

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

低放射性廢棄物隧道處置
水文地質模擬技術發展現況與國內
隧道工程水文地質模擬案例研究

計畫編號：952006FCMA002

受委託機關(構)：國立中央大學應用地質研究所

計畫主持人：董家鈞、陳瑞昇

報告日期：中華民國九十五年十二月

摘要

台灣低放射性廢棄物處置山岳區域隧道處置為多種處置方式選項之一。隧道周圍岩盤原有之裂隙加上興建隧道造成周圍岩盤產生新的裂隙，均將成為地下水流之可能路徑，而低放射性廢棄物主要將透過這些路徑而影響到生物圈。因此，位於裂隙岩盤隧道合宜之水文地質調查，以及做為後續核種傳輸模擬基礎之水文地質模擬，均為低放射性廢棄物隧道處置場安全評估之要項。瑞典 SKB 公司，已針對運轉中的 SFR 低放射性廢棄物處置場，進行水文地質模擬完整且系統性的研究，因此詳細回顧 SFR 關於水文地質模擬技術的發展與現況，對於管制業務所需處置場分階段核照作業推動將極有助益。然而，水文地質模擬所涉及之關鍵問題，將與場址之地質狀況極其相關，因此，完整回顧台灣過去隧道工程之經驗，特別是在候選場址附近之隧道工程水文地質調查、模擬與評估經驗，亦甚具價值。

本研究回顧瑞典 SFR 低放射性廢料處置場之水文地質模擬相關之經驗，同時，亦蒐集整理放射性廢料處置場候選場址附近地質條件類似之重大隧道工程案例。根據候選場址地質條件，本研究亦將介紹候選場址附近水文地質模擬可能涉及之重要水文地質特性。藉由 SFR 案例分析成果，本研究完整介紹隧道處置地下水流動分析方法，包括數值分析與隧道流量預測解析解，同時說明分析項目應包括：進入處置隧道之流量分析、流動路徑分析、到達地表穿透時間分析以及各種可能發生之境況敏感度分析。關於國內重大隧道工程案例回顧結果發現，水文地質調查、分析與評估常對於工程施工順利與否，扮演決定性之角色。本研究介紹之隧道工程(與部份放射性廢料處置候選場址地質條件類似)施工中之湧水災變，充分說明了此一影響。也因此，本研究蒐集候選場址附近之地質資料，並針對其水文地質特性進行概略說明，根據文獻資料顯示，臺灣東南部(部份候選場址所在地)於陸弧碰撞時造成多期、複雜之變形，因此，水文地質概念模式之建立，應基於詳細、由廣而精之完整構造地質調查與解釋，方不致於過度簡化水文地質概念模型。本研究成果期能提供未來同屬裂隙介質之臺灣放射性廢料處置場之場址水文地質調查、模擬與評估作業參考，同時亦期能作為物管局針對低放射性廢棄物可能採取之岩盤中隧道處置場址水文地質模擬核照審查之依據。

Abstract

Taiwan's low level radioactive waste (LLRW) might be disposed of using the tunnel system in mountain areas. Construction of tunnels creates fractures in the host rock formation. These man-made fractures along with the naturally occurred joints, faults form effective passways of groundwater. Thus, there is a possibility that the radioactive waste can be transported by groundwater to the biosphere through these fractures. The safety assessment of such an event relies on an understanding of the hydrogeology of the fractured rock formation, which can be properly described by a hydrogeological conceptual model. Based on the flow paths and flow conditions produced from groundwater flow simulation, transport simulation can be followed. Consequently, the techniques of hydrogeological simulation for repository of low radioactive residues with tunnel system in fracture rocks is needed for quality control under different stages including siting, design, construction, operation, closure, and post-closure stages for LLRW disposal. The systematic studies have been executed on this issue by SKB in Swedish of SFR repository for low- and intermediate- level nuclear waste which is still operating. It is valuable for comprehensively reviewing the development of hydrogeological simulation techniques for SFR. Besides, since the repository site might be changed, the concerned problems for developing and reviewing hydro-geologic simulation are quite different. Taiwan's experience is also valuable for investigating and simulating the groundwater flow in a tunnel. The proposed plan is to review the procedure and approach of the hydro-geologic simulation of repository for low- and intermediate- level nuclear waste with tunnel system in Swedish. Hydrogeological investigation and simulation of constructed tunnel in Taiwan is also reviewed. The hydrogeological conditions are evaluated of possible sites of repository for low- and intermediate- level nuclear waste. The results of the proposed works will become the guideline for hydrogeological site investigation, simulation and evaluation. It is expected the proposed research provides the reviewing agency, Atomic Energy Council, the reviewing technique of the hydrogeological simulation for repository of low radioactive residues which will be deposited in the hill area with tunnel system.

目錄

中英摘要	
目錄	I
圖目錄	III
表目錄	VI
第一章 概論	1
1.1 計畫背景說明	1
1.2 計畫目的	2
1.3 計畫內容	3
第二章 瑞典 SFR 隧道處置地下水流動模擬案例	4
2.1 SFR 地下水流動分析模式	4
2.1.1 隧道模式	5
2.1.2 邊界條件(Boundary conditions)	10
2.1.3 模式建立與模擬之順序(Establishment and simulation order of models)	11
2.2 隧道地下水流流量預測	12
2.3 地下水流動路徑分析(Flow path analysis)	15
2.3.1 由處置隧道流出地表之地下水流動路徑長度 (Length of flow paths)	15
2.3.2 自處置隧道流出至地表之穿透時間(Breakthrough times for flow paths)	19
2.3.3 裂隙作為水力通導區之流動路徑 (Fracture zones as conductors of flow paths)	22
2.3.4 處置隧道間水力交互作用(Hydraulic interaction between deposition tunnels)	24
2.3.5 流經處置隧道內之地下水來源(Origin of water in deposition tunnels)	25
2.3.6 流經處置隧道之地下水流出位置(Location of discharge areas)	26
2.3.7 流出區分佈以及流出區地下水稀釋作用(Discharge distribution and dilution in discharge area)	28
2.4 抽水井對 SFR 地下水流動之影響	29
2.5 擴大隧道系統(Extended tunnel system)	33
2.6 敏感度分析-障壁失效	34
2.6.1 隧道封塞失效 (degradation of tunnel plugs)	34
2.6.2 SILO 處置隧道封裝罐失效	36
2.6.3 BMA 處置隧道封裝罐失效或滲漏	37
2.6.4 BTF1 處置隧道失效或滲漏	38
2.7 敏感度分析-地形些微改變對地下水流動的影響	40

2.8 SFR 中低放射性廢棄物處置場之隧道充滿水所需時間	41
第三章 隧道內地下水流量以及充水時間估計之解析解	44
3.1 隧道內穩態地下水流量估計之解析解	44
3.1.1 球體隧道內之地下水流動	45
3.1.2 無限長圓柱體隧道內之地下水流動	45
3.1.3 橢圓體隧道內之地下水流動	46
3.2 利用解析解驗證隧道流量數值計算結果	49
3.3 估算隧道完全充滿水所需時間之解析解	50
3.3.1 徑向儲蓄	51
3.3.2 軸向儲蓄	52
3.4 利用解析解驗證隧道充滿水時間計算結果	53
第四章 國內重要隧道工程水文地質調查、分析與評估案例	55
4.1 雪山隧道工程水文地質調查、分析與評估案例	55
4.1.1 隧道工程概況	55
4.1.2 水文地質調查與隧道設計分析概況	55
4.1.3 雪山隧道水文地質分區	56
4.1.4 施工中湧水記錄	56
4.1.5 瞬時湧水量推估方法與實測值之比較	60
4.1.6 隧道長期湧水量推估方法之比較	61
4.2 新永春隧道工程水文地質調查、分析與評估案例	75
4.2.1 隧道工程概況	75
4.1.2 水文地質調查與隧道設計分析	76
4.2.3 新永春隧道水文地質特性	77
4.2.4 施工中面臨之湧水問題以及處理方式	78
4.2.5 瞬時湧水量推估方法與實測值之比較	82
第五章 候選場址水文地質特性概述	83
5.1 候選場址位置與相關集水區	83
5.2 六號、八號以及九號候選場址地質概況	83
5.3 七號候選場址地質概況	91
第六章 結論與建議	93
參考文獻	94

圖目錄

圖 2-1	SFR 隧道系統之配置，灰色表通達隧道(access tunnels)，紅色表 SILO 處置隧道，深藍色表 BTF1 處置隧道，淺藍色表 BTF2 處置隧道，綠色表 BLA 處置隧道，黃色表 BMA 處置隧道	5
圖 2-2	SFR 隧道系統配置以及局部尺度之裂隙帶(Fracture zones)	6
圖 2-3	SFR 隧道系統配置(封閉後)與局部尺度裂隙帶(圖 2-2 經放大旋轉)	6
圖 2-4	處置隧道(BTF、BLA、BMA)水平剖面之詳細模式	7
圖 2-5	BTF 處置隧道之垂直剖面詳細尺度模式	8
圖 2-6	BLA 處置隧道之垂直剖面詳細尺度模式	8
圖 2-7	BMA 處置隧道之垂直剖面詳細尺度模式	8
圖 2-8	SILO 處置隧道之垂直剖面詳細尺度模式	9
圖 2-9	各尺度模式間空間區域之鏈狀關係原則	10
圖 2-10	半局部尺度模式、地形與海岸線之後退與 SFR 之處置場之位置	10
圖 2-11	不同尺度模式間之設立與模擬之鏈狀順序原理	11
圖 2-12	流經處置隧道頂端回填濾層之總流量	14
圖 2-13	流經廢料罐與廢料儲存區域之總流量	15
圖 2-14	西元 2000 年時隧道系統、垂直裂隙帶(區域 6)與地下水之流動路徑	16
圖 2-15	西元 4000 年時隧道系統、垂直裂隙帶(區域 6)與地下水之流動路徑	17
圖 2-16	西元 6000 年時(擬穩態)隧道系統、垂直裂隙帶(區域 6)與地下水之流動路徑	18
圖 2-17	不同時間由不同處置隧道流出地表之地下水流動路徑長度，圖中呈現三個不同百分比(90%、50%與 10%)之流動路徑長度	19
圖 2-18	由不同隧道流出之流動路徑之穿透時間	21
圖 2-19	區域 H2、3 與 6 作為通過各處置隧道傳輸之水力通導區的重要性。縱軸為通過各處置隧道且流經某一重要裂隙帶區域流量佔總流量之百分比	23
圖 2-20	不同處置隧道之水流交互作用	25
圖 2-21	流經處置隧道內之地下水來源	26
圖 2-22	局部模式預測得西元 2000 與 3000 年流經處置隧道之流出區	27
圖 2-23	局部模式預測得西元 4000 與 5000 年流經處置隧道之流出區	28
圖 2-24	假設水井之位置以及裂隙帶與隧道系統之位置	31
圖 2-25	井可能遭受來自處置場地下水污染之風險區域，代表的風險區域面積約 0.2 平方公里，此圖以同心圓表示之研究區範例	32
圖 2-26	相對於以 SFR 中心為同心圓所定義之風險區大小	33
圖 2-27	SFR 擴大隧道系統與局部裂隙帶之立體圖	34
圖 2-28	敏感度分析 Sel 7 與 Sel 0 分析情況下流出區域種類隨時間改變之關係	41
圖 2-29	BMA 隧道之詳細模式處置場封閉後隧道充水百分比	42

圖 2-30	SILO 隧道之詳細模式處置場封閉後隧道充水百分比	43
圖 3-1	處置隧道充滿水時間長度估算之徑向儲蓄解析模式(Alytic solution No.1; 儲蓄沿著圓柱體半徑)以及軸向儲蓄(Alytic solution No.2; 儲蓄沿著圓柱體高度)示意圖, 徑向儲蓄解析模式地下水由外環往內儲蓄; 軸向儲蓄解析模式由底部往上儲蓄	51
圖 3-2	SILO 處置隧道充水期間地下水入流量變化(暫態)數值模擬與解析解計算結果	54
圖 4-1	雪山隧道之水文地質分區與湧水地點	57
圖 4-2	隧道開挖面地下水之流出模式	60
圖 4-3	均質含水層中隧道湧水初期流量之估算	61
圖 4-4	雪山隧道瞬時湧水量實測與計算值之比較	61
圖 4-5	抽水井出水與水位洩降示意圖	64
圖 4-6	計算流域平均高程與流路幅寬	65
圖 4-8	翡翠水庫與雪山隧道通過相關流域	67
圖 4-9	金瓜溪流域平均高程與流路幅寬	68
圖 4-10	里程 30K+013 之隧道地形橫剖面與湧水流入範圍	68
圖 4-11	雪山隧道之長期湧水流入範圍	69
圖 4-12	分析模式之剖面線位置	70
圖 4-13	有限差分網格及邊界條件	71
圖 4-14	穩定時之等水壓線分佈與流場分佈	71
圖 4-15	直徑 8m 隧道之遠域與隧道近域之網格	72
圖 4-16	隧道開挖後等水壓線分佈	72
圖 4-17	隧道開挖後流場分佈	72
圖 4-18	隧道湧水之衰減曲線	73
圖 4-19	不同隧道半徑下之湧水衰減曲線	73
圖 4-20	不同岩體滲透係數下之湧水衰減曲線	74
圖 4-21	不同襯砌滲透係數下之湧水衰減曲線	74
圖 4-22	不同初始水位面下之湧水衰減曲線	75
圖 4-23	新永春隧道(紅線)及永春隧道位置圖(藍線)	76
圖 4-24	新永春隧道(a)水壓分佈圖與(b)流線網圖	78
圖 4-25	新永春隧道湧水情形	79
圖 4-26	地電阻探測結果與量測水量水壓比對量	80
圖 4-27	水平長距離鑽探作業	80
圖 4-28	水平長距離鑽探作業孔口出水情形	81
圖 4-29	新永春隧道原路線(藍線)與改線後(紅線)平面配置圖	81
圖 4-30	大口徑排水洩水降壓	82
圖 5-1	恆春與大武圖幅	84
圖 5-2	南迴鐵路沿線地質圖	86

圖 5-3	菩安山背斜東翼(左：大武以南；右：大武至太麻里)之層面位態下半球等面積投影分析	87
圖 5-4	菩安山背斜東翼之褶皺軸下半球等面積投影分析	88
圖 5-5	菩安山背斜東翼大武至太麻里間劈理面位態下半球等面積投影分析	88
圖 5-6	六號與八號候選場址附近構造解釋	89
圖 5-7	候選場址附近地區構造作用分期、應力場及地層變形特徵	90
圖 5-8	澎湖群島南幅	91
圖 5-9	七號場址露頭柱狀圖	92

表目錄

表 2-2	詳細模式預測流經 SILO 處置隧道總流量與平均比流量	13
表 2-3	BMA 處置隧道配置條件 Alt.3 預測流經 BMA 處置隧道總流量與平均比流量	14
表 2-4	不同時間點由 BMA 隧道流出地表之流動路徑長度	16
表 2-5	不同時間點由 SILO 隧道流出地表之流動路徑長度	16
表 2-6	由 BMA 隧道流出之穿透時間	20
表 2-7	由 SILO 隧道流出之穿透時間	20
表 2-8	通過處置隧道 BMA 且流經各重要裂隙帶區域流量佔總流量之百分比	22
表 2-9	通過處置隧道 SILO 且流經各重要裂隙帶區域流量佔總流量之百分比	22
表 2-10	BLA 隧道與其它處置隧道間之水力交互作用	24
表 2-11	BTF2 隧道與其它處置隧道間之水力交互作用	24
表 2-12	流經 BMA、BLA 與 BTF 處置隧道地下水流出之稀釋作用	29
表 2-13	假設 D 井抽水造成流經各處置隧道總水流量變化率分析	30
表 2-14	假設 D 井抽水造成流經各處置隧道之水流量與流至井內的水流量比例	30
表 2-15	擴大隧道系統後流經新設處置隧道與現有處置隧道之總流量	34
表 2-16	詳細模式預測流經 BMA 處置隧道總流量(假設無封塞情況下)	35
表 2-17	詳細模式預測流經 SILO 處置隧道總流量(假設無封塞情況下)	36
表 2-18	詳細模式預測流經 SILO 處置隧道總流量(假設 SILO 處置隧道封裝罐失效但封塞完整)	36
表 2-19	詳細模式預測流經 SILO 處置隧道總流量(假設 SILO 處置隧道封裝罐以及封塞均失效)	37
表 2-20	詳細模式預測流經 BMA 處置隧道總流量(假設 BMA 處置隧道封裝罐失效)	38
表 2-21	詳細模式預測流經 BTF1 處置隧道總流量(假設 BTF1 處置隧道封裝罐失效狀況 1)	39
表 2-22	詳細模式預測流經 BTF1 處置隧道總流量(假設 BTF1 處置隧道封裝罐失效狀況 2)	39
表 2-23	不同隧道系統構造詳細模式之初始孔隙率	41
表 2-24	BMA 處置隧道充滿水所需時間詳細模式預測結果	42
表 2-25	SILO 處置隧道充滿水所需時間詳細模式預測結果	42
表 3-1	解析解與數值解估計之處置隧道總流量比較	50
表 4-1-1	雪山隧道開挖面地盤湧水狀況分佈與計算結果比較表	58
表 4-1-2	雪山隧道開挖面地盤湧水狀況分佈與計算結果比較表	59

表 4-2	日本 30 個長期湧水量較大的隧道案例	63
表 4-3	雪山隧道長期湧水量計算表(高橋法)	69

第一章 概論

1.1 計畫背景說明

低放射性廢棄物主要經由核電廠、研究單位及醫療機構等所產生，一般而言，低放射性廢棄物的管制年限較高放射性廢棄物為短。根據 IAEA[1]建議，中、低放射性廢棄物可採地表處置，也可考慮水力壓裂、深井注入及深地層處置。因地表處置概念之推動有其社會因素上之困難度，人口以及開發密度較低山岳地區之隧道處置為較可能之選項。隧道周圍岩盤原有之裂隙加上興建隧道造成周圍岩盤產生新的裂隙，均將成為地下水流之路徑，而低放射性廢棄物主要將透過這些途徑而影響到生物圈。基於隧道處置方式的考量，位於裂隙岩盤中隧道之地下水流動與傳輸問題，將是處置場安全性之重要考慮因素，因此建立合理的水文地質模式以評估處置場的水文地質特性與評估長期地下水流動行為，並作為後續核種傳輸模擬之基礎，將是低放射性廢棄物處置計畫關鍵課題之一。

董家鈞與陳瑞昇(2005)[2]回顧水文地質概念模式建構技術，提出水文地質概念模式建立過程應注意：(1)模式架構與分階段推動；(2)模式之尺度選擇以及模擬順序；(3)水文地質分區；(4)不同水文地質分區之模擬概念選擇；(5)配合前述四項基本條件與時機，使用合宜之調查、試驗、監測以及分析方法，確認所得到資料之可靠度；(6)妥善利用模擬技術校核水文地質概念模式各項條件(幾何、邊界、初始條件)以及水文地質參數；(7)妥善利用模擬技術測試水文地質概念模式各項條件以及水文地質參數之敏感度；(8)利用跨領域校核技術，以確認水文地質概念模式之合理性。

正因水文地質概念模式之建構過程極為複雜的，其他國家水文地質模擬之成功經驗，對我國低放隧道處置業務之推動便顯得重要。回顧全球之低放射性廢棄物處置計畫，不乏以隧道處置概念進行規劃，如芬蘭與瑞典均採隧道處置處理低放射性廢棄物[3]。芬蘭之隧道處置場址位於花崗岩與閃長岩中，至於瑞典之中、低放射性廢棄物最終處置場之處置隧道則位於海床下 60 公尺之石英岩中。瑞典核燃料與廢棄物管理公司(Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.; SKB)中、低放射性廢棄物最終處置場 SFR (Swedish Final Repository for radioactive waste)之經驗甚值得參考。根據水文地質概念模式，該公司曾進行 SFR 長期地下水流動模擬預測，應用考慮處置隧道與包含斷層帶周遭岩石之地下水流系統數學

模式，模擬三維時變之地下水流變化，藉由有限差分數值程式 GEOAN，計算地下水流動路徑及隧道流量，並利用解析解進行分析結果驗證(Holmén and Stigsson, 2001[4])。

然而，台灣之水文地質條件與芬蘭或瑞典均極不相同，且基於過去台灣地區相關之隧道工程建設經驗，地下水常造成工程施工困境。回顧國內東部之隧道工程，從早期北迴鐵路之永春隧道、南迴鐵路之中央隧道及大烏隧道、木瓜溪水力發電工程龍澗尾水隧道到近期之北宜高速公路雪山隧道與東部鐵路改善計畫之新永春隧道，均發生災變程度不一之湧水事件[5]。因此，如何由成功或失敗的案例中學習水文地質的調查、分析與評估經驗益顯重要。因低放射性廢棄物最終處置場可行性研究已著手進行中，水文地質調查工作之推動已迫在眉睫，若能針對台灣既有隧道工程之水文地質調查、分析與評估，進行回顧與介紹，將能吸取相當重要的成功經驗或失敗教訓，特別是與候選場址類似之地質區之施工經驗，更是重要的資料，因此，蒐集並分析台灣隧道工程案例，特別是水文地質之調查、分析與評估技術，亦相當重要。

1.2 計畫目的

低放射性廢棄物隧道處置之水文地質模擬有其理論與實務上之特殊性與複雜性，為嚴密管制低放射性廢棄物隧道式最終處置作業，本研究擬就國外已成功運作之實際案例說明低放射性廢棄物處置隧道之水文地質模擬技術發展現況，期能更具體呈現安全評估報告中水文地質相關議題之審查重點與要求。另外，有鑒於台灣地質條件複雜且特殊，透過吸取國內於候選場址附近之隧道工程經驗，亦可望對場址附近可能面對之水文地質問題有更深入之了解，同時，亦可回顧水文地質調查與隧道設計階段成功經驗與尚待改善之處。因此，本計畫主要目的為就國內、外之相關經驗進行水文地質模擬案例研究，以供作為未來管制與審查作業(與水文地質概念模式有關之部分)之參考。綜而言之，了解國、內外隧道處置或隧道工程成功與失敗經驗，並回饋至隧道處置概念可行性研究中，對於低放射性廢棄物最終處置管制業務推展將極有助益。

本研究將分兩個主要部份進行：(1)國外成功案例回顧，特別是已於運轉中的低放射性廢棄物隧道處置區之介紹；(2)蒐集國內重要隧道工程之水文地質調查、分析與評估案例，檢討其成功或失敗的關鍵問題；基於案例分析成果，可進

一步探討可能候選場址隧道處置水文地質調查、分析與評估之關鍵課題，並回饋至可行性研究中。

1.3 計畫內容

如前所述，本研究將分兩個主要部份進行：(1)國外成功案例回顧；(2)蒐集國內重要隧道工程之水文地質調查、分析與評估案例。以下分別加以說明：

(1)國外成功案例回顧：

本計畫蒐集並回顧瑞典核燃料與廢料管理公司 SFR(Swedish Final Repository for radioactive waste)之隧道處置水文地質模擬與技術研究[4]，並以案例探討方式，介紹運轉中之 SFR 低放射性廢棄物隧道處置場之水文地質模擬過程與模擬結果。第二章詳細說明 SFR 隧道處置場如何透過地下水流動數值模擬，計算流經處置隧道地下水之流量、流動路徑長度及流經處置隧道之地下水到達地表所需之穿透時間(breakthrough time)，上述分析已將可能為隧道導水通道之裂隙、處置隧道間之可能水力交互作用、處置隧道內地下水的來源、隧道流動路徑之流出位置、流出分布與流出區域之稀釋等問題納入考慮，因此極富參考價值。第三章則介紹如何利用解析方法進行隧道流量預測以及估算隧道完全充滿水所需時間之解析解，以及利用解析解驗證數值程式計算之結果。

(2)蒐集國內重要隧道工程之水文地質調查、分析與評估案例：

本研究蒐集國內重大隧道工程之水文地質調查、分析與評估之案例，並根據施工過程發生之湧水事件，檢討於調查、分析與評估過程之得失，第四章詳細描述雪山隧道以及新永春隧道之水文地質調查、分析與評估，特別是湧水量之估算方式介紹，原因是此兩個重要的隧道均曾於施工時發生大量湧水之意外，湧水量估算結果得以與施工中詳實之記錄相互比對。雪山隧道位於雪山山脈地質區(板岩、硬頁岩、變質砂岩)，新永春隧道則位於中央山脈東翼地質區(板岩、大理岩與片岩)，地質條件與可能候選場址屬於中央山脈西翼區之脊樑山脈區(板岩為主)類似但非完全相同，然而仍具參考價值。本研究第五章則根據候選場址附近之區域地質概況，簡要說明其水文地質特性，並提出未來水文地質調查、分析與評估應特別注意之問題。

第二章 瑞典 SFR 隧道處置地下水流動模擬案例

本章詳細介紹瑞典核燃料與廢料管理公司(Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)放射性廢棄物最終處置場 SFR (Swedish Final Repository for radioactive waste)之隧道處置地下水流動模擬之相關經驗，主要內容摘自瑞典核燃料與廢料管理公司編號R-01-02之技術報告(Holmén and Stigsson, 2001[4])。地下水流動模擬目的是為了估計SFR中低放射性廢棄物處置場(repository for low-and intermediate-level nuclear waste)未來的地下水移動，並提供SFR中低放射性廢棄物處置場量化安全評估(safety assessment)所需之資料。由於封場後處置場內之放射性廢棄物可能溶解於地下水中而隨地下水流動而傳輸至地表面，因此未來地下水流動型態(flow pattern)為研究之重點。

一般而言，地下水流動模擬應能計算給定區域：(1)自然條件下(未受隧道處置工程擾動)；以及(2)完成放射性廢棄物處置隧道後之地下水流動之情形。自然條件下之地下水流路徑，對於水文地球化學(hydrogeochemistry)之解釋非常重要。對於放射性廢棄物處置隧道之入流量或因隧道存在所產生地下水之洩降等，亦為重要須評估之要項，而流經處置隧道後進入生物圈之地下水流動路徑與所需時間，對於處置場之安全評估更是相當關鍵。對於長期評估而言，海水面以及海岸線位置之變化可能亦須納入考慮。以下分別介紹SFR貯置場地下水流動模擬方法(2.1節)、流經處置隧道之地下水流量預估(2.2節)、地下水流動路徑與穿透時間計算以及流出位置與稀釋作用評估(2.3節)、對附近井之影響(2.4節)、隧道系統擴大之影響分析(2.5節)、假設突發狀況之影響敏感度分析(2.6節與2.7節)以及封場隧道充滿水所需時間計算(2.8節)。

2.1 SFR地下水流動分析模式

SFR地下水流動模擬採用系統性分析方法。研究區域採三維模式分析，模式中包含了處置隧道(repository tunnels)區與其周圍滿布裂隙之岩盤。地下水流動模擬採用描述整體水力系統之三維模式(數學模式)。此三維模式乃利用有限差分(finite difference method)數值程式GEOAN建構而成。研究區域模擬考慮區域性(regional)尺度、局部性(local)尺度、次局部性(semi-local)尺度以及詳細(detailed)尺度等四種尺度模式。

為了描述岩體裂隙之異質性(heterogeneity)，區域尺度模式採用序率連續體方法(stochastic continuum approach)描述主要裂隙帶(large fracture zones)間之岩體，主要裂隙帶則採定率方法(deterministically)描述其位置與延伸。區域尺度模式中岩體之有效水力傳導係數(effective conductivity)應與包括岩體與裂隙之局部尺度

模式之等值有效水力傳導係數(equivalent conductivity)相同，局部與詳細尺度模式採用定率方式描述裂隙分佈，至於岩體則視為均質材料。局部尺度模式之岩體水力傳導係數視為均勻分佈，同時利用校正程序(calibration procedure)取得，局部尺度模式之水力傳導係數值應與詳細尺度模式之等值有效水力傳導係數相同。

2.1.1 隧道模式

SFR中低放射性廢棄物處置場的隧道系統配置詳見圖2-1，圖2-1中灰色表通達隧道(access tunnels)，紅色表SILO處置隧道，深藍色表BTF1處置隧道，淺藍色表BTF2處置隧道，綠色表BLA處置隧道，黃色表BMA處置隧道。在局部與詳細尺度模式中，隧道視為獨立但相互連結單元(cell)所組成之連續構造。SFR中低放射性廢棄物處置場局部尺度模式(包含全部隧道及周圍岩體與裂隙分佈)詳見圖2-2和圖2-3。至於詳細尺度模式則應包含所有隧道的描述(通達隧道除外)，詳見圖2-4~圖2-8，此外，詳細尺度模式應描述處置隧道內更細部之構造，如障壁(barrier)與封裝罐(encapsulation)等。以下敘述以及圖表中若未敘明模擬條件，則均為處置場規劃設計之基準條件。

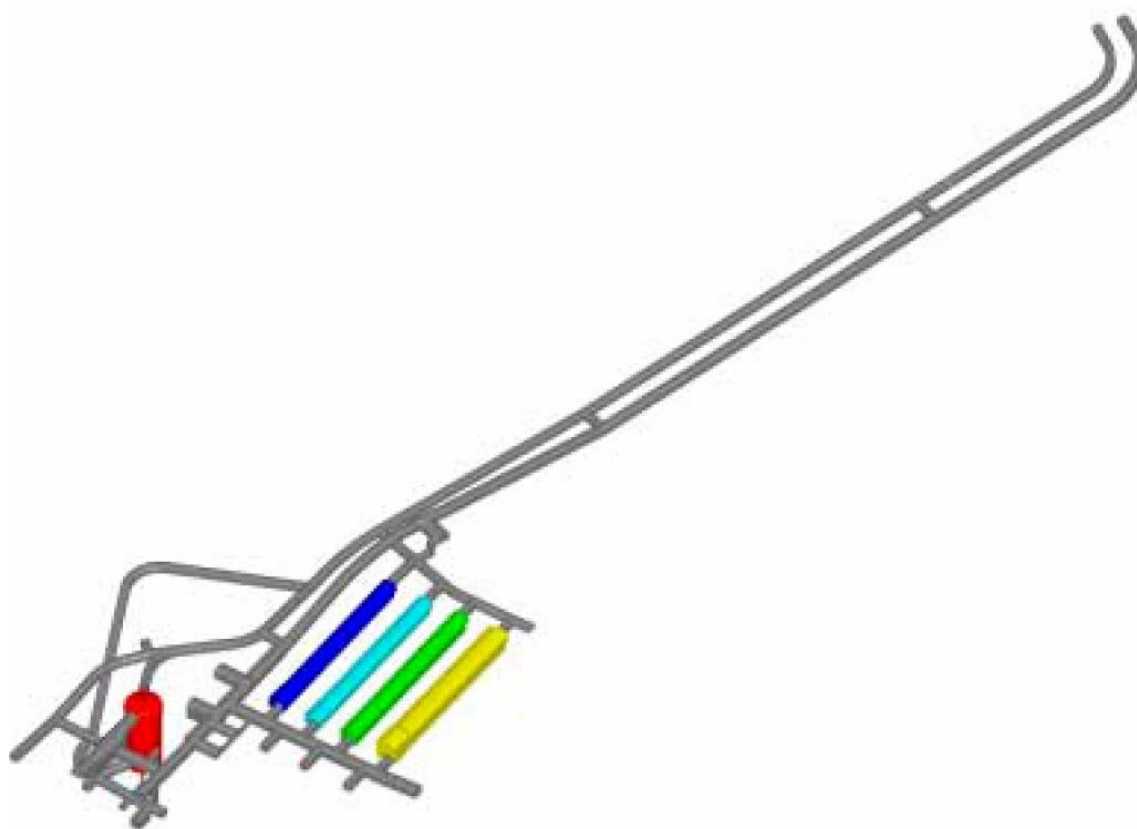
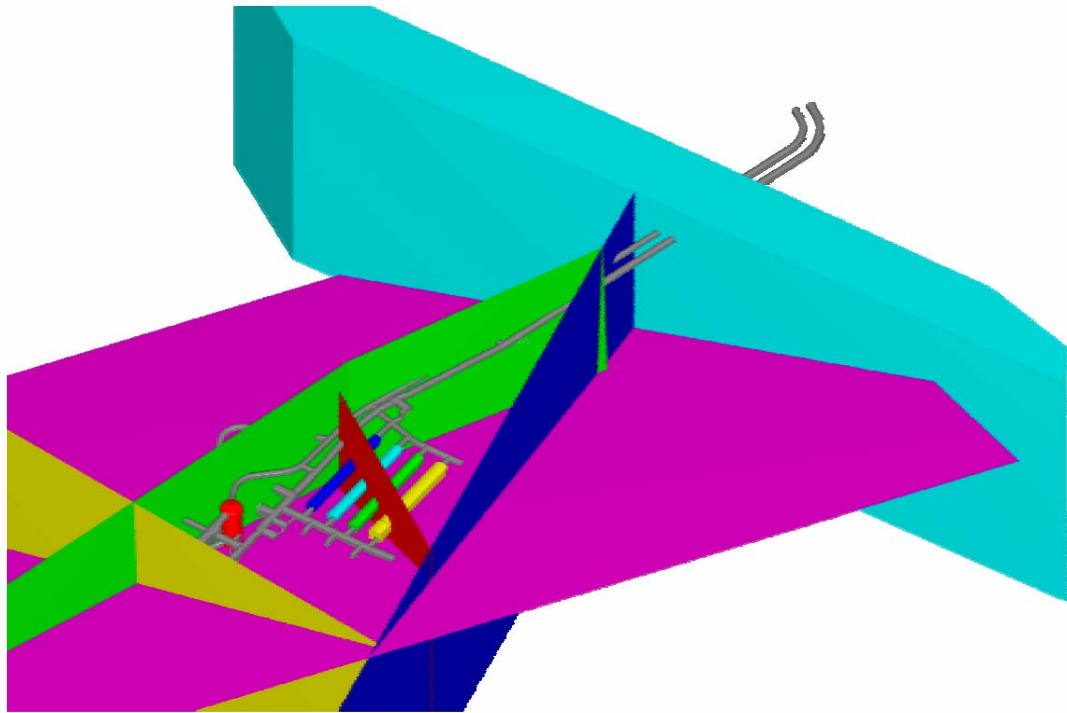
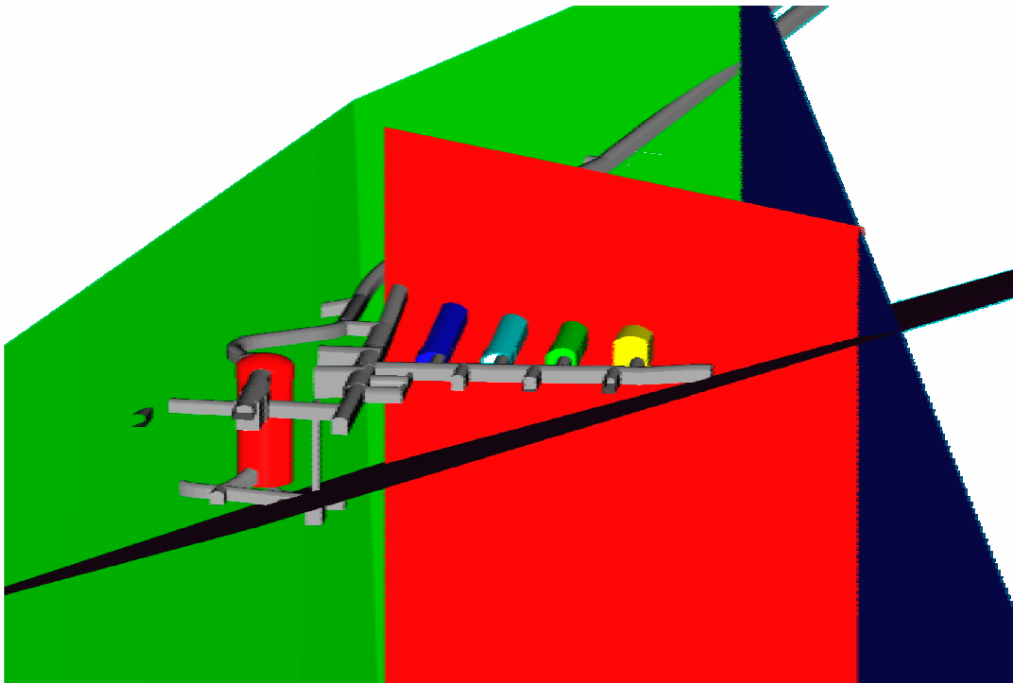


圖2-1 SFR隧道系統之配置，灰色表通達隧道(access tunnels)，紅色表SILO處置隧道，深藍色表BTF1處置隧道，淺藍色表BTF2處置隧道，綠色表BLA處置隧道，黃色表BMA處置隧道(摘自[4])



ZONES: Purple= H2. Dark blue= 3. Dark red= 6. Yellow= 8. Green= 9.
 TUNNELS: Grey= Access. Red= SILO. Dark blue= BTF1. Light blue= BTF2. Green= BLA. Yellow= BMA

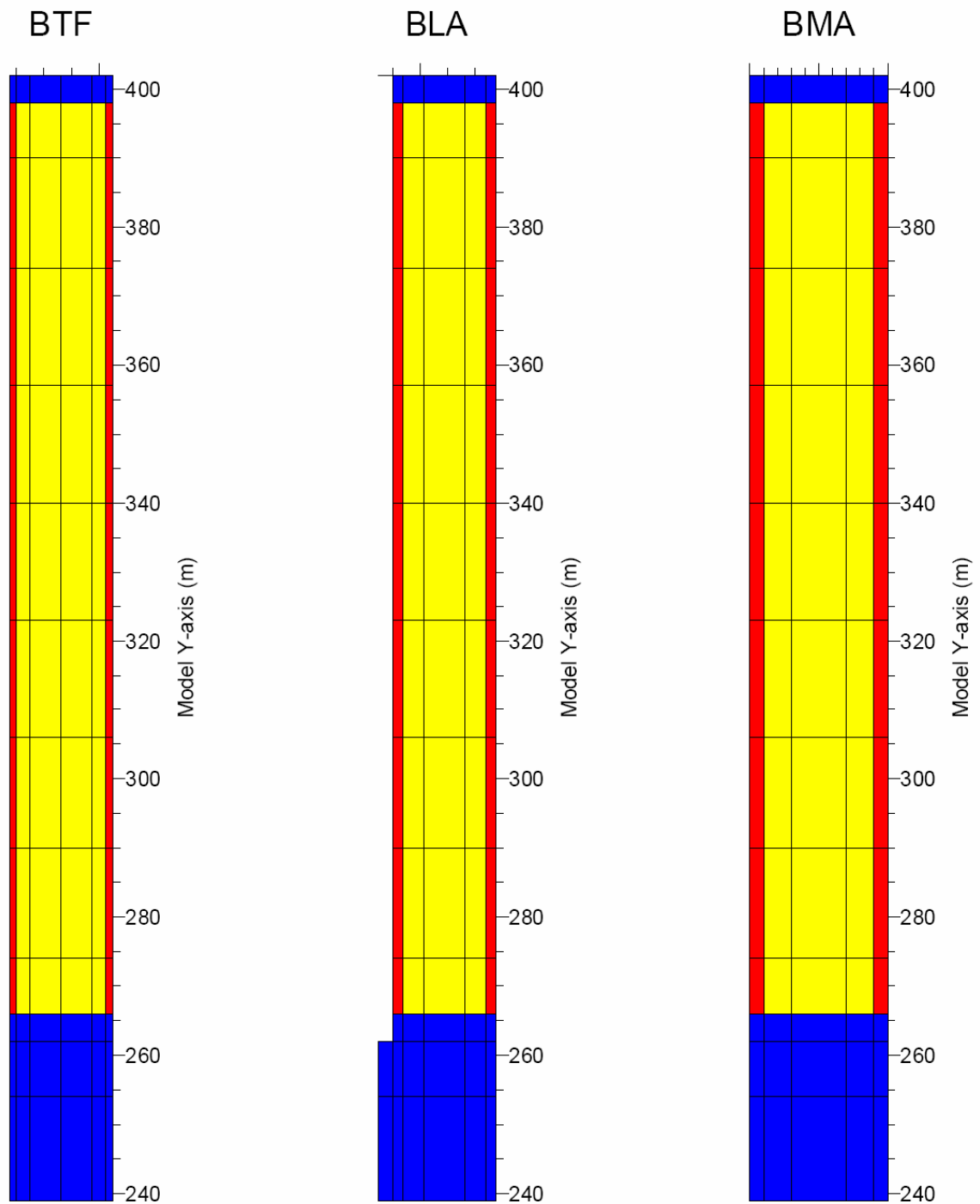
圖2-2 SFR隧道系統配置以及局部尺度之裂隙帶(Fracture zones) (摘自[4])



View II. A close-up view of zones H2 and 6 and the layout of the deposition tunnels. Zone H2 is a sub-horizontal zone, which intersects the access tunnels below the SILO. Zone 6 is a vertical zone that intersects the following deposition tunnels: BTF1, BTF2, BLA and BMA.

ZONES: Black= H2. Dark blue= 3. Red= 6. Green= 9.
 TUNNELS: Grey= Access. Red= SILO. Dark blue= BTF1. Light blue= BTF2. Green= BLA. Yellow= BMA

圖2-3 SFR隧道系統配置(封閉後)與局部尺度裂隙帶(圖2-2經放大旋轉) (摘自[4])



BLUE COLOUR: Denotes loading areas.

RED COLOUR: Denotes barriers (side fill) at sides of waste/encapsulation.

YELLOW COLOUR: Denotes the waste/encapsulation domain.

圖2-4 處置隧道(BTF、BLA、BMA)水平剖面之詳細模式 (摘自[4])

BTF TUNNELS - VERTICAL CROSS-SECTION THROUGH STORAGE AREA.

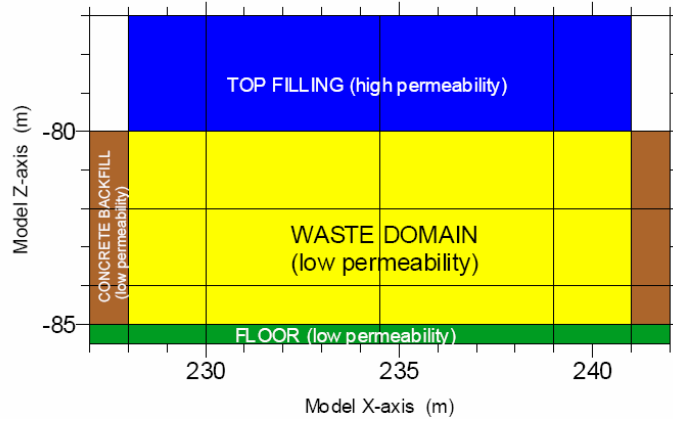


圖2-5 BTF處置隧道之垂直剖面詳細尺度模式(摘自[4])

BLA TUNNEL - VERTICAL CROSS-SECTION THROUGH STORAGE AREA.

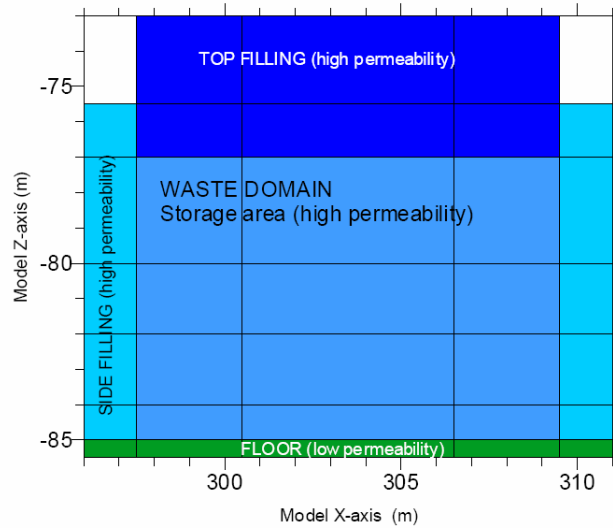


圖2-6 BLA處置隧道之垂直剖面詳細尺度模式(摘自[4])

BMA TUNNEL - VERTICAL CROSS-SECTION THROUGH STORAGE AREA.

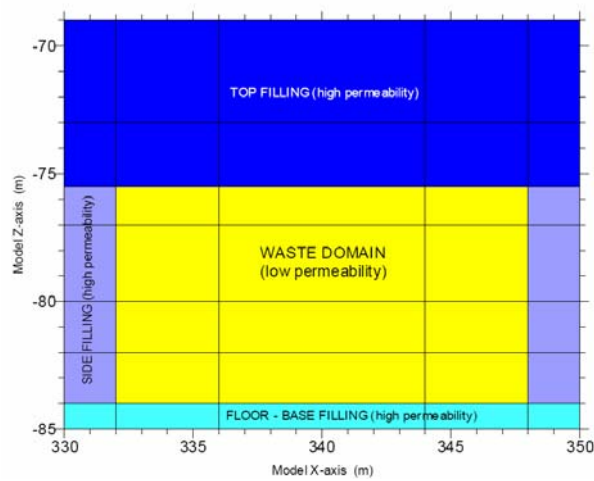


圖2-7 BMA處置隧道之垂直剖面詳細尺度模式(摘自[4])

SILO - VERTICAL CROSS-SECTION

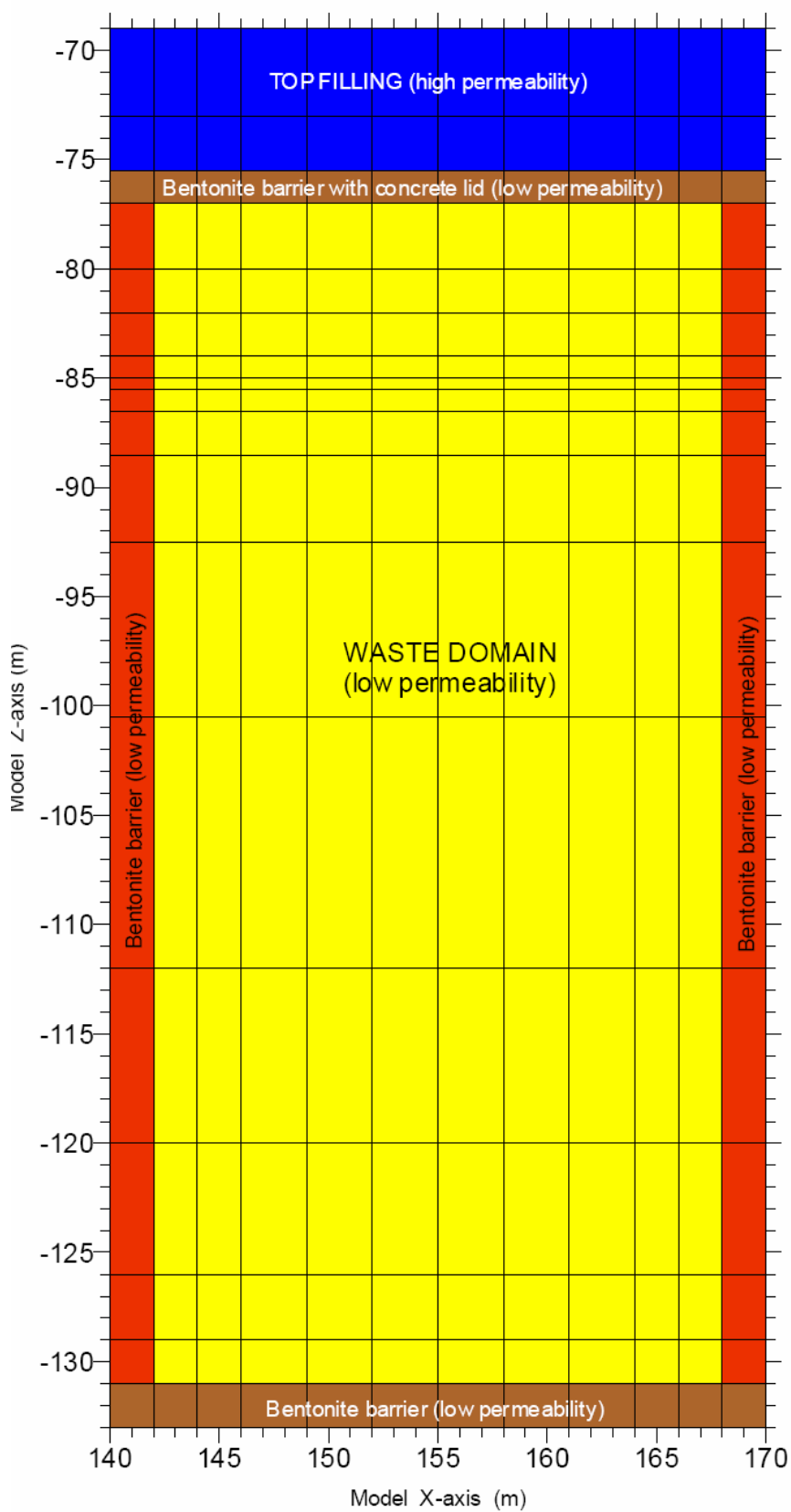


圖2-8 SILO處置隧道之垂直剖面詳細尺度模式(摘自[4])

2.1.2 邊界條件(Boundary conditions)

區域尺度模式之邊界儘可能與自然水力邊界(物理邊界；physical boundaries)重合。局部尺度模式和次局部尺度模式之邊界條件則由區域尺度模式提供，至於詳細尺度模型之邊界條件則來自局部尺度模型。此模擬技巧稱為逐步網格細密法(telescopic mesh refinement；圖2-9)。因模式納入考慮海岸線位移(土地的上昇與海平面改變的總和)(圖2-10)，故模式的邊界條件為時變性(time-dependent)。

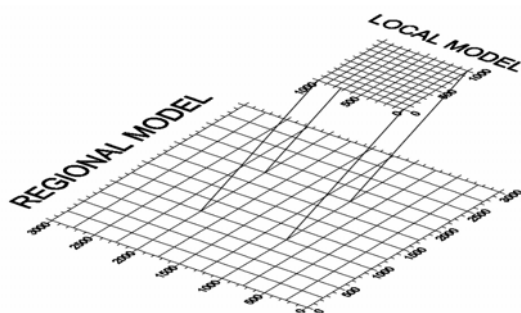


圖2-9 各尺度模式間空間區域之鏈狀關係原則(摘自[4])

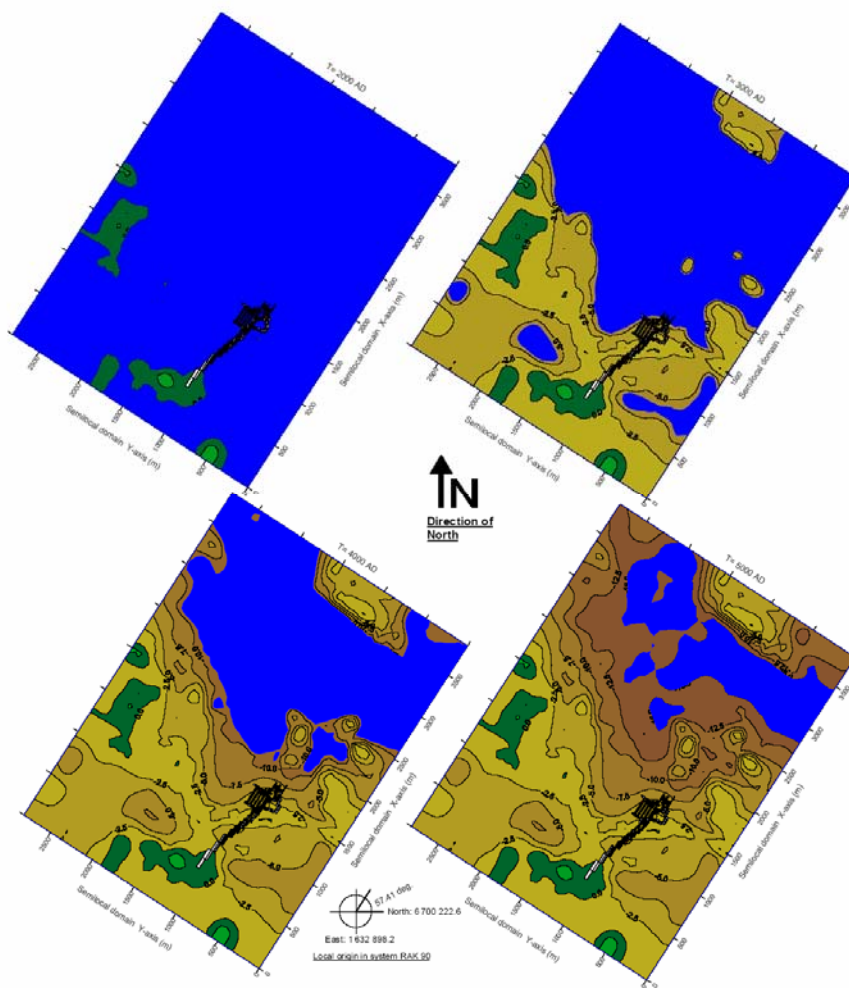
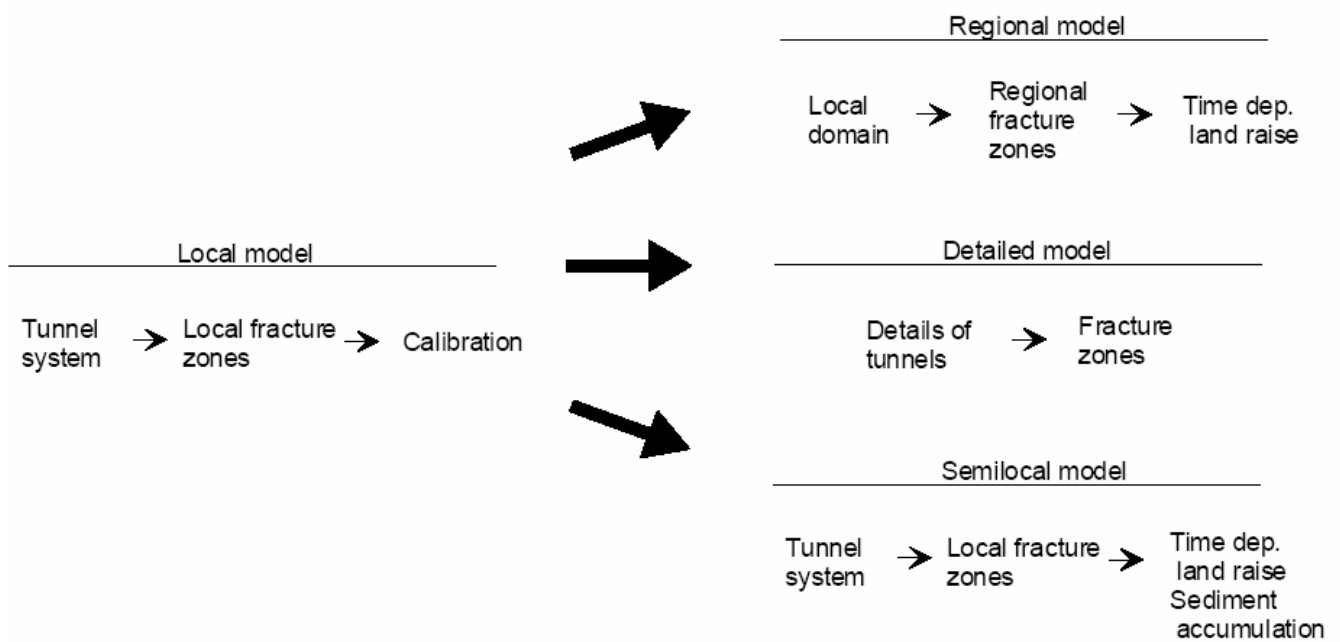


圖2-10 半局部尺度模式、地形與海岸線之後退與SFR之處置場之位置(摘自[4])

2.1.3 模式建立與模擬之順序(Establishment and simulation order of models)

模式之建立應由隧道系統向外逐步進行，也就是說，模式的建立應自詳細尺度模式至局部尺度模式至區域尺度模式。然而，時變性地下水流之模擬則應始自區域尺度模式，基於區域尺度模式模擬結果，方接著進行局部以及詳細尺度之模擬。因此，模式建立順序是由詳細尺度至區域尺度，模擬順序則是由區域尺度至詳細尺度(如圖2-11所示)。

ESTABLISHMENT ORDER OF FORMAL MODELS



SIMULATION ORDER OF FORMAL MODELS

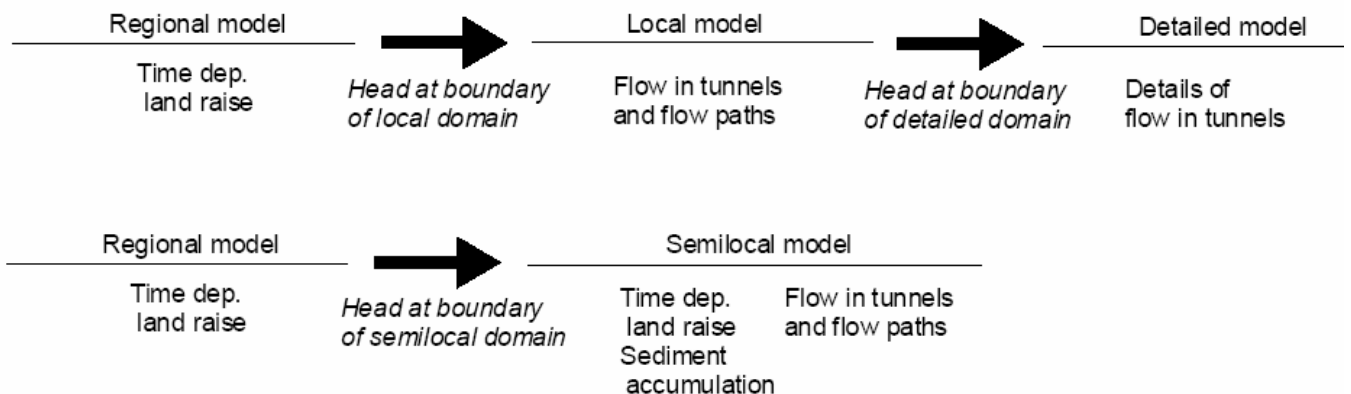


圖2-11 不同尺度模式間之設立與模擬之鏈狀順序原理(摘自[4])

2.2 隧道地下水流量預測

SFR中低放射性廢棄物處置場位於海水以下之地層，因此若海岸線無後退，則海水仍覆蓋SFR中低放射性廢棄物處置場，此種情狀區域性與處置隧道內之地下水流量將極微小。然而，由於海岸線位移造成之海岸線後退，大約在西元2800年時，海岸線將後退至約處置隧道上方。海岸線的後退將造成SFR中低放射性廢棄物處置場地下水的流動將從垂直向上流動改變為水平方向；而地下水的流量也因而隨之增加。因此預測之SFR中低放射性廢棄物處置場區域地下水流與隧道內之流量都將隨時間增加，但是西元5000年時，地下水之流動將達擬穩態(steady-state-like)。

詳細尺度模式(考慮處置隧道內部地下水流障壁與封裝罐等構造)目的主要是為詳細預測處置場封閉後處置隧道內之地下水流量。詳細尺度模式預測處置隧道內大多數之地下水將沿高滲透性處流動(如頂端回填濾層)。這些高滲透性構造將成為流動障壁，並引導地下水儘可能遠離封裝罐。不過，只有BMA隧道周遭有設置圍繞封裝罐之高滲透材料；因此，BMA是SFR中低放射性廢棄物處置場唯一以高滲透性水力籠狀設施(hydraulic cage)完整保護封裝罐的處置隧道。SILO則是利用低滲透性膨潤土(low-permeable bentonite)形成有效的流動障壁，以保護封裝罐之周邊系統。BLA隧道保護則相對較不完整，原因是BLA隧道內並無封裝罐。

對SILO與BMA隧道內之封裝罐，模式預測得之地下水流量均相當微小。以BMA隧道而言，這樣的結果導因於BMA隧道封裝罐周遭有效的高滲透性水力籠狀設施。不過，若要發揮其功效，必須整個封裝罐周圍均完整設置。舉例而言，BMA隧道底部高滲透性的礫石基座若為類似於BTF隧道和BLA隧道之混泥土地板(concrete floor)取代，則流入BMA隧道封裝罐內之地下水量將為目前設計方式之20-40倍。因此，處置隧道不同內部構造(different internal structures)之地下水總流量隨時間之變化均需要基於詳細尺度模式分別加以計算，而不同內部構造計算得之流量即有所不同，流經BMA及SILO等兩座處置隧道之地下水總流量以及比流量(單位面積流量；反應局部地區之流量)計算結果列於表2-1及表2-2，表中分別列出不同時間流經處置隧道周邊不同區塊(如頂端回填濾層、貯置坑側壁、封裝罐等等)之流量。以BMA處置隧道為例，為顯示不同內部構造配置對地下水流量以及比流量計算結果之影響，流量預測共分三種不同配置條件(Alt.1、Alt.2、Alt.3)進行計算，其中Alt.3計算所得結果詳列於表2-3，比較表2-1及表2-3可發現Alt.1與Alt.3有不同的總流量以及比流量，Alt.3的總流量以及比流量比Alt.1，因此說明了採用不同內部構造配置將對地下水流量有明顯影響。流經各處置隧道流量隨時間變化之趨勢則顯示於圖2-12和圖2-13。

表2-1 詳細模式預測流經BMA處置隧道總流量與平均比流量(摘自[4])

BMA	Total flow (m ³ /year)					
	Trough different parts of the studied tunnel at different times					
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD	6000 AD	7000 AD
Top filling	5.9	20.6	33.8	35.4	35.5	35.5
Waste domain Encapsulation	0.07	0.13	0.26	0.28	0.28	0.28
Filling at sides	6.8	14.9	27.5	29.5	29.6	29.6
Concrete/sand floor	7.7	12.8	26.4	28.7	28.9	28.9
Loading areas	2.8	22.4	32.2	32.8	32.7	32.7
All surroundings	8.8	36.8	53.0	55.0	55.0	55.0
Tunnel flow	8.7	36.7	52.7	54.7	54.7	54.7
Qallsurr. – Qwaste						

BMA	Average specific flow (m/s)					
	In different parts of the studied tunnel at different times					
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD	6000 AD	7000 AD
Top filling	2.2E-10	3.0E-9	4.9E-9	5.1E-9	5.1E-9	5.1E-9
Waste domain. Encap.	9.3E-13	7.5E-12	1.2E-11	1.3E-11	1.3E-11	1.3E-11
Filling at sides	5.2E-10	4.3E-9	7.1E-9	7.3E-9	7.3E-9	7.3E-9
Concrete/sand floor	5.6E-10	4.5E-9	7.4E-9	7.7E-9	7.7E-9	7.7E-9
Loading areas	1.3E-10	6.3E-10	1.0E-9	1.1E-9	1.1E-9	1.1E-9
All surroundings	2.6E-10	2.6E-9	4.2E-9	4.3E-9	4.3E-9	4.3E-9

表2-2 詳細模式預測流經SILO處置隧道總流量與平均比流量(摘自[4])

SILO	Total flow (m ³ /year)					
	Trough different parts of the studied tunnel at different times					
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD	6000 AD	7000 AD
Top filling	0.53	1.4	2.2	2.2	2.2	2.2
Bentonite at top	0.27	0.32	0.21	0.28	0.31	0.31
Waste domain Encapsulation	0.23	0.22	0.16	0.23	0.25	0.25
Bentonite at base	0.24	0.22	0.27	0.33	0.35	0.35
Bentonite at sides	0.023	0.043	0.055	0.054	0.054	0.054

SILO	Average specific flow (m/s)					
	In different parts of the studied tunnel at different times					
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD	6000 AD	7000 AD
Top filling	2.4E-11	8.5E-11	2.8E-10	2.8E-10	2.8E-10	2.8E-10
Bentonite at top	1.0E-11	1.2E-11	8.4E-12	1.1E-11	1.2E-11	1.2E-11
Waste domain. Encap.	1.3E-11	1.2E-11	6.8E-12	1.1E-11	1.3E-11	1.3E-11
Bentonite at base	1.0E-11	9.4E-12	1.1E-11	1.4E-11	1.4E-11	1.4E-11
Bentonite at sides	8.7E-13	8.1E-13	7.8E-13	9.6E-12	1.0E-12	1.0E-12

表2-3 BMA處置隧道配置條件Alt.3預測流經BMA處置隧道總流量與平均比流量(摘自[4])

BMA	Total flow (m ³ /year)					
	Trough different parts of the studied tunnel at different times					
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD	6000 AD	7000 AD
Top filling	6.4	31.3	52.1	53.9	54.7	54.7
Waste domain. Encap.	7E-3	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004
Filling at sides	7.1	21.0	37.3	39.7	40.1	40.1
Filling at base	7.9	15.5	30.6	33.0	33.4	33.4
Loading areas	3.1	32.1	49.4	49.8	50.9	50.9
All surroundings	8.8	38.1	55.5	57.5	57.5	57.5
Tunnel flow	8.8	38.1	55.5	57.5	57.5	57.5
Qallsurr. – Qwaste						

BMA	Average specific flow (m/s)					
	In different parts of the studied tunnel at different times					
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD	6000 AD	7000 AD
Top filling	3.8E-10	6.2E-9	1.0E-8	1.0E-8	1.0E-8	1.0E-8
Waste domain. Encap.	1.1E-14	1.1E-13	1.9E-13	1.9E-13	1.9E-13	1.9E-13
Filling at sides	5.9E-10	6.4E-9	1.1E-8	1.1E-8	1.1E-8	1.1E-8
Filling at base	6.4E-10	6.6E-9	1.1E-8	1.1E-8	1.1E-8	1.1E-8
Loading areas	1.4E-10	1.2E-9	2.4E-9	2.5E-9	2.6E-9	2.6E-9
All surroundings	3.6E-10	4.8E-9	8.0E-9	8.2E-9	8.3E-9	8.3E-9

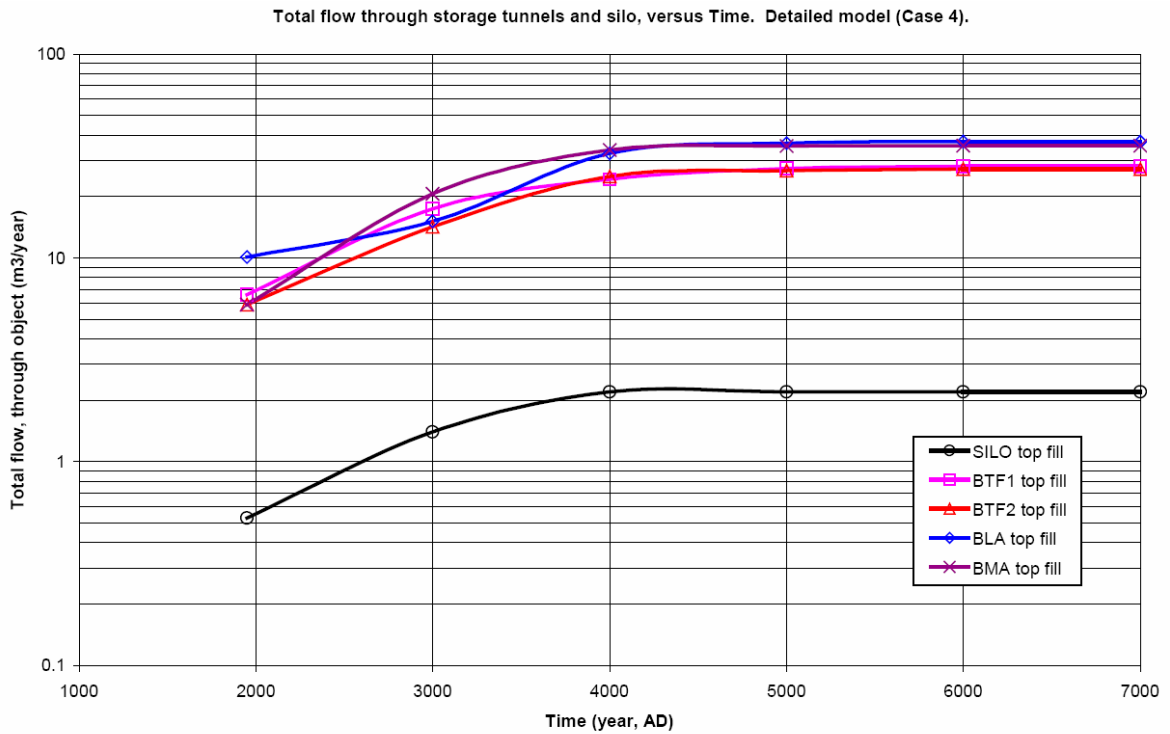


圖2-12 流經處置隧道頂端回填濾層之總流量(摘自[4])

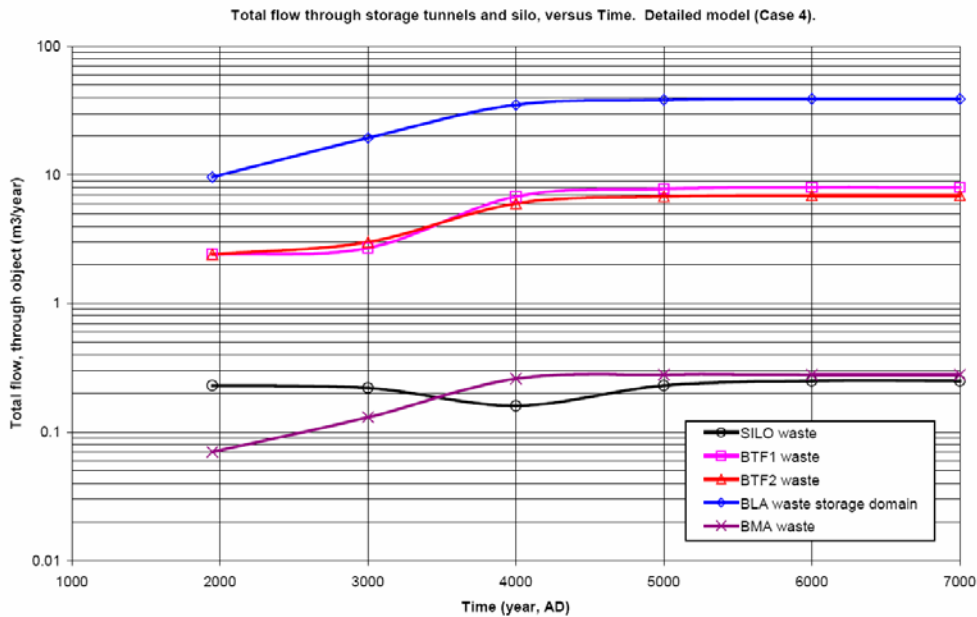


圖2-13 流經廢料罐與廢料儲存區域之總流量(摘自[4])

2.3 地下水流動路徑分析(Flow path analysis)

2.3.1 由處置隧道流出地表之地下水流動路徑長度 (Length of flow paths)

模式預測只要海水位面高於SFR中低放射性廢棄物處置場，流經處置隧道的地下水流動路徑將較短且大致上為由處置隧道垂直到地表。當地下水的流動方向因海岸變遷而由垂直到地表改變為較為水平之流動時，地下水流動型態將變得更複雜，流動路徑長度亦將增加。研究中分別計算5個不同的處置隧道之個別流動路徑與時間之關係，考慮未來地形保持不變(topography remains the same)之基準條件狀況下，穩態之流動路徑視覺化(visualisation)結果詳見圖2-14~圖2-17，不同時間點流經BMA及SILO隧道流動路徑長度則列於表2-4及表2-5，流動路徑分析採質點追蹤模擬(particle tracking simulation)，質點追蹤模擬主要是藉由追蹤於一假想之無限小的質點於流場中之移動來追蹤地下水流動路徑，質點追蹤模擬須先由地下水流模式產生水頭分布並以水頭分布計算地下水流速度，而後可藉由地下水流速分布追蹤地下水流動路徑，質點追蹤模擬通常有兩方面的應用，一方面是幫助流場的視覺化，另一方面則為追蹤污染物的路徑，此處質點是以隨機方式於處置隧道外圍釋放，因此不同的釋放位置將有不同的流動路徑長度，因此流動路徑長度分析結果為一統計機率分布函數，因此表中列出各個百分比(10%、50%、90%)之流動路徑長度，此處須說明百分比為10%之流動路徑長度，意謂低

於此流動路徑長度之累積機率分布為10%時之對應流動路徑，其他(50%與90%)百分比之流動路徑長度依此類推。

表2-4 不同時間點由BMA隧道流出地表之流動路徑長度(摘自[4])

BMA Time AD	Flow path length (m)		
	10 th Percentile	50 th Percentile	90 th Percentile
2000	66	67	73
3000	77	114	199
4000	96	176	260
5000	112	206	312
6000	114	214	316
7000	115	216	316

表2-5 不同時間點由SILO隧道流出地表之流動路徑長度(摘自[4])

SILO Time AD	Flow path length (m)		
	10 th Percentile	50 th Percentile	90 th Percentile
2000	66	66	131
3000	80	379	425
4000	69	341	384
5000	70	355	395
6000	71	355	395
7000	71	355	395

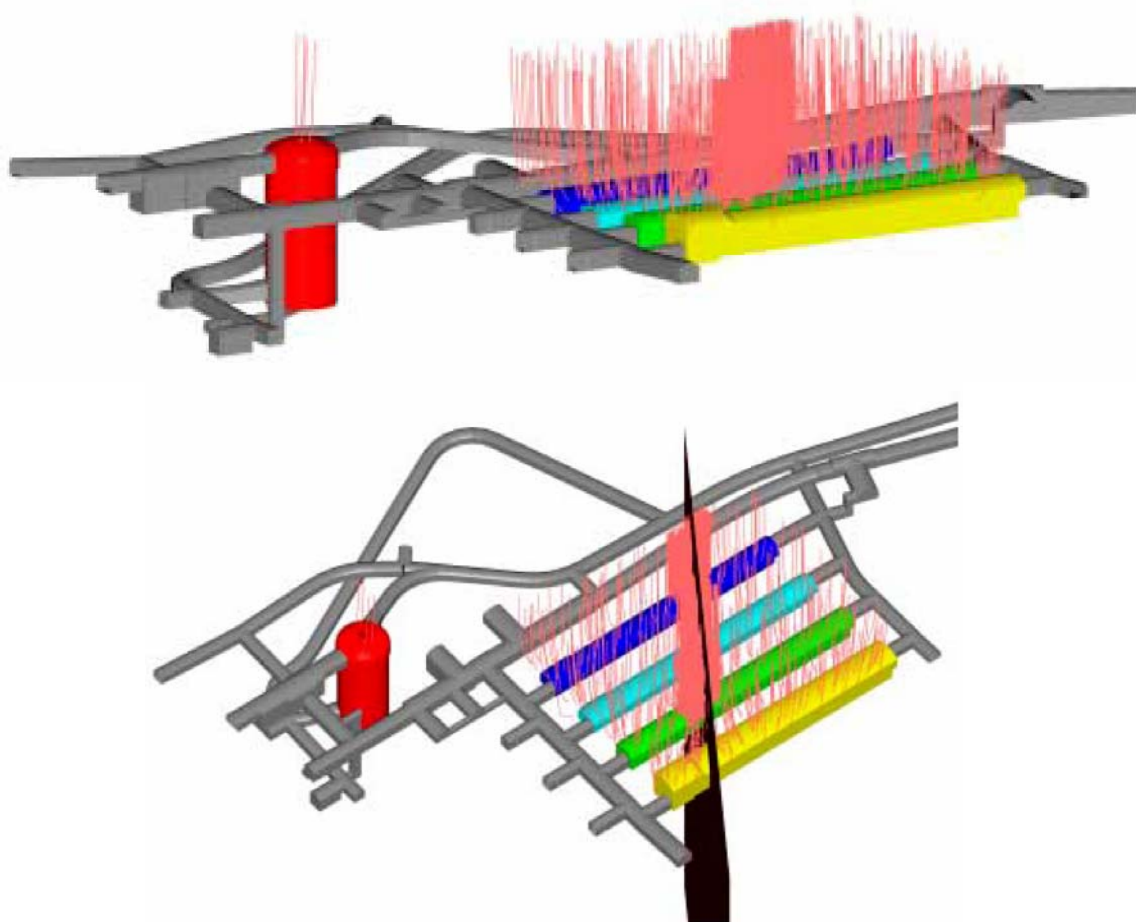


圖2-14 西元2000年時隧道系統、垂直裂隙帶(區域6)與地下水流動路徑(摘自[4])

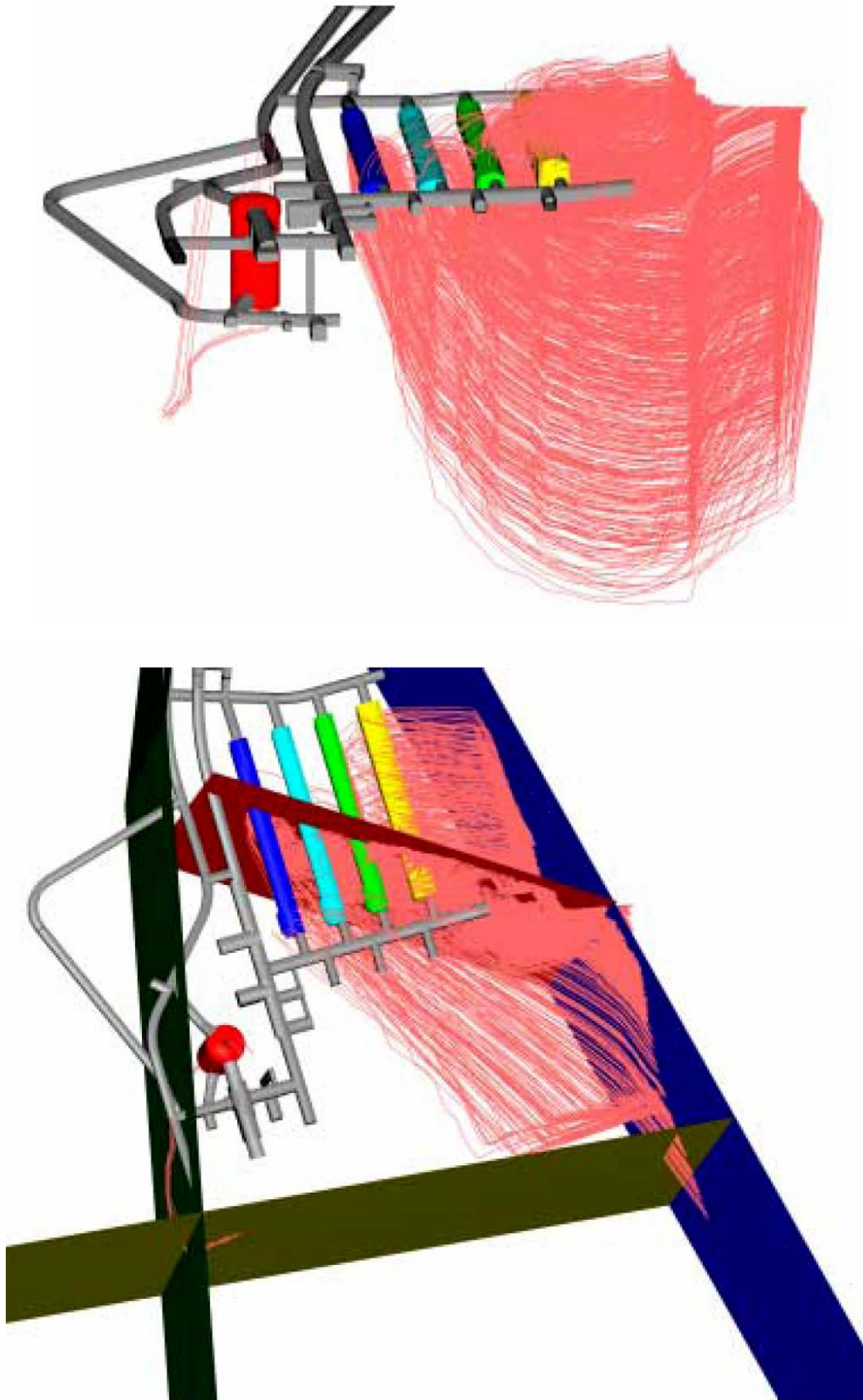


圖2-15 西元4000年時隧道系統、垂直裂隙帶(區域6)與地下水之流動路徑(摘自 [4])

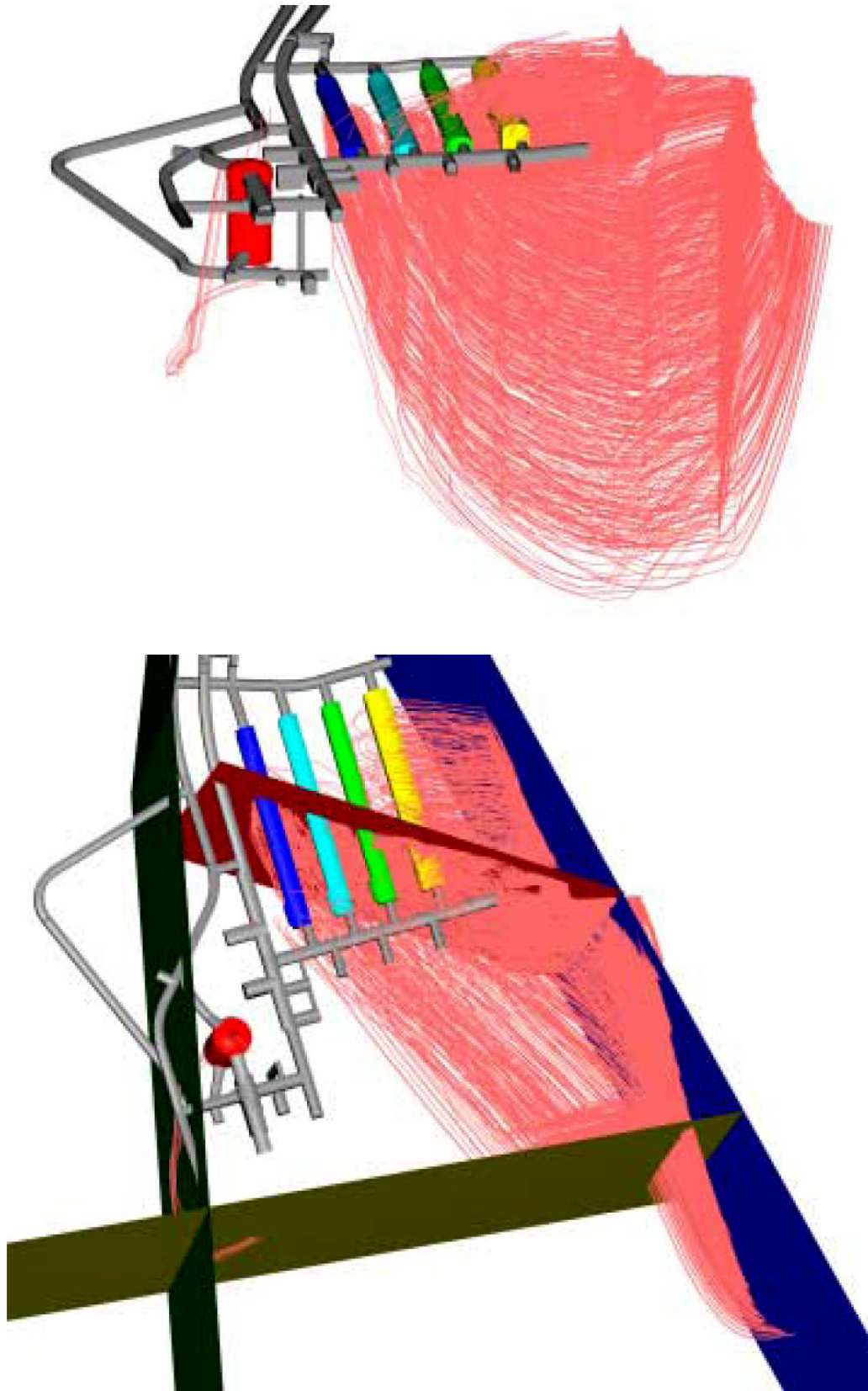


圖2-16 西元6000年時(擬穩態)隧道系統、垂直裂隙帶(區域6)與地下水之流動路徑(摘自[4])

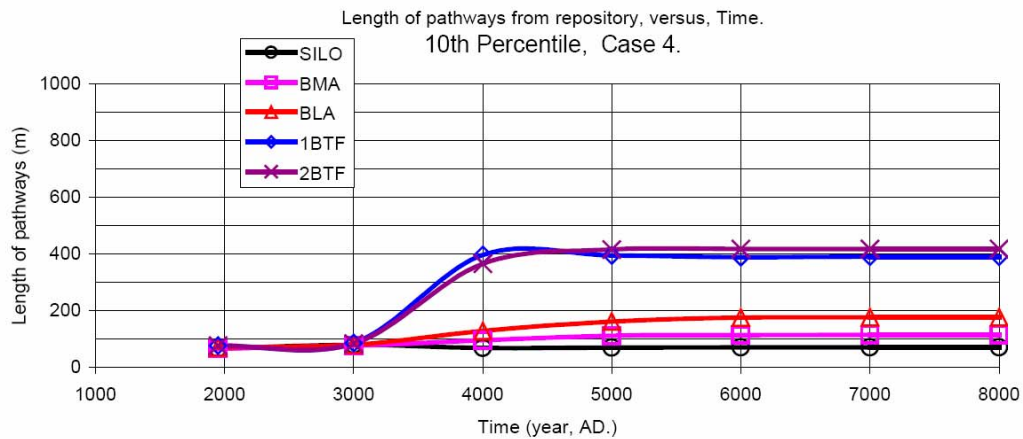
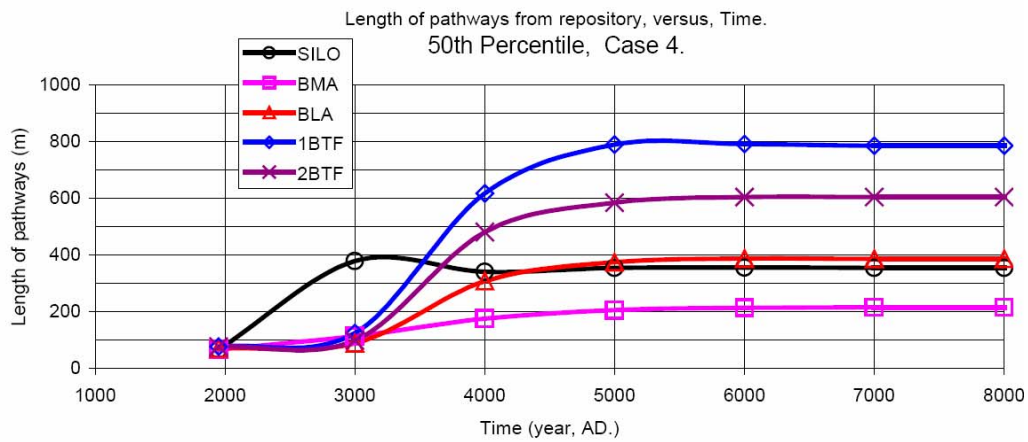
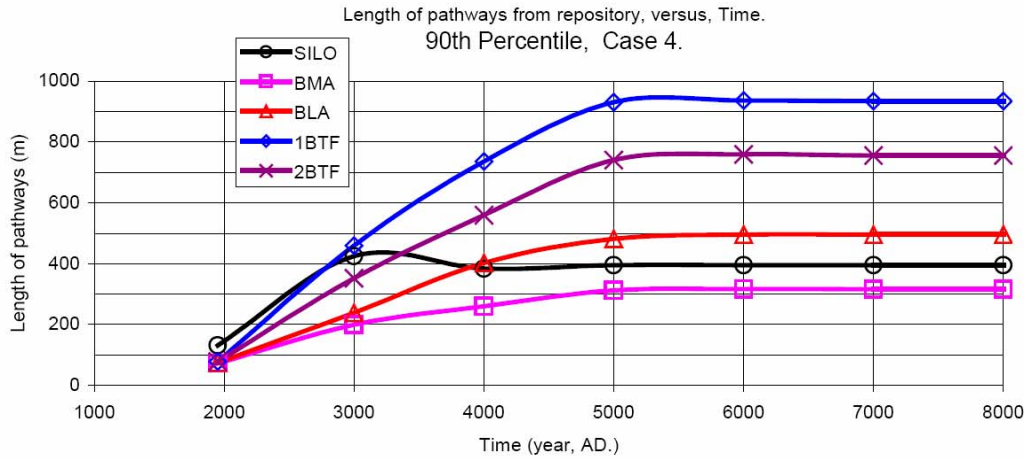


圖2-17 不同時間由不同處置隧道流出地表之地下水流動路徑長度，圖中呈現三個不同百分比(90%、50%與10%)之流動路徑長度(摘自[4])

2.3.2 自處置隧道流出至地表之穿透時間(Breakthrough times for flow paths)

穿透時間與核種傳輸過程有關根據分析結果發現BMA隧道、BLA隧道、BTF1隧道以及BTF2隧道最短穿透時間(breakthrough times)將在西元3000年左

右，SILO隧道則將在西元4000年；此一時期地下水流量大、流動路徑短。早期，在西元2000年左右，流動路徑短、地下水的流量小。西元4000-5000年間以及之後，地下水流量大且流動路徑長。考慮地形保持不變之分析基準條件，BMA及SILO處置隧道其流動路徑與穿透時間計算結果詳見表2-6及表2-7，對於5個不同的處置隧道其流動路徑與穿透時間計算結果詳見圖2-18。如前節所言因流動路徑長度分析結果為一統計機率分布函數，因此。因穿透時間亦為統計機率分布值，因此表中列出10%、50%、90%之穿透時間。此處須說明百分比為10%之穿透時間，意謂低於此穿透時間之累積機率分布為10%時之對應穿透時間，穿透時間之計算方法採下式計算，考慮一變數 C

$$C = \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{q_i} \quad (2-1)$$

此處 L_i 為流動路徑中第 i 段之長度[L]，而 q_i 為於第 i 段流動路徑之比流量(specific flow)[L/T]。當孔隙率為0.01(或1%)時， $C = 100 \times t_{breathrough}$ ，此處 $t_{breathrough}$ 為穿透時間。上述計算並未考慮延散(dispersion)等相關傳輸過程，延散造成原因主要為在地下水流動的描述一般常用Darcy定律，然而Darcy定律在計算流速時只考慮兩點間的水頭差，其代表一巨觀的描述，然而若從微觀的孔隙構造來看，溶質在孔隙介質的傳輸可能因為流動孔徑大小、流動路徑遠近與流動是位於孔徑中心或位於與固體顆粒之交界等各種原因而造成溶質移動之快慢差異，因此將造成溶質的分散現象，也就是忽略延散代表的一溶質的平均移動行為，然而延散會造成部份溶質移動比平均移動快，而一部份溶質移動比平均移動慢。

表2-6 由BMA隧道流出之穿透時間(摘自[4])

BMA Time AD	Flow paths, breakthrough time (Years)		
	10 th Percentile	50 th Percentile	90 th Percentile
2000	103	248	319
3000	18	52	91
4000	39	74	106
5000	49	84	127
6000	51	86	132
7000	51	87	132

表2-7 由SILO隧道流出之穿透時間(摘自[4])

SILO Time AD	Flow paths, breakthrough time (Years)		
	10 th Percentile	50 th Percentile	90 th Percentile
2000	300	313	1056
3000	80	379	425
4000	40	121	163
5000	45	129	172
6000	47	131	182
7000	47	131	182

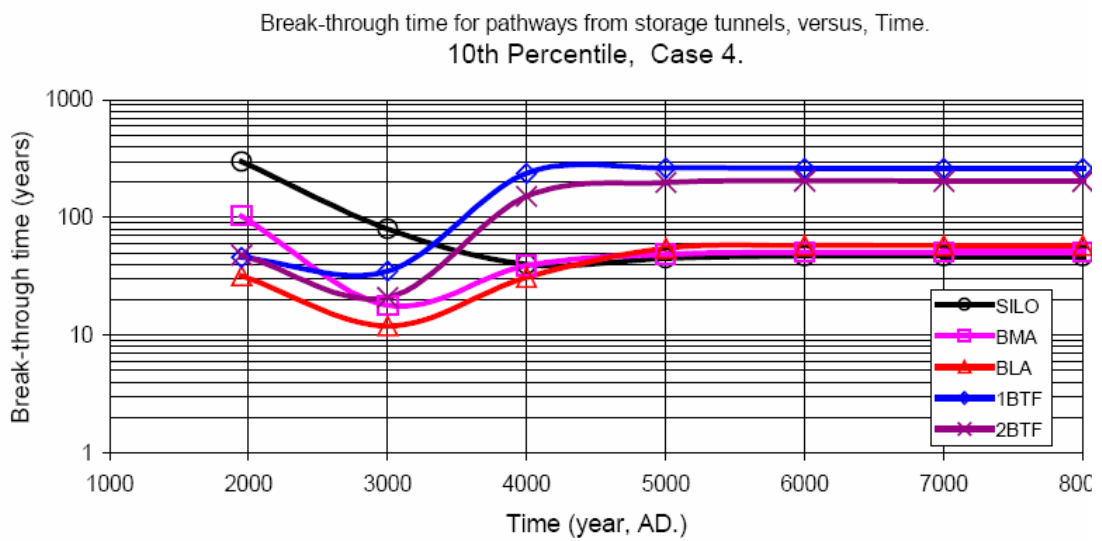
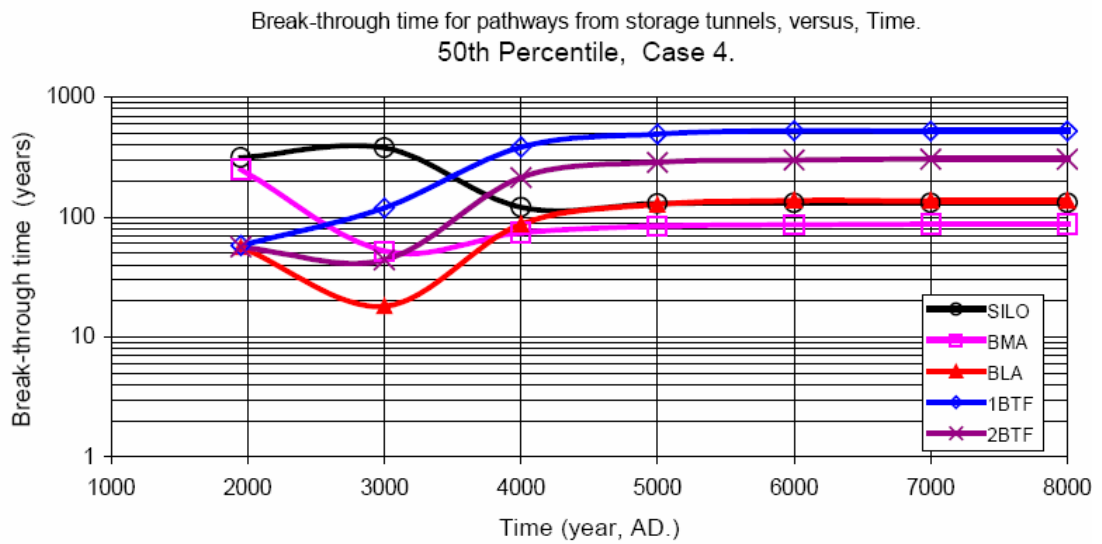
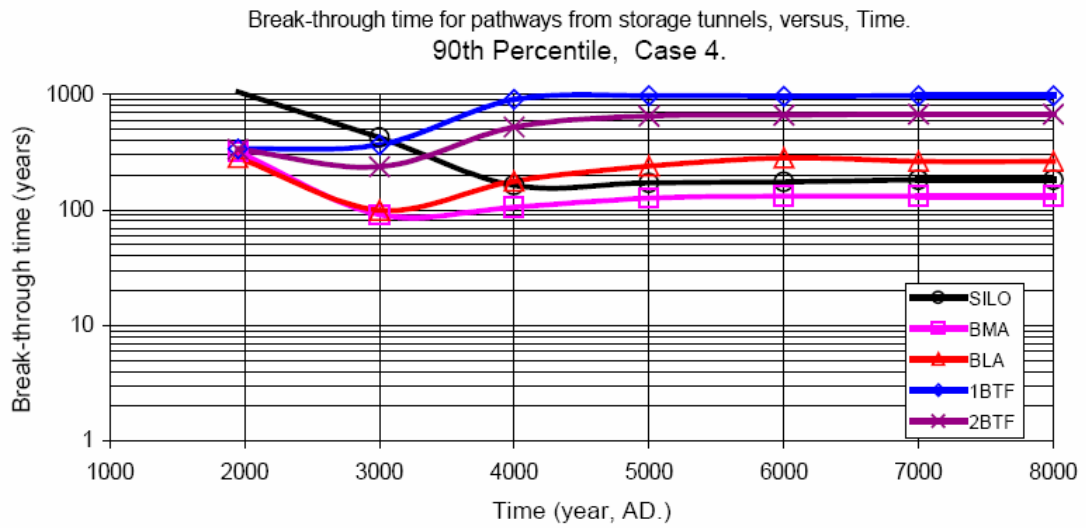


圖2-18 由不同隧道流出之流動路徑之穿透時間(摘自[4])

2.3.3 裂隙作為水力通導區之流動路徑 (*Fracture zones as conductors of flow paths*)

處置隧道地下水流動路徑上存在的裂隙，其可能為由處置隧道流出之地下水力通導區之重要性應加以估計。一般而言，各裂隙做為地下水力通導區之重要性將隨時間增加而增加。西元2000年時，唯一的重要裂隙為垂直裂隙帶6(區域6)；西元7000年時則裂隙帶區域H2、裂隙帶區域3，裂隙帶區域6，裂隙帶區域8和裂隙帶區域9均將對由處置隧道流出之地下水流動路徑有所影響。裂隙帶區域H2、裂隙帶區域3，裂隙帶區域6影響之地下水流動路徑詳見圖2-19。通過BMA及SILO處置隧道且流經各重要裂隙帶區域流量佔總流量之百分比則列於表2-8及表2-9。

表2-8 通過處置隧道BMA且流經各重要裂隙帶區域流量佔總流量之百分比(摘自[4])

Time AD	Important Zones (percentage of flow from the tunnel that passes the zone)				
	Z-H2	Z-3	Z-6	Z-8	Z-9
2000	-	-	24	-	-
3000	28	35	47	-	-
4000	40	62	55	-	-
5000	42	73	61	2	-
7000	45	76	71	2	-

表2-9 通過處置隧道SILO且流經各重要裂隙帶區域流量佔總流量之百分比(摘自[4])

Time AD	Important Zones (percentage of flow from the tunnel that passes the zone)				
	Z-H2	Z-3	Z-6	Z-8	Z-9
2000	All flow directly through the rock mass				
3000	83	-	-	75	83
4000	55	-	-	55	55
5000	60	-	-	60	60
7000	61	-	-	61	61

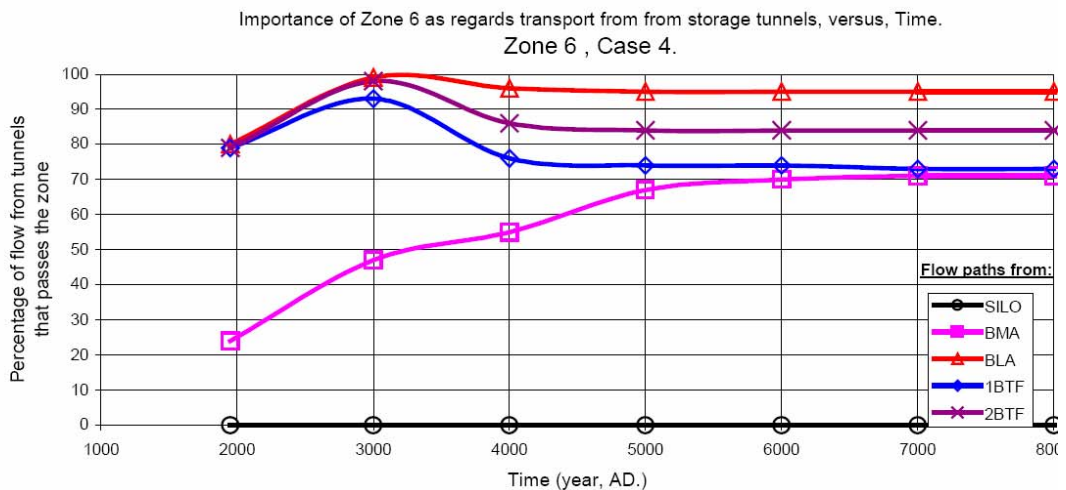
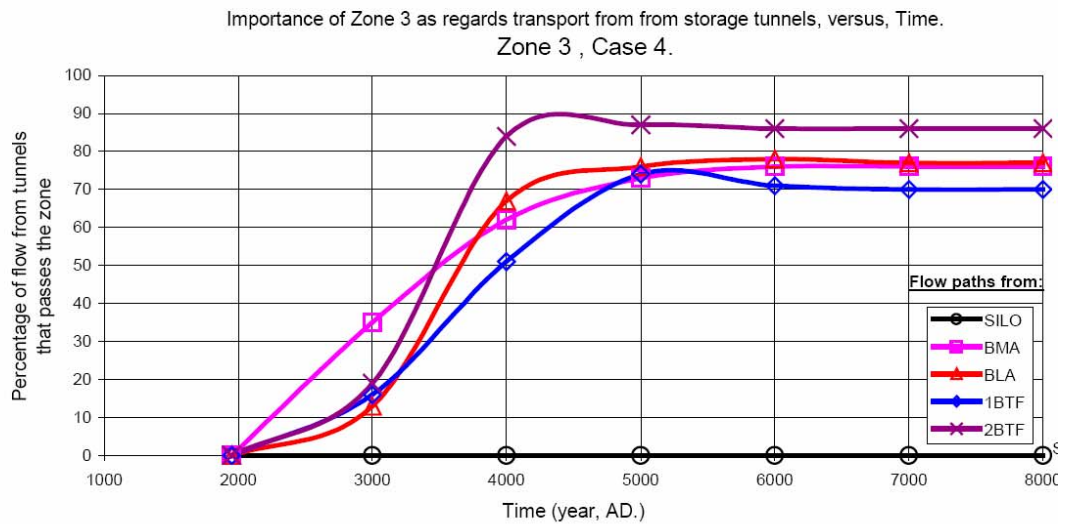
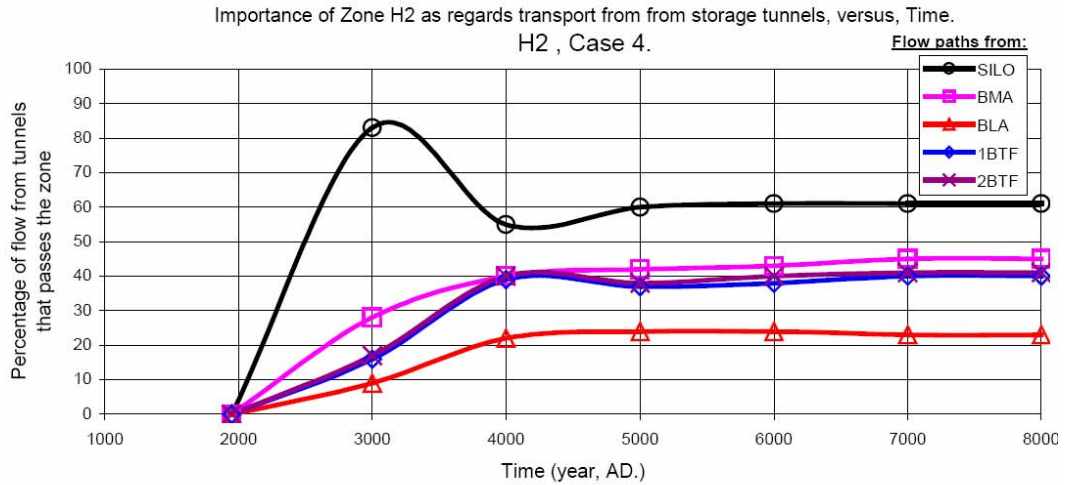


圖2-19 區域H2、3與6作為通過各處置隧道傳輸之水力通導區的重要性。縱軸為通過各處置隧道且流經某一重要裂隙帶區域流量佔總流量之百分比(摘自[4])

2.3.4 處置隧道間水力交互作用(Hydraulic interaction between deposition tunnels)

藉由地下水流動分析，即可了解流經各處置隧道地下水之流動路徑上是否同時也流經其它隧道，以據此評估不同處置隧道彼此間之水力交互作用。一般而言，個別處置隧道彼此間之水力交互作用極為有限。舉例而言，雖然自BTF2隧道與BMA隧道流出之地下水將流經BLA隧道(表2-10)；自BTF1隧道流出之地下水將流經BTF2隧道(表2-11)，但是經過分析結果發現，由任一處置隧道流出之地下水將僅有低於10%之流量流經其他處置隧道。處置隧道間最大的水力交互作用發生在西元3000年至西元4000年之間(圖2-20)。

表2-10 BLA隧道與其它處置隧道間之水力交互作用(摘自[4])

Time AD	Flow from surrounding deposition tunnels (percentage of flow from the surrounding tunnels that passes the BLA)				
	SILO	BMA	BLA	BTF1	BTF2
2000	-	-	X	-	-
3000	-	6	X	-	5
4000	-	4	X	0.1	8
5000	-	3	X	0.1	4
7000	-	3	X	0.2	4

表2-11 BTF2隧道與其它處置隧道間之水力交互作用(摘自[4])

Time AD	Flow from surrounding deposition tunnels (percentage of flow from the surrounding tunnels that passes the BTF2)				
	SILO	BMA	BLA	BTF1	BTF2
2000	-	-	-	-	X
3000	-	-	-	10	X
4000	-	-	-	4	X
5000	-	-	-	4	X
7000	-	-	-	4	X

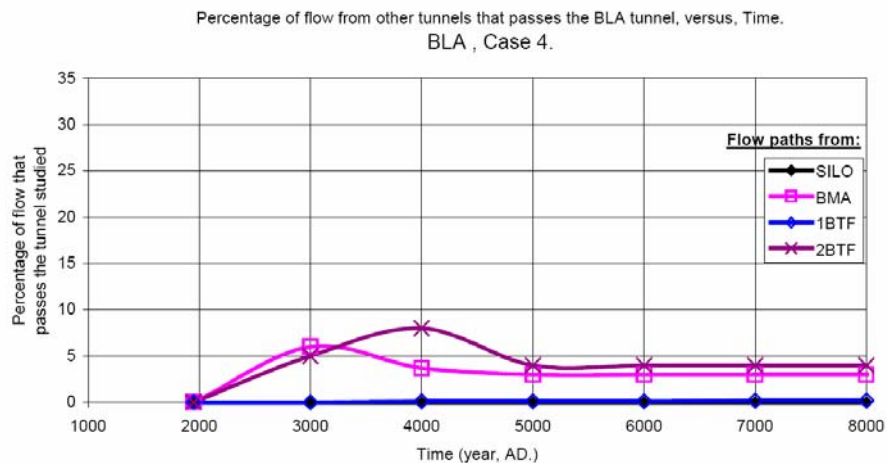
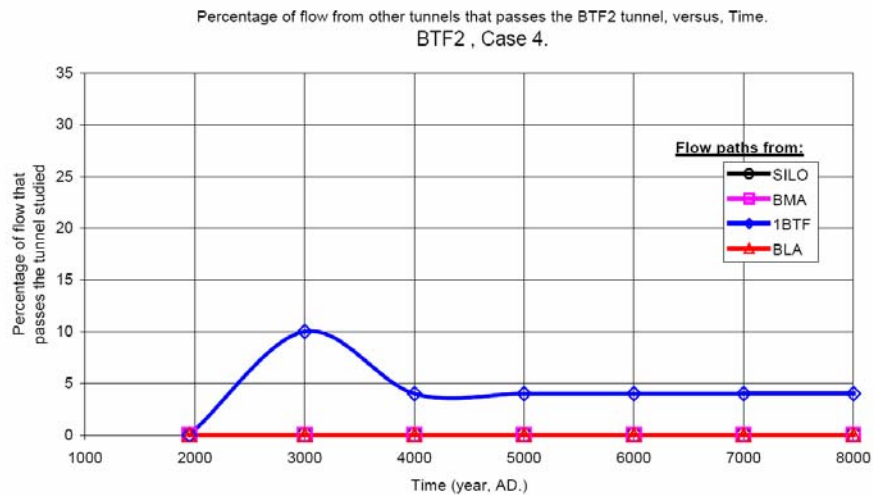


圖2-20 不同處置隧道之水流交互作用(摘自[4])

2.3.5 流經處置隧道內之地下水來源(Origin of water in deposition tunnels)

西元2200年到西元3000年期間，後退之海岸線將通過SFR中低放射性廢棄物處置場上方，而地下水流動型態將產生改變。由於地下水流動型態改變，流經處置隧道的地下水來源(origin)也將隨之改變。因此地下水的化學組成(chemical composition)即有所不同。模式預測SFR中低放射性廢棄物處置場前750年，到達處置隧道之地下水由原先來自很深處年代較古老的地下水(高的氯化物含量、低含氧量; high chloride content, low oxygen content)轉變為來自SFR中低放射性廢棄物處置場周遭補注區較年輕的地下水(無氯化物，但有一些氧; no chloride, some oxygen)，主要變化將發生於西元2300年至西元2750年之間。西元2750年後當海岸線持續後退，流經處置隧道之地下水來自補注區(年輕的地下水)的情況將保持不變，這也是地下水流動漸漸達穩態之最終情況。詳細分析請參見圖2-21，分析結果包含了穩態及暫態路徑。穩態路徑表示達穩態後地下水流路徑不再隨時間改變，暫態路徑則表示未達穩態前之路徑地下水流會隨時間改變。

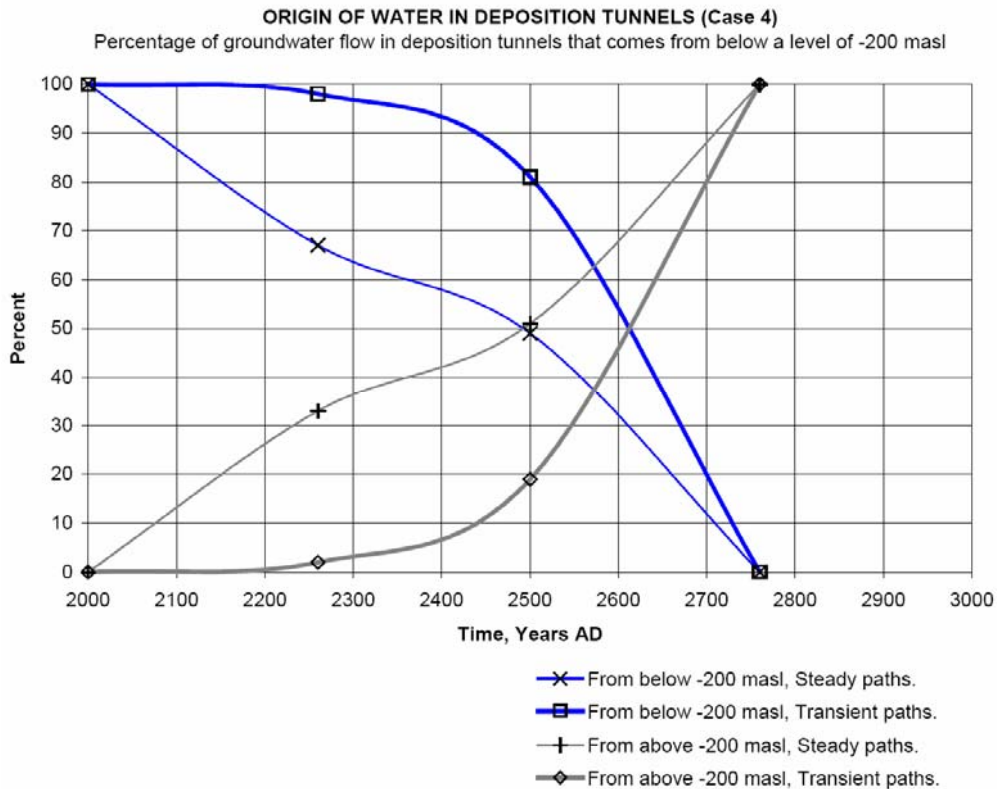


圖2-21 流經處置隧道內之地下水來源(摘自[4])

2.3.6 流經處置隧道之地下水流出位置(Location of discharge areas)

因為海岸線後退改變了地下水的流動型態，因此，流經處置隧道之地下水流出區(discharge areas)將隨時間改變而改變。影響地下水流出區最重要之因素為地形以及海平面位置。分析結果顯示大多數流出區位於地形低區(low-lying parts of the topography)，流出量最大處主要沿著透水的裂隙區，特別是裂隙區與地形低區交界處。西元 2000 年，主要流出區位於處置隧道上方，隨著時間增加，主要流出區將朝向 SFR 的北邊移動。

考慮時間因素，研究時期間地形可能因不同作用(例如沈積作用)稍有改變。雖然分析之基準條件未考慮地形變化，然而，沈積作用有可能造成地形之改變，關於地形改變對地下水流動之影響敏感度分析詳見 2.7 節。假設地形保持不變(基準條件)，主要流出區將由西元 2000 年時位於處置隧道正上方(圖 2-22)，逐漸遷移至西元 5000 年(地下水流動達穩態)時位於處置隧道北方 500 公尺處(圖 2-23)，流經 SILO 處置隧道的流出區則位於主要流出區的東側。於基準條件下(地形保持不變)，所有的流出區將集中於處置隧道 700 公尺的水平距離範圍內。

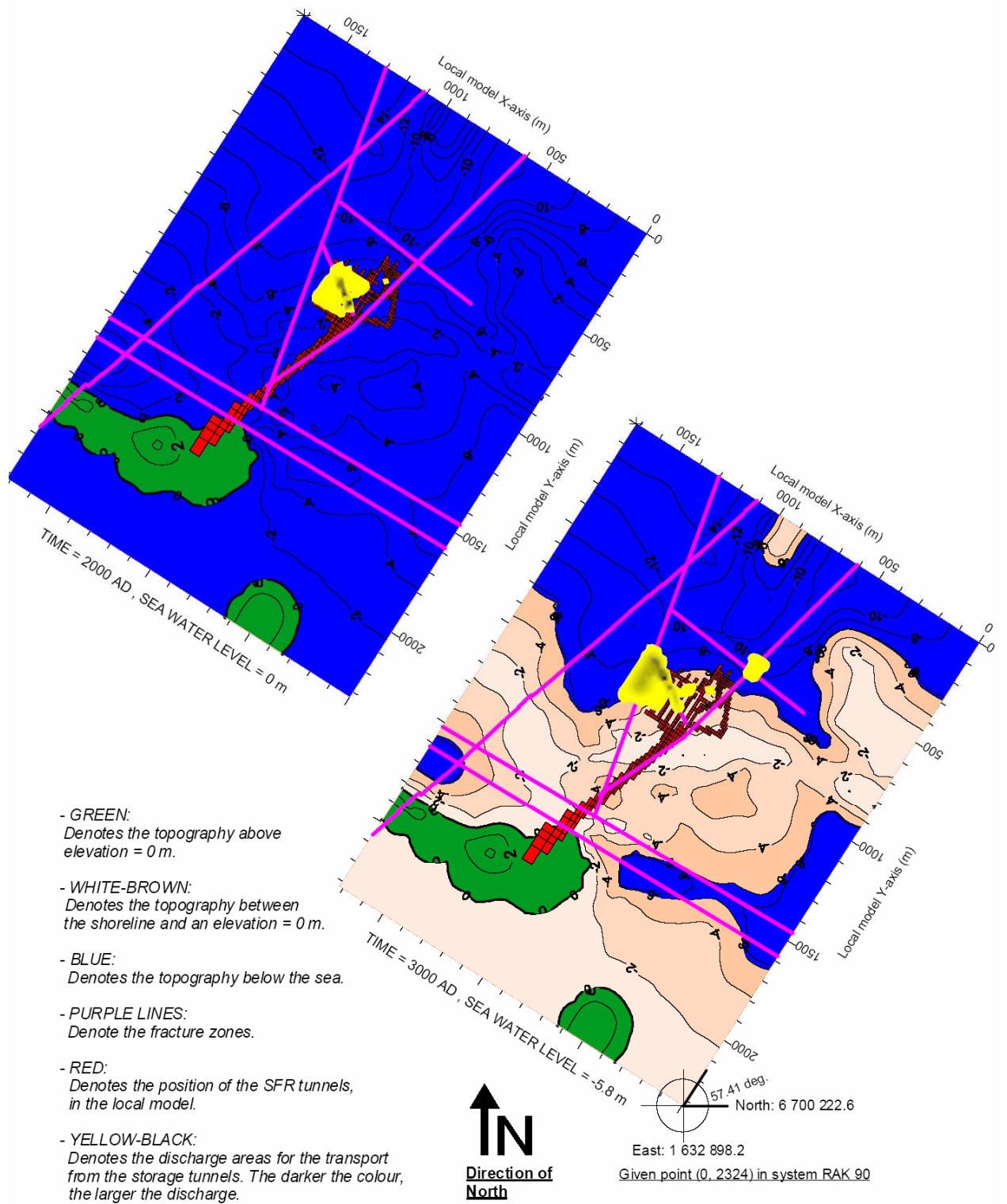


圖2-22 局部模式預測得西元2000與3000年流經處置隧道之流出區(摘自[4])

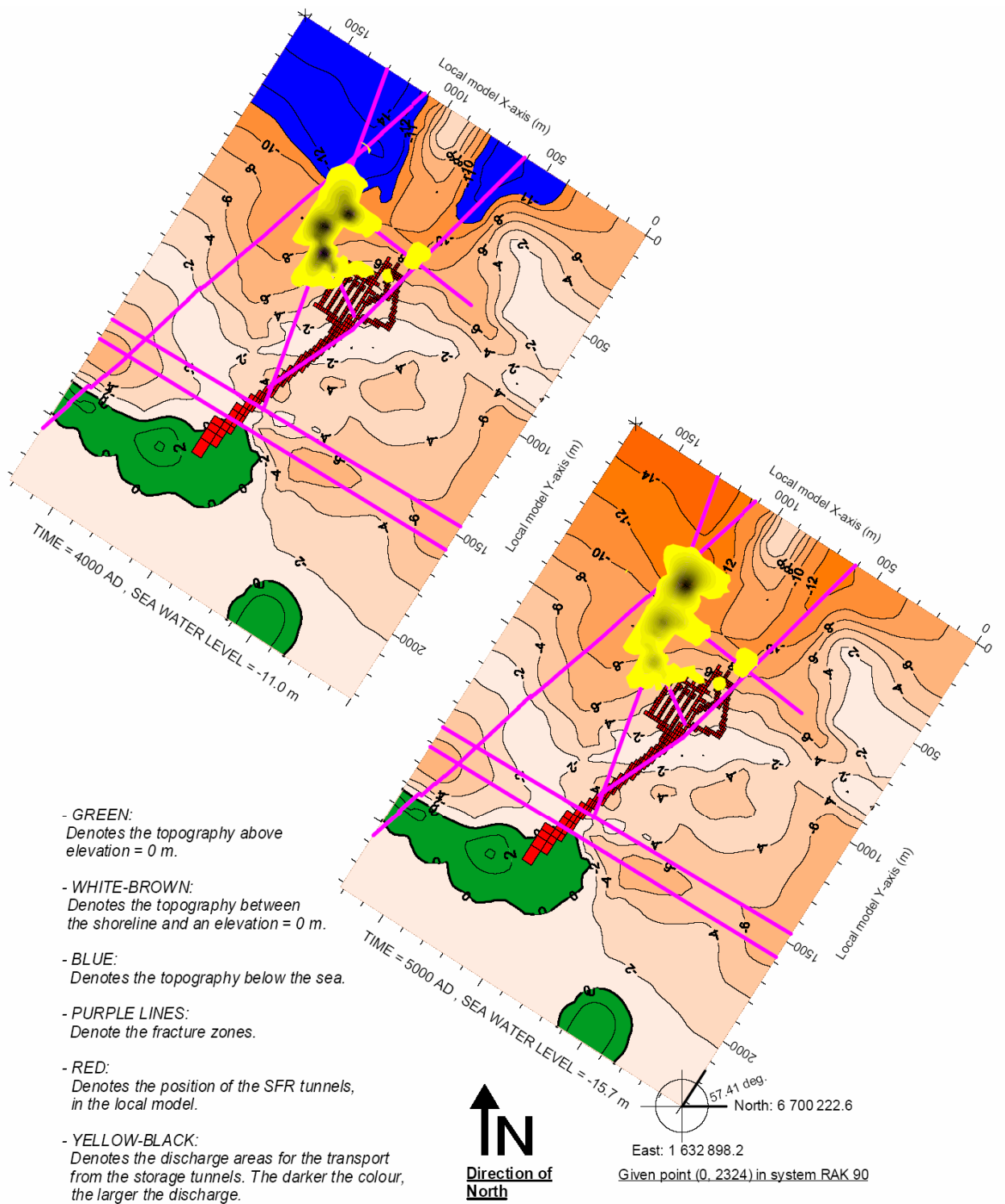


圖2-23 局部模式預測得西元4000與5000年流經處置隧道之流出區(摘自[4])

2.3.7 流出區分佈以及流出區地下水稀釋作用(Discharge distribution and dilution in discharge area)

由於海岸線後退，因此將改變流出區之位置，也就是處置隧道之地下水流出

區位於海平面以上或以下將隨時間而產生變化。西元2000年，所有來自處置隧道之地下水，將於海平面以下流出。如果將來地形仍保持不變(基準條件)，西元4000年所有來自處置隧道之地下水，將全部於海平面以上流出。在西元2000年至西元4000年之間，流出區主要將靠近海岸線。當流出區高於海平面，流出區之地下水將混合了流經處置隧道的地下水(受污染者)以及未流經處置隧道的地下水(未受污染者)。混合比例經計算後確認流出區受污染之地下水將因此被稀釋。地下水最終流回地表進一步與未受污染之地表水混合稀釋之效應未納入分析考慮。地下水稀釋估計結果證明流經處置隧道之地下水佔所有流出地下水僅數個百分比，地下水稀釋計算採所有流經處置隧道地下水流動路徑的平均值。BMA、BLA與BTF隧道流出區之流出分布與稀釋計算結果詳見表2-12。

表2-12 流經BMA、BLA與BTF處置隧道地下水流出之稀釋作用(摘自[4])

TIME	FLOW FROM BMA, BLA, BTF Discharge distribution (%)		GROUNDWATER DISCHARGE Balance between contaminated and non-contaminated water at the discharge areas where the water from the BMA, BLA and BTF tunnels discharges.			
	Below sea (%)	Above sea (%)	Discharge of groundwater (m ³ /year)		Discharge of groundwater (%)	
			Not from deposition tunnels (non-polluted)	From BMA, BLA, BTF (polluted)	Not from deposition tunnels (non-polluted)	From BMA, BLA, BTF (polluted)
2000 AD	100	0	-	-	-	-
3000 AD	ca. 40 (1)	ca. 60 (1)	- (1)	- (1)	- (1)	- (1)
4000 AD	0	100	4471	205	96	4
5000 AD	0	100	3903	209	95	5
Steady state						

(1) The discharge is close to the shoreline, the distribution below or above the sea is uncertain.

2.4 抽水井對SFR地下水流動之影響

海岸線自處置場附近後退以後，地表不再被海水覆蓋，地表有設置抽水井之可能性。為了探討SFR中低放射性廢棄物處置場附近水井對未來地下水流場之影響，因此考慮設置假設水井(分析假設井位詳見圖2-24)進行分析。分析結果發現：

1. 除非水井非常接近處置隧道，SFR中低放射性廢棄物處置場上游的井受污染的可能性極低。
2. 設置於SFR中低放射性廢棄物處置場場區內的水井，可能會抽到流經處置隧道受污染之地下水，因為井將沿著它整段長度收集地下水，所以並非所有抽取得之地下水均流經處置隧道。通過隧道系統的水井抽水將引起通過隧道的流

量大幅增加，如果與處置隧道相交的井抽取的地下水全部來自處置隧道(此一情況不太可能發生)，則所有井內流出的地下水均將受污染而無任何稀釋作用發生。如果井僅與通達隧道(access tunnel)相交，則污染的地下水將獲得稀釋。

3. SFR中低放射性廢棄物處置場下游的一口井位於流經處置隧道地下水之流動路徑上，或位於處置隧道流出點之下方時，縱使此一水井是一個非常弱的流出點(sink)，此一水井仍將抽取得受到SFR中低放射性廢棄物處置場污染之地下水。然若此一水井位於流動路徑或是流出區之外，要使地下水流動路徑改變而抽取得流經SFR中低放射性廢棄物處置場之地下水，該水井必須是非常強的流出點。

無論如何，由於現階段的氣候型態下之大量補注能力與岩盤的低水力傳導性，一個水井不可能為一非常強的流出點因而改變大範圍的地下水流動型態。就基準條件(地形保持不變)而言，一口井抽取得地下水均為流經處置隧道之污染地下水並不可能，因為未受擾動的地下水流動路徑廣泛地分佈於整個處置場附近，井中抽取得之地下水亦必定受到稀釋，除非水井恰位於處置隧道內且僅自隧道中抽取地下水。假設之D井分析結果綜合說明列於表2-13與表2-14中，因D井抽水，將造成流經BLA處置隧道地下水流量大幅增加(表2-13)，同時，流經BLA處置隧道之地下水亦將全部被抽取出來(表2-14)。

表2-13 假設D井抽水造成流經各處置隧道總水流量變化率分析(摘自[4])

Well D 2.37m ³ /day	CHANGE IN TOTAL FLOW GIVEN AS A FLOW FACTOR- LOCAL MODEL				
	Flow Factor = New Flow / Flow of base case				
Time AD	SILO (1)	BMA	BLA	BTF2	BTF1
3000 AD	Small Changes	1.5	867	2.3	1.1
5000 AD	Small Changes	1.4	867	2.6	1.7

(1) First SILO definition (SD1).

表2-14 假設D井抽水造成流經各處置隧道之水流量與流至井內的水流量比例(摘自[4])

Well D 2.37m ³ /day	PERCENTAGE OF TOTAL FLOW OF A DEPOSITION TUNNEL THAT REACHES THE WELL				
	SILO (1)	BMA	BLA	BTF2	BTF1
3000 AD	0	75	100	100	97
5000 AD	0	75	100	99	67

(1) First SILO definition (SD1).

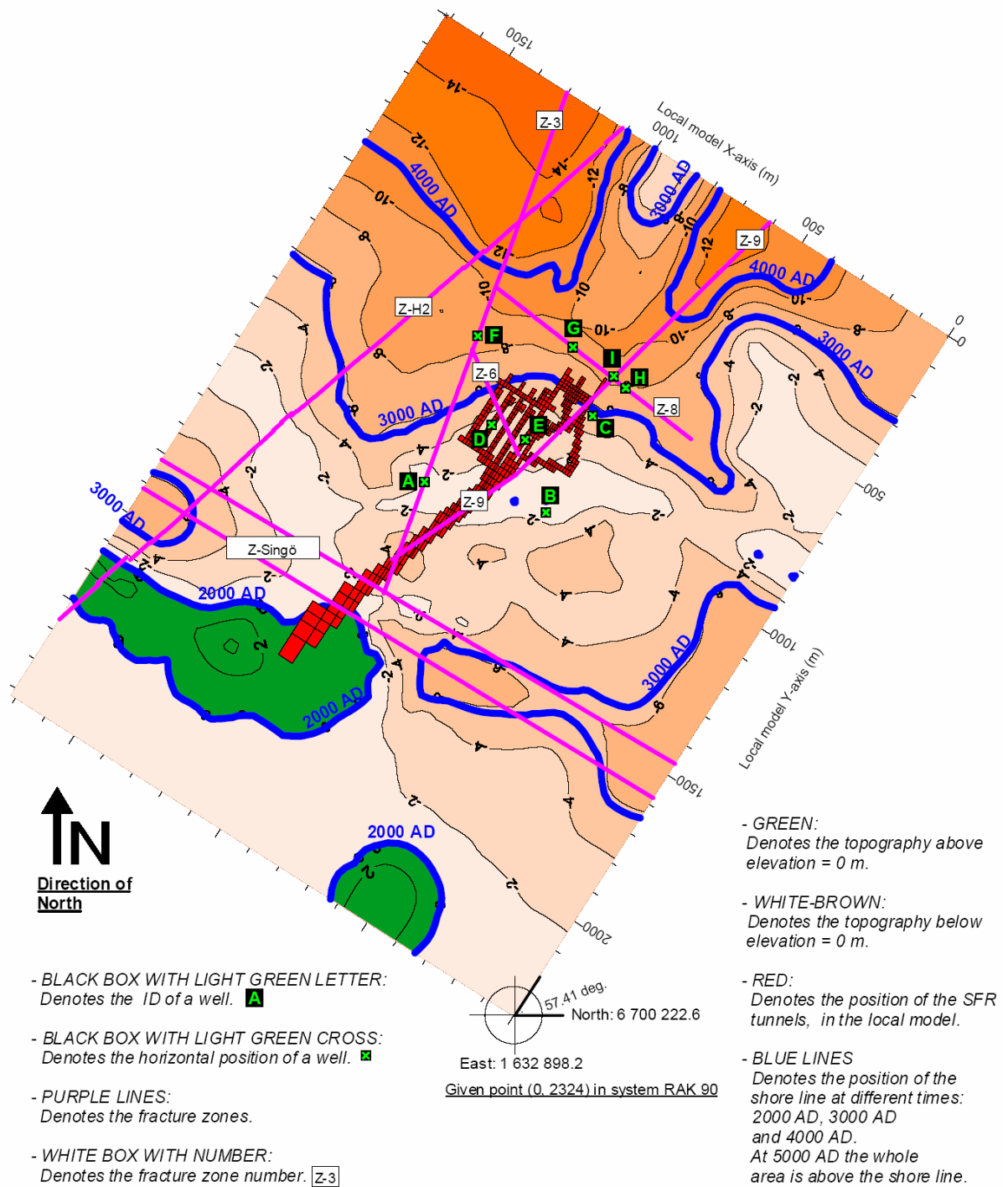


圖2-24 假設水井之位置以及裂隙帶與隧道系統之位置(摘自[4])

若將一口可能抽取自SFR中低放射性廢棄物處置場污染之地下水之水井或者與處置隧道相交之水井定義為危險地區，藉由比較(i)風險區面積和(ii)現今於SFR中低放射性廢棄物處置場內水井的密度，可以估計一口井鑽在危險地區內的機率(如果井位為均勻隨機分佈)。此處分別考慮三種情況之風險地區面積，風險

區1表可能抽取得來自處置隧道之污染地下水之區域，風險區2表垂直鑽井與處置隧道相交之區域，風險區3則為傾斜鑽井與處置隧道相交之區域，水井位於可能抽取得污染的地下水(風險區1)的機率為0.18。考慮鑽井與處置隧道相交之情況，對於垂直鑽井(風險區2)導致可能發生的機率是0.0007；傾斜鑽井(風險區3)導致可能發生的機率0.04。上述機率值對應於將鑽井鑽在對應於不同風險區的可能性。因此，此一機率與井被污染(風險區1)或井相交於處置隧道(風險區2和3)不同。風險區1是水井抽得受污染地下水的風險高，而風險區2和3則是井與處置隧道相交機率的上限與下限，分析結果請參閱圖2-25和圖2-26。

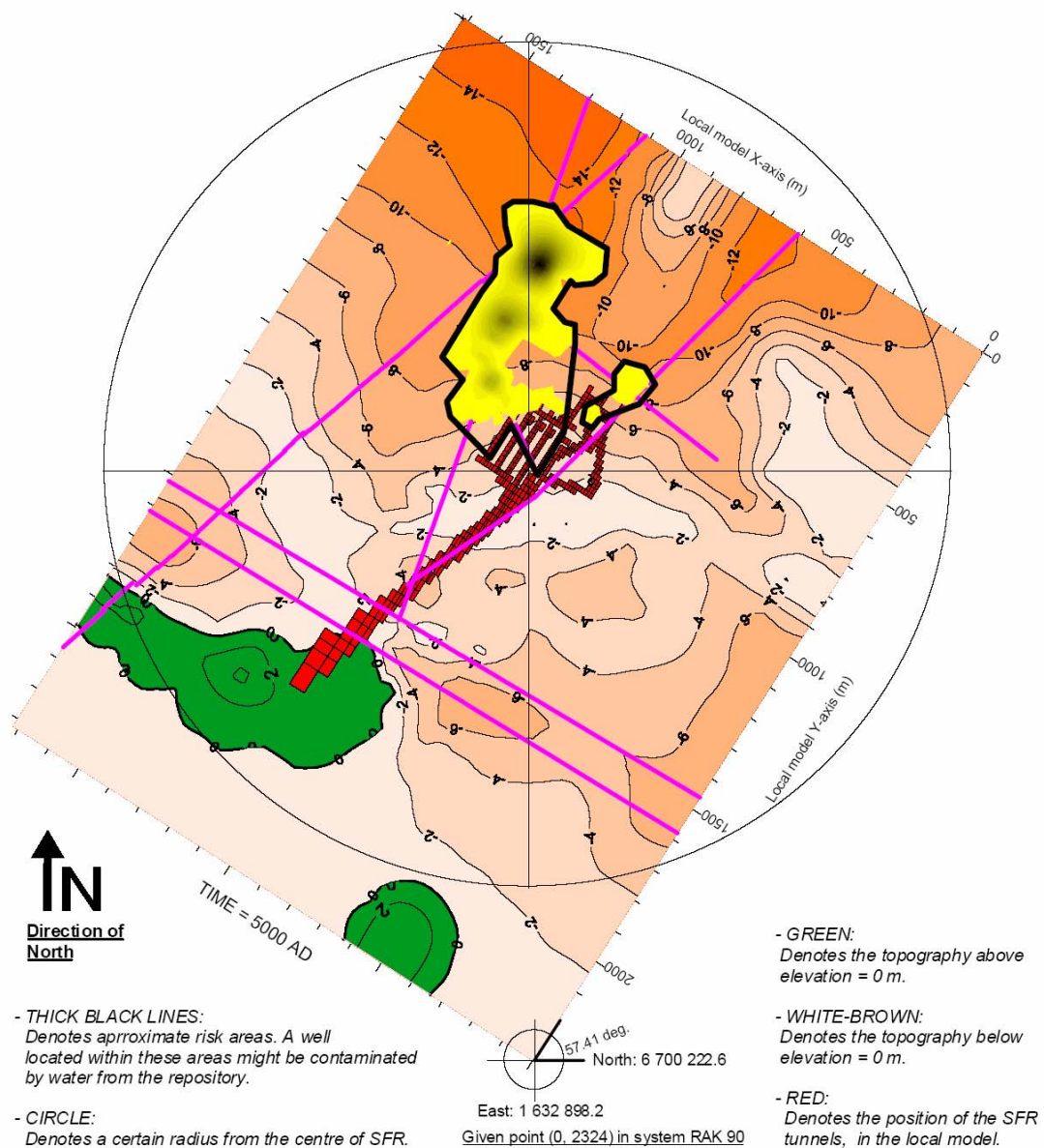


圖2-25 井可能遭受來自處置場地下水污染之風險區域，代表的風險區域面積約0.2平方公里，此圖以同心圓表示之研究區範例(摘自[4])

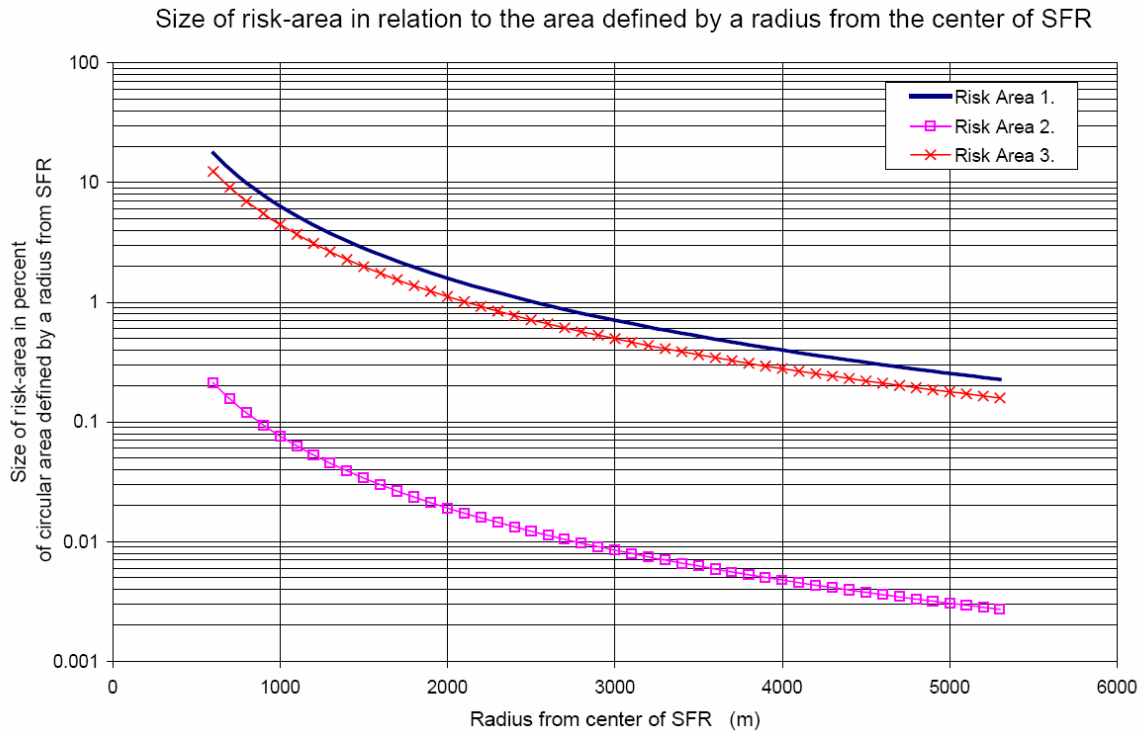


圖2-26 相對於以SFR中心為同心圓所定義之風險區大小(摘自[4])

2.5 擴大隧道系統(Extended tunnel system)

SFR中低放射性廢棄物處置場將有擴大計畫(expansion of the SFR repository)以處置未來核電廠除役後之放射性廢料。擴大隧道系統模擬之目的為評估擴大隧道系統封閉後地下水流入之情況。因為設計與建造SFR中低放射性廢棄物處置場期間，也就是擴大隧道系統初始配置確定時，對於裂隙分佈位置與延伸之瞭解遠不及現今之瞭解程度，因此擴大之隧道系統(參閱圖2-27)配置未能避開局部裂隙區。就水文地質觀點，新的隧道擴大計畫之隧道系統並非最佳配置。以目前隧道擴大計畫之規劃條件下，流入新擴大隧道系統的地下水將比流入舊隧道更多，同時，由新隧道流出至地表之地下水流動路徑將比舊隧道更短。擴大之隧道系統附近之地下水流動模擬結果與目前現有隧道系統地下水流動模擬結果趨勢相同，也就是說，SFR中低放射性廢棄物處置場之區域地下水流量將隨時間增加而增加，隨後於西元5000年~西元6000年間地下水流動將逐漸達擬穩態。值得注意的是，新隧道將影響現有隧道系統之地下水流動。流經新隧道系統之地下水流量將比流經現有隧道系統之地下水流量大得多。流經新設與現有處置隧道之地下水總流量與時間之關係計算結果詳列於表2-15。

表2-15 擴大隧道系統後流經新設處置隧道與現有處置隧道之總流量(摘自[4])

OLD AND NEW DEPOSITION TUNNELS			
TOTAL FLOW (m ³ /year)			
Time AD	ALL OLD TUNNELS	ALL NEW TUNNELS	ALL TUNNELS OLD AND NEW
2000	45	213	257
3000	116	509	625
4000	238	1298	1536
5000	254	1293	1547
6000	254	1297	1551
8000	254	1297	1551

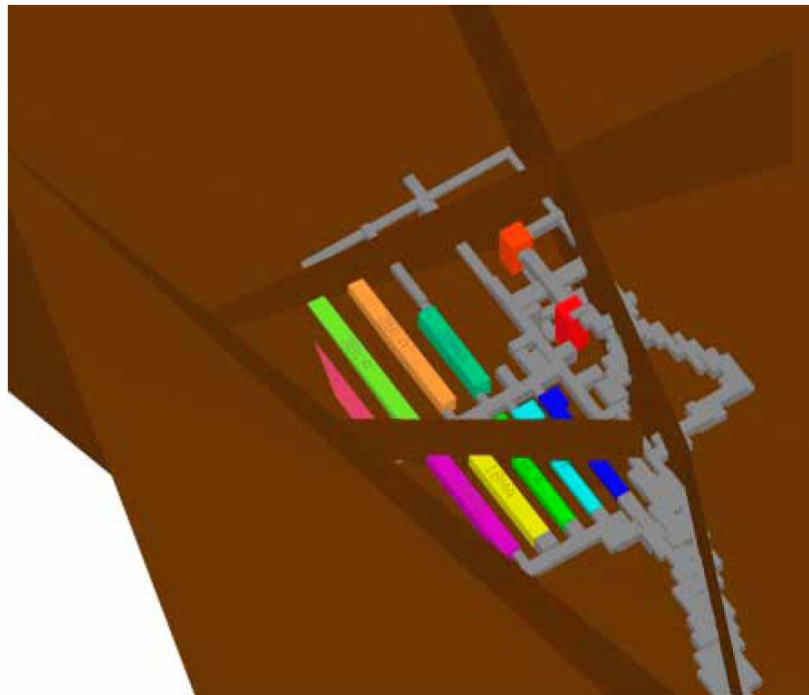


圖2-27 SFR擴大隧道系統與局部裂隙帶之立體圖(摘自[4])

2.6 敏感度分析-障壁失效

2.6.1 隧道封塞失效 (degradation of tunnel plugs)

作為敏感度分析案例(sensitivity case)，假設分隔水平處置隧道與通達隧道(access tunnels)間之封塞以及通達斜坡(access ramp)內封塞將於一定時間內逐漸

失效。在封塞逐漸失效期間，處置隧道間之地下水流量將伴隨區域地下水流動型態變化而增加。此外，封塞失效將另外增加隧道內之地下水流量，再者，封塞失效亦將改變流經隧道之水流方向，因而影響隧道內地下水總流量。

1. 考慮通過所有隧道之總流量，詳細尺度模式預測當封塞完全失效時，BMA、BLA和BTF處置隧道總流量將為維持封塞完整情況下的2到3倍。在SILO處置隧道上緣填方區地下水流量之增加量更大，封塞失效情況下之地下水流量是封塞完整有效情況下的30倍。
2. 考慮流經封裝罐之隧道總流量，詳細尺度模型預測封塞失效造成流量之變化如下：BTF處置隧道內，因地下水流向之改變，造成地下水流量略有減少。在BLA和BMA處置隧道內，因封塞失效造成地下水流量增加了2到3倍。當區域地下水流尚未改向，地下水流動仍維持垂直向時，封塞失效將造成流經SILO處置隧道地下水流量減少，然而，若區域地下水流向轉變為水平流動時(西元4000年以後)，封塞失效將造成流量略為增加。

分析結果詳見表2-16至表2-17。因為通達斜坡(access ramp)以上之地面上升而位於海平面以上，因此，通達斜坡即產生一地下水分水嶺。因為地下水流動之分水嶺位於通達斜坡內，因此，通達斜坡設置封塞與否，對於地下水流過隧道系統將沒有太大的影響。因為分水嶺位於通達斜坡，因此，即使全部封塞均失效，大的裂隙帶(Singo分區)對於SFR中低放射性廢棄物處置場隧道系統之地下水流動並不會造成很大的衝擊。

表2-16 詳細模式預測流經BMA處置隧道總流量(假設無封塞情況下)(摘自[4])

BMA No plugs	Total flow (m ³ /year)					
	Trough different parts of the studied tunnel at different times					
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD	6000 AD	7000 AD
Top filling	7.0	55.7	69.2	72.2	72.9	73.0
Waste domain. Encap.	0.08	0.46	0.59	0.60	0.60	0.60
Filling at sides	8.2	46.1	57.4	58.9	58.6	58.6
Concrete/sand floor	9.1	51	61.7	62.3	61.4	61.3
Loading areas	7.9	117.8	138.8	144.3	146.1	146.2
All surroundings	12.3	120.3	133.4	135.7	135.8	135.8
Tunnel flow Qallsurr. - Qwaste	12.2	119.8	132.8	135.1	135.2	135.2
<u>Waste Flow Factor</u> Q_Fac = Q2 / Q1 Q2 =Qwaste_no plugs Q1 =Qwaste_basecase	1.1	3.8	2.3	2.1	2.1	2.1
<u>Tunnel Flow Factor</u> Q_Fac = Q2 / Q1 Q2=Qtunnel_no plugs Q1=Qtunnel_basecase	1.4	3.3	2.5	2.5	2.5	2.5

表2-17 詳細模式預測流經SILO處置隧道總流量(假設無封塞情況下)(摘自[4])

SILO No plugs	Total flow (m ³ /year)					
	Trough different parts of the studied tunnel at different times					
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD	6000 AD	7000 AD
Top filling	7.7	19.9	58.1	64.1	66.4	66.5
Bentonite at top	0.15	0.04	0.3	0.34	0.36	0.36
Waste domain. Encap.	0.16	0.06	0.25	0.30	0.31	0.31
Bentonite at base	0.20	0.12	0.33	0.39	0.40	0.41
Bentonite at sides	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04
<u>Waste Flow Factor</u> Q_Fac = Q2 / Q1 Q2 =Qwaste_no plugs Q1 =Qwaste_basecase	0.70	0.27	1.56	1.30	1.24	1.24
<u>Top fill Flow Factor</u> Q_Fac = Q2 / Q1 Q2=Qtopfill_no plugs Q1=Qtopfill_basecase	14.5	14.2	26.4	29.1	30.2	30.2

2.6.2 SILO處置隧道封裝罐失效

為了進行敏感度分析，茲考慮模擬SILO處置隧道封裝罐失效(failed)之情況下之地下水流動情況。假設狀況為SILO處置隧道之混凝土障壁以及蒙脫土障壁發生滲漏(breached)，模擬結果發現若封裝罐(encapsulation)失效，流經SILO處置隧道之地下水流量將遠大於封裝罐為完整之情況，但是縱使封裝罐失效，SILO處置隧道仍具阻礙地下水流動之部分功效。詳細尺度模型預測於SILO處置隧道封裝罐失效之情況下，其水力傳導係數約為 10^{-8} m/s，封裝罐滲漏情況下流經貯置區的地下水流量將為封裝罐無滲漏之情況下的3~10倍，增加的流量取決於海岸線(shoreline)的位置，最大差別發生在西元3000年左右。就流經其他處置隧道的地下水流而言，如果隧道系統其它處置隧道是完整無滲漏的，SILO處置隧道封裝罐失效將不致於造成太大的衝擊。敏感度分析結果詳見表2-18與表2-19。

表2-18 詳細模式預測流經SILO處置隧道總流量(假設SILO處置隧道封裝罐失效但封塞完整)(摘自[4])

Failed SILO Intact tunnel plugs	Total flow (m ³ /year)					
	Trough different parts of the studied tunnel at different times					
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD	6000 AD	7000 AD
Top filling	0.81	1.82	2.64	2.46	2.44	2.44
Bentonite at top	0.72	1.32	0.98	0.89	0.91	0.91
Waste domain. Encap. Q2	0.66	1.08	1.47	1.54	1.58	1.58
Bentonite at base	0.51	0.34	0.84	1.00	1.04	1.04
Bentonite at sides	0.82	1.69	2.71	2.89	2.95	2.95
<u>Waste Flow Factor</u> Q_Factor = Q2 / Q1 Q2 =Qwaste_failed Q1 =Qwaste_base case	2.9	4.9	9.2	6.7	6.3	6.3

表2-19 詳細模式預測流經SILO處置隧道總流量(假設SILO處置隧道封裝罐以及封塞均失效)(摘自[4])

Failed SILO No tunnel plugs	Total flow (m ³ /year)					
	Trough different parts of the studied tunnel at different times					
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD	6000 AD	7000 AD
Top filling	7.69	19.98	58.19	64.12	66.43	66.58
Bentonite at top	0.29	0.25	1.15	1.18	1.19	1.19
Waste domain. Encap. Q2	0.62	0.74	1.53	1.64	1.66	1.66
Bentonite at base	0.68	0.42	1.16	1.34	1.37	1.37
Bentonite at sides	0.89	1.29	2.46	2.57	2.6	2.6
<u>Waste Flow Factor</u> Q _{Factor} = Q ₂ / Q ₁ Q ₂ = Q _{waste_failed} Q ₁ = Q _{waste_base case}	2.7	3.7	9.6	7.1	6.6	6.6

2.6.3 BMA處置隧道封裝罐失效或滲漏

BMA處置隧道以混凝土牆分隔成不同的區域，以下敏感度分析著重於假設部分BMA處置隧道分區失效或滲漏時之地下水流動情況，敏感度分析假設接近裂隙帶區域6處(Zone 6)之水力傳導係數與周圍高水力傳導係數的回填材料相同(1×10^{-5} m/s)。分析結果發現流經BMA處置隧道滲漏區的地下水流量將比無滲漏時之地下水流量為大，因為滲漏區將造成地下水流動方向改變，因而造成地下水往滲漏區流動。但是，因為處置隧道完整部分仍然具有低滲透性(被完整的混凝土牆分隔)，通過完整未滲漏區的地下水流量將無太大的變化。因此，地下水流動變化主要發生在滲漏區。BMA處置隧道裡的地下水流動將因區域地下水流動型態變化而增加，此與基準條件分析結果行為相同。在封裝罐完整未滲漏區域的地下水流動則幾乎與基準條件(全部未滲漏)分析結果相同。

另一方面，考慮流經滲漏區段(breached section)以及整個貯置封裝罐的地下水，詳細尺度模式預測滲漏區段之地下水流量佔封裝罐總流量的97%。模式預測通過滲漏的封裝罐之地下水流量將增加30至37倍間。然而，因封裝罐周圍材料水力傳導係數變化不大，因此封裝罐附近所有地下水流量(包括通過上方以及側邊回填材料等)於滲漏情況下與根據基準條件分析得之地下水流量相差不大。滲漏區段造成的影響主要是改變原先於回填區流動之地下水的流向，並提供了一個地下水流動的捷徑。若其他處置隧道之地下水流量亦納入計算，則假設滲漏情況與根據基準條件分析得之地下水流量為相同，敏感度分析詳細結果請參考表2-20。

表2-20 詳細模式預測流經BMA處置隧道總流量(假設BMA處置隧道封裝罐失效)(摘自[4])

BMA With breached encap.	Total flow (m ³ /year)					
	Trough different parts of the studied section at different times					
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD	6000 AD	7000 AD
Top filling	5.9	21.4	35.1	36.6	36.6	36.6
Intact parts of encapsulat.	0.04	0.16	0.29	0.30	0.30	0.30
Breached part of encapsulat.	2.4	3.7	9.2	10.1	10.2	10.2
All of encapsulation	2.4	3.86	9.5	10.4	10.5	10.5
Flow of breached part in relation to that of all encap.	>99%	96%	97%	97%	97%	97%
Filling at sides	4.7	14.4	23.2	24.2	24.2	24.2
Filling at base	7.5	12.7	26.0	28.2	28.4	28.4
Loading areas	2.4	22.1	31.8	32.3	32.2	32.2
All surroundings	11.1	40.4	62.0	64.9	65.0	65.0
Tunnel flow Qallsurr. - Qwaste	8.7	36.6	52.6	54.6	54.6	54.6
Waste Flow Factor Q_Factor = Q2 / Q1 Q2 =Qencap_breached Q1 =Qencap_base case	34.8	30.0	36.5	37.1	37.5	37.5
Tunnel Flow Factor Q_Factor = Q2 / Q1 Q2 =Qtunnel_breached Q1 =Qtunnel_base case	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

2.6.4 BTF1處置隧道失效或滲漏

作為敏感度分析之情況之一，以下嘗試說明模擬BTF1處置隧道部分區段失效或滲漏時之地下水流動情況。敏感度分析假設接近裂隙帶區域6處(Zone 6)部分區域滲漏且其水力傳導係數與周圍高水力傳導係數的回填材料相同(10^{-5} m/s)，敏感度分析中考慮兩種情況：狀況1為只有封裝罐失效或滲漏，底部及側邊的混凝土牆保持完整，狀況2則為包括底部及側邊之全部混凝土牆均產生滲漏。模擬結果顯示隨著區域地下水流動型態之改變，BTF1處置隧道之地下水流量將隨之增加，此狀況與基準條件分析結果相同。

1. 考慮狀況1，封裝罐內之地下水流量將隨著時間增加而增加，至西元6000年左右地下水流量漸趨穩定。詳細尺度模式預測流經封裝罐滲漏區段之地下水流量佔所有封裝罐內地下水流量的60%(表2-21)。相較於封裝罐保持完整(分析基準條件)之狀況，封裝罐滲漏將造成1.6倍大的地下水流量(西元3000年時為2.3倍)。
2. 考慮狀況2，裝罐內之地下水流量將隨時間增加，至西元6000年左右地下水流量漸趨穩定。詳細尺度模式預測流經封裝罐滲漏區段之地下水流量佔所有

封裝罐內全部地下水流量的90%(表2-22)。相較於封裝罐保持完整(分析基準條件)之狀況，封裝罐滲漏將造成5倍大的地下水流量(西元3000年時為6.3倍)。

3. 至於流經處置隧道(SILO、BMA、BLA、BTF2)內之地下水流量則與根據基準條件所計算得之結果非常接近。

表2-21 詳細模式預測流經BTF1處置隧道總流量(假設BTF1處置隧道封裝罐失效狀況1)(摘自[4])

BTF1 Alt 1. Breached Encap.	Total flow (m ³ /year)					
	Trough different parts of the studied section at different times					
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD	6000 AD	7000 AD
Intact parts of encapsulat.	1.7	2.1	5.3	6.1	6.3	6.3
Breached part of encapsulat.	2.6	4.3	5.8	6.3	6.5	6.5
All of encapsulation	4.2	6.3	11.0	12.3	12.6	12.6
Flow of breached part in relation to that of all encap.	61%	67%	53%	51%	51%	51%
<u>Waste Flow Factor</u> Q _{Factor} = Q ₂ / Q ₁ Q ₂ = Q _{encap_breached} Q ₁ = Q _{encap_base case}	1.8	2.3	1.6	1.6	1.6	1.6
Tunnel flow (Q _{allsurr.} - Q _{waste})	8.2	19.8	28.5	31.3	32.1	32.1
<u>Tunnel Flow Factor</u> Q _{Factor} = Q ₂ / Q ₁ Q ₂ = Q _{tunnel_breached} Q ₁ = Q _{tunnel_base case}	1.09	1.02	1.08	1.02	1.05	1.05

表2-22 詳細模式預測流經BTF1處置隧道總流量(假設BTF1處置隧道封裝罐失效狀況2)(摘自[4])

BTF1 Alt 2. Breached Encap, Floor and Side-fillings	Total flow (m ³ /year)					
	Trough different parts of the studied section at different times					
	2000 AD	3000 AD	4000 AD	5000 AD	6000 AD	7000 AD
Intact parts of encapsulat.	1.2	1.9	4.0	4.7	4.9	4.8
Breached part of encapsulat.	12.0	15.1	30.7	33.9	34.5	36.1
All of encapsulation	13.2	17.0	34.7	38.6	39.3	40.8
Flow of breached part in relation to that of all encap.	91%	879%	88%	88%	88%	88%
<u>Waste Flow Factor</u> Q _{Factor} = Q ₂ / Q ₁ Q ₂ = Q _{encap_breached} Q ₁ = Q _{encap_base case}	5.5	6.3	5.1	4.9	4.9	4.9
Tunnel flow (Q _{all_structures})	14.5	24.1	45.0	50.2	51.2	51.2
<u>Tunnel Flow Factor</u> Q _{Factor} = Q ₂ / Q ₁ Q ₂ = Q _{tunnel_breached} Q ₁ = Q _{tunnel_base case}	1.94	1.24	1.71	1.64	1.69	1.68

2.7 敏感度分析-地形些微改變對地下水流動的影響

流出區附近之地表形貌特性(landscape)與生物環境(biological environment)對於計算放射性核種釋放(release of radioactive nuclides)有重大影響。因為通過處置隧道之地下水將自處置隧道區北側流出區(discharge areas)流出，而這些地區將上升到海平面以上，因生物及地質作用(biological and geological origin)，處置隧道北側流出區將發生沉積物(sediments)堆積，沉積物堆積將造成地形改變，因而引起地下水頭的上升(groundwater heads)，並進一步造成地下水流改變，因而使得流出區移往其他地下水水頭較低處(近海岸線)。地形改變敏感度分析考慮沉積物不同沉積速率與沉積物之水力傳係數值，分析結果發現，如果沉積物之水力傳導係數不致於過大，沉積物之沉積速率比沉積物的水力傳導係數對地下水的移動影響更大，不同分析條件總沉積物累積量將與最大沉積物累積速度有關，但是並非直接等同於根據此一速度進行計算，原因是模式中沉積物堆積只發生於地下水流出區，而且僅於持續出流地區。以下進一步說明此一敏感度分析結果。

1. *Sel 0*為基準分析條件，地下水流出直接進入位於巨大而開放之表面水體(如流出位於海岸線之海面下或湖中)，大約西元2000年至3900年左右流出將進入開放之水體或海岸線附近，自此之後，流出區將位於海岸線以上(圖2-28)。
2. 地下水流出區位於野溪和濕地(wetlands)等，流出區將產生明顯堆積物之情況，敏感度分析考慮不同沉積速率與沉積物之水力傳係數值，以*Sel 7*之條件為例(沉積速率10mm/year；沉積物水力傳導係數 10^{-9} m/sec)，大約在西元2000年至西元4600年之間流出將進入開放水體(如流出位於海岸線之海面下或湖中)或海岸線附近，大約在西元4600年至5200年之間，流出區將位於海岸線上方，但是仍然相當接近海岸，此一時期流出區至海岸線之距離不超過200公尺，於西元5200年之後，流出區將進入一個小湖，自此之後，流出區位置將視小湖之沉積速率而定，若此一小湖持續堆積沉積物，此一小湖或許將在幾百年內變成一沼澤(mire)，若在這種情況下，由處置隧道流出之流動路徑將往小湖的北邊移動，而自更大的湖滲出，關於*Sel 7*之敏感度分析條件再區分為*Sel 7A*(無沉積物於湖中沉積)及*Sel 7B*(有沉積物於湖中沉積)，分析結果詳參圖2-28。

因為地質和生物過程(geological and biological process)很難量化，因此將增加分析之不確定性，故地質與生物過程未納入其他研究分析。

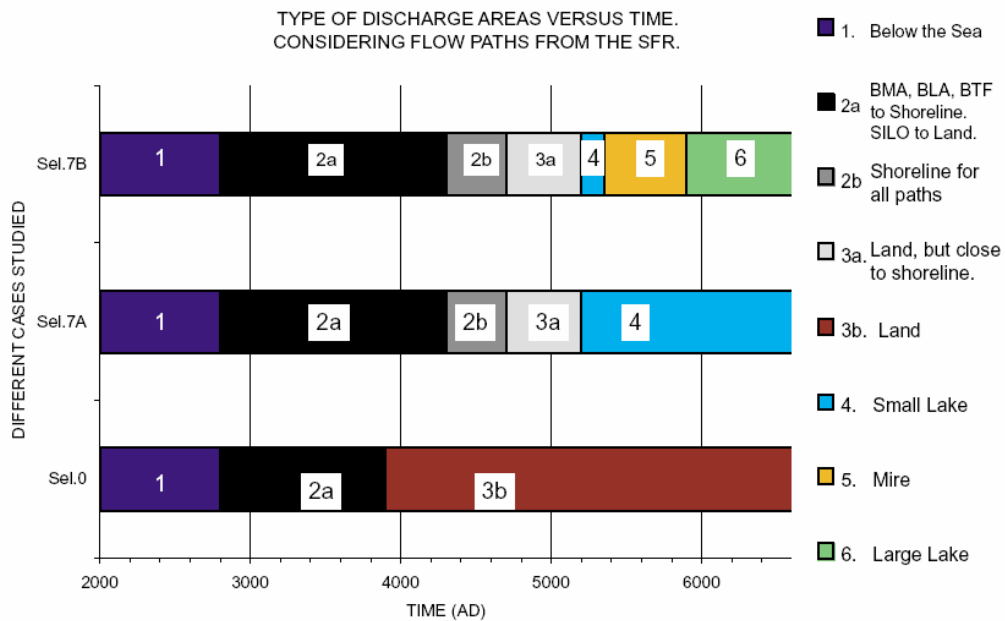


圖2-28 敏感度分析Sel 7與Sel 0分析情況下流出區域種類隨時間改變之關係(摘自[4])

2.8 SFR中低放射性廢棄物處置場之隧道充滿水所需時間

目前SFR中低放射性廢棄物處置場隧道均保持乾燥，然而當處置場廢棄後，隧道將逐漸充滿地下水。基於詳細尺度模型定義隨充水過程發生之孔隙之變化(參閱表2-23)，利用鏈狀模擬(由區域-至局部-至詳細尺度模型)，即可進行充水過渡時期之地下水流動數值分析，同時，充滿水所需時間即可加以估計。

表2-23 不同隧道系統構造詳細模式之初始孔隙率(摘自[4])

Material in Tunnel	Initial available porosity	Percent
Access tunnels	0.5	Empty tunnels, 50% available (1)
Sand backfill	0.2	20
Bentonite backfill	0.01	1
Porous concrete	0.05	5
Concrete (encapsulation, floor)	0.01	1
Waste SILO	0.10	10
Waste BTF	0.25	25
Waste BLA	0.20	20
Waste BMA	0.15	15

(1) Tunnel volume is reduced because of the excessive size of the access tunnels in the numerical models.

最後充滿水的部分是SILO處置隧道的封裝罐附近之孔隙；要讓這一部份隧道充滿水可能需要25年，至於要讓BMA、BLA以及BTF處置隧道完全充滿水則

約需數年。BMA及SILO處置隧道詳細分析結果詳見表2-24及表2-25以及圖2-29及圖2-30。

表2-24 BMA處置隧道充滿水所需時間詳細模式預測結果(摘自[4])

BMA Part of tunnel	LENGTH OF SATURATION PERIOD Saturation of initial available porosity	
	50% saturation	100% saturation
Tunnel floor (sand)	< 1 month	< 1 month
Filling at sides (sand)	2 month	11 months
Top fill (sand)	1 year	2 years and 4 months
Waste and encap. (concrete)	6 months	1 year and 6 months

表2-25 SILO處置隧道充滿水所需時間詳細模式預測結果(摘自[4])

SILO Part of SILO	LENGTH OF SATURATION PERIOD Saturation of initial available porosity	
	50% saturation	100% saturation
Bentonite at base	ca. 1 month	6 months
Bentonite at sides	2.5 years	13-16 years
Bentonite at top	0.5 years	2 years
Top filling (sand) above encap.	1.8 years	4 years
Inside of barriers, encap.& waste	9.2 years	23 years

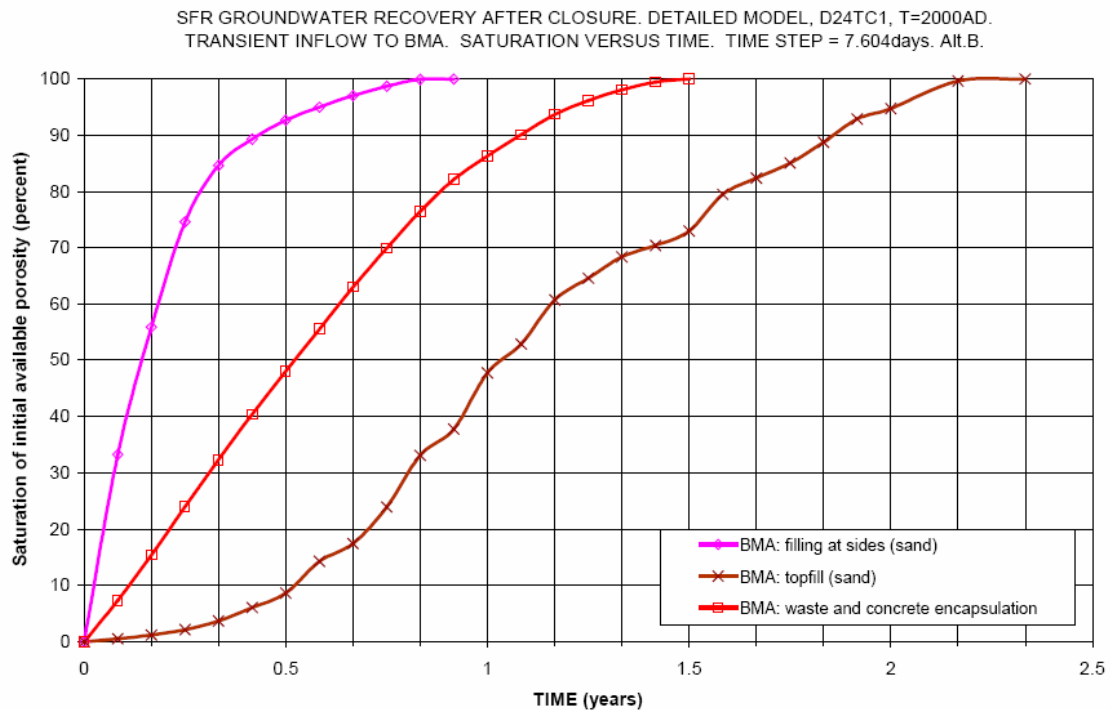


圖2-29 BMA隧道之詳細模式處置場封閉後隧道充水百分比(摘自[4])

SFR GROUNDWATER RECOVERY AFTER CLOSURE. DETAILED MODEL, D24TC1, T=2000AD.
 TRANSIENT INFLOW TO SILO. SATURATION VERSUS TIME. TIME STEP = 7.604days. Alt.B.

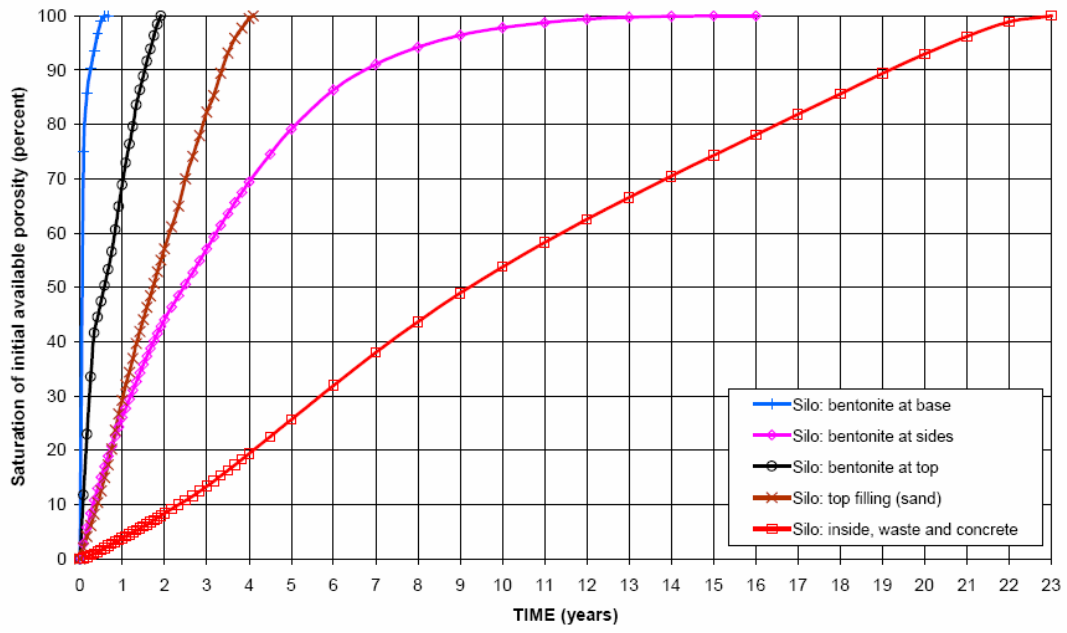


圖2-30 SILO隧道之詳細模式處置場封閉後隧道充水百分比(摘自[4])

第三章 隧道內地下水流量以及充水時間估計之解析解

為驗證數值程式之合理性，發展隧道處置概念之地下水流動模擬解析模式對於計算結果之檢核有其必要性。Holmén and Stigsson (2001)[4]提出一解析模式驗證流經隧道地下水流動數值模擬結果，此解析模式考慮隧道為關閉(Closed)、密封(Sealed)，隧道內無抽水且地下水流達穩態，岩體(Rock mass)假設為均質與等向性，而隧道內亦為均質與等向性。採用之解析方法為利用熱傳導模式應用於地下水流動計算，其基本假設為地下水流動之介質為受壓或壓力面位置已知非受壓狀態，且隧道與其周遭包圍物視為兩不同水力性質之介質，分別考慮隧道為圓柱體、球體與橢圓體三種情形，相類似雙介質情形亦存在熱傳導領域雙介質固體之熱傳導相關問題已存在相關解析解，而借用其解析解並經適當修正，可應用地下水流動模擬，並與數值方法所得結果比較與驗證。本章將概略敘述此一解析解之理論模式(3.1節)，並舉SFR之分析實例說明如何利用解析解驗證數值解之正確性(3.2節)。

另一方面，當處置場廢棄後，隧道將充滿地下水。如2.8節所述，利用鏈狀模擬，即可進行充水時期之地下水流動數值分析，同時，隧道充滿水時間的長度即可加以估計。為驗證數值程式之合理性，處置隧道充水時間計算解析模式對於計算結果之檢核亦有其必要性。地下水充滿處置隧道過程之入流量(暫態)，可利用Theim方程式計算(Holmén and Stigsson, 2001[4])。本章亦將概略敘述此一解析解之理論模式(3.3節)，並舉SFR之分析實例說明如何利用解析解驗證數值解之正確性(3.4節)。

3.1 隧道內穩態地下水流量估計之解析解

假設流動所在的介質為受壓(confined)或自由水面位置已知時，可利用計算熱傳導所推導之數學模式來進行地下水流計算。介質內與周遭介質內不同傳導特性物體之熱或流體穩態流動問題非常重要，且已有相關解析解推導完成。以下分別考慮隧道為圓球體(sphere)、圓柱體(cylinder)與橢圓體(ellipsoid)時，隧道內水頭之解析公式，相關公式主要擷取自Carslaw and Jaeger (1959)[6]。其原本主要推導用於計算固體內之熱傳導，但可重新改寫發展(rewritten and developed)應用於地下水流動問題。

解析公式假定地下水流穩態情形，以無限大均質、等向的介質來描述岩體，解析公式可計算在(1)任意區域地下水流方向下，球體內部與外部之水頭；或(2)區域地下水流方向與圓柱體主軸呈正90度正交；(3)區域地下水流方向與橢圓體主軸或短軸呈正90度正交時，橢圓體內部之水頭與外部之水頭。然而須注意解析

公式假設隧道為一均質的介質所包圍，然而裂隙岩層通常為異質性。

隧道內之地下水流將沿著隧道變化，隧道內之地下水流量取決於(1)隧道配置、長度與尺寸；(2)隧道內填充物與障壁之性質；(3)區域地下水流方向與大小和(4)周遭岩體的異質性。

地下水之比流量(specific flow)為：

$$q = KI \quad (3-1)$$

此處 q 為比流量[m/s]； K 為水力傳導係數[m/s]； I 為水力梯度[-]。以下之推導隧道內之水頭表為 ϕ_t [m]，而隧道外之水頭表為 ϕ_r [m]。

3.1.1 球體隧道內之地下水流動

根據上述基本假設，球體隧道內之水頭為(Carlsaw and Jaeger, 1959[6])：

$$\phi_t = \frac{3K_r I_r}{2K_r + K_t} x \quad (3-2)$$

此處 K_r 為岩體之水力傳導係數[m/s]； K_t 為隧道內部之水力傳導係數[m/s]； I_r 為在較大距離之區域地下水流水力梯度； x 為距球體隧道中心的距離[m]。

球體隧道內之水力梯度 I_t 為其水頭 ϕ_t 之微分，可表為：

$$I_t = \frac{d\phi_t}{dx} = \frac{3K_r I_r}{2K_r + K_t} \quad (3-3)$$

球體隧道內之地下水流與岩體區域地下水流之比值為：

$$\frac{q_t}{q_r} = \frac{K_t I_t}{K_r I_r} = \frac{K_t \frac{3K_r I_r}{2K_r + K_t}}{K_r I_r} = \frac{3K_t}{2K_r + K_t} \quad (3-4)$$

3.1.2 無限長圓柱體隧道內之地下水流動

假設區域地下水流動與圓柱隧道內之主要長軸呈90度正交，則圓柱隧道內之水頭為(Carlsaw and Jaeger, 1959[6])：

$$\phi_t = \frac{2K_r I_r}{K_r + K_t} x \quad (3-5)$$

圓柱體隧道內之水力梯度 I_t 為其水頭 ϕ_t 之微分，可表為：

$$I_t = \frac{d\phi_t}{dx} = \frac{2K_r I_r}{K_r + K_t} \quad (3-6)$$

圓柱體隧道內之地下水流與岩體區域地下水流之比值為：

$$\frac{q_t}{q_r} = \frac{K_t I_t}{K_r I_r} = \frac{K_t \frac{2K_r I_r}{K_r + K_t}}{K_r I_r} = \frac{2K_t}{K_r + K_t} \quad (3-7)$$

3.1.3 橢圓體隧道內之地下水流動

類球體為一三維的物體，其可視為一圓球體之其中一軸或兩軸長度放大延伸，類球體(spheroid)可以三個互相正交的軸A、B與C，主軸意謂最長的軸A，另外兩個短軸分別為B與C，此三軸都可分為半軸(相當圓球體之半徑)，半軸長分別以 a 、 b 與 c 表示。類球體之體積為：

$$Volume = \frac{4}{3} \pi abc \quad (3-8)$$

中心於點 (x_0, y_0, z_0) 且半軸長為 a 、 b 與 c 之類球體方程式為：

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} = 1 \quad (3-9)$$

當其中兩半軸長度相等，此類球體可稱為橢圓體，橢圓體 $a > b = c$ ，此處 a 為長軸， b 與 c 為短軸，不同橢圓體之幾何資料與形狀如圖所示。

考慮三維直角座標系統，假設主軸沿著直角座標系統之 x 軸，短軸沿著直角座標系統之 y 與 z 軸，則中心點 $(0,0,0)$ 之橢圓體表面之方程式為：

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (3-10)$$

區域地下水流之水力梯度可以向量表示為：

$$\bar{I} = (I_1, I_2, I_3) \quad (3-11)$$

此處 I_1 為區域地下水流沿 x 軸方向水力梯度之分量； I_2 為區域地下水流沿 y 軸方向水力梯度之分量； I_3 為區域地下水流沿 z 軸方向水力梯度之分量。

橢圓體隧道內部與外部之水頭為(Carslaw and Jaeger, 1959[6])：

$$\phi_t = \frac{1}{1+A_0\left(\frac{K_t-K_r}{K_r}\right)} I_1 x + \frac{1}{1+B_0\left(\frac{K_t-K_r}{K_r}\right)} I_2 y + \frac{1}{1+C_0\left(\frac{K_t-K_r}{K_r}\right)} I_3 z \quad (3-12)$$

$$\phi_r = I_1 x - I_2 y - I_3 z - \frac{\left(\frac{K_t-K_r}{K_r}\right) I_1 A_{\lambda} x}{1+A_0\left(\frac{K_t-K_r}{K_r}\right)} - \frac{\left(\frac{K_t-K_r}{K_r}\right) I_2 B_{\lambda} x}{1+B_0\left(\frac{K_t-K_r}{K_r}\right)} - \frac{\left(\frac{K_t-K_r}{K_r}\right) I_3 C_{\lambda} x}{1+C_0\left(\frac{K_t-K_r}{K_r}\right)} \quad (3-13)$$

此處

$$A_{\lambda} = \frac{1}{2} abc \int_{\lambda}^{\infty} \frac{du}{(a^2+u)\sqrt{(a^2+u)(b^2+u)(c^2+u)}} \quad (3-14)$$

$$B_{\lambda} = \frac{1}{2} abc \int_{\lambda}^{\infty} \frac{du}{(b^2+u)\sqrt{(a^2+u)(b^2+u)(c^2+u)}} \quad (3-15)$$

$$C_{\lambda} = \frac{1}{2} abc \int_{\lambda}^{\infty} \frac{du}{(c^2+u)\sqrt{(a^2+u)(b^2+u)(c^2+u)}} \quad (3-16)$$

λ 為已知之任意點 (x, y, z) 下，滿足以下方程式之一正根

$$\frac{x^2}{a^2+\lambda} + \frac{y^2}{b^2+\lambda} + \frac{z^2}{c^2+\lambda} = 1 \quad (3-17)$$

A_0 、 B_0 與 C_0 為 $\lambda=0$ 時積分式 A_{λ} 、 B_{λ} 與 C_{λ} 之值。

當橢圓體為 $a > b = c$ 時， A_{λ} 、 B_{λ} 、 C_{λ} 、 A_0 、 B_0 與 C_0 可簡化為：

$$A_{\lambda} = \frac{1-e_0^2}{e_0^3} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+e_{\lambda}}{1-e_{\lambda}} \right) - e_{\lambda} \right] \quad (3-18)$$

$$B_{\lambda} = C_{\lambda} = \frac{1-e_0^2}{2e_0^3} \left[\frac{e_{\lambda}}{1-e_{\lambda}^2} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+e_{\lambda}}{1-e_{\lambda}} \right) \right] \quad (3-19)$$

$$A_0 = \frac{1-e_0^2}{e_0} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+e_0}{1-e_0} \right) - e_0 \right] \quad (3-20)$$

$$B_0 = C_0 = \frac{1-e_0^2}{2e_0^3} \left[\frac{e_0}{1-e_0^2} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+e_0}{1-e_0} \right) \right] \quad (3-21)$$

$$\text{此處 } e_\lambda = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2 + \lambda}} ; e_0 = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$$

方程式(3-12)顯示隧道內之水頭為線性變化且與(i)區域地下水流方向與大小；(ii)隧道系統的性質(形狀)；(iii)於隧道系統的位置相關。方程式(3-12)可重新改寫為：

$$\phi_t = \Omega_1 I_1 x + \Omega_2 I_2 y + \Omega_3 I_3 z \quad (3-22)$$

$$\text{此處 } \Omega_1 = \frac{1}{1 + A_0 \left(\frac{K_t - K_r}{K_r} \right)} ; \Omega_2 = \frac{1}{1 + B_0 \left(\frac{K_t - K_r}{K_r} \right)} ; \Omega_3 = \frac{1}{1 + B_0 \left(\frac{K_t - K_r}{K_r} \right)}。$$

常數係數 Ω_1 、 Ω_2 與 Ω_3 由橢圓體隧道的形狀與隧道內與外部之水力傳導係數比決定。

區域地下水流動沿著橢圓體之主軸方向時，隧道內之地下水流動

當區域地下水流動沿著橢圓體之主軸方向時，式(3-12)可簡化為：

$$\phi_t = \frac{I_1 x}{1 + A_0 \left(\frac{K_t - K_r}{K_r} \right)} \quad (3-23)$$

橢圓體隧道內之水力梯度 I_r 為其水頭 ϕ_t 之微分，可表為：

$$I_t = \frac{d\phi_t}{dx} = \frac{I_1}{1 + A_0 \left(\frac{K_t - K_r}{K_r} \right)} \quad (3-24)$$

圓柱體隧道內之地下水流與岩體區域地下水流之比值為：

$$\frac{q_t}{q_r} = \frac{K_t I_t}{K_r I_1} = \frac{K_t \left[\frac{I_1}{1 + A_0 \left(\frac{K_t - K_r}{K_r} \right)} \right]}{K_r I_1} = \frac{\frac{K_t}{K_r}}{1 + A_0 \left(\frac{K_t - K_r}{K_r} \right)} \quad (3-25)$$

區域地下水流動沿著橢圓體之短軸方向時，隧道內之地下水流動

當區域地下水流動沿著橢圓體之短軸方向時，式(3-12)可簡化為：

$$\phi_t = \frac{I_2 y}{1 + B_0 \left(\frac{K_t - K_r}{K_r} \right)} \quad (3-26)$$

橢圓體隧道內之水力梯度 I_r 為其水頭 ϕ_t 之微分，可表為：

$$I_t = \frac{d\phi_t}{dy} = \frac{I_2}{1 + B_0 \left(\frac{K_t - K_r}{K_r} \right)} \quad (3-27)$$

圓柱體隧道內之地下水流與岩體區域地下水流之比值為：

$$\frac{q_t}{q_r} = \frac{K_t I_t}{K_r I_1} = \frac{K_t \left[\frac{I_2}{1 + B_0 \left(\frac{K_t - K_r}{K_r} \right)} \right]}{K_r I_2} = \frac{\frac{K_t}{K_r}}{1 + B_0 \left(\frac{K_t - K_r}{K_r} \right)} \quad (3-28)$$

以上考慮區域地下水流動分別沿著橢圓體之長軸與短軸方向時，可由上述式(3-24)與(3-28)探討地下水流沿著橢圓體之長軸與短軸兩者之總流量相同時之水力傳導係數：

$$\frac{\frac{K_t}{K_r}}{1 + B_0 \left(\frac{K_t - K_r}{K_r} \right)} P_2 = \frac{\frac{K_t}{K_r}}{1 + A_0 \left(\frac{K_t - K_r}{K_r} \right)} P_1 \quad (3-29)$$

此處 $P_1 = \pi b^2$ 為與長軸正交之最大面積； $P_2 = \pi ab$ 為與短軸正交之最大面積

3.2 利用解析解驗證隧道流量數值計算結果

解析模式(analytical model)之目的為估算流過處置隧道之地下水流量，並檢核數值模式並無根本的誤差。SFR解析解估算的結果和局部尺度模式(詳述於第二章)計算的結果列於表3-1。根據表3-1可知解析解預測與局部尺度模式計算結果相當接近。

表3-1 解析解與數值解估計之處置隧道總流量比較(摘自[4])

Deposition Tunnel	Actual volume (m3)	Analytical Prediction of total flow (m3/year)		Numerical Prediction of total flow (m3/year) Local model. Base case.	
		Time 2000 AD (1)	Time 8000 AD (2)	Time 2000 AD	Time 8000 AD
SILO	47 500	-	-	1	4
BMA	47 600	19	85	5	65
BLA	27 600	14	74	15	61
BTF1	19 700	12	68	13	44
BTF2	19 700	12	68	12	41

(1) Vertical regional flow along ellipsoid short axis. Size of regional flow = 0.003 m3/m2 year
 (2) Horizontal regional flow along ellipsoid main axis. Size of regional flow = 0.007 m3/m2 year

3.3 估算隧道完全充滿水所需時間之解析解

考慮隧道為一圓柱體，周圍岩體為均質材料，假設(1)充滿水的過程隧道內部氣體會排出，而不影響地下水流入量與改變隧道壓力，(2)未充滿水的內部壓力為常數，則可利用Theim方程式(暫態解)計算地下水入流量，Theim方程式(Holmén and Stigsson, 2001[4])如下：

$$\phi = \phi_0 + \frac{Q}{2\pi Kb} \ln\left(\frac{r}{R}\right) \quad (3-30)$$

此處 ϕ 為於圓柱體隧道之水頭[m]， ϕ_0 為給定之外部邊界水頭[m]， Q 為圓柱體隧道之流量[m/sec³]， b 為圓柱體隧道高度[m]， r 為圓柱體隧道之半徑[m]， R 為外部邊界半徑[m]。重整式(3-30)可得：

$$Q = 2\pi Kb \frac{\phi - \phi_0}{\ln\left(\frac{r}{R}\right)} \quad (3-31)$$

考慮於圓柱體內水之儲蓄為時變，並且忽略圓柱體外介質的儲蓄，由於一般結晶質岩體(rock mass)於受壓下由壓力變化之岩體儲蓄相較於圓柱體內水之儲蓄通常非常小，此處分別考慮兩種情況的圓柱體內水之儲蓄(圖3-1)，(1)儲蓄沿著圓柱體半徑---徑向儲蓄；(2)儲蓄沿著圓柱體高度---軸向儲蓄。

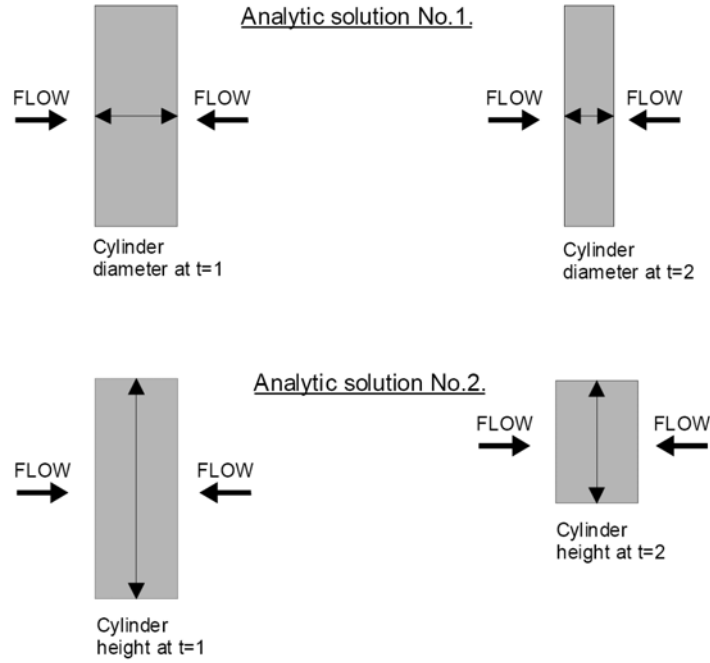


圖3-1 處置隧道充滿水時間長度估算之徑向儲蓄解析模式(Analytic solution No.1；儲蓄沿著圓柱體半徑)以及軸向儲蓄(Analytic solution No.2；儲蓄沿著圓柱體高度)示意圖(摘自[4])，徑向儲蓄解析模式地下水由外環往內儲蓄；軸向儲蓄解析模式由底部往上儲蓄。

3.3.1 徑向儲蓄

假設水於圓柱體之儲蓄沿著圓柱體半徑方向，由外環往內儲蓄，當地下水慢慢進入圓柱體，且越來越多的水充滿圓柱體的外環，則未充水的半徑將隨時間增加而逐漸減小，假設圓柱體高度為常數，則以下方程式可計算時間 t_1 至時間 t_2 之儲蓄量：

$$V_{avail} = (\pi r_{t_1}^2 b - \pi r_{t_2}^2 b) \eta_{cyl} \quad (3-32)$$

V_{avail} 為時間 t_1 至時間 t_2 可行之儲蓄量， r_1 為時間 t_1 時水之儲蓄半徑， r_2 為時間 t_2 時水之儲蓄半徑， η_{cyl} 為圓柱體內之孔隙率。

時間 t_1 至時間 t_2 之流入量為：

$$V_{in} = \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt \approx Q_{t_1} \Delta t \quad (3-33)$$

V_{in} 為時間 t_1 至時間 t_2 可行之流入量， Q_{t_1} 為時間 t_1 時流入量， Δt 時間段。

由質量守恆與流體連續方程式， V_{in} 須相等於 V_{avail} ，可得下式：

$$Q_{t1}\Delta t = (\pi r_{t1}^2 b - \pi r_{t2}^2 b)\eta_{cyl} \quad (3-34)$$

由式(3-34)求解半徑

$$r_{t2} = \sqrt{r_{t1}^2 - \frac{Q_{t1}\Delta t}{\pi b \eta_{cyl}}} \quad (3-35)$$

將式(3-35)代入式(3-31)得：

$$Q_{t2} = 2\pi K b \frac{\phi - \phi_0}{\ln \left(\frac{\sqrt{r_{t1}^2 - \frac{Q_{t1}\Delta t}{\pi b \eta_{cyl}}}}{R} \right)} \quad (3-36)$$

Q_{t2} 為時間 t_2 時流入量。

以式(3-31)為初始條件，在每一個演算時間段很小時，可由式(3-36)逐一計算下一時間段的入流量。

3.3.2 軸向儲蓄

假設水於圓柱體之儲蓄沿著圓柱體高度方向，由底部往上儲蓄，當地下水慢慢進入圓柱體，且越來越多的水充滿圓柱體的底部，則未充水的高度將隨時間增加而逐漸減小，假設圓柱體半徑為常數，則以下方程式可計算時間 t_1 至時間 t_2 之儲蓄量：

$$V_{avail} = (\pi r^2 b_{t1} - \pi r^2 b_{t2})\eta_{cyl} \quad (3-37)$$

V_{avail} 為時間 t_1 至時間 t_2 可行之儲蓄量， b_1 為時間 t_1 時可儲蓄高度， b_2 為時間 t_2 時可儲蓄高度， η_{cyl} 為圓柱體內之孔隙率。

時間 t_1 至時間 t_2 之流入量為：

$$V_{in} = \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt \approx Q_{t1}\Delta t \quad (3-38)$$

V_{in} 為時間 t_1 至時間 t_2 可行之流入量， Q_{t1} 為時間 t_1 時流入量， Δt 時間段。

由質量守恆與流體連續方程式， V_{in} 須相等於 V_{avail} ，可得下式：

$$Q_{t1}\Delta t = (\pi r^2 b_{t1} - \pi r^2 b_{t2}) \eta_{cyl} \quad (3-39)$$

由式(3-39)求解可儲蓄高度：

$$b_{t2} = b_{t1} - \frac{Q_{t1}\Delta t}{\pi r^2 \eta_{cyl}} \quad (3-40)$$

將式(3-40)代入式(3-31)可得：

$$Q_{t2} = 2\pi K \left(b_{t1} - \frac{Q_{t1}\Delta t}{\pi r^2 \eta_{cyl}} \right) \phi - \phi_0 \ln\left(\frac{r}{R}\right) \quad (3-41)$$

Q_{t2} 為時間 t_2 時流入量。

以式(3-31)為初始條件，在每一個演算時間段很小時，可由式(3-41)逐一計算下一時間段的入流量。

3.4 利用解析解驗證隧道充滿水時間計算結果

解析模式(analytical model)之目的為估算處置場封閉後充滿水所需之時間，並檢核數值模式是否存在根本的誤差。根據上述解析解，隧道流量隨時間之變化即可計算而得，因此，充滿水所需時間即可進行估算。利用鏈狀模擬進行處置隧道封閉後之地下水充水時期之地下水流動數值模擬已詳述於第二章。圖3-2為SILO處置隧道充水期間地下水入流量變化(暫態)數值模擬與解析解計算結果，Analytic No.1為徑向儲蓄之解析解計算結果，Analytic No.2則為軸向儲蓄之解析解計算結果。根據圖3-2可知解析解預測結果與數值模式計算結果相當接近，亦即數值模擬無根本之錯誤。

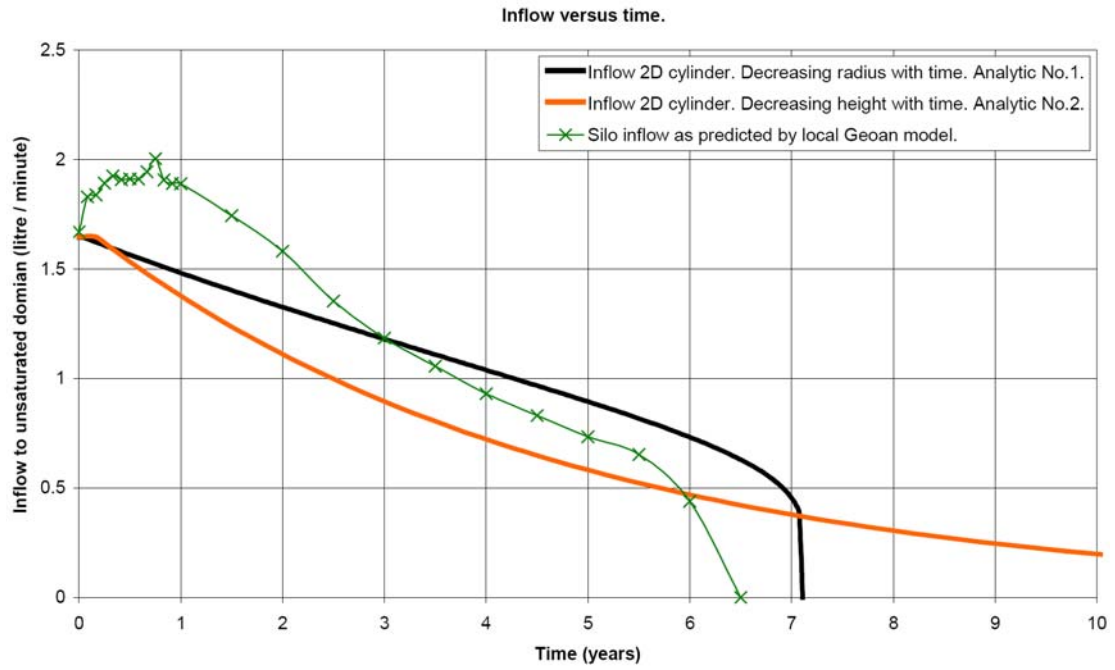


圖3-2 SILO處置隧道充水期間地下水入流量變化(暫態)數值模擬與解析解計算結果(摘自[4])

第四章 國內重要隧道工程水文地質調查、分析與評估案例

本研究蒐集國內雪山隧道以及新永春隧道工程之水文地質調查、分析與評估之案例(傅子仁等人, 1999; 許尚逸與黃俊鴻, 2000; 蔣序元, 2001; 薛文城, 2001a; 薛文城, 2001b; 中華民國大地工程學會, 2002; 傅子仁與薛文城, 2004; 國工局, 2005; 王文禮等人, 2006; 曾何騰與孫荔珍, 2006; 曾大仁等人, 2006; 傅子仁等人, 2006; 張文城, 2006; 劉弘祥與張龍均, 2006[7-20]), 並根據施工經驗, 檢討調查、分析與評估過程之成功與失敗經驗。雪山隧道位於雪山山脈地質區(板岩、硬頁岩、變質砂岩), 新永春隧道則位於雪山山脈與中央山脈東翼地質區(板岩、大理岩與片岩), 地質條件與可能候選場址屬於中央山脈西翼區之脊梁山脈區(板岩為主)雖非完全相同, 然亦仍具參考價值。

4.1 雪山隧道工程水文地質調查、分析與評估案例

4.1.1 隧道工程概況

雪山隧道全長 12.9 公里, 為目前東南亞第一, 世界排名第三長之公路隧道。隧道分南北雙向之主線雙車道隧道以及導坑隧道, 自民國八十年導坑隧道開工, 至民國九十三年全線貫通, 施工期共歷經 13 年。原設計採全線利用隧道鑽掘機(TBM)開挖, 然因施工時多次遭遇湧水事件, 因此部分隧道段採鑽炸法施工。

4.1.2 水文地質調查與隧道設計分析概況

隧道全線位於雪山山脈地質區, 由第三紀輕度變質之沉積岩組成, 因受構造運動作用, 隧道沿線多褶皺, 且為多條斷層切割。隧道施工前, 設計單位經由地表地質調查結果, 即發現帶寬約為 20~100 公尺切割隧道之斷層帶含有豐富的地下水。因此, 施工將遭遇地下水問題於調查、設計階段即已相當清楚, 以導坑隧道設計為例, 考慮 6 條主要斷層及眾多剪裂帶穿過隧道, 排水設計時即已預估通過這些地質弱面經由開挖面滲入隧道之地下水最大出水量可達 3.2cms (劉弘祥與張龍均, 2006) [20]。惟更細緻之水文地質調查、分析與評估在調查工作初期並不容易。

導坑隧道設置之重要目的之一即為地質調查, 對於水文地質調查而言, 導坑施工過程累積之隧道湧水資料更是重要。導坑之另一重要目的即為了能提前排除主線隧道岩盤內之地下水, 並先行對弱帶進行必要之處理, 以降低主隧道施工困難度, 惟可惜施工中後期導坑進度並未超前主隧道過多, 而使得導坑設置效果打了折扣。隧道完工後, 對於雪山隧道水文地質概況之瞭解, 已遠超過施工前。因此, 以下將根據國工局(2005)之研究報告[14], 介紹雪山隧道之水文地質概況,

並將焦點鎖定在施工中隧道湧水紀錄以及各種事後分析方法與實測結果之比較，以做為未來類似地質條件下，處置隧道長期地下水流量預測之參考，同時亦可作為處置隧道施工湧水量預估之參考。

4.1.3 雪山隧道水文地質分區

依據監造單位所提供雪山隧道導坑湧水區段圖與岩體分類圖，國工局(2005)研究報告[14]建議將雪山隧道分為三個水文地質分區，如圖 4-1 所示。由南洞口至里程約 36K 處劃為一區，主要是石牌背斜構造，為發生高密度湧水及高湧水量之第一區段，涵蓋金盈、上新、四稜及石牌北、北支等斷層，以及金面山段乾溝層、金盈段與上新段及石牌段四稜砂岩。由里程 36K 至石槽斷層之倒吊子向斜構造為湧水密度及湧水量次高之第二區段，涵蓋四稜段乾溝、粗窟與大桶山層。由石槽斷層以西至北口之鶯子瀨向斜構造為湧水密度極低及湧水量很小之第三區段，僅在鶯子瀨向斜構造附近有局部之湧水。涵蓋石槽斷層，下石槽段與坪林段之大桶山、媽岡與枋腳地層。

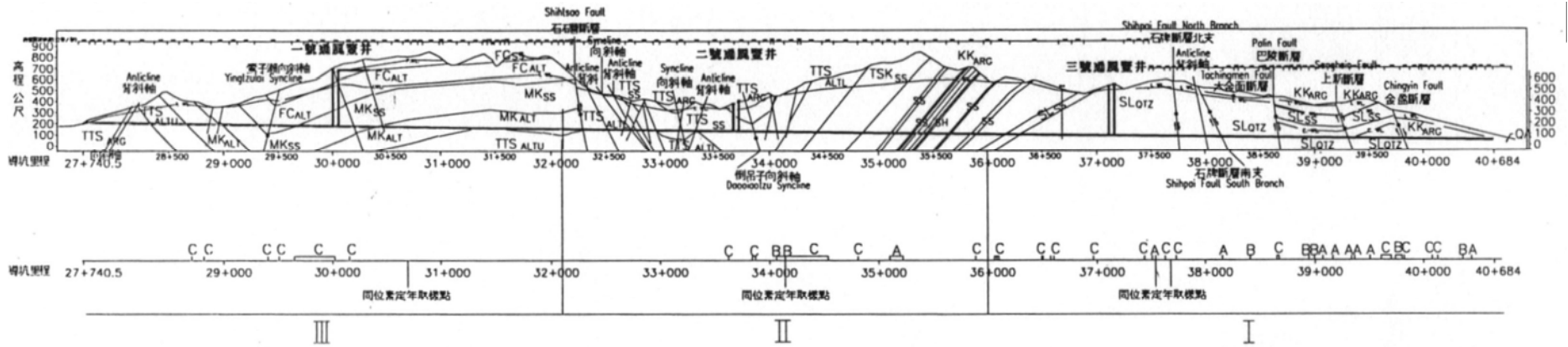
4.1.4 施工中湧水記錄

雪山隧道貫通後，監造單位(中興北宜工程處)將主坑與導坑施工時 36 處湧水地點之湧水狀況整理如表 4-1(國工局，2005) [14]，由表 4-1 可發現，雪山隧道導坑開挖，曾於通過金盈斷層時發生每秒 150 公升之瞬時湧水量(0.2cms)，而南口北上隧道主線亦曾於遭遇上新斷層時發生大規模湧水，因而發生抽坍造成 TBM 遭土石掩埋。其他重要湧水事件亦多與通過構造以及剪裂帶有關。

然而，湧水量並非一固定值，根據世界各地隧道湧水經驗得知，隧道開挖面湧水量多隨時間變化而變化，剛突破開挖面之極大湧水量，稱之為瞬時湧水量或突發湧水量，平衡時之湧水量稱之為長期湧水量或穩定湧水量。從出水時至達到穩定湧水量所需之時間，稱為平衡時間。隧道開挖面湧水量隨時間衰減之現象，可利用圖 4-2 之概念模式，並根據以下理論式計算(國工局，2005) [14]：

$$q_i = q_0 \left\{ 1 - \frac{2R}{\sqrt{2R^2 + 4H^2} - R} \left[1 - \frac{\sqrt{R^2 + 4H^2}}{\sqrt{R^2 + \left(2H + \frac{k}{\lambda}t\right)^2}} \right] \right\} \quad (4-1)$$

其中， q_0 ：不透水層開挖後之瞬時湧水量(m^3/min)， q_i ：時間之湧水量(m^3/min)， k ：含水層之透水係數(m/min)， λ ：裂隙率， R ：湧水最大影響範圍(m)， H ：原地下水面與隧道中心點之水頭差(m)， t ：湧水開始後之時間(min)。



岩層分類	III		II		I			
	岩種段	下石 礫段	礫湖段	四堵段	石牌段	上新段	金龜段	金龜山段
II		II = 13.0 %	II = 36.2 %	II = 8.5 %	II = 2.1 %			
III = 44.0 %	III = 30.0 %	III = 53.0 %	III = 79.7 %	III = 43.6 %	III = 44.4 %	III = 27.9 %	III = 0.4 %	III = 1.4 %
IV = 51.4 %	IV = 40.9 %	IV = 53.0 %	IV = 7.9 %	IV = 34.4 %	IV = 40.9 %	IV = 44.7 %	IV = 33.7 %	IV = 54.2 %
V = 4.6 %	V = 14.6 %	V = 8.3 %	V = 3.9 %	V = 17.7 %	V = 11.2 %	V = 2.3 %	V = 61.5 %	V = 36.8 %
VI	VI = 1.5 %	VI = 2.5 %	VI = 2.2 %	VI = 2.2 %	VI = 3.5 %	VI = 4.1 %	VI = 4.4 %	VI = 7.6 %

LEGEND

- MK_{ALT} 礫湖層之砂岩與頁岩互層
Alternations of Sandstone And Shale of Makang Formation
- TTS_{ALTU} 大橋山層之上部細砂岩與頁岩互層
Upper Part Alternations of Fine Grain Sandstone And Argillite of Istungshon Formation
- TTS_{ARG} 頁岩與細砂岩互層
Argillite Intercalated With Thin Silty Sandstone of Istungshon Formation
- TTS_{SS} 大橋山層之砂岩與頁岩互層
Sandstone Intercalated With Thin Argillite (or Silty Sandstone) of Istungshon Formation
- FC_{SS} 礫湖層之厚層砂岩與頁岩互層
Massive Sandstone Intercalated With Thin Shale of Fangchiao Formation
- FC_{ALT} 礫湖層之砂岩與頁岩互層
Alternations of Sandstone And Shale of Fangchiao Formation
- MK_{SS} 礫湖層之厚層砂岩與頁岩互層
Massive Sandstone Intercalated With Thin Shale of Makang Formation
- SL_{SS} 四堵砂岩之細至中粒砂岩與頁岩互層
Fine to Medium Grain Sandstone Intercalated With Argillite of Saekeng Formation
- SL_{QTZ} 四堵砂岩之厚層石英岩與頁岩互層
Massive Quartzite Intercalated With Coaly Shale of Saekeng Formation
- TTS_{ALTU} 大橋山層之下部細砂岩與頁岩互層
Lower Part Alternations of Fine Grain Sandstone And Argillite (or silty sandstone) of Istungshon Formation
- TSK_{SS} 粗層砂岩之細粒砂岩與頁岩互層
Fine Grain Sandstone Intercalated With Argillite of Tsuku Formation
- KK_{ARG} 乾溝層之厚層頁岩
Massive Argillite of Kankou Formation
- Fault or Shear Zone
- Formation Boundary
- Syncline or Anticline Axis

A: 湧水量 > 100 L/S
 B: 湧水量 50 ~ 100 L/S
 C: 湧水量 10 ~ 50 L/S

圖 4-1 雪山隧道之水文地質分區與湧水地點(摘自[14])

表 4-1-1 雪山隧道開挖面地盤湧水狀況分佈與計算結果比較表(摘自[14])

編號	位置	里程	湧水量	地質狀況	抽坍處理概況	計算結果	
						初始水頭差 (m)	瞬時湧水量 $q_0(1/s)$
1	導坑 鑽炸段	40K+525.7	0.5 l/s	4m 破碎帶	40m ³ 噴凝土封面,H型鋼加固及鑽設排水孔	40	7.7
2		40K+445.9	100 l/s	30cm	2m ³ ,處理概況同上	45	118.7
3		40K+365.6	65 l/s	裂隙	100m ³ ,鋼肋、噴凝土、H型鋼、灌漿回填	80	25.5
4	導坑 TBM 段	40K+138.5	11-32 l/s	<50cm	開挖迂迴隧道	110	32.0
5		40K+083	20-40 l/s (40K+107~109.4 曾遭遇湧水)	<50cm	開挖迂迴隧道	130	22.6
6		40K+017	初期 2.5-5 l/s 後 期 6.7-8.3 l/s	10cm (凝灰岩)	未抽坍	150	24.3
7		39K+816	25-30 l/s	金盈斷層	開挖迂迴隧道	150	45.6
8		39K+526	85-148 l/s	50cm	開挖迂迴隧道	280	190.7
9		39K+168.7	100-140 l/s	20cm	開挖迂迴隧道	300	204.3
10		39K_079.4	19-150 l/s	10m	無法以迂迴隧道通過,改開挖繞行隧道	300	120.3
11		38K+995	85 l/s	7m 寬	鑽設排水孔	280	103.1
12	導坑 鑽炸段	38K+940	60 l/s	層間泥縫	抽坍面堆砌沙包並埋設排水管,改由繞行隧道向前開挖	280	103.1
13		38K+670	水量大,無法量測水量及水壓	1.6m 寬	排水及灌漿處理	320	110.1
14		38K650	排水孔最大水量 40 l/s,有水壓	1-1.25m 寬	排水及灌漿處理	320	110.1
15		38K+415	80-100 l/s	0.8-1m(6 m 寬)	堆砌沙包並埋設排水管,堆砌階梯式平台後噴凝土封面,進行鑽灌及排水處理	340	112.0
16		38K+155	100-130 l/s	8m 寬(石 牌斷層北 支)	鑽灌及排水處理	330	111.8
17	導坑 TBM 段	37K+692 ~37K+684± (停機於 37K+684.15)	探查時研判水量 大,有水壓		先進行鑽灌作業,完成後續開挖前進	420	118.9
18		37K+436	10 l/s	15m 寬	開挖迂迴隧道(受困前已先進行鑽灌處理)	410	118.2
19		37K+360	3-5 l/s	7m 寬	開挖迂迴隧道	410	118.2

南口導坑(里程 40K+684~32K+427.5)

表 4-1-2 雪山隧道開挖面地盤湧水狀況分佈與計算結果比較表(摘自[14])

	編號	里程	湧水量	剪裂帶	抽坍處理概況	計算結果		
						初始水頭差 (m)	瞬時湧水量 q_0 (l/s)	
南口北上線	1	39K+545~530	3 l/s	<50cm	造成局部抽坍,封面後加強支撐工	280	52.4	
	2	38K+929	130 l/s	上新斷層	經鑽灌,並以頂帽坑工作坑開挖與處理完成後當 TBM 持續向前開挖仍造成 38K+902 大湧水抽坍致 TBM 遭土石埋沒	280	52.4	
	3	38K+614~605	沿各破裂面大量滲流		僅局部抽坍,未造成大規模抽坍	250	49.4	
	4	37K+280~242	局部 20-30l/s		未造成大規模抽坍	400	59.8	
	5	37K+099	15-50 l/s	2m	大量抽坍並造成後方已完成支撐變形且有人員傷亡。變形段支撐補強,碴堆封面,灌漿及開挖面灌漿排水處理	400	59.8	
南口南下線	1	38K+609~599	高水壓層	2m 寬	鑽灌處理	260	50.6	
	2	37K+078~056	10-15 l/s		未造成抽坍	400	59.8	
	3	37K+002.5	30 l/s		抽坍後,施作碴料擋牆並埋設排水管後進行灌漿作業	390	59.4	
32K+427.5)南口導坑 (里程 272K+742.1~	1	28K+715.8~719.8	≤ 9 l/s	層面控制 (<50cm)	未抽坍	150	38.0	
	2	28K+816~821	20-50 l/s	節理之薄泥縫 (<50cm)	未抽坍	150	38.0	
	3	29K+507	50 l/s	鶯子瀨向斜	加厚噴凝土,H型鋼及鋼管加強支撐分三階段錐體灌漿	200	43.5	
	4	30K+150	8 l/s	層面	未造成大規模抽坍	390	58.4	
井增闢工作面 北上線,二號豎	1	33K+162~154	滲水	<50cm	回填噴凝土,鑽設排水孔	86.2	99.1	
	2	33K+154~132	7-10 l/s(33K+132 達 1000 l/s)	數十公分 (<50cm)	同上	86.2	99.1	
	3	33K+620	40-70 l/s	>1m	80-90m ³ ,排水,堆砌碴堆擋牆並埋設排水管,鑽灌處理	96.2	110.6	
程 27K+296.7~)	北口北上線(里	1	29K+064~102.5	3-5 l/s	鶯子瀨向斜東翼	未造成抽坍	84	96.6
下線 北口南	1	28K+960	2-6 l/s	鶯子瀨向斜軸部及東翼	局部小規模坍落	84	96.6	

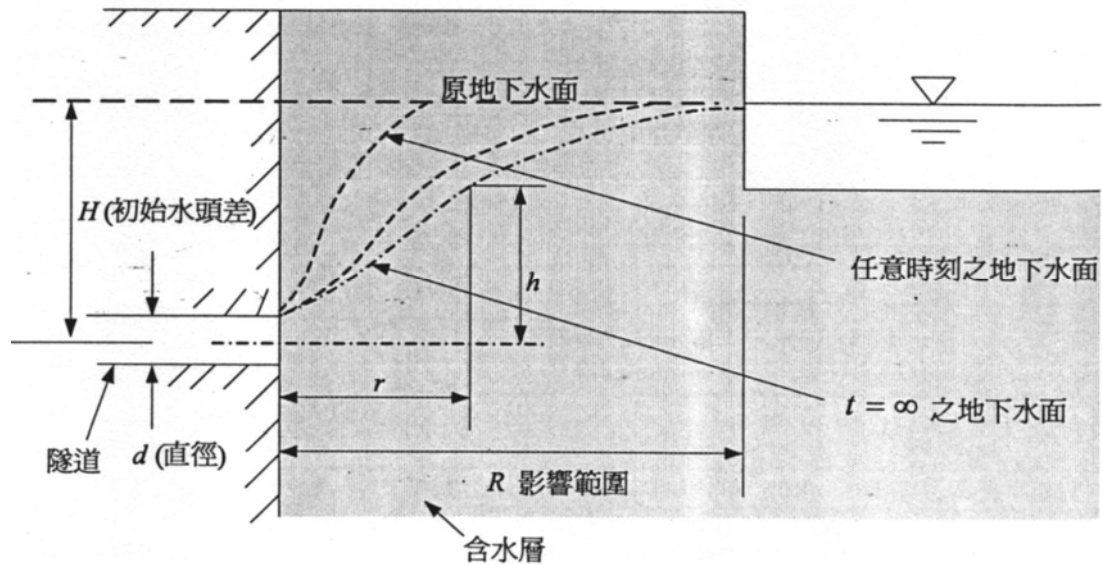


圖 4-2 隧道開挖面地下水之流出模式(摘自[14])

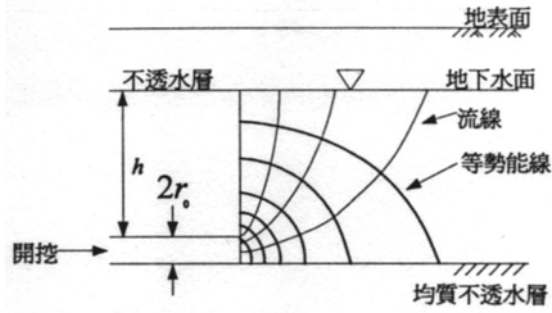
4.1.5 瞬時湧水量推估方法與實測值之比較

瞬時湧水之推估，對於隧道工程施工相當重要，惟此一湧水量估計並不容易。國工局(2005) [14]以滲流公式估計雪山隧道導坑之異常湧水地點瞬時湧水量，隧道開挖面之瞬時湧水量，可利用如圖 4-3 靜水壓狀態隧道鑽穿含水層垂直界面之流網以及下式計算：

$$q_0 = k \cdot h \cdot \frac{n_f}{n_e} \cdot l \quad (4-2)$$

其中， k ：透水係數(m/sec)， n_f ：流線之切割數目， n_e ：等勢線之切割數目， l ：湧水斷面的橫向寬度 $= 2r_0$ (m)， h ：水頭差(m)。

以隧道開挖斷面積為 $2r_0 \times 2r_0 = 2m \times 2m$ 之導坑來計算，在水頭差 $h = 100m$ 之條件下，若以透水係數 $k = 10^{-2}cm/sec$ (反算所得雪山隧道岩盤之透水係數值)依上式以及圖 4-3 即可計算得瞬時湧水量約為 $0.66m^3/min$ 。將雪山隧道導坑之斷面積，以一等值正方形取代，即可計算瞬時湧水量與水頭差之關係。若將雪山隧道導坑施工時三十六處異常湧水資料，對照里程，找出原始地下水位或壓力水位，配合反算所得之透水係數，即可計算得各湧水地點之瞬時湧水量，結果見表 4-1。圖 4-4 顯示瞬時湧水之實測值與計算值之比較。根據圖 4-4 可發現湧水計算值較實測值為大，這是因為工地所量測之所謂“瞬時”湧水量，都是在開挖面出水後某段時間所量的湧水量，並非真正的瞬時湧水量，因此計算值偏大是合理的。



$$q_0 = k \cdot h \frac{n_f}{n_e} \cdot l$$

- k : 透水係數(m/s)
- n_f : 依流線切割之網格數
- n_e : 依等勢能線切割之網格數
- l : 透水斷面之厚度(= $2r_0$)
- h : 水位差

圖 4-3 均質含水層中隧道湧水初期流量之估算(h - q_0 關係) (摘自[14])

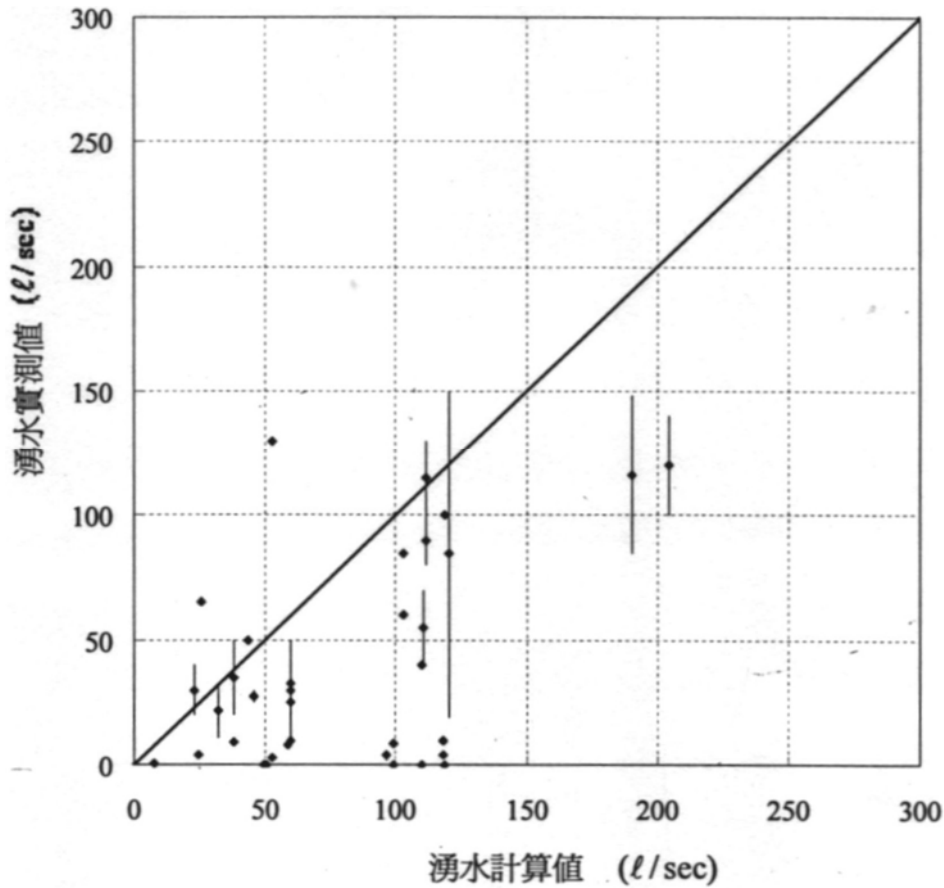


圖 4-4 雪山隧道瞬時湧水量實測與計算值之比較(摘自[14])

4.1.6 隧道長期湧水量推估方法之比較

第二章與第三章曾完整說明處置隧道流量預測之數值分析法以及利用解析解方式進行流量預測之驗證。以雪山隧道為例，恰提供一次本土隧道範例，用以

驗證隧道長期流量各種推估方法之合適性。國工局(2005) [14]利用貫通時湧水量推估法、經驗法、水文地質類比法以及數值分析法，推估雪山隧道完工後，可能之長期湧水量，並與實測值進行比較，摘要說明如後：

依貫通時湧水量推估

雪山隧道貫通時全線(包括兩個主坑與一個導坑)總湧水量約為 0.6 cms (至 93 年 2 月)，其中北口約 0.15 cms，南口約 0.45 cms。根據日本鐵路隧道湧水資料的統計結果發現隧道貫通後數年至數十年後之長期湧水量約為隧道貫通時湧水量之 50%~80%，隨著年降雨量的變化，約有 20%~30%的變化。因此可推估雪山隧道完工後之長期湧水量約在 0.48~0.30 cms 之間。

經驗法

依據石井政次與佐久間文彥(1973,1977；間接引用自國工局(2005)) [14]對日本全國主要鐵路隧道（273 個案例）之長期湧水量所做的調查分析結果，統計出長期湧水量與隧道長度之關係為：

$$q = 0.14\ell^{1.8} \quad (4-3)$$

其中 q (m^3/min) 為長期湧水量， ℓ (km) 為隧道長度，相關係數為 0.53。利用統計資料中湧水量較大之 30 個隧道案例來統計，其平均關係式為：

$$q = 4.0\ell^{0.32} \quad (4-4)$$

若為簡化計算式，可取

$$q = 0.10\ell^2 \quad (4-5)$$

之簡易經驗式進行隧道長期流量預估。惟上述經驗公式離散性頗大。以雪山隧道長度計算，上述三式之計算結果分別為 9.98，16.64，9.07(m^3/min)，也就是 0.17，0.28，0.15(m^3/sec)，與貫通時之湧水量約 0.6(m^3/sec)所推估的長期湧水量下限值 0.3(m^3/sec)相較，以經驗式(4-4)較為準確。表 4-2 為國工局(2005) [14]蒐集得日本 30 個湧水量較大隧道流量資料，摘錄作為參考。

表 4-2 日本 30 個長期湧水量較大的隧道案例(摘自[14])

No.	線名	隧道名稱	長度(m)	年	長期湧水 m ³ /min	比湧水量 m ³ /min/km	地質	覆土厚 (m)	開挖面最大 湧水量 (m ³ /min)	全湧水量 (貫通時) (m ³ /min)	缺水問題的對象
1	東海道	丹那	7804	大 12 昭 9	72.0	9.23	安山岩、集塊岩、火山砂	140~570(220)	134.5	100.8	丹那盆地一帶的井戶、湧泉、溪谷水
2	上越	新清水	13500	昭 42	40.8	3.02	花崗閃綠岩	100~1200(550)	5.8	46.5	入口部一部份的溫泉湧泉
	北宜高	雪山	12900	民國 94	28.8~18	1.40~2.23	四稜砂岩、硬頁岩	200~650(300)	9.0	36.0	
3	肥薩	矢岳	2096	大 10	20.0	9.28	輝石安山岩			15.0~20	覆土淺，地表的溪谷水流入
4	山陽新	六甲	16200	昭 46	16.5	1.02	花崗岩	150~450(180)	4.0	18.0	芦屋水源的溪谷水，其他部份井戶、湧泉
5	上越	清水	9702	“6	14.5	1.49	閃綠岩	1200 (600)	6.0	32.8	沒發生特別問題
6	山陽新	福岡	8488	“48	13.3	1.57	綠色片岩	100~450(200)	20.0	14.0	犬鳴川一帶，西坑口附近井戶、溪谷水
7	“	新關門	18714	“48	12.0	0.64	中生層	30~350(120)	3.0	16.0	藤谷，棕野附近井戶渴減水
8	東海道新	北鄉山	5170	“39	10.8	2.09	安山岩、tf	20~200(100)	6.0	16.8	真鶴町水源渴水
9	東北新	葦王	11175	“51	10.2	0.89	安山岩、熔岩、集塊岩	100~400(200)	4.5		幾乎全區的井戶、湧水、水田用溪谷水
10	北陸	北陸	13870	“37	9.1	0.66	古生層	50~500(150)	14.0	16.8	一部份井戶、溪谷水渴水
11	日田彥山	釋迦岳	4379	“30	9.1	2.08	安山岩、凝灰岩	540 (340)	5.0	18.0	---
12	山陽新	北九州	11747	“48	8.5	0.72	礫岩、頁岩、花崗岩	20~370(70)			井掘，大葦，上津役的井戶減水
13	“	安芸	13030	“48	7.6	0.58	花崗岩	80~400(150)	10.0		大多田，乃美偉，雄野井戶渴減水
14	高山	官	2080	“8	7.5	3.61	石英斑岩、流紋質 tf			12.2	---
15	浦上	長崎	6170	“46	7.0	1.13	安山岩、凝灰岩	20~400(70)	3.5	11.8	上部盆地底部，現川周邊減水
16	指宿	山川	1060	“33	6.7	6.32	安山岩、凝灰岩	15			---
17	信工 3 期(4 期)	水路	15600	“26(46)	6.6	0.42	第三、四紀層	60			(3 期二程的渴水更嚴重)
18	神岡	割石	2677	“40	6.4	2.39	第三紀砂礫	40			---
19	東海道新	新丹那	7958	“39	6.1	0.77	安山岩、凝灰角礫岩	140~570(220)	3.1	7.9	舊丹那一時渴水，復原後再度渴水
20	岩德	中山	1410	“9	5.3	3.76	花崗岩	40			---
21	神岡	茂住	3310	“38	5.1	1.53	第三紀砂礫	30			---
22	山陽新	大平山	6640	“48	5.0	0.75	黑色片岩、一部份礫岩	120~560(200)			入口的一部份井戶
23	北陸	親不知	4536	“40	4.9	1.08	花崗斑岩	30~100 (60)			溪谷水、湧泉的枯竭
24	石北	石北	4329	“7	4.9	1.13	古生層、粘板岩、片岩	300 (130)			---
25	北陸	浦本	2680	“43	4.6	1.72	第三紀砂礫	80~190 (80)			上部水田、湧泉
26	山陽新	埴生	3409	“48	4.6	1.33	花崗岩	15~110 (50)			井戶、湧泉的枯竭
27	“	五日市	6585	“48	4.5	0.68	“	60~160 (80)	1.4		井戶的渴減水
28	高山	釣鐘	1003	“5	4.4	4.39	古生層	40 (25)			---
29	東北	塩釜	1214	“19	4.3	3.55	第三紀砂礫	40 (25)			---
30	根室	新狩勝	5790	“40	4.2	0.73	第三紀	280 (150)			---

水文地質類比法(高橋法)

高橋法(Takahashi method)為日本學者高橋彥治所提出(石井政次,1978,間接引用自許尚逸與黃俊鴻,2000) [8],該法假設隧道湧水之水位洩降與抽水井情況類似,隧道湧水發生時隧道上方會產生水位洩降(圖 4-5),根據地下水非穩定流理論,不同距離之水位洩降有如下之關係:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{r}{R} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4-6)$$

其中 R 為在不考慮降雨補助時,由於隧道湧水所形成的水位洩降,在某一切面上之影響範圍半徑值,亦稱為湧水影響半徑:

$$R = \sqrt{6k_t \cdot H} \quad (4-7)$$

式(4-7)中之 k_t 為地層平均透水係數

$$k_t = \frac{k \cdot \lambda}{\lambda} \quad (4-8)$$

或

$$k_t = \frac{R^2}{6H} \quad (4-9)$$

其中 k 、 λ 分別代表地層的透水係數及孔隙率。

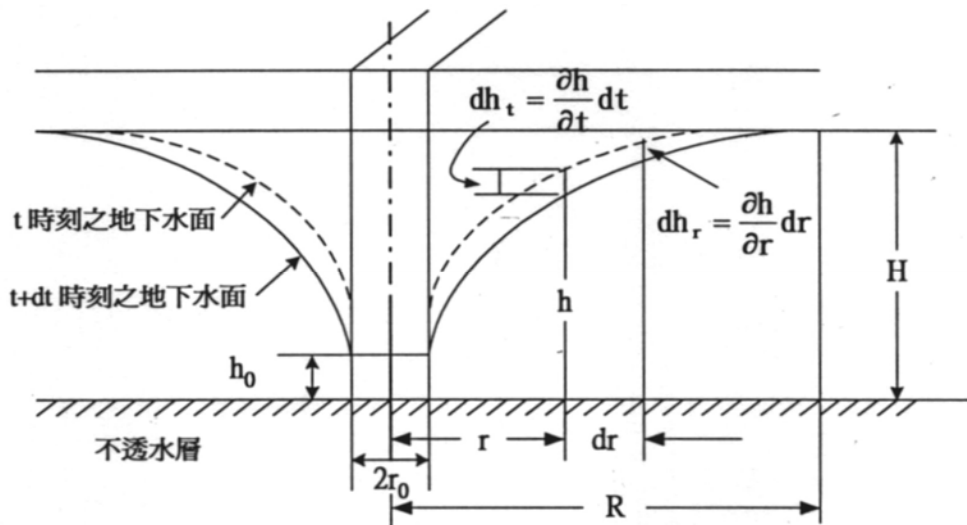


圖 4-5 抽水井出水與水位洩降示意圖(摘自[14])

考慮距隧道中心 r 距離之微小長度 dr ，在 dt 時間中在水位洩降區域內所流失的水量為：

$$\lambda \cdot dr \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \cdot dt = \lambda \cdot dr \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \cdot dt \quad (4-10)$$

上式積分即可得水位面洩降所流入之水量 Q_n 。若考慮降雨時之單位面積補助水量為 q_s ，則在 r 範圍內流入隧道之總水量 Q 可分再加上因降雨所補助之水量 Q_s ，以及穩態(達西定律)流入之水量 Q_t 三者總和，如下式：

$$Q = Q_n + Q_s + Q_t = \lambda \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \cdot \frac{r^2}{2R} + q_s \cdot r + h \cdot k \cdot \frac{\partial h}{\partial r} \quad (4-11)$$

平均透水性係數 k_t 之求取，可分為兩種方法。一為利用水文地質調查所獲得的地層透水性係數 k 及孔隙率 λ ，代入式(4-8)計算，得出平均透水性係數 k_t ，惟相關係數取得不易；再者則是利用水文類比關係，求出平均透水性係數 k_t 。一旦得出地層平均透水性係數 k_t ，即可以計算出湧水影響半徑 R ，再代入式(4-9)求出該水位洩降情況下之湧水量。另外，亦可利用高橋法之地形類比關係求出隧道長期之持續湧水量。高橋法計算步驟如下：

A. 計算流域平均透水性係數 k_t

取隧道通過附近的流域範圍，其面積為 $A \text{ km}^2$ ，主流路直線長度為 $L \text{ km}$ 。平均流路幅寬為 $2R=A/L \text{ km}$ 。繪出流域等高線，分別標出右分水嶺(H_R)、河床(H_b)、左分水嶺(H_L)的高度，如圖 4-6 所示。將主流路分為 n 段，計算出每段之高程差 $h_i = H_{Ri}$ (或 H_{Li}) - H_{bi} ，與流路平均高程差 $H_m = \sum h_i / 2n$ 。則該流域之平均透水性 k_t 即透過水文類比方式以式(4-9)計算而得。

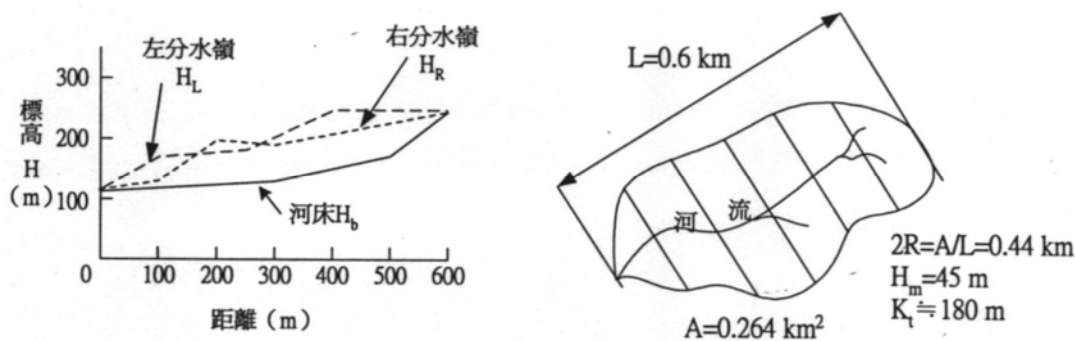


圖 4-6 計算流域平均高程與流路幅寬(摘自[14])

B. 湧水流入範圍之計算與修正

由算出的流域平均透水性 k_f 值代入式(4-7)，可得高程-流域寬幅之 H-R 二次拋物標準曲線。依水文地質條件取適當距離分段，繪出同比例的流域橫斷面圖，再將標準曲線之原點和隧道重疊，則 H-R 曲線與地表面之交點在平面圖上之投影，即為隧道湧水流入範圍，見圖 4-7。連接每段範圍，即是隧道在此流域之全部湧水流入範圍。

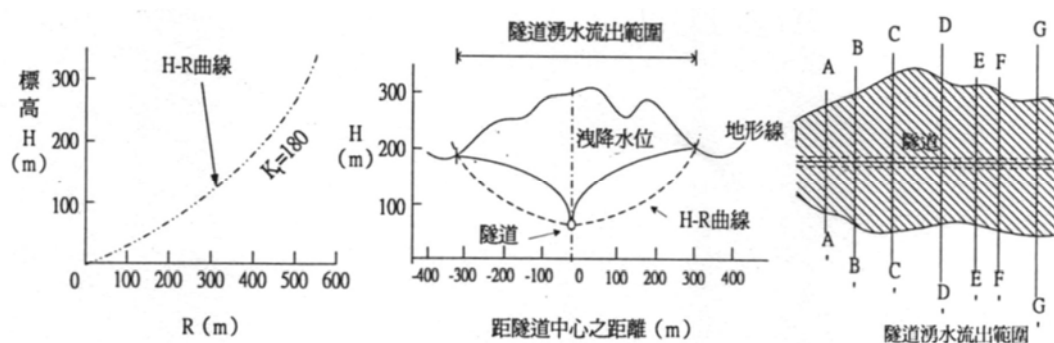


圖 4-7 計算隧道湧水流入面積(摘自[14])

前述之流入範圍是假定為均勻地質條件下所得結果，在實際應用上則需考慮水文地質條件（如節理、斷層等）加以修正。例如：砂礫層或破碎帶發達之含水層，則流入範圍增大；平行隧道之不透水斷層，則會形成阻水層。

C. 計算湧水量

湧水流量 Q_e 又稱基底流量，是指該流域中長久流出之地下水注入河谷形成之流量。該流域之湧水流量 Q_e 除以總流域面積 A ，即可得出該流域之湧水比流量 q_e 如下：

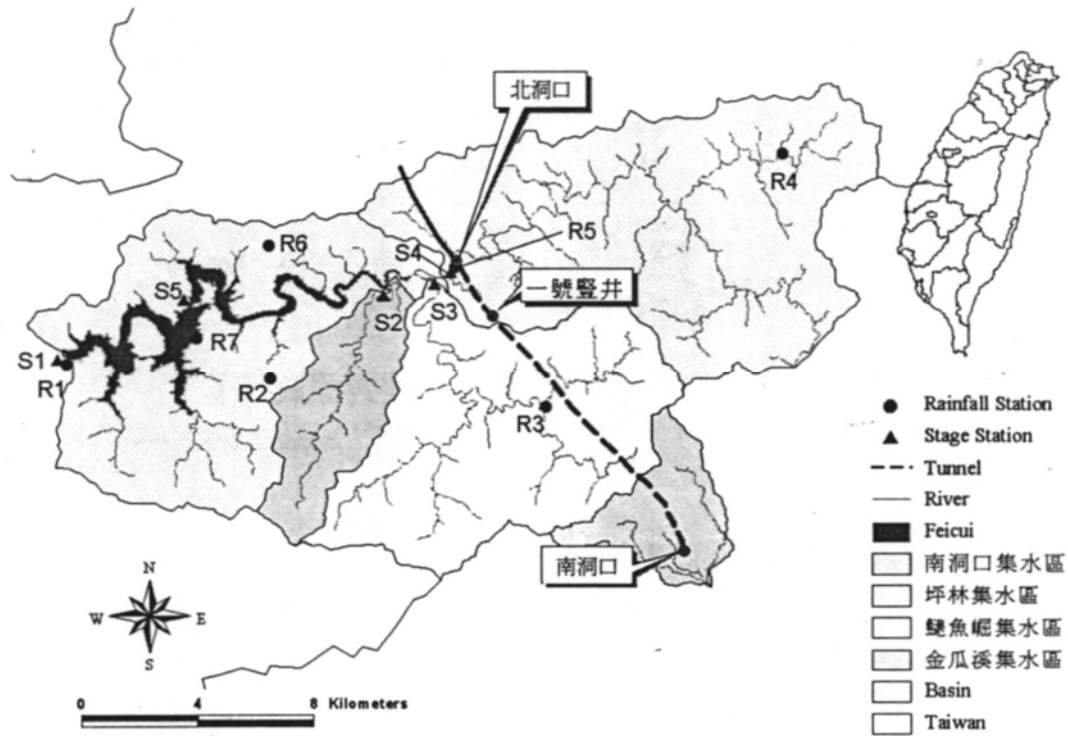
$$q_e = \frac{Q_e}{A} \quad (4-12)$$

步驟 B 求出的流入範圍 A ，乘以該流域的湧水比流量 q_e ，即得出隧道在該流域的持續湧水量。若隧道橫跨若干個流域，則需考慮不同流域對湧水量之貢獻，隧道之總湧水量 Q 分段計算如下：

$$Q = \sum q_i \cdot l_i \cdot (R_L + R_R) = \sum q_i \cdot A_i \quad (4-13)$$

其中： q_i ：流域湧水比流量， l_i ：流域中主要流路之直線長度， $R_L + R_R$ ：等流域面積下之平均流路幅寬。

雪山隧道通過相關流域如圖 4-8 所示。其中，金瓜溪流域之平均高程、流路幅寬及平均透水係數如圖 4-9 所示。里程 30K+013 之隧道地形橫剖面與湧水流入範圍如圖 4-10 所示。依據高橋法所得雪山隧道之湧水流入範圍如圖 4-11 所示。將湧水流入範圍再乘以各流域之湧水比流量(由各流域水文站觀測資料計算)即可估得雪山隧道長期湧水量約為 0.34 cms，如表 4-3 所示。此計算值接近依貫通時湧水量所推估之長期湧水量範圍 0.48-0.30 cms。



(S1：翡翠，S2：金瓜溪，S3：鱧魚溪，S4：坪林，S5：乾溝，R1：翡翠，R2：九芎根，R3：碧湖，R4：太平，R5：坪林，R6：十三股，R7：乾溝)

圖 4-8 翡翠水庫與雪山隧道通過相關流域(摘自[14])

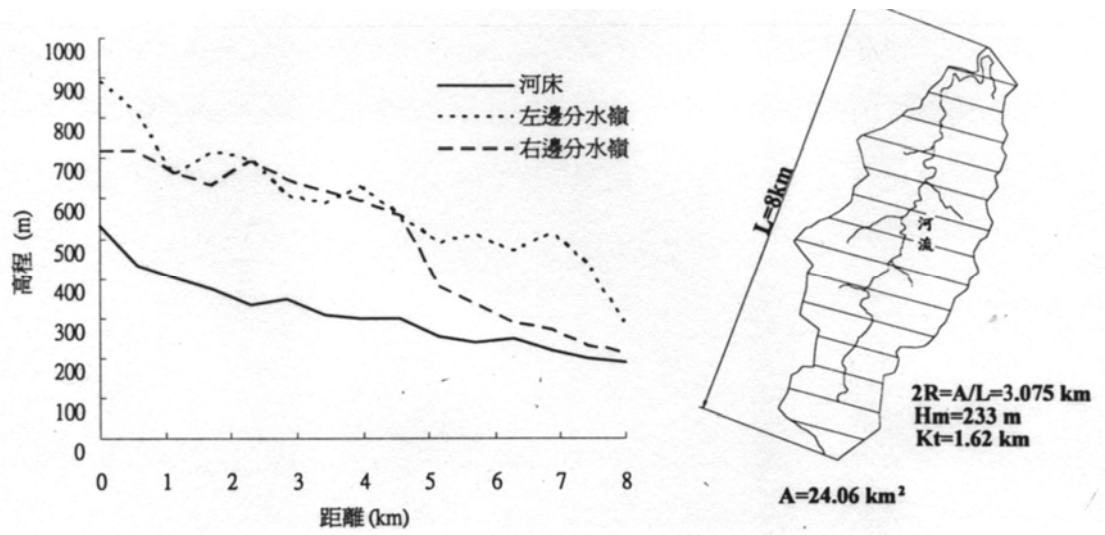


圖 4-9 金瓜溪流域平均高程與流路幅寬(摘自[14])

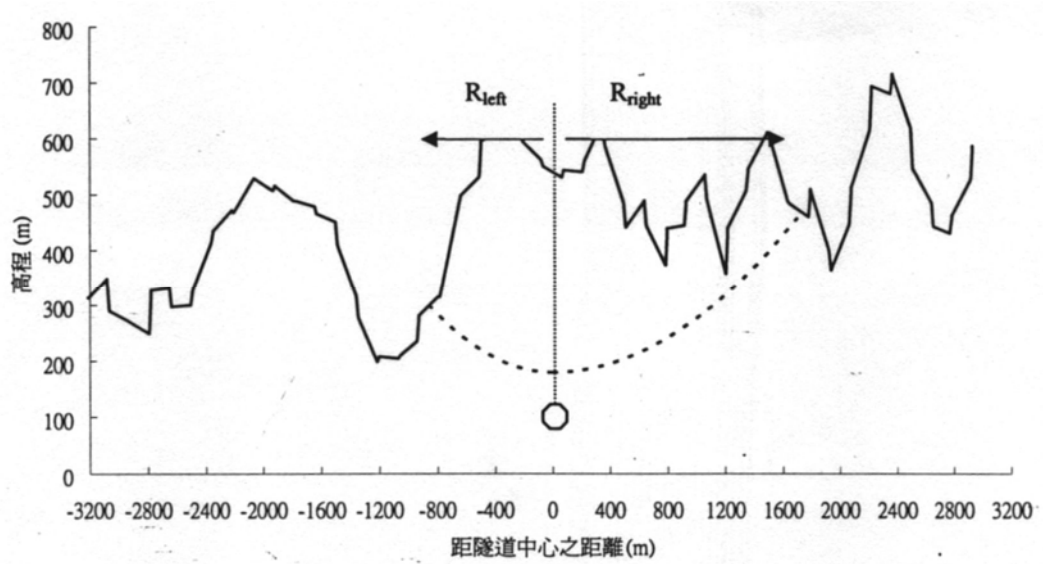


圖 4-10 里程 30K+013 之隧道地形橫剖面與湧水流入範圍(摘自[14])

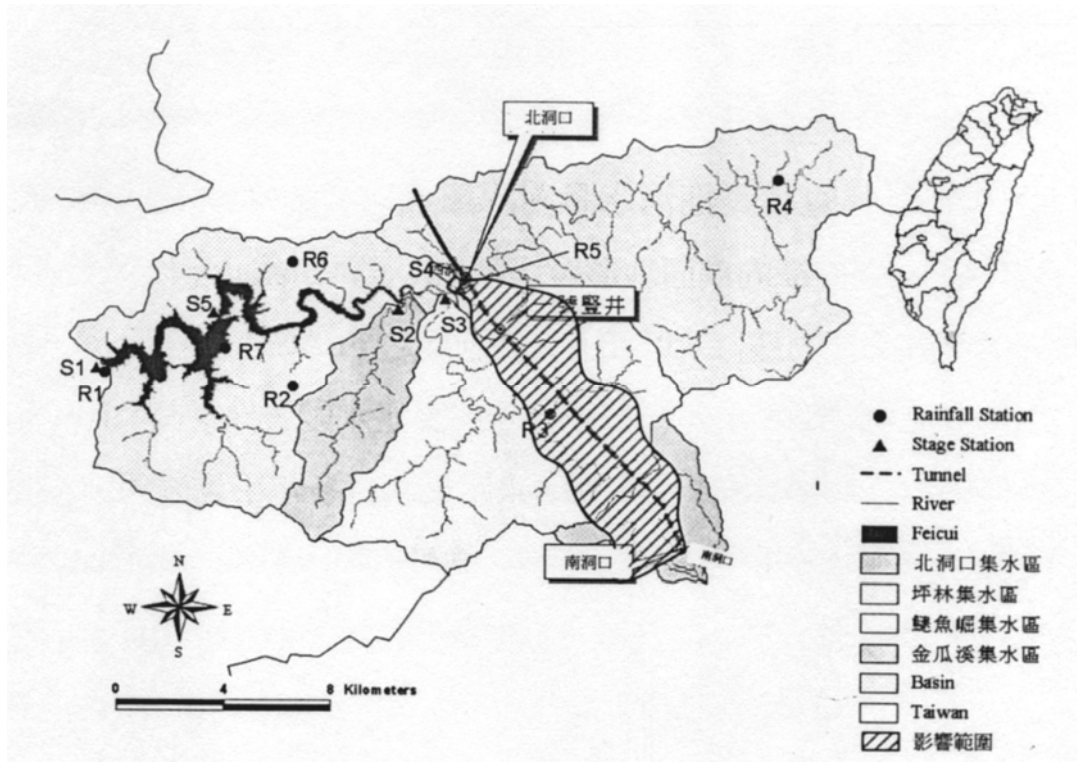


圖 4-11 雪山隧道之長期湧水流入範圍(摘自[14])

表 4-3 雪山隧道長期湧水量計算表(高橋法)(摘自[14])

流域劃分 No.	q_e ($\ell/\text{sec}\cdot\text{km}^2$)	長度 Li(km)	$\sum Li$ (km)	流出幅寬 2R(km)	流出範圍 A(km^2)	Q_i (cms)	$\sum Q$ (cms)	單位長度 流量(ℓ/m)
1	17.84	0.498	0.50	0.54	0.27	0.005	0.005	0.009
3	17.48	0.995	1.49	1.34	1.33	0.023	0.028	0.023
4	17.48	0.995	2.49	2.60	2.59	0.045	0.073	0.045
5	7.69	0.995	3.48	3.31	3.29	0.025	0.099	0.025
6	7.69	0.995	4.48	3.63	3.61	0.028	0.126	0.028
2	7.69	0.995	5.47	2.88	2.86	0.022	0.148	0.022
7	7.69	0.995	6.47	2.74	2.73	0.021	0.169	0.021
8	7.69	0.995	7.46	3.70	3.68	0.028	0.198	0.028
9	7.69	0.995	8.46	3.71	3.69	0.028	0.226	0.029
10	7.69	0.995	9.45	3.40	3.38	0.026	0.252	0.026
11	7.69	0.995	10.45	3.58	3.56	0.027	0.279	0.028
12	7.69	0.995	11.44	3.38	3.36	0.026	0.305	0.026
13	7.69	0.995	12.44	3.38	3.37	0.026	0.331	0.026
14	7.69	0.498	12.94	1.98	0.99	0.008	0.339	0.015

數值分析法

國工局(2005) [14]報告中，利用有限差分程式 FLAC2D 模擬雪山隧道之瞬時湧水與長期湧水現象。分析剖面選取里程 30K+267 之隧道橫向剖面至兩側河谷為止作為兩側邊界，剖面位置如圖 4-12 所示，分析網格及邊界條件如圖 4-13 所示，兩側河谷為定水頭邊界，上部地形面有定量之降雨入滲，入滲量依水庫集水區多年平均降雨入滲量估計。為簡化計算，岩體假設為等向性，其透水係數採用中興顧問公司之反算值 0.0001m/s ，為模擬初始地下水位之分佈與施工前地下水位一致，需先進隧道開挖前之穩定地下水位分析，圖 4-14 為穩定時之等水壓線分佈與流場分佈。為簡化分析，三孔隧道等效為一直徑為 8m 之隧道(不考慮襯砌之影響)，圖 4-15 為隧道遠域與近域之網格。隧道開挖後，等水壓力線與地下水位之變化如圖 4-16，近域與遠域流場向量分佈則見圖 4-17，由圖中明顯看出隧道湧水現象以及地下水往兩側河谷補助。圖 4-18 顯示隧道湧水之衰減曲線，由最大之瞬時湧水量 $1.585 \times 10^{-2}\text{cms/m}$ 隨時間衰減至穩定湧水量 $3.58 \times 10^{-3}\text{cms/m}$ 。由此可計算出開挖隧道長期湧水對原先地下水對兩側河谷流量補助之影響，此計算例之影響為 5.91%。

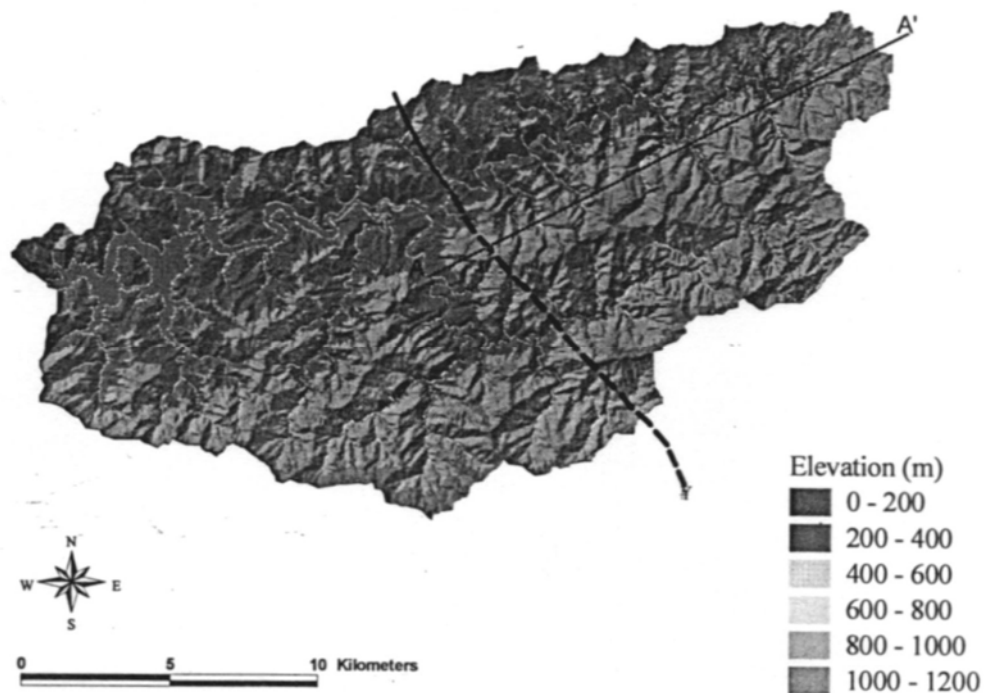


圖 4-12 分析模式之剖面線位置(摘自[14])

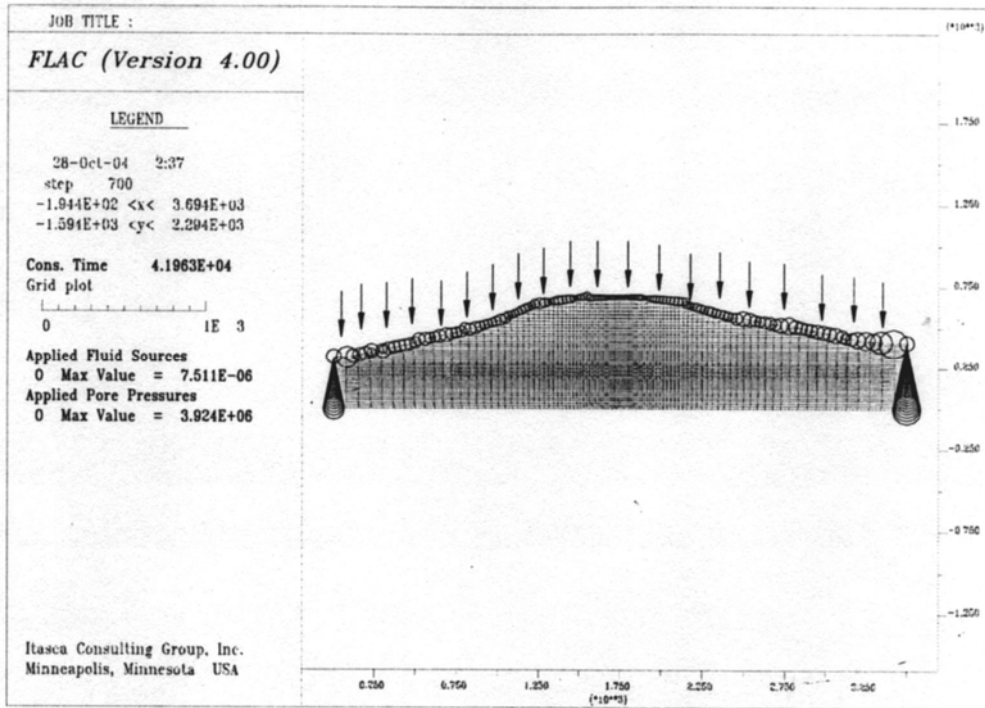


圖 4-13 有限差分網格及邊界條件(摘自[14])

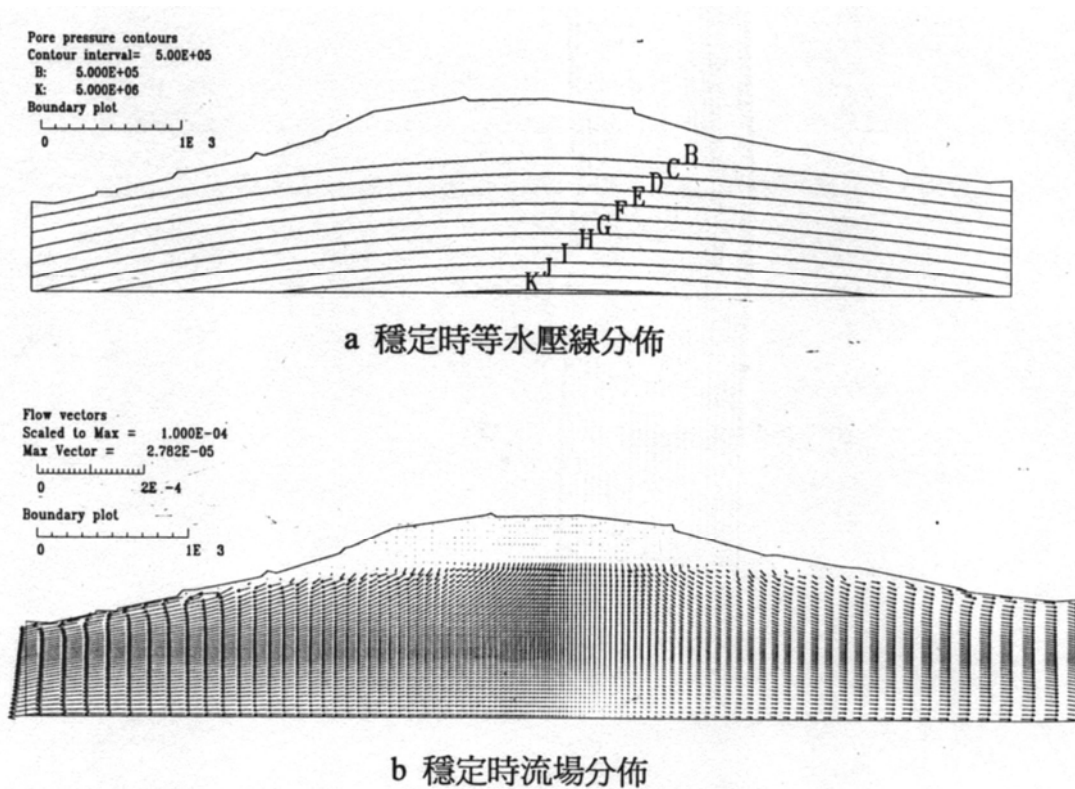
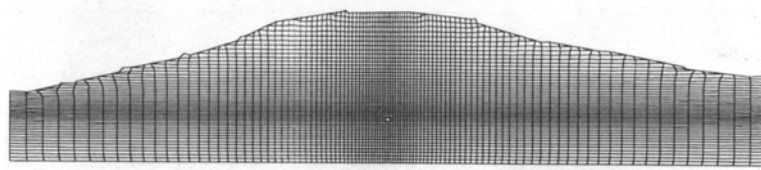
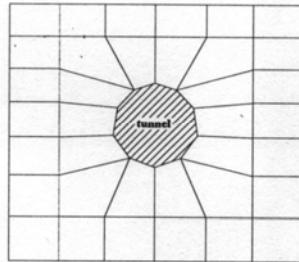


圖 4-14 穩定時之等水壓線分佈與流場分佈(摘自[14])



a 隧道遠域網格



b 隧道近域網格

圖 4-15 直徑 8m 隧道之遠域與隧道近域之網格(摘自[14])

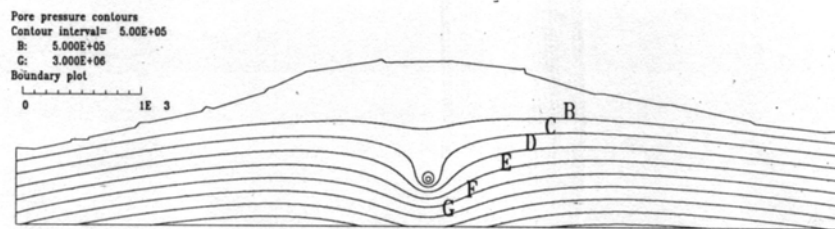
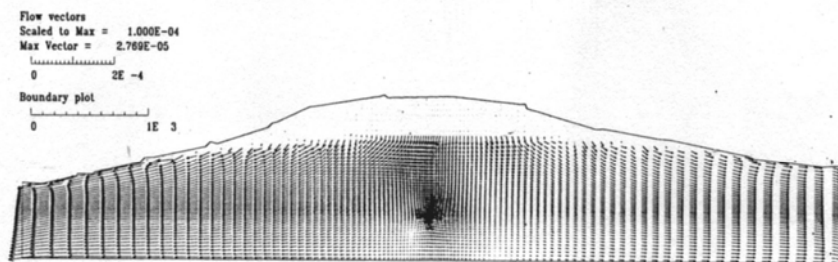
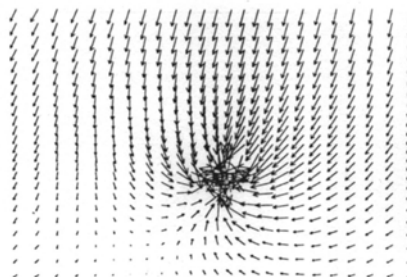


圖 4-16 隧道開挖後等水壓線分佈(摘自[14])



a 隧道開挖後遠域流場分佈



b 隧道開挖後近域流場分佈

圖 4-17 隧道開挖後流場分佈(摘自[14])

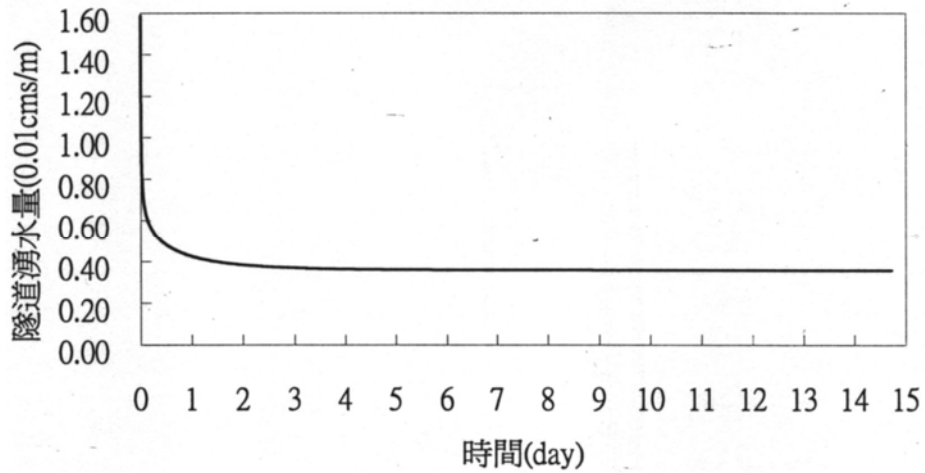


圖 4-18 隧道湧水之衰減曲線(摘自[14])

國工局(2005) [14]研究報告亦進行參數影響分析，利用數值分析以瞭解瞬時與長期湧水量，受到初始水位高程、岩體透水係數、隧道開挖斷面大小、有無架設噴凝土襯砌之影響。參數影響分析結果如下：

A.開挖斷面大小之影響

固定初始地下水位與岩體透水係數，測試隧道半徑為 17.2m、10m、8m 及 5m 四種情況。其中半徑 8m 隧道為模擬兩主坑加一導坑之等值大圓面積=201.2m²。其湧水衰減曲線之比較，如圖 4-19，由圖 4-19 可發現，開挖面積越大湧水量越大。

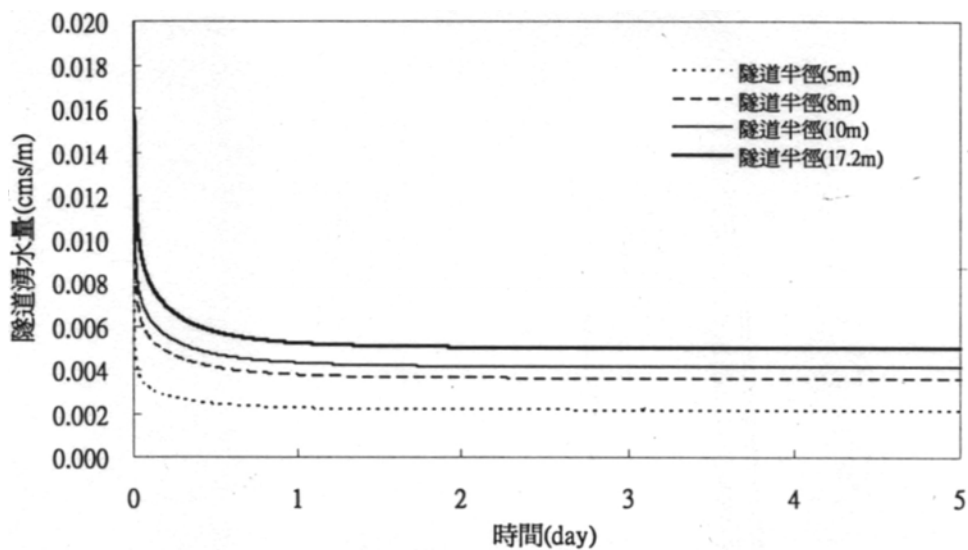


圖 4-19 不同隧道半徑下之湧水衰減曲線(摘自[14])

B. 岩體透水係數之影響

依據反算各湧水地點之透水係數介於 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3} \text{m/sec}$ 間，因此取 $k=1 \times 10^{-5} \text{m/sec}$ ， $k=1 \times 10^{-4} \text{m/sec}$ ， $k=1 \times 10^{-3} \text{m/sec}$ 進行分析。湧水衰減曲線如圖 4-20 所示，分析結果顯示隧道湧水量隨透水係數的增加而增加。

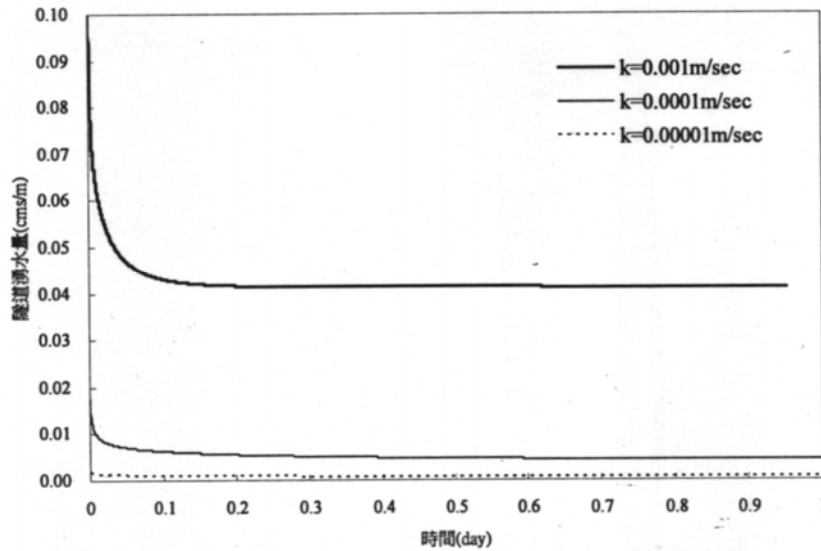


圖 4-20 不同岩體滲透係數下之湧水衰減曲線(摘自[14])

C. 隧道噴凝土襯砌之影響

假設隧道有 20cm 之噴凝土襯砌，其透水係數分別為 1.67×10^{-7} 、 1.67×10^{-8} 、 $1.67 \times 10^{-9} \text{m/sec}$ 。湧水衰減曲線如圖 4-21 所示，分析結果顯示隧道湧水量隨噴凝土襯砌透水係數的減小而變小。

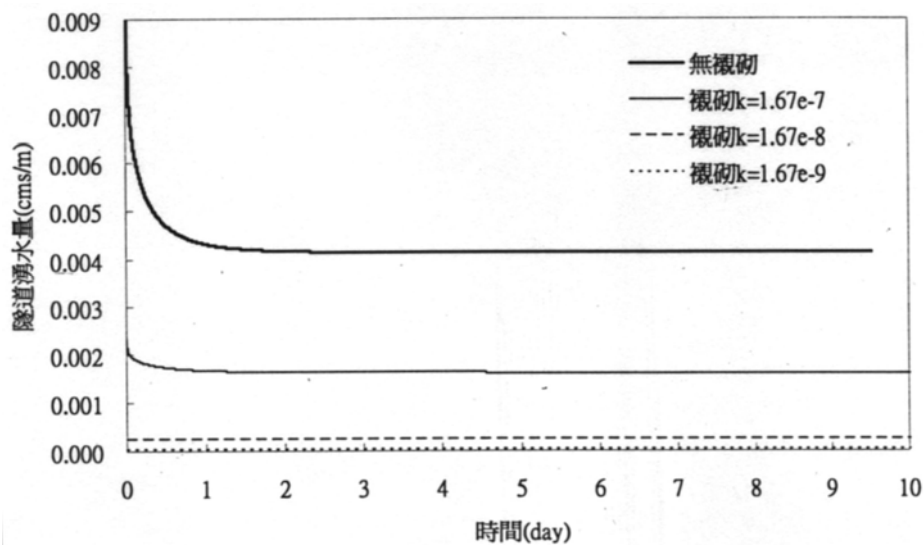


圖 4-21 不同襯砌滲透係數下之湧水衰減曲線(摘自[14])

D. 初始地下水水位面之影響

假設五種不同地下水水位面，隧道與其上方水位面垂直距離分別為 465m(水位面 V)、356m(水位面 IV)、270m(水位面 III)、243m(水位面 II)及 214m(水位面 I)。湧水衰減曲線如圖 4-22 所示，分析結果顯示隧道湧水量隨地下水水位面的降低而變小。

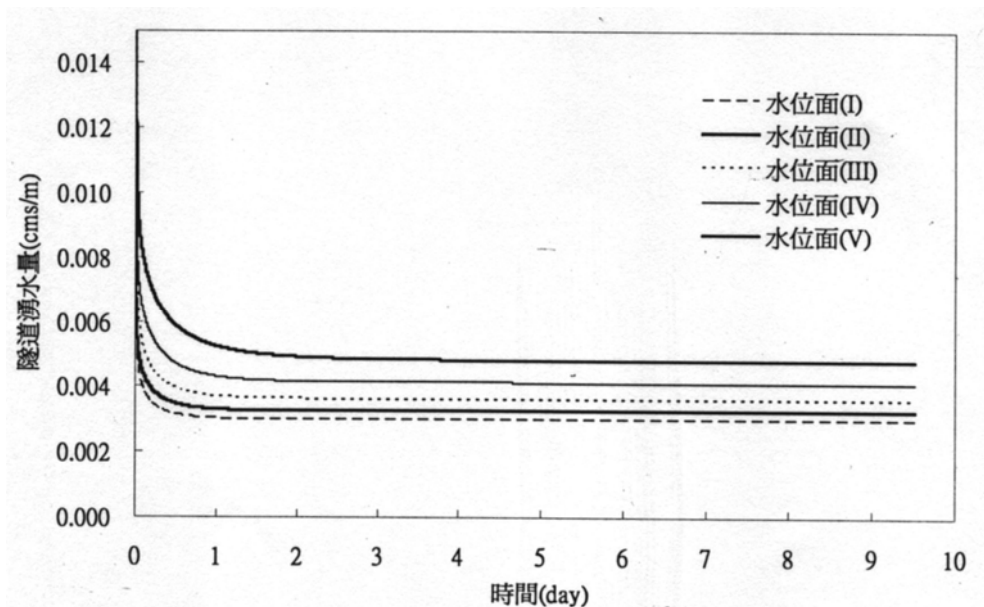


圖 4-22 不同初始水位面下之湧水衰減曲線(摘自[14])

若以分析剖面之原始地下水位，等值大圓面積 $A=201.2\text{m}^2$ 為準及考慮施築襯砌之影響，其瞬時湧水量為 15.9 l/sec/m ，長期湧水量為 1.0 l/sec/m 。若湧水破碎帶為 1m 寬度，則瞬時湧水量為 15.9 l/sec ，與實測瞬時湧水量級 $10\sim 150\text{ l/sec}$ 相當，長期湧水量則為之長期湧水量直接乘以隧道長度，應乘以湧水段長度。若以第六類岩盤所佔的比例估計，長度約為全長的 3%，約為 387m。將單位公尺(m)之長期湧水量直接乘以 387m，所得隧道長期總湧水量約 $0.387\text{m}^3/\text{sec}$ 。與以貫通時湧水量所估計之長期湧水量 $0.48\sim 0.30\text{m}^3/\text{sec}$ 相去不遠。

4.2 新永春隧道工程水文地質調查、分析與評估案例

4.2.1 隧道工程概況

新永春隧道位於蘇澳與東澳之間(圖 4-23)，為東部鐵路雙軌化與電氣化工程中關鍵工程之一。同時，新永春隧道為台灣東部鐵路改善計畫擴建雙軌工程中之第三長單線隧道，全長 4,433 公尺(原規劃全長 4,460 公尺)，線形約呈南北走向，位於舊永春隧道之西側，兩者平均間距 400 公尺，平均覆蓋厚度為 300 公尺，通

過雪山山脈以及中央山脈地質區之廬山層與大南澳片岩。民國 87 年 10 月 24 日隧道南口工作面 1,812 公尺處突發湧水，最大湧水量達 $83 \text{ m}^3/\text{min}$ ，在災變處理期間，量測出高達 $50 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 之水壓，此一水壓甚至超過隧道上方岩覆之厚度所能產生靜水頭壓力，為考量高水壓及水量洩降施工之可行性，最後決定改線。事變處理過程陸續獲得取相當多的地質及水文資料，相當值得參考。



圖 4-23 新永春隧道(紅線)及永春隧道位置圖(藍線)(摘自[12])

4.1.2 水文地質調查與隧道設計分析

鑒於舊永春隧道於開挖時所遭遇施工困難與瓶頸，如地質狀況不佳導致開挖機具大約未能充分發揮效能及通過溪流下方造成隧道內大量湧水等，新永春隧道於設計時即已進行詳細之地質調查、水文調查與路線研擬工作(王文禮等人，2006) [12]。設計階段之探查項目有：地球物理探測、地表地質調查、地質鑽探、溪流流量調查與地下水位監測等。調查結果顯示(曾何騰與孫荔珍，2006) [17]，新永春隧道自北而南遭遇地層為板岩、長石砂岩夾變質礫岩、千枚狀板岩與長石質砂岩互層、綠色片岩、大理岩、角閃岩及石英雲母片岩。主要弱面走向為北70度西，向南傾斜60度。隧道通過之處有三條斷層，北側為位於板岩中東西走向之F斷層，其為北側板岩系與南側大南澳片岩之界線斷層。另有南側三條南北走向位於綠色片岩與大理岩中之1、2、3號斷層，其均順著東澳北溪河谷發育，屬性為張裂性平移段層，因此成為地下水滲入之重要通道。隧道開挖經此三條斷層時預估會有湧水之狀況發生；另隧道南端200公尺及洞口部分位於未膠結之河階堆積及沖積層，開挖時易發生崩塌、大量湧水，且對洞口附近之邊坡穩定性有不利之影響。

為求開挖工作能於安全、穩定中進行，依整體地質探查之結果，新永春隧道之設計理念如下所述(中華民國大地工程學會，2002) [12]：

1. 針對通過斷層破碎帶與湧水區段，提出一系列之探測方法與開挖輔助工法，如：前進探查孔、TSP探測、開鑿迂迴坑、隔幕灌漿及噴漿封面等，期使未知之地質狀況能予以掌握。
2. 為提升外支撐之效益，並減少隧道開挖後應力集中之現象，本隧道斷面形狀為類橢圓形，與一般鐵路隧道馬蹄型斷面不同。
3. 預期南端之湧水量大，故研擬於隧道之西側興建一斷面約 8m^3 之排水隧道，以排除大量之地下水。
4. 隧道南端位於河階堆積及沖積層，故先於隧道周圍($26\text{m}\times 15\text{m}\times 13\text{m}$)進行山地固結灌漿，以事前地盤改良之方式，將可能之危險因子降低。

雖然新永春隧道施工困難一如事先預料，且隧道設計與施工已有相當之準備，卻仍然發生湧水災變，因此可以了解水文地質對隧道開挖之高度重要性，同時也凸顯了設計階段實不易完整掌握複雜構造岩盤之水文地質概況。因此，水文地質調查、分析與評估工作應隨施工而持續進行。以下關於新永春隧道水文地質特性之說明(蔣序元,2001) [9]，即為災變後進行一系列調查、分析與評估後所獲得之結果。

4.2.3新永春隧道水文地質特性

根據規劃階段地質調查報告(聯合大地工程顧問，1994) [21]、湧水災害後補充地質調查報告(聯合大地工程顧問，2000) [22]、長距離水平鑽探調查報告(三井應用地質株式會社，2001) [23]、湧水災害後新永春隧道與舊永春排水廊道的水量調查紀錄、湧水抽坍記錄、湧水災害後工程進度表、大口徑排水施工計畫書(泰億營造有限公司，2001) [24]、蘇澳站雨量記錄、北迴鐵路完工報告(榮民工程事業管理處，1986) [25]，蔣序元(2001) [9]針對新永春隧道水文地質特性分析說明如下：

由地表地質調查結果推測主坑西側為連續的大理岩帶，由水量與水壓調查結果，大理岩帶湧水特徵是水壓高、水量大且穩定，不受降雨的影響。以水系圖、地形圖以及溪流流量量測記錄，推測新永春隧道內湧水來源在西側，主隧道東側岩盤對湧水之貢獻較微。

根據水平鑽探調查的結果，通過斷層前後水平鑽孔之水量、水壓的變化都很大，顯示斷層對地下水流動影響大。由水平鑽探調查的水壓結果發現，水壓超過

15kgf/cm² 的範圍，最西側與最東側的位置，在通過斷層泥區後水壓開始增加，顯示斷層泥區有良好的阻水性，但在靠近主坑湧水點的位置，在通過斷層泥區前水壓就開始增加，顯示主坑受湧水抽坍的影響，失去了阻水效果。根據地質調查以及數值分析研判，地質構造分佈對地下水文影響甚巨，斷層泥區在大理岩與方綠色片岩間，形成大理岩的阻水層，因隧道開挖引起鬆動失去阻水功能，造成大理岩Ⅱ中的高壓地下水湧出，導致新永春隧道湧水災害。

蔣序元(2001) [9]由數值模擬分析的結果，推測新永春隧道區域的水壓分佈如圖 4-24(a)所示。根據圖 4-24(a)可發現水壓大於 35 kgf/cm² 的區域(紅色)分佈在北方，而存疑斷層東側之大理岩Ⅱ的水壓低於大理岩Ⅲ的水壓，可能的原因是主坑湧水降低南方的水壓，所以大理岩Ⅱ的水壓較低。在綠色片岩中主坑西側的水壓較高，推測是因為主坑湧水抽坍提高地層的透水性，所以高壓的地下水由此流路進入主坑，造成大量的湧水。另基於數值模擬分析結果，推測新永春隧道區域流線網如圖 4-24(b)所示，根據圖 4-24(b)可發現地下水進入主坑的方式大致可分成兩種：(1)直接由西側進入主坑(2)繞過主坑西側的崩坍擾動區，由東側進入主坑。

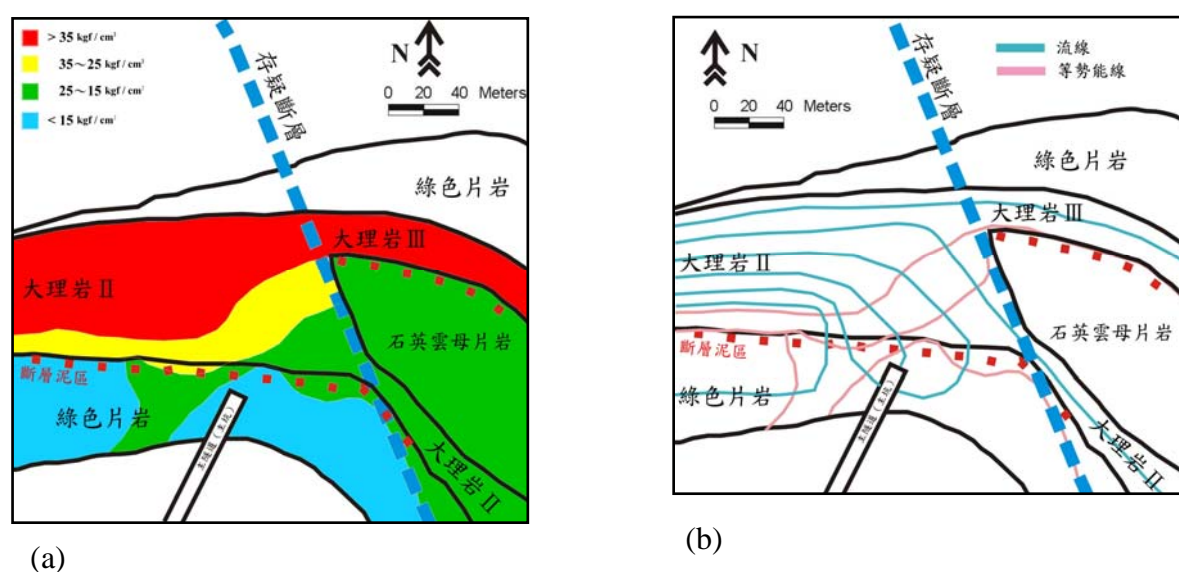


圖4-24 新永春隧道(a)水壓分佈圖與(b)流線網圖(摘自[9])

4.2.4 施工中面臨之湧水問題以及處理方式

新永春隧道經前期詳細之調查與縝密之設計後，施工中於關鍵之南洞口與北側F斷層處均順利通過，惟於民國87年10月24日南口工作面開挖至距洞口1,812

公尺處，覆蓋高度約250公尺，於上半部左側突發大量湧水達 $25\text{m}^3/\text{min}$ ，現場緊急撤離機具、人員，而於10月27日施工人員準備處理湧水狀況時，開挖面又發生大量抽坍，湧水量達 $50\text{m}^3/\text{min}$ ，坍流土石共約 $22,000\text{m}^3$ ，約掩埋110公尺而無法緊急處理，其後湧水量持續上昇，最高可達 $80\text{m}^3/\text{min}$ ，且掩埋範圍持續擴大，於11月7日土石坍掩之隧道長度已達540公尺，此後逐漸趨於穩定。在災變處理期間，量測出高達 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 之水壓，超過隧道上方岩覆之厚度所能產生靜水頭壓力，因湧水量持續維持在 $45\sim 70\text{t}/\text{min}$ 之間且流速甚高，一般機具均無法進入，初期之搶修工作陷於停頓，於是停工討論處理對策。

為減少迂迴坑開挖長度與縮短工期，於12月30日起土石清除，湧水量仍維持約 $45\sim 50\text{m}^3/\text{min}$ (湧水情形詳圖4-25)，至民國88年3月初清理至350m，湧水量出現異常大變化，湧水量紀錄為9日間由 $40\text{m}^3/\text{min}$ 逐日遞減至 $12\text{m}^3/\text{min}$ ，其後1日間再增昇至 $35.6\text{m}^3/\text{min}$ ，又急驟降至 $1.5\text{m}^3/\text{min}$ 再突昇至 $43\text{m}^3/\text{min}$ ，而再度坍流大量土石後又坍回第一次土石坍掩穩定處，湧水量亦曾高達 $56\text{m}^3/\text{min}$ ，約估坍流出土石為 $7,000\text{m}^3$ ，連同第一次坍流出土石總共約 $22,000\text{m}^3$ 。



圖 4-25 新永春隧道湧水情形(摘自[10])

補充地質調查於民國87年底開始展開，於民國88年5月完成(曾何騰與孫荔珍，2006) [17]。為瞭解可能改移路線至東側路段之未開挖段開挖時可能遭遇之突發性湧水風險，並評估此區段之地下水分佈狀況與岩盤完整性，決定除震測外再增加地電阻影像剖面探測工作(Resistivity imaging profile-RIP)，並於民國89年8月完成地電阻影像剖面3,635公尺(圖4-26)、折射震測探查1,380公尺、反射震測探查1,000公尺。補充地質調查作業研判隧道地表西側為地下水主要之供應來源，於主坑西側打設迂迴坑應有排水之效。另由地表溪流之出現與消失，顯示有一地下水路連通至隧道。當湧水量突然減少時，有可能因湧水通路為崩塌材

料堵塞，導致水壓持續上升，而代表有另一次突發性湧水之發生潛能。另外，研判往北區段仍有相當長度為高裂隙且具湧水可能之劣質岩盤。至於崩塌規模與情況之確認，仍需進行水平長距鑽孔探查，以直接取樣崩塌段(斷層帶)之材料與量測水壓及水量。

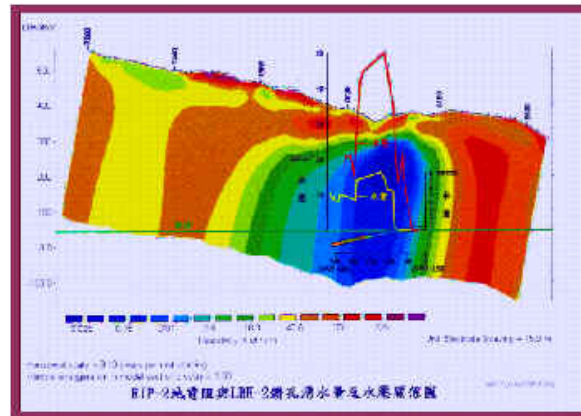


圖 4-26 地電阻探測結果與量測水量水壓比對量(摘自[11])

災變後補充地質調查所進行之水平長距離鑽探累計完成 10 孔，深度為 85.2~427.4 公尺之間，總鑽探深度達 2,100 公尺，期間分別遭遇 35~50kg/cm² 之高水壓與 3~9m³/min 之湧水量(詳圖 4-27、圖 4-28)，由獲取之岩心與湧水層區段與地電阻探測資料比對亦至為吻合(薛文城，2001b[11])。另一方面，水文調查中進行氡元素定年分析發現，水質混有年輕之地下水，但由追蹤劑測試，並未發現直接由上方流域滲入之水，因此研判隧道內之湧水與廣域地下水補助或地下水脈較為密切(薛文城，2001b[11])。



圖 4-27 水平長距離鑽探作業(摘自[11])



圖 4-28、水平長距離鑽探作業孔口出水情形(摘自[11])

依據調查結果獲取地質資料綜合研判分析如下(薛文城, 2001b[11]): (1)隧道內主要湧水係由西側遠處較高之地下水頭提供來源, 非僅由隧道上方地表溪流所滲漏而下, 湧水層大部份為角礫狀或多孔狀之大理岩。湧水壓可高達 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 遠超過相當隧道覆蓋高度之水頭壓力(覆蓋約 260m)。(2)東側湧水區段長度較短, 壓力較低有較佳之水文地質狀況。東側水壓 $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 水量 $10\text{m}^3/\text{min}$, 類似之湧水狀況, 北宜雪山隧道有處理及突破經驗。如改採東側(NE 線)對工程處理應較有信心。(3)主隧道東側之地下湧水量及水壓狀況較西側為低。且主隧道及西側迂迴坑湧水已有相當時日, 應具洩水降壓功能, 惟仍需增作大口徑鑽孔排水以洩降水壓。(4)東側前方確實地質狀況仍需藉由水平長距離鑽探確認。初步顯示湧水區段較短, 湧水壓力及湧水量較小, 水文地質條件較佳。(5)若採取由崩壞之開挖面修復, 將冒極高之地質與工程風險, 採東側繞行應較為安全妥切。經由綜合研判分析, 考量後續施工之可行性、風險性、安全性、經濟性等因素, 決定改移至東側路線施工(圖 4-29), 並將原主坑與西側迂迴坑作為長期排水廊道使用, 以確保改移段之主線不受湧水干擾。

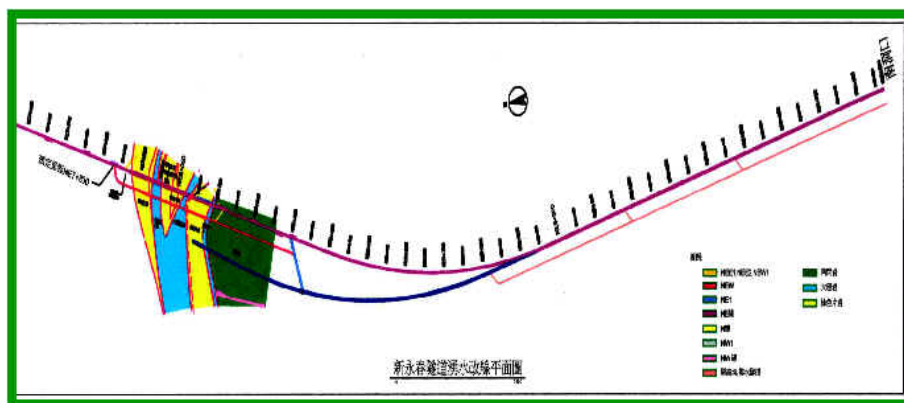


圖 4-29 新永春隧道原路線(藍線)與改線後(紅線)平面配置圖(摘自[11])

由地表補充地質調查及相當數量之水平長距離鑽探等資料研判，已充分瞭解高壓湧水段潛在的地工災害與程度，但此區段之地工特性仍存在諸多不確定性。經評估 NE 東行線突破高壓湧水段採取如下措施(薛文城，2001b[11])以確保開挖能順利進行：1.阻水灌漿。2.補強岩體灌漿。3.施作管幕工法以防斷層段或破碎岩盤崩坍。4.加強鋼支保。5.縮短輪進距離。6.將隧道斷面由馬蹄形改為正圓形。7.NW 迂迴坑繼續進行大口徑排水(4-30)，以收洩水降壓之效。



圖 4-30 大口徑排水洩水降壓(摘自[11])

阻水灌漿之工法選擇為高壓湧水段突破關鍵，經嚴謹評估後決定以熱瀝青灌漿工法進行阻水灌漿，完成阻水灌漿後即施以補強岩體灌漿，再進行開挖。熱瀝青灌漿在歐洲及美國已有超過 100 年之成功經驗。熱瀝青特性包括：灌注於湧水中不會流失；在破碎岩塊含水孔隙中，流動行為類似熔岩，當流動至距灌注點較遠處，漿體逐漸冷卻、黏滯性逐漸增加；熱瀝青擴散滲透除依賴灌注壓力外，與水份接觸時所產生之水蒸氣，亦有助於驅使其滲入岩縫或孔隙。熱瀝青會再融化其表殼(與水接觸部份)，穿透至水蒸氣所形成之空間，而高移動性之水蒸氣所造成類真空空間復吸引瀝青跟隨其移動而前進。熱瀝青需同時配合灌注水泥漿，以控制冷縮及加速冷凝過程。水泥漿之硬化也因熱瀝青而加速，使其不致被水沖失。水泥漿滲入瀝青冷縮空間，強化固結效果，也可防止瀝青材潛變。

4.2.5 瞬時湧水量推估方法與實測值之比較

許尚逸與黃俊鴻(2000) [8]利用 4.2 節介紹之高橋法，進行新永春隧道長其持續湧水量推估，估計結果為每分鐘 20.1 噸，與實測值每分鐘 22 噸相當接近。關於詳細分析過程請參考許尚逸與黃俊鴻(2000) [8]之論文。

第五章 候選場址水文地質特性概述

經由可能替代場址篩選作業，選出四處可能候選替代場址，包括：(1)六號場址（加津林場址）；(2)七號場址（東吉嶼場址）；(3)八號場址（南田南部場址）以及；(4)九號場址（旭海北部場址）。本研究蒐集相關文獻，針對四處可能候選場址之地質條件進行瞭解，並根據區域地質資料，對於影響水文地質較明顯之部份做概略性之說明。

5.1 候選場址位置與相關集水區

四處候選場址中，六號場址（加津林場址）位於大武鄉大竹村；七號場址（東吉嶼場址）位於澎湖縣望安鄉東吉嶼；八號場址（南田南部場址）位於達仁鄉南田村；九號場址（旭海北部場址）位於屏東縣牡丹鄉旭海村。六號場址相關流域為津林溪集水區；八號場址相關流域為達仁溪(又稱楓港溪)、塔瓦溪及南田溪之無名野溪等溪流之集水區；九號場址相關流域為里仁溪(汝奶溪)之集水區。

5.2 六號、八號以及九號候選場址地質概況

根據經濟部地質調查所大武(經濟部中央地質調查所,1993) [26]以及恆春圖幅(經濟部中央地質調查所,1991) [27]，六號、八號與九號等三個場址出露地層為中新世中期潮州層之硬頁岩與板岩偶夾透鏡狀砂岩體(如圖 5-1)，三個候選場址雖然出露之岩性相當單調，然而地層卻受到強烈擠壓變形；受板岩與砂岩互層材料不同，可形成各種不同類型之褶皺。於西部麓山帶，常根據地層之不連續追蹤測繪斷層，於板岩區則因岩性單調、難以追蹤其延伸而常改以褶皺觀點解釋與測繪，至於岩層之不連續則以岩相變化加以解釋(經濟部中央地質調查所,1993) [26]。因此，六號及八號場址所在之大武圖幅中，未見測繪出常被視為重要水力分區(hydraulic conductivity domain)之斷層，並不代表調查者於野外未見斷層，只是在圖幅測繪時決定未納入而已，使用圖幅者不宜過度解釋認為六號與八號場址附近沒有斷層。

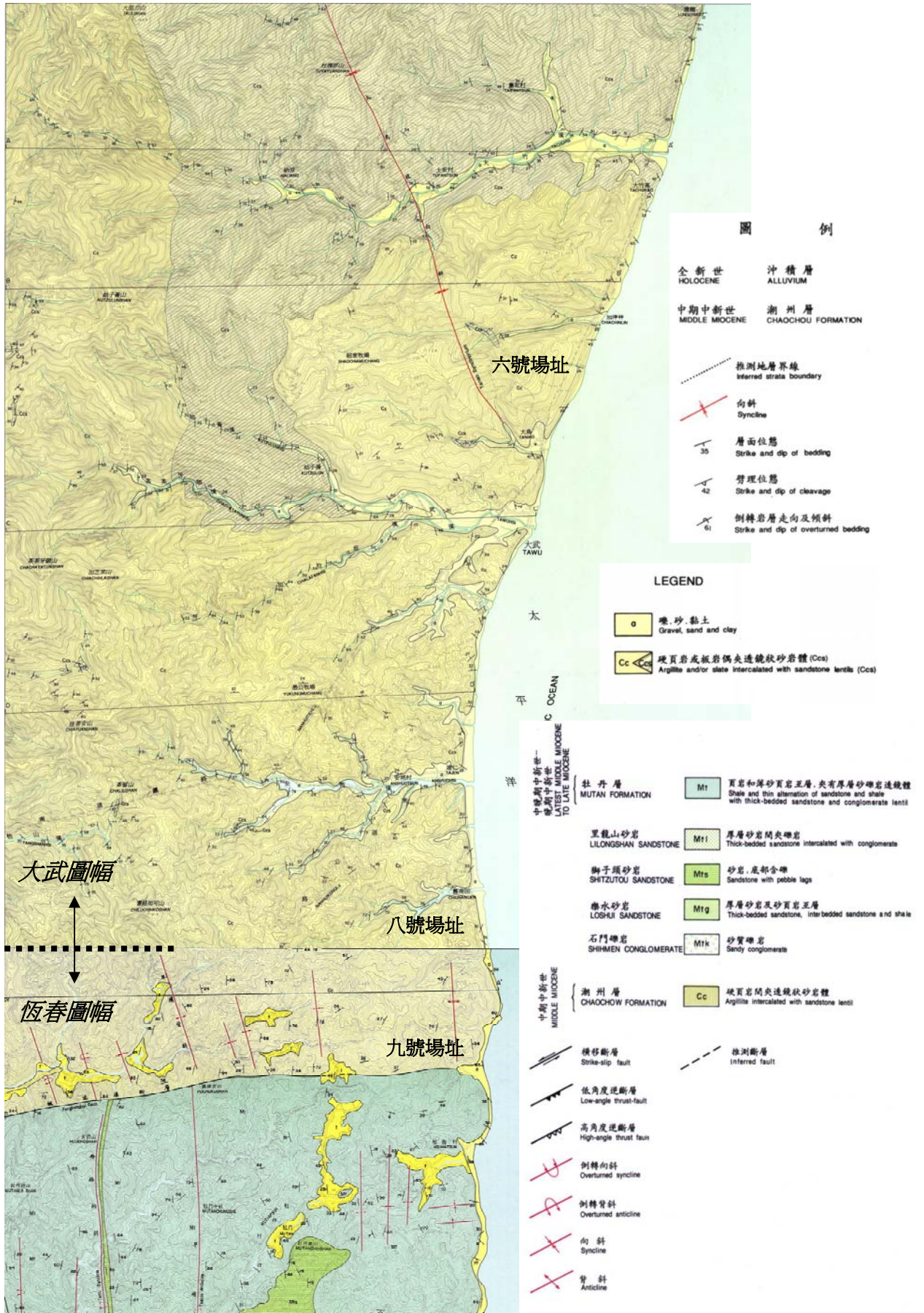


圖 5-1 恆春與大武圖幅(摘自[26,27])，原比例尺 1:50,000

大武圖幅中與六號及八號場址相關之重要構造為大鳥向斜，大鳥向斜為一複向斜，由杜鴉原山往南，經新興社然後延伸至大鳥，全長約 15 公里(如圖 5-1)。大鳥向斜之向斜軸面近乎垂直，向斜軸則向南傾沒，兩翼劈理均往向斜軸部傾斜，岩層位態主要亦向軸部傾斜。恆春圖幅中與九號候選場址相關之重要構造為楓港斷層，由恆春圖幅顯示，楓港斷層緊鄰九號場址南側(如圖 5-1)。楓港斷層北側為中期中新世潮州層，而南側為中晚期至晚期中新世之牡丹層，因此推測楓港斷層北側為升側，且由丹路向斜被錯動之情形研判其兼具左移性質(經濟部中央地質調查所,1991) [27]。惟因靠東側海岸附近並無明顯之斷層現象，因此值得確認其是否存在，若楓港斷層確實存在且緊鄰九號場址，應將其視為該場址之重要水力分區，甚至視為該候選場址重要之水文地質邊界。

關於六號、八號與九號等三個場址之岩盤特性，包括(1)岩石與(2)不連續面，可自胡賢能與詹新甫(1984) [28]針對南迴鐵路沿線進行之調查結果獲得重要資訊，南迴鐵路沿線地質圖如圖 5-2。前述，三個候選場址出露岩層均為潮州層，根據胡賢能與詹新甫(1984) [28]針對南迴鐵路沿線板岩系地層之分段結果(共分六段；L1-L6)，六號場址之岩盤屬於其所稱之 L2 段及 L3 段，八號與九號等兩個場址之岩盤則均屬於 L3 段，關於南迴鐵路板岩系地層 L2 段以及 L3 段之特性分別說明如後：

L2 段(厚塊狀硬頁岩或板岩及少數厚層變質砂岩)

本段整合覆蓋於 L1 段(劈理發達塊狀板岩)之上，因分布範圍廣，岩性於各地略有變異。八號、九號候選場址西側、南北向之菩安山背斜軸附近出露岩層屬於本段上部，主要為厚塊狀硬頁岩或板岩及少數厚層變質砂岩所構成。硬頁岩由暗灰色或深灰色粉砂質泥岩經輕微變質作用形成，硬頁岩間夾薄紋狀細砂岩層，此細砂岩層質地堅緻，有劈理面發育。變質砂岩以層狀細至中粒砂岩為主，間夾薄層硬頁岩或板岩，單一砂岩層底部偶見礫石及泥粒，且顆粒往上逐漸變細，變質砂岩厚度可達 10 公尺以上。往北出露於大武溪(接近六號場址)之 L2 段，變質砂岩含量顯著增加，再往北出露於金崙溪之變質砂岩厚度可增加至 200 公尺以上。L2 段下部常有薄至厚層次雜砂岩出現，薄層次雜砂岩與硬頁岩呈互層狀，常具級層沉積構造及變質造成之片理構造，本段岩層受褶曲作用呈緊密小褶皺。

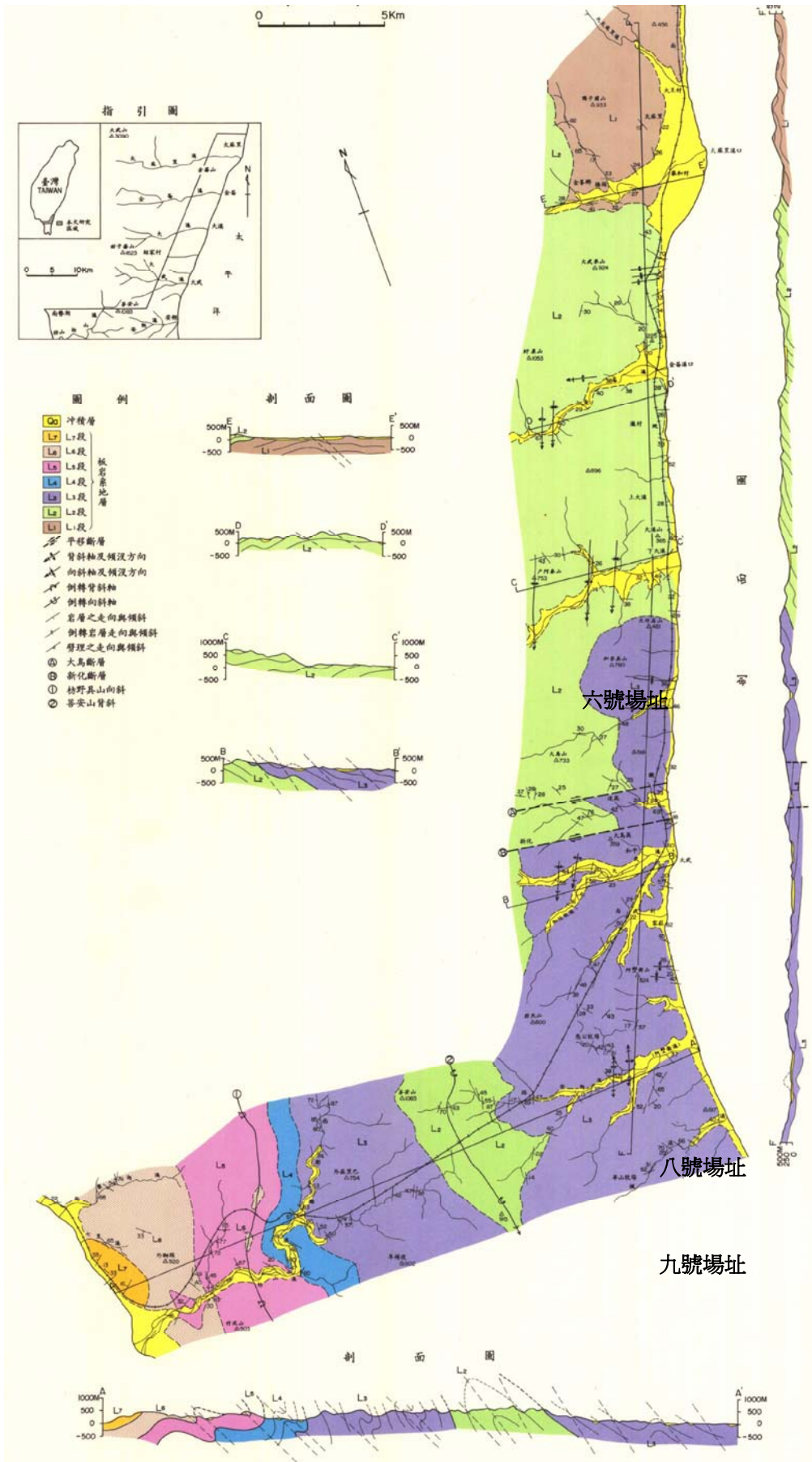


圖 5-2 南迴鐵路沿線地質圖，原比例尺為 1:100,000 (摘自[28])

L3 段(硬頁岩)

本段整合上覆 L2 段，其分界在於一厚層變質砂岩。本段岩層幾乎全由硬頁岩所組成，只有少許變質砂岩夾雜其中。硬頁岩劈理不甚發達，新鮮時呈灰黑色、塊狀、質地緻密；風化後表面受鐵銹染成灰褐色，也常出現洋蔥狀剝理構造。本段岩層受褶曲作用產生之緊密拖曳褶皺相當普遍。六號場址即大致上位於一組東西向之向斜(場址北側)與背斜(場址南側)軸部間。

如前所述，六號、八號與九號等三個場址因受劇烈之構造運動褶曲，岩層之位態變化甚巨，同時，形成許多幅度僅數公尺至數百公尺之褶皺。根據現地量測結果，菩安山背斜東翼(大武以南以及大武至太麻里)之層面位態，經投影分析(圖 5-3)可發現極點散佈非常廣，代表岩層走向變化極大，但因極點多接近中心，故表示地層傾角不大。

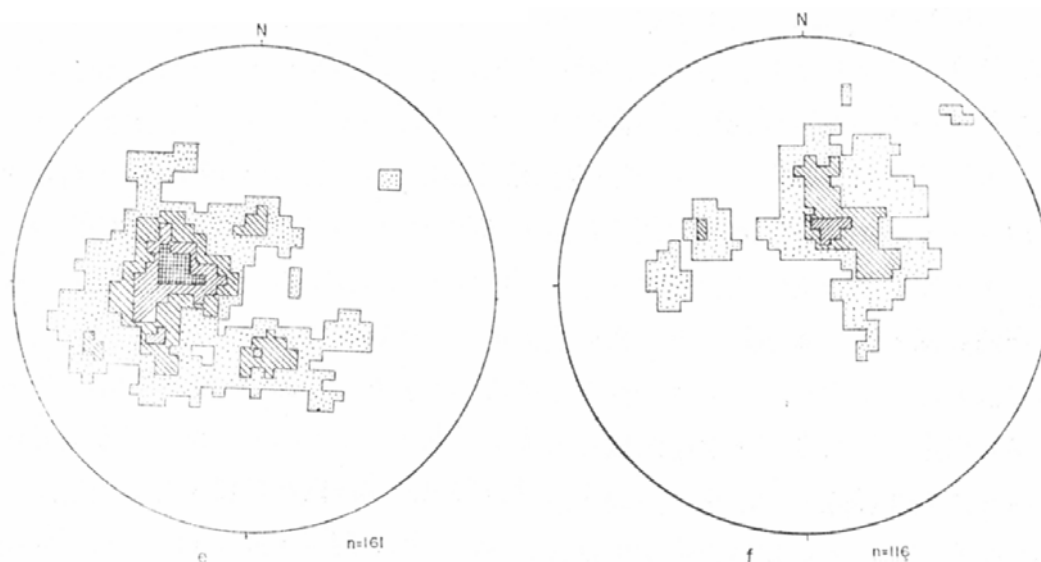


圖 5-3 菩安山背斜東翼(左：大武以南；右：大武至太麻里)之層面位態下半球等面積投影分析(摘自[28])

其次，褶皺軸可由層面位態分析獲得，根據分析結果發現，菩安山背斜東翼之褶皺軸散佈於投影圖周圍(如圖 5-4)，顯示此區岩層可能受到多次構造作用，且主應力方向變化甚大。

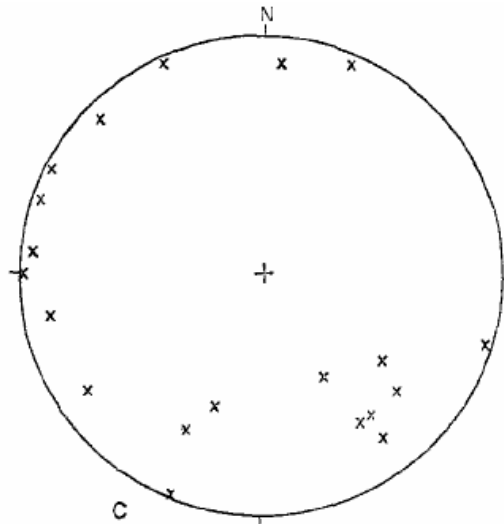


圖 5-4 菩安山背斜東翼之褶皺軸下半球等面積投影分析(摘自[28])

最後，根據劈理面之觀察與分析，愈接近菩安山背斜(變質作用之中心)劈理愈發達，菩安山背斜西翼之劈理位態相當一致(約為 $N11^{\circ}E/50^{\circ}E$)，然而，菩安山背斜東翼之劈理似乎受構造作用產生輕微褶皺現象，大武至太麻里間兩組劈理面分別為(1)南北向、向西傾斜 20° ；以及(2)北 20° 西走向、向東傾斜 35° ，此二組劈理可能分別為板劈理以及破裂劈理，菩安山背斜東翼大武至太麻里間劈理面位態下半球等面積投影分析結果示於圖 5-5。

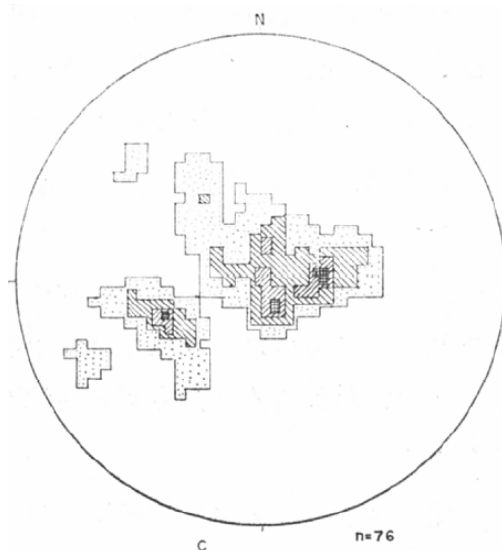


圖 5-5 菩安山背斜東翼大武至太麻里間劈理面位態下半球等面積投影分析(摘自[28])

因劈理面常與最大主應力垂直，因此，根據層面、褶皺以及劈理面之觀察與分析，可得出候選場址附近地區所受之構造作用有三次(胡賢能與詹新甫,1984) [28]，最早期之運動發生於此一區域劈理面生成前，主應力方向幾近南北向，故其造成以東西軸向之褶曲，第二次構造運動與本區域劈理面形成同期，此一論點可由板劈理面與褶皺軸面相平行得到證明，此運動之主應力為東南東-西北西方向，與本區之主要構造垂直，最後一次褶曲發生於劈理面生成之後，惟其作用力不大，僅使本區岩層及劈理面產生些微折轉彎曲，由劈理面位態分析推測其主應力方向約為南北向。然而，因六號、八號與九號候選場址之地質構造複雜，因此，關於此區之構造解釋仍有不同看法(Lu et al.,2001;Chang et al.,2003;Chang et al.,2006) [29-31]，圖 5-6 為 Chang et al. (2006) [31] 根據六號與八號候選場址附近大量之調查所作的構造解釋，根據野外證據，顯示了陸弧碰撞於臺灣東南部造成多期、複雜之變形機制(圖 5-7)，因此，水文地質概念模式之建立，應基於詳細、由廣而精之完整構造地質調查與解釋，方不致於過度簡化地質模型。

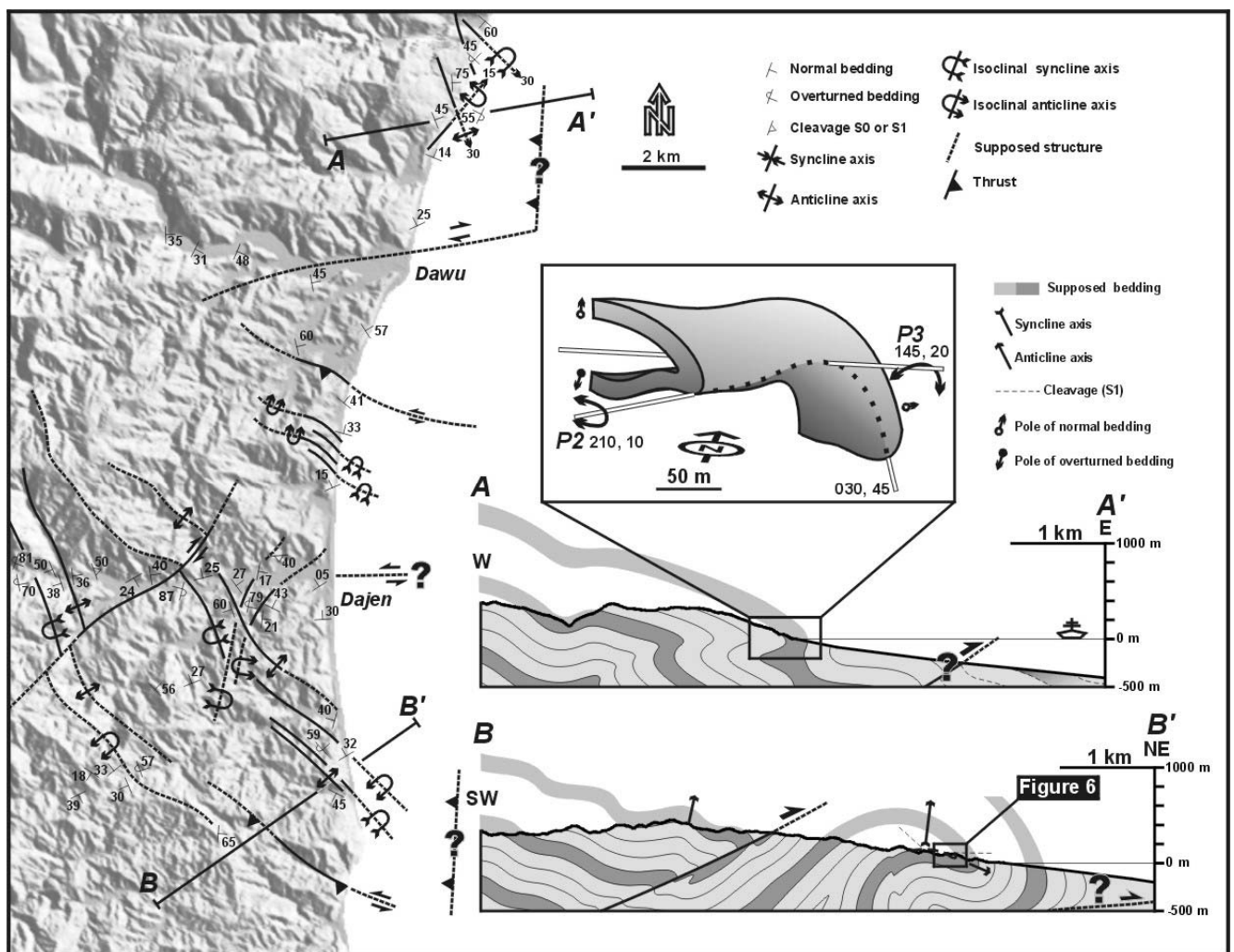


圖 5-6 六號與八號候選場址附近構造解釋(摘自[31])

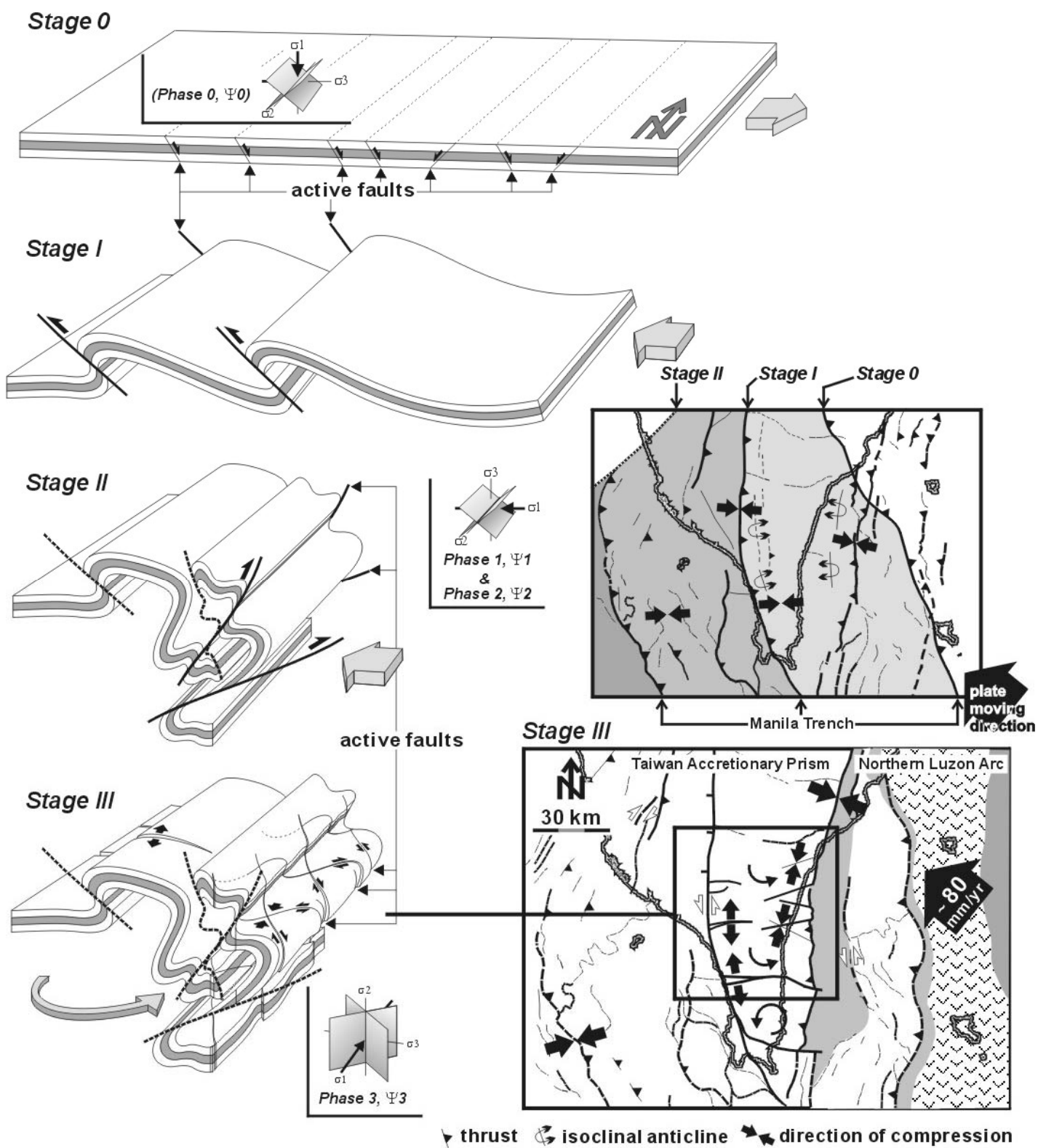


圖 5-7 候選場址附近地區構造作用分期、應力場及地層變形特徵(摘自[31])

5.3 七號候選場址地質概況

七號候選場址位於澎湖東吉嶼，根據經濟部中央地質調查所澎湖群島望安島與虎井圖幅(澎湖群島南幅；經濟部中央地質調查所，1999) [32]，出露地層為中新世中期之澎湖層(圖 5-8)。澎湖層的岩性包括玄武岩相、沉積岩相以及火山角礫岩相，玄武岩相是由數層玄武岩熔岩流疊置而成，愈接近地表風化程度愈高，表層土壤經紅土化作用呈紅壤。新鮮玄武岩質地堅硬，外觀呈現非顯晶質，顏色為暗灰色或黑色，最顯著之外觀特徵為普遍具有柱狀節理，少數地點可見板狀節理或熔岩狀構造；氣孔和氣孔柱為玄武岩外觀另一特徵，多富集於厚層熔岩流之頂部和底部。沉積岩相以厚層碎屑沉積岩組成，具平行層理，傾角相當小，層面幾近於水平，偶而可見礫岩與凝灰質砂岩。這些沉積岩膠結很差，非常鬆軟。火山凝灰角礫岩出現的地點較少，這些出露的凝灰角礫岩淘選度差，多呈塊狀而無層理，火山角礫岩上覆厚層玄武岩。

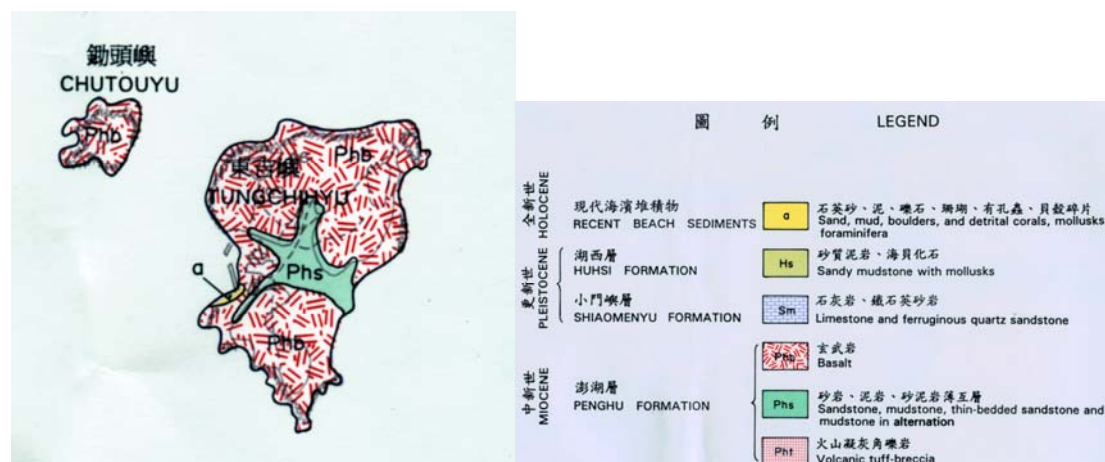


圖 5-8 澎湖群島南幅；原比例尺 1:50,000(摘自[32])

七號場址地表出露之地層，於島周圍主要為玄武岩相，島中央則為沉積岩相(圖 5-8)，根據七號場址北側之露頭，地表(高程為海平面以上 30 公尺)以下有厚約 15 公尺之緻密玄武熔岩，其下為約 5 公尺之沉積層，再下則為火山凝灰角礫岩(圖 5-9(a))。至於其南側之露頭(莊文星，1992) [33]，地表為數公尺厚之多氣孔玄武岩，其下則為有厚約 15 公尺之緻密玄武熔岩，直接覆於火山凝灰角礫岩之上(圖 5-9(b))。

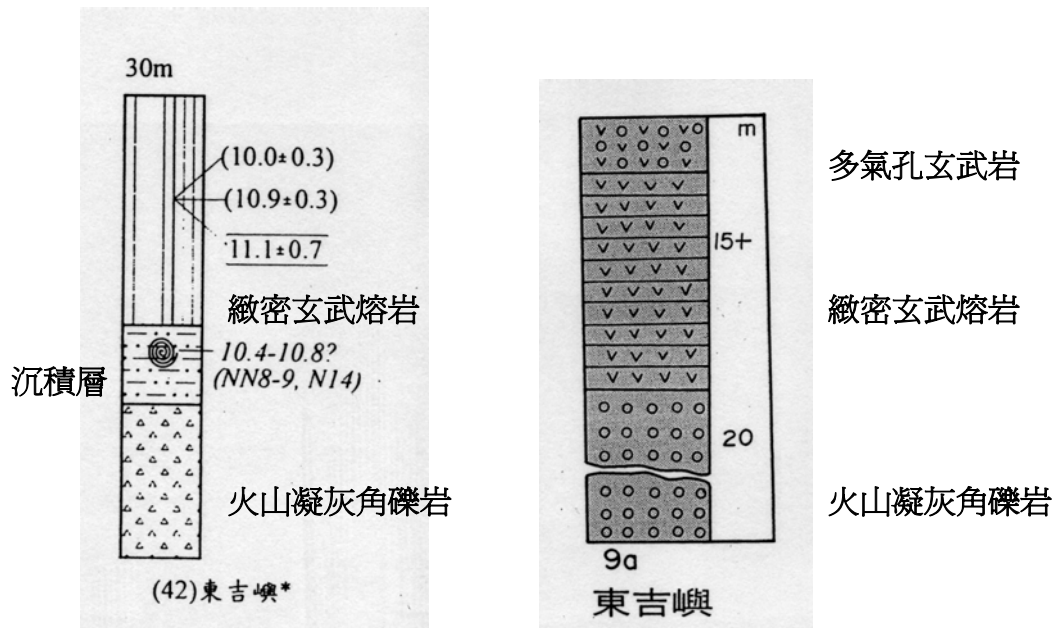


圖 5-9 七號場址露頭柱狀圖：(a)七號場址北側(摘自[32])；(b) 七號場址南側(摘自[33])

綜而言之，除了玄武岩之柱狀節理，七號候選場址應注意玄武岩之氣孔/氣管構造之影響性，另外，玄武岩下方之沉積岩層之透水性應特別加以評估。至於凝灰角礫岩，若其以細顆粒之火山灰為主，可能滲透性相對較低，然而，若其以粗粒為主，則其成為滲透路徑之可能性即不應忽視，因此，凝灰角礫岩大小顆粒分佈之變異性仍應妥善調查與評估。

第六章 結論與建議

1. 本年度計畫完成低放射性廢棄物隧道處置水文地質模擬 SFR 案例介紹，同時亦選擇國內雪山隧道以及新永春隧道，進行水文地質調查、分析與評估案例說明，以提供作為行政管理作業推動之參考。
2. 本研究完整介紹 SFR 貯置場地下水流動模擬方法、流經處置隧道之地下水流量預估、地下水流動路徑與穿透時間計算以及流出位置與稀釋作用評估、對附近井之影響、隧道系統擴大之影響分析、假設突發狀況之影響敏感度分析以及封場隧道充滿水所需時間計算。這些分析內容與方法對於我國低放隧道貯置評估具有重要參考價值。
3. 台灣地質條件複雜，隧道施工經常遭遇大量湧水之困境，根據過去隧道工程經驗，地質構造以及地層特性為重要決定性因素，詳細且規劃完善之水文地質調查、分析與評估相當關鍵。本研究蒐集候選場址附近之地質資料，發現位於本島之候選場址岩性變化不大，然而構造卻相當複雜，除了局部尺度之構造調查與解釋外，大區域之構造特性解釋以及現地應力對水文地質分析與評估之影響應特別注意。
4. 本研究介紹隧道流量預測解析模式(Holmén and Stigsson, 2001)，此一解析模式已成功應用於 SFR 案例作為複雜之數值解驗證之用。本研究亦介紹已成功應用於雪山隧道以及新永春隧道湧水量預估之經驗以及半經驗水文類比模式，於經詳細調查獲致合理水文地質參數之條件下，這些模式可作為隧道地下水流動詳細模擬前簡易評估之用。至於屬連續體概念之有限差分數值模式，亦曾成功應用於雪山隧道地下水流動分析。然而，水文地質概念模型以及水文地質參數之合理性仍是成功模擬地下水流動最關鍵因素之一。
5. 除了流量預測之解析模式外，本研究亦介紹關於隧道封閉後充水時間長度預估之解析模式，此一解析模式 Holmén and Stigsson(2001)曾成功應用於 SFR 案例快速計算隧道封閉後充水時間長度，並作為數值模式驗證之用。
6. 以放射性廢料管制技術發展所需，隧道流量以及封閉後充水時間長度計算之解析模式與程式碼之發展值得進一步研究。

參考文獻：

1. IAEA. 1982. Site investigations for repositories for solid radioactive waste in shallow ground, Vienna: IAEA, Technical Report Series No.216.
2. 董家鈞、陳瑞昇，2005。低放射性廢棄物隧道處置水文地質概念模式審查技術之建立。放射性待處理物料管理處 94 年度報告。
3. 紀立民，1997。放射性廢料最終處置場場址地質特性調查之研究。核能研究所。
4. Holmén J. G., Stigsson M., 2001. Modelling of future hydrogeological conditions at SFR. SKB R-01-02. Svensk Kärnbränslehantering AB.
5. 胡邵敏等人主編，2006。山岳隧道工程專輯。地工技術基金會。
6. Carslaw H. S., Jaeger J. C. 1959. Conduction of heat in solids. Second edition, Oxford University, New York.
7. 傅子仁、許健宏、吳沐仁，1999。「北迴雙線新永春隧道突發性巨量湧水災害概況及因應措施」。土木技術。
8. 許尚逸、黃俊鴻，2000。「山岳隧道之瞬時突發性湧水量與持續湧水量評估－以新永春隧道為例」。2000 岩盤工程研討會論文集，台中，第 263-272 頁。
9. 蔣序元，2001。新永春隧道之湧水分析。國立台灣大學土木工程學研究所，碩士論文。
10. 薛文城，2001a。「台灣有史以來最大巨量湧水新永春隧道災變處理」。技師報 NO.262，中華民國土木技師公會。
11. 薛文城，2001b。「新永春隧道湧水災變後工程因應措施」。技師報 NO.263，中華民國土木技師公會。
12. 中華民國大地工程學會，2002。中華民國大地工程學會會訊，第六卷第三期。
13. 傅子仁、薛文城，2004。「新永春隧道高壓巨量湧水災害處理之檢討」。地工技術，第 99 期，第 63-72 頁。
14. 國工局，2005。雪山隧道工程施工湧水與鄰近地表、地下水文及翡翠水庫進流變異之關聯研究。國道新建工程局 94 年度研究報告。
15. 王文禮、王泰典、張清秀、李元靖、吳裕仁、陳天臨，2006。「新永春隧道工程規劃與設計」。山岳隧道工程專輯，pp.227。
16. 曾大仁、蔡秉儒、張龍均，2006。「山岳隧道湧水地盤處理案例探討」。山岳隧道工程專輯，pp.633。
17. 曾何騰、孫荔珍，2006。「新永春隧道工程地質調查」。山岳隧道工程專輯，pp.101。
18. 傅子仁、查念祖、薛文城，2006。「處理北迴鐵路新永春隧道巨量湧水災害之因應對策與處理工法」。山岳隧道工程專輯，pp.619。
19. 張文城，2006。「雪山隧道之規劃、設計、施工與地工技術」。山岳隧道工程專輯，pp.211。

20. 劉弘祥、張龍均，2006。「雪山隧道導坑工程之設計與施工概況」。山岳隧道工程專輯，pp.221。
21. 聯合大地工程顧問，1994。東部鐵路改善工程新永春隧道細部地質調查工作成果報告書，台北。
22. 聯合大地工程顧問，2000。8K+058 處突發性湧水崩塌補充地質調查工作報告，台北。
23. 三井應用地質株式會社，2001。新永春隧道水平長距離鑽探報告書，台北。
24. 泰億營造有限公司，2001。東部鐵路改善北迴線新永春隧道新建工程隧道南口通過斷層破碎、湧水段大口徑鑽孔排水施工計畫，台北。
25. 榮民工程事業管理處，1986。北迴鐵路完工報告，台北。
26. 經濟部中央地質調查所，1993。大武圖幅。
27. 經濟部中央地質調查所，1991。恆春圖幅。
28. 胡賢能與詹新甫，1984。「南迴鐵路沿線板岩系地層之構造」。經濟部中央地質調查所特刊，第三號，pp.25-43。
29. Lu C. Y., Chang K. J., Malavieille J., Chan Y. C., Chang C. P., Lee J. C., 2001. Structural evolution of the southeastern Central Range, Taiwan. *Western Pacific Earth Science* 1, 213-226.
30. Chang C. P., Angelier J., Lee T. Q., Huang C. Y., 2003. From continental margin extension to collision orogen: structural development and tectonic rotation of the Hengchun peninsula, southern Taiwan. *Tectonophysics* 361, 61-82.
31. Chang C. P., Angelier J., Lu C. Y., 2006. Polyphase deformation in a newly emerged accretionary prism: Folding, faulting and rotation in the southern Taiwan mountain range. *Tectonophysics* (Submitted).
32. 經濟部中央地質調查所，1999。澎湖群島南幅。
33. 莊文星，1992。台灣之火山活動與火成岩。國立自然科學博物館。