

隧道之施工與管理績效探討 – 從彭山隧道談起

李友恆¹、李民政²

¹國道新建工程局結構組 地工科科長

²中興工程顧問股份有限公司 地工部副理

一、前言

國道 5 號高速公路於南港頭城段興建時，為引進國外先進之隧道施工技術，於部份施工標中規定承包商須引進國外優良承包商以短期結合之方式承攬。因此彭山隧道即為義大利商與國內廠商結合承攬施做，其施工進度及施工管理方面頗有值得借鏡之處。

中興公司於民國 86 年曾針對國內隧道案例之施工效率部份，受國工局委託進行「隧道工程作業與流程之研究」[1]，本文即摘錄其中重點，藉以闡明隧道施工管理之各項重點課題。有關隧道施工功率之研究，之前已有多人從事這方面之探討，本研究進行時均曾列入重要之參考文獻[2][3][4][5][6][7]。

本文所蒐集之隧道工程施工資料之來源如下：

(一) 北二高計畫

北二高工程之隧道施工進度資料主要以鄭文隆(1995)[2]之研究成果為主要來源，計有福德、安坑、中和、木柵(原木柵 I)、景美(原木柵 II)、台北 I 以及台北 II 隧道各 2 座隧道，共計 14 座隧道，資料期間涵蓋各隧道開工日起至 82 年 1 月 31 日止之施工記錄，共蒐集 5,039 輪之輪進施工資料(表 1)。其中除木柵隧道、景美隧道、以及中和隧道之上半斷面開挖於當時尚未貫通外，其餘隧道均已完成上半段面之開挖工作。

北二高隧道除台北 I 及台北 II 隧道為二車道斷面外，其餘均為三車道斷面。根據鄭文隆之分析，兩者之作業時間差異約在 15~25%，故本文於分析時未將兩者之資料加以區分，而取全部平均值進行比較分析。此乃因二車道與三車道斷面之上半斷面開挖量其實相近，二車道之上半斷面開挖面積約為 53~57m²，三車道則為 60~62m²，加上二車道斷面之作業空間較受限制，因此兩者之作業時間相差有

限。

(二) 二高後續計畫

二高後續計畫之隧道資料，主要採用基隆隧道之施工資料，其開挖總輪數與總開挖長度如表 1 所示。由於基隆隧道經過新山水庫附近，為避免隧道開挖時之爆震對壩體產生不利之影響，局部採用破碎機進行隧道開挖作業。

(三) 北宜計畫

北宜計畫部份，本文蒐集彭山隧道與雪山隧道(原坪林隧道)東口鑽炸段之施工資料加以統計分析，其中彭山隧道西、東行線分別於 86 年 5 月 29 日及 86 年 6 月 25 日貫通。雪山隧道之資料則為 83 年 4 月至 84 年 2 月間之鑽炸段施工記錄。兩隧道之開挖輪數與開挖長度見表 1。

二、 隧道施工效率分析

隧道施工一般係採分階段開挖方式施做，但施工進度通常由上半斷面開挖所控制，因此本文針對上半斷面開挖之施工月進度、施工作業時間及閒置時間進行分析探討。

(一) 月進度分析

本文統計北二高及國道 5 號部份隧道上半斷面施工之平均月進度資料，平均月進度係指隧道開挖長度與施工期間(以月為單位)的比值，施工期間包含所有施工作業時間與非施工作業時間。由北宜高彭山、雪山隧道(原坪林隧道)、北二高福德、木柵、景美隧道及二高後續計畫基隆隧道之平均月進度比較圖(圖 1)可以看出，彭山隧道之月進度明顯高出其他隧道許多。但木柵隧道之平均月進度明顯較低，係因該隧道施工遭遇高度擠壓變形之斷層帶，有長達一年以上無法前進開挖，嚴重影響施工進度所致。

(二) 施工輪進時間分析

本文針對國道 5 號及北二高各隧道工程於各類岩體中之作業循環時間進行分析，以便瞭解不同承包商採不同工作型態下，其輪進時間之差異。圖 2 至圖 4 分

別為第IV類、第V類及第VI類岩盤中，彭山隧道、南港(一)隧道(現已與南港(二)隧道連接合稱南港隧道)及北二高隧道每輪進各項作業時間統計結果。該統計係以施工作業時間作為分析基礎，包括有效作業時間及閒置時間(Downtime)在內，並已扣除假日、民俗節日及颱風、大雨等非施工作業時間。統計結果顯示多數工作項目之作業時間，彭山隧道都明顯居於優勢，可見彭山隧道在施工作業效率上是居於明顯領先的地位，且領先的幅度相當平均。其中第VI類岩盤因只打設補強性岩栓，數量較少，因此作業時間比北二高大幅減少。若分析各作業項目所消耗的時間，則都以噴凝土、岩栓安裝、裝藥開炸及通風修挖出碴等項目耗時最多。

各隧道於IV~VI類岩體之單一輪進作業循環中，各個作業項目所耗費時間之比例統計結果見圖5。圖中呈現南港隧道與北二高隧道隨岩體之劣化，支撐作業時間(含岩栓、支撐鋼管、噴凝土、鋼筋及鋼線網之安裝)所佔比例隨之增加，如南港(一)隧道由55%、61%、至72%，北二高隧道則由57%、66%至72%，但彭山隧道則為56%、65.4%與54%。

比較彭山隧道與國內其他隧道發現，造成施工績效有如此差距之原因可歸納如下述幾點，其中管理層面及技術層面之因素皆有：

1. 採用全能作業班，因界面之消除有效減少閒置時間。
2. 工地組織健全，從工地負責人至技術工人每個角色之分工及角色認知均較明確，故易於針對各種狀況作出適當之反應。
3. 以噴漿臂施工代替人力噴凝土，效率較高。
4. 以濕式噴凝土方式施工，且預拌車直接在開挖面作業。
5. 出碴車容量大，效能高。
6. 通風管徑大(1.8m 直徑)，減少開炸後通風時間，並使隧道環境改善，提昇操作手工作效率。
7. 仰拱設側溝排水，可保持乾淨致路面暢通，不致泥濘不堪，若仰拱泥濘不堪，將使出碴車行駛速度緩慢，且以低速檔前進時排煙大，不但造成通風系統之負荷，亦使出碴車維修頻率高。
8. 機械化施工，且機具維修能力佳，因此機具因素閒置之時間少。

(三) 閒置時間分析

閒置時間(downtime)定義為在施工作業時間中因機具、材料、人力及施工程序

等的問題，或小規模地質抽心所產生的閒置。針對閒置時間之定量分析，本文整理國道 5 號彭山隧道、北二高安坑隧道及二高後續計劃基隆隧道之施工及閒置時間記錄資料進行統計。經分類後，工地的閒置情況可分為下列幾個項目：

1. 鑽堡機等施工機具故障
2. 水電力故障
3. 換班(待作業手)
4. 待料
5. 待機
6. 動線受阻(含測量耽誤)
7. 回噴及清理反彈料
8. 抽心處理及其他

本文並統計各隧道於第 III、IV、V 及 VI 類岩盤，平均每米輪進之作業與閒置時間。圖 6 及圖 7 顯示於 III、IV 類岩體之統計結果。統計資料顯示，彭山隧道在各有效作業上所花費之時間，顯著地比安坑與基隆隧道來得少。閒置時間方面，安坑與基隆隧道均以「機具故障」一項所佔時間最多，其他則以「水電故障」、「待料」、「待機」與「抽心處理及其他」等項目相對佔有較多之時間。而彭山隧道之閒置時間較其他兩隧道為少，且其「機具故障」一項所佔之時間並未與其他項目有太大之差異，顯示彭山隧道在施工管理、作業安排、以及機具維修保養方面均優於其他隧道。

根據朱紹義(1993)[3]的研究，在北二高隧道的閒置時間中，因機具維修產生的閒置佔 30.6%~40%，佔最大的比例。另根據郭瑋漢(1992)[4]針對耗時最多的噴凝土一項所作的研究，顯示噴凝土的工作進行中有很多時間是用於與噴凝土動作無直接關係的工作，其中包含準備工作、塞管、待料、機械故障等方面，顯示噴凝土作業仍有很大的改善空間。

三、 隧道施工績效探討

(一) 隧道施工作業之探討

北二高隧道與彭山隧道在各輪進作業時間方面存在若干的差距，其成因除了施工管理方面，尚有於個別作業中因施工機具、作業手素質不同等因素，甚至施工環境的差別。以下針對各個主要作業項目之作業時間差距作進一步分析，並同時針對施工環境部份加以說明。

1. 噴凝土

以往國內時常採用的專業分班制，常導致開挖工作班寧可多挖也不願少挖，因此超炸現象較為普遍，同時也導致噴凝土用量增加。以往國內習慣採乾式噴凝土施工，而彭山隧道是以溼式噴凝土配合機械臂施工。

以往不採用溼式噴凝土的原因主要是初期投資較大，以及作業手習性的問題，另方面國內的工地調度普遍較鬆散，採用溼式噴凝土時如因預拌車耽誤，會有初凝的問題。而彭山隧道選擇臨近西洞口下方崩山溪側設置專用拌合廠，自出料後運至工作面一般均在 10 分鐘以下，因此噴凝土的品質較為穩定。

根據承包商統計，彭山隧道採用溼式噴凝土的反彈率約為 18%，較一般乾式噴凝土為少。另外，噴漿機臂施噴時，操作人員可以搖桿操控，可控制角度與距離，除了節省人力外，品質也較穩定，同時因為灰塵量少，工作環境也容易維持，對提高工作人員的效率有很大的益處。

2. 岩栓打設

岩栓打設的效率除施工機械外，尚取決於岩栓數量、長度、直徑與是否須施加預力而定，在作業時間上北二高岩栓的施作數量確較彭山隧道為多，如北二高大量採用 9m 岩栓，且除第 VI 類岩盤外均施加預力等也造成作業時間的耗費。特別是在第 VI 類岩盤，彭山隧道並沒有設計系統岩栓，僅在開挖後視需要打設補強岩栓(spot bolt)，數量明顯偏少，致兩者在作業時間上差距特別明顯。

3. 裝藥開炸

彭山隧道大部份仍以鑽炸法施工，並採用非電氣式雷管 (nonel detonator)，非電氣雷管係以導爆管之傳爆火花來引發雷管。非電氣雷管主要特點係不必用電流來引發雷管，而以導爆管的傳爆火花來引發各種雷管，所以在使用過程中不必擔心任何不明電流、靜電、雷電等之進入而引起的意外爆炸事故，較為安全，其引爆效果與 MS 或 DS 遲發電雷管完全相同。同時因為安裝較為迅速，在彭山隧道每一輪進在雷管安裝、結線以及檢查上可節

省 20min。其主要缺點是成本較高，但若考慮工安及效率則仍值得加以推廣。

4. 通風修挖(炸)出碴

隧道開炸後，由於煙霧瀰漫且含有毒氣體CO及CO₂，故須經過通風之後人員才可以進入，進行後續工作，通常洞內之CO及CO₂應分別控制在 50ppm 及 5000ppm之下，通風的能量均應滿足爆破後 30 分鐘內工作人員可以進入作業。

修挖工作通常是因為開挖不足而引起的，在開挖良好的情況下，這項工作本不需要。通常修挖的時間並不甚長，以北二高為例，大多在 80 分鐘以下。在採用全能班的情況下，爆破作業手因沒有本位主義心態，故較不易有超炸的情況發生。

在出碴方面，主要的工作包含裝載及運輸所需的時間，裝載決定的因素包括碴料大小、裝碴機容量、運碴方式及棄碴場設置等。運碴時間受到運距及工作環境(運輸道路大小、通風、道路路況、照明)等之影響，彭山隧道的長度達到 3.8 公里以上，其洞內運碴的運距長度遠大於北二高任何隧道(北二高隧道最長為 1.86 km)，且其洞內路幅不若三車道寬敞，但其出碴時間反而較短，推究其原因應在於碴車容量大、路況良好以及良好的工作安排所致。

5. 隧道施工環境

以往隧道情況多是陰暗、空氣污濁、危險性高且容易肇事的施工場所。尤其國內隧道常有滲水情形，在排水狀況不佳的情況下，道路常泥濘不堪，使車輛不易行駛，或以低速檔前進造成洞內空氣更加污濁。而施工環境不良造成作業手及機具操作效率的降低是顯而易見的。彭山隧道則在這方面有相當大的改善，主要是因為考慮到施工環境不良對人與機具造成的影響。此外施工環境改善雖花費若干初期費用，但對施工效率的改善回收效益更大。

(二) 施工管理的探討

施工管理對隧道施工效率的影響可能遠超過施工技術的層次，以往隧道工程屢有因為層層轉包及分工過細，致工地人員極為複雜，有時一個工地可有十幾個單位的人員一起作業，工作人員互不相識也不易協調，施工管理不易。施工管理主要取決於工地組織是否健全及作業分工是否合乎需要：

1. 工地組織

以往隧道工程的承包商多將隧道全部或依工作面分包給較專業之分包商，而分包商再另行委託小包組織工作班底，通常小包會組織 3~4 個工作班，如噴凝土、開炸、打岩栓等工作班，各自負責在每一工作循環內的部份工作。其中上下包之間都是以合約型態來規範，其遭遇的問題大致如下：

- (1) 由於上下包以契約型態運作，因此在指揮上並無權威性，常造成指揮調度上之困難。
- (2) 機具調派不靈活，並常因機具維修人員與施工人員不同，產生延誤，特別是機具故障時造成的維修問題，更是造成延誤的主要因素。
- (3) 一個工地有多個工作面分屬不同的分包商負責，在需要互相支援機具及人力時無法靈活調度。
- (4) 由於上、下包界面多，且風險分擔並不清楚，因此在遇有狀況時互相觀望，通常待各級包商對權責方面有共識後，才能繼續施工。
- (5) 附屬工程(排水、通風、照明)由於常成爲模糊三不管地帶，工地環境難以維持。
- (6) 由於層層節制的關係，如總包商或分包商發生財物或人事上的問題，常導致工地停擺；整個組織具有高度的不確定性，有時上下包之間因糾紛而解約，在另覓新的下包時常耗費時日，且新的工作班又須適應新的環境，影響工作的效率。
- (7) 由於隧道工程常須在工地作隨機應變的處理，業主、監造顧問及總包商協商後的結果，如須層層轉達及溝通，在效能及時間上常會打折扣，尤其在講究彈性施工的隧道工程，常造成杆格。
- (8) 在工程市場有限及缺乏誘因的情況下，領班及工人趕工的意願不強。

彭山隧道之施工由主承包商主導，工地的事務由該公司統籌辦理，該公司在台設有計畫經理負責，旗下則有施工經理、隧道總領班、領班及工人，直接受雇於 TORNO 公司，其指揮採一條鞭式。機具則全由 TORNO 公司負責供應並由領班及工人負責維修。其優點主要在於事權統一，指揮靈活，因此整個指揮系統較爲健全。

2. 作業之分工

目前隧道施工的作業分班有兩種，一種稱為時段分班，另一種稱為專業分班。時段分班是以時間點劃分 2~3 個工作班，每一工作班每日固定工作 8 或 12 小時，在此時段內所有作業一律由該工作班施作，亦即任一工作班皆具有完成每一種作業的能力，故有時稱為全能班。而專業分班係將輪進工作分為二至四個專業分班，如鑽炸班、出渣班、噴凝土班及岩栓班等，由於每個工作班只做固定的作業項目，每天交班的時間並不固定，導致每日各工作班作業時間都不確定。當時國內隧道承包商仍然以採用專業分班制為主，但在採用新奧工法甚多的日本及歐洲各國，早已採用時段分班制。

國內採用專業分班是配合以實作數量計價的方式來實施，理論上依實作計價的方式可刺激工作班的工作意願，並簡化隧道的管理，因為隧道小包的例行管理工作只有丈量各工作班的數量而已，但實際執行起來，卻有相當多的問題存在。

- (1). 工作界面多，由於交班的次數相當多，且時間並不固定，在每一個交班介面都可能發生延遲。
- (2). 責任不明，各個工作班只是想在最短時間內將所要的「數量」作出來，缺乏對品質要求的誘因，例如鑽炸班為了避免開炸不足產生的修炸，通常抱著寧可多炸不要少炸的心態，因此在超挖過多的情況下常造成噴凝土及襯砌混凝土超量使用的情況。
- (3). 容易產生三不管的工作地帶，由於各工作班只圖完成本身的工作，對共同的部份常無人問津，例如路面的清理，臨時的排水等，造成工地環境不佳。
- (4). 由於施工班對隧道小包為合約關係，因此小包對施工班的指揮並不靈活，畢竟上下包之間之約束力遠不如同一家公司主管對下屬的約束力，因此隧道工地的管理非常鬆散，缺乏機動性及應變能力。

採時段分班時，通常完成數量的利益是由包商統籌分配，而風險亦由其承擔。對管理者而言，必須更用心去安排工作及調度人力機具，以防止工作延誤造成的損失。大致上時段分班可歸納出下列的優點：

- (1). 工人的工作時間固定，且作息正常，體力及精神較能適應，有助於提昇工作效率。
- (2). 由於交班的時間明確，交班單純迅速，人員容易掌握，且每日交班次數減少。

- (3). 作業介面少，工人聽命於領班，總領班可根據整體的施工情況靈活調度人力及機具，由於各工作班間不會有本位主義，因此在專業班中常見的超炸現象及岩栓施打落後的情況不會發生。
- (4). 時段分班制度下，共同的項目如施工道路、通風、照明維持及工安措施等較易要求，在專業分班制度下則甚難要求，但這些項目對施工效率卻有重大影響。

曾大仁(1994)[6]曾針對兩種工作分班作過定量的比較，根據北二高木柵一號南下線南口工作面 82 年 11 月之實際進度(採時段分班)與福德隧道(採專業分班)相比，取木柵隧道 IV 類岩盤開挖 40 輪與福德隧道同類岩盤 169 輪相比(詳表 2)，專業分班的平均輪進為 22.9hr，比時段分班的 12.9hr 多使用 10hr。根據其分析主要差距出現在鑽孔(差 82min)、噴凝土(差 184min)、打岩栓(差 137min)。而此三項作業皆為專業分班交班後的首項重要工作，可見交班延誤應為兩者差距的主因。

四、 結語

隧道工程之施工進度一向是工程推動時極關鍵之課題，本文針對彭山隧道之施工管理與其他國內隧道加以研析，並提出下列幾項對策供作參考。

(一) 隧道施工技術

1. 加強施工機械化

在工資逐年調升的趨勢下，施工機械化是無法避免的趨勢，除可減低對人力的依賴外，在品質的穩定上也有幫助，加上機械管理遠比人員管理簡單，機械化施工可大幅簡化施工管理的需求，有助於工程的順利推動，而這些因素也是促使先進國家邁向施工機械化的因素。

2. 施工技術之改善

依據國道 5 號彭山隧道之施工成效來評估，下列施工技術值得參考採用：

- (1) 濕式噴凝土
- (2) 雷射定位
- (3) 非電氣式雷管

3. 改善隧道內之排水、通風、照明等

隧道施工環境的改善有利於機具及作業手的效率，且對人員的健康及機具的壽命亦有益處，可於開工前要求承包商提出具體的施工計畫，實際執行時則要求包商確實加以落實。

4. 充分的地質調查

由於設計階段並無法完全掌握地質狀況，因此施工中的地質調查有必要列入，使後續施工較易掌握，例如彭山隧道施工時，即常利用前進探查偵知前方的地質，並妥善加以因應。

(二) 隧道施工管理

國內隧道工程的管理問題主要是介面過多，責任不明，組織鬆散等現象。長久以來，這些問題也是所有公共工程的通病，但因隧道工程本身的不確定性及複雜性，上述問題所造成的負面效果，尤其嚴重，例如介面過多常造成施工進度受阻，而當隧道有緊急狀況須處理時，常因組織運作能力欠佳而貽誤時機，並造成惡化，因此施工管理的良窳對隧道工程的效率有密不可分的關係。

本文歸納國內隧道管理方面的問題，建議從下列幾點加以著手改善：

1. 杜絕層層轉包的情況，確實要求承包商負起工地經營及日常管理的責任，並加重其工地負責人的責任。工地負責人應能靈活有效地調度人員及機械，並能隨時掌控進度、品質及處理突發狀況。
2. 在隧道作業編組方面，應以時段分班制度取代以往慣用的專業分班制度，而施工作業手應有受過職訓，以提昇作業效率及維護品質。
3. 工地應建立機具維修的制度，並充實維修的人力，如機具應有定期的保養、維修，以維持正常的操作，如有機具故障時應有應變的計畫。
4. 對於工作突發的重大事件，可以任務編組的方式組成技術小組，由業主、監造單位、承包商代表組成，並由各單位加強授權，以便能及時採取對策，迅速控制工地的緊急情況。

參考文獻

1. 張吉佐，隧道工程作業與流程之研究，國道新建工程局，1997。
2. 鄭文隆，鑽炸法公路隧道施工進度之案例分析，中華道路工程學刊，1995。
3. 朱紹義，北二高岩石隧道工程鑽炸施工法之施工技術與開挖進度探討，國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所碩士論文，1993。
4. 郭瑋漢，岩石隧道施工進度之案例探討，國立台灣工業技術學院營建工程技術研究所碩士論文，1992。
5. 侯源連，彭山隧道施工管理，中國工程師學會會刊，第 70 卷，第二期，1997 年 2 月。
6. 曾大仁，北二高隧道工程鑽炸開挖施工管理探討，第二屆國道建設技術研討會，1994。
7. 李友恆，隧道施工之功率分析探討，第一屆國道建設技術研討會，1992。

表 1 各隧道輪進數及開挖長度

隧道名稱	輪進數目	長度(m)	備註	
福德隧道	北上線	1,006	1,637.7	當時已貫通
	南下線	948	1,567.4	當時已貫通
安坑隧道	北上線	166	303	當時已貫通
	南下線	218	418.5	當時已貫通
中和隧道	北上線	200	369	當時尚未貫通
	南下線	273	497.2	當時尚未貫通
木柵隧道 (原木柵 I 隧道)	北上線	397	644.6	當時尚未貫通
	南下線	514	873.5	當時尚未貫通
景美隧道 (原木柵 II 隧道)	北上線	65	90.4	當時尚未貫通
	南下線	144	203.2	當時尚未貫通
台北 I 隧道	右線	460	748	當時已貫通
	左線	460	786.7	當時已貫通
台北 II 隧道	右線	94	155.3	當時已貫通
	左線	94	149.1	當時已貫通
基隆隧道	北上線	738	1230	隧道全長資料
	南下線	712	1105	隧道全長資料
彭山隧道	東行線	2,890	3,823.65	隧道全長資料
	西行線	2,848	3,780.85	隧道全長資料
雪山隧道 (原坪林隧道)	東行線	244	310	東口鑽炸段部份資料
	西行線	371	552.9	東口鑽炸段全部資料

表 2 時段分班及專業分班第 IV 類岩盤輪進時間比較表

工作項目	福德隧道 (專業分班) 輪近時間(分)	木柵隧道 (時段分班) 輪近時間(分)	差時
準備	74	32	42
鑽孔	150	68	82
裝藥開炸	60	68	-8
通風	34	17	17
出碴(含清浮石)	196	122	74
鋼支保	58	40	18
鋼線網	63	64	-1
噴凝土	379	195	184
支撐鋼管	87	53	34
岩栓	237	100	137
總計	1311	759	552

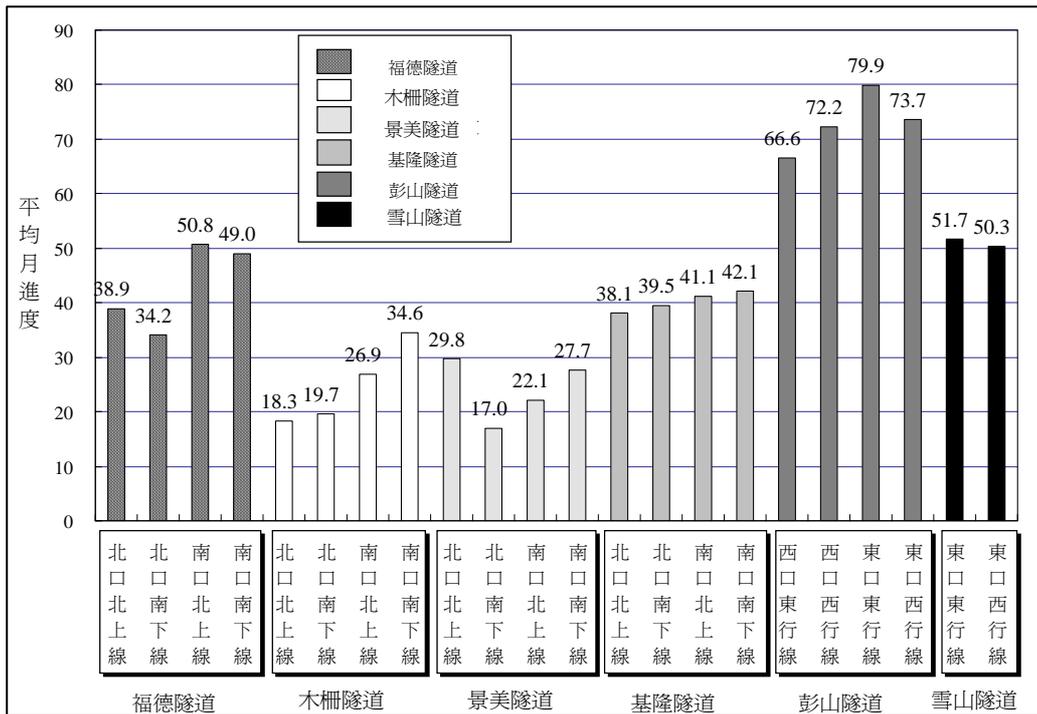


圖 1 國道 5 號及北二高相關隧道平均月進度比較圖

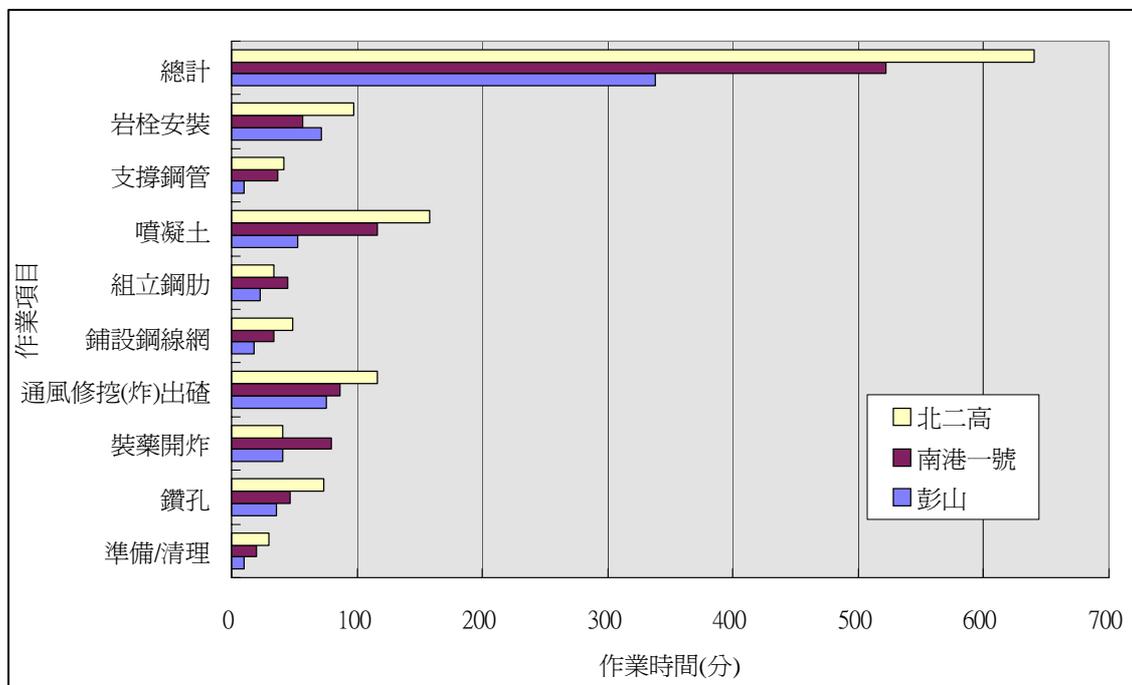


圖 2 國道 5 號及北二高隧道每公尺輪進各項作業時間比較(第 IV 類岩盤)

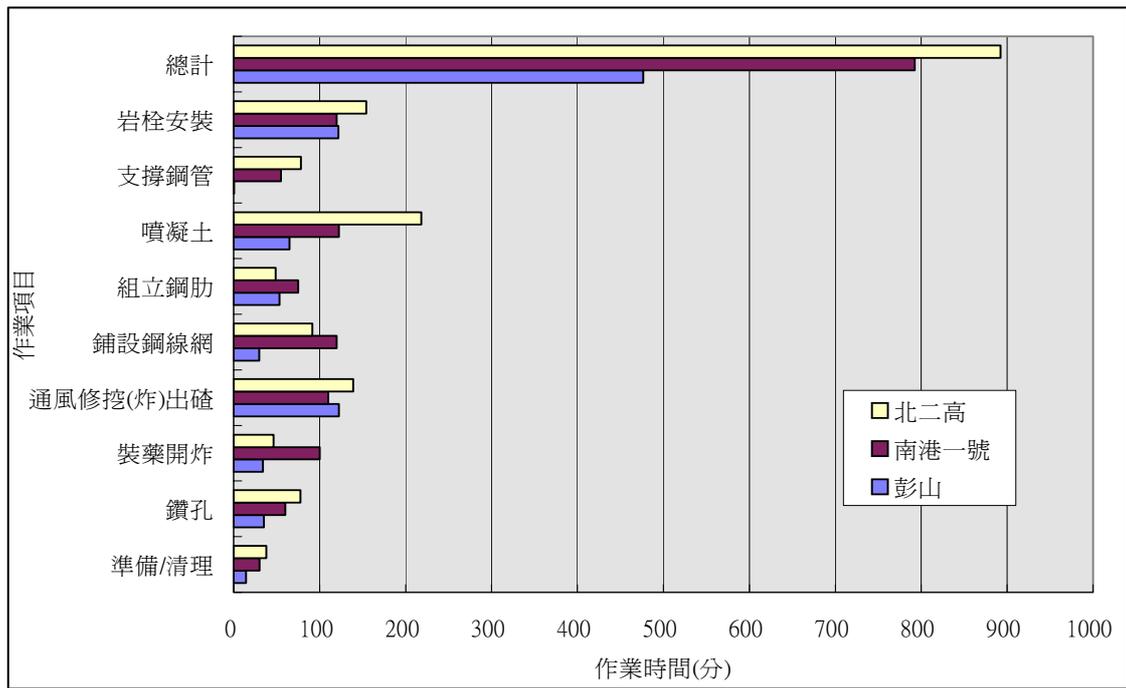


圖 3 國道 5 號及北二高隧道每公尺輪進各項作業時間比較(第 V 類岩盤)

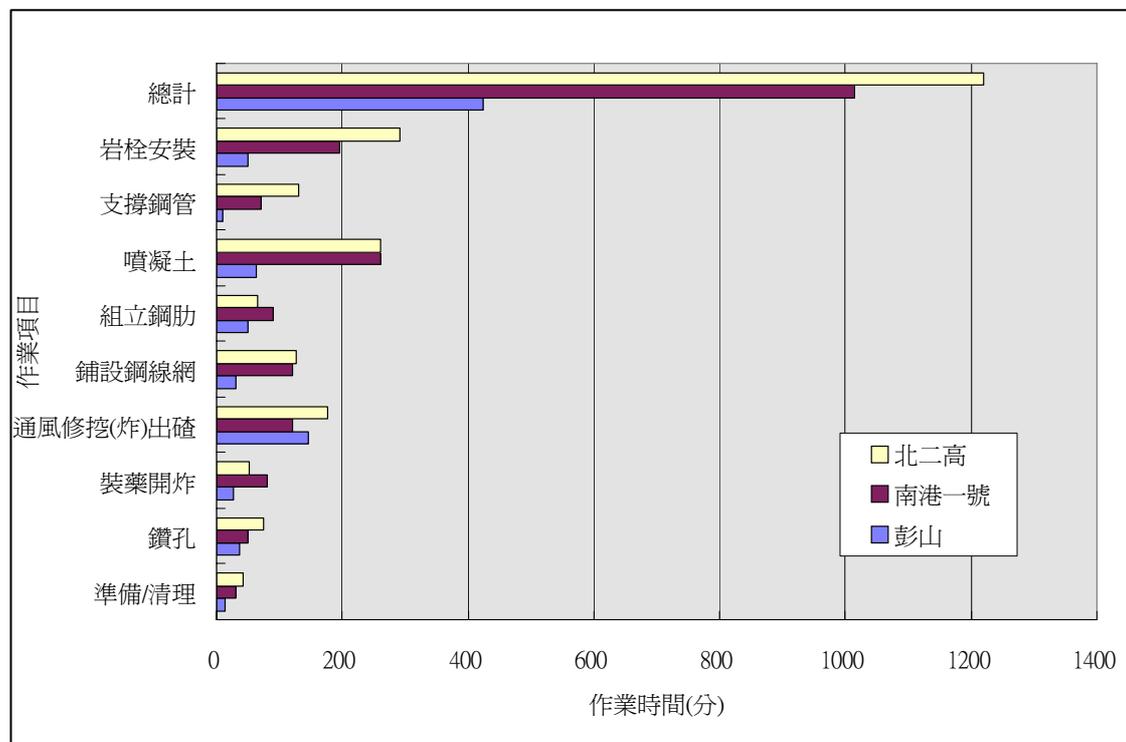


圖 4 國道 5 號及北二高隧道每公尺輪進各項作業時間比較(第 VI 類岩盤)

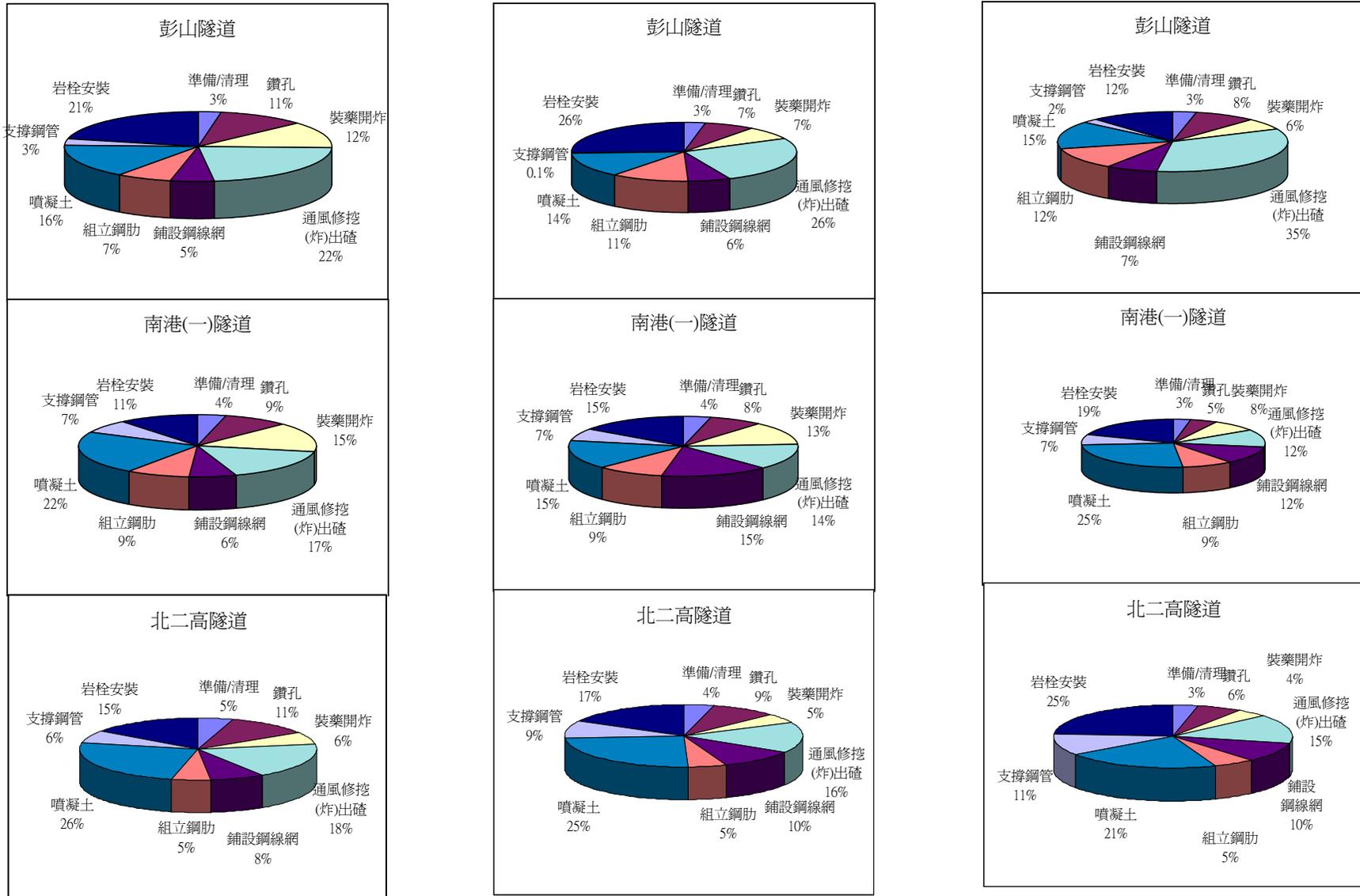


圖 5 國道 5 號及北二高隧道各輪進作業時間比例(第 IV~VI 類岩盤)

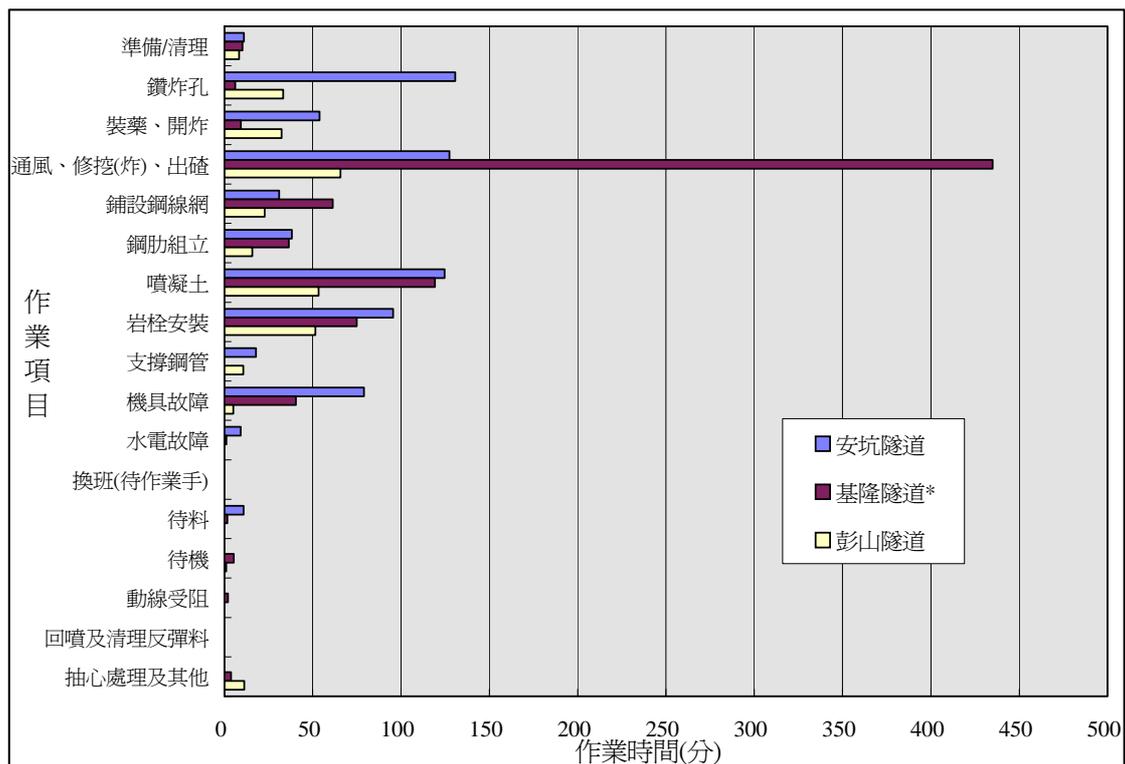


圖 6 國道 5 號及北二高隧道每公尺輪進作業與閒置時間比較(第 III 類岩盤)

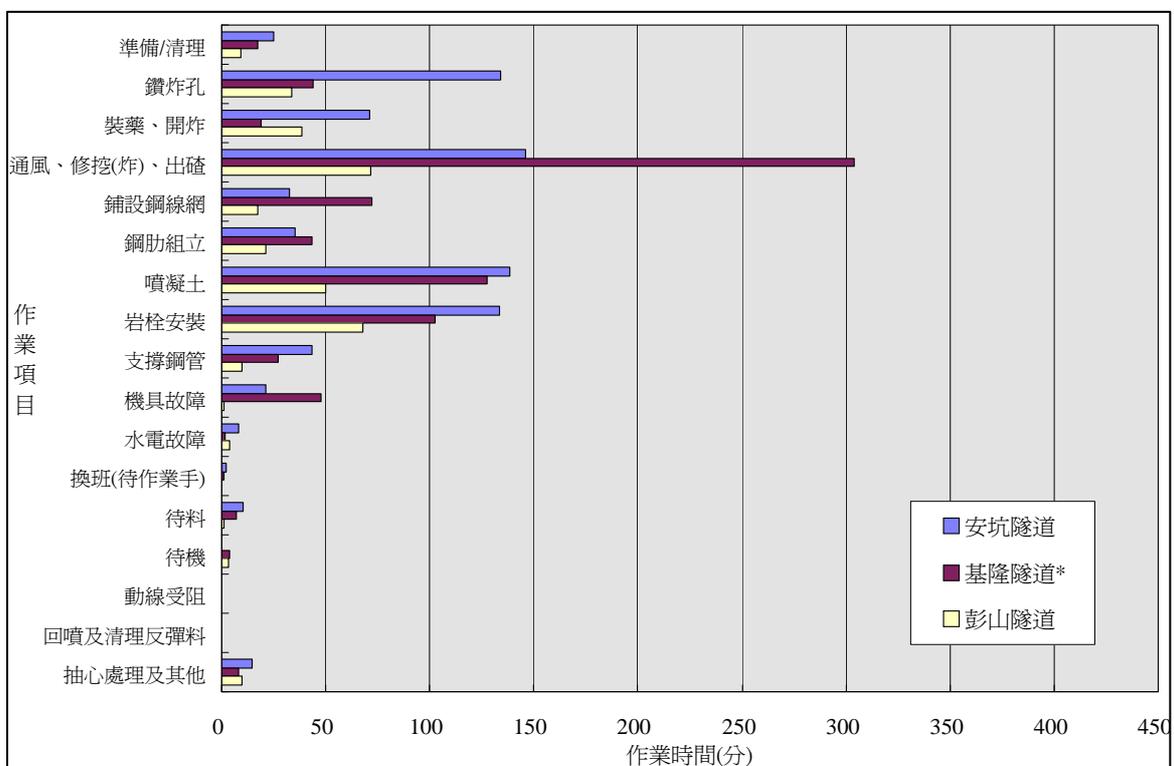


圖 7 國道 5 號及北二高隧道每公尺輪進作業與閒置時間比較(第 IV 類岩盤)