

參加2001年ITA年會及考察歐洲長隧道施工與管理

心得報告



曾令杰(工程組)

經濟部水利處中區水資源局

中華民國九十年八月

目 錄

	頁次
一、 前言	1-1
二、 大會研討主題摘要	2-1
三、 隧道歷史與考據	3-1
四、 義大利高速鐵路隧道工程(Bologna 至 Florence)	4-1
五、 Lotschberg 隧道(南口).....	5-1
六、 瑞士 Gotthard Base 鐵路隧道	6-1
七、 心得及建議	7-1

附錄

隧道設計與施工新理念 - ADECO-RS

摘要

鑑於世界各國對於鐵、公路興建或大型水資源開發等之隧道設計皆有朝大斷面或大型化之趨勢，開挖機械日新月異，隧道施工趨向工業化、自動化，以高效率機具克服各種地質狀況。除技術上之掌握外，財務支援亦是隧道興建重要因素，工程風險評估（Risk Assessment）之辦理方式除技術可行性之風險評估外，隧道地質風險之預測及合理之分攤模式亦為順利解決近年來世界各國推動B.O.T方式施工過程遭遇之各種爭議。隨著環保意識高漲，施工過程產生之各種污染源對環境及生態衝擊在在使設計及施工產生重大影響，未來環境影響評估、防範及保護措施均需更為嚴謹。大量既存隧道受自然及人為因素，隨著年代久遠必需加以維修，而隨著大眾運輸量之快速成長則有擴寬隧道之需求，如何在現有隧道擴充斷面又需兼顧維持日常運輸功能亦為工程技術之一大挑戰。

一、前言

經濟部水利處中區水資源局研提九十年出國計畫 考察歐洲長隧道施工與管理，並奉行政院核定。適逢世界隧道協會 (I.T.A) 2001 年年會在義大利米蘭舉行，本次考察即藉由參加年會及會後隧道工程觀摩活動達成研習目的，本行程由中華民國隧道協會邀集國內各工程機構組團，參加 2001 年世界隧道會議 (ITA 2001 World Tunnel Congress) 及考察歐洲目前正施工中之公路、鐵路 (含高鐵) 等隧道工程，團員共二十三名，由本局 (經濟部水利處中區水資源局)、台電、東部鐵路改善局、公路局、國工局、中華顧問工程司、榮工公司、中興顧問、聯合大地、台大土木系、介興營造、弘浚公司、培頓公司、利德公司、隧道協會等十五個單位組成。

2001 年世界隧道會議係由義大利及瑞士兩會員國共同在義大利米蘭會議中心 (Centro Congressi Milano Fiori) 舉辦，會中除例行之會員國會議外，並有三天之隧道技術性論文發表及最新隧道工程展覽，會後並舉辦數天之義大利、瑞士隧道施工觀摩活動，筆者選擇參加大會舉辦之瑞士 Lotschberg 隧道工地參觀。

本次行程如表 1.1 所示。參加 ITA 活動之前後，並安排參訪義大利、瑞士及德國多處隧道工地及工程單位，此次考察收穫良多，茲彙整心得報告以供本司同仁之參考。

表 1.1 2001 年 ITA 年會及工程參觀考察行程表

	日期	預定參觀考察行程
1	6/7 (四)	台北 / 香港 / 羅馬 班機：國泰 TPE HKG CX531 2035/2220 HKG FRA CX289 2345/0600+1 FRA ROM LH3988 0730/0915
2	6/8 (五)	羅馬 班機於早晨抵達，隨即展開拜會行程。
3	6/9 (六)	羅馬 -- 佛羅倫斯 上午專車前往文藝復興發源地--佛羅倫斯，抵達後安排參觀義大利高 鐵隧道工程。
4	6/10 (日)	佛羅倫斯 -- 米蘭 上午從佛羅倫斯出發，午後前往米蘭，18：30 於米蘭會議中心參加 ITA 歡迎雞尾酒會。
5	6/11 (一)	米蘭 參加 ITA 年會研討活動，。20：00 於 Basilica of Sant Ambrogio 參加 歡迎音樂會及雞尾酒會。
6	6/12 (二)	米蘭 參加 ITA 年會研討活動。
7	6/13 (三)	米蘭 參加 ITA 年會研討活動及惜別餐會 Gala dinner。
8	6/14 (四)	米蘭 - 伯恩 - 蘇黎世 參加會後觀摩行程，參觀瑞士 LOTSCHBERG Base Tunnel 南口。
9	6/15 (五)	蘇黎世 參觀 Hagerbach Test Gallery AMG 公司試驗坑道。
10	6/16 (六)	蘇黎世 - 夫賴堡 - 巴登巴登 - 科隆 參觀 Herrenknecht AG 公司 SchwanauTBM 等隧道施工機械製造工 廠。
11	6/17 (日)	科隆 週日休息資料整理。
12	6/18 (一)	科隆 - 法蘭克福 參觀地鐵及高鐵車站建設。
13	6/19 (二)	法蘭克福 / 香港 CX288 1400 / 0705+1 搭機經香港轉機回台北。
14	6/20 (三)	香港 / 台北 CX530 0900 / 1045 結束 2001 年 ITA 年會及歐洲工程參觀考察。

二、大會研討主題摘要

2001 年 ITA 年會由會員國義大利及瑞士兩國之隧道協會合辦，於義大利米蘭之 Milanofiori Congress Centre 舉行，大會程序如表 2.1 所示。相關活動情形如照片 2.1~2.4。年會各場次技術論文發表會共有五場次及一次專題討論，各場次之主題摘要如下：

1. 第一次發表會之主題為隧道歷史與考據：

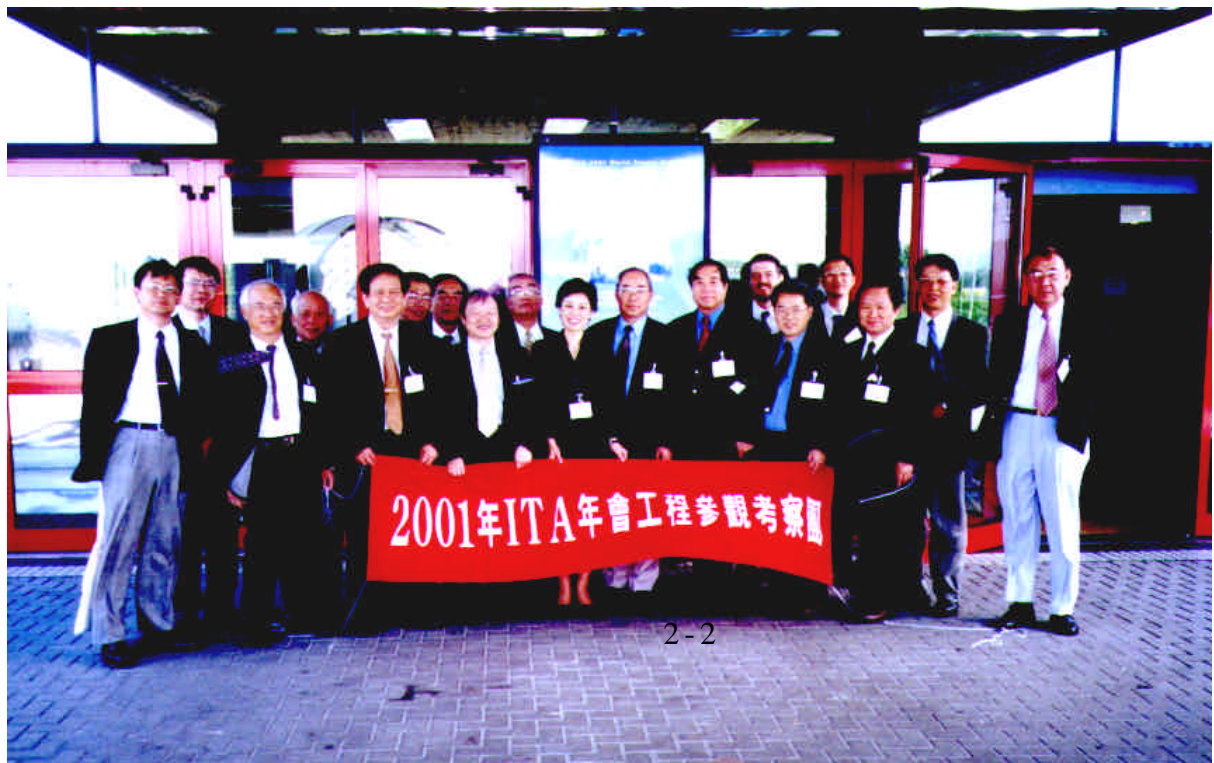
- 地質知識運用於 Eupalinos 隧道設計
- 古代隧道之規劃及配置
- 古埃及之隧道工程
- 古羅馬帝國時代之 Napoli 地區隧道工程
- 隧道工程之地盤反應控制；迄 1960 年代之發展里程碑

本單元所彙整講述歐洲地區古老隧道資料，可了解先民在隧道施工技術及地質調查、記錄等均已具有相當之水準，尤其看到穿越阿爾卑斯山之 Gotthard、Lotschberg 等隧道早期(約 100 多年前)之地質剖面圖，對古人進行地質調查工作之詳細、繪圖之精細等專業素養不禁肅然起敬。而看到古代隧道開挖、支撐所使用之方法、材料、程序，與現代技術相較其實可發覺其中主要原理、原則仍是一脈相傳的。

瑞士技術學院之 K. Kovari 提出「隧道工程之地盤反應控制；迄 1960 年代之發展里程碑」一文，詳述自 1844 年以來隧道施工採用鋼支保、岩釘、噴凝土等支撐構件以穩定地盤之技術發展經過。其特別之一項異議為，NATM 之概念為「隧道支撐襯砌應維持薄且利用仰拱形成環體」，如 Muller 及 Fecker 於 1978 年提出之 NATM 第 10 項原則「細長之臨時及永久襯砌 Temporary and final lining slim」(參照圖 2.1)，早期之襯砌較今日厚重得多(圖 2.1(A))。但事實上早在 1836 年 Brunel 為 Great Western Railway 設計之著名的 Box Tunnel 即採用薄襯砌及仰拱(圖 2.1(B))。

表 2.1 年會程序

	六月十日(日)	六月十一日(一)	六月十二日(二)	六月十三日(三)
上午	一般會議	開幕典禮及第一次發表會(隧道歷史及考古學)	專題討論：計畫財務之風險評估	第四次發表會(地下施工及環境)
下午	工作會議	第二次發表會(隧道施工之工業化)	第三次發表會(隧道更新及擴大工程)	第五次發表會(正進行之主要計畫)及閉幕典禮
晚上	歡迎酒會	歡迎音樂會及雞尾酒會		惜別餐會



照片 2.1 全體團員於年會會場門口合影



照片 2.2 筆者攝於會場入口

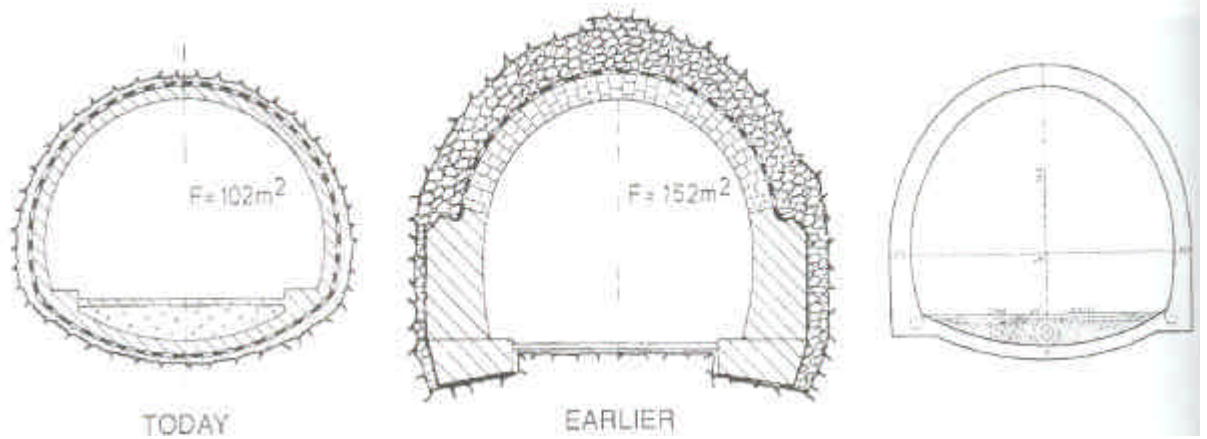


照片 2.3 I.T.A 年會開幕式



照片 2.4 大會演講會場一瞥

(註：大會備有同步口譯英、義、德、法語，照片中前排為公路局楊副局長、左為中華顧問工程司趙副總經理、右為陳福勝經理)



(A)隧道襯砌概念之演進

(B) Brunnel 為 Great Western Railway, 設計之 Box Tunne(London)

圖 2.1 隧道薄殼襯砌支撐概念之相關發展

Kovari 以一系列之隧道支撐構件之運用及地盤反應控制等相關技術之發展歷程強調出 NATM 是被過度喧染的，其實質內容不過是歷來隧道施工前輩已成功運用之岩釘、噴凝土、鋼支保等組成之系統支撐而已。著實是對該工法之技術與背後之商業利益提出相當嚴苛之質疑，可謂發人深省之論述。

2. 第二次發表會之主題為隧道施工之工業化

- 隧道工程技術之最新發展
- 義大利 Bologna 隧道計畫：大直徑土壓平衡式 TBM 之設計準則
- 義大利隧道施工之工業化
- 硬岩盤之 TBM 開鑿率
- 自由斷面開挖機隧道開挖自動化
- 硬岩高速隧道開挖
- 最新 Atlas Copco (自動化) 鑽堡在西部鐵路及地鐵隧道之施工
- TGV MEDITERRANEE 隧道全斷面開挖工法
- 高績效鑽炸工法

本單元所發表之論文以隧道施工機械製造廠商之論著為主，德國之 TBM 製造廠 Herrenknecht 公司由老闆 M. Herrenknecht 親自出馬以「隧道工程技術之最新發展」為題，發表該公司近十年來在硬岩 TBM 及軟土潛盾機、推

管機等之發展業績，尤其對加泥土壓平衡式潛盾工法在台北捷運隧道及硬岩 TBM 在歐洲高速鐵路隧道之應用等大肆宣傳。

其他之論文發表者多以 TBM 或潛盾機之開挖、環片組裝、背填灌漿、地層狀況探測、施工自動監測系統等最近之運用狀況，尤以自動化為主要之重點。例如，世界著名之隧道施工設備製造商瑞典之 Atlas Copco 公司以自動定位鑽堡之發展為題等。另有對 TBM 等隧道開挖機械之施工效率、削刀磨耗等提出統計分析者，亦有對巨臂型削岩機（Roadheader）提出報告者，顯見隧道施工追求高效率、提高施工安全、降低勞工需求、克服困難地層等為隧道工程界之共識及努力之目標，不論在機械開挖或傳統鑽炸設備之發展及改良均有相當可觀之成就。

3. 專題討論-計畫財務之風險評估

- 基礎建設之財務支應—公私部門之角色
- BOT 計畫成功之先決條件
- 計畫財務之法律觀點
- BOT 計畫之地質風險
- 都會區經濟可行性及計畫財務
- 非都會區計畫財務之地質風險

本單元之安排顯見大會深覺一個重大隧道工程順利推動之要件，除技術性之掌握度外，財務之支援亦為其重要因素。歐洲地區經過約十餘年之經濟衰退之後，近四、五年來各項經濟建設蓬勃發展，歐盟（EU）戮力推動各國區域合作居功甚偉。在政府部門預算有限之情況下，謹慎評估工程之經濟可行性，作好財務計畫，為工程推動之重要搖籃。近年來世界各國推動以 BOT 方式辦理基礎建設，對隧道工程而言，因地質構造之不確定性，其風險相對而言是較高的。工程風險評估（Risk Assessment）之辦理方式，除技術可行性之風險評估外，地質構造風險之預測及合理之分攤模式亦為順利解決施工過程遭遇之各項爭議之重點。

4. 第三次發表會之主題為隧道更新及擴大工程

- 老舊隧道、耐用性延長之修復工作

- 擴大鐵、公路隧道之新施工法
- 基於反算分析之地下結構維修診斷
- 地下鐵隧道橢圓石墨鑄鐵 SGI 環片防火性能研究
- 混凝土耐久性對設計及施工技術之影響—義大利鐵路隧道之經驗
- 瑞士 Simplon 隧道之重建工程
- 義大利白朗峰(Mont Blanc)隧道之重建、結構加強及安全性之改善

隧道設置於地層中持續受地層岩（土）壓、水壓之作用及地下水之滲湧、車輛排氣之侵蝕等，乃至因為車輛碰撞、火災等意外事故，於使用相當時日後勢必會造成若干程度之損壞，必須即時予以整修。而鐵公路交通隧道因為運量之快速成長，每有拓寬之需求。義大利 Societa Autostrade engineering 首先於 1980 年提出將二車道拓寬為三車道並增設一處緊急路肩之需求。而為維持運輸功能，於拓寬工程期間又多需維持原有隧道開放通行。經工程師們的研究，考量如先將預定擴挖範圍之地層予以加固，利用切割機具將擴挖範圍之外週予以切割，並快速完成支撐構件，再運用類似隧道襯砌鋼模之構架將原有隧道予以支撐，應可在開放通車狀況下進行擴挖工程。

5. 第四次發表會之主題為地下施工及環境

- 以色列隧道及供水工程：4000 多年之歷史及將來之展望
 - 南非 Stuckeberg 隧道施工期間之環境影響及減輕措施
 - 捷克 D8 高速公路穿越景觀保護區之環境考量
 - 德國 Rennsteig 隧道之排水系統
 - 義大利 Appia Antica 隧道經過 Regina Viarum 產生之考古及風景重建問題
- 隨著環保意識之日益高漲，隧道施工過程可能帶來之污染源，如棄渣運輸過程可能造成之固體懸浮微粒漂浮，排水可能造成之污染，地下水之影響；隧道營運期間通風系統排出之廢氣可能造成之氣溫、空氣污染，乃至因隧道洞口、通風豎井等設施對景觀之衝擊，生態保護地區環境敏感受體之影響等，對隧道施工技術、工程設施設計等均已產生相當之影響，未來之隧道工程隊環境衝擊之評估必須更為完整，防範及保護措施必須更重視成效。

6. 第五次發表會之主題為正進行中之主要計畫

- 特殊之挑戰：Gotthard Base 隧道
- Groene Hart 計畫之環境需求：世界最大隧道全斷面鑽掘機
- 穿越 Appennines 山 72 公里之 Bologna 至 Florence 高速鐵路隧道
- 在挑戰環境下 Caland 隧道之設計
- 世界第三長山岳隧道施工 - 膨脹及軟弱泥岩地層之開挖
- 印度 27.39 公里頭水隧道 10.15 公尺直徑隧道襯砌
- Parramatt 鐵路工程

歐洲目前正在進行之大型隧道工程，主要以高速鐵路系統為主，其中最大之兩項計畫應屬下列兩項：

- (1) 瑞士境內穿越阿爾卑斯山之交通計畫 (The Alp Transit project) —以將重型貨運自擁擠之公路轉移至鐵路，並提供高速之客運系統，故需降低隧道坡度以提升載運重量及行車速度，而於既有隧道更低之位置增闢新的隧道故稱為基線隧道(Base Tunnel)。其中長達57公里之 Gotthard及34公里之Lotschberg兩雙孔隧道為最大之工程。該兩隧道覆土層高達2300 m ，分別採用TBM及鑽炸法施工以多處工作面同時加緊施工中。
- (2) 義大利境內自高速鐵路建設計畫其中自 Bologna 速鐵路建設計畫其中至 Florence 段隧道工程。

三、隧道歷史與考據

在本次大會的第一場次主題在探討隧道歷史與考據，主講者將人類歷史上最
早施工之隧道工程相關之施工技術及地質構造依據考古學家之發現彙整，包
括西元前三十九年開始施工之古羅馬帝國於 NAPOLI 地區施工之 Crypta
Neapolitana，Grotta di Seiano，Grotta di Cocceio 等三條隧道，其中部份經
整修仍維持可通行之狀況，相關資料如表 3.1 所示。由古代隧道開挖、支撐
所使用之方法、材料、程序，與現代技術相較其實可發覺其中主要原理、原
則仍是一脈相傳的，筆者等深覺有必要介紹給各位同仁參考。

表 3.1 古羅馬帝國 NAPOLI 地區隧道主要特性

隧道名稱	長度(m)	寬度(m)	高度(m)	備註
Crypta Neapolitana	711	4.5	4.5 5.2	2 通風斜坑
Grotta di Seiano	780	4.0 6.5	5.0 8.0	3 水平通風坑
Grotta di Cocceio	970	4.5	4.5 8.0	5 垂直或斜通風井

瑞士技術學院之 K. Kovari 提出「自 1960 年以來隧道施工對地層反應控制
(The Control of Ground Response-Milestones up to the 1960s)」一文，詳述自
1844 年以來隧道施工採用鋼支保、岩釘、噴凝土等支撐構件以穩定地層之技
術發展經過，其中重要技術發展里程碑如下：

1. 地層反應與隧道施工關係

1865 於倫敦鐵路隧道施工過程所作「隧道開挖對接近開挖面地層之破壞影
響」之解釋，如圖 3.1 所示。

2. 地層應力計算模式

- (1) Fayo 於 1885 年提出隧道開挖過程可能因岩體層面走向，致隨開挖發生之破
壞機制模式，如圖 3.2。

- (2) Luthgen於1929年對地層可能因隧道之超挖而逾期上方自然形成地拱之情形，如圖 3.3。
- (3) 1912年 Wismann 對深隧道開挖前與開挖後地層應力變化之解釋，如圖 3.4。
- (4) 1957年Mohr 提出地層反應與隧道支撐特性曲線之關係圖，如圖3.5。

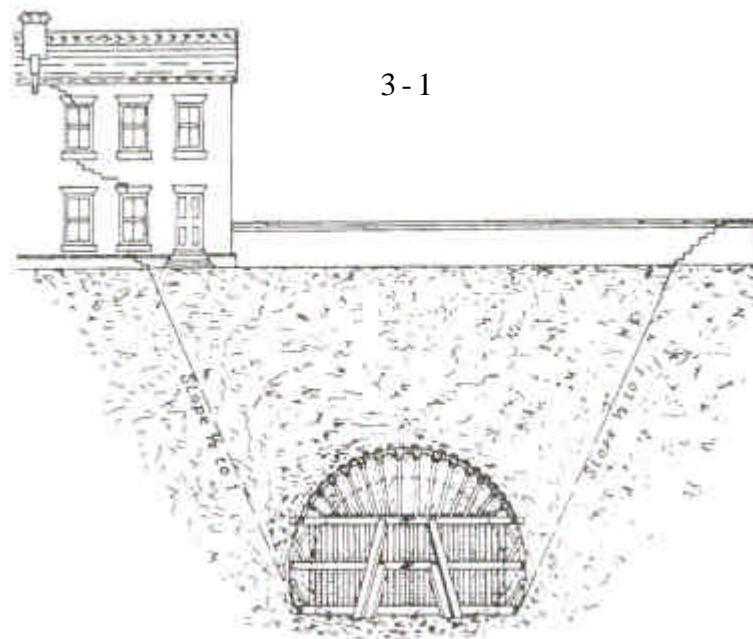


圖 3.1 接近隧道開挖面引起之崩坍情形 (West 1988)

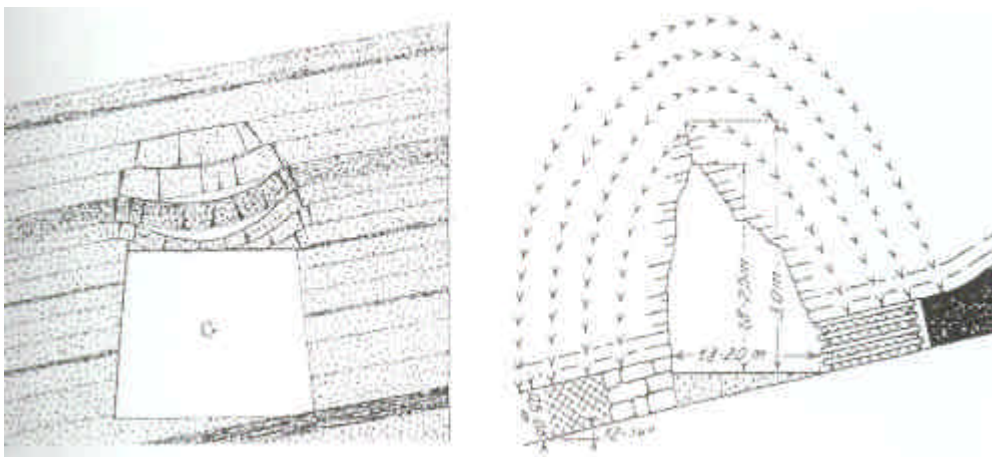


圖 3.2 頂拱岩層層面破壞機制 圖 3.3 超挖上方形成之自然地拱

3-2

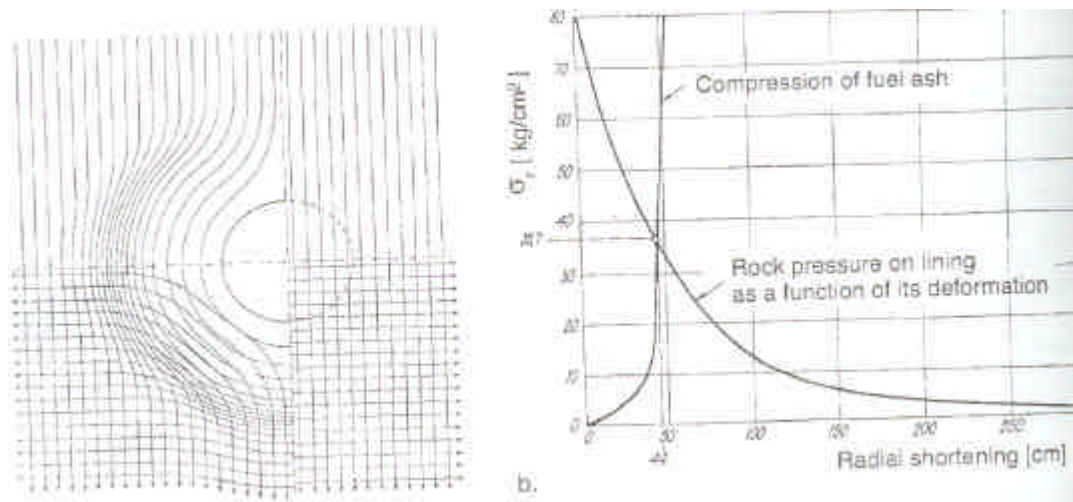


圖 3.4 深隧道開挖形成之應力分 圖 3.5 地層反應曲線與支撐特性關係

3. 隧道支撐系統之發展

- (1) 木支撐 - 1908 1913年Lotschberg隧道南坡道採用之木支撐如圖3.6
- (2) 鋼支撐 - 1880年 Schneider 提出以鋼支保配合木襯板作為隧道臨時支撐支方式，如圖3.7。
- (3) 鋼支撐與木支撐結合使用 - 1906年Simplon 隧道於擠壓段地層採用型鋼與木樑組成支支撐構件，如圖3.8。
- (4) 槽型滑動鋼支堡 - 1948年Frohlich 提出槽型鋼支保滑動連接構件之運用，如圖3.9。



圖 3.6 Lotschberg 隧道南口使用木支撐

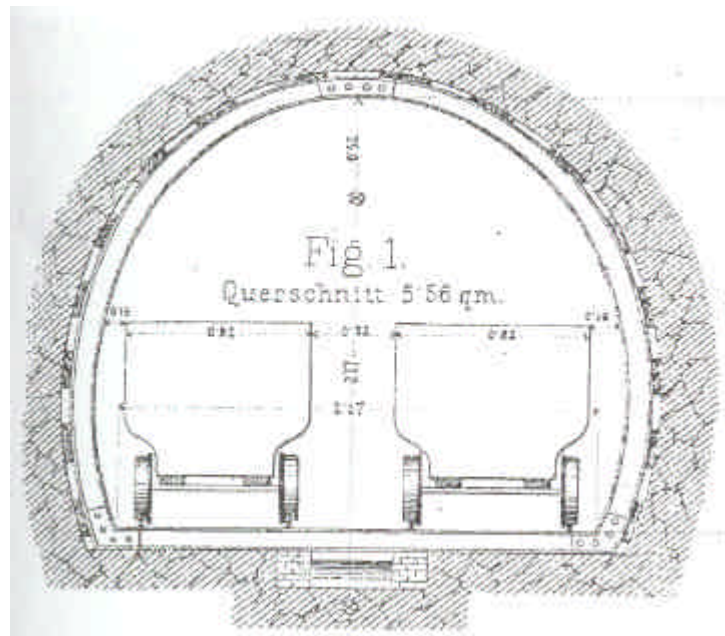
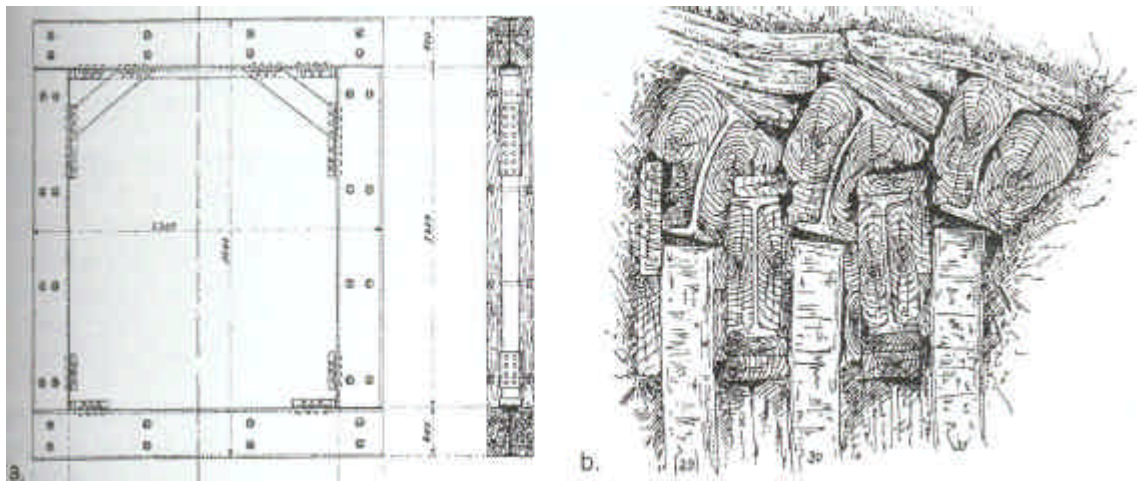


圖 3.7 鋼支保及木襯板臨時支撐系統



(A)鋼支撐及木樑組成支撐構件

(B)鋼支撐損壞情形

圖 3.8 Simplon 隧道採用鋼樑及木樑支撐構件於擠壓地層

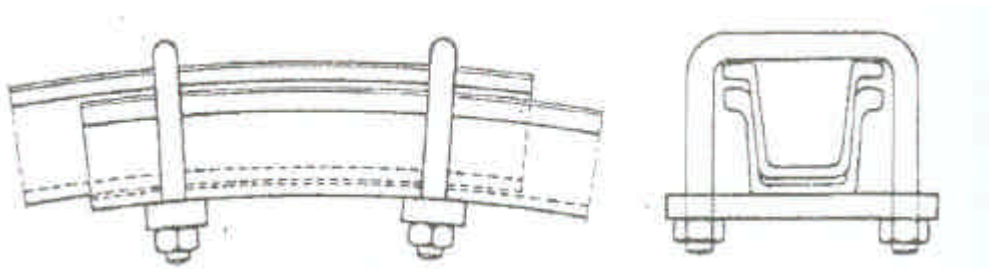


圖 3.9 以滑動接頭連接槽型鋼組成之支撐(Frohlich , 1948)

(5)噴凝土襯砌之使用

噴凝土技術起自1911年美國之C.E. Akeley 發明而或專利之“水泥槍 (cement-gun)”，其後經美國、德國、瑞士等多位工程師之研究發展，諸如：C.Weber，G.Senn，M.J.Stam，等而確立其應用技術。曾使用過之名稱包括：“guniting”、“torkreting”等。

由 Knox and Potter 1920 發表之報告中可了解曾於 Calumnet & Hecla Conglomerate 礦場深達1500m 之坑道中使用該技術以替代木襯板之作用，使用後發現不僅具有防火功能，且需要之厚度減薄，強度高，耐久性良好等優點。至於“shotcreting”一詞則始見於1920年，於美國伊利諾州之鐵路隧道中使用，歐洲則於1927年於瑞士蘇黎世之³⁻Umberg Tunnel 將鐵路隧道改成公路隧道工程中使用，如圖3.10。



圖 3.10 噴凝土運用於瑞士蘇黎士 Ulmberg 隧道 (1927)

(6) 岩釘技術之發展

岩釘技術之發展歷史起自 Stephan Frohlich and Klupfel 於1913年獲得之專利規範(No.302909)，如圖3.11所示。其主旨為「鑽設有效深度之鑽孔至地層內，裝入鋼棒、鋼管或鋼纜以適當方式將其底端固定或全長灌注水泥漿，以將岩層拉結形成一支撐梁體。使隧道頂部及側壁得以穩定支撐，以取代傳統之自底部施設木支撐之方式」。之後約四十年兼有德國、美國等多位工程師進行各種不同之岩釘打設試驗，參照圖3.12，可惜未能立即於隧道工程中運用。至1943 1950年始於美國之礦坑中使用，1952年以後於歐洲開始大量運用。

隧道工程首次使用系統岩釘於1950年美國之懷厄明州(Wyo.)之 Keyhole Dam 工程長約 250m 之導水隧道中。系統岩釘技術之真正突破則以紐約長達

42Km之Delaware 供水隧道工程，如圖3.13。其後分別於歐美地區漸次推廣使用，參照圖2.14、2.15

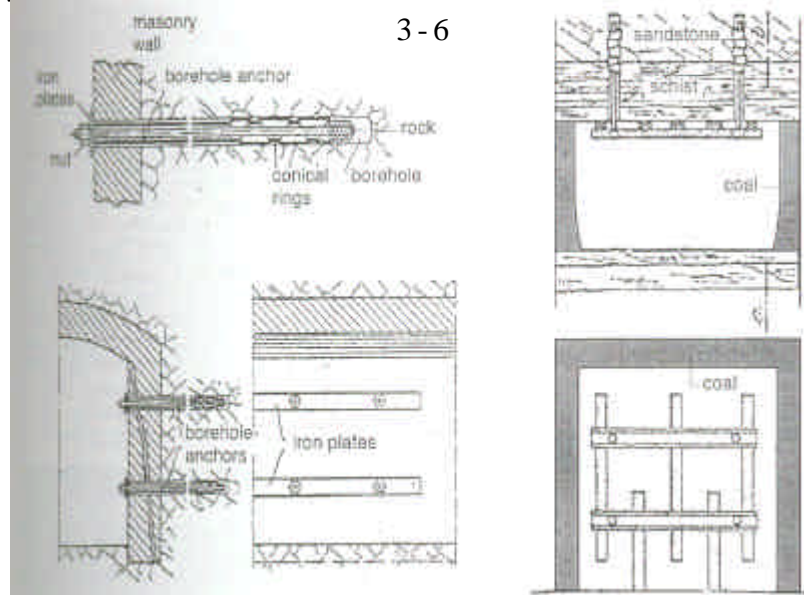


圖 3.11 利用岩釘支撐損壞之側壁及頂拱襯砌（1913 年首度運用）

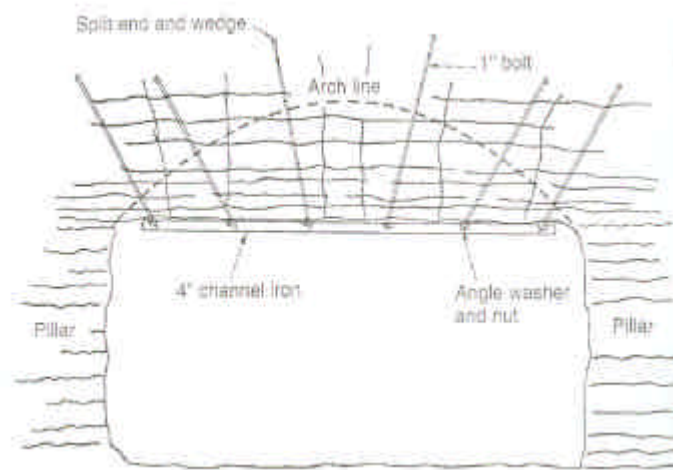


圖 3.12.運用槽型鋼及岩釘支撐開挖面上方鬆弛地層（Weigel 1943）

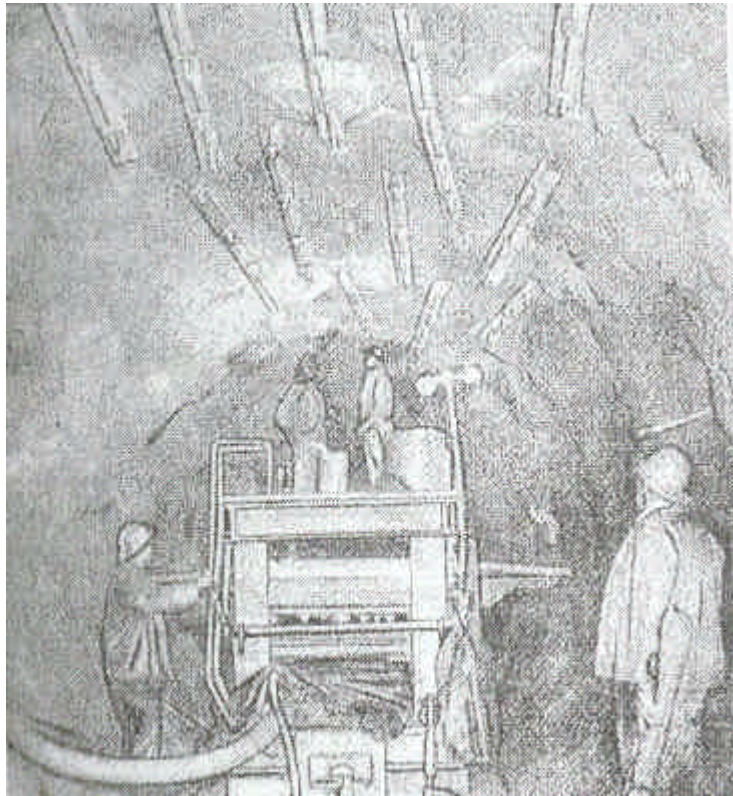


圖 3.13 East-Delaware 隧道使用岩釘支撐頂拱(Weiss 1952)

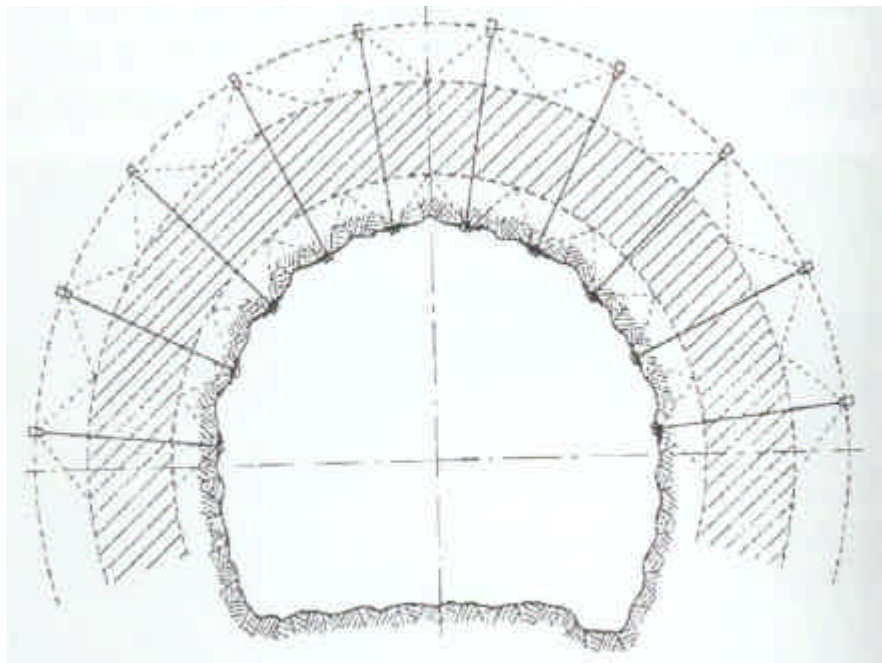


圖 3.14 利用系統岩釘輔助圍岩形成支撐拱圈(Talobre 1957)

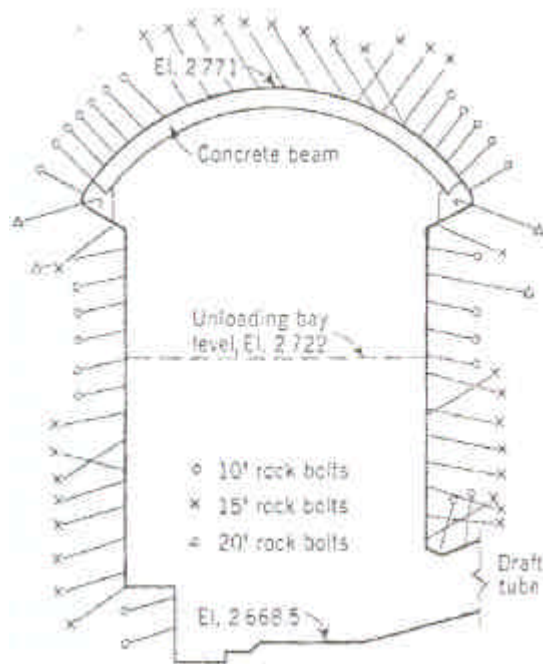


圖 3.15 地下廠房採用岩釘支撐(Snowy Mountain Hydroelectric scheme , 1958)

(7)支撐構件之結合運用

自1930年以來系統岩釘與噴凝土之結合使用已於幾個國家出現過，但多以強調岩釘為主，直至1950年第一部「真正」之噴漿機由瑞士工程師 G. Senn 研發出可使用最大粒徑達 25mm 之骨材，施噴速度達 3m³/h及其他多項改良之後，一個「噴漿工法(shotcrete method)」之新世紀開始展開。在極短時間內大家了解到以噴漿襯砌作為控制地層反應之主要措施。歐洲地區大量之水力發電隧道及交通隧道工程之展開加速此種觀點之擴散，1952年新式噴漿機運用於長達26.7 km 開挖面達21.4m之瑞典Maggia水力發電中之 Verbanò 引水隧道工程，如圖3.16；而噴凝土與岩釘之結合使用亦於該工程中，如圖3.17；1958年於義大利Como 之 Monastero水力發電計畫中長達15.2 km 之導水隧道(直徑7m)工程則使用Senn之噴漿機將噴凝土結合桁型鋼肋(Lattice Girder)作為隧道之支撐襯砌，如圖3.18。

至1960年噴漿工法之技術細節及科學背景已非常完整，很快地在世界各地隧道工程中運用，以取代木支撐，並以「噴漿工法(shotcreting method)」為名在德語系國家(奧地利、德國、瑞典等)普遍地流通。

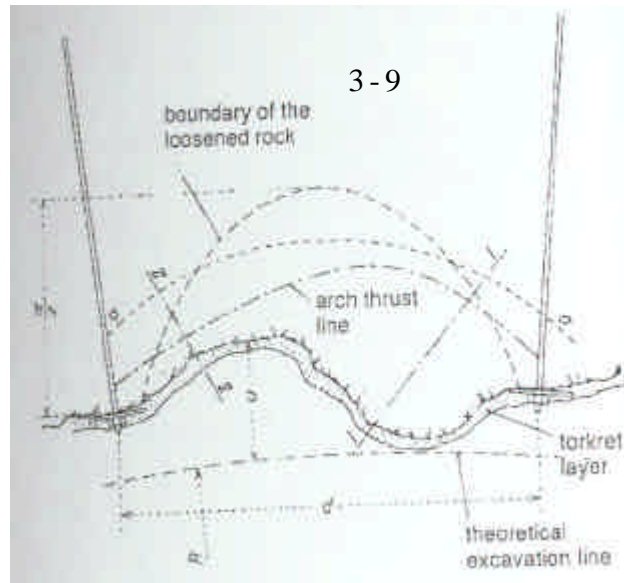


圖 3.16 噴凝土與岩釘之結合效益(Sonderegger 1955)

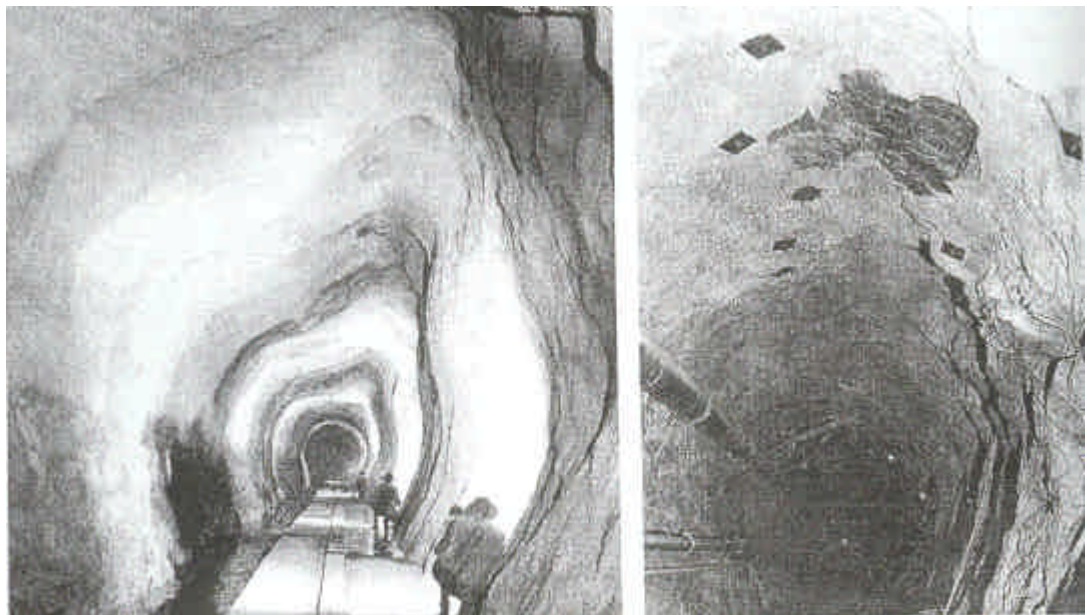


圖 3.17.噴凝土及岩釘運用於瑞典 Maggia 水力發電隧道工程 (1952 1955)

3-

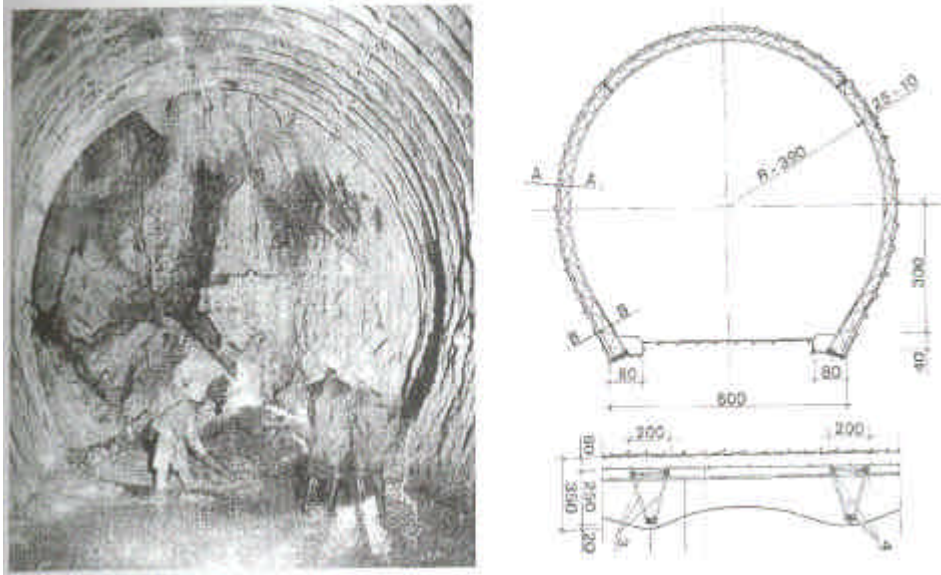


圖 3.18 桁型鋼肋之運用 (1958 年義大利 Monastero 隧道)

(8) NATM名稱之出現

1963年 Rabcewicz 在發表之一篇論文中將「噴漿工法」重新命名為「新奧工法(New Austrian tunneling Method)」聲稱:「噴漿 - 岩釘 - 工法(shotcreting-rock bolting – method)已於奧地利發展並試驗成功」,且表示「由於其發源國家故此工法稱為 New Austrian Tunneling Method ,之後以其首字字母NATM廣泛地流通迄今。

事實上,從隧道工程發展歷程可了解世界上許多工程師均曾致力於避免使用木支撐之努力。其中一個例子, O'Rourke 在1913年一篇文章中提到「任何減少或避免木支撐之使用需要是隧道最重要之技術」。

四、義大利高速鐵路隧道工程(Bologna 至 Florence 段)

本工程係歐洲國際鐵路系統 (Euro₃Rail) 之一環，業主為 TGV，總承包商為 FIAT Engineering，設計顧問為 Lunardi Consulting Engineering。

本段路線自米蘭 (Milano) 至納普勒斯 (Naples) 穿越亞蘋林山 (Apennines) 其中自 Bologna 至 Florence 段長度約 94 公里其中 73 公里 (約 78%) 為隧道，計畫時程 1996-2002 年、計畫金額 25 億美金。自 96 年 7 月開工以來迄今最高以 26 個工作面開挖。

義大利高速鐵路計畫 (Milan-Naples) 相關位置見圖 4.1，其中工程困難度最高的一段位是於 Bologna 與 Florence 之間。



圖 4.1 Blolgna-Florence 段工程位置圖

Bologna-Florence 段全線共有 9 座隧道，隧道總長合計 73.1 km，隧道段佔全線之 93.4%，目前這 9 座隧道及其 13 座聯絡隧道均已動工興建。

Bologna-Florence 段隧道群之相關資料^{4,1}如下：

(1) 隧道數：9

- 全長：59,279.46 m
- 最大坡度：0.15 %

(2) 聯絡隧道數：13

- 全長：8,841.64 m
- 最大坡度：9.35 %

(3) 預計工期：72月

(4) 岩層種類：Sedimentary rocks

- 北段：fine grained sandstone and marl-soft rock
- 南段：limestone, interbedded with marl, lutite-massive rock mass
- 中央段：“argille scagliose” formation：mass highly slickensided overconsolidated clay with random presence of limestone boulders, shear strength as that of an overconsolidated high plasticity clay with 60% drop between peak and residual.

本工程之特色為克服軟弱地層而採用 P.Lunardi(義大利隧道協會現任理事長)所設計之 ADECO-RS 工法。其基本理念係以岩釘等支撐系統加強 (Reinforcement) 岩體自承性 (self-supporting)，控制 (Control) 隧道之變形量 (Deformation)，使隧道開挖施工得以維持再以接近全斷面之施工方式列用大型機具快速施工，並縮短通過不良地層之時間，降低發生崩坍等地質風險。(詳附錄一)

隧道之設計將開挖面岩體 (CORE FACE) 分成三種類型：

(1) 穩定地層 (Stable) - 允許變形量以公分計

(2) 短期穩定地層 (Stable in the short term) - 允許變形量以 mm 計

(3)不穩定地層(Unstable) - 不允許變形

採用之加強支撐設施包括：

- (1)於開挖面打設長FRP岩釘，
- (2)於頂拱打設FRP岩釘使形成傘狀管幕支撐(The RUPM Method)，
- (3)以預切機(Mechanical Precutting)將開挖面前方頂拱切出一環體使開挖時隧道周邊形成一勻滑斷面降低變形量，
- (4)利用噴射灌漿或凍結工法加強前進管幕，
- (5)鑽設頂拱排水孔，
- (6)打設仰拱，
- (7)頂拱輻射分布之岩釘打設，
- (8)噴凝土(配合鋼支保、鋼線網或鋼纖維等之使用以加強之)，
- (9)先撐鋼管。

由現場施工成效觀察可了解，利用輕便之FRP等材料所作之加強支撐對隧道開挖面變形量之控制成效極佳，故可於軟弱地層仍得以相當快之速度施工通過(平均每工作面約為50m/月)。

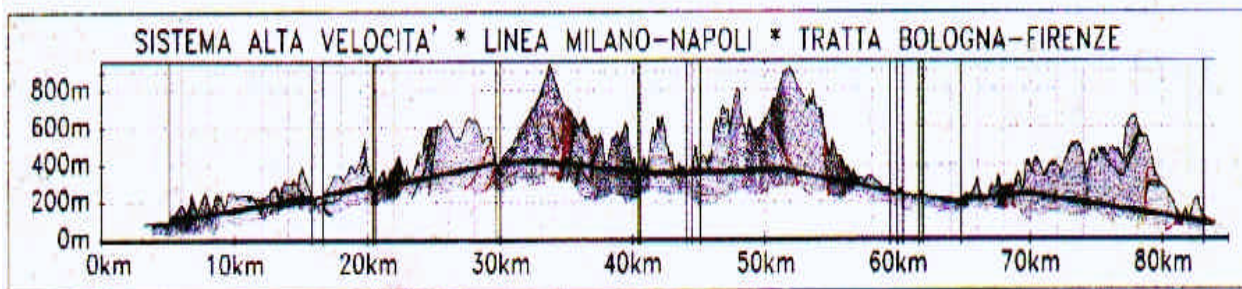


圖 4.2 義大利高速鐵路 Milan-Naples 線之 Bologna 至 Florence 段

4-3
ITALIAN H-S SYSTEM

TYPICAL TUNNEL CROSS SECTION 1

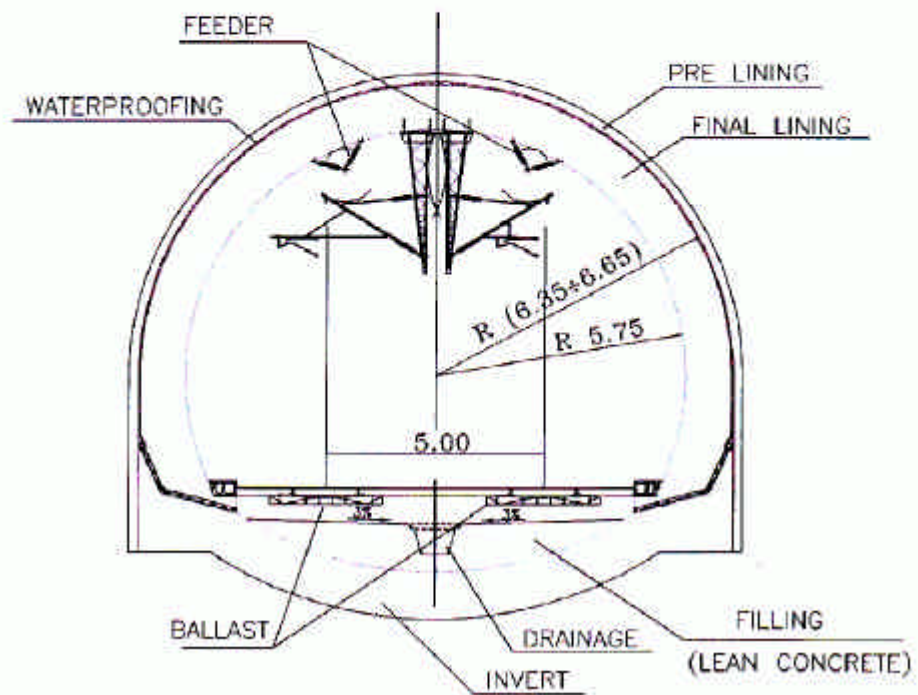
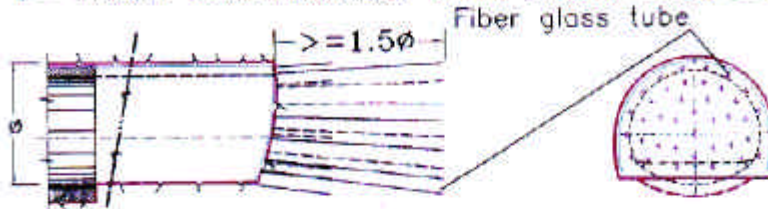


圖 4.3 雙軌鐵路隧道之標準斷面圖

ITALIAN H-S SYSTEM

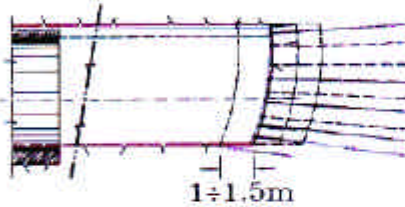
SECTION "B2" - CLASS "B"

1- FRONT STABILIZATION WITH FIBER GLASS TUBES

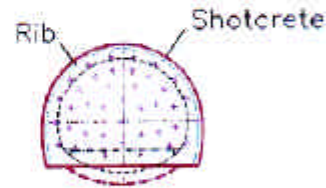
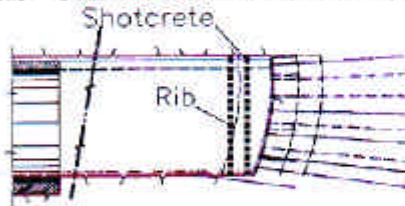


2- EXCAVATION (MAX 1φ)

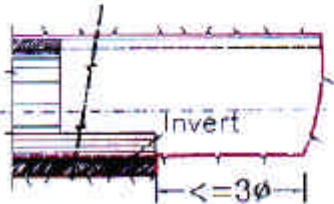
2.1- ADVANGEMENT (MAX 1+1.5m)



2.2- PRE LINING : RIBS AND SHOTCRETE INSTALLATION



3- INVERT CONSTRUCTION (1m)



4- FINAL LINING CONSTRUCTION (.9m)

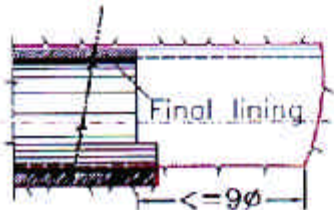
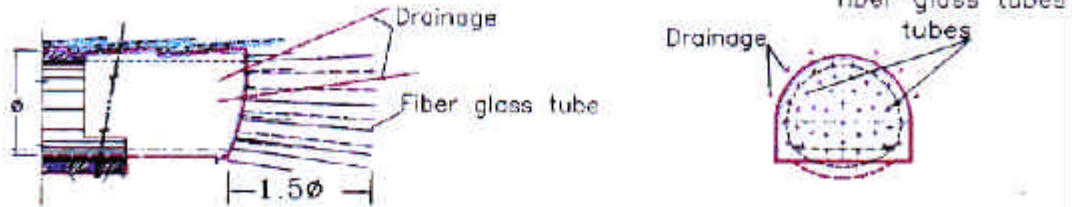


圖 4.4 隧道開挖及支撐型式(等級 B2)

ITALIAN H-S SYSTEM

SECTION "C1" - CLASS "C"

1- FRONT STABILIZATION



2- GROUND IMPROVEMENT WITH JET GROUTING

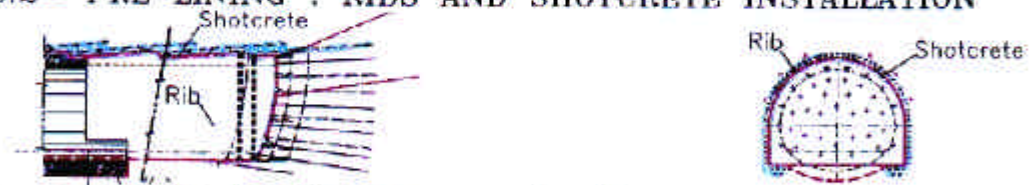


3- EXCAVATION (MAX 1φ)

3.1- ADVANGEMENT (MAX 1÷1.5m)



3.2- PRE LINING : RIBS AND SHOTCRETE INSTALLATION



4- INVERT CONSTRUCTION (1m)



5- FINAL LINING CONSTRUCTION (.85m average)

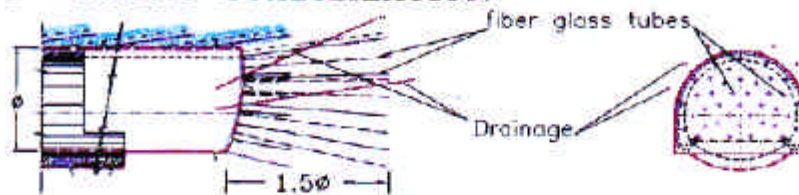


圖 4.5 隧道開挖及支撐型式(等級 C1)

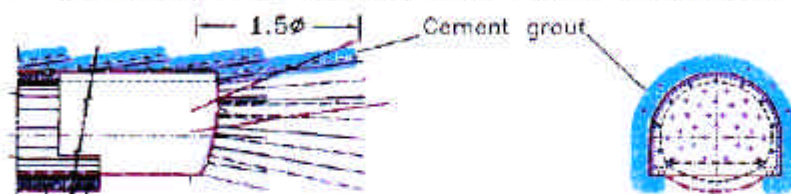
ITALIAN H-S SYSTEM

SECTION "C2" - CLASS "C"

1- FRONT STABILIZATION

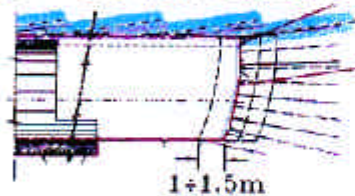


2- GROUND IMPROVEMENT WITH CEMENT GROUT



3- EXCAVATION MAX 1φ

3.1- ADVANGEMENT (MAX 1÷1.5m)



3.2- PRE LINING : RIBS AND SHOTCRETE



4- INVERT CONSTRUCTION (1m)



5- FINAL LINING CONSTRUCTION (.7m)

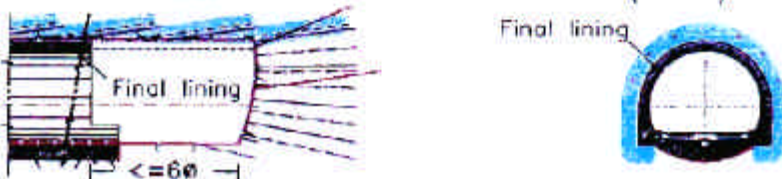
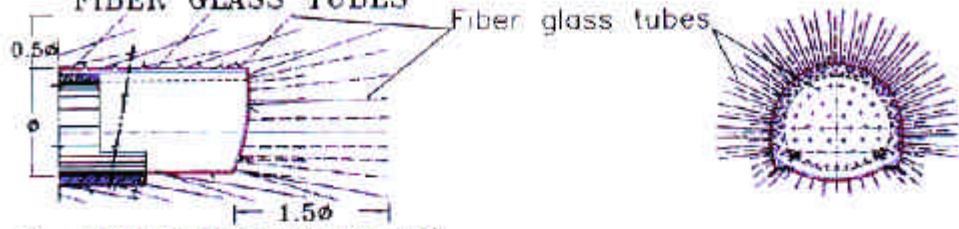


圖 4.6 隧道開挖及支撐型式(等級 C2)

ITALIAN H-S SYSTEM

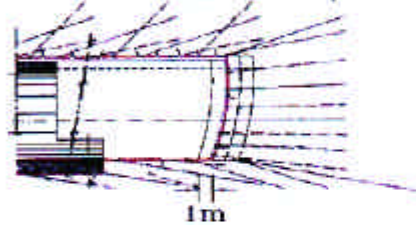
SECTION "C4" - CLASS "C"

1- FRONT STABILIZATION AND GROUND IMPROVEMENT WITH FIBER GLASS TUBES

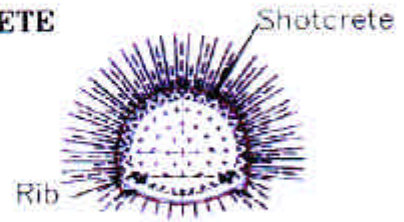
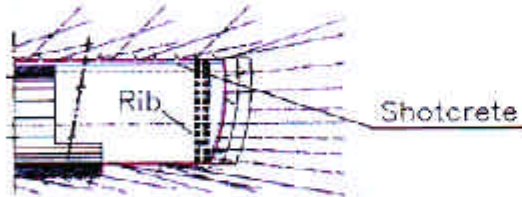


2- EXCAVATION (MAX 1φ)

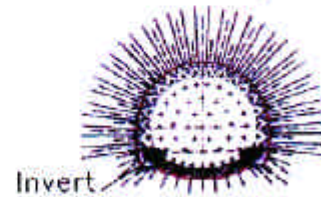
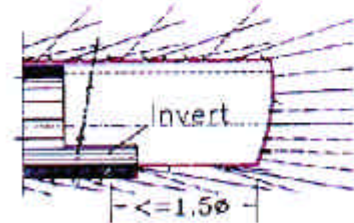
2.1- ADVANGEMENT (MAX 1m)



2.2- PRE LINING : RIBS AND SHOTCRETE



3- INVERT CONSTRUCTION (1m)



4- FINAL LINING CONSTRUCTION (.9m)

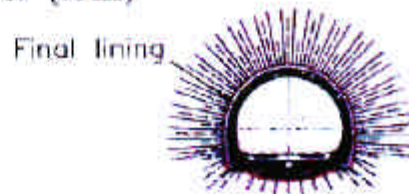
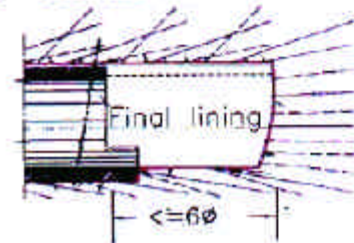


圖 4.7 隧道開挖及支撐型式(等級 C4)



照片 4.1 參觀大利高鐵隧道工程 - 工地討論(1)



照片 4.2 參觀大利高鐵隧道工程 - 工地討論(2)



照片 4.3 參觀大利高鐵隧道工程 - 現地參觀

五、Lotschberg 隧道(南口)

1. 緣起

歐洲內陸交通運輸形態正在快速地改變，在二十年前人員與貨物穿越阿爾卑斯山之交通鐵路面臨公路或飛機之嚴重挑戰，極度之不確定性。在 1981 年提議興建高速鐵路後此種狀況已明顯地改變。為了因應急速成長之交通需求瑞士人表達希望改善鐵路系統而於 1992 年設定投資新建重運量之新式鐵路運輸系統，1998 年通過瑞士有史以來最大規模之投資計畫，為改善鐵路運輸能量將興建服務品質更高之鐵路運輸路網，其中貫穿阿爾卑斯山區為歐洲北向交通主軸部份將以較低高程興建隧道故稱為「基底隧道(Base Tunnel)」以別於既有之隧道，目前政積極進行的兩大隧道即為長 34.6 公里之 Lotschberg 及長 57 公里之 Gotthard 隧道。將來以時速達 200km/h 之快速鐵路列車行駛，自 Basle 至 Milan 間穿越 Gotthard 山區之行車時間將可縮短為 4 小時，對德國、瑞士、義大利間之交通將會有莫大助益。

Lotschberg 基底隧道長約 34.6 公里，北口位於瑞士境內 Frutigen，南口則在 Raron，與現有之 Simplon 基底隧道連接形成穿越歐洲內陸山區北向之重要鐵路幹線，採雙孔單線隧道設計配置，預定分三階段施工在 2007 年開放通車時部份路線將僅有單孔隧道先行開放，其餘路段再陸續完成開放(詳圖 5.1)。

2. 施工構想

因應工期緊迫及山區通達不易之特性，本工程施作試驗隧道以，試驗隧道為地質調查開挖支撐設計需要，於 1994—1996 年自北端之 Kandertal 先施作一長達 9.6 公里之試驗隧道，所作之甚多鑽孔對本工程助益極大。本隧道工作面安排及地質情況詳圖 5.2 及圖 5.3 所示。

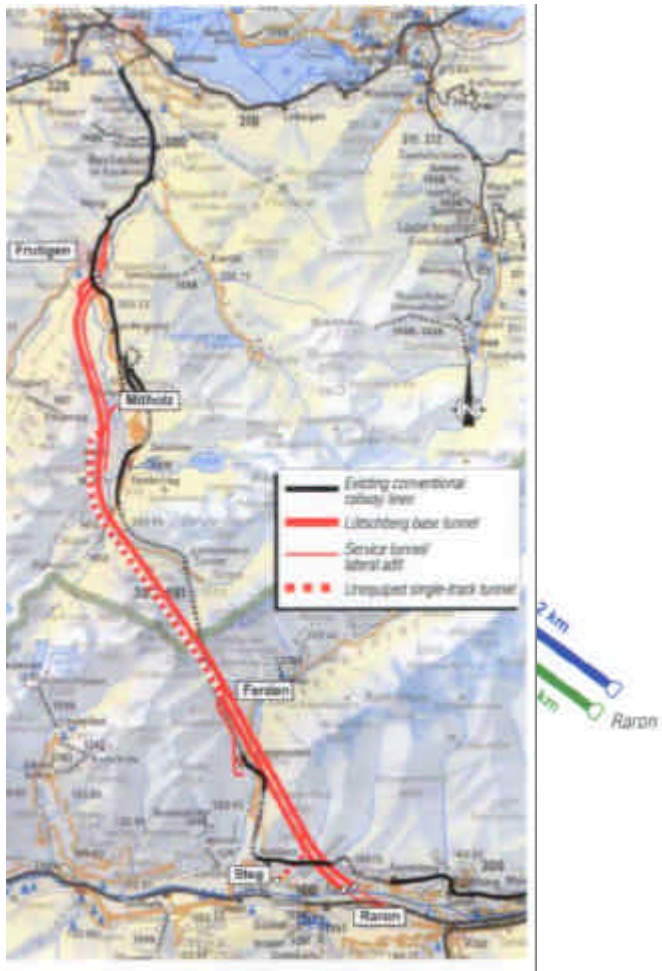


圖 5.1 Lötchberg 隧道位置圖

圖 5.2 Lötchberg 隧道工作面安排

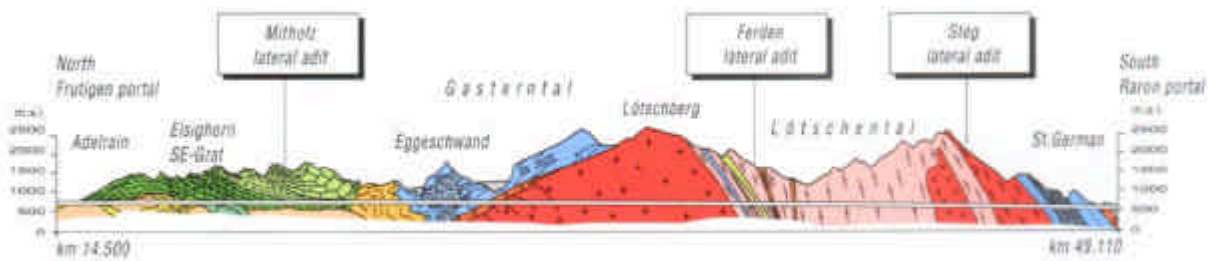


圖 5.3 Lötchberg 隧道地質剖面圖

3. 施工計畫

- (1) 與試驗隧道進行同時自Mitholz 開挖長達1.5公里之通達隧道至基底隧道位置，用以分別闢設三個工作面以負責北段隧道之施工(西段隧道將佔以明挖覆蓋工法施工)；
- (2) 自Ferden 施作4公里之通達隧道至基底隧道位置以施作緊急坑及通風機房，並自2001年五月開始闢設4個工作面以鑽炸法分別向南北口進行開挖。
- (3) 自南口之Raron 開設4.9公里之導坑，另自南口之Steg於2000年十月以直徑9.45m T B M開挖通達隧道及基底隧道共約8.5公里。
- (4) 自南口Raron 以另一部TBM 開挖10.2公里。

Ferden、Mitholz 兩主要工作面預定可於 2004 年底至 2005 年初貫通，其餘部份之開挖將配合襯砌及裝修工作平行施作，預定可於 2007 年完工通車。



照片 5.1 利用鑽堡開設鑽炸孔之情形



照片 5.2 Lotschberg 隧道簡報室入口



照片 5.3 聽報 Lotschberg 隧道工程簡報



照片 5.4 襯砌環片製造工廠



照片 5.5 直徑 9.6m 之 TBM 機械



照片 5.6 組裝中之 TBM 機械



照片 5.7 洞口臨時保護側施

六、瑞士 Gotthard Base 鐵路隧道

本次大會對於貫穿阿爾卑斯山計畫中最長的基底隧道，一長 57 公里之 Gotthard Base 鐵路隧道為有大篇幅的介紹，茲將研討內容報導如下。

瑞士 Gotthard Base 隧道設計將容許高速客運火車時速 200 公里，貨運時速 140 公里。隧道容許最大縱坡為 1%，隧道洞口必須在既有 Gotthard 鐵路隧道下 600 至 800 公尺施工。其位置詳如圖 6.1 所示。

4. 1.地形及地質

本隧道全長 57 公里中，53 公里之地質包括三主要片麻岩區，即 Aar-Massif，Gotthard massif 和 Pennine 片麻岩區。此三區屬於有利施工區。隧道技術困難段為 Middle Tavetscher Massif 和三較年青的沉積岩區。Aar Massif 之主要岩性為片麻岩和花岡片麻岩；Gotthard Massif 之主要岩性為絹雲母板岩和絹雲母千枚岩；Pennine 片麻岩區則為片麻岩。詳如圖 6.2 所示。

隧道主要路段之覆蓋非常厚。有 35 公里長隧道覆蓋超過 1,000 公尺，20 公里長之覆蓋大於 1,500 公尺，5 公里長之覆蓋大於 2,000 公尺。最大覆蓋為 2,300 公尺。除了高覆蓋之力學效應外，隧道內岩石溫度可達 45°C。此高岩溫加上施工機具和施工車輛之發熱，致使隧道施工中需空調設備。



圖 6.1 Gotthard Base 鐵路線位置

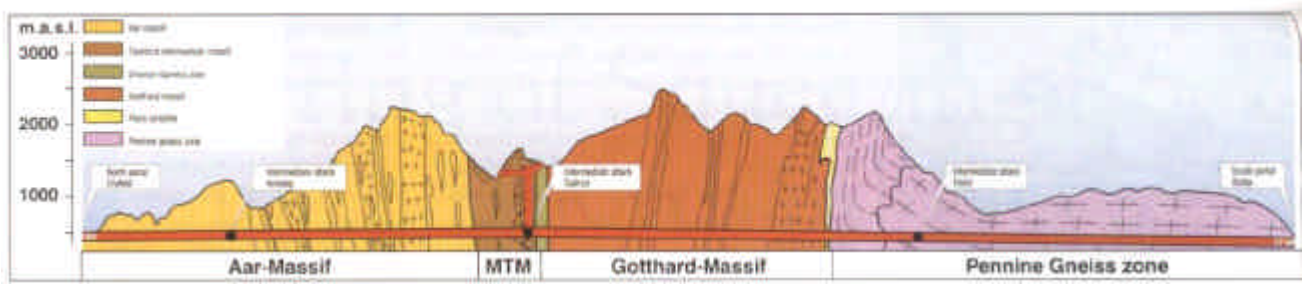


圖 6.2 Gotthard Base 隧道地質縱剖面

5. 2. 隧道設計

本隧道基於行車安全和施工考量採用雙孔各為單線鐵路隧道，開挖面積約 65m^2 。為限制隧道內相對濕度在 70% 以內，此為隧道內設備所需條件，以及隧道全線溫度在 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 以內，滲入隧道內襯砌混凝土之水量應少於每公里 35 毫升/秒。由地質情況預料滲水量將大於上述值，因此本隧道需設防水膜。

第二個要求為隧道腐蝕要求，經由高速列車之空氣動力模型試驗得知，此腐蝕取決於隧道襯砌在縱軸之偏差及襯砌表面之粗糙度。由於上述二個襯砌要求，決定隧道不能採取以前設想的單層襯砌。

隧道標準剖面係基於上述雙層支撐系統，外層包括鋼線網、噴凝土、岩栓、鋼支保和防水層。以 Gotthard Base 計畫中之 Faido 隧道為例，其設計先將隧道沿線岩體分為 FK0~FK6 及糖粒狀白雲岩 FKP1~FKP3，然後據以選定開挖等級 I~VII。詳如表 6.1 及圖 6.3 所示。

表 6.1 Gotthard Base 隧道 Faido 段鑽炸法開挖所需支撐

岩體等級	支撐						內襯 混凝土 (cm)	開挖 等級	預估 變形 (cm)	開挖 斷面積 (m ²)	預計長度(m)	
	岩柱(L1 區)		噴凝土 L1(cm) L2(cm)	鋼線網		鋼支保 (L1,TYP) 間距 a					東孔	西孔
	(m)	(支/m)		L1, TYP (m ² /m)	L2, TYP (m ² /m)							
FK0	3.0~4.0	視需要	5 ¹ 5 ²	-	-	-	30	II	5	64.2	1,437	1,504
FK1	3.0~4.0	3.33	5 ¹ 5 ²	-	-	-	30	II	5	64.2	1,988	2,082
FK2A	3.0~4.0	4.67	5 ¹ 5 ²	-	-	-	30	II	5	64.2	2,699	2,903
FK2B	3.0~4.0	4.67	6-8 ¹ 5 ²	-	-	-	30	II	5	64.9	1,174	1,360
FK3	3.0~4.0	7.33	10 ¹ 6-8 ²	-	-	-	30	III	5	66.3	2,483	2,561
FK4	3.0~4.0 ⁶	16	15 ³ 10 ²	100/100/5/5 25.09	-	-	30	IV	10	69.9	1,490	1,510
FK5A	3.0~4.0	21	15 ³ 15 ²	100/100/6/6 25.79	-	-	35	IV	15	74.3	375	386
FK5B	3.0~4.0	30	15 ³ 15 ³	100/100/6/6 29.85	100/100/6/6 28.90	TH36 0.75m	35	VI	15	75.4	144	144
FK6	3.0~4.0	30	20 ³ 20 ³	100/100/6/6 30.47	100/100/6/6 29.22	TH44 0.5m	35	VII	15	78.5	45	45
FKP1	依合約數量		5 ³ 15 ³	100/100/6/6 28.90	150/150/6/6 28.59	TH36 1.0m	30	V	15	70.9	41	41
FKP2	依合約數量		10 ³ 15 ³	100/100/6/6 29.53	100/100/8/8 28.90	TH44 0.8m	35	VI	15	73.9	50	50
FKP3	依合約數量		10 ³ 20 ³	100/100/6/6 29.53	100/100/8/8 28.90	TH44 0.35m	35	VII	15	75.4	62	62
1.鋼纖維噴凝土, 2.素噴凝土, 3.鋼線網噴凝土										總計	11,926	12,586

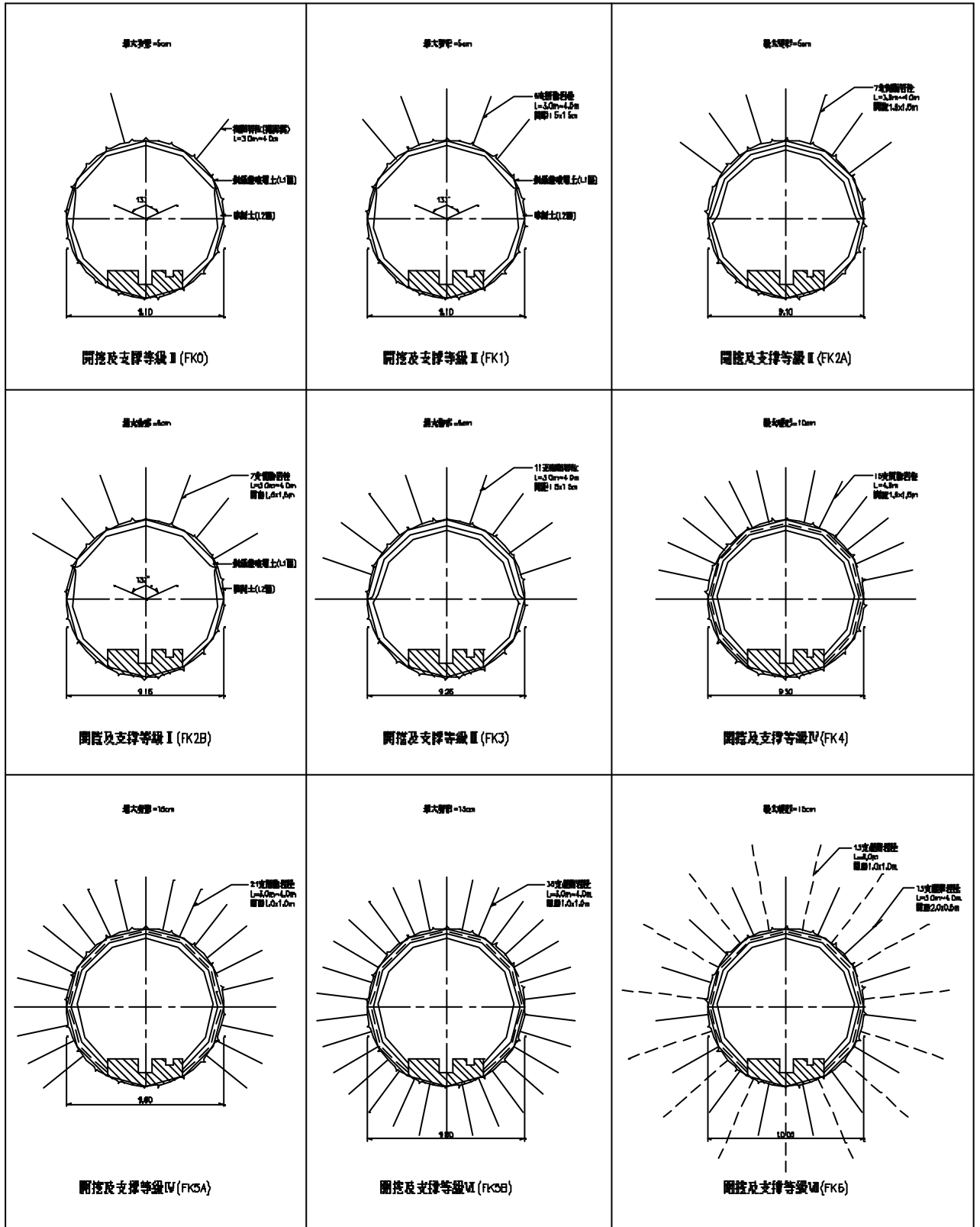


圖 6.3 Gotthard Base 隧道 Faido 段支撐型式

6. 3. 施工計畫

為建立合理的長隧道施工工期，設置中間工作點，此等橫坑及斜井在等完工後做為通風之用。五個工作點包括：(a)Erstfeld(北口)，(b)Amsteg 橫坑(1.2 公里長)，(c)Sedrun 橫坑(1 公里長)及豎井(800 公尺深)，(d)Faido 橫坑(2.7 公里長，坡度 12%)，(e)Bodio(南口)。

本工程之施工準備，自 1993 年 Piora Basin 調查工作開始，一直到 1998 年才澄清 Piora Basin 區地質情況。Sedrun 區之 1 公里長連接隧道於 1996 年開工，800 公尺深豎井則於 1998 年 8 月開工，費時 18 個月於 2000 年 2 月完成。另外 Amsteg 及 Faido 兩處均於 1999 年 7 月開始準備工程施工。由 2000 年 5 月業主 Alptransit AG 之簡介資料，可知本工程預定於 2011 年通車，詳如圖 6.4。

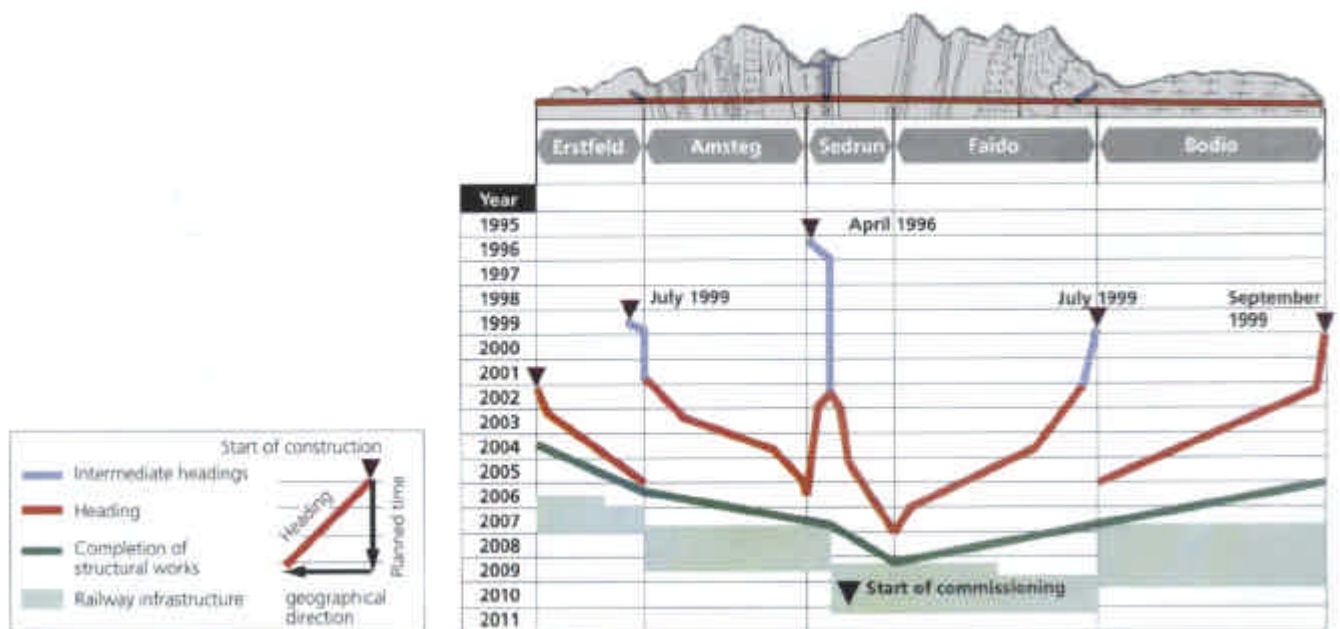


圖 6.4 Gotthard Base 隧道計畫時程表

本工程隧道施工方式，選擇鑽炸法或 TBM 開挖，依下述因素決定：(a) 隧道標準橫斷面，(b)配合整體施工進度之考量，(c)每個隧道段長度，(d)地質及水文地質情況，(e)材料處理觀念(混凝土骨料全由本工程碴料提供)。

由表 6.2 顯示，Erstfeld 和 Bodio 以及 Amsteg 和 Faido 段在覆蓋厚度，岩石品質和施工進洞情況是相似的。Amsteg 和 Faido 兩段各有 25 處擾動區。Sedrun 段則在岩盤特性及施工進洞方面與其他四段不同。上表亦指出 Erstfeld 及 Amsteg 採用 TBM 開挖，Sedrun 段因地質差，採用鑽炸法開挖且要求儘速完成環狀閉合。Faido 段之最大覆蓋達 2,300 公尺，又有 25 處擾動區及 150 公尺 Piora Basin 白雲岩段為沉積岩入侵，因此要求投標廠商需用兩種施工方式報價，即開放式或帶盾 TBM，或鑽炸法及 Roadheader 開挖。Bodio 段地質尚佳，因長度達 16.5 公里，其東孔採用帶盾 TBM，西孔則可為開放式或帶盾 TBM。

表 6.2 Gotthard Base 隧道各施工段之地質及開挖方式

段別	長度 (公里)	覆蓋 (m)	主要地質 (岩性)	擾動區 (處)	進洞 方式	其他限 制條件	邀標開挖方式
Erstfeld	7.0	300~600	片麻岩	<10	洞口	-	TBM
Amsteg	11.5	300~2,100	片麻岩、花崗岩	約 25	通達隧道	-	TBM
Sedrun	7.0	1,000~1,700	千枚岩、片岩 TZM-North	約 15	豎井	瓶頸	鑽炸法並儘速完成 閉合
Faido	14.5	1,200~2,300	片麻岩、花崗岩	約 25	斜坑	瓶頸	開放式或帶盾 TBM；或鑽炸法及 Roadheader
Bodio	16.5	100~1,100	片麻岩	約 10	外環隧道 /洞口	需儘速與 Faido 段 相連	東孔採用帶盾 TBM，西孔則可為 開放式或帶盾式 TBM

7. 4.施工前調查

(1)Piora Basin

6-7

Piora Basin介於北方Gotthard Massif 和南方Pennine Gneiss Zone之間，為一沉積岩侵入，自1993年起就開始詳細且有系統的調查。一條長5.5公里之調查隧道在主隧道上方350公尺已開挖完成。在此標高之岩層為碳-硫質三疊系岩層，包括白雲岩、角礫化白雲岩、白雲岩-石膏/硬石膏，其間包括糖粒狀白雲岩，某些區域地下水壓高。在此標之Piora Basin厚約230公尺。經由此探查隧道再鑽4傾斜孔(Bs4.1~4.5)至主隧道之標高，由岩心檢查、岩溫測量及物理震測，結果顯示在主隧道標高之岩層均為完整碳質三疊系岩盤，偶夾硬石膏或石膏，無地下水壓，原來推測之糖粒狀白雲岩未深達到隧道標高。詳如圖6.5所示。

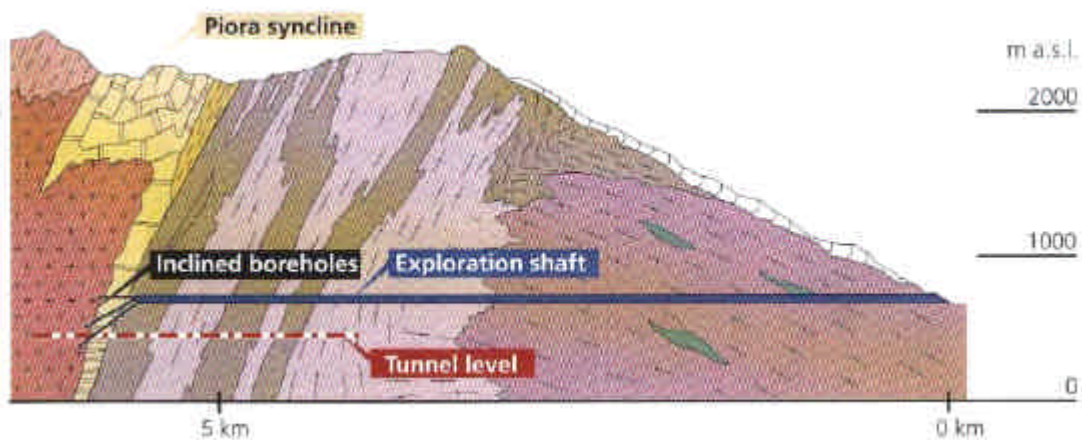


圖 6.5 Piora 背斜調查廊道及探查鑽孔

(2)Middle Tavetsch Massif

本岩盤屬片麻岩，千枚岩和片岩，除SB1、SB2及SB3，3傾斜孔之外，在1995~1997年間曾鑽探2傾斜孔SB3.2及SB4.1，於本岩層之南部及北部孔深最大達1,750公尺。此深孔已達Gotthard Base隧道。5孔共長5622.3公尺。Middle Tavetsch Massif地段之南側，已開挖2條豎井施工用之通達隧道，長1.3公里。由此隧道之現地資料得知南段岩盤較預期為佳。北段岩盤則較預料為差；即

- A. 1公里中之70%為弱岩(Weak rocks)，包括糜嶺狀千枚岩。
- B. Clavaniev zone(CZ)：粘土狀糜嶺岩(Kakirite)，千枚狀片岩及片麻岩。詳如圖6.6所示。

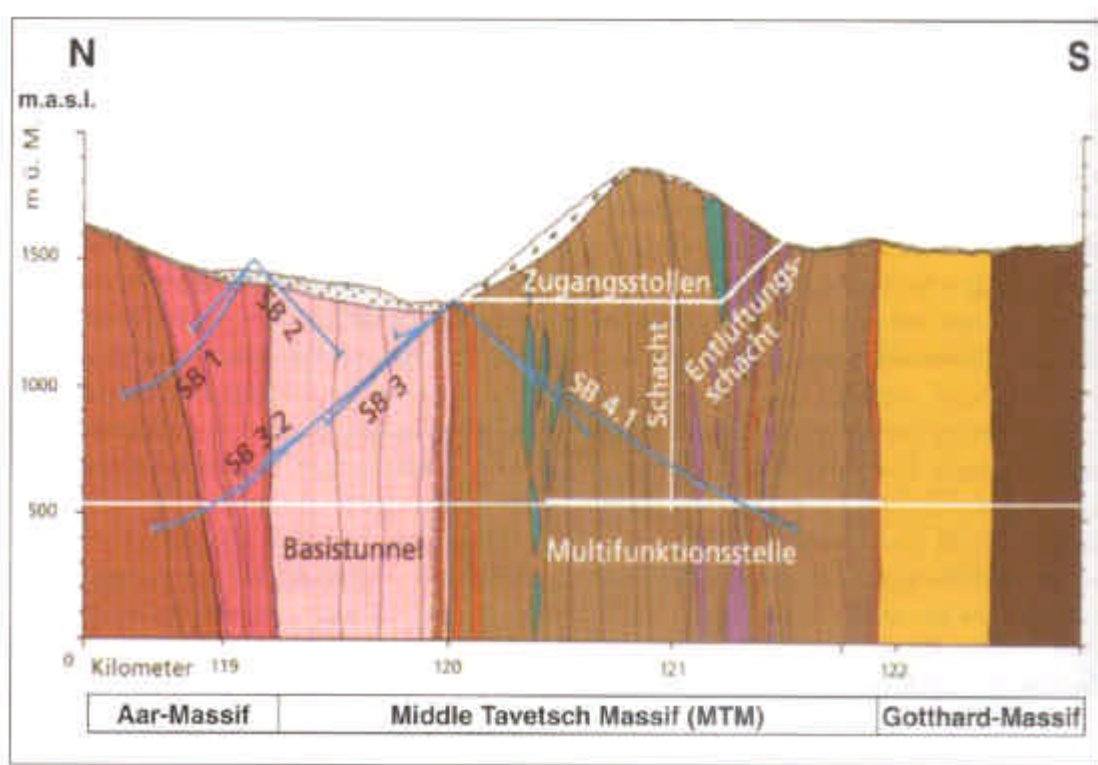


圖 6.6 Middle Tavetsch Massif 調查廊道及鑽孔

8. 5.本工程之特點

(1)Sedrun段之設計及施工方案

- A. 由Sedrun經由800公尺豎井底部可向北及向南共開挖主隧道約6公里長。此標亦包括多功能車站。

- B. 此隧道之擠壓段之施工觀念係基於細心構想之岩盤地工模型(Geotechnical model)岩石之力學性質係由岩心室內試驗而得。其中岩心三軸排水和不排水試驗時控制孔隙水壓力最令人感興趣。雖然構造複雜之糜嶺狀千板岩相當均勻，但可用之結果係由39組試驗而得。
- C. 一段岩體均勻，覆蓋900公尺，長度幾百公尺之隧道周圍岩盤之地工模型，其 $E=2\text{Gpa}$ ， $\mu=23^\circ$ ， $C=250\text{Kpa}$ (排水情況)。
- D. 在Middle Tavetsch Massif及Clavianiev zone，隧道開挖後變形甚大，因此其斷面採圓形，全斷面開挖，開挖面系統式岩栓，擴挖以容納收斂變形，鋼支保需可滑移且構成一環，環狀岩栓支撐及噴凝土環形閉合。噴凝土在環形鋼支保安裝後收斂達到預估值後施噴，以防止隧道斷面再減小。隧道開挖面之岩栓長12~18公尺，並留有6公尺重疊。內襯混凝土最厚1.2公尺，在開挖面後方300公尺於現場澆置。內襯混凝土之尺寸係基於假定初期支撐於長期使用因腐蝕而完全失去功能，且內襯除了高岩壓外，尚需承擔外水壓約 10kg/cm^2 。本區隧道開挖之困難在於開挖面不穩定、開挖面之劈裂(spalling)、頂拱落盤及收斂值太大。本區擠壓性地盤之開挖及支撐見表6.3，圖6.7、6.8及6.9。

表 6.3 Gotthard Base 隧道擠壓岩盤之開挖及支撐

1.隧道開挖斷面直徑	10.18~13.08m
2.擴大開挖	0.30~0.70m
3.開挖斷面積	81~134m ²
4.輪進長度	1.0m
5.鋼纖維噴凝土(保護層)	0.05m
6.鋼支保 間距 每 m 隧道所需重量	TH44/70 1.00~0.33m 2.5~9.4ton
7.噴凝土(開挖面後)	0.35~0.50m
8.岩栓 長度 極限荷重 每 m 隧道所需長度	8~12m 320KN 96~288m
9.開挖面之岩栓 長度 極限荷重 每 m 隧道所需長度	12~18m 320KN 80~210m
10.內襯混凝土	0.30~1.20m

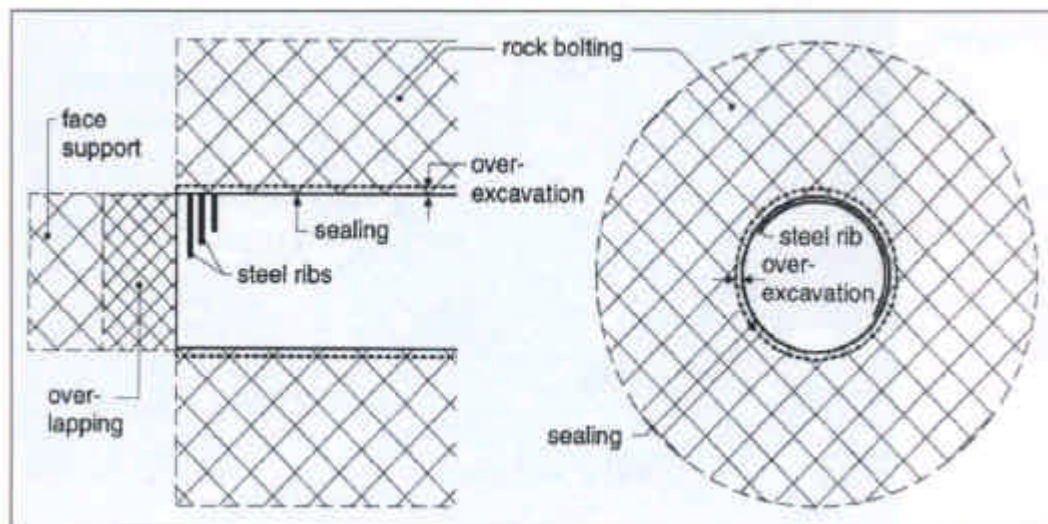


圖 6.7 Gotthard Base 隧道強擠壓岩盤之擴挖及支撐

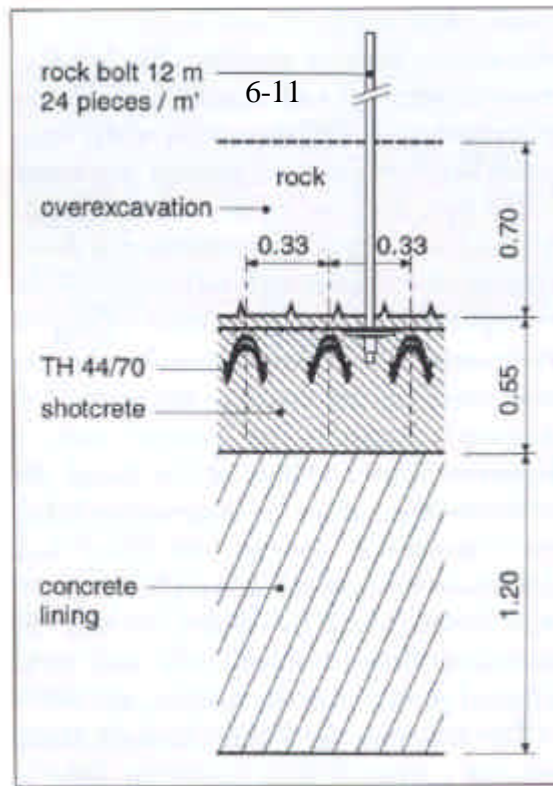


圖 6.8 Gothard Base 隧道強擠壓段橫剖面

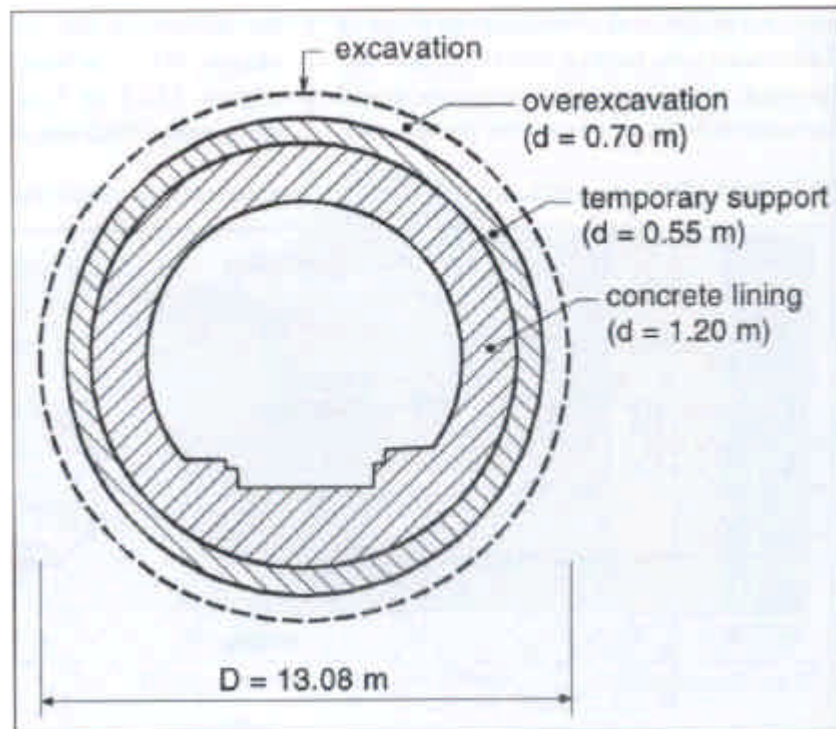


圖 6.9 Gotthard Base 隧道強擠壓段之橫斷面

(2)高岩溫之處理

本工程曾由瑞士聯邦科技大學地球物理研究所辦理隧道岩溫⁶⁻¹²和湧水區研究。採用有限元素法發展程式FRACT來分析隧道沿線岩溫。岩溫一般隨深度而增加，惟有許多影響因素；局部地熱流動，地形三度空間效應，地表溫度和一些地質因素(岩石結構/片理，熱傳導，沖蝕率，地下水流動)。研究發現在岩溫由純傳導模型預測時，最靈敏的參數為大氣溫度遞減率和岩石熱導性。在岩溫預測時必須考慮熱之水平對流效應(熱之重分佈，河谷溫度升高，山脊下溫度降低)，關鍵參數為地下水位之降溫效果和水力傳導性。研究亦得知，由顯著之岩溫不正常可以預測幾百公尺前含水/水力活躍區(即大量湧水之高風險區)。Gottard Base隧道之高覆蓋造成隧道周圍岩盤溫度最高達45 ℃，計畫在高岩溫路段於施工中採用空調使工作溫度降至28 ℃。隧道內岩盤滲水對隧道溫度不利，此滲水可藉由在噴凝土外殼及內襯混凝土間 - 防水層來防止。再者，隧道營運時由於列車之活塞效應，可將隧道內之熱空氣帶出，因此隧道內不需空調設施。詳如圖6.10所示。

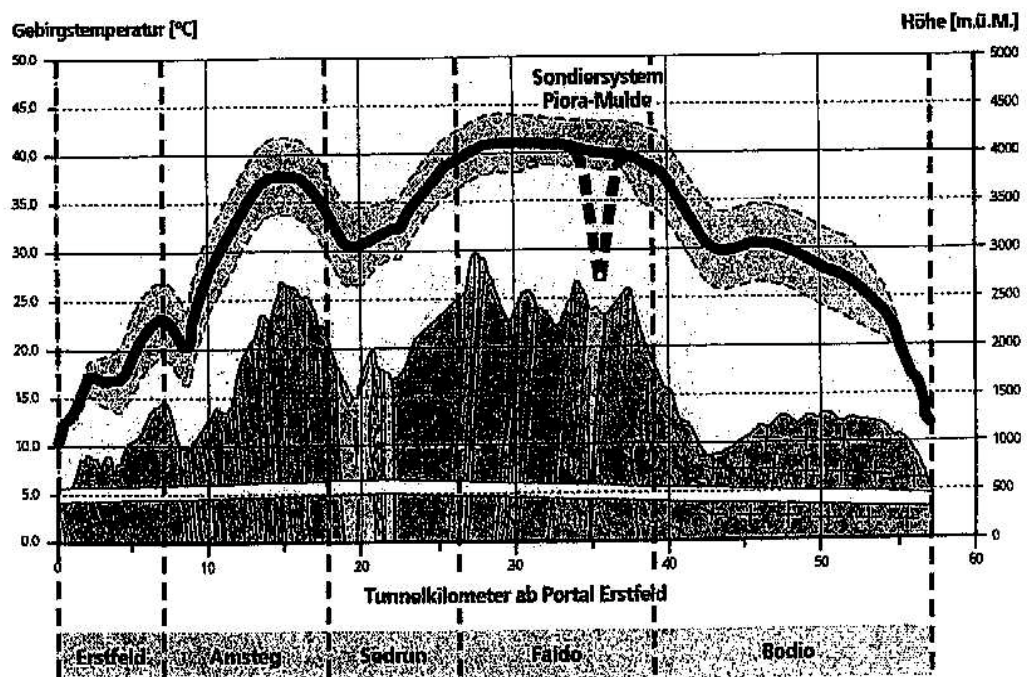


圖 6.10 Gotthard Base 隧道高岩溫

6-13

七、心得及建議

利用參加 2001 年 ITA 年會之便順道前往義大利、瑞士及德國等三國參訪隧道工程，對歐洲隧道工程技術之最近趨勢有初步認識。筆者等以為這些趨勢或作法可供國內借鏡或引用。茲說明如下：

- (1)為考慮降低交通車輛對環境之沖擊，歐洲最近正實施鐵路興建計畫，如德國高鐵Cologne-Frankfurt及Nuremberg-Ingolstadt兩條路線正在施工，瑞士鐵路所謂「Swiss Rail 2000」亦為偉大鐵路發展計畫，尤其Gotthard Base隧道長57公里為世界上最偉大的鐵路隧道工程。奧地利亦在改善現有鐵路系統以提高行車速率及加大客貨運客量，如新建長54公里Brenner Base鐵路計畫，正在施工調查廊道。由此足見歐洲鐵路發展將比公路更為優先。
- (2)歐洲之交通隧道之防災政策由於奧地利 Tauren及法國與義大利間之Mont Blanc隧道於1999年發生火災事故分別造成12人和39人死亡，而使歐洲交通隧道之防災政策有漸趨於保守和嚴謹之現象。西德Cologne-Frankfurt高速鐵路隧道就依該國之防災規定，於隧道每長度1000公尺即應設置逃生通路，如以豎井為通道，則豎井高度在30公尺以內者僅需設逃生樓梯，如高度大於30公尺，則除樓梯外另需設升降電梯供逃生之用。瑞士Gotthard Base將是鐵路隧道(長57公里)採用雙孔單線隧道，除每隔325公尺有橫坑相連外，並於Sedrun及Faido兩處設多功能車站，使列車必要時可由一孔轉入另一孔，充分考量防災。
- (3)西德高速鐵路Cologne-Frankfurt及Nuremberg-Ingolstadt兩條線，均採用設計及施工標，即所謂統包發包方式。惟根據Tunnel&Tunnelling International於1999年5月報導Cologne-Frankfurt高鐵工程施工時提及該工程自發包後遭遇

幾項特殊困難，經於1998年中之協議，業主DB同意將完工供營運日期延至2002年5月(由54個月延長至71個月)。這些困難包括：

- E. (a)結構設計時間比預估為長，係由於業主的設計審核顧問需較長時間審核，DB亦由於需符合EU環境準則需較長時間。
- F. (b)氣候使鐵路路堤施工遲緩，以及隧道、高架橋和橋梁基礎地質比預期差。

縱然已獲同意延期，承包商仍有很大工期壓力，預料在完工後幾年將有因地質問題和其延誤而要求補償之索賠案之仲裁和法律訴訟。

- (4)德國高速鐵道隧道均採用不排水隧道設計，即除隧道施工期間將地下水滲入開挖斷面內之部分排出隧外，隧道全周舖布防水層，阻隔地下水之滲入隧道內。且隧道內襯砌混凝土應在承受外水壓及岩盤壓力作用及防止溫度變化所可能發生裂縫情況下決定混凝土之鋼筋量。筆者瞭解德國鐵路隧道大多為淺層覆蓋，地下水壓較低，同時鄰近住宅、公路、農田等不允許以排水隧道設計。另外德國隧道開挖碴料由業主所有，並指定地點堆置。此碴料用來做道路隔音土堤及其他填土需求。此政策最符合資源利用和環境保護原則。
- (5) 德國、瑞士及奧地利三國交通隧道工地，顯現桁型鋼支保取代U型及H型鋼支保；3D光學隧道收斂觀測及分析取代收斂鋼卷尺量測隧道收斂相對變形；另外隧道施工測量自動化已取代人工收方測量。即用自動儀器如Profile 4000及Debit等儀器來自動量測隧道開挖後及噴凝土施噴後之斷面藉以管理施工品質。
- (6)義大利隧道協會理事長P. Lunardi所提出之「ADECO-RS」隧道理念，係以岩釘等支撐系統加強岩體自承性，並控制隧道之數量，使隧道施工得以採大型機具做全面開挖，除以達快速施工之目的外，並可降低落盤之風險。上述理念值得再深入研究引進，筆者等已將相關資料整理如附錄。

7-2

附 錄

隧道設計與施工新理念 - ADECO-RS

隧道設計與施工新理念 - ADECO-RS

The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils

從事隧道設計之工程師發現，與地上構造物相比較，隧道所須面臨待解決之土木工程問題較為複雜。因為從事隧道設計之前置基本設計資料之取得相當困難。

首先就地上構造物而言它並不存在任何問題，因為地上構造物係根據型鋼或鋼筋混凝土等材料之強度及變形等性質，建立於所希望之平衡系統上。眾所周知隧道工程之另一個特性是，在大都是情況下設計工程師及營建工程師無法確切得知隧道構造物之外力重量，且隧道構造物所承受之外力並不是最後階段之壓力，所謂最後階段之壓力係

指隧道完成後所承受之設計外部負載。但是在隧道施工之中間階段，開挖之擾動影響並不是由最後襯砌承受隧道變位，在此階段，洞口附近岩體中之初始應力，使得在隧道開挖面周遭岩體擠壓，在隧道開挖面形成應力集中。

隧道開挖中間階段很重要，因為在此階段若能精確考慮隧道周遭壓力所造成之拱效應，則可得知隧道之完整性和生命。拱效應之產生取決於隧道所承受之壓力規模及地盤強度和變形性質，如圖 1 所示：

1. 靠近隧道開挖面
2. 遠離隧道開挖面
3. 兩者皆不是

(1)第一個情況：

按照隧道周遭之地盤強度及其彈性變形之反應，使隧道周遭地盤能夠承受來自偏離之應力流動。

(2)第二個情況：

當隧道周遭地盤無法承受轉移之應力流動且呈地盤非彈性反應時，地盤塑性變形之大小將與地盤之塑性範圍成正比。此外，地盤塑性變形也會增加對地盤產生影響，隧道應力之承壓拱使應力流動轉移傳播到岩體裡，直到三向度之應力狀態與地盤之強度性質相互兼容的。在這種情形下，"拱效應"之形成離隧道開挖面較遠，因此在隧道周遭地盤僅能以其剩餘強度抵抗開挖面產生之應力並將引起相當大之地盤變形。

(3)第三個情況：

當隧道周遭之地盤完全無法承受開挖所造成之轉移應力流，且在某些範圍內造生隧道崩潰。

- A.第一個情況，拱效應會很自然地出現；
- B.第二個情況，在地盤受適當之"幫助"穩定，則拱效應會自然地產生；
- C.第三個情況，拱效應無法自然地產生必須於隧道開挖前藉由人

為輔助工法使地盤產生拱效應。

隧道設計工程師之最重要任務是要決定，當隧道開挖後是否能夠觸發地盤之拱效應，以確保在特定之應力應變條件下維持隧道開挖之穩定性。為達到這個目的，下面所列之知識為不可缺少之要求，詳如圖 2 所示：

A. 隧道開挖之地盤介質

B. 開挖所採取之行動

C. 隨著開挖之預期反應。

此時地盤材料係指隧道開挖所在之地盤介質，與傳統土木工程材料相比較，地盤材料顯得相當異常，因為地盤材料不僅不連續、不均勻、且各向異性。靠近地球地? 表面，就大地形態學而言此處地盤介質有較多樣性變化，這些地盤之多樣特性取決於材料本身內在之自然性質。在地底較深度處，地盤介質之特性將會隨著所處之應力狀態而改變，因而也影響到隧道開挖條件。

當開挖前進面穿過地盤介質採取行動，隧道開挖前進可視為一個圓盤面用速度 v 穿過岩體前進，且在開挖圓盤面後面留下圓管形空間，並且對隧道之縱向及橫向周遭地盤造成擾動而改變初始應力狀態。

初始應力場能夠以流線網來表示，然而在隧道開挖區域由於受到隧道開挖之擾動影響，使得原來之初始應力流線網產生偏離轉移，而集中於隧道附近並使應力增加。這些應力增加之大小取決於受擾動區域之規模(在受擾動區域因地盤位移增加使得地盤工程性質衰退)及隧道洞周附近各個地盤性質之岩體強度行為。

隧道開挖面之受擾動區域係定義為靠近隧道開挖面半徑 R_f 所影響之範圍。隧道設計工程師必須特別專注於此受擾動區域範圍之地盤行為，因為此受擾動區域範圍之力學行為將由三維應力行為過渡為平面應變應力行為。因此，合理之隧道分析方法需考

慮三向度之應力計算而不是一般之二維分析計算。

地盤對於隧道開挖行動之反應為地盤變形。這些地盤變形發生於隧道開挖面前方之受擾動區域，且在隧道開挖洞周附近產生應力集中情形，無論應力集中情形及地盤變形都深受著開挖面前進方法之影響。根據開挖理論可瞭解隧道襯砌之入侵。所謂入侵即表示隧道襯砌發生不穩定。

隧道開挖前進期間若地盤應力沒有從三向度應力狀態轉為二維應力狀態時，即隧道開挖前進面之應力逐漸減少到 $\sigma_3 = 0$ 使得開挖面之前方地盤應力狀況處於彈性範圍中，在這種情況下靠近隧道開挖面周遭岩體之拱效應自然會產生。

在另一方面，當隧道開挖前進面之應力逐漸減少到 $\sigma_3 = 0$ 使得靠近開挖面之地盤應力狀況處於彈塑性範圍時，則不受開挖影響之襯砌將以彈塑性模式向隧道洞內部變形並會引起短期之隧道穩定問題。即表示在缺乏干擾情況下將引發塑性變形並透過開挖面周遭以輻射狀及縱向傳播，將"拱效應"從隧道轉移到岩體內，這種從轉移之拱效應只能發生於隧道穩定之情況下。

最後，當隧道開挖前進面之應力逐漸減少到 $\sigma_3 = 0$ 並使得開挖面前方地盤失穩，此時隧道開挖變形將增大到無法接受程度，則地盤"拱效應"之形成將不可能發生。此種無法產生拱效應情況一般發生於非凝聚性或鬆散等地盤，因此必須藉由人為地盤改良使拱效應產生。

因此，就拱效應形成及道隧道之長期及短期穩定性而言，主要是根據隧道開挖之地盤"變形反應"之規模及品質。

根據前述之考慮早在二十五年以前已開始研究，當隧道前進時所引起之地盤中之應力狀態及隧道變形之間的關係。

結 論

隧道開挖後對地盤變形之影響，以前對於隧道開挖變形收斂行為並沒有特別注意，也沒有進行更深度分析。然而由最近研究顯示認為能夠利用簡單之變形收斂限制行為，解決與隧道開挖有關之所有問題之理論設計方法和隧道開挖系統(如圖 3-18 所示)。

前者包括兩種方法：“特徵線理論”(theory of characteristic lines)由首先由 Lombardi 提出，“收斂限制法”(convergence-confinement method)由 Panet 發展兩者都是有名的理論，且都認識到隧道開挖之核心。此兩者方法雖能瞭解隧道開挖之穩定性影響，但確無法提出如何處理當隧道開挖面不穩定之情況，也無法任何提出具體有效之建議。

後者如 NATM 工法係根據地盤分類進行施工，無可置疑的係根據過去經驗之累積。NATM 主要的長處是：

- 1.將地盤當成隧道開挖所遇到的材料介質。
- 2.引進 shotcrete 及岩栓等新技术用於隧道開挖之主動限制變形。
- 3.有系統之監測並解釋岩盤變形行為。

然而今天，用二向度問題考慮隧開挖問題，且只集中注意隧道開挖變形收斂之行為，有下列之侷限性。

- 1.由於無法適用於各種地盤類型及各種應力-應變情況，岩盤分類系統並不是完善。
- 2.完全忽略。
- 3.忽視新技术為隧道之穩定單獨提出簡單之變形限制技術。
- 4.不提供隧道設計及隧道施工兩者間之清楚界定。
- 5.解決監測之適當性問題，採用非科學模式正確尺寸，並將地盤分類及地盤變形大小加以比較。

在隧道開挖期間對地盤開挖之作為只有根據隧道開挖洞周之變形收斂性可能會使工程師走入盲點。工程師將集中於隧道不穩定之處理

不探討造成隧道不穩定之原因。

地盤材料之應力-應變情況屬於普通等級時，當隧道開挖有困難時很容易處理開挖成功，但若地盤材料條件很差時，則當有開挖困難則不容易處理，因為：

- 1.若沒有設計隧道安全診斷機制，將無法準確地預測隧道開挖行為。
- 2.監測以限制不可預知之變形。
- 3.若缺乏有效之穩定系統，則希望能夠處理發生不穩定的原因。
- 4.無法初步評估隧道開挖之風險預測，工作計畫及開挖速率。

各種類型隧道之需求快速穩定的成長，包括那些地盤之應力-應變條件屬於極端等級。隧道開挖希望能夠控制各種不同應力-應變條件下之地盤變形行為，而不是只能控制”不困難”條件下之地盤變形行為。為了減少前述之不良影響，須要將問題拉回現實的三向度情形，且考慮整個隧道開挖之動態過程而不是僅考慮開挖之最後階段，有理論及實驗研究為基礎，根據岩體和土體之變形控制分析提供開挖新方法之基礎。這些新方法已成功的應用有 10~15 年歷史，且廣泛的適用於各種類型地盤及應力-應變條件包括最困難之地盤條件，且有許多成功案例都是應用舊觀念(NATM 及其相關工法)在較不困難地盤情況下舊觀念方法並沒有顯示侷限性及缺點，甚至發生令人失望之災難性結果。

綜合言之，法國 Marseilles 到 Lyons 之高速鐵路線(New TGV)之 Tartaiguille 隧道於 1996 年 2 月開始施工，隧道斷面有 180m² 根據 NATM 原理成功地進行隧道開挖，直到遇到 argile 地盤，其包括有 75%高嶺石。地盤條件困難，地盤開挖幾乎不可能。為解決此困難 1997SNCF 建立研究小組成員包括法國鐵路工程師，G.T.E 工程師、Coyne 及 CETU、Terrasol 及 Simecsol 大地顧問工程師，這些工程師小組輪流成為諮詢主要歐洲隧道之專家，且經這些專家設計解決而使隧道安全成功地通過粘土層。

在審查幾個建議書後，發現沒有任何建議書能提供業主所要求之安全和可靠性的保證。首先關於完成時間，SNCF 根據類似之成功案例提出可能之施工時間和費用之保證。1997年3月 Rocksoil S.P.A. 贏得 860 米長隧道之細步設計合約目前此工程合約仍然在執行中。

根據 ADECO-RS 原理澈底修正原有設計，並於在 1997 年 7 重新開始運作，當現場工程師逐漸有信心採用此新技術，則成功機會也隨著變大。顧問工程師應記錄下隧道開挖之平均開挖速率追蹤，以期隧道開挖速率能夠大於每天 1.4m 之進度以確保隧道開挖能在 1998 年 7 月前完成。自從採用新系統後只一年就有一個月進度超前。

根據過去十多年來所獲得之經驗，可以很有信心的宣稱 ADECD-RS 可適用於任何類型地盤及任何應力-應變條件下之隧道設計與施工，且可以有穩定之隧道開挖速率。可見，當可以用簡單方法限制隧道開挖面或隧道洞周之變形時，則可以進行機械化開挖。時至今日，隧道在複雜及困難之地盤條件下，若有採取變形限制之預先措施則可用機械化開挖隧道。隧道開挖工程無論隧道開挖尺寸及隧道所處之地盤類型，最後可能成一種工業化產品(即有不變之隧道開挖速率及精確的開挖時間表與開挖費用。

綜合言之，透過充份利用最近最新之知識，諸如隧道分析計算能力及先進技術，如圖 18 所示，ADECD-RS 工法可以提供設計及施工工程師一個簡單之指導方針，給予隧道在三個基本行為分類。為完成此目標，可根據地盤之應力-應變關係，藉用數學技巧以預測隧道開挖面前進之穩定性。此外，為使隧道開挖面有均勻之變形行為，隧道設計工程師須在預先變形限制法或簡單變形限制法，作一選擇以控制穩定隧道開挖變形。因此，穩定隧道變形時需視在縱向隧道斷面部份或橫向隧道斷面部份，配合監測儀器選擇最適當之穩定方法。隧道斷面類型分類需能適用於各種隧道類型及各種地盤應力-應變關係，且按每 m 開挖費用及開挖所須時間皆能自動計算。

- 為控制隧道變形之穩定需要一些諸如”結構元素”等措施以維持隧道開挖之穩定。隧道工程從費用方面來看，各種類型之地盤其隧道開挖和襯砌費用有逐漸趨於常數之趨勢，但地盤改良及地盤穩定之費用則變化較大。

- 若有完備且可靠之設計，主要承包單位將試著對使隧道在各種類型地盤中之開挖作業工業化，甚至在最困難地盤條件下亦如是。

- 給出施工時間及施工費用之計畫，且避免最近在 Clerk of Works 與承包單位之間所引起之爭論。

- 透過使用單一參數統合所有地盤分類系統(隧道開挖面及開挖面前方擾動核之應力-應變行為)，使隧道在開挖期間能夠容易且客觀之測量，且根據地盤變形之大地工程分類可以解決以往分類系統之最清楚且明顯之缺點是，即直到今天 Clerks of Works 和承包單位仍有爭論。

- 根據前述之重要特性，ADECO-RS 工法引起相當大之興趣且很快使隧道設計者將其列為有利之替代選擇。承包單位採用前述工法之設計規格，則 Bologna 到 Florence 間之新高速鐵路施工設計特別重要。目前 Bologna 到 Florence 間之隧道世界上最大隧道：長度約 84.5 公里，斷面積為 140m² 根據前述之重要特性，ADECO-RS 工法引起相當大之興趣且很快使隧道設計者將其列為有利之替代選擇。承包單位採用前述工法之設計規格，則 Bologna 到 Florence 間之新高速鐵路施工設計特別重要。目前 Bologna 到 Florence 間之隧道世界上最大隧道：全長 90 公里，隧道長度約 84.5 公里，斷面積為 140m² 其所經過之地盤條件大部份都很差，不但地盤性質變化多端且力學性質相當差。儘管地盤條件困

難，承包單位以統包方式(turnkey)得到合約，即表示承包單位自己須完全充分設計且要接受所有之工程風險，包括地質因素之風險。自從 1998 年 7 月有超過 30%之隧道開挖以全斷面開挖完成是以 32 個隧道工作面同時進行完成之隧道，且以近似每月約 1,600m 之速率開挖隧道。

當隧道之設計和施工技術可能失去它對計畫需求之一些魅力時，則無論在效率和功能之要求上可藉助於 ADECO-RS 工法滿足所需。

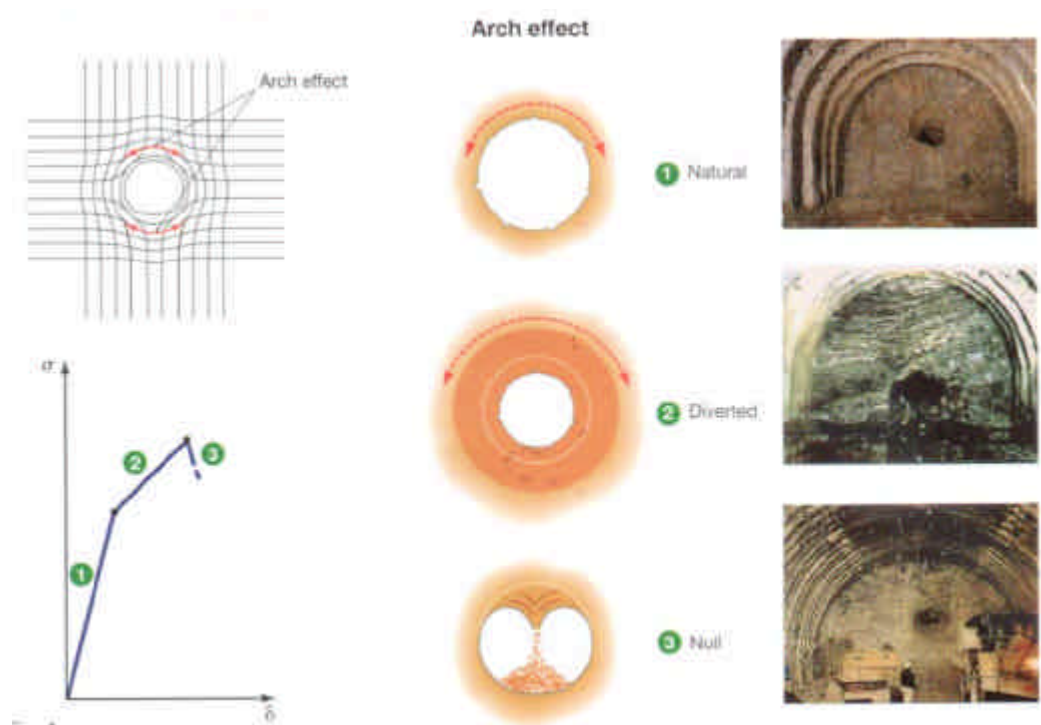


圖-1 地盤拱效應 (Arch effect)

(圖-1 之說明)

隨著隧道開挖之進行地盤產生應力流，應力流愈靠近隧道開挖洞室愈，即拱效應愈靠近開挖洞室，則隧道開挖愈穩定。地盤拱效應之產生茲分三種情況說明如下：

① 情況 1 (Natural):

地盤拱效應發生於靠近隧道開挖面，拱效應會很自然地產生；

② 情況 2 (Diverted):

地盤拱效應發生於遠離隧道開挖面，在地盤經適當之"幫助"穩定，則拱效應會自然地產生；

③ 情況 3 (Null) :

拱效應無法自然地產生，必須於隧道開挖前藉由人為輔助工法使地盤產生拱效應。

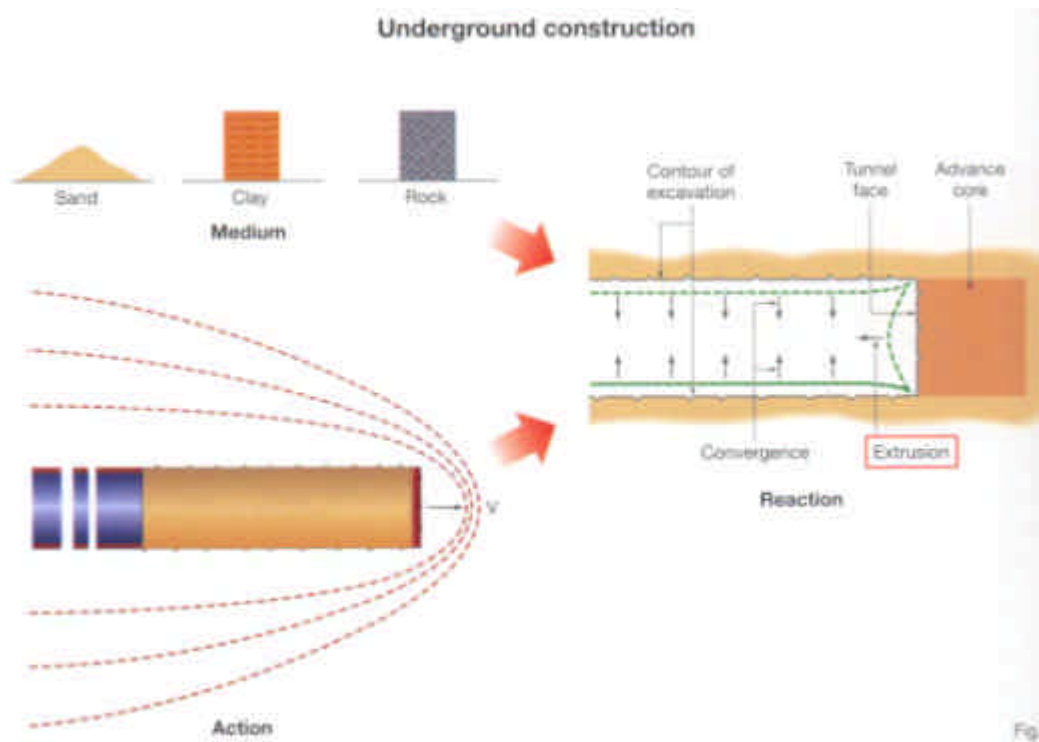


圖-2 隧道開挖產生之變位型式

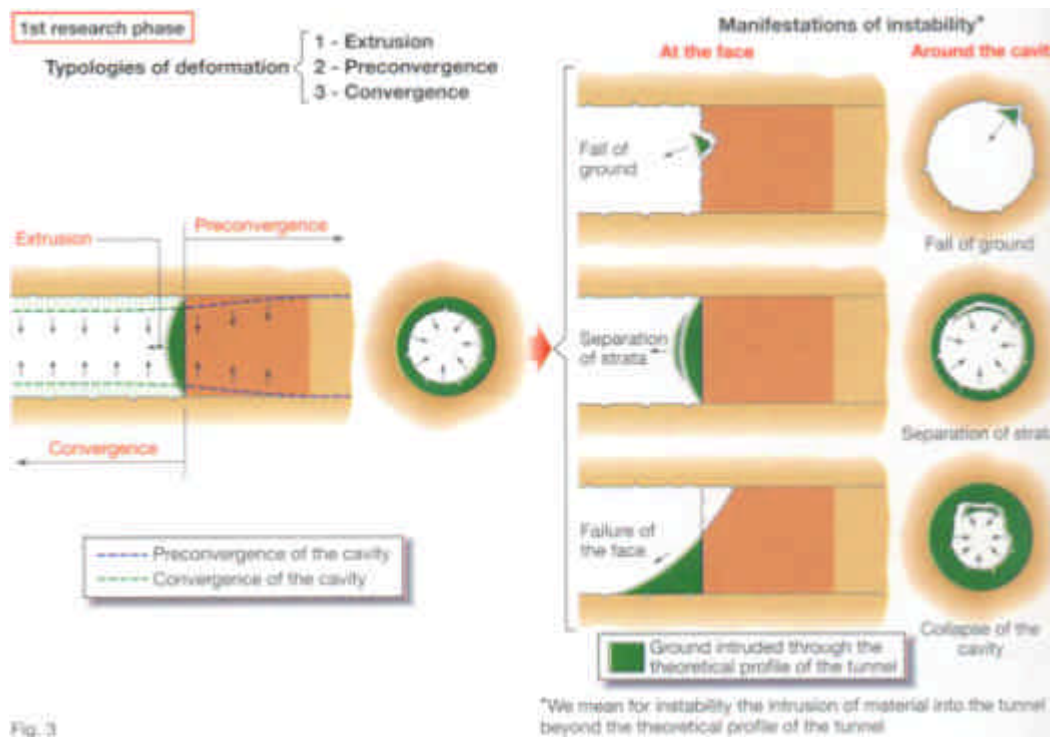


Fig. 3

圖-3 隧道開挖所產生之變位與破壞方式

(圖-2&3 之? 明)

隧道開挖所產生之位移或變形可分為下列三類：

1. 入侵變形(Extrusion)：發生於隧道開挖面上。
2. 前期變形(Preconvergence)：發生於隧道開挖面之前方。
3. 收斂變形(Convergence)：發生於隧道開挖面之後方。

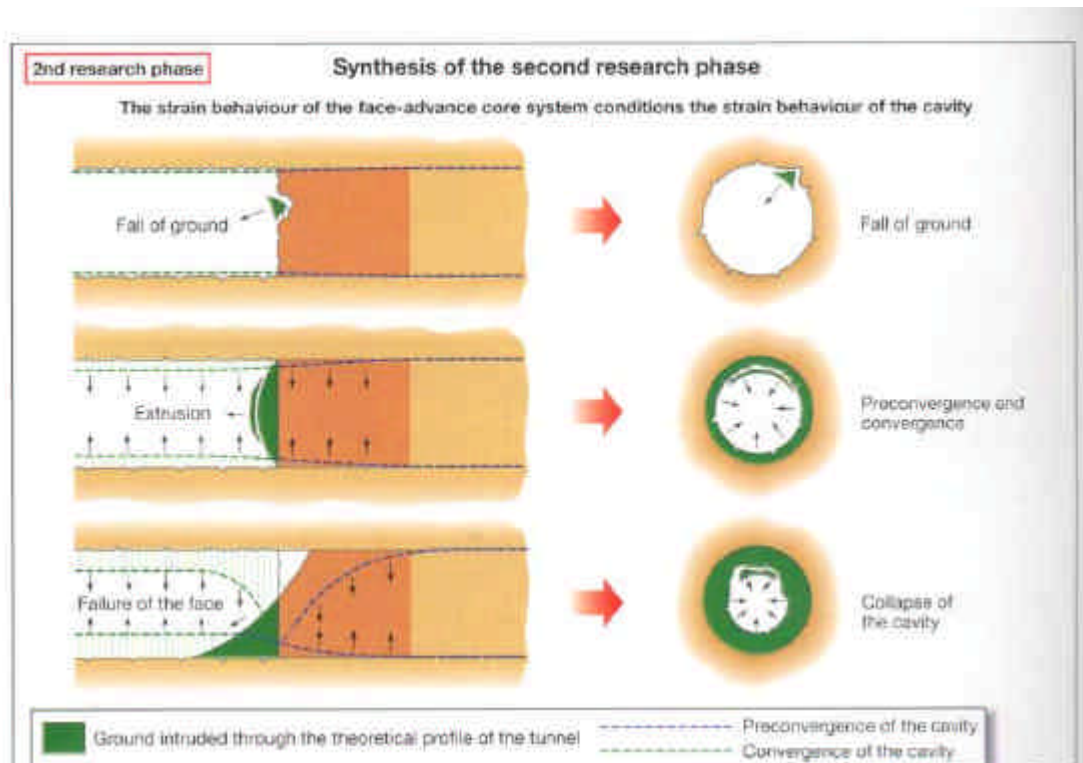


圖-4 隧道開挖前進面破壞方式

(圖-4 之說明)

隧道開挖面破壞方式分為下列三類：

1. 開挖面輕微落盤 (Fall of ground)。
2. 開挖面入侵 (Extrusion)。
3. 開挖面全面破壞 (Failure of the face)。

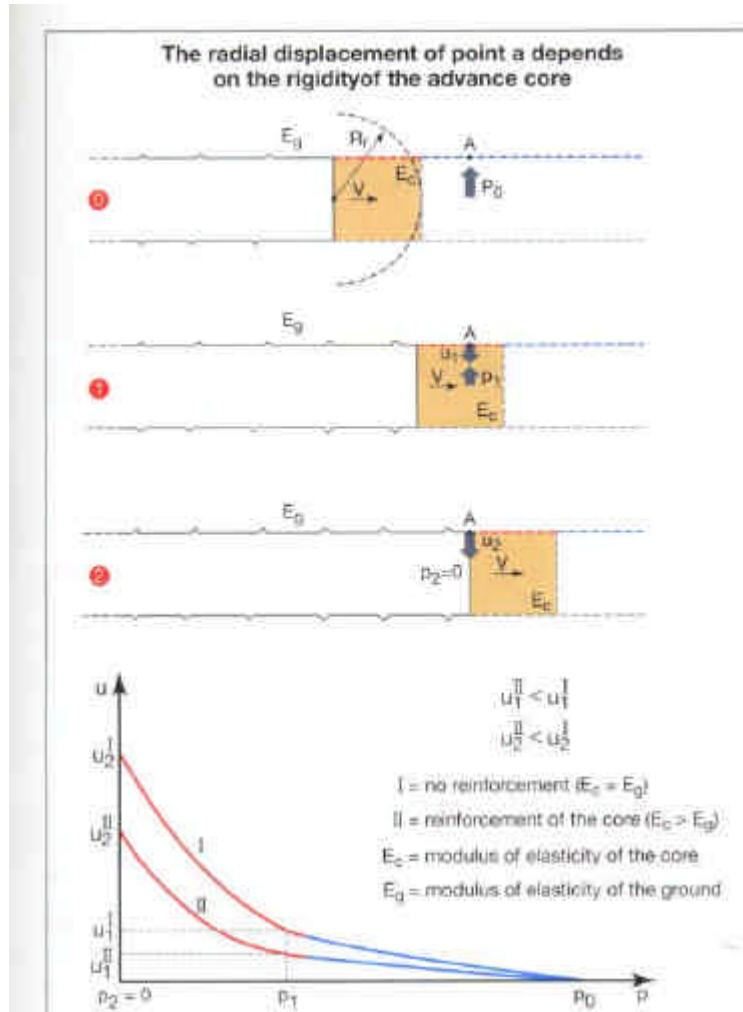


圖-5 擾動區(core)補強與隧道位移之關係

(圖-5 之說明)

隧道徑向位移(radial displacement)與隧道開挖面之前方擾動區(core)之關係。

- 擾動區(core)有補強者徑向位移較小。
- 擾動區(core)無補強者徑向位移較大。

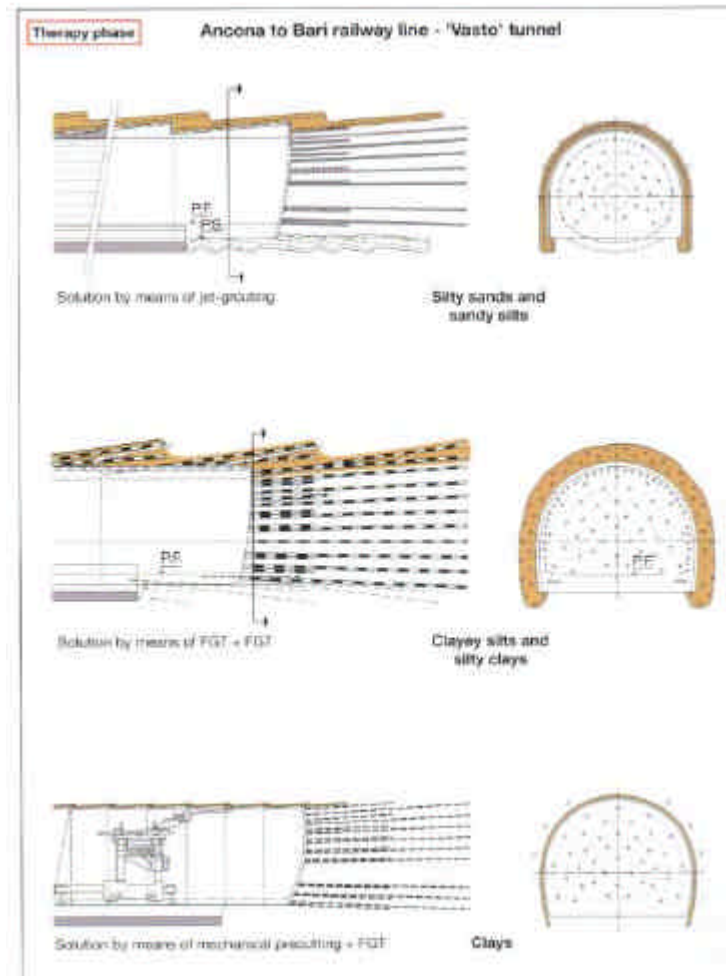


圖-6 英國 Vasto 隧道開挖困難時之處理對策

(圖-6 之說明)

英國 Vasto 隧道施工遇到沉泥質砂 (silty sand)、砂質沉泥(sandy silty)、粘土質沉泥(clayey silts)、沉泥質粘土 (silty clay)或粘土(clays)等困難地層時，採用開挖面全面打設玻璃纖維管(FGT, fibre glass tubes)以穩定隧道開挖面之前方擾動區，成功地完成隧道開挖。

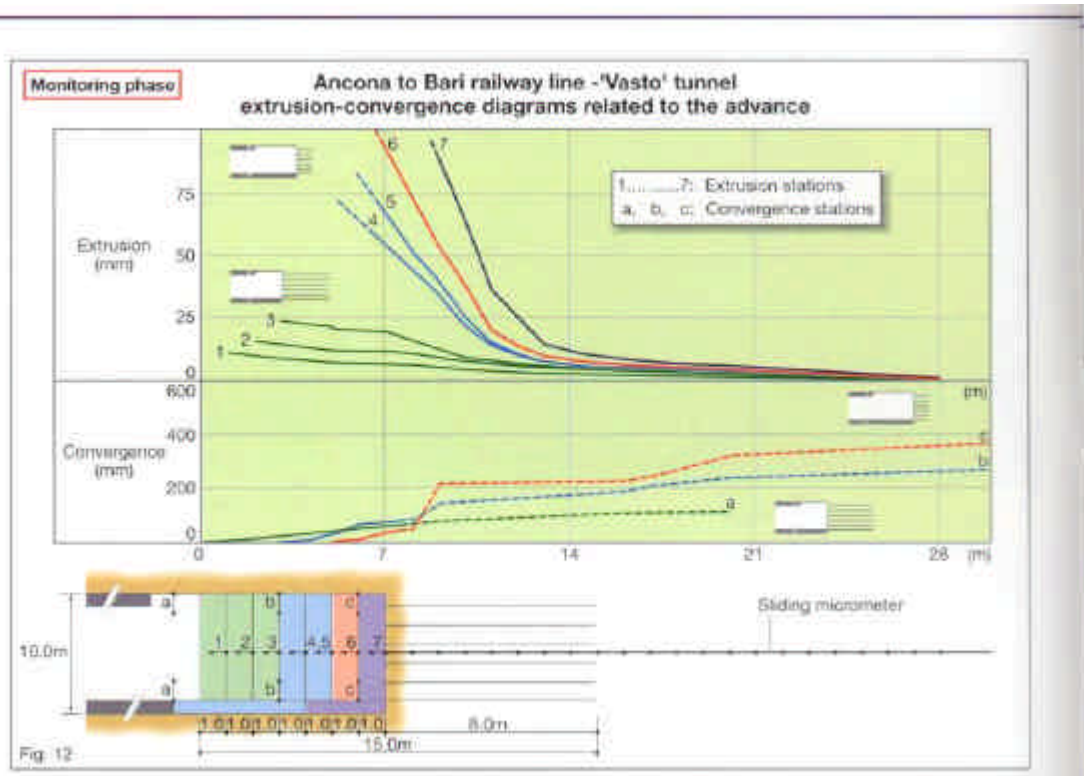


圖-7 玻璃纖維管穩定範圍與變位之關係

(圖-7 之說明)

英國 Vasto 隧道採用開挖面全面打設玻璃纖維管(FGT, fibre glass tubes)以穩定隧道開挖面之前方擾動區，成功地完成隧道開挖。圖示斷面 1~7 所示之採玻璃纖維管穩定前方擾動區之範圍依次減少，因此，開挖面之位移也依次增大。

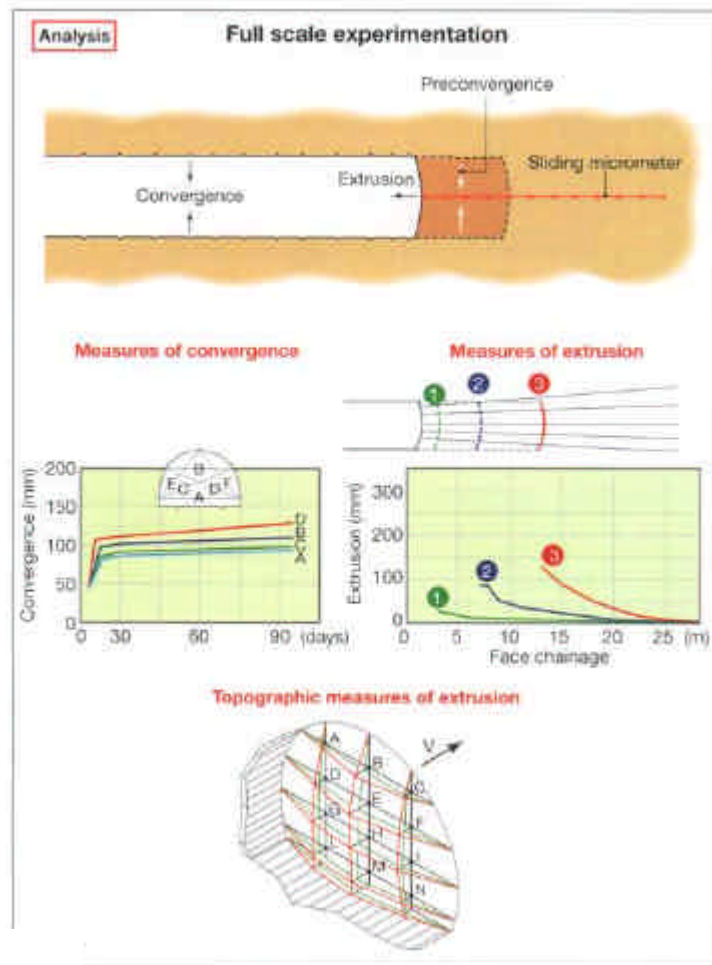


圖-8.1 擾動區打設玻璃纖維管穩定之試驗結果

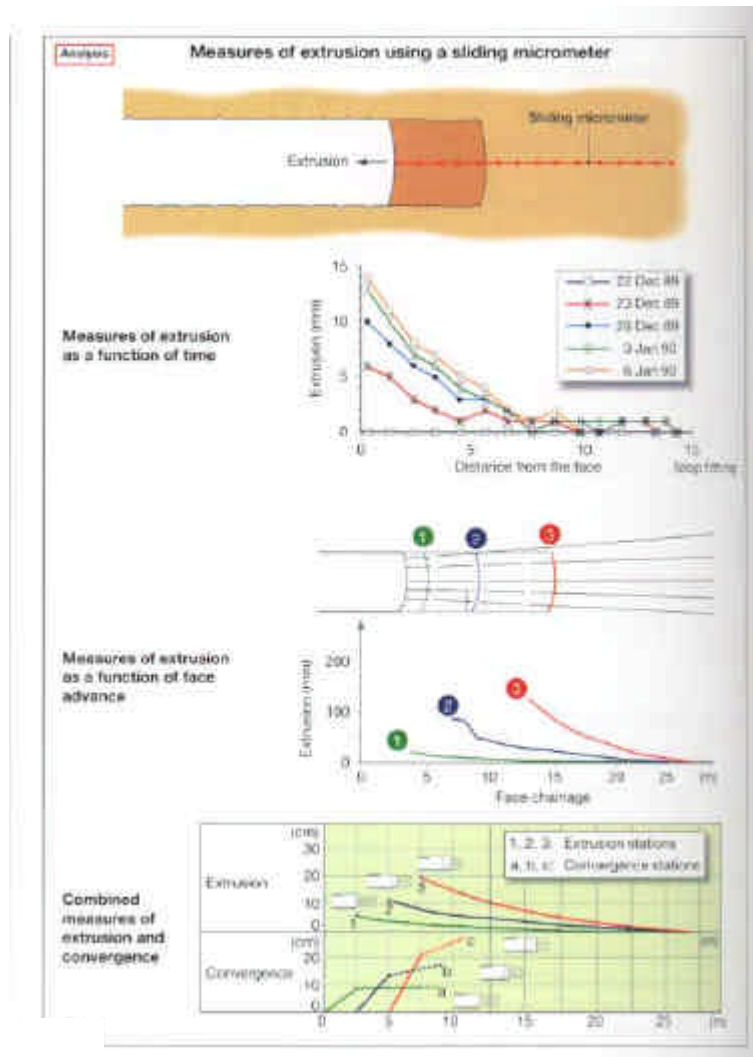


圖-8.2 打設玻璃纖維管穩定與隧道變位之關係

(圖-8.1&2 之說明)

由全尺寸試驗顯示開挖面位移與開挖面前面擾動區之穩定性有一致關係。圖示斷面 1 所穩定之擾動區範圍較大則隧道變位較小；反之，斷面 3 所穩定之擾動區範圍較小則隧道變位較大。

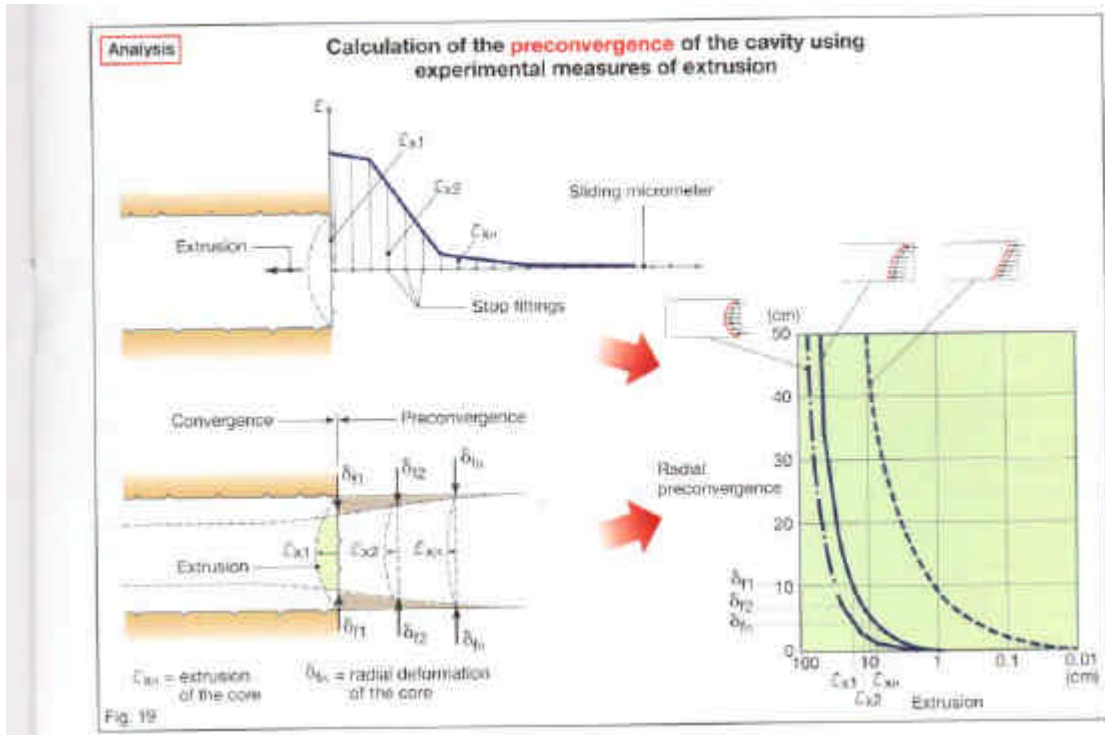


圖-9 隧道開挖面變位型式與變位大小之關係

(圖-9 之說明)

由隧道開挖面及開挖面前方擾動區之變位顯示，開挖面之入侵變位對稱者，徑向收斂變位較小。

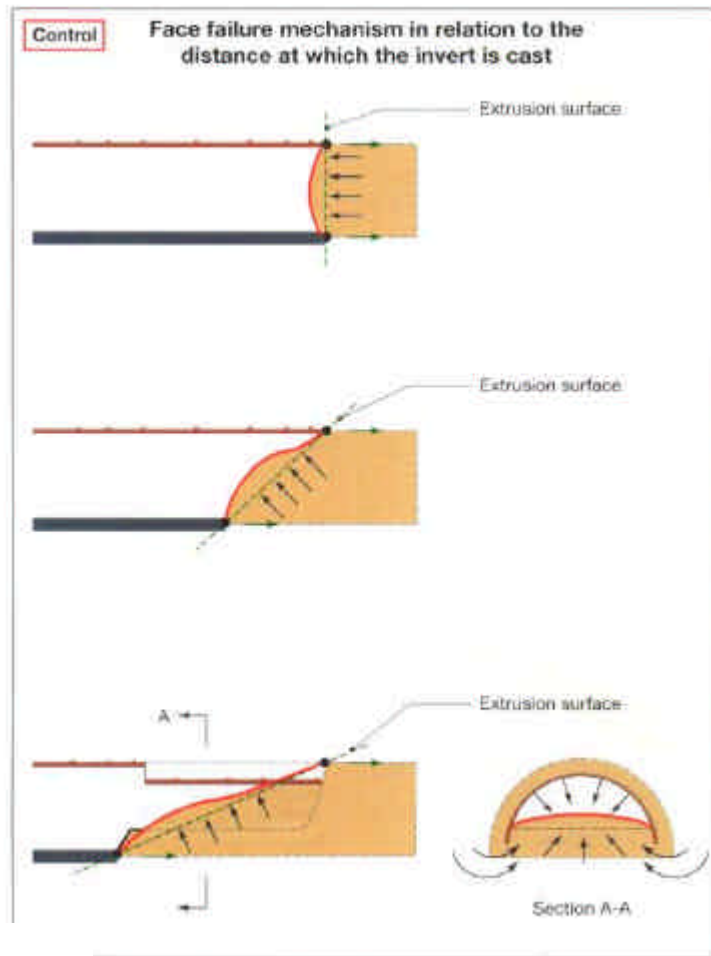


圖-10 仰拱閉合時機與隧道開挖面變位之關係

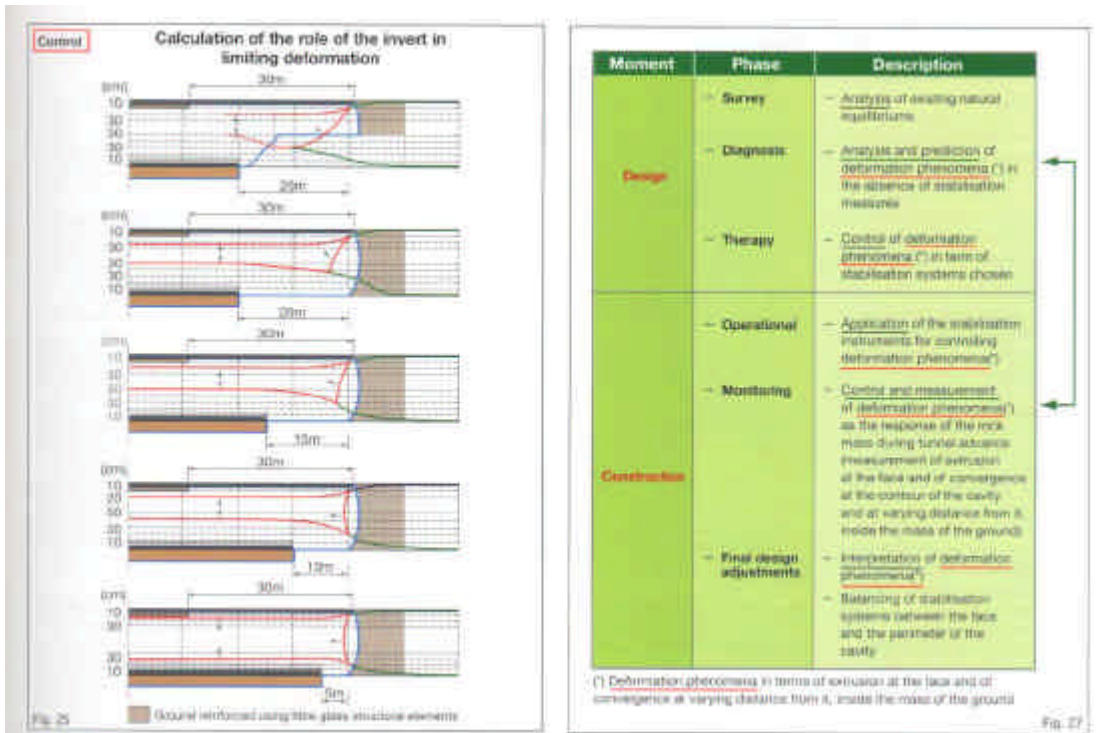


圖-11 仰拱閉合時機與隧道開挖面變位之關係

(圖-10&11 之說明)

表示隧道開挖面之入侵變位與仰拱打設時機之關係。若仰拱閉合與開挖同步，則閉合開挖時開挖面之入侵變位呈對稱且變位小。仰拱閉合時機愈慢，懸臂(cantilever)效用對隧道開挖面之穩定愈不利。

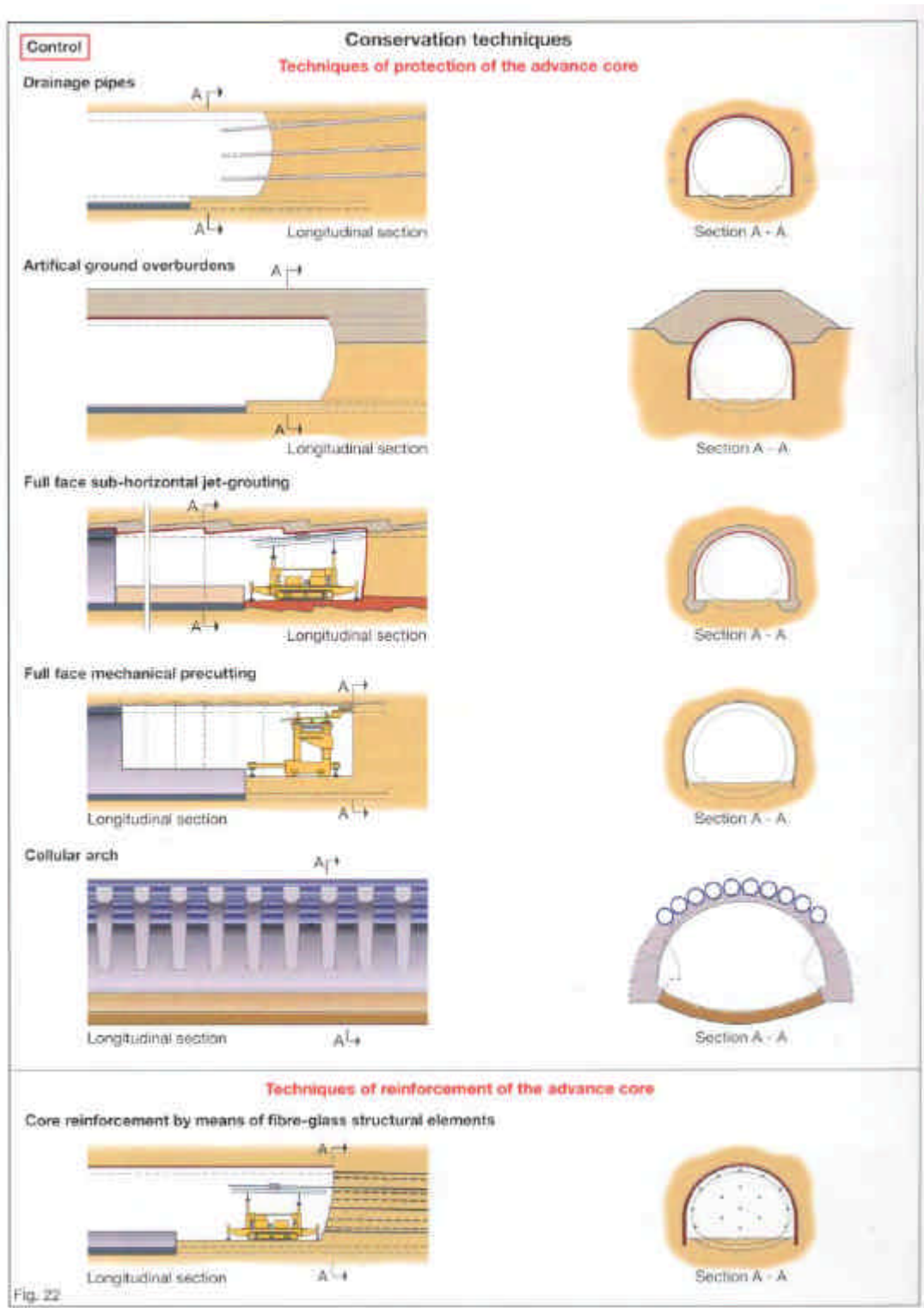


圖-12 隧道開挖面前方擾動區之穩定方法

(圖-12 之說明)

隧道開挖面前方擾動區之穩定方法包括：排水(drainage)、人工加厚

覆土層(overburden)、水平高壓噴射灌漿(jet-grouting)、機械式預挖(precutting)、前進頂拱支撐(cellular arch)及打設玻璃纖維管(FGT)等。

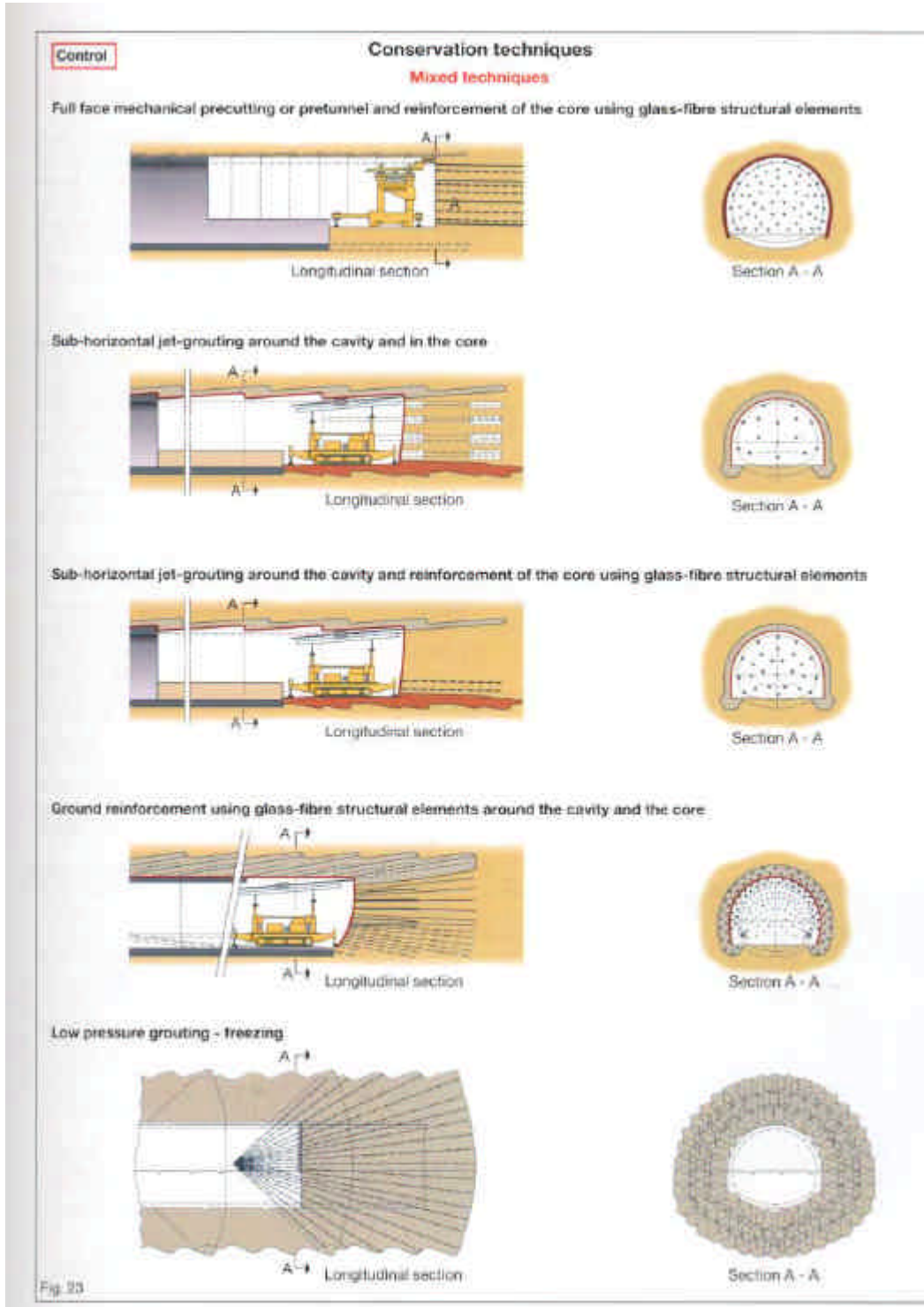


圖-13 各種穩定工法之混合應用

(圖-13 說明) 圖-12 所示各種穩定工法之混合應用及冰凍工法穩定。

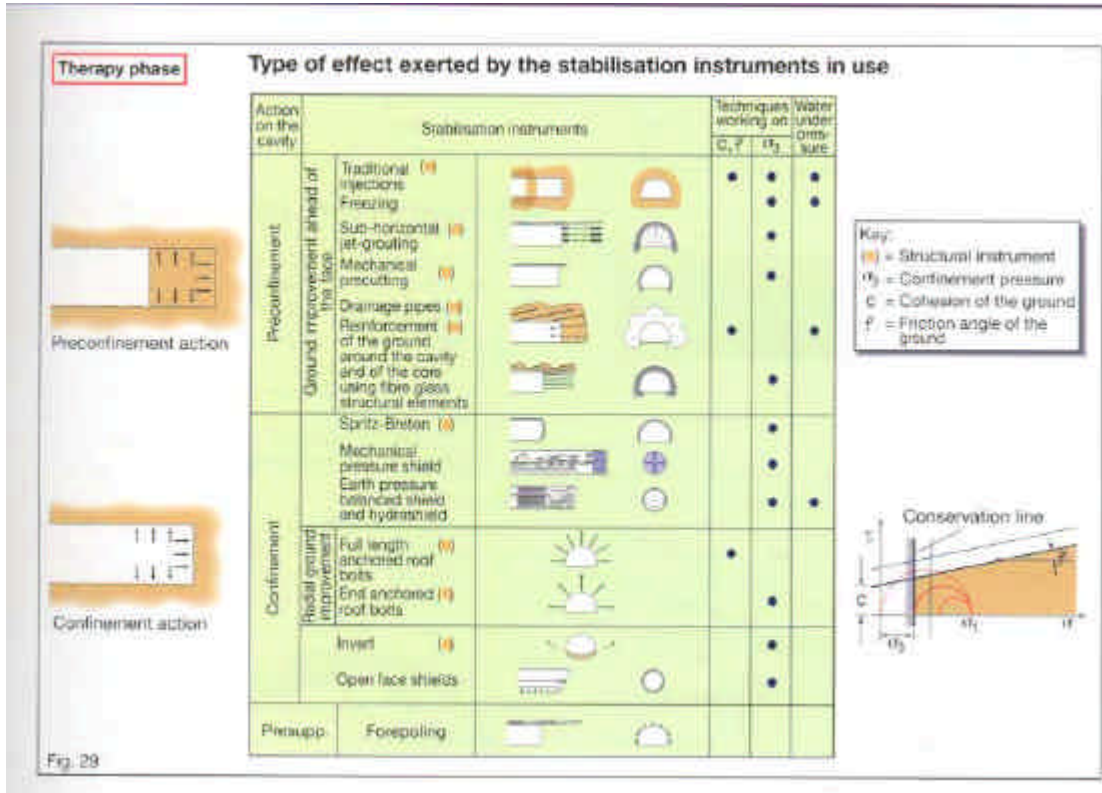


圖-14 各種隧道穩定措施之功效

(圖-14 說明)

本圖詳述各種工法對隧道穩定之作用，其中以增加圍壓(σ_3)之貢獻最大。因增加圍壓相當於將莫耳圓變小，即離降伏線(yield line)愈遠表示隧道愈安全穩定。

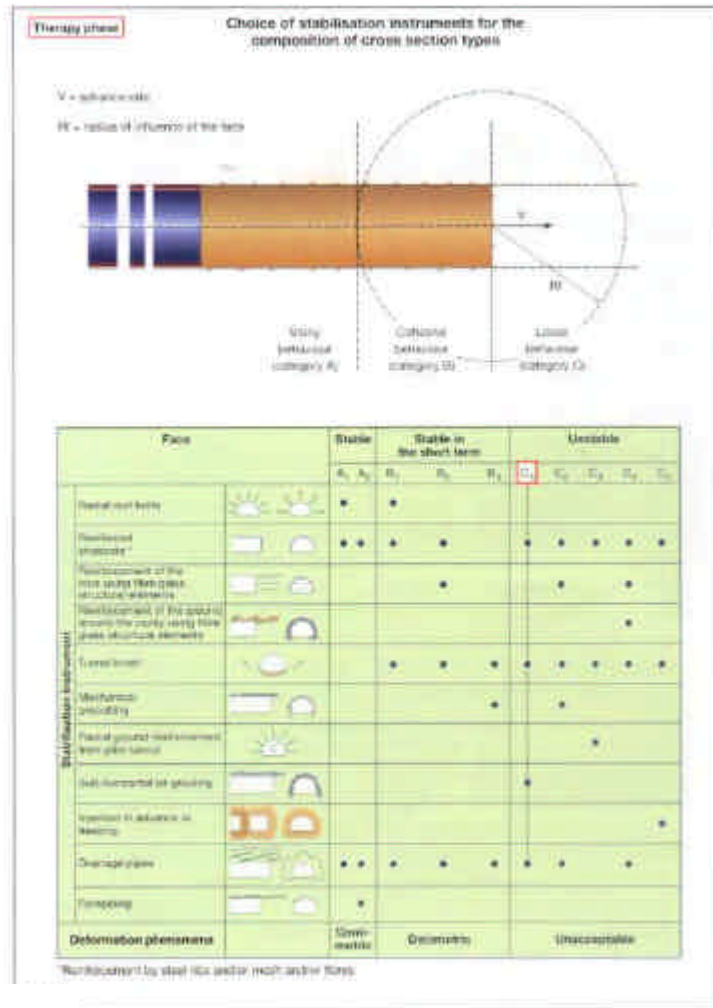


圖-15 隧道開挖各類等之穩定對策

(圖-15 說明)

將隧道開挖可能產生不穩定之地盤分類為 A,B,C 三類(各類中又再分 2~5 級), 並表示各等級應採取之穩定對策。

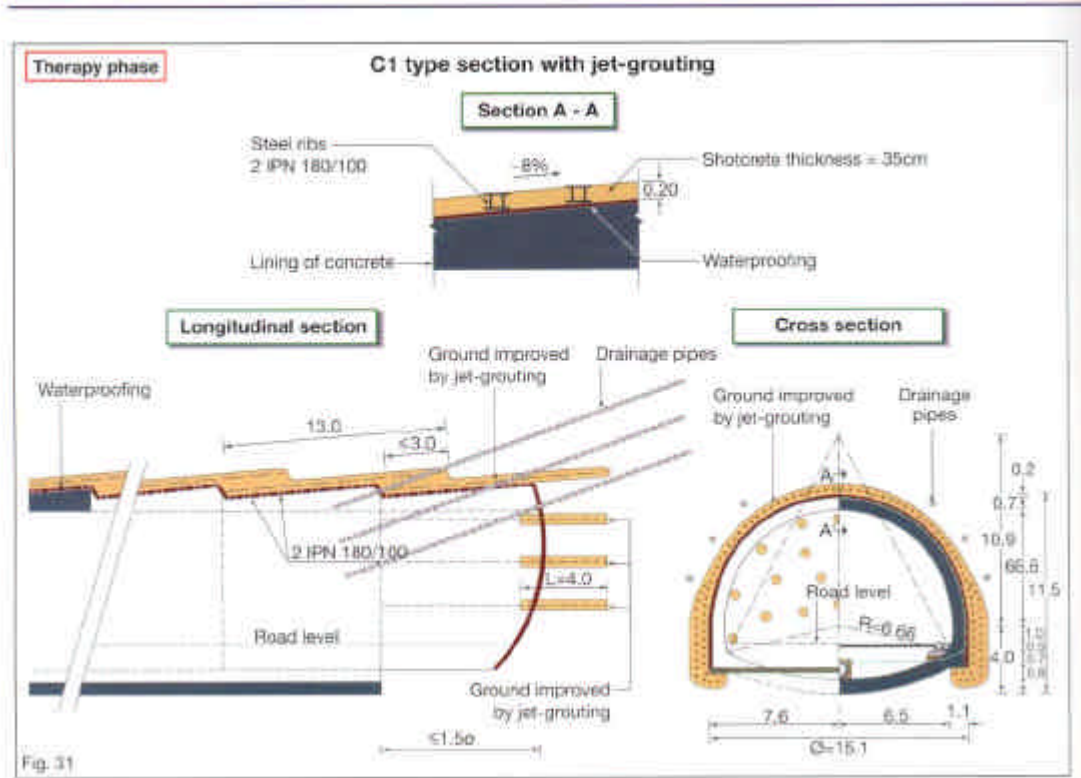


圖-16 道開挖面前方擾動區(C類)穩定措施標準圖

(圖-16 說明)

典型之道開挖面前方擾動區(C類)之穩定對策。

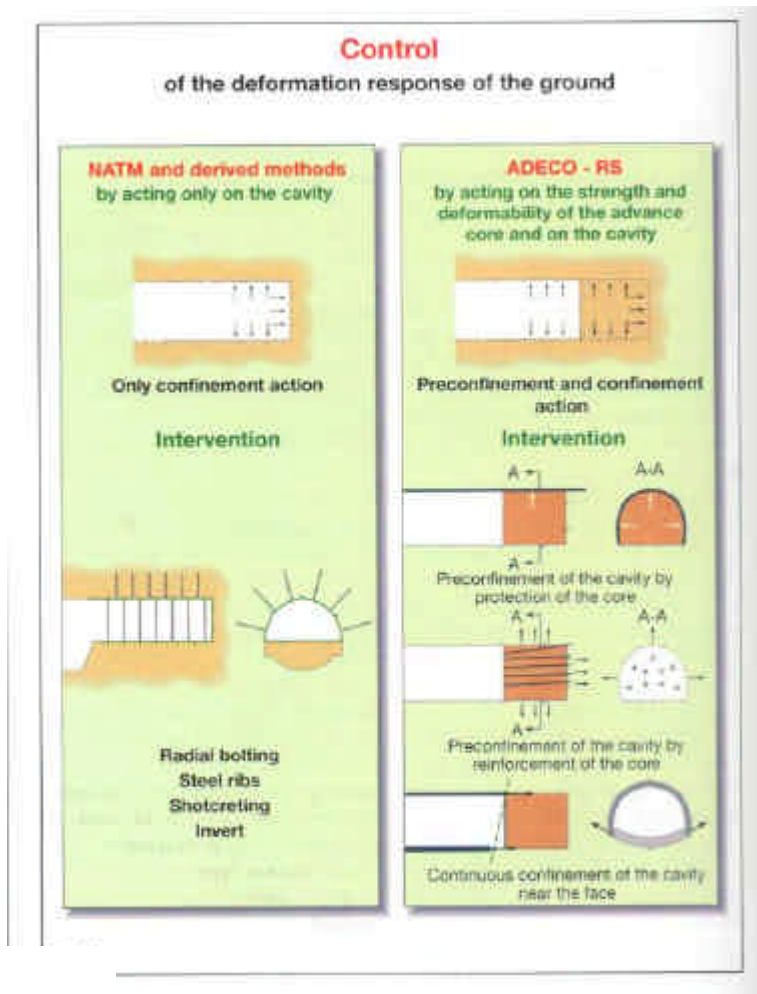


圖-17 NATM 工法與 ADECO-RS 工法之比較

(圖-17 說明)

NATM 工法及 ADECO-RS 工法之地盤變位反應。

NATM 工法比較著重隧道開挖面後方之變位處理，而 ADECO-RS 工法除隧道開挖面後方之變位處理外，更強調開挖面前方變位之穩定處理。

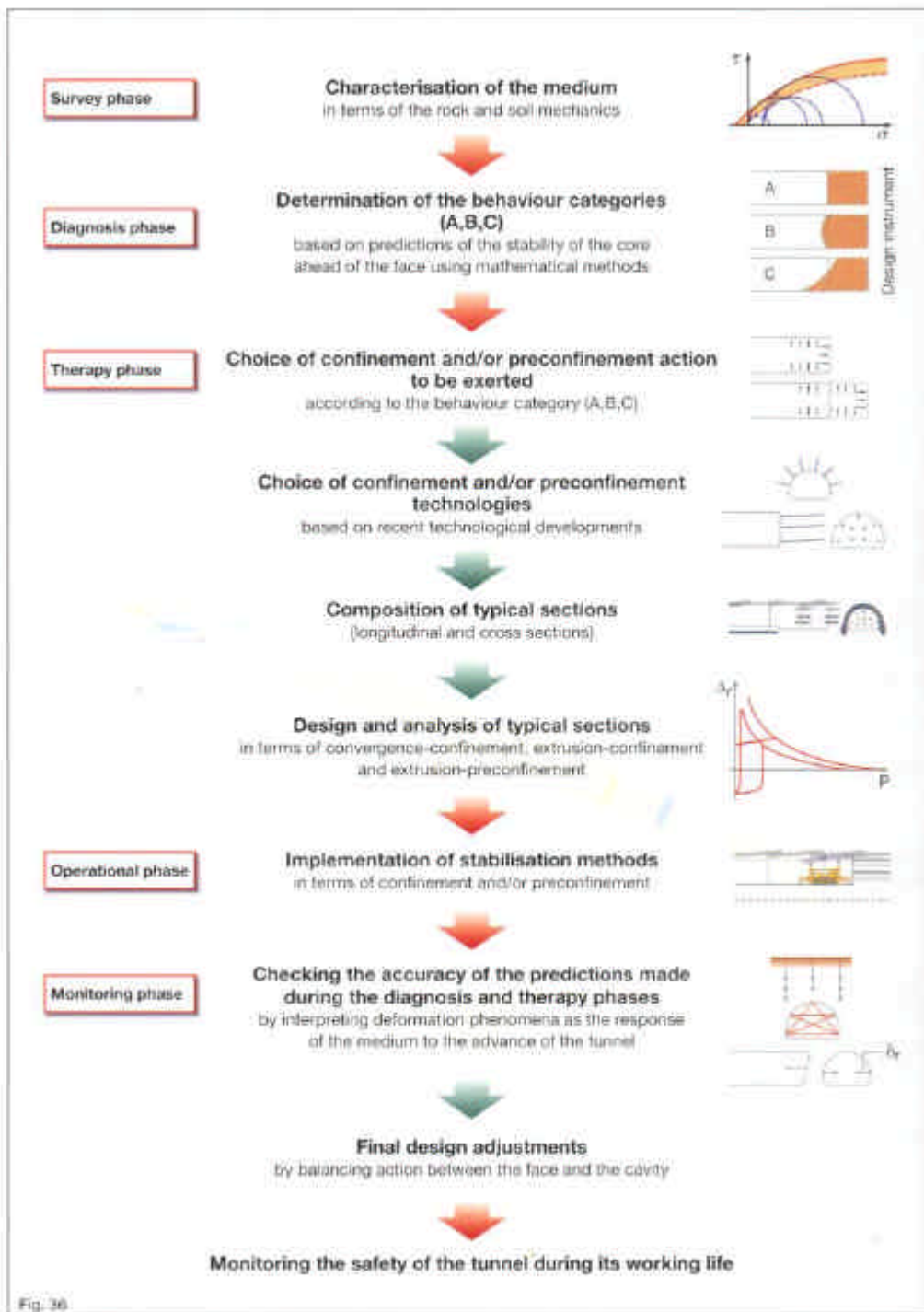


圖-18 完成隧道設計及施工之流程圖

(圖-18 說明)

調查：瞭解土層或岩盤之力學特性。

診斷：根據隧道開挖面前方擾動區之穩定情形，將地盤分為 A,B,C 三

類進行設計。

治療：根據所診斷之 A,B,C 等類別設計相應之穩定處理措施。

施工：現場根據設計之穩定措施施作，以穩定隧道開挖面前方及後方之隧道變位。

監測：根據監測數據回饋檢視前述診斷及治療之可靠度，必要時調整設計以維持隧道開挖之安全。