

吳 偉 特\*

## 22. 大眾捷運系統 (Mass Rapid Transit System)-MRT

大眾捷運系統(MRT)，係指目前大台北地區之都會區捷運系統規劃計劃(交通部運委會，1982)；為目前政府積極推動三大重要交通計劃之一，其餘兩大計劃分別為「台北市鐵路地下化工程」(Taipei Railway Underground Project, TRUP)，與「台北市中運量捷運系統」(Medium Capacity Transit System, MCTS)。

為解決大台北都會區因人口與車輛激增，導致交通阻塞日趨嚴重之問題，民國68年交通部運輸計劃委員會(現改稱運輸研究所)負責並委託，英國工程顧問公司規劃設計 MRT 計劃，進行有關台北都市及其附近所屬衛星市鎮之大眾運輸規劃工作，以每小時單方向最大運量為二萬人以上之高運量設計之，故本計劃亦可稱為「大眾捷運中之高運量系統計劃」。

至於台北市中運量捷運系統(MCTS)，則由台北市政府工務局負責，並委託國立交通大學運輸研究所規劃設計；以每小時單方向最大運量在五千人至二萬人之中運量為設計標準；本計劃可視之為「大眾捷運中之中運量系統計劃

」，故亦為 MRT 中之一環；其計劃中特性，為全線之考慮路線，採行在既有道路上之高架型式，其中部份地區視需要可採地下型式，其建設經費較 MRT 為少，且其工期較採地下施工者為短。

台北市區鐵路地下化工程(TRUP)，為未來台北捷運系統之一環，係為捷運系統之先驅工程，僅為改善目前台北市區中部份平交道問題，亦即將目前縱貫鐵路從萬華站到華山段部份，從地表面移至地下；其計劃目標除消除平交道，改善交通外，並建立台北都市運輸中心，改建台北及華山站場，貫通南北市區，並配合其他路線，形成大眾捷運之完整路網，並期望能引進工程新技術，建立起國內地鐵工程之典範標準。

由於目前交通部推動之捷運系統，其運輸機具採用傳統之地下鐵路型式，此合於高運量標準，故一般習稱大眾捷運系統(MRT)之名稱，已似乎與傳統之地下鐵引用之捷運系統名稱，合而用之，而實際上兩者應有所不同。

## 23. 台北市鐵路地下化工程 (Taipei Railway Underground Project)-TRUP

台北市鐵路地下化工程，係指由交通部所屬地下鐵路工程處負責，並委託西德工程顧問公司規劃設計；台北市鐵路橫貫市區，如何改善大費苦心，經長期研究結果，就原先四十餘種可能方案，歸納為「遷移改道」，「原地高架」與「納入地下」之最後三類。

民國68年交通部運輸計劃委員會，委託國

內外顧問工程司詳加研究結果，以納入地下之延長隧道案最具功效，並能兼顧鐵路幹線運輸，及大眾運輸系統之需求，遂於同年十月成立工程籌備處，並於民國69年9月聘請德國鐵路顧問公司，進行初步規劃工作。

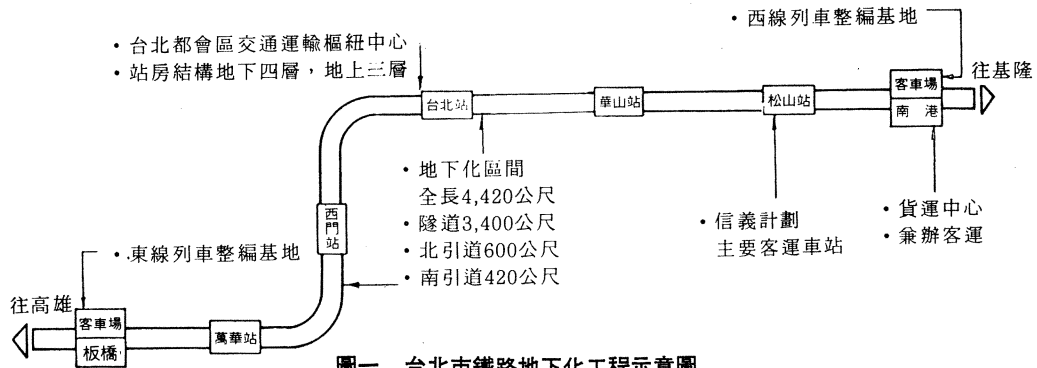
民國71年台北都會區捷運系統(MRT)規劃完成，其中 S<sub>1</sub> 郊區線即為利用南港至樹林區段

\* 國立台灣大學土木工程學系教授

之縱貫鐵路，加以改良並適應未來之擴展；地下鐵工程計劃之地下區間全長4420公尺(圖一)，其中包括隧道3400公尺，北引道 600 公尺與南引道 420 公尺；位於板橋客車場周邊工程已於72年 7 月開工，主體工程亦於73年 9 月動工，預定78年 6 月完工(台北市地下鐵工程處，1984)。

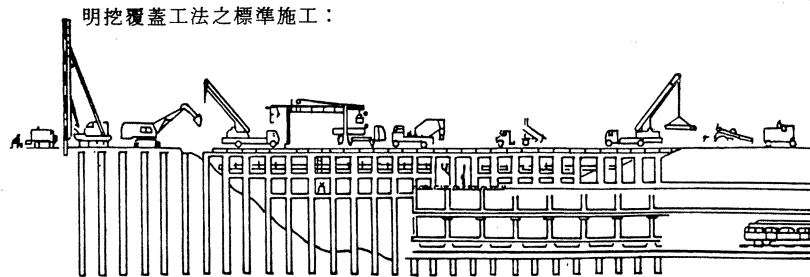
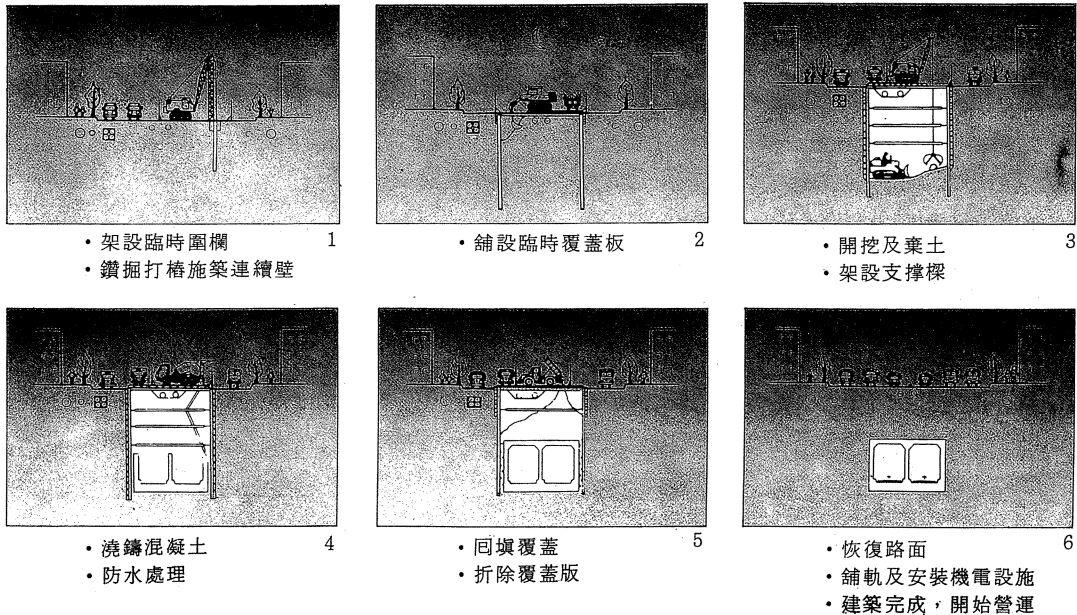
由於縱貫鐵路平均坡度緩和，約為10%，且其總長度不長，加以又需考慮台北車站之建

造改建施工方法，通風，旅客進出方便等因素，故台北地下鐵路之施工方法，採用淺埋式之明挖覆蓋法(Cut & Cover method)較為經濟。茲將明挖覆蓋法之施工步驟，示於圖二；為免影響交通，以盡量不阻斷交通為原則，施工期間鋪以覆蓋版，以保路面交通之流通與安全；並採夜間部份地區封鎖數小時，翌晨恢復原狀之措施，以供車輛通行。



圖一 台北市鐵路地下化工程示意圖

明挖覆蓋法施工步驟



圖二 明挖覆蓋工法示意圖

## 24. 隧道潛盾施工法 (Shield Tunneling Method)

潛盾施工法係使用於易崩塌之較弱土質內之開挖隧道方法；即主要使用較隧道外徑斷面稍大之可移動鋼套筒（即為潛盾機）掘進土中，除可用以支撐隧道開挖洞口四周之地盤，以便在潛盾機內安全迅速地施工開挖外，亦可保護永久襯砌之施工工作。

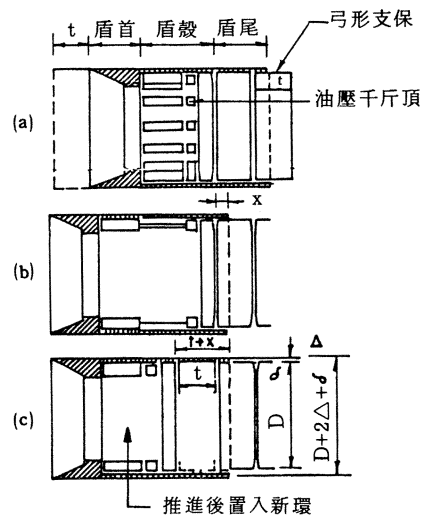
本方法可免除傳統隧道開挖施工法，所需大量密佈之臨時支撐，反覆架設與拆除工作之缺點，並可避免開挖與襯砌工作之相互干擾作用；故可安全迅速地向前推進，亦可節省費用；此外，對於地面上各項建築設施、活動與交通等影響程度，可減至最低；惟其缺點為對於覆蓋土層較淺薄之施工，較有困難；且對於因施工受地質及地下水影響，引致之地盤沉陷問題，較難避免之；同時當土質之穩定性狀況程度不一，為求施工順利而必須採用氣壓，灌漿或深井排水等輔助工法，以克服並穩定土質及地下水情況，來防止流砂，湧水與隆起等現象時，常導致工程費用之大量提高。

大體言之，潛盾機為剛性結構之鋼筒，由殼板與推進千斤頂構成(圖三)；鋼製殼板用以支撐四周之地盤，鋼筒兩端之前端部份，用以供人工或機械實施開挖施工作業，而尾端部份則用以安裝襯砌之弓形支保，並以弓形支保作為千斤頂之反力座措施，使潛盾機得以向前推進；當潛盾機之鋼筒尾端，脫離弓形支保後，則以水泥砂漿填充其空隙；此種以潛盾機之鋼筒逐步先行，而以永久襯砌隨後跟進，背填灌漿殿後之反覆循環施工方法，一如甲蟲於土中穿泥前進之方式。

國內使用潛盾施工法遠溯至民國65年，但直至民國68年由榮民工程處陸續引進本法後，

才真正發揮潛盾工法之實際功效；前後總共引進手挖式，土壓平衡式，泥水加壓式，密閉機械式與泥土加壓式五種機型之潛盾機；其中大部份從事國內下水道工程，包括台北市建國北路（民國68年4月至70年10月），民族路（69年至今）與民權東路（70年至今）衛生下水道工程，與高雄市成功路污水下水道工程（69年5月至72年10月），前後共使用了八部潛盾機，隧道內徑自2.4 m至3.6 m，預計潛盾施工法完成之里程長度將超過10公里（朱旭，1984）。

有關潛盾工法在國內採用所發生之缺點（楊建西，1982），除前述所言之引起地表沉陷問題，以及常須採用輔助工法增加成本外，其他如對於地質變化複雜之適應性程度較低，施工斷面固定無法變化，與潛盾機之設備投資甚大等等，皆為其缺點。



圖三 潛盾施工作業循環示意圖

## 25. 新奧國隧道工法(New Austrian Tunneling Method) - NATM

新奧國隧道工法(NATM) (簡稱新奧工法) 係主要利用半剛性支撐系統，使隧道周圍岩體發揮本身強度，形成承載環，以達到隧道開挖面之穩定；亦即利用岩體本身之支撐能力，來穩定開挖之隧道；此為奧地利 Rabcewicz 與

Fenner 教授研究發展之新觀念。

新奧工法已成為目前隧道工程設計與施工之主流，為相當經濟有效之施工方法；歐洲自1960年即已開始應用，甚為成功；國內最近幾年才開始引進，其最成功之例子為台灣鐵路東

部拓寬工程之自強一號隧道，在接近坍塌大量流出泥漿地帶，經全部採用新奧工法，並輔以隧道開挖面之高壓隔幕灌漿，得以穩定該地區變化多端之惡劣地質情況（陳世芳等，1982；林清標等，1983）。

由於 NATM 之半剛性支撐系統於開挖或開炸後可立即施工，且施工後能容許岩體面有適當之位移；因此為能使隧道支撐來源，主要由開挖四周之岩體來承擔，可直接在岩體之開挖面上立即加上薄且具可撓性之噴凝土(Shotcrete)初步支撐(Preliminary Support)，以促使該襯砌與周圍岩體一體化；並可利用鋼絲網，岩栓，鋼管灌漿，鋼矢板(Liner Plate)，或柔性結合之 U 型鋼支保等加強措施加以強化之，以達到並維持岩體三軸應力之最佳狀態。

因此經由新奧工法完成之隧道，可視為一個由岩體承載環與支撐系統形成之厚壁管道；基本上初步支撐即能穩定岩盤，而二次支撐措施之雙重設計，僅為提供額外之安全係數而已；當設計雙重支撐時，二次支撐亦以薄型之半剛性者為佳。

由於新奧工法之基本觀念，是以剪力理論為基礎，並在施工時有關支撐材料之選用與裝設之時機(時間因素)，係根據岩盤之變位來決定；故岩體變形之控制，在新奧工法中十分重要，除可使岩體變形形成支撐環外，亦可使岩體應力之損失達到最小；一般施工時必須使用觀測儀器量測岩盤之變位，混凝土應力，襯砌與岩盤間之接觸應力等資料(包括控制量測，

支撐量測與穩定量測)，加以判斷，並彈性地依現場條件與地質變化，運用各種材料，其最終目的係利用半剛性支撐系統之作用，達到岩體承載環之效用，以求隧道之穩定性。

岩體變形之時間因素，係根據岩石力學之室內與現場試驗，現場量測，開挖面岩體自立時間，變形速率，岩體分類等資料加以估計之。

根據地質調查與現場量測資料，配合有限元素方法之分析，可考慮隧道節理之彈塑性變形分析，並可模擬不同開挖程序施工之變形，使得分析結果愈來愈精確，更增加隧道工程設計與分析工作之穩定性。

新奧工法對於不同岩體與土壤具有高度之適應性，並能勝任對隧道斷面及形狀之變化，且無論在何種地形，諸如岩層，地層，通過河底，穿過高樓底部等均能施工；同時並可配合托底，冷凍，灌漿，壓氣，祛水等輔助工法；故在歐洲早已引用在地下鐵，山岳隧道，導水隧道，下水道，地下電廠等工程之中，已證明為相當經濟有效之施工方法。

國內已往隧道工程多習用鋼支保施工方式，但時生災害，此因鋼支保背後之空隙，常造成岩盤之鬆動，而引起大範圍之塑性變形，再加上開挖時岩盤閉合時間太慢，致使仰供(Invert)未能及時處理造成破壞等原因所致；此種鋼支保先天性之缺點，已可因新奧工法之特色與施工方法加以克服；國內東部鐵路拓寬工程之自強一號隧道即為成功之例子。

## 26. 岩體分類 (Rock Mass Classification)

岩體分類與隧道設計幾乎已密不可分(洪如江，1983)；岩體分類之結果，目前除用以隧道設計外，亦可得出岩體之剪力強度與變形模數，並可應用於壩基，岩坡等工程。

Terzaghi(1946)為最早使用岩體分類之始祖，所建議之隧道支撐設計，將岩盤按地質之優劣分為九級，並分別推估相對應之岩盤荷重；其支撐主要以鋼支保為主。

Terzaghi 之岩體分類法簡單易用，岩盤荷重隨隧道大小比例增加，且鋼支保應力分析可採理論圖解法得之，故會極受工程師與施工者之信賴與採用；惟因所包含之因素較少，加以

一般地質變化複雜，估算不易一致，常有出入；且其荷重假設值亦顯得稍嫌保守；同時目前隧道工程已逐漸採用效率高且經濟之半剛性支撐系統(李榮松，1984)，故目前已逐漸被能包含多項因素之定量直接法之岩體分類方法所取代。

目前採用之岩體分類方法，其特點為岩體經分類後，可不經過推估岩盤荷重與分析計算之步驟，即可直接決定所須之支撐型式與大小；亦即現地工程地質師可憑藉其過去累積經驗，在工地對於隧道開炸與出渣後之調查資料，按岩盤之品質指數，節理之組數，間距，方向

，節理面情況，地下水流，單壓強度及應力等工程地質因素，加以評分分類以供設計工程師之研判依據；一般而言，評分愈高，岩盤品質愈佳；工程地質因素，可統括為地質材料因素，地質構造因素，環境因素與工程因素四類。

現代岩體分類，可遠溯至1964年至1972年間之 Deere(1964, 1966)，Cecil(1970)與 Merritt(1972)等人，單憑岩石之品質指標(RQD)，決定隧道支保設計之關係。

1973年至1979年間，南非之 Bieniawski (1973, 1974, 1976, 1978, 1979)則除考慮 RQD 外，亦考慮了岩石之材料強度，弱面之間距，狀況，方位，地下水狀況等因素，而得出計算岩體之評分法(Rock Mass Rating, RMR)；此外並經由經驗與試驗得出，RMR 法與岩體力學之變形與強度性質，以及隧道開挖，支保方法之關係。

1974年美國之 Wickham 等人(1974)，則根據岩石之地質分類、地質構造、滲水情形，弱面之品質，間距、方位，以及隧道前進方向等因素，而得出估算岩體構造評分法(Rock Structure Rating, RSR)；並根據經驗建立 RSR 法與隧道荷重，支保工程設計之關係。

1974年挪威之 Barton 等人(1974)，則根據岩石之 RQD，弱面之組數、粗糙狀況，品質及弱面內水流情形，與應力影響因素，加以估算岩體品質(Rock Mass Quality, Q)；並根據經驗建立岩體品質 Q 與隧道荷重，支保設計之關係。

此外，日本之池田和彥(1972)亦曾根據岩性(分為六級)，與岩體之傳波速度，成立岩體分等方法；並依經驗建立各岩體與隧道設計之關係。

因此，一般通稱上述 RMR 法，RSR 法，Q 法，與池田和彥法為岩體分類法，其中又以 Bieniawski 之 RMR 法，經南非科學與工業研究委員會(Council for Scientific & Industrial Research)正式提出使用，故現今皆稱為 CSIR 岩體分類法；此外，Barton 等人之 Q 法，亦經挪威地工技術研究所(Norwegian Geotechnical Institute)正式提出使用，故現今皆稱為 NGI 岩體分類法。

由於 CSIR 法與 NGI 法，對岩體影響隧道支撐之因素，除考慮較為詳盡外，並能加以具體且定量之敘述；同時並能列出與評分值相對應之隧道支撐表，使用時非常方便，客觀且實用，故現今已廣受設計工程師之採用；國內翡

翠水庫有關隧道工程之設計與施工，即採用此兩種方法(李榮松，1983)。

基於各種岩體分類法考慮之工程地質因素，不盡相同，故 Bieniawski(1976)與 Rutledge 等人(1978)研究各分類方法相互之關係，如下列所示：

$$\text{RMR}=9\log_e Q+44$$

$$\text{RMR}=13.5\log Q+43$$

$$\text{RSR}=0.77 \text{RMR}+12.4$$

$$\text{RSR}=13.3\log Q+46.5$$

## 參 考 文 獻

- 交通部運輸計劃委員會(1982)「台北都會區捷運系統計劃報告」。
- 台北市鐵路地下化工程處(1984)「鐵路地下化工程簡介」。
- 李榮松(1984)「台灣隧道工程設計之新趨向」1984年近代工程技術研討會論文集，大地工程與地下結構組，PP.413~418。
- 李榮松(1983)「岩體分類在翡翠水庫隧道工程之應用」中國土木水利工程學會72年年會論文集，PP.515~539。
- 朱旭(1984)「盾構施工法在國內應用之探討」中國土木水利工程學會73年年會論文集，PP.51~71。
- 洪如江(1983)「現代隧道工程技術之研究—岩體分類法在隧道工程之應用」榮建研究中心研究報告，TR-7263
- 林清標，謝玉山(1983)「新奧工法在自強隧道工程之應用」中國土木水利工程學會72年年會論文集，PP.579~597。
- 陳世芳，林文雄(1982)「台鐵東拓工程自強一號隧道之災變及施工方法」中國土木水利工程學會71年年會論文集第三冊。
- 楊建西(1982)「新奧工法在國內應用之探討」中國土木水利工程學會71年年會論文集第三冊。
- 池田和彥(1972)「隧道之物理探查」物理探礦25卷6號，PP.48~62。
- BARTON, N., LIEN, R. and LUND, J. (1974) "Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support", *NGI Publication No. 106*.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1973) "Engineering Classification of Jointed Rock Masses", *The Civil Engineer in South Africa*.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1974) "Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunneling", *Proc. 3rd Cong. Intl. Soc. Rock Mech.*, Denver, Vol.2A: 27-32.

- BIENIAWSKI, Z. T. (1976) "Rock Mass Classification in Rock Engineering", *Proc. Symp. Expl. Rock Engg.*, Johannesburg, 1: 97-106.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1978) "Determining Rock Mass Deformability: Experience from Case Histories", *Intl. J. Rock Mech. & Mining Sc.* 15: 237-247
- BIENIAWSKI, Z. T. (1979) "The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications", *Proc. Intl. Cong. Rock Mech. Montreux* 2:40-48
- CECIL, O. S. (1970) "Correlation of Rockbolts-Shotcrete Support and Rock Quality Parameters in Scandinavian Tunnels". *Ph. D. Thesis, University of Illinois*, Urbana, 414 pages.
- DEERE, D. U. (1964) "Technical Description of Rock Cores for Engineerpurposes". *Rock Mechanics and Engineering Geology*. Volume 1, Number 1, pages 17-22.
- DEERE, D. U. and MILLER, R. P. (1966) "Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock". *Technical Report No. AFNL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory*, Now Mexico.
- MERRITT, A. H. (1972) "Geologic Prediction for Underground Excavations". *Proc. First North American Rapid Excavation and Tunnelling Conference*, AIME, New York, pages 115-132.
- RUTLEDGE, T. C. and PRESTON, R. L. (1978) "New Zealand Experience with Engineering Classification of Rock for the Prediction of Tunnel Support", *Proc. Intl. Tunnel. Symp. Tokyo*, pp. A3-1-7.
- WICKHAM, G. E. TIEDEMANN, H. R. and SKINNER, E. H. (1974) "Ground Support Prediction Model (RSR Concept)", *Proc. 2nd Rapid Exc. & Tunneling Conf., AIME N. Y.*, pp.691-707.