



行政院原子能委員會  
放射性物料管理局

行政院原子能委員會放射性物料管理局  
委託研究計畫研究報告

106 年低放射性廢棄物坑道處置安全  
審驗技術建立之關鍵課題研析  
子計畫三：低放射性廢棄物坑道處置結構  
穩定性驗證方法研究

計畫編號：105FCMA011

計畫主持人：董家鈞

子計畫三主持人：楊長義、李宏輝

受委託機關(構)：社團法人中華民國大地工程學會

報告日期：中華民國 106 年 12 月

**106 年低放射性廢棄物坑道處置安全  
審驗技術建立之關鍵課題研析  
子計畫三：低放射性廢棄物坑道處置結構  
穩定性驗證方法研究**

受委託單位：社團法人中華民國大地工程學會

計畫主持人：董家鈞

子計畫三主持人：楊長義、李宏輝

研究期程：中華民國 106 年 2 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 79.68 萬元(子計畫三經費)

**行政院原子能委員會放射性物料管理局  
委託研究計畫研究報告**

**中華民國 106 年 12 月**

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

---

---

## 摘要

根據低放射性廢棄物處置技術先進國家的經驗，最終處置方式多採近地表處置，依廢棄物埋藏於地表或地下之方式，可再區分為(1)地表壕溝、(2)混凝土窖與(3)坑道處置三種。其中，坑道處置係將放射性廢棄物埋置於數十公尺的地下，透過工程障壁與天然障壁所構成的多重障壁系統，以限制或遲滯放射性核種的遷移。坑道處置在設計、建造、運轉與封閉等各階段，除了需考量場址特性的影響，所需技術也遠較其他處置方式複雜。

為能確保處置坑道在運轉階段能維持坑道結構之穩定性，本研究除蒐整低放射性廢棄物處置先進國家分析有關處置坑道結構穩定之經驗及國內既有的坑道結構穩定分析方法與驗證技術外，並進一步根據我國低放射性廢棄物可能場址，對鄰近既有坑道進行地質、建造過程與劣化現況之資料蒐集與現場調查。針對影響坑道結構穩定性之可能影響因子與肇因進行討論，並研析相關的數值分析、試驗與檢測等驗證方法，據此建立了外島與本島坑道處置結構穩定性審查之假想案例，提出我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性分析流程與驗證重點，及低放處置審查導則(第0版)相關條文修訂建議，俾為後續發展處置坑道結構穩定性審驗技術奠基，以縮短審驗技術發展時程。

關鍵詞：低放射性廢棄物處置、坑道處置、坑道結構穩定分析

---

## Abstract

With the international experiences of low-level radioactive waste disposal technology in the advanced countries, the final disposal of nuclear energy is mostly conducted near land surface. It could be divided into surface trenches, concrete vaults and deposition tunnels according to the waste buried location. Radioactive waste in the deposition tunnels is buried in tens of meters underground, it is restricted or delayed the migration of radioactive nuclear species through the multiple barrier system of artificial and natural barrier. The impacts of site characteristics during design, construction, operation, and closure phases need to be considered for the deposition tunnels, and the required technology is more complex than other disposal methods.

In order to ensure the stability of the tunnel structure during the operation phase, this study reviewed the experiences in the advanced countries about the stability analysis of low-level radioactive waste tunnels, and integrated domestic existing tunnel structure stability analysis methods and verification techniques. Furthermore, this research collected data and investigated the information on the current conditions of the existing tunnels in the potential low radioactive waste disposal site in our country. It discussed the potential factors which could affect the stability of tunnel structure, and analyzed the relevant numerical data, experiments, and detection methods. Thus, it established hypothetical review cases of tunnel structural stability, which could lay a review technique foundation and shorten the development process.

**Keywords: Low Level Radioactive Waste, Deposition Tunnel, Stability Analysis of Tunnel Structure**

---

---

## 目錄

摘要 .....	I
Abstract .....	II
目錄 .....	III
表目錄 .....	VI
圖目錄 .....	VII
第一章、前言 .....	1
1.1 計畫背景 .....	1
1.2 計畫目的與重要性 .....	1
1.3 計畫工作項目與期程規劃 .....	2
1.4 與本研究計畫有關之國外文獻 .....	3
1.5 報告內容 .....	4
第二章、國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法 .....	6
2.1 瑞典 SFR 長期穩定性分析 .....	6
2.1.1 場址介紹 .....	6
2.1.2 地質條件 .....	10
2.1.3 坑道裂隙測繪 .....	10
2.1.4 岩石與裂隙之力學參數 .....	13
2.1.5 回填材料力學參數 .....	16
2.1.6 現地應力 .....	17
2.2 “3DEC”數值分析 .....	18
2.2.1 數值模型尺寸 .....	18
2.2.2 分析模式 .....	19
2.2.3 數值模型觀測點 .....	22
2.2.4 長期劣化分析-強度參數折減模擬 .....	22
2.2.5 現地應力 .....	25
2.3 數值分析結果 .....	26

---

---

2.3.1 變形岩塊模型分析結果 .....	26
2.3.2 剛體岩塊模型分析結果 .....	32
2.4 小結 .....	33
第三章、國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法 .....	35
3.1 影響國內隧道結構穩定性之關鍵因子 .....	35
3.1.1 外力因素 .....	35
3.1.2 環境因素 .....	38
3.1.3 非力學因素 .....	39
3.2 隧道結構穩定性之分析方法 .....	39
3.2.1 有限元素法 .....	40
3.2.2 有限差分法 .....	40
3.2.3 邊界元素法 .....	41
3.2.4 離散元素法 .....	41
3.2.5 不連續變形分析法 .....	42
3.2.6 岩塊理論 .....	42
3.2.7 物理模型法 .....	42
3.3 隧道運轉階段結構穩定性之驗證方法 .....	43
3.3.1 光學檢測之類型 .....	44
3.3.2 微變形監測技術 .....	47
3.3.3 導電與電子檢測之類型 .....	50
3.3.4 物理波動檢測之類型 .....	52
3.3.5 其他檢測類型 .....	52
3.4 小結 .....	55
第四章、建立坑道處置結構穩定性審查假想案例 .....	56
4.1 建立本土坑道假想案例之重要性 .....	56
4.2 假想案例——外島翟山坑道 .....	57
4.2.1 地理位置 .....	57
4.2.2 金門島地質條件 .....	58
4.2.3 翟山坑道建造與營運歷史 .....	59

---

---

4.2.4 坑道出露之地質材料與地質構造 .....	60
4.2.5 坑道現況調查 .....	60
4.3 假想案例二—本島台鐵安朔隧道.....	69
4.3.1 地理位置 .....	69
4.3.2 地質條件、岩體分類與隧道斷面支撐工法 .....	69
4.3.3 安朔隧道施工階段之災變記錄 .....	72
4.3.4 檢測項目與方法 .....	73
4.4 小結.....	74
第五章、我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術.....	77
5.1 「無襯砌坑道」之結構穩定驗證方法.....	77
5.2 「襯砌坑道」之結構穩定驗證方法.....	82
5.3 處置坑道結構穩定性驗證方法之審驗技術.....	85
第六章、我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證重點.....	87
6.1 低放處置坑道結構穩定性模式審驗重點.....	87
6.2 低放處置審查導則(第0版)相關條文修訂建議.....	88
第七章、結論與建議.....	92
7.1 結論.....	92
7.2 建議.....	93
參考文獻.....	94
附錄 A 隧道施工規範、技術手冊及相關文獻.....	99
附錄 B 審查意見與處理情況.....	103
附錄 C 期末簡報.....	109

---

## 表目錄

表 1.3-1 計畫工作項目與期程規劃 .....	2
表 2.1-1 裂隙位態描述 .....	11
表 2.1-2 岩體力學參數 .....	13
表 2.1-3 破碎帶之岩體力學參數 .....	13
表 2.1-4 根據 163 組傾斜儀試驗獲得之節理粗糙度與摩擦角等參數 .....	15
表 2.1-5 根據 163 組傾斜儀試驗獲得之 MOHR-COULOMB 強度參數 .....	16
表 2.1-6 於數值模型中所採用的裂隙參數 .....	16
表 2.1-7 數值模型中採用之混凝土材料參數 .....	17
表 2.1-8 數值模型中採用之回填砂材料參數 .....	17
表 2.1-9 數值模型考量的現地應力與方向 .....	17
表 3.1-1 影響處置坑道襯砌結構穩定性之因素與現象 .....	36
表 3.1-2 岩心風化程度分類表 .....	38
表 3.3-1 隧道施工安全監測與營運安全檢監測之差異性比較 .....	48
表 3.3-2 定義不同尺度量測之比較 .....	49
表 3.3-3 各種非破壞性檢測技術於隧道襯砌檢測之比較 .....	54
表 4.2-1 金門坑道工程建設資料 .....	59
表 4.3-1 安朔隧道地質條件與施工期間破壞型式總表 .....	71
表 4.3-2 施工階段於安朔隧道之災變及其原因彙整 .....	72
表 4.3-3 營運期間於安朔隧道檢測項目、方法與檢測結果 .....	73
表 4.4-1 翟山坑道與安朔隧道假想案例資料彙整 .....	76
表 5.2-1 處置坑道檢監測項目與技術列表-岩石力學有關項目 .....	83
表 5.3-1 本文建議坑道處置結構穩定性分析流程 .....	86
表 6.1-1 坑道結構穩定性影響項目、肇因與審驗重點 .....	87
表 6.2-1 坑道處置結構穩定性分析流程與低放處置審查導則章節之關連性 .....	89
表 6.2-2 審查導則編修要點建議 .....	90



## 圖目錄

圖 1.4-1 已蒐集之重要報告文獻封面 .....	3
圖 2.1-1 瑞典 SFR 所處地理位置示意圖 .....	7
圖 2.1-2 SFR 地下空間立體視圖 .....	7
圖 2.1-3 SFR-1 所屬處置窖之(A)空間配置與(B)斷面形狀與尺寸 .....	8
圖 2.1-4 SFR-1 處置窖之斷面細部尺寸、廢棄物堆置情況及採取的封塞填充材料 .....	9
圖 2.1-5 SFR-1 處置場地質破裂帶之空間分佈圖 .....	10
圖 2.1-6 BMA 處置窖裂隙測繪圖 .....	11
圖 2.1-7 三維裂隙岩體網絡模型 .....	12
圖 2.1-8 以 SCHMIDT 等面積投影展示裂隙分佈 .....	12
圖 2.1-9 與處置窖長軸方向幾近垂直的二條節理其空間分佈 .....	13
圖 2.1-10 不同取樣深度條件下之強度與節理參數 .....	15
圖 2.2-1 SFR 處置窖長期穩定性數值模型 .....	18
圖 2.2-2 3DEC 數值模型裂隙分佈 .....	19
圖 2.2-3 變形塊體模型 .....	20
圖 2.2-4 變形塊體模型之坑道位置、尺寸及弱面分佈 .....	20
圖 2.2-5 變形塊體模型考慮的八組不同的裂隙網絡條件 .....	21
圖 2.2-6 剛體模型 .....	21
圖 2.2-7 數值模型觀測點設置位置 .....	22
圖 2.2-8 摩擦角與折減步次之關係曲線 .....	23
圖 2.2-9 逐次劣化影響範圍示意圖 .....	24
圖 2.2-10 以岩體強度折減情形下考量處置窖之長期穩定分析結果 .....	24
圖 2.2-11 考量現地應力作用下之垂直等應力線分佈圖 .....	25
圖 2.3-1 變形岩塊模型分析結果(位移量分佈) .....	27
圖 2.3-2 變形岩塊模型分析結果(最大主應力分佈) .....	27
圖 2.3-3 變形岩塊模型分析結果(塑性區分佈) .....	28
圖 2.3-4 變形岩塊模型分析結果(垂直向位移分佈) .....	29
圖 2.3-5 變形岩塊模型分析結果(最大主應力分佈) .....	30

---

圖 2.3-6 變形岩塊模型分析結果(塑性區分佈).....	31
圖 2.3-7 剛體岩塊模型在強度折減分析結果 .....	32
圖 2.3-8 剛體岩塊模型在強度折減分析結果 .....	33
圖 3.1-1 山岳隧道受震損害型態示意圖 .....	37
圖 3.2-1 FLAC 用於分析大地工程之示意圖.....	41
圖 3.2-2 日本學者之室內隧道實驗 .....	43
圖 3.3-1 TS360 系統 .....	45
圖 3.3-2 DIBIT 測量成果展開圖 .....	46
圖 3.3-3 曾文水庫防淤隧道工程豎井閘室(往上游測)光達掃描成果展示圖 .....	47
圖 3.3-4 曾文水庫防淤隧道工程豎井閘室襯砌微變監測技術作業架構 .....	48
圖 3.3-5 跨尺度多時序監測整合技術之測量作業架構 .....	49
圖 3.3-6 透地雷達原理示意圖 .....	50
圖 3.3-7 多相線性陣列電磁波雷達與傳統透地雷達比較 .....	51
圖 3.3-8 多相線性陣列電磁波雷達與隧道檢測車 .....	51
圖 4.1-1 國內與國外隧道襯砌之異狀種類統計差異比較 .....	56
圖 4.2-1 翟山坑道位置示意圖 .....	57
圖 4.2-2 金門地質圖 .....	58
圖 4.2-3 翟山坑道現勘位置 .....	61
圖 4.2-4 翟山坑道入口處地質現況 .....	62
圖 4.2-5 翟山坑道入口處洞口防護設施 .....	62
圖 4.2-6 翟山坑道入口處岩坡風化情形 .....	63
圖 4.2-7 翟山坑道坑道段之圍岩 .....	64
圖 4.2-8 主要節理面位態 .....	65
圖 4.2-9 翟山坑道坑道段之地質現況 .....	65
圖 4.2-10 翟山坑道側壁之基性岩脈群(1).....	66
圖 4.2-11 翟山坑道側壁之基性岩脈群(2).....	67
圖 4.2-12 翟山坑道側壁之基性岩脈群(3).....	67
圖 4.2-13 翟山坑道頂拱處局部基性岩脈地下水入滲 .....	68
圖 4.2-14 翟山坑道側壁處基性岩脈與花崗片麻岩交界處已呈現風化現象 .....	68

---

---

圖 4.2-15	翟山坑道近出海口處節理密布，頂拱及側壁岩面呈現鏽染情況.....	69
圖 4.3-1	南迴線金崙隧道至安朔隧道區域地質圖.....	70
圖 4.3-2	安朔隧道支撐工法斷面圖.....	71
圖 5.1-1	無襯砌坑道主要的破壞模式.....	78
圖 5.1-2	無襯砌坑道之穩定性與破壞模式.....	79
圖 5.1-3	金門無支撐地下坑道安全檢測與評估流程圖.....	80
圖 5.1-4	金門無支撐地下坑道頂拱之地面光達掃描部分結果.....	81
圖 5.1-5	金門無支撐地下坑道頂拱之光學影像照片.....	81

## 第一章、前言

### 1.1 計畫背景

根據國際間低放射性廢棄物處置技術先進國家的經驗，最終處置方式多採近地表處置，依廢棄物埋藏於地表或地下之方式，可進一步區分為地表壕溝、混凝土窖與坑道處置三種；其中，坑道處置係將放射性廢棄物埋置於數十公尺的地下，透過工程障壁與天然障壁所構成的多重障壁系統，以限制或遲滯放射性核種的遷移，其在設計、建造、運轉與封閉等各階段，除了需考量場址特性的影響，所需技術也遠較其他處置方式複雜。

有鑑於坑道處置為我國低放射性廢棄物處置方式之潛在選項，同時考量我國地質條件具特殊性，為確保處置設施與處置坑道結構在運轉階段的穩定性，物管局102年與103年委託進行之「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術發展」(周鼎等人，2013)及「處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究」(楊長義與李宏輝，2014)，已整理出處置坑道結構穩定之影響因素計有外力、環境與非力學因素；此外，在前期研究中亦藉由蒐集營運中交通隧道的維護經驗，整理了隧道襯砌異狀關鍵肇因，及其對應的檢測與監測方法(楊長義與李宏輝，2015)。為能確保處置坑道在運轉階段能維持坑道結構之穩定性，實有必要持續蒐整國際低放射性廢棄物處置先進國家之經驗與技術，並掌握國內既有的坑道結構穩定分析方法與驗證技術，以提升及具體落實低放處置審查技術之本土化。

### 1.2 計畫目的與重要性

本子項計畫延續前期研究，進一步針對低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性之驗證方法進行國際資訊蒐整與研析，同時考量本土地質條件之特殊性，亦將汲取國內隧道工程經驗，並根據我國低放射性廢棄物可能場址，對鄰近既有的坑道現況進行地質、建造歷史與現況之資料蒐集與調查，針對可能影響坑道結構穩定性之影響因子進行討論，及研析相關的數值分析、試驗與檢測等驗證方法，據此建立坑道處置結構穩定性審查假想案例，為後續發展處置坑道結構穩定性審驗技術奠基，並縮短審驗技術發展歷程。

### 1.3 計畫工作項目與期程規劃

本計畫之工作項目與期程規劃，彙整如表1.3-1。

表1.3-1 計畫工作項目與期程規劃

工作內容	106 年											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
子項計畫三-低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法研究			※			※			※			※
國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法資訊蒐集與研析												
國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法												
建立坑道處置結構穩定性審查假想案例												
提出我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術												
提出我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證												
成果報告撰寫												
工作進度估計百分比 (累積數)	0%	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%

## 1.4 與本研究計畫有關之國外文獻

本研究於計畫執行期間，蒐集了國際低放射性廢棄物處置機構提出之相關技術報告，尤其以處置坑道結構穩定性有關之驗證方法與分析經驗，為本年度國際資訊研析之重點，已蒐整之主要技術文獻其報告封面如圖1.4-1所示。

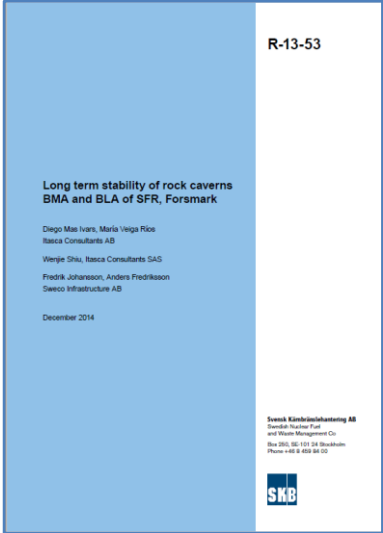
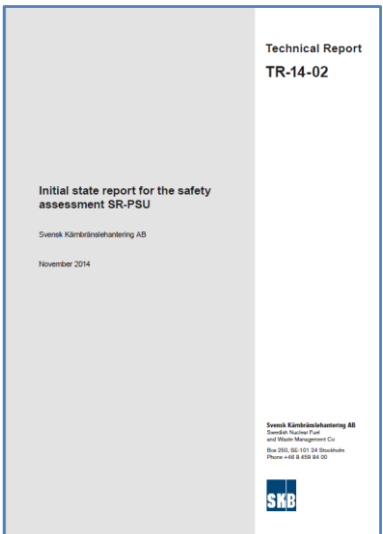
	<p>SKB, 2014. Long term stability of rock caverns BMA and BLA of SFR, Forsmark. (R-13-53)</p> <p>SKB針對SFR-1的BMA與BLA處置窖的長期穩定性進行之三維數值分析。</p>
	<p>SKB, 2014. Initial state report for the safety assessment SR-PSU. (TR-14-02)</p> <p>SKB於2014年整理SFR-1、SFR-3各處置坑道之設施介紹、各元件尺寸、設計考量因素、檢監測項目與封閉規劃。</p>

圖1.4-1 已蒐集之重要報告文獻封面

---

## 1.5 報告內容

本研究之工作項目細分為「國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法資訊蒐集與研析」、「國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法」、「建立坑道處置結構穩定性審查假想案例」、「提出我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術」及「提出我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證」等五項，各分項工作進度如表1.3-1所示，除本章前言外，依計畫擬定之工作項目內容題列各章標題，其內容分別如下列所述：

### 第二章 國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法

針對坑道處置結構穩定性之驗證方法，本項工作擬自國際間放射性廢棄物處置技術先進國家發表之技術報告、隧道工程與岩石力學等相關學術期刊，蒐整與坑道結構穩定性驗證方法有關之現地試驗、檢監測項目、數值分析與工程案例等相關經驗與成果。

### 第三章 國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法

根據國內一般坑道襯砌之異狀統計資料顯示(周鼎等人，2013；楊長義與李宏輝，2014)，常見的襯砌異狀依序為裂縫、滲漏水與剝落，造成上述襯砌結構異狀的影響因素包括了外力(地震作用、邊坡運動與開挖擾動)、環境(風化作用與岩石依時變形特性)與非力學因素(混凝土中性化、鋼筋保護層厚度不足...等)，由於上述襯砌異狀攸關處置坑道結構穩定性，甚至可能影響處置坑道在運轉階段之功能性與使用性，透過國內一般坑道其在設計、建造與運轉階段之相關技術報告蒐整研析，釐清影響坑道結構穩定性之關鍵因子，與符合國內地質與環境條件所採取的驗證方法，為本項工作重點。

### 第四章 建立坑道處置結構穩定性審查假想案例

根據我國低放射性廢棄物可能場址所處場址特性與可能採取的處置坑道型式，以台灣本島(有襯砌結構)或外島(無襯砌結構)既有坑道為假想案例，蒐集坑道結構在運轉階段可能產生的裂縫、滲漏水與剝落等異狀，並針對其可能的肇因與驗證方法進行討論。

---

## 第五章 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術

綜整第二、三、四章成果，依我國低放射性廢棄物可能場址與處置坑道型式，整理出處置坑道結構在運轉階段可能產生之異狀及坑道結構穩定性之驗證方法。

## 第六章 我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證重點

總結前述各項工作成果，提出符合我國地質與環境條件之低放處置坑道結構穩定性模式驗證重點，此外並依「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第0版)」與本研究有關之章節進行研析與討論，提出低放處置審查導則(第0版)相關條文修訂建議。

## 第七章 結論與建議

綜整本研究成果並提出結論與建議，供未來相關研究與應用之參考。



## 第二章、國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法

本章整理瑞典SFR處置場針對1BMA與1BLA處置窖，採數值方法進行之長期穩定性分析，內容含括場址介紹、地質條件、裂隙調查及數值模型建模及其分析過程與結果，相關經驗值得我國參考。

### 2.1 瑞典 SFR 長期穩定性分析

瑞典SFR中、低放處置場在TR-14-01長期安全評估技術報告中 (SKB, 2014)，曾針對處置窖在沒有適當的回填，及10,000年的時間尺度條件，評估了處置窖周圍岩壁可能因岩體風化、強度降低而導致岩體鬆動，進而造成岩塊掉落的可能性。在長時間條件下，處置窖周圍岩體的鬆動，可能造成處置窖的混凝土結構之尺寸、幾何形狀和性質改變，也會引起滲流流量和滲流方向的變化，影響放射性核種傳輸(SKB, 2008)。

基於上述考量，SKB利用 3DEC 數值分析工具進行處置窖的長期穩定性分析，分析過程考慮了處置場之地質條件、岩石力學特性與處置窖幾何尺寸等，其相關分析方法與經驗結果，可供我國未來低放處置坑道進行長期穩定分析之參考。

#### 2.1.1 場址介紹

瑞典SFR中低放廢棄物處置場位於Forsmark核電廠附近離岸約一公里遠，在波羅的海海面下50公尺深的海床內(海水覆蓋深度約5公尺)，其地理位置如圖2.1-1所示。SFR-1處置場從1976年開始規劃，1983年取得建造許可，1988年取得運轉許可，目前係由SKB公司委託電廠代為營運。SFR-1處置場處置容量可達63,000立方公尺，延伸計畫SFR-3處置場將再興建5條處置坑道及1條專為核電廠反應器壓力槽的處置坑道，詳圖2.1-2，預計可處置108,000立方公尺廢棄物。

SFR-1處置場目前接收中放射性廢棄物與低放射性廢棄物，主要是核電廠運轉產生的放射性廢棄物，以及醫療、工業及研究機構所產生的低放射性廢棄物(SKB, 2011a)。SFR-1處置場位在海床的下方，故透過二條平行之交通隧道以連接Forsmark核電廠(NPP)。目前的SFR-1處置場，包含一個處置筒倉(Silo)與四條岩盤處置窖(Rock vault)，以因應不同的廢棄物種類。廢棄物處置筒倉(Silo)位處海平面下60公尺處，筒倉底部位置更深達

海平面下130公尺處。SFR-1處置場的四條處置窖坑道，其空間配置與斷面形狀及尺寸，詳圖2.1-2至圖2.1-4所示。



圖2.1-1 瑞典SFR所處地理位置示意圖(SKB, 2008)

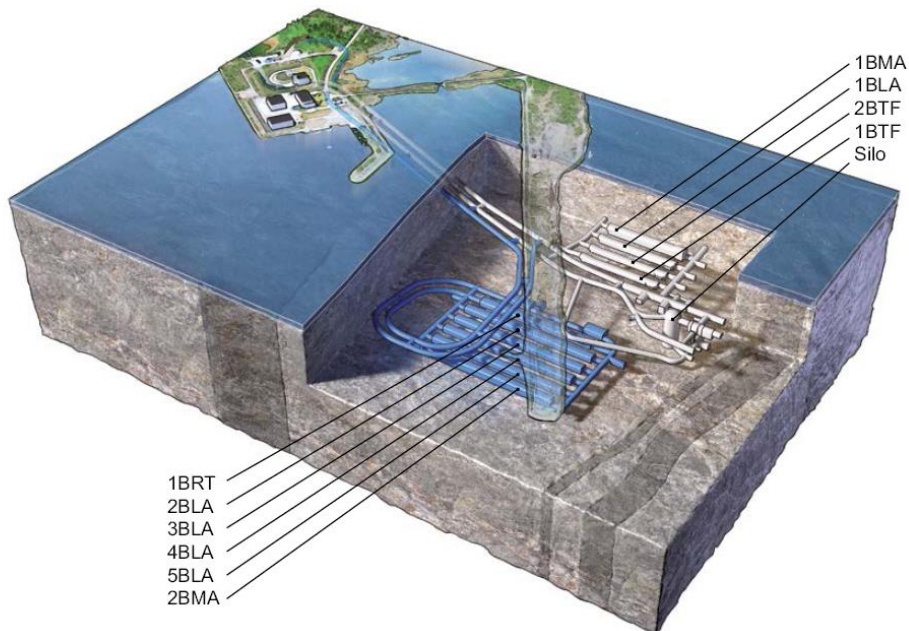


圖2.1-2 SFR 地下空間立體視圖。淺灰色部分為現有的SFR-1處置場、藍色部分為計畫擴建的SFR-3部分。處置窖包括了1-2 BMA處置窖、1-5BLA處置窖、1-2BTF處置窖、筒倉與BRT處置窖(SKB, 2014a)

1BTF與2BTF處置窖寬約15公尺、高約9.5公尺、長160公尺，主要的廢棄物種類為脫水的低放射性離子交換樹脂。處置窖側壁與頂拱均施作噴凝土襯砌，底板則為混凝土澆置而成，下方為排水性良好的基礎，沿著兩側岩壁設置了1公尺高的護壁板(baseboard)。1BTF處置窖規劃存放鋼桶(steel drum)形式的廢棄物包件(waste packaging)，為能提供鋼桶良好的支撐，混凝土槽係沿著坑道方向放置兩側，以混凝土箱(concrete mould)組成隔牆(partition wall)，鋼桶置入後逐一進行灌漿填封作業。2BTF處置窖的廢棄物包件僅有混凝土槽(concrete tank)，其堆置方式為一層排有四個混凝土槽，一個工作面堆置二層，完成堆置後以預先組裝而成的混凝土元件覆蓋其上作為輻射屏蔽。BLA處置窖部分，主要是存放低放射性且經過固化處理的廢棄物，處置窖寬15公尺、高12.5公尺、長160公尺，使用起重機將貨櫃逐一堆疊處置，貨櫃以兩排平行存放，如圖2.1-4所示，依貨櫃的尺寸(視貨櫃為full-height或half-height) 每排堆疊3或6層，處置窖的排水基礎澆注混凝土板，岩壁和頂拱施作噴凝土。

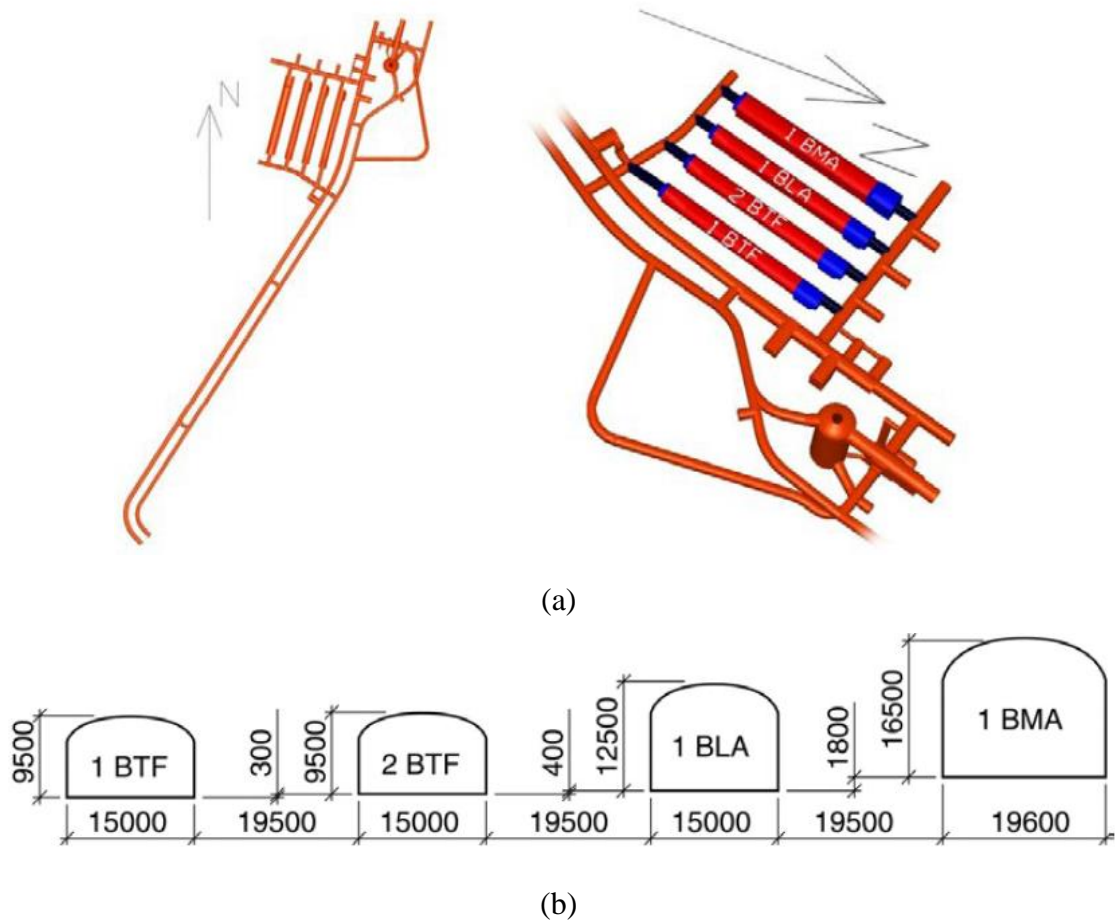
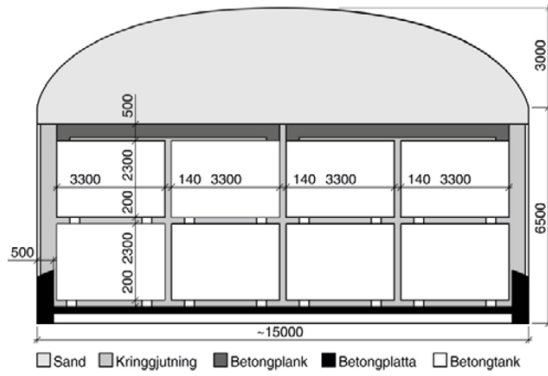


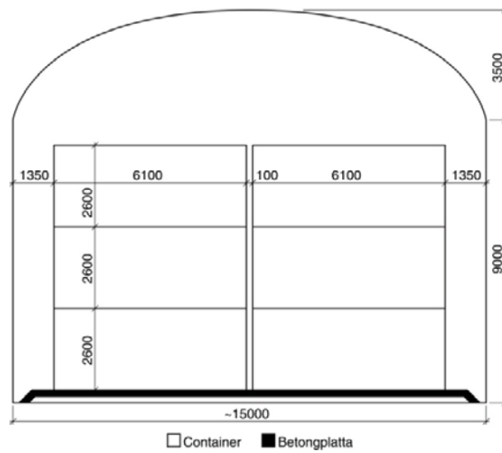
圖2.1-3 SFR-1所屬處置窖之(a)空間配置與(b)斷面形狀與尺寸 (SKB, 2014b)

Length: 160 m  
 Width: 15 m  
 Height of walls: 6.5 m  
 Height of tunnel arch: 3 m  
 Total height: 9.5 m  
 Total volume: 19,700 m<sup>3</sup>



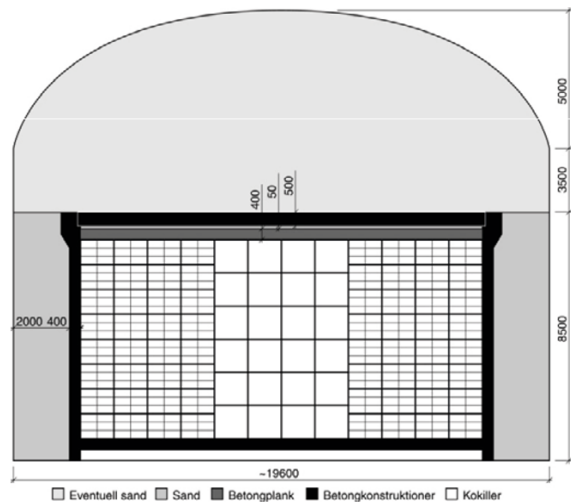
(a)

Length: 160 m  
 Width: 15 m  
 Height of walls: 9 m  
 Height of tunnel arch: 3.5 m  
 Total height: 12.5 m  
 Total volume: 27,600 m<sup>3</sup>



(b)

Length: 160 m  
 Width: 19.6 m  
 Height of walls: 11.5 m  
 Height of arch: 5 m  
 Total height: 16.5 m  
 Total volume: 47,650 m<sup>3</sup>



(c)

圖2.1-4 SFR-1處置窖之斷面細部尺寸、廢棄物堆置情況及採取的封塞填充材料：(a)1BTF與2BTF、(b)BLA與(c)BMA (SKB, 2014b)

### 2.1.2 地質條件

SFR的母岩種類含括了三種不同的岩石種類(SKB, 2011b)，分別是長英質(Felsic)至中等變質火山岩類(Intermediate metavolcanic rocks)、屬Svecofennian生成年代之近花崗岩類(Granitoid)與粗顆粒狀之偉晶岩類(Pegmatite)。在地質破裂帶(Fracture zones)部分，Forsmark區域的原岩條件多呈現塊狀形態(block-like pattern)的破裂，變形特性明顯的區域為地質破裂帶，依規模大小區分為二，破裂區範圍超過10公里者屬區域性破裂區(regional zones)，範圍低於10公里者屬局部破裂區(local zones)(Andersson, 2000)。SFR-1處置場地質破裂帶之空間分佈圖如圖2.1-5所示。

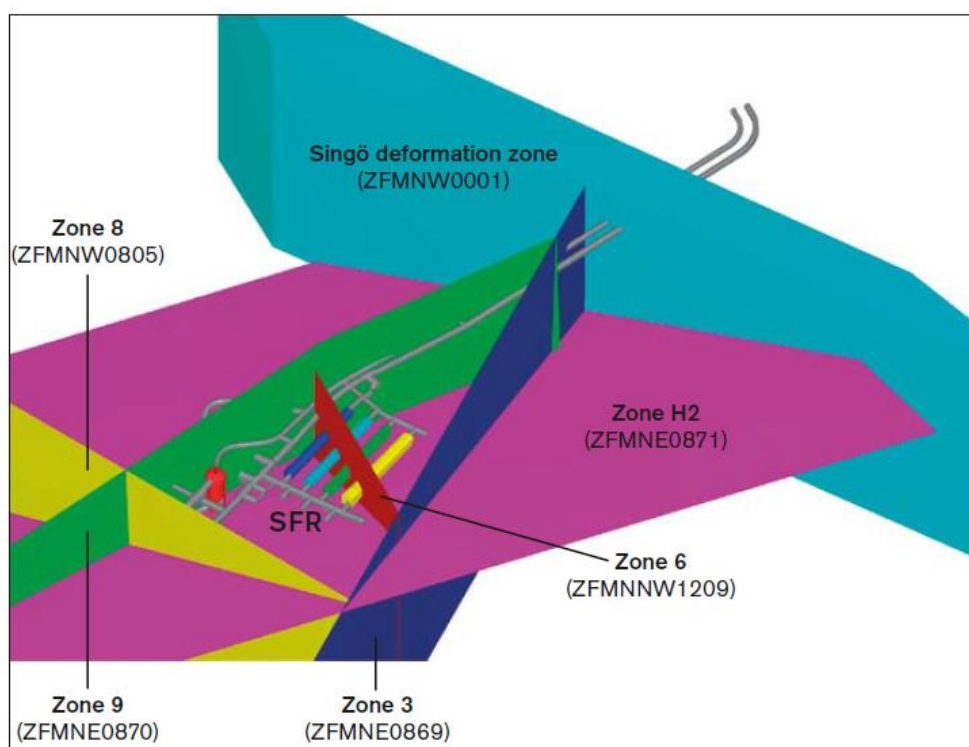


圖2.1-5 SFR-1處置場地質破裂帶之空間分佈圖(SKB, 2011b)

### 2.1.3 坑道裂隙測繪

SKB進行了坑道裂隙測繪(fracture mapping of caverns)，藉以瞭解地質破裂帶及岩體裂隙對處置坑道的影響，並作為後續數值分析建模之依據，以BMA處置窖為例，其裂隙測繪結果如圖2.1-6。在現地裂隙調查過程中，對於處置窖沿線的地質主控構造(dominant structure)、具規律性出現的地質構造與不具規律性但經研判其對處置窖穩定性可能有影響的裂隙，均詳實計載於坑道裂隙測繪圖中。現地調查結果，判釋出可能影響處置窖穩

定性之弱面(節理面)計三組，如表2.1-1，表列之弱面走向係相對於處置窖長軸方向(處置窖長軸方向為N30°E)。另外，根據表2.1-1可進一步建構裂隙岩體網絡(discrete fracture network, DFN)模型，如圖2.1-7，與等面積投影展示之裂隙分佈，如圖2.1-8。

調查結果亦顯示，走向幾乎與處置窖長軸方向互為垂直之弱面計有兩條，第一條之傾角與傾向分別為27°與161°，第二條則為70°與25°，節理內寬約1公尺，如圖2.1-9。

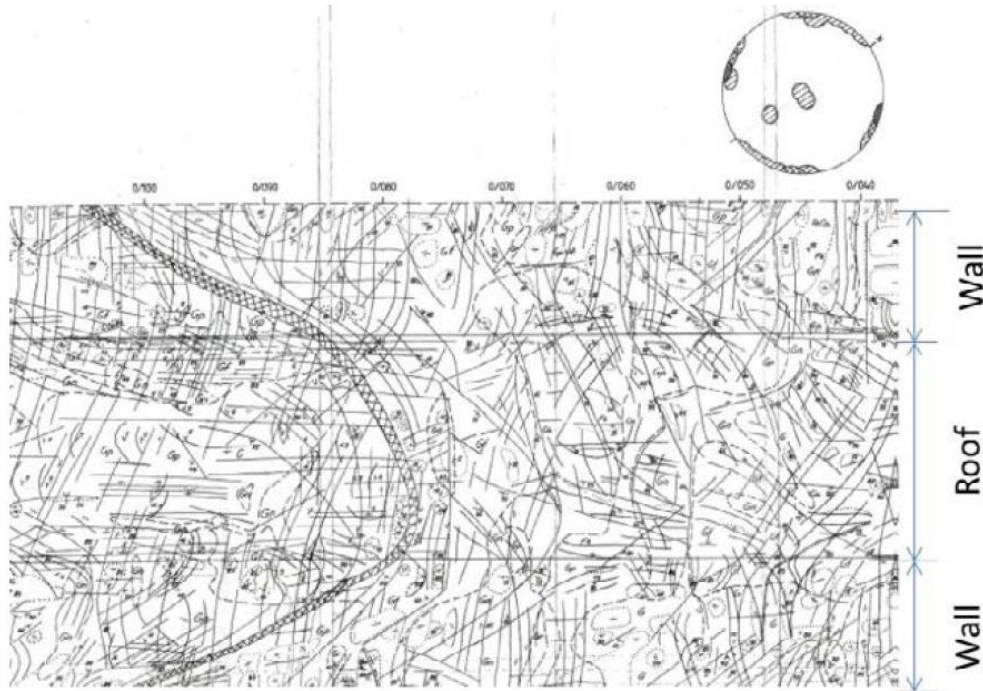


圖2.1-6 BMA處置窖裂隙測繪圖(SKB, 2014c)

表2.1-1 裂隙位態描述(SKB, 2014c)

Strike of fractures with respect to longitudinal axis of caverns [°]	Dip [°]	Average distance between fractures
13 ± 20	90 ± 5	2 m
97 ± 27	90 ± 14	2 m
0 ± 180	0 ± 17	3 m

註：處置窖長軸方向為N30°E

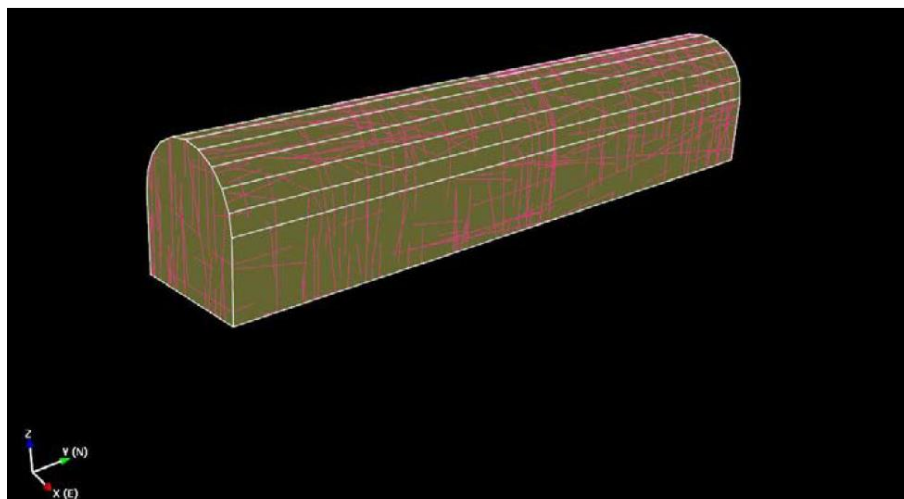


圖2.1-7 三維裂隙岩體網絡模型(SKB, 2014c)

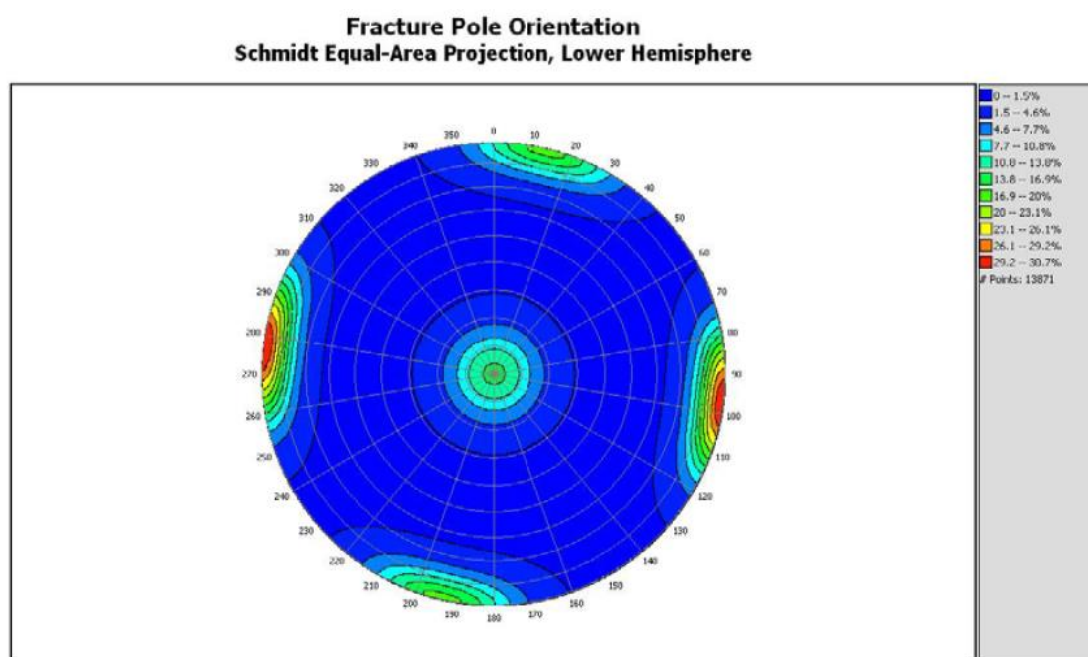


圖2.1-8 以Schmidt等面積投影展示裂隙分佈(SKB, 2014c)

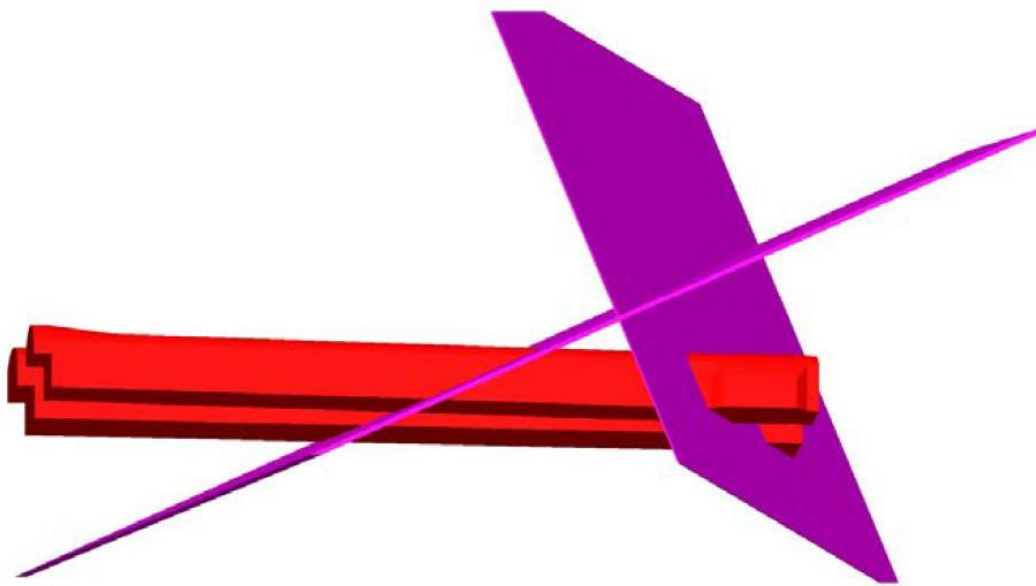


圖2.1-9 與處置窖長軸方向幾近垂直的二條節理其空間分佈(SKB, 2014c)

### 2.1.4 岩石與裂隙之力學參數

嚴謹的數值分析，其在模型尺寸、網格精度、邊界條件、材料組成律與材料之物性與力學特性等參數，須審慎規劃與選定。為建構合理的數值分析模型，SKB根據Glamheden等人(2007a)的調查及反算分析(back analysis)結果，選定岩體力學參數，詳如表2.1-2與表2.1-3所示。其中，表2.1-2為二條節理之間之岩體力學參數，表2.1-3為破碎帶之岩體力學參數，雖然破碎帶岩體有較高的摩擦角，但其凝聚力與抗張強度均小於破碎帶以外之岩體參數。

表2.1-2 岩體力學參數(SKB, 2014c)

Modulus of deformation [GPa]	Poisson's ratio [-]	Friction angle [°]	Cohesion [MPa]	Tensile strength [MPa]	Dilation angle [°]
60	0.23	40	23.3	-6.8	15

表2.1-3 破碎帶之岩體力學參數(SKB, 2014c)

Modulus of deformation [GPa]	Poisson's ratio [-]	Friction angle [°]	Cohesion [MPa]	Tensile strength [MPa]	Dilation angle [°]
16	0.43	51	2.0	-0.1	15



在裂隙力學參數部分，主要是根據 Barton and Choubey (1977)提出的尖峰剪力強度準則(Empirical peak shear strength criterion)：

$$\tau_p = \sigma_n \tan[JRC \log_{10}(\frac{JCS}{\sigma_n}) + \phi_b] \quad (2.1)$$

其中，節理粗糙係數(JRC)與節理側壁強度 (JCS)其值與選取的裂隙長度有關，所獲得的量測結果轉換為標準裂隙長度100 mm之量測值，標示為JRC<sub>100</sub> 及JCS<sub>100</sub>。此外， $\phi_b$  裂隙(或節理面)的基本摩擦角，若裂隙為潮溼條件，節理面基本摩擦角  $\phi_b$  應修正為殘餘摩擦角  $\phi_r$ 。當正向應力  $\sigma_n$  達到一定程度以上，可利用式(2.1)評估 Mohr-Coulomb強度準則之力學參數，如式(2.2)：

$$\tau_p = c_p + \sigma_n \tan \phi_p \quad (2.2)$$

其中， $c_p$  與  $\phi_p$  為尖峰凝聚力與尖峰摩擦角，若節理或裂隙的剪力行為已達峰後條件，其強度準則力學參數應修正為  $c_r$  與  $\phi_r$ ，即殘餘凝聚力與殘餘摩擦角。SKB在處置場場址進行大量的鑽探與試驗研究，並整理出基本摩擦角  $\phi_b$ 、殘餘摩擦角  $\phi_r$ 、JRC<sub>100</sub> 及 JCS<sub>100</sub>與取樣深度的關係，如圖2.1-10，其結果顯示：(i)隨著取樣深度越深，基本摩擦角  $\phi_b$  與殘餘摩擦角  $\phi_r$  有略為增加的趨勢、(ii) JRC<sub>100</sub> 與 JCS<sub>100</sub> 與取樣深度無關。

此外，Glamheden等人(2007b) 根據163組傾斜儀試驗，整理了節理粗糙度、摩擦角與Mohr-Coulomb強度參數，如表2.1-4與表2.1-5，在數值模型中，所採用的裂隙材料參數如表2.1-6所示。

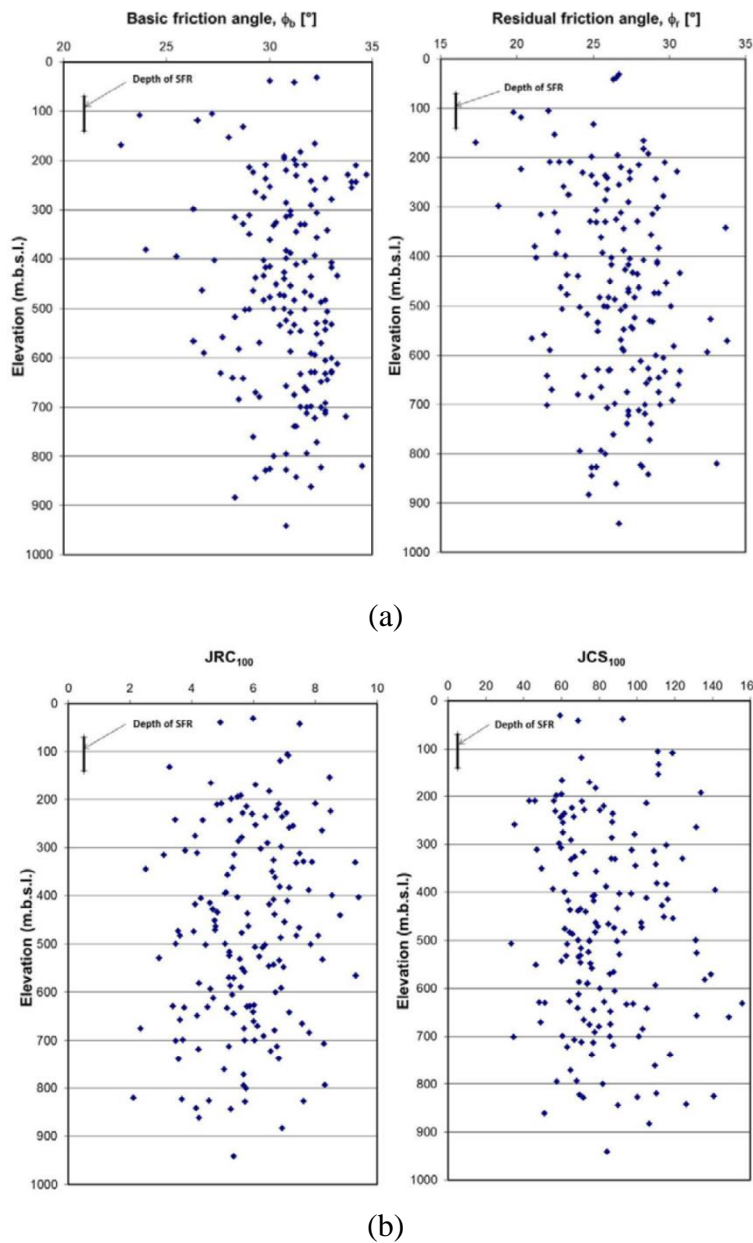


圖2.1-10 不同取樣深度條件下之強度與節理參數：(a)基本摩擦角與殘餘摩擦角、(b) JRC<sub>100</sub> 與 JCS<sub>100</sub> (SKB, 2014c)

表2.1-4 根據163組傾斜儀試驗獲得之節理粗糙度與摩擦角等參數(SKB, 2014c)

	Minimum	Mean	Median	Maximum	Standard deviation
Basic friction angle (°)	22.8	30.8	31.2	34.7	2.0
JRC <sub>100</sub>	2.1	5.8	5.8	9.4	1.5
JCS <sub>100</sub> MPa	33	83	77	156	25
Residual friction angle (°)	17.3	26.4	26.7	33.8	2.9

表2.1-5 根據163組傾斜儀試驗獲得之Mohr-Coulomb強度參數(SKB, 2014c)

Parameter	Minimum	Mean	Median	Maximum	Std.dev
$\phi_p, ^\circ$	25.8	33.8	33.9	37.7	1.9
$c_p, \text{MPa}$	0.2	0.5	0.5	0.8	0.1
$\phi_r, ^\circ$	20.3	29.4	29.6	37.9	3.0
$c_r, \text{MPa}$	0.2	0.4	0.4	0.7	0.1

表2.1-6 於數值模型中所採用的裂隙參數(SKB, 2014c)

Friction angle, $\phi_r$ [ $^\circ$ ]	Cohesion, $c_r$ [MPa]	Normal stiffness [GPa/m]	Shear stiffness [GPa/m]
25.0	0.05	80.0	2.0

此外，在SKB R-13-53(SKB, 2014)技術報告中，說明了幾點有關裂隙參數選定與假設的考量：

- (1) 膨脹角(dilation angle)假設為零。
- (2) 不考慮孔隙水壓力的影響(現地的壓力水頭約 60公尺，孔隙水壓力為 0.6 MPa)。
- (3) 風化作用下，節理面JCS值將折減，當 $JCS/\sigma_n=1$ 時( $\sigma_n$ 為正向應力，與岩覆深度有關)以式(2.3)取代式(2.1)：

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r \tag{2.3}$$

- (4) 殘餘摩擦角部分，根據Barton(2002)的研究，指出節理含泥條件下，其殘餘摩擦角約為8至17度；根據Forsmark地區之傾斜儀試驗結果，節理面在不含夾泥條件下之殘餘摩擦角約為15至17度，對於風化之裂隙其殘餘摩擦角最低值約8度。

### 2.1.5 回填材料力學參數

在BMA處置窖的長期穩定性模擬分析，亦將回填材料納入考量，其回填材料包括混凝土與砂，材料參數如表2.1-7與表2.1-8。

表2.1-7 數值模型中採用之混凝土材料參數(SKB, 2014c)

Modulus of deformation [GPa]	Poisson's ratio [-]	Friction angle [°]	Cohesion [MPa]	Tensile strength [MPa]	Dilation angle [°]
17	0.15	38	8.17	1.05	10

表2.1-8 數值模型中採用之回填砂材料參數(SKB, 2014c)

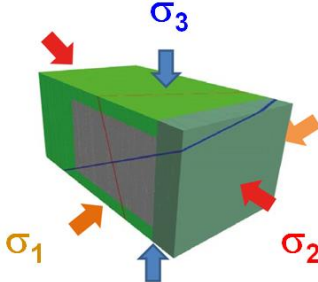
Modulus of deformation [MPa]	Poisson's ratio [-]	Friction angle [°]	Dilation angle [°]
6	0.3	32	15

### 2.1.6 現地應力

根據SKB(2002)的現地應力量測與分析報告，數值模型採用的現地應力如表2.1-9。

表2.1-9 數值模型考量的現地應力與方向

$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
$\sigma_h, \text{MPa}$	$\sigma_h, \text{MPa}$	$\sigma_v, \text{MPa}$
$4.8 + 0.095 \cdot z$	$1.4 + 0.028 \cdot z$	$0.027 \cdot z$



## 2.2 “3DEC”數值分析

為探討處置窖因岩體在長時間條件下，可能因長期劣化(long term degradation)導致岩體崩解(decomposition of rock mass)之可能影響，採用的數值工具為ITASCA公司出版的3DEC三維離散體分析軟體，屬隧道工程與岩石邊坡工程等岩石力學相關領域所採用之數值工具。根據SKB在1BMA與1BLA處置窖長期穩定性數值分析經驗，分析程序為：

- (1) 輸入初始材料參數並選定彈性模式進行運算。
- (2) 完整岩石部分改採莫爾-庫倫材料模式(Mohr-Coulomb)，裂隙部分更改為庫倫滑移裂隙模式(Coulomb slip fracture mode)，並進行運算直到滿足平衡條件。
- (3) 處置窖開挖模擬。
- (4) 1BMA處置窖回填砂土與混凝土後之模擬分析。
- (5) 針對處置窖周圍岩體的強度參數進行折減與模擬。
- (6) 重複步驟(5)，直到(i)岩塊開始掉落(針對變形岩塊模型)至處置窖，或(ii)處置窖填滿岩塊(針對剛體岩塊模型)。

上述步驟中，項次(5)係藉著強度參數的折減以反映地質材料長期劣化的影響，SKB在此一部分提出的作法與經驗，可作為我國未來在處置窖長期穩定分析之參考。

### 2.2.1 數值模型尺寸

考量數值運算效能，所建立的3DEC長期穩定分析模型僅考量 BMA與BLA兩個相鄰的處置窖，模型尺寸為240 × 140 × 100公尺，如圖2.2-1(a)，且為軸對稱之3DEC 數值模型，如圖2.2-1(b)。

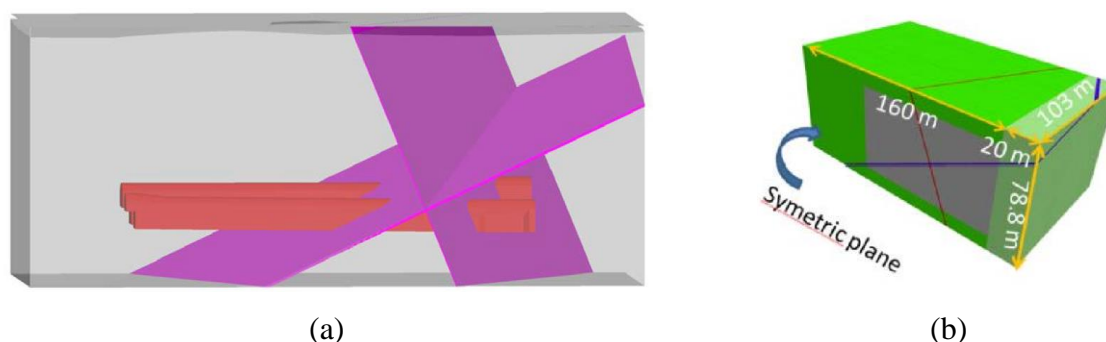


圖2.2-1 SFR處置窖長期穩定性數值模型(a)模型尺寸為 240 × 140 × 100 m、(b)為軸對稱之3DEC 數值模型 (SKB, 2014c)

此外，在變形塊體模型分析中(詳2.2.2節)，3DEC模型區的裂隙分佈區分內、外二區，如圖2.2-2所示，內區如圖中灰色部分，其裂隙分佈密度較高，外區如綠色部分，其裂隙分佈密度較低。

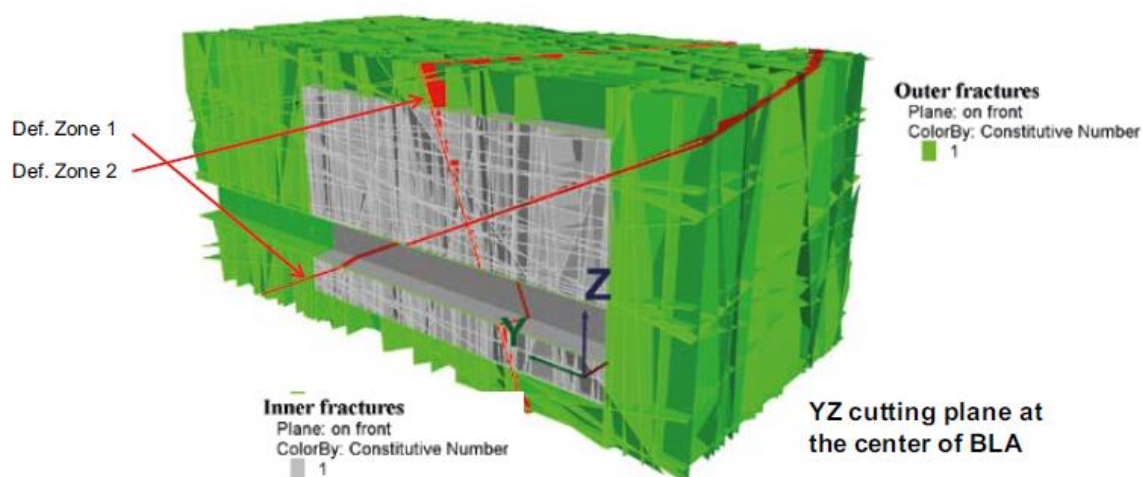


圖2.2-2 3DEC 數值模型裂隙分佈 (SKB, 2014c)

## 2.2.2 分析模式

3DEC長期穩定分析模型考量了兩種分析模型(analyzed models)，分別是變形塊體模型(models with deformable blocks)與剛體模型(models with rigid blocks)。在變形塊體模型條件下，坑道位置、尺寸及兩條主要弱面分佈，詳如圖2.2-3所示，並將BMA處置窖封閉後，填入混凝土與回填砂亦一併納入模擬與分析，如圖2.2-4。相關考量說明如下：

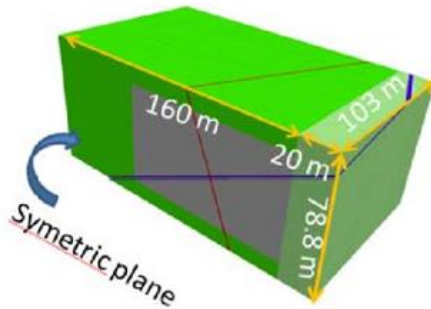
- (1) 根據表2.1-1裂隙位態描述，經統計分析整理出 8 組不同的裂隙網絡，如圖2.2-5。
- (2) 變形岩塊模型運算較為耗時(一組模型約需3個月始能完成分析)。
- (3) 所有的裂隙(fracture)均為完全的平面之無限結構(perfectly planar and infinite structure)，模型中同時考量了兩條影響處置坑道穩定性之弱面，並根據調查結果設定弱面內寬為1公尺。
- (4) 當岩體產生明顯的位移，則停止程式運算；模擬岩塊開始掉落時的裂隙摩擦角，定義為臨界摩擦角(the critical friction angle)。
- (5) 數值模型區分：(i)外部岩體區(outer zone)與(ii)內部岩體區(inner zone)，二者的裂隙間距不同，模擬之BMA與BLA處置窖位於內部岩體區。

**3DEC DP 4.20**

©2011 Itasca Consulting Group, Inc.  
 Step 0  
 18/11/2011 16:54:28

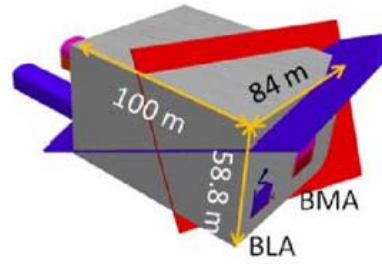
**Block**

- Colorby: Region
- inner blocks
  - deformable zone 2
  - deformable zone 1
  - outer blocks
  - BLA
  - BMA
  - concrete
  - sand



Outer rock

外部岩體區，裂隙間距 6 m



Inner rock

內部岩體區，裂隙間距 2~3 m

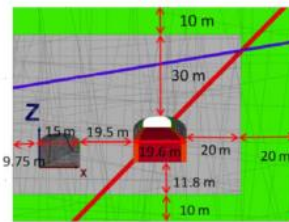
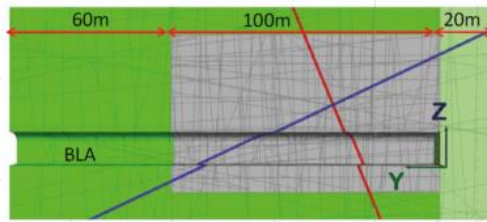
圖2.2-3 變形塊體模型(models with deformable blocks) (SKB, 2014c)

**3DEC DP 4.20**

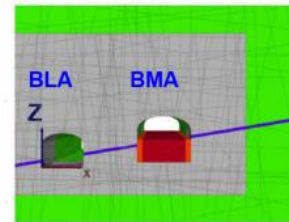
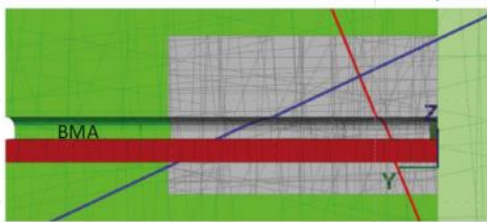
©2011 Itasca Consulting Group, Inc.  
 Step 0  
 18/11/2011 16:41:32

**Block**

- Plane: on front  
 Colorby: Region
- inner blocks
  - deformable zone 2
  - deformable zone 1
  - outer blocks
  - BLA
  - BMA
  - concrete
  - sand



Deformation zone 2 (red intersects the center of BMA at about Y = 80 m)

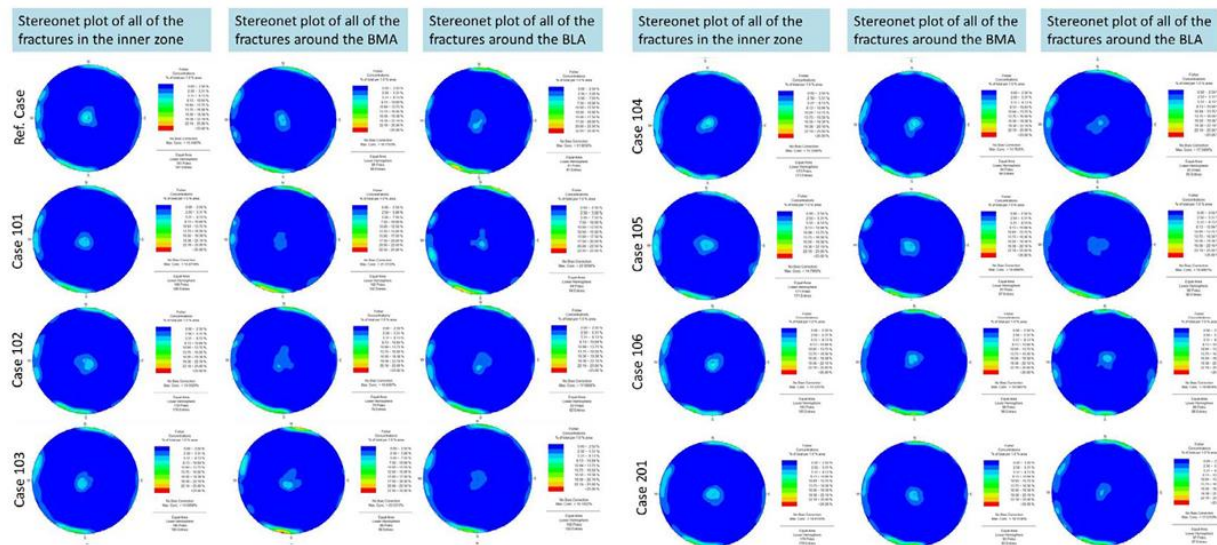


Deformation zone 1 intersects the center of BMA at about Y = 20 m

平行處置窖長軸方向之縱斷面  
 (y軸方向為處置窖長軸方向)

垂直處置窖長軸方向之橫斷面  
 (BMA處置窖中，紅色與深紅色分別為模擬砂與混凝土的填入)

圖2.2-4 變形塊體模型之坑道位置、尺寸及弱面分佈(SKB, 2014c)



變形岩塊模型(deformable block models)採用之8組不同的裂隙網絡條件

圖2.2-5 變形塊體模型考慮的八組不同的裂隙網絡條件(SKB, 2014c)

在剛體模型部分，如圖2.2-6，相關考量說明如下：

- (1) 僅考慮兩種分析案例：(i)根據裂隙的平均位態(走向與傾角)設置裂隙網絡、(ii)考量最不利的裂隙位態分佈，於特定的裂隙位態標準差條件下設置裂隙網絡，此分析案例是為參考案例(Ref. case)。
- (2) 評估處置窖在封閉後，因材料劣化導致岩體強度降低甚而喪失，進而造成岩體潰塌(total collapse)，岩塊填滿處置窖。
- (3) 剛體岩塊模型分析時間較為省時快速。

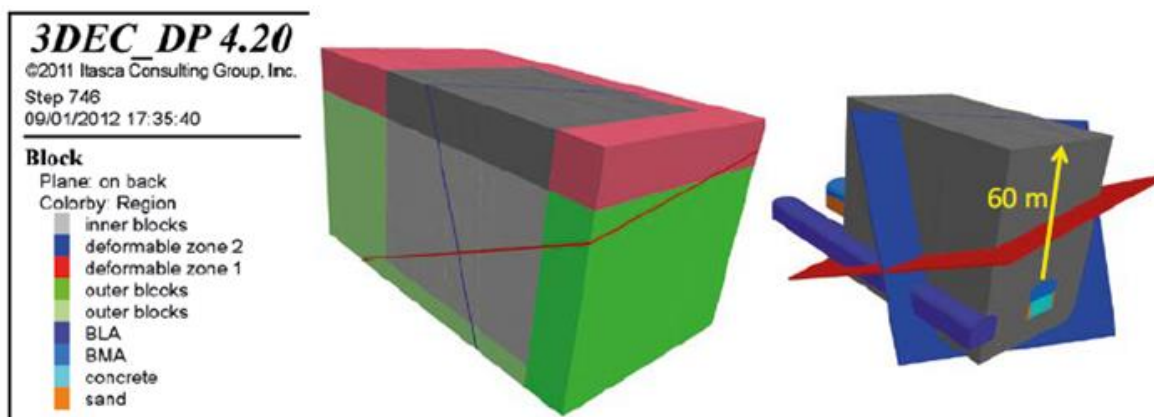


圖2.2-6 剛體模型(models with rigid block) (SKB, 2014c)



### 2.2.3 數值模型觀測點

由於SFR處置場址計有兩條變形帶弱面對坑道穩定性有潛在影響，故在 3DEC 模型中，除考慮岩體裂隙外，亦根據實際的地質調查結果，依變形帶的位態與內寬建立弱面元素，為瞭解變形帶對坑道穩定性的影響，其分別在坑道長軸方向緊鄰變形帶處設置了四個觀測位置，於每一個觀測位置在垂直方向上各設置4個垂直觀測點，詳如圖2.2-7。

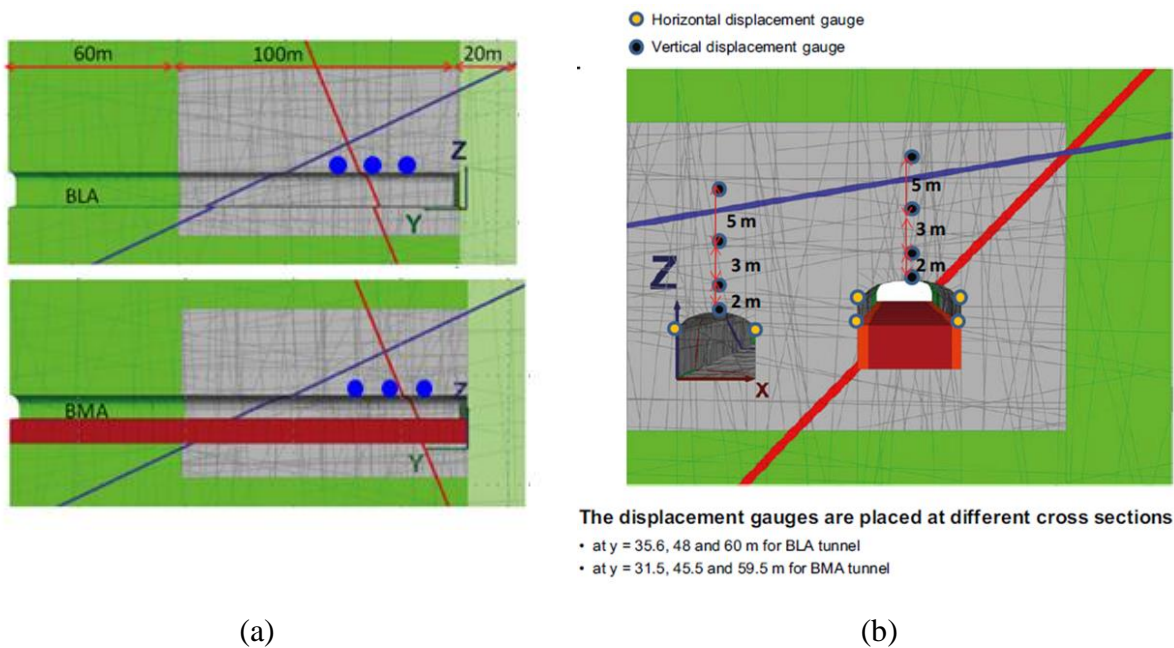


圖2.2-7 數值模型觀測點設置位置(a)模型縱剖面與(b)模型橫切面 (SKB, 2014c)

### 2.2.4 長期劣化分析-強度參數折減模擬

為探討岩體力學性質可能因長期風化、材料劣化引致力學強度降低、變形性增加，造成處置坑道長期穩定性的影響，SKB在其 3DEC 分析模型中，提出以下幾點作法：

- (1) 假設劣化僅發生在裂隙，完整岩石的力學特性不變。
- (2) 劣化影響範圍：

係自鄰近處置窖周圍之岩體，隨折減步次(reduction step)  $n$  的增加往外延伸。

$$r_{red,n} = r_i + n \cdot \delta r \quad (2.4)$$

$r_i$ : 處置窖半徑， $\delta r$ : 0.5 m

(3) 剪力強度折減：

數值分析過程中，每經過一次折減步次(reduction step)的運算後，摩擦角隨之遞減，如圖2.2-8，可知隨著數值分析的迭代運算過程，代表岩體強度劣化的影響範圍愈大，且緊鄰處置窖的岩體強度劣化將愈趨嚴重，如圖2.2-9。

$$\tau_n = c \cdot r_{c,n} + \sigma_n \cdot \tan(\phi \cdot r_{\phi,n}) \quad (2.5)$$

$$r_{c,n} = n - n \quad (2.6)$$

$$r_{\phi,n} = a^{n-1}, a = 0.9 \quad (2.7)$$

$\tau_n$ 為  $n$  次折減後之剪力強度， $r_{c,n}$  與  $r_{\phi,n}$  分別為第  $n$  次折減運算後之凝聚力與摩擦角折減係數， $a$  為折減因子( $a = 0.9$ )，從式(2.6)可知，凝聚力在第一次的折減步次運算後其值為零。

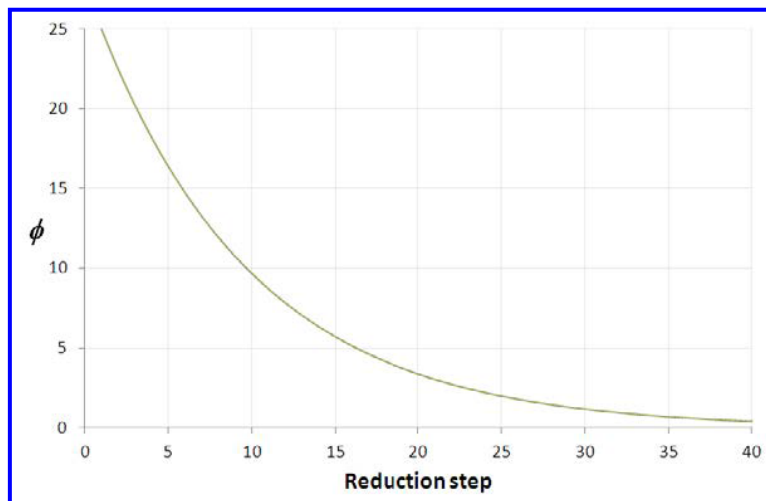


圖2.2-8 摩擦角與折減步次之關係曲線 (SKB, 2014c)

(4) 裂隙勁度折減：

$$K_{N,n} = K_N \cdot r_{\phi,n} \quad (2.8)$$

$$K_{S,n} = K_S \cdot r_{\phi,n} \quad (2.9)$$

經由「強度參數折減分析方法」，上述劣化影響範圍與剪力強度折減之設定，可透過3DEC 進行處置窖長期穩定分析，以圖2.2-10為例，隨著折減因子由 65.6% 降至 13.5% 的過程中，鄰近處置窖之圍岩強度參數與變形參數隨之遞減，岩體鬆動範圍亦逐漸擴大。其中，所提出的「強度參數折減分析方法」僅可反映(i)材料強度劣化及(ii)劣化範圍隨時

間的變化；但對於其他可能影響劣化及其分佈範圍的因子，例如既有的岩體破裂帶，或因岩體變形引致的應力分佈等，則不列入考量。

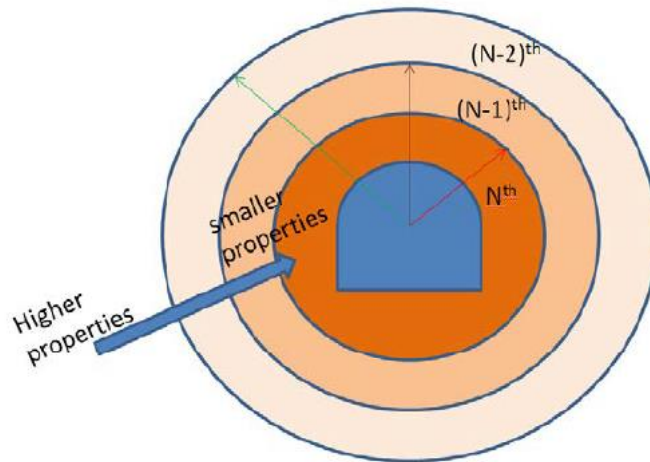


圖2.2-9 逐次劣化影響範圍示意圖 (SKB, 2014c)

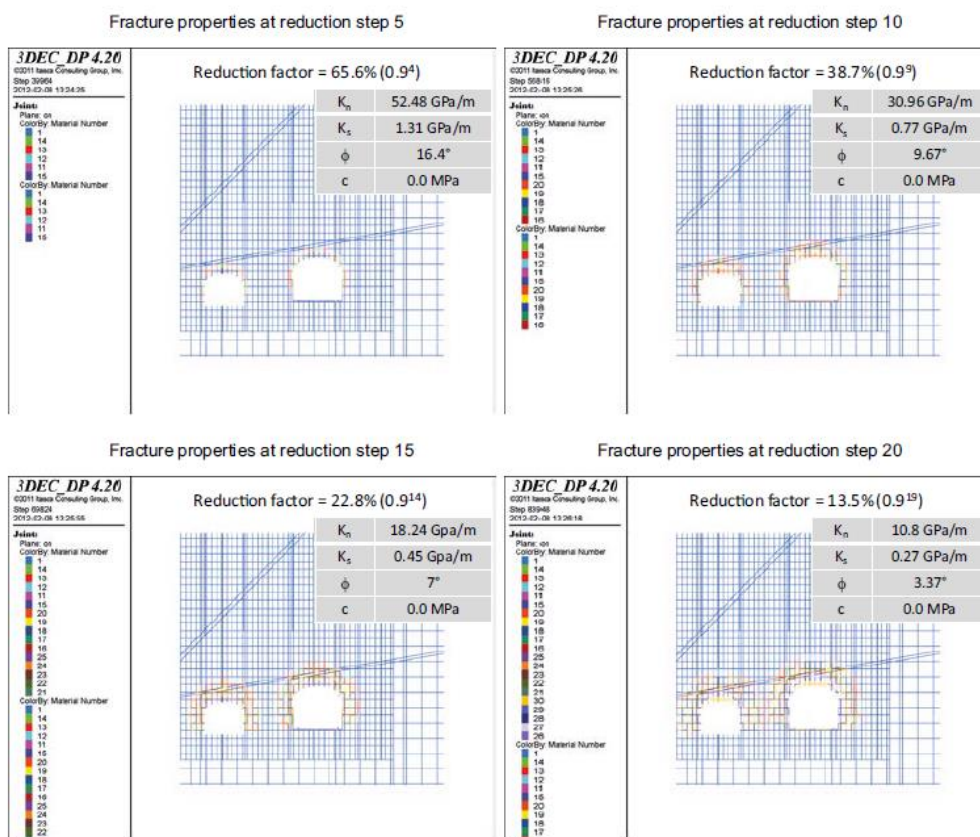
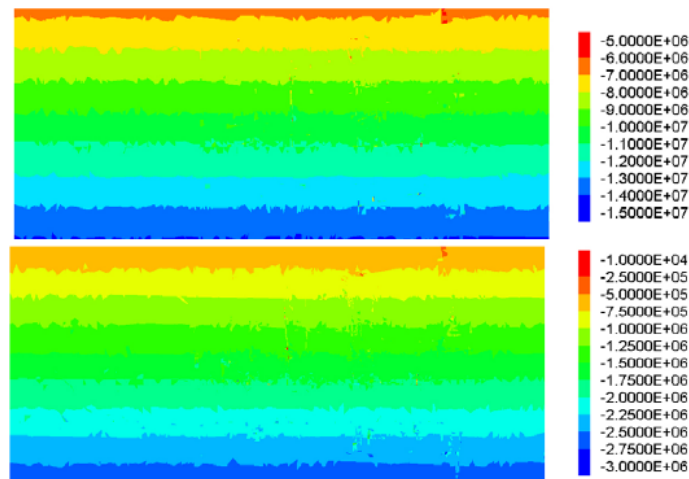


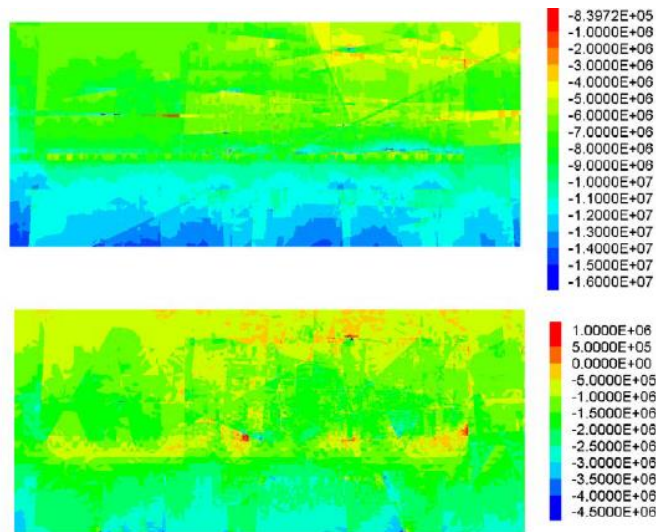
圖2.2-10 以岩體強度折減情形下考量處置窖之長期穩定分析結果(SKB, 2014c)

### 2.2.5 現地應力

根據2.2.2節數值分析程序，3DEC數值模型建立後，先以彈性模式進行平衡運算，接續將(i)岩石材料設定為 Mohr-Coulomb 材料模式，及(ii)裂隙設定為 Coulomb slip材料模式後，再進行一次平衡運算。以裂隙網絡編號 case 105的分析結果為例，其在彈性模式運算，及岩石與裂隙分別設定相對應的材料後，所獲得的等應力線分佈如圖2.2-11。



(a)



(b)

圖2.2-11 考量現地應力作用下之垂直等應力線分佈圖(取平行於BLA長軸方向之縱剖面為例) (SKB, 2014c)

圖2.2-11(a)顯示彈性模式條件下，垂直應力隨深度變化呈現層狀分佈；若分別將岩石材料設定為 Mohr-Coulomb 材料模式，及裂隙設定為 Coulomb slip材料模式後，垂直應力的分佈隨裂隙的空間分佈而有所變化，如圖2.2-11(b)。

## 2.3 數值分析結果

### 2.3.1 變形岩塊模型分析結果

以參考案例(Reference case)為例，模擬分析之位移、最大主應力與塑性區分佈，示如圖2.3-1至圖2.3-3，茲將其分析結果整理如下：

- (1) 開挖完成階段(end of excavation step)，岩塊最大位移量約 2~3 cm，主要位於側壁(西側)，及側壁與頂拱交界處，如圖2.3-1；此外，僅在變形帶出現張力引致之塑性破壞，如圖2.3-3。
- (2) 處置窖回填後進行岩體參數折減模擬，其初始裂隙摩擦角自25度逐次遞減至7.84度時岩塊開始有顯著滑動，故定義臨界摩擦角(the critical fracture friction angle)為7.84度；此時，1BLA處置窖僅在變形帶出現張力引致之塑性破壞，1BMA部分，在斷面位置Y = 20 m處，破裂帶有張力引致之塑性破壞；在Y = 40 m處，破裂帶存在張力與剪力引致之塑性破壞；另外，在回填砂土部分，有剪力，及剪力與張力引致之塑性破壞，研判係受兩側岩體擠壓所致，如圖2.3-3。
- (3) 以裂隙網絡編號 case 105之 3DEC 模型，同時考量初始裂隙摩擦角僅為15度，且無初始凝聚力之條件，其初始裂隙參數最差之情境(scenario)，此一假想條件係根據前述 Forsmark 地區之傾斜儀試驗結果，節理面在不含夾泥條件下之殘餘摩擦角約為15至17度。其分析結果如圖2.3-4至圖2.3-6：在開挖完成階段，岩塊最大位移量為2.5~5.5 cm，塑性區仍只出現在變形帶，且屬張力破壞所引致。

上述開挖模擬分析，係考慮無任何加勁(reinforcement)條件下進行之分析，在開挖完成後，視考慮的初始條件，其岩塊最大位移量為 2~3 cm，或2.5~5.5 cm，但之後開挖面即達到穩定。

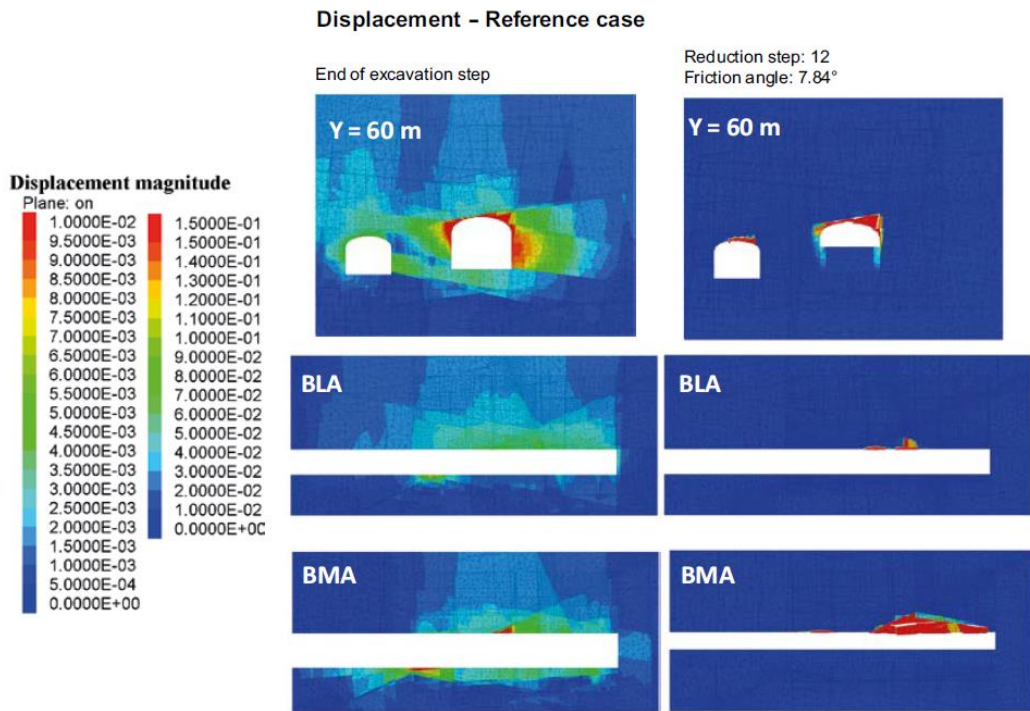


圖2.3-1 變形岩塊模型分析結果(位移量分佈) (SKB, 2014c)

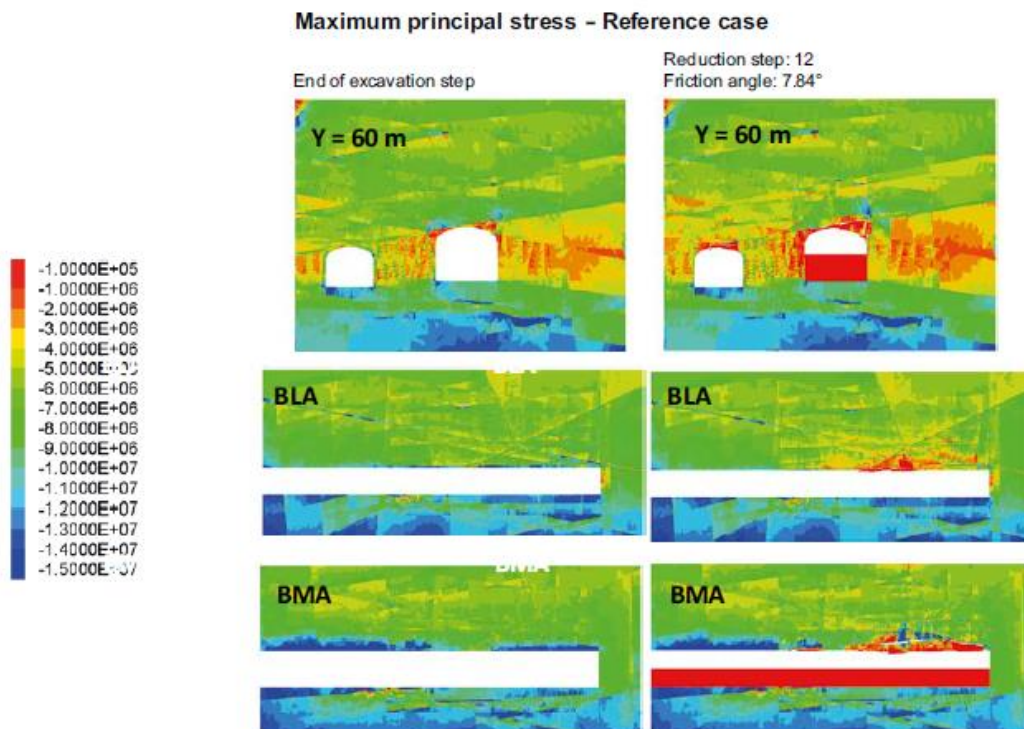


圖2.3-2 變形岩塊模型分析結果(最大主應力分佈) (SKB, 2014c)

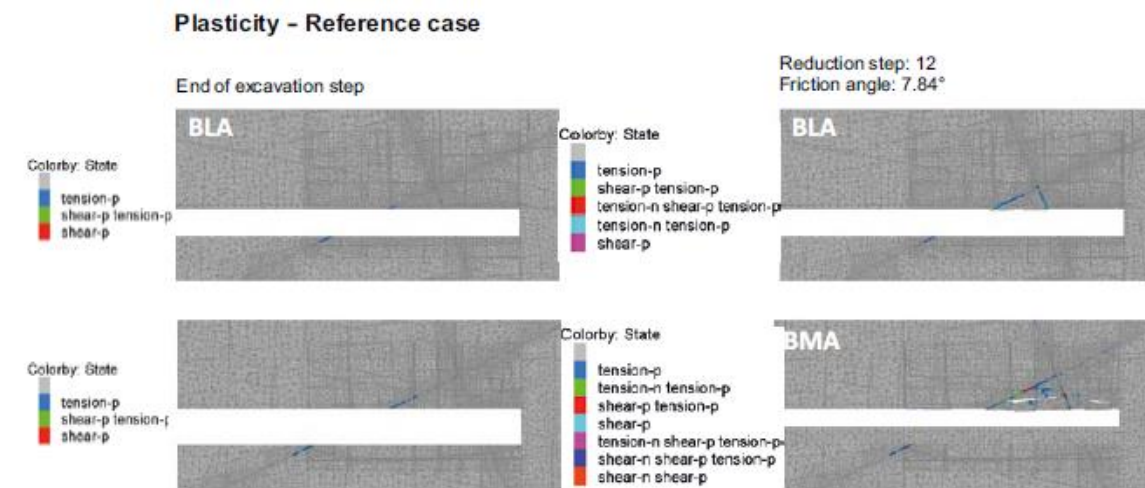
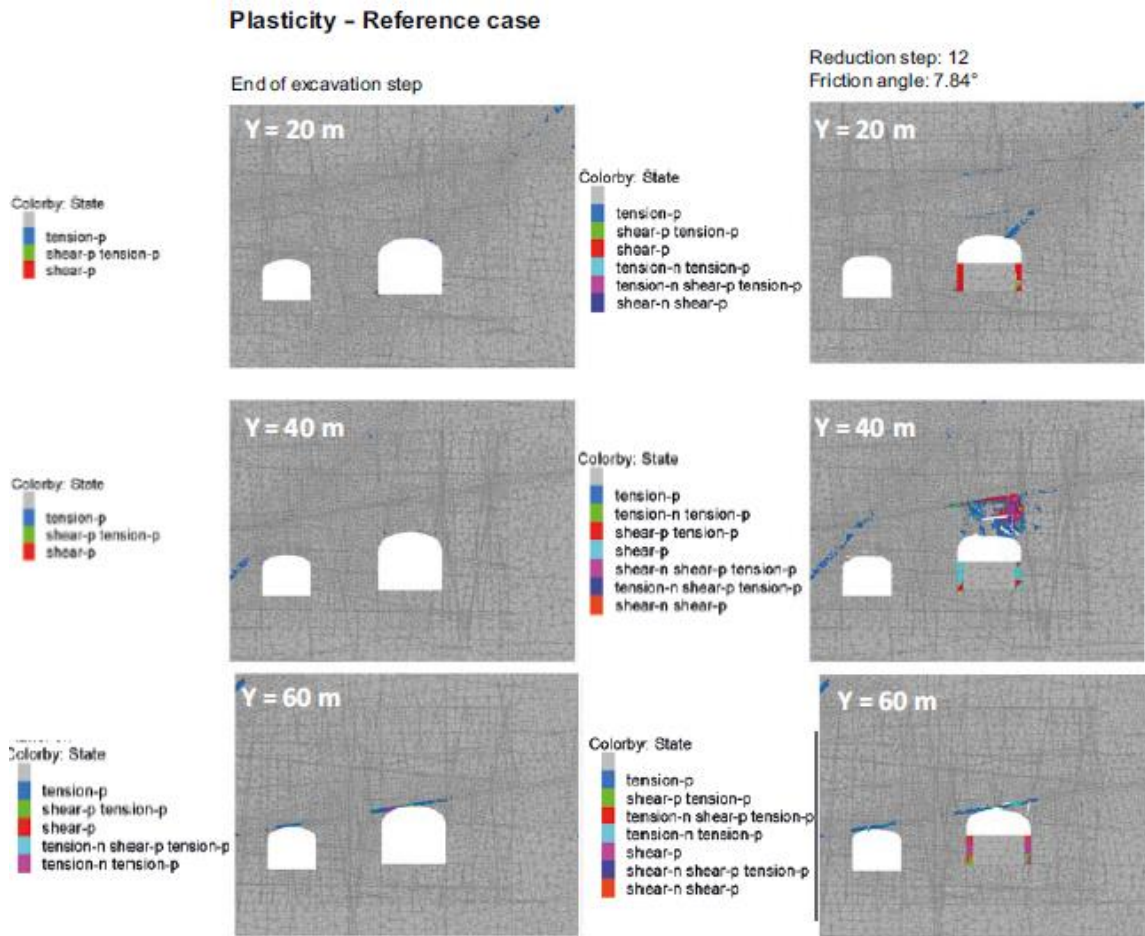
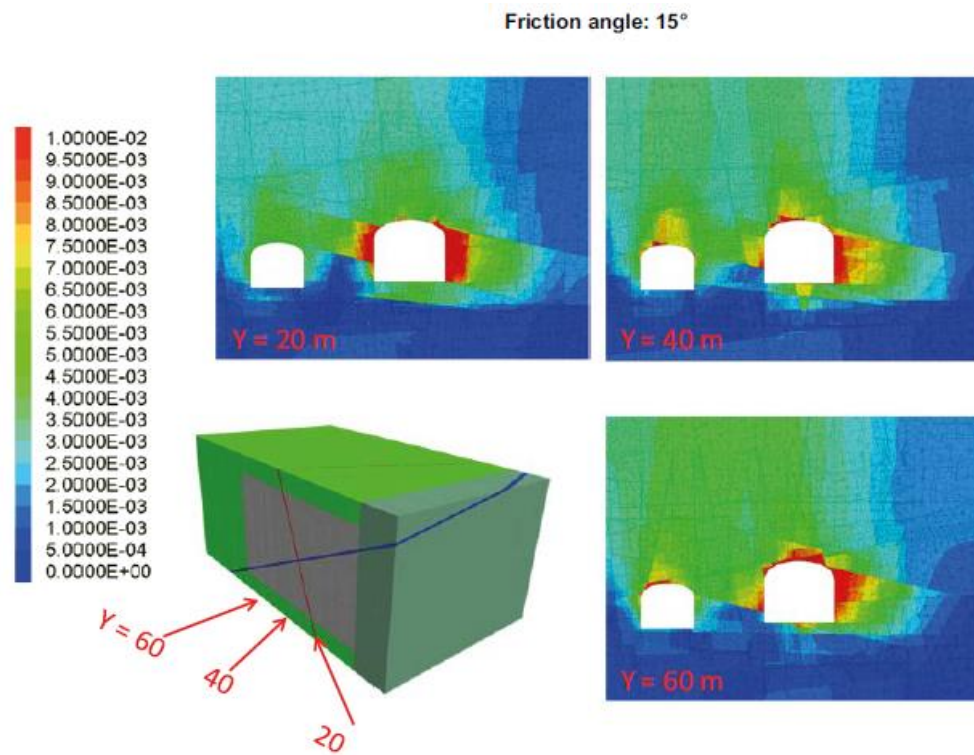
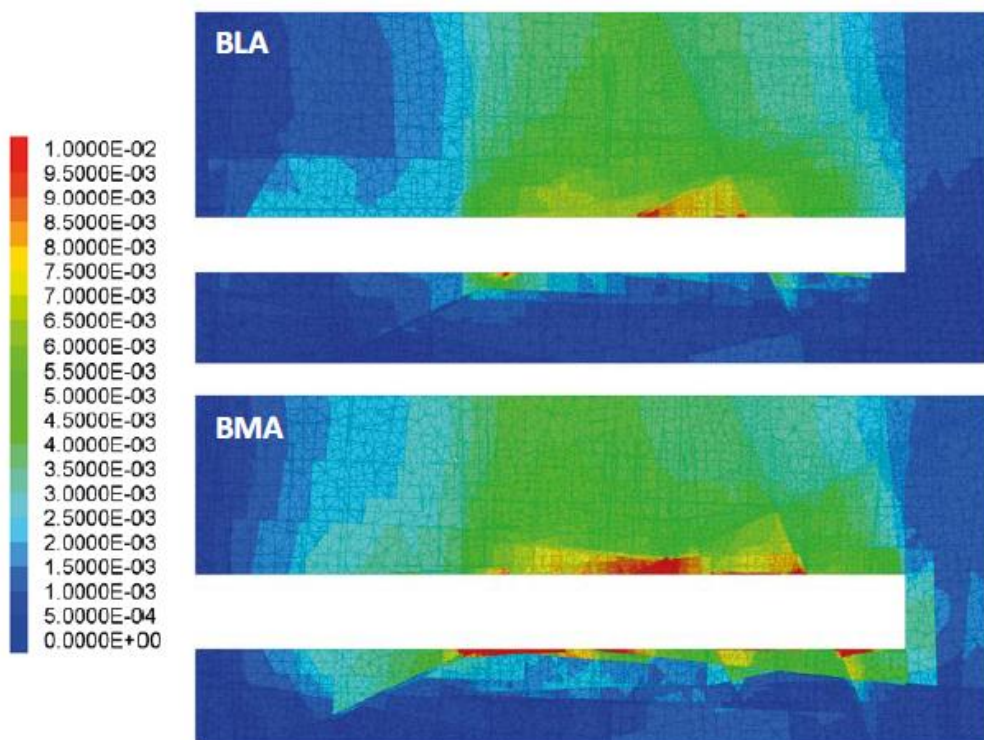


圖2.3-3 變形岩塊模型分析結果(塑性區分佈) (SKB, 2014c)



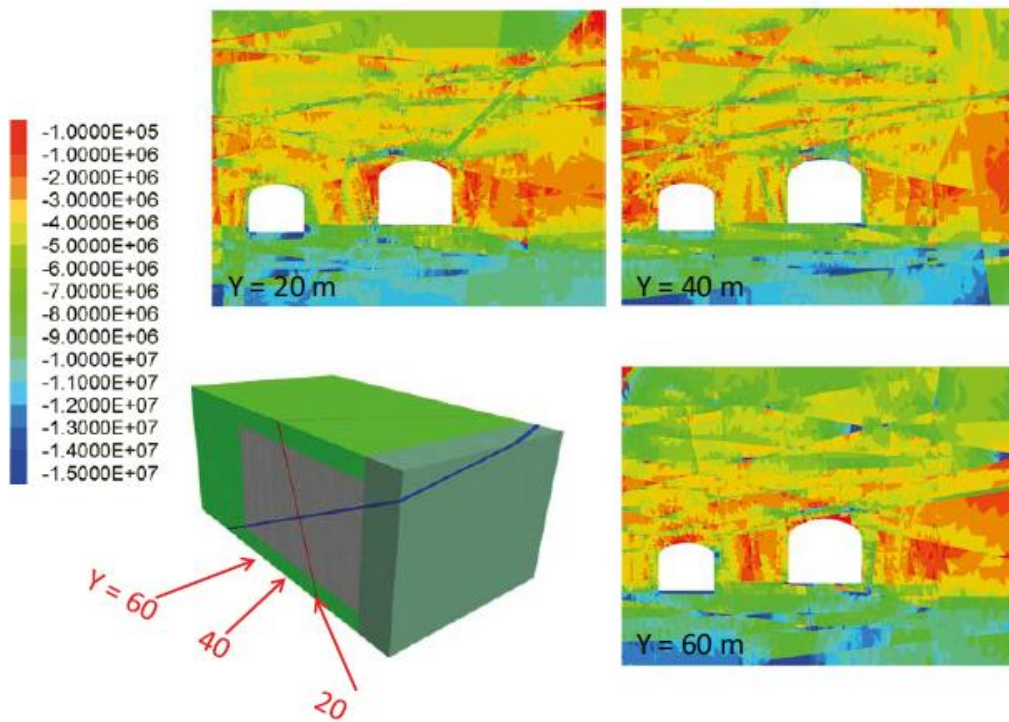
(a)



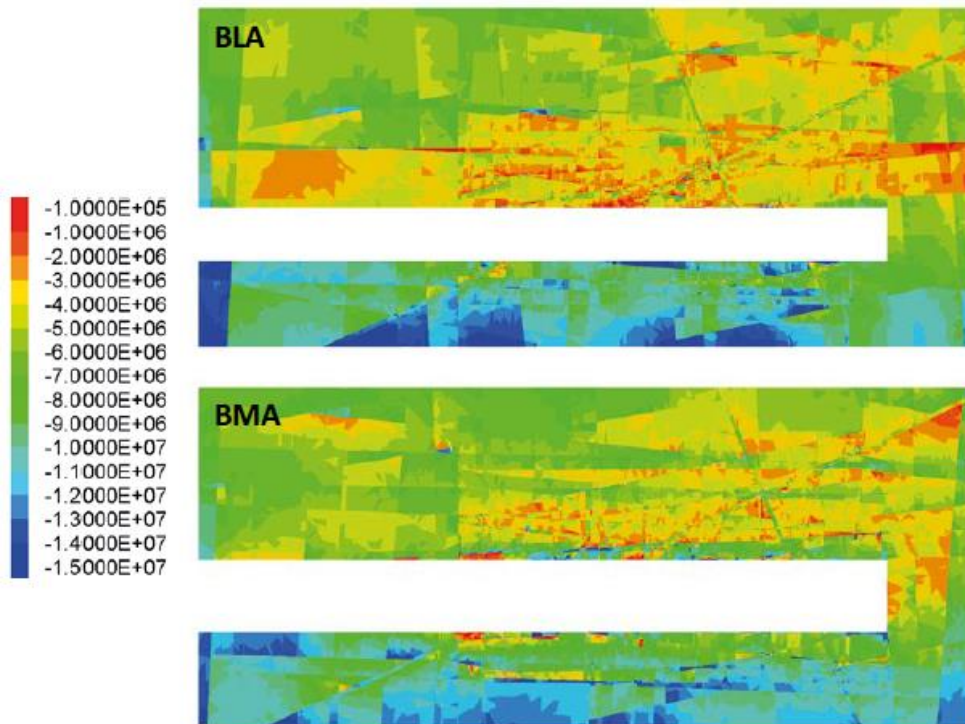
(b)

圖2.3-4 變形岩塊模型分析結果(裂隙網絡編號 case 105，初始摩擦角15度)：處置窖(a)橫切面與(b)縱剖面之垂直向位移分佈 (SKB, 2014c)





(a)



(b)

圖2.3-5 變形岩塊模型分析結果(裂隙網絡編號 case 105，初始摩擦角15度)：處置窖(a)橫切面與(b)縱剖面之最大主應力分佈 (SKB, 2014c)

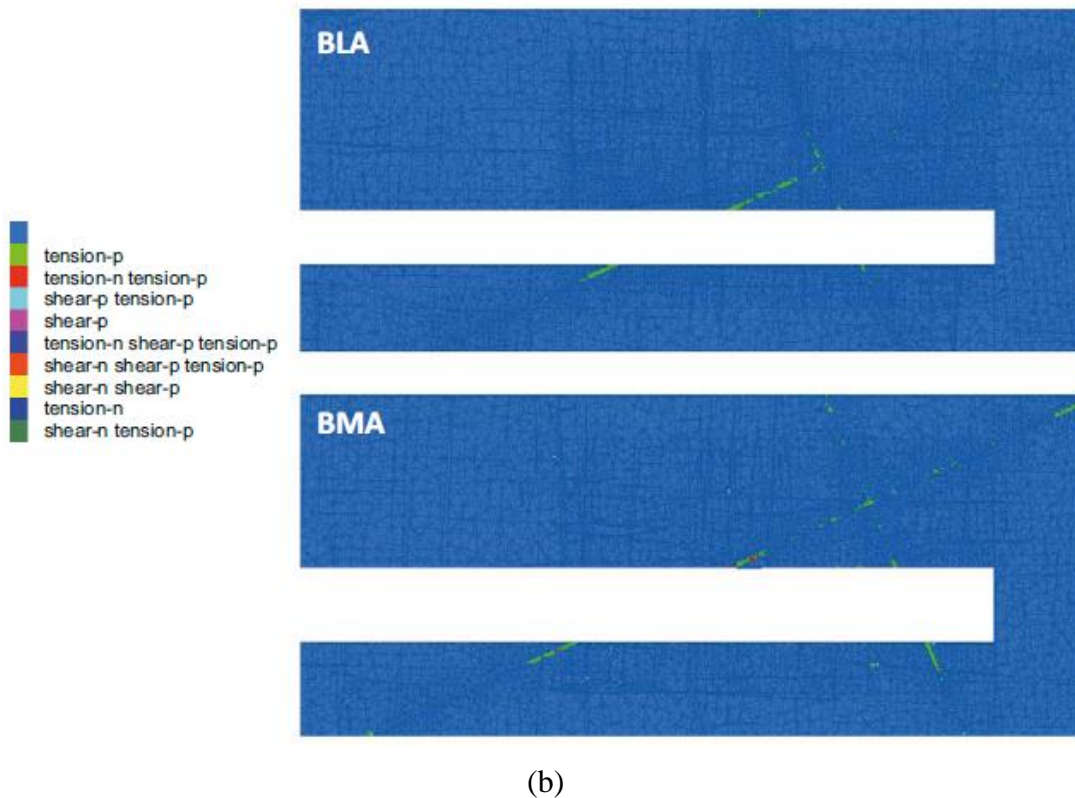
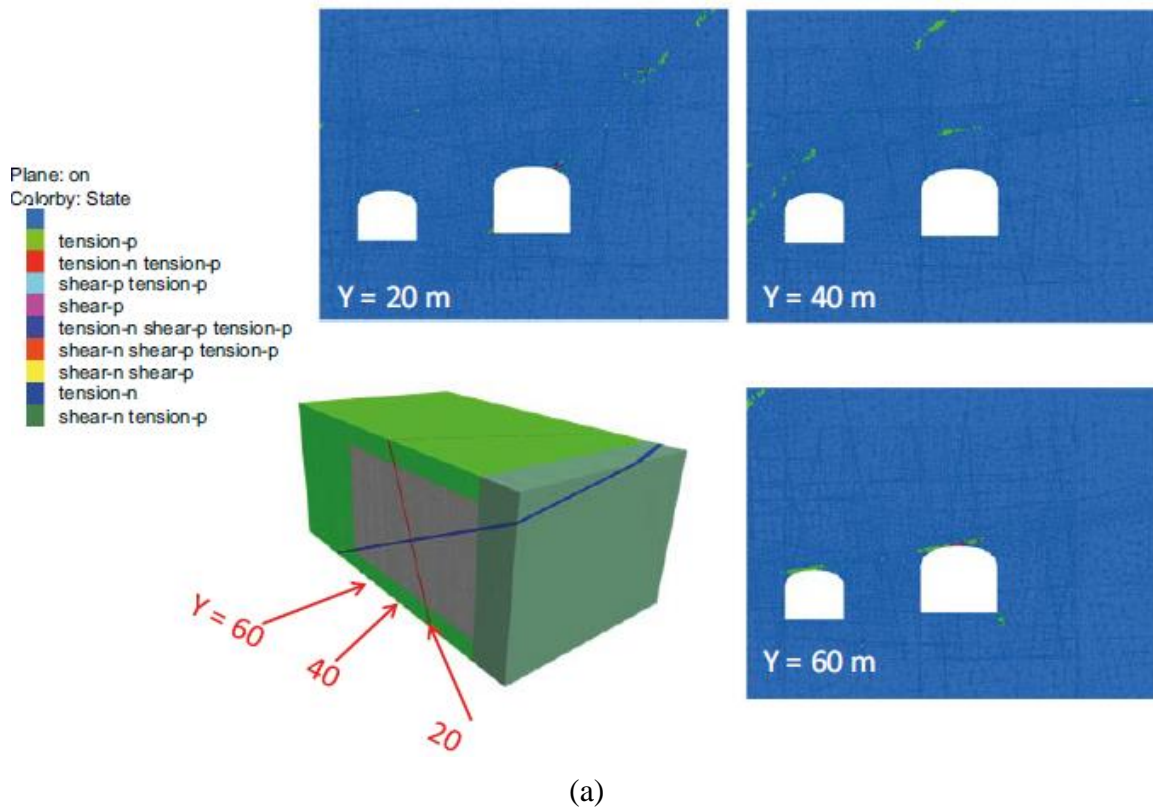


圖2.3-6 變形岩塊模型分析結果(裂隙網絡編號 case 105，初始摩擦角15度)：處置窖(a)橫切面與(b)縱剖面之塑性區分佈 (SKB, 2014c)

### 2.3.2 剛體岩塊模型分析結果

相較於變形岩塊模型，剛體岩塊模型因假設岩塊為不可變形之剛體，所有的變形僅發生在裂隙、弱面等不連續面，故其運算速度相對較快；因此，針對處置窖可能因為周圍岩體劣化，引致岩塊滑入並填滿坑道之可能情況，若採用變形岩塊模型進行分析將較為耗時，故採剛體模型進行分析。

根據其分析結果顯示，當裂隙摩擦角折減至 5.71 度，處置窖頂拱處的岩塊開始掉落，如圖 2.3-7。若裂隙摩擦角折減至 1 度以下，處置窖的變形分析如圖 2.3-8，其結果顯示最終的鬆動岩塊範圍將可延伸至原本處置窖頂拱上方 34 公尺處。

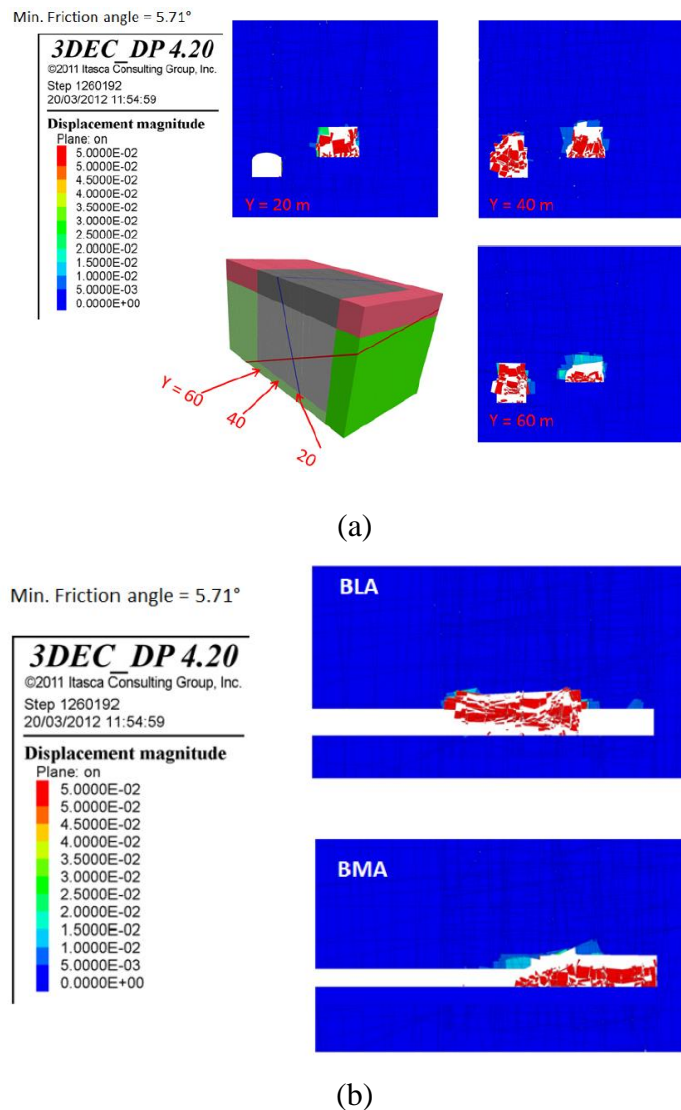
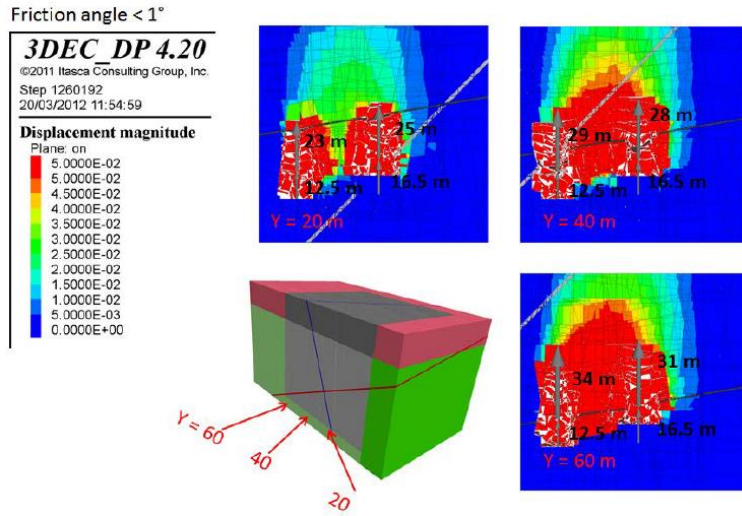
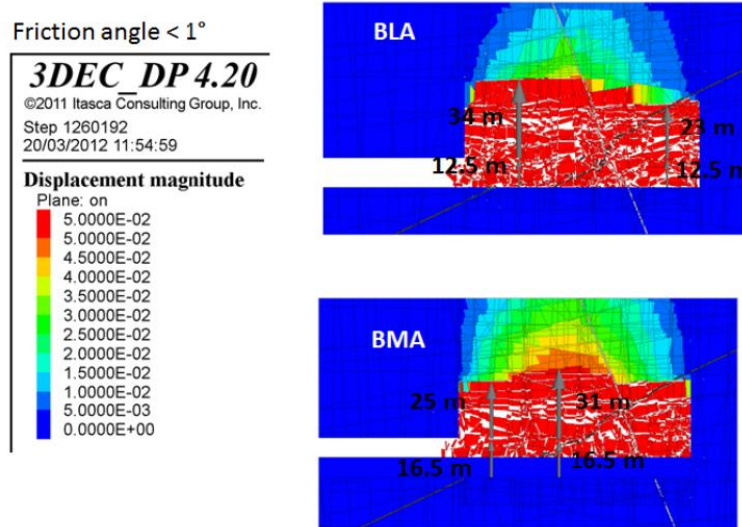


圖 2.3-7 剛體岩塊模型在強度折減分析結果(裂隙摩擦角降至 5.71 度)：(a)橫切面 Y=20、40 與 60 m 處及 (b) 平行於坑道長軸方向之縱剖面有鬆動岩塊掉落 (SKB, 2014c)



(a)



(b)

圖2.3-8 剛體岩塊模型在強度折減分析結果(裂隙摩擦角降至1度以下)：(a)橫切面Y=20、40與 60 m處及(b)平行於坑道長軸方向之縱剖面有鬆動岩塊掉落(SKB, 2014c)

## 2.4 小結

本章蒐整了國外瑞典SFR低放射性廢棄物處置場址相關背景資料，包括了地質條件、坑道裂隙測繪、岩石與裂隙力學參數、回填材料力學參數與現地應力等，於坑道處置結構穩定性驗證過程所需蒐集之資料。此外，在長期穩定性分析部分：

---

**(1) 岩體數值模型建構**

根據(i)裂隙位態及統計分析建立之裂隙網絡DFN，與變形岩塊數值模型(models with deformable blocks)之建模經驗；或(ii)在考量運算效率，分別依裂隙的平均位態(走向與傾角)與最不利的裂隙位態分佈而建立之剛體岩塊數值模型(models with rigid blocks)，均可作為我國低放坑道處置長期穩定數值分析之參考。

**(2) 岩體長期劣化分析方式**

導致之岩體崩解情境，在變形塊體模型部分，考量岩體長期劣化導致之岩體崩解情境，隨著數值運算步次的持續進行，透過「強度參數折減分析方法」使材料強度持續弱化及其劣化影響範圍的持續擴大，據以模擬岩體材料經長期劣化後對處置坑道穩定性的影響。此一分析作法，可供我國未來針對岩體材料劣化對處置坑道長期穩定分析之參考。

## 第三章、國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法

### 3.1 影響國內隧道結構穩定性之關鍵因子

隧道建置於地表下，其結構穩定性與所處圍岩岩性及地質條件有關，因此(1)在建造初期需經過充分的地質調查與試驗，獲得足夠的參數加以設計；(2)並於施工期間監測圍岩的行為，才能確保隧道結構的穩定性。

依據原子能委員會放射性物料管理局於 2012 年至 2016 年度間，委託研究計畫報告「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術發展」(王泰典等人，2012)及「低放射性廢棄物處置安全管制技術發展子計畫五—處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究」(楊長義與李宏輝，2014)之研究，經彙整一般坑道在營運期間所產生的襯砌裂縫、滲水與龜裂等異狀及其肇因，同時考量我國本土隧道案例顯示之滲漏水問題，及其可能加速襯砌材料劣化而對處置坑道結構穩定性之負面影響，歸納整理出坑道穩定性之影響因素計有三項，包括(I)外力因素、(II)環境因素及(III)非力學因素，如表3.1-1所示。

#### 3.1.1 外力因素

係指坑道整體結構(包括坑道周圍圍岩)在受到大於坑道結構強度的外在作用力下，使坑道結構造成不穩定。主要原因包括地震作用、邊坡運動與開挖擾動之影響，相關內容摘述說明如后：

##### (1) 地震作用

地震作用期間，地下結構體受震方向包括水平向及垂直向，且整體結構於短時間內來回往返多次受力而擺動變形，襯砌因擺動變形所產生之應力與彎矩，其複合受力機制對隧道產生不同之影響，若此複合應力超出襯砌之極限強度，則會使混凝土產生剝落、錯動、龜裂及滲漏水等異狀。在國內重大地震引致之隧道受損型態中，包括襯砌破壞(遭斷層剪斷、縱、橫、斜向龜裂)、因邊坡坍塌引致破壞、底版(路面)龜裂或隆起與側壁向內擠壓變形等型式，如圖3.1-1。

表3.1-1 影響處置坑道襯砌結構穩定性之因素與現象 (楊長義與李宏輝, 2014)

處置坑道結構長期穩定 影響項目與肇因		襯砌或其他坑道結構之異狀
外力因素	地震作用	1.襯砌遭斷層剪斷破壞 2.襯砌縱向龜裂 3.襯砌橫向龜裂 4.襯砌單側斜向龜裂 5.襯砌環狀斜向龜裂 6.底版(路面)龜裂或隆起 7.側壁向內擠壓變形 8.滲漏水 9.隧道因邊坡坍塌破壞
	邊坡運動	襯砌裂縫具偏壓特徵，例如： 1.襯砌肩部產生開口性張力裂縫 2.裂縫可能呈現縱向、環向與斜向型態
	開挖擾動	1.襯砌裂縫具塑性壓特徵： (1)挫曲、(2)開口裂縫、(3)剪力裂縫、(4)側壁擠出、(5)仰拱隆起 2.襯砌裂縫具鬆弛土壓特徵： (1)頂拱產生開口性裂縫、(2)側壁產生壓縮裂縫或剪力裂縫、(3)鬆弛土壓集中於小範圍之橢圓形、半月形、格子狀或放射狀之裂縫
環境因素	風化作用引致岩石強度弱軟化	1. 圍岩強度弱化或依時變形特性顯著，致岩盤鬆動產生岩壓造成二次支撐之襯砌結構受力產生異狀，其異狀特徵如塑性壓與鬆弛土壓者 2. 於施工建造階段可能引致開挖斷面擠壓、岩盤剝落、抽心落盤等問題
	依時性變形特性	
非力學因素	混凝土中性化	網狀裂縫
	鋼筋保護層厚度不足	條狀裂縫
	鹼值粒料反應	龜殼狀裂縫
	混凝土澆置中斷(冷縫)	連漪狀裂縫
	襯砌背後空洞或厚度不足	

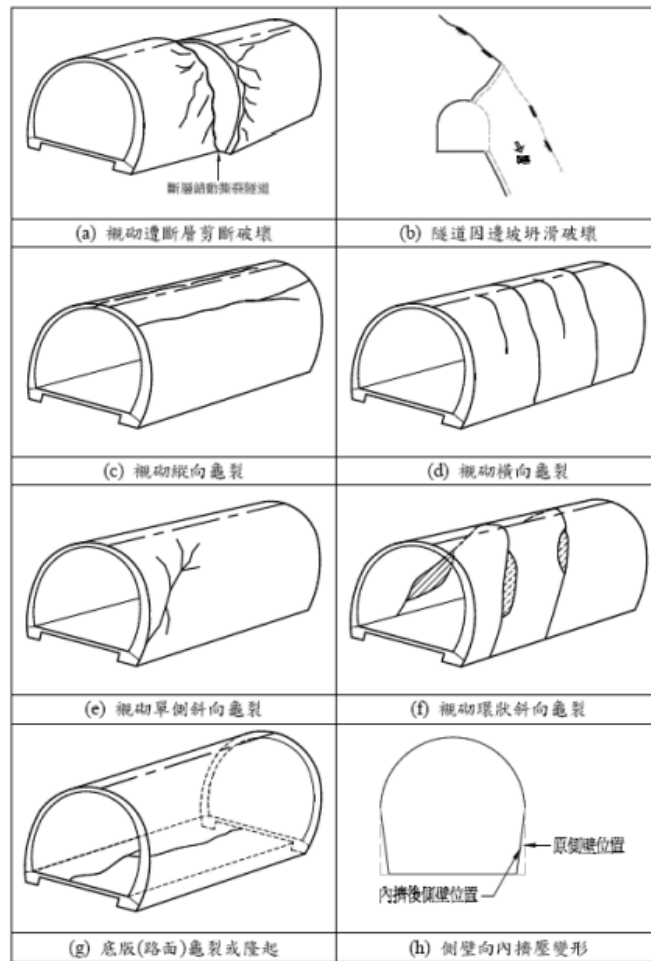


圖3.1-1 山岳隧道受震損害型態示意圖(王文禮等人，2000)

(2) 邊坡運動

邊坡潛移作用引致隧道異狀之型態，區分為邊坡潛移方向垂直、斜交與平行於隧道軸向等3種類別。透過資料蒐集與調查(襯砌影像、隧道異狀及現地崩崖)、研判襯砌裂縫型態及監測作業，可對邊坡潛移引致隧道異狀進行診斷與提出因應措施。

(3) 開挖擾動

坑道因開挖作用對圍岩形成擾動，造成現地岩體應力釋放，使得坑道與豎井周圍岩體特定區域內，應力及應變產生變化，造成圍岩產生變形或形成微裂隙，並改變水力傳導或吸附行為，影響岩體對於核種傳輸的遲滯能力。此一特定區域在大地工程領域稱之



為開挖擾動帶(EDZ)，亦為坑道變形的影響因素。且軟弱岩盤受開挖擾動後，開挖擾動帶範圍隨時間遞增而增大，開挖擾動對岩盤之依時性變形有顯著影響。

### 3.1.2 環境因素

因我國特殊之地質與氣候環境影響，岩石材料多因風化作用強烈，使岩石弱軟化迅速，且長期依時行為明顯，其強度與變形性依時變化大。以下分項說明如后：

#### (1) 風化作用引致岩石強度弱軟化

地表或接近地表的岩石，因為與空氣和水接觸，或者受生物活動影響，發生了化學和物理的變化，因而改變了這些岩石的化學成分和物理性質，地質上叫做風化作用(weathering)，依其過程又可區分為物理性風化與化學性風化兩種方式。

表3.1-2 岩心風化程度分類表(ISRM, 1981)

風化等級	風化程度	描述
W0	新鮮	岩質新鮮，無風化跡象，但主要不連續面(如節理面)可能會有輕微氧化鐵鏽染變色現象。地質錘敲擊聲十分清脆。
W1	輕微風化	整個岩體的不連續面幾乎都有輕微明顯的氧化鐵鏽染變色現象，部分長石礦物已受風化分解。地質錘敲擊聲大致清脆。
W2	中度風化	岩石材料風化分解成土壤者約一半。新鮮或微變色岩石仍脈絡相連或以團塊狀存在。地質錘敲擊聲有悶音。
W3	高度風化	岩石材料風化分解成土壤者超過一半。新鮮或微變色岩石以不連續脈絡或團塊狀存在。岩心可用手指捏碎。地質錘敲擊聲極悶或是一敲岩心即散開。
W4	完全風化	岩石材料已完全分解，但原本之岩石組構仍可肉眼分辨。手指可捏碎，泡水會散開。所有長石礦物已轉變成黏土礦物。
W5	殘餘土壤	所有的岩石材料已完全分解成土壤，原本之岩石組構已消失無法分辨。

物理性風化作用又稱崩解作用，此作用可使物體的顆粒失去結合力，由大塊碎成細粒，成為礫、砂、粉砂等，可是沒有顯著的化學成分的改變。物理性風化的原因是溫度改變、凍裂作用、生物作用和剝離作用；岩石因溫度改變，造成熱脹冷縮，反覆進行，經若干時日之後，大幅減弱岩石中礦物顆粒間結合的程度，促使岩石崩裂。而化學性風化作用又稱分解作用，因岩石接觸到水、氧和酸，發生化學變化。岩石中的礦物成分或化學成分改變，使原來礦物因溶解而流失，也可能有新的礦物生成例如黏土礦物，這種作用會引起岩石內部結構改變或體積變化，一般是體積變大而使密度變小，導致岩石強度自然降低。風化程度可參考國際岩石力學學會(ISRM)岩石風化度分類表進行分級，如表3.1-2所示。

## (2) 依時性變形對坑道長期穩定的影響

岩石材料在相同應力持續作用狀態下，隨時間產生之變形行為稱之為潛變(creep)，即稱為岩石材料之依時性變形行為。常見的依時變形模式主要可分為(i)黏彈模式(Visco-elastic model)、(ii)黏彈塑模式(Visco-elasto-plastic model)與(iii)黏塑模式(Visco-plastic model)，其中以黏彈模式中柏格模式(Burgers model)為岩石力學相關試驗最廣泛使用，係以彈簧及阻尼基本元件組合模擬材料在受力狀態下，應變變形量隨時間變化之增大行為。另外，依時性變形特性參數與場址特性之間，岩體材料變形模數、強度、岩層組成比例對岩體依時變形特性影響相當顯著，而環境因素，如瞬間水位的急遽變化亦會造成岩體材料之依時性變形。

### 3.1.3 非力學因素

係指坑道結構因混凝土中性化、鋼筋保護層厚度不足、鹼值粒料反應、混凝土澆置中斷(冷縫)、襯砌背後空洞或厚度不足等因素，造成襯砌產生裂縫等異狀。

## 3.2 隧道結構穩定性之分析方法

目前在隧道結構穩定性分析上，有多種方法。在數值模擬方面，應用於連續體分析的有限元素法(Finite Element Method, FEM)、有限差分法(Finite Difference Method, FDM)及邊界元素法(Boundary Element Method, BEM)，應用於離散體分析的離散元素法(Distinct Element Method, DEM)、不連續變形分析法(Discontinuous Deformation Analysis,

DDA)。另外有以幾何概念發展的岩塊理論(Block Theory)及以實體模擬的物理模型法(Physical Model Method)，茲概述如后。

### 3.2.1 有限元素法

有限元素法(Finite Element Method, FEM)係利用虛功原理(virtual works theory)將有限空間之材料離散化(discretization)，使各元素間連接成一連體系統(continuous system)，藉由各元素矩陣組合成整體結構矩陣，進而運算求其未知量。整體運算結構須滿足固體力學的4種分析條件：(1) 平衡方程式(equation of equilibrium)、(2)應力-應變之組成律關係(constitutive law)、(3)位移-應變之諧和性(compatibility)、(4)位移-荷重之總體勁度矩陣(global stiffness matrix)。

目前在套裝軟體中，以達梭系統 SIMULIA 旗下的 ABSQUS 軟體使用最為廣泛，可適用於黏土、沙土到岩石的各種岩土材料，以及高壓混凝土結構分析(如高圍壓隧道、放射性廢棄物掩埋隧道等受高壓之混凝土結構)。

### 3.2.2 有限差分法

有限差分法(Finite Difference Method, FDM)是一種計算微分方程近似解的數值方法。其原理係對某一函數 $y = f(x)$ ，先將變數 $x$ 離散化，以特定的間距 $\Delta h$ 區隔為 $x_1$ 、 $x_2$ 、...、 $x_{n-1}$ 、 $x_n$ 、 $x_{n+1}$ 、...，其所對應的函數值分別為 $y_1 = f(x_1)$ 、 $y_2 = f(x_2)$ 、...、 $y_{n-1} = f(x_{n-1})$ 、 $y_n = f(x_n)$ 、 $y_{n+1} = f(x_{n+1})$ 、...，即可透過各變數的泰勒展開式進行彼此間的數值運算，求得微分方程的近似解。

目前在隧道工程的應用上，主要以美國 Itasca Consulting Group Inc.發行之數值分析軟體 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)之應用較為廣泛。FLAC 程式能針對應力控制的隧道問題進行分析，求得各開挖施工階段中，岩體變形、應力與塑性區大小，以及各支撐構件之應力大小等，為一簡便且多功能的分析工具。但是對於由岩石弱面所組合而成的岩楔(Rock Wedge)所引致的構造控制問題，FLAC 目前並沒有適當的分析模式，是該程式在應用上最大的限制，應用情形如圖3.2-1所示。

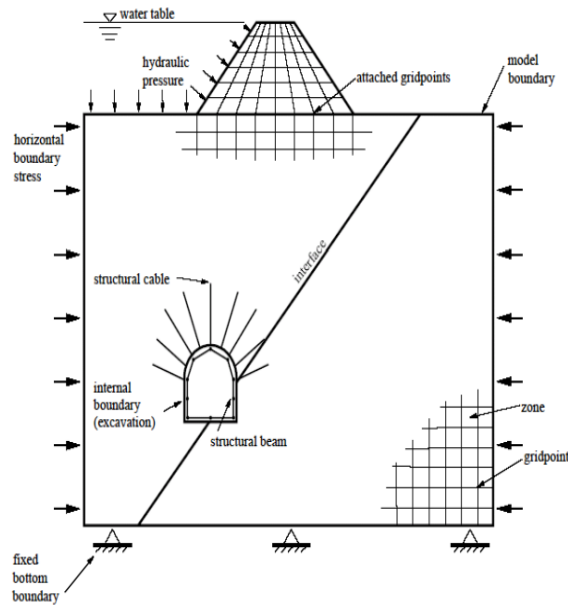


圖3.2-1 FLAC用於分析大地工程之示意圖

### 3.2.3 邊界元素法

邊界元素法(Boundary Element Method, BEM)係根據元素特性離散邊界積分方程式後，以電腦計算得到方程式解之數值方法。積分方程式通常是根據物理和力學問題推導出控制其現象之偏微分方程式，再利用基本解、散度定理(divergence theorem)及積分運算元推導出相對應之邊界積分方程式。

邊界元素法具有減少數值計算之複雜度和獲得高準確性之解的優點。邊界元素法只需要在定義域之邊界切割網格和數值計算，可以降低問題之一階維度，所以設定元素等前處理和數值計算都較為容易。另外，由於邊界元素法是將基本解代入問題之偏微分方程式，然後利用散度定理及積分運算元推導出相對應之邊界積分方程式，以數學技巧或數值模擬求解積分方程，所以邊界元素法的分析結果具有高精準度。然而許多問題之基本解未必能取得，也因此限制了邊界元素法的應用，且邊界積分方程式多為奇異性積分，所以處理積分時容易產生誤差，以致無法求得精確結果。

### 3.2.4 離散元素法

離散元素法(Distinct Element Method, DEM)是由 Cundall (1974)首先提出的數值方法，將模擬的對象拆解成各自獨立的顆粒(particle)來分析，顆粒與顆粒接觸後的互動關係以牛頓第二運動定律計算，離散元素法由於顆粒間各自獨立，可以記錄顆粒的位移、

旋轉、接觸力等資訊，而且相對於連續性的數值分析，離散元素法的顆粒各自獨立，沒有像有限元素法的網格有變形限制，故可用來分析不連續性的變形問題。

目前以離散元素法為基礎所開發應用於岩石力學領域分析的程式中，主要為ITASCA公司旗下的UDEC、3DEC、PFC2D、PFC3D等4款軟體，其中UDEC與3DEC主要用於塊體分析，PFC2D與PFC3D則用於顆粒流的運算。

### 3.2.5 不連續變形分析法

不連續變形分析法(Discontinuous Deformation Analysis, DDA)是石根華(1984)所發表的新數值方法，其模擬之元素(或塊體)為可分離、可變形、可移動、可轉動，且塊體與塊體之間可以是完全非連續的，不同於有限元素法與邊界元素法所模擬之元素間為連續且不可分開。因此能自然的處理塊體的大變位分析與非連續性節理的運算。DDA採用「全勢能法」(total potential energy)為理論基礎，因而整個分析系統之能量總合除可達到基本物理學或基本力學上所要求之原則外，其作用力亦能達到平衡。其優點為整體之理論與數值分析架構簡單，且數值運算容易，因此不連續元素法能以較為簡化之理論架構處理岩石塊體間之非連續力學行為。

### 3.2.6 岩塊理論

岩塊理論(Block Theory)又稱為關鍵塊體理論(Key Block Theory)，為石根華(1985)所創。在岩層中，岩體雖因不連續面而切割成各自獨立的塊體，但在開挖前會因為互相箝制而形成穩定平衡的狀態，經開挖後，因某些塊體的形狀、位置，會引致鄰塊之連鎖滑移，而引發一連串崩落，其最先破壞整體平衡的塊體，稱為「關鍵塊體」。因此，根據現地地質以及開挖面位態量測資料分析岩體內可能產生的不連續面塊體，找出關鍵塊體，進而強化工程結構物如地下廠房、隧道等之穩定性，是此方法最主要的運用。

### 3.2.7 物理模型法

物理模型法(Physical Model Method)係在建構模型試驗時，掌握模型與實體之間的相似關係，以模型相似理論為原則，為模型做基本設計，將複雜的實體行為化為簡單的物理現象，據以轉換於模型試驗中。首先確定研究的實體物理行為，瞭解現象發生過程中受那些主要控制變數影響，藉由實體觀察結果作為模型試驗探討的方向與模型建構的依

據，明確地將實體行為機制以精準的試驗規劃與量測設備將試驗結果作定性與定量分析，再由模型試驗的結果推算出實體於此相似行為作用下的物理量變化。例如朝倉俊弘等人(1994)進行縮小尺寸 1/30 的純混凝土襯砌試驗，探討載重型態、特定襯砌肇因對襯砌型態之影響。野城一榮等(2004)延續朝倉俊弘等人(1994)之雙線隧道襯砌模型，如圖 3.2-2(a)，探討隧道襯砌受集中荷重作用時的荷重—位移關係。小島芳之等人(2006)設計引致隧道襯砌異狀之外力型態—集中荷重、偏壓與塑性壓之試驗，探討隧道襯砌受不同外力型態作用時的荷重—位移關係。佐野信夫等人(2006)建立實驗過程中襯砌剛性與裂縫進展的關係，藉觀察裂縫發展評估襯砌現有之剛性。Kojima與Yashiro(2005)為了解鄰近施工對隧道可能的影響，建立如圖 3.2-2(b)之實驗模型，於地表反覆進行開挖與回填，獲得加卸載過程隧道襯砌受力的變化。

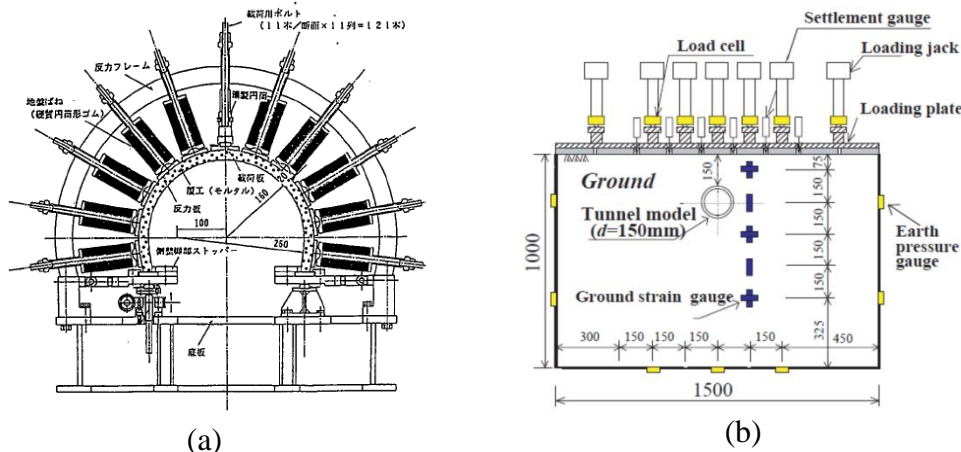


圖3.2-2 日本學者之室內隧道實驗(a)純混凝土雙線隧道模型試驗(朝倉俊弘等，1994) (b)反覆加卸載隧道模型(Kojima and Yashiro, 2005)

### 3.3 隧道運轉階段結構穩定性之驗證方法

就隧道結構穩定性而言，研擬適切的檢測與監測方法，及襯砌異狀肇因的診斷流程，藉以掌握處置坑道長期變形行為，為鞏固處置坑道結構穩定之關鍵要項。隧道安全廣受各國重視，國外多有因應各國境內坑道狀況而制定的檢測技術報告(Benford, 1983；Miyaguchi, 1986；日本土木學會，2002、2003)。國內部分，亦有相關的技術報告可供參閱(黃燦輝，1997；黃燦輝，2008)。本研究引用部分前期報告之成果，整理目前既有營運中坑道廣泛使用的檢監測技術。

### 3.3.1 光學檢測之類型

#### (1) 目視與攝影檢測

目視檢測(Visual inspection)，即採目視方式觀察隧道襯砌表面是否有異常龜裂、滲水、腐蝕等現象，並將其紀錄於圖上。通常在嚴重或有疑慮之處，輔以照片或攝影紀錄。

#### (2) 隧道淨空測量

隧道淨空測量係運用測量儀器及其原理，根據已知的方位觀測各隧道里程、斷面距離、角度、高程等數據，經計算求得隧道淨空斷面的位置、面積或體積。測量基本原點係透過已知點與未知點之間的水平角、垂直角、水平距、斜距及高程差等關係，計算其相關位置及坐標。依據測量已知點與未知點的方式，測量方法又可進一步細分，如前方交會法與後方交會法等。由於隧道內空間狹隘，單純使用前方交會法或後方交會法，測量精度受到限制，因此進行淨空測量時，有時利用較多已知坐標的控制點，推算求點的坐標。

#### (3) 襯砌影像掃描

隧道襯砌表面裂縫、滲漏水、剝落、空洞等情況可以用照相或攝影的方式記錄其表面之影像，藉由影像掃描快速的將隧道壁面狀態記錄下來，再判釋隧道襯砌異狀之狀況，以供隧道改善之規劃與設計之參考。襯砌影像掃描的裝置，目前主要可分為：

- TS360隧道全斷面掃描系統：

其組成包括：(i)雷射影像掃描儀(TS360B)；(ii)紅外線熱像掃描儀(TS360BT)；以及(iii)雷射淨空掃描儀(TS360BP)等三大部份組成，如圖3.3-1所示。操作時，將該系統放置於沿隧道前進之軌道車或工作架上，雷射光、紅外線等藉由360°旋轉的稜鏡反射功能，將掃描器的射線偏轉，在工作車輛行駛穿越受測隧道的斷面時，受測隧道襯砌表面的狀況即可被以360°螺旋管狀的形式，一次且迅速地對受測隧道作全斷面掃描調查，可獲得隧道全斷面的灰階影像、溫度分佈影像以及淨空剖面。

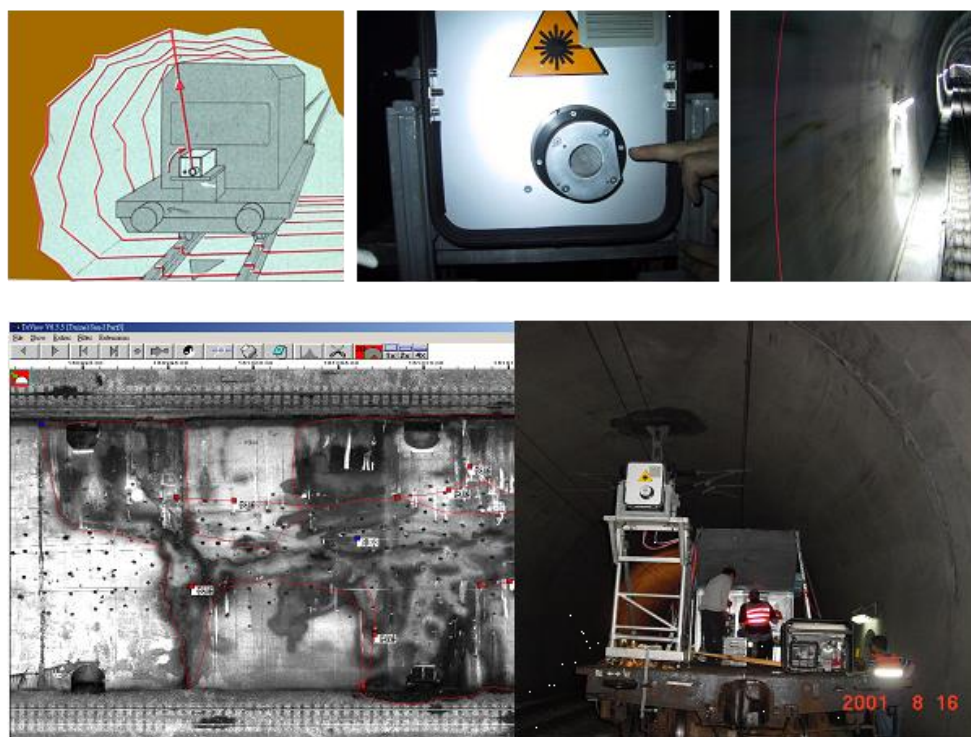


圖3.3-1 TS360系統

- DIBIT三維隧道影像掃描儀

DIBIT三維隧道影像掃描儀(DIBIT tunnel scanner,簡稱DIBIT系統)為可攜式隧道影像記錄器。DIBIT系統模擬航空照相之原理，對相同目標攝取重疊影像，藉以取得隧道表面之影像像素點(Pixel)立體坐標。對一般公路隧道規模而言，隧道斷面需分別攝取重疊影像，進而組合構成全斷面。



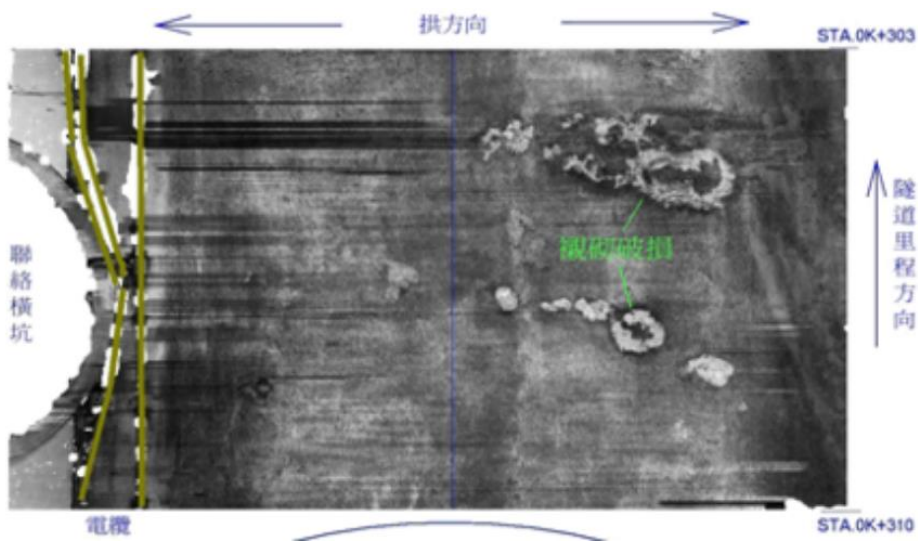


圖3.3-2 DIBIT 測量成果展開圖(葛文忠、俞旗文，2005)

- 熱紅外線掃瞄

透過紅外線熱影像儀器進行電磁波偵測，並將偵測所得訊號轉換成可供人類視覺辨識的影像圖形，可進一步計算出溫度分佈值。由於隧道內溫度變化可能與襯砌背後孔洞、內部缺陷、含水狀況或裂縫等有關，藉由測得溫度分佈，配合影像等資料，可以推測得到襯砌表面乾濕、剝落、不同材料之熱傳導係數之變化及內部空洞等資訊。

- 三維雷射掃瞄技術

三維雷射掃瞄技術（又稱光達（Light Detection And Ranging, LiDAR））為新興的測量技術，具有快速、自動、高精度收集三維空間資料特性。透過雷射對目標物進行高密度的掃瞄，紀錄雷射訊號的走時、反射強度或相位，可以快速地完成量測工作。在隧道工程的應用上，最初多為施工階段的監測作業，如水利署(2016)運用於曾文水庫防淤隧道工程開挖支撐快速評估，如圖3.3-3。目前國內已有學者開始將此技術應用於隧道變位監測，如江怡萱(2014)利用原始資料中的現地特徵，將多時期多測站光達資料整合至共同坐標基準，再建立隧道二維變形分析模型及隧道三維變形分析模型，進行全隧道變位訊號估計與品質評估，驗證此技術為現行隧道安全監測任務中一項具體可行的技術方案。



圖3.3-3 曾文水庫防淤隧道工程豎井閘室(往上游測)光達掃描成果展示圖(水利署,2016)

### 3.3.2 微變形監測技術

在進入運轉營運階段，因隧道的變位大致在施工期間即已達到初步穩定，前、後檢測的變位非常小，大多僅有數毫米，就目前的工程測量技術並無法獲得測點精準的位移量，此點可從表3.3-1所列有關隧道施工安全監測與營運安全檢監測之比較得知。為了解營運中隧道襯砌承受荷重的變異影響，邱雅筑等人(2012)基於運動學的觀點，分離襯砌位移為剛體運動及變形兩大分量，並分別探討近域與遠域外力變化造成的襯砌剖面變形性特徵曲線(profile-deformational characteristic curve)，繼而建立量測襯砌剖面變形曲線所需的微變監測技術架構，如圖3.3-4，其內容包括了平面控制測量、高程控制測量、路線測量暨回歸計算、襯砌3D絕對坐標全斷面測量與襯砌剖面變形曲線繪製及應用等主要項目。

基於坐標框架與儀器特性，現行測量作業通常考慮待測區域的位置與範圍以選擇滿足精度要求且作業簡便的方式進行。若所採用的測量方法進行待測區的變位或變形監測時，需配合額外的參考點或固定點，始能比較不同時期特定点位坐標的變化。賴彥儒(2013)根據常見的工程測量與監測作業及其選用的坐標特性，劃分了三個不同尺度的測量作業，分別是全域尺度、介觀尺度與局部尺度，詳表3.3-2。為能對待測區域實施多時期測量，必須針對變形參數進行統計檢定測試以確定變形是否確實存在而非受到測量誤差的影響，賴彥儒(2013)經由一系列的測試研究，驗證其分析方法可將不同時期的監測資訊轉至絕對坐標系統下，並得到絕對量測精度；同時，根據王泰典等人(2009)與邱雅筑等人(2012)提出的襯砌微變監測技術作業架構，將全域尺度下的GPS測量作業、介觀尺度下的測量作業及局部尺度下的測量作業相結合，提出了跨尺度多時序監測整合技術之測量作業架構，如圖3.3-5。

表3.3-1 隧道施工安全監測與營運安全檢監測之差異性比較(邱雅筑等人，2012)

項目	施工過程安全監測	營運過程安全檢監測
應力變化	隧道開挖引致應力調整幅度大、圍岩變形量大	安全檢測期間沒有開挖應力調整所造成的變形
支撐之效果	前進面效應與一次支撐支持隧道穩定、支撐勁度相對應力調整量較小	一次支撐與二次支撐襯砌支持隧道穩定，支撐勁度相對外力變化量較大
隧道變形量	監測量測所得變位明顯，可達數十毫米以上	測量所得位移不明確，常僅有數個毫米
測量之精度	既有工程測量技術可滿足精度要求	既有工程測量技術尚無法提供測點精準位移量
岩體參數與反算分析技術的應用性	透過反算分析可求得現地應力與岩體力學參數	隧道變型量較小且精度不足，反算分析結果變異較大

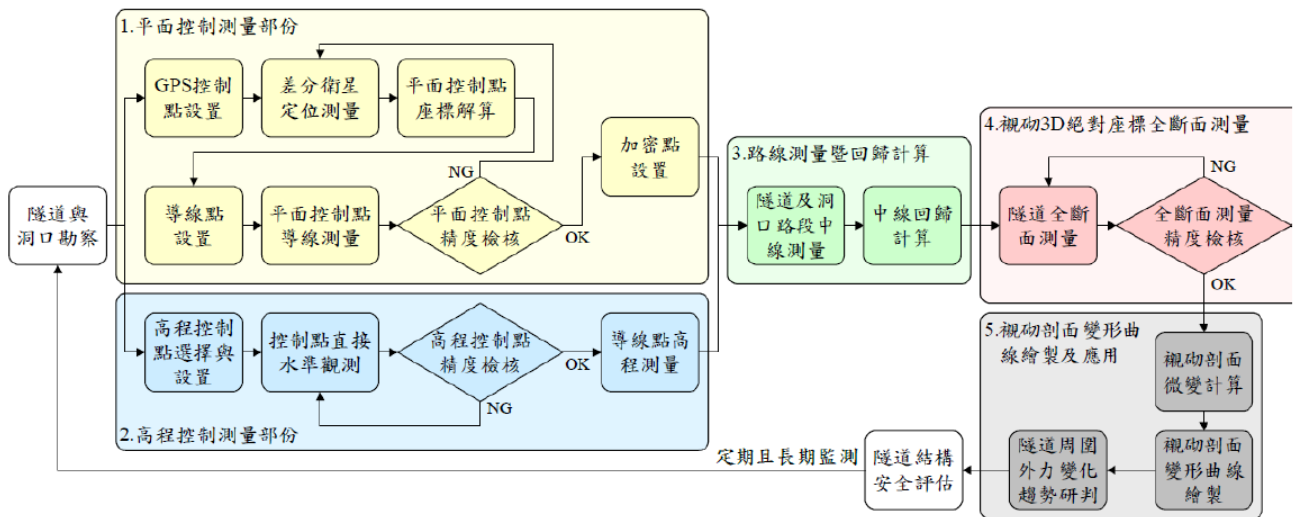


圖3.3-4 曾文水庫防淤隧道工程豎井開室襯砌微變監測技術作業架構(邱雅筑等人，2012)

表3.3-2 定義不同尺度量測之比較(賴彥儒，2013)

不同尺度 比較項目	全域尺度 Macro-scale	介觀尺度 Meso-scale	局部尺度 Micro-scale
坐標系統	國家絕對坐標系 TWD97、 TWVD2001	國家絕對坐標系 TWD97、 TWVD2001	測站單元之 測站坐標系
施測方式	GPS靜態測量 水準測量	加密控制測量	單站自由測站法
已知點	衛星控制點 一、二等水準點	隧道控制點 Meso-scale Control	測站中心
待測點	隧道控制點 Meso-scale Control	加密控制網 Meso-Network	監測剖面點 Tunnel Profile 局部加密控制網 Meso-Network(net#)

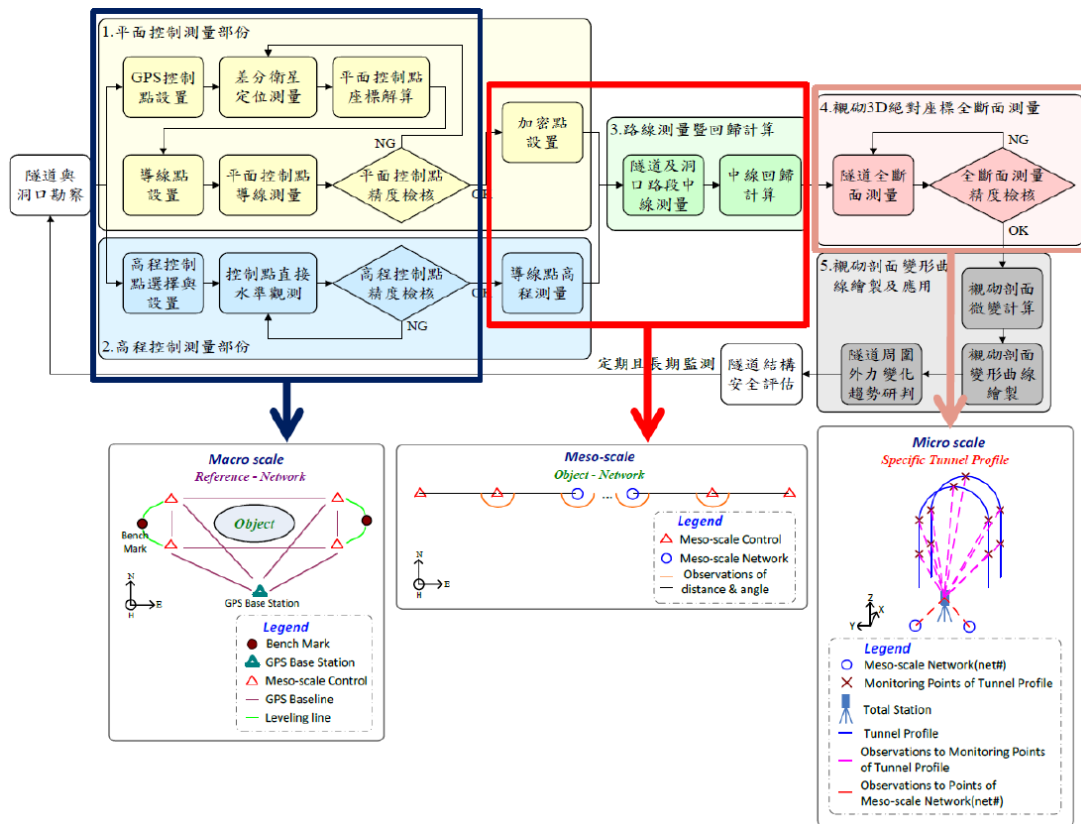


圖3.3-5 跨尺度多時序監測整合技術之測量作業架構(賴彥儒，2013)

### 3.3.3 導電與電子檢測之類型

#### (1) 透地雷達

透地雷達(ground penetration radar)簡稱GPR，是一種反射電磁波探測法，以高壓線圈為探測源，產生高頻電磁波射入探測區域介質內，在行經電磁特性如導電率(conductivity)或介電常數(dielectric constant)變化的界面或異常體時，會依斯涅爾定律(Snell's law)將部份能量反射回來，反射能量的強度依此界面的反射係數(又稱反射率)而定，透過天線接收並記錄於儀器內，將連續之歷時記錄排在一起，則成雷達波剖面，分析反射波的走時、強度及相位，即可獲得探測區域介質電磁特性異常的幾何位置，進而推估相關的地質構造及結構體的完整性，有關透地雷達原理示意，如圖3.3-6。

若襯砌和岩盤交接良好，應用透地雷達探測可能無法看到明顯的反射界面，但若襯砌中存在蜂窩、背後空洞、含水等缺陷，則可藉由透地雷達探查測出，而且由於不必和襯砌緊密接觸、施測快速，因此透地雷達可以說是襯砌完整性調查非常有效的工具。

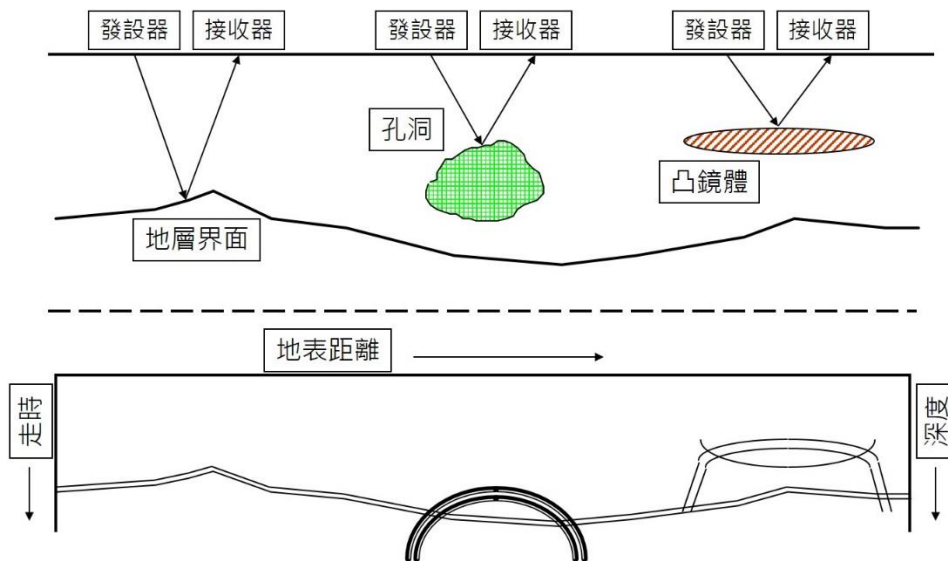


圖3.3-6 透地雷達原理示意圖

#### (2) 多相線性陣列電磁波雷達

多相線性陣列電磁波雷達(multipath linear array electromagnetic wave radar)的原理類似透地雷達，係由多個雷達線性排列組合而成，透過不同位置雷達對電磁波訊號的解析，可解析出襯砌背後缺陷的三維空間分佈。多相線性陣列電磁波雷達與電磁波雷達(即傳統透地雷達)比較如圖3.3-7所示。日本東鐵道公司曾針對隧道檢測車的檢測精度進行

試驗，驗證可有效檢測出襯砌背後的裂縫、冷縫、空洞與蜂窩等各種缺陷，如圖3.3-8所示。

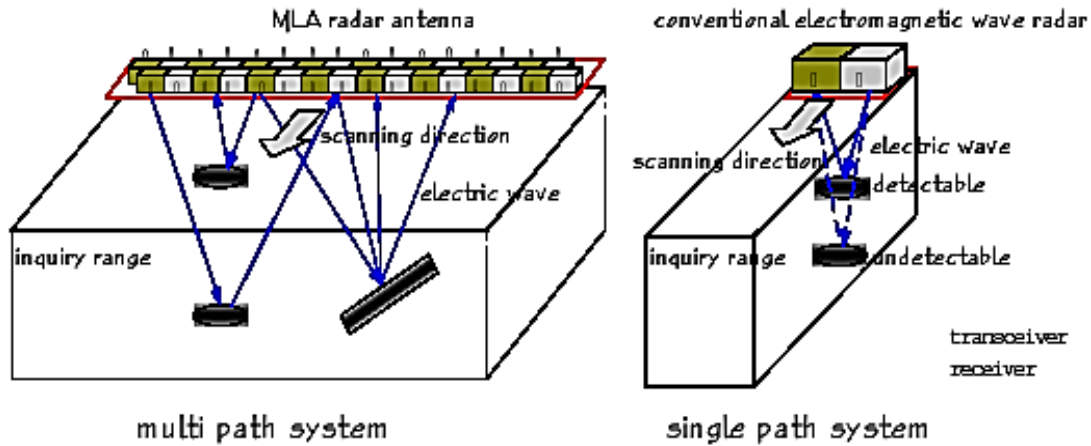


圖3.3-7 多相線性陣列電磁波雷達與傳統透地雷達比較

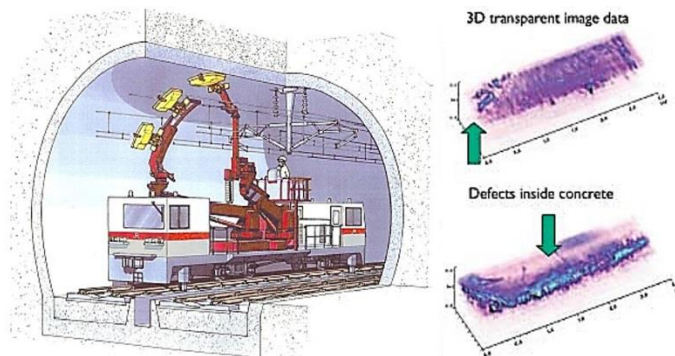


圖3.3-8 多相線性陣列電磁波雷達與隧道檢測車(王泰典，2007)

### (3) 自然電位法探測鋼筋腐蝕

結構物中之鋼筋腐蝕，因時間或其他因素造成一電化學反應，有如電池一般，代表一通電，即可產生電流，因此混凝土內腐蝕與未腐蝕之鋼筋間產生某種程度的電位差。故藉著鑽孔將探測器放入，接觸鋼筋而造成一電流迴路，如此可於混凝土表面測得範圍內(約2 m × 2 m)之鋼筋電位差，經比對即可瞭解鋼筋之腐蝕程度，而據以評估結構體之強度。惟於此之前，將擇重要具代表性(如強度劣化區、滲漏水處、中性化區等)處，利用鋼筋位置探測儀探測壁面內鋼筋位置，再鑽孔接通電流迴路，進行鋼筋腐蝕探測。

### (4) 電阻法探測鋼筋腐蝕

當人工電場加諸於鋼筋混凝土結構物等，因混凝土及鋼筋等介質電導性的不同，使得結構物之電位產生不均勻的分佈，此時若測量其電阻變化狀況，可據此做定性或定量的解析。電阻法係以電阻儀器在現場量測鋼筋混凝土的電阻，根據量測結果判定鋼筋腐蝕的可能性。

### 3.3.4 物理波動檢測之類型

#### (1) 敲擊回音法

敲擊回音法(impact-echo method)是應用物理波動技術探測裂縫深度的一種方法，其源於1983年由美國國家標準及科技院(National Institute of Standards and Technology)發展之低頻暫態應力波傳原理之非破壞性檢測方法。施作程序係利用機械性敲擊產生暫態應力波動並導入待測物體內，應力波遇到內部的孔隙或瑕疵時，形成反射波反射回待測物體表面，藉由接收器的序時訊號接收及分析，並不斷地移動敲擊及接收的位置，可以估計出孔隙或瑕疵的位置及形狀。

#### (2) 超音波檢測

超音波檢測是指「以低能量高頻率的超音波，對物件(內部)瑕疵加以檢測」。一般超音波檢測所使用頻率由 1MHZ 至 25MHZ，基本設備需有電子訊號產生器，藉著換能器(或稱探頭 Transducer of Probe or search Unit)發射出超音波，再經由藕合劑(Couplant)傳入試件中。在試件中，超音波會有或多或少的衰減，當傳至介面時，超音波可能反射或透射，藉由偵檢、分析反射或透射訊號，則可檢測出瑕疵，並可定出瑕疵位置。

### 3.3.5 其他檢測類型

混凝土強度的探測方法有許多種，如混凝土強度錘法、測試槍法、拉拔試驗、貫入阻力法等。其中混凝土強度錘法與測試槍法，只能測得混凝土表面之強度指標，惟因其施作簡便，因此常使用於現場之簡易測試。進行試驗前應對材料表面進行適當處理，將可獲得更具代表性之結果。

針對各種非破壞性檢測技術於隧道襯砌檢測的特性，包括檢測方式、空間定位精度、檢測速度以及所需的配合設備及相關作業等，黃燦輝等人(2008)於「隧道襯砌非破壞性檢測技術之開發」總結報告書中，整理了各種檢測技術應用於隧道襯砌之定位精度與檢測速度比較，詳如表3.3-3，可供未來處置坑道襯砌結構檢測技術選定之參考。

此外，在行政院原子能委員會放射性物料管理局103年委託研究計畫「處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究」(楊長義與李宏輝，2014)中，已根據國外中、低放處置坑道及國內營運中一般坑道之經驗，提出處置坑道在運轉期之檢監測項目建議，包括了岩盤穩定性監測、坑道斷面監測、襯砌裂縫、裂縫擴展、襯砌受力與變形及水文地質相關參數監測等項目。



表3.3-3 各種非破壞性檢測技術於隧道襯砌檢測之比較(修改自黃燦輝，2008)

非破壞性檢測技術		檢測方式	空間定位精度	檢測速度	配合設備/作業
光學技術類	目視/攝影/錄影檢測	三維面狀	低	視異狀程度、隧道照明而定，0.2~1.5km/人時	一般攝、錄器材與量尺
	隧道淨空測量	三維點狀	甚高	單一斷面施作迅速	需設測量控制點、內業處理
	隧道影像掃描(TS360系統)	三維面狀	高	2~5km/hr	需工作車配合及內業處理
	隧道影像掃描(DIBIT系統)	三維面狀	高	100 m/hr	需測量定位配合及內業處理
	熱紅外線掃描	三維面狀	高	2~5km/hr	需測量定位配合及內業處理
導電與電子技術類	透地雷達	二維線狀	視配合作業而定	0.5~1.5km/hr	檢測位置另行目視或測量定位，常需工作車/架、需內業處理
	多相線性陣列電磁波雷達	二維線狀	視配合作業而定	0.2~0.3km/hr	
	自然電位法	二維線狀	視配合作業而定	單點施作迅速	檢測位置另行目視或測量定位，常需工作車/架
	電阻法	二維線狀	視配合作業而定	單點施作迅速	
物理波動技術類	敲擊回音法	二維線狀	視配合作業而定	單點施作迅速	檢測位置另行目視或測量定位，常需工作車/架、需內業處理
	超音波檢測	二維線狀	視配合作業而定	單點施作迅速	
	打擊聽音法	局部點狀	視配合作業而定	單點極快，全面性施作需大量人力	
其他類	混凝土強度錘	局部點狀	視配合作業而定	單點施作迅速	檢測位置另行目視或測量定位，常需工作車/架
	測試槍	局部點狀	視配合作業而定	單點施作迅速	

### 3.4 小結

(1)襯砌裂縫與(2)滲水為影響坑道長期穩定的關鍵因子。其中，尤以坑道襯砌發生裂縫為國內坑道在營運過程中最常見之異狀。而造成上述坑道異狀之原因，概可區分為三大類：(I)外力因素(地震作用、邊坡運動與開挖擾動)、(II)環境因素(風化作用引致岩石強度弱軟化、依時性變形特性)及(III)非力學因素(混凝土中性化、鋼筋保護層厚度不足、鹼值粒料反應、冷縫及襯砌背後空洞或厚度不足等)。針對處置坑道在運轉階段，因外力因素、環境因素或非力學因素之作用，導致坑道結構穩定性可能受到影響，其對應的驗證方法整理如以下二點：

#### (1) 外力因素與環境因素對坑道結構穩定性的影響驗證

針對外力因素與環境因素影響下之處置坑道結構穩定性分析與驗證，考量縮尺物理模型試驗的邊界條件，及模擬材料與真實材料的相似關係，並不易反映出真實處置坑道所處外力因素(邊界條件)與環境因素(模擬材料之選定)的影響。循此，仍可透過既有的隧道結構穩定數值模擬分析方法，包括有限元素法、有限差分法、邊界元素法、離散元素法等理論基礎所發展的數值分析工具進行數值模型建模與參數分析，惟環境因素部分，因涉及岩石強度弱軟化及依時性變形特性(潛變)，仍需透過實驗建立具強度弱軟化或具依時性變形特性之岩石材料組成律，繼而可參考第二章瑞典SKB所採用的「強度參數折減分析方法」(SKB, 2014)進行相關的數值分析工作。

#### (2) 非力學因素對坑道結構穩定性的影響驗證

混凝土中性化、鋼筋保護層厚度不足、鹼值粒料反應、冷縫及襯砌背後空洞或厚度不足等非力學因素，則可應用各種檢測技術包括光學檢測、導電與電子檢測、物理波動檢測等技術，掌握坑道斷面的穩定性、襯砌是否有可疑裂縫的產生與持續發展、混凝土品質劣化與鋼筋銹蝕等狀況對坑道結構穩定性的可能影響。

## 第四章、建立坑道處置結構穩定性審查假想案例

### 4.1 建立本土坑道假想案例之重要性

一般坑道依其地質條件、岩體強度與支撐特性、坑道斷面形狀、尺寸及用途，採襯砌或無襯砌之設計。根據前期研究(楊長義與李宏輝，2014)，國內本土坑道具襯砌者，在運轉階段襯砌可能出現裂縫或滲漏水等異狀，且國內的襯砌異狀與國外坑道相較，二者實有部分差異，如圖4.1-1，例如國外襯砌異狀以裂縫所佔比例最高(79%)，其次依序為仰拱隆起或沉陷(34%)、剝落(33%)與滲漏水(23%)；而在國內案例，仍以裂縫比例最高(92%)，其次依序為滲漏水(72%)、剝落(43%)與仰拱隆起或沉陷(13%)。再者，國內外隧道襯砌異狀比例最高之前四項均是：裂縫、滲漏水、剝落與仰拱隆起或沉陷，國內外均以裂縫所佔比例最高。但國內隧道發生裂縫的比例高達92%，遠高於國外的79%，顯示國內隧道襯砌幾乎都會出現裂縫問題。

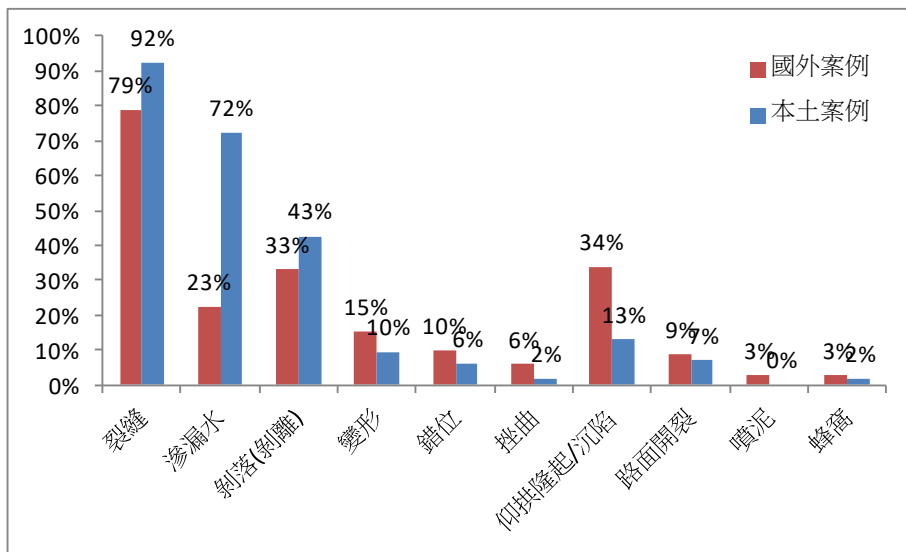


圖4.1-1 國內與國外隧道襯砌之異狀種類統計差異比較(楊長義與李宏輝，2014)

經濟部已公告「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」二處為低放射性廢棄物最終處置設施建議候選場址。本研究為發展安全管制驗證技術之需要，同時考量我國低放射性廢棄物可能場址特性，故蒐整本土坑道假想案例分別為外島與本島案例各一處：

- A. 在外島坑道假想案例部分：主要是考量無襯砌結構之坑道亦屬可能採取的處置坑道型式，故本研究以金門既有之無襯砌結構坑道為假想案例，蒐集坑道地理位置、地

質條件、建造與營運歷史、出露之地質材料與地質構造等資料，並分別就坑道之入口、坑道段與水道段進行現況調查。

- B. 在本島假想案例部分：本研究根據前期研究「低放射性廢棄物處置安全管制技術發展子計畫五：處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究」(楊長義與李宏輝, 2014) 已蒐整之交通部台灣鐵路管理局「南迴線金崙等七座隧道安全檢測評估報告」(交通部台灣鐵路管理局, 2008) 中，所列之安朔隧道檢測案例，整理納入本研究之具襯砌型式之坑道假想案例。據此，建立坑道處置結構穩定性審查假想案例，為後續發展處置坑道結構穩定性審驗技術奠基，期能縮短審驗技術發展歷程。

## 4.2 假想案例一—外島翟山坑道

### 4.2.1 地理位置

翟山坑道位於金門島本島西南側南面海岸突出部的翟山內，地理位置為北緯 $24^{\circ}23'18.69''$ ，東經 $118^{\circ}19'5.10''$ 。翟山坑道包含坑道和水道兩部分，坑道段由陸上坑道入口銜接至水道，全長101公尺，寬約6公尺，高約3.5公尺；水道部分呈A字形，有兩處出口，詳圖4.2-1，總長357公尺，寬11.5公尺，高8公尺。

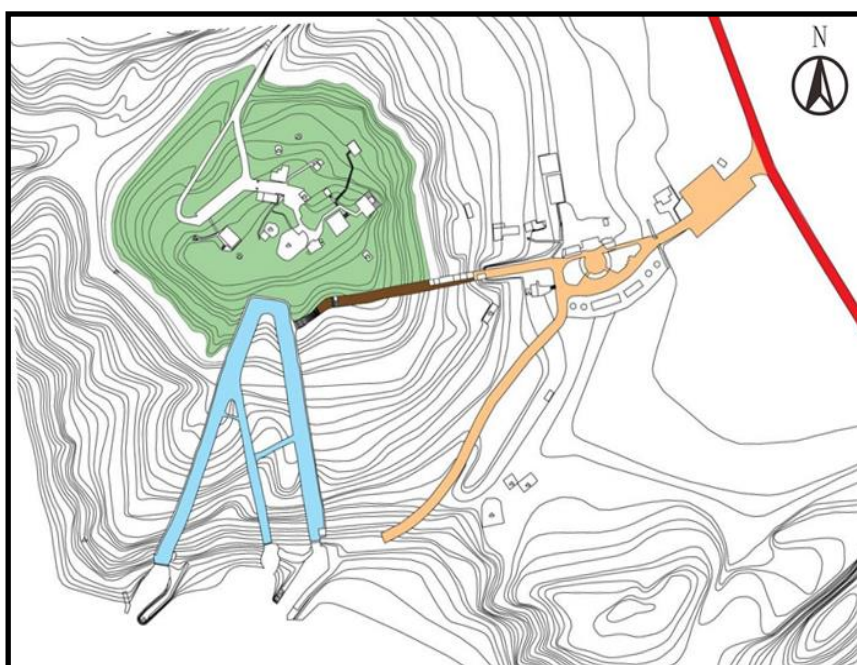


圖4.2-1 翟山坑道位置示意圖(吳宗江, 2012)

民國五十年代反攻大陸專案「國光計畫」中，突擊登陸廈門的「龍騰」作戰計畫前置作業規劃於金門建置數座大型登陸艇坑道，並以「金鯨」作為專屬計畫名稱，翟山坑道即為金鯨坑道案大帽山坑道的一部份(袁興言，2012)。

#### 4.2.2 金門島地質條件

根據中央地質調查所提出的金門區域地質研究結果(林蔚等人，2011)，主要為早期白堊紀花崗片麻岩與花崗岩，形成於2億至1億年前的燕山運動期，其地質圖詳如圖4.2-2。燕山運動時期福建沿海地區地殼變動形成大型左移的深斷裂帶活動與岩漿活動，平潭-東山斷裂帶控制了火山噴發和岩漿侵入，形成潛伏的巨大花崗岩岩體。花崗片麻岩與花崗岩分佈佔金門全島總面積之半，部分地區覆蓋於花崗岩質基盤岩石之上為晚更新世之紅土層與現代沉積物。

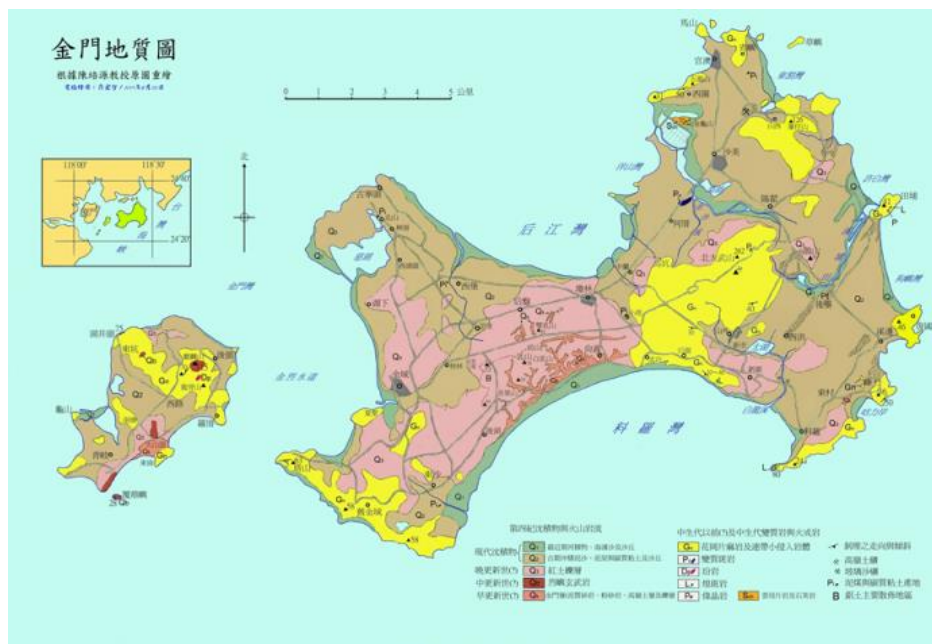


圖4.2-2 金門地質圖(陳培源，1965；符宏智重繪，2001)

花崗片麻岩與花崗岩分佈佔金門全島總面積之半，部分地區覆蓋於花崗岩質基盤岩石之上為晚更新世之紅土層與現代沉積物。金門地區位於平潭-東山深斷裂帶的中段，區域地質構造形成受早期的深部剪切、入侵與變質作用，以及後期的淺部侵入作用與脆性破裂作用所影響；因此岩體入侵並冷卻後，廣泛發育貫穿花崗岩類基盤的伸張節理且多屬冷卻節理，節理位態分佈以東北-西南為主；此外，因岩體抬升與剝蝕至接近地表所造

成解壓與剝蝕作用，形成大型洋蔥狀剝離節理或頁狀節理，影響地表地形發育以及近地表坑道的穩定性。(林蔚等人，2011；李亮瑩等人，2012)

### 4.2.3 翟山坑道建造與營運歷史

翟山坑道是一座由陸地通往海面之通道，主要功能為提供登陸小艇泛水及迴轉，內有停靠碼頭，可隨時載運國軍登陸部隊與補給物資(國防部三軍大學「戰役史研究小組」，1993)。翟山坑道於民國 52 年 12 月 14 日動工開鑿，於民國 53 年 10 月完工，如表 4.2-1，開鑿石料約 8 萬 6,000 立方公尺，工程經費約 1,113 萬餘元。

表 4.2-1 金門坑道工程建設資料(吳宗江，2012)

建設名稱	開鑿日期	完工日期	備註
太武山東區後勤坑道	45年4月1日	46年5月15日	由各守備隊分區開鑿
北坑道	45年4月16日	46年2月24日	由陸軍26、68師派工兵開鑿
東坑道	46年11月1日	47年3月20日	由陸軍27、32師派工兵開鑿
前山前坑道	47年10月1日	52年7月底	由陸軍58、26師派工兵、步兵開鑿
成功坑道	48年7月9日	49年12月底	由陸軍41、68師派工兵、步兵開鑿
料羅修護坑道	48年5月18日	48年12月26日	由陸軍69師派工兵開鑿
夏興坑道	50年11月28日	51年5月5日	由陸軍93師派工兵、步兵開鑿
漁村坑道	53年1月17日	53年9月10日	由陸軍33師派工兵、步兵開鑿
翟山坑道	52年12月14日	53年10月	由陸軍58師派工兵、步兵開鑿
塔山坑道	52年7月16日	53年10月上旬	由陸軍26師派工兵、步兵開鑿
九宮坑道	52年12月20日	53年10月	由陸軍41師派工兵、步兵開鑿

施工部隊為陸軍步兵師及工兵營，施工人員以工兵為主、步兵為輔，工兵的軍士官經過測量之後，在岩壁做上記號，由工兵部隊以氣鑽進行鑽孔，依指示從不同地方鑽出不同深度的石孔，再由有經驗的士官將雷管埋入，並依序放置黃色炸藥、拉出引線再用泥土密封，最後將引線拉出洞外編號並引爆。爆破後由小組人員入內確認安全之後，再

由步兵隨之入內搬運石塊清渣(金門縣文化局, 2013)。坑道建造過程中, 基於花崗片麻岩與花崗岩的岩質佳, 為快速建造並投入防禦工事, 因此未設置系統性的支撐或襯砌。

翟山坑道完工後由海軍海灘總隊小艇第二大隊進駐, 由於泥沙淤積、兩岸關係和緩等因素, 海灘總隊第二大隊第二中隊撤離, 營區改由金門防衛司令部金西師接管, 至民國 75 年, 因泥沙淤積且戰備功能減退, 坑道封閉除役。民國 86 年, 金防部將翟山坑道移交金門國家公園管理處, 經整修後隨即開放參觀, 現已成為金門著名的觀光景點。本坑道迄今五十多年, 適與處置坑道預定設計之營運期程相近, 且未設置系統性的支撐或襯砌, 其目前所顯現工程性質現況與母岩劣化變化, 正足以提供推估處置坑道封閉前之穩定狀況。

#### 4.2.4 坑道出露之地質材料與地質構造

翟山坑道中主要出露的岩類為弱片麻狀的花崗片麻岩、角閃岩脈、花崗岩脈、偉晶岩脈及十餘條東北-西南走向基性岩脈群。地質構造上, 可觀察到順韌性剪切帶低角度侵入的角閃岩脈, 其接觸帶平行於圍岩的片麻理及糜嶺岩帶, 並且接觸帶上呈現圍岩因侵入作用發生混合岩化接觸圈, 產生部份融熔並形成長英質岩脈, 顯現出長英質岩漿以不混溶的現象混合在角閃岩漿中的特殊現象。接近東西走向侵入的花崗岩脈與偉晶岩脈, 伴生東西走向小型低角度韌性正斷層, 斷距僅約數十公分。

#### 4.2.5 坑道現況調查

因金門地區地下坑道皆屬於冷戰時期之軍事設施, 在長期戰備及軍事管制之情況下, 相關資訊及研究成果甚為缺乏, 因此, 對於坑道現況之瞭解必須透過現地調查進行。翟山坑道為無襯砌之岩石坑道(僅在洞口段有施作混凝土結構, 避免鬆動之風化岩塊掉落), 由於開挖岩面未施作襯砌, 因此可直接進行開挖面地質狀況之觀察與監測。以下分別介紹坑道入口處之洞口段、坑道段與水道段之地質現況, 相關位置如圖4.2-3所示。



圖4.2-3 翟山坑道現勘位置

#### (1) 坑道入口處

如圖4.2-3所列A處，坑道入口處節理密布，主要為一組密集的東北-西南走向高角度剪力節理，以及一組低角度之解壓節理，如圖4.2-4所示。洞口岩體受節理面交互截切而呈現破碎狀，因此構築鋼筋混凝土洞門作為洞口防護設施，並設置鋼線防護網以攔截墜落之岩塊，此處為本坑道目前唯一設置之支撐與防護系統，如圖4.2-5。此外，觀察洞口附近圍岩長期受地表水作用，導致花崗片麻岩呈現高度風化至完全風化狀態，岩坡面上植被茂密，如圖4.2-6所示。





圖4.2-4 翟山坑道入口處地質現況



圖4.2-5 翟山坑道入口處洞口防護設施



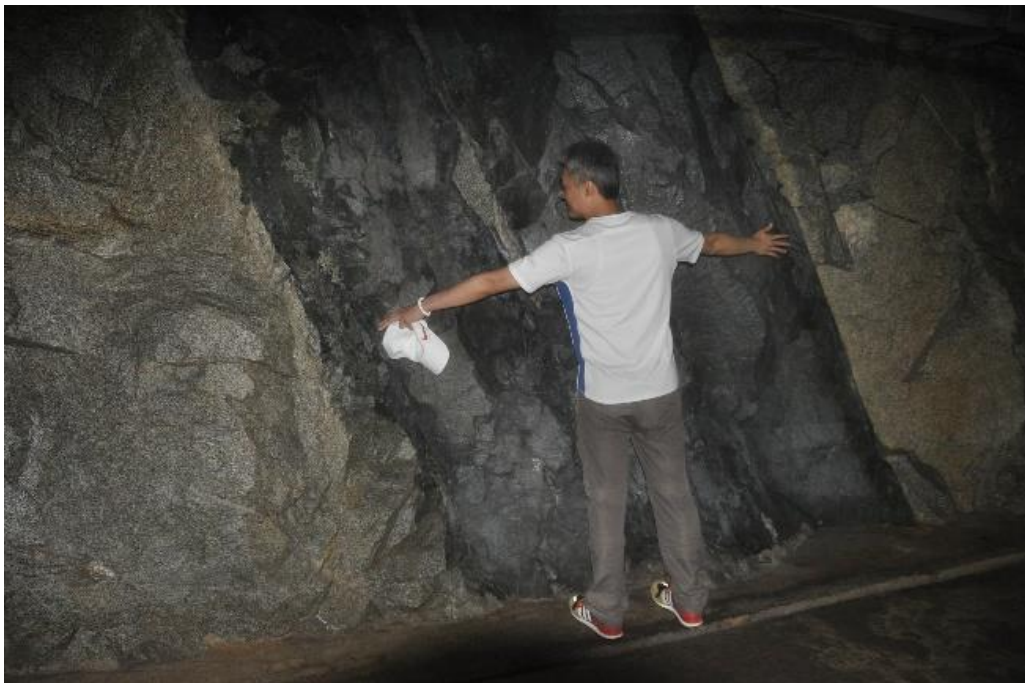
圖4.2-6 翟山坑道入口處岩坡風化情形

## (2) 陸上坑道段

陸上坑道段如圖4.2-3所列B處，坑道段之圍岩以花崗片麻岩為主，如圖4.2-7，開挖面之岩性良好，主要節理面位態計有三組：(i) Joint set 1： $N30^{\circ}E/N88^{\circ}$ 、(ii) Joint set 2： $N60^{\circ}W/S83^{\circ}$ 、(iii) Joint set 3： $N50^{\circ}E/S23^{\circ}$ ，如圖4.2-8所示。岩體局部區域出現東北-西南走向之灰黑色基性侵入岩脈群，如圖4.2-9及圖4.2-10所示。基性岩脈為圍岩在早期構造活動中，張裂作用導致岩漿侵入節理所形成，從開挖面上可觀察基性岩脈在三維空間之分佈型態。



(a)



(b)

圖4.2-7 翟山坑道坑道段之圍岩：(a)花崗片麻岩與(b) 黑色基性侵入岩脈

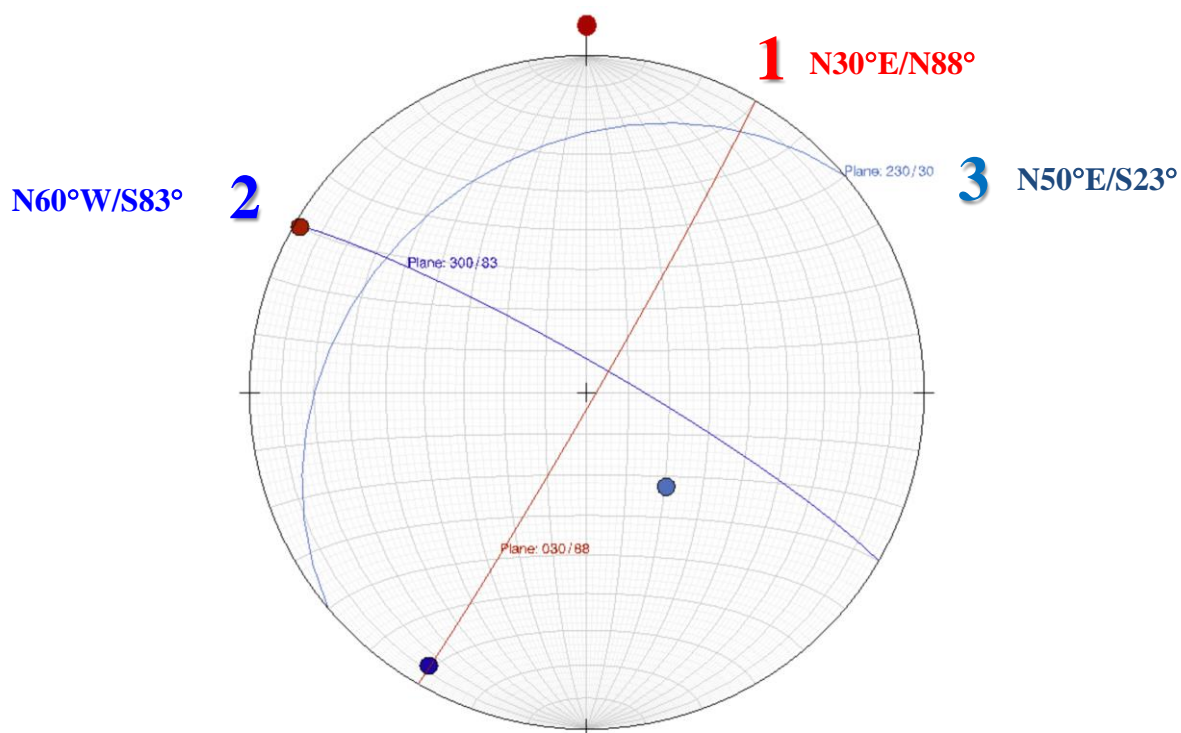


圖4.2-8 主要節理面位態計有三組：(i) Joint set 1：N30°E/N88°、(ii) Joint set 2：N60°W/S83°、(iii) Joint set 3：N50°E/S23°



圖4.2-9 翟山坑道坑道段之地質現況



圖4.2-10 翟山坑道側壁之基性岩脈群(1)

### (3) 水道段

水道段如圖4.2-3所列C、D、E處，其圍岩亦以花崗片麻岩為主，局部區域出現基性岩脈與偉晶岩脈。圖4.2-11中，自坑道側壁延伸至頂拱處之灰黑色岩脈為基性岩脈群；圖4.2-12中，左側側壁上之白色岩脈為偉晶岩脈，圍岩與侵入岩脈之岩性良好，但呈現部分風化現象，頂拱處局部風化之基性岩脈呈現白色，且因地下水入滲已有碳酸鈣結晶，詳如圖4.2-13，此一風化之基性岩脈延伸至側壁處，亦可觀察到基性岩脈與花崗片麻岩交界處已呈現風化現象，如圖4.2-14。

水道段近出海口處節理密布，由於覆蓋較淺且節理似已相互連通，並與地表破裂(碎)帶相連，導致滲水嚴重，頂拱及側壁岩面上之鏽染情形隨處可見，如圖4.2-15所示；局部區域之岩面鏽染嚴重，顯示長期受地下水或雨水滲流侵蝕。



圖4.2-11 翟山坑道側壁之基性岩脈群(2)



圖4.2-12 翟山坑道側壁之基性岩脈群(3)



圖4.2-13 翟山坑道頂拱處局部基性岩脈地下水入滲



圖4.2-14 翟山坑道側壁處基性岩脈與花崗片麻岩交界處已呈現風化現象



圖4.2-15 翟山坑道近出海口處節理密布，頂拱及側壁岩面呈現鏽染情況

### 4.3 假想案例二—本島台鐵安朔隧道

#### 4.3.1 地理位置

根據交通部台灣鐵路管理局「南迴線金崙等七座隧道安全檢測評估報告」(交通部台灣鐵路管理局, 2008)進行之七座隧道檢測紀錄, 包括金崙、多良一號、大竹二號、大竹一號、大鳥、大武二號及安朔隧道, 全區路線橫跨台東縣太麻里鄉、大武鄉及達仁鄉, 東臨太平洋, 西與屏東縣以中央山脈相隔, 本研究僅整理摘錄安朔隧道之檢測資料, 並分述如后。

#### 4.3.2 地質條件、岩體分類與隧道斷面支撐工法

南迴鐵路沿線地層劃分為七個岩段, 詳圖 4.3-1, 案例所處之地層分屬第二岩段(L2)與第三岩段(L3)。第二岩段(L2)係整合覆蓋於第一岩段上, 分佈範圍從香蘭至大溪地區、大武溪中及上游地區, 以及菩安山背斜軸附近地區, 因分佈範圍廣, 岩性在各地略有變異。菩安山背斜軸附近出露岩層屬於本段上部, 主要由厚塊狀硬頁岩或板岩及少數厚層變質砂岩所組成。

安朔隧道岩性以硬頁岩為主, 硬頁岩及變質砂岩互層次之, 里程 36K+419-36K+672.4 公尺處為斷層破碎帶, 按 CSIR 岩體分類為第 III 至 V 類, 岩體強度約為 10 至 50 MPa, 地下水狀況為輕微滲水至嚴重湧水, 主要不連續面為劈理與節理, 三組節理位態為  $J1=N37^{\circ}\sim 47^{\circ}W/89^{\circ}NE$ 、 $J2=N69^{\circ}\sim 84^{\circ}E/85^{\circ}SE$  及  $J3=N33^{\circ}\sim 43^{\circ}E/86^{\circ}SE$ ,



二組劈理位態為 $C1=N20^{\circ}E/48^{\circ}SE$ 與 $C2=N26^{\circ}W/38^{\circ}NE$ 。施工期間隧道破壞型式以岩塊墜落、岩塊翻倒與岩層之材料破壞為主，如表4.3-1所示。

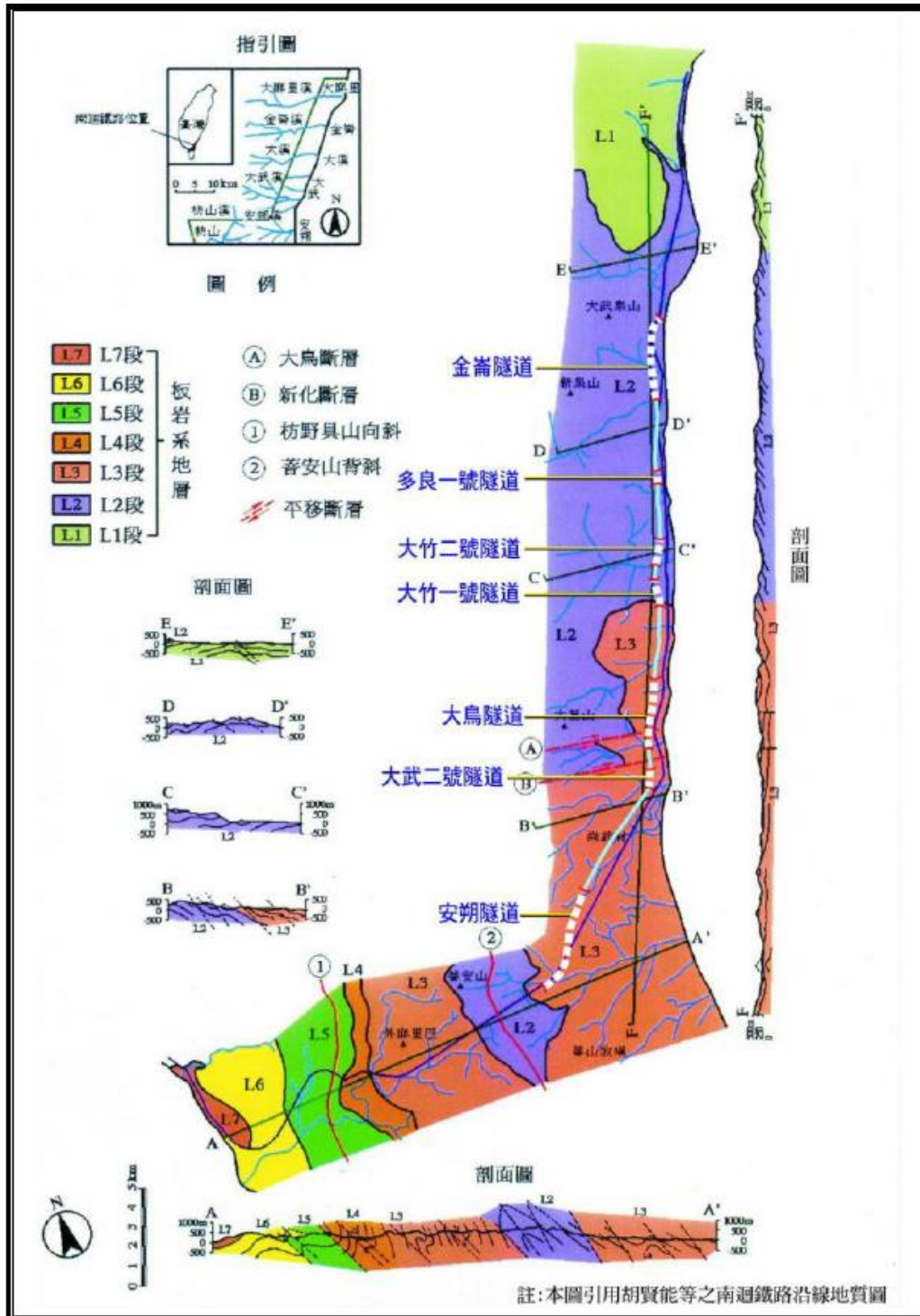


圖4.3-1 南迴線金崙隧道至安朔隧道區域地質圖(交通部台灣鐵路管理局，2008)

安朔隧道斷面採雙線馬蹄型設計，起拱線淨寬9.1公尺，路基面寬8.15公尺，施工工法分別採用明挖覆蓋工法、美國鋼支保支撐工法(傳統工法)與新奧工法，如圖4.3-2所示。隧道沿線每600公尺設置一處大型避車洞，另每40公尺設置一處小型避車洞。於民國80年12月完工啟用，迄今已營運26年之久。

表4.3-1 安朔隧道地質條件與施工期間破壞型式總表(交通部台灣鐵路管理局，2008)

隧道	施工里程	岩性	構造	岩體分類 (CSIR)	岩石單壓 (MPa)	地下水	破壞型式
安朔	32k+167~32k+262	—	—	—	—	—	—
	32k+262~32k+654	硬頁岩為主，少部分變質砂岩	破碎帶	III~V	20~40	輕微滲水	—
	32k+654~33k+848	硬頁岩	—	IV~V	20~50	輕度~中度湧水	岩塊墜落 岩塊翻倒 材料破壞
	33k+848~34k+033	硬頁岩	—	IV~V	25~40	輕度~嚴重湧水	岩塊墜落
	34k+033~36k+419	硬頁岩及硬頁岩與變質砂岩之互層為主	破碎帶	IV~V	20~40	輕微滲水~中度以上湧水	岩塊墜落 材料破壞
	36k+419~36k+672.4	斷層泥為主	斷層 破碎帶	III~V	10~40	輕度滲水	岩塊墜落
	36k+672.4~37k+650	—	—	—	—	—	—

資料來源：「南迴鐵路工程—工程輯要」(南迴鐵路工程處，民國81年)

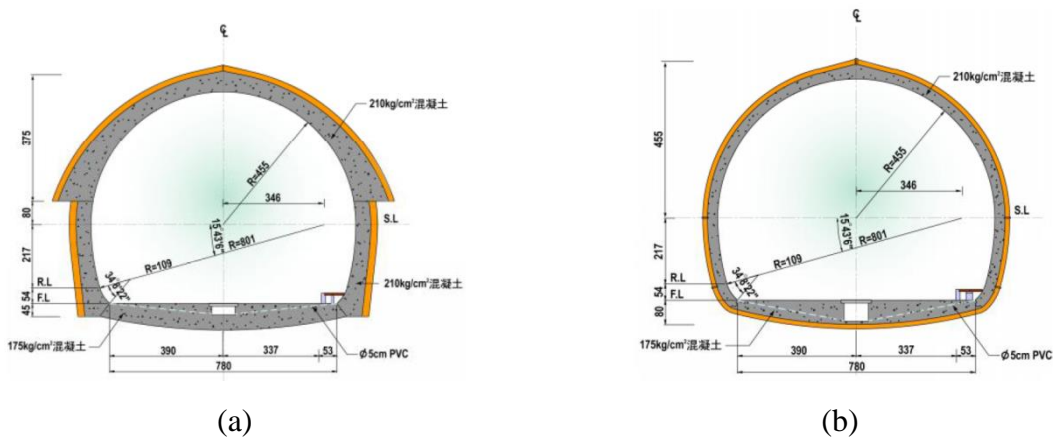


圖4.3-2 安朔隧道支撐工法斷面圖：(a)雙線隧道美國鋼支堡工法標準斷面圖；(b) 雙線隧道新奧工法標準斷面圖(交通部台灣鐵路管理局，2008)

### 4.3.3 安朔隧道施工階段之災變記錄

據「南迴鐵路工程-工程輯要」(南迴鐵路工程處，1992)記載之安朔隧道施工階段災變位置及描述，整理施工期間的災變類型及發生原因如表4.3-2，可知工程災變主要發生在第IV與第V類岩體區，災變類型區分擠壓、抽心與落盤、湧水及隧道覆蓋層下、地層滑動等，至於工程災變之原因，與鬆動岩盤、破碎及風化岩層、斷層帶、偏壓及淺覆蓋等因素有關，前三項與地質條件有關，後二項屬隧道選線及地形條件之影響。

表4.3-2 施工階段於安朔隧道之災變及其原因彙整(楊長義與李宏輝，2014)

災變類型	發生位置	發生原因
擠壓	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 支保變形(ASSM 工法)</li> <li>2. 鋼支保變形(NATM 工法)、噴凝土裂縫</li> <li>3. 開挖斷面擠壓變形(頂拱下陷 1 m、側壁往內擠壓 30 cm、底部向上隆起 26cm)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 鬆動岩盤產生岩壓，或因地質鬆軟破碎與偏壓顯著所導致</li> <li>2. 疏鬆且膠結不良之含泥層岩盤經開挖後引致開挖面擠壓</li> <li>3. 遇破碎泥岩(疑是斷層帶)</li> </ol>
抽心與落盤	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 頂拱</li> <li>2. 開挖面</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 因剪力楔型岩塊坍塌，或遇含泥量高之破碎硬頁岩及其碎屑，及開挖通過斷層帶引致抽心</li> <li>2. 因岩盤破碎含大量粘土層及風化岩層，或因開挖面通過斷層破碎帶引致落盤</li> </ol>
湧水	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 山側 60°</li> <li>2. 開挖面</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 地下水位高及開挖擾動</li> <li>2. 逢颱風雨季致地下水位上升，湧水不斷</li> </ol>
隧道覆蓋層下陷、地層滑動	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 近洞口段</li> <li>2. 近洞口段</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 地質破碎引致隧道覆蓋層下陷</li> <li>2. 地質軟弱、隧道覆蓋厚度僅 5-12 m，經開挖後引致地層滑動及地表裂隙</li> </ol>

#### 4.3.4 檢測項目與方法

檢測項目包括「裂縫與滲水調查」、「襯砌及背後空洞調查」、「裂縫寬度與深度調查」、「混凝土強度檢測」與「混凝土中性化調查」等項目，相關檢測方法與結果詳如表4.3-3所示。

表4.3-3 營運期間於安朔隧道檢測項目、方法與檢測結果

項目	方法與技術	檢測結果
裂縫與滲水調查	1. 目視檢查 2. 隧道影像掃描技術	提供隧道全線襯砌表面裂縫及滲水位置與分佈情形，供後續維護與持續追蹤比對之參考
襯砌及背後空洞調查	透地雷達	具代表性的異狀可歸納成三種型態：(A)裂隙發達；(B)背後疏鬆；(C)厚度改變
裂縫寬度與深度調查	超音波	施測區域其裂縫深度為襯砌設計厚度的34%至43%，供後續維護與掌握混凝土襯砌是否有繼續劣化現象之參考
混凝土強度檢測	1. 混凝土強度錘試驗 (Schmidt hammer test) 2. 鑽心取樣進行室內抗壓試驗	1. 混凝土強度錘試驗易受混凝土表面狀況(蜂窩、裂縫與剝落)影響，檢測數值僅供一般性襯砌強度檢驗參考 2. 於隧道目視檢查之混凝土劣化處、襯砌剝落處、裂縫位置、混凝土膠結不良處、滲水位置等側壁或頂拱進行鑽孔取樣後進行室內抗壓強度試驗，試驗組數中僅有一個試體試驗值低於設計強度 210 kgf/cm <sup>2</sup>
混凝土中性化調查	混凝土中性化試驗	安朔隧道襯砌混凝土中性化深度多在3公分以內

#### 4.4 小結

根據本研究蒐整之外島無襯砌坑道及本島具襯砌坑道假想案例計二處，茲將坑道所處地點、完工啟用日期、地質條件、坑道屬性、斷面尺寸、長度及坑道結構異狀等，整理如表4.4-1。此外，針對於坑道所處地質條件，及對坑道結構穩定性之影響因素整理如下：

##### (1) 地質條件

- a. 外島假想案例：翟山坑道屬花崗片麻岩與花崗岩，岩體單壓强度高，開挖後無需支撐結構輔助，岩體可維持良好的自立性；惟須考慮地質構造(geological structural)可能引致的岩塊滑動與掉落。例如，坑道所處岩體中既有的兩組剪力節理及一組解壓節理，及經坑道開挖形成的自由面，可能造成坑道在側壁產生局部的楔形破壞及頂拱處產生之落盤。此外，於金門島常見有基性岩脈入侵，其經風化作用後呈現黏土化，對於地下水入滲及坑道斷面結構的影響需進一步評估。
- b. 本島假想案例：東部之台鐵南迴線安朔隧道，其地質條件以硬頁岩為主，硬頁岩及變質砂岩互層次之，岩體分類屬第III至V類。

##### (2) 外力因素—開挖擾動之影響

- a. 外島假想案例：翟山坑道因國防戰備需求，於一年內即完成施工並啟用，其施工方法主要採鑽炸法，經現地勘查仍可發現施工當時遺留的炸孔與爆破裂紋，對於圍岩岩體的損傷，例如鬆動岩塊的形成與裂隙長度的擴展伸長、分佈密度的增加等，需透過定期的維護(1.目視檢查與2.鬆動岩塊敲除)以降低局部岩塊破壞造成工作人員之危害。
- b. 本島假想案例：台鐵南迴線安朔隧道於施工階段發生之擠壓、落盤、湧水及少部份底部隆起等，係與鬆動岩盤、破碎及風化岩層、斷層帶、偏壓及淺覆蓋等因素有關，為確保隧道斷面穩定性，支撐工法採取鋼支保工法與新奧工法，並以混凝土襯砌作為其二次襯砌；惟後續營運階段檢測發現，於襯砌發生之隧道異狀，部分成因實與上述肇因有關，例如於頂拱處襯砌產生的裂縫與其上方的鬆動岩盤有關。

---

(3) 環境因素—大地材料依時變形性與弱軟化特性之影響

大地材料依時變形性與弱軟化特性，與岩石材料種類、礦物組成與含量、節理與裂隙等弱面條件及地下水有關：

- a. 外島假想案例：翟山坑道位於花崗片麻岩與花崗岩區，坑道自啟用迄今已逾50年，除側壁與頂拱有局部的楔型岩塊破壞外，坑道斷面形狀維持良好。惟部分侵入花崗岩體之基性岩脈因地下水入滲已呈現風化現象，及洞口附近圍岩亦因地表水作用而呈現高度風化至完全風化狀態。
- b. 本島假想案例：台鐵南迴線安朔隧道所處地質條件屬第III至V類之岩體分類，自啟用迄今已26年，惟根據其在施工階段的災變類型與後續檢測之結果，研判其大地材料依時變形性與弱軟化特性較為顯著。

(4) 非力學因素—混凝土材料劣化

主要是針對本島假想案例且具襯砌之坑道結構者，需考量混凝土澆置品質及所處環境對混凝土材料劣化之可能影響，主要是在使混凝土強度的降低，與裂隙的增加導致地下水入滲等影響穩定性問題。

表4.4-1 翟山坑道與安朔隧道假想案例資料彙整

	翟山坑道	台鐵南迴線安朔隧道
地點	金門縣古崗村	台東縣達仁鄉
完工日/目前運轉	民國 53 年/ 53 年	民國 80 年/26 年
地質條件	<ol style="list-style-type: none"> <li>岩性：花崗片麻岩與花崗岩</li> <li>構造：岩體有偉晶岩脈與基性岩脈入侵有兩組剪力節理、一組解壓節理</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>岩性：硬頁岩為主，硬頁岩及變質砂岩互層次之</li> <li>構造：CSIR 岩體分類為第 III 至 V 類，36K+719 - 36K+672.4 處為斷層破碎帶，主要不連續面為劈理與節理</li> </ol>
坑道屬性	軍事隧道(現為觀光用)	交通隧道
斷面尺寸	<ol style="list-style-type: none"> <li>陸上坑道段：寬約 6 m，高約 3.5 m</li> <li>水道段：寬約 11.5 m，高約 8 m</li> </ol>	寬 7.8 m，高 7.3 m
長度	<ol style="list-style-type: none"> <li>陸上坑道段：101 m</li> <li>水道段：357 m</li> </ol>	5,481 m
襯砌	無	有
開挖方式	鑽炸法	明挖覆蓋工法、美國鋼支保支撐工法(傳統工法)及新奧工法
坑道結構異狀(運轉階段)	<ol style="list-style-type: none"> <li>陸地洞口段：岩體風化、地表水入滲、落石。</li> <li>陸上坑道段：坑道側壁與頂拱有局部鬆動岩塊引致落石。</li> <li>水道段：坑道側壁與頂拱有局部鬆動岩塊引致落石；基性岩脈因地下水入滲引致風化速度加劇，造成坑道滲水。</li> <li>近海洞口段：鏽染風化嚴重、地表水入滲。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>襯砌裂縫、滲水、剝落。(裂縫深度約為襯砌設計厚度之 34~43%)</li> <li>部分區段襯砌背後疏鬆、襯砌厚度不一</li> <li>襯砌混凝土中性化(深度約 3cm) [註：襯砌設計厚度 65cm]</li> </ol>

## 第五章、我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審

### 驗技術

本研究主要針對低放射性廢棄物坑道處置結構之穩定性，蒐整國際低放射性廢棄物處置先進國家相關經驗，同時針對國內既有的坑道結構穩定分析方法與驗證技術進行盤點，並以我國低放射性廢棄物可能場址之鄰近既有坑道，包含「無襯砌坑道」及「有襯砌坑道」兩種型式，研析並比較此二類坑道在運轉階段之坑道異狀。

針對「無襯砌坑道」部分，根據坑道現況調查，獲知其坑道異狀主要是(1)滲漏水、(2)岩塊鬆動及(3)節理因基性岩脈入侵，長時間經風化作用後呈現黏土化等現象；而針對「有襯砌坑道」部分，知其坑道異狀主要是發生在襯砌結構的(1)變形、(2)裂縫與(3)滲漏水為主。

循此，有關「無襯砌坑道」的結構穩定性驗證方法，國內一般坑道設計較少考慮採用，故本研究蒐整國外有關處置坑道結構穩定分析經驗及國立台北科技大學與金門大學研究團隊(李亮瑩等人，2012)於金門進行之無支撐地下坑道安全檢測與維護經驗，可作為本研究發展驗證方法審驗技術之參考。而有關「有襯砌坑道」部分，評估坑道在運轉階段之結構穩定性端賴相關之檢監測技術，本研究將根據2014年研究成果：「低放射性廢棄物處置安全管制技術發展子計畫五一處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究」(楊長義與李宏輝，2014)研究中，摘錄與本研究有關之處置坑道運轉期檢監測要項研析成果，作為發展低放坑道處置結構穩定性驗證方法之基本依據。

#### 5.1 「無襯砌坑道」之結構穩定驗證方法

「無襯砌坑道」的破壞模式主要有二種，分別是(I)重力引致之岩塊滑動破壞，屬地質構造主控之破壞(gravity-induced structurally controlled block movement)與(II)應力引致之剝落破壞(stress-induced spalling)，如圖5.1-1所示。



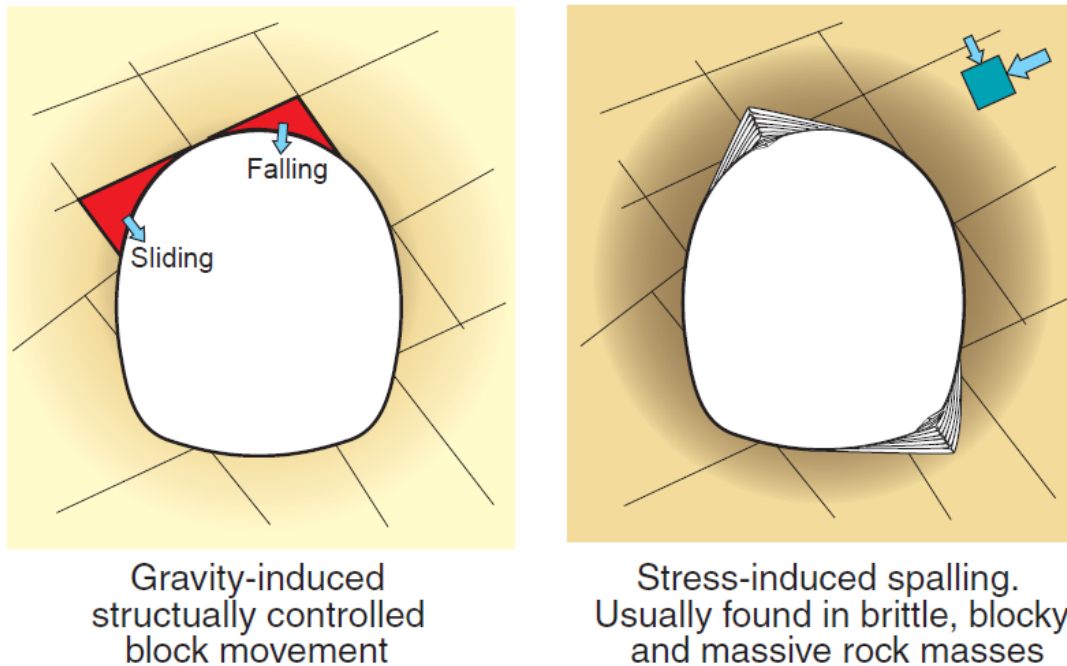


圖5.1-1 無襯砌坑道主要的破壞模式：(a) 重力引致之岩塊滑動破壞與(b)應力引致之剝落(spalling)破壞(SKB, 2011)

(I)地質構造主控之破壞一般多發生在淺層隧道，其現地應力值相對較低；(II)應力引致之剝落破壞，則一般發生在深層隧道，其現地應力值相對較高。不同的岩體破碎程度條件及其所在現地應力條件下，隧道之破壞模式詳如圖5.1-2所示。隨著現地應力的增加，岩體中的裂隙、節理受到較高的圍束應力，此時岩體的行為將趨於脆性(brittle) 圖5.1-2中，按地質強度指數(GSI)區分完整岩體( $GSI > 75$ )、中度裂隙分佈岩體( $50 < GSI < 75$ )與高度裂隙分佈岩體( $GSI < 50$ )。其中，圖5.1-2中 $Di$ 為損傷指數(damage index)，其定義為開挖面最大切線應力 $\sigma_{max}$  (maximum tangential stress)與岩石室內試驗單壓強度 $\sigma_c$ 之比值，亦即  $Di = \sigma_{max} / \sigma_c$ 。若現地應力之最大主應力( $\sigma_1$ )與岩石單壓強度( $\sigma_c$ )之比值  $\sigma_1 / \sigma_c < 0.15$  或是損傷指數  $Di < 0.4(\pm 0.1)$ ，則屬地質構造主控之破壞。

處置坑道若是位處地質破碎帶或是無施作做襯砌結構之條件，可採(1)伸張計或(2)位移計進行岩盤穩定性之監測；若是監測單一潛在滑動岩塊，則可採用裂縫計進行監測(楊長義與李宏輝，2014)。另外，根據李亮瑩等人(2012)進行之金門花崗岩體無襯砌地下坑道之安全檢測與維護經驗主要是針對覆蓋較淺且深度少於10 m之坑道，依其調查結果指出坑道在使用多年後坑壁有滲水現象，部分節理面呈開張、剪動狀，節理面內壁風化

，尤其以夾泥節理面最為明顯，並有局部範圍坑道地面發現小規模墜落岩塊(李亮瑩等人，2012)。

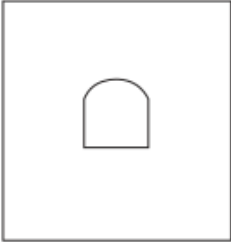
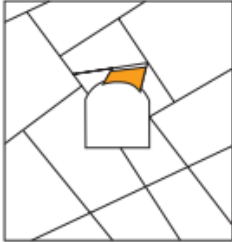
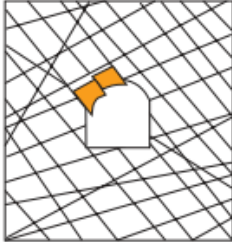

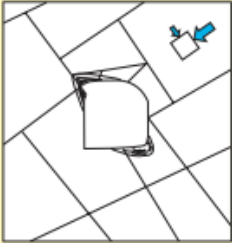
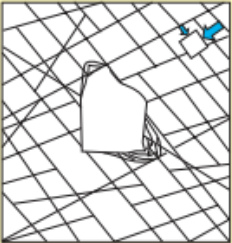
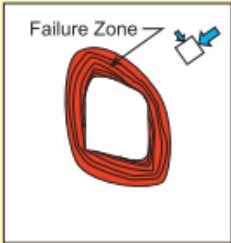

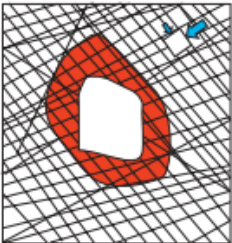
	Massive ( $GSI > 75$ )	Moderately Fractured ( $50 > GSI < 75$ )	Highly Fractured ( $GSI < 50$ )	
Low In-Situ Stress ( $\sigma_1 / \sigma_c < 0.15$ )	 Linear elastic response.	 Falling or sliding of blocks and wedges.	 Unravelling of blocks from the excavation surface.	$D_f < 0.4 (\pm 0.1)$
Intermediate In-Situ Stress ( $0.15 < \sigma_1 / \sigma_c < 0.4$ )	 Brittle failure adjacent to excavation boundary.	 Localized brittle failure of intact rock and movement of blocks.	 Localized brittle failure of intact rock and unravelling along discontinuities.	$0.4 (\pm 0.1) > D_f < 1.1 (\pm 0.1)$
High In-Situ Stress ( $\sigma_1 / \sigma_c > 0.4$ )	 Brittle failure around the excavation.	 Brittle failure of intact rock around the excavation and movement of blocks.	 Squeezing and swelling rocks. Elastic/plastic continuum.	$D_f > 1.1 (\pm 0.1)$

圖5.1-2 無襯砌坑道之穩定性與破壞模式(Hoek et al., 1980)

為掌握坑道節理位態分佈，李亮瑩等人(2012)依圖5.1-3之檢測與評估流程，分別進行路線勘查、坑道側壁出露之節理面位置與位態初步調查、坑道幾何量測、節理面位態調查與節理面描述，最後採用地面光達(LiDAR)進行掃描，獲得之點雲資料如圖5.1-4，並與光學照片影像進行節理位置比對，如圖5.1-5。在岩塊墜落潛能研判部分，則採用了

(1)岩塊理論(石根華, 1985)與(2)UWEDGE 程式進行分析。透過岩塊理論, 可據以分析確認關鍵岩塊(key block)並協助判定坑道內可能移動、或存在墜落潛能之不穩定岩塊分佈的位置; 此外, UWEDGE 軟體係由加拿大RocScience 公司發展的分析軟體, 同樣可用來分析坑道內可能移動岩塊的可能位置、形狀及其大小, 以提供岩塊理論分析所得知之關鍵岩塊相互比對, 作為坑道穩定安全之評估所用。

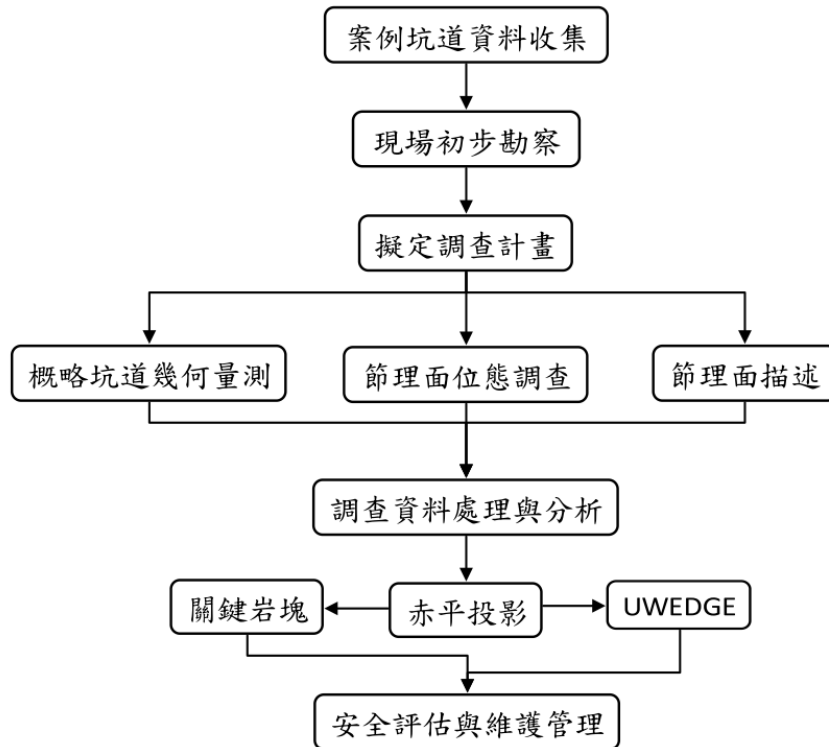


圖5.1-3 金門無支撐地下坑道安全檢測與評估流程圖(李亮瑩等人, 2012)

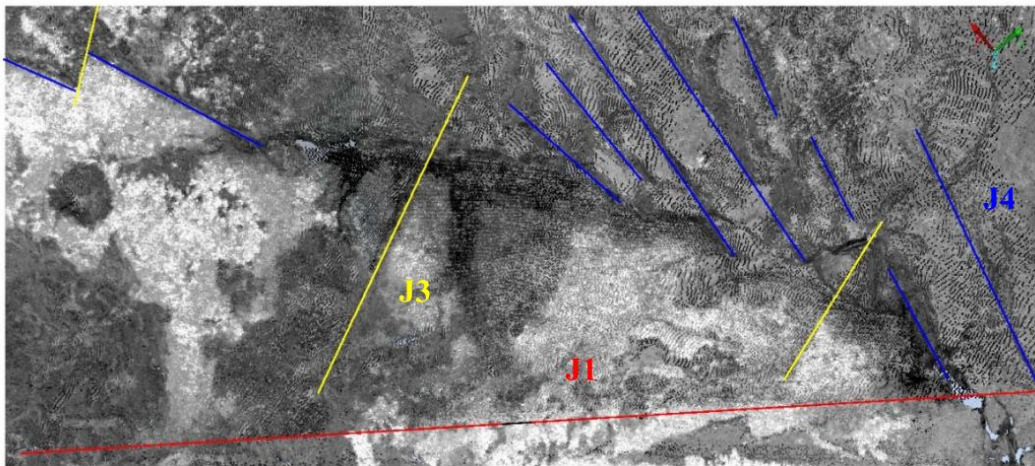


圖5.1-4金門無支撐地下坑道頂拱之地面光達掃描部分結果(李亮瑩等人，2012)

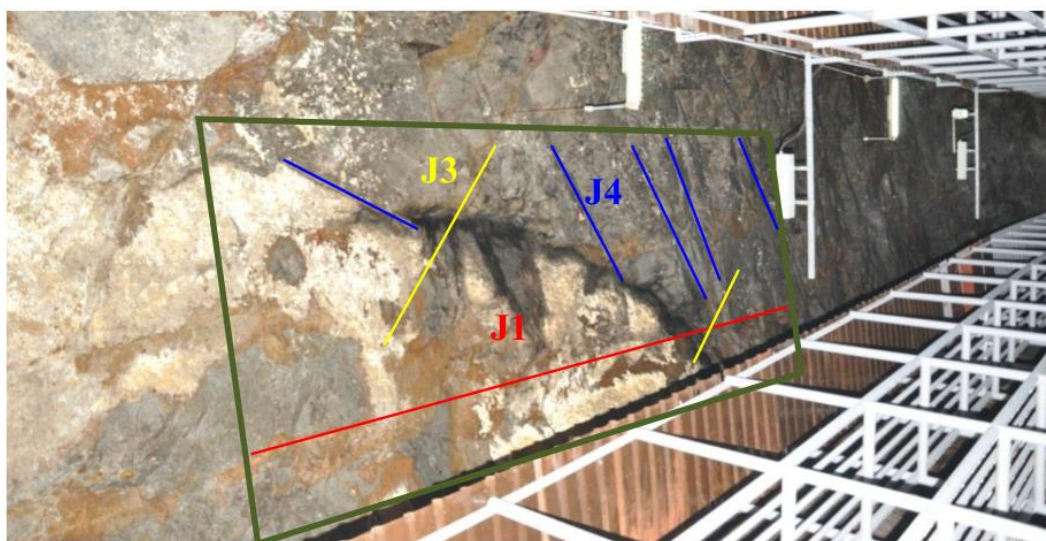


圖5.1-5 金門無支撐地下坑道頂拱之光學影像照片(李亮瑩等人，2012)

此外，根據SKB技術報告TR-01-38(SKB, 2001)，進行處置場初期設計時，須詳加考量與下列與岩石力學有關之項目，以確保處置坑道結構在運轉階段的穩定性：

- (i) 處置設施的深度；
- (ii) 處置場的配置，包括聯絡坑道路線與基礎設施；
- (iii) 坑道形狀與尺寸；
- (iv) 聯絡坑道與處置坑道的建造方法，例如鑽炸工法或機械式開挖；
- (v) 現地應力空間分佈；
- (vi) 聯絡坑道及處置坑道空間配置之關係；
- (vii) 處置坑道間距形成的岩柱寬度等。

## 5.2 「襯砌坑道」之結構穩定驗證方法

根據本案(2014)前期研究成果：「低放射性廢棄物處置安全管制技術發展子計畫五—處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究」(楊長義與李宏輝，2014)研究已蒐整了國外中、低放處置坑道及國內營運中一般坑道之經驗，本案進一步將之整理成(見表5.2-1)在設計階段、建造階段、運轉階段，處置坑道結構穩定性之相關檢監測項目：

### (1) 坑道斷面之穩定性監測

坑道斷面監測，包括坑道斷面之收斂(內空變位)與襯砌變形。若處置坑道位處地質破碎帶且具襯砌結構之情況，建議採(1)伸張計、(2)鋼捲尺收斂計、或(3)3D光學量測系統，進行坑道斷面之收斂性(內空變位)量測。基於處置坑道結構穩定性之考量，掌握處置坑道在運轉階段的變形量為重要課題。但若未來處置坑道經一次支撐、二次支撐加固後，傳統的測量技術可能無法提供微小變位之監測，建議可採用本團隊新開發的襯砌微變監測技術與跨尺度多時序監測整合技術(見3.3.2節與圖3.3-4、圖3.3-5)，以有效量測襯砌之微小變形，俾利評估掌握坑道結構穩定行為。

### (2) 襯砌裂縫及裂縫擴展

處置坑道結構穩定特性影響因素，包括(1)地震作用、(2)邊坡運動與(3)開挖擾動影響岩體性質等，可藉由運轉期襯砌異狀觀察上述因素對坑道結構的影響，並可透過隧道影像掃描技術與裂縫位移計記錄裂縫分佈及裂縫擴展的情況。

### (3) 襯砌受力與變形

由襯砌之應力與應變量測結果，可做為判斷襯砌結構受力後的行為是否符合原設計之依據，並供評估坑道結構與圍岩間的力學機制。目前，可採用的技術是可在襯砌埋設光纖感測器，以量測支撐環片內部應變，進而計算評估環片的受力與變形。

### (4) 水文地質相關參數監測

掌握岩體之導水特性與地下水滲流狀況，不僅是處置坑道在預防放射性核種傳播之重要課題，亦是評估地下水是否造成坑道結構安全的重要參數。一般可透過水文地質鑽孔監測地下水位變化，或經由雙封塞導水試驗以量測現地岩體導水特性。另外可分別於坑道內觀測點，設置流量計與水壓計，以記錄地下水之滲流量與滲流壓力。

表5.2-1 (a) 處置坑道檢監測項目與技術列表-岩石力學有關項目(楊長義與李宏輝，2014)

	設計階段		建造階段		運轉階段	
	檢監測項目	技術或儀器	檢監測項目	技術或儀器	檢監測項目	技術或儀器
岩 石 力 學	無	無	開挖面觀察	目視	岩盤穩定性	位移量測/伸張計 應力量測/計測岩栓
			淨空變位與頂拱下陷	位移量測/收斂觀測儀及收斂岩釘、光學式收斂監測、電子式收斂監測	單一潛在滑動岩塊	位移量測/裂縫計
			仰拱隆起	加列收斂岩釘、伸縮儀、沉陷觀測釘等	坑道斷面收斂	位移量測/伸張計、捲尺收斂計
			中心線量測 地中變位量測	收斂計	內空變位	3D光學量測系統
					襯砌裂縫分佈與擴展	隧道影像掃描、裂縫位移計
			地表及地中沉陷	位移量測/地表沉陷點觀測、地中變位計、插入式傾斜計、插入式地中變位計	襯砌變形	襯砌微變監測技術
			岩栓軸力	應力量測/計測岩栓		跨尺度多時序監測整合技術
			一次襯砌應力量測	應力量測/電子式襯砌應力量測		襯砌黏貼應變計
			一次襯砌應變量測	應變量測/噴凝土應變計量測	坑道環片受力與變形	於環片組立時埋設光纖感測器
			二次襯砌應力量測	應力量測/電子式襯砌應力量測	坑道襯砌的位移及受力後的反應、頂拱的沉陷量	斷面收斂量測系統(襯砌表面感測器、溫度感測器、傾斜感測器及裂縫量測)

表5.2-1 (b) 處置坑道檢監測項目與技術列表-水文地質及坑道襯砌有關項目(楊長義與李宏輝，2014)

	設計階段		建造階段		運轉階段	
	檢監測項目	技術或儀器	檢監測項目	技術或儀器	檢監測項目	技術或儀器
水文地質	地下水位	水文地質鑽孔	地下水位	水文地質鑽孔	地下水位	水文地質鑽孔
	岩體導水特性	雙封填塞導水試驗	岩體導水特性	雙封填塞導水試驗	岩體導水特性	雙封填塞導水試驗
	地下水滲流量	觀測站設置流量計	地下水滲流量	觀測站設置流量計	地下水滲流量	觀測站設置流量計
	地下水滲流壓力	水壓計	地下水滲流壓力	水壓計	地下水滲流壓力	水壓計
坑道襯砌	無	無	無	無	混凝土中性化	混凝土中性化檢測
					鋼筋保護層厚度不足	透地雷達探測
					襯砌背後孔洞	透地雷達、熱紅外線掃描
					襯砌裂縫寬度與深度	超音波試驗
					混凝土劣化	史密特錘試驗、鑽孔取樣進行單壓試驗

### 5.3 處置坑道結構穩定性驗證方法之審驗技術

處置坑道之所需支撐型式與所處母岩地質條件及岩石力學特性有關。針對強度較高、變形較小之花崗岩體，其地下坑道多屬無支撐設計之「無襯砌坑道」，如前述瑞典SFR中、低放處置場，及外島金門翟山坑道等。但若是岩體強度較低、彈性係數較低者，仍可透過適當的岩體支撐系統，包括岩栓、掛網噴凝土、混凝土襯砌等等，即形成「有襯砌坑道」之結構型式，如前述本島台鐵安朔隧道。

本研究綜整前述各章成果，針對處置坑道結構穩定性，提出一整合性的分析流程，詳如表5.3-1：包含「資料蒐集與分析」、「坑道結構穩定分析」與「檢測與監測」：

#### (1) 資料蒐集與分析

工作項目包括(I)地質暨地下水文資料蒐集、(II)岩石物理特性、岩石與弱面力學特性蒐集及(III)弱面空間分佈與統計分析。

#### (2) 坑道結構穩定分析

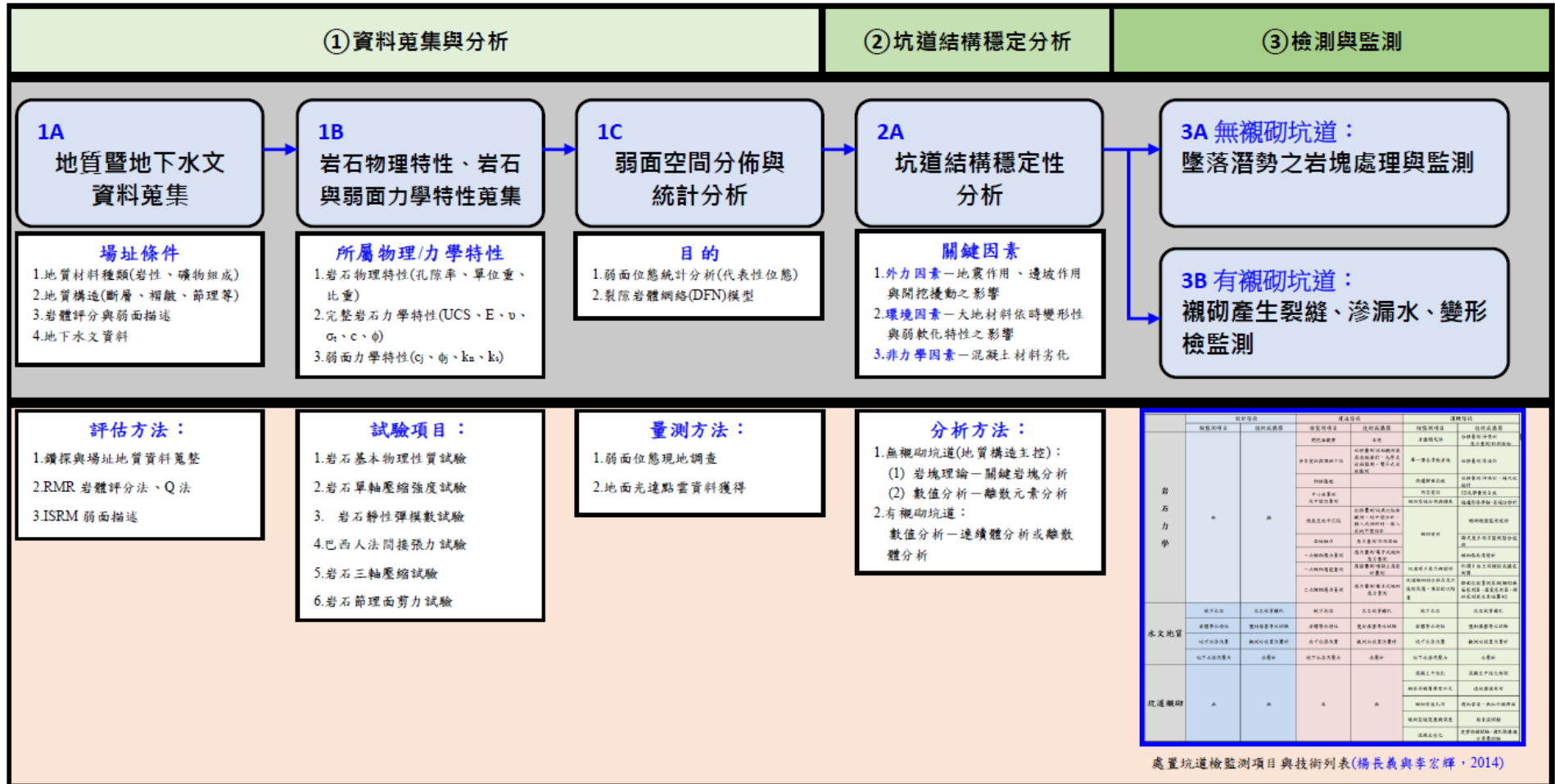
襯砌裂縫與滲水為影響坑道結構穩定之關鍵因子，其肇因區分外力因素、環境因素及非力學因素。針對外力因素與環境因素可能導致處置坑道結構穩定性之影響評估，可採用數值分析方法進行驗證；若是屬於地質構造主控，且為無支撐之地下坑道者，亦可採岩塊理論進行高潛勢墜落岩塊分析。

#### (3) 檢測與監測

運轉階段，處置坑道結構之穩定性，可依表5.3-1所列之檢監測項目與技術列表，可進一步針對「岩石力學」、「水文地質」與「坑道襯砌」三者對應之檢監測項目與技術，進行坑道結構之檢測與監測，以驗證處置坑道結構之穩定性。



表5.3-1 本文建議坑道處置結構穩定性分析流程



## 第六章、我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證重點

總結前述各項工作成果，本章提出符合我國地質與環境條件之低放處置坑道結構穩定性模式審驗重點，並依「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第0版)」與本研究有關之章節進行研析與討論，以提出低放處置審查導則(第0版)相關條文之修訂建議。

### 6.1 低放處置坑道結構穩定性模式審驗重點

已知(1)襯砌裂縫與(2)滲水兩者為影響坑道結構穩定的關鍵因子，其肇因區分為外力因素、環境因素與非力學因素，據此，(A)本研究提出坑道處置結構穩定評估與審查要項，詳如表6.1-1所示；此外，(B)本研究蒐整國內一般隧道相關之施工規範，詳如附錄，並將(C)本研究所提低放處置坑道結構穩定性影響項目有關之規範，同時列於表6.1-1，以供未來相關審驗工作之參考。

惟涉及地震力對隧道的影響部分，國內僅「台北捷運系統工程土木工程設計手冊」與「高雄捷運系統紅橘線路網建設案土建及車站工程設計規範」述及土層隧道耐震設計，國外規範部分則是包括日本與中國大陸等，此部分精進仍有賴相關之國際資訊蒐整補充之。

表6.1-1 坑道結構穩定性影響項目、肇因與審驗重點

處置坑道結構穩定性影響項目與肇因		處置坑道結構穩定性審驗重點 (本計畫建議)	備註 (相關規範)
外力因素	地震作用	(1) 選定之大地材料參數與坑道尺寸是否正確？ (2) 採用之分析方法是否適切？是否足以反映坑道結構受震行為？ (3) 是否依據「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」(第0版)第三章之場址特性描述，提出合理的設計基準地震？	台北捷運系統工程土木工程設計手冊(針對土層隧道)

處置坑道結構穩定性 影響項目與肇因		處置坑道結構穩定性審驗重點 (本計畫建議)	備註 (相關規範)
	邊坡運動	(1) 選定之 <b>大地材料參數與坑道尺寸</b> 是否正確？ (2) 採用之 <b>分析方法</b> 是否適切？是否足以反映坑道 <b>洞口</b> 段可能受到邊坡運動之影響？	公共工程施工網 要規範
	開挖擾動	(1) 選定之 <b>大地材料參數與坑道尺寸</b> 是否正確？ (2) 採用之 <b>開挖工法對圍岩擾動的影響評估</b> 是否合理？ (3) 採用之 <b>分析方法</b> 是否適切？是否足以反映坑道 <b>圍岩</b> 因開挖擾動引致之範圍與鬆動土壓之影響？	公共工程施工網 要規範 隧道施工技術規 範 施工說明書技術 規定 山岳隧道之施工
環境 因素	風化作用引致岩 石強度弱軟化	(1) 選定之 <b>大地材料參數與坑道尺寸</b> 是否正確？ (2) 採用之 <b>分析方法與材料組成模式</b> 是否適切？是否足以反映坑道 <b>圍岩強度弱軟化</b> 之影響？	無
	依時變形特性	(1) 選定之 <b>大地材料參數與坑道尺寸</b> 是否正確？ (2) 採用之 <b>分析方法與材料組成模式</b> 是否適切？是否足以反映坑道 <b>圍岩依時變形特性</b> 之影響？	無
非力學 因素	混凝土中性化	(1) 選定之 <b>檢測方法</b> 是否適切？	舊交通隧道之安 全檢測、維修與 補強技術研訂 (I)(II) 隧道非破壞性檢 測技術之開發總 結報告書
	鋼筋保護層厚度 不足	(2) 施測或取樣 <b>位置</b> 是否合宜？ (3) <b>樣本數</b> 是否具代表性？	
	鹼值粒料反應		
	混凝土澆置中斷( 冷縫)		
	襯砌背後空洞或 厚度不足		

## 6.2 低放處置審查導則(第 0 版)相關條文修訂建議

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」(第0版)共分13章，依目前所列之章節，並未直接述及有關坑道處置結構穩定性之條文。但是，基於坑道處置方式可能為我國未來低放射性廢棄物處置採用方式之一，同時考量我國地質條件不若國

外處置場之場址所具備極良好天然障壁優勢，為確保坑道處置結構穩定性，實有必要針對現有的低放處置審查導則提出相關之修訂建議。

經檢視目前的「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」(第0版)，同時比對表5.3-1之坑道處置結構穩定性分析流程，本研究所提之「①資料蒐集與分析」、「②坑道結構穩定分析」與「③檢測與監測」與審查導則所對應章節關係，詳如表6.2-1所示。

為求審查導則修訂建議之內容能更趨完善，本子計畫研究將前期105年度研究所提出之建議內容一併整理於表6.2-2，並就本計畫研析內容，將相關之增訂與修訂建議內容同列於表6.2-2。

表6.2-1 坑道處置結構穩定性分析流程與低放處置審查導則章節之關連性

審查導則相關章節 分析流程項次	第三章 「場址特性 描述」	第四章 「處置設施 之設計」	第五章 「處置設施 之建造」	第六章 「處置設施 之運轉」	第七章 「處置設施 之安全評估」
① 資料蒐集與分析	◎				
② 坑道結構穩定分析		◎	◎	◎	◎
③ 檢測與監測		◎	◎	◎	◎

表6.2-2 審查導則編修要點建議

章 節	審查導則編修要點建議	
	105*	106
第三章 場址 特性 描述	<p><b>提供要項部分：</b>                      提供工程地質及岩石力學等大地工程特性參數之調查與試驗結果，包括地質與地層、斷層、裂隙分布、地下水分布、岩石力學特性與岩體評分初步建議，及坑道開挖可能引致之圍岩擾動範圍，與大地工程材料依時性與抗侵蝕特性等應一併提出。</p> <p><b>審查作業部分：</b>                      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？調查與評估方法是否適當與具代表性？調查成果是否足以描述場址大地工程特性？是否充分考慮圍岩受開挖擾動後，造成圍岩工程材料特性的可能變異？是否經過適當的取樣，並提供室內或現地試驗相關佐證資料？採用的取樣與試驗方法是否符合大地工程專業規範？岩體評分建議是否適切？</p>	<p><b>提供要項部分：</b>                      提供工程地質，及土壤與岩石等大地工程特性參數之調查與試驗結果，包括地質與地層、斷層、裂隙分布、地下水分布、岩石力學特性、弱面描述與岩體評分初步建議，及坑道開挖可能引致之圍岩擾動範圍，與大地工程材料依時變形性與弱軟化抗侵蝕特性之評估方法等應一併提出。</p> <p><b>審查作業部分：</b>  <del>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？</del>調查與評估方法是否適當與具代表性？<del>弱面位態調查與統計分析方法是否合理？</del>調查成果是否足以描述場址大地工程特性？<del>是否充分考慮圍岩受開挖擾動後</del>造成圍岩工程材料特性的可能變異？是否經過適當的取樣，並提供室內或現地試驗相關佐證資料？採用的取樣與試驗方法是否符合大地工程專業規範？<del>弱面描述與岩體評分建議是否適切？</del>所提大地工程材料依時變形性與弱軟化特性之評估方法是否可行？</p>
第四章 處置 設施 之 設計	<p><b>提供要項部分：</b>                      根據「場址特性描述」所提供的大地工程特性參數，提出影響坑道結構長期穩定之可能因子，及具以提出因應的坑道設計與維護策略。</p> <p><b>審查作業部分：</b>                      所提處置坑道之設計是否考量建造過程可能遭遇之問題與因應策略？處置坑道在使用年限內，可能遭遇之滲水、變形、支撐構件強度降低等影響，其在處置坑道設計如何因應與強化。</p>	<p><b>提供要項部分：</b>                      根據「場址特性描述」所提供的大地工程特性參數與弱面空間分佈，提出坑道結構穩定性分析方法，並分別針對影響坑道結構穩定之「外力因素」與「環境因素」進行分析，據以影響坑道結構長期穩定之可能因子，及具以提出因應的坑道設計與維護策略。</p> <p><b>審查作業部分：</b>                      所提坑道結構穩定性分析方法是否適切？是否足以反映大地工程特性，及「外力因素」與「環境因素」對坑道結構穩定性之影響？所提處置坑道之設計是否考量建造過程可能遭遇之問題與因應策略？<del>處置坑道在使用年限內，可能遭遇之滲水、變形、支撐構件強度降低等影響，其在處置坑道設計如何因應與強化。</del></p>
第五章 處	<p><b>提供要項部分：</b>                      根據「場址特性描述」所提供的場址地質構造、水文地質概況與大地工程特性參數，針對坑道開挖工法與支撐方式，及建造期間可能遭遇的工程地質問題，研擬因應策略。</p>	<p><b>提供要項部分：</b>                      根據「場址特性描述」之地質、地下水所提供的場址地質構造，<del>水文地質概況</del>與大地工程特性參數，針對提出坑道開挖工法與支撐方式，及針對建造期間可能遭遇的工程地質問題，研擬因應策略。</p>

章 節	審查導則編修要點建議	
	105*	106
置 設 施 之 建 造	<p><b>審查作業部分：</b> 所提開挖工法與支撐方式是否確實考量場地地質構造、水文地質概況與大地工程特性參數？針對圍岩擾動與超挖量的控制是否合宜？可能遭遇的工程地質問題與因應策略是否合理可行？</p>	<p><b>審查作業部分：</b> 是否確實根據「場址特性描述」之地質、地下水與大地工程特性參數提出適切的<del>所提</del>開挖工法與支撐方式是否確實<del>考量場地地質構造、水文地質概況與大地工程特性參數？</del>開挖工法造成<del>針對</del>圍岩的擾動評估與超挖量的控制是否合宜？可能遭遇的工程地質問題與因應策略是否合理<del>可行</del>？</p>
第 六 章  處 置 設 施 之 運 轉	<p><b>提供要項部分：</b> 說明處置設施在運轉階段，針對岩體穩定性、坑道支撐結構與地下水入滲狀況所實施的檢測項目、檢測方法與頻率、檢測執行單位與組成人員。</p> <p><b>審查作業部分：</b> 檢測項目是否足以反映岩體穩定性、坑道支撐結構與地下水入滲之實際狀況？檢測方法是否具體可行？檢測頻率是否合適？檢測執行單位與組成人員是否具備執行檢測工作與數據判讀之能力。</p>	<p><b>提供要項部分：</b> 說明處置設施在運轉階段，針對岩體穩定性、坑道<del>支撐</del>結構與地下水入滲狀況所實施的檢<del>監</del>測項目、檢<del>監</del>測方法與<del>技術</del>頻率、檢<del>監</del>測執行週期、檢測執行單位與組成人員。</p> <p><b>審查作業部分：</b> 檢<del>監</del>測項目是否足以反映岩體穩定性、坑道<del>支撐</del>結構與地下水入滲之實際狀況？<del>提出之</del>檢<del>監</del>測方法與<del>技術</del>是否具體可行？<del>檢測頻率</del>檢<del>監</del>測執行週期是否合適？檢測執行單位與組<del>成</del>人員是否具備執行檢測工作與數據判讀之能力。</p>
第 七 章  處 置 設 施 之 安 全 評 估	<p><b>提供要項部分：</b> 應充分說明處置坑道的設計考量、與岩石力學及水文地質有關的設計參數、參數基準量測值、運轉初期所建立的坑道斷面幾何參數與視砌影像資料、檢監測方法與技術、執行檢監測週期，並提供檢監測參數合理範圍，以供相關安全評估與維修補強判定之參考。</p> <p><b>審查作業部分：</b> 應檢核處置坑道在運轉初期所建立的坑道斷面幾何參數與視砌影像資料是否完整？採用的檢監測方法與技術是否可行？執行檢監測之週期是否合理？提供的監測參數合理範圍如何獲得與驗證？</p>	<p><b>提供要項部分：</b> 應充分說明處置坑道的設計考量、<del>與岩石力學及水文地質有關的設計參數</del>大地工程特性參數與弱面空間分佈<del>參數</del>基準量測值、運轉初期所建立的坑道斷面幾何參數與視砌影像資料、檢監測方法與技術、<del>執行</del>檢監測<del>執行</del>週期，並提供檢監測參數合理範圍，以供相關安全評估與維修補強判定之參考。</p> <p><b>審查作業部分：</b> 應檢核處置坑道在運轉初期所建立的坑道斷面幾何參數與視砌影像資料是否完整？採用的檢監測方法與技術是否可行？<del>執行</del>檢監測<del>執行</del>週期是否合理？提供的監測參數合理範圍如何獲得與驗證？</p>

註\*：「低放射性廢棄物坑道處置工程地質與長期穩定審驗技術建立之資訊研析」(楊長義與李宏輝，2016)所提審查導則編修要點建議。

## 第七章、結論與建議

本計畫透過蒐集並研析(1)國外低放廢棄物坑道處置結構穩定性之驗證經驗，與(2)國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法，接續完成；(3)我國外島與本島坑道處置結構穩定性審查假想案例之建立、提出(4)我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術與(5)我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證重點。

本計畫依約所完成之各項工作成果，綜整於7.1節，未來可研究與精進之課題則建議於7.2節。

### 7.1 結論

#### (1) 國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法

蒐整了國外瑞典SFR低放射性廢棄物處置場址相關背景資料，與坑道處置結構穩定性驗證過程所選定地質與大地工程特性參數；此外，依循SFR利用離散體分析軟體3DEC所建構「岩體數值模型」與「岩體長期劣化分析」之方式，均可供我國未來針對岩體材料劣化對處置坑道結構穩定性之影響分析參考。

#### (2) 國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法

綜整一系列前期研析有關國內一般坑道其在設計、建造與運轉階段之技術報告成果，可獲知(I)襯砌裂縫與(II)滲水二者為影響我國本土坑道長期穩定的關鍵因子；本研究並針對處置坑道在運轉階段，因外力因素、環境因素或非力學因素之作用，所導致坑道結構穩定性之可能影響，提出相對應的驗證與評估方法，包括既有的隧道結構穩定數值模擬分析方法與檢、監測技術等。

#### (3) 建立坑道處置結構穩定性審查假想案例

考量我國低放射性廢棄物可能場址特性，本研究蒐整兩個本土坑道假想案例，分別為外島與本島案例各一處。在外島坑道假想案例部分，主要是考量無襯砌結構之坑道亦屬可能採取的處置坑道型式，故以金門既有之無襯砌結構坑道為假想案例；本島假想案例部分，則是以台鐵南迴線安朔隧道為例。並將兩案例坑道之建造資訊、地質條件與運轉階段之坑道結構異狀等資訊彙整於表4.4-1；另分別針對坑道長期穩定之影響因素，包括外力因素、環境因素與非力學因素進行分析與討論。

#### (4) 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術

針對「無襯砌坑道」及「有襯砌坑道」兩種型式，研析比較此二類坑道在運轉階段之坑道異狀，及相對應的結構穩定性驗證方法；並綜整前述各項成果，針對處置坑道結構穩定性，提出一整合性的評估與驗證分析流程：包含「資料蒐集與分析」、「坑道結構穩定分析」與「檢測與監測」，詳如表5.3-1。

#### (5) 我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證重點

總結前述各項工作成果，本章提出符合我國地質與環境條件之低放處置坑道結構穩定性模式審驗重點，詳如表6.1-1；此外，為求審查導則修訂建議之內容能更趨完善，本子計畫研究將前期105年度研究所提出之建議內容，與本子計畫研析之增訂與修訂建議內容同列於表6.2-2。

## 7.2 建議

本研究已針對低放射性廢棄物處置坑道，依「無襯砌坑道」及「有襯砌坑道」兩種型式提出其在運轉階段之可能異狀，與坑道結構穩定性分析流程、驗證項目、評估與驗證方法，為能更進一步具體落實審驗技術本土化，應將國內現行一般隧道之設計方法或規範，與低放處置坑道結構穩定性驗證項目進行關聯性比較與適用性討論並精進之。



---

## 參考文獻

- [1] Andersson J, Ström A, Svemar C, Almén K-A, Ericsson L O, 2000. What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation. SKB TR-00-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [2] Barton N, Choubey V, 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics* 10, 1–54.
- [3] Barton N, 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 39, 185–216.
- [4] Bodén A, Lundin J, 2007. SFR kontrollprogram, Bergkontroll-Bergkontrollgruppens årsrapport 2006, Huvudrapport. Doknr 2448900-001, Vattenfall Power Consultant AB, 2007-03-05.
- [5] 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.
- [6] Glamheden R, Mærsk Hansen L, Fredriksson A, Bergqvist L, Markström I, Elfström M, 2007a. Mechanical modelling of the Singö deformation zone. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.1. SKB R-07-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [7] Glamheden R, Fredriksson A, Röshoff K, Karlsson J, Hakami H, Christiansson R, 2007b. Rock mechanics Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [8] Haapanen, R., Aro, L., Koivunen, S., Lahdenperä, A-M., Kirkkala, T., Hakala, A., Helin, J., and Ikonen, A.T.K. 2011. Selection of real-life analogues for future lakes and mires at a repository site. Full paper, International Conference on Radioecology & Environmental Radioactivity: Environment & Nuclear Renaissance, 19-24 June 2011, Hamilton, Ontario. *Radioprotection* 46(6): S647–S651.
- [9] HAGROS, A., JOHANSSON, E. & ÖHBERG, A. “Research and monitoring programme of the bedrock in the VLJ repository at Olkiluoto for 2006-2017”, Teollisuuden Voima Oy, Work Report VLJ-10/05, 2005.

- 
- [10] Hjerpe, T., Ikonen, A.T.K., and Broed, R. 2010. Biosphere Assessment Report 2009. Posiva Report 2010-03.
- [11] Hoek, E. and E. T. Brown, 1980. Underground Excavations in Rock. The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- [12] Hoel, E. and Wood, D.F., Support in underground hard rock mines, Underground Support Systems, 35, 1987.
- [13] Hökmark H, 1993. Numerical analysis of time-dependent deformations in the rock surrounding the SFR repository. Clay Technology AB, Lund, Internal report.
- [14] Holmén J G, Stigsson M, 2001. Modelling of Future Hydrogeological Conditions at SFR.
- [15] Forsmark. SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [16] IAEA. 2001. Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste. IAEA -TECDOC-1208.
- [17] IAEA, 2014, Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities, Specific Safety Guide No. SSG-31, Vienna.
- [18] Kasa, S. 2011. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2009 – Foreign materials. Posiva Working Report 2010-46.
- [19] Lahti, M. (ed.) and Siren, T. 2011. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2010 – Rock Mechanics. Posiva Working Report 2011-47.
- [20] Miller, B., Arthur, J., Bruno, J., Hooker, P., Richardson, P., Robinson, C., Arcos, D., and West, J. 2002. Establishing baseline conditions and monitoring during construction of the Olkiluoto URFC access ramp. Posiva Report 2002-07.
- [21] MoDeRn. 2013. MoDeRn Monitoring Reference Framework report. MODERN DELIVERABLE (D-1.2).
- [22] MoDeRn. 2013. State of Art Report on Monitoring Technology DELIVERABLE. MODERN DELIVERABLE (D-N:2.2.2).
- [23] NRC. 1991, Standard Format and Content of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (NUREG-1199, Rev. 2, 1991)
- [24] NRC. 1994, Standard Review Plan for the review of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (NUREG-1200, Rev. 3, 1994)
-

- 
- [25] Öhberg A., Johansson E., Anttila P. and Saari J., 2011, Two decades of rock monitoring experiences at the two underground repositories for operating waste in Finland, 2011 World Tunnel Congress and 37th General Assembly, Helsinki, Finland.
- [26] Penttinen, T., Partamies, S., Lahdenperä, A.-M., Pitkänen, P., Ahokas, T., and Kasa, S. 2011. Results of monitoring at Olkiluoto in 2009 – Hydrogeochemistry. Posiva Working Report 2010-44.
- [27] Posiva. 2002. The observational method applied to engineering and construction of the access to the ONKAIO facility. Posiva Report 2002-48.
- [28] Posiva. 2003. Programme of Monitoring at Olkiluoto During Construction and Operation of the ONKALO. Posiva Report 2003-05.
- [29] Posiva. 2012. Monitoring at Olkiluoto – a Programme for the Period Before Repository Operation. Posiva Report 2012-01.
- [30] Posiva. 2013. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2012, Rock Mechanics. Posiva Report 2013-47.
- [31] RWMC. 2005. Monitoring of Geological Disposal – Current Status and Technical Possibilities. RWMC Technical Report RWMC-TRE-04004.
- [32] Read, R.S. (2004): 20 years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 41, 1251-1275.
- [33] Richard E. Goodman, Gen-hua Shi. 1985. Block Theory and Its Application to Rock Engineering, PRENTICE-HALL, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- [34] Shi, G-H, and Goodman, R.E. 1984. Discontinuous Deformation Analysis. Proc. of the 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 269-277.
- [35] SKB, 2002. Forsmark – site descriptive model version 0. SKB R-02-32, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [36] SKB. 2003. Design, construction and performance of the clay-based isolation of the SFR silo. SKB R-03-30.
- [37] SKB, 2004. Preliminary site description Forsmark area – version 1.1. SKB R-04-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
-

- 
- [38] SKB. 2007. Construction experiences from underground works at Forsmark. SKB R-07-10.
- [39] SKB. 2008. Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase, SKB Report R-08-05.
- [40] SKB. 2011a. International perspective on repositories for low level waste. SKB R-11-16.
- [41] SKB. 2011b. Site investigation SFR Bedrock geology. SKB R-10-49.
- [42] SKB. 2013. Äspö Hard Rock Laboratory Annual report 2012. SKB TR-13-10.
- [43] SKB. 2014a. Safety analysis for SFR Long-term safety. SKB TR-14-01.
- [44] SKB. 2014b. Initial state report for the safety assessment. SKB TR-14-02.
- [45] SKB. 2014c. Long term stability of rock caverns BMA and BLA of SFR, Forsmark. SKB R-13-53.
- [46] Schubert W, Goricki A, Button E A, Riedmüller G, Pölser P, Steindorfer A F, Vanek R, 2001. Consistent excavation and support determination for the design and construction of tunnels. Felsbau 19, 85–92.
- [47] 王文禮、王泰典、蘇灼謹、林峻弘、譚家瑞、黃燦輝，2000，台灣中部岩石隧道之震害與修復，地工技術，第81期，第5-18頁。
- [48] 交通部台灣鐵路管理局，2008，南迴線金崙等七座隧道安全檢測評估報告。
- [49] 江怡萱，2013，雷射掃描技術於隧道內空變位監測之應用，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。
- [50] 林蔚、李寄嶼、楊小青、陳正宏，2011，五萬分之一臺灣地質圖及說明書—金門，經濟部中央地質調查所。
- [51] 吳宗江，行政院國科會專題研究成果報告，2012，典藏金門戰地文化-坑道3D數位化與展示，2012。
- [52] 周鼎、吳禮浩、王泰典、李宏輝、李佳翰、詹尚書、許珮筠、曹孟真，2012，坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術發展，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告。
- [53] 周鼎、吳禮浩、王泰典、李宏輝，2013，坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術發展，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告。
-

- 
- [54] 黃燦輝、林銘郎、王泰典，2008，隧道襯砌非破壞性檢測技術之開發，交通部鐵路改建工程局東部工程處委託研究計畫。
- [55] 董家鈞、楊長義、李宏輝，2014，處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告。
- [56] 董家鈞、楊長義、李宏輝，2015，處置坑道結構長期穩定需求及監測方法之研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告。
- [57] 董家鈞、楊長義、李宏輝，2016，低放射性廢棄物坑道處置工程地質與長期穩定審驗技術建立之資訊研析，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告。
- [58] 張福麟，2011，低放射性廢棄物坑道處置安全評估-關鍵議題初步探討，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告。
- [59] 張吉佐、侯秉承、張博翔，2007，台灣隧道設計與施工，2007海峽兩岸地工技術/岩土工程交流研討會。
- [60] 張吉佐、劉弘祥，2001，山岳隧道工程設計與實例手冊。
- [61] 臺灣省政府交通處南迴鐵路工程處，1992，南迴鐵路工程：工程輯要。
- [62] 藍維恭、蘇文崎、林志權、周坤賢、陳正勳，2015，臺9線南迴公路安朔草埔段隧道工程特殊考量及施工挑戰，2015，中華技術。

## 附錄 A 隧道施工規範、技術手冊及相關文獻

整理自王泰典等人(2012)與陳正勳等人(2008)

項次	名稱	出版者/作者	出版年度	規範內容(或適用條件)
1	潛盾隧道施工技术規範之研討	中華民國隧道協會	1999	(1) 工程管理 (2) 工址調查 (3) 施工與設備 (4) 環片與襯砌 (5) 輔助工法 (6) 附屬工程
2	公共工程施工網要規範	行政院公共工程委員會	2001	(1) 隧道施工管理(02401) (2) 隧道施工通則(02402) (3) 岩體分類與開挖支撐類型(02403) (4) 洞口開挖及邊坡保護(02411) (5) 隧道鑽炸法及非全斷面機械開挖(02412) (6) 先進支撐(02421) (7) 鋼支保(02422) (8) 隧道用岩栓(02423) (9) 隧道噴凝土(02424) (10) 隧道襯砌(02425) (11) 隧道鑽孔及灌漿(02432) (12) 隧道計測及儀器(02447) (13) 隧道防水層(02448)
3	隧道施工技术規範	交通部台灣區國道新建工程局	2003	針對鑽炸法及非全斷面機械開挖之隧道施工，參考行政院公共工程委員會頒布之公共工程施工網要規範 02401~3, 02411~2, 02421~5, 02432、02447~8 等 13 章訂定
4	施工說明書技術規定	交通部公路總局	2005	針對鑽炸法及非全斷面機械開挖之隧道施工，並參考行政院公共工程委員會頒布之公共工程施工網要規範訂定： (1) 隧道施工安全 (2) 隧道施工通則 (3) 岩體分類與開挖支撐類型

				(4) 洞口開挖及邊坡保護 (5) 隧道鑽炸法及非全斷面機械開挖 (6) 豎井開挖 (7) 鋼支撐架 (8) 隧道用岩栓 (9) 隧道噴凝土 (10) 隧道襯砌 (11) 隧道鑽孔及灌漿 (12) 隧道計測及儀器 (13) 隧道防水層 (14) 隧道其他工作
5	潛盾隧道設計及施工準則與解說	中華民國隧道協會	2009	(1) 第一~四章：設計作業 (2) 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 (3) 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
6	山岳隧道之施工	榮民工程事業管理處(林福星編著)	1981	(1) 施工計畫 (2) 開挖方法 (3) 鑽岩 (4) 開炸 (5) 岩碴處理 (6) 支保 (7) 襯砌 (8) 壓縮空氣量計算 (9) 隧道換氣與照明設備 (10) 斜坑 (11) 豎井 (12) 隧道工程特種施工之實例
7	實用隧道工程	汪燮之	1987	(1) 岩石隧道施工

	學			<ul style="list-style-type: none"> <li>(2) 無爆破岩石隧道施工</li> <li>(3) 土質隧道施工</li> <li>(4) 豎井</li> <li>(5) 沉埋管隧道</li> </ul>
8	隧道工程	榮民工程 事業管理 處	1990	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 現代隧道施工技術在台灣地區之應用</li> <li>(2) 隧道工法之演進與展望</li> <li>(3) 隧道施工機具及設備</li> <li>(4) 隧道施工之通風</li> <li>(5) 隧道之排水系統</li> <li>(6) 隧道開炸之施工探討</li> <li>(7) 超挖控制之爆破技術</li> <li>(8) 隧道突發事件及對策</li> <li>(9) 隧道施工的湧水對策</li> <li>(10) 施工進度表於隧道工程之製作與應用</li> <li>(11) 隧道施工之品質控制</li> </ul>
9	公路隧道設計、施工—半剛性支撐工法	交通部公路總局第二區養護工程處(張嘉德編著)	1993	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 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</li> <li>(2) 施工中之現象與對策</li> <li>(3) 計測</li> </ul>
10	營建自動化推廣手冊叢書	內政部營建署	1997~ 2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 隧道監測自動化系統</li> <li>(2) 隧道工程全能作業班</li> <li>(3) 台灣隧道施工技術之發展及其成效</li> <li>(4) 隧道施工地質探查技術</li> <li>(5) 隧道施工湧水處理技術</li> <li>(6) 隧道氣爆處理技術</li> </ul>
11	隧道工程實務	國立台灣科技大學營建工程系(陳志南主編)	1998	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 隧道施工技術</li> <li>(2) 隧道施工管理</li> <li>(3) 隧道工程災變處理實務</li> <li>(4) 隧道工程施工與管理</li> <li>(5) 隧道鑽炸實務</li> </ul>
12	隧道施工技術、品管與案例彙編	中華民國隧道協會(劉弘祥主	2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 山岳隧道鑽炸法</li> <li>(2) 山岳隧道 TBM</li> <li>(3) 軟土潛盾隧道</li> </ul>



		編)		
13	台北捷運系統 工程土木工程 設計手冊	台北捷運 局	1998	述及土層隧道耐震設計
14	高雄捷運系統 紅橘線路網建 設案土建及車 站工程設計規 範	高雄捷運 局	2002	述及土層隧道耐震設計
15	美國南加州捷 運地下結構耐 震設計準則		1984	述及土層隧道耐震設計
16	台灣高鐵設計 規範			覆蓋深度 $\leq 15\text{m}$ 之隧道耐震設計
17	日本隧道工程 標準規範及解 說(山岳工程篇)		1996	覆蓋深、地盤良好等不考慮。 施工中發生崩塌、膨脹壓、湧水斷層破碎帶、 都市隧道或淺覆蓋土砂層隧道、交叉段、矢板 工法施工之隧道(襯砌背面有空洞或地盤劣化)
18	日本鐵道構造 物等設計標 準·同解說		1997	斷面極端變化、地質變化極大處、覆蓋變化極 大處、線形曲率變化極大處、軟弱地盤、液化(土 層)
19	山岳隧道工程 技術準則及解 說	工程會	2003	洞門
20	公路隧道設計 規範	交通部	2003	一般岩盤不考量，惟必要時得視地形、地質及 覆蓋深度等條件考量
21	大陸川藏公路 隧道抗震設計		2002	洞門、淺覆蓋及偏壓段、活動斷層
22	大陸鐵路工程 設計技術手冊 —隧道		1995	洞門、洞口、淺覆蓋及偏壓段(設計震度 7(0.1g) 、8(0.2g) 、9(0.4g)時考量)

## 附錄 B 審查意見與處理情況

項次	審查意見	處理情況
1	相關參考文獻如有電子檔部分，請於成果報告光碟中一併提供。	已依委員意見修訂，相關文獻資料電子檔於期末報告定稿時一併寄送。
2	中、英文摘要多為工作項目描述，請補充簡要計畫成果，以完整呈現計畫概況。	已依委員意見修訂，將計畫成果於中、英摘要補述。
3	「潛在場址」為低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例中定義之專有名詞，本報告中假想案例並非完全符合本名詞定義，應避免使用法律上已有定義之名詞，請全數修正為「可能場址」。	感謝審查委員意見，已將報告內中相關文字修訂為「可能場址」。
4	第 7 頁圖 2.1-2，SFR 地下空間立體視圖漏未提及 BTF，請補充。	依審查意見完成修正。
5	表 3.3-3 中，DIBIT 系統之檢測速度相較於其他方法似乎過度緩慢，請確認是否正確。	<ul style="list-style-type: none"> <li>文獻出處所列檢測速度為 0.01~0.1 m/hr。</li> <li>另查詢其它相關文件，相同的掃描系統(DIBIT)其掃描速度為 100 m/hr，此數值應屬合理。</li> </ul>
6	4.2.2 金門地質條件說明，係根據中央地質調查所提出之金門區域地質研究成果，經查地調所於 2011 年出版金門地質圖幅及說明書(2011，林蔚)，建議相關說明與附圖(4.2-2)採上述之資料。	依審查意見，將相關內文說明依金門地質圖幅及說明書(2011，林蔚)於以補充。
7	第 69 頁內文及表 4.4-1 安朔隧道之斷層破碎帶里程與表 4.3-1 不一致，請確認後更正。另節理位態及劈理位態如角度單位為度，上標請勿省略。C1 之斜線符號誤植，請更正。	依審查意見完成修正(1)內文與表列內容不一致與(2)角度單位及(3)斜線符號等處。
8	第 72 頁內文中之災變類型請與表 4.3-2 一致。	依審查意見完成修正。
9	第 81 頁倒數第 2 行語焉不詳，請修正。	感謝審查委員意見，已修訂如下： (v)現地應力空間分佈； (vi)聯絡坑道及處置坑道空間配置之關係；
10	第 82 頁第 7 行，請確認此處之坑道是否應為具有襯砌之坑道。	感謝委員建議，已將「(1)岩盤之穩定性監測」相關內容調整至 5.1 「無襯砌坑道」之結構穩定驗證方法。

11	<p>第 83 頁表 5.2-1(a)，請確認建造階段「仰拱隆起」及「中心線量測地中變位量測」之技術或儀器為何，若無亦請註明。另請確認運轉階段「開挖面觀察」之技術或儀器是否漏列收斂計。</p>	<p>感謝委員建議，已修訂如下：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 建造階段「仰拱隆起」及「中心線量測地中變位量測」之技術或儀器為何，已加列收斂岩釘、伸縮儀、沉陷觀測釘等。</li> <li>• 運轉階段「開挖面觀察」之技術或儀器已增列收斂計。</li> </ul>
12	<p>表 6.2-1 標題及第 88 頁倒數第 3 行，「低放審查導則」之簡稱無法看出本導則係用於低放最終處置之審查，請修正為「低放處置審查導則」。目錄亦請一併修正。</p>	<p>依審查意見完成修正。</p>
13	<ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 「坐標」一詞已為現行法定名詞，請修正全報告中之「座標」為「坐標」。</li> <li>(2) 報告中多處出現「、及」、「、與」等符號誤用，請修正。</li> <li>(3) 全報告中，「銹染」請一致修正為「鏽染」。</li> <li>(4) 表目錄中，「MOHR-COULOMB」之大小寫請與內文中表 2.1-5 標題一致。</li> <li>(5) 表目錄漏列表 4.3-1 及表 4.3-2，請補列。</li> <li>(6) 表目錄中，表 5.2-1(A)及表 5.2-1(B)之大小寫請與內文相關表格之標題一致。</li> <li>(7) 圖目錄中，「SCHMIDT」之大小寫請與內文中圖 2.1-8 標題一致。</li> <li>(8) 圖目錄中，「CASE」之大小寫請與內文中圖 2.3-4、圖 2.3-5 及圖 2.3-6 標題一致。</li> <li>(9) 圖目錄中，漏列圖 3.1-1 及圖 4.1-1，請補列。</li> <li>(10) 第 1 頁第 5 行，請修正「人工障壁」為「工程障壁」。</li> <li>(11) 第 5 頁倒數第 1 及 2 行，請修正兩處之「結論」為「結論與建議」。</li> <li>(12) 第二章之章名有誤，應修正為「國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法」。目錄、頁尾、1.5 節及 7.1 節等處亦請一併修正。</li> <li>(13) 第 6 頁 7 行，請修正「跨度」為「尺度」。</li> <li>(14) 第 7 頁第 1 行，請修正「形狀與尺寸」為「形狀及尺寸」。</li> </ol>	<p>感謝委員建議，已依審查意見完成修正。</p>


	<p>(15) 第 8 頁最末行，請修正「拱頂」為「頂拱」。</p> <p>(16) 第 21 頁第 1 行，請修正「模型形」為「模型」。</p> <p>(17) 第 9 頁圖 2.1-4，請修正「…尺寸及廢棄物…」為「…尺寸、廢棄物…」、請修正「(3)」為「(c)」。</p> <p>(18) 第 10 頁第 4 行，請修正「(Granitoid)」為「(Granitoid)」。</p> <p>倒數第 4 行，請修正「處置坑」為「處置坑道」。</p> <p>(19) 第 14 頁倒數第 5 行，請修正「隨者」為「隨著」。</p> <p>(20) 第 17 頁內文中，請修正「表 2.1-11」為「表 2.1-9」。</p> <p>(21) 第 20 頁圖 2.2-4，請修正「較長軸」為「長軸」。</p> <p>(22) 第 26 頁第 12 行，請修正「…滑動時…」為「…滑動…」。</p> <p>倒數第 7 行，請修正「想定」為「假想」。</p> <p>倒數第 5 行，請修正「圖 2.3-5」為「圖 2.3-6」。</p> <p>(23) 第 35 頁第 3 行，請修正「…岩性與地質…」為「…岩性及地質…」。</p> <p>第 6 行，請修正「物料管理局」為「放射性物料管理局」。</p> <p>第 7 行，請修正「服務」為「發展」。</p> <p>第 9 行，請修正「所產的」為「所產生的」。</p> <p>(24) 第 35 頁最末行及第 37 頁，請修正「圖 3.3-1」為「圖 3.1-1」。</p> <p>(25) 第 38 頁第 9 行，請修正「區分物理風化與化學風化」為「區分為物理性風化與化學性風化」。</p> <p>表 3.1-2，W1 之描述欄，請修正「以受」為「已受」；W5 風化程度欄，請修正「殘於土壤」為「殘餘土壤」。</p> <p>(26) 第 39 頁第 5 行，請修正「又可稱」為「又稱」。</p> <p>倒數第 10 行，請修正「依時變特性」為「依時變形特性」。</p> <p>最末行，請修正「…不連續變形分析法…」為「…、不連續變形分析法…」。</p> <p>(27) 第 40 頁第 4 行，請修正「theo」為「theory」。</p> <p>第 11 至 12 行，「高壓混凝土結構分析」前方請補上「以及」二字、「核廢料」請修正為「放射性廢棄物」、「掩埋隧道」請修正為「處置坑道」、「受高壓混凝土結構」為「受高壓之混凝土結構」。</p> <p>倒數第 3 行，請修正「構建」為「構件」。</p>	
--	---	--

	<p>(28) 第 42 頁第 4 行，請修正「公司所旗下」為「公司旗下」。</p> <p>(29) 第 43 頁第 5 行，請修正「圖 3.2-2a」為「圖 3.2-2(a)」。</p> <p>第 9 行，請修正「圖 3.2-2b」為「圖 3.2-2(b)」。</p> <p>(30) 第 44 頁第 3 行，請修正「是否異常龜裂」為「是否有異常龜裂」。第 4 行，請修正「腐蝕現象」為「腐蝕等現象」、請修正「疑惑」為「疑慮」。</p> <p>倒數第 9 行，請修正「壁面」為「壁面」。</p> <p>(31) 第 49 頁介觀尺度之英譯有誤，請修正。</p> <p>(32) 第 50 頁第 3 行，請修正「fadar」為「radar」。</p> <p>(33) 第 52 頁倒數第 12 行，請修正「超波」為「超音波」。倒數第 10 行，請修正「檢測」為「瑕疵」。</p> <p>(34) 第 52 頁「Couplant」之中文名稱為「藕合劑」，請修正。</p> <p>(35) 第 53 頁句末請加上句號。</p> <p>(36) 第三章「物理波動檢測之類型」應為 3.3.4 節，「其他檢測類型」應為 3.3.5 節，節次有誤，請修正。目錄亦請一併修正。</p> <p>(37) 第 55 頁第 3 行，請修正「可區分三大類」為「可區分為三大類」。倒數第 7 行，請修正「特徵」為「特性」、請修正「第三章」為「第二章」。</p> <p>(38) 第 56 頁第 7 行，請修正「比例也最高」為「比例最高」。</p> <p>(39) 第 57 頁第 6 行，請修正「據襯砌」為「具襯砌」。</p> <p>(40) 第 60 頁倒數第 4 行，請修正「瞭解」為「瞭解」。</p> <p>倒數第 2 行，請修正「施做」為「施作」。</p> <p>(41) 第 61 頁最末行，請修正「植披」為「植被」、請修正「圖 4.2-6」為「圖 4.2-6」。</p> <p>(42) 第 69 頁倒數第 8 行，請修正「二岩段」為「第二岩段」。倒數第 6 行，請修正「後塊狀」為「厚塊狀」。</p> <p>(43) 第 72 頁第 2 行，請修正「南迴鐵路-工程輯要」為「南迴鐵路工程-工程輯要」。</p> <p>(44) 第 73 頁第 3 行，請修正「結國祥如」為「結果詳如」。表 4.3-3 標題，請修正「…安朔隧道營運期</p>	
--	---	--

	<p>間檢測項目…」為「…安朔隧道檢測項目…」。</p> <p>表目錄亦請一併修正。表 4.3-3 倒數第 5 行，請修正「組述」為「組數」。</p> <p>(45) 第 74 頁第 8 行，請修正「自力性」為「自立性」。倒數第 8 行，請修正「定期的與維護」為「定期的維護」。倒數第 4 行，請修正「鋼支堡」為「鋼支保」。</p> <p>(46) 第 76 頁表 4.4-1 標題，請修正「假設案例」為「假想案例」。表目錄亦請一併修正。請修正所有「路上」為「陸上」。第 7 行，請修正「岩入侵」為「岩脈入侵」。</p> <p>(47) 第 82 頁第 5 行及第 92 頁倒數第 12 行，請修正「運轉期間」為「運轉階段」。</p> <p>(48) 第 82 頁第 7 行，請修正「施做」為「施作」。</p> <p>(49) 第 85 頁第 2 行，請修正「…地質條件與岩石力學…」為「…地質條件及岩石力學…」。第 9 行，請修正「地質資料蒐集與分析」為「資料蒐集與分析」。第 11 行，請修正「…分佈統計…」為「…分佈與統計…」。</p> <p>(50) 第 86 頁表 5.3-1，場址條件欄請修正「摺皺」為「褶皺」、「地下水分文資料」為「地下水文資料」。1B 末尾請補上「蒐集」二字。試驗項目欄請修正「岩石靜彈模數試驗」為「岩石靜性彈模數試驗」。</p> <p>(51) 第六章頁尾誤植為第七章，請更正。</p> <p>(52) 第 87 頁第 7 行，請修正「區分」為「區分為」。</p> <p>(53) 第 88 頁表 6.1-1，請修正「依時性變形特性」為「依時變形特性」。倒數第 4 行，請修正「屏障」為「障壁」。最末行，請刪除「評估與驗證」等字。</p> <p>(54) 第 89 頁第 5 行及第 93 頁倒數第 6 行，請修正「表度 6.2-2」為「表 6.2-2」。</p> <p>(55) 第 90 至 91 頁表 6.2-2，請修正「因子」為「章節」。</p> <p>(56) 第 90 頁第四章 106 年提供要項部分，「坑道結構穩定性…據以」等字應為藍字。第五章 106 年提供要項部分，「與大地工程特性參數」等字應為黑字。</p>	
--	--	--

<p>(57) 第 91 頁第五章 106 年審查作業部分，「是否」、「根據「場址特性描述」、「造成」及「評估」等字應為藍字。第六章 106 年提供要項部分最末行，請在技術後方補上「頻率」。審查作業部分，請修正「施測頻率」為「檢測頻率」、請修正「組人成人員」為「組人成人員」。第七章 106 年審查作業部分倒數第 2 行，請修正「檢監測」為「檢監測之」。</p> <p>(58) 第 93 頁第 3 行，請修正「各章」為「各項」。</p> <p>(59) 參考文獻〔49〕、〔50〕、〔52〕至〔54〕，請修正「核能研究所」為「放射性物料管理局」。</p> <p>(60) 附錄 6 規範內容(9)，請修正「換器」為「換氣」。</p> <p>(61) 附錄 9 出版者/作者請用全稱，以維持一致性。</p> <p>(62) 附錄 20 規範內容，請修正「、」為「、」。</p>	
--	--

## 附錄 C 期末簡報



行政院原子能委員會  
放射性物料管理局

行政院原子能委員會  
放射性物料管理局

低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性  
驗證方法研究


---

期末審查簡報

淡江大學 楊長義  
國防大學理工學院 李宏輝  
金門大學 許宗傑

社團法人中華民國大地工程學會

中華民國106年12月19日



### 簡報綱要

---

- 壹、計畫目的
- 貳、工作內容與期程規劃
- 參、成果報告章節 vs. 完成的工作項目
- 肆、執行成果說明

2



## 壹、計畫目的

- I. 針對低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性之驗證方法進行國際資訊蒐整與研析。
- II. 針對可能影響坑道結構穩定性之影響因子進行討論，及研析相關的數值分析、試驗與檢測等驗證方法。
- III. 根據我國低放射性廢棄物潛在場址，對鄰近既有的坑道現況進行地質、建造歷史與現況之資料蒐集與調查，建立坑道處置結構穩定性審查假想案例。
- IV. 建立我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術。

3

## 貳、工作內容與期程規劃

工作內容	106年											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
子項計畫三-低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法研究			※			※			※			※
國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法資訊蒐集與研析												
國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法												
建立坑道處置結構穩定性審查假想案例												
提出我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術												
提出我國低放處置技術之處置坑道結構穩定性模式驗證												
成果報告撰寫												
工作進度估計百分比 (累積數)	0%	10%	15%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%

4

## 參、成果報告章節 vs. 完成的工作項目

**Ch2 國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法**

- 本章節整理瑞典SFR處置場針對1BMA與1BLA處置室，採數值方法進行之長期穩定性分析，內容含位址介紹、地質條件、裂隙調查及數值模型建構、及其分析過程與結果。

**Ch3 國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法**

- 透過國內一般坑道其在設計、運轉與運轉期間之相關技術報告蒐整研析，釐清影響坑道結構穩定性之關鍵因子，與符合國內地質與環境條件所採取的驗證方法。

**Ch4 建立坑道處置結構穩定性審查假想案例**

- 以①台灣本島(有襯砌結構)或②外島(無襯砌結構)既有坑道為假想案例，蒐集坑道結構在運轉期間可能產生之裂縫、滲漏水與剝離等異狀，並針對其可能的釐因與驗證方法進行討論。

**Ch5 我國低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法之審技術**

- 綜整前述成果，依我國低放射性廢棄物可能場址與處置坑道型式，整理出處置坑道結構在運轉期間可能產生之異狀及坑道結構穩定性之驗證方法。

**Ch6 我國低放處置技術之坑道結構穩定性模式驗證重點**

- 綜整前述資料及國內外採擷的關鍵參數，①提出符合我國地質與環境條件之低放處置坑道結構穩定性模式驗證重點，並依「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查準則(第0版)」與本研究有關之章節進行研析與討論，提出②低放處置審查準則(第0版)相關條文修訂建議。

5

## I. 國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法資訊蒐集與研析(1/2)

肆、執行成果說明(01/10)

Long term stability of rock covers BMA and BLA of SFR, Forsmark (SKB, 2014)

Layout of the SFR-1

SFR-1 之處置室與埋地坑道佈置圖

**Numerical model**

- 數量模型尺寸 (200 x 100 x 100 m)
- 考慮岩層各向異性
- 為數值模型可知，採對稱之三維全場
- 數值模型，在模型中儲存於 180A 與 181A 處置室

**Material properties-Fracture**

Critical peak shear strength criterion (Barton and Choubey, 1977)

$$\tau_c = \sigma_n \left[ \tan \phi_0 + \frac{1 - \sin \phi_0}{2} \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_{cm}} \right)^a \right]$$

- JRC (粗糙度係數) 與 JCS (原岩峰值強度) 與岩質對於裂隙產生內應力，建議選擇岩質裂隙率與裂隙長度範圍每 200 mm 之範圍為  $a > JRC_{200}$  and  $JCS_{200}$
- 若裂隙為深埋條件，則建議基本裂隙角  $\phi_0$  取岩 裂隙摩擦角  $\phi_0$

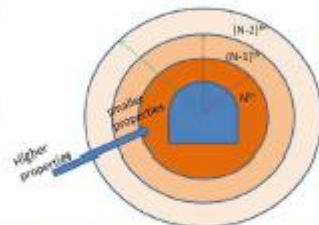
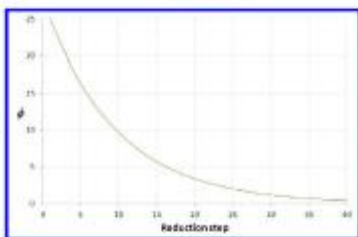
岩質 180A 與 181A 之裂隙參數				岩質 180B 與 180C 之裂隙參數			
Material	Fracture	Mean	Standard Deviation	Material	Fracture	Mean	Standard Deviation
180A/181A	1	0.1	0.1	180B/180C	1	0.1	0.1
180A/181A	2	0.1	0.1	180B/180C	2	0.1	0.1
180A/181A	3	0.1	0.1	180B/180C	3	0.1	0.1
180A/181A	4	0.1	0.1	180B/180C	4	0.1	0.1
180A/181A	5	0.1	0.1	180B/180C	5	0.1	0.1
180A/181A	6	0.1	0.1	180B/180C	6	0.1	0.1
180A/181A	7	0.1	0.1	180B/180C	7	0.1	0.1
180A/181A	8	0.1	0.1	180B/180C	8	0.1	0.1
180A/181A	9	0.1	0.1	180B/180C	9	0.1	0.1
180A/181A	10	0.1	0.1	180B/180C	10	0.1	0.1

6

肆、執行成果說明(02/10)

### I. 國外低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法資訊蒐集與研析(2/2)

- 材料劣化之模擬，係假設劣化僅發生在裂隙，完整岩石的力學特性不變。
- 劣化影響範圍：係自鄰近處置室周圍之岩體，隨折減步數(reduction step)  $n$  的增加往外延伸。  
 $r_{red,n} = r_i + n \cdot \delta r$   
 $r_i$ : 處置室半徑,  $\delta r$ : 0.5 m
- 裂隙剪力強度折減:  
 $\tau_c = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi \cdot r_{\phi,n})$   
 $r_{\phi,n} = n - \alpha$   
 $r_{\phi,n} = a^{n-\alpha}$ ,  $\alpha = 0.9$   
 $\tau_c$ 、 $r_{c,n}$  與  $r_{\phi,n}$  分別為  $n$  次折減後之剪力強度、凝聚力與摩擦角折減係數,  $\alpha$  為折減因子; 凝聚力在第一次的折減步次運算後其值為零。
- 裂隙勁度折減:  
 $K_{N,n} = K_N \cdot r_{\phi,n}$   
 $K_{T,n} = K_T \cdot r_{\phi,n}$

劣化影響範圍與摩擦角遞減狀況(SK B, 2014)

肆、執行成果說明(03/10)

### II. 國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法(1/2)

處置坑道結構長期穩定之驗證項目(羅長義與李宇輝, 2014) 隧道與非破壞性檢測技術之比較(段海自量博, 2005)

處置坑道結構長期穩定之驗證項目	驗證其他坑道結構之異狀		驗證項目		
	驗證項目	驗證方法	驗證項目	驗證方法	
1. 外力因素	地質因素	1. 地質調查與地質圖 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	1. 地質調查 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖
	地質因素	1. 地質調查與地質圖 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	1. 地質調查 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖
	地質因素	1. 地質調查與地質圖 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	1. 地質調查 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖
2. 環境因素	地質因素	1. 地質調查與地質圖 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	1. 地質調查 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖
	地質因素	1. 地質調查與地質圖 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	1. 地質調查 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖
	地質因素	1. 地質調查與地質圖 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	1. 地質調查 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖
3. 非力學因素	地質因素	1. 地質調查與地質圖 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	1. 地質調查 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖
	地質因素	1. 地質調查與地質圖 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	1. 地質調查 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖
	地質因素	1. 地質調查與地質圖 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	1. 地質調查 2. 地質剖面圖 3. 地質剖面圖 4. 地質剖面圖 5. 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖	地質調查 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖 地質剖面圖

## II. 國內一般坑道結構穩定性之關鍵因子與驗證方法(2/2)

肆、執行成果說明(06/10)

### 「無襯砌坑道」之結構穩定驗證方法

	Massive (RFR < 75)	Moderately Fractured (75 < RFR < 700)	Highly Fractured (1000 < RFR)	
Low to Slightly Stress (0.1, 0.2, 0.3)	 Linear cracks in situ.	 Fading or widening of blocks and bridges.	 Spalling of blocks from the surrounding rock.	0.007 RFR < 10
Intermediate to Slightly Stress (0.15 to 0.7, 0.15 to 0.4)	 Bolted holes adjacent to fracture locations.	 Localized brittle failure of rock and movement of blocks.	 Localized brittle failure of rock and movement of blocks.	0.007 RFR < 10
High to Slightly Stress (0.7, 0.15 to 0.4)	 Failure along the fracture.	 Bolted holes of impact rock around the excavation and movement of blocks.	 Spalling and wedging of blocks.	0.007 RFR < 10

無襯砌坑道之穩定性與破壞模式(Hoek et al., 1980)

金門無支撐地下坑道頂拱之地震光檢掃描面分析結果  
(李俊強等人, 2012)

## III. 建立坑道處置結構穩定性審查假想案例(1/2)

肆、執行成果說明(04/10)

**1. 坑道結構缺陷之真象與判斷**  
 坑道結構缺陷之真象與判斷之第一性，如何從表面觀察到內部之真象，再經斷面地質調查，於斷面地質調查之基礎上，再將地質調查方法與較好的地質調查資料，以地質調查斷面之真象與判斷。

**2. 地下水對坑道岩盤及襯砌的影響**  
 國內外坑道岩盤與襯砌比較，國內坑道岩盤與襯砌，如：D&S (VLA) (VLA) 與 VLA 岩盤，其地下水係由地質調查，其在2009年仍用 2.5 L/min 的流速(高於 20 L/min)，同樣岩盤係由地下水湧入造成岩盤的河成性岩盤與襯砌與岩盤之襯砌水化作用。

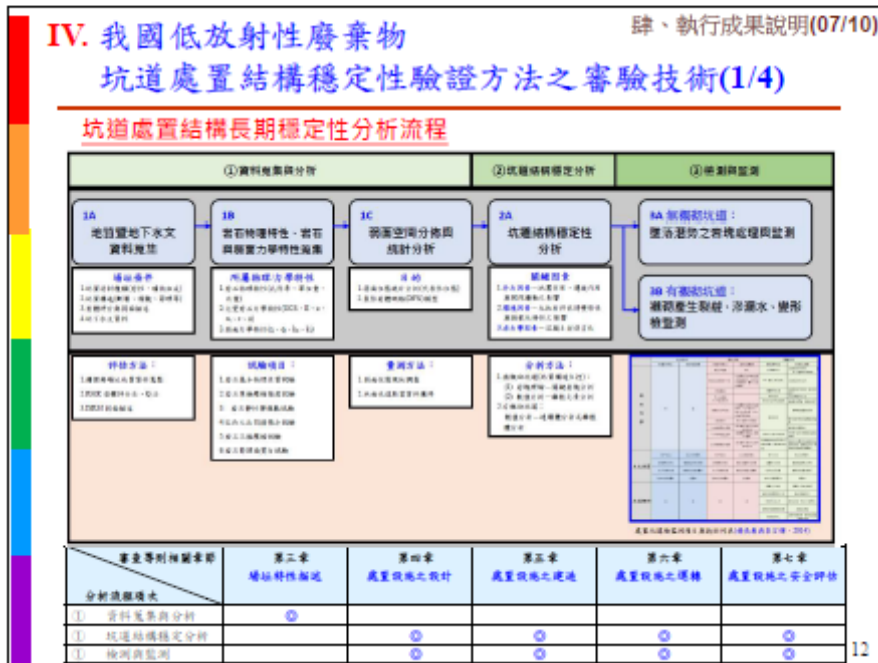
主要管理參考之法，管理由地質調查之真象與判斷：  
 Inlet out 1 : N30 E 588°  
 Inlet out 2 : N90 W 585°  
 Inlet out 3 : N90 E 523°

肆、執行成果說明(05/10)

### III. 建立坑道處置結構穩定性審查假想案例(2/2)

	羅山坑道	台鐵南迴線安南隧道
地點	金門縣古崗村	台東縣達仁鄉
完工日/目前運轉	民國53年/53年	民國80年/26年
地質條件	1. 岩性：花崗片麻岩與花崗岩 2. 構造：岩體有偉晶岩脈與基性岩入侵有兩組剪裂節理、一組解理節理	1. 岩性：硬頁岩為主，硬頁岩及變質砂岩互層次之 2. 構造：CSIR岩體分類為第III至V類，36K+719 - 36K+672.4處為斷層破碎帶，主要不連續面為劈理與節理
坑道屬性	軍事隧道(視為觀光用)	交通隧道
斷面尺寸	1. 路上坑道段：寬約6 m，高約3.5 m 2. 水邊段：寬約11.5 m，高約8 m	寬7.8 m，高7.3 m
長度	5,481 m	1. 路上坑道段：101 m 2. 水邊段：357 m
襯砌	無	有
開挖方式	鑽炸法	明挖覆蓋工法、美國鋼支撐支撐工法(傳統工法)及新工法
坑道結構異狀(運轉期間)	1. 陸地洞口段：岩體風化、地表水入滲、落石。 2. 路上坑道段：坑道側壁與頂拱有局部鬆動岩塊引致落石。 3. 水邊段：坑道側壁與頂拱有局部鬆動岩塊引致落石；基性岩脈因地下水入滲引致風化速度加劇，造成坑道滲水。 4. 近海洞口段：錯節風化嚴重、地表水入滲。	1. 襯砌裂縫、滲水、剝落。(裂縫深度的為襯砌設計厚度之34~43%) 2. 部分區段襯砌會後磁裂，襯砌厚度不一 3. 襯砌混凝土中性化(厚度的3cm) [註：襯砌設計厚度65cm]

11



IV. 我國低放射性廢棄物 坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(2/4)		肆、執行成果說明(08/10)	
坑道結構穩定性影響項目、肇因與審驗重點			
處置坑道結構長期穩定影響項目與肇因	坑道處置結構長期穩定審驗重點 (本計畫建議)		備註 (相關規範)
外力因素	地震作用	(1) 選定之大地材料參數與坑道尺寸是否正確？ (2) 採用之分析方法是否適切？是否足以反映坑道結構受震行為？ (3) 是否依據「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」(第0版)第三章之場址特性描述，提出合理的設計基準地震？	台北捷運系統工程土木工程設計手冊(針對土層隧道)
	邊坡運動	(1) 選定之大地材料參數與坑道尺寸是否正確？ (2) 採用之分析方法是否適切？是否足以反映坑道洞口段可能受到邊坡運動之影響？	公共工程地工綱要規範
	開挖擾動	(1) 選定之大地材料參數與坑道尺寸是否正確？ (2) 採用之開挖工法對圍岩擾動的影響評估是否合理？ (3) 採用之分析方法是否適切？是否足以反映坑道圍岩因開挖擾動引致之範圍與鬆動土質之影響？	公共工程地工綱要規範 隧道施工技術規範 地工說明書 技術規定 山岳隧道之施工

13

IV. 我國低放射性廢棄物 坑道處置結構穩定性驗證方法之審驗技術(3/4)		肆、執行成果說明(09/10)	
坑道結構穩定性影響項目、肇因與審驗重點			
處置坑道結構長期穩定影響項目與肇因	坑道處置結構長期穩定審驗重點 (本計畫建議)		備註 (相關規範)
環境因素	風化作用引致岩石強度弱軟化	(1) 選定之大地材料參數與坑道尺寸是否正確？ (2) 採用之分析方法與材料組成模式是否適切？是否足以反映坑道圍岩強度弱軟化之影響？	無
	依時性變形特性	(1) 選定之大地材料參數與坑道尺寸是否正確？ (2) 採用之分析方法與材料組成模式是否適切？ (3) 是否足以反映坑道圍岩依時變形特性之影響？	無
非力學因素	混凝土中性化	(1) 選定之檢測方法是否適切？	舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(I)(II) 隧道非破壞性檢測技術之開發總結報告書
	鋼筋保護層厚度不足	(2) 施測或取樣位置是否合宜？	
	輸送材料反應	(3) 樣本數是否具代表性？	
	混凝土流置中斷(冷縫)		
	襯砌背後空洞或厚度不足		

14

