

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

坑道處置設施設計及其穩定性評  
估之審查技術發展(101 年度工作)

計畫編號：101FCMA006

報告編號：101FCMA006-10

執行單位：核能研究所

計畫主持人：周鼎

子項工作負責人：吳禮浩

報告作者：王泰典、李宏輝、李佳翰、詹尚  
書、許珮筠、曹孟真

報告日期：中華民國 101 年 12 月

(本頁空白)

## 摘要

低放射性廢棄物處置為近年核能工程發展之關鍵項目，處置設施場址的設計與建造於結構安全與長期穩定之要求更遠高於現行工程標準，其中天然障壁與工程障壁提供廢棄物處置的防護工作，結構安全與長期穩定的確保，不僅為放射性廢棄物最終處置設施設計與建造的關鍵議題，而其影響因素亦為場址選擇必要考慮的重要因素。本計畫彙整以往之研究成果，蒐集整理國內外既有之坑道地質調查、設計與建造之相關法規等，比較其差異進而評估處置坑道於設計階段應具備長期穩定考量的要項，並蒐集既有坑道結構穩定與服務功能異常之現象，歸納影響坑道長期穩定與服務功能異常之因素可分為外力引致與環境變異，並提出處置坑道長期穩定設計考量與管制要項探討與建議，供處置設施經營者執行處置計畫以及後續研修審查導則之參考。

關鍵詞：低放射性廢棄物處置場，坑道異常現象，長期穩定影響因素，外力因素，環境因素

The disposal of low-level radioactive waste has recently become the key issue of nuclear engineering. Thus, to fulfill the demands to structural safety and long-term stability, the standards on design and construction of disposal site are stricter than those of other uses. The natural and engineering barriers provide the protection to radioactive disposal. So the ensurements and influencing factors of structural safety and long-term stability are the key issue of radioactive disposal. In this research, the geological investigation, design and construction legislation et al. of existing tunnel were collected to investigate the considerations of long-term stability in design step of radioactive disposal. Also, the cause of exceptional tunnel structural phenomenon to influence the long-term stability of tunnel were analyzed, the major influencing factors are external force caused and environment changed. Finally, the results of this research might be able to set up the framework of requirements on waste disposal facilities, and assure the quality of further disposal installations.

Keywords : Disposal of low-level radioactive, tunnel, exceptional phenomena, long-term stability, affecting factors, structural safety

# 目錄

摘要.....	I
目錄.....	II
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 報告內容.....	2
第二章 國內外既有隧道設計方法、規範與相關準則整理.....	3
2.1 國內外既有隧道設計方法.....	3
2.1.1 經驗設計法.....	3
2.1.2 觀察設計法.....	10
2.1.3 分析設計法.....	10
2.2 設計規範與準則.....	11
2.2.1 設計規範彙整.....	11
2.2.2 設計理念與考量因素.....	13
2.2.3 設計項目與流程.....	14
2.3 國內既有隧道施工技術規範.....	19
2.4 隧道施工相關其他技術文件.....	20
第三章 處置坑道與一般地下坑道設計目標、對於坑道穩定與服務功能需求異同分析.....	22
3.1 一般坑道.....	22
3.2 處置坑道.....	31
3.2.1 場址特性.....	31
3.2.2 場址調查規範與成果.....	33
3.2.3 場址調查項目.....	35
第四章 國內外坑道結構穩定與服務功能異常現象影響因素探討.....	44
4.1 國內外相關研究.....	44
4.2 坑道襯砌異狀資料蒐集.....	47
4.3 坑道異狀整理與分類.....	49
4.4 坑道穩定與服務功能異常現象影響因素探討.....	55
4.4.1 外力因素.....	55
4.4.2 環境因素.....	66

第五章 處置坑道長期穩定設計考量與管制要項探討與建議.....	71
5.1 長期穩定設計考量之初步建議.....	71
5.1.1 設計目標與功能需求 .....	71
5.1.2 土木設計 .....	74
5.2 審查要項初步建議.....	74
第六章 結論與建議.....	76
6.1 結論.....	76
6.2 建議.....	76
參考文獻.....	78
附錄一 審查意見回覆	

(本頁空白)

# 第一章 前言

## 1.1 計畫背景

我國低放射性廢棄物處置場目前正積極進行選址規劃作業，處置設施之設計與建造已為處置場發展的關鍵項目，其中天然障壁與工程障壁提供廢棄物處置的防護工作，結構安全與長期穩定的確保，不僅為放射性廢棄物最終處置設施設計與建造的關鍵議題，而其影響因素亦為場址選擇必要考慮的重要因素。我國基礎工程與地下工程數十年來蓬勃發展，技術日趨成熟，然放射性廢棄物處置場址工程規模龐大，其運轉服務的生命週期需求亦十倍以上於一般之公共工程，因此坑道處置方式之坑道整體的結構安全與長期穩定的標準更高於現行一般工程之標準。

物管局於 99 與 100 年度已委託執行「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」以及「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」研究計畫，提出我國處置技術在坑道穩定與長期效能評估具體之精進方向，然影響坑道長期穩定因素含括甚廣，仍需進一步釐清影響坑道穩定與服務功能異常之關鍵因素，以供坑道場址設計時所需的特性參數與相關設計建議，俾利完善國內放射性廢棄物處置架構及審查與管制單位核准相關計畫時之審查要項。

## 1.2 計畫目的與重要性

本計畫彙整以往之研究成果，蒐集整理國內外既有之坑道地質調查、設計與建造之相關法規、管理規則、技術規範以及研究成果等，比較其差異進而評估處置坑道於設計階段應具備考量的要項，並蒐集既有坑道結構穩定與服務功能異常之現象，探討影響坑道長期穩定與服務功能異常之因素，繼而就處置坑道服務功能需求與長期穩定之觀點提出處置坑道長期穩定設計考量與管制要項探討與建議，以供處置設施經營者執行處置計畫以及後續研修審查導則之參考。

## 1.3 國內外有關本計畫之執行情況

我國低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則草案之有關第三、四及五章中

有關場址之特性描述、處置設施之設計以及處置設施之建造等部份，係參考 NUREG-1200 法規為基本架構而提出。然美國有關場址特性、處置設施設計、建造之管理單位、法規制度皆不同於我國，NUREG-1200 原版本中多處引用美國其他單位訂定之法規、條例或管理規則等，我國可能缺乏對應的法規、條例或管理規則，或由不同的單位訂有相近者，但因其事業主管目的不同，直接引用可能出現偏頗情事。

物管局 99 年委託執行「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 100 年委託執行「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」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相異處對坑道穩定影響之案例蒐集，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，詳參相關計畫之報告。

#### 1.4 報告內容

本報告為本計畫期末成果報告，除本章說明計畫之背景、目的、國內外有關本計畫之執行情況外，其餘各章節主要執行內容為：

第二章 國內外既有坑道設計方法、規範與相關準則整理；

第三章 處置坑道與一般地下坑道設計目標、對於坑道穩定與服務功能需求異同分析；

第四章 國內外坑道結構穩定與服務功能異常現象影響因素之探討；

第五章 處置坑道長期穩定設計考量與管制要項探討與建議；

第六章 結論與建議。



## 第二章 國內外既有隧道設計方法、規範與相關準則整理

坑道因應建造目的、服務對象與使用年限的考量，應有其相對應的設計方法、規範及準則。國內坑道工程數十年來蓬勃發展，技術日趨成熟，然放射性廢棄物處置場址工程規模龐大，其營運的生命週期需求亦十倍以上於一般之公共工程，因此處置設施中之坑道整體的結構安全與長期穩定的標準應更高於現行一般工程之標準。本計畫整理國內外既有坑道設計方法、規範及相關準則，評估不同功能需求的坑道設施相關規定，探討不同功能需求之坑道其設計環境與條件，作為後續處置坑道之參照。本章節就既有坑道設計方法、設計規範與準則、既有施工技術規範、及施工相關技術文件詳述如后。

### 2.1 國內外既有隧道設計方法

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

#### 2.1.1 經驗設計法

經驗設計法為將以往工程經驗經由統計分析，歸納出經驗法則，並據以進行支撐設計之方法。採用經驗設計法時，應充分瞭解其發展背景與資料庫之內容，以掌握其適用範圍。經驗設計法之骨幹是各種岩體分類系統。透過岩體分類將過去之工程經驗加以歸納分析，整理出經驗法則，供後續隧道工程參考比較，據以設計支撐系統。岩體分類系統之種類相當多，其中著名者為 Terzaghi 之 Rock Load Classification，Bieniawski 之 Geomechanics Classification System，Barton 等人之 Q System。以 Q System 之經驗設計法為例，經由岩體評分得到 Q 值後，可依據圖 2.1-1 與 2.1-2 及表 2.1-1 或圖 2.1-3 找到對應之支撐建議。而根據 Geomechanics Classification System 之 RMR 評分，則可找到不同開挖寬度所對應之岩體自立時間，如圖 2.1-4 所示。

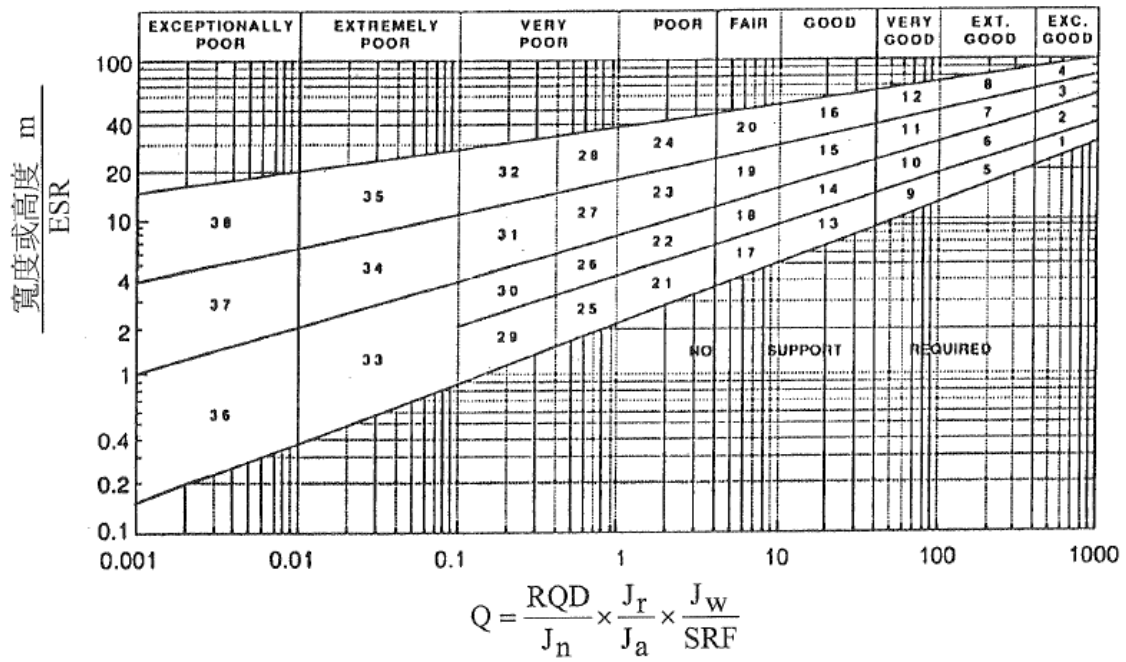


圖 2.1-1 Q 值及修正開挖寬度所對應之 38 個噴凝土—岩栓支撐系統(Barton, 1974)

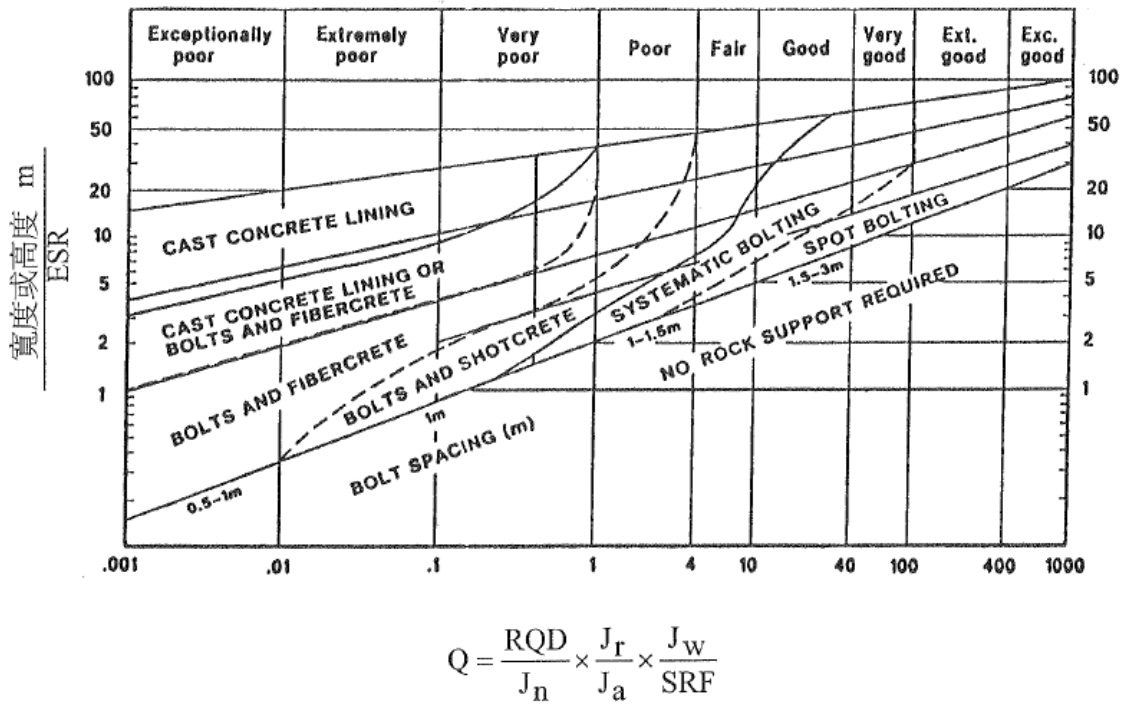


圖 2.1-2 Q 值及修正開挖寬度所對應之支撐型式(Barton, 1986)

表 2.1-1 由 212 個案例所得 38 個分區之支撐建議(Barton, 1988)

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

表 2.1-1 由 212 個案例所得 38 個分區之支撐建議(Barton, 1988)(續)

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

表 2.1-1 由 212 個案例所得 38 個分區之支撐建議(Barton, 1988)(續)

區 域 (支撐類別)	條 件 係 數			支 撐 型 式	附 註
	$\frac{RQD}{J_n}$	$\frac{J_r}{J_a}$	寬度 ESR		
30	$\geq 5$	-	-	B(tg)1m +S 2.5-5cm	IX
	$< 5$	-	-	S(mr)5-7.5cm	IX
	-	-	-	B(tg)1m +S(mr)5-7.5cm	VIII, X, XI
31	$> 4$	-	-	B(tg)1m +S(mr)5-12.5cm	IX
	$\geq 4, \geq 1.5$	-	-	S(mr)7.5-25cm	IX
	$< 1.5$	-	-	CCA 20-40cm	IX, XI
	-	-	-	+B(tg)1m CCA(sr)30-50cm +B(tg)1m	VIII, X, XI
32 見註 XII	-	-	$\geq 20m$	B(tg)1m +S(mr)40-60cm	II, IV, IX, XI
	-	-	$< 20m$	B(tg)1m +S(mr)20-40cm	III, IV, IX, XI
	-	-	-	CCA(sr)40-120cm +B(tg)1m	IV, VIII, X, XI
33*	$\geq 2$	-	-	B(tg)1m +S(mr)2.5-5cm	IX
	$< 2$	-	-	S(mr)5-10cm	IX
	-	-	-	S(mr)7.5-15cm	VIII, X
34	$\geq 2$	$\geq 0.25$	-	B(tg)1m +S(mr)5-7.5cm	IX
	$< 2$	$\geq 0.25$	-	S(mr)7.5-15cm	IX
	-	$< 0.25$	-	S(mr)15-25cm	IX
	-	-	-	CCA(sr)20-60cm +B(tg)1m	VIII, X, XI
35 見註 XII	-	-	$\geq 15m$	B(tg)1m +S(mr)30-100cm	II, IX, XI
	-	-	$\geq 15m$	CCA(sr)60-200cm +B(tg)1m	II, VIII, X, XI
	-	-	$< 15m$	B(tg)1m +S(mr)20-75cm	III, IX, XI
	-	-	$< 15m$	CCA(sr)40-150cm +B(tg)1m	III, VIII, X, XI
36*	-	-	-	S(mr)10-20cm	IX
	-	-	-	S(mr)10-20cm +B(tg)0.5-1.0m	VIII, X, XI
	-	-	-	S(mr)20-60cm S(mr)20-60cm +B(tg)0.5-1.0m	IX VIII, X, XI
37	-	-	-	S(mr)20-60cm	IX
	-	-	-	S(mr)20-60cm	VIII, X, XI
	-	-	-	+B(tg)0.5-1.0m	
	-	-	-	CCA(sr)100-300cm	IX
38 見註 XIII	-	-	$\geq 10m$	CCA(sr)100-300cm	II, VIII, X, XI
	-	-	$\geq 10m$	+B(tg)1m	
	-	-	$< 10m$	S(mr)70-200cm	IX
	-	-	$< 10m$	S(mr)70-200cm +B(tg)1m	III, VIII, X, XI

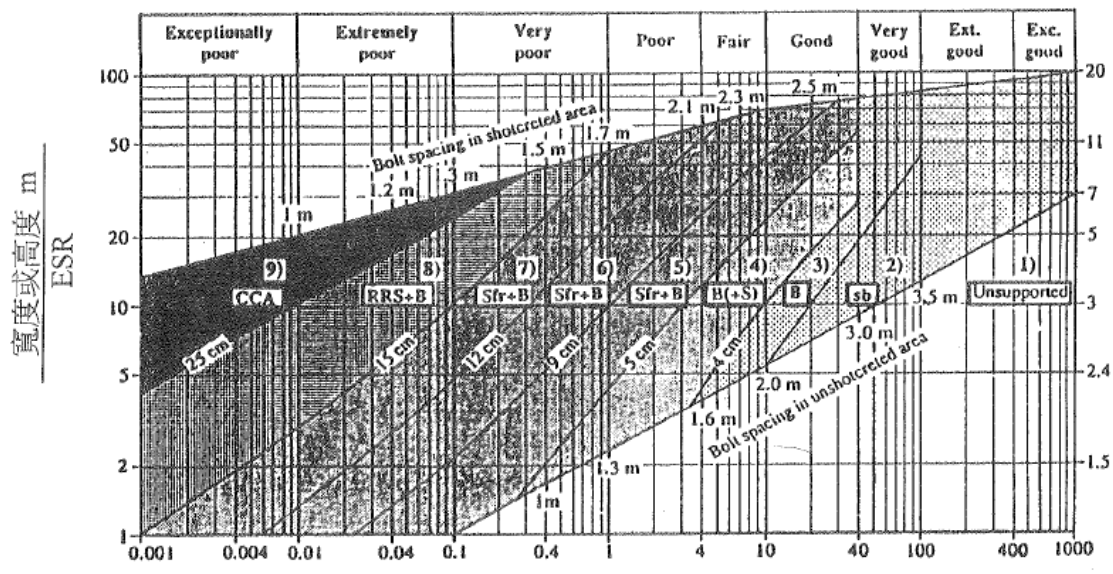
\*作者估計之支撐。可用之案例紀錄尚不足以可靠估計支撐需要量。

使用支撐表之鑰：  
sb = 局部岩栓  
B = 系統岩栓  
(utg) = 無預力，有灌漿  
(tg) = 加預力(堅實岩盤用機械膨脹式岩栓，岩質極差之岩盤用後拉法灌漿岩栓，見註 XI)  
S = 噴凝土  
(mr) = 鋼線鋼補強  
clm = 鍊網補強(chain link mesh)  
CCA = 澆鑄混凝土拱  
(sr) = 鋼筋補強

表 2.1-1 由 212 個案例所得 38 個分區之支撐建議(Barton, 1988)(續)

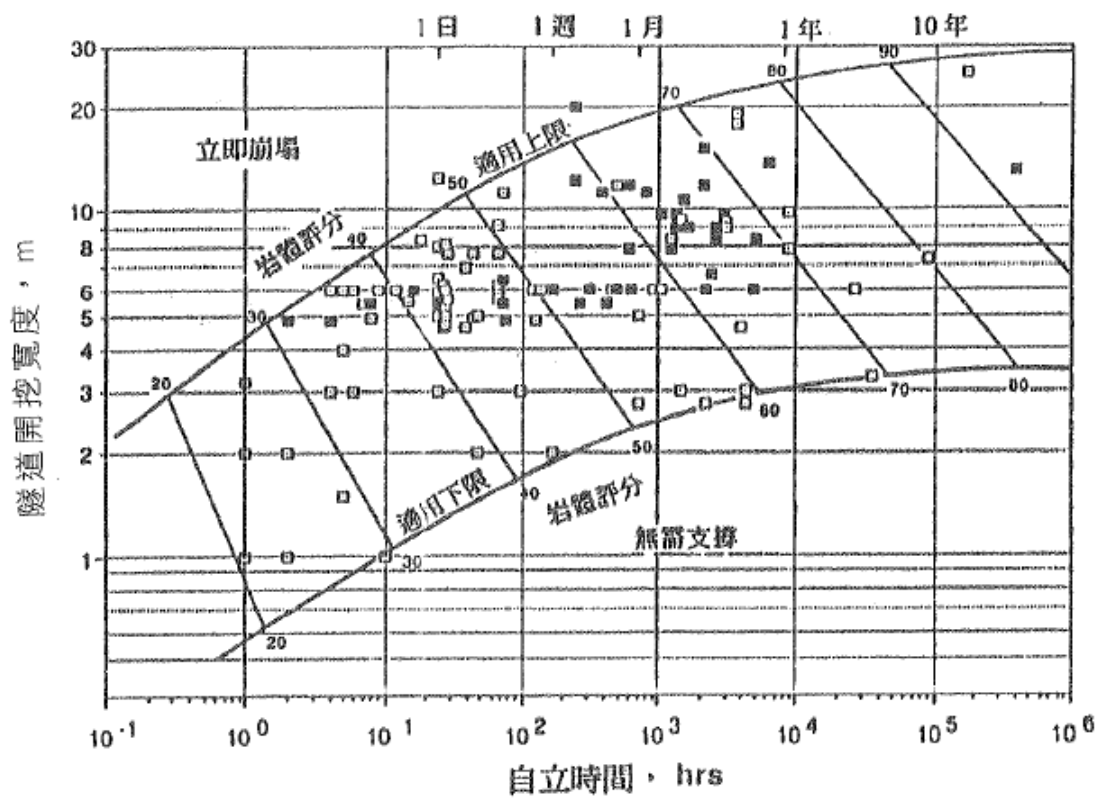
註：

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



$$\text{Rock mass quality } Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

圖 2.1-3 Q 值及修正開挖寬度對應岩栓—鋼纖噴凝土支撐系統(Grimstad & Barton, 1993)



■ 礦坑中拱頂坍塌之案例，□ 隧道拱頂坍塌之案例

圖 2.1-4 RMR 之隧道開挖寬度與岩體自立時間之關係(Bieniawski, 1984)

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

### 2.1.2 觀察設計法

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

### 2.1.3 分析設計法

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

#### A. 理論分析法

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

理論分析法有下列方法：

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

#### B. 數值分析法



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

## 2.2 設計規範與準則

目前針對一般隧道設計的規範或研究成果整理說明如后。

### 2.2.1 設計規範彙整

- A. 公路隧道消防法規制訂(交通部台灣區國道新建工程局，1997)；本法規為符合本土化使具體可行，先後邀請相關學者、專家、民間團體、工程實務界暨政府相關機關研討，經擷取可行意見及研討國外公路隧道法規中有關消防設備配置規定，提出「公路隧道消防安全設備設施設置規範草案」計八十五條。全文分成三篇，第一編為總則，第二編為消防設計，第三編為消防安全設備設施，供為臺灣地區公路隧道消防設備設置管理及改善對策之指導基準。
- B. 公路隧道安全設施準則研訂(交通部台灣區國道新建工程局，1998)；本準則之主要目的，在結合機電、交控、緊急與安全逃生及營運管理等先進技術，並參酌世界各國之經驗，針對公路隧道運轉所需之安全設施，研訂一套適合國內使用之設置準則。經分析結果，首先將隧道安全設施準則劃分為機電設施、交通監控設施、緊急及安全逃生設施以及營運管理措施四大類。依據上述分類，並參酌世界各國相關之準則，加上各專業領域之知識，整合研訂定出適合國內高速公路隧道使用之「公路隧道安全設施準則」，可供未來相關隧道規劃、設計之參考。
- C. 隧道工程設計準則與解說(中國土木水利工程學會，1999)；本設計準則分成三部分，第一部分為總則，說明設計準則涵蓋的範圍及適用性；第二部分為調查與試驗，針對隧道工程之特性，就工址調查的範圍、項目、進行方法及成果判釋等詳細說明；第三部分為隧道設計，就設計項目、設計理念及注意事項等加以闡述說明。
- D. 山岳隧道工程設計與實例手冊(中華民國隧道協會，1999)；本手冊包括與隧道工程相關之概述、地質調查、隧道定線、隧道洞口、隧道設計、特殊地質段設計、災變對策、隧道開挖、隧道監測與回饋及結語。

- E. 隧道二次襯砌功能、設計理念與混凝土設計規範之研究與建議對策(交通部台灣區國道新建工程局，2000)；於各隧道對二次襯砌之設計功能需求不同，二次襯砌仍有許多不同之設計方案可供選擇，因此本研究中列舉多種設計方案，提供二次襯砌設計更廣泛之選擇，最後本研究將提出二次襯砌之方案評選建議準則及評選參考流程，作為決定二次襯砌設計之參考。其內容包括：前言、問題特性分析、以處理不確定因素之基本觀念探討二次襯砌之功能與定位、文獻回顧與設計現況、以隧道工程設計之觀念來探討二次襯砌之功能與設計考量、二次襯砌之類型簡介與分析、混凝土設計規範應用在二次襯砌之探討、案例探討、二次襯砌設計之建議考慮方式共 9 章。
- F. 公路隧道設計規範(交通部，2003)；交通部考量隧道設計規範確有及早訂定之必要，遂於民國 92 年 3 月委由中華民國隧道協會，以國道新建工程局委託中國土木工程學會所編「隧道工程設計準則與解說(民國 88 年)」為藍本進行複審，並編訂本規範。複審期間聘請 18 位產官學界之專家擔任審查委員負責審查，於民國 92 年 11 月始定案，並由交通部頒布實施。
- G. 台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立(行政院公共工程委員會，2003)；行政院公共工程委員會有鑑於台灣地區沿用之岩體分類法係因襲國外系統，常無法反映國內特殊之地質條件，且隧道工程相關資料至今仍散佈於各單位中，相關經驗無法有效傳承與保存，因此，彙整國內隧道工程資料，並透過國際隧道工程技術交流方式，參酌國外現行岩體分類系統以及著名隧道工程案例加以研究，以建立台灣地區之岩體分類與支撐系統，供爾後之隧道工程使用。同時利用現代電腦科技功能建立隧道工程資料庫，將台灣過去隧道工程之相關資訊加以保存，提供後續隧道工程之決策與執行上之參考。
- H. 軟土潛盾隧道工程設計與實例手冊(中華民國隧道協會，2004)；本手冊涵蓋了與軟土潛盾隧道工程相關的工址調查、隧道規劃、設計、施工及展望；潛盾機選擇和評選模式、應用及設計；潛盾隧道環片襯砌、工作井、施工輔助工法、施工監測及建物保護等。
- I. 公路隧道消防安全設備設置規範草案(交通部台灣區國道新建工程局，2008)；本規範蒐集先進國家如歐盟、美國、日本、澳洲、中國大陸等關於公路隧道消防安全設備設置規範，並分類探討各國設備設置之異同，研擬一套符合我國國情之公路隧道消防安全設備法規。並提出「公路隧道消防安全設備設置規範草案」內容，除訂定我國公路隧道分級規範外，

全文共分為五章及附錄 A，第一章「總則篇」、第二章「消防設計篇」、第三章「消防安全設備篇」、第四章「輔助消防搶救上之必要設備篇」、第五章「附則篇」，及附錄 A「火災控制設備」，並以 FDS 完成模擬公路隧道火災排煙情境分析。

- J. 潛盾隧道設計及施工準則與解說(中華民國隧道協會，2009)；本準則使用原則為(1)條文可做為政府、事業單位要求施工設計單位之基本事項；(2)解說內容提供設計及施工數據與資訊，供相關單位參考；(3)提供政府、事業單位、設計與施工單位共同之依循與標準；(4)從事潛盾隧道工程人員之參考書籍。

### 2.2.2 設計理念與考量因素

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

#### A. 設計原則：

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

#### B. 考量因素：

1. 地盤特性：包括岩性、構造、地下水、弱面特性、隧道軸線與地層位態關係、開挖面自立性與地盤行為等條件。
2. 斷面形狀：包括功能上必須之最小行車淨空與附屬設施空間，以及配合地盤、開挖工法及支撐等特性所需之形狀。隧道斷面之幾何形狀應力求圓滑平順，以避免應力集中。
3. 一般岩盤隧道設計可不考慮地震影響。但必要時，得視地形、地質及隧道覆蓋深度等條件考慮之。
4. 特殊荷重：包括淺覆蓋地形之上載荷重、膨脹及擠壓地盤之異常荷重以及鄰近邊坡地形之偏壓荷重等。
5. 施工方法與順序。
6. 地下水與地表水之影響。

另中國土木水利工程學會編著之「隧道工程設計準則與解說」(1999)亦針對隧道之設計

原則與考量因素建議如下：

A. 設計原則：

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

B. 考量因素：

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

2.2.3 設計項目與流程

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

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

其中有關隧道之支撐設計方法則分為：初期支撐、襯砌與仰拱三部分，規範如下：

A. 初期支撐：

1. 隧道支撐包括初期支撐及襯砌，情況適合時可僅做初期支撐。

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

#### B. 襯砌：

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

#### C. 仰拱：

1. 當地質不佳，僅以頂拱之支撐可能無法控制地盤變形者，應考慮設置仰拱，將支撐系統閉合。
2. 仰拱形狀與厚度應符合構成仰拱構造之力學要求與施工需要。
3. 另中國土木工程學會編著之「隧道工程設計準則與解說」(1999)則說明隧道工程之主要設計內容與設計流程，如圖 2.2-1 及圖 2.2-2 所示。

其中有關隧道之支撐設計方法則分為：初期支撐、二次支撐二部分，建議如下：

#### A. 初期支撐：

1. 隧道支撐包括初期支撐及二次支撐(混凝土襯砌)，情況適合時亦可單以初期支撐作為永久支撐。
2. 初期支撐設計方法可概分為經驗法、觀察法和分析法等三種，應依據地質特性、支撐架設時間、開挖方法、支撐系統之柔性與使用經驗及熟悉度等條件，評估其適用性後選用。
3. 隧道支撐設計應訂定適當之變形寬容量。

4. 經驗設計法係套用以往工程經驗之方法，視地盤良窳分級，依據隧道之功能，評析斷面形狀與尺寸、覆蓋深淺、大地應力、開挖方法等因素之影響，再參考以往案例，設計各級地盤之支撐系統。
5. 觀察設計法係於施工進行間之設計方法，針對施工時觀察所悉之地盤特性，套用預先設計之支撐系統及開挖方法，並實施觀察與監測，確認、補強或修正原設計。
6. 分析設計法係利用數學解析、數值分析或物理模型等方式，分析隧道開挖面周圍之應力與變形，以設計隧道支撐之方法。
7. 採用觀察設計法或分析設計法時，隧道支撐均應於施工期間，藉各種監測結果之分析，回饋於支撐設計，以確認支撐系統之妥適性，並得據以調查或修正原設計，以符實際安全需要。
8. 設計之回饋與修正應反映於隧道工程之合約。

#### B. 二次支撐：

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

經整理國內外既有坑道設計方法、設計規範與準則，以及隧道施工相關技術文件，顯現目前坑道設計方法與規範準則僅著眼於坑道結構設計時，對地形、地質等工程環境調查，以掌握足夠資料提高開挖施工期間坑道設施之安全性與穩定性考量，未對坑道設施竣工後長期穩定性考量進行評估作業，考量坑道處置設施時間尺度較一般坑道尺度為長，後續坑道處置設施考量長期穩定性評估時所需場址特性項目與參數，為坑道處置設施穩定性評估之關鍵技術。

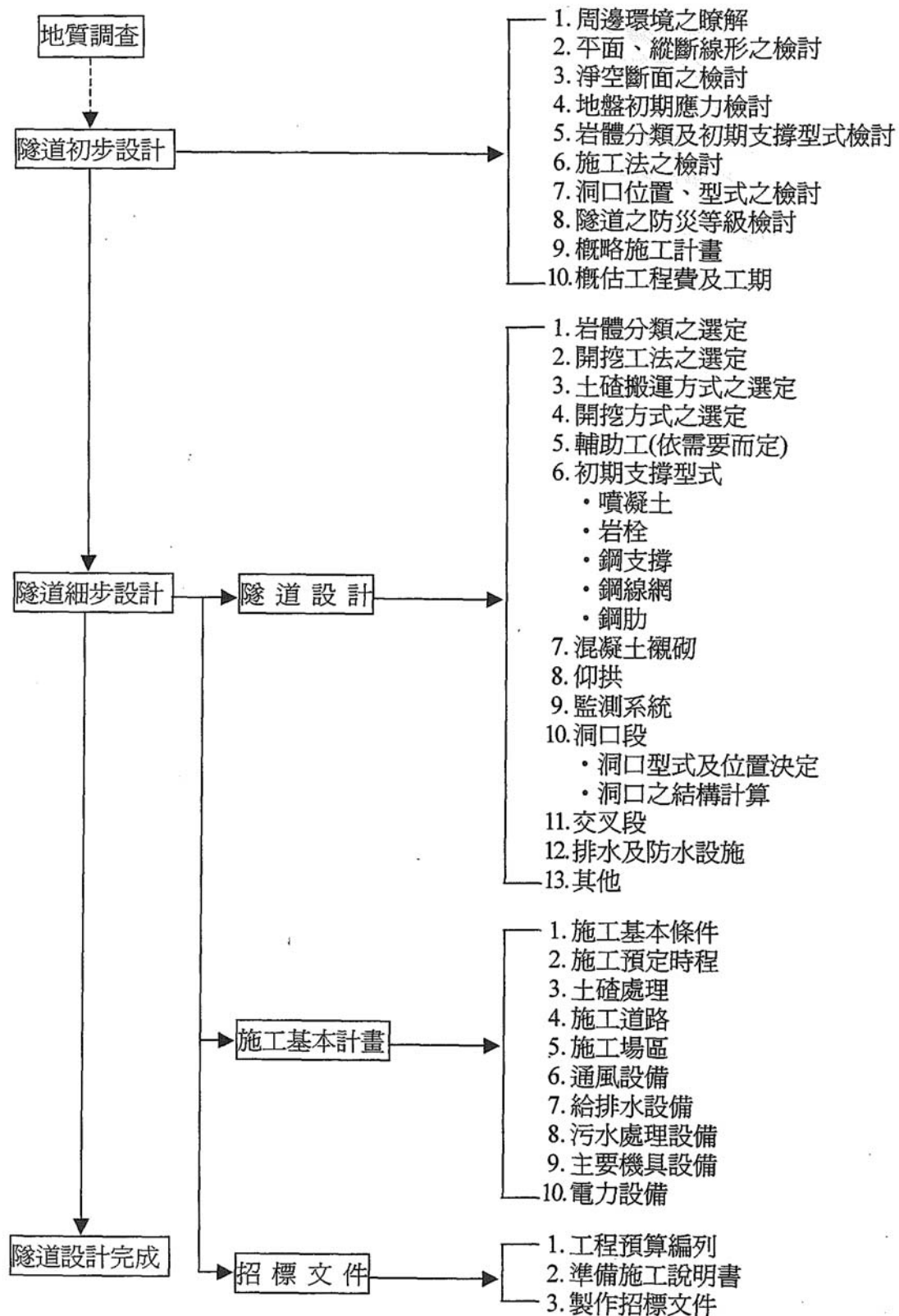


圖 2.2-1 隧道之主要設計內容(中國土木工程學會，1999)

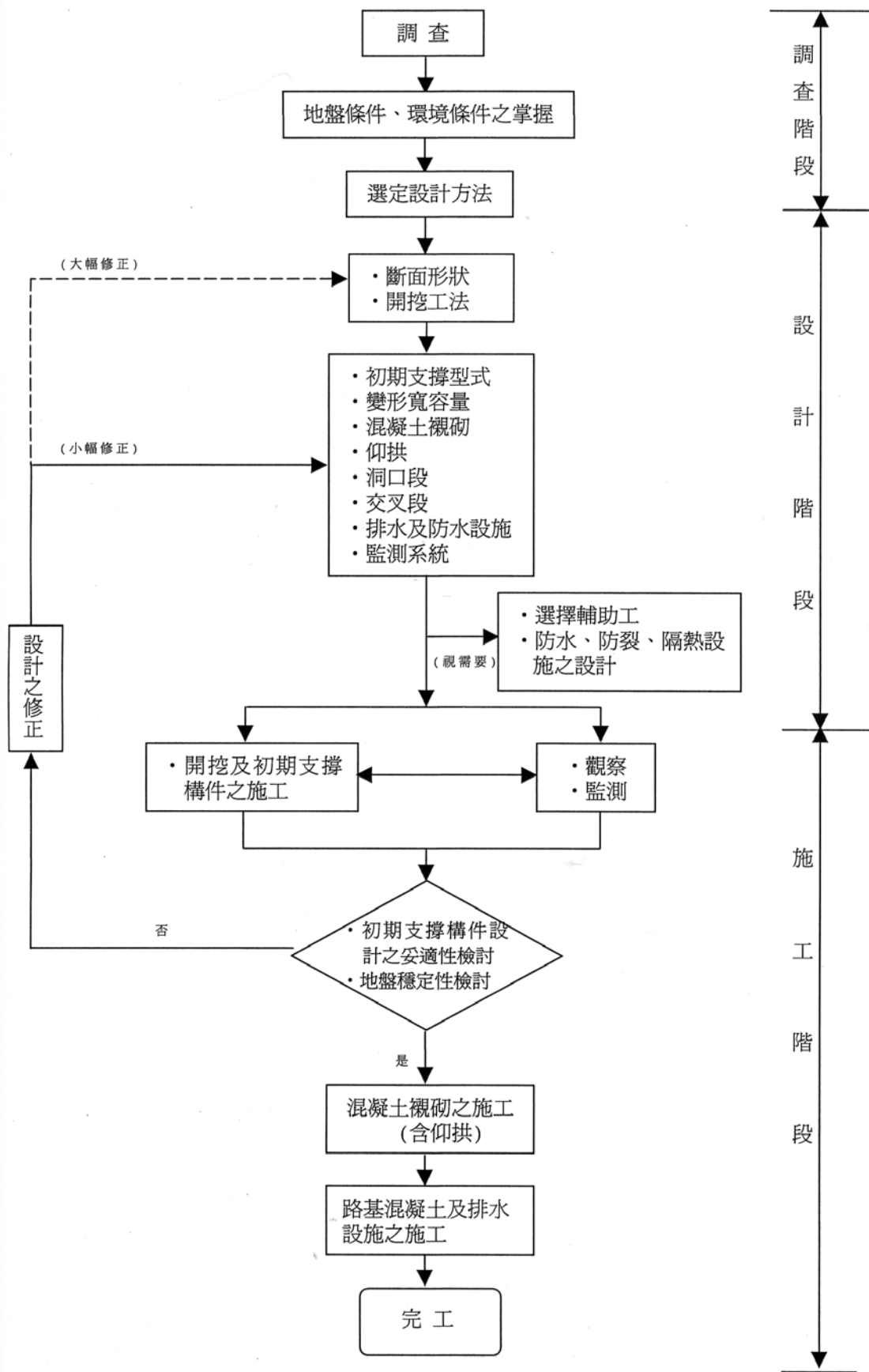


圖 2.2-2 隧道設計流程圖(中國土木工程學會，1999)



## 2.3 國內既有隧道施工技術規範

針對國內外既有隧道施工技術規範整理說明如后。

- A. 潛盾隧道施工技術規範之研討(中華民國隧道協會，1999)：盾隧道工法係以缺乏自立性地層為主要施工對象之隧道施工法，為確保都市交通順暢、減少噪音與震動、解決施工用地取得及近鄰施工問題，潛盾隧道工法已逐漸取代明挖覆蓋工法成為都會區隧道工法之主流，廣泛地運用在捷運隧道、衛生下水道、輸水幹管、共同溝及其他維生管線之興建上，對增進都市生活機能、提升人類文明生活水準有極大貢獻。本規範內容包含工程管理、工址調查、施工與設備、環片與襯砌、輔助工法、附屬工程共 6 個章節。
- B. 公共工程施工綱要規範 (行政院公共工程委員會，2001)：行政院公共工程委員會為整合劃一全國公共工程施工規範，提升工程品質，特訂定本要點。凡適用政府採購法以辦理新興公共工程及各類房屋建築工程之規劃、設計、施工之機關、法人或團體均適用本要點。主辦機關辦理工程應應用行政院公共工程委員會所訂定之公共工程施工綱要規範(含完整版、精簡版綱要規範及有關標準化與資訊化措施)。主辦機關自本要點實施日(90.11.15)起辦理新興個別計畫之規劃、設計及施工，應用施工規範之有關措施及內容，如有所不足或另有特殊情節，應循施工規範完整版所訂有關編撰格式、編碼架構及編碼規則增刪修撰，以因應其個案需用。
- C. 隧道施工技術規範(交通部台灣區國道新建工程局，2003)：要針對鑽炸法及非全斷面機械開挖之隧道施工提出規範要求，內容係參考行政院公共工程委員會頒布之公共工程施工綱要規範第 02401 章 隧道施工管理、02402 章 隧道施工通則、02403 章 岩體分類與開挖支撐類型、02411 章 洞口開挖及邊坡保護、02412 章 隧道鑽炸法及非全斷面機械開挖、02421 章 先進支撐、02422 章 鋼支保、02423 章 隧道用岩栓、02424 章 隧道噴凝土、02425 章 隧道襯砌、02432 章 隧道鑽孔及灌漿、02447 章 隧道計測及儀器、02448 章 隧道防水層，共計 13 章而制定。
- D. 施工說明書技術規定(交通部公路總局，2005)：分為上、下二冊，內容涵蓋所有公路興建與養護所需之施工技術，內容亦參考行政院公共工程委員會頒布之公共工程施工綱要規範而制定，惟其中第 02401 章 隧道施工安全、02402 章 隧道施工通則、02403 章 岩體分類

與開挖支撐類型、02411 章 洞口開挖及邊坡保護、02412 章 隧道鑽炸法及非全斷面機械開挖、02415 章 豎井開挖、02422 章 鋼支撐架、02423 章 隧道用岩栓、02424 章 隧道噴凝土、02425 章 隧道襯砌、02432 章 隧道鑽孔及灌漿、02447 章 隧道計測及儀器、02448 章 隧道防水層、02449 章 隧道其他工作，共計 14 章，主要針對鑽炸法及非全斷面機械開挖之隧道施工提出規範要求。

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

## 2.4 隧道施工相關其他技術文件

除 2.3 節所蒐集彙整有關隧道施工之技術規範外，國內亦有一些施工相關之書籍、報告或技術文件等可供本研究進一步參考。

- A. 山岳隧道之施工(榮民工程事業管理處，1981)：由 林福星先生編著，內容包括施工計畫、開挖方法、鑽岩、開炸、岩碴處理、支保、襯砌、壓縮空氣量計算、隧道換器與照明設備、斜坑、豎井、隧道工程特種施工之實例等共 12 章，堪稱國內第一本有關山岳隧道施工之專書。
- B. 實用隧道工程學(汪燮之，1987)：其中第三章岩石隧道施工、第四章無爆破岩石隧道施工、第五章土質隧道施工、第六章豎井、第七章沉埋管隧道等 5 章，均針對隧道之施工技術與方法而撰寫。
- C. 隧道工程(榮民工程事業管理處，1990)：分為上下二冊，其中現代隧道施工技術在台灣地區之應用、隧道工法之演進與展望、隧道施工機具及設備、隧道施工之通風、隧道之排水系統、隧道開炸之施工探討、超挖控制之爆破技術、隧道突發事件及對策、隧道施工的湧水對策、施工進度表於隧道工程之製作與應用、隧道施工之品質控制等章節均與隧道工程之施工息息相關。

- D. 公路隧道設計、施工—半剛性支撐工法(公路局第二區工程處，1993)：由 張嘉德先生編著，其中第4章施工內容包括開炸、機械挖掘、噴凝土施工、岩栓施工、鋼支保組裝、襯砌施工等，第5章施工中之現象與對策、第6章計測等，剖具參考價值。
- E. 營建自動化 推廣手冊叢書(內政部營建署，1997~2000)：內政部營建署為推廣隧道工程之營建自動化，委請財團法人台灣營建研究院召集國內產官學界有關隧道工程方面之專家、學者，共同編撰一系列叢書，包括隧道監測自動化系統、隧道工程全能作業班、台灣隧道施工技術之發展及其成效、隧道施工地質探查技術、隧道施工湧水處理技術(上、下冊)、隧道氣爆處理技術等共七冊，亦十分具有實用價值。
- F. 隧道工程實務(國立台灣科技大學營建工程系，1998)：由台科大營建系 陳志南教授主編，其內容主要係將「隧道工程施工技術研習班」與「隧道工程實務人才培訓班」之教材彙編而成，其中隧道施工技術、隧道施工管理、隧道工程災變處理實務、隧道工程施工與管理、隧道鑽炸實務等章節內容與隧道施工息息相關。
- G. 隧道施工技術、品管與案例彙編(中華民國隧道協會，2009)：由 劉弘祥先生主編，內容分為第一篇山岳隧道鑽炸法、第二篇山岳隧道TBM、第三篇軟土潛盾隧道，而每篇又分為四個章節，第一章為探討各種工法之施工技術，第二章則詳列施工品質管理流程與所需表格，第三、四章則各舉二實際案例詳加說明。

## 第三章 處置坑道與一般地下坑道設計目標、對於坑道穩定與服務功能需求異同分析

處置坑道設施主要以工程、天然雙重障壁概念封存放射性廢棄處置物，在考量的服務功能與使用年限內不致使廢棄物流出，而造成環境破壞以至影響國人健康，故設計目標上，對於坑道長期穩定的評估與安全性與一般坑道差異甚大，在設計的條件上所需考慮的因素亦較一般坑道多元且嚴謹。本計畫整理處置坑道與一般坑道分別在設計目標、坑道穩定需求等考量下之調查準則、流程項目、方法與需求，進而比較處置坑道與一般地下坑道調查設計項目之異同分析，供評估處置坑道設計應考量之場址描述特性參數選取之準則。

### 3.1 一般坑道

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

而圖 3.1-1 則為各階段工址調查之流程、內容與方法，其主要調查方法如表 3.1-2 所示，調查項目則詳見表 3.1-1，表 3.1-4 為主要室內試驗項目與方法，另有關水文地質調查之目的與內容可參考表 3.1-5，表 3.1-6 則為建議隧道周圍環境之調查項目。另外，本研究亦彙整國內外一般場址特性調查的規範或研究成果，如表 3.1-7 所示。

表 3.1-1 山岳隧道工址調查目的、內容與範圍 (日本土木學會, 1996)

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

表 3.1-2 主要地質調查方法(日本土木學會,1996)

調查方法	由調查可得知的項目	調查結果在規劃、設計上之利用	調查之存疑項目	
資料調查	計畫地區的地形、地質、水文、災害歷史、施工性等的概要	1. 在候補路線的選定階段,掌握應避開的地形、地質及水文上的存疑項目及存疑地區的概要。 2. 抽取地表勘查及其後在詳查實地加確認的存疑項目。	1. 因地區而異,有的地區有缺資料的情形。 2. 通常圖說類的精度較低。 3. 圖說類的表示未必與調查目的一致。	
空照圖判讀	1. 表層地質,尤其滑坡、崩塌地、虛錐堆積物等,隧道河口附近之不確定地形、地質。 2. 地質構造,尤其斷層、裂縫等弱面。 3. 人工改變前的表層地質。		1. 計畫地區內雖然能夠以均一精度做出調查,但因有誤判的可能,故應在地表勘查時加以確認。 2. 在各勘查階段應在施行判讀,藉以提高精度。	
地表地質勘查	1. 虛錐、滑坡、崩塌地等之表層地質的分布、性質形態及穩定性。 2. 基盤地質的分布、性質形態 3. 地質構造(褶皺、斷層等)之分布、性質形態。	1. 綜合各種調查、試驗結果,編成地質平面圖、斷面圖等,俾明沿線組成地質的分布、性質形態等。 2. 有關沿線組成地質的安全性、施工性之定性評估	1. 由勘查而編成的地質圖類係一種解釋圖,應在其後的調查加以驗證。 2. 受所用地形圖精度的左右甚大。	
物理探查	彈性波探查 (折射波法)	1. 洞口附近、小覆蓋區間之未固結堆積物、風化層厚度、性質狀態的掌握。 2. 開挖後基岩的狀態(硬度、風化變質、龜裂狀態等)的掌握。 3. 斷層、破碎帶、軟弱層的位置、規模、狀態或連續性的掌握。 4. 天然地盤分類的探討	1. 夾有低速度層時,分析不正確。 2. 結果始終為速度分布;地質分布、風化變質之程度、龜裂發達程度等的評估,應與其他調查結果一併做綜合性評估。	
	電氣探查 (比電阻垂直探查法,比電阻二維探查法)	地盤比電阻值及比電阻值得斷層分布狀態	1. 調查精度因探查地點的面積、變化甚大。 2. 量測比電阻與地盤的理學強度無直接關係	
鑽孔調查	1. 土砂、岩盤的成層狀態與分布。 2. 斷層、破碎帶及軟弱層的位置、規模、性質形態或連續性。 3. 岩時的種類,風化或變質,裂縫、節理等之性質形態。 4. 有無地下水,湧水壓與其水量。	1. 直接確認規劃路線沿線的地質,俾明組成地質的分布、性質形態的詳細情況。 2. 依所採岩石的硬度、風化、變質狀況和龜裂情況等,探討地盤分類、開挖工法、支撐襯砌之炸藥使用量。	點的調查,應與地表勘查、物理探查等的各項調查應用。	
孔內試驗、檢測	標準貫入試驗	1. 隧道洞口附近、小覆蓋區間之地盤穩定性的探討。 2. 岩盤或支撐層深度的掌握。	1. 近年來,在軟岩地盤中的應用例雖有增加,但通常不能適用於岩盤或礫岩層。 2. N值50以上之硬地盤,不能做仔細的判斷。	
	孔內水平載重試驗	地盤之變形係數及彈性係數等。	地盤之變形分析	
	滲水試驗	地盤的水理特性(滲水係數,由試驗方法求得之滲水量係數之蓄水係數)	1. 含水層的突然湧水和恆常湧水的預測、評估。 2. 未固結地盤中間挖工作面自立性的評估。	1. 量測值為概略值,因就數量級(order)加以評估。 2. 應依地盤條件選定試驗方法。
	速度檢測 PS檢測	地盤之彈性波波速度的垂直分布	1. 由速度直接推估岩盤、土砂的界面或岩盤的風化、變質及裂縫之多寡。 2. 掌握以彈性波探查未能獲知的低速度層。	1. 無地下水時,有時(使用浮游型受震器時)不能量測。 2. 在地下水水面下,有時不能量測低速度層。
	電氣檢測	鄰近孔壁部分之是比電阻值 $\rho_a(\Omega \cdot m)$	1. 依據比電阻值掌握地質分布。 2. 掌握含水層的地下水蘊藏狀況。	1. 限於在地下水水面以下量測, 2. 裝有套管(casing)區間不能量測。
	孔內電視 (borehole television)	1. 地層的成層狀況,斷層、裂縫的規模、性質形態、走向傾斜。 2. 湧水狀況。	1. 根據龜裂狀況、走向、傾斜,探討開挖工作面的穩定性。 2. 探討湧水處的性質形態。	應將孔內充分洗淨
室內試驗	1. 組成岩石之物理、力學特性:單位重量、彈性波波速度、抗壓強度等。 2. 組成岩石之礦物化學特性:黏土礦物含量、消散(slaking)特性等。 3. 組成土質之物理、力學特性:顆粒組成、含水比、抗壓強度、稠度(consistency)等。	1. 掌握地盤彈性波波速度、裂縫等所引起之岩盤的劣化程度。 2. 根據抗壓強度掌握岩盤的力學特性。 3. 膨脹性地盤的預測評估 4. 探討在隧道洞口附近,小覆蓋地盤未固結堆積物的穩定性。 5. 探討未固結地盤開挖工作面的自立性。	1. 對中硬岩、硬岩,因以無裂縫的試體試驗,故試驗值不能代表地盤的物理性質。 2. 軟岩試驗因含水比的不同,試驗結果有時會有大不相同的情形。 3. 力學試驗易受採取試體的擾亂影響。	

表 3.1-3 地質調查項目與方法 (日本土木學會, 1996)

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

表中符號： (地盤條件)

- 應掌握
- △ 有時應掌握

(調查方法)

- 有效
- △ 有時有效

註：室內試驗詳見解說表2.4所示。

表 3.1-4 主要室內試驗項目與方法 (日本土木學會, 1996)

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

○：經常施行者    △：有時施行者



表 3.1-5 水文地質調查目的與內容 (日本土木學會, 1996)

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

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

表 3.1-6 隧道周圍環境調查項目 (日本土木學會, 1996)

對象	調查項目	調查事項	留意點
施 工 前	地形、地質、地盤狀況	地形的狀況與成因、層序、層相、地質構造、地層的時代區分、層厚、壓縮性、透水性	連續性、斷層的有無
	地下水狀況	含水層的分佈與透水性、各含水層的地下水壓與水質及經年變化、地下水的流向與流速、湧泉的分佈與湧水量、地下水的補注狀況	重視事前調查、充分進行水井調查等
	地盤下陷	事業對象區域的年間下陷量與累積下陷量、下陷的範圍、層別下陷量與下陷速度、下陷對建物等的影響	過去施工案例的調查
施 工 中	地盤及結構物的狀態變化	建物、建造物狀態 (結構形式、健全度、用途、位置等)、地形 (地面狀態、不穩定地形、地盤的物理性質等)、土地利用狀況 (用途、使用狀況等)、地下水狀況 (含水比、地下水位等)、有可能發生狀態變化的結構物之鄰近結構物	調查施工前的狀態, 對於覆蓋小的區間、滑坡及斷層處應注意調查
	污濁水	排水狀態、流量及水質、排水路徑、水路狀態、管道末端河川狀態 (流量、水質、利用狀態等)	調查法令等的規定狀況、污濁水的發生原因、仔細掌握排放前的狀態、影響的程度
	交通障礙	搬運路的狀況 (結構、交通量、堵塞狀況、道路管理者、道路周邊的環境等)	交通尖峰時, 不能錯車處或退避處等
竣 工 後	減水、缺水	水利用狀況 (用途、使用量)、地下水位、水質 (水溫、濁度、含溶成分、臭氣、色等)、水源狀況 (種類、供應量、供應路徑、變動等)、有可能發生缺水的鄰近工程	特別注意含水層及不透水層 地下水位的變動測定應在開工前調查
	噪音及振動	環境噪音、環境振動 地形、地質 (覆蓋、地盤的物理性質) 土地利用狀況 (用途、受噪音及振動影響之房屋或設施的分佈)	特別注意城市區近旁的硬岩地盤 注意調查隧道洞口及覆蓋小的區間
	礦物污染、重金屬	湧水之 pH、電氣傳導度、水質分析、含有量試驗、溶質試驗 ( $H_2O$ , $H_2O_2$ )	留意礦化帶、礦床 探討礦質、湧水處理
	空氣污染	空氣污染物質 (濃度分佈、特別是 $CO$ , $NO_2$ ) 氣象狀況	注意隧道洞口及通風塔周邊

表 3.1-7 一般場址特性調查的規範或研究成果

規範或研究成果	
國外	<ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 日本土木學會，軟岩調查・設計・施工的基本與事例，1984。</li> <li>(2) 日本土木學會，軟岩的調查・試驗的指針(案)，1991。</li> <li>(3) 日本土木學會，隧道在調查計測的評價與利用，1987。</li> <li>(4) 日本土木學會，隧道的地質調查與岩盤計測，1983。</li> <li>(5) 日本土木學會，隧道標準示方書 山岳工法・同解說，2006。</li> <li>(6) Bieniawski, Z. T., Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A. A.</li> <li>(7) Balkema Publishers, Rotterdam, 1984. Hoek, E. and Brown, E. T., Underground Excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1982.</li> <li>(8) Hoek, E., Rock Engineering, Evert Hoek Consulting Engineer Inc., Canada, 2000.</li> <li>(9) U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations, Washington, 1995.</li> <li>(10) U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock, Washington, 1997.</li> <li>(11) U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design Geotechnical Investigations, Washington, 2001.</li> <li>(12) British Standards Institution, Code of practice for site investigations (BS 5930), 1999.</li> </ol>
國內	<ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 工址地盤調查準則(內政部建築研究所，1993)</li> <li>(2) 大地工程調查作業準則(交通部台灣區國道新建工程局，1999)</li> <li>(3) 隧道工程設計準則與解說(中國土木水利工程學會，1999)</li> <li>(4) 建築物基礎構造設計規範(內政部營建署，2001)</li> <li>(5) 台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立(行政院公共工程委員會，2003)</li> <li>(6) 初等工程地質學大綱(洪如江，2007)</li> </ol>

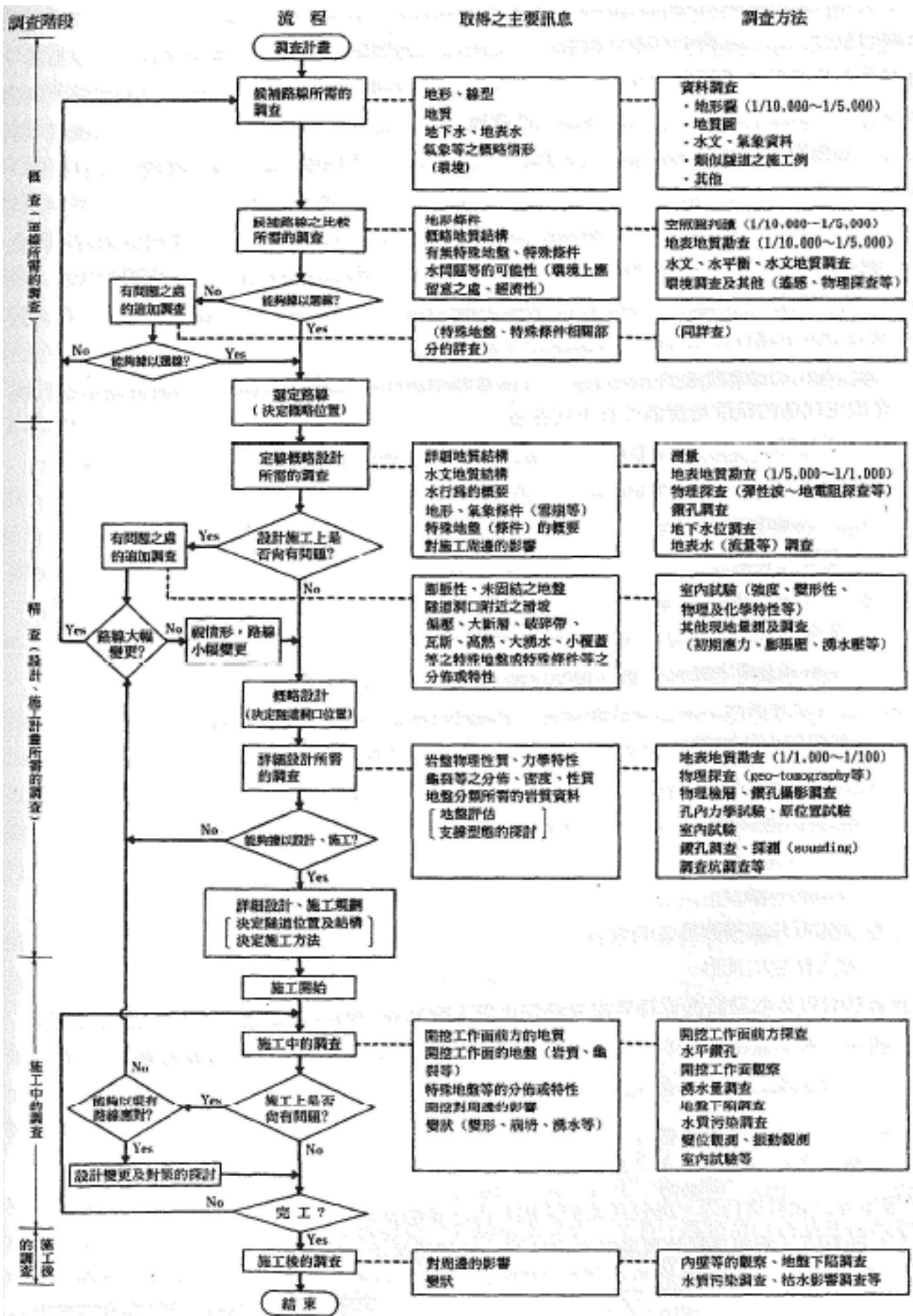


圖 3.1-1 山岳隧道各階段工址調查流程圖 (日本土木學會, 1996)

## 3.2 處置坑道

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

### 3.2.1 場址特性

根據國際原子能總署(IAEA)與美國核能管制委員會(NRC)於 1991 至 2001 年間頒布之相關文件，包括準則、導則與報告等，綜整「場址特性」含括之項目如表 3.2-1，現就各文件內容整理說明如后：

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

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

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

1. 一般 (General)。
2. 地質 (Geology)。
3. 水文地質 (Hydrogeology)。
4. 地球化學 (Geochemistry)。

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

3. 地質與地震學 (含場址地質特性調查、地震調查)。
4. 水文 (含地表水文、地下水特性調查)。
5. 土工特性。
6. 地球化學特性。
7. 天然資源 (地質資源、水資源)。
8. 生物特性。
9. 運轉前環境監測。

表 3.2-1 場址特性項目

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

### 3.2.2 場址調查規範與成果

目前國外有關處置場場址特性調查的規範或研究成果以國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)頒布之文件為首要考量，其次則為美國核能管制委員會(U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC)、芬蘭輻射與核能安全局 (STUK)、澳洲國家健康與醫藥研究委員會 (National Health and Medical Research Council, NHMRC)、中國國家環境保護總局等之規範、技術資料或研究成果可供本案進一步探討，以制定適用於國內場址特性、設計條件與建造環境之審查導則，相關國家制定之規範如表 3.2-2 所示。

表 3.2-2 處置場場址特性調查規範

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



### 3.2.3 場址調查項目

因國內並無處置場址調查規範可供查詢，故相關資料係參考國際原子能總署(IAEA)等國外之研究文獻與報告整理彙整如后。

#### A. 處置場址調查項目

1. 國際原子能總署 (IAEA) 於 1984 年發表「Site Investigations, Design, Construction, Operation, Shutdown and Surveillance of Repositories for Low- and Intermediate- Level Radioactive Wastes in Rock Cavities」之報告，報告編號為 Safety Series No. 62, 1984，說明場址調查之項目、內容與需取得之參數等。其中，場址調查之項目可概分五項，如表 3.2-3 所示：

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

表 3.2-4 則為一般空氣、地表與地下調查技術，而有關水文地質調查之項目與技術詳見表 3.2-5，表 3.2-6 則舉例說明大地、物理與化學方面所需之參數與量測技術。

2. 美國核能管制委員會 (NRC) 於 1982 年發表「Tests for Evaluating Sites for Disposal of Low-Level Radioactive Waste」之報告，報告編號為 NUREG/CR-3038, 1982，亦列表說明低放射性廢棄物處置場之試驗項目、參數與相關規範。表 3.2-7 為低放射性廢棄物處置場場址特性所需參數。

3. 西元 1979 年，世界各國為瞭解放射性廢棄物處置場之可行性，並進一步探討需考量之場址特性、地下水流動模式與溶質之傳輸、工程障壁設計等，而建置一國際性計畫—Stripa，其第三階段之流程與項目如圖 3.2-1 所示，表 3.2-8 則為第三階段之試驗內容(Fairhurst et al., 1993)，其中技術研究小組分為：

- 一、工程障壁。
- 二、地質。
- 三、地球物理。

四、地球化學。

五、水文地質。

六、地下水流動之數值模擬。

七、岩石力學。

八、溶質傳輸。

4. 韓國政府為確保高放射性廢棄物處置場之可行性與安全性，於 2003 年於 Kaeri 地區設置一地下研究試驗室，其主要研究項目可分為下列五項，詳細研究內容詳見表表 3.2-9。(Kwon et al., 2006)

一、岩石力學。

二、地質。

三、工程障壁系統。

四、流體傳輸。

五、系統設計。

經整理處置坑道與一般坑道於場址特性項目要求及調查規範，顯現處置坑道因時間尺度較一般坑道尺度長，對場址特性掌握要求更高，其場址特性調查項目更嚴謹，比較處置坑道與一般坑道調查項目之差異，除考量與一般坑道調查項目相同的一般項目、地質項目、水文地質項目與構造地質項目等外，進一步考量上述項目於時間尺度上變異對處置設施之影響，本章歸納處置坑道較一般坑道增加之場址特性調查項目如后。

1. 地質演化過程(Geomorphological processes)：調查項目包含風化、侵蝕、邊坡滑動等；
2. 構造地質與地震(Tectonics and seismicity)：近期斷層活動、與地震震波造成之影響；
3. 水-力-熱-化耦合作用(Hydrologic-Mechanical-Chemical-Thermal Coupled processes)：

探討水力、力學、熱力學、化學等作用在耦合行為下對處置設施的反應。

處置坑道因嚴謹的場址特性調查項目，對場址的特性掌握高於一般坑道工程，除增加開挖及營運階段安全性之外，對於影響處置設施長期穩定性之項目亦列入考量，有助提高處置設施整體的長期穩定性，但各關鍵項目調查中影響因素與場址特性描述參數，仍尚未有具體的結論，因此針對關鍵項目影響因素與描述參數之深入探討，為坑道處置設施長期穩定性評估之重要課題。

表 3.2-3 場址特性調查之項目與技術 (IAEA, 1984)

---

**1.Geological setting**

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

**2.Hydrogeology and hydrology**

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

**3.Tectonics**

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

---

#### 4. Rock mechanics properties

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

#### 5. Geomorphological processes

Subjects	Weathering Erosion Landslides Sedimentation
Techniques	Remote sensing Geological field mapping

表 3.2-4 一般空氣、地表與地下調查技術 (IAEA, 1984)

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

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

表 3.2-5 水文地質調查之項目與技術 (IAEA, 1984)

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

表 3.2-6 大地、物理與化學之參數與量測技術 (IAEA, 1984)

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

表 3.2-7 低放射性廢棄物處置場場址特性之參數 (NUREG, 1982)

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

表 3.2-8 Stripa 計畫第三階段之試驗內容 (Fairhurst et al., 1993)

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

表 3.2-9 韓國地下研究試驗室之研究項目與內容 (Kwon et al., 2006)

---

R&D items

---

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



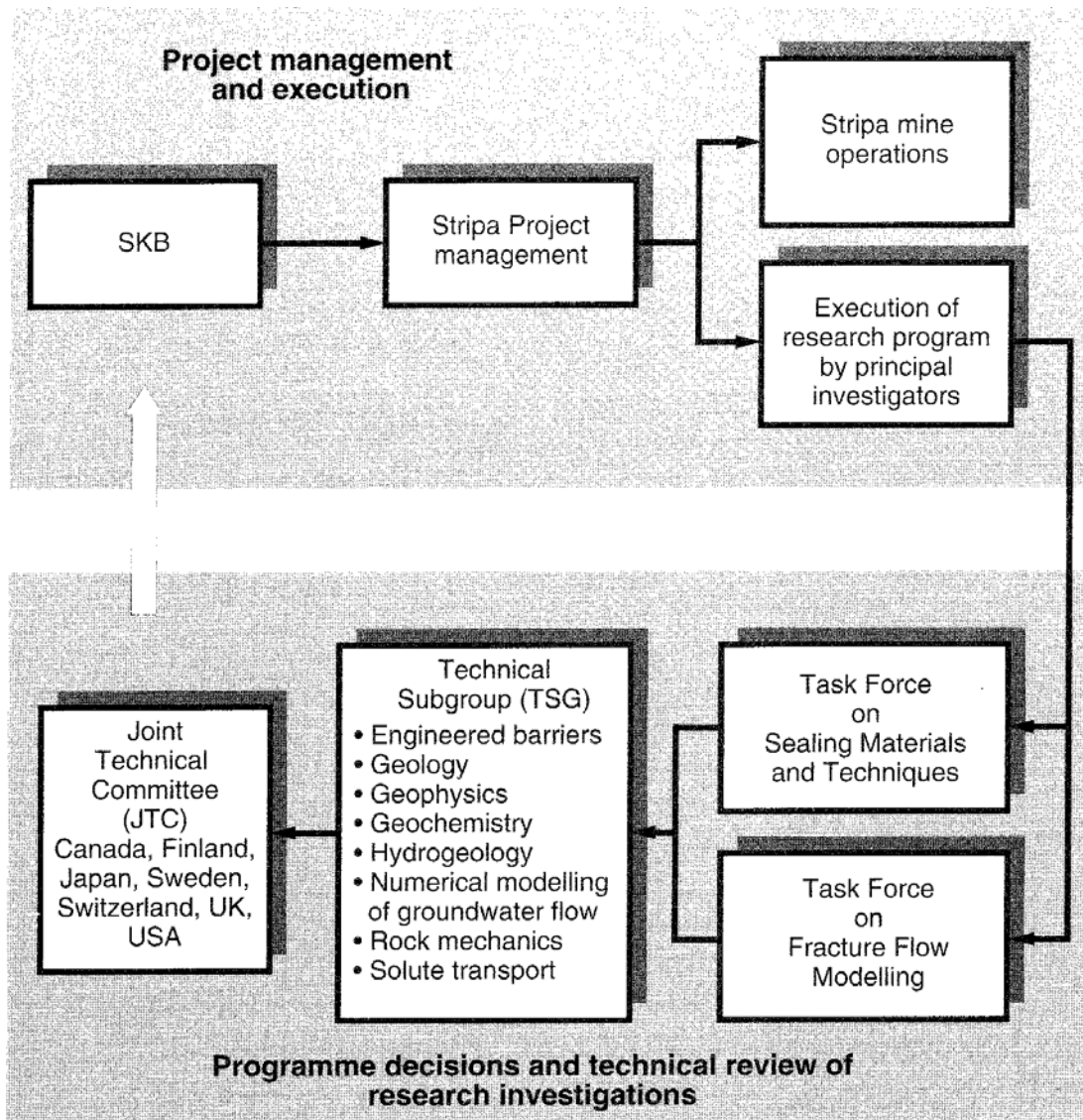


圖 3.2-1 Stripa 計畫第三階段之流程與項目 (Fairhurst et al., 1993)

## 第四章 國內外坑道結構穩定與服務功能異常現象影響因素探討

就坑道結構的建置流程而言，開挖期間圍岩與一次支撐即已達成力平衡狀態，圍岩變形穩定或趨於緩和後才設置的二次襯砌，基本上為美觀坑道結構與加強防護之設計，受力大小理論上應遠小於襯砌材料之強度。然國內外營運中隧道檢測與維護經驗顯示，坑道襯砌表面常發現裂縫、滲水、龜裂等異狀，顯示坑道建造完成後並非全然穩定。因應處置坑道於穩定性與使用年限之要求，本研究廣泛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，據以彙整坑道襯砌材料老化、劣化以及滲漏水等異常現象，提供後續探討長期穩定影響因素之參考。

### 4.1 國內外相關研究

日本土木學會於 2002 年出版之「山岳隧道覆工的現狀與對策」一書中，將隧道異狀依發生(出現)位置分為：(1)襯砌；(2)路面(路盤)；(3)洞口三大項，而異狀種類則有變形、裂縫、剝落、漏水等，詳見表 4.1-1。

而次年(2003 年)針對全國鐵路、公路及水利隧道，以問卷調查方式調查隧道異狀之種類，統計結果顯示：鐵路(JR)隧道以裂縫及接縫開裂最多，其次則依漏水、表面脫落、剝落、接縫錯位、冰柱、側冰(icicle onside wall)的順序排列；而公路隧道則以裂縫最多，其次則按剝離、施工縫裂開、石灰等的析出、路面變形、塊狀掉落、擠出、邊溝變形的順序排列，詳見圖 4.1-1。

隧道的變形現象有很多不同型式，不僅有在襯砌出現的裂縫、變形及漏水等現象，而且亦會在路基部分與周邊地盤出現變形。若將該等現象分別按發生變形的部位加以整理，則如圖 4.1-2 所示(日本土木學會，2003)。

此外，就隧道的異狀現象(圖 4.1-3)，主要是對於襯砌及軀體的變形、裂縫、剝落、漏水、或是使用金屬材料所構築時，發生腐蝕現象等狀況為代表。隧道會發生各種不同的異狀，這些異狀現象也會因為山岳隧道與都市隧道而有所不同。就山岳隧道及都市隧道的異狀現象不同的原因，說明如下(日本土木學會，2005)：

- 都市隧道在設計階段會將地層的荷重一併計算，但山岳隧道並不連同地層荷重一起

做計算，這是因為如果增加地層荷重時，山岳隧道會比都市隧道更容易發生異狀。

- 山岳隧道的襯砌大多採用無筋混凝土來施工，都市隧道的襯砌或軀體是以 RC 來做施工，因此，都市隧道比山岳隧道容易發生鋼筋腐蝕及伴隨鋼筋腐蝕所發生的異狀。
- 都市隧道大多在都市的地下等較安定的環境條件下所建設，山岳隧道則是在寒冷地帶或地滑地帶等各種環境條件下所建設，所以山岳隧道比都市隧道更容易發生異狀。

早期國內隧道檢查作業僅公路局依交通部於 1987 年頒布之「公路養護手冊」以及鐵路局依「工務規章」之相關規定執行，惟其皆僅進行例行之巡查與檢查，可謂國內隧道安全檢測的萌芽。而國內真正隧道安全檢測作業主要始於 1993 年原省政府交通處東部鐵路改善工程局，為進行北迴鐵路雙軌化及電氣化工程，必須確認沿線既有隧道是否符合電氣化標準，而針對隧道之滲漏水、裂縫、內淨空不足等現象，委託國內專業顧問公司進行檢測、調查與評估，並提出改善對策與方案。

王泰典等(2007a)與王泰典(2008、2010)以台灣隧道為背景，蒐集整理 1990 年代以來安全檢測作業調查所得的異狀，並納入相關報導中早期隧道的破壞案例指出，採用磚(石)砌、混凝土與鋼筋混凝土等不同的襯砌材料、以及不同構築方式之隧道所發生的異狀形態各不相同。

表 4.1-1 隧道異狀現象分類(日本土木學會，2002)

對象	異狀現象	
襯砌	裂縫	裂縫
		接縫斷裂
		錯位
		續灌接縫的開口
	變形、移動、沈下、側壁傾倒	
	襯砌修補材料的劣化、浮起、剝落	
	漏水、冰柱、側冰、土砂流入、石灰粉等的溶出	
路盤、路面	軌道偏差(鐵路)	
	排水溝的裂縫、變形	
	中央通路的裂縫、變形(鐵道)	
	路面、路肩、檢查走道的隆起或沈下、裂縫、緣石傾倒(道路)	
	噴泥	
洞口	裂縫	
	錯位	
	前傾、下陷、移動	

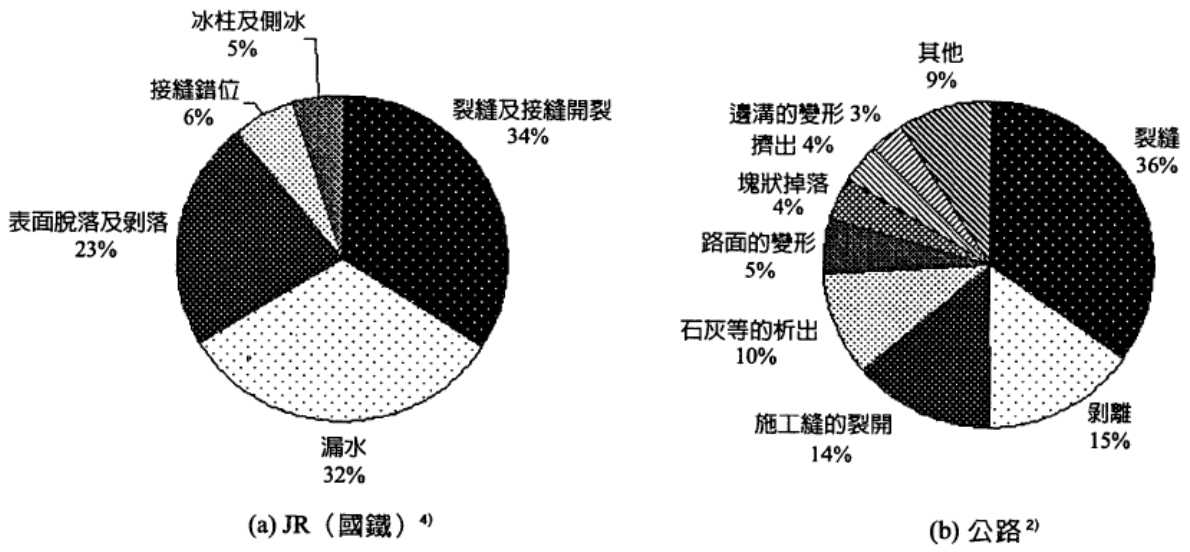


圖 4.1-1 隧道異狀種類比例(日本土木學會，2003)

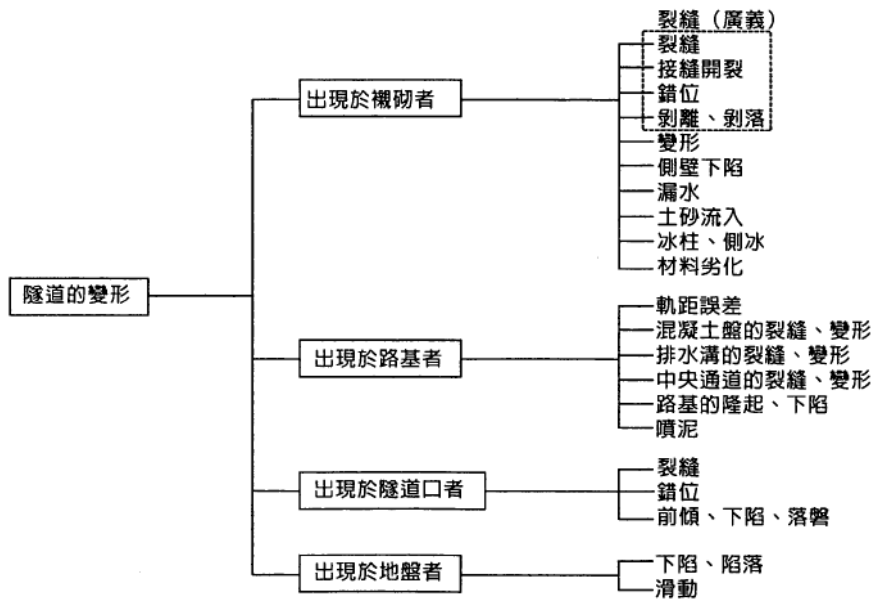


圖 4.1-2 隧道異狀分類圖(日本土木學會，2003)

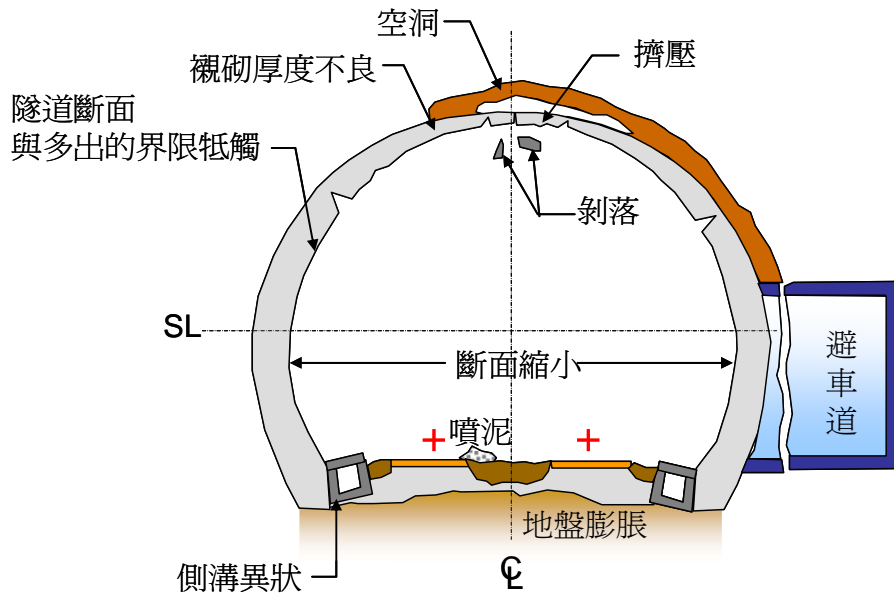


圖 4.1-3 山岳隧道異狀現象模式圖(日本土木學會，2005)

## 4.2 坑道襯砌異狀資料蒐集

本研究擴充王泰典(2010)有關隧道長期穩定影響因素之研究研究成果，共蒐集彙整 52 座隧道(累計長度達 87.994 公里)檢測案例，其中公路隧道 9 座(累計長度 5.466 公里)，鐵路隧道 39 座(累計長度 61.394 公里)，水利隧道 4 座(累計長度 21.134 公里)，詳見表 4.2-1。

表 4.2-1 本研究蒐集彙整隧道檢測案例總表

項次	隧道名稱	長度(m)	功能	建成年代	檢測時間	檢測報告
1	枋野一號隧道	324	鐵路	1992	1994	√
2	枋野二號隧道	180	鐵路	1992	1994	√
3	安朔三號隧道	240	鐵路	1992	1994	√
4	加津林隧道	170	鐵路	1992	1994	√
5	多良一號隧道	520	鐵路	1992	1994	√
6	和仁隧道	2,411	鐵路	1982	1997	√
7	清水隧道	2,106	鐵路	1982	1997	√
8	崇德隧道	2,682	鐵路	1982	1997	√
9	梗枋隧道	250	鐵路	1986	2000	√
10	蘇澳一號隧道	199	鐵路	1982	2001	√
11	蘇澳二號隧道	113	鐵路	1982	2001	√
12	蘇澳三號隧道	206	鐵路	1982	2001	√
13	蘇澳四號隧道	239	鐵路	1982	2001	√
14	永春隧道	4,021	鐵路	1982	2001	√
15	南澳隧道	5,286	鐵路	1982	2001	√
16	三義壹號隧道	7,354	鐵路	1996	2001	√
17	金崙隧道	4,392	鐵路	1992	2007	√
18	多良一號隧道	1,649	鐵路	1992	2007	√
19	大竹二號隧道	1,236	鐵路	1992	2007	√
20	大竹一號隧道	1,452	鐵路	1992	2007	√
21	大鳥隧道	3,652	鐵路	1992	2007	√
22	大武二號隧道	1,181	鐵路	1992	2007	√
23	安朔隧道	5,481	鐵路	1992	2007	√
24	集集第1號隧道	383	鐵路	1925	2009	√
25	集集第2號隧道	804	鐵路	1925	2009	√
26	集集第3號隧道	567	鐵路	1925	2009	√
27	中興隧道	90	鐵路	1960	2009	√
28	集集第4號隧道	141	鐵路	1925	2009	√
29	集集第5號隧道	105	鐵路	1925	2009	√
30	集集第6號隧道	67	鐵路	1925	2009	√
31	枋山一號隧道	300	鐵路	1992	2010	√
32	枋山二號隧道	585	鐵路	1992	2010	√
33	枋山三號隧道	688	鐵路	1992	2010	√
34	枋山四號隧道	156	鐵路	1992	2010	√
35	枋山五號隧道	205	鐵路	1992	2010	√
36	枋野一號隧道	1,809	鐵路	1992	2010	√
37	枋野二號隧道	720	鐵路	1992	2010	√
38	枋野三號隧道	1,360	鐵路	1992	2010	√
39	中央隧道	8,070	鐵路	1992	2010	√

表 4.2-1 本研究蒐集彙整隧道檢測案例總表(續)

項次	隧道名稱	長度(m)	功能	建成年代	檢測時間	檢測報告
40	台八線馬陵隧道	360	公路	N.A.	1997	√
41	149甲線草嶺隧道	505	公路	N.A.	1999	√
42	自強隧道	825×2	公路	1972	2004	√
43	金龍隧道	173×2	公路	1992	2004	√
44	莊敬隧道	210	公路	1972	2004	√
45	懷恩隧道	490+485	公路	1979	2004	√
46	雪霧隧道	375	公路	N.A.	2008	√
47	嘉寶隧道	310	公路	1989	2008	√
48	利稻隧道	735	公路	N.A.	N.A.	N.A.
49	武界隧道	15,130	水利	1934	1997	√
50	桃園大圳第四號隧道	300	水利	1924	2001	√
51	烏山嶺隧道	3,220	水利	1929	2004	√
52	員山子分洪隧道	2,484	水利	2005	2010	√

### 4.3 坑道異狀整理與分類

隧道襯砌損害與異狀的調查起於 1970 年前後，歐洲許多十九世紀建造的交通隧道面臨老朽化的問題，檢修工作因而陸續展開(Janin et al., 1970)，雖有少數報導探討損害之現象，但主要以工程案例個案研究為主(Eraud, 1974; Birkmeyer, 1978)。且歐美地區工程環境之特性係委由顧問公司依據其專業經驗進行檢測及相關修復之建議，並有契約保密相關規定，因此蒐集所得文獻資料多數以報導採用的檢測技術與修補工法為主，少有異狀型態的討論(Russel, 1993; Rogers, 1993; Lukacs, 1997; Chen, 1995; Sherwood, 1995; SANCOT, 1995; Haack et al., 1992; Bickel et al., 1996; ITA-Working Group Maintenance and Repair 1997)。

襯砌異狀可依目視是否可以直接觀察判別，區分為「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 4.3-1 列舉常見的數種典型，其中除圖 4.3-1(i)係以彩色探測攝影機穿過襯砌開張之裂縫攝得背後之孔洞外，其餘皆可自襯砌表面直接觀察判別(王泰典等，2007)。

#### (1) 以襯砌型式分類(王泰典等，2007)

而不同的襯砌型式，目視可識別的異狀亦各不相同，圖 4.3-2 至圖 4.3-4 分別為磚(石)砌、

混凝土以及鋼筋混凝土襯砌常見的異狀。磚砌襯砌常見的異狀包括常見於起拱線上 30~60° 的散狀剝落(圖 4.3-2(a))、起拱線附近的縱向剝落(圖 4.3-2(b))、黏結磚塊的勾縫材料劣化鬆落以及伴隨時磚塊錯移的鼓起現象(圖 4.3-2(c))等。

混凝土襯砌則以各式各樣的裂縫最為常見，其中以頂拱的放射狀裂縫、兩縱向平行裂縫(圖 4.3-3(a))、頂拱中間開裂(圖 4.3-3(b))與起拱線附近斜向平行裂縫(圖 4.3-3(c))等，最易識別。

鋼筋混凝土襯砌表面裂縫一般不若混凝土襯砌明顯，但襯砌錯動或混凝土剝落以至鋼筋外露亦有數個案例，其中鋼筋外露可進一步區分其位置是否為搭接處(圖 4.3-4(b)及(c))，以及外露的鋼筋是否出現腐蝕或挫屈(圖 4.3-4(c))等。

預鑄環片襯砌一般完整性較佳，多數的異狀係環 3-8(圖 4.3-5(c))，環片發現裂縫的案例(圖 4.3-5(e))相當罕見。

## (2) 以襯砌構築方式分類(王泰典等，2007)

不同構築方式隧道襯砌異狀亦不相同。1930 年代以前採疊砌圬工方式構築的襯砌，勾縫材料多為水泥砂漿與石灰黏土，常見劣化鬆落的現象。另疊砌式襯砌剛度低，淨空入侵向內鼓起後，多僅出現磚塊剝落 1/4~1/2 寬度或錯動現象，連續式的裂縫相當罕見。

採模板支撐現場澆置混凝土構築的襯砌可以 1970~80 年代施工的北迴線與南迴線鐵路隧道群為代表，襯砌異狀受混凝土施工連續性影響甚大，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上，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。

採用預鑄混凝土環片配合背填灌漿構築的襯砌，因混凝土品質穩定，襯砌異狀多屬環片因施工碰撞受損，導致接頭處小規模局部破損或滲水現象。



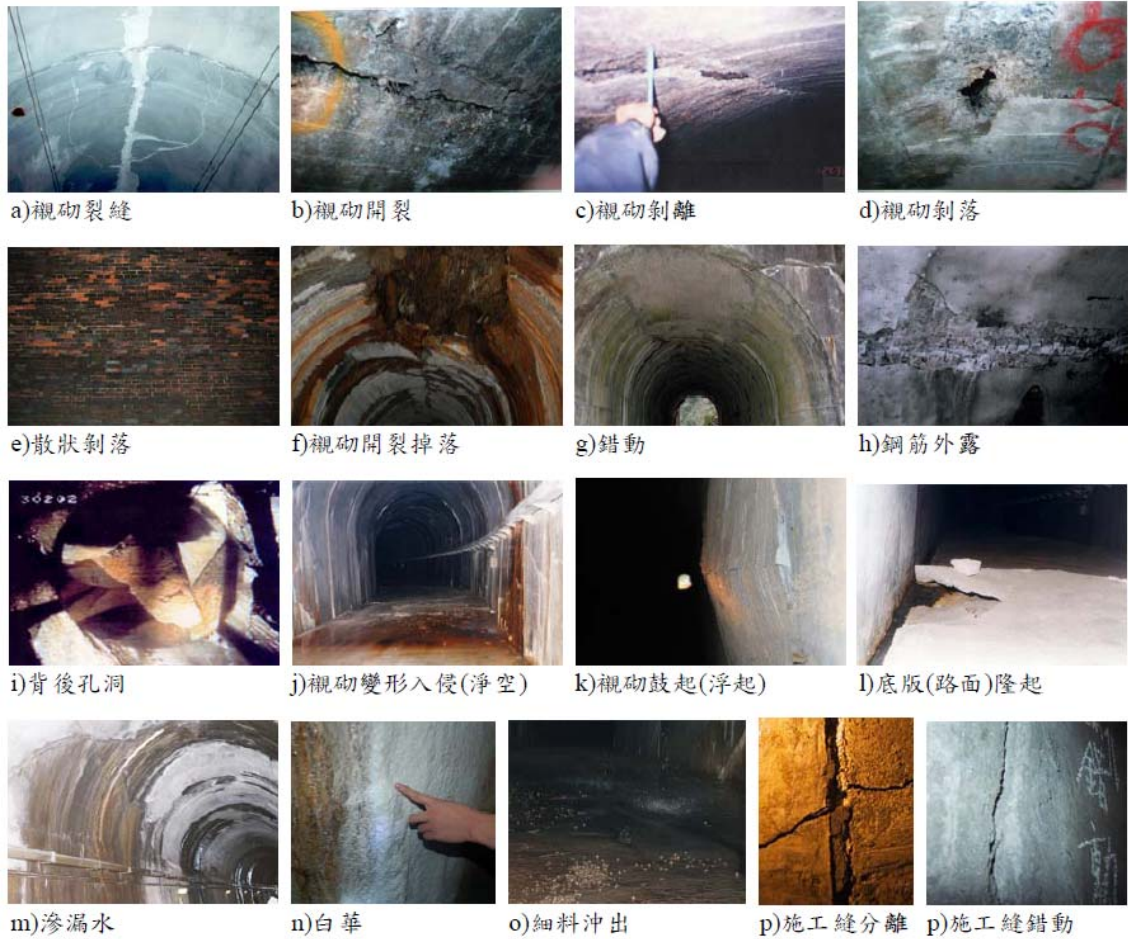


圖 4.3-1 數種典型的目視可識別異狀(王泰典等, 2007)



圖 4.3-2 磚造觀砌常見的目視可識別異狀(王泰典等, 2007)



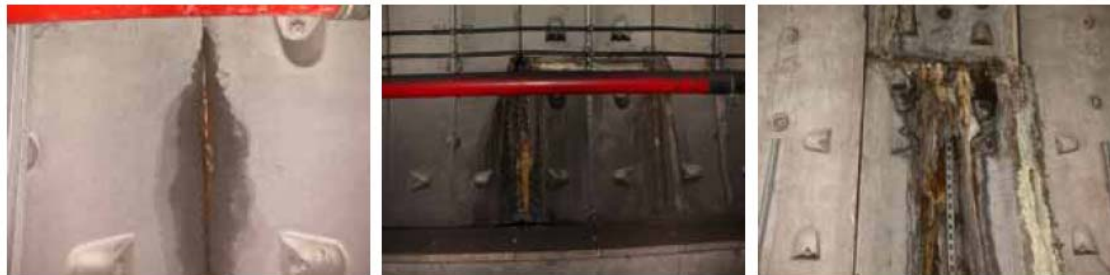
a)頂拱放射狀與起拱線縱向裂縫 b)頂拱中間開裂與左側縱向裂縫 c)起拱線附近平行縫與上方斜裂縫

圖 4.3-3 混凝土襯砌常見的目視可識別異狀(王泰典等，2007)

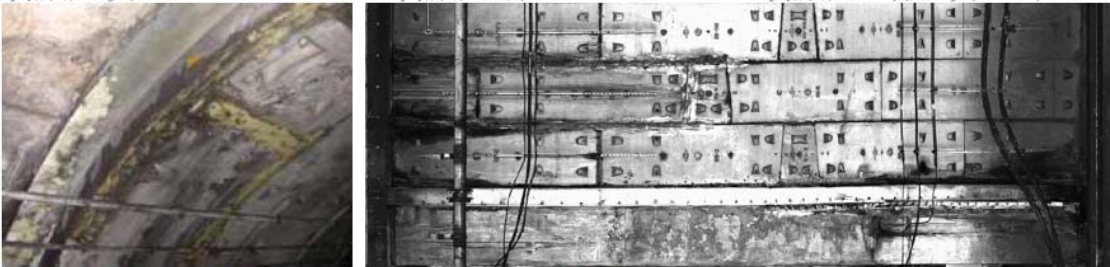


a)起拱線附近開裂錯動 b)鋼筋外露(搭接處) c)鋼筋外露(非搭接處、鋼筋挫屈)

圖 4.3-4 鋼筋混凝土襯砌常見的目視可識別異狀(王泰典等，2007)



a)環片界面滲水 b)環片界面漏水 c)環片界面及螺栓孔滲水、白華



d)修補後環片界面滲水、白華 e)環片界面滲水、環片裂縫

圖 4.3-5 預鑄環片襯砌常見的目視可識別異狀(王泰典，2008)

### (3) 以隧道功能分類

圖 4.3-6 為鐵路隧道典型之異狀種類，依其異狀發生之部位可概分為(李佳翰等，2008)：

(1) 隧道洞口：(a)洞門開裂；(b)洞門前傾；(c)側抱式擋牆開裂；(d)側抱式擋牆位移；(e)排水溝阻塞等異狀。

(2) 襯砌：(a)裂縫或開裂；(b)剝離或剝落；(c)滲漏水；(d)白華；(e)鋼筋銹蝕；(f)變形入侵等異狀。

(3) 避車洞：(a)裂縫；(b)剝落；(c)滲漏水；(d)白華；(e)鋼筋銹蝕等異狀。

(4) 仰拱：(a)隆起；(b)噴泥；(c)積水；(d)軌道變形等異狀。

常見的水工隧道異狀與一般隧道常見的襯砌異狀相同，如襯砌裂縫、開裂、錯動、剝離、鋼筋外露、襯砌變形入侵(淨空)等異狀，皆常見於水工隧道之中。然其異於一般隧道者，水流經年累月地磨損，襯砌混凝土表面常見狀似蜂窩的現象(圖 4.3-7(a))。襯砌若有剝離、錯動現象，加上水流作用，即易導致混凝土剝落，甚至達圍岩可見的情況(圖 4.3-7(b))，此時採內視鏡觀察，通常可見襯砌與周圍岩土的間隙，甚至是襯砌背後在隧道內流水與地下水交互作用造成的孔洞與空洞。水流造成的磨損通常於仰拱最為明顯，可將數十毫米的仰拱磨耗殆盡(圖 4.3-7(c))，有時圍岩壓力較大，仰拱磨損達一定程度後，所剩餘者強度勁度不足，引致局部湧水、湧泥(圖 4.3-7 (d))，甚至是破裂隆起(圖 4.3-7 (e))等現象(尚新民等，2010)。

隧道滲水在水工隧道中相當常見(圖 4.3-7 (f))。若地層為土壤或是軟弱岩石，水工隧道的水流與地下水交互作用可能造成周圍岩土反覆的滲流作用，加速加劇細料的掏刷，滲水夾帶細料甚至砂礫進入隧道內。由於水流運搬了掏刷進入隧道內的細料，因此安全檢測過程並不易發現此一現象，然長期作用後，掏刷範圍岩土強度逐漸喪失，影響範圍持續加大且向上發展，可能引致隧道上方地表下陷(圖 4.3-7 (g))，甚至發生開天窗式的煙囪狀破壞。即便隧道距離邊坡坡趾仍有數十公尺，亦可能由於滲透作用弱化周圍岩土，影響鄰近邊坡的穩定性。邊坡在地震、豪雨襲擊下，即可能失穩滑動並造成隧道裸露襯砌破壞(圖 4.3-7 (h))(尚新民等，2010)。



圖 4.3-6 鐵路隧道異狀類型(李佳翰等，2008)

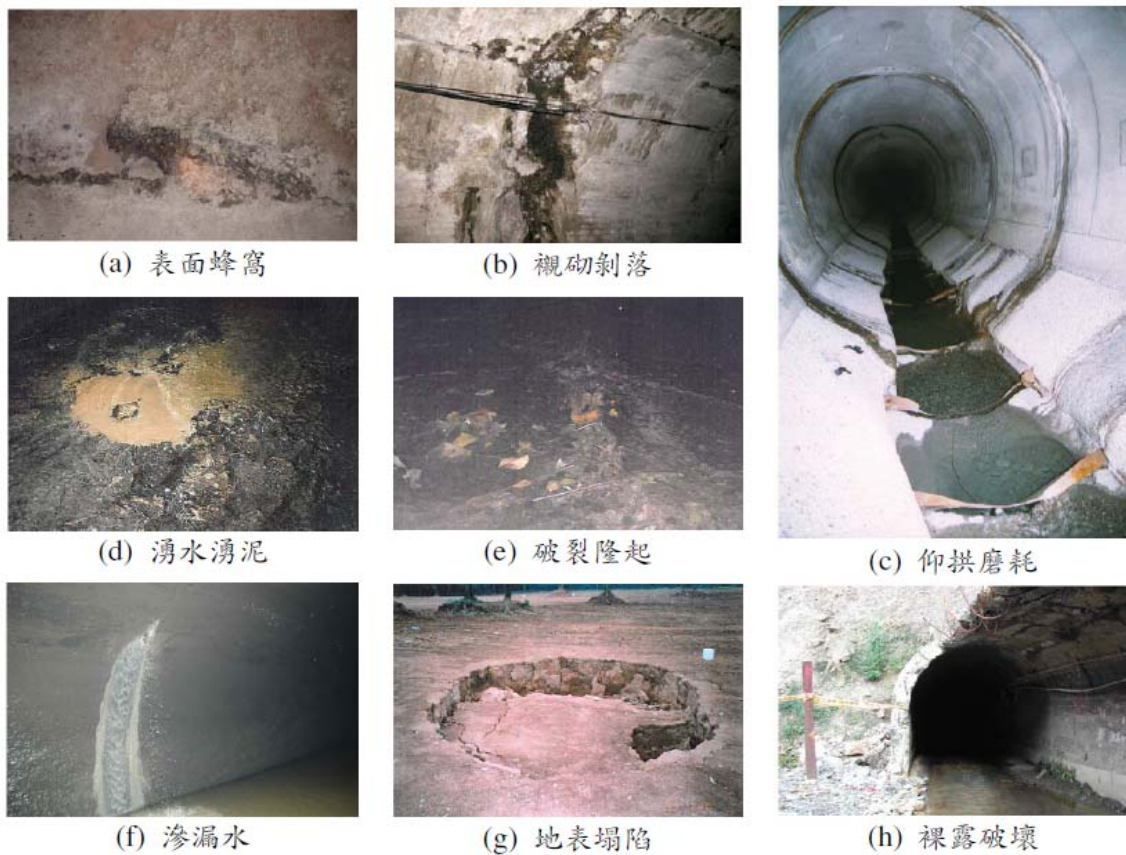


圖 4.3-7 水工隧道異狀種類(尚新民等，2010)

#### 4.4 坑道穩定與服務功能異常現象影響因素探討

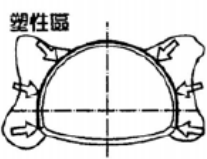
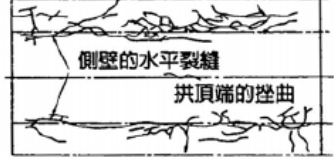
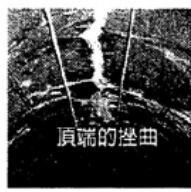
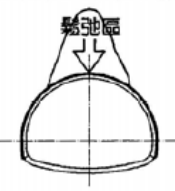
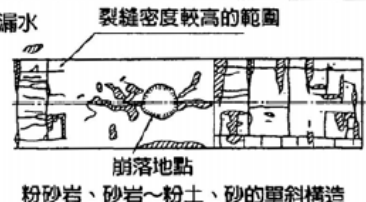

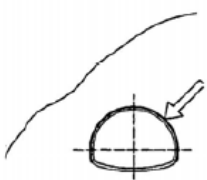
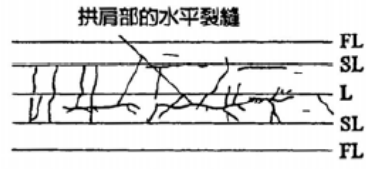
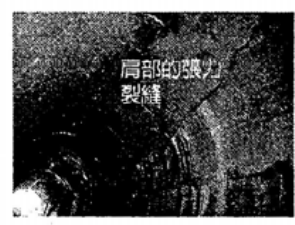
瞭解坑道有那些異狀種類後，其次必須進一步探討產生這些異狀之可能原因為何，以利後續探討影響坑道長期穩定影響因素。本章即歸納整理各項原因所產生之隧道異狀型態，利用這些異狀型態加以比對、判釋，探討坑道襯砌異狀可能的肇因。

##### 4.4.1 外力因素

坑道的異狀原因大致可區分為「外在因素」與「內在因素」兩大類，其中外因又可細分為「外力」與「環境」二大因素；而內因則可細分為「材料」、「施工」與「設計」三大因素。

根據襯砌之受力機制、地形效應與異狀型態，外力因素又可區分為：(1)塑性壓；(2)鬆弛土壓；(3)偏壓三大類，如表 4.4-1 所示。

表 4.4-1 外力因素及其代表性異狀(日本土木學會，2003)

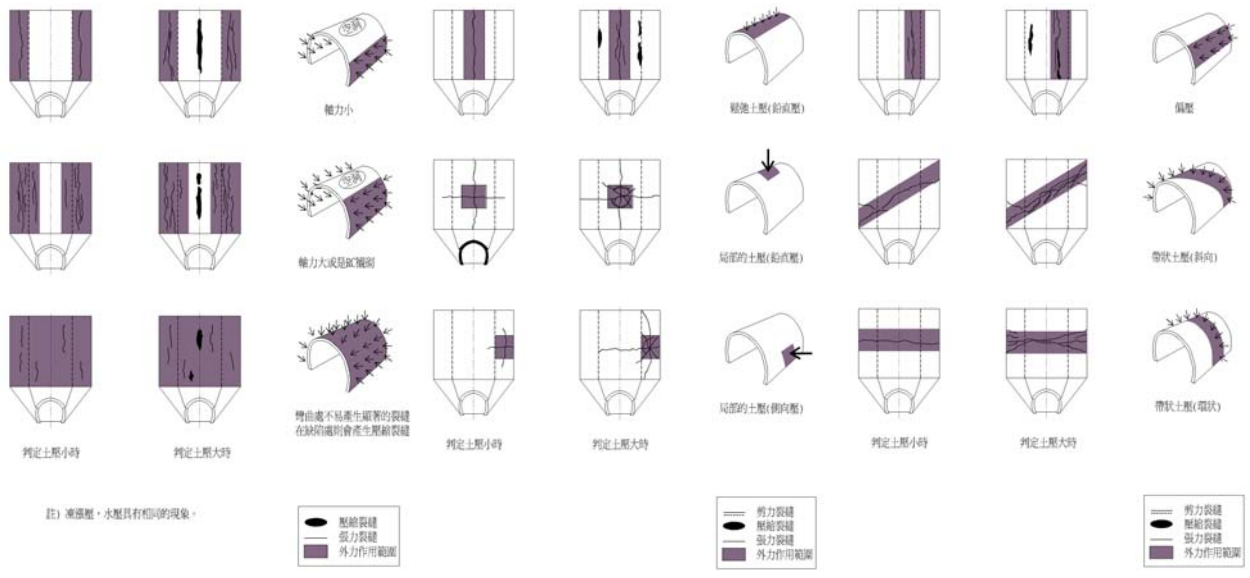
	地壓	代表性的案例圖	案例照片
塑性地壓			
鬆弛土壓		 崩落地點 粉砂岩、砂岩~粉土、砂的單斜構造	
偏壓		 FL SL L SL FL 產生偏壓、邊坡表層向下移動引起的變形之隧道，其變形展開圖之例	

塑性壓係指因隧道開挖而引起隧道週圍岩盤之塑性化，雖已施加外支撐與內襯砌，惟由於圍岩之長期弱化或潛變，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，詳見圖 4.4-2(a)。

鬆弛土壓係由於隧道超挖回填不實、外支撐經年腐蝕或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，如圖 4.4-2(b)所示。

偏壓則主要係因隧道上方地形左右不對稱或由於邊坡滑動、潛移而形成一側地壓遠大於另一側地壓時，此地壓長期作用下使得襯砌肩部產生開口性張力裂縫，詳見圖 4.4-2(c)。

而當隧道襯砌周圍環境不良時，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，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、打設不連續等，皆會使隧道襯砌產生劣化現象，如圖 4.4-3 所示。



(a) 塑性壓 (b) 鬆弛土壓 (c) 偏壓

圖 4.4-2 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)

<p>(a) 周圍地下水反覆凍融</p> <p>(b) 火災、表面加熱</p> <p>(c) 酸與鹽類之化學作用</p> <p>(d) 襯砌內、外面之溫度與濕度差</p> <p>(e) 中性化引致內部鋼筋銹蝕</p> <p>使用環境條件不良</p>	<p>(a) 水泥凝結之水化熱 (厚度大於80cm以上容易發生)</p> <p>(b) 鹼骨材反應</p> <p>(c) 水泥之異常凝結</p> <p>(d) 含泥骨材</p> <p>(e) 劣質風化骨材</p> <p>(f) 混凝土下沈引致開裂</p> <p>材料不佳</p>	<p>(a) 拌合不均勻</p> <p>(b) 拌合時間過長發生初凝</p> <p>(c) 膠結不全</p> <p>(d) 水泥之異常凝結</p> <p>(e) 不連續打設</p> <p>(f) 襯砌下沈(一個基腳下沈)</p> <p>(g) 襯砌下沈(縱向差異沈陷)</p> <p>施工不當</p>
--	---	--

圖 4.4-3 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)

王泰典等(2007)依據隧道與邊坡潛移方向的相對空間關係，邊坡潛移引致隧道異狀之型態，可以分為：(1)邊坡潛移方向垂直於隧道軸向；(2)邊坡潛移方向斜交於隧道軸向；(3)邊坡潛移方向平行於隧道軸向等三種類別加以探討。

而欲診斷隧道異狀是否係邊坡潛移所致前，需先蒐集彙整該隧道之地形、地質、設計、施工、歷年安全檢測與維修補強記錄，再依下列步驟與流程(圖 4.4-4)進行診斷：(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(李佳翰等，2009)。

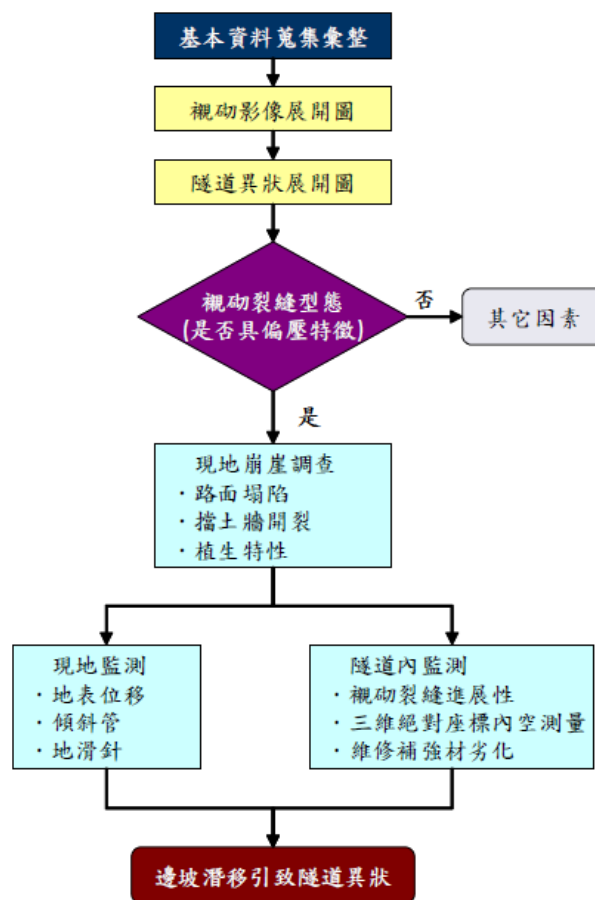


圖 4.4-4 邊坡潛移引致隧道異狀診斷流程圖(李佳翰等，2009)

因此，為確認上述診斷流程之適用性，本研究選擇一案例隧道，進行現地調查、影像嵌接、檢測與監測、異狀判釋以及肇因診斷，詳述如后。

南部某雙車道公路隧道因公路舊線邊坡崩坍頻繁，路線往山側內移改採隧道穿越，於1989年建成。隧道線型呈弧形，自東洞口呈南北走向向西轉為西北走向，西洞口段與邊坡坡面斜



交，交角約為  $45^\circ$ ，岩性以黑色片岩為主，間夾綠色片岩、矽質片岩。西口邊坡為一活躍的大規模崩塌地，隧道完工後約 2 年即發現襯砌出現龜裂，隨即陸續自隧道內鑽設排水孔、並加設鋼線網以及噴凝土等補強措施。

由隧道襯砌影像與異狀展開圖(圖 4.4-5)顯示：襯砌裂縫型態具偏壓特徵，且隧道內檢測結果發現裂縫仍持續發生，尤以距洞口 27 至 108 m 區段最為活躍，其中在距洞口 33 m 及 99 m 處有嚴重錯動，襯砌分離逾 300 mm，洞口側路面下陷亦分別逾 150 及 400 mm，且錯動處襯砌與圍岩分離，狀如襯砌背後存在孔洞。

為進一步釐清隧道之異狀是否係邊坡潛移所致，分別進行(1)遙測影像判釋與(2)現地崩崖調查。據其成果(圖 4.4-6)研判應為邊坡潛移的兩個滑動面所致，如圖 4.4-7 所示。

而 2005~2007 年間地表位移量測結果顯示位移速率平均約 3.3~3.8 mm/月，傾度管監測得知位移速率約 1.4~6.5 mm/月，較 1999~2000 年量測之位移速率增加數倍，進一步證明邊坡持續潛移。

因此，綜合上述成果與兩個滑動面間之裂縫分布，大致可歸納出兩個主要的延伸方向，其一為與邊坡潛移滑動面平行的裂縫，另一為間隔 6 m 出現的環向裂縫，皆位於施工縫位置，研判係邊坡潛移過程襯砌仍具一定程度的完整性，然變形大部份集中在結構較弱的隧道襯砌施工縫位置所致。

另王文禮等人(2000)彙整集集地震引致中部地區多處山岳隧道損害情況，各地區震度與中部地區受損隧道位置分佈之關係，則如圖 4.4-8，震動強度以車籠埔斷層為界，可劃分成斷層錯動區、上盤、下盤及其他地區等三大震區，其中以斷層錯動區所受震動強度為最大，上盤次之，下盤及其他地區則較小，詳細損害情況統計如圖 4.4-9，其中以襯砌龜裂為最多，其次為洞口邊坡坍滑及襯砌剝落；隧道較具代表性之受損型態如圖 4.4-10 所示，包括：(1)襯砌遭斷層剪斷破壞；(2)隧道因邊坡坍滑破壞；(3)襯砌縱向龜裂；(4)襯砌橫向龜裂；(5)襯砌單側斜向龜裂；(6)襯砌環狀斜向龜裂；(7)底版(路面)龜裂或隆起；(8)側壁向內擠壓變形。隧道遭受地震震波作用時，將可能發生縱向變形、斷面壓縮變形、軸向彎矩變形與 Ranking 變形。縱向變形主要是由沿隧道縱軸之 P 波所引致，如圖 4.4-11(a)。若 P 波入射方向與隧道長軸形

成正交，即 P 波沿隧道斷面環向前進時，將造成隧道斷面的壓縮變形，如圖 4.4-11(b)。軸向彎矩變形主要由沿隧道縱軸之 S 波及瑞利波所造成，如圖 4.4-11(c)(d)。當 S 波沿圓形斷面隧道環向前進時，則可能產生橢圓狀變形(Ovaling)，如圖 4.4-11(e)；若是箱型斷面之隧道，則產生 Ranking(角度之變形，如圖 4.4-11(f))。

另曹孟真等人(2012)蒐集台灣中部橫貫公路某隧道資料，探討邊坡失穩造成隧道營運維護之影響。中部橫貫公路通過地質作用旺盛、山嶺重疊且地勢險峻的中央山脈，先天地質條件不佳引致邊坡抗災能力不足，因此通常採用明隧道等工法繞避邊坡經常性災害地區，2009 年 10 月和 2011 年 10 月，該隧道先後遭遇上邊坡崩塌壓毀(圖 4.4-12)，研究結果顯示該地區受邊坡失穩類型中落石與岩屑崩滑兩類影響甚鉅，主要與褶皺與片理發達以及片岩與大理岩界面差異侵蝕作用造成弱帶有關，因而造成隧道結構的破壞。

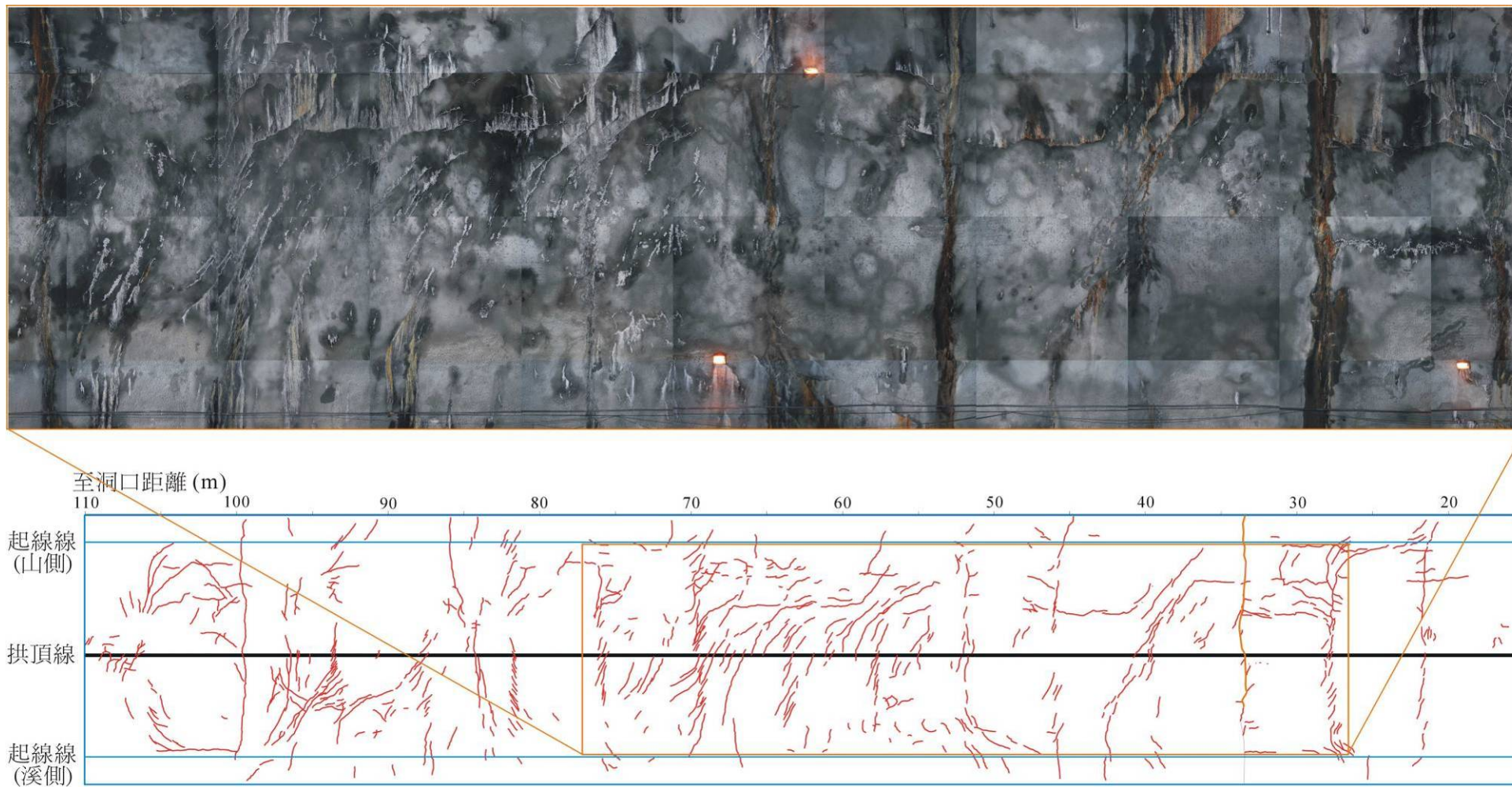


圖 4.4-5 隧道襯砌影像與異狀展開圖(李佳翰等，2009)

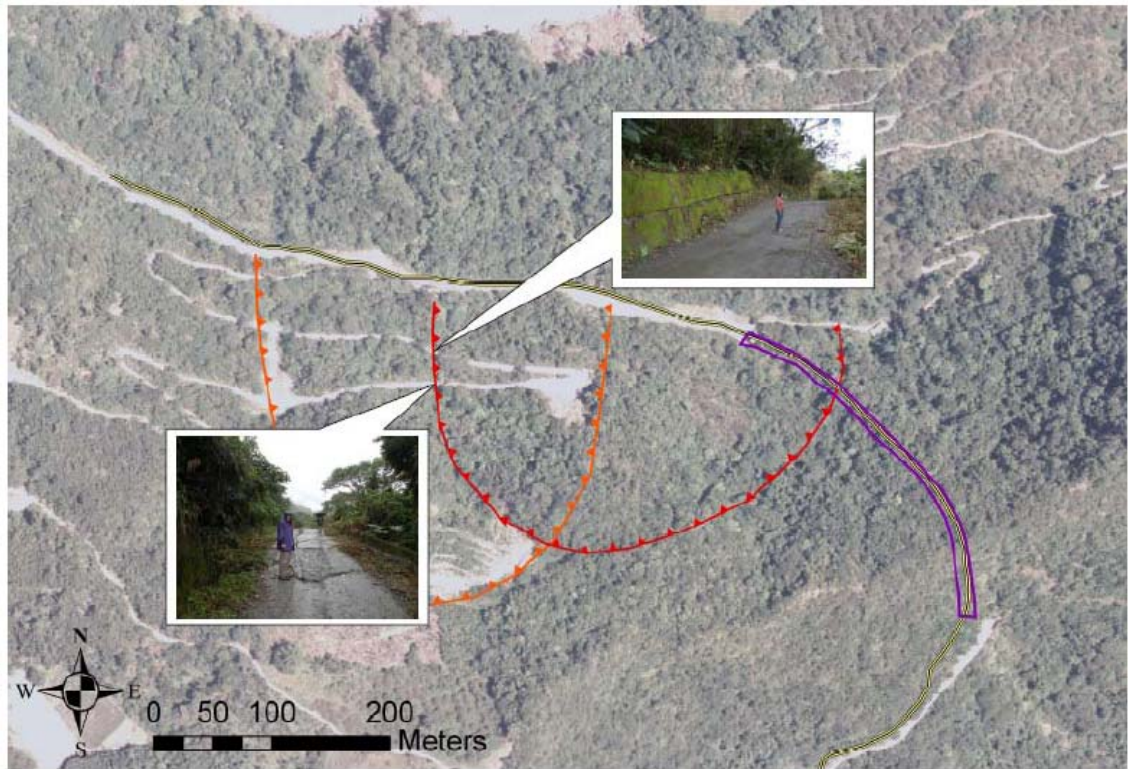


圖 4.4-6 遙測影像判釋與現地崩崖查核(李佳翰等，2009)

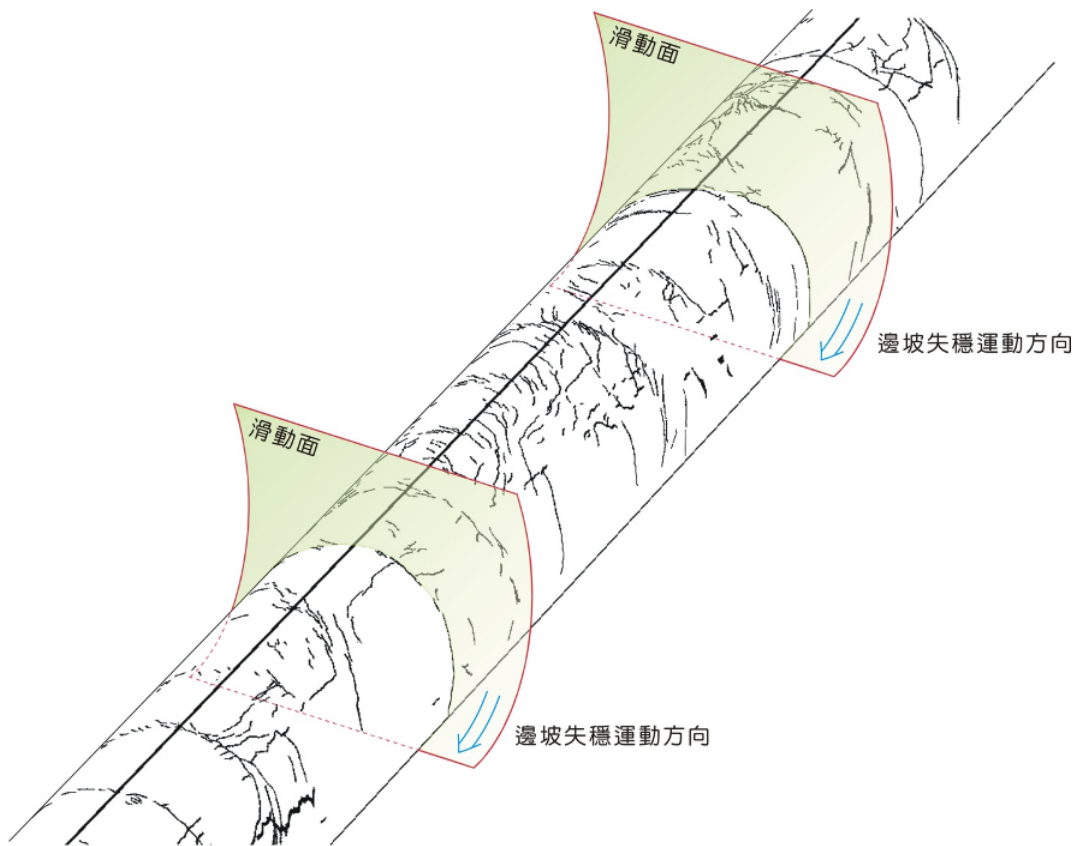


圖 4.4-7 邊坡潛移與隧道相對關係示意圖(李佳翰等，2009)

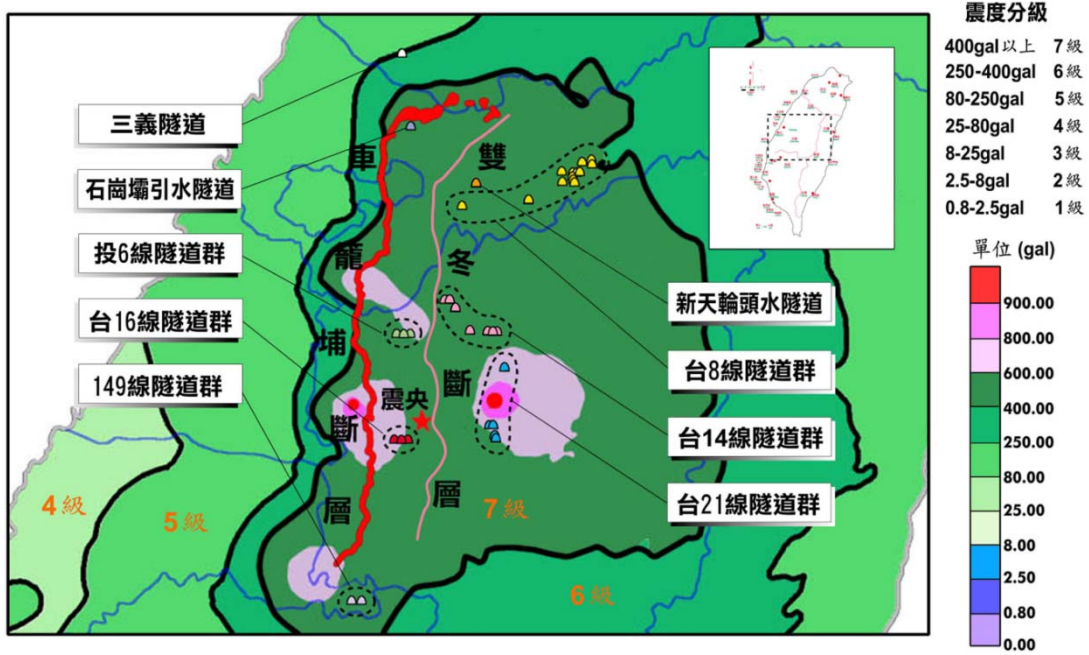


圖 4.4-8 集集大地震台灣各地區震度圖與中部地區受損隧道位置分佈  
(王文禮等人，2000)

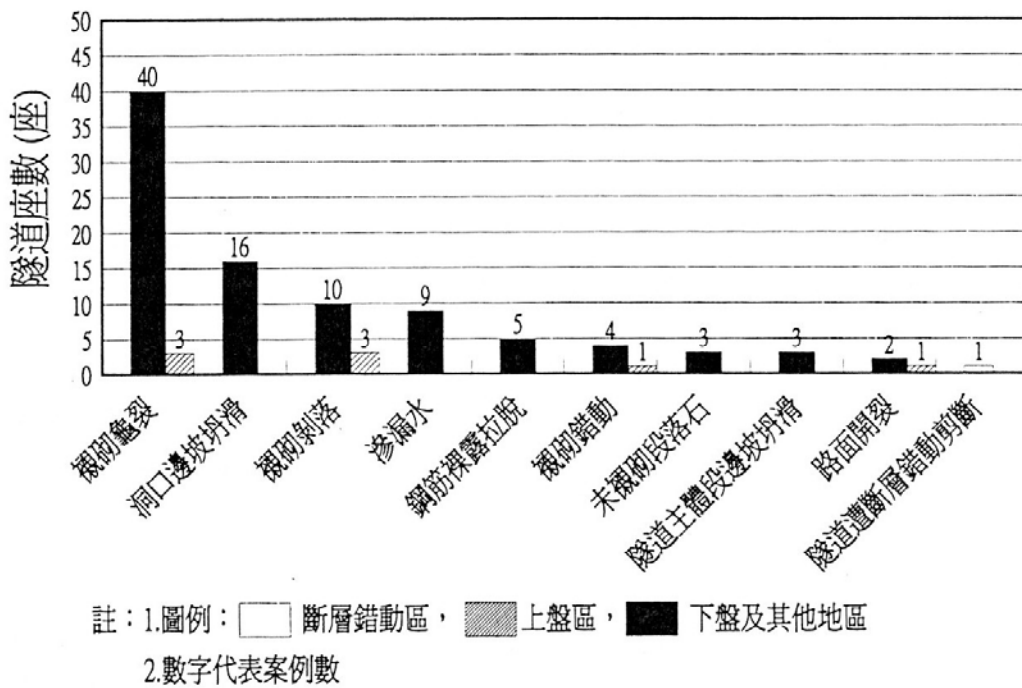


圖 4.4-9 隧道受損情形統計(王文禮等人，2000)

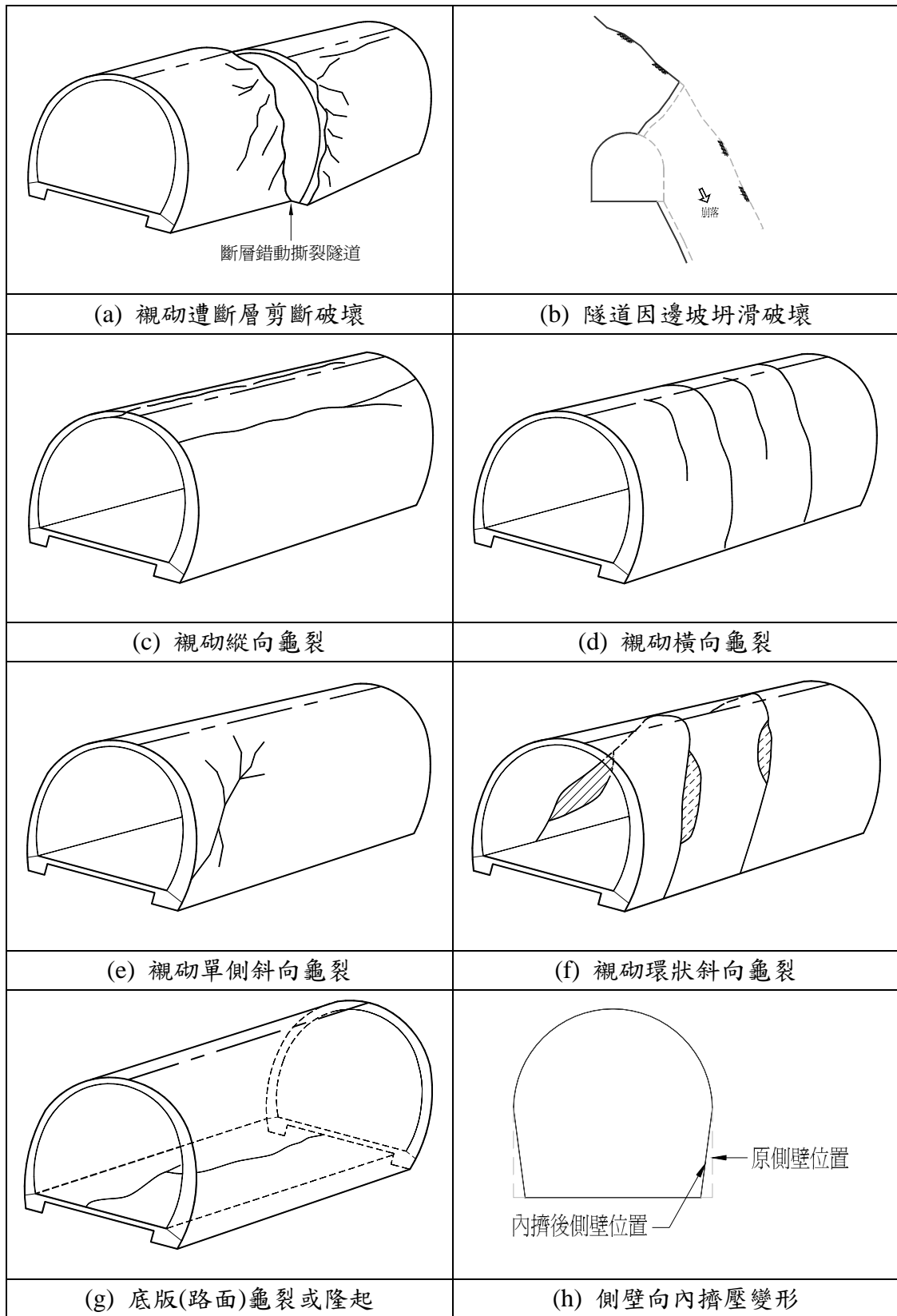


圖 4.4-10 山岳隧道受震損害型態示意圖(王文禮等人, 2000)

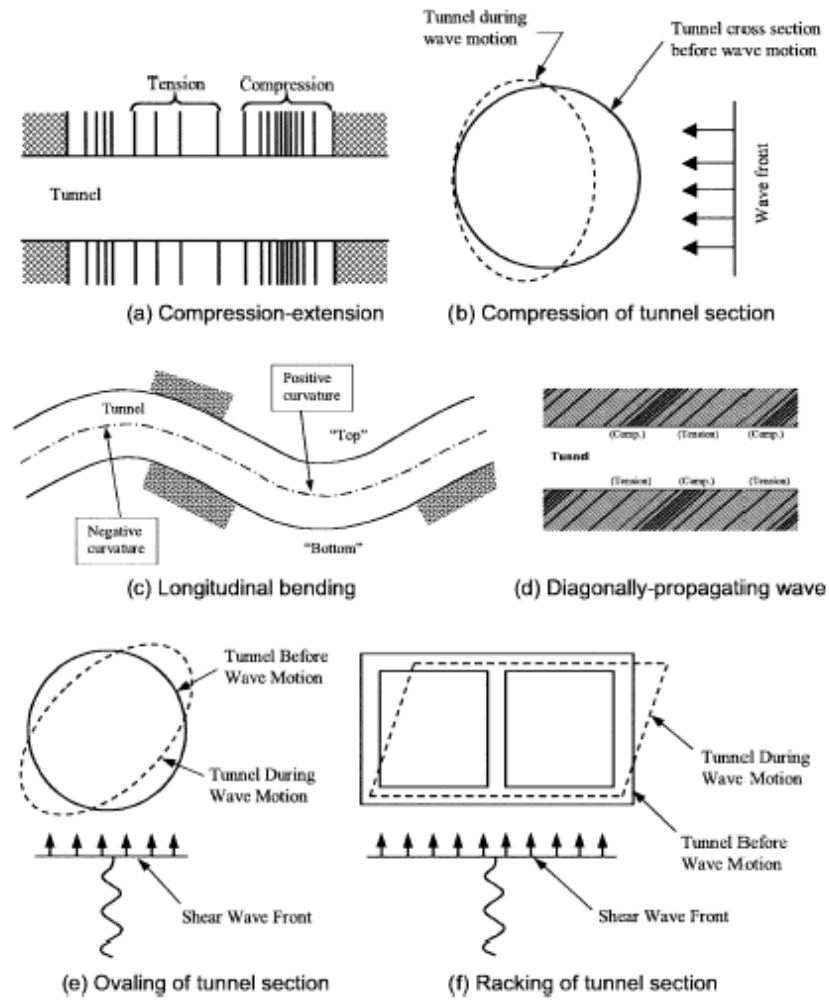


圖 4.4-11 震波作用下之隧道變形行為(Owen and School,1981)

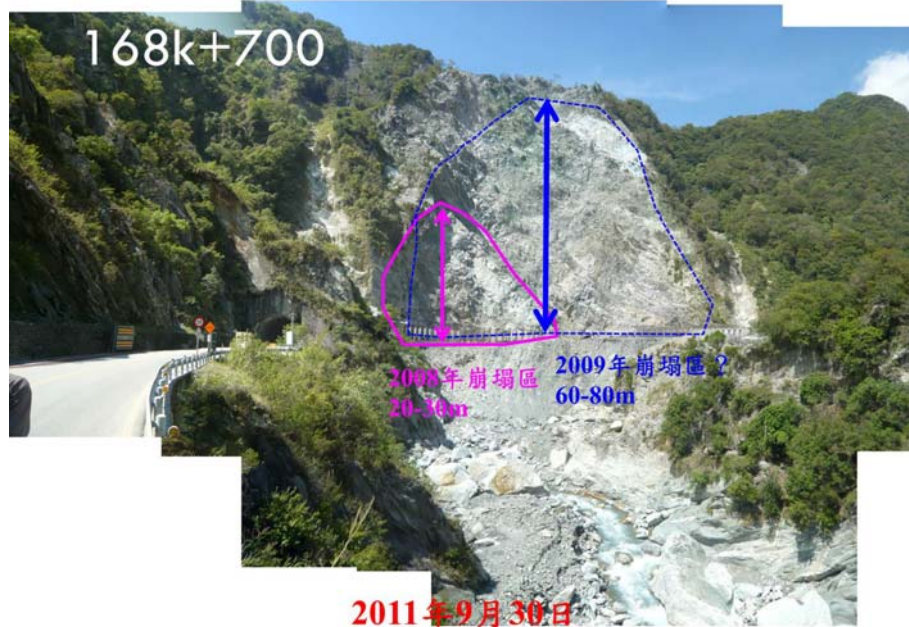


圖 4.4-12 中部橫貫公路某明隧道因邊坡失穩造成破壞(曹孟真等人, 2012)

#### 4.4.2 環境因素

由於我國特殊之地質與氣候環境影響與發育所致，其土壤與岩石之「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，岩石弱軟化迅速；(2)岩石長期行為明顯，強度與變形性依時變化大。

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(Ulusay and Hudson, 2007；許金華，2006)。惟風化過程岩石微觀組構的變化、弱軟化的程度以及各類力學參數之相互關係，迄今仍缺乏系統性的量化研究，故有關岩石風化程度的量化評估，為工程地質研究亟待努力的課題。

關禮琳等人(2009)以台灣東部海岸山脈水璉礫岩某一邊坡失穩案例為對象，透過人為浸潤與乾燥循環的環境變異弱軟化岩石，模擬自然風化環境岩石的崩解與分析過程，配合一系列室內試驗(表 4.4-1)求得風化過程岩石力學特性參數的變化；繼而採用個別元素法模擬不同風化程度岩石的應力—應變曲線，探討影響岩石弱軟化的敏感微觀因子；最後結合室內試驗與個別元素法模擬所得，應用有限差分法數值分析，探討風化引致岩石弱軟化對邊坡穩定的影響。研究成果顯示，水璉礫岩風化後，抗風化能力下降、強度降低、變形性增加，且強度降低主要受到風化弱軟化礫岩的基質成份較顯著，導致礫岩的視凝聚力下降，視摩擦角在人工風化過程的變化較不明顯。而顆粒力學個別元素法考慮較多的微觀參數，提供探討影響岩石弱軟化的敏感微觀因子，結合室內試驗基質弱軟化的結果後，可有效模擬不同風化程度岩石的應力—應變曲線；透過微觀膠結強度與變形參數以及介觀力學特性參數之模擬成果，可初步量化探討風化作用弱軟化岩石引致對邊坡穩定的影響，提供邊坡工程設計更多的量化參考資訊。

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：(1)水分含量越高，其風化程度越劇烈；(2)於相同風化程度下，水分含量越高，其強度( $I_{s50}$ )越低(圖 4.4-13)；(3)風化程度越高，其強度( $I_{s50}$ )越低。

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，

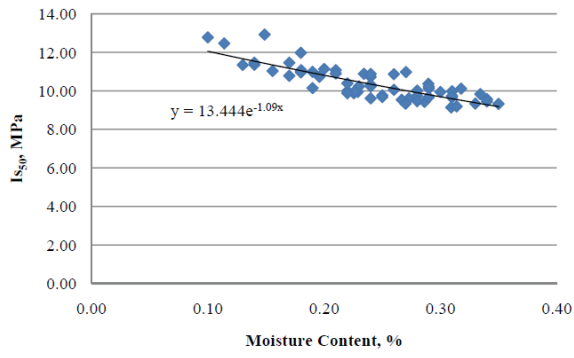


除了岩性軟弱之外，尚具有剪脹、高潛變量與遇水易弱化等特性；容易造成隧道大量變形之擠壓行為，屬於隧道工程之問題岩種。當地下開挖(如礦坑、地下電廠、放射性廢棄物儲存廠等)和隧道工程在通過此類岩石時，便可能遭遇到嚴重擠壓變形、剝落乃至於大量抽心的事故。以北二高中和隧道為例，施工期間通過木山層砂岩段時，即遭遇大量之擠壓變形。台灣的第三紀砂岩地層分布廣泛，而擠壓之問題於近年來台灣地區隧道工程之施工經驗中經常遭遇。

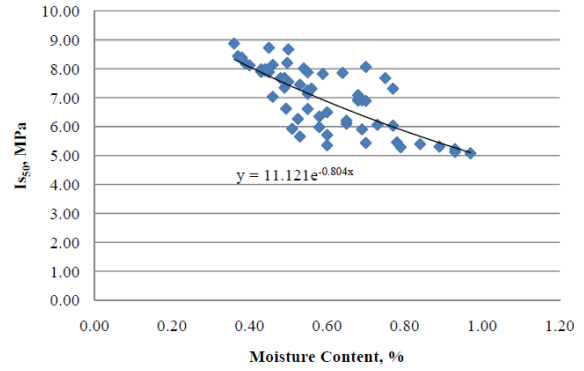
俞旗文與陳錦清(2002)以某大型公路隧道於斷層帶發生高度擠壓之實際工程案例為例，說明以 Burgers 潛變模式與二維 FLAC 有限差分程式進行潛變分析，以評估隧道斷層帶二次襯砌長期安定性之方法。潛變力學參數係由現場於二次襯砌安裝前之長期隧道頂拱沉陷變化速率觀測值，與二次襯砌安裝後連續觀測約 500 餘天之岩壓觀測值，進行黏彈塑性反算分析求得。之後再以黏彈性潛變分析，模擬預測隧道於營運後不同時期，內襯砌可能之受力程度，如圖 4.4-14 所示。

表 4.4-1 試驗項目、目的與方法(闕禮琳等人，2009)

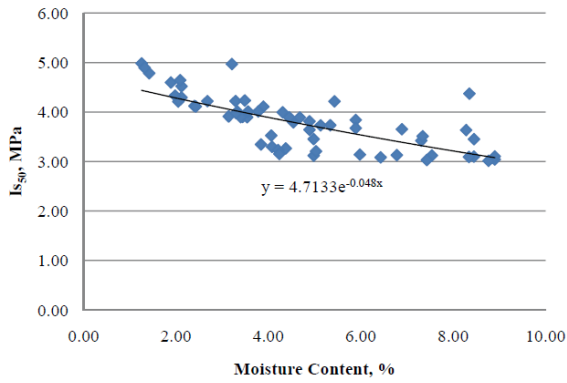
試驗名稱	試驗目的	方法	試驗設備
消散耐久試驗	探討風化程度對礫岩抗風化能力的影響。	將10顆40~60g且約等向之試體，置入篩桶中進行等速滾動，於10分鐘後烘乾並秤重，進行兩次比較試驗後減少之重量，即為消散耐久指數。	消散耐久儀
單軸壓縮試驗	求取單軸荷載狀態下岩石應力－應變關係，並求得其強度與變形模數。	利用軸向變形量及原有試體長度，轉換應變量及斷面積修正值，配合量測所得荷重值以計算各應變量對應之應力值，即可繪製應力－應變曲線。	壓力試驗機
點荷重試驗	目的在於測定岩石材料之點荷重指數( $I_s$ )探討整體強度。	以點荷重試驗儀之兩端鋼錐，夾破規則或不規則形狀之試體。	點荷重試驗儀
傾斜試驗	評估礫岩表層侵蝕、剝落過程摩擦特性的變化。	將試體置於載台，等速提升傾角，並記錄初始滑動角度，且將試體以 $45^\circ$ 為間隔，測試了岩石試樣八個方向的視摩擦角與方向之關係。	摩擦試驗傾斜台
薄片觀察	在偏光顯微鏡下進行岩石的礦物鑑定與組成分析並觀察探討岩象的變化。	觀察礦物內部的細微構造，如礦物的晶形或集合體、解理的發達與否、礦物的顏色和多色性、折射率的大小、對某組解理的消光角和單光軸、雙光軸等干涉像等特性，藉以鑑定礦物類別。	偏光顯微鏡



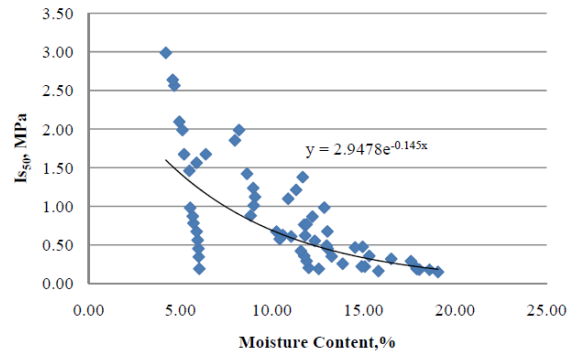
(a) weathering grade I



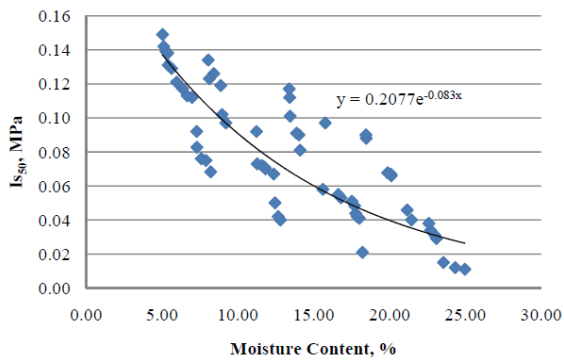
(b) weathering grade II



(c) weathering grade III

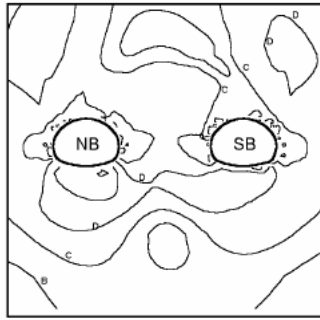


(d) weathering grade IV

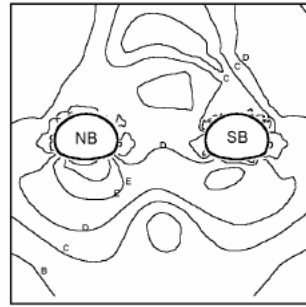


(e) weathering grade V

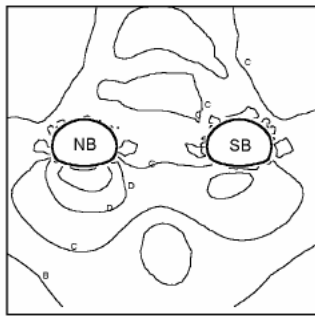
圖 4.4-13 花崗岩於各種風化程度下水分含量對強度的影響(Mohamad et al., 2011)



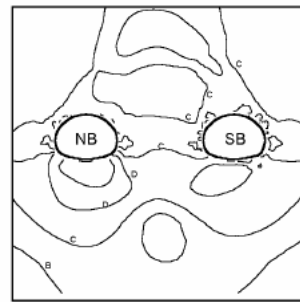
(a)兩年後



(b)4年後



(c)6年後



(d)10年後

圖 4.4-14 隧道斷層帶圍岩內軸差應力之依時演化情況(俞旗文與陳錦清，2002)

## 第五章 處置坑道長期穩定設計考量與管制要項探討與建議

依據物料管理局委託 99 年度「放射性廢棄物坑道處置場址特性調查及設施設計與建造審查要項研究」計畫及 100 年度「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」計畫之建議，處置設施場址特性調查與設施設計需求與我國既有的坑道設計及施工技術相關法規、標準、規範存在明顯的差異，且研究結果發現我國天然障壁特性與處置技術先進國家有明顯相異處，目前基於 NUREG-1200 基本架構所研訂的安全分析報告審查導則無法完全涵括，為必需進一步精進的課題，本章將針對坑道處置長期穩定性之影響因素，提出設施設計及其穩定性評估審查要項考量之初步建議，並提出管制技術進一步研究發展之參考方向。

### 5.1 長期穩定設計考量之初步建議

#### 5.1.1 設計目標與功能需求

如前所述，台灣處於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊邊界碰撞地帶，地震發生頻繁，故未來放射性廢棄物坑道處置場之「設計目標與功能需求」，應考量台灣之『地震』特性，除於「場址特性調查」階段補充說明斷層與地震危害度之調查與評估方法外；於「處置設施設計」階段，亦應建議或規範處置場之『受震』或『耐震』之分析模式與方法。

依相關文獻蒐集彙整顯示，隧道或地下坑室之受震數值方法有：(1)有限元素法(FEM)如三維飽和岩體隧道抗炸分析(Kim, 2001)、山岳隧道地震時行為(細井秀憲等人，2002)；(2)有限差分法(FDM)如岩石隧道受集集地震損害分析(曾威量，2001)、隧道受震時之反應(Kirzhner and Rosenhouse, 2000)、明潭地下電廠之受震分析(陳錦清等人，2000)；(3)採用 DEM 如瑞典 Norra Lanken 捷運隧道抗炸分析(Rosengren, 1993)；(4)採用邊界元素法(BEM)如半無限域中散射體承受傾斜入射波引起之散射現象(蔡宜璋，1998)。

Bäckblom 等人(2004)則基於歷史地震資料暨分析模式探討未來地震對瑞典放射性廢棄物最終處置場之影響(圖 5.1-1)，其歸納出 4 種數值分析模式(表 5.1-1)，其中最主要之分析模式如圖 5.1-2 所示，而數值模式則如圖 5.1-3 所示。研究結果顯示：此分析模式可有效評估近域斷層或剪裂帶錯動對放射性廢棄物最終處置場之影響。

表 5.1-1 四種放射性廢棄物最終處置場受震分析模式

#	Conceptual idea with pro et con and code used
1	A slip is imposed at the primary fault. The static response of the linear elastic rock mass with inclusions of friction-less target fractures is calculated using the displacement-discontinuity method. The target fractures populations are generated utilizing site-specific lengths, strikes and dips +: A huge number of calculations possible with varying magnitudes, distances to target fractures and target fracture statistics -: Static effects are calculated but not the dynamic effects. Fractures must be friction-less. Code: POLY3D [10, 11]
2	A slip is imposed at the primary fault. The dynamic response of the linear elastic rock mass with inclusions of one target fracture with friction is calculated using a finite difference code FLAC3D for the target volume. The WAVE finite-difference code is used to simulate the dynamic boundary conditions for the FLAC3D calculations. WAVE provides a fair description of the processes at the rupture of the primary fault +: The dynamic effects of a distant earthquake are studied. The target fracture can have friction and other fracture properties like cohesion and stiffness. -: Static effects are not calculated. Only one target fracture. Only a few numbers of calculations are practically possible. Codes: WAVE [12] FLAC3D [13]
3	A slip is imposed at the primary fault. The combined static and dynamic response of the linear elastic rock mass with inclusion of one target fracture with friction is computed. +: Static as well as dynamic response -: Fractures must be aligned with the computational grid. Code: WAVE
4	The rock mass includes the primary fault and slip on that fault takes place as a result of potential instability +: Full static and dynamic response. -: Only one target fracture. Only a few computations are practically possible. Code: FLAC3D

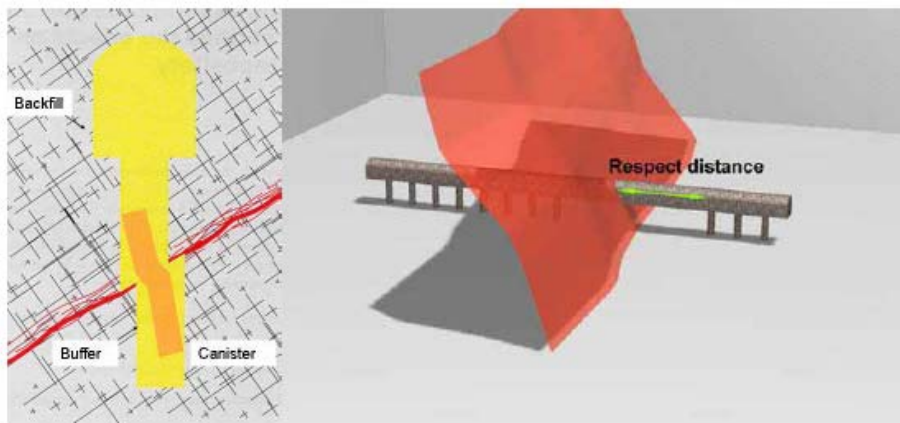


圖 5.1-1 放射性廢棄物最終處置場遭受剪裂帶錯動之可能破壞模式(Bäckblom et al., 2004)

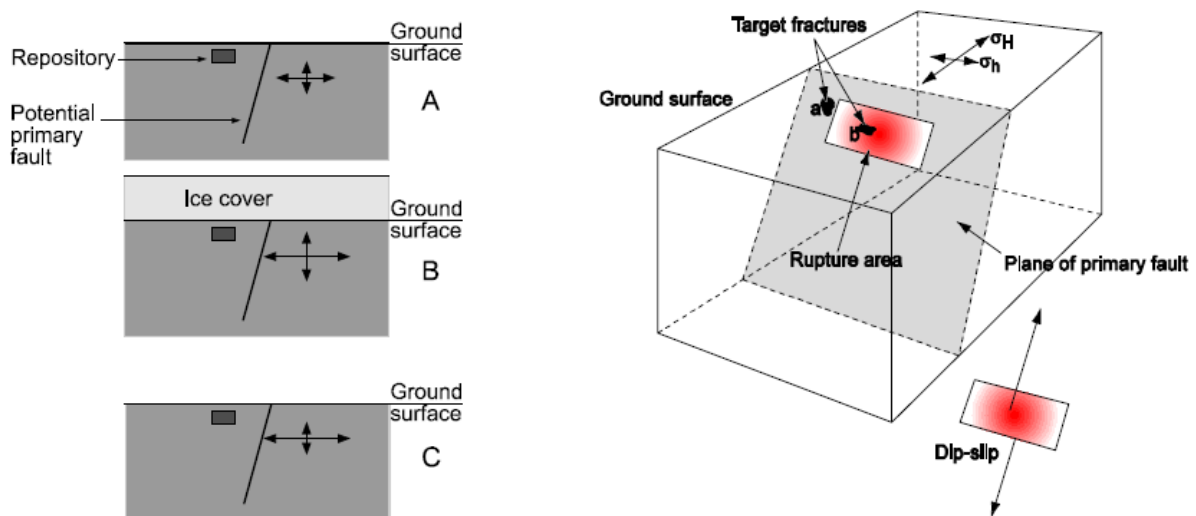


圖 5.1-2 近域斷層或剪裂帶錯動對最終處置場影響之概念模型(Bäckblom et al., 2004)

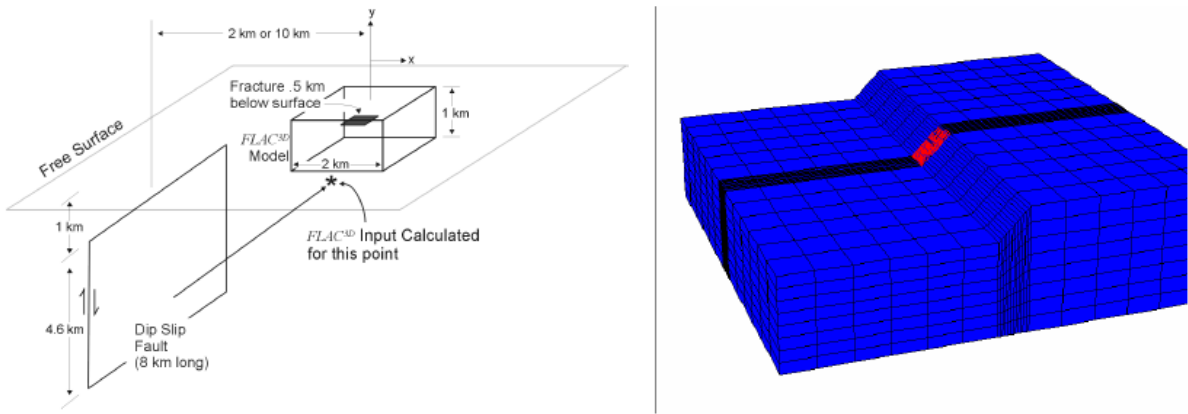


圖 5.1-3 近域斷層或剪裂帶錯動對最終處置場影響之數值模型(Bäckblom et al., 2004)

國際隧道協會(International Tunnelling Association, ITA)則建議採用 Hashash 等人(2001)建議之隧道耐震分析與設計流程(圖 5.1-4)，首先為進行工址受震環境定義，內容包括地震危害度分析、設計地震選擇、地盤震動參數選擇；其次為地盤受震反應評估，即予以評估區分為如活動斷層剪動或洞口邊坡滑動等地盤破壞，或地盤震動所造成之隧道破壞；最後進行隧道受震行為評估，依設計年限選擇受震設計載重，並進行隧道受震分析，其中依需要採用自由場分析或地盤與結構互制分析等受震變形法，最後依分析結果進行支撐耐震設計，而對於特殊段如洞口等亦須進行相關設計。

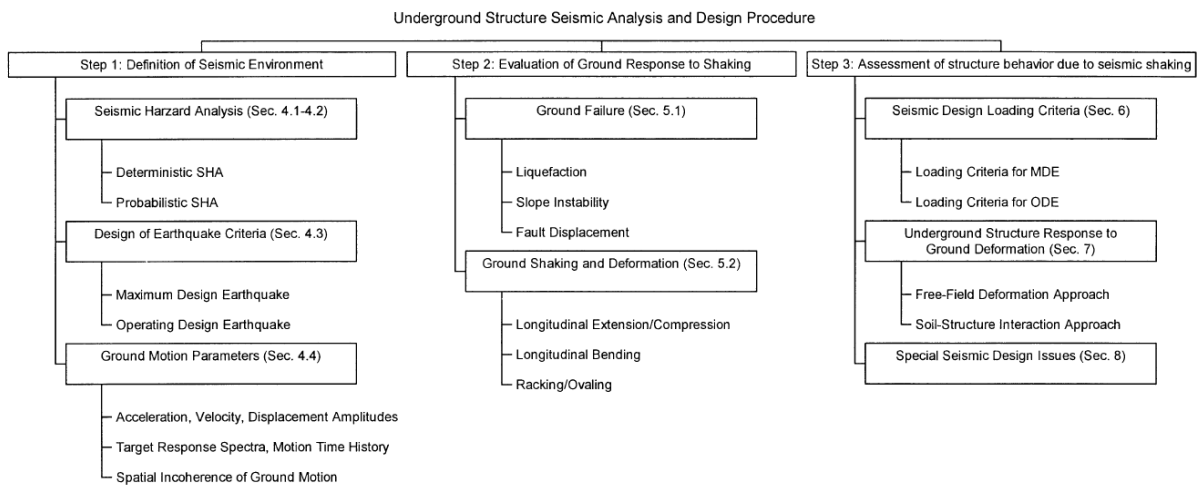


圖 5.1-4 隧道耐震分析與設計流程(Hashash et al., 2001)

### 5.1.2 土木設計

如前所述，由於我國特殊之地質與氣候環境影響與發育所致，台灣之岩石具有：(1)風化作用強烈；(2)長期或依時行為明顯等特性。故未來放射性廢棄物坑道處置場之「土木設計」，應考量台灣岩石之『風化作用』與『依時行為』特性，除於「場址特性調查」階段進行相關試驗與調查外；於「處置設施設計」階段，亦應考量上述特性以致岩體參數依時弱化，並納入處置場設計與分析之模式與方法中。

## 5.2 審查要項初步建議

我國低射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則共分十三章，對應之審查導則草案中第四章「處置設施之設計」章節，依據本計畫研究結果，針對審查導則草案第四章有關設施設計審查要項，提供長期穩定性評估時應考量之要點，建議如下表 5.2-1。



表 5.2-1 審查導則草案有關場址特性調查及設施設計與建造審查要項編修要點之建議(第四章處置設施之設計部分)

因子	安全分析報告內容概要	審查導則編修要點建議
設計目標與功能需求	說明處置設施長期穩定考量下，對於影響因素如外力中地震作用、環境因素中大地材料依時性變形與弱軟化行為對坑道穩定性影響之設計基準、設計要項及設計規格等。	<p><u>提供要項部分</u>：應涵蓋處置設施長期穩定考量下之設計目標、設計基準與功能需求以及對應引用法規、報告或函文之依據，設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等，各項設計成果應說明採用的比例尺與包括之詳細圖說、設計細部報告以及相關附冊等。</p> <p><u>審查作業部分</u>：應檢核處置設施長期穩定考量下之設計目標、確認設計基準與功能需求是否完整，引用法規、報告或函文之適當性與代表性，設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等正確性與合理性，圖說比例尺之適當性、設計報告與附冊之正確性與完整性，是否需實施處置設施穩定分析與安全分析等平行驗證審查等。</p>
建築設計	說明處置設施長期穩定考量下，對於影響因素如外力中地震作用、環境因素中大地材料依時性變形與弱軟化行為對坑道穩定性影響之主要結構物、使用需求規劃及其配置。	<p><u>提供要項部分</u>：應涵蓋處置設施主要結構物長期穩定考量下之建築設計目標、使用需求規劃及其配置、相關的設計基準與功能需求，以及對應引用法規與報告之依據；並包括設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等，各項設計成果應說明採用的比例尺與所包含之詳細圖說、設計細部報告以及相關附冊等。</p> <p><u>審查作業部分</u>：應檢核處置設施主要結構物長期穩定考量下之建築設計目標、確認使用需求規劃及其配置是否滿足，相關的設計基準與功能需求是否完整，引用法規與報告之適當性與代表性，設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等正確性與合理性，圖說比例尺之適當性、設計報告與附冊之正確性與完整性，是否需實施處置設施建築設計穩定分析與安全分析等平行驗證審查等。</p>
結構設計	說明處置設施主要結構物長期穩定考量下，對於影響因素如外力中地震作用、環境因素中大地材料依時性變形與弱軟化行為對坑道穩定性影響之結構分類、設計荷重及其組合等。	<p><u>提供要項部分</u>：應涵蓋處置設施主要結構物長期穩定考量下之結構設計分類、設計基準與功能需求、相關的設計荷重及其組合，以及對應引用法規與報告之依據；並包括設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等，各項設計成果應說明採用的比例尺與所包含之詳細圖說、設計細部報告以及相關附冊等。</p> <p><u>審查作業部分</u>：應檢核處置設施主要結構物長期穩定考量下之結構分類、設計基準與功能需求是否滿足，確認相關的設計荷重及其組合，引用法規與報告之適當性與代表性，設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等正確性與合理性，圖說比例尺之適當性、設計報告與附冊之正確性與完整性，是否需實施處置設施結構設計穩定分析與安全分析等平行驗證審查等。</p>
土木設計	說明處置設施主要結構物長期穩定考量下，對於影響因素如外力中地震作用、環境因素中大地材料依時性變形與弱軟化行為對坑道穩定性影響之工程材質、屏蔽材料之特性與設計標準(包括處置設施及其覆蓋、回填等)、地表防洪及地下排水系統之設計。	<p><u>提供要項部分</u>：應涵蓋處置設施主要結構物長期穩定考量下工程材質以及屏蔽材料之設計目標、使用需求規劃及其配置、相關的設計基準與功能需求，以及對應引用法規與報告之依據；並包括設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等。土木設計應包括處置設施及其覆蓋、回填、地表防洪及地下排水系統以及護坡工程等。</p> <p><u>審查作業部分</u>：應檢核處置設施主要結構物長期穩定考量下之工程材質、屏蔽材料設計目標、使用需求規劃及其配置是否滿足，相關的設計基準與功能需求是否完整，引用法規與報告之適當性與代表性，設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果等正確性與合理性，圖說比例尺之適當性、設計報告與附冊之正確性與完整性，材料試驗規範與試驗方法之適當性，是否需實施平行驗證審查等。</p>

## 第六章 結論與建議

### 6.1 結論

本計畫蒐集既有坑道結構穩定與服務功能異常之現象，探討影響坑道長期穩定與服務功能異常之因素，繼而就處置坑道服務功能需求與長期穩定之觀點提出處置坑道長期穩定設計考量與管制要項探討與建議。依約完成各工作項目，說明如后。

1. 完成蒐集國內外既有坑道設計方法、規範與相關準則之彙整，整理於本報告第二章。
2. 完成處置坑道與一般地下坑道於設計目標、對於坑道穩定與服務功能需求之彙整，整理於本報告第三章。
3. 完成國內外坑道結構穩定與服務功能異常現象之蒐集彙整，並透過既有地下坑道洞室襯砌損傷與異狀資料，提出坑道穩定影響因素含外力及環境因素，其中包括地震引致地盤震動可能導致處置坑道襯砌受力在特定位置大幅增加、大地材料依時變形及弱軟化行為可能導致處置坑道周圍應力趨於異向、襯砌受力緩慢增加，影響處置設施的長期穩定。且坑道的結構功能減降亦可能誘發周圍地質材料應力應變持續調整。
4. 透過我國天然障壁與處置技術先進國家相異處管制技術相應審查要項的探討顯示，有關設施設計之設計目標與功能需求之審查要項需強化有關影響長期穩定性因素之建議，如外力因素中地震作用，環境因素中地質障壁依時性變形與弱軟化行為對坑道處置設施之長期穩定影響，亟需進一步評估分析。

### 6.2 建議

本計畫透過我國既有地下坑道洞室襯砌損傷與異狀資料之蒐集整理初步顯示，我國的處置環境可能因地震、天然障壁材料弱軟化等因素，影響處置設施長期的穩定。目前已建成長度逾千公里的地下坑道雖然結構穩定問題並不多見，然變形、裂縫與滲漏水卻相當普遍。處置設施之穩定雖可透過處置技術之精進達成，然因處置設施的服務週期長於交通、水力隧道，有關處置設施長期穩定的議題，未來可就下列課題繼續深入探討，以求更完整、嚴謹的審查標的提升處置設施安全性與長期穩定性。

1. 影響坑道處置設施之長期穩定性因素，如本研究中整理之外力因素之地震作用、環境因素中地質障壁依時性變形與弱軟化行為，應深入探討各因素可藉以描述之參數，以及描述參數與場址特性之關係，供處置設施於設計與調查階段審查要項之參考。
2. 持續蒐集整理既有坑道之異狀，探討造成既有坑道異狀之肇因，對應的場址特性描述、參數評估、調查技術以及管制審查要項，精進處置技術並健全管制作業。
3. 處置設施為多重障壁概念，然不同功能障壁的最佳效能發揮時期不同，其間是否相互影響？在處置坑道建造、營運期間功能需求的界定與相關的設計需求，未來建議進一步深入探討釐清。

## 參考文獻

- [1] Barton, N.R., Lien, R., and Lunde, J. (1974): Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 189-236.
- [2] Barton, N.R. (1988): Rock Mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection using the Q-system, In Kirkaldie, L.. *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, ASTM Special Technical Publication 984, pp. 59-88.
- [3] Barton, N.R., and Grimstad, E. (1993): Updating the Q-system for NMT. In Kompen, C.; Berg, S.L.. *Proc. of the International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, Fagernes, 1993. Norwegian Concrete Association, Oslo. pp. 163–177, 234–241.
- [4] Backblom, G. and C. D. Martin (1999): Recent Experiments in Hard Rocks to Study the Excavation Response: Implications for the Performance of a Nuclear Waste Geological Repository, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 377-394.
- [5] Backblom, G., R. Stanfors, G. Gustafson, I. Rhen, P. Wikberg, O. Olsson and C. Thegerstrom (1997): Aspo Hard Rock Laboratory-Research, Development and Demonstration for Deep Disposal of Spent Nuclear Fuel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 12, No. 3, pp. 385-406.
- [6] BÄCKBLOM, G., MUNIER, R. and HÖKMARK, H. (2004) “EARTHQUAKE DATA AND MODELLING TO STUDY THE EFFECTS OF FUTURE EARTHQUAKES ON A FINAL REPOSITORY OF SPENT NUCLEAR FUEL IN SWEDEN”, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 3238.
- [7] Bieniawski, Z. T. (1970): Time-dependent behaviour of fractured rock. *Rock Mechanics*, 2, pp. 123-137.
- [8] Bieniawski, Z. T., *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*, A. A.Balkema Publishers, Rotterdam, 1984.
- [9] Chijimatsu M., T. Fujita, Y. Sugita, K. Amemiya and A. Kobayashi (2001): Field experiment, results and THM behavior in the Kamaishi mine experiment. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 38(1), pp. 67-78.
- [10] Cristescu, N. (1993): Rock rheology. *Comprehensive Rock Engineering* (ed. in chief J. A. Hudson), Pergamon, Oxford, Vol. 1, pp. 523-544.
- [11] Cundall, P. A. (1971): A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock system. In: *Proc. Int. Symp. Rock Fracture*, Nancy, II-8.
- [12] Duarte Azevedo, I. C., L. E. Vaz and E. A. Vargas (1998): A numerical procedure for the analysis of the hydromechanical coupling in fractured rock masses. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 22, pp. 867-901.
- [13] Hoek, E. and Brown, E. T. (1980): *Underground Excavations in Rock*.
- [14] Hoek, E. (2006): *Practical Rock Engineering*, Evert Hoek Consulting Engineer Inc.
- [15] Hashash, Y. M. A., J. J. Hook, B. Schmidt and K. I. C. Yao (2001) “Seismic design and

- analysis of underground structures”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol 16, P. 247-293.
- [16] IAEA. 1982, *Site investigations for repositories for solid radioactive waste in shallow ground*, Vienna: IAEA, Technical Report Series No.216.
- [17] IAEA. 1984, *Site Investigations, Design, Construction, Operation, Shutdown and Surveillance of Repositories for Low-and Intermediate-Level Radioactive Wastes in Rock Cavities*.
- [18] IAEA. 1993, *The radioactive waste management glossary*, Vienna: IAEA.
- [19] Kwon, S., C. S. Lee, S. J. Cho, S. W. Jeon and W. J. Cho (2009): An investigation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24, pp. 1-13.
- [20] Lama, R. D. and V. S. Vutukuri (1978): *Handbook on Mechanical Properties of Rocks*, Vol. III & IV, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
- [21] Min, K. B., J. Rutqvist, C. F. Tsang and L. Jing (2004): Stress-Dependent permeability of fractured rock masses: a numerical study. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 41(7), pp. 1191-1210.
- [22] Mohamad, E. T., Isa, M. F. M., Amin, M. F. M., Komoo, I., Gofar, N. and Saad, R. (2011) “Effect of Moisture Content on the Strength of Various Weathering Grades of Granite”, *EJGE*, Vol. 16, P. 863-886.
- [23] Nuclear Regulatory Commission, U.S., 1994, *Standard Review Plan for the review of a license application for a low-level radioactive waste disposal facility(NUREG-1200)*, Washington, USA.
- [24] U. S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1199, “Standard Format and Content Guide of a License Application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility,” Rev. 2, January 1991.
- [25] U. S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-O902, “Site Suitability Selection and Characterization,” April 1982.
- [26] Nguyen T. S., L. Borgesson, M. Chijimatsu, J. Rutqvist, T. Fujita, J. Hernelind, A. Kobayashi, Y. Ohnishi, M. Tanaka and L. Jing (2001): Hydromechanical response of a fractured granitic rock mass to excavation of a test pit-the Kamaishi Mine experiment in Japan. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 38(1), pp. 79-94.
- [27] Noorishad, J., P. A. Witherspoon, and T. L. Brekke (1971): A method for coupled stress and flow analysis of fractured rock masses. Publication No. 71-6, Dept. of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- [28] Pellet, F., M. Roosefid and F. Deleruyelle (2009): On the 3D numerical modelling of the time-dependent development of the damage zone around underground galleries during and after excavation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24, pp. 665-674.
- [29] Peng, S. S. and E. R. Podnieks (1972): Relaxation and the behaviour of Failed Rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 9, pp. 699-712.
- [30] Pusch R. and C. Svemar (1993): Influence of Rock Properties on Selection of Design for a Spent Nuclear Fuel Repository, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 8, No. 3,

pp. 345-356.

- [31] Pusch, R. and R. Stanfors (1992): The Zone of Disturbance Around Blasted Tunnels at Depth, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 29, No. 5, pp. 447-456.
- [32] Saiang, D. (2008): Damaged Rock Zone Study, A Progress Report, Luleå University of Technology Department of Civil, Mining and Environmental Engineering Division of Rock Mechanics.
- [33] Sato, T., T. Kikuchi and K. Sugihara (2000): In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan. *Engineering Geology*, 56(1-2), pp. 97-108.
- [34] Sugihara, K. (2009): Geological disposal of high-level radioactive waste and the role of rock engineering, *International Journal of JCRM (Japanese Committee for Rock Mechanics)*, Volume 5, Number 1, pp. 19-24.
- [35] Stephansson, O. and Zang, A., (2010): How to generate the Final Rock Stress Model (FRSM) at a site or an area, 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60165-8
- [36] Wang, T. T., W. Lo, Y. C. Ding and S. T. Liu (2007): Study on tunnel excavation disturbed zone in weak rock with time-dependent behavior, 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics, 9-13 Jul., Lisbon, Portugal, pp. 1057-1160.
- [37] Wang, T.T. and T.H. Huang (2007): Recent Rock Tunnelling Activities in Taiwan, *Development, Advancement and Achievement of Geotechnical Engineering in Southeast Asia, 40<sup>th</sup> Anniversary Commemorative Volume of the Southeast Asian Geotechnical Society*, 8-11, May, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 385-390.
- [38] 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。
- [39] 中華民國隧道協會，1999，山岳隧道工程設計與實例手冊，科技圖書。
- [40] 中華民國隧道協會，1999，潛盾隧道施工技術規範之研討，科技圖書。
- [41] 中華民國隧道協會，2004，軟土潛盾隧道工程設計與實例手冊，科技圖書。
- [42] 中華民國隧道協會，2009，潛盾隧道設計及施工準則與解說，科技圖書。
- [43] 中華民國隧道協會，2009，隧道施工技術、品管與案例彙編，科技圖書。
- [44] 工業技術研究院能源與資源研究所，2008，美國核能法規 NUREG-1199 低強度放射性廢料淺地處置安全分析報告之標準格式及內容中譯版，放射性待處理物料管理處委託研究計畫報告初稿。
- [45] 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，*土工技術*，81，85-96。
- [46] 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。
- [47] 王泰典、張芳銘、邱雅筑、蘇峰民、林銘郎、鄭富書、黃燦輝(2007)：隧道安全檢測技術之新發展，*隧道安全檢測系列研討會 II—安檢技術交流與探討論文集*，9 月 21 日，宜蘭，148-183。
- [48] 王泰典(2007)：從襯砌異狀漫談隧道設計過程對維護管理之考量，中興基金會之友聯誼會專刊，25-39。

- [49] 張嘉峰、李維峰、王泰典、溫俊明、陳育聖(2008)：捷運隧道段、出土段與特殊高架車站結構設施之損壞修復作業手冊，台北市政府捷運局委託研究計畫報告，台北。
- [50] 王泰典(2008)：隧道結構安全檢測技術，隧道結構安全檢測與管理研討會，7月25日，台北，86-135。
- [51] 王泰典，2008，裂隙岩體水力-力學耦合行為之研究(II)，行政院國家科學委員會補助專題研究計畫，NSC 96-2221-E-027-061，台北。
- [52] 王泰典、翁祖炘、李宏輝(2011)：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，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫(100FCMA005)，台北。
- [53] 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。
- [54] 王泰典、董家鈞(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，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫(98FCMA003)，台北。
- [55] 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。
- [56] 日本土木學會，隧道標準示方書 [山岳工法編]·同解說，1996。
- [57] 日本土木學會，隧道標準示方書 山岳工法·同解說，2006。
- [58] 吉小明，2005，隧道開挖的圍岩損傷擾動帶分析，岩石力學與工程學報，第24卷，第10期，第1697-1702頁。
- [59] 交通部，2003，公路隧道設計規範。
- [60] 交通部公路總局，2005，施工說明書技術規定(共二冊)。
- [61] 交通部台灣區國道新建工程局，1997，公路隧道消防法規制訂，研究報告 094。
- [62] 交通部台灣區國道新建工程局，1998，公路隧道安全設施準則研訂，研究報告 097。
- [63] 交通部台灣區國道新建工程局，2000，隧道二次襯砌功能、設計理念與混凝土設計規範之研究與建議對策，研究報告 118。
- [64] 交通部台灣區國道新建工程局，2008，公路隧道消防安全設備設置規範草案，研究報告 157。
- [65] 交通部台灣區國道新建工程局，2003，隧道施工技術規範，使用手冊 031。
- [66] 行政院公共工程委員會，2001，台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立—台灣地區特殊地質隧道之調查評估，行政院公共工程委員會專案研究計畫，研究報告。
- [67] 行政院公共工程委員會，2003，台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立，行政院公共工程委員會專案研究計畫，研究報告 0920198。
- [68] 行政院公共工程委員會，2010，公共工程施工綱要規範(<http://pcces.archknowledge.com/>)。
- [69] 汪懋之，1987，實用隧道工程學，國立編譯館，大中國圖書公司。
- [70] 吳柏青、丁原智，2008，紅外線熱影像分析探討隧道及坑室爆破岩體損傷檢測，資源與環境學術研討會論文集，花蓮，第277-290頁。
- [71] 李宏輝、趙振宇，2002，含泥岩石節理面力學行為之研究，2002岩盤工程研討會，新竹中華大學，第145-156頁。
- [72] 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。

- [73] 李佳翰、陳建華、林信宏、王泰典(2009)：隧道異狀成因診斷案例探討－以邊坡潛移引致襯砌異狀為例，第十三屆大地工程學術研討會暨國科會成果發表會論文摘要集，8月26-28日，宜蘭，I-21-1~9。
- [74] 林志冠，1994，岩石隧道依時變形行為之研究，國立台灣科技大學營建工程技術學系碩士論文。
- [75] 林福星，1981，山岳隧道之施工，榮民工程事業管理處。
- [76] 尚新民、王泰典、李佳翰、林銘郎(2010)：從檢修案例探討水工隧道全生命週期觀點的設計考量，隧道建設，30(增 1)(第九屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會論文集，8月18~19日，洛陽)，211-220。
- [77] 詹佩臻、闕禮琳、王泰典、羅偉、翁祖炘(2009)：水璉礫岩人工風化下單壓強度弱軟化之探討，2009 資源與環境學術研討會，5月22日，花蓮，401-408。
- [78] 闕禮琳、詹佩臻、王泰典、羅偉、翁祖炘(2009)：風化弱軟化岩石引致邊坡失穩案例探討－以水璉礫岩邊坡為例，礦冶，53(4)，67-76。
- [79] 岡田勝也等(2007)，鐵道構造物等維持管理標準 // 同解說(構造物編)－隧道(日文)，日本鐵道總合技術研究所。
- [80] 財團法人台灣營建研究院，1997~2000，營建自動化 推廣手冊叢書，內政部營建署。
- [81] 張嘉德，1993，公路隧道設計、施工－半剛性支撐工法，公路局第二區工程處。
- [82] 張六順、趙振宇、黃燦輝，2005，正向閉合下模擬節理面粗糙特性對其導水性之影響，第十一屆大地工程研討會論文集，台北縣萬里，F39-1-F39-6。
- [83] 陳志南，1998，隧道工程實務，國立台灣科技大學營建工程系，科技圖書。
- [84] 俞旗文、陳錦清 (2002) 「岩盤潛變分析與隧道斷層帶二次襯砌之長期安定評估」，2002 岩盤工程研討會論文集，第 253-262 頁。
- [85] 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。
- [86] 朝倉俊弘等(2003)，隧道變狀機制(日文)，日本土木學會。
- [87] 黃燦輝、王文禮、王泰典、徐力平，2000，台灣隧道工程之地質處理技術，隧道工程地質處理技術研討會，台北，第 1-36 頁。
- [88] 董家鈞，1989，黏彈性岩石隧道依時性收斂變形模式，國立交通大學土木工程學系碩士論文。
- [89] 經濟部水利署，2003，基隆河員山子分洪工程 細部設計計算書。
- [90] 經濟部水利署南區水資源局，2008，曾文水庫越域引水工程計畫－隧道工程 西引水隧道 B 段工程細部設計計算書。
- [91] 雷世璋、趙振宇、黃燦輝，2003，岩石節理面剪動－導水偶合行為影響因素之研究，第十屆大地工程研討會論文集，台北縣三峽，第 647-650 頁。
- [92] 榮民工程事業管理處，1990，隧道工程(上、下冊)。
- [93] 趙振宇、陳建勛、黃燦輝，2004，剪力作用下岩石節理面粗糙特性對其導水性之影響，2004 岩盤工程研討會論文集，台北縣淡水，第 168-175 頁。
- [94] 趙振宇、雷世璋、黃燦輝，2004，岩石節理面受剪－導水偶合行為之研究，第四屆海峽兩岸地工技術/岩土工程交流研討會論文集，台北，台灣卷，第 123-130 頁。



# 附錄一

## 審查意見回覆

(A)研究報告書書面審查意見暨辦理情形

(B)研究報告書審查會各專家意見暨辦理情形

## (A) 研究報告書書面審查意見暨辦理情形

各委員綜合意見	意見回覆與辦理情形
1. 文中引述很多 IAEA, NRC 等多項報告內容，卻未於參考文獻列出，請補充。(詳閱報告初稿之審查標示)	已增列 IAEA、NRC 等引用文獻於參考文獻。
2. 請將報告中所有「核廢料」之文字改為「放射性廢棄物」。	已將「核廢料」全數修正為「放射性廢棄物」。
3. ...在大地工程特性方面....造成處置坑道長期穩定性之變異。請問，一般在地下 30 公尺以下之坑道，須多久風化才影響到坑道之穩定性？	裂隙岩體的風化速率受多種影響影響，包括地下水流動的連通裂隙網絡、地質作用引致的應力變化、坑道開挖引致的工程擾動...目前仍無一定的風化速率報導。本研究整理岩石力學特性與微觀組構統計分析結果，嘗試探討相關性，提供未來管制審查項目的參考。
4. 本報告嚴謹詳實，內容豐富對處置工作極具參考價值。	感謝肯定。
5. 建議未來研究宜區隔高放與低放的不同，例如功能目標與工法等。	感謝委員建議，擬於後續計畫中探討。
6. 成果報告詳實豐碩，值得參考。	感謝肯定。
7. 文中所敘述「回績分析」是否應為「回饋分析」。	應為回饋分析，已修正。
8. 報告中部分圖表中文字之清晰度，請加強。	表 3.1-3~3.1-5、圖 3.1-1、圖 4.4-2、圖 4.4-3、圖 5.1-1 已提高解析度。

## (B) 研究報告書審查會議專家意見暨辦理情形

各委員綜合意見	意見回覆與辦理情形
<p>1. 本計畫就處置坑道設施設計及其穩定性評估課題廣泛蒐集整理國內外文獻，並就我國與處置技術先進國家地質特性提出差異比較，並依據我國地質特性，探討可能影響處置坑道長期穩定的因素，研究課題符合處置坑道審查技術研發政策目標。</p>	<p>感謝肯定。</p>
<p>2. 坑道長期穩定因素是否影響工程障壁功能，或是對地質障壁造成影響，請補充說明。</p>	<p>本計畫歸納影響坑道長期穩定性因素包含外力引致與環境變異，外力因素如地震作用、塑性土壓等部分，會直接影響工程障壁功能，而環境變異如大地材料依時性變形與弱軟化行為，則影響地質障壁強度與變形性等工程地質特性，可能間接影響工程障壁功能與建造初期評估的地質障壁阻隔功效。</p> <p>研究報告第 4.3 節已針對一般功能坑道結構功能減降導致周圍地質材料弱化的案例加以探討，處置坑道服務生命週期大於一般坑道，此部分課題不宜直接排除可能性，建議納入後續研究並列入第 6.2 節中。</p>
<p>3. 有關審查導則要點建議中處置場址應調查項目，應屬定性項目，建議以附錄方式條列長期穩定性評估時應考量因素。</p>	<p>感謝委員建議，後續可探討長期穩定性影響因素與描述性參數，並以附錄方式條列應考量與調查之場址特性參數，供審查單位參考。</p>
<p>4. 處置坑道年限與長期穩定性影響因素間之關係可否被評估？</p>	<p>藉長期穩定影響因素與長期穩定描述性參數，可考量時間變異下描述性參數的變化，</p>

	<p>進而探討對處置坑道長期穩定性之影響。然此部分仍待學術基礎研究建立量化關係描述。</p>
<p>5. 建議後續對本報告有關長期穩定影響因素的場址特性參數與審查要項，進一步深入探討。</p>	<p>感謝委員建議，本報告已整理長期穩定影響因素，有關對應的場址特性描數與參數評估技術暨審查要項，已納入第 6.2 節中建議。</p>