

行政院原子能委員會  
放射性物料管理局委託研究計畫

「放射性廢棄物坑道處置場址  
特性調查及設施設計與建造審查要項研究」

正式報告

主持人：王泰典

委託單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局

執行單位：國立臺北科技大學

計畫編號：99FCMA002

中華民國九十九年十二月七日

行政院原子能委員會放射性物料管理局

「低放射性廢棄物坑道處置場址  
特性調查及設施設計與建造審查要項研究」

委託研究計畫工作

正式報告

主持人           ： 王泰典

共同主持人     ： 董家鈞、顧承宇、李宏輝

研究助理       ： 李佳翰、詹佩臻、詹尚書、蕭宇翔

執行單位       ： 國立臺北科技大學

中華民國九十九年十二月七日

## 目錄

目錄.....	1
第一章 前言.....	3
1.1 計畫背景.....	3
1.2 計畫目的與重要性.....	3
1.3 國內外有關本計畫之執行情況.....	4
1.4 報告內容.....	5
第二章 國內暨有場址調查規範與調查技術彙整.....	7
2.1 調查規範.....	8
2.2 調查技術.....	11
2.2.1 調查階段.....	11
2.2.2 調查項目與方法.....	11
第三章 坑道處置場址特性調查與參數評估之檢查與審查架構暨審查要點研析..	20
3.1 場址特性調查與參數評估架構.....	20
3.1.1 場址特性.....	20
3.1.2 場址調查規範與成果.....	22
3.1.3 場址調查項目.....	24
3.2 審查要項探討.....	46
3.2.1 既有資料蒐集.....	46
3.2.2 地形與地貌.....	50
3.2.3 地質.....	50
3.2.4 水文.....	56
3.2.5 大地工程特性.....	59
3.2.6 現地應力.....	65
第四章 國內既有隧道設計及施工技術規範彙整.....	69
4.1 國內既有隧道設計技術規範.....	69
4.1.1 設計規範彙整.....	69
4.1.2 設計理念與考量因素.....	71
4.1.3 設計項目與流程.....	72
4.2 國內既有隧道施工技術規範.....	76
4.3 隧道施工相關其他技術文件.....	78
第五章 國內既有隧道設計方法、設計參數與穩定分析技術之彙整.....	80
5.1 國內既有隧道設計方法.....	80
5.1.1 經驗設計法.....	80
5.1.2 觀察設計法.....	87
5.1.3 分析設計法.....	87

5.1.4 案例說明—二高中寮隧道 .....	88
5.2 隧道設計參數 .....	92
5.2.1 隧道設計參數評估 .....	92
5.2.2 案例說明—員山子分洪隧道 .....	98
5.3 隧道設計穩定分析技術 .....	99
5.3.1 分析設計法種類 .....	100
5.3.2 案例說明—曾文越域引水隧道 .....	104
第六章 國內既有隧道工程材料之技術規範彙整分析 .....	111
6.1 隧道支撐材料 .....	111
6.1.1 鋼支撐架 .....	111
6.1.2 噴凝土 .....	112
6.1.3 岩栓 .....	113
6.1.4 先進支撐 .....	115
6.2 隧道襯砌材料 .....	117
6.2.1 設計條件 .....	117
6.2.2 組成材料 .....	117
6.2.3 基本特性 .....	124
6.2.4 隧道襯砌材料各項試驗及規範 .....	125
第七章 國內既有隧道施工技術對多重壁障功能影響之初步探討 .....	127
7.1 不同隧道開挖工法之擾動 .....	127
7.1.1 隧道開挖擾動之定義 .....	127
7.1.2 不同隧道開挖工法之擾動影響 .....	128
7.2 困難地質因應處理方法之探討 .....	134
7.2.1 擠壓 .....	134
7.2.2 湧水 .....	135
7.2.3 有害性氣體 .....	136
7.2.4 斷層破碎帶 .....	137
7.2.5 煤層及廢煤坑 .....	137
7.3 隧道施工對多重障壁功能的影響初探 .....	139
7.3.1 影響過程與參數 .....	139
7.3.2 隧道開挖施工對圍岩之爆破損傷 .....	140
7.3.3 開挖擾動帶之依時變形特性 .....	143
7.3.4 開挖擾動帶之水力特性 .....	144
第八章 結論與建議 .....	151
8.1 結論 .....	151
8.2 低放處置場安全分析報告審查導則草案編修之建議 .....	151
參考文獻 .....	156

## 第一章 前言

### 1.1 計畫背景

世界各國對於低放射性廢棄物最終處置方式包含近地表處置及地下坑道處置方式，並以近地表處置佔多數，技術相對較為成熟。部分國家則因處置環境及其條件，採用坑道式處置方式，例如瑞典及南韓。我國目前積極推動低放射性廢棄物最終處置規劃與建造作業，因地形、地質環境及人口分布特性，地下坑道處置方式極可能是未來處置方式的選項，亟需循序務實推動各項處置技術之建置。

因應低放射性廢棄物最終處置設施經營者執行處置計畫之依循，並做為審查人員之審查作業指引，物管局已於去(98)年度執行「低放射性廢棄物最終處置設施場址特性參數與設計建造管制技術之研究」計畫，完成美國核管會 NUREG-1200 內容中文化作業，並對應我國低放處置安全分析報告導則章節，建立本土化審查導則草案初稿。然美國有關場址特性、處置設施設計、建造之管理單位、法規制度皆不同於我國，NUREG-1200 原版本中多處引用美國其他單位訂定之法規、條例或管理規則等，我國可能缺乏對應的法規、條例或管理規則；場址地質與工程環境先天差異，以致設計與施工等部分議題存有疑義不清等問題。經「低放射性廢棄物最終處置設施場址特性參數與設計建造管制技術之研究」計畫彙整提出諸多差異與疑義處，仍待進一步比較與深入探討，俾利完善審查導則暨管制技術規範。

### 1.2 計畫目的與重要性

物管局基於管制技術的提昇及審查作業之需求，今(99)年度執行「放射性廢棄物坑道處置場址特性調查及設施設計與建造審查要項研究」計畫，旨在依據我國工程與環境特性，蒐集整理既有之坑道地質調查、設計與建造之相關法規、管理規則、技術規範以及研究成果等，繼而對照我國低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則相關細則以及安全分析報告所建立對應的審查導則草案與相關的研究報告，進行深入地比較與探討，並提出具體之建議，以供物管局建置更完整的管制技術及研訂本土化審查規範的重要參考。

延續(98)年度「低放射性廢棄物最終處置設施場址特性參數與設計建造管制技術之研究」計畫，針對我國場址地質與工程環境先天差異，以致場址調查、設

計與建造等部分議題存有疑義不清等問題，本計畫將在我國安全分析報告審查導則草案的架構下，探討引用其他公共工程坑道地質調查、設計與建造規範與準則的適用性，將共通部分進行最大的接軌，並針對相異處提出改善的建議與後續探討的議題。研究成果可有效縮短未來建制管制規範的時間，並可提供物管局以及未來低放射性廢棄物處置設施相關計畫申請者、審查人員之參考。

### 1.3 國內外有關本計畫之執行情況

美國政府聯辦法規標題 10，第 61 部分(Title 10 of the Code of Federal Regulations, Part 61, 10 CFR 61)「陸地處置放射性廢料的執照需求(Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste)」中，規定低強度放射性廢料的接收、持有、及處置單位要求須有一份美國核管會(NRC)的執照，並在 10 CFR 61.10 至 10 CFR 61.16 訂出為了申請建造及運轉一座陸地處置場執照，以便處置低放射性廢料所須提供的資訊項目。申請文件中必須含安全分析報告(Safety Analysis Report, SAR)及環境報告(Environmental Report, ER)兩部分。為了確保低放射性廢棄物陸地處置場執照建造及運轉執照申請單位進行安全分析等報告包含 10CFR61 所要求的資訊，以及協助美國核管會審查委員確定申請單位所提供資訊是完整的，伴隨執照申請時一併提出的環境報告應依照 10 CFR 51 以及法規指引 4.18(Regulatory Guide 4.18)，「放射性廢淺近表處置環境報告之標準格式及內容(Standard Format and Contents of Environmental Report for Near-Surface Disposal of Radioactive Waste)」中。安全分析報告可以引用包含於環境報告中的資訊作為參考。美國核管會亦定有「低放射性廢料處置場執照申請之標準格式與內容」(以下簡稱 NUREG-1199)，提供申請單位及審查人員參考。

另外，美國核管會另定有「低放射性廢料處置場執照申請審查之標準審查計畫」(Standard Review Plan for the review of a license application for a low-level radioactive waste disposal facility, SRP) (以下簡稱 NUREG-1200)，主要目的在提供核管會審查人員執行審查作業的指引。NUREG-1200 中每一個 SRP 針對審查範圍、審查程序、接受準則、審查發現及參考資料等部分，皆有清楚的定義與說明。NUREG-1200 提供一個定義完整的技術平台，一方面確保審查人員審查的品質與一致性，另一方面也提供處置設施潛在申請單位對於執照審查程序廣泛而完整的資訊。

國內在放射性物料的管理方面歷經法源訂定與技術研究多年的努力，管制技術逐漸與國際接軌，如 93 年發布之「放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法」。為求管制技術之進一步精進，管制規範以及作業程序亦陸續建立，已積極完成 NUREG-1199 與 NUREG-1200 的中文化作業，並對應我國低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則，建立安全分析報告審查導則草案(B 版)。

我國低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則草案之有關第三、四及五章中有關場址之特性描述、處置設施之設計以及處置設施之建造等部分，係 98 年度執行之「低放射性廢棄物最終處置設施場址特性參數與設計建造管制技術之研究」計畫參考 NUREG-1200 法規為基本架構而提出。然美國有關場址特性、處置設施設計、建造之管理單位、法規制度皆不同於我國，NUREG-1200 原版本中多處引用美國其他單位訂定之法規、條例或管理規則等，我國可能缺乏對應的法規、條例或管理規則，可能由不同的單位訂有相近者，但因其事業主管目的不同，直接引用可能出現偏頗情事，因此「低放射性廢棄物最終處置設施場址特性參數與設計建造管制技術之研究」報告於第三、四及五章原則上按 NUREG-1200 中文版，將引用美國法規、條例或管理規則以及明顯不合我國國情之規定，皆以斜粗體字型表示；部分中文化過程存在疑義者，屬工程邏輯問題者以紅色字體表示，屬文義不清問題者附上原文並以紅色字體表示；將 NUREG-1200 審查發現舉例說明之描述，以斜體黑色字型表示；將審查導則草案初稿相關章節相互引用者以底線表示；該計畫增列部分則以斜體灰黑色字型表示。該等特別標示之處，即為本計畫探討之部分要點，分別於本報告第二至第七章中探討。

## 1.4 報告內容

本計畫主要的工作內容包括下列 8 項：

- (1) 國內既有場址調查規範與調查技術彙整。
- (2) 坑道處置場址特性調查與參數評估之檢查與審查架構暨審查要點研析。
- (3) 國內既有隧道設計及施工技術規範彙整。
- (4) 國內既有隧道設計方法、設計參數與穩定分析技術之彙整。
- (5) 國內既有隧道工程材料之技術規範彙整分析。

- (6) 國內既有隧道施工技術對多重壁障功能影響之初步探討。
- (7) 配合物管局辦理「低放處置場安全分析報告審查導則草案」編修。
- (8) 參與本局召開之技術研討會議報告工作成果暨研究成果報告撰寫。

由於計畫期程時間之限制，本研究擬基於我國低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則草案第三、四、五章之架構，針對場址特性調查、坑道設計與建造等三部分，蒐集整理我國公共工程應用之法規、管理規則、技術規範以及相關之研究成果；繼而探討前述各項法規、規範與研究成果的研訂背景與應用範圍，並比較其與低放射性廢棄物坑道處置的功能需求以及設計目標，據以探討應用於低放處置的適用性。

針對公共工程既有法規、管理規則、技術規範以及相關之研究成果適用於低放射性廢棄物坑道處置的部分，將整理相關之規則與技術規範，按安全分析報告審查導則草案之架構，直接納入。並將針對重要內容採附錄方式列舉，例如場址特性調查與評估的重要因子、坑道設計與建造所需的場址特性重要參數之調查技術、試驗程序與檢核要點等，以利應用之參考。

針對公共工程既有法規、管理規則、技術規範以及相關之研究成果與低放射性廢棄物坑道處置的功能需求以及設計目標不同而無法直接應用之部分，本研究則進一步探討，嘗試針對差異處較小之部分提出修訂之建議，再納入安全分析報告審查導則草案之架構，並加以標注，以供未來詳加探討與增修。至於設計功能需求差異較大、或既有公共工程尚未考慮低放射性廢棄物坑道處置特殊需求而難於短期修訂之部分，則整理關鍵之問題點，並依據蒐集所得國外相關研究成果，提出後續持續改善精進之建議。

期中報告，內容包含「國內既有場址調查規範與調查技術彙整」、「坑道處置場址特性調查與參數評估之檢查與審查架構暨審查要點研析」、「國內既有隧道設計及施工技術規範彙整」、「國內既有隧道設計方法、設計參數與穩定分析技術之彙整」及「國內既有隧道工程材料之技術規範彙整分析」等部分研究成果初稿。



## 第二章 國內暨有場址調查規範與調查技術彙整

放射性廢棄物最終處置設施之申設流程從選擇處置型式(近地表處置或坑道處置)、選址、場址特性、設計、建造、操作至封閉(圖 2)，各階段所需提送之文件與審查皆十分複雜且嚴謹，尤其是「選址」與「設計」階段「場址特性」之「調查」、「分析」與「評估」甚為關鍵，將嚴重影響處置場之選擇、設計與未來操作階段，甚至封閉後之安全穩定與障壁成效。因此，以下將彙整國內既有場址調查規範與調查技術，包括對應的應用目標、功能需求及整體調查架構之分析；依坑道處置工程障壁系統設計及功能評估參數之需求，評估前述各項技術規範，提出應用於處置設施安全分析報告審查之探討。

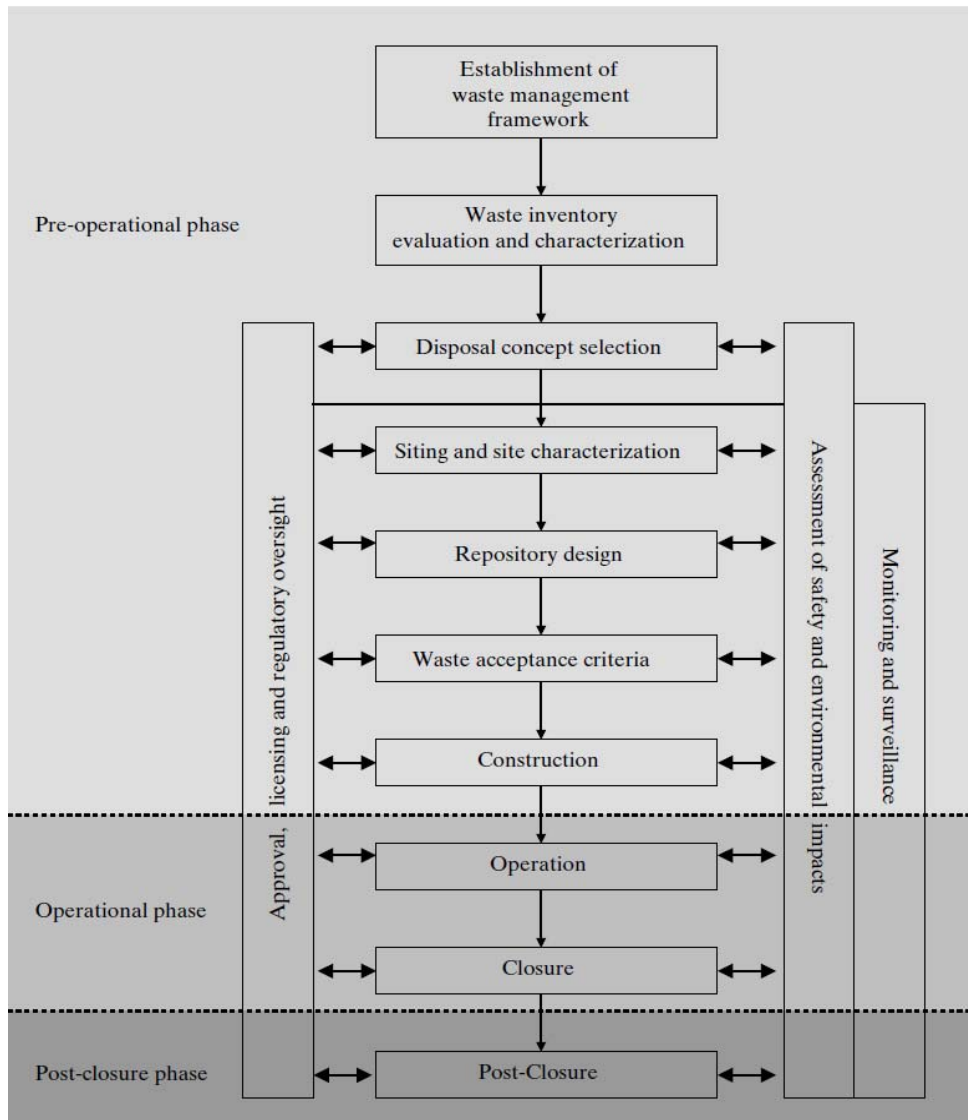


圖 2 近地表處置場申設流程示意圖 (IAEA, 2003)

## 2.1 調查規範

雖國內目前尚未建立或制定放射性廢棄物坑道處置之場址特性調查的規範，但目前針對一般場址特性調查的規範或研究成果亦可供本研究案進一步參考，現歸納整理說明如后，並進行比較討論如表 2.1-1。

- (1) 工址地盤調查準則(內政部建築研究所，1993)：本準則係採綱要式之條文編列，俾國內建築、土木工程，有一可供遵循之工址地盤調查參考指針。其內容包括總則、調查計畫分段、基本考量、調查方法、調查最小需求、專業人員資格、作業注意事項、調查報告內容與建議格式等八章，計 70 條。
- (2) 大地工程調查作業準則(交通部台灣區國道新建工程局，1999)：本準則包含地表地質調查、地球物理探勘、鑽探調查、開挖調查、岩石及土壤之室內試驗、現地試驗共六個章節。
- (3) 隧道工程設計準則與解說(中國土木水利工程學會，1999)：本設計準則分成三部分，第一部分為總則，說明設計準則涵蓋的範圍及適用性；第二部分為調查與試驗，針對隧道工程之特性，就工址調查的範圍、項目、進行方法及成果判釋等詳細說明；第三部分為隧道設計，就設計項目、設計理念及注意事項等加以闡述說明。
- (4) 建築物基礎構造設計規範(內政部營建署，2001)：本規範分為總則、基礎載重、基地調查、淺基礎、樁基礎、沉箱基礎、擋土牆、基礎開挖、地層改良、土壤液化評估共十個章節。
- (5) 台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立(行政院公共工程委員會，2003)：行政院公共工程委員會有鑑於台灣地區沿用之岩體分類法係因襲國外系統，常無法反映國內特殊之地質條件，且隧道工程相關資料至今仍散佈於各單位中，相關經驗無法有效傳承與保存，因此，彙整國內隧道工程資料，並透過國際隧道工程技術交流方式，參酌國外現行岩體分類系統以及著名隧道工程案例加以研究，以建立台灣地區之岩體分類與支撐系統，供爾後之隧道工程使用。同時利用現代電腦科技功能建立隧道工程資料庫，將台灣過去隧道工程之相關資訊加以保存，提供後續隧道工程之決策與執行上之參考。

- (6) 隧道工程地質探查技術(台灣營建研究院叢書，2000)：全書蒐集「隧道工程地質探查技術研討會」之發表文獻，為隧道工程地質探查、地球物理在隧道工程地質探查之應用、隧道施工震波探測(TSP)技術及應用、鋼索取樣式長距離鑽探技術及應用、反循環式長距離水平鑽探技術及應用、隧道工程地下水探查技術與應用、隧道工程地熱溫泉探測技術及應用、隧道煤層煤坑探查技術及應用、隧道工程有害氣體探查技術及應用等。
- (7) 工程地質測繪準則與解說(中國土木工程學會，1999)：本準則旨在規範工程地質圖之繪製標準，如工程地質測繪重點、精度要求、應測繪項目、資料記載及測繪成果表達之方式等；內容包括：總則、現地調查、工程地質平面圖、鑽孔柱狀圖、工程地質剖面圖、開挖地質圖、地球物理探查成果圖、遙測影像判釋成果圖、地質災害圖等。
- (8) 基礎工程施工規範與解說(中國土木工程學會，1998)：本規範及解說涵蓋工法說明、材料要求、施工程序、施工計畫、施工注意事項、施工檢驗、施工記錄等。

表 2.1-1 比較與討論

參考文獻	出處	年代	適用範圍及特色	項目
工址地盤調查準則	內政部建築研究所	1993	本準則係採綱要式之條文編列，俾國內建築、土木工程，有一可供遵循之工址地盤調查參考指針。	其內容包括總則、調查計畫分段、基本考量、調查方法、調查最小需求、專業人員資格、作業注意事項、調查報告內容與建議格式等八章，計 70 條。
大地工程調查作業準則	交通部台灣區國道新建工程局	1999	適用於國道公路，主要分為兩個階段：可行性及規劃階段、初步設計階段，無論是可行性研究、規劃、設計、施工及營運維護等階段，皆應配合各階段之需要性而有其不同「範圍」、「精度」及「程度」之調查工作。	本準則包含地表地質調查、地球物理探勘、鑽探調查、開挖調查、岩石及土壤之室內試驗、現地試驗共六個章節。
隧道工程設計準則與解說	中國土木工程學會	1999	本準則可適用於下列情形：1.供政府、事業單位辦理規劃設計或編擬規劃設計工作招標文件之參考。2.做為工程規劃設計	本設計準則分成三部分，第一部分為總則，說明設計準則涵蓋的範圍及適用性；第二部分為調查與試驗，針對隧道工程之特性，就工址調

			單位辦理規劃設計、監造之準繩。3.供政府、事業單位審查工程計畫。規劃設計成果及監造作業之依據。4.工施工單位辦理施工計畫與管理之參考。	查的範圍、項目、進行方法及成果判釋等詳細說明；第三部分為隧道設計，就設計項目、設計理念及注意事項等加以闡述說明。
建築物基礎構造設計規範	內政部營建署	2001	適用於一般建築物基礎設計之最低安全要求，適用於大部分一般性建築物基礎設計之需要，惟對於特殊之建築物基礎或地質狀況，因視情況採用特別之調查、試驗或相關研究，從事分析與設計，使建築物基礎能符合其安全使用之目的。	本規範分為總則、基礎載重、基地調查、淺基礎、樁基礎、沉箱基礎、擋土牆、基礎開挖、地層改良、土壤液化評估共十個章節。
台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立	行政院公共工程委員會	2003	台灣地區之岩體分類與支撐系統	
隧道工程地質探查技術	台灣營建研究院叢書	2000	「隧道工程地質探查技術研討會」之發表文獻	隧道工程地質探查、地球物理在隧道工程地質探查之應用、隧道施工震波探測(TSP)技術及應用、鋼索取樣式長距離鑽探技術及應用、反循環式長距離水平鑽探技術及應用、隧道工程地下水探查技術與應用、隧道工程地熱溫泉探測技術及應用、隧道煤層煤坑探查技術及應用、隧道工程有害氣體探查技術及應用等。
工程地質測繪準則與解說	中國土木工程學會	1999	本準則適用於下列工址地盤調查準則中各類工程計畫之工程地質測繪、製圖作業：建築與一般結構物、山坡地開發工程、海岸造地與港埠工程、隧洞或地下結構物工程、大壩工程、鐵路道路與一般土石方工程、橋梁工程、其他相關大地工程等。	內容包括：總則、現地調查、工程地質平面圖、鑽孔柱狀圖、工程地質剖面圖、開挖地質圖、地球物理探查成果圖、遙測影像判釋成果圖、地質災害圖等。

## 2.2 調查技術

對地下場址可能面臨的地質問題，其工程地質探查方法將隨著科技進步，各種自動化、大能量的機械設備與精密儀器的引進，配合相關技術的傳輸與經驗的累積，在遠距與特殊地質的探查方面必有相當的突破，以下就調查階段及調查項目與方法進行說明。

### 2.2.1 調查階段

場址調查主要可分為兩階段，即可行性評估與規劃階段與初步及細部設計階段。為達到最具經濟效益的作法，調查工作應分期進行，每一期的規劃應根據上一期所獲得之資料來決定。

#### A. 可行性評估與規劃階段

主要目的為提供足夠的資料作為可行性的分析(Feasibility study)、工程規劃及決定進一步探測的方法。初步察探的資料收集及調查，包括地形圖、地質圖、土壤測量(Soil survey)資料、航測影像、現場踏勘及初步鑽探。

#### B. 初步及細部設計階段

主要是為了獲得設計時所需的詳細資料，如土壤強度與壓力的關係、壓密性能及透水性等。一般用於細部探測的方法有下列數種：地球物理測量、探測及探測桿(Sounding and Probing)、鑽探及取樣(Boring and Sample)、水文地質及土壤取樣(Soil Sampling)，方法之選擇視地質特性及場址範圍與複雜度而決定。

### 2.2.2 調查項目與方法

我國交通部台灣區國道新建工程局於1999年出版之「大地工程調查作業準則」，建議一般大地工程於可行性評估與規劃階段之工址調查流程如圖 2.2-1 所示，初步及細部設計階段流程如圖 2.2-2 所示。其內容除包含地表地質調查、地球物理探勘、鑽探調查、開挖調查、岩石及土壤之室內試驗、現地試驗等可供參考外，並規範設計階段地質平面及剖面圖之比例尺(精度要求)如下：

- 區域地質圖：1/10,000~1/50,000
- 航照判釋圖：1/5000
- 沿線平縱斷面地質圖：1/1000~1/5000
- 鑽孔平面及柱狀圖：1/2000~1/5000

- 隧道平縱斷面地質圖：1/1000~1/2000
- 隧道洞口平縱斷面地質圖：1/200~1/500
- 重要結構物之基礎或有潛在滑動疑慮之邊坡：1/200~1/500

本研究研擬之大地工程合理地質調查架構主要執行階段之調查方法與項目如表 2.2-1 所示，就特殊地質調查作業重點如表 2.2-2 所示。

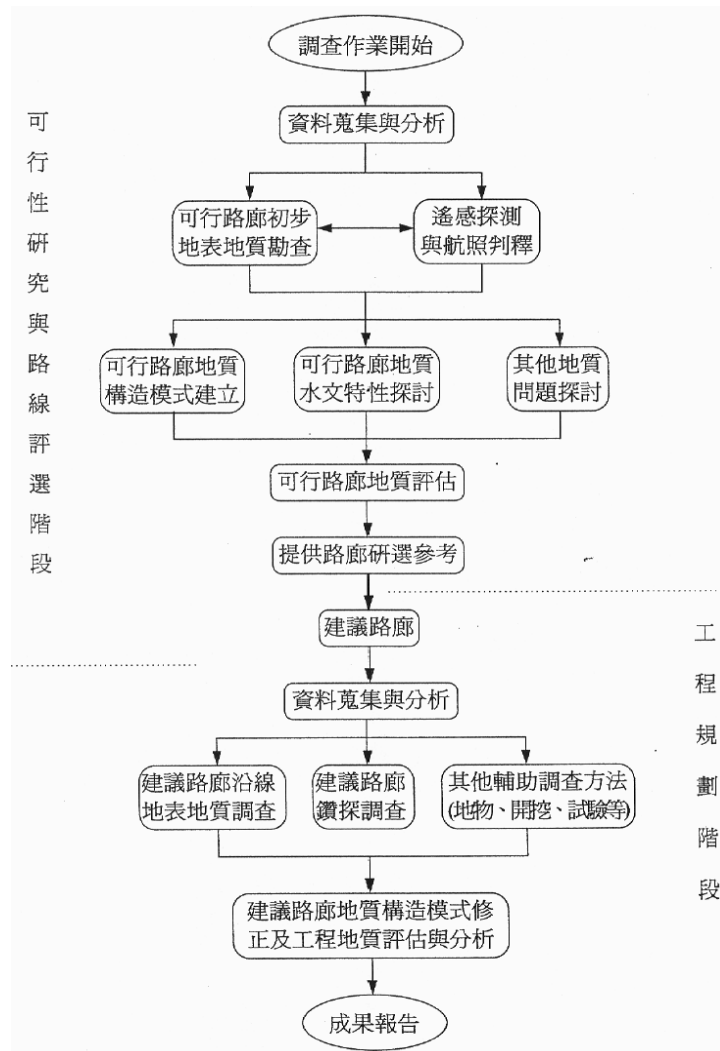


圖 2.2-1 可行性評估與規劃階段之大地工程調查流程圖(國道新建工程局，1999)

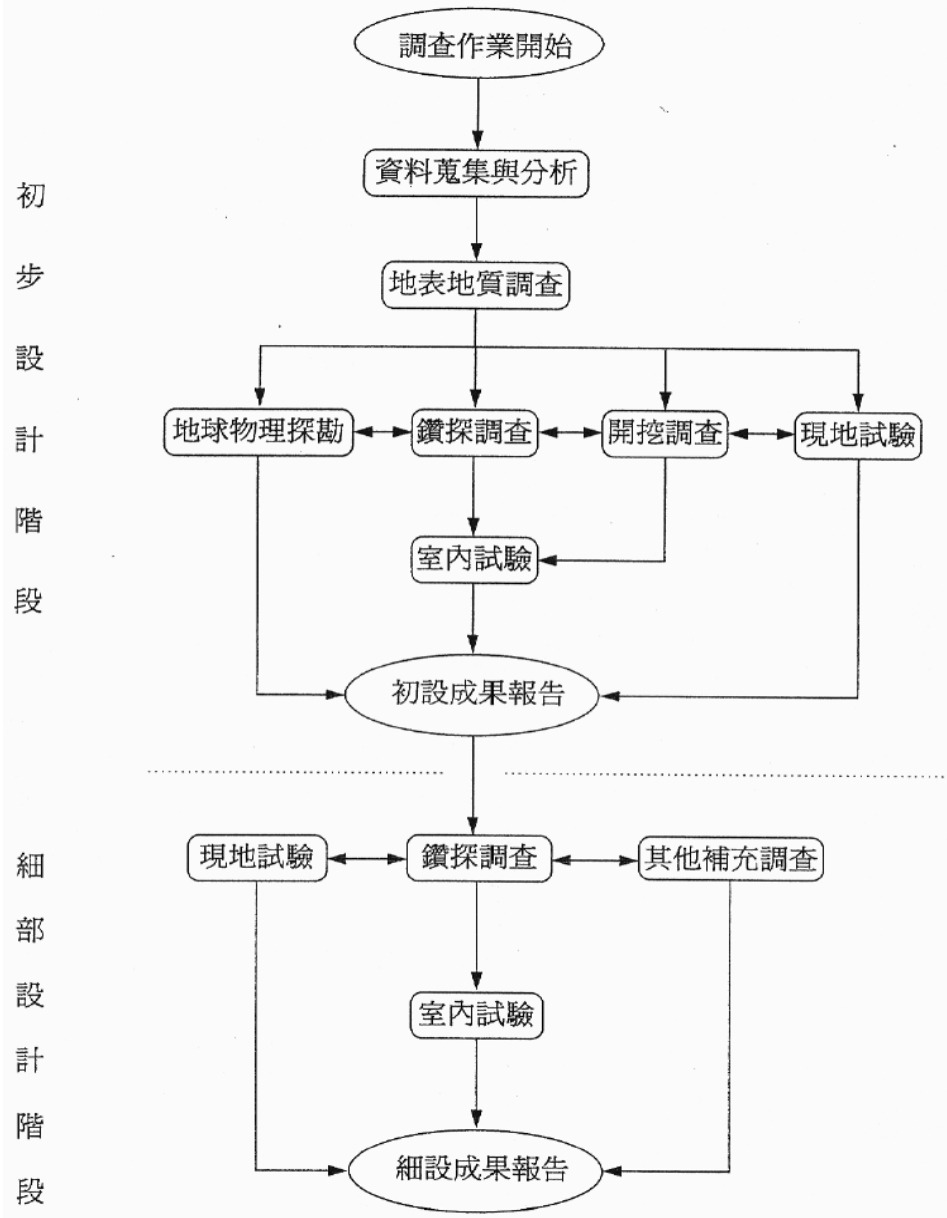


圖 2.2-2 設計階段之大地工程調查流程圖(國道新建工程局，1999)

表 2.2-1 本研究研擬之大地工程合理地質調查架構主要執行階段之調查方法與項目

執行階段	調查類別與主要成果	調查方法	調查項目
可行性評估階段	一般地質調查及地表地質調查、繪製精度 1/5000 或 1/2000 之一般地質圖、地表地質圖、地質剖面圖	應用遙測、航照、地球物理探測、配合少數的鑽探及取樣試驗，少數鑽探調查	大地應力、崩塌地、活斷層、地震災害、風化、文情等文獻資料蒐集，特殊地質條件之初步界定，範圍之初步界定，岩體各項評估用參數
規劃階段	繪製精度 1/1000~1/2000 之一般地質圖、地表地質圖、工程地質圖	地球物理探測、鑽探及取樣、相當數量之開挖調查、各種定性至半定量試驗	岩心與岩體之強度、變形與滲透性之範圍、弱面空間分佈、力學性質等
設計階段	繪製精度 1/1000~1/2000、部分 1/100~1/200 之一般地質圖、地表地質圖、岩盤地質圖、工程地質圖	各結構物如洞口段、豎井、交叉段位置附近之精密鑽探及取樣主要結構物位置周密之試驗及室內試驗，必要時挖調查、模型試驗、離型試驗如反算法、試挖等	設計參數包括岩心與岩體之強度、變形性與滲透性、弱面空間分佈、力學性質等

表 2.2-2 特殊地質調查作業重點

執行階段	問題分析與定義	系統整合與分析	評估與決策
可行性評估階段	潛在工程問題探討、問題影響範圍界定	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ 相關案例經驗之蒐集、問題對工程之影響、特殊地質調查之建構、解決方案之研擬、專家小組研議</li> </ul>	環境衝擊評估、可行或另謀方案、是否繼續調查或進入下一階段
規劃階段	問題影響程度之探討	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ 解決方案之評估</li> <li>✚ 替代方案之研擬</li> <li>✚ 專家小組之評選與聘任組成</li> </ul>	成本與工期分析、問題之掌握程度、是否繼續調查或進入下一階段
設計階段	問題影響型式(破壞模式)之建立、問題處理成效(因應問題對策下之施工情況預測)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✚ 解決方案擬定、替代方案擬定、各項對策之規範</li> <li>✚ 施工監測、預警系統擬定</li> <li>✚ 承商資格遴選與限制</li> <li>✚ 專家小組之運作</li> </ul>	是否退回適當的工程階段、繼續調查或進入下一階段

場址調查項目與方法有很多種，每種方法都有其適用的範圍與限制，在場址的調查通常必須配合多種方法，截長補短，綜合各種資料而得到最佳的調查結果。

#### A. 地球物理探勘

地球物理方法在場址調查中常用的主要有反射震測、折射震測、隧道內震測、透地雷達、電探法、電磁測、電井測、井測及跨孔式井測等。以下簡介常用方法，如表 2.2-3 所示。其方法與特色如下：



1. 全面性：地球物理方法通常以量測整個調查區域的人為或天然物理量，經資料處理之後，得到廣域的物理參數圖(如磁力測勘、重力測勘)，並可解釋該區域的地下構造情形。
2. 遙測性：地球物理方法可說是地下遙測法，在地表上或隧道內，採用震波、電磁波及電力等探測源，傳入地下，探測無法直接到達的地方。
3. 連續性：一般地球物理的結果在空間上都具有連續性，由於地球物理方法在空間上的取樣率相當高，因此在空間上可視為一連續性的結果，如反射震測剖面，提供連續的地下震測剖面；地電阻影像剖面法，提供連續的地電阻率剖面，進而提供推估地下水等分布情形。
4. 非破壞性：由於探測所用的探測源不是天然的就是小量人工探測源，一般不會對探測目標及施測位置附近造成太大的破壞或影響，因此可以說是非破壞性檢測。

表 2.2-3 常用的地球物理方法

方法	提供資訊	適用範圍	適用時機
磁力測勘	磁力分布圖	大區域斷層調查、地質調查	選線調查
重力測勘	重力分布圖、重力剖面圖	大區域斷層調查、地質調查	選線調查
空中磁測	快速提供大區域磁力分布圖	大區域斷層調查、地質調查	選線調查
空中電磁測	快速提供大區域地電阻資料	大區域斷層調查、地熱溫泉調查、地質調查	選線調查
反射震測	較深地下構造影像	斷層、破碎帶、地質弱帶調查	選線調查、細部設計施工前計畫調查，補充調查
折射震測	提供淺層(約30公尺深)速度分布及構造	提供反射震測靜態修正資料，淺層斷層位置，風化層厚度，如洞口段覆土厚度等。提供震波速度資料。	選線調查、細部設計施工前計畫調查，補充調查
地電阻影像剖面法	電性地層構造	地下水調查、溫泉地熱調查、風化層厚度，如洞口段覆土厚度等，斷層調查。	選線調查、細部設計施工前計畫調查，補充調查
隧道內震測	隧道開挖面前方震波影像	隧道開挖面前方地質弱帶調查	施工中調查
透地雷達	約30公尺以內地下結構	隧道附近煤坑調查	施工中調查
電磁測法	電性地層	地下水探查、斷層調查、溫泉調查	選線調查、細部設計施工前計畫調查，補充調查
控制波源大地電磁法	電性地層構造	地下水探查、斷層調查、溫泉調查	選線調查、細部設計施工前計畫調查，補充調查
跨孔式震波斷層掃描	震波速度構造	煤坑調查、斷層調查	細部設計施工前計畫調查、災害補充調查。可配合鑽探實施。
跨孔式地電阻斷層掃描	地下電性地層構造	地下水調查、煤坑調查	細部設計施工前計畫調查、補充調查。可配合鑽探實施。
電井測	探測井壁附近之電性、密度、孔隙率、波速	地下水調查、湧水評估	細部設計施工前計畫調查、補充調查。可配合鑽探實施。
下孔式震波速度井測	P波 S波速度	提供估算現地動態彈性模數	細部設計施工前計畫調查、補充調查。可配合鑽探實施。

## B. 鑽探調查

其主要目的在於探查土層與岩層的層次與分布、查證地質構造、查證地球物理的探測結果、取樣俾便進行物理性質及力學試驗、觀測地下水位及從事抽水試

驗、現場試驗、裝設監測儀器、地質改良等。參考工程地質通論(潘國樑, 2007)

對鑽探佈孔原則如表 2.2-4 所示

表 2.2-4 鑽探佈孔原則

工程性質	佈孔間距	鑽深
廣大的新址	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 初期以 50~150 m 的間距為原則；任何相鄰四孔所圍的面積，約占全區的 10%(約分成 3 格*3 格)。</li> <li>● 詳勘期已獲得最有用的地質剖面為原則。</li> </ul>	—
壓縮性的軟岩	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 候選場址採用 30~60 m 的間距</li> <li>● 定址後於舊鑽孔間加入新鑽孔。</li> </ul>	—
使用窄距的基腳之大型建物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 在長、寬方向各探 15m 的間距，必須涵蓋機械的位置或電梯坑；或以獲得最有用的地質剖面為原則。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⚡ 垂直應力小於荷重的 10% 之深度。</li> <li>⚡ 一般需要鑽到基腳底面以下至少 10 m 的深度</li> </ul>
低載重的倉庫	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 至少在四角各佈 1 孔，並在中間的基腳位置補鑽數孔，以了解土層的剖面為原則。</li> </ul>	—
堅固的地基，面積小於 30 m*30 m~60 m*60 m	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 在對角處佈兩孔；如果土層延展不規則時，再在中間補孔。</li> </ul>	—
濱海的建物，如碼頭、船塢等	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 不超過 15 m 的間距；在重要位置需再補孔。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⚡ 鑽至挖掘深度以下約為離水牆高的 0.75~1.5 倍之深度；若遇軟層，則應鑽入堅固層為止。</li> </ul>
長的隔離壁或泊船碼頭	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 初期沿著壁面採 60 m 的間距。</li> <li>● 必要時再補中間孔，孔距約 15 m。</li> <li>● 在壁內及壁外應佈置數孔以了解壁趾部擊及壁後主動楔體的土層結構。</li> </ul>	—
邊坡穩定分析、深開挖、高土堤	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 在關鍵的方向佈置 3~5 孔，繪製地質剖面，以供分析；對於滑動中的邊坡，應在滑動體外的上邊坡至少佈 1 孔。</li> <li>● 必要時，應該多切幾條地質剖面</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⚡ 鑽至滑動面以下 5m，或其下的穩定岩土層為止。</li> <li>⚡ 對於深開挖，應鑽至坑底以下 1~3m；若鑽至邊坡的水平寬度之 0.5~1.25 倍為止。若遇軟層，則應鑽入堅固層為止。</li> </ul>
壩、滯水結構	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 在地基區，初期採用 60m 的間距。</li> <li>● 在壩軸上補孔，採用 30m 的間距。</li> <li>● 在壩肩、溢洪道等關鍵處也應佈孔。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⚡ 對於土石壩，需鑽至底寬的 0.5 被深度。</li> <li>⚡ 對於小型混凝土壩，需鑽至壩高 1~1.5 倍深度。</li> <li>⚡ 或鑽入很厚的堅硬不透水層 3~6m 為止。</li> <li>⚡ 研究壩基滲流或地下水的浮托力時，應鑽至不透水層，或水庫滿水位時水深之兩倍。</li> </ul>
鐵路、公路	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 初期採用 300m 間距。</li> <li>● 遇複雜地質時，採 30~50m 間距。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⚡ 中心線：5~10m</li> <li>⚡ 橋墩：大於 25~30m</li> <li>⚡ 研究河水的刷深時，應鑽至河床下 5~10m，或河水為最大變化量的 4 倍。</li> </ul>

### C. 水文地質

水文地質調查的任務主要在於獲得正確的地質、水文地質資料，一般調查工

作由測繪、初勘、細勘、試驗、長期觀測等工作所組成，而組成此水文地質調查有關地下水考慮因素，如圖 2.2-3 所示。

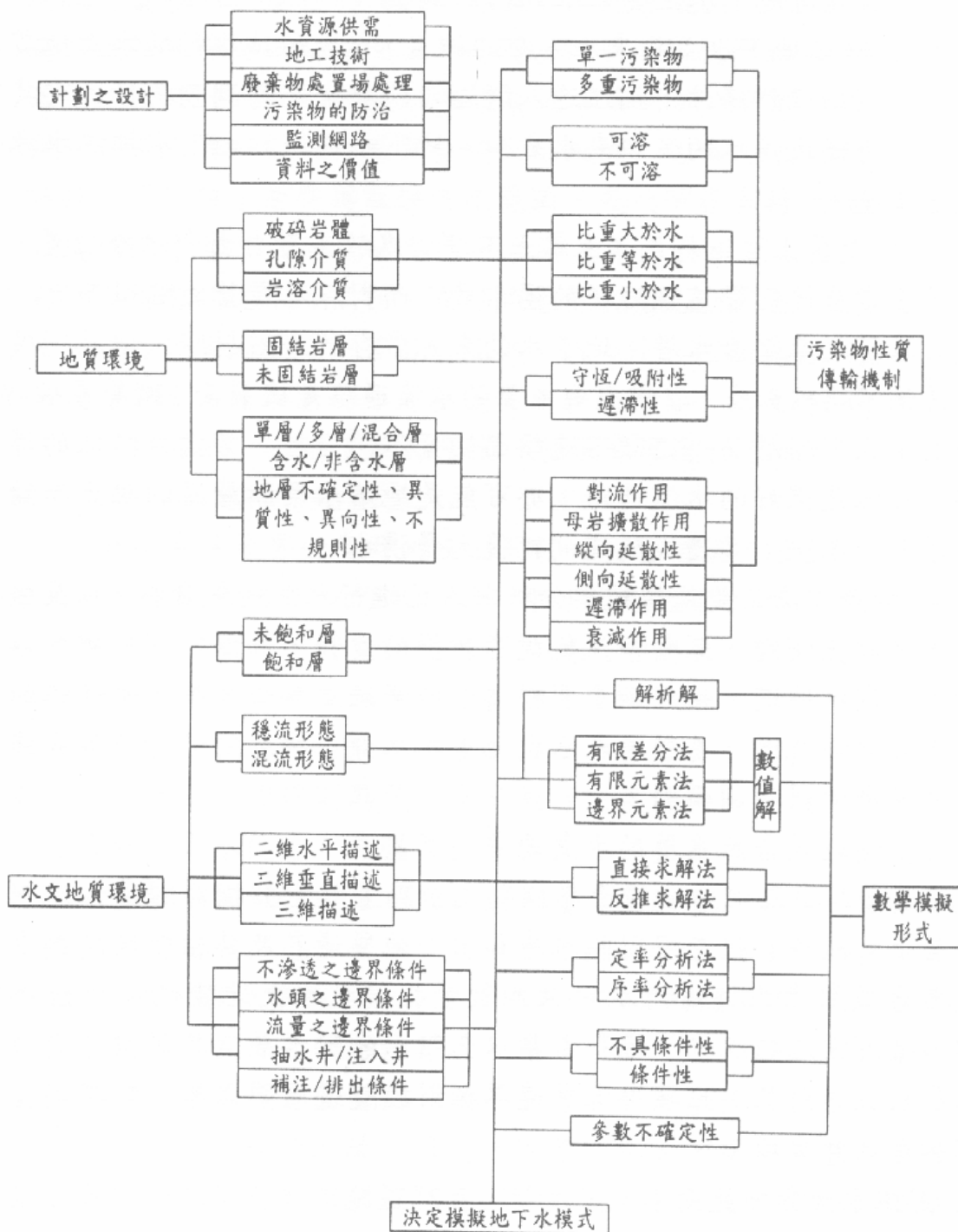


圖 2.2-3 水文地質調查有關地下水模式組成考慮因素示意圖

台灣營建研究院於 2000 年出版之「隧道工程地質探查技術」，建議水文地質調查重點如下：

1. 地下水主要來水方向的調查

2. 圍岩阻水層的水文地質邊界調查
3. 對斷層與破碎帶的調查
4. 對岩溶(喀斯特 Karst Topography)含水層之湧水調查
5. 地下熱水與地溫的調查

水文地質調查項目可參考中國土木水利工程學會(1999)出刊之「隧道工程設計準則與解說」，如表 2.2-5 所示

表 2.2-5 水文地質調查要項 (中國土木水利工程學會，1999)

項 目		方 法	規 劃 階 段			施 工 階 段
			地 質 構 造	水 文 環 境	湧 水 量	
水文地質 (蓄水層)	構 造	資料調查	√	√	√	
		地表測繪	√	√	√	
		震 測	√			
		鑽 探	√	√		
	特 性	水井水位測量		√	√	
		抽水試驗			√	
湧水壓測量				√		
水 平 衡		降雨量量測		√	√	
		地表水量量測		√	√	
		地下水位量測		√	√	
水文環境	水 源	湧泉調查		√	√	
		井水位測量		√	√	
		河川流量測量		√	√	
		湖沼水位測量		√	√	
	水 利	農業用水調查		√		
		工業用水調查		√		
		其他用水		√		
施 工 中		坑內湧水量量測				√
		坑內水溫量測				√
		排水水質量測				√

## 第三章 坑道處置場址特性調查與參數評估之檢查與 審查架構暨審查要點研析

囿於國內尚無制定放射性廢棄物坑道處置之場址特性之調查規範，而「場址特性調查」與「參數評估」對於置場之選擇、設計、運作與場址除役後之障壁成效等影響甚鉅，為求謹慎，本章透過資料彙整，嘗試建立場址特性調查內容與參數評估所需參考規範，並透過審查要點的定義與應用，進行要點研析。

### 3.1 場址特性調查與參數評估架構

本節從「場址特性」、「場址調查規範與成果」與「場址調查項目」等三個部分建立場址特性調查與參數評估架構。

#### 3.1.1 場址特性

根據國際原子能總署(IAEA)與美國核能管制委員會(NRC)於 1991 至 2001 年間頒布之相關文件，包括準則、導則與報告等，綜整「場址特性」含括之項目如表 3.1-1，現就各文件內容整理說明如后：

A. 國際原子能總署 (IAEA) 於 1999 年頒布「近地表核廢料處置場(Near Surface Disposal of Radioactive Waste)」之安全準則 (IAEA Safety Standards Series No. WS-R-1) 中有關可接受場址特性要求之項目如下：

1. 一般 (General)。
2. 地質 (Geology)。
3. 水文地質 (Hydrogeology)。
4. 地球化學 (Geochemistry)。
5. 構造地質與地震 (Tectonics and seismicity)。
6. 地貌 (Surface processes)。
7. 氣象與氣候 (Meteorology and climate)。
8. 對人類活動的影響 (Impact of human activities)。

B. 國際原子能總署 (IAEA) 於 1994 年頒布「近地表處置設施選址 (Siting of Near Surface Disposal Facilities)」之安全導則 (IAEA Safety Series No. 111-G-3.1) 中有關選址所需之場址特性項目包括：

1. 一般 (General)。
  2. 地質 (Geology)。
  3. 水文地質 (Hydrogeology)。
  4. 地球化學 (Geochemistry)。
  5. 構造地質與地震 (Tectonics and seismicity)。
  6. 地貌 (Surface processes)。
  7. 氣象 (Meteorology)。
  8. 人類引起之事件 (Man-induced events)。
  9. 廢棄物運輸 (Transportation of waste)。
  10. 土地利用 (Land use)。
  11. 人口分布 (Population distribution)。
  12. 環境保護 (Protection of the environment)。
- C. 國際原子能總署 (IAEA) 於 2001 年發表「Technical considerations in the design of near surface disposal facilities for radioactive waste」之報告(IAEA TECDOC-1256)，則說明設計階段必須獲得之場址特性內容有：
1. 既有基礎設施。
  2. 可利用空間。
  3. 接近廢棄物源(proximity to waste arisings)。
  4. 地形。
  5. 氣候與水文。
  6. 地質構造及其特性 (例如：力學、地形、裂隙、斷層、震態等)。
  7. 水文地質與地化特徵 (例如：滲透性、地下水流態、水質、遲滯過程等)。
  8. 地質演化過程。
- D. 美國核能管制委員會(NRC)於 1991 年頒佈之「申請低放射性廢棄物處置設施之標準格式與內容 (Standard Format and Content of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility)」(NUREG-1199)與 1994 年頒佈之「申請低放射性廢棄物處置設施之審查導則 (Standard Review Plan for the review of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility)」(NUREG-1200)中有關場址特性之項目包括：

1. 地理、人口統計及未來發展 (場址位置及其敘述、人口分佈)。
2. 氣象及氣候。
3. 地質與地震學 (含場址地質特性調查、地震調查)。
4. 水文 (含地表水文、地下水特性調查)。
5. 土工特性。
6. 地球化學特性。
7. 天然資源 (地質資源、水資源)。
8. 生物特性。
9. 運轉前環境監測。

表 3.1-1 場址特性項目

機構	國際原子能總署 (IAEA)	國際原子能總署 (IAEA)	國際原子能總署 (IAEA)	美國核能管制委員會 (NRC)
年份	1999	1994	2001	1991 與 1994
場址特性項目	(1) 一般 (2) 地質 (3) 水文地質 (4) 地球化學 (5) 構造地質與地震 (6) 地貌 (7) 氣象與氣候 (8) 對人類活動的影響	(1) 一般 (2) 地質 (3) 水文地質 (4) 地球化學 (5) 構造地質與地震 (6) 地貌 (7) 氣象 (8) 既有設施 (9) 廢棄物運輸 (10) 土地利用 (11) 人口分布 (12) 環境保護	(1) 既有基礎設施 (2) 可利用空間 (3) 接近廢棄物源 (4) 地形 (5) 氣候與水文 (6) 地質構造及其特性 (7) 水文地質與地化特徵 (8) 地質演化過程	(1) 地理、人口統計及未來發展 (2) 氣象及氣候 (3) 地質與地震學 (4) 水文 (5) 土工特性 (6) 地球化學特性 (7) 天然資源 (8) 運轉前環境監測
備註	選址階段之描述	選址階段之描述	設計階段之描述	選址階段之描述

### 3.1.2 場址調查規範與成果

目前國外有關處置場場址特性調查的規範或研究成果以國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 頒布之文件為首要考量，其次則為美國核能管制委員會 (U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC)、芬蘭輻射與核能安全局 (STUK)、澳洲國家健康與醫藥研究委員會 (National Health and Medical Research Council, NHMRC)、中國國家環境保護總局等之規範、技術資料或研究



成果可供本案進一步探討，以制定適用於國內場址特性、設計條件與建造環境之審查導則，相關國家制定之規範如表 3.1-2 所示。另外，本研究亦彙整國內外一般場址特性調查的規範或研究成果，如表 3.1-3 所示。

表 3.1-2 處置場場址特性調查規範

國家與機構	處置場場址特性調查規範
國際原子能 總署 (IAEA)	(1) Geological Disposal of Radioactive Waste Safety Requirements (No. WS-R-4, 2006)
	(2) Technical Considerations in the Design of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste (IAEA-TECDOC-1256, 2001)
	(3) Characterization of Groundwater Flow for Near Surface Disposal Facilities (IAEA-TECDOC-1199, 2001)
	(4) Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste Safety Guide (No. WS-G-1.1, 1999)
	(5) Near Surface Disposal of Radioactive Waste Safety Requirements (No. WS-R-1, 1999)
	(6) Hydrogeological Investigation of Sites for the Geological Disposal of Radioactive Waste (Technical Reports Series No. 391, 1999)
	(7) Principles of Radioactive Waste Management Safety Fundamentals (No. 111-F, 1995)
	(8) Siting of Near Surface Disposal Facilities (No. 111-G-3.1, 1994)
	(9) Siting of Geological Disposal Facilities (No. 111-G-4.1, 1994)
	(10) Site Investigations, Design, Construction, Operation, Shutdown and Surveillance of Repositories for Low-and Intermediate-Level Radioactive Wastes in Rock Cavities (Safety Series No. 62, 1984)
	(11) Criteria for Underground Disposal of Solid Radioactive Wastes (Safety Series No. 60, 1983)
	(12) Shallow Ground Disposal of Radioactive Wastes (Safety Series No. 53, 1981)
美國核能管 制委員會 (NRC)	(1) Standard Review Plan for the review of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (NUREG-1200, Rev. 3, 1994)
	(2) Compilation of Nuclear Safety Criteria Potential Application to DOE Nonreactor Facilities (DOE-STD-101-92, 1992)
	(3) Standard Format and Content of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (NUREG-1199, Rev. 2, 1991)
	(4) Tests for Evaluating Sites for Disposal of Low-Level Radioactive Waste (NUREG/CR-3038, 1982)
芬蘭輻射與 核能安全局 (STUK)	Disposal of Low and intermediate Level Waste from the Operation of Nuclear Power Plants (GUIDE YVL 8.1, 2003)
澳洲國家健 康與醫藥研 究委員會 (NHMRC)	Code of practice for the near-surface disposal of radioactive waste in Australia (No. 35, 1992)
中國國家環 境保護總局	核技術利用放射性廢物庫選址、設計與建造技術要求(試行, 2004)

表 3.1-3 一般場址特性調查的規範或研究成果

規範或研究成果	
國外	(1) 日本土木學會，軟岩調查・設計・施工的基本與事例，1984。 (2) 日本土木學會，軟岩的調查・試驗的指針(案)，1991。 (3) 日本土木學會，隧道在調查計測的評估與利用，1987。 (4) 日本土木學會，隧道的地質調查與岩盤計測，1983。 (5) 日本土木學會，隧道標準示方書 山岳工法・同解說，2006。 (6) Bieniawski, Z. T., Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A. A. (7) Balkema Publishers, Rotterdam, 1984. Hoek, E. and Brown, E. T., Underground Excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1982. (8) Hoek, E., Rock Engineering, Evert Hoek Consulting Engineer Inc., Canada, 2000. (9) U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations, Washington, 1995. (10) U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock, Washington, 1997. (11) U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design Geotechnical Investigations, Washington, 2001. (12) British Standards Institution, Code of practice for site investigations (BS 5930), 1999.
國內	(1) 工址地盤調查準則(內政部建築研究所，1993) (2) 大地工程調查作業準則(交通部台灣區國道新建工程局，1999) (3) 隧道工程設計準則與解說(中國土木水利工程學會，1999) (4) 建築物基礎構造設計規範(內政部營建署，2001) (5) 台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立(行政院公共工程委員會，2003) (6) 初等工程地質學大綱(洪如江，2007)

### 3.1.3 場址調查項目

本節將場址調查項目區分為「處置場址調查項目」與「一般場址調查項目」。在「處置場址調查項目」部分，因國內並無處置場址調查規範可供查詢，故相關資料係參考國際原子能總署(IAEA)等國外之研究文獻與報告；在「一般場址調查項目」部分，相關國內研究成果已於第二章「國內暨有場址調查規範與調查技術彙整」介紹，故本節有關一般場址調查項目僅針對國外部分提出整理。

#### A. 處置場址調查項目

1. 國際原子能總署 (IAEA) 於 1984 年發表「Site Investigations, Design, Construction, Operation, Shutdown and Surveillance of Repositories for Low- and Intermediate- Level Radioactive Wastes in Rock Cavities」之報告，報告編號為

Safety Series No. 62, 1984, 說明場址調查之項目、內容與需取得之參數等。

其中，場址調查之項目可概分五項，如表 3.1-4 所示：

- 一、地質調查。
- 二、水文與水文地質。
- 三、構造地質。
- 四、岩石力學特性。
- 五、地形演化。

表 3.1-5 則為一般空氣、地表與地下調查技術，而有關水文地質調查之項目與技術詳見表 3.1-6，表 3.1-7 則舉例說明大地、物理與化學方面所需之參數與量測技術。

2. 美國核能管制委員會 (NRC) 於 1982 年發表「Tests for Evaluating Sites for Disposal of Low-Level Radioactive Waste」之報告，報告編號為 NUREG/CR-3038, 1982, 亦列表說明低放射性廢棄物處置場之試驗項目、參數與相關規範。表 3.1-8 為低放射性廢棄物處置場場址特性所需參數。

3. 西元 1979 年，世界各國為瞭解放射性廢棄物處置場之可行性，並進一步探討需考量之場址特性、地下水流動模式與溶質之傳輸、工程障壁設計等，而建置一國際性計畫—Stripa, 其第三階段之流程與項目如圖 3.1-1 所示，表 3.1-9 則為第三階段之試驗內容(Fairhurst et al., 1993)，其中技術研究小組分為：

- 一、工程障壁。
- 二、地質。
- 三、地球物理。
- 四、地球化學。
- 五、水文地質。
- 六、地下水流動之數值模擬。
- 七、岩石力學。
- 八、溶質傳輸。

4. 韓國政府為確保高放射性廢棄物處置場之可行性與安全性，於 2003 年於 Kaeri 地區設置一地下研究試驗室，其主要研究項目可分為下列五項，詳細研究內容詳見表 3.1-10。(Kwon et al., 2006)

- 一、岩石力學。

- 二、地質。
- 三、工程障壁系統。
- 四、流體傳輸。
- 五、系統設計。

表 3.1-4 場址特性調查之項目與技術 (IAEA, 1984)

---

### **1.Geological setting**

Subjects	Rock types overlying unconsolidated sediments Contact and cross-cutting relationships Tectonic setting; folds, faults and fractures Degree, uniformity and directions of oriented features Geological history
Techniques	Remote sensing Airborne and ground geophysical survey Geological field mapping Geophysical land survey Bore-hole logging

### **2.Hydrogeology and hydrology**

Subjects	Porosity and permeability Recharge and discharge areas Groundwater velocity and age Hydraulic gradient Water Migration and sorption characteristics Chemistry Geometrical characteristics of aquifers and aquitards Characteristics of surface water bodies
Techniques	Bore-hole logging In-situ test and measurements Laboratory studies Remote sensing

### **3.Tectonics**

Subjects	Seismicity Isostatic and lateral movements State of stress Recent fault movements
Techniques	Remote sensing Geological field mapping Geodetic/microseismic survey In-situ test and measurements

---

#### 4. Rock mechanics properties

Subjects	Composition of rocks and fracture-filling materials Physical and chemical properties also with respect to interactions between radionuclides and host rock
Techniques	Field mapping Bore-hole logging In-situ test and measurements Laboratory studies

#### 5. Geomorphological processes

Subjects	Weathering Erosion Landslides Sedimentation
Techniques	Remote sensing Geological field mapping

表 3.1-5 一般空氣、地表與地下調查技術 (IAEA, 1984)

Investigation techniques	Potential application		
	Airborne	Ground surface	Subsurface
Gravitational	Indication of shape and distribution of rock masses of differing density such as salt dispirs <sup>a</sup> , igneous intrusions and ore bodies. Aid in identifying and interpreting geological structures		Measurement of in-situ rock density which improves the interpretation of regional gravity data
Magnetic	Detection of regional and local variations in magnetic intensity which aid in mapping bedrock, interpreting geological structures, and identifying ore bodies		
Electromagnetic	Assessment of mineral potential and detection of faults and fractures		
Seismic	Not applicable	Identification of different strata including structural configuration. Also identification of depth to the underlying crystalline basement, and detection of unlevered rock masses and faults and fractures	
Electrical	Not applicable	Indication of thickness of sedimentary layers, depth of unconsolidated sediments, occurrence of certain shear or fracture zones	Indication of lithological variations, rock porosity, groundwater salinity and occurrence of fractures

<sup>a</sup> Structure in which a mobile core, such as salt, has been injected into the more brittle overlying rock through a gravitational mechanism.

表 3.1-6 水文地質調查之項目與技術 (IAEA, 1984)

Subjects	Techniques
Porosity	Bore-hole logging Laboratory tests
Permeability	In-situ test (pumping and injection tests), packer tests Laboratory tests Model calibration
Groundwater velocity	Tracer tests, water dating, hydrodynamic equations
Hydraulic gradient	Observation of piezometric levels
Natural fluctuations of water levels	Well observations Piezometric observations Meteorological observations
Chemical composition of ground water	Chemical analyses, bore-hole logging
Residence time, age of groundwater	Chemical analyses Determination of isotopic composition Hydrodynamic equations
Dimensions and connections of the different hydrogeological systems including those of potable water	Well observations Hydrogeological mapping Bore-hole logging, in-situ tests Chemical analyses
Location of recharge and discharge areas	Remote sensing Hydrogeological mapping Tracer tests Isotopic analysis Water temperature
Interaction between groundwater and wastes	Laboratory tests

表 3.1-7 大地、物理與化學之參數與量測技術 (IAEA, 1984)

Subjects	Parameter	Measurement techniques
Rock samples	Mineral and chemical composition	Microscopy(optical, electronic) X-ray diffraction Wet or dry chemical analysis, radiometric methods X-ray fluorescence analysis Atomic absorption spectrometry
	Age	Isotopic analysis
	Sorption properties	Experiments with radioactive or other tracers followed by conventional chemical analysis In-situ analysis
Groundwater samples	Chemical composition (includes gas, organic and trace element content)	Wet or dry chemical analysis, radiometric methods X-ray fluorescence analysis Atomic absorption spectrometry Optical spectrometry Gas chromatography
	Acidity-alkalinity (pH)	Electrochemical methods both in the laboratory and field
	Oxidation-reduction potential (Eh)	
	Electrical conductivity	
	Age	Isotopic analysis

表 3.1-8 低放射性廢棄物處置場場址特性之參數 (NUREG, 1982)

Stratigraphy	Porosities and void ratio
Lithology and soils	Hydraulic potentials and pressures
Structure	Seepage Velocity
Geomorphology	Apparent Velocity
Ground water system and boundaries	Flow direction
Surface water system and boundaries	Dispersion
Recharge and discharge areas	Pore water age
Visual description	Suction pressures
Soil classification	Suction pressures function
Rock classification	Water-holding parameters
Material zone boundaries	Infiltration capacity
Water zone boundaries	Evapotranspiration
Immediate site boundary	Precipitation
Extended site boundary	Runoff coefficients (runoff)
Color (material color)	Air temperature
Grain-size distribution or parameter (grain-size distribution)	Air pressure
Material densities	Wind speeds and directions
Water content	Partition coefficients
Soil water pH and acidity (soil pH and acidity)	Mineralogy and clay mineralogy
Electrical conductivity or resistivity (electrical resistivity)	Ion exchange capacities
Penetration parameter	Oxidation-reduction potential
Material variability parameter	Natural gamma and spectra (material radioactivity)
Hydraulic conductivities	Soil solubles
Permeability function	Soil organics
Transmissivity	Gaseous constituents
Storativity	Ground water chemistry
Anisotropy	Surface water chemistry
Collapse susceptibility	Atterberg limits
Shrinking-swelling parameter	Specific gravity
Strength	Seismic velocity
Consolidation relation	Heaving susceptibility (frost heaving)
Compaction relation	Erodibility parameters (erodibility)
Rebound index	Monument and point positions
	Burial unit boundaries
	Material temperature

表 3.1-9 Stripa 計畫第三階段之試驗內容 (Fairhurst et al., 1993)

Experiment	Measurements	Purpose
“First” simulated drift experiment	Rate and Distribution of groundwater inflow to the array of six 100-m-long boreholes	Comparison with predictions by equivalent porous media and fracture flow models
“Second” simulated drift experiment	Rate and distribution of groundwater inflow to the remaining 50-m-long D boreholes after construction of the 50-m-long Validation Drift	Comparison with predictions by equivalent porous media and fracture flow models, including effects of drift excavation
Fracture distribution in the Validation Drift	Mapping of the fractures in the roof, floor, and walls of the Validation Drift	Comparison with stochastic predictions of fracture patterns by fracture network models
Validation Drift experiment	Rate and distribution of groundwater inflow	Comparison with predictions by equivalent porous media and fracture flow models
“First” radar/saline tracer experiment	Collection of saline tracer in the D boreholes from injections in the H zone, before construction of the Validation Drift	Design of the tracer migration test; calibration of the equivalent porous media and fracture flow fracture flow transport models; evaluation of effects of drift excavation
“Second” radar/saline tracer experiment	Collection of saline tracer in the Drift from injections in the H zone	Design of the tracer migration test; comparison with predictions by equivalent porous media and fracture flow transport models; evaluation of effects of drift excavation
Tracer migration experiment	Collection of dye and metal-complex tracers in the Validation Drift and in a borehole from injections in the H zone the “good” rock	Comparison with predictions by equivalent porous media and fracture flow transport models
Monitoring of groundwater head	Distribution of groundwater heads within and around the SCV site during (i) construction of the validation Drift; (ii) implementation of the validation experiments; and (iii) draining of the T1 borehole	Comparison with predictions by equivalent porous media and fracture flow models



表 3.1-10 韓國地下研究試驗室之研究項目與內容 (Kwon et al., 2006)

---

R&D items

---

- Rock mechanics
    - Rock mass classification
    - Rock stress and deformation measurement and analysis
    - Properties and mechanical effects of rock discontinuity and fracture zone
    - Effects of stress change on the hydraulic properties of rock discontinuity
    - Blasting techniques and blasting effect on adjacent tunnels
    - EDZ development and its properties
    - Evaluation of tunnel stability and rock support design
    - Thermal property of rock (heater test)
    - Influence of earthquake on underground facility
  - Geology
    - prediction of rock boundaries
    - Distribution rock discontinuity and fracture zone
    - Groundwater network and flow characteristics in rock discontinuity
    - Flow test through fracture system
    - Prediction technique of flow rate into tunnel
  - Engineered barrier system
    - Thermal-hydro-mechanical (THM) behavior of EBS
    - Gas migration in engineered barrier system
    - Contaminant diffusion and chemical buffering of buffer
    - Colloid generation and migration at the interface between buffer and rock
  - Fluid migration
    - Contaminant migration in rock mass
    - Gas migration in shear zone
    - Contaminant diffusion in rock matrix
    - Colloid migration and retardation in geosphere
  - System design
    - Demonstration of emplacement technology
    - Tunnel sealing technology
    - Verification of deposition hole drilling
    - Concrete plug design and its application
    - Verification of retrieval operation
    - Verification of transportation method
-

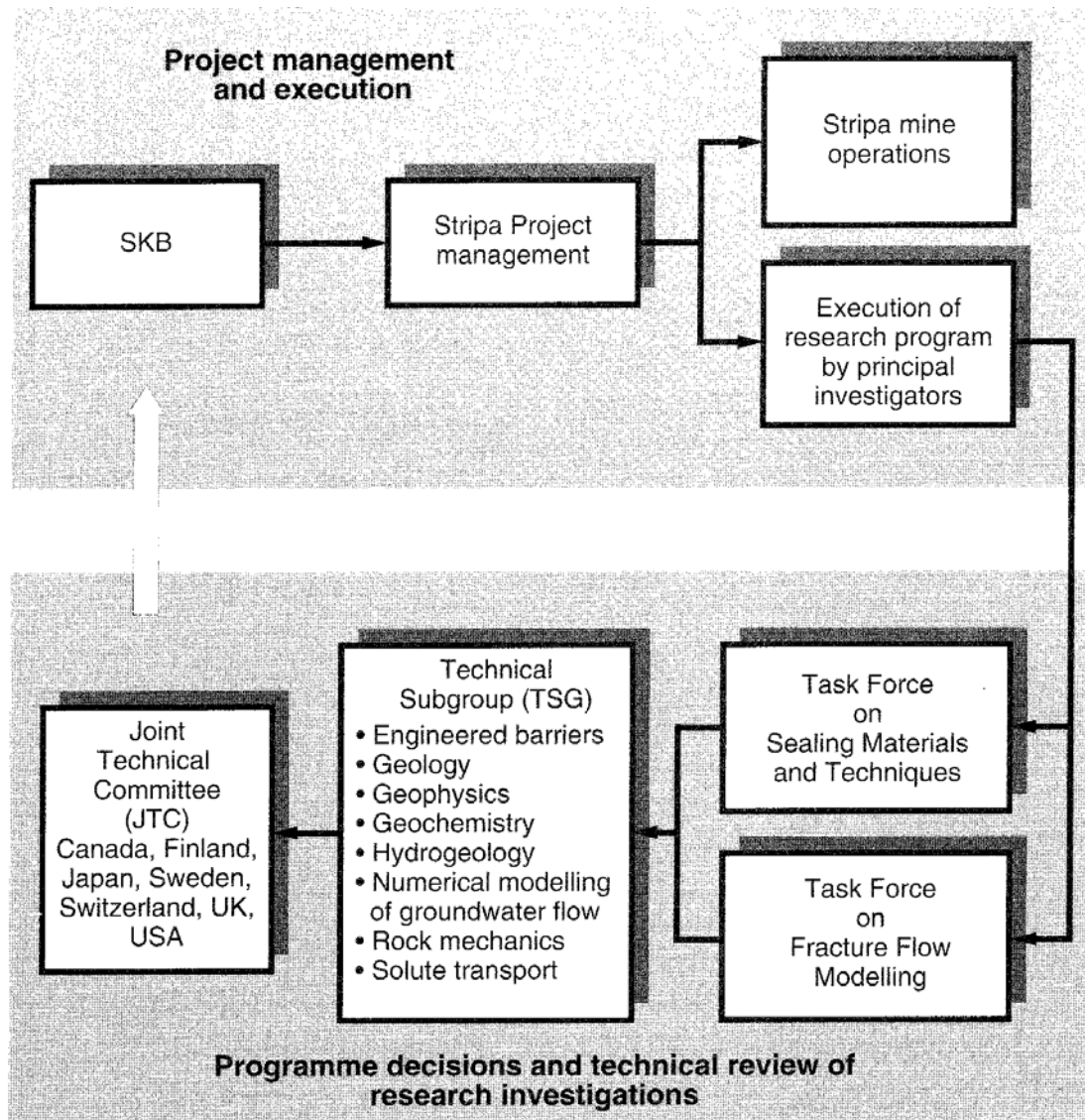


圖 3.1-1 Stripa 計畫第三階段之流程與項目 (Fairhurst et al., 1993)

## B. 一般場址調查項目

美國陸兵工團 (U.S. Army Corps of Engineers, USACE) 於 2001 年出版之「大地工程調查(Geotechnical Investigations)」手冊中，詳細說明一般大地工程於選址、設計與建造各階段工址調查之目的、流程、項目與分析內容等：

1. 選址前區域地質調查流程、資料蒐集與分析項目如圖 3.1-2。
2. 場址初勘階段之調查流程、資料蒐集與分析項目如圖 3.1-3。
3. 選址階段之調查流程、資料蒐集與分析項目詳見圖 3.1-4。
4. 設計階段工址調查流程、資料蒐集與分析項目如圖 3.1-5。
5. 施工階段工址調查之品質確認與調查流程、資料蒐集與分析項目如圖 3.1-6 與圖 3.1-7 所示。

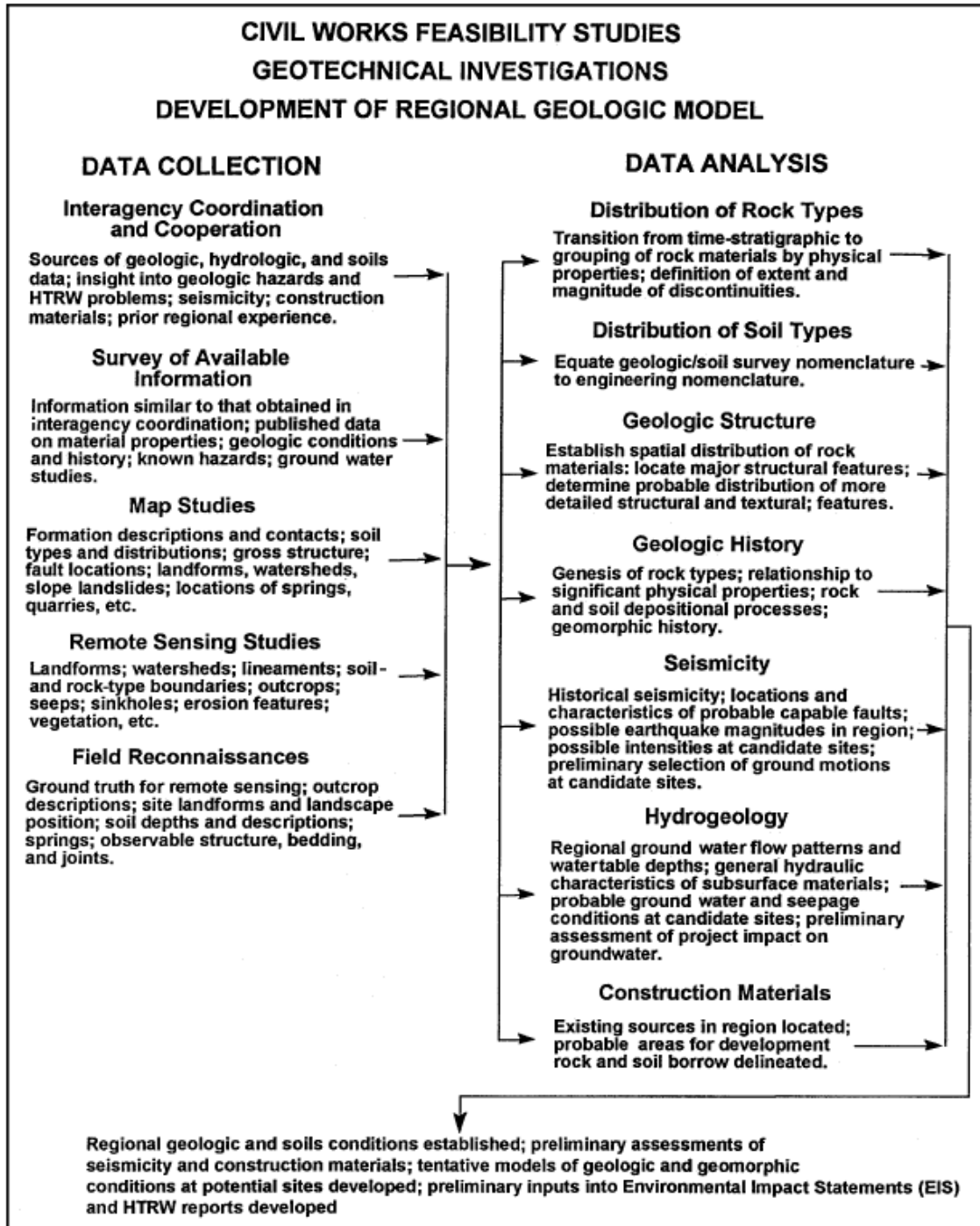


圖 3.1-2 區域地質調查流程圖 (USACE, 2001)

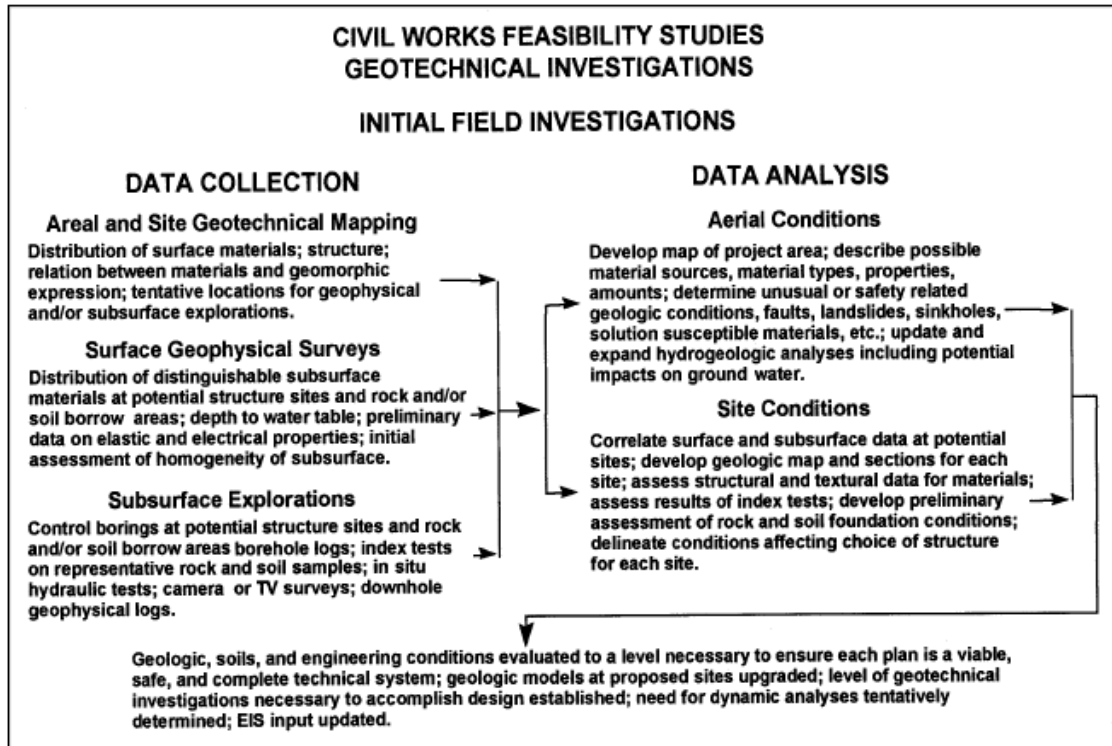


圖 3.1-3 場址初勘階段工址調查流程圖 (USACE, 2001)

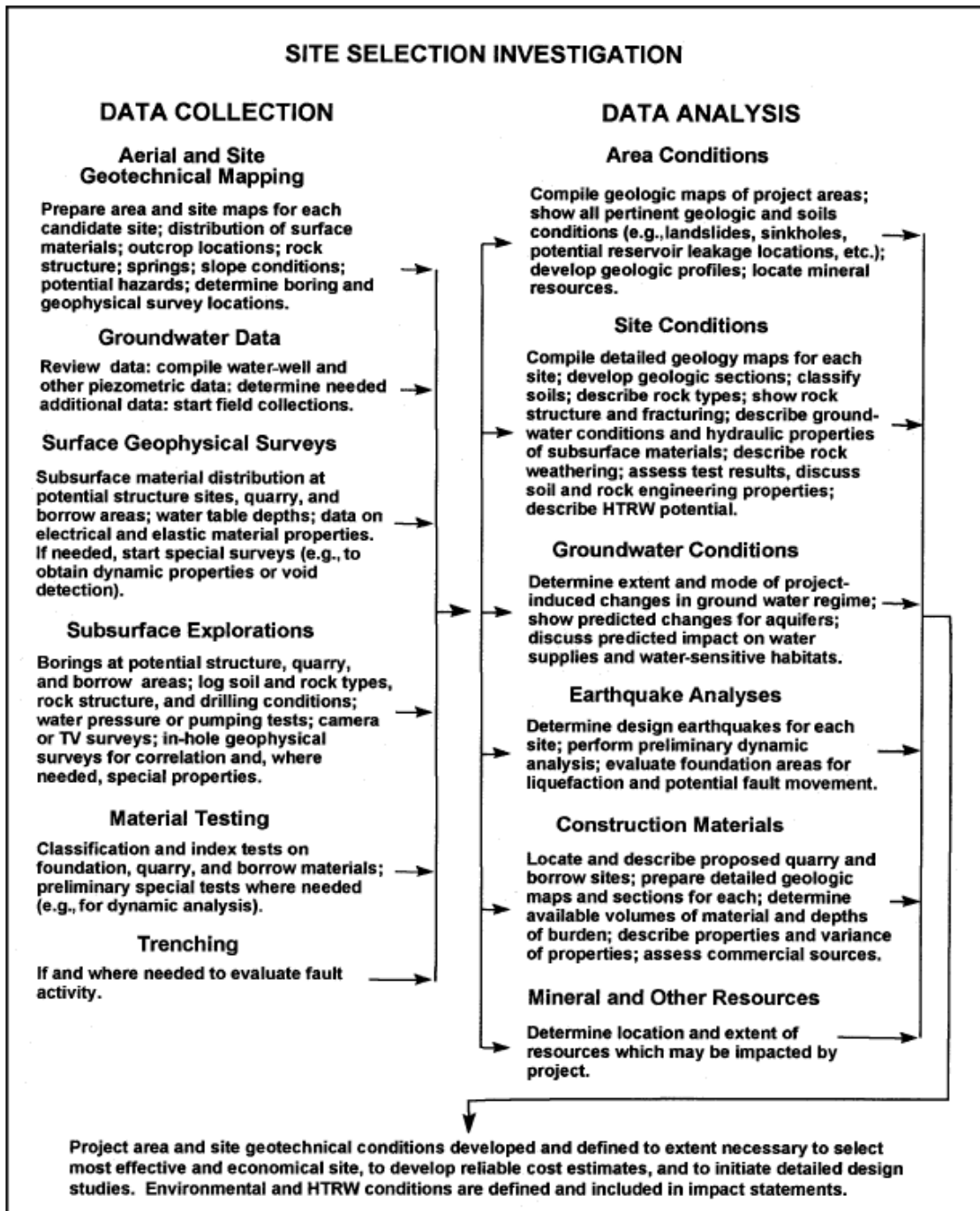


圖 3.1-4 選址階段工址調查流程圖 (USACE, 2001)

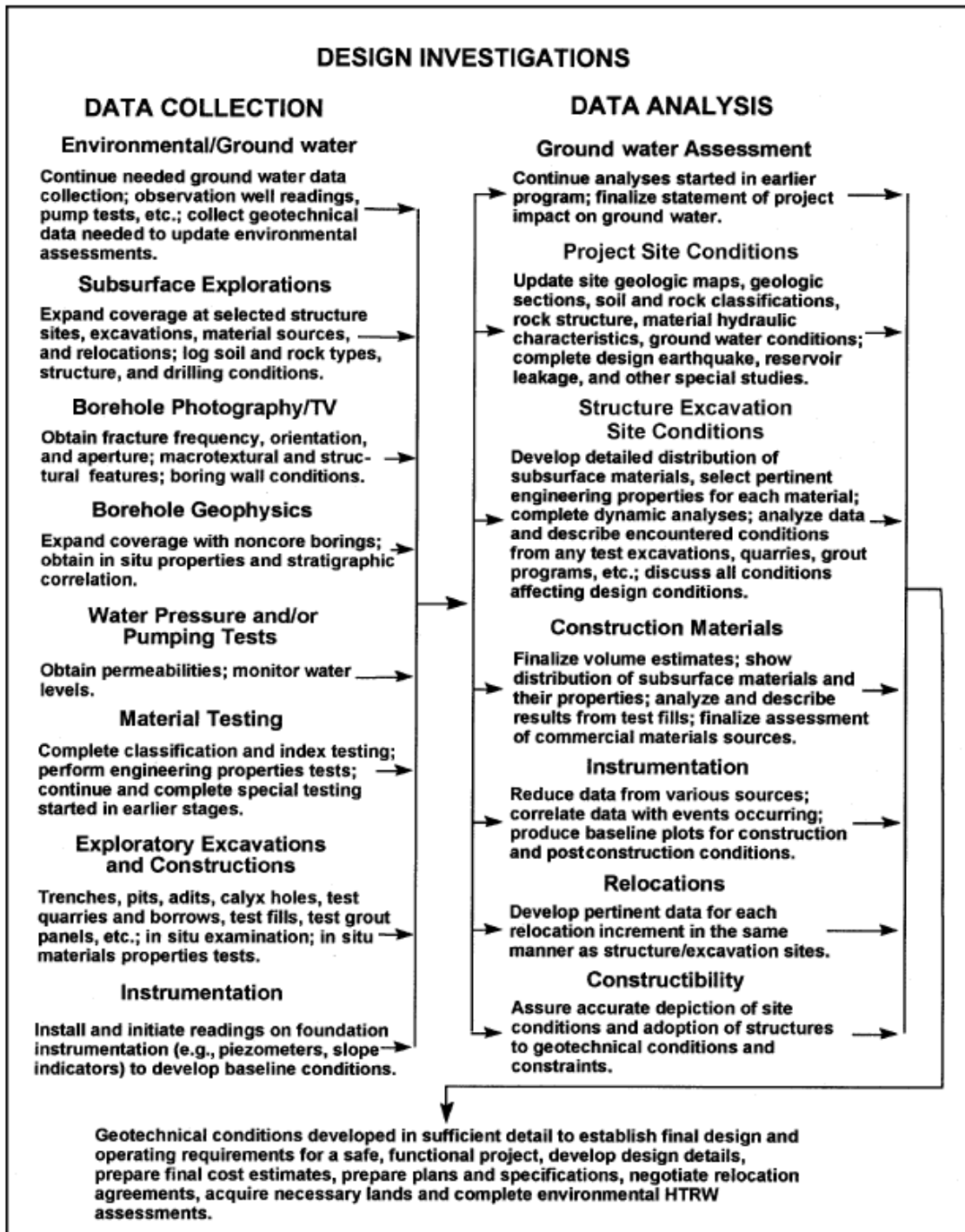


圖 3.1-5 設計階段工址調查流程圖 (USACE, 2001)

<b>CIVIL WORKS CONSTRUCTION                      CONSTRUCTIBILITY, QUALITY MANAGEMENT, AND DOCUMENTATION                      QUALITY ASSURANCE OF GEOTECHNICAL ACTIVITIES</b>		
<b><u>Excavation Procedures</u></b>	<b><u>Foundation/Abutment Treatment</u></b>	<b><u>Embankment/Backfill</u></b>
Grades Unwatering Overburden Rock Blast patterns/procedures Fragmentation Control of wall rock damage Slope stability Support Preliminary cleanup Surface protection	Subsurface Curtain grouting Area grouting Consolidation grouting Caissons, trenches, slurry walls, etc. Surface Final cleanup Dental concrete Shotcrete Slurry grouting Drainage Adits Drain holes Relief wells	Material source Material placement Control tests Slope stability Seepage control Diversion and closure

圖 3.1-6 施工階段品質確認之工址調查項目 (USACE, 2001)

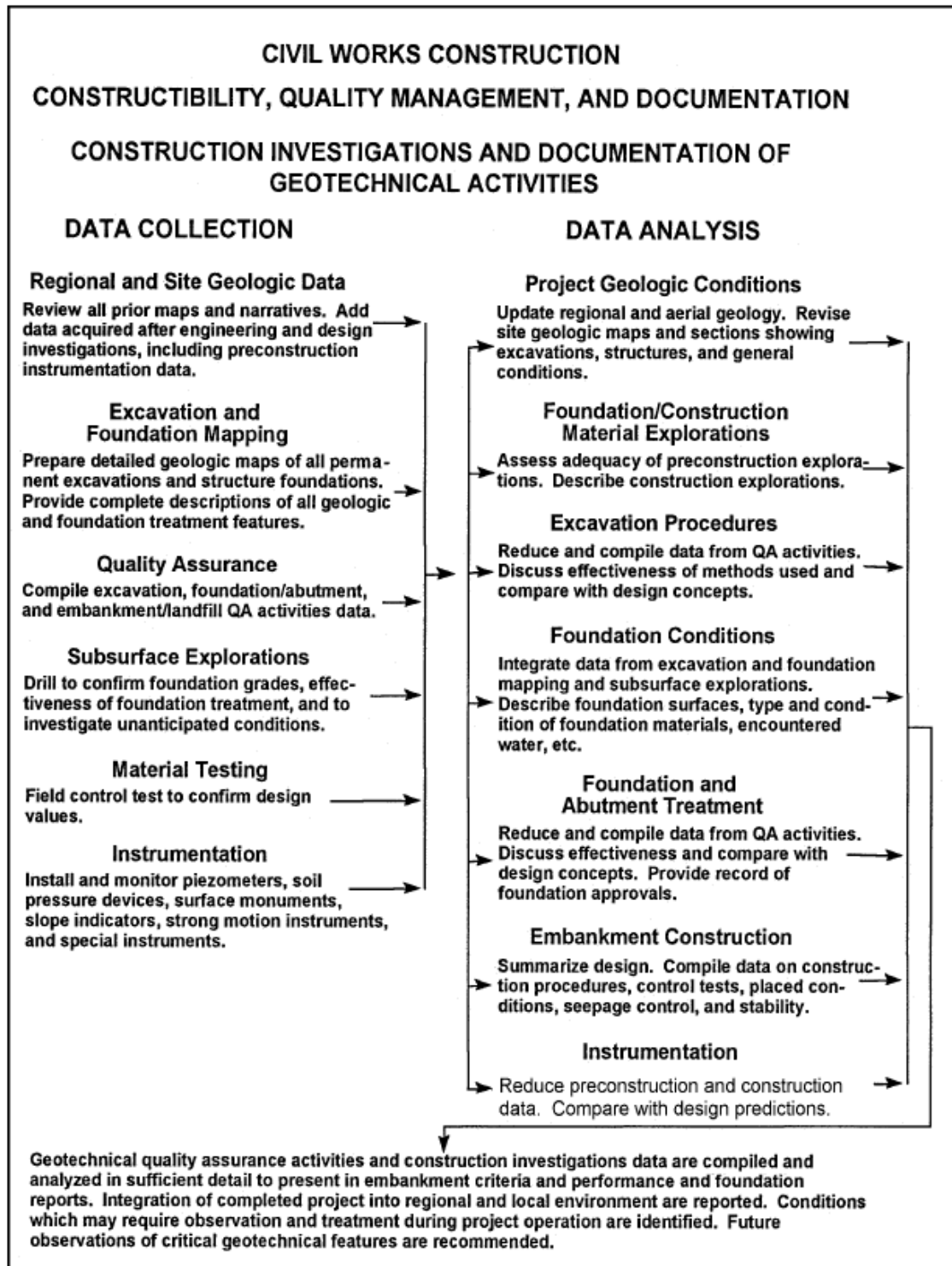


圖 3.1-7 施工階段工址調查流程圖 (USACE, 2001)



另日本土木學會隧道工學委員會於 1996 年出版之「隧道標準示方書 山岳工法・同解説」，則詳細說明山岳隧道之地盤調查準則、流程、項目、方法與需求等。隧道工程或地下坑道之工址調查可概分為：(1)選線階段；(2)設計階段；(3)施工階段；(4)施工後等四個階段，各階段之調查目的、內容與範圍皆有所不同，如表 3.1-11 所示。

而圖 3.1-8 則為各階段工址調查之流程、內容與方法，其主要調查方法如表 3.1-12 所示，調查項目則詳見表 3.1-13，表 3.1-14 為主要室內試驗項目與方法，另有關水文地質調查之目的與內容可參考表 3.1-15，表 3.1-16 則為建議隧道周圍環境之調查項目。

表 3.1-11 山岳隧道工址調查目的、內容與範圍 (日本土木學會,1996)

施工與調查之流程	選線所需的調查	決定路線	設計、施工計畫所需的調查	開工	施工中的調查	竣工	施工後的調查
主要目的	未取得選擇適合於地形、地質及其他環境條件之路線所需的資料，以及為籌劃下一階段調查所需的基本資料。	取得初步設計、施工計畫及估價等所需的基本資料。	施工中可能發生的問題的預測及確認，設計變更、施工管理。取的供補償及日後所需的資料。	施工中及施工後所發生問題的確認。取的供補償或變狀對策所需的資料。			
調查內容	地形與地質調查、環境調查，以及其他調查。一般概略性調查。	地形與地質調查、環境調查，以及其他調查。精密的地質調查、考慮具體周邊對策之調查，以及工程相關設備等所需之調查等。	地形與地質調查、觀測、環境調查，以及其他調查。隧道洞內之觀測係以觀察地盤狀態及觀測支撐之行為為主。隧道周邊的環境調查、觀測係以判別施工的影響及對策的效果為主。	地質調查、觀測、環境調查，以及其他調查。隧道周邊的環境調查、觀測係以判別施工的影響及對策的效果為主。			
調查範圍	包括比較路線之廣泛範圍。	隧道、可能與隧道有關之處所及各該周邊。	隧道內及可能受施工影響的範圍。	已有問題處為中心之影響範圍。			

表 3.1-12 主要地質調查方法 (日本土木學會, 1996)

調查方法	由調查可得知的項目	調查結果在規劃、設計上之利用	調查之存疑項目	
資料調查	計畫地區的地形、地質、水文、災害歷史、施工性等之概要	1. 在候補路線的選定階段，掌握應避開的地形、地質及水文上的存疑項目及存疑地區的概要。 2. 抽取地表勘查及其後存詳查實施加確認的存疑項目。	1. 因地區而異，有的地區有缺資料的情形。 2. 通常圖說類的精度較低。 3. 圖說類的表示未必與調查目的一致。	
空照圖判讀	1. 表層地質，尤其滑坡、崩塌地、崖壁堆積物等，隧道洞口附近之不穩定地形、地質。 2. 地質構造，尤其斷層、裂縫等弱面。 3. 人工改變前的表層地質。		1. 計畫地區內雖然能夠以均一精度做出調查，但因有誤判的可能，故應在地表勘查時加以確認。 2. 在各勘查階段應在施行判讀，藉以提高精度。	
地表地質勘查	1. 崖壁、滑坡、崩塌地等之表層地質的分布、性質形態及穩定性。 2. 基岩地質的分布、性質形態。 3. 地質構造(褶皺、斷層等)之分布、性質形態。	1. 綜合各種調查、試驗結果，編成地質平面圖、斷面圖等，俾明沿線組成地質的分布、性質形態等。 2. 有關沿線組成地質的安全性、施工性之定性評估	1. 由勘查而編成的地質圖類係一種解釋圖，應在其後的調查加以驗證。 2. 受所用地形圖精度的左右甚大。	
物理探査	彈性波探査(折射波法)	1. 地盤的彈性波速度。 2. 起因於斷層、破砕帶之低速度帶的位置、規模及速度值。	1. 1. 洞口附近、小覆蓋區間之未固結堆積物、風化層厚薄、性質狀態的掌握。 2. 開挖後基岩的狀態(硬度、風化變質、龜裂狀態等)的掌握。 3. 斷層、破砕帶、軟弱層的位置、規模、狀態或連續性的掌握。 4. 天然地盤分類的探討	
	電氣探査(比電阻垂直探査法，比電阻二維探査法)	地盤比電阻值及比電阻值得斷層分布狀態	1. 崖壁和風化層深度的掌握。 2. 用比電阻值掌握地質結構和岩質。 3. 軟弱夾層之檢出。 4. 軟層之性質形態和規模的掌握。 5. 地下水和含水層之分布、性質形態的探討	
鑽孔調查	1. 土砂、岩盤的成層狀態與分布。 2. 斷層、破砕帶及軟弱層的位置、規模、性質形態或連續性。 3. 岩質的種類，風化或變質，裂縫、節理等之性質形態。 4. 有無地下水，湧水壓與其水量。	1. 直接確認規劃路線沿線的地質，俾明組成地質的分布、性質形態的詳細情況。 2. 依所採岩石的硬度、風化、變質狀況和飽和情況等，探討地盤分類、開挖工法、支撐襯砌之片簾使用量。	1. 調查精度因探査地點的面積、變化甚大。 2. 量測比電阻與地盤的理學強度無直接關係	
孔內試驗、檢測	標準貫入試驗	1. 地盤之N值與軟硬或緊密程度。 2. 土壤試驗的採取，組成土壤的判別和分類。	1. 隧道洞口附近、小覆蓋區間之地盤穩定性的探討。 2. 岩盤或支撐層深度的掌握。	
	孔內水平載重試驗	地盤之變形係數及彈性係數等。	地盤之變形分析	
	透水試驗	地盤的水理特性(透水係數、由試驗方法求得之透水量係數之蓄水係數)	1. 含水層的突然湧水和恆常湧水的預測、評估。 2. 未固結地盤中間挖工作面自立性的評估。	1. 近年來，在軟岩地盤中的應用例雖有增加，但通常不能適用於岩盤或礫岩層。 2. N值50以上之硬地盤，不能做仔細的判斷。
	速度檢測PS檢測	地盤之彈性波速度的垂直分布	1. 由速度直接推估岩盤、土砂的界面或岩盤的風化、變質及裂縫之多寡。 2. 掌握以彈性波探査未能獲知的低速度層。	1. 慎重選定適合於組成地質、鑽孔口徑的機種。 2. 應依據岩心觀察，選定可代表地質狀況的區間。
	電氣檢測	鄰近孔壁部分之比電阻值 $\rho_a(\Omega \cdot m)$	1. 依據比電阻值掌握地質分布。 2. 掌握含水層的地下水蘊藏狀況。	1. 量測值為概略值，因就數量級(order)加以評估。 2. 應依地盤條件選定試驗方法。
	孔內電視(borehole television)	1. 地層的成層狀況，斷層、裂縫的規模、性質形態、走向傾斜。 2. 湧水狀況。	1. 根據龜裂狀況、走向、傾斜，探討開挖工作面的穩定性。 2. 探討湧水處的性質形態。	1. 無地下水時，有時(使用浮游型受震器時)不能量測。 2. 在地下水水面下，有時不能量測低速度層。
室內試驗	1. 組成岩石之物理、力學特性：單位重量、彈性波速度、抗壓強度等。 2. 組成岩石之礦物化學特性：黏土礦物含量、消滅(slaking)特性等。 3. 組成土質之物理、力學特性：顆粒組成、含水比、抗壓強度、稠度(consistency)等。	1. 掌握地盤彈性波速度、裂縫等所引起之岩盤的劣化程度。 2. 根據抗壓強度掌握岩盤的力學特性。 3. 膨脹性地盤的預測評估 4. 探討在隧道洞口附近，小覆蓋地盤未固結堆積物的穩定性。 5. 探討未固結地盤開挖工作面的自立性。	1. 對中硬岩、硬岩，因以無裂縫的試驗試驗，故試驗值不能代表地盤的物理性質。 2. 軟岩試驗因含水比的不同，試驗結果有時會有大不相同的情形。 3. 力學試驗易受採取試體的擾亂影響。	

表 3.1-13 地質調查項目與方法 (日本土木學會, 1996)

地盤條件	調查項目	地盤條件	地形		地質構造		岩質、土質				地下水		物理性質		力學性質		礦物化學性質		其他							
			滑坡、崩塌地	有偏壓作用的地形	覆蓋	地質分佈	斷層、褶皺	岩質、土質名稱	岩相	破裂等不連續面	風化、變質	固結度	含水層	地下水位	滲水係數	彈性波速度	物理特性	強度特性	變形特性	黏土礦物	消散特性	吸水、膨脹率	地熱	溫泉	有害瓦斯	地下資源
			資料調查	空照圖判讀	地表地質調查	彈性波探查	電氣探查	鑽孔調查	標準貫入試驗	孔內水平載重試驗	透水試驗	速度檢層	電氣檢層	孔內電視	室內試驗											
一般地盤	硬岩、中硬岩	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				△	△	△	
	軟岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△	
	土砂	○	○	○	○		○				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					
	隧道洞口周邊或山谷有可能崩坍之地盤	○	○	○	○		○				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
	小覆蓋地盤			○	○		○				○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
	斷層破碎帶、褶皺擾亂帶	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			△	△	
	未固結地盤			○	○		○					○	○	○	○	○	○	○	○	○						
特殊地盤	膨脹性地盤	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					
	有可能崩坍的地盤						○	○	○				○	○	○											
	有高地熱、溫泉、有害瓦斯及地下資源等地盤				△	○	○	○	○	△		○	○			△	○	△	△	△		△	○	○	○	△
	有可能發生高水壓或大湧水之地盤						○	○	○	○	△	○	○	○	○											
調查方法		資料調查	○	△	○	△	△	△	△																	
		空照圖判讀	○	△		△	○		△	△																
		地表地質調查	○	○	○	○	○	○	○	△	△	○	○													
		彈性波探查	△			△	○			○	○	△			○											△
		電氣探查	△			△			△		△	△	○	○			△							△	△	
		鑽孔調查	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○											
		標準貫入試驗										○							△	△						
孔內水平載重試驗																	○									
透水試驗											○	○											○			
速度檢層				△	△			○	○	△																
電氣檢層				△		△			△	△	○	△	△	○	△											
孔內電視					△			○																		
室內試驗														○	○	○	○	○	○	○	○					

表中符號： (地盤條件) (調查方法) 註：室內試驗詳見解說表2.4所示。

○ 應掌握 ○ 有效  
△ 有時應掌握 △ 有時有效

表 3.1-14 主要室內試驗項目與方法 (日本土木學會, 1996)

試驗項目	由試驗可求得的物理性質	地盤條件				目的
		硬岩	軟岩	土砂		
				黏土質	砂質	
單位體積重量試驗	單位體積重量	△	○	○	○	
自然含水比	含水比		○	○	○	砂質地盤開挖工作面穩定之標準
顆粒試驗	顆粒分佈			○	○	流砂之指標
土粒比重試驗	土粒的真比重			○	○	
稠度試驗	液性、塑性限度 塑性指數			△		
單軸壓縮試驗	單軸壓縮強度、靜彈性係數、靜柏松比 (Poisson's ratio)	○	○	○	○	地盤強度比、數值分析的參考資料
三軸壓縮試驗	凝聚力、內摩擦角		△	△	△	數值分析的參考資料
壓裂試驗	抗張強度	△	△			
點載重試驗		△	△			強度的簡易指標
透水試驗	透水係數				△	含水未固結層之湧水量或開挖工作面穩定之探討
超音波傳播速度試驗	P波及S波速度、動彈性係數、動剛性率、動柏松比	○	△			龜裂係數等之分類指標
消散 (slaking) 試驗	浸水分解之程度		○			膨脹性之判斷指標
陽離子交換容量試驗 (CEC)	蒙脫土 (montmorillonite) 等含量推估		△			
X線分析	黏土礦物的種類		△	△		

○：經常施行者    △：有時施行者

表 3.1-15 水文地質調查目的與內容 (日本土木學會, 1996)

項目	調查目的	調查內容	調查階段			
			路線選定	施工計畫	施工中	完工後
水文調查的細目	資料	收集地形、地質、水文、地下水利用之相關資料，並掌握調查地區之水文地質結構、地下水概要、疑慮處，藉以擬定調查計畫。	◎	◎	△	△
	案例	參考地盤條件之類似地區及鄰近地區的以往工程，評估對象隧道之湧水及減水、缺水的規模，並探討調查方法的適用性。	◎	◎	△	△
	水文	《含水層的結構》將地下水容器的水文地質結構(含水量的分佈、規模)及地下水性質形態(地層水、裂隙水)等整理成水文地質圖，藉以預測湧水地點及集水範圍，並擬定有效的水文地質調查計畫。	◎ ○ ○ △ △	◎ ◎ ◎ ◎ ○	○ ○ ○ ○ ○	△ △ △ △ ○
	地質	《含水層的特性》評估含水層的透水係數、滯留係數等之水力常數，俾依水理學方法預測湧水量與集水範圍。	△ △ △ △ △	◎ ◎ ○ △ △	△ △ △ △ △	△ △ △ △ △
水平衡	為掌握調查地周邊的水循環系統，實施水文氣象、地表流量、地下水位調查等，並探討水平衡，藉以預測因施工而引起的地下水動態。	水文氣象：降雨量、氣溫 地表流量：河川流量、湖沼蓄水池、壩及用水量、湧泉量 地下水位：觀測井、現有井 蒸發散量 隧道湧水量、缺水影響	◎ ◎ ◎ ○	◎ ◎ ◎ ○	◎ ◎ ◎ ○	◎ ◎ ◎ ○
	水文環境	掌握上列調查所獲得的可能集水範圍及鄰近地區的水源與水利用實際狀態，藉以預測因施工而引起的影響。	◎ ○	◎ ◎	○ ○	○ ○
預測方法	預測隧道洞內是否有湧水發生、湧水量、湧水位置及其集水範圍。預測方法的運用，係依據各調查、探討階段訊息的質、量及所需的預測精度及內容而施行。	依施工案例的方法 依地形、水文地質條件的方法 依水理公式的方法 依數值分析的方法	◎ ○ ○	○ ◎ ◎	△ △ △ △	△ △ △ △

◎：應加以實施之調查 ○：最好能夠加以實施之調查 △：必要時最好加以實施之調查

表 3.1-16 隧道周圍環境調查項目 (日本土木學會, 1996)

對象	調查項目	調查事項	留意點
施 工 前	地形、地質、地盤狀況	地形的狀況與成因、層序、層相、地質構造、地層的時代區分、層厚、壓縮性、透水性	連續性、斷層的有無
	地下水狀況	含水層的分佈與透水性、各含水層的地下水壓與水質及經年變化、地下水的流向與流速、湧泉的分佈與湧水量、地下水的補注狀況	重視事前調查、充分進行水井調查等
	地盤下陷	事業對象區域的年間下陷量與累積下陷量、下陷的範圍、層別下陷量與下陷速度、下陷對建物等的影響	過去施工案例的調查
施 工 中	地盤及結構物的狀態變化	建物、建造物狀態(結構形式、健全度、用途、位置等)、地形(地面狀態、不穩定地形、地盤的物理性質等)、土地利用狀況(用途、使用狀況等)、地下水狀況(含水比、地下水位等)、有可能發生狀態變化的結構物之鄰近結構物	調查施工前的狀態，對於覆蓋小的區間、滑坡及斷層處應注意調查
	污濁水	排水狀態、流量及水質、排水路徑、水路狀態、管道末端河川狀態(流量、水質、利用狀態等)	調查法令等的規定狀況、污濁水的發生原因、仔細掌握排放前的狀態、影響的程度
	交通障礙	搬運路的狀況(結構、交通量、堵塞狀況、道路管理者、道路周邊的環境等)	交通尖峰時，不能錯車處或退避處等
竣 工 後	減水、缺水	水利用狀況(用途、使用量)、地下水位、水質(水溫、濁度、含溶成分、臭氣、色等)、水源狀況(種類、供應量、供應路徑、變動等)、有可能發生缺水的鄰近工程	特別注意含水層及不透水層地下水位的變動測定應在開工前調查
	噪音及振動	環境噪音、環境振動 地形、地質(覆蓋、地盤的物理性質) 土地利用狀況(用途、受噪音及振動影響之房屋或設施的分佈)	特別注意城市區近旁的硬岩地盤 注意調查隧道洞口及覆蓋小的區間
	礦物污染、重金屬	湧水之 pH、電氣傳導度、水質分析、含有量試驗、溶質試驗(H <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	留意礦化帶、礦床 探討礦質、湧水處理
竣 工 後	空氣污染	空氣污染物質(濃度分佈、特別是 CO、NO <sub>2</sub> ) 氣象狀況	注意隧道洞口及通風塔周邊

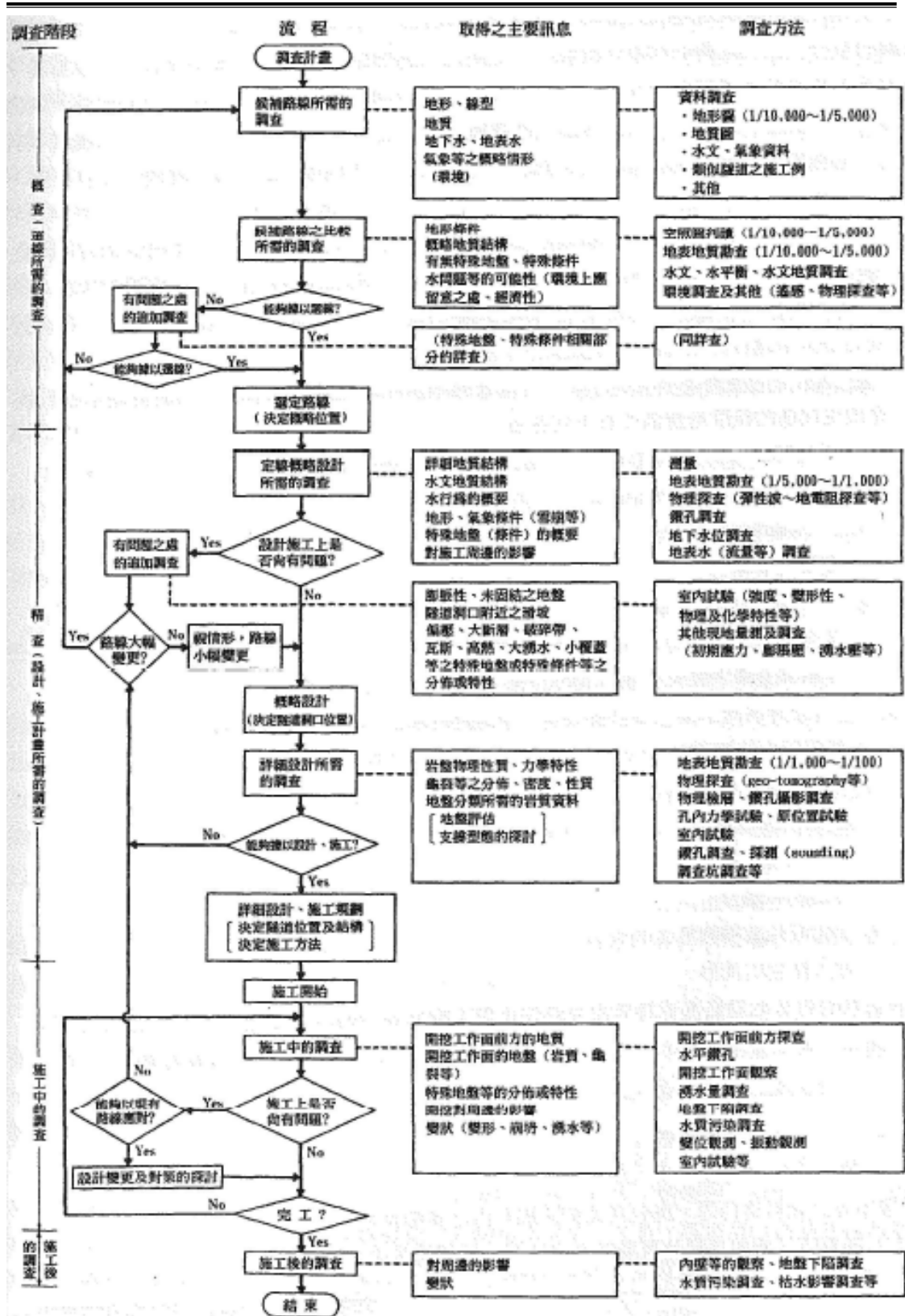


圖 3.1-8 山岳隧道各階段工址調查流程圖 (日本土木學會, 1996)

## 3.2 審查要項探討

本節介紹審查要項之參數定義與應用，初步蒐整之參數內容包括既有資料蒐集(包含底圖、地質圖與地質剖面圖)、地形與地貌、地質、水文、大地工程特性與現地應力等。另本節整理有關處置場址特性調查與參數評估之審查要項係以項目的完整性為觀點進行整理，選址作業難以達成全數項目的調查，因此係以初步及細部設計階段審查作業為主要考量，然可行性評估與規劃階段可擇要提出以供審查。

### 3.2.1 既有資料蒐集

以環境與工程地質調查為例，在從事地面調查前，應先蒐集既有相關資料，如底圖(或稱地形圖)、地質圖、地質報告、鑽探報告、地球物理探勘報告、地震資料、氣象對水文資料、衛星影像與航照等，本節僅就底圖、地質圖與地質剖面圖之定義與應用略作介紹。

#### A. 底圖(Base Map)

1. 定義：將地面起伏的形態按一定比例尺，用高程註記、等高線和圖例符號明確的表現在圖上，即為等高線地形圖(Contour Map)，簡稱底圖，可透過底圖量測法(Method of Base Map Measurement)與航空量測底圖(Base Map by Airborne Measurement)等方法測定之，底圖量測程序如圖 3.2-1 所示。
2. 應用：對於低放射性廢料處置場址的地表淺層特性調查而言，獲取高精度的可靠底圖，不僅可提供場址調查所需的資料，並可作為場址規劃與調查階段研判與選擇的依據。底圖在比例尺的選擇上為：

一、踏勘階段為 1:50000 至 1:25000。

二、可行性分析階段為 1:500 至 1:2000(或 1:100)。

三、規劃階段為 1:2000 至 1:10000。

四、基本設計為 1:500(局部為 1:200 至 1:100)。

#### B. 地質圖(Geology Map)

1. 定義：係反映一個地區地質情況的圖件。是在正確的地形圖上，按照一定比例將地殼某部分的地質情況(如岩層、地質構造等)縮小、投影在一個平面上，並用規定的符號或顏色所表示的一種圖件，可透過地質圖量測方法(Method of



Survey of Geologic Map)測定之，其測繪流程如圖 3.2-2 所示。

2. 應用：可用以研究場區的重要地質構造特徵，以界定不同種類之岩石種類與土壤沉積層、層面位置與特性、不同地質單元與個別地質單元之礦物與岩性變化；地質構造特性、剖面圖製作之基礎等。

### C. 地質剖面圖(Stratigraphic Section)

1. 定義：係反映勘測區域場址某一特定斷面上包括之地層、岩性變化、地層接觸關係、地質構造、風化規律、第四紀鬆散覆蓋情況、地質物理、地質現象及水文地質特徵等與工程有關的地下深部工程地質條件之基本圖件，其繪製流程如圖 3.2-3 所示。
2. 應用：可用於評估場址地區的地質歷史、地質構造與相關之工程特性，為進行各項地質測繪、分析各種地質現象、查明地質構造的依據，適用於地質調查、地質構造、礦床探勘、成礦作用及低放射性廢料處置場之調查研究。

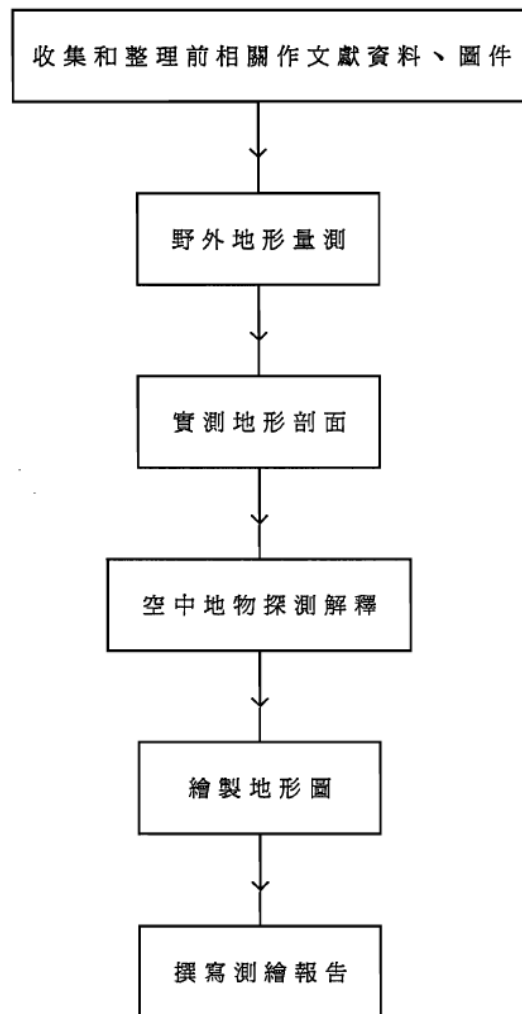


圖 3.2-1 底圖(地形圖)繪製流程圖(中鼎工程，1994)

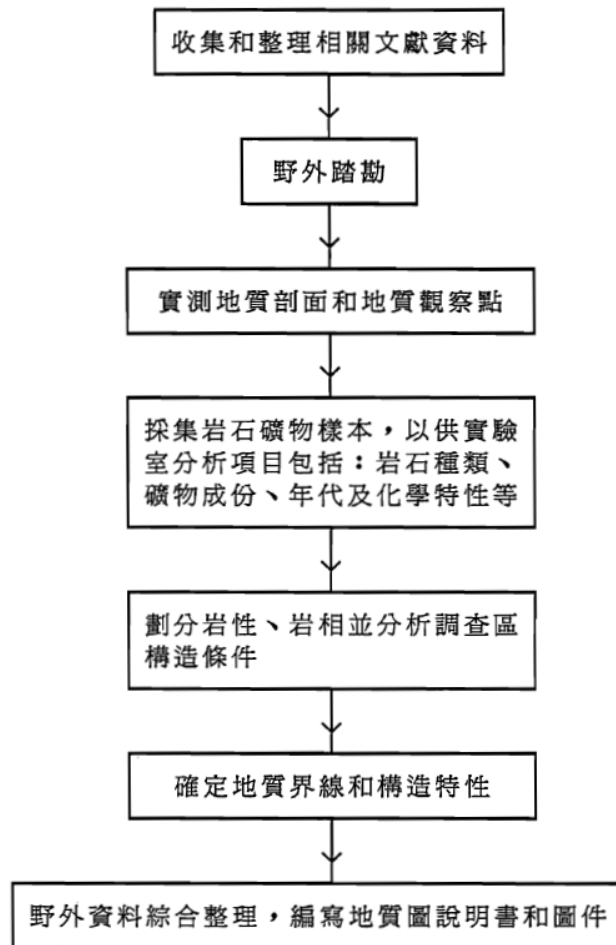


圖 3.2-2 地質圖測繪流程圖(中鼎工程，1994)

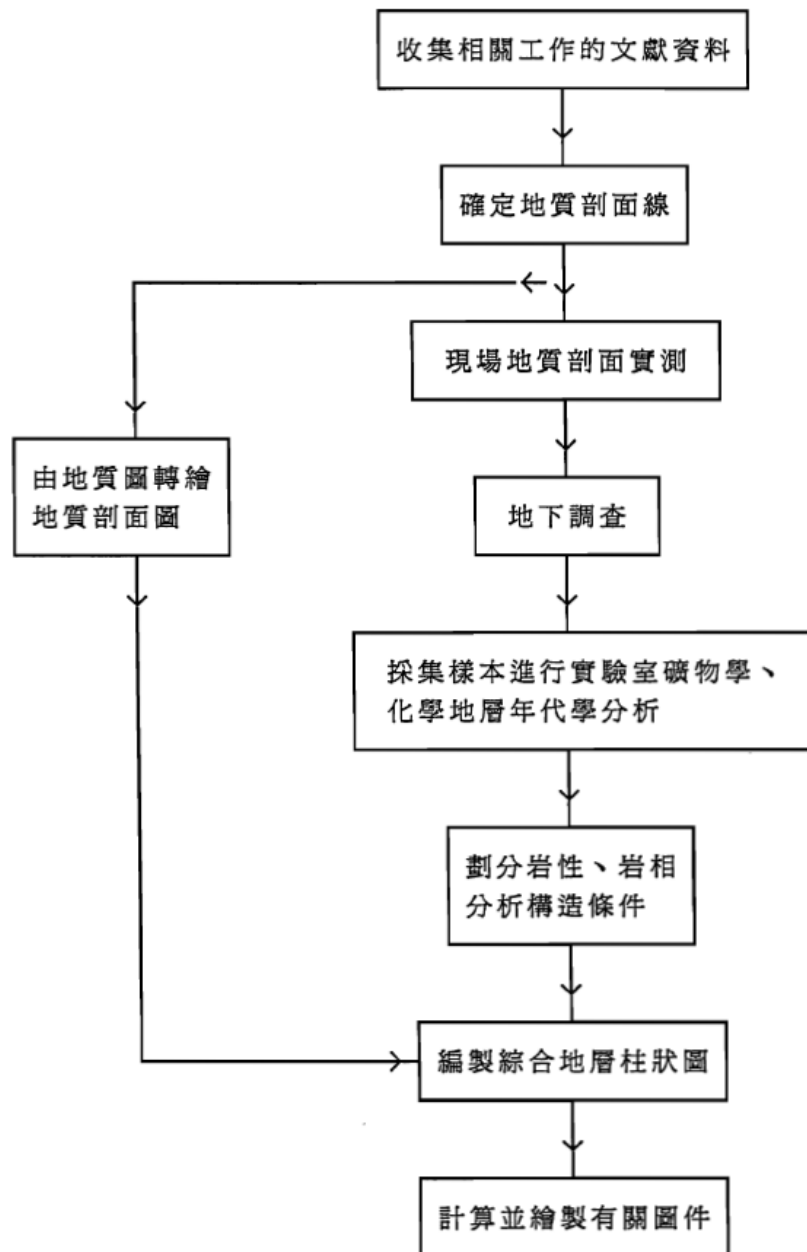


圖 3.2-3 地質剖面圖繪製流程圖(中鼎工程，1994)

### 3.2.2 地形與地貌

由於內、外力地質作用的長期進行，在地殼表面形成的自然起伏形態，稱為地貌。地形一詞通常用來專指地表既成形態的某些外部特徵，如高低起伏、坡度大小與空間分佈等(表 3.2-1)；地貌一詞則包括地表形態的所有外部特徵，而且是運用地質動力學的觀點，分析及研究這些形態的成因與發育過程及結果。

表 3.2-1 地形分類(潘國樑，1999)

大 分 類	小 分 類
山麓地形	山坡、崖錐、崩積地、崩塌地、土石流、扇狀地、斷層帶
台 地	岩盤台地、砂礫台地、紅土台地、石灰岩台地、火山岩台地
河谷地形	侵蝕溝、谷底*、河階、自然堤防、後背濕地、舊河道、砂洲
低 地	沖積平原、海岸平原、砂丘、濕地、沼澤、潟湖、三角洲
人工地形	開挖地、填土、礦渣堆積、棄土場、垃圾掩埋場

\*谷底是洪水線以下的河谷部份。

### 3.2.3 地質

#### A. 礦物學(Mineralogy)

1. 定義：係一門研究礦物的形成、產狀、性質、成分與分類之科學，可利用目視法(Visual Examination)、偏光顯微鏡鑑定(Identification under Reflected Light Microscope)、反光顯微鏡鑑定與顯微結晶化學分析(Microchemical analysis)。
2. 應用：預測風化特徵，評估離子交換能力，預測工程行為，判斷具價值之礦源存在。

#### B. 礦化作用/經濟潛能(Mineralization/Economical Potential)

1. 定義：係地球在演化過程中，使分散在地殼和上部地函的化學元素和有用物質在一定的地質環境中，相對集中形成礦床的作用，其評判工作流程如圖 3.2-4 所示。
2. 應用：探測場址地區之天然資源分佈與蘊藏量，並評估其是否具有開採價值，可作為篩選低放射性廢料處置場址之選擇依據，若場址蘊存高經濟價值天然資源，如金礦、工業原料、石油及天然氣等，則基於經濟發展之考量，必需再另覓新址。

### C. 風化作用(Weathering)

1. 定義：係指地表或近地表的岩石，在日照、輻射、風吹、雨水、冰雪、地下水、氣體和生物等作用下，物理形狀與化學成份發生變化的作用，稱為風化作用，其調查工作流程如圖 3.2-5 所示。
2. 應用：為礦床資源調查、工程建設之前期調查，基地承載力評估、岩坡穩定性分析、岩石風化程度分類及風化作用對岩石力學性質影響研判等的依據。由於低放射性廢料處置場埋置深度較淺，故岩石風化作用之程度及深度，可應用於場址規劃設計與施工階段時之參考，並作為安全評估之依據。

### D. 侵蝕作用(Erosion)

1. 流動的水、冰、大氣削移地表物質的作用，謂之侵蝕作用，因侵蝕必生搬運乃至堆積，故廣義的侵蝕包括搬運及堆積作用，並分為水力作用(Hydraulic Action)、溶蝕作用(Corrosion)、磨蝕作用(Abrasion)及吹蝕作用(Deflation)。
2. 應用：適用於工程建設項目規劃和實施時參考，其可應用於評估於低放射性廢料處置場之廢料處置壕溝覆蓋層，以及襯墊、柱頭等設施對於風、地表逕流與地下水侵蝕之抵抗力，以作為設施設計與長期安全性之依據。
3. 侵蝕作用對於低放射性廢料處置場之影響：
  - 一、風與地表逕流會侵蝕沖刷地表設施與表層土壤，因而減少覆蓋層厚度，增加放射性廢料曝露於地表之機會。
  - 二、地下水會侵蝕地下設施與土層，形成孔隙，而造成放射性核種遷移至人類生活圈之途徑。

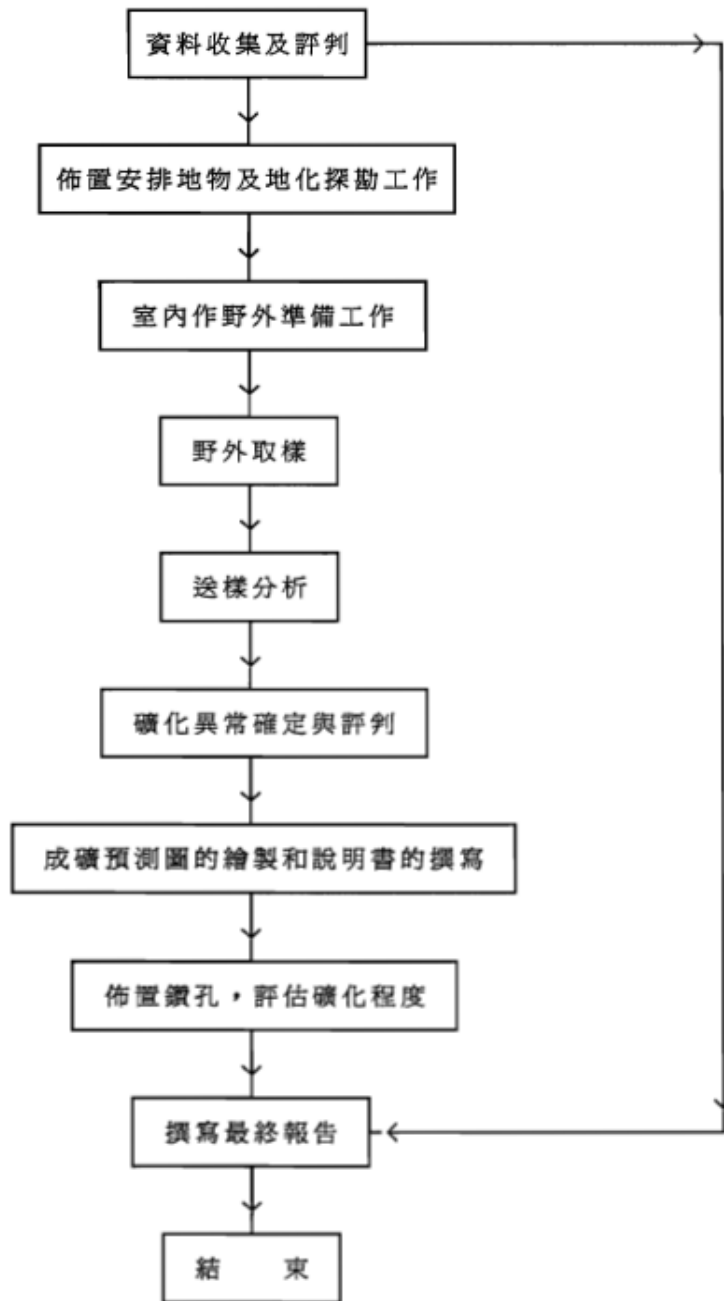


圖 3.2-4 礦化作用/經濟潛能評判工作流程(中鼎工程，1994)

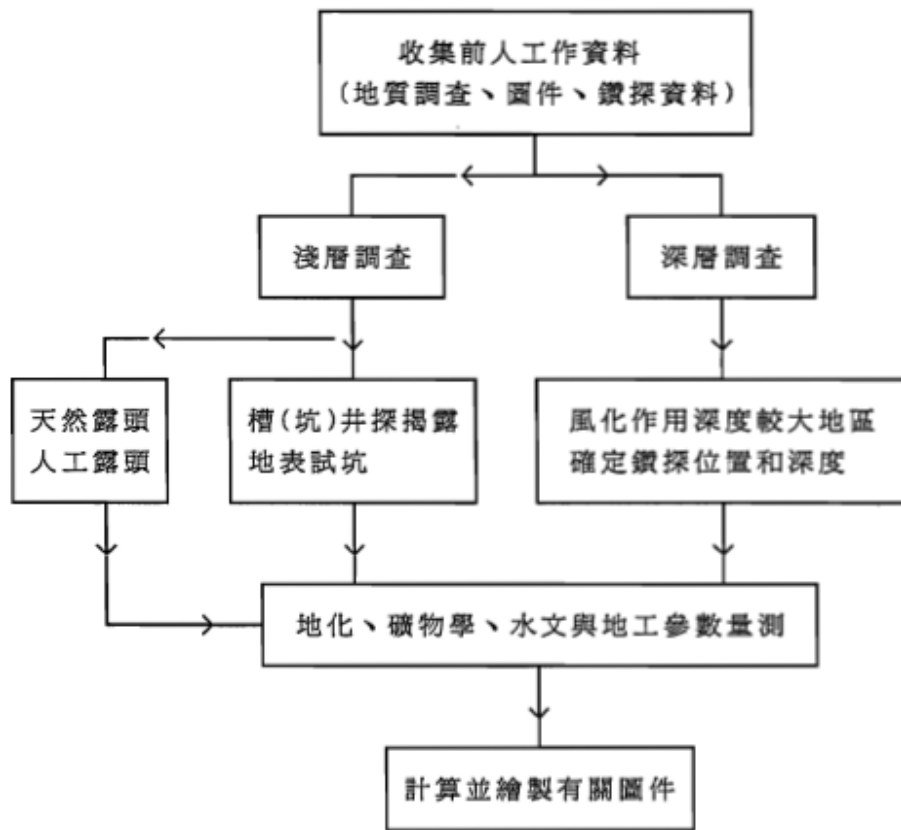


圖 3.2-5 風化作用調查工作流程(中鼎工程，1994)

#### E. 地質年代(Age)

1. 定義：地殼中各種岩石和礦物都是在一定的地質年代中形成，它們有一定的順序，而一連串的岩層就構成了一部地球進化史，每一岩層代表後一個進化的過程與時間。因此，地質年代乃指各種地質作用發生的年代，其測定方法有鈾-鉛法(U-Pb Method)、鉀-氬法(K-Ar Method)、鉍-鋇法(Rb-Sr Method)、碳-14法(<sup>14</sup>C Method)、地磁地層法(Magnetostratigraphic Method)、生物地層對比(Biostratigraphic Correlation)、年代地層對比(Chronostratigraphic Correlation)。
2. 應用：年代參數可用於評估斷層之位移歷史，並判斷是否為活斷層，以及地層上升與侵蝕速率作為低放射性廢料處置場址選擇與設計之依據。

#### F. 地質構造(Geologic Structure)

1. 定義：係地殼運動使地殼發生變形、變位和改變地殼各部之間的空間組合形跡。此種通過地殼運動使地殼產生並保存下來的變動形跡，即岩石變形的產物稱為地質構造。常見的地質構造形跡有二種，分別是褶皺(Fold)與斷裂(Fracture)，其繪製流程如圖 3.2-6 所示。
2. 應用：地質構造的調查與分析資料，可應用於水文與地工參數調查的滲透與岩石物理力學性質分析，及低放射性廢料處置場址之設計與地質災害預防，如山崩與地震等。

#### G. 地質災害(Geological Hazards)

1. 定義：係地殼內動力地質作用使得岩石圈在大氣圈、水文圈與生物圈的相互作用影響下，使生態環境或人類生命、物質財富遭受損失的現象或事件，例如落石、邊坡滑動、土石流、地震作用等均屬之，其調查流程如圖 3.2-7 所示。
2. 應用：地質災害調查可應用於工程設施、城市規劃、水利建設及鐵路與公路規劃、設計與施工之參考。對於低放射性廢料處置場而言，若場址所在地區易發生危險性高之地質災害，基於安全性之考慮，需遷移場址或變更設計。評估場址地區可能發生之地質災害種類、危險性與影響程度，可作為篩選低放射性廢料處置場之選擇依據，以及規劃設計與施工之參考。



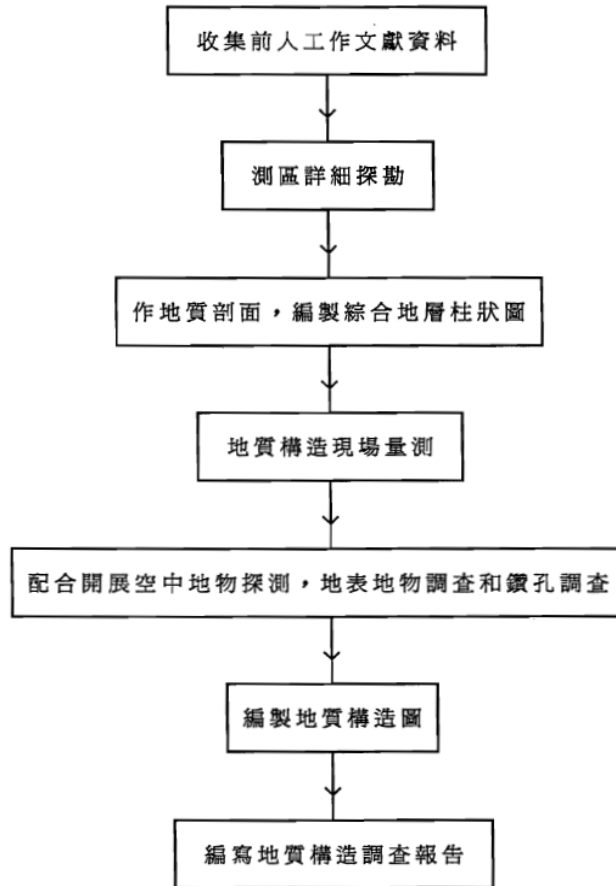


圖 3.2-6 地質構造繪製流程圖(中鼎工程，1994)

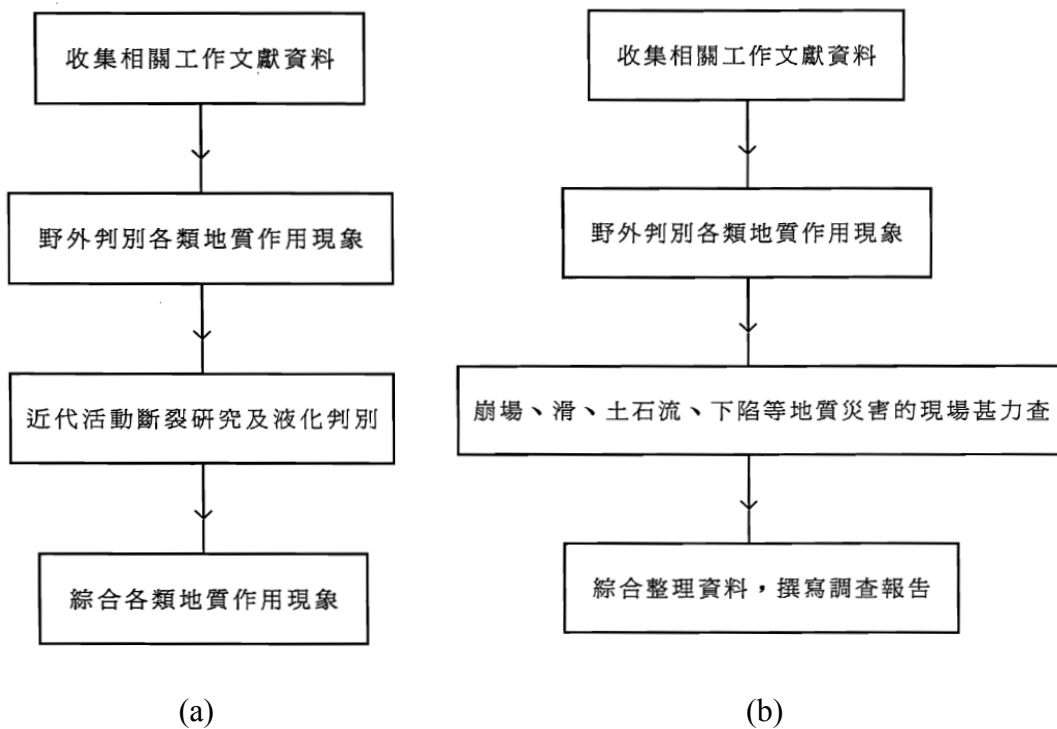


圖 3.2-7 地質災害調查工作流程圖：(a)內動力地質作用；(b)外動力地質作用(中鼎工程，1994)

### 3.2.4 水文

#### A. 水力傳導度

1. 定義：單位面積和單位水力梯度下，通過單位斷面的出水量。
2. 應用：為地下水文學及污染物質傳輸之重要參數。

#### B. 貯蓄係數(Storage Coefficient)

1. 定義：自一含水層之單位面積直柱體中，將水平面降低或昇高一單位高度所洩出或得到的水體積為單位貯蓄係數(Specific Storage)  $S_s$ ， $S_s$  乘上含水層厚度為貯蓄係數  $S$ (圖 3.2-8)。
2. 應用：為地下水文學之重要參數。

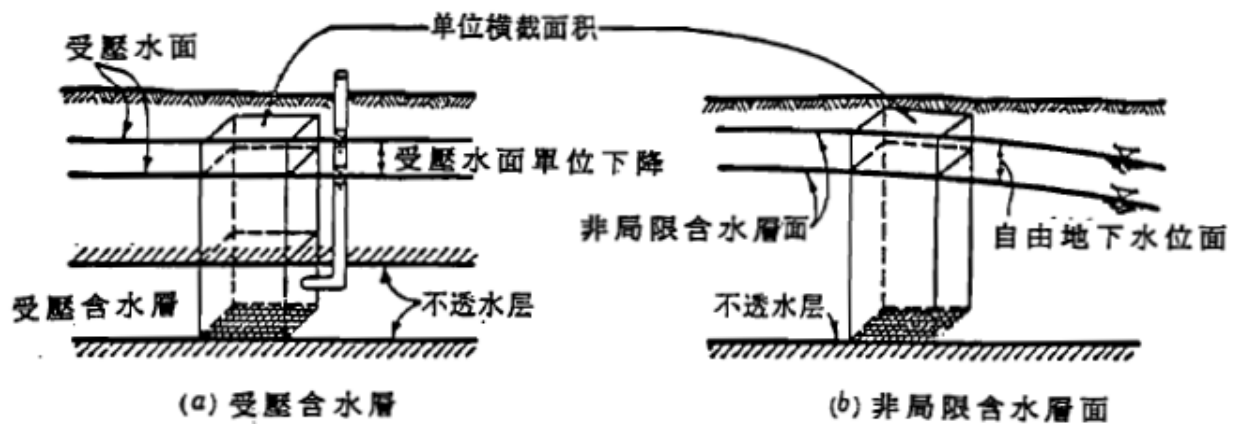


圖 3.2-8 定義貯蓄係數示意圖

#### C. 流通度(Transmissivity)

1. 定義：係水力傳導係數  $K$  與含水層厚度  $b$  之乘積，其意義為單位寬度和單位水力梯度下，整個飽和含水層所能透過的水量。
2. 應用：為地下水文學中，水流模式之重要參數。

#### D. 孔隙率(Porosity)

1. 定義：岩體(或土樣)中所含之孔隙體積與岩體之總體積之百分比。有效孔隙率是指孔隙中能相互貫通而使水份在其中形成流動者。在地下水流中，有效孔隙率較為重要，合理的孔隙率範圍如表 3.2-2 所示。
2. 應用：場址對於水流及其中所含物質的貯存、吸附與可能外洩污染質傳送能力。

表 3.2-2 孔隙率數值範圍

材 質	孔隙率(%)
粉土與黏土	50~60
細砂	40~50
中砂	35~40
粗砂	25~35
礫石	20~30
砂與礫石混合物	10~30
冰磧土	25~45
密緻固態岩石	<1
破碎與風化的火成岩	2~10
現代世的透水玄武岩	2~5
壤狀溶岩	10~50
凝灰岩	30
砂岩	5~30
具有原生與次生孔隙率的碳酸類岩石	10~20

E. 水力水頭(Hydraulic Head)

1. 定義：一單位質量之水所含的能量，包含有壓力水頭、速度水頭及位能。由於地下水之速度能很小可忽略，所以將壓力水頭及位能之和稱為地下水力水頭，單位為米(m)。
2. 應用：由於水力水頭在時間和空間上的分佈是不一致的，因此可以利用於其空間變化計算水力梯度，進一步估算地下水流向、流速。此參數是安全評估模式的重要依據，亦是描述區域地下水流動及傳輸的重要參數。

F. 水力梯度(Hydraulic Gradient)

1. 定義：地下水流經所接觸介質中，會損失其能量，以液體流經每單位長度介質所損失的能量，稱為水力梯度。
2. 應用：水力梯度傾向，可代表地下水流動的可能方向，可用來研判处置場址附近地下水流動的方向及估算地下水之流動速率，同時可做為場址附近地下水流之補注區及流出區特性之研判。

G. 延散係數(Dispersion Coefficient)

1. 定義：描述污染物溶液在地層中伴隨地下水移動所擴展及稀釋程度，其因次為  $L^2/T$ ，合理範圍如表 3.2-3 所示。
2. 應用：主要用於核種在孔隙介質或破裂岩層中傳輸情形，當核種外移時，因有延散作用，在沿地下水主流方向濃度較高，時間愈長，濃度就愈小。在評估核種從處置場滲出後的遷移是個重要參數。

表 3.2-3 延散係數合理範圍

試驗規模	平均傳輸距離 (m)	試驗方法	縱向延散度 $\alpha_L$ (m)	橫向延散度 $\alpha_T$ (m)
實驗室管柱	0.5~2.0	管柱方法	0.001~0.02	/
局部規模	2.0~4.0	單井試驗	0.01~1.0	/
整體規模I	4.0~20.0	雙井試驗	0.1~20.0	/
整體規模II	20.0~100.0	雙井或多井試驗	10.0~50.0	10.0±
區域規模	>100.0	區域環境資料	10.0~200.0	1~100

#### H. 遲滯因子(Retardation Factor)

1. 定義：溶質在孔隙介質中於地下水流動時，借由吸附或其他化學過程由孔隙水傳輸至固體部分過程稱之遲滯；與遲滯因子同樣重要的是分配係數 (Distribution Coefficient, Kd)，為地層中核種比活度與地下水中核種比活度之比值，是某些核種在介質與地下水中分配之情形。
2. 應用：分配係數是核種溶液隨地下水移動時，某些特定核種在地層材質與地下水分佈之情形，藉由此數據之獲得及推求遲滯因子，可了解該核種在介質中受到阻滯使得濃度衰減情形，進而評估場地之地層介質對阻滯核種遷移之功能。本參數也可用來評估場址工程障壁、固化體和回填材料對阻滯核種遷移之功能，只是介質不同，其它均同。

#### I. 孔隙水年代(Pore Water Age)

1. 定義：地層中孔隙水所含的許多同位素主要由大氣的宇宙射線與大氣水交互作用後，落於地表而滲於地下，藉此可測定該地層水之年代，謂之孔隙水年代或地下水年代。
2. 應用：孔隙水年代測定可以預測場址附近地下水移動情況，孔隙水年代愈久，可反映出該地層地下水之滲漏可能性不高；孔隙水年代愈年輕，可反映出該地層滲流速度快。

#### J. 降水(Precipitation)

1. 定義：係指大氣之水汽，以固態或液態降落到地表上。
2. 應用：降水是一個區域(場址)中水平衡演算的重要輸入資料，尤其是降水在場址周圍上的分佈強度，更是場址水文特性的重要分析數據。

#### K. 蒸發散量(Evapotranspiration)

1. 定義：係水份由濕表面蒸發及由植物蒸散之總和。

2. 應用：進行水文平衡分析時，對蒸發散量之瞭解方能推求處置場址及其附近之缺水量、土壤蓄水量、地表暴雨量及洪水逕流量，以作為敘述處置場址特性之基本資料，並決定場址有效降雨所造成之逕流。

#### L. 入滲容量(Infiltration Capacity)

1. 定義：係地表可能之最大入滲率，謂之該土壤於某些條件下之「入滲容量」。
2. 應用：測量入滲容量有助於了解地表水逕流與地下水流系統之間的分佈，因為入滲率較大之區域，地下水水面變動範圍較大。此外，入滲容量可推測近地表面之垂直水力傳導係數，及在工程設計時所考慮的含水量問題，和處置場區核種遷移的預估。

#### M. 逕流係數(Runoff Coefficient)

1. 定義：係降落於場區之雨量能從地表流出該場區之能力。
2. 應用：逕流的量測對降雨在處置場址之地表水與地下水的分配估算有其重要性，因為降雨、蒸發、入滲與逕流是水平衡演算的重要因子。

#### N. 氣象因素(Weather Factor)

1. 定義：係大氣中與水汽有關的因子，如氣溫、氣壓、風向、風速、濕度、降雨及蒸發等，是影響水文變化的重要因子。
2. 應用：透過長期的蒐集(至少一年以上)，可反應場址上空之季節性變化，及對地上水文狀況的因果關係，且可應用於下列三種分析上：

- A. 決定處置場址的水收支演算。
- B. 分析空氣傳播的路徑。
- C. 決定氣象之頻率分析。

### 3.2.5 大地工程特性

#### A. 粒徑分析(Grain Size Distribution)

1. 定義：係土壤中每種粒徑大小百分比的測定，粗顆粒粒徑(粒徑大於 0.075mm 者)採篩分析，細顆粒(粒徑小於 0.075mm 者)採比重計分析，分析結果可透過粒徑分佈曲線呈現，如圖 3.2-9。
2. 應用：粒徑分佈曲線和阿太堡限度(Atterberg Limit)為土壤分類之重要依據，可應於低放射性廢料處置場之壕溝設計。

#### B. 阿太堡限度(Atterberg Limits)

1. 定義：含水粘性土壤在乾燥過程中歷經液性、塑性、半塑性與固體等四個狀

態，此種因含水量改變導致土體狀態、強度及體積變化之性質，稱為稠度；土壤在這四種狀態之界限含水量稱為阿太堡限度。

- 應用：結合粒徑分佈曲線和阿太堡限度試驗之塑性圖表，如圖 3.2-10，可應用於統一土壤分類法(Unified Soil Classification)，如圖 3.2-11，或 ASTM 分類法以研判土壤工程性質者，且可作為低放射性廢料處置場址壕溝回填土壤之選擇依據。

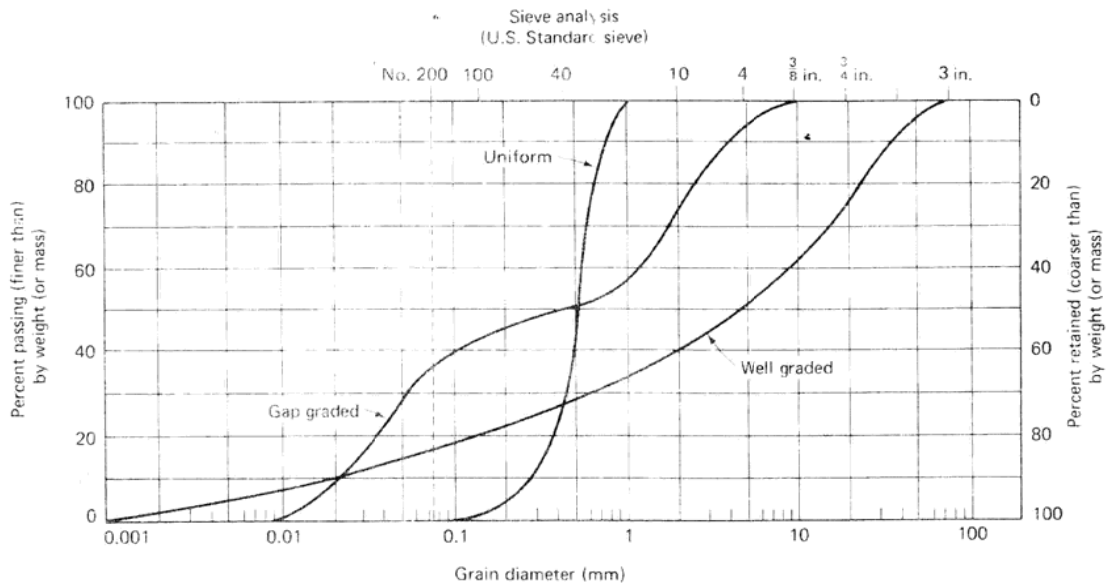


圖 3.2-9 粒徑分佈曲線

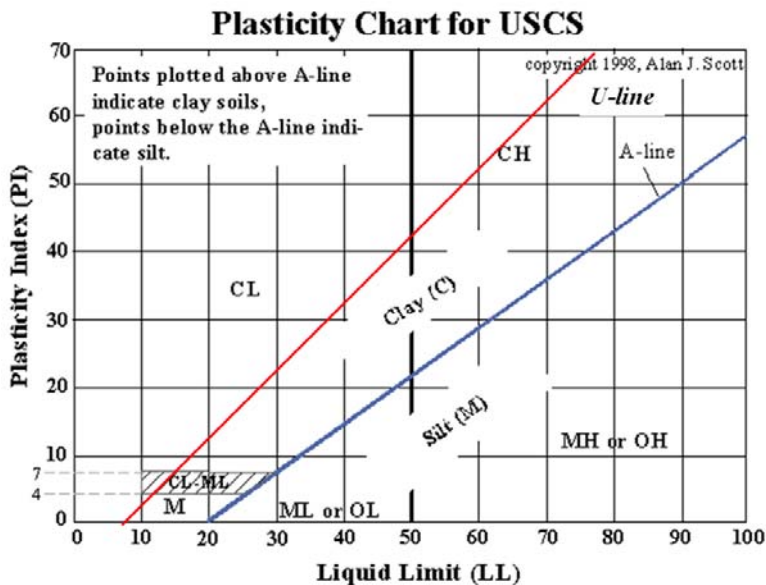


圖 3.2-10 阿太堡限度試驗之塑性圖表

Major divisions			Group symbol	Group name
Coarse grained soils more than 50% retained on No.200 sieve	gravel > 50% of coarse fraction retained on No.4 sieve	clean gravel with < 5% fines	GW	well graded gravel, fine to coarse gravel ( $Cu > 4$ and $1 < Cc < 3$ )
			GP	poorly graded gravel (not meeting the requirements for GW)
		gravel with >12% fines	GM	silty gravel ( <i>plastic chart</i> )
			GC	clayey gravel ( <i>plastic chart</i> )
	sand $\geq$ 50% of coarse fraction passes No.4 sieve	clean sand with < 5% fines	SW	well graded sand, fine to coarse sand ( $Cu > 6$ and $1 < Cc < 3$ )
			SP	poorly-graded sand (not meeting the requirements for SW)
		sand with >12% fines	SM	silty sand ( <i>plastic chart</i> )
			SC	clayey sand ( <i>plastic chart</i> )
Fine grained soils more than 50% passes No.200 sieve	silt and clay liquid limit < 50	inorganic	ML	Silt ( <i>plastic chart</i> )
			CL	clay ( <i>plastic chart</i> )
		organic	OL	organic silt, organic clay
	silt and clay liquid limit $\geq$ 50	inorganic	MH	silt of high plasticity, elastic silt ( <i>plastic chart</i> )
			CH	clay of high plasticity, fat clay ( <i>plastic chart</i> )
		organic	OH	organic clay, organic silt
Highly organic soils		Pt	peat	

圖 3.2-11 統一土壤分類法

### C. 基本參數(Basic Parameters)

1. 定義：將土壤成份以固、液及氣態三相圖表示，如圖 3.2-12，以評估其工程性質和行為，常用參數包括體積參數(孔隙率、孔隙比與飽和度)、重量參數(含水量、土壤總單位重、土壤乾單位重、土粒比重、土壤浸水單位重與土壤飽和單位重)及相對密度(Dr)與活度(Ac)等。
2. 應用：基本參數與阿太堡限度可初步研判低放射性廢料處置場址土壤之工程性質。

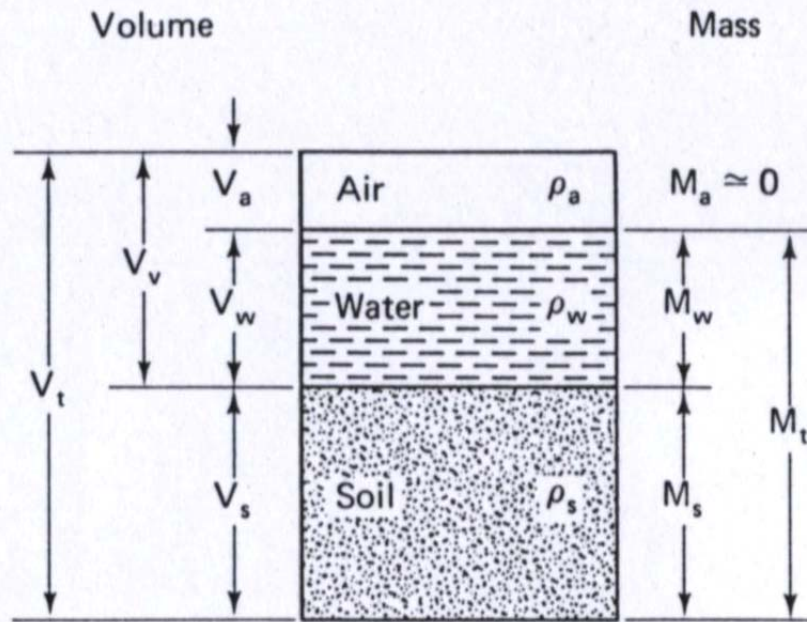


圖 3.2-12 土壤組成之固、液及氣態三相圖

#### D. 剪力強度(Shear Strength)

1. 定義：係指土壤抵抗剪應力的極限強度，為每單位面積之內部阻力，它由土體提供沿任何平面抵抗破壞與滑動的能力。就室內試驗而言，砂土採直接剪力試驗(Direct Shear Test)，粘土採三軸試驗(Triaxial Shear Test)求得剪力強度參數  $c$  (凝聚力)與 (摩擦角)，三軸試驗依實際工程條件區分為不壓密不排水、壓密不排水、壓密排水與三軸透水試驗，如圖 3.2-13。
2. 應用：低放射性廢料處置場址進行大地工程設計與建造之重要參數，然大地材料行為複雜，如何在設計階段採適當之強度參數為分析依據則須詳加考慮。

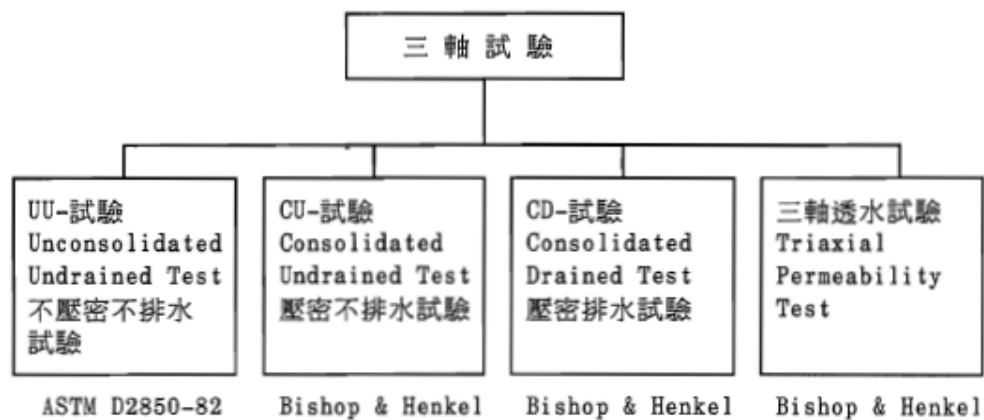


圖 3.2-13 三軸試驗分類



#### E. 沉陷特性(Settlement Characteristics)

1. 定義：土壤受外力作用會發生某程度的壓縮，係因土壤顆粒的變形、土壤顆粒的重新排列、孔隙空氣或水之排出等其它原因所造成。沉陷一般可分為即時沉陷(Immediate Settlement)、壓密沉陷(Consolidation Settlement)與二次沉陷(Secondary Settlement)。
2. 應用：透過沉陷特性分析，可得壓縮指數(Compression Index)、膨脹指數(Swelling Index)與壓密係數(Coefficient of Consolidation)，是評估場址興建後，地盤可能產生之沉陷值與完成沉陷所需之時間。

#### F. 液化潛能(Liquefaction Potential)

1. 定義：土壤受動態力作用，導致土壤內孔隙水壓升高，有效覆土壓力降低，當孔隙水壓上升至超過有效覆土壓力時，土壤的行為將如同液體一般，幾無強度可言，此種現象稱為液化。
2. 應用：為評估低放射性廢料處置場址在受地震力等動態荷重作用下，地盤發生液化之可能性評估。

#### G. 大地應力(Tectonic Stress)

1. 定義：地盤因受其上部覆蓋地層自重或因地殼板塊運動等作用於土體或岩體的應力，稱為大地應力。
2. 應用：低放射性廢料處置場址的空間設計與佈置必需考慮大地應力的作用，如能減少地下空間所承受之大地應力，將可以節省開挖空間的支撐費用，並降低潛變之影響，以增加結構體之長期穩定性。

#### H. 透水係數(Permeability Coefficient)

1. 定義：當水流通過斷面積為 A 之土層時，其流量(q)與水力坡降(i)成正比，即 $q=ki$ ，其中 k 為透水係數或水力傳導係數(Hydraulic Conductivity)或滲透係數(Permeability Coefficient)，表示水流穿過土層難易性，影響透水性之主要因素包括土壤顆粒大小、孔隙水性質、孔隙比、孔隙形狀與排列、飽和度等，合理之透水係數範圍如表 3.2-5 所示。
2. 應用：可配合數學模式分析低放射性廢料處置場址附近地下水流量與滲流速率。

表 3.2-5 透水係數合理範圍

土壤種類	滲透係數 K		滲透性
	(cm/sec)	(ft/min)	
礫石	10	20	高
粗砂	1	2	
中砂	$1 \times 10^{-1}$	$2 \times 10^{-1}$	中
細砂含礫石	$1 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$	
細砂	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-3}$	
粉土質砂土	$1 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	低
粉土	$1 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	
粉土質黏土	$1 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-6}$	
黏土	$1 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$	甚低
	$1 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-8}$	
	$1 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$	

I. 夯實特性(Compaction Characteristic)

1. 定義：以人工或機械方式施加能量於土壤上，促使土壤原有結構排列改變或破壞，以減少孔隙率，增加密度，各種土壤夯實特性參數合理範圍如表 3.2-6。
2. 應用：可應用於低放射性廢料處置場址土壤工程特性之改良，以減少透水性與壓縮性，增加抗剪強度及減少沉陷量。

表 3.2-6 各種土壤夯實特性參數合理範圍

項目	種類		
	粘性土	砂質土	有機土
濕土單位重, $r_m(g/cm^3)$	1.3~1.8	1.6~2.0	0.8~1.3
乾土單位重, $r_d(g/cm^3)$	0.5~1.4	1.2~1.8	0.1~0.6
含水量, $w(\%)$	130~150	10~30	80~1200

J. 收縮/膨脹特性(Shrinkage/Swelling Characteristic)

1. 定義：收縮為土壤內水份蒸發消失，導致土體體積減少之現象；膨脹為土壤內吸水導致土壤體積增加之現象，膨脹程度與產生之膨脹壓力，均與黏土含量、結構、組成及物理化學成份有關。

2. 應用：對於黏土含量豐富之低放射性廢料處置場址而言，需評估收縮與膨脹現象對地工參數(如剪力強度、滲透性與壓縮性)之影響。

#### K. 土壤成份(Soil Composition)

1. 定義：所指土壤成份係礦物含量(Mineral Content)、離子交換能力(Ion Exchange Capacity)與可溶性鹽類(Soluble Salts)。礦物含量係指對結構物會造成分裂的膨脹性土壤，如蒙脫土類；離子交換能力係指地下水與土壤間產生交換離子之能力；可溶性鹽類為溶於水中之鈉、鎂、鈣與鉀成份。
2. 應用：礦物含量的分析有助於評估低放射性廢料處置場址設施之穩定性分析；離子交換能力分析有助於瞭解核種遷移受到離子交換之影響，尤其黏土性土壤具有少量有機質，對阻滯核種遷移有很大效果。可溶性鹽類含量分析有助於瞭解土壤之微觀行為。

#### L. 震波速度(Seismic Velocity)

1. 定義：震波於地層中傳遞之速度，震波可分為壓力波(Compression Wave，又稱為縱波、主要波與 P 波)與剪力波(Shear Wave，又稱為橫波、次要波與 S 波)。
2. 應用：震波速度可配合鑽探結果，研判低放射性廢料處置場址之地層變化，以繪製地質圖與地層剖面圖，並界定地下孔穴或坑道之所在，作為場址地震反應分析之地層參數。此外，亦可做為開挖難易及開挖機具選擇之參考指標。

#### M. 岩石品質指標(Rock Quality Designation, RQD)

1. 定義：為岩體完整性的一種指標，係鑽孔時獲得長度大於 10 cm 之岩心試體總長度與岩心鑽探進尺總長度之比，以百分比表示。岩心試體直徑應不小於 NX 尺寸(直徑 54mm，長徑比為 2.5~3.0)。
2. 應用：用於描述岩體的完整性或連續性，一般用於岩體品質等級之分類。

### 3.2.6 現地應力

台灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海洋板塊地碰撞帶前緣，板塊運動造成快速隆起的造山帶區域且地質構造活動頻繁，板塊持續運動造成之大地應力來源可依照不同尺度將其劃分為廣域性構造作用力(Broad scale tectonic forces)及區域性構造應力(Local tectonic stresses)，板塊作用造成之應力作用區域如圖 3.2-14。

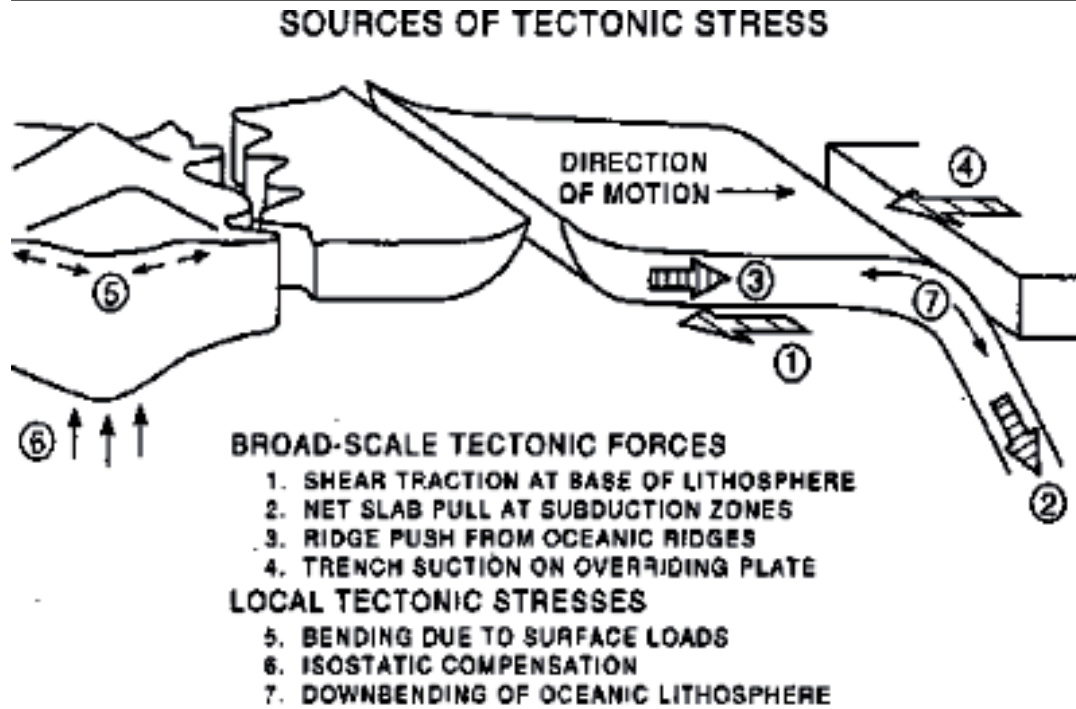


圖 3.2-14 大地應力來源(O. Stephansson and A. Zang, 2010)

不同的大地應力來源對場址影響狀況不一，Zang & Stephansson (2010)將其距場址遠近進行分類如圖 3.2-15，Level 0 為場址區域，而 Level 1—3 為近域至遠域，顯示場址近域會受 A. 初始應力 B. 孔隙擾動 C. 構造現象 D. 構造活動等影響，其中初始應力又受其他應力作用影響，整理如下：

A. 初始應力：現地岩體初始應力場，顯示單位元素內所受之應力。

1. 地球重力。

2. 板塊作用。

一、板塊活動：隱沒帶或中洋脊等板塊交界帶。

二、造山運動。

三、斷層構造。

3. 殘餘應力：如成岩作用或褶皺作用等，將大地應力以應變方式呈現，其岩體包含應變能。

4. 引力作用。

B. 孔隙擾動。

C. 構造現象。

D. 構造活動。

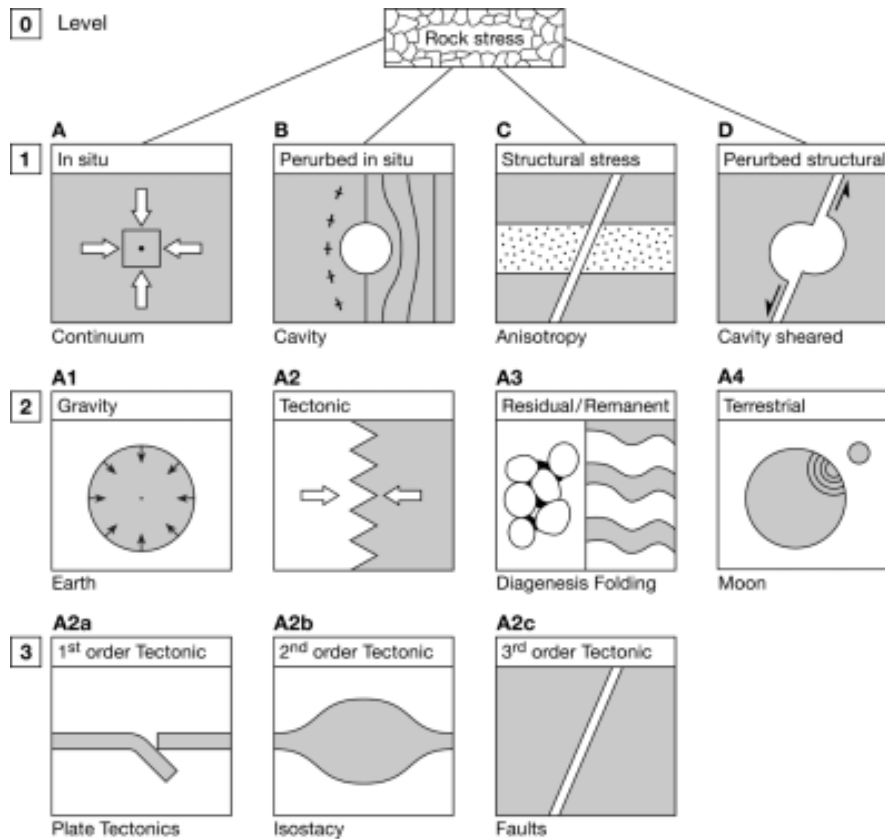


圖 3.2-15 不同尺度下之應力來源 (O. Stephansson and A. Zang, 2010)

透過對應力來源及種類的了解，可幫助建立場址現地應力概況，O. Stephansson and A. Zang (2010)提出如何建立一場址(或區域)之現地應力模型(圖 3.2-16)，主要透過：

- A. 最佳估計應力模型(BESM)：彙整過去既有之應力資料並選取場址適用範圍之現地應力資料，建立該場址最佳估算應力模型，包含應力來源之分類、地形/地質資料，以及現有之鑽孔與岩心資料等。
- B. 應力量測法(SMM)：對場址區域進行現地應力量測，利用鑽孔進行現地試驗(如水力破裂法或套鑽法等)，以及透過室內試驗對現地採取之岩心進行量測應力資料(如 ASR、DSA 及 Kaiser effect 等)。
- C. 綜合應力測定(ISD)：整合既有資料與現地資料，建立適合之應力模式(水力破裂法或斷層滑動分析等)及進行數值模擬，與探討參數包含岩石材料、邊界效應、幾何影響因子，並選定合適之模擬軟體。
- D. 最終岩石應力模型(FRSM)：透過前述之現地應力量測及研究，建立該場址最終的岩石應力模型。

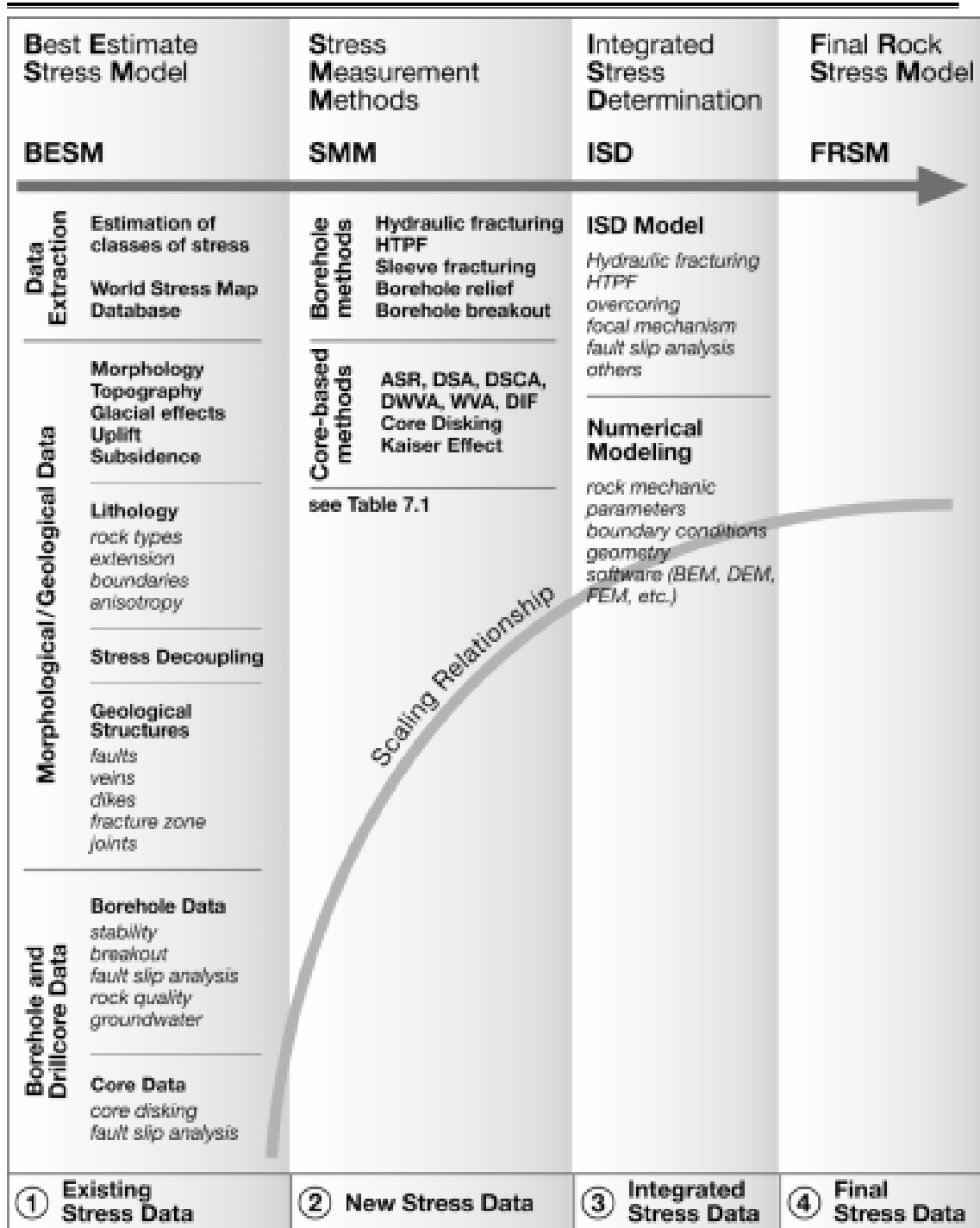


圖 3.2-16 建置最終岩石應力模型流程(O. Stephansson and A. Zang, 2010)

## 第四章 國內既有隧道設計及施工技術規範彙整

本章將依坑道處置設計與施工需求之概念，彙整國內既有隧道設計及施工技術相關法規、標準、規範。範圍包含工程經營管理、施工佈置、施工材料、施工方法、施工機具設備、施工程序、施工時程、工業安全衛生、水土保持與環境保護、品管與品保方案及緊急應變處理等。

### 4.1 國內既有隧道設計技術規範

雖國內目前尚未建立或制定低放射性廢棄物最終處置設施場之坑道設計的規範，但目前針對一般隧道設計的規範或研究成果亦可供本研究案進一步參考，現歸納整理說明如后。

#### 4.1.1 設計規範彙整

- A. 隧道工程設計準則與解說(中國土木工程學會，1999)；本設計準則分成三部分，第一部分為總則，說明設計準則涵蓋的範圍及適用性；第二部分為調查與試驗，針對隧道工程之特性，就工址調查的範圍、項目、進行方法及成果判釋等詳細說明；第三部分為隧道設計，就設計項目、設計理念及注意事項等加以闡述說明。
- B. 山岳隧道工程設計與實例手冊(中華民國隧道協會，1999)；本手冊包括與隧道工程相關之概述、地質調查、隧道定線、隧道洞口、隧道設計、特殊地質段設計、災變對策、隧道開挖、隧道監測與回饋及結語。
- C. 公路隧道設計規範(交通部，2003)；交通部考量隧道設計規範確有及早訂定之必要，遂於民國 92 年 3 月委由中華民國隧道協會，以國道新建工程局委託中國土木工程學會所編「隧道工程設計準則與解說(民國 88 年)」為藍本進行複審，並編訂本規範。複審期間聘請 18 位產官學界之專家擔任審查委員負責審查，於民國 92 年 11 月始定案，並由交通部頒布實施。
- D. 台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立(行政院公共工程委員會，2003)；行政院公共工程委員會有鑑於台灣地區沿用之岩體分類法係因襲國外系統，常無法反映國內特殊之地質條件，且隧道工程相關資料至今仍散佈於各單位中，相關經驗無法有效傳承與保存，因此，彙整國內隧道工程資料，並透過國際隧道工程技術交流方式，參酌國外現行岩體分類系統以及著

名隧道工程案例加以研究，以建立台灣地區之岩體分類與支撐系統，供爾後之隧道工程使用。同時利用現代電腦科技功能建立隧道工程資料庫，將台灣過去隧道工程之相關資訊加以保存，提供後續隧道工程之決策與執行上之參考。

- E. 隧道二次襯砌功能、設計理念與混凝土設計規範之研究與建議對策(交通部台灣區國道新建工程局，2000)；於各隧道對二次襯砌之設計功能需求不同，二次襯砌仍有許多不同之設計方案可供選擇，因此本研究中列舉多種設計方案，提供二次襯砌設計更廣泛之選擇，最後本研究將提出二次襯砌之方案評選建議準則及評選參考流程，作為決定二次襯砌設計之參考。其內容包括：前言、問題特性分析、以處理不確定因素之基本觀念探討二次襯砌之功能與定位、文獻回顧與設計現況、以隧道工程設計之觀念來探討二次襯砌之功能與設計考量、二次襯砌之類型簡介與分析、混凝土設計規範應用在二次襯砌之探討、案例探討、二次襯砌設計之建議考慮方式共 9 章。
- F. 軟土潛盾隧道工程設計與實例手冊(中華民國隧道協會，2004)；本手冊涵蓋了與軟土潛盾隧道工程相關的工址調查、隧道規劃、設計、施工及展望；潛盾機選擇和評選模式、應用及設計；潛盾隧道環片襯砌、工作井、施工輔助工法、施工監測及建物保護等。
- G. 潛盾隧道設計及施工準則與解說(中華民國隧道協會，2009)；本準則使用原則為(1)條文可做為政府、事業單位要求施工設計單位之基本事項；(2)解說內容提供設計及施工數據與資訊，供相關單位參考；(3)提供政府、事業單位、設計與施工單位共同之依循與標準；(4)從事潛盾隧道工程人員之參考書籍。
- H. 公路隧道消防法規制訂(交通部台灣區國道新建工程局，1997)；本法規為符合本土化使具體可行，先後邀請相關學者、專家、民間團體、工程實務界暨政府相關機關研討，經擷取可行意見及研討國外公路隧道法規中有關消防設備配置規定，提出「公路隧道消防安全設備設施設置規範草案」計八十五條。全文分成三篇，第一編為總則，第二編為消防設計，第三編為消防安全設備設施，供為臺灣地區公路隧道消防設備設置管理及改善對策之指導基準。
- I. 公路隧道安全設施準則研訂(交通部台灣區國道新建工程局，1998)；本準則之主要目的，在結合機電、交控、緊急與安全逃生及營運管理等先進技術，並參酌世界各國之經驗，針對公路隧道運轉所需之安全設施，研訂一套適合



國內使用之設置準則。經分析結果，首先將隧道安全設施準則劃分為機電設施、交通監控設施、緊急及安全逃生設施以及營運管理措施四大類。依據上述分類，並參酌世界各國相關之準則，加上各專業領域之知識，整合研訂定出適合國內高速公路隧道使用之「公路隧道安全設施準則」，可供未來相關隧道規劃、設計之參考。

- J. 公路隧道消防安全設備設置規範草案(交通部台灣區國道新建工程局，2008)；本規範蒐集先進國家如歐盟、美國、日本、澳洲、中國大陸等關於公路隧道消防安全設備設置規範，並分類探討各國設備設置之異同，研擬一套符合我國國情之公路隧道消防安全設備法規。並提出「公路隧道消防安全設備設置規範草案」內容，除訂定我國公路隧道分級規範外，全文共分為五章及附錄 A，第一章「總則篇」、第二章「消防設計篇」、第三章「消防安全設備篇」、第四章「輔助消防搶救上之必要設備篇」、第五章「附則篇」，及附錄 A「火災控制設備」，並以 FDS 完成模擬公路隧道火災排煙情境分析。

#### 4.1.2 設計理念與考量因素

我國交通部頒布之「公路隧道設計規範」(2003)規範隧道之設計原則與考量因素如下：

##### E. 設計原則：

1. 隧道設計宜考量隧道周圍地盤之自立性，使其與支撐系統共同形成適當之拱效應，以穩定開挖所造成之變形。
2. 支撐系統設計宜考量隧道變形寬容量，採用適當勁度之支撐構件。
3. 隧道設計宜保留適當施工彈性，並得依隧道監測資料回饋調整。

##### F. 考量因素：

1. 地盤特性：包括岩性、構造、地下水、弱面特性、隧道軸線與地層位態關係、開挖面自立性與地盤行為等條件。
2. 斷面形狀：包括功能上必須之最小行車淨空與附屬設施空間，以及配合地盤、開挖工法及支撐等特性所需之形狀。隧道斷面之幾何形狀應力求圓滑平順，以避免應力集中。
3. 一般岩盤隧道設計可不考慮地震影響。但必要時，得視地形、地質及隧道覆蓋深度等條件考慮之。

4. 特殊荷重：包括淺覆蓋地形之上載荷重、膨脹及擠壓地盤之異常荷重以及鄰近邊坡地形之偏壓荷重等。
5. 施工方法與順序。
6. 地下水與地表水之影響。

另中國土木水利工程學會編著之「隧道工程設計準則與解說」(1999)亦針對隧道之設計原則與考量因素建議如下：

A. 設計原則：

1. 原則上，隧道設計應充分利用隧道周圍地盤之自持能力，使其與隧道支撐系統共同形成適當之承載環，以調適開挖造成之地盤變形與應力變化。
2. 隧道支撐系統設計應依隧道斷面所容許發生之變形量大小，採用適當勁度之支撐構件。
3. 施工期間應監測隧道之變形與支撐構件之應力，視需要補強支撐系統或適當修正原設計，以符安全經濟原則。

B. 考量因素：

1. 地盤特性：包括隧道軸線與地層位態之關係、大地應力作用之方向、開挖面之自力性、地工力學行為與地盤膨脹、擠壓、流動及湧水等不利條件。
2. 斷面形狀：包括功能上必須之內空斷面與配合地盤特性、開挖方法、施工順序及支撐等特性所需之形狀。
3. 開挖方法。
4. 地震之影響：一般岩盤隧道設計不考慮地震影響，但必要時，得視地形、地質、隧道覆土深度、洞口邊坡及隧道交叉段等條件考慮之。
5. 特殊荷重：包括淺覆蓋地形之上載荷重、膨脹性地層之擠壓荷重、鄰近邊坡地形之偏壓荷重等。

4.1.3 設計項目與流程

我國交通部頒布之「公路隧道設計規範」(2003)針對隧道之設計項目及流程等規範如下：

- A. 隧道設計之基本項目如下：斷面形狀、開挖方法、初期支撐型式及變形寬容量、襯砌、洞口、排水與防水設施、監測系統及其它特殊情況。
- B. 隧道設計得分為初步設計及細部設計兩階段進行，施工期間並得依監測評估

結果進行設計調整。

其中有關隧道之支撐設計方法則分為：初期支撐、襯砌與仰拱三部分，規範如下：

A. 初期支撐：

1. 隧道支撐包括初期支撐及襯砌，情況適合時可僅做初期支撐。
2. 隧道支撐設計應考量適當之變形寬容量。
3. 初期支撐設計方法可概分為經驗設計法和分析設計法等二種，應依據地盤特性、施工方法、支撐架設時間、支撐系統特性與使用經驗及熟悉度等條件，評估其適用性後選用。
4. 經驗設計法係套用以往工程經驗之方法，視地盤良窳分級，依據隧道之功能，評析斷面形狀與尺寸、覆蓋深淺、大地應力、開挖方法等因素之影響，再參考以往案例，設計各級地盤之支撐系統。
5. 分析設計法係利用數學解析或數值分析等方式，求得隧道開挖面周圍之應力與變形，以設計隧道支撐之方法。

B. 襯砌：

1. 襯砌係以提供隧道內部安全設施之裝設及短期或長期安全使用為目的。
2. 襯砌應依據短期或長期之可能荷重，設計其厚度、強度及加勁材。於洞口段、斷面幾何形狀變化段、交叉段、裝設通風與機電設施等處，應視襯砌應力大小，檢討增加襯砌厚度、強度及配筋。

C. 仰拱：

1. 當地質不佳，僅以頂拱之支撐可能無法控制地盤變形者，應考慮設置仰拱，將支撐系統閉合。
2. 仰拱形狀與厚度應符合構成仰拱構造之力學要求與施工需要。
3. 另中國土木水利工程學會編著之「隧道工程設計準則與解說」(1999)則說明隧道工程之主要設計內容與設計流程，如圖 4.1-1 及圖 4.1-2 所示。

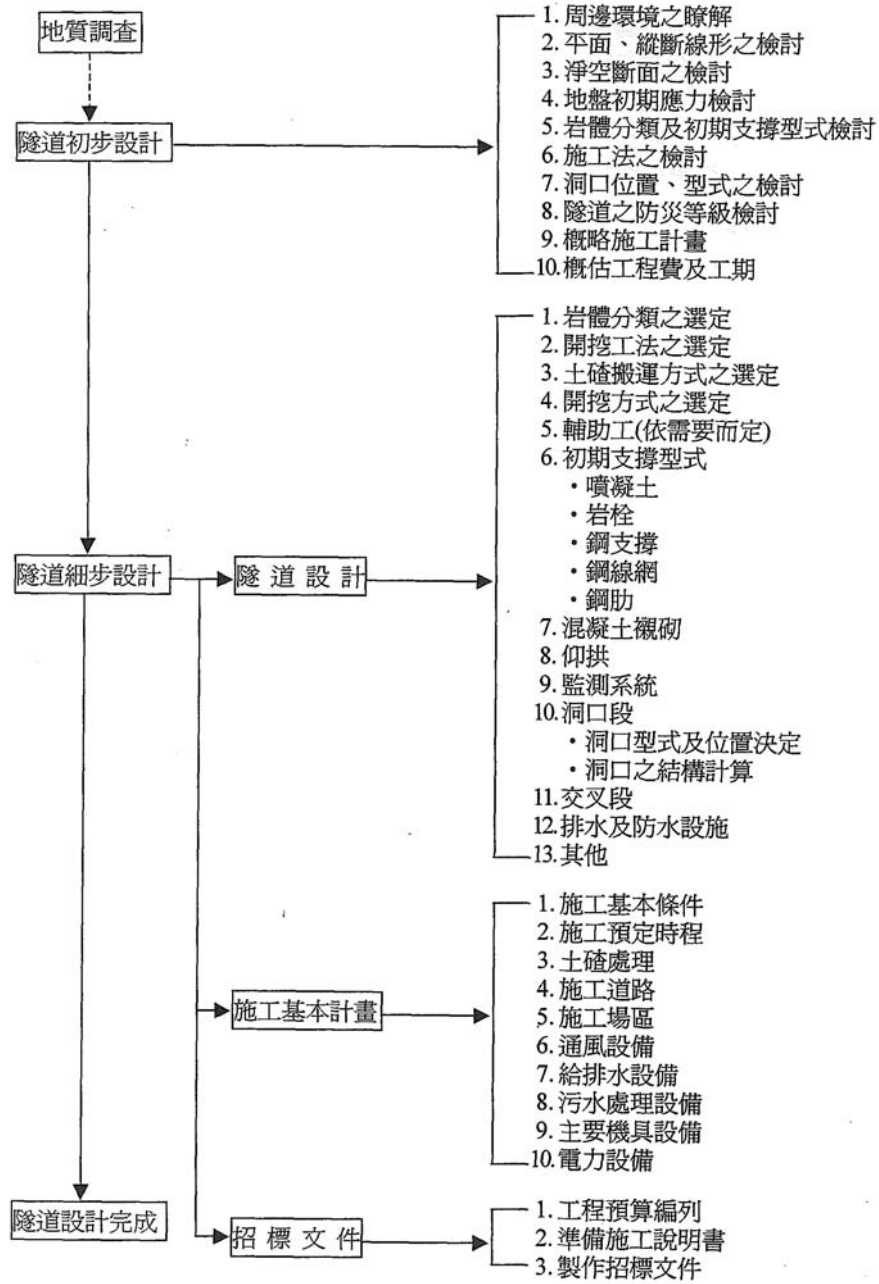


圖 4.1-1 隧道之主要設計內容(中國土木水利工程學會，1999)

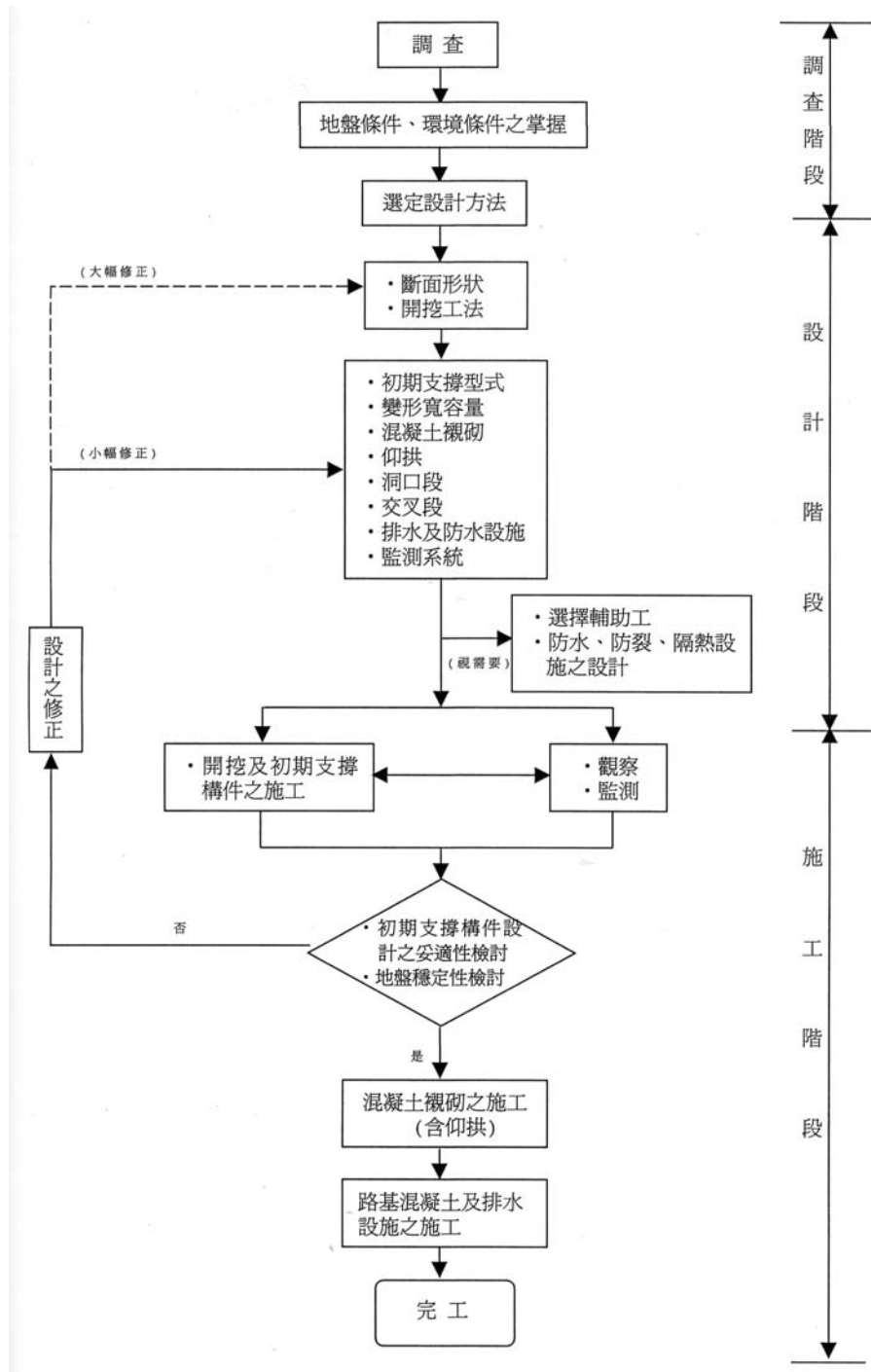


圖 4.1-2 隧道設計流程圖(中國土木工程學會，1999)

其中有關隧道之支撐設計方法則分為：初期支撐、二次支撐二部分，建議如下：

A. 初期支撐：

1. 隧道支撐包括初期支撐及二次支撐(混凝土襯砌)，情況適合時亦可單以初期支撐作為永久支撐。

2. 初期支撐設計方法可概分為經驗法、觀察法和分析法等三種，應依據地質特性、支撐架設時間、開挖方法、支撐系統之柔性與使用經驗及熟悉度等條件，評估其適用性後選用。
3. 隧道支撐設計應訂定適當之變形寬容量。
4. 經驗設計法係套用以往工程經驗之方法，視地盤良窳分級，依據隧道之功能，評析斷面形狀與尺寸、覆蓋深淺、大地應力、開挖方法等因素之影響，再參考以往案例，設計各級地盤之支撐系統。
5. 觀察設計法係於施工進行間之設計方法，針對施工時觀察所悉之地盤特性，套用預先設計之支撐系統及開挖方法，並實施觀察與監測，確認、補強或修正原設計。
6. 分析設計法係利用數學解析、數值分析或物理模型等方式，分析隧道開挖面周圍之應力與變形，以設計隧道支撐之方法。
7. 採用觀察設計法或分析設計法時，隧道支撐均應於施工期間，藉各種監測結果之分析，回饋於支撐設計，以確認支撐系統之妥適性，並得據以調查或修正原設計，以符實際安全需要。
8. 設計之回饋與修正應反映於隧道工程之合約。

B. 二次支撐：

1. 二次支撐以提供隧道內部安全設施之裝設及短期或長期安全使用為目的。
2. 二次支撐應依據長期之可能荷重，決定其厚度。洞口段、斷面幾何形狀變化段、交叉段、裝設通風與機電設施等處，應視襯砌應力大小，檢討增加襯砌厚度、強度或配筋之需要性。

## 4.2 國內既有隧道施工技術規範

雖國內目前尚未建立或制定低放射性廢棄物最終處置設施場之坑道施工的規範，但目前針對一般隧道施工的規範或研究成果亦可供本研究案進一步參考，現歸納整理說明如后。

- (1) 公共工程施工綱要規範 (行政院公共工程委員會，2001)：行政院公共工程委員會為整合劃一全國公共工程施工規範，提升工程品質，特訂定本要點。凡適用政府採購法以辦理新興公共工程及各類房屋建築工程之規劃、設計、施

工之機關、法人或團體均適用本要點。主辦機關辦理工程應應用行政院公共工程委員會所訂定之公共工程施工綱要規範(含完整版、精簡版綱要規範及有關標準化與資訊化措施)。主辦機關自本要點實施日(90.11.15)起辦理新興個別計畫之規劃、設計及施工，應用施工規範之有關措施及內容，如有所不足或另有特殊情節，應循施工規範完整版所訂有關編撰格式、編碼架構及編碼規則增刪修撰，以因應其個案需用。

- (2) 隧道施工技術規範(交通部台灣區國道新建工程局，2003)：要針對鑽炸法及非全斷面機械開挖之隧道施工提出規範要求，內容係參考行政院公共工程委員會頒布之公共工程施工綱要規範第 02401 章 隧道施工管理、02402 章 隧道施工通則、02403 章 岩體分類與開挖支撐類型、02411 章 洞口開挖及邊坡保護、02412 章 隧道鑽炸法及非全斷面機械開挖、02421 章 先進支撐、02422 章 鋼支保、02423 章 隧道用岩栓、02424 章 隧道噴凝土、02425 章 隧道襯砌、02432 章 隧道鑽孔及灌漿、02447 章 隧道計測及儀器、02448 章 隧道防水層，共計 13 章而制定。
- (3) 施工說明書技術規定(交通部公路總局，2005)：分為上、下二冊，內容涵蓋所有公路興建與養護所需之施工技術，內容亦參考行政院公共工程委員會頒布之公共工程施工綱要規範而制定，惟其中第 02401 章 隧道施工安全、02402 章 隧道施工通則、02403 章 岩體分類與開挖支撐類型、02411 章 洞口開挖及邊坡保護、02412 章 隧道鑽炸法及非全斷面機械開挖、02415 章 豎井開挖、02422 章 鋼支撐架、02423 章 隧道用岩栓、02424 章 隧道噴凝土、02425 章 隧道襯砌、02432 章 隧道鑽孔及灌漿、02447 章 隧道計測及儀器、02448 章 隧道防水層、02449 章 隧道其他工作，共計 14 章，主要針對鑽炸法及非全斷面機械開挖之隧道施工提出規範要求。
- (4) 潛盾隧道施工技術規範之研討(中華民國隧道協會，1999)：盾隧道工法係以缺乏自立性地層為主要施工對象之隧道施工法，為確保都市交通順暢、減少噪音與震動、解決施工用地取得及近鄰施工問題，潛盾隧道工法已逐漸取代明挖覆蓋工法成為都會區隧道工法之主流，廣泛地運用在捷運隧道、衛生下水道、輸水幹管、共同溝及其他維生管線之興建上，對增進都市生活機能、提升人類文明生活水準有極大貢獻。本規範內容包含工程管理、工址調查、施工與設備、環片與襯砌、輔助工法、附屬工程共 6 個章節。

- (5) 潛盾隧道設計及施工準則與解說(中華民國隧道協會, 2009): 準則前四章為設計相關, 第五及第六章則針對施工部分制定, 其內容大綱為第五章施工設備: 包括概論、地面設備、工作井設備、隧道內設備; 第六章施工: 包含概論、測量、環片之製作、環片之儲存、搬運及處理、潛盾機之製造、組裝及檢查、潛盾機維護管理、工作井、潛盾發進到達、潛盾施工、二次襯砌與步道、輔助工法、聯絡通道、施工監測、施工管理、品質管理、安全衛生管理、環境保護措施、各種條件下之施工等共 18 小節。

#### 4.3 隧道施工相關其他技術文件

除 4.2 節所蒐集彙整有關隧道施工之技術規範外, 國內亦有一些施工相關之書籍、報告或技術文件等可供本研究進一步參考。

- (1) 山岳隧道之施工(榮民工程事業管理處, 1981): 由 林福星先生編著, 內容包括施工計畫、開挖方法、鑽岩、開炸、岩碴處理、支保、襯砌、壓縮空氣量計算、隧道換器與照明設備、斜坑、豎井、隧道工程特種施工之實例等共 12 章, 堪稱國內第一本有關山岳隧道施工之專書。
- (2) 實用隧道工程學(汪燮之, 1987): 其中第三章岩石隧道施工、第四章無爆破岩石隧道施工、第五章土質隧道施工、第六章豎井、第七章沉埋管隧道等 5 章, 均針對隧道之施工技術與方法而撰寫。
- (3) 隧道工程(榮民工程事業管理處, 1990): 分為上下二冊, 其中現代隧道施工技术在台灣地區之應用、隧道工法之演進與展望、隧道施工機具及設備、隧道施工之通風、隧道之排水系統、隧道開炸之施工探討、超挖控制之爆破技術、隧道突發事件及對策、隧道施工的湧水對策、施工進度表於隧道工程之製作與應用、隧道施工之品質控制等章節均與隧道工程之施工息息相關。
- (4) 公路隧道設計、施工一半剛性支撐工法(公路局第二區工程處, 1993): 由 張嘉德先生編著, 其中第 4 章施工內容包括開炸、機械挖掘、噴凝土施工、岩栓施工、鋼支保組裝、襯砌施工等, 第 5 章施工中之現象與對策、第 6 章計測等, 剖具參考價值。
- (5) 營建自動化 推廣手冊叢書(內政部營建署, 1997~2000): 內政部營建署為推廣隧道工程之營建自動化, 委請財團法人台灣營建研究院召集國內產官學界



有關隧道工程方面之專家、學者，共同編撰一系列叢書，包括隧道監測自動化系統、隧道工程全能作業班、台灣隧道施工技術之發展及其成效、隧道施工地質探查技術、隧道施工湧水處理技術(上、下冊)、隧道氣爆處理技術等共七冊，亦十分具有實用價值。

- (6) 隧道工程實務(國立台灣科技大學營建工程系，1998)：由台科大營建系 陳志南教授主編，其內容主要係將「隧道工程施工技術研習班」與「隧道工程實務人才培訓班」之教材彙編而成，其中隧道施工技術、隧道施工管理、隧道工程災變處理實務、隧道工程施工與管理、隧道鑽炸實務等章節內容與隧道施工息息相關。
- (7) 隧道施工技術、品質與案例彙編(中華民國隧道協會，2009)：由 劉弘祥先生主編，內容分為第一篇山岳隧道鑽炸法、第二篇山岳隧道 TBM、第三篇軟土潛盾隧道，而每篇又分為四個章節，第一章為探討各種工法之施工技術，第二章則詳列施工品質管理流程與所需表格，第三、四章則各舉二實際案例詳加說明。

## 第五章 國內既有隧道設計方法、設計參數與 穩定分析技術之彙整

本章將依坑道處置工程障壁系統設計需求之概念，彙整國內既有隧道設計方法、設計參數與穩定分析技術，初步探討國內現有技術於坑道處置設計之應用，並以國內數個隧道設計實例為背景加以介紹，以供後續審查重點之研析與建議。

### 5.1 國內既有隧道設計方法

隧道工程之主體設計主要包含二大部分，其一為隧道開挖之初期支撐；其二則為二次支撐(混凝土襯砌)。而根據中國土木水利工程學會於1999年出版之「隧道工程設計準則與解說」，將初期支撐概分為：(1) 經驗設計法；(2) 觀察設計法；(3) 分析設計法，分述如后。另中華民國隧道協會於同年(1999)出版之「山岳隧道工程設計與實例手冊」，則將隧道設計方法區分為：(1) 標準支撐型式法；(2) 類似條件設計法；(3) 解析法，亦可供參考。

#### 5.1.1 經驗設計法

經驗設計法為將以往工程經驗經由統計分析，歸納出經驗法則，並據以進行支撐設計之方法。採用經驗設計法時，應充分瞭解其發展背景與資料庫之內容，以掌握其適用範圍。

經驗設計法之骨幹是各種岩體分類系統。透過岩體分類將過去之工程經驗加以歸納分析，整理出經驗法則，供後續隧道工程參考比較，據以設計支撐系統。岩體分類系統之種類相當多，其中著名者為 Terzaghi 之 Rock Load Classification，Bieniawski 之 Geomechanics Classification System，Barton 等人之 Q System。以 Q System 之經驗設計法為例，經由岩體評分得到 Q 值後，可依據圖 5.1-1 與 5.1-2 及表 5.1-1 或圖 5.1-3 找到對應之支撐建議。而根據 Geomechanics Classification System 之 RMR 評分，則可找到不同開挖寬度所對應之岩體自立時間，如圖 5.1-4 所示。

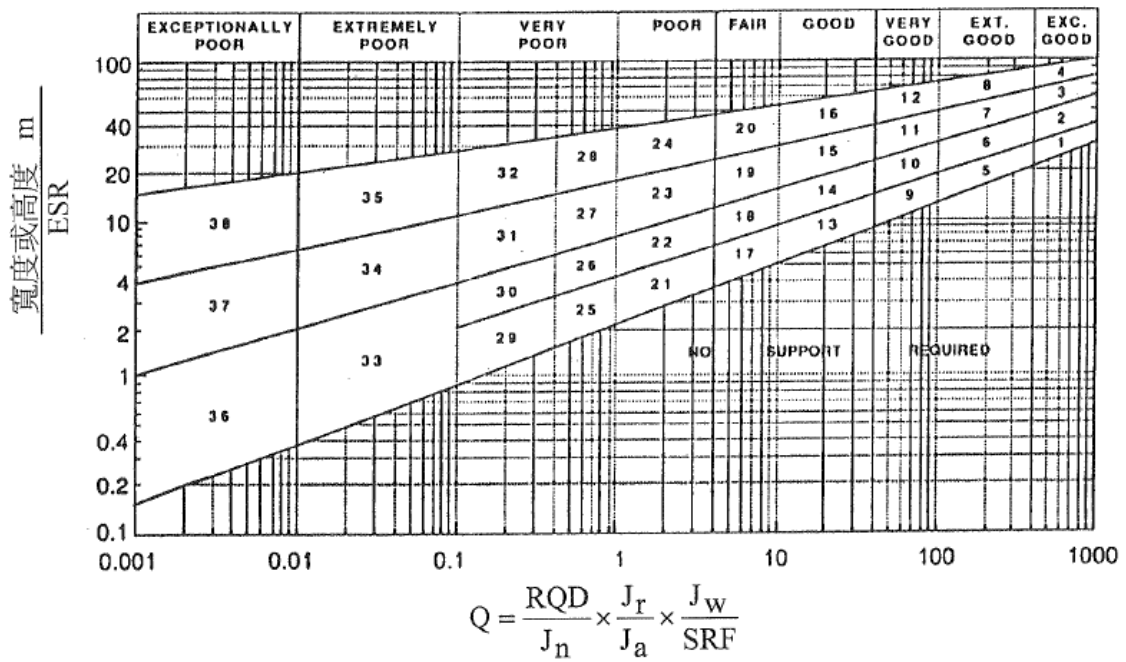


圖 5.1-1 Q 值及修正開挖寬度所對應之 38 個噴凝土-岩栓支撐系統(Barton, 1974)

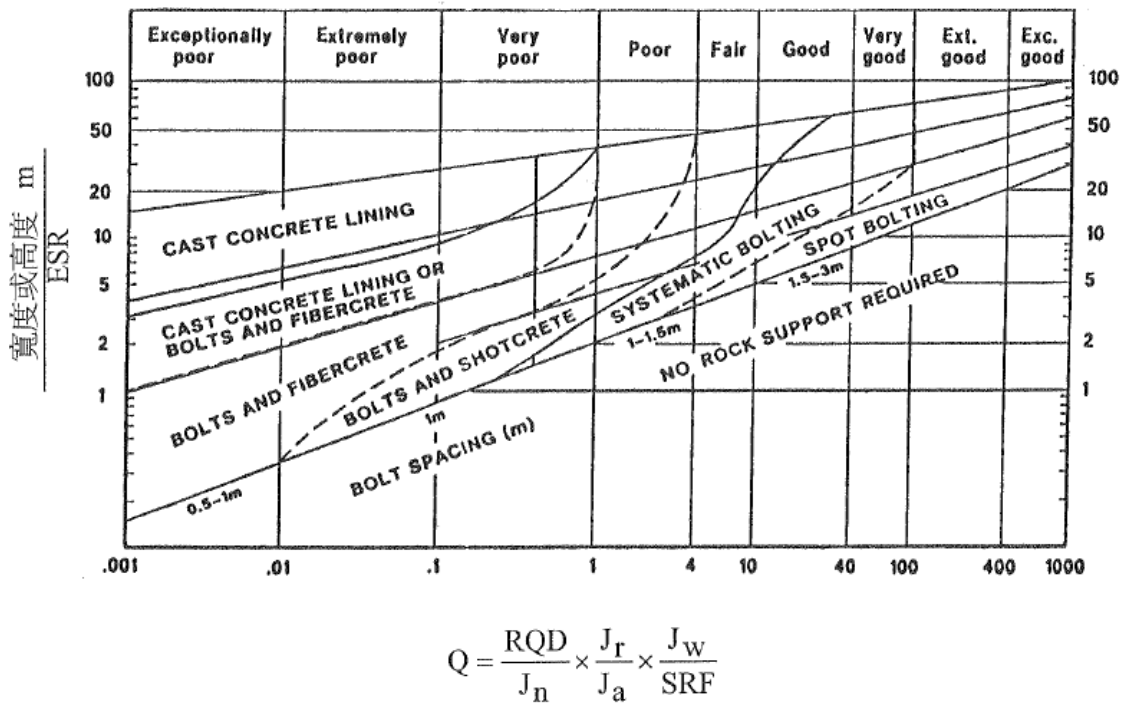


圖 5.1-2 Q 值及修正開挖寬度所對應之支撐型式(Barton, 1986)

表 5.1-1 由 212 個案例所得 38 個分區之支撐建議(Barton, 1988)

區 域 (支撐類別)	條 件 係 數			支 撐 型 式	附 註
	$\frac{RQD}{J_n}$	$\frac{J_r}{J_a}$	$\frac{\text{寬度}}{\text{ESR}}$		
1*	-	-	-	sb(utg)	-
2*	-	-	-	sb(utg)	-
3*	-	-	-	sb(utg)	-
4*	-	-	-	sb(utg)	-
5*	-	-	-	sb(utg)	-
6*	-	-	-	sb(utg)	-
7*	-	-	-	sb(utg)	-
8*	-	-	-	sb(utg)	-
附註：1 至 8 類之支撐型式應依據開炸技術而定。實施勻滑面開炸並徹底清除鬆石，或可免除支撐之需要性，粗糙之開炸可能導致需要單層噴凝土，尤其是開挖高度>25m 時為然。將來之案例紀錄應區別 1 至 8 類。					
9	$\geq 20$	-	-	sb(utg)	-
	$< 20$	-	-	B(utg)2.5-3m	-
10	$\geq 30$	-	-	B(utg)2-3m	-
	$< 30$	-	-	B(utg)1.5-2m +clm	-
11*	$\geq 30$	-	-	B(tg)2-3m	-
	$< 30$	-	-	B(tg)1.5-2m +clm	-
12*	$\geq 30$	-	-	B(utg)2-3m	-
	$< 30$	-	-	B(utg)1.5-2m +clm	-
13	$\geq 10$	$\geq 1.5$	-	sb(utg)	I
	$\geq 10$	$< 1.5$	-	B(utg)1.5-2m	I
	$< 10$	$\geq 1.5$	-	B(utg)1.5-2m	I
	$< 10$	$< 1.5$	-	B(utg)1.5-2m +S 2-3cm	I
14	$\geq 10$	-	$\geq 15$	B(tg)1.5-2m +clm	I, II
	$< 10$	-	$\geq 15$	B(tg)1.5-2m +S(mr)5-10cm	I, II
	-	-	$< 15$	B(utg)1.5-2m +clm	I, III
15	$> 10$	-	-	B(tg)1.5-2m +clm	I, II, IV
	$\leq 10$	-	-	B(tg)1.5-2m +S(mr)5-10cm	I, II, IV
16* 見註 XII	$> 15$	-	-	B(tg)1.5-2m +clm	I, V, VI
	$\leq 15$	-	-	B(tg)1.5-2m +S(mr)10-15cm	I, V, VI
17	$> 30$	-	-	sb(utg)	I
	$\geq 10, \leq 30$	-	-	B(utg)1-1.5m	I
	$< 10$	-	$\geq 6m$	B(utg)1-1.5m	I
	$< 10$	-	$< 6m$	S 2-3cm	I
18	$> 5$	-	$\geq 10m$	B(tg)1-1.5m +clm	I, III
	$> 5$	-	$< 10m$	B(utg)1-1.5m +clm	I
	$\geq 5$	-	$\geq 10m$	B(tg)1-1.5m +S 2-3cm	I, III
	$\geq 5$	-	$< 10m$	B(utg)1-1.5m +S 2-3cm	I

表 5.1-1 由 212 個案例所得 38 個分區之支撐建議(Barton, 1988)(續)

區 域 (支撐類別)	條 件 係 數			支 撐 型 式	附 註
	$\frac{RQD}{J_n}$	$\frac{J_r}{J_a}$	寬度 ESR		
19	-	-	$\geq 20m$	B(tg)1-2m +S(mr)10-15cm	I, II, IV
	-	-	$< 20m$	B(tg)1-1.5m +S(mr)5-10cm	I, II
20* 見註 XII	-	-	$\geq 35m$	B(tg)1-2m +S(mr)20-25cm	I, V, VI
	-	-	$< 35m$	B(tg)1-2m +S(mr)10-20cm	I, II, IV
21	$\geq 12.5$	$\leq 0.75$	-	B(utg)1m +S 2-3cm	I
	$< 12.5$	$\leq 0.75$	-	S 2.5-5cm	I
	-	$> 0.75$	-	B(utg)1m	I
22	$> 10, < 30$	$> 1.0$	-	B(utg)1m +clm	I
	$\leq 10$	$> 1.0$	-	S 2.5-7.5cm	I
	$< 30$	$\leq 1.0$	-	B(utg)1m +S(mr)2.5-5cm	I
	$\geq 30$	-	-	B(utg)1m	I
23	-	-	$\geq 15m$	B(tg)1-1.5m +S(mr)10-15cm	I, II, IV, VII
	-	-	$< 15m$	B(utg)1-1.5m +S(mr)5-10cm	I
24* 見註 XII	-	-	$\geq 30m$	B(tg)1-1.5m +S(mr)15-30cm	I, V, VI
	-	-	$< 30m$	B(tg)1-1.5m +S(mr)10-15cm	I, II, IV
25	$> 10$	$> 0.5$	-	B(utg)1m +mr or clm	I
	$\leq 10$	$> 0.5$	-	B(utg)1m +S(mr)5cm	I
	-	$\leq 0.5$	-	B(tg)1m +S(mr)5cm	I
26	-	-	-	B(tg)1m +S(mr)5-7.5cm	VIII, X, XI
	-	-	-	B(utg)1m +S 2.5-5cm	I, IX
27	-	-	$\geq 12m$	B(tg)1m +S(mr)7.5-10cm	I, IX
	-	-	$< 12m$	B(utg)1m +S(mr)5-7.5cm	I, IX
	-	-	$> 12m$	CCA 20-40 cm +B(tg)1m	VIII, X, XI
	-	-	$< 12m$	S(mr)10-20cm +B(tg)1m	VIII, X, XI
28* 見註 XII	-	-	$\geq 30m$	B(tg)1m +S(mr)30-40cm	I, IV, V, IX
	-	-	$\geq 20, < 30m$	B(tg)1m +S(mr)20-30cm	I, II, IV, IX
	-	-	$< 20m$	B(tg)1m +S(mr)15-20cm	I, II, IX
	-	-	-	CCA(sr)30-100cm +B(tg)1m	IV, VIII, X, XI
29*	$> 5$	$> 0.25$	-	B(utg)1m +S 2-3cm	-
	$\leq 5$	$> 0.25$	-	B(utg)1m +S(mr)5cm	-
	-	$\leq 0.25$	-	B(tg)1m +S(mr)5cm	-

表 5.1-1 由 212 個案例所得 38 個分區之支撐建議(Barton, 1988)(續)

區域 (支撐類別)	條件係數			支撐型式	附註
	$\frac{RQD}{J_n}$	$\frac{J_r}{J_a}$	$\frac{\text{寬度}}{\text{ESR}}$		
30	$\geq 5$	-	-	B(tg)1m +S 2.5-5cm	IX
	$< 5$	-	-	S(mr)5-7.5cm	IX
	-	-	-	B(tg)1m +S(mr)5-7.5cm	VIII, X, XI
31	$> 4$	-	-	B(tg)1m +S(mr)5-12.5cm	IX
	$\leq 4, \geq 1.5$	-	-	S(mr)7.5-25cm	IX
	$< 1.5$	-	-	CCA 20-40cm +B(tg)1m	IX, XI
32 見註 XII	-	-	$\geq 20m$	CCA(sr)30-50cm +B(tg)1m	VIII, X, XI
	-	-	$< 20m$	B(tg)1m +S(mr)20-40cm	II, IV, IX, XI
	-	-	-	CCA(sr)40-120cm +B(tg)1m	III, IV, IX, XI
33*	$\geq 2$	-	-	B(tg)1m +S(mr)2.5-5cm	IX
	$< 2$	-	-	S(mr)5-10cm	IX
	-	-	-	S(mr)7.5-15cm	VIII, X
34	$\geq 2$	$\geq 0.25$	-	B(tg)1m +S(mr)5-7.5cm	IX
	$< 2$	$\geq 0.25$	-	S(mr)7.5-15cm	IX
	-	$< 0.25$	-	S(mr)15-25cm CCA(sr)20-60cm +B(tg)1m	IX VIII, X, XI
35 見註 XII	-	-	$\geq 15m$	B(tg)1m +S(mr)30-100cm	II, IX, XI
	-	-	$\geq 15m$	CCA(sr)60-200cm +B(tg)1m	II, VIII, X, XI
	-	-	$< 15m$	B(tg)1m +S(mr)20-75cm	III, IX, XI
	-	-	$< 15m$	CCA(sr)40-150cm +B(tg)1m	III, VIII, X, XI
36*	-	-	-	S(mr)10-20cm	IX
	-	-	-	S(mr)10-20cm +B(tg)0.5-1.0m	VIII, X, XI
37	-	-	-	S(mr)20-60cm	IX
	-	-	-	S(mr)20-60cm +B(tg)0.5-1.0m	VIII, X, XI
38 見註 XIII	-	-	$\geq 10m$	CCA(sr)100-300cm	IX
	-	-	$\geq 10m$	CCA(sr)100-300cm +B(tg)1m	II, VIII, X, XI
	-	-	$< 10m$	S(mr)70-200cm	IX
			$< 10m$	S(mr)70-200cm +B(tg)1m	III, VIII, X, XI

\*作者估計之支撐。可用之案例紀錄尚不足以可靠估計支撐需要量。

使用支撐表之縮：

sb =局部岩栓

B =系統岩栓

(utg)=無預力，有灌漿

(tg)=加預力(堅實岩盤用機械膨脹式岩栓，岩質極差之岩盤用後拉法灌漿岩栓，見註 XI)

S =噴凝土

(mr)=鋼線鋼補強

clm =鍊網補強(chain link mesh)

CCA =澆鑄混凝土拱

(sr)=鋼筋補強

表 5.1-1 由 212 個案例所得 38 個分區之支撐建議(Barton, 1988)(續)

註：

- I. 高度之岩爆或爆裂，常用預力岩栓及加大之承載板，其間距為 1 公尺(偶為 0.8 公尺)。爆裂停止後加最後之支撐(襯砌)。
- II. 同一開挖中常用數種長度之岩栓，如 3, 5 及 7 公尺。
- III. 同一開挖中常用數種長度之岩栓，如 2, 3 及 4 公尺。
- IV. 常用預力鋼腱補充岩栓支撐之壓力，典型之間距為 2 至 4 公尺。
- V. 同一開挖中常用數種長度之岩栓，如 6, 8 及 10 公尺。
- VI. 常用預力鋼腱補充岩栓支撐之壓力，典型之間距為 4 至 6 公尺。
- VII. 屬此類之若干舊發電廠房使用系統性或局部性岩栓與鍊式鋼絲網，並用全跨混凝土頂拱(厚 250~400 公厘)作為永久支撐。
- VIII. 涉及膨脹之情形，例如含蒙脫土(水可進入)岩體。在高度膨脹情形下，於支撐後方預留膨脹空間。如為可能採用排水措施。
- IX. 不涉及膨脹粘土或擠壓岩體之情形。
- X. 涉及擠壓岩體之案例。一般以高剛性支撐做為永久支撐。
- XI. 根據作者(Barton 等)之經驗，如具膨脹性或擠壓性，且  $RQD/J_a$  值夠高(即 $>1.5$ )，構築混凝土(或噴凝土)拱前之臨時支撐，可為岩栓(加預力之機械膨脹式)，可能與噴凝土結合。如岩體節理極度發達或岩體破碎(即  $RQD/J_a < 1.5$ ，例如石英岩中之方塊狀剪碎帶)，則臨時支撐可能至數層之噴凝土。混凝土(或噴凝土)拱澆置後，可能補加系統性岩栓(預力者)以減緩混凝土拱上之不均勻載重分佈，但如  $RQD/J_a < 1.5$  或有大量粘土，此一措施可能無效，除非岩栓在施預力前加以灌漿。此種極度劣質之岩體，利用急凝樹脂錨碇，亦可能獲得端錨岩栓之足夠長度。嚴重之膨脹與/或擠壓之岩體，可能需要將混凝土構築至開挖前進面，可能用潛盾做為臨時保護。此等情況之開挖前進面可能亦需要臨時支撐。
- XII. 安全上之原因，在開挖與支撐頂拱時，常須採用多區開挖法。僅適用於寬度/ESR $>15$  情形。
- XIII. 高度擠壓岩體在開挖與支撐頂拱、牆及仰拱時，通常需要採用多區開挖法。僅適用於寬度/ESR $>10$  之極劣質岩體。

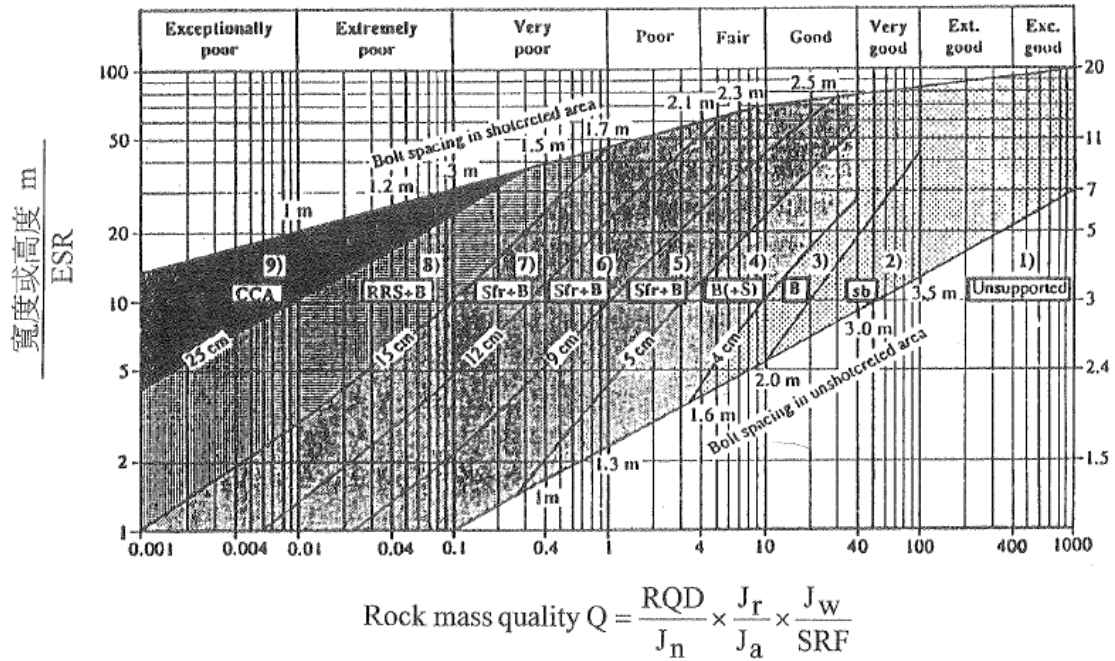


圖 5.1-3 Q 值及修正開挖寬度所對應之岩栓—鋼纖噴凝土支撐系統(Grimstad & Barton, 1993)

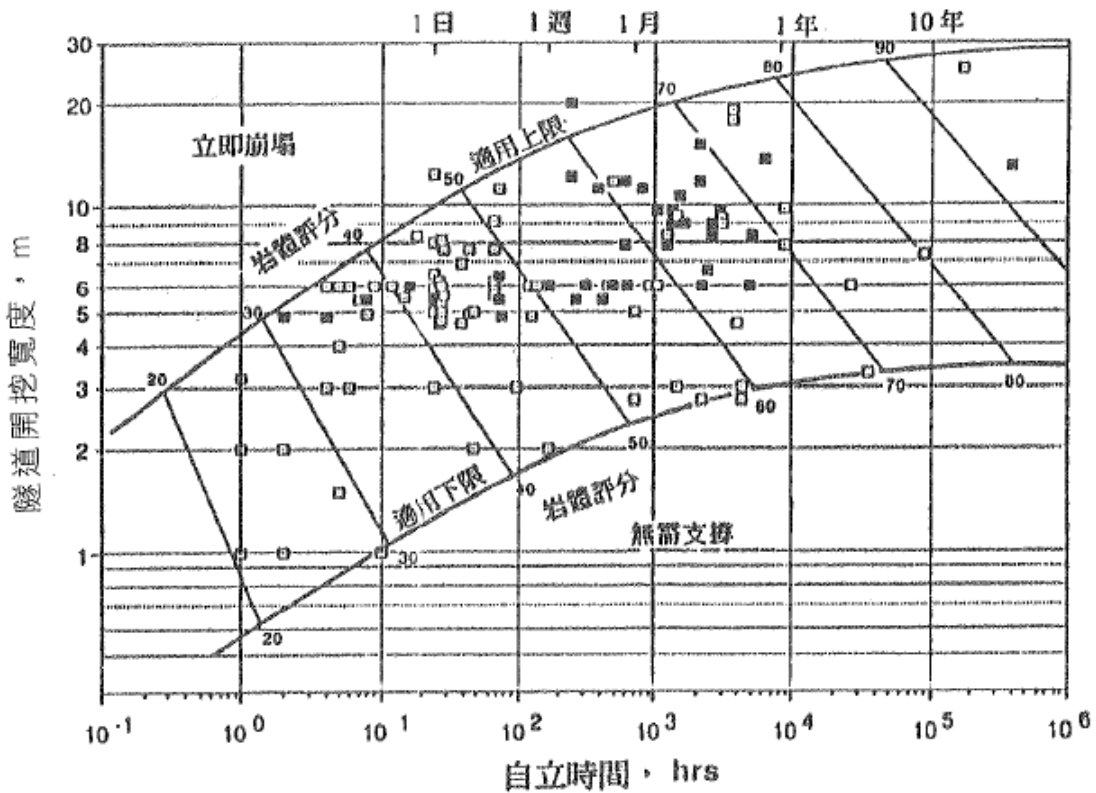


圖 5.1-4 RMR 之隧道開挖寬度與岩體自立時間之關係(Bieniawski, 1984)



然而，影響隧道支撐設計之因素，除地質條件外，尚包括隧道斷面尺寸形狀、覆蓋深淺、大地應力、開挖方式等，須做整體性之考量。由於各岩體分類系統皆有其特殊之重點與適用之範圍，故採用經驗設計法時，不應過分依賴某一岩體分類系統，而應交叉比較採用不同岩體分類系統之結果，以便更充分掌握岩體之特性。雖然一般而言，經驗設計法為較偏向保守之設計，但由於隧道工程之不確定性高，故施工中仍須密切配合監測計畫之執行，進行回績分析，驗證支撐設計之適用性，以確保隧道工程之安全與順利完成。

### 5.1.2 觀察設計法

觀察設計法為現代隧道支撐設計經常採用之設計方法，主要是根據以往之工程經驗及岩石力學理念，對每種岩質型態，於施工前訂定支撐構件及前進程序，並藉施工中之各類監測結果，做必要之修正，以確保支撐設計之安全性。是一種“進行間設計”之方法，亦為較合經濟原則與合理之設計方法。因為觀察設計法強調修正設計之必要性，因此，監測資料之回績分析誠屬必要，且應視為設計之一部分。觀察設計法較常採用者包括收斂變形控制法(convergence confinement method)及俗稱之新奧工法(NATM)。

### 5.1.3 分析設計法

當預料有不正常岩壓造成變形量超過預期值之特殊岩盤條件，及挖掘斷面為特殊形狀等理由，選用標準支撐型式不宜時，就需選用分析設計法，並依分析計算結果設計支撐型式。分析設計法可概分為理論分析法及數值分析法二類。

#### A. 理論分析法

當隧道斷面為圓形或簡化為相當之圓形等簡單形狀可依彈塑性理論以理論分析法分析圍岩應力狀態。隧道設計之重要因素包括隧道開挖斷面形狀、開挖順序、支撐裝設時機等施工順序，由於理論解析法只能在有限之假定條件下始能分析，因此上述重要因素無法考慮，所得成果之評估應作適當修正。

理論分析法有下列方法：

1. 極限平衡理論：Rabcewicz 法、Fedder 法、Duddek 法、Galczynish 法及山本法。
2. 應力－應變場理論：Kastner 法、岡法、Egger 法及 Hoek-Brown 法。

#### B. 數值分析法

有限元素法及邊界元素法等能分析岩盤及構造物之應力狀態，此等數值分析法可分析比較不同斷面形狀及開挖方法等。惟電腦程式分析模型、岩盤力學性質及初期岩體壓力狀態等解析上所需之輸入參數須設法解決。

上述各項分析方法之詳細說明與比較請詳見 5.3 節。

#### 5.1.4 案例說明—二高中察隧道

二高後續計畫田寮燕巢段，北端銜接台南路段，往南則銜接燕巢九如段。在此路段之中察隧道南下線長 1,858 公尺，北上線長 1,828 公尺。隧道每孔均為 3 車道。隧道貫穿之丘陵區地表高程在 20 至 360 公尺間，其中以中察山最高。

##### A. 隧道地質

中察隧道之山區地層為中新世晚期之烏山層及中新世晚期至上新世早期之蓋子寮頁岩層，如圖 5.1-5 所示。中察隧道北口以北則有旗山斷層通過，隧道中段及南口亦發現數條大型及中型斷層破碎帶。

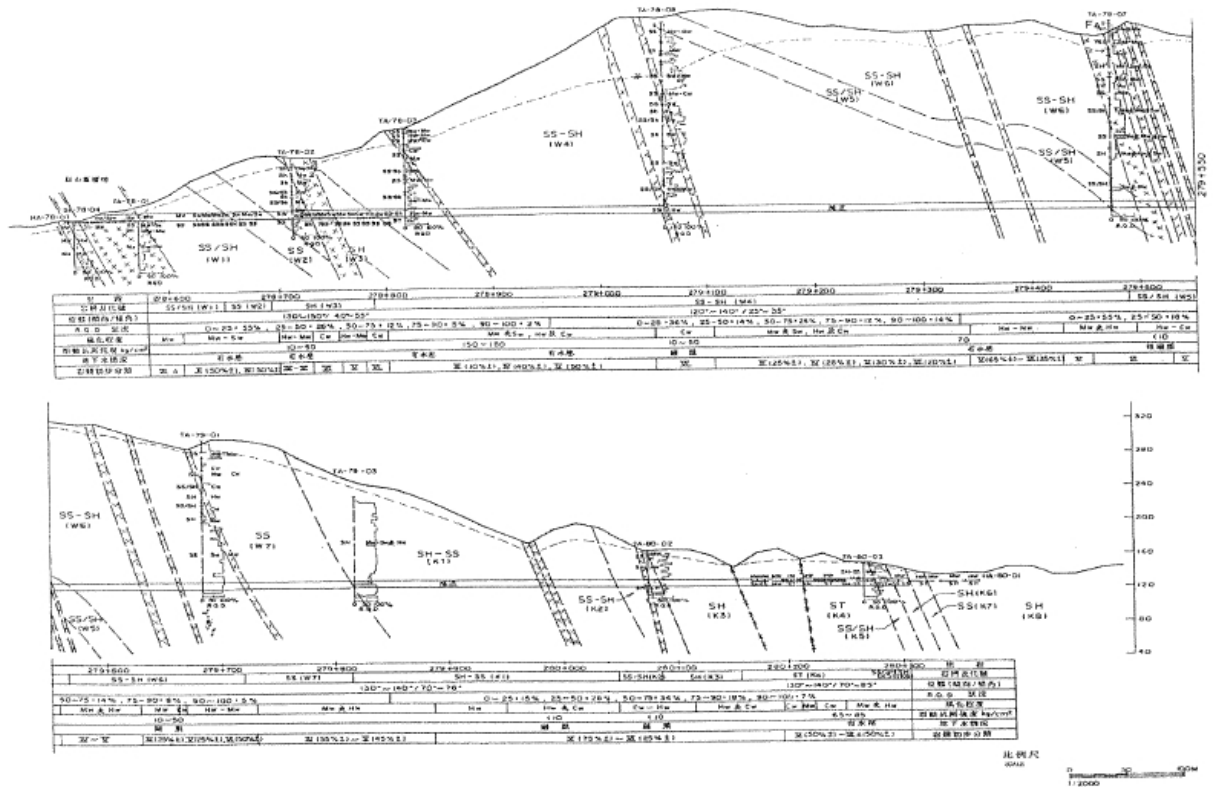


圖 5.1-5 二高中察隧道地質剖面圖(王文通，1999)

##### B. 岩體分類

本隧道岩體分類係考慮定量之分類法，並輔以岩體地質特性之定性分類法。定量之岩體分類法，以南非 CSIR 之 RMR 法及挪威 NGI 之 Q 法為代表。隧道岩

體地質特性之定性分類法，係依據地層岩性、地質構造、風化程度及地下水活動等綜合因素分析、研判而定。本隧道無 I、II 類，僅有 III 至 VI 類。岩體分類如表 5.1-2 所示。

表 5.1-2 二高中寮隧道岩體分類表(王文通，1999)

類級	岩性	地質構造	風化程度	地下水情況	岩體力學狀態	施工方法及加固措施	註明
I 類	中厚層至厚層砂岩，單層厚度 60cm 以上，岩體完整、岩質甚堅硬。	構造簡單，裂隙極少，間距超過 1m，裂隙面閉合、堅固緊鎖、乾淨及不透水。	新鮮，局部輕度風化。	無地下水。	呈彈性狀態，岩體之自持力很強，自持時間很長，開挖面及隧道周圍岩體皆很穩定。	上半斷面輪進長度 4m，因開炸而開裂之岩塊須敲掉，隧道頂拱需打岩栓，噴凝土±50mm 厚。	相當於 RMR 之 I 類，81~100 分。
II 類	中厚層至厚層砂岩，單層厚度 20~60cm，夾薄層砂岩，岩體完整，岩質堅硬至甚堅硬。	構造簡單，裂隙稀少，間距約 0.5~1m，裂隙面閉合至 <1mm 寬、堅固、緊鎖、乾淨及不透水。	輕度風化至新鮮，新鮮岩體為主。	無地下水，或局部地段呈小面積濕潤。	呈彈性狀態，岩體之自持力強至很強，自持時間長，開挖面及隧道周圍岩體皆穩定至甚穩定。	上半斷面輪進長度約≤3.5m，開裂之岩塊須敲掉，隧道頂拱及兩側壁需打岩栓，噴凝土 100mm 厚。	相當於 RMR 之 II 類，61~80 分。
III 類	厚層砂岩為主，夾薄層砂岩，岩質堅硬至極堅硬，局部中度堅硬。	構造簡單，裂隙中等發育程度，間距約 0.3~0.6m，無裂隙密集帶，岩體完整，裂隙面窄至甚窄，寬度 <2mm，通常為閉合裂隙，微弱至極微弱透水。	中度至輕度風化。	局部地段濕潤至滴水，大部份地段乾燥，不透水。	基本上處於彈性狀態，局部呈塑性狀態，岩體之自持力較強，自持時間較長。裂隙較密之局部地段，有應力集中現象。	上半斷面輪進長度≤2.5m，隧道頂拱、兩側壁以 H125×125 鋼支撐，岩栓及 150mm 厚噴凝土加固，視需要設置先撐鋼管。	相當於 RMR 之 III 類，評分 41~60。
IV 類	薄層砂岩、頁岩、砂頁岩互層及輕度破碎之厚層砂岩。	構造裂隙比較發達，裂隙稍微密集，裂隙之間距約 0.3m 左右，裂隙面比較窄、繃染，偶有軟質礦物薄膜，或受小斷層影響之地帶，岩層輕微褶皺、稍微破碎。裂隙面、層面呈弱至輕度透水。	中度風化，局部輕度風化，局部裂隙面為高度至中度風化。	隧道開挖面潮濕、滴水、滲水等。	以彈性狀態為主，塑性狀態之範圍稍微擴大，應力集中地段稍微擴大。岩體之自持力較差，自持之時間較短。	上半斷面輪進長度縮短至 1.5~2.0m，隧道頂拱、兩側壁以 H125×125 鋼支撐，岩栓及 250mm 厚噴凝土加固，應考慮設置先撐鋼管，支撐及加固時間須迅速，不宜延誤。	相當於 RMR 之 IV 類，評分 21~40。

表 5.1-2 二高中寮隧道岩體分類表(王文通，1999)(續)

類級	岩性	地質構造	風化程度	地下水情況	岩體力學狀態	施工方法及加固措施	註明
V 類	砂岩、頁岩及各種砂頁岩互層等之岩塊或中小型斷層之破碎及風化帶中之岩體。	中小型斷層擠壓破碎帶、岩體褶皺破碎或構造裂隙密集帶，破碎面及裂隙面間距約 0.06~0.3m，其中充填風化土及軟弱礦物等。裂隙面及層面呈輕度至中度透水。	風化裂隙及風化層面皆非常發達，極風化、高度風化至中度風化參雜交替。	隧道開挖面連續滴水、滲水或湧水。	以塑性狀態為主及部份彈性狀態。頂拱、兩側壁及前方開挖面岩體過壓狀況比較嚴重。岩體之自持力很差，自持之時間很短。	上半斷面輪進長度約為 1.0~1.5m，隧道開挖之前使用先撐鋼管，開挖時須立即支撐，隧道頂拱及兩側壁須以 H150×150 鋼支撐、岩栓及 300mm 厚噴凝土加固，工作面亦須臨時支撐及加固。有時需採取特殊開挖型式、開挖方法及加固措施，包括底部仰拱噴凝土。	相當於 RMR 之 V 類中較好部份，評分≤20。
VI 類	砂岩、頁岩及各種砂頁岩互層為主，中斷層破碎風化帶岩體。	大及中斷層擠壓破碎帶，寬度相當大，佔據隧道全部斷面或大部份面積，斷層破碎及風化帶走向與隧道平行或小角度斜交，構造裂隙極發達、極密集及岩體極破碎，擠壓破碎帶參雜著斷層角礫岩、糜棱岩、斷層泥、破碎之石英脈、方解石脈、綠泥石、高嶺土及蒙脫土等軟弱礦物等。	風化裂隙及風化層面皆非常發達，極風化至高度風化。	隧道開挖面連續滴水、滲水、中度至大量滲水或流水等。	處於塑性狀態中，局部為彈性狀態。岩體之自持力極低，自持之時間極短。隧道周圍岩體及前方開挖面等過壓狀況相當嚴重。	一般不宜用炸藥開炸，使用鑿岩機掘削或局部地段用小炸藥量開炸。上半斷面輪進長度縮短至最小距離，約 0.8~1m 以內。隧道頂拱及兩側壁以重型鋼支撐 H150×150、岩栓及 300mm 厚之噴凝土支撐及加固之外，還需以先撐鋼管、鋼護板、先撐固結灌漿及先撐排水孔等加固前方開挖面、頂拱及側壁之岩體。環狀開挖頂拱，預留開挖面上之土心。開挖面立即以鋼絲網噴凝土加固，防止破碎、風化及軟弱岩體因承受高水頭壓力而崩塌或抽心等事故。洞口段需預除前方開挖面及兩側斜坡之不穩定岩塊，整治斜坡及施築假隧道。	相當於 RMR 之 V 類中最差部份，相當於其評分 <10 部份。
類	屬於該 VI 類之岩體，包括隧道洞口段及覆蓋層相當薄之處，岩體破碎、裂隙及風化層面很發達，裂隙及層面之透水性大，地下水之滲流量取決於補給源區之水量及水頭。						

### C. 隧道設計

1. 隧道標準斷面：隧道斷面形狀及大小取決於地質狀況、車道淨空需求和新奧工法之基本理念。本隧道以 3 車道為設計標準，每車道寬度 3.65 公尺，外加兩側 0.3 公尺路肩，路面總寬度為 11.55 公尺。隧道襯砌有兩層，即外襯砌包括噴凝土、鋼支保及岩栓等，內襯砌為混凝土或鋼筋混凝土。於兩層襯砌間

鋪設防水層，以防止滲水進入隧道內部。

2. 隧道開挖及支撐系統：隧道開挖斷面積大小由所需淨空斷面及地質狀況而定，開挖形狀則依新奧工法原理及地質情況研擬，對於地質狀況較差岩類(IV、V、VI 及 VIa 洞口段)需仰拱閉合。本工程隧道開挖分為上半開挖、台階和仰拱開挖三部分。本隧道支撐系統包括噴凝土、鋼線網、鋼支保、岩栓及支撐鋼管等，如圖 5.1-6 所示。

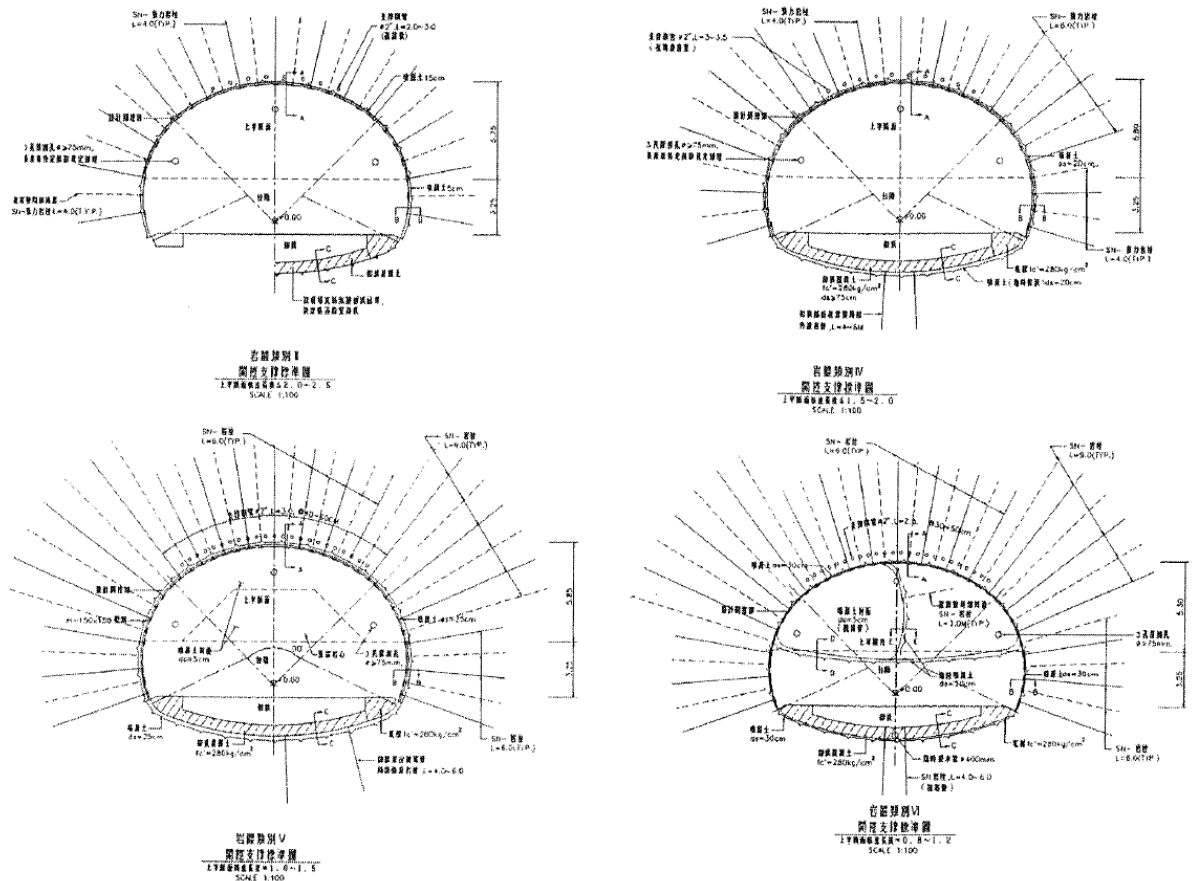


圖 5.1-6 二高中寮隧道支撐設計(王文通，1999)

3. 混凝土內襯砌：凝土襯砌之目的有：(a)增加安全係數；(b)支撐防水膜，承載滲水壓力；(c)減低通風之摩擦損失；(d)便利懸吊附屬設施。本隧道混凝土內襯砌為 40 公分之無筋混凝土，其厚度於側壁基腳部分因幾何斷面而略為加厚。混凝土內襯砌於支撐系統裝設完成後及岩體應力重新調整達到新的平衡後即可澆置。採用依隧道斷面設計組立而成之活動式鋼模澆置混凝土。
4. 隧道連接橫坑及設施凹槽：速公路隧道通常應設有連接橫坑、避車彎及設施凹槽。連接橫坑包括人行及車行橫坑二種，設施凹槽可分為緊急電話凹槽、消防栓槽、交通監控凹槽、透水管維護凹槽及電氣凹槽等五種。

5. 隧道防水及排水系統：察隧道之排水系統包括橫向集水及縱向排水。至於洞口端之地面雨水，隧道內洗滌水及車輛洩流污水或消防用水之排流則依道路縱向坡度、路面超高及地勢導流至隧道側溝，再流經隧道口之油水分離系統後排入邊溝。

#### D. 隧道結構分析

中察隧道設計時，除依據隧道沿線工程地質情況，將隧道周圍岩盤分為 III 至 VI 類。各類岩體參照以往經驗，初步選擇支撐系統及內襯砌混凝土。然後再用有限元素法分析支撐系統及內襯砌之應力及變形量，檢核其安全性。

1. 外襯砌(初期支撐)：隧道外襯砌結構分析，採用有限元素法程式 MISES III，分析各開挖階段所引起之地層應力—應變分佈、影響範圍以及隧道之變形。分析時尋找隧道沿線地質條件最差，覆土厚度較大之斷面為代表，並選擇 IV、V、VI 類岩體加以分析。而岩體材料之參數變異範圍相當大，僅能以部分岩石試驗值依經驗估計岩體參數，本隧道 IV 類岩體及噴凝土、內襯砌混凝土參數如表 5.1-3 所示。

表 5.1-3 二高中察隧道第 IV 類岩體參數(王文通，1999)

岩層／襯砌描述	彈性模數 E (MN/m <sup>2</sup> )	泊生比 $\nu$	凝聚力 C (MN/m <sup>2</sup> )	摩擦角 $\phi$ (deg)	靜止土 壓力係數 K <sub>0</sub>	單位重 $\gamma$ (MN/m <sup>3</sup> )
土壤	50.0	0.40	0.01	20	0.67	0.020
風化深灰色粉砂岩與 破碎帶互層	2000	0.275	0.25	27.5	0.38	0.024
灰綠色粉砂岩	2750	0.25	0.50	37.5	0.34	0.025
粉砂岩與砂頁岩互層	2250	0.275	0.30	27.5	0.38	0.024
灰綠色粉砂岩	2750	0.275	0.50	37.5	0.38	0.025
噴凝土	5000	0.17	—	—	—	—
內襯砌	8000	0.17	—	—	—	—

中察隧道外襯砌有限元素法分析結果，包括隧道內變形量、岩栓應力、噴凝土軸力與安全係數，以第 IV 類岩體及外襯砌為例，岩體開挖後之變形量在 0.58~3.28 公分，岩栓應力最大為 287 MPa，比岩栓屈服應力 420 MPa 小，噴凝土最大軸力 3,154 kN，在 25 公分厚之噴凝土其安全係數為 1.70，噴凝土彎曲應力相當小而可忽略。

2. 內襯混凝土：層中隧道結構由岩體和襯砌組成聯合結構。內襯混凝土之分析

方法可有二種，即二維樑－彈簧模式(Two Dimensional Beam - Spring Model)及有限元素法。中寮隧道採用有限元素法，以 MISES III 程式分析。

內襯混凝土之材料參數，彈性模數  $E$  為 8,000 MPa，包生比  $\nu$  為 0.17，厚度 40 公分。中寮隧道分析內襯混凝土時保守假定長期隧道周圍岩體之荷重由內襯砌承受，不考慮岩栓和噴凝土之貢獻。內襯砌以二維平面應變元素模擬。當混凝土強度  $f_c'$  為  $210 \text{ kg/cm}^2$  時，允許拉應力為  $2\sqrt{f_c'}$ ，即  $28.98 \text{ kg/cm}^2$ ，允許壓應力為  $0.45f_c'$ ，即  $94.5 \text{ kg/cm}^2$ ，內襯混凝土厚 40 公分，其產生拉應力之最小偏心距為 6.7 公分。故第 IV、V 及 VI 類岩體之隧道內襯混凝土不需配筋。

## 5.2 隧道設計參數

隧道或岩盤設計參數之選定並非直接套用室內力學試驗之結果即可，因室內試驗係求得完整岩石試體之力學性質，現地岩體則尚需考慮岩石風化、地質構造特性及組數、夾泥、規模效應、以及取樣之代表性等因素，因此實際設計所使用之參數，須依據室內試驗之結果數據，並同時考量前述各項因素而加以估算。

### 5.2.1 隧道設計參數評估

目前隧道工程設計或分析之參數，均利用調查階段鑽探所取得岩心，進行岩石室內物理及勵學性試驗所得參數，依岩體分類並配合 Hoek & Brown 之破壞準則(failure criterion)，及其發展之岩體強度參數計算軟體 RocLab 進行評估。該軟體藉由輸入岩體之完整岩心單壓強度、GSI (geological strength index)、 $m_i$  (material constant)、 $D$  (disturbance factor)、 $MR$  (modulus ratio)等值，計算岩盤(岩體)之力學強度參數值。各輸入參數選取說明如下：

單壓強度：依據不同岩性之岩心試體試驗平均值進行選取，若無試驗資料時可參考表 5.2-1 選用之。

GSI：依據地質描述(表 5.2-2)選取適當之數值。

$m_i$ ：以表 5.2-3 之岩性分類與建議值選取。

$D$ ：依開挖時可能造成擾動之程度由弱至強給與予 0~1 間之數值，參考表 5.2-4。

$MR$ ：參考表 5.2-5 之岩性分類與建議值選取。

表 5.2-1 岩心單壓強度評估表(Hoek, 2006)

Grade*	Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely Strong	> 250	>10	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100 - 250	4 - 10	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff
R4	Strong	50 - 100	2 - 4	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale
R3	Medium strong	25 - 50	1 - 2	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone
R2	Weak	5 - 25	**	Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, rocksalt, potash
R1	Very weak	1 - 5	**	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife	Highly weathered or altered rock
R0	Extremely weak	0.25 - 1	**	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

\* Grade according to Brown (1981).

\*\* Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield highly ambiguous results.

表 5.2-2 地質強度指標(GSI)評估表(Hoek and Marinos, 2000)(1/2)









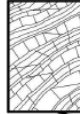

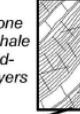

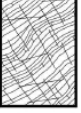

<p><b>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</b></p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		<p><b>SURFACE CONDITIONS</b></p> <p>VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces</p> <p>GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p> <p>FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p> <p>POOR Slack-sided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p> <p>VERY POOR Slack-sided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p>				
<p><b>STRUCTURE</b></p>		<p><b>DECREASING SURFACE QUALITY</b> →</p>				
 <p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90	80	70	60	N/A	
 <p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	80	70	60	50	40	
 <p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>	70	60	50	40	30	
 <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>	60	50	40	30	20	
 <p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>	50	40	30	20	10	
 <p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>	N/A	N/A	30	20	10	



表 5.2-2 地質強度指標(GSI)評估表(Marinos and Hoek, 2000)(2/2)

GSI FOR HETEROGENEOUS ROCK MASSES SUCH AS FLYSCH (Marinos.P and Hoek. E, 2000) From a description of the lithology, structure and surface conditions (particularly of the bedding planes), choose a box in the chart. Locate the position in the box that corresponds to the condition of the discontinuities and estimate the average value of GSI from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than giving GSI = 35. Note that the Hoek-Brown criterion does not apply to structurally controlled failures. Where unfavourably oriented continuous weak planar discontinuities are present, these will dominate the behaviour of the rock mass. The strength of some rock masses is reduced by the presence of groundwater and this can be allowed for by a slight shift to the right in the columns for fair, poor and very poor conditions. Water pressure does not change the value of GSI and it is dealt with by using effective stress analysis.		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes)		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes)		
COMPOSITION AND STRUCTURE		VERY GOOD - Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD - Rough, slightly weathered surfaces	FAIR - Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR - Very smooth, occasionally slickensided surfaces with compact coatings or fillings with angular fragments	VERY POOR - Very smooth slickensided or highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
	<b>A. Thick bedded, very blocky sandstone</b> The effect of pelitic coatings on the bedding planes is minimized by the confinement of the rock mass. In shallow tunnels or slopes these bedding planes may cause structurally controlled instability.	70	60	A		
	<b>B. Sandstone with thin inter-layers of siltstone</b>		50	B		
	<b>C. Sandstone and siltstone in similar amounts</b>			C		
	<b>D. Siltstone or silty shale with sandstone layers</b>			D		
	<b>E. Weak siltstone or clayey shale with sandstone layers</b>			E		
C, D, E and G - may be more or less folded than illustrated but this does not change the strength. Tectonic deformation, faulting and loss of continuity moves these categories to F and H.						
	<b>F. Tectonically deformed, intensively folded/faulted, sheared clayey shale or siltstone with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure</b>				30	
	<b>G. Undisturbed silty or clayey shale with or without a few very thin sandstone layers</b>					20
	<b>H. Tectonically deformed silty or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces.</b>					10

→ : Means deformation after tectonic disturbance

表 5.2-3 岩石材料參數  $m_i$  評估表(Hoek, 2006)

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates* (21 ± 3)	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2	Claystones 4 ± 2
			Breccias (19 ± 5)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
		Organic			Chalk 7 ± 2	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4) Metasandstone (19 ± 3)	Quartzites 20 ± 3	
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites 26 ± 6		
	Foliated**		Gneiss 28 ± 5	Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3	Diorite 25 ± 5		
		Dark	Gabbro 27 ± 3	Dolerite (16 ± 5)		
	Hypabyssal		Porphyries (20 ± 5)		Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5) Andesite 25 ± 5	Dacite (25 ± 3) Basalt (25 ± 5)	Obsidian (19 ± 3)
		Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)	

\* Conglomerates and breccias may present a wide range of  $m_i$  values depending on the nature of the cementing material and the degree of cementation, so they may range from values similar to sandstone to values used for fine grained sediments.

\*\*These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of  $m_i$  will be significantly different if failure occurs along a weakness plane.

表 5.2-4 開挖擾動係數 D 評估表(Hoek et al., 2002)




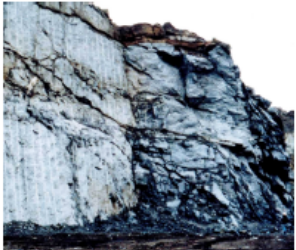

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	D = 0
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass.  Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	D = 0  D = 0.5 No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	D = 0.8
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	D = 0.7 Good blasting  D = 1.0 Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal.  In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	D = 1.0 Production blasting  D = 0.7 Mechanical excavation

表 5.2-5 模數比 MR 評估表(Hoek & Diederichs, 2006)

	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates 300-400	Sandstones 200-350	Siltstones 350-400	Claystones 200-300
			Breccias 230-350		Greywackes 350	Shales 150-250 * Marls 150-200
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone 400-600	Sparitic Limestones 600-800	Micritic Limestones 800-1000	Dolomites 350-500
		Evaporites		Gypsum (350)**	Anhydrite (350)**	
Organic					Chalk 1000+	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 700-1000	Hornfels 400-700 Metasandstone 200-300	Quartzites 300-450	
	Slightly foliated		Migmatite 350-400	Amphibolites 400-500	Gneiss 300-750*	
	Foliated*			Schists 250-1100*	Phyllites /Mica Schist 300-800*	Slates 400-600*
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite+ 300-550	Diorite+ 300-350 Granodiorite+ 400-450		
		Dark	Gabbro 400-500 Norite 350-400	Dolerite 300-400		
	Hypabyssal		Porphyries (400)**		Diabase 300-350	Peridotite 250-300
	Volcanic	Lava		Rhyolite 300-500 Andesite 300-500	Dacite 350-450 Basalt 250-450	
		Pyroclastic	Agglomerate 400-600	Volcanic breccia (500)**	Tuff 200-400	

\* Highly anisotropic rocks: the value of MR will be significantly different if normal strain and/or loading occurs parallel (high MR) or perpendicular (low MR) to a weakness plane. Uniaxial test loading direction should be equivalent to field application.

+ Felsic Granitoids: Coarse Grained or Altered (high MR), fined grained (low MR).

\*\* No data available, estimated on the basis of geological logic.

### 5.2.2 案例說明－員山子分洪隧道

員山子分洪隧道分析、設計所需之各項力學與變形性參數，係依上述方法將各類岩體之岩材參數藉由 RocLab 軟體轉換為岩體參數如表 5.2-6 所示。經評估 RocLab 軟體計算結果，並綜合既往相關工程之經驗，隧道沿線各類岩體之設計

參數研選結果如表 5.2-7 所示，其中各岩類單位重係以試驗之平均值為依據；包生比則以靜彈性與動彈性試驗值為上限值，並參考以往工程設計經驗所訂定。在 RocLab 軟體計算結果中第 V 類之較軟弱岩盤之計算結果與以往相關工程經驗值差異較大，經評估後選定為表中之建議值。

表 5.2-6 員山子分洪隧道各類岩體 RocLab 輸入值(水利署，2003)

支撐等級 參數	第 II 類	第 III 類	第 IV 類	第 V 類
RMR 值	80 - 61	60 - 41	40 - 21	≤20
覆蓋深度(m)	100	110	140	90
地質條件	砂岩為主，節理間距較大，乾燥或輕微潮濕	砂岩及頁岩，節理較密，局部有滲水現象	頁岩及砂頁岩互層，節理發達或滲水量較大	斷層帶或煤層岩體破碎；湧水
單壓強度(Mpa)	30	25	20	10
GSI	55	41	30	12
mi	11	10	10	8
D	0.1	0.1	0.2	0.2

表 5.2-7 員山子分洪隧道各類岩體參數評估表(水利署，2003)

岩體類別 設計參數	第 II 類		第 III 類		第 IV 類		第 V 類	
	RocLab 計算值	建議值	RocLab 計算值	建議值	RocLab 計算值	建議值	RocLab 計算值	建議值
RMR 值	80 - 61		60 - 41		40 - 21		≤20	
單位重(KN/m <sup>3</sup> )	24		24		26		26	
凝聚力 C(Mpa)	1.27	1.27	0.98	0.98	0.70	0.70	0.088	0.45
內摩擦角φ(°)	35.34	35.34	27.75	27.75	21.35	21.35	19.54	19.00
彈性模數(Mpa)	6938.80	7000	2829.40	2500	1272.79	1000	319	500
包生比ν	—	0.22	—	0.26	—	0.28	—	0.3

### 5.3 隧道設計穩定分析技術

隨著電腦科技之快速發展，利用電腦從事相關分析之工程案例已愈來愈多。隧道工程中隧道斷面大小、形狀等條件之變化及交叉段複雜之三維問題，已非從經驗設計法及觀察設計法中即可獲得足夠之參考資料，此時應採用分析設計法輔助支撐設計。惟採用本法時應瞭解大地參數之變異性大，設計參數之決定不易，且岩體破壞機制相當複雜等特性，審慎選擇分析模式與設計參數，以求安全適切之支撐設計。

### 5.3.1 分析設計法種類

分析設計法依其性質約可分為 3 大類：

- A. 解析解法(analytical analysis)，又稱公式解法，如岩盤—支撐互制曲線法，適用於軸對稱、均質材料、圓形隧道之情況，圖 5.3-1 為示意圖；圖 5.3-2 則為其設計範例。
- B. 岩盤載重法(rock load analysis)，如 Terzaghi 之岩盤載重法(圖 5.3-3 及表 5.3-1)。
- C. 數值分析法(numerical analysis)，本法需要用套裝電腦程式分析，又可分為下列數種：
  - 1. 連續體分析法：(a)有限元素法(FEM)；(b)邊界元素法(BEM)；(c)有限差分法(FDM)。
  - 2. 不連續體分析法：(a)離散元素法(DEM)；(b)樺塊理論法(block theory)；(c)DDA (discontinuous deformation analysis)各種方法之適用範圍見圖 5.3-4。

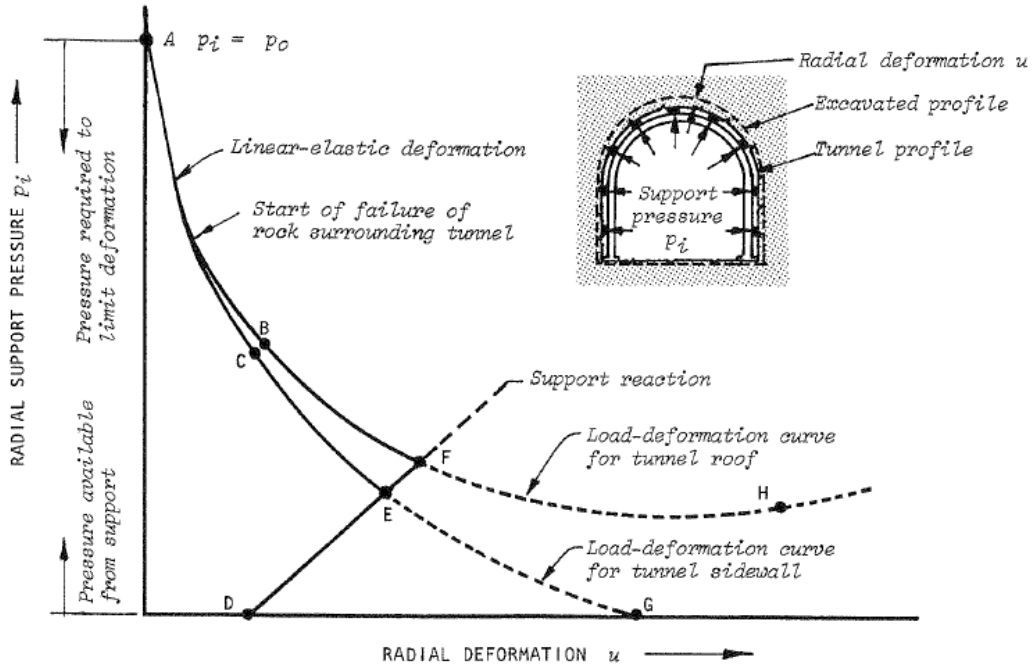
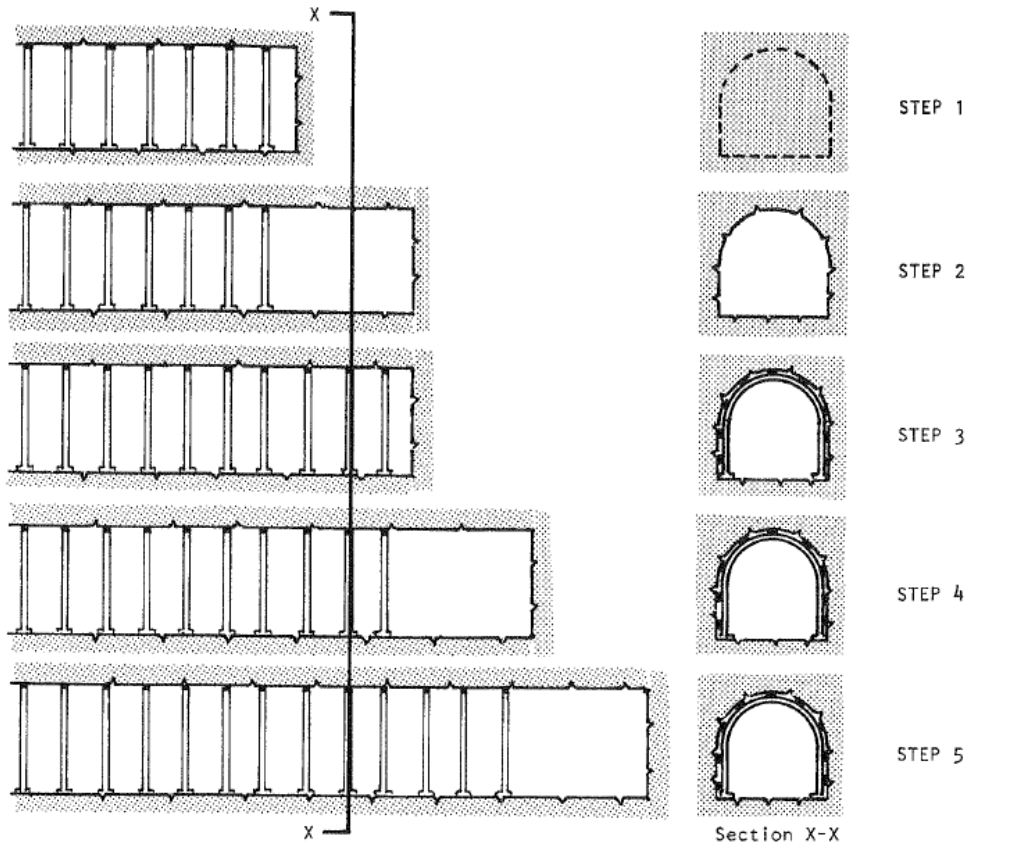
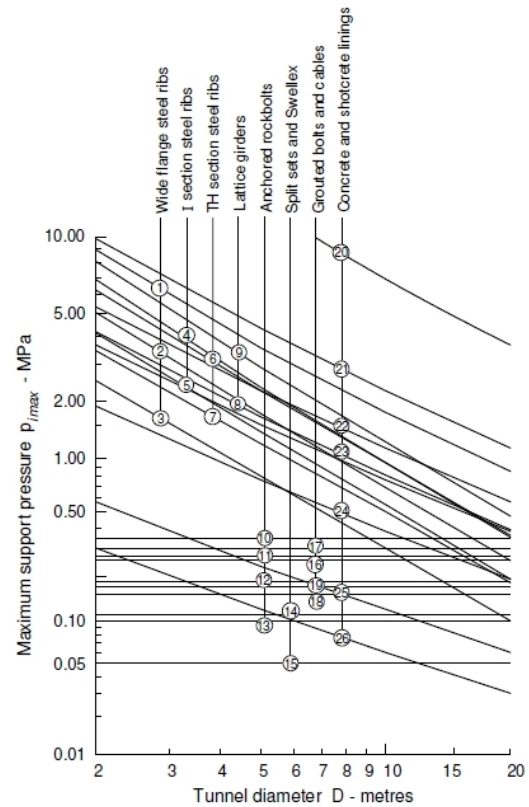


圖 5.3-1 岩盤—支撐互制曲線法(Daeman, 1977)

Support type	Flange width - mm	Section depth - mm	Weight - kg/m	Curve number	Maximum support pressure $p_{i\max}$ (MPa) for a tunnel of diameter $D$ (metres) and a set spacing of $s$ (metres)
Wide flange rib	305	305	97	1	$p_{i\max} = 19.9D^{-1.23}/s$
	203	203	67	2	$p_{i\max} = 13.2D^{-1.3}/s$
	150	150	32	3	$p_{i\max} = 7.0D^{-1.4}/s$
I section rib	203	254	82	4	$p_{i\max} = 17.6D^{-1.29}/s$
	152	203	52	5	$p_{i\max} = 11.1D^{-1.33}/s$
TH section rib	171	138	38	6	$p_{i\max} = 15.5D^{-1.24}/s$
	124	108	21	7	$p_{i\max} = 8.8D^{-1.27}/s$
3 bar lattice girder	220	190	19	8	$p_{i\max} = 8.6D^{-1.03}/s$
	140	130	18		
4 bar lattice girder	220	280	29	9	$p_{i\max} = 18.3D^{-1.02}/s$
	140	200	26		
Rockbolts or cables spaced on a grid of $s \times s$ metres	34 mm rockbolt			10	$p_{i\max} = 0.354/s^2$
	25 mm rockbolt			11	$p_{i\max} = 0.267/s^2$
	19 mm rockbolt			12	$p_{i\max} = 0.184/s^2$
	17 mm rockbolt			13	$p_{i\max} = 0.10/s^2$
	SS39 Split set			14	$p_{i\max} = 0.05/s^2$
	EXX Swellex			15	$p_{i\max} = 0.11/s^2$
	20mm rebar			16	$p_{i\max} = 0.17/s^2$
	22mm fibreglass			17	$p_{i\max} = 0.26/s^2$
	Plain cable			18	$p_{i\max} = 0.15/s^2$
	Birdcage cable			19	$p_{i\max} = 0.30/s^2$

Support type	Thickness - mm	Age - days	UCS - MPa	Curve number	Maximum support pressure $p_{i\max}$ (MPa) for a tunnel of diameter $D$ (metres)
Concrete or shotcrete lining	1m	28	35	20	$p_{i\max} = 57.8D^{-0.92}$
	300	28	35	21	$p_{i\max} = 19.1D^{-0.92}$
	150	28	35	22	$p_{i\max} = 10.6D^{-0.97}$
	100	28	35	23	$p_{i\max} = 7.3D^{-0.98}$
	50	28	35	24	$p_{i\max} = 3.8D^{-0.99}$
	50	3	11	25	$p_{i\max} = 1.1D^{-0.97}$
	50	0.5	6	26	$p_{i\max} = 0.6D^{-1.0}$



Approximate maximum capacities for different support systems installed in circular tunnels. Note that steel sets and rockbolts are all spaced at 1 m.

圖 5.3-2 岩盤—支撐互制曲線法設計範例(Hoek, 1998)



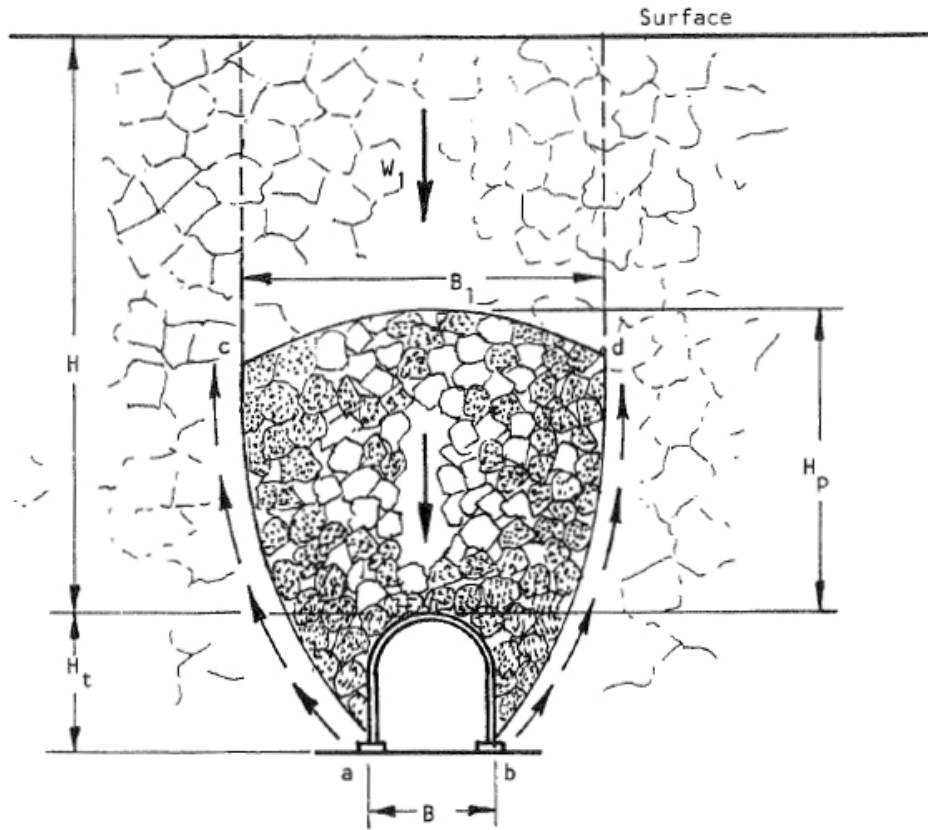


圖 5.3-3 Terzaghi 之隧道荷重示意圖(Terzaghi, 1946)

表 5.3-1 隧道深度大於  $1.5(B+H_t)$  情形支撐上方岩盤載重  $H_p$ (Terzaghi, 1946)

岩盤狀況	岩盤載重 $H_p$ (呎)	附註
1.硬與完整	0	如發生剝落或爆脫，僅需輕度襯砌
2.硬層狀或片狀 <sup>2</sup>	0 至 $0.5B$	輕度支撐，主要為防護剝落
3.渾厚、中度節理	0 至 $0.25B$	不同位置之荷重可能急遽變化
4.中度塊狀與夾薄層	$0.25 B$ 至 $0.35(B+H_t)$	無側壓
5.高度塊狀與夾薄層	$(0.35$ 至 $1.10)(B+H_t)$	少許或無側壓
6.完全破碎但化學上完整	$1.10(B+H_t)$	有相當之側壓，滲水對隧道底部之軟化作用導致鋼支撐下部需要連續支撐或採用圓形支撐
7.擠壓岩盤，中度深度	$(1.10$ 至 $2.10)(B+H_t)$	高度側壓，需要仰拱支撐。建議採圓形支撐
8.擠壓岩盤、大深度	$(2.10$ 至 $4.50)(B+H_t)$	
9.膨脹岩盤	至 250 呎，與 $(B+H_t)$ 值無關	需要圓形支撐、極端情形使用可縮短之支撐

註：1. 隧道拱頂在地下水位以下之載重。如拱頂永遠在地下水位以上，則岩盤狀況 4 至 6 所給之數字可減少 50%。

2. 部份常見之岩層常夾有頁岩。未風化之真頁岩不比其他層狀岩層差，惟「頁岩」一詞常指不具岩石性質之夯實緊密之粘土沉積物，此類所謂「頁岩」在隧道內行為有如擠壓甚或膨脹岩層。

如岩層中含一系列之水平層狀砂岩或石灰岩與未成岩頁岩，則隧道開挖常使兩側岩層逐漸受壓而使拱頂下陷。再者，由於所謂之「頁岩」與岩層界面上抗滑阻力較低，有大量減少拱部岩層架橋能力之趨勢，因此在此種岩層中，拱頂壓力或許與高度塊狀及夾薄層之岩盤相同。

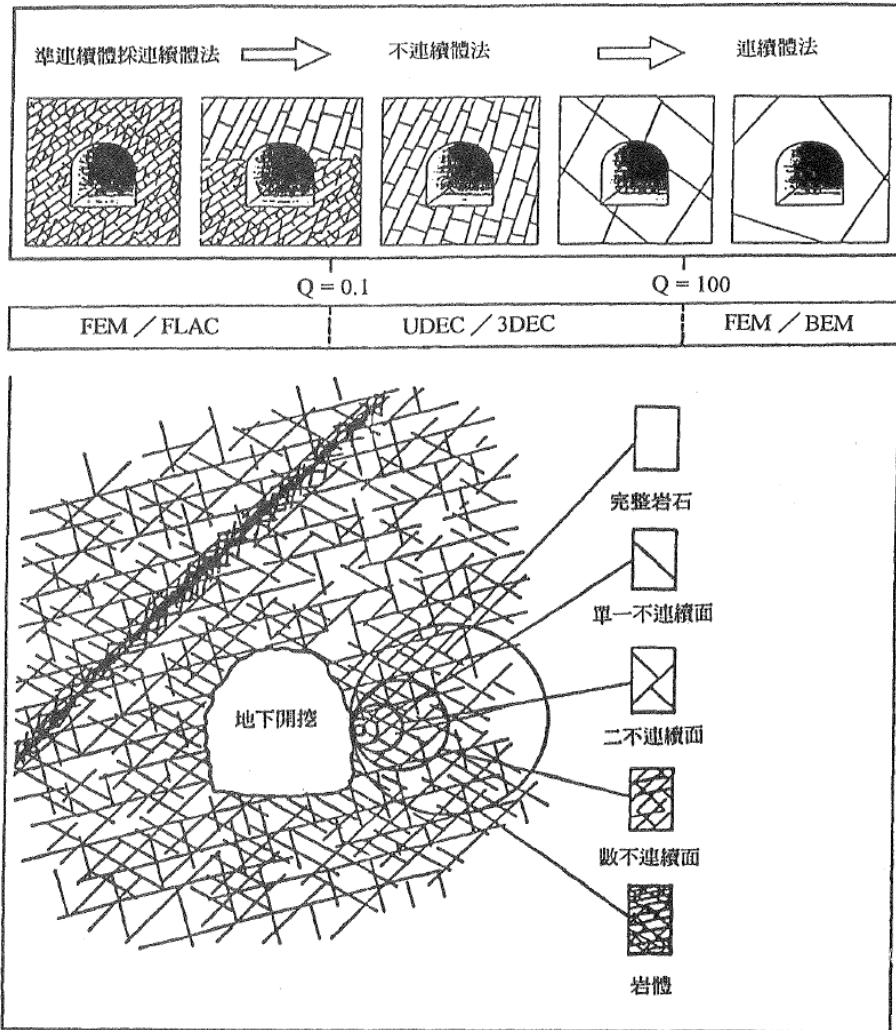


圖 5.3-4 Q 值與數值模擬分析法之關係(Barton, 1996)

### 5.3.2 案例說明－曾文越域引水隧道

曾文水庫越域引水工程計畫之隧道工程開挖方式包括傳統新奧工法(NATM)與全斷面隧道鑽掘工法(TBM)，本小節以西隧道 B 段為例說明新奧工法之設計理念及過程，設計內容包括隧道地質評估、隧道開挖支撐分析以及隧道內襯砌設計，開挖支撐設計乃採用 FLAC 4.0 程式，模擬在各類岩體內開挖隧道的情況。隧道內襯砌之結構行為則採用 SAP 2000 結構分析程式進行分析。

#### A. 新奧工法隧道開挖支撐設計

本區段隧道開挖支撐設計係依隧道沿線鑽探資料和地質特性，將地層按岩體種類、岩性、岩石強度、風化程度、破裂程度、層面間距及地下水狀況予以分類。依此分類首先以經驗法擬定對應之支撐設計，續以調查或推估所得之岩體參數為依據，再應用數值分析方法模擬之，並檢核各種支撐材料受力情形及塑性區大

小，據以修訂經驗法之支撐設計。

本分析採用顯性的有限差分法(美國 ITASCA Consulting Group INC.所發展的 FLAC 4.0 程式)，模擬在各類岩體內開挖隧道的情況。以二維平面應變元素模擬岩體，以梁元素模擬噴凝土與桁型鋼支保，以桿件元素模擬岩栓。同時假設岩體為一均質、等向的材料，其組成模式為完全彈塑性模式，破壞準則採用 Mohr-Coulomb 準則。

1. 岩體材料強度參數：據「西引水隧道 B 段—補充地質調查紀實與評估報告」，將室內試驗所得完整岩石(intact rock)之材料強度參數利用 RocLab 程式轉換為岩體(rock mass)之材料強度參數，可得各類岩體之設計參數，如表 5.3-2 所示。

表 5.3-2 曾文越引西隧道 B 段各類岩體設計參數評估表(水利署南區水資源局, 2008)

設計參數 岩體類別	單壓 強度 (MPa)	GSI	mi	D	$\nu$	岩覆 (m)	凝聚力 (MPa)	內摩 擦角 ( $^{\circ}$ )	彈性 模數 (MPa)
第 A II 類	65	50	20	0.2	0.26	360	1.58	45.52	7256
第 A III 類	45	40	15	0.2	0.26		1.06	36.85	3395
第 A IV 類	30	35	12	0.2	0.26		0.76	30.08	2078
第 A V 類	20	25	10	0.2	0.26		0.48	22.35	954

2. 支撐系統：據上述各岩體類別之特性，擬定個別之支撐系統，如表 5.3-3 所示。

表 5.3-3 曾文越引西隧道 B 段支撐系統表(水利署南區水資源局, 2008)

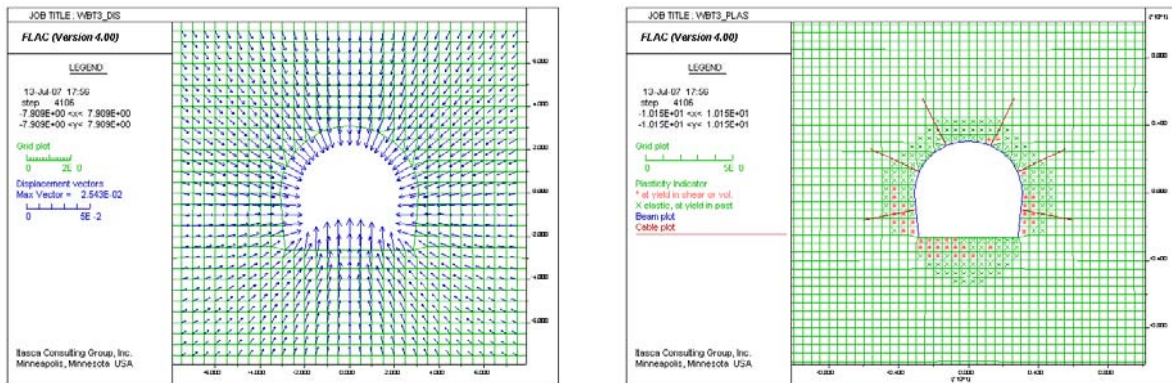
支撐等級	II a	III a	IV a	V a
開挖程序	全斷面開挖	全斷面開挖	全斷面開挖	全斷面開挖或 上下階式開挖 (視需要)
輪進長度	2.0m~2.5m	1.5m~2.0m	1.0m~1.5m	0.8m~1.0m
噴凝土	C&W : 5cm	C&W : 10cm	C&W : 15cm I : 15cm(視需要)	C、W&I : 20cm
鋼絲網	—	C&W : 1-5mmΦ (100mm×100mm)	C&W : 1-5mmΦ I : 1-5mmΦ(視需要) (100mm×100mm)	C、W&I : 2-5mmΦ (100mm×100mm)
岩栓	C&W : 25mmΦ 預力灌漿岩栓 L=3m @2.2m(環 向)×2.0m~2.5m	C&W : 25mmΦ 預力灌漿岩栓 L=3m @2.2m(環 向)×1.5m~2.0m	C&W : 25mmΦ 非預力灌漿岩栓 L=4m @1.7m(環 向)×1.0m~1.5m	C&W : 25mmΦ 非預力灌漿岩栓 L=4m @1.7m(環 向)×0.8m~1.0m
鋼支保	—	C&W : G100 @1.5m~2.0m	C&W : G125 @1.0m~1.5m	C&W : G150 @0.8m~1.0m
開挖面 支撐	—	—	封面噴凝土 5cm (視需要)	封面噴凝土 5cm (視需要)
先撐保護	—	—	C : 32mmΦ 先撐鋼棒 L=3m @0.3~0.5m(環 向)×1.0m~1.5m (視需要)	C : 32mmΦ 先撐鋼棒 L=3m @0.3~0.5m(環 向)×0.8m~1.0m 或 C : 100mmΦ 管幕鋼管 L=12m @0.3~0.5m(環 向)×10m
地盤改良	—	—	—	改良厚度 t ≥ 3m (視需要)

3. 變形量檢核：區段各類岩體開挖、支撐後，頂拱處最大變形量如表 5.3-4 所示，其中第 AIII 類岩體之變位圖請詳見圖 5.3-5(a)。

表 5.3-4 曾文越引西隧道 B 段各類岩體頂拱最大變形量(水利署南區水資源局, 2008)

岩體類別	支撐等級	頂拱最大變形量(cm)	變形寬容量(cm)
A II	II a	0.40	2
A III	III a	1.49	5
A IV	IV a	3.74	10
A V	V a	8.13	15

4. 塑性區檢核：區段第 AIII 類岩體開挖、支撐後之塑性區圖請詳見圖 5.3-5(b)，由塑性區圖可見支撐岩栓均能貫穿塑性區。

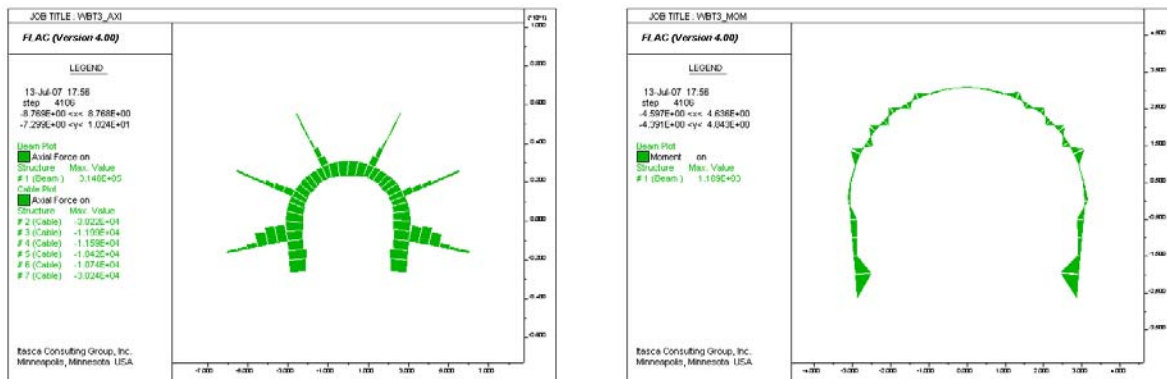


(a) 變位圖

(b) 塑性區圖

圖 5.3-5 曾文越引西隧道 B 段第 AIII 類岩體(第 IIIa 級支撐)變位與塑性區圖(水利署南區水資源局, 2008)

5. 支撐應力檢核：區段第 AIII 類岩體開挖、支撐後之支撐構件所受軸力及彎矩圖請詳見圖 5.3-6。



(a) 軸力圖

(b) 彎矩圖

圖 5.3-6 曾文越引西隧道 B 段第 AIII 類岩體(第 IIIa 級支撐)軸力與彎矩圖(水利署南區水資源局, 2008)

## B. 新奧工法隧道內襯砌設計

本區段，岩覆厚度 200m 至 400m 之間。考慮隧道支撐之長期強度受環境影響而弱化，因此內襯砌必須承受外力，其包括岩覆荷重、襯砌外水壓力、襯砌內水壓力，並究不同之岩體類別所引致之岩壓進行內襯砌之分析及設計。

1. 載重：慮以下載重：

一、呆重(D)：隧道內襯砌之自重。

二、岩覆荷重(L)：考慮隧道支撐長期強度弱化，則內襯砌需承受弱化所轉嫁之岩覆荷重，因此假設內襯砌需承受 25%~40%不等之岩覆荷重。

三、隧道外水壓(Hout)：隧道外水壓採修正係數法評估後，選取該區段最高之內襯砌外水頭進行分析及設計。作用於內襯砌外水壓值，則依深度之不同計算內襯砌上方各點之外水壓值。

四、隧道內水壓(Hin)：依細計準則規定，隧道內水深比不得大於 0.75，作為隧道內水壓值評估之依據。

依統包需求計畫書內之細部設計準則，採用 U.S.D 設計法，載重組合如下：

- (a)  $U=1.4D+1.7L+1.7H(out)$
- (b)  $U=0.9D+1.7L+1.7H(out)$
- (c)  $U=1.4D+1.7H(out)$
- (d)  $U=0.9D+1.7H(out)$
- (e)  $U=1.4D+1.7L+1.7H(out+in)$
- (f)  $U=0.9D+1.7L+1.7H(out+in)$
- (g)  $U=1.4D+1.7H(out+in)$
- (h)  $U=0.9D+1.7H(out+in)$

2. 結構分析模型：道內襯砌之結構行為採用 SAP 2000 結構分析程式進行分析，以桿件元素模擬內襯砌，並採用非線性元素 GAP 模擬內襯砌與岩盤間之互制行為。本段內襯砌採二種型式，一為仰拱中央 30cm 厚，另為仰拱中央 60cm 厚，如圖 5.3-7(a)所示。結構分析模型則採斷面厚度之中心線，並切割成 60 個桿件元素，內襯砌模型如圖 5.3-7(b)所示。

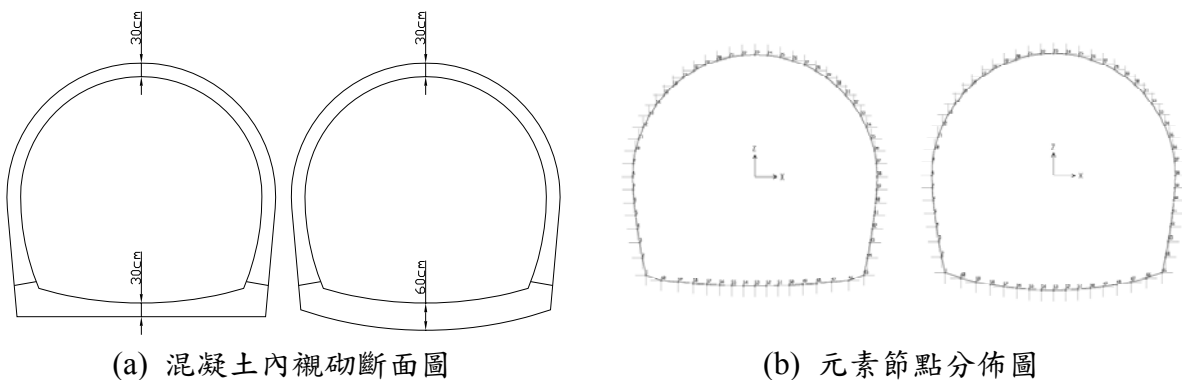


圖 5.3-7 曾文越引西隧道 B 段內襯砌斷面與元素節點分佈圖(水利署南區水資源局, 2008)

3. 節點彈簧勁度：節點彈簧勁度採用給與垂直及水平彈簧之方式，其計算係採用 Vlasov & Leontie 所導出之地盤反力係數  $K_s$  ( $\text{kgf}/\text{m}^2$ )，並乘以節點前後元素之垂直、水平方向投影長度。
4. 外岩壓之推估：道支撐應力之評估將採用收斂束制法之理論分析模式，其主要包括地盤反應曲線(Ground Reaction Curve, GRC)、縱剖面變形曲線(Longitudinal Deformation Curve, LDC)及支撐反應曲線(Support Reaction Curve, SRC)，求得平衡狀態下之支撐應力。
5. 外水壓之推估：用中國學者張有天(2005)建議之公式推估。

$$P_0 = \beta_1 \times \beta_2 \times \beta_3 \times \gamma_w h_0$$

其中  $P_0$ ：襯砌外水壓力

$h_0$ ：地下水頭高

$\gamma_w$ ：水單位重

$\beta_1$ ：初始滲流場(隧道開挖前)隧道軸線處外水壓力修正係數

$\beta_2$ ：此係數反應出圍岩滲透性與襯砌滲透性間之關係， $\beta_2=0\sim 1.0$ 。

$\beta_3$ ：即隧道排水設施修正係數， $\beta_3=0\sim 1.0$ 。

6. 分析結果及內襯砌配筋設計：分析結果分別輸出桿件元素之軸力圖、剪力圖及彎矩圖，以進行內襯砌之剪力鋼筋、撓曲鋼筋、溫度鋼筋等之設計，並計算鋼筋搭接長度。其中撓曲鋼筋設計係將不同之載重組合下之  $N_u$ 、 $M_u$  繪於  $\phi N_d - \phi M_d$  交互影響圖中，以檢核構件是否產生破壞，如圖 5.3-8 所示。圖 5.3-9 則為內襯砌配筋詳圖。

外水頭20m 第III類岩體 各載重組合下之頂拱交互影響圖

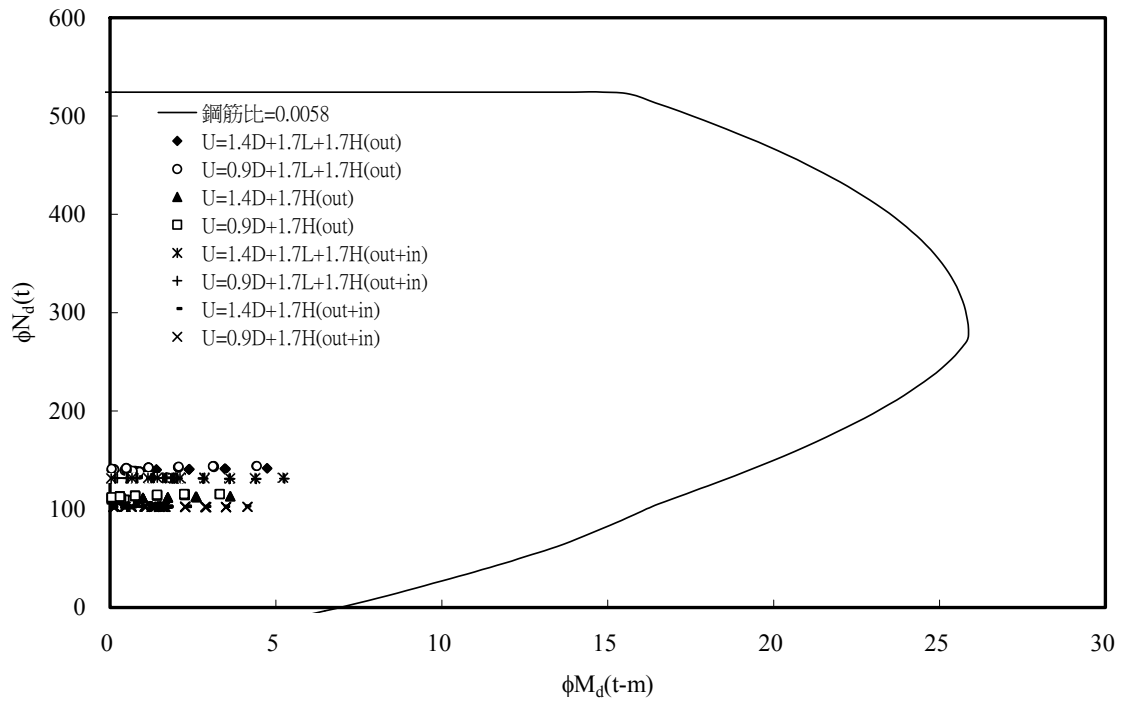
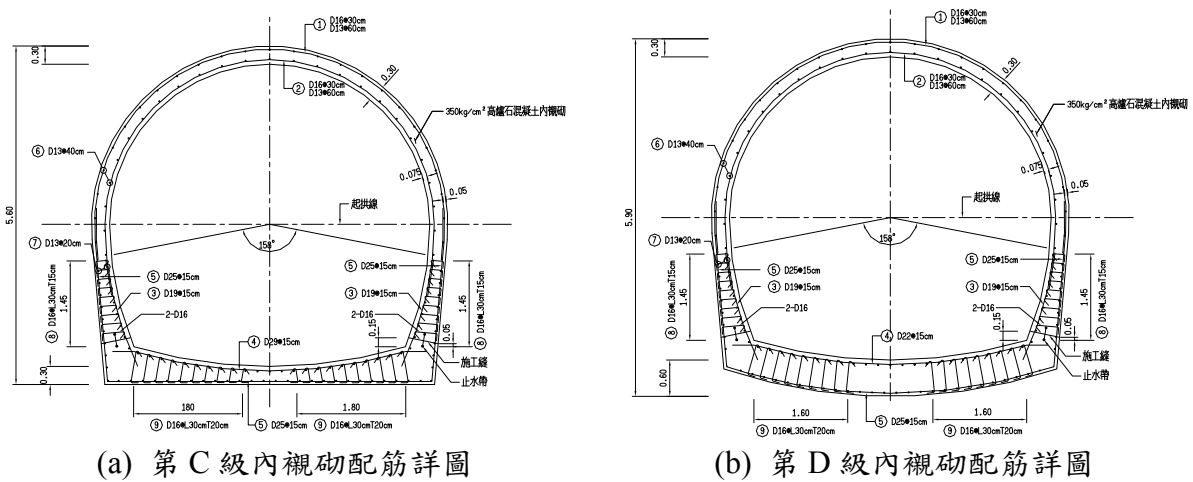


圖 5.3-8 曾文越引西隧道 B 段第 C 級內襯砌頂拱之  $\phi N_d - \phi M_d$  交互影響圖(水利署南區水資源局, 2008)



(a) 第 C 級內襯砌配筋詳圖 (b) 第 D 級內襯砌配筋詳圖  
圖 5.3-9 曾文越引西隧道 B 段內襯砌配筋詳圖(水利署南區水資源局, 2008)



## 第六章 國內既有隧道工程材料之技術規範彙整分析

本章將依坑道處置工程障壁系統設計需求之概念，彙整國內既有隧道工程材料之規範以及隧道工程材料最新的資訊。以下將針對隧道支撐材料與隧道襯砌材料分開探討。

### 6.1 隧道支撐材料

現今之隧道力學認為隧道開挖使岩體應力分佈改變，岩體經適當變形調適新應力場後，自身即有適量之自撐能力，視地質而定，故支撐之設計原則是儘量利用岩體之自撐能力，僅給予輔助性之措施，加強圍岩之強度，使不致引起漸進破壞。由於須容許圍岩有適當之變形，故支撐為半剛性，由噴凝土、岩栓、鋼肋(鋼支保或稱鋼支撐架)等構成。(中國土木工程學會，1999)。故本節將依隧道開挖後之支撐順序，分別探討鋼支撐架、噴凝土、岩栓以及先進支撐等之技術規範如后。

#### 6.1.1 鋼支撐架

根據行政院公共工程委員會最新版施工綱要規範第 02422 章「鋼支撐架」(V5.0)之定義，鋼支撐架係指：「於地下開挖後能立即有效保護，作為開挖初期支撐；而在噴凝土襯砌完成後，鋼支撐架可作為補強支撐系統之一部分，共同承擔外在壓力」。

而其種類可分為(1) H 型鋼支撐架；(2) U 型鋼支撐架；(3) 桁型鋼支撐架(Lattice Girder)等三種，如圖 6.1-1 所示。其中 U 型鋼支撐架，依組裝方式及使用目的不同可分為：(1)可縮型與(2)不可縮型；而桁型鋼支撐架則可細分為三桿及四桿二種。

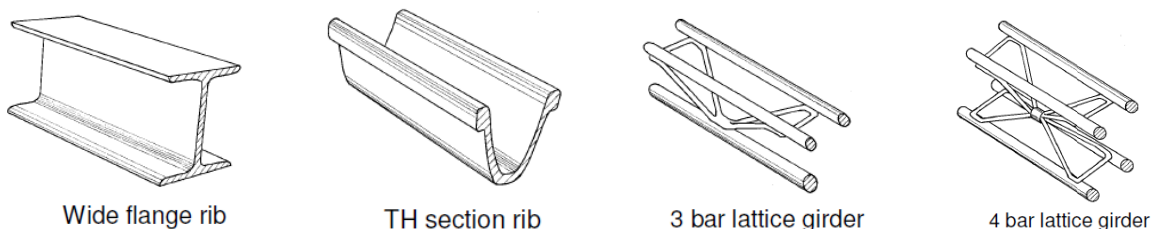


圖 6.1-1 各類鋼支撐架示意圖(Hoek, 2006)

鋼支撐架依材料本身、附件及零件等，均須符合表 6.1-1 相關規範之規定。而其製作與加工則須符合下列規定：

- A. 鋼支撐架之彎製須有適當設備，俾使彎製後之鋼支撐架無皺曲或扭曲現象。
- B. 鋼支撐架須按設計圖說規定之型鋼或鋼筋冷彎製成，不得熱彎，亦不得以片段鋼料拼接使用。彎製後之鋼支撐架無皺曲或扭曲現象。
- C. 鋼支撐架之縱向與橫向組成構件及鋼板應為新料。
- D. 鋼支撐架各處之銲接應由經驗豐富之合格電銲工確實銲牢(合格電銲工之定義為經政府機關或公營事業單位考試合格，持有 AWS-3G 級以上之證件者)。
- E. 凡加工發生皺曲或扭曲之鋼支撐架均不得使用。
- F. 鋼支撐架之製作許可差，剪切與裝配為 2 mm，冷彎後之半徑方向為 10 mm。

表 6.1-1 鋼支撐架相關規範彙整表

材料	規範
結構型鋼、鋼板、鋼筋	CNS 2473 G3039 SS400、CNS 2947 G3057 SM041、ASTM A36/A36M 或 JIS G3101 SS41(H 形)、CNS 2473 G3039 SS490、ASTM A572 或 JIS G3101 SS55 (U 形)、CNS 560 A2006 SR300、CNS 560 A2006 SD420、CNS2473 G3039 SS540 或 CNS 2473 G3039 SS540 (桁型)
附件及零件	規範
螺栓	CNS 3124 B2123、JIS B1180、JIS B1181、ASTM A307
繫桿	CNS 2473 G3039 SD280
鋼板	CNS 2473 G3039 SS400
螺帽	CNS 4236 B2170
套管	CNS 2056 G3030 重級鋼管、JIS G3454 STPG38、JIS G3454 STPG42、ASTM A53 E 型 40 級或 A 級
可縮接頭夾片	CNS 3828 G3086 S35C、JIS G4051 S35C 或 ASTM A575

### 6.1.2 噴凝土

依中國土木工程學會(1999)之定義，噴凝土之主要功能包括：(1)封蓋岩盤面，防止岩盤風化；(2)防止地下水自節理或層縫滲出，避免節理項料之流失與淘空；(3)因噴凝土本身之剪力強度，抵擋頂拱鬆動岩塊之掉落，亦可提供適當之支撐應力。

而隧道用噴凝土，一般可分為需事先架設鋼線網方能附著之噴凝土，以及無須組立鋼線網而直接添加鋼纖維之鋼纖噴凝土二大類；施工方式則分為乾拌法或濕拌法二種。

另根據行政院公共工程委員會最新版施工綱要規範第 02424 章「隧道噴凝土」(V5.0)之規定，噴凝土內各項材料需符合表 6.1-2 之相關規定。

表 6.1-2 隧道噴凝土相關規範彙整表

材料	規範
水泥	CNS 9208 (輸氣劑)
鋼纖維	CNS 12892
摻料	CNS 12283 (減水劑、強塑劑)、CNS 14689
鋼線網	CNS 6919
砂灰	ASTM C1240

施工注意事項：

- A. 噴凝土施工必須使用速凝劑計量設備，以便控制速凝劑添加量，避免超用而影響品質。
- B. 施工人員需每輪記錄噴凝土及速凝劑用量。

### 6.1.3 岩栓

根據行政院公共工程委員會最新版施工綱要規範第 02423 章「隧道用岩栓」(V5.0)之定義，岩栓係指：「以增加岩體剪力強度來改善岩質，若施預力或與噴凝土共同產生三度空間圍壓狀態，可形成岩拱增進岩體自持能力」。

而其種類可分為：(A) SN 岩栓；(B) 樹脂岩栓；(C) 開縫管岩栓；(D) 膨脹管岩栓；(E) 自鑽式岩栓；(F) 玻璃纖維岩栓等六種，詳見圖 6.1-2。各類岩栓定義如下：

- A. SN 岩栓：鑽孔後，孔底灌注水泥砂漿，若為預力岩栓則裝入瞬結劑，再補灌水泥砂漿，插入岩栓，旋轉岩栓可刺破瞬結劑，讓砂漿及早硬化迅速固定岩栓。
- B. 樹脂岩栓：鑽孔後，將樹脂膠囊插入孔底，然後插入岩栓，刺破膠囊並攪拌，使樹脂充滿孔內，黏住整支岩栓。
- C. 開縫管岩栓：鑽孔孔徑稍微較岩栓直徑小一些，然後用鑽機將開縫管岩栓用力推入孔內，此種岩栓能立即產生支撐作用。
- D. 膨脹管岩栓：鑽孔後，將岩栓管插入孔內，用手提高壓水泵以預設水壓將孔內岩栓管膨脹，使其與孔內岩壁不規則面產生摩擦力，岩栓管膨脹使岩栓長度縮短與端板緊壓岩面或噴凝土面。
- E. 自鑽式岩栓：岩栓本身可以接續，是鑽桿也是灌漿管，使鑽孔、灌漿、錨碇與固結一次作完，適用於鑽孔困難但又不致於堵塞灌漿孔的岩體，灌漿錨固可採用水泥系列材料或化學材料。
- F. 玻璃纖維岩栓：岩栓是由約 70%的玻璃纖維加在多元酯(Polyester)或環氧樹脂

(Epoxy Resin)製造而成，可以樹脂或水泥漿使其與岩體錨固。

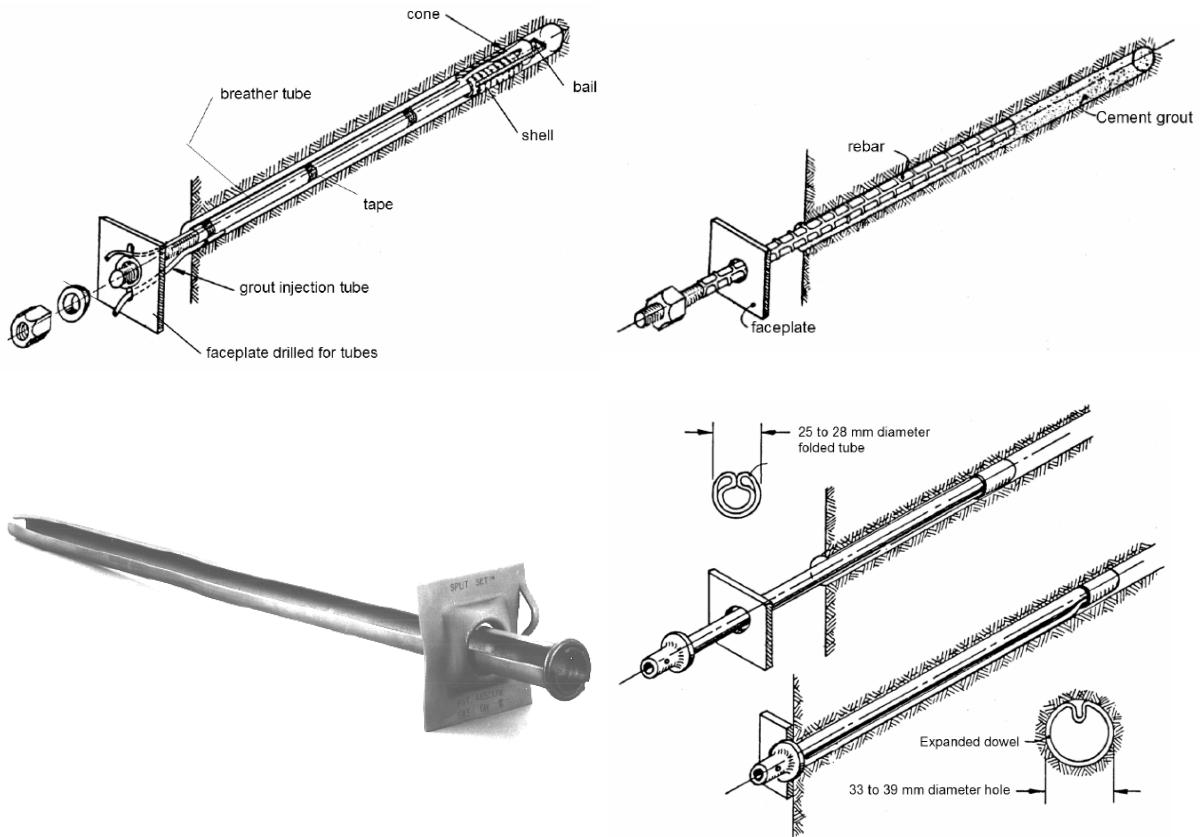


圖 6.1-2 各類隧道用岩栓示意圖(Hoek, 2006)

各類岩栓及其附屬構件均須符合表 6.1-3 相關規範之規定。

表 6.1-3 隧道用岩栓相關規範彙整表

種類	材料	規範
SN 岩栓	錨桿	CNS 560 A2006 SD420、ASTM A615/A615M
	承板	CNS 2473 G3039 SS400、ASTM A36/A36M、JIS G3101 SS41
	螺帽	CNS 3128 B2126、ASTM A30702
	墊圈	CNS 150 B2010、ANSI B27.2
樹脂岩栓	錨桿	CNS 560 A2006 SD420、ASTM A615/A615M
	承板	CNS 2473 G3039 SS400、ASTM A36/A36M、JIS G3101 SS41
	螺帽	CNS 3128 B2126、ASTM A307
	墊圈	CNS 150 B2010、ANSI B27.2
	樹脂錨固材料	ASTM D695
開縫管岩栓	錨桿	CNS、ASTM
	承板	CNS 2473 G3039 SS400、ASTM A36/A36M、JIS G3101 SS41、ASTM F432
膨脹管岩栓	錨桿	CNS、ASTM

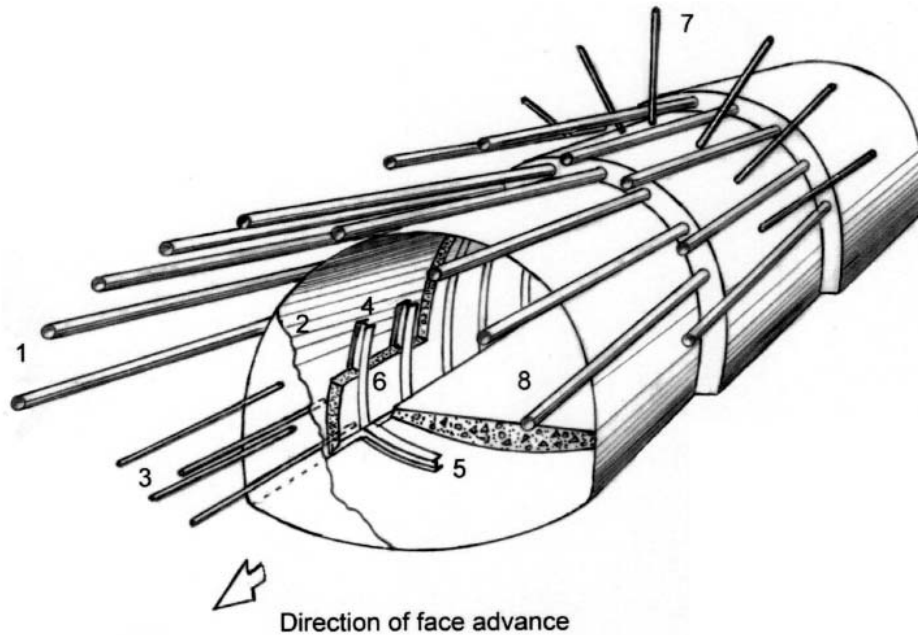
	承板	CNS 2473 G3039 SS400、ASTM A36/A36M、JIS G3101 SS41
	錨桿	CNS 560 A2006 SD420
自鑽式岩栓	承板	CNS 2473 G3039 SS400、ASTM A36/A36M、JIS G3101 SS41
	螺帽	CNS 3128 B2126、ASTM A307
	墊圈	CNS 150 B2010、ANSI B27.2
	續接器	CNS、ASTM
玻璃纖維岩栓	錨桿、承板、螺帽及墊圈	CNS、ASTM

#### 6.1.4 先進支撐

根據行政院公共工程委員會最新版施工綱要規範第 02421 章「先進支撐」(V5.0)之定義，先撐鋼管、先撐鋼棒、注膠先撐鋼管與管幕鋼管，係於開挖前將鋼管或鋼棒打入或插入前方未開挖之軟弱地層中，使其在開挖線外形成一保護層。而鋼護板主要使用於無凝聚性之土壤或極端脆弱之岩體中，藉此防止開挖時拱頂之岩塊鬆落，在噴凝土襯砌形成足夠支承力前，支撐可能鬆落之岩體。

故其種類可分為：(A) 先撐鋼管；(B) 先撐鋼棒、鋼軌或型鋼；(C) 注膠支撐鋼管；(D) 鋼護板；(E) 管幕鋼管等共五種，詳見圖 6.1-3。各類先進支撐定義如下：

- A. 先撐鋼管：於隧道開挖前，在隧道縱向鋼支保支撐外增設鋼管先撐，並灌漿，使隧道開挖後未支撐間距(Free Span)減小，防止岩塊鬆落。
- B. 先撐鋼棒，鋼軌或型鋼：於隧道開挖前，在隧道縱向鋼支保支撐外增設鋼棒，鋼軌或型鋼先撐，使隧道開挖後未支撐間距(Free Span)減小，防止岩塊鬆落。
- C. 注膠支撐鋼管：於隧道開挖前，在隧道縱向鋼支保支撐外增設鋼管先撐，再灌入速凝性材料水泥砂漿，以固結岩盤，使隧道開挖後未支撐間距(Free Span)減小，防止岩塊鬆落。
- D. 鋼護板：於隧道開挖前，在隧道縱向鋼支保支撐外增設鋼片矢板先撐，使隧道開挖後未支撐間距(Free Span)減小，防止岩塊鬆落。
- E. 管幕鋼管：於隧道開挖前，在隧道縱向鋼支保支撐外增設口徑及長度均較大之鋼管，鋼管表面或可設有灌漿孔且孔口有止回閥，再灌漿改良地質，使隧道開挖後未支撐間距(Free Span)減小，防止岩塊鬆落。



- 1 Forepoles – typically 75 or 114 mm diameter pipes, 12 m long installed every 8 m to create a 4 m overlap between successive forepole umbrellas.
- 2 Shotcrete – applied immediately behind the face and to the face, in cases where face stability is a problem. Typically, this initial coat is 25 to 50 mm thick.
- 3 Grouted fiberglass dowels – Installed midway between forepole umbrella installation steps to reinforce the rock immediately ahead of the face. These dowels are usually 6 to 12 m long and are spaced on a 1 m x 1 m grid.
- 4 Steel sets – installed as close to the face as possible and designed to support the forepole umbrella and the stresses acting on the tunnel.
- 5 Invert struts – installed to control floor heave and to provide a footing for the steel sets.
- 6 Shotcrete – typically steel fibre reinforced shotcrete applied as soon as possible to embed the steel sets to improve their lateral stability and also to create a structural lining.
- 7 Rockbolts as required. In very poor quality ground it may be necessary to use self-drilling rockbolts in which a disposable bit is used and is grouted into place with the bolt.
- 8 Invert lining – either shotcrete or concrete can be used, depending upon the end use of the tunnel.

圖 6.1-3 各種隧道支撐構件示意圖(Hoek, 2006)

各類先進支撐及其附屬構件須符合表 6.1-4 相關規範之規定。

表 6.1-4 各類先進支撐相關規範彙整表

材料	規範
先撐鋼管材質	CNS 2056 G3030 (中級)
先撐鋼棒材質	CNS 560 A2006 SD280
注膠先撐鋼管	CNS 4437 G3103 STKM 17C、JIS G3445 STKM 17C
鋼護板材質	CNS 2473 G3039 SS400
管幕鋼管材質	CNS 2056 G3030 (重級)

## 6.2 隧道襯砌材料

混凝土材料為一種三相的複合材料，係混合適當比例的水泥、骨材及水所獲得的，是目前結構物上應用最廣的材料，它具有良好的力學特性，可使用在很多不同的工業用途上，在適當的維護下其生命週期可達數百年至千年以上。而隧道襯砌材料主要即以混凝土為主，一般可分鋼筋混凝土及普通混凝土兩類，部分隧道則可採噴凝土。混凝土之組成材料除一般水泥、骨材及水，亦可加入摻合物與試劑混合以增強某些特定想要的性質，但以適當的觀點來看，這些摻料及試劑並不被視為混凝土材料之一部分。一般常見的摻料改良型混凝土又可分高強度混凝土、纖維強化混凝土、高分子改良混凝土等類型。而根據農田水利施工規範隧道襯砌及仰拱混凝土所有材料應依第 03310 章「結構用混凝土」及相關規定辦理。以下將茲由混凝土設計條件、組成材料、基本性質及相關規範等進行描述。

### 6.2.1 設計條件

混凝土材料組成變化極大，性質因配比與材料不同而異，須視需求使用，除一般型式混凝土外，尚包括輕質混凝土、重質混凝土、輸氣混凝土、高早強混凝土等特殊型式混凝土。配比設計時，須確保獲得所需強度及充分耐久性，並滿足良好施工性的要求，藉此選擇適當的材料類型，以搭配工法使用。

過去混凝土配比之設計大多以經驗法則為主無科學理論，是以任意選擇的體積混合混凝土等成份，如一體積的水泥對兩體積的砂及四體積的碎石。目前此老方法仍被用於小物件上，其中以 1:1.5:3、1:2:4、1:3:5 等之體積比最廣泛被使用。

而目前對於混凝土配比的設計方法主要以兩個基本原理為主，水灰比及絕對體積兩原則。水灰比(W/C)為在任一所示之混合物使用之水重對水泥重的比。對壓縮強度小於 41 MPa 之混凝土而言，W/C 比主要控制混凝土的強度，因通常水泥漿比礦石弱許多，若 W/C 比降至低於 0.5 會使得壓實(compaction)變得困難，一般此時則需添加額外之相關摻料，提高其工作性。絕對體積的原則敘述為一單位體積的混凝土為其諸成份絕對體積的和。

### 6.2.2 組成材料

一般混凝土的成分中(以絕對體積而言)含有 31%~51%粗骨材、24%~30%細骨材、7%~15%波特蘭水泥、14%~21%水、0.5%~8%空氣，其材料之組成變化極

大。密度分布範圍可由輕質絕緣用混凝土  $240 \text{ kg/m}^3$ 、常重混凝土  $2400 \text{ kg/m}^3$  到重質混凝土  $6400 \text{ kg/m}^3$ 。以下將就水泥、骨材、摻料及試劑進行討論。

#### A. 水泥

通常用於隧道結構物之水泥為普通波特蘭水泥、高爐水泥 B 型及飛灰水泥 B 型，為了獲得早強強度，有使用早強水泥、加速硬化劑或摻料之情形。係以水硬性矽酸鈣類為主要成分之熟料研磨而得之水硬性水泥，通常並與一種或一種以上不同形態之硫酸鈣為添加物共同研磨。水泥製造得選擇水淬高爐爐渣、飛灰或石灰石作為添加物，但三者總添加量不得超過水泥總質量之 5%，其中水淬高爐爐渣應符合 CNS 12223(水淬高爐爐渣)之規定；飛灰應符合 CNS 11271(卜特蘭飛灰水泥用飛灰)之規定；石灰石之  $\text{CaCO}_3$  應大於 95%，且  $\text{Al}_2\text{O}_3$  應小於 2.5%。以下將就常見的幾種水泥及成份規定進行整理：

1. 普通波特蘭水泥，根據其應用範圍不同可分為八類，下表 6.2-1~3 依序為種類及應用範圍、化學成分標準規定、波特蘭水泥化學成分任選規定。

表 6.2-1 波特蘭種類及應用範圍

種 類		用 途
卜 特 蘭 水 泥	第 I 型：普通水泥	一般構造物
	第 II 型：中度抗硫酸鹽水泥	抗鹽蝕、海灣、臨海、海中構造物、需要中度水合熱者如水渠等巨積混凝土工程
	第 III 型：早強水泥	緊急工程，需縮短工期之工程
	第 IV 型：低熱水泥	水壩等巨積混凝土工程
	第 V 型：高度抗硫酸鹽水泥	抗酸蝕、下水道、地下室、溫泉區等特殊環境之工程
輸 氣 卜 特 蘭 水 泥	輸氣第 I A 型	一般構造物需要輸氣者
	輸氣第 II A 型	抗鹽蝕構造物需要輸氣者
	輸氣第 III A 型	緊急工程需要輸氣者



表 6.2-2 波特蘭水泥化學成分標準規定

水 泥 型 別	I	IA	II 及 IIA	III 及 IIIA	IV	V
二氧化矽(SiO <sub>2</sub> ) 最小值, %	—	—	20.0 <sup>(4)</sup> ( <sup>5</sup> )	—	—	—
氧化鋁(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 最大值, %	—	—	6.0	—	—	—
氧化鐵(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 最大值, %	—	—	6.0 <sup>(4)</sup> ( <sup>5</sup> )	—	6.5	—
氧化鎂(MgO) 最大值, %	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
三氧化硫( <sup>3</sup> )(SO <sub>3</sub> ) 最大值, %						
當 C <sub>3</sub> A <sup>(1)</sup> 為 8%以下時	3.0	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
當 C <sub>3</sub> A <sup>(1)</sup> 大於 8%時	3.5	3.5	( <sup>2</sup> )	4.5	( <sup>2</sup> )	( <sup>2</sup> )
燒失量 最大值, %	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
不溶殘渣 最大值, %	4.30	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
矽酸三鈣(C <sub>3</sub> S) <sup>(1)</sup> 最大值, %	—	—	—	—	35 <sup>(4)</sup>	—
矽酸二鈣(C <sub>2</sub> S) <sup>(1)</sup> 最小值, %	—	—	—	—	40 <sup>(4)</sup>	—
鋁酸三鈣(C <sub>3</sub> A) <sup>(1)</sup> 最大值, %	—	—	8	15	7 <sup>(4)</sup>	5 <sup>(5)</sup>
鋁鐵酸四鈣加 2 倍之鋁酸三鈣 <sup>(1)</sup> (C <sub>4</sub> AF + 2C <sub>3</sub> A)或固溶體(C <sub>4</sub> AF + C <sub>2</sub> F)採用兩者中之合適者 最大值, %	—	—	—	—	—	25.0 <sup>(5)</sup>

表 6.2-3 波特蘭水泥化學成分任選規定

水 泥 型 別	I 及 IA	II 及 IIA	III 及 IIIA	IV	V	備註
鋁酸三鈣 <sup>(6)</sup> (C <sub>3</sub> A) 最大值, %	—	—	8	—	—	適用於抵抗中度硫酸鹽侵蝕
鋁酸三鈣 <sup>(6)</sup> (C <sub>3</sub> A) 最大值, %	—	—	5	—	—	適用於抵抗高度硫酸鹽侵蝕
矽酸三鈣 <sup>(6)</sup> (C <sub>3</sub> S)及鋁酸三鈣(C <sub>3</sub> A)之和 最大值, %	—	( <sup>7</sup> ) 58	—	—	—	適用於中度水合熱
鹼類(Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O) 最大值, %	( <sup>8</sup> ) 0.60	( <sup>8</sup> ) 0.60	( <sup>8</sup> ) 0.60	( <sup>8</sup> ) 0.60	( <sup>8</sup> ) 0.60	低鹼水泥
氯離子(Cl <sup>-</sup> )最大值, %	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	—

2. 飛灰水泥，依據灰飛水泥中之飛灰含量可分為三類，如下表 6.2-4。波特蘭飛灰水泥用飛灰則規定如表 6.2-5。其他飛灰水泥品質規範則如表 6.2-6。

表 6.2-4 飛灰水泥之分類

種類	飛灰含量(質量%)
A	超過 5, 10 以下
B	超過 10, 20 以下
C	超過 20, 30 以下

表 6.2-5 灰飛成份規定

二氧化矽(SiO <sub>2</sub> )	45 以上
含水量	1 以下
燒失量	5 以下

表 6.2-6 飛灰水泥之品質規範

項 目 \ 種 類		A	B	C
細度，比表面積(m <sup>2</sup> /kg)，最小值		250	250	250
凝結時間 (兩法任用其一)	吉爾摩氏試驗			
	初凝(分鐘)，不少於	60	60	60
	終凝(小時)，不多於	10	10	10
	費開氏試驗			
	初凝(分鐘)，不少於	45	45	45
	終凝(小時)，不多於	7	7	7
健度：熱壓膨脹，%最大值		0.5	0.5	0.5
抗壓強度 MPa{kgf/cm <sup>2</sup> }	3 天	12.4{126}	11.4{116}	9.8{100}
	7 天	19.3{197}	18.2{186}	17.2{175}
	28 天	27.6{281}	25.9{264}	24.1{246}
氧化鎂，%最大值		6.0	6.0	6.0
三氧化硫(SO <sub>3</sub> )，%最大值		3.0	3.0	3.0
燒失量，%最大值		3.2	3.6	3.9

3. 高爐爐水泥，是波特蘭水泥與水淬高爐爐渣粉所製成之均勻混合物，在水泥中高爐爐渣所佔之重量百分率應在 25~65%之範圍內，而高爐水泥之成份應符合下表 6.2-7 之規定。

表 6.2-7 波特蘭高爐水泥之化學成份規定

水 泥 種 類	IS 及 IS-A
三氧化硫(SO <sub>3</sub> )，最大值，%	3.0
硫化物硫(S)，最大值，%	2.0
不溶殘渣，最大值，%	1.0
燒失量，最大值，%	3.0

4. 鋁質水泥，使用於特殊抗蝕環境，因與波特蘭水泥的礦物像組成不同，故不會形成氫氧化鈣與游離石灰。鋁質水泥之成份需符合下表 6.2-8 之規定。

表 6.2-8 鋁質水泥化學成份規範

項 目	規 定
硫化物中之硫含量(S)，% (最大值)	0.1
氯化物中之氯含量，% (最大值)	0.1
鹼含量，以 Na <sub>2</sub> O 當量值表示 (Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O)，% (最大值)	0.4
氧化鋁 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 含量，% (最小值)	30
氧化鋁 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/ 氧化鈣 (CaO) 質量比	0.85 ~ 1.40

A. 骨材之相關規範

骨材的選取應為乾淨且不易被壓碎之碎石與砂，品質須符合 CNS 1240 A2029 之一般規定。可分細粒料、粗粒料、結構混凝土用輕質粒料及高爐渣粗細粒料，以下將就各項分別列出其規範。

1. 細粒料，包括天然砂、加工砂或兩者組合之砂、或可資源化再利用材料。細粒料之級配須符合表 6.2-9 之規定。細粒料中有害物質之含量不得超過表 6.2-10 所規定之限值。

表 6.2-9 細粒料之級配規定

試驗篩之標稱孔寬(CNS 386)	過篩百分率%
9.5 mm	100
4.75 mm	95~100
2.36 mm	80~100
1.18 mm	50~85
60 μm	25~60
300 μm	5~30
150 μm	0~10

表 6.2-10 細粒料中有害物質之含量限制

混凝土用細粒料中有害物質	最大許可含量 (質量百分數)
土塊及易碎顆粒	3.0
小於試驗篩75 μm CNS 386之物質：	
承受磨損之混凝土	3.0 <sup>(2)</sup>
所有其他混凝土	5.0 <sup>(2)</sup>
煤及褐炭：	
表面外觀重要之混凝土	0.5
所有其他混凝土	1.0
水溶性氯離子含量：	
預力混凝土	0.012
所有其他混凝土	0.024

2. 粗粒料，粗粒料包括礫石、軋碎之礫石、碎石、氣冷高爐爐渣、軋碎之水硬性水泥混凝土、或上述材料之組合物、或可資源化再利用材料。粗粒料之級配須符合表 6.2-11 之規定。

表 6.2-11 粗粒料之級配規定

尺 度 稱 號	試驗篩標 稱 尺寸(mm)	造 篩 百 分 率 %													
		100mm (4")	90mm (3½")	75mm (3")	63mm (2½")	50mm (2")	37.5 (1½")	25.0mm (1")	19.0mm (¾")	12.5mm (½")	9.5mm (⅜")	4.75mm (No.4)	2.36mm (No.8)	1.18mm (No.16)	300 μm (No.50)
1	90-37.5	100	90-100	—	25-60	—	0-15	—	0-5	—	—	—	—	—	—
2	63-37.5	—	—	100	90-100	35-70	0-15	—	0-5	—	—	—	—	—	—
3	50-25.0	—	—	—	100	90-100	35-70	0-15	0-5	—	—	—	—	—	—
357	50-4.75	—	—	—	100	95-100	—	35-70	10-30	—	0-5	—	—	—	—
4	37.5-19.0	—	—	—	—	100	90-100	20-55	0-15	—	0-5	—	—	—	—
467	37.5-4.75	—	—	—	—	100	95-100	—	35-70	—	0-5	—	—	—	—
5	25.0-12.5	—	—	—	—	—	100	90-100	20-55	0-10	0-5	—	—	—	—
56	25.0-9.5	—	—	—	—	—	100	90-100	40-85	10-40	0-5	—	—	—	—
57	25.0-4.75	—	—	—	—	—	100	95-100	—	25-60	0-10	0-5	—	—	—
6	19.0-9.5	—	—	—	—	—	—	100	90-100	20-55	0-15	0-5	—	—	—
67	19.0-4.75	—	—	—	—	—	—	100	90-100	—	20-55	0-10	0-5	—	—
7	12.5-4.75	—	—	—	—	—	—	—	100	90-100	40-70	0-15	0-5	—	—
8	9.5-2.36	—	—	—	—	—	—	—	—	100	85-100	10-30	0-10	0-5	—
89	9.5-1.18	—	—	—	—	—	—	—	—	100	90-100	20-55	5-30	0-10	0-5
9 <sup>(3)</sup>	4.75-1.18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100	85-100	10-40	0-10	0-5

3. 輕質粒料，不適用於防火和填充用之混凝土，常用的有高爐爐渣、黏土、矽藻土、飛灰、頁岩、板岩、浮石、火山渣及凝灰岩等。粒度級配需符合下表 6.2-12 之規定。

表 6.2-12 結構混凝土輕質粒料之級配規定

試驗篩孔徑(mm) 粒料尺度(mm)		25	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	300 $\mu$ m	150 $\mu$ m
		(1in)	(3/4in)	(1/2in)	(3/8in)	(No.4)	(No.8)	(No.16)	(No.50)	(No.100)
細粒料	4.75 至 0	—	—	—	100	85 至 100	—	40 至 80	10 至 35	5 至 25
粗粒料	25 至 4.75	95 至 100	—	25 至 60	—	0 至 10	—	—	—	—
	19 至 4.75	100	90 至 100	—	10 至 50	0 至 15	—	—	—	—
	12.5 至 4.75	—	100	90 至 100	40 至 80	0 至 20	0 至 10	—	—	—
	9.5 至 2.36	—	—	100	80 至 100	5 至 40	0 至 20	0 至 10	—	—
混合粒料	12.5 至 0	—	100	95 至 100	—	50 至 80	—	—	5 至 20	2 至 15
	9.5 至 0	—	—	100	90 至 100	65 至 90	35 至 65	—	10 至 25	5 至 15

### B. 混凝土攪和物與摻料

混凝土一般為提高其各項特性所需，或為滿足某些特殊工作需求會額外添加摻料及藥劑，以下將就攪和物及摻料分開討論。

- 攪和物，使用於混凝土中，可供達到混凝土所需之膠結性或是產生卜作嵐效應之特性者，一般常見的摻料有燃煤飛灰、天然或煨燒卜作嵐材料、水淬高爐爐渣等，其中高爐爐渣粉依活性指數，可分為三個等級：80 級、100 級和 120 級，在使用時應依工程需要慎選之。一般針對飛灰及天然或煨燒卜作嵐攪和物可分三類，下表 6.2-13 為對其之化學成份要求。而高爐渣則有其他相關之規定。

表 6.2-13 化學成份要求

試驗項目	礦物性攪和物類別		
	N類	F類	C類
二氧化矽(SiO <sub>2</sub> )+氧化鋁(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )+氧化鐵(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )之總量，%(最小值)	70.0	70.0	50.0
三氧化硫(SO <sub>3</sub> )，%(最大值)	4.0	5.0	5.0
含水量，%(最大值)	3.0	3.0	3.0
燒失量，%(最大值)	10.0	6.0	6.0

- 摻料，混凝土為達到某些需求及功能通常一般會添加藥劑進行其性能之改善，一般常見的有減水劑、緩凝劑、早強劑及複合藥劑等，可單項或多項共同使用，下表 6.2-14 為混凝土各像摻料藥劑之功能與類型及相對應之規範整理。

表 6.2-14 混凝土使用之摻料功能與規範

摻料類型	功能	材料
輸氣劑 (ASTM C260) (CNS 9208)	改善耐久性	木質性脂鹽
		某些合成清潔劑
		苯烷基，硫酸基本質鹽
		石油酸鹽
		蛋白質類鹽
		脂肪及樹脂酸及其鹽類
減水劑 (ASTM C494 Type A) (CNS 12283)	減少用水量	硫化木質素
	保持稠度	
緩凝劑 (ASTM C494 Type B) (CNS 12283)	延緩凝結時間	-
加速劑 (ASTM C494 Type C) (CNS 12283)	加速凝結	氯化鈣 (ASTM D98)
	發展早期強度	
減水緩凝劑 (ASTM C494 Type D) (CNS 12283)	減少用水量	如減水劑 Type A
	延緩凝結	
減水加速劑 (ASTM C494 Type E) (CNS 12283)	減少用水量 加速凝結	如減水劑 Type A 加入更多加速劑
波索蘭 (ASTM C618) (CNS 3036) (CNS 10896)	改善工作度及塑性	天然波索蘭 (N 級)
		飛灰 (F 及 G 級)
		其他材料 (S 級)
造氣劑	凝結時造成膨脹	鋁粉
防潮及防水劑	減少滲透性	-
強塑劑	增加流動性	-

### 6.2.3 基本特性

一般而言普通混凝土之抗壓強度遠高於抗拉強度，但混凝土之基本特性會根據其配比設計及摻料或摻合物等之添加不同而有所差異，以下將簡單就混凝土之

強度特性、變形性、耐久性等進行討論。

#### A. 強度特性

混凝土之強度取決於水灰比與材料之配比設計，當水灰比減小，強度會隨之增加，可視需求選取材料，通常用於隧道結構物之水泥為普通波特蘭水泥、高爐水泥 B 型及飛灰水泥 B 型，為了獲得早強強度，有使用早強水泥、加速硬化劑或摻料之情形。

#### B. 變形尺寸

混凝土的彈性模數約為 35 GPa，在應力作用下將發生彈性變形與潛變；其受溫度、濕度引起之收縮應變，容易導致裂縫的生成。改良方法可在混凝土中添加膨脹性混合劑或收縮減少劑、使用強塑劑使其於相同工作度下減少單位水量、或使用低發熱水泥之方法。

#### C. 耐久性

一般混凝土暴露在潮濕的凍融環境下容易膨脹而破壞，使用輸氣劑能使混凝土具低水灰比，經得起多次凍融循環作用而不致惡化，同時提升強度。

### 6.2.4 隧道襯砌材料各項試驗及規範

- A. 隧道混凝土襯砌施作之規定：根據農田水利施工規範「第 02425 章 隧道襯砌」之規定，隧道內襯砌每次澆置長度應視施工機具設備容量、混凝土澆置量、施工速度等而適當選定，以儘量能在一班（Shift）澆置完成為原則，一般為 8 至 16m。
- B. 隧道襯砌內之鋼筋：襯砌及仰拱混凝土內之鋼筋應依第 03210 章「鋼筋」及相關規定辦理。
- C. 混凝土之試驗規範：根據不同之混凝土其相關試驗及規範也有所不同，**下表 6.2-15** 整理幾個類型之混凝土試驗規格與與相關規範。

表 6.2-15 混凝土之規格與試驗規範

試驗材料	試驗項目	試驗方法	規格值
實驗室混凝土圓柱試體	試體之製作及養護	CNS 1231 (2005) ASTM C192/C192M-06	
	抗壓強度	CNS 1232 (2002) ASTM C39/39M-05 AASHTO T22-06	10 tf ~ 190 tf (98 kN ~ 1862 kN)
	彎曲強度	CNS 1233、1234 (1984) ASTM C78-02 ASTM C293-02 AASHTO T97-03	50 kgf ~ 29000 kgf (490 N ~ 284200 N)
新拌混凝土	取樣	CNS 1174 (1986) ASTM C172-04	標稱最大粒徑 ≤ 75 mm
	試體之製作及養護	CNS 1231 (2005) ASTM C31/C31M-06 AASHTO T126-01 AASHTO T23-04	坍度 ≥ 2.5 cm 粒料標稱最大粒徑 ≤ 75 mm
	氯離子含量試驗	CNS 1078 (2001) 第 25 節 CNS 5858 (1981) CNS 13465 (1995) CNS 14703 (2002) ASTM C114-05 第 19 節 ASTM D512-04 不含 C 法 ASTM C1218/C1218M-99 AASHTO T260-97	0.001% ~ 1.5%
	坍度試驗	CNS 1176 (2003) ASTM C143/C143M-05a AASHTO T119M/T119-05	坍度 ≥ 2.5 cm 粒徑 ≤ 37.5 mm
	凝結時間	CNS 14220 (1998) ASTM C403/C403M-05 AASHTO T197M/T197-05	粒料標稱最大粒徑 ≤ 75 mm
場鑄之常重混凝土	配比設計	CNS 12891 (1998) ACI 211.1-91 ACI 318-05	坍度 ≥ 2.5 cm 粒料標稱最大粒徑 ≤ 50 mm
硬固混凝土	耐磨損試驗	CNS 13297 (1993) ASTM C418-05	



## 第七章 國內既有隧道施工技術對多重壁障功能影響之初步探討

本章將彙整國內既有隧道施工技術，研析各類隧道開挖工法、支撐工法及各種困難地質因應處理方法特性，初步探討對處置設施多重壁障近場功能之影響，研提坑道處置施工安全及開挖擾動特性之管制與審查要項建議。

### 7.1 不同隧道開挖工法之擾動

地質條件與水文特性為處置場址選址的重要因素，除需深入考量廣域的地質與水文條件外，處理設施通常係地下空間的利用，開挖規模十分龐大，開挖施工過程將造成天然障壁顯著的應力—應變調整，因而存在所謂的擾動區(excavation disturbed zone, EDZ)，改變障壁的工程行為，因此，本節首先定義放射性廢棄物坑道處置場開挖所引致之擾動區(EDZ)，並比較不同隧道開挖工法對擾動區之影響，最後彙整目前國際上關於此課題之現地試驗與數值分析成果。

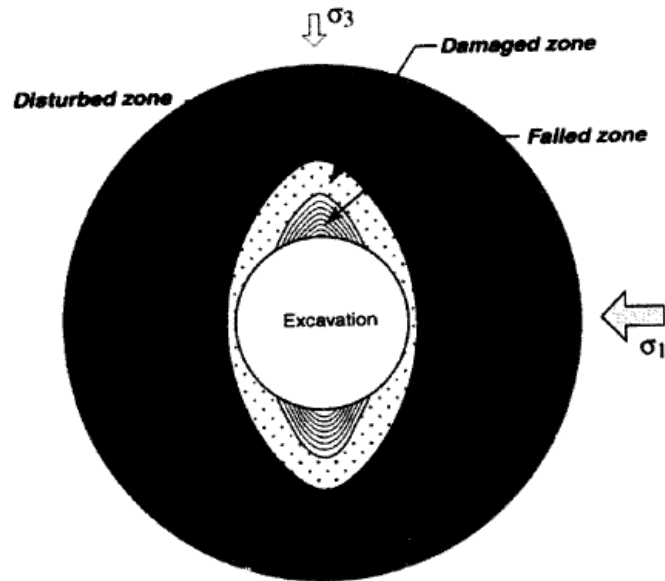
#### 7.1.1 隧道開挖擾動之定義

根據 Backblom 與 Martin (1999)之研究，將隧道開挖擾動帶(EDZ)定義為：「開挖擾動帶(EDZ)係包含損傷區(damaged zone)與破壞區(failed zone)之區域」，如圖 7.1-1(a)所示，並詳述如下：

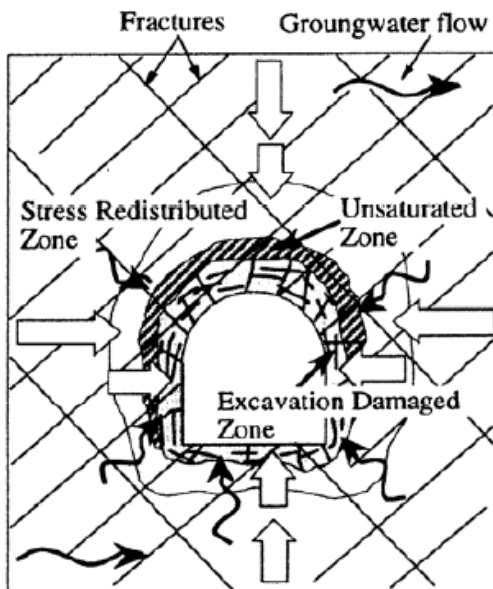
- A. 破壞區(failed zone)：岩塊完全從岩體分離之區域。
- B. 損傷區(damaged zone)：岩體性質發生不可逆改變之區域。
- C. 擾動區(disturbed zone)：岩體狀態(如：應力或水力傳導特性)顯著改變但可逆之區域。

而 Sato 等人(2000)則將隧道開挖引致之擾動帶(EDZ)區分為：(1)開挖損傷區(excavation damaged zone)；(2)未飽和區(unsaturated zone)；(3)應力重新分配區(stress redistributed zone)三大區域，詳見圖 7.1-1(b)。

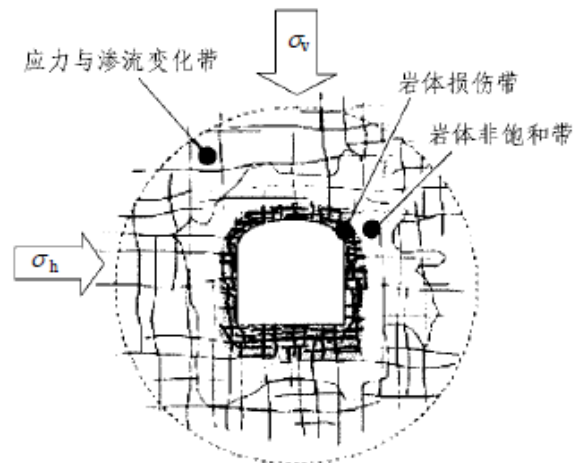
大陸學者吉小明(2005)亦參考 Sato 等人(2000)之定義，將隧道開挖引起的擾動帶(EDZ)區分為：(1)岩體損傷帶；(2)岩體非飽和帶；(3)應力與滲流變化帶三大區域，如圖 7.1-1(c)所示。



(a) Backblom 與 Martin (1999)



(b) Sato 等人(2000)



(c) 吉小明(2005)

圖 7.1-1 岩體開挖擾動帶(EDZ)不同定義示意圖

### 7.1.2 不同隧道開挖工法之擾動影響

由於興建放射性廢棄物坑道處置場施工過程，其坑道(隧道)及處置場址之地下開挖工程均會擾動場址周圍岩體之力學、水力甚至化學等特性(Backblom and Martin, 1999)，因此，世界各國為探討不同坑道(隧道)開挖工法對周圍岩體擾動之影響，紛紛進行一系列之現地試驗，現彙整說明如后。

瑞典為探討不同坑道(隧道)開挖工法對周圍岩體擾動之影響，於 Aspo 硬岩試驗室(現地)開挖一深達 1,700 公尺、總長達 3,600 公尺之現地試驗坑道(圖 7.1-2)，並於地表下 420 公尺位置之二試驗坑道，分別採用鑽炸法(drill & blast

method)與全斷面鑽掘機(TBM)開挖(圖 7.1-3)，且於開挖前中後進行一系列之現地試驗與觀測，以瞭解二種對不同坑道(隧道)開挖工法對周圍岩體擾動之程度，研究結果顯示：(1)鑽炸法所引致之擾動區大小，受周圍岩體狀況高度影響。(以本試驗為例，鑽炸法之擾動區於坑道側壁及頂拱為 0.3~0.5 公尺；於仰拱則為 1~1.5 公尺)；(2)二種開挖工法於超過 2 公尺外(遠域)之現地量測位置，均未顯示破壞(擾動)現象；(3)根據音射(acoustic emission)量測結果顯示，鑽炸法所引致擾動區大小大約為全斷面鑽掘機之 10 左右(Backblom et al., 1997)。

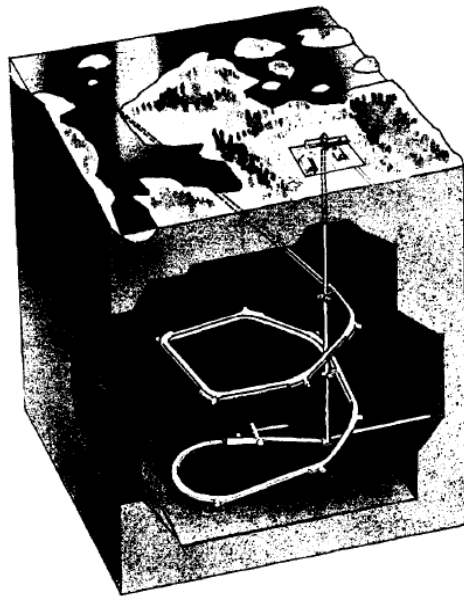


圖 7.1-2 瑞典 Aspo 硬岩試驗室之現地試驗坑道示意圖(Backblom et al., 1997)

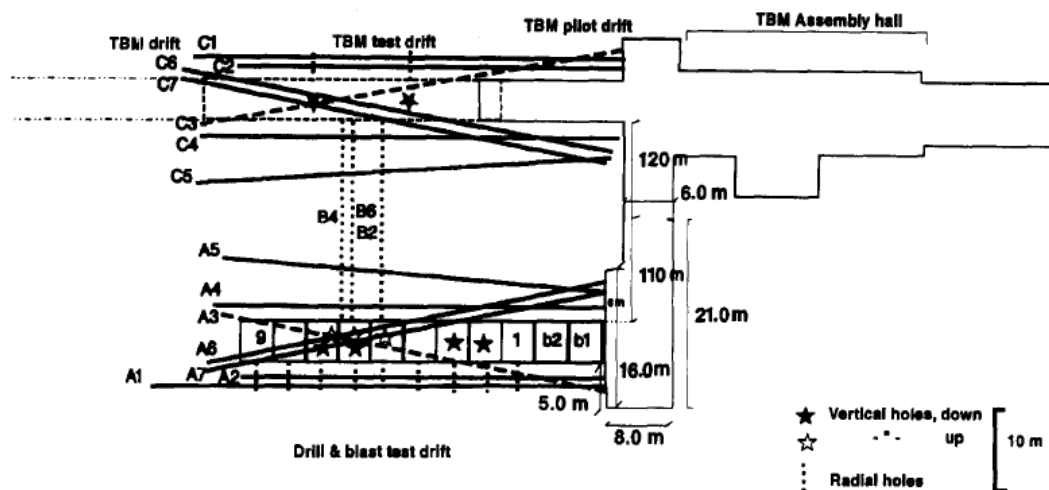


圖 7.1-3 瑞典 Aspo 硬岩試驗室之不同開挖工法試驗坑道示意圖(Backblom et al., 1997)

日本高放射性廢棄物處置場之研究、規劃、設計與施工期程如圖 7.1-4 所示，其中為探討上述課題，分別於 1980 與 1990 年代起開挖 Tono(東濃)與 Kamaishi

試驗坑道。Tono(東濃)試驗坑道位於日本中部的岐阜縣，其試驗坑道分別採用鑽炸法與懸臂式挖掘機(boom header)開挖；而 Kamaishi 試驗坑道位於日本北部，其試驗坑道則分別採用一般開炸(normal blasting)與勻滑開炸(smooth blasting)技術開挖，以探討不同坑道(隧道)開挖工法或不同開炸技術對周圍岩體擾動之影響，其現地試驗結果(圖 7.1-5 與圖 7.1-6)顯示：(1)鑽炸法開挖之擾動帶約為 1 公尺寬；(2)機械式(懸臂式挖掘機)開挖之擾動帶則約為 0.3 公尺寬(Sugihara, 2009)。

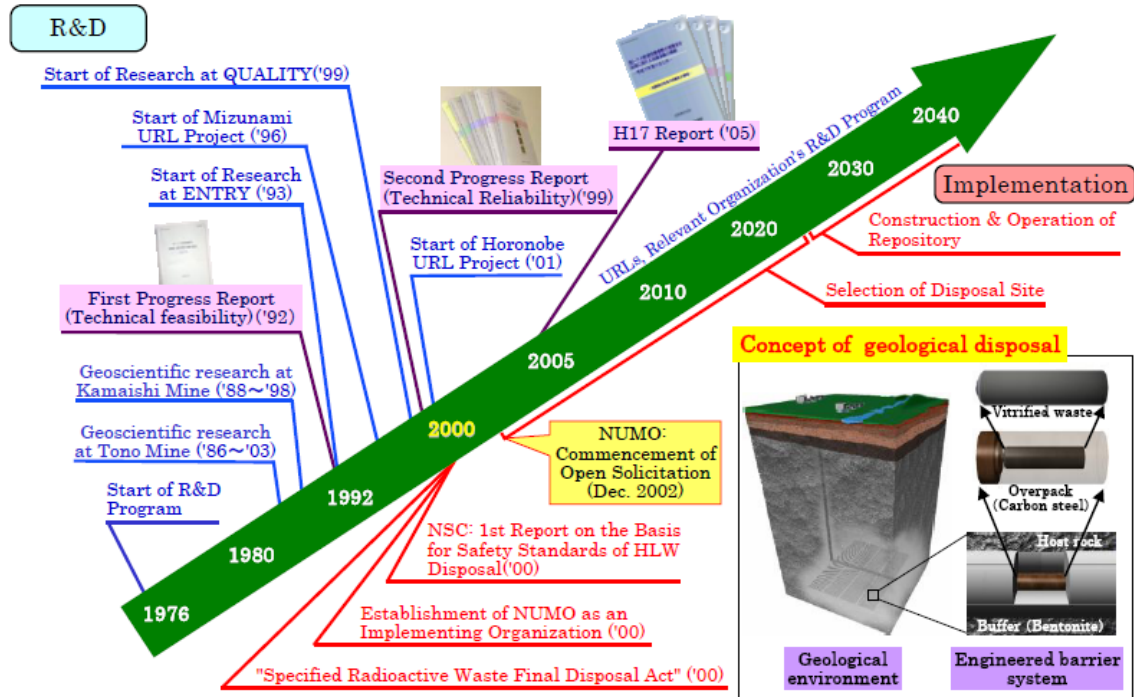


圖 7.1-4 日本高放射性廢棄物處置場各階段期程示意圖(Sugihara, 2009)

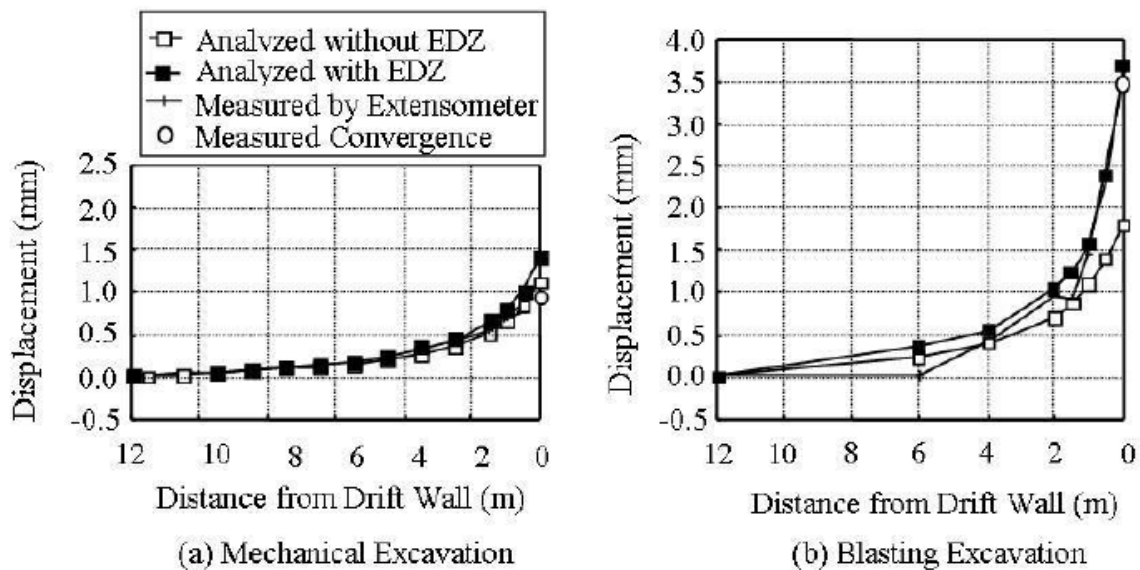


圖 7.1-5 不同開挖工法之坑道壁體位移量測與數值分析成果(Sugihara, 2009)

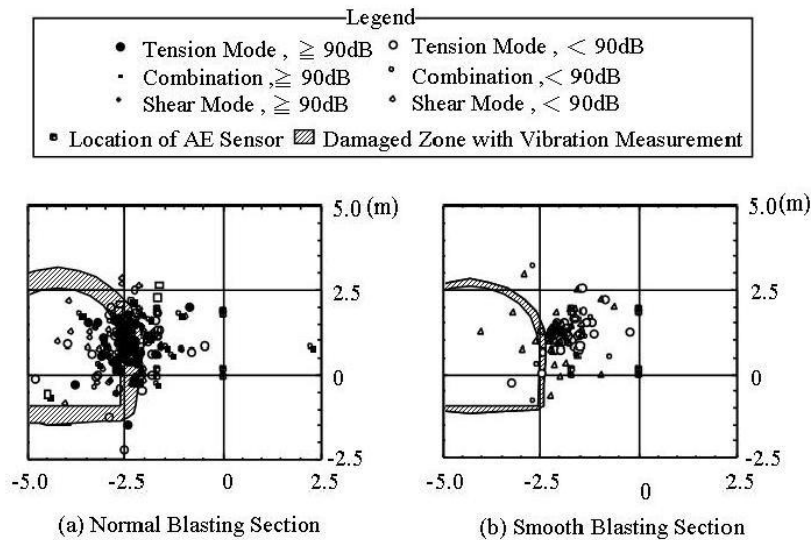


圖 7.1-6 不同開炸技術之 AE 量測成果(Sugihara, 2009)

瑞士亦為探討不同坑道(隧道)開挖工法對周圍岩體擾動之影響，於覆蓋 (overburden) 介於 230~320 公尺深之 Mont Terri 岩石試驗室(現地)，分別採用(1)鑽炸法；(2)懸臂式削岩機(road header)；(3)氣動式破碎機(pneumatic hammering)開挖試驗坑道(圖 7.1-7)，並進行一系列之力學與水力學相關試驗，最後則提出適用於 Opalinus Clay 岩性開挖擾動帶之概念模型，如圖 7.1-8 所示(Bossart et al., 2002)。

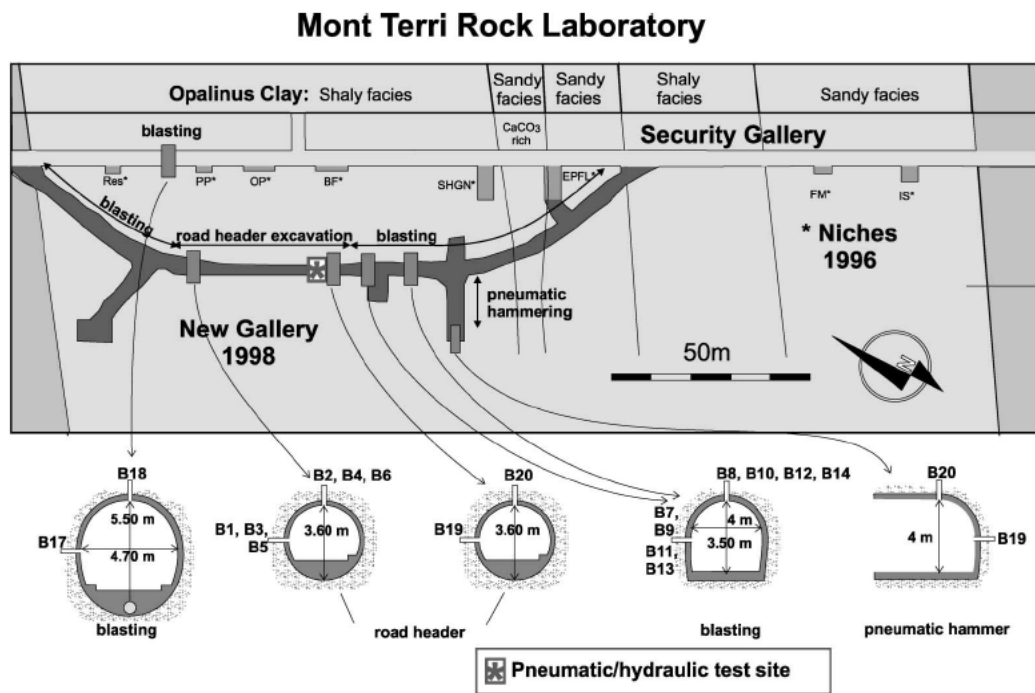


圖 7.1-7 瑞士 Mont Terri 岩石試驗室之不同開挖工法試驗坑道示意圖(Bossart et al., 2002)

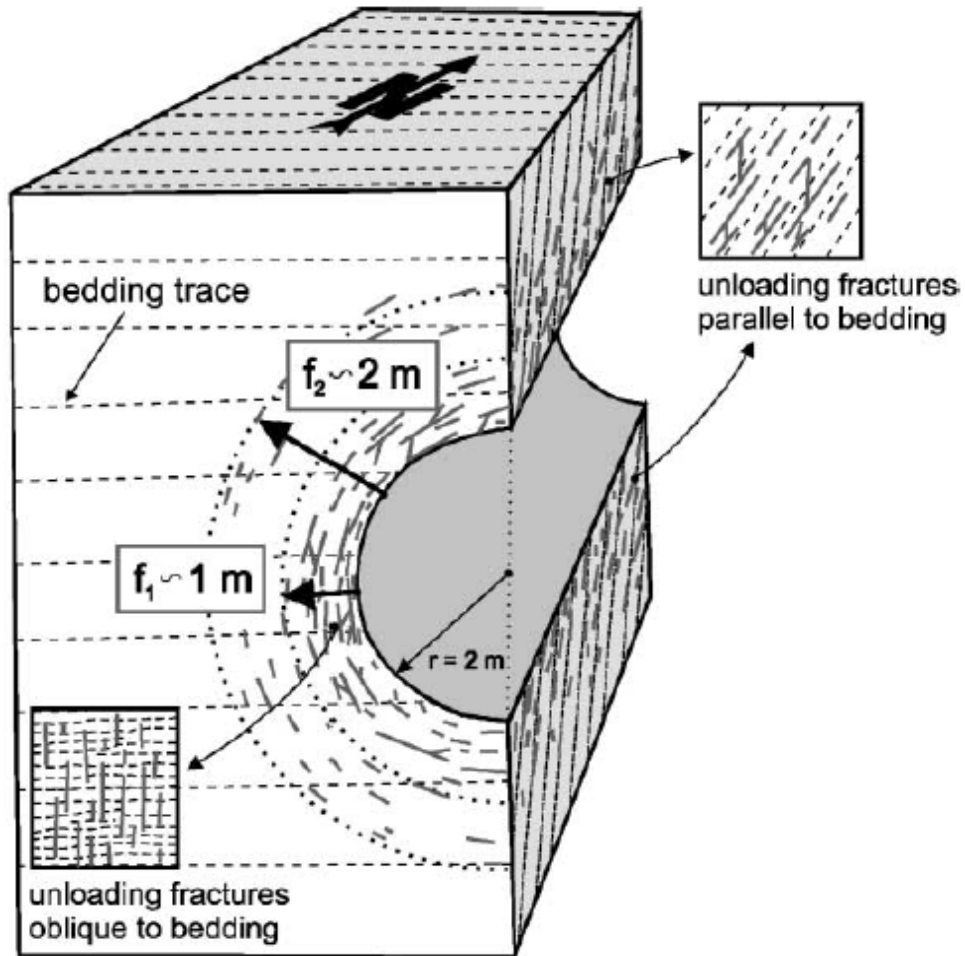


圖 7.1-8 瑞士 Opalinus Clay 岩性開挖擾動帶之概念模型(Bossart et al., 2002)

台灣方面目前此領域與課題之相關研究甚為稀少，僅郭福隆與廖同柏曾於 1991 年於地工技術期刊發表之文章，簡略提到並比較不同隧道開挖工法對周圍岩體之擾動，如表 7.1-1 所示。其後 Wang 等人(2007)則依實際隧道開挖案例，初步探討隧道於軟弱岩盤之開挖擾動帶及其依時行為，詳見圖 7.1-9。

表 7.1-1 不同坑道(隧道)開挖工法比較表(郭福隆與廖同柏，1991)

考慮因素	開炸工法	Roadheader 工法	TBM 工法
應用地質情況	任何地質	軟岩—中硬岩	軟岩—硬岩
投資成本	較低	低—中等	高
施工進度及工期	慢	中等	甚快
交貨時間	2—3 月	3—6 月	9—18 月
工地組合及試運轉	2 週	2 週	8—12 週
組合場地	無限制	中等	較大
最小轉彎半徑	無限制	約 5 公尺	約 200—300 公尺
一般最大坡度	約 30°	約 15°	10°—30°
開挖斷面形狀	任意	任意	圓型
開挖斷面尺寸	任意	任意	1.8—12 公尺
隧道支撐費用	大	中等	小
開挖面週邊撓動情形及超挖量	大	小	小
隧道內通風情形及費用	不良、高	尚可、中	良好、低
斷層處理及鑽探查孔	無限制	無限制	可能
適用隧道長度(註：D 為隧道直徑)	無限制	1000 公尺以上	約 0.8D x 1000 公尺
環境影響(如噪音、震動、廢氣等)	大	小	小
使用坑夫人力數量	大	中	小
國內施工經驗	多	少	無
施工用電量	小	小—中等	大
地質風險造成機具損失	小—中	小—中	小—大
施工人員安全性	低	高	高
機具重複使用性	高	中	低
對地下水影響	大	小	小
隧道內運渣系統要求及重要性	較小	較小	高

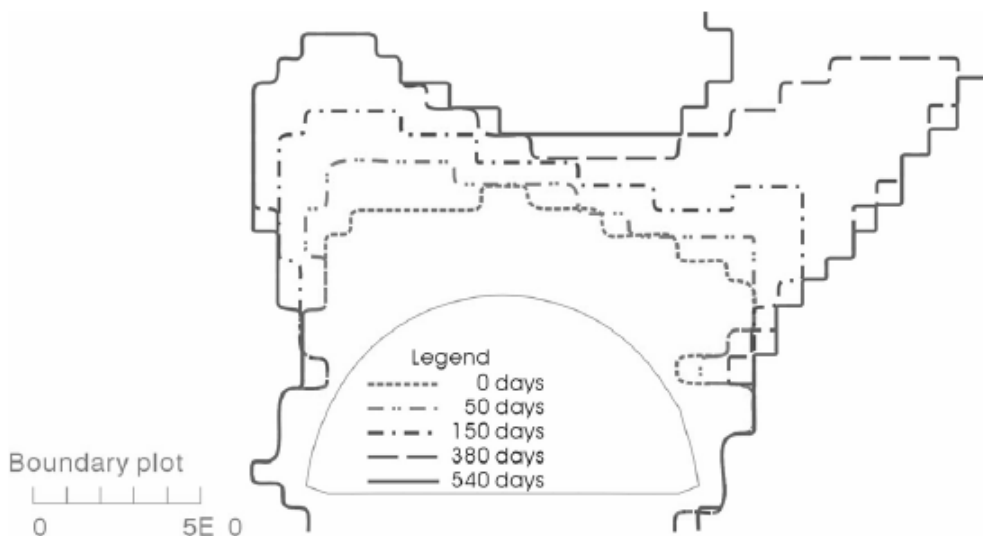


圖 7.1-9 隧道開挖擾動帶之依時變化行為(Wang et al., 2007)

## 7.2 困難地質因應處理方法之探討

按照行政院公共工程委員會於 2001 年委託之研究案報告：台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立—台灣地區特殊地質隧道之調查評估，將隧道可能遭遇之困難地質分為：(1)擠壓性地盤；(2)膨脹性地盤；(3)岩爆地盤；(4)湧水性地盤；(5)有害性氣體地盤；(6)地熱地盤；(7)斷層破碎帶等七大類，並提出其評估、調查方法、研判準則及因應對策，為本節之主要參考內容。

另中華民國隧道協會於 1999 年出版「山岳隧道工程設計與實例手冊」(張吉佐與劉弘祥主編)中第六章特殊地質段設計(王文禮與王泰典主筆)將隧道工程可能遭遇之特殊地質區分為：(1)軟弱地層；(2)斷層；(3)偏壓；(4)淺覆蓋；(5)煤層及廢煤坑；(6)擠壓與膨脹性地盤；(7)地熱及溫泉；(8)湧水；(9)鄰近結構物等九大項，並分別描述其地工特性、處理原則及實際案例說明，亦為本節之主要參考內容。現綜合彙整上述主要研究成果如后。

### 7.2.1 擠壓

在支撐對策方面，具擠壓性地盤隧道之開挖支撐可以概分為主動式(active approach)及被動式(passive approach)兩種方式。主動式支撐策略係利用勁度較高或厚度較厚的支撐，以抑制過量變形之發生，例如重型鋼支保、系統性高密度之長岩栓以及厚層混凝土襯砌等支撐方式，必要時亦可以採用固結灌漿之方式進行地盤改良。被動式支撐策略則容許變形產生，不預先施加太大之束縛，因此隧道之設計必須容許較大的變形量發生。此類設計之對策包括(圖 7.2-1)：

- A. 超挖預留變形空間：在隧道開挖時即超挖，容許適當之變形發生，以符合完工時隧道淨斷面大小之要求。
- B. 可伸縮式鋼支保：使用 U 型或槽型鋼支保，配合可伸縮式的搭接設計，以容許較大的變形。
- C. 噴凝土預留槽溝：在噴凝土沿隧道長軸方向預留槽溝，避免擠壓過程噴凝土因變形過大而破壞。必要時，可利用特殊之降伏構件(yielding element)填充於槽溝內，提供噴凝土初期支撐，並避免變形過大時的破壞。
- D. 可伸展式岩栓：預留槽溝之噴凝土以「可伸展式岩栓」(yielding bolt)輔助固定於開挖面，此類岩栓在承壓鈹端亦設有降伏構件，容許隧道收斂時岩栓過



量伸長，避免岩栓承受過大拉力而發生破壞。

- E. 二次噴凝土：容許發生一定量的變形，隧道變形趨於穩定後，施加二次噴凝土，以抑制進一步之變形。

南迴鐵路大鳥隧道施工遭遇鬆軟岩層及斷層泥，造成嚴重變形、支保斷裂、淨空不足、已完成仰拱隆起等擠壓性問題，採取前進鋼撐、分上、下斷面開挖及支撐、澆置仰拱混凝土等處理對策。

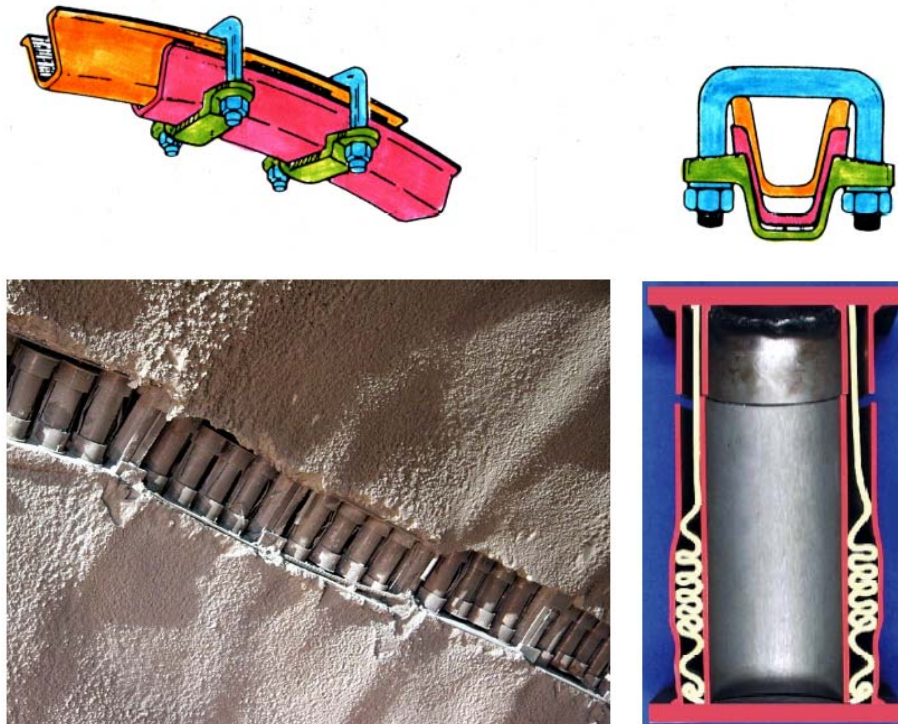


圖 7.2-1 擠壓對策示意圖(Hoek, 2006)

### 7.2.2 湧水

隧道施工遭遇湧水時，處理對策可分為湧水之排除與阻止兩大類。排水工法包括利用排水鑽孔或排水導坑等重力排水工法，以及利用開鑿水井強制抽水排除之深井或點井工法。至於湧水的阻水策略則大多採用化學灌漿或冷凍工法，除了具有止水之功效外，並具有短期地盤改良、方便初期開挖及支撐作業之效果，惟所需費用較排水工法為高，且須考慮環保問題。山岳隧道一般採用之湧水對策及工法如表 7.2-1 所示。

表 7.2-1 山岳隧道湧水對策及工法

湧水對策	工法	
排水工法	重力排水	排水鑽孔、排水導坑
	強制排水	深井工法、點井工法
止水工法	化學灌漿、壓氣工法、冷凍工法	
併用工法	化學灌漿、輔助、止水工法與排水工法併用	

排水或阻水工法之選擇，應根據地形、地質、工期及環保等條件，就其經濟性及施工效果等項目加以評估。其影響因素有：(1)地質構造(透水係數，地下水位分佈等)；(2)湧水量與水壓；(3)湧水區範圍；(4)覆蓋厚度；(5)鄰近構造物(包括地上與地下)；(6)周圍地下水利用情況；(7)隧道外排水設施。

一般隧道施工初期的湧水量通常隨時間增加而逐漸減低，最後收斂至穩定水流。湧水處理若採排水工法，必須評估排水對周圍水文環境造成之衝擊，例如地下水位之降低可能造成隧道附近既有水井水量枯竭；如隧道位於淺覆蓋段，亦須注意抽水可能造成地表沉陷問題。若採用臨時性止水工法，必須考慮化學灌漿效果喪失或冰凍工法解凍後，隧道支撐受力可能隨時間而增加；而地下水豐沛地層、破碎地盤或節理十分發達地區，隧道完工後將長期承受較高之水壓，支撐設計必須考慮排水系統堵塞造成水壓力增量，或是於防水層施工前進行固結灌漿，增加周圍岩體之強度，並降低其滲透性，以確保隧道長期之穩定性。

北宜高速公路坪林隧道施工遭遇四稜砂岩斷層破碎帶，造成湧水及 TBM 受困等困難，目前在此區段採取「遠排近灌」處理原則，並應用水平長距離鑽探、隧道前方地質震波探查技術、地電阻影像探查地下水分佈技術，以獲得開挖面前方地質及水文情況，據以研擬較佳施工對策。

### 7.2.3 有害性氣體

對於隧道較常遭遇的有害氣體甲烷而言，其處理原則與防治對策依其滲漏體積與壓力而定，主要可分為止氣灌漿、通風稀釋及直接排放置隧道外等措施，以抑制在施工場所累計至安全界限，再配合防爆機電設施，人員火源管制及自動切斷電源等設施，全程監控與人員演習訓練等方式，防止災害發生。士林水力發電工程之頭水隧道遭遇瓦斯氣體威脅，基本上採取上述對策處理，其止氣灌漿並分為已開挖段及前進開挖段兩種方法，分述如后。

#### A. 已開挖段止氣灌漿

鑽孔角度向開挖面偏斜 7 度，長度至少超出開挖面 5 公尺，含氣帶之孔底間距以小於 2 公尺為原則。鑽孔順序由上往下，並優先施作右側部分(氣體逸出源)，左側是否需要施作，則視濃度是否小於 0.2% 決定。

每鑽 10 公尺，量測氣體濃度一次，若發現氣體或濃度很低，灌水泥漿封孔，待凝固後，再灌次一孔。當發現某一鑽孔進入含氣帶，即暫停鑽孔作業，以鎂水泥進行止氣灌漿。鑽孔灌漿以 1 至 3 公尺為一單元，不斷進行檢測、補灌(仍有氣體逸出時)、重鑽等循環作業，直至預定深度。長孔灌漿完成後，若氣體濃度仍大於 0.2%，局部補鑽短孔灌漿。

#### B. 前進開挖段止氣灌漿

視前進鑽探孔檢測結果，決定止氣灌漿程度，灌漿材料採 PU 樹脂。微量氣體逸出段，孔距以 1 公尺為原則；大量氣體湧出段(濃度大於 3%)，孔距縮短至 0.4 公尺，並視止氣成效調整孔距與孔數，直至濃度小於 3%。鑽孔順序由上往下，孔深約 8.5 公尺，每輪約挖 1.5 公尺，前進 5 輪約 7.5 公尺，即重複鑽灌作業，並保持 1 公尺重疊區。

#### 7.2.4 斷層破碎帶

隧道開挖前宜對斷層段預作處理，例如以排水或阻水之方式減輕或避免湧水之影響，並應進行必要之保護工法，例如於頂拱上方及開挖面前方實施開挖前之地盤改良、管幕工法、水平高壓噴射樁等。斷層段隧道施工應採分區開挖之原則，支撐與襯砌宜緊緊跟上，並儘速閉合仰拱，以發揮隧道整體之支撐功效。

支撐設計可採用與軟弱地層處理原則類似之對策，以勁度較大、強度較高之支撐系統，抑制岩體過量變形，避免引發更大之岩壓。必要時亦可以配合開挖前之保護工法，採用固結灌漿之方式進行地盤改良，以提高隧道與周圍岩體長期之穩定性。

北二高木柵隧道穿越灣潭斷層，施工時曾發生超過 1 公尺之變形，採取下列處理措施：(1)儘速完成補強岩栓、仰拱及兩側基礎混凝土；(2)增設 50 及 60 噸預力鋼鍵，加強隧道穩定性；(3)加強監測計畫；(4)提出緊急支撐應變計畫。

#### 7.2.5 煤層及廢煤坑

隧道如可能遭遇煤層與廢煤坑時，設計階段即應評估其影響性，對於可能影響隧道施工安全之煤層與廢煤坑，應考慮預做處理，例如採用回填灌漿方式回填

廢煤坑、固結灌漿處理已開採煤面之崩塌區域、挖除可能導致隧道沉陷或支撐受力不均之煤面等。另外，煤層出現地區經常伴隨有煤氣或瓦斯，廢煤坑內積水亦可能產生沼氣，此類有害氣體之施工監測與排除，亦應於設計階段加以考慮。

部分礦區之煤層與廢煤坑分佈十分密集，其處理費用十分昂貴，設計過程對於隧道受煤層與廢煤坑之影響範圍應加以評估，以做為處理改善之依據。對於已開挖煤面與廢煤坑之處理，應以提高施工安全為主要之考量，全面性之回填或補強處理應儘量避免。

隧道開挖支撐方面，支撐系統應考慮採用厚重、勁度較高之剛性支撐，設仰拱並應儘速閉合，岩栓於此類地層之支撐效果應仔細評估，儘量避免將岩栓設置於煤層或未處理之已開挖煤面或廢煤坑中。

隧道混凝土襯砌設計時，應考慮對煤層與廢煤坑之處理效果，並予以折減，或是以未經處理之狀況考慮襯砌之設計載重，以提高隧道長期之穩定性。

南港二號隧道施工過程曾多次遭遇煤坑及煤層影響，其中較主要的兩次廢煤坑狀況及處理情形如表 7.2-2 所示。施工經驗及監測資料顯示，煤坑及煤層如及早發現並預先予以處理，則對隧道穩定之影響較小。

表 7.2-2 南港二號隧道施工過程廢煤坑處理對策一覽表

位置	南港二號隧道東行線 EB13k+031~13k+064	南港二號隧道西行線 WB13K+010~13K+040
坑道類別	煤礦主坑道與片道	採煤探查坑
現況	煤坑主坑道與隧道斜交、片道與隧道垂直，煤坑主坑道上方岩盤坍塌，仍具坑道形狀，片道已坍塌填塞	探查坑與隧道近乎平行，坑洞周圍岩體風化破碎，仍可見坑道，隧道台階降挖後坑道不明確
坑道尺寸(m)	主坑 1.8×1.2，片道 1.2×0.9	3-0.75×0.6
鬆動區範圍	上方 1.5m，兩側 1.0m	坑壁外圍 1.0m
岩盤岩性	上方厚層砂岩	上方厚層砂岩
處理方式	以填充灌漿自下而上填充岩隙中孔洞，以達改良、填實功效	同左
襯砌補強方式	13k+037~13k+041、 13k+054~13k+064 襯砌全斷面 加補強鋼筋	13k+010~13k+016.2 襯砌加補 強鋼筋

### 7.3 隧道施工對多重障壁功能的影響初探

由 7.1 節之研究與探討可知，不同坑道(隧道)開挖工法對周圍岩體之擾動影響程度不一，而其對放射性廢棄物坑道處置場址多重障壁功能的影響，主要係因既存的弱面如層面、節理面與片理面等，可能發生剪動、剪脹或張裂，亦可能形成新的細微裂弱，進而改變天然障壁的地質與水文特性，因此，以下將針對坑道(隧道)施工對多重障壁功能的影響進行初步探討。

#### 7.3.1 影響過程與參數

Sato 等人(2000)首次提出坑道(隧道)開挖擾動帶(EDZ)影響周圍岩體特性改變之過程，如圖 7.3-1(a)所示，其主要影響為：(1)開挖損傷(裂隙)；(2)應力重新分布；(3)孔隙水壓改變等，故周圍岩體之岩石力學、水文地質與地球化學等特性也隨之改變，此將嚴重影響並關係未來處置場址多重障壁功能的安全評估(Safety Assessment)。大陸學者吉小明(2005)亦參考 Sato 等人(2000)之研究成果，也提出類似之流程圖，詳見圖 7.3-1(b)。

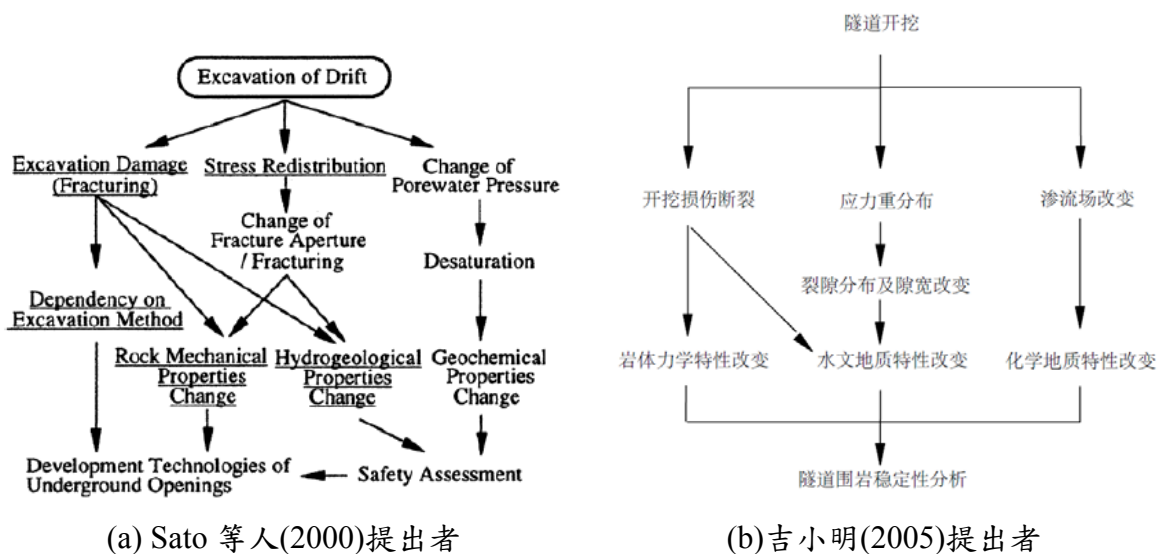


圖 7.3-1 隧道開挖引起的圍岩特性的改變過程

此外，Saiang (2008)則根據圓形隧道開挖塑性區(Plastic Zone)大小解析解理論之概念，提出處置場址坑道開挖影響周圍岩體力學與水力特性參數有：(1)波速(v)；(2)勁度(E)；(3)軸差應力；(4)水力傳導係數(K)；(5)透射率(T)，上述(1)~(3)參數數值隨著距開挖擾動帶(EDZ)越遠而提高；(4)與(5)二參數則下降，如圖 7.3-2 所示。換言之，坑道(隧道)開挖擾動帶將使周圍岩體之波速、勁度與軸差應力下

降；並使水力傳導係數與透射率提高，此將使處置場之安全係數降低(因受擾動岩體具有依時變形特性，使坑道受力增加)、輻射傳撥機率提高(因地下水為放射物傳輸的最可能媒介)。

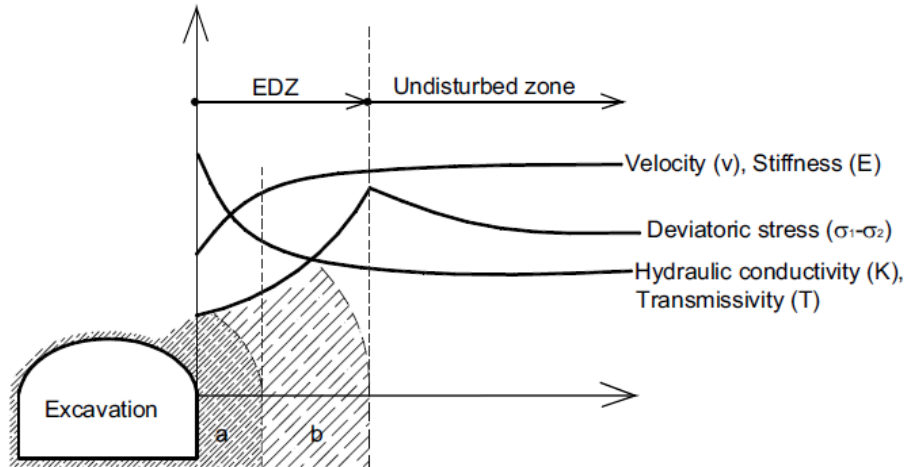


圖 7.3-2 隧道開挖擾動所影響之周圍岩體參數(Saiang, 2008)

### 7.3.2 隧道開挖施工對圍岩之爆破損傷

Pusch 與 Stanfors (1992)、Pusch 與 Svemar (1993)認為影響隧道開挖擾動對圍岩之爆破損傷主要係受(1)岩體節理位態；(2)爆破(開炸)技術；(3)炸藥用量；(4)現地應力等因子高度影響。圖 7.3-3 顯示坑道(隧道)開挖方向與岩體節理位態關係對開挖擾動帶(EDZ)大小之影響；圖 7.3-4 則顯示不同爆破(開炸)技術對圍岩之擾動影響；圖 7.3-5 則統計不同炸藥用量所造成圍岩損傷區(Damage Zone)大小之實測資料成果。

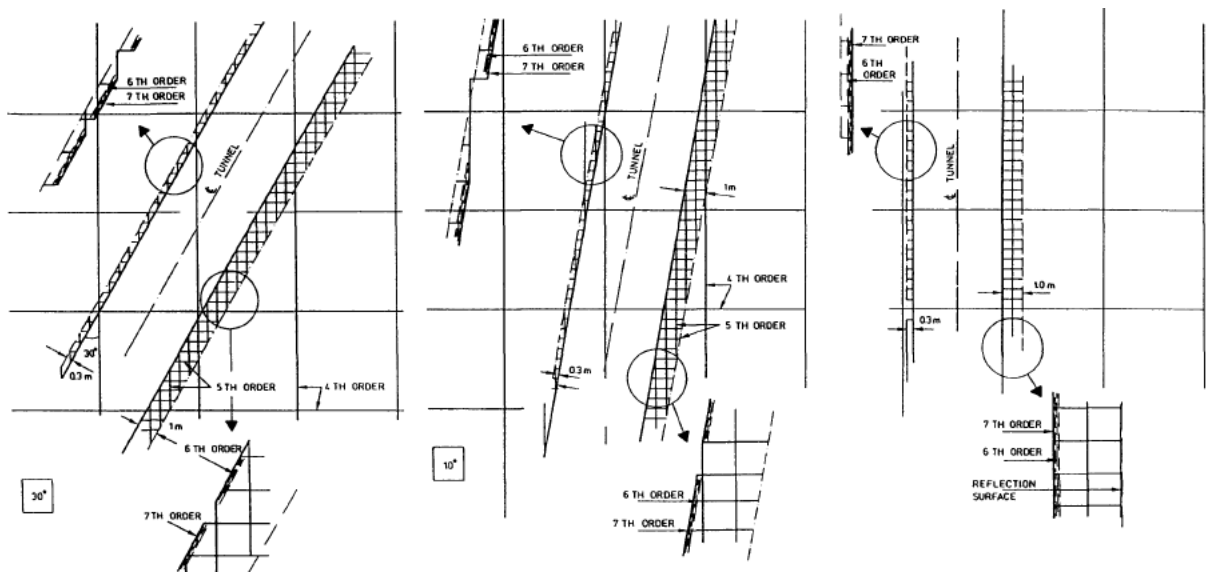


圖 7.3-3 坑道(隧道)開挖方向與岩體節理位態對開挖擾動帶(EDZ)大小之影響 (Pusch and Stanfors, 1992)

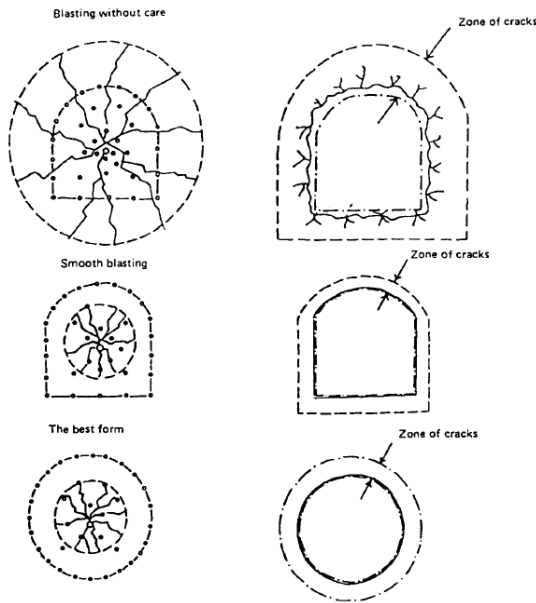


圖 7.3-4 不同爆破(開炸)技術對圍岩擾動影響示意圖(Pusch and Stanfors, 1992)

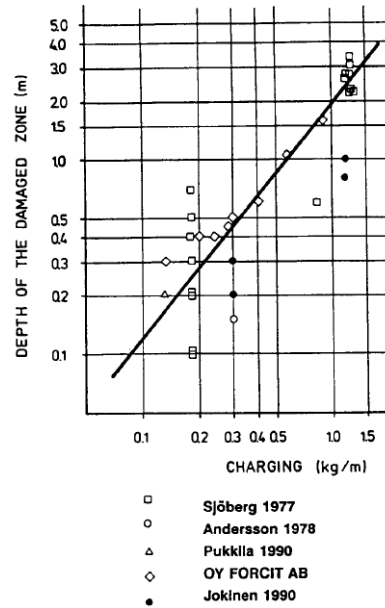


圖 7.3-5 不同炸藥用量所造成圍岩損傷區(Damage Zone)大小之實測資料(Pusch and Stanfors, 1992)

韓國 KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute)機構之 Kwon 等人(2009)為進一步瞭解坑道(隧道)開挖施工對圍岩之爆破損傷及其擾動帶大小與各項岩體參數之變化，於 KURT (KAERI underground research tunnel)開挖一試驗坑道，並於爆破開挖前後分別進行一系列之試驗與量測，其研究結果顯示：爆破開挖後現地岩體之楊氏模數(Young's Modulus)、P 波波速均降低；而孔隙率(Porosity)則增加，詳見圖 7.3-6。

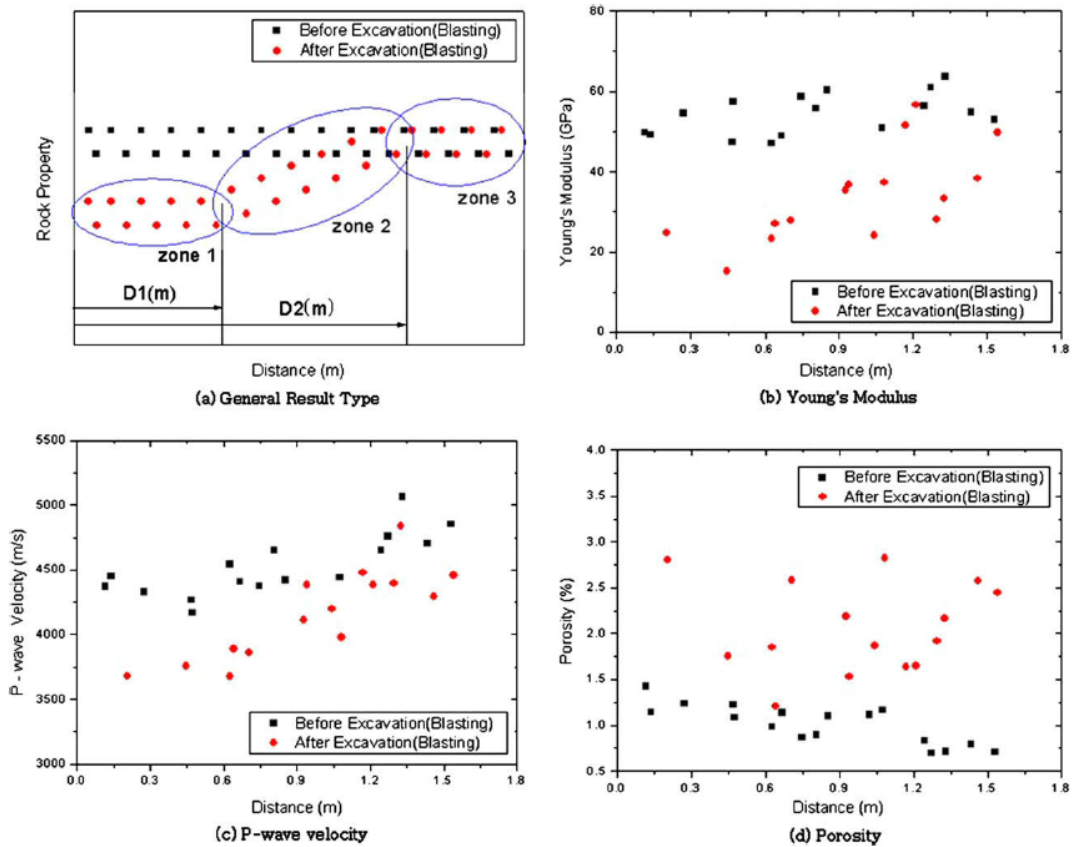


圖 7.3-6 坑道(隧道)爆破開挖前後各岩體參數之變化(Kwon et al., 2009)

國內吳柏青與丁原智(2008)曾嘗試利用紅外線熱影像分析探討隧道及坑室爆破岩體損傷檢測，初步研究成果(圖 7.3-7)顯示：(1) 紅外線熱影像於檢測隧道爆破後的斷面、頂拱、兩側壁等有很好的效果，其表面溫度變化差異在 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 之間；(2) 隧道斷面頂拱的位置於爆破後出現高溫，係因爆破時釋放出高溫、高壓氣體，朝著頂拱的方向擴散出去，再加上頂拱屬於完整的岩塊，散熱不易，是故顯示較高的溫度。

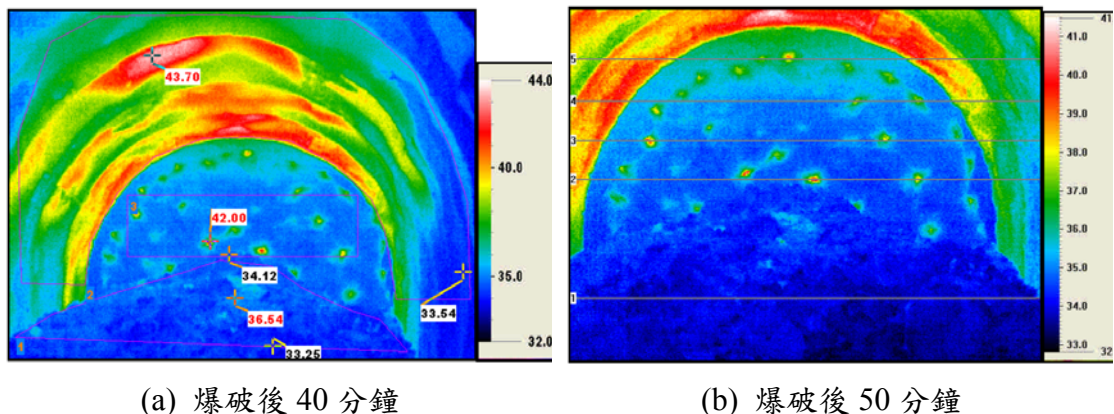


圖 7.3-7 應用紅外線熱影像分析坑道(隧道)爆破岩體損傷檢測(吳柏青與丁原智，2008)



### 7.3.3 開挖擾動帶之依時變形特性

大地材料的依時性變形行為視其性質與荷載條件而異，包括潛變、鬆弛 (relaxation)、荷載速率效應與疲勞(fatigue)現象等。以完整岩材為例，依時性變形行為已有許多學者探討，如 Bieniawski (1970)、Peng 與 Podnieks (1972)、Lama 等(1978)、Cristescu (1993)等，其特性較能知曉。Pellet 等人(2009)則利用三維有限元素法之數值模擬方式，分析坑道(隧道)開挖後之依時變形行為，如圖 7.3-8 所示。圖 7.3-9 則為支撐對減緩隧道開挖擾動影響之貢獻(效應)。

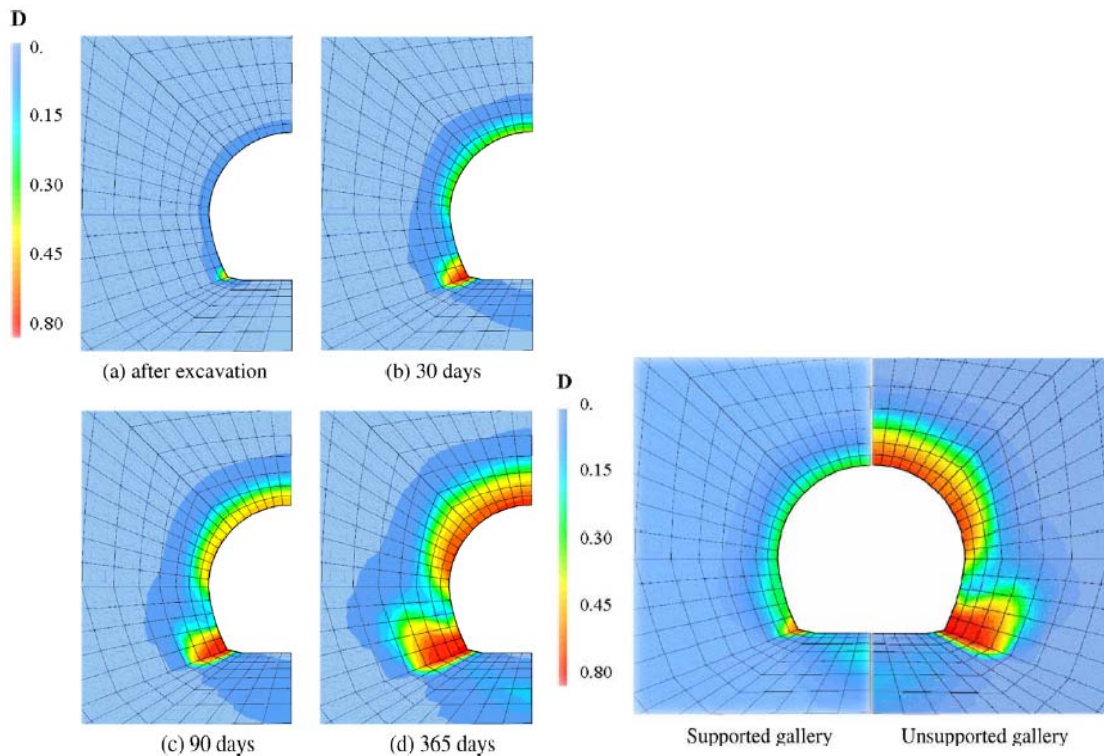


圖 7.3-8 坑道(隧道)開挖後依時變形行為之數值分析成果(Pellet et al., 2009)

圖 7.3-9 有無支撐對隧道開挖擾動影響之數值分析(Pellet et al., 2009)

國內董家鈞(1989)考慮黏滯性的岩體中進行隧道開挖建造，隧道的收斂變形與時間會有相當大的關聯性，針對影響隧道之收斂變形的時間因素做詳盡的探討及研究。並提出了一套簡化的二向度模式黏彈模式及拉式轉換法，將影響隧道收斂變形的時間因素及三向度因素納入考慮，探討隧道與支撐間互制的問題。其研究成果可應用於預測隧道之長期收斂變形。

林志冠(1994)則探討岩石隧道開挖施工之前期變形量，包括開挖前已發生之變形量，以及開挖後至裝設計測系統前之變形量。其依據大地材料所做過的依時性變形模式，反推出二種不同的變形預測模式，推導出潛變參數，並利用 FLAC

程式來模擬隧道壁面之變形。其針對不同之岩體分類 RMR 值求得不同的潛變參數，並模擬不同延遲時間之支撐架設之影響。研究成果顯示，在不同的潛變特性下，岩石隧道開挖後計測前之變形量佔岩體總變形量相當大的比例，值得重視。

#### 7.3.4 開挖擾動帶之水力特性

1980 年代放射性棄廢物處理問題受到高度重視，水力壓裂、深井注入及隧道等地下處置概念漸漸形成，岩體滲透行為開始有較深入的探討。惟自然岩體中存在許多不連續面，如裂隙、層面、節理面與片理面等，使其力學與水力行為呈現異質性(heterogeneity)與異向性(anisotropy)，並造成模擬、分析與相關工程設計的困難。因此，以下分別就岩體滲透行為與現地試驗二方面，初步探討如后。

##### A. 岩體滲透行為

加州大學柏克萊分校 Noorishad 等人(1971)發展一套二維節理岩體內滲流之有限元素分析程式，該模式可考慮岩材與節理面的變形，然無法對節理面滑動破壞及膨脹行為進行分析；至於節理面導水性則以流量立方律為基礎，結合岩體力學模式求解出節理岩體力學與水力耦合行為下之聯立解，從而分析正交節理岩盤上壩基的穩定性。

1971 年 Cundall 提出的離散元素法(DEM)發展之 UDEC 程式，可對岩體中每一組成岩塊及節理面逐一處理計算其受力行為。挪威地工技術研究所之 Barton 等(1992)針對 Stripa 計畫中的地下坑洞開挖引致岩盤變形與導水性進行研究，亦引用該數值方法進行坑洞開挖周圍岩體力學行為的分析，至於岩體中節理面之導水性則以其發展之 JRC-e 導水耦合模式為基礎，再進一步推算出岩盤內節理系導水性變化之分布。

美國明尼蘇達大學 Asgian (1988)結合有限差分法之 UDEC 與邊界元素法提出一套節理岩體滲流耦合行為之混合型(hybrid)數值分析模式，用於探討高壓灌注試驗下之節理岩體的變形與水力傳導特性。但仍僅止於岩材的彈性範圍，節理面變形則可發展至滑動(slip)與膨脹變形，滲流則仍採用較簡單之流量立方律做為滲流場之分析依據。

Duarte Azevedo 等人(1998)基於等值連續體觀念，考慮岩體中的裂隙呈多重平行層切割完整岩石，採用黏塑模式模擬節理的剪力行為與膨脹行為，黏彈模式模擬閉合行為，參考 Barton 等(1985)建議的節理面變形性與傳導特性，依據水力

內寬估算節理面的滲透性，進而求得裂隙岩體的滲透張量，並進一步利用自我適應時階控制法(self-adaptive time step control)建立有限元素分析程式，分析裂隙岩體水力—力學耦合行為。

Cesano 等人(2003)指出岩體裂隙的空間分佈特性影響其滲透行為，針對地質岩體分類法建立一套裂隙岩體異質指數定量化程序，進而依據義大利西北部阿爾卑斯山隧道案例的裂隙資料，透過統計分析建立裂隙的變化傾向與滲流方向與滲流量的關係，並定義一裂隙岩體異質指數，提供不同尺度岩體課題裂隙參數變化特性評估的參考。

Min 等人(2004)以一離散裂隙網絡量測資料，考慮岩體中裂隙的非線性正向閉合變形與剪脹行為，利用二向度離散元素法程式 UDEC 進行數值模擬試驗，探討不同荷載條件下裂隙岩體的水平方向滲透特性變化。數值模擬試驗結果顯示，當水平應力與垂直應力比值不足以造成裂隙剪脹行為時，岩體滲透係數隨應力的增加而減小；當比值足以造成裂隙剪脹行為時，岩體滲透係數隨應力的增加而增大。低應力情況岩體滲透係數變化較高應力情況顯著，且應力引致的裂隙剪脹行為將造成流徑的集中化現象，導致岩體滲透行為具有異向性之特性。依據數值模擬試驗結果，Min 等人(2004)進一步建議一套估算裂隙岩體應力相依滲透行為之經驗公式。

國內方面，趙振宇進行一系列節理面導水耦合行為研究，深入探討節理面導水性的影響因素，整理如后：

1. 針對規則鋸齒狀岩石節理面，夾泥厚度與鋸齒元素之高度比為影響其剪力行為的主要控制因子，夾泥節理面於中低正應力條件破壞多為滑動破壞；當正應力較高時鋸齒元素方發生剪動破壞(李宏輝、趙振宇，2002)。
2. 剪動條件下節理面的滲流試驗結果顯示，剪動初期，滲流量受到節理粗糙度的影響較為顯著；當剪位移超過尖峰位移量之後，明顯流徑已然形成，滲流比並達到一穩定狀態(雷世璋、趙振宇、黃燦輝，2003)。
3. 由實驗結果驗證，平滑節理面之基本摩擦角及剪向勁度無規模效應現象。節理面粗糙起伏較大者，其剪力、膨脹曲線之規模效應較為明顯；反之，節理面粗糙起伏較為平緩，未呈現明顯之力學規模效應。透過理論模式進行量化分析結果顯示，節理面受剪時節瘤接觸面積比、節瘤平均接觸應力、平均上坡角的變化等，為造成節理面剪力強度規模效應的主要因素(趙振宇、陳建

勛、黃燦輝，2004；趙振宇、雷世璋、黃燦輝，2004)。

4. 節理面越粗糙，各加載循環之滲透係數變化倍率均較節理面平緩者來得大，且節理面越粗糙者，其在第一次加載循環下滲透係數都有高達兩階的變化倍率。隨著正向應力的增加，節理面逐漸地閉合使得節理內寬縮小，當滲流遭遇接觸節瘤區之阻礙時，會尋找內寬大小相仿的內寬通過，而並非依循內寬較大處流動，因而形成一條條的流槽，並在滲流路徑上表現出扭曲的特性，且此流徑扭曲特性對於較粗糙節理面而言，其效應要比節理面平緩者來得顯著。考慮初始內寬與節瘤壓縮效應的力學模式，可有效反應出節理面粗糙度、內寬分布與接觸面積變化對節理閉合變形性的影響，亦可有效的預測節理面於正向閉合過程之導水性變化，並得知節理面滲流速度場的分布。流槽水平向扭曲率對導水行為具較高的影響性，接觸面積比次之，且接觸面積比與流槽水平向扭曲率兩者修正量之差距會隨著正應力增加而減少(張六順、趙振宇、黃燦輝，2005)。

另王泰典(2008)則利用 MATLAB 程式語言撰寫裂隙岩體水力-力學耦合模式，首先透過序率途徑(stochastic approach)，依破裂面空間分佈與幾何特性參數(破裂面中心點位、破裂面跡線長度、破裂面位態及破裂面內寬)生成裂隙網絡(discrete fractured networks, DFN)如圖 7.3-10(a)，求得流體有效的通道—滲流網絡如圖 7.3-10(b)。繼而以滲流網絡為基礎，假設岩石材料透水性可忽略，流體只能在破裂面中流動的情況下，採用定率途徑(deterministic approach)，依循質量守恆與達西定律，求解通道中各節理之水頭，並據以計算裂隙岩體之滲透係數張量，探討裂隙岩體之滲流行為以及應力耦合作用對於裂隙岩體滲透係數之影響。

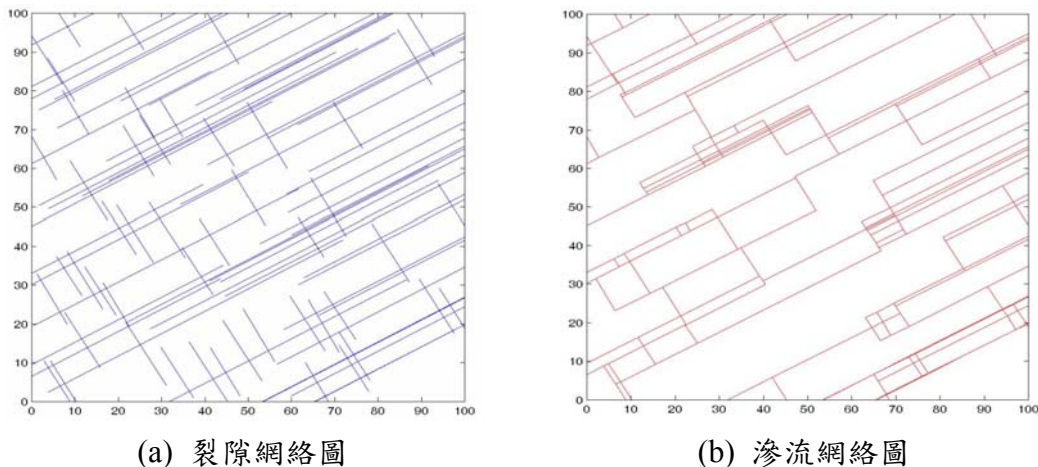


圖 7.3-10 裂隙岩體水力-力學耦合行為研究之網絡圖(王泰典，2008)

## B. 相關現地試驗

1980 年代的數個核廢料處置相關研究計畫陸續推動，如瑞典的 STRIPA 計畫、美國的 CLIMAX、Yucca Maintain 以及 INTERVAL 計畫，逐漸應用大型現地試驗探討岩體溫度、滲流、應力與化學場的耦合行為。

DECOVALEX (DEvelopment of COupled THM models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation)係一核廢料隔離實驗與耦合模式對比驗證大型國際合作計畫，自 1992 年起由瑞典、法國、美國、日本、挪威、芬蘭、英國與加拿大等核能先進國家共同推動，此計畫可謂是國際地質與岩體工程領域有關岩體行為互制作用最廣泛也是最深入的研究計畫。

DECOVALEX 計畫迄今已完成前 3 期研究(DECOVALEX I, 1992~1995；DECOVALEX II, 1995~2000；DECOVALEX III, 2000~2003)。最近完成的一期 DECOVALEX III 計畫進行了兩個大型的現地測試案例(test cases, TC)與三個基準試驗(benchmark tests, BMT)，並針對岩體熱力—水力—力學耦合機制進行一系列的討論，以供作為最終處置場址調查、功能評估(performance assessment, PA)與安全評估(safety assessment, SA)之參考。依據前三期研究成果的基礎，DECOVALEX 目前正進行第 4 期有關岩體熱力—水力—力學—化學耦合行為研究計畫(DECOVALEX THMC, 2004~2007)。

在 DECOVALEX II 計畫中，Chijimatsu 等(2001)於日本釜石礦場(Kamaishi Mine)聯絡坑道中開挖一直徑 1.7m，深度 5.0m 之試坑，進行大尺度現地試驗以評估工程障蔽技術的適用性，並觀測近域的岩體熱力—水力—力學耦合反應，試驗區域之佈置與試坑、鑽孔以及感測器相關位置如圖 7.3-11 所示。Nguyen 等(2001)利用試坑開挖過程的周圍花崗岩的水力與力學反應觀測結果，如圖 7.3-12 所示，透過四組團隊進行平行研究，其中三組假設岩體為等值多孔隙介質，分別考慮不同的離散裂隙方式，另一組假設圍岩為等值彈性體，其彈性模數自裂縫張量理論推導而得。依據數值模擬結果與現地試驗觀測結果比較顯示，流入試坑的總流量、坑壁的流量分佈以及圍岩的變位量有較佳的預測結果，惟不同鑽孔的水壓以及坑壁的開張行為較出現較大的偏差，Nguyen 等進一步建議應發展更嚴謹的岩體數學模式，考慮耦合行為互制過程重要參數的變化特性，以及尋求等值連續體模式代表性體積元素更適當的描述尺度，以模擬近域的圍岩裂隙開張現象。

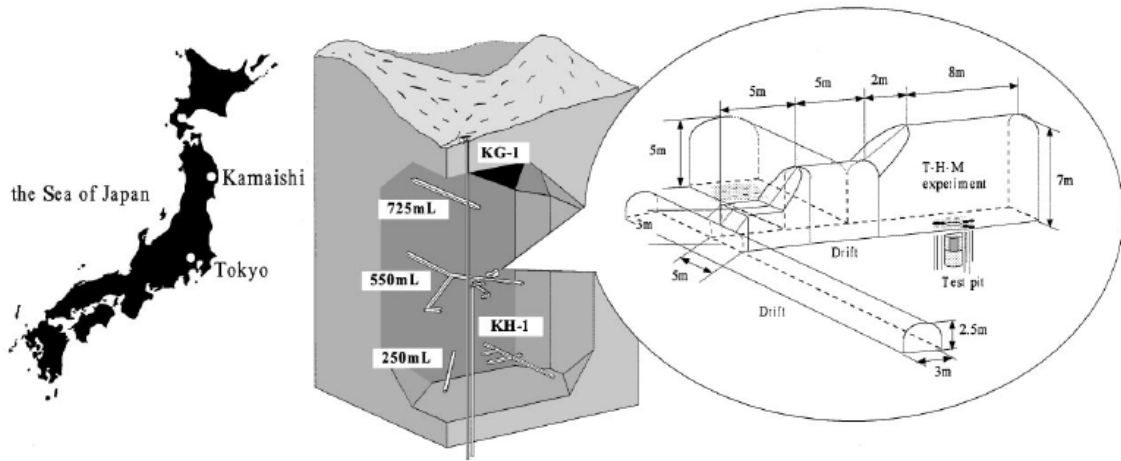


圖 7.3-11 日本釜石礦場(Kamaishi Mine)試驗區域佈置示意圖 (Chijimatsu et al., 2001)

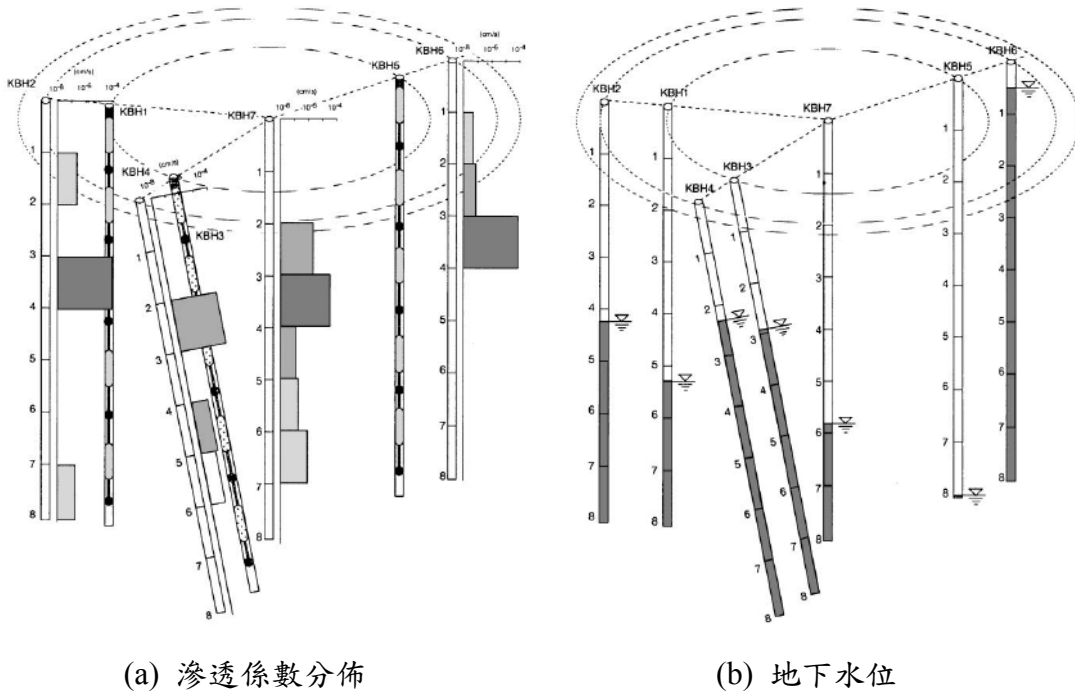


圖 7.3-12 試坑周圍花崗岩的水力與力學反應觀測結果(Nguyen et al., 2001)

DECOVALEX III 計畫進行了兩個大型的現地測試案例(test cases, TC)與三個基準試驗(benchmark tests, BMT)。第一個現地測試案例 TC1 係於瑞士格林塞爾地下測試場(Grimsel Underground Testing Facility)進行的結晶質母岩中全尺度工程障蔽試驗 (full-scale engineered barriers experiment in crystalline host rock, FEBEX)，試驗內容主要將兩個加熱器放置於橫坑中並以皂土回填，透過大量佈置於橫坑圍岩中的監測系統，觀測加熱器反覆加熱與冷卻過程圍岩的反應現象，

以探討高放射性廢料處置場址天然障蔽(地質岩體)近域的耦合作用機制。FEBEX 試驗的測試坑道與監測孔位佈置如圖 7.3-13 所示，其觀測期長達 9 年以上。

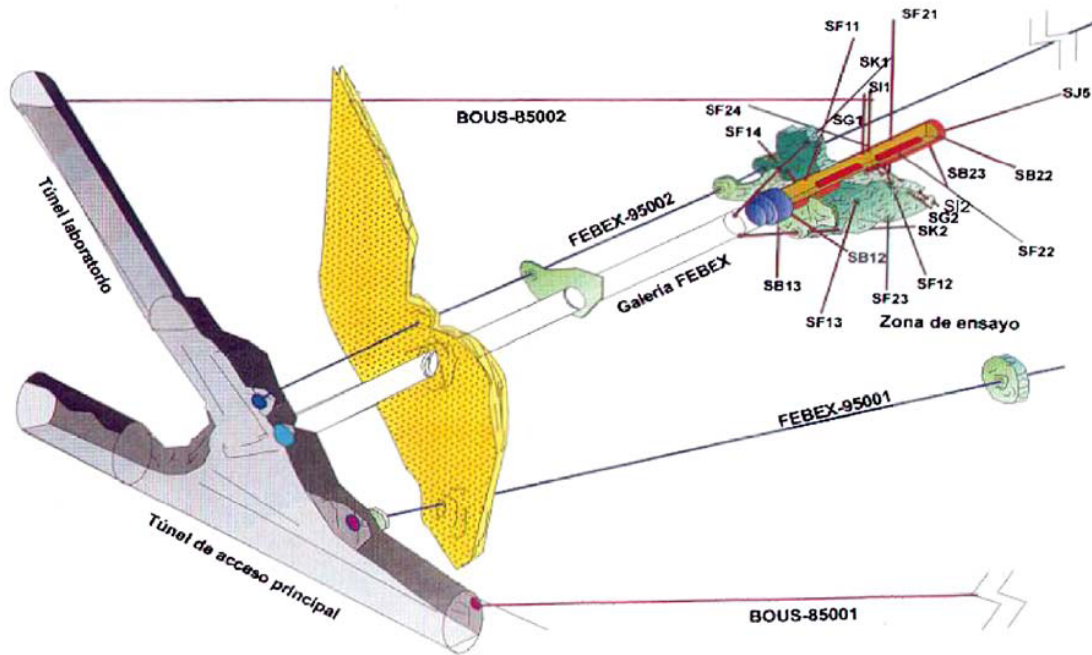


圖 7.3-13 FEBEX 試驗的測試坑道與監測孔位佈置

FEBEX 試驗針對近域的圍岩水力—力學耦合模式、回填皂土熱力—水力—力學行為分析以及圍岩熱力—水力—力學行為分析等課題，進行多團隊的平行研究，其中有關圍岩水力—力學耦合模式的研究成果顯示，數值分析結果能否有效模擬現地試驗，受水文地質模式是否適當考量圍岩和實驗系統特性的影響程度，大於分析模式採用的數值方法(如離散裂面系統或等值多孔隙連體等)。且水力—力學耦合模式必需同時考慮裂隙岩體的流動和應力/變位行為，尤其是開挖施工納入分析條件時，岩體應力/變位的模擬反應短期的力學荷載作用和邊界條件的變化，對分析結果具重要的影響。

另一個現地測試案例 TC2 係於美國內華達州雅卡山(Yucca Mountain)進行的橫坑尺寸試驗(drift scale test, DST)，利用佈置於未飽和凝灰岩中的 9 個大型加熱器和 50 個輔助加熱器組成的加熱系統，觀測未回填情況下圍岩溫度、位移、飽和度、有效水力傳導係數和水質等的變化，以評估探討該試驗位置是適合做為高放射性廢棄物和核廢料的貯放場址，DST 試驗的佈置如圖 7.3-14 所示，其觀測結果提供多種分析模式對比驗證的參考。

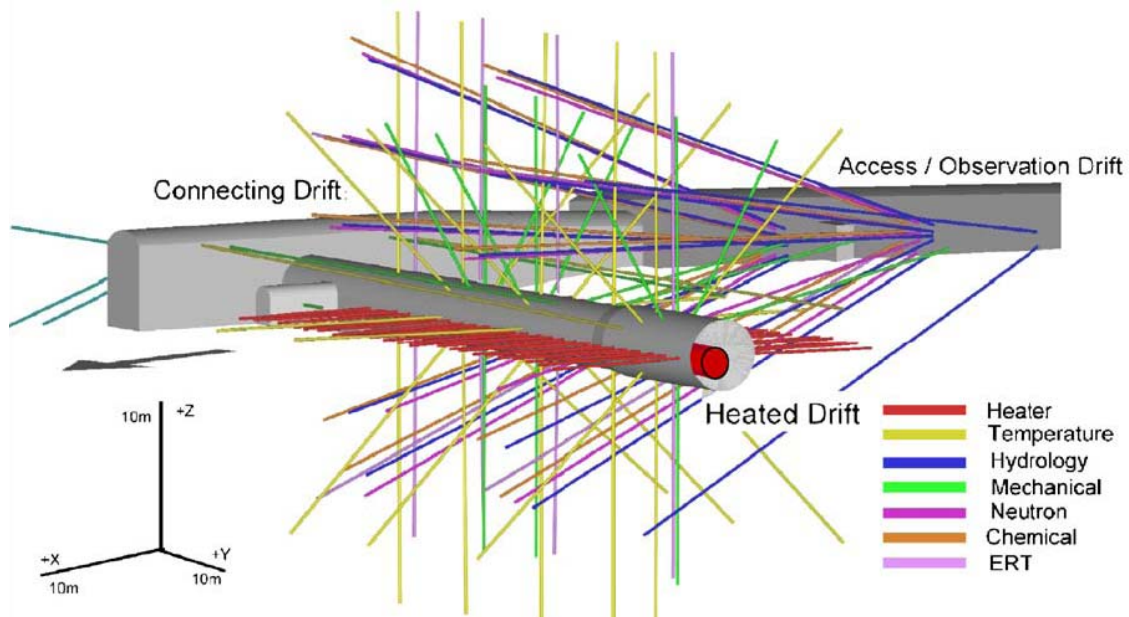


圖 7.3-14 DST 試驗的加熱橫坑與聯絡坑道以及監測孔位佈置

BMT 基準試驗採用數值模擬實驗方式針對關注貯置場址的效能，給予假設條件探討岩體熱力－水力－力學效應個別作用下或耦合作用的行為，並外推探討跨時間和空間尺度的結果。BMT 基準試驗皆由各國多團隊進行平行研究，探討不同的概念模型與數值模式的差異性，再綜合討論試驗結果的特性，包括下列三個主要試驗主題：

BMT1：近域流動與力學整合分析(flow and mechanical integrity in the near field)，主要探討典型的貯放場佈置下，熱力－水力－力學互制作用對流動型態以及工程障蔽和天然障蔽整合結構的影響。

BMT2：裂隙岩體熱力－水力－力學作用機制的升尺寸研究(upscaling of THM processes in fracture rock)，主要探討裂隙岩體熱力、水力和力學特性(小尺寸試驗獲得)，如何升尺寸(upscaling)應用於大尺寸(large-scale)的貯置場址功能評估。由於岩體中僅需少數的裂隙存在，即可能改變其水力、力學以及其耦合行為，因此 BMT2 試驗特別注重由小尺寸分析考量岩體熱力－水力－力學耦合作用，升尺寸至一等值的(equivalent)連體代表其特性，應用於貯置場址功能評估時有關溶解物傳輸分析結果的影響程度。

BMT3：冰川和永久凍土的影響(effect of glaciation and permafrost)，主要探討冰期循環對於貯置場址地質圈(geosphere)長期效能(最長達 100,000 年)的影響。



## 第八章 結論與建議

### 8.1 結論

本計畫依約完成下列工作項目，其中第(1)至(6)項分述於本報告第二章至第七章，第(7)與(8)項亦於計畫執行過程配合物管局另案計畫與各工作會議與相關討論完成。

- (1) 國內既有場址調查規範與調查技術彙整。
- (2) 坑道處置場址特性調查與參數評估之檢查與審查架構暨審查要點研析。
- (3) 國內既有隧道設計及施工技術規範彙整。
- (4) 國內既有隧道設計方法、設計參數與穩定分析技術之彙整。
- (5) 國內既有隧道工程材料之技術規範彙整分析。
- (6) 國內既有隧道施工技術對多重壁障功能影響之初步探討。
- (7) 配合物管局辦理「低放處置場安全分析報告審查導則草案」編修。
- (8) 參與本局召開之技術研討會議報告工作成果暨研究成果報告撰寫。

本計畫研究成果可提供我國低放處置場安全分析報告審查導則草案編修之參考。依據研究所得，茲針對審查導則草案編修與本計畫有關之部分，提出本計畫之建議於 8.2 節。

### 8.2 低放處置場安全分析報告審查導則草案編修之建議

我國低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則共分十三章，對應之審查導則草案除與本計畫相關之第三章「場址之特性描述」、第四章「處置設施之設計」以及第五章「處置設施之建造」以外章節，已由另案計畫提出，包括第三章「場址之特性描述」之與地表環境較相關的八項，即社會與經濟、地形與地貌、氣象、地表水、天然資源、生態、輻射背景偵測、交通狀況及其他，以及第四章「處置設施之設計」之輻射安全設計部分，另案計畫已有涵括。以下僅依據本計畫研究結果，針對審查導則草案第三章至第五章其他有關場址特性調查及設施設計與建造審查要項編修之要點，建議如下表 8.1 至表 8.3。

表 8.1 審查導則草案有關場址特性調查及設施設計與建造審查要項編修要點之建議(第三章 場址之特性描述部分)

因子	安全分析報告內容概要	審查導則編修要點建議	本報告對應可參考之章節
地質與地震	說明場址及附近地區之地層、地體構造、活斷層、歷史地震等調查之成果等，並說明斷層與地震危害度之調查與評估方法。	提供要項部分：應涵蓋蒐集既有調查成果之範圍與內容，地質與地震調查之架構、調查與評估之方法，以及調查之成果等。 審查作業部分：應涵蓋既有調查成果之查核、調查架構是否符合描述場址特性之需求、調查與評估方法之適當性與代表性，調查成果是否足以描述場址地質與地震特性等。	2.1 調查規範 2.2 調查技術，包括調查階段與相應之調查項目與方法 3.1 場址特性調查與參數評估架構 3.2 審查要項探討，包括既有資料蒐集及地質部分 5.2 隧道設計參數 7.2.4 斷層破碎帶
地下水	說明場址及附近地區之地下水體水文、水質特性及其使用狀況、水文地質架構與水文參數等資料及其調查方法。	提供要項部分：應涵蓋蒐集既有調查成果之範圍與內容，地下水體水文、水質特性及其使用狀況、水文地質架構與水文參數等之調查架構、調查與評估之方法，以及調查之成果等。 審查作業部分：應涵蓋既有調查成果之查核、調查架構是否符合描述場址特性之需求、調查與評估方法之適當性與代表性，調查成果是否足以描述場址地下水特性等。	2.1 調查規範 2.2 調查技術，包括調查階段與相應之調查項目與方法 3.1 場址特性調查與參數評估架構 3.2 審查要項探討，包括既有資料蒐集及水文部分 5.2 隧道設計參數 7.2.2 湧水 7.3.4 開挖擾動帶之水力特性
地球化學	說明可能影響場址安全及核種遷移之水化學，土壤與岩石之分類組成及地球化學特性，以及相關之地化模擬資料。地球化學調查因子涵蓋場址及附近地區之無機質成分、有機質含量、氧化還原電位、酸鹼值、分配係數、遲滯因子、離子交換能力、放射性核種之溶解度與化學型態、價數與性質等。	提供要項部分：應涵蓋蒐集既有調查成果之範圍與內容，包括可能影響場址安全及核種遷移之水化學，土壤與岩石之分類組成及地球化學特性，以及相關之地化模擬資料等。地球化學之調查架構、調查因子、調查與評估之方法，以及調查之成果等。 審查作業部分：應涵蓋既有調查成果之查核、調查架構是否符合描述場址特性之需求、調查與評估方法之適當性與代表性，調查成果是否足以描述場址地球化學特性等。	2.1 調查規範 2.2 調查技術，包括調查階段與相應之調查項目與方法 3.1 場址特性調查與參數評估架構 3.2 審查要項探討，包括既有資料蒐集及水文部分 7.2.3 有害性氣體 7.3.4 開挖擾動帶之水力特性
大地工程特性	說明場址之大地工程特性與測量方法，並界定影響處置設施設計與建造之地工參數，包括場址地區土壤與岩石的強度、變形性與滲透性等。	提供要項部分：應涵蓋蒐集既有調查成果之範圍與內容，包括地工特性、水文地質與現地應力等要項，地工特性、水文地質與現地應力之調查架構、調查與評估之方法，以及調查之成果等。 審查作業部分：應涵蓋既有調查成果之查核、調查架構是否符合描述場址地工特性、水文地質與現地應力特性之需求、調查與評估方法之適當性與代表性，調查成果是否足以描述場址大地工程特性等。	2.1 調查規範 2.2 調查技術，包括調查階段與相應之調查項目與方法 3.1 場址特性調查與參數評估架構 3.2 審查要項探討，包括既有資料蒐集及大地工程特性部分 5.1 國內既有隧道設計方法 5.2 隧道設計參數 5.3 隧道設計穩定分析技術 7.1 不同隧道開挖工法之擾動 7.2 困難地質因應處理方法之探討

表 8.2 審查導則草案有關場址特性調查及設施設計與建造審查要項編修要點之處置設施之設計部分)

因子	安全分析報告內容概要	審查導則編修要點建議	本報告對應可參考之章節
設計目標與功能需求	說明處置設施之設計基準、設計要項及設計規格等。	<p>提供要項部分：應涵蓋處置設施之設計目標、設計基準與功能需求以及對應引用法規、報告或函文之依據，設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等，各項設計成果應說明採用的比例尺與包括之詳細圖說、設計細部報告以及相關附冊等。</p> <p>審查作業部分：應檢核處置設施之設計目標、確認設計基準與功能需求是否完整，引用法規、報告或函文之適當性與代表性，設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等正確性與合理性，圖說比例尺之適當性、設計報告與附冊之正確性與完整性，是否需實施處置設施穩定分析與安全分析等平行驗證審查等。</p>	<p>4.1 國內既有隧道設計技術規範，包括設計規範彙整、設計理念與考量因素與設計項目與流程</p> <p>4.2 國內既有隧道施工技術規範</p> <p>4.3 隧道施工相關其他技術文件</p> <p>5.1 國內既有隧道設計方法，包括經驗設計法、觀察設計法與分析設計法</p> <p>5.2 隧道設計參數</p> <p>5.3 隧道設計穩定分析技術</p>
建築設計	說明處置設施主要結構物、使用需求規劃及其配置。	<p>提供要項部分：應涵蓋處置設施主要結構物之建築設計目標、使用需求規劃及其配置、相關的設計基準與功能需求，以及對應引用法規與報告之依據；並包括設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等，各項設計成果應說明採用的比例尺與所包含之詳細圖說、設計細部報告以及相關附冊等。</p> <p>審查作業部分：應檢核處置設施主要結構物之建築設計目標、確認使用需求規劃及其配置是否滿足，相關的設計基準與功能需求是否完整，引用法規與報告之適當性與代表性，設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等正確性與合理性，圖說比例尺之適當性、設計報告與附冊之正確性與完整性，是否需實施處置設施建築設計穩定分析與安全分析等平行驗證審查等。</p>	<p>4.1 國內既有隧道設計技術規範，包括設計規範彙整、設計理念與考量因素與設計項目與流程</p> <p>4.2 國內既有隧道施工技術規範</p> <p>4.3 隧道施工相關其他技術文件</p> <p>5.1 國內既有隧道設計方法，包括經驗設計法、觀察設計法與分析設計法</p> <p>5.2 隧道設計參數</p> <p>5.3 隧道設計穩定分析技術</p>
結構設計	說明處置設施主要結構物之結構分類、設計荷重及其組合等。	<p>提供要項部分：應涵蓋處置設施主要結構物之結構設計分類、設計基準與功能需求、相關的設計荷重及其組合，以及對應引用法規與報告之依據；並包括設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等，各項設計成果應說明採用的比例尺與所包含之詳細圖說、設計細部報告以及相關附冊等。</p> <p>審查作業部分：應檢核處置設施主要結構物之結構分類、設計基準與功能需求是否滿足，確認相關的設計荷重及其組合，引用法規與報告之適當性與代表性，設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等正確性與合理性，圖說比例尺之適當性、設計報告與附冊之正確性與完整性，是否需實施處置設施結構設計穩定分析與安全分析等平行驗證審查等。</p>	<p>4.1 國內既有隧道設計技術規範，包括設計規範彙整、設計理念與考量因素與設計項目與流程</p> <p>4.2 國內既有隧道施工技術規範</p> <p>4.3 隧道施工相關其他技術文件</p> <p>5.1 國內既有隧道設計方法，包括經驗設計法、觀察設計法與分析設計法</p> <p>5.2 隧道設計參數</p> <p>5.3 隧道設計穩定分析技術</p>

<p>土木設計</p>	<p>說明處置設施主要結構物之工程材質、屏蔽材料之特性與設計標準(包括處置設施及其覆蓋、回填等)、地表防洪及地下排水系統之設計。</p>	<p>提供要項部分:應涵蓋處置設施主要結構物工程材質以及屏蔽材料之設計目標、使用需求規劃及其配置、相關的設計基準與功能需求,以及對應引用法規與報告之依據;並包括設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等。土木設計應包括處置設施及其覆蓋、回填、地表防洪及地下排水系統以及護坡工程等。                  審查作業部分:應檢核處置設施主要結構物之工程材質、屏蔽材料設計目標、使用需求規劃及其配置是否滿足,相關的設計基準與功能需求否否完整,引用法規與報告之適當性與代表性,設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等正確性與合理性,圖說比例尺之適當性、設計報告與附冊之正確性與完整性,材料試驗規範與試驗方法之適當性,是否需實施平行驗證審查等。</p>	<p>4.1 國內既有隧道設計技術規範,包括設計規範彙整、設計理念與考量因素與設計項目與流程                  4.2 國內既有隧道施工技術規範                  4.3 隧道施工相關其他技術文件                  5.1 國內既有隧道設計方法,包括經驗設計法、觀察設計法與分析設計法                  5.2 隧道設計參數                  5.3 隧道設計穩定分析技術                  6.1 隧道支撐材料                  6.2 隧道襯砌材料</p>
<p>輔助設施或系統之設計</p>	<p>說明廢棄物暫貯區、廢棄物檢整或處理系統、粉塵與廢水收集排放處理系統、廢棄物傳送系統、分析或偵測系統之設計,並說明各系統失效時之補救措施。</p>	<p>提供要項部分:應涵蓋處置設施廢棄物暫貯區、廢棄物檢整或處理、粉塵與廢水收集排放處理、廢棄物傳送、分析或偵測系統等輔助設施或系統之設計目標、使用需求規劃及其配置、相關的設計基準與功能需求,以及對應引用法規與報告之依據;並包括設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等,各項設計成果應說明採用的比例尺與所包含之詳細圖說、設計細部報告以及相關附冊等。                  審查作業部分:應檢核處置設施輔助設施或系統之設計目標、使用需求規劃及其配置是否滿足,相關的設計基準與功能需求否否完整,引用法規與報告之適當性與代表性,設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等正確性與合理性,圖說比例尺之適當性、設計報告與附冊之正確性與完整性,是否需實施處置設施建築設計穩定分析與安全分析等平行驗證審查等。</p>	<p>無</p>
<p>公用設施或系統之設計</p>	<p>說明通訊、電力、供水、供氣、照明、廢棄物處理、通風等系統之設計,並說明各系統失效時之補救措施。</p>	<p>提供要項部分:應涵蓋處置設施有關通訊、電力、供水、供氣、照明、廢棄物處理、通風等公用設施或系統之設計目標、使用需求規劃及其配置、相關的設計基準與功能需求,以及對應引用法規與報告之依據;並包括設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等,各項設計成果應說明採用的比例尺與所包含之詳細圖說、設計細部報告以及相關附冊等。公用設施或系統設計應包括備援系統,並說明各系統失效時之補救措施。                  審查作業部分:應檢核處置設施公用設施或系統之設計目標、使用需求規劃及其配置是否滿足,相關的設計基準與功能需求否否完整,引用法規與報告之適當性與代表性,設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等正確性與合理性,圖說比例尺之適當性、設計報告與附冊之正確性與完整性,是否需實施處置設施建築設計穩定分析與安全分析等平行驗證審查等。</p>	<p>4.1 國內既有隧道設計技術規範,包括設計規範彙整、設計理念與考量因素與設計項目與流程</p>

表 8.3 審查導則草案有關場址特性調查及設施設計與建造審查要項編修要點之建議(第五章 處置設施之建造部分)

因子	安全分析報告內容概要	審查導則編修要點建議	本報告對應可參考之章節
施工特性	說明施工規劃概要，包括所遵循之法規、標準、規範、施工階段及施工範圍等。	提供要項部分：應涵蓋處置設施施工規劃概要，施工範圍與工區整體佈置、整體期程規劃與施工階段劃分、施工界面處理，施工所遵循之法規、標準與規範，施工潛在危害、因應措施與緊急應變對策。 審查作業部分：應檢核處置設施施工規劃是否完整可行，施工範圍與工程整理佈置是否適當、整體期程規劃與施工階段劃分是否造成界面衝突、施工所遵循之法規、標準與規範是否適當、施工潛在危害是否考慮周詳、是否採取因應措施並預擬緊急應變對策。	4.2 國內既有隧道施工技術規範 4.3 隧道施工相關其他技術文件 6.1 隧道支撐材料 6.2 隧道襯砌材料 7.1 不同隧道開挖工法之擾動 7.2 困難地質因應處理方法之探討 7.3 隧道施工對多重障壁功能影響初探
施工計畫	處置設施之建造應擬具可行施工計畫，包括工程經營管理、施工佈置、施工材料、施工方法、施工機具設備、施工程序(含與處置作業並存之施工程序)、施工時程、工業安全衛生、水土保持與環境保護、品管與品保方案及緊急應變處理等。	提供要項部分：應涵蓋處置設施建造有關之施工計畫，包括工程經營管理、施工佈置、施工材料、施工方法、施工機具設備、施工程序、施工時程、監測與回饋設計、工程安全衛生、水土保持與環境保護、品管與品保方案及緊急應變處理等。各項施工計畫應包括對應引用的法規與報告，工項進度控管、品質檢核與驗收計價之依據。 審查作業部分：應檢核處置設施工程經營管理相關組織與施工佈置之合理性與適當性、施工材料是否符合場址設計要求，材料檢驗計劃與退貨處理程序是否完備，施工方法、施工機具設備、施工程序與施工時程是否合宜，監測佈置是否符合場址設計要求，量測頻率是否合適，施工安全預警系統與回饋設計計畫是否合理、工程安全衛生、水土保持與環境保護是否符合相關法規規定、品管與品保方案及緊急應變處理等是否適當合理。	4.2 國內既有隧道施工技術規範 4.3 隧道施工相關其他技術文件 6.1 隧道支撐材料 6.2 隧道襯砌材料 7.1 不同隧道開挖工法之擾動 7.2 困難地質因應處理方法之探討 7.3 隧道施工對多重障壁功能影響初探

## 參考文獻

- [1] Asgian, M. I. (1988): A numerical study of fluid flow in deformable, naturally fractured reservoirs. Ph. D. Dissertation, University of Minnesota.
- [2] Backblom, G. and C. D. Martin (1999): Recent Experiments in Hard Rocks to Study the Excavation Response: Implications for the Performance of a Nuclear Waste Geological Repository, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 377-394.
- [3] Backblom, G., R. Stanfors, G. Gustafson, I. Rhen, P. Wikberg, O. Olsson and C. Thegerstrom (1997): Aspö Hard Rock Laboratory-Research, Development and Demonstration for Deep Disposal of Spent Nuclear Fuel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 12, No. 3, pp. 385-406.
- [4] Bieniawski, Z. T. (1970): Time-dependent behaviour of fractured rock. *Rock Mechanics*, 2, pp. 123-137.
- [5] Bossart, P., P. M. Meier, A. Moeri, T. Trick and J. C. Mayor (2002): Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory, *Engineering Geology*, 66, pp. 19-38.
- [6] Cesano, D., A. C. Bagtzoglou and B. Olofsson (2003): Quantifying fractured rock hydraulic heterogeneity and groundwater inflow prediction in underground excavations: the heterogeneity index. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(1), pp. 19-34.
- [7] Chijimatsu M., T. Fujita, Y. Sugita, K. Amemiya and A. Kobayashi (2001): Field experiment, results and THM behavior in the Kamaishi mine experiment. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 38(1), pp. 67-78.
- [8] Cristescu, N. (1993): Rock rheology. *Comprehensive Rock Engineering* (ed. in chief J. A. Hudson), Pergamon, Oxford, Vol. 1, pp. 523-544.
- [9] Cundall, P. A. (1971): A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock system. In: *Proc. Int. Symp. Rock Fracture*, Nancy, II-8.
- [10] Duarte Azevedo, I. C., L. E. Vaz and E. A. Vargas (1998): A numerical procedure for the analysis of the hydromechanical coupling in fractured rock masses. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 22, pp. 867-901.
- [11] Hoek, E. and Brown, E. T. (1980): *Underground Excavations in Rock*.
- [12] Hoek, E. (2006): *Practical Rock Engineering*, Evert Hoek Consulting Engineer Inc.
- [13] Kwon, S., C. S. Lee, S. J. Cho, S. W. Jeon and W. J. Cho (2009): An investigation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24, pp. 1-13.

- [14] Lama, R. D. and V. S. Vutukuri (1978): Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Vol. III & IV, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
- [15] Min, K. B., J. Rutqvist, C. F. Tsang and L. Jing (2004): Stress-Dependent permeability of fractured rock masses: a numerical study. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 41(7), pp. 1191-1210.
- [16] Nguyen T. S., L. Borgesson, M. Chijimatsu, J. Rutqvist, T. Fujita, J. Hernelind, A. Kobayashi, Y. Ohnishi, M. Tanaka and L. Jing (2001): Hydromechanical response of a fractured granitic rock mass to excavation of a test pit-the Kamaishi Mine experiment in Japan. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 38(1), pp. 79-94.
- [17] Noorishad, J., P. A. Witherspoon, and T. L. Brekke (1971): A method for coupled stress and flow analysis of fractured rock masses. Publication No. 71-6, Dept. of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- [18] Pellet, F., M. Roosefid and F. Deleruyelle (2009): On the 3D numerical modelling of the time-dependent development of the damage zone around underground galleries during and after excavation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24, pp. 665-674.
- [19] Peng, S. S. and E. R. Podnieks (1972): Relaxation and the behaviour of Failed Rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 9, pp. 699-712.
- [20] Pusch R. and C. Svemar (1993): Influence of Rock Properties on Selection of Design for a Spent Nuclear Fuel Repository, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 8, No. 3, pp. 345-356.
- [21] Pusch, R. and R. Stanfors (1992): The Zone of Disturbance Around Blasted Tunnels at Depth, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 29, No. 5, pp. 447-456.
- [22] Saiang, D. (2008): Damaged Rock Zone Study, A Progress Report, Luleå University of Technology Department of Civil, Mining and Environmental Engineering Division of Rock Mechanics.
- [23] Sato, T., T. Kikuchi and K. Sugihara (2000): In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan. *Engineering Geology*, 56(1-2), pp. 97-108.
- [24] Sugihara, K. (2009): Geological disposal of high-level radioactive waste and the role of rock engineering, *International Journal of JCRM (Japanese Committee for Rock Mechanics)*, Volume 5, Number 1, pp. 19-24.
- [25] Stephansson, O. and Zang, A., (2010): How to generate the Final Rock Stress Model (FRSM) at a site or an area, 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60165-8

- [26] Wang, T. T., W. Lo, Y. C. Ding and S. T. Liu (2007): Study on tunnel excavation disturbed zone in weak rock with time-dependent behavior, 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics, 9-13 Jul., Lisbon, Portugal, pp. 1057-1160.
- [27] 中國土木工程學會，1999，隧道工程設計準則與解說，科技圖書。
- [28] 中華民國隧道協會，1999，山岳隧道工程設計與實例手冊，科技圖書。
- [29] 中華民國隧道協會，1999，潛盾隧道施工技術規範之研討，科技圖書。
- [30] 中華民國隧道協會，2004，軟土潛盾隧道工程設計與實例手冊，科技圖書。
- [31] 中華民國隧道協會，2009，潛盾隧道設計及施工準則與解說，科技圖書。
- [32] 中華民國隧道協會，2009，隧道施工技術、品管與案例彙編，科技圖書。
- [33] 王泰典，2008，裂隙岩體水力—力學耦合行為之研究(II)，行政院國家科學委員會補助專題研究計畫，NSC 96-2221-E-027-061，台北。
- [34] 吉小明，2005，隧道開挖的圍岩損傷擾動帶分析，岩石力學與工程學報，第24卷，第10期，第1697-1702頁。
- [35] 交通部，2003，公路隧道設計規範。
- [36] 交通部公路總局，2005，施工說明書技術規定(共二冊)。
- [37] 交通部台灣區國道新建工程局，1997，公路隧道消防法規制訂，研究報告094。
- [38] 交通部台灣區國道新建工程局，1998，公路隧道安全設施準則研訂，研究報告097。
- [39] 交通部台灣區國道新建工程局，2000，隧道二次襯砌功能、設計理念與混凝土設計規範之研究與建議對策，研究報告118。
- [40] 交通部台灣區國道新建工程局，2008，公路隧道消防安全設備設置規範草案，研究報告157。
- [41] 交通部台灣區國道新建工程局，2003，隧道施工技術規範，使用手冊031。
- [42] 行政院公共工程委員會，2001，台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立—台灣地區特殊地質隧道之調查評估，行政院公共工程委員會專案研究計畫，研究報告。
- [43] 行政院公共工程委員會，2003，台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立，行政院公共工程委員會專案研究計畫，研究報告0920198。
- [44] 行政院公共工程委員會，2010，公共工程施工綱要規範 (<http://pcces.archknowledge.com/>)。
- [45] 汪燮之，1987，實用隧道工程學，國立編譯館，大中國圖書公司。
- [46] 吳柏青、丁原智，2008，紅外線熱影像分析探討隧道及坑室爆破岩體損傷檢測，資源與環境學術研討會論文集，花蓮，第277-290頁。
- [47] 李宏輝、趙振宇，2002，含泥岩石節理面力學行為之研究，2002岩盤工程研討會，新竹中華大學，第145-156頁。
- [48] 林志冠，1994，岩石隧道依時變形行為之研究，國立台灣科技大學營建工程



- 技術學系碩士論文。
- [49] 林福星，1981，山岳隧道之施工，榮民工程事業管理處。
- [50] 財團法人台灣營建研究院，1997~2000，營建自動化 推廣手冊叢書，內政部營建署。
- [51] 張嘉德，1993，公路隧道設計、施工—半剛性支撐工法，公路局第二區工程處。
- [52] 張六順、趙振宇、黃燦輝，2005，正向閉合下模擬節理面粗糙特性對其導水性之影響，第十一屆大地工程研討會論文集，台北縣萬里，F39-1-F39-6。
- [53] 陳志南，1998，隧道工程實務，國立台灣科技大學營建工程系，科技圖書。
- [54] 黃燦輝、王文禮、王泰典、徐力平，2000，台灣隧道工程之地質處理技術，隧道工程地質處理技術研討會，台北，第 1-36 頁。
- [55] 董家鈞，1989，黏彈性岩石隧道依時性收斂變形模式，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- [56] 經濟部水利署，2003，基隆河員山子分洪工程 細部設計計算書。
- [57] 經濟部水利署南區水資源局，2008，曾文水庫越域引水工程計畫—隧道工程西引水隧道 B 段工程細部設計計算書。
- [58] 雷世璋、趙振宇、黃燦輝，2003，岩石節理面剪動—導水耦合行為影響因素之研究，第十屆大地工程研討會論文集，台北縣三峽，第 647-650 頁。
- [59] 榮民工程事業管理處，1990，隧道工程(上、下冊)。
- [60] 趙振宇、陳建勛、黃燦輝，2004，剪力作用下岩石節理面粗糙特性對其導水性之影響，2004 岩盤工程研討會論文集，台北縣淡水，第 168-175 頁。
- [61] 趙振宇、雷世璋、黃燦輝，2004，岩石節理面受剪—導水耦合行為之研究，第四屆海峽兩岸地工技術/岩土工程交流研討會論文集，台北，台灣卷，第 123-130 頁。