



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

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

期末報告

計畫編號：103FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫五主持人：楊長義、李宏輝

受委託機關(構)：國立中央大學

報告日期：中華民國 103 年 12 月 18 日

---

---

## 摘要

我國放射性廢棄物處置場目前正積極進行選址規劃作業，除建造前的場址調查、規劃設計與施工外，運轉期間處置坑道的結構安全與長期穩定性之確保、必要的檢監測項目之設置、與藉由檢監測成果以獲得封閉後安全評估所需的參數，均為放射性廢棄物最終處置技術刻不容緩探討的關鍵課題。處置坑道結構長期穩定之保持，將可提供在廢料桶存放混凝土結構體外的多一道防護，以降低放射源之外釋風險。然因，國內地質年代較年輕，圍岩所能提供的屏障效果不若國外廢棄物處置先進國家地質條件之優勢，為確保處置坑道長期穩定之需求，本研究蒐集國內外具代表性的處置坑道與一般坑道案例，統整其所設置的檢監測項目及目的，並蒐集具代表性的坑道襯砌異狀，探討襯砌異狀之肇因及其影響因素，進一步研析襯砌異狀與坑道結構長期穩定性之關聯。基於處置坑道的觀點上，以建議適合本土地質條件所應有的檢監測項目、方法與技術，並提供擬訂處置坑道在建造期與運轉期間檢監測計畫之參考。

**關鍵詞：**低放射性廢棄物處置場，處置坑道，長期穩定，檢測與監測

---

---

## Abstract

The planning of low-level waste final repository is now actively promoted in Taiwan. To ensure the long-term structure stability of deposition tunnels, the key factors are the site investigation and design before construction, the inspections and monitoring the response of tunnel structures under operation period. The actual behaviors of tunnels can get by the monitoring system during tunnel construction and operation periods. This information will improve the assessment of long-term stability of repository.

This research aims to learn the experiences of tunnel's inspections and measurements from the abroad LLW/ILW waste final repository. We focus on the experiences of the purposes, items and technologies of inspections and measurements for long-term stability. The measurement results and monitoring system adopted in these typical LLW/ILW repositories are studied. The special geological conditions of tunnel measurements in Taiwan are also considered. Finally, the recommendations are proposed to supplement the Guidelines on Safety Assessment of Low-Level Waste Disposal Repository.

**Keywords: LLW final depository, deposition tunnel, long-term stability, inspections and measurements**

## 目 錄

摘要	.....	I
目錄	.....	III
表目錄	.....	VI
圖目錄	.....	VIII
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	國內外有關本計畫之執行情況.....	1
1.4	工作項目、進度與研究流程.....	2
1.5	已蒐集之重要文獻.....	4
第二章	處置坑道監測之重要性與設計流程.....	9
2.1	處置坑道監測的重要性.....	9
2.2	監測工作的界定.....	9
2.3	監測計畫設計流程.....	12
2.4	相關的監測參數與對應的量測方法.....	16
2.5	與監測工作有關的專業領域 - 以 Olkiluoto 為例.....	17
2.6	綜合整理.....	19
第三章	國內外隧道及處置坑道檢測與監測案例蒐集.....	20
3.1	國外坑道處置案例.....	20
3.1.1	瑞典SFR-1處置設施.....	20
3.1.2	芬蘭Olkiluoto VLJ處置設施.....	31
3.1.3	芬蘭LOVIISA VLJ處置設施.....	39
3.1.4	小結.....	42
3.2	國內一般坑道經驗.....	44
3.2.1	安朔隧道檢測案例.....	44
3.2.2	營運中隧道之監測-以雪山隧道為例.....	55
3.2.3	小結.....	58
3.3	國外處置坑道監測與國內隧道檢監測經驗之項目比較.....	59
第四章	處置坑道結構安全與長期穩定之強化需求分析.....	61
4.1.	坑道襯砌異狀分類與肇因.....	61
4.1.1	坑道襯砌異狀分類.....	61
4.1.2	坑道襯砌異狀肇因.....	61
4.1.3	國內本土坑道襯砌異狀現象與國外之差異.....	65

4.2	處置坑道結構長期穩定特性之影響項目	67
4.2.1	外力因素	67
4.2.2	環境因素	72
4.3	處置坑道結構長期穩定安全之檢監測流程與項目	76
4.3.1	處置坑道結構長期穩定安全之檢監測流程	76
4.3.2	處置坑道結構長期穩定之檢監測項目	77
第五章	處置坑道施工期檢測及運轉期監測要項研析	81
5.1	一般隧道施工期的檢監測規範與內容	81
5.1.1	隧道監測之目的與功能	81
5.1.2	監測項目及配置	82
5.1.3	目視觀察	83
5.1.4	淨空變位與頂拱下陷	83
5.1.5	地表及地中沉陷	84
5.1.6	仰拱隆起及中心線量測	85
5.1.7	地中變位、鋼支保應力、岩栓軸力及襯砌應力	85
5.1.8	監測儀器之選用	86
5.1.9	監測頻率與初始值紀錄	86
5.1.10	監測資訊之處理	87
5.2	一般隧道運轉期的檢監測規範與內容	88
5.2.1	國內外隧道安全檢測現況	88
5.2.2	隧道檢測技術與檢測對象	88
5.3	監測技術近期發展與應用	92
5.3.1	微變形監測技術	92
5.3.2	襯砌受力與變形監測新技術	99
5.4	處置坑道施工期及運轉期檢監測要項研析	101
5.4.1	處置坑道施工期檢監測要項研析	101
5.4.2	處置坑道運轉期檢監測要項研析	101
第六章	處置坑道之檢監測計畫導則草案研析	105
6.1	處置坑道檢監測計畫通則	105
6.2	監測計畫內容	106
第七章	低放處置審查導則(第0版)處置坑道相關章節與條文內容之修訂建議	109
7.1	低放處置審查導則(第0版)與處置坑道檢監測有關之章節研析	109
7.2	低放處置審查導則(第0版)相關條文之修訂建議	110
第八章	結論與建議	112
8.1	結論	112

---

---

8.2 建議.....	113
參考文獻 .....	115
附錄A .....	119
附錄B .....	123
附錄C .....	126

## 表目錄

表1.4-1	研究內容與進度表	5
表2.2-1	日本原子力環境整備促進・資金管理中心(RWMC)對地質處置場址相關監測目標與描述	11
表2.4-1	監測參數與對應的量測方法	16
表2.5-1	物理及水文地質的各種過程及其與「場址的瞭解」與「處置場性能表現」有關聯性的各項影響因子	18
表3.1-1	SFR-1處置場岩體力學特性評估值	27
表3.1-2	岩體導水特性與岩體厚度	30
表3.1-3	Olkiluoto VLJ處置場址與岩石力學有關的監測項目及監測頻率	34
表3.1-4	Olkiluoto VLJ處置場址在岩石力學與水文地質的監測項目與頻率	34
表3.1-5	Olkiluoto VLJ處置場內採用的量測方法與紀錄參數	36
表3.1-6	Loviisa VLJ處置場址監測計畫	40
表3.1-7	國外處置坑道監測項目、儀器與位置彙整	43
表3.2-1	安朔隧道地質條件總表	48
表3.2-2	透地雷達劣化影像說明表	51
表3.2-3	透地雷達施測成果-背後空洞調查	51
表3.2-4	透地雷達施測成果-裂縫寬度與深度調查	52
表3.2-5	安朔隧道於施工階段災變位置及其原因	55
表3.2-6	雪山隧道長期監測工作項目與頻率彙整表	57
表3.2-7	國內營運中隧道之檢監測項目	58
表3.3-1	國外處置坑道監測與國內隧道檢監測經驗之項目比較	60
表4.1-1	襯砌異狀影響因素分類	63
表4.1-2	外力因素及其代表性襯砌異狀	63
表4.1-3	山岳隧道襯砌異狀案例之裂縫型態彙整表	65
表4.2-1	ISRM 岩石風化度分類表	73
表4.2-2	南橫岩石風化速率指數(WRI)排序	74
表4.3-1	處置坑道襯砌結構長期穩定之檢測項目	77
表4.3-2	外力變化引致之隧道異狀原因及其維修與補強工法	79
表5.1-1	隧道洞內監測項目	82
表5.1-2	隧道洞外之監測項目	83
表5.1-3	淨空變位與頂拱下陷監測之測線數配置方式	83
表5.1-4	淨空變位與頂拱下陷監測斷面之間距要求	84
表5.1-5	地表、地中沉陷監測斷面之間距	84

---

表5.1-6	監測頻率之概略建議基準 .....	86
表5.1-7	內空變位、頂拱下沉之監測頻率 .....	86
表5.2-1	ITA對非破壞性檢測技術應用於隧道安全檢測之檢討 .....	90
表5.3-1	隧道施工安全監測與營運安全檢監測之差異性比較 .....	93
表5.3-2	定義不同尺度量測之比較 .....	98
表5.3-3	首爾地鐵營運階段所裝設的監測儀器及應用 .....	100
表5.4-1	處置坑道檢監測項目與技術列表 .....	103
表7.1-1	審查導則草案有關處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之編修要點建議 .....	110



## 圖目錄

圖1.1-1	捷克Richard處置場運輸通道之鋼筋混凝土二次襯砌結構	6
圖1.1-2	捷克Richard處置場存放室之襯砌支撐結構	6
圖1.4-1	研究計畫流程圖	7
圖1.5-1	已蒐集之重要報告文獻封面	8
圖2.3-1	MoDeRn闡述監測計畫之完整流程	14
圖2.3-2	處置場址生命週期各階段所執行的監測作業	15
圖3.1-1	放射性廢棄物處置場類型	20
圖3.1-2	SFR-1所處地理位置示意圖	21
圖3.1-3	瑞典SFR-1核廢料最終處置場	21
圖3.1-4	SFR-1處置場之處置窖與處置坑道空間配置圖	23
圖3.1-5	BMA中放射性廢棄物處置坑道存放方式及結構	24
圖3.1-6	BLA低放射性廢棄物處置坑道存放方式及結構	24
圖3.1-7	BTF坑道存放方式及結構	24
圖3.1-8	SFR-1處置場採用的廢料儲存方式	25
圖3.1-9	SFR-1處置場BLA處置坑道堆置情況	25
圖3.1-10	SFR-1處置場地質圖	26
圖3.1-11	SFR-1處置場地質破裂帶之空間分布圖	27
圖3.1-12	處置窖所處位置之主要破裂帶分佈與坑道側壁不穩定岩塊之示意圖	28
圖3.1-13	伸張計量測徑向潛變量變化	29
圖3.1-14	1988至2006年期間，SFR 1處置設施之地下水滲流監測紀錄	31
圖3.1-15	Olkiluoto所處區域地理位置	32
圖3.1-16	Olkiluoto VLJ 中低放處置設施	32
圖3.1-17	Olkiluoto VLJ 中低放處置場址針對破裂區的量測	35
圖3.1-18	Olkiluoto VLJ處置場以裂縫計監測特定節理的開裂與閉合量	35
圖3.1-19	Olkiluoto VLJ處置場址在Silo佈設伸張計與收斂計之量測位置	37
圖3.1-20	Olkiluoto VLJ處置場於1989至2009年10年期間處置窖之岩石位移監測變化	37
圖3.1-21	Olkiluoto VLJ處置場址於1989至2009年十年間之地下水滲漏監測	38
圖3.1-22	LOVIISA VLJ處置場的空間配置	39
圖3.1-23	LOVIISA VLJ 低放射性固化廢棄物處置坑道的監測結果	41
圖3.1-24	自1996至2009年間Loviisa VLJ處置場址之地下水滲流監測	42
圖3.2-1	南迴線金崙隧道至安朔隧道地理位置圖	45
圖3.2-2	南迴線金崙隧道至安朔隧道地形圖	46
圖3.2-3	南迴線金崙隧道至安朔隧道區域地質圖	47

圖3.2-4	安朔隧道支撐工法斷面圖	48
圖3.2-5	隧道影像掃描	49
圖3.2-6	隧道影像掃描成果範例	49
圖3.2-7	安朔隧道內襯砌現況及說明	50
圖3.2-8	GPR主機及現場施測照片	51
圖3.2-9	安朔隧道透地雷達施測成果	52
圖3.2-10	安朔隧道史密特錘檢測結果	53
圖3.2-11	鑽心取樣現場作業照片	53
圖3.2-12	安朔隧道內混凝土鑽心抗壓試驗分析圖	54
圖3.2-13	安朔隧道混凝土中性化試驗結果圖	54
圖3.2-14	雪山隧道監測項目	57
圖3.2-15	雪山隧道地下水監測位置圖	58
圖4.1-1	數種典型的目視可識別異狀	62
圖4.1-2	塑性壓、鬆弛土壓與偏壓之裂縫型態	64
圖4.1-3	環境、材料與施工因素之裂縫型態	64
圖4.1-4	國內外266座隧道襯砌異狀種類統計圖	66
圖4.1-5	國內與國外隧道襯砌之異狀種類統計差異比較	66
圖4.2-1	山岳隧道受震損害型態示意圖	68
圖4.2-2	邊坡潛移引致隧道異狀診斷流程圖	69
圖4.2-3	加拿大AECL URL 坑道歷經20年之坑道變形狀況	69
圖4.2-4	加拿大AECL URL 坑道開挖擾動之狀況模擬	70
圖4.2-5	加拿大AECL URL 坑道開挖擾動與破壞機制之關係	70
圖4.2-6	隧道開挖擾動帶之依時擴大變化行為	71
圖4.2-7	碎屑沉積岩力學特性遇水弱化因子分析	74
圖4.2-8	依時變形速率增加後m值與應變率關係	75
圖4.2-9	水災前後之收斂應變速率與岩層特性之關係	76
圖4.3-1	隧道異狀診斷流程	80
圖5.1-1	國內既有隧道檢監測規範	81
圖5.1-2	淨空變位與頂拱下陷監測之測線配置例	84
圖5.1-3	地表沉陷與地中變位監測之測點配置範例	85
圖5.1-4	地中變位、鋼支保應力、岩栓軸力及襯砌應力測點配置範例	85
圖5.1-5	監測資訊之處理	87
圖5.2-1	隧道檢測的四類對象	91
圖5.2-2	目視檢測襯砌展開圖之記錄範例	91
圖5.2-3	襯砌表面掃描成果例	92

---

圖5.3-1	隧道位移與其組成的分量 .....	93
圖5.3-2	同一隧道橫斷面在前後兩次量測結果之差異 .....	94
圖5.3-3	襯砌變形分離示意圖 .....	94
圖5.3-4	近域外力引致之襯砌剖面變形特徵曲線 .....	95
圖5.3-5	遠域外力引致之襯砌剖面變形特徵曲線 .....	95
圖5.3-6	襯砌微變監測技術作業架構 .....	96
圖5.3-7	案例隧道襯砌表面3D絕對座標測量結果 .....	96
圖5.3-8	案例隧道在距西洞口約69 m剖面之全斷面測量結果 .....	97
圖5.3-9	案例隧道距在西洞口69 m剖面之量測結果 .....	97
圖5.3-10	跨尺度多時序監測整合技術之測量作業架構 .....	99
圖5.3-11	在坑道環片間埋設光纖以感測環片之受力與變形機制 .....	99
圖5.3-12	韓國首爾地鐵考量坑道長期安全所採用的監測設備 .....	100
圖6.2-1	收斂釘與收斂觀測儀 .....	106
圖6.2-2	岩盤變位監測之機械式伸縮儀 .....	107
圖6.2-3	三維變位處理暨應用流程 .....	107
圖6.2-4	隧道工程監測資訊處理與回饋流程 .....	108
圖6.2-5	日本稻里雙線隧道淨空變位管理基準值 .....	108

## 第一章 前言

### 1.1 計畫背景

我國放射性廢棄物處置場目前正積極進行選址規劃作業，除建造前的場址調查、規劃設計與施工外，運轉期間處置坑道的結構安全與長期穩定性之確保，必要的檢測與監測項目之設置、以及藉由檢監測成果獲得封閉後安全評估所需的參數，為放射性廢棄物最終處置技術應刻不容緩深入探討的關鍵課題。我國地下工程數十年來蓬勃發展，技術日趨成熟，然因放射性廢棄物處置設施工程規模龐大，且國內工程地質條件不及國外相關處置技術先進國家的優勢，如何確保處置坑道結構的長期穩定甚為重要。以捷克 Richard 處置場為例，其於1964年將地下深度70至80 m的石灰岩廢棄礦坑改建成中、低放廢棄物處置場，地下坑道空間約16,000 m<sup>3</sup>，為確保坑道結構的安全，其運輸坑道採加強 RC 襯砌設計，如圖 1.1-1 所示，圖 1.1-2 是坑道側室廢料桶存放狀況，此外，廢料桶存放室存滿後將以水泥漿回填封存，並於鄰近區域透過鑽探孔進行水文地質監測。有鑑於我國地質條件與國外迥異，基於處置坑道結構長期穩定之考量，探求因應國內地質環境的處置坑道於運轉期間之檢測、監測項目，以及其所能回饋提供安全評估使用之參數，為處置坑道安全評估分析的關鍵議題。

### 1.2 計畫目的與重要性

本計畫目的在於蒐集國內外具代表性的處置坑道與既有坑道案例，統整其設置的檢測與監測項目及其目的，以及蒐集具代表性的坑道襯砌異狀，探討襯砌異狀肇因及影響因素，進一步研析襯砌異狀與坑道結構安全及長期穩定性之關聯，基於處置坑道的觀點以整理出應有的檢測與監測項目，提供處置坑道運轉期間完整的檢測與監測計畫需求之參考。本計畫重要性評述於后。

- (1) 藉具代表性國內外坑道檢監測案例之蒐集，瞭解因應不同場址與地工條件，坑道運轉期間所應具備的檢測與監測項目。
- (2) 探討因開挖擾動對坑道周圍環境可能造成的變異，並據以提供相對應的檢測與監測項目。
- (3) 瞭解檢監測結果與坑道行為之相關性，做為未來坑道維護與強化技術研析之參考。
- (4) 藉坑道運轉過程檢測與監測計畫之結果，提供更多的地質、地工參數，供處置坑道封閉前狀態評估及其安全評估分析使用參數之參考。

### 1.3 國內外有關本計畫之執行情況

國內在放射性物料的管理方面歷經法源訂定與技術研究多年的努力，管制技術逐漸與國際接軌，如93年發布之「放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法」。為求管制技術之進一步精進，管制規範以及作業程序亦陸續建立，已積極完成

NUREG-1199與NUREG-1200的中文化作業，並對應我國低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則，已建立**安全分析報告審查導則草案(B版)**。然因國內工程地質條件較國外處置技術先進國家複雜，於坑道之調查、規劃設計與施工、運轉及封閉期間，均應有充分的檢測與監測計畫，以獲知更多的地質資訊及相關的安全評估所需參數，供處置坑道環境影響及安全評估之參考，並予以增列於**安全分析報告審查導則草案(B版)**中，提供相關處置設施經營者執行處置計畫以及審查人員之參考。

行政院原子能委員會放射性物料管理局在99年執行「放射性廢棄物坑道處置場址特性調查及設施設計與建造審查要項研究」與在100年執行「放射性廢棄物坑道處置場址特性調查及設施設計審查要項建議以及天然障壁長期穩定潛在影響因子之探討」等計畫，依據我國工程與環境特性進行深入比較與探討，針對本土化審查導則暨管制技術規範編修要點提出了具體之建議；並就我國天然障壁與處置技術先進國家之相異處對坑道穩定影響進行案例蒐集，提出國內天然障壁地工特性及特有自然條件因素對坑道穩定之影響，進而提出場址特性調查審查要項考量之初步建議。行政院原子能委員會核能研究所於101年接受委託執行「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術研究」計畫，則依據既有坑道襯砌異狀歸納出坑道設施長期穩定性之影響因素，包括圍岩材料力學特性之依時變化、隧道長期荷載外力之變化、突發性外力事件如地震之作用等因素，並就處置坑道與一般坑道功能需求與穩定性之評估要項，指出應用既有的一般坑道規範與準則應用於處置坑道之不足，仍須進一步針對影響長期穩定影響因素探討相關處置坑道設施之設計與穩定性評估所需參數，供處置設施經營者在執行處置計畫以及後續研修審查導則之參考(以上請參考相關計畫之期末報告)。

目前處置坑道運轉期間所應設置的檢測與監測項目，多著重於蒐集地下水以便掌握核種傳輸外釋的多寡，多未針對處置坑道運轉期間的結構安全與長期穩定特性等需求制訂檢測與監測項目，係因國外地質條件優越、岩盤自持性佳、滲透係數等水文地質條件亦足以提供適切的處置環境。然而，相對於國內工程地質條件則欠佳，透過國內一般坑道的監檢測案例蒐集與研析，制訂本土性適切的處置坑道運轉期間的檢測與監測項目，以提供更充足的地質資訊及相關的安全評估所需參數，俾利處置坑道環境影響及安全評估之參考，實為刻不容緩的關鍵議題。

#### 1.4 工作項目、進度與研究流程

本研究之工作項目分為「國內外隧道及處置坑道檢測與監測案例蒐集」、「處置坑道結構安全與長期穩定之強化需求分析」、「處置坑道施工期檢測及運轉期監測要項研析」、「處置坑道檢測與監測計畫導則草案研析」及「提出低放處置審查導則(第0版)處置坑道相關章節與條文內容之修訂建議」等五項，各分項工作進度如表1.4-1所示，為執行所列工作項目擬定之研究流程則示如圖1.4-1，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 處置坑道監測之重要性與設計流程

為瞭解放射性廢棄物處置先進國家與核能機構對處置場址監測工作所涵蓋的內容，故針對監測之重要性、監測工作的界定與設計流程等進行相關資料蒐集與整理。

## 第三章 國內外隧道及處置坑道檢測與監測案例蒐集

本章針對國外處置坑道及國內一般隧道之檢監測案例進行資料蒐整與研析。在處置坑道部分，蒐整了瑞典SFR與芬蘭VLJ處置設施監測資料；在一般隧道部分，蒐整了台灣鐵路管理局南迴線安朔隧道檢測案例；最後，透過上述國外處置坑道及國內一般隧道檢監測案例研析，並且考量了地質破裂帶與地質材料潛變特性之影響，整理了符合我國地質環境條件之低放處置坑道檢監測項目表。

## 第四章 處置坑道結構安全與長期穩定之強化需求分析

就處置坑道結構之長期穩定性，可提供在廢料桶存放混凝土結構外多一道防護，以降低放射源之外釋量。有鑑於國內的地質年代年輕，圍岩所能提供的屏障效果較薄弱，如何透過國內已建立的隧道襯砌異狀判釋與肇因之研析經驗及相關檢監測項目，做為分析處置坑道長期變形行為之基礎，確保處置坑道結構安全，實為本章探討的重點。

## 第五章 處置坑道施工期檢測及運轉期監測要項研析

考量處置坑道對於場址特性的掌握度高於一般坑道，本章除參考山岳隧道工程在施工期與運轉期的檢監測項目，另外就結構安全與長期穩定性的考量，參考國外低放處置坑道經驗，提出處置坑道在施工期與運轉期間的檢監測項目。

## 第六章 處置坑道之檢監測計畫導則草案研析

本章綜整前述有關國外處置坑道與國內一般隧道的檢監測經驗，基於本土地質條件及處置坑道長期結構穩定之考量，及第五章歸納整理的處置坑道檢監測項目與技術列表，進一步探討處置坑道檢測與監測計畫應有的內容。

## 第七章 低放處置審查導則(第0版)處置坑道相關章節與條文內容之修訂建議

針對「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)，其與本案「處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究」有關之章節，包括「第四章處置設施之設計」、「第五章處置設施之建造」與「第六章處置設施之運轉」提出與本案成果有關之建議。

## 第八章 結論與建議

## 1.5 已蒐集之重要文獻

本研究於計畫執行期間蒐集了國外處置坑道監測相關報告文獻計23篇，其內容涵括關於監測之規範、架構、定義、設計流程與案例，篩選出最重要的文獻計有下列6篇(報告封面如圖1.5-1所示)，其內容依文獻年分概述如后：

(1) SKB報告編號R-03-30

SKB於2003年整理了SFR低放處置場址原岩地質條件、處置設施的設計準則與工程障壁相關監測項目暨結果。

(2) Posiva 工作報告編號2003-05

Posiva於Olkiluoto處置場址興建ONKALO岩性處置設施之監測計畫中，為能瞭解VLJ中、低放處置場址長期穩定情況提出了岩石力學相關的監測項目。

(3) Posiva工作報告編號2012-01

Posiva針對Olkiluoto處置場址ONKALO岩性處置設施運轉前提出的監測計畫中，指出了處置場址與處置設施長期穩定的諸多影響因子，並依其屬性歸納為岩石力學、水文地質、化學、地表環境與外來材料等五大分類，亦針對相關的監測參數與對應的監測方法整理成表。

(4) Posiva工作報告編號2013-47

Posiva在2013年提出的Olkiluoto監測報告中，報導了處置場址與處置設施初步的監測結果。

(5) 歐洲原子能機構MoDeRn報告編號D-1.2

歐洲原子能機構於2013年提出的監測相關架構報告中，針對監測計畫之設計提供清楚的流程脈絡。

(6) 歐洲原子能機構MoDeRn報告編號2.2.2

歐洲原子能機構於2013年提出的監測先進技術報告中，針對VLJ中、低放處置場址的監測項目、技術與方法提供了詳實的記載。

表1.4-1 研究內容與進度表

工作項目	103 1	103 2	103 3	103 4	103 5	103 6	103 7	103 8	103 9	103 10	103 11	103 12	備註
子項計畫五：處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究			※			※			※			※	
國內外隧道及處置坑道檢測與監測案例蒐集													
處置坑道結構安全與長期穩定強化需求分析													
處置坑道施工期檢測及運轉期監測要項研析													
處置坑道檢測與監測計畫導則草案研析													
提出低放審查導則(第0版)處置坑道相關章節與條文內容修訂建議													
工作進度估計百分比 ( 累 積 數 )		5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	





圖1.1-1 捷克Richard處置場運輸通道之鋼筋混凝土二次襯砌結構

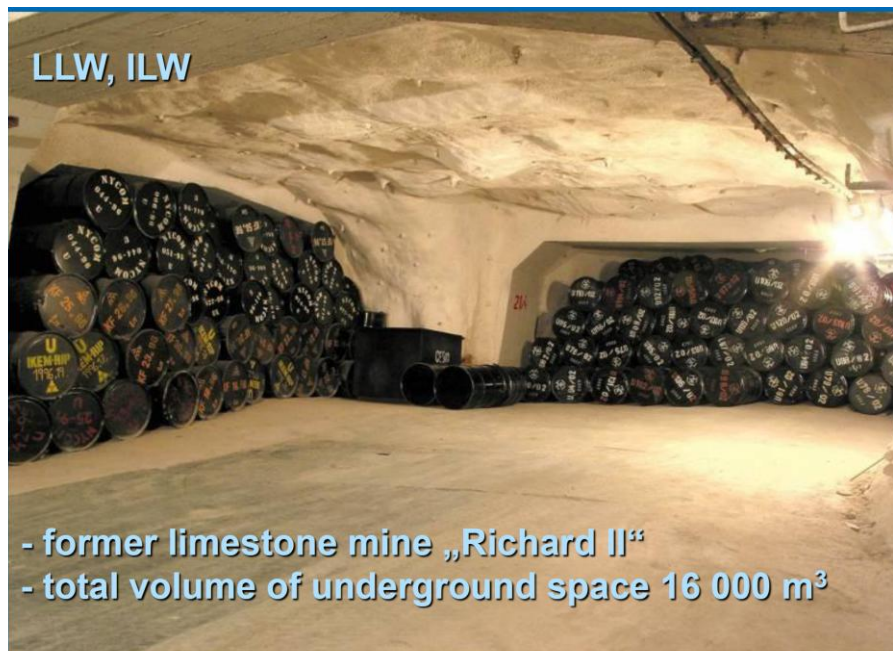


圖1.1-2 捷克Richard處置場存放室之襯砌支撐結構

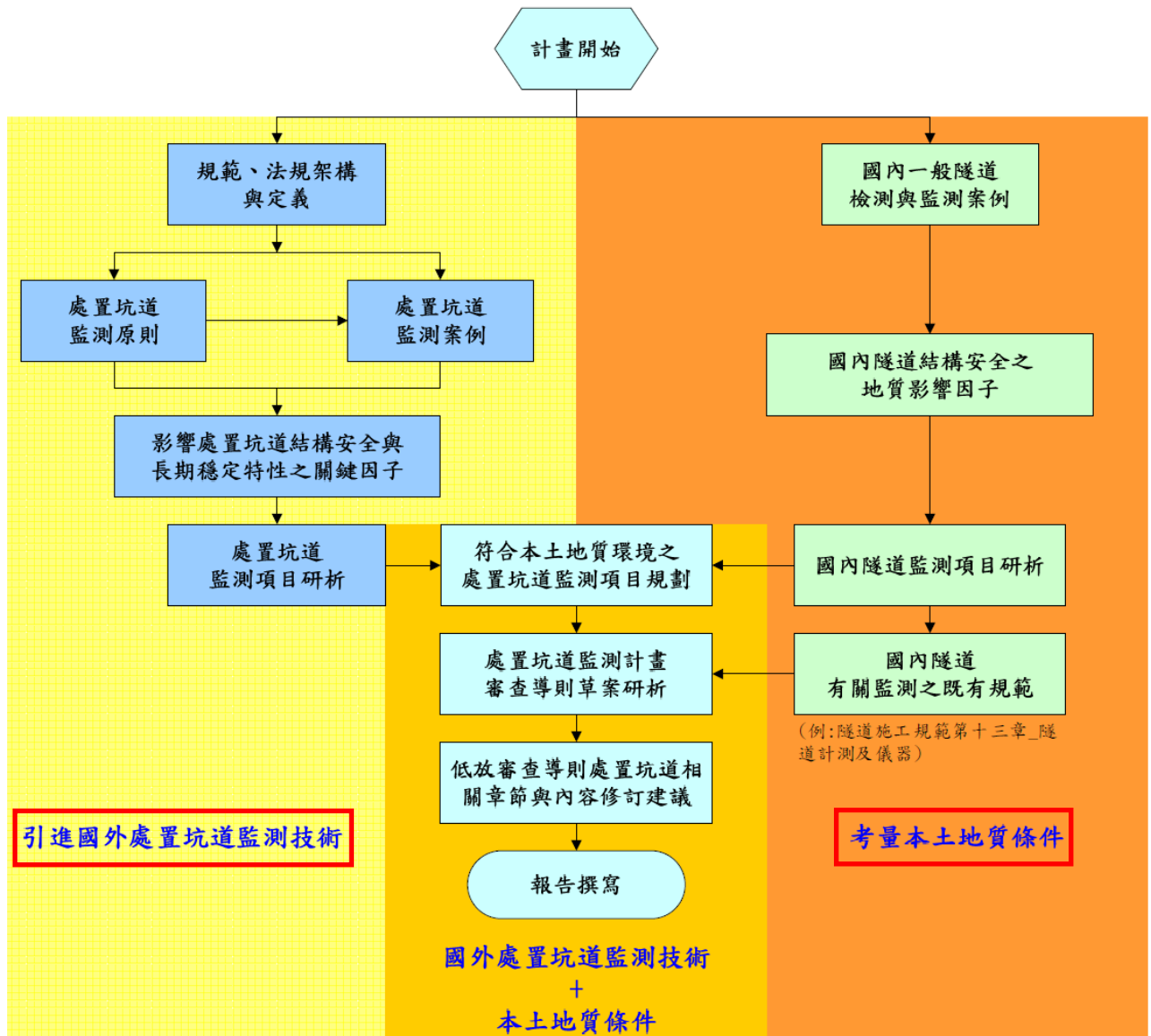


圖1.4-1 研究計畫流程圖

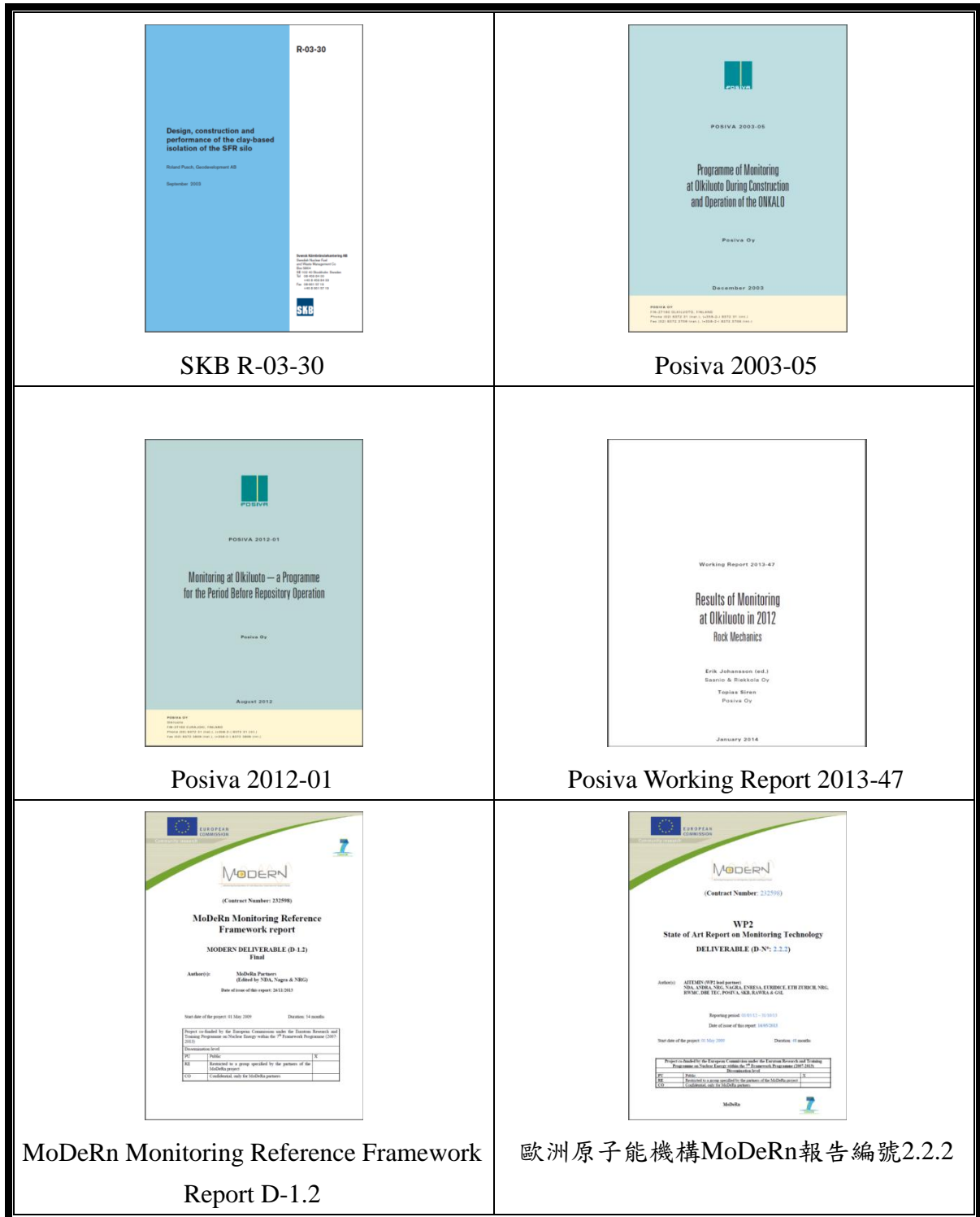


圖1.5-1 已蒐集之重要報告文獻封面

## 第二章 處置坑道監測之重要性與設計流程

### 2.1 處置坑道監測的重要性

根據國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)在對地質處置場址的安全要求要項(Safety Requirements on Geological Disposal)中提出的處置設施監測工作內容，闡述了監測工作在處置坑道建造前、運轉中與封存後的重要性：

“在地質處置設施建造之前與建造過程中，須針對監測計畫提出具體的定義與執行相關工作。透過監測計畫所蒐集與更新的資料在於確認處置場址與設施，在運轉期間，相關工作者與所處環境居民的安全與確保其對環境的影響，以及在處置場址封存後，任何可能影響其安全性的條件。”

在處置設施之開發建造與運轉期間的各個階段均須有監測工作的執行。監測計畫的目的包括了：提供處置設施運轉期間安全保證之評估，及確保處置設施相關條件符合封存後的安全要求。至於，在處置設施封存後是否須持續進行監測工作，根據IAEA TEC-DOC-1208技術報告2.1.7節，說明了地質處置設施對於放射性廢棄物的可能傳遞已有經過嚴謹的評估及多重障壁之設計，即便在封存後已無需進行監測，但基於社會大眾對於放射性廢棄物處置設施安全的期待，相關的監測工作仍可持續進行(IAEA, 2001)。

前述有關確保處置設施封存後的安全性，應該在處置設施開發建造前即應開始著手規劃相關監測工作，並做為監測策略(monitring strategies)的參考，而在處置設施開發建造與運轉期間，上述監測規劃內容是具有彈性的，且允許被修改與更新。

另外，在IAEA TEC-DOC-1208技術報告文件中，針對處置場址的監測工作提到了下述內容：“...監測工作在於提供處置設施在不同時期有關設施安全的基本資訊，以增強對處置設施長期安全的信心，此為放射性廢物處置工作的關鍵項目”。

### 2.2 監測工作的界定

監測工作在於確保核廢料處置場址與其設施的長期穩定與安全，為能對監測工作內容能有具體且共同的認知，本研究嘗試瞭解放射性廢棄物處置先進國家對於監測相關工作的界定。以芬蘭Olkiluoto處置設施為例，Posiva在編號2012-01報告中針對監測的定義與項目提出的說明如下(Posiva, 2012)：

#### (1) 監測的定義

針對工程環境或是放射性參數所進行之持續或周期性的觀察或量測工作，有助於評估處置系統各組成部分的運轉情況與反應，或是處置場址運轉期間對環境的影響，及執行後續各階段相關工作之決策參考。

#### (2) 監測項目

監測項目是由專家學者根據相關法規與規範進行討論後決定。當監測項目釐訂後，緊接著則是監測計畫的持續更新過程。Posiva根據ONKALO處置設施建造期間

---

於Olkiluoto地區所所累積的監測經驗(Posiva, 2003)，提出六項監測項目：

- a. 場址的長期安全。監測項目要能展現處置場址周圍環境條件，並不因場址的興建與運轉而造成長期安全性的影響。
- b. 描述與模擬場址特性所需的回饋參數。為能增進對場址特性的瞭解與掌握未來可能的變化，監測所獲得的參數資料可應用於測試與各種不同類型的處置場址分析與預測模式。
- c. 環境影響的監測。
- d. 處置場址的設計與興建對岩石圈與地表環境的影響參數。
- e. 工程障壁系統的效能。針對工程障壁的效能進行監測，以確保工程障壁的功能性符合期待與預測的要求。
- f. 必要的輻射值監測。在於執行必要的輻射值與處置場址所處環境核種的釋放狀況。

日本原子力環境整備促進・資金管理中心(The Radioactive Waste Management Funding and Research Centre, RWMC)針對高放地質處置場址相關監測方法與技術研究提出了系統性的回顧探討(RWMC, 2005)，並整理出五個監測目標與相關描述，如表2.2-1所示，原文列表如附錄圖A.1。

表2.2-1 日本原子力環境整備促進・資金管理中心(RWMC)對地質處置場址  
 相關監測目標與描述(RWMC, 2005)

監測目標	描述
[1] 確認場址安全性及相關工程量測的適當性	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 確認處置系統各項功能是否符合原本的規劃</li> <li>• 確認設計/建造過程的相關假設是否合理</li> <li>• 驗證安全評估模式</li> <li>• 處置場址在運轉/建造過程中有關設施改善或相關修繕需求之鑑定</li> </ul>
[2] 符合法定規範之要求	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 處置設施封存後相關措施符合法定規範要求</li> <li>• 處置設施建造與運轉期間對工作人員與在地居民的安全考量及措施是否符合法定規範要求</li> <li>• 確保符合環境衝擊相關規範之要求</li> </ul>
[3] 提供政策訂定與運作決策所需資訊	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 提供決策所需資訊</li> <li>• 置放廢棄物的回收處理</li> </ul>
[4] 瞭解候選處置場址地質環境之基本特徵	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 針對處置場址地質環境基本特徵進行瞭解與研析</li> </ul>
[5] 訂定公共政策所需之參考資訊	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 強化社會大眾(尤其是在地居民)對於地質處置場址的信心</li> <li>• 為未來世代蒐集相關的資料</li> </ul>

## 2.3 監測計畫設計流程

本章節針對處置場址監測計畫需考量的項目、設計流程與合理的監測週期作一概述介紹。

- (1) 在設計監測系統上需考量的項目
  - a. 廢棄物處置包件(Waste disposal packages, WDP)。
  - b. 處置單元(Disposal unit, including near-field)。
  - c. 封存(Seals, including near-field)。
  - d. 監測系統的設計(Design of monitoring systems)。

- (2) 監測計畫設計流程

根據MoDeRn D-1.2提出的監測架構報告(MoDeRn D-1.2, 2013)，提供了清楚的監測計畫流程脈絡，如圖2.3-1所示，依流程順序區分下列三部分：

- a. 訂定監測項目、監測程序與需要蒐集的參數

流程工作內容包括訂定主要的監測項目與提出監測理由，進而釐清次要的監測項目與所需蒐集的資訊，在決定前述主、次要監測項目後，訂出相關的監測方法並完成主要監測項目列表(Preliminary Parameters List)。

- b. 監測計畫設計

根據前項流程羅列的主要監測項目列表，具體訂定出：

- (a) 監測參數的量測頻率、精度與可靠度。
- (b) 可能的量測技術與規格參數。

經由上列二項的比較，討論可行的監測參數與對應的監測技術，繼而訂出監測計畫。

- c. 執行與管理

按照監測計畫執行監測工作，再根據監測結果評估可能影響並做出決策反應。

- (3) 監測值合理範圍的評估

監測技術必須能提供有意義的監測資訊，若在一定時間範圍內難以量測到明顯的數據變化，仍應研析數據的合理性及其是否如預期發展；因此，針對量測項目之合理值與可能的變化範圍、趨勢必須在事前予以謹慎評估(MoDeRn, 2013)。

- (4) 不同時期的監測作為(Monitoring at different phases of the disposal programme)

根據國際原子能總署(IAEA)在地質處置場址安全導則(Specific Safety Guide)有關處置設施監測與監管(Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities)之專書中，提到了處置設施在選址、建造、運轉、封存與封存後各個階段的監測工作意義(IAEA, 2014)，如圖2.3-2所示。

- a. 基準監測(Baseline monitoring)，為收集資料以支持場址之評估過程及確認首度安全評估之重要特色及論證。
- b. 設施建造中之監測(Monitoring of the as-built facility)，係指工程施作期間需同步

掌握的相關資訊以支持工程作業的進行，及發展後續程序之安全項目。因應工程的進行，有許多額外的監測工作將於此階段進行。

- c. 設施運轉中之監測(Monitoring of the operating facility)—為評估符合規範要求與支持後續安全性之提出申請。
- d. 封閉監測(Monitoring for closure)—為評估滿足規範要求，以支持封閉之工作與封閉後之監測。新的監測可在這階段加入，有些監測則可停止。
- e. 封閉後處置設施性能之監測(Monitoring of the post-closure performance of the disposal facility)，在於確保處置設施於封存後，其與環境安全的相關參數是否符合監管規範之要求，並且作為後續監管期程與解除監管決策之參考。

此外，以Olkiluoto處置場址為例，在其被列為處置場候選場址時，有關場址特徵的相關評估與調查工作隨即在1980年展開，並持續至2004年，此一期間的工作可視為監測前導作業。正式的監測計畫則開始於2003年(Posiva, 2003)，並做為2004年ONKALO處置設施興建時相關監測工作的依據，每年並出版相關的監測報告。

Olkiluoto處置場於2012年底提出建照申請，2012至2014期間為次要建築(無需建照者)施作，監測於此階段開始，同時開始規劃工程障壁系統(Engineered Barrier System, EBS)之監測計畫。處置設施的建造於2014年至2018年期間進行，此一期間同時進行工程障壁系統的相關測試，及工程障壁系統監測設備與方法之研究與開發。處置設施在經二年全尺度實測驗證(full-scale demonstrations and test runs)後，將於2020開始運轉，運轉期為100年，預定於2120進行封存，期間將每15年修訂更新監測計畫。目前尚未決定是否於封存後繼續監測，且囿於未來封存時的監測技術尚且無法預知，故相關的監測計畫尚未含括封存與封存之後的監測工作內容。(Posiva, 2012)



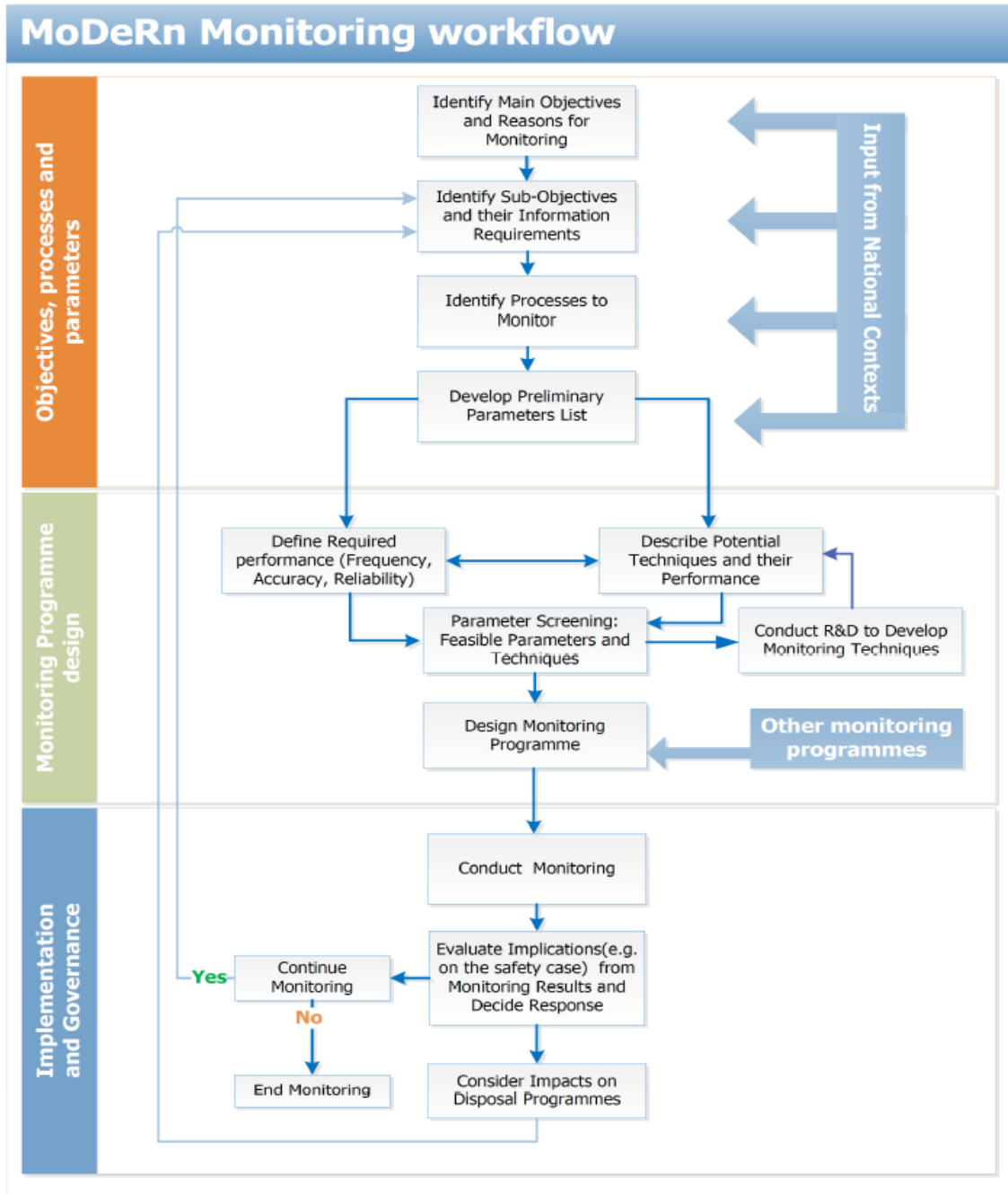


圖2.3-1 MoDeRn闡述監測計畫之完整流程(MoDeRn, 2013)

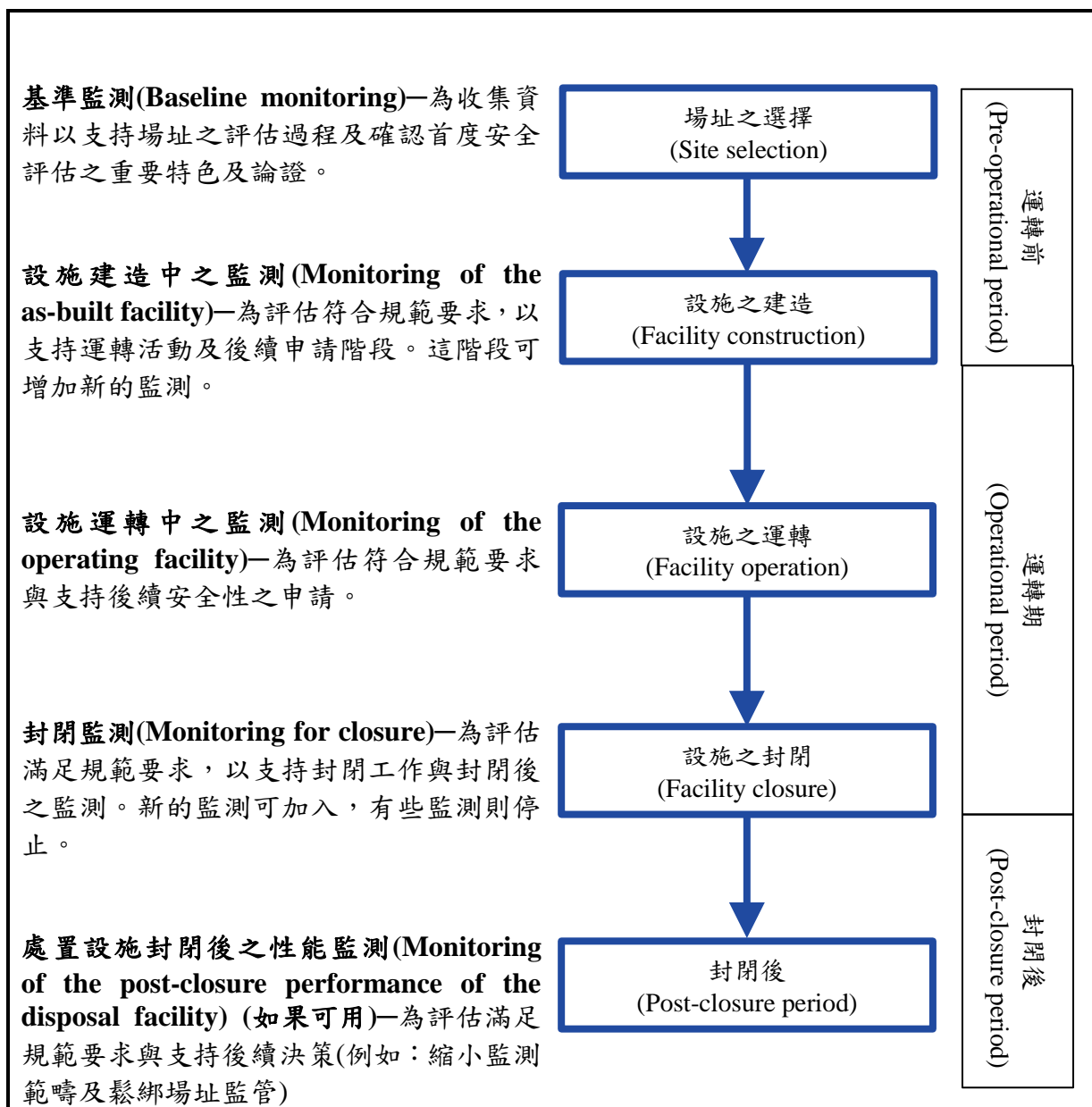


圖2.3-2 處置場址生命週期各階段所執行的監測作業(IAEA, 2014)

## 2.4 相關的監測參數與對應的量測方法

IAEA(2001)例舉了影響處置設施結構穩定的相關監測參數，如表2.4-1所示，包含：岩石溫度、弱面與裂隙等開口結構的變形(包括方位與裂縫延伸速率)、岩石應力的變化、水滲透速率、岩體支撐條件、處置設施的溫濕度、回填材料與密封材料的再飽和等，而其對應的監測方法則包括了鑽井調查、以及在處置設施埋設相關儀器設備。原文列表如附錄圖A.2。

表2.4-1 監測參數與對應的量測方法(IAEA, 2001)

分類/監測目的	代表性參數	具代表性的量測方法	資料存取方法
處置設施的結構劣化(Degradation of repository structures) 處置設施結構監測/開口的結構穩定	1. 岩石溫度 2. 弱面與裂隙等開口結構的變形(包括方位與裂縫延伸速率) 3. 近處置設施之岩石應力場變化 4. 地下水滲透速率 5. 岩體支撐條件 6. 處置設施的溫濕度 7. 回填材料與密封材料的再飽和	1. 熱電偶 2. 位移計 3. 應變或荷重感應器 4. 體積變化量測 5. 應變或荷重感應器 6. 各類量測技術 7. 壓力感應、濕度量測、地球物理量測(如震測法等)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 處置設施內部量測, 包括鑽探測量</li> <li>• 可於現地埋設量測設備, 透過無線傳輸或埋線等方式傳遞量測資料</li> <li>• 回填材料開口處的現地或遠端量測</li> </ul>
廢料包件與緩衝材料的行為(Behaviors of waste packages and buffer materials) 置放廢棄物功能狀況的監測/功能狀況的監測	1. 應變與腐蝕電流 2. 包件溫度與濕度 3. 滲透水的放射性活度 4. 廢棄物衍生氣體含量 5. 緩衝材料再飽和與回脹壓力	1. 應變計、電流計 2. 其他可茲利用之量測技術 3. 加馬(gamma)值量測 4. 氣體分析 5. 壓力感應與濕度量測	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 廢料包件之現地或遠端監測</li> <li>• 廢料包件鄰近區域之現地或遠端監測</li> <li>• 處置場排放水之放射性活性監測</li> <li>• 處置場附近空氣之放射性活性監測</li> </ul>

## 2.5 與監測工作有關的專業領域 - 以 Olkiluoto 為例

監測架構按專業領域劃分岩石力學(Rock mechanics)、水文地質(Hydrology)、水文-大地-化學(Hydro geochemistry)、地表環境(Environmental monitoring)與外來材料(Foreign materials)等，以芬蘭Olkiluoto處置場址為例，分別針對上述五項專業監測領域出版相關的監測報告，相關監測報告所屬領域與作者列述如下：

- (1) 岩石力學，Lahti and Siren (2011)。
- (2) 水文地質，Vahtinen et al. (2012)。
- (3) 水文-大地-化學，Penttinen 等人(2011)。
- (4) 外來材料，Kasa (2011)。
- (5) 地表環境，Haapanen (2011)。

此外，在Olkiluoto的文獻案例中，針對ONKALO處置設施施作期間，表列出所有可能與「場址的瞭解(site understanding)」與「處置場性能表現(repository performance)」有關聯性的各項物理性過程(physical processing)，並按各影響因子之相關領域區分岩石力學(RM)、水文地質(Hy)、化學(CH)、地表環境(SE)與外來材料(FM)，如表2.5-1所示，其中可觀察到岩石力學領域部分與處置場址及處置設施相關者包括了下列數項：

- (1) 既存裂隙的反應(Evolution of the fracture network: Reactivation of existing fractures)。
- (2) 新生裂隙的反應(Evolution of the fracture network: Generation of new fractures)、微震(Microseismicity)。
- (3) 岩體溫度變化(Temperature changes: in the rock mass)。
- (4) 地殼抬升(Isostatic uplift)與外來物質的影響(Inadvertent introduction of foreign substances)等。

表中「unfeas.」代表該項物理過程的變化很小不易監測，例如開挖損傷區的發展大多在開挖施工階段即已完成，若要透過事後的監測並不具太大的意義；「coming」代表處置設施進入建造程序時，將可透過監測系統之建置及可供使用的設備來進行空氣與流體之採樣與測試；「human」代表人為的活動；「low sig.」代表意義性較低。除上述物理性過程之關聯性探討外，與水文地質(hydrogeological)、地球-化學(geochemical)與生物作用(biological)的各種過程及其與處置場址與處置設施之相關性原文列表，整理於附錄圖A.3-1與附錄圖A.3-2。

表2.5-1 物理與及水文地質的各種過程及其與「場址的瞭解」與「處置場性能表現」有關聯性的各項影響因子(Miller et al., 2002)

物理性過程	與「場址的瞭解」的關聯性	與「處置場性能表現」的關聯性	領域分類	備註
開挖損傷區(Development of an excavation damaged zone, EDZ)的發展	高	高		unfeas.
既存裂隙的反應(Evolution of the fracture network: Reactivation of existing fractures)	高	高	RM	
新生裂隙的反應(Evolution of the fracture network: Generation of new fractures)、微震(Microseismicity)	高	高	RM	
岩體的曝氣情況(Aeration of the rock mass)	高	中		unfeas.
計畫性引進之外來流體(Planned introduction of foreign fluids)	高	低	FM	
計畫性引進之外來材料(Planned introduction of foreign solid materials)	高	高	FM	
微震(Microseismicity)	中	低	RM	
鑽孔水位的沉降變化(Sinking of satellite boreholes)	高	中		human
岩體溫度變化(Temperature changes: in the rock mass)	低	低	RM	
地下水溫度變化(Temperature changes: in the groundwater)	中	低	Hy	
空氣溫度變化(Temperature changes: in the air)	中	低		coming
地下水除氣(Degassing of groundwater)	中	中	CH	coming
地表下陷(Ground subsidence)	低	低		low sig.
地殼抬升(Isostatic uplift)	中	高	RM	
外來物質的影響(Inadvertent introduction of foreign substances)	中	低	FM	
岩體的除氣(Degassing of rock mass)	低	低		low sig.

## 2.6 綜合整理

回顧本章蒐整之國外處置坑道監測工作界定、設計流程、監測項目與方法及對應之領域分類，未來在第四章「處置坑道結構安全與長期穩定之強化需求分析」與第五章「處置坑道施工期檢測及運轉期監測要項研析」時，應含括以下幾點項目：

### (1) 處置坑道監測工作的重要性

可參考國際原子能總署(IAEA)在地質處置場址的安全需求要項中之闡述，例：

“在地質處置設施興建之前與興建過程中，須針對監測計畫提出具體定義與執行相關工作。透過監測計畫所蒐集與更新的資料在於確認處置場址與設施在運轉期間，相關工作者與所處環境居民百姓的安全與確保其對環境的影響，及處置場址封存後，任何可能影響其安全性的條件。”

### (2) 明確的監測定義

按Posiva(2003)提出的監測定義，是針對工程環境或是放射性參數所進行之持續或周期性的觀察或量測工作，就本計畫研究目的係針對處置坑道結構長期穩定提出符合我國地質條件的監測項目與方法；因此，本研究所述監測工作，係僅限於工程環境之持續或周期性的觀察或量測工作。

### (3) 監測計畫

監測計畫必須在處置設施興建前提出，監測的期程包括了處置坑道興建、運轉與封存等期程，並述明處置設施發展與運轉期間，所提之監測計劃內容具有彈性且允許被修改與更新；唯封存後的監測工作，鑑於國際上放射性廢棄物處置先進國家尚無相關經驗，且未來封存後的監測技術尚且無法預知，基於地下水是放射性物質在岩石圈傳遞的重要媒介，故建議可將地下水放射性活度為處置場封存後之監測項目，對於處置設施結構安全的監測暫不列入考量。

### (4) 監測項目訂定原則

除了參考Posiva(2003)提出的監測定義與六個監測項目，及日本原子力環境整備促進・資金管理中心(RWMC)整理的五個監測目標，本研究考量我國地質環境之特殊性，針對處置坑道結構長期穩定有關的工程環境監測項目，條列下列四點原則：

- a. 處置設施興建與運轉期間，監測項目所提供的參數足以反映處置設施的結構安全性及相關工程量測的適當性。
- b. 監測項目所提供的參數，足以描述與模擬場址工程地質特性及其對處置設施結構的影響，例如地質破裂帶、開挖損傷區、地質材料潛變特性與地下水湧水等國內山岳隧道常遭遇的工程地質問題。
- c. 處置場址的設計與興建對岩石圈與地表環境的影響參數，例如地表沉陷與地中變位之監測等，及鄰近坑道出入口地表與結構物之可能沉陷及變位。

### 第三章 國內外隧道及處置坑道檢測與監測案例蒐集

為擷取國際上有關放射性廢棄物處置先進國家在處置坑道之相關檢監測經驗，及考量本土地質條件對處置坑道長期穩定之可能影響，本研究分別搜集並研析具代表性的國外處置坑道及國內一般坑道之檢監測案例，供作後續發展符合我國本土地質條件之處置坑道檢測與監測計畫導則草案研擬之參考。

#### 3.1 國外坑道處置案例

在國外處置坑道之檢監測案例部分，本文蒐集了瑞典SFR-1及芬蘭VLJ與Loviisa坑道處置設施監測資料，三處處置坑道監測案例均位於海岸地區。一般的放射性廢棄物處置場分為地上洞穴處置、工程近地表處置與地下洞穴處置，如圖3.1-1所示，本文所蒐集之三處國外案例，SFR-1屬於離岸海床之洞穴處置，VLJ與Loviisa則屬於近岸陸地之洞穴處置，三處封閉後都有海岸遷移問題。

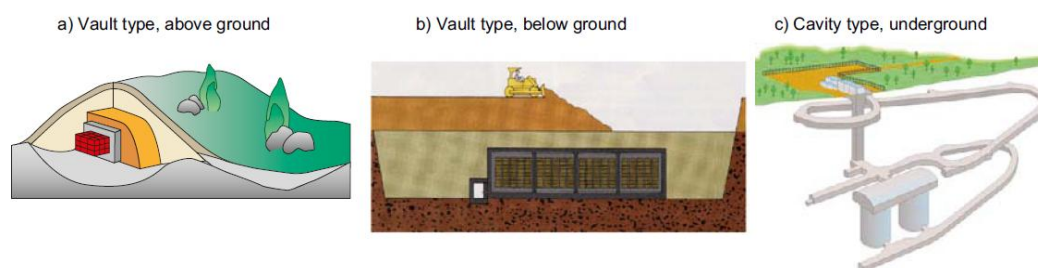


圖3.1-1 放射性廢棄物處置場類型: (a)地上洞穴處置；(b)工程近地表處置與(c)地下洞穴處置(SKB, 2011a)

##### 3.1.1 瑞典SFR-1處置設施

瑞典SFR-1處置場位於Forsmark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3.1-2與圖3.1-3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。

##### (1) 背景介紹

SFR-1處置場目前為容納中、低放廢棄物(LILW)，每年處置醫療、工業及研究機構所產生的低放廢棄物約 $10 \sim 20 \text{ m}^3$  (SKB, 2011a)。SFR-1處置場係以處置40年的核電廠運轉廢棄物為目標，目前的建造容量為 $61,700 \text{ m}^3$ ，未來將擴建第二期到 $150,000 \text{ m}^3$ 以容納除役廢棄物。由於SFR-1處置場位在海床的下方，故倚靠二條平行之隧道連接Forsmark核電廠(NPP)。目前的SFR-1處置場，如圖3.1-2所示，包含一個處置窖(Silo)與四條岩盤處置坑道(Rock vault)，長半衰期的中放射性廢棄物處置於處置窖，其活度佔整個處置場的90%。處置窖之岩盤開挖空間為高70 m、直徑30 m，內部的混凝土結構物高50 m、直

徑26 m、厚度0.8 m，底部基座為夯實的砂砂與膨潤土、側壁與母岩之間的縫隙以膨潤土回填厚度至少1 m。處置窖內部隔成 $2.55 \times 2.55$  m的豎坑，依序吊入混凝土製的方形處置容器後分層以水泥回填間隙，所有作業均以遙控操作方式進行(Lindberg, 2005)。



圖3.1-2 瑞典SFR-1所處地理位置示意圖(SKB, 2008)

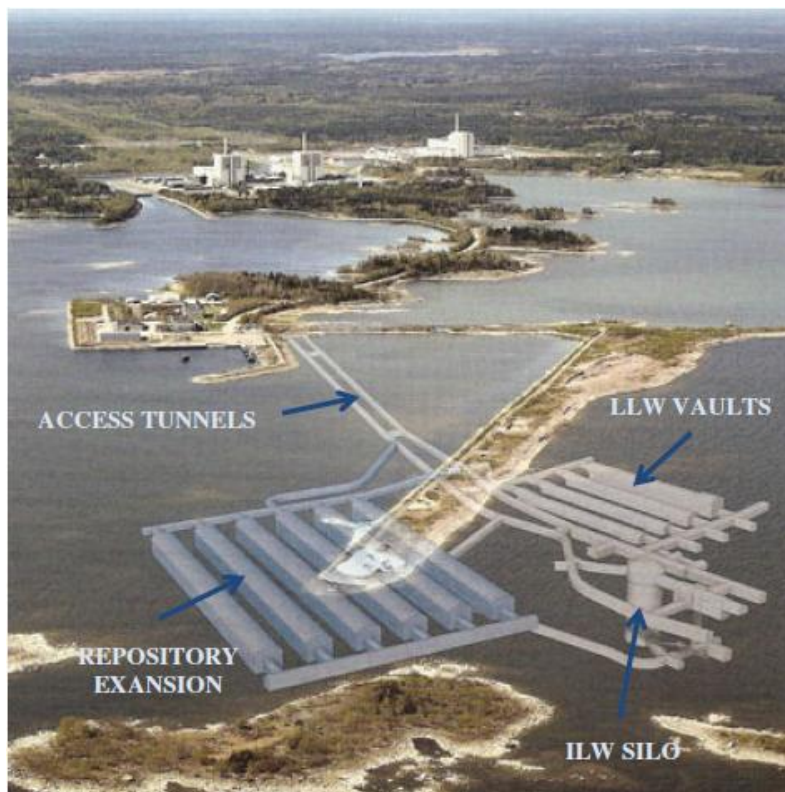


圖3.1-3 瑞典SFR-1核廢料最終處置場(BSRRW, 2009)



SFR-1處置場的四條處置坑道，如圖3.1-4所示，長 160 m，寬介於 15至20 m、高介於 10至17 m (IAEA, 2001b)，四條處置坑道係用來處置低放射性廢棄物與短半衰期中放射性廢棄物。四條坑道尺寸、結構型式與用途分別為(Lindberg, 2005)：

一條BMA坑道：尺寸長160 m，寬19.5 m，高16.5 m，以混凝土結構隔成15個處置室，遙控操作置放短半衰期中放射性廢棄物，如圖3.1-5；

一條BLA坑道：尺寸長160 m，寬15 m，高12.5 m，處置標準貨櫃盛裝的低放射性廢棄物，如圖3.1-6；

二條BTF坑道：尺寸長160 m，寬14.8 m，高9.5 m，處置混凝土箱盛裝的中放射性廢棄物，如圖3.1-7。

低放射性廢棄物會先在核電廠進行處理、壓縮與裝箱(如圖3.1-8所示，例如200公升的圓筒、金屬容器或處置標準貨櫃等)，低放廢棄物因為無需任何放射性屏障(Radiation Shielding)，故使用一般的起重設備直接放入BLA處置坑道，如圖3.1-9所示；BLA處置坑道的設計相當簡單，處置標準貨櫃係直接放置在混凝土地板上。在處置場運轉期間，所有的廢棄物容器上方均架設防水隔板，以防地下水滴到廢棄物容器，上述隔板會在處置場封存前予以拆除(Sweden, 2008)。整體而言，存放在處置坑道的放射性廢棄物其活度僅佔SFR-1整體活度的0.2% (IAEA 2001)。

除了目前運轉中的SFR-1低放射性廢棄物處置場外，瑞典SKB公司亦開始著手規劃一處第二期工程稱為SFL3-5的中放射性廢棄物處置場。初步建議地點仍在Forsmark電廠附近的岩層中的六條坑道，但其深度將比SFR-1設施更深且更長。

## (2) 地質條件

SFR的母岩種類包含了三種不同的岩石種類(Bodén and Lundin, 2007；SKB, 2006)，如圖3.1-10所示，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)。長英質至中等變質火山岩類形成於Svecofennian造山運動，為該地區最古老的岩床，並且主控了SFR-1對外聯絡坑道所處位置的地質特性；近花崗岩類其葉理分布不一，其主控了處置場北半部與鄰近陸地之地質特性；粗顆粒狀之偉晶岩類為至少二種不同生成年代之侵入岩，生成年代較古老者，主控了對外聯絡坑道至處置場南側區域的地質特性。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, 2003)。SFR-1處置場地質破裂帶之空間分布圖如圖3.1-11所示。

## (3) 施工場址的準備(Preparation of the construction site)

基於處置容量與穩定性的考量，處置窖所處空間約 50,000 m<sup>3</sup>。此外，根據岩石力學的穩定性分析，指出坑道直徑不超過25-30 m為原則，開挖空間高約50 m，最後選定的

坑道直徑為29 m，靠近側牆的開挖空間高50 m，穹頂部分為65 m，整個開挖空間為一橢圓形狀。坑道採用傳統的鑽炸工法，因此在開挖面四周存在數公尺不等的開挖擾動帶。

處置窖所處的工程障壁係由濕潤的膨潤土包覆，為了避免浮力效應造成處置窖的隆起，以及回脹壓力造成坑道斷面不均勻變形，在岩盤與坑道襯砌之間埋設高密度交錯的纖維排水管，且連接至混凝土底板的排水管道，並透過定期的排水記錄以確保排水功能順暢，以避免水壓力的上升。

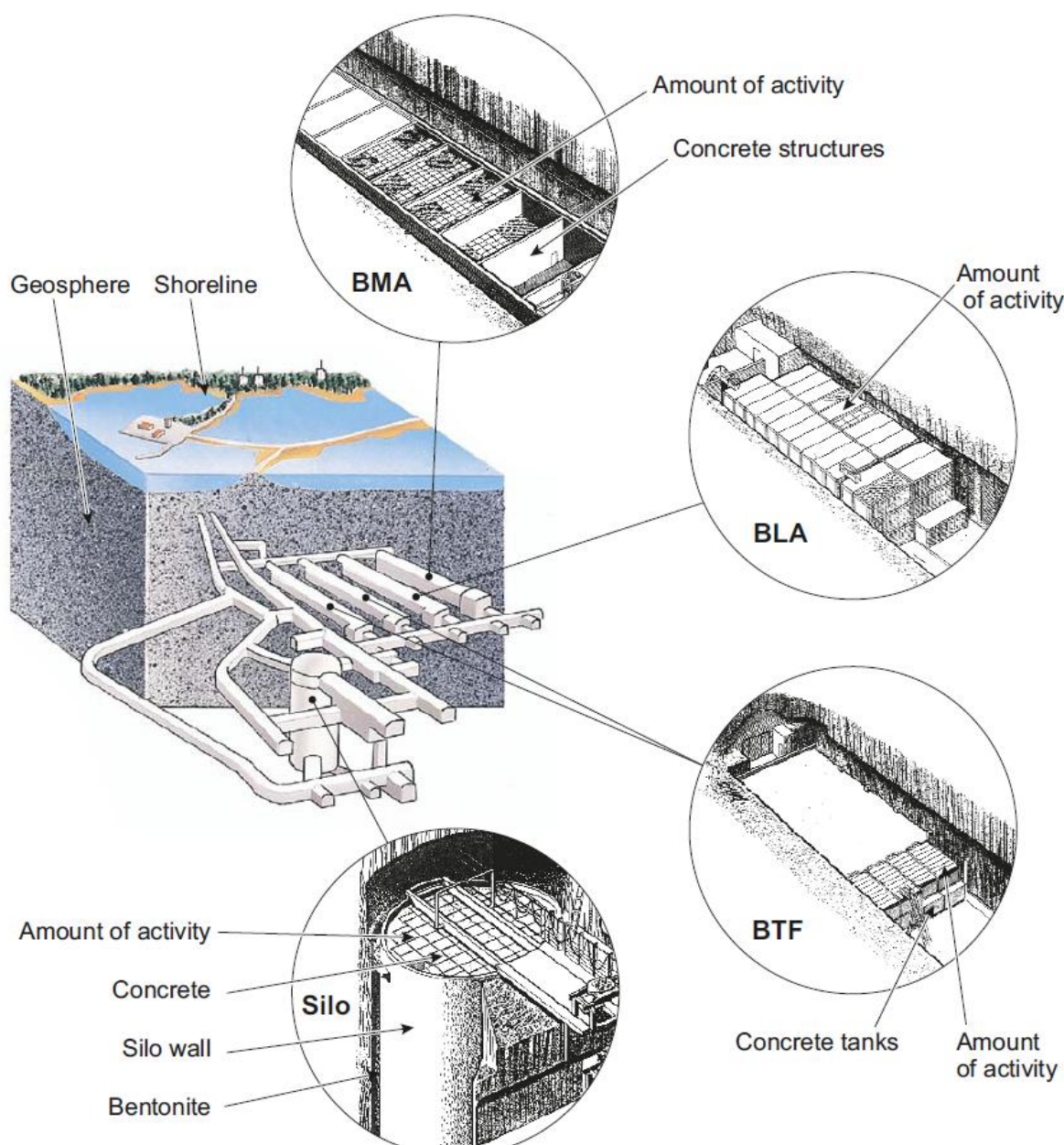
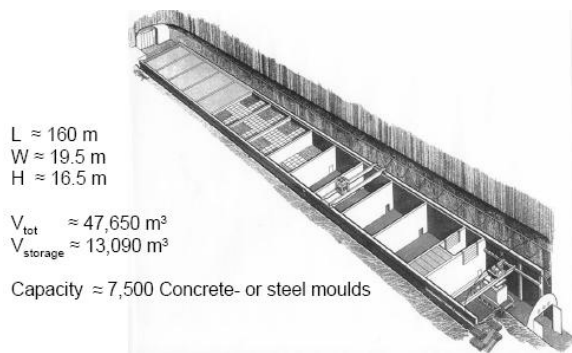
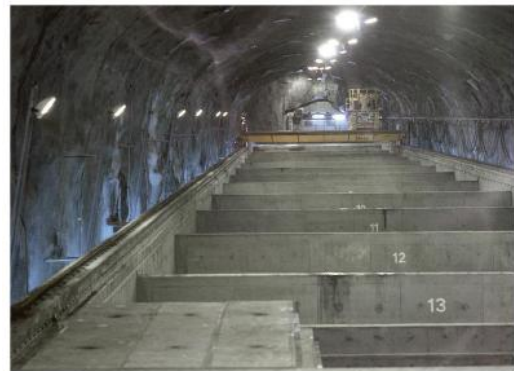


圖3.1-4 SFR-1處置場之處置窖與處置坑道空間配置圖(SKB, 2011b)

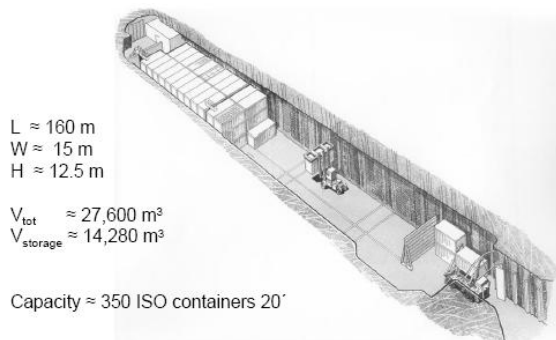


(a)



(b)

圖3.1-5 BMA中放射性廢棄物處置坑道存放方式及結構

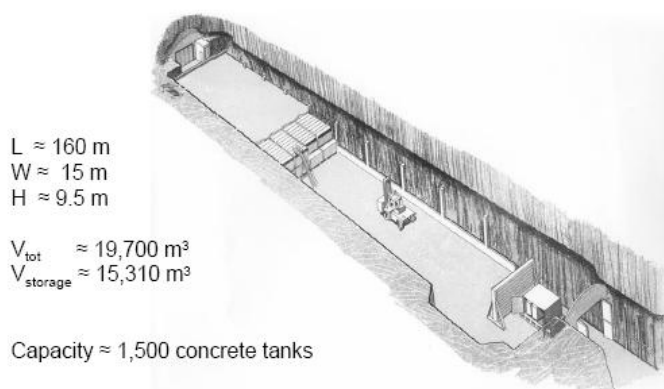


(a)



(b)

圖3.1-6 BLA低放射性廢棄物處置坑道存放方式及結構



(a)



(b)



(c)

圖3.1-7 BTF坑道存放方式及結構

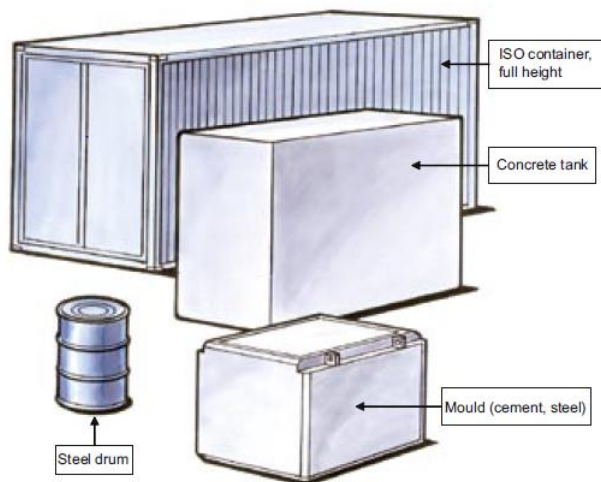


圖3.1-8 SFR-1處置場採用的廢料置放方式(SKB, 2008)

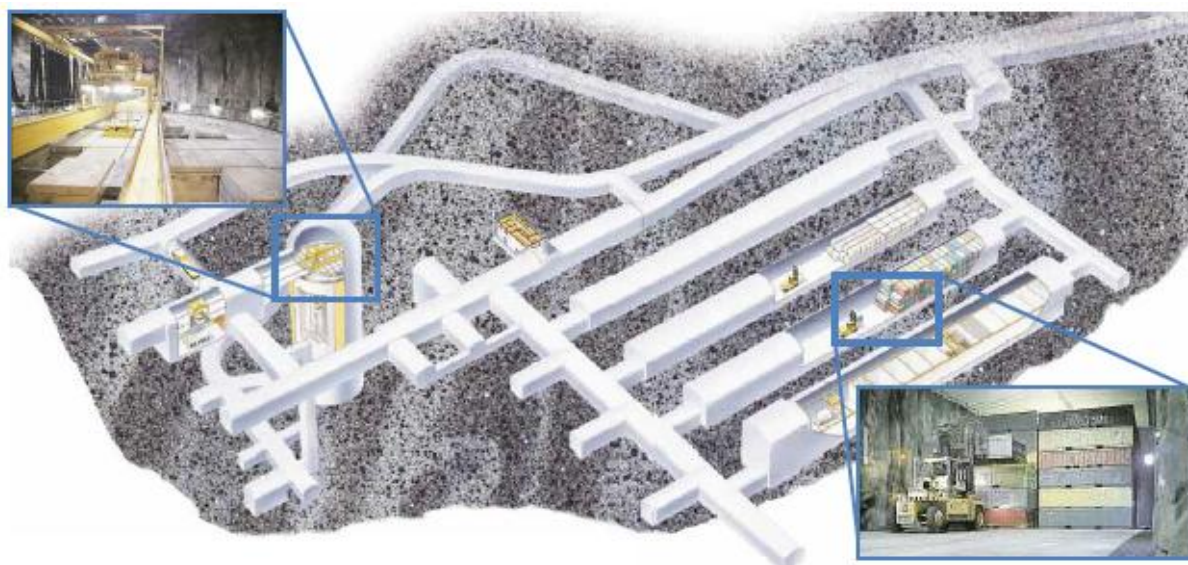


圖3.1-9 SFR-1處置場BLA處置坑道堆置情況(SKB, 2006)

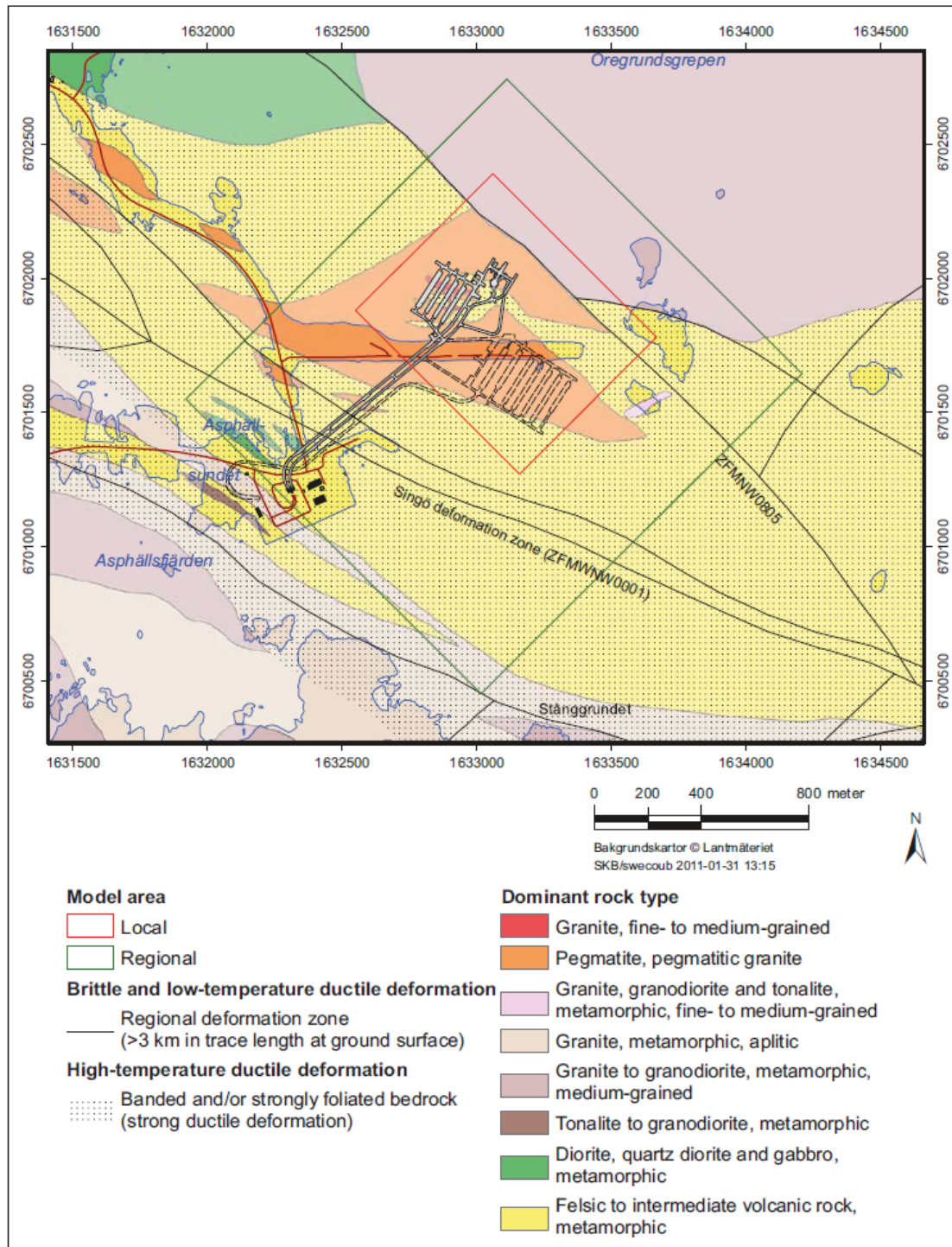


圖3.1-10 SFR-1處置場地質圖(SKB, 2011a)

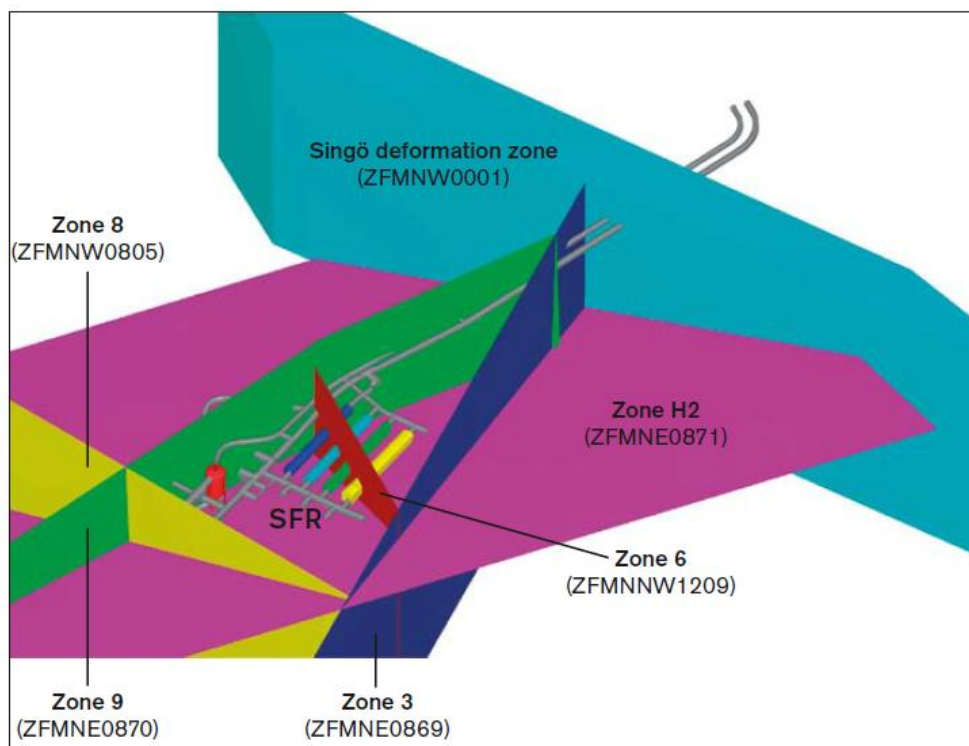


圖3.1-11 SFR-1處置場地質破裂帶之空間分布圖，區分為H2區(紫色)、Zone 3(深藍色)、Zone 6(深紅色)、Zone 8(黃色)、Zone 9(綠色)、Singö Zone(淺綠色)。坑道部分：聯絡坑道(灰色)、處置窖(紅色)、1BTF(深藍色)、2BTF(淺藍色)、BLA(綠色)與BMA(紅色)。(SKB, 2011b)

#### (4) 現地應力與岩盤力學特性

經透過震測法、地質鑽探與現地應力量測等方法掌握母岩力學相關特性，並進一步分析聯絡坑道附近的岩體力學特性(Stille et al., 1985)，其結果如表3.1-1，顯示最大與中間主應力值(方向)分別為10 MPa(NW/SE)與5 MPa(NE/SW)，垂直應力3 MPa為最小主應力。岩體張力強度為10 MPa，變形模數為20 GPa，顯示場址所處岩體力學特性尚屬良好(good quality)，處置坑道與聯絡坑道以岩栓(rock bolts)與鋼纖維噴凝土(fiber-reinforced shotcrete)為其斷面支撐方式。另外，根據地質鑽探資料顯示，地質破裂帶大多夾雜方解石(calcite)、綠泥石(chlorite)與濁沸石(laumontite)等礦物之含泥物質。

表3.1-1 SFR-1處置場岩體力學特性評估值(Stille et al., 1985)

Parameter	Estimated value MPa
Maximum horizontal stress	10
Minimum horizontal stress	5
Tensile strength of rock mass	10
Deformation module of rock mass	20,000

### (5) 岩盤穩定性評估

由於處置場位處岩體破裂區，為瞭解場址內聯絡坑道與處置坑道的岩盤穩定性，曾進行岩楔穩定分析及落磐可能性評估，評估項目包括針對坑道側壁與頂拱岩塊的穩定性進行破壞風險評估及坑道斷面的潛變(creep)監測。

#### a. 坑道側壁與頂拱岩塊的穩定性

針對坑道側壁與頂拱岩塊的穩定性進行破壞風險評估，以掌握岩盤的穩定性，所考慮引致破壞的機制為過應力區(overstressing)與岩體潛變(creep)的兩種因素。圖 3.1-12 案例為顯示了破裂帶 Zone 9 的地層位態與坑道開挖面形成的岩楔可能沿著層面滑動的狀況。

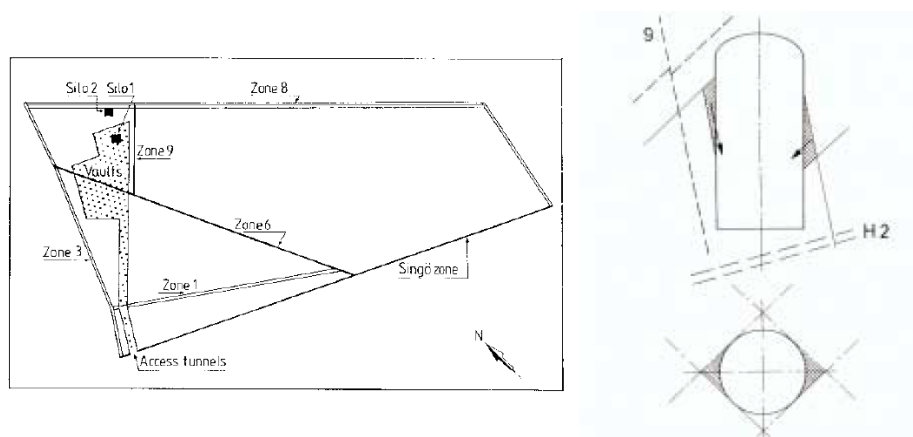


圖 3.1-12 處置窖所處位置之主要破裂帶分佈與坑道側壁不穩定岩塊之示意圖  
(SKB, 2003)

#### b. 潛變量測

##### ■ 量測設備(Instrumentation)

在 SFR-1 係透過採用伸張儀(Extensometers)固定在岩壁上以量測岩體的依時變形，量測位置則分別架設在頂拱、與垂直側壁上部邊緣位置。透過潛變量測目的可以掌握坑道斷面的收斂行為(convergence of the cavern)、膨潤土(bentonite)的側向壓縮、坑道底部與處置窖的隆起。。

##### ■ 應變理論值(Theoretical strain)

Harald Hökmark(1993)利用勁度彈簧與阻尼盤串聯的 Kelvin model 來評估坑道斷面的潛變收斂行為，但其採用的參數實際有諸多不確定性，例如楊氏模數取  $10^4$  MPa、剪力模數取  $4 \times 10^3$  MPa、阻尼係數取  $10^{12}$  MPa，故僅能約略的估算出岩體因坑道開挖所引致的最大潛變量約 1 cm (發生在坑道頂部)，且 95% 的潛變變形量會在 150 年後才完成。潛變影響的區域則影響到坑道邊緣 15m 範圍的岩體內，也因此岩體潛變將造成坑道頂拱處的岩栓與處置窖頂部間的距離有所變化或影響處置窖的穩定性。

■ 實際的潛應變(Actual creep strain)

如圖3.1-13所示，Vattenfall Hydropower(1993)提1985至1993年間的坑道徑向潛變量之量測報告，顯示了潛變速率在開始的數月有明顯的3-4 mm的快速潛變量，此點符合Kelvin model描述的材料變形特性，顯示以Kelvin model描述潛變形為之可行性；其實測值與Harald Hökmark(1993)理論值計算結果相差不大；然而，因本項量測工作係在開挖完成後的數月才開始，非於初始狀態即進行量測，因此坑道斷面因開挖引致的實際潛變量應該高於目前此一量測值(3mm~4mm)。

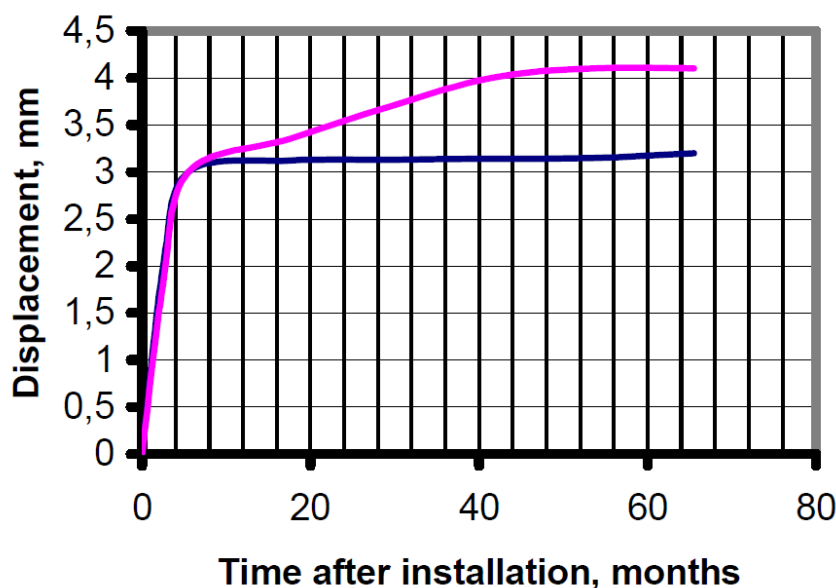


圖3.1-13 伸張計量測徑向潛變量變化(Bodén, 1993)  
 (紅色與深藍色曲線分別為編號E4與E7伸張計之長度變化量)

(6) 水文地質(Hydrogeology)

在水文地質調查部分，包括了近地表地下水條件、岩石導水性與地下水流入量，茲分別說明如后：

a. 近地表地下水條件

SFR所在位置的Forsmark地區其75%的地表面面積覆蓋了冰磧土(till)，地質年代屬第四紀之沉積物(Quaternary deposit)，亦常看到礫石(boulder)的分布。根據岩石導水特性的調查，近地表面有較高的水力導水係數(hydraulic conductivity)，其值約  $10^{-5}$  至  $10^{-4}$  m/s，比出水量(specific yield)介於 10至20%，孔隙率約 30至40%。在地表冰磧土下方土層的水力導水係數為  $1.2 \times 10^{-6}$  m/s，比出水量為 2至5%，孔隙率為 20至30%，介於冰磧土與岩層交界的水力導水係數約為  $1.3 \times 10^{-5}$  m/s。

Forsmark地區的地下水主要來自於降雨，但是在夏季，湖水為湖水周邊含水層地下水來源，然而，因冰磧土底部的垂直導水特性較低，導致地下水交換(water



exchange)並不顯著。此外，在高水位面時期，波羅的海(Baltic Sea)亦提供了地下水交換的來源。此一地區並無明顯的地形起伏，因此，地下水流系統的形成主要取決於不同深度土層的水力導水特性。

#### b. 岩體導水特性

SFR-1所在位置之母岩為富含裂隙的結晶岩類，岩體裂隙形成地下水流通的管道，因此，水力傳導特性取決於岩體裂隙的連通狀況，且具尺度依存性(scale-dependent)。為掌握岩體導水特性，於H2(如圖3.1-11)區的坑道四周進行了20組雙封填塞(straddle-packer tests)導水試驗，另外於其他各區進行了2至5組的試驗。表3.1-2為岩體導水特性試驗與岩體厚度調查結果，顯示Zone 3的導水性最佳，其水力導水特性為  $2.9 \times 10^{-6}$  m/s。

表3.1-2 岩體導水特性與岩體厚度(Holmén and Stigsson, 2001)

Zone	Hydraulic conductivity [m/s] (geometric mean)	Approximate thickness of the zone (m)	Number of tests
H2	$3.4 \cdot 10^{-7}$	6	20
3	$2.9 \cdot 10^{-6}$	6	3
6	$2.1 \cdot 10^{-7}$	2	2
8	$5.1 \cdot 10^{-7}$	9	5
9	$9.8 \cdot 10^{-9}$	3	4

具代表性的岩體導水特性必須考慮岩體尺度與地下水流方向，不同的地質破裂帶其間岩體導水特性端視地質破裂帶所定義的區域；此外，透過導水隧道(drained tunnel)研究處置坑道系統的地下水滲入量時，是有機會評估隧道徑向(radial flow)地下水流的等值導水特性。

#### c. 地下水入滲(Groundwater inflow)

SFR-1處置設施透過長期的監測計畫以量測20年期間地下水滲流進入的情況，量測資料如圖3.1-14所示。在1988年的地下水每小時總滲入量為  $44 \text{ m}^3/\text{h}$ ，之後滲流量呈現遞減趨勢，至2006年仍有  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ ，顯示20年後每一小時仍有  $20 \text{ m}^3$  的地下水入滲量。另一方面，由量測記錄經驗，顯示在20年期間1992年曾經修改監測計畫；儀器K303水表在1999及2005年是允許被更新替換的。

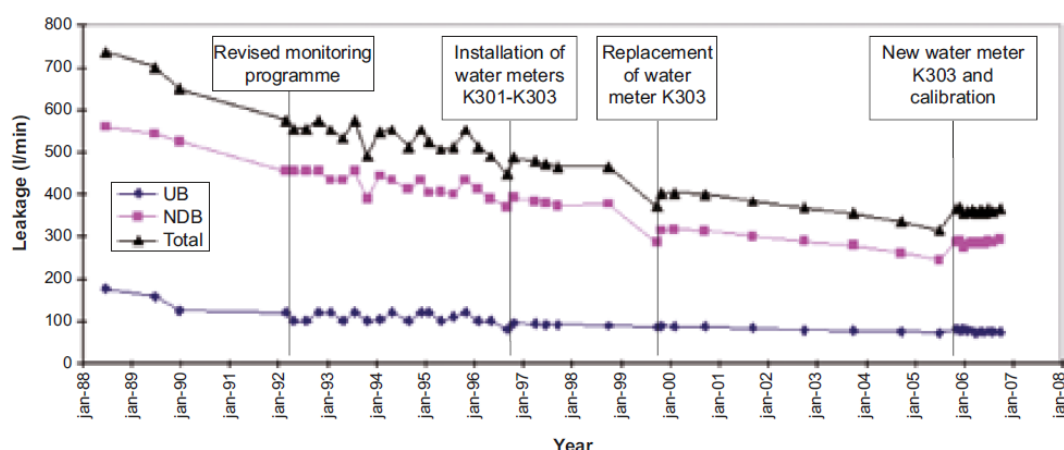


圖3.1-14 1988至2006年期間，SFR 1處置設施之地下水滲流監測紀錄  
 (UB = maintenance building, NDB = lower drainage basin)(Bodén and Lundin, 2007).

### 3.1.2 芬蘭Olkiluoto VLJ處置設施

#### (1) 背景介紹

Olkiluoto位於波羅的海北部波的尼亞灣(Gulf of Bothnia)半島上，如圖3.1-15，其地上面積多為林貌，地勢平坦，周圍屬淺水海域，局部的岩床凹地大多有風化表土層覆蓋，且無天然湖泊，而半島西側為Olkiluoto核電廠座落位置。

Olkiluoto所處原岩條件為結晶岩盤(crystalline bedrock)，係由Precambrian Fennoscandian地盾所屬的 Svecofennian造山帶主控，其組成包含了片麻岩(gneisses)與偉晶象花崗岩(pegmatitic granites)，生成年代約 1930至1800百萬年前；該區域的斷層帶主要起源於Svecofennian造山運動，位態分佈為NE-SW走向的平移斷層(strike-slip faults)，岩盤的地下水主要分佈在水文地質區(hydrogeological zones)與地質破裂帶。約在近100,000年前，Olkiluoto地表曾被冰層覆蓋，土壤鹽分含量高，地下水的化學特性與基質孔隙水相當複雜。

Olkiluoto核電廠於1980年開始運轉，隨即著手低放射性廢棄物處置場址之調查，最後選定Olkiluoto VLJ處置場現址為低放射性廢棄物處置場。Olkiluoto VLJ處置場距離Olkiluoto核電廠不到一公里，處置窖建造於地下約60至95公尺深處岩層，廢棄物經由運輸坑道送往處置區，如圖3.1-16。Olkiluoto VLJ處置場於1986年提出建造申請，經Eurajoki市政府與芬蘭輻射與核能安全中心審核通過發給建造執照後，於1988年開始進行開挖作業，1992年設施建造完成開始運轉處置作業，其處置容量約9,000立方公尺。Olkiluoto VLJ處置場的設計，將來廢棄物貯滿封閉後無需進行監管。

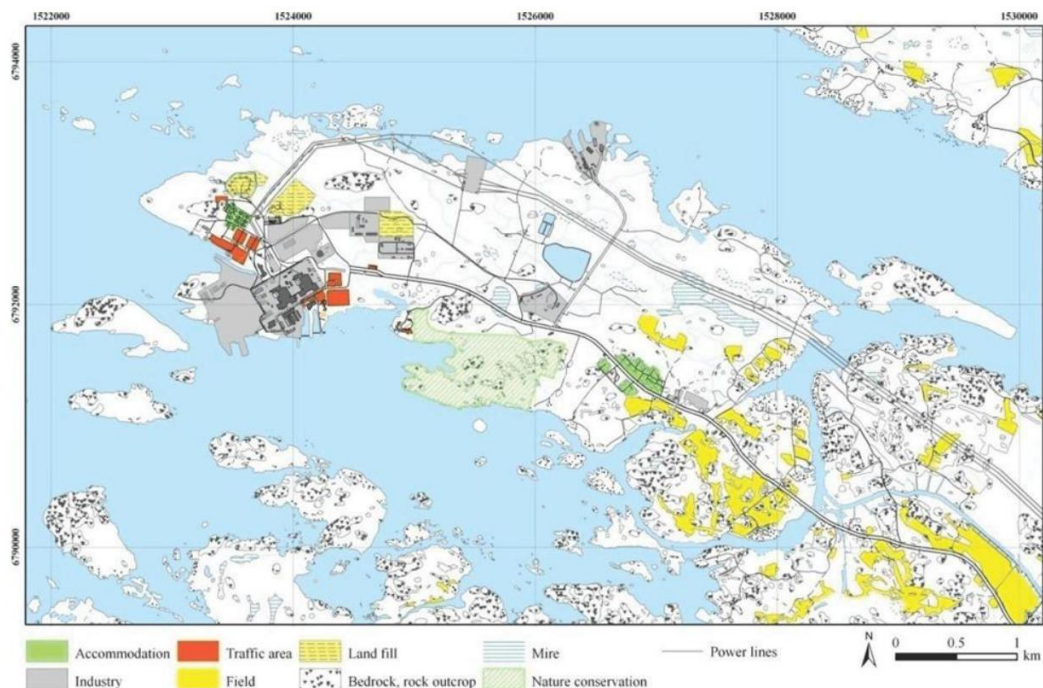


圖3.1-15 Olkiluoto所處區域地理位置(Hjerpe, Ikonen, and Broed, 2010)

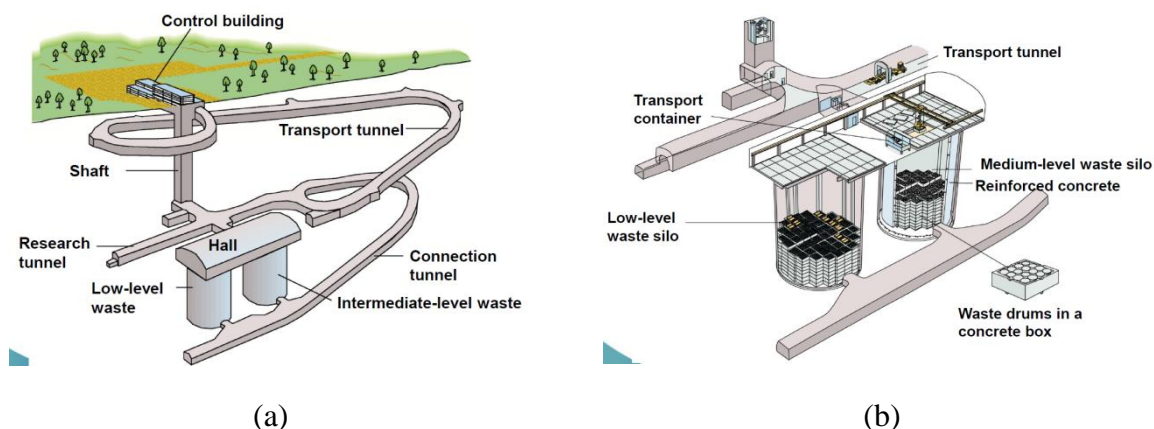


圖3.1-16 Olkiluoto VLJ 中低放處置設施：(a)VLJ處置場處置區及相關聯絡坑道等設施；(b) 處置區依低放與中放射性廢料處置區分二處置窖

## (2) 監測歷史與監測項目

Olkiluoto VLJ處置場址自1980年代建造、1992年運轉後，隨即進行有系統性的監測工作，與岩石力學較有關者如表3.1-3內所示，包括：岩盤位移量測、溫度量測與岩栓荷重量測等，其後於2004年也增加目視檢測及AE監測岩石之破裂損傷，亦得知整體監測項目陸續在增加改善；另外，2006至2015年間，與岩石力學、水文地質及空氣有關的監測計畫如表3.1-4所示(Anttila et al., 2001)。針對上述所列監測計畫，依監測時間之連續性及項目整理下列幾點：

a. 連續性監測

在岩石力學部分，採用連續性監測的項目包括：伸張計、岩栓荷重計與岩石溫度；在水文地質部分，包括地下水滲漏(groundwater leakage)之地下水湧出量(pumped volume)、水頭差(hydraulic head)之自動監測、降雨(precipitation)與海平面變化。

b. 週期性監測

在岩石力學部分，包括了地質破裂帶、監測大廳(hall)與坑道、處置窖(silo)之收斂性監測(convergence measurement)、監測大廳頂拱與噴凝土檢測；在水文地質部分，主要為滲漏點的影像監測(photographing of leakage points)。

c. 視需要施測

主要為水文地質部分地下水滲漏項目之流堰監測及水頭差(hydraulic head)之人工監測項目。

表3.1-3 Olkiluoto VLJ處置場址與岩石力學有關的監測項目及監測頻率

ROCK MECHANICS	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
GPS-measurements (since 1995)	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
Microseismic measurements (since 2002)										
Precise levelling										
- Block deformation	x		x		x		x		x	
- Block and site deformation	x				x				x	
Extensometer measurements*										
Convergence measurements				XX	XX	XX				
Stress cell measurements*										
Loads in rock bolts										
Rock damage										
- AE measurements										
- Visual mapping										
Rock temperature										

\*Measurements may start earlier

x = represents the amonth of measurements







 = Continuous  
 = Measuring campaigns  
 = Single measurement

表3.1-4 Olkiluoto VLJ處置場址在岩石力學與水文地質的監測項目與頻率  
 (Hagros et al., 2005)

Measurement	Year	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
Rock mechanics	Extensometers	[Continuous]										
	Loads in rock bolts	[Continuous]										
	Convergence measurements	[Continuous]										
	Fracture zone					●						●
	Hall and construction tunnel					●						●
	Medium level silo					●						●
	Hall roof, shotcrete check					●						●
	Rock temperature	[Continuous]										
Hydrogeology	Groundwater leakage	[Continuous]										
	Pumped volume	[Continuous]										
	Weirs	[Optional]										
	Hydraulic head	[Continuous]										
	Automatic measurements	[Continuous]										
	Manual measurements	[Optional]										
	Precipitation	[Continuous]										
	Sea level	[Continuous]										
	Photographing of leakage points						●					●
Groundwater chemistry analyses	*	●	*	*	●	*	*	●	*	*	*	
Air	Humidity	[Optional]										
	Temperature	[Continuous]										
	Gases	●	●	*	*	●	*	*	●	*	*	

Legend:

 Continuous/regular measurement (e.g. once per day)  
 Single measurement  
 \* } Optional measurement, if needed

### (3) 地質破裂帶的監測

在Olkiluoto地區進行的板塊變形量測(Tectonic deformation)計畫區分為區域變形量測(Regional deformation)與局部變形量測(Local deformation)，於Olkiluoto VLJ進行的地質破裂帶監測計畫則屬後者，相關量測工作始於 1990年(Johansson 2000)。量測方法如圖3.1-17所示，係在坑道襯砌壁上架設伸張計(extensometer)藉以觀察坑道徑向與軸向的收斂行為，就Olkiluoto VLJ處置場址而言，在地表下深度10-70m的範圍內有五處坑道位置被地質破裂帶所穿過，全區共架設16支伸張計，並自1989年開始監測紀錄。

此外，針對單一潛在滑動岩塊的量測，係利用裂縫計(jointmeters or crackmeters)監測節理的開裂與閉合，如圖3.1-18所示。

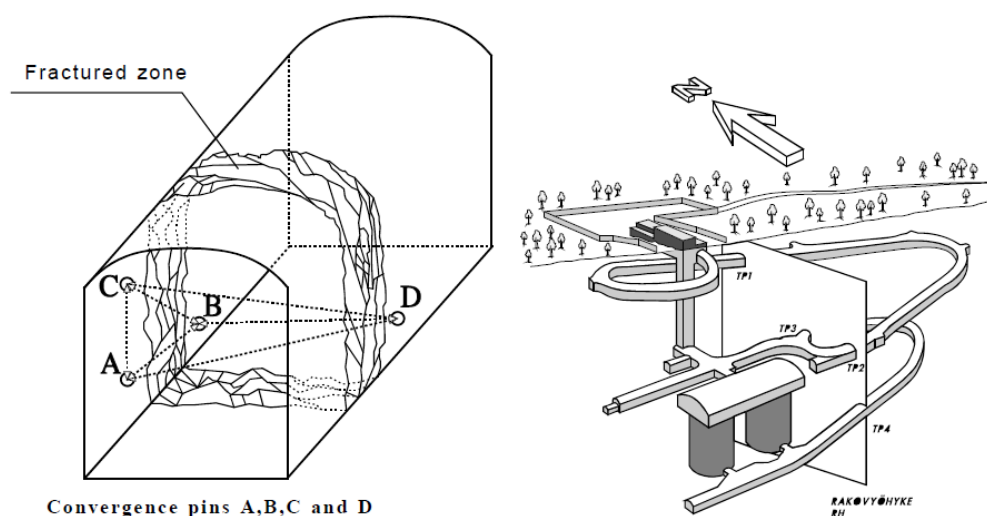


圖3.1-17 Olkiluoto VLJ 中低放處置場址針對破裂區的量測，例如在坑道埋設量測點觀察坑道的收斂行為(Johansson, 2000)

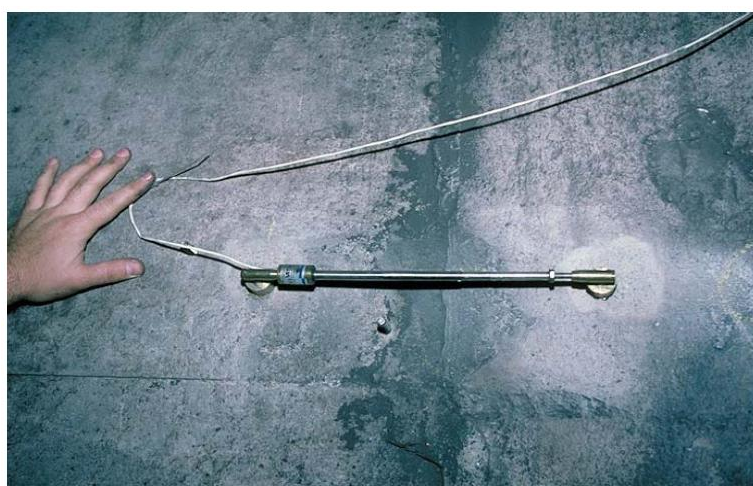


圖3.1-18 Olkiluoto VLJ處置場以裂縫計監測特定節理的開裂與閉合量(MoDeRn, 2013)

#### (4) 岩盤位移與收斂監測

VLJ處置設施自1980年代後期即針對岩石力學相關項目展開系統性的監測工作，包括岩盤位移監測(rock displacement monitoring)與收斂監測(convergence measurements)；在岩盤位移監測部分，採用了捲尺收斂計(tape convergence measurement)與伸張計，如圖3.1-19所示，伸張計共有18支，並採鑽孔灌漿固定之；伸張計係以資料擷取系統(type CR10)每日量測，收斂計量測則是五年實施一次。

Olkiluoto VLJ處置場內的所有監測訊號均透過訊號線連接至資料擷取器，訊號線均套管保護並埋設在混凝土襯砌內，所採用的感應器屬振弦式傳感器(vibrating wire transducer)，其優點為訊號可長距離傳輸且不易受到水分或濕度變化的干擾，目前在量測設備上的缺點在於伸張計的讀寫頭(reading heads of extensometer)易因凝結水(condensed water)影響其功能性致需更換，且訊號偶受干擾。

Olkiluoto VLJ處置場內採用的量測方法、紀錄參數、量測位置、量測精度示如表3.1-5所示。

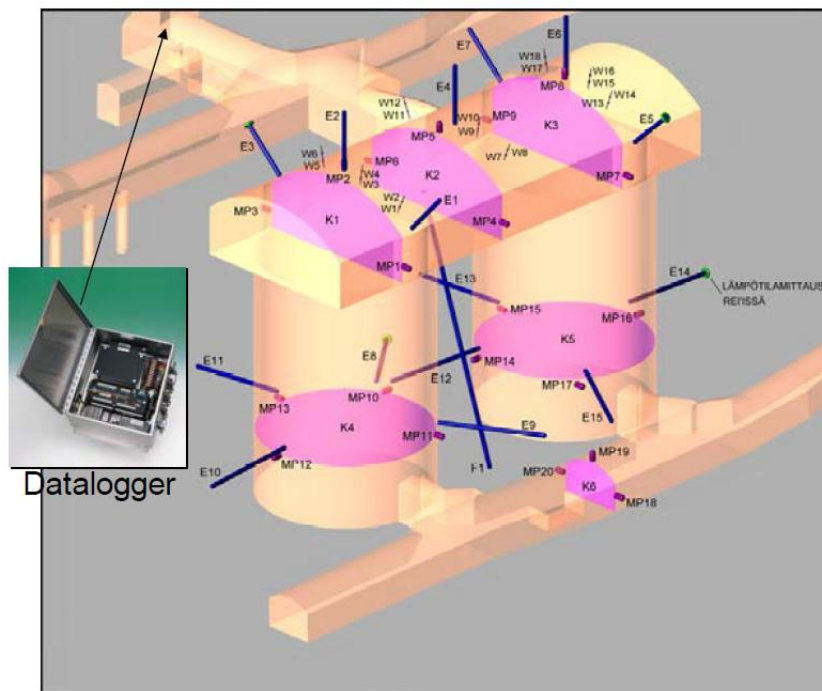
在Loviisa VLJ處置場自1997年也同樣針對岩石力學相關項目進行系統性的監測工作；在岩盤位移監測部分，亦採用了捲尺收斂計，14支伸張計跟接縫開度計，伸張計跟接縫開度計係以資料擷取設備於每日進行紀錄，伸張計量測則每半年施測一次。

圖3.1-20所示是針對處置窖岩石位移監測結果(伸張計編號E9位置)，顯示了伸張計變化值非常小，岩石位移低於0.4 mm，顯見坑道結構之穩定狀況。此外，最大的岩栓荷重軸力低於 10 kN。平時造成伸張計量測值會微小變動的原因，來在於現場環境溫度(約18至19°C)與岩石溫度(7°C)的溫度差值所造成。

Loviisa處置場的量測訊號採光纖(fibre optics cable)傳輸，資料擷取狀況良好，僅有一次因為閃電造成系統性當機致資料記讀失敗的經驗，有關VLJ處置設施的量測結果與經驗於Öhberg 等人(2011)的報告中另有詳述。

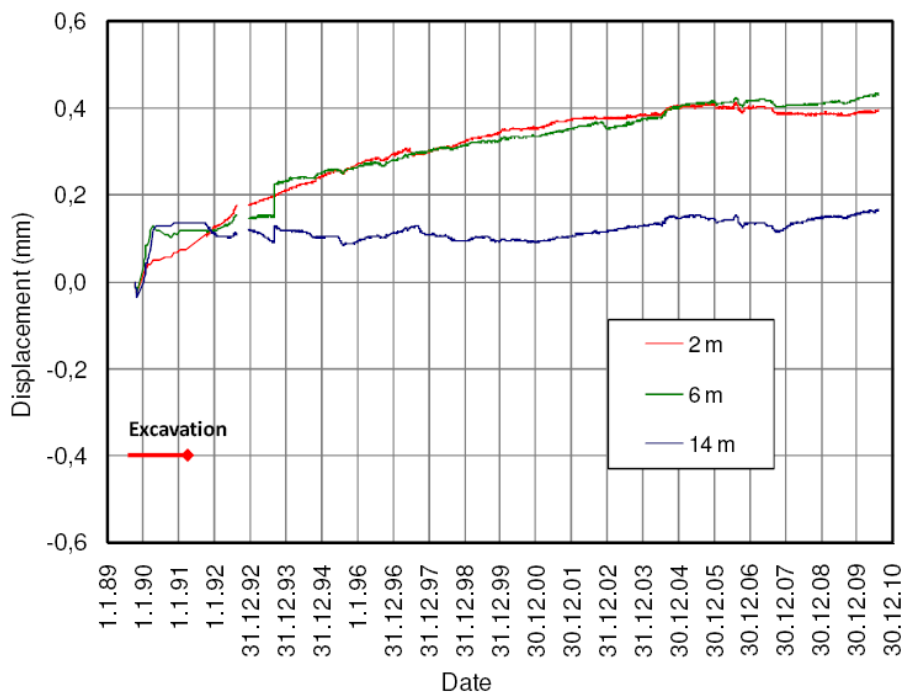
表3.1-5 Olkiluoto VLJ處置場內採用的量測方法與紀錄參數

技術/方法	參數	應用	量測區域	量測精度	可靠度
收斂計	位移	位移變化監測	處置設施周 邊岩石/地質 破裂帶	0.1-0.5 mm	中等
伸張計	位移	位移變化監測	處置設施周 邊岩石	0.05 mm	高
裂縫計	位移	位移變化監測	岩石裂隙	0.05 mm	高



(藍色線段代表伸張計，淡紫色所圍成之斷面為收斂計之量測位置)

圖3.1-19 Olkiluoto VLJ處置場址在Silo佈設伸張計與收斂計之量測位置  
 (Öhberg et al., 2011)



(伸張計編號E9位置)

圖3.1-20 Olkiluoto VLJ處置場於1989至2009年10年期間處置窖之岩石位移監測變化  
 (Öhberg et al., 2011)



### (5) 水文地質監測

Olkiluoto VLJ處置場的水文地質條件，例如水力高差(Hydraulic head)與降雨，在開挖建造前即已先進行了數年的監測工作，在開挖建造、與運轉期間，即依表3.1-4的監測計畫展開系統性的監測工作。監測項目，包括地下水入滲處置場址的狀況、鄰近岩體的地下水的水頭、場址的降雨量、及海水面。也於10個監測點進行其他的監測項目：溫度、濕度、CO<sub>2</sub>含量與氮氣含量監測(氮氣含量計有12個監測點)。

地下水入滲率(groundwater leakage rate)之監測係利用處置窖上、下二側抽水站進行連續性地監測，施作頻率為每五年施測一次，每一個月記錄一個資料點；此外，在聯絡坑道(connection tunnel)與運輸坑道(transportation tunnel)間設置了量測堰(measuring weirs)。根據監測結果，如圖3.1-21所示，地下水入滲率自1992年的 45 l/min已逐年遞減至2009年的 38 l/min，且84% 的地下水入滲來自運輸坑道，其餘的來自聯絡坑道，且無地下水入滲處置窖的狀況。

水力水頭高差每5年施測一次，每一個月記錄一個資料點，並利用鑽孔與多液位式水壓計(multilevel piezometer)進行自動監測；此外，在處置場址鑽了三個地下水監測孔位以進行水力高差的持續性監測。

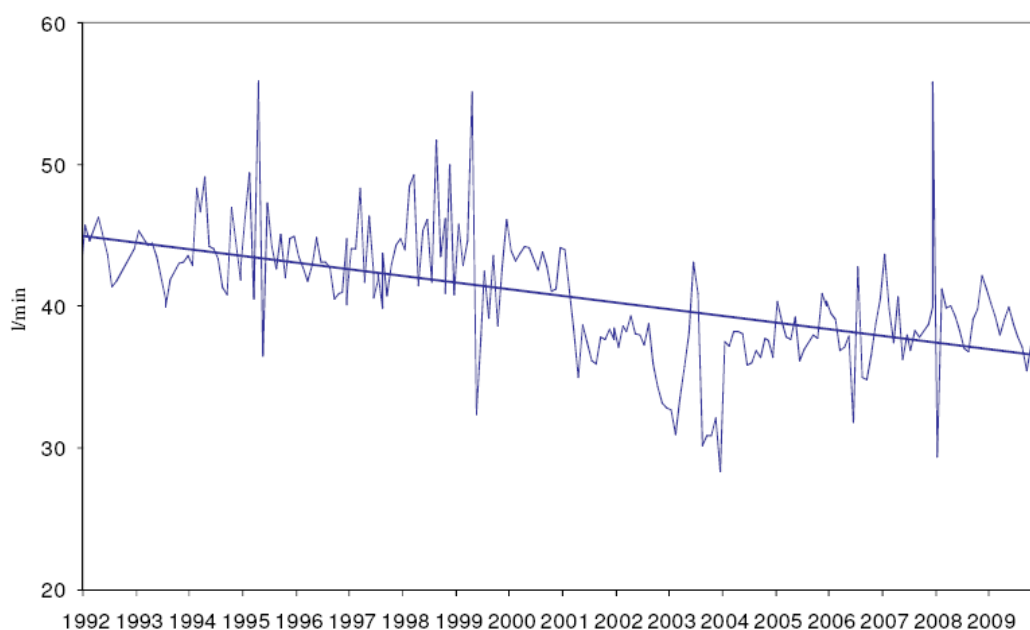


圖3.1-21 Olkiluoto VLJ處置場址於1989至2009年十年間之地下水滲漏監測  
(Öhberg et al., 2011)

### 3.1.3 芬蘭LOVIISA VLJ處置設施

#### (1) 背景介紹

Loviisa VLJ處置設施興建於1993年，並於1997年開始低放射性廢棄物處置作業。Loviisa VLJ屬地下型處置設施且鄰近發電廠，其建造區分三階段。第一階段(1993-1997)包括了總長 1,100 m 聯絡坑道的開挖工程、二個垂直井(vertical shaft)及處置坑道(disposal caverns)，也包括了兩個維修廢棄物坑道(tunnels for maintenance waste)及低放射性固化廢棄物(solidified waste)處置坑道。低放射性固化廢棄物處置坑道於2011開始運轉，並於2010至2011年間進行第三座維修廢棄物坑道的開挖工程及聯絡坑道的施作，如圖3.1-22所示。

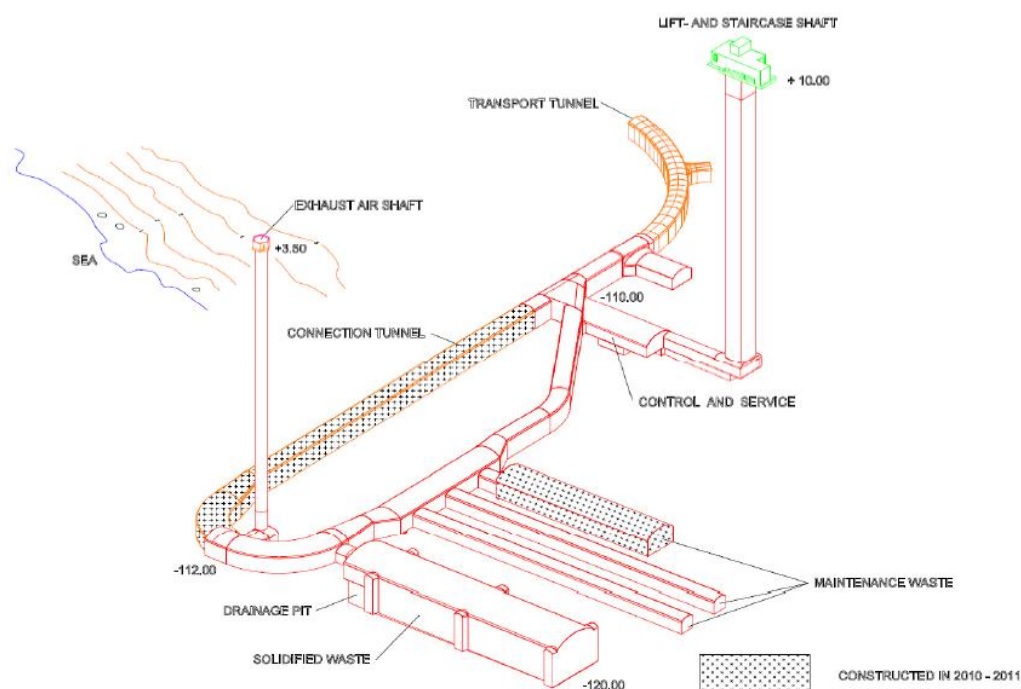


圖3.1-22 LOVIISA VLJ處置場的空間配置(Öhberg et al., 2011)

#### (2) 地質條件

Loviisa VLJ處置場址所處的Hästholmen島其岩石材料有顯著的傾斜透鏡狀褶曲(sloping lenses)與層面(layers)，主要為無奧環花崗岩(pyterlite)與奧長環斑花崗岩(wiborgite)，場址位置的地質條件為結晶岩類(crystalline)與前寒武紀奧長環斑花崗岩(Precambrian rapakivi granite)。在地質構造部分，有三個具傾斜的地質破裂帶，其深度距地表下60至70 m。處置設施建造於兩個主要地質破裂帶之間的完整岩體，且為一停滯水區(stagnant brackish groundwater regime)；根據地質露頭調查，出露的節理面位態為NW-SE 與ENE-WSW，傾角近乎垂直，平均的裂隙密度約為 0.6 pcs/m；此外，第三個

且裂隙發展最顯著的地質破裂帶為水平分布，平均的裂隙密度約為 1.3 pcs/m，將場址岩體切割成一近似立方體。

(3) 監測計畫

Loviisa VLJ處置場址監測計畫如表3.1-6所示，有關坑道結構穩定性之監測項目主要包括：伸張計、收斂量測、裂縫計、荷重計、溫度監測；按監測頻率區分連續自動監測與反覆的人工監測(一年1至12次)。其中，兩座坑道在2011年建造期間即安裝了伸張計(extensometer)、荷重計(load gauge)與收斂岩釘(convergence bolt)，也包括了長期監測計畫的提出；至於自動資料擷取系統的更新作業則於2007年進行。

表3.1-6 Loviisa VLJ處置場址監測計畫 (Öhberg et al., 2011)

量測項目		量測頻率
Rock mechanics	伸張計	連續量測
	荷重計	連續量測
	裂縫計	連續量測
	溫度	連續量測
	收斂量測	半年施測
Hydraulicgeology	地下水滲流	
	-地下水湧出體積	連續量測
	-流堰監測	每月施測
	導電度	每月施測
	水力高差	連續量測
	地下水水位面	每月施測
	新鮮/鹽水介面	每季施測
	降雨	連續量測
海平面位置	連續量測	
Chemistry	地下水取樣與分析	每年施測

(4) 岩石力學監測

如同Olkiluoto VLJ處置設施之監測作法，Loviisa VLJ處置場址所進行岩石力學監測目的旨在掌握岩石坑道的長期穩定性，所裝設的自動資料擷取系統包括了14個伸張計(extensometer)、7個荷重規(load gauge)、9個熱感應貼片(thermal gauge)、及1個裂縫位移

計(fissurometer)。相關監測工作於1996年處置場址建造開挖後隨即展開，並利用資料擷取器於每日進行資料紀錄，監測位置設在廢棄物坑道與低放射性固化廢棄物處置坑道的交叉斷面。經過14年後，如圖3.1-23所示，坑道的變形量一如預期且其值非常小(低於 0.1 mm)，顯示了處置坑道的穩定性。此外，裂縫位移計用在監測處置坑道頂拱既有的開口裂隙，其結果顯示裂隙開口量約 0.15 mm。

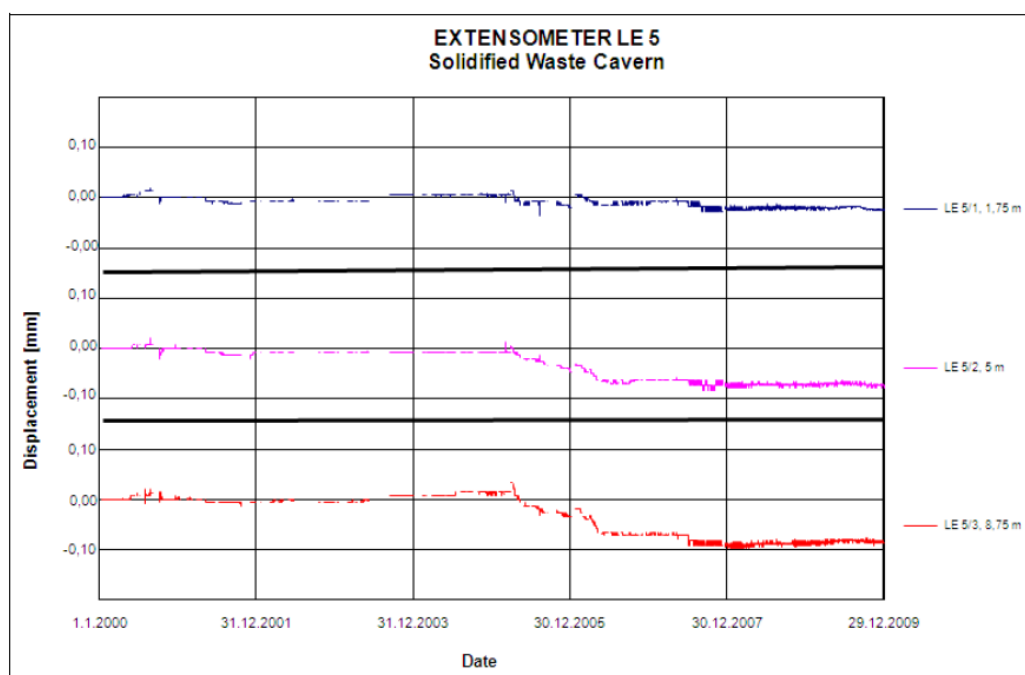


圖3.1-23 LOVIISA VLJ 低放射性固化廢棄物處置坑道的監測結果(伸張計編號LE5在2005至2006年間，圖中顯示的位移量變化係因建造期間溫差所導致)(Öhberg et al., 2011)

#### (5) 水文地質監測

Loviisa VLJ處置場址的地下水監測已系統性地進行了超過10年，監測工作包括鑽孔的地下水水頭量測(groundwater head measurements)、多液位式水壓計(multilevel piezometer)與新鮮/鹽水地下水介面(interface of the fresh/brackish groundwater)。在處置設施建造期間，曾因地下水滲入岩石坑道，導致地下水位面下降了數公尺；同時鹽水水位面上升了數十公尺。地下水的入滲量監測已成為處置坑道運轉期間其水文地質監測的重要課題。至目前為止，地下水入滲的變化趨勢已趨穩定，如圖3.1-24所示，其入滲量從1996年的 300 l/min降至 2009年的 65 l/min。推測上述地下水滲流趨緩的原因，可能係因裂隙開口被化學沉澱物所填充，也可能是因為周圍岩盤應力調整導致裂隙開口閉合；地下水滲流趨緩亦影響了該區域的地下水分佈，且地下水位面及新鮮/鹽水地下水介面的變化趨勢，顯示該處的水文地質條件逐漸回到開挖前的狀況。

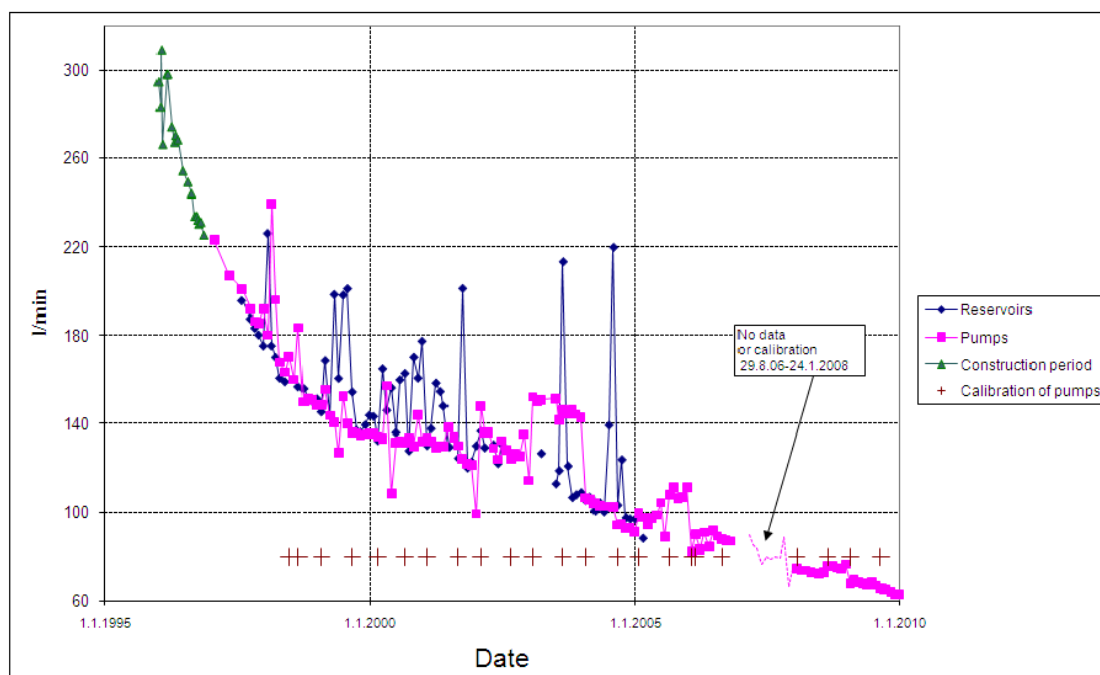


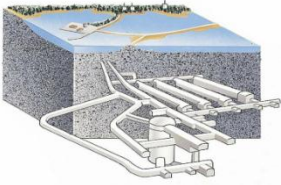
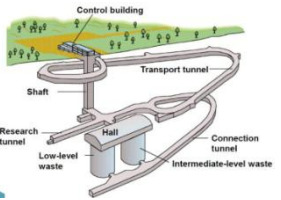
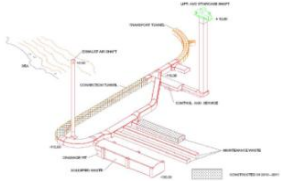
圖3.1-24 自1996至2009年間Loviisa VLJ處置場址之地下水滲流監測(Ö hberg et al., 2011)

### 3.1.4 小結

經綜整瑞典SFR-1、芬蘭Olkiluoto VLJ與Loviisa VLJ三個中、低放處置設施之監測項目、監測目地、監測儀器與位置，如表3.1-7所示，三處坑道處置案例之比較條列整理如后：

- (1) 三個國外處置設施均屬坑洞處置，其中瑞典SFR-1屬於離岸海床下之岩盤坑洞處置，芬蘭Olkiluoto VLJ與Loviisa VLJ同屬近岸陸地下之岩盤坑洞處置。
- (2) 三處案例針對岩盤穩定性之監測，係考量處置坑道或聯絡坑道鄰近地質破裂帶處，或是單一潛在滑動之岩塊(如Olkiluoto VLJ)對坑道結構及內部工作人員安全的影響，而造成岩盤穩定性疑慮之原因，來自地質破裂帶(fracture zone)、過應力區(overstressed zone)、及岩體潛變(creep)特性(而岩體潛變變形大多來自弱面之潛變行為)的影響。
- (3) 針對水文地質的監測項目，主要有地下水入滲量及水頭高差二項，且視需要於場址進行開挖作業前即已進行數年的監測工作(Olkiluoto VLJ為例)；另外，為掌握地下水挹注來源，降雨、海平面位置須一併納入監測項目。
- (4) 視監測項目的屬性決定監測頻率，屬於對岩盤穩定性項目多採連續自動量測(每天記錄一次)，坑道斷面收斂量測則多採半年施測一次。水文地質項目部分，地下水湧出體積、水力高差、降雨及海平面位置屬連續量測，流堰監測、地下水水位面與新鮮/鹽水介面，則採每月施測或每季施測一次。

表 3.1-7 國外處置坑道監測項目、儀器與位置彙整

	處置型式	監測項目與目的	監測儀器/位置
<p><b>瑞典 SFR-1</b></p> <p>建造: 1983 運轉: 1988</p>	<p>離岸海床之坑洞處置</p> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 岩石力學 聯絡坑道與處置坑道的岩盤穩定性</li> <li>2. 水文地質 (1)岩體導水特性 (2)地下水入滲</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 伸張計/固定在岩壁上，或架設在頂拱與垂直側壁上部邊緣以量測岩體的依時變形</li> <li>● 雙封填塞(straddle-packer tests)導水試驗/鄰近地質破裂帶之坑道</li> </ul>
<p><b>Olkiluoto VLJ</b></p> <p>建造: 1988 運轉: 1992</p>	<p>近岸陸地之坑洞處置</p> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 岩石力學 (1)坑道之岩盤穩定性 (2)單一潛在滑動岩塊 (3)坑道斷面收斂</li> <li>2. 溫度</li> <li>3. 水文地質 (1)地下水入滲 (2)水力高差</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 伸張計、荷重計/坑道結構襯砌</li> <li>● 裂縫計/滑動岩塊界面兩側</li> <li>● 伸張計、捲尺收斂計/大廳(hall)與處置窖</li> <li>● 溫度計</li> <li>● 抽水站/處置窖上、下二側</li> <li>● 鑽孔與多液位式水壓計(multilevel piezometer)/鑽設監測孔位</li> </ul>
<p><b>Loviisa VLJ</b></p> <p>建造: 1993 運轉: 1997</p>	<p>近岸陸地之坑洞處置</p> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 岩石力學 岩石坑道的長期穩定性</li> <li>2. 水文地質 地下水入滲</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 伸張計、荷重規、熱感應貼片與裂縫位移計/維修廢棄物坑道與低放射性固化廢棄物處置坑道的交叉斷面</li> <li>● 地下水水頭量測、多液位式水壓計、新鮮/鹽水地下水介面</li> </ul>

### 3.2 國內一般坑道經驗

考量我國未來低放射性廢棄物處置場址潛在可能區域，及目前已蒐集之隧道檢測案例詳實性，本研究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)進行隧道檢測案例整理，所述七座隧道包括金崙、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，其地理位置如圖3.2-1所示。此外，為了解國內營運中隧道之監測項目，本研究以國道五號雪山隧道為例，整理其採用的監測項目供後續相關章節之參考。

#### 3.2.1 安朔隧道檢測案例

案例所處地形以山坡丘陵為主，地形陡峭，鄰近山脈標高 200-1000公尺不等，全區嶺線大致呈現東西走向，高度均自西向東遞減至海岸附近，嶺線高度亦有北高南低的趨勢，大鳥山以北之嶺線高度長在海拔七百公尺以上，大鳥山以南的高度逐漸下件至五百公尺左右，地形漸趨平緩，其地形詳如圖3.2-2所示。

根據「南迴鐵路工程-工程輯要」報告中，將南迴鐵路沿線地層劃分為七個岩段，案例所處之地層分屬第二岩段(L2)與第三岩段(L3)。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，主要由後塊狀硬頁岩或板岩及少數厚層變質砂岩所組成。

案例區的區域性地質構造由南而北包括了菩安山背斜、新化斷層及大鳥斷層。菩安山背斜由數個較小的倒轉褶皺所組成，其本身亦為一倒轉褶皺。新化斷層及大鳥斷層均為右移斷層，斷面走向約為東西向。菩安山背斜位於安朔隧道之西方約3公里，新化斷層於大武山二號隧道出口北方約2公里處，大鳥斷層則通過大鳥隧道，其區域地質圖如圖3.2-3所示。

##### (1) 岩體分類

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+719-36K+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=N37~47W/89NE、J2=N69~84E/85SE及J3=N33~43E/86SE，二組劈理位態為C1=N20E.48SE與C2=N26W/38NE，破壞型式以岩塊墜落、岩塊翻倒與材料破壞為主，如表3.2-1所示。

##### (2) 隧道斷面支撐工法

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3.2-4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。



圖3.2-1 南迴線金崙隧道至安朔隧道地理位置圖(交通部台灣鐵路管理局，2008)



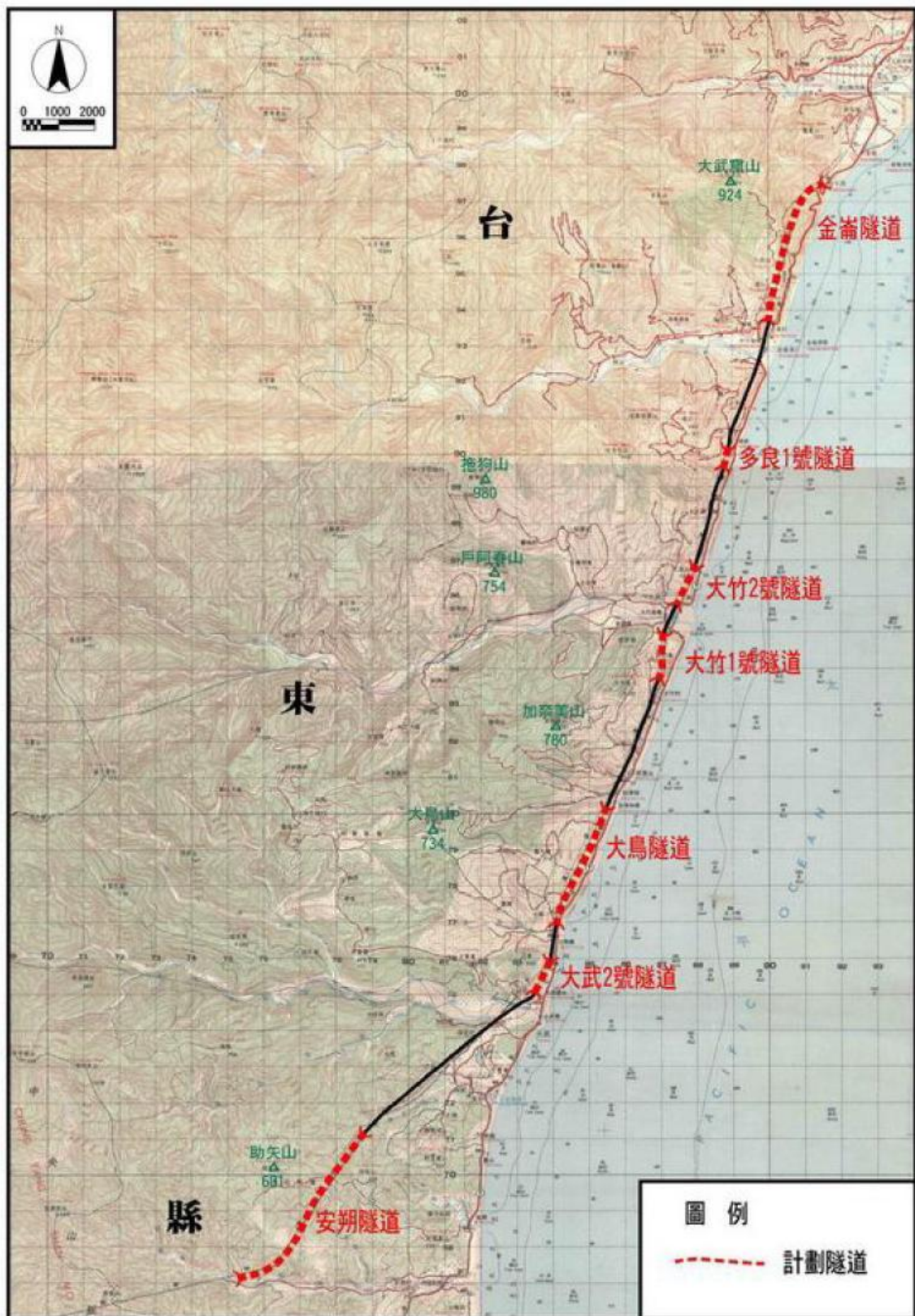


圖3.2-2 南迴線金崙隧道至安朔隧道地形圖(交通部台灣鐵路管理局，2008)

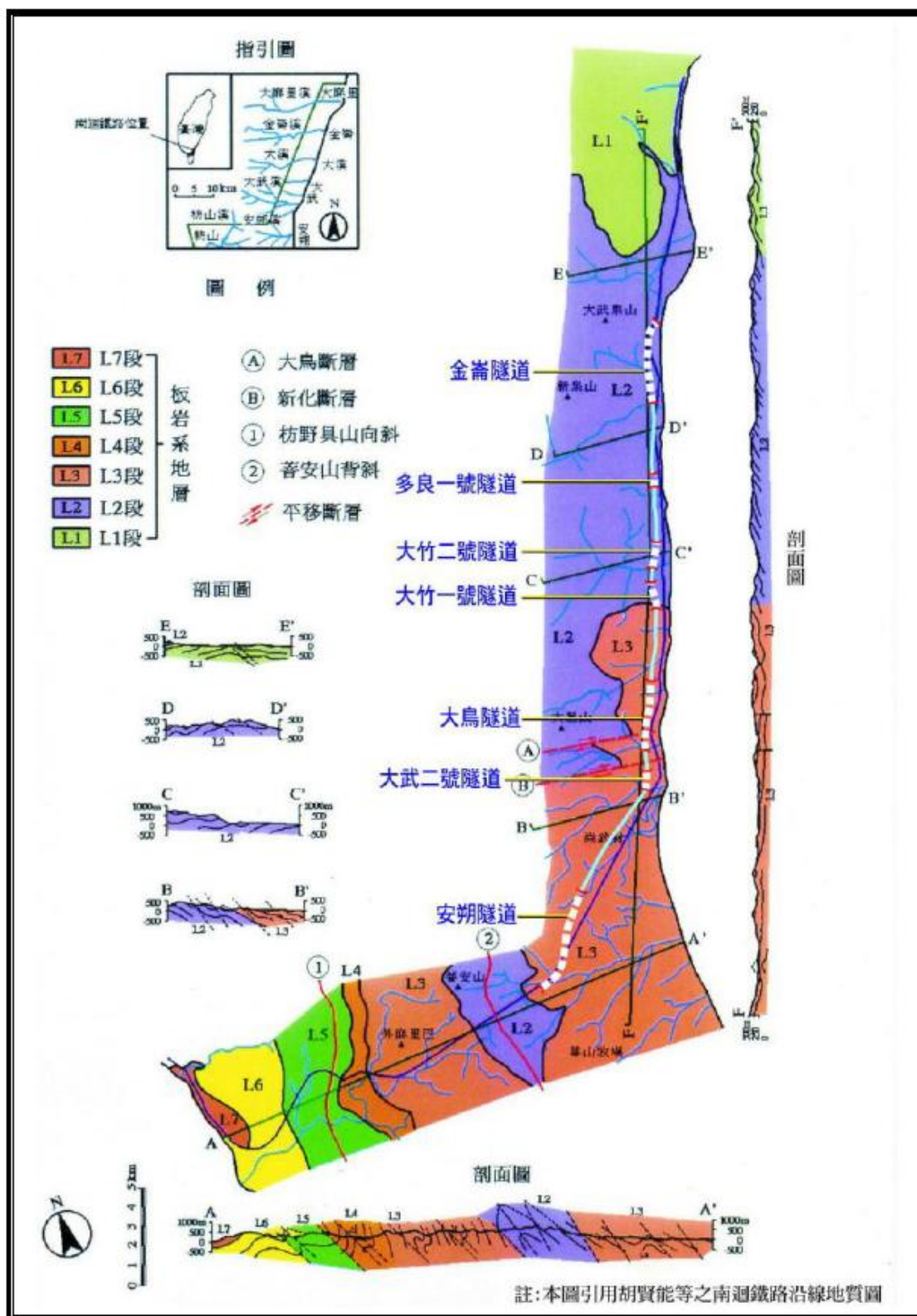


圖3.2-3 南迴線金崙隧道至安朔隧道區域地質圖(交通部台灣鐵路管理局，2008)

表3.2-1 安朔隧道地質條件總表(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)

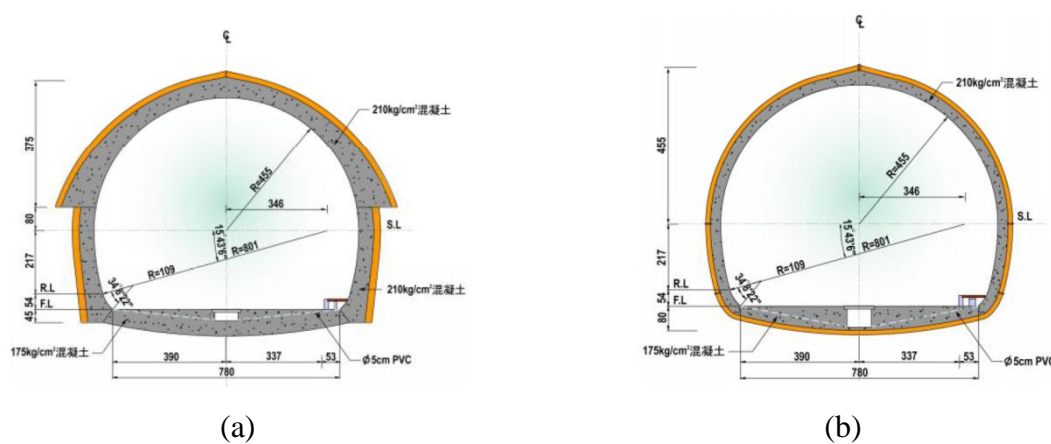


圖3.2-4 安朔隧道支撐工法斷面圖：(a)雙線隧道美國鋼支堡工法標準斷面圖；(b) 雙線隧道新奧工法標準斷面圖(交通部台灣鐵路管理局，2008)

### (3) 裂縫與滲水調查

隧道襯砌表面裂縫調查目的，在於瞭解隧道全線襯砌表面裂縫位置與分佈情形；滲水調查，則為瞭解襯砌表面滲水位置與滲水情形，本項調查工作分為隧道影像掃描與目視檢查。

在隧道影像掃描部分，採用瑞士 Leica公司與Amberg工程顧問公司合作發展的GRP5000隧道影像掃描系統進行隧道表面裂縫及滲水影像的掃描，如圖3.2-5所示，所獲得的隧道襯砌表面影像成果如圖3.2-6所示。

在目視檢查部分，主要在隧道主線段以及橫坑段由工程人員執行與判定，並於異常程度較為嚴重或複雜區段以噴漆標定範圍。依安朔隧道目視檢查結果，顯示隧道內可見襯砌修補痕跡，多處襯砌裂縫伴隨滲水，嚴重者有噴水現象，滲水出混凝土多有白華現象，另有部分裂縫相互連結造成表面呈片狀剝落，隧道現況異狀照片如圖3.2-7所示。



(a)



(b)

圖3.2-5 隧道影像掃描：(a)GRP5000隧道影像掃描系統與(b)現場作業照片(交通部台灣鐵路管理局，2008)

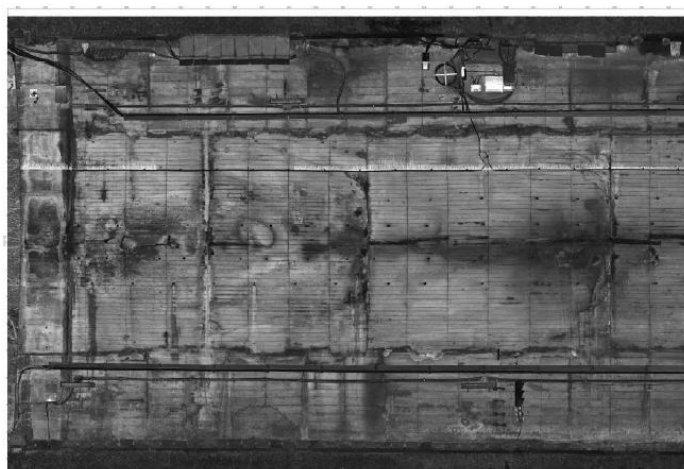


圖3.2-6 隧道影像掃描成果範例(交通部台灣鐵路管理局，2008)

#### (4) 隧道襯砌及背後空洞調查

本項檢測工作採用透地雷達進行，透地雷達探測方法是採用高壓線圈為探測源，產生高頻電磁波射入結構體內，經電磁特性如導電率或介電常數變化的界面或異常體時，會依斯涅爾定律(Snell's law)將部分能量反射回來，分析反射波的走時、強度及相位變化，即可獲得隧道襯砌內電磁特性異常之幾何位置，可有效探查區域襯砌厚度完整性及襯砌背填灌漿之狀況，對於日後補強設計與施工的特殊劣化區段確認相當有助益。

所述案例採用美國GSSI公司透地雷達主機SIR 3000，搭配900MHZ天線，如圖3.2-8，可適用探測襯砌背後1m範圍內的可疑空隙。根據透地雷達探測襯砌的影像，具代表性的異狀可歸納成三種型態，分別是：(A)裂隙發達；(B)背後疏鬆；(C)厚度改變。如表3.2-2所示，針對安朔隧道的施測成果如表3.2-3與圖3.2-9所示。



圖3.2-7 安朔隧道內襯砌現況及說明(交通部台灣鐵路管理局，2008)



圖3.2-8 GPR主機及現場施測照片(交通部台灣鐵路管理局，2008)

表3.2-2 透地雷達劣化影像說明表(交通部台灣鐵路管理局，2008)

影像種類	名稱	說明
A	裂縫發達	襯砌具劣化影像
B	背後疏鬆	襯砌外緣具劣化影像
C	厚度改變	襯砌或圍岩產生不接合面

根據調查結果，安朔隧道長度 5481 公尺，呈現襯砌背後疏鬆現象之區段其影響深度大約在20-50公分，少數疏鬆影像超過60公分，並認為隧道厚度的改變大多屬於小範圍襯砌與圍岩的接觸面變化，但也提出了靠近34K+220~34K+230所發現的疏鬆現象應該持續追蹤，並採取適當的維修手段以補強襯砌受損處。

表3.2-3 透地雷達施測成果-背後空洞調查(交通部台灣鐵路管理局，2008)

隧道名稱	組數	編號	里程	長度(m)	A	B	C	頂拱可能襯砌厚度範圍(cm)
安朔	11	1	33K+490	18	N	N	N	55-60
		2	33K+785	18	N	N	N	55-60
		3	34K+095	18	N	N	N	55-60
		4	34K+155	18	N	N	N	55-60
		5	34K+210	18	N	N	N	55-60
		6	34K+230	18	N	Y	N	55-60
		7	34K+495	18	N	N	N	55-60
		8	35K+990	18	N	N	N	55-60
		9	37K+085	18	N	Y	N	55-60
		10	37K+610	18	N	N	N	55-60
		11	37K+985	18	N	N	N	55-60

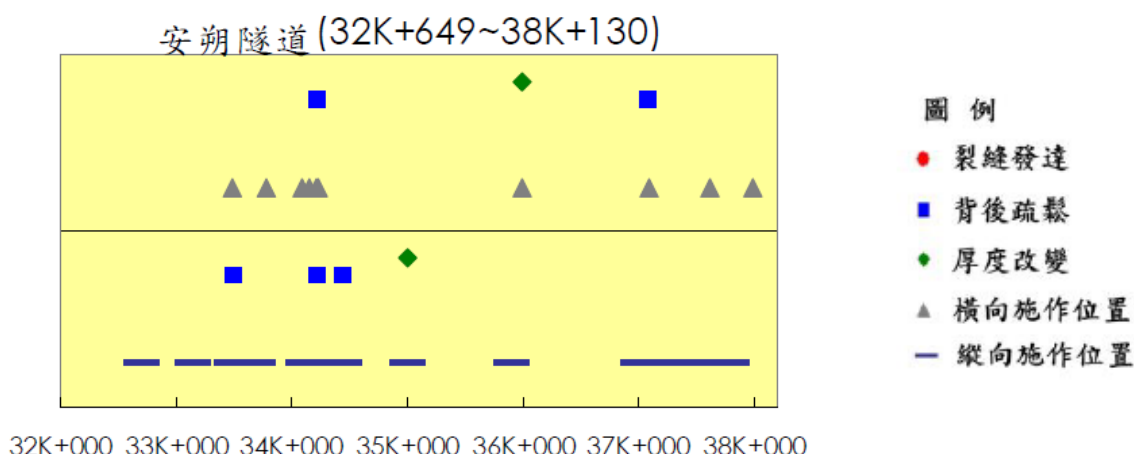


圖3.2-9 安朔隧道透地雷達施測成果(交通部台灣鐵路管理局，2008)

(5) 裂縫寬度與深度調查

本案係利用超音波進行隧道襯砌裂縫深度及寬度檢測，結果如表3.2-4所示，顯示所選取之施測區域其裂縫深度為襯砌設計厚度的34%至43%，針對上述已掌握的襯砌劣化現象，調查執行單位建議未來應持續觀察裂縫附近的襯砌狀態是否有繼續劣化的現象。

表3.2-4 透地雷達施測成果-裂縫寬度與深度調查(交通部台灣鐵路管理局，2008)

隧道名稱	組數	編號	里程	施測位置	裂縫觀測寬度 (mm)	裂縫計算深度 (cm)	襯砌設計厚度 (cm)	裂縫深度比例 (%)
安朔	2	1	34k+100	山側	0.8	27.7	65	43%
		2	34k+210	山側	0.6	22.4	65	34%

(6) 史密特錘試驗

採史密特錘試驗(Schmidt hammer test)進行襯砌混凝土強度檢測，結果如圖3.2-10所示，考量史密特錘試驗極易受混凝土表面狀況(蜂窩、裂縫與剝落)影響，故本項檢測數值僅供一般性襯砌強度檢驗參考，實際混凝土強度建議以鑽心抗壓試驗結果為主。

(7) 隧道鑽孔探查、取樣及室內抗壓強度試驗

鑽探調查分別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，鑽心取樣作業照片如圖3.2-11所示，安朔隧道室內抗壓強度試驗結果如圖3.2-12所示，顯示安朔隧道有一個試體試驗值低於設計強度 210 kgf/cm<sup>2</sup>。

(8) 混凝土中性化試驗

受到良好保護的混凝土pH值約12~14，當混凝土中氫氧化鈣遇水後會解離為鈣離子及氫氧根離子，並在鋼筋表面形成保護性鈍化膜。但是空氣中的酸性物質(如二氧化碳、二氧化硫等)會降低混凝土的酸鹼度，使pH值降到7~9左右，此過程即為混凝土中性化。





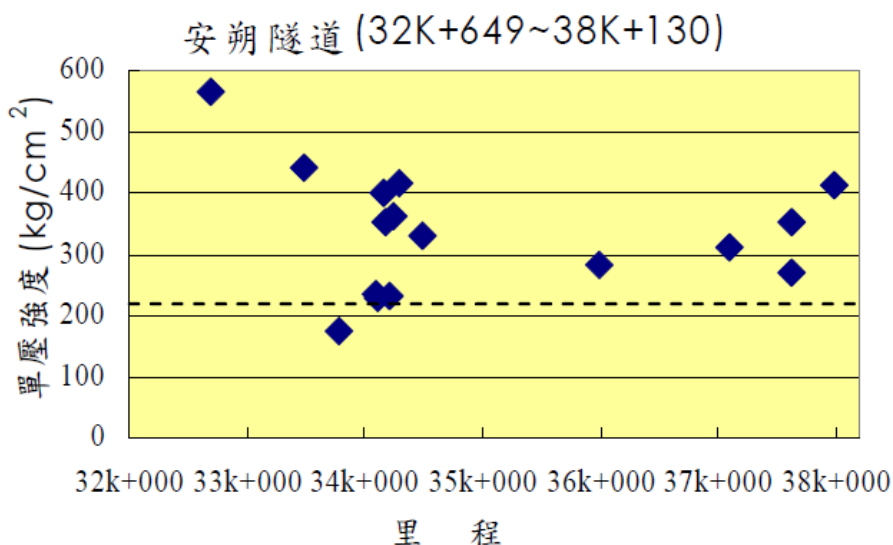


圖3.2-12 安朔隧道內混凝土鑽心抗壓試驗分析圖(交通部台灣鐵路管理局，2008)

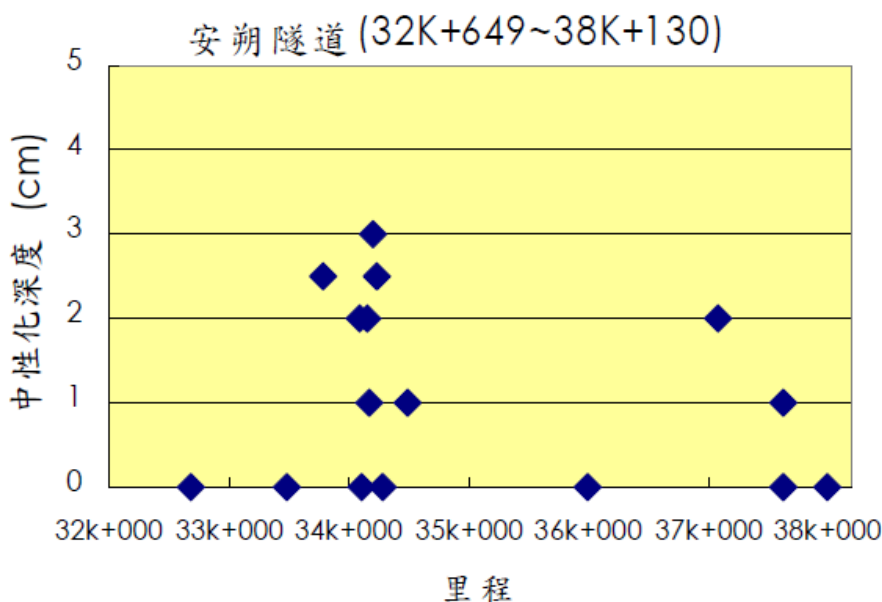


圖3.2-13 安朔隧道混凝土中性化試驗結果圖(交通部台灣鐵路管理局，2008)

本計畫除蒐整上述安朔隧道檢測項目外，亦根據「南迴鐵路-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3.2-5，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、落盤、湧水及少部份底部隆起等，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3.2-5 安朔隧道於施工階段災變位置及其原因

災變類型	發生位置	發生原因
擠壓	1. 支保變形(ASSM工法) 2. 鋼支保變形(NATM工法)、噴凝土裂縫 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)	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 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 3. 遇破碎泥岩(疑係斷層帶)
抽心與落盤	1. 頂拱 2. 開挖面	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 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
湧水	1. 山側60° 2. 開挖面	1. 地下水位高及開挖擾動 2. 逢颱風雨季致地下水位上升，湧水不斷
隧道覆蓋層下陷、地層滑動	1. 近洞口段 2. 近洞口段	1. 地質破碎引致隧道覆蓋層下陷 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

### 3.2.2 營運中隧道之監測-以雪山隧道為例

國道五號雪山隧道於2006年6月開始營運通車，囿於施工期間曾歷經極端破碎地層的挑戰，包括斷層、剪裂帶與湧水等，致其結構安全課題一直備受關注，復因通車不久即發生隧道襯砌局部滲水問題，雖經鑑定認為滲水問題對隧道結構並無影響，但基於安全考量遂於隧道進行下列之長期監測項目(李民政等人，2011)，如表3.2-6所示，表中所列第一項在為提供內空變位監測所需參考點，並於2011年2月完成全線控制測量作業，故後續僅就內空變位監測、孔隙水壓監測、地下水量監測與裂縫擴展監測整理介紹：

### (1) 內空變位監測

針對施工階段地質構造較特殊的十二個斷面進行隧道襯砌斷面內空變位監測，監測方法採用3D光學量測系統，如圖3.2-14所示，監測點位以施工期間曾遭遇抽坍、大量湧水事件及重要地質構造等里程為觀測重點。

### (2) 孔隙水壓監測

監測雪山隧道主線及導坑沿線之水壓參考值，考量襯砌背後水壓波動幅度較大，尤其是颱風、暴雨來襲時，局部區段水壓可能即反應，故採自動記讀、人工定期取值之方式辦理。監測斷面之選擇，係以施工期間曾遭遇大量湧水、抽坍之里程及重要地質構造位置為監測重點。採用之水壓計為英國AML電子式水壓計進行監測(型號為Pi642c2-10brg)，可量測水頭達100m；此外，亦將當初滲水診斷小組所建議設置之3組水壓計納入監測計畫中(系屬上述同品牌之產品，可量測水頭為50m)，上述各水壓計之自動記讀頻率設定為1次/30min。

### (3) 地下水量監測

於隧道沿線長期水量量測，於導坑內設置二具流量計，雪山隧道南口設置二具流量計，共計四具。導坑內分站監測斷面之研選，係綜合考量中央大學之研究與建議，同時參採施工中曾遭遇大湧水之區段。據此，於里程16k+996(OCM1 斷面-鶯仔瀨向斜附近)、19k+714(OCM2 斷面-石石曹斷層附近)、23k+413(OCM3 斷面-四稜砂岩西界)及28k+095(OCM4 斷面-近導坑南洞口)等四處設置監測斷面(雪山隧道湧水長期監測計畫監測報告，2007)，監測斷面位置如圖3.2-15所示，圖中里程係設計里程，與前述通車里程不同。隧道南口之總量監測，於南洞口回填邊坡之頂部平台新設量水井，以相同於導坑之方式，針對清水(OCM5)及混合部分清水之污水系統(OCM6)分別設置量水斷面以進行總量監測。

### (4) 裂縫擴展監測

目前設置四組裂縫位移計，監測既有裂縫之位移變化，目前襯砌雖局部存在規模不等之裂縫，惟均屬施工中產生之施工縫或溫度裂縫。

為達到隧道結構物破壞預防之效，上述各項監測資料分析每月辦理一次，並於與「雪山隧道維護管理手冊(隧道土木結構部份)」內所訂之警戒值對照，評估隧道結構物安全與否。

表3.2-6 雪山隧道長期監測工作項目與頻率彙整表(李民政等人，2011)

编号	項目	目的	監測頻率
1	隧道內控制點測量	獲取內空變位之絕對變位, 隧道沿線之大尺度位移	1 次/年
2	主線隧道內空變位量測, 導坑隧道內空變位量測	隧道斷面之內空變化	1 次/月
3	裂縫擴展監測	既有裂縫或施工縫之擴展觀測	1 次/月
4	孔隙水壓監測(單點式), 孔隙水壓監測(多點式)	特定位點之孔隙水壓變化	1 次/30 min
5	沿線長期水量量測, 單點水量量測	隧道區段之出水量, 單點出水量	1 次/月

注: 孔隙水壓(含單點式及多點式)之數據採自動記錄, 其取值頻率為 1 次/月。

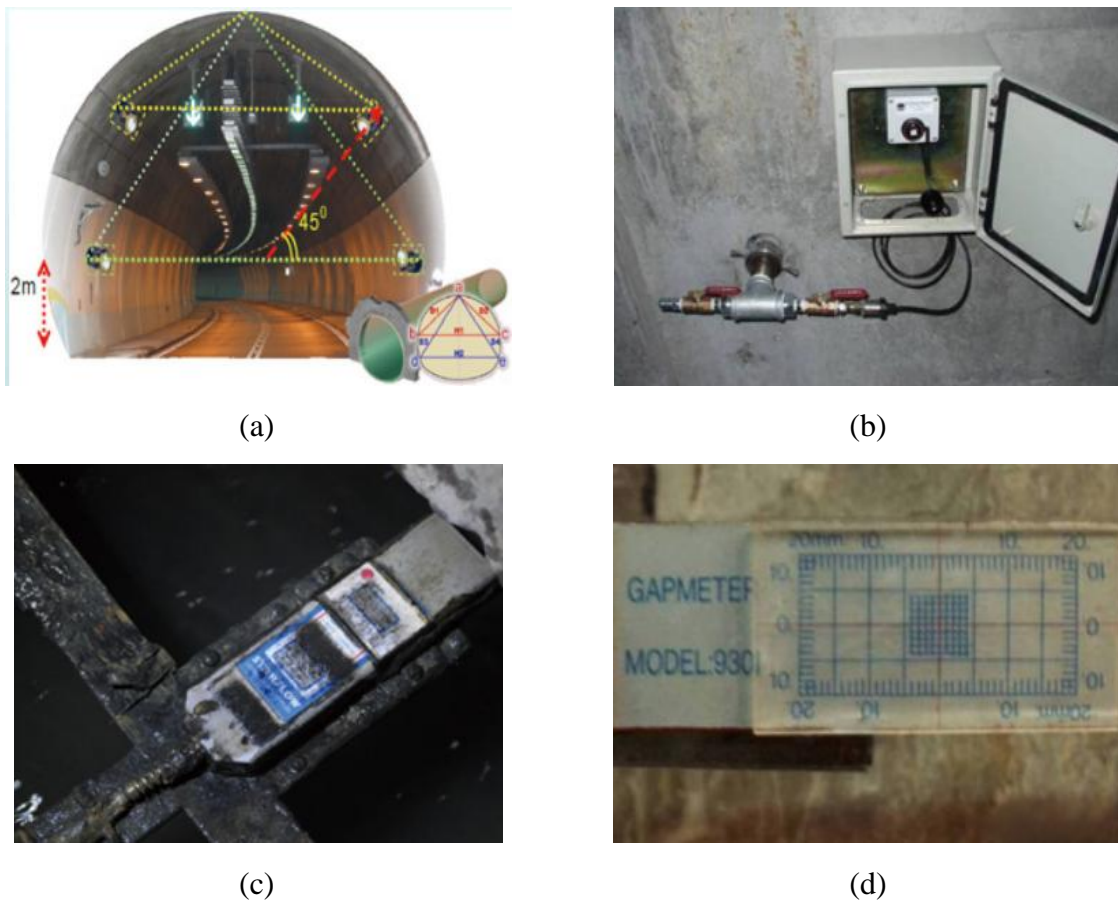


圖3.2-14 雪山隧道監測項目: (a)內空變位觀測稜鏡設置; (b) 孔隙水壓觀測; (c)地下水流量觀測與(d)裂縫位移計

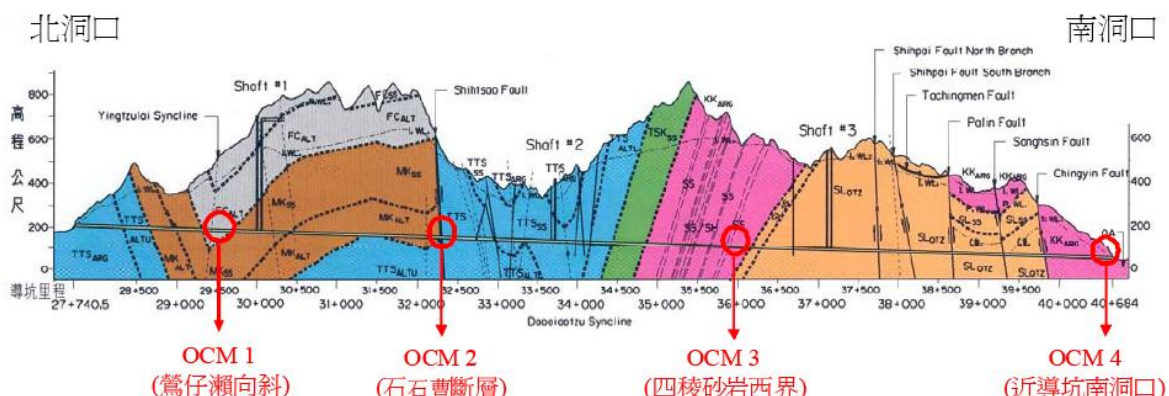


圖3.2-15 雪山隧道地下水監測位置圖

### 3.2.3 小結

綜整安朔隧道檢測與雪山隧道監測項目如表3.2-7所示。就雪山隧道之監測項目而言，係針對施工階段遭遇的斷層、剪裂帶與湧水等工程地質與水文地質造成的施工困難，及其對坑道結構安全的可能影響進行長期的監測；在南迴鐵路安朔隧道部分，同樣在施工階段遭遇了鬆動岩盤、破碎及風化岩層、斷層帶、偏壓及淺覆蓋等工程地質及地形因素所造成的施工挑戰，惟因早期的隧道工程尚未建立營運階段的長期監測觀念，致隧道結構出現裂縫及滲水等異狀時始採取相關檢測及修復作業。

表3.2-7 國內營運中隧道之檢監測項目

檢監測項目	檢監測方法	備註
內空變位觀測	3D光學量測系統	雪山隧道
襯砌裂縫擴展觀測	裂縫位移計	雪山隧道
孔隙水壓觀測	水壓計	雪山隧道
地下水流量觀測	流量計	雪山隧道
裂縫與滲水位置調查	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 目視檢查</li> <li>● 隧道影像掃描</li> </ul>	安朔隧道
裂縫寬度與深度調查	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 超音波探測</li> </ul>	安朔隧道
隧道襯砌背後空洞調查	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 透地雷達探測</li> </ul>	安朔隧道
混凝土強度	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 非破壞性檢測—史密特錘試驗</li> <li>● 破壞性檢測—鑽心取樣室內抗壓強度試驗</li> </ul>	安朔隧道
混凝土品質	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 中性化試驗</li> </ul>	安朔隧道

### 3.3 國外處置坑道監測與國內隧道檢監測經驗之項目比較

#### (1) 地質材料與地質構造

本計畫蒐整的瑞典SFR-1、芬蘭Olkiluoto VLJ與Loviisa VLJ三處國外處置坑道監測經驗，其處置型式屬於離岸海床及近岸陸地之坑洞處置，場址所處地質條件均屬結晶岩類，偶遇有規模不等的地質破裂帶；相較之下，由國內南迴鐵路安朔隧道與國道五號雪山隧道檢監測案例，可知本土地質沉積年代相對年輕，復因板塊擠壓與抬升作用，地質條件多屬鬆動岩盤、疏鬆且膠結不良之風化岩層，且極易受到斷層與地質破裂帶之影響導致建造施工期間均已遭遇諸多工程地質問題。

#### (2) 檢監測項目之比較評析

綜整國外處置坑道監測與國內隧道檢監測之項目比對，如表3.3-1，將監測項目依屬性區分岩石力學、水文地質、坑道襯砌材料及其他等四大項研析比較。

##### a. 岩石力學項目

國外處置坑道與國內一般隧道的監測目的，均在於確保坑道結構的穩定性。惟國外處置坑道所處地質條件狀況良好，坑道全線大多無襯砌結構加固，故可於潛在滑動岩塊加設伸張計進行監測；但國內營運中隧道，均須採用混凝土襯砌作為其二次支撐，相關的施測項目多數僅直接在襯砌上進行。以雪山隧道為例，為避免施測作業影響車流，故採3D光學量測系統進行內空變位量測，同時針對襯砌既有的裂縫進行監測。

##### b. 水文地質項目

國外處置坑道所規劃的水文地質監測項目，於坑道建造施工前即展開，以建立水文地質資料之基準監測參考值，並於運轉期間持續掌握地下水水壓與入滲量，此部分與國內雪山隧道之監測內容大致相同。惟雪山隧道對於水文地質之監測目的，在於確保地下水水壓力對坑道結構安全的影響，國外處置坑道之監測則除了結構安全的考量外，亦是為了掌握地下水的傳輸特性。

##### c. 坑道襯砌材料

坑道襯砌主要為混凝土材料，鑑於國內隧道早期的施工方法對於鬆動岩盤、破碎及風化岩層、斷層帶、湧水、偏壓及淺覆蓋等特殊地質的可能影響並未能全盤了解與因應技術並未成熟，導致營運期間本土坑道襯砌呈現異狀並影響坑道結構安全；相較之下，已蒐集的國外處置坑道案例並無顯示相關跡證資訊，此點間接顯示了我國地質條件不若國外之優勢，亦反映本地特殊地質對坑道結構長期穩定的可能影響。

##### d. 其他

降雨量監測的目的在於掌握降雨對地下水挹注的影響，此部分在國外處置坑道及國內雪山隧道均有實施；此外，因蒐整的國外處置坑道為離岸海床與近岸陸地之坑洞處置方式，海平面位置的掌握在於比對監測孔位裡的新鮮/鹽水介面變化，至於

溫度的監測在於了解坑道內部溫度變化對相關監測儀器的影響。

表3.3-1 國外處置坑道監測與國內隧道檢監測經驗之項目比較

異同分析 項目		國外中、低放處置坑道 (SFR-1、Olkiluoto與Loviisa VLJ)	國內營運中一般隧道 (安朔隧道與雪山隧道)
岩石力學	變位監測	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 坑道斷面收斂量測</li> <li>● 弱面與裂隙等開口結構的變形</li> <li>● 潛在滑動岩塊監測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 內空變位量測</li> <li>● 襯砌裂縫</li> </ul>
	應力監測	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 岩體支撐條件(岩栓荷重)</li> </ul>	無 <sup>*註1</sup>
水文地質	地下水滲流	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 岩體導水特性</li> <li>● 地下水入滲</li> <li>● 水力高差</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 測站設置流量計</li> <li>● 水壓計</li> </ul>
坑道襯砌材料	襯砌裂縫	無 <sup>*註2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 目視檢查</li> <li>● 隧道影像掃描</li> <li>● 超音波探測</li> </ul>
	襯砌滲水	無 <sup>*註2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 目視檢查</li> <li>● 隧道影像掃描</li> </ul>
	混凝土品質	無 <sup>*註2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 非破壞性檢測</li> <li>● 破壞性檢測</li> <li>● 中性化試驗</li> </ul>
其他	降雨	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 雨量觀測站</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 可由中央氣象局雨量觀測站提供</li> </ul>
	海平面位置	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 海平面位置</li> </ul>	無
	溫度	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 溫度</li> </ul>	無

\*註1：營運中監測項目並無應力監測項

\*註2：因國外坑道無襯砌

## 第四章 處置坑道結構安全與長期穩定之強化需求分析

國外處置技術先進的國家在低放廢棄物處置場建置，多以礦坑或洞穴等地下坑道做為處置方式，如芬蘭的Olkiluoto場址，因其地盤年代較久遠，圍岩的岩石力學與水文地質先天特性具有著極佳的屏障效果。相較於國內的地質年代年輕，圍岩在上述特性所能提供的屏障效果較薄弱，因此如何根據國內一般隧道在本土特殊的地質條件與環境下，透過由已建立的隧道襯砌異狀判釋與肇因等之研析經驗、及所需檢監測項目，以做為供分析處置坑道長期變形行為之基礎，確保處置坑道結構安全，實為本章欲探討的重點。

### 4.1 坑道襯砌異狀分類與肇因

本研究引用前期報告「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術研究」(王泰典, 2013)有關“國內外坑道結構穩定與服務功能異常現象影響因素探討”章節，所蒐集整理國內外營運中坑道安全檢測報告以及長期行為有關之文獻，以彙整坑道襯砌分類與肇因，及研析國內外坑道襯砌異狀現象之異同。

#### 4.1.1 坑道襯砌異狀分類

國內一般坑道襯砌異狀分類，王泰典等(2007)已建立初步的分類型態，主要可分為「目視可識別」以及「目視無法識別」兩大類，其中「目視可識別」的異狀絕大多數為發生在襯砌表面者，而與襯砌完整性以及襯砌背後孔洞有關的異狀，則多數無法直接目視識別。目視可識別的異狀種類繁多，圖4.1-1列舉常見的數種典型，其中除圖4.1-1(i)係以彩色探測攝影機穿過襯砌張開之裂縫攝得背後之孔洞照片外，其餘皆可自襯砌表面直接觀察判別(王泰典等, 2007)；另外，王泰典等(2007)亦以襯砌型式、襯砌構築方式及襯砌功能加以分類，不同類型下坑道所屬的異狀整理於附錄B供卓參。其中，1970~80年代施工的北迴線與南迴線鐵路隧道群採模板支撐現場澆置混凝土構築襯砌，由於大多數隧道未設置防水層，故在側壁與頂拱的施工界面多有滲漏水現象，裂縫的發展亦受環狀施工縫而影響，且因早期混凝土灌漿設備與技術限制，襯砌背後常檢測出孔洞現象。

#### 4.1.2 坑道襯砌異狀肇因

根據黃燦輝與鄭富書(1997、1998)探討老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂的經驗，及黃燦輝等人(1999)探討震後隧道結構快速診斷手冊之建立與震後隧道結構快速補強手段相關計畫中，研析不同襯砌異狀所對應的可能肇因。黃燦輝等(2006)延續前期之研究，並整合國外相關研究成果(朝倉俊弘等, 2003)，提出襯砌異狀影響因素主要可分為外在因素與內在因素，其中外在因素可區分為物理性與化學性因素，內在因素可分成設計、材料與施工三部分，詳如表4.1-1所示。

日本土木學會(2003)根據襯砌之受力機制、地形效應與異狀型態，將外力因素區分為，如表4.1-2所示：(1)塑性地壓；(2)鬆弛土壓；(3)偏壓三大類。有關塑性地壓、鬆弛



土壓與偏壓之裂縫型態描述如圖4.1-2所示。**塑性地壓**：係指因隧道開挖而引起隧道週圍岩盤之塑化，雖已施加外支撐與內襯砌，但惟由於圍岩之長期弱化或潛變，會使得作用於襯砌之地壓持續增加而產生異狀。其異狀型態包括：挫曲、開口裂縫、剪力裂縫、側壁擠出及仰拱隆起等。**鬆弛土壓**：係由於隧道超挖回填不實、外支撐經年腐蝕或被地下水沖蝕形成空洞，經列車振動或地震引起地盤鬆弛而形成垂直向之鬆弛土壓作用於襯砌上方。若鬆弛土壓係連續作用於隧道頂拱縱斷面方向時，隧道襯砌頂拱會產生開口性裂縫，側壁則可能產生壓縮裂縫或剪力裂縫；惟若鬆弛土壓集中於一小範圍時，則會產生橢圓形、半月形、格子狀或放射狀之裂縫，甚至可能產生襯砌頂拱之崩落現象。**偏壓**：則主要係因隧道上方地形左右不對稱或由於邊坡之滑動、潛移等而形成一側地壓遠大於另一側地壓時，在此地壓長期作用下使得襯砌肩部產生開口性張力裂縫。

當隧道襯砌周圍環境不良時，例如凍溶效應、火害、鹽害、溫差與中性化等；或者澆置混凝土襯砌所使用之材料不佳時，例如水化熱過高、鹼粒料(鹼骨材)反應等；亦或是打設混凝土襯砌時施工不當，如：拌合不勻、初凝現象、膠結不全、異常凝結與打設不連續等，皆會使隧道襯砌產生劣化現象，如圖4.1-3所示。

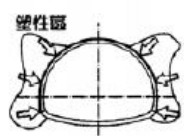


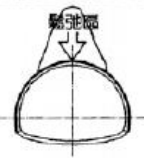


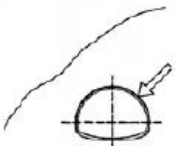
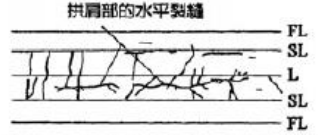



圖4.1-1 數種典型的目視可識別異狀(王泰典等，2007)

表4.1-1 襯砌異狀影響因素分類(朝倉俊弘等，2003；黃燦輝等，2006)

外在因素			內在因素			
分類	物理性	化學性	分類	設計	材料	施工
自然因素	1.地形變異，如地滑、偏壓 2.地質變異，如膨脹壓、塑性擠壓、頂拱鬆動岩(土)壓、基礎沉陷或承载力不足 3.地下水變異，如水位升降之水壓變化、凍脹壓 4.其他，如地震、地殼變動	1.圍岩(土)長期弱軟化 2.地下水具侵蝕性或含有害物質 3.鹽害、凍害	自然因素	—	1.澆置混凝土之溫濕度	—
			人為因素	1.未設置仰拱 2.側壁陡直 3.排水工設計不良 4.防水工設計不良 5.保護層不足 6.襯砌強度不足(設計岩(土)壓過低) 7.襯砌厚度不足(襯砌動度不足)	1.骨材含泥量過高 2.異常凝結 3.鹼骨材反應 4.養護之溫差應力 5.乾縮	1.養護不良 2.拆模過早 3.粒料分離 4.襯砌背後空洞 5.混凝土澆置不均勻 6.混凝土模板下陷 7.施工縫施作不良 8.澆置中斷形成冷縫 9.排水、防水工施作不良 10.支保下沉 11.襯砌強度不足 12.襯砌厚度不足
人為因素	1.近接施工，如開挖、回填、蓄排水 2.其他，如列車行駛振動、空氣壓力變化等	1.火災 2.煙害				

表4.1-2 外力因素及其代表性襯砌異狀(日本土木學會，2003)

	地壓	代表性的案例圖	案例照片
塑性地壓		 側壁的水平裂縫 拱頂端的挫曲	 拱頂的挫曲
鬆弛土壓		 漏水 裂縫密度較高的範圍 崩落地點 粉砂岩、砂岩~粉土、砂的單斜構造	 頂端的崩落
偏壓		 拱肩部的水平裂縫 FL SL L SL FL 產生偏壓、邊坡表層向下移動引起的變形之隧道，其變形展開圖之例	 側壁的水平裂縫

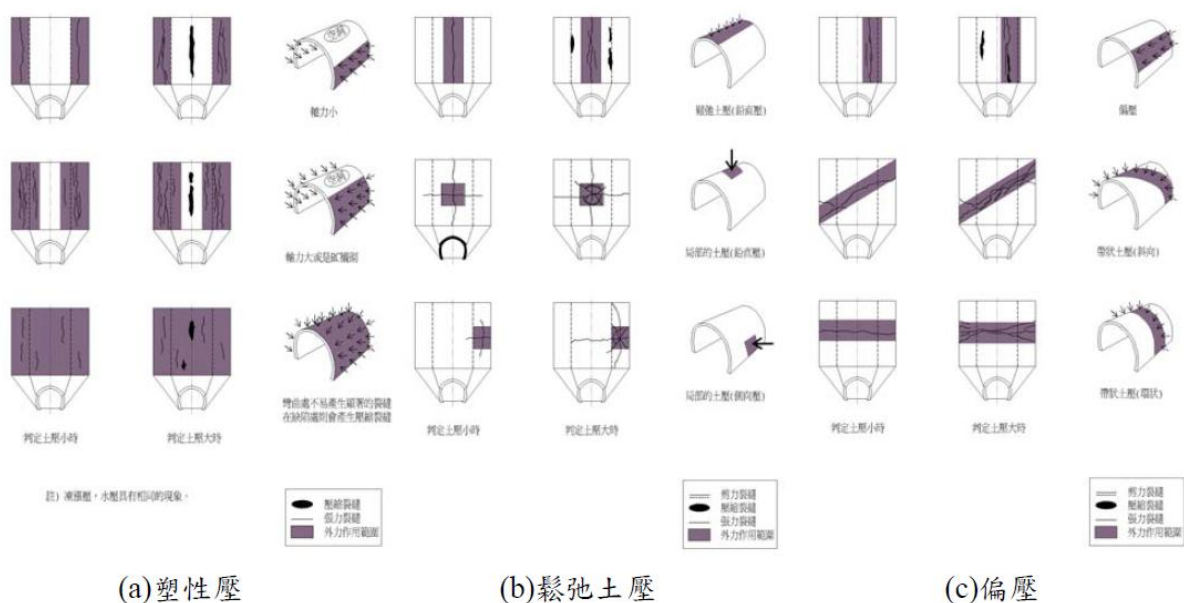


圖4.1-2 塑性壓、鬆弛土壓與偏壓之裂縫型態(日本鐵道總合技術研究所，2007)

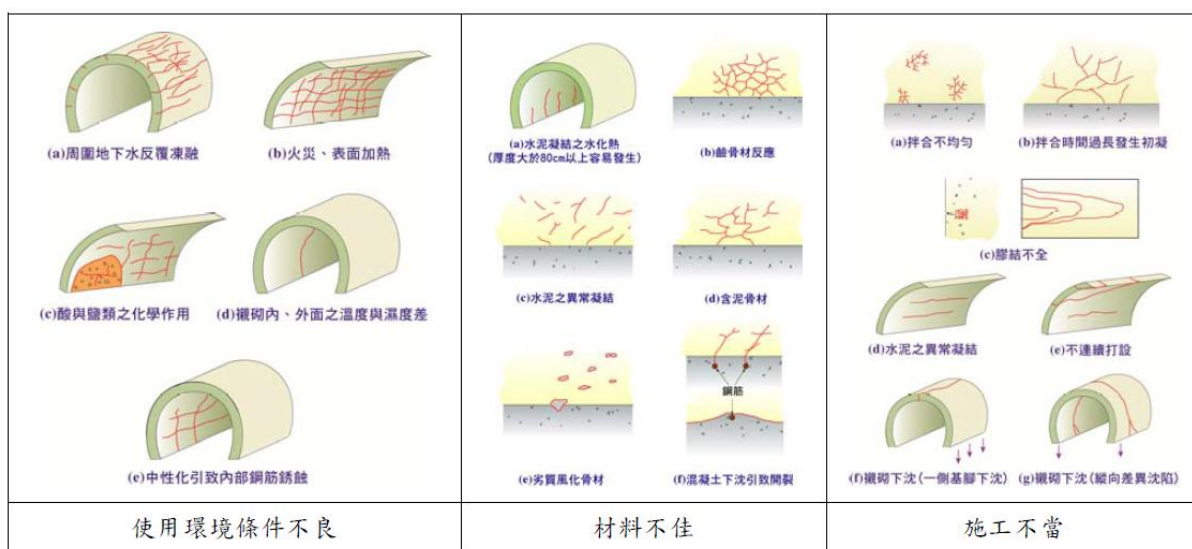


圖4.1-3 環境、材料與施工因素之裂縫型態(日本鐵道總合技術研究所，1998)

此外，根據李佳翰(2013)所蒐集的國內山岳隧道襯砌異狀案例，將可能的肇因區分為「力學因素」與「非力學因素」，透過各案例的檢測與調查成果，進一步探討了各種異狀肇因於襯砌表面之產狀。就「力學因素」之肇因，包括了邊坡潛移、地震、擠壓、斷層活動、地下水壓與承载力不足；「非力學因素」之肇因部分，包括了中性化、鋼筋保護層厚度不足、鹼質粒料反應、混凝土澆置中斷、襯砌背後空洞或厚度不足等，有關山岳隧道襯砌異狀案例之裂縫型態彙整表如表4.1-3所示。

表4.1-3 山岳隧道襯砌異狀案例之裂縫型態彙整表(李佳翰, 2013)

分類	肇因	裂縫型態
力學因素	邊坡潛移	縱向
		環狀
		斜向
	地震	放射狀
	擠壓	縱向
	斷層活動	羽狀
	地下水壓	仰拱橫向
非力學因素	承载力不足	側壁橫向 (由下往上)
	中性化	網狀
	鋼筋保護層厚度不足	條狀
	鹼質粒料反應 (鹼骨材反應)	龜殼狀
	混凝土澆置中斷 (冷縫)	連漪狀
	襯砌背後空洞或厚度不足	—

#### 4.1.3 國內本土坑道襯砌異狀現象與國外之差異

李佳翰(2013)蒐集266個國內外山岳隧道之襯砌異狀案例，並整理歸納成10個襯砌異狀種類，包括裂縫、滲漏水、剝落或剝離、變形、錯位、挫曲、仰拱隆起或沉陷、仰拱開裂、仰拱噴泥與蜂窩。按其統計結果，如圖4.1-4所示，可知在所有蒐集266個隧道襯砌中發生裂縫之異常狀況佔82%比例最高；其次依序為發生滲漏水(44%)、剝落或剝離(36%)、仰拱隆起或沉陷(22%)與變形等(9%)。

此外，本研究根據李佳翰(2013)所蒐集的 266個國內外案例資料，進一步比較 151處國外與 115處國內隧道襯砌異狀種類，如圖4.1-5所示，並整理如下列幾點：

- (1) 在國外案例，襯砌之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，仍以裂縫比例也最高(92%)，其次依序為滲漏水(72%)、剝落(43%)與仰拱隆起或沉陷(13%)。
- (2) 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。
- (3) 在比例最高之前四項中，國內隧道襯砌之滲漏水問題是次高，其比例高達72%，遠遠高於國外的23%。國內發生高比例滲漏水的原因，可能與國內早期隧道施工並無

鋪設防水層，亦可能因國內隧道所處水文地質環境具充沛的地下水滲流條件、或岩體破裂較嚴重其裂隙聯通程度高於國外所致。

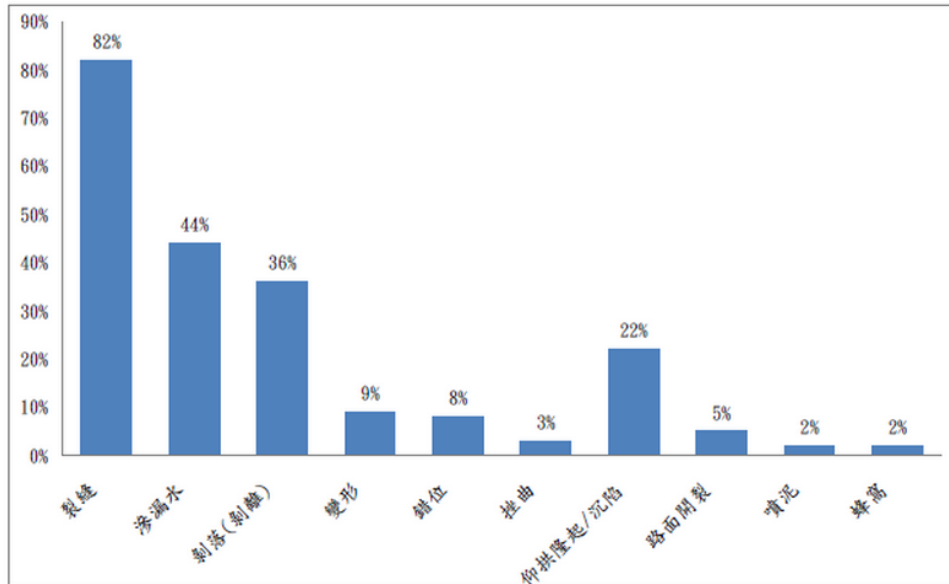


圖4.1-4 國內外266座隧道襯砌異狀種類統計圖(李佳翰，2013)

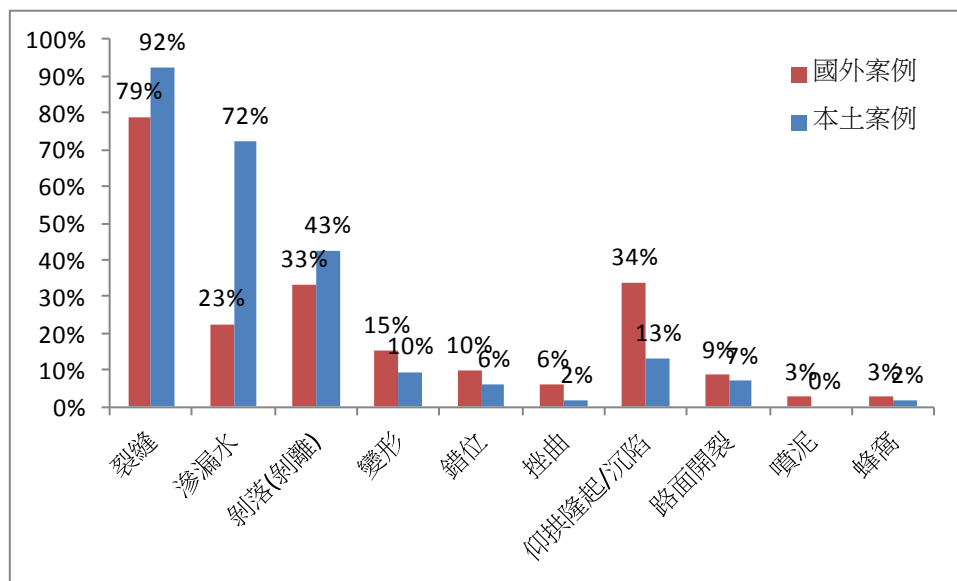


圖 4.1-5 國內與國外隧道襯砌之異狀種類統計差異比較

## 4.2 處置坑道結構長期穩定特性之影響項目

王泰典等(2012)於「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術服務」報告中，提出影響國內一般坑道長期穩定性的影響因素，包括外力因素、環境因素兩大類，分別列述於后。

### 4.2.1 外力因素

外力因素，主要係指坑道整體結構(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。以集集地震引致中部地區多處山岳隧道損害情況為例(王文禮等人，2000)，較具代表性之受損型態如圖4.2-1所示，包括襯砌遭斷層剪斷破壞、隧道因邊坡坍塌引致破壞、襯砌縱向龜裂、襯砌橫向龜裂、襯砌單側斜向龜裂、襯砌環狀斜向龜裂、底版(路面)龜裂或隆起與側壁向內擠壓變形。

#### (2) 邊坡運動

邊坡潛移長時間慢慢的作用引致隧道異狀之型態，依據隧道與邊坡潛移方向的相對空間關係(王泰典等人，2007)，可以分為邊坡潛移方向垂直於隧道軸向、邊坡潛移方向斜交於隧道軸向與邊坡潛移方向平行於隧道軸向等三種類別加以分析探討。李佳翰等(李佳翰等，2009)針對隧道異狀是否是邊坡潛移所致已提供如圖4.2-2所示之診斷步驟與流程。

#### (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)；在加拿大研究中，使用開挖擾動帶(Excavation Disturbed Zone, EDZ)及高度破壞帶(Highly Damaged Zone, HDZ)兩種名詞代表之。

Read(2004)利用加拿大原子能有限公司(Atomic Energy of Canada Limited, AECL)建置的地下坑道實驗室(Underground Research Laboratory, URL)，根據監測坑道開挖後20年的結果，探討開挖擾動帶對隧道長期穩定造成的影響：圖4.2-3(a)為坑道開通後20年來整體變形狀況，可明顯看出坑道呈某方向擠壓變形；圖4.2-3(b)為坑道剖面仰拱的變形狀況，圖4.2-3(c)則為特定方向擠壓變形的局部放大，可明顯看出變形來自於圍岩的片狀剝落。進一步探討坑道變形的影響因素，指出係因坑道開挖造成的開挖擾動帶(圖

4.2-4)，已使坑道部分圍岩內部因壓力重新調整而產生微裂隙，部分損傷圍岩隨時間在應力作用下使損傷區域逐漸發展，進而產生一系列的挫屈與擠壓破壞(圖 4.2-5)，導致坑道逐漸變形而影響其長期穩定性。王泰典等人(2007)依實際隧道開挖案例，探討隧道於軟弱岩盤之開挖擾動帶及其依時行為，研究結果(圖 4.2-6)顯示：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，顯現開挖擾動對岩盤之依時性變形影響顯著。

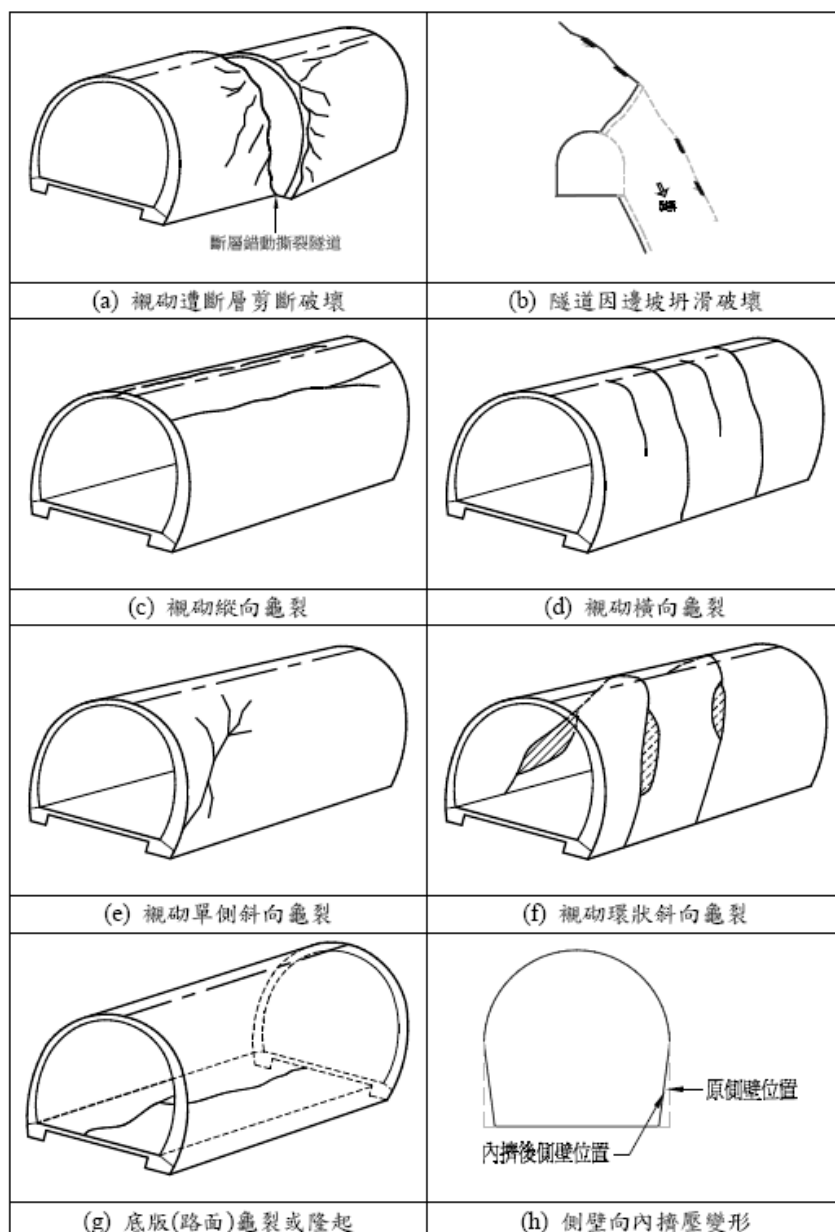


圖4.2-1 山岳隧道受震損害型態示意圖(王文禮等人，2000)

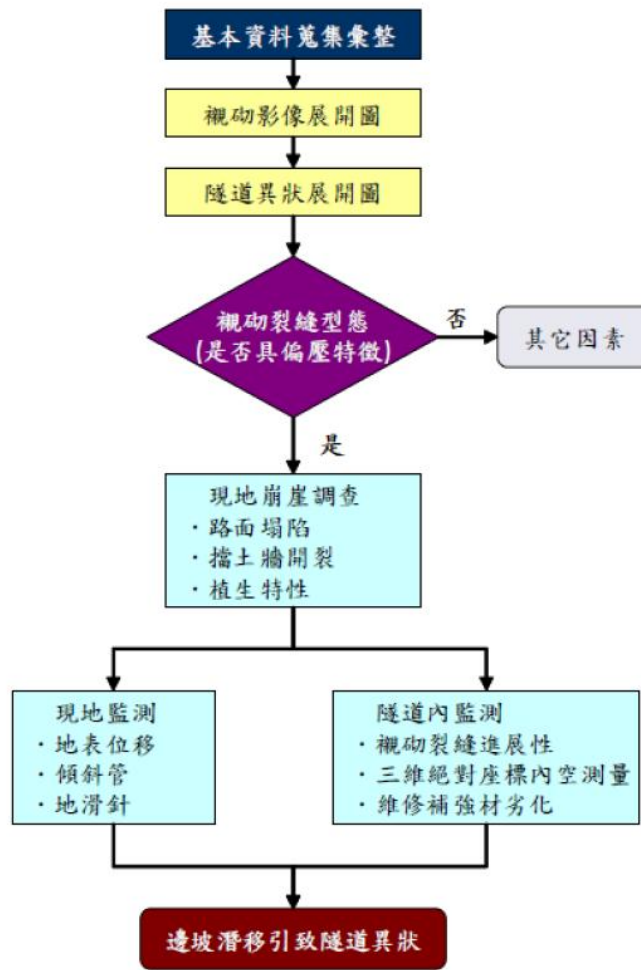


圖4.2-2 邊坡潛移引致隧道異狀診斷流程圖(李佳翰等，2009)



圖4.2-3 加拿大AECL URL 坑道歷經20年之坑道變形狀況(Read, 2004)



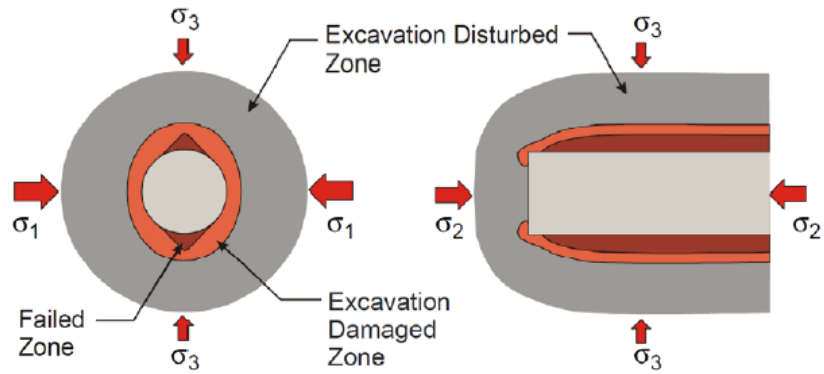


圖4.2-4 加拿大AECL URL 坑道開挖擾動之狀況模擬(Read, 2004)

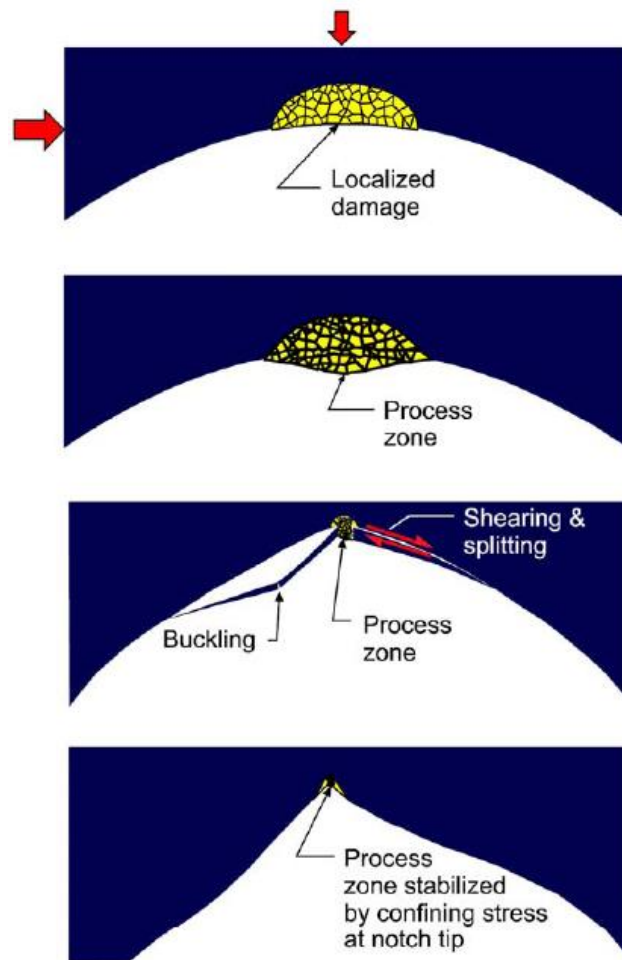


圖4.2-5 加拿大AECL URL 坑道開挖擾動與破壞機制之關係(Read, 2004)

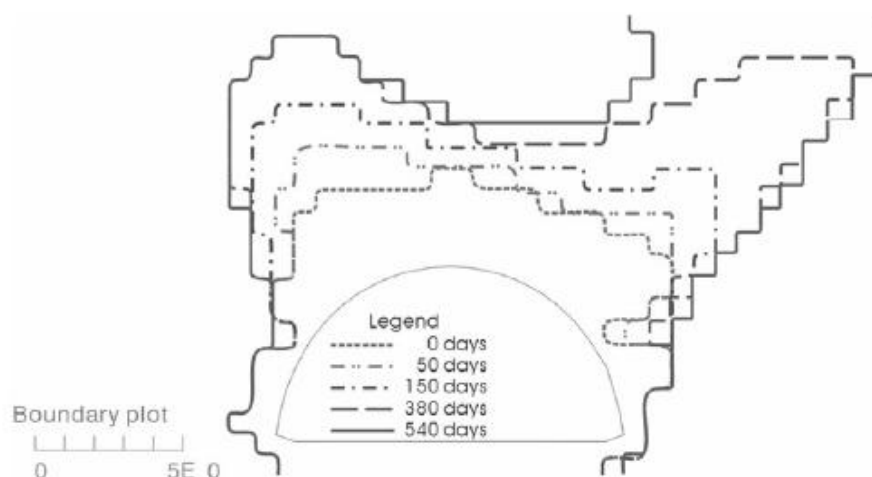


圖4.2-6 隧道開挖擾動帶之依時擴大變化行為(Wang et al., 2007)

#### 4.2.2 環境因素

環境因素係指因國內特殊之地質與氣候環境影響與發育所致，使土壤與岩石之「大地工程特性」除一般之強度、變形性與滲透性相異於國外其他國家外，尚具有：(1)風化作用強烈，使岩石弱軟化迅速；(2)岩石長期依時行為明顯，其強度與變形性依時變化大。本節僅針對風化作用引致岩石強度弱軟化、及依時性變形特性對坑道穩定的影響，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)，依其過程又可區分物理風化與化學風化兩種方式。

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，岩石中礦物顆粒間結合的程度必將大為減弱，促進岩石崩裂。而化學性風化作用又可稱分解作用，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。

風化作用進行速率和下列因素有關(Ulusay and Hudson, 2007；許金華，2006)：母岩的岩性和結構、氣候(包含水分和溫度)、地形(坡度)、時間、岩石出露面積、有機物含量多寡、節理的分布與鑽孔動物。風化作用為岩石弱軟化的主因，對於岩體工程設計及其安定性影響深遠，故岩石風化帶的分佈以及風化程度的描述，為工址地質調查的重點工作。根據Barton與Choubey(1977)的研究指出岩體之風化過程或等級，可概分為五個階

段，國際岩石力學學會(ISRM)根據 Brown的(1981)研究建議將風化度分成 I~VI級，如表 4.2-1：

- a. 完整岩石內出現節理面(或稱為弱面)，此時節理壁材料抗壓強度(joint wall compression strength，簡稱JCS)與材料抗壓強度  $\sigma_c$ 相同。
- b. 若節理面內為導水者，JCS逐漸降低而小於  $\sigma_c$ 。
- c. 中度風化階段，不透水岩塊中之導水風化節理，JCS為  $\sigma_c$ 之某一比例。
- d. 節理風化效應深入岩塊內， $\sigma_c$ 逐漸降低，JCS持續降低。
- e. 高度風化階段，此時的  $\sigma_c$ 降低至與 JCS 相同。

劉賢淋(1984)研究風化作用對岩石材料強度性質之影響，認為岩石材料之風化對岩石力學性質有不利影響，例如原為穩定之岩坡，因為風化作用使得岩石材料強度降低而導致坍塌。此外，其採用岩石反覆浸水和烘乾，並用超音波測 P 波波速。不管是乾燥或浸水狀態，岩石之單壓強度均隨P波波速增加而增加。文中也提到大理岩、石灰岩、花崗岩、砂岩及頁岩，烘乾強度比氣乾強度高 6%，浸水飽和比氣乾強度低12%，又某些砂岩浸水飽和試體，其單壓強度僅約乾燥試體之 45~60%，頁岩浸水其強度降低 60%。

許金華(2006)以南橫岩石樣本，於現地利用史密特錘每月測量其單壓強度，連續測量4個月。發現：南橫出露岩石，風化最快的是硬頁岩，其風化速率 78.8 MPa/yr；風化最慢的是板岩，其風化速率是 13.5 MPa/yr，如表4.2-2。單壓強度超過 80 MPa的新鮮硬頁岩，經4個月的風化後其單壓強度弱化到僅剩約8 MPa，同時出現鉛筆狀構造。

Mohamad 等人(2011)則探討不同水分含量對花崗岩於各種風化程度下其強度的影響，其研究結果顯示：水分含量越高，其風化程度越劇烈；於相同風化程度下，水分含量越高，其強度(Is<sub>50</sub>)越低；風化程度越高，其強度(Is<sub>50</sub>)越低。

詹佩臻(2011)利用統計學多變量迴歸分析(multiple regression analysis)方法，探討碎屑沉積岩力學特性的影響因子，以及其遇水弱化、軟化程度的關鍵物理性質指標與微觀組構特性，研究結果顯示碎屑沉積岩岩石材料風化循環過程中，其岩石孔隙率n與顆粒面積比GAR影響岩石力學特性最顯著，如圖4.2-7所示。

在台灣西部麓山帶岩層以第三紀的沉積岩為主，由於該岩層成岩作用時間短，岩石膠結及壓密程度不佳；復以台灣既溫且濕的氣候環境，風化作用快速進行，使得此類岩層常呈膠結不良、孔隙率高、變形性大等特性，形成大地工程之不利因素。以其中之木山層砂岩為例，除了岩性軟弱之外，尚具有剪脹、高潛變量與遇水易弱化等特性；容易造成隧道大量變形之擠壓行為，屬於隧道工程之問題岩種。當地下開挖(如礦坑、地下電廠、放射性廢棄物處置場等)和隧道工程在通過此類岩石時，便可能遭遇到嚴重擠壓變形、剝落乃至於大量抽心的事故。以北二高中和隧道為例，施工期間通過木山層砂岩段時，即遭遇大量之擠壓變形。台灣的第三紀砂岩地層分布廣泛，而擠壓之問題於近年來台灣地區隧道工程之施工經驗中經常遭遇。

表4.2-1 ISRM 岩石風化度分類表(Brown, 1981)

分類級數	分類名稱	風化程度描述
I	新鮮 (Fresh)	岩石材料未見風化跡象，不連續面可能稍見變色。
II	輕微風化 (Slightly weathered)	全部岩材均已變色，岩石表面其強度略低於新鮮狀況。
III	中度風化 (Moderately weathered)	岩材內分解或崩解為土壤之部分小於 50% 新鮮或變色岩材仍保留其岩層連續結構。
IV	高度風化 (Highly weathered)	岩材內分解或崩解為土壤之部分大於 50% 剩留少部分新鮮或變色核石。
V	完全風化 (Completely weathered)	所有岩材均已分解或崩解為土壤，但仍保留岩層結構。
VI	殘餘土壤 (Residual soil)	所有岩材均已轉化為土壤，岩層結構破壞體積變大。

表4.2-2 南橫岩石風化速率指數(WRI)排序(許金華，2006)

岩石種類	四月均風化速率 (百萬帕/月)	外插月均風化速率 (百萬帕/月)	外插年均風化速率 (百萬帕/年)	風化速率指數 WRI
新鮮硬頁岩	18.80	6.56	78.8	7.9
不新鮮硬頁岩	11.58	3.85	46.2	7.6
硬頁岩質板岩	16.80	6.54	78.5	6.4
玄武岩	16.30	6.33	76.0	5.9
千枚岩質板岩	4.00	1.42	17.0	5.7
砂岩	9.79	3.36	40.3	4.5
變質砂岩	11.81	5.48	65.8	4.5
石灰質砂岩	8.50	2.30	27.5	4.4
板岩質硬頁岩	4.00	2.03	24.3	3.5
礫觀層細砂岩	5.25	2.50	30.0	2.6
板岩	1.65	1.13	13.5	2.4
方解石	2.38	0.79	9.50	2.4

**備註**

四月均風化速率：4個月實測平均求得四月均風化速率  
 外插月均風化速率：外插至12個月求得外插月均風化速率  
 外插年均風化速率：外插至1年計算求得外插年均風化速率  
 風化速率指數 =  $\{ [(q_{u1} - q_{u2}) / q_{u1}] / \Delta t \} \times 100$   
 單位： $q_{u1}$ 、 $q_{u2}$  (MPa)， $\Delta t$  (月)，風化速率指數 (無)

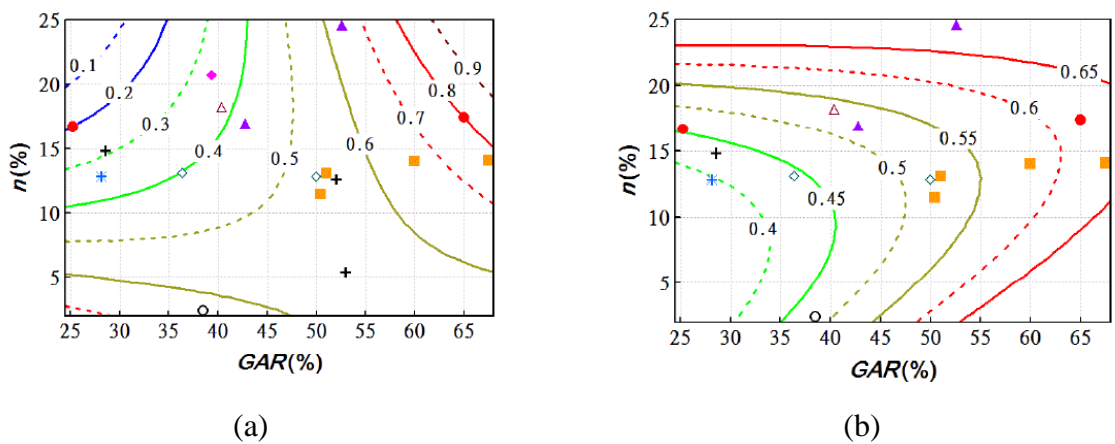


圖4.2-7 碎屑沉積岩力學特性遇水弱化因子分析(a)乾濕強度比RUCS與岩石孔隙率及顆粒面積比趨勢圖與(b) 乾濕變形比RE與岩石孔隙率及顆粒面積比趨勢圖(詹佩臻，2011)

## (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。

林宏勳(2001)以台灣西部麓山帶木山層砂岩進行一系列岩石潛變形為研究，並提出潛變量及潛變速率二者與岩石所受之正規化軸差應力大小有關，且在相同的試驗與應力條件下，含水試體的潛變量高於乾燥試體者。

詹尚書等人(2012)利用隧道變形經驗公式，迴歸淨空變形歷時、歷距曲線，據岩體變形行為特性的分類，佐以最小二乘法(generalized least squares)以得到最佳迴歸曲線，探討依時性變形特性參數與場址特性之關聯。研究結果顯示岩體材料變形模數、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，如瞬時水位變化亦會造成岩體材料之依時性變形；岩石材料的破碎程度、變形模數與強度將影響到岩石依時性變形中空間與時間效應的比例係數，即彈塑性變形與依時性變形之比例。瞬時水位變化對岩石材料的依時變形特性，反應速度取決於岩層組成比例在透水性的差異；應變率量值則端視岩石材料組成比例間的關係，包含本身的依時變形與岩層間界面滑動引致的依時性變形特性(圖4.2-8、圖4.2-9)。

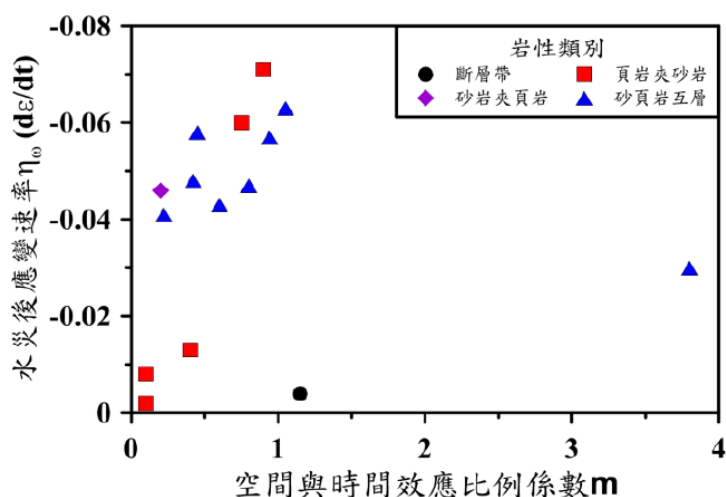


圖 4.2-8 依時變形速率增加後 m 值與應變率關係(詹尚書等人，2012)

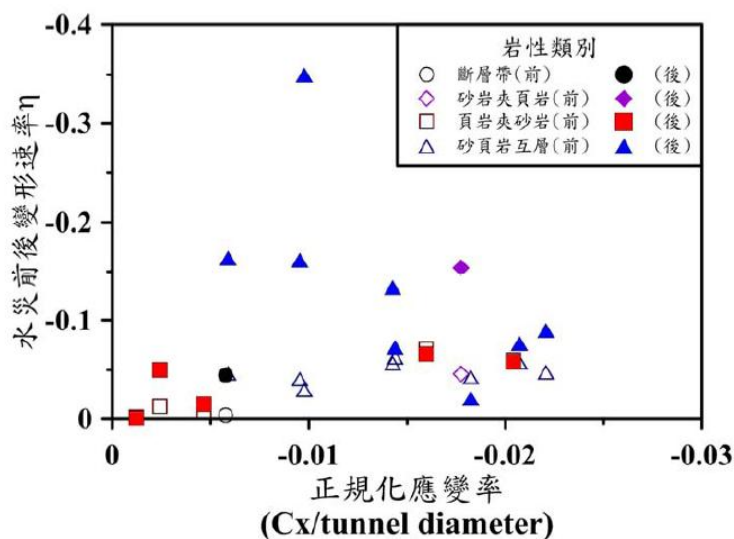


圖 4.2-9 水災前後之收斂應變速率與岩層特性之關係(詹尚書等人, 2012)

### 4.3 處置坑道結構長期穩定安全之檢監測流程與項目

就處置坑道結構長期穩定性而言，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長期穩定安全之關鍵要項。

#### 4.3.1 處置坑道結構長期穩定安全之檢監測流程

##### (1) 邊坡潛移引致坑道襯砌異狀之診斷

李佳翰等人(2009)以邊坡潛移造成坑道襯砌破壞之案例，建議應就隧道之地形、地質、設計、施工、歷年安全檢測與維修補強記錄之彙整研析後，依下列診斷流程探討襯砌異狀肇因：(1)首先由地形圖或相片基本圖判斷此隧道是否位於偏壓地形；(2)由遙測影像(正射影像或航空照片)判釋隧道沿線是否具有潛在滑動面；(3)拍攝「襯砌影像展開圖」並繪製「隧道異狀展開圖」；(4)由「隧道異狀展開圖」之「裂縫型態」，包括裂縫形狀(縱向、斜向、環狀、雁形等)、部位(頂拱、側壁、仰拱)、狀態(開口、閉合、錯動)等，初步研判是否係邊坡潛移所致；(5)進行現地崩崖調查，尋找滑動邊界之直接證據；(6)利用地表位移與傾斜管觀測，確認潛移速率與滑動深度；(7)觀察裂縫長度與寬度之變化，以確認其有無進展性；(8)進行隧道內淨空「三維絕對坐標內空測量」，利用前後期相同位置之測量成果，將位移量與變形量分離，以探討隧道之滑移、旋轉、甚至受力大小；(9)若隧道曾進行噴凝土補強，亦可由噴凝土之裂縫型態、開裂位置與進展性，診斷滑動邊界與潛移速率。

##### (2) 完整的隧道異狀診斷流程

李佳翰(2013)根據所蒐集的國內外 266 座坑道檢測案例提出完整的隧道異狀診斷流

程，透過蒐集襯砌表面影像及異狀展開圖，並特徵化襯砌表面異狀以量化裂隙型態，及佐以其他安全檢測資訊如透地雷達、微變監測等資料，判別隧道襯砌異狀的肇因，如圖 4.3 所示。

#### 4.3.2 處置坑道結構長期穩定之檢監測項目

本研究綜整前述各節內容，依據對處置坑道結構長期穩定之影響因素、及對應的襯砌異狀與檢監測項目統整於表 4.3-1。鑑於 4.1.3 節所述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對處置坑道結構長期穩定之負面影響，本研究參考李佳翰(2013)之分類，將處置坑道結構長期穩定影響項目增列「非力學因素」。此外，根據何泰源等人(1999)的研究，羅列了外力變化引致之隧道異狀原因及其維修與補強工法，如表 4.3-2，可據以作為未來探討處置坑道維修與補強課題之參考。

表 4.3-1 處置坑道襯砌結構長期穩定之檢監測項目

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	檢監測項目
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	1. 襯砌目視檢查 2. 襯砌影像掃描 3. 襯砌裂縫擴展性 4. 內空變位量測 5. 隧道中線量測 6. 洞口段邊坡災害調查
	邊坡運動	襯砌裂縫具偏壓特徵，例如： ● 襯砌肩部產生開口性張力裂縫 ● 裂縫可能呈現縱向、環向與斜向型態	1. 襯砌目視檢查 2. 襯砌影像掃描 3. 現地崩崖調查 4. 現地監測(地表位移、傾斜管、地滑計) 5. 隧道內監測(襯砌裂縫進展性、三維絕對座標內空量測、維修補強材劣化)



	開挖擾動	<ol style="list-style-type: none"> <li>襯砌裂縫具塑性壓特徵：                     <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 挫曲</li> <li>(2) 開口裂縫</li> <li>(3) 剪力裂縫</li> <li>(4) 側壁擠出</li> <li>(5) 仰拱隆起</li> </ol> </li> <li>襯砌裂縫具鬆弛土壓特徵：                     <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 頂拱產生開口性裂縫</li> <li>(2) 側壁產生壓縮裂縫或剪力裂縫</li> <li>(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</li> </ol> </li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 襯砌目視檢查</li> <li>● 襯砌影像掃描</li> <li>● 襯砌裂縫擴展性</li> </ul>
環境因素	風化作用引致岩石強度弱軟化	<ol style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>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</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 襯砌目視檢查</li> <li>● 襯砌影像掃描</li> <li>● 襯砌裂縫擴展性</li> </ul>
	依時性變形特性		
非力學因素	混凝土中性化	網狀裂縫	混凝土中性化試驗
	鋼筋保護層厚度不足	條狀裂縫	透地雷達探測
	鹼值粒料反應	龜殼狀裂縫	混凝土強度試驗
	混凝土澆置中斷(冷縫)	漣漪狀裂縫	襯砌目視檢查
	襯砌背後空洞或厚度不足		透地雷達探測

表 4.3-2 外力變化引致之隧道異狀原因及其維修與補強工法(何泰源等人，1999)

補修與補強工法		隧道異狀原因								
		鬆動土壓	偏壓、邊坡潛移	地層滑動	塑性壓	水壓	地盤下陷	地盤承载力不足	地震	洞口段
填縫(pointing)		○	△	△	△	△	△	△	○	△
擋板、防護網		○	△	△	△	△	△	△	○	△
背填灌漿		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	△
內覆襯砌	噴凝土*	△	○	○	○	△	△	-	○	○
	現場打設混凝土	△	○	○	○	△	-	-	○	○
鋼筋補強		○	○	○	○	△	◎	-	○	○
岩栓補強		△	◎	○	◎	△	△	○	○	△
護基(foot protection)混凝土		-	○	△	-	-	-	◎	△	○
支撐(strut)		-	○	○	○	△	△	△	△	○
設置仰拱		-	○	○	○	△	○	◎	○	○
地盤灌漿		△	△	-	-	△	△	○	○	○
新設排水設施		△	△	○	△	◎**	-	○	△	△
邊坡穩定		-	○	◎	-	-	-	-	◎	◎

註備：採用之維修、與補強工法應針對各種隧道異狀原因選擇適當工法,並參考以下說明加以組合使用。

說明：◎：最適合該異狀之工法

○：適合該異狀之工法

△：視情況對該異狀有效之工法

-：不適合該異狀之工法

\*：有大變位之處時，採鋼纖維噴凝土(SFRC)有效

\*\*：以改良或新設導水設施改善排水效果

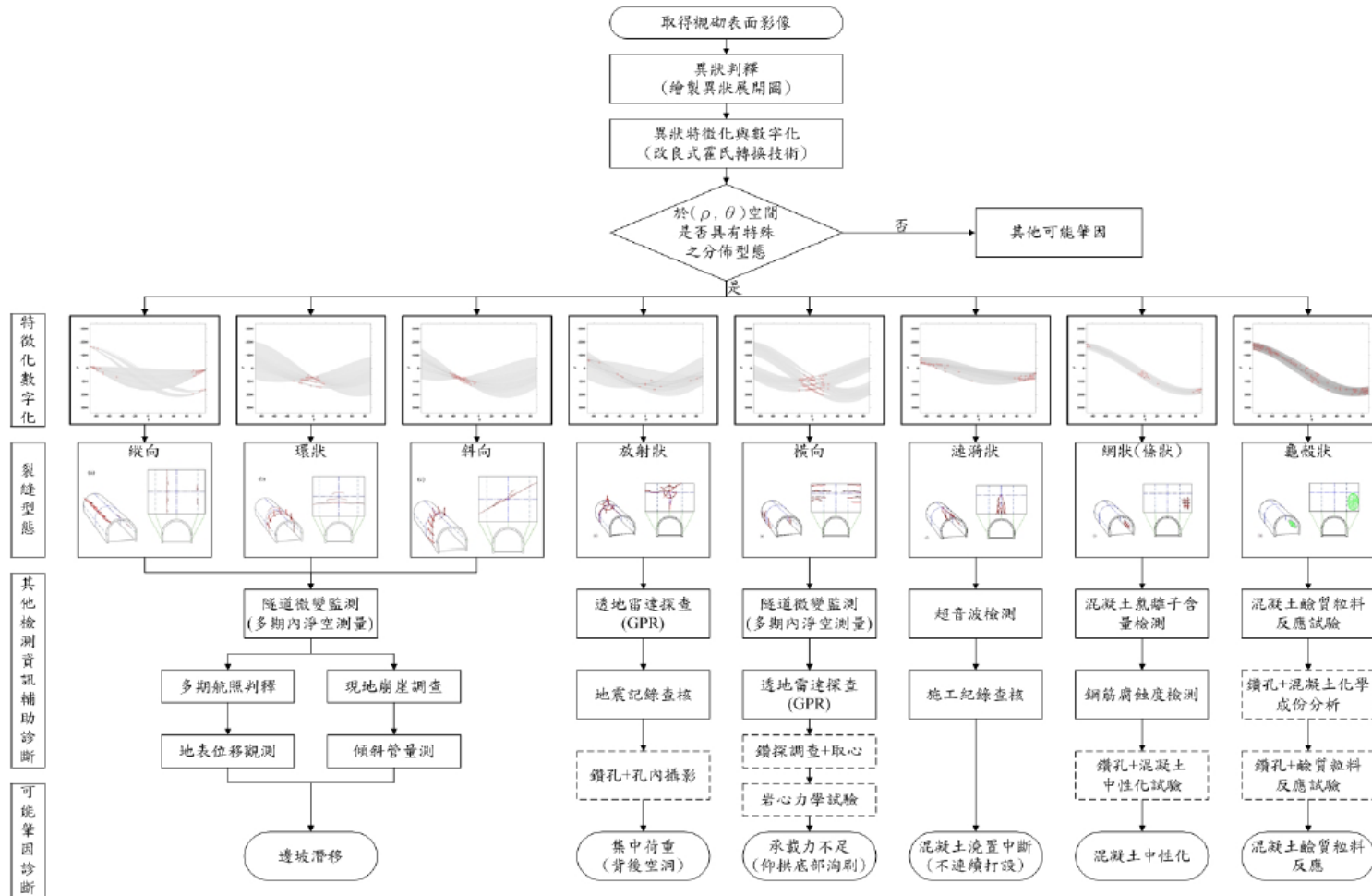


圖 4.3-1 隧道異狀診斷流程(李佳翰，2013)

## 第五章 處置坑道施工期檢測及運轉期監測要項研析

基於處置坑道結構長期穩定安全之考量，盡可能於不同時期蒐集分析坑道場址特性參數，以及處置坑道與圍岩間的相關行為，可大幅提高處置坑道整體的結構長期穩定之安全性。第四章主要就國內一般坑道異狀肇因所對應到坑道長期結構安全影響因素，提出必要的檢測與監測項目，並針對因應各影響因素以強化處置坑道結構安全之需求。本章整合第四章所之建議檢測與監測項目，更進一步探討處置坑道於建造與運轉期間，所應考量的檢測與監測要項，提供相關單位參考運用。

### 5.1 一般隧道施工期的檢監測規範與內容

國內目前的隧道檢監測規範，係著重於施工階段的檢監測內容，主要是根據交通部國道新建工程局於 1993 年出版的「隧道施工技術規範」項次 12 之「隧道計測及儀器」、中國土木水利工程學會 1999 年編著科技圖書出版的「隧道工程設計準則與解說」第八章「監測系統」；另包括張吉佐與劉弘祥於 1999 年編著之「山岳隧道工程設計與實例手冊」第九章「隧道監測與回饋」，上述參考書籍封面如圖 5.1-1 所示，以下僅摘述其中隧道監測之目的與功能、監測項目及配置、監測儀器之選用、監測方式與頻率及監測資訊之處理摘述整理。

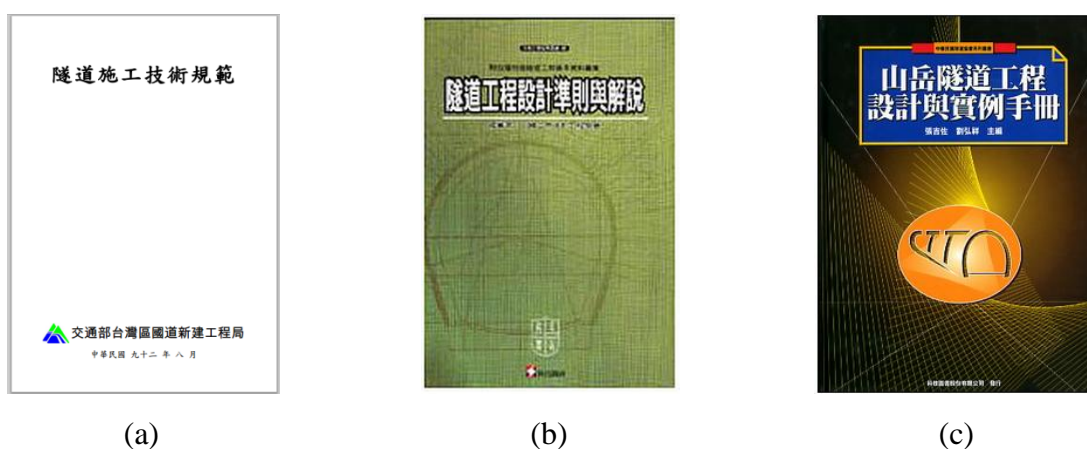


圖 5.1-1 國內既有隧道檢監測規範：(a)「隧道施工技術規範」、(b)「隧道工程設計準則與解說」與(c)「山岳隧道工程設計與實例手冊」

#### 5.1.1 隧道監測之目的與功能

設置監測系統進行觀測之目的，旨在施工期間隨時掌握隧道周圍地盤行為與支撐效果，以檢核隧道之安全性、設計模式適用性，以及驗證地盤反應行為與支撐效果等，俾配合隧道內之觀察及補充調查、試驗資料，進行隧道安全綜合評估、回饋分析或設計修正，以確保隧道工程之安全性及經濟性。監測系統及其相關工作之規劃設計，原則上，

應使其至少具備下列功能：

- (1) 可有效警示須針對地盤採行即時處置對策與支撐加強之累進式變形狀況。
- (2) 確悉支撐構件之應力發展狀況，並指明其強度無虞或無發生強度破壞之可能性。
- (3) 提供進行回饋分析、設計修正之充分資料或聲請保險理賠之完整憑證。
- (4) 確認所採隧道建造方法之妥適性。
- (5) 掌握隧道之變形及確保隧道斷面淨空符合設計需求。
- (6) 掌握隧道上方地表面及鄰近結構物之沉陷與傾斜、洞口邊坡及特殊區段(如:惡劣地質區)之地層位移或穩定性變化、地下水位下降或水源枯竭等資訊。

### 5.1.2 監測項目及配置

監測工作在於獲得建造中隧道的位移資料，包括周邊位移、地中位移與地表沉陷等；另一部分在獲得應力資料，包括支撐構件內部應力、支撐與岩體間之接觸應力與岩栓軸力等。此外，隧道的監測項目大致區分洞內與洞外監測兩大部分，如表 5.1-1 與表 5.1-2 所示。一般覆蓋層厚度較厚之區段僅進行洞內監測，其中在表 5.1-1 所列洞內監測項目內之開挖面觀察、淨空變位及頂拱下陷是重要的監測項目，原因在於可藉此獲得隧道建造時的基本資料，並作為隧道安定與否的依據。

表5.1-1 隧道洞內監測項目(王文禮與蘇灼謹，1999)

項目	地質狀況			地盤物理性質				開挖面及地中位移					支撐狀況						
	地下水			地下水	地盤材料試驗	地盤現場試驗	彈性波速度量測	淨空變位	頂拱下陷	仰拱隆起	中心線量測	地中變位量測	一次襯砌觀察	鋼支保應力量測	岩栓軸力量測	岩栓拉拔試驗	一次襯砌應力量測	二次襯砌觀察	二次襯砌應力量測
地盤條件	開挖面觀察	前進鑽探	前進震測																
硬岩地盤	◎	△	○	△	△	△	△	◎	◎		△	△	◎	△	△	△	△	○	△
軟岩地盤	◎	△	○	△	△	△	△	◎	◎	△	○	△	◎	△	△	△	△	○	△
軟岩地盤 (塑性變形顯著地層)	◎	△	○	△	△	△	△	◎	◎	△	○	◎	◎	△	◎	△	○	○	○
土砂地盤	◎	△		○	◎	△	△	◎	◎	△	△		◎	△	△	○	△	○	△

說明：◎很重要 ○重要 △視需要而定

表5.1-2 隧道洞外之監測項目(王文禮與蘇灼謹，1999)

項目	地表觀察	地表變位		地中變位		結構物變位		地下水量測
		地表沉陷	地表位移	地表沉陷	地中傾斜位移	地表結構物	地中結構物	
地盤條件								
安定地盤	○	○				△	△	△
可能產生問題地盤	○	○	○	△		○	○	○
會產生地層滑動地盤	○	○	○	○	○	○	○	○

在監測配置部分，儀器之佈置應考慮隧道規模、斷面形狀、地盤條件、施工方法、施工對鄰近結構物之影響程度等因素，同時顧及不同監測項目間之關聯性與交互檢核效用。以下分別針對目視觀察、淨空變位與頂拱下陷、地表及地中沉陷、仰拱及中心線量測及地中變位、鋼支保應力、岩栓軸力及襯砌應力等監測配置分述如后：

### 5.1.3 目視觀察

目視觀察包括開挖面地質觀察及已施工區間之襯砌(一次襯砌與二次襯砌)觀察。

### 5.1.4 淨空變位與頂拱下陷

淨空變位測線及頂拱下陷測點配置，如表5.1-3及圖5.1-2所示，係依開挖工法、覆蓋厚度、地質條件及所在區段而定。淨空變位與頂拱下陷應配置佈設在同一監測斷面，其佈設間距介於 10至 50 m，依所處區段及地質狀況而有所差異；若是位於洞口段、初期施工區域(距洞口段 200 m之區段)、淺覆蓋(覆蓋厚度小於 2 倍之隧道直徑)與土質地盤等特殊區段，採用較小間距，如表5.1-4所示。

表5.1-3 淨空變位與頂拱下陷監測之測線數配置方式(日本土木學會，1986)

區間 開挖 工法	一般區間	特殊區間			
		洞口附近	覆蓋厚 2D 以下 (D:隧道開挖寬)	預期地盤具擠壓 性 或有偏壓狀况	實施支撐安全管 理監測之位置
全斷面開挖	水平 1 測線		3 測線或 6 測線		3 測線或 6 測線
短台階開挖	水平 2 測線	4 測線或 6 測線	4 測線或 6 測線 註(1)	4 測線或 6 測線 註(2)	4 測線或 6 測線
多段台階開挖	各台階別 水平 1 測線	各台階別 3 測線	各台階別 3 測線 註(1)	各台階別 3 測線 註(2)	各台階別 3 測線

註(1)如可確實實施隧道外之地表沉陷等監測，得省略斜測線。

註(2)如變位量偏大或偏壓傾向顯著時，宜以一般測量一併監測絕對變位。

表5.1-4 淨空變位與頂拱下陷監測断面之間距要求(日本土木學會，1986)

位置	一般區段		洞口段	特殊區段
	初期施工區段 約進洞 200 公尺	後續施工區段		
間距	20 公尺	30 至 50 公尺	10 公尺	10 至 20 公尺

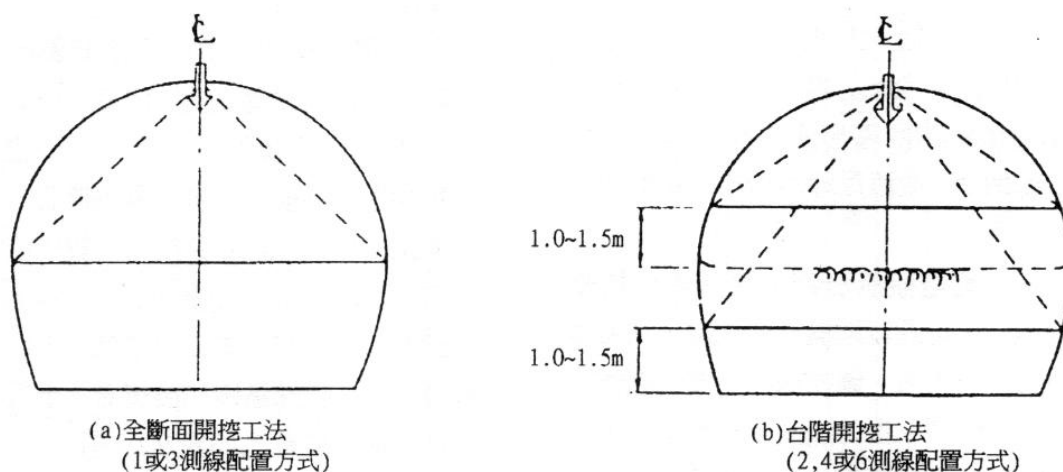


圖5.1-2 淨空變位與頂拱下陷監測之測線配置例(日本土木學會，1986)

### 5.1.5 地表及地中沉陷

地表、地中沉陷之監測儀器佈置間隔視地盤條件、地下水位、覆蓋厚度、有無鄰近結構物及施工方法等因素而定，測點配置範例如圖5.1-3。當以覆蓋厚度之考量因素，其測點間隔可參考日本土木學會所提之建議，以表5.1-5所列之間隔為原則。凡初始施工段、地質變化較劇處及可能受施工影響之鄰近結構物附近，均應採表中較小之間隔，並宜與內空變位及頂拱下陷監測點設於同一里程斷面上。

表5.1-5 地表、地中沉陷監測断面之間距(日本土木學會，1986)

覆蓋厚度 h 與隧道開挖寬 D 之關係	測點間隔
$2D < h$	20~50m
$D < h < 2D$	10~20m
$h < D$	5~10m

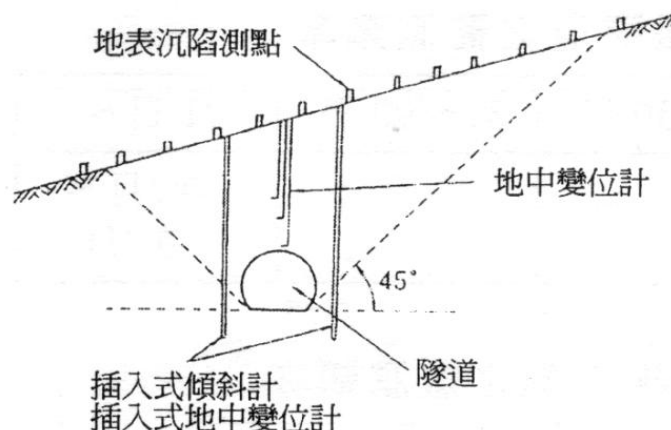


圖5.1-3 地表沉陷與地中變位監測之測點配置範例(日本土木學會，1986)

### 5.1.6 仰拱隆起及中心線量測

配置隧道仰拱隆起及中心線量測主要係用於具擠壓性或偏壓狀況之地盤，設置間隔可參考前述淨空變位頂拱下陷監測儀器之配置間隔。

### 5.1.7 地中變位、鋼支保應力、岩栓軸力及襯砌應力

目的在為達到掌握隧道周圍地盤及支撐構件反應行為，以供校核設計、防範異常現象與問題發生為目的。因此，宜佈置於代表性地質區間之初始施工段為原則。為安全管理之需要，發生特殊問題或異常現象處，亦均宜額外裝設。一般地盤條件之佈置間隔建議採 200~500 公尺，測點配置如圖5.1-4所示，惟仍宜按隧道規模或地盤條件妥適研訂之。

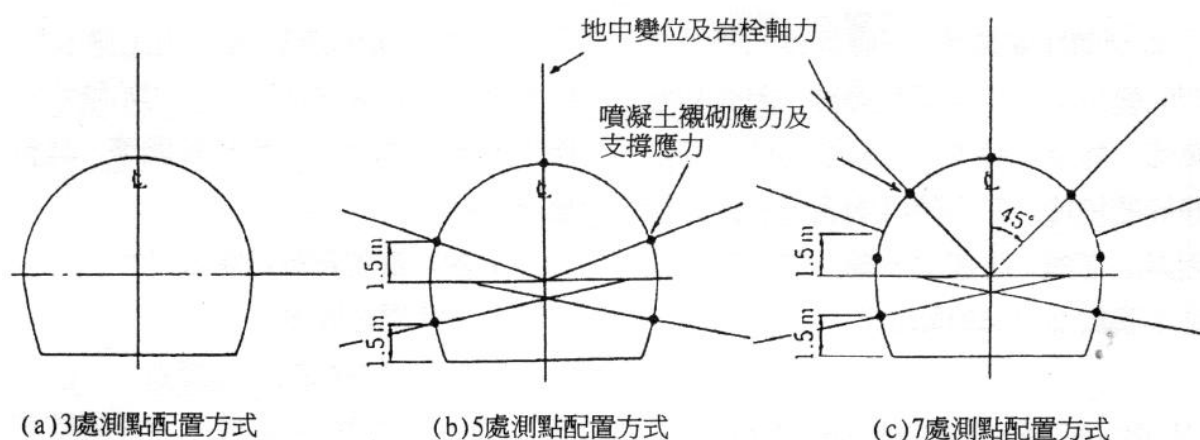


圖5.1-4 地中變位、鋼支保應力、岩栓軸力及襯砌應力測點配置範例(日本土木學會，1986)



### 5.1.8 監測儀器之選用

為充分發揮監測系統之功能，儀器性能之選用，應妥予考量下列事項：

- (1) 精度良好，且測讀範圍廣、俾可精確、有效測讀。
- (2) 儀器應能因應施工環境條件，具有較佳之耐水性、耐濕性、耐塵性、耐衝擊性、耐寒性、耐熱性及耐久性等性能，以免其損壞或失效率過高影響監測效果。
- (3) 儀器購置及裝設費用低。埋設後不予回收之儀器購置費、埋置費及測讀儀器費等整體費用宜一併評估。
- (4) 操作簡易、便捷。儀器之埋設安裝、測讀及紀錄、資料解析等作業愈簡便愈佳。

### 5.1.9 監測頻率與初始值紀錄

監測頻率應視監測值對地盤條件、施工條件等之時間效應敏感度與設計之需求，於監測系統設計同時一併擬定，期能對設計階段所預期隧道周圍地盤與支撐構件所可能發生之變位、應力之變化速率，以及開挖施工之輪進狀況及監測斷面與開挖面之距離等事項，提供預警資訊並判定隧道、地盤穩定度。通常，從(1)確認隧道與相關支撐構件穩定安全性所需之頻率；(2)預測及研判隧道與相關支撐構件行為反應所需之頻率；(3)充分掌握隧道施工時支撐系統與地盤間互制行為關係所需之頻率等三者之需求中，綜合研訂合宜之監測頻率。

基本上，隧道開挖初期，開挖面附近之地盤與支撐構件之變位、應力有較顯著之變化，隨後則漸趨穩定。因此，一般多以監測儀器安裝完成日後所經歷之時段長短，訂定不同之監測頻率，如表 5.1-6 所示，亦可依地盤與支撐構件之變位、應力之變化速率，或依監測儀器裝設位置至開挖面之距離，訂定其監測頻率，如表 5.1-7 所示。由於隧道實際施工時，周圍地盤與支撐構件之反應行為無法完全與設計所預期者相同，因此監測頻率仍應於施工期間考慮隧道開挖面、地盤、支撐等之實際反應行為與狀況變化，作適度之調整。

表5.1-6 監測頻率之概略建議基準(日本土木學會，1983)

距儀器裝設日之日數	0~7 日	8~14 日	15~30 日	31 日~
監測頻率	2 次/日~ 1 次/日	1 次/日~ 1 次/2 日	1 次/2 日~ 1 次/3 日	1 次/3 日~ 1 次/7 日

表5.1-7 內空變位、頂拱下沉之監測頻率(日本道路協會，1993)

監測頻率	變位速率	至開挖面之距離
2 次/1 日	10 mm/日 以上	0~1D
1 次/1 日	5~10 mm/日	1D~2D
1 次/2 日	1~5 mm/日	2D~5D
1 次/7 日	1 mm/日 以下	5D 以上

D: 隧道開挖寬度

監測儀器安裝後，初始值應儘可能及早讀取，一般初始值的測定最好於開挖後 12 小時以內完成。

### 5.1.10 監測資訊之處理

為使監測作業能充分發揮其功能，須獲取正確、具代表性之監測數據，監測結果亦須妥適整理及解析。隧道開挖初期周圍地盤及支撐構件之行為反應既顯著又快速，因此，監測資料整理及解析工作亦須有時效性，均應儘速完成，方足以確保施工安全。基本上，各項監測項目之監測結果、資料大多整理成變位或應力與歷時之關係曲線，供掌握監測項目之變化速率及趨勢，藉以解析或研判其是否已趨收斂、穩定。若有必要，經由回饋分析及設計修正，補強支撐系統或採取其他輔助措施。監測結果整理所得之變位或應力與歷時關係曲線範例如圖 5.1-5 所示。

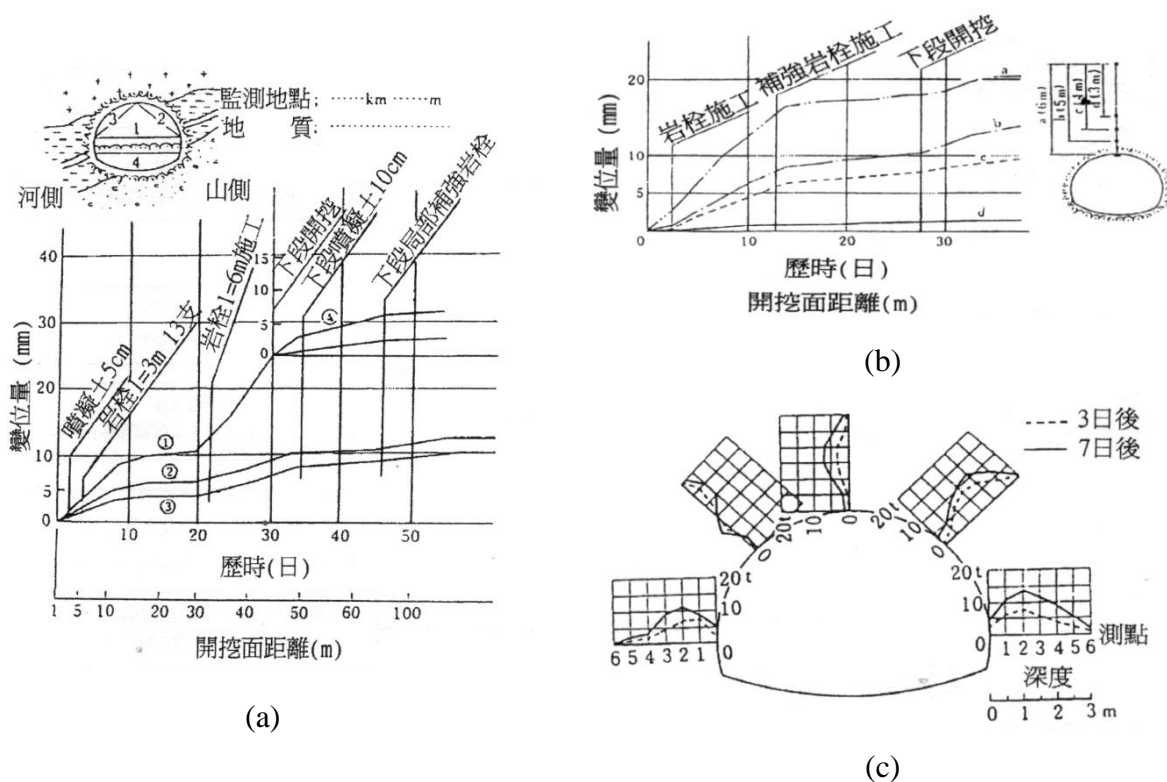


圖 5.1-5 監測資訊之處理：(a)淨空變位歷時變化曲線範例；(b)地中變位歷時曲線範例與 (c)岩栓軸力分佈範例

## 5.2 一般隧道運轉期的檢監測規範與內容

一般隧道在運轉期的監測工作，其目的在於掌握某些地質因素或水文地質等環境因素對隧道安全的可能影響，如前述3.2.2節介紹之雪山隧道目前所進行的內空變位、孔隙水壓與地下水監測工作即屬此例；或基於老舊隧道的安全考量，當襯砌出現裂縫、滲漏等異狀時所進行的檢測工作，如3.2.1節介紹之安朔隧道檢測案例即屬此例。本節旨在瞭解國內既有隧道在運轉期間的檢測相關規範與內容，透過了解現行的檢監測技術與做法，以作為後續探討處置坑道在運轉期間的檢監測項目之參考依據。

### 5.2.1 國內外隧道安全檢測現況

在國內部分，交通部曾於1987年頒佈交技(76)字第027692號，交通部技術標準規範公路類公路工程「公路養護手冊」，付梓頒行。其內容集中於道路管理者(業主單位)之執行，包括路面工程、排水工程、橋樑工程、隧道工程、涵管工程、交通安全及管理設施。所規定執行的業務包括每週2~3次之平時巡查，每年1次之定期檢查和必要性之臨時檢查，其檢查流程如附錄圖C.1。

在國外部分，日本道路公團乃於1989年委託財團法人日本隧道技術協會，設置老朽化對策特別委員會開始進行檢討。1990年整理日本各單位機關有關襯砌異常狀況判定基準與評估資料，建議日本道路公團所維護管理的高速道路隧道之檢測、調查與安全度判定等基本法則，如附錄圖C.2所示。

此外，國內部份隧道因老舊出現龜裂與漏水等異狀，自1993年起陸續辦理隧道結構安全檢測，採目視測繪與全斷面隧道掃描設備(TS360 Tunnel Scanner System)等方式，進行裂縫及滲水初步調查。對於異狀顯著處，進一步採透地雷達實施襯砌厚度調查，或採史密特錘進行襯砌局部強度調查，嚴重處施以混凝土鑽孔取樣及強度試驗，並進行必要補強措施，目前已蒐整的國內隧道安全檢測案例與檢查項目如附錄表C.1所示。

此外，國內既有隧道檢測規範，可參閱交通部於1996年委託國立台灣大學土木工程學系進行「老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂」(黃燦輝、鄭富書等，1997、1998)相關報告，其內容主要針對台灣老舊交通坑道之安全檢測，建議區分為檢查與安全檢測兩階段的制度，檢查階段可由隧道管理單位自行辦理或委託專業顧問公司辦理，又區分為平時檢查、定期檢查與臨時檢查及其頻率一併整理於附錄表C.2。

黃燦輝等(2008)於「隧道襯砌非破壞性檢測技術之開發」研究計畫中，建議隧道安全檢測作業管理依實施步驟可區分為初次檢查(測)、平時巡查、臨時檢查、標準檢測與詳細檢測等階段進行，如附錄圖C.3之流程。

### 5.2.2 隧道檢測技術與檢測對象

#### (1) 隧道檢測技術與方法

根據國內營運中隧道實施安全檢測作業之經驗，常以調查隧道是否出現異狀或既有異狀是否出現變化為重點，以確保隧道的安全性與耐久性，進而減少營運中的維護作業

頻率以及延長隧道的服務年限。目前國內外常見的檢測方法與技術可大致區分為破壞性檢測與非破壞性檢測兩類，其中又以非破壞性檢測技術為國際隧道協會(ITA)所推薦，並針對各種非破壞性檢測技術探討其理論背景、主要應用領域、應用上的限制、優缺點以及應用於隧道檢測作業的適用性，彙整如表 5.2.1。國內常用的檢測方法摘述說明如后：

a. 地電阻影像剖面探測(RIP)

地電阻影像剖面法是地電阻測量技術中，結合水平電性剖面法及地電阻垂直測深法的先進施測方式。此種方式可以同時達到探測垂直測深及側向地層電阻變化的功效，在山區進行工程地質、地下水資源和地下地質調查時，地電阻影像剖面法對岩性變化與地下水富集區具有高度敏感性，非常適用於調查斷層破碎帶、剪裂帶、地下水分佈之調查。

b. 隧道內橫斷面淨空測量

採用Leica GRP5000隧道影像掃描系統，於影像掃描時可一併測量隧道斷面淨空，其精度可在10 mm以內，每斷面最多可量測至20,000點。

c. 地表現場勘查

地表現場勘查目的在取得現場地形、地貌、植被、岩層露頭、水系及周邊交通之狀況等資料。現場勘查範圍以各隧道洞口為主。

d. 裂縫、滲水之調查(攝影及測繪)

隧道襯砌表面裂縫調查在瞭解各隧道全線襯砌表面裂縫的位置、分佈情形等，而滲水調查則欲瞭解襯砌表面的滲水位置、滲水情形等。本項調查工作分為兩大部分，其一為隧道影像掃描，另一則為全線目視檢查。

e. 隧道襯砌及背後空洞調查

**透地雷達探測方法**，是以高壓線圈為探測源，產生高頻電磁波射入結構體內，在行經電磁特性如導電率或介電常數變化的界面或異常體時，會依斯涅爾定律(Snell's)將部份能量反射回來，分析反射波的走時、強度及相位，即可獲得隧道襯砌內電磁特性異常之幾何位置，進而可有效地瞭解探查區域襯砌厚度完整性及襯砌背填灌漿之狀況，對於日後補強設計與施工的特殊劣化區段確認，相當具有助益。

**敲擊回音法**，是以敲擊表面的方法導入應力波(聲波)於混凝土內部，由結構體內瑕疵或邊界回傳之應力波所造成的反應來做非破壞評估的一種方法。此法可用來決定鋼筋及混凝土結構物中之瑕疵-例如垂直裂縫、斷層、孔隙以及蜂窩之深度、位置與範圍，並可精確量測混凝土樓版或橋面版之厚度以及介面接合程度。

f. 裂縫寬度與深度探查

屬於不破壞受檢測物之原有特徵及其可用性，而能偵知其品質狀況的檢測方法。此項技術可針對混凝土表面發現的裂縫進行非破壞檢測，並成功地運用在新建土木工程品質監管及建築物老劣化之診斷，對於混凝土的材料強度及其結構瑕疵可以有效地偵測，不僅迅速確實，且不破壞受檢結構物的完整性。

g. 史密特錘試驗

在隧道目視發現有特殊異常的位置進行強度試驗，並配合混凝土抗壓強度試驗數值予以修正。施測角度分為0度(垂直側壁)及90度(垂直頂拱)兩種。

表 5.2-1 ITA 對非破壞性檢測技術應用於隧道安全檢測之檢討(ITA, 1997)

非破壞性檢測技術		主要應用範圍	隧道檢測適用性	問題點	優點
物理波動技術	結構振動法	橋梁、地表結構物	甚低	襯砌厚度不一、岩層非均質性、地下水位變異	無
	震波折射法	地質調查(探求地層厚度)	低	檢測精度與速度	襯砌背後存在大空洞時有效
	微振動與音射分析	煤礦、室內試驗	甚低	重現性、檢測精度	構造自身裂隙生成過程
	超音波折射法	鋼結構物、輸油管線	甚低	可能與測試地層背景偶合、地層非均質、粒料造成漫射、檢測精度	無
放射性技術	珈瑪射線背散射法	路工結構物	甚低	檢測速度、貫入深度	無
	中子背散射法	地層密度與含水量	低	檢測速度、貫入深度	可測出各點的含水量
導電與電子技術	旋電流法	材料導電度、輸油管裂縫檢測、鋼筋檢測	低	檢測速度、非導電性材料不適用、貫入深度	可檢測鋼筋
	透地雷達	橋梁、隧道、路工	高	檢測速度、評估不易、材料包覆折射	貫入深度佳
	電位法	鋼筋腐蝕檢測	低	檢測速度、貫入深度	可檢測鋼筋腐蝕
光學技術	熱紅外線掃描與目視判視	隔熱度檢查、隧道	甚高	隧道氣候條件必須變異不大、評估不易、設備釋放熱源	有效檢測空洞、含水量、裂縫、檢測速度快
	多光譜分析法	遺址、結構物、隧道	高	檢測速度、振動、需強光源、評估不易、貫入深度	可有效檢測出裂隙、乾裂縫

(2) 隧道檢測對象

隧道構築於地下，結構行為受地形、地質等環境條件變異而影響，加上襯砌長期老朽化，以致影響隧道結構安全的因素十分複雜，造成的異狀徵兆或現象種類相當繁雜。依檢測對象不同，對應的隧道安全檢測亦有多種不同的對策與作業方式。就隧道檢測的對象而言，依據位置與異狀特性大致可區分為下列各項，如圖 5.2-1 所示四類檢測對象：

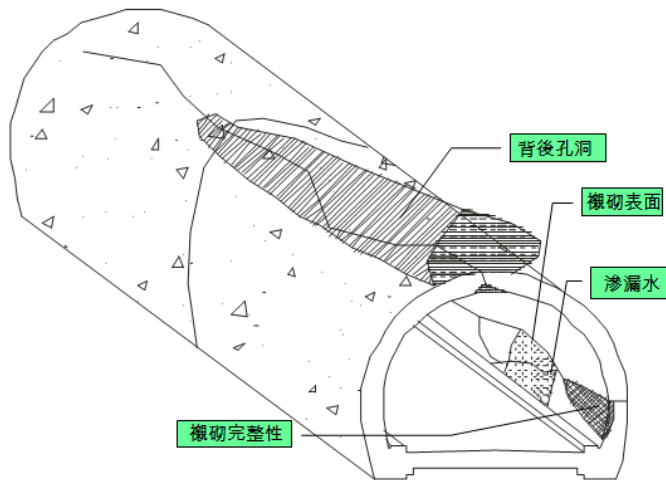


圖 5.2-1 隧道檢測的四類對象

a. 襯砌表面

襯砌表面係指隧道內可視的襯砌範圍，在交通隧道通常為路面以上的側壁與頂拱的襯砌，在水利隧道則為全斷面的襯砌。針對襯砌表面進行檢測，係基於隧道存在異狀時，襯砌表面必然會有某些徵兆，如圖4.1-1所示。故觀察這些徵兆，即可瞭解隧道襯砌的穩定性或相應的變化。襯砌表面的檢測方式可應用目視觀測、隧道淨空測量與襯砌掃描等方式進行：目視觀測與隧道襯砌掃描結果，通常在襯砌展開圖上繪製其異狀分佈位置，略加說明後輔以異狀處的攝影、錄影等加以記錄，目視檢測記錄案例列舉示如圖5.2-2；而隧道淨空測量結果，則可繪製其淨空斷面圖，有時尚需經計算求得隧道之中心線或圓形隧道襯砌真圓度等，襯砌表面掃描記錄方式則列舉如圖5.2-3。

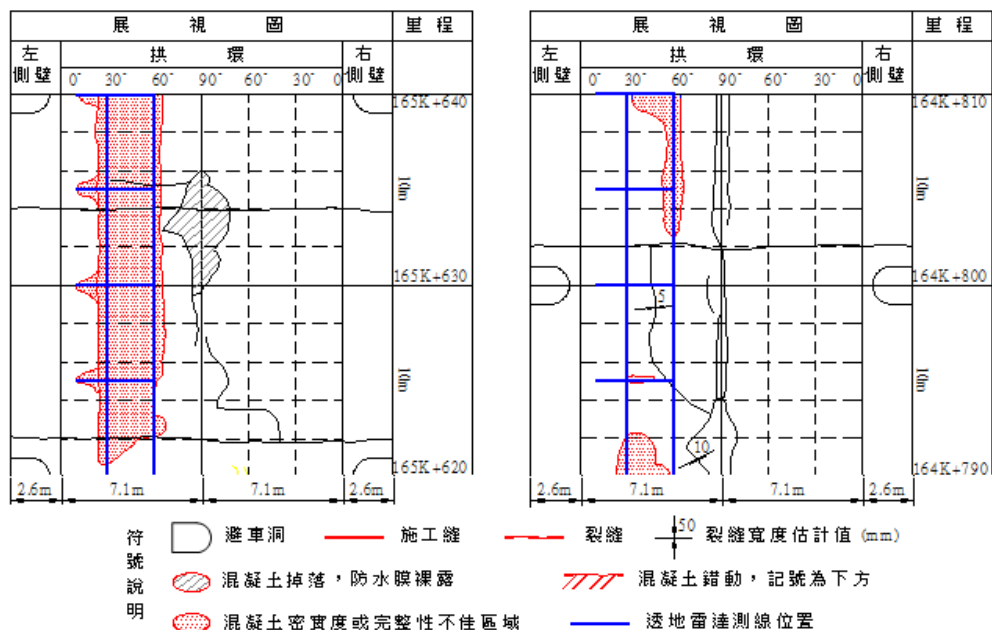


圖5.2-2 目視檢測襯砌展開圖之記錄範例

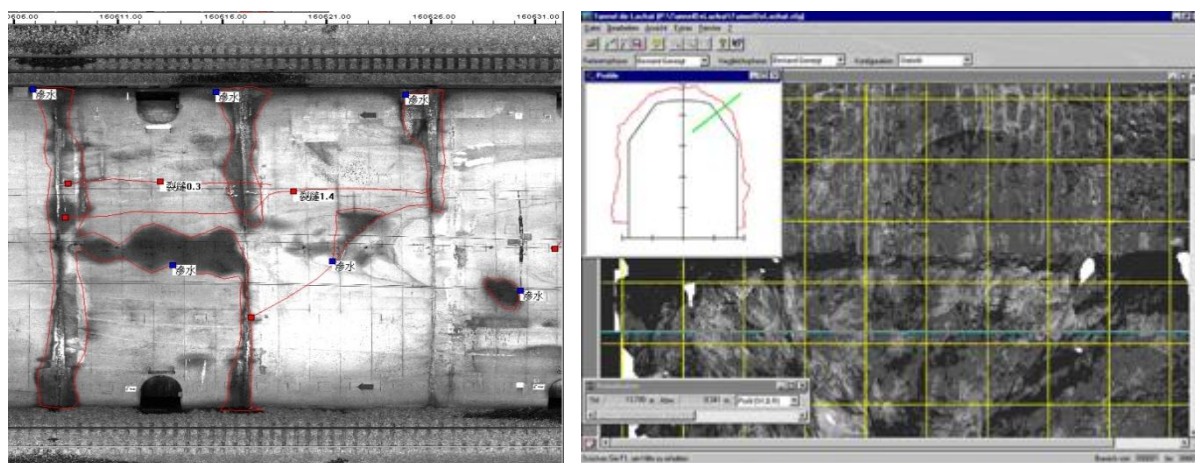


圖 5.2-3 襯砌表面掃描成果例

b. 襯砌完整性

襯砌完整性係指襯砌與其設計條件的相符程度，包括襯砌厚度、強度、鋼筋數量、腐蝕程度、位置與保護層厚度、以及襯砌是否出現蜂窩、析離、孔洞、裂縫或裂隙、中性化、氯離子含量過高等異常現象。前述項目的設計條件與檢測結果的差異，即為襯砌在完整性上的缺陷，由於襯砌完整性部份檢測項目如襯砌厚度、強度等具量化定義，故相對其他檢測項目，其結果較易量化表示。

c. 襯砌背後孔洞

襯砌背後空洞係指隧道襯砌與圍岩間存在間隙、孔洞，或圍岩鬆動與周遭岩層脫離，或周圍存在水包等現象。隧道頂拱或周圍附近因存在空洞，岩溫出現變化，岩體的介電特性亦發生改變，此種襯砌背後孔洞通常可應用透地雷達或熱紅外線掃描進行檢測。

d. 其他檢測項目

包括隧道內的路面、排水溝等異狀、隧道附屬設施情況以及隧道周圍的地盤狀況等。隧道內的路面、排水溝等附屬結構設施，檢測方式可參照襯砌主體結構進行；隧道周圍地盤狀況亦可透過非破壞性檢測或其他調查方式進行。

### 5.3 監測技術近期發展與應用

#### 5.3.1. 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 5.3-1 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，近年邱雅筑等人(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，如圖 5.3-1 至圖 5.3-3 所示，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)

，如圖 5.3-4 與圖 5.3-5，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 5.3-6，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 絕對座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。

表 5.3-1 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	營運過程安全檢測/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	隧道變形量較小且精度不足，反算分析結果變異較大

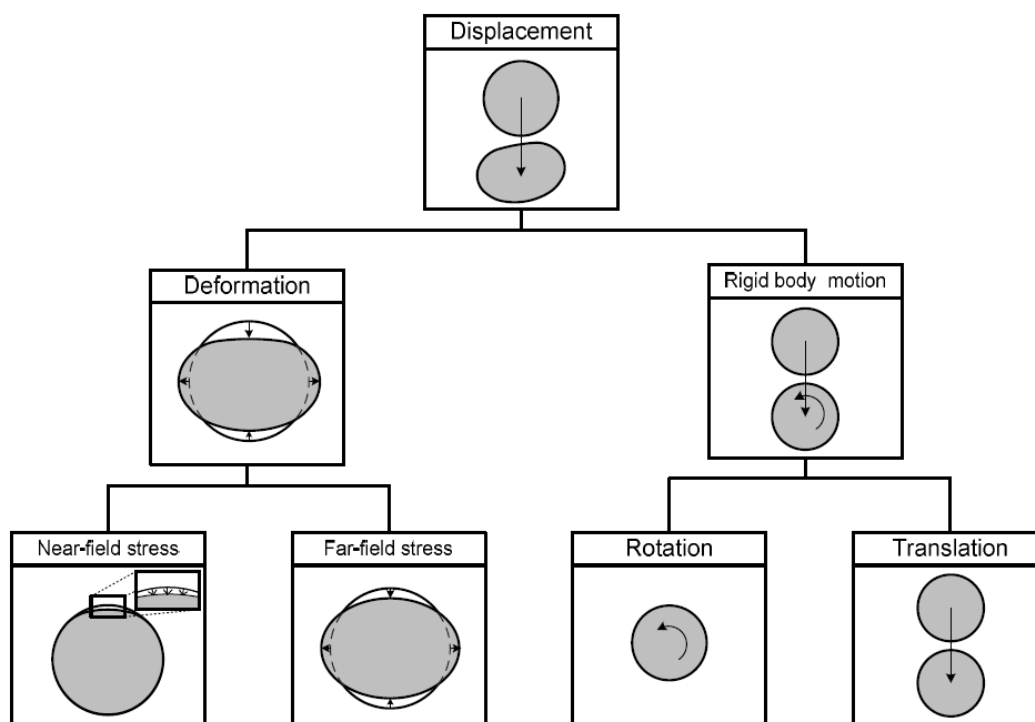


圖 5.3-1 隧道位移與其組成的分量(邱雅筑等人，2012)



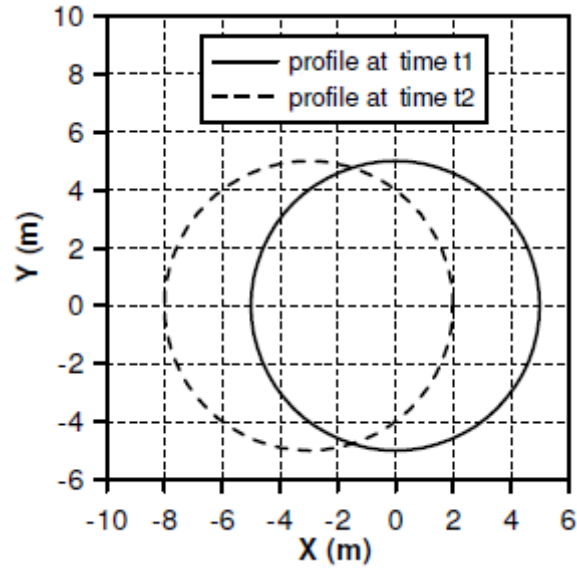


圖 5.3-2 同一隧道橫斷面在前後兩次量測結果之差異(邱雅筑等人，2012)

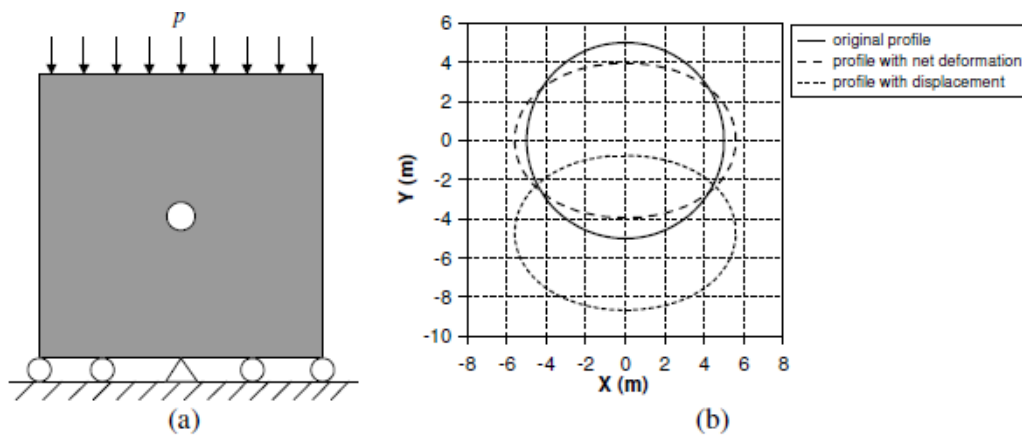


圖 5.3-3 襯砌變形分離示意圖：(a)外力條件與(b)變形分離成果(邱雅筑等人，2012)

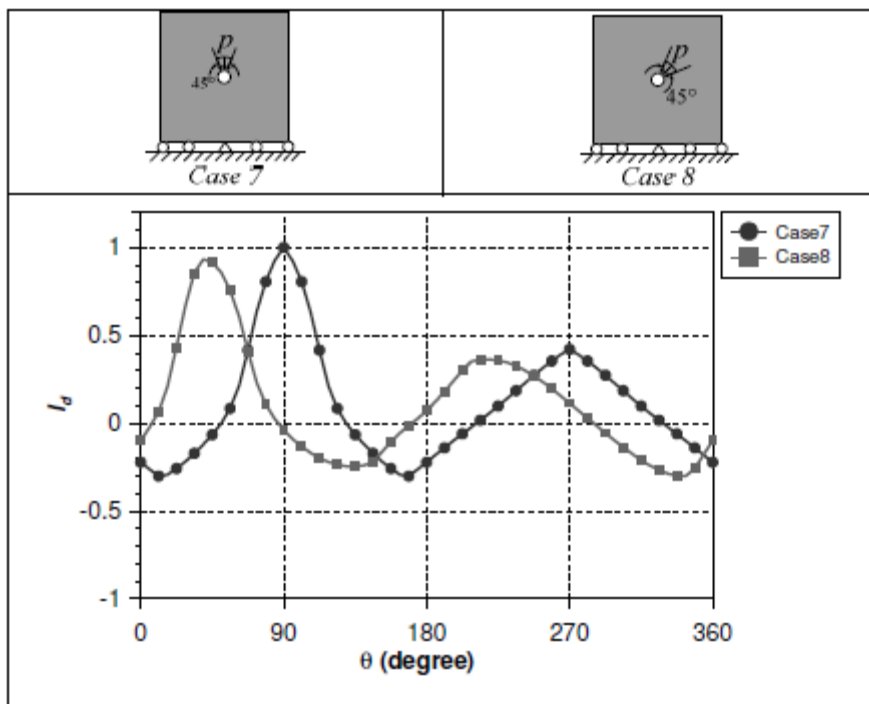


圖 5.3-4 近域外力引致之襯砌剖面變形特徵曲線(邱雅筑等人，2012)

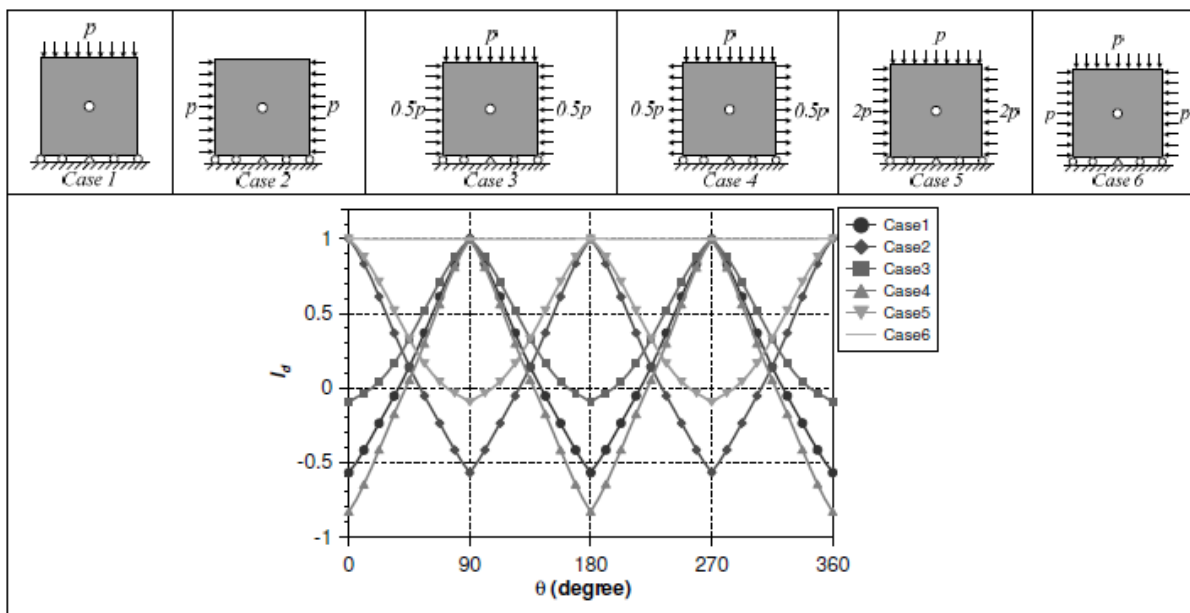


圖 5.3-5 遠域外力引致之襯砌剖面變形特徵曲線(邱雅筑等人，2012)

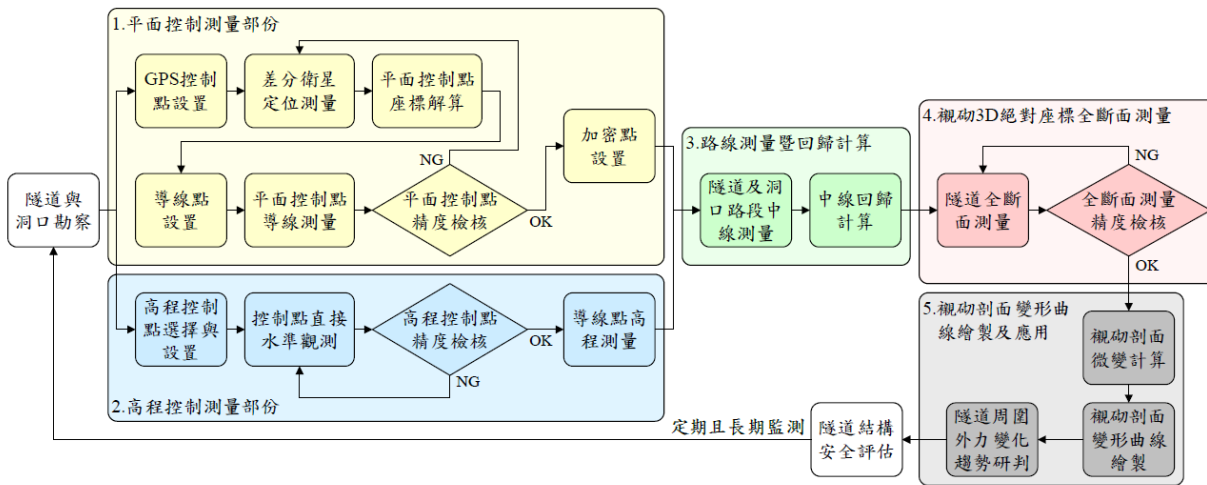


圖 5.3-6 襯砌微變監測技術作業架構(邱雅筑等人，2012)

此外，邱雅筑等人(2012)以台灣東南部某雙車道公路隧道為例，於2009年2月及7月分別進行隧道全斷面測量，如圖 5.3-7，以探討微變監測技術在營運中隧道安全檢測與穩定分析的應用。經案例隧道應用經驗顯示，其所提隧道微變監測技術可有效掌握隧道襯砌剖面變形特性，如圖 5.3-8 與圖 5.3-9，經比對剖面變形特徵曲線後，研判所得的外力變化最大值方向符合其他安全檢測成果，提供了安全評估與未來維修補強設計有重要參考資料。

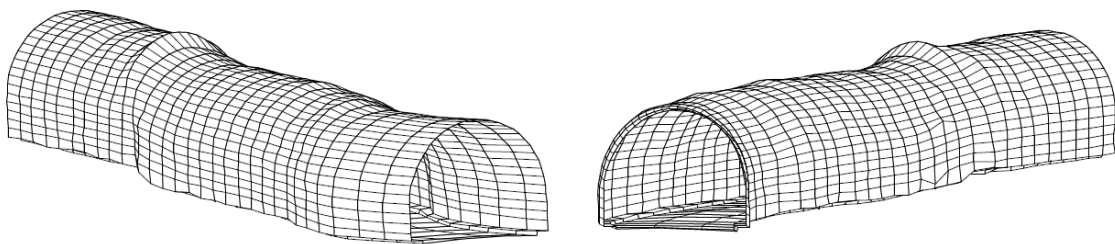


圖 5.3-7 案例隧道襯砌表面 3D 絕對座標測量結果(邱雅筑等人，2012)

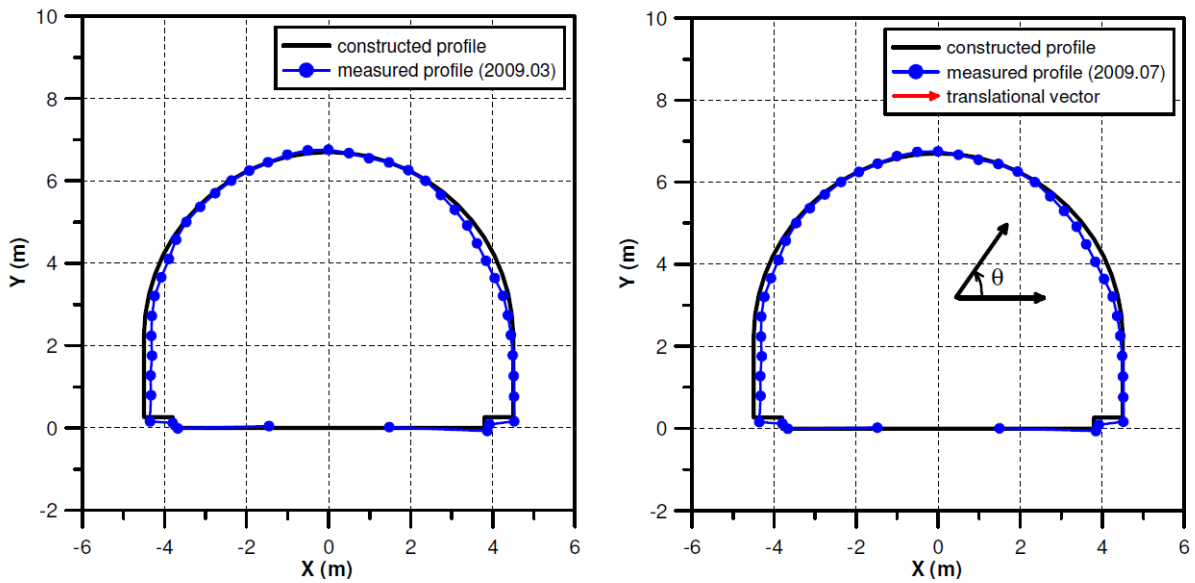


圖 5.3-8 案例隧道在距西洞口約 69 m 剖面之全斷面測量結果(邱雅筑等人，2012)

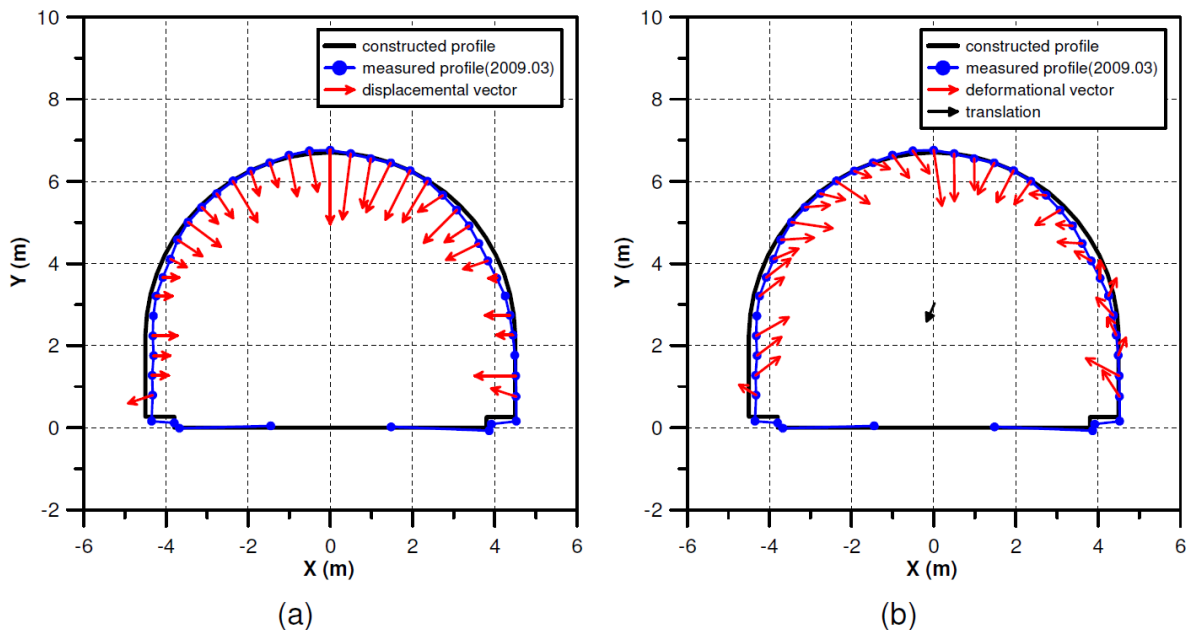


圖 5.3-9 案例隧道距在西洞口 69 m 剖面之量測結果(a)位移分量與(b)變形分量[位移與變形放大至 200 倍] (邱雅筑等人，2012)

基於座標框架與儀器特性，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位座標的變化。賴彥儒(2013)根據常見的工程測量與監測作業及其選用的座標特性，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，表5.3-2為不同的尺度的定義、特性、

座標系統與應用情況。此外，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座標系統下，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)提出的視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5.3-10。

簡言之，賴彥儒(2013)提出跨尺度多時序監測整合技術，包括全域尺度、介觀尺度與局部尺度，及建立對應的監測作業流程，並將監測資訊整合至政府公告的絕對坐標系內評估其絕對精度，可作為掌握監測體三維變形特性之基礎。

表 5.3-2 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#)

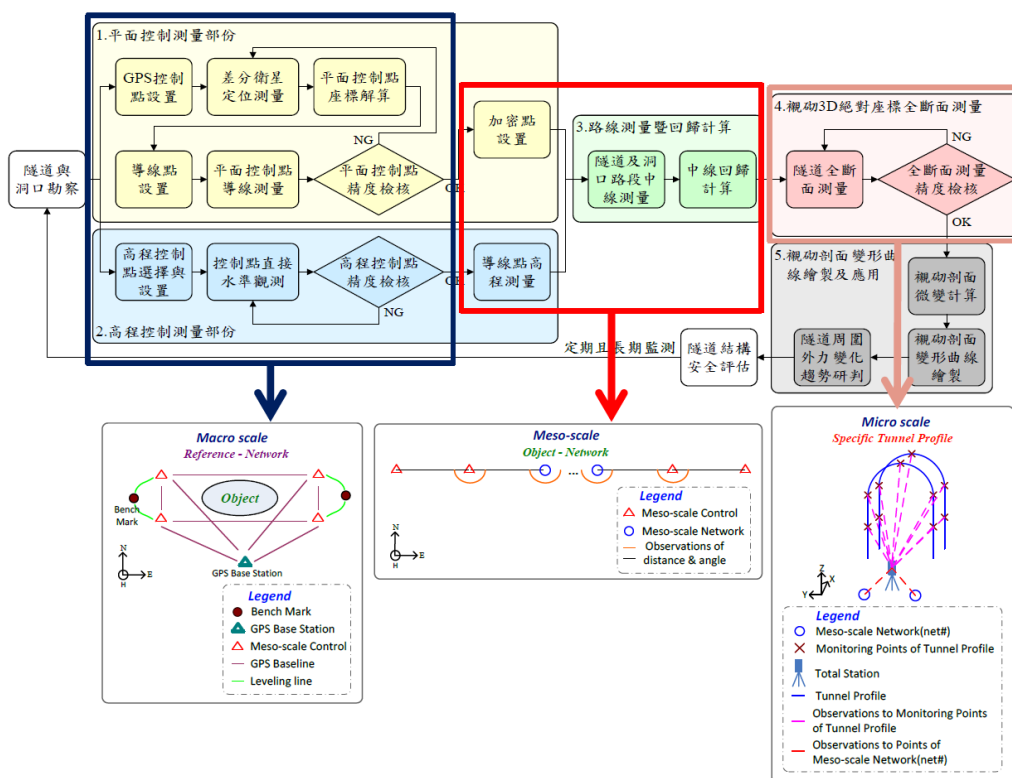


圖 5.3-10 跨尺度多時序監測整合技術之測量作業架構(賴彥儒，2013)

### 5.3.2. 襯砌受力與變形監測新技術

Cheng and Ni(2009)利用埋設光纖感測器於環片組立之間，如圖5.3-11所示，量測環片內部之應變量，藉以求得坑道環片受力與變形之機制，並可提供長期且即時的監測資訊，以確保坑道營運期之安全性。

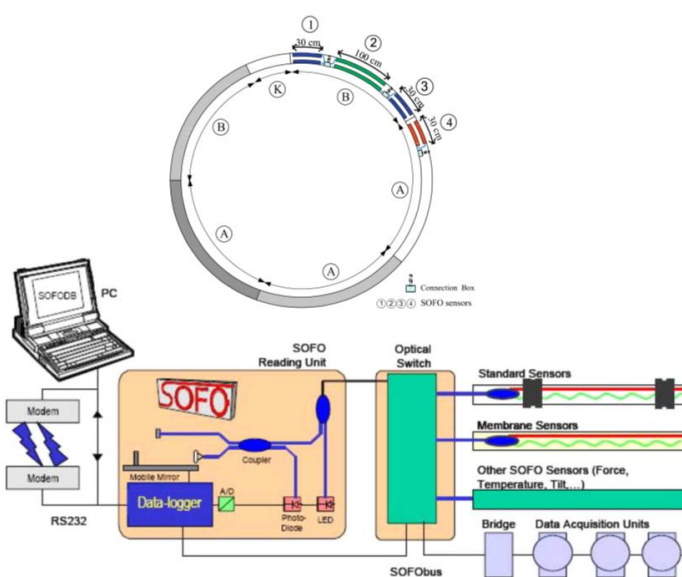


圖5.3-11 在坑道環片間埋設光纖以感測環片之受力與變形機制(Cheng and Ni, 2009)

Hyung-Sik Chung 等人(2006)也曾報導了韓國首爾地鐵基於長期安全的考量所採用的監測設備，包括了坑道二維斷面收斂量測系統(Two Dimensional Tunnel Convergence Measuring System, TCMS)，其組成包括了襯砌表面感測器(linear position sensor)、溫度感測器、傾斜感測器(tilt sensor)及裂縫量測(crack and joint meter)；另外，在嵌式感測器包括了水壓計(pneumatic piezometer)、總水壓計(total pressure cell)、應變計(黏貼於混凝土、鋼筋與襯砌)及伸張計(extensometer)，分別如表5.3-3與圖5.3-12所示。二維斷面收斂量測系統在於量測坑道襯砌的位移及受力後的反應及頂拱的沉陷量，嵌式感測器在於量測飽和土壤的孔隙水壓力、有效應力與襯砌的應變，並做為評估土壤與岩體的位移與穩定與否的判別根據。

表5.3-3 首爾地鐵營運階段所裝設的監測儀器及應用(Chung et al., 2006)

	Attached sensors for 2D-TCMS	Embedded sensors
Sensor types	Linear position sensors / Temperature sensors / Tilt sensors / Crack and joint meters	Pneumatic piezometer / Total pressure cells / Concrete, Rebar and Shotcrete strain gauges / Rod type multi point borehole extensometers (MPBX)
Applications	Monitoring movement on tunnel lining and the behaviour of structures under load / Measuring settlement of crown	Measuring pore water pressure in saturated soil, effective stress in soils and Strain in reinforced concrete linings / Determine stability and movement behaviour of soil & rock mass.

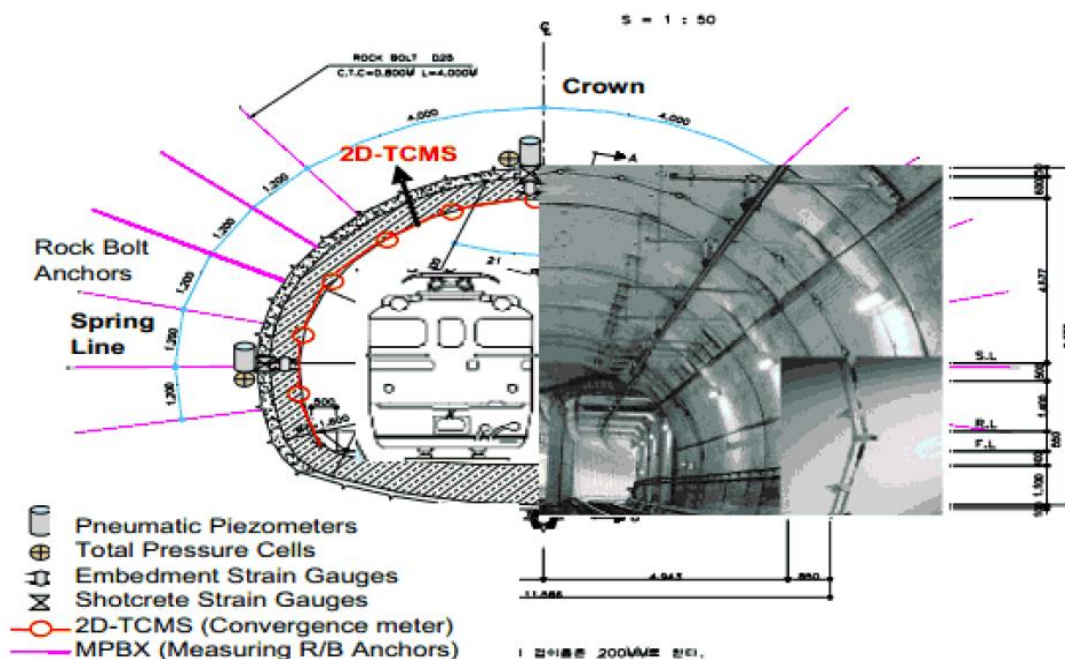


圖5.3-12 韓國首爾地鐵考量坑道長期安全所採用的監測設備(Chung et al., 2006)

## 5.4 處置坑道施工期及運轉期檢監測要項研析

考量處置坑道對於場址特性的掌握度須高於一般坑道，本章除參考山岳隧道工程在建造期及運轉期的檢監測項目，另外就坑道結構安全與長期穩定性的考量，參考國外低放處置坑道經驗，提出適合本地處置坑道在建造施工期與運轉期間的檢監測項目。

### 5.4.1. 處置坑道施工期檢監測要項研析

處置坑道建造期的檢監測目的，與一般隧道在建造過程中所執行的檢監測工作相同，旨在了解坑道開挖所揭露的地盤狀況、變形狀況與支撐狀況，並回饋至原設計，指導施工方法、順序與技術。以下所列處置坑道建造期檢監測要項，係根據處置坑道工程之特有要求，及參考本章 5.1 節整理之一般隧道建造期的檢測項目提出建議：

#### (1) 水文地質監測與量測基本值建立

由過去國內隧道工程施工經驗已知水文地質條件對隧道開挖施作及開挖面穩定性影響甚鉅，甚至造成營運中隧道襯砌滲水之異狀。此外，就處置坑道而言，地下水是放射性核種重要的傳輸途徑，鑒於國外處置坑道在建造施工前即展開水文地質相關監測並建立其基準值。爰此，本研究建議：(i)在處置坑道建造前，宜於場址設立鑽探孔監測地下水水位面變化，以建立量測基本值；(ii)在坑道開挖作業進行時，除依一般隧道作法監測開挖面滲水狀況，並進行滲流量與水壓之監測。

#### (2) 洞外與洞內近洞口段監測

洞外監測部分，考量坑道洞口段之施工與邊坡穩定有關，可依邊坡穩定監測項目進行監測作業，包括地表位移、傾斜管與地滑計；若是近洞口段、初期施工區域(距洞口段 200m)與淺覆蓋(覆蓋厚度小於 2 倍之隧道直徑)區域，可參考表 5.1-2 之隧道洞外監測項目。

#### (3) 洞內監測

除開挖面目視觀察外，開挖面、地中位移與支撐狀況的監測可參考表 5.1-1 之隧道洞內監測項目，其重點在於監測下列幾點：

- a. 開挖面變形，包括淨空變位、頂拱下陷與仰拱隆起。
- b. 地中位移，包括中心線量測與地中位移量測。
- c. 支撐狀況，包括一次襯砌與二次襯砌的目視觀察與應力量測、岩栓拉拔試驗與軸力量測。

### 5.4.2. 處置坑道運轉期檢監測要項研析

本研究根據第三章有關國外中、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：

#### (1) 岩盤穩定性監測

處置坑道若是位處地質破碎帶或是無施做襯砌結構之條件，建議採伸張計或位移計進行岩盤穩定性監測；若是監測單一潛在滑動岩塊，可採用裂縫計進行監測。



## (2) 坑道斷面監測

坑道斷面監測，包括坑道斷面收斂(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，建議採伸張計、捲尺收斂計或3D光學量測系統進行坑道斷面之收斂性(內空變位)量測。基於處置坑道長期穩定之考量，掌握處置坑道在運轉期間的變形量為重要課題，若坑道經一次支撐、二次支撐加固後，一般的測量技術可能無法提供高精度的微小變位監測，建議可採用本團隊新開發的襯砌微變監測技術、跨尺度多時序監測整合技術量測襯砌變形。

## (3) 襯砌裂縫及裂縫擴展

由4.2節整理的處置坑道結構長期穩定特性之影響因素，包括地震作用、邊坡運動與開挖擾動等，可由襯砌異狀之觀察上述因素對坑道結構的影響，並可透過隧道影像掃描與裂縫位移計紀錄裂縫分佈及裂縫擴展的情況。

## (4) 襯砌受力與變形

由襯砌應力與應變的量測結果，可做為襯砌結構受力後的行為是否符合原設計之判斷依據，及評估坑道結構與圍岩間的力學機制，目前可採用的技術可於襯砌埋設光纖感測器以量測環片內部應變，進而計算環片的受力與變形。

## (5) 水文地質相關參數監測

掌握岩體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，或經由雙封填塞導水試驗量測現地岩體導水特性。另外，可分別由坑道內觀測點設置流量計與水壓計以紀錄地下水滲流量與滲流壓力。

本研究參考Oikiluoto依監測領域及其屬性(Posiva, 2012)，分別依(A)岩石力學、及(B)水文地質、與(C)坑道襯砌三部分整理了處置坑道檢監測項目與技術列表，如表5.4-1所示，並分別就處置坑道在(i)設計階段、(ii)建造階段、與(iii)運轉階段所需考量的監測項目及對應的技術或儀器加以整理，以供後續相關應用之參考。

表5.4-1(a) 處置坑道檢監測項目與技術列表-岩石力學有關項目

	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	
<b>岩 石 力 學</b>	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		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		內空變位	3D光學量測系統	
			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	襯砌裂縫分佈與擴展	隧道影像掃描、裂縫位移計	
			岩栓軸力	應力量測/計測岩栓	襯砌變形	視砌微變監測技術	
			一次襯砌應力量測	應力量測/電子式襯砌 應力			跨尺度多時序監測整合技 術
			一次襯砌應變量測	應變量測/噴凝土應變 計			視砌黏貼應變計
			二次襯砌應力量測	應力量測/電子式襯砌 應力	坑道環片受力與變形	於環片組立時埋設光纖感 測器	
		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5.4-1(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

	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

## 第六章 處置坑道之檢監測計畫導則草案研析

本章綜整前述有關國外處置坑道與國內一般隧道的檢監測經驗，基於本土地質條件及處置坑道長期結構穩定之考量，及第四章歸納整理的處置坑道檢監測項目與技術列表，進一步探討處置坑道檢測與監測計畫應有的內容；亦參考IAEA (2014)之建議，從處置坑道生命週期各階段所需執行的監測作業進行本章草案研析。

### 6.1 處置坑道檢監測計畫通則

#### (1) 檢監測計畫擬訂之啟動時間

處置坑道建造前，即須建立部分監測項目的基準量測值，且處置坑道生命週期各階段的監測項目可能有項目的增減調整，為能全盤掌握監測作業，實有必要在規劃設計階段即開始著手規劃監測計畫之擬訂，並做為監測策略的參考。

#### (2) 處置坑道全生命週期中各階段的檢監測計畫

根據國際原子能總署(IAEA)在地質處置場址安全導則有關處置設施監測與監管專書中(IAEA, 2014)，提到了處置設施選址、建造、運轉、封存與封存後等階段的監測工作內容，如圖2.3-2所示，且上述各階段的監測內容是具有彈性的且允許被修改與更新。因此，監測計畫實施後經多久時間需進行調整與修訂，實有必要在監測計畫中提出。

#### (3) 檢監測的目的與工作範圍

應就檢監測目的與工作範圍予以說明，例如處置坑道建造期間進行的監測作業，其目的在於協助工程人員掌握坑道圍岩變形行為與採用的支撐效果，除了要檢核隧道之安全性與設計模式之適用性外，亦在於驗證地盤反應行為與支撐效果。此外，由於處置坑道所處區域地質與水文地質條件攸關處置坑道建造工法之採用與運轉期間維修補強策略之擬訂，故監測範圍應與地質與水文地質條件對處置坑道可能的影響區域一致。

### 6.2 監測計畫內容

根據2.3節整理MoDeRn提出的監測架構報告(MoDeRn D-1.2, 2013)，介紹了監測計畫流程脈絡，如圖2.3-1所示，依流程依序為「辨識監測項目、監測程序與需要蒐集的參數」、「監測計畫設計」及「執行與管理」，參考上述流程及一般隧道監測計畫擬訂之經驗，建議處置坑道的監測計畫內容須包含下列項目：

#### (1) 監測項目與參數

監測計畫中需辨識主要的監測項目並提出監測理由，進一步釐清次要的監測項目與所需蒐集的參數資訊，決定前述主、次要監測項目後，訂出相關的監測方法並完成主要監測項目列表(Preliminary Parameters List)，如表2.4-1(IAEA, 2001)與本計畫歸納整理的表5.3-4。

## (2) 監測儀器、精度與監測頻率

根據擬訂的監測項目及其屬性，規劃所需要的監測儀器、精度與監測頻率，以坑道開挖之地盤變位監測為例，相關的監測頻率如表5.1-6與表5.1-7所示。採用的監測儀器的規格(測量範圍與精度)與量測方法，亦應一併於監測計畫中詳述，例如收斂監測中常採用的收斂觀測儀及收斂岩釘，其儀器規格與量測方法如圖6.2-1所示，另岩盤變位監測之機械式伸縮儀如圖6.2-2所示；此外，量測方法或是分析流程，亦應一併於計畫中說明，如襯砌微應變監測技術之三維變位處理與應用流程如圖6.2-3所示。

## (3) 監測資訊處理與回饋

以隧道工程施工監測為例，在工程進行前必須制定工程管理基準與因應策略，並透過監測資訊迅速反應於設計與施工單位，其監測管理流程如圖6.2-4。其次，監測計畫中必須明確述明監測執行與監測資訊處理權責單位，並律訂監測分析報告出版週期。

## (4) 合理的監測值範圍

監測之目的除了要確認隧道之安全性與設計模式之適用性外，亦在於驗證地盤反應行為與支撐效果，同時也是要確保施工安全與經濟性。監測工作如欲發揮其功能時，應該建立監測管理值，藉以反應安全合理的監測範圍，例如日本稻里雙線隧道淨空變位管理基準值，如圖6.2-5。

	<h3>量測方法</h3>
<h3>主要規格</h3>	<ol style="list-style-type: none"> <li>①進行收斂變位量測前，先以校正架進行收斂觀測儀之校正，確認收斂觀測儀之功能正常後再攜至工地進行量測。</li> <li>②將鋼尺螺栓先與收斂觀測儀之鋼鋼尺相接，拉出鋼尺使量測位置之兩支收斂岩釘分別與安裝螺栓、鋼尺螺栓鎖緊，拉直鋼尺。</li> <li>③將定位鈹固定器嵌入鋼尺量測固定孔內，再旋緊張力螺栓使鋼尺拉緊，然後進行閉合量之測讀，讀數值可由定位鈹上標線與測微錶得之。</li> <li>④由鋼尺量測每兩支收斂岩釘之距離，其變化量即為岩盤之相對位移量。</li> </ol>
<p>1.收斂釘</p>	
<p>尺寸：22 mm <math>\phi</math>，長 250 mm</p>	
<p>材質：防腐蝕電處理過之竹節鋼筋棒、附保護蓋</p>	
<p>2.收斂觀測儀</p>	
<p>量測長度：20 m，測微錶精度：0.05 m</p>	

圖6.2-1 收斂釘與收斂觀測儀(林正陽，2003)


	<p><b>主要規格</b></p> <p>①機械式伸縮儀 型式：單孔單測點或單孔多測點 材質：伸縮桿為玻璃纖維，外部為塑膠保護套管，錨錠端可選用單向油壓錨或防腐蝕電處理過之竹節棒，量測端可固定並含保護裝置。</p> <p>②機械式測微錶 型式：指針式 量測範圍：50mm 最小刻度：0.01mm</p>
<p><b>量測方法</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 每次進行量測時，皆須利用所附之校正器檢查並記錄測微錶讀數。</li> <li>2. 取出伸縮儀量測頭部之保護蓋，插入測微錶進行量測，並紀錄讀數。</li> </ol>	

圖6.2-2 岩盤變位監測之機械式伸縮儀(林正陽，2003)

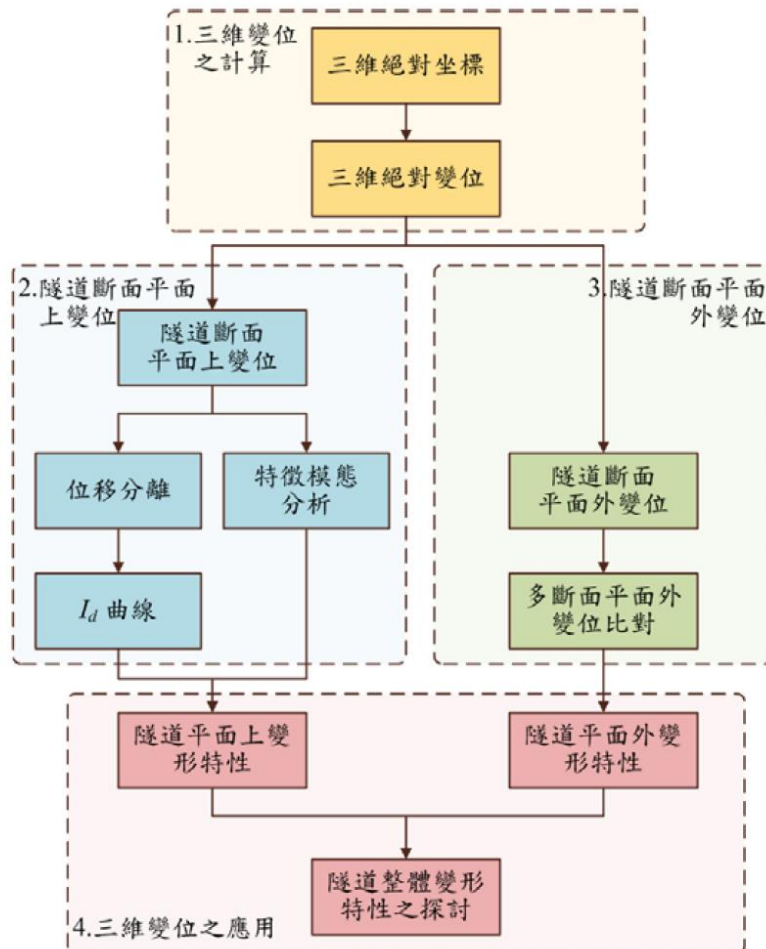


圖6.2-3 三維變位處理暨應用流程(邱雅筑，2014)

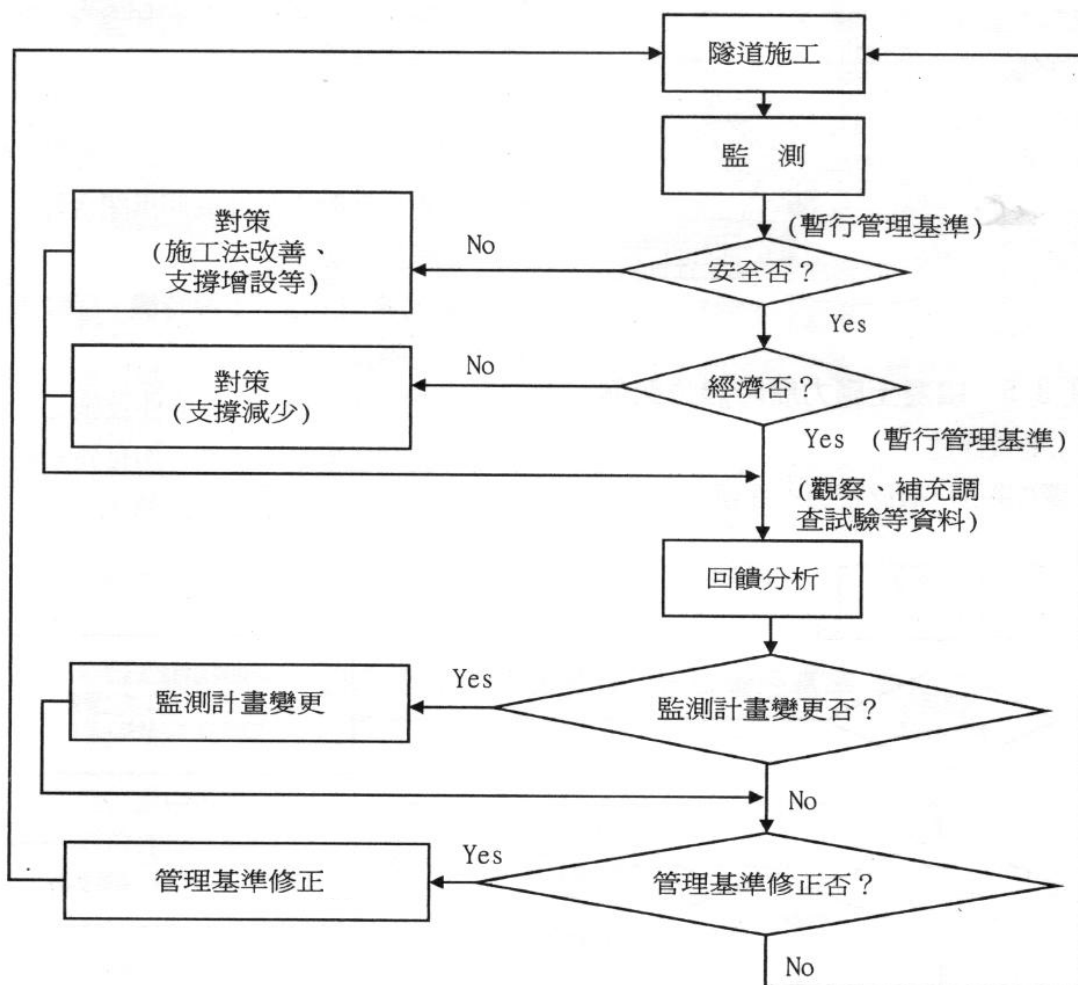


圖6.2-4 隧道工程監測資訊處理與回饋流程(王文禮與蘇灼謹，1999)

管理基準值	狀況	對策
淨空變位量 50mm 以下 淨空變位速率 5mm/日以下	注意 I (綠燈)	繼續施工
淨空變位量 50mm~100mm 淨空變位速率 5~10mm/日以上	注意 II (黃燈)	增加計測頻率 檢討施工過程 檢討施工循環速率，施工需要注意 檢討隧道斷面閉合 檢討加強支撐
淨空變位量 100mm 以上 淨空變位速率 10mm/日以上	注意 III (紅燈)	增加計測 施工過程再檢討 施工循環速度變緩，施工時需特別注意 加強支撐 隧道斷面儘速閉合 採特殊措施如停工

圖6.2-5 日本稻里雙線隧道淨空變位管理基準值(王文禮與蘇灼謹，1999)

## 第七章 低放處置審查導則(第0版)

### 處置坑道相關章節與條文內容之修訂建議

本章針對「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)」與處置坑道檢監測有關之章節進行瞭解，同時總結前述各章成果，提出低放處置審查導則(第0版)相關條文之修訂建議。

#### 7.1 低放處置審查導則(第0版)與處置坑道檢監測有關之章節研析

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，目前所列之章節，並未述及與處置坑道檢監測有關之條文。基於坑道處置方式可能為我國未來低放射性廢棄物處置方式之一，同時考量我國地質條件不若國外處置場之場址所具備良好天然屏障優勢，實有必要輔以相關的處置坑道檢監測作法以確保坑道結構的長期穩定要求。

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)，與本計畫有關之章節包括「第四章 處置設施之設計」、「第五章 處置設施之建造」與「第七章 處置設施之安全評估」，茲將上述章節標題及與處置坑道檢監測有關之導則修訂方向建議整理如下列幾點：

##### (1) 處置設施之設計

###### 章節標題與內容：

原章節內容在於，說明處置設施的建築、結構、土木、輻射安全、輔助設計或系統、公用設施或系統之設計，及上述設計與系統之詳細圖說與細部資料。

###### 修訂條文之參考依據與方向：

根據2.3節之監測計畫設計流程，述及按照國際原子能總署(IAEA)之建議，應從處置設施生命週期之觀點進行監測計畫設計流程；此外，為能周全考量監測項目與監測參數，及因應處置設施在設計、建造、封閉等不同時期的監測項目可能有所調整，應於處置設施之設計階段即提出詳細監測規劃，並於計畫中說明監測目的、項目與參數、監測頻率、監測系統、組件、裝設位置、資料傳遞方式、故障排除與更換週期、資料判讀與分析之執行單位。

##### (2) 處置設施之建造

###### 章節標題與內容：

原章節內容在於說明處置設施的施工特性與施工計畫。

###### 修訂條文之參考依據與方向：

根據5.4節有關處置坑道施工期及運轉期檢監測要項研析，處置坑道施工期的檢監測目的旨在了解坑道開挖所揭露的地盤狀況、變形狀況與支撐狀況，並回饋至原設計



，指導施工方法、順序與技術；爰此，處置坑道在建造期間的監測計畫除了可參考一般隧道之作法外，考量相關安全評估作業所需，應提出監測參數合理範圍與水文地質相關參數的基準量測值。

### (3) 處置設施之安全評估

#### 章節標題與內容：

原章節內容係說明處置設施輻射劑量評估、設備操作、闖入者防護與長期穩定性。

#### 修訂條文之參考依據與方向：

根據 3.3 節有關國外處置坑道監測與國內隧道檢監測經驗之項目比較，及 4.2 節有關處置坑道結構長期穩定特性之影響項目，應在處置坑道運轉期間執行坑道結構之檢監測作業，並且根據在運轉初期所建立的坑道斷面幾何參數與視砌影像資料，做為檢監測結果之比較對照依據。

## 7.2 低放處置審查導則(第0版)相關條文之修訂建議

根據 7.1 節之章節研析內容，本計畫分別就：處置設施之設計、處置設施之建造、與處置設施之安全評估等三項因子，整理審查導則草案中有關處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之編修要點建議，如下表 7.1-1 所示。

表 7.1-1 審查導則草案有關處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之編修要點建議

因子	安全分析報告內容概要	審查導則編修要點建議
處置設施之設計	從處置設施生命週期之觀點，依設計、建造與封閉等階段所需進行的檢監測項目，及採用的檢監測方法與技術。	<p>提供要項部分：</p> <p>應充分說明護坡工程或處置坑道工程的材料特性與設計標準，及處置設施在建造、運轉與封閉等各個階段之護坡工程或處置坑道工程之長期穩定監測規劃等。</p> <p>審查作業部分：</p> <p>應檢核護坡工程或處置坑道工程的材料特性、設計標準、穩定監測等是否適當？是否具長期穩定的特性？穩定監測規劃，必須述明在處置設施建造、運轉與封閉等各個階段執行前，即提出詳細之監測計畫。監測計畫之內容須包括(1)監測項目與參數；(2)監測頻率；(3)監測系統、組件、裝設位置、資料傳遞方式、故障排除與更換週期；(4)資料判讀與分析之執行單位。</p>

<p>處 置 設 施 之 建 造</p>	<p>說明處置坑道在建造過程中，為掌握地質或水文地質條件對坑道開挖作業的影響，並獲得設計與施工所需要的回饋參數，及相關安全評估之基準，而實施的檢監測項目、方法與技術。</p>	<p><u>提供要項部分：</u>                  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、水文地質相關參數的基準量測值、坑道開挖與支撐方法，以及坑道開挖過程所採用的監測項目、監測參數、監測方法與技術，並提供監測參數合理範圍，以供相關安全評估基準之參考。</p> <p><u>審查作業部分：</u>                  應檢核處置坑道開挖作業與支撐方法之正確性與合理性？規劃的監測項目與參數是否完整？採用的監測方法與技術是否可行？提供的監測參數合理範圍如何獲得與驗證？</p>
<p>處 置 設 施 之 安 全 評 估</p>	<p>說明處置坑道在運轉期間，因外力因素(地震作用、邊坡運動與開挖擾動引致之塑性壓與鬆弛土壓問題)、環境因素(風化引致岩石強度弱化及岩體依時變形)及非力學因素對處置坑道結構長期穩定之可能影響，而實施的檢監測項目、方法與技術。</p>	<p><u>提供要項部分：</u>                  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、水文地質相關參數的基準量測值、運轉初期所建立的坑道斷面幾何參數與襯砌影像資料、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><u>審查作業部分：</u>                  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襯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>

## 第八章 結論與建議

本計畫透過蒐整國外處置坑道與國內一般隧道的檢監測案例，與分析國內外一般坑道襯砌異狀之異同，並在本土特殊地質條件及處置坑道長期結構穩定的需求前提下，提出符合我國地質條件之低放處置坑道檢監測項目與技術列表。此外，從處置坑道生命週期的觀念，研析處置坑道在設計、建造與運轉等階段的檢監測計畫內容，進而針對低放處置審查導則(第0版)與處置坑道相關之章節與條文內容提出修訂方向建議。本計畫依約所完成之各項工作成果，綜整於8.1節；另就未來待研究與精進之項目則建議於8.2節。

### 8.1 結論

#### (1) 監測之重要性、監測工作之界定與設計流程

根據本研究蒐整的國外處置坑道監測相關報告文獻，瞭解處置坑道監測工作的重要性在於確保處置設施相關工作者與所處環境居民的安全，及處置設施對於環境的影響是否如期待。其次，篩選出相關重要參考文獻有：(i)國際原子能總署提出的處置場址生命週期各階段所執行的監測作業(IAEA, 2014)；(ii)監測參數與對應的量測方法(IAEA, 2001)；(iii) Posiva提出的監測定義與六個監測項目(Posiva, 2003)；(iv)日本原子力環境整備促進・資金管理中心整理的五個監測目標(RWMC, 2005)，是為本研究進行「第五章處置坑道施工期檢測及運轉期監測要項研析」與「第六章處置坑道之檢監測計畫導則草案研析」之重要依據，更可作為後續相關研究課題與決策之參考。

#### (2) 國內外坑道檢測與監測案例蒐整研析

本研究蒐集了瑞典SFR-1及芬蘭Olkiluoto VLJ與Loviisa VLJ坑道處置設施監測資料，藉以瞭解國外處置坑道在運轉期間，進行有關岩石力學與水文地質之檢監測目的，係在於掌握地質破裂帶對處置坑道的穩定安全影響與地下水滲流狀況。由國內南迴鐵路安朔隧道在運轉期間的檢測案例，可瞭解一般隧道在襯砌結構出現異狀時的因應檢監測方法；由國道五號雪山隧道在運轉期間的監測案例中，則可瞭解目前所實施的監測項目，其目的在於持續追蹤監測過去在建造階段曾遭遇的工程地質災害問題是否會影響隧道結構的長期安全穩定性。

本研究進一步比較國外處置坑道監測與國內隧道檢監測項目，綜整如表3.3-1，並將監測項目依屬性區分(i)岩石力學、(ii)水文地質、(iii)坑道襯砌材料及(iv)其他等四大項，可歸納得出：監測岩體穩定性及地下水滲流兩類為國內外坑道共同注意的監測項目；惟因國外處置坑道所處優良地質條件可允許岩盤直接裸露無需支撐，但國內坑道則幾乎需輔以襯砌結構來維持岩盤穩定性，因而國內隧道檢監測項目大多藉由在襯砌的變位量測、裂縫擴展及混凝土材料品質劣化程度，來判斷坑道結構的安全與穩定性。

### (3) 基於處置坑道結構安全及長期穩定需求之檢監測項目

本研究依據處置坑道結構長期穩定之影響因素、及對應的襯砌異狀與檢測項目進行統整，並提出表4.3-1之處置坑道襯砌結構長期穩定之檢測項目，內容已涵括了(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化及岩體依時變形)、與(iii)非力學因素(混凝土中性化等)所可能導致襯砌結構之可能異狀與因應的檢監測項目。

針對處置坑道進入運轉階段後，因坑道的變位大致在建造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，建議可採用本研究團隊新開發的襯砌微變監測技術、跨尺度多時序監測整合技術進行襯砌變形量測。

此外，本研究亦蒐整有關外力變化引致隧道異狀之分類，及因應的維修與補強方法建議，如表4.3-2，可作為未來探討處置坑道後續維修與補強課題之參考。

### (4) 處置坑道建造期及運轉期檢監測要項與檢監測計畫

因處置坑道對於場址特性的掌握度高於一般坑道，本研究除了參考山岳隧道工程在建造期及運轉期的檢監測項目外，另基於坑道結構安全與長期穩定性的需求，依監測領域及屬性區分為(A)岩石力學、及(B)水文地質、與(C)坑道襯砌三部分，整理處置坑道檢監測項目與技術列表(參表5.4-1)，並分別就處置坑道在(i)設計階段、(ii)建造階段、與(iii)運轉階段所需考量的監測項目及對應的技術或儀器加以整理。

其次，針對處置坑道檢監測計畫草案，依(i)處置坑道檢監測計畫通則、與(ii)監測計畫內容等已於第六章分項研析討論。

### (5) 審查導則與處置坑道相關章節條文內容修訂建議

本研究檢視目前的「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)，與本計畫有關之章節包括「第四章 處置設施之設計」、「第五章 處置設施之建造」與「第七章 處置設施之安全評估」共三章，分別針對上述三章之原章節內容進行研析，並提出修訂條文之參考依據與修訂方向，經統整後完成審查導則草案有關處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之編修要點，建議如表7.1-1所示。

## 8.2 建議

本研究透過國外處置坑道與國內一般坑道的檢監測案例蒐集，及考量處置坑道結構長期穩定強化之需求前提下，提出了符合我國本土地質條件之處置坑道檢監測項目、技術列表與計畫草案；然而，在研究過程中發現仍有下列課題尚待進一步研析討論：

### (1) 檢監測資料的分析技術

坑道為一高度靜不定之結構物，如何透過已埋設的感應器或是監測技術，進一步分析坑道結構的變形行為，有助於釐清周圍環境或局部荷載變化引致之坑道斷面變形，並研析合理的監測策略。

---

## (2) 檢監測結果與處置坑道結構行為之關聯性

如何根據檢監測結果掌握坑道結構襯砌異狀之關鍵肇因，據以研析因應的監測作為，包括監測項目、感測裝置數量、架設位置與資料擷取頻率等，確保相關監測工作足以反映處置坑道結構之長期穩定性。

## (3) 處置坑道封閉前之檢測與評估項目研析

根據本研究蒐整之國內一般坑道檢監測經驗，可發現襯砌結構在運轉期間已有裂縫、滲水、背後孔洞與混凝土襯砌中性化等問題；低放處置設施運轉期以60年計，在進入封閉階段前應如何確保處置坑道結構符合封閉條件，研析合理的檢測與評估項目實為重要課題。

## (4) 處置坑道封閉後之監測對策探討

國際原子能總署(IAEA, 2014)在地質處置場址安全導則有關處置設施監測與監管之專書中，提出監測作業應隨處置場址生命週期各階段屬性予以調整；針對處置坑道封閉後之監測策略，實有待國外相關文獻之蒐整研析，同時考量國內本土地質條件與可能潛在候選場址特性，針對封閉後的監測對策進行探討。

---

---

## 參考文獻

- [1] Bodén A, 1993. SFR Kontrollprogram Bergkontroll. Besiktningsgruppens årsrapport 1993.
- [2] Bodén A, Lundin J, 2007. SFR kontrollprogram, Bergkontroll-Bergkontrollgruppens årsrapport 2006, Huvudrapport. Doknr 2448900-001, Vattenfall Power Consultant AB, 2007-03-05.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Hjerpe, T., Ikonen, A.T.K., and Broed, R. 2010. Biosphere Assessment Report 2009. Posiva Report 2010-03.
- [6] Hökmark H, 1993. Numerical analysis of time-dependent deformations in the rock surrounding the SFR repository. Clay Technology AB, Lund, Intenal report.
- [7] Holmén J G, Stigsson M, 2001. Modelling of Future Hydrogeological Conditions at SFR.
- [8] Forsmark. SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [9] IAEA. 2001. Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste. IAEA -TECDOC-1208.
- [10] IAEA, 2014, Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities, Specific Safety Guide No. SSG-31, Vienna.
- [11] Kasa, S. 2011. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2009 – Foreign materials. Posiva Working Report 2010-46.
- [12] Lahti, M. (ed.) and Siren, T. 2011. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2010 – Rock Mechanics. Posiva Working Report 2011-47.
- [13] 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.
- [14] MoDeRn. 2013. MoDeRn Monitoring Reference Framework report. MODERN DELIVERABLE (D-1.2).
- [15] MoDeRn. 2013. State of Art Report on Monitoring Technology DELIVERABLE. MODERN DELIVERABLE (D-N:2.2.2).

- 
- [16] NRC. 1991, Standard Format and Content of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (NUREG-1199, Rev. 2, 1991)
- [17] 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)
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Posiva. 2002. The observational method applied to engineering and construction of the access to the ONKALO facility. Posiva Report 2002-48.
- [21] Posiva. 2003. Programme of Monitoring at Olkiluoto During Construction and Operation of the ONKALO. Posiva Report 2003-05.
- [22] Posiva. 2012. Monitoring at Olkiluoto – a Programme for the Period Before Repository Operation. Posiva Report 2012-01.
- [23] Posiva. 2013. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2012, Rock Mechanics. Posiva Report 2013-47.
- [24] RWMC. 2005. Monitoring of Geological Disposal – Current Status and Technical Possibilities. RWMC Technical Report RWMC-TRE-04004.
- [25] 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.
- [26] SKB. 2003. Design, construction and performance of the clay-based isolation of the SFR silo. SKB R-03-30.
- [27] SKB, 2004. Preliminary site description Forsmark area – version 1.1. SKB R-04-15, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [28] SKB, 2008, Safety analysis SFR 1, SKB Report R-08-130.
- [29] SKB. 2011a. International perspective on repositories for low level waste. SKB R-11-16.
- [30] SKB. 2011b. Site investigation SFR Bedrock geology. SKB R-10-49.
- [31] Stille H, Fredriksson A, Widing E, Åhrling G, 1985. Bergmekaniska beräkningar. FEManalys av silo med anslutande tunnlar. Arbetsrapport SFR 85-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [32] Vaittinen, T., Ahokas, H., Klockars, J., Nummela, J., Pentti, E., Penttinen, T., Pöllänen, J., Karvonen, T., and Lindgren, S. 2012. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2010 –
-

- Hydrology. Posiva Working Report 2011-43.
- [33] 中國土木水利工程學會(1999)，隧道工程設計準則與解說，科技圖書。
- [34] 行政院原子能委員會放射性物料管理局，2009，低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(98FCMA001B)，台北。
- [35] 行政院原子能委員會放射性物料管理局，2009，低放射性廢棄物最終處置設施場址特性參數與設計建造管制技術之研究(98FCMA003)，台北。
- [36] 交通部(1997)：老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(I)，黃燦輝、鄭富書等，台灣台北。
- [37] 交通部(1998)：老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(II)，黃燦輝、鄭富書等，台灣台北。
- [38] 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。
- [39] 王文禮、蘇灼謹 (1999)，「隧道監測與回饋」，山岳隧道工程設計與實例手冊，中華民國隧道協會系列叢書，科技圖書。
- [40] 王文禮、王泰典、蘇灼謹、林峻弘、譚家瑞、黃燦輝(2000)：台灣中部山岳隧道之震害與修復，地工技術，81，85-96。
- [41] 王泰典、黃燦輝、鄭富書、薛文城、傅子仁(2007)：台灣隧道襯砌異狀類別之探討，隧道建設，第27卷(增刊：第六屆海峽兩岸隧道與地下工程學術及技術研討會論文集，8月20~21日，昆明)，87-92。
- [42] 王泰典(2008)：探討襯砌異狀之類別與診斷，營建知訊，304，22-31。
- [43] 王泰典、董家鈞、顧承宇、李宏輝(2010)：低放射性廢棄物坑道處置場址特性調查及設施設計與建造審查要項研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫(99FCMA002)，台北。
- [44] 王泰典、李宏輝(2012)：坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術研究，行政院原子能委員會核能研究所委託研究計畫(NL1010476)，桃園。
- [45] 朱晃葵(2009)：大地材料依時變形對隧道收斂特性之影響，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- [46] 何泰源、黃燦輝、鄭富書(1999)：隧道之維護管理方式—調查、安全評估及維修方式之探討，財團法人台灣營建研究所，台灣台北。
- [47] 李佳翰、王泰典、秦德(2008)：鐵路隧道結構安全檢測之探討，2008 岩盤工程研討會論文集，10月30-31日，台北，579-588。
- [48] 李佳翰(2013)：山岳隧道襯砌異狀肇因診斷技術研究，國立台北科技大學工程科技研究所博士論文。
- [49] 李民政、張博翔、黃筱卿(2011)：雪山隧道營運中長期監測成果分析与評估，隧道建設，第31卷，增刊1，第87-95頁。
- [50] 林宏勳(2001)：木山層砂岩之潛變行為研究，國立台灣大學土木工程學研究所碩士



論文。

- [51] 林正陽(2003)：全方位隧道監控系統，三聯技術，46，8-16。
- [52] 邱雅筑、陳正勳、王泰典、鄭富書、黃燦輝(2012)：襯砌剖面變形特徵曲線與微變形監測技術應用於營運中隧道荷載變化之評估，中國土木水利工程學刊，第24卷，第2期，第101-109頁。
- [53] 邱雅筑(2014)：營運中隧道變位模態解析與高精度監測技術之研究，國立台灣大學土木工程學研究所博士論文。
- [54] 許金華 (2006) 「從岩石風化速率探討南橫山崩—以敏督莉颱風為例」，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- [55] 黃燦輝、何泰源、張吉佐、姚錫齡(1999)：震後隧道結構快速診斷與補強手冊，財團法人台灣營建研究所，台灣台北。
- [56] 詹佩臻(2009)：海岸山脈邊坡穩定特性之探討—以水璉礫岩邊坡為例，國立台北科技大學資源工程研究所碩士論文。
- [57] 詹尚書、劉曉樺、王泰典、秦德、蕭富元(2012)：岩體依時變形特性之隧道變位計測結果案例探討，第十一屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會論文集，11月1-2日，台灣溪頭，A10-1~9。
- [58] 賴彥儒(2013)：場址變位跨尺度多時序量測整合技術-以隧道工程為例，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- [59] 日本土木學會，トンネルの変状メカニズム，東京：日本土木學會，2003。
- [60] 日本鐵道綜合技術研究所，変状トンネル対策工設計マニュアル，東京：日本財團法人鐵道綜合技術研究所，1998。
- [61] 日本鐵道綜合技術研究所，鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)トンネル，東京：日本財團法人鐵道綜合技術研究所，2007。
- [62] 朝倉俊弘等(1998)，變狀隧道對策工設計導則(日文)，日本鐵道總合技術研究所。
- [63] 西村和夫等(2002)，山岳隧道襯砌的現狀與對策(日文)，日本土木學會
- [64] 朝倉俊弘等(2003)，隧道變狀機制(日文)，日本土木學會。

## 附錄 A

**圖A.1** 地質處置場址相關監測目標與描述(RWMC, 2005)

Objective	Description
1. Confirming safety performance and the adequacy of the repository's engineered measures	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confirming whether or not disposal system components function as planned</li> <li>• Confirming design/construction assumptions</li> <li>• Verifying safety assessment models</li> <li>• Judging the need for facility improvements or repairs related to repository operation / construction</li> </ul>
2. Confirming compliance with statutory requirements	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confirming compliance with regulations after a closure of repository</li> <li>• Confirming compliance with safety regulations for workers and local residents during construction and operation</li> <li>• Confirming compliance with environmental impact assessment regulations</li> </ul>
3. Providing information for making decisions on policy and operations	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Providing information for decision-making</li> <li>• Dealing with the retrievability of emplaced waste</li> </ul>
4. Understanding the baseline characteristics of the geological environment at Preliminary Investigation Areas, etc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Clarifying the baseline characteristics of the geological environment</li> </ul>
5. Providing information for public decision-making	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enhancing the confidence that the public (particularly local residents) have in geological disposal</li> <li>• Compiling databases for future generations</li> </ul>

圖A.2 監測參數與對應的量測方法 (IAEA, 2001)

Category/purpose of monitoring	Typical parameters	Access method	Typical measurement methods
<p>DEGRADATION OF REPOSITORY STRUCTURES</p> <p>Monitoring of repository structures/structural stability of openings</p>	<p>Rock temperatures</p> <p>Deformation of openings (orientations and apertures, propagation rates)</p> <p>Rock stress changes close to repository</p> <p>Water infiltration rate</p> <p>Condition of rock supports</p> <p>Repository temperatures, humidity</p> <p>Resaturation of backfill and seal materials</p>	<p>Within repository monitoring including access from boreholes drilled from the repository. Could include the use of devices that are installed in situ but with radio signals or earth currents for transmission of data.</p> <p>In situ/remote monitoring of backfilled openings</p>	<p>Thermocouples etc.</p> <p>Displacement detectors</p> <p>Strain/load sensors</p> <p>Volume measurements</p> <p>Strain/load measurements</p> <p>Various techniques</p> <p>Pressure sensors, moisture detectors, geophysical techniques (seismic wave transmission)</p>
<p>BEHAVIOUR OF WASTE PACKAGES AND BUFFER MATERIALS</p> <p>Monitoring the condition of emplaced waste packages/condition of buffer</p>	<p>Strain, corrosion current</p> <p>Package temperature, humidity close to packages</p> <p>Radioactivity in drainage water</p> <p>Waste-derived gases in repository air</p> <p>Resaturation/swelling pressure in buffer</p>	<p>In situ /remote monitoring of waste packages</p> <p>In situ /remote monitoring of environment close to the package</p> <p>Radioactivity monitoring of repository effluent water</p> <p>Monitoring of radioactive and other gases in repository air</p> <p>In situ/remote monitoring of environment close to the package</p>	<p>Strain gauge, current meter</p> <p>Many techniques available</p> <p>Various e.g. gamma detection</p> <p>Gas analyser</p> <p>Pressure sensors, moisture detectors</p>

圖A.3-1 物理性(physical)與水文地質(hydrogeological)的各種過程與「場址的瞭解」與「處置場性能表現」有關聯性的各項影響因子

Process number	Process name	Site	Perform	Discipline	Why out
<b>Physical processes:</b>					
P1	Development of an excavation damaged zone (EDZ)	H	H		unfeas.
P2.1	Evolution of the fracture network: Reactivation of existing fractures	H	H	RM	
P2.2	Evolution of the fracture network: Generation of new fractures	H	H	RM	
P3	Aeration of the rock mass	H	M		unfeas.
P4	Planned introduction of foreign fluids	H	L	FM	
P5	Planned introduction of foreign solid materials	H	H	FM	
P6	Microseismicity	M	L	RM	
P7	Sinking of satellite boreholes	H	M		human
P8.1	Temperature changes: in the rock mass	L	L	RM	
P8.2	Temperature changes: in the groundwater	M	L	Hy	
P8.3	Temperature changes: in the air	M	L		coming
P9	Degassing of groundwater	M	M	Ch	coming
P10	Ground subsidence	L	L		low sig.
P11	Isostatic uplift	M	H	RM	
P12	Inadvertent introduction of foreign substances	M	L	FM	
P13	Degassing of rock mass	L	L		low sig.
<b>Hydrogeological processes:</b>					
H1	Evolution of hydraulic network	H	H	Hy	
H2	Evolution of hydraulic heads	H	H	Hy	
H3	Evolution of fracture properties	H	H	Hy	
H4	Ingression of water	M	L	Hy	
H5	Egression of water	M	L	Hy	
H6	Density-driven flow	H	H	Hy	
H7	Release of rock matrix brines	M	L	Ch	
H8	Seismic pumping	M	L	Hy	
H9	Perturbation of the hydrology	M	L	Hy	
H10	Evolution of the saline water interface	H	H	Hy+Ch	

圖A.3-2 地球-化學(geochemical)與生物作用(biological)的各種過程與「場址的瞭解」與「處置場性能表現」有關聯性的各項影響因子

Process number	Process name	Site	Perform	Discipline	Why out
<b>Geochemical processes:</b>					
<i>Solids:</i>					
GS1	Redistribution of rock mass	M	L		low sig.
GS2	Evolution of fracture-coating materials	H	H		unfeas.
GS3	Evolution of rock matrix	H	H		unfeas.
GS4	Maturation of cement	L	L		low sig.
GS5	Degradation of cement	M	M		indirect
GS6	Cement-rock interaction	M	L		indirect
GS7	Ageing of minerals and mineraloids	M	M		unfeas.
GS8	Degradation of metallic components	L	L		low sig.
GS9	Degradation of resins and plastics	L	L		low sig.
GS10	Leaching of rock spoil	H	L	SE	
GS11	Degradation of inadvertently introduced foreign solids	L	L		low sig.
<i>Liquids:</i>					
GL1	Influences of groundwater mixing	H	M	Ch	
GL2	Influences of water-rock interactions	H	M	Ch	
GL3.1	Influences of introduced air: Oxidation of groundwater	H	M	Ch	
GL3.2	Influences of introduced air: Carbonation of groundwater	H	M	Ch	
GL4	Influences of degrading cement	M	M	Ch	
GL5	Influences of microbial activity	H	M	Ch	
GL6	The influences of temperature changes	M	L	Ch	
GL7	Influences of planned introduced fluids	H	L	Ch	
GL8	Influences of degrading metallic components	L	L	Ch	
GL9	Influences of degrading resins and plastic components	M	L	Ch	
GL10	Influences of inadvertently introduced foreign materials	L	L	Ch	
<i>Gases:</i>					
GG1	Exsolution of gases	M	M	Ch	coming
GG2	Introduction of gases from machinery	L	L		low sig.
<b>Biological processes:</b>					
B1	Perturbation of microbiological populations	H	M	Ch	
B2	Perturbation of microbiological activities	H	M	Ch	
B3	Biodegradation	H	M	Ch	
B4	Biocatalysis	M	L	Ch	
B5	Biofilm growth	M	L	Ch	
B6	Biocolloid formation	M	L	Ch	
B7.1	Floral colonisation of the tunnel	L	L		low sig.
B7.2	Faunal colonisation of the tunnel	L	L		low sig.
B8	Modification of the surface ecosystem	L	L	SE	

## 附錄 B



兩側起拱線上45°附近傘狀剝落



起拱線附近縱向剝落



勾縫材料劣化鬆落與襯砌鼓起

圖B.1 依襯砌型式分類襯砌異狀(王泰典等, 2007)



頂拱放射狀與起拱線縱向裂縫



頂拱中間開裂與左側縱向裂縫



起拱線附近平行縫與上方斜裂縫

(a) 混凝土襯砌



起拱線附近開裂錯動



鋼筋外露(搭接處)



鋼筋外露(非搭接處、鋼筋挫屈)

(b) 鋼筋混凝土襯砌



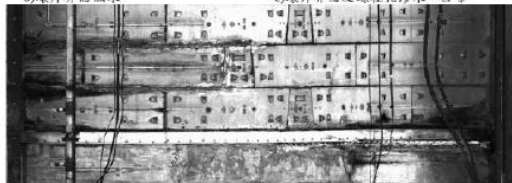
a) 環片界面滲水



b) 環片界面滲水



c) 環片界面及螺絲孔滲水、白華

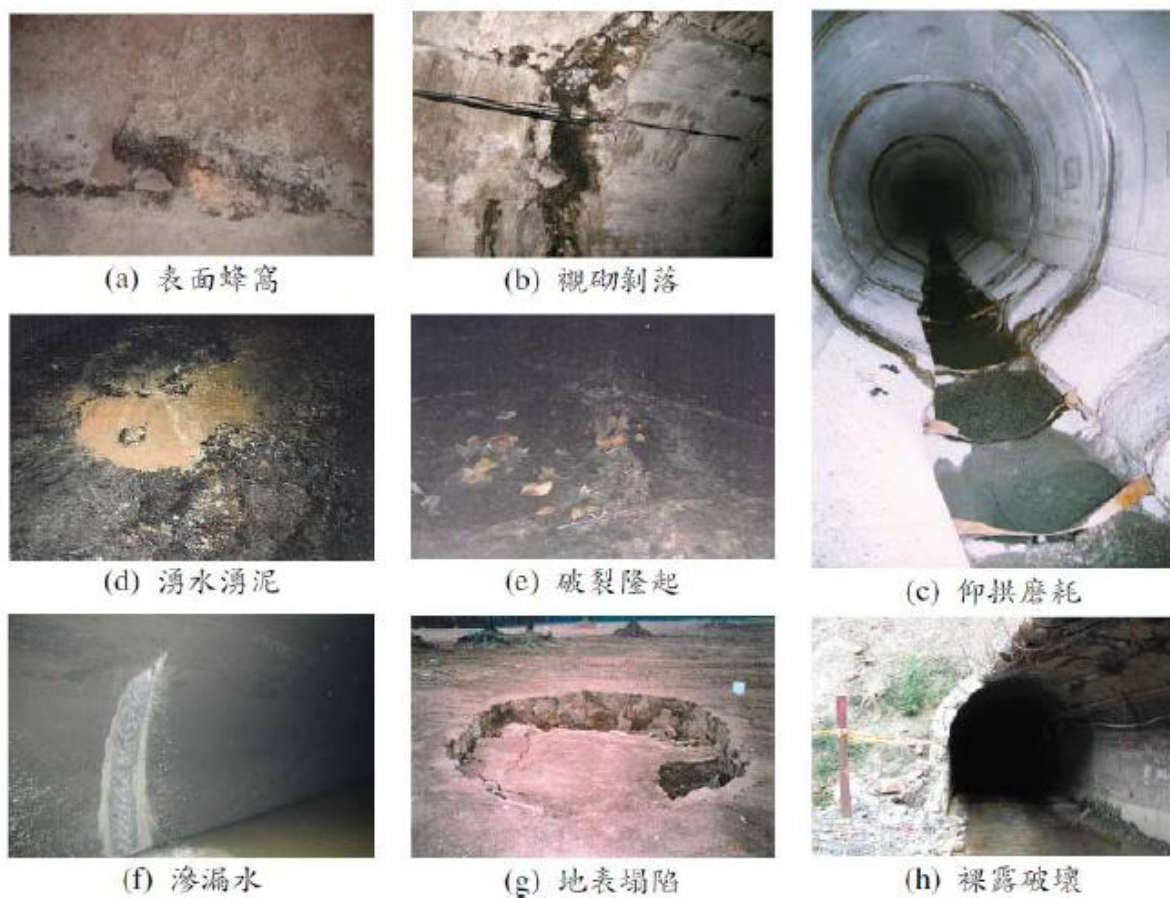


(c) 預鑄環片襯砌

圖B.2 以襯砌構築方式分類襯砌異狀(王泰典等, 2007; 2008)



圖B.3 以隧道功能分類襯砌異狀－鐵路隧道(李佳翰等，2008)



圖B.4 以隧道功能分類襯砌異狀－水工隧道(尚新民，2010)



## 附錄 C

表 C.1 國內隧道安全檢測案例彙整表

隧道名稱		里程		長度(m)	安全檢測項目	
鐵路 隧道	1.四瑞一號	4K+639	5K+004	365	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 中線測量</li> <li>• 橫斷面淨空量測</li> <li>• 道碴厚度調查</li> <li>• 裂縫及滲水調查</li> </ul> (TS360 之雷射影響掃描)	
	2.四瑞二號	5K+677	5K+950	273		
	3.深澳(下行)單軌	7K+302	7K+374	72		
	4.深澳(上行)單軌	7K+326	7K+362	36		
	5.龍潭隧道	9K+558	9K+708	150		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 襯砌厚度調查</li> </ul> (GPR 透地雷達)
	6.龍鎮隧道	9K+887	9K+956	69		
	7.柑坪隧道	9K+970	10K+048	78		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 史密特錘試驗</li> <li>• 鑽孔取樣強度試驗</li> <li>• 室內抗壓強度試驗</li> </ul>
	8.頌德隧道(下行)單軌	10K+630	10K+792	162		
	9.瑞芳隧道(上行)單軌	10K+665	10K+787	122		
	10.福住隧道	11K+192	11K+585	393		備註
	11.示德隧道	12K+603	13K+120	517		
	12.三貂嶺隧道	16K+466	18K+570	2,104		
	13.五分隧道(下行)單軌	22K+055	22K+262	207		
	14.五分隧道(上行)單軌	22K+125	22K+205	80		
	15.雙溪隧道	23K+265	23K+386	121		
	16.共和隧道	23K+766.6	24K+224.5	458		
	17.長潭隧道	24K+628	24K+895	267		
	18.福隆隧道	33K+364	33K+521	157		
	19.草嶺隧道	33K+992	36K+274	2,282		
	20.大里隧道	41K+392.8	41K+639.5	247		
	21.大溪隧道	43K+307.5	44K+009	702		
	22.合興隧道	45K+667.9	46K+580	912		
	23.梗枋隧道	47K+228	47K+478	250		
	24.更新隧道	50K+488	50K+638.8	151	編號 1-25 號隧道為宜蘭線隧道，檢測時間為 1996 年。	
	25.外澳隧道	51K+407.7	51K+722.4	315		
	26.和仁隧道單軌	48K+487	50K+898	2,411	編號 26-28 號隧道為北迴線隧道，檢測時間為 1996 年。	
	27.清水隧道單軌	51K+188	53K+294	2,106		
	28.崇德隧道單軌	53K+457	56K+139	2,682	編號 29-33 號隧道為南迴線隧道，檢測時間為 1993-1994 年。	
	29.枋野一號隧道(單軌)	18K+000~+104	18K+930~19K+150	324		
	30.枋野二號隧道(單軌)	20K+380	20K+560	180		
	31.安朔三號隧道	33K+580	33K+820	240	編號 34 號隧道為西幹線山線鐵路隧道，檢測時間為 1999、2000 年。	
	32.加津林隧道(單軌)	49K+230	49K+400	170		
	33.多良一號隧道(單軌)	58K+500	59K+020	520	編號 35-42 號隧道為西幹線舊山線鐵路隧道，檢測時間為 1999 年。 部分案例如編號 29 號隧道，僅檢測其中部分路段。	
	34.三義壹號隧道	159K+740	167K+468	~2,000		
	35.舊山線一號隧道	—	—	230		
	36.舊山線二號隧道	—	—	726		
	37.舊山線三號隧道	—	—	511		
	38.舊山線四號隧道	—	—	48		
	39.舊山線五號隧道	—	—	237		
	40.舊山線六號隧道	—	—	228		
	41.舊山線七號隧道	—	—	1,262		
	42.舊山線八號隧道	—	—	519		
合計	42		~24,883			
(單軌)	21		12,833			
(雙軌)	21		~12,050			

表 C.1 國內隧道安全檢測案例彙整表(續)

隧道名稱		長度(公尺)	安全檢測項目
43.台北捷運隧道		~68,000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 隧道斷面檢測</li> <li>• 隧道斷面掃描(TS360 之雷射影響掃描)</li> <li>• 真圓度分析(隧道淨空測量)</li> <li>• 過河隧道覆土厚度分析</li> <li>• 附屬設施現況調查</li> <li>• 襯砌背後空洞檢測(GPR 透地雷達)</li> <li>• 隧道淨空檢測(隧道淨空測量)</li> <li>• 混凝土強度檢測</li> <li>• 裂縫深度檢測</li> <li>• 鋼筋腐蝕檢測</li> <li>• 滲漏水水質檢測</li> </ul>
公路隧道	44.辛亥隧道	975	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 混凝土超音波裂縫及孔隙檢測</li> <li>• 混凝土強度試驗</li> <li>• 混凝土中性化試驗</li> <li>• 鋼筋腐蝕檢測</li> <li>• 施工縫漏水量、土砂流入量檢測</li> <li>• 隧道內變位檢測及 DIBIT 掃描(編號 44~46)</li> <li>• 透地雷達掃描</li> <li>• 一氧化碳含量檢測</li> </ul>
	45.懷恩隧道	974.5	
	46.自強隧道	975	
	47.馬陵隧道	360	
	48.過港隧道	1,932	
水利隧道	49.武界隧道	15,100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 隧道水準及導線測量</li> <li>• 全線襯砌表面龜裂、滲水、劣化深度記錄攝影</li> <li>• 透地雷達深測襯砌厚度及構造</li> <li>• 史密特錘測試混凝土強度</li> <li>• 裂縫深度探測</li> <li>• 襯砌背後空洞照相探測</li> <li>• 襯砌鑽心取樣</li> <li>• 混凝土強度試驗</li> <li>• 混凝土中性化試驗</li> <li>• 岩石強度試驗</li> <li>• 水質試驗</li> </ul>
	50.烏山嶺隧道	3,207	

註：編號 43~45、49 號隧道檢測時間為 2003 年，編號 46 號隧道檢測時間為 1996 年，編號 47 號隧道檢測時間為 1997~1998 年，編號 48 號隧道檢測時間為 2002 年，編號 50 號隧道檢測時間為 2003 年。

表 C.2 黃燦輝與鄭富書(1997)建議之隧道檢查頻率

檢查類別	隧道狀況	檢查頻率	執行單位
平時檢查	任一隧道	1 次/日~1 次/週	業主自辦
定期檢查	新完工隧道	1 次/月~1 次/半年	業主自辦 或 委託專業公司辦理
	一般隧道	1 次/年~1 次/5 年	
	重要隧道	1 次/月~1 次/半年	
	30 年以上隧道	1 次/半年~1 次/2 年	
臨時檢查	已出現異狀隧道	1 次/週~1 次/年	委託專業公司辦理
	一般隧道	平時檢查時發現可能之異狀時 大量豪雨期間或之後 地震之後 隧道內發生事故時 隧道已出現異狀需持續追蹤異狀之發展時 其他特殊狀況(如鄰近隧道興建工程時)	業主自辦

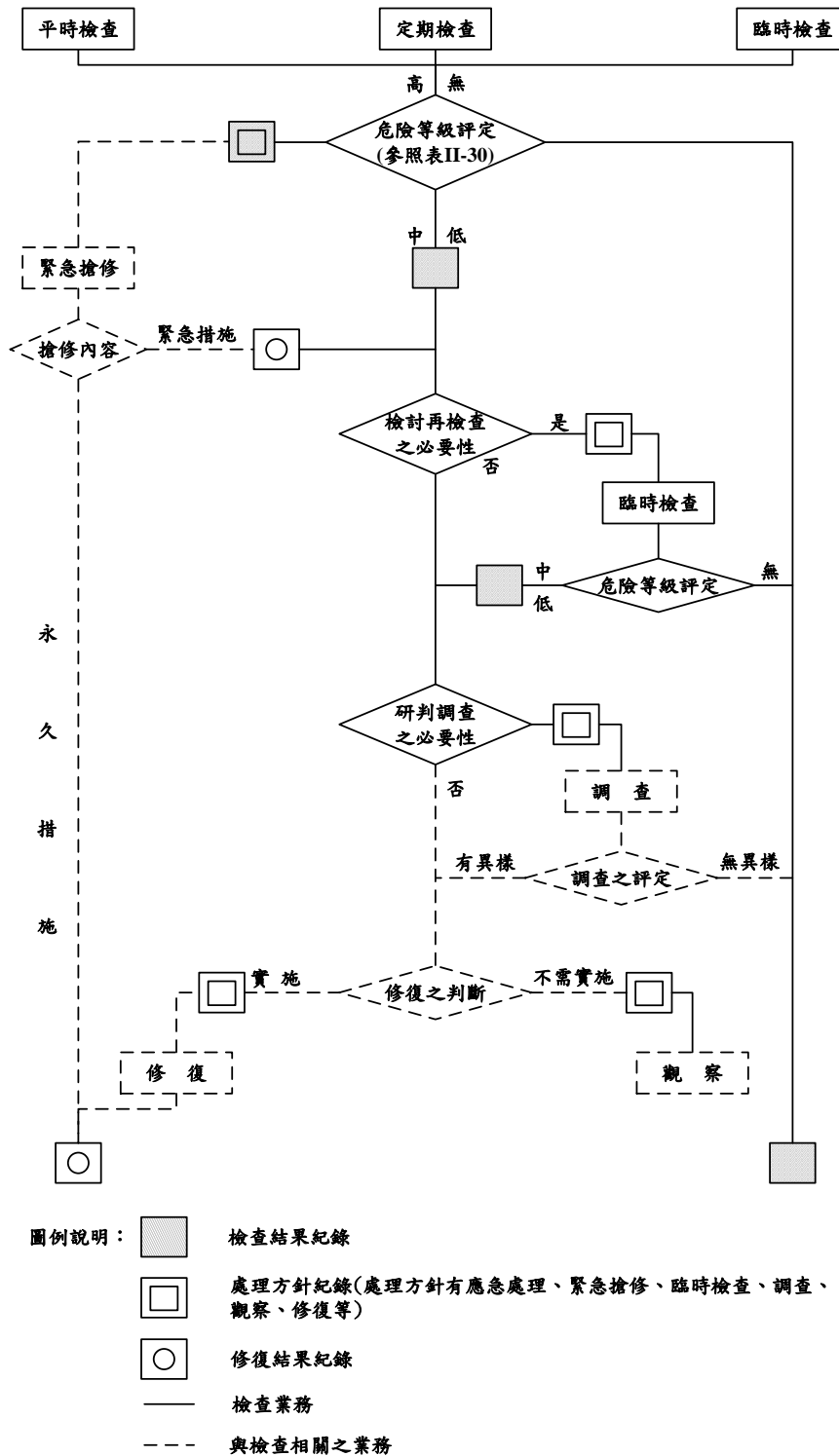


圖 C.1 我國公路有關工程檢查作業之流程(交通部，1987)

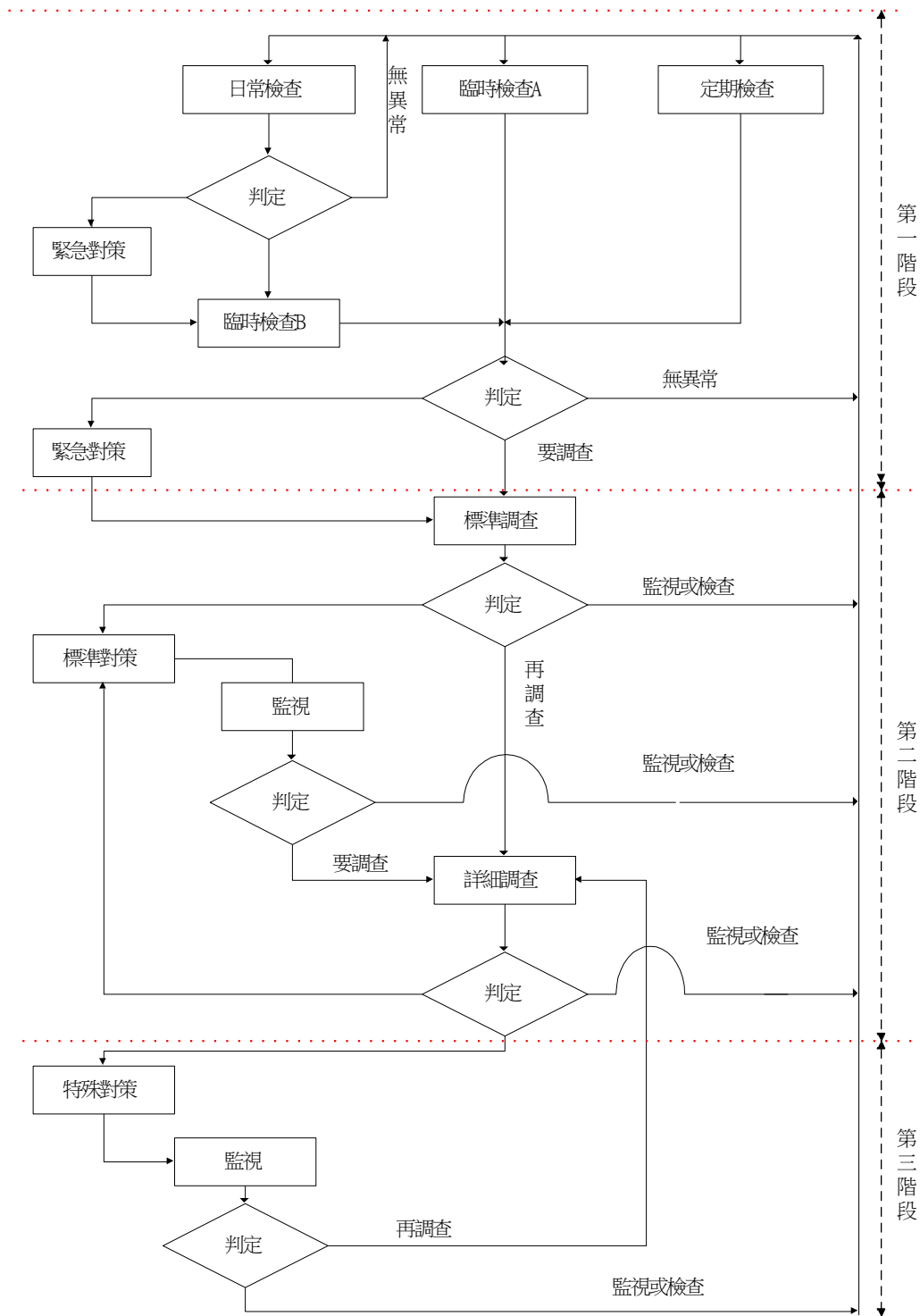
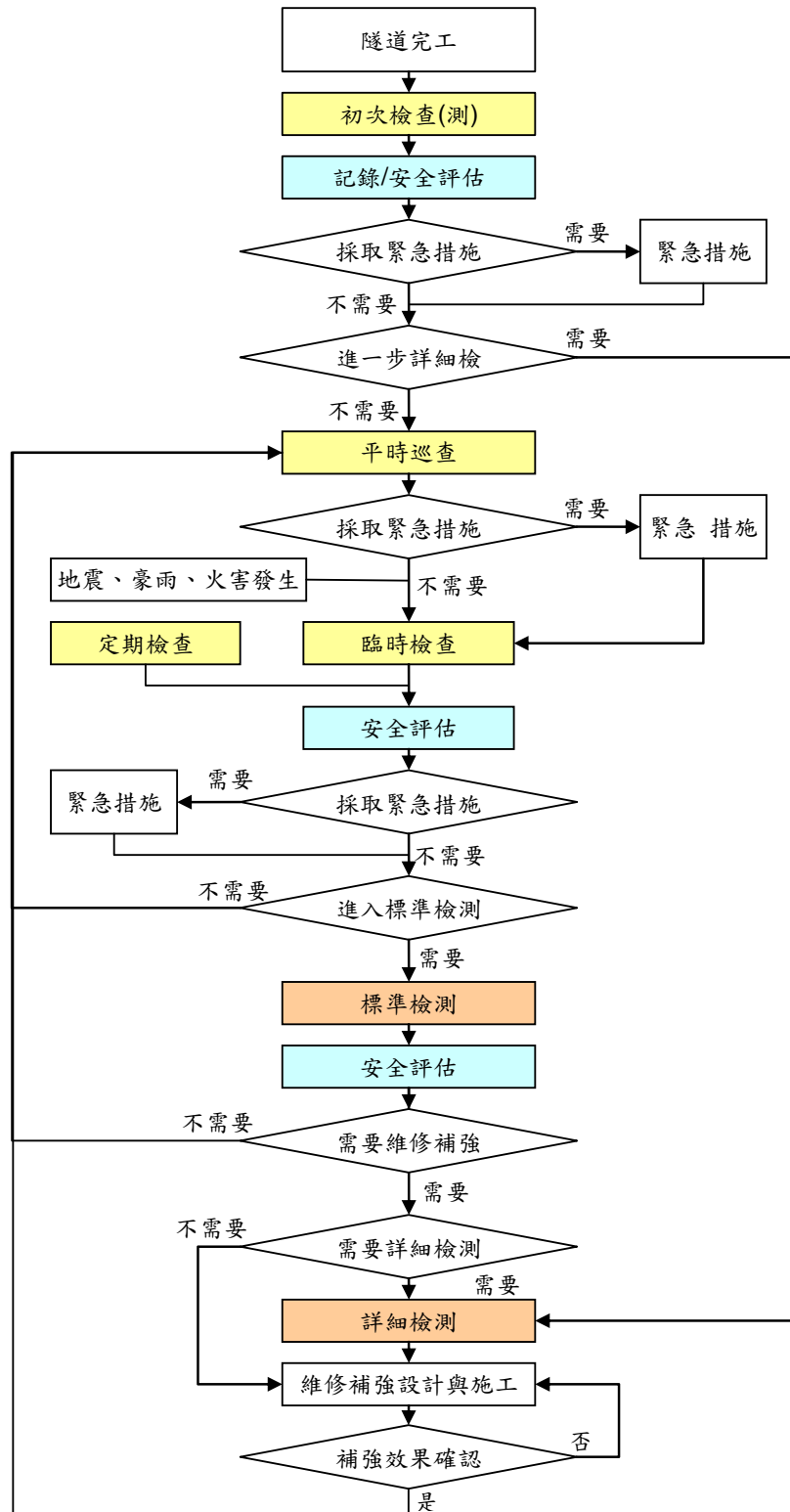


圖 C.2 日本隧道維護管理作業流程圖(日本隧道技術協會，1992)



圖C.3 黃燦輝等(2008) 建議各檢監測階段檢測之作業

## 附錄 D 放射性廢棄物處置輻射劑量與風險評估安全審查技術 建置期末報告(初稿)審查意見與答復說明

子計畫五：處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究		
項次	審查意見	委辦單位答復說明
1	本子計畫期末報告章節名稱於目錄、本文及各頁下方標註多處不一致，請一致化。另章名應力求與契約工作項目一致。	已依審查意見，完成章節名稱於目錄、本文與各頁標註之一致性校訂；章節名稱及相關內容亦與契約工作項目一致。
2	本報告圖表之編號方式多處未一致，且多處未按章節編號，請一致化（建議採用「章.節-編號」）。	已完成修訂。
3	附錄 A 中，圖 A.4 至圖 A.6 於報告本文中未提及，請補充。另 P.10 最末行，「附錄表 2.1」請修正為「附錄圖 A.1」；P.16 第 6 行，「附錄表 2.2」請修正為「附錄圖 A.2」。	考量本文內容一致性，原附錄圖 A.4 至圖 A.6 已刪除，餘 P.10 與 P.16 建議修正項目均已完成修訂。
4	日本 RWMC 之中文譯名請一致使用「原子力環境整備促進・資金管理中心」。	感謝審查委員之建議，報告內容相關中文譯名已修訂。
5	「史密特錘」、「施密特硬度錘」、「混凝土強度錘」名詞請一致化。	已統一修正為「史密特錘」。
6	本報告中提及，安朔隧道曾用超音波法檢測隧道襯砌之裂縫寬度及深度，惟期末報告審查會議簡報中，相關圖片為敲擊回音法之儀器設備，請再次確認何者正確。	感謝審查委員指正。經確認後，報告內文所述無誤；期末報告審查會議簡報圖示應為「敲擊回音法」，非「超音波探測-敲擊回音法」。

7	「裂縫型態」、「裂縫形態」名詞請一致化。	已統一修正為「裂縫型態」。
8	「低放審查導則(第0版)」請全數修正為「低放處置審查導則(第0版)」。	內文相關文字已全數修正為「低放處置審查導則(第0版)」。
9	請再次校稿訂正本報告之錯別字。	已完成錯別字校稿訂正。