



行政院原子能委員會
放射性物料管理局

行政院原子能委員會放射性物料管理局

委託研究計畫研究報告

106 年低放射性廢棄物坑道處置安全

審驗技術建立之關鍵課題研析

子計畫一：低放射性廢棄物坑道處置場址

特性審驗技術之關鍵課題研究

計畫編號：105FCMA011

計畫主持人：董家鈞

子計畫一主持人：董家鈞

受委託機關(構)：社團法人中華民國大地工程學會

報告日期：中華民國 106 年 12 月

**106 年低放射性廢棄物坑道處置安全
審驗技術建立之關鍵課題研析
子計畫一：低放射性廢棄物坑道處置場址
特性審驗技術之關鍵課題研究**

受委託單位：社團法人中華民國大地工程學會

計畫主持人：董家鈞

子計畫一主持人：董家鈞

研究期程：中華民國 106 年 2 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 120 萬元(子計畫一經費)

**行政院原子能委員會放射性物料管理局
委託研究計畫研究報告**

中華民國 106 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

中文摘要

本研究為低放射性廢棄物處置為期 4 年計畫的第二年，該計畫的目標是建立一個與隧道處置場址特徵化相關之平行驗證技術，本研究之成果期望有助於提高低放廢物處置之管制能力。本計畫第一年已完成國際研究資訊之回顧，內容包含場址的初始狀態和正常演變，以及國內特殊地質條件等。今年我們根據 Forsmark 場址所收集的數據，重點回顧了隧道處置場址關鍵參數的不確定性，此場址之中-高放射性廢物處置調查結果豐富，有利於了解關鍵參數的不確定性。再者，進一步針對隧道周圍岩體的水力耦合參數進行敏感性分析。利用 Oda 連續模型評估破裂面之特徵化(例如：密度、持續性、開口寬、粗糙度、強度、位態…等)對受不同邊界應力影響的隧道之水力傳導和流體流動的影響。模擬結果認為，破裂面特徵和邊界應力將主導地下水流動，其中最重要的參數是破裂面之開口寬。現地應力和不連續面方向的分佈為均向分布時，結果顯示等勢線為圓形且流動方向皆指向隧道中心；如果現地應力和不連續面方向的分佈為異向分布，則隧道周圍的流動方向不再沿著徑向方向，地下水流分析應考慮應力誘發和固有的異向性。

Abstract

This study is the second year of a four-year project. The goal of this project is to establish a parallel verification technique related to the site characterization of tunnel disposal. It is anticipated that the achievement of this study can contribute to enhance the regulation capability for the low-level radioactive waste disposal project. The first year of this project completed the international researches review, including the initial state and the reference evolution of the site, as well as domestic special geological conditions. This year we focus on reviewing the uncertainty of key parameters of tunnel disposal sites based on the data collected from Forsmark site. The abundant investigation results of high- to medium-level radioactive waste disposal project could be beneficial to understanding the uncertainty of key parameters. Following the uncertainty analysis, we perform the sensitivity analysis of the hydro-mechanical coupling parameters of rock mass around a tunnel. Oda's continuum model is used to evaluate the influence of fracture characteristics (e.g, intensity, persistency, aperture, roughness, strength, orientation...) on hydraulic conductivity and fluid flow around a tunnel subjected to different boundary stress. It is concluded that the fracture characteristics and boundary stress will dominate the groundwater flow. The most important parameter is the fracture aperture. The equal potential lines are circle shape and the flow vectors are along the radial direction of the circular shape tunnel for isotropic fracture distribution and boundary stress. The flow vectors around a tunnel are no longer along the radial direction if the in-situ stress and distribution of fracture orientations are anisotropic. The stress-induced and inherent anisotropic should be consider for groundwater flow analysis.

目錄

中文摘要	I
Abstract	II
目錄	3
圖目錄	5
表目錄	6
第一章 前言	7
第二章 國際處置場址之初始狀態量化資訊研析	9
2.1 瑞典核燃料和廢物管理公司(SKB)之分階段場址調查流程概述	9
2.2 各調查階段場址特徵化參數之建立	10
第三章 力學-水力特徵化之不確定性評估	13
3.1 場址初始狀態量化參數之不確定性	13
3.2 破裂面幾何特徵統計建模之方法	24
3.2 破裂面幾何特徵之不確定性評估	29
第四章 力學-水力特性對流場敏感度分析	31
4.1 分析方法	31
4.2 以粗糙度係數(JRC_0)為變數之分析結果	33
4.3 以不連續面單壓強度(JCS_0)為變數之分析結果	37
4.4 受風化作用影響之結果	42
4.5 結果與討論	43
第五章 力學-水力特性對坑道周圍流場敏感度分析	44
5.1 分析方法	44
5.2 水力傳導係數分布	47
5.3 等向裂隙($D_{33}=0$)對於坑道周圍流場之影響	49
5.4 異向裂隙($D_{33}=2$)對於坑道周圍流場之影響	50
5.3 結果與討論	51
第六章 坑道處置場址特性之安全評估審查重點及注意事項	52
6.1 近岸離島通用之審查重點建議	52

6.2 特定候選場址之審查重點建議	53
第七章 結論與建議	54
7.1 結論	54
7.2 建議	55
參考文獻	56
附錄一	57
附錄二	65
附錄三	72
附錄四	77

圖目錄

圖 2.1 SKB 建置 FORSMARK 地區 SDM-SITE 之主要參考架構	10
圖 3.1 FORSMARK 處置場址地質圖(第 2.2 版)	14
圖 3.2 目標區的破裂面域(FFM)以及變形帶(ZFM)三維模型	15
圖 3.3 單軸抗壓強度 A)和拉伸強度 B)與深度之關係，並按岩石類型進行分類之結果.....	17
圖 3.4 楊氏係數 A)和柏松比 B)與深度之關係，並按岩石類型進行分類之結果.....	18
圖 3.5 2002-2007 年 FORSMARK 場址調查所有取心鑽孔和衝擊鑽探鑽孔配置圖，以及傾斜鑽孔於地面上的投影.....	21
圖 3.6 圖 3.5 中各個鑽孔場址(DS)詳細配置圖，包含鑽探點附近或第四紀沉積物中的鑽孔..	22
圖 3.7 2006 年於編號 5 號鑽孔場址(DS5)中鑽孔 HFM14(P 點)進行三週干涉試驗	23
圖 4.1 未考慮風化作用之情形下， JRC_0 與初始力學內寬 E_0 之關係圖	34
圖 4.2 未考慮風化作用之情形下， JRC_0 與力學內寬 E 之關係圖	34
圖 4.3 未考慮風化作用之情形下， JRC_0 與水力內寬 E 之關係圖	35
圖 4.4 未考慮風化作用之情形下， JRC_0 與水力傳導係數 K 之關係圖	35
圖 4.5 未考慮風化作用之情形下， JCS_0 與初始力學內寬 E_0 之關係圖	38
圖 4.6 未考慮風化作用之情形下， JCS_0 相對於 JRC_0 之適用範圍.....	38
圖 4.7 未考慮風化作用之情形下， JCS_0 與力學內寬 E 之關係圖	39
圖 4.8 未考慮風化作用之情形下， JCS_0 與水力內寬 E 之關係圖.....	39
圖 4.9 未考慮風化作用之情形下， JCS_0 與水力傳導係數 K 之關係圖.....	39
圖 5.1 本研究採用之座標系統圖.....	45
圖 5.2 不連續面位態密度函數分布圖($D_{33}=0$ (左)， $D_{33}=2$ (右)).....	46
圖 5.3 隧道開挖前水力傳導係數分布圖($D_{33}=0$)	47
圖 5.4 隧道開挖水力傳導係數分布圖($D_{33}=0$)	48
圖 5.5 隧道開挖水力傳導係數分布圖($D_{33}=2$)	48
圖 5.6 均質均向水力傳導係數條件下隧道開挖周圍岩盤總水頭分布圖($D_{33}=0$).....	49
圖 5.7 均質均向水力傳導係數條件下隧道開挖周圍岩盤隧道開挖流速向量分布圖($D_{33}=0$)....	49
圖 5.8 隧道開挖周圍岩盤總水頭分布圖($D_{33}=2$)	50
圖 5.9 隧道開挖周圍岩盤隧道開挖流速向量分布圖($D_{33}=2$)	51

表目錄

表 2.1 節錄 SKB 在各階段確定或更新的參數表，並說明每個參數之用途.....	11
表 3.1 SKB 於 FORSMARK 處置場址之岩石類型分類表	13
表 3.2 目標區中每個鑽孔樣本進行不同測試方法的次數.....	16
表 3.3 岩石域 RFM029 單軸抗壓強度測試結果	17
表 3.4 五個岩石域的樣本進行不同試驗方法測試破裂面的數目	19
表 3.5 所有傾斜試驗(TILT TESTS)的計算結果，共 163 次測試	20
表 3.6 不連續面位態模型.....	25
表 3.7 破裂面尺寸-歐基里得假設之構造連續模型 (TCM)	26
表 3.8 破裂面尺寸-分形構造連續模型 (TCMF)	26
表 3.9 破裂面尺寸-露頭尺度模型(OSM).....	27
表 3.10 破裂面尺寸-構造斷層模型(TFM)	27
表 3.11 平均 P32 密度，破裂面“不受 DZ 影響”.....	28
表 3.12 平均 P32 密度，破裂面“受 DZ 影響”.....	28
表 4.1 不考慮風化作用下，變數為 JRC_0 之計算結果	35
表 4.2 不考慮風化作用下，變數為 JCS_0 之計算結果.....	40
表 4.3 相同條件下，不考慮風化作用以及考慮風化作用之結果	42
表 5.1 本研究使用之參數表.....	45

第一章前言

我國近年來積極推動低放射性廢棄物處置工作，經濟部已核定 2 處建議候選場址，台灣電力公司已針對此 2 處場址進行調查規劃，目前朝向坑道處置之方向進行技術發展。政府對於低放射性廢棄物處置進行嚴密把關是一貫的目標，除了必須不斷提升審驗技術，也必須建置適合國內低放處置之規範。本計畫擬透過四年期程，針對處置坑道之場址特性、工程設計、長期穩定、生物圈劑量評估以及長期安全等，透過國際資訊研析、驗證方法研究、驗證評估研究、審查規範建立(修正)等四步驟推動，一方面持續彙整國外放射性廢棄物坑道處置設施安全評估審查技術，研析國內在安全評估審查技術發展所面臨問題與精進對策，另一方面希望能協助管制單位建立坑道處置安全審查及分析驗證之能力，以使國內處置管制技術能與國際接軌。

本年度計畫為此四年期工作之第二年度，去年度「低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之國際資訊研析」已針對場址特性、工程設計、安全評估等主要方向進行國際資訊研析，本年度計畫將根據去年研究之結果進一步提出審驗技術建立，依：(1)場址特性審驗技術建立；(2)工程設計審驗技術建立；(3)結構穩定性驗證方法；(4)長期安全分析審驗方法；(5)生物圈情節分析審查技術等 5 個主題分別由 5 個子計畫進行研析。

本子計畫彙整國際間場址特性調查成果(TR-01-29、R-07-45、R-07-31、R-07-47)，盤點瑞典關於場址特性相關參數之定量化成果，透過以上報告蒐集包含地質、岩石力學、水文地質等有關場址初始之量化資訊，以分析各參數不確定性，並進一步針對處置坑道周圍岩盤之力學-水力耦合特性之相關參數，透過等值化擬連續體理論模型探討場址特性參數對水力傳導係數流經處置坑道地下水流量與壓力之敏感度，並嘗試最後提出審查案例精進之建議。期盼能逐步達成以下目標：(1)處置設施場址特性相關量化資訊及關鍵課題釐清；(2)各項與場址特徵化相關處置技術驗證方法之建立；(3)提供適合於國內坑道場址特性相關處置技術與提升審驗能力；(4)回饋於國內「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」(原能會物管局，2012) 場址特性相關章節之精進。

以下說明與子計畫一(以下簡稱本計畫)高度相關計畫過去執行成果。102 年度物管局計畫「低放射性廢棄物處置場址特性與設施設計審查規範精進之研究」(原能會物管局，2013)已針對審查導則場址及設施設計相關條文，提供修訂方向建議，103 年度物管局計畫「低放射性廢

棄物處置場址特性審查規範精進之研究」(原能會物管局, 2014), 針對審查導則場址相關條文, 提出「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)之場址特性修訂草案」(以下簡稱審查導則之場址特性修訂草案), 並在 104 年度物管局計畫「低放射性廢棄物處置安全管制技術發展」, 持續進行場址之特性描述審查規範精進之研究。針對坑道處置之場址特性, 自 105 年度開始, 透過國際資訊研析、審查要項研究、驗證方法評估、審查規範建立(修正)等四步驟逐年推動, 去年度(105 年度)物管局計畫「低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之國際資訊研析」(原能會物管局, 2016)彙整國外放射性廢棄物坑道處置設施安全評估審查技術, 研析國內在安全評估審查技術發展所面臨問題與精進對策。本年度計畫進一步提出我國關於坑道處置場址特徵化工作需精進之關鍵議題, 針對場址初始狀態進一步定量化, 並進一步針對力學-水力耦合量化資訊之不確定性進行深入探討, 評估相關參數對地下水流經處置隧道流量之敏感度, 最後提出場址特徵化參數不確定性之評估結果, 目標期望可協助建立管制單位對於坑道處置安全審查及分析驗證之能力, 以使國內處置管制技術能與國際接軌。

本報告第一章為計畫說明; 第二章根據瑞典 Forsmark 處置場址報告書, 彙整處置場址初始狀態之定量化資訊, 提供後續不確定性評估之重要資訊; 第三章針對瑞典 Forsmark 處置場址的不確定性評估進行說明; 第四章則是對處置場的力學-水力特性之流場敏感性進行分析, 找出可能對於流場敏感性之因子; 第五章進一步探討隧道開挖對於流場之影響; 第六章則是提供低放射性廢棄物最終處置技術有關場址特性章節審查之建議; 最後第七章提出本計畫之結論與建議。

第二章 國際處置場址之初始狀態量化資訊研析

目前國際間已興建數座低放射性廢棄物最終處置場，包含美國、法國、日本、瑞典、英國、西班牙以及芬蘭等國家。然而，這些國家對於低放射性廢棄物處置方式有所差異，除了依據廢棄物之核種半化期長短與活度採取近地表、中等深度以及深地質處置等處置方法之外，亦須配合當地自然、社會、環境與廢棄物特性等整體性進行通盤考量。例如日本六個所村採用地面處置窖式即為近地表低放處置場；美國 Barnwell 及 Richland 兩處處置場採用淺地表壕溝掩埋技術進行低放處置；另外，瑞典 Forsmark 處置場為坑道處置形式，即將廢棄物放置於較深之岩層中。

因我國目前朝向坑道處置之方向進行技術發展，因此，勢將面對裂隙岩盤介質，因此，岩盤不連續面特性對流場之影響為關鍵課題。目前國際間裂隙岩盤不連續面特性調查成果資料發表，以高放場址較為豐富，故本計畫嘗試蒐集瑞典 Forsmark 高放處置場址不連續面特徵調查之量化資料，並掌握該場址不連續面特性之變異性，以進一步作為對水力特性敏感度分析之參考。

2.1 瑞典核燃料和廢物管理公司(SKB)之分階段場址調查流程概述

雖然高、低放對於場址調查與安全評估有不同程度之要求，但是瑞典核燃料和廢物管理公司(SKB)於兩個不同的地點(Forsmark 和 Laxemar / Simpevarp 地區)調查與場址特徵化工作之流程還是相當值得參考，以下概略說明之。於 Forsmark 場址，每次資料調查結束後，SKB 將針對場址資料進行分析並進行建模(場址描述模型)工作，場址描述模型(site descriptive model, SDM)集結了包含地質學、岩石力學、熱力學、水文地質學、水文地球化學以及地表系統描述的綜合模型，SKB 於 2002 年完成第 0 版(SKB, 2002)場址描述模型(SDM)，建立了場址調查前所需的資訊；2004 年 6 月完成第 1.1 版(SKB, 2004; SKB, 2005a)。第 1.2 版完成了 SDM 初始場址調查工作(initial site investigation, ISI)，以及完成初步的處置庫設計(layout D1)、初步安全評估(preliminary safety evaluation, PSE)(SKB, 2005b)和安全評估(safety assessment, SR-Can)(SKB, 2006a)。

SKB 於整個場址調查工作(Complete Site Investigation, CSI)期間，進行了三個階段的分析和建模工作，每個階段最重要的工作是嘗試並解決處置場工程和安全評估的不確定性。第 2.1

版(SKB 2006b)更新了 Forsmark 地質模型，第 2.2 版和 2.3 版已完成建立綜合不同學科領域的場址描述模型 SDM-Site，其中有關 SDM-Site 的主要參考架構如圖 2.1 所示。以下將說明 Forsmark 不同階段應彙整之場址特性初始狀態之量化資訊，並呈現與水力-力學耦合分析比較相關之參數資料統計結果，以作為後續參數敏感度分析之參考。

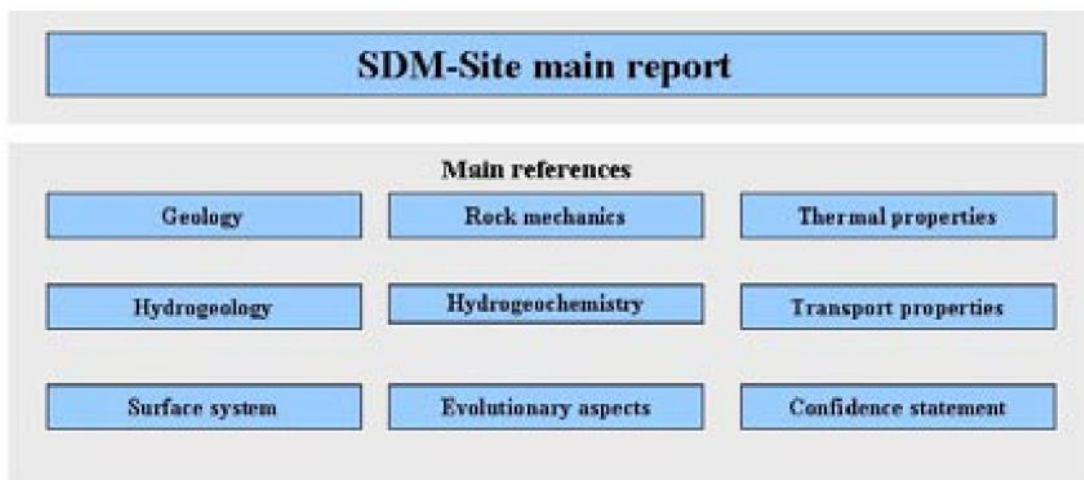


圖 2.1 SKB 建置 Forsmark 地區 SDM-Site 之主要參考架構

2.2 各調查階段場址特徵化參數之建立

SKB 針對 Forsmark 處置場址各領域所需之參數進行調查，調查項目包含地質、岩石力學、水文地質、熱特性、水文地球化學、岩石的傳輸特性以及地表生態(其中水文地球化學、岩石傳輸特性及熱特性在本計畫中不討論)，這些調查的結果將提供後續模型建置之重要資料，而最終結果將提供設施設計和安全評估。因此必須詳細地進行調查和建模，以利提供做為判斷場址適用性的重要資訊。以下將介紹 SKB 對於各領域所需確認之參數，這些重要資訊日後可檢視國內低放處置所考慮之因素是否完備。

SKB 針對不同領域詳細的分類參數的類別、每個參數被確定的時間(包含參數更新)以及參數的用途。最初先進行可行性研究(FS)，可行性研究之後進行場址調查(分別為初始(ISI)和完整(CSI)場址調查)，最後進行詳細描述(DC)。以表 2.1 為例，表 2.1 節錄與本研究有關之參數，由表可知許多參數在較早階段已透過調查而獲得，隨著陸續的調查工作得到新的資訊並進行更新。另外，地質、岩石力學、水文地質、水文地球化學、岩石的傳輸特性以及地表生態詳見附錄一。再者，本研究集中彙整有關岩石力學、以及水文地質方面相關參數，SKB 針對處置場址區域樣本進行單軸及三軸試驗(包含抗壓強度、抗拉強度、楊氏係數以及柏松比等)，

以及傾斜試驗(例如：摩擦角、凝聚力)等，並透過統計分析彙整出各參數特性範圍，相關參數詳見附錄二、附錄三以及第三章，透過蒐集這些參數可進一步討論不確定性。

表 2.1 節錄 SKB 在各階段確定或更新的參數表，並說明每個參數之用途

參數組	參數	確定參數的時間				用於
		FS	ISI	CSI	DC	
地質參數						
局部次要 破裂面域	方位			X	X	為水文地質模型和岩石力學模型(處置場設計)的輸入資料。 破裂面填充礦物等為水文地球化學模型的輸入資料。
	長度		X	X	X	
	開口寬度			X	X	
	性質(破裂面數量、間距、塊體尺寸、破裂面特性、風化/蝕變)			X	X	
破裂面- 隨機 描述的數據	密度(不同組)		X	X	X	為詳細的水文地質模型和詳細的岩石力學模型的輸入資料。 為核種傳輸模型間接輸入資料。 破裂面填充礦物等為水文地球化學模型的輸入資料。
	方位		X	X	X	
	跡線長度(trace length)		X	X	X	
	粗糙度			X	X	
	風化(蝕變)			X	X	
岩石力學						
破裂面帶	幾何		X	X	X	描述性岩石力學模型中將岩石細分成不同的岩體。
破裂面 力學特性	正向變形特性			X	X	離散岩石力學模型，輸入岩體的變形特性數據。
	切向變形特性			X	X	
	剪切強度、節理粗糙度、節理抗壓強度、基礎摩擦 ϕ_b 、破裂面後摩擦 ϕ_r			X	X	
邊界條件和輔助數據	現地應力、大小和方向		X	X	X	穩定性評估
水文地質						
隨機模擬的破裂面帶和破裂面增加岩體	幾何 - 岩體具有類似的水力特性	(X)	X	X	X	計算模型
	破裂面帶及破裂面的空間分佈和幾何性質的統計描述		X	X	X	DFN models
	導水率的統計分佈		X	X	X	
	水力傳導係數的統計分佈		X	X	X	SC models

*FS 為可行性研究時期；ISI 為初始場址調查時期；CSI 為完整場址調查時期；DC 為詳細描述時期。

我國低放處置建議候選場址目前已針對許多項目進行初始狀態量化工作，但目前受限於社會因素，許多進一步的參數量化工作目前仍無法進行，但透過本研究研析 SKB 之經驗，針對不同時期針對各項參數調查，什麼參數建議首先調查，或是否需要依照時間的演進更新場址量化參數，仍可提供國內處置技術做為參考重點。

第三章 力學-水力特徵化之不確定性評估

場址參數的不確定性攸關處置場址設施設計之安全，上一章介紹了場址初始狀態參數量化的相關資訊，本章依據上一章的量化資訊彙整與本研究較相關之參數，並探討參數的不確定性，包含了地質資料、岩石力學以及水文地質，接著討論模型的不確定性，詳細討論如下：

3.1 場址初始狀態量化參數之不確定性

SKB 對於 Forsmark 處置場址範圍進行場址初始狀態量化分析，其中包含地質、岩石特性、水文地質、水文地球化學、岩石的傳輸特性以及地表生態進行量化，本節將彙整與本研究較相關之主題進行討論，討論內容如下：

1. 地質構造

SKB 對於 Forsmark 處置場址範圍進行岩體的分類，共分為 A 至 D 四個群組，如表 3.1 所示。每個群組中，不同的岩石類型根據其岩石組成、粒度和相對年齡進行區分，並且建置一個岩石類型的代碼系統(例如，111058 屬於 D 組年齡的細至中粒花崗岩)。圖 3.1 的地質圖上顯示，整個場址區域由不同岩石類行組成，其中紫色方框的目標區(紅色框線為候選區域)大部分由中粒變質花崗岩-花崗閃長岩組成。

Forsmark 場址區域一共歸類出 14 種岩石域以及 6 個獨立的破裂面結構域(以下簡稱破裂面域)。整體上目標區域之岩石域(RFM)由 RFM029 和 RFM045 所組成(如圖 3.1)，而目標區域中含有四個破裂面域(FFM)，包括 FFM01、FFM02、FFM03 和 FFM06，破裂面區之三維模型如圖 3.2 所示。

表 3.1 SKB 於 Forsmark 處置場址之岩石類型分類表

岩石分組	
Group D的岩石僅部分受到延性變形和變質影響。	
Group D (c 1,851 million years)	•細至中等顆粒花崗岩和細晶岩(111058)。偉晶岩、偉晶花崗岩(101061)。
Group C岩石在角閃岩相變質條件下受低滲透韌性變形影響。	
Group C (c 1,864 million years)	•細至中粒變質花崗閃長岩、正英閃長岩(101051)。
Group A和Group B的岩石在角閃岩相變質條件下受到穿透韌性變形影響。	

岩石分組	
Group B (c 1,886–1,865 million years)	<ul style="list-style-type: none"> •含有黑雲母的中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩(101057)和細晶變質花崗岩(101058)，兩者都以斜角閃岩和不規則夾雜物(102017)為主。局部鈉長石化花崗岩(104)。 •變質正英閃長岩-花崗閃長岩(101054)與角閃岩包體(102017)。變質花崗閃長岩(101056)。 •超基性岩(101004)。變質閃長岩、石英閃長岩和輝長岩(101033)。
Group A (supracrustal rocks older than 1,885 million years)	<ul style="list-style-type: none"> •硫化物礦化、可能是次生的岩石(沉積構造)(109010)。 •火成岩(103076)、鈣矽酸鹽岩(108019)和氧化鐵礦化(109014)。下層沉積岩(106001)。

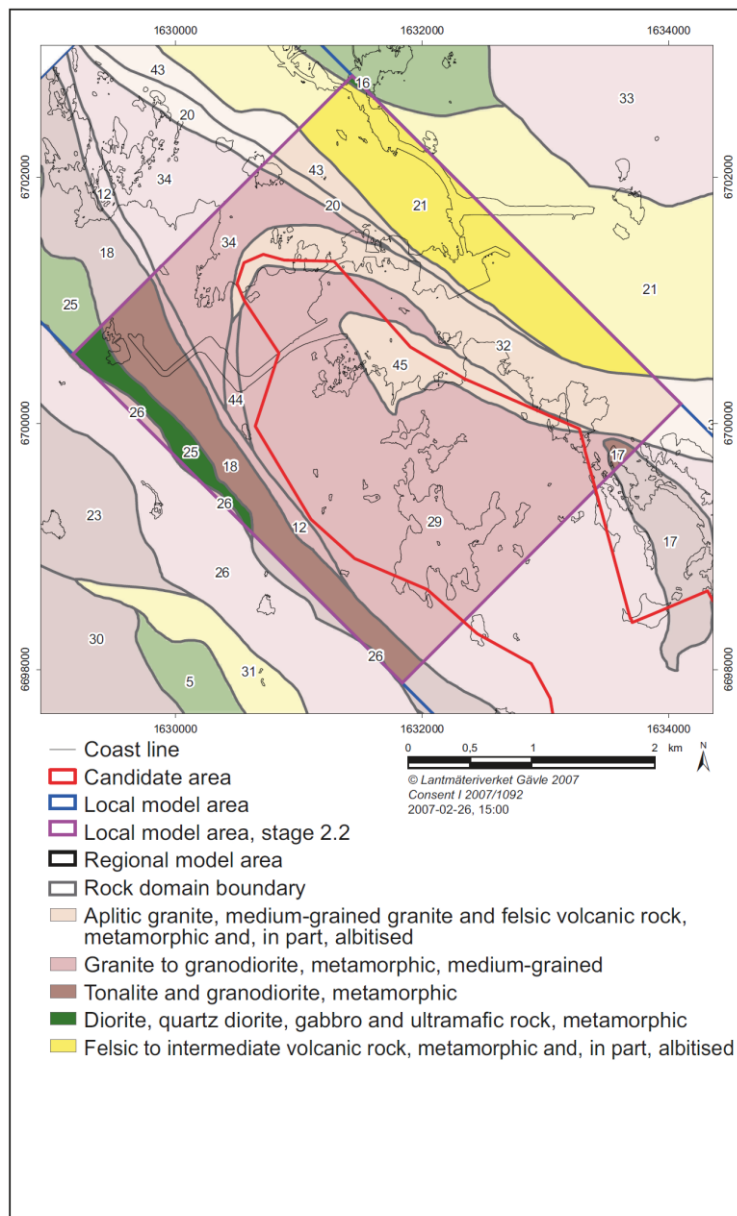


圖 3.1 Forsmark 處置場址地質圖(第 2.2 版)

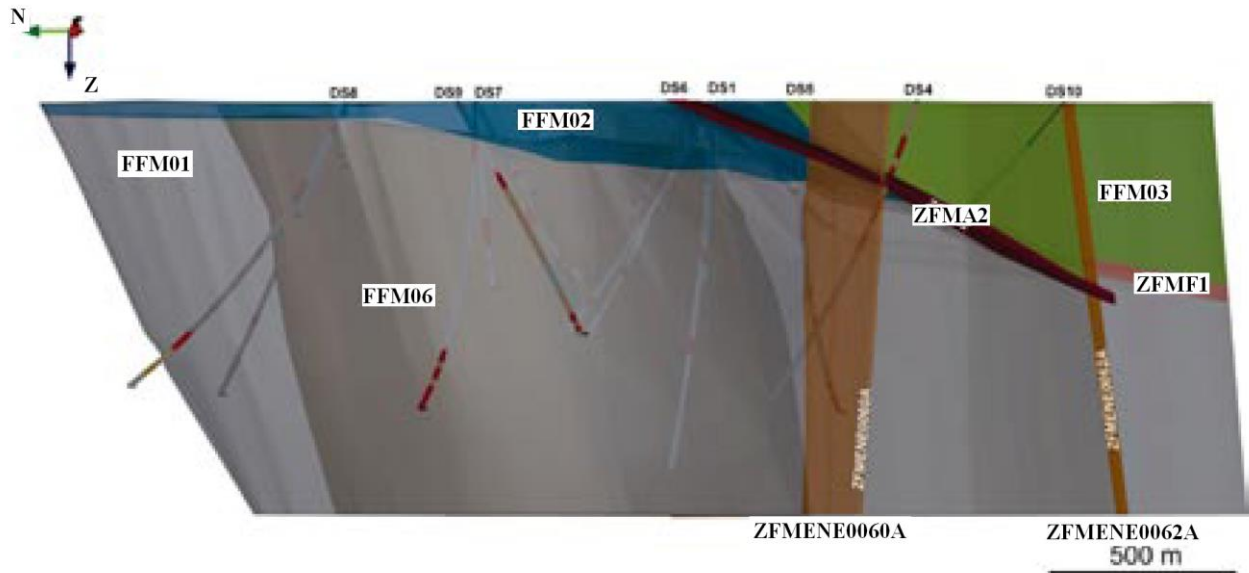


圖 3.2 目標區的破裂面域(FFM)以及變形帶(ZFM)三維模型

岩石域 RFM029 中的主要岩石類型是中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩(75%，101057)。其次為偉晶岩和偉晶花崗岩(13%，101061)、中粒變質花崗岩類(5%，101051)和角閃岩(4%，102017)。岩石域 RFM045 主要的岩石類型分別為細晶變質花崗岩(101058)和中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩(101057)，分別占本區域的約 51%和 18%。其次要的岩石類型基本上與 RFM029 相同，包括偉晶岩和偉晶岩花崗岩(14%，101061)、中粒變質花崗岩類(9%，101051)和角閃岩(6%，102017)。

破裂面域 FFM01 於目標區的深部，FFM02 於場址區域的西北側近地表區域，FFM03 位於目標區的東南部，變形帶 ZFMA2 和 ZFMF1 的正上方，FFM06 的位置如圖 3.2 中深灰色部分，此破裂面域與岩石域 RFM045 重合，其特徵為普遍的分佈細粒度變質(鈉長石化)花崗岩，以及具有較高的石英含量(與未變質的花崗岩相比)。

根據瑞典 Forsmark 之經驗，可提供我國兩處低放處置建議候選場址地質調查之重要參考依據，針對場址區域中岩體分類、岩石分類系統、岩石域與破裂面三維模型等分析方式，可做為我國場址地質調查重要參考，完整且詳細的場址區域調查，可降低處置場址之不確定性因素。

2. 岩石力學

岩石域

岩石力學方面，SKB 主要針對 Forsmark 處置場址區域 RFM029 和 RFM045 兩個岩石

域中的岩體進行測試，岩石域中又細分成破裂面域 FFM01、FFM02、FFM03 和 FFM06，並簡要說明相鄰的岩石域 RFM017、RFM018 和 RFM034 的資料。每個岩石區域進行的完整岩體實驗室試驗的數量和類型見表 3.2。完整岩體中進行試驗程序共包括 97 次單軸壓縮試驗、94 次三軸壓縮試驗和 205 次拉伸試驗。壓縮試驗則分為 FFM01 進行 63 個試驗、FFM03 進行 21 次試驗以及 FFM06 進行 5 次試驗。整個場址調查期間的重點為目標區域 FFM01 和 FFM06 中 400-500 公尺的試驗深度下測試力學特性。測試結果主要是完整、新鮮和不確定的岩石。大多數測試樣品整體上保持完整，只有少數樣本較不完整，其中鑽孔 KFM04A 中在岩石域 RFM018 的四個樣本歸類於變形帶(ZFMNW1200)。

表 3.2 目標區中每個鑽孔樣本進行不同測試方法的次數

鑽孔	岩石域	破裂面域	單軸壓縮	三軸壓縮	拉伸試驗
KFM01A	RFM029	FFM01	14	14	30
KFM01A				6	
KFM01C	RFM029	FFM01	-	5	-
KFM01D	RFM029	FFM01	-	4	20
KFM02A	RFM029	FFM01	5	4	10
KFM02A	RFM029 PDZ	-	4	4	10
KFM02A	RFM029	FFM03	5	4	10
KFM02B				6	
KFM03A	RFM029	FFM03	12	12	30
KFM03A	RFM017	FFM03	4	4	10
KFM04A	RFM018 DZ	-	4		11
KFM04A	RFM029	FFM01	10	8	22
KFM05A	RFM029	FFM01	10	8	20
KFM06A	RFM029	FFM01	10	-	5
KFM06A	RFM045	FFM06	5	-	-
KFM07A	RFM029	FFM01	8	4	6
KFM08A	RFM029	FFM01	-	6	1
KFM09A	RFM034	FFM01	6	3	14
KFM09A	RFM044	FFM05	-	2	6
Total			97	94	205

表 3.3 顯示了岩石域 RFM029 單軸抗壓強度的測試結果，這些岩石域的力學特性結果彙整於附錄二。岩石域 RFM029 中的主要岩石類型為中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩(101057)，而岩石域 RFM045 主要由細晶變質花崗岩(101058)組成，目標區域中的其他岩石類型還包含了角閃石-花崗閃長岩、偉晶岩和角閃岩。SKB 為了獲更具有品質的訊息，進行實驗室間的交叉試驗，不同測量系統(即不同儀器、觀察者、環境等)的重複測量獲得

不同的結果，這些試驗主要交叉比對可再現性的資訊。主要力學測試於赫爾辛基工業大學 (HUT)比較單軸、三軸和間接拉伸強度試驗。此外，加拿大礦業和礦物科學實驗室(CANMET)也進行了間接和直接拉伸強度試驗。另外，不同深度與完整岩石樣本的特性圖如圖 3.3 及圖 3.4。

表 3.3 岩石域 RFM029 單軸抗壓強度測試結果

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	47	157	226	225	289	28.8
FFM01	偉晶岩、偉晶花崗岩	10	192	228	231	266	21
FFM03	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	13	203	220	221	251	12.9
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	143	150	152	155	5.6
no FFM	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	166	205	206	242	32.6

no FFM：可能的變形帶。

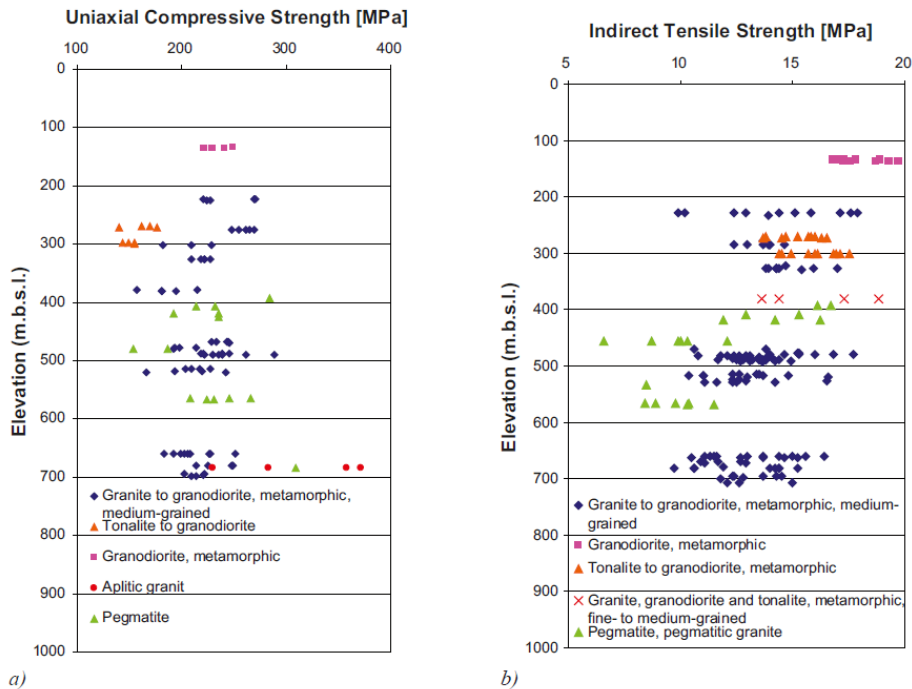


圖 3.3 單軸抗壓強度 a)和拉伸強度 b)與深度之關係，並按岩石類型進行分類之結果

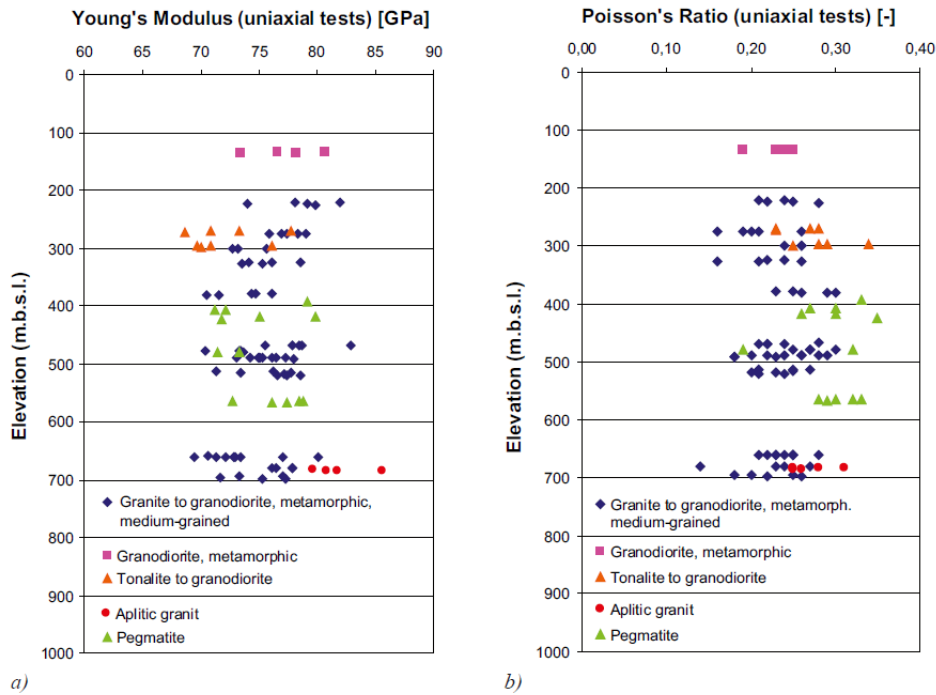


圖 3.4 楊氏係數 a)和柏松比 b)與深度之關係，並按岩石類型進行分類之結果

由圖 3.3a 可知，主要岩石類型(中粒變質花崗岩-花崗閃長岩)的單軸抗壓強度具有隨著深度緩慢降低的趨勢，其他岩石類型樣本數量太少，無法觀察到明顯變化的趨勢。而拉伸強度隨深度的變化(圖 3.3b)中，主要岩石類型的拉伸強度呈現隨著深度緩慢降低的趨勢，而其他岩類型沒有顯示出明顯的趨勢。壓縮和拉伸強度隨著深度輕微降低可能來自岩心取樣時解壓造成之微裂隙。另外，針對變質花崗岩、中等顆粒的花崗閃長岩觀察的結果發現，楊氏係數亦顯示出隨深度增加而緩慢降低的趨勢(圖 3.4a)，其中深度約 300 公尺時降低最為明顯。而柏松比的測試結果沒有明顯的趨勢(圖 3.4b)。

破裂面域

破裂面域(FFM)是指在岩石單元中相似的破裂面密度岩體。破裂面域 FFM01、FFM02 和 FFM03 主要代表岩石域 RFM029 的岩體，而 FFM06 等同於岩石域 RFM045 的岩體。破裂面域之岩石力學特性主要根據 RFM029、RFM045、RFM012、RFM034 以及 RFM044 五個岩石域進行測試，每個破裂面域進行的實驗室試驗之數量和類型見表 3.4。其中利用傾斜試驗(tilt tests)求取凝聚力與抗剪摩擦角之方式說明於後：傾斜試驗可以求得基本抗剪摩擦角與 JRC ，因此，可根據 3.1 式繪製破壞包絡線(曲線)，應力範圍為 0-20 MPa，再者，用 3.2 式回歸 3.1 式之曲線得到截距以及直線與水平夾角，即為凝聚力與抗剪摩擦角。所有傾斜試驗的參數如表 3.5 所示，其他破裂面域傾斜試驗的結果見附錄三，其中 c_p^{MC} 以及

ϕ_p^{MC} 為凝聚力峰值和摩擦角峰值， c_r^{MC} 為殘餘凝聚力以及 ϕ_r^{MC} 殘餘摩擦角。結果顯示，其中 FFM01 和 DZ 之間的評估摩擦角和凝聚力差異非常小。另外，開口與閉合破裂面的剪力試驗結果詳見附錄三。

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_b^{BB} + JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad 3.1$$

$$\tau = c_p^{MC} + \sigma_n \tan(\phi_p^{MC}) \quad 3.2$$

表 3.4 五個岩石域的樣本進行不同試驗方法測試破裂面的數目

鑽孔	岩石域	破裂面域	破裂面的傾斜試驗	張開性破裂面的剪力試驗	緊閉隙破裂面的剪力試驗
KFM01A	RFM029	FFM01	20	1	
KFM01A	RFM029	FFM02	11	4	
KFM01A	RFM029DZ		10	1	
KFM01D	RFM029	FFM01			4
KFM02A	RFM029	FFM01	13	4	
KFM02A	RFM029	FFM03	9	1	
KFM02A	RFM029DZ		18	2	
KFM03A	RFM029	FFM03	30	8	
KFM03A	RFM029DZ		5		
KFM03B	RFM029	FFM03	2		
KFM03B	RFM029 DZ		1		
KFM04A	RFM029	FFM01	22	2	
KFM04A	RFM029	FFM04	2		
KFM04A	RFM029 DZ		2	4	
KFM05A	RFM029	FFM01	4	8	
KFM05A	RFM029 DZ		5		
KFM06A	RFM029	FFM01		6	
KFM07A	RFM029	FFM01		5	
KFM08A	RFM029	FFM01		2	
KFM08A	RFM029 DZ			3	
KFM09A	RFM044	FFM05	5	2	
KFM09A	RFM44 DZ		1		
KFM09A	RFM034	FFM01		1	
KFM09A	RFM012	FFM04		3	
KFM09A	RFM029	FFM01	1		
KFM09A	RFM029 DZ		2		
Total			163	57	4

表 3.5 所有傾斜試驗(tilt tests)的計算結果，共 163 次測試

Test	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard deviation
Peak friction angle, ϕ_p^{MC} [°]	25.8	30.8	30.9	34.9	3.1
Peak cohesion, c_p^{MC} [MPa]	0.2	0.5	0.5	0.7	0.1
Residual friction angle, ϕ_r^{MC} [°]	20.3	26.2	26.8	32.8	3.9
Residual cohesion, c_r^{MC} [MPa]	0.2	0.4	0.4	0.6	0.1

岩石力學性質的經驗方法估計受到地質參數不確定性，以及經驗方法本身所引起的不確定性影響。評估參數的變化範圍取決於輸入數據的不確定性；特徵化岩體可能受到樣本數的大小以及人為之影響。

根據 SKB 之調查發現，破裂面域 FFM01 和 FFM06 的岩石力學特性顯示具有最高值，破裂面域 FFM02 最低。破裂面域 FFM01 和 FFM06 之間的變形特性差異很小，FFM01 的平均變形模量為 69GPa，FFM06 的平均變形模量為 70GPa，其中，破裂面域 FFM06 中具有更高的破裂面密度。破裂面域 FFM06 及破裂面域 FFM01 的平均單軸抗壓強度分別為 126 MPa 和 109 MPa，儘管完整的岩石具有較高的強度，FFM06 中較高的破裂面密度降低了岩體強度。其中，內聚力的不確定性顯著高於其他參數。

透過現地調查岩石的特性，並透過試驗結果統計其不確定性，對於後續處置坑道建置而言至關重要，而本研究於後面章節對於水力-力學特性之敏感性分析，岩石單壓強度之大小可能會對於處置坑道周圍岩石流場之敏感性有顯著影響，而傾斜試驗可間接得到粗糙度係數(JRC)，這些參數可能會嚴重影響處置場區域之流場，本研究於後面章節會對於粗糙度係數以及不連續面之岩石單壓強度與流場敏感度有進一步討論，因此，詳細的分析結果，除可降低其不確定性，亦可對於後續研究及處置設施設計提供重要資訊。

3. 水文地質

SKB 對於 Forsmark 候選區域(如圖 3.5)的十二個鑽孔位置(DS)進行取心鑽孔和衝擊鑽探鑽孔試驗，候選區域長約 6 公里，寬 2 公里，圖 3.6 顯示了鑽孔場址的詳細地圖，包含 25 個取心鑽孔和 38 個衝擊鑽探鑽孔。其中取心鑽孔鑽孔 KFM04B、KFM07A 和 KFM09A 位於西北候選區域的外圍，鑽孔 KFM11A 和 KFM12A 位於候選區域之外。

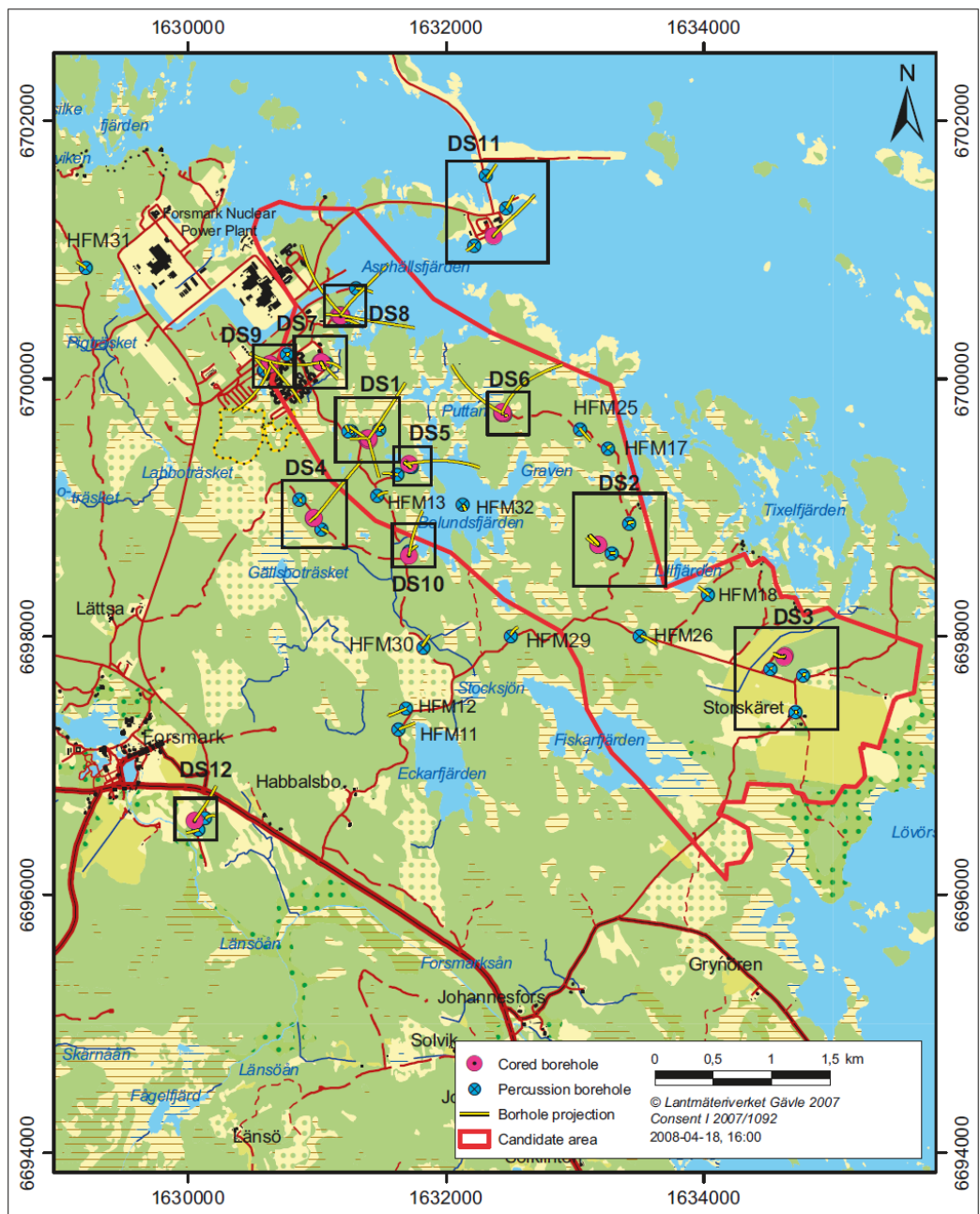


圖 3.5 2002-2007 年 Forsmark 場址調查所有取心鑽孔和衝擊鑽探鑽孔配置圖，以及傾斜鑽孔於地面上的投影

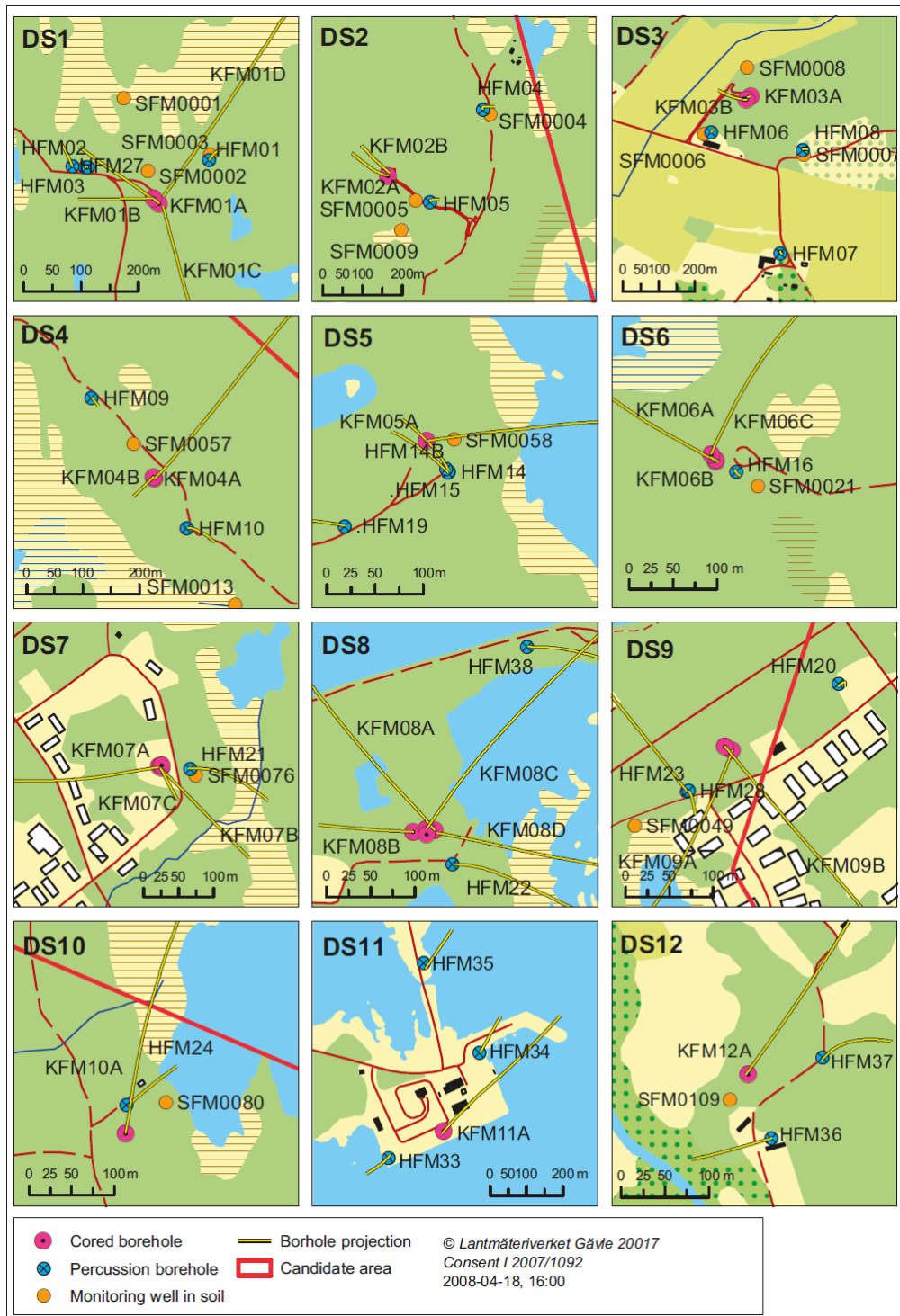


圖 3.6 圖 3.5 中各個鑽孔場址(DS)詳細配置圖，包含鑽探點附近或第四紀沉積物中的鑽孔

SKB 於 Forsmark 候選區域內進行一系列的跨孔(干擾)試驗評估，此試驗的結果強烈受到構造地質、破裂面系統的水力特性和資料採集的位置影響，其中，完整場址調查階段(CSI)進行的最重要的大規模干擾試驗。例如，2006 年度於編號 5(DS5)鑽孔場址之 HFM14 鑽孔的干擾試驗中，通過抽水試驗進行干擾試驗流量約 350L/min。候選區域中共有 36 個觀察鑽孔(105 個監測截面)監測地下水位，在這 36 個鑽孔中，其中 12 個鑽孔為取心鑽孔(55 個

監測截面)，另外 24 鑽孔為衝擊鑽探鑽孔(50 個監測截面)，每個監測截面，估計抽樣 21 天的資料進行測試。水力分析包括水力擴散細數估計、邊界條件解釋，圖 3.7，圖中顯示 2006 年在鑽孔 HFM14 中使用的監測網絡的簡化 2D 視圖，以及對應於 0.01 公尺的洩降響應時間。

根據 SKB 之結果指出，試驗範圍內最上層 150m 之岩體具有連接良好的裂隙網絡，且淺層岩體脂含水層具高的異向性及幾乎沒蓄水率(storativity)。也就是說，破裂面系統在水平方向上具有很好的穿透性，並與露頭區有良好的水力連接。其中，具有較高的水力擴散率之岩體，其主因根據 BIPS 圖像顯示，節理薄片具有非常寬的孔隙。

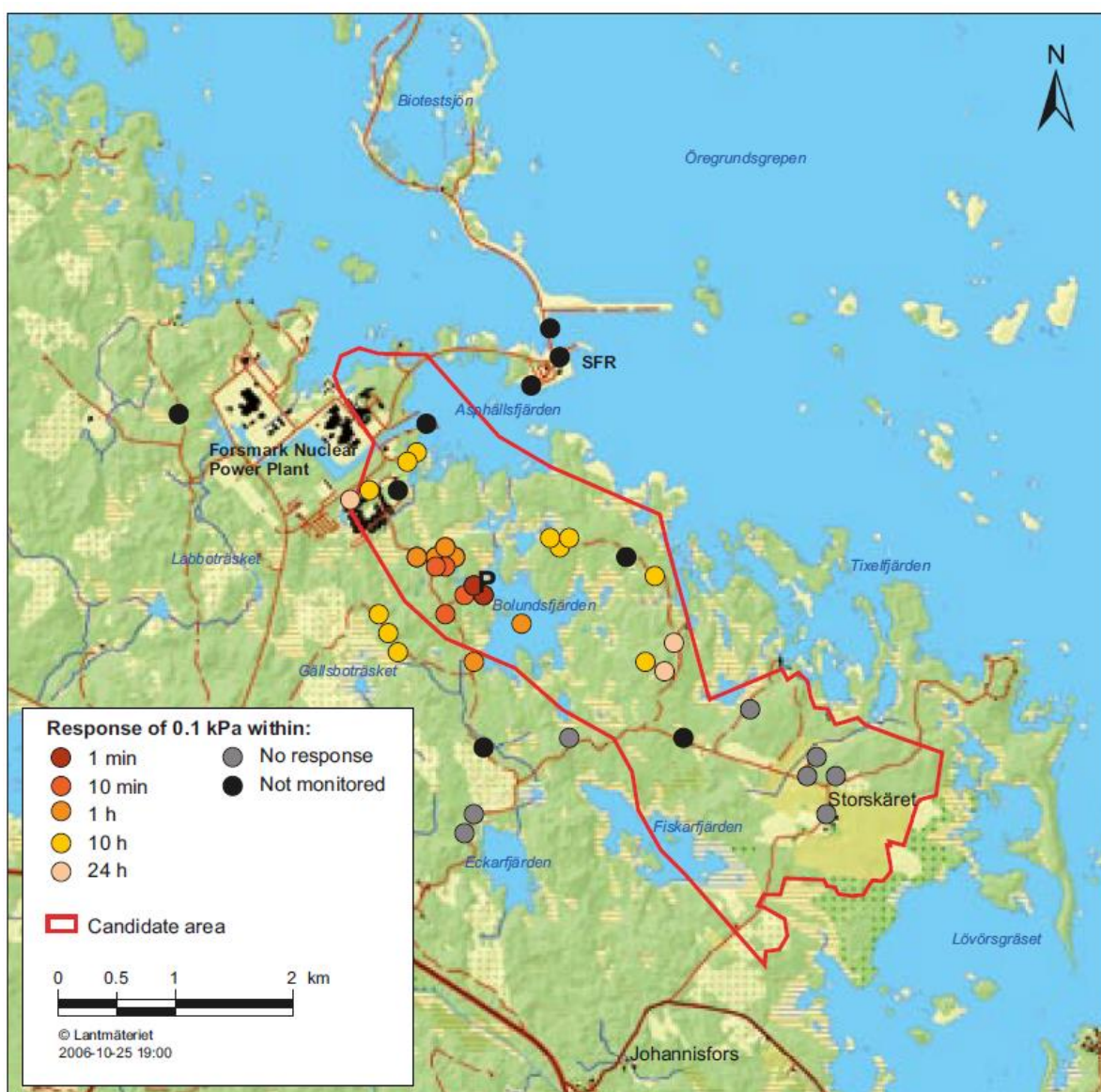


圖 3.7 2006 年於編號 5 號鑽孔場址(DS5)中鑽孔 HFM14(P 點)進行三週干涉試驗

3.2 破裂面幾何特徵統計建模之方法

統計地質離散破裂面網絡模型的基本方法是以基岩中破裂面的方位和終止關係為基礎，劃分為每個不同組別的破裂面域，減少相關的參數變化，降低 DFN 模型的總體的變化或不確定性。要完全模擬 DFN，需要的資訊包含 a)破裂面位態；b)破裂面尺寸；c)破裂面形狀；d)破裂面密度；e)破裂面空間控制，包括尺度化關係和位置模型；f)破裂面終止關係。此外，在建模過程中，應個別處理“受變形帶影響”的岩體。受變形帶影響之岩體破裂面密度相對於整體岩石為高，標有“受變形帶影響”的區域應使用不同的 P_{32} 強度(P_{10} 單位長度的破裂面數(鑽孔)； P_{21} 每單位面積的破裂面長度(露頭)； P_{32} 單位體積岩體破裂面積)。因此，為了降低模擬的不確定性，必須掌握這些“受變形帶影響”岩體的資訊。為了有效的進行 DFN 模擬，SKB 針對上述 DFN 模式所需之資訊，包含破裂面位態、尺寸、密度及空間等進行模型建置，敘述如下：

1. DFN 位態模型

破裂面位態模型主要由破裂面的方位、地質特徵和幾何關係發展而來。SKB 建構地質 DFN 位態模型的工作流程如下：

- (1) 使用露頭測繪資料，確定每個破裂面域中的破裂面位態。
- (2) 進行立體投影(stereoplots)分析。
- (3) 經由分配球面概率分佈量化位態組(Orientation sets)。
- (4) 根據走向區分露頭組(outcrop sets)：
 - a) 普現群組(Global)；
 - b) 局部群組(Local)。
- (5) 每個破裂面區域中，針對鑽孔和露頭數據的每個破裂面組之擬合方位分佈被彙編成單個數據集。每個破裂面組的最終方位模型包含：
 - a) 平均極點(φ, θ)適用於單一區域；
 - b) 潛在變異的單變數 Fisher 集中度參數在平均極點位置(K_{mp})；

c) Fisher 集中度參數(κ)的平均值。

(6) 參數變異性透過 Fisher 集中度參數 κ (正態分佈)的統計分佈進行規範。

以破裂面域 FFM01 為例，表 3.6 為整理出 FFM01 中各個參數值，包含每個破裂面域中屬於哪個破裂面組、露頭組分類、平均極點以及 Fisher 分佈。另外，完整之參數如附錄四。

表 3.6 不連續面位態模型

破裂面域	破裂面組	露頭組分類	平均極點			Fisher 分佈 κ		
			Trend	Plunge	κ_{mp}	Mean	Std. dev.	Median
FFM01	NE	Global	314.9	1.3	47.4	20.9	9.4	17.8
FFM01	NS	Global	270.1	5.3	47.0	21.3	13.2	20.3
FFM01	NW	Global	230.1	4.6	32.3	15.7	8.1	12.6
FFM01	SH	Global	0.8	87.3	48.9	17.4	7.1	14.4
FFM01	ENE	Local	157.5	3.1	100.0	34.1	17.0	34.1
FFM01	EW	Local	0.4	11.9	30.0	13.9	5.6	13.5
FFM01	NNE	Local	293.8	0.0	33.1	21.8	0.9	NA
FFM01	SH2	Local	164.0	52.6	NA	35.43	NA	NA
FFM01	SH3	Local	337.9	52.9	10.2	17.1	0.1	NA

2.DFN 尺寸模型

尺寸模型是指對破裂面面積的數學描述，不同的破裂面組可能需要不同的尺寸模型。地質 DFN 的尺寸模型由兩種替代模型組成：一個建立在耦合尺寸-密度關係(TCM / TCMF)之上，主要來自地表露頭數據，以及第二個模型(OSM + TFM)，其主要來自地表露頭，其尺寸資訊主要來自鑽孔數據。此外，由於已經通過地質和構造變形程度來區分破裂面區域，因此可以合理地假定破裂面的尺寸模型因破裂面而不同。破裂面和次要變形帶域的統計模型包含兩個不同大小的模型替代方案：

- (1) 構造連續模型(TCM)：假設破裂面總體為一個很大的範圍(例如，從公尺延伸到公里)，此模型允許多個尺度上組合資料集。構造連續模型替代方案之間的唯一區別是歐基里德(Euclidean)假設 (TCM)或分形(TCMF)尺寸-密度尺度化。以破裂面域

FFM01 為例，表 3.7 及表 3.8 為上述兩種構造連續模型之參數，完整之參數如附錄四。

- (2) 露頭比例模型+構造斷層模型(OSM + TFM)：不考慮單一耦合尺寸密度的複合尺寸模型。在這個具體的參數化中，假設破裂面屬於不同尺度不同密度的不同群體(節理和斷層)。破裂面域 FFM01 之露頭比例模型如表 3.9(完整參數參閱附錄四)，構造斷層模型如表 3.10。

表 3.7 破裂面尺寸-歐基里得假設之構造連續模型 (TCM)

破裂面域	破裂面組	群組種類	尺寸分佈	Min. radius r_0 (m)	Exponent (k_r)	Match P_{32} $r_{0-\infty}$ (1/m)
FFM01	NE	Global	Power Law	0.66	3.02	1.74
FFM01	NS	Global	Power Law	0.06	2.78	1.29
FFM01	NW	Global	Power Law	0.59	2.85	0.95
FFM01	SH	Global	Power Law	0.82	2.85	0.63
FFM01	ENE	Local	Power Law	0.32	3.25	2.74
FFM01	EW	Local	Power Law	0.17	3.1	1.12
FFM01	NNE	Local	使用露頭比例尺寸模型			
FFM01	SH2	Local	根據露頭比例使用 SH 組的尺寸模型			
FFM01	SH3	Local	根據露頭比例使用 SH 組的尺寸模型			

表 3.8 破裂面尺寸-分形構造連續模型 (TCMF)

破裂面域	破裂面組	群組種類	尺寸分佈	Min. radius r_0 (m)	Exponent (k_r)	Match P_{32} $r_{0-\infty}$ (1/m)
FFM01	NE	Global	Power Law	0.72	3.01	1.74
FFM01	NS	Global	Power Law	0.06	2.76	1.29
FFM01	NW	Global	Power Law	0.63	2.85	0.95
FFM01	SH	Global	Power Law	0.72	2.83	0.63
FFM01	ENE	Local	Power Law	0.34	3.25	2.74
FFM01	EW	Local	Power Law	0.17	3.13	1.12
FFM01	NNE	Local	使用露頭比例尺寸模型			
FFM01	SH2	Local	根據露頭比例使用 SH 組的尺寸模型			
FFM01	SH3	Local	根據露頭比例使用 SH 組的尺寸模型			

表 3.9 破裂面尺寸-露頭尺度模型(OSM)

破裂面域	破裂面組	群組種類	尺寸分佈	Min. radius r_0 (m)	Exponent (k_r)	Match P_{32} $r_0-\infty$ (1/m)
FFM01	NE	Global	Power Law	0.039	2.64	1.74
FFM01	NS	Global	Power Law	0.039	2.90	1.29
FFM01	NW	Global	Power Law	0.039	2.44	0.95
FFM01	SH	Global	Power Law	0.039	2.61	0.63
FFM01	ENE	Local	Power Law	0.039	2.20	2.74
FFM01	EW	Local	Power Law	0.039	3.06	1.12
FFM01	NNE	Local	Power Law	0.039	3.00	4.39
FFM01	SH2	Local	From SH	0.039	2.61	0.92

表 3.10 破裂面尺寸-構造斷層模型(TFM)

破裂面域	破裂面組	群組種類	尺寸分佈	Min. radius r_0 (m)	Exponent (k_r)	Match P_{32} r_0-564 (1/m)
All Domains	NE	Global	Power Law	28	3	0.0285
All Domains	NS	Global	Power Law	28	2.2	0.0003
All Domains	NW	Global	Power Law	28	2.06	0.0003
All Domains	SH	Global	Power Law	28	2.83	0.0286
All Domains	ENE	Global	Power Law	28	3.14	0.0871
All Domains	EW	Global	Power Law	28	2.85	0.0014

3. DFN 密度模型

地質 DFN 模型的破裂密度與尺寸和空間模型密切相關。最終密度模型建立在以下假設之上：

- 露頭比例模型中的破裂域 FFM01 和 FFM06，大小-密度匹配點基於使用王氏解法(Wang solution)從核心鑽孔數據獲取平均 P_{32} 值，假設分佈最小半徑等於鑽孔半徑的分佈。
- 對於所有其他模型(TFM、TCM、TCMF)和露頭比例模型的其他區域(FFM02 和 FFM03)，尺寸密度匹配點建立在同時匹配從核心鑽孔獲得的平均 P_{32} 值與匹配相關表面露頭上的 P_{21} 值的 P_{32} 值。最小半徑通常設定為大於鑽井的最小半徑。在可能的情況下，量化 P_{32} 的變異性。雖然沒有強烈的深度依賴性，但 P_{32} 確實隨岩性和破裂域而變化。另外，沒有限制 P_{32} 應該在空間上作為伽馬分佈而變化。在密度模型表中呈現的值表示在 0.5m 和 564m 之間的截斷的 P_{32} 值(破裂面域 FFM01 如表 3.11 及表 3.12，完整之參數參閱附錄四)。另請注意，TFM 模型僅在不受 DZ 影響的破裂配對時才有效。

表 3.11 平均 P_{32} 密度，破裂面“不受 DZ 影響”

破裂面域	破裂面組	群組種類	Mean P_{32} (0.5–564 m)			(28–564 m)
			OSM	TCM	TCMF	TFM
FFM01	NE	Global	0.33	2.30	2.50	0.0285
FFM01	NS	Global	0.13	0.24	0.26	0.0003
FFM01	NW	Global	0.29	1.10	1.15	0.0003
FFM01	SH	Global	0.13	0.95	0.85	0.0286
FFM01	ENE	Local	1.24	1.60	1.70	0.0871
FFM01	EW	Local	0.07	0.34	0.33	0.0014
FFM01	NNE	Local	0.34	使用 OSM	使用 OSM	NA
FFM01	SH2	Local	0.19	使用 OSM	使用 OSM	NA
FFM01	SH3	Local	0.19	使用 OSM	使用 OSM	NA

表 3.12 平均 P_{32} 密度，破裂面“受 DZ 影響”

破裂面域	破裂面組	群組種類	Mean $P_{32r_0-\infty}$	Mean P_{32} (0.5–564 m)		
				OSM	TCM	TCMF
FFM01	NE	Global	5.45	1.04	7.22*	7.22*
FFM01	NS	Global	2.60	0.26	0.49	0.49
FFM01	NW	Global	2.42	0.75	2.79*	2.79*
FFM01	SH	Global	2.44	0.50	3.69*	3.69*
FFM01	ENE	Local	3.90	1.76	2.27	2.27
FFM01	EW	Local	2.85	0.19	0.87	0.87
FFM01	NNE	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM01	SH2	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM01	SH3	Local	2.24	0.46	使用 OSM	使用 OSM

* r_0 適合在 FFM01 中大於 $r_{\min}(0.5 \text{ m})$ ；因此， P_{32} 增加。

3.2 破裂面幾何特徵之不確定性評估

因破裂面岩體水力-力學耦合問題在於破裂面之幾何與力學-水力參數統計特性，以下摘要總結 SKB 報告(引用文獻)地質特徵化模型建立團隊於 Forsmark 場址特徵化 2.2 階段與破裂面統計量化有關之不確定性評估獲致之結論，希望根據 Forsmark 場址特徵化經驗所獲得之參數不確定性範圍，可作為低放坑道處置之參考(並非要求低放處置有與 Forsmark 場址特徵化一樣的調查強度，只是提供參數不確定評估結果，作為低放場址調查重點方向決定之參考)。

- (1) 破裂面位態：地質 DFN 參數化的分析結果顯示，三個破裂面域(FFM01，FFM03 和 FFM06)，有四個普現群組一致，分別為 NE、NS、NW 和 SH 之破裂面組。破裂面域 FFM02 相較於其他域中增加兩個普現群組(分別為 ENE 和 EW 破裂面組)，但這兩個群組於其他破裂面域中歸類於局部群組。有效掌握處置場區域之破裂面位態，可能是降低不確定性之關鍵因素之一。
- (2) 破裂面尺寸：“構造連續”為影響不確定性最大的因素，地質 DFN 參數化過程中完成的統計分析結果可說明，露頭和鑽孔測量的破裂面與公里尺度的變形區可能是不同的群體。可能影響大概為一個破裂密度的數量級，對岩體的滲透性的影響大約為一個數量級。如果採用構造連續模型，則最重要的不確定性是尺度大於幾十公尺之不確定性因素，此影響構造連續模型的尺度模型。因此，可能需要注意是否可使用構造連續體，允許單一模型包含鑽孔、露頭、地磁線和變形區數據。如果不使用構造連續體，且破裂面尺度差異較大(大尺度如：斷層/變形區之破裂面；小尺度：節理)，是否有尺寸之限制？
- (3) 破裂面密度：所使用的模型(包含歐基里得假設、分形或其他類型的模型)所涵蓋的範圍(地表至處置深度)；當深度因素被評估時，除了最上面的 100 公尺以外，破裂面密度似乎沒有深度的系統性變化。除近地表環境外，密度變化不是深度的系統函數。假設忽略深度因素，則會稍微高估平均密度(約 10%)。破裂密度隨岩性、破裂面組和破裂面域變化而變化。因此，國內在進行相關研究時，可能須注意所使用的模型所涵蓋的範圍(地表至處置深度)，且破裂密度如何隨深度而變化，假設不考慮深度變化，則評估不確定性因素會增加多少。

- (4) 岩石類型：不同岩石類型的數據組合將對於不確定性產生最大的影響。假設將這些數據進行組合，對每個區域分別建模(包含具有非常不同的破裂密度的幾種獨特的岩石類型(例如角閃岩))，則可減小影響，可能影響密度大約半個數量級，對岩體的滲透率有相應的影響。因此需關注一些議題，包含岩石類型如何影響不確定性?如果不考慮岩石類型之因素，則不確定性會如何變化?

最後，SKB 地質團隊建議水文地質團隊、工程團隊以及負責安全評估者應檢視地質團隊所提出之不確定性是否滿足其分析需求。同時，因 FFM01 以及 FFM06 兩區之破裂面尺寸量化結果不確定性太高(缺少 FFM01 以及 FFM06 兩處之破裂面軌跡長資料，不確定性高達 2-3 個數量級)，地質團隊亦建議後續隧道或豎井開挖時應盡可能調查相關資料。最後，所有資料使用者必須自行評估不確定性是否滿足其分析需求。使用資料者若發現不確定性過大，則應進行進一步之調查與分析以降低不確定性。

破裂面參數之統計特性不確定性關鍵課題之一是尺寸效應，根據露頭、鑽井以及地物探測獲得之資料進行昇尺度建模，不確定性是很高的，由露頭到公里級尺寸，破裂面密度與滲透係數差異可以差到一個數量級。若直接昇尺度的可能性不存在，且斷層帶或變形區附近之破裂面特性與遠離這些區域之破裂面特性非常不同，那麼多大的斷層帶或變形區應該被獨立出來分析?多小的節理系統可以被納入擬連續體昇尺度模型中?這些問題都存在不確定性，根據非常有限的抽水試驗資料分析結果顯示，尺寸超過 200 公尺之破裂面不納入擬連續體滲透隙數平均化的情況下，破裂面密度與滲透係數可能下降 0.66-09 倍。破裂面密度昇尺度關係(由鑽井/露頭尺度至處置窖尺度)模式建立也具有不確定性，由露頭尺度推估處置窖尺度之破裂面密度最大增加 1.6 倍。不同岩石分區位之破裂面密度也會不一樣，若統計時將不同岩石分區分開，則破裂面密度(以及滲透係數)之不確定性可減少約半個數量級。至於深度相關之破裂面密度若忽略不考慮，可能會高估破裂面密度約 10%，而破裂面方位對破裂面密度不確定性的影響，主要來自於破裂面分組時的不確定性。

第四章 力學-水力特性對流場敏感度分析

本章節探討可能對於坑道處置場址岩體裂隙中流場的敏感度因子，過去常用來模擬破裂介質中水流之方法有兩種，其一為擬連續體模式(continuum approach)，另一類則採用離散模式(discrete approach)。擬連續模式中，裂隙岩體被假設為一均勻等值孔隙介質，此種方法將每組破裂面的流動性質以平均值表示，因此這類模式適合較大範圍的岩體，不需要對單一破裂面之性質完全了解；離散模式通常假設岩體為多組不連續面分割，經調查岩體之不連續面分布，再利用統計方法，以建立岩體離散裂隙模型。綜上所述，前者方法較適用於大區域、不連續面數量相對極多之模擬區域，而後者方法適用於小區域、不連續面數量相對較少之模擬區域。然而，地質處置範圍較適合上述擬連續體模式之方法，因此本章主要採用擬連續體模式之方法進行分析。

4.1 分析方法

Oda 於 1985 提出破裂張量概念，將岩體視為均質異向性之介質，假設岩體之材料為不透水材質，地下水只能透過岩體中的破裂面流動，並根據破裂面形狀、內寬、位態、長度等參數，以二維連續模式導出破裂岩體滲透係數張量(如式 4.1)：

$$P_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{e_m} \int_0^{l_m} \int_{\Omega} l^2 e^3 \hat{n}_i \hat{n}_j E(\hat{n}) f(l) g(e) d\Omega dl de \quad (4.1)$$

其中 ρ 為不連續面體密度(Volume density)，代表單位體積岩體之不連續面個數， l 為破裂面長度， e 為開口寬。由上式得知每個參數對於裂隙岩體水力傳導係數的影響程度不同， ρ 與水力傳導係數成一次方關係， l 與水力傳導係數為平方關係， e 為三次方關係。再者，利用滲透係數張量可進一步求得水力傳導係數 k_{ij} (式 4.2)：

$$k_{ij} = \frac{1}{12} (P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij}) \quad (4.2)$$

由式(4.1)與(4.2)可知，水力傳導係數與不連續面密度成正比，與裂隙大小(長度)平方成正比，也就是說，裂隙大小對水力傳導係數之影響大於裂隙密度。另外，由式(4.1)與(4.2)亦可知，水力傳導係數與裂隙開口寬三次方成正比，為影響岩盤中流體流動之最關鍵因子，以下不連續特性敏感度分析將集中於裂隙開口寬 e 相關之參數。

裂隙開口寬為不連續面位態與應力之函數，本研究計算開口寬之方法如式 4.3，首先假設一未受應力作用之初始開口寬 E_0 減去因應力作用而改變之開口寬閉合量 ΔE 得到力學內寬 E 。

$$E = E_0 - \Delta E \quad (4.3)$$

其中，初始開口寬的計算方法本研究使用 JRC(不連續面粗糙度係數)與 JCS(不連續面單壓強度)之概念(Bandis, 1983)，如式(4.4)：

$$E_0 = \frac{JRC_0}{5} \left(0.2 \frac{\sigma_c}{JRC_0} - 0.1 \right) \quad (4.4)$$

JRC_0 為不連續表面之粗糙度係數(試驗室尺寸 10 cm)， JCS_0 為不連續面表面之單壓強度(試驗室尺寸 10 cm)， σ_c 為完整的岩石單壓強度，假設不連續面未受風化作用的影響，此時不連續面之單壓強度可視為完整岩石之單壓強度($JCS_0 = \sigma_c$)。

Bandis et al. (1983)認為單一不連續面之正向應力 σ_n 與不連續面開口寬受正向應力之閉合量 ΔE 之關係可用雙曲線模擬，如式(4.5)所示：

$$\sigma_n = \frac{\Delta E}{a - b\Delta E} \quad (4.5)$$

其中， a 、 b 為常數(可由實驗獲得)。

$$a = 1/k_0 \quad (4.6)$$

$$b = 1/k_0 b_n^m \quad (4.7)$$

將式(4.6)、式(4.7)帶入式(4.5)，可得不連續面開口寬閉合量 ΔE (如式 4.8)，即可求得力學內寬 E ，其中 k_0 為節理受某一正向應力時之初始正向勁度， b_n^m 為不連續面內寬最大閉合量。

$$\Delta E = \frac{a\sigma_n}{1 + b\sigma_n} \quad (4.8)$$

Bandis et al. (1983)認為初始正向勁度 K_0 (式 4.9)與不連續面內寬最大閉合量 b_n^m (式 4.10)也可使用 JRC、JCS 之概念有如下之經驗公式：

$$k_0 = 0.02 \left(\frac{JCS_0}{E_0} \right) + 2JRC_0 - 10 \quad (4.9)$$

$$b_n^m = 0.3 - 0.006JRC_0 + 2.24 \left(\frac{JCS_0}{E_0} \right)^{-0.25} \quad (4.10)$$

上述各公式中參數之適用範圍如下：

$$JRC_0 : 5 \sim 15 ; JCS_0 : 22 \sim 182 \text{ (MPa)} ; E_0 : 0.1 \sim 0.6 \text{ (mm)}$$

上述之計算得到力學內寬，最後透過式(4.11)力學-水力內寬轉換公式(Bandis, et al. 1985)得到水力內寬 e ，並帶入 Oda model 即可求得水力傳導係數。

$$e = \frac{E^2}{JRC_0^{2.5}} \quad (4.11)$$

4.2 以粗糙度係數(JRC_0)為變數之分析結果

本節探討未受到擾動或風化作用，如上一節式(4.4)中，不連續面之單壓強度可視為完整岩石之單壓強度($JCS_0 = \sigma_c$)，因此式(4.4)之初始開口寬只與粗糙度係數 JRC_0 有關，因此式(4.4)可縮減為 $E_0 = 0.02JRC_0$ 。再者，假設各參數值：破裂面密度 $\rho = 5$ (條/ m^3)，破裂面長度 $l = 5$ (m)， $JCS_0 = 100$ (MPa)，以 JRC_0 為變數(4~16)針對不同邊界應力進行計算(所有詳細的數據如表 4.1)，並針對不同均向邊界應力 σ_n 進行計算($\sigma_n = 0.15$ MPa、0.9 MPa、1.8 MPa、6.0 MPa、7.5 MPa)，計算結果如下：

圖 4.1 為 JRC_0 與初始力學內寬 E_0 之關係。由於不考慮風化作用之情況，不連續面之單壓強度視為完整岩石之單壓強度，因此簡化後 E_0 與 JRC_0 為正比之關係，與計算結果(圖 4.1)相符。再者，透過式(4.3)可進一步計算出力學內寬，計算結果如圖 4.2 所示，結果可發現其趨勢與初始力學內寬之結果相似，但可發現當邊界應力越大，對於力學內寬的敏感度越大。得到力學內寬之結果可透過式(4.11)之力學-水力內寬轉換公式將力學內寬轉換成水力內寬，計算結果如圖 4.3，結果可發現其敏感度與力學內寬有相同之趨勢， JRC_0 愈大，其受到邊界應力之敏感度則愈大。

最後，利用以上資料進一步求得水力傳導係數 K ，其關係圖如圖 4.4，可以發現其趨勢與水力內寬之結果相似，但放大了約 3 次方倍，與式 4.1 水力傳導係數與開口寬成三次方關係相符。

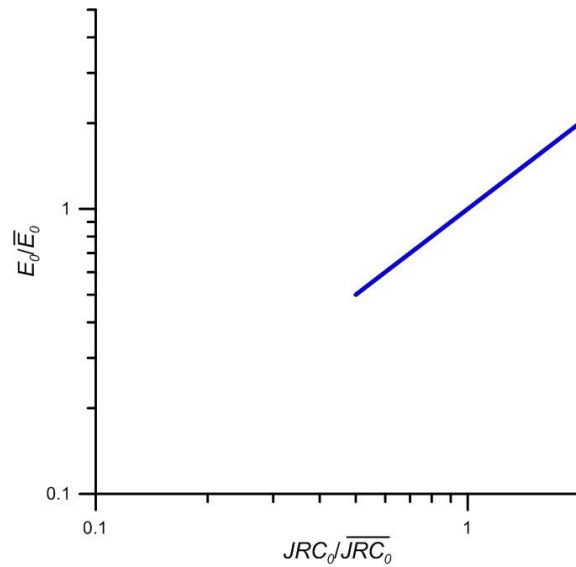


圖 4.1 未考慮風化作用之情形下， JRC_0 與初始力學內寬 E_0 之關係圖

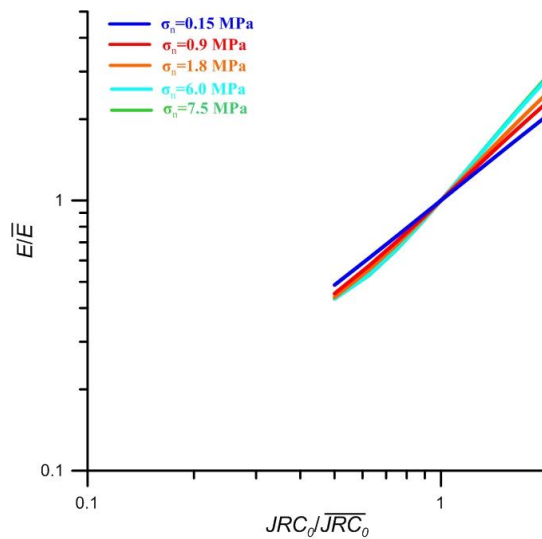


圖 4.2 未考慮風化作用之情形下， JRC_0 與力學內寬 E 之關係圖

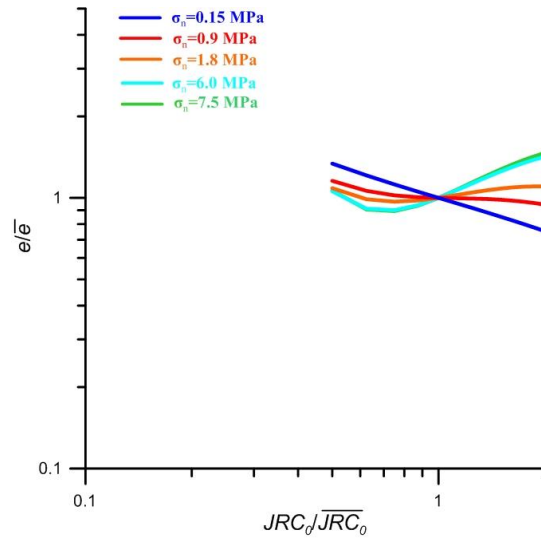


圖 4.3 未考慮風化作用之情形下， JRC_0 與水力內寬 e 之關係圖

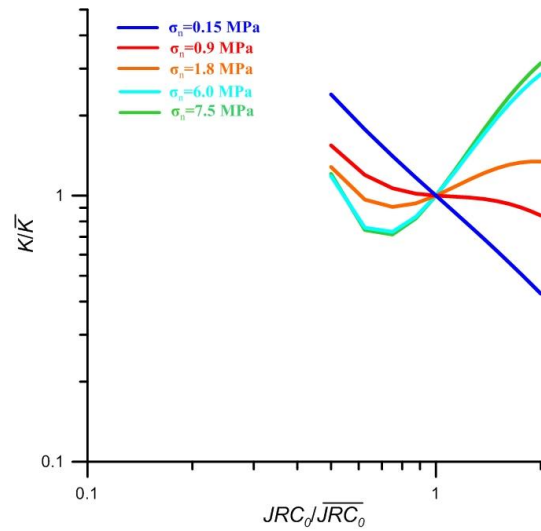


圖 4.4 未考慮風化作用之情形下， JRC_0 與水力傳導係數 K 之關係圖

表 4.1 不考慮風化作用下，變數為 JRC_0 之計算結果

參數設定	JRC_0	E_0 (mm)	E (mm)	e (mm)	K (m/sec)
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JCS_0=100$ MPa 邊界應力(均向): 10M(0.15MPa)	4	0.08	7.4196E-05	1.7203E-04	2.7770E-11
	5	0.1	9.3242E-05	1.5552E-04	2.0517E-11
	6	0.12	1.1269E-04	1.4401E-04	1.6290E-11
	7	0.14	1.3247E-04	1.3537E-04	1.3529E-11
	8	0.16	1.5250E-04	1.2847E-04	1.1566E-11
	9	0.18	1.7269E-04	1.2272E-04	1.0080E-11
	10	0.2	1.9296E-04	1.1775E-04	8.9042E-12
	11	0.22	2.1329E-04	1.1336E-04	7.9450E-12
	12	0.24	2.3363E-04	1.0942E-04	7.1456E-12
	13	0.26	2.5397E-04	1.0585E-04	6.4689E-12
14	0.28	2.7429E-04	1.0259E-04	5.8894E-12	

	15	0.3	2.9460E-04	9.9596E-05	5.3884E-12
	16	0.32	3.1489E-04	9.6831E-05	4.9520E-12
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JCS_0=100$ MPa 邊界應力(均向): 60M(0.9MPa)	<i>JRC₀</i>	<i>E₀</i> (mm)	<i>E</i> (mm)	<i>e</i> (mm)	<i>K</i> (m/sec)
	4	0.08	5.7540E-05	1.0346E-04	6.0408E-12
	5	0.1	7.2867E-05	9.4982E-05	4.6737E-12
	6	0.12	8.9789E-05	9.1425E-05	4.1680E-12
	7	0.14	1.0802E-04	9.0007E-05	3.9771E-12
	8	0.16	1.2727E-04	8.9484E-05	3.9082E-12
	9	0.18	1.4726E-04	8.9245E-05	3.8769E-12
	10	0.2	1.6776E-04	8.8997E-05	3.8447E-12
	11	0.22	1.8858E-04	8.8617E-05	3.7957E-12
	12	0.24	2.0960E-04	8.8069E-05	3.7256E-12
	13	0.26	2.3072E-04	8.7357E-05	3.6360E-12
	14	0.28	2.5187E-04	8.6506E-05	3.5308E-12
	15	0.3	2.7303E-04	8.5545E-05	3.4144E-12
	16	0.32	2.9416E-04	8.4502E-05	3.2911E-12
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JCS_0=100$ MPa 邊界應力(均向): 120M(1.8MPa)	<i>JRC₀</i>	<i>E₀</i> (mm)	<i>E</i> (mm)	<i>e</i> (mm)	<i>K</i> (m/sec)
	4	0.08	4.8499E-05	7.3506E-05	2.1662E-12
	5	0.1	6.1157E-05	6.6907E-05	1.6336E-12
	6	0.12	7.6005E-05	6.5509E-05	1.5333E-12
	7	0.14	9.2635E-05	6.6192E-05	1.5818E-12
	8	0.16	1.1068E-04	6.7679E-05	1.6908E-12
	9	0.18	1.2982E-04	6.9358E-05	1.8198E-12
	10	0.2	1.4976E-04	7.0927E-05	1.9462E-12
	11	0.22	1.7028E-04	7.2249E-05	2.0570E-12
	12	0.24	1.9118E-04	7.3275E-05	2.1458E-12
	13	0.26	2.1235E-04	7.4002E-05	2.2104E-12
	14	0.28	2.3367E-04	7.4456E-05	2.2513E-12
	15	0.3	2.5509E-04	7.4669E-05	2.2707E-12
	16	0.32	2.7653E-04	7.4679E-05	2.2716E-12
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JCS_0=100$ MPa 邊界應力(均向): 400M(6.0MPa)	<i>JRC₀</i>	<i>E₀</i> (mm)	<i>E</i> (mm)	<i>e</i> (mm)	<i>K</i> (m/sec)
	4	0.08	3.6142E-05	4.0820E-05	3.7099E-13
	5	0.1	4.4343E-05	3.5174E-05	2.3736E-13
	6	0.12	5.5360E-05	3.4755E-05	2.2898E-13
	7	0.14	6.8579E-05	3.6278E-05	2.6041E-13
	8	0.16	8.3567E-05	3.8578E-05	3.1316E-13
	9	0.18	9.9982E-05	4.1138E-05	3.7971E-13
	10	0.2	1.1755E-04	4.3695E-05	4.5501E-13
	11	0.22	1.3603E-04	4.6112E-05	5.3480E-13

	12	0.24	1.5526E-04	4.8322E-05	6.1540E-13
	13	0.26	1.7506E-04	5.0292E-05	6.9380E-13
	14	0.28	1.9531E-04	5.2017E-05	7.6765E-13
	15	0.3	2.1592E-04	5.3502E-05	8.3531E-13
	16	0.32	2.3681E-04	5.4763E-05	8.9577E-13
	<i>JRC</i> ₀	<i>E</i> ₀ (mm)	<i>E</i> (mm)	<i>e</i> (mm)	<i>K</i> (m/sec)
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JCS_0=100$ MPa 邊界應力(均向): 500M(7.5MPa)	4	0.08	3.4616E-05	3.7446E-05	2.8639E-13
	5	0.1	4.2198E-05	3.1854E-05	1.7629E-13
	6	0.12	5.2652E-05	3.1437E-05	1.6946E-13
	7	0.14	6.5329E-05	3.2920E-05	1.9459E-13
	8	0.16	7.9786E-05	3.5167E-05	2.3721E-13
	9	0.18	9.5684E-05	3.7677E-05	2.9172E-13
	10	0.2	1.1275E-04	4.0202E-05	3.5439E-13
	11	0.22	1.3077E-04	4.2611E-05	4.2197E-13
	12	0.24	1.4955E-04	4.4835E-05	4.9157E-13
	13	0.26	1.6895E-04	4.6844E-05	5.6064E-13
	14	0.28	1.8884E-04	4.8627E-05	6.2716E-13
	15	0.3	2.0913E-04	5.0190E-05	6.8957E-13
	16	0.32	2.2973E-04	5.1541E-05	7.4679E-13

4.3 以不連續面單壓強度(JCS_0)為變數之分析結果

探討不連續面單壓強度 JCS_0 之結果，此節計算過程與前一節相似，本研究將 JRC_0 設定為 8，其餘參數與前一小節之參數設定相同(即破裂面密度 $\rho=5$ (條/ m^3)、破裂面長度 $l=5$ (m)、 $JCS_0=\sigma_c$)，改變 JCS_0 (20~180MPa)並觀察其結果，結果如下(所有詳細的數據如表 3)：

由於不考慮風化作用， $JCS_0=\sigma_c$ ，因此計算結果可發現 JCS_0 與 E_0 無關(如圖 4.5)。進一步求得力學內寬 E ，本研究發現 JCS_0 有一個適用範圍，當 JCS_0 值約為 20~40 MPa 時，計算邊界應力 σ_n 為 6.0、7.5 MPa 之結果力學內寬 E 為負值，此結果表示開口寬閉合量 ΔE 大於初始開口寬 E_0 ，造成不合理的情況發生。因此，假設當開口寬完全閉合時，開口寬閉合量 ΔE 等於初始力學內寬 E_0 ，並可計算出 JCS_0 對應 JRC_0 的一個適用範圍，如圖 4.6 所示，各曲線右側為適用範圍，代表所計算出來的 $E_0 > \Delta E$ 。由圖可知，邊界應力 σ_c 越大， JCS_0 之適用範圍愈受到限制，表示邊界應力愈大裂隙愈容易完全閉合。

圖 4.7、圖 4.8 及圖 4.9 分別為力學內寬、水力內寬及水力傳導係數與 JCS_0 之關係，結果

顯示相同之趨勢，邊界應力 σ_n 對於開口寬之之影響非常劇烈，並且在較高的邊界應力條件下，越容易達到開口寬完全閉合之狀態。

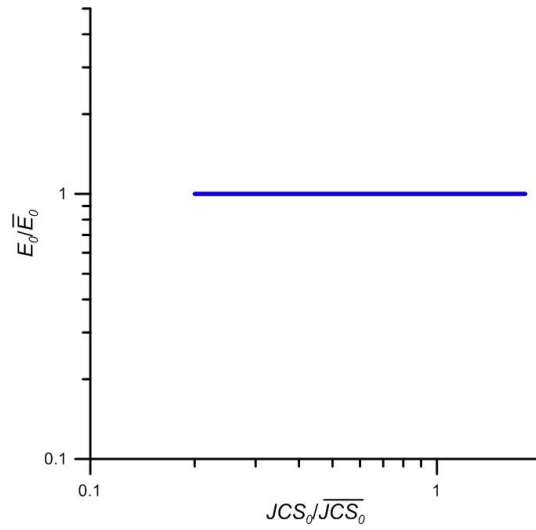


圖 4.5 未考慮風化作用之情形下， JCS_0 與初始力學內寬 E_0 之關係圖

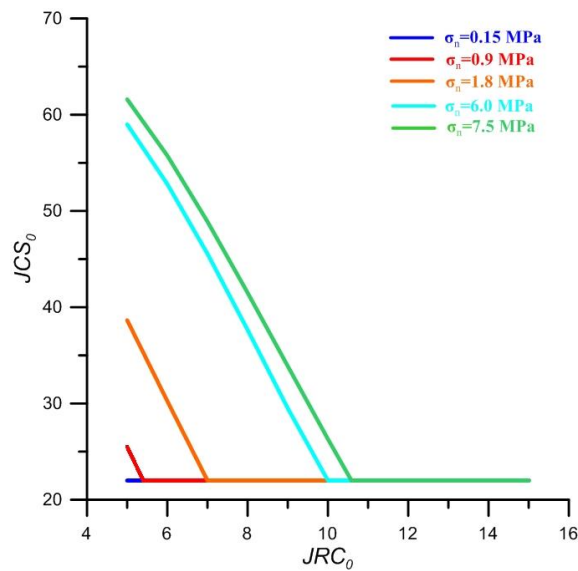


圖 4.6 未考慮風化作用之情形下， JCS_0 相對於 JRC_0 之適用範圍

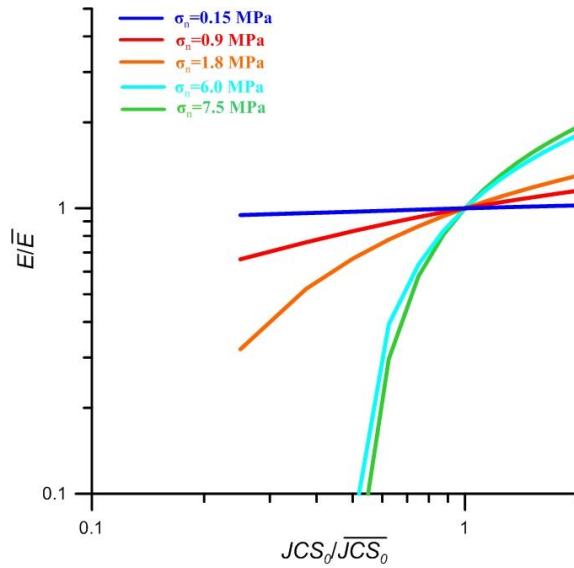


圖 4.7 未考慮風化作用之情形下， JCS_0 與力學內寬 E 之關係圖

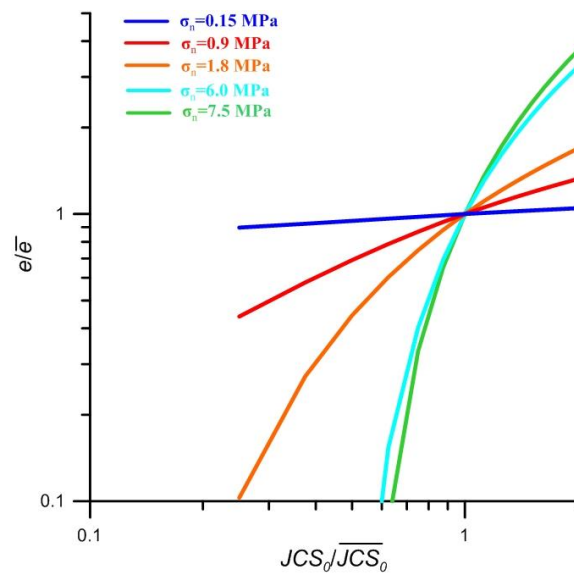


圖 4.8 未考慮風化作用之情形下， JCS_0 與水力內寬 e 之關係圖

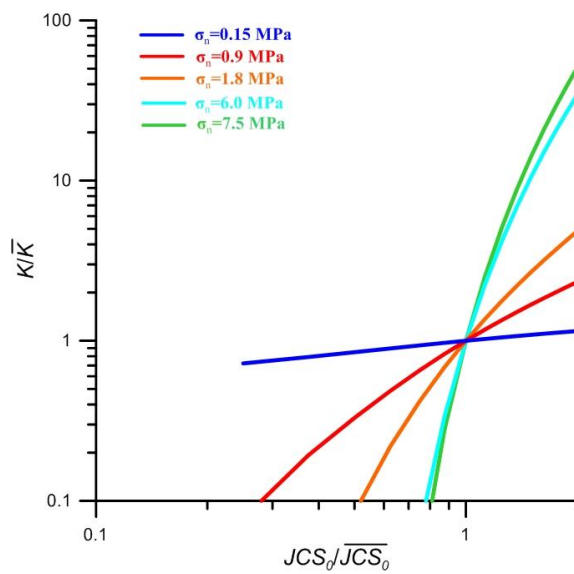


圖 4.9 未考慮風化作用之情形下， JCS_0 與水力傳導係數 K 之關係圖

表 4.2 不考慮風化作用下，變數為 JCS_0 之計算結果

參數設定	JCS_0 (MPa)	E_0 (mm)	E (mm)	e (mm)	K (m/sec)
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JRC_0=8$ 邊界應力(均向): 10M(0.15MPa)	20	0.16	1.4327E-04	1.1339E-04	7.9523E-12
	30	0.16	1.4548E-04	1.1692E-04	8.7184E-12
	40	0.16	1.4718E-04	1.1966E-04	9.3450E-12
	50	0.16	1.4852E-04	1.2185E-04	9.8674E-12
	60	0.16	1.4961E-04	1.2364E-04	1.0310E-11
	70	0.16	1.5051E-04	1.2514E-04	1.0690E-11
	80	0.16	1.5128E-04	1.2642E-04	1.1020E-11
	90	0.16	1.5193E-04	1.2752E-04	1.1309E-11
	100	0.16	1.5250E-04	1.2847E-04	1.1566E-11
	110	0.16	1.5300E-04	1.2932E-04	1.1795E-11
	120	0.16	1.5344E-04	1.3007E-04	1.2001E-11
	130	0.16	1.5384E-04	1.3074E-04	1.2189E-11
	140	0.16	1.5420E-04	1.3135E-04	1.2360E-11
	150	0.16	1.5452E-04	1.3191E-04	1.2518E-11
	160	0.16	1.5482E-04	1.3242E-04	1.2665E-11
	170	0.16	1.5510E-04	1.3290E-04	1.2802E-11
	180	0.16	1.5537E-04	1.3335E-04	1.2933E-11
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JRC_0=8$ 邊界應力(均向): 60M(0.9MPa)	JCS_0 (MPa)	E_0 (mm)	E (mm)	e (mm)	K (m/sec)
	20	0.16	8.0324E-05	3.5642E-05	2.4696E-13
	30	0.16	9.2062E-05	4.6820E-05	5.5981E-13
	40	0.16	1.0071E-04	5.6030E-05	9.5939E-13
	50	0.16	1.0743E-04	6.3760E-05	1.4138E-12
	60	0.16	1.1285E-04	7.0356E-05	1.8995E-12
	70	0.16	1.1734E-04	7.6064E-05	2.4003E-12
	80	0.16	1.2114E-04	8.1067E-05	2.9059E-12
	90	0.16	1.2441E-04	8.5505E-05	3.4097E-12
	100	0.16	1.2727E-04	8.9484E-05	3.9082E-12
	110	0.16	1.2981E-04	9.3088E-05	4.3996E-12
	120	0.16	1.3209E-04	9.6384E-05	4.8837E-12
	130	0.16	1.3416E-04	9.9428E-05	5.3612E-12
	140	0.16	1.3606E-04	1.0227E-04	5.8337E-12
	150	0.16	1.3783E-04	1.0494E-04	6.3035E-12
	160	0.16	1.3949E-04	1.0749E-04	6.7735E-12
	170	0.16	1.4107E-04	1.0994E-04	7.2475E-12
180	0.16	1.4260E-04	1.1233E-04	7.7302E-12	
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JRC_0=8$ 邊界應力(均向):	JCS_0 (MPa)	E_0 (mm)	E (mm)	e (mm)	K (m/sec)
	20	0.16	3.2264E-05	5.7504E-06	1.0371E-15
	30	0.16	5.2503E-05	1.5228E-05	1.9261E-14
	40	0.16	6.7021E-05	2.4814E-05	8.3336E-14
50	0.16	7.8152E-05	3.3741E-05	2.0952E-13	

120M(1.8MPa)	60	0.16	8.7061E-05	4.1872E-05	4.0042E-13
	70	0.16	9.4415E-05	4.9245E-05	6.5136E-13
	80	0.16	1.0063E-04	5.5944E-05	9.5496E-13
	90	0.16	1.0599E-04	6.2060E-05	1.3037E-12
	100	0.16	1.1068E-04	6.7679E-05	1.6908E-12
	110	0.16	1.1486E-04	7.2876E-05	2.1110E-12
	120	0.16	1.1861E-04	7.7718E-05	2.5603E-12
	130	0.16	1.2203E-04	8.2262E-05	3.0362E-12
	140	0.16	1.2518E-04	8.6560E-05	3.5374E-12
	150	0.16	1.2810E-04	9.0656E-05	4.0637E-12
	160	0.16	1.3086E-04	9.4593E-05	4.6164E-12
	170	0.16	1.3347E-04	9.8408E-05	5.1979E-12
	180	0.16	1.3597E-04	1.0214E-04	5.8117E-12
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JRC_0=8$ 邊界應力(均向): 400M(6.0MPa)	JCS_0 (MPa)	E_0 (mm)	E (mm)	e (mm)	K (m/sec)
	20	0.16	-	-	-
	30	0.16	-	-	-
	40	0.16	5.6162E-06	1.7425E-07	2.8855E-20
	50	0.16	2.5843E-05	3.6894E-06	2.7392E-16
	60	0.16	4.1799E-05	9.6518E-06	4.9041E-15
	70	0.16	5.4863E-05	1.6628E-05	2.5074E-14
	80	0.16	6.5855E-05	2.3958E-05	7.5009E-14
	90	0.16	7.5304E-05	3.1327E-05	1.6768E-13
	100	0.16	8.3567E-05	3.8578E-05	3.1316E-13
	110	0.16	9.0896E-05	4.5642E-05	5.1859E-13
	120	0.16	9.7477E-05	5.2490E-05	7.8879E-13
	130	0.16	1.0345E-04	5.9118E-05	1.1269E-12
	140	0.16	1.0892E-04	6.5536E-05	1.5353E-12
	150	0.16	1.1397E-04	7.1759E-05	2.0155E-12
160	0.16	1.1868E-04	7.7807E-05	2.5692E-12	
170	0.16	1.2309E-04	8.3700E-05	3.1982E-12	
180	0.16	1.2725E-04	8.9459E-05	3.9049E-12	
破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 完整岩石單壓強度 $\sigma=JCS_0$ $JRC_0=8$ 邊界應力(均向): 500M(7.5MPa)	JCS_0 (MPa)	E_0 (mm)	E (mm)	e (mm)	K (m/sec)
	20	0.16	-	-	-
	30	0.16	-	-	-
	40	0.16	-	-	-
	50	0.16	1.8068E-05	1.8034E-06	3.1989E-17
	60	0.16	3.5159E-05	6.8287E-06	1.7368E-15
	70	0.16	4.9132E-05	1.3335E-05	1.2934E-14
	80	0.16	6.0879E-05	2.0474E-05	4.6811E-14
	90	0.16	7.0969E-05	2.7823E-05	1.1748E-13
	100	0.16	7.9786E-05	3.5167E-05	2.3721E-13
	110	0.16	8.7602E-05	4.2394E-05	4.1558E-13

	120	0.16	9.4615E-05	4.9453E-05	6.5966E-13
	130	0.16	1.0097E-04	5.6323E-05	9.7451E-13
	140	0.16	1.0679E-04	6.2999E-05	1.3638E-12
	150	0.16	1.1216E-04	6.9490E-05	1.8302E-12
	160	0.16	1.1714E-04	7.5807E-05	2.3761E-12
	170	0.16	1.2181E-04	8.1967E-05	3.0037E-12
	180	0.16	1.2620E-04	8.7987E-05	3.7153E-12

4.4 受風化作用影響之結果

裂隙表面風化作用會造成初始開口寬 E_0 增加，進一步造成水力傳導係數 k 增加，舉例而言，在相同條件下(假設破裂面密度 $\rho=5$ 、破裂面長度 $l=5$ 、正向應力(均向)=0.15MPa、 $JRC_0=8$ 以及 $\sigma_c=100$ MPa)，不考慮風化作用時，初始力學內寬 E_0 計算結果為 0.16(mm)，但受到風化作用影響時，不連續面單壓強度下降(假設 JCS_0 下降至 50 MPa)，初始力學內寬 E_0 變為 0.48 (mm)，進一步影響了力學內寬 E 、水力內寬 e 以及水力傳導係數 k ，其中水力內寬 e 與力學內寬 E 的平方成正比(如式 4.11)，而水力傳導係數 k 又與水力內寬三次方成正比，因此，初始力學內寬 E_0 改變對於水力傳導係數 k 之影響非常巨大，分析過程中應加以考慮是否受到風化作用影響之因素。

表 4.3 相同條件下，不考慮風化作用以及考慮風化作用之結果

破裂面密度 $\rho=5$ 破裂面長度 $l=5$ 邊界應力(均向): 10M (0.15MPa) $JRC_0=8$ $\sigma_c=100$ MPa	不考慮風化($JCS_0=\sigma_c$)	考慮風化($JCS_0=50$ MPa)
	$E_0=0.16$ (mm)	$E_0=0.48$ (mm)
	$E=1.5250E-04$ (mm)	$E=4.6237E-04$ (mm)
	$e=1.2847E-04$ (mm)	$e=1.1810E-03$ (mm)
	$k=1.1566E-11$ (m/sec)	$k=8.9846E-09$ (m/sec)

4.5 結果與討論

本章討論了力學-水力特性對流場之敏感度，除了計算破裂面長度、破裂面密度與水力傳導係數之關係，主要針對不連續面粗糙係數(JRC)及不連續面單壓強度(JCS)進行分析，其相關討論如下：

1. 水力傳導係數與不連續面密度成一次方關係，與破裂面長度成平方關係，與水力內寬成三次方關係。
2. 不連續面粗糙係數(JRC)對於流場之敏感度：不連續面粗糙係數相對於其他參數而言，對於流場之敏感度較小，當 JRC_0 增加或減少 1 倍時，力學內寬、水力內寬及水力傳導係數幾乎不會超過 2 倍之變化範圍。
3. 不連續面單壓強度(JCS)對於流場之敏感度：不連續面單壓強度對於流場敏感度較高，且在未考慮風化作用之情況下， JCS_0 小於一定程度時，開口寬會完全閉合，此情況在邊界應力愈大之情況愈明顯。
4. 邊界應力 σ_n 對於流場之敏感度：由分析結果得知，邊界應力對於流場之敏感度非常敏感，但邊界應力之大小大約到達一定的程度時，其敏感度開始趨緩，假設處置場是以地下坑道形式，表示接近地表處敏感度比較大(邊界應力 $\sigma_n=0.15、0.9、1.8$ MPa)，但到較深處(邊界應力 $\sigma_n=6.0、7.5$ MPa)時，其影響較小。
5. 風化作用對於對於流場之敏感度：在是否考慮風化作用之相比結果發現，考慮風化作用使初始開口寬增加，進一步影響到水力傳導係數，導致結果變化幅度更為明顯。

第五章力學-水力特性對坑道周圍流場敏感度分析

目前國內有關低放射性廢棄物處置傾向坑道處置，然而處置坑道通常位於岩盤中，開挖過程的湧水以及核種是否會透過流經岩盤之地下水而影響生物圈，均為坑道處置重要課題，因此評估處置坑道周圍岩盤之滲透特性及地下水流動特性即相當重要。岩體因沉積、構造或變質作用，導致滲透係數受不連續面控制而具先天異向性。應力亦影響裂隙開口寬，進而影響岩盤滲透係數，因此岩體滲透特性具有應力導致之異向性。本章節首先探討均向及異向不連續面受水力傳導係數的影響程度；再者，進一步針對隧道周圍之流場進行討論。分析結果如下所述。

5.1 分析方法

1. 座標系統及參數選取

探討坑道開挖後應力重新分布造成應力異向性，處置坑道周圍附近之岩盤滲透特性之影響，本研究使用 Kirsch (1898)所提出的二維彈性理論，以開挖後坑道周圍應力重新分布來計算滲透係數值，本研究所使用之參數如表 5.1，座標系統如圖 5.1，關係如下：

$$l = \sin\phi \cos\theta \quad \text{式(5.1)}$$

$$m = \sin\phi \sin\theta \quad \text{式(5.2)}$$

$$n = \cos\phi \quad \text{式(5.3)}$$

其中 $\theta = 2\pi - \beta$ ($0 \leq \theta \leq 2\pi$)， $\phi = \varphi$ ($0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$)。β為不連續面傾向方向，φ則為不連續面傾角。

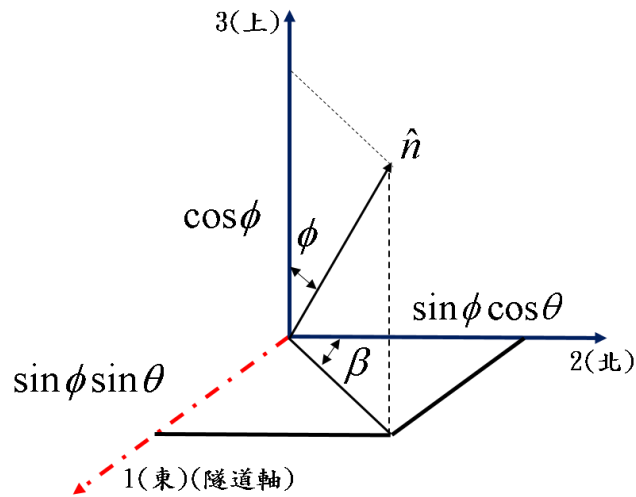


圖 5.1 本研究採用之座標系統圖

如圖 5.1，軸 1 代表東方，軸 2 代表北方，軸 3 代表上方，本研究之坑道開挖面落在軸 2 軸 3 平面上。

表 5.1 本研究使用之參數表

應力狀態	垂直應力張量 σ_{ij} (MPa) (岩體有效單位重為 15 kN/m^3)	7.5
	側向岩壓係數	1.0
不連續面 特性	不連續面長度 p (公尺)	1
	不連續面粗糙度係數 JRC	15
	不連續面單壓強度 JCS (MPa)	100
	體密度 ρ (條/ m^3)	5
	不連續面法線向量分佈密度函數	$D_{33}=0、2$

2. 不連續面參數設定

岩體不連續面之方位分布調查成果，常以不連續面法線向量立體投影圖呈現，本研究採用組構張量為係數之向量展開以逼近向量分布資料，並定義方向密度函數 $E(\hat{n})$ ，其物理意義為某向量 \hat{n} 佔全部向量之總比例數，且各方向之總和為 1，如式(5.4)所示

$$\int E(\hat{n})d\Omega = 1 \quad \text{式(5.4)}$$

再者，利用 n 階組構張量為逼近係數求得不連續面位態分佈 $E(\hat{n})$ ，其中組構張量階數越高，所逼近之結果越準確，而本研究採用 2 階第三類組構張量逼近不連續面位態分佈 $E(\hat{n})$ 如式(5.5)

$$E(\hat{n}) = 1 + D_{ij}n_i n_j \quad \text{式(5.5)}$$

根據式(5.5)，若不連續面分布恰與座標系統 1、2、3 三個座標軸一致，式中 D_{11} 、 D_{22} 與 D_{33} 值則可反應不連續面法線向量於空間分布異向性程度，其中， D_{11} 、 D_{22} 與 D_{33} 之和為 0。本研究分析分別採用 $D_{33}=0$ 及 $D_{33}=2$ ，當 D_{11} 、 D_{22} 與 D_{33} 值皆為 0 時($D_{11}=D_{22}=D_{33}=0$)，表示不連續面位態密度函數 $E(\hat{n})$ 為均向分布，岩體中各方向之不連續面分布個數皆相同。當 $D_{33}=2(D_{11}=D_{22}=-1)$ 時，代表法線向量之不連續面密度較其他兩軸大，即不連續面位態分布具有先天異向性，圖 5.2 至圖 5.3 分別代表不同 D_{33} 之不連續面位態機率密度函數分布，可看出 $D_{33}=0$ 時，密度函數分布為一球狀，代表四面八方之不連續面密度皆相同，當 D_{33} 增加至 2 時，軸 3 之密度增加，軸 1 與軸 2 密度則減少。

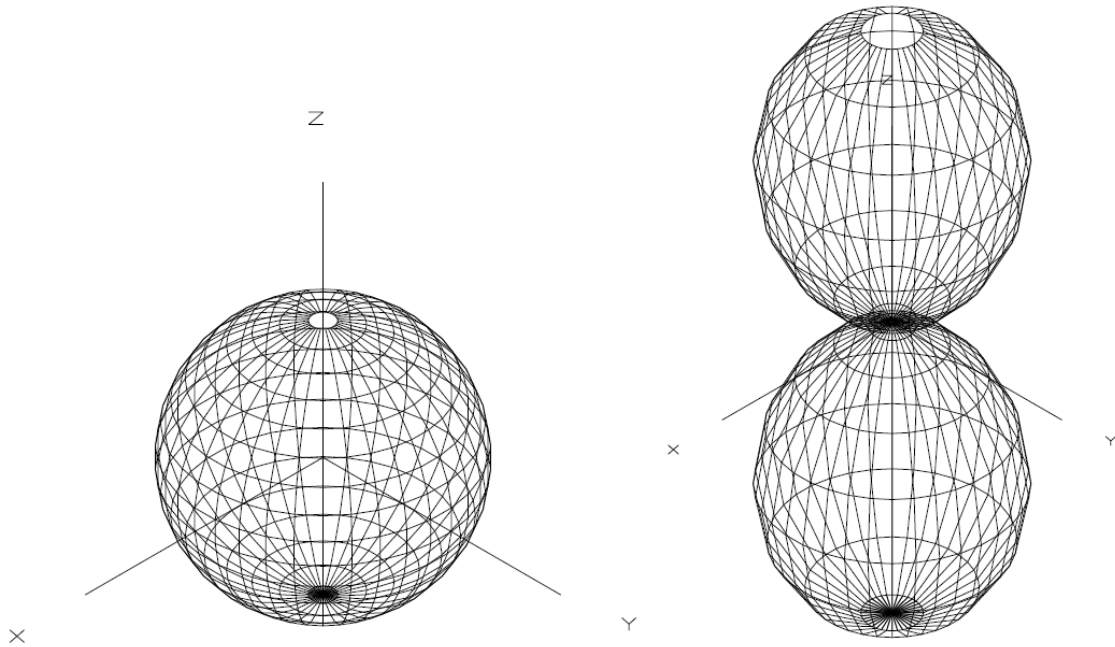


圖 5.2 不連續面位態密度函數分布圖($D_{33}=0$ (左)， $D_{33}=2$ (右))

5.2 水力傳導係數分布

1. 隧道開挖前之水力傳導係數

隧道開挖前裂隙岩體水力傳導係數之結果，參數設定如表 5.1，假設不連續面為均向分布($D_{33}=0$)，平均邊界應力為 7.5 MPa，均向邊界應力下隧道開挖前模型內水力傳導係數分布如圖 5.3，最大與最小主值均為 $2.76E-05$ m/sec，且於模型內各處皆相同，水力傳導係數異向比為 1。

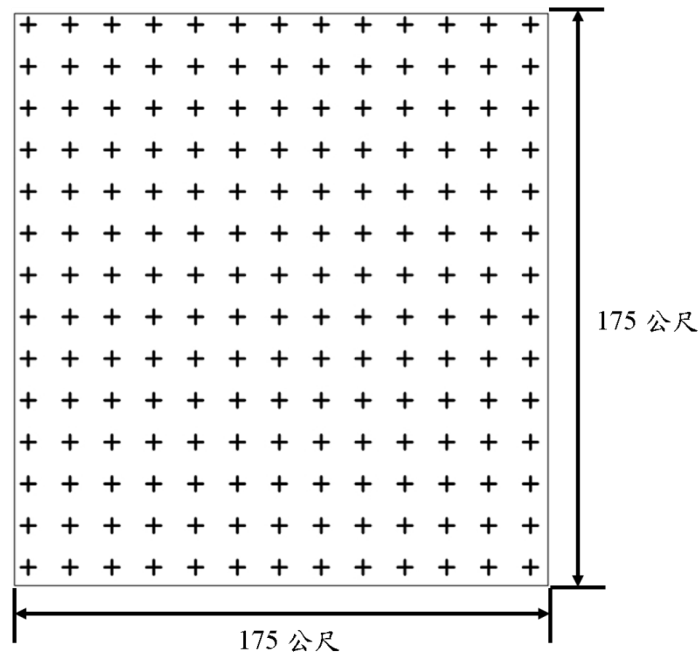


圖 5.3 隧道開挖前水力傳導係數分布圖($D_{33}=0$)

2. 隧道開挖應力重新分布對水力傳導係數之影響

本節將考慮隧道開挖後應力重新分布造成之應力異向性對隧道周圍岩盤水力傳導係數之影響，假設邊界應力相同之情況，且平均邊界應力為 7.5 MPa 條件下，不連續面為均向分布($D_{33}=0$)及異向分布之結果。

圖 5.4 為均向邊界應力下之水力傳導係數於隧道周圍之分布，由內而外分別為 $r/a=1$ 、1.25、1.5、1.75、2，其中 r 為距隧道中心之距離， a 為隧道半徑(在此為 5m)，圖中 '+' 字向量大小代表於軸 2 與軸 3 平面上之最大與最小主水力傳導係數。

可發現受到隧道開挖應力重新分布之影響，水力傳導係數主方向皆是隧道徑向與切向，由圖中可看出近隧道處 '+' 字向量長短明顯不同，代表有明顯的水力傳導係數異向性；因不

連續面及邊界應力為均向分布，故隧道各方向之滲透特性皆一致。

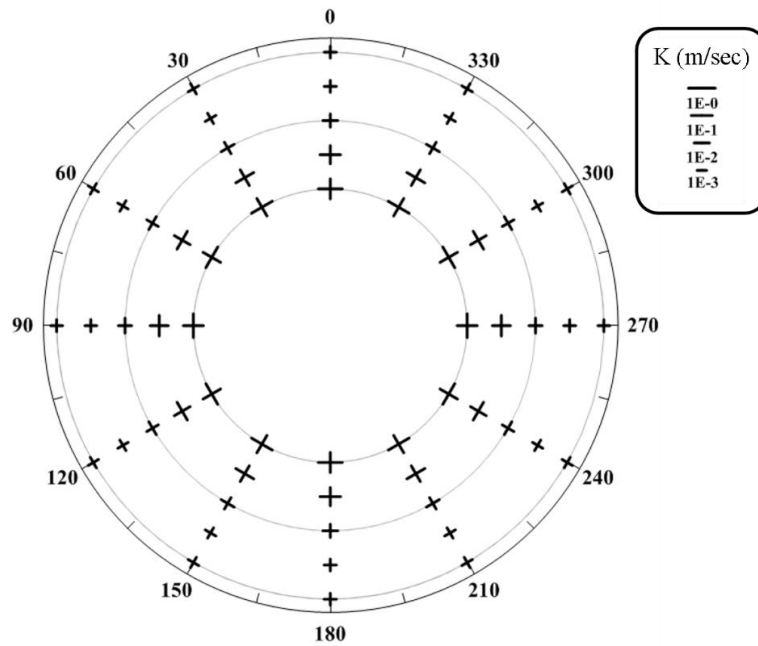


圖 5.4 隧道開挖水力傳導係數分布圖($D_{33}=0$)

圖 5.5 為 $D_{33}=2$ 之水力傳導係數於隧道周圍之分布，明顯可看出近隧道處水力傳導係數主方向不再是徑向與切向，隨著不連續面先天異向性增加，水力傳導係數主方向亦跟著改變，而隧道各方向水力傳導係數分布存在差異，且於近隧道處依然可看出明顯異向性。

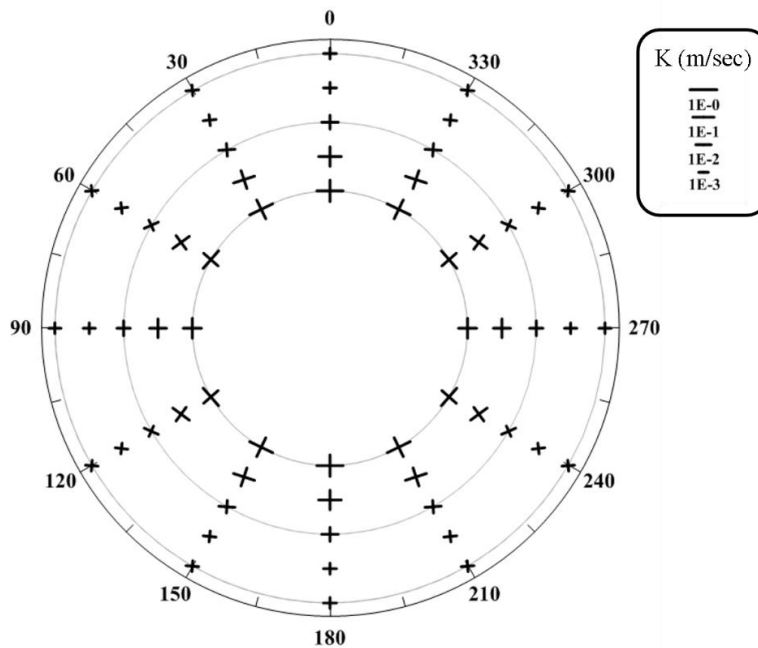


圖 5.5 隧道開挖水力傳導係數分布圖($D_{33}=2$)

5.3 等向裂隙($D_{33}=0$)對於坑道周圍流場之影響

圖 5.6 為隧道開挖周圍岩盤總水頭分布，由圖可知在均質均向條件下，水頭由邊界向隧道遞減，水力梯度則由邊界向隧道遞增，圖 5.7 為流速分布，範圍為流場圖中(圖 5.6)之紅框，由圖可知，越接近隧道流速越快，紅色虛線範圍為流速值大於平均數值之範圍，且流向皆指向隧道中心。

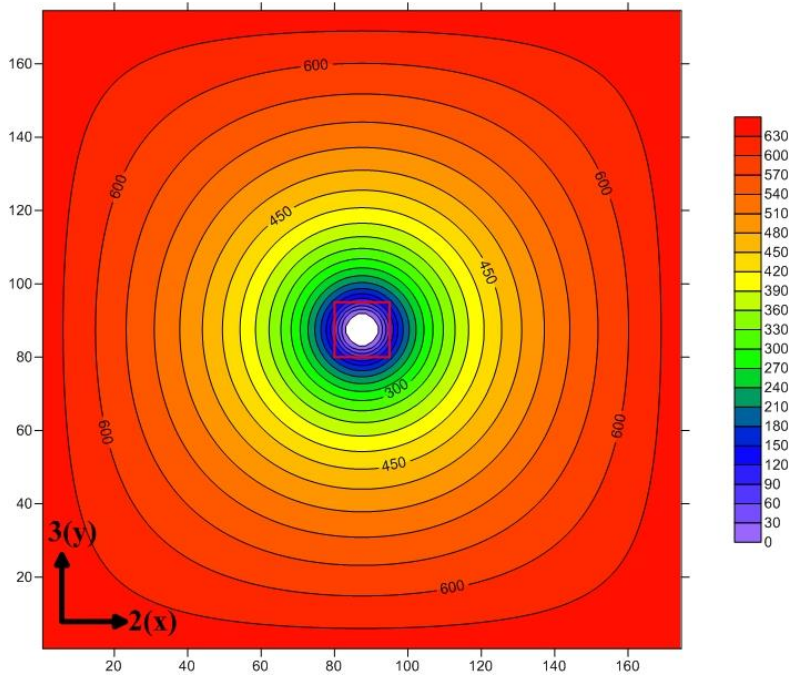


圖 5.6 均質均向水力傳導係數條件下隧道開挖周圍岩盤總水頭分布圖($D_{33}=0$)

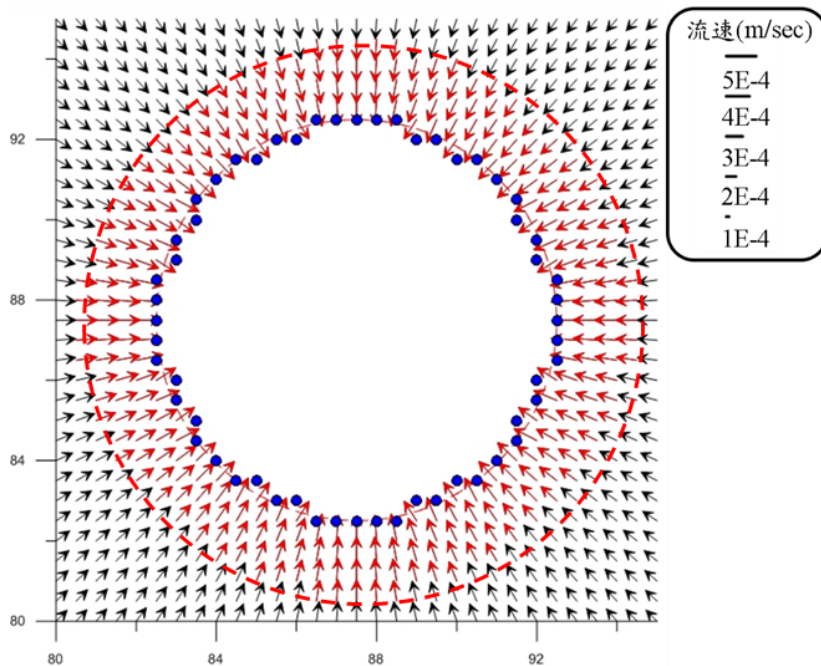


圖 5.7 均質均向水力傳導係數條件下隧道開挖周圍岩盤隧道開挖流速向量分布圖($D_{33}=0$)

5.4 異向裂隙($D_{33}=2$)對於坑道周圍流場之影響

本節考慮不連續面先天異向性對於隧道周圍流場及隧道滲流量之影響，假設 $D_{33}=2$ 進行分析。 $D_{33}=2$ 條件下隧道開挖周圍岩盤總水頭分布如圖 5.8，由結果得知等勢能線形狀為扁的橢圓，顯示不連續面先天異向性增加造成水力傳導係數異向性也隨之增加，而近隧道壁面處，受到應力重新分布的影響，等勢能線恢復為圓形。

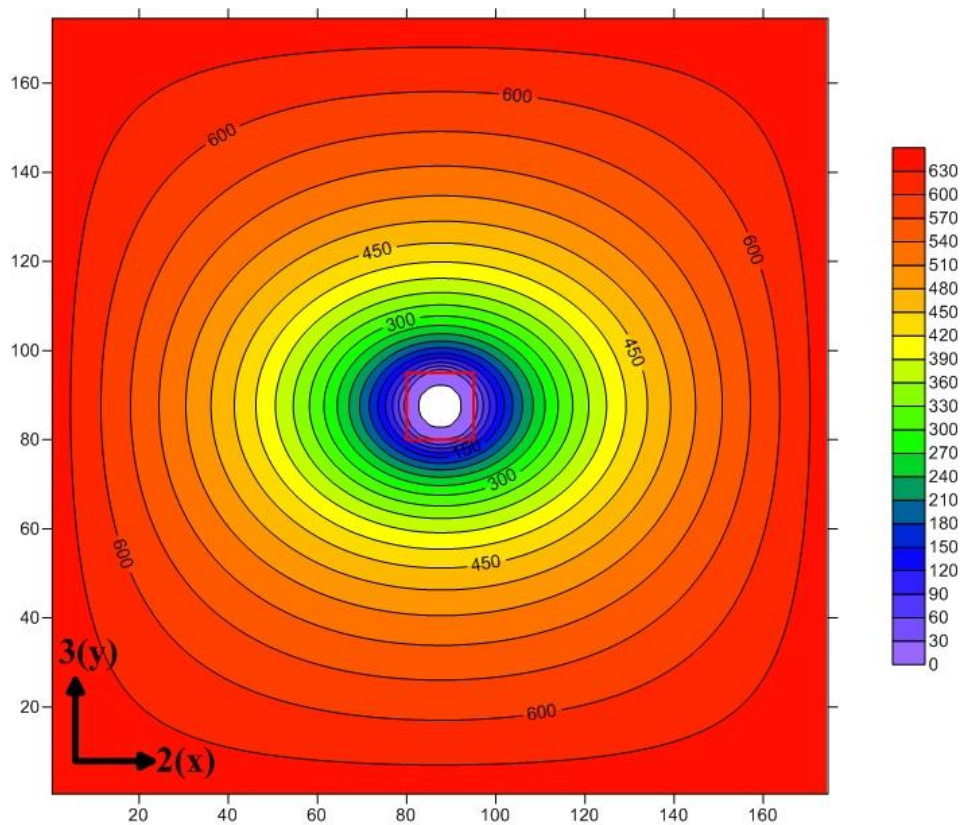


圖 5.8 隧道開挖周圍岩盤總水頭分布圖($D_{33}=2$)

$D_{33}=2$ 之流速分布如圖 5.9，先天異向性導致水平分量流速增加，而流速在隧道頂拱與側壁之差異加大，隧道頂拱之流速明顯大於隧道側壁，虛線範圍為流速值大於平均數值之範圍，表示不連續面先天異向性影響隧道周圍地下水流動行為甚巨。隧道總滲流量為 $0.0541 \text{ m}^3/\text{sec}$ ，隧道頂拱之入流量大於隧道側壁。由結果得知，先天異向性程度增加，流入隧道的總滲流量減少，表示水平不連續面於隧道側壁受壓效應大於水平不連續面於隧道頂拱之解壓效應。

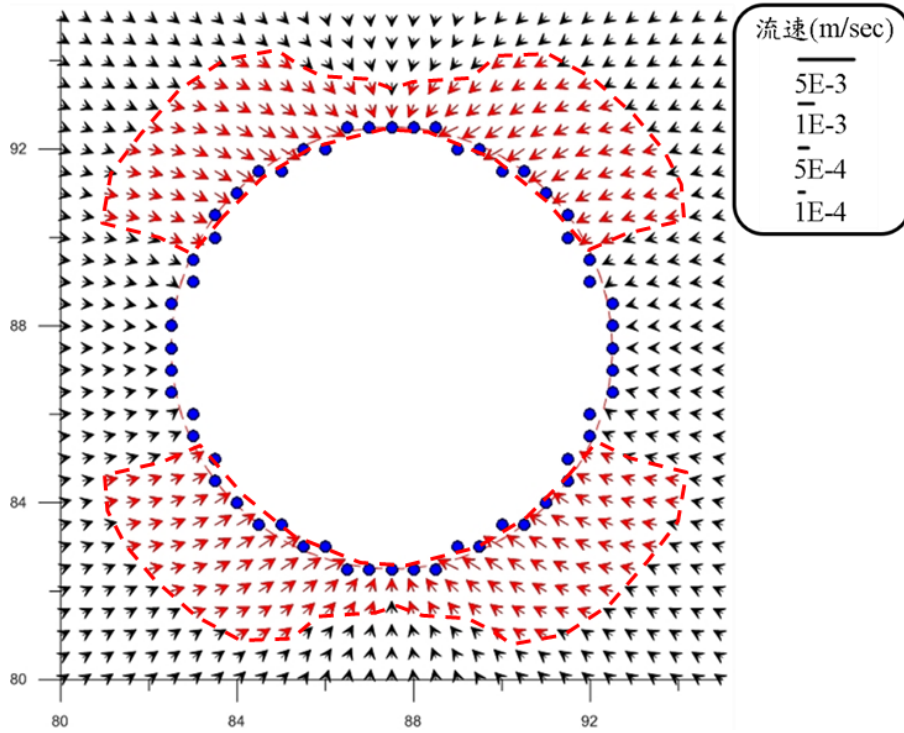


圖 5.9 隧道開挖周圍岩盤隧道開挖流速向量分布圖($D_{33}=2$)

5.3 結果與討論

本章首先探討隧道周圍岩盤水力傳導係數異向性與異質性對流場之影響，其中分別針對均質均向、均質異向以及異質均向進行分析，再者，隧道開挖導致應力重新分布，分別探討均向及異向邊界應力對於水力傳導係數之影響，最後探討先天異向性對隧道開挖水力傳導係數之影響，其重點如下：

1. 本研究假設現地應力為均向(7.5 MPa)，於不連續面分佈為均向及異向條件下，分別計算坑道周圍應力異向性分布之岩盤滲透係數。
2. 不連續面位態呈均向分佈，總水頭等值線由邊界向隧道呈同心圓狀遞減，流向皆指向隧道中心。
3. 不連續面位態為異向分佈時，總水頭等值線呈橢圓狀由邊界向隧道遞減，流向不再指向隧道中心，在距離隧道壁面約一倍半徑處逐漸變回圓形。
4. 不連續面位態分佈異向性及隧道開挖導致坑道周圍應力重新分佈，造成應力異向性對滲透係數主值、主方向與異向性比影響顯著。

第六章坑道處置場址特性之安全評估審查重點及注意事項

本研究彙整了國際間有關場址特性之量化參數，並針對其中有關水力-力學特性之重要參數探討其不確定性，再者，針對攸關母岩之水力傳導係數的重要參數進行分析，並探討各參數對於水力傳導之敏感性。另外，前期研究之成果包含了國內外之場址特性調查成果彙整，以及國內候選處置場特殊地質等課題。本章根據前述之成果以及前期之研究，提出低放處置有關場址特性審查之意見及注意事項，相關重點如下。

6.1 近岸離島通用之審查重點建議

1. 對於坑道處置之場址特徵化，審查單位應注意三項關鍵課題，包括：

- (1) 確認場址特徵化方法之適合性；
- (2) 確認場址特徵化成果已可供工程設計及安全評估所需；
- (3) 場址特徵化之不確定性。

場址特徵化工作需要留意場址的複雜性，必須多方面分析及彙整對於處置場址安全至關重要之參數，這些特徵化之成果亦需對於工程規劃設計具有關聯性。再者，掌握這些參數之不確定性，提供做為後續工作之重要參考資料，避免造成超乎預期之結果。舉例而言，場址抬昇量採平均值，估計此一參數之不確定性，並且此參數之不確定性對工程規劃設計(如處置深度)之影響程度；根據文獻資料，不同地層、不同尺度條件下，水力傳導係數值的不確定性；根據現有資料，現地應力大小與方向之不確定性。這些關鍵因子可能對於處置場址安全評估至關重要，因此對於審查單位而言，建議應留意這幾項關鍵課題。

除了場址特徵化參數之不確定性，參數敏感度亦應有所評估。舉例而言，地層水力傳導滲透係數異向性比對於流場之敏感度；區域性流場評估改變牡丹層與潮州層水力傳導係數比值對結果之影響程度；硬頁岩隨深度改變水力傳導係數之設定，其影響分析結果之程度。審查單位也應注意這個關鍵課題，並對執行單位進行審查。對於執行單位而言，這些資訊的掌握度愈高，對於後續場址特徵化調查與概念模式建立工作愈有幫助。也建議執行單位逐步強化參數不確定性與敏感度之量化評估。

2. 主應力方向除了攸關處置坑道配置規劃以外，候選場址主應力方向與主應力值均將影響裂隙岩盤之水力特性，不連續面特性分析及統計結果也是關鍵參數，場址特徵化審查宜注意此兩項之特徵化結果。
3. 應注意候選場址未來抬升、侵蝕量化結果以及對處置設施安全性影響之評估是否完備。
4. 注意地質圖比例尺與原始資料調查精度應能匹配。
5. 候選場址區域海水面變化趨勢估計之原理與方法合宜性應加以評估。
6. 參數或評估之依據，宜有支援報告支持。
7. 工程配置規劃構想原則充足，如處置坑道位置(例如：烏坵場址為何置於小坵北側)、軸向配置、深度等；另外，審查單位須審核執行單位工程配置與重要場址特徵化資訊(例如：達仁場址高角度裂隙區位)套疊之充足性亦應加以評估。
10. 開挖擾動區特性評估是關鍵議題之一。

6.2 特定候選場址之審查重點建議

1. 達仁場址高角度裂隙對場址設計、施工性及安全評估可能產生不可忽略之影響，執行時應注意調查方法，其中調查目的應包括剪裂帶位置確認以及水力-力學特性評估。
2. 達仁場址附近有文獻報導曾發生過大規模海底山崩事件，達仁場址海嘯評估應注意海底山崩對於處置場之影響是否已合宜考慮。
3. 我國兩處候選場址坑道開挖擾動的影響程度差異可能相當大，審查時應注意。

第七章 結論與建議

在四年期的計畫中，過去已針對國際間低放射性廢棄物處置場址特性進行研析，並與我國潛在場址環境進行比較，本計畫進一步的蒐集國際間低放射性廢棄物處置場址有關初始狀態定量化資訊，並參考瑞典 SKB 相關技術報告，彙整重要定量化之結果，透過這些量化資訊，可進一步釐清不確定性。再者，本計畫進一步將重點放在處置場址岩石的力學-水力特性的不確定性分析方法，並對其做敏感度分析，透過這些國外處置經驗，最後回饋於國內低放處置審驗技術。本計畫期中重要成果總結如下：

7.1 結論

1. 本計畫蒐集與瑞典 SKB 技術報告，彙整有關處置場址初始狀態之定量化資訊，一方面可學習 SKB 於各階段場址調查流程，一方面本報告亦集中呈現與本研究較相關包含了地質、岩石力學、水文地質之資訊，希望能做為後續審查要項擬定之參考。
2. 彙整 SKB 使用之相關模型，探討參數對於模型之不確定性因素，其中，破裂面參數之統計特性不確定性關鍵課題之一是尺寸效應，由露頭到公里級尺寸，破裂面密度與滲透係數差異可以差到一個數量級。根據有限的分析結果顯示，破裂面不納入擬連續體滲透隙數平均化的情況下，破裂面密度與滲透係數可能下降 0.66-09 倍。破裂面密度與尺寸關係，破裂面密度最大增加 1.6 倍；若將不同岩石分區分開，則破裂面密度(以及滲透係數)之不確定性可減少約半個數量級；不考慮深度相關因素，可能會高估破裂面密度約 10%；破裂面方位對破裂面密度的不確定性主要來自於破裂面分組時的不確定性。
3. 水力傳導係數與不連續面密度成一次方關係，與破裂面長度成平方關係，與水力內寬成三次方關係。不連續面粗糙係數對於流場之敏感度相對於不連續面單壓強度而言，對於流場敏感度較低，流場對邊界應力(現地應力)非常敏感(特別在接近地表處)；另外，風化作用也會影響流場。
4. 由結果顯示，當隧道周圍不連續面位態呈均向分佈，總水頭等值線由邊界向隧道呈同心圓狀遞減，流向皆指向隧道中心；不連續面位態呈非均向分佈，總水頭等值線呈扁橢圓狀向隧道遞減，流向不再指向隧道中心。

7.2 建議

1. 對於後續場址初始狀態量化工作，瑞典 SKB 之方法值得參考，以分階段之步驟進行場址參數量化及參數更新。
2. 建議對於特定影響處置場安全之參數宜進行詳細的調查，包含場址初始狀態各參數之不確定性，以及這些參數對於模型之不確定性因素。
3. 對於強烈影響水力傳導係數之參數(包含破裂面長度、水力內寬、不連續面單壓強度以及風化作用)建議特別留意，宜有詳細調查。
4. 隧道開挖造成應力重新分布，以及非均向之不連續面位態，可能強烈影響處置坑道周圍岩體之流場，建議對這些因素進行詳細的評估。

參考文獻

1. Bandis, S.C., Lumsden, A.C., Barton, N.R., 1983. Fundamentals of rock joint deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 20(6), 249-268.
2. Bandis, S.C., Barton, N.R., Christianson, M., 1985. Application of joint behavior to rock mechanics problems. *Proc Int. Symp. On Fundamentals of Rock Joints*, Bjorliden.
3. SKB, 2001. Site investigations: Investigation methods and general execution programme. SKB TR-01-29.
4. SKB, 2002. Forsmark - site descriptive model version 0. SKB R-02-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
5. SKB, 2004. Preliminary site description Forsmark area - version 1.1. SKB R-04-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
6. SKB, 2005a. Preliminary site description Forsmark area - version 1.2. SKB R-05-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
7. SKB, 2005b. Preliminary safety evaluation for the Forsmark area. Based on data and site descriptions after the initial site investigation stage. SKB TR-05-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
8. SKB, 2006a. Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar - a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. SKB TR-06-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
9. SKB, 2006b. Site descriptive modeling Forsmark stage 2.1. Feedback for completion of the site investigation including input from safety assessment and repository engineering. SKB R-06-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.
10. SKB, 2007a. Geology Forsmark- Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-45.
11. SKB, 2007b. Rock Mechanics Forsmark- Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-31.
12. SKB, 2007c. Thermal properties-Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-47.
13. Oda, M., 1985. Permeability tensor for discontinuous rock masses. *Geotechnique*, 35(4), 483-495.
14. 原能會物管局，2012，低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第0版)。
15. 原能會物管局，2013，低放射性廢棄物處置場址特性與設施設計審查規範精進之研究，102FCMA009。
16. 原能會物管局，2014，低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究，103FCMA002。
17. 原能會物管局，2016，低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之國際資訊研析，104FCMA019。

附錄一

附表一.1 地質

參數組	參數	確定參數的時間				用於
		FS	ISI	CSI	DC	
地形	地形	X	X			概述、地質構造模型、構造識別。
土壤覆蓋	土壤覆蓋層厚度		X	X		土壤模型(Soil model) (間接用於土壤和環境、表層水文地質、生物圈模型)。
	土壤分佈	X	X			
	土壤描述		X			
	土壤類型		X			
	底部沉積物		X	X		
	新構造運動特徵		X			新構造運動評估
基岩-岩石類型						
場址內所發現的岩石類型	岩石類型分佈(空間和百分比)	X	X	X	X	岩性模型 (Lithological model) (間接用於理解岩石力學、水文地質和地球化學)
	捕獲岩(xenoliths)			X	X	
	岩脈	X	X	X	X	
	接觸(contacts)		X	X		
	年代			X		
	礦產潛力 - 工業礦產	X	X			
岩石類型說明	礦物成分		X	X	X	岩性模型 (Lithological model) (間接用於理解岩石力學、水文地質和地球化學)
	晶粒大小		X	X	X	
	礦物定位(mineral orientation)		X	X	X	
	微破裂面(microfractures)			X	X	
	密度		X	X		
	孔隙率			X		
	磁感率(susceptibility) γ 輻射等(gamma radiation etc)		X			
	礦物蝕變/風化		X	X	X	
基岩 - 構造						
塑性構造	褶皺(幾何)		X	X	X	地質構造模型 (Geological-structural model)
	葉理(foliation)		X	X		
	線理(lineation)		X	X	X	
	脈狀紋(veining)		X	X		
剪裂帶 (Shear zones)	年代			X		
	性質、範圍	X	X	X	X	
脆性構造						
區域和局部主要破裂面域	位置	X	X	X		地質構造模型。處置場設計。為水文地質模型和岩石力學模型的輸入資料。
	方位		X	X		
	長度	X	X	X		
	寬度		X	X		
	移動(Movements)(尺寸, 方			X		

	向)				破裂面填充礦物等為水文地球化學模型的輸入資料。
	年代			X	
	性質(破裂面數量、間距、塊體尺寸、破裂面特性、破裂面填充(破裂面礦物)、風化/蝕變		X	X	X
局部次要破裂面域	位置		X	X	X
	方位			X	X
	長度		X	X	X
	開口寬度			X	X
	移動(movements)(尺寸，方向)			X	X
	年代			X	X
	性質(破裂面數量、間距、塊體尺寸、破裂面特性、破裂面填充(破裂面礦物)、風化/蝕變			X	X
破裂面- 隨機描述的數據	密度(不同組)		X	X	X
	方位		X	X	X
	跡線長度(trace length)		X	X	X
	聯繫模式(contact pattern)			X	X
	孔徑寬度			X	X
	粗糙度			X	X
	風化(蝕變)			X	X
	破裂面填充(破裂面礦物)			X	X
	年代			X	X
					為詳細的水文地質模型和詳細的岩石力學模型的輸入資料。 為核種傳輸模型間接輸入資料。 破裂面填充礦物等為水文地球化學模型的輸入資料。

附表一.2 岩石力學

參數組	參數	主要確定期間				用於
		FS	ISI	CSI	DC	
破裂面帶	幾何		X	X	X	描述性岩石力學模型中將岩石細分成不同的岩體。
破裂面力學特性	法線方向變形特性			X	X	離散岩石力學模型，輸入岩體的變形特性數據。
	剪切方向變形特性			X	X	
	剪切強度					
	節理粗糙度					
	節理抗壓強度			X	X	
完整岩石的力學特性	基礎摩擦 ϕ_b					
	破裂面後摩擦 ϕ_r					
	(楊氏)彈性係數		X	X	X	離散岩石力學模型，輸入岩體的變形特性數據。
	柏松比(ν)		X	X	X	
	強度		X	X	X	
抗拉強度		X	X	X		
壓痕指數(Indentation index)				X	X	可鑽性評估
岩體的力學特性	楊氏係數(彈性)			X	X	岩石力學模型
	柏松比 (ν)			X	X	岩石力學模型
	不同系統的岩石分類(RMR、Q)		X	X	X	確定不同系統的變形和強度特性。
	動態傳播速度，壓力波		X	X	X	動態分析模型
	動態傳播速度，剪切波			X	X	動態分析模型
	強度			X	X	岩石力學模型
密度和熱特性	密度		X	X	X	岩石力學模型
	熱膨脹係數		X	X	X	岩石力學模型
邊界條件和輔助數據	原位應力、大小和方向		X	X	X	可鑽性評估
	觀察變形和地震活動	X	X			岩石力學模型“驗證”

附表一.3 水文地質

參數組	參數	主要確定期間				用於
		FS	ISI	CSI	DC	
模擬確定性破裂面帶	幾何 - 區域和局部主要破裂面帶	X	X	X	X	計算模型
	導水率或水力傳導係數的確定性或統計分佈		X	X	X	計算模型
	儲存係數		(X)	X	X	瞬態計算模型
隨機模擬的破裂面帶和破裂面增加岩體	幾何 - 岩體具有類似的水力性能	(X)	X	X	X	計算模型
	破裂面帶及破裂面的空間分佈和幾何性質的統計描述		X	X	X	DFN models
	導水率的統計分佈		X	X	X	
	水力傳導的統計分佈		X	X	X	SC models
	具體存儲計算模型和存儲係數的統計分佈		(X)	X	X	瞬態計算模型
土壤層	幾何 - 土體具有類似的水力性能		X	X		計算模型
	水力傳導率		(X)	X		計算模型
	明確的蓄水量(Specific storage)		(X)	X		瞬態計算模型
地下水水力特性	密度、粘度和壓縮性		X	X	X	計算模型
	鹽度		X	X	X	
	溫度		X	X		計算模型
邊界條件和輔助數據	氣象和水文資料	X	X	X	(X)	定義邊界條件和地下水模型(gwm)和生物圈模型(bm)
	補充/排出區		X	X	X	定義邊界條件和gwm及bm的校準
	部分鑽孔和地表水道中的壓力或水頭		X	X	X	定義邊界條件和gwm和bm的校準
	鹽度		X	X	X	定義邊界條件和gwm的校準
	GW流過鑽孔		(X)	X	X	gwm校準
	區域邊界條件(解釋)，過去和未來演變		X	X	(X)	定義邊界條件 (當前條件、古水文地質學視角、可能場景的分析)

附表一. 4 水文地球化學

參數組	參數	主要確定期間				用於
		FS	ISI	CSI	DC	
變量	pH, Eh		X	X	X	傳輸模型 處置罐腐蝕 燃料溶解，膨潤土
主要成分	TDS (sum of main components), Design Na, K, Ca, Mg, Canister corrosion HCO ₃ , SO ₄ , Cl, Si		X	X	X	地球科學理解 設計 處置罐腐蝕 膨潤土穩定性
微量元素	Fe, Mn, U, Th, Ra, Al, Li, Cs, Sr, Ba, HS, I, Br, F, NO ₃ , NO ₂ , NH ₄ , HPO ₄ , Canister corrosion REE, Cu, Zr, Rb		X	X	X	地球科學理解 傳輸模型 處置罐腐蝕
溶解氣體	N ₂ , H ₂ , CO ₂ , CH ₄ , Ar, He, C _x H _x , O ₂		X	X	X	地球科學理解 傳輸模型
穩定同位素	² H in H ₂ O, ¹⁸ O in H ₂ O and SO ₄ , ¹³ C in DIC and DOC, ³⁴ S in SO ₄ and HS, ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr, ³ He, ⁴ He, ¹¹ B, ³⁷ Cl, Xe同位 素, Kr同位素		X	X	X	地球科學理解 傳輸模型
放射性 同位素	T, ¹⁴ C in DIC and DOC, ²³⁴ U/ ²³⁸ U, ³⁶ Cl, Rn, ²²⁶ Ra		X		X	地球科學理解 傳輸模型
其他	DOC (溶解有機材料)、腐植酸、黃 腐酸、膠體、細菌		X		X	傳輸模型 燃料溶解
破裂面填充 礦物	固相中的主要元素和微量元素 $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr, ²³⁴ U/ ²³⁸ U, 方 解石和氧化鐵的形態 ³⁴ S in FeS, FeS ₂			X	X	地球科學理解 傳輸模型
岩石矩陣	孔隙水中的總鹽度			X	X	傳輸模型

附表一.5 岩石的傳輸特性

參數組	參數	主要確定期間				用於
		FS	ISI	CSI	DC	
處置孔尺寸特性	地下水化學		X	X	X	源項模型中的參數(溶解度， 吸附) 評估處置罐、膨潤土的穩定性
	地下水流量		(X)	X	X	源項模型(處置罐腐蝕)
	破裂面孔徑，幾何			(X)	X	源項模型(處置罐腐蝕)
流路特性 (Properties of flow paths)	流路(Flow paths)		(X)	X	X	安全評估
	沿流動路徑的傳輸阻力		(X)	X	X	安全評估
	分散性			X	X	傳輸計算
	流動孔隙率			X	X	傳輸計算
岩石特性	吸附係數			X	X	安全評估
	基質擴散率			X	X	安全評估
	基質孔隙率			X	X	安全評估
	最大穿透深度			X	X	安全評估
	地下水化學			X	X	確定相關吸附數據
土壤層/受體的 傳輸性質	水通量			X		生物圈模式、土地和環境，參 見表面生態系統
	流動孔隙率			X		
	吸附係數			X		
	生物活性			X		
輔助數據	示踪劑測試(Tracer tests)			X	X	驗證/校準
	破裂面填充的化學分析			X	X	地球科學理解
	岩石的化學分析			X	X	地球科學理解
	地下水中的地下水化學、膠體、氣體等			X	X	排除其他傳輸機制 地球科學理解，預測變化

附表一.6 地表生態

參數組	參數	主要確定期間				用於
		FS	ISI	CSI	DC	
地質學	地形；土地隆起；土壤層；暴露的岩石		x	x	x	理解、安全評估、自然與環境監測
水文地質 地下水	補充/排放區；土壤水和地下水；地下水位；井			x	x	see above
水文地質 地表水、湖泊、河道和海洋	底部地形；水位；水循環(Water turnover)；體積、鹽度			x	x	see above
水文地質 計量學	沉澱；徑流；蒸散		x	x	x	see above
水文地球化學 湖泊和海中的土壤和沈積物	C (POC、DOC、DIC)；N (NO ₃ 、NO ₂ 、NH ₄ 、Tot N、Org N)；P (PO ₄ 、Org P、Tot P)；Si、I、K、Fe；微量物質；放射性核種；有毒有機污染物；含水量；氧化還原區			x	x	see above
水文地球化學 土壤水及地下水、湖泊、河道和海洋	C (POC、DOC、DIC、Alk)；N (NO ₃ 、NO ₃ ⁺ 、NO ₂ 、NH ₄ 、Tot N、Org N)；P (PO ₄ 、Org P、Tot P)；Si、I、K、Fe；微量物質；放射性核種；有毒有機污染物；pH；O ₂ ；鹽度；在地表水中還有葉綠素和顆粒含量			x	x	see above
生態系統 林業	數量 (m ³ / ha)；生產(Production)；輪作(Rotation)；年齡結構			x		see above
生態系統 農業	生產作物(Production crops)；畜牧業、肉類生產；範圍、位置和面積			x	x	see above
生態系統 釣魚、打獵和戶外娛樂	釣魚和狩獵的範圍；蘑菇和漿果採摘的範圍等			x	x	see above
生態系統 有毒污染物	生物量中的有毒污染物			x		see above
生態系統 植物	植被類型、關鍵棲息地族群、優勢種紅皮書物種		x	x	x	see above
生態系統 動物	物種、生物量、生產紅皮書物種		x	x	x	see above
氣候	地面結凍(天數、深度)；冰況；風；氣壓；日長；日照；日照角；生長期；			x	x	see above

水生參數 湖泊、河道 和海洋	湖型；沉積物類型；氧含量；氧化；分層；光照條件；溫度；海水循環；潮流；暴露程度；鹽度			x	x	see above
-----------------------------	--	--	--	----------	----------	-----------

附錄二

附表二.1 單軸抗壓強度

(Rock domain : RFM029)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩- 花崗閃長岩	47	157	226	225	289	28.8
FFM01	偉晶岩、偉晶花崗岩	10	192	228	231	266	21
FFM03	中粒度變質花崗岩- 花崗閃長岩	13	203	220	221	251	12.9
FFM03	變質長石-花崗閃長 岩	4	143	150	152	155	5.6
no FFM	中粒度變質花崗岩- 花崗閃長岩	4	166	205	206	242	32.6

(Rock domain : RFM045)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM06	細晶岩脈變質花崗岩	5	229	310	320	371	66.7

(Rock domain : RFM017)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	140	162	166	176	15.7

(Rock domain : RFM018)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
no FFM	變質花崗閃長岩	4	222	236	236	249	12.0

(Rock domain : RFM034)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩- 花崗閃長岩	4	192	199	195	214	10.3
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	2	153	170	170	187	23.8

附表二.2 三軸抗壓強度

(Rock domain : RFM029)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum TCS [MPa]	Mean TCS [MPa]	Median TCS [MPa]	Maximum TCS [MPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	44	222	333	323	525	73.2
FFM01	細至中等顆粒變質花崗岩-花崗閃長岩和輝光岩	4	260	369	379	457	90.3
FFM01	偉晶岩-偉晶花崗岩	5	245	329	321	448	76.9
FFM03	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	12	239	310	318	372	41.7
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	171	199	199	228	23.6
no FFM	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	274	320	308	391	50.5

(Rock domain : RFM017)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	176	193	195	207	12.7

(Rock domain : RFM018)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
no FFM	變質花崗閃長岩	3	226	297	307	359	66.7

(Rock domain : RFM034)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	2	315	325	325	336	15.3
FFM01	偉晶岩、偉晶花崗岩	1	359	359	359	359	-

(Rock domain : RFM044)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum UCS [MPa]	Mean UCS [MPa]	Median UCS [MPa]	Maximum UCS [MPa]	StDev
FFM05	偉晶岩、偉晶花崗岩	2	348	405	405	462	80.4

附表二.3 抗拉強度

(Rock domain : RFM029)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum T [MPa]	Mean T [MPa]	Median T [MPa]	Maximum T [MPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	92	9.7	13.5	13.7	17.9	1.57
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	12	8.4	11.5	11.0	16.2	2.64
FFM03	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	30	10.4	13.6	13.8	17.0	1.71
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	10	14.4	16.0	16.1	17.5	1.11
no FFM	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	10	11.1	13.3	12.6	16.6	1.91

(Rock domain : RFM017)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum T [MPa]	Mean T [MPa]	Median T [MPa]	Maximum T [MPa]	StDev
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	10	13.7	15.2	15.5	16.5	1.01

(Rock domain : RFM018)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum T [MPa]	Mean T [MPa]	Median T [MPa]	Maximum T [MPa]	StDev
no FFM	變質花崗閃長岩	11	16.8	18.0	17.8	19.7	0.98

(Rock domain : RFM034)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum T [MPa]	Mean T [MPa]	Median T [MPa]	Maximum T [MPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	8	14.0	15.6	15.3	17.7	1.19
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	6	6.6	9.6	10.0	12.1	1.83

(Rock domain : RFM044)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum T [MPa]	Mean T [MPa]	Median T [MPa]	Maximum T [MPa]	StDev
FFM05	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	13.6	16	15.9	18.8	2.44
FFM05	偉晶岩，偉晶花崗岩	2	16.1	16.4	16.4	16.7	0.42

附表二. 4 楊氏係數(單軸試驗)

(Rock domain : RFM029)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	47	69.5	75.7	75.9	82.9	2.85
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	10	71.1	75.3	75.6	79.8	3.23
FFM03	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	13	70.6	75.2	75.3	70.1	2.82
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	69.7	71.7	70.4	76.2	3.01
no FFM	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	76.6	77.5	77.3	78.6	0.83

(Rock domain : RFM045)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM06	細晶岩脈變質花崗岩	5	80.0	81.9	81.3	85.6	2.60

(Rock domain : RFM017)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	68.7	72.6	72.1	77.8	3.92

(Rock domain : RFM018)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
no FFM	變質花崗閃長岩	4	73.4	77.2	77.4	80.7	3.04

(Rock domain : RFM034)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	70.4	72.7	73.4	73.6	1.54
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	2	71.5	72.4	72.4	73.3	1.30

附表二.5 楊氏係數(三軸試驗)

(Rock domain : RFM029)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	44	66.1	74.3	74.4	85.4	4.00
FFM01	細至中等顆粒變質花崗岩-花崗閃長岩和輝光岩	4	66.4	66.7	66.8	71.1	2.44
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	5	65.4	70.9	69.8	76.3	4.26
FFM03	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	12	69.5	73.8	73.6	77.2	2.56
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	65.4	70.9	71.6	74.8	3.94
no FFM	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	71.4	71.9	71.7	71.0	0.71

(Rock domain : RFM017)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	65.9	69.9	70.7	72.2	2.80

(Rock domain : RFM018)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
no FFM	變質花崗閃長岩	3	70.5	74.6	75.7	77.6	3.68

(Rock domain : RFM034)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	2	68.7	70.1	70.1	71.4	1.88
FFM01	偉晶岩、偉晶花崗岩	1	77.2	77.2	77.2	77.2	-

(Rock domain : RFM044)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum E[GPa]	Mean E[GPa]	Median E[GPa]	Maximum E[GPa]	StDev
FFM05	偉晶岩、偉晶花崗岩	2	67.7	69.4	69.4	71.0	2.34

附表二. 6 柏松比(單軸試驗)

(Rock domain : RFM029)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	47	0.14	0.23	0.24	0.30	0.036
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	10	0.26	0.3	0.3	0.35	0.027
FFM03	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	13	0.16	0.23	0.24	0.27	0.029
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	0.25	0.29	0.29	0.34	0.037
no FFM	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	0.20	0.22	0.22	0.24	0.018

(Rock domain : RFM017)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	0.23	0.25	0.25	0.28	0.026

(Rock domain : RFM018)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
no FFM	變質花崗閃長岩	4	0.19	0.23	0.24	0.25	0.026

(Rock domain : RFM034)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	0.25	0.27	0.27	0.30	0.021
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	2	0.19	0.26	0.26	0.32	0.092

附表二.7 柏松比(三軸試驗)

(Rock domain : RFM029)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	44	0.15	0.19	0.19	0.26	0.027
FFM01	細至中等顆粒變質花崗岩-花崗閃長岩和輝光岩	4	0.20	0.24	0.24	0.27	0.030
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	5	0.20	0.24	0.25	0.28	0.036
FFM03	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	12	0.17	0.20	0.21	0.22	0.019
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	0.19	0.21	0.20	0.23	0.017
no FFM	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	4	0.17	0.19	0.20	0.20	0.015

(Rock domain : RFM017)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
FFM03	變質長石-花崗閃長岩	4	0.18	0.19	0.19	0.21	0.015

(Rock domain : RFM018)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
no FFM	變質花崗閃長岩	3	0.18	0.18	0.18	0.19	0.006

(Rock domain : RFM034)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
FFM01	中粒度變質花崗岩-花崗閃長岩	2	0.24	0.25	0.25	0.25	0.007
FFM01	偉晶岩，偉晶花崗岩	1	0.17	0.17	0.17	0.17	-

(Rock domain : RFM044)

FFM	Rock type	No. of samples	Minimum V [-]	Mean V [-]	Median V [-]	Maximum V [-]	StDev
FFM05	偉晶岩，偉晶花崗岩	2	0.23	0.24	0.24	0.25	0.014

附錄三

附表三.1 傾斜試驗的結果

FFM01 傾斜試驗的計算結果，共 63 次測試。

Test	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard deviation
Peak friction angle, ϕ_p^{MC} [°]	29.5	33.9	33.9	36.6	1.7
Peak cohesion, c_p^{MC} [MPa]	0.2	0.4	0.4	0.7	0.1
Residual friction angle, ϕ_r^{MC} [°]	22.6	29.7	30.1	37.9	2.9
Residual cohesion, c_r^{MC} [MPa]	0.2	0.4	0.4	0.6	0.1

FFM02 傾斜試驗的計算結果，共 7 次測試。

Test	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard deviation
Peak friction angle, ϕ_p^{MC} [°]	25.8	30.8	30.9	34.9	3.1
Peak cohesion, c_p^{MC} [MPa]	0.2	0.5	0.5	0.7	0.1
Residual friction angle, ϕ_r^{MC} [°]	20.3	26.2	26.8	32.8	3.9
Residual cohesion, c_r^{MC} [MPa]	0.2	0.4	0.4	0.6	0.1

FFM03 傾斜試驗的計算結果，共 41 次測試。

Test	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard deviation
Peak friction angle, ϕ_p^{MC} [°]	32.2	34.5	34.2	37.7	1.5
Peak cohesion, c_p^{MC} [MPa]	0.2	0.5	0.5	0.8	0.1
Residual friction angle, ϕ_r^{MC} [°]	23.7	29.3	29.6	33.5	2.5
Residual cohesion, c_r^{MC} [MPa]	0.2	0.4	0.4	0.7	0.1

FFM04 傾斜試驗的計算結果，共 2 次測試。

Test	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard deviation
Peak friction angle, ϕ_p^{MC} [°]	33.1	34.5	34.5	35.8	1.9
Peak cohesion, c_p^{MC} [MPa]	0.3	0.5	0.5	0.6	0.2
Residual friction angle, ϕ_r^{MC} [°]	32.3	33.0	33.0	33.7	1.0
Residual cohesion, c_r^{MC} [MPa]	0.3	0.5	0.5	0.6	0.2

FFM05 傾斜試驗的計算結果，共 5 次測試。

Test	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard deviation
Peak friction angle, ϕ_p^{MC} [°]	31.4	33.4	33.4	34.8	1.3
Peak cohesion, c_p^{MC} [MPa]	0.3	0.4	0.4	0.6	0.1
Residual friction angle, ϕ_r^{MC} [°]	24.3	27.8	27.3	32.4	3.4
Residual cohesion, c_r^{MC} [MPa]	0.2	0.4	0.4	0.5	0.1

附表三.2 開口裂隙的直接剪力試驗結果

每個破裂面域之剪切勁度 $K_{S0.5}$ 試驗，共 57 個試驗。

FFM	Number of samples	Minimum $K_{S0.5}$ (MPa/mm)	Mean $K_{S0.5}$ (MPa/mm)	Median $K_{S0.5}$ (MPa/mm)	Maximum $K_{S0.5}$ (MPa/mm)	Std.dev. $K_{S0.5}$ (MPa/mm)
FFM01	29	1	10	9	23	6
FFM02	4	4	8	8	12	4
FFM03	9	4	8	7	15	4
FFM04	3	1	8	10	12	6
FFM05	2	4	6	6	8	3
DZ	10	3	12	10	35	10
ALL	57	1	10	9	35	6

每個破裂面域之剪切勁度 K_{S5} 試驗，共 57 個試驗。

FFM	Number of samples	Minimum K_{S5} (MPa/mm)	Mean K_{S5} (MPa/mm)	Median K_{S5} (MPa/mm)	Maximum K_{S5} (MPa/mm)	Std.dev. K_{S5} (MPa/mm)
FFM01	29	7	26	25	46	9
FFM02	4	21	26	27	31	4
FFM03	9	23	31	29	43	7
FFM04	3	12	16	14	22	5
FFM05	2	14	20	20	25	7
DZ	10	7	26	26	41	9
ALL	57	7	26	25	46	8

每個破裂面域之剪切勁度 K_{S20} 試驗，共 57 個試驗。

FFM	Number of samples	Minimum K_{S20} (MPa/mm)	Mean K_{S20} (MPa/mm)	Median K_{S20} (MPa/mm)	Maximum K_{S20} (MPa/mm)	Std.dev. K_{S20} (MPa/mm)
FFM01	29	18	34	33	52	10
FFM02	4	25	33	32	41	8
FFM03	9	20	35	36	49	10
FFM04	3	18	23	22	29	5
FFM05	2	23	25	25	26	2
DZ	10	19	31	33	44	8
ALL	57	18	33	32	52	10

每個破裂面域的膨脹角 $\Psi_{0.5}$ 試驗，共 57 個試驗。

FFM	Number of samples	Minimum $\Psi_{0.5}$ (°)	Mean $\Psi_{0.5}$ (°)	Median $\Psi_{0.5}$ (°)	Maximum $\Psi_{0.5}$ (°)	Std.dev. $\Psi_{0.5}$ (°)
FFM01	29	7.8	14.6	14.4	27.1	4.1
FFM02	4	11.5	15.2	15.9	17.6	2.9
FFM03	9	14.0	16.4	15.4	20.2	2.2
FFM04	3	9.5	10.1	10.0	10.9	0.7
FFM05	2	144	14.7	14.7	15.0	0.4
DZ	10	0.3	14.4	16.4	22.8	6.4
ALL	57	0.3	14.6	14.9	27.1	4.2

每個破裂面域的膨脹角 ψ_5 試驗，共 57 個試驗。

FFM	Number of samples	Minimum Ψ_5 (°)	Mean Ψ_5 (°)	Median Ψ_5 (°)	Maximum Ψ_5 (°)	Std.dev. Ψ_5 (°)
FFM01	29	2.5	7.7	7.6	13.7	2.7
FFM02	4	1.6	2.2	2.2	2.6	0.5
FFM03	9	0.5	3.1	3.4	6.3	2.1
FFM04	3	5.4	6.6	6.4	7.9	1.3
FFM05	2	8.7	8.8	8.8	8.8	0.1
DZ	10	1.0	5.7	4.2	13.0	4.3
ALL	57	0.5	6.2	6.1	13.7	3.4

每個破裂面域的膨脹角 ψ_{20} 試驗，共 57 個試驗。

FFM	Number of samples	Minimum Ψ_{20} (°)	Mean Ψ_{20} (°)	Median Ψ_{20} (°)	Maximum Ψ_{20} (°)	Std.dev. Ψ_{20} (°)
FFM01	29	0.2	3.2	3.1	9.6	2.1
FFM02	4	0.2	2.1	1.9	4.3	2.2
FFM03	9	0.2	2.3	1.9	6.1	1.7
FFM04	3	0.3	1.3	1.5	2.2	1.0
FFM05	2	1.9	2.3	2.3	2.6	0.5
DZ	10	0.5	3.0	3.2	46	1.3
ALL	57	0.2	2.8	2.6	9.6	1.9

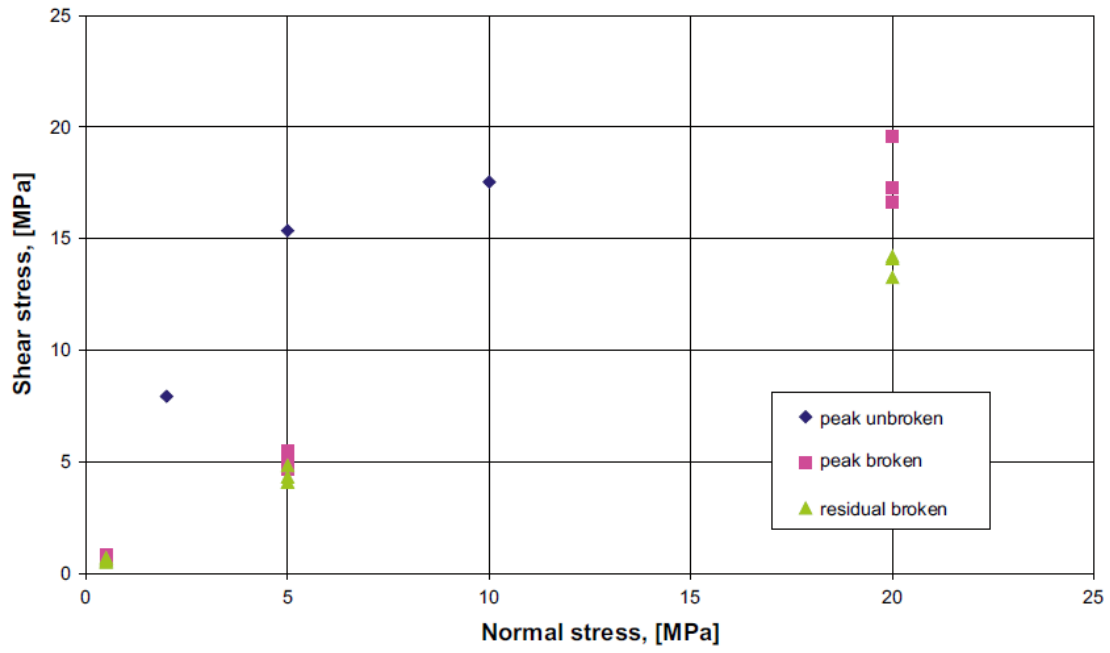
每個破裂面域的殘餘摩擦角 (ϕ_r) 試驗，共 57 個試驗。來自測試類型 I 和類型 II 的值被轉換為測試類型 III。

FFM	Number of samples	Minimum ϕ_r (°)	Mean ϕ_r (°)	Median ϕ_r (°)	Maximum ϕ_r (°)	Std.dev. ϕ_r (°)
FFM01	29	27.9	34.9	34.6	41.9	3.4
FFM02	4	24.1	34.8	37.3	40.3	7.3
FFM03	9	25.7	34.2	36.1	41.5	6.2
FFM04	3	29.6	32.2	32.4	34.6	2.5
FFM05	2	32.2	34.3	34.3	36.4	3.0
DZ	10	30.3	34.8	35.1	36.8	2.0
ALL	57	24.1	34.6	35.1	41.9	4.0

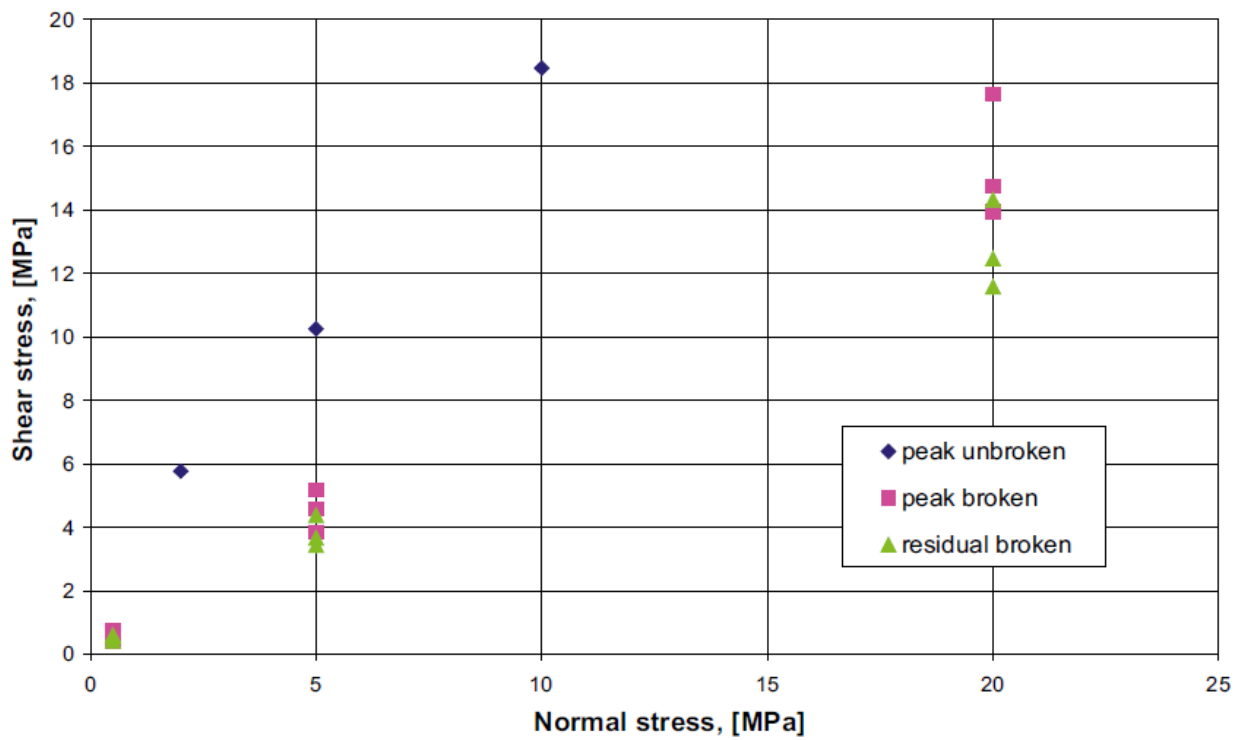
每個破裂面域的殘餘凝聚力 (c_r) 試驗，共 57 個試驗。

FFM	Number of samples	Minimum c_r (°)	Mean c_r (°)	Median c_r (°)	Maximum c_r (°)	Std.dev. c_r (°)
FFM01	29	0.1	0.3	0.3	0.8	0.2
FFM02	4	0.1	0.4	0.2	1.3	0.6
FFM03	9	0.2	0.5	0.3	1.1	0.4
FFM04	3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.1
FFM05	2	0.4	0.4	0.4	0.5	0.1
DZ	10	0.0	0.3	0.3	0.6	0.2
ALL	57	0.0	0.4	0.3	1.3	0.2

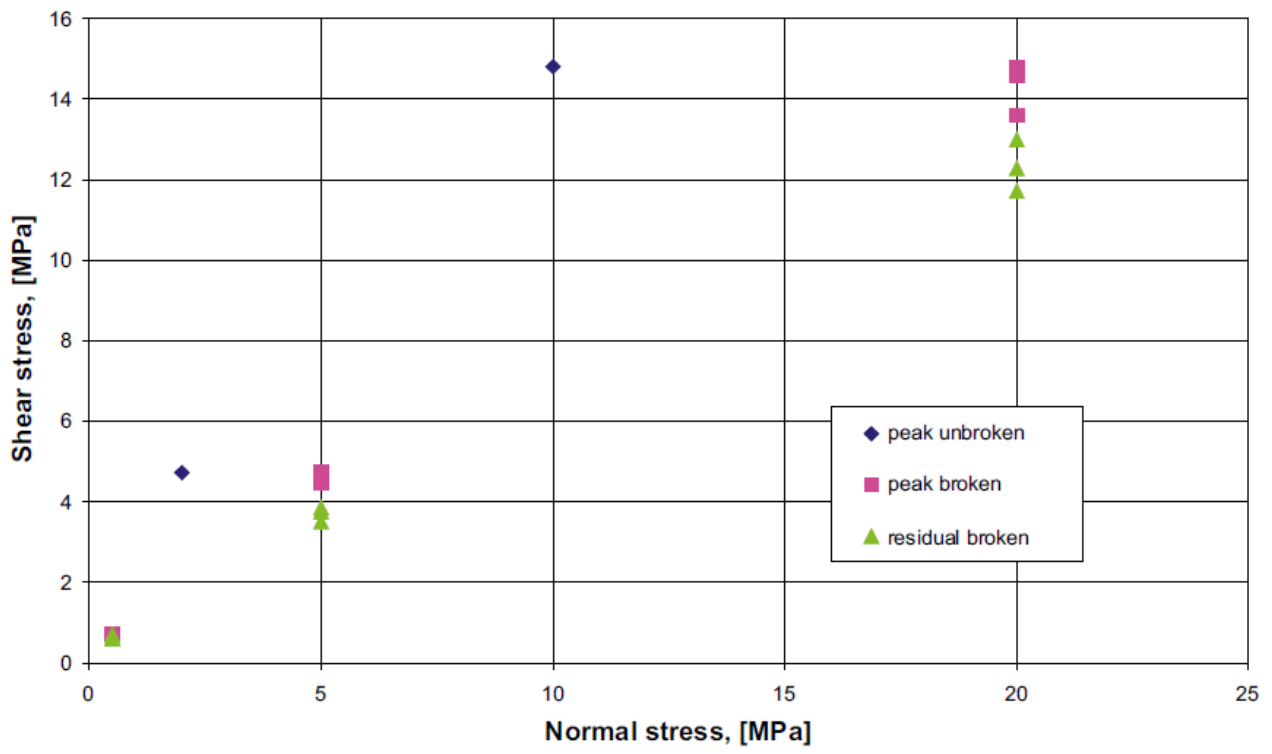
附圖三.1 閉合性破裂面的直接剪力試驗結果



附圖三.1A 鑽孔 KFM01D 閉合破裂面剪切試驗 482.83



附圖三.1B 鑽孔 KFM01D 閉合破裂面剪切試驗 588.28



附圖三.1C 鑽孔 KFM01D 閉合破裂面剪切試驗 658.34

附錄四

附表四.1 不連續面位態模型參數

破裂面域	破裂面組	Global or local set?	概率分佈	平均極點			Fisher 分佈 κ		
				Trend	Plunge	κ_{mp}	Mean	Std. dev.	Median
FFM01	NE	Global	Univ. Fisher	314.9	1.3	47.4	20.9	9.4	17.8
FFM01	NS	Global	Univ. Fisher	270.1	5.3	47.0	21.3	13.2	20.3
FFM01	NW	Global	Univ. Fisher	230.1	4.6	32.3	15.7	8.1	12.6
FFM01	SH	Global	Univ. Fisher	0.8	87.3	48.9	17.4	7.1	14.4
FFM01	ENE	Local	Univ. Fisher	157.5	3.1	100.0	34.1	17.0	34.1
FFM01	EW	Local	Univ. Fisher	0.4	11.9	30.0	13.9	5.6	13.5
FFM01	NNE	Local	Univ. Fisher	293.8	0.0	33.1	21.8	0.9	NA
FFM01	SH2	Local	Univ. Fisher	164.0	52.6	NA	35.43	NA	NA
FFM01	SH3	Local	Univ. Fisher	337.9	52.9	10.2	17.1	0.1	NA
FFM02	NE	Global	Univ. Fisher	315.3	1.8	33.8	27.0	24.0	22.9
FFM02	NS	Global	Univ. Fisher	92.7	1.2	24.1	30.7	27.1	19.2
FFM02	NW	Global	Univ. Fisher	47.6	4.4	18.6	19.7	22.9	13.9
FFM02	SH	Global	Univ. Fisher	347.4	85.6	87.8	23.2	8.8	20.4
FFM02	ENE	Global	Univ. Fisher	157.9	4.0	100.0	53.2	35.1	47.6
FFM02	EW	Global	Univ. Fisher	186.3	4.3	46.5	34.2	20.6	33.2
FFM02	NNE	Local	Univ. Fisher	107.2	1.8	NA	45.3	NA	NA
FFM02	NNW	Local	Univ. Fisher	73.0	5.6	NA	11.6	NA	NA
FFM03	NE	Global	Univ. Fisher	311.1	2.7	81.3	25.9	9.8	24.7
FFM03	NS	Global	Univ. Fisher	270.2	6.9	91.4	19.7	10.8	18.2
FFM03	NW	Global	Univ. Fisher	42.4	2.8	84.8	18.4	7.3	17.4
FFM03	SH	Global	Univ. Fisher	348.8	71.0	77.3	13.1	5.7	11.8
FFM03	ENE	Local	Univ. Fisher	164.8	1.2	NA	44.0	NA	NA
FFM03	EW	Local2	Univ. Fisher	196.5	7.3	50.7	27.2	17.6	22.7
FFM06	NE	Global	Univ. Fisher	125.7	10.1	54.6	45.1	21.5	53.3
FFM06	NS	Global	Univ. Fisher	91.0	4.1	100.0	19.5	7.8	15.2
FFM06	NW	Global	Univ. Fisher	34.1	0.8	100.0	16.1	6.1	15.9
FFM06	SH	Global	Univ. Fisher	84.3	71.3	100.0	10.8	5.1	10.8
FFM06	ENE	Local	Univ. Fisher	155.4	8.3	NA	20.8	NA	NA
FFM06	SH2	Local	Univ. Fisher	0.0	47.5	NA	12.7	NA	NA

附表四.2 破裂面尺寸-歐基里得假設之構造連續模型 (TCM)

破裂面域	破裂面組	群組種類	尺寸分佈	Min. radius r ₀ (m)	Exponent (k _r)	Match P ₃₂ r _{0-∞} (1/m)
FFM01	NE	Global	Power Law	0.66	3.02	1.74
FFM01	NS	Global	Power Law	0.06	2.78	1.29
FFM01	NW	Global	Power Law	0.59	2.85	0.95
FFM01	SH	Global	Power Law	0.82	2.85	0.63
FFM01	ENE	Local	Power Law	0.32	3.25	2.74
FFM01	EW	Local	Power Law	0.17	3.1	1.12
FFM01	NNE	Local	從露頭尺度使用尺寸模型			
FFM01	SH2	Local	從露頭尺度 SH 組使用尺寸模型			
FFM01	SH3	Local	從露頭尺度 SH 組使用尺寸模型			
FFM02	NE	Global	Power Law	0.35	3.02	3.31
FFM02	NS	Global	Power Law	0.04	2.78	1.61
FFM02	NW	Global	Power Law	0.23	2.85	2.12
FFM02	SH	Global	Power Law	0.14	2.85	2.78
FFM02	ENE	Global	Power Law	0.26	3.25	3.65
FFM02	EW	Global	Power Law	0.16	3.1	1.19
FFM02	NNE	Local	從露頭尺度使用尺寸模型			
FFM02	NNW	Local	無法參數化；沒有破裂面尺寸資料可用			
FFM03	NE	Global	Power Law	0.24	2.95	2.91
FFM03	NS	Global	Power Law	0.36	2.93	1.49
FFM03	NW	Global	Power Law	0.59	2.90	1.46
FFM03	SH	Global	Power Law	0.20	2.81	0.96
FFM03	ENE	Local	Power Law	0.93	3.24	0.44
FFM03	EW	Local2	Power Law	0.5	3.13	0.74
FFM06	NE	Global	Power Law	0.35	3.02	3.30
FFM06	NS	Global	Power Law	0.039	2.78	2.15
FFM06	NW	Global	Power Law	0.32	2.85	1.61
FFM06	SH	Global	Power Law	0.79	2.85	0.64
FFM06	ENE	Local	Power Law	0.74	3.25	0.98
FFM06	SH2	Local	從露頭尺度 SH 組使用尺寸模型			

附表四.3 破裂面尺寸-分形構造連續模型 (TCMF)

破裂面域	破裂面組	群組種類	尺寸分佈	Min. radius r_0 (m)	Exponent (k_r)	Match P_{32} $r_{0-\infty}$ (1/m)
FFM01	NE	Global	Power Law	0.72	3.01	1.74
FFM01	NS	Global	Power Law	0.06	2.76	1.29
FFM01	NW	Global	Power Law	0.63	2.85	0.95
FFM01	SH	Global	Power Law	0.72	2.83	0.63
FFM01	ENE	Local	Power Law	0.34	3.25	2.74
FFM01	EW	Local	Power Law	0.17	3.13	1.12
FFM01	NNE	Local	從露頭尺度使用尺寸模型			
FFM01	SH2	Local	從露頭尺度 SH 組使用尺寸模型			
FFM01	SH3	Local	從露頭尺度 SH 組使用尺寸模型			
FFM02	NE	Global	Power Law	0.36	3.01	3.31
FFM02	NS	Global	Power Law	0.05	2.76	1.61
FFM02	NW	Global	Power Law	0.24	2.85	2.12
FFM02	SH	Global	Power Law	0.12	2.83	2.78
FFM02	ENE	Global	Power Law	0.27	3.25	3.65
FFM02	EW	Global	Power Law	0.19	3.13	1.19
FFM02	NNE	Local	從露頭尺度使用尺寸模型			
FFM02	NNW	Local	無法參數化；沒有破裂面尺寸資料可用			
FFM03	NE	Global	Power Law	0.21	2.94	2.91
FFM03	NS	Global	Power Law	0.31	2.92	1.49
FFM03	NW	Global	Power Law	0.69	2.89	1.46
FFM03	SH	Global	Power Law	0.25	2.81	0.96
FFM03	ENE	Local	Power Law	1.04	3.25	0.44
FFM03	EW	Local2	Power Law	0.5	3.13	0.80
FFM06	NE	Global	Power Law	0.38	3.01	3.30
FFM06	NS	Global	Power Law	0.039	2.76	2.15
FFM06	NW	Global	Power Law	0.34	2.85	1.61
FFM06	SH	Global	Power Law	0.70	2.83	0.64
FFM06	ENE	Local	Power Law	0.78	3.25	0.98
FFM06	SH2	Local	從露頭尺度 SH 組使用尺寸模型			

附表四.4 破裂面尺寸-露頭尺度模型(OSM)

破裂面域	破裂面組	群組種類	尺寸分佈	Min. radius r_0 (m)	Exponent (k_r)	Match P_{32} $r_{0-\infty}$ (1/m)
FFM01	NE	Global	Power Law	0.039	2.64	1.74
FFM01	NS	Global	Power Law	0.039	2.90	1.29
FFM01	NW	Global	Power Law	0.039	2.44	0.95
FFM01	SH	Global	Power Law	0.039	2.61	0.63
FFM01	ENE	Local	Power Law	0.039	2.20	2.74
FFM01	EW	Local	Power Law	0.039	3.06	1.12
FFM01	NNE	Local	Power Law	0.039	3.00	4.39
FFM01	SH2	Local	From SH	0.039	2.61	0.92
FFM01	SH3	Local	From SH	0.039	2.61	0.84
FFM02	NE	Global	Power Law	0.10	2.64	3.31
FFM02	NS	Global	Power Law	0.06	2.90	1.61
FFM02	NW	Global	Power Law	0.04	2.44	2.12
FFM02	SH	Global	Power Law	0.07	2.61	2.78
FFM02	ENE	Global	Power Law	0.039	2.20	3.65
FFM02	EW	Global	Power Law	0.15	3.06	1.19
FFM02	NNE	Local	Power Law	0.5	3.00	1.35
FFM02	NNW	Local	無法參數化；沒有破裂面尺寸資料可用			
FFM03	NE	Global	Power Law	0.07	2.62	2.91
FFM03	NS	Global	Power Law	0.05	2.63	1.49
FFM03	NW	Global	Power Law	0.36	2.59	1.46
FFM03	SH	Global	Power Law	0.12	2.57	0.96
FFM03	ENE	Local	Power Law	0.65	2.70	0.30
FFM03	EW	Local2	Power Law	1.03	3.36	0.44
FFM06	NE	Global	Power Law	0.039	2.64	3.30
FFM06	NS	Global	Power Law	0.039	2.90	2.15
FFM06	NW	Global	Power Law	0.039	2.44	1.61
FFM06	SH	Global	Power Law	0.039	2.61	0.64
FFM06	ENE	Local	Power Law	0.039	2.20	0.98
FFM06	SH2	Local	Power Law	0.039	2.61	1.03

附表四.5 平均 P₃₂ 強度，破裂面“不受 DZ 影響”

破裂面域	破裂面組	群組種類	Mean P ₃₂ (0.5–564 m)			(28–564 m)
			OSM	TCM	TCMF	TFM
FFM01	NE	Global	0.33	2.30	2.50	0.0285
FFM01	NS	Global	0.13	0.24	0.26	0.0003
FFM01	NW	Global	0.29	1.10	1.15	0.0003
FFM01	SH	Global	0.13	0.95	0.85	0.0286
FFM01	ENE	Local	1.24	1.60	1.70	0.0871
FFM01	EW	Local	0.07	0.34	0.33	0.0014
FFM01	NNE	Local	0.34	Use OSM	Use OSM	NA
FFM01	SH2	Local	0.19	Use OSM	Use OSM	NA
FFM01	SH3	Local	0.19	Use OSM	Use OSM	NA
FFM02	NE	Global	1.14	2.30	2.50	0.0285
FFM02	NS	Global	0.25	0.24	0.26	0.0003
FFM02	NW	Global	0.67	1.10	1.15	0.0003
FFM02	SH	Global	0.86	0.95	0.85	0.0286
FFM02	ENE	Global	1.65	1.60	1.70	0.0871
FFM02	EW	Global	0.34	0.34	0.40	0.0014
FFM02	NNE	Local	1.35	Use OSM	Use OSM	NA
FFM02	NNW	Local	無法參數化			
FFM03	NE	Global	0.86	1.45	1.30	0.0285
FFM03	NS	Global	0.34	1.10	0.95	0.0003
FFM03	NW	Global	1.18	1.70	1.95	0.0003
FFM03	SH	Global	0.43	0.45	0.55	0.0286
FFM03	ENE	Local	0.36	0.74	0.80	0.0871
FFM03	EW	Local2	1.17	0.95	1.10	0.0014
FFM06	NE	Global	0.63	2.30	2.50	0.0285
FFM06	NS	Global	0.21	0.29	0.31	0.0003
FFM06	NW	Global	0.50	1.10	1.15	0.0003
FFM06	SH	Global	0.13	0.95	0.85	0.0286
FFM06	ENE	Local	0.44	1.60	1.70	0.0900
FFM06	SH2	Local	0.21	Use OSM	Use OSM	NA

附表四.6 平均 P_{32} 強度，破裂面“受 DZ 影響”

破裂面域	破裂面組	群組種類	Mean $P_{32r_{0-\infty}}$	Mean P_{32} (0.5–564 m)		
				OSM	TCM	TCMF
FFM01	NE	Global	5.45	1.04	7.22*	7.22*
FFM01	NS	Global	2.60	0.26	0.49	0.49
FFM01	NW	Global	2.42	0.75	2.79*	2.79*
FFM01	SH	Global	2.44	0.50	3.69*	3.69*
FFM01	ENE	Local	3.90	1.76	2.27	2.27
FFM01	EW	Local	2.85	0.19	0.87	0.87
FFM01	NNE	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM01	SH2	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM01	SH3	Local	2.24	0.46	Use OSM	Use OSM
FFM02	NE	Global	5.24	1.80	3.64	3.95
FFM02	NS	Global	4.72	0.73	0.71	0.77
FFM02	NW	Global	2.35	0.74	1.22	1.27
FFM02	SH	Global	6.59	2.04	2.24	2.01
FFM02	ENE	Global	5.05	0.50	2.21	2.35
FFM02	EW	Global	0.18	0.05	0.05	0.06
FFM02	NNE	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM02	NNW	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM03	NE	Global	4.52	5.25	2.25	2.02
FFM03	NS	Global	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM03	NW	Global	1.15	1.49	1.34	1.53
FFM03	SH	Global	2.48	2.24	1.15	1.41
FFM03	ENE	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM03	EW	Local2	0.41	0.72	0.89	1.03
FFM06	NE	Global	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM06	NS	Global	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM06	NW	Global	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM06	SH	Global	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM06	ENE	Local	0.00	0.00	0.00	0.00
FFM06	SH2	Local	0.00	0.00	0.00	0.00