

行政院原子能委員會
放射性物料管理局委託研究計畫

「放射性廢棄物坑道處置場址特性調查及
設施設計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」

正式報告

主持人：王泰典

委託單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局

執行單位：國立臺北科技大學

計畫編號：100FCMA005

中華民國一百年十一月二十一日

行政院原子能委員會放射性物料管理局

「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」

委託研究計畫工作

正式報告

主持人 ： 王泰典
共同主持人 ： 翁祖炘、李宏輝
研究人員 ： 李境和、李佳翰
研究助理 ： 呂軒志、詹尚書、謝珮喬
執行單位 ： 國立臺北科技大學

中華民國一百年十一月二十一日

目錄

目錄.....	1
第一章 前言.....	3
1.1 計畫背景	3
1.2 計畫目的與重要性	4
1.3 國內外有關本計畫之執行情況	4
1.4 報告內容	5
第二章 場址特性描述之審查導則(草案).....	7
2.1 社會與經濟	7
2.2 地形與地貌	8
2.3 氣象	9
2.4 地質與地震	10
2.5 地表水	14
2.6 地下水	15
2.7 地球化學	18
2.8 天然資源	21
2.9 生態	22
2.10 輻射背景偵測	23
2.11 大地工程特性	25
2.12 交通狀況	28
2.13 其他	29
第三章 處置設施之設計之審查導則(草案).....	31
3.1 設計目標與功能需求	31
3.2 建築設計	34
3.3 結構設計	35
3.4 土木設計	37
3.5 輻射安全設計	38
3.6 輔助設施或系統之設計	41
3.7 公用設施或系統之設計	42
3.8 設計成果	44
第四章 國內天然障壁長期穩定潛在影響因子之探討.....	45
4.1 隧道襯砌損害與異狀類型蒐集彙整	45
4.2 隧道襯砌異狀之影響因素探討	48
4.3 天然障壁(地質)材料依時變形特性及其對隧道之影響.....	51
4.4 隧道受震反應之初步探討	52
4.4.1 入射 P 波、S 波所引致之隧道變形	52

4.4.2 隧道襯砌及地盤之相對勁度	53
4.4.3 地震對不同隧道深度的影響	54
4.4.4 地質弱帶的影響	54
4.4.5 地震引致之應力與彎矩之複合應力	54
4.5 代表性試驗室力學特性試驗	54
第五章 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	57
5.1 國內外天然障壁地工特性差異之探討	57
5.1.1 國外天然障壁之地工特性	57
5.1.2 國內天然障壁之地工特性	61
5.2 隧道支撐材料力學特性差異之探討	64
5.2.1 隧道設計參數評估	64
5.2.2 內襯砌	66
5.3 我國特有的自然條件等因素(如地震)對於坑道穩定可能的影響	72
第六章 我國天然障壁與處置技術先進國家相異處管制技術相應審查要項的初步建議	76
6.1 場址特性調查審查要項考量之初步建議	76
6.1.1 地震	76
6.1.2 大地工程特性	78
6.2 設施設計審查要項考量之初步建議	82
6.2.1 設計目標與功能需求	82
6.2.2 土木設計	85
第七章 處置場安全分析報告設施之安全評估中第 7.4 節長期穩定性之審查導則草案	86
第八章 結論與建議	90
8.1 結論	90
8.2 建議	91
參考文獻	92

第一章 前言

1.1 計畫背景

行政院原子能委員會放射性物料管理局(以下簡稱物管局)基於達成國內低放射性廢棄物最終處置審查工作,已研訂相關法規,包括「放射性物料管理法」、「放射性物料管理法施行細則」、「放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法」、「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」、「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」(以下簡稱安全分析報告導則)等。在「放射性物料管理法」中規定:低放射性廢棄物最終處置設施之興建與運轉,須經原子能委員會審查通過後,始得為之;在「放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法」及「放射性物料管理法施行細則」中規定:申請興建及運轉低放射性廢棄物最終處置設施者,應檢附安全分析報告,送原子能委員會審查;而在「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」中則規定:低放處置設施之設計應確保其對設施外一般人所造成之個人年有效劑量,不得超過0.25毫西弗,並應符合合理抑低原則。

安全分析報告導則係供處置設施經營者(申請人)申請低放射性廢棄物最終處置設施(以下簡稱處置設施)建造執照時所附安全分析報告編撰之依循,該導則適用於淺地、隧道或地窖等不同形式的處置設施。安全分析報告包含下列內容:第一章概論、第二章處置設施之綜合概述、第三章場址之特性描述、第四章設施之設計、第五章設施之建造、第六章設施之運轉、第七章設施之安全評估、第八章設施之組織規劃行政管理及人員訓練計畫、第九章輻射防護作業及環境輻射監測計畫、第十章保安計畫意外事件應變計畫及消防防護計畫、第十一章最終處置設施封閉及監管規劃、第十二章品質保證計畫。

物管局於民國93年發布的安全分析報告導則,係參酌美國NUREG-1199「Standard Format and Content of a License Application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility」報告而研訂。而美國NRC為審查低放處置設施申請者依NUREG-1199所提出的安全分析報告,平行研訂了NUREG-1200「Standard Review Plan for the review of a license application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility」(Rev.3),以供審查人員執行審查作業的指引。

因應低放射性廢棄物最終處置設施經營者執行處置計畫之依循,並做為審查人員之審查作業指引,物管局已於前(98)年度執行「低放射性廢棄物最終處置設施場址特性參數與設計建造管制技術之研究」計畫,完成美國核管會NUREG-1200內容中文化作業,並對應我國低放處置安全分析報告導則章節,建立審查導則草案初稿;並於去(99)年執行「放射性廢棄物坑道處置場址特性調查及設施設計與建造審查要項研究」、「放射性廢棄物最終處置場址之環境安全因子審查技術規範研議」及「坑道式最終處置設施安全評估審查要項研究」計畫,依據我國工程與環境特性,按既有之相關法規、條例、管理規則、研究成果等,進行深入地比較與探討,針對本土化審查導則暨管制技術規範提出具體之建議,包括第五章設施之建造、第六章設施之運轉、第七章設施之安全評估、第八章設施之組織規劃行政管理及人員訓練計畫、第九章輻射防護作業及環境輻射監測計

畫、第十章保安計畫意外事件應變計畫及消防防護計畫、第十一章最終處置設施封閉及監管規劃、第十二章品質保證計畫等項目的審查導則草案。而有關第三章場址之特性描述、第四章設施之設計、以及第七章設施之安全評估之 7.4 節長期穩定性之審查導則草案，因涉及我國與美國場址地質與工程環境先天差異，以致場址特性參數描述與處置設施設計仍待進一步比較與深入探討，俾利完善審查導則草案。

1.2 計畫目的與重要性

本計畫擬將彙整以往之研究成果，蒐集整理既有之坑道地質調查、設計與建造之相關法規、管理規則、技術規範以及研究成果等，依據我國工程與環境特性，針對處置設施場址特性參數與設計等章節提出審查規範之本土化草案，完成審查導則草案之第三章場址之特性描述、第四章設施之設計之審查導則、以及第七章設施之安全評估之 7.4 節長期穩定性等部份，以供物管局建置更完整的管制技術以及研訂本土化審查規範的重要參考。

另外，本計畫亦將針對天然障壁長期穩定潛在影響因子，透過我國與處置技術先進國家天然障壁自然條件異同處進行比較與探討，研究分析對於處置設施可能的影響，並提出管制技術相應審查要項的初步建議，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

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

另外，美國核管會另定有「低放射性廢料處置場執照申請審查之標準審查計畫」(Standard Review Plan for the review of a license application for a low-level radioactive waste disposal facility, SRP)(以下簡稱 NUREG-1200)，主要目的在提供核管會審查人員執行審查作業的指引。NUREG-1200 中每一個 SRP 針對審查範圍、審查程序、接受準則、審查發現及參考資料等部份，皆有清楚的定義與說

明。NUREG-1200 提供一個定義完整的技術平台，一方面確保審查人員審查的品質與一致性，另一方面也提供處置設施潛在申請單位對於執照審查程序廣泛而完整的資訊。

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

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

物管局去(99)年執行「放射性廢棄物坑道處置場址特性調查及設施設計與建造審查要項研究」計畫，依據我國工程與環境特性進行深入比較與探討，並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，詳參該計畫期末報告表 8.1 至表 8.3。

1.4 報告內容

本計畫主要的工作內容包括下列 7 項：

1. 處置場安全分析報告場址特性調查審查規範本土化草案。
2. 處置場安全分析報告設施設計審查規範本土化草案。
3. 國內天然障壁長期穩定潛在影響因子之探討，應針對我國與處置技術先進國家天然障壁自然條件異同處之探討，並提出相異處如地震、天然障壁材料依時弱化、軟化的可能影響。
4. 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，應包括襯砌與支撐之異狀與對服務功能之影響。

5. 我國天然障壁與處置技術先進國家相異處管制技術相應審查要項的初步建議，應包括場址調查與設計參數審查重點之研析等。
6. 處置場安全分析報告設施之安全評估中第 7.4 節長期穩定性之審查導則草案。
7. 於 100 年 11 月舉辦場址特性審查、設施安全設計審查相關研習講座各 1 場次。

由於計畫期程時間之限制，本研究擬基於物管局去(99)年度執行「放射性廢棄物坑道處置場址特性調查及設施設計與建造審查要項研究」計畫針對本土化審查導則暨管制技術規範編修要點提出之具體建議，如表 4.1 與 4.2，逐項探討我國相關法規、規範與研究成果，並比較其與低放射性廢棄物坑道處置的功能需求以及設計目標，據以提出(1)第三章場址之特性描述、(2)第四章設施之設計，(3)第七章設施之安全評估中 7.4 長期穩定性之審查導則草案。

此外，有關天然障壁長期穩定潛在影響因子部份，擬透過我國地質材料以及既有交通、水力隧道長期穩定特性相關研究報導之蒐集整理，比較我國與處置技術先進國家天然障壁自然條件異同處，並提出相異處如地震、天然障壁材料依時弱化、軟化的可能影響，繼而針對潛在場址類似工程特性岩石進行鑽心取樣或購買代表性岩樣，進行試驗室力學特性試驗，求得力學特性參數概略的範圍，以供比較我國與處置技術先進國家管制技術相應審查要項時天然障壁之參考數據。

第二章 場址特性描述之審查導則(草案)

2.1 社會與經濟

描述場址及附近地區之行政區交通設施、公共設施、軍事設施、觀光休閒設施、場址所在鄉鎮及週邊鄉鎮之人口數(含流動人口)及人口結構、土地利用情形與開發計畫。

內 容	說 明
<p>低放射性廢棄物處置場之設置，應儘量避免影響社會與經濟發展，故須提出下資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 描述場址附近地區之行政區或至少 5 公里範圍內交通設施與公共設施。 2. 描述場址附近至少 5 公里範圍內軍事設施。 3. 描述場址附近至少 5 公里範圍內觀光休閒設施。 4. 描述場址所在鄉鎮及週邊鄉鎮之人口數(含流動人口)與人口結構，及目前人口分布與未來發展 5. 描述場址附近至少 5 公里範圍內土地利用情形與開發計畫。 <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 處置場不得設於重要交通道路橋梁的下方、不得位於重要交通道路隧道附近 1 公里內。處置場場址外圍 1 公里內不得有重要公共設施，例如醫院、車站等。 2. 軍事設施的作業是否會影響處置設施安全？是否有飛機起降？火砲射擊等作業？ 3. 處置場設施是否會影響觀光休閒設施民眾的安全？觀光休閒設施未來發展是否會影響處置場設施安全。 4. 處置設施場址，不得位於每平方公里 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 依低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則第三章第一款規定，申請設置低放射性廢棄物最終處置設施，須提供場址附近交通設施、公共設施、軍事設施、觀光休閒設施、場址所在鄉鎮及週邊鄉鎮之人口數(含流動人口)及人口結構、土地利用情形與開發計畫等相關資料。 2. 提供至少 5 公里範圍內的資料，較能了解其狀況與影響。參考低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則第三章第九款距離的規定。 <ol style="list-style-type: none"> 1. 處置場若位於橋梁下方，發生意外事故時，可能會衝擊處置場安全。離交通道路隧道 1 公里內，處置場的水文與大地應力可能受到影響，衝擊處置場安全。離處置場 1 公里內公共設施之民眾，可能受到較多輻射影響，為減少集體劑量不宜設置較多民眾較多的公共設施。 2. 有飛機起降、火砲射擊等軍事設施，可能影響處置場安全。 3. 觀光休閒設施之開發，如整地、鑿井等，可能影響處置場安全。

<p>600 人以上的之鄉(鎮、市)。判斷其預估人口成長與未來發展，不致對該設施的功能目標造成影響。</p> <p>5. 場址附近 5 公里範圍內土地利用與開發計畫是否會破壞地表水與地下水及改變地形地貌之情形並影響處置場安全。</p>	<p>4. 依低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準第 5 條之規定。美國 NUREG-1200 內 2.1.1 節亦有此規定。</p> <p>5. 土地的農耕與開發可能改變地表水與地下水及改變地形地貌，進而影響處置場安全，故應多加注意。</p>
---	---

2.2 地形與地貌

描述場址及附近地區地形與地貌，包括地形高度與起伏趨勢、坡度分布、重要地貌特徵(如河川、山脈、湖泊、海岸線等)，及潛在環境災害分布地區(如崩塌地、沖蝕溝、河川攻擊坡、土石流沖積扇、斷層錯動地形等)。

內 容	說 明
<p>地形與地貌的準確性對安全評估報告中輻射外洩及意外發生的情節假設相當重要，故須提出下資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 必須以正確的經緯度座標，描述場址及附近地區至少 5 公里範圍內地形與地貌，包括地形高度與起伏趨勢、坡度分布、重要地貌特徵(如河川、山脈、湖泊、海岸線等)。並提出可接受比例尺的場址地形圖，並應鉅細靡遺地評述場址地形。</p> <p>2. 必須以正確的經緯度座標，描述場址及附近地區至少 5 公里範圍內潛在環境災害分布地區(如崩塌地、沖蝕溝、河川攻擊坡、土石流沖積扇、斷層錯動地形等)。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 審查委員針對高程與地形起伏、坡度和排水狀況等資料詳加審查，並視需要進行現地勘查。所列地形與地貌資料是否正確應用於輻射劑量安全評估。</p> <p>2. 潛在環境災害分布地區中單一面積是否大於 0.1 平方公里，且工程技術</p>	<p>1. 參考美國 NUREG-1200 內 2.1.1 節。</p> <p>1. 地形與地貌將影響處置場輻射劑量安全評估，所以應有正確資料。</p> <p>2. 潛在環境災害分布地區將影響處置場安全。</p> <p>1. 處置場輻射劑量安全評估須使用正確的地形與地貌資料，故須確認是否正確用於評估中。</p> <p>2. 依低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準中第</p>

無法整治克服。	2 條第 4 款規定，處置設施場址不得位於單一面積大於 0.1 平方公里且工程技術無法整治克服的地區。
---------	---

2.3 氣象

提供場址附近之氣象資料，包括風向、風速、溫度、濕度、降水量、降水強度、颱風發生之頻率等，並提供有紀錄以來之最大降水量、最高及最低溫度、最大風速。

內 容	說 明
<p>氣象可能影響低放處置場址安全設計、建造、運作與封閉作業，故須提出下資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 描述場址地區氣候的一般資料，包括氣團種類、天氣特徵(高、低氣壓系統和鋒系)、一般氣流型態(如風向與風速)，氣溫和濕度、降水量、降水強度以及大尺度的大氣過程與局部氣象條件關係等。 2. 描述場址地區季節性與年極端氣候現象的發生頻率，包括暴雨、颱風、洪水、海嘯，並提供有紀錄以來之最大降水量、最高及最低溫度、最大風速。 3. 描述影響設計作業及效能評估之當地氣候狀況： <ol style="list-style-type: none"> (1) 用於輻射安全評估的氣象參數，包括平均與最大風向量、平均與最大風持續時間以及降雨強度等。 (2) 會使場址劣化的天氣參數，包括降雨強度、暴雨、風向量、氣溫與氣壓梯度等。 4. 描述場址當地氣候，如氣流、氣溫、大氣中之水蒸氣、降雨、霧、大氣穩定度及空氣品質等。 5. 以提供資料 3 所列當地氣候參數來評估設施建造、運作和地形的影響。 	<p>1. 參考美國 NUREG-1200 內 2.2 節。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 場址平均或極端氣候狀況，可能影響低放處置場址之安全設計、建造、運作與封閉作業，故須提供場址地區氣候的一般資料、季節性與年極端氣候現象的發生頻率、有紀錄的極端氣候資料及用於設計作業及效能評估之當地氣候資料。

<p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 氣象與氣候基本資訊是否完整與正確。 2. 風與大氣的穩定度資料是否以場址現地資料為主，其它鄰近有代表性之氣象站的長期監測資料為輔。 3. 設計基準之氣象資料是否與場址極端氣候強度與頻率一致。 4. 處置場功能評估所使用的大氣擴散模式是否適用於該場址。 5. 必須先確定資料對場址具有足夠的代表性，再去確認氣象站與其資料之合適性。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 資料須完整與正確，才能執行正確的處置設施效能評估。風與大氣的穩定度資料為評估場址大氣擴散之輸入資料。
--	---

2.4 地質與地震

說明場址及附近地區之地層、地體構造、活斷層、歷史地震等之調查成果等，並說明斷層與地震危害度之調查與評估方法。

內 容	說 明
<p>場址及附近地區之地質特性涉及處置設施概念、設計、功能之合適性，也會影響水文地質模式、地表水與地下水之貯存與流動。區域性地震以及場址附近可能被誘發活動的地質構造，將影響處置安全，故須提出下資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 描述區域性地質構造、地體構造歷史、區域性應力和歷史地震等相關資料，及其調查範圍與內容、調查架構、調查與評估方法、調查成果。 2. 若場址處於中至高度地震帶且附近有活動斷層，應提出斷層的形態、斷層長度、斷層之位移、斷層滑動速率、斷層移動特性、地震歷史和斷層錯移歷史等資料，並說明斷層與地震危害度之調查與評估方法。 3. 提出場址及附近地區之地層、岩性和地形特性相關資料，包括土壤液化指 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 參考美國 NUREG-1200 內 2.3.1 及 2.3.2 節，及參考物管局 99FCMA002 報告內第八章內容。 1. 場址及附近地區之地層、地體構造、活斷層、歷史地震等將影響處置安全。

標、喀斯特地形(karst terrain)、斷層、結晶變形(crystal deformation)、差異沉陷(differential subsidence)、塊體移動(mass wasting)、局部應力狀態(regional stress regime)和人類活動的影響等。

4. 應進行下列調查並提出調查結果：地震特性、場址與區域地體構造特性、地震活動與地質構造或地體分區間的相互關係、最大地震潛勢、場址地震波傳遞特性、設計基準地震、沉陷和液化潛勢以及地球物理方法等。

(1) 地震特性：(a)必須評估所有可得之歷史數據，並詳列場址範圍 300 公里以內地震規模大於或等於 3 的所有地震參數；(b)提出標示震央的地圖以顯示這些地震的分佈，以大比例尺的地圖，標出場址 100 公里以內發生的地震，以及地震發生率高的區域；(c)必須列出地震發生的時間、震源深度、震央座標、最大強度、規模和與場址的距離、資料的來源；(d)其它與山崩、地表斷裂和液化等相關之資料。

(2) 場址與區域之地體構造特性：須清楚正確的界定場址區域內所有重要地質構造與地體構造分區，以決定地震潛勢。在場址附近的區域若有活動斷層，必須在該區域地圖上標示地體構造分區、與這些斷層相關的地震位置以及相關的地質構造位置等。

(3) 地震活動和地質構造或地體構造分區間相互關係：當地震的發生和地質構造或地體構造分區有關時，必須提出其相關的理論根據，並將地質構造的特性、地區

地體構造模型和歷史地震活動皆納入考量。地震位置和其震源深度應彙整條列，決定該地震位置所使用的方法也應敘明。相關資料呈現應以圖示標明地體構造分區、地震震央、地質構造位置，以及用來定義地體構造分區的相關資訊。所有的地圖皆應使用同一比例尺。

- (4) 最大地震潛勢：必須查閱文獻以界定有紀錄可循的可信最大地震及其地質結構或歷史記載上最大地震與其地殼變動帶。當最新地質或地震活動證據出現，充分證明會造成比歷史紀錄上最大地震更大的地震時，應加以預估可能發生的地震規模。當地震的發生與地質構造有關時，估算在此地質狀況下會發生的最大地震時，必須將地震的破裂長度(rupture length)和斷層的形態(正斷層或逆斷層等)列入考量。另外，若有可能時，地震的頻率(frequency content of the earthquake)也應加以討論。以場址為中心 300 公里範圍內所發生過地殼變動所引起的最大地震，其地震規模大於等於 3，則必須提出等震度圖(iseismal maps)。場址的地表震動也應使用適當的衰減模式(attenuation models)加以評估。在評估地表震動時，應使用距離場址最近之地體構造分區相關之最大地震。
- (5) 場址的地震波傳遞特性：為了估算場址的地表震動，必須先了解震源至場址的地震波傳遞特性。此外，岩盤上覆材料對於地震波

<p>有放大或衰減的作用，故應該加以描述。這些覆蓋材料及岩盤的壓力波速或剪力波速、統體密度以及剪力模數的資料應加以陳述，計算使用的方法和皆須敘明。</p> <p>(6) 設計基準地震：必須描述地表和設施位置所關心之深度，其最大地震所造成的震動情形。最大地震造成場址尖峰水平和垂直加速度必須使用適當的衰減式加以計算。地表震動之放大效應潛能必須加以討論。在某些狀況下，場址反應譜應與結構物設計反應譜進行比較。在可能的狀況下，應該進行地震災害或然率之預估，並應記錄這些災害估計的假設狀況與不確定性。根據地震災害或然率研究結果，應能點出哪一個震動源將會對場址造成最重要之影響。</p> <p>(7) 沉陷與液化潛勢：靜態與動態條件下地下與回填材料之變形或差異沉陷、液化潛能，以及地表下土壤液化對覆蓋材料穩定度的影響等，皆須加以分析。</p> <p>(8) 地球物理方法：使用的地球物理方法，必須加以說明其適用範圍、數據取得、處理以及解釋等採用之方法。</p> <p>(二) 審查作業</p> <p>1. 場址地質特性資訊是否完整：是否均能進行完整透徹的文獻研究、適當的現地勘查和該地區及場址狀況的物理檢視。</p> <p>2. 若場址處於中至高度地震帶，須確認是否地震與地質構造有關，如地震是否將造成斷層錯動或造成斷層相關之褶皺。若地震之發生與地質構造有</p>	<p>1. 場址地質特性資訊必須完整可靠，才能確保設計正確與處置設施安全。</p> <p>2. 若場址處於中至高度地震帶，必須進行最大地震評估，以確保處置設施功能與安全。</p>
---	---

<p>關，則該地質構造可能引致之最大地震必須進行評估。</p> <p>3. 對於場址及附近地區之地層、岩性和地形特性相關資料，應審查地形、邊坡穩定、流體之注入與抽取、基岩的溶解、剪裂帶、節理、裂隙以及地震活動等作用。上述資訊必須依照適當的參考文獻作出完整紀錄，包括已出版和未出版數據和資料，以及私人溝通所取得之資訊等。圖說應包括地體構造、地質、地形以及地質構造圖；地層剖面；鑽孔柱狀圖；電測井錄；以及航空照片。若有需要，特定場址也應於圖面標示油井、瓦斯井、斷層、喀斯特地形特徵、以及反射震測剖面等。</p> <p>4. 有關地震與地球物理相關資料的審查：(1)是否能被接受？可視需要召開會議釐清與資料相關之問題。(2)進行現地勘查以(a)釐清或確認所提出的相關資料；(b)檢核場址之地質構造；(c)評估鑽探岩心、探坑、和地球物理探勘資料等。(3)必要時提出補充資料的要求，並且陳述可能與申請人相同或相反的主張。</p>	<p>3.場址及附近地區之地層、岩性和地形特性，涉及場址的地表水與地下水的評估模式。</p> <p>4. 地震難以預測，與地球物理相關資料須加以釐清與確認。</p>
---	--

2.5 地表水

說明場址及附近地區之地表水體水文、水質特性、水資源使用狀況及其調查方法。

內 容	說 明
<p>場址及附近地區之地表水，影響處置設施的設計、運轉、封閉與功能，故須提出下資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 描述場址及附近地區之地表水體水文、水質特性、水資源使用狀況及其調查方法。</p>	<p>1. 參考美國 NUREG-1200 內 2.4.1 節。</p> <p>1. 地表水涉及放射性核種傳輸路徑，水資源使用影響集體劑量，故須正確描述與調查。</p>

<p>2. 提出該場址洪氾與侵蝕之分析結果。</p> <p>3. 若遇到暴雨情形，場址及附近地區水文系統受擾動之分析。</p> <p>4. 場址/設施水文介面之評估和描述。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 場址及附近地區之地表水體水文、水質特性、水資源使用狀況及其調查方法是否完整？地表水及其使用之水文特性描述是否詳盡？</p> <p>2. 場址洪氾潛在的可能機制是否已被界定清楚？場址區發生淹水的可能性是否很低？場址防洪設計是否不足？處置場必須是排水良好、非洪氾區或經常積水的地區。廢棄物處置場不可位於 100 年頻率洪氾水平原內、沿海高度災害發生區或濕地。</p> <p>3. 現場勘查以確認場址及其鄰近環境的水文特性，以了解水文系統受擾動之分析及場址/設施水文介面之評估。</p>	<p>2. 處置場若遭洪氾與侵蝕，將影響處置場安全，故須加以評估分析。</p> <p>3. 水文系統若受擾動，將影響設施安全與輻射劑量評估。</p> <p>4. 做好水文介面措施，可增進設施安全與減少放射性核種外釋。</p> <p>1. 地表水涉及放射性核種傳輸路徑，水資源使用影響集體劑量，所以調查方法需要完整，描述需要詳盡。</p> <p>2. 防範地表水洪氾，確保處置場安全。</p> <p>3. 現場勘查可實際了解地表水狀況。</p>
--	---

2.6 地下水

說明場址及附近地區之地下水體水文、水質特性及其使用狀況、水文地質架構與水文參數等資料及其調查方法。

內 容	說 明
<p>地下水區域通常分為未飽和區與飽和區，水為放射性核種外釋的主要媒介，故應說明場址及附近地區之地下水體水文、水質特性及其使用狀況、水文地質架構與水文參數等資料及其調查方法，須提出下資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 飽和層特性調查資料</p> <p>(1) 說明水文地質架構與水文參數等之調查架構、調查與評估之方法，以及調查之成果等。</p>	<p>1. 參考美國 NUREG-1200 內 2.4.2 節，及參考物管局 99FCMA002 報告內第八章內容。</p> <p>1. 地下水區域通常分為未飽和區與飽和區，故應進行飽和層特性調查與未飽和層特性調查；為進行地下水模擬，須要有保守且正確的地下水</p>

<p>(2) 說明測量、採樣、採樣地點與採樣頻率決定之邏輯、測量使用的儀器以及監測井的建造等之規格文件。</p> <p>(3) 現地和實驗室數據分析的步驟。</p> <p>(4) 描述含水層系統、水文參數與地層層次分佈以及飽和層的平面寬度及厚度等。</p> <p>(5) 地下水飽和層概念模式包括補注區和流出區、主要含水系統之側向與含水層間的互動關係。</p> <p>(6) 地下水體水文、水質特性及其使用狀況。</p> <p>2. 未飽和層特性調查資料</p> <p>(1) 說明測量、採樣、採樣地點與採樣頻率決定之邏輯、測量使用的儀器以及監測井的建造等之規格文件。</p> <p>(2) 現地和實驗室數據分析的步驟。</p> <p>(3) 描述含水層系統、水文參數與地層層次分佈，包括如特性曲線與入滲速率等。</p> <p>(4) 地下水未飽和層概念模式，包括土壤含水量變化、側向與地層層次間的特性曲線、入滲與滲漏速率、流體於不飽和層中整體之移動。</p> <p>3. 地下水模式</p> <p>(1) 發展模式的方法、理論和根據，包含模式型態的呈現、驗證與校準。</p> <p>(2) 輸入模式的資料，包括現地與實驗室測量與分析資料、使用地質統計或其他數據產生或簡化技術的資料、外界來源資料和現地的任何修正資料等。</p> <p>(3) 展示模式所得的結果，可適切地代表物理系統。包含地下水運動的方向、滲透量、深度滲漏至飽和層空間</p>	<p>模式。</p>
--	------------

<p>與時間的分佈和異常高或異常低滲透的區域。</p> <p>(4) 發展的模式包含模擬水頭分佈、速率分佈和所有可能影響含水層之地下水方向。</p> <p>(二) 審查作業</p> <p>1. 地下水特性資料描述是否完整？使用標準評估程序審查並陳述資料的遺漏、缺點和不當，要求補充資料或提出解釋。</p> <p>2. 飽和層</p> <p>(1) 水文地質架構、水文參數調查架構、調查與評估方法，是否符合場址特性需求？是否適當並具代表性？調查成果是否足以描述場址地下水特性等？</p> <p>(2) 採樣程序與取樣地點是否符合邏輯？蒐集、保存及樣品分析的程式是否可被接受、是否有品質管制？</p> <p>(3) 含水層試驗的假設、分析方法以及試驗程序是否正確？推導出的導水係數、儲水係數以及水力傳導係數結果是否精確。</p> <p>(4) 地下水是否流出表面進入處置設施？是否因水位的變動造成地下水與廢棄物接觸？</p> <p>(5) 主要水文參數、地下含水層的範圍、補注-流入區、流速和方位以及流動穿越時間，是否考量季節性變異及長期趨勢？</p> <p>(6) 地下水體水文、水質特性及其使用狀況是否明確？</p> <p>3. 未飽和層</p> <p>(1) 未飽和層監測計畫和採樣程序是否可被接受、是否有品質管制？取樣地點是否符合邏輯？</p> <p>(2) 未飽和層的現地與實驗室資料是</p>	<p>1. 地下水特性資料描述需要完整，若有遺漏、缺點和不當，應要求補充資料或提出解釋，否則可以退件。</p> <p>2. 為確保地下水模擬的正確性，須審查飽和層、未飽和層、概念模式與數值分析。</p>
--	---

<p>否正確？是否考量季節性變異及長期趨勢？</p> <p>4. 概念模式</p> <p>(1) 地下水概念模式所描述的所有水文地質過程與特性是否正確？包含深層滲漏的潛勢、補注/流出區域、影響區域水文地質過程之異常物理參數、含水層與受限含水層之分佈、含水層間之作用以及飽和與未飽和層地下水的移動。</p> <p>(2) 水文地質概念模式是否有缺陷？是否採保守假設？使用的資料是否適當？評估結果是否合理？</p> <p>(3) 地下水分析模式是否有適當的文件？是否經過驗證及校準？是否可適當地模擬場址及鄰近地區的物理系統？</p> <p>(4) 模式建立策略、解析或數值模式與相關方法之解釋，是否合理且正確無誤？</p> <p>5. 數值分析</p> <p>(1) 執行數值分析所需要的地下水資料是否正確？</p> <p>(2) 模式輸入資料及簡化方法是否合理且正確無誤？</p> <p>(3) 分析結果是否適切地保守或符合實況？</p>	
--	--

2.7 地球化學

說明可能影響場址安全及核種遷移之水化學，土壤與岩石之分類組成及地球化學特性，以及相關之地化模擬資料。地球化學調查因子涵蓋場址及附近地區之無機質成分、有機質含量、氧化還原電位、酸鹼值、分配係數、遲滯因子、離子交換能力、放射性核種之溶解度與化學型態、價數與性質等。

內 容	說 明
<p>場址地球化學特性，影響廢棄物體中放射性核種遷移，也涉及處置場的設計，影響場址的安全，須提出下資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 地球化學之調查架構、調查因子、調查與評估之方法，以及調查之成果等。 2. 水化學背景資料：包括場址及附近地區之無機質成分、有機質含量、氧化還原電位、酸鹼值、溫度、溶氧量；並提出採樣、保護、貯存及分析程序，以及前述作業期間之品保與品管程序。 3. 土壤與岩石之分類組成及地球化學特性資料：包括土壤與岩石之分配係數、遲滯因子、離子交換能力、放射性核種之溶解度與化學型態、價數與性質等；並提出採樣、保護、貯存、分析及實驗程序，以及前述作業期間之品保與品管程序。 4. 地球化學模擬：地球化學概念模式之功能、模式確認演練、分析程式之資料庫、輸入與輸出之數據，以及分析結果之解釋等。 <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 查核既有調查成果是否充分？調查架構是否符合描述場址特性之需求？調查與評估方法是否適當與具代表性？調查成果是否足以描述場址地球化學特性等？ 2. 水化學背景資料： <ol style="list-style-type: none"> (1) 採樣、保護、貯存、分析程序及品保與品管程序，是否符合原訂定之作業程序書？ (2) 溫度、酸鹼值、氧化還原電位及溶氧量是否為現地測得？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 參考美國 NUREG-1200 內 2.6 節，及參考物管局 99FCMA002 報告內第八章內容。 <ol style="list-style-type: none"> 1. 場址地球化學特性，影響廢棄物體中放射性核種遷移，也涉及處置場的設計，影響場址的安全，所以需提出(1)水化學背景資料、(2)土壤與岩石之分類組成及地球化學特性資料、(3)地球化學模擬。 <ol style="list-style-type: none"> 1. 水化學背景資料與土壤與岩石之分類組成及地球化學特性資料必須正確，地球化學概念模式及電腦分析程式必須適用於場址。

<p>(3) 無機及有機成份、溶解氣體、穩定同位素等之分析，是否適當？</p> <p>(4) 採樣分析作業是否一年以上，是否按季執行？</p> <p>3. 土壤與岩石之分類組成及地球化學特性：</p> <p>(1) 採樣、保護、貯存、分析程序及品保與品管程序，是否符合原訂定之作業程序書？</p> <p>(2) 所有礦物、非晶質固體、礦物被覆層及有機化合物等會影響重要放射性核種濃度或影響場址穩定性者，是否均已完成足夠之特性描述、實驗及模擬作業。</p> <p>(3) 重要放射性核種在土壤與岩石中之分配係數、遲滯因子、離子交換能力、溶解度、化學型態、價數與性質等是否適當？</p> <p>4. 地球化學模擬：</p> <p>(1) 地球化學概念模式及電腦分析程式是否適當用於場址特性調查？</p> <p>(2) 將程式分析所用之資料庫(如水複合、礦物溶解度、氣體溶解度、熱力學常數、分配係數等)之品質與完整性是否可被接受？</p> <p>(3) 模式分析所輸入之資料，是否與場址特性調查及相關之實驗室與現地實驗所獲的之數據一致？</p> <p>(4) 模式分析結果之解釋與所用數據是否一致</p> <p>(5) 確保模式分析所用程式之驗證是否充分的？</p>	
--	--

2.8 天然資源

說明場址及附近地區可能存在之重要天然資源，包括地質、礦產、及水資源等。

內 容	說 明
<p>天然資源包括地質、礦產、及水資源等。場址及附近地區可能存在之重要天然資源，其未來開發可能影響處置場之功能目標，須提出下資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 地質與礦產資源：</p> <p>(1) 說明已知存在的地質與礦產資源。</p> <p>(2) 防範非故意侵入的方法。</p> <p>2. 水資源：</p> <p>(1) 水資源的描述：包含：(a)場址及附近地區地下水目前與可能的使用情形描述、(b)地表水目前與可能使用情形之描述。</p> <p>(2) 開發的影響描述：開發所造成水資源流域改變的分析結果，包括地下水流動時間、流速和方向等。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 地質與礦產資源：</p> <p>(1) 是否已標明了該區的已知資源。</p> <p>(2) 已知資源是否依經濟價值分為： (a)具經濟價值、(b)略具經濟價值、(c)不具經濟價值的已知資源。</p> <p>(3) 場址是否可能因地質與礦產資源而被侵入？侵入的情形是否考量探勘、採石、鑽孔注水和抽水、農耕的翻土、開炸、河川分洪以及水壩建造等。</p> <p>(4) 是否執行現地勘查？</p> <p>(5) 現在與未來資源利用的資料，是</p>	<p>1. 參考美國 NUREG-1200 內 2.7.1 與 2.7.2 節。</p> <p>1. 場址及附近地區之重要天然資源，未來可能被開發，影響處置場之功能目標，故須說明已知存在的地質與礦產資源、水資源、防範非故意侵入的方法、開發的影響。</p> <p>1. 天然資源資料的正確性，將影響場址未來的發展，所以應執行現地勘查、及開發的影響評估。</p>

<p>否正確及保守？</p> <p>(6) 地質與礦產資源的開採是否導致設施的功能失效？</p> <p>2. 水資源：</p> <p>(1) 經現勘審查後，水資源的描述是否正確與充分？</p> <p>(2) 水資源開發的影響描述及分析結果，是否適切與充足？分析所使用的方法是否完整、適當的保守、是否經過驗證、輸入資料與得到的結果是否合理？</p>	
---	--

2.9 生態

提供場址及附近地區之生態調查資料，包括場址半徑五公里範圍之主要生物種類、數量、分布、組成、棲息地，設施建造與運轉可能影響之保育類野生動物與植物，及可能影響處置場安全之生物活動與人為活動等。

內 容	說 明
<p>場址及附近地區之陸生與水生的物種與其棲息地可能對設施的功能造成影響，也可能涉及食物鏈，須提出下資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 場址及附近地區之生態調查資料：包括場址半徑五公里範圍之主要生物種類、數量、分布、組成、棲息地 2. 場址及鄰近地區的生態地圖：須顯示主要植物群的界線、次要生物群的地點、特別的棲息地、場址界線、建築區域和其它可能整地的區域、緩衝區及最近的空照照片。 3. 現地植物物種的資料、孕育該物種之主要農作層及主要農耕型態。 4. 可能影響處置場安全之自然作用、生物活動與人為活動及其未來演變的概述。 5. 已知對設施功能有重大影響的脊椎動物物種、保育類野生動物與植物清 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 參考美國 NUREG-1200 內 2.8 節。 1. 場址及附近地區之生態可能對設施的功能造成影響，需要考量生態、農耕、自然作用、生物活動、人為活動、病媒或害蟲、商業或休閒等的影響。

<p>單。</p> <p>6. 當地有重要影響的病媒或害蟲之非脊椎動物物種清單。</p> <p>7. 重要的商業或休閒脊椎動物清單與估算。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 場址及附近地區之生態調查資料及其可能因建造、運作及封閉計畫而受影響的分析是否充足與適切？是否足以評估設施安全？</p> <p>2. 可能影響處置場安全之自然作用、生物活動與人為活動及其未來演變的相互關係說明是否合理？</p> <p>3. 對設施功能有重大影響的脊椎動物物種、保育類野生動物與植物、病媒或害蟲之非脊椎動物物種，是否有防範與保護措施？</p> <p>4. 處置設施對商業或休閒價值的物種是否造成影響以及可能連帶對人類是否有不利的影響？</p>	<p>1. 資料影響設施的安全評估，需要充足與適切，尤其會影響處置場安全之自然作用、生物活動、人為活動、未來演變、病媒或害蟲等。</p>
--	--

2.10 輻射背景偵測

說明運轉前環境輻射背景偵測結果及偵測方法。

內 容	說 明
<p>若有處置場運轉前的輻射背景偵測結果，未來可與運轉中、封閉後的輻射偵測結果相比較，可顯示處置場之影響。所以申請者須提出下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 運轉前二年以上環境輻射背景偵測結果：連續性環境直接輻射監測結果、累積劑量之環境直接輻射監測結果、運轉時放射性核種可能擴散途徑之環境試樣取樣分析結果(包括水樣、食物樣、土樣、草樣、空氣樣)。</p> <p>2. 偵測方法：</p> <p>(1) 環境直接輻射：說明偵測儀器之</p>	<p>1. 依低放處置安全分析導則第三章第十項位置之要求。依輻射工作場所管理與場所外環境輻射監測作業準則第十七條之規定。NUREG-1200 之 2.9 節也有此項要求。</p> <p>1. 依輻射工作場所管理與場所外環境輻射監測作業準則第十七條之規定，須提報運轉前二年以上環境輻射背景偵測結果。輻射背景偵測包括直接輻射與環境試樣分析。</p> <p>2. 偵測方法涉及環境輻射背景偵測結果的正確性與可靠性。</p>

<p>名稱、性能、偵測範圍與偵檢靈敏度。</p> <p>(2) 環境試樣：說明試樣種類、取樣頻次、取樣地點、取樣方法、試樣保存、分析方法、偵檢靈敏度。</p> <p>3. 建立運轉後環境試樣紀錄基準及環境試樣調查基準之預警措施。</p> <p>(二) 審查作業</p> <p>1. 環境輻射背景偵測結果：</p> <p>(1) 採樣/監測/分析的頻率是否適當足以建立環境趨勢。</p> <p>(2) 有意義的資料是否能真實反映測量值或計算資料的正確性。</p> <p>(3) 是否於足夠數量的地點實行採樣與監測、是否至少有一個背景/控制 (background/control) 的監測位置。</p> <p>2. 偵測方法：</p> <p>(1) 直接輻射儀器校正和實驗室分析的設施，是否可適切確保儀器效能、方法的有效性與敏感度。</p> <p>(2) 記錄及統計分析程序是否根據標準化技術。進行常態分佈測試的資料點是否超過十點？</p> <p>(3) 資料的整體不確定度是否被陳述，是否至少在 95% 的信心水準以內。</p> <p>(4) 資料變動性的來源及被刪除的資料，是否被清楚討論。</p> <p>(5) 在運轉前環境監測資料小於可偵測值時，是否以適當的方法加以評估。</p> <p>3. 建立預警措施：</p> <p>(1) 環境試樣紀錄基準值及環境試樣調查基準值，是否合理、可行。</p> <p>(2) 環境試樣濃度超過環境試樣調查基準值，採取的調查行動與預防措施，是否合理、有效。</p>	<p>3. 依輻射防護之規定，試樣分析結果超過紀錄基準值，則須加以記錄；若超過調查基準值，則應採取調查行動的預警措施。所以在執行運轉前二年以上的環境輻射背景偵測後，應參考其結果，建立運轉後環境試樣紀錄基準及環境試樣調查基準之預警措施。</p> <p>1. 環境輻射背景偵測結果，須具有環境趨勢，以便與未來比較；有意義的資料，須能反映其正確性，採樣與監測至少有一個遠離場址的背景/控制監測位置。</p> <p>2. 偵測方法涉及環境輻射背景偵測結果的正確性與可靠性，所以要求偵測儀器、校正及分析方法，需要符合科學的方法。對於資料的變動性與被刪除的資料，需要加以確認。</p> <p>3. 環境試樣紀錄基準值及環境試樣調查基準值須大於儀器的最低可測值，才有意義；監測結果超過環境試樣調查基準，可能達到處置場的約束劑量，所以須採取調查行動與預防措施。</p>
--	--

2.11 大地工程特性

說明場址之大地工程特性與測量方法，並界定影響處置設施設計與建造之地工參數，包括場址地區土壤與岩石的強度、變形性與滲透性等。

內 容	說 明
<p>場址之大地工程特性影響處置設施之設計與處置功能與安全，故須提出下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 地工特性、水文地質與現地應力之調查架構、調查與評估之方法，以及調查之成果等。 2. 地質工程、地球化學與地震調查： <ol style="list-style-type: none"> (1) 可清楚陳述場址地質狀況之地質圖、地質剖面、地質構造、地質歷史與工程地質資料，及其測量方法。 (2) 場址地區土壤岩石的物理及強度特性，特別是天氣與雨水對土壤與岩石具有風化和溶解濾出之地球化學作用。 (3) 處置設施設計基準地震事件的資料，必須包括地震的規模、地震之高程與位置、最大水平加速度、最大速度、地震的延時和場址土壤條件對地表震動放大效應之潛勢。 3. 大地工程與地球物理調查： <ol style="list-style-type: none"> (1) 平面圖中應清楚顯示低放處置設施的輪廓和所有鑽孔、偵測點、處置坑、處置壕溝、震度線、水壓計、觀測井和地質剖面的位置。 (2) 足夠數量的場址剖面圖，以清楚顯示土壤與岩石分層，及處置設施與地表下材料之相關性。 4. 現地與實驗室試驗及工程特性： 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 參考美國 NUREG-1200 內 2.5 節，及參考物管局 99FCMA002 報告內第八章內容。 1. 評估場址資訊，以決定場址是否適合設立低放射性廢棄物處置場。所以需說明場址之大地工程特性與測量方法，並界定影響處置設施設計與建造之地工參數，包括場址地區土壤與岩石的強度、變形性與滲透性等。

<p>(1) 場址及借土區之土壤及岩石，經現地與實驗室試驗的項目(土壤指數及工程特性試驗方法)如下：土壤分類、含水量、重量密度、空隙比、孔隙率、飽和度、阿太堡限度、比重、級配分析、夯實、收縮-膨脹、延散性、擴散特性、滲透性、水力傳導特性、壓密性、直接剪力試驗、三軸壓縮試驗、單軸壓縮試驗、相對密度、特別試驗(週期強度、剪力模數)、阻尼，視需要而定</p> <p>(2) 說明現地與實驗室試驗試體的作業程序準備工作。</p> <p>(3) 若場址地底材料存在飽和非凝聚土壤和高敏感黏土，須對不穩定的地區進行土壤液化潛能評估。</p> <p>(4) 說明處置設施設計與建造之地工參數已使用合理且保守的參數值，必須能解釋這些參數如何用於設計、確實屬於保守。用於設計的參數資料必須製成表格，這些設計用的參數必須基於現地與實驗室試驗的結果記錄。</p> <p>5. 借土材料</p> <p>(1) 回填用之借土材料範圍、整地和邊坡之相關計畫及材料形態及數量。</p> <p>(2) 根據實驗室的試驗結果決定之借土材料工程特性。</p> <p>6. 地層與設計參數</p> <p>(1) 適量處置場之平面與剖面圖：清楚顯示場址地表下土壤、岩石分層與處置設施間之關係。剖面圖必須顯示鑽孔位置和用以建立土壤與岩石分層之鑽孔柱狀圖。</p> <p>(2) 說明土壤與岩石分層：基於所有蒐集得之資料，特別是探勘時發</p>	
---	--

現地層為軟弱或疏鬆的區域。

- (3) 設計參數：根據該場址土壤與岩石分層以及土壤與岩石材料的試驗結果。以表格方式呈現，也可用圖形表示，並應充份顯示建議設計參數之保守性。

(二) 審查作業

1. 調查架構是否符合描述場址地工特性、水文地質與現地應力特性之需求？調查與評估方法是否適當與具代表性？調查成果是否足以描述場址大地工程特性等？
2. 地質工程、地球化學與地震調查：
 - (1) 所有存在或可能發生地表或地下沉陷、上升或潰陷、變形、溶洞或構造弱點、岩盤中未釋放之壓力、以及可能因物理或化學特性而不穩定之岩石或土壤，是否已被適當地評估？
 - (2) 所提出與設計基準地震事件相關之資料，是否足以定義出地震規模、水平最大加速度、最大速度、地震延時以及地表震動放大之潛勢？
3. 大地工程與地球物理調查：
 - (1) 使用之探勘技術是否為目前工程實務使用之代表性技術？其所採樣之樣本是否足以代表現場之土壤狀況？
 - (2) 所執行之調查，是否足以涵蓋場址及借土區，並提供足夠詳盡之資訊。
 - (3) 場址現地調查所用的儀器及技術，是否為目前使用於大地工程專業領域中之適當方法？
4. 現地與實驗室試驗及工程特性：
 - (1) 取樣計畫之數量及品質是否足以確認大地工程特性評估關鍵之

1. 為確保提供資料的正確性與保守性，審查事項包括：(1)場址與借土區特性大地工程與地球物理調查之範圍與結果；(2)使用現地與實驗室試驗，判斷場址材料及借土材料工程特性之範圍與結果；(3)借土材料的選擇；(4)場址地層分層與設計參數選擇。

<p>材料皆已取得?</p> <p>(2) 調查作業是否足以決定場址內不同材料的特性?</p> <p>(3) 分析與設計所需要實驗室試驗與現地試驗所獲致之靜態與動態大地工程特性，是否具保守性且可為大地工程專業實務所接受?</p> <p>5. 借土材料：填方借土材料探勘計畫，是否施作足夠數量之鑽孔、取樣以及探查坑等，以確立借土之量與品質是適用的。</p> <p>6. 地層與設計參數</p> <p>(1) 探勘位置計畫、剖面、顯示場址土壤與岩層的縱斷面，與探勘記錄進行比較，是否均已保守地應用於建立土壤與岩層之分層。</p> <p>(2) 地層厚及側向延伸的推估通常具不確定性，用於設計參數的土壤與岩石特性及地下分層，是否完整及保守。</p>	
---	--

2.12 交通狀況

提供場址與附近地區交通運輸系統（包括鐵路、公路、水運等）及運輸能力等資料。

內 容	說 明
<p>為使處置設施興建、運轉與未來封閉作業順利，並降低放射性廢棄物運送過程中對民眾輻射影響的衝擊，必須說明場址與附近地區交通狀況，故須提出下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 場址與附近地區交通運輸系統的說明，包括鐵路、公路、或水運等。</p> <p>2. 各種交通運輸系統的運輸能力及各種運送工具與流量。</p> <p>3. 放射性廢棄物運送路徑範圍五公里內的居民人口數及利用此道路的時間。</p>	<p>1. 交通狀況可能影響處置設施作業及運送路徑民眾之輻射劑量，故須提出交通運輸系統的說明、運輸能力及各種運送工具與流量、運送路徑範圍五公里內的居民人口數及利用此道路的時間等資料。</p>

<p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 場址與附近地區交通運輸系統的說明是否明確？尤其放射性廢棄物運送到處置設施的必經路徑，其路況是否良好？ 2. 放射性廢棄物運送路徑的各種運送工具與流量，是否會影響放射性廢棄物運送作業？是否需要裝設輻射監測設備？ 3. 預估放射性廢棄物運送路徑範圍五公里內的居民利用該路徑的時間是否正確？是否用於輻射劑量評估？。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 提供的資料必須明確，可用於輻射劑量評估與裝設輻射監測設備之依據，判斷是否影響放射性廢棄物運送作業。
--	--

2.13 其他

(一) 說明其他足以影響處置設施設計及建造之場址特性因素(如崩塌滑動、侵蝕、洪水、土石流、火山爆發、海嘯等)。

(二) 場址特性調查範圍應以學理上完整之地理區域為準，調查週期與精度應符合一般工程技術規範要求，成果應足以充分說明場址特性。

(三) 調查成果應以適當比例尺之地圖加以說明，歷史資料應加以統計分析並以適當圖表呈現以利審查。原始調查數據得列為報告附冊備查。

(四) 視場址之地域差異性，申請人得提供其他足以影響處置設施設計與建造之場址特性因素補充說明。

內 容	說 明
<p>由於場址特性有其獨特性，可能有特殊的特性需要加以說明，因此要求說明其他場址特性，故須提出下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 說明其他足以影響處置設施設計及建造之場址特性因素(如崩塌滑動、侵蝕、洪水、土石流、火山爆發、海嘯等)。 2. 場址特性調查範圍應以學理上完整之地理區域為準，調查週期與精度應符合一般工程技術規範要求，成果應足以充分說明場址特性。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 場址特性有其獨特性，故要求提供其他場址特性資料，供審查。 <ol style="list-style-type: none"> 1. 因場址之地域差異性，須提供其他足以影響處置設施設計及建造之場址特性因素，並加以補充說明。為使補充資料正確、可用，要求須符合學理、技術規範要求，並以適當圖表說明。

<p>3. 調查成果應以適當比例尺之地圖加以說明，歷史資料應加以統計分析並以適當圖表呈現以利審查。原始調查數據得列為報告附冊備查。</p> <p>4. 視場址之地域差異性，申請人得提供其他足以影響處置設施設計與建造之場址特性因素補充說明。</p> <p>(二) 審查作業</p> <p>1. 足以影響處置設施設計及建造之場址特性因素，是否充分考量？是否有充分的佐證資料？</p> <p>2. 場址特性調查，是否符合學理上、技術規範上的要求？調查結果是否可充分說明場址特性？</p> <p>3. 調查成果是否以適當比例尺圖加以說明？是否經統計分析並以適當圖表說明？</p> <p>4. 足以影響處置設施設計與建造之特殊場址特性，是否已補充說明？</p>	<p>1. 補充的場址特性資料，需要充分、符合要求、經適當分析、並以適當圖表說明。</p>
---	---

第三章 處置設施之設計之審查導則(草案)

3.1 設計目標與功能需求

說明處置設施之設計基準、設計要項及設計規格等。

內 容	說 明
<p>處置設施設計目標與功能，係為提供廢棄物的長期隔離、降低處置設施接收與處置放射性廢棄物之輻射劑量、降低處置場關閉後維護工作量以及改進場址自然環境，以保護群眾的健康與安全。為達成設計目標與功能，故須提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 說明降低處置單元水滲透之設計基準、設計要項及設計規格。 2. 說明處置單元覆蓋完整性之設計基準、設計要項及設計規格。 3. 說明回填物、廢棄物及覆蓋物構造穩定性之設計基準、設計要項及設計規格。 4. 說明降低廢棄物與積水接觸之設計基準、設計要項及設計規格。 5. 說明運轉及封閉期場區排水之設計基準、設計要項及設計規格。 6. 說明場址封閉與穩定化之設計基準、設計要項及設計規格。 7. 減少長期維護需求之設計基準、設計要項及設計規格。 8. 防止非故意侵入處置場障壁之設計基準、設計要項及設計規格。 9. 合理抑低職業曝露之設計基準、設計要項及設計規格。 10. 現場監測之設計基準、設計要項及設計規格。 11. 可適當監管與補救緩衝區之設計基準、設計要項及設計規格。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 參考美國 NUREG-1200 內 3.1 與 3.2 節。 1. 為達到處置設施設計目標與功能，須提出降低水滲透、處置單元覆蓋完整性、構造穩定性、降低廢棄物與積水接觸、運轉及封閉期場區排水、場址封閉與穩定化、減少長期維護需求、防止非故意侵入、合理抑低職業曝露、現場監測、緩衝區等之設計基準、設計要項及設計規格。

(二)審查作業

1. 降低處置單元水滲透之設計，是否清楚說明：(1)導引場區降水離開處置單元、(2)導引場外降水流入排水系統及導引地下水離開處置單元。導引場區降水與地下水離開處置單元的主要設計準則必須說明其排水系統可以控制降水流速和地下水位。此最低流速與地下水位必須根據(1)最大降雨(PMP)所導致的最壞狀況(2)因意外狀況所產生之堵塞。
2. 處置單元覆蓋完整性之設計，是否清楚說明：採取的方法可使覆蓋物(1)達成預期使用時期、(2)避免連續性維護需求、(3)可抵抗地表地質與生物活動之剝夷作用。處置單元覆蓋物侵蝕保護之主要設計準則至少應說明(1)一般運作狀況時的地表水和風速；(2)異常性地表水與風速以及正常水位。處置單元覆蓋物完整性的主要設計準則至少應說明(1)評估整體性與差異性沉陷以及預估廢棄物與填充材料的密度增加狀況；(2)預估覆蓋物材料在掩埋廢棄物可能受災時的強度與耐受性；(3)相關於最大地震的異常地表震動。
3. 構造穩定性之設計，是否清楚說明廢棄物可長期隔離及避免經常維護。確保填充材、廢棄物和廢棄物覆蓋物的結構穩定性之主要設計準則至少應說明(1)廢棄物容器內與容器內填充材料之間預知的空隙容量；(2)因運作而產生的空隙效應；(3)設計基準異常事件對於結構穩定性的效應；和(4)在廢棄物有害時期，因地質化學環境使填充材、廢棄物形態和廢棄物覆蓋材料的剝蝕。
4. 降低廢棄物與積水接觸之設計，是否清楚說明使用方法可使廢棄物在暫時

1. 對降低水滲透、處置單元覆蓋完整性、構造穩定性、降低廢棄物與積水接觸、運轉及封閉期場區排水、場址封閉與穩定化、減少長期維護需求、防止非故意侵入、合理抑低職業曝露、現場監測、緩衝區等資料，提供審查作業須注意的事項。

- 貯存、處置場運轉中、場區關閉期間，降低與積水的接觸。主要設計準則至少應(1)清楚說明；(2)說明廢棄物之貯存、吊卸和封閉處置單元；(3)說明處置單元覆蓋物表土下與表土的排水和暫存區域；(4)描述處置單元地面自然材料與排水材料及地面排水間的滲透性；和(5)描述暴露於空氣中之廢棄物暫時存放平臺與覆蓋物。是否提出防範運轉期主動性排水系統組件意外破壞和封閉後被動性排水系統組件被破壞之設計準則。
5. 處置場運轉中與封閉期場區排水之設計，是否清楚說明使用方法可將(1)地表水引導遠離廢棄物，(2)以速度與斜度的方法控制排水系統流出處置單元。主要設計準則至少應(1)清楚說明；(2)說明運轉期和封閉後場址表土排水狀況；(3)涵蓋表土的排水特性，分流結構和表土排水斜坡等。是否提出因應上游水庫毀壞或下游排水堵塞之設計準則。
6. 場址封閉與穩定化之設計，是否清楚說明其措施，可(1)提供廢棄物長期隔離的功能與避免經常性維護之需求。(2)提供場址關閉與穩定計劃，並可應改善場區自然環境特性。場址關閉及穩定化之主要設計準則應至少說明(1)設計時應提出場址封閉計劃的相關項目；(2)封閉與可能主動維護的設計基準。
7. 減少長期維護需求之設計，是否清楚說明處置場關閉後，如何避免長期維護之需求。主要設計準則必須預測 (1)材料之耐用度；(2)侵蝕作用，(3)排水系統退化的效應；和(4)監控系統的退化。
8. 防止非故意侵入處置場障壁之設計，

<p>是否清楚說明設立之障壁，以避免個人不經意的侵入處置設施。障壁主要設計準則必須說明標示物、障壁材料，障壁退化比率的可能範圍。</p> <p>9. 合理抑低職業曝露之設計，是否清楚說明如何合理抑抵職業曝露。減少職業曝露之主要設計準則必須說明(1)接收、檢查、管控、貯存和處置作業之輻射合理抑低措施；(2)對已知較高活性廢棄物之屏蔽設計；和(3)處置非穩定性廢棄物或裝載意外破損廢棄物的預備方案。</p> <p>10. 現場監測之設計，是否清楚說明處置場運轉中及運轉後的環境監測計畫。現場監測系統之主要設計準則必須說明(1)監測系統設備與組件的已知使用壽命；(2)退化的可能速率和監測設備失效的可能事件的處理方法。</p> <p>11. 緩衝區之設計，是否清楚說明外圍處置單元與場界間緩衝區之特性。緩衝區之主要設計準則必須說明(1)可供監測所需的空間尺寸；(2)不可接受的輻射發生時可採取正確措施所需的空間尺寸。</p>	
--	--

3.2 建築設計

說明處置設施主要結構物、使用需求規劃及其配置。

內 容	說 明
<p>為促進處置設施達到妥善規劃與配置，在建築設計方面，須提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 說明處置設施主要結構物之建築設計目標、使用需求規劃及其配置、相關的設計基準與功能需求，以及對應引用法規與報告之依據。包括設計要項、設計規格、設計方法以及設計之</p>	<p>1. 參考物管局 99FCMA002 報告內第八章內容。</p> <p>1. 為促進處置設施達到妥善規劃與配置，並發揮其功能，故要求提出主要結構物之建築設計目標、使用需求規劃及其配置、相關的設計基準與功能需求、設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果。</p>

<p>成果等。</p> <p>2. 處置設施主要結構物的正視圖、通過重要系統的參個軸向剖面圖及細部設計。主要結構物，包括各種處置單元、貯存廠房、接收與吊卸廠房、除污與檢整廠房、輔助廠房與公共廠房。</p> <p>3. 各種處置單元覆蓋物、處置單元內外的排水與集水系統的剖面圖及細部設計。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 應檢核處置設施主要結構物之建築設計目標、確認使用需求規劃及其配置是否滿足？相關的設計基準與功能需求是否完整？引用法規與報告是否適當與具代表性？設計要項、設計規格、設計方法以及設計之成果是否正確與合理？</p> <p>2. 主要結構物的正視圖與剖面圖是否能正確顯示各重要系統的配置？是否符合設計與建造規範。</p> <p>3. 各種處置單元覆蓋物、處置單元內外的排水與集水系統的剖面圖是否可顯示出其功能？</p>	<p>1. 處置設施主要結構物須符合建築設計目標、需求規劃、適當配置，也需滿足其設計基準與功能需求。</p>
--	--

3.3 結構設計

說明處置設施主要結構物之結構分類、設計荷重及其組合等。

內 容	說 明
<p>為促進處置設施各類重要結構物的安全，在結構設計方面，須提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 主要結構物之結構分類與各類結構的負載。負載包括靜負載(D)和活負載(L)、偶發液態水平和垂直壓力之負載(F)、土壤壓力之負載(H)、溫度差之熱負載(T)、風壓力之負載(W)，地震之負載(E)。</p>	<p>1. 參考美國 NUREG-1200 內 3.2A 節。</p> <p>1. 主要結構物之結構設計，須加以分類、分析各種負載、引用適當法規、慎選負載組合、確認分析的正確性。</p>

2. 說明混凝土結構物及鋼構結構物之設計所選用之負載組合，並說明所選用負載組合的原因。
3. 適用之法規、標準和規範。
4. 設計與分析步驟：資料包含(1)每一個結構及其基礎之描述，若結構物經破壞將導致工作人員或民眾之輻射危害，需提出結構物補強措施等；(2)設計的假設包含邊界狀況和假設之基礎等；(3)設計的分析步驟描述包含電腦程式和有效性；(4)描述設計基準地震力之計算方法；(5)用以確認設計的方法。
5. 場址之衝擊因素：結構設計對場址特性(地質、地震、氣象、氣候、水文和大地工程與地質化學特性)之衝擊，說明如何被列入考量。

(二)審查作業

1. 主要結構物之結構分類是否適當？各類結構的負載因子是否正確且充分考量？
2. 混凝土結構之強度(U)設計，必須大於最大的負載組合。鋼構結構物之設計，可使用彈性應力方法，強度(S)設計必須大於最大的負載組合。
3. 所引用的法規、標準或規範是否適切？
4. 設計與分析步驟：結構分析與設計和結構系統與構件之資料，與所使用之設計、分析方法和結果，均是否保守且為優良工程設計之代表。
5. 若場址之衝擊因素：是否已清楚定義與評估可能之衝擊；該場址因素是否將不會被結構物設計造成有害的影響。

1. 主要結構物之分類與負載分析必須正確且保守，以確保個結構物安全。

3.4 土木設計

說明處置設施主要結構物之工程材質、屏蔽材料之特性與設計標準（包括處置設施及其覆蓋、回填等）、地表防洪及地下排水系統之設計。

內 容	說 明
<p>為促進處置設施安全，應慎選工程材質與屏蔽材料，並須考量置設施覆蓋與回填、地表防洪、地下排水系統及護坡工程等，在土木設計方面，須提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 工程材質與屏蔽材料之組成、密度、抗壓強度、耐久性、退化率、滲水性等特性及其設計標準。 2. 地表防洪的材料特性、設計標準、排水功能。 3. 地下排水系統的材料特性與排水規劃、排水設計、抑低滲入處置單元設計。 4. 護坡工程的材料特性、設計標準、應力監測等。 5. 適用之法規、標準和規範。 <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 工程材質與屏蔽材料之組成與特性是否符合場址特性要求？設計標準是否適切？ 2. 地表防洪的材料特性、設計標準、排水功能是否可防止水入侵至處置單元。 3. 地下排水系統的材料特性與排水規劃、排水設計，是否適當？是否可抑低地下水滲入處置單元？ 4. 護坡工程的材料特性、設計標準、應力監測等是否適當？是否具長期穩定的特性？ 5. 所引用的法規、標準或規範是否適切？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 參考物管局 99FCMA002 報告內第八章內容。 <ol style="list-style-type: none"> 1. 土木設計應包括處置設施及其覆蓋、回填、地表防洪及地下排水系統以及護坡工程等。其材料特性與設計標準，將影響其功能。 <ol style="list-style-type: none"> 1. 覆蓋、回填、地表防洪及地下排水系統以及護坡工程等材料特性與設計標準，須符合場址特性，才能發揮其功能。

3.5 輻射安全設計

(1)安全限值：說明設施內外之輻射限值與輻射防護分區規劃。

(2)處置設施結構之輻射屏蔽分析：說明處置設施輻射屏蔽結構體構造強度、比重、厚度等有關資料，針對處置廢棄物含有核種之活度、比活度及分布情形，進行輻射屏蔽分析評估。

(3)職業曝露合理抑低：說明設施正常運轉期間，合理抑低工作人員輻射劑量所採行之設計或措施，至少應包括下列各項：(a)輻射監測區域規劃、輻射管制區劃分及輻射防護設備之使用等。(b)廢棄物接收、暫貯、檢整、搬運、處置及控制中心等作業區職業曝露合理抑低之設計。(c)對較高活度廢棄物之屏蔽設計。

內 容	說 明
<p>輻射安全設計不但要確保工作人員與一般民眾的輻射劑量在法規限值內，也應依輻射防護之要求，使工作人員與一般民眾的輻射劑量合理抑低。須提出下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 安全限值</p> <p>(1)提出設計概念，包括設計基礎與準則。</p> <p>(2)為使工作人員劑量合理抑低，輻射管制區再細分為不同之輻射區，並定出各輻射區之最大輻射劑量率。</p> <p>2. 處置設施結構之輻射屏蔽分析</p> <p>(1)屏蔽之設計準則</p> <p>(2)各輻射管制區內廢棄物所含各核種之活度、比活度及分布情形。</p> <p>(3)各輻射管制區輻射屏蔽結構體之構造強度、比重、厚度等有關資料</p> <p>(4)屏蔽參數與計算程式</p> <p>3. 職業曝露合理抑低：</p> <p>(1)輻射監測區域規劃、輻射管制區劃分及輻射防護設備之使用等。</p> <p>(2)廢棄物接收、暫貯、檢整、搬運、處置及控制中心等作業區職業曝露合理抑低之設計。</p> <p>(3)對較高活度廢棄物之屏蔽設計。</p>	<p>1.依低放處置安全分析導則第四章第五項輻射安全設計之要求。NUREG-1200之7.1節與7.3節也有此項要求。</p> <p>1. 訂定各輻射區之安全限值，可促進各輻射屏蔽之設計，並管制人員之進出，以確保工作人員知輻射安全。</p> <p>2. 輻射屏蔽設計與分析，涉及未來是否能安全運轉，所以須提相關資料供審查。</p> <p>3.輻射防護除須確保工作人員與一般民眾之輻射劑量低於游離輻射防護安全標準之限值外，也必須使劑量合理抑低。為使職業曝露合理抑低，須考量設施設計與管制作業，採取合理抑低措施。</p>

4. 人員污染防護之設計。

5. 人員、物料進出設計。

(二)審查作業

1. 安全限值：

(1)處置場輻射安全設計：在場區外，民眾的年有效劑量不得超過 0.25 毫西弗；在場區內，是否考量輻射源(加馬輻射與空浮)、工作環境、及占用時間，將輻射管制區分區管制，並訂定工作人員的輻射劑量行政管制值；該輻射劑量行政管制值，是否符合合理抑低。

(2)是否考量各輻射管制區內工作人員之占用時間與人數，及合理抑低原則，訂定其劑量率限值。並對該管制區之屏蔽與通風設計，是否考量合理抑低。

2. 處置設施結構之輻射屏蔽分析

(1)屏蔽之設計準則：各輻射管制區之屏蔽設計，是否考量合理抑低；該區之計算最大輻射劑量率，是否小於其限值。

(2)各輻射管制區內廢棄物所含各種之活度、比活度及分布情形：是否考量運轉期間各廢棄物接收區、暫存區、再處理包裝區之最大廢棄物量，及可能的最大活度與比活度。

(3)各輻射管制區輻射屏蔽結構體之構造強度、比重、厚度等有關資料：輻射屏蔽結構體之構造強度與比重，是否一併被考慮在建築物結構體。

(4)屏蔽參數與計算程式：輻射屏蔽厚度之計算，是否利用可接受的屏蔽計算程式，其屏蔽參數之假設是否

4. 設施之輻射防護設計，必須避免工作人員遭受到體內與體外之放射性物質之污染。

5. 為防範放射性物質污染外界環境，必須有完善的人員、物料進出設計。

1. 處置場場區外民眾劑量須小於低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則第八條之規定，低放處置設施之設計，應確保其對設施外一般人所造成之個人年有效等效劑量，不得超過 0.25 毫西弗。為使職業曝露合理抑低，輻射管制區須分區管制。

2. 輻射屏蔽分析，必須使用正確參數與計算機程式，才能得到正確分析與正確的屏蔽設計。

<p>合理，並計算各輻射管制區之輻射劑量率。</p> <p>3. 職業曝露合理抑低</p> <p>(1)輻射監測區域規劃：輻射監測區域內的劑量率是否都小於 0.5 微西弗/小時。</p> <p>(2)輻射管制區，是否依輻射劑量率的狀況，再加以細分；每一種輻射管制區內，是否裝設區域輻射監測器與空浮監測器；監測器安裝位置，是否為人員經常到達的地方；監測器之刻度，是否涵蓋預期事故之最大劑率值；各監測器讀值看板，是否裝設在進入管制區之入口明顯處。各輻射管制區的通風，是由低空浮區流向高空浮區，且高空浮區在排放口需裝設過濾器與空浮連續監測器。高空浮區排放口，在測到超過排放限值時，是否有警報，是否可自動關閉排放並停止作業。</p> <p>(3)進入管制區，是否經過輻射防護管制站；管制站是否備妥合適的防護衣、防護手套、防護鞋套、防護面具、及各種人員劑量偵測儀器；在出管制站前，是否裝設全身污染偵測設備，及洗滌、沐浴設備。</p> <p>(4)廢棄物接收、暫貯、檢整、搬運、處置及控制中心等作業區職業曝露合理抑低之設計：各作業區是否考量其方便性、減少污染、減少停留時間、避免接觸廢棄物的設計。</p> <p>(5)對較高活度廢棄物之屏蔽設計：經屏蔽後之高輻射區，是否允許人員進入與維修相關設備；是否有利用遙控操作高輻射源的設計。</p> <p>4. 人員污染防護之設計：輻射作業環境是否有污染管制限值？空浮管制限值？防範體外污染與體內污染之裝備</p>	<p>3. 職業曝露合理抑低，須考量設施設計與管制作業，採取合理抑低措施。輻射監測區與各種管制區都需加以監測，在管制區更須進行人員進出管制與防護。對較高活度廢棄物，須加以屏蔽，並利用遙控方式操作。</p> <p>4. 須有完善的人員污染防護之設計，以確保工作人員之輻射安全。</p>
--	---

<p>是否足夠？</p> <p>5. 人員、物料進出設計：是否有足夠的偵檢設備與洗滌設備？是否可避免污染擴散到外面環境？</p>	<p>5. 須有嚴謹的進出管制設計，以確保不會污染環境。</p>
--	----------------------------------

3.6 輔助設施或系統之設計

說明廢棄物暫貯區、廢棄物檢整或處理系統、粉塵與廢水收集排放處理系統、廢棄物傳送系統、分析或偵測系統等之設計，並說明各系統失效時之補救措施。

內 容	說 明
<p>低放廢棄物處置設施的輔助設施或系統，包括廢棄物暫貯區、廢棄物檢整或處理系統、粉塵與廢水收集排放處理系統、廢棄物傳送系統、分析或偵測系統等輔助性建物及道路，其設計應能達成：(1)協助處置設施之運轉，維護工作人員安全；(2)協助處置設施建造需求；(3)對處置場封閉措施不會產生負面影響。須提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 各種輔助設施的設計基礎及適用準則之描述，包括設施配置圖、工程藍圖、建造規格等。 2. 引用建築法規及工業標準。 3. 各種輔助建物的安全使用年限及其內重要設備的更換週期。 4. 各種輔助設施對處置場建造、運轉與封閉的影響。 5. 總體交通系統的設計：涵蓋道路的配置、用途、建材、交通管制、以及道路表水的排水系統。 <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 各種輔助設施是否能有效協助處置設施之運轉並維護工作人員安全？ 2. 引用的建築法規及工業標準是否適切？ 3. 在預期的安全使用年限期間，每一建 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 參考美國 NUREG-1200 內 3.4.2 節。 1. 輔助設施或系統之設計應能協助處置設施之運轉，維護工作人員安全，故應提供設計相關資料估審查。 1. 審查確認各種輔助設施的功能：有效協助處置設施之運轉並維護工作人員安全，並能避免對處置場建造、運轉與封閉產生負面影響。

<p>物是否均能安全地使用？重要設備的更換週期是否適切？</p> <p>4. 各種輔助設施對處置場建造、運轉與封閉是否不會產生負面的影響？</p> <p>5. 總體交通系統是否足以協助處置設施之安全運轉且對處置場建造、運轉與封閉不具負面影響。</p>	
---	--

3.7 公用設施或系統之設計

說明通訊、電力、供水、供氣、照明、廢棄物處理、通風等系統之設計，並說明各系統失效時之補救措施。

內 容	說 明
<p>公用設施或系統涵蓋通訊、電力、供水、供氣、照明、廢棄物處理、通風、與消防等系統。為確保每一公用系統能有效協助處置設施運轉並維護工作人員安全，須提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 通訊系統之設計與安裝 2. 電力系統之設計與安裝 3. 供水系統之設計與建造 4. 供氣系統之設計與安裝 5. 照明系統之設計與安裝 6. 一般廢棄物處理之設計與建造 7. 通風系統之設計與安裝 8. 消防系統之設計與安裝 <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 通訊系統之設計與安裝： <ol style="list-style-type: none"> (1)在廢棄物接受、吊卸與處置作業之所有時間，不論是視訊或音訊是否皆可清晰的聯繫廠區的人員？ (2)是否可與廠區外官方單位維持可靠的聯繫，特別是在緊急應變的時期？ (3)是否會與設施的設計或運作相抵觸？ 2. 電力系統之設計與安裝：是否可對處 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 參考美國 NUREG-1200 內 3.4.1 與 3.4.3 節。 <ol style="list-style-type: none"> 1. 為確保每一公用系統能有效協助處置設施運轉並維護工作人員安全，須提供通訊、電力、供水、供氣、照明、廢棄物處理、通風、與消防等系統之設計與安裝。 <ol style="list-style-type: none"> 1. 為確保每一公用系統能有效協助處置設施運轉並維護工作人員安全，列舉出各公用系統之審查要項。

<p>置場安全運轉，提供充足的電力？</p> <p>3. 供水系統之設計與建造：</p> <p>(1)對處置場建造、運轉及消防，是否皆可提供足夠的水量？</p> <p>(2)是否可提供工作人員足夠的飲用水？</p> <p>(3)是否可提供工作人員除污用的溫水？</p> <p>4. 供氣系統之設計與安裝：</p> <p>(1)對處置場建造與運轉，是否可提供足夠且適當氣體，以利作業之進行？</p> <p>(2)是否可提供場區必須的燃料氣體？</p> <p>5. 照明系統之設計與安裝：</p> <p>(1)對處置場建造與運轉，是否可提供充足的照明。</p> <p>(2)對於可預期的意外狀況，是否可提供緊急照明。</p> <p>6. 一般廢棄物處理之設計與建造：</p> <p>(1)是否符合國家環保法規？</p> <p>(2)是否會與設施的設計或運轉相抵觸。</p> <p>7. 通風系統之設計與安裝：</p> <p>(1)是否考量污染區與無染區的不同通風系統？</p> <p>(2)污染區的通風設計，是否由低污染區傳送到高污染區？是否經過高效率過濾器過濾與偵測後才排放？</p> <p>8. 消防系統之設計與安裝：</p> <p>(1)消防程序、材料、設備和系統，是否可保護工作人員與大眾免於輻射與火警災害？</p> <p>(2)是否備有預防輻射與火災災害的計劃？</p> <p>(3)是否備有工作人員如何應變與預防火災發生的訓練計劃？</p>	
--	--

3.8 設計成果

應附適當比例尺之詳細圖說，設計細部資料得列報告附冊備查。

內 容	說 明
<p>為確保處置設施之各項設計，符合其設計目標與功能，並便於查閱與追蹤，各項設計成果，須提供下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 各重要設計成果之詳細圖說，應說明採用的比例尺。 2. 各重要設計成果之細部報告及其相關附冊等。 <p>(二)審查作業</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 各重要設計成果之詳細圖說是否完整？圖說比例尺是否適當性？ 2. 設計成果細部報告與附冊是否正確與完整？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 參考物管局 99FCMA002 報告內第八章內容。 1. 為確保各重要設計成果便於查閱與追蹤，須提供適當比例尺之詳細圖說、設計細部資料、及其相關附冊等。 1. 詳細圖說與設計細部資料，必須完整且便於查閱與追蹤。

第四章 國內天然障壁長期穩定潛在影響因子之探討

由於目前系統性探討天然障壁長期穩定行為之研究仍不多見，故本章將由隧道襯砌損害與異狀之類型、隧道襯砌異狀之影響因素、天然障壁(地質)材料依時變形特性及其對隧道之影響、隧道受震反應以及代表性力學特性試驗等五大部份，整理國內外研究情況，以探討天然障壁長期穩定潛在影響因子。

4.1 隧道襯砌損害與異狀類型蒐集彙整

所謂隧道襯砌異狀，係指隧道完工後，因外力、環境、材料、設計、施工等因素，造成襯砌等變形、裂縫、剝落、漏水現象，影響原先使用功能現象之通稱。若任異狀自由發展，隧道可能存在整體崩壞之風險(何泰源等，1999；朝倉俊弘等，2003)。

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)。直至 2006 年歐盟為整合歐洲隧道工程新技術之發展而推動 TUNCONSTRUCT 計畫，其中一本研究報告(Leucker et al., 2006)蒐集彙整歐洲隧道之各類異狀，並將其分為(1)原始缺陷；(2)物理或化學作用引致的現象；(3)裂縫；(4)變形；(5)不穩定；(6)水的影響；(7)排水問題等七大類，而有關混凝土襯砌之數種典型異狀則彙整如圖 4.1-1 所示。

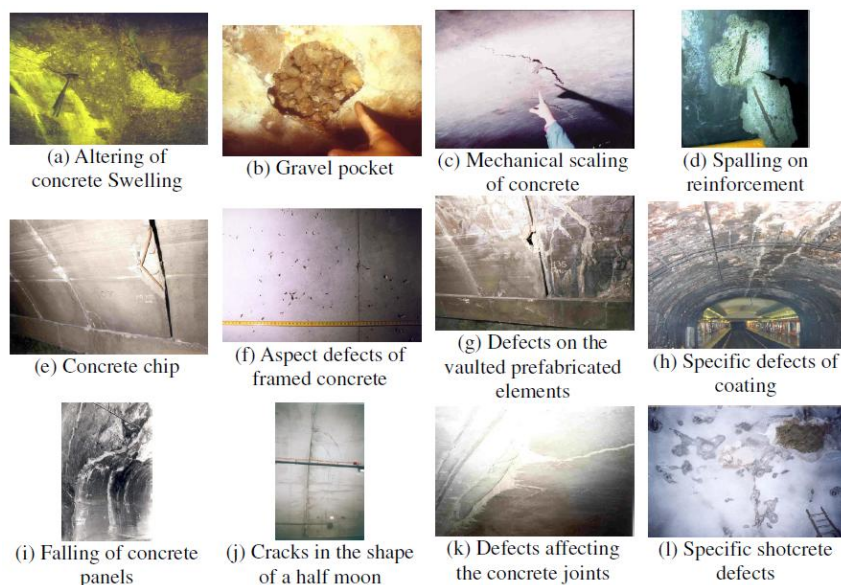


圖 4.1-1 歐洲隧道混凝土襯砌之數種典型異狀(Leucker et al., 2006)

日本則對隧道襯砌異狀有較詳細的調查與統計，日本隧道技術協會(1990、1992)自 1979 年開始針對國鐵全線 3,819 座隧道(總長 1,834 km)進行漏水實況調查，其調查結果顯示，有漏水現象的比例為 56%。其後 1986 年再針對 100 座鐵路隧道及 10 座公路隧道進行異常狀態詳細調查，發現隧道異狀以龜裂、裂縫、錯離等裂縫形式所佔比例最多，其次是漏水現象，而襯砌表面剝離、剝落居第三，最後是錯斷裂開及冰柱凍害現象；且經統計隧道使用時間與異狀出現之關係發現，完工 50 年以上者其發生異狀的機會特別大，詳見圖 4.1-2。另日本土木學會(2003)則從 121 篇文獻資料中蒐集彙整 90 座隧道異狀案例，並將異狀分為(1)裂縫；(2)變形；(3)隆起；(4)剝落或脫落；(5)其他等五大類，各異狀所佔比例如圖 4.1-3 所示。

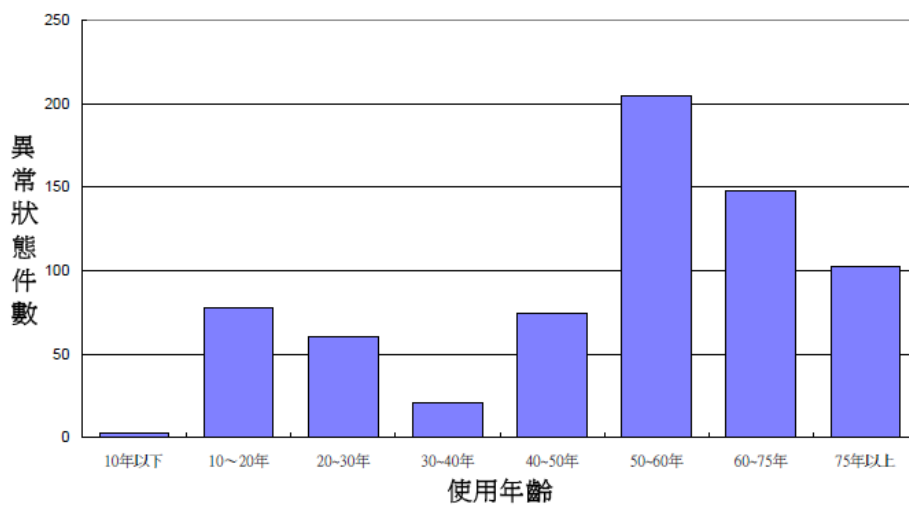


圖 4.1-2 日本異常狀態隧道的使用時間分佈(日本隧道技術協會，1992)

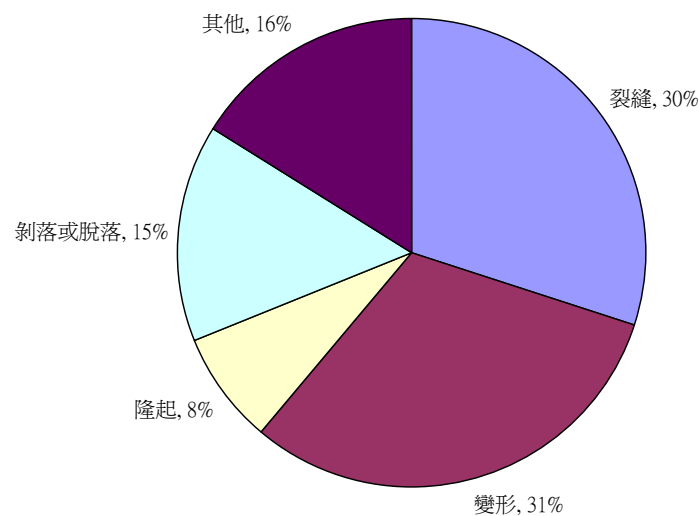


圖 4.1-3 日本隧道襯砌異狀之各類型比例(朝倉俊弘等，2003)

王泰典等(2007、2008)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，該報導並分類了隧道襯砌異狀的類別，大致分為「目視可識別」與「目視無法識別」二大類，常見的襯砌目視可識別異狀詳見圖 4.1-4。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。例如圖 4.1-4 中除圖(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。劉啟川(2006)則採用與王泰典等(2007、2008)相同的背景資料，整理國內隧道檢測案例指出，不同的襯砌型式，常見的異狀各不相同，如表 4.1-1 所示。



圖 4.1-4 常見的隧道襯砌異狀(王泰典等，2007)

表 4.1-1 襯砌型式與常見異狀之關係(劉啟川，2006)

襯砌型式	結構特色	常見異狀	使用情況	代表性案例隧道
支架式 (木構或鋼構)	接點多、 自由度高	腐蝕、接點斷裂、桿件彎 曲、挫曲、背後空洞、岩 塊掉落、剝落	臨時支撐 配合其它支撐	基隆附近採礦坑道
疊砌式 (砌磚或砌石)	勁度小、 耐震能力差	岩體擠入變形、接縫黏結 材劣化、塊體掉落、剝落、 滲漏	日據時期興建之隧道，目 前仍在使用者不多	三義舊山線隧道 竹子嶺隧道
場鑄混凝土	勁度大、 韌性小、 耐震能力差	破裂、錯動、塊體掉落、 剝落、滲漏水、白華、銹 染、背後回填灌漿不實	主流之襯砌型式 視需要採鋼筋加強	北迴鐵路隧道群 南迴鐵路隧道群 北二高隧道群等
預鑄混凝土 環片或結構	勁度大、 連接處勁度小、 強度小	接縫處滲漏水、背後回填 灌漿不實	全斷面隧道鑽掘機及潛盾 機施工隧道 沈埋管工法隧道 推進工法隧道	台北、高雄捷運隧道 雪山隧道 TBM 鑽掘段 高雄過港隧道 部分下水道
裸岩或薄層 噴凝土	直接反應岩體變 形	岩塊掉落、剝落、防水性 差	岩體完整性較佳之變質岩 區，如大理岩區或輕度變 質岩區	中橫公路天祥區段 新竹縣五峰鄉桃山隧道 翡翠水庫交通隧道

4.2 隧道襯砌異狀之影響因素探討

營運中隧道經由安全檢測作業獲致隧道襯砌存在之異狀種類後，必須進一步探討這些異狀形成的可能肇因，以利後續隧道安全評估與維修補強對策之設計(李佳翰等，2009)。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，以及黃燦輝等(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可能肇因，黃燦輝等(2008)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之分類，詳見表 4.2-1。

表 4.2-1 襯砌異狀影響因素分類(朝倉俊弘等，2003；黃燦輝等，2008)

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

隧道襯砌異狀的可能肇因甚多，其關係可採用日本土木學會(2002、2003)提出的隧道異狀網狀關係圖來加以說明，如圖 4.2-1 所示。依據現代化隧道工法的概念，隧道周圍天然的岩體即是荷重的來源，亦屬於支撐結構的一部分，從力學的觀點而言，人造的襯砌產生變形、破裂的主因，不外乎隧道支撐結構所承受的外力增加或變化超過了結構材料的強度；或是支撐的勁度及強度相對地減弱，變形持續增加，致使支撐結構無法抵抗現地應力之大小。有關隧道支撐結構的強度除了必需考慮結構材料的強度外，亦受到隧道幾何大小、形狀引致的影響。因此圖中隧道異狀的生成，其直接影響因素為荷重增加、支撐構件及周圍地盤之強度及勁度的減低；而間接關聯的滲漏水問題，則會增加對材質劣化及空洞生成的不利影響，進而加速異狀生成及惡化(朝倉俊弘等，2003)。表 4.2-1 與圖 4.2-1 雖然說明了襯砌異狀型的影響因素，但對於異狀的型態、產狀、依時變異與形成肇因的輯遞關係，卻著墨不多。

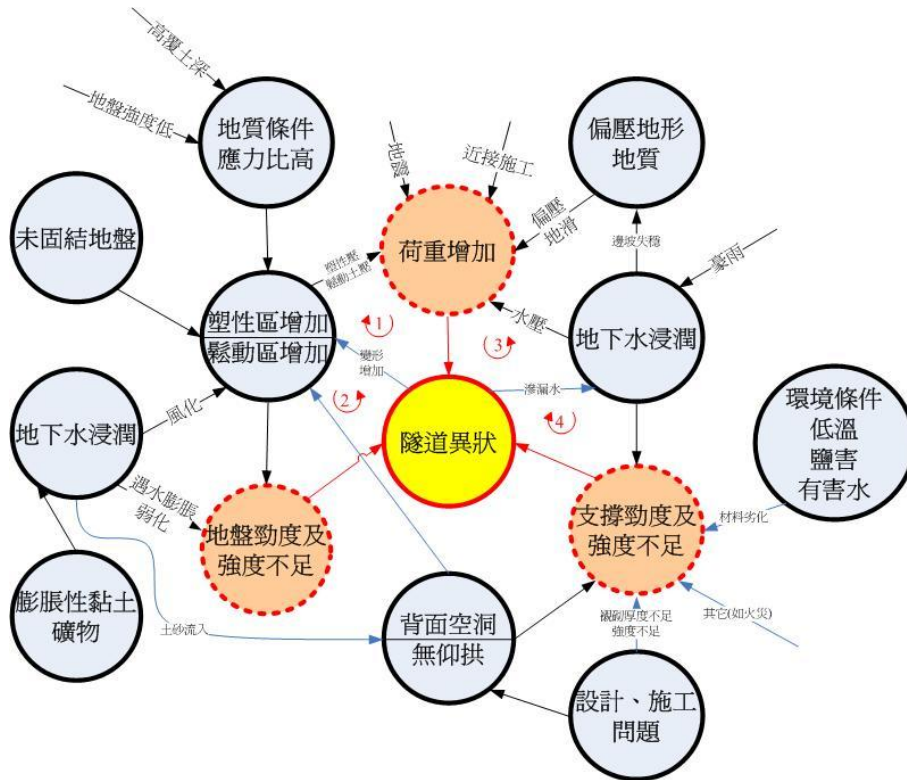


圖 4.2-1 隧道異狀影響因素關係圖(朝倉俊弘等，2003)

日本鐵道總合技術研究所(1998、2007)分為「外力因素」與「環境、材料與施工因素」所引致的兩大類異狀，說明其型態與產狀。其中「外力因素」部份根據襯砌之受力機制、地形效應與異狀型態，又可細分為(1)塑性壓；(2)鬆弛土壓；(3)偏壓等三類因素所造成的裂縫型態，詳見圖 4.2-2；而「環境、材料與施工因素」則包括了因隧道襯砌周圍環境不良如凍溶效應、火害、鹽害、溫差與中性化等、澆置混凝土襯砌所使用之材料不佳如水化熱過高、鹼粒料反應等、亦或是打設混凝土襯砌時施工不當如拌合不均、初凝現象、膠結不全、異常凝結、打設不連續等因素所造成的表面龜裂或裂縫型態，如圖 4.2-3 所示。

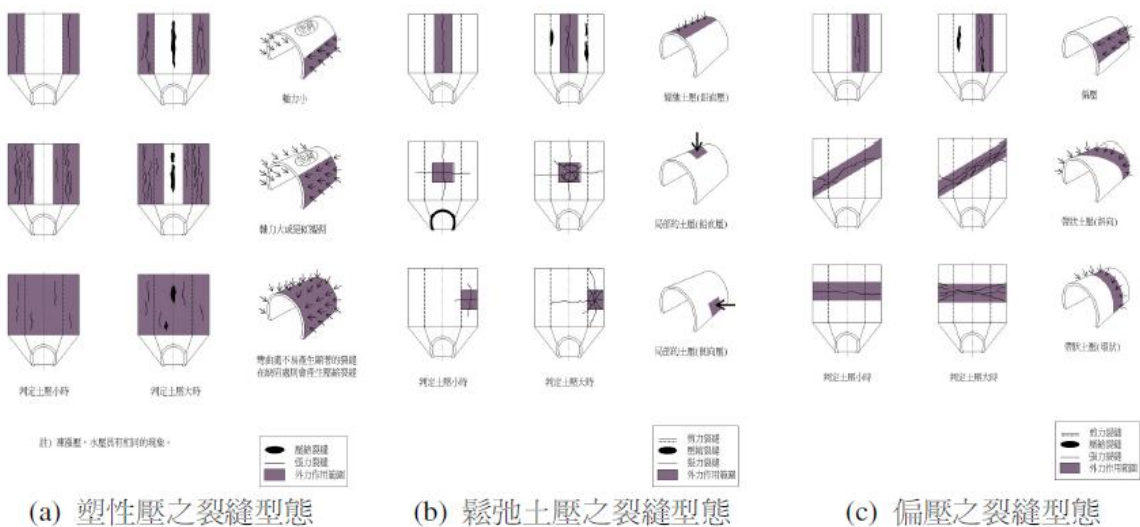


圖 4.2-2 外力因素所引致之襯砌表面裂縫型態(岡田勝也等，2007)

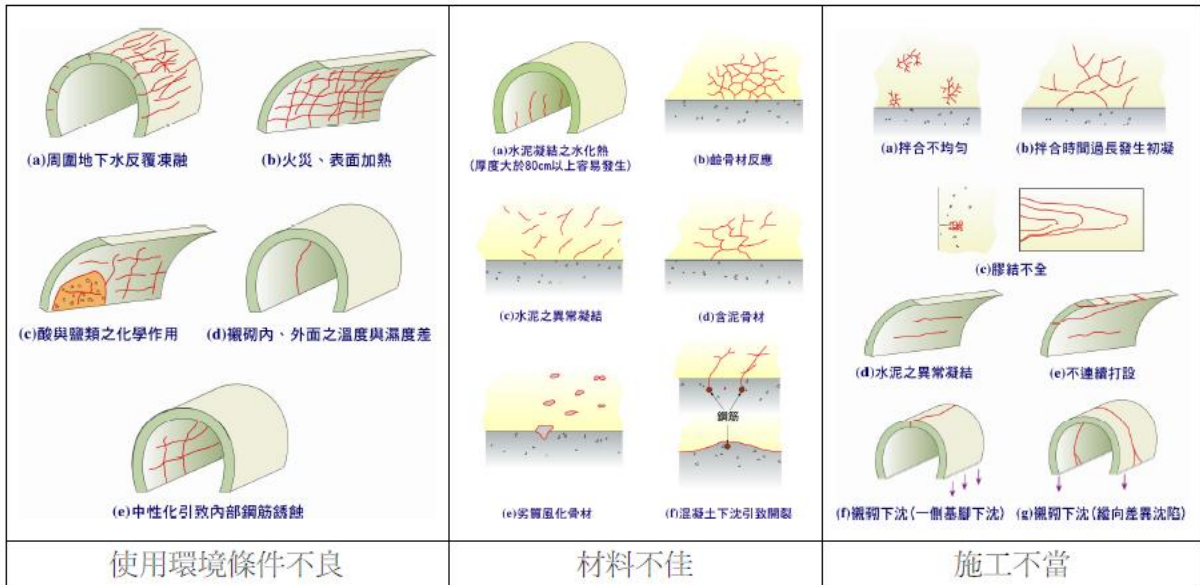


圖 4.2-3 環境、材料與施工因素所引致的襯砌表面龜裂或裂縫型態(朝倉俊弘等，1998)

4.3 天然障壁(地質)材料依時變形特性及其對隧道之影響

地質材料具明顯依時變形特性，在承受應力達特性門檻以上常顯露依時變形行為，而依時變形特性因不同的荷載行為而異，包括潛變、鬆弛、荷載速率效應與疲勞等現象。

- 潛變：潛變乃是指再一定的外在環境下，材料的變形行為和時間的關係。此“一定的外在環境”包含一定的溫度、濕度及應力狀態。
- 鬆弛：鬆弛亦是材料依時行為之一，其乃是指材料在一定外在環境下，承受一固定不變的應變時，其內部應力隨著時間遞減的行為。
- 速率效應：對於大部分的材料而言，試驗時加載的應力或應變速率愈快的，其強度愈高；加載速率愈慢時，強度愈低。此種行為稱之為速率效應。造成速率效應的主要原因乃是由於材料的質流所致。
- 疲勞：所謂疲勞是指當材料承受一反覆荷重時，材料的強度隨著反覆荷重的施加而下降甚至破壞之行為，是屬於材料的依時行為之一。根據前人研究結果，材料之疲勞亦有和潛變相似之行為，可分為一次疲勞(減速疲勞)、二次疲勞(等速疲勞)、三次疲勞(加速疲勞)。

隧道周圍地質材料的變形特性，依據隧道施工的過程可區分為：(1)開挖支撐初期的彈塑變形以及(2)開挖面遠離後的依時變形；隧道開挖移除地質材料後，圍岩即時的應力—應變調整引致的隧道收斂變形主要來自地質材料的彈塑變形，地質材料的力學性質、隧道開挖造成的應力變化程度、以及支撐勁度大小與支撐時機等因素皆會影響其變形量，直到開挖面遠離監測斷面位置約 2~3 倍開挖直徑後，開挖移除大地材料引致的應力—應變調整對於監測斷面的影響將越來越

小，隧道開挖面逐漸遠離後所產生的變形，主要由大地材料之依時行為所致。因此隧道周圍的應力分佈，自開挖初期隨施工高度變化的狀態，逐漸調整為二維平面應變狀態。

圖 4.3-1 為木柵隧道某擠壓變形斷面頂拱沉陷的量測結果，上半斷面開挖後六個月進行台階及仰拱降挖，頂拱沉陷量迅速增加，仰拱閉合後變形量仍無法抑止，經採用灌漿岩栓補強、基腳混凝土澆置與預力鋼腱補強等措施，雖有效緩與隧道淨空變形，但仍持續發生長達 26 個月之久，至隧道修挖前累計達 1.29 m(鄭富書等，1996)；透過案例可以瞭解，大地材料依時行為可能高度影響隧道收斂特性，且支撐補強、仰拱混凝土、基腳混凝土澆置等改變支撐勁度、隧道周圍應力分佈之措施，對於隧道周圍大地材料依時變形行為具有明顯的抑制效果。



圖 4.3-1 木柵隧道某斷面頂拱沉陷歷時曲線

考慮大地材料依時變形參數隨應力狀態而變化，依時變形與隧道周圍應力狀態相互影響，隧道開挖後周圍應力狀態存在依時變化的現象。圓形與橢圓形隧道應力集中現象不明顯，開挖後體積應力明顯大於馬蹄形隧道，圓形、橢圓形與馬蹄形隧道的依時變形特性存在明顯的差異：前二者因體積應力較大，軸差應力較小，依時變形已趨近於零；後者則因體積應力與軸差應力的組合使得依時變形持續發生。而若僅考慮開挖後一次支撐，則圓形與橢圓形隧道支撐軸力將隨時間而緩慢增加，支撐應力亦緩慢上升；而馬蹄形隧道卻因變形過大，支撐軸力下降，支撐應力則因彎矩增加而增加。

4.4 隧道受震反應之初步探討

4.4.1 入射 P 波、S 波所引致之隧道變形

隧道遭受震波作用時，將可能發生縱向變形、斷面壓縮變形、軸向彎矩變形與 Ranking 變形。縱向變形主要是由沿隧道縱軸之 P 波所引致，如圖 4.4-1(a)。若 P 波入射方向與隧道長軸形成正交，即 P 波沿隧道斷面環向前進時，將造成隧道斷面的壓縮變形，如圖 4.4-1(b)。軸向彎矩變形主要由沿隧道縱軸之 S 波及瑞利波所造成，如圖 4.4-1(c)(d)。當 S 波沿圓形斷面隧道環向前進時，則可能產生橢圓狀變形(Ovaling)，如圖 4.4-1(e)；若是箱型斷面之隧道，則產生 Ranking(角度之變形，如圖 4.4-1(f))。

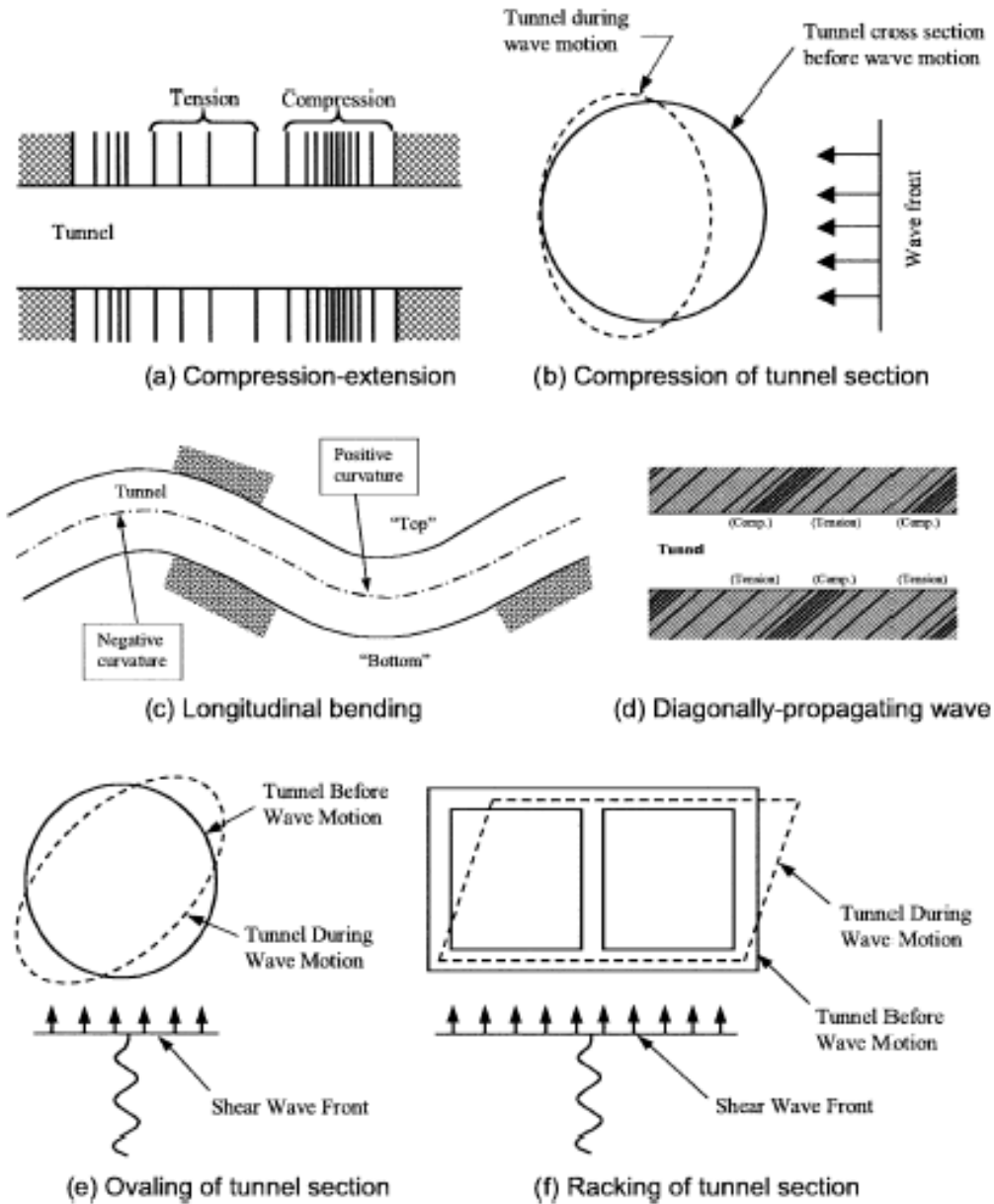


圖 4.4-1 震波作用下之隧道變形行為(Owen and School,1981)

4.4.2 隧道襯砌及地盤之相對勁度

當震波波長遠比隧道直徑為大時，對於無襯砌隧道而言，動態應力將較靜態應力大約 15 %，但地下結構物之動態應力集中情況，應與結構體襯砌及地盤之相對勁度有關。Nemark 與 Hendron 提出結構撓度比 J (Structural flexibility ratio) 的觀念(如式 4.4-1)作為判斷地下結構體是否為撓性體之依據:

$$J = \frac{Er / (1 + \nu_r)}{[6E_l I_l / R \nu_l^2] (1 / R^3)} \quad (\text{式 4.4-1})$$

以隧道為例，式 4.4-1 的 E_r 及 E_l 分為地盤及襯砌之楊氏模數， ν_r 及 ν_l 分別為地盤及襯砌之柏松比， I_l 為襯砌慣性矩(moment of inertia)， R 為隧道半徑。當 J 大於 10 時，則視隧道為一撓性體，即外力作用下，隧道與地盤一起變形。

4.4.3 地震對不同隧道深度的影響

一般地震的震源較隧道位置為深，且地震波在傳遞過程中，受到不同岩盤及地層界面與地表面多次反射及折射作用，愈靠近地表，其一般地盤性質愈弱，波速傳遞越慢。若根據折射原理，地震波之傳遞方向將逐步接近垂直。地震發生時，P波先到達，接著為S波，P波與S波之波速可參考式 4.4-2 與式 4.4-3：

縱波(P-wave)波速：

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (\text{式 4.4-2})$$

剪力波(S-wave)波速：

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{式 4.4-3})$$

其中E為彈性模數，G為剪力模數， ρ 為密度， ν 為柏松比。

地震波之波長大小往往與波傳過程中所經過地盤性質有關，越堅硬之地盤，波傳速度較快，其地震波長亦較長，例如堅硬岩盤具有相對大之彈性模數，地震波剪力波速在岩盤一般大於1000(m/s)，故其對應之波長一般有百米以上，遠超過地下隧道斷面尺寸；而隧道與周遭岩盤隨著地震波一起擺動，因此一般而言，地震波對深層隧道結構影響不大。反之，當地震波傳到靠近地表之土層，地震波速變慢，波長亦跟著變得較短，易使得隧道襯砌產生損害，故一般地震對深層隧道影響較小，而對淺層隧道而言，尤其是偏壓隧道及洞口段的影響較大。

4.4.4 地質弱帶的影響

地震發生時，隧道受地震之影響或位移程度雖不似地表結構顯著，唯地震波仍透過地盤介質進行波傳，於受地震波而擺動後，經由弱帶(如斷層破碎帶)產生位移放大與相差位移。

4.4.5 地震引致之應力與彎矩之複合應力

地震作用期間，地下結構體受震方向包括水平向及垂直向，且整體結構於短時間內來回往返多次受力而擺動變形，襯砌因擺動變形所產生之應力與彎矩，其複合受力機制對隧道產生不同之影響，若此複合應力超出襯砌之極限強度，則會使混凝土產生剝落、錯動、龜裂及滲漏水等異狀。

在地震剪力波作用下，岩盤剪力變形可能造成隧道與岩盤變位無法完全一致，此造成隧道襯砌受力增大。

4.5 代表性試驗室力學特性試驗

根據日本土木學會隧道工學委員會於1996年出版之「隧道標準示方書 山岳工法・同解說」，可知山岳隧道主要室內室驗項目與方法，如表 4.5。而力學特

性試驗部分有點載重、單軸壓縮試驗、巴西式試驗以及三軸壓縮試驗等方法。

表 4.5 主要室內試驗項目與方法(日本土木學會,1996)

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

○：經常施行者 △：有時施行者

計畫根據日本土木學會之室內試驗項目與方法，針對潛在場址類似工程特性岩心進行鑽心取樣，並於實驗室採用規則圓柱岩心試體或不規則岩塊，利用試驗機，使其破壞而求其強度參數。另考慮到隧道依時變形，而加入消散耐久試驗。試驗之目的及方法分述如下：

點載重試驗：測定岩石材料之點載重指數(Is)。試驗時以點載重試驗儀之兩圓錐夾破規則或不規則形狀之岩石樣本，以求點載重指數(Is)。

$$I_s = P / D^2$$

單軸壓縮試驗：求取完整岩心之單壓強度，以作為岩心強度分析及各項岩力分析、設計與施工之依據。試驗時將岩心置於試驗機上，加壓並記錄荷重數，直到試驗破壞。試驗結果與試體的含水量、材料的異向性及採用之試驗步驟有關。

巴西式試驗：以適當的長徑比之岩心，橫放在特製岩心夾內，再以試驗機加壓直到試體張裂破壞，以求取間接抗張強度，假設岩心為均質均厚的線彈性材料，岩心間接張力適度計算公式如下： $\sigma_t = 2P/\pi DT$ 其中 P 為破壞荷重，D 為試體直徑，T 為厚度。

三軸壓縮試驗：求取試體在三軸受壓狀況下之剪力強度參數(C 及 ϕ)，供基礎承載分析之用。試驗結果與試體的岩石種類、含水比、加壓軸與不連續面角

度，以及加壓速率有關。

消散耐久試驗：測定岩石材料的消散耐久性指數，藉以了解岩石於標準乾、濕循環下，所能提供對於軟化與解體之抗力及岩石的膠結狀況。

消散指數 1(Id1) 第一個循環後，剩餘乾重百分比

消散指數 2(Id2) 第二個循環後，剩餘乾重百分比

消散指數 3(Id3) 第三個循環後，剩餘乾重百分比

第五章 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

本章將蒐集彙整國內外天然障壁之地工特性、隧道支撐材料之力學特性等相關研究或案例，並據以比較天然障壁地工特性、隧道支撐材料力學特性以及我國天然障壁特有的自然條件等因素(如地震)對於坑道穩定可能的影響，以供未來處置設施設計以及管制技術研究發展之參考。

5.1 國內外天然障壁地工特性差異之探討

5.1.1 國外天然障壁之地工特性

由於國外之地質年代較久遠，故其天然障壁(地質障壁)之地工特性(強度、變形與滲透性)異於我國之天然障壁。參考美國柏克萊大學土木系 R. E. Goodman 教授蒐集各國岩石力學相關試驗成果所撰寫之書籍“Introduction to Rock Mechanics”(Second Edition)得知，各國岩石(Intact Rock)或岩體(Rock Mass)之孔隙率(Porosity)大約介於 0~43% 之間(表 5.1-1)，水力傳導係數(Hydraulic Conductivity)大約介於 1×10^{-3} ~ 1×10^{-11} 之間(表 5.1-2)，單壓強度(Unconfined Compressive Strength)大約介於 11.3~355 MPa 之間(表 5.1-3)；而代表性之剪力強度參數則如表 5.1-4 所示，凝聚力(Cohesion)大約介於 0~70.6 MPa 之間，摩擦角(Friction Angle)大約介於 7.5° ~ 48° 之間(Goodman, 1989)。

而德國為研究放射性廢棄物永久處置場址之水力傳導特性，於北部地區施作一試驗場址(圖 5.1-1)，根據其研究成果顯示，當地各岩層之水力傳導係數(或稱滲透係數)僅介於 1×10^{-3} ~ 1×10^{-11} 之間(表 5.1-5)，十分適合作為放射性廢棄物之永久處置場。

表 5.1-1 各種岩性之孔隙率(Goodman, 1989)

Rock	Age	Depth	Porosity (%)
Mount Simon sandstone	Cambrian	13,000 ft	0.7
Nugget sandstone (Utah)	Jurassic		1.9
Potsdam sandstone	Cambrian	Surface	11.0
Pottsville sandstone	Pennsylvanian		2.9
Berea sandstone	Mississippian	0–2000 ft	14.0
Keuper sandstone (England)	Triassic	Surface	22.0
Navajo sandstone	Jurassic	Surface	15.5
Sandstone, Montana	Cretaceous	Surface	34.0
Beekmantown dolomite	Ordovician	10,500 ft	0.4
Black River limestone	Ordovician	Surface	0.46
Niagara dolomite	Silurian	Surface	2.9
Limestone, Great Britain	Carboniferous	Surface	5.7
Chalk, Great Britain	Cretaceous	Surface	28.8
Solenhofen limestone		Surface	4.8
Salem limestone	Mississippian	Surface	13.2
Bedford limestone	Mississippian	Surface	12.0
Bermuda limestone	Recent	Surface	43.0
Shale	Pre-Cambrian	Surface	1.6
Shale, Oklahoma	Pennsylvanian	1000 ft	17.0
Shale, Oklahoma	Pennsylvanian	3000 ft	7.0
Shale, Oklahoma	Pennsylvanian	5000 ft	4.0
Shale	Cretaceous	600 ft	33.5
Shale	Cretaceous	2500 ft	25.4
Shale	Cretaceous	3500 ft	21.1
Shale	Cretaceous	6100 ft	7.6
Mudstone, Japan	Upper Tertiary	Near surface	22–32
Granite, fresh		Surface	0 to 1
Granite, weathered			1–5
Decomposed granite (Saprophyte)			20.0
Marble			0.3
Marble			1.1
Bedded tuff			40.0
Welded tuff			14.0
Cedar City tonalite			7.0
Frederick diabase			0.1
San Marcos gabbro			0.2

^a Data selected from Clark (1966) and Brace and Riley (1972).

表 5.1-2 各種岩性之水力傳導係數(Goodman, 1989)

Rock	k (cm/s) for Rock with Water (20°C) as Permeant	
	Lab	Field
Sandstone	3×10^{-3} to 8×10^{-8}	1×10^{-3} to 3×10^{-8}
Navajo sandstone	2×10^{-3}	
Berea sandstone	4×10^{-5}	
Greywacke	3.2×10^{-8}	
Shale	10^{-9} to 5×10^{-13}	10^{-8} to 10^{-11}
Pierre shale	5×10^{-12}	2×10^{-9} to 5×10^{-11}
Limestone, dolomite	10^{-5} to 10^{-13}	10^{-3} to 10^{-7}
Salem limestone	2×10^{-6}	
Basalt	10^{-12}	10^{-2} to 10^{-7}
Granite	10^{-7} to 10^{-11}	10^{-4} to 10^{-9}
Schist	10^{-8}	2×10^{-7}
Fissured schist	1×10^{-4} to 3×10^{-4}	

^a Data from Brace (1978), Davis and De Wiest (1966), and Serafim (1968).

表 5.1-3 各種岩性之單壓強度(Goodman, 1989)

Description ^a	q_u		q_u/T_0^b	Reference ^c
	MPa	psi		
Berea sandstone	73.8	10,700	63.0	5
Navajo sandstone	214.0	31,030	26.3	5
Tensleep sandstone	72.4	10,500		1
Hackensack siltstone	122.7	17,800	41.5	5
Monticello Dam s.s. (greywacke)	79.3	11,500		4
Solenhofen limestone	245.0	35,500	61.3	5
Bedford limestone	51.0	7,400	32.3	5
Tavernalle limestone	97.9	14,200	25.0	5
Oneota dolomite	86.9	12,600	19.7	5
Lockport dolomite	90.3	13,100	29.8	5
Flaming Gorge shale	35.2	5,100	167.6	3
Micaceous shale	75.2	10,900	36.3	2
Dworshak Dam gneiss				
45° to foliation	162.0	23,500	23.5	5
Quartz mica schist \perp schistosity	55.2	8,000	100.4	5
Baraboo quartzite	320.0	46,400	29.1	5
Taconic marble	62.0	8,990	53.0	5
Cherokee marble	66.9	9,700	37.4	5
Nevada Test Site granite	141.1	20,500	12.1	7
Pikes Peak granite	226.0	32,800	19.0	5
Cedar City tonalite	101.5	14,700	15.9	6
Palisades diabase	241.0	34,950	21.1	5
Nevada Test Site basalt	148.0	21,500	11.3	7
John Day basalt	355.0	51,500	24.5	5
Nevada Test Site tuff	11.3	1,650	10.0	7

表 5.1-4 各種岩性之剪力強度參數(Goodman, 1989)

Description	Porosity (%)	S_i (MPa)	ϕ	Range of Confining Pressure (MPa)	Reference ^b
Berea sandstone	18.2	27.2	27.8	0–200	4
Bartlesville sandstone		8.0	37.2	0–203	3
Pottsville sandstone	14.0	14.9	45.2	0–68.9	8
Repetto siltstone	5.6	34.7	32.1	0–200	4
Muddy shale	4.7	38.4	14.4	0–200	4
Stockton shale		0.34	22.0	0.8–4.1	2
Edmonton bentonitic shale (water content 30%)	44.0	0.3	7.5	0.1–3.1	9
Sioux quartzite		70.6	48.0	0–203	3
Texas slate; loaded 30° to cleavage		26.2	21.0	34.5–276	6
90° to cleavage		70.3	26.9	34.5–276	6
Georgia marble	0.3	21.2	25.3	5.6–68.9	8
Wolf Camp limestone		23.6	34.8	0–203	3
Indiana limestone	19.4	6.72	42.0	0–9.6	8
Hasmark dolomite	3.5	22.8	35.5	0.8–5.9	4
Chalk	40.0	0	31.5	10–90	1
Blaine anhydrite		43.4	29.4	0–203	3
Inada biotite granite	0.4	55.2	47.7	0.1–98	7
Stone Mountain granite	0.2	55.1	51.0	0–68.9	8
Nevada Test Site basalt	4.6	66.2	31.0	3.4–34.5	10
Schistose gneiss 90° to schistosity	0.5	46.9	28.0	0–69	2
30° to schistosity	1.9	14.8	27.6	0–69	2

^a Data from Kulhawy (1975) (Ref. 5).

- ^b 1. Dayre, M., Dessene, J. L., and Wack, B. (1970) *Proc. 2nd Congress of ISRM*, Belgrade, Vol. 1, pp. 373–381.
2. DeKlotz, E., Heck, W. J., and Neff, T. L. (1964) First Interim Report, *MRD Lab Report 64/493*, U. S. Army Corps of Engineers, Missouri River Division.
3. Handin, J. and Hager, R. V. (1957) *Bull. A.A.P.G.* **41**: 1–50.
4. Handin, J., Hager, R. V., Friedman, M., and Feather, J. N. (1963) *Bull. A.A.P.G.* **47**: 717–755.
5. Kulhawy, F. (1975) *Eng. Geol.* **9**: 327–350.
6. McLamore, R. T. (1966) Strength-deformation characteristics of anisotropic sedimentary rocks, Ph.D. Thesis, University of Texas, Austin.
7. Mogi, K. (1964) *Bull. Earthquake Res. Inst.*, Tokyo, Vol. 42, Part 3, pp. 491–514.
8. Schwartz, A. E. (1964) *Proc. 6th Symp. on Rock Mech.*, Rolla, Missouri, pp. 109–151.
9. Sinclair, S. R. and Brooker, E. W. (1967) *Proc. Geotech. Conf. on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks*, Oslo, Vol. 1, pp. 295–299.
10. Stowe, R. L. (1969) U. S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station. Vicksburg, *Misc. Paper C-69-1*.

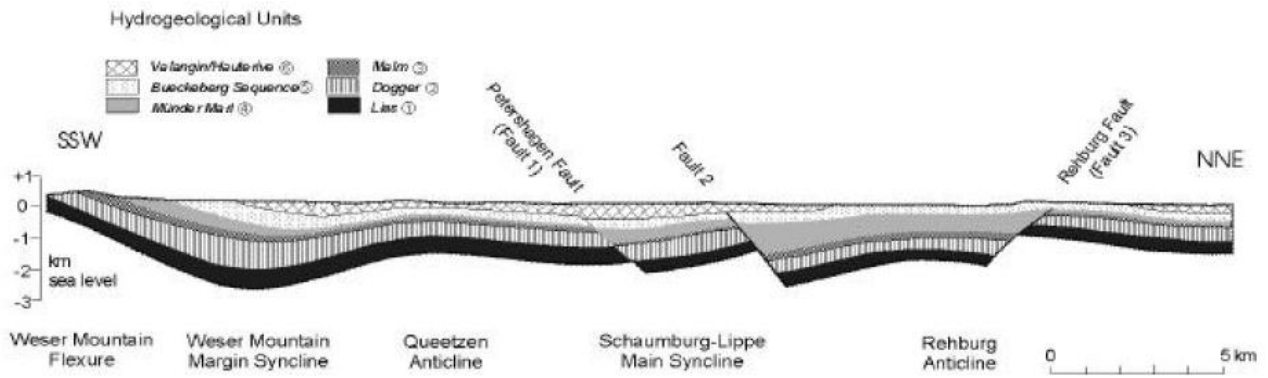


圖 5.1-1 試驗場址之地質剖面圖(Genty et al., 2002)

表 5.1-5 試驗場址各岩層之水力傳導係數(Genty et al., 2002)

Hydrogeological Unit	Hydraulic conductivity K [m/s].
6 Lower cretaceous (Valangin/Hauterive)	1E-10
5 Bückeberg Sequence (Wealden)	1E-8
4 Münden Marl (Upper Tithon)	1E-10
3 Malm (Upper Jurassic)	1E-7
2 Dogger (Middle Jurassic)	1E-8
1 Lias (Lower Jurassic)	1E-10
Faults	1E-10

5.1.2 國內天然障壁之地工特性

國內之施國欽與李彪(1994)蒐集彙整並統計台灣地區沉積岩與變質岩之單壓強度，其中沉積岩之單壓強度大約介於 0.76~39.92 MPa 之間(表 5.1-6)；而變質岩之單壓強度大約介於 3.32~174.44 MPa 之間(表 5.1-7)。

而徐智宏等人(1994)則蒐集彙整並統計台灣地區沉積岩之靜彈性模數(或稱變形模數)，其值大約介於 249.9~30141.5 MPa 之間(表 5.1-8)。

表 5.1-6 台灣地區沉積岩單壓強度統計表(施國欽&李彪，1994)

地質時代	地層	岩性	取樣地區*	組數	qu(kg/cm ²)					
					最大值	最小值	平均值(A)	A+σ	A-σ	標準差(σ)
上新世 更新世	隆起珊瑚礁	石灰岩	46	3	126.62	68.76	98.11	121.74	74.48	23.63
	楊梅層	砂岩	23,42,45	25/28	196.87	1.18	33.67	80.05	0	46.38
	楊梅層	泥岩	29,45	10/11	110.00	1.39	27.63	57.51	0	29.88
	頭料山層	砂岩	5,9,23,34	92	154.73	2.92	30.59	60.56	0.63	29.96
	頭料山層	頁岩	23,37	4	61.22	7.09	39.05	62.23	15.87	23.18
	頭料山層	泥岩	23,37	7/9	54.62	2.12	26.41	45.09	7.74	18.68
	頭料山層	砂頁互層	37	2	14.71	5.56	10.14	14.71	5.56	4.58
	頭料山層	砂頁夾層	37	1	-	-	44.07	-	-	-
	二重溪層	頁岩	30	3	157.16	69.76	100.98	140.79	61.17	39.81
	二重溪層	泥岩	30	13	11.77	4.71	7.72	9.89	5.56	2.17
上新世	卓蘭層	砂岩	12,23,27,35,37,44	112	209.93	0.83	36.54	78.90	0	42.36
	卓蘭層	頁岩	19,44	12/13	275.44	1.83	65.12	147.24	0	82.12
	卓蘭層	泥岩	14,23,27,37	24	44.94	2.42	14.69	26.14	3.24	11.45
	卓蘭層	砂頁互層	37	3	21.97	2.81	13.26	21.17	5.34	7.92
	卓蘭層	砂頁夾層	37	8	22.79	2.70	13.07	20.81	5.33	7.74

地質時代	地層	岩性	取樣地區*	組數	qu(kg/cm ²)					
					最大值	最小值	平均值(A)	A+σ	A-σ	標準差(σ)
中新世晚期	桂竹林層	砂岩	7,10,23,43	17	339.43	3.33	102.02	186.78	17.26	84.76
	桂竹林層	頁岩	7,23	2	198.41	88.27	143.34	198.41	88.27	55.07
	南勢坑層	砂岩	28	16	354.00	44.02	194.19	278.11	110.27	83.92
	南莊層	砂岩	22	13	820.16	66.61	407.37	635.74	179.00	228.37
	南莊層	頁岩	22	1	-	-	182.70	-	-	-
中新世中期	南港層	砂岩	4	5	231.52	6.49	107.72	181.95	33.49	74.23
	南港層	砂岩	11	26	206.88	18.00	66.61	116.63	16.59	50.02
	南港層	砂岩	13	2	116.67	47.23	81.95	116.67	47.23	34.72
	南港層	砂岩	20	58	167.53	17.55	94.51	127.63	61.40	33.11
	南港層	砂岩	22	29	327.38	5.02	72.59	158.40	0	85.81
	南港層	砂岩	36	15	323.68	12.89	120.41	208.90	31.91	88.49
	南港層	砂岩	38	85	755.00	17.00	322.39	479.80	164.97	157.41
	南港層	砂岩	33	3	119.27	25.71	83.53	124.80	42.27	41.27
	南港層	頁岩	22,36,38	8	31.00	13.72	23.06	28.88	17.24	5.82
	南港層	砂頁夾層	22,36,38	4	21.06	8.83	15.07	19.74	10.40	4.67
	石底層	砂岩	8,13,31,32	21	226.96	10.94	88.75	146.27	31.24	57.52
	石底層	頁岩	13	1	-	-	57.59	-	-	-
	石底層	砂頁互層	13,31,39	6	161.84	11.19	61.62	115.63	7.61	54.01

地質時代	地層	岩性	取樣地區*	組數	qu(kg/cm ²)					
					最大值	最小值	平均值(A)	A+σ	A-σ	標準差(σ)
中新世晚期	大寮層	砂岩	17,23,24,26,41	44	735.71	14.56	275.44	458.55	92.34	183.10
	大寮層	頁岩	3,8,24	10	391.09	15.00	127.79	249.29	0	121.50
	大寮層	砂頁互層	15	1	-	-	209.60	-	-	-
	大寮層	砂頁夾層	6	1	-	-	557.63	-	-	-
	木山層	砂岩	16,18,21,40	21	761.07	101.44	269.80	428.08	111.52	158.28
	木山層	頁岩	40	11	284.91	52.65	163.35	234.44	92.26	71.09
	木山層	砂頁互層	40	6	416.00	66.13	228.42	364.79	92.05	136.37
	五指山層	砂岩	38,40	80	755.00	55.00	29.62	436.31	148.93	143.69
	五指山層	頁岩	38	1	-	-	227.00	-	-	-

*註：取樣地區編號

- | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|----------|-------|-------|-----------|--------|
| 1 八斗子 | 2 八堵 | 3 士林 | 4 大安 | 5 大里 | 6 大武壠 | 7 大埔 | 8 中和 |
| 9 中南二高 | 10 中壢 | 11 內湖 | 12 斗六 | 13 木柵 | 14 王田 | 15 台北市 | 16 外雙溪 |
| 17 正濱 | 18 石門 | 19 名間 | 20 南港 | 21 安康 | 22 汐止 | 23 板橋~後龍溪 | |
| 24 松山 | 25 金山 | 26 信義 | 27 南投~彰化 | 28 美濃 | 29 桃園 | 30 烏山頭 | |
| 31 基隆 | 32 深坑 | 33 深澳 | 34 通霄 | 35 造橋 | 36 景美 | 37 新竹~通霄 | |
| 38 新店 | 39 瑞芳 | 40 萬里 | 41 萬華 | 42 龍潭 | 43 礁溪 | 44 霧峰 | 45 寶山 |
| 46 蘭嶼 | | | | | | | |

表 5.1-7 台灣地區變質岩單壓強度統計表(施國欽&李彪，1994)

地質時代	地層	岩性	取樣地區	組數	qu(kg/cm ²)					
					最大值	最小值	平均值(A)	A+σ	A-σ	標準差(σ)
中新世	廬山層	硬頁岩	枋山~太麻里	31	757	105	335.35	538	133	202.7
	廬山層	變質砂岩	枋山~太麻里	14	2606	337	1142.36	1954	331	811.4
	廬山層	板岩	宜蘭蘇澳	2	146	56	100.96	146	56.2	44.8
漸新世	澳底層	變質砂岩	坪林~頭城	7	851	277	432.71	618	247	185.4
	澳底層	砂岩夾板岩	坪林~頭城	6	669	276	388.33	528	249	139.2
	澳底層	板岩	坪林~頭城	19	648	193	449.84	567	332	117.6
漸新世	大桶山層	變質砂岩	坪林~頭城	10	2250	544	1453.40	2013	894	559.5
	大桶山層	砂岩夾板岩	坪林~頭城	14	795	306	518.79	673	364	154.7
	大桶山層	板岩	坪林~頭城	22	1749	212	625.00	980	270	355.0
	乾溝層	硬頁岩	台中縣	9	654	202	419.49	546	293	126.3
	乾溝層	硬頁岩	宜蘭礁溪	2	484	360	422.26	484	360	61.8
	乾溝層	變質砂岩	台中縣	3	794	232	530.25	761	300	230.7
	乾溝層	砂岩夾板岩	坪林~頭城	1	1170	1170	1170.00	1170	1170	0.0
	乾溝層	板岩	坪林~頭城	18	823	74	345.28	560	130	215.1
	四稜砂岩	硬頁岩	台中霧社	4	334	63	177.75	284	71.7	106.1
	四稜砂岩	變質砂岩	台中谷關	3	1582	359	843.00	1374	312	530.8
	四稜砂岩	變質砂岩	台中霧社	2	2170	1391	1780.07	2170	1391	389.5
四稜砂岩	石英岩	坪林~頭城	10	1685	876	1342.10	1642	1042	300.1	

地質時代	地層	岩性	取樣地區	組數	qu(kg/cm ²)					
					最大值	最小值	平均值(A)	A+σ	A-σ	標準差(σ)
漸新世	白冷層	硬頁岩	台中新天輪	16	624	118	321.89	481	163	159.4
	白冷層	石英砂岩	南投北山坑	12	1955	308	1215.25	1761	669	545.9
	白冷層	石英岩	台中新天輪	47	2199	266	1408.12	1908	909	499.6
	白冷層	砂岩夾硬頁岩	台中新天輪	5	710	110	330.17	549	112	218.4
先第三紀	大南澳片岩	角閃岩	宜蘭蘇澳	3	475	280	381.67	461	302	79.8
	大南澳片岩	角礫岩	崇德~和平	3	369	176	297.69	384	211	86.3
	大南澳片岩	片麻岩	花蓮和平	1	940	940	940.05	940	940	0.0
	大南澳片岩	片麻岩	崇德~和平	30	1012	214	583.39	797	370	213.8
	大南澳片岩	片麻岩	宜蘭觀音	4	522	219	392.50	502	283	109.5
	大南澳片岩	大理岩	花蓮天祥	33	1152	236	541.51	747	336	205.2
	大南澳片岩	大理岩	花蓮和平	16	911	322	674.34	811	538	136.4
	大南澳片岩	大理岩	崇德~和平	34	998	519	720.72	839	602	118.6
	大南澳片岩	大理岩	宜蘭觀音	1	259	259	259.00	259	259	0.0
	大南澳片岩	變質燧石	宜蘭觀音	8	915	389	638.25	818	459	179.5
	大南澳片岩	變質砂岩	花蓮和平	4	511	333	405.88	472	340	65.9
	大南澳片岩	變質砂岩	宜蘭觀音	12	1899	357	905.17	1312	498	406.9
	大南澳片岩	黑色片岩	花蓮和平	2	49	19	33.85	49	18.7	15.2
大南澳片岩	綠色片岩	花蓮和平	10	455	32	176.93	335	18.6	158.3	

地質時代	地層	岩性	取樣地區	組數	qu(kg/cm ²)					
					最大值	最小值	平均值(A)	A+σ	A-σ	標準差(σ)
先第三紀	大南澳片岩	綠色片岩	崇德~和平	5	1074	636	922.72	1074	771	151.4
	大南澳片岩	綠色片岩	宜蘭觀音	7	814	192	443.57	647	240	203.8
	大南澳片岩	石英雲母片岩	宜蘭蘇澳	9	497	94	316.85	436	198	119.2
	大南澳片岩	石英雲母片岩	花蓮和平	2	320	281	300.34	320	281	19.5
	大南澳片岩	石英雲母片岩	宜蘭觀音	3	567	115	311.33	501	122	189.2

表 5.1-8 台灣地區沉積岩靜彈性模數統計表(徐智宏等人, 1994)

地質年代	地層	取樣地區	岩性	組數	切線變形模數 (kg/cm ³)					
					極大值	極小值	平均值(A)	標準差(σ)	A+σ	A-σ
上新世	楊梅層	新竹寶山	泥岩	1	—	—	5245.00	—	—	—
	楊梅層	新竹寶山	砂岩	4	8930	5754	7457.50	1137.72	8595.22	6319.78
	頭料山層	板橋~後龍溪	泥岩	1	—	—	4260.00	—	—	—
	頭料山層	板橋~後龍溪	砂岩	2	4000	3600	3800.00	200.00	4000.00	3600.00
上新世	卓蘭層	板橋~後龍溪	泥岩	2	2800	2300	2550.00	250.00	2800.00	2300.00
	卓蘭層	雲林斗六	砂岩	3	4696	3877	4166.00	375.28	4541.28	3790.72
中新世晚期	南勢坑層	高雄美濃	砂岩	8	35096	9567	22655.13	8517.15	31172.27	14137.98
中新世中期	南港層	台北木柵	頁岩	1	—	—	5600.00	—	—	—
	南港層	台北內湖、景美	砂岩	22	15300	2975	7804.91	3577.70	11382.61	4227.21
中新世早期	大寮層	台北	頁岩	5	46180	1413	22286.60	17541.31	39827.91	4745.29
	大寮層	台北、基隆八堵	砂岩	9	50323	8170	30437.11	11734.20	42171.31	18702.92
	大寮層	台北	砂頁互層	7	47670	32773	41386.14	5202.05	46588.19	36184.10
	木山層	台北萬里、野柳	頁岩	2	18000	13390	15695.00	2305.00	18000.00	13390.00
	木山層	台北萬里、野柳	砂岩	9	70000	15780	36920.78	18456.36	55377.13	18464.42
	木山層	野柳	砂頁互層	4	53328	37015	44389.00	5837.25	50226.25	38551.75
	澳底層枋寮段	坪林~頭城	砂岩	3	196900	71900	115400.00	57672.93	173072.93	57727.07
漸新世	大桶山層	坪林~頭城	砂岩	6	497500	122600	307566.67	123327.92	430894.59	184238.75
	乾溝層	坪林	頁岩	3	105400	8900	64966.67	40917.51	105884.17	24049.16
	乾溝層	坪林~頭城	砂岩	20	579600	5800	59135.00	120829.07	179964.07	-61694.07
	乾溝層	坪林	砂頁互層	6	68000	10600	36833.33	20588.97	57422.30	16244.37

5.2 隧道支撐材料力學特性差異之探討

5.2.1 隧道設計參數評估

如前所述，由於國外之地質年代較久遠，其天然障壁(地質障壁)之岩體強度較為堅硬、節理較不發達，故許多國外之隧道(如：芬蘭之沿海線鐵路隧道，圖 5.2-1)或地下坑室(如：芬蘭的 Orimattila 岩石坑室，圖 5.2-2；Olkiluoto 低放永久處置場，圖 5.2-3；建設中之 ONKALO 高放永久處置場，圖 5.2-4)，開挖後即使不施作任何外支撐或內襯砌，依然自立良好，甚至能清楚窺見當時開炸作業所遺留下來周邊孔之痕跡，足見其岩體之堅硬程度。

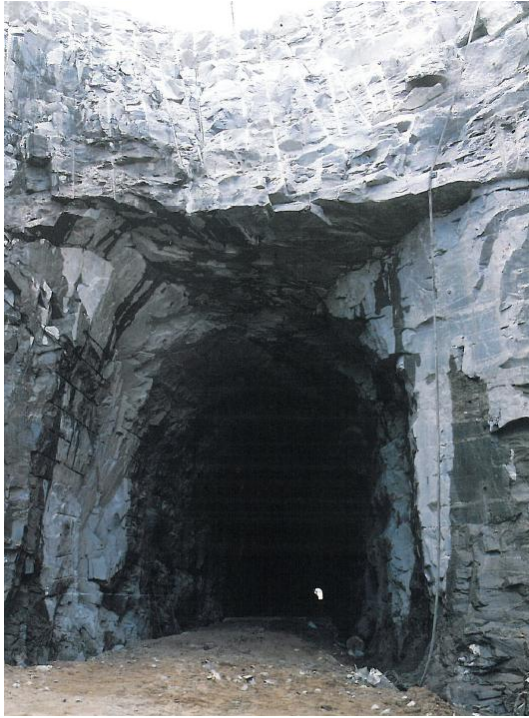


圖 5.2-1 芬蘭沿海線鐵路隧道



圖 5.2-2 芬蘭 Orimattila 岩石坑室



圖 5.2-3 芬蘭 Olkiluoto 低放永久處置場



圖 5.2-4 芬蘭建設中之 ONKALO 高放永久處置場

此外，一些歐美地區由於其岩體節理並不發達，少量節理所形成之關鍵岩塊 (key block) 反而為其隧道或地下坑室開挖支撐之重點；不若亞洲地區之岩體較為破碎，大多打設系統性支撐構件以利拱效應之成形與抑制隧道或地下坑室圍岩之變形，如擠壓 (squeezing) 現象。因此，其開挖支撐順序有時會調整為：開炸後，先進行關鍵岩塊之岩栓打設，再施噴噴凝土，必要時再打設系統性岩栓以懸吊鋼線網 (如：瑞士 Gotthard Base 鐵路隧道，圖 5.2-5)，避免高應力區之岩塊剝落 (spalling) 或岩爆 (rock burst) 現象。另部分岩體較佳區段，甚至於隧道或地下坑室開挖後只於頂拱施做噴凝土保護，側壁與仰拱均無任何外支撐構件 (如：芬蘭 Olkiluoto 低放永久處置場，圖 5.2-6)。

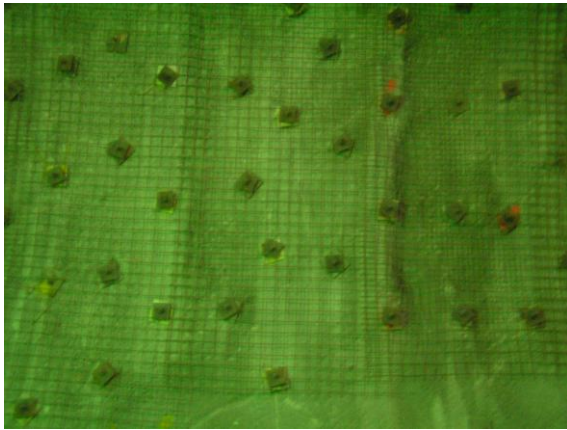


圖 5.2-5 瑞士 Gotthard Base 鐵路隧道



圖 5.2-6 芬蘭 Olkiluoto 低放永久處置場之通達坑道

隧道工程自 1970 年代新奧工法(New Austrian Tunneling Method, NATM)與理念流傳以來，逐漸自傳統採用鋼性支撐支持鬆動岩壓的思維，轉變為採用半鋼性至柔性的支撐系統恢復岩體的 3D 應力狀態，透過輕量化的人為支撐結合隧道圍岩，形成地拱穩定隧道的現代化觀念。除了隧道工法與理念的進步外，隧道工程支撐系統的推陳出新亦相當快速，包括新奧工法發展初期主要應用的支撐構件如噴凝土、鋼線網、型鋼支保以及灌漿岩栓等，皆出現了新式的高性能輕量化產品，如纖維噴凝土、桁架式支保、碟式岩栓、承載式岩栓以及膨脹式岩栓等。這些支撐構件以及其所組成的支撐系統，無論於國內或國外，大多數已有成功應用的案例。

5.2.2 內襯砌

隧道(坑道)內襯砌之功能與設計是可以隨隧道之安全性、功能需求、經濟性或其他特殊要求而改變的。許多隧道設計傾向採用混凝土二次襯砌提供安全需求，尤其對重要性高的隧道，此常由於設計者對一次支撐材料長期強度的可靠性缺乏信心，事實上一次支撐的施工環境常不易控制，隧道一次支撐構件強度的變異性應大於在非隧道施工的相同構件，而混凝土二次襯砌強度的變異性則遠小於隧道一次支撐強度的變異性，所以對安全性要求較高的隧道，採用混凝土二次襯砌來減低因一次支撐強度變異性導致的失效；此外由於一次支撐材料的破壞模式多較鋼筋混凝土二次襯砌較脆性，故鋼筋混凝土二次襯砌可能改變隧道破壞模式，可提供較有預警且延展性較長的破壞，此亦為工程設計中的重要考量，一般除非在確定失敗機率極低下，否則一般土木建築結構設計多要求破壞模式不可為脆性破壞，混凝土二次襯砌不僅可為提供安全餘額的方法之一，也可改善隧道的破壞模式，此兩者皆為隧道二次襯砌的穩定功能(國工局，2000)。

本研究參考各方文獻，綜合列出對內襯砌功能較具代表性之看法及建議之設計對策如表 5.2-1。綜合表中資料可明顯的看出，對於內襯砌設計上差異主要歸因於對其功能看法上的不同。大體而言，對於內襯砌之功能可分為兩類：第一類是認為內襯砌沒有穩定上的作用，例如 Geoconsult Consulting Engineer、Stephen J. K-Lein 等人及北歐之設計等，這些設計之二次襯砌主要目的不在於穩定隧道，而在於隧道之防水、隔溫、美觀、修飾及配合內部設施之安裝等服務性功能；另一類則認為內襯砌為支撐的一部份，有助於隧道長期穩定之功用，例如：日本隧道技術協會、美國工兵團、德國高鐵等，其荷重來源有：(1)岩石及一次支撐的

潛變；(2)一次支撐受腐蝕或其他原因造成材料的劣化；(3)地下水壓、外荷重等外力的變化及自重；(4)地質條件惡劣、不均勻、偏壓、膨脹性土壓、斷層等因素；(5)施工品質之不穩定；(6)減少裂縫；(7)不確定因素；(8)為控制變形。

其中德國高鐵更明確指出，其設計與施工須保證一次支撐受地下水長期影響而崩解時，仍能承受所有的應力及荷重，此點亦充分說明，對於一次支撐構件之耐久性看法其實是相當分歧的。但在上述相同具有穩定功能之二次襯砌設計案例中，在受力假設上則相當分歧，日本隧道技術協會及德國高鐵均假設二次襯砌之載重以一次支撐相同之載重設計；美國工兵團建議以一次支撐設計載重之25%~75%分配；另案例中對於混凝土二次襯砌中是否添加鋼筋亦呈現相當分歧之現象，日本道路公團建議二次襯砌一般採用無筋混凝土，Geoconsult Consulting Engineer 建議不分岩體分類均採用無筋混凝土，德國高鐵則採用鋼筋混凝土，Stephen J. K-Lein 等人指出在美國有混凝土二次襯砌設計不受力，但仍需配筋之案例。從以上之資料顯示，二次襯砌之功能目的差異相當大，世界上並無一個較為統一之準則可供遵循。

表 5.2-2 為日本隧道技術協會針對歐洲著名 11 個隧道內襯砌設計之調查結果，其中除奧地利 Tanzenbery 隧道設計內襯砌為不具穩定功能，其他多數隧道均有穩定作用。但各隧道所採厚度十分分歧，在相當二車道斷面之隧道，設計厚度有從最小 25 公分到 50 公分不等，局部地質惡劣地段有採用 80 公分之設計。瑞士 Seelisbery Highway (Lot Huttegg) 隧道使用環片(Segment)支撐，並無二次襯砌；St. Gotthard 隧道全線除特殊路段（如洞口，地質惡劣之處等）外，大多僅有一層襯砌支撐。

有鑑於國內天然障壁(地質障壁)之地質材料具有依時變形之特性(詳第 4.3 節)，雖施工時均會要求內襯砌打設時其隧道(含外支撐)內淨空變形已達穩定(變形速率小於 3mm/月)，惟經本研究團隊長期調查及蒐集國內外隧道襯砌損害、異狀類型與影響因素之成果(詳第 4.1、4.2 節)顯示：由於國內天然障壁(地質障壁)之地質材料具有依時變形特性，故外支撐可考量採用具有延展性之設計理念與材料特性，且內襯砌設計仍需考量承受外支撐受力 25%~75%之荷重，並進行必要之配筋設計，以期使放射性廢棄物坑道暨處置場址達長期穩定。

表 5.2-1 各國隧道內襯砌之功能與設計對策(1/2)(國工局，2000)

資料來源	功能	設計對策
1. 社團法人日本隧道技術學會 [1]	<p>一、力學上的因素：</p> <p>1.二次襯砌主要在提高安全係數。一次支撐雖已使隧道變形穩定了，但由於噴凝土受應力大而發生裂縫，岩栓所受拉力亦大，一次支撐只提供了 SF=1.0。在此情況下，岩石和一次支撐因潛變所造成二次襯砌之受力有考慮的必要。</p> <p>2.在地質狀況十分惡劣的情況下，由於工期及隧道內容許變形量之限制之下，二次襯砌必須提前施工以穩定變形。</p> <p>二、非力學因素：</p> <p>一次支撐足以永久支持岩壓時，二次襯砌沒有穩定上的要求，其功能為：(1)防止漏水，(2)美觀，及(3)配合隧道內部設施安裝。</p>	<p>二次襯砌之設計仍以一次支撐所承受之荷重設計。</p> <p>二次襯砌在施工不久就受力，設計時必須考慮二次襯砌所承受之應力及因混凝土早期受力所導致之強度降低。</p>
2. 日本道路公園 [3]	<p>1.一般而言，一次支撐採噴凝土、岩栓及鋼支保等組合者，二次襯砌通常於地盤穩定後施工，因此不需考慮穩定上功能。</p> <p>2.對於地質條件特別惡劣、有顯著偏壓、膨脹性土壓、覆蓋層薄及考慮水壓的情況下，必須考慮穩定因素來決定二次襯砌斷面。</p> <p>3.對於變形無法收斂之情況下，必須於適當的時間以耐荷力較大之支撐來穩定變形。此時必須估計土壓，考慮增加二次襯砌厚度或以補強方法因應。</p>	<p>一般而言，二次襯砌採用場鑄無筋混凝土。</p> <p>補強方式如下：</p> <p>1. 以鋼筋補強。</p> <p>2. 以鋼纖維補強。</p>
3. RABCEWICZ, L And GOLSER, J [4]	<p>二次襯砌之設計厚度由所要求之安全係數及一次支撐大小而定。</p>	<p>定義安全係數如下：</p> $S = \frac{P_1^a + P_1^1}{P_1^a}$ <p>P_1^a：一次支撐之強度 P_1^1：二次襯砌之強度</p>
4. HOEK, E [5]	<p>一、地質軟弱之斷層帶二次襯砌必須承受相當的荷重。</p> <p>二、其他地質狀況隧道已完全由岩栓、噴凝土和鋼支保所支撐，二次襯砌只承受了很小的荷重。荷重的主要來源為二次襯砌的自重，小部份的水壓及因潛變導致之外力。二次襯砌只需採用極小之設計荷重。</p>	<p>荷重的估計可依據 Terzaghi's classification 所建議之載重或全部覆蓋層重之較小者。</p> <p>二次襯砌只需採用極小之設計荷重。二次襯砌難免因地質天然條件承受到偏心載重，產生裂縫，採用少量鋼筋可增加二次襯砌抵抗偏心載重的能力並減少裂縫。</p>

表 5.2-1 各國隧道內襯砌之功能與設計對策(2/2)(國工局, 2000)

資料來源	功能	設計對策
5. U.S. ARMYCO-RPS ENGINEER [6]	當初期支撐採用岩栓及噴凝土時，後期支撐(Final support)將承受較小的荷重。(未註明後期支撐施工之時間)	建議後期支撐(Final Support)採用0.25~0.75 之一次支撐設計載重。
6. JURGEN MOR-SCHER AND MANFRED BAU-DENDISTEL [7]	1.二次襯砌係依據周圍岩體性質、地下水的化學成分及流量的影響而設計。 2.其設計與施工須保證一次支撐受地下水長期影響而崩解時仍能承受所有的應力及荷重。	二次襯砌必須能承受與一次支撐相同之荷重。一般均採鋼筋混凝土，厚度最小為40公分。
7. GEOCONSULT CONSULTING ENGINEER [8]	二次襯砌主要在提供服務性功能(Functional Reason)及增加安全性，不在穩定上(Structural Reason)之考慮。	一般不分岩類採相同厚度之無筋混凝土。
8. STEPHEN J. K-LEIN RANDALL J. ESSEX and JOHN A. BISC-HOFF [16]	二次襯砌非設計來支撐岩壓，其目的在排水、美觀及維修等。岩石加勁系統(如岩栓、spiling、噴凝土等一次支撐)係設計用來維持隧道長期之穩定。	採用厚度30公分之鋼筋混凝土(隧道跨距大於12公尺)。
9. N.BARTON, E. GRIMSTAD, etc. [14] (挪威工法)	挪威工法一般以岩栓及鋼纖維噴凝土作為隧道之後期支撐(Final Support)，很少採用混凝土作為最後支撐。	一般採用薄板襯砌作為隧道內防水、隔溫、裝修等之設施。
10. BROCH, E. and SORHEIM, S. [10]	在高岩爆潛能之隧道採用岩栓及鋼纖噴凝土為初期支撐，後期支撐以岩栓補強，並為避免地下水滲出地面結冰造成行車危險，採用PE板防水。	後期支撐(Final Support)採用岩栓補強，並以PE板將水導至隧道兩側排出。
11 Z. T. Bieniawski [12] (RMR)	RMR 岩體評分系統建議之隧道支撐量為總支撐量(Final Support)，而不是初期支撐(Primary Support)。隧道設計不需要額外增加混凝土襯砌，提供穩定功能	隧道設計不需要額外增加混凝土襯砌，提供穩定功能。

表 5.2-2 各國隧道內襯砌調查成果一覽表(1/2)

隧道名稱		(1) Seelisberg tunnel (Switzerland)	(2) Sellisberg Highway (Switzerland)	(3) St. Gotthard road Tunnel (Switzerland)	(4) Subway tunnel of Frankfurt a. M. (Germany)	(5) Railway Tunnel NBS HANNOVER (Germany)	(6) VUACHE Highway Tunnel (France)
(1)斷面							
• 淨斷面	m	10.84x 9.20	11.0(圓形)	11.0x 7.2~8.5	5.6(圓形)	13x 9	10.4x 7.0
• 一次支撐厚度(最小、最大)	cm	30、35	40、50(環片)	除特殊路段僅有一層襯砌	15	10~20	—
• 二次襯砌厚度	cm	30~50	—	30-45(最大 80)	40	30	—
• 二次襯砌容許最小厚度	cm	35	—	30	30	30	35
(2)混凝土配比							
• 28 天設計強度	kg/cm ²	300	450	300	250	250	250
• 水泥單位用量	kg/m ²	300	325	300	290	345	325
• 水灰比 W/C	%	60	44	50	60	49	50
• 坍度	cm	45	—	無特別試驗	49	40	8~11
• 粗細骨材比(C:S:G)	%	1:4:4	1:2:4	1:4:4	1:3.25:3.11	—	(1:2.3:3.3)
• 骨材最大粒徑	mm	32	32	32	32	32	344:787:808
• 添加劑(名稱、添加量)		—	—	Plastocrete BV 40 C x 0.5%	elekfr. Fiiferasche C x 21%	Cx 0.06	25
• 水泥種類		普通波特蘭水泥	普通波特蘭水泥	普通波特蘭水泥	普通波特蘭水泥	普通波特蘭水泥	普通波特蘭水泥
(3)混凝土施工							
• 頂拱與側壁分開澆注		否	—	是	否	否	否
• 每模澆注長度	m	8.0	—	7.6	8.0	11.0	12.0
• 養護時間	Hr	48	3(加熱)	36	12	24	18

隧道名稱		(7) FREJUS tunnel (France)	(8) TANZENBERG Tunnel (Austria)	(9) Munick Urderground Railway Tunnel (Germany)	(10) Pfander Tunnel (Austria)	(11) Arlberg Tunnel (Germany)
(1)斷面						
• 淨斷面	m	10.5x 8	9.30x 7.13	6.30x 7.00 13.10 x 9.10 10.60x 9.00 19.60x 7.70	10.5x 8.0	10.10x 8.70
• 一次支撐厚度	cm	—	40、20	15、25、30、35	5、15	5、20
• 二次襯砌厚度	cm	55	25	50、50、70	25	25
• 二次襯砌最小厚度	cm	35	20	無規定	25	25
(2)混凝土配比						
• 28 天設計強度	kg/cm ²	300	300	250	225	225 (部份 300、400 kg/cm ²)
• 水泥單位用量	kg/m ²	350	245	310 以上	250	290 (部份 300、400 kg/cm ²)
• 水灰比 W/C	%	63	55	65 以下	54	47~50
• 坍度	cm	8~13	40~44	40	42	—
• 粗細骨材比(C:S:G)	%	(1:2.9:3.1) 300:880:935	0/16 16/50 60% 40%	—	—	1:3.13:3.76
• 骨材最大粒徑	mm	25	50	32	16	32 Cx
• 添加劑(名稱、添加量)		Pepsoplast Cx 0.25%	FLUAL 45 kg/m ²	—	Plastocrete	0.35(MOVOPLAST) (LIQUIPLAST)
• 水泥種類		普通波特蘭水泥	普通波特蘭水泥	普通波特蘭水泥	低熱水泥	普通波特蘭水泥
(3)混凝土施工						
• 頂拱側壁分開澆注		否	否	否	否	否
• 每模澆注長度	m	1.35	12.0	約 10	12	12
• 養護時間	Hr	48	24	無規定	8	8

表 5.2-2 各國隧道內襯砌調查成果一覽表(2/2)

隧道名稱	(1) Seelisberg tunnel (Switzerland)	(2) Sellisberg Highway (Switzerland)	(3) St. Gotthard road Tunnel (Switzerland)	(4) Subway tunnel of Frankfurt a. M. (Germany)	(5) Railway Tunnel NBS HANNOVER (Germany)	(6) VUACHE Highway Tunnel (France)
(4)裂縫 • 是否發生 • 裂縫方向(縱向、環向) • 裂縫容許寬 • 裂縫防止方法	是 縱向 0.1 —	是 縱向 0.2 —	否 —	是 環向 1.0 No	是 — 無規定	是 雙向 1.5 No
(5)二次襯砌 • 是否為支撐材料 • 承載力是否經計算 • 是否考慮為外觀修飾 • 其他意見	是 是 (計算水壓) 否 —	無二次襯砌	是 是 否 二次襯砌表面光滑 有助於通風	是 是 是 —	是 是 否 —	是 是 否 —
(6)隔絕材料 • 一次支撐與二次襯砌 間是否使用防水膜 • 防水膜商品名稱 • 防水膜對二次襯砌是 否有防止裂縫之功效	是 SIKA 否	否 — —	是 PVC(t=2mm) 否	否 — 否	是 PVE or ECB 是	是 (2700 公尺中有 600 公尺) PVC (岩石與混凝土之 間) 是
備註						

隧道名稱	(7) FREJUS tunnel (France)	(8) TANZENBERG Tunnel (Austria)	(9) Munick Underground Railway (Germany)	(10) Pfander Tunnel (Austria)	(11) Arlberg Tunnel (Germany)
(4)裂縫 • 是否發生 • 裂縫方向(縱向、環向) • 裂縫容許寬 • 裂縫防止方法	是(少量) 環向 1.0	否 — —	是 — 無特別規定 DIN 1045 (0.1~0.3mm)	是 雙向 無規定 配合隔絕材料使用	是 雙向 無規定 配合隔絕材料使用
(5)二次襯砌 • 是否為支撐材料 • 承載力是否經過計算 • 是否考慮為外觀修飾 • 其他意見	是 是 否 • 以 4.65m 長之岩栓做 為臨時支撐 • 岩栓遭腐蝕後由二 次襯砌支撐	否 否 否 —	是 是 否(車站) 是(其他)	是 否 增加安全係數	是 是 否 可提高岩栓受腐蝕後長 期之安全係數
(6)隔絕材料 • 一次支撐與二次襯砌 間是否使用防水膜 • 防水膜商品名稱 • 防水膜對二次襯砌是 否有防止裂縫之功效	是(僅 20m) PVC 否	是 PVC 否	否 — —	是(部份使用) PVC 是	是(部份使用) PVC 是
備註					

5.3 我國特有的自然條件等因素(如地震)對於坑道穩定可能的影響

國內目前因地震而產生破壞之隧道案例已有多件，其中記錄較為詳實者，應屬 1999 年集集地震所引致之破壞，其餘案例於蒐集到文獻所載不多。分述如下：

舊清水隧道位於台灣東部地震頻繁地區，且岩壁長期受到海浪侵蝕之影響，公路局在民國 84 年 12 月檢查時即發現現有隧道頂拱襯砌有數道與行車方向平行之裂縫，於民國 85 年發生之幾次地震，則使舊清水隧道崩塌嚴重(黃燦輝等人，1999)。民國 87 年 7 月 17 日中午 12 時 51 分，於嘉義瑞里阿里山地區，發生規模 6.2 之地震，其震央距地表僅五百公尺，根據省林務局發佈之災情資料，此次地震造成阿里山森林鐵路第四號隧道東口內側、東口起五十公尺二處崩塌，及第七號隧道洞口坍方(黃燦輝等人，1999)。

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 5.3-1，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 5.3-2，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 5.3-3 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。

集集地震後經詳細調查的損害案例—鐵路山線三義壹號隧道與通風橫坑(中華顧問工程司，2003)，其主要損壞模式包括：(1)襯砌剝落；(2)襯砌龜裂；(3)滲漏水；(4)底拱損壞；(5)附屬結構襯砌損壞；(6)襯砌厚度不均；(7)孔隙空洞等七種。襯砌龜裂可區分有縱向裂縫與環向裂縫兩類。部分區段之縱向裂縫並不單一存在，而有呈平行或交叉型式，且多存在於襯砌混凝土澆注之兩模施工縫間；底拱損壞則於通風橫坑發現有明顯底版凸起及縱向龜裂發生之情形。滲漏水主要分佈於主隧道兩側縱向起拱線位置及施工縫位置。大致歸納滲漏水方面之異狀包括有搶修段岩栓打設處漏水、壁面沁水、施工縫滲水及裂縫滲水等四種。於附屬結構襯砌損壞部分，三義隧道之避車洞於震後亦發現有損壞情形，嚴重者有避車洞頂拱襯砌剝落之情形，較輕者則為頂拱或其角隅之混凝土龜裂。

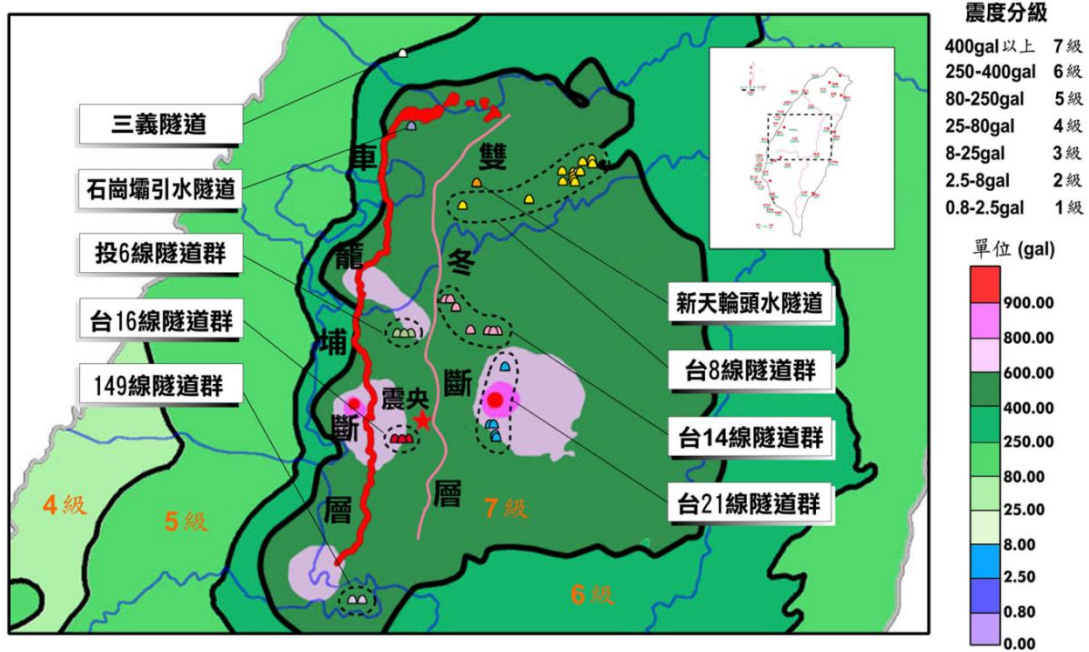


圖 5.3-1 集集大地震台灣各地區震度圖與中部地區受損隧道位置分佈

(王文禮等人，2000)

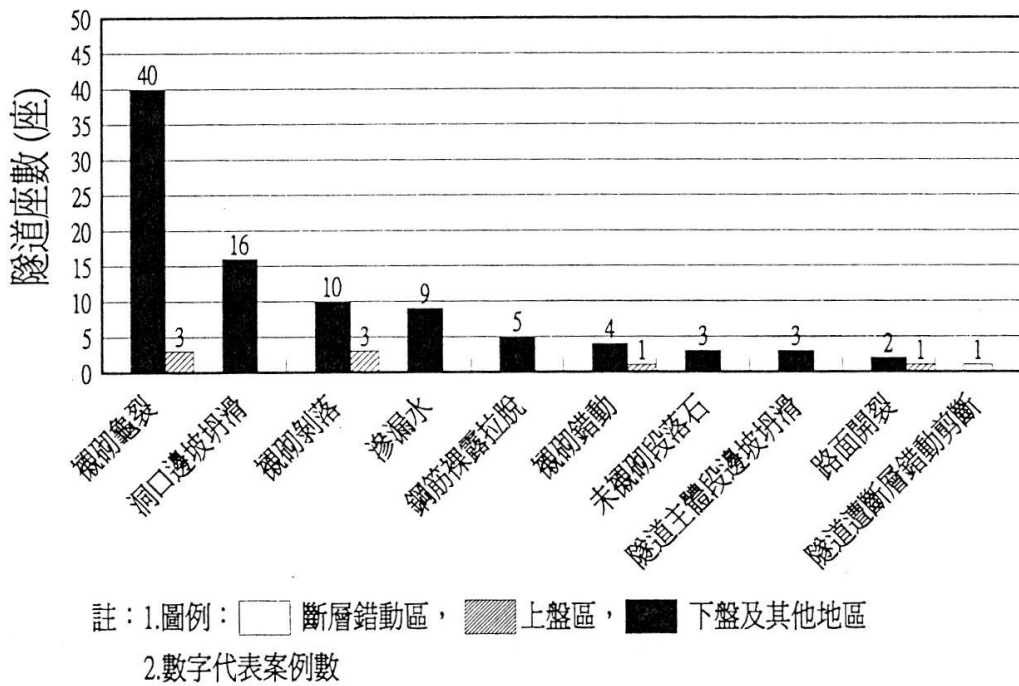


圖 5.3-2 隧道受損情形統計

(王文禮等人，2000)

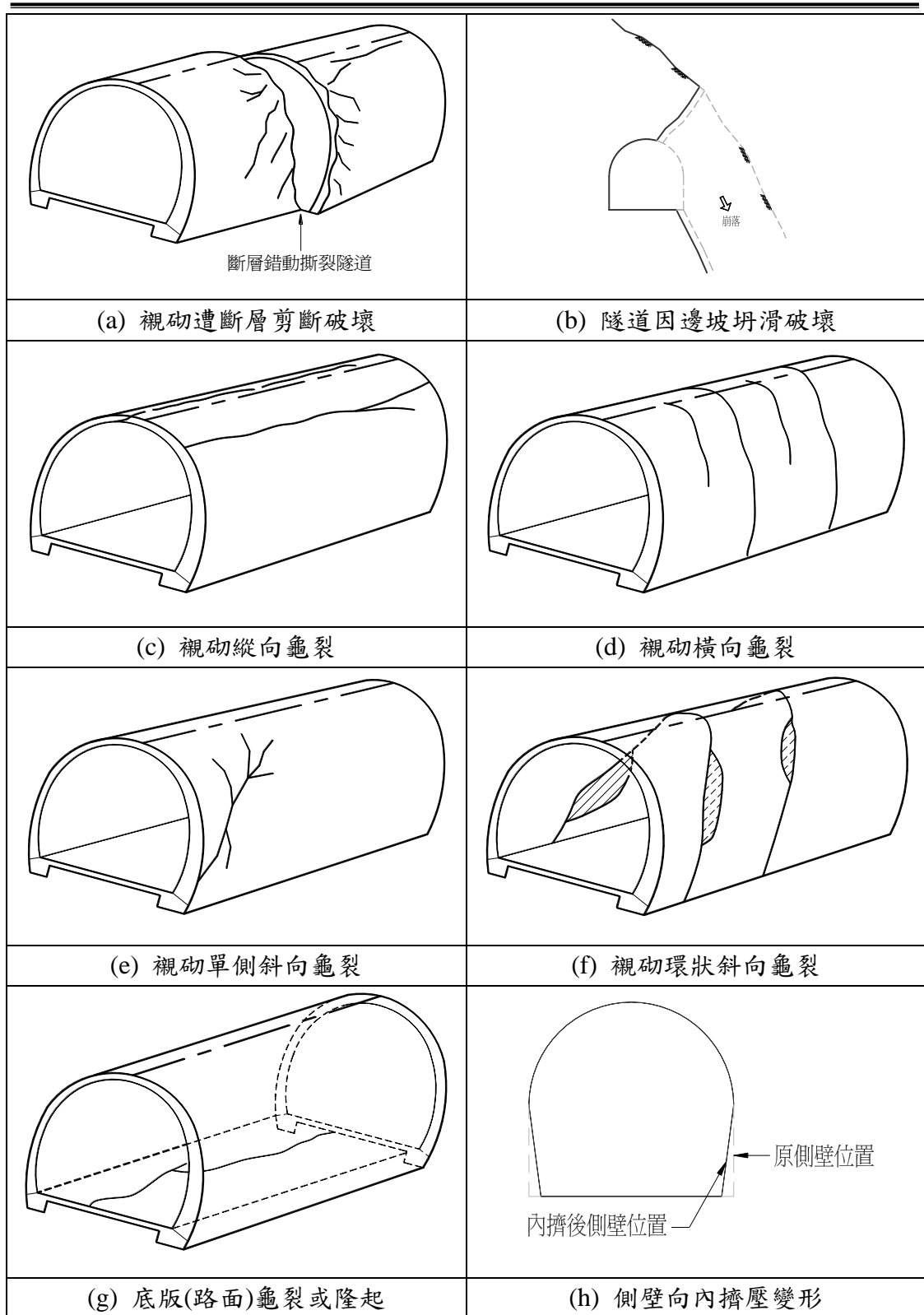


圖 5.3-3 山岳隧道受震損害型態示意圖

(王文禮等人，2000)

鐵路舊山線中部 12 座隧道建於 1898~1935，原始襯砌設計皆為磚砌，自 1935 年新竹—台中地震後，1938 年重建改為混合式；洞口、破碎段、地質不良段等襯砌使用鋼筋混凝土，一般地段用純混凝土加補強筋，地質良好地段使用 2 至 5 層磚砌作為襯砌。集集地震舊山線 2 號隧道在距北洞口約 100 m 處，有一道環狀裂縫；距南洞口約 380 m 處有一段長 55 m，東西兩側壁近等間隔 1~2 m，高度約 3 m 之垂直裂縫，4 號隧道南洞口約 10 m 處東西兩側各一道高約 3 m 之垂直裂縫，另一處於南洞口正上方牌坊頂有 2 道垂直各 1 m 裂縫及 1 m 之水平裂，其餘舊山線隧道無損壞，其中舊線 9 號隧道雖緊鄰三義斷層大甲溪北岸露頭及近車籠埔斷層，現調查結果無震害痕跡。新山線竹南至豐原間，計 7 座新建隧道，於 1998 年 9 月起通車行駛，除南勢隧道採傳統工法施工，其餘 6 座皆採新奧工法 (NATM) 工法施作，然 7 座中唯三義壺號隧嚴重受損。

Uzarski and Arnold (2001) 於集集地震後，調查台灣中部地區地下結構物之受震災害，包括：八卦山隧道、明湖電廠、明潭電廠、頭水隧道、台 21 線隧道群、台 14 線隧道群、新天輪電廠、馬鞍電廠、士林水力發電廠及三義鐵路隧道。歸納地下結構物發生破壞之區段，大多位於(1)遭遇不良地盤；(2)與斷層相交；(3)與潛在滑動面相交；(4)開挖斷面改變；(5)隧道與地下結構物相交。

曾大仁等人(2007)探討集集地震引致中寮隧道北口襯砌龜裂及路面下陷，國家地震研究中心(2010)於 2010 年 3 月 4 日高雄縣甲仙地震規模 $ML = 6.4$ 後現勘結果，發現隧道入口右側山坡可由目視發現疑似斷層錯動造成之隧道本體襯砌破裂。中寮隧道共計有四條斷層通過，主要影響以旗山斷層為主。甲仙地震後，經現地勘驗結果發現，隧道受到斷層錯動作用引致隧道內襯砌頂拱、照明設備、襯砌側壁、路緣水溝和道路鋪面等產生一連貫裂縫。

第六章 我國天然障壁與處置技術先進國家相異處管制技

術相應審查要項的初步建議

依據 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」計畫之建議，處置設施場址特性調查與設施設計需求與我國既有的坑道設計及施工技術相關法規、標準、規範存在明顯的差異，且研究結果發現我國天然障壁特性與處置技術先進國家明顯相異處，目前基於 NUREG-1200 基本架構所研訂的安全分析報告審查導則無法完全涵括，必需進一步精進的課題，本章將針對此部份提出場址特性調查及設施設計審查要項考量之初步建議，並提出管制技術進一步研究發展之參考方向。

6.1 場址特性調查審查要項考量之初步建議

目前我國於民國 93 年 10 月 20 日會物字第 0930036761 號函發文實施之「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」中有關「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告內容」，針對『場址之特性描述』章節幾乎完全參考 NUREG-1200 (Standard review plan for the review of a license application for a low-level radioactive waste disposal facility) 分為：(1)社會與經濟；(2)地形與地貌；(3)氣象；(4)地質與地震；(5)地表水；(6)地下水；(7)地球化學；(8)天然資源；(9)生態；(10)輻射背景偵測；(11)大地工程特性；(12)交通狀況；(13)其他共 13 小節。以下將基於我國場址特性與美國場址特性相異處，就其中幾項審查要項應補充考量之初步建議說明如后。

6.1.1 地震

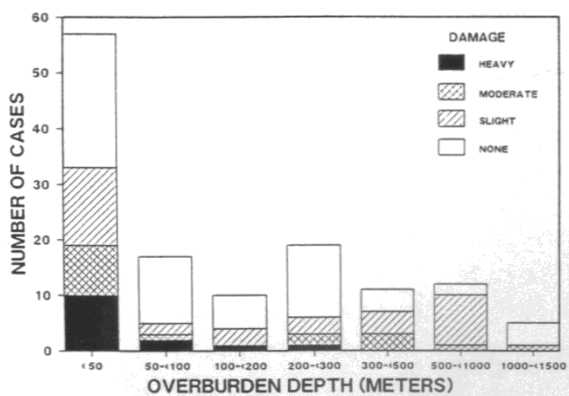
由本報告第 4.4 節與第 5.3 節之研究顯示：(1) 隧道(或地下坑室)於(a)入射 P 波或 S 波、(b)隧道襯砌及地盤之相對勁度、(c)不同覆蓋深度、(d)地質弱帶、(e)應力與彎矩之複合應力、(f)隧道襯砌與圍岩變形不一致等情況下，隧道(或地下坑室)之受震反應大不相同；(2) 台灣處於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊邊界碰撞地帶，地震發生頻繁，故山岳(岩石)隧道(或地下坑室)受震破壞之案例時有所聞。[Dowding and Rozen \(1978\)](#)曾統計美國加州、阿拉斯加與日本共 71 個直徑 3~6 公尺之隧道破壞案例，指出因地震造成隧道破壞之機制，大多由下列三種原因組合造成：(1)地震引致的地盤破壞，例如土壤液化及隧道洞口處之邊坡滑動；(2)斷層錯動；(3)地盤震動等三類。其進一步將此 71 個隧道之破壞原因分類，可歸納出下列五種型態：(1)靠近隧道洞口；(2)地盤條件不佳；(3)淺覆蓋及不均勻荷重；(4)共振行為與動態荷重；(5)地盤運動造成之動態應力集中。

日本學者[吉川惠也\(1979\)](#)等人彙整文獻，收集 1923 年關東大地震至 1995 年兵庫縣南部地震(神戶地震)間之隧道受震破壞案例，集行統計及分析。指出山岳隧道

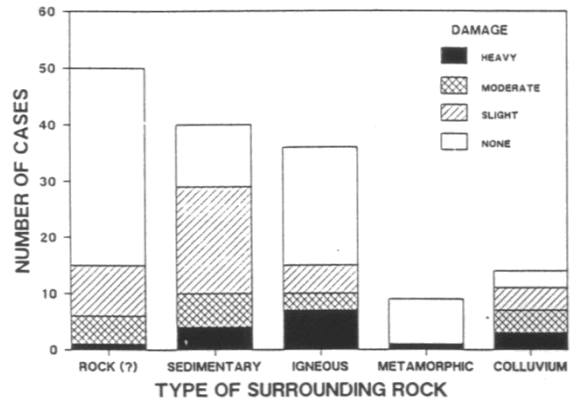
雖然屬於耐震性較佳的結構物，但在以下三項因素存在時，隧道較容易遭受地震損壞：(1)地震規模大，尤以規模 7 以上地震較易造成隧道大規模破壞；(2)近地震斷層面，距離地震規模 7 之地震斷層 10 公里內與距離地震規模 8 之地震斷層 30 公里內之隧道，稱為近斷層之隧道；(3)特殊條件，係指洞口的邊坡不穩定、隧道周邊地盤塌陷及隧道跨越斷層帶等情況。

Sharma and Judd (1991) 進行地下結構物受震反應之定性分析，收集世界各國 85 個地震共 192 個受震案例，指出影響結構穩定性之顯著因子，包括：(1)覆蓋深度；(2)主要岩石種類；(3)支撐型式；(4)地理位置；(5)地震規模與距震央距離等五項。並歸納最大地表加速度、覆蓋深度與受災程度間之關係，以最大地表加速度代表地震規模與距震央距離之綜合影響，結果如圖 6.1-1 所示，以供新建或既有地下結構物受震危害評估參考。其案例中可觀察到之破壞型式，包括：(1)開挖孔洞之變形；(2)頂拱局部破壞造成落盤；(3)頂拱及側壁之坍塌；(4)斷層交叉段之錯移；(5)圍岩之剝落；(6)支撐及襯砌之變形。

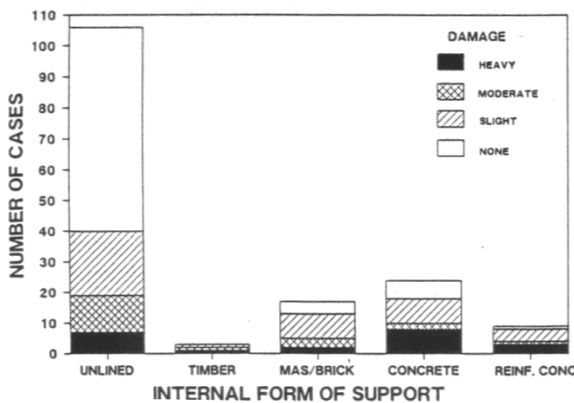
因此，建議未來審查要項「場址之特性描述」針對『地震』部份，除說明場址及附近地區之地層、地體構造、活斷層、歷史地震等之調查成果外，尚需補充說明斷層與地震危害度之調查與評估方法。



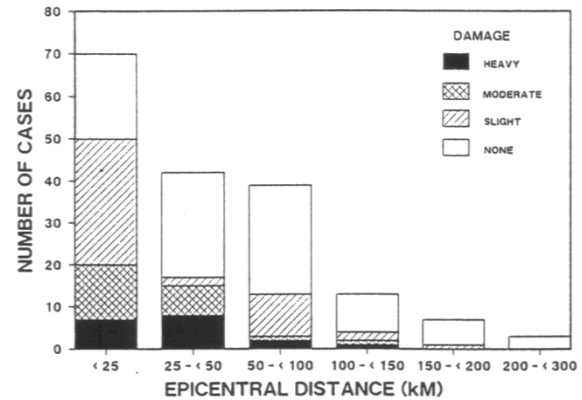
(a) 覆蓋深度



(b) 主要岩石種類



(c) 支撐型式



(d) 距震央距離

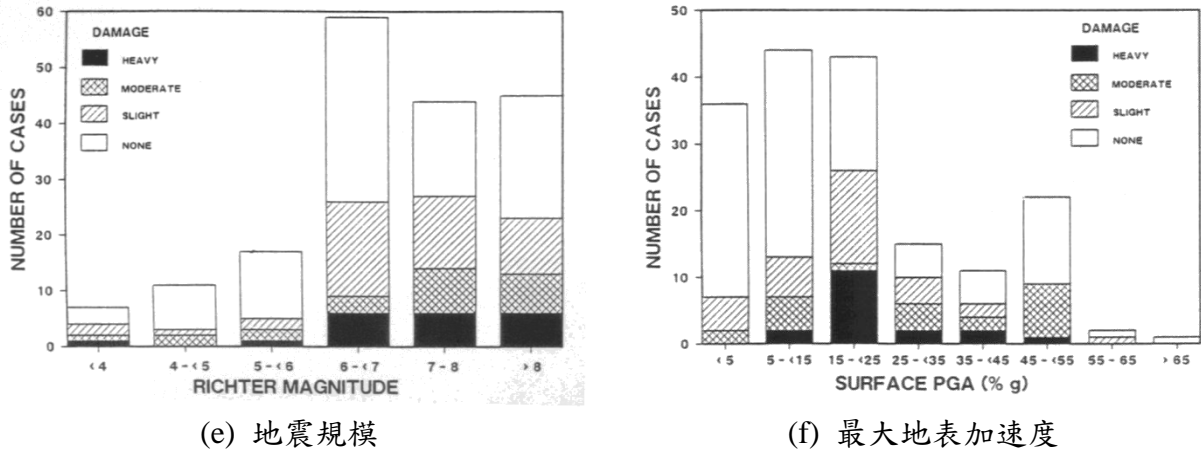


圖 6.1-1 地下結構物受震影響因子統計(Sharma and Judd, 1991)

6.1.2 大地工程特性

依據本報告第 4.3、5.1 與 5.2 節之研究顯示：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。

1. 風化作用

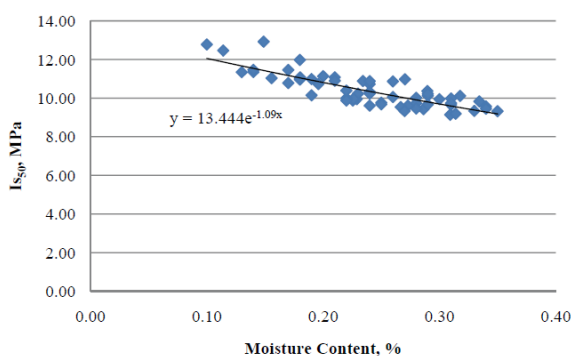
風化作用為岩石弱軟化的主因，對於岩體工程設計及其安定性影響深遠，故岩石風化帶的分佈以及風化程度的描述，為工址地質調查的重點工作(Ulusay and Hudson, 2007；許金華，2006)。惟風化過程岩石微觀組構的變化、弱軟化的程度以及各類力學參數之相互關係，迄今仍缺乏系統性的量化研究，故有關岩石風化程度的量化評估，為工程地質研究亟待努力的課題。

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 6.1-1)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。

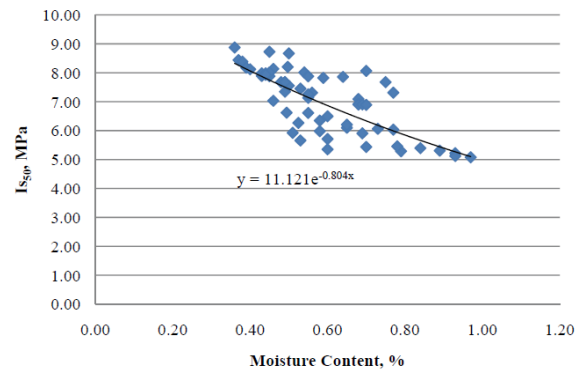
表 6.1-1 試驗項目、目的與方法(闕禮琳等人, 2009)

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

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(Is₅₀)越低(圖 6.1-2)；(3)風化程度越高，其強度(Is₅₀)越低。



(a) weathering grade I



(b) weathering grade II

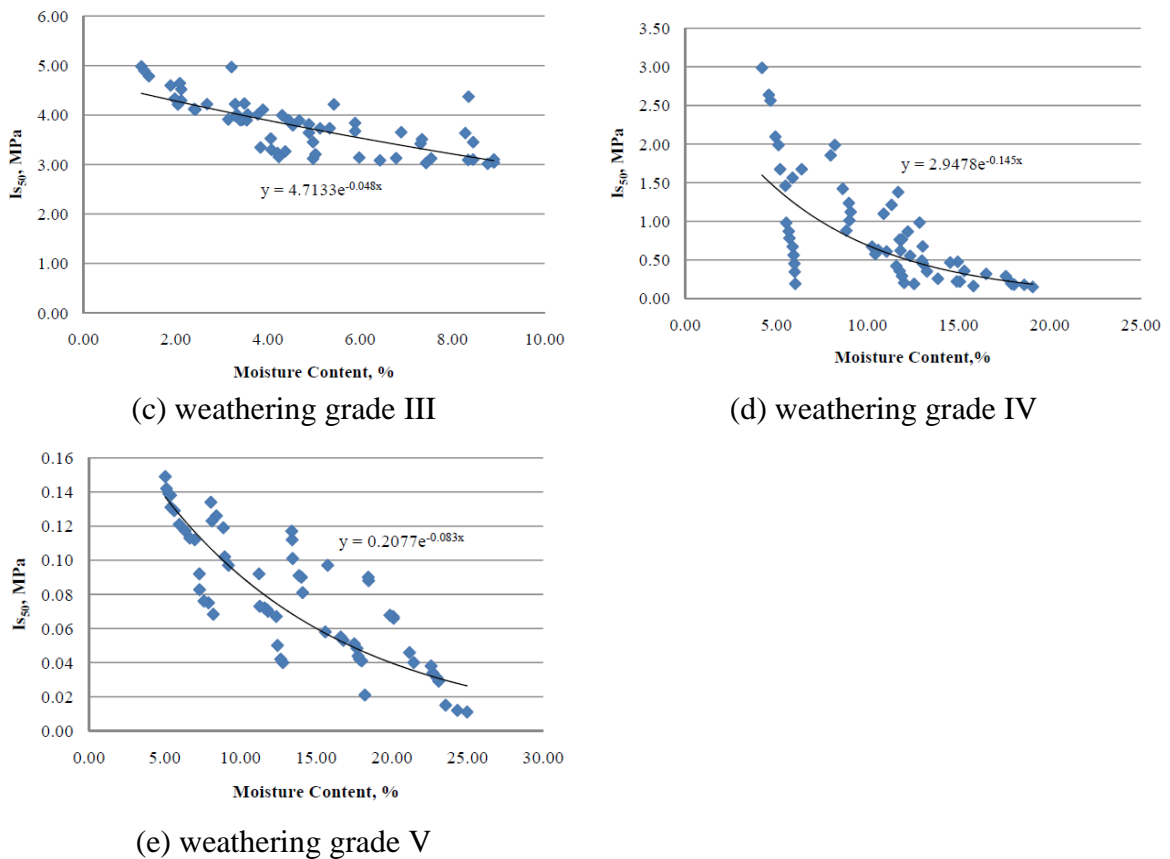


圖 6.1-2 花崗岩於各種風化程度下不同水分含量對其強度的影響(Mohamad et al., 2011)

2. 岩體依時行為

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、核廢料儲存廠等)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 6.1-3 所示。

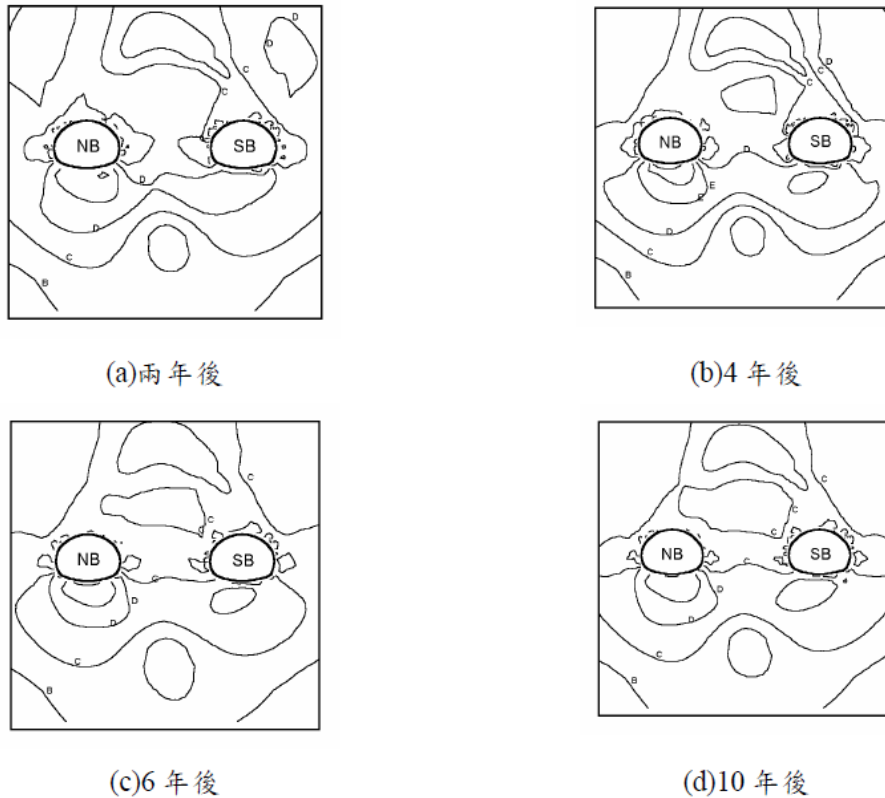


圖 6.1-3 隧道斷層帶圍岩內軸差應力之依時演化情況(俞旗文與陳錦清，2002)

而鄭富書(2003)乃針對這些第三紀沈積地層的擠壓依時變形行為進行探討，其研究係選取一系列第三紀沈積岩層為主的砂岩進行潛變實驗，包括五指山層砂岩、木山層砂岩、大寮層砂岩等三種岩層。其研究成果顯示：(1)單軸潛變試驗方面，木山層於低應力下的潛變行為異於五指山層及大寮層砂岩，其第一階段的軸向潛變量通常會大於第二階段，其後軸向潛變量才又會隨著應力比值的增加而變大；(2)三軸潛變試驗方面，純剪三軸潛變試驗與傳統三軸試驗結果均顯示，應力比值與軸向、側向及體積潛變量之關係，均存在一致性良好的趨勢；(3)含水量之影響方面，相同應力比下，含水試體之潛變量較乾燥試體來的大；(4)木山層砂岩為一高度遇水弱化之砂岩，其強度弱化比約為 40%；(5)相同應力狀態下，純剪三軸潛變試驗所得之潛變量較傳統三軸所得潛變值來的高。

此外，根據 Jaeger (1979)的研究顯示，地面下之岩層隨深度增加，岩層中之岩壓與溫度亦隨之增高，平均每增加 1 m，溫度大約增高 0.031~0.033°C。以歐洲阿爾卑斯山岩覆約 2,000 m 深之隧道周圍岩石及未來橫貫台灣中央山脈之鐵路隧道為例，其周遭岩石之溫度即可能到達 60°C 以上。而由 Dames and Moore (1978)就高放射性核廢料儲存之研究報告中亦指出，在儲存核廢料金屬密封容器外與岩石之介面處，其溫度可高達 200°C。

故鄭富書與蔡立盛(2004)、鄭富書等人(2005)乃進一步進行一系列加溫狀態下之單軸與三軸試驗，並探討其與常溫下之岩石力學性質之差異性。其研究成果顯示：(1)以木山層砂岩為例，溫度對此材料的強度及變形行為沒有顯著之影響。此結果顯示，在 120 度的範圍內，工程設計時，採用室溫試驗所得之參數值即可，

反而應該多注意現場施工環境降溫技術；(2)針對砂岩即時及依時力學行為之綜合討論，研究結果得到砂岩試體之塑性流與黏塑流的角度相似，可推論塑性勢能面亦為黏塑勢能面；(3)根據實驗資料所得砂岩之降伏面和塑性增量以及黏塑性增量方向相互正交，意謂其滿足諧合準則之條件。亦即對砂岩材料而言可假設降伏面、塑性勢能面及黏塑勢能面三者為同一面。

6.2 設施設計審查要項考量之初步建議

目前我國於民國 93 年 10 月 20 日會物字第 0930036761 號函發文實施之「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」中有關「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告內容」，針對『處置設施之設計』章節亦幾乎完全參考 NUREG-1200 (Standard review plan for the review of a license application for a low-level radioactive waste disposal facility) 分為：(1)設計目標與功能需求；(2)建築設計；(3)結構設計；(4)土木設計；(5)輻射安全設計；(6)輔助設施或系統之設計；(7)公用設施或系統之設計共 7 小節。以下將基於我國場址特性與美國場址特性相異處，就其中幾項審查要項應補充考量之初步建議說明如后。

6.2.1 設計目標與功能需求

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

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

Bäckblom 等人(2004)則基於歷史地震資料暨分析模式探討未來地震對瑞典核廢料最終處置場之影響(圖 6.2-1)，其歸納出 4 種數值分析模式(表 6.2-1)，其中最主要之分析模式如圖 6.2-2 所示，而數值模式則如圖 6.2-3 所示。研究結果顯示：此分析模式可有效評估近域斷層或剪裂帶錯動對核廢料最終處置場之影響。

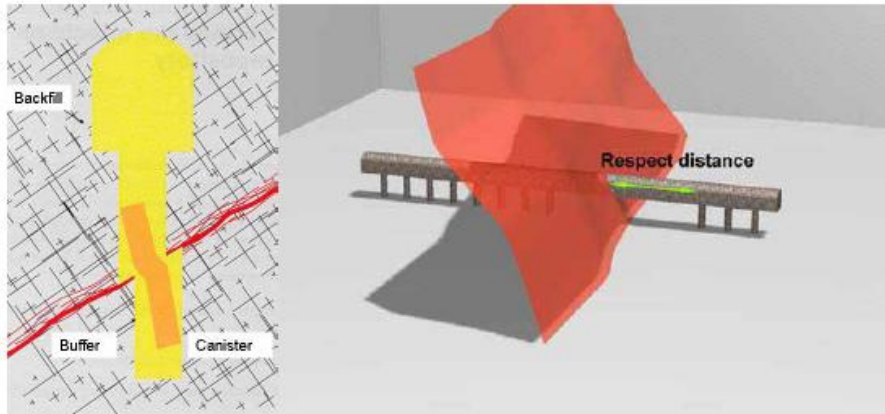


圖 6.2-1 核廢料最終處置場遭受剪裂帶錯動之可能破壞模式(Bäckblom et al., 2004)

表 6.2-1 四種核廢料最終處置場受震分析模式

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

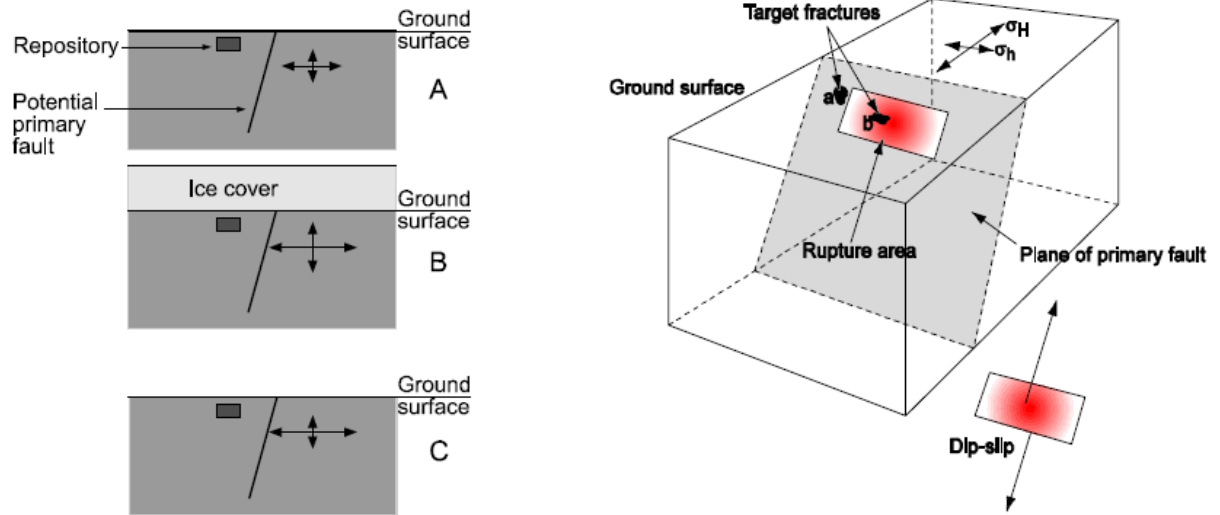


圖 6.2-2 近域斷層或剪裂帶錯動對最終處置場影響之概念模型(Bäckblom et al., 2004)

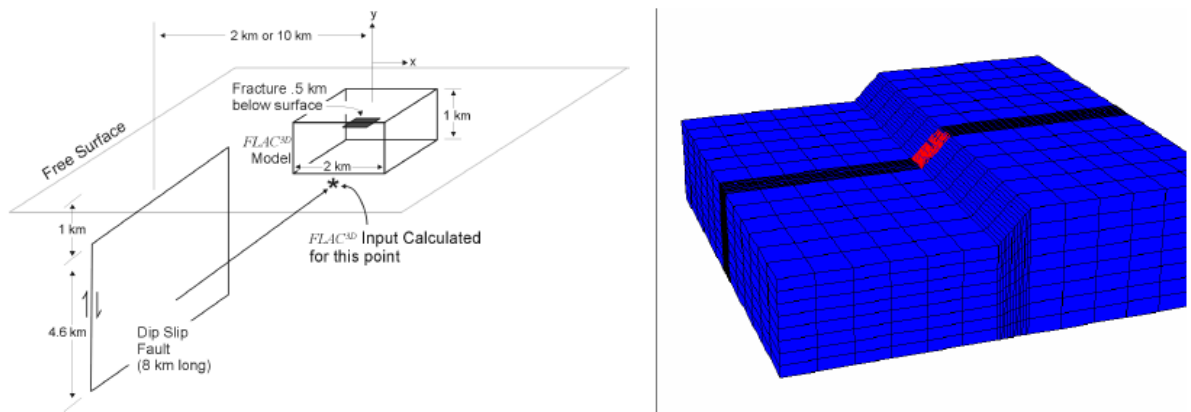


圖 6.2-3 近域斷層或剪裂帶錯動對最終處置場影響之數值模型(Bäckblom et al., 2004)

而蔣華等人(2009)以有限元素法探討公路隧道斷層帶處之橫斷面耐震分析，襯砌在地震作用下，其應力最多增加 8.37%。Amorosi 等人(2009)以二維有限元素法探討位於具黏彈性及黏彈塑性黏土之圓形隧道受地震波作用下行為。Moghaddam 等人(2007)以物理探測方法-表面波量測法(MASW)探測地下孔洞，並以有限差分法模擬振動產生瑞利波，併同瞭解地下孔洞變形情況。陳正勳與黃燦輝(2006)則以簡諧 P 波及 S 波模擬地震波，探討圓形隧道襯砌受震的破壞機制。陳正勳等人(2011)更進一步探討深度對隧道受震反應的影響，當深度接近 0.25 倍岩體波長時，地震引致襯砌軸力與彎矩的增量出現明顯的放大效應。

國際隧道協會(International Tunnelling Association, ITA)則建議採用 Hashash 等人(2001)建議之隧道耐震分析與設計流程(圖 6.2-4)，首先為進行工址受震環境定義，內容包括地震危害度分析、設計地震選擇、地盤震動參數選擇；其次為地盤受震反應評估，即予以評估區分為如活動斷層剪動或洞口邊坡滑動等地盤破壞，

或地盤震動所造成之隧道破壞；最後進行隧道受震行為評估，依設計年限選擇受震設計載重，並進行隧道受震分析，其中依需要採用自由場分析或地盤與結構互制分析等受震變形法，最後依分析結果進行支撐耐震設計，而對於特殊段如洞口等亦須進行相關設計。

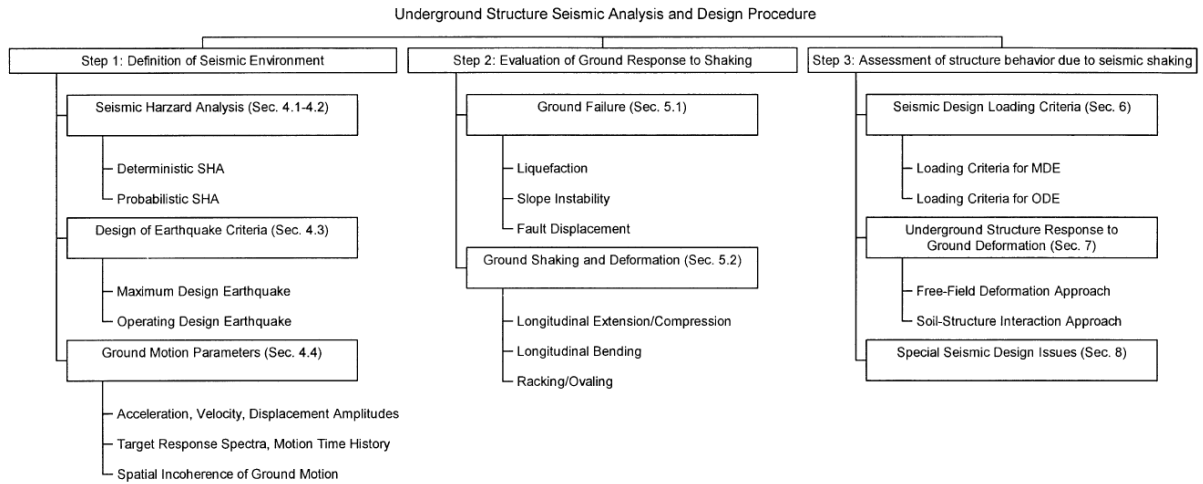


圖 6.2-4 隧道耐震分析與設計流程(Hashash et al., 2001)

6.2.2 土木設計

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

第七章 處置場安全分析報告設施之安全評估中第 7.4 節長期穩定性之審查導則草案

依據 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」以及本報告第四、五及六章之討論可知，我國處置場址在地質環境與地質材料方面長期穩定特性不同於國外處置技術先進國家，處置場安全分析報告有關設施之安全評估必需考量其可能引致長期穩定程度的變異。

茲按本計畫研究結果，建議處置場安全分析報告設施之安全評估中第 7.4 節長期穩定性之審查導則(草案)如后：

■ 長期穩定性

評估並分析處置設施於運轉期間及封閉後之長期穩定性與安全性。分析時應說明分析方法、輸入參數、假設狀況、適用範圍、模式分析結果及不確定性等。

內 容	說 明
<p>處置設施需確保於運轉期間及封閉後之長期穩定性與安全性，故須提出下列資料供審查。</p> <p>(一)提供資料</p> <p>1. 長期穩定性之調查架構、調查、評估與分析之方法，以及評估與分析之成果。</p> <p>2. 址地形與地貌、氣象、地質與地震、地表水、地下水及地球化學在處置設施運轉期間及封閉後可能的變異潛勢：</p> <p>(1) 明處置設施設計服務週期場址特性可能的變異，以及其對應影響的設計條件與設計參數。</p> <p>(2) 址各項特性長期變異的可能組合、以及影響處置設施長期穩定的可能情境與對應的設計條件。</p> <p>3.</p>	<p>1. 考物管局 99FCMA002 報告第三、七章以及 100FCMA005 報告第四至第六章內容。</p> <p>2. 明處置設施長期穩定的影響因素以及考慮的方法，包括調查架構、調查、評估與分析之方法。</p>

<p>質材料工程特性可能的依時變異潛勢：</p> <p>(1) 質材料受天然風化作用與人為開挖擾動後可能的弱軟化現象與工程特性變異的試驗結果、以及對應的設計條件與設計參數變化。</p> <p>(2) 質材料單一工程特性變異後對於耦合特性影響之陳述與評估。</p> <p>4. 程障壁材料工程特性可能的依時變異潛勢。</p> <p>5. 置設施在場址特性、地質材料與工程障壁材料變異後之安全評估與長期穩定分析。</p> <p>6. 置設施在運轉期間有關場址特性、地質材料與工程障壁材料依時變異的監測以及長期穩定回饋分析計畫。</p> <p>7. 置設施在運轉期間工程障壁監測與檢測計畫、工程障壁因場址特性、地質材料與障壁材料老劣化引致損傷或異狀的接受準則與維護計畫。</p> <p>8. 置設施運轉初期與運轉終期障壁功能調查與差異評估計畫，以及在封閉前設施障壁功能的可接受準則。</p> <p>(二)審查作業</p> <p>1. 查架構是否符合描述場址地工特性、水文地質與現地應力特性可能的依時變化？調查、評估與分析方法是否適當與具代表性？調查結果</p>	
---	--

<p>是否足以評估與分析處置設施場址長期穩定性。</p> <p>2. 址特性的變異潛在評估是否合理？與場址特性描述調查以及引用的資料是否具一致性？對於處置設施運轉期間與封閉後的預測條件與準則、以及對應影響的設計條件與設計參數的考慮是否適當且具有代表性？</p> <p>3. 質材料工程特性可能的依時變異相關試驗條件與模擬情境是否適當？試驗結果的解釋與對應的設計參數選擇是否合理？材料工程特性變異後耦合特性的評估是否合理？</p> <p>4. 程障壁材料工程特性可能的依時變異相關試驗條件與模擬情境是否適當？試驗結果的解釋與對應的設計參數選擇是否合理？</p> <p>5. 置設施在場址特性、地質材料與工程障壁材料變異後之安全評估與長期穩定分析方法、假設狀況、適用範圍是否合理？模式分析結果是否存在極端情況？不確定性變異程度是否適當？</p> <p>6. 置設施在運轉期間有關場址重要的特性參數是否持續調查與監測？地質材料與工程障壁材料依時變異的監測計畫是否合理？監測結果的處理以及長期穩定回饋分析計畫是否適當？</p> <p>7. 置設施在運轉期間工程障壁監測與檢測項目與頻率是否合理？工程障</p>	
--	--

<p>壁因場址特性、地質材料與障壁材料老劣化引致損傷或異狀的情境是否符合前述第 5 項的評估與分析範圍？障壁損傷與異狀超出預計的應變、評估與修復計畫是否適當？可接受準則是否合理？維護計畫在運轉期間的可行性以及是否足以確保障壁功能在運轉期間的損失在可接受之範圍？</p> <p>8.</p> <p>置設施運轉初期與運轉終期障壁功能調查項目是否足以量化比較障壁功能的依時變異？差異評估計畫反映處置設施長期穩定變異的精度是否適當？設施封閉前障壁功能的可接受準則是否適當？</p>	
--	--

第八章 結論與建議

8.1 結論

本計畫延續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」，持續增補完成處置場址安全分析報告審查導則，並探討審查導則之技術瓶頸，依約完成各工作項目，說明如后：

1. 完成處置場址安全分析報告有關場址特性描述之審查導則草案，依據描述場址特性之13個子項，整理於本報告第二章。
2. 完成處置場址安全分析報告有關處置設施設計之審查導則草案，依據描述處置設施設計之8個子項，整理於本報告第三章。
3. 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顯示，我國與處置技術先進國家天然障壁之條件存有許多差異處，可能影響處置設施的長期穩定。其中包括地震引致地盤震動可能導致處置坑道襯砌受力在特定位置大幅增加、障壁材料依時弱軟化可能導致處置坑道周圍應力趨於均向、襯砌受力緩慢增加，影響處置設施的長期穩定。
4. 透過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整理顯示，我國天然障壁的土工特性通常軟弱於處置技術先進國家，因此在交通、水力隧道方面的襯砌設計常需考慮受力的情況，此點明顯不同於地下工程技術先進國家；而水力特性方面則因現地試驗資料不多，目前尚無法系統地比較。由我國已建成長度逾千公里的地下坑道且可維持相當的服務品質觀之，處置設施之穩定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，仍待持續精進相關技術。
5. 透過我國天然障壁與處置技術先進國家相異處管制技術相應審查要項的探討顯示，有關場址特性描述之審查要項需強化有關地震引致地盤震動對處置坑道襯砌受力增量的評估與分析；其次，在大地工程特性方面，風化作用以及岩體依時行為引致的天然障壁材料弱軟化造成的處置坑道長期穩定之變異，亦應進一步評估分析。此部份相應的審查要項除場址特性描述章節外，亦應於設施設計之設計目標與功能需求以及對應的土木設計中描述。
6. 依據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」以及本報告第四、五及六章之討論獲知，我國處置場址在地質環境與地質材料方面長期穩定特性不同於國外處置技術先進國家，處置場安全分析報告有關設施之安全評估必需考量其可能引致長期穩定程度的變異，本報告據以提出處置場址安全分析報告設施之安全評估中7.4長期穩定性之審查導則草案，整理於第七章。
7. 有關場址特性審查、設施安全設計審查相關研習講座，將配合物管局規劃於

100年11月各辦理1場次。

8.2 建議

本計畫透過我國既有地下坑道洞室襯砌損傷與異狀資料之蒐集整理初步顯示，我國的處置環境可能因地震、天然障壁材料弱軟化等因素，影響處置設施長期的穩定。目前已建成長度逾千公里的地下坑道雖然結構穩定問題並不多見，然變形、裂縫與滲漏水卻相當普遍。處置設施之穩定雖可透過處置技術之精進達成，然因處置設施的服務週期長於交通、水力隧道，有關處置設施長期穩定的議題，仍待持續精進相關技術、深入探討。

參考文獻

- [1] Andersson J., Christiansson R., Hudson J., 2002. Site Investigations strategy for rock mechanics site descriptive model. SKB R-02-01. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [2] Andersson J., 2003. Site descriptive modeling - strategy for integrated evaluation. SKB R-03-05. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [3] Ask, D., 2003. Evaluation of measurement-related uncertainties in the analysis of overcoring rock stress data from Aspo HRL, Sweden: a case study, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 40, 1173–1187.
- [4] Ask, D., 2006. New developments in the Integrated Stress Determination Method and their application to rock stress data at the Aspo HRL, Sweden, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 43, 107–126
- [5] IAEA. 1982, Site investigations for repositories for solid radioactive waste in shallow ground, Vienna: IAEA, Technical Report Series No.216.
- [6] IAEA. 1993, The radioactive waste management glossary, Vienna: IAEA.
- [7] Nuclear Regulatory Commission, U.S., 1994, Standard Review Plan for the review of a license application for a low-level radioactive waste disposal facility(NUREG-1200), Washington, USA.
- [8] Genty, A., K. Fischer-Appelt, C. Certes, C. Serres, F. Besnus, B. Baltes and K. J. Röhlig (2002): Assessing the Potentialities of Integrated Modelling during Early Phases of Siting and Design of a Geological Repository: the REGIME Exercise, EUROSAFE Forums 2002, Berlin.
- [9] Goodman, R. E. (1989): Introduction to Rock Mechanics (Second Edition).
- [10] Bickel, J.O., J.R. Kuesel and E.H. King (1996): Tunnel Engineering Handbook, 520-540, Chapman & Hall, New York.
- [11] Brikmeyer, J.A. (1978): Rapid Transit Subways - Maintenance Guide, Report UMTA-MA-06-0025-78-3.
- [12] Chen, H.M. (1995): Retrofit Techniques for Floating Slab Track, Transportation Research Record 1503, 118-126.
- [13] Eraud, J. (1974): Policy in the Field of Inspection, Maintenance of Tunnels, SNCF.
- [14] 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.
- [15] ITA-Working Group Maintenance and Repair (1997): Bibliography on Maintenance and Repair of Tunnels.

- [16] Janin, J. J. et al. (1970): Chemical Grouting for Paris Rapid Transit Tunnels, In: Proc. ASCE Construction Division, 96.
- [17] Leucker, R. et al. (2006): Report for Structural Integrity of Tunnels Frame for an European data base, Technology Innovation in Underground Construction (TUNCONSTRUCT).
- [18] Lukacs, J.J. (1997): Retrofitting Tunnel Kilns, American Ceramic Society Bulletin, 76, 2, 48-53.
- [19] 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.
- [20] Russel, H. A. (1993): Control of Groundwater in Tunnel Rehabilitation, In: Proc. Rapid Excavation and Tunneling Conference Boston, 505-513, USA.
- [21] 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.
- [22] South African National Council on Tunnelling (SANCOT) (1995): Guidelines for Maintenance and Repair of Underground Structures.
- [23] Amorosi, A. and Boldini, D. (2009) “Numerical modelling of the transverse dynamic behavior of circular tunnels in clayey soils”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29, P. 1059-1072.
- [24] BÄCKBLÖM, G., MUNIER, R. and HÖKMARK, H. (2004) “EARTHQUAKE DATA AND MODELLING TO STUDY THE EFFECTS OF FUTURE EARTHQUAKES ON A FINAL REPOSITORY OF SPENT NUCLEAR FUEL IN SWEDEN”, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 3238.
- [25] Dames and Morre (1978) “Thermomechanical stress analysis and development of thermal loading guidelines”, In Technical Support for GEIS: Radioactive Waste Isolation in Geologic Formations, vol. 20, White Plains, N. Y.
- [26] Dowding, C.H. and Rozen, A. (1978) “Damage to rock tunnel from earthquake shaking”, Journal of the Geotechnical Engineering Division, No. 2, P 175-191.
- [27] Hashash, Y. M. A., J. J. Hook, B. Schmidt and K. I. C. Yao (2001) “Seismic design and analysis of underground structures”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 16, P. 247-293.
- [28] Jaeger, C. (1979) “Rock Mechanics and Engineering”, 2nd Ed., Cambridge Univ. Press.
- [29] Moghaddam, A. N., Cascante, G., Phillips, C. and Hutchinson, D. J. (2007) “Effects of underground cavities on Rayleigh waves—Field and numerical

- experiments”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, P. 300-313.
- [30] 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.
- [31] Sharma, S. and W. R. Judd (1991) “Underground opening damage from earthquakes”, *Engineering Geology*, 30, P263-276.
- [32] Ulusay, R. and Hudson, 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.
- [33] 吉川惠也 (1979) 「鐵道トコネルの震災事例調査」，鐵道技術研究報告，No.1123.
- [34] 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。
- [35] 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。
- [36] 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。
- [37] 陳正勳、黃燦輝 (2006) 「山嶺隧道受震之破壞型態及其機制初探」，第五屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會論文集，第 A22-1~A22-8 頁。
- [38] 曾威量 (2001) 「岩石隧道受集集地震損害分析」，台灣大學土木所碩士論文。
- [39] 蔣華、蔣樹屏、王曉雯、林義 (2009) 「斷層帶處公路隧道橫斷面抗震分析」，*隧道建設*，第 29 卷，第 1 期，第 14-18 頁。
- [40] 蔡宜璋 (1998) 「半無限域中散射體承受傾斜入射波引起之散射現象」，國立台灣大學土木工程研究所博士論文。
- [41] 鄭富書 (2003) 「西部麓山帶砂岩潛變特性研究」，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，NSC91-2211-E-002-046。
- [42] 鄭富書、蔡立盛 (2004) 「溫度影響岩石之潛變行為研究(I)」，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，NSC92-2211-E-002-047。
- [43] 鄭富書、蔡立盛、陳正旺 (2005) 「溫度影響岩石之潛變行為研究(II)」，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，NSC93-2211-E-002-038。
- [44] 闕禮琳、詹佩臻、王泰典、羅偉、翁祖焯 (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」，*鑛冶*，第五十三卷，第四期，第 67-76 頁。
- [45] 工業技術研究院能源與資源研究所，2008，美國核能法規 NUREG - 1199 低強度放射性廢料淺地處置安全分析報告之標準格式及內容中譯版，放射性待處理物料管理處委託研究計畫報告初稿。
- [46] 王泰典、董家鈞、李佳翰，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，原子能委員會放射性物料管理局委託研究報告。
- [47] 王泰典、董家鈞、顧承宇、李宏輝、李佳翰，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，台北。
- [48] 林志森，1997，我國用過核燃料長程處置，岩石力學技術報告。
- [49] 紀立民，1997，放射性廢料最終處置場址地質特性調查之研究。核能研究所。
- [50] 胡國興，2005，低放射性廢棄物處置場址調查作業檢查技術之建立，放射性待處理物料管理處委託研究計畫報告。
- [51] 泰興工程顧問股份有限公司，1988，蘭嶼貯存場環境影響報告。原子能委員會放射性待處理物料管理處，台北。
- [52] 張柏菁，2005，低放射性廢棄物最終處置場輻射安全評估審查技術之建立，放射性待處理物料管理處委託研究計畫報告。
- [53] 莊文星、羅俊光、劉文忠、陳聯燮，1989，蘭嶼貯存場地下水與岩石調查。中央地調所彙刊，第五號。
- [54] 董家鈞、陳瑞昇，2005，低放射性廢棄物隧道處置水文地質概念模式審查技術之建立，放射性待處理物料管理處委託研究計畫報告。
- [55] 詹新甫，1985，蘭嶼地區放射性待處理物貯存地質環境調查。中央地質調查所 74 年度研究報告。
- [56] 交通部台灣區國道新建工程局，2000，隧道二次襯砌功能、設計理念與混凝土設計規範之研究與建議對策，研究報告 118。
- [57] 施國欽、李彪，1994，台灣地區沉積岩單壓強度初步研究，1994 年岩盤工程研討會，第 219-228 頁。
- [58] 徐智宏、施國欽、李彪，1994，台灣地區沉積岩靜彈性初步研究，1994 年岩盤工程研討會，第 209-218 頁。
- [59] 陳正勛、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。
- [60] 日本隧道技術協會(1992)，隧道老朽化對策有關之調查研究，日本。
- [61] 王泰典(2008)，探討襯砌異狀之類別與診斷，營建知訊，304，22-31。
- [62] 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。
- [63] 西村和夫等(2002)，山岳隧道襯砌的現狀與對策(日文)，日本土木學會。
- [64] 何泰源、黃燦輝、鄭富書(1999)，隧道之維護管理方式—調查、安全評估及維修方式之探討，隧道自動化安全檢測、維修與補強技術研討會論文集，31-54。
- [65] 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。
- [66] 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。
- [67] 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。
- [68] 朝倉俊弘等(2003)，隧道變狀機制(日文)，日本土木學會。
- [69] 黃燦輝、林銘郎、王泰典(2008)，隧道非破壞性檢測技術之開發總結報告書，交通部鐵路改建工程局東部工程處委託研究計畫報告，宜蘭。
- [70] 黃燦輝等(1999)，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，財團法人台灣營建研究院。
- [71] 黃燦輝與鄭富書(1997)，老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(I)，交通部委託研究計畫報告。
- [72] 黃燦輝與鄭富書(1998)，老舊交通隧道之安全檢測、維修與補強技術研訂(II)，交通部委託研究計畫報告。
- [73] 劉啟川(2006)，隧道異狀成因與判別模式之研究，國立台灣大學土木工程學研究所碩士論文。