數值相近。對比到數值模擬 Case 1 與 Case 2 中 B 層相當於實際地下 3200~4600 公尺處所設置的監測圓 C-B_C、C-B_{W1}、C-B_{W2}、C-B_{E1}、C-B_{E2} 的模擬成果顯示，出磺坑背斜的木山層於 Case 1 的模擬過程中並沒有明顯的裂隙發育，孔隙率為 3.3~4.9%，大幅低於實際量測值，而 Case 2 中由於褶皺兩翼軟硬層交界處有零星裂隙發育，使 Case 2 中得到的孔隙率高於 Case 1 孔隙率，監測圓計算得到的孔隙率為 4.3~7.1%，與 C-145 的孔隙率較為相近。於出磺坑背斜軸部地下 3603.5~3693.95 公尺處的五指山層以岩心試驗得到之孔隙率為 8.9~10.7%，其中於 C-145 中發現在採樣深度僅相距 2 公尺的距離間孔隙率由 8.9%增加至 10.7%。對比到數值模擬 Case 1 與 Case 2 中 A 層相當於實際地下 4000~6000 公尺處所設置的監測圓 C-A_{C1}、C-A_{C2} 的模擬成果顯示，出磺坑背斜的五指山層於 Case 1 與 Case 2 的模擬過程中皆有明顯發生於背斜軸部的裂隙，Case 1 的孔隙率為 5.8~7.4%，Case 2 的孔隙率為 7.8~7.9%，皆小於實際量測值。

八卦力地區並未蒐集到可與數值模擬成果比較之岩心孔隙率資料。根據數值模擬成果，Case 1 與 Case 2 中 B 層相當於實際地下 2800~3800 公尺

處所設置的監測圓 $P-B_C$ 、 $P-B_{W1}$ 、 $P-B_{W2}$ 、 $P-B_{E1}$ 、 $P-B_{E2}$ 顯示，八卦力構造的木山層於 Case 1 中裂隙集中於背斜西翼，並於 A 層底部的背斜軸部產生了兩條方向相異的破裂帶，孔隙率因位置的不同有很大的差異，約為 0.4~9.9%，並以東翼計算出的孔隙率最低，西翼計算出的孔隙率最高。

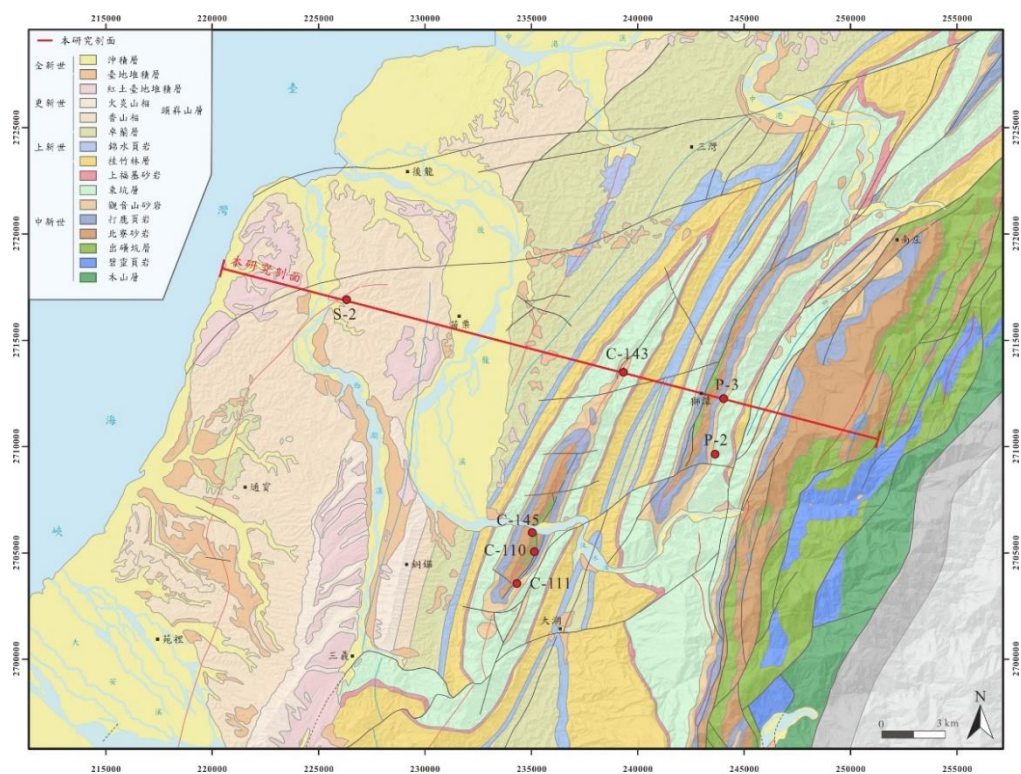


圖 70 中油岩心試驗與 NMR 試驗使用之鑽井位置。(改自中油公司十萬分之一地質圖苗栗圖幅，1994)

表 16 中油岩心試驗與 NMR 試驗之孔隙率及滲透率結果。

實驗	樣本編號	井名	採樣深度(m)	地層	產層	孔隙率(%)	滲透率(mD)
岩心試驗	1	C-110	2635.3	木山層	非產層	10.5	0.059
	2	C-110	3635.6	木山層	非產層	10	0.048
	3	C-111	3692.1	五指山層	11 th	10.1	0.028
	4	C-111	3693.95	五指山層	11 th	10.5	0.139
	5	C-114	2530.1	木山層	7 th	11.7	0.168
	6	C-145	2218.1	木山層	非產層	5.9	0.006
	7	C-145	2227.7	木山層	非產層	6.5	0.004
	8	C-145	3603.5	五指山層	12 th	8.9	0.023
	9	C-145	3604.6	五指山層	12 th	9.3	0.255
	10	C-145	3605.1	五指山層	12 th	10.7	0.327
	11	P-2	3743.7	木山層	非產層	7.6	0.077
NMR 試驗	1	C-124	2744.0	木山層	7 th	9.5	N.D
	2	C-124	2744.2	木山層	7 th	9.9	N.D
	3	C-124	2744.6	木山層	7 th	9.7	N.D
	6	C-114	2330.4	木山層	7 th	8.8	N.D
	7	P-2	4348.4	木山層	10 th	6.8	N.D

資料來源：台灣中油公司。

表 17 現地採樣試驗量測之孔隙率與數值模擬成果比較表。

		現地採樣結果			數值模擬成果						
構造 名稱	井名	採樣深度(m)	地層	孔隙率 (%)	力學層	Case 1 孔隙率(%)			Case 2 孔隙率(%)		
						西翼	軸部	東翼	西翼	軸部	東翼
出 礦 坑 背 斜	C-110	2635.3	木山層	10.5	B 層	3.5~3.6	3.3	4.7~4.9	4.3~7.0	4.4	6.0~7.1
	C-110	3635.6	木山層	10							
	C-114	2530.1	木山層	11.7							
	C-145	2218.1	木山層	5.9							
	C-145	2227.7	木山層	6.5							
	C-124	2744	木山層	9.5							
	C-124	2744.2	木山層	9.9							
	C-124	2744.6	木山層	9.7							
	C-114	2330.4	木山層	8.8							
	P-2	3743.7	木山層	7.6							
	C-111	3692.1	五指山層	10.1	A 層	--	5.8~7.4	--	--	7.8~7.9	--
	C-111	3693.95	五指山層	10.5							
	C-145	3603.5	五指山層	8.9							
	C-145	3604.6	五指山層	9.3							
	C-145	3605.1	五指山層	10.7							
八卦力 構造	--	--	--	--	B 層	4.3~9.9	2.8	0.4~2.7	4.8~9.6	2.3	3.2~3.9

6-3 以 PFC^{2D} 模擬地質構造剖面之限制

本研究之數值模擬乃針對出磺坑背斜與八卦力構造所建立之二維模型，模擬成果以出磺坑背斜及八卦力構造之形貌是否符合地質構造剖面中的形貌為優先考量，故出磺坑背斜以西以八卦力構造以東的構造形貌以及斷層發育並無法兼顧。

二維模擬中孔隙率以面積計算，其計算結果將小於三維情況下由顆粒複雜之堆積形成的孔隙體積，但目前尚無二維與三維孔隙率之換算或修正公式得以參考。地質構造剖面中，八卦力構造軸部以及八卦力構造以東的一系列斷層構造可能為由更複雜的機制引致，由於本研究並未將該機制列入考慮，八卦力構造東翼實際之孔隙率可能較本研究成果高。檢核地質圖與野調查資料皆顯示出磺坑背斜以東無頭嵴山層與卓蘭層出露，上述兩地層之沉積年代可能晚於出磺坑背斜發育時間，欲模擬此情境需將模擬切割為多個階段並對各構造活動、沉積時序都有精確的掌控，並做出假設才有可能增加模擬準確性，然而在本研究其間建立的數值模型上，難以考慮如此複雜情況。

七、結論與建議

本研究成果分為野外地質調查、地質構造剖面以及數值模擬分析三部分，野外結果顯示後龍溪沿岸出露的北寮砂岩、桂竹林層及東坑層之部分岩段，以厚層砂岩及砂頁岩互層為主；各地層中較軟弱之岩段受到植被、亦或為防波堤或邊坡工程覆蓋。汶水溪沿岸自小南勢斷層以東岩層開始有較劇烈變化，且於日出溫泉度假飯店正門口發現鹿場斷層之露頭，斷層兩側岩性明顯不同，且斷層以西的岩層接近垂直，以東的岩層則為低傾角，顯示鹿場斷層兩側岩層之斷距頗大。由於該區出露岩層已有較劇烈的褶曲，因此若以急折法繪製此區的地質剖面時，應作適切的調整。此外，原訂剖面繪製範圍東至羅山斷層，但於其西邊的神桌山斷層，該斷層以東之岩層已受嚴重褶曲，因此認為急折法，不適用於深部構造形態的繪製。

根據彙整之前人研究成果，可將出磺坑背斜與八卦力構造的演化模式歸納為四類：(1) Namson (1981)所提出，出磺坑背斜為組成背斜之岩層沿下伏的基底滑脫面，因上舉褶皺作用形成背斜構造，而八卦力構造則由前五指山層的部分岩段之疊置作用使五指山層以上的岩層被撐起；(2) Hung and Wiltschko (1993)認為區域內岩層的變形與構造的生成，是上伏岩層沿基底滑脫面往西滑動推進的同時受到拱彎作用，而造成褶曲所致，造成兩翼皆為高角度之對稱或近乎對稱的褶皺；(3) 鍾開增(1996)認為類似上述的滑脫面上方的岩層，因下方基盤出現階梯形斷層(亦即斷坪—斷坡—斷坪形貌的斷層)，岩層因沿斷坡滑動造成拱升之故，形成上伏於斷坡的背斜構造，其認為出磺坑背斜與八卦力構造的 formed 皆緣自此因。(4) 陳采蔚(2016)則認為出磺坑背斜與八卦力構造，為下伏的逆衝斷塊楔形體推擠上覆的五指山層及更年輕的岩層演育而成。

苗栗西部麓山帶之向斜與背斜構造特徵與拱彎作用產生的褶皺特徵相符，本研究認為研究區域之岩層變形與構造發育，主要應與基底滑脫面之上

岩層受到側向的拱彎褶皺作用所造成。此外，加上力學分層之概念，將五指山層到頭嵛山層的岩層組合，打破岩性地層的分層概念，依照岩層的力學特性，重新劃分為 8 層，並參照 Ramsay and Huber (1987) 提出之六種模型中的 Model E 做為編修地質構造剖面的根據，對地質構造剖面進行修繪，並將其結果做為數值模擬力學分析的參考依據。

本研究以基底滑脫面加上側向擠壓造成的拱彎作用，進行之地質構造模擬結果顯示，硬層強度為軟層強度之 25 倍與 50 倍且水平應變量達 38% 時，可成功模擬出八卦力構造與出磺坑背斜之構造形貌，褶皺形貌由硬層主控，其軸部軟硬岩層交界處與力學層修繪結果一致。並可由褶皺形貌及褶皺發生的位置發現本模型中褶皺 F4 為不對稱背斜半波長約 3 公里，西翼至地下 1.5 公里處轉緩，並於地下 3 公里處發生波形的變化，變為寬展褶皺或與相鄰褶皺構造匯合形成箱型褶皺，相當於地質構造剖面中錦水背斜；而兩組模擬成果中 Fold 3 的半波長約 4.8~5.2 公里，振幅約 3.4~4.8 公里，兩翼平直、緊密為一對稱褶皺，可比對地質構造剖面中出磺坑背斜；褶皺 F2 發育時間略早於 F3 (出磺坑背斜)，於淺層中兩者的半波長與振幅幾乎相同，但其形貌並非對稱褶皺，褶皺東翼角度較緩，相當於八卦力背斜。Case 1 的褶皺 F4 地下 3 公里的範圍內、褶皺 F4 地下 2 公里的範圍內之褶皺形貌與力學層修繪剖面接近。Case 2 的褶皺 F4 地下 3 公里以下、褶皺 F3 與 F2 微體形貌皆與力學層修繪剖面一致。整體而言模擬成果與地質構造剖面修會後之成果相似度極高。根據不同硬軟層強度比進行模擬結果顯示，當硬層強度為軟層強度之 25 倍時，裂隙集中發育於錦水背斜西翼與八卦力構造西翼，於出磺坑背斜兩翼亦有零星裂隙發育，出磺坑背斜東翼孔隙率高於西翼，東翼木山層孔隙率達 4.7~4.9%；八卦力構造區域，八卦力構造西翼孔隙率高於東翼，西翼木山層孔隙率達 4.3~9.9%。當硬層強度為軟層強度之 50 倍時，裂隙發育於八卦力構造之西翼、軸部 A 層與出磺坑背斜背斜兩翼，且東翼

裂隙較為密集，出磺坑背斜東翼孔隙率高於西翼，東翼木山層孔隙率達 6.0~7.1%；八卦力構造區域，八卦力構造西翼孔隙率高於東翼，西翼木山層孔隙率達 4.8~9.6%。將數值模擬中孔隙率分析結果與現地採樣之岩心孔隙率進行比較顯示二維模擬計算出之孔隙率皆小於現地採樣之岩心孔隙率。

現階段本研究以水平滑脫面上 1:1000 之數值模擬模型成功的模擬出苗栗地區出磺坑背斜與八卦力構造形貌，並進行初步的裂隙分佈與孔隙率分析。由於時間上的限制本研究採用之數值模擬模型對現地狀況做了大幅簡化，尚無法於相同尺度下採用傾斜滑脫面之模型模擬出出磺坑背斜與八卦力構造之形貌，亦尚未考慮地層沉積時序、岩層內之流體以及造成八卦力構造以東的斷層之機制。未來研究建議優先考慮傾斜滑脫面與尺度效應對顆粒與鍵結參數進行模擬，並審視本研究區構造演育的過程中褶皺與斷層構造的關係來調整模型內提供外力之機制，建立更接近現地狀況之模擬模型。

參考文獻

- 台灣油礦探勘總處，「出磺坑構造地質剖面勘查指南」，地質，**7(2)**，83-90 頁，1986。
- 何信昌，五萬分之一台灣地質圖說明書，苗栗圖福，經濟部中央地質調查所，新北市中和區，1994。
- 何春蓀，「台灣西部麓山帶的地質」，地工技術，**20**，80-98 頁，1987。
- 何春蓀，台灣地質概論：台灣地質圖說明書，經濟部中央地質調查所，台北縣中和市，1986。
- 吳柏裕，「出磺坑淺部油氣層天然裂隙方位之初步研究」，石油季刊，**22(3)**，1986。
- 吳偉智，范振暉，陳大麟，吳健一，王勝雄，葉榮富，吳柏裕和彭日昇，「出磺坑淺層油氣再開發評估」，探採研究彙報，**21**，461-476 頁，1998。
- 李錦發，五萬分之一台灣地質圖說明書，東勢圖福，經濟部中央地質調查所，新北市中和區，2000。
- 周佳儀，「出磺坑背斜構造發育之三角剪切模型」，國立中央大學，碩士論文，2008。
- 林慶偉和楊耿明，「台灣西北部內麓山帶橫移構造特性分析之砂盒模型研究」，國科會報告，2009。
- 洪奕星，「台灣西北部麓山帶中新統至下部上新統岩相和生痕化石相分析及沉積環境」，國立台灣大學，博士論文，1988。
- 孫其誠和王光謙，顆粒物質力學導論，科學出版社，2009。
- 張憲卿，五萬分之一台灣地質圖說明書，白沙屯圖福，經濟部中央地質調查所，新北市中和區，1990。
- 陳文山，台灣地質概論，中華民國地質學會，台北市，2016。

陳采蔚，「苗栗地區錦水背斜下構造演育與裂縫發育」，國立台灣大學，碩士論文，2016。

陳振華，「由晚期新生代沈積物之岩象學與構造地層學研究探討台灣中西部褶皺逆衝帶之演化」，國立台灣大學，博士論文，1993。

游能悌和鄧屬予，「出磺坑剖面中新統的岩相與沈積環境」，地質，**15(1)**，127-151 頁，1995。

黃旭燦和陳耀輝，「台灣的油氣田」，科學發展，**534**，38-43 頁，2017。

黃富文和周青，「台灣西北部打鹿砂岩儲集問題」，探採研究彙報，**8**，25-40 頁，1985。

黃鑑水，五萬分之一台灣地質圖說明書，台北圖福，經濟部中央地質調查所，新北市中和區，2005。

塗明寬和陳文政，五萬分之一台灣地質圖說明書，竹東圖幅，經濟部中央地質調查所，新北市中和區，1991。

楊宜蓉和胡植慶，「顆粒體離散元素法模擬西部麓山帶細道邦構造裂縫儲油潛能之評估」，台灣鑛業，**65(3)**，13-18 頁，2013。

慧美麗，「台灣中部晚期中新世至更新世二氧化碳 儲集層及蓋層之地層暨礦物組成研究」，國立中央大學，碩士論文，2018。

潘國樑，工程地質通論，台灣五南圖書出版股份有限公司，台北市，2007。

鄧屬予，台灣地質系列第 9 號：台灣的沉積岩，經濟部中央地質調查所，臺北縣中和市，1997。

鍾開增，「苗栗地區麓山帶之地質構造」，國立中央大學，碩士論文，1996。

魏聲焜，「苗栗地區上新世至中新世之構造地層學之研究」，國立成功大學，碩士論文，1994。

羅仕榮，「區域性儲集岩資料分析」，探採研究彙報，**25**，131-148 頁，2003。

嚴珮綺，「利用鑽井資料推估台灣新竹至台中地區的地下」，國立中央大學，碩士論文，2012。

Carena, S., Suppe, J. and Kao, H., "Active detachment of Taiwan illuminated by small earthquakes and its control of first-order topography", Geology, **Vol. 30(10)**, pp. 935-938, 2002.

Chapple, W. M., "Mechanics of thin-skinned fold-and-thrust belts", Geological Society of America Bulletin, **Vol. 89(8)**, pp. 1189-1198, 1978.

Chou, J. T. and Yeh, M. K., "Comparison of the suggested" Szuling sandstone" in the Tiechienshan TCS-34 well, Miaoli and the Paileng formation, Kuohsing, Nantou", Petroleum Geology of Taiwan, **Vol. 23**, pp. 41-53, 1987.

Cundall, P. A. and Strack, O. D. L., "A discrete numerical model for granular assemblies", Géotechnique, **Vol. 29(1)**, pp. 47-65, 1979.

Currie, J. B., Patnode, H. W. and Trump, R. P., "Development of folds in sedimentary strata", Geological Society of America Bulletin, **Vol. 73(6)**, pp. 655-673, 1962.

Davis, D., Suppe, J. and Dahlen, F. A., "Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, **Vol. 88(B2)**, pp. 1153-1172, 1983.

Hoek, E., Practical rock engineering, Geosysta Ltd, 2006.

Hung, J. H. and Wiltschko, D. V., "Structure and kinematics of arcuate thrust faults in the Miaoli-Cholan area of western Taiwan", Petroleum Geology of Taiwan, **Vol. 28**, pp. 59-96, 1993.

Hung, J. H. and Yang, C. N., "Mesoscale deformation mechanisms in the Chuhuangkeng anticline, Miaoli, Taiwan", Proceedings of the Geological Society of China, **Vol. 34(1)**, pp. 17-42, 1991.

Itasca, Particle Flow Code in 2 Dimensions Version 3.0 Online Manual, Itasca Consulting Group Inc., 2002.

- Ku, C. C., "Disharmonic folding in the Wenshuichi valley, Miaoli", Proceedings of the Geological Society of China, **Vol. 5**, pp. 135-139, 1962.
- Lin, C. H., Yeh, Y. H. and Roecker, S. W., "Seismic velocity structures beneath the Sanyi-Fengyuan area, central Taiwan and their tectonic implications", Proceedings of the Geological Society of China **Vol. 32 (1)**, pp. 101-120, 1989.
- Lin, C. W., Wey, S. K. and Lin, C. J., "Structural lithic units in the western foothills, Taiwan a case study in the Miaoli Wenshui and the Chiayi Alishan areas", Journal of the Geological Society of China, **Vol. 39(2)**, pp. 167-188, 1996.
- Marshak, S. and Mitra, G., Basic method of structural geology, Prentice Hall Englewood cliffs, New Jersey, 1988.
- Mitra, S. and Namson, J., "Equal-area balancing", American Journal of Science, **Vol. 289(5)**, pp. 563-599, 1989.
- Mouthereau, F., Deffontaines, B., Lacombe, O., Angelier, J., Byrne, T. B. and Liu, C. S., "Variations along the strike of the Taiwan thrust belt: Basement control on structural style, wedge geometry, and kinematics", Special Papers-Geological Society of America, pp. 31-54, 2002.
- Namson, J., "Structural of the western foothills belt, Miaoli-Hsinchu area,Taiwan: (I) Southern part", Petroleum Geology of Taiwan, **Vol. 18**, pp. 31-51, 1981.
- Namson, J., "Structural of the western foothills belt, Miaoli-Hsinchu area,Taiwan: (II) Central part", Petroleum Geology of Taiwan, **Vol. 19**, pp. 51-76, 1983.
- Ramsay, J. G. and Huber, M. I., The techniques of modern structure geology Vol 2: Folds and Fracture, Vol. 2, Academic Press, 1987.
- Rowland, S. M., Duebendorfer, E. M. and Schiefelbein, I. M., Structural analysis and synthesis Blackwell Publishing Ltd, 1986.
- Suppe, J., "Geometry and kinematics of fault-bend folding", American Journal of Science, **Vol. 283**, pp. 684-721, 1983.
- Suppe, J., "Mechanics Of Mountain-Building And Metamorphism In Taiwan", Memoir of the Geological Society of China, **Vol. 4**, pp. 67-89, 1981.

Tai, P. C. and Teng, L. S., "Sequence stratigraphy analysis of the Oligocene strata, northern Taiwan", Journal of the Geological Society of China, **Vol. 37(4)**, pp. 607-640, 1994.

Woodward, N. B., Boyer, S. E. and Suppe, J., Balanced geological cross-sections: An essential technique in geological research and exploration, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1989.

附錄一 監測圓座標、半徑與孔隙率

本研究透過選定特定顆粒為圓心指定監測圓設置位置與大小，於水平應變量達 38%時 Case 1 與 Case 2 中各設置的 24 個監測圓之詳細資訊如表 18 與表 19 所示。各監測圓半徑為圓心顆粒半徑之 5 倍以確保各監測圓內涵蓋足夠數量的顆粒。模擬中採用之座標系統以模型之左下角，左牆與底牆之交點為原點(0, 0)，x 軸向右為正，y 軸向上為正。

表 18 數值模擬成果 Case 1 監測圓座標。

	名稱	監測圓 ID	圓心 bid	半徑(m)	座標(m)	孔隙率
出 礦 坑 背 斜	C-AC ₂	1	2626	0.298	(13.431, 2.691)	0.058
	C-AC ₁	2	1807	0.298	(13.179, 2.543)	0.074
	C-BC	3	3250	0.298	(13.901, 3.422)	0.033
	C-BW ₂	4	3441	0.298	(13.249, 3.146)	0.035
	C-BW ₁	5	3549	0.298	(12.859, 3.241)	0.036
	C-BE ₂	6	4980	0.298	(14.227, 2.843)	0.047
	C-BE ₁	7	5540	0.298	(14.219, 2.089)	0.049
	C-CC	8	6789	0.298	(14.133, 4.561)	0.100
	C-DC	9	10144	0.298	(14.350, 5.473)	0.090
	C-DW	10	9854	0.298	(13.717, 5.075)	0.055
	C-DE	11	8063	0.298	(14.903, 4.686)	0.074
	C-EC	12	11311	0.298	(14.289, 6.528)	0.110
八 卦 力 構 造	P-AC ₁	13	1892	0.298	(19.492, 2.015)	0.032
	P-AC ₂	14	2708	0.298	(19.458, 1.820)	0.041
	P-BC	15	3401	0.298	(18.881, 2.926)	0.028
	P-BW ₂	16	3979	0.298	(18.933, 2.253)	0.099
	P-BW ₁	17	3204	0.298	(18.972, 1.613)	0.043
	P-BE ₂	18	3497	0.298	(19.465, 2.788)	0.027
	P-BE ₁	19	4121	0.298	(20.081, 2.496)	0.004
	P-CC	20	7164	0.298	(19.264, 4.000)	0.076
	P-DC	21	8885	0.298	(19.405, 5.020)	0.084
	P-DW	22	8205	0.298	(18.653, 4.422)	0.039
	P-DE	23	10587	0.298	(20.073, 4.511)	0.084
	P-EC	24	11481	0.298	(20.014, 6.594)	0.062

表 19 數值模擬成果 Case 2 監測圓座標。

	名稱	監測圓 ID	圓心 bid	半徑(m)	座標(x, y)	孔隙率
出 礮 坑 背 斜	C-A _{C2}	1	2626	0.298	(14.053, 2.236)	0.078
	C-A _{C1}	2	1807	0.298	(13.983, 1.631)	0.079
	C-B _C	3	3250	0.298	(13.992, 3.460)	0.044
	C-B _{W2}	4	3441	0.298	(13.558, 2.858)	0.070
	C-B _{W1}	5	3599	0.298	(13.292, 2.347)	0.046
	C-B _{E2}	6	4980	0.298	(14.516, 2.942)	0.060
	C-B _{E1}	7	4108	0.298	(14.651, 2.459)	0.070
	C-C _C	8	6789	0.298	(14.215, 4.300)	0.107
	C-D _C	9	10144	0.298	(14.281, 5.571)	0.103
	C-D _W	10	10220	0.298	(13.431, 4.807)	0.067
	C-D _E	11	8063	0.298	(14.867, 4.858)	0.088
	C-E _C	12	11311	0.298	(14.368, 6.532)	0.097
八 卦 力 構 造	P-A _{C1}	13	1635	0.298	(19.202, 2.354)	0.031
	P-A _{C2}	14	2708	0.298	(19.022, 2.869)	0.042
	P-B _C	15	3401	0.298	(19.081, 3.699)	0.023
	P-B _{W2}	16	3979	0.298	(18.698, 3.155)	0.096
	P-B _{W1}	17	4101	0.298	(18.560, 2.854)	0.088
	P-B _{E2}	18	3497	0.298	(19.464, 3.118)	0.032
	P-B _{E1}	19	4879	0.298	(19.767, 2.872)	0.022
	P-C _C	20	7241	0.298	(19.355, 4.583)	0.064
	P-D _C	21	8885	0.298	(19.640, 5.447)	0.054
	P-D _W	22	8947	0.298	(18.415, 4.684)	0.033
	P-D _E	23	10587	0.298	(20.275, 4.771)	0.081
	P-E _C	24	11481	0.298	(19.924, 6.480)	0.101