

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(102 年成果報告)

計畫編號：102FCMA004

報告編號：102FCMA004-06

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

報告日期：中華民國 102 年 12 月

[本頁空白]

Review technology related research for underground repository facilities design and associated stability evaluation

Wang, Tai-Tien* Li, Hung-Hui**

Abstract

Taiwan is now actively promoting the planning of low radioactive waste final disposal. Due to the topographic-, geological- and demographic characteristics, an underground cavity is the most probably final disposal type, and associated control regulations and corresponding guidelines for review plan are urgently needed. The commissioned research projects entitled “Review technology related research for underground repository facilities design and associated stability evaluation” performed in 2012 have proposed key factors related with facilities design and associated stability issues, which are sophisticated objectives due to the unique site characteristics by Taiwan. This project list before results systematically to investigate the influence associated facilities requirements related with lining anomalies of tunnel, and proposes the essential factors based on underground repository facilities design and associated stability issues. Furthermore, this project investigates the site feature description and characteristics parameters which are corresponded to major influencing factors associated with long-term stability of existing tunnel lining, such as the mechanical properties of geological material varies with time and external force affection likes earthquake et al. Finally, this project analyzes the possible impacts of disposal facilities due to site characterization parameter varies, and supply appropriate design considerations of disposal facilities and provide the recommendations associated site characterization description and

parameters assessment for reference.

Keywords : Disposal of radioactive waste, tunnel anomalies, long-term stability,
affecting factors, feature description, parameters assessment

* National Taipei University of Technology
Institute of Mineral Resources Engineering

**Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University
Environmental Information and Engineering Dept.

坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術發展

王泰典*、李宏輝**

摘 要

我國目前積極推動低放射性廢棄物最終處置規劃與建造作業，因地形、地質環境及人口分布特性，地下坑道處置方式極可能是未來處置方式的選項，亟需循序務實推動各項處置技術之建置。101 年度「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術研究」研究計畫，提出我國特殊地質條件下，影響坑道穩定與服務功能異常現象之關鍵因素。本計畫彙整以往研究成果，探討襯砌異狀對坑道設施功能需求之影響，繼而基於處置坑道設施設計及其穩定性的功能需求，研擬對應的設計考量要素與對策。另外，本計畫依據前期研究的坑道襯砌穩定影響主要因素，如環境因素中圍岩材料力學特性依時性變化與弱軟化特性、外力因素中如地震作用等因素，探討對應的場址特性描述及其特性參數，進而瞭解長期穩定場址特性關係、設計評估方法對結構穩定性之影響，作為後續分析場址特性參數變異對處置設施可能造成的影響，研析適切的處置坑道設施設計考量，並提出有關場址特性描述與參數評估的具體建議，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：放射性廢棄物處置場，坑道異常現象，長期穩定，影響因素，特性描述，參數評估

*國立台北科技大學 資源工程研究所

**國防大學中正理工學院 環境資訊及工程學系

目 錄

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	2
1.4 報告內容	3
第二章 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	4
2.1 一般坑道	4
2.2 處置坑道	13
2.2.1 場址特性	13
2.2.2 場址調查規範與成果	15
2.2.3 場址調查項目	18
2.3 處置坑道與一般地下坑道對於坑道穩定與服務功能需求異同分析	27
第三章 國內外坑道設施異狀案例探討與資訊彙整分析	30
3.1 國內外相關研究	30
3.2 坑道襯砌異狀資料蒐集	34
3.3 坑道異狀整理與分類	36
3.4 坑道穩定與服務功能異常現象影響因素探討	43
3.4.1 坑道異狀影響因素	43
3.4.2 異狀案例資訊彙整分析-外力因素	46
3.4.2 異狀案例資訊彙整分析-環境因素	59
第四章 影響坑道長期穩定與服務功能因素之場址特性描述與 對應參數探 討	67

4.1 外力因素	67
4.1.1 地震作用	67
4.2 環境因素	70
4.2.1 大地材料依時性變形	70
4.2.2 大地材料弱軟化	72
4.3 既有坑道設計方法與規範之檢討	78
第五章 處置坑道功能需求分析以及對應的場址特性變異影響之探討	79
5.1 不同地盤組合下地震作用之影響	79
5.2 既有長期穩定影響因素耦合場址變異效應	80
5.3 開挖擾動引致場址特性變異之效應	82
5.4 開挖引致材料特性變異之影響	86
5.5 處置坑道功能需求分析	89
第六章 坑道處置設施設計與場址特性參數評估要項之探討	93
6.1 場址特性描述項目與參數評估要項之探討	93
6.2 坑道處置設施設計評估要項之探討	95
第七章 結論與建議	98
7.1 結論	98
7.2 建議	99
參考文獻	102

[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核能工程發展的關鍵項目，其中天然障壁與工程障壁提供廢棄物處置的防護，其結構安全與長期穩定的確保，不僅為低放射性廢棄物最終處置設施設計與建造的關鍵議題，結構安全與長期穩定的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，然低放射性廢棄物處置場址工程規模龐大，其運行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。

行政院原子能委員會放射性物料管理局(以下簡稱物管局)101 年度「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術研究」計畫，已具體提出我國特殊地質條件下，影響坑道穩定與服務功能異常現象之關鍵因素，主要包括外力作用與環境因素兩部分，外力作用中包含作用於坑道上方不均勻載重、地震作用與邊坡運動等因素，環境因素包含大地材料依時性變形與風化作用造成弱軟化行為等。然為提供處置坑道設施相關的設計參數評估要項，須瞭解長期穩定影響因素對應的場址特性描述調查及場址特性參數，以及場址特性參數變異對處置坑道穩定可能造成的影響，據以提供處置坑道設施設計的考量要素與評估參數，以俾利完善國內低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，藉已蒐集國內具代表性的既有坑道設施異狀案例，探討襯砌異狀對坑道設施功能需求之影響，繼而基於處置坑道設施設計及其穩定性的功能需求，研擬對應的設計考量要素與對策，提出處置坑道長期穩定設計考量因素以及對應的審查技術與管制要項的探討與建議。

另外，本計畫亦將初步掌握的既有坑道襯砌穩定影響主要因素，如環境因素中圍岩材料力學特性依時性變化與弱軟化特性、外力因素中如地震作用、邊坡運動與開挖擾動等因素，探討對應的場址特性描述及其特性參數，分析場址特性參數變異對處置設施可能造成的影響，據以研究適切的處置坑道設施設計考量，及相關場址特性描述與參數評估的具體建議，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」計畫與 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，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。核研所 101 年執行「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術研究」計畫，依據既有坑道襯砌異狀歸納坑道設施長期穩定性影響因素，包括圍岩材料力學特性依時變化、隧道長期荷載外力的變化、突發性外力事件如地震作用、邊坡運動等因素，並就處置坑道與一般坑道功能需求與穩定性評估要項，指出既有一般坑道規範與準則應用於處置坑道之不足，仍須進一步針對長期穩定性影響因素

探討相關處置坑道設施設計與穩定性評估參數，供處置設施經營者執行處置計畫，以及相關單位研修審查導則之參考，詳參相關計畫之期末報告。

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 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；

第三章 國內外坑道設施異狀案例探討與資訊彙整分析；

第四章 影響坑道長期穩定與服務功能因素之場址特性描述與對應參數探討；

第五章 處置坑道功能需求分析以及對應的場址特性變異影響之探討；

第六章 坑道處置設施設計與場址特性參數評估要項之探討；

第七章 結論與建議。

第二章 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

處置處置坑道設施主要以工程與天然等多重障壁概念封存放射性廢棄物，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。物管局 101 年度「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術研究」計畫中，已將處置坑道與一般坑道於設計目標、坑道穩定需求等考量下之調查準則、流程項目、方法與需求進行詳細整理，並比較處置坑道與一般地下坑道調查設計項目之異同分析。本計畫為「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術研究」研究計畫之延伸，就前期報告提出的影響坑道穩定與服務功能異常現象之關鍵因素，深入探討坑道穩定影響因素對應的場址特性描述項目與評估參數，以研究適切的處置坑道設施設計考量，及相關場址特性描述與參數評估的具體建議，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。爰此，鑒於報告的完整性，本章及第三章「國內外坑道設施異狀案例探討與資訊彙整分析」，將引用部分前期報告成果，作為論述與佐證本計畫研究成果之基礎。

2.1 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・同解説」，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、內容與範圍如表 2.1-1 所示。圖 2.1-1 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 2.1-2 所示，調查項目則詳見表 2.1-1，表 2.1-4 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 2.1-5，表 2.1-6 則為建議隧道周圍環境之調查項目。另外，國內外一般場址特性調查的規範或研究成果，如表 2.1-7 所示。

表 2.1-1 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	選線所需的調查	決定路線	設計、施工計畫所需的調查	開工	施工中的調查	竣工	施工後的調查
主要目的	未取得選擇適合於地形、地質及其他環境條件之路線所需的資料，以及為籌劃下一階段調查所需的基本資料。		取得初步設計、施工計畫及估價等所需的基本資料。		施工中可能發生的問題的預測及確認，設計變更、施工管理。取的供補償及日後所需的資料。		施工中及施工後所發生問題的確認。取的供補償或變狀對策所需的資料。
調查內容	地形與地質調查、環境調查，以及其他調查。一般概略性調查。		地形與地質調查、環境調查，以及其他調查。精密的地質調查、考慮具體周邊對策之調查，以及工程相關設備等所需之調查等。		地形與地質調查、觀測、環境調查，以及其他調查。隧道洞內之觀測係以觀察地盤狀態及觀測支撐之行為為主。隧道周邊的環境調查、觀測係以判別施工的影響及對策的效果為主。		地質調查、觀測、環境調查，以及其他調查。隧道周邊的環境調查、觀測係以判別施工的影響及對策的效果為主。
調查範圍	包括比較路線之廣泛範圍。		隧道、可能與隧道有關之處所及各該周邊。		隧道內及可能受施工影響的範圍。		已有問題處為中心之影響範圍。

表 2.1-2 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、崖錐堆積物等，隧道河口附近之不穩定地形、地質。 2. 地質構造，尤其斷層、裂縫等弱面。 3. 人工改變前的表層地質。		1. 計畫地區內雖然能夠以均一精度做出調查，但因有誤判的可能，故應在地表勘查時加以確認。 2. 在各勘查階段應在施行判讀，藉以提高精度。	
地表地質勘查	1. 崖錐、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. 地盤的彈性波速度。 2. 起因於斷層、破碎帶之低速度帶的位置、規模及速度值。	1. 1. 洞口附近、小覆蓋區間之未固結堆積物、風化層厚度、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	
	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. 崖錐和風化層深度的掌握。 2. 用比電阻值掌握地質結構和岩質。 3. 軟弱夾層之檢出。 4. 軟層之性質形態和規模的掌握。 5. 地下水和含水層之分布、性質形態的探討	
鑽孔調查	1. 土砂、岩盤的成層狀態與分布。 2. 斷層、破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. 地盤之N值與軟硬或緊密程度。 2. 土壤試驗的採取，組成土壤的判別和分類。	1. 隧道河口附近、小覆蓋區間之地盤穩定性的探討。 2. 岩盤或支撐層深度的掌握。	
	孔內水平載重試驗	地盤之變形係數及彈性係數等。	地盤之變形分析	
	透水試驗	地盤的水理特性(透水係數、由試驗方法求得之透水量係數之蓄水係數)	1. 含水層的突然湧水和恆常湧水的預測、評估。 2. 未固結地盤中間挖工作面自立性的評估。	1. 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(使用浮游型震震器時)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 2.1-3 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					
	斜坡、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		○	○	○	○	○	○	○	○	○				○	○	○	○	○	○	○					
地盤條件	有可能崩坍之地盤						○	○	○					○	○	○									
	有高地熱、溫泉、有害瓦斯及地下資源等的地盤			△	○	○	○	○	△			○	○		△	○	△	△	△		△	○	○	○	△
	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 2.1-4 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 2.1-5 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 文 調 查 的 綱 目	資料	收集地形、地質、水文、地下水利用之相關資料，並賞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。	◎	◎	△	△		
	水文地質	《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)及地下水性質型態(地層水、裂縫水)等整理成水文地質圖，藉以預測湧水地點集集水範圍，並擬定有效的水文地質調查計畫。	地表地質勘查 物理勘查 鑽孔調查 孔內檢層 水質調查	◎ ○ ○ △ △	◎ ◎ ◎ ◎ ○	○ ○ ○ ○ ○	△ △ △ △ ○	
		《含水層的特性》評估含水量的透水係數、儲蓄係數等之水力常數，俾依水理學方法預測湧水量與集水範圍。	單孔式透水試驗 湧水壓試驗、灌水試驗 抽水試驗、孔間透水試驗 追蹤劑試驗、流向流速試驗 減水深調查	△ △ △ △ △	◎ ◎ ○ △ △	△ △ △ △ △	△ △ △ △ △	
		水平衡	為掌握調查地周邊的水循環系統，實施水文氣象、地表流量、地下水位調查等，並探討水平衡，藉以預測因施工而引起的地下水動態。	水文氣象:降雨量、氣溫	◎	◎	◎	◎
				地表流量:河川流量、湖沼蓄水池、堰及用水量、湧泉量 地下水位:觀測井、現有井 蒸發散量 隧道湧水量、缺水影響	◎ ◎ ○ ○	◎ ◎ ○ ○	◎ ◎ ○ ◎	◎ ◎ ○ ◎
	水文環境	掌握上列調查所獲得的可能集水範圍及鄰近地區的水源與水利用實際狀態，藉以預測因施工而引起的影響。	水源:湧泉、河川、湖沼、蓄水池、井、有效雨量 水利用:公共給水、下水道、工業用水、農業用水	◎ ○	◎ ◎	○ ○	○ ○	
預測方法	預測隧道洞內是剖有湧水發生、湧水量、湧水位置及其集水範圍。預測的方法運用，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實施	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 △ :必要時最好加以實施之調查

表 2.1-6 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、下陷對建築物的影響	過去施工案例的調查
施工中	地盤的狀態變化 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
	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、臭氧、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特別注意地下水位的變動測定應在開工前調查
	噪音 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附蓋小的區間
	穢物汙染 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 ₂ O ₂ 、H ₂ O)	留意礦化帶、礦床、探討礦渣、湧水處理
竣工後	空氣汙染	空氣汙染物質(濃度分佈特別注意特別是 CO ₂ 、NO ₂)氣象狀況	注意隧道洞口及通風塔周邊

表 2.1-7 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"> (1) 日本土木學會，軟岩的調查・試驗的指針(案)，1991。 (2) 日本土木學會，隧道在調查計測的評估與利用，1987。 (3) 日本土木學會，隧道的地質調查與岩盤計測，1983。 (4) 日本土木學會，隧道標準示方書 山岳工法・同解說，2006。 (5) Bieniawski, Z. T., Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, 1984. Hoek, E. and Brown, E. T., Underground Excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1982. (7) Hoek, E., Rock Engineering, Evert Hoek Consulting Engineer Inc., Canada, 2000. (8) U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations, Washington, 1995. (9) U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock, Washington, 1997. (10) U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design Geotechnical Investigations, Washington, 2001. (11) British Standards Institution, Code of practice for site investigations (BS 5930), 1999.
國內	<ol style="list-style-type: none"> (1) 工址地盤調查準則(內政部建築研究所，1993) (2) 大地工程調查作業準則(交通部台灣區國道新建工程局，1999) (3) 隧道工程設計準則與解說(中國土木水利工程學會，1999) (4) 建築物基礎構造設計規範(內政部營建署，2001) (5) 台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立(行政院公共工程委員會，2003) (6) 初等工程地質學大綱(洪如江，2007)

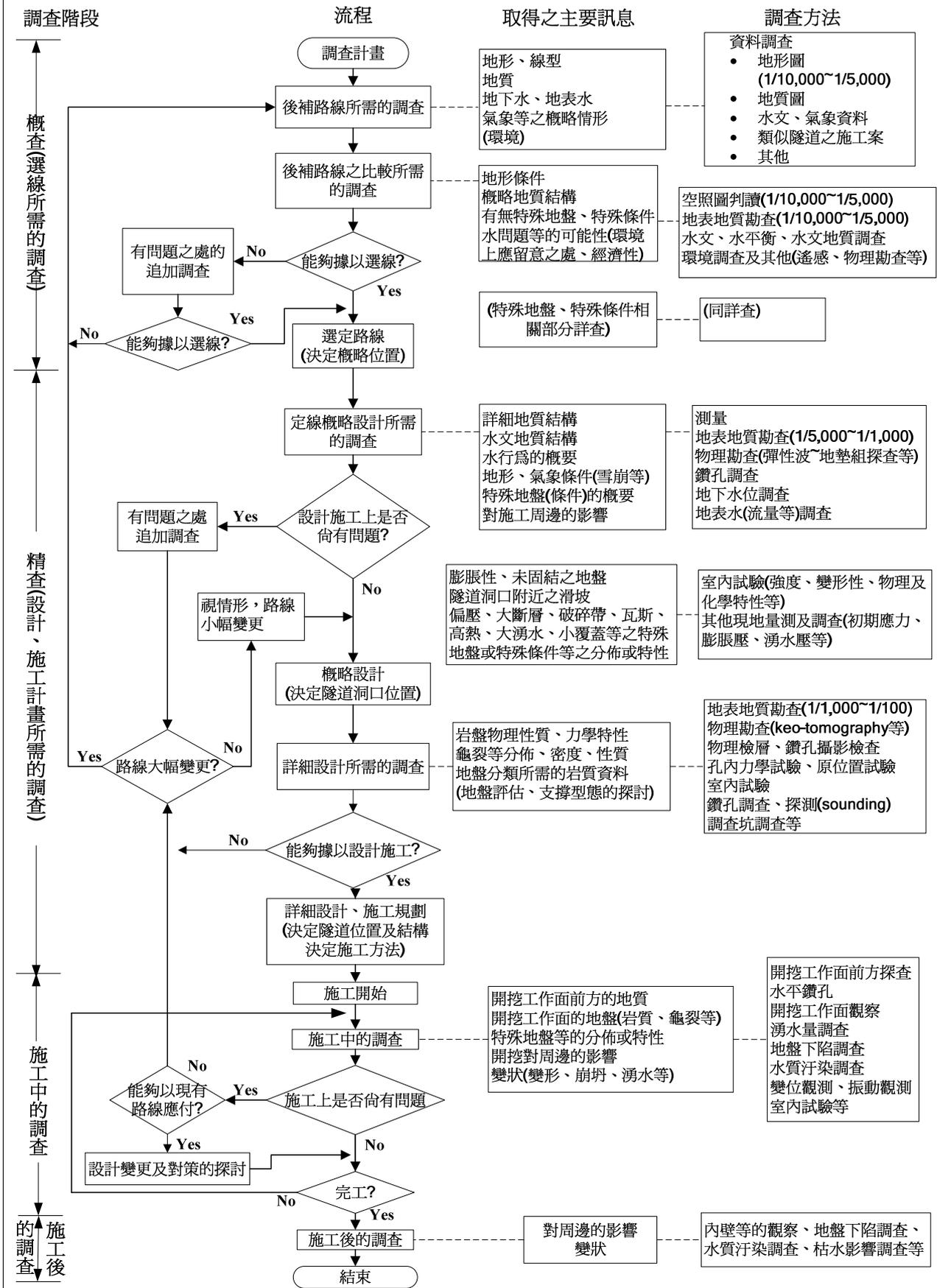


圖 2.1-1 山岳隧道各階段工址調查流程圖 (日本土木學會, 1996)

2.2 處置坑道

主要以「場址特性」、「場址調查規範與成果」與「場址調查項目」三個部分統整處置設施場址特性調查與參數評估架構。

2.2.1 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，其「場址特性」含括之項目如表 2.2-1，各文件場址特性要求項目如后。

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 2.2-1 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
		(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		
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

2.2.2 場址調查規範與成果

有關處置場場址特性調查的規範或研究成果，目前以國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 發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亦可供參考。相關國家制定之規範如表 2.2-2 所示。

表 2.2-2 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)

2.2.3 場址調查項目

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 2.2-3 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 2.2-4 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 2.2-5，表 2.2-6 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 2.2-7 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 2.2-1 所示，表 2.2-8 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. 韓國於 Kaeri 地區設置一地下研究試驗室，其主要研究項目與內容詳見表 2.2-9。(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. 熱 - 水 - 力 - 化 耦 合 作 用 (Thermal-Hydrologic-Mechanical-Chemical Coupled processes)：探討熱力學、水力、力學、化學等作用在耦合行為下對處置設施的反應。

表 2.2-3 場址特性調查之項目與技術 (IAEA, 1984)

1. 地質環境		2. 水文地質學及水文學	
調查項目	<p>上覆鬆散沉積物的岩石類型</p> <p>不同岩層介面連結與交叉的關係</p> <p>構造環境：褶皺、斷層與裂隙類型、均向及異向性之特性</p> <p>地質歷史</p>		<p>孔隙率及滲透率</p> <p>補給區及排水區</p> <p>地下水流速及年代</p> <p>水力梯度</p> <p>水</p> <p>遷移及吸附特性</p> <p>化學</p> <p>含水層與滯水層的幾何特性</p> <p>地表水體特性</p>
調查技術	<p>遙測</p> <p>空中及地面地球物理探查</p> <p>野外地質測繪</p> <p>地球物理陸上調查</p> <p>鑽孔測井</p>		<p>鑽孔測井</p> <p>現地試驗與量測</p> <p>室內研究</p> <p>遙測</p>
3. 構造學		4. 岩石力學特性	
調查項目	<p>地震</p> <p>地殼均衡及側向運動</p> <p>應力狀態</p> <p>近期斷層運動</p>		<p>岩石與裂隙填充材料的組成成分</p> <p>放射性核素與圍岩間物理特性及化學特性的相互影響</p>
調查技術	<p>遙測</p> <p>野外地質測繪</p> <p>大地/微震調查</p> <p>現地試驗與量測</p>		<p>野外測繪</p> <p>鑽孔測井</p> <p>現地試驗與量測</p> <p>室內研究</p>
5. 地形地貌演化過程			
調查項目	<p>風化</p> <p>侵蝕</p> <p>地滑</p> <p>沉積</p>		
調查技術	<p>遙測</p> <p>野外地質測繪</p>		

表 2.2-4 一般空氣、地表與地下調查技術 (IAEA, 1984)

調查技術	電位應用		
	空中	地表	地下
重力式	不同密度岩體之分佈與特徵形狀，例如噴出岩 ^a 、侵入岩與礦體。輔助辨別及解釋地質構造		量測現地岩石密度以改善區域性重力資料之判讀
磁力式	探測磁場強度於區域性與局部性之差異，以助描繪基岩、地質構造之解釋以及礦體之鑑定		
電磁力式	評估礦產潛勢以及探測斷層與裂隙		
震測式	不適用	辨別不同地層包括構造上的輪廓。也可辨別相關結晶質基盤的深度，及探測無擾動之岩體、斷層與裂隙	
電導式	不適用	指出沉積層厚度、鬆散或未固結沉積物之深度、剪切帶或破裂帶之分佈	指出岩性的變化、岩石孔隙率、地下水鹽度與裂隙產狀

^a：為活動地核，如岩鹽，由淺至深地經由重力機制被注入較脆性的上覆岩石產生的構造

表 2.2-5 水文地質調查之項目與技術 (IAEA, 1984)

調查項目	調查技術
孔隙率	鑽孔測井、室內試驗
滲透率	現地試驗(抽水與注水試驗)、封塞試驗 室內試驗、模型率定
地下水流速	示蹤劑試驗、定年法、流體動力學方程式
水力梯度	水壓計水位之觀測
地下水位面自然波動	水井觀測、水壓計水位觀測 氣象觀測
地下水化學成分	化學分析、鑽孔測井
地下水滯留時間與年代	化學分析、同位素組成測定 流體動力學方程式
不同水文地質系統包括飲用水之尺度及關連	水井觀測、水文地質測繪鑽孔測井 現地試驗、化學分析
補注區及排水區位置	遙測、水文地質測繪、示蹤劑試驗 同位素分析、水溫量測
地下水及廢棄物之相互作用	室內試驗

表 2.2-6 大地、物理與化學之參數與量測技術 (IAEA, 1984)

調查項目	參數	量測技術
岩石樣本	材料及化學組成	顯微鏡(光學式、電子式) X 射線繞射分析、乾濕化學分析 放射量測法、X 射線螢光分析 原子吸收光譜法
	年代	同位素分析
	吸附性質	於放射性或其他示蹤劑試驗後之一般化學分析、 現地分析
地下水樣本	化學組成(包括氣體、有機物及微量元素含量)	乾濕式化學分析、放射法 X 射線螢光分析、原子吸收光譜法 光譜量測技術、氣相層析法
	酸鹼度(pH) 氧化還原電位(Eh) 導電率	室內或現地的電化學方法
	年代	同位素分析

表 2.2-7 低放射性廢棄物處置場場址特性之參數 (NUREG, 1982)

地層	孔隙率與孔隙比
岩性與土壤	水力勢能與壓力
構造	滲流速度
地形地貌	視速度
地下水系統及邊界	水流方向
地表水系統及邊界	擴散
補注區及排水區	孔隙水年代
目視描述	吸入壓力
土壤分類	吸入壓力函數
岩體分類	含水參數
材料範圍邊界	滲透量
水範圍邊界	蒸散量
直接場址邊界	降水量
延伸場址邊界	逕流係數(逕流)
顏色(材料顏色)	氣溫
粒徑分佈或參數(粒徑分佈)	氣壓
材料密度	風速與風向
含水量	分配係數
土壤水 pH 值與活性(土壤 pH 值與活性)	礦物學與黏土礦物學
導電率或電阻率(電阻率)	離子交換容量
透入參數	氧化還原電位
材料參數變異	自然伽瑪與光譜(放射性物質)
水力傳導係數	土壤可溶性物質
滲透函數	土壤有機物質
導水係數	氣體成分
蓄水率	地下水化學
異向性	地表水化學
崩陷係數	阿太堡限度
收縮膨脹參數	比重
強度	震波速度
壓密關係	凍脹係數(凍脹作用)
夯實關係	侵蝕度參數(侵蝕度)
回彈指數	界石與點位
材料溫度	埋葬(埋藏)單位邊界

表 2.2-8 Stripa 計畫第三階段之試驗內容 (Fairhurst et al., 1993)

試驗名稱	量測方法	試驗目的
第一次漂移試驗模擬	地下水流入經過排列的六個深度 100 m 的鑽孔之流速與分佈	藉等效孔隙介質與裂隙水流模型與預測值比較
第二次漂移試驗模擬	於已建置 50 m 深鑽孔後，利用剩餘編號 D 的 50 m 深鑽孔進行漂移之驗證	藉等效孔隙介質與裂隙水流模型與預測值比較，包括漂移井建置的影響
驗證漂移系統之裂隙分佈	描繪漂移試驗井於上盤、下盤與側壁之裂隙	比較裂隙網絡模型所預測的隨機裂隙型態
驗證漂移試驗	地下水流入量之流速與分佈	藉等效孔隙介質與裂隙水流模型與預測值比較
第一次雷達/鹽水示蹤劑試驗	在漂移試驗驗證前，於 D 鑽孔蒐集由 H 區域注入的鹽水示蹤劑	設計示蹤劑遷移試驗； 率定等效孔隙介質與裂隙水流遷移模型； 評估漂移井開挖之影響
第二次雷達/鹽水示蹤劑試驗	蒐集由 H 區域注入而漂移的鹽水示蹤劑	設計示蹤劑遷移試驗； 藉等效孔隙介質與裂隙水流遷移模型與預測值比較； 評估漂移井開挖之影響
示蹤劑遷移試驗	蒐集在漂移驗證井及 H 區域中完整岩石注入染料與復合金屬示蹤劑	藉等效孔隙介質與裂隙水流遷移模型與預測值比較
地下水頭之監測	在下列步驟下建立 SCV 場址周圍的地下水位水頭之分布 [1] 建置漂移驗證井 [2] 執行驗證的試驗 [3] 在 T1 鑽孔引流	藉等效孔隙介質與裂隙水流模型與預測值比較

表 2.2-9 韓國地下研究試驗室之研究項目與內容 (Kwon et al., 2006)

R&D 項目

● 岩石力學

- 岩體分類
- 岩石應力與變形量測及分析
- 岩石不連續面與破裂帶之特性及力學效應
- 岩石不連續面水力特性受應力變化的影響
- 鄰近隧道爆破技術與爆破效應之影響
- 開挖擾動帶(EDZ)之發展及其特性
- 評估隧道穩定性與岩石支撐設計
- 岩石熱力特性(加熱試驗)
- 地下設施受震影響

● 地質

- 預測岩石邊界
- 岩石不連續面與破碎帶之分佈
- 岩石不連續面地下水網絡與水流特徵
- 裂隙系統水流試驗
- 流入隧道內水流速率的預測技術

● 工程障壁系統

- EBS 之熱-水-力學行為(THM)
- 工程障壁系統之氣體遷移
- 緩衝材料內污染物擴散與化學緩衝作用
- 緩衝材料與岩石的介面之膠體生成及遷移作用

● 流體遷移

- 岩體中污染物遷移作用
- 剪裂帶之氣體遷移作用
- 岩石基質之污染物擴散作用
- 岩石圈內膠體遷移及阻滯作用

● 系統設計

- 配置技術之展示
 - 隧道封閉技術
 - 堆積孔鑽井驗證技術
 - 混凝土底塞設計與應用
 - 修補操作驗證技術
 - 傳輸方法驗證技術
-

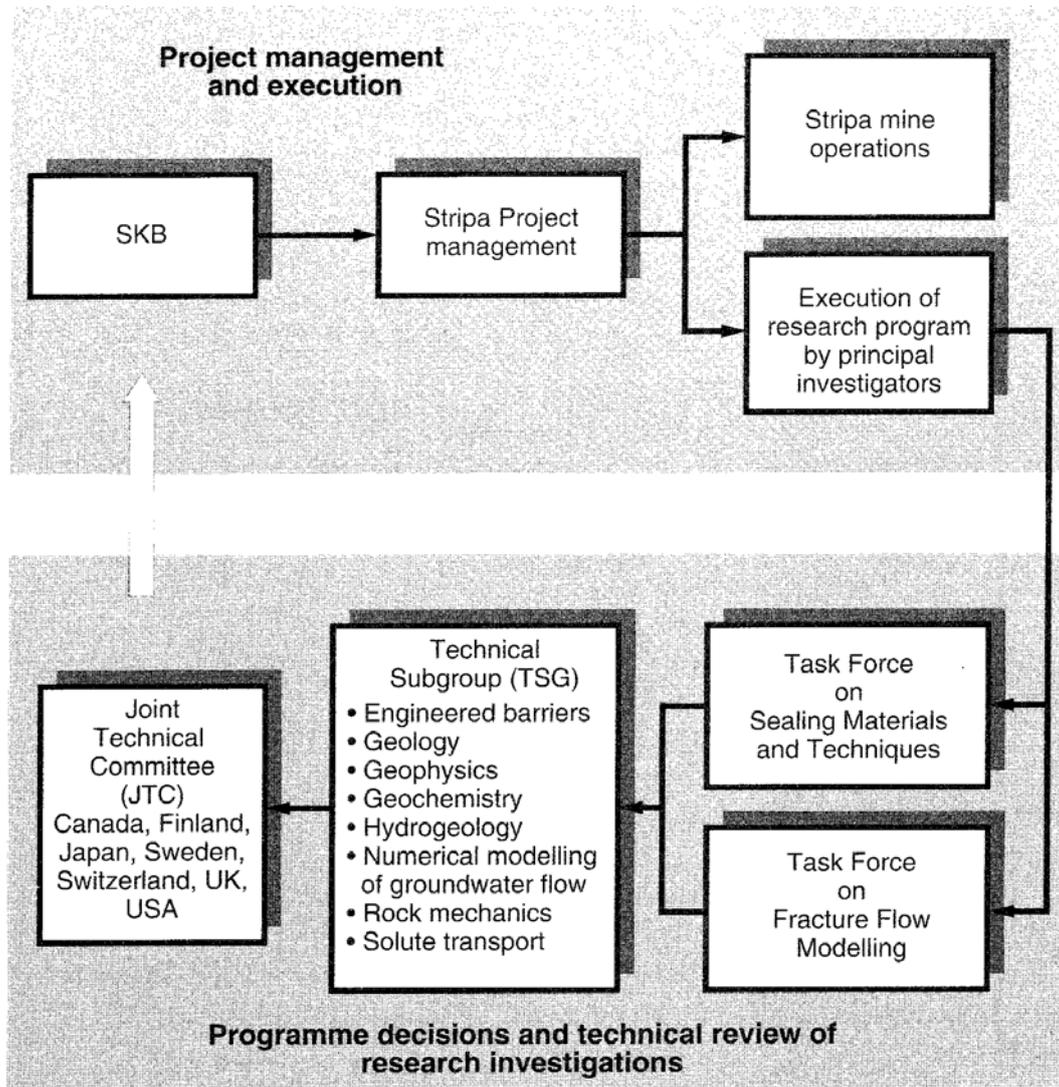


圖 2.2-1 Stripa 計畫第三階段之流程與項目 (Fairhurst et al., 1993)

2.3 處置坑道與一般地下坑道對於坑道穩定與服務功能需求異同分析

既有一般坑道設計方法與規範，於工址調查的選線、設計階段，其調查項目主要包括地形調查、地質調查、以及環境調查等，施工階段著重在開挖中坑道內圍岩變形量監測，及其他地質災害之調查與預防，施工後著重在施工完成後對整體環境的影響調查。綜整之，既有一般坑道的調查理念著眼於評估工程地質如地形、地質、水文地質等條件，對整體工程施工過程安全性與穩定性之考量，於竣工後環境參數的變異、外力作用對未來坑道長期穩定性的調查並未多作著墨，主要一般坑道營運年限多數以百年作為設計基準，且一般坑道長期

穩定性與否僅涉及坑道功能的維持，其影響的空間亦僅限區域尺度，不若處置坑道長期穩定性與否牽涉污染物傳輸的影響範圍甚廣。爰此，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。初步歸納處置坑道於長期穩定性考量下與一般坑道場址特性調查項目的差異，主要有顯著的幾點差異：

1. 時間與空間尺度上的差異：黃燦輝(2013)指出一般坑道與處置坑道在時間與空間尺度上之差異(圖 2.3-1)，一般坑道工程時間上考量為百年，空間上考量尺度為百公尺，處置坑道在時間與空間尺度上分別為千年及公里級，因其尺度上的差異，如何獲得具代表性的場址特性參數，為處置坑道長期穩定性考量的關鍵課題。爰此，考量各種獲得場址特性參數方法的尺度，可明確看出以既有一般坑道的全尺度試驗，佐以地質演化過程的考量，應為獲取處置坑道場址特性參數的可行性作法。
2. 場址特性調查參數之差異：Yow and Hunt(2002)指出因處置坑道在時間與空間尺度上與一般坑道之差異，在場址特性調查參數部分，需考量熱力、水力、應力、化學因素相互耦合效應的影響，各因素間耦合的效應如圖 2.3-2 所示。並比較既有一般坑道與處置坑道於設計目標、調查項目等規範之差異，處置坑道調查項目亦考量地質演化過程包括風化、侵蝕、以及邊坡滑動等相關課題對處置坑道的影響，以確保處置坑道之長期穩定。

本章已初步歸納一般坑道與處置坑道於設計目標、調查項目等規範之差異，惟各調查項目中之影響因素與對應之場址特性描述項目與評估參數，國內外仍尚未有具體的結論，因此如何就坑道長期穩定性深入探討其影響因素，並獲得長期穩定性影響因素對應的場址特性描述項目與評估參數，為坑道處置設施長期穩定性評估之重要課題。

第三章 國內外坑道設施異狀案例探討與資訊彙整分析

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，且許多隧道建成之後未達設計年限一半即出現，顯示襯砌應力已超過混凝土強度，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」中”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，並增列本年度蒐集的異狀案例，據以彙整坑道設施異狀可能肇因，及影響其服務功能異常與穩定性疑慮之因素，提供後續探討長期穩定影響因素對應場址特性描述與參數評估項目之參考。

3.1 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 3.1-1。

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(ice on inside 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 3.1-1。

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 3.1-2 所示(日本土木學會，2003)。

此外，就隧道的異狀現象(圖 3.1-3)，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。

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 3.1-1 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	

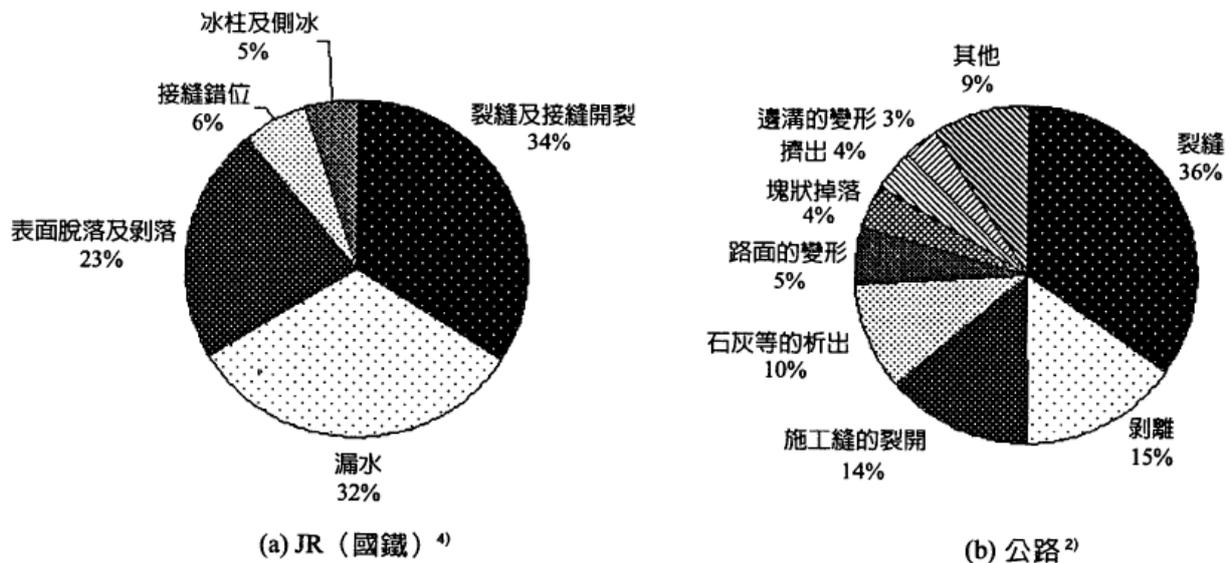


圖 3.1-1 隧道異狀種類比例(日本土木學會，2003)

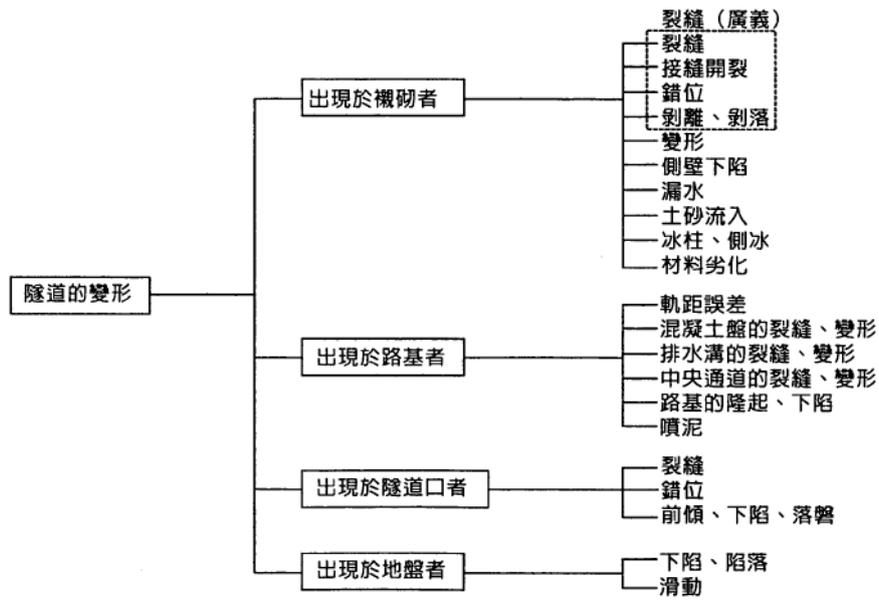


圖 3.1-2 隧道異狀分類圖(日本土木學會，2003)

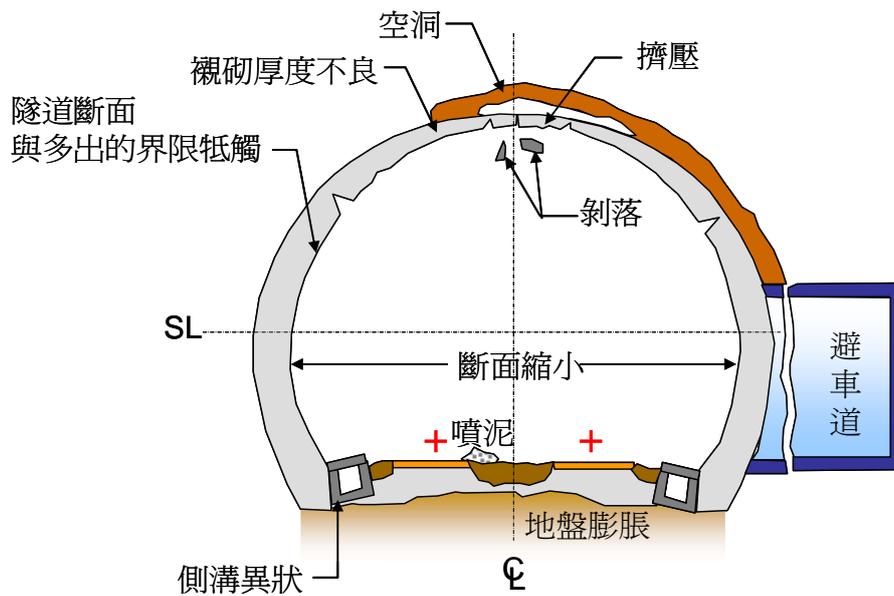


圖 3.1-3 山岳隧道異狀現象模式圖(日本土木學會，2005)

3.2 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 3.2-1。另外，李佳翰(2013)於「山岳隧道襯砌異狀肇因診斷技術研究」博士論文中，蒐集國內外 266 座隧道檢測案例，亦可參考。

表 3.2-1 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 3.2-1 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	√

3.3 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 3.3-1 列舉常見的數種典型，其中除圖 3.3-1(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 3.3-2 至圖 3.3-4 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 $30\sim 60^\circ$ 的散狀剝落(圖 3.3-2(a))、起拱線附近的縱向剝落(圖 3.3-2(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 3.3-2(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 3.3-3(a))、頂拱中間開裂(圖 3.3-3(b))與起拱線附近斜向平行裂縫(圖 3.3-3(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 3.3-4(b)及(c)), 以及外露的鋼筋是否出現腐蝕或挫屈(圖 3.3-4(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 3.3-5(c)), 環片發現裂縫的案例(圖 3.3-5(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 $1/4\sim 1/2$ 寬度或錯動現象, 連續式的裂縫相常罕見。

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。

(3) 以隧道功能分類

圖 3.3-6 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 3.3-7(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 3.3-7(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 3.3-7(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 3.3-7(d))，甚至是破裂隆起(圖 3.3-7(e))等現象(尚新民等，2010)。

隧道滲水在水工隧道中相當常見(圖 3.3-7(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，加速加劇細料的淘刷，滲水夾帶細料甚至砂礫進入隧道內。由於水流運搬了淘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，

淘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 3.3-7 (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 3.3-7 (h))(尚新民等，2010)。

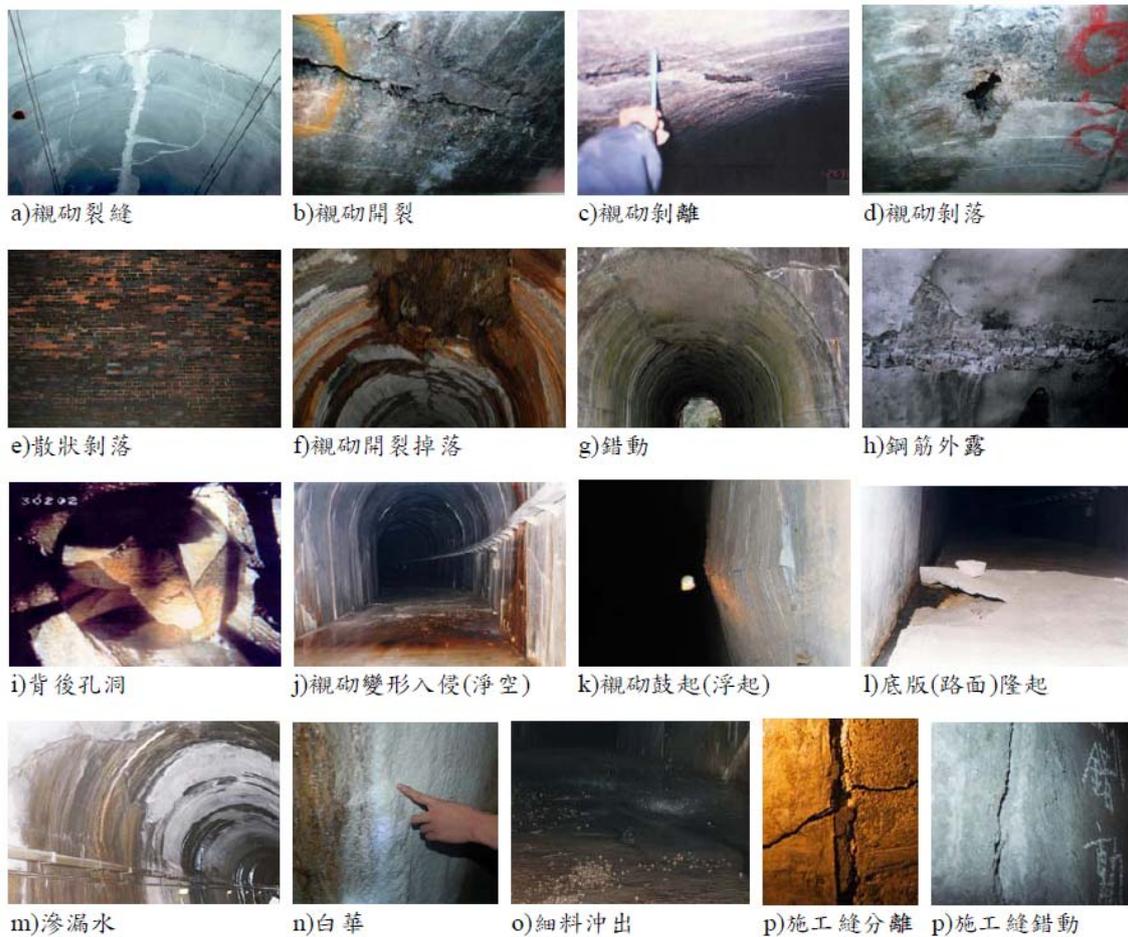


圖 3.3-1 數種典型的目視可識別異狀(王泰典等，2007)



圖 3.3-2 磚造襯砌常見的目視可識別異狀(王泰典等，2007)



圖 3.3-3 混凝土襯砌常見的目視可識別異狀(王泰典等，2007)

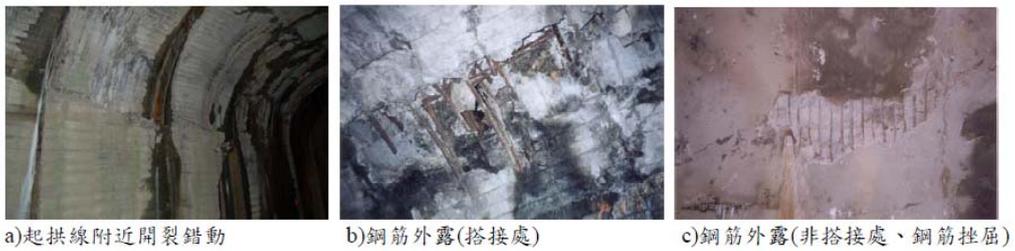


圖 3.3-4 鋼筋混凝土襯砌常見的目視可識別異狀(王泰典等，2007)

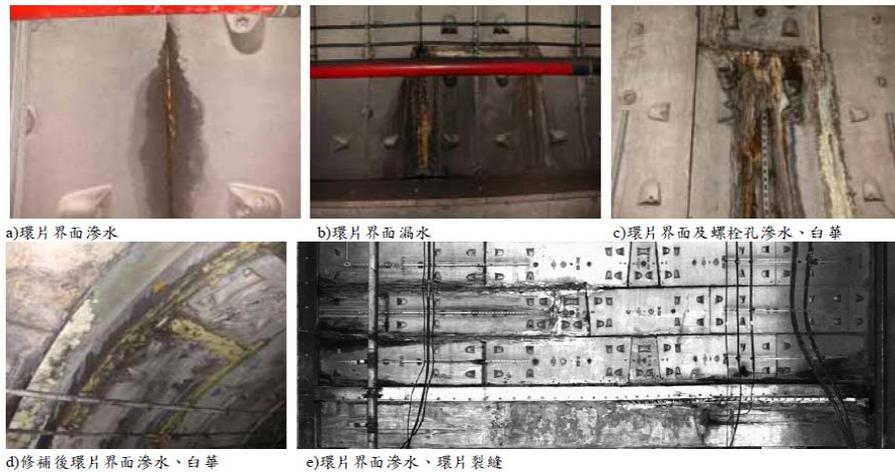


圖 3.3-5 預鑄環片襯砌常見的目視可識別異狀(王泰典，2008)

(3) 以隧道功能分類

圖 3.3-6 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 3.3-7(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 3.3-7(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 3.3-7(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 3.3-7 (d))，甚至是破裂隆起(圖 3.3-7 (e))等現象(尚新民等，2010)。

隧道滲水在水工隧道中相當常見(圖 3.3-7 (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 3.3-7 (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 3.3-7 (h))(尚新民等，2010)。



圖 3.3-6 鐵路隧道異狀類型(李佳翰等，2008)

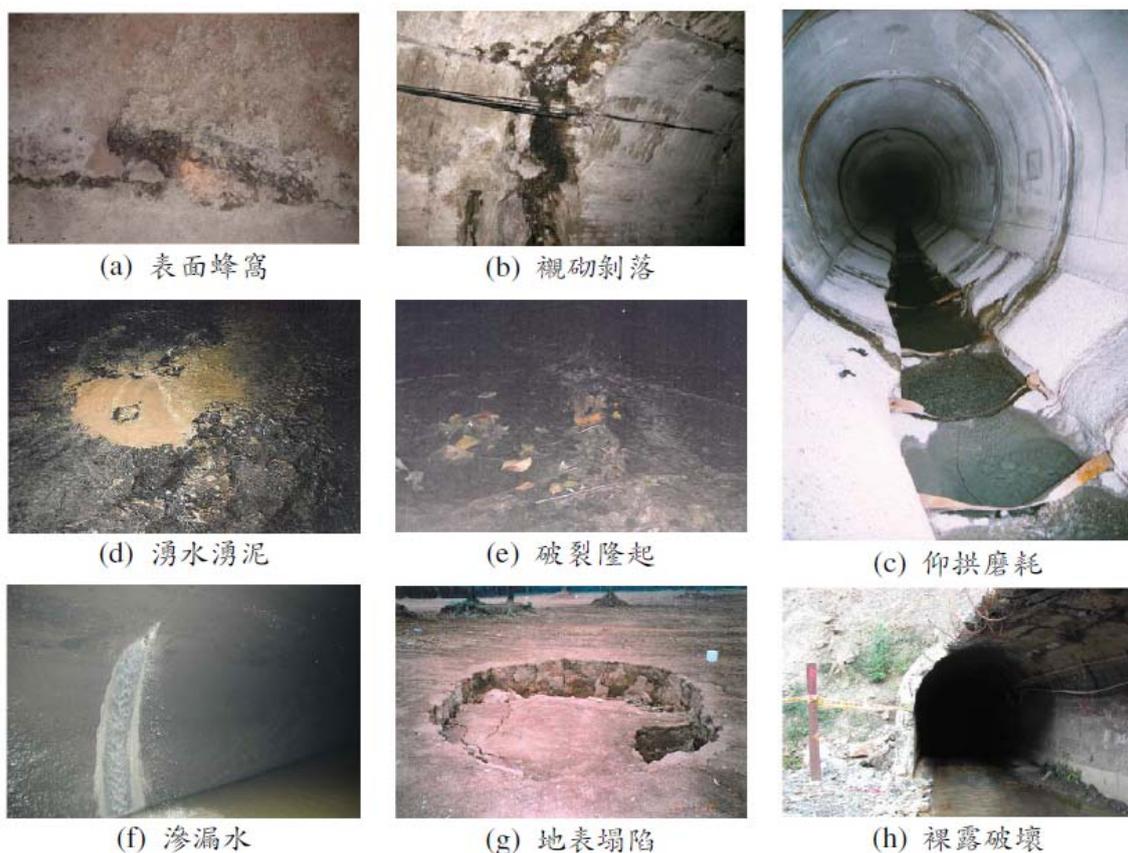


圖 3.3-7 水工隧道異狀種類(尚新民等，2010)

3.4 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。

3.4.1 坑道異狀影響因素

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，黃燦輝等(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，皆論及隧道襯砌異狀的影響因素，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(表 3.4-1)。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：(1)塑性壓；(2)鬆弛土壓；(3)偏壓三大類，如表 3.4-2 所示。本計畫彙整前人及案例判釋獲得的結果，將坑道的異狀原因大致區分為「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。

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 3.4-1(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 3.4-1(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 3.4-1(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 3.4-2 所示。

表 3.4-1 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，如水位昇降之水壓變化、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(襯砌勁度不足)	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.襯砌背後孔洞 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 3.4-2 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	<p>塑性區</p>	<p>側壁的水平裂縫 拱頂端的壓曲</p>	<p>頂端的壓曲</p>
鬆弛土壓	<p>鬆弛區</p>	<p>漏水 裂縫密度較高的範圍 崩塌地點 粉砂岩、砂岩~粉土、砂的單斜構造</p>	<p>頂端的崩落</p>
偏壓		<p>拱肩部的水平裂縫 FL SL L SL FL</p> <p>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</p>	<p>肩部的張力裂縫</p>

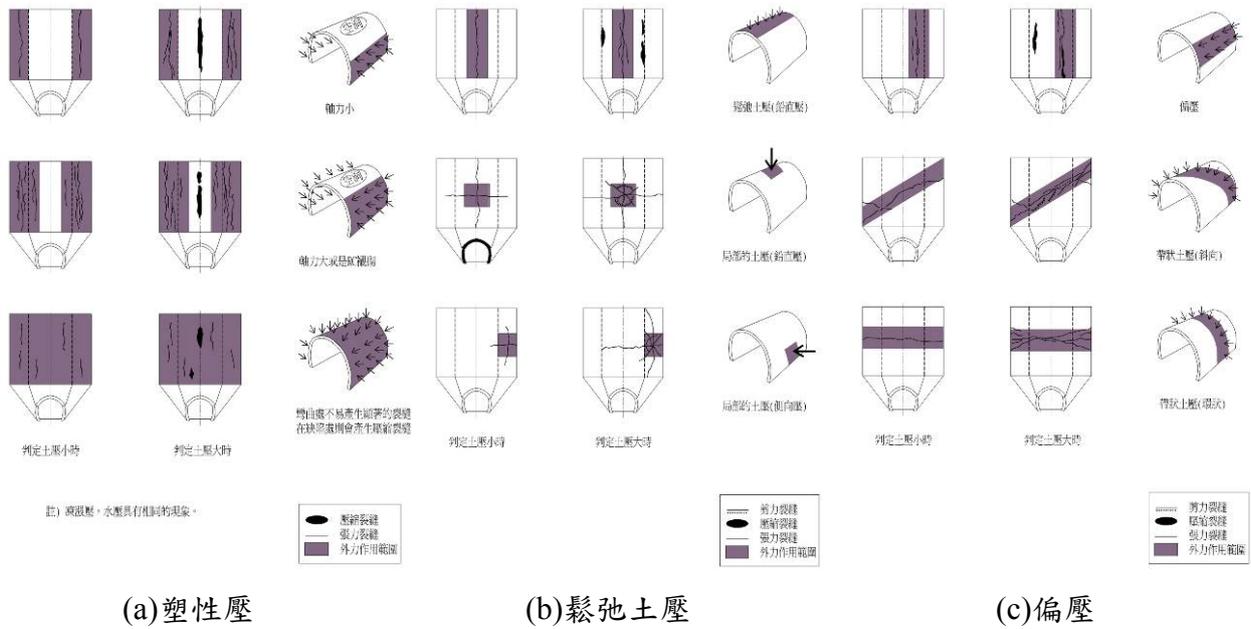


圖 3.4-1 塑性壓、鬆弛土壓與偏壓之裂縫型態(日本鐵道總合技術研究所，2007)

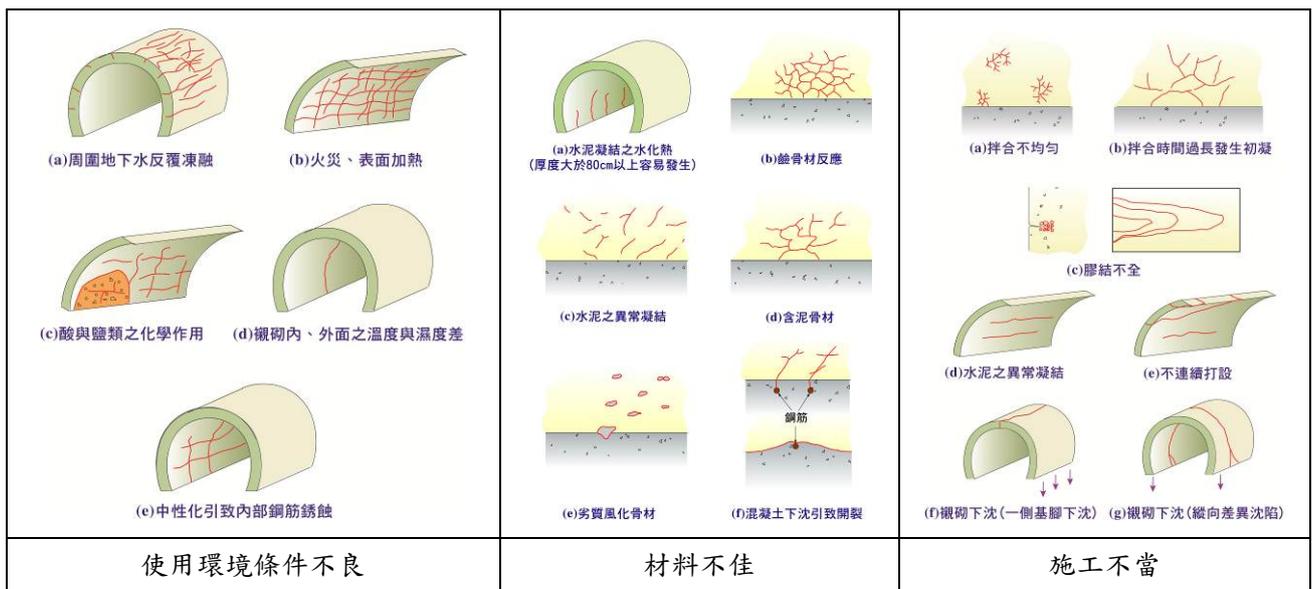


圖 3.4-2 環境、材料與施工因素之裂縫型態(日本鐵道總合技術研究所，1998)

3.4.2 異狀案例資訊彙整分析-外力因素

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 3.4-3)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)。

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° ，岩性以黑色片岩為主，間夾綠色片岩、砂質片岩。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 3.4-4)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，利用遙測影像進行判釋。據其成果(圖 3.4-5)研判應為邊坡潛移的三個滑動面所致，如圖 3.4-6 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。

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，2009 年 10 月和 2011 年 10 月，該隧道先後遭遇上邊坡崩塌壓毀(圖 3.4-7)，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。

李佳翰(2013)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，以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(圖 3.4-8)。

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 3.4-9，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 3.4-10，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 3.4-11 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(Owen and Scholl,1981)。縱向變形主要是由沿隧道縱軸之 P 波所引致，如圖 3.4-12(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 3.4-12(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 3.4-12(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 3.4-12(e)；若是箱型斷面之隧道，則產生 Ranking(角度之變形，如圖 3.4-12(f))。

坑道開挖造成圍岩產生變形，因開挖擾動使得圍岩應力重新調整，隧道周圍圍岩產生變形量較大或岩石材料特性改變的區域，稱為開挖擾動帶(Excavation Disturbed Zone, EDZ)。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)，根據坑道監測開挖後 20 年的結果，探討開挖擾動帶對隧道穩定造成的影響，圖 3.4-13(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 3.4-13(b)為坑道剖面仰拱的變形狀況，圖 3.4-13(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，研究結果指出因坑道開挖造成的開挖擾動帶(圖 3.4-14)，已使坑道部分圍岩因壓力重新調整而造成圍岩內部微裂隙產生，隨著部分損傷圍岩在時間與應力作用下損傷區域逐漸發展，進而產生一系列的挫屈與擠壓破壞(圖 3.4-15)，造成坑道逐漸變形影響其長期穩定性。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(圖 3.4-16)，研究結果顯示軟弱岩盤受開挖擾動後，開挖擾動帶隨時間遞增而範圍增大，其擴張規模與初始擾動帶範圍相似，顯現開挖擾動對岩盤依時性變形影響顯著。

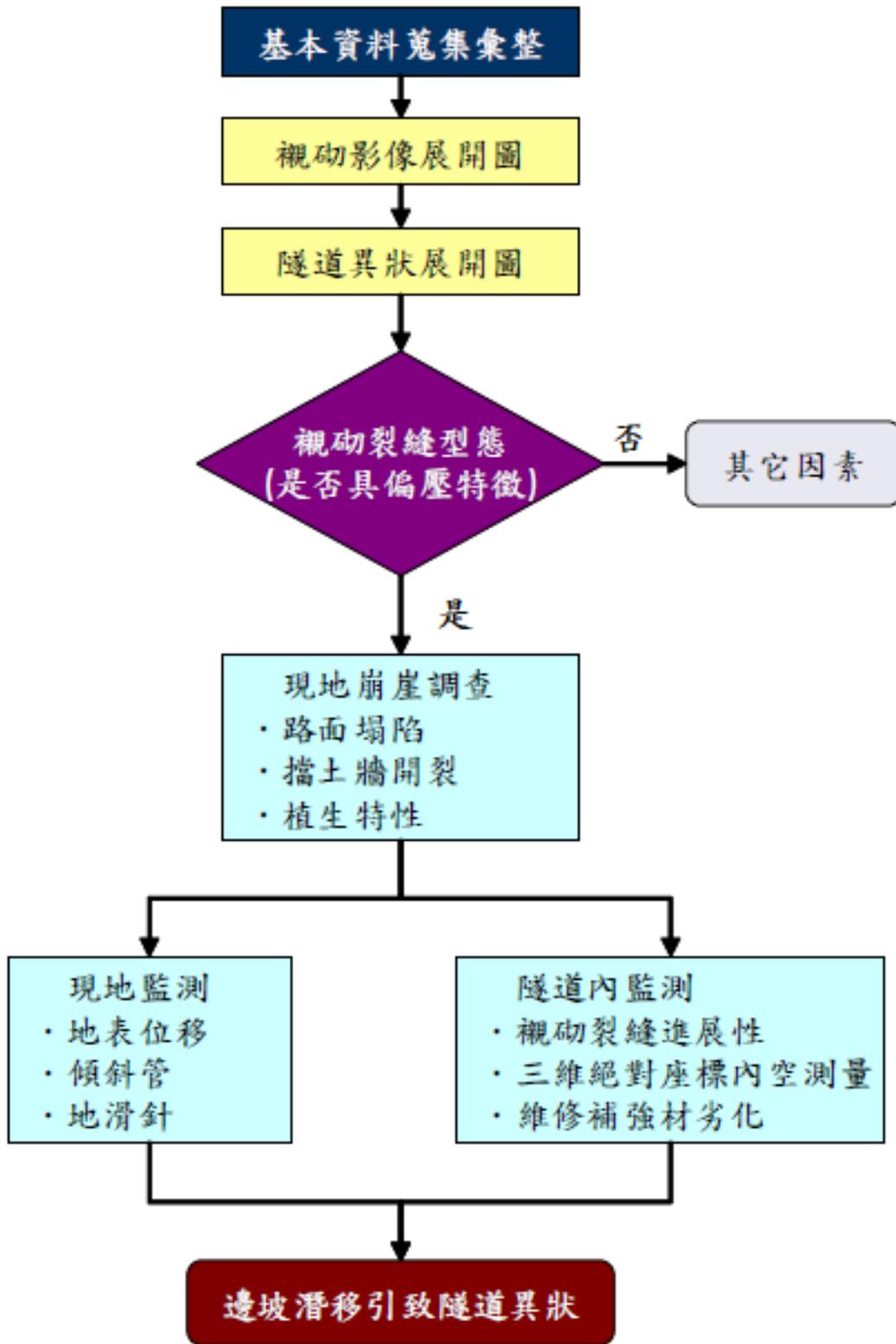


圖 3.4-3 邊坡潛移引致隧道異狀診斷流程圖(李佳翰等，2009)

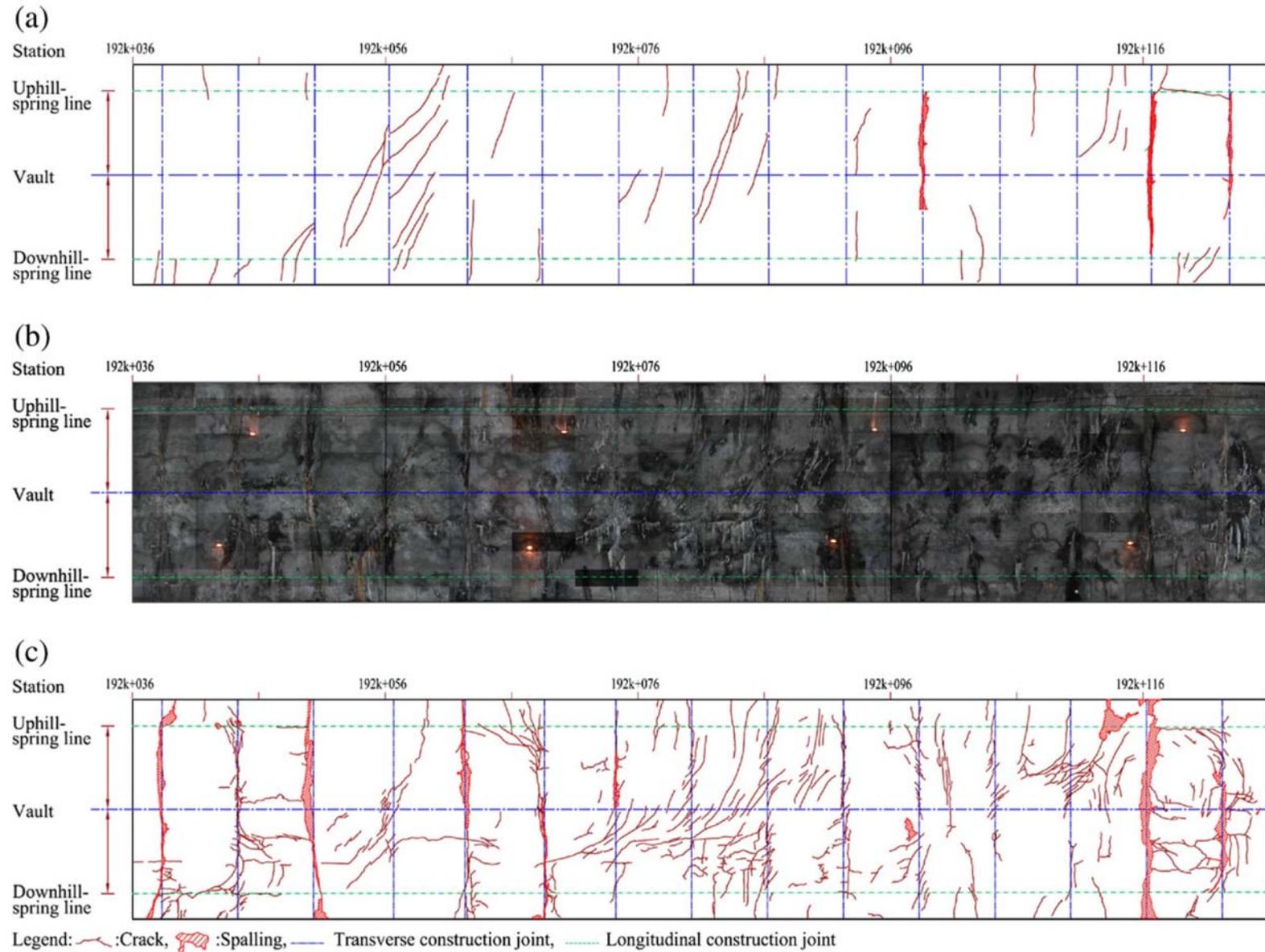


圖 3.4-4 隧道襯砌影像與異狀展開圖於 1992 年(上)與 2009 年(中下)比較(Wang, 2010)

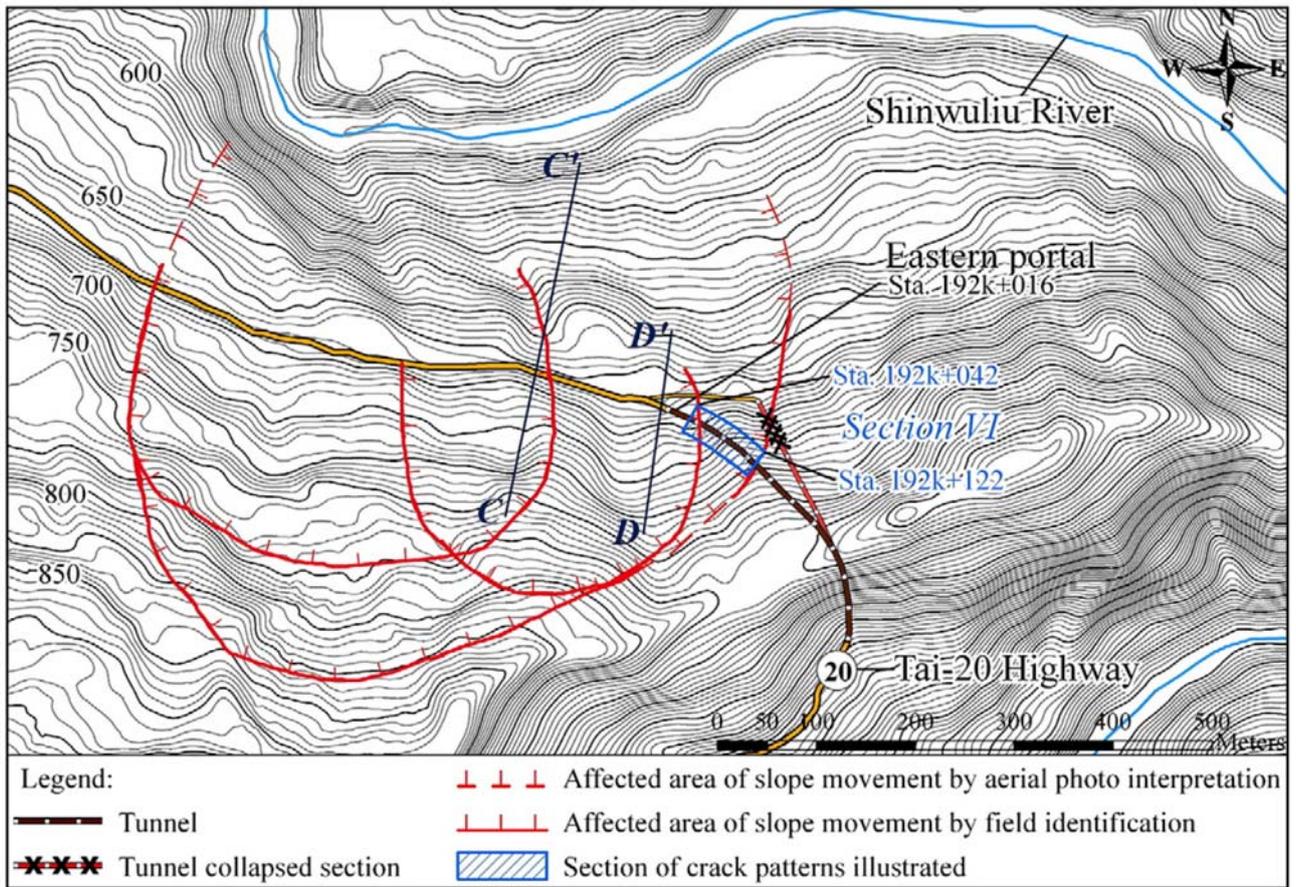


圖 3.4-5 遙測影像判釋滑動體範圍與邊界(Wang, 2010)

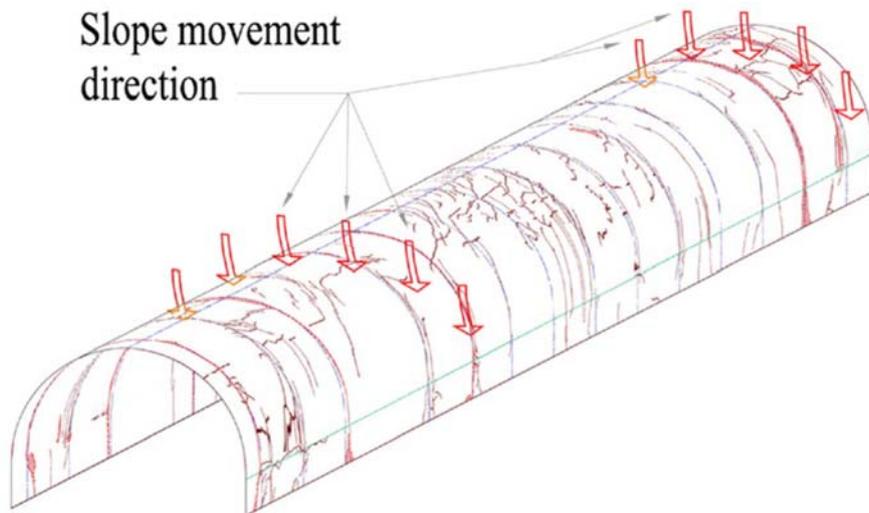


圖 3.4-6 邊坡潛移與隧道相對關係示意圖(Wang, 2010)



圖 3.4-7 中部橫貫公路某隧道受邊坡失穩而破壞，災前(左)與災後(右)照片

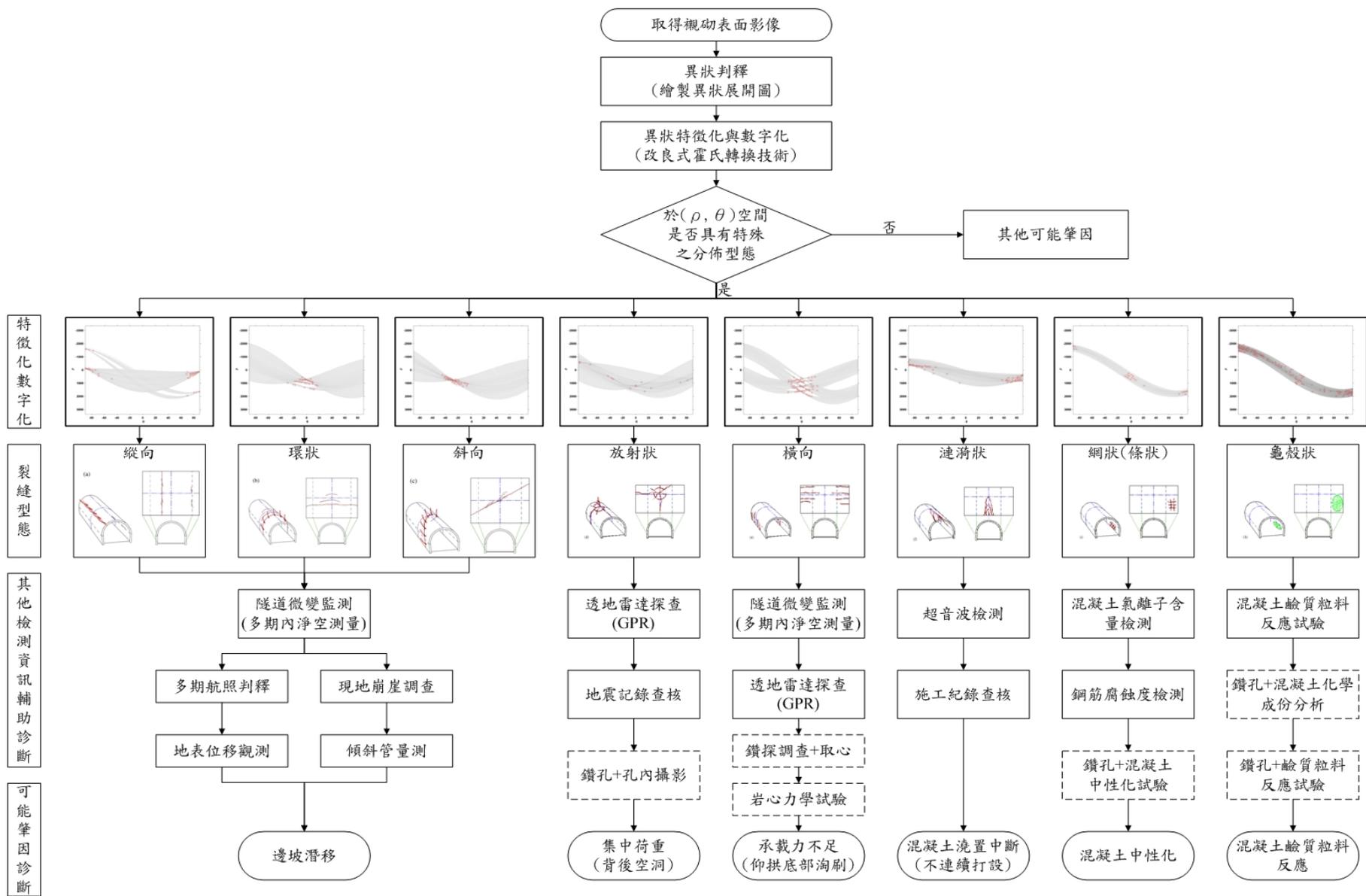


圖 3.4-8 隧道異狀診斷流程(李佳翰，2013)

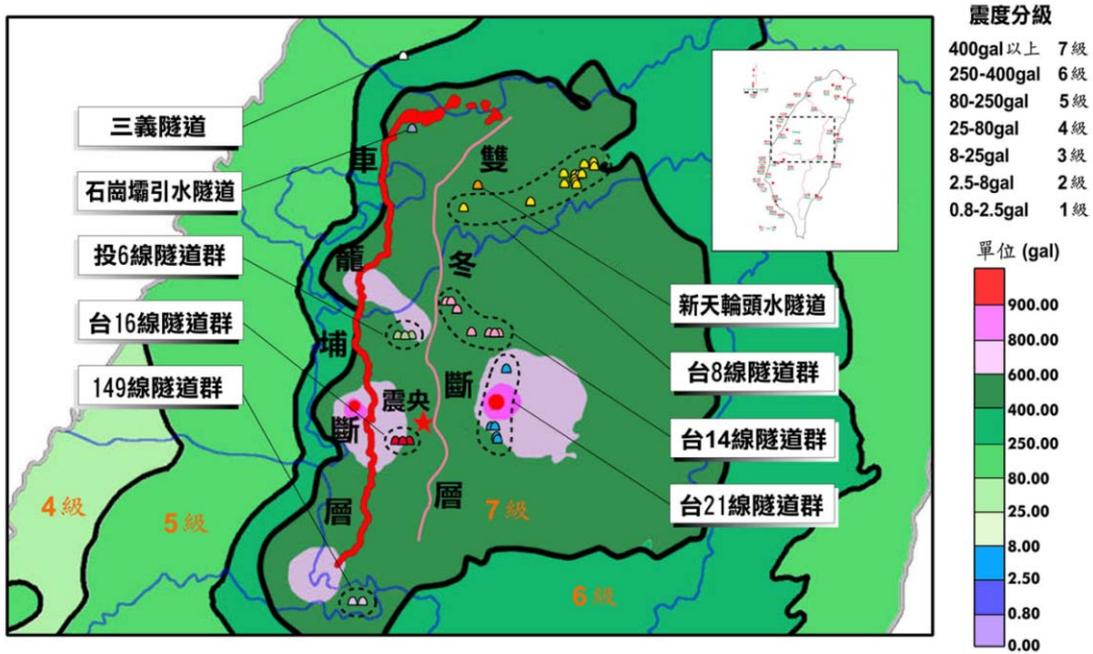


圖 3.4-9 集集大地震台灣各地區震度圖與中部地區受損隧道位置分佈
(王文禮等人，2000)

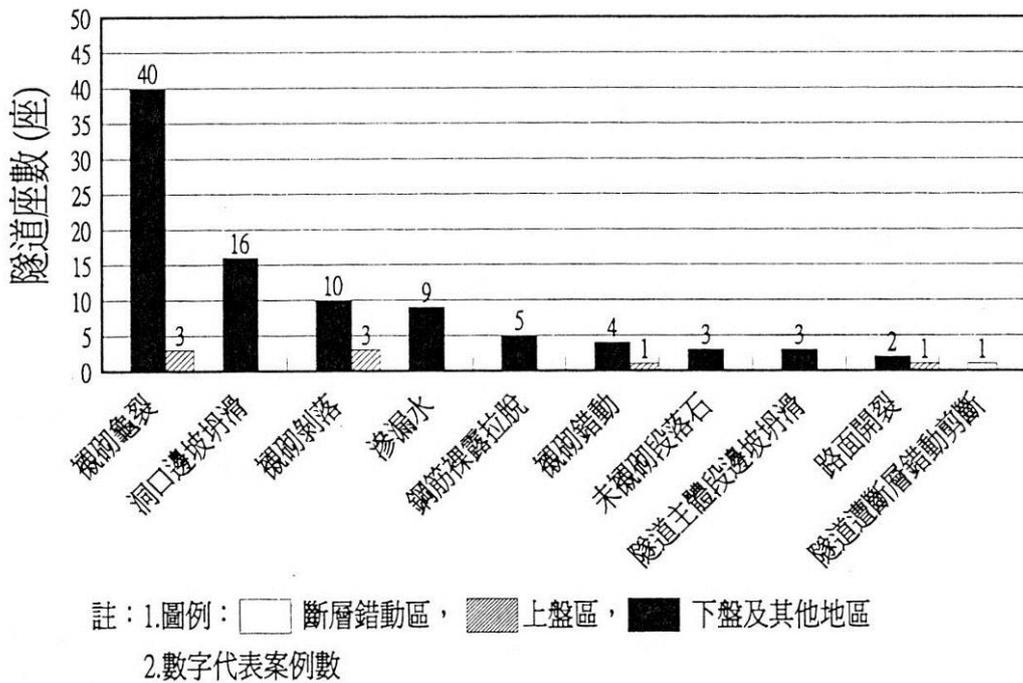


圖 3.4-10 隧道受損情形統計(王文禮等人，2000)

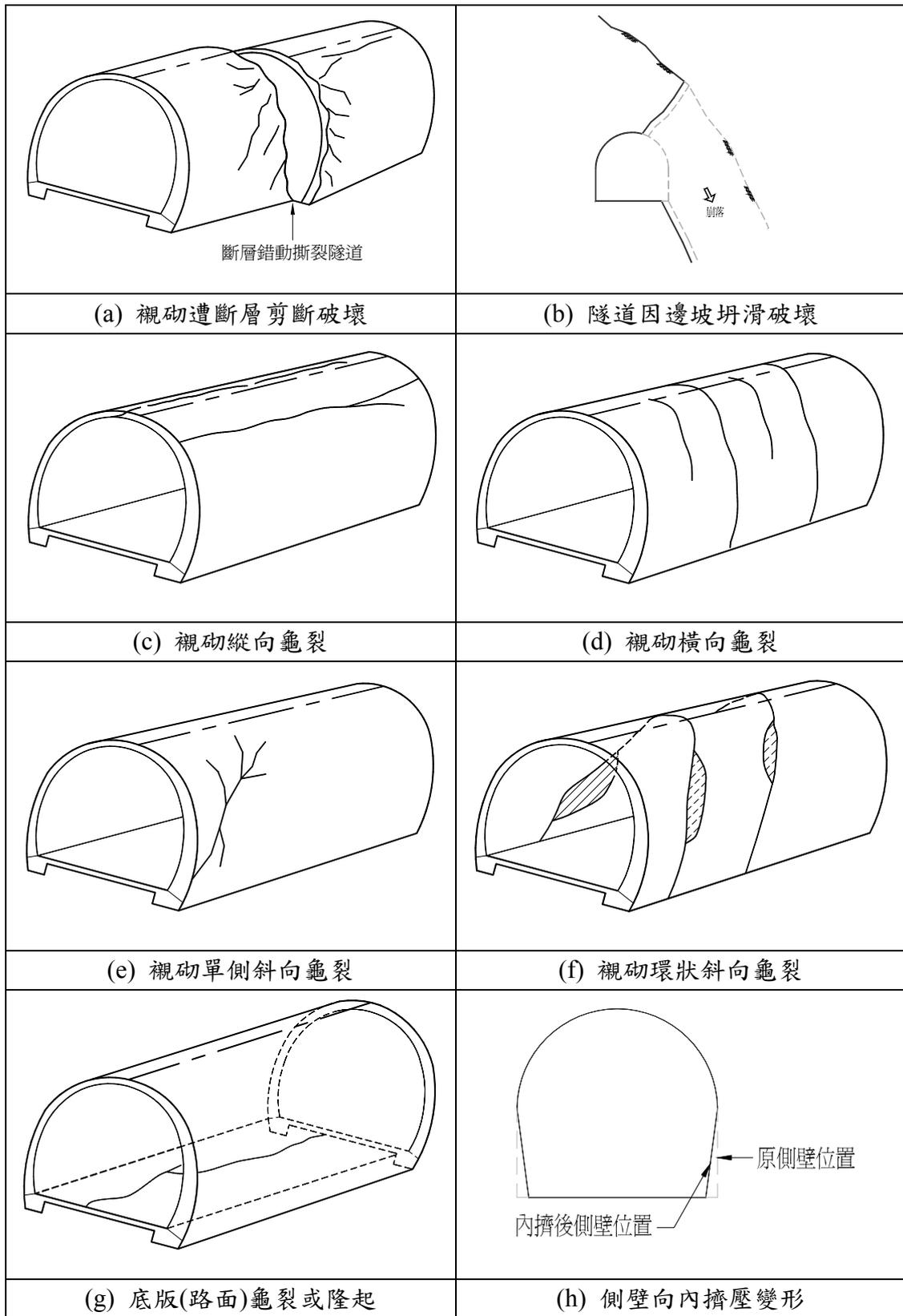


圖 3.4-11 山岳隧道受震損害型態示意圖(王文禮等人，2000)

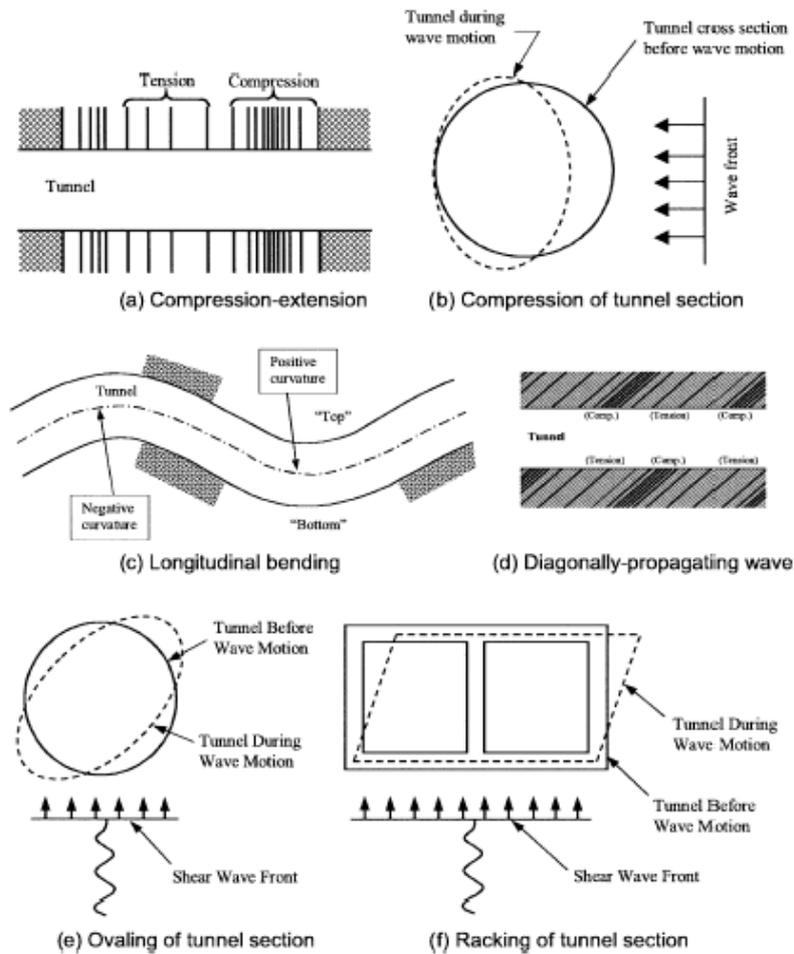


圖 3.4-12 震波作用下之隧道變形行為(Owen and Scholl,1981)



圖 3.4-13 URL 坑道歷經 20 年之坑道變形狀況(Read, 2004)

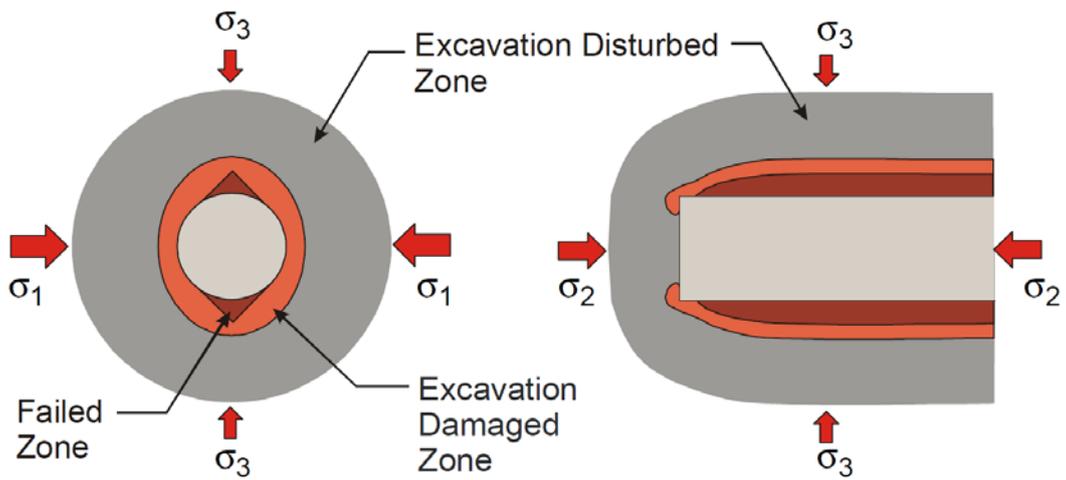


圖 3.4-14 URL 坑道破壞狀況與現地應力分佈及開挖擾動之關係示意(Read, 2004)

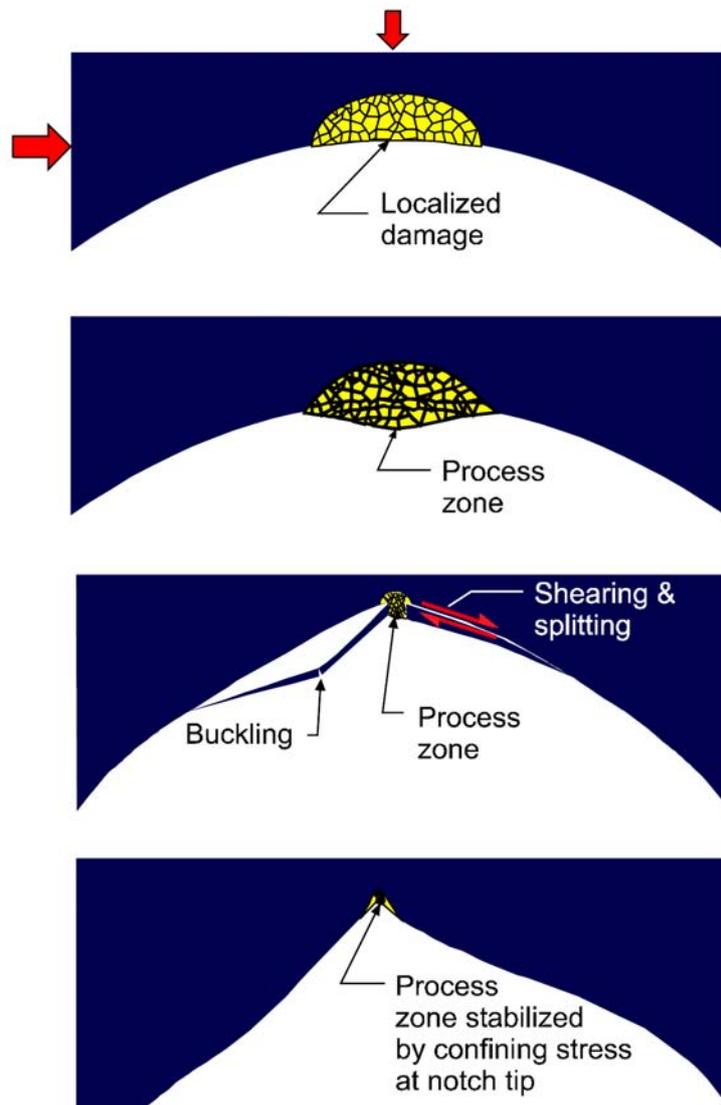


圖 3.4-15 URL 坑道破壞機制與開挖擾動之關係(Read, 2004)

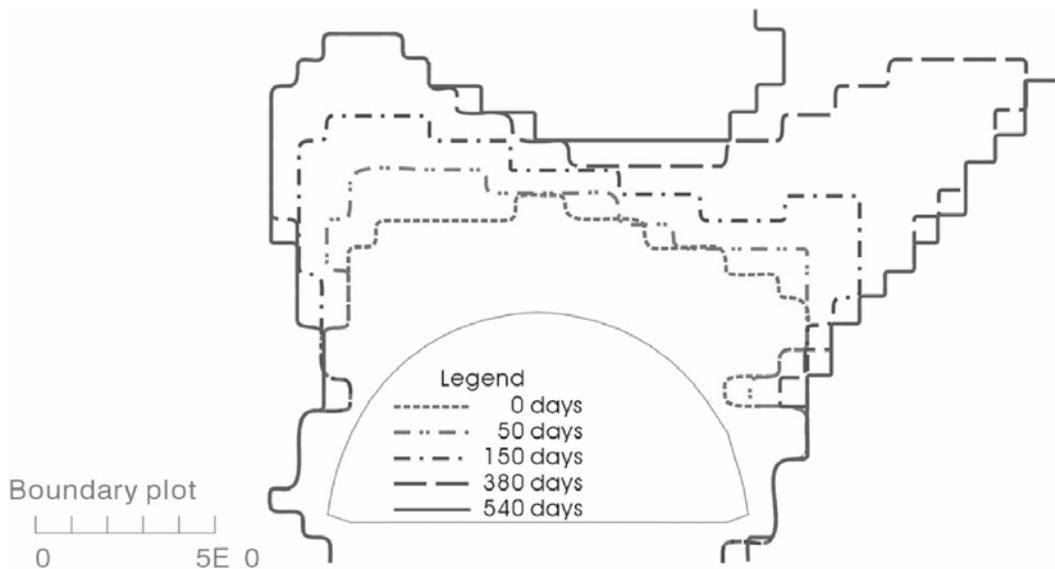


圖 3.4-16 隧道開挖擾動帶之依時變化行為(Wang et al., 2007)

3.4.2 異狀案例資訊彙整分析-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。

闕禮琳等人(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 3.4-1)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 3.4-17)；(3)風化程度越高，其強度(I_{s50})越低。

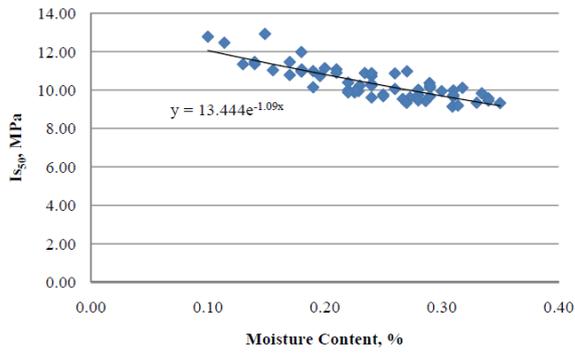
台灣西部麓山帶岩層以第三紀的沉積岩為主，由於該岩層成岩作用時間短，岩石膠結及壓密程度不佳；復以台灣既溫且濕的氣候環境，風化作用快速進行，使得此類岩層常呈膠結不良、孔隙率高、變形性大等特性，形成大地工程之不利因素。以其中之木山層砂岩為例，除了岩性軟弱之外，尚具有剪脹、高潛變量與遇水易弱化等特性；容易造成隧道大量變形之擠壓行為，屬於隧道工程之問題岩種。當地下開挖(如礦坑、地下電廠、放射性廢棄物儲存廠等)和隧道工程在通過此類岩石時，便可能遭遇到嚴重擠壓變形、剝落乃至於大量抽心的事故。以北二高中和隧道為例，施工期間通過木山層砂岩段時，即遭遇大量之擠壓變形。台灣的第三紀砂岩地層分布廣泛，而擠壓之問題於近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

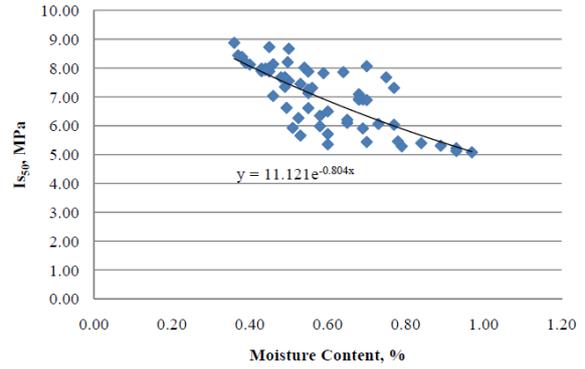
約 500 餘天之岩壓觀測值，進行黏彈塑性反算分析求得。之後再以黏彈性潛變分析，模擬預測隧道於營運後不同時期，內襯砌可能之受力程度，如圖 3.4-18 所示。詹尚書等人(2012)透過一已開挖貫通後卻因故停工隧道案例，蒐集隧道持續變形計測結果，計測期間該隧道曾遭遇莫拉克颱風引致的豪雨影響，藉計測結果繪製的隧道變形曲線特徵加以分類並探討岩體依時變形特性。研究結果顯示，三民頁岩區域變形曲線主要可分為四類，分別為(I)僅彈塑性變形(圖 3.4-19)、(II)彈塑性變形穩定後，延遲一段時間發生依時性變形(圖 3.4-20~圖 3.4-22)、(III)彈塑性變形尚未穩定即伴隨依時性變形，水災後無變化(圖 3.4-23)、(IV)彈塑性變形尚未穩定即伴隨依時性變形，水災後二次變化(圖 3.4-24)。研究結果顯示坑道變形行為除受到開挖擾動引致的彈塑性變性外，部分岩體有顯著依時性變形特性，以及受到豪雨的影響，變形的速率會有所改變。。

表 3.4-1 試驗項目、目的與方法(闕禮琳等人，2009)

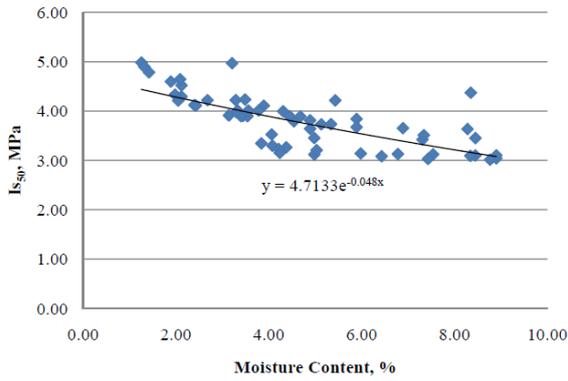
試驗名稱	試驗目的	方法	試驗設備
消散耐久試驗	探討風化程度對礫岩抗風化能力的影響。	將10顆40~60g且約等向之試體，置入篩桶中進行等速滾動，於10分鐘後烘乾並秤重，進行兩次比較試驗後減少之重量，即為消散耐久指數。	消散耐久儀
單軸壓縮試驗	求取單軸荷載狀態下岩石應力－應變關係，並求得其強度與變形模數。	利用軸向變形量及原有試體長度，轉換應變量及斷面積修正值，配合量測所得荷重值以計算各應變量對應之應力值，即可繪製應力－應變曲線。	壓力試驗機
點荷重試驗	目的在於測定岩石材料之點荷重指數(Is)探討整體強度。	以點荷重試驗儀之兩端鋼錐，夾破規則或不規則形狀之試體。	點荷重試驗儀
傾斜試驗	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°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



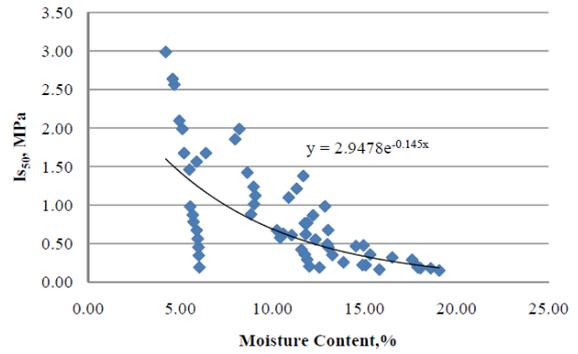
(a) weathering grade I



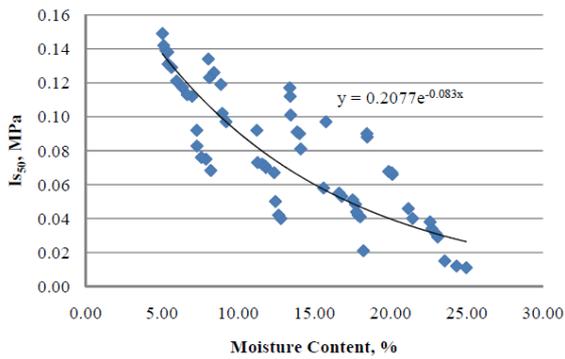
(b) weathering grade II



(c) weathering grade III



(d) weathering grade IV



(e) weathering grade V

圖 3.4-17 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)

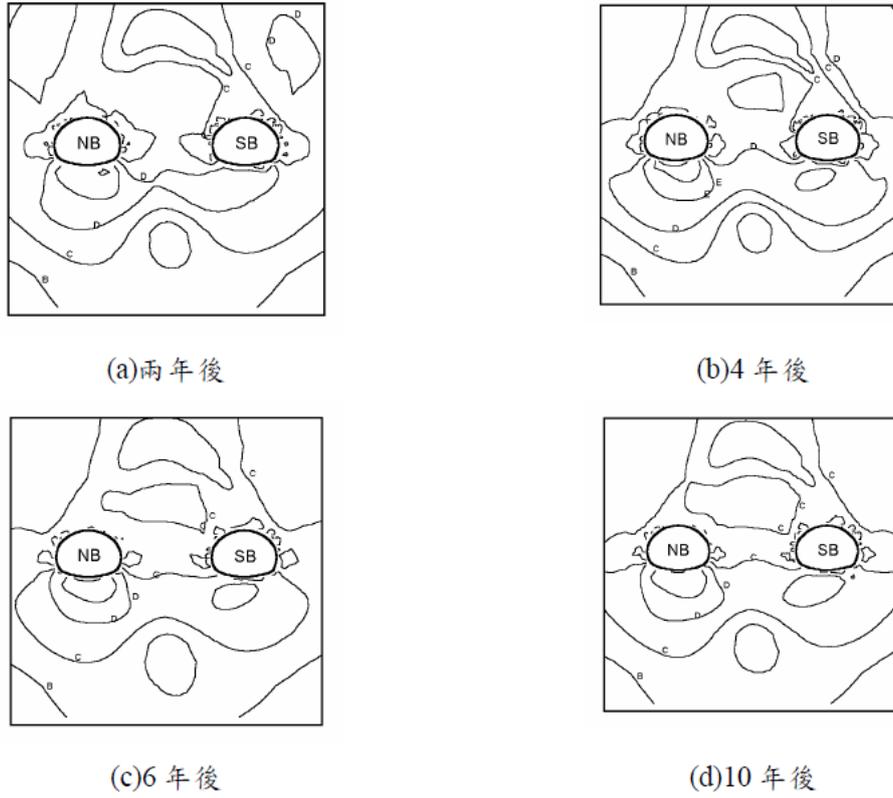


圖 3.4-18 隧道斷層帶圍岩內軸差應力之依時演化情況(俞旗文與陳錦清，2002)

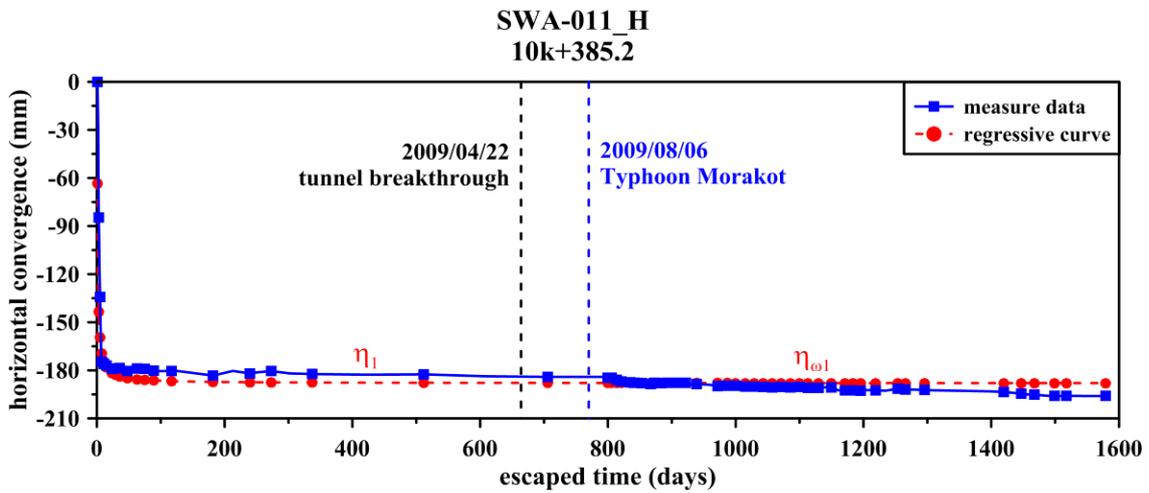


圖 3.4-19 I 類別隧道收斂變形歷時曲線(詹尚書等人，2012)

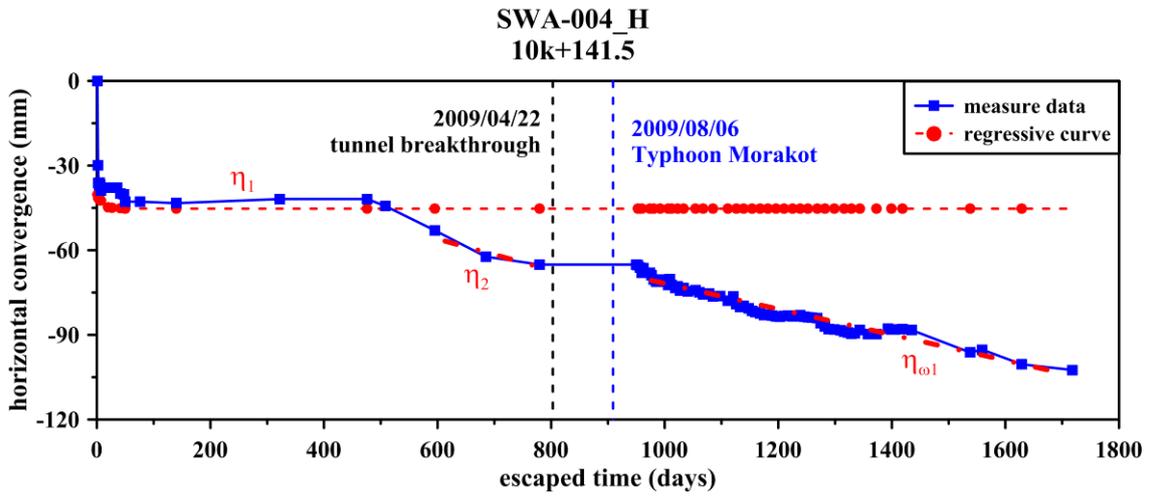


圖 3.4-20 II 類別隧道收斂變形歷時曲線(1)(詹尚書等人，2012)

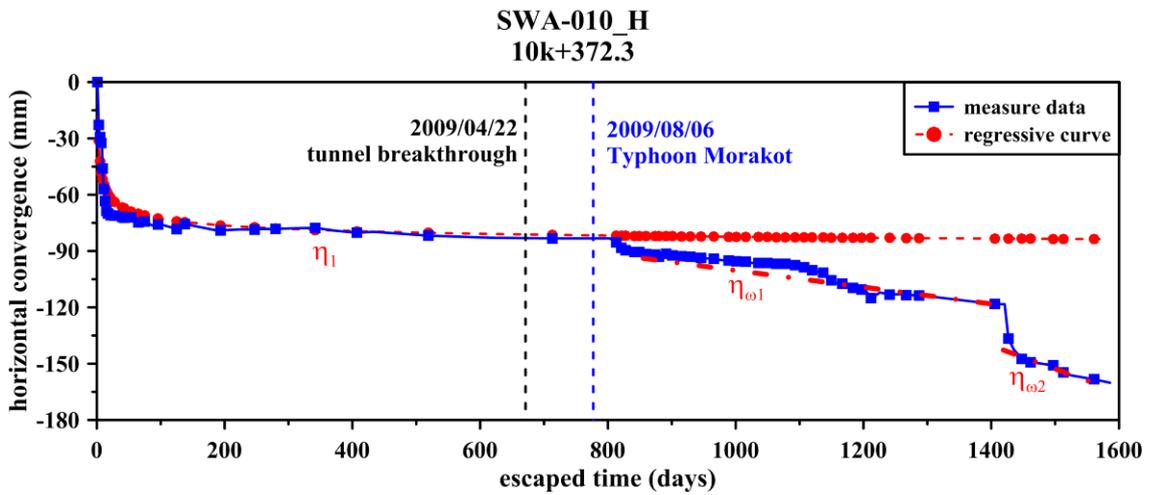


圖 3.4-21 II 類別隧道收斂變形歷時曲線(2)(詹尚書等人，2012)

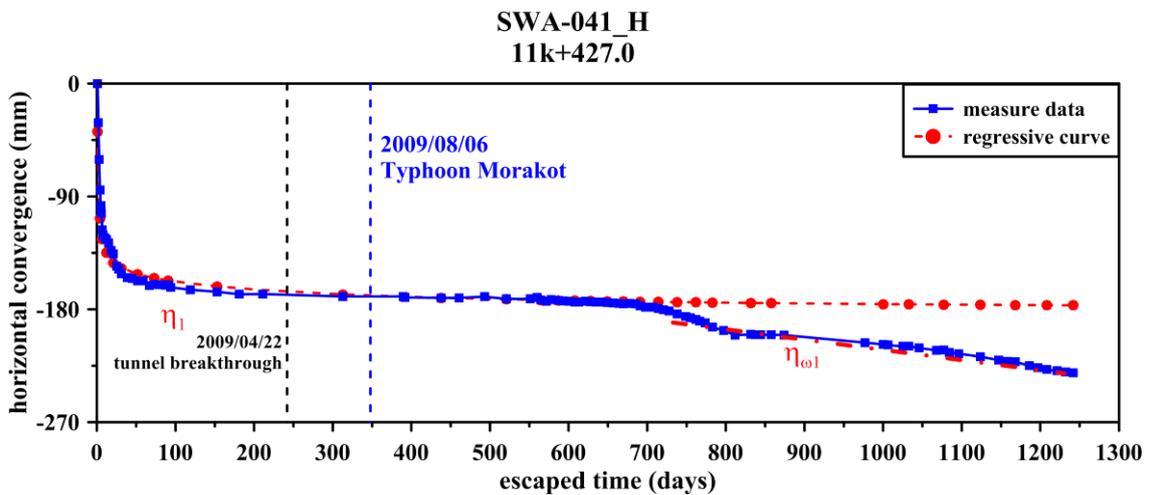


圖 3.4-22 II 類別隧道收斂變形歷時曲線(3)(詹尚書等人，2012)

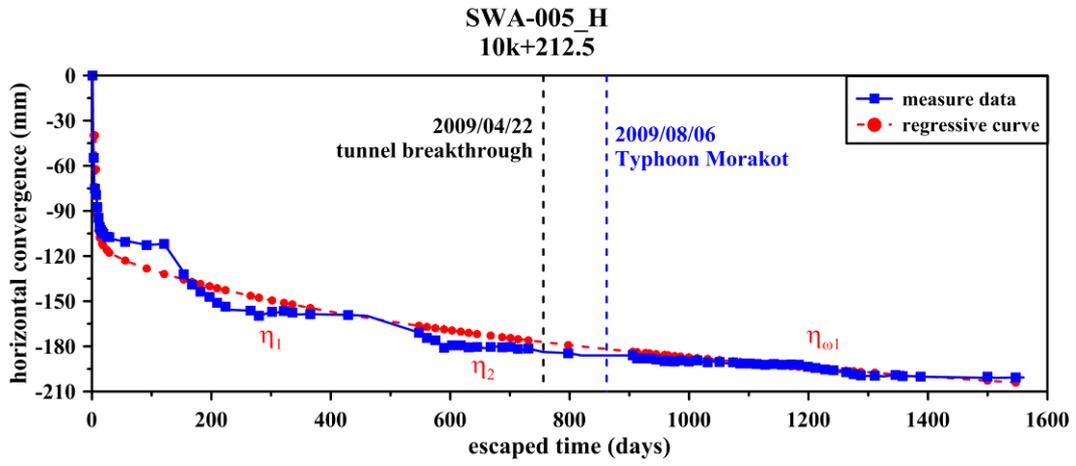


圖 3.4-23 III 類別隧道收斂變形歷時曲線(詹尚書等人，2012)

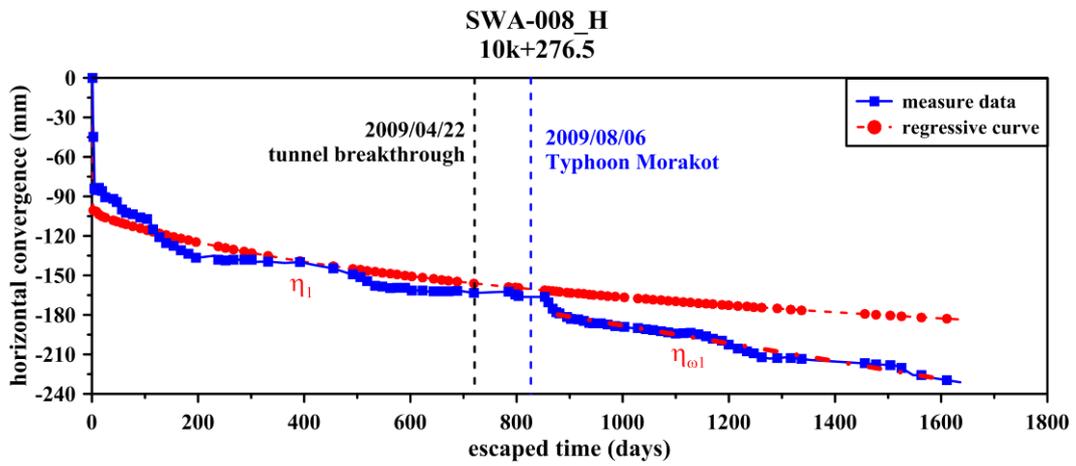


圖 3.4-24 IV 類別隧道收斂變形歷時曲線(詹尚書等人，2012)

第四章 影響坑道長期穩定與服務功能因素之場址特性描述與 對應參數探討

基於前章蒐集彙整國內外坑道穩定與服務功能異常現象之案例，及提出造成服務功能異常現象之影響因素，本研究繼而針對所提影響因素，深入探討各因素對應的場址特性描述與參數評估項目。前章歸納坑道穩定影響因素主要分成外力因素與環境因素，其中外力因素中之地震作用影響既有坑道功能異常現象案例最頻繁，且地震影響範圍極廣，對結構物影響程度亦最難掌握；環境因素中大地材料因開挖擾動造成的材料弱軟化及依時性變形特性，發生時可能已歷時甚久，且工程建造期間不易察覺，其對坑道之影響為考量長期穩定之關鍵項目。因此本章主要針對外力因素中地震作用，與環境因素中大地材料依時變形特性及弱軟化行為，探討各因素對應的場址特性項目及其對應參數，並探討對應的場址特性參數變異影響因子，提供既有處置坑道設計方法之檢討，以及考量坑道長期穩定評估之參考，俾利後續提出相關設計考量於管制要項之建議。

4.1 外力因素

4.1.1 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。王文禮等人(2001)利用國內三義一號鐵路隧道受震案例，整理山岳隧道受地震作用影響後坑道襯砌受損情況(圖 3.4-10)，並統計坑道異狀與斷層相對位置、距離等因子(圖 4.1-1)，探討地震作用對坑道襯砌造成的影響。研究結果指出，地震作用對坑道的影響，可能與坑道與斷層相對位置、坑道深度與岩層特性相關。陳正勳等人(2011)亦以三義一號受震案例，分析不同類型震波傳達造成的震害類型(圖 4.1-2)，研究結

果顯示隧道襯砌受震損害主要可分成四種類型，分別為縱向裂縫、環向裂縫或環向施工縫錯動、環狀剝落以及斜向裂縫與剝落。襯砌縱向裂縫主要受地震波中 S 波垂直或 45° 入射引起襯砌軸力與彎矩增加的影響。環向裂縫或環向施工縫錯動則受到水平方向傳遞 P 波造成的張力破壞以及樂夫波造成襯砌應力增加的影響。環狀剝落與隧道承受地盤較明顯的水平向應力、S 波 45° 入射及大型避車洞導致應力集中有關。而斜向裂縫則是震波造成軟硬互層圍岩的應變差異以及襯砌結構剛度特性所致。然地震作用影響坑道穩定性具體場址特性參數評估項目，仍待進一步深入研究探討，以了解地震作用影響坑道穩定性之對應的場址特性參數項目，提供相關審查管制要項建議。

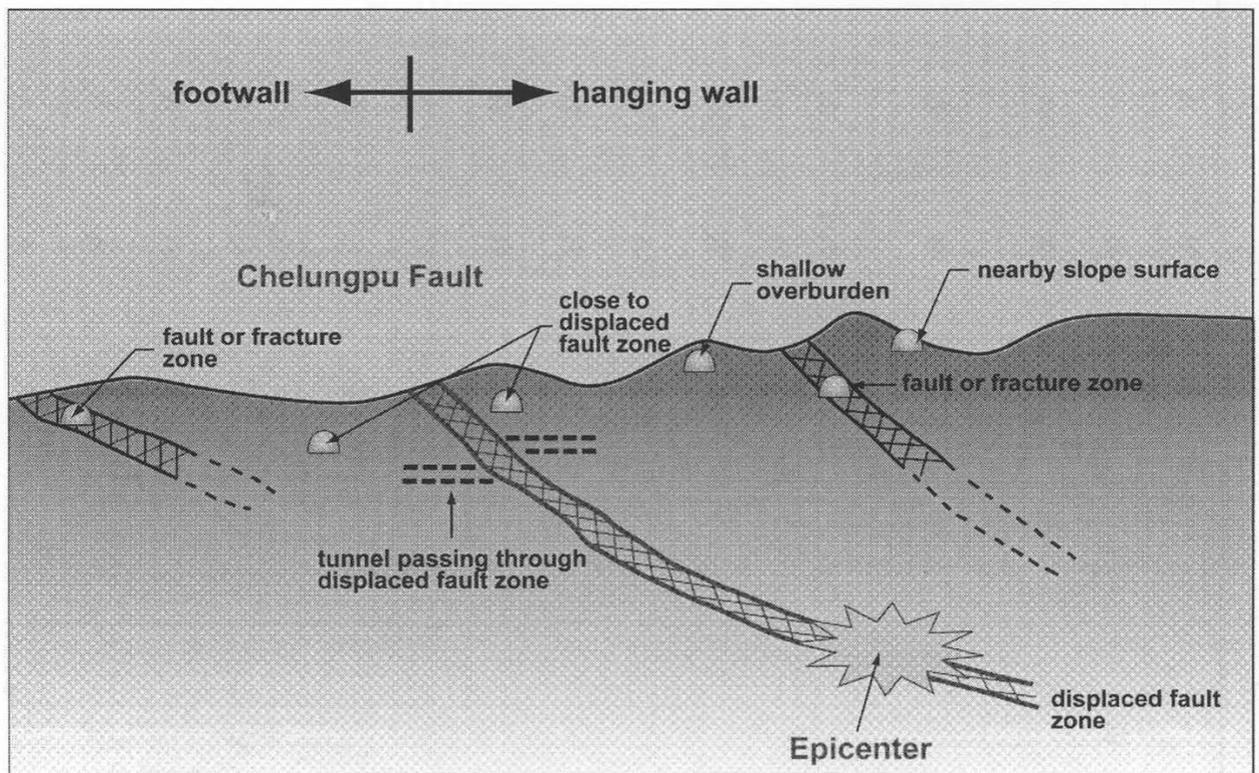


圖 4.1-1 不同震害類型與坑道及斷層相對位置關係(王文禮等人，2001)

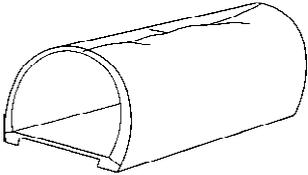
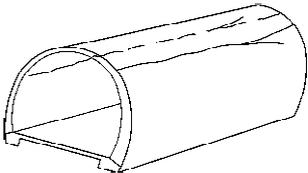
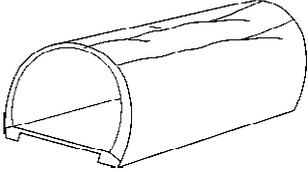
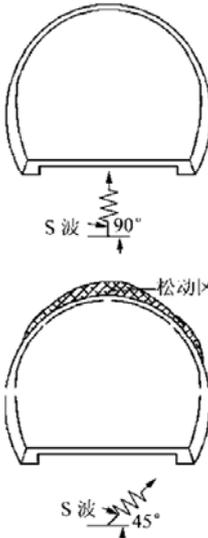
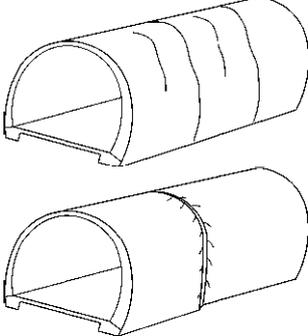
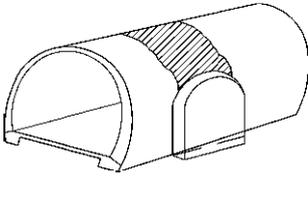
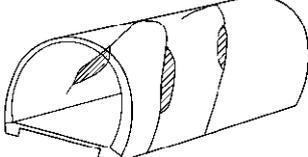
損害型態	隧道受震損壞概念模式示意圖	影響因素
		<p>S波 45°入射情況，圓形隧道襯砌於 $\theta = 0^\circ, \pm 90^\circ$，180處軸力與彎矩增量有最大值^[14]</p> <p>主隧道頂拱上方常存有開挖施工過程既存的鬆動岩楔，頂拱中央($\theta = 0$)發生單一縱向裂縫</p> <p>橫坑因馬蹄形隧道斷面形狀，其襯砌於起拱線與底版($\theta = \pm 90^\circ, 180$)等處相對頂拱($\theta = 0$)易發生災害</p>
<p>襯砌縱向裂縫</p>		<p>S波 0°入射情況，圓形隧道襯砌於 $\theta = \pm 45^\circ, \pm 135^\circ$處軸力與彎矩增量有最大值^[14]</p>
		<p>S波 45°入射情況，隧道頂拱襯砌背後存在鬆動區及承受地盤水準力時，產生頂拱中央與肩部縱向裂縫^[4]</p>
<p>襯砌環向裂縫或環向施工縫錯動</p>		<p>水準向傳遞的P波或L波引致襯砌環向裂縫或環向施工縫錯動</p>
<p>襯砌環狀剝落</p>		<p>S波 45°入射情況，隧道承受地盤水準擠壓力時，產生頂拱與肩部環向裂縫^[4]</p> <p>大型避車洞造成斷面襯砌剛度差異及應力集中</p> <p>本損害形態伴隨底拱隆起</p>
<p>襯砌斜向裂縫與剝落</p>		<p>軟硬互層圍岩的應變差異，導致互層的介面發生相對位移^[4]</p> <p>裂縫自接近軟硬互層介面環向，發展轉向相對位移較大一側形成斜向裂縫</p>

圖 4.1-2 不同震害類型及其影響因素(陳正勳等人，2011)

4.2 環境因素

4.2.1 大地材料依時性變形

岩石材料在持續相同應力狀態下，隨時間產生之變形行為稱之為潛變 (creep)，即為岩石材料依時性變形行為。常見的依時變形模式主要可分為(1)黏彈模式(Visco-elastic model)、(2)黏彈塑模式(Visco-elasto-plastic model)、與(3)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隨時間變化之行為，其描述式為：

$$\epsilon(t) = \left[\frac{1}{G_1} \left(1 - e^{-\frac{G_1 t}{\eta_1}} \right) \right] + \left(\frac{1}{G_2} + \frac{t}{\eta_2} \right) \quad (\text{式 4.2-1})$$

其中 G_1 、 G_2 為彈簧(岩石材料)勁度模數， η_1 、 η_2 為阻尼(依時性變形)的黏滯係數。

Sulem 等人(1987a、1987b)將隧道開挖後圍岩變形區分為：(1)與空間有關之前進面效應；(2)與時間有關之潛變效應等兩個影響因素。建議隧道淨空變形經驗公式為：

$$C(x, t) = C_1(x) [1 + m C_2(t)] \quad (\text{式 4.2-2})$$

$$C_1(x) = C_{\infty x} \left[1 - \left(\frac{X}{x + X} \right)^2 \right] \quad (\text{式 4.2-3})$$

$$C_2(t) = 1 - \left(\frac{T}{t + T} \right)^n \quad (\text{式 4.2-4})$$

式中 $C(x, t)$ 為開挖後 t 時間，距開挖面距離為 x 時，隧道的淨空間收斂變形量， X 為與空間效應有關之特定參數， n 與 T 為與時間相關之特定參數，而 m 代表時間效應與空間效應對於淨空間變形的影響比例係數。

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。表4.2-1

整理最佳迴歸結果獲得的變形特性參數，及水災前後變形速率 η 。研究結果顯示岩體材料變形模數、強度、岩層組成比例影響岩體依時變形特性相當顯著，而環境因素，如瞬時水位變化亦會造成岩體材料依時性變形。岩石材料的破碎程度、材料變形模數與強度將影響岩石依時性變形中空間與時間效應比例係數，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上，反應速度取決於岩層組成比例其透水性的差異；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4.2-1、圖4.2-2)。

表 4.2-1 國內某發生依時變形隧道 Sulem 參數迴歸統計分析結果(詹尚書等人，2012)

監測區段	變形類別	岩性	變形特性參數						
			C_x	X	m	n	T	η_1/η_2	η_{w1}/η_{w2}
SWA-011	I	SH-SS	-168.4	7.3	0.1	0.9	25.9	-0.008/-	-0.02/-
SWA-012	I	SH-SS	-47.9	10.3	0.1	1.8	113.5	-0.002/-	-0.0003/-
SWA-004	II	FZ	-19.9	2.1	1.2	1.2	5.1	-0.004/-0.07	-0.05/-
SWA-010	II	SH-SS	-57.3	12.3	0.4	1.1	18.4	-0.01/-	-0.05/-0.12
SWA-037	II	SS/SH	-78.3	9.3	3.8	1.8	9.9	-0.03/-	-0.35/-
SWA-038	II	SS/SH	-140.3	7.3	0.8	17.9	917.3	-0.05/-	-0.16/-0.16
SWA-039	II	SS/SH	-285.2	8.5	0.2	2.6	11.0	-0.04/-	-0.16/-
SWA-041	II	SS/SH	-120.2	13.5	0.4	3.2	87.6	-0.05/-	-0.09/-
SWA-005	III	SS/SH	-112.8	10.6	0.6	1.7	401.5	-0.04/-0.03	-0.02/-
SWA-006	III	SS/SH	-120.1	1.3	0.5	3.9	99.6	-0.06/-	-0.08/-
MWA-002	IV	SS-SH	-115.7	6.6	0.2	0.8	7.5	-0.05/-	-0.15/-
SWA-007	IV	SS/SH	-83.9	5.1	1.1	0.9	282.6	-0.06/-	-0.07/-0.03
SWA-008	IV	SH-SS	-82.9	8.3	0.9	1.1	136.4	-0.07/-	-0.07/-
SWA-009	IV	SH-SS	-120.8	10.6	0.8	1.1	371.9	-0.06/-	-0.06/-
SWA-040	IV	SS/SH	-62.2	10.5	0.9	0.6	10.6	-0.06/-	-0.13/-

註：FZ：斷層帶 SS-SH：砂岩夾頁岩 SS/SH：砂頁岩互層 SH-SS：頁岩夾砂岩

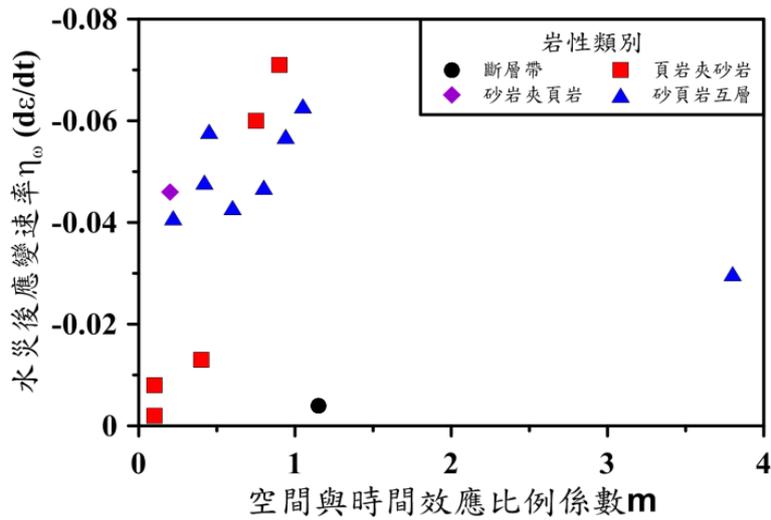


圖 4.2-1 依時變形速率增加後 m 值與應變率關係(詹尚書等人，2012)

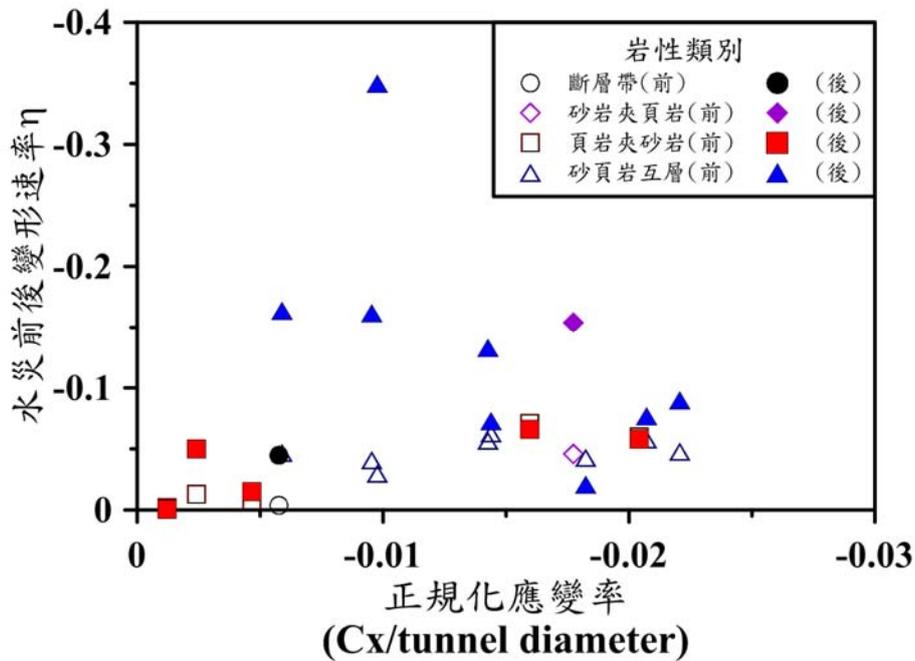


圖 4.2-2 水災前後之收斂應變速率與岩層特性之關係(詹尚書等人，2012)

4.2.2 大地材料弱軟化

大地材料常受風化作用影響，而產生材料弱軟化現象，對於岩體工程設計、穩定性及安全性影響甚鉅，在考量坑道設施長期穩定條件下，了解大地材料弱軟化特性，為設施穩定性與安全性評估之關鍵項目。

Hoek 與 Brown 於 1980 年提出岩體非線性破壞準則，經不斷地修正後，已可同時描述完整岩石與裂隙岩體因應力造成降伏的情況，在國內外岩體工程特性評估的應用上，已成為最常見的破壞準則，其主要描述式係透過岩性

參數 m_i 、完整岩石單軸壓縮強度 σ_{ci} 或(Uniaxial Compressive Strength, UCS)、岩體破碎(完整)程度參數 s ，可獲得完整岩石或裂隙岩體的強度包絡線，必要時亦可透過 a 值修正包絡線的曲度，如式 4.2-5 所示。

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (\text{式 4.2-5})$$

其中 σ'_1 和 σ'_3 分別為發生破壞時的最大和最小主應力(有效應力)，岩性參數 m 和 s 通常需要以三軸試驗求取。然岩性參數 m 因與岩石的組成材料、種類、及成岩環境等因素相關，十分難以求得。而岩石因不同成岩環境而有其不同的微觀組構，並衍生不同的岩石性質，除可用以描述的岩性參數 m 值外，尚包括物理特性、力學特性等。Bell 等(1998)提出影響岩石物理及力學特性的微觀組構因子包括石英含量(quartz content)、黏土含量(clay size content)、堆疊密度(packing density)、以及顆粒尺寸分佈(particle size distribution)。Jeng 等(2004)以台灣的砂岩為例，探討影響砂岩力學特性之物理特性與微觀組構因子，包括乾密度(dry density)、視比重(specific weight)、孔隙率(porosity)、顆粒面積比例(grain area ratio, GAR)、堆疊密度與礦物含量，研究結果顯示孔隙率與顆粒面積比例影響砂岩單壓強度顯著，並進一步提出以孔隙率與 GAR 兩因子作為砂岩力學特性的分類指標(圖 4.2-3)。Weng 等(2012)利用個別元素法數值分析工具，探討孔隙率與 GAR 對砂岩力學特性的影響，研究結果指出此二因子對砂岩凝聚力影響顯著，而 GAR 影響砂岩的摩擦角顯著，隨著孔隙率降低與 GAR 增加，砂岩的剪力模數與體積模數增加(圖 4.2-4)。Sabatakakis 等(2008)探討影響沉積岩類包括泥灰岩、砂岩與石灰岩的力學特性之微組構因子，研究結果顯示石英含量、方解石與石灰岩比例(sparite/micrite)影響力學特性顯著，其中方解石與灰岩比例越高，岩性參數 m_i 值將會降低(圖 4.2-5)。

闕禮琳等人(2009)以水璉礫岩為對象，透過不同次數的乾濕循環人工風化作用，探求不同風化程度消散耐久指數、單軸壓縮強度、點荷重強度以及

視摩擦角的變化，研究成果顯示，水璣礫岩風化後，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(圖 4.2-6、圖 4.2-7)。Tan 等(2011)以花崗岩為對象，探討凍融作用對花崗岩力學特性的影響，以及循環次數與力學參數的相互關係，研究成果顯示單壓強度、變形特性以及彈性模數隨著循環次數增加而下降，這些關係可用一些指數方程式來進行描述。

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(圖 4.2-8、圖 4.2-9)。

郭雅雯(2012)以大理岩為對象進行風化試驗，針對一般指數與微觀組構進行分析討論，探討風化過程中岩體弱軟化特性及影響因素，研究結果顯示，岩石單壓強度隨乾濕循環次數增加有逐漸下降的趨勢，破壞應變則隨乾濕循環次數增加有逐漸上升的趨勢(圖 4.2-10)，而岩石楊氏模數隨乾濕循環次數增加亦有逐漸下降的趨勢(圖 4.2-11)。在岩石強度特性參數方面，凝聚力隨乾濕循環次數增加有逐漸下降的趨勢(圖 4.2-12)，摩擦角則隨乾濕循環次數增加有逐漸上升的趨勢(圖 4.2-13)。利用岩石薄片影像以了解乾溼循環的微觀組構變化，探討乾濕循環對岩石力學特性之影響，研究結果顯示，隨乾溼循環次數增加，岩石孔隙逐漸增大並降低其抗風化能力，風化過程中大理岩之白雲石發生去白雲石化作用(dedolomitization)，方解石相對比例上升，而白雲石呈下降趨勢(圖 4.2-14)。

我國地處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊斜向聚合帶以及北半球亞熱帶氣候區，持續的板塊推擠在高溫多雨的環境下演化了多變的地形，常見崇山峻嶺與湍急河川，旺盛的地質活動更造成了複雜的地層與地質構造，尤多軟弱、破碎岩石。基於上述特殊的環境條件相互作用下，岩盤風化速率更較國

外處置技術先進國家來的迅速。爰此，了解國內岩石的風化特性，並於「場址特性調查」階段進行相關試驗與調查外，亦於「場址特性描述與參數評估項目」部分，考量加入岩性、岩象等受風化影響具顯著變異的評估因子，以增進坑道長期穩定性之安全評估。

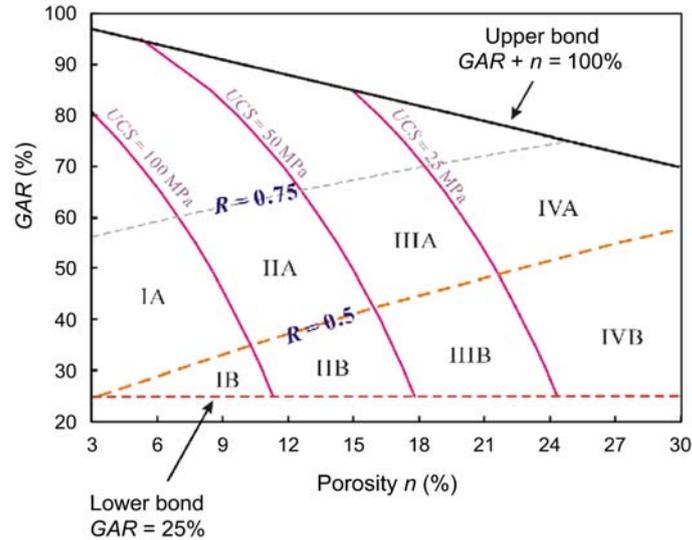


圖 4.2-3 孔隙率、GAR 指標與砂岩單壓強度之分類(Jeng 等，2004)

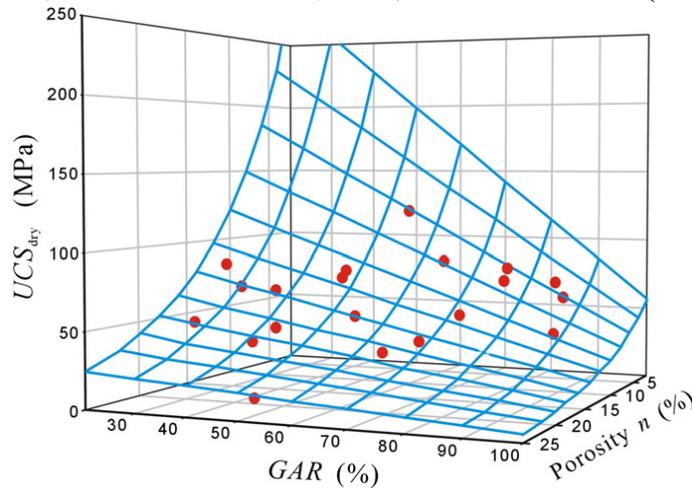


圖 4.2-4 孔隙率與 GAR 對砂岩單壓強度的影響(Weng 等，2012)

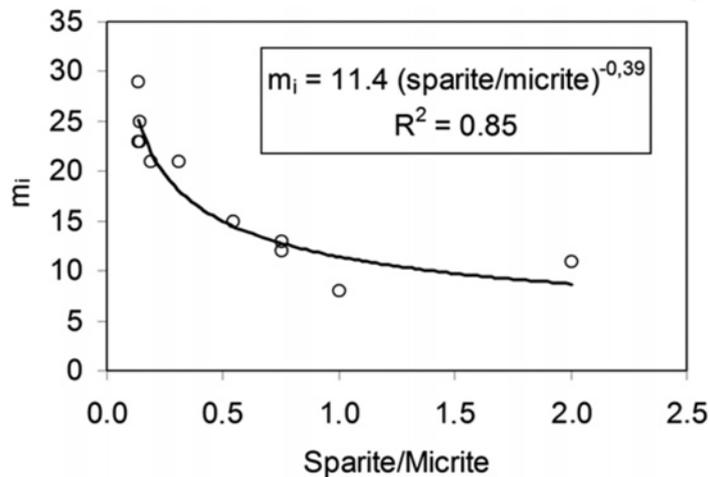


圖 4.2-5 石灰岩中方解石與石灰岩比例對 mi 值的影響(Sabatakakis 等，2008)

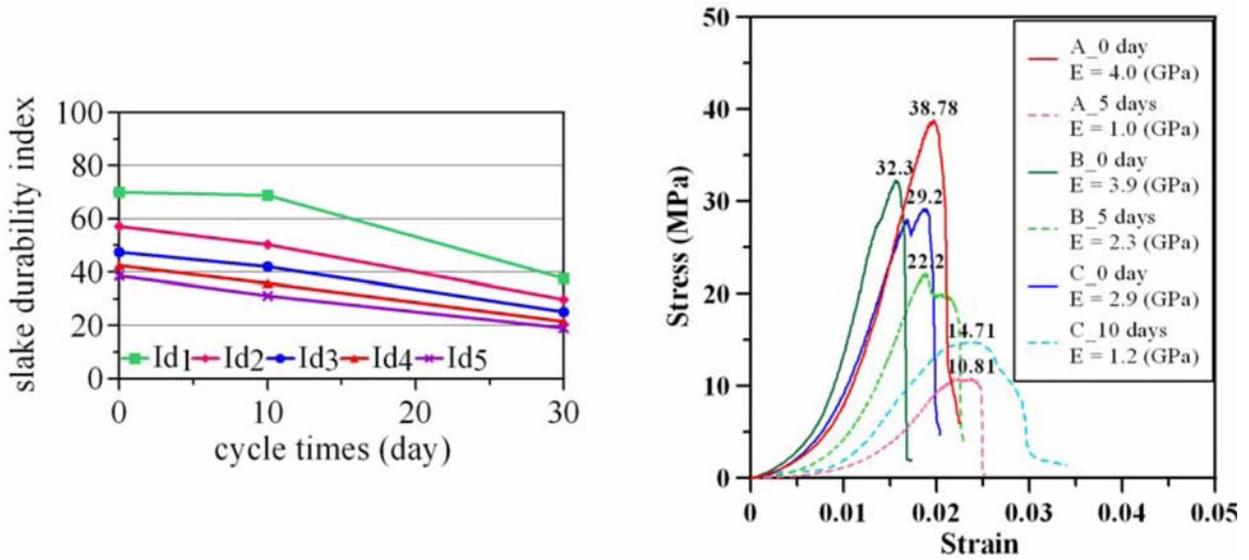


圖 4.2-6 水璉礫岩歷經不同乾濕循環次數下消散耐久指數變化(左)與單軸壓縮應力—應變曲線(右)(闕禮琳等，2009)

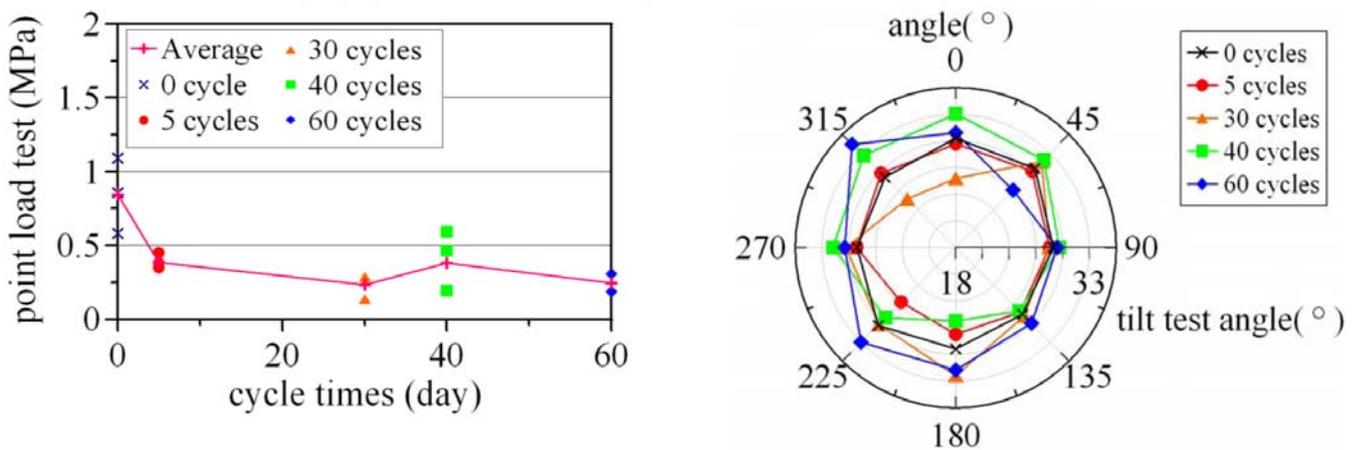


圖 4.2-7 水璉礫岩歷經不同乾濕循環次數下點荷重指數變化(左)與不同方向視摩擦角極圖(右)(闕禮琳等，2009)

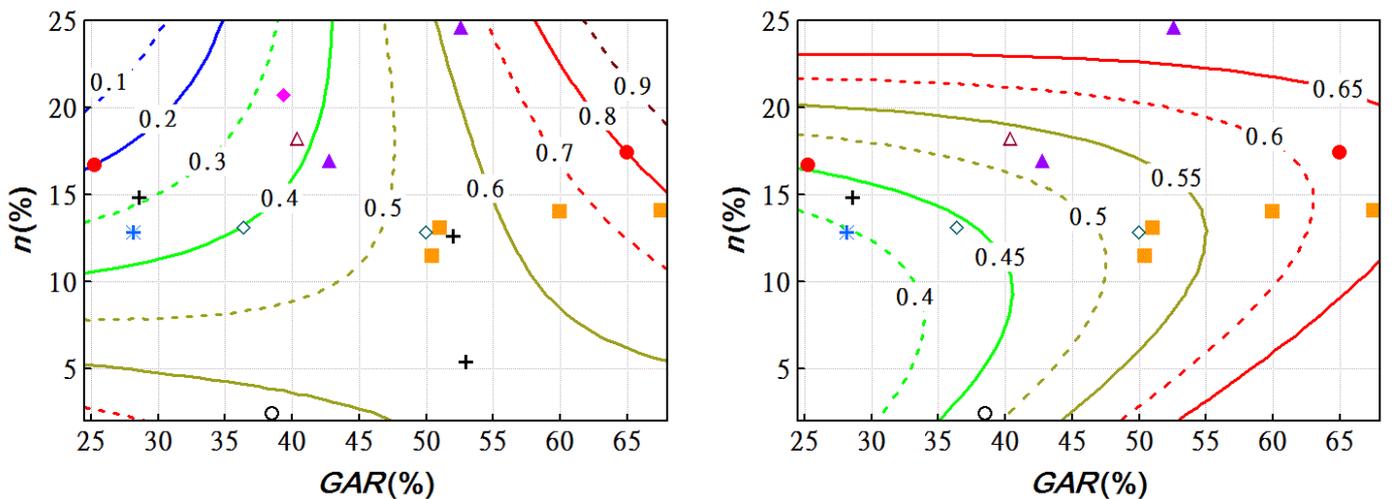


圖 4.2-8 乾濕強度比 RUCS 與岩石孔隙率

圖 4.2-9 乾濕變形比 RE 與岩石孔隙率及

及顆粒面積比趨勢圖(詹佩臻等, 2011)

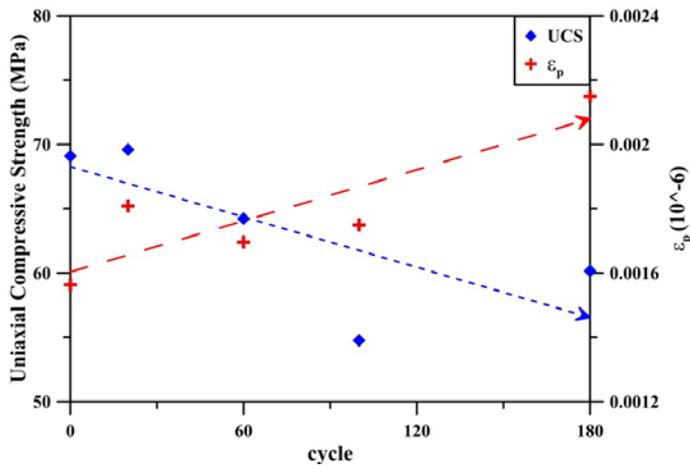


圖 4.2-10 破壞應變受乾濕循環次數之影響

顆粒面積比趨勢圖(詹佩臻等, 2011)

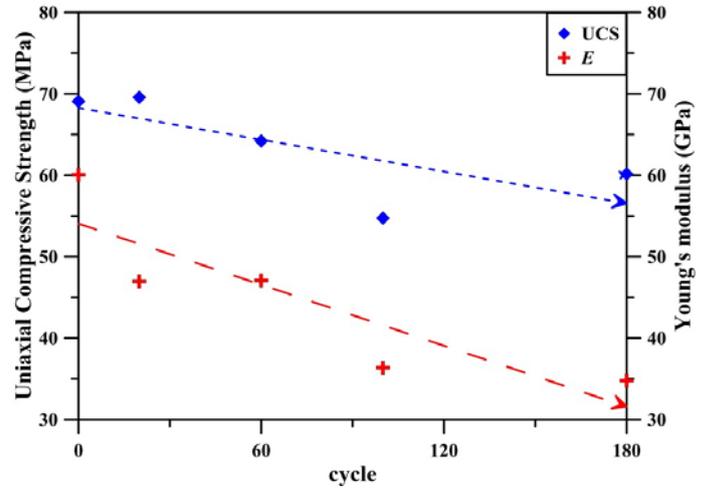


圖 4.2-11 楊式模數受乾濕循環次數之影響

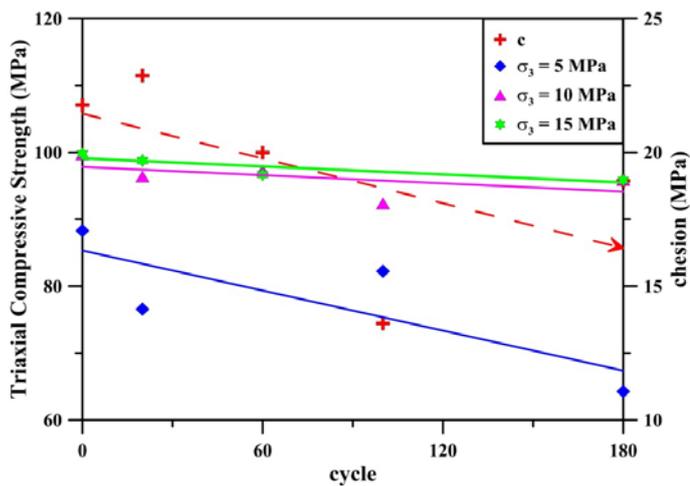


圖 4.2-12 視凝聚力受乾濕循環次數之影響

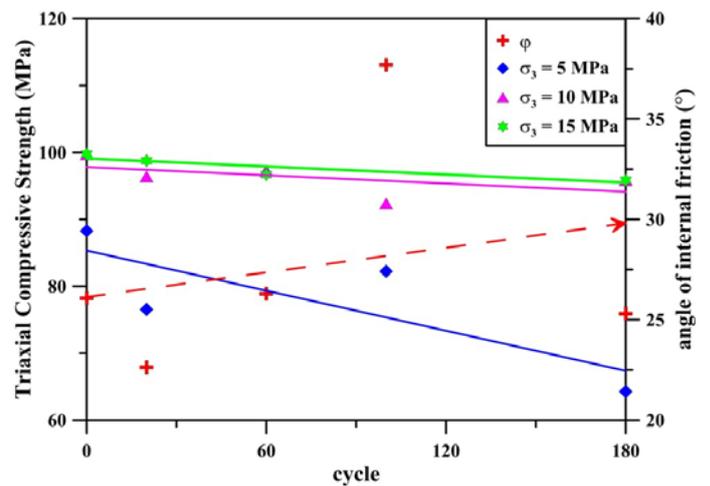


圖 4.2-13 視摩擦角受乾濕循環次數之影響

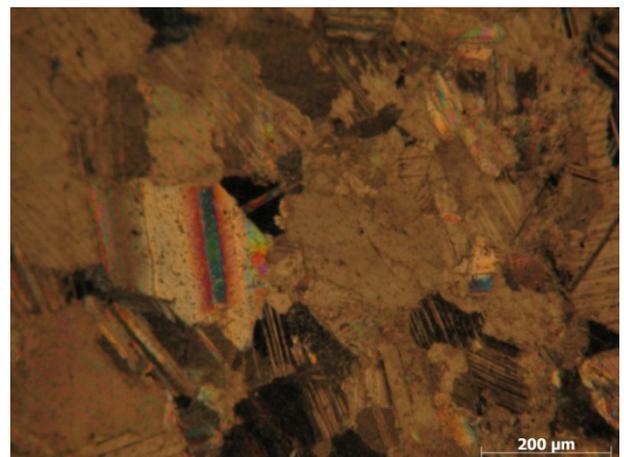
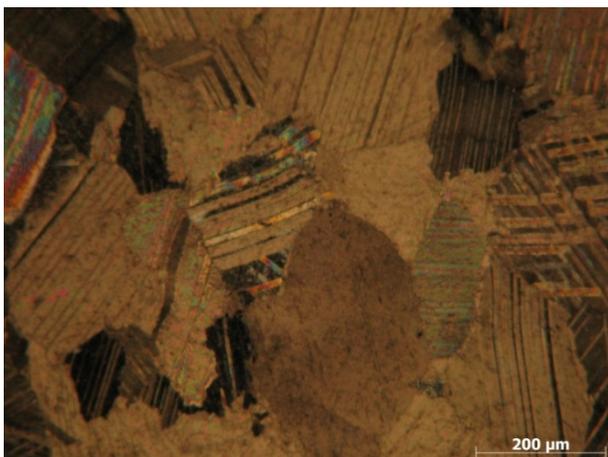


圖 4.2-14 未循環(左)與循環 180 次(右)之大理岩薄片影像(郭雅雯, 2012)

4.3 既有坑道設計方法與規範之檢討

基於既有坑道設計規範與調查項目等準則下建造的岩石隧道，被視為堅固而且耐久的結構設施，然近十幾年的坑道結構安全檢測結果發現，甚多的岩石隧道在未達設計年限一半之際，襯砌混凝土受力即因超過強度而發生異狀，顯示國內岩石隧道工程的地質調查、場址特性描述、設計參數研析、設計理念與設計準則、以至於開挖、支撐施工方式等現行做法，皆有進一步深入檢討與改善的必要。爰此，本章就造成既有坑道服務功能異常現象之影響因素，歸納整理目前既有坑道設計方法與調查規範較不足之處，以及相對應的坑道長期穩定性之場址描述性項目於后，提供處置坑道設施長期穩定性考量時相關場址特性描述項目之參考。

外力因素：

1. 地震作用對坑道的影響；
2. 邊坡運動對坑道的影響；
3. 開挖擾動對場址及坑道的影響。

環境因素：

1. 依時性變形對坑道穩定的影響；
2. 弱軟化特性對坑道穩定的影響；
3. 依時性變形與弱軟化特性對地質材料的變化。

對上述坑道長期穩定性影響因素與場址特性描述項目，深入探討其對應的評估參數或調查項目，為後續考量處置設施設計及其穩定性評估之審查管制要項制定之關鍵課題。

第五章 處置坑道功能需求分析以及對應的場址特性變異影響之探討

經利用國內外坑道穩定與服務功能異常現象案例，獲得坑道長期穩定性影響因素，並據以研析各影響因素對應的場址特性描述項目，以及對應場址特性項目的評估參數之影響。本章進一步考量場址特性參數的變異，探討參數變異對既有坑道的影響程度，據以提出處置坑道在長期穩定性考量下所應具備的功能需求。本計畫主要針對地震作用於不同場址特性、既有長期穩定影響因素耦合場址變異效應、開挖擾動引致場址特性變異、開挖擾動引致材料變異等部分，探討各影響因素變異對既有坑道或場址特性造成的影響，據以提供處置坑道設施設計應具備的考量，以及相關場址特性描述與參數評估的具體建議。

5.1 不同地盤組合下地震作用之影響

考量地層分布多非為單一岩層，許瑞慈(2012)利用有限元素法軟體分析水平雙岩層，在岩層具不同的密度、泊松比及波速等條件下，坑道建置相對岩層位置受震後的反應，以探討震波垂直入射於不同硬度地層(Impedance ratio)、不同隧道位置(\square/λ)和頻率(Hz)進而引發隧道襯砌應力變化之情形。圖 5.1-1 與圖 5.1-2 分別表示坑道建置與岩層分布的相對位置。研究結果顯示，震波引發隧道襯砌最大正規化軸應力、剪應力與撓曲應力增量隨正規化覆蓋深度(\square/λ)、頻率(Hz)與波長(λ)有關，當正規化覆蓋深度(\square/λ)為 0.25 之奇數倍時襯砌應力增量存在最大值；正規化覆蓋深度(\square/λ)為 0.25 之偶數倍時存在最小值。上下層岩層性質關係主要藉阻抗比(α)加以描述，圖 5.1-3 顯示當隧道位於上層岩層時，其阻抗比(α)折減或放大入射波，進而影響正規化動態應力增量值。圖 5.1-4 顯示隧道位於下層岩層時，正規化動態應力增量主要由覆蓋深度(h)、襯砌彈性模數(EI)與圍岩彈性模數(E_r)之比例為影響因子。綜整之，若隧道建置於水平互層的岩層，且兩岩層具不同的力學特性參數，受震引致襯砌應力增量影響因子包含波長(\square)、頻率(f)、覆蓋深度(h)、阻抗比(α)、以及襯砌

彈性模數(EI)與圍岩彈性模數(Er)之比例等因素。

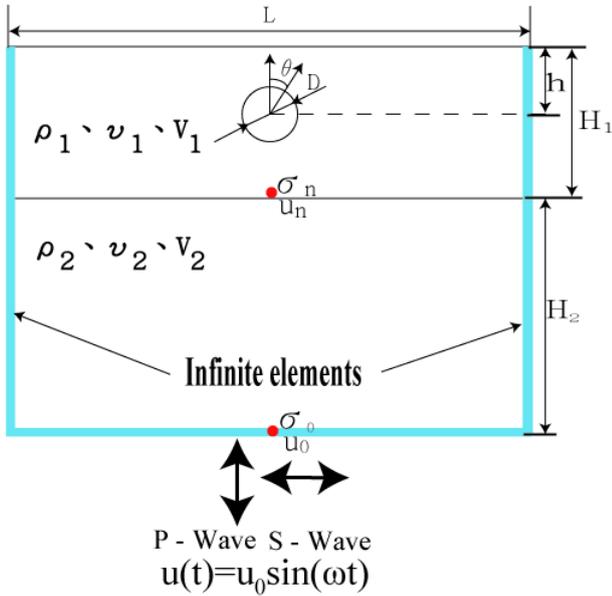


圖 5.1-1 隧道位於上層示意圖(許瑞慈, 2012)

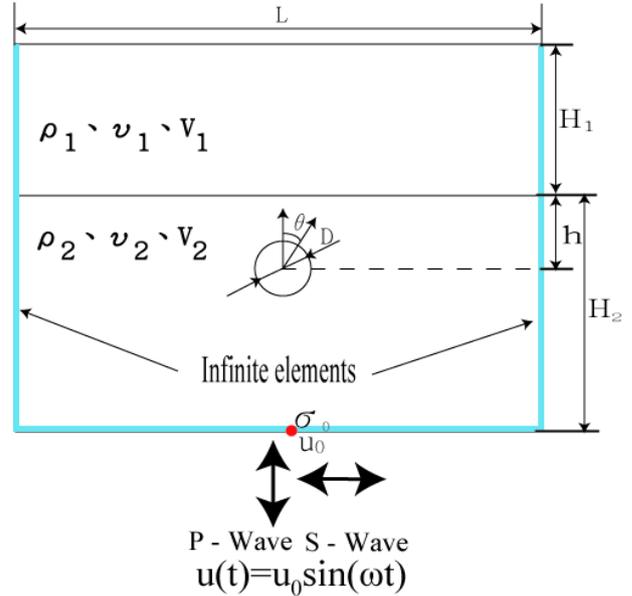


圖 5.1-2 隧道位於下層示意圖(許瑞慈, 2012)

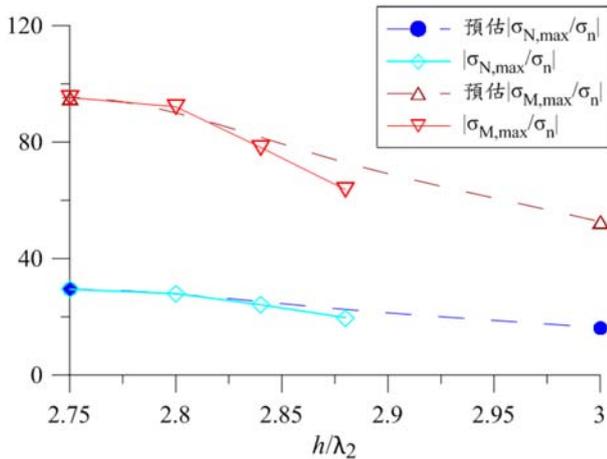


圖 5.1-3 隧道位於上層且靠近地層介面，正規化覆蓋深度與正規化動態應力之關係(許瑞慈, 2012)

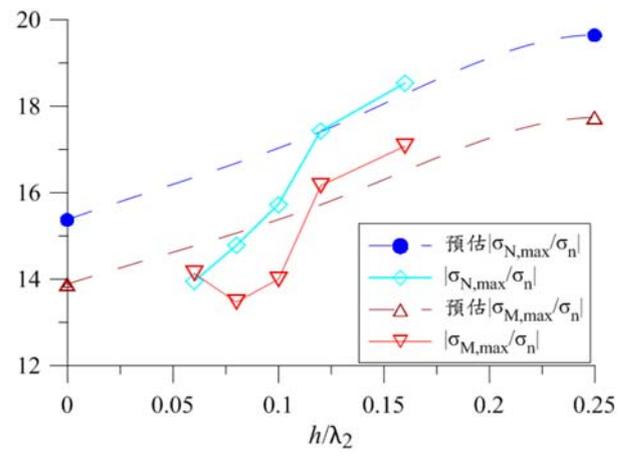


圖 5.1-4 隧道位於下層且靠近地層介面，正規化覆蓋深度與正規化動態應力關係(許瑞慈, 2012)

5.2 既有長期穩定影響因素耦合場址變異效應

坑道受到外力或環境等長期穩定影響因素致坑道襯砌產生異狀，使得坑道局部較不穩定，進而引發坑道整體長期穩定之疑慮，以及間接使得場址特性產生變異，本節藉國內外既有坑道的案例，探討坑道受到長期穩定性影響因素後產生破壞，對場址特性的影響及其對既有坑道之效應。Wang and Lee(2012)利用既有水力坑道異狀案例，探討水力坑道生命週期之設計考量。研究指出當既

有坑道襯砌產生異狀後，若異狀伴隨滲水情況，將引致地下水流集中於襯砌異狀處而產生水力坡降，在滲水過程中將夾帶部分岩層中基質部分，致使地盤承载力不足而引發地表局部沉陷(圖 5.2-1)。另一方面，若坑道建置於緊鄰溪側的邊坡上，初始坑道開挖擾動帶在受到外力作用如地震作用、豪雨作用等因素下，邊界條件改變將引致開挖擾動帶範圍增大，以及坑道周圍滲流條件的改變，進而引發坑道的局部失穩及破壞(圖 5.2-2)。

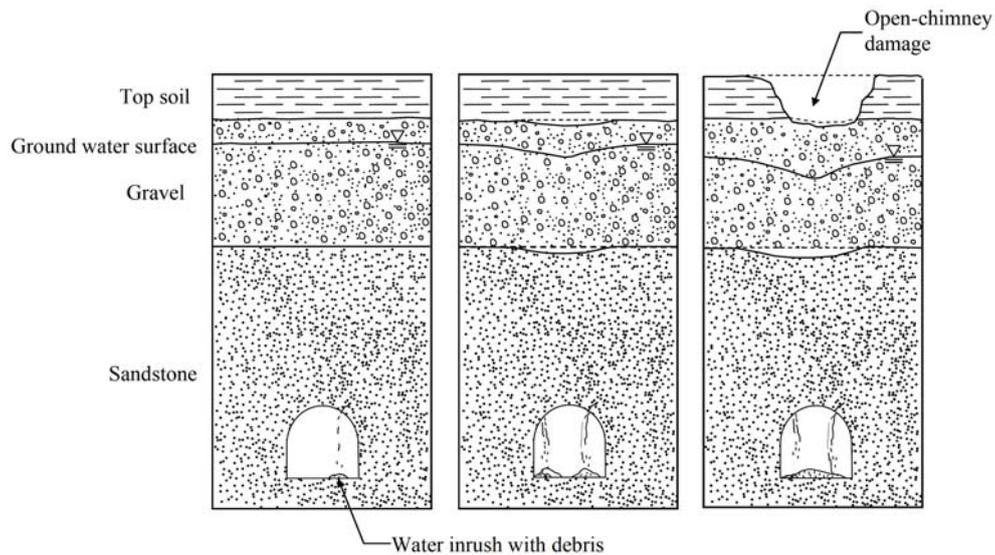


圖 5.2-1 坑道滲水使得岩層基質流失引致地表沉陷(Wang and Lee, 2012)

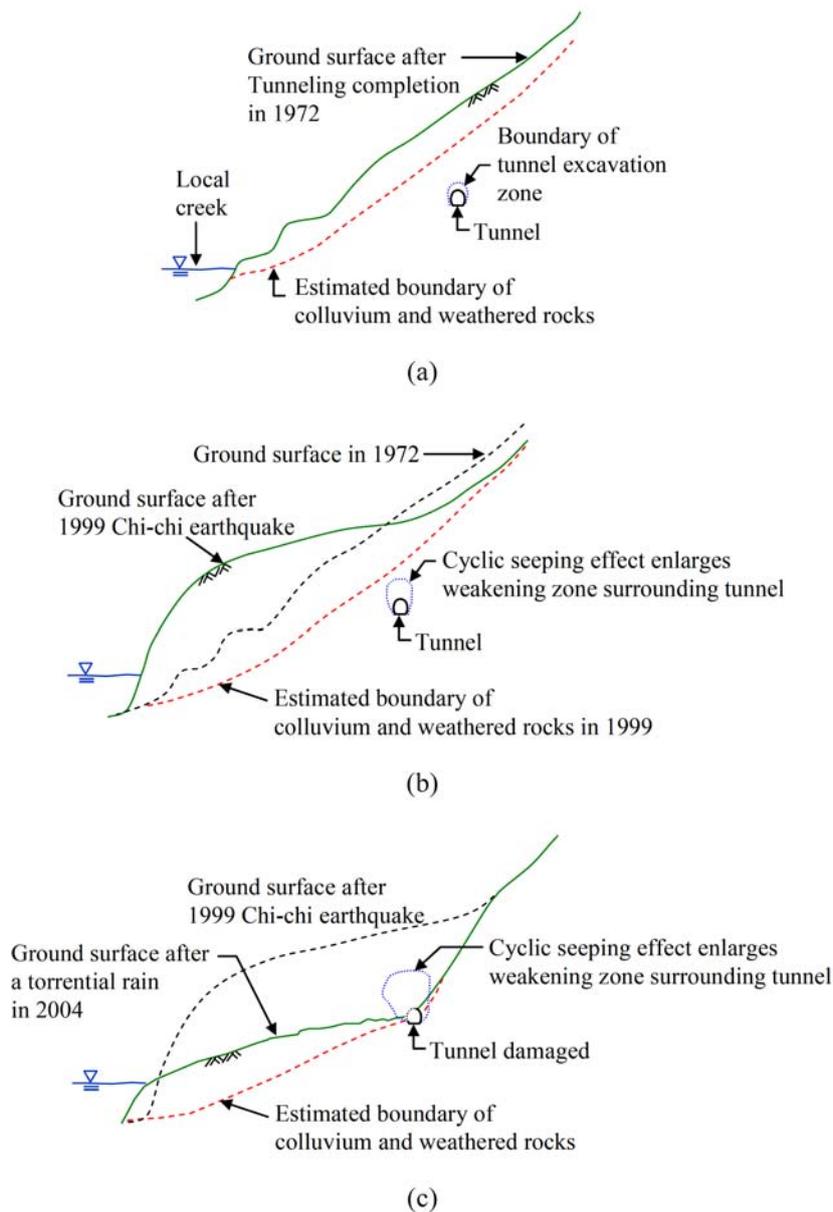


圖 5.2-2 地震及豪雨引致隧道周圍場址條件改變引發失穩(Wang and Lee, 2012)

5.3 開挖擾動引致場址特性變異之效應

坑道開挖引致開挖擾動帶，將局部改變坑道周圍場址特性，其影響場址特性的項目與程度至今仍為坑道長期穩定之關鍵課題。Zangerl 等人(2008)以瑞士 Gotthard 公路隧道為例，探討坑道開挖引致坑道周圍圍岩應力重新分布，進而影響周圍裂隙岩體滲流行為及對環境的影響。該公路隧道與地區裂隙的相對關係如圖 5.3-1 所示，該地區裂隙均屬高角度裂隙，與坑道軸向交角近乎垂直。圖 5.3-2(a)為坑道開挖所通過的岩層與岩性分布，以及地表沉陷量的分布，圖 5.3-2(b)為坑道開挖時各開挖面量測到的滲水量。研究結果顯示，在部分岩性

中開挖時，其滲水量相較其他岩性來的大，該岩性上方地表沉陷量亦十分顯著。考量坑道開挖後應力重新調整造成坑道徑向減壓、切向加壓的影響，將造成裂隙岩體中裂隙平面的部分閉合、部分開張的情況，引致坑道周圍場址水力特性的改變(圖 5.3-3)，進而引發整體場址水力特性改變之效應，而造成數公里內地表產生下陷，10 年來最大下陷量達 15 公分之多，區域地表下陷及場址滲流特性改變，恐對坑道結構產生長期穩定性之影響。Strozzi 等人(2011)藉合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)獲得大範圍地形變化，探討坑道施工引致地表沉陷的因子與機制。研究結果顯示，當坑道於變質岩類開始施工時，鄰近水壓井出現水壓大幅洩降的現象(圖 5.3-4)，此大幅洩降的位置與地表沉陷量最大處相近(圖 5.3-5)，推論坑道施工引致的開挖擾動，會影響坑道周圍圍岩力學及水力學的特性，進而造成區域地表下陷，對坑道設施的長期穩定性具一定程度的影響。

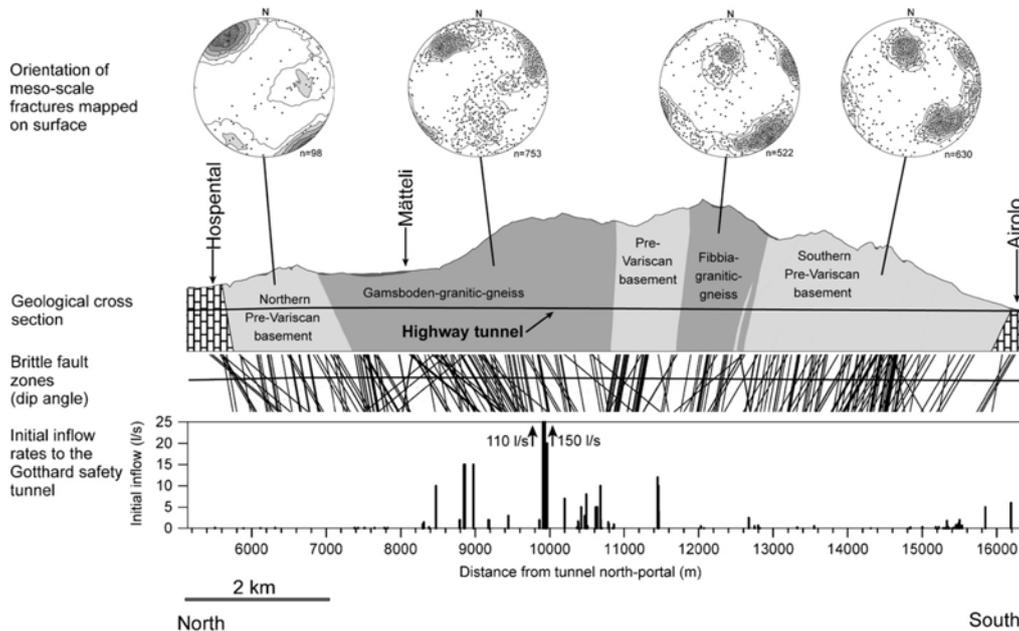
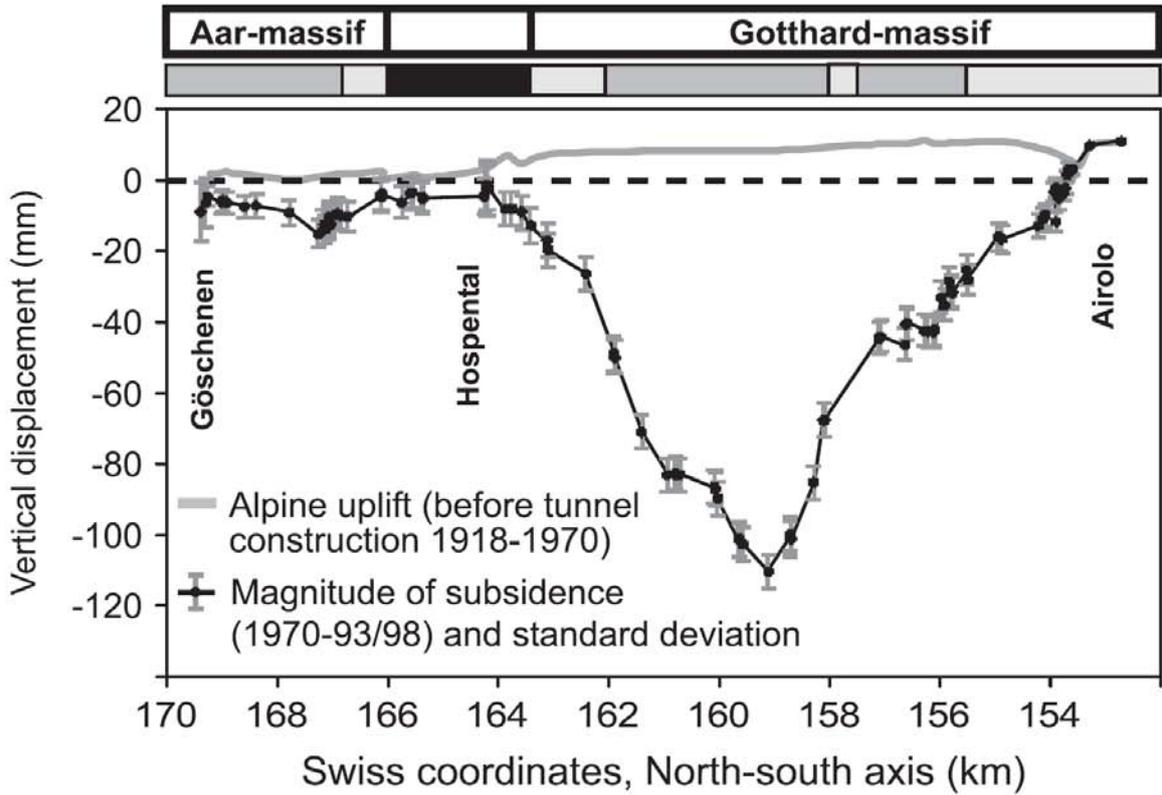


圖 5.3-1 Gotthard 公路隧道沿線岩性、裂隙與開挖滲水之分布(Zangerl 等人,2008)

a



b

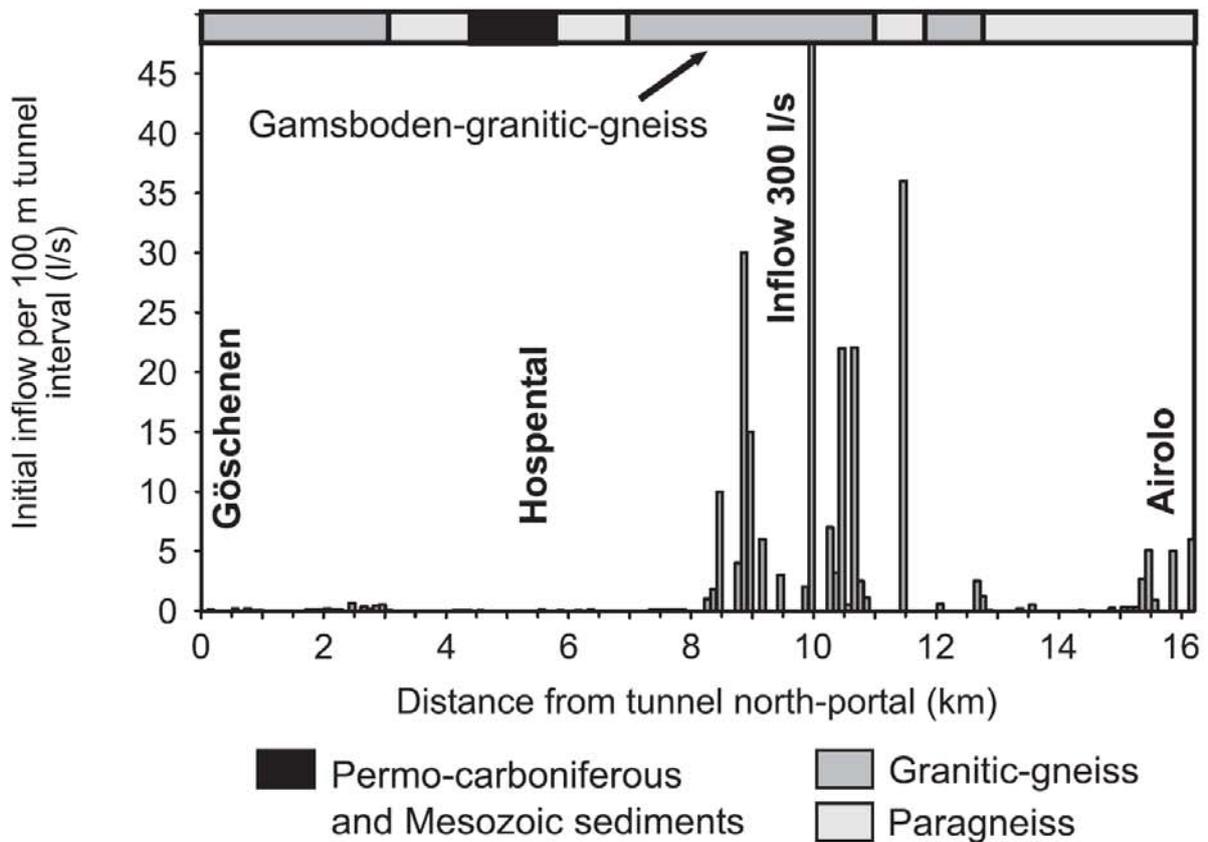


圖 5.3-2 Gotthard 公路隧道開挖滲水與地表沉陷量之關係(Zangerl 等人，2008)

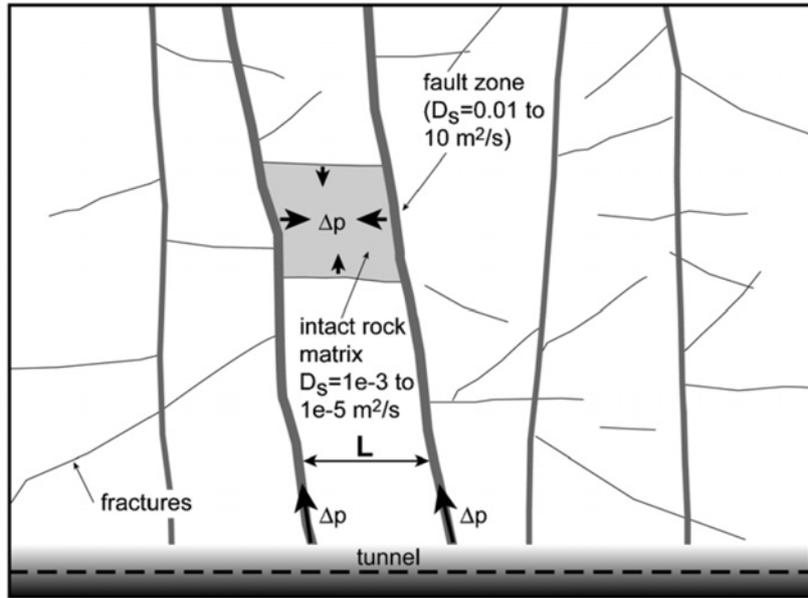


圖 5.3-3 開挖擾動使得場址水力學特性改變引致地表沉陷(Zangerl 等人, 2008)

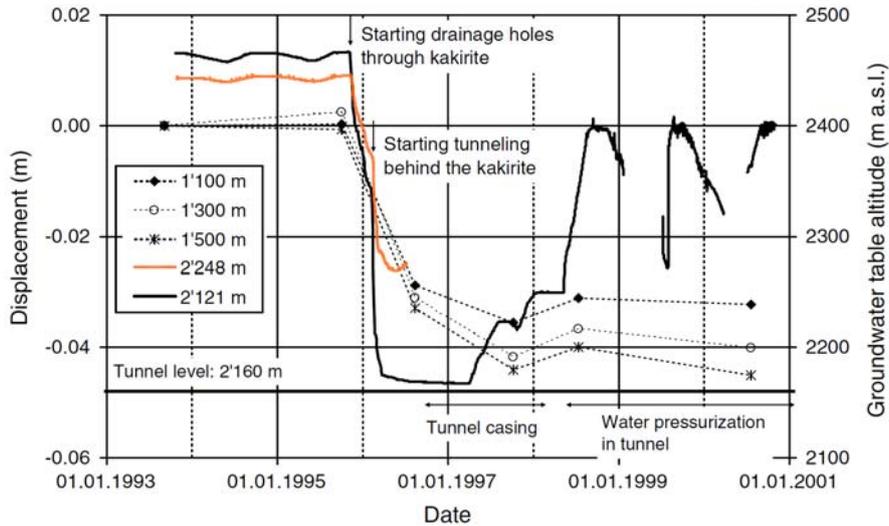


圖 5.3-4 開挖擾動引致水壓洩降之相對關係(Strozzi 等人, 2011)

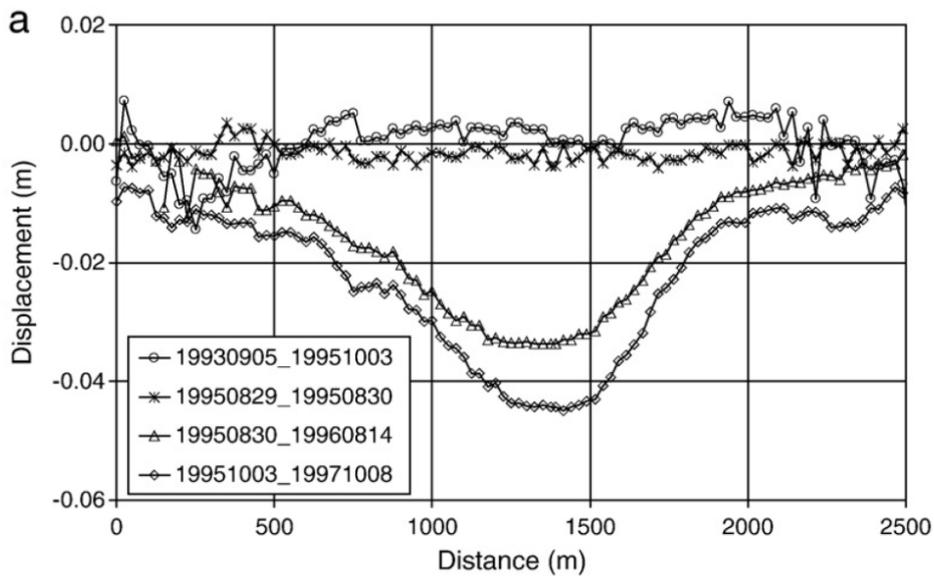


圖 5.3-5 歷年地表地形變化曲線(Strozzi 等人, 2011)

5.4 開挖引致材料特性變異之影響

大地材料承受應力達特定門檻以上時常顯露依時變形行為，其特性迥然不同於廣泛應用的彈塑性組成模式所描述者，而造成工程行為具有依時變化的現象。欲在既有的彈塑性模式下納入依時變形特性，受限於分析程序的複雜性以及參數取得的困難度等因素，在工程實務上仍不多見。

朱晃葵(2009)針對大地材料之彈塑性以及依時性變形行為，考慮隧道施工過程周圍材料應力變化之特性，納入柏格黏彈塑(Burgers visco-elasto-plastic)模式之阻尼參數 ηM 隨應力狀態而變化(圖 5.4-1)，探討大地材料依時變形對隧道收斂特性之影響，透過數值模式之建立應用於隧道開挖模擬分析，經與施工案例監測資料的比對，探討不同開挖與支撐方式隧道周圍的應力分佈，以及該應力狀態下周圍材料阻尼參數的變化，以至於其引致的隧道收斂變形特性，並闡述大地材料依時變形特性對隧道長期穩定性的影響。

研究結果顯示，隧道開挖初期當圍岩應力狀態達破壞包絡線後大地材料呈塑性狀態，待噴凝土、岩栓等構件支撐效果發揮，大地材料依時變形亦逐漸受到控制使得應力路徑轉折至穩定狀態(圖 5.4-2)，大地材料阻尼參數 ηM 隨隧道開挖後軸差應力的量值決定依時性變形特性(圖 5.4-3)，而隧道各位置構件支撐所承受的軸向應力隨依時性變形趨緩而漸趨穩定，然當隧道分階開挖受開挖擾動之影響時，構件支撐承受的應力狀態有劇烈之變化，顯現開挖擾動對大地材料依時性變形有一定之影響(圖 5.4-4)。

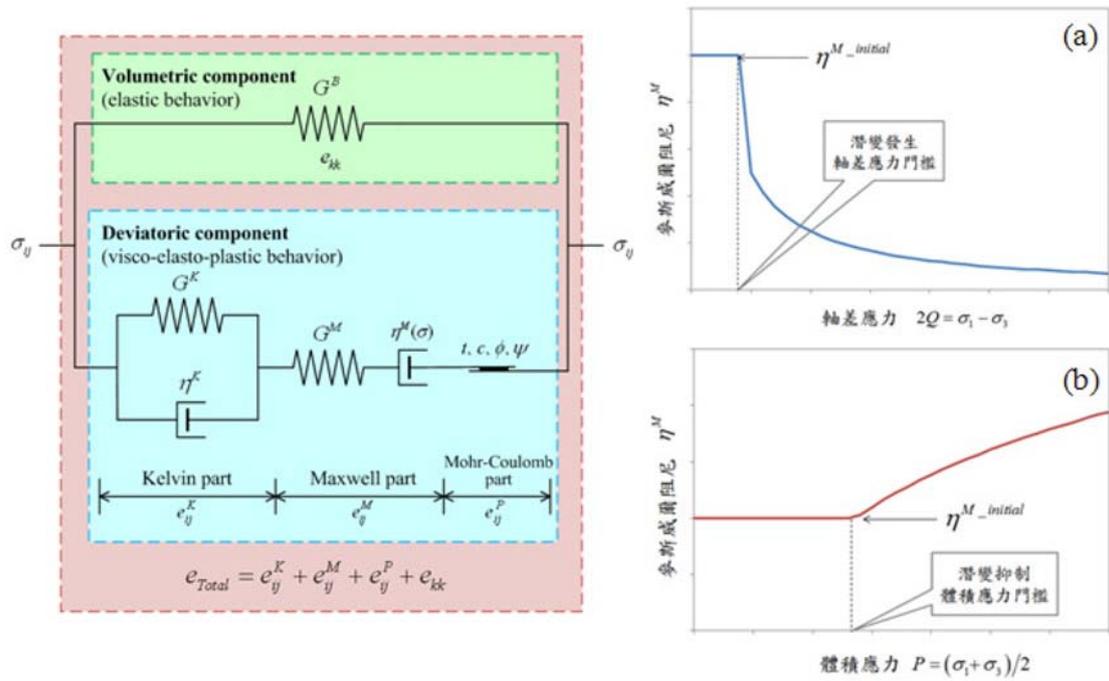


圖 5.4-1 柏格黏彈塑模式及應力狀態與阻尼值關係(朱晃葵，2009)

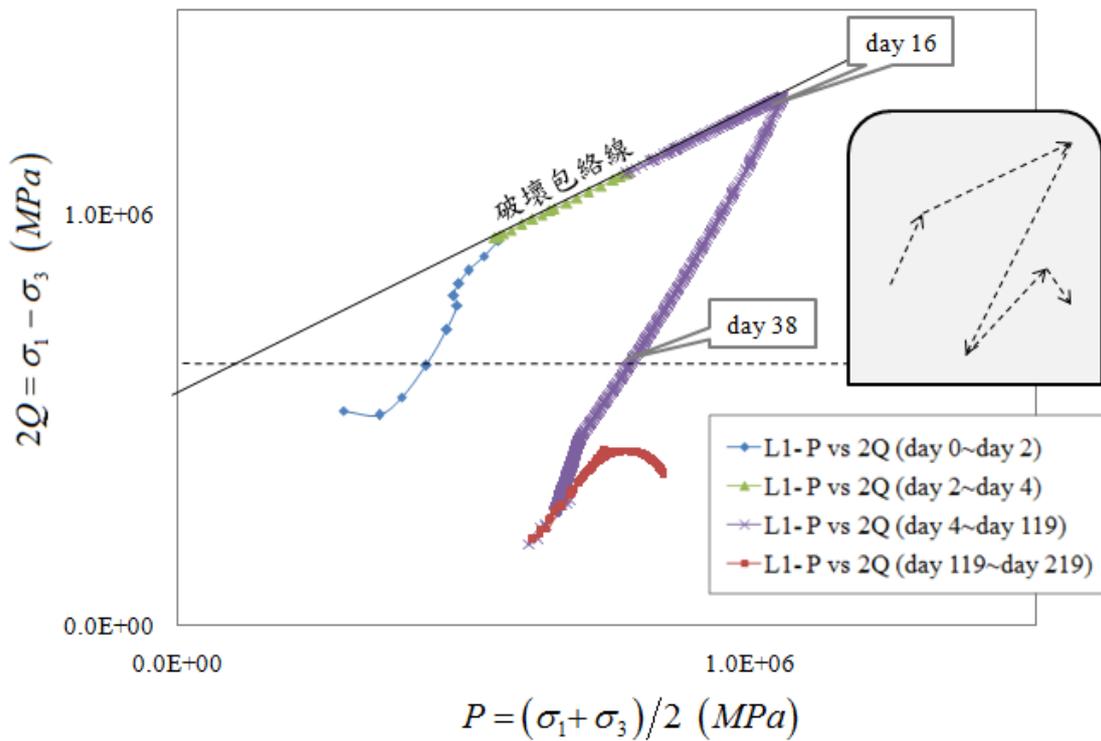


圖 5.4-2 開挖後隧道頂拱大地材料應力路徑之變化(朱晃葵，2009)

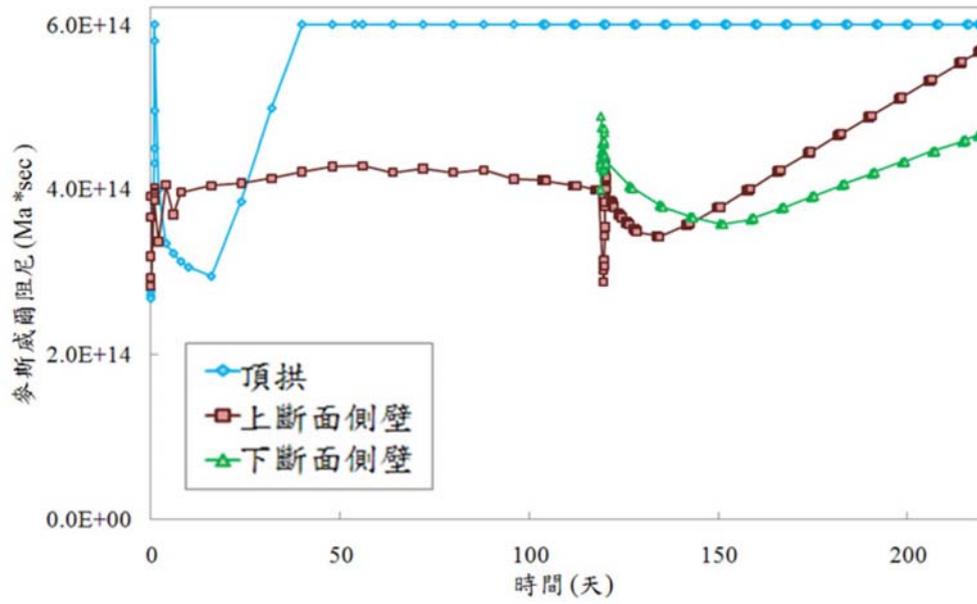


圖 5.4-3 大地材料麥斯威爾阻尼值之歷時曲線(朱晃葵，2009)

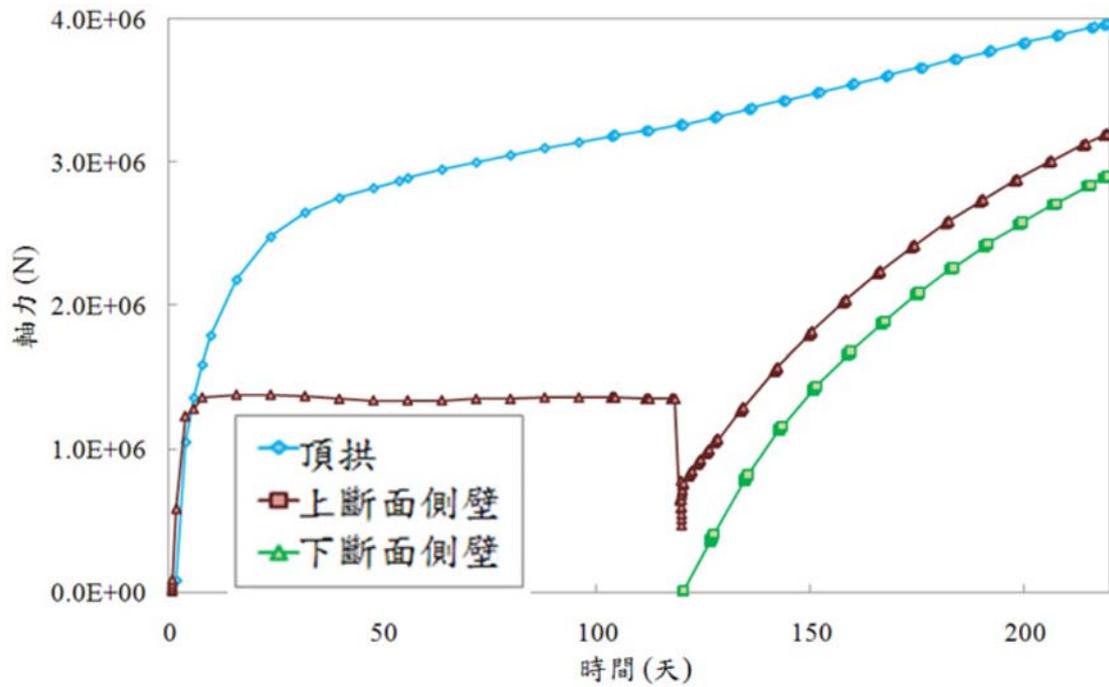


圖 5.4-4 隧道噴凝土襯砌軸向應力歷時曲線(朱晃葵，2009)

5.5 處置坑道功能需求分析

物管局於 2009 年「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」中，參考美國核能法規 NUREG-1200 詳列處置設施之設計目標、功能需求、以及建築結構等一系列的相關法規要求，國際隧道協會 (International Tunnelling Association, ITA) 於 1994 年發表的「Underground Repositories for Non-Nuclear Waste: Considerations for Engineering Design」中針對"非"放射性廢棄物最終處置場設計所建議的考量因素(圖 5.5-1)與設計流程(圖 5.5-2)，雖未針對放射性廢棄物，亦明確指出設計最終處置場時所需具備的流程及考量，主要係處置坑道因需具備堅固、抵抗侵蝕、減低地下水入滲、以及抵抗乾濕循環等基本條件，故處置坑道設計概念需與場址特性及其評估參數環環相扣，除完整的場址特性參數建置外，亦需考量長期穩定性影響因素對應的場址特性參數變異之影響。

Wang and Lee(2012)指出水力隧道在全生命週期考量下，於設計階段應考量營運階段中襯砌異狀導致坑道受損或破壞，並予以設計建置完成後可供管理單位監測、檢修之規劃與空間，以提高坑道的使用年限及落實全生命週期之概念(圖 5.5-3)。本計畫第三、四章已初步指出國內既有坑道長期穩定性之影響因素，並提出其對應的場址特性描述項目，在考量處置坑道功能不受或減低長期穩定性因素之影響，除完善的場址特性描述項目及其對應的參數評估與調查項目建置外，處置坑道需具備抵抗或減輕外力因素或環境因素對坑道造成的損害，包括適切的耐震設計、充分的障壁材料工程地質特性之掌握、開挖支撐方式的精進等，以確保處置場設施的安全營運以及長期穩定之考量。

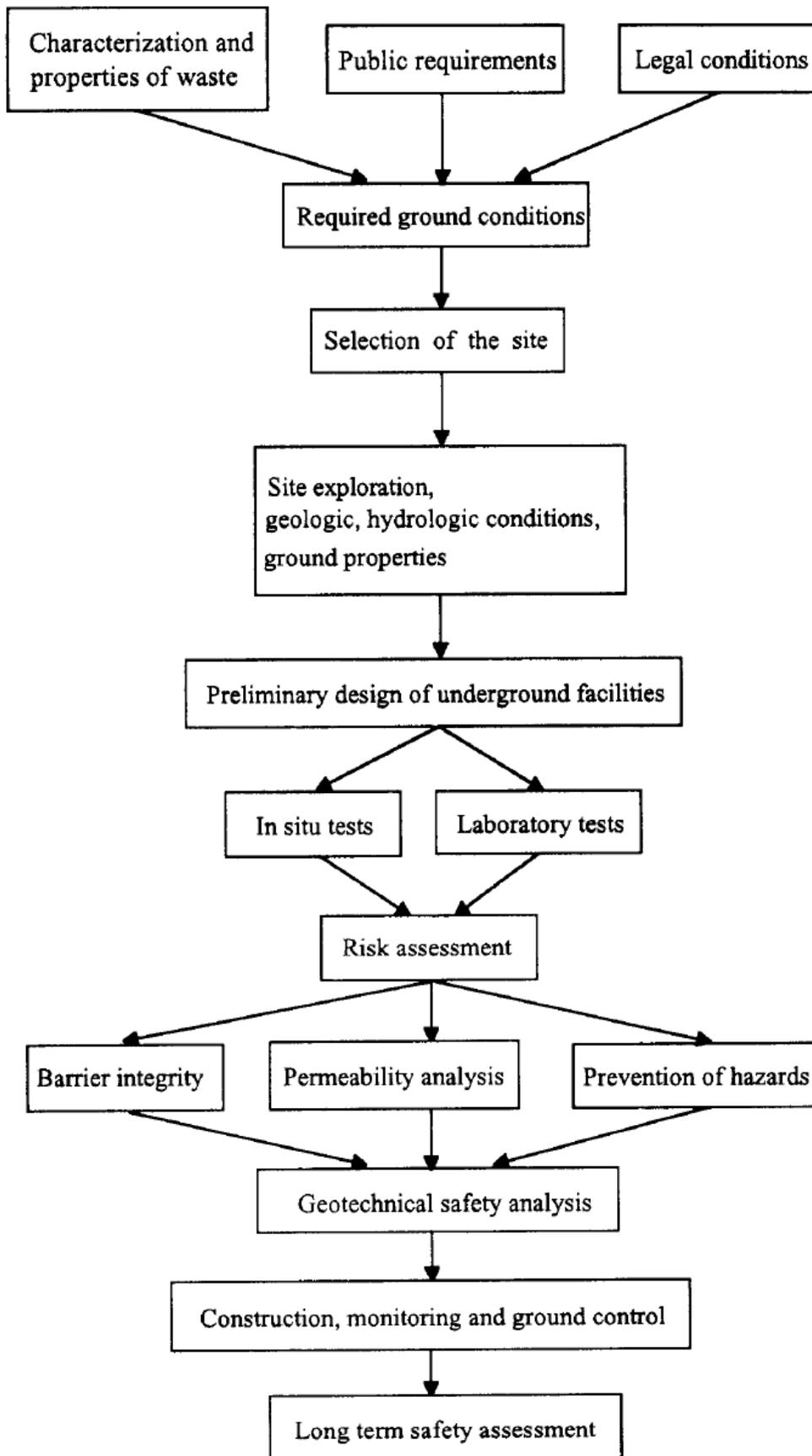


圖 5.5-1 設計地下貯存場之考量因素流程圖(ITA, 1994)

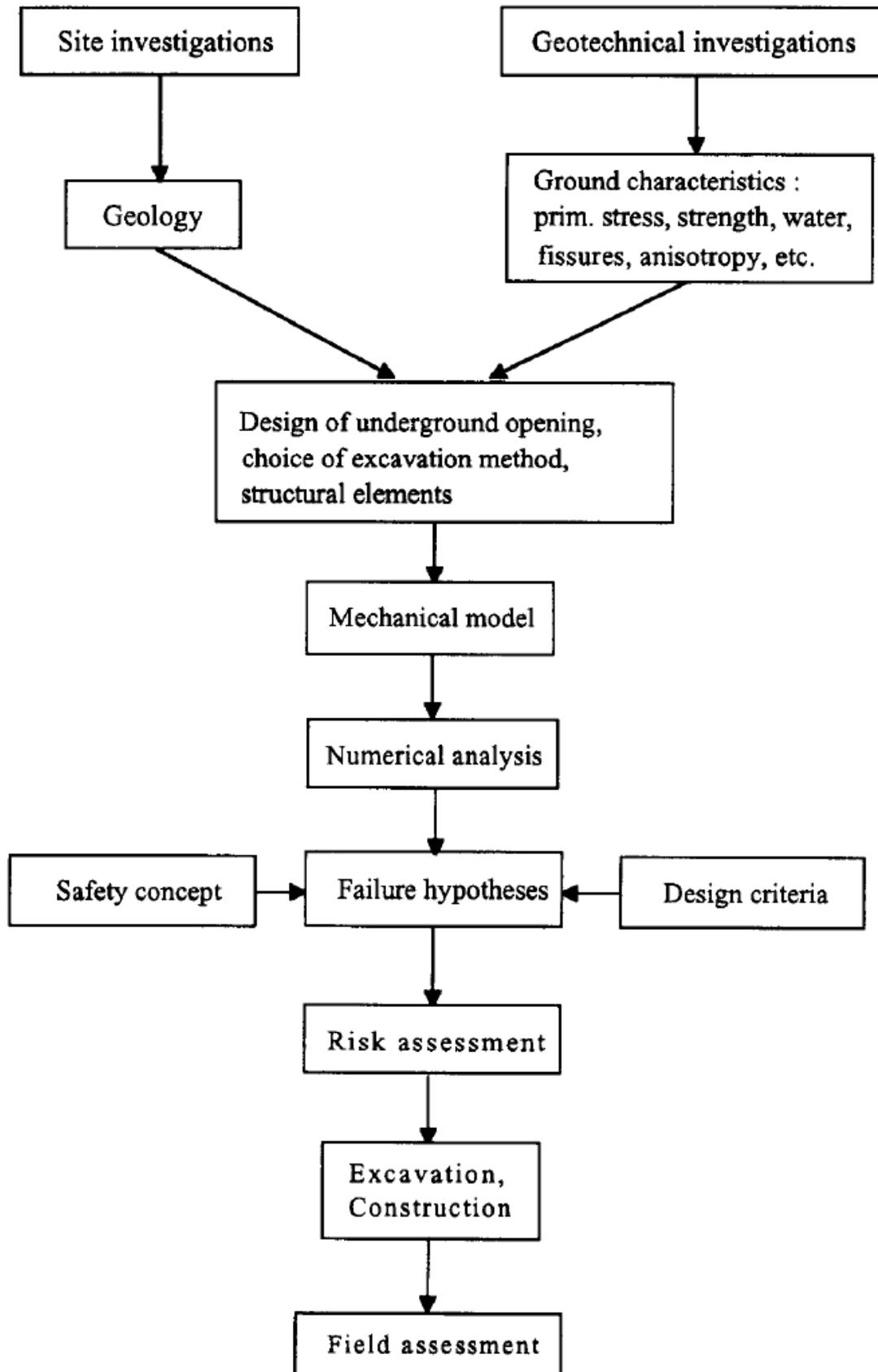
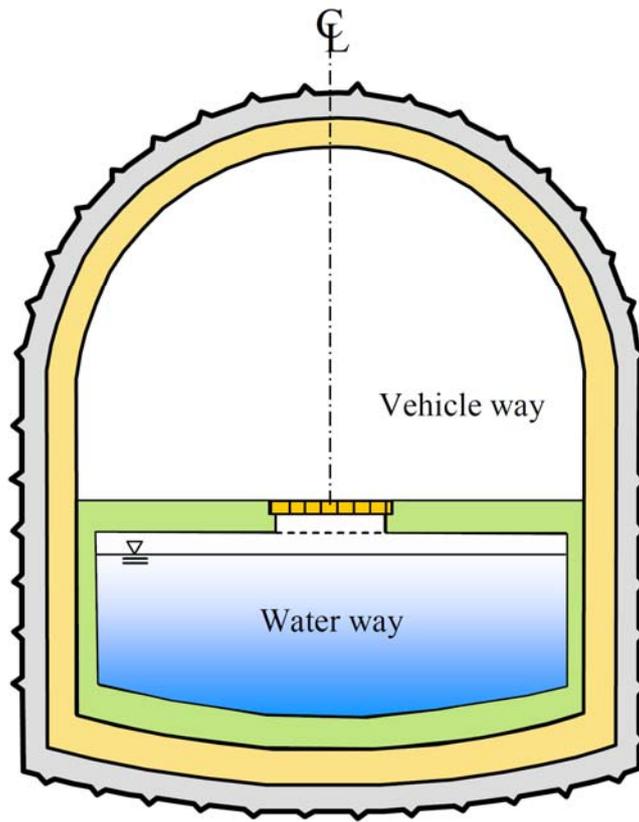
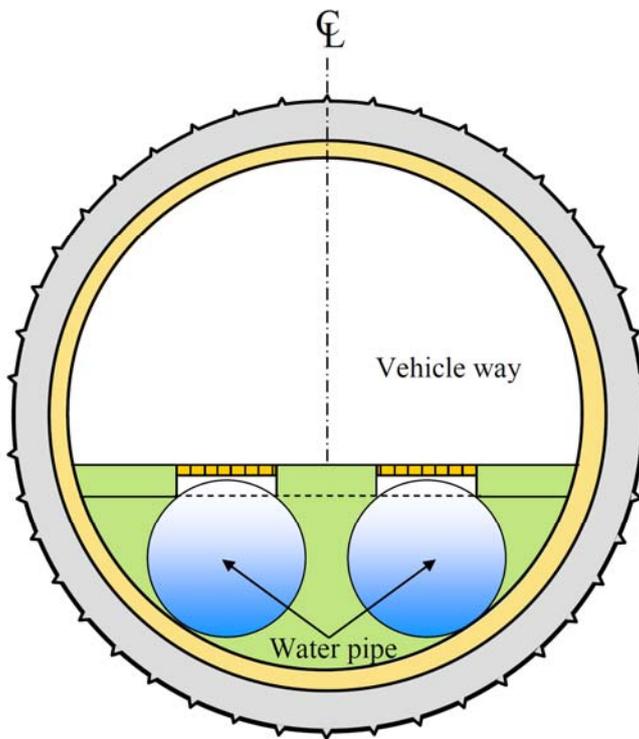


圖 5.5-2 地下貯存場之大地工程設計流程圖(ITA, 1994)



(a)



(b)

圖 5.5-3 水力隧道於全生命週期考量下之建置概念(Wang and Lee, 2012)

第六章 坑道處置設施設計與場址特性參數評估要項之探討

本計畫基於將既有一般坑道視為全尺度現地試驗，依據國內外既有一般坑道服務功能異常現象歸納整理，探討影響坑道長期穩定性影響因素，以及對應的場址特性描述項目及對應的參數評估與調查項目，供坑道處置設施設計需求與審查要項之參考。本章總結各章成果，提出處置坑道長期穩定性考量下，應具備的場址特性參數與調查項目，據此建議處置坑道設施之設計考量，以及相對應的審查管制要項，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。

6.1 場址特性描述項目與參數評估要項之探討

處置坑道基於安全與使用年限考量下，其長期穩定性的要求程度自然較一般坑道嚴謹，方能提升國人對利用坑道方式處置低放射性廢棄物作法之信心。本計畫將隧道襯砌結構安全檢測所得，視為經過設計考量的全尺度長時間的實驗結果，依據本土積累的寶貴實例，提出迥異於現代化隧道工法起源的國家其岩體強硬、抗風化能力佳、力學特性依時變異輕微之場址特性描述，供國內特殊的地質、氣候等工程條件下，據以參考的處置坑道設施設計及其穩定性評估的相關場址特性參數評估要項。

本計畫彙整國內外既有一般坑道服務功能異常的現象，將可能影響坑道服務功能的異狀探求其穩定性影響因素，主要為第三章中襯砌異狀影響因素的「外在因素」中之「外力」、「環境」因素。據前期成果報告及本計畫建議的坑道長期穩定性影響因素，歸屬其於既有處置規範與相關技術報告中對應的場址特性建議調查項目，並提出相對應的場址特性描述項目，以及所應涵蓋對應長期穩定性影響因素之參數評估與調查項目，綜整如表 6.1-1 所示，茲分別詳述於后。

外力因素：

1. 地震作用對坑道的影響：於處置技術較先進國家的相關設計規範與調查項目，已明確指出應考量地震作用對坑道之影響，並建議調查項目為地震活動

性、應力狀態、近其斷層運動等項目，除參考其建議調查項目外，考量地震作用對坑道影響的因子與場址特性息息相關，舉凡坑道所處位置、坑道周圍岩層力學特性、坑道圍岩波傳特性等條件，以及地震作用本身釋放的能量多寡、震源距離等因素，目前國際岩石力學學會已邀集國際上專家學者，致力於探討相關岩石動力學等相關研究課題，惟目前地震作用與場址特性對應的參數評估項目，尚無較佳的定論，本計畫歸納國內既有地震作用致使坑道襯砌異狀案例，初步建議坑道與斷層相對位置、斷層的種類與地震可能影響範圍，為相關場址特性描述與對應的參數評估項目。

2. 邊坡運動對坑道的影響：國內地質受年代輕、板塊碰撞推擠與氣候條件之影響，使得岩層風化速度較劇烈且破碎，遇地震或豪雨等因素影響，常造成山區邊坡大小不一的運動，破壞山區道路及交通甚劇。對處置坑道而言，邊坡穩定的掌握為處置坑道交通確保的關鍵要項。邊坡運動類型主要包含落石、滑動、蠕動、複合型破壞與流動等，與地質材料的組成特性、地形、風化程度等因素相關，對處置坑道而言，確認邊坡可能運動類型、地質材料工程特性與邊坡運動的影響、以及運動方向與坑道相對關係，為處置坑道設施前期調查與評估的關鍵項目。
3. 開挖擾動對場址及坑道的影響：處置坑道因工程開挖，將造成周圍岩層應力重新調整，當調整後應力超過岩層所能承受的強度時，會產生岩層片狀剝落、擠壓或岩爆等相關地質災害，並改變初始的岩層力學、水力學特性，恐影響處置坑道場址工程特性。因此，了解坑道圍岩的力學特性、水力學特性，並探討開挖方法對岩層擾動的影響程度與範圍，以及開挖擾動對長期工程特性的可能影響程度，為確保場址特性參數與處置坑道設施設計條件吻合的必備要素。

環境因素：

1. 依時性變形對坑道穩定的影響：大地材料因開挖造成應力重新調整，岩石受力後累積能量，其能量蓄積的多寡與岩層特性相關，當能量致使岩層產生緩慢且不易發覺的變形行為，恐對處置坑道的長期穩定影響甚大。因此，了解

地質材料依時性變形機制與可能影響因素，並探討依時性變形與水力特性之關係、依時性變形對坑道穩定與障壁功能的影響程度，為處置坑道長期穩定性考量之關鍵參數評估與調查項目。

2. 弱軟化特性對坑道穩定的影響：大地材料弱軟化特性係指材料因風化作用、開挖擾動等因素，使得材料強度與變形性參數可能隨時間而降低，使得坑道承受較大的應力而影響穩定性。故了解地質材料弱軟化的可能影響因素，以及弱軟化的變化趨勢及範圍，並探討岩層弱軟化與周圍環境特性的關係、弱軟化特性對坑道穩定與障壁功能的影響程度，亦為處置坑道長期穩定性考量之關鍵參數評估與調查項目。。

6.2 坑道處置設施設計評估要項之探討

本計畫依據低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告對應之審查導則草案中，根據本計畫研究結果，針對草案中第四章「處置設施之設計」章節中設施設計審查要項部分，應審慎評估既有坑道服務功能異常現象之影響因素對處置坑道長期穩定性的影響，並基於長期穩定性影響因素對應的場址特性描述項目深入探討其相關課題，包括地震作用、邊坡運動、開挖擾動、大地材料依時性變形與弱軟化特性對坑道之可能影響，並詳細探查場址特性描述項目對應的參數評估與調查項目，作為處置坑道長期穩定性評估應考量的要點，本計畫基於處置坑道設施長期穩定性之考量，建議坑道設施設計評估與審查要項如表 6.2-1 所示。

表 6.1-1 場址特性描述項目與參數評估要項之整理

既有坑道長期穩定性影響因素(本計畫)		對應場址特性項目 (IAEA, 1999)	場址特性描述項目	參數評估與調查項目(本計畫建議)
外力因素	地震作用	構造地質與地震 Tectonics	地震作用對坑道的影響	[1]. 場址卓越頻率 [2]. 不同岩層波傳特性 [3]. 坑道岩覆深度與震波傳遞的關係
	邊坡穩定	地形演化過程 Geomorphological processes	邊坡運動對坑道的影響	[1]. 邊坡可能運動類型(滑動、蠕動、複合型與流動) [2]. 地質材料工程特性對邊坡運動的影響 [3]. 運動方向與坑道相對關係
	開挖擾動	— —	開挖擾動對場址及坑道的影響	[1]. 圍岩岩層力學特性 [2]. 圍岩岩層水力學特性 [3]. 開挖方法對擾動範圍之影響 [4]. 擾動對長期場址工程特性之影響
環境因素	大地材料依時性變形	岩石力學特性 Rock mechanics properties	依時性變形對坑道穩定的影響 變形後地質材料與障壁特性的變化	[1]. 依時性變形機制與影響因素 [2]. 岩層依時性變形與水力特性關係 [3]. 依時性變形對坑道穩定與障壁功能的影響
	大地材料弱軟化特性	地形演化過程 Geomorphological processes	弱軟化特性對坑道的影響 弱軟化後地質材料與障壁特性的變化	[1]. 弱軟化特性機制與影響因素 [2]. 岩層弱軟化特性與環境特性的關係 [3]. 弱軟化特性對坑道穩定與障壁功能的影響

表 6.2-1 坑道處置設施設計評估與審查要項

既有坑道長期穩定性影響因素(本計畫)		場址特性描述項目	設計評估要項(本計畫建議)	審查要項(本計畫建議)
外力因素	地震作用	地震作用對坑道的影響	應充分說明處置設施受地震作用之影響，以及對應的參數調查項目成果，其設計基準、功能需求、設計規格、設計方法與設計成果，並檢附處置設施於該長期穩定性因素下之情境模式，作為處置設施安全評估之基準。	應檢核處置設施考量受震下之設計目標、確認設計基準與功能需求是否完整，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，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。
	邊坡穩定	邊坡運動對坑道的影響	應充分說明處置設施場址邊坡地質材料工程特性與邊坡運動可能性關聯，以及對應的參數調查項目成果，茲以涵蓋對應的設計基準、功能需求、設計規格、設計方法與設計成果，並檢附處置設施於該長期穩定性因素下之情境模式，作為處置設施安全評估之基準。	應檢核處置設施於場址邊坡工程特性與邊坡運動完整調查成果下之設計目標、確認設計基準與功能需求是否完整，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，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。
	開挖擾動	開挖擾動對場址及坑道的影響	應充分說明處置設施開挖方法對場址擾動之影響，以及對岩層工程特性之影響，以及對應的參數調查項目成果，茲以涵蓋對應的設計基準、功能需求、設計規格、設計方法與設計成果，並檢附處置設施於該長期穩定性因素下之情境模式，作為處置設施安全評估之基準。	應檢核處置設施受開挖擾動影響考量下之設計目標、確認設計基準與功能需求是否完整，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，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。
環境因素	大地材料依時性變形	依時性變形對坑道穩定的影響 變形後地質材料與障壁特性的變化	應充分說明處置設施場址岩層工程特性隨時間的變異程度，以及依時性變形對坑道穩定與障壁功能之影響，以及對應的參數調查項目成果，茲以涵蓋對應的設計基準、功能需求、設計規格、設計方法與設計成果，並檢附處置設施於該長期穩定性因素下之情境模式，作為處置設施安全評估之基準。	應檢核處置設施受場址岩層工程特性依時性變化考量下之設計目標、確認設計基準與功能需求是否完整，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，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。
	大地材料弱軟化特性	弱軟化特性對坑道的影響 弱軟化後地質材料與障壁特性的變化	應充分說明處置設施場址岩層特性參數弱軟化與環境特性之關係，以及弱軟化特性對坑道穩定與障壁功能之影響，以及對應的參數調查項目成果，茲以涵蓋對應的設計基準、功能需求、設計規格、設計方法與設計成果，並檢附處置設施於該長期穩定性因素下之情境模式，作為處置設施安全評估之基準。	應檢核處置設施受場址岩層特性參數弱軟化特性考量下之設計目標、確認設計基準與功能需求是否完整，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，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。

第七章 結論與建議

本計畫自處置坑道與一般坑道於設計目標、對於坑道穩定與服務功能需求出發，探討處置坑道與一般坑道對穩定需求之異同分析，並蒐集整理國內外營運中一般坑道安全檢測報告以及長期行為有關之文獻，據以彙整恐影響坑道穩定性之襯砌材料老化、劣化以及滲漏水等服務功能異常現象，提供後續探討影響坑道長期穩定之影響因素，進而針對坑道長期穩定之影響因素，深入探討各影響因素對應的場址特性描述項目，以及對應的參數評估與調查項目，據此建議處置坑道設施之設計考量，以及相對應的審查管制要項，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。本計畫依約完成各工作項目，說明如后。

7.1 結論

1. 依據前期成果報告重新彙整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差異，並完成處置坑道與一般坑道調查項目異同分析，一併整理於本報告第二章。異同分析結果顯示，處置坑道與一般坑道場址特性調查的差異主要在時間與空間尺度上的差異，以及場址特性調查參數上之差異。在長期穩定性考量下，處置坑道考量調查項目包括地質演化過程、構造地質與地震、熱-水-力-化耦合作用等項目，其中地質演化過程係包括風化、侵蝕、邊坡滑動等因子可能對處置坑道造成的影響，構造地質與地震即近期斷層活動、與地震震波造成之影響，熱-水-力-化耦合作用則主要探討熱力學、水力、力學、化學等作用在耦合行為下對處置設施的反應。

2. 依據前期成果報告，以及本年度納入的一般坑道異常現象之案例，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，並探討坑道長期穩定性影響因素，整理於本報告第三章。研究結果顯示影響坑道長期穩定性影響因素主要可區分為外力因素與環境因素兩部分，其中外力因素可細分為地震作用、

邊坡穩定與開挖擾動對坑道造成的影響，環境因素則分為大地材料依時性變形與大地材料弱軟化特性因素。

3. 透過坑道長期穩定性影響因素，探討各因素因應場址變異對坑道可能造成的影響、各因素機制與影響因素、以及對坑道穩定與障壁功能之影響，完成影響坑道長期穩定與服務功能因素之場址特性描述與對應參數之探討，以及場址特性變異對坑道影響之探討，整理於報告第四、五章。

4. 完成坑道長期穩定性影響因素對應的場址特性描述項目，以及提出處置坑道長期穩定性考量下，所應涵蓋對應長期穩定性影響因素之參數評估與調查項目，並據以建議坑道處置設施設計評估要項與審查要項，整理於報告第六章。研究結果顯示，設施設計之設計目標與功能需求，需明確根據長期穩定性影響因素對應場址特性調查項目之結果予以設計評估，並據以審查相關調查及設計成果，作為處置設施安全性與長期穩定性之後盾。

7.2 建議

本文針對低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則草案(第 0 版)之第三章「場址之特性描述」、第四章「處置設施之設計」、與第七章「處置設施之安全評估」提出修正建議，分別以表列對照原文與修正建議。

「第三章 場址之特性描述」修正建議

頁碼	原文	修正建議
3.11 大地工程特性 3.11.2.2 安全性評審 (5) 地層與設計參數 62頁	審查人員將針對探勘位置計畫(location plans)、剖面(cross-sections)、顯示場址土壤與岩層的縱斷面(profiles)進行審查，並與探勘記錄進行比較，以確認所有蒐集之資料(特別是探勘時遭遇的軟弱區)，均已保守地應用於建立土壤與岩層之分層，特別值得注意的是，地層厚以及側向延伸的推估通常具不確定性，而此不確定性在建立土壤與岩層之分層時應保守考量。審查人員還必須考量，申請人是否完整地及	審查人員將針對探勘位置計畫(location plans)、剖面(cross-sections)、顯示場址土壤與岩層的縱斷面(profiles)進行審查，並與探勘記錄進行比較，以確認所有蒐集之資料(特別是探勘時遭遇的軟弱區)，均已保守地應用於建立土壤與岩層之分層，特別值得注意的是，地層厚以及側向延伸的推估通常具不確定性，而此不確定性在建立土壤與岩層之分層時應保守考量。審查人員還必須考

	<p>保守地解釋取得自調查作業之土壤與岩石特性，以進一步建立設計參數。若其使用之土壤與岩石特性以及地下分層很顯然地不保守，審查人員將要求補充額外資料以驗證申請者提出之建議。</p>	<p>量，申請人是否完整地及保守地解釋取得自調查作業之土壤與岩石特性，<u>並考慮施工方法對土壤與岩石特性造成的短期影響與長期的變異，以及對其他場址特性可能造成的影響</u>，以進一步建立設計參數。若其使用之土壤與岩石特性以及地下分層很顯然地不保守，審查人員將要求補充額外資料以驗證申請者提出之建議。</p>
--	--	--

「第四章 處置設施之設計」修正建議

頁碼	原文	修正建議
<p>4.1 設計目標與功能需求 4.1.3.3 法規評審準則 (3) 構造穩定性 87頁</p>	<p>申請人針對覆土、廢棄物及掩蓋物構造上穩定性設計特性的相關討論，若其設計特性已清楚的描述並顯示該特性已整合於全面的LLWDF 計劃中，則此部分資料的提出可被接受。在設計特性敘述時，申請人至少必須說明其廢棄物長期隔離及避免經常維護之需求方面已依循10 CFR 61.51(a)(1)已列入考量。其它方面的設計特性將於SRP 3.2, 3.3.1, 4.3, 5.1.2 與 6.3.3 中詳述。</p>	<p>申請人針對覆土、廢棄物及掩蓋物構造上穩定性設計特性的相關討論，<u>應包括長期穩定性以及構造物失穩之影響</u>。若其設計特性已清楚的描述並顯示該特性已整合於全面的LLWDF 計劃中，則此部分資料的提出可被接受。在設計特性敘述時，申請人至少必須說明其廢棄物長期隔離及避免經常維護之需求方面已依循10 CFR 61.51(a)(1)已列入考量。其它方面的設計特性將於SRP 3.2, 3.3.1, 4.3, 5.1.2 與6.3.3 中詳述。</p>

「第七章 處置設施之安全評估」修正建議

頁碼	原文	修正建議
<p>7.4 長期穩定性 194頁</p>	<p>審查人員將審查申請者依據所提供SAR 第3 章「場址之特性描述」內容，提出之可能影響處置設施長期穩定性與安全性的事件，並針對每一事件評估與分析是否符合長期穩定性的安全需求。</p>	<p>審查人員將審查申請者依據所提供SAR 第3 章「場址之特性描述」內容，<u>以及施工方法造成的影響與變異</u>，提出之可能影響處置設施長期穩定性與安全性的事件，並針對每一事件評估與分析是否符合長期穩定性的安全需求。</p>

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. 應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，並了解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，裨利精進處置技術及健全管制作業。

2. 應就既有坑道襯砌服務功能異常現象如變形、裂隙等異狀，探討對坑道長期穩定性之影響程度，並與處置坑道工程障壁之功能需求建立關聯，提出處置坑道工程障壁長期穩定性考量下，穩定性影響因素變異對障壁功能之影響程度，提供處置設施設計評估之考量。

3. 應持續探討長期穩定性影響因素與場址特性的相關性，如建立長期穩定影響因素與場址岩層力學特性、水力學特性、及工程地質特性之關聯，以完善處置技術相關場址調查項目與評估參數之建置。

4. 應確立場址特性於處置坑道全生命週期各階段之調查需求與評估項目，提出因應的調查項目與方法及相關的場址特性調查建議，如調查階段應評估影響隧道長期穩定之岩體依時變化特性，施工階段應評估開挖擾動造成岩體弱軟化及水力耦合行為對隧道影響的效應，提出適當的調查項目與建議。

參考文獻

- [1] Bell, F. G., M.G. Culshaw (1998) : Petrographic and engineering properties of sandstones from the Sneinton Formation, Nottinghamshire, England, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 31(1), 5-19.
- [2] Bickel, J.O., J.R. Kuesel and E.H. King(1996): Tunnel Engineering Handbook, 520-540, Chapman & Hall, New York.
- [3] Brikmeyer, J.A.(1978): Rapid Transit Subways – Maintenance Guide, Report UMTA-MA-06-0025-78-3.
- [4] Eraud, J.(1974): Policy in the Field of Inspection, Maintenance of Tunnels, SNCF.
- [5] Haack, A., J. Schreyer and G. Jackel(1992): Repair and Maintenance with Special Respect to Leakages in Tunnels, In: Proc. International Symposium on Current Experience on Tunnelling, 238-280, Kairo.
- [6] Russel, H.A.(1993): Control of Groundwater in Tunnel Rehabilitaion, In: Proc. Rapid Excavation and Tunneling Conference Boston, 505-513, USA.
- [7] Sherwood, B.(1995): Long Submerged Tunnel Inspections: the Mantaro Headrace Tunnel Central Andes Mountains, Peru, In: Oceans Conference Record(IEEE) San Diego, 2008-2012, USA.
- [8] Ulusay, R. and Judson, J.A.(2007): The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring, 1974-2006, Compilation arranged by the ISRM Turkish national group, Ankara, Turkey.
- [9] Janin, J. J. et al. (1970): Chemical Grouting for Paris Rapid Transit Tunnels, In: Proc. ASCE Construction Division, 96.

- [10]Rogers, W. F. (1993): Rehabilitation/upgrading of Underrated or Deteriorating Single or Multi- span Structures Using Corrugated Steel Pipe, Tunnel Liner Plate or Structural Plate, In: Proc. of the International Conference on Pipeline Infrastructure II San Antonio, 671-675, USA.
- [11]Lukacs, J.J. (1997): Retrofitting Tunnel Kilns, American Ceramic Society Bulletin, 76, 2, 48-53.
- [12]Chen, H.M. (1995): Retrofit Techniques for Floating Slab Track, Transportation Research Record 1503, 118-126.
- [13]South African National Council on Tunnelling (SANCOT) (1995): Guidelines for Maintenance and Repair of Underground Structures.
- [14]ITA-Working Group Maintenance and Repair (1997): Bibliography on Maintenance and Repair of Tunnels.
- [15]Bieniawski, Z. T., Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A. A.Balkema Publishers, Rotterdam, 1984.
- [16]Hoek, E. and Brown, E. T., Underground Excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1982.
- [17]Hoek, E., Rock Engineering, Evert Hoek Consulting Engineer Inc., Canada, 2000.
- [18]U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations, Washington, 1995.
- [19]U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock, Washington, 1997.
- [20]U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design Geotechnical Investigations, Washington, 2001.

- [21]British Standards Institution, Code of practice for site investigations (BS 5930), 1999.
- [22]Hoek, E. and Brown, E.T., Empirical strength criterion for rock masses, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 106(GT9), pp. 1013-1035, 1980.
- [23]IAEA. 1982, Site investigations for repositories for solid radioactive waste in shallow ground, Vienna: IAEA, Technical Report Series No.216.
- [24]IAEA. 1993, The radioactive waste management glossary, Vienna: IAEA.
- [25]IAEA. 1984, Site Investigations, Design, Construction, Operation, Shutdown and Surveillance of Repositories for Low-and Intermediate-Level Radioactive Wastes in Rock Cavities.
- [26]IAEA. 1994, Siting of Near Surface Disposal Facilities (No. 111-G-3.1, 1994)
- [27]IAEA. 1999, Safety Standards Series No. WS-R-1: Near Surface Disposal of Radioactive Waste.
- [28]IAEA. 2001, Technical Considerations in the Design of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste (IAEA-TECDOC-1256, 2001)
- [29]IAEA. 2006, Geological Disposal of Radioactive Waste Safety Requirements (No. WS-R-4, 2006)
- [30]IAEA. 2001, Technical Considerations in the Design of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste (IAEA-TECDOC-1256, 2001)
- [31]IAEA. 2001, Characterization of Groundwater Flow for Near Surface Disposal Facilities (IAEA-TECDOC-1199, 2001)
- [32]IAEA. 1999, Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste Safety Guide (No. WS-G-1.1, 1999)
- [33]IAEA. 1999, Near Surface Disposal of Radioactive Waste Safety Requirements

(No. WS-R-1, 1999)

- [34]IAEA. 1999, Hydrogeological Investigation of Sites for the Geological Disposal of Radioactive Waste (Technical Reports Series No. 391, 1999)
- [35]IAEA. 1995, Principles of Radioactive Waste Management Safety Fundamentals (No. 111-F, 1995)
- [36]IAEA. 1994, Siting of Near Surface Disposal Facilities (No. 111-G-3.1, 1994)
- [37]IAEA. 1994, Siting of Geological Disposal Facilities (No. 111-G-4.1, 1994)
- [38]IAEA. 1984, 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)
- [39]IAEA. 1983, Criteria for Underground Disposal of Solid Radioactive Wastes (Safety Series No. 60, 1983)
- [40]IAEA. 1981, Shallow Ground Disposal of Radioactive Wastes (Safety Series No. 53, 1981)
- [41]ITA. 1994, Underground repositories for non-nuclear waste: Considerations for engineering design, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 9, No. 4, 461-469.
- [42]NRC. 1991, Standard Format and Content of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (NUREG-1199, Rev. 2, 1991)
- [43]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)
- [44]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)
- [45]NRC. 1992, Compilation of Nuclear Safety Criteria Potential Application to

DOE Nonreactor Facilities (DOE-STD-101-92, 1992)

- [46]NRC. 1991, Standard Format and Content of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (NUREG-1199, Rev. 2, 1991)
- [47]NRC. 1982, Tests for Evaluating Sites for Disposal of Low-Level Radioactive Waste (NUREG/CR-3038, 1982)
- [48]STUK. 2003, Disposal of Low and intermediate Level Waste from the Operation of Nuclear Power Plants (GUIDE YVL 8.1, 2003)
- [49]NHMRC. 1992, Code of practice for the near-surface disposal of radioactive waste in Australia (No. 35, 1992)
- [50]中國國家環境保護總局. 2004, 核技術利用放射性廢物庫選址、設計與建造技術要求。
- [51]Jeng., F. S., Weng., M. C., Lin., M. L. and Huang., T. H. (2004) “Influence of petrographic parameters on geotechnical properties of tertiary sandstones from Taiwan”, *Engineering Geology* 73, 71-91.
- [52]Kwon, S., W.J. Cho and P.S. Han(2006): Concept development of an underground research tunnel for validating the Korean reference HLW disposal system, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, pp. 203-217.
- [53]Fairhurst, C., F. Gera, P. Gnirk, M. Gray and B. Stillborg(1993): The International Stripa Project: an overview, *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless*, Vol. 8, pp. 315-343.
- [54]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.
- [55]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.

- [56]Sulem, J., M. Panet and A. Guenot (1987a): Closure analysis in deep tunnels. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 24(3), 145-154.
- [57]Sulem, J., M. Panet and A. Guenot (1987b): An analytical solution for time-dependent displacement in a circular tunnel. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 24(3), 155-164.
- [58]Sabatakakis N., Koukis G., Tsiambaos G., Papanakli S. (2008) Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks. *Engineering Geology* 97:80–90.
- [59]Strozzi, T., Delaloye, R., Poffet, D., Hansmann, J. and Loew, S. (2011): Surface subsidence and uplift above a headrace tunnel in metamorphic basement rocks of the Swiss Alps as detected by satellite SAR interferometry, *Remote Sensing of Environment*, 115, 1353-1360.
- [60]Tan X., Chen W., Yang J., Cao J. (2011) Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze–thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology* 68: 130–138.
- [61]Owen, G.N. and R.E. Scholl(1981): *Earthquake Engineering of Large Underground Structures*, prepared for the Feral Highway Administration, FHWA/RD-80/195.
- [62]Newark, N. M.(1968): “Problems in Wave Propagation in Soil and Rock,” *International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials*.
- [63]Chen, C.H., T.T. Wang, F.S. Jeng and T.H. Huang (2012): Mechanisms causing seismic damage of tunnels at different depths, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28(1), 31-40.
- [64]Wang, T.T. (2010): Characterizing crack patterns on tunnel linings associated

with shear deformation induced by instability of neighboring slopes, *Engineering Geology*, 115(1-2), 80-95.

- [65] Wang, T.T. and C.H. Lee (2012): Life cycle design considerations for hydraulic tunnels - lessons learned from inspection and maintenance cases, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000371
- [66] Weng, M. C. and Li., H. H., (2012) “Relationship between the deformation characteristics and microscopic properties of sandstone explored by the bonded-particle model”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science* 56, 34-43.
- [67] Yow, J. L. and J. R. Hunt (2002), Coupled processes in rock mass performance with emphasis on nuclear waste isolation. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*,39(2), 143-150.
- [68] Zangerl, C., Evans, K.F., Eberhardt, E. and Loew, S. (2008): Consolidation settlements above deep tunnels in fractured crystalline rock: Part 1—Investigations above the Gotthard highway tunnel, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 45, 1195-1210.
- [69] Zangerl, C., Evans, K.F., Eberhardt, E. and Loew, S. (2008): Consolidation settlements above deep tunnels in fractured crystalline rock: Part 2—Numerical analysis of the Gotthard highway tunnel case study, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 45, 1211-1225.
- [70] ---, NUREG/CR-3038, “Tests for Evaluating Sites for Disposal of Low-Level Radioactive Waste,” R. J. Lutton et al., U.S. Department of the Army, Army Engineer Waterways Experiment Station, December 1982
- [71] 洪如江(2007)，初等工程地質學大綱，土工技術研究發展基金會出版，167頁。

- [72]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。
- [73]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。
- [74]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。
- [75]王泰典(2008)：探討襯砌異狀之類別與診斷，*營建知訊*，304，22-31。
- [76]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。
- [77]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。
- [78]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劃(NL1010476)，桃園。
- [79]中國土木水利工程學會(1993)，「工址地盤調查準則」，內政部建築研究所籌備處委託研究報告。
- [80]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。
- [81]內政部營建署(2001)，*建築物基礎構造設計規範*。
- [82]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。

- [83]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。
- [84]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。
- [85]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。
- [86]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。
- [87]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。
- [88]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。
- [89]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。
- [90]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。
- [91]黃燦輝、林銘郎、王泰典、王文禮、李維峰 (2006)：隧道襯砌非破壞性檢測技術之開發(第一年度期末報告)，交通部鐵路改建工程局東部工程處委託研究計畫，宜蘭。
- [92]黃燦輝(2013)：台灣隧道工程之回顧與展望，中華民國隧道協會 2013 年年會專題演講。

- [93]陳正勳、王泰典、黃燦輝 (2011) 「山嶺隧道受震損害類型與原因之案例研究」，岩石力學與工程學報，第 30 卷，第 1 期，第 45-57 頁。
- [94]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。
- [95]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。
- [96]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。
- [97]郭雅雯(2012)：岩石風化之力學特性與微觀組構變化暨吸附二氧化碳能力之研究，國立台北科技大學資源工程研究所碩士論文。
- [98]許瑞慈(2012)：兩層岩層中隧道受簡諧 P 波與 S 波作用之反應，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。
- [99]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。
- [100] 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。
- [101] 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。
- [102] 曹孟真、楊濟豪、王泰典、許宗傑、林銘郎、莊心凱、詹佩臻(2012)：邊坡失穩引致營運中隧道崩塌案例探討，2012 海峽科技專家論壇分會場暨海峽兩岸地質災害防治學術研討會，會議簡報。

- [103] 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。
- [104] 朝倉俊弘等(2003)，隧道變狀機制(日文)，日本土木學會。
- [105] 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。
- [106] 日本土木學會，隧道標準示方書 [山岳工法編]・同解說，1996。
- [107] 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。
- [108] 日本土木學會，軟岩的調查・試驗的指針(案)，1991。
- [109] 日本土木學會，隧道在調查計測的評価與利用，1987。
- [110] 日本土木學會，隧道的地質調查與岩盤計測，1983。
- [111] 日本土木學會，隧道標準示方書 山岳工法・同解說，2006。