

新奧工法的回顧與展望

王泰典 國立臺灣大學土木工程學系 / 教授、大地技師

摘要

新奧工法源於 Rabcewicz 於 1948 年提出的雙層支撐襯砌概念，1950 至 1960 年代結合噴凝土、岩栓與現場量測技術逐漸成形，核心在於允許圍岩於可控範圍內適度變形，動員圍岩自承能力並形成俗稱的地拱效應，再依觀測回饋調整支撐與施工程序；結合閉合約束法闡釋其隧道力學理論後廣為應用，成為 20 世紀後半葉廣泛採用的山岳隧道工法，近期更演變為以風險管理為導向的觀測施工體系。台灣自 1982 年自強隧道引進後，廣泛應用於鐵路、公路與水力隧道並趨於成熟。展望未來，新奧工法憑藉其完整的隧道力學理論與施工彈性，將與全斷面鑽掘機形成複合施工策略，並朝數位化觀測、數位孿生驅動的智能化回饋設計、全生命週期監測與風險管理制度化方向發展；材料與設備將朝低碳化、自動化與高品質控制精進。

一、前言

山岳隧道工程具有施工前難以完全掌握地質、施工中必須持續驗證設計的本質。隧道開挖使原有應力重新分布，圍岩可能產生收斂、鬆弛、剪動或擠壓變形；支撐設計若僅依調查階段的有限資料採取固定而厚重的配置，往往難以兼顧安全、施工性與經濟性。1950 至 1960 年代逐漸形成的新奧工法（New Austrian Tunnelling Method, NATM），將噴凝土、岩栓、鋼支保、仰拱閉合及現場量測整合為圍岩－支撐共同作用系統，其關鍵不在特定材料或開挖機具，而在允許圍岩於可控制範圍內適度變形，機動發展其自承能力，並依實際觀測行為調整支撐與施工程序（Rabcewicz, 1964a, 1964b, 1965; Rabcewicz and Golser, 1973; Müller and Fecker, 1978）。

新奧工法往往被簡化為巨觀可視的鑽炸開挖、噴凝土襯砌或某一組標準支撐型式，未見其結合岩體力學、閉合約束分析與觀測法的設計施工管理理念。其實施過程應在施工前建立可能地盤行為、設計條件與假設、監測項目、預警值、以及輔助工法或備援措施，施工中則以開挖面地質、隧道周壁變位、支撐受力、地下水及施工紀錄持續檢核，形成設計預測－施工觀測－比較修正的閉合回饋（Peck, 1969; Nicholson *et al.*, 1999; Austrian Society for Geomechanics, 2010）。

台灣位處活躍造山帶並深受東亞季風影響，地質構造複雜、斷層與剪裂帶密集，地下水與颱風豪雨補注作用顯著，山岳隧道施工常遭遇破碎岩盤，出現擠壓變形、湧水及開挖面不穩定等現象。新奧工法自 1980 年代引進後，逐漸成

為國內鐵路、公路及水力隧道的重要工法。本文由歷史發展與力學概念出發，回顧新奧工法在國際及台灣的演進，並從與 TBM 複合施工、數位化觀測、工程地質模型、數位孿生、智慧化回饋設計、風險管理及全生命週期維護等面向，探討其未來挑戰與發展方向。

二、新奧工法的發展

2.1 新奧工法的萌芽

1940 年代以前，山岳隧道施工通常先開挖底導坑或小導坑，再逐步擴挖至全斷面，並配合木支保、磚石襯砌或鋼拱支保支撐，再設置混凝土襯砌。這類工法，也就是國內俗稱的傳統工法，在地質不良的地盤中雖具施工安全性，但支撐系統厚重、施工程序複雜、工期長且成本高。傳統工法的隧道力學觀點，圍岩是需要由支撐系統承受的地壓來源，也就是說，支撐與襯砌的主要任務是抵抗岩體壓力，而不是主動引導圍岩形成穩定承載環。

Rabcewicz 在 1948 年提出的雙層支撐／襯砌概念，可謂是新奧工法最早的基礎論述：隧道開挖後先設置第一層初期支撐，用於穩定圍岩並控制變形；第二層為永久襯砌，通常於初期支撐與圍岩變形趨於穩定後再施作，以避免永久襯砌承受過大的早期變形荷載。此一概念的工程意義相當重要，改變了隧道支撐需要愈早設置、愈厚重、愈剛硬的傳統思維，提倡依據岩體反應與支撐作用時機控制圍岩變形。

1950 年代末至 1960 年代初期，噴凝土與岩栓等新技術快速發展，配合隧道內量測技術的進步，新奧工法的基礎論述得以整合實踐。噴凝土在開挖後迅速封閉岩面，減少節理張開、岩塊鬆脫、風化與地下水作用，並形成薄而連續的初期支撐層。岩栓補強節理岩體，使破碎岩體形成較完整的受力區域，增加岩拱效應與圍岩自承能力。而現場量測的圍岩收斂變形、支撐應力、岩體變位等資料，不僅反應隧道行為，更提供調整支撐與開挖程序的依據。

一般認為，新奧工法的正式形成與 Rabcewicz、Müller、Pacher 三人密切相關。1962 年，Rabcewicz 在薩爾斯堡第 13 屆地質力學研討會中提出「New Austrian Tunnelling Method (NATM)」的名稱；1964 年起，他在 *Water Power* 期刊連續發表 3 篇英文論文，使 NATM 開始獲得國際注意。

依據前述，圖 1 與表 1 整理新奧工法萌芽歷程，並納入其後續發展。

2.2 閉合約束法的輔助

Fenner (1938) 採用二維方式處理圍岩－支撐互制的概念，可謂地盤反應曲線與圍岩約束觀念的濫觴。Pacher (1964) 圖示地壓與支撐變形關係；Panet 和 Guellec (1974) 進一步以約束損失因素 (confinement loss factor) 表示支撐安裝前已發生的變形。法國隧道與地下空間協會 (Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain, AFTES) 在 1978 年巴黎研討會引用相關研究，並正式提出閉合約束法 (Convergence-Confinement Method) 的名稱；其後 Panet (1995) 進一步系統化其理論與應用。

圖 2 簡要說明隧道周圍岩土材料收斂曲線與支撐作用曲線的關係。地盤收斂曲線描述隧道周圍岩土材料自初始狀態 (P_0) 受開挖擾動後，收斂變形量 (δ) 達到平衡狀態所需的徑向應力分量值，而支撐作用曲線則描述支撐設置時機對應的圍岩收斂變形量、以及構件變形所發揮的支撐作用力 (S)。地盤收斂曲線與支撐作用曲線的交會點即為隧道開挖支撐後新的平衡狀態點。

圖 2 繪出 3 種地盤收斂曲線，代表不同隧道工程地質條件下典型的開挖面附近圍岩變形特性。岩體工程特性佳、現地應力不大情況下，隧道開挖後周壁收斂變形量小，周圍岩土材料即達到了新的平衡狀態，隧道開挖面附近的變形特性可以 $P_0 H$ 曲線描述。對於軟弱岩體或是現地應力過大情況下，隧道開挖後周壁顯露明顯的收斂變形特性，然而過量的變形快速發生，周圍岩土材料擾動範圍迅速增大，收斂曲線出現上凹現象，

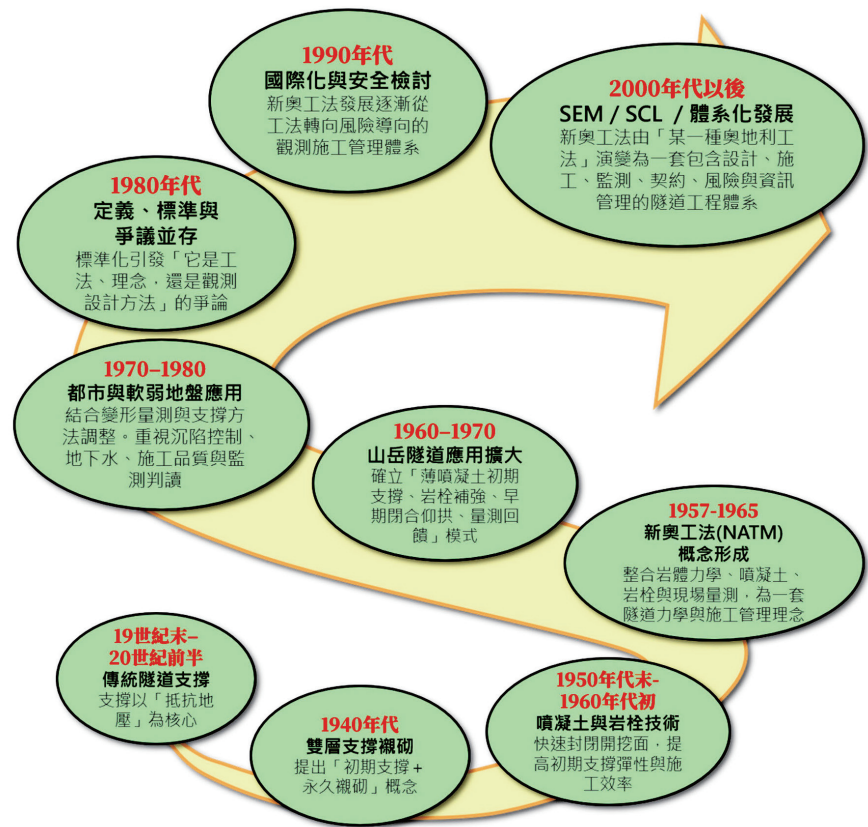


圖 1 新奧工法的發展歷程

表 1 新奧工法發展歷程彙整

時期	發展階段	主要內容	工程意義
19 世紀末至 20 世紀前半	傳統隧道支撐階段	以木支保、磚石襯砌、鋼拱支保為主，常採多導坑分部開挖。	隧道支撐多以「抵抗地壓」為核心，施工慢、支撐厚重，較少明確利用圍岩自承能力。
1940 年代	雙層襯砌觀念出現	Rabcewicz 於 1948 年提出「初期支撐＋永久襯砌」雙層支撐概念，並主張允許岩體與初期支撐先產生可控制變形，再施作永久襯砌。	奠定「變形控制」與「支撐時機」的觀念基礎。
1950 年代	噴凝土與岩栓技術成熟	噴凝土、岩栓、鋼筋網、鋼支保等支撐技術逐漸普及。Palmström (1996a、1996b) 指出 NATM 利用了 1950 年代末至 1960 年代初期成熟的岩栓與噴凝土技術。	快速封閉開挖面、抑制岩體鬆弛、提高初期支撐彈性與施工效率。
1957 ~ 1965 年代	NATM 概念形成	Rabcewicz、Müller、Pacher 等人整合岩體力學、噴凝土、岩栓與現場量測，逐漸形成新奧工法。1962 年 Rabcewicz 於薩爾斯堡地質力學研討會正式提出 NATM，1964 年於 Water Power 發表英文論文。	NATM 從工程經驗與支撐技術組合，提升為一套隧道力學與施工管理理念。
1960 ~ 1970 年代	山岳隧道應用擴大	NATM 應用於奧地利、德國、瑞士等山岳隧道，特別是弱岩、擠壓性地層、高地壓或複雜地質條件。	確立「薄噴凝土初期支撐、岩栓補強、早期閉合仰拱、量測回饋」的典型模式。
1970 ~ 1980 年代	都市與軟弱地盤應用	NATM 逐漸擴展至地鐵、都市隧道與軟弱地盤；Arlberg Road Tunnel 等大型工程亦採用 NATM 並結合變形量測與支撐方法調整。	工法從山岳岩盤隧道推廣至都市地下工程，但對沉陷控制、地下水、施工品質與監測判讀要求更高。
1980 年代	定義、標準與爭議並存	1980 年奧地利 ITA 國家委員會提出官方定義；但 Kovári 等人後來批評「ground ring」與「activation」等概念不夠明確。	NATM 一方面被標準化，一方面也引發「它是工法、理念，還是觀測設計方法」的爭論。
1990 年代	國際化與安全檢討	NATM 進入英國與其他地區，Heathrow Express Link 隧道坍塌後，英國 HSE 於 1996 年出版 NATM 安全檢討報告。	工程界更重視風險管理、監測預警、施工品質、契約責任與停工準則。
2000 年代以後	SEM/SCL/Conventional Tunnelling 體系化	美國、英國等地常以 SEM (Sequential Excavation Method) 或 SCL (Sprayed Concrete Lining) 描述類似施工體系；FHWA 2009 年道路隧道手冊將 SEM 納入道路隧道設計施工指南。	NATM 逐漸演變為更廣義的「分序開挖、噴凝土襯砌、監測回饋、風險管理為導向」地下工程體系。

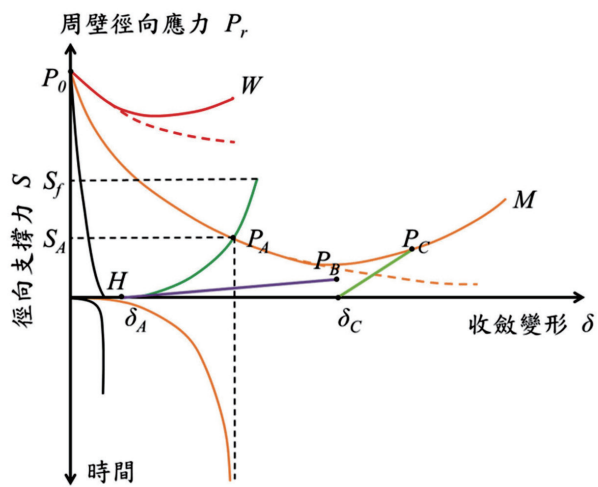


圖 2 地盤收斂曲線及支撐作用曲線（取自王泰典等，2016）

隧道周壁所需的平衡應力可能接近初始狀態應力值，甚至更大，此情況下隧道開挖面附近的變形特性可以 P_0W 曲線描述。若岩體工程特性中等，現地應力不致過大，則隧道開挖面附近的變形特性介於 P_0H 與 P_0W 曲線之間，可以 P_0M 曲線描述：隧道開挖後周壁可量測到收斂變形量，透過支撐系統可以抑制收斂變形，且收斂變形量的大小與支撐系統設置的時機、支撐勁度大小有關。圖中 $\delta_A P_A$ 曲線與橫坐標軸的交點 δ_A 表示支撐系統設置時，隧道周壁已經發生的收斂變形量，此時支撐系統因構件無變形，而尚未提供支撐作用力， $\delta_A P_A$ 曲線與 P_0H 曲線的交點 P_A ，表示地盤收斂變形與支撐作用曲線達到平衡，力學上隧道開挖後達到了穩定狀態。此時支撐構件的安全係數可以透過支撐強度 S_f 與平衡狀態支撐受力 S_A 的比值估算。相同的隧道工程地質條件下，支撐系統可能因為勁度不足，或是設置時機過晚，而降低了安全性，分別如 $\delta_B P_B$ 、 $\delta_C P_C$ 曲線的情況。

新奧工法在 1950 ~ 1960 年代逐漸成形，其核心觀念是：開挖後不應立即以極剛性支撐完全承受地壓，而應讓圍岩在可控制範圍內產生適度變形，藉此動員圍岩自承能力，也就是俗稱的地拱效應，噴凝土、岩栓、鋼支保、仰拱與圍岩閉合形成共同承載系統。閉合約束將「圍岩變形－支撐反力－支撐時機」之間的關係轉化為可計

算、可繪圖、可比較的力學方法，清晰地解釋開挖過程中圍岩與支撐的互制效應，並決定適當支撐時機。

2.3 新奧工法的茁壯

在閉合約束法的輔助闡釋下，新奧工法在 1960 年代逐漸與岩體力學、地壓理論及支撐反力觀念結合，並突顯其幾個重要概念，包括：1. 圍岩變形不是完全有害，而是需要控制：適度變形可使開挖後的應力重新分布，降低作用於支撐上的荷載；但若變形過大或支撐過晚，則可能導致鬆弛、剪動、擠壓變形或坍塌；2. 強調支撐－圍岩互制，支撐剛度與支撐時機同等重要：太剛的支撐可能承受過大早期荷載；太柔或太晚的支撐則可能導致過度變形；3. 現場量測納入設計與施工：Pacher (1964) 於試驗坑變形量測與支撐設計的代表性研究逐漸發展，以變形量測作為判斷地盤行為與支撐設計的重要依據，將閉合約束法以及前述 1、2 點概念在隧道工程的應用獲得實踐與檢驗。

1970 年代以後，新奧工法在歐洲山岳隧道、交通隧道與都市地下工程中快速擴展，應用範圍也從深埋山岳隧道擴展到都市軟弱地盤與地鐵工程，挑戰的重點除了圍岩自承能力，還包括：沉陷控制、鄰近建物保護、地下水控制、淺覆土穩定、開挖面穩定、施工分序以及輔助工法等。

1980 年奧地利工程師與建築師協會 (ÖIAV) 所屬道路研究學會之隧道工作組提出新奧工法官方定義：新奧地利隧道工法係藉由啟動地下洞室周圍岩土體所形成的承載環，使周圍岩體或土體本身成為隧道整體承載結構的一部分；此一將圍岩由「施加荷載的對象」轉變為「承擔荷載的主要結構構件」，支撐系統則用來維持、調節並充分發揮圍岩的自承能力，使新奧工法更具制度化與國際識別性 (ÖIAV, 1980; Austrian Society for Geomechanics, 2010)。在新奧工法發展的歷程，瑞士 Kovári 教授多次地批評圍岩自持力、地拱等觀念的定義不明確，並舉例不能夠以發現水具有浮力，來支持某種游泳技

術的發明 (Kovári, 1993)。這一系列的挑戰反而促進了新奧工法理論論述的精進，如今回顧觀之，饒富趣味。

1990 年代，新奧工法已被廣泛用於歐洲以外地區。然而，隨著其在都市軟弱地盤與複雜地下工程中應用增加，安全事件與概念爭議也受到重視。最具代表性的事件之一，是英國 Heathrow Express Link 隧道坍塌。英國健康與安全執行署 (Health and Safety Executive, HSE) 檢討應用新奧工法施工隧道坍塌事件，工法的檢討報告指出，新奧工法不只是噴凝土、岩栓或分部開挖的應用，而應建立完整的管理體系，包括：現場地質判釋、監測資料判讀、警戒值設定、停工與補強準則、設計者與施工者責任分工、契約彈性、第三方審查與風險溝通。HSE 的報告於 1996 年出版 (Health and Safety Executive, 1996)，2014 年再以 PDF 形式重新發布。此後，新奧工法的發展逐漸從工法轉向為以風險管理為導向的觀測施工體系。

2000 年代以後，不同國家對新奧工法的名稱與內涵有不同用法。其中以強調分階開挖、支撐與量測回饋的 (Sequential Excavation Method, SEM)、以及國際隧道協會工作小組 (International Tunnelling Association (ITA), Working Group 14, 2000) 常用、強調與機械化全斷面隧道鑽掘機 (Tunnelling Boring Machine, TBM) 掘進相對的傳統循環式開挖方法 (Conventional Tunnelling) 最為普遍。美國 FHWA 2009 年出版 Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements，其範圍涵蓋明挖覆蓋、鑽炸、機械掘進、沉埋、箱涵推進與 SEM 等道路隧道設計施工內容 (Hung *et al.*, 2009)。FHWA 手冊中的 SEM 指南強調地盤分類、支撐類型、初期支撐、輔助工法與完整監測系統。這代表新奧工法的現代化方向已經自「某一種奧地利工法」，演變為一套包含設計、施工、監測、契約、風險與資訊管理的隧道工程體系 (ITA Working Group

19 Conventional Tunnelling, 2009; Laufer, 2010; Gall and Munfah, 2010)。

三、在我國的應用

按蒐集所得的紀錄資料，台灣的隧道工程最早始於清朝時期台灣巡撫劉銘傳在 1888 ~ 1890 年間建造的獅球嶺隧道，當時曾委託英籍工程師協助。隨著技術的演進，隧道開挖支撐也從 19 世紀末期的人工或半機械化鑽炸開挖、砂岩、紅磚疊砌，木支保、鋼支保，逐步走向油壓鑽堡、噴凝土、鋼線網、岩栓、鋼纖維噴凝土、自動噴漿機與系統化監測。台灣山岳隧道工程長期面臨地質構造複雜、斷層與剪裂帶密集、地下水豐沛、颱風豪雨補注快速等問題。工程實務上，隧道開挖經常遭遇破碎岩盤、擠壓變形、湧水、沉泥、剪裂帶及開挖面不穩定等狀況，因此需要一種能夠依照現地地質變化調整開挖與支撐方式的工法。新奧工法強調開挖後即時支撐、利用圍岩自承能力、現場監測與彈性調整，正好符合台灣山區隧道地質變化快速的工程需求。

儘管 1970 年代新奧工法的理論與施工所需的技術已趨成熟，但 1970 ~ 1980 年代在台施工的北迴鐵路隧道群、奇萊引水計畫隧道群、明湖抽水水力發電工程隧道群等，主要仍以鑽炸開挖、鋼支保配合木楔、木背板等傳統工法施工。儘管奇萊引水計畫隧道工程曾在較佳岩盤區段採用噴凝土與鋼線網取代傳統鋼支保支撐，但並未搭配施工觀測與圍岩變形控制。1982 年東線鐵路自強隧道施工遭遇沉泥段，委請奧地利 Geoconsult 及法國 BSG 公司工程師現場指導，以及德國鐵路顧問 DEC 派員駐地顧問，可視為台灣隧道工程正式引入新奧工法的重要起點。早期引進新奧工法期間，除謝玉山先生曾赴奧地利專題研習並返國應用於自強隧道沉泥段外 (謝玉山與林清標，1984；謝玉山，1985)，王文通先生亦曾親赴歐陸研習新奧工法，並將奧地利隧道工法及岩體分類相關知識整理介紹至國內 (李宏徹，1989；王文通，1989)。林肇振 (1983) 在營建世界發表之新

奧工法 (NATM) 在隧道工程上之應用，則是國內首見新奧工法的技術討論與知識傳播。

1980 年代後期至 1990 年代，南迴鐵路隧道群局部採用新奧工法施工，佳山計畫與明潭抽水水力發電計畫隧道工程則大量或全部採用。明潭地下廠房並被記載為國內首次採用鋼纖維噴凝土與自動噴漿機的重要案例。新奧工法已從單一隧道困難區段處理，擴展為大型地下工程與水力發電地下廠房的主要施工理念。

1990 年代新奧工法成為鐵路與公路山岳隧道常用工法，代表性的案例包括山線鐵路三義壹號隧道、北二高隧道群、北迴鐵路新南澳、新觀音、新永春等隧道，並逐漸累積大量開挖支撐、施工監測與不良地質處理經驗。而 1990 年代後期台 76 線東西向快速公路「芳苑－草屯線」八卦山隧道穿越第四紀台地礫石、砂層及其透鏡體，採用新奧工法設計與施工，將新奧工法應用範圍自岩盤山岳隧道擴展至膠結程度不一、地下水敏感的礫石與砂質地盤 (Wallis, 1999)。

值得一提的，1990 年開工的北宜高速公路雪山隧道原規劃設計以 TBM 為主要工法，僅兩端洞口段使用鑽炸法輔助；然而後續施工過程遭遇斷層、湧水等困難地質狀況致 TBM 受困，改採鑽炸法施工，按新奧工法理論進行灌漿改良地盤突破施工困難區段 (高速公路局網站，2026)。此一經驗突顯新奧工法在地質條件不利隧道施工區段的應用性。

2000 年代後期至 2010 年代，花東鐵路瓶頸路段雙軌化、蘇花公路山區路段改善計畫隧道工程除全面採用新奧工法設計與施工外，更廣泛納入鋼纖維噴凝土等新材料，配合不同尺度隧道工程地質特性整合預測、異質採購最低標 (當時法規名稱，現稱為「評分及格最低標」、施工風險管理、以及即時通報與資訊公開等 (公路局網站，2015；邵厚潔等，2015、2018；王泰典等，2018)，新奧工法在台灣隧道可謂進入成熟化、機械化、材料升級與品質管理強化階段。圖 3 繪出新奧工法在我國隧道工程的應用歷程，表 2 整理相關隧道工程應用紀要。

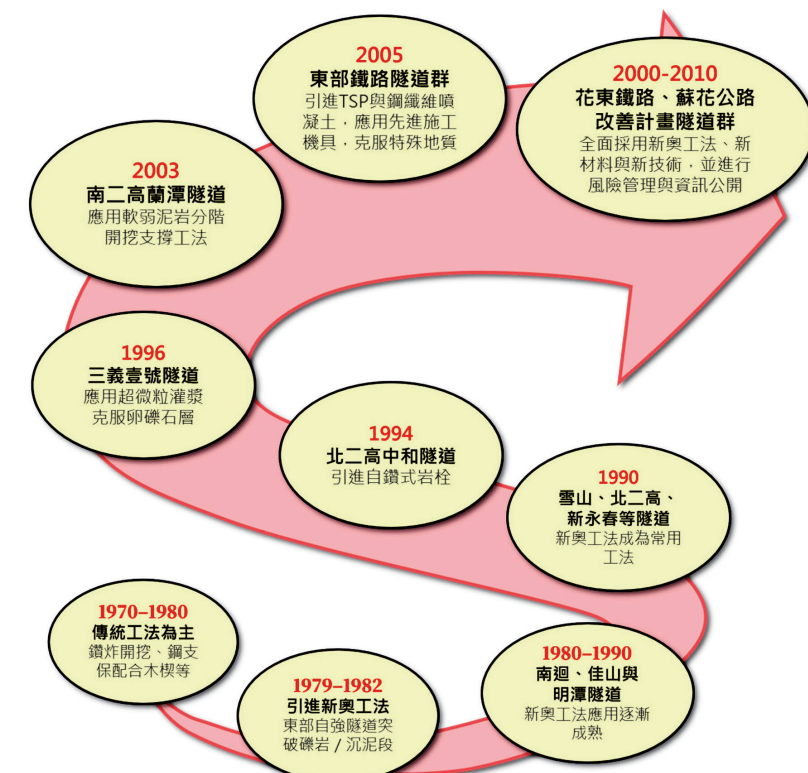


圖 3 新奧工法在我國隧道工程的應用歷程

表 2 新奧工法在我國隧道工程應用紀要（修改自王泰典等，2018）

年代	隧道名稱	紀要	備註
1979 ~ 1982	台鐵自強隧道	首次引進新奧工法突破礫岩／沉泥段	沉泥、擠壓特殊地質
1980 年代	南迴鐵路隧道群	隧道施工全線進行開挖面地質評估、岩體分類、監測及記錄	
1990 年代	北宜高雪山隧道	TBM 屢遭夾埋後，運用新奧工法協助突破	首度設計採用 TBM 開挖
1994	北二高中和隧道	岩栓鑽孔退桿後屢屢坍塌，引進自鑽式岩栓	
1996	台鐵三義號隧道	應用超微粒灌漿改善施工條件，自鑽式岩栓大量應用	卵礫石層
2003	南二高蘭潭隧道	分階開挖支撐，同一橫斷面最多分 9 階開挖	軟弱泥岩
2005	東部鐵路隧道群	引進隧道內震波探測（TSP）技術以及鋼纖維噴凝土，應用先進自動化隧道施工機具	大規模抽坍、高壓巨量湧水等特殊地質
2010 年代	蘇花改隧道群	搭配異質採購最低標（法規現稱為「評分及格最低標」、高風險管理、即時通報及資訊公開等	
2020 年代	國家生技研究園區聯外道路隧道工程	採用全斷面光達掃描及 3D 開挖面動態數位孿生系統	
2026	蘇花安隧道群	設計階段納入三維視覺化工程地質模型、光達掃描施工動態測繪孿生模型、隧道周壁變位模型，開啟數位孿生為核心的隧道設計及施工管理	

四、蛻變與挑戰

4.1 新奧工法在國際隧道工程的未來展望

土層隧道與山岳隧道工程特性不一，施工方法原本大異其趣，前者以潛盾工法為主流，後者則有鑽炸與全斷面鑽掘機（Tunnel Boring Machine, TBM）開挖等不同方式。潛盾機著重於維持開挖面與周圍地層穩定，配合環片襯砌，成為軟弱地盤隧道施工的基礎。TBM 則源自岩盤隧道全斷面機械切削需求，早期多為適用於穩定岩盤的開放式 TBM，隨著滾刀、刀盤以及撐靴等系統持續改良，展現極佳的開挖效率。

1960 年代以後，兩條技術路線逐漸整合。軟弱地盤潛盾由人工開挖發展為全斷面機械切削，並形成土壓平衡式及泥水加壓式潛盾，以開挖土體或加壓泥漿平衡土壓與地下水壓。岩盤 TBM 加裝圓筒形護盾，發展為單盾式 TBM，可在破碎岩盤中保護設備與人員，並以已完成的環片襯砌提供推進反力；雙盾式 TBM 機身具備伸縮護盾設計，結合開放式與單盾式 TBM 優點，可以在挖掘岩石的同時進行襯砌環片組裝，同時具有撐靴及環片推進系統，在穩定岩盤中可同步掘進與組裝環片，遇不良地質時則轉為潛盾機型式推進，大幅提升整體掘進速度與適用地質條件。1990 年代出現兼具土壓平衡與泥水加壓的開挖面穩定與排土系統雙模潛盾機；2010 年代更發展適用於混合地盤的多

模式 TBM，可在開放式、土壓式與泥水式模式間轉換，顯示兩者已由早期的「岩盤切削」與「地層支撐」分工，整合為兼具開挖作業、開挖面穩定、出土、推進及襯砌組裝的一體化機械施工系統。而潛盾機與 TBM 用語的界線也逐漸模糊，國際隧道協會在 2000 年出版的 TBM 建議與導則（Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines）已將潛盾機納入分類，反映 TBM 逐漸成為廣義的上位名詞（International Tunnelling Association, 2000）。

1. 新奧工法與 TBM 形成混合式施工策略

約莫在 20 世紀末，山岳隧道施工出現了鑽炸與 TBM 工法之競合，前者結合新奧工法圍岩變形控制等理論、多元施工機械支援、以及前進支撐與地盤改良等輔助工法，適用的隧道施工地質條件較 TBM 工法廣泛，施工亦具彈性；而 TBM 工法數個嚴重夾埋事件，發展應用一度受到熱議。然而，21 世紀後隧道應用場域大幅擴充，十數公里、甚至數十至百餘公里的長大隧道工程計畫陸續推出，鑽炸工法多元施工機械與開挖效率難以滿足此類長大隧道工程規劃，加速隧道工程朝向機械化施工，再加上土木工程人力資源流失，施工人員需求相對較低的 TBM 工法逐漸成為隧道工程的主流。具有高度施工彈性的新奧工法／分階開挖工法（NATM/SEM）則在斷層破碎帶、洞口淺覆土、大斷面、橫坑、聯絡通

道、擴挖段、避難空間以及地質快速變化區等應用場域被突顯。

因此，未來新奧工法在國際上的發展，可能不再強調「新奧地利工法」這個名稱，而是更重視其背後的工程精神：分序開挖、初期支撐、現場觀測與監測作業、快速回饋、支撐調整與風險管理。而依據地質風險、斷面需求、工期、環境限制與施工可及性彈性調整的施工特性，在施工人力可支持的條件下，仍具競爭力，可以預見的，採用 TBM + NATM/SEM + 輔助工法的複合式策略將是國際隧道施工未來十數至數十年的趨勢。

2. 由傳統觀測法走向數位化觀測法

觀測施工，包括開挖面揭露的地質工程特性、開挖面圍岩穩定性以及支撐後隧道周壁變位等，可謂實施新奧工法本質的要項，但傳統觀測多仰賴人工地質判釋、經驗判斷與收斂量測等監測作業，資料整合與傳遞費時費力。近期觀測作業已朝向數據化與即時化數位發展，包括開挖面影像紀錄、數位地質紀錄與辨識、三維雷射掃描（王泰典等，2018）、收斂自動化量測、配合必要的地下水壓力、湧水量監測，以及支撐構件受力等施工參數整合。國際上亦已提出以資料服務架構整合新奧工法多源施工資料的構想（Du *et al.*, 2018）。

同時，新奧工法應用的核心在於即時現場監測、施工資訊回饋與施工方案動態調整；而未來挑戰在於如何快速取得、管理與分析施工中大量、多源且異質的資料，並建立不同地質條件與施工資料間的關聯。

3. 工程地質模型、數位孿生與智慧化回饋設計

建築資訊模型（Building Information Modeling, BIM）是一套整合設計、施工、營運與維護資訊的數位化協同管理平台，也是土木工程邁向智慧化與全生命週期管理的重要基礎（ISO, 2018）。對於山岳隧道工程而言，地質條件難以完整特徵化與模型化，卻是工程不確定性的主要來源，因此 BIM 在山岳隧道的導入較地上工程困難（Gall *et al.*, 2026）。近年工程地質模型（Engineering

Geological Model, EGM）的發展逐漸受到重視；EGM 可隨工程各階段增補與修正，並結合數位孿生呈現施工觀察及監測結果，使新奧工法傳統「觀察－判釋－修正」的模式，轉變為以 EGM 為核心的「模型－監測－預測－修正」智慧化管理流程（Baynes and Parry, 2024）。

EGM 不僅是設計階段的靜態剖面，更整合鑽探、地球物理探測、岩性與構造分布、地下水及現地應力等資料，並於施工過程依前進探查、開挖面紀錄持續更新，動態表達空間變異與不確定性的三維模型。數位孿生則將實體隧道與虛擬模型連結，持續匯入整合數據化觀測成果，特別是近期近景攝影建置數值表面模型或是地面光達掃描所得點雲，透過各項觀測資料反算岩體參數，檢核設計條件，並使數值模型反映當前圍岩狀態。數位孿生與地工觀察法具有高度互補性，可由單純呈現施工資訊，進一步發展為風險預測及支撐決策平台。此種由現地資料流持續更新虛擬模型，並以模型支援預測及決策的概念，正是土木工程數位孿生的重要發展方向（Sacks *et al.*, 2020; Boje *et al.*, 2020）。

智慧化回饋設計可進一步結合物理模型、機器學習及專家知識，比較實測行為與預測包絡線，自動辨識變形加速、支撐負荷異常及湧水風險，並建議調整開挖進尺、開挖順序、岩栓配置、噴凝土厚度與仰拱閉合時機。目前已在 TBM 開挖隧道逐步應用。可以預期的，由經驗導向、現場觀察調整的新奧工法，很快地將提升為工程地質模型驅動、數位孿生支援及智慧化回饋設計新世代隧道工法。

4. 安全管理與契約制度將更受重視

儘管施工彈性為新奧工法主要優點之一，但也可能因現場判斷、支撐時機、監測警戒值與責任分工不明而產生風險。英國 HSE 在 Heathrow Express Link 隧道坍塌後出版新奧工法安全檢討報告，內容涉及新奧工法失敗與坍塌歷史、法規、風險導向方法與風險管理模式。

新奧工法近年發展已跳脫單純的施工技術框架層次，實務應用上納入完整的風險管理制度已成國際潮流，包括地質基準報告、施工中地質預報、支撐等級調整程序、監測警戒值、停工準則、補強決策、第三方審查、設計－施工－監造責任分工與契約變更機制。各國不盡相同的工程管理與契約制度，也使新奧工法衍生了多元的風險管理制度與對應的應用方法。

4.2 新奧工法在台灣隧道工程的未來展望

台灣位處活躍造山帶，並深受東亞季風影響，多山地的地形特性加上豪雨、颱風的侵襲，基礎設施的邊坡構造物長期維護費用高昂，加上地震與極端氣候事件不時擾動，隧道工程必然是永續發展中關鍵設施的一環。不論山區公路改善、鐵路截彎取直或災害路段改善、水資源開發利用或調度備援等交通、或是水力基礎設施韌性觀點，隧道皆是最重要的構造物。不論與 TBM 工法的競合結果，新奧工法在洞口段、短、中長度山岳隧道、施工橫坑、避難聯絡通道以及局部破碎帶、特殊斷面的隧道扮演的角色勢必不可或缺。另一方面，長大或高覆蓋隧道地質在設計階段難於全線調查，一旦因地質風險考量而採用鑽炸開挖配合新奧工法施工，施工挑戰自然不在話下。換言之，新奧工法應用在更多困難施工隧道工程環境是可以預期的。此一情境下，新奧工法在台灣隧道工程將朝向幾個方向發展：

1. 數位孿生為核心的工程地質模型、超前探查與施工監測結合

乘數位科技進步之便，EGM 得以三維數位化呈現。我國在科技領域亦居全球領先群，隧道工程數位孿生發展進度具優勢地位。王泰典等（2025）提出山岳隧道設計施工多模型整合應用技術，將工程地質模型、數值模擬模型與施工動態測繪孿生模型、以及隨開挖面前進變化的隧道周壁變位模型等於同一平台整合呈現，具有精進隧道施工監測作業效益。將其所提技術應用位於台北市南港的國家生技研究園區聯外道路大斷面

隧道工程通過極淺覆蓋區段施工監測，按開挖面測繪地質結果修正視覺化三維工程地質模型，並據以調整數值模擬模型；繼而按施工過程應用先進測繪技術建立的隧道施工動態孿生模型以及隧道周壁變位模型進行反算分析，求得地盤參數後，提供檢核並調整淺覆蓋段支撐設計與施工策略，成功地克服施工挑戰。數值模擬模型預測的隧道周壁與隧道周壁變位模型在量值與空間分布特性相符，顯示以數位孿生為核心的多模型整合技術具有精進山岳隧道施工監測的應用性。該整合技術可望將推廣至國內近期推動的山岳隧道工程。此工程亦由臺北市政府公開說明採用全斷面光達掃描及 3D 開挖面動態數位孿生系統（臺北市政府工務局新建工程處，2025）。

2. 從施工期監測擴展到全生命週期監測

台灣隧道工程發展已逾 130 年，最早一批採用新奧工法施工的隧道使用已逐漸接近早期一般土木構造物設計考量的服務年限，並且陸續出現襯砌漏水、裂縫等現象，甚至已有結構安全堪虞而改建案例。隧道結構安全檢測經驗回饋了數個涉及隧道設計、施工以及維護管理要項，包括透過數位孿生技術保存隧道設計、施工階段工程地質調查、施工監測、特殊地質處理、以及建築資料模型等，以及觀測營運期隧道結構長期演化，以提供維護管理決策依據。

爰此，以往台灣新奧工法隧道工程多強調施工期間的監測作業，未來應進一步延伸到營運期，包括襯砌裂縫、滲漏水、地震後變形、背後空洞、排水系統阻塞、長期潛移或擠壓變形等監測。此一變革將使新奧工法強調圍岩變形觀測與隧道行為掌握的精神，由施工階段延伸至智慧化隧道維護管理。

3. 發展台灣化的新奧工法資料庫與案例回饋機制

台灣已有豐富的新奧工法隧道施工案例，包括鐵路、公路、水工、地下廠房與長隧道工程，但資料常分散在設計報告、施工紀錄、監測

報表、災變處理紀錄與學位論文中。未來若能建立台灣新奧工法案例資料庫，將開挖面地質、岩體分類、支撐型式、變形曲線、湧水量、災變事件、補強措施與施工速率整合，可大幅提升新工程的地質風險評估與支撐設計合理性。

國際上已有研究主張以大數據環境建立新奧工法施工資料服務系統，整合多源異質施工資料並建立資料關聯，提供類似工程快速查詢與決策參考。這一方向非常適合台灣推動本土化隧道工程知識庫。

4. 材料與設備將朝低碳化、自動化與高品質控制發展

台灣新奧工法已從早期鋼支保、噴凝土與人工噴漿，發展到桁型鋼支保、自鑽式岩栓、鋼纖維噴凝土與自動噴漿機。近期並進一步強化濕拌噴凝土品質控制、噴凝土回彈量降低、早強與韌性控制、低碳膠結材料、機械手臂噴漿、無人化危險區作業與數位施工紀錄。花東鐵路瓶頸路段雙軌化與蘇花公路山區路段改善隧道工程經驗已顯示，這些新技術已逐漸成為台灣新奧工法隧道施工的配套措施，未來可望進一步成熟應用。

5. 與智慧基礎設施及防災管理結合

台灣隧道不只面臨施工風險，營運期間也面臨地震、豪雨、滲漏水、排水系統老化、襯砌劣化與坡地災害連動問題。未來新奧隧道應與智慧基礎設施管理結合，將施工期監測資料保留下來，作為營運期健康監測的初始狀態資料；再透過光纖感測、影像辨識、雷射掃描、物聯網感測器與人工智慧異常判釋，建立從施工到維護的一體化資料鏈。

五、結語

回顧新奧工法的發展可知，其形成並非單一設備或支撐材料的發明，而是岩體力學、噴凝土與岩栓技術、閉合約束觀念及現場量測逐步整合的結果。其核心理念是明瞭地下工程地質條件

的不確定性，以可控制的圍岩變形機動發展其自承能力，再透過適時、具變形相容性的初期支撐與及早發展地拱效應，使圍岩與支撐形成共同承載系統。觀測結果不是施工紀錄的附屬品，而是驗證設計假設、調整支撐等級與管理施工風險的必要依據。

台灣自 1980 年代由自強隧道困難地質處理開始引進新奧工法，歷經鐵路、公路、水力工程與大型地下空間的應用，已逐步建立開挖面地質判釋、岩體分類、分階開挖、初期支撐、輔助工法及監測管理等實務能力。台灣複雜多變的地質條件、豐沛地下水、強震與豪雨環境，使新奧工法彈性的施工應用尤其重要；但也說明它不能被視為固定的支撐表或施工循環。工法成效取決於工程地質模型的可靠度、現場判釋品質、支撐施作時機、監測反應速度，以及設計、施工、監造與業主間清楚的責任及契約調整機制。

面對長大隧道機械化施工潮流、土木工程人力流失以及地質風險升高的趨勢，TBM 工法必然將成為隧道工程的主流。新奧工法憑藉其隧道力學完整理論與施工彈性，未來將與 TBM、超前探查、灌漿及其他地盤改良技術形成複合施工策略；其觀測法亦將由人工量測轉向影像、光達、物聯網及自動感測所構成的數位化觀測。以數位孿生為核心，整合工程地質模型、數值模擬模型與施工動態測繪孿生模型、以及隨開挖面前進變化的隧道周壁變位模型等於同一平台整合呈現，可使施工揭露的地質與變形資料即時更新模型，進一步進行參數反算、風險預測與支撐方案比較，將傳統的「觀察－判釋－修正」提升為可追溯且具不確定性管理的智慧化回饋設計。同時，施工期資料應延伸至營運維護，作為滲漏水、襯砌裂縫、排水功能、地震後反應及長期變形評估的初始基準。新奧工法的名稱與施工配套可能持續演變，但「以圍岩行為為核心、以量測證據修正設計、以風險管理確保安全」的基本精神，仍將是未來山岳隧道工程不可取代的核心。

參考文獻

1. Austrian Society for Geomechanics. (2010). Guideline for the Geotechnical Design of Underground Structures with Conventional Excavation.
2. Baynes, F. J., & Parry, S. (2024). Guidelines for the Development and Application of Engineering Geological Models on Projects (Version 2.0). IAEG Commission 25 Publication No. 1.
3. Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a Semantic Construction Digital Twin: Directions for Future Research. *Automation in Construction*, 114, 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>.
4. Du, B., Du, Y., Xu, F., He, P. 2018. Conception and Exploration of Using Data as a Service in Tunnel Construction with the NATM, *Engineering*, 2018, 123-130.
5. Fenner, R. (1938). *Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdrucks*. Essen: Glückauf.
6. Gall, V.E., Mleczo, V., Robert, F., Angerer, W., Salmi, J., Ye, Z., Grasmick, J., Rives, M., Aldrian, W., Dohmen, P., Jacobs, A., Ninic, J., Karlovsek, J. (2026). ITA-AITES – BIM in tunnelling – Guideline for mechanised and conventional tunnels. 168. [10.1016/j.tust.2025.106714](https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106714).
7. Gall, V., Munfah, N. (2010). Design Guidelines for Sequential Excavation Method (SEM) Practices for Road Tunnels in the United States. North American Tunneling Conference. 415-422.
8. Health and Safety Executive. (1996; reissued 2014). Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels: A Review of Sprayed Concrete Lined Tunnels with Particular Reference to London Clay. HSE.
9. Hung, C. J., Wisniewski, J., Monsees, J., & Munfah, N. (2009). Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements. FHWA-NHI-10-034, Federal Highway Administration.
10. ISO (International Organization for Standardization). (2018). ISO 19650-1:2018, Organization and Digitization of Information about Buildings and Civil Engineering Works, Including Building Information Modelling (BIM)—Information Management Using Building Information Modelling—Part 1: Concepts and Principles. Geneva: ISO.
11. ITA Working Group 14 Mechanized Tunnelling. (2010). Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machines—ITA Report.
12. ITA Working Group 19 Conventional Tunnelling. (2009). General Report on Conventional Tunnelling Method—ITA Report No. 2.
13. Kovári, K. (1993). Erroneous Concepts behind NATM. Lecture at the Rabcewicz-Geomechanical Colloquium, Salzburg.
14. Lauffer, H. (2010). The Development of the NATM – A Historical Review. *Geomechanics and Tunnelling*, 3(6), 763–772.
15. Müller, L., Fecker, E. (1978). Grundgedanken und Grundsätze der „Neuen Österreichischen Tunnelbauweise“. In O. Natau, E. Fecker, & G. Reik (Eds.), *Grundlagen und Anwendung der Felsmechanik: Felsmechanik-Kolloquium Karlsruhe 1978* (pp. 247–262). Trans Tech Publications.
16. Nicholson, D., Tse, C.-M., & Penny, C. (1999). The Observational Method in Ground Engineering: Principles and Applications. CIRIA Report 185. London: CIRIA.
17. ÖIAV (Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein). (1980). Neue Österreichische Tunnelbaumethode: Definition und Grundsätze. Wien.
18. Pacher, F. (1964). Deformationsmessungen im Versuchsstollen als Mittel zur Erforschung des Gebirgsverhaltens und zur Bemessung des Ausbaues. In: Müller, L. (eds) *Grundfragen auf dem Gebiete der Geomechanik / Principles in the Field of Geomechanics. Felsmechanik und Ingenieurgeologie / Rock Mechanics and Engineering Geology*, vol 1. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-25703-6_12
19. Palmström A. (1996a). Characterizing rock masses by the R_{Mi} for use in practical rock engineering. Part 1: The development of the rock mass index (R_{Mi}). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(2), 175 – 188.
20. Palmström A. (1996b) Characterizing rock masses by the R_{Mi} for use in practical rock engineering. Part 2: Some practical applications of the rock mass index (R_{Mi}). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(3), 287 – 303.
21. Panet, M. (1995). *Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement*. Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
22. Panet, M., Guellec, P. (1974). Contribution à l'étude du soutènement derrière le front de taille. *Roc. 3rd Cong. Int. Soc. Rock Mechanics*, 2B.
23. Peck, R. B. (1969). Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics. *Géotechnique*, 19(2), 171–187.
24. Rabcewicz, L. V. (1964a). The New Austrian Tunnelling Method, Part One. *Water Power*, November 1964, 453–457.
25. Rabcewicz, L. V. (1964b). The New Austrian Tunnelling Method, Part Two. *Water Power*, December 1964, 511–515.
26. Rabcewicz, L. V. (1965). The New Austrian Tunnelling Method, Part Three. *Water Power*, January 1965, 19–24.
27. Rabcewicz, L. V., Golser, J. (1973). Principles of Dimensioning the Supporting Systems for the New Austrian Tunnelling Method. *Water Power*, March 1973, 88–93.
28. Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. S., & Girolami, M. (2020). Construction with Digital Twin Information Systems. *Data-Centric Engineering*, 1, e14. <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>.
29. Wallis, S. (1999). NATM Takes on Gravel Deposits in Taiwan. *Tunnels & Tunnelling International*, 31, 30-2.
30. 公路局網站，2015，公告「資訊」新聞專區「本局最新消息」1445 日無數汗水與努力，蘇花改最長觀音隧道全線貫通，https://www.thb.gov.tw/News_Content_table.aspx?n=87&s=51457。
31. 林肇振，1983，新奧工法 (NATM) 在隧道工程上之應用，*營建世界*，23，75-82。
32. 王文通，1989，部份斷面挖掘機在隧道工程和開礦中之應用，*地工技術*，28，50-60。
33. 王泰典、李亮瑩、郭育安、許宗傑，2016，岩石隧道開挖面工程地質特性及開挖支撐快速量化評估新技術，*大地技師*，12，14-27。
34. 王泰典、林璋元、黃詠智、莊海岳、邱家宏、李佳翰、林俊良、陳正勳，2025，測繪學生結合工程地質與數值模擬模型精進山岳隧道施工監測探討，第 23 屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會 (TUSS 2025)。
35. 王泰典、陳正勳、邵厚潔，2018，新奧工法在我國隧道工程應用回顧及蘇花公路山區路段改善計畫的精進，*地工技術*，157，7-16。
36. 李宏徹，1989，編者的話，*地工技術*，28，4。
37. 臺北市政府工務局新建工程處網站，2025，國家生技研究園區聯外道路工程榮獲 113 年度優良隧道工程獎肯定，https://nco.gov.taipei/News_Content.aspx?n=BB8CF6F431E10630&sms=72544237BBE4C5F6&s=FF00921F4D46299D。
38. 謝玉山，1985，自強隧道沉泥段之突破，*地工技術*，11，41-50。
39. 謝玉山與林清標，1984，新奧工法在自強隧道之應用，*土木工程*，20，12-26。
40. 邵厚潔、林蔚然、蔡立盛、陳正勳、吳文隆，2015，臺 9 線蘇花公路山區路段改善計畫隧道規劃及特殊考量，*中華技術*，105，66-83。
41. 邵厚潔、陳正勳、吳宗翰、林志權、郭育安、鄭斯元，2018，臺 9 線蘇花改計畫南澳和平段隧道特殊考量及困難地質因應，*中華技術*，119，52-67。
42. 高速公路局網站，2026，本局資訊「歷史專區」國道新建工程局歷史專頁「國道路網規劃及建設成果」國道 5 號工程，<https://www.freeway.gov.tw/Publish.aspx?cnid=3009>。