

拾壹 工程地質在隧道工程之應用 (The Applications of Engineering Geology in Tunnelling)

洪如江*

一、前言

隧道是最典型的土木工程，就物理條件而言，常常遠離城市，看到的都是粗糙的岩石、粗糙的機械、粗糙的材料，甚至粗糙的人！聽到的是開炸前的鑽孔噪音、開炸時的爆炸聲、出碴時的機械車輛聲。走在隧道中，常常下是泥漿，上是漏水。就工程師的人格而言，常常須要豐富的經驗、當機立斷的個性、甚至還偶而要冒點險。有不少工程人員，不相信40歲以下的工程師所做的隧道設計，甚至不歡迎女士們進入施工中的隧道。

隧道是所有土木工程中與地質關係最密切者，其安全性、工期、造價，無一不受地質的影響與控制。因此，隧道也是工程師與地質師最須要並肩作戰的工地。

隧道，可以採用最原始的方法施工：由坑夫點火爆破(Bombing)，手推車(甚至用糞箕)出碴，坑木(或重型鋼架)支撐，而事先沒有設計，看不到一張計算書。隧道，也可以非常現代化：事先(與施工中)有詳細的地形測量、地質調查，岩石力學試驗、高速電腦分析(FEM或BEM)；施工時，採用千萬美金一部的隧道鑽進機(TBM)、雷射控制、聲波自動斷面掃描、儀器監測等等最新技術、設備及觀念。而從最原始的方法到最現代化的作業，技術上相差幾千年，可以在同一時段內(甚至同時)、在同一地區內並存！假如看到同一個工地、同一負責人所管轄的兩條大致相同的隧道，同時在進行，一條已經用了必要的最現代化技

術順利推進；另一條却用最原始的方法在做做停停、停停做做的，不必覺得很意外，很可能設計者不同，也可能監工者不同，更可能是一條“自營”，而另一條“發小包”。

地質條件對隧道工程影響很大；但是支撐方法、開炸技術也極為重要。一個屬於中、上地質條件的工址，開炸技術優越者，隧道周圍岩盤不發生塑性帶(Plastic Zone)；開炸技術不佳者，塑性帶厚度可達數公尺甚至十公尺！

有些隧道工程，處於堅強岩盤之中及有利工程環境之下，例如挪威峽灣兩岸花崗岩層，妥善開炸之後，略作修整，即可供巨艦進出，甚至作為軍港者。至於瑞典某些地下車站，只見炸藥所開之岩壁及天盤，並無任何人工襯砌。而我國金門之地下醫院、地下戲院，中外馳名。但是也有些隧道工程，條件極端惡劣，例如：

- (1)長隧道通過高山，例如上覆岩厚超過2000公尺者，可能發生岩爆及高溫，危害工程人員之健康甚至於生命，而需要特別支保者。
- (2)長隧道通過深海下之岩盤，例如日本本州青森至北海道涵管之青函隧道，全長約54公里(陸地部份30.6公里；海床下者23.3公里)，隧道斷面為高9公尺，寬11公尺，全部工程歷時21年，比原定工期延長達8年之久；預算美金8億，但數度追加預算，決算為27.6億，意即實際工程費為預算的3.45倍，追加部份(19.6億)也達到預算(8億)的2.45倍，平均每公里約花5千萬美元(本段統計數字引用民國74年3月11日中國時報刊登之日本青森

* 國立臺灣大學土木工程學系教授

法新社電)。

上述二種條件極端惡劣之隧道工程，純就科學而言，絕對可以做成功；純就技術而言，雖然極為困難，也可以做出來；就工程而言，要計算金錢上的益本比，要做財務上的還本計畫，要考慮工程經驗及人命成本（整個工程可能喪失多少人命及健康）。若是連覆蓋岩厚500公尺的長隧道都做不好、甚至還沒做過，則覆蓋岩厚接近岩爆的長隧道可以暫緩，21年花28億美金做一條隧道的壯舉也可以暫緩。隧道工程的躍升，宜循序漸進。

二、隧道選線之重要因素

2.1 引言

隧道選線如果正確，就是成功的一半。近年來所知的隧道災變與失敗，大部份是由於選線不當。影響選線的重要因素很多，有些因素的作用是非常不明確的，事先難於明瞭，甚至於開挖後也難於完全排除心中之疑慮者；有些因素的作用，需要詳細調查、深入探討，才能明白；也有些因素的作用，只要有普通的土木工程智識就能看清楚。從事隧道選線，當然不可能只考慮技術因素，也不只要考慮工程因素，有時還受到政治的左右。通常，如隧道是一條公路或鐵路的一部份，路線的選擇，通常要考慮所經過城鎮的運輸需求，隧道的位置大致已由路線限定，只能作小幅度的調整，但有時小幅度的調整，已足於避免災變或困難，而完全不妨害路線的完整。但是，長隧道的情形就大不相同。長隧道由於代價高，例如青涵隧道（造價近28億美元，工期21年），本身就是整個工程計畫的目的，或者是整個工程計畫的關鍵，選線的幅度就可以很大。舉例而言，南迴鐵路，原擬穿越南大武山（海拔2000多公尺），後來改走枋山。隧道選線，首先要研究本隧是否為整個工程計畫的“關鍵”？若否，隧道要遷就兩頭路線，隧道有大困難，以技術方法解決之；若是主要關鍵，則隧道選線優先，兩頭路線要遷就隧道，而且，隧道的選線要特別慎重。

茲列出隧道選線的重要因素如下：

- (1) 隧道長度
- (2) 上覆岩厚，或簡稱覆蓋(Cover 或 Covering)
- (3) 大地應力
- (4) 活性斷層
- (5) 與河谷的相關性
- (6) 不穩及軟弱地層

2.2 隧道長度與選線

隧道，長度就是難題。人員、機具、材料、岩碴的進出，隧道愈長，效率愈低、危險愈高、成本也愈高，有時甚至要另闢施工坑道（小於主隧道之平行坑或直交坑）。照明、通風、排烟、排水及災變處理，其困難程度，皆因長度的增加而急速升高，有時還要預先構築直通山頂的豎井，構築平行於主隧道的排水坑道。當然，也有把施工坑道兼作排水、通風之用者。排水及通風，若是合併在主隧道之中，則隧道斷面加大。隧道長度超過某一限度，斷面之額外加大，純粹是為通風。而斷面加大，困難度也加大，將於下節討論。

就地質調查而言，隧道愈長，困難也愈大。

圖 11.1，示穿越一山區的兩種做法。圖 11.1(A)，隧道採高線；圖 11.1(B)，隧道採低線。將一條長隧道分成兩條短隧道，隧道總長度相近，但工程意義相差很大。有必要詳為說明。低線長隧道，除了前述各種困難及缺點之外，另因工作面只有二處，工期久，還本期加長，利息負擔加重，對環境（工程車輛對地方道路之破壞、噪音等等）的影響也拖長；高線二條短隧道，可以有四個工作面，工期縮短一半左右，每條隧道只有低線隧道的一半長，困難度大減，斷面也可能不必額外加大，成本必較低，而且，早完工，早利用，早發揮隧道之交通、運輸功效。圖 11.1 雖然只就高低二線所造成的結果加以討論；其實，在平面上，也可以用同一精神，從事選線，寧挖多條短隧道，莫挖一條長隧道。為此，選線者對沿線之地形、地質、及種種環境因素，宜有充分瞭解，選線才會正確。

2.3 覆蓋(Cover)

所謂覆蓋，指隧道中心至地表之鉛直距離。覆蓋太深，缺點很多：

- (1) 地質調查困難，在地表所做的地質調查，難於延伸至隧道高程，由山頂向下鑽探，不但費用高，也是困難重重，鑽機（及鑽工）搬運上山，就工程浩大。即使地表地質調查，地質人員也是極為辛苦，效率不高。
- (2) 覆蓋壓力(Overburden Pressure) 太高，有岩爆危險、支撐費高。詳細討論，見下節“大地應力”欄。
- (3) 豎坑（通風、逃生用）長度大，效果及費用（建造、維護及使用）皆屬不利。

覆蓋太淺，也有問題。一般之土壤及岩石，正應力大者剪力強度亦大（除非摩擦角 ϕ 等於零）。覆蓋淺者，不但正應力小，而且因為風化程度高及固結度低，故剪力強度也低，故當隧道開挖之後，天盤以上之岩石難於自保。隧道如在多節理之岩盤中開挖，覆蓋太淺則節理之正應力太小，節理剪力強度不足，天盤以上之岩石易於滑動甚發生落盤現象。挪威之經驗(Selmer-Olsen and Broch, 1982)，多節理堅硬岩盤，天盤上最大可能墜落岩楔頂點至風化界面之距離，至少需五公尺以上，才不至於不穩，示如圖11.2。

2.4 大地應力(Tectonic Stress)

隧道及地下工程，只要不太淺，其荷重，主要來自大地應力。大地應力之來源，除重力之外，可能是沖刷解壓、板塊運動、或地球收縮等等與大地構造有關之動力（洪如江，民國73年元月）。

深度超過2~3公里之地層，各方向之壓力大致相等且大致等於覆蓋重力；深度不超過1~2公里之地層，水平地壓力常大於鉛直地壓力，示如圖11.3。

根據 Russenes (1974)之研究，當隧道內壁切向應力(Tangential Stress)對岩石材料強度之比值超過某一限度，就可能發生岩爆(Rockbursting)，如圖11.4所示。而隧道內壁之最大切向應力正比於大地應力，因此，若岩石材料強度一定，則大地應力愈大者，岩爆愈易於發生。但據 Broch and Sørheim (1984) 之報告，高強度之岩石(單壓強度高達2000 kg/cm²)，只要隧道內壁之最大切向應力大於500 kg/cm²，即可能發生嚴重岩爆；而強度較低之岩石，即使發生岩爆，也常是低至中度者。

須注意者，圖11.4之岩爆潛勢分級，僅可供隧道選線之初步估算之用，不宜在未作進一步調查、試驗及分析之前，作為設計之用。

Panet 曾報告了由法國貫穿阿爾比士山通至意大利之 Mont Blanc 隧道之岩爆。該隧道，全長11.6km；覆蓋超過1500m者達6km之長，最大覆蓋2540m，次大覆蓋2100m。隧道長軸方向為西北~東南。主要弱面方位為N60~40°E/80°~90°SE，大致與隧道長軸正交；另二組弱面走向分別為N0°~20°E及S60°E至EW，傾角皆高，弱面常有擦痕(Slickenside)。岩石大致屬花崗岩質，單壓強度960~1130

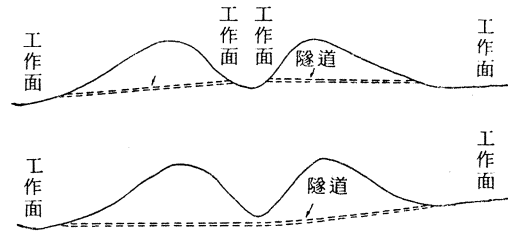


圖11.1 隧道穿越山區之兩種選線：
(A)高線，分別開挖兩條短隧道
(B)低線，以一條長隧道貫穿

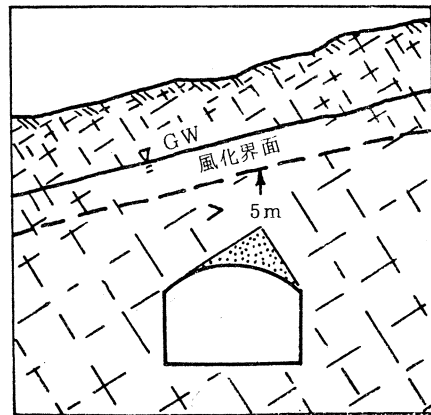
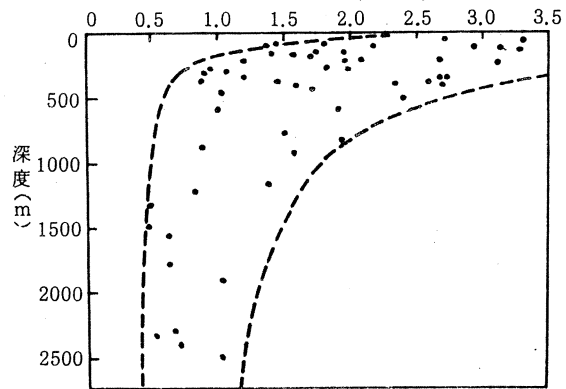


圖11.2 隧道頂至風化界面最小距離(Selmer-Olsen and Broch, 1982)



$$K = \text{平均水平應力 } \sigma_{hav} / \text{鉛直應力 } \sigma_v$$

圖11.3 平均側向地壓力/鉛直壓力比值與深度之關係(資料來源：Brown & Hock, 1978)

bar，張力強度63~90 bar，變形模數約五十萬 bar。

Mont Blanc 隧道，以全斷面開挖前進，當覆蓋超過700m之後，即可在已挖之隧道內聽到因岩石應力調整所引起的噪音，並在覆蓋

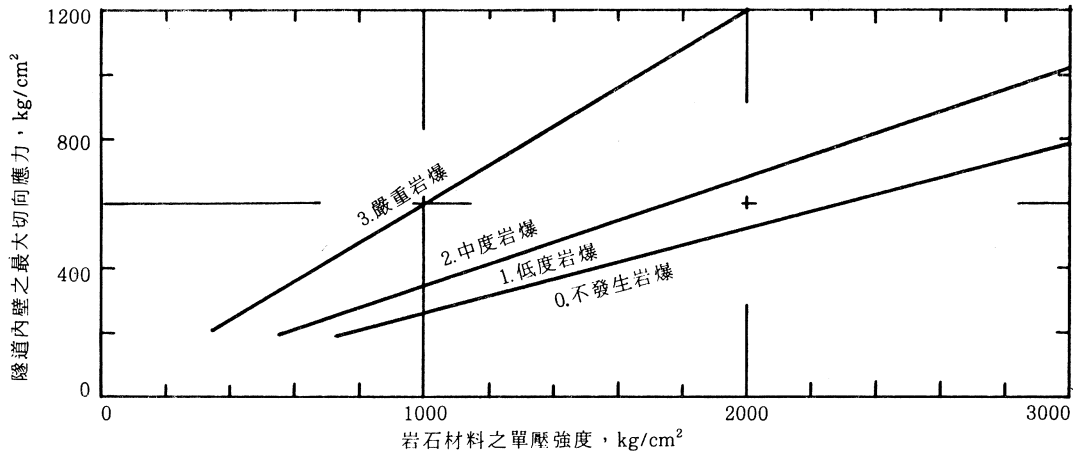


圖11.4 岩爆潛勢之分級(根據 Russenes, 1974; Broch and Sφrheim, 1984改繪)

超過1500m之處，發生岩爆，隧道側壁岩石跳離原地，彈入隧道之中。為克服岩爆，總共用了16萬支岩栓。

Mont Blanc 隧道在通車之後，曾補辦當地應力試驗二位置，皆由隧道壁鑽進岩盤內辦理之。

	位置一	位置二
最大主應力		
σ_1 (bar)	500~800	350~420
最小主應力		
σ_2 (bar)	40~190	95~145
覆蓋壓力(bar)	530	—

推估在未挖隧道前之當地應力為 $\sigma_z = 500\text{bar}$ ， $\sigma_x = \sigma_y = 0.4\sigma_z$ 。岩石材料單壓強度 σ_c 為960~1130 bar。隧道內壁之最大切向應力，根據彈性理論已接近其單壓強度，由圖11.4可見，岩爆潛勢嚴重。

2.5 活性斷層

活性斷層，在地震之時，在潛變之時，皆有相當大之錯動。隧道若與活性斷層正交，則可能在斷層活動之時被破壞。隧道若與活性斷層同行，則情況更為不利，全線都有受破壞之可能。即使二者平行，也是不妙，因為活性斷層之寬度常常很大，斷層線附近地盤必然脆弱。在其中開挖隧道，施工困難，支保需求必大。因此在選線之時，宜及早調查活性斷層之位置、及其寬度，以求避免意外災害、縮短工期、降低工程費用。

斷層，即使不是活性者，也很脆弱，能避開最好。萬一不能避開，寧願隧道與之正交，也

不要同行(圖11-5)。

2.6 與河谷之相關性

河谷，地表上之弱點。河谷解壓所造成之惡果至少有九項之多(洪如江，民國70年)，其可能與相近隧道有關者為：兩岸之開口節理、小型逆斷層、斷層泥、空隙及背斜等等。

隧道，如太接近河谷且平行者，如圖11.6所示之隧道A，河岸因解壓而生之開口節理，可能逐片向河谷內翻落，隧道一側暴露或下側掏空，終於破壞。圖11.6中之隧道B，略向山側內移，遠離應力解除所產生之開口節理，則較為安定，但可能損失觀光機會。

河谷解壓之後，愈接近河谷之處，其最大地壓力 p_1 與最小地應力 p_3 之差愈大，如圖11.7所示。而隧道內壁最大切向應力 $(\sigma_{\theta\theta})_{\max}$ 為：

$$(\sigma_{\theta\theta})_{\max} = 3p_1 - p_3$$

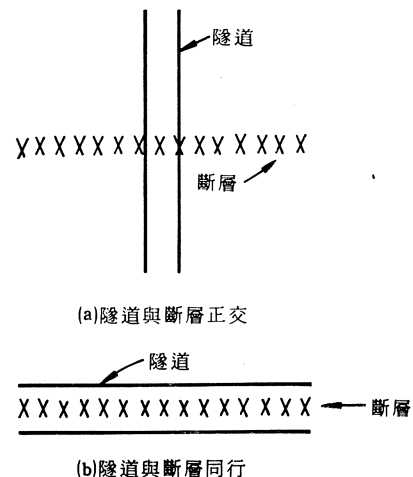


圖11.5 隧道與斷層正交而不同行

因此，隧道愈靠近河谷，如圖11.6中之隧道A，其內壁最大切向應力也會大，岩爆機會也愈大。隧道遠離河谷(圖11.7之隧道B)，地壓力較為均衡，當 $P_1 = P_3 = P$ ，則 $\sigma_{\theta_0} = 2P$ 。

此外，若在河床下開挖隧道，則河川水流或伏流水可能湧入隧道之中。

2.7 不穩定及軟弱地層

在不穩定或軟弱地層中開挖隧道，不但開挖之時困難多，支保量大、意外災變機會大，而且完工之後還有可能整條隧道隨不穩地層橫移或扭曲者，不得不事先注意。茲舉出幾種不穩定及軟弱地層之例，討論如下：

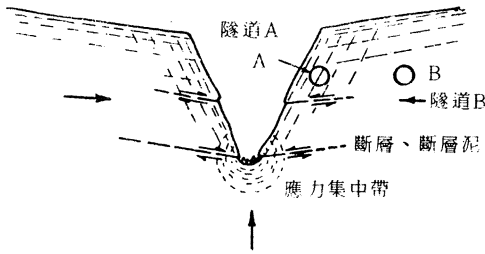


圖11.6 狹谷因解壓而產生開口節理等等惡果 (Patton & Hendron Jr., 1974) 對隧道之影響(隧道A及B為筆者所加入)

2.7.1 崩積土

崩積土之邊坡穩定安全係數，常小於1.20，甚至接近於1.0，織地疏鬆，內部多水。暴雨或久雨，皆可能使原來已經過高之壓力水面更形升高，促進滑動。坡趾之少許挖動，也可能

造成坍方。在這種地層中開挖隧道，湧水必多，甚至有整條已挖隧道被淹沒之例；而土石疏鬆，難於自立，寸寸開挖，皆需支保，甚至必須先行灌漿或打入插板(Forepolling)然後再挖者。就算全線貫通，甚至已經開始使用，也可能會有扭曲、全線橫移、或隨崩積土層之全面坍方而滑落坡下。因此，及早發現崩積土之位置、範圍、及性質，對隧道之選線極為重要。

北迴鐵路谷風隧道，位於崩積土層之底部(圖11.8)。開挖之時困難重重，後經改明挖通過此一崩積土區。由圖可見，若在選線之時，將隧道線略向西移或略向下移，即可位於相當良好之岩盤之內。

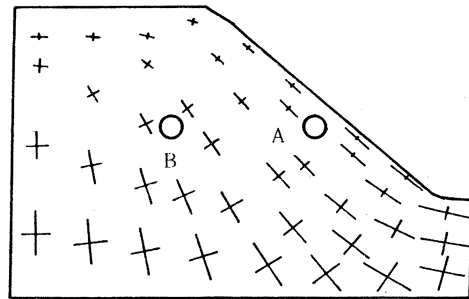


圖11.7 河谷解壓後河岸內之地壓力分佈(Broch and Sphiheim, 1984)，長線為 P_1 ，短線為 P_3 (註：隧道A及B為筆者所加)

2.7.2 膨脹性地層

某些地層，係由火山灰構成，開挖之時，迅速膨脹，已挖斷面，在數日之內，趨於閉合，甚至重型鋼支保也被擠壓扭曲，難於阻擋隧道斷面之縮小。

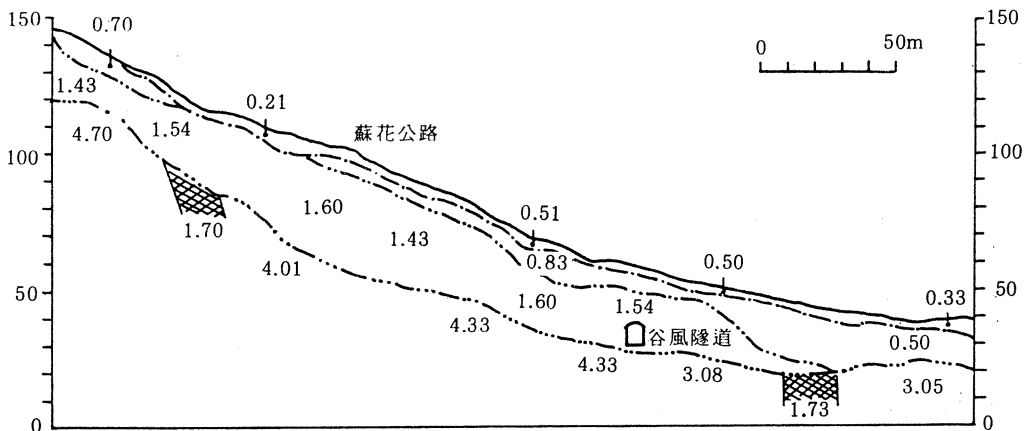


圖11.8 北迴鐵路谷風隧道橫斷面位置與地盤中各傳波速度層之相對關係、圖中數字為傳波速度 km/sec (潘國樞，梁敬豪，民國73年)

在此種地層中開挖透道，採用岩栓之效果可能最佳，壁面以噴漿(有網)保護以免小塊或小片脫落。

膨脹性地層，常與火山灰、風化蛇紋石、海積黏土等有關。

2.7.3 石灰岩多洞穴地區

石灰岩地區，常有水蝕洞穴及伏流水，岩體中又常夾泥。在這種地層開挖隧道，洞穴填不勝填，湧水、漏水最大之處，甚難堵塞或排除。岩栓、岩錨之灌漿，拱頂之填隙灌漿也可能發生超出預算很多尚無法灌飽之困境。

2.7.4 剪動之蛇紋石地層

蛇紋石之軟弱者或曾經剪動者，其剪力強度極低，摩擦角有低至 8° 者，致開挖時變形量大，支保設計困難之至，尤其是有大片落盤之可能。

2.7.5 風化層

熱帶及亞熱帶，地層之風化深度可能很大。風化層之強度，原已甚低，尤其是綠泥石、滑石、石膏、石墨等之片岩，以及某些頁岩，風化之後，非常不穩定，甚至在空氣中自行剝落，遇水更形加速風化。

2.7.6 水位下之飽和砂土

微濕而未飽和之砂土，尚有假凝聚力；一旦飽和，全無凝聚力；若浸於水位之下，不但沒有凝聚力，而且還有孔隙水壓，拆損其剪力強度。一般隧道之支保需求，常以水位下之飽和砂土為最高亦即100%，作為比較之尺度。

2.7.7 土、岩交界

土壤岩石交界，變形性及強度不連續，設計及施工皆屬困難。岩石層若透水性不佳，則土、岩交界積水必多。此外，土、岩交界必參差不齊，開挖時軟硬變化無常，開挖工具難於安排，事先估價難於準確。

三、隧道設計之重要地質因素

3.1 當地應力(In-Situ Stresses)

土木工程結構之設計，首先估算荷重。隧道及地下工程(包括地下廠房、岩窖、等)以外之絕大部份土木結構物，其自重及活重，就是荷重的大部份；而堅硬地盤中或覆蓋較深之隧道及地下工程，鋼筋混凝土、軌道、甚至火車頭及貨物之重量，皆可勿略不計，因為大地應力及岩壓之大小，常為這些重量的10倍甚至100倍。例如明湖地下電廠之鉛直向當地應力 $\sigma_x = 39 \text{ kg/cm}^2$ ，水平向當地應力 $\sigma_y = 27 \text{ kg/cm}^2$

，剪應力 $\tau_{xy} = 3 \text{ kg/cm}^2$ ；挪威 Heggura 隧道，當地應力高達200至300 kg/cm^2 。

在隧道選線之時，所考慮之地壓力(Earth Pressure)，係以區域性且與大地構造(Geotectonics)有關之應力，因此以大地應力(Tectonic Stresses)來考慮，尚屬洽當。

在隧道設計之時，不得不考慮局部之應力變化，例如接近河谷之隧道(例如圖11.6及圖11.7之隧道A)，其所受到之地壓力，已非該區域大環境下之一般大地應力，而已經受到河谷解壓之調整，因而稱之為當地應力。在開挖之前的當地應力，為靜止地壓力(Earth Pressure at Rest)，但靜止地壓力係數K。常大於1.0，如圖11.3所示。隧道開挖之後，地壓力逐漸因隧道淨空之縮小而變小，至最小值，稱為主動地壓力(Active Earth Pressure)。隧道變形若不在主動地壓力之前穩定(由支保工平衡之)，岩壓回升，可能達到Terzaghi(1946)所估之岩壓。

早年之隧道，斷面小、覆蓋小；開挖之時，爆破威力常常太大；開挖之後，支保工建立之行動緩慢、支保工與岩壁不密接，因此，隧道天盤鬆動(Loosening)至地拱發生作用為止，而鬆動之岩盤高度通常正比於隧道直徑而反比於岩盤之品質。鬆動之岩盤，加壓於支保工，成為岩壓(Rock Load)。

當隧道斷面愈來愈大，開挖之時，已經不用爆破(Bombing)而採用溫和開炸(Smooth Blasting)技術，使開炸出來的岩壁幾乎沒有破裂，並且迅速且及時地建立支保工，使隧道變形小，岩盤的鬆動範圍小，支保工需求少。

由於隧道工程之進步，如上所述，因此，隧道設計對當地應力的態度也有極大的變化。早年，支保工(常是剛性的鋼支保及混凝土)建立於開挖空間之週圍，以抵抗陷落下來之鬆動岩盤。後來，由於對工程地質及岩石力學的瞭解，支保工採用半剛性甚至柔性單元，深入岩盤，施加微量之圍壓(Confining Pressure)，使週圍岩盤發揮抗剪強度，甚至抗壓強度，以抵抗主動地壓力。不過，近來對當地應力的態度，又進入了新的境界，體認隧道週圍各方向的當地應力皆不相同，也未必需要 360° 都有支保，甚至也未必需要左右對稱的支保，有時，只要在主應力差太大的角落安裝岩栓就可以了。

覆蓋淺者，但為風化土，或為高度破碎岩盤，或因主要弱帶通過，不但大地應力作用不

顯著；當地應力之量測困難且意義不大。隧道之穩定，受弱面、裂隙之影響較大。

3.2 地質構造

3.2.1 主要弱面之方位 (Orientation of Major Weak Plane)

一般之原則是：隧道長軸寧願正交主要弱面而不要與之同行(平行)。茲就隧道軸向、開挖前進方向、主要弱面走向，主要弱面傾角等四項因素之組合，分別示其對隧道開挖穩定性之利害關係如圖 11.9。

隧道覆蓋很淺者，地盤完全風化或完全破碎，弱面方位之影響不顯著；覆蓋淺至中等者，弱面常常已受風化作用，弱面正應力及剪力強度皆低，弱面之存在對隧道之開挖極為不利，因此上述主要弱面之方位關係重大；覆蓋深者，弱面之正應力及剪力強度皆高，因此大地應力之作用顯著而弱面之影響相對降低。

3.2.2 弱面之組數 (No. of Weak Plane Sets)

弱面，如僅有一組（或僅有一組為顯著者），則異向性大，弱面方位與隧道軸向及前進方向關係很大（已於3.2.1討論），設計用之岩石力學參數也具有異向性。弱面如果有三組或更多組，則異向性不顯著，而岩盤由弱面切割成許多岩塊，這些岩塊可能成為落盤的重點。

3.2.3 岩塊之尺寸 (Block Size)

地盤如由三組或更多組弱面切割成許多岩塊，則弱面之間距 (Spacing) 決定了岩塊之尺寸 (及形狀)。岩塊小於或遠小於隧道斷面者，易於發生落盤；岩塊大者，天盤部份易於促進拱作用而避免落盤。岩塊之大小，也影響到支

保工（例如岩栓、鋼支保）之密度及長度之設計。

3.2.4 弱面之品質及內涵

弱面之風化腐朽狀況，裂縫之內寬及夾泥之性質，也影響到單一弱面以及整個岩體之強度、變形性、及透水性，對隧道之設計，極為重要。

3.2.5 不穩岩楔與關鍵岩塊

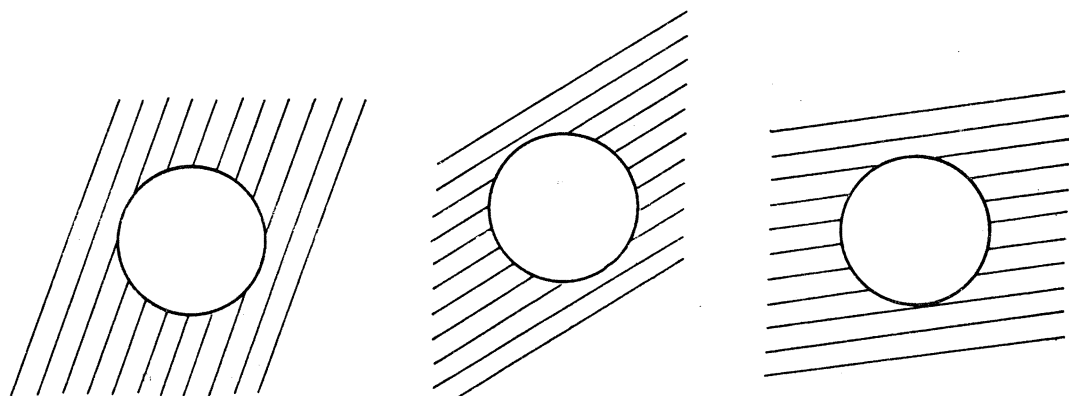
地質構造上之弱面，將岩盤切割成許多岩塊，當隧道開挖之後，有些岩塊可能不穩。找出不穩岩楔 (Unstable Wedge) 予以固定的作法，在英國 Dinorwic 抽蓄水力發電計畫之地下電廠工程中，曾經應用 (Croney et al, 1978)，圖 11.10。Goodman & Shi (1985) 稱不穩岩塊為關鍵岩塊 (Key Blocks)，圖 11.11。

不穩岩楔或關鍵岩塊，皆須由弱面及開挖面（在岩坡之情形，可以為自然坡面）所切割成有限大小並且為可動者。通常，不穩岩楔一旦脫落，將造成其他岩楔之不穩。

3.3 地質材料或岩體之力學特性

地質構造不顯著之地盤，例如未固結土壤、高度風化破碎之岩盤、軟弱岩盤（例如泥岩）、及厚層岩盤（例如厚層花崗岩）等，其材料性質成為隧道設計上的重要因素。尤其是材料上的強度、變形性、透水性及耐久性，都必須在設計時加以考慮。

岩盤之中，如有弱面，則整個岩體之力學性質是設計上所必需的資料。如何求得岩體之力學性質，請參閱作者另文（工程地質之計量及其應用，土工技術雜誌第六期）。



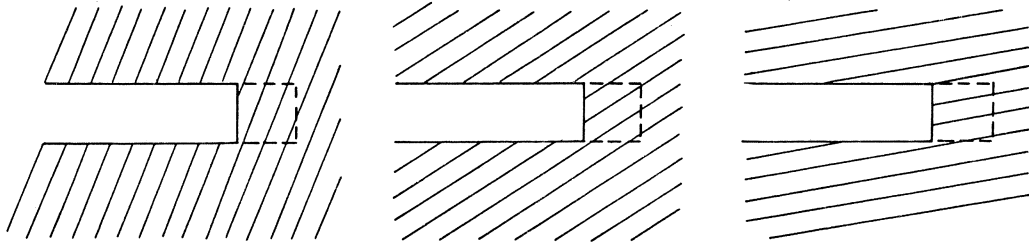
傾角45°~90°，岩塊滑落、墜落最不利

傾角20°~45°，小塊墜落，尚可

傾角0°~20°，岩塊墜落，不利

A. 主要弱面走向 // 隧道長軸

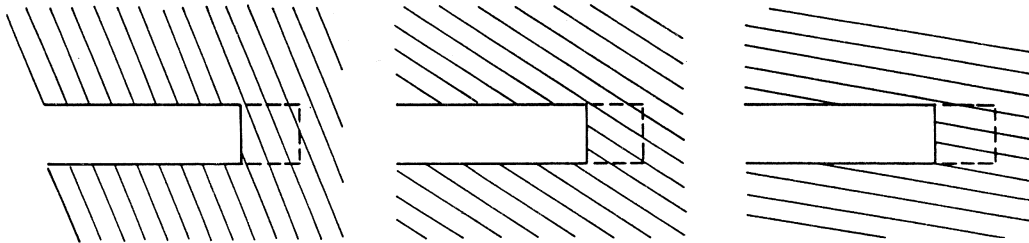
圖 11.9 主要弱面方位對隧道開挖穩定性之關係 (1/3)



傾角 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ，小塊墜落，尚可 傾角 $20^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ，岩塊墜落或滑落，不利 傾角 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ，岩塊墜落，不利

B.主要弱面 \perp 隧道長軸，隧開前進方向逆於弱面傾向

圖11.9 主要弱面方位對隧道開挖穩定性之關係(%)



傾角 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ，偶有小塊墜落，最有利 傾角 $20^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ，偶有小塊墜落，有利 傾角 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ，岩塊墜落，不利

C.主要弱面 \perp 隧道長軸，隧道前進方向同於弱面傾向

圖11.9 主要弱面方位對隧道開挖穩定性之關係(%)

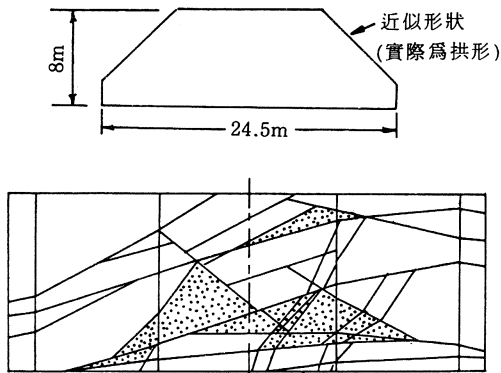


圖11.10 英國 Dinorwic 地下電廠試挖段中，某一小段天盤之展開圖，不穩岩楔以陰影顯示(Croney, Legge & Dhalla, 1978)

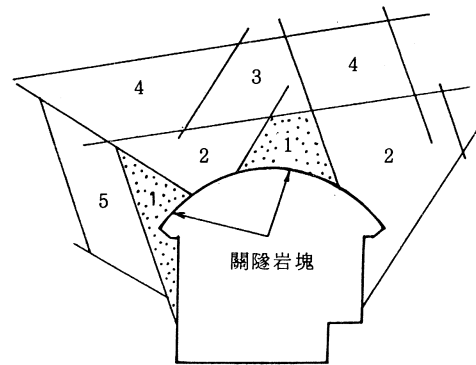


圖11.11 關鍵岩塊(Goodman and Shi, 1985)

3.4 地下水壓及地下水量

地下水壓高者，弱面之有效正應力低，剪力強度也低，岩楔或岩塊易於被推擠而脫落或滑動，必須增加支保工或設計排水措施。

地下水量大者，如預計坑內排水不足於克服，則須預為外圍排水（例如平行之排水廊道）或外圍灌漿之設計。

四、隧道施工之重要地質因素

4.1 地質條件之均勻度

隧道施工，若地質條件均勻，則易於採用同一種開挖方法、同一系統的支保工，並且，已挖段的經驗有助於未挖段的預測，常可使工期縮短、經費節餘、災變少。若地質條件不均勻，剛剛遭遇堅硬岩石，馬上又碰到軟弱地帶，則上述優點全失，而且也難於採用現代化全自動隧道機(TBM)施工。

4.2 斷層及斷層泥

隧道開挖進行中，遭遇斷層，常發生斷層泥、斷層屑伴同地下水湧入隧道已挖段，致人

員傷亡、機具受損，重新打通困難者。

4.3 湧水量

湧水量大，施工必然困難。有時，造成暫時停工，等待排水後再進；有時，需另開排水廊道或外圍灌漿阻水克服之。

4.4 主要弱面或弱帶之方位

若主要弱面或弱帶與隧道同行，則施工甚感痛苦，必須長期抗戰到底。若主要弱面走向正交於隧道長軸且傾向坑內者，則工作面 (Face) 常有整片岩盤滑落坑內，危害正在從事開挖工作之人員及機具，有時，可以向前打入岩栓安定前盤 (Heading) 然後再挖除之 (浪費難於避免，亦不得已之措施也)。

4.5 岩爆

岩爆對人員及機具之威脅極大，通常以岩栓、金屬網或開鑿消壓廊道克服之。參閱2.4。

4.6 岩石之硬度(Hardness)

隧道之開挖，如採用開炸法 (Blasting)，則炸藥孔鑽機鑽頭之種類、磨耗、與速度，皆因岩質之硬度而大有不同；如採用挖岩機 (Header 或 Heading Machine) 開挖，則岩質之硬度 (及強度) 也影響挖岩機轉頭之選擇；如採用隧道機 (TBM) 開挖，則岩質之硬度 (及強度)，影響切削刃口之選擇及隧道機推力之大小。

4.7 岩石之韌度(Toughness)

有些岩石，強度及硬度皆非甚高，但鑽頭及切削刃口却難於深入，不發生鑽、削作用而造成互磨現象；開挖之時，難於將岩石大片撕脫而僅挖出幾道小而淺之槽溝。

4.8 弱面之間距

岩盤弱面之間距，影響開挖方法，參閱作

者另文 (工程地質中之材料因素，地工技術雜誌第三期)。

參 考 文 獻

洪如江(民國70年)：「環境因素在山崩中之作用」工程環境會刊第二期63~72頁。

潘國樑、樑敬豪(民國73年)「地球物理探勘」中華民國73年近代工程技術討論會大地工程與地下結構組論文「台灣地區工程地質調查與岩石試驗發展」中之四

BROCH, E. and SØRHEIM (1984) "Experiences from the Planning, Construction and Supporting of a Road Tunnel Subjected to Heavy Rock-bursting." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 17:15-35

CRONEY, P., LEGGE, T. F. and DHALLA, A. (1978) "Location of Block Release Mechanisms in Tunnels from Geological Data and the Design of Associated Support" *Computer Methods in Tunnel Design*, ICE, London

GOODMAN, R. E. and SHI, GEN-HUA (1985) *Block Theory and Its Application to Rock Engineering* Prentice-Hall, N. J.

HOEK, E. and BROWN, E. T. (1980) *Underground Excavations in Rock*, IMM, London

PATTON, F. D. and HENDRON Jr., A. J. (1974) "General Report on Mass Movement" *Proc. 2nd Intl. Cong. of the Intl. Assoc. of Engg. Geolts.*

RUSENES (1974) 請見 BROCH & SORHEIM (1984)

SELMER-OLSEN, R. and BROCH, E. (1982) "General Design Procedure for Underground Openings in Norway" a contribution to *Norwegian Hard Rock Tunnelling*, Pub. No.1, Norwegian Soil and Rock Engineering Association, Trondheim

勘誤：技術講座專欄 以「工程地質在水庫工程之應用」一文中 圖9.2 漏排 (KNILL, 1970)。