

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  
水文地質概念模式審查技術之建立

計畫編號：942005FCMA002

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：中華民國九十四年十二月



## 摘要

台灣之低放射性廢棄物處置概念，山岳區域之隧道處置可能是主要的選項。因此，建立合理的水文地質概念模式以評估處置場的水文地質特性，並作為後續地下水流動模擬以及核種傳輸模擬之基礎，將是低放射性廢棄物處置計畫之關鍵課題。針對管制業務所需，處置場分階段之核照作業，均應針對水文地質概念模式有一套相對的審查機制。雖然過去關於此一方面之研究，已有具體之成果，然而隨著處置概念之不同與處置地點之差異，水文地質概念模式建立之關鍵課題與審查重點將有著明顯的不同。本研究將以位於裂隙岩盤中之隧道水文地質概念模式建立方法與程序為核心，建立以程序審查為基礎之審查技術，重點項目包括：(1)針對裂隙介質之離散裂隙網絡(Discrete fracture network)概念以及統計連續性(Stochastic Continuum)概念說明其理論基礎，並明列水文地質參數需求，以作為調查時以及後續模式建立時之參考；(2)考慮水文地質調查、試驗、分析以及地下水流動模擬與水文地質概念模式之互制關係；(3)水文地質參數驗證方法之建立；以及(4)地下水流動模擬之驗證方法選擇。本研究建立屬裂隙介質場址之水文地質調查項目、方法、調查作業程序及調查後之水文地質資料分析與評估方法之審查技術，並提供水文地質概念模式建立以及相關參數選擇應注意之關鍵點以及驗證方法，成果可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之水文地質概念模式核照審查行政作業之參考。

## Abstract

Repository of low radioactive residues will be located in the hill area with tunnel system. One of the key issues of the safety assessment is how to develop the hydro-geologic conceptual model of repository site in fracture rock. The conceptual model provides the basis for groundwater flow modeling. Based on the flow paths and flow conditions produced from groundwater flow simulation, transport simulation can be followed. Consequently, the techniques for developing conceptual model of repository site in fracture rocks is needed for quality control under different stages including planning, designing, constructing, operating and abandoned stages for repository of low radioactive residues. The systematic studies have been executed on this issue in Taiwan. Since the repository site might change, the concerned problems for developing and reviewing hydro-geologic conceptual model are quite different. This research establishes the procedure and approach of the hydro-geologic conceptual model of repository site in fracture rocks. The proposed procedure can be provided as the basis of reviewing technique of the conceptual model. There are four important features in this work. (1) Introduce the discrete fracture network and stochastic continuum approaches for fracture rocks and list the demanded parameters for the two models. The site investigation and modeling should take this aspect into consideration in prior. (2) The importance of interactions between hydrogeologic conceptual model with site investigations, field tests, analysis of hydrogeologic parameters and groundwater flow modeling are emphasized. (3) To establish the methodology for verifying the hydrogeologic parameters obtained from field tests. (4) To select proper analytical model to verifying the simulated results of groundwater flow. The results of this work can be used as a guideline for hydrogeological site investigation including: investigation items, methods, procedures, etc. The results also provide the techniques to reviewing the hydrogeologic parameters as well as the modeling of groundwater flow and how to verify them. The results of this work provide the agency, Atomic Energy Council, the reviewing technique of the hydro-geologic conceptual model for repository of low radioactive residues which located in the hill area with tunnel system.

# 目錄

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 中英文摘要                       |     |
| 目錄                          | I   |
| 圖目錄                         | V   |
| 表目錄                         | VII |
| 第一章 概論                      | 1   |
| 1.1 計畫背景說明                  | 1   |
| 1.1.1 低放射性廢棄物之處置            | 1   |
| 1.1.2 隧道處置概念                | 1   |
| 1.1.3 水文地質概念模式              | 2   |
| 1.1.4 低放射性廢棄物隧道處置水文地質概念模式審查 | 3   |
| 1.2 計畫目的                    | 4   |
| 1.3 水文地質概念模式建立一般性工作程序       | 4   |
| 1.4 水文地質概念模式與場址調查以及安全評估之相關性 | 7   |
| 第二章 水文地質概念模式相關專業用詞標準化       | 9   |
| 2.1 模式尺度                    | 9   |
| 2.2 分區                      | 9   |
| 2.3 水文地質模擬                  | 11  |
| 第三章 水文地質概念模式之基本觀念與參數        | 14  |
| 3.1 水文地質概念模式建立之目的           | 14  |
| 3.2 水文地質模式重要概念              | 14  |
| 3.3 數學模式                    | 16  |
| 3.4 幾何特徵描述                  | 18  |
| 3.4.1 水文地質模式之尺度             | 18  |
| 3.4.2 模式分區                  | 20  |
| 3.5 描述尺度                    | 20  |
| 3.6 水力分區之水力特性               | 22  |
| 3.6.1 水力通導分區                | 22  |

|            |                           |           |
|------------|---------------------------|-----------|
| 3.6.2      | 水力岩石分區                    | 23        |
| 3.6.3      | 水力土壤分區                    | 25        |
| <b>3.7</b> | <b>地表水文</b>               | <b>26</b> |
| 3.7.1      | 一般性說明                     | 26        |
| 3.7.2      | 地形                        | 27        |
| 3.7.3      | 水路、湖泊與海                   | 27        |
| 3.7.4      | 氣象條件                      | 27        |
| 3.7.5      | 漫地流、中間流與地下水補注             | 27        |
| <b>3.8</b> | <b>邊界條件與初始條件</b>          | <b>28</b> |
| <b>第四章</b> | <b>水文地質分析所需之基本資料調查與分析</b> | <b>30</b> |
| <b>4.1</b> | <b>收集與整理場址之相關現有資料</b>     | <b>30</b> |
| <b>4.2</b> | <b>現地調查計畫</b>             | <b>30</b> |
| <b>4.3</b> | <b>現地調查與主要資料分析</b>        | <b>30</b> |
| 4.3.1      | 水力試驗描述                    | 30        |
| 4.3.2      | 水文                        | 31        |
| 4.3.3      | 土壤層的水力性質                  | 33        |
| 4.3.4      | 單孔水力試驗—土壤層                | 33        |
| 4.3.5      | 干擾試驗—土壤層(初步評估)            | 34        |
| 4.3.6      | 岩石之鑽孔與鑽孔時之測量              | 34        |
| 4.3.7      | 累積流率井測—岩盤                 | 35        |
| 4.3.8      | Posiva 氏流率井測—岩盤           | 36        |
| 4.3.9      | 單孔暫態水力試驗—岩石               | 38        |
| 4.3.10     | 干擾試驗-岩盤(初步評估)             | 39        |
| 4.3.11     | 稀釋試驗                      | 41        |
| 4.3.12     | 長期壓力水頭監測                  | 42        |
| <b>4.4</b> | <b>水文地質基本資料之一般性分析</b>     | <b>42</b> |
| 4.4.1      | 基本資料之品質控制                 | 42        |
| 4.4.2      | 水的性質                      | 42        |

|            |                            |           |
|------------|----------------------------|-----------|
| 4.4.3      | 水文地質主要資料的綜合評估              | 43        |
| 4.4.4      | 主要資料的分析                    | 44        |
| 4.4.5      | 統計分析                       | 44        |
| <b>第五章</b> | <b>三維模擬與場址敘述性模型</b>        | <b>47</b> |
| <b>5.1</b> | <b>地質鑽孔岩心判釋與水文地質主要資料分析</b> | <b>48</b> |
| 5.1.1      | 水力通導分區與水力岩石分區之研判與分析        | 48        |
| 5.1.2      | 主要地質統計評估                   | 49        |
| <b>5.2</b> | <b>離散裂隙網路模式水力參數推估</b>      | <b>50</b> |
| 5.2.1      | 簡介                         | 50        |
| 5.2.2      | 一般概念                       | 50        |
| 5.2.3      | 離散裂隙網路模式水力特性               | 51        |
| <b>5.3</b> | <b>三維模擬</b>                | <b>53</b> |
| <b>5.4</b> | <b>地下水數值模擬：三維模式測試與校正</b>   | <b>56</b> |
| 5.4.1      | 過程                         | 57        |
| 5.4.2      | 工作敘述                       | 58        |
| 5.4.3      | 數值水流模式之技術查核                | 58        |
| 5.4.4      | 模式設計-建構地質為基礎之三維地下水流模式      | 60        |
| 5.4.5      | 模式幾何特性不同解釋之測試              | 61        |
| 5.4.6      | 水力校正與敏感度分析                 | 62        |
| 5.4.7      | 對於水文地質現象通盤了解、描述與呈現所需之模擬    | 62        |
| 5.4.8      | 結果呈現-報告                    | 63        |
| 5.4.9      | 模式結果範例                     | 63        |
| <b>5.5</b> | <b>敘述模式不確定性與信賴度評估</b>      | <b>65</b> |
| <b>5.6</b> | <b>敘述模式報告</b>              | <b>68</b> |
| 5.6.1      | 場址描述                       | 68        |
| 5.6.2      | 了解與描述之數值地下水流模擬             | 69        |
| 5.6.3      | 整體評估敘述模式之不確定性與信賴度          | 69        |
| 5.6.4      | 新調查建議                      | 69        |

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| 5.7 數值地下水流模擬：現地調查計畫與探討性模擬 | 69        |
| 5.7.1 目的                  | 69        |
| 5.7.2 已確認模式版本             | 69        |
| 5.7.3 探測性模擬應用之範例          | 70        |
| <b>第六章 資料與文件之管理</b>       | <b>71</b> |
| 6.1 主要資料                  | 71        |
| 6.2 原始資料的分析               | 71        |
| 6.3 整合性評估和場址描述            | 72        |
| <b>第七章 水文地質概念模式審查重點</b>   | <b>73</b> |
| <b>第八章 結論與建議</b>          | <b>77</b> |
| 8.1 結論                    | 77        |
| 8.2 建議                    | 77        |
| <b>參考文獻</b>               | <b>78</b> |
| <b>附錄一 隧道地下水流場數學模式介紹</b>  | <b>81</b> |

## 圖目錄

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 圖 1-1 | 場址調查獲致主要資料彙整於資料庫以及經分析解釋後之敘述性模式(場址幾何性狀與特性)   | 6  |
| 圖 1-2 | 水文地質概念模式建立流程與跨領域校核。A：概念模式更新議題；B：資料傳遞與資料接收；C：因互動與整合模式而更新描述性模式；D：使描述性模式更詳盡之新的水文地質調查                       | 8  |
| 圖 2-1 | 單元與分區概念示意圖。(a)虛擬地質圖，包含數類岩石；(b)根據虛擬地質圖加以區分岩石單元，並基於水力特性之異同區分為三個分區；(c)若虛擬地質圖增加一個變形區，因而增加了一個分區以及增加了 5 個岩石單元 | 10 |
| 圖 2-2 | 虛擬地質圖(圖 2-1(a))以及增加一變形區後之水力分區劃分(圖 2-1(c))以不同方式(僅區分兩個分區，一為水力通導分區，另一為水力岩石分區)重新劃分結果                        | 11 |
| 圖 3-1 | 地質模型概念示意圖   | 14 |
| 圖 3-2 | 水文地質模型概念示意圖   | 15 |
| 圖 3-3 | 接近地表之水文地質模型示意圖  | 15 |
| 圖 3-4 | 地下水流動模擬之序率連續性(Stochastic Continuum; SC)概念與離散裂隙網路(Discrete fracture network; DFN)概念                      | 16 |
| 圖 3-5 | Simpevarp 地區之區域與局部尺度之水文地質模式涵蓋範圍示意圖  | 19 |
| 圖 3-6 | 水文地質模式描述尺度示意圖   | 21 |
| 圖 3-7 | 脆性變形區(Brittle deformation zone)構造示意圖  | 22 |
| 圖 3-8 | 接近地表之地質與地下水流動示意圖  | 28 |
| 圖 4-1 | Laxemar 地區與其鄰近地區之地表水分區(排水盆地)、水路與地形  | 32 |
| 圖 4-2 | Laxemar 地區與其鄰近地區之地表水分區(排水盆地)、水路與一般植生描述  | 32 |
| 圖 4-3 | Laxemar 地區與其鄰近地區之河川地形、線形、井孔位置與水路  | 33 |
| 圖 4-4 | 累積流率井測(Cumulative flow ; CF)試驗與注入試驗結果之範例  | 35 |
| 圖 4-5 | 差異流率(Difference flow logging)量測示意圖  | 36 |
| 圖 4-6 | 差異流率(Difference flow logging)量測設備示意圖  | 37 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 圖 4-7  | 在觀測井孔之多封塞干擾試驗(Interference test with multi-packer system)  | 40 |
| 圖 4-8  | 壓力監測系統與稀釋試驗(Dilution test)示意圖  | 41 |
| 圖 4-9  | 藉由鑽井地質紀錄、地球物理井測資料以及水力試驗結果之綜合評析範例   | 44 |
| 圖 4-10 | 範例說明沿著鑽孔水力傳導係數 $K$ (m/s) 值之分布與水力通導分區(HCD)位置之初步評估，右邊為整個鑽孔 $Log_{10}K$ 累積機率分布，估計 $Log_{10}K$ 之上、下限分別為-10.20 與-5.79   | 45 |
| 圖 4-11 | 沿著鑽井 $Log_{10}K$ (水力傳導係數 $K$ 之單位為 m/s) 之分布，上圖為全部資料統計結果，中間為水力岩石分區(HRD)資料統計結果，下圖為水力通導分區(HCD)資料統計結果，估計整個鑽井所有資料之 $Log_{10}K$ 上、下限分別為-10.20 與-5.79，上、下限值呈現於直方圖但未包括在累積機率圖中 | 45 |
| 圖 5-1  | 變形區三維井孔相交示意，變形區位置表面井孔交接，模擬變形區厚度，包含所有在井孔與表面之觀測，且納入考慮構造之自然起伏   | 48 |
| 圖 5-2  | 利用岩體視覺系統(Rock Visualisation System, RVS) 可將鑽孔觀察所得之主要變形區建構出模擬構造面(Modeled structural surface 左圖)，而模擬構造區(Modeled structural volume)則由模擬構造面以及給定之厚度(右圖)組成                 | 49 |
| 圖 5-3  | (a)顯示一個由假設鑽孔觀測所得之導水裂隙，(b)鑽孔中觀察到之導水裂隙將與岩體中之其它導水裂隙相互連通。(c)前述之導水裂隙僅為整個離散裂隙網路之一部分  | 53 |
| 圖 5-4  | 顯示於 Simpevarp 模式第零版之模擬變形區之幾何特徵   | 54 |
| 圖 5-5  | 地下水模擬流程圖   | 57 |
| 圖 5-6  | 三維視覺化變形分區幾何特徵，(上)模擬構造面，(下左)固定厚度之模擬構造體積，(下右)變厚度之模擬構造體積地下水流模式  | 61 |
| 圖 5-7  | Laxemar 地區三維視覺化地下水流模式  | 64 |
| 圖 5-8  | Laxemar 地區三維剖面洩降分析   | 64 |
| 圖 5-9  | 地表流徑分析顯示補助與流出區   | 65 |

## 表目錄

|       |                          |    |
|-------|--------------------------|----|
| 表 1-1 | 場址調查不同階段之水文地質概念模式        | 5  |
| 表 3-1 | 水力通導分區參數之空間分佈            | 23 |
| 表 3-2 | 水力岩石分區參數之空間分佈-離散裂隙網絡模式概念 | 24 |
| 表 3-3 | 水力岩石分區參數之空間分佈-連續性孔隙介質模式  | 24 |
| 表 3-4 | 水力土壤分區參數之空間分佈            | 26 |
| 表 4.1 | 建議各測試階段之期距               | 38 |
| 表 6-1 | 場址描述之不確定性                | 65 |

# 第一章 概論

## 1.1 計畫背景說明

### 1.1.1 低放射性廢棄物之處置

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。所謂地表處置是指於地表、地表下或者地表下幾十公尺的岩洞中，以具工程障壁或不具工程障壁之方式處置[2]，如法國盧伯處置中心。我國過去針對低放射性廢棄物處置，已於蘭嶼地區進行相當完整且全面之地質調查與研究[3-18]，惟過去相關研究之基礎主要根據地表處置概念。然而，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，因此，相關之研究有必要以隧道處置概念為基礎，再進行深入探討與評估。

### 1.1.2 隧道處置概念

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處置，如芬蘭與瑞典均採隧道處置處理低放射性廢棄物[19]。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 SFR 處置場則位於海床下 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(Final Repository)之經驗甚值得參考，根據水文地質概念模式，該公司進行 SFR 長期地下水流動模擬預測，應用考慮處置坑洞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，首先藉由有限差分數值程式 GEOAN，計算地下水流徑及隧道流量，其次利用解析解進行分析結果驗證(Holmen and Stigsson, 2001[20])。

隧道處置與地表處置面臨之水文地質問題極為不同，首先，地表處置多位於土壤(或稱為未固結沖積層)中，屬於多孔隙介質，然而，隧道處置則多位於岩盤中，屬裂隙介質，因此，不論是概念模式之建立、數學模式之理論基礎或是數學模擬所需之水文地質參數，均有明顯之不同。其次，隧道處置工程本身，將與水文地質產生互制作用，如(1)隧道開挖將引致岩盤應力改變，因而造成水文地質參數之改變；(2)營運階段隧道持續抽水以維持隧道中之乾燥，因而影響地下水

之流動；(3)封閉後，地下水逐漸流入隧道或坑洞，因而亦將產生不同之問題。源於上述問題，瑞典 SFR 處置場之地下水流分析，即區分為三階段進行[20]：(1)隧道未開挖前；(2)隧道開挖後；以及(3)運轉結束封閉後。源於台灣地質構造之複雜，可預見隧道處置之水文地質概念模式之建立勢將相對地困難。

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。

### 1.1.3 水文地質概念模式

水文地質概念模式(Hydrogeological conceptual model)此一專業用詞，不同專業人員有時會有解讀上之差異[21]。眾所周知，水文地質學主要為探討地下流體與固體地質材料間之交互作用，而所謂水文地質概念模式，即指根據現地的水文地質調查結果，所提出能描述真實水文地質系統之概念，雖然一個概念模式不可能完全詳盡地描述真實水文地質系統，然而概念模式有助於了解真實水文地質系統內地下水的流動。一般而言，概念模式本身只描述水文地質系統內基本水文地質架構之概念，為了進一步了解或預測水文地質系統內地下水之流動行為，必須藉助數學(解析與數值)模式或物理模式加以解決。

水文地質系統中地下水流動之模擬，通常需根據現場地質特性及水文地質邊界條件建構場址特性化(Site specific)之概念模式，以作為地下水流動模擬之基礎。為能成功轉換概念模式成為數學或物理模式模擬之基礎，必須有一精度與數量均能滿足模擬需要之資料庫，以提供相關水文地質條件，包括水文地質系統的組成單元以及幾何分布特性(如水文地質分層、位置以及地表水體與河川之位置及相關邊界條件)，水文地質參數則包括水力傳導係數(Hydraulic conductivity)、流通係數(Transmissivity)與貯水係數(Storage coefficient)的空間變化等。

水文地質概念模式建構過程中，有數個關鍵問題必須注意：(1)水文地質概念模式建構必須要有模式尺度(Model size)之概念，地下水模擬一般可分為區域尺度(Regional size)與局部尺度(Local size)，區域尺度模式對於水文地質特徵描述之精細程度不如局部尺度，然而，區域尺度模擬所得結果，將有效建立局部模式之邊界條件。(2)空間上水文地質單元(Unit)應能適當之劃分，一般而言，水文地質單元之劃分主要依據地質單元(Geological units)劃分之結果，具有相同水文地質

特性之單元，則可合併成為單一水文地質分區(Domain)。水文地質之重要分區包括接近地表屬多孔隙介質之水力土壤分區(Hydraulic Soil Domain; HSD)、岩盤(屬裂隙介質)中之水力岩石分區(Hydraulic Rock Domain; HRD)以及水力導通分區(Hydraulic Conductor Domain; HCD)。(3)土壤一般以連續性多孔隙介質(Continuum Porous Medium; CPM)概念作為模式建立之基礎，然而裂隙介質模式建立則可區分為離散裂隙網絡概念(Discrete fracture network)以及序率性連續(Stochastic Continuum; SC)概念，不同概念模式所需輸入之水文地質參數亦有所不同。因此，水文地質調查時以及後續之模擬，均應了解裂隙介質具有不同模擬概念，以及其間之差異。

#### 1.1.4 低放射性廢棄物隧道處置水文地質概念模式審查

如前所述，台灣過去放射性廢棄物處置概念以地表處置為主，對於隧道處置概念著墨不多，然而關於水文地質概念模式審查機制之建立，卻早已開始進行。放射性物料管理局為建立放射性廢棄物處置場址水文地質概念模式審查機制，曾委託成功大學進行相關研究[22-23]，並完成水文地質概念模式建立的程序與方法之建議，其中包括：(1)定義水文地質單元、(2)準備水收支平衡以及(3)定義地下水流系統，上述研究並以蘭嶼處置場作為範例，進行深入之討論。惟因該時期處置概念以地表處置為主，因此關於裂隙介質之特性以及模式建立應注意事項，並非其關鍵課題，故於該研究中所佔比重較低。另一方面，尚有部分關鍵課題，如(1)水文地質調查及現地試驗與水文地質概念模式建立間之關連性，(2)水文地質參數驗證方法，(3)地下水流模擬驗證方法，均未列於該研究項目中，值得進一步建立其相關審查機制。

本計畫之重點工作，為協助建立針對位於裂隙岩盤(Fracture rock)低放射性廢棄物處置場址水文地質概念模式之審查方式。其中第二章至第六章主要整理自Rhén et al.(2003)[21]，包括於第二章說明模式尺度之概念以及建構概念模式時應清楚界定地質材料屬多孔隙介質之水力土壤分區(HSD)、屬裂隙介質之水力岩石分區(HRD)或水力導通分區(HCD)。針對離散裂隙網絡(Discrete fracture network)概念以及序率連續性(Stochastic Continuum)概念，於第三章中加以說明其理論基礎，並明列所需之水文地質參數，以作為調查時以及後續模式建立時之依據。關於場址水文地質概念模式之建立，基本上應包括：(1)裂隙岩盤場址水文地質特徵描述；(2)相關水文地質參數定義與推估；(3)參數驗證；(4)場址地下水流場模

式選擇，相關調查、分析與模擬說明於第四章與第五章中詳述。第六章則詳述資料與文件之管理。其中有關於裂隙岩盤場址水文地質特徵描述部分，以及相關水文地質參數定義與推估，均與水文地質調查規劃、執行以及分析息息相關，應列為審查之重點項目之一，本計畫以隧道處置概念為基礎，於第七章提出水文地質模式審查重點。最後，附錄一列出本計畫協助選擇之隧道流量預估之解析解。然而解析模式之驗證為數學模式計算結果之驗證，至於地下流動模擬結果尚應透過現地資料觀測之方式進行驗證。

## 1.2 計畫目的

針對管制業務所需，處置計畫規劃設計以及完工後之核照作業，均應針對水文地質概念模式有一套相對的審查機制。本計畫提供場址調查作業期間水文地質調查項目、方法、調查作業程序及調查後之水文地質資料分析與評估方法之審查技術，並提供水文地質概念模式建立以及相關參數選擇應注意之關鍵點以及驗證方法，研究成果將可作為物管局針對低放射性廢棄物可能採取之隧道處置場址之水文地質概念模式核照審查作業之參考。

本計畫建議水文地質概念模式應以“程序審查”為基礎，除正式文件送審前各階段工作之程序與品管監督，書面文件審查重點亦著重於水文地質概念模式建構過程以及採用方法是否合宜，並提出參數驗證要求之標準以及提供水文地質分析模擬檢核之解析模式。程序審查將包括條列水文地質調查、現地與實驗室試驗與分析、資料解釋、參數選用、邊界條件決定以及地下水流模擬作業與驗證的審查重點，並著手開始協助與水文地質概念模式建立相關之程序審查(低放射性廢棄物最終處置場可行性研究-地下水文調查計畫書)。本計畫之最終目標為能以主管機關立場，協助評估未來處置場地下處置區與水文地質概念模式相關之最適化規劃。

綜而言之，本計畫主要目的包括：(1)提供建立水文地質概念模型之合理程序；(2)提出水文地質概念模式建立需考慮之要項；(3)作為行政程序審查之參考。

## 1.3 水文地質概念模式建立一般性工作程序

關於高放射性廢棄物場址水文地質概念模型建立之程序如表 1-1。先期場址調查(Site Investigation; SI)結束後應提出水文地質模式之初步架構，待完整場址

調查結束後則應提出完整之水文地質模式，而此一模式應成為安全評估之基礎。表 1-1 中之水地質概念模式(版本編碼 0；V<sub>0</sub>)，將成為場址調查規劃之重要參考依據，場址調查所獲成果與資料，將逐步作為建立水文地質概念模式之基礎，其中包括：各水文地質單元之水力參數、初始條件與邊界條件以及地下水流動模擬與不同版本水文地質概念模式之測試。模式測試主要應先進行幾何或邊界條件測試，此一測試應與地質、地球化學、傳輸以及地表生態系統進行交互檢核，以確保各跨領域模式之一致性。待幾何或邊界條件測試完成，即可進行模式參數校正與敏感度分析。經校正之地下水分析成果對於地球化學、傳輸與地表生態分析相當有參考價值，同時亦將成為設計暨安全評估之重要基礎。不同版本之水文地質模式以及地下水流動模擬成果即為最終輸出成果。低放射性廢棄物隧道處置之水文地質概念模式建構，雖然不必然需完全依循表 1-1 程序進行，然而表 1-1 之精神仍相當值得參考。

表 1-1 場址調查不同階段之水文地質概念模式(譯自 Rhén et al., 2003[21])

|                 | 場址調查階段                  | 涵蓋範圍                            | 模式   |
|-----------------|-------------------------|---------------------------------|--|
| 先期場址調查<br>(SI)前 | 可行性研究<br>現有資料處理<br>現地檢核 | 許多候選場址附<br>近區域                  | *區域尺度概略性<br>(General)水文地質概念<br>模式(V <sub>0</sub> )         |
| 先期場址調查<br>(SI)後 | 遙測影像、地表調查<br>與淺孔調查      | 候選場址附近區<br>域以及場址本身<br>(區域與局部尺度) | 供場址評選用之概略性<br>(General)水文地質概念<br>模式(V <sub>1.1</sub> )     |
|                 | 地表調查配合部分<br>深鑽孔         | 場址(含區域環境)                       | 區域與局部尺度之初步<br>(Preliminary)水文地質<br>概念模式(V <sub>1.2</sub> ) |
| 完整場址調查<br>(SI)後 | 多孔深鑽孔調查與<br>補充地表調查      | 場址(含區域環境)                       | 區域與局部尺度之水文<br>地質概念模式(V <sub>2.1</sub> )                    |
|                 | 更多孔深鑽孔調查<br>與補充地表調查     | 場址(含區域環境)                       | 區域與局部尺度之水文<br>地質概念模式修正版本<br>(V <sub>2.1</sub> )            |
|                 | 更多補充地表調查                | 場址(含區域環境)                       | 區域與局部尺度之水文<br>地質概念模式最終版本<br>(V <sub>2.1</sub> )            |

\*水文地質概念模式版本編碼 0(V<sub>0</sub>)為場址調查規劃之基礎

跨領域資料調查與蒐集以及最終建立之描述性模式詳見圖 1-1。地質、岩石力學、熱力與熱傳、水文地質、地球化學作用、地下水核種傳輸以及地表生態系統等，均有獨立進行之調查，然而，資料之應用與模擬，必須經由跨領域資料之整合與專業合作，方得以竟其功。

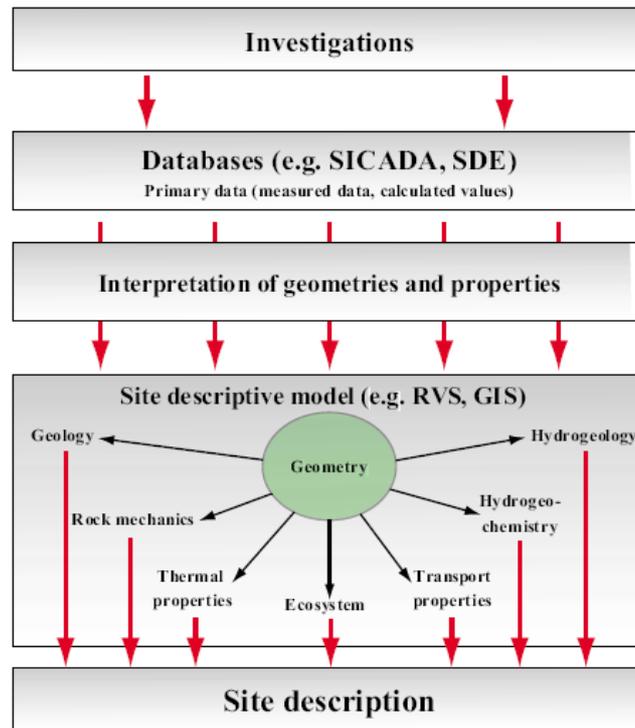


圖 1-1 場址調查獲致主要資料彙整於資料庫以及經分析解釋後之敘述性模式(場址幾何性狀與特性)(摘自[21])

水文地質概念模式建立及其與其他專業領域間關聯性如圖 1-2 所示。值得注意的是水文地質模式與地質領域高度之關聯性。圖 1-2 顯示之水文地質概念模式建立，共分六大部分：

- (1) 水文地質分析所需主要資料建立：涵蓋現地調查工作以及量測資料初步分析
- (2) 主要資料之分析：配合鑽孔資料，進行單孔試驗或監測之資料分析
- (3) 場址特性描述整合評估：
  1. 與地質模型進行互相校核，並根據岩心紀錄、井測以及單孔試驗進行綜合性分析；

2. 利用地質資料建構三維岩盤重要變形區(Major deformation zone)，並進行跨領域分析與測試三維重要變形區之合理性，視需要進行修正與解釋並回至 1 重新進行分析；
  3. 主要工作為(a)評估水文地質概念之正確性、(b)利用地下水流動模擬以了解現地狀況、(c)評估模型之不確定性以及(d)檢核敘述性水文地質概念模式是否足以成為水文地質概念模式版本編碼 X.Y (V<sub>X.Y</sub>)之報告或數值資料。此一階段工作應於跨領域之模式相互間檢核已完成，確認不同領域之模式已趨於一致後進行。若有必要，經由外差部分重要現象，地下水流動模擬結果將可作為下一階段場址調查規劃之參考，設計與安全評估小組特定問題，亦可透過地下水模擬加以釐清。此一階段工作最需要跨領域合作，基於可用之資料建構一致之模式，如圖 1-1 所示。
- (4) 資料傳遞：根據場址調查所獲資料提供分析所需資料，或分析所得資料提供作為其他分析所需資料之傳遞
  - (5) 設計暨安全評估：設計與安全評估應為獨立於進行場址調查之機構，此一工作應基於最終版本之水文地質概念模型。
  - (6) 場址評估：基於最終水文地質概念模型(包括其他專業分支之模型)、設計與安全評估，進行研判處置場興建決策所需資訊均已充足，是否需要進行其它調查、分析與評估。

#### 1.4 水文地質概念模式與場址調查以及安全評估之相關性

水文地質概念模式與場址調查相關性極高，概念模式之建立有賴場址調查結果之分析與解釋，水文地質概念模式可協助場址調查規劃。因此，水文地質模式與水文地質調查應具有一互制與反饋機制，亦即水文地質調查規劃應基於合理之水文地質模式，而調查結果將作為檢核模式亦即修正模式之基礎，修正後之模式亦將成為進一步調查規劃之基礎。另外，水文地質模式為安全評估之重要基礎，安全評估應基於水文地質概念模式之最終版本。

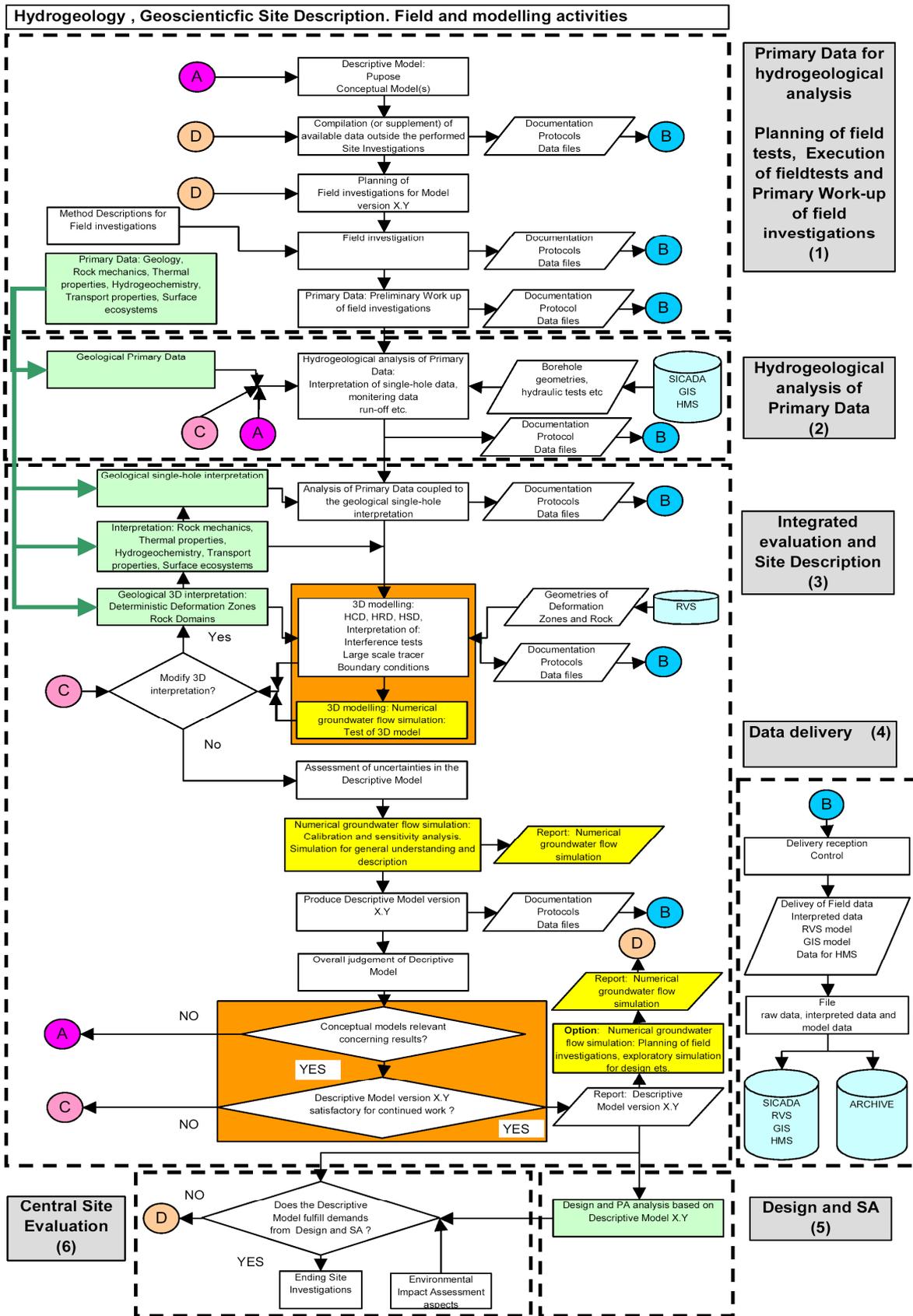


圖 1-2 水文地質概念模式建立流程與跨領域校核。A：概念模式更新議題；B：資料傳遞與資料接收；C：因互動與整合模式而更新描述性模式；D：使描述性模式更詳盡之新的水文地質調查(摘自[21])

## 第二章 水文地質概念模式相關專業用詞標準化

由於水文地質概念模式與其他領域間有非常重要的關連性，因此需有統一且清楚的名詞定義，以避免誤解。本章整理各種常用專業用詞之含意。

### 2.1 模式尺度(Model size)

場址的水文地質模式包括區域(Regional)的水文地質描述與局部(Local)的水文地質描述，局部場址的水文地質描述通常涵蓋 10 平方公里，且須詳盡至可提供隧道處置設計與所需之安全評估之依據。

區域場址水文地質模式通常包含比局部場址的更大範圍，因此不可能如局部場址模式詳細，但需要地質、水力與區域其他情況的整體描述。區域場址描述提供區域地下水模擬所需之資料，而區域場址之地下水模擬為清楚定義與測試局部場址下水流模式之基礎。

### 2.2 分區(Domains)

幾何模式由數個體積(Volumes)所組成，三維模式中最小的體積稱為單元(Unit)，如圖 2-1 所示，不同領域可能將基本地質單元組成不同之分區(Domains)，如圖 2-2 所示，與水文地質相關之專有名稱說明如下：

**變形區(Deformation zone)**：基本上為一定厚度、二維，曾經脆性或塑性變形之區域。

**岩石單元(Rock unit)**：具有相同性質之岩石，例如某一特定岩石型態。

**土壤單元(Soil unit)**：岩盤上覆之具有相似性質沉積物，有時又稱為第四紀沉積物。包括沖積層、殘餘表土或火山灰等皆屬之。

**分區(Domains)**：同樣性質之單元組成分區。

**水力導通分區(Hydraulic Conductor Domain; HCD)**：確定位置之變形區，具有固定水力參數或可明確定義水力參數之變動性。

**水力岩石分區(Hydraulic Rock Domain; HRD)**：具有同樣水力特性之岩石單元，且不包含於水力通導分區內。

**水力土壤分區(Hydraulic Soil Domain;HSD)**：具有同樣水力特性之土壤單元。

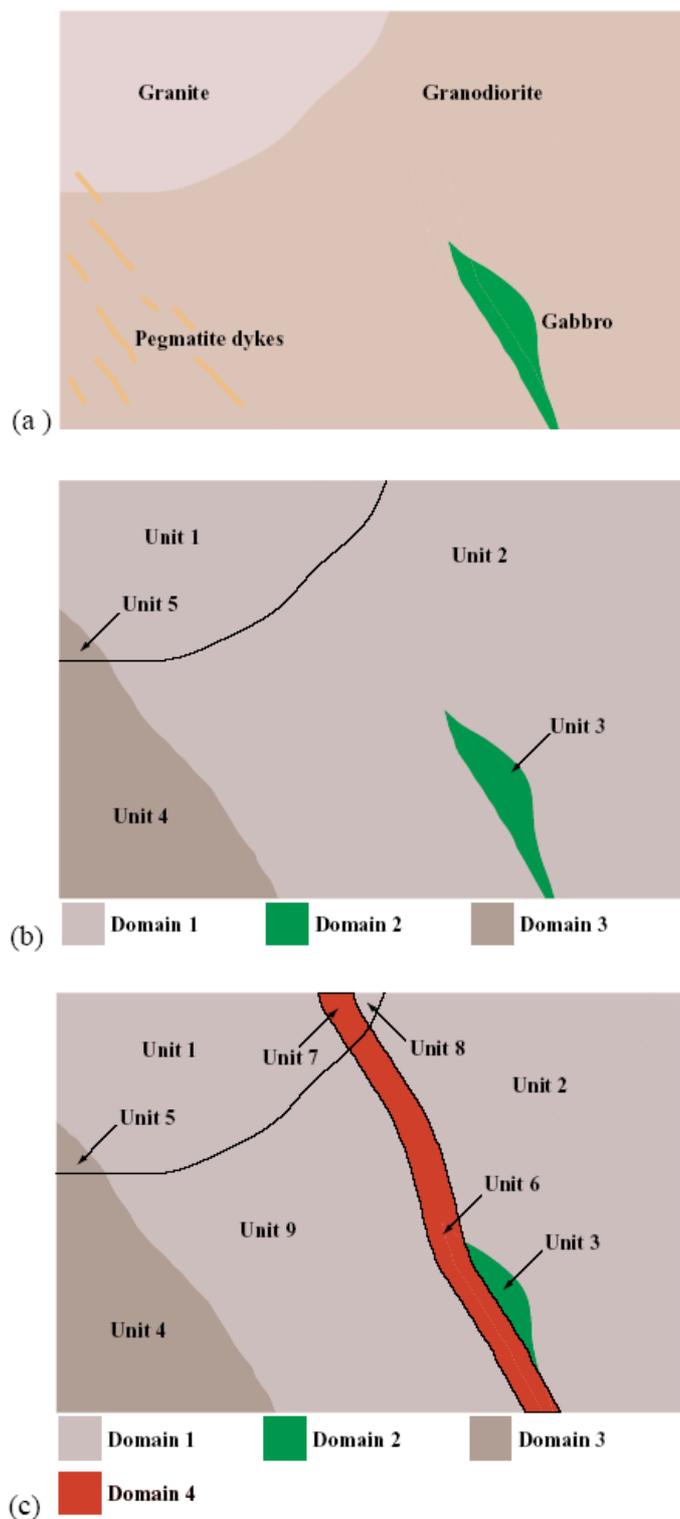


圖 2-1 單元與分區概念示意圖。(a)虛擬地質圖，包含數類岩石；(b)根據虛擬地質圖加以區分岩石單元，並基於水力特性之異同區分為三個分區；(c)若虛擬地質圖增加一個變形區，因而增加了一個分區以及增加了 5 個岩石單元(摘自[21])

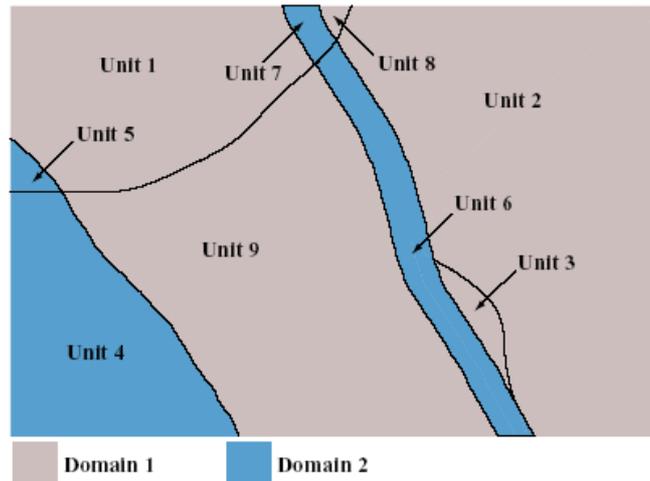


圖 2-2 虛擬地質圖(圖 2-1(a))以及增加一變形區後之水力分區劃分(圖 2-1(c))以不同方式(僅區分兩個分區，一為水力通導分區，另一為水力岩石分區)重新劃分結果(摘自[21])

## 2.3 水文地質模擬

雖然水文地質與地下水流模式的專有名詞已經非常確定，但兩者間仍非完全一致。本節概述水文地質模式常用之相關專有名詞。

### 與模式 (Models) 相關部分

**數學模式(Mathematical model)**：藉由簡化假設納入考慮相關過程，利用數學方程式來描述一物理系統。

**概念模式(Conceptual model)**：定義欲解決問題的幾何架構，模擬的尺度大小，描述過程之組成方程式(數學模式)與邊界條件。

**說明模式(Interpretation model)**：有效說明某一問題之概念數學模式。

**水文地質敘述性模式(Hydrogeological descriptive model)**：藉由一特定概念模式之地球科學模式，此概念模式須有限範圍，清楚定義的幾何區域，指定參數予這些區域，以描述其空間變化且最後定義邊界條件。

**地下水流模式(Groundwater flow model)**：利用數學模式於水文地質描述性模式，此模式可能為解析(Analytical)或者為一計算機程式(Computer code)。

**地下水流模式程式(Groundwater modelling code)**：一非參數化之計算機程式，應用於地下水模擬，以表示物性架構，幾何，主要過程與邊界條件之地下水流模式。

## **與模擬 (Modelling) 相關部分**

**模擬(Simulation)**：包含輸入(Input)與輸出(Output)，完整執行一地下水流模式之計算機程式。

**地下水流動模式測試(Model testing of a groundwater flow model)**：藉由各種可能幾何與邊界條件已決定其正確性。

**校正(Calibration)**：為了使地下水流系統之觀測資料與模式模擬結果間達到某種程度之一致性，因此修正模式的幾何架構，水力性質與邊界條件。

**可信度(Fidelity)**：應用模式所得結果與真實系統間之相似度，校正目標與可接受度之殘差(Residual)，取決於所選用之可信度，也就是說跟模擬的計畫的目標相關。

**敏感度分析(Sensitivity analysis)**：量化評估模式輸入的不確定性與變化性對模式校正，校正敏感度分析與結果或結論的影響(預測敏感度分析)。

**殘差(Residual)**：一變數在特定時間與位置，觀測值與計算值間之差異。

**水文條件(Hydrologic condition)**：一組初始、邊界條件和水力性質用以定義幾何架構。

**邊界條件(Boundary condition)**：系統邊界狀態的數學表示式用以限制模式的數學方程式，邊界可分外部與內部(例如隧道)。

**初始條件(Initial condition)**：一水流系統之一組水文條件，例如：在一特定時間整個水流系統之壓力分布，此相當於含水層系統之臨前水文條件。

**參數(Parameter)**：物理或化學量(岩石、土壤、水路、海或大氣之性質、條件與狀態)。

**序率(Stochastic)**：考慮參數為隨機變數。

**有效水力傳導係數(Effective hydraulic conductivity)**：在序率連續理論中有效水力傳導係數表示在均一、穩態流場下給予一水力梯度，使可以產生如一統計上無限均質區域之相同比流量，此時之水力傳導係數值稱之，有時可代表區域之假設常數值。

**塊狀有效水力傳導係數(Block-effective hydraulic conductivity)**：於一數值格網方塊指定一水力傳導係數值。

**水力傳導係數(Hydraulic conductivity)**：描述水於透水性介質移動之容易程度，依 Darcy 定律可定義為水移動速度與水力梯度關係的正比係數，當決定水力傳導

係數須考慮介質之滲透性、流體密度及運動黏滯性等相關因子。

**流通係數(Transmissivity)**：含水層厚度與水力傳導係數(hydraulic conductivity)之乘積。

**貯水係數(Storage coefficient)**：單位面積水頭下降一單位所能釋出水的體積。

**比出水量(Specific yield,  $S_y$ )**：單位體積含水層由重力排水所能排除之水的體積。

**比保水量(Specific retention,  $S_r$ )**：單位體積含水層由重力排水不能排除之水的體積。

**滲透性(Permeability)**：描述流體於孔隙介質流動之容易程度，其與介質有關。

### 第三章 水文地質概念模式之基本觀念與參數

#### 3.1 水文地質概念模式建立之目的

水文地質模式建立之目的為提供地下水系統內之地下水流動模擬所需之基本資料。更精確的說，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(Hydrogeochemical)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，均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徑，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。

#### 3.2 水文地質模式重要概念

根據相同之水文地質特性將地質材料(包括土壤與岩體)區分為相同單元。圖 3.1 顯示地質概念模式，該區域之地質材料包括土壤與岩體，其中岩體則包括岩石、單一裂隙、局部區域之次要與主要裂隙帶(Local and major fracture zone)、區域裂隙帶 (Regional fracture zone)。基本上，區域裂隙帶幾何分佈與水力特性應定量加以決定，至於位於區域裂隙帶間之岩體，則可根據其水力特性而區分為單一或數個單元，若區域裂隙帶中水力特性極為不同，有時亦可再細分數個單元。圖 3.2 為一深度 1,000 公尺地區之水文地質概念模式，而圖 3.3 則為一深度約 100 公尺地區之水文地質概念模式。

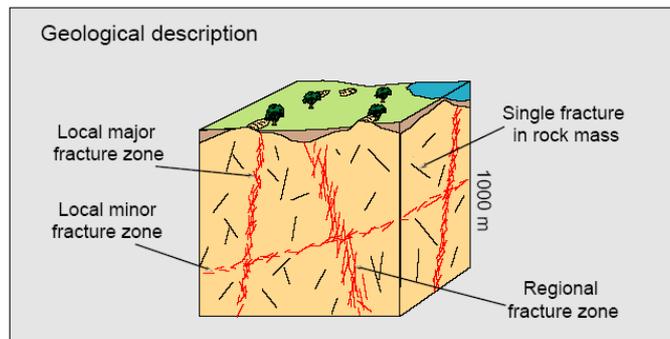


圖 3-1 地質模型概念示意圖(摘自[21])

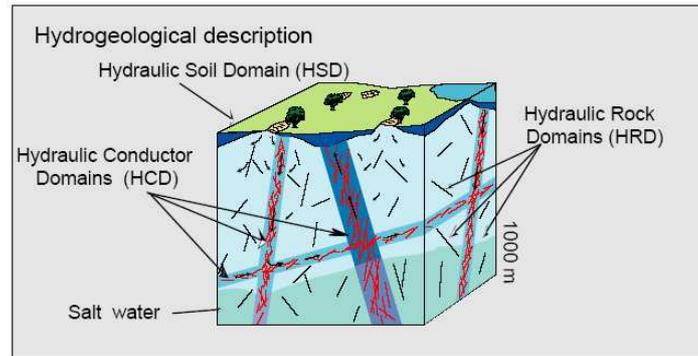


圖 3-2 水文地質模型概念示意圖(摘自[21])

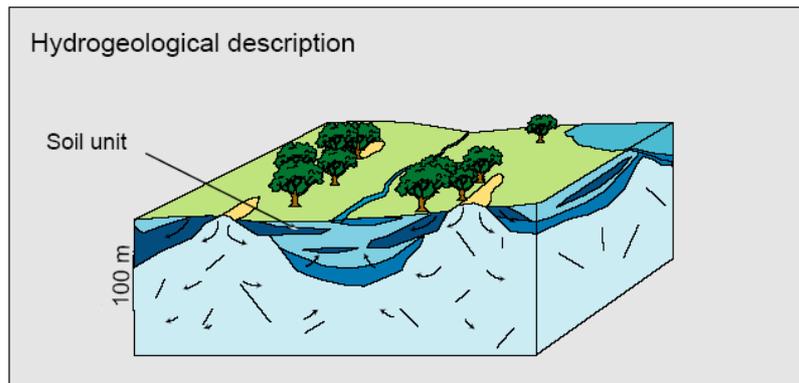


圖 3-3 接近地表之水文地質模型示意圖(摘自[21])

水力土壤分區(Hydraulic Soil Domains, HSD)一般以連續性多孔隙介質(Continuum Porous Medium; CPM)概念作為模式建立之基礎，水力岩石分區(Hydraulic Rock Domains, HRD)則可區分為離散裂隙網絡(Discrete fracture network; DFN)概念以及連續性多孔隙介質(Continuum Porous Medium; CPM)概念。水力土壤與水力岩石分區內之水文地質參數可為常數或為統計分布，然而對於水力岩石分區而言，一般考慮水文地質參數為統計分布，故連續性孔隙介質概念即轉化為序率連續性(Stochastic Continuum; SC)概念，而離散裂隙網路(DFN)概念亦多由統計方法建立。利用序率連續性概念以及離散裂隙網路概念模擬岩體之示意圖如圖 3.4。

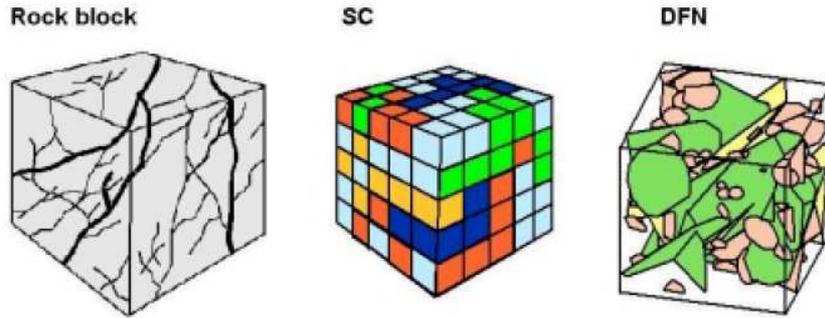


圖 3-4 地下水流動模擬之序率連續性(Stochastic Continuum; SC)概念與離散裂隙網路(Discrete Fracture Network; DFN)概念(摘自[21])

飽和變密度地下水流動一般假設摩擦造成之能量損失為一定值，而主要驅動地下水流動者為地下水位面，而地下水位面則受土壤與岩石特性及降雨影響。地表水文之動態模擬(水路內之流動與土壤中之非飽和流動模擬)雖可進一步考慮，然而對於大尺度區域地下水流模擬地表水文之動態模擬則非必然需要。

### 3.3 數學模式

雖然不同概念之地下水流模式所需參數可能有所不同，但計算地下水流動(移流)之方程式原則上相同，納入密度變化考慮之基本地下水流動方程式為：

**移動方程式**

$$q = -\frac{k}{\mu} \cdot (\text{grad}(p) + \rho \cdot g \cdot \text{grad}(z)) \quad (3-1)$$

**連續方程式 (質量守恆)**

$$\text{div}(\rho \cdot q) + \frac{d(\rho \cdot n)}{dt} + \rho \cdot Q = 0 \quad (3-2)$$

**傳輸方程式**

$$\text{div}(D\rho \cdot \text{grad}(C) - C\rho \cdot q) = \frac{\partial(\rho n_e C)}{\partial t} + Q\rho \cdot C_s \quad (3-3)$$

**狀態方程式**

$$\rho = f(T_e, C, p) \quad (3-4)$$

$$\mu = f(T_e, C, p) \quad (3-5)$$

**平均移流速度**

$$v_a = \frac{q}{n_e} \quad (3-6)$$

上述方程式之符號意義分述如下：

$q$  為每單位面積的流量（比流量）

$k$  為滲透率

$\mu$  為動力黏滯度

$p$  為水壓力

$\rho$  為流體密度

$g$  為重力加速度

$z$  為高程

$n_e$  為有效孔隙率

$n$  為總孔隙率

$Q$  為每單位體積之注水或抽水

$t$  為時間

$T_e$  為溫度

$D$  延散張量

$C$  為可溶解物種之質量百分比

$C_s$  注入或抽取流體之質量百分比

上述方程式可用以計算考慮壓力、溫度和密度情況之地下水流動。滲透性為地質材料性質而動力黏滯度為流體性質。地下水流模擬主要根據滲透性，然而在某些情況下密度效應可以被忽略，尤其是說明水力試驗所得之水力性質。如果水密度效應可以被忽略，則上述方程式可簡化如下：

**移動方程式**

$$q = -\frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \cdot \text{grad}\left(\frac{p}{\rho \cdot g} + z\right) = -K \cdot \text{grad}\left(\frac{p}{\rho \cdot g} + z\right) = -K \cdot \text{grad}(h) = K \cdot i \quad (3-7)$$

**連續方程式**

$$-\text{div}(q) \approx \frac{S_s}{\rho \cdot g} \frac{d(p)}{dt} + Q \approx S_s \frac{d(h)}{dt} + Q \quad (3-8)$$

$$K = k \cdot \frac{\rho_w \cdot g}{\mu_w} \quad (3-9)$$

$$S_s = (\alpha + n \cdot \beta) \cdot \rho_w \cdot g = n \cdot c_l \cdot \rho_w \cdot g \quad (3-10)$$

其中  $K$  為水力傳導係數， $S_s$  為比貯水係數(Specific storage coefficient)，在地下水之相關文獻，系統的壓縮性為  $C_t = \alpha/n + \beta_w$ ， $\alpha$  為孔隙介質的壓縮性， $\beta_w$  為水的壓縮性。

在 DFN 模式中，二維裂隙於空間中為相互連結，在假設流體性質為常數下，這些二維裂隙主要的參數為  $T$ (流通係數)與  $S$ (貯水係數)。

系統之蓄水能力可能為局部變化，其主要取決於有效岩石應力或系統是否為受壓或非受壓。在地下水流模式中，非受壓部分的效應為延遲之壓力回應。如果考慮比出水量( $S_y$ )為相關，則納入於模擬中。有效應力的效應則將不包含於大尺度之區域場址描述模式，雖然有時並未納入考慮未飽和流動，但如果欲模擬未飽和流動，則為了取得土壤持水和毛細傳導曲線，主要參數將包括土壤地層、地質的描述與其顆粒分佈曲線。

### 流體獨立參數

在地下水力學中孔隙介質的主要參數為水力傳導係數(Hydraulic conductivity)、流通係數(Transmissivity)、比貯水係數(Specific storage coefficient)、比出水量(Specific yield,  $S_y$ )與比保水量(Specific retention,  $S_r$ )。理論上比出水量與比保水量之和相等於孔隙率值，但在實際現地試驗(自由排水之孔隙系統)，由於受孔隙介質內氣體侵入影響，排水的體積通常少於此值。通常假設溫度、壓力、與溶質濃度不影響這些參數與地下水流動。

如果溫度、壓力與溶質濃度對地下水流有重大影響，將使用岩體與表面沉積物流體獨立參數： $k$  為滲透係數(Permeability)、 $n$  為總孔隙率、 $ct$  為系統壓縮性。

雖然在密度與重力加速度已知下，總孔隙率與壓縮性可以計算得，但藉由水力試驗並無法估算總孔隙率。因此可定義一孔隙壓縮因子。

石油工程習慣使用滲透性厚度積( $kb$ )( $m^2$ )。同樣地，蓄水能力將以孔隙率、壓縮性、厚度積( $nctb$ )。溫度、總溶解固體(TDS)與水壓對計算得之水力性質之影響，應該也要考慮。

## 3.4 幾何特徵描述

### 3.4.1 水文地質模式之尺度

水文地質模式之尺度分為區域場址模式(Regional site model)與局部場址模

式(Local site model)兩種尺度，區域尺度水文地質模式為區域地下水流模式之基礎，同時，所得模擬結果將提供作為局部尺度水文地質模式之邊界條件。區域尺度之水文地質模式，其涵蓋範圍應足夠大至能其邊界條件對於局部尺度之地下水流邊界條件已無太大之影響。而局部尺度之水文地質模式涵蓋範圍應足夠大至能完整模擬隧道處置場周圍之地下水流場。

根據瑞典 SKB 報告 R-03-08(2003)之建議[21]，局部尺度之水文地質模式應能涵蓋  $10\text{km}^2$  之區域，至於區域尺度之水文地質模式涵蓋範圍應更廣。場址調查(Site investigation)即應於上述範圍內執行，因局部尺度之水文地質模式要求較低之不確定性，故於局部尺度範圍內之調查應較區域尺度範圍密度為高。為了討論區域地下水流邊界條件之適當性，有時甚至需要提出超級廣域模式(Super regional models)，此一模式多基於對於某一個廣大地區之地質與水文地質現有的了解。圖 3-5 為 Simpevarp 場址不同尺度之水文地質模式涵蓋範圍圖[21]。

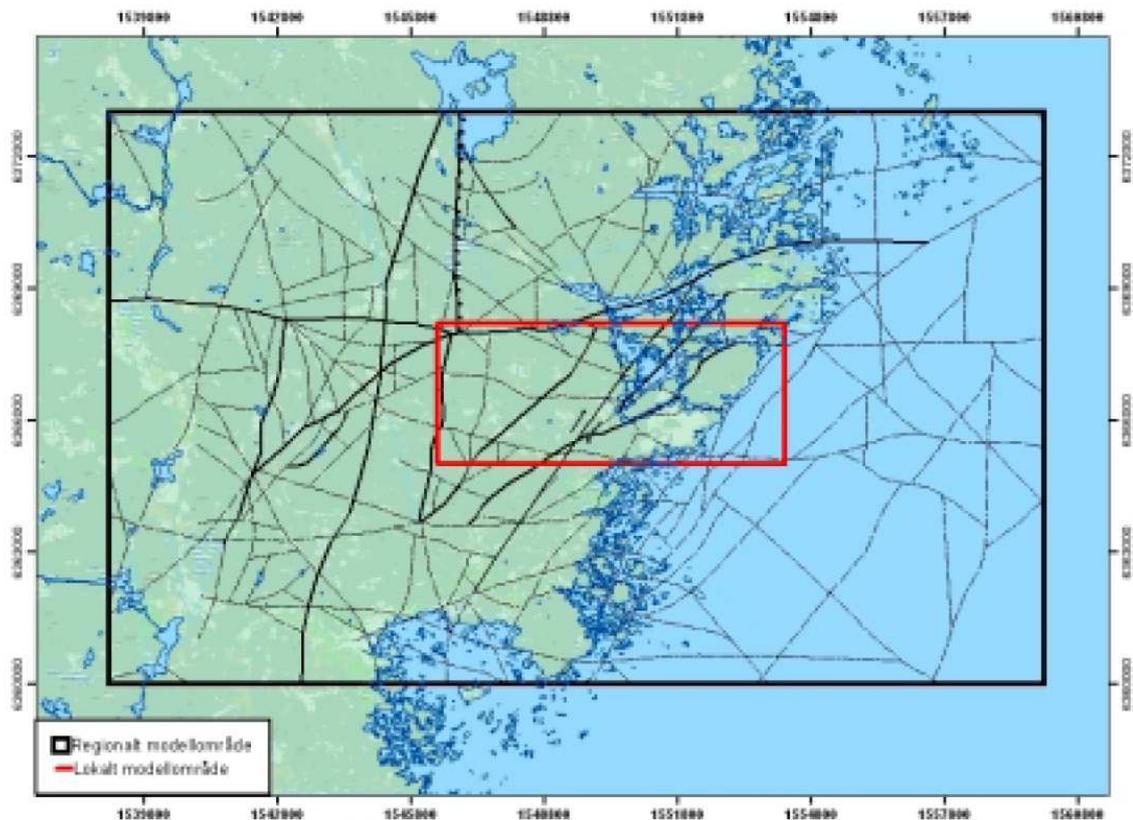


圖 3-5 Simpevarp 地區之區域與局部尺度之水文地質模式涵蓋範圍示意圖(摘自 [21])

### 3.4.2 模式分區(Model domains)

幾何特徵描述為不同領域所共有之基礎資訊。不同領域所進行之幾何特徵調查結果，可作為其他領域之獨立證據，或可加以綜合解釋與評估，以得到幾何特徵描述、邊界條件以及初始條件之完整架構。

地球科學之敘述性模式主要依據性質之不同而區分出不同之幾何單元，所謂的性質將視使用者以及所使用之模式而極為不同，其中設計與安全評估為地球科學敘述性模式之主要使用者。

地質模式為所有場址敘述性模式之基礎。圖 3-1 呈現主要之地質元素。最重要的地質元素為劇烈變形區(Large deformation zones)，此一地質元素對於地球科學敘述性模式影響甚大。因此，於空間中清楚定義劇烈變形區對於幾何特徵描述極為重要。部份局部次要裂隙帶(Local minor fracture zones)大部份以統計方式於空間中加以描述，因此類地質單元數量常太多，以致難以一一於調查獲得而於模擬尺度之空間中加以定義。然而，隨著調查數量與精度之增加，於模擬尺度空間中被清楚定義之次要裂隙區將逐漸隨之增加。裂隙(Fractures)以統計方式於模擬尺度之空間中加以定義，裂隙的統計特性將由露頭以及調查孔觀察而得。基於岩體之特性(如岩石種類與力學特性等)，岩石單元(Rock units)以及岩石分區(Rock domains)即能於模擬尺度之空間中加以定義(如圖 2-1)。

結合單孔水力試驗(Hydraulic single-hole tests)、干擾試驗(Interference tests)以及變形區、岩石單元之幾何特徵描述，即可進行幾何單元特性描述，如圖 2-2 與圖 3-2 之水力通導分區(Hydraulic Conductor Domains, HCD)與水力岩石分區(Hydraulic Rock Domains, HRD)。

地質模式中亦包含了土壤沉積物之型態與分層，尤其是第四紀沖積物。基於地質模式，配合水文地質調查，土壤沉積物將被區分為水力土壤分區(Hydraulic Soil Domains, HSD)，如圖 3-3。

### 3.5 描述尺度

水文地質模式中之參數值應與使用水文地質模式(特別是設計或安全評估)者所需之描述精度(或空間解析度)間建立關聯性(Andersson,2003[24])。例如儲置罐溶質之傳輸與儲置隧道與儲置坑洞設計，均需要詳細的敘述尺度。運輸隧道與模擬深儲置場周圍地下水流場之描述並不需太詳細之描述尺度。對於為提供局部

尺度水文地質概念模式邊界條件之區域尺度模擬，較大的描述尺度則相對足夠。

對一空間變化之性質，所謂的尺度指的是區域內性質視為平均之尺寸或稱為描述尺度，不同應用所需之描述尺度有不同的需求。以地球科學描述性模式所需，不同尺度同時存在，隨著與儲置槽距離漸遠，場址調查數量漸減，能描述的精細程度亦隨之漸減。這意味著區域與局部尺度之水文地質概念模式，不僅對於不確定性有所差異，於描述尺度上亦有所區別。

SKB 公司編號 R-03-08 報告(Rhén et al.,2003[21])中，建議尺度之選擇有 5 公尺(大約是儲置槽的尺度)，20 公尺(大約是隧道的尺度)以及 100 公尺(區域尺度之水文地質概念模式之尺度)三種，如圖 3-6 所示。5 公尺之描述尺度為的是供靠近儲置槽與儲置隧道所需，20 公尺之描述尺度則是為了供儲置場局部尺度水文地質模式所需，而 100 公尺之描述尺度則是供區域尺度水文地質概念模式所需。描述尺度均與每一個場址不同模擬目的有關。

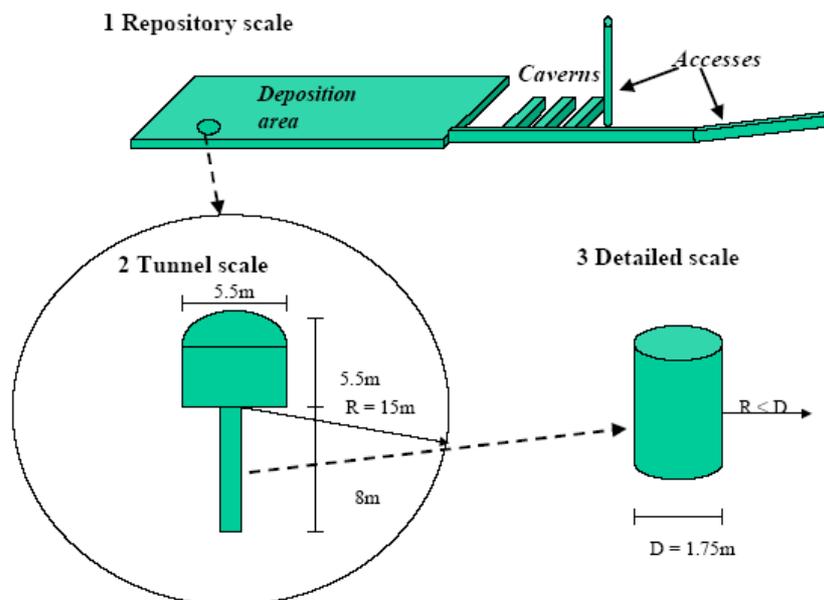


圖 3-6 水文地質模式描述尺度示意圖(摘自 Andersson et al.,2002[25])

然而，有些水力試驗其描述尺度較 5m 更細微，如裂隙間距(與裂隙出現頻率有關)常以數十公分之尺度加以描述，這些資料事實上對於近場模擬(Near-field modelling)極為重要，這些資料將與 5m 描述尺度互相比較。

雖然每一個參數對應一個描述尺度，但某些描述卻是大致上與尺度無關的。舉例而言，裂隙分布描述雖然可能受限於最小取樣範圍，然而於水文地質概念模

式描述上卻是與尺度無關的參數。

水文地質概念模式中之描述尺度與試驗量測尺度有關。試驗結果所得之參數，事實上將受到該試驗所涵蓋之體積範圍(與試驗方法及試驗持續時間長短有關)影響，不同試驗之量測方法於空間中之解析度即為量測尺度，如孔內試驗之量測尺度大致上與量測段之長度相關。

因為滲透特性常無法直接取平均，因此符合模擬所需描述尺度之不同試驗量測精度避免了滲透特性平均的複雜性。

### 3.6 水力分區之水力特性

一般而言，水力分區通常即為地質分區，然而，若於一地質分區中，水力特性變化過大，則一個地質分區可能再細分為數個水力分區。反之，若數個地質分區其水力特性變化不大，則亦可合併為一個水力分區。以下之介紹不納入考慮鹽類相關之傳輸特性。由水力試驗與追蹤劑試驗所得結果可作為發展水力分區之孔隙率空間變化關係模式。

#### 3.6.1 水力通導分區(Hydraulic Conductor Domains, HCD)

岩盤劇烈變形區於水文地質概念模型中以水力通導分區表示，然而，劇烈變形區之岩盤滲透性可能極低，因此水力通導分區並非必然代表其即為地下水之導水區。一個清楚定義厚度的劇烈變形區可能由多個水力通導分區構成，多個水力通導分區由數個面所區分，水力通導分區之參數列於表 3-1，其概念則示於圖 3-7。

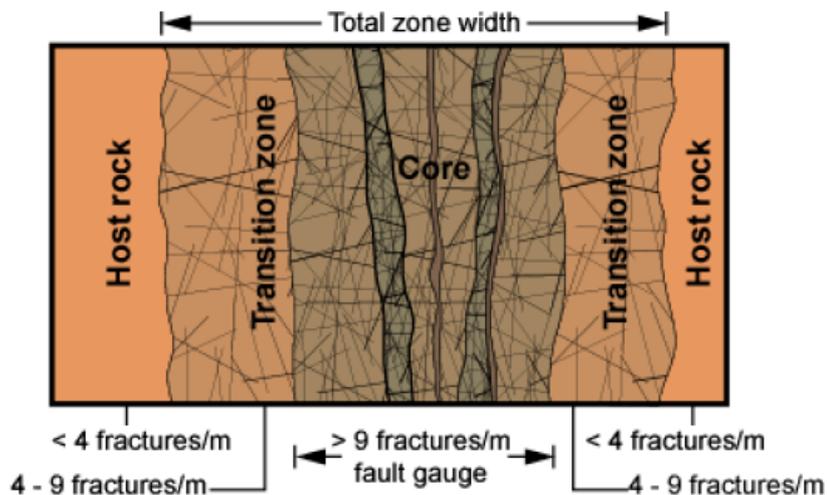


圖 3-7 脆性變形區(Brittle deformation zone)構造示意圖(摘自 Munier et al., 2003[26])

表 3-1 水力通導分區參數之空間分佈(譯自[21])

| 參數   | 符號 (單位)              | 描述尺度      | 參數於水力通導分區中之空間分布表示方法 | 附註   |
|------|----------------------|-----------|---------------------|--|
| 流通係數 | T(m <sup>2</sup> /s) | 10~100(m) | 常數或統計分布             | 一個劇烈變形區可能有好幾個水力通導分區  |
| 貯水係數 | S(-)                 | 10~100(m) | 常數或統計分布，經常視為 T 的函數  | 由干涉試驗獲得，然而，因為貯水係數參數於空間幾何分布上的複雜性，加上試驗抽水段距離觀察段較遠，故造成估計上極富困難度 |
| 帶寬   | b(m)                 | -         | 常數                  | 由地表地質以及鑽井之地質、水文地質以及地球物理綜合解釋獲得                              |

經由地質解釋，將岩盤劇烈變形區取一代表性之寬度，並將具相同水文地質特徵的岩盤設定為水力通導分區，一個岩盤變形區中若水力特徵變化較大，則可能進一步將其劃分為數個水力通導分區。水力通導分區之延伸通常超過數百公尺以上，因此，水力通導分區之參數一般為 10~100 公尺範圍內劇烈變形區之平均值，換句話說，描述尺度為 10~100 公尺。

水力通導分區之裂隙特徵可能極為複雜，水力通導分區之水力特性可能為少數相互間連結性極佳之大裂隙所控制，或是由密度與填充物均有極大差異之裂隙區組成。當以定值參數描述水力通導分區時並不考慮裂隙於空間分布之複雜特徵，然而，若有需要則可利用統計分佈方式(10~100 公尺尺度)描述取代定值參數之描述方式。雖然有些試驗對於裂隙分布特性描述時如何進行參數之“平均”有幫助，然而，地質上對於劇烈變形區的分類與解釋，卻常為具有如此異質性的水文地質或傳輸特性參數設定之基礎。

劇烈變形區中有時會有低滲透性的斷層泥，因斷層泥的存在使得水力傳導分區具有異向性，此一異向性應於地下水流動之模擬時加以考慮。

### 3.6.2 水力岩石分區(Hydraulic Rock Domains, HRD)

水力岩石分區由非屬水力通導分區之岩石單元(Rock units)所組成。水力岩石分區之參數可設定為常數，但是絕大部分水力岩石分區之參數將被視為於空間中之統計分布。模擬水力岩石分區有兩類概念：離散裂隙網路模式概念(Discrete

Fracture Network; DFN model)以及連續性孔隙介質模式概念(Continuum porous medium; C model)。根據兩種模式概念之不同，水力岩石分區之參數即有所不同，離散裂隙網絡模式與連續性孔隙介質模式之參數分別列於表 3-2 與表 3-3。水力岩石分區不同模式概念分別說明如後：

表 3-2 水力岩石分區參數之空間分佈-離散裂隙網絡模式概念(DFN Model) (譯自[21])

| 參數    | 符號 (單位)    | 描述尺度      | 參數於水力岩石分區中之空間分佈表示方法 | 附註   |
|-------|------------|-----------|---------------------|--|
| 流通係數  | $T(m^2/s)$ | 10~100(m) | 統計分布                | -  |
| 貯水係數  | $S(-)$     | 10~100(m) | 統計分布，經常視為 T 的函數     | 由干擾試驗獲得，然而，因為貯水係數參數於空間幾何分布上的複雜性，加上試驗抽水段距離觀察段較遠，故造成估計上極富困難度 |
| 帶寬或層厚 | $b(m)$     | -         | 常數，經常視為 T 的函數       | 由地表地質以及鑽井之地質、水文地質以及地球物理綜合解釋獲得                              |

表 3-3 水力岩石分區參數之空間分佈-連續性孔隙介質模式(C modele) (譯自[21])

| 參數     | 符號 (單位)   | 描述尺度        | 參數於水力岩石分區中之空間分佈表示方法 | 附註   |
|--------|-----------|-------------|---------------------|--|
| 水力傳導係數 | $K(m/s)$  | 5,20~100(m) | 常數或統計分布             | -  |
| 比貯水係數  | $Ss(1/m)$ | 5,20~100(m) | 常數或統計分布，經常視為 K 的函數  | 由干擾試驗獲得，然而，因為貯水係數參數於空間幾何分布上的複雜性，加上試驗抽水段距離觀察段較遠，故造成估計上極富困難度 |
| 比出水    | $Sy(-)$   | 100(m)      | 常數或統計分布             | 由干擾試驗獲得，然而對於低滲透區之估計極富困難度                                   |

水力岩石分區需要定義之水力特性包括：裂隙之位態分布、裂隙大小尺寸分

布、裂隙密度(單位體積中裂隙之面積)、裂隙空間分佈模式、裂隙形狀(常設為圓形或方形)、流通係數之分布(或其他參數之分布)。雖然這些水力特性為離散裂隙網絡概念模式(DFN Model)數值程式輸入參數所需之資訊，但是同時也是序率連續性(Stochastic Continuum)概念模式(SC Model)數值程式輸入參數前處理所需之資訊。雖然前述之水力特性與尺度無關，然而模擬時，應考量水力岩石分區範圍大小、數值程式離散化之程度(網格大小)與裂隙大小間之關係，根據 Andersson et al.(2002)[25]以及 Rhen et al.(1997)[27]之建議，500 公尺直徑範圍之水力特性將基於統計 1 公尺痕跡長(Trace length)之裂隙獲得。連續性數值程式，若模擬參數乃是利用 DFN 概念取得之，則分析時可考慮區分次網格，次網格之參數可設定為常數或某一統計分布。每一裂隙之特性設定為常數，小裂隙視為單一裂隙，然而大裂隙則應視為於空間中相互連結。上述裂隙於空間分佈之設定為重要方法。

連續性數值程式參數之空間分佈描述方法還包括了直接設定水力傳導係數為常數，此一為常數之水力傳導係數應為等效水力傳導係數(Effective hydraulic conductivity,  $K_{ef}$ )。雖然所謂等效水力傳導係數的觀念備受質疑，然而，根據不同水力試驗、不同代表體積所獲致之不同等效水力傳導係數，對於利用地下水流動模式校正參數極具參考性。

序率連續性模式中參數空間分布場，可由不同尺度之試驗獲得之水力傳導係數與網格經驗關係式，建立塊體等效水力傳導係數(Block-effective hydraulic conductivity,  $K_b$ )之均值與標準差(Rhen et al.,1997;Walker et al.,1997;SR 97,1999 [28-30])。利用這種方法求得之結果不需要進行空間修正。

地質統計法亦可做為建立空間參數分佈之修正方式(Isaaks and Srivastava, 1989; Deutsch and Journel, 1997; Jensen et al.,2000; Deutsch,2002[31-34])。Jensen et al. (2000)[33]認為對於相關假設並未確認合理性，故目前地質統計法於高度異質性破裂岩盤滲透性資料之統計處理尚需進一步研究。或許利用 DFN 推估 SC Model 之空間關聯性再利用地質統計法設定網格參數為可行之方法[35]。

### 3.6.3 水力土壤分區(HSD)

土壤層的水文地質概念模型建構，一般以土壤之地質分區以及於土壤層進行之水力試驗為基礎。不同的土壤單元(Soil units)即可根據給定之水力特性，區分為不同之水力土壤分區。一個水力土壤分區可能包括一個或許多個土壤單元，水力土壤分區之參數列於表 3-4。由地形與岩盤面決定之土壤深度也是水文地質概

念模式與水力土壤分區極為相關之重要資訊。

表 3-4 水力土壤分區參數之空間分佈(譯自[21])

| 參數     | 符號(單位)  | 描述精度     | 參數於水力岩石分區中之空間分佈表示方法 | 附註                      |
|--------|---------|----------|---------------------|-------------------------|
| 水力傳導係數 | K(m/s)  | 1~100(m) | 常數或統計分布             | 由土壤粒徑分佈或水力試驗獲得          |
| 比貯水係數  | Ss(1/m) | 1~100(m) | 常數或統計分布,經常視為K的函數    | 由干涉試驗獲得,然而對於低滲透區之估計極富困難 |
| 比出水量   | Sy(-)   | 100(m)   | 常數或統計分布             | 由干涉試驗獲得,然而對於低滲透區之估計極富困難 |

基本上,設定水力土壤分區內之水文地質參數為一常數。欲以統計方式進行參數描述常將面臨資料不足之困境。概略性的空間統計參數可用作測試地下水流出區域(Discharge area)之行為。雖然貯水係數不易推估,然而文獻中卻有相當多之參考值可供使用。

### 3.7 地表水文

#### 3.7.1 一般性說明

在地表水文主要考慮之基本幾何單元為湖泊、水路與地形,地形可用以定義地表水分界與排水區域,通常會希望地下水分界與地表水分界一致。由地表面、湖泊與水路有效降雨(降雨扣除蒸發散量)提供水路之淨流量、逕流與海面下地下水流出量(如果某一流出區是以海水為邊界)。在地表面一部份的有效降雨以漫地流(在陸地表面流動)或中間流(在地表下與飽和帶上之流動之部份入滲水)直接流入湖泊或水路。中間流可能以滲流的方式流出地表並繼續以漫地流進入河流。其餘的入滲水(淨入滲流)滲漏穿過未飽和層而補注地下水。在某些區域地下水流出進入陸地表面,表面水體或至大氣稱為流出區。從地下水流到地表面的飽和層的水稱為”基流(Base flow)”,流到海水則稱為”海面下外流(Subsea outflow)。來自流出區之逕流對水文地質而言為一重要變數,流出區之有效降雨可藉由逕流除以流出區面積計算,有時亦稱為比逕流(Specific runoff),以上所言之各因子為估算地

下水模式上邊界之基本。近地表面之地質調查與地下水流如圖 3-8 所示

### 3.7.2 地形

地形為定義水收支平衡計算中流出區計算之基本且為模擬之幾何單元。

### 3.7.3 水路、湖泊與海

鄰調查場址之水流流路、湖泊與海之幾何特徵為主要模擬元素，其可能為流出區或在某種水力條件下其為補注區。水路、湖泊、海水位之年平均與時間變化與水路之逕流量為特別重要。

### 3.7.4 氣象條件

降雨、潛勢蒸發散、空氣溫度之年平均量與時間與空間分布對估算上邊界條件特別重要，且可與逕流估算比較。

### 3.7.5 漫地流、中間流與地下水補注

儘管逕流率與氣象條件應用於水收支平衡水流之量化，但地質模式仍為描述漫地流、中間流發生因子之基礎。漫地流與中間流之詳細說明並不重要，但無論如何，地表下土壤層 0.5~1 公尺通常較深層土壤有較高之水力傳導性，當地下水位靠近地表時可強烈影響中間流與地下水之流動。

補注效應與在地圈之反應可藉由量測地下水位面、土壤或岩石層井中之不同深度觀測段之壓力面與水路、湖泊與海之水位估算。植生與湧泉之觀測可呈現流出區與某些水文地質情形。

通常地下水面(天然)沿地形變化，而在高地形點上有較大之深度。由於有薄層土壤覆蓋岩石之異質性，地下水位面與壓力面之空間變化可能非常大。此可能於高地形點上有最大變化。

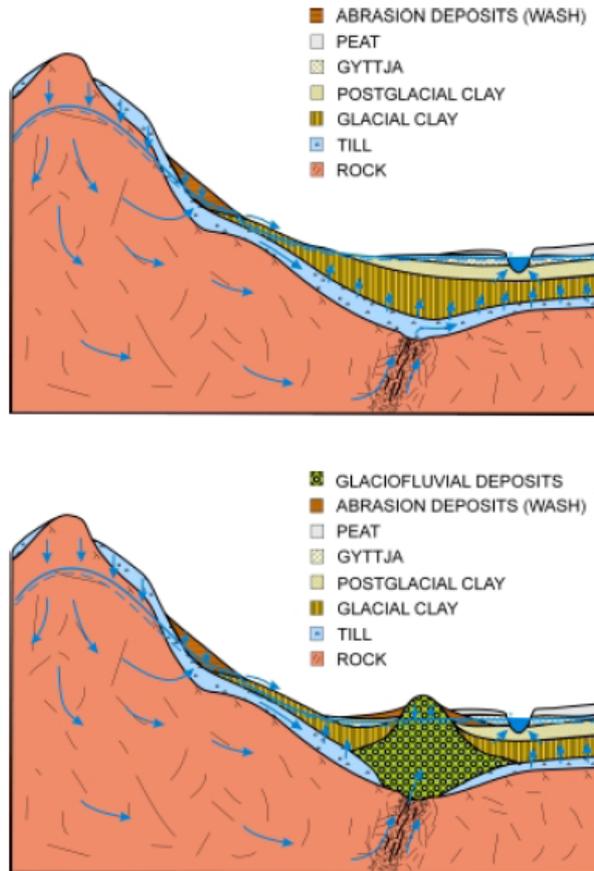


圖 3-8 接近地表之地質與地下水流動示意圖(摘自[21])

### 3.8 邊界條件與初始條件

通常指定之邊界條件有五種型式：

- 定水頭邊界(Dirichlet 條件)
- 定流量邊界(Neumann 條件)
- 水頭相依流動邊界(Cauchy 或混合邊界條件)
- 自由水面邊界(水頭等於邊界高度，例如地下水位面)
- 滲流面邊界(類似自由水面邊界)

由於不同邊界位置與考慮問題的條件不同因此須考慮不同的邊界條件。上邊界通常以簡化的邊界條件模擬，逕流率通常可用以估計平均之有效降雨率。降雨與蒸發散對說明某些場址特性資料非常重要，且可用以詳細模擬近表面流動之較。抽水或入滲等外部來源亦需納入模擬考慮。開放性鑽孔之水位量測通常可做為地下水流模式之校正。由於在地面或海平面下位置與深度之不同，垂直邊界通常具有不同的邊界條件。在區域模式，最重要的是儘可能定義模擬的體積以使邊

界條件較為簡單且可信賴。邊界條件之位置與空間變化通常取決於所得之鑽孔之壓力與總溶解固體(TDS)變化、地形與地質描述。對局部場址模式而言邊界條件主要由區域場址模式而得。當底部距離處置深度夠遠且不影響處置深度之流場時，區域場址模式之下邊界通常可假設為零流量邊界。

對暫態模擬通常須給定一初始條件，壓力觀測對了解補注區域與流出區域地下水流系統非常重要。對某些地下水模擬有時須考慮時間相依之邊界條件。長時間之地下水模擬須考慮海岸移動。

## 第四章 水文地質分析所需之基本資料調查與分析

水文地質數學模式所需之相關資料主要取自於現地調查與監測，因此本章將回顧相關的水文地質調查方法，進行場址調查須以多階段進行以增加每階段更新模式所需之場址特性資料。至於主要水文地質資料分析，其目的為編輯、詮釋、分類與資料的初步評估，此時尚不需跨領域資料之綜合分析評估。此項工作包含監測資料（降雨、逕流、水位）以及針對水力試驗所得資料之初步詮釋與分析。如果沿著鑽孔地盤調查結果可以取得，此部分資料之分析也將納入。整體資料分析的目的為綜觀與詮釋水文地質相關資料，以方便水文地質資料與三維模式間相互之連結與互動。

### 4.1 收集與整理場址之相關現有資料

在進行場址調查前應先收集與整理與場址相關的現有資料以有效進行現地調查計畫之規劃，所收集資料須包括現有的鑽孔、構造，氣象、水文與海洋相關資料。

### 4.2 現地調查計畫

在開始規劃現地調查時須以初始之水文地質模式為基礎，在進行現地調查更應有連續性規劃，經過每一版本的水文地質模式，須詳查每一數學模式是否滿足設計與安全分析之需求與場址的全面了解。如果無法滿足相關需求時，此時須進行補充調查，並提出關於補充調查的型式與位置之建議。

### 4.3 現地調查與主要資料分析

#### 4.3.1 水力試驗描述

用於現地的水力試驗方法有三種：定流量試驗(如抽水試驗(Pumping test)、流量井測(Flow logging))、定壓力試驗(如注入試驗(Injection test))、變水頭與變流量試驗(如微水試驗(Slug test))。藉由比較不同試驗方法所得結果，便於相關參數關連性的探討。

常用於岩盤區之量測尺度(鑽孔內試驗區段長度)分別為全鑽孔長度、100 公

尺、20 公尺與 5 公尺，如果量測一特定的水力通導分區(HCD)也可選用其它不同之試驗區段長度。

許多方法可用以分析這些試驗，抽水試驗與注入試驗在假設穩定的情況可利用 Moye(1967)[36]計算試驗區段(流動區段)之流通係數(Transmissivity)與比容量(Specific capacity, Q/s)。對暫態試驗(量測流率與壓力變化為時間的函數)的分析方法通常取決於試驗方法，主要的分析方法可參考 Kruseman and Ridder (1990)[37]。微水試驗最適當的分析方法為 Cooper's method (Cooper et al., 1967; Papadopoulos et al., 1967[38,39])。

水力試驗資料需詳盡，如果水力試驗中有進行暫態試驗，需說明水力試驗之流動區域與範圍(流場)，繪製之壓力導數與流動範圍需根據現有資料加以確認其適當性。此階段可進行水力試驗之輔助分析與解釋，但通常干擾試驗之重新解釋將配合三維模擬階段進行(詳第五章)。

#### 4.3.2 水文

首先須由空照圖製作新的地形圖，此地形圖須包含水流流路、湖泊與海岸所在位置，透過現地實地勘察配合此一地形圖，可進行地表水分界，水文現地測繪之工作尚須包括確認湧泉位置與可能流出區。水流流路之逕流量亦須量測，部份水流流路之逕流量甚至需要長期連續量測，逕流通常於初始場址調查階段即開始量測。部份湖泊與海洋的水位亦須連續量測。

儘可能於場址設立 1 至 2 個氣象觀測站，所進行的量測須包括空氣溫度、降水、風速、空氣濕度與總輻射(Global radiation)，由這些量測的基本資料可計算潛勢蒸發散，另外須於河川、湖泊與海洋採取水樣以獲得總溶解固體。

水流流路、湖泊與海岸位置，配合地形圖與現地水文實地勘查，可提供定義地表水分界以及可能流出區所需之資料(如圖 4-1~圖 4-3)。

逕流量可由集水面積推估，流路之連續流量、湖泊與海洋的水位、氣象觀測站之氣象等測量資料也應加以整理。鄰近場址附近所測得之氣象、水文與海洋等量測基本資料，應系統性整理儲存於資料庫中。海水採樣之總溶解固體值為重要水文地質參數(Smellie, 2003[40])，觀測值應載明於書面報告中。觀測井觀測所得之資料須整理並載明於書面報告中，以分析評估觀測值隨時間而變化之情形，並由觀測結果驗證已執行之水力試驗之詮釋。

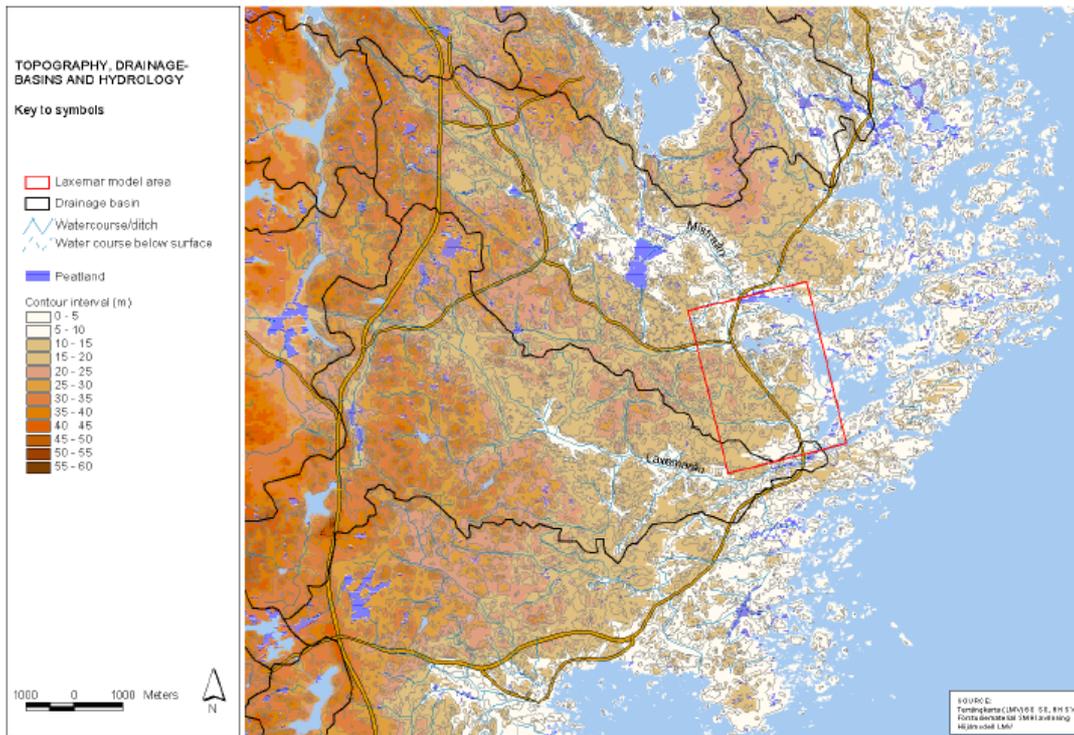


圖 4-1 Laxemar 地區與其鄰近地區之地表水分區(排水盆地)、水路與地形(摘自 Andersson et al., 2002[41])

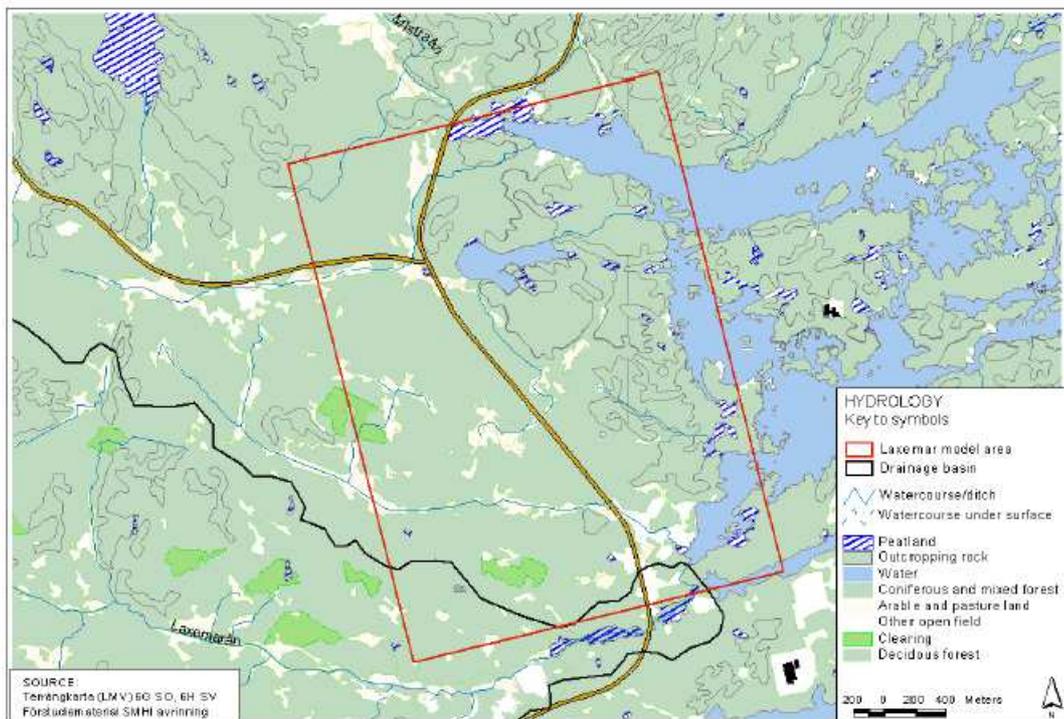


圖 4-2 Laxemar 地區與其鄰近地區之地表水分區(排水盆地)、水路與一般植生描述(摘自 Andersson et al., 2002[41])

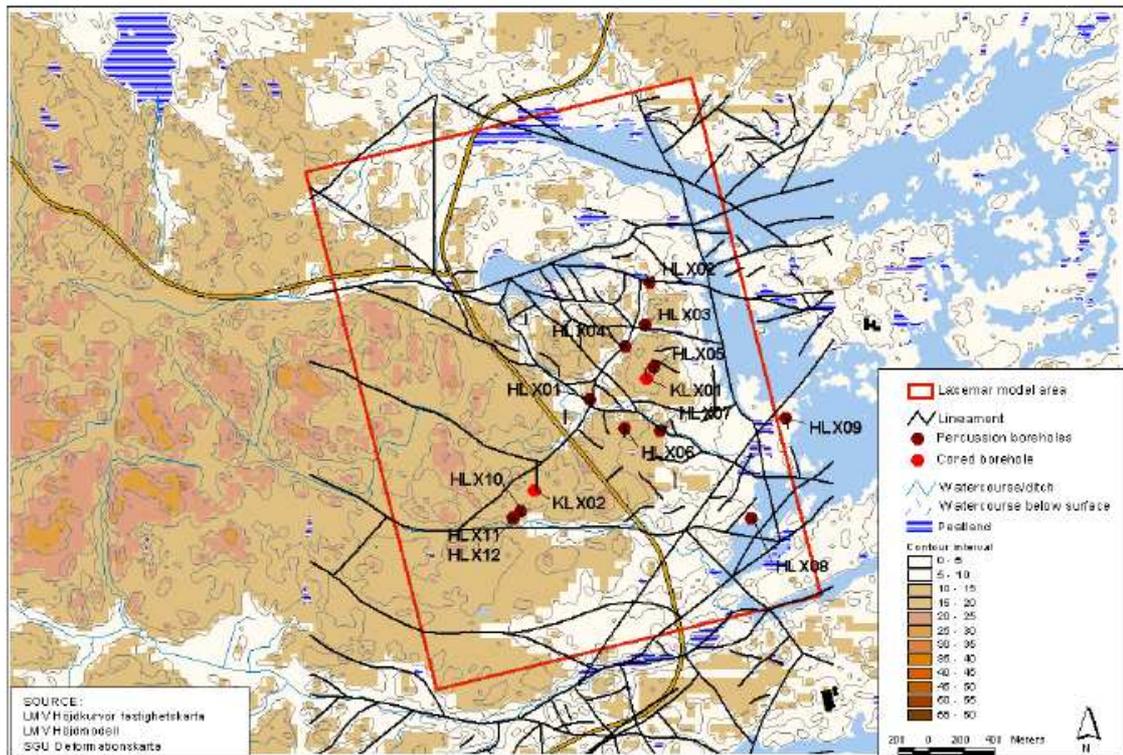


圖 4-3 Laxemar 地區與其鄰近地區之河川地形、線形、井孔位置與水路(摘自 Andersson et al., 2002[41])

### 4.3.3 土壤層的水力性質

土壤層的地質圖繪製，將藉由地表現地測繪，挖坑、鑽孔、折射震測，空載地球物理方法，希望配合鑽孔而能指出表土層之深度。在鑽孔與挖坑的同時需採集土壤樣本，每一樣本都須以目視分類，且對採集樣本進行實驗室分析，以獲取粒徑分佈曲線，特別重要的是粒徑分佈曲線特性（過篩百分比為 60%與 10%之粒徑  $d_{10}, d_{60}$ ）。

粒徑分佈曲線特性 ( $d_{10}, d_{60}$ ) 可用以估算土壤樣本的水力傳導係數。土壤樣本的地質描述為初步區分土壤地質單元或最終區分水力土壤分區(HSD)之基礎。

### 4.3.4 單孔水力試驗—土壤層

抽水試驗或微水試驗將於土壤層有井篩之水井中操作，試驗所得之結果將依照標準微水試驗分析方法或單孔抽水試驗之方法分析，流通係數或者水力傳導係數可藉由水力試驗取得。

水溫與總溶解固體之量測也需記錄，抽水試驗之分析可提供井之薄壁因子 (Skin factor)、滲漏情形與指示其他邊界條件。

由安裝觀測鑽孔時所取得之土樣地質描述，為初步根據水力性質（主要為水力傳導係數）區分為可能地質單元，或最終區分為水力土壤分區(HSD)之基礎。水力試驗結果詮釋時，應參考土樣之地質描述，水力試驗結果應設法辨認出代表滲漏之區域以及重要之水文地質邊界條件。水力試驗對於水文地質之幾何與滲漏條件之解釋，應與地質學家根據地質描述共同討論。

#### 4.3.5 干擾試驗—土壤層(初步評估)

初步評估意謂分析所有於試驗後似乎仍不可取得的幾何特徵與地質資料，當然部份初步評估仍可與現地試驗分析同時進行，干擾試驗之說明最好於主要資料分析階段與模式整合階段。

進行於表面層之干擾試驗主要是估算較高透水性地層之性質與幾何特徵，流通係數 ( $T$ ) 與水力傳導係數 ( $K$ ) 可由此試驗獲得。代表性溫度與總溶解固體須加以記錄且須初步評估邊界、滲漏情形與井之薄壁因子。這些試驗將藉由標準的干擾試驗分析方法來分析。部分的干擾試驗結果將於三維模式開始前，依照地表堆積物定義之地質分區再重新進行分析，干擾試驗的結果可能影響區域範圍的評估。

觀測鑽孔之土壤自表面層至基盤頂部鑽孔段之洩降變化，通常藉由距離—洩降圖、時間—洩降圖與停止抽水後於觀測段達成 1Kpa 壓力變化所需時間（時間稽延  $t_L$ ）來分析，如果可能，可計算觀測鑽孔至邊界之距離。場址相關土壤層之地質描述應與水力試驗結果之詮釋相互比較，水力試驗反應出地層之滲漏、邊界條件與土層之異向性應特別加以注意。水力試驗對於水文地質之幾何與滲漏條件之解釋，應與地質學家根據地質描述共同討論。

#### 4.3.6 岩石之鑽孔與鑽孔時之測量

鑽孔的同時，可依照標準方法測量獲取多項參數，其中包括衝擊式鑽孔法、岩心旋鑽式鑽孔法、鑽探施作時參數的記錄、鑽孔水之採樣與岩心鑽取之碎屑取樣。主要的目的為獲取全面岩石與水力條件相關資訊，以利於鑽孔時水質採樣之規劃。另一目的為便於鑽孔冷卻與穩定使用液體與鑽孔碎屑間平衡之計算。岩心孔之鑽取過程中或完成鑽孔後，可進行試驗區段長度 100 公尺尺度之試驗。在鑽孔進行過程中，最後階段約 30 至 50 公尺長之鑽孔之自然（未擾動）之壓力通常需 6 至 12 小時量測記錄。抽水試驗方法敘述、壓力量測以及與鋼索取樣相關之水質採樣，將作為試驗與鑽孔水質採樣之參考依據。

#### 4.3.7 累積流率井測(Cumulative Flow ; CF)—岩盤

累積流率測量(CF)通常藉由鑽井推進，於衝擊式鑽孔或旋鑽式岩心鑽孔內進行，其主要目的為定義抽水時沿著鑽孔之累積流率分佈。流率的分布與估算得整段鑽孔的流通係數，可用來估算流通係數異常處，累積的  $T$  值分布可以下式計算：

$$\sum T_i = T \cdot \frac{\sum Q_i}{Q_p}$$

此處  $Q_p$  為在表面測量得之抽水率， $\sum Q_i$  為修正之測量流率(在抽水時之流率分佈減去沒有抽水時之自然流率分布)，自然流率分布有時可能低於所使用方法之測量極限。流通係數 ( $T$ ) 代表整個鑽孔，流通係數通常由井測前後抽水時期洩降或回升段估算。流率井測(累積流率 CF)試驗與注入試驗結果之範例如圖 4-2。

流率井測之執行需參考相關標準方法，其量測的範圍與 Posiva 氏流率井測 (Posiva-Flow Logging ; PFL) 的方法(詳見 4.3.8 節)不同。流率井測累積流率 CF 之上限與下限較 Posiva 氏流率井測 (PFL) 為高。岩心孔流率測量之目的為能量測到較高流通特徵，此流通特徵可能超過 PFL 流率之量測上限。如果 PFL 流率量測提供足夠資料，則就不須於岩心孔進行累積流率(CF)流率測量。

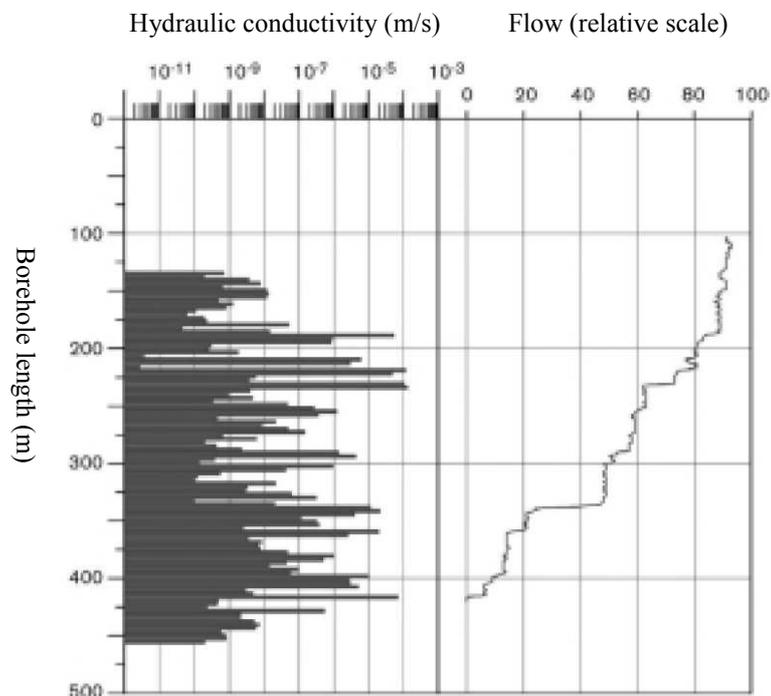


圖 4-4 累積流率井測(CF)試驗與注入試驗結果之範例(摘自 [21])

沿著鑽孔之累積流通係數、流動之異常性、導電度(EC)與溫度須與岩心資料一起繪製，特別注意可能屬於水力通導分區(HCD)之鑽孔段。

#### 4.3.8 Posiva 氏流率井測(Posiva-Flow Logging ; PFL)—岩盤

Posiva 氏流率井測 (PFL) 僅能適用於旋鑽式岩心孔，一般選用的方法為如圖 4-5 與圖 4-6 所示之差異流率儀 (Difference Flow Meter，簡稱 DIFF)。

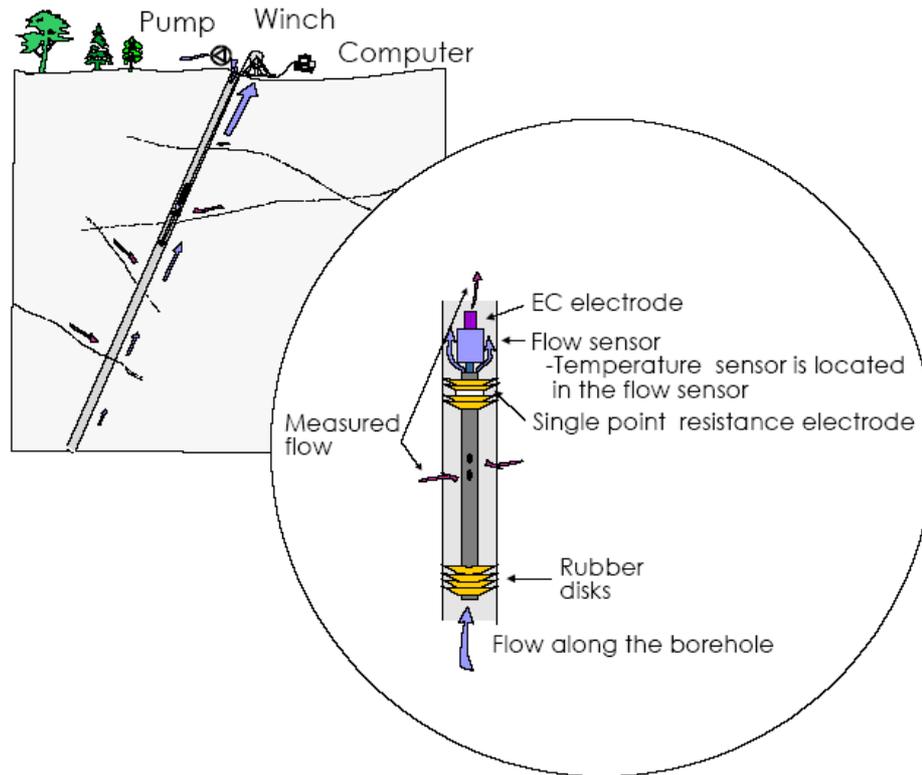


圖 4-5 差異流率(Difference flow logging)量測示意圖(摘自[21])

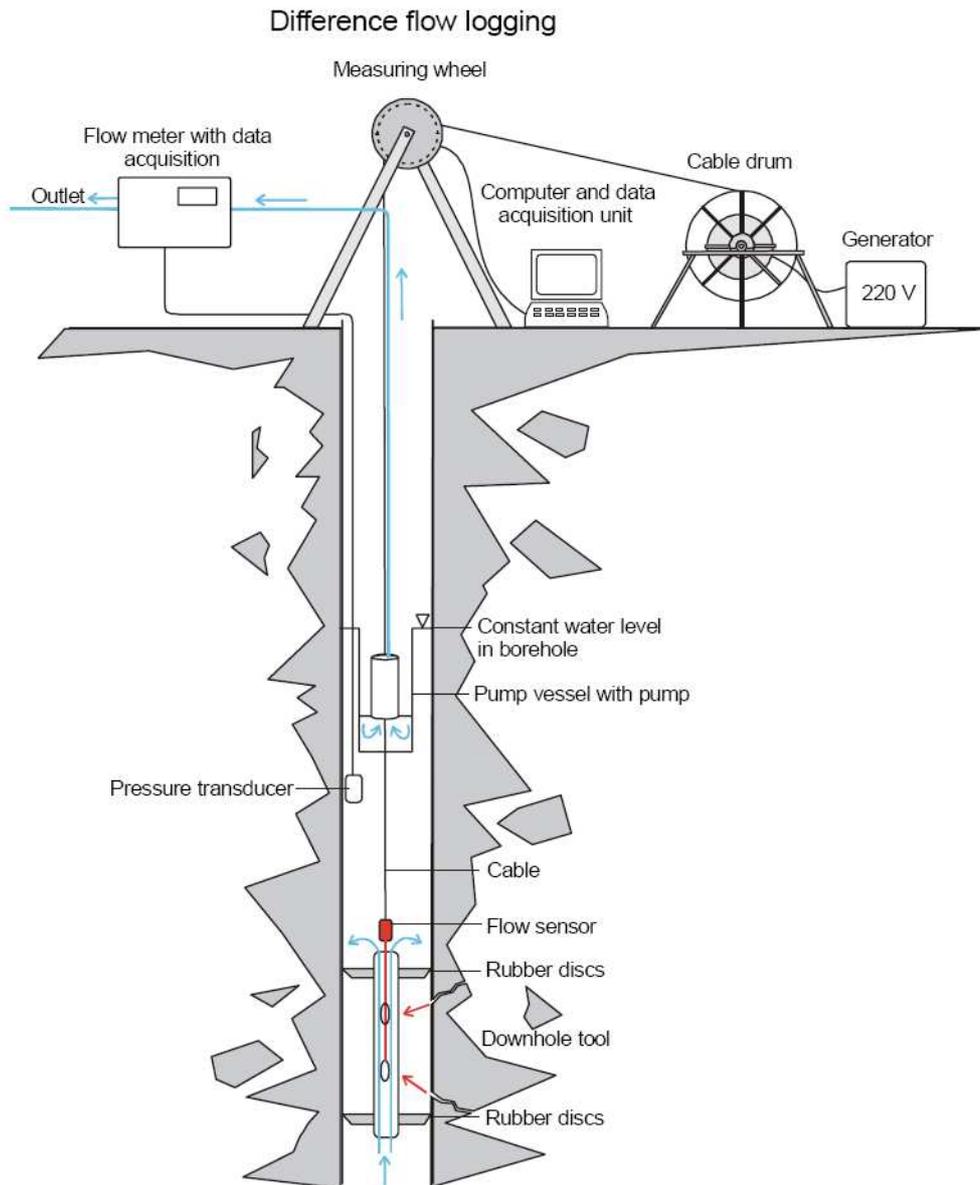


圖 4-6 差異流量(Difference flow logging)量測設備示意圖(摘自[21])

量測段長度 ( $L$ ) 為橡皮圓盤所限制，每一測量段之移動距離稱為步驟長度 ( $dL$ )，測量段的距離可以  $dL=L$  移動 (逐步流量測量) 或是以  $dL < L$  移動 (重疊流量測量)。重疊流量測量之優點為可相當準確地辨認沿著鑽孔之流量異常。流量異常通常與岩心紀錄之裂隙或裂隙帶分布有相當對比之關係。

如果使用不同的洩降於兩個順序的流量測量，可由假設有效影響半徑之徑向、穩態流理論計算近似流通係數與近似未擾動壓力。

在開放鑽孔的情況下，以水文地球化學的觀點，量測段之自然流流入與流出 ( $Q_0$ ) 與測量段估算之未擾動壓力 ( $P_0$ ) 適用於水收支考量。導電度(EC)與量測段之絕對壓力 ( $P_t$ ) 對每一量測結果之評估都非常重要。溫度與導電度(EC)對每

一流體獨立參數也是非常有效。流通異常性之推估可藉結合逐步與重疊流量量測之結果。例如：位於一較長區段（例如 5m）之流量異常流通係數  $T_n$ ，可從逐步測量的長距離流通係數  $T_5$  與在短距離之重疊測量之長距離區段 5m 之流量和，依下式計算：

$$T_n = T_5 \cdot \frac{Q_n}{\sum_5 Q_n} \quad (4-1)$$

流動異常（與單點阻抗，SPR）可與岩心測量比較以辨認特定的裂隙與裂隙帶，比量測極限流通係數大的裂隙可跟岩心測量資料(例如裂隙方向)結合。此資料可用以估算異向性(Anisotropy)。關於 PFL 更詳細資料可參考（Öhberg and Rouhiainen, 2000[42]）。

量測尺度（L）與步驟長度（dL）比例(L:dL)為(1:0.1)、(5:5)以及(5:0.5)試驗所得之水力參數，應與流量異常以及岩心紀錄資料繪製在一起，特別注意可能屬於水力通導分區(HCD)之鑽孔段，資料將藉由單變量統計分析。流動異常性合併解釋得之流通係數，經與岩心記錄資料比較後，可辨認大致的單一裂隙或裂隙群組。第五章提出裂隙群之分析方法，以進行裂隙群分組並確認水力特性之異向性。

#### 4.3.9 單孔暫態水力試驗—岩石

抽水試驗將於開放鑽孔或封塞封隔段進行，可能全部鑽孔抽水或者以封塞封隔出一區段，試驗可採用定流率試驗（抽水試驗）或定壓力試驗（注入試驗）。

通常抽水試驗初始以一短暫的容量試驗(capacity test)操作，以選擇較合適的試驗流率，容量試驗後，通常讓其自然壓力回復，以測量在岩層的壓力變化趨勢。各測試階段之期距建議如表 4-1。

表 4.1 建議各測試階段之期距(譯自[21])

| 試驗方式 | 試驗段長度    | 控制條件      | 容量試驗 | 穩定時間 | 流動期間  | 恢復期間    | 附註    |
|------|----------|-----------|------|------|-------|---------|-------|
| 注入試驗 | 5 公尺     | 定壓 200kPa | 不需要  | 15 分 | 15 分  | 15 分    |       |
| 注入試驗 | 20 公尺    | 定壓 200kPa | 不需要  | 30 分 | 30 分  | 30 分    |       |
| 抽水試驗 | 5-100 公尺 | 定流率       | 需要   | 3 小時 | 3 小時  | 3 小時    | 延時視試驗 |
| 抽水試驗 | 全段鑽孔     | 定流率       | 需要   | 1 天  | 1-2 天 | 0.5-1 天 | 目的而定  |

整個現地工作將依照單孔抽水試驗的標準方法，試驗資料的分析將參考相關

分析方法。抽水試驗可求得含水層的流通係數  $T$  值，代表水樣溫度與總溶解固體 (TDS) 也需量測。抽水試驗分析可以瞭解井的薄壁因子、滲漏情形與指示其他邊界條件。

由鑽孔取得之岩心地質描述，為初步根據水力性質（主要為水力傳導係數）區分為可能地質單元，或最終區分為水力通導分區(HCD)或水力岩石分區(HSD)之基礎。水力試驗結果詮釋時，應參考岩盤之地質描述。

整段鑽孔所得之水力試驗(通常測量尺度為 5、20、100m)所得之水力參數、流量測量資料應與岩心紀錄資料繪製在一起，特別注意可能屬於水力通導分區(HCD)之鑽孔段，資料將藉由單變量統計分析。

長時間之水力試驗結果可辨認出代表滲漏之區域以及重要之水文地質邊界條件。水力試驗對於水文地質之幾何與滲漏條件之解釋，應與地質學家根據地質描述共同討論。

#### 4.3.10 干擾試驗-岩盤(初步評估)

初步評估相關說明詳見 4.3.5 節。

##### 高品質之干擾試驗

干擾試驗主要藉由一位於岩石之鑽孔抽水而於其它觀測井孔量測水力反應，其目的為估算水力性質與岩石之幾何性質(儘可能)，視鑽孔岩心條件，通常可於整段鑽孔抽水，或僅於封塞封隔段抽水(如圖 4-7)，此試驗一般以定流率的方式操作。

通常先以一短時間之容量試驗取得相關資料以選擇較合適之試驗流率，容量試驗後讓壓力在自然水流條件下使其回升 2-3 天，此一期間量測地層中水壓之大致變化趨勢，抽水時間段通常為 3 天，而接續之回升段時間則為 1-2 天，有時可進行較長時間之抽水試驗，抽水時間約為 3-6 個月，而回升時間約為 1-2 個月。有時追蹤劑試驗可伴隨長時間的抽水試驗一起執行(單孔或跨孔試驗)，在某些鑽孔段可執行稀釋試驗(Dilution test)。

一般可藉由此試驗說明水力通導分區(HCD)之流通係數( $T$ )以及貯水係數( $S$ ，如果可能)，或是整段抽水鑽孔之流通係數之等。代表性水溫與總溶解固體(TDS)也須記錄。另外可初步評估水力通導分區(HCDs)間之連通性、邊界條件、滲漏情形與井之薄壁因子，試驗所得資料可用以校正地下水流模式。

部份干擾試驗將於三維模擬開始進行時配合確定位置之變形區與岩石分區

重新分析。反之(如第五章所示)，干擾試驗之結果亦可能影響變形區與岩石分區之位置與延伸性評估。

### 低目標干擾試驗

如果觀測鑽孔距抽水井在 500-1000 公尺之內，可固定執行連續之觀測鑽孔監測。壓力反應雖然很難量化說明，但至少可提供水力連通性相關資訊，此一水力連通性常代表水力通導分區之存在，或是顯示了水力通導分區顯示出的異向性。如前述，干擾試驗將於三維模擬開始進行時配合確定位置之變形區與岩石分區重新分析(如第五章所示)。

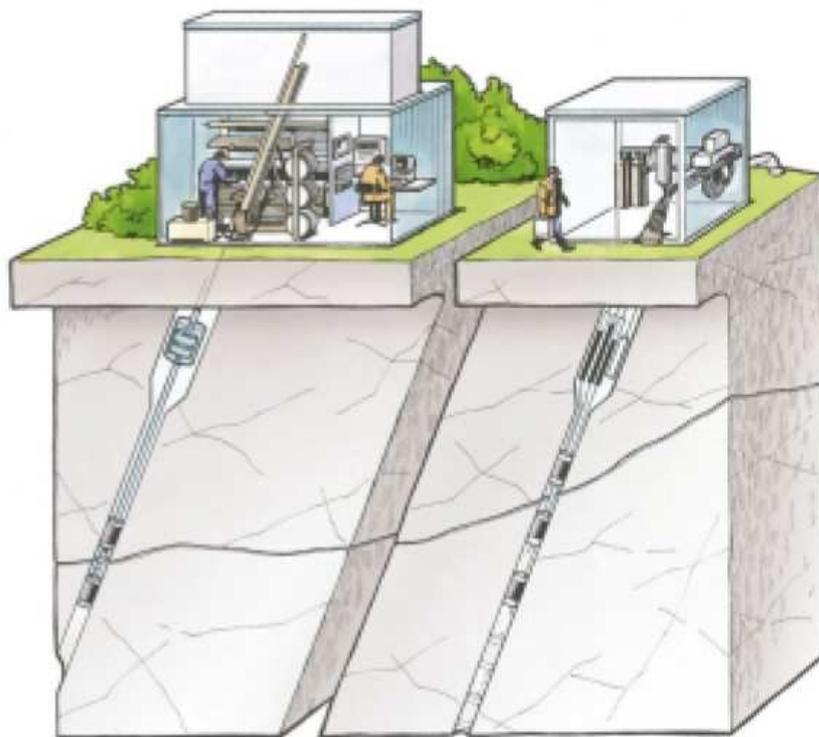


圖 4-7 在觀測井孔之多封塞干擾試驗(Interference test with multi-packer system)  
(摘自[21])

觀測井之土壤與岩盤鑽孔段之洩降變化，通常藉由距離—洩降圖、時間—洩降圖與停止抽水後於觀測段達成 1Kpa 壓力變化所需時間(時間稽延  $t_L$ )來分析，如果可能，可計算觀測鑽孔至邊界之距離。場址相關土壤層以及岩盤之地質描述應與水力試驗結果之詮釋相互比較，水力試驗反應出地層之滲漏、邊界條件與土層之異向性應特別加以注意。水力試驗對於水文地質之幾何與滲漏條件之解釋，應與地質學家根據地質描述共同討論。

#### 4.3.11 稀釋試驗

在飽和地層之地下水流動情況可藉由稀釋試驗概略了解(Halevy, et al., 1967; Drost et al., 1968; Gaspar and Oncecu, 1972[43-45])。此試驗可藉由一永久安裝於鑽孔之封塞區隔段系統進行(參考圖 4-8)，稀釋率通常可於自然水流條件下或長時間之抽水試驗條件下量測。稀釋試驗於 Berglund and Selroos(2003)[46]中有詳細之介紹。

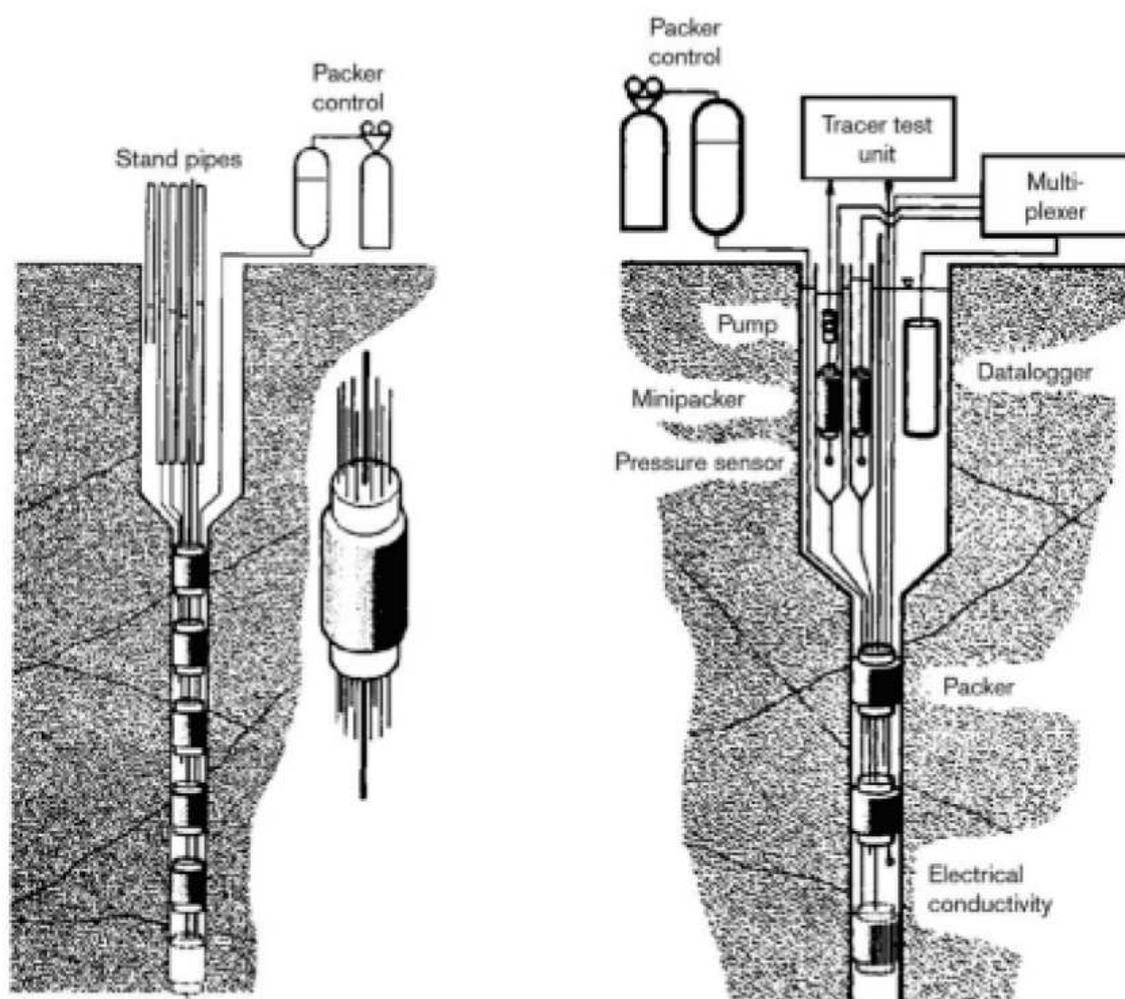


圖 4-8 壓力監測系統與稀釋試驗(Dilution test)示意圖([21])

在自然情況(未干擾)與不同干擾試驗下，藉由稀釋實驗所得通過鑽孔段的流量，經綜合分析後，可用以整體評估所收集水文地質相關之資料。這些經綜合評估後之水文地質資料，將用於三維模擬，以計算自然流量的大小(假設一修正因子以修正受井孔影響之流場)以及水力通導分區(HCD)間之關連性。

#### 4.3.12 長期壓力水頭監測

當於鑽孔操作完所有試驗後，通常可安裝封塞系統(圖 4-8)，於土壤層之觀測鑽孔包含一含有井篩段之管子，且於這些管子無安裝封塞。壓力水頭測量可藉由資料記錄器 (Data logger) 記錄。採用人為方式記錄立管(Standpipe)或開放式鑽孔(Open borehole)中水位之主要目的為校正自動紀錄之資料。為得到立管內有與觀測段有一致流體密度，需抽出立管中的水，並利用抽出水的電導度量測以估算流體密度。量測系統安裝後，壓力水面之自然變化以及干擾試驗之水力反應皆可量測而得。

土壤層中，應執行觀測鑽孔之效能試驗(Performance test)，以判斷觀測鑽孔與地層間之連通性。

岩盤之觀測區段數目取決於井孔長度與重要水力通導分區(HCD)之數目。因封塞封隔段間之開放井孔為顯著之導水區(充滿短迴路的交接裂隙)，因此觀測區段不應太長，但同時受限於鑽孔所能安裝觀測區段最大之數目。最大可安裝之觀測區段數目取決於鑽孔直徑與需要作為稀釋試驗量測段數目。在一 76mm 開放鑽孔最大可安裝壓力觀測區段數為 10 個區段，而其中 2 個為稀釋試驗量測區段。在衝擊式鑽孔最大可安裝量測壓力區段為 4，而其中 1 個為稀釋試驗量測區段。

稀釋試驗量測區段愈短愈好，已使量測區段間水量能盡量減少，有時可於試驗區段塞入一固形物體，以更減少量測區段之水量。

### 4.4 水文地質基本資料之一般性分析

#### 4.4.1 基本資料之品質控制

儲存於資料庫中相關水力試驗詮釋資料或報告需重新檢核，以確信相關報告呈現之資料是正確的，同時也須確認分析之相關說明合理。利用傳統盒鬚圖(Box and whisker plot)分析實際資料或繪製  $\log_{10}$  (測量值) 之方法可篩選出資料之問題處。如果有些資料可能是錯誤，應詢問相關調查計畫主持人或執行計畫者以解決相關資料存疑的問題。

#### 4.4.2 水的性質

如果彙整水力試驗資料之時，尚未獲得總溶解固體(TDS)與溫度相關資料，可由其它測量方式獲取並更新水文地質資料庫。主要資料來源為水力試驗測試段所獲取之水樣，並從而測得代表性之導電度(EC)、總溶解固體與來自於井測

之溫度。鑽孔中表面層可能無法取得地下水溫度之量測資料，但可藉由水力試驗期間測試得知地表下各深度之地下水溫，估計表面層之溫度。

對只有導電度值而無總溶解固體值之測試區段，可由下式(Rhen et al., 1997[47])計算 TDS 值：

$$TDS = \frac{0.00467}{0.741} \cdot EC \quad (4-2)$$

$EC$  : 水之電導度(mS/m)

$TDS$  : (g/L)

由溫度與總溶解固體可計算水之密度與動力黏滯度(Horne,1995 [48])，藉此，可進一步計算流體之重要水力參數如內滲透性(Intrinsic permeability)與孔隙率壓縮性積(Porosity-compressibility-product)，且可評估溫度與總溶解固體對水力參數之影響。

#### 4.4.3 水文地質主要資料的綜合評估

為整體性的了解水文地質資料，需將岩心紀錄各項重要資訊以及地球物理井測結果，與各種不同型式水力試驗結果繪製在一起，以綜合評估水文地質主要資料。圖 4-9 為 SKB 公司 Aspo HRL 場址之綜合評析之範例。岩心紀錄常為水力試驗結果所獲取水力參數資料解釋以及初步劃分其屬於何類地質單元之重要依據，以及進一步配合水力試驗資料區分為水力通導分區(HCD)或水力岩石分區(HRD)之基礎。

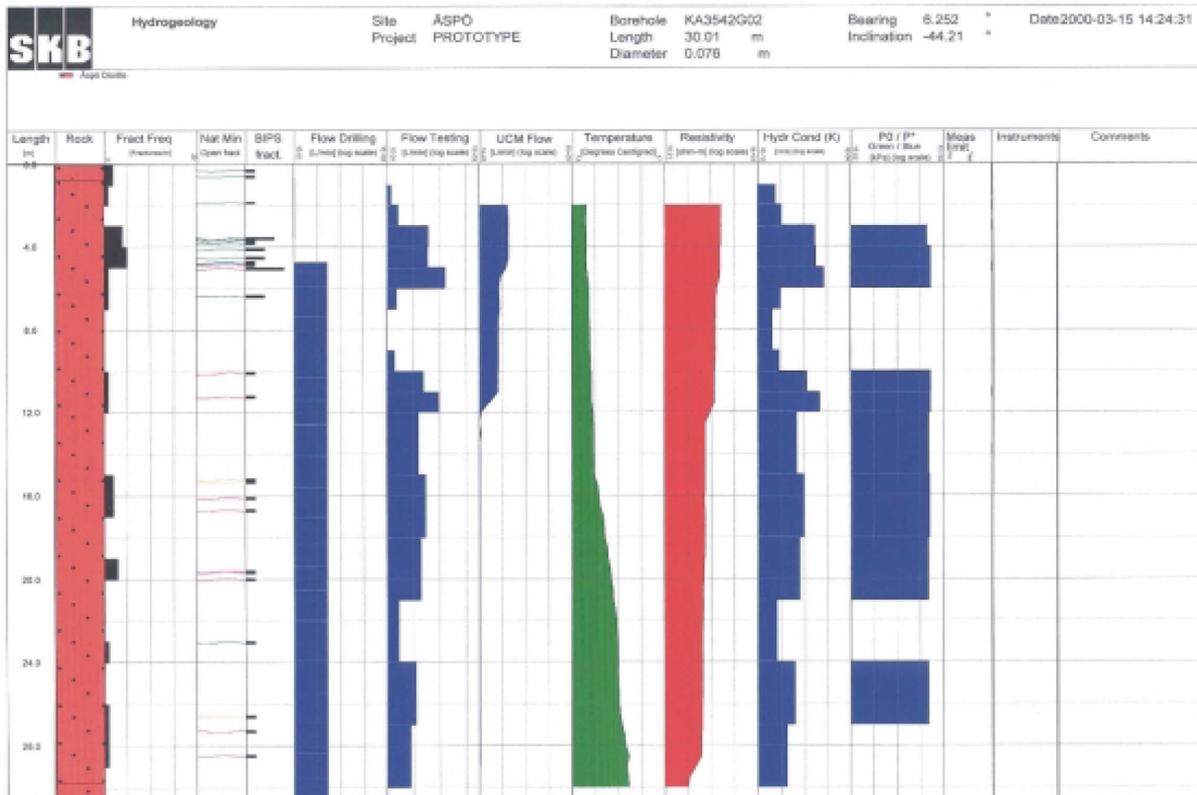


圖 4-9 藉由鑽井地質紀錄、地球物理井測資料以及水力試驗結果之綜合評析範例(摘自[21])

#### 4.4.4 主要資料的分析

岩盤之水文地質分析最重要的資料，為水力試驗結果、天然裂隙分布、岩石種類與破碎情況。至於土壤，每一鑽孔相關場址土壤層之地質描述以及對土壤水力性質的說明是最重要的。

水文地質資料初步關連性分析研究與統計分析須同時進行，一般描述性資料之統計分析採用單變量統計為主。

#### 4.4.5 統計分析

單變量統計分析可用來綜合評析不同型式的量測資料。以鑽井資料分析為範例，對每一個量測尺度，單變量統計可用以評估沿著鑽孔之量測資料之系統性。根據相較鄰近岩石屬高滲透特性者，以及根據地質解釋為變形區或岩石單元，可用來區分鑽井中代表可能之水力通導分區(HCD)或水力岩石分區(HRD)，鑽井岩心記錄之岩石種類，亦將做為資料統計分析分組之重要參考。圖 4-10 與圖 4-11 說明水力傳導係數分布資料之統計分析，此一分析範例已納入考慮量測值之上限與下限。

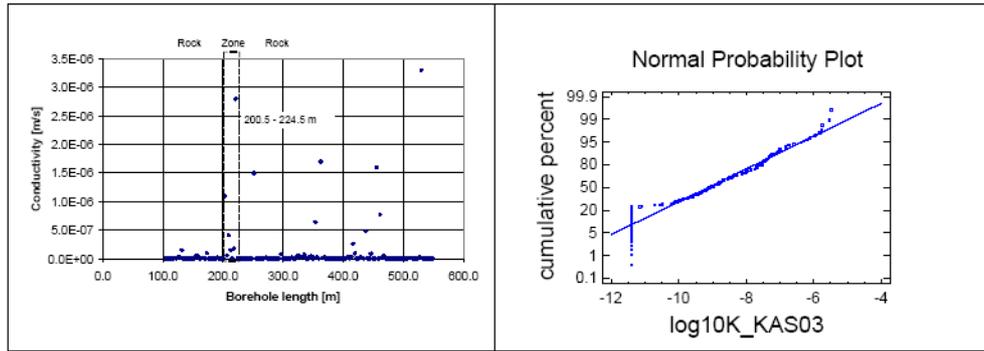


圖 4-10 範例說明沿著鑽孔水力傳導係數  $K$  (m/s) 值之分布與水力通導分區(HCD)位置之初步評估，右邊為整個鑽孔  $Log_{10}K$  累積機率分布，估計  $Log_{10}K$  上、下限分別為 -10.20 與 -5.79(摘自 [21])

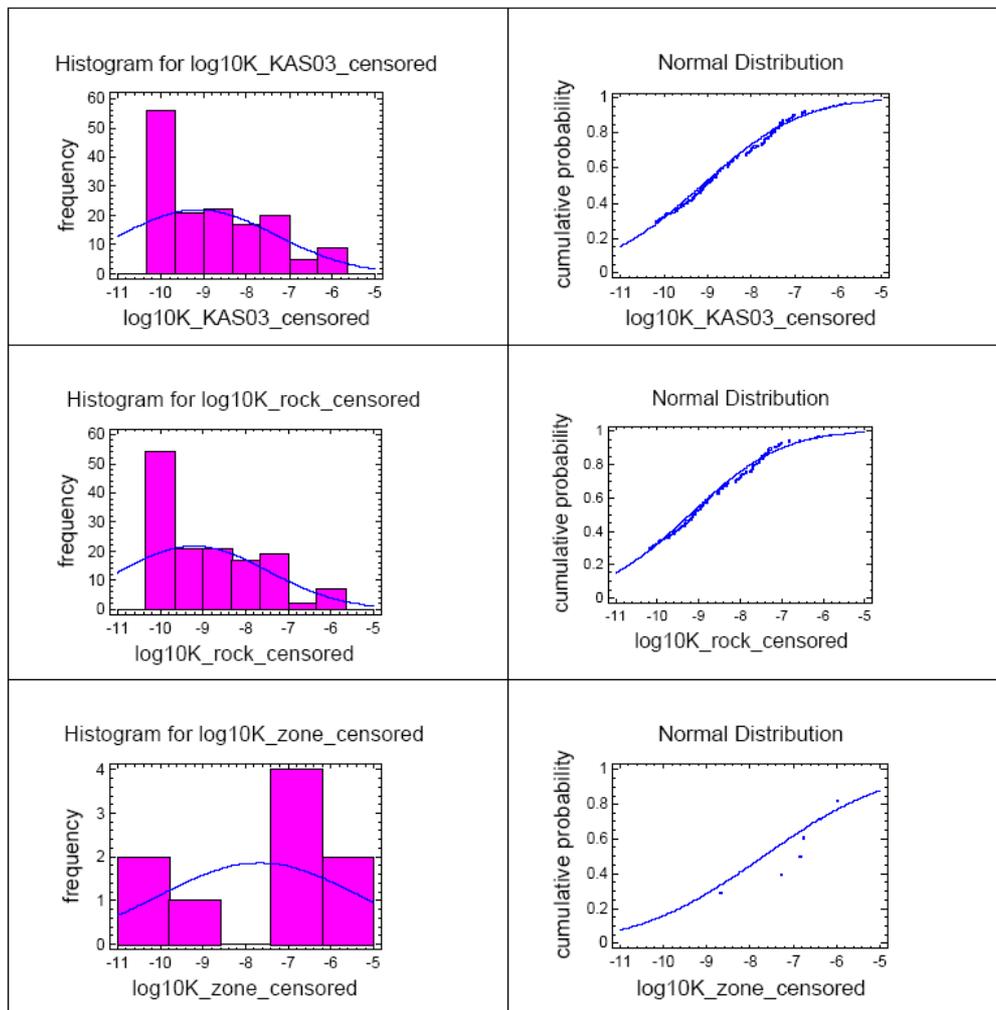


圖 4-11 沿著鑽井  $Log_{10}K$  (水力傳導係數  $K$  之單位為 m/s) 之分布，上圖為全部資料統計結果，中間為水力岩石分區(HRD)資料統計結果，下圖為水力通導分區(HCD)資料統計結果，估計整個鑽井所有資料之  $Log_{10}K$  上、下限分別為 -10.20 與 -5.79，上、下限值呈現於直方圖但未包括在累積機率圖中(摘自 [21])

通常假設流通係數( $T$ )或水力傳導係數( $K$ )為對數常態分佈，因此僅分析轉換後的資料  $\text{Log}_{10}T$  與  $\text{Log}_{10}K$  即可，資料分佈之算數平均與標準差應加以計算，並應註明資料之機率分佈函數以及累積分佈函數。資料統計分析時亦可測試其他型的分佈函數。

鑽井資料之地質統計分析也須進行，鑽孔資料的分析主要藉著沿著鑽孔進行之半變異(Semi-variogram)分析來討論裂隙特性的相關性，藉此利用相關性模式確認裂隙特性是否具有空間上的週期重現性。

基盤面將藉由穿過土壤層之鑽孔、露頭調查、折射震測、空載地球物理與先前露頭的調查成果加以確認。這些資料將用來估計基盤面的半變異圖，同時用來模擬基盤面。

## 第五章 三維模擬與場址敘述性模型(Site description)

三維模擬需整合地質、岩石力學、熱力與熱傳、水文地質、水文地球化學、傳輸以及地表生態系統等。基於所有可利用之資訊，三維模擬主要目的在於能提出一致的場址敘述性模型，隨調查資料逐漸增加，藉以逐步建構 X.Y 版本之模型。

為建立水力通導分區(HCD)與水力岩石分區(HRD)之特性，需要地質領域之調查與分析資料，甚至有時需要重新分析岩石力學或水文地球化學領域之相關資料。第四章所敘述之水文地質主要資料分析與地質學家所進行之鑽孔岩心紀錄大致上是各自獨立作業，水文地質主要資料分析結果，可提供作為確認沿著鑽孔量測得水力通導分區(HCD)之流通係數分布是否異常，由岩心紀錄所得自然裂隙之頻率與破碎情況，可與前述流通係數分布分析結果進行交互比對驗證，有時流通係數分布與岩性分布亦有其關聯性。水文地質水力參數之分析與解釋成果，常需進一步由地質師根據岩心判釋所獲得之岩心特性加以驗證。干擾試驗常用來確認先前地質研判之主要變形區是否存在，或是用來發現其他先前未發現之主要變形區。大尺度之追蹤劑試驗(tracer test)與干擾試驗對於整合分析評估非常有效。

敘述性模式(Descriptive model)可透過地下水流動模擬(Groundwater flow simulation)測試或驗證觀察到之現象，因此，地下水流動模擬為三維水文地質模式(Hydrogeological 3D modelling)之基礎。經校正後之地下水流動模式(Groundwater flow model)將為水文地質場址敘述性模式(Hydrogeological site descriptive model)之骨幹。地下水流流徑模擬(Flow paths)與質點追蹤(Particle tracking)對於水文地球化學、傳輸以及地表生態系統等領域均極為重要。

地下水流動模擬分析將可獲得由補注區至流出區之流徑，結合土壤或岩體之地質描述，流徑分析所得結果為瞭解水文地球化學與解釋地下水組成之基礎。

岩石力學之應力分析模擬，可以獲知岩石中主應力值、主應力方向以及主應力比值，而主應力值與方向為造成水力傳導係數異向性原因之一。水力資料結合應力分析結果，對於岩盤水力性質受應力影響之了解極有助益。

本章將說明三維模擬與其他領域間相互關聯性與互制過程，如何得以逐步修正水文地質概念模型，此一互制工作之流程詳圖 1-2。

## 5.1 地質鑽孔岩心判釋與水文地質主要資料分析

### 5.1.1 水力通導分區(HCD)與水力岩石分區(HRD)之研判與分析

地質師進行之岩心判釋，可提供主要變形區位置，並將沿鑽孔之岩石依其特性進行岩石之地質分類(如圖 5-1)。此主要變形區之判釋及岩心之分類可與水力試驗結果相互比較。

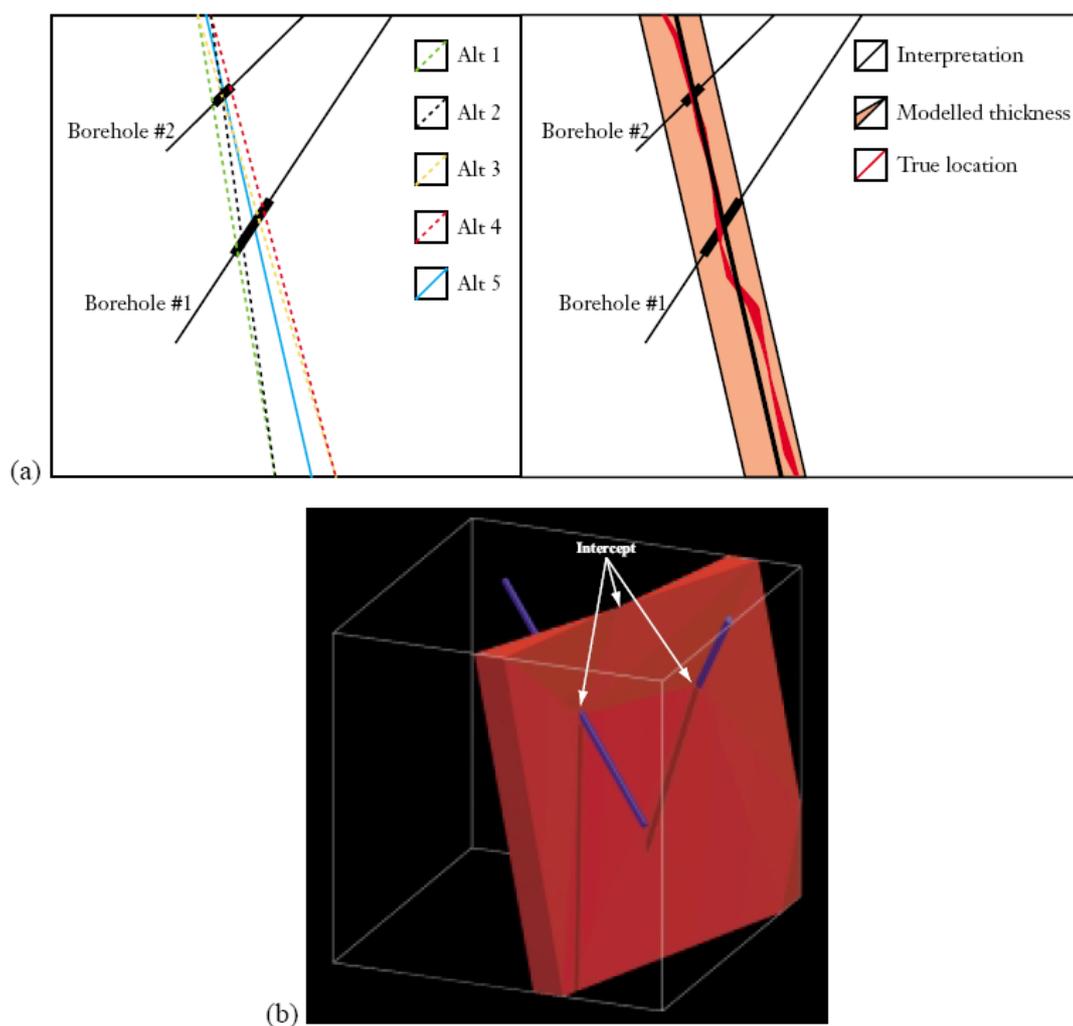


圖 5-1 變形區三維井孔相交示意，變形區位置表面井孔交接，模擬變形區厚度，包含所有在井孔與表面之觀測，且納入考慮構造之自然起伏(摘自 Munier et al.,2003[26])

利用岩體視覺系統(Rock Visualisation System, RVS) 可將鑽孔觀察所得之主要變形區建構出模擬構造面(Modeled structural surface)，而模擬構造區(Modeled structural volume)則由模擬構造面以及給定之厚度組成(如圖 5-2)。因岩石之應力

場為造成滲透特性異向性原因之一，故岩體中之主應力值以及其方向亦相當重要。

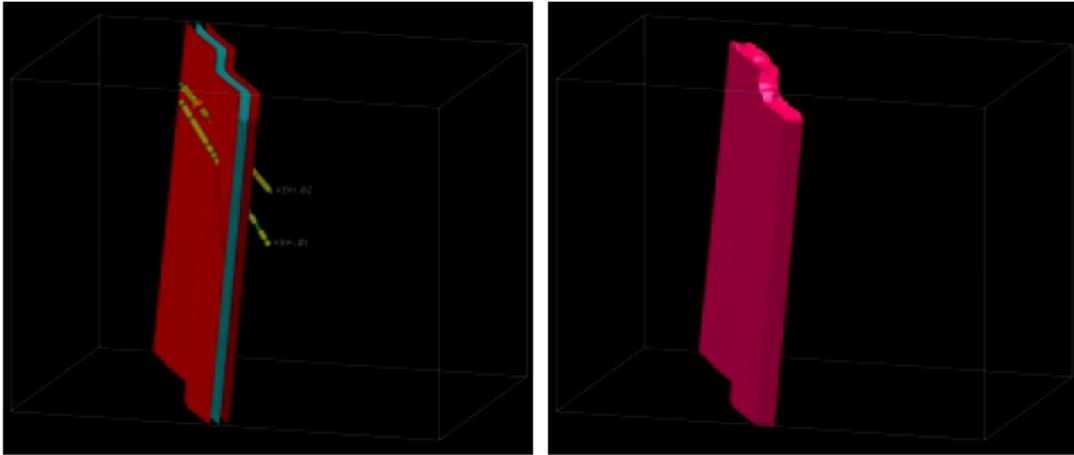


圖 5-2 利用岩體視覺系統(Rock Visualisation System, RVS) 可將鑽孔觀察所得之主要變形區建構出模擬構造面(Modeled structural surface 左圖)，而模擬構造區(Modeled structural volume)則由模擬構造面以及給定之厚度(右圖)組成(摘自[21])

首先，根據干擾試驗加以檢視三維模式中主要變形區之存在，是否恰可合理解釋試驗觀察所得之反應。其次，合併主要變形區之分析結果，以及次要變形區之岩石(Non-deterministic deformation zone rock)與鑽孔岩石分類資料，單孔試驗量測結果應進行重新分析，以下介紹如何利用統計方法進行資料之分析。

### 5.1.2 主要地質統計評估

地質主要資料應利用單變數統計法加以重新分析，資料來源包括單孔試驗對於主要變形區之地質解釋、次要變形區之岩石以及鑽孔岩石分類資料(岩石類型與分區)。量測結果與觀察結果的空間關聯性，可利用不同之地質統計方法進行。裂隙系統之空間分布模式(含水力特性)將於 5.2 節加以介紹，本節將介紹地質統計模型應用於水力試驗觀察結果。

沿著鑽孔之觀察結果之關連性可由半變異性模式(Semivariance modelling)加以探討。分析關鍵因素為變異性(Variance)、相關長度(Correlation lengths)與週期性(Periodicity, hole effects)。三維之半變異性模式可用來分析空間資料，然而，根據經驗可知，空間資料分析結果一般僅於鑽孔附近有較高之關連性，參數值之變化可預期將產生明顯之變化，此一情況並不符合傳統之地質統計 Kriging 法。

然而其他之 Kriging 統計法可能仍可使用，其中選項之一為利用離散裂隙網路 (DFN) 模式進行地下水流分析，藉以獲得等效之水力傳導係數，並模擬可用於序率連續性 (SC) 模型之半變異性 (詳見第三章)。

水力通導分區 (HCD) 參數之變異性與相關長度特別重要，然而，分析所要之水力參數資料卻難以取得。藉由多鑽孔通過同一水力通導分區 (HCD) 之試驗結果可進行大範圍之變異性分析，然而小範圍之變異性則需利用離散裂隙網路 (DFN) 模式進行分析，如前所述。水力通導分區 (HCD) 與水力岩石分區 (HRD) 與深度相關之特性亦需要加以探討。

## 5.2 離散裂隙網路 (DFN) 模式水力參數推估

### 5.2.1 簡介

根據觀察，破裂面較少之石英岩之水文地質特性為：(1) 離散裂隙控制地下水流動與溶質之傳輸；(2) 滲透特性為高度尺度相關並具異向性。因此，藉由觀測結果，水文地質場址敘述性模式應儘可能詳細重製構造之幾何與水力特性，除此之外，可假設基岩對於地下水流影響性不高。水文地質離散裂隙網路 (DFN) 模式，主要目標在於精確描述導水性大的變形區，而忽略次要的變形區對於地下水流之影響。所謂之變形區雖可獨立描述其特性，然而，此一變形區卻可能同時包含許多個破裂面。

### 5.2.2 一般概念

離散裂隙網路 (DFN) 模式之概念，是以無限薄之二維塊狀區域模擬裂隙，此二維塊狀區域稱為分離裂隙 (Discrete fractures)。由露頭與鑽孔所得之裂隙資料可依構造地質研判與統計分析，建立三維網絡內之個別二維分離裂隙。裂隙網絡之建立可分為兩類：(1) 定率式；與 (2) 序率式。定率式裂隙分布常為經由局部觀測/量測獲得真實之裂隙分佈，而序率式裂隙分布則描述裂隙於空間出現之可能機率。裂隙網絡建立之合理性除了需利用地質方式加以驗證外，亦須透過水力模擬進行校正 (例如：與現地干擾試驗結果比較)。

離散裂隙網路 (DFN) 模式之重要假設說明如下：

1. 地質構造 (裂隙) 可以二維塊狀區域模擬。
2. 三維裂隙網絡之幾何特性 (方位、大小、密度與空間分布) 與水力特性，可根據調查線 (Trace line) 以及鑽孔之水力試驗獲得。

3. 未能於露頭或鑽孔觀察到之裂隙，可利用序率式之蒙地卡羅方法模擬，模擬結果須與露頭或鑽孔所得結果相互印證。蒙地卡羅模擬須基於露頭與鑽孔調查線所得之裂隙統計以及鑽孔之水力試驗結果。
4. 地下水於裂隙網絡之流動可使用常見於連續體之水力定律(如 Navier-Stokes 與 Darcy 方程式)。序率裂隙之水力特性可假設與幾何特性有關或不具相關性。
5. 有意義之邊界條件可設定於裂隙網絡之模擬區域邊界或模擬區域中任一處(如沿鑽孔設定邊界條件)。

### 5.2.3 離散裂隙網路(DFN)模式水力特性

絕大部分離散裂隙網路(DFN)模式之建立，應基於調查線紀錄得之裂隙特性統計以及構造地質解釋所得之結果。Munier et al. (2003)[26]針對建立離散裂隙網路(DFN)模式有詳細之介紹。為了解地下水於以序率產生裂隙網絡中之流動，以下說明如何將調查線所得之統計資料與水力試驗所得水力參數加以連結。

石英質岩盤之水力特性主要取決於裂隙之流通係數與裂隙間之連通性，裂隙網絡之連通性可由鑽孔水力試驗結果加以估計。入流點數量以及其導水性，乃根據多種試驗綜合研判所得，試驗方法包括：BIPS logging(鑽孔井壁光學影像)、岩心分析、差異流量觀測以及雙封塞注入試驗。差異流量儀與雙封塞注入試驗設備之偵測門檻值會影響導水性裂隙頻率(Conductive fracture frequency; CFF), P10c之推測，也就是說越低的偵測門檻值將推測得較高之導水裂隙頻率。天然(開放)裂隙與總裂隙(包括天然與封閉)數目可由岩心判釋獲得(Munier et al.,2003[26])。如果偵測門檻值設定為零，則導水裂隙頻率將等於總裂隙頻率。然而，天然與封閉裂隙無法由岩心判釋加以區分。

圖 5-3(a)顯示一個由假設鑽孔觀測所得之導水裂隙頻率，離散裂隙網路(DFN)模式最重要的水文地質假設詳見圖 5-3(b)，鑽孔中觀察到之導水裂隙將與岩體中之其它導水裂隙相互連通。值得注意的是，鑽孔中之導水裂隙不必然與所有導水裂隙均相互連通，且其相互連通度亦隨空間分布而有所不同。

根據在 SKB 場址調查之經驗，偵測門檻值大約在  $1 \times 10^{-11} \sim 5 \times 10^{-11} \frac{m^2}{sec}$  就足

以模擬主要裂隙間之地下水流動。儘管於如此小範圍之偵測門檻值下，導水裂隙頻率仍僅為總裂隙頻率之某一比例，如圖 5-3(c)所示，對大尺度之地下水模擬或

許可允許較高之偵測門檻值。

高精密度之差異流量觀測(每一階段測量長度約 0.1m)可獲得高於偵測門檻值之個別流動特徵，且直接提供用作流通性分析。低精密度之差異流量儀觀測(每一階段測量長度約 1.0m)結合雙封塞注入試驗，可提供多個裂隙之流通性分析。

在一公尺長鑽孔段單一裂隙之流通係數相當於在連續孔隙介質材料內一公尺長鑽孔段之水力傳導係數。由雙封塞注入試驗所得之流通係數分布與導水裂隙頻率可由 Osnes 方法決定(Osnes et al., 1988[49])。此方法假設鑽孔段之裂隙網絡流通係數為所有導水裂隙流通係數之和。

$$T_i = \sum_{j=1}^{n_i} T_{ij} \quad (5-1)$$

此處  $T_i$  為第  $i$ th 封塞區間視流通係數， $T_{i,j}$  為第  $i$ th 封塞區間內第  $j$ th 導水裂隙之流通係數，對一給定之封塞區隔間導水裂隙之數目可假設為由 Poisson 分布所定義之隨機數

$$f_n(n) = \frac{\bar{n}^n e^{-\bar{n}}}{n!} \quad (5-2)$$

此處  $\bar{n}$  為 Poisson 過程相等於  $n$  之期望值，導水裂隙頻率由  $f_c = \frac{n}{L_i}$  決定，此處  $L_i$  為測試段長度。

此方法假設裂隙沿著鑽孔均勻分布，但此一假設並非為真實情況，因此於計算前須小心檢視。

假設在各封塞區隔段裂隙流通係數之分布型式各自獨立(不相互影響，無空間之關聯性)。 $T_i$  之分布為各隨機事件數目之和，因此，為 Poisson 隨機過程(Feller,1971[50])，在一給定封塞區隔段，此方法裂隙之平均數由 Poisson 分布率參數  $n$  所定義，而裂隙之流通係數  $T_{i,j}$  則可以對數常態分布決定(平均值  $m_{\log T}$  與標準差  $s_{\log T}$ )。

給定一組參數描述裂隙流通係數分布( $f(T_{i,j})$ )與導水裂隙頻率  $f_c$ ，封塞區間之流通係數分布( $f(T_i)$ )即可藉由模擬退火搜尋演算(Simulated annealing search routine)搜尋最佳套配值(Best fit value)之蒙地卡羅模擬獲得。如果流量測量資料

並不足以直接計算導水裂隙頻率  $f_c$ ，此時可藉由  $f_c$  初始猜測值進行蒙地卡羅模擬，直至量測與模擬資料以 K-S 或 Chi-Square 統計方法檢定有良好的吻合。

當模擬的區段內無導水裂隙或其流通係數  $T_i$  值小於偵測門檻  $T_{\text{threshold}}$  值時，此時流通係數值即設定為現地最低可量測流通係數門檻  $T_{\text{threshold}}$  值。

綜合上述，導水裂隙之強度以及流通係數分布 ( $f(T_{i,j})$ )，可利用封塞區隔段量測得之流通係數分布 ( $f(T_i)$ ) 與藉由給定裂隙頻率以及單一裂隙流通係數分布模擬結果，利用 K-S 或 Chi-Square 統計方法進行比較後決定之。其中，利用 K-S 或 Chi-Square 統計確認觀測值與模擬值最符合之 Poisson 分布率參數  $n$ 、平均值  $m_{\log T}$  與標準差  $s_{\log T}$  即視為最佳化參數。

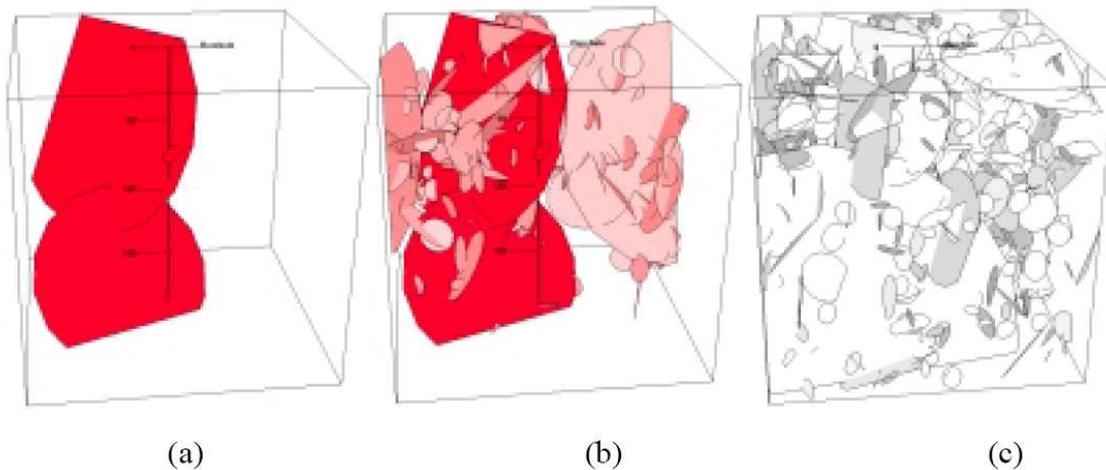


圖 5-3 (a)顯示一個由假設鑽孔觀測所得之導水裂隙，(b)鑽孔中觀察到之導水裂隙將與岩體中之其它導水裂隙相互連通。(c)前述之導水裂隙僅為整個離散裂隙網路之一部分(摘自[21])

### 5.3 三維模擬

三維模擬主要的目標尺度為區域場址敘述模式與局部場址敘述模式，原則上每一階段調查結果均應提供作兩種模擬尺度更新之用，逐步地，區域場址敘述模式因場址調查進行之更新將減少，而局部場址敘述模式之幾何架構與岩石性質則可能因場址調查之逐漸詳盡而更新。同樣地，如果已確認區域場址敘述模式足以提供局部場址敘述模式適當之邊界條件時，地下水模擬之區域場址敘述模式在場址調查進行時亦應儘量避免改變。

整合三維模擬之工作包含主要資料之分析與地下水流模擬，其彼此間亦高度

相關。對每一次更新敘述模式，須先重新定義水力分區之幾何與水力性質，以修正地下水流模擬之輸入條件。地下水流模擬之基礎為利用岩體視覺系統所定義之變形區之幾何模式以及岩石分區，圖 5-4 顯示於 Simpevarp 模式第零版之模擬變形區之幾何特徵，在三維模擬的早期階段，為了測試某些水文地質相關假說，地下水流模式之部份更新仍相當有用。

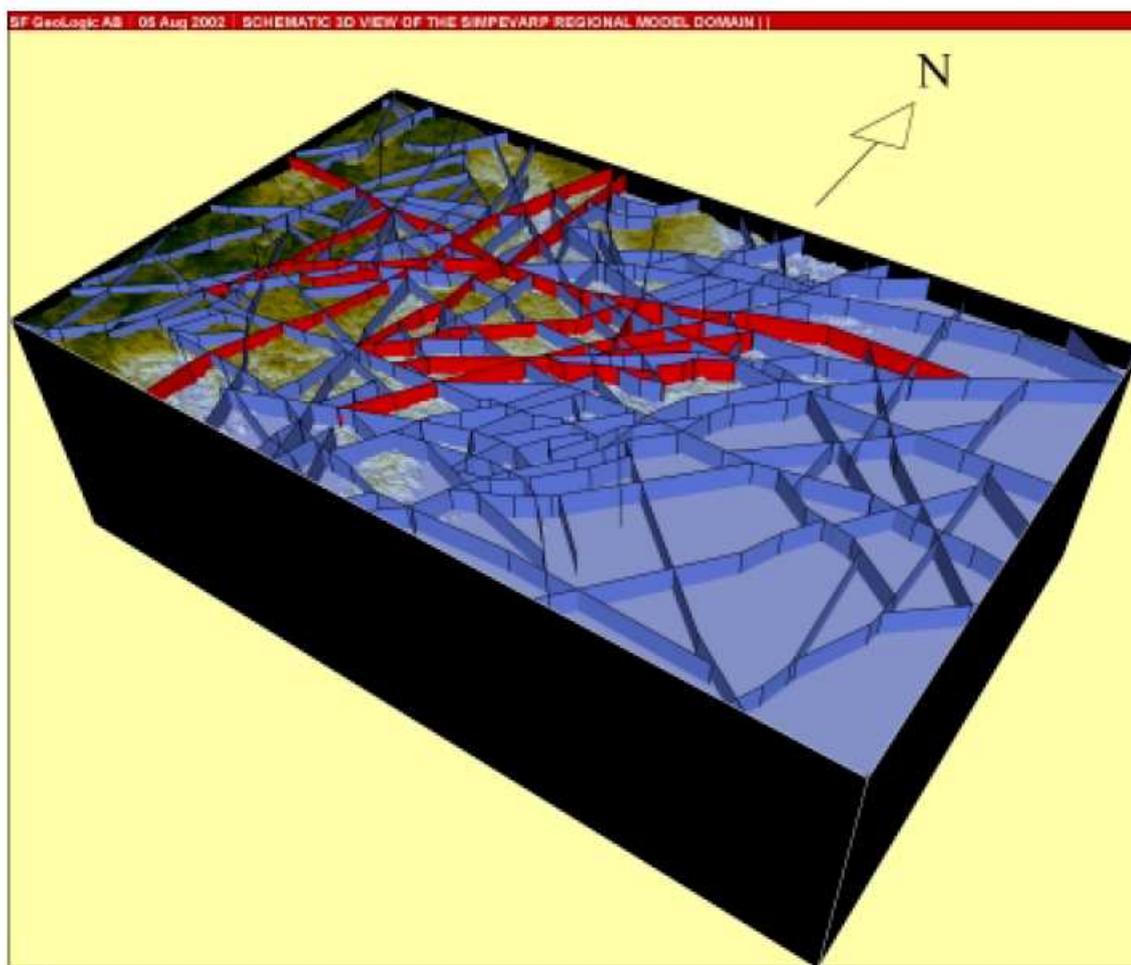


圖 5-4 顯示於 Simpevarp 模式第零版之模擬變形區之幾何特徵(摘自[21])

### 水力通導分區(HCD)、水力岩石分區(HRD)與水力土壤分區(HSD)：幾何與水力性質

水文地質之基礎為確認水力通導分區(HCD)與水力岩石分區(HRD)，以及相關資料之統計分析，此一成果係與地質領域確認變形區與岩石分區整合分析而得。三維整合分析可能改變地質領域建立之變形區與岩石分區幾何模式，因此，部份單變量統計分析與地質統計分析亦須隨之更新。

## 干擾試驗與大尺度追蹤劑試驗

於鑽孔期間測得之干擾(週圍鑽孔量測得之壓力反應)與相對短期之水力試驗(例如鑽岩心孔時 100m 測試尺度之水力試驗或衝擊鑽孔之水力試驗等)結果，對於水力異向性與特定裂隙帶之確認非常有幫助，受精密控制干擾試驗之反應，對於檢驗測試地質模式中之裂隙帶存在情形，提供較具可信度之資訊。干擾試驗測得之反應，可作為修正地質模式之重要參考。

干擾試驗之限制在於：若裂隙帶與其餘岩盤間之水力性質無明顯對照，或裂隙帶之滲透性很低時，干擾試驗觀測段之反應可能並不明顯。在此情形下，裂隙帶之幾何與水力性質之給定主要將依據地質判釋與單孔試驗。若如圖 5-1 所示，有數個鑽孔與變形區相交，此時或許可用以推估貯水係數並探討在貯水係數於變形區內大尺度之變異性。

## 水力通導分區(HCD)性質指定

變形區之厚度(參考圖 3-7 之總帶寬)，可根據地質描述中關於某一地質分區之定義，地質之解釋，有助於估計與鑽孔相交之變形區厚度(計算所得之構造厚度 Calculated thickness of structure)，同時，亦有助於建立岩體視覺系統之幾何模式，變形區之幾何特性描述可自岩體視覺系統輸出獲得，而岩體視覺系統包括：模擬構造面(二維元素)以及模擬構造區(變形區)，變形區幾何特性之不確定性稱為變形區之模擬不確定性(Modeled uncertainty of deformation zone)。

首先利用單孔試驗與幾何地質模式，分析預期可能與鑽孔相交之主變形區，如果變形區比週遭岩石具較高滲透性，則變形區平均水力性質之推估，以跨一特定裂隙帶之長時期之水力試驗較具代表性。

如果於特定變形區並無進行水力試驗，則裂隙區之水力性質設定主要將依據裂隙區之地質描述與參考鄰近變形區之水力性質。水力通導分區(HCD)性質之單變量統計以及深度之相關性，將作為無水力試驗之變形區水力性質指定之基礎。

如果數個鑽孔相交於某一水力通導分區(HCD)，此時可概觀大尺度之變化，地質師某種程度可協助描述於水力通導分區(HCD)內小尺度之變化、內部構造與裂隙充填物特性，某些一般型式之裂隙帶可以離散裂隙網路(DFN)模式產生。

## 水力岩石分區(HRD)性質指定

幾何地質模式預期與鑽孔相交之岩石區域劃分將作為單孔試驗結果詮釋之重要參考，單孔試驗結果分析亦將作為岩石分區是否須進一步細分或者須合併之

重要參考。每一水力岩石分區(HRD)與測量尺度均應進行單變量統計分析，包括深度相關性分析之地質統計也須一併進行，另外，此時應決定離散裂隙網路(DFN)模式是否需要更新。

干擾試驗除了於水力通導分區(HCD)將產生反應外，於水力岩石分區(HRD)同樣也將產生反應。地下水流模式將水力岩石分區(HRD)之異質性以統計分布加以考慮，將使觀測與模擬結果之比較產生困難，然而，由數個不同序率場(Stochastic field)所得之實現值(Realization)，可與觀測資料進行比較，從而評估模擬時指定之流通係數與貯水係數之關聯性。

### **邊界與初始條件**

對數值模擬而言，邊界與初始條件為必需的，湖泊、海水位與地形常為明確之上邊界。逕流之觀測對了解區域之水收支平衡非常重要，觀測之逕流率可用於推估數值模式分析需要之平均有效降雨。壓力水頭與總溶解固體 TDS(或導電度 EC)之量測，對於邊界與初始條件之評估非常重要，然而，土壤層與岩石中，僅有少數地點有機會量測到壓力水頭與總溶解固體。相關量測資料可提供設定適當邊界與初始條件之依據，惟須經數值模式測試其合理性。模擬所得之壓力水頭與總溶解固體將與量測結果比較。事先可預知由最後一次冰河期以後之地下水模擬，將成為測試目前於指定水力性質的條件以及水文地質概念模擬結果之一部分。

## **5.4 地下水數值模擬：三維模式測試與校正**

本節描述如何測試與應用三維地下水流模擬以發展水文地質場址敘述性模式。SKB 場址調查計畫中，三維地下水流模式之整體目標為了解水文地質系統概念，特別是評估水文地質場址敘述性模式之不確定性。此一目標可藉由數值模擬達成(完整執行地下水模擬計算之輸入與輸出)。

完整的地下水模擬過程如圖 5-5 所示，此為圖 1-2 所示之整體模擬過程之部份。圖 1-2 顯示綜觀場址水文地質模擬過程，及其與水文地質及其他地球科學(地質、岩石力學、水文地球化學、熱力與熱傳、地表生態系統與傳輸)領域間之相互影響，三維地下水流數值模擬將與“整合評估與場址描述”此一大架構下產生互制。從水文地質之觀點，場址之地質敘述模式為各領域中最为重要之一部分。

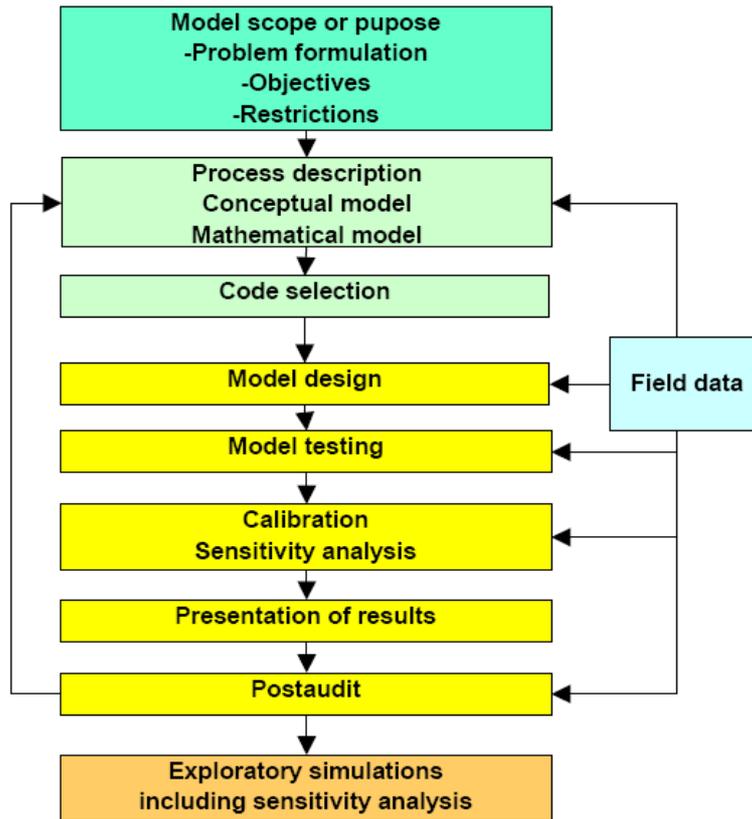


圖 5-5 地下水模擬流程圖(摘自[21])

#### 5.4.1 過程

SKB 場址調查計畫之數值模擬之功能包括了測試與應用兩方面，而應用需要基於完整之測試結果。綜而言之，地下水流數值模擬之應用，包含以下幾個主要的基本步驟，以達成水文地質系統具可接受之代表性後將模式出版為報告：

- 工作敘述
- 用於地下水流數值模擬概念相關假設之技術查核
- 基於三維地下水流數值模擬所需，設計(建構)所需之地質模式
- 裂隙幾何不同解釋方案，利用三維地下水流數值模擬加以測試
- 水力參數校正與敏感度分析
- 進行地下水流模擬，用以了解、敘述與呈現關心的現象
- 結果呈現(報告出版)

上述步驟用以了解並呈現地下水流系統之特性，也就是說利用數學架構了解地質-水力模式，同時經模式之執行與校正以了解地下水流系統之不確定性。這些步驟須依序進行，且有些步驟須反覆進行，所有的步驟對模擬現地水文地質情

況都是必須的，下節中將詳述各步驟。

#### 5.4.2 工作敘述(Task Description;TD)

地下水流模擬採用之模式可分為區域及局部尺度模式(如表 1-1 所示)，於 SKB 場址調查計畫中，局部模式屬於區域模式之次分區。不論是區域或局部模式，場址水文地質敘述性模式(Site descriptive hydrogeological model)均由裂隙幾何特徵建構與其他不同地球科學領域間之關聯，因此，區域或局部模式之差異僅為模式尺度、幾何特徵之解析度以及模擬網格大小，而非採用之概念或是使用之資料不同而區分的。

不論尺度或敘述性模式版本，每一個涉及數值模擬之計畫均應進行工作敘述(Task Description; TD)。工作敘述應清楚詳列一般性與特定數值模擬之目的，同時清楚說明對於品質最低之要求以及預期達成之模擬結果。

SKB 將建立一個與模擬執行者溝通之管道，一但發現工作敘述不夠詳盡，SKB 將與模擬者討論執行計畫細節，一但工作敘述以及執行細節經 SKB 同意，後續之模擬將由 SKB 之品質系統(Quality assurance system)控管。

因涉及整合評估，因此，執行工作期間不可避免的將發現有一些未如預期的解釋情況發生。SKB 將分析這些未如預期之解釋，例如，水力試驗之解釋，有時需要數值模擬結果協助，視問題複雜程度，水力試驗者可直接參與數值模擬，或是另外撰寫一個工作敘述並加以執行。

#### 5.4.3 數值水流模式之技術查核

應用數值地下水流模式，數值模擬者應處理包括：

- 水文地質概念之代表性
- 模式維度(Dimensionality)
- 模式之離散化(Discretisation)
- 初始與邊界條件
- 水力性質

等項目之技術查核。

空間的維度(Spatial dimensionality)主要由模擬目標與地下水流系統特性決定，除非其他特別說明，否則所有場址調查計畫中之數值地下水流模擬都為三維。

時間的維度(Temporal dimensionality)主要為選擇穩態或暫態模擬，理論上穩態模擬產生平均或長期之結果，此一模擬僅適合應用於真實的平衡狀態可達到之

物理現象。暫態分析主要進行於邊界條件隨時間變化(由於海岸線移動)，或研究標的超過一個以上之時間點(例如抽水試驗)，穩態或類穩態即可以判斷測試連通性，並進行局部校正。

依裂隙岩層三維地下水流模式概念，傳統上一般區分為地下水流經三維立方體(序率連續性 SC 模式)或二維平面(離散裂隙網路 DFN 模式)兩類。模擬概念之選擇取決於輸入資料特性與數值模擬之目標，在某些情況下不同之模擬概念可同時進行，以評估模擬概念之不確定性。

空間之離散化，對每一模式之架構過程都為關鍵性步驟，不正確之空間離散化，不僅可能影響輸入資料異質性(例如於鑽孔中不同封塞區隔段間注入試驗之空間變化)之呈現，亦會影響數值穩定性。很明顯當測量尺度小於空間離散尺度時，現地所得之記錄必須進行平均化。為了確保免於數值誤差，模擬者應考慮不同之空間離散化並加以測試，結果須於報告中呈現。

時間離散化是針對暫態模擬選擇時間點數與離散時間段大小，時間離散化對處理溶質傳輸(例如鹽)模擬的問題特別重要，由於受所使用之空間離散化尺度影響，對離散化之最大時間段將有所限制，以避免造成數值不穩定。為了評估所使用之時間離散化是否可能造成數值之不穩定，模擬者應考慮不同之時間離散化並加以測試，結果須於報告中呈現。一般希望模擬者在模式設立的早期階段即能確定完全滿足 Courant 或 Neumann 準則。Courant 準則指的是在一模擬時間區間內  $[t, t+\Delta t]$  由移流所造成離開數值空間單元(cell)之質量不能大於模擬時間區間開始時於空間單元(cell)內之質量。Neumann 準則主要說明濃度梯度方向無法只由延散-擴散單獨改變(Andersson and Woessner, 1992[51])，關於地下水流模擬各種數值準則可參考相關地下水文獻。

初始與邊界條件：初始條件提供暫態模擬之起始點，穩態模擬不需初始條件。初始條件包含在模擬開始每一節點上之壓力(或水頭)與濃度(例如鹽度)，初始條件表示由相同模式所得之穩態解。為評估初始條件對結果之影響，模擬者須設定不同初始條件執行測試，結果亦須於報告中呈現。

所有地下水流數值模擬都須於模擬區域邊界或所有內部之源/匯上各節點指定邊界條件，在 SKB 場址調查計畫中相關之邊界條件可分成四種：(1)定壓力或定濃度(Specified pressure and concentration)、(2)定流體通量或質量通量(Specified fluid flux and mass flux)、(3)混合邊界條件(Mixed conditions)與；(4)自由水面邊界

條件(Free surface boundary; water table)，一般期望模式設定時以天然水文邊界做為邊界條件，如果於模擬區域邊界必須使用人工的邊界條件，模擬者須測試人工邊界條件之影響以確保其足夠遠離目標地區，結果亦須於報告中呈現。

水力性質包括水流系統之地下水傳導能力與貯蓄特性，關心之地下水流系統包括孔隙介質(水力土壤分區 HSD)與裂隙介質(水力通導分區 HCD 與水力岩石分區 HRD)，且概念模式須特別著重於此一系統之複雜性，例如三分區之分界處之地下水流動之處理。水力性質包括流通係數與貯水係數、水力傳導係數與比貯水係數以及比出水量。於模擬區域之水力性質可能屬均質性或異質性，某些水力性質(如水力傳導係數)可能具有方向性(異向性)，水力性質之現地或實驗室量測結果應列出，以設定水力性質之可接受範圍，並規範序率實現值之產生(蒙地卡羅模擬)與模式校正。

#### 5.4.4 模式設計-建構地質為基礎之三維地下水流模式

以地質為基礎之三維地下水流模式之建構，取決於模式所使用之概念方法，主要兩個方法包括序率連續(SC)模式與離散裂隙網路(DFN)模式。水力土壤分區(HSD)、水力岩石分區(HRD)與水力通導分區(HCD)等水力分區(如圖 3-2 與圖 3-3)，其相關於序率連續(SC)與離散裂隙網路(DFN)之水力性質可參考 3.2-3.6 節之說明。裂隙幾何元素將由岩體視覺系統(RVS)輸出至數值模式，至於水力通導分區(HCD)可設定其為一平面或一個區域，此一概念可參考圖 5-6 與 5.1.1 節。

如果數學模式採用序率連續(SC)方法，模擬者須於報告中完整說明尺度之處理過程，也就是說合併考慮水力性質相關資料尺度(測量尺度)與數值模式所選擇之解析度(模擬尺度；離散化)。報告中相關之說明應儘量清楚，以利進行蒙地卡羅模擬(如探討鑽孔封塞封隔段量測所得之資料與蒙地卡羅模擬自相關統計分析結果之一致性)。如果數學模式採用離散裂隙網路(DFN)方法，模擬者須於報告中完整說明選擇定率裂隙帶與序率裂隙之原理，同時說明如何結合模擬裂隙之幾何與水力性質，另外報告中亦須清楚說明裂隙網路幾何實現值是植基於校正(定率裂隙帶)或條件化後產生(序率裂隙)，此一部分詳 5-2 節之說明。

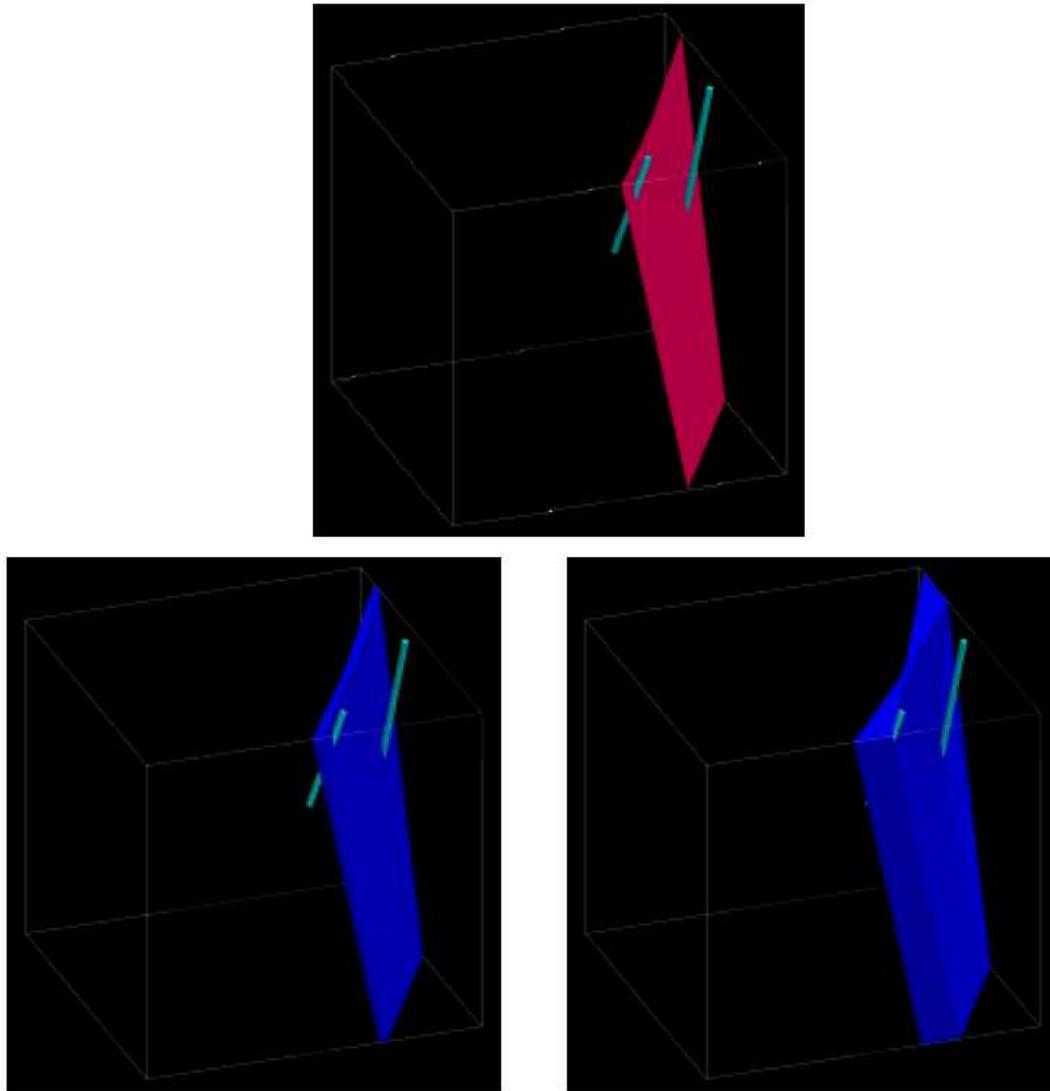


圖 5-6 三維視覺化變形分區幾何特徵，(上)模擬構造面，(下左)固定厚度之模擬構造體積，(下右)變厚度之模擬構造體積地下水流模式(摘自 Munier et al, 2003[26])

#### 5.4.5 模式幾何特性不同解釋之測試

場址敘述模式將於調查期間內持續更新，其主因為於模擬區域大小之變化以及裂隙介質之水力複雜性。場址調查開始時，場址敘述模式將有許多不確定性，當更多資料出現時，裂隙幾何即開始出現一些可能之解釋，此時，模式之測試非常重要，測試結果可做為幾何解釋於水力特性上是否合理之依據。測試者常期盼找到惟一且正確的幾何解釋，但須注意模式測試只可排除幾何解釋中不合理者，而非確定眾多幾何解釋中何者為正確的。因此，惟一之幾何解釋僅是工作進行之假設，隨時間增加，資料收集更詳細，將可能有其他之幾何解釋出現。在此一

重覆過程中，模式測試有一清楚之目標，此一目標即為對模擬水流系統的了解程度是足夠的，量化評量以呈現模式測試過程將於下節討論。

除地質構造模式，水文地球化學資料(主要總溶解固體 TDS)也可作為水力通導分區(HCD)幾何特性模式建構合理性評估之重要依據。

#### 5.4.6 水力校正與敏感度分析

模式測試主要為了選擇裂隙之幾何解釋，地下水流模式之水力校正，則是為了能於合理範圍內調整水力參數、初始與邊界條件，以使得模擬與觀測之水文地質校正目標(如壓力、流率或濃度等)達到一致。雖然自動化之逆推估技術不斷成熟，然而，實際上模式校正之達成，仍需藉由試誤法調整模式輸入參數以擬合觀測資料。模式參數、初始與邊界條件之可變化範圍取決於敘述模式中所呈現之資料，參數通常藉由現地量測取得，模式參數之可變化範圍須與現地觀測範圍一致。模式模擬與現地觀測之一致程度可藉由統計方法量化，理想情況應於校正前設定可接受之校正準則，在文獻中可找到各種準則，可應用於量測鑽孔段壓力水頭、水位面與總溶解固體、逕流率、稀釋試驗估得之達西通量(Darcy fluxes)。水力校正之前提為基於假設構成水文地質場址敘述性模式中用以定義水力分區之基本幾何架構是正確的，若有顯著不同之幾何解釋存在，水力校正就無意義，此時模式測試可能更為重要。

水力敏感度分析為模式輸入變化或不確定性對校正模式水力行為影響之量化分析，如果任何稍微改變輸入水力參數即造成可觀之水力反應，此即意味著校正屬高敏感度。模擬開始應先定義一個或數個評量模式校正敏感度之定量化評估指標(或目標函數)，並藉由模擬值與觀測資料進行比較，以水文地質而言，此一指標可為鑽孔內淡水與海水之交界面位置、執行抽水試驗與追蹤劑試驗之反應、逕流率、補注與流出區分布等。定量化評估指標也可為傳輸特性，例如暫時場址與生物圈間之移流傳輸時間，貯存場深度之達西通量、流徑阻抗(F 因子)、貯存場深度釋放質點之流出區位置之分布與型式。從設計之觀點，可以根據不同場區配置對於溶液進入貯存罐流入率的影響、建造與操作期岩石與其上砂石層洩降形狀與大小，作為敏感度分析之定量化評估指標。

#### 5.4.7 對於水文地質現象通盤了解、描述與呈現所需之模擬

對於所建構之地下水流數值模式之可信程度，乃架構於地下水流數值模擬所獲知之相關水力行為，並與觀察結果進行比較。此一階段之地下水流模擬之主要

目標為：

- 呈現對模擬之地下水流系統現況之了解
- 測試並敘述各種假設狀況對模擬之地下水流系統之影響；與
- 作為安全評估與貯存場設計之重要背景輸入資料。

#### 5.4.8 結果呈現-報告

模擬結果報告之目的為以文字化傳達模擬結果、過程與採用之假設，報告須包括審查者與決策者(SKB)對地下水流模擬之可信度所提供之意見。報告之詳盡程度，應使一獨立模擬者可重現模擬結果。最後，報告須描述列於 5.4 節各方面之要求。地下水流模擬報告內容之範例建議如下，原始範例採自美國材料試驗學會(ASTM,1999[52])之應用地下水流模式之標準規範。

- 概述
- 概念模式
- 數值程式
- 地下水流模式建置
- 測試與校正
- 預測性模擬結論

#### 5.4.9 模式結果範例

數值程式中，執行所需之幾何、水力性質與邊界條件形成之“地下水流模式”參考圖 5-7。“地下水流模式”可進行天然(未擾動)情形與干擾試驗之模擬。模擬結果將呈現給定之水力通導分區(HCD)與水力岩石分區(HRD)水力性質是否合理。藉由模擬測試確定模式裂隙幾何特性是否為合理，地下水流模式即為完成校正。此意謂在地下水流模式之水力性質與邊界條件已調整到可與觀測資料(如壓力水頭、鑽孔段總溶解固體分布與流出區)有最好之一致性。干擾試驗為校正最基本的一環，水力試驗模擬結果之範例示於圖 5-8。

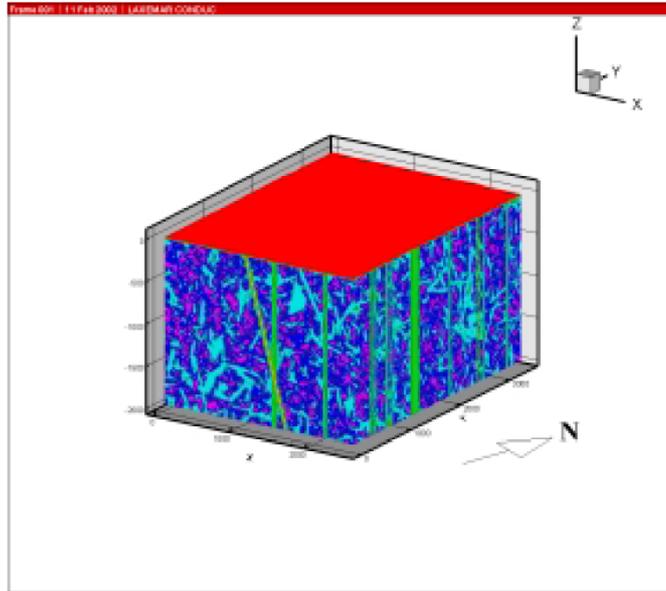


圖5-7 Laxemar地區三維視覺化地下水流模式(摘自 Andersson et al, 2002[41])

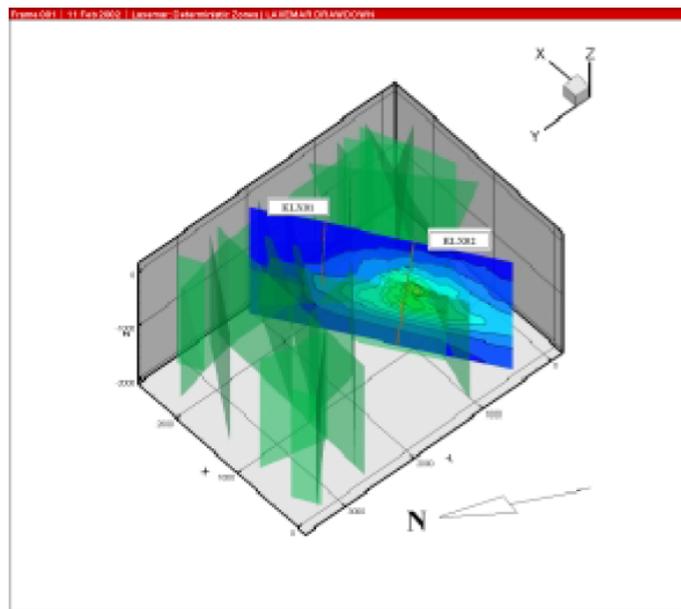


圖 5-8 Laxemar 地區三維剖面洩降分析(摘自 Andersson et al, 2002[41])

另一重要的事項，為模擬結果與水文地球化學資料(特別是總溶解固體 TDS)之比較。藉由質點追蹤，利用地下水流模擬模式建立之流徑可增加對於水文地球化學的了解。流徑對水文地質與水文地球化學兩學科之關連性非常重要，於模擬區域內之流徑或流場，可作為由水文地質到水文地球化學相關現象了解之基礎，同時，水文地球化學對於化學相關資料以及流場之解釋，可能促使水文地質模式之改變。同時，應確定各領域模式間之一致性，如此方能使場址敘述模式有較高

之可信度。

補注與流出區應該能藉由地下水流模擬重現之。圖 5-9 為圖解補注與流出區近表面之流向範例。

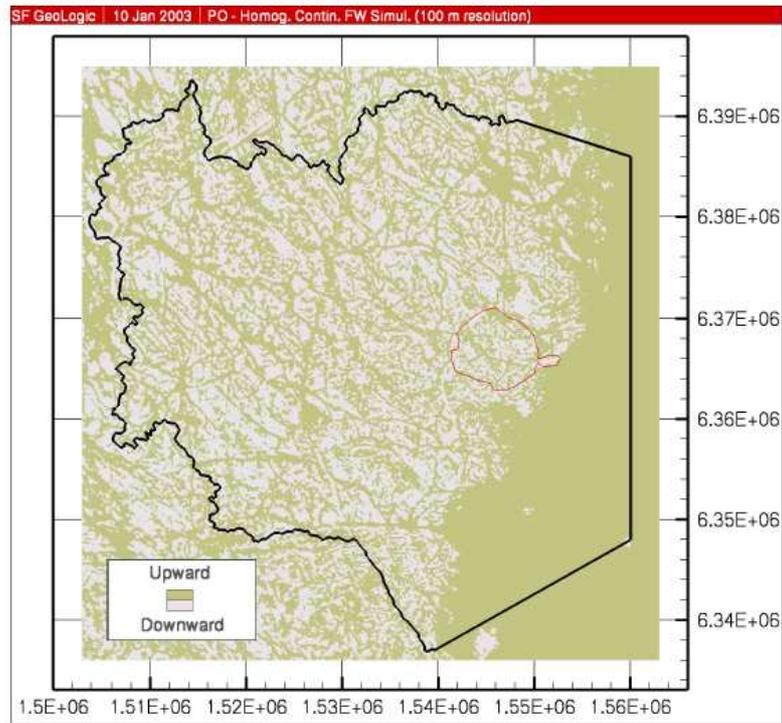


圖 5-9 地表流徑分析顯示補助與流出區(摘自[21])

## 5.5 敘述模式不確定性與信賴度評估

模式幾何、水力性質、初始與邊界條件之解釋，常包含了量測資料、空間與時間變化、概念模式相關議題等之不確定性。不確定性與信賴度評估之詳細說明可參考 Andersson(2003)[53]以及表 6-1。

表 6-1 場址描述之不確定性(譯自[21])

|    | 概念模式                    | 調查          | 三維模擬與計算          |
|----|-------------------------|-------------|------------------|
| 概念 | 概念模式建立程序不正確             | 調查所採用不正確的假設 | 數學模式不正確          |
| 構造 | 概念模式幾何描述不正確             | 不正確的調查位置    | 幾何分區不正確          |
| 資料 | 不正確的參數估計(參數值、變異性以及空間分佈) | 量測誤差        | 水力特性、初始與邊界條件之不正確 |

許多不確定性與概念模式有關，調查型式、數學模式與由相關資料所做之結論均與模式建立過程相關，因此，對調查或模擬而言，相關過程之確立相當重要。

概念模式包含了確認幾何元素型式，如果使用之幾何元素型式並非與場址敘述、參數化與模擬相關，使用之調查方法即可能失去意義，因此敘述模式的可信度將減少。概念模式之不確定性可應用於更大的尺度，敘述性模式可能包含替選模式，包括：

- 替選之幾何架構(變形區與岩石分區之幾何架構)
- 於相同幾何架構下，可能之替選描述(如離散裂隙網路(DFN)模式或序率連續性(SC)模式或不同參數值)

替選之幾何架構意謂著一個不同的幾何架構，如未於原始模式包含之新的變形區，當使用同一幾何架構。採取不同替選之描述時，離散裂隙網路(DFN)模式與序率連續性(SC)模式即代表不同之空間參數表示概念。另外，其它替選模式包括了不同參數表示方法(不論是離散裂隙網路(DFN)模式或序率連續性(SC)模式)，如序率連續性(SC)模式中，水力岩石分區採用定值參數或統計分布之參數。

如果提供作為分析之資料，量測尺度與預期不同，或是某些資料欠缺，此時，因先天之變異性，可能很難獲得參數之空間分布模式，此將引致水力性質給定之不確定性，資料涉及之概念不確定性很難量化，以參數為例，根據不同之概念模式將採用不同之資料詮釋方法，藉由比較不同資料詮釋方法之機率密度函數，參數之有效性即可加以評估，如暫態水力試驗，可假設穩態與暫態並分別加以評估參數之有效性。除此以外，參數有效性評估可藉由不同水力試驗在相同鑽孔段操作，例如在相同鑽孔段操作 5m 長測量尺度之注入試驗與 Posiva 流量(PFL)測量。

如果調查是根據錯誤之概念想法，模式敘述可能存在較大之不確定性，缺乏對場址的了解，可能導致調查者過度集中調查一些較不重要的岩體或區域，模式之逐步修正過程，可以使調查者集中於重要(如場址敘述要求降低不確定性)區域進行調查。另外，場址調查時，不同的量測方法均將引致量測誤差。

量測引致之不確定性(量測誤差)一般可量化，此一誤差可能是隨機誤差或是系統性誤差。由儀器準確度與操作過程所造成之隨機誤差是無法避免的。系統性誤差可能源自於錯誤之儀器校正，一般而言，系統性量測誤差很難察覺，但詳盡的量測方法描述以及收集資料之品管可減低此不確定性。重要資料之相關報告應包含量測解析度與記錄變數(如壓力與流率)之精度。這些資料結合解釋用之模

式，可加以估算量測之不確定性。通常量測之不確定性影響並不顯著。

場址三維模擬之不確定性也須與前述之概念誤差合併考慮，如果模式建立之基本過程未知，明顯地將無法進行概念模式之數學化。另外，幾何模式之解釋也存在不確定性，幾何模式中變形區之位置、範圍、方向以及岩石分區都包含不確定性，變形區位置可透過變形區不確定性模式加以掌握(Munier et al.,2003[26])，不確定性模式可協助定義特定變形區其他可能位置，透過岩體視覺系統(RVS)，可順利將各種變形區之可能位置轉換至地下水流模式中，並測試於不同位置之變形區對流場之影響，這種不確定性稱為資料不確定性，且非替選幾何架構之不確定性。

最後，資料常代表著其為某一體積(或時間)之平均值，如果這些量測是在空間不同點進行，且結果非定值(排除量測之不確定性)，如此，即表示資料具有空間變異性(或時間變異性)。藉由測量方法，累機分布函數或機率密度函數可用以描述變數，對於空間抽樣變數可分析其空間之相關性，對時間抽樣變數可分析其時間之相關性，由空間或時間變化所造成之不確定性可由這些統計模式估計，不同邊界條件亦可經數值地下水流模式測試，以探討邊界條件不確定性對流場之影響。

上述三維模擬之資料與構造不確定性，可稱之為資料不確定性(模式參數值之不確定性)。一般而言，構造存在與否之不確定性較小，構造水力性質之不確定性常較顯著，因為構造存在與否較易證明，但其水力性質卻不易準確估計。

地下水流模擬對於評估敘述模式之不確定性非常有用，首先，固定幾何架構與水力性質，其次，藉由選擇定量化評估指標(例如壓力與流徑)進行敏感度分析，接著，改變不同幾何架構，重覆藉由選擇定量化評估指標進行敏感度分析，分析結果將可作為敘述模式不確定性與信賴度整體評估之基礎。

上述評估所使用之定量化評估指標應可以呈現

- 改變基本水文地質條件後之變化程度
- 模式的有效性(藉由重要之模擬議題)

有用之定量化評估指標應可以

- 測試模式之水流型式(了解水流型式為了解場址水文地質條件之基礎)
- 測試與貯存場安全相關之傳輸議題

- 測試與深貯存場建構對環境影響相關之地下水議題

藉由比較不同模式結果之一致性，為檢核敘述性模式信賴度的另一種方法，這些一致性檢核已於前章短暫提及，一致性檢核如下所列：

- 干擾試驗對測試變形區裂隙幾何模式與其連通性非常有用，然而，主要之限制在於當變形區流通係數甚低時，或調查體積很大時變形區間之裂隙幾何與其連通性無法測試，於土壤分區之干擾試驗，亦對於測試地質之邊界以及土壤層滲透性與連續性相當有效。
- 類似於干擾試驗，傳輸領域所進行之跨孔追蹤劑試驗，對於測試變形區之幾何模式與其連通性相當有效，於觀測段之稀釋試驗，提供比壓力反應更直接之地下水流動觀測結果。
- 實際(未擾動)情況下總溶解固體(TDS)之空間分布、抽水試驗抽出水總溶解固體之改變與對於最後一期之冰河期演變之了解，所提供之水文地質化學資料應該與地下水流模擬結果一致(古水文地質模擬與干擾試驗之模擬)。
- 水文地質化學之觀察與模擬所獲致之結論，應與沿流動路徑裂隙礦物之水文地球化學、有機礦物與氧化還原情形一致。
- 模擬之流出區應與圈繪之湧泉、濕地與由地表面生態系統判釋之可能流出區一致。
- 岩石力學應力場之計算與模擬，所獲得之應力大小與應力比與水力異向性之主方向有關，瑞典的一些觀測也證實此關聯確實存在，然而，開口裂隙數百萬年久之化學沉澱可能降低此一應力引致之異向性。由地潮所引起之每日應力改變可能為異向比存在的原因。
- 滲透性隨深度之變化，可能與裂隙密度或/以及應力條件隨深度改變有關。

## 5.6 敘述模式報告

### 5.6.1 場址描述

如果 X,Y 版水文地質場址敘述性模式與其它替選方案與現有可取得之資料相配合，則水文地質場址敘述性模式之幾何、水力性質與邊界條件須以系統簡潔方式加以描述。分區水力性質可根據試驗分析或模式校正而得。書面報告須包含

區域尺度與局部尺度之水文地質場址敘述性模式參數，如果某一參數無特定場址資料可供評估，由其它 SKB 調查結果或其它一般文獻中所紀錄之資料，可採用為初步估計值。

### **5.6.2 了解與描述之數值地下水流模擬**

每一場址地下水流模擬報告(包括使用不同數值程式之模擬結果)均須分別文件化，這些地下水流模擬報告須詳細說明基本概念、數學公式、空間指定方法、初始與邊界條件、校正、條件化與對場址通盤了解之模擬。基本概念、校正與重要結果都須包含於敘述模式報告。重要結果包括說明於天然狀態下岩盤與土壤層之壓力與鹽度分布、流徑與流出區。

### **5.6.3 整體評估敘述模式之不確定性與信賴度**

模式幾何架構工作與指定性質之不確定性與信賴度須被討論並總結。詳細請參考(Andersson, 2003[24])。對不確性減少之需要主要依據將來通盤了解、深貯存場設計與安全評估。

### **5.6.4 新調查建議**

根據水文地質場址敘述性模式之不確定性與信賴度整體評估，對於岩盤與土壤層之分區將更了解，因此，新的調查不確定性將可降低，根據整體評估結果，後續調查方式與調查區位可得到更佳之建議。

## **5.7 數值地下水流模擬：現地調查計畫與探討性模擬**

### **5.7.1 目的**

藉由已確認水文地質場址敘述性模式版本，探討性模擬可用來探討特定問題以及協助決策。

### **5.7.2 已確認模式版本**

第一個確認之水文地質場址敘述性模式版本，同時已進行地下水流數值模擬者為 1.1 版，1.1 版將有後續其它三個模式版本，1.2、2.1 與 2.2 版。這些模式版本間之差異如表 1-1 所示，簡而言之，當收集得更多與水文地質系統相關之資料，數值模擬將更為完整，因此，1.2 與 2.2 版為比 1.1 與 2.1 版更為詳細之地下水流模式。依表 1-1 所述，1.2 版主要提供初步場址敘述，2.2 版(或後續版本)則提供場址敘述，此意謂 1.2 或 2.2 版(或後續版本)地下水流模式，不論是支援相關委託設計或安全評估均屬必要。

### 5.7.3 探測性模擬應用之範例

不像已確認模式版本之模擬過程，探討性模擬主要是為了特定問題而進行。這些問題由進行調查、設計與安全評估等主要工作者所提出，特定問題也可能由負有協調工作之場址評估者，或不同主要工作與不同場址間協調後提出。對於調查關心的特定問題為現地調查工作之規劃，例如：

- 對某鑽孔之多封塞系統干擾試驗與追蹤劑試驗，何謂最適設計？
- 對於尚未進行鑽孔調查處，干擾試驗預期之水力反應為何？

對於設計關心的特定問題為貯存設施配置之規劃，例如：

- 各種替選貯存設施配置情況下，地下水流至豎井或處置坑之入流量為何？
- 各種替選貯存設施配置與施工方式引致之自由水面洩降與含鹽地下水上升情況為何？

對於安全關心的特定問題為現地情況與貯存設施配置之考量，例如：

- 考慮或不考慮變密度流(含鹽地下水)效應下，建議之貯存場配置與地下水移動至生物圈之時間為何？
- 擾動前與擾動後於貯存深度之達西通量為何？
- 從深層貯存場流經裂隙網路之傳輸阻抗(F 因子)為何？

以上問題只是少數例子，於確定模式版本過程，將由工作描述加以說明(參考 5.4 節)，此工作描述列出 SKB 之探討性模擬之一般與特定目標，且說明在模式設定與預期輸出之最低之品保要求。

## 第六章 資料與文件之管理

調查、解釋和三維模擬產生之資料應以圖1-2中書面文字或數值資料形式(digital format)彙整成報告。本章回顧所有應被整理出來的資料與文件。

### 6.1 主要資料(Primary data)

現地調查(Field investigations)和可用資料的目錄(Inventory)，由包含了方法敘述(Method Descriptions)、指南(Instructions)和相關規範(Routines)組成的管制計畫控制。文件資料應詳述現地調查之一般性資訊(如負責公司、調查人員、調查地點、時間與方法)、品管(QC)、出版之報告、量測或解釋所得之參數數值資料之交付。應提供書面報告和經由水力試驗解釋獲取之參數等資料之樣本。

現地調查期間收集的所有資料稱為主要資料(Primary data)。主要資料分為原始資料(Raw data)與分析或計算後獲取之資料(Routine work up and calculated data)。以數值方式呈現之原始資料應儲存於SICADA(場址特性資料庫)或者是GIS資料庫SDE(空間資料搜尋引擎)以及其他現地紀錄中。分析或計算所得之資料為依循標準程序所獲得之解釋性資料。現地調查所獲得之解釋性參數應以數值檔格式交付到SICADA 資料庫中，同時亦應提供一份書面報告。書面報告也應包括現地調查一般性敘述(Description of the field investigations)與品管等資訊。

水壓面監測(Monitoring of piezometric levels)、水體(包含河道、湖以及海)之水面高度監測，氣象資料以及溪流之流量連續儲存於SKB的資料庫中。大多數資料是儲存在HMS(水文監測系統；Hydro Monitoring System)資料庫中。有些監測資料可能來自於資料記錄器(Data logger)，資料將由固定之收集程序由資料記錄器轉至SKB的HMS資料庫。水壓面資料每日的變化，也可以轉移到SICADA資料庫中。

### 6.2 原始資料的分析(Analysis of Primary data)

原始資料的分析主要是基於SICADA與SDE資料庫以及書面報告。如果檢查特定現地調查成果或成效是必要的，應利用現地記錄檔案(Field archive)。

報告提供的參數值應特別檢查極端值。如果發現極端值是打印錯誤或者錯誤

解讀，資料庫中的值應加以修改。

某些水力試驗可能欠缺部份流體基本性質。地球物理井測(Geophysical logging)值以及分析提取之水的樣品等其他來源之資訊，亦應加入SICADA資料庫。表土層(Surficial deposits)之水力傳導係數主要利用粒徑分佈曲線(Grain size distribution curves)加以推估，這些數據應儲存在SICADA資料庫中。

水文相關資料(氣象學，逕流，湖或海水位面)經常是經由解釋與分析後獲得。地表水的分界(或許也是地下水分水嶺)應是需要加以更新並儲存於GIS資料庫中。

### **6.3 整合性評估和場址描述(Integrated evaluation and Site description)**

整合性評估(Integrated evaluation)將按步驟進行，從幾何特徵(Geometric framework)、分區特性(Domain properties)到邊界條件(Boundary conditions)逐步加以修正更新。此一過程的資料儲存於發展場址模式(Development of the descriptive model)之各工作群裡。

當X.Y.描述性模式之版本與可用之資料詮釋結果相符，此一版本的描述性模式將成為官方模式，並正式儲存在RVS和SDE資料庫。X.Y版本之模式也應以書面報告形式呈現，報告中應包括資料收集方法、主要資料評析綜合意見、三維模型的綜論(Summary of the 3D integrated modeling)、對於三維模型的不確定和可信任程度之總和評估(Overall assessment of uncertainty and confidence pertaining to the model)以及X.Y版本模型精簡的描述。不同領域的解釋應於同一份報告中整合地呈現。

關於幾何特性，如變形區(Deformation zones)、岩石單元(Rock units)特性和鑽井資料等，均來自RVS資料庫。地質領域之變形區與岩石單元特性等資料，經整合性評估後應一併更新。水文地質領域可經與地質領域工作人員進行討論後，於RVS資料庫中建立水文地質版本的模式。於RVS中官方X.Y版本之模式可能同時包含水力通導分區(HCDs)、水力岩盤分區(HRDs)，也許同時包含了水力土壤分區(HSDs)。水力特性和邊界條件均應於書面報告中加以描述，但是某些資料可能僅儲存於SICADA和SDE資料庫中，作為X.Y版本模型的基本資料。

## 第七章 水文地質概念模式審查重點

本審查重點著重於審查水文地質敘述性模式建構的過程是否合宜。下列之審查重點僅提供作為審查工作推動之參考，關於審查執行細節仍應視實際水文地質概念模式建構情況而有所調整。

1. 水文地質敘述性模式建構階段劃分(可參考表 1-1)：
  - 工址調查過程逐步累積調查、測量之資料，應作為先前水文地質模式之修正依據，不同分支之預測應透過跨分支(領域)之討論而得到一致性。
  - 水文地質概念模式應隨資料增加而逐步檢討
  - 水文地質調查應隨水文地質概念模式更迭而有所因應
  
2. 水文地質不同尺度模式建構與模擬順序-模式鏈(Model chain)：
  - 模式鏈建立順序：隧道細部模式(Detail model)至局部模式(Local model)至區域模式(Regional model)。局部模式建立後，應先根據現況資料，進行模式之校正(Calibration)，再據以建立區域模式。
  - 模擬順序：區域模式(Regional model)至局部模式(Local model)至隧道細部模式(Detail model)。區域模式模擬結果(Distribution of head)為局部模式邊界條件決定之依據，局部模式模擬結果為隧道細部模式邊界條件決定之依據。
  - 以 SFR 為例，區域模式為依時性模擬(Time-dependent modeling)，所得結果為不同時間點之水頭分佈，其次根據不同時間點之水頭分部作為局部模式之邊界條件，並加以透過數學模式模擬，即可評估得於不同時期之局部模式模擬結果。
  
3. 場址水文地質特徵分區(水文地質分區)：
  - 土壤分區(多孔隙介質)
  - 岩盤(屬裂隙介質)
    - ◆ 岩石分區(Rock domain)
    - ◆ 水力導通分區(Hydraulic conductor domain)

4. 水文地質分區之模擬概念選擇：
  - 土壤分區(HSD)一般以連續性孔隙介質(Continuum porous medium)概念作為模式建立之基礎。
  - 水力岩石分區(HRD)則可區分為離散裂隙網絡概念(Discrete Fracture Network)以及統計連續性(Stochastic Continuum)概念。
  - 水力導通分區(HCD)則由一個或數個給定厚度(不同 Transmissivity)之區域所組成。
  - 不同概念使用之水文地質參數有所不同，因此，於水文地質調查時以及後續之模擬均應注意上述之差異。
  
5. 水文地質概念模式建構過程：
  - 與地質模型進行互相校核，並根據岩心紀錄、井測以及單孔試驗進行綜合性分析；
  - 利用地質資料建構三維岩盤重要變形區(Major deformation zone)，並進行跨領域分析與測試三維重要變形區之合理性，視需要進行修正與解釋並回至前一步驟重新進行分析；
  - 下一步主要工作為(a)評估水文地質概念之正確性、(b)利用地下水流動模擬以了解現地狀況、(c)評估模型之不確定性以及(d)檢核敘述性水文地質概念模式是否足以成為 X.Y 版本之報告或數值資料。
  - 此一階段工作應於跨領域之模式相互間檢核已完成，確認不同領域之模式已趨於一致後進行。若有必要，經由外差部分重要現象，地下水流動模擬結果將可作為下一階段場址調查規劃之參考，設計與安全評估小組特定問題，亦可透過地下水模擬加以釐清。此一階段工作最需要跨領域合作，基於可用之資料建構一致之模式，如圖 1-1 所示。
  
6. 水文地質分析所需主要資料建立：
  - 合宜之調查以及分析方法(詳參第四章)
  - 工址調查所得之解釋性資料，將外差至模型之全域而非僅及量測點，因此空間上變異概念、資料本身的不確定性以及對於問題本身瞭解的不足

均應妥適的處理，並將之視覺化。

- 主要資料之分析：配合鑽孔資料，進行單孔試驗或監測之資料分析

## 7. 地下水模擬：

地下水流數值模擬之應用，包含以下幾個主要的基本步驟，以達成水文地質系統具可接受之代表性(詳參第五章)：

- 工作敘述
- 用於地下水流數值模擬概念相關假設之技術查核
- 基於三維地下水流數值模擬所需，設計(建構)所需之地質模式
- 場址地下水流場模式選擇
- 裂隙幾何不同解釋方案，利用三維地下水流數值模擬加以測試
- 水文地質概念模式與參數之驗證(Test and calibration)
  - ◆ 根據水文地質模式以及選擇之參數，建立數學模式並利用數值程式或解析方式求解，再根據水文地質調查結果進行參數與概念模式之驗證
  - ◆ 水文地質概念模式應利用數學、物理模式以及現地量測資料加以校正
  - ◆ 水文地質參數、邊界條件、應利用數學、物理模式以及現地量測資料加以校正
- 水力參數敏感度分析
- 進行地下水流模擬，用以了解、敘述與呈現關心的現象，如流量、流徑(flow path)、穿透時間(Breakthrough times)、滲出位置(Discharge area)
- 結果呈現(報告出版)

上述步驟用以了解並呈現地下水流系統之特性，也就是說利用數學架構了解地質-水力模式，同時經模式之執行與利用現地調查、量測、分析資料進行校正，以了解地下水流系統之不確定性。這些步驟須依序進行，且有些步驟須反覆進行，所有的步驟對模擬現地水文地質情況都是必須的。

## 8. 資料傳遞(詳參第六章)：

- 根據場址調查所獲資料提供分析所需資料，或分析所得資料提供作為其

他分析所需資料之傳遞

- 應推動資料收集、管理、解釋、分析以及報告的透明性及清晰性。
- 應充分應用過往經驗。

9. 水文地質概念模式應用之注意事項：

- 水文地質概念模式為地下水流動分析之基礎，地下水流動分析結果將為傳輸以及地化分析之基礎
- 設計暨安全評估：設計與安全評估應為獨立於進行場址調查之機構，此一工作應基於最終版本之水文地質概念模型。
- 水文地質概念模式以及後續之地下水流模擬應能加強安全評估(SA)與工址調查(SI)間之交互作用，並適時於不同階段提供不同需要之資訊，同時能適時將跨領域交互作用所得資訊做為回饋。
- 場址評估：基於最終水文地質概念模型(包括其他專業分支之模型)、設計與安全評估，進行研判處置場興建決策所需資訊均已充足，是否需要進行其它調查、分析與評估。

10. 與隧道處置相關之審查重點

- 隧道處置場址之水文地質概念模式建立至少應有三階段
  - ◆ 隧道處置場興建前
  - ◆ 隧道處置場興建後(隧道內將持續抽水)
  - ◆ 隧道封閉後(慢慢充水直至隧道充滿水)
- 與隧道處置場流量與流動方向分析，應包括區域與局部模式之模擬，以及隧道詳細模式之模擬，隧道詳細模式應包括所有防護結構物
- 隧道開挖解壓造成周圍水文地質單元水力參數之改變應納入考慮
- 數值模擬與分析結果可利用簡單之解析模式(如附錄一)加以驗證

11. “模擬”事實上是一個學習過程，因此，水文地質概念模式建立過程以及後續模擬之策略必須具有彈性，並視需要隨時調整與更新。

## 第八章 結論與建議

### 8.1 結論

1. 本年度計畫完成低放射性廢棄物隧道處置水文地質概念模式審查重點之研擬，並提供關於行政管理作業推動之參考。
2. 本研究建議水文地質概念模式之審查，應著重於水文地質敘述性模式建構的過程是否合宜。
3. 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，確認所得到資料之不確定性；(6)妥善利用模擬，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。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，確認水文地質概念模式之合理性。
4. 地下水流模擬事實上是一個學習過程，因此，為持續改善模擬之可靠程度，最基本之水文地質概念模式建立過程以及後續模擬之策略必須具有彈性，並視需要隨時調整與更新，審查執行細節仍應視實際水文地質概念模式建構情況而有所調整。

### 8.2 建議

1. 本年度計畫以一般性放射性廢棄物處置水文地質概念模式審查有清楚之說明，並針對隧道處置審查重點進行原則上之說明，惟隧道處置有其理論與實務上之特殊性與複雜性，關於此一方面具體之審查要求重點可進一步探討。
2. 本年度計畫執行以水文地質概念模式建立程序進行一般性之說明與解釋，未來若能配合實際案例進行介紹，將能更具體呈現審查重點與要求，同時可吸取國外相關經驗。
3. 水文地質概念模式與水文地質調查相關性極高，未來此兩方面關於審查技術之研究可考慮進行計畫間之交流，以達整合之目的。

## 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. IAEA. 1993, The radioactive waste management glossary, Vienna: IAEA.
3. 尤崇極、施清芳、張坤城、宋國良、鄧仁杰、張福麟、劉建麟，1991。我國用過核廢料長程處置計畫第二階段工作計畫—蘭嶼地質調查報告書。原子能委員會核能研究所，台北。
4. 中興工程顧問社，1987。蘭嶼地區放射性待處理物料貯存場地下水調查及地質探查報告。放射性待處理物料管理處 76 年度研究報告。
5. 李振誥，1991。破裂岩層地下水流及污染物傳輸模式之評選及應用於示範場址（一）。放射性待處理物料管理處 80 年度研究報告。
6. 李振誥，1992。破裂岩層地下水流及污染物傳輸模式之評選及應用於示範場址（二）。放射性待處理物料管理處 81 年度研究報告。
7. 李振誥，1993。破裂岩層地下水流及污染物傳輸模式之評選及應用於示範場址（三）。放射性待處理物料管理處 82 年度研究報告。
8. 徐年盛等，1991。放射性廢料設施及其附近地區地下水流及水質傳輸模擬之研究（一）。放射性待處理物料管理處 80 年度研究報告。
9. 徐年盛等，1992。放射性廢料設施及其附近地區地下水流及水質傳輸模擬之研究（二）。放射性待處理物料管理處 81 年度研究報告。
10. 徐年盛等，1993。放射性廢料設施及其附近地區地下水流及水質傳輸模擬之研究（三）。放射性待處理物料管理處 82 年度研究報告。
11. 徐年盛等，1994。放射性廢料設施及其附近地區地下水流及水質傳輸模擬之研究（四）。放射性待處理物料管理處 83 年度研究報告。
12. 泰興工程顧問股份有限公司，1988。蘭嶼貯存場環境影響報告。原子能委員會放射性待處理物料管理處，台北。
13. 莊文星、羅俊光、劉文忠、陳聯燮，1989。蘭嶼貯存場地下水與岩石調查。中央地調所彙刊，第五號。
14. 詹新甫，1995。蘭嶼地區放射性待處理物料貯存地質環境調查。中央地質調查所 74 年度研究報告。
15. 郭明錦，1991。放射性廢料設施及其附近地下水示蹤及井壓試驗設計研究（一）。放射性待處理物料管理處 80 年度研究報告。
16. 郭明錦，1992。放射性廢料設施及其附近地下水示蹤及抽水試驗含水層特性描述之研究（二）。放射性待處理物料管理處 81 年度研究報告。
17. 郭明錦，1993。放射性廢料設施及其附近地下水示蹤及抽水試驗含水層特性描述之研究（三）。放射性待處理物料管理處 82 年度研究報告。
18. 郭明錦，1994。放射性廢料設施及其附近地下水示蹤及抽水試驗含水層特性描述之研究（四）。放射性待處理物料管理處 83 年度研究報告。
19. 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。

20. Holmén J. G., Stigsson M., 2001. Modelling of future hydrogeological conditions at SFR. SKB R-01-02. Svensk Kärnbränslehantering AB.
21. Rhén I., Follin S., Hermanson J., 2003. Hydrogeological site descriptive model – a strategy for its development during Site Investigations. SKB R-03-08. Svensk Kärnbränslehantering AB.
22. 簡錦樹, 1995。低放射性廢料最終處置場水文地質概念模式審查技術之建立 (一)。放射性待處理物料管理處 84 年度報告。
23. 簡錦樹, 1996。低放射性廢料最終處置場水文地質概念模式審查技術之建立 (二)。放射性待處理物料管理處 85 年度報告。
24. Andersson J., 2003. Site descriptive modeling - strategy for integrated evaluation. SKB R-03-05. Svensk Kärnbränslehantering AB.
25. Andersson J., Christiansson R., Hudson J., 2002. Site Investigations strategy for rock mechanics site descriptive model. SKB R-02-01. Svensk Kärnbränslehantering AB.
26. Munier R., Stanfors R., Milnes G., Stenberg L., Triumph C.-A., Hermansson J., 2003. Geological site descriptive model – a strategy for model development during site investigation. SKB R-03-07. Svensk Kärnbränslehantering AB.
27. Rhén I (ed), Bäckblom (ed), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997a. Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/2. Results from pre-investigations and detailed site characterization. Summary report. SKB TR-97-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.
28. Rhén I (ed), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997b. Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on site characterization 1986–1995. SKB TR-97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.
29. Walker D, Rhén I, Gurban I, 1997. Summary of hydrogeological conditions at Aberg, Beberg and Ceberg, SKB TR-97-23. Svensk Kärnbränslehantering AB.
30. SR 97, 1999. Deep repository for spent nuclear fuel. SR 97 – Post-closure safety, Main report, volume II, SKB TR-99-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
31. Isaaks E H, Srivastava R M, 1989. Applied Geostatistics, Oxford University Press, New York.
32. Deutsch C V, Journel A G, 1997. GSLIB, Geostatistical Software Library and User Guide, Oxford University Press, New York.
33. Jensen J L, Lake L W, Corbett P W M, Goggin D J, 2000. Statistics for petroleum engineers and geoscientists, Handbook of Petroleum Exploration and Production, 2, Second ed, Elsevier, Amsterdam.
34. Deutsch C V, 2002. Geostatistical reservoir modeling, Oxford University Press, New York.
35. SKB, 1998. Characterization and Evaluation of Sites for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste in Fractured Rocks, Proceedings from the 3<sup>rd</sup> Äspö International Seminar Oskarshamn, June 10–12, 1998, SKB TR-98-10. Svensk Kärnbränslehantering AB.
36. Moye D G, 1967. Diamond drilling for foundation exploration Civil Eng. Trans., Inst. Eng. Australia, Apr. 1967, pp 95–100.

37. Kruseman G P, de Ridder N A, 1990. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. ILRI publication 47, The Netherlands, Int. Inst. For Land Reclamation and Improvement.
38. Cooper H H Jr, Bredehoeft J D, Papadopoulos I S, 1967. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources. Res.*, v 3 no 1, pp 263–269.
39. Papadopoulos I S, Bredehoeft J D, Cooper H H, 1973. On the Analysis of ‘Slug Test’ Data. *Water Resources. Res.* v 9, no 4 1973 pp 1087–1089.
40. Smellie J, Laaksoharju M, Tullborg E-L, 2003. Hydrogeochemical Site Descriptive Model – a strategy for the model development during site investigations. SKB R-02-49. Svensk Kärnbränslehantering AB.
41. Andersson J, Berglund J, Follin S, Hakami E, Halvarson J, Hermanson J, Laaksoharju M, Rhén I, Wahlgren C-H, 2002. Testing the methodology for site descriptive modelling. Application for the Laxemar area. SKB TR-02-19. Svensk Kärnbränslehantering AB.
42. Öhberg A, Rouhiainen P, 2000. Posiva groundwater flow measuring techniques. Report Posiva 2000-12.
43. Halevy E, Moser H, Zellhofer O, Zuber A, 1967. Borehole dilution techniques: A critical review. Proceedings of the symposium on isotopes in hydrology in Vienna, 14–18 November 1966. International Atomic Energy Agency.
44. Drost W, Klotz D, Koch A, Moser H, Neumaier F, Rauert W, 1968. Point dilution methods of investigating groundwater flow by means of radioisotopes. *Water Resources Research*, Vol 4, No 1, pp 125–146.
45. Gaspar E, Onescu M, 1972. Radioactive tracers in hydrogeology, Elsevier Publ. Comp.
46. Berglund S, Selroos J-O, 2003. Transport Properties Site Descriptive Model – Guidelines for Evaluation and Modelling. SKB R-03-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.
47. Rhén I (ed), Gustafson G, Stanfors R, Wikberg P, 1997. Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/5. Models based on site characterization 1986–1995. SKB TR-97-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.
48. Horne R N, 1995. Modern well test analysis. Second edition Petroway Inc.
49. Osnes J D, Winberg A, Andersson J, 1988. Analysis of Well Test Data – Application of Probabilistic Models to Infer Hydraulic Properties of Fractures, Topical Report RSI-0338, RE/SPEC Inc., Rapid City, South Dakota.
50. Feller W, 1971. An Introduction to Probability Theory and Its Applications, Vol 2, 3rd ed. New York: Wiley.
51. Andersson M P, Woessner W W, 1992. Applied Groundwater Modeling, Simulation of flow and advective transport, Academic Press, New York.
52. ASTM, 1999. ASTM Standards on Determining Subsurface Hydraulic Properties and Ground Water Modeling, second ed.
53. Andersson J, 2003. Site descriptive modelling – strategy for integrated evaluation. SKB R-03-05. Svensk Kärnbränslehantering AB.

## 附錄一 隧道地下水流場數學模式介紹

為驗證數值程式之合理性，本研究協助選擇適用於隧道處置概念之地下水流動模擬檢核之解析模式。

Holmén J. G., Stigsson M. (2001) [20]發展一解析方法驗證流經坑道地下水流動數值模擬結果，此解析方法考慮坑道為關閉(Closed)且密封(Sealed)，地下水流達穩態，且岩石基質(Rock mass)為均質與等向性，而坑道內亦為均質與等向性，坑道內並無抽水。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，且坑道與其週遭包圍物視為兩不同水力性質之介質，分別考慮坑道為圓柱體、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。