

## 高速公路隧道容量與臨界速度分析： 以福德、木柵、石碇、彭山、雪山隧道為例

# Capacity and Critical Speed Analysis of National Freeway Tunnels: Case Study of Fude, Muzha, Shiding, Pengshan, and Hsuehshan Tunnel

余宣 Hsuan Yu<sup>1</sup>

周承彥 Chen-Yen Chou<sup>2</sup>

邱華玉 Hua-Yu Chiu<sup>3</sup>

潘格平 Ge-Ping Pan<sup>4</sup>

陳宜均 Yi-Jyun Chen<sup>5</sup>

### 摘要

台灣人口密度高且地形多山，目前國道高速公路共設置雙向 52 座隧道，以便利通行。然而，當車輛駛入隧道後，由於行車環境突然改變，其車流特性亦可能不同。故本研究針對高速公路車流量較高之北部路段，選擇總長超過 1.5 公里之國道 3 號福德隧道及木柵隧道，與國道 5 號石碇隧道、彭山隧道，以及雪山隧道，透過高速公路局之車輛偵測器資料，推估隧道路段之道路容量及臨界速度，並與公路容量手冊基本路段之設計值比較，以瞭解隧道路段與基本路段車流特性之差異，作為後續相關規劃之參考。分析結果顯示，國道 3 號隧道雙向均為 3 車道，推估容量約為每小時 4,450 至 4,900 pcu，相較同車道數基本路段設計容量之每小時 6,600 pcu，約折減 26% 至 33%；國道 5 號隧道雙向均為 2 車道，推估容量約為每小時 2,350 至 2,750 pcu，相較同車道數基本路段設計容量之每小時 4,300 pcu，約折減 36% 至 45%。再以臨界速度觀之，國道 3 號隧道雙向路段臨界速度約為每小時 66.0 至 72.5 公里，相較基本路段之每小時 77.0 公里，約折減 6% 至 14%；國道 5 號隧道雙向路段之臨界速度則為每小時 50.4 至 62.2 公里，相較基本路段之每小時 75.3 公里，約折減 18% 至 33%。此外，無論推估之容量及臨界速度，均以國道 5 號之隧道路段折減幅度較國道 3 號為大，推測與兩國道之旅次特性不同有關。

**關鍵詞：** 容量、臨界速度、高速公路隧道、車流特性

<sup>1</sup> 儀衡工程技術顧問股份有限公司資料分析師。(聯絡地址：11491 台北市內湖區瑞光路 210 號 8 樓，電話：02 77208989，E-mail: hsuanyu@pavement.com.tw)

<sup>2</sup> 儀衡工程技術顧問股份有限公司資料分析師。

<sup>3</sup> 儀衡工程技術顧問股份有限公司副總經理。

<sup>4</sup> 林同棧工程顧問股份有限公司協理，交通工程執業技師，中華民國交通工程技師公會會員。

<sup>5</sup> 林同棧工程顧問股份有限公司交通組組長，交通工程執業技師，中華民國交通工程技師公會會員。

## Abstract

Taiwan is densely populated with many mountains across the region, and thus currently there are 52 tunnels on both directions of National Freeways to save travel time for the road users. However, when a vehicle enters a tunnel, the change of the environment could lead to different traffic flow characteristics of the road segments. Therefore, this research focuses on the tunnels with a length over 1.5 kilometers on National Freeway segments located in the northern part of Taiwan, where the flow rates are higher. The selected tunnels include both directions of Fude Tunnel and Muzha Tunnel on National Freeway No.3, along with Shiding Tunnel, Pengshan Tunnel, and Hsuehshan Tunnel on National Freeway No.5. Through vehicle detector data from Freeway Bureau, the capacity and the critical speed of each road segment with a tunnel are estimated. Furthermore, those values are compared with the design values of the basic segments from Highway Capacity Manual to understand the difference between the segments with tunnels and the basic segments, providing a reference for future design and planning. In this research, the estimated capacity of the segments with tunnels on the 3-lane National Freeway No.3 is 4,450 to 4,900 pcu/h on both directions. Compared to the 3-lane basic segment, where the design value of capacity is 6,600 pcu/h, the estimated value is 26% to 33% less than the design value. And the estimated capacity of the segments with tunnels on the 2-lane National Freeway No.5 is 2,350 to 2,750 pcu/h on both directions. Compared to the 2-lane basic segment, where the design value of capacity is 4,300 pcu/h, the estimated value is 36% to 45% less than the design value. As for the critical speed, the estimated value of the segments with tunnels on National Freeway No.3 is 66.0 to 72.5 km/h on both directions. Compared to the critical speed of the 3-lane basic segment with a design value of 77.0 km/h, the estimated value is 6% to 14% less than the design value. And the estimated critical speed of the segments with tunnels on National Freeway No.5 is 50.4 to 62.2 km/h on both directions. Compared to the critical speed of the 2-lane basic segment with a design value of 75.3 km/h, the estimated value is 18% to 33% less than the design value. For both road capacity and critical speed, the difference between the design value and estimated value on National Freeway No.5 is bigger than the difference on National Freeway No.3. And this may due to the different trip purposes on both Freeways.

**Keywords:** Capacity Analysis, Critical Speed, Freeway Tunnel, Traffic Flow Characteristics

## 一、前言

臺灣人口密度較高且地形多山，使得高速公路建置時常於多山路段設置隧道，目前高速公路全線共設有 52 座隧道，以縮短行駛距離，且其中有 48 座係設置於縱向之高速公路。設置隧道雖可縮短兩地距離，但車輛駛入隧道後，行車環境突然改變，亦會影響駕駛人之駕駛行為，進而使車流特性產生改變。越正毅（1984）在分析日本高速公路之車流特性時，發現多數隧道路段為壅塞機率較高之地點；我國曾平毅等（2013）亦提到公路隧道通常是潛在之車流瓶頸路段。然而，於彙整國內有關隧道路段車流特性之相關文獻時可發現，多數文獻均係針對國內最長（約 12.9 公里）之國道 5 號雪山隧道車流特性進行分析，較少針對其他隧道進行探討。惟雪山隧道之隧道長度為其他隧道（均小於 4 公里）之 3 倍以上，故車流特性亦可能有所不同，故本研究乃針對高速公路隧道，分析其容量及臨界速度等車流特性，並與高速公路基本路段之設計值進行比較，以瞭解隧道路段與基本路段車流特性之差異，可作為後續公路規劃與設計時之參考。

## 二、文獻回顧

「容量」為道路設計上重要之參考數值，亦為用以評估道路服務水準之重要指標。根據臺灣公路容量手冊（2011），道路容量指在一已知之交通、控制、幾何及其他狀況下，單位時間內經常可通過一定點之最大流率。而流率等於容量時之平均速率則稱為「臨界速率」，彙整如圖 1 所示。

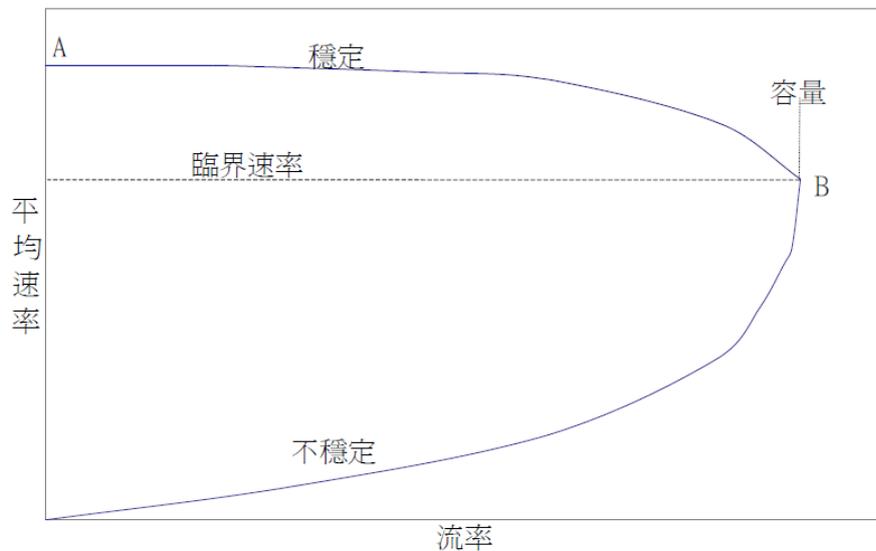


圖 1 容量與臨界速度示意圖（臺灣公路容量手冊，2011）

諸多文獻對於容量亦有相關補充說明，林豐博等人（2009）則提到通過路段之最大流量，通常可於車流狀態從穩定狀態進入壅塞狀態前 15 分鐘內觀測得到。惟實際量測路段之最大流量時，亦會因環境因素（如天氣、能見度、行車時段等）而有所不同，因此容量值應視為該路段從穩定狀態進入壅塞狀態前之流量平均值（曾平毅等，2013）。而有國外文獻則說明容量亦會受到旅次特性的影響，May（1990）提到非通勤旅次增加則會使容量下降，Sharma（1987）亦提到休閒旅次因對道路環境較不熟悉，故使容量折減程度較大。而割田博等人（2004）、岡村秀樹等人（2011），及塚田幸広等人（2006）於研究中發現假日之駕駛對於道路熟悉度相較平日之通勤駕駛為低，其平均車間距較長且密度較低，以致容量下降。曾平毅等人（2013）亦提到公路隧道通常是潛在的車流瓶頸，其容量變異性較大。再加上許多隧道位於北部地區交流道密集之路段，故隧道車流於低流量時就進入壅塞狀態的現象並不少見（臺灣公路容量手冊，2011），致使隧道內之實際容量較不容易測得。而即使隧道被視為路段之壅塞瓶頸點，從美國及日本相關文獻（Transportation Research Board，2012；越正毅，1984）亦可發現目前其並無隧道路段道路容量相關之參考值，而均使用基本路段之設計容量作為設計值；目前僅知韓國建設部（Korean Ministry of Construction，今韓國國土交通部）之公路容量手冊（1992）以 0.98 作為隧道路段設計容量之折減係數，惟其與臺灣高速公路隧道路段之車流特性亦恐有落差。

以容量分析方法觀之，目前國內文獻多以車輛偵測器（Vehicle Detector，以下簡稱 VD）蒐集之資料為主，並將其整合為 15 分鐘資料再加以計算容量值；或將超過 30 天之 VD 資料，統計該路段流率-速度關係之代表值，並將最大流率視為該路段容量值（交通部運輸研究所，2013）；亦有研究使用 3 至 5 天之 VD 資料，以速度連續下降前之最大流量作為該路段之容量值（林豐博等，2009）。

綜合上述可知，不同路段因行車環境不同，道路容量亦將有所不同；即使於相同路段所量測之道路容量，亦會因為環境因素改變而受到影響，使得道路實際容量難以估計。因此，本研究乃以隧道內多組 VD 以及長時間（30 天）之資料分析隧道路段之容量，透過大量資料之統計分析，降低特殊因素（事故、天氣等）所產生之影響，以分析國內隧道容量及臨界速度。

### 三、分析範圍與方法

#### 3.1 分析範圍

根據第二章之文獻回顧彙整結果可知，為探討高速公路隧道之道路容量與臨界速度，需以車流量較大且有進入不穩定狀態之壅塞路段進行分析。然而，高速公路 VD 佈設密度約間隔 1 至 2 公里，以至於長度較短之隧道，其隧道內佈設之 VD 數量較少，甚至無佈設 VD，實難以探討前述分析。

本研究為篩選分析之隧道，將縱向高速公路雙向合計之 48 座隧道進行統計，各隧道之基本資料依照其長度排名彙整如表 1 所示。由表 1 可知，共計有雙向 12 座隧道總長超過 1.5 公里，且因北部地區多以山地、丘陵和台地地形為主，故該 12 座隧道中有 10 座位於北部地區之國道 3 號與國道 5 號；僅國道 3 號中寮南北向隧道位於南部地區。而北部地區因交通量較大，且較常產生壅塞，故本研究針對國道 3 號北部路段以及國道 5 號該 10 座總長超過 1.5 公里之隧道，包括國道 3 號雙向福德隧道、木柵隧道，以及國道 5 號雙向石碇隧道、彭山隧道，以及雪山隧道進行分析。

表 1 縱向國道隧道基本資料表

排名	道路編號	方向	隧道名稱	長度(公里)	地區
*1	國道 5 號	北向	雪山	12.96	北區
*2	國道 5 號	南向	雪山	12.93	北區
*3	國道 5 號	南向	彭山	3.86	北區
*4	國道 5 號	北向	彭山	3.81	北區
*5	國道 5 號	南向	石碇	2.79	北區
*6	國道 5 號	北向	石碇	2.72	北區
*7	國道 3 號	北向	木柵	1.88	北區
8	國道 3 號	南向	中寮	1.86	南區
*9	國道 3 號	南向	木柵	1.85	北區
10	國道 3 號	北向	中寮	1.83	南區
*11	國道 3 號	南向	福德	1.76	北區
*12	國道 3 號	北向	福德	1.72	北區
13	國道 6 號	東向	埔里	1.31	南區
14	國道 3 號	北向	基隆	1.27	北區
15	國道 6 號	西向	埔里	1.26	南區
16	國道 3 號	南向	基隆	1.26	北區
17	國道 3 號	南向	蘭潭	1.25	南區
18	國道 3 號	北向	新店	1.22	北區
19	國道 3 號	北向	蘭潭	1.21	南區
20	國道 3 號	南向	新店	1.17	北區
21	國道 3 號	南向	中和	0.87	北區

排名	道路編號	方向	隧道名稱	長度(公里)	地區
22	國道3號	北向	中和	0.83	北區
23	國道3號甲線	東向	臺北一號	0.80	北區
24	國道3號甲線	西向	臺北一號	0.78	北區
25	國道3號	南向	汐止	0.66	北區
26	國道3號	北向	汐止	0.64	北區
27	國道3號	北向	景美	0.57	北區
28	國道3號	南向	景美	0.56	北區
29	國道3號	北向	七堵	0.56	北區
30	國道3號	北向	埔頂一號	0.55	北區
31	國道3號	南向	埔頂一號	0.53	北區
32	國道3號	南向	七堵	0.52	北區
33	國道3號	南向	碧潭	0.52	北區
34	國道3號	北向	碧潭	0.50	北區
35	國道5號	南向	南港	0.46	北區
36	國道1號	北向	大業	0.46	北區
37	國道3號	南向	安坑	0.46	北區
38	國道5號	北向	南港	0.46	北區
39	國道3號	北向	安坑	0.40	北區
40	國道1號	南向	中興	0.35	北區
41	國道3號	南向	埔頂二號	0.34	北區
42	國道3號	北向	埔頂二號	0.33	北區
43	國道5號	北向	烏塗	0.25	北區
44	國道5號	南向	烏塗	0.22	北區
45	國道3號甲線	西向	臺北二號	0.21	北區
46	國道3號甲線	東向	臺北二號	0.19	北區
47	國道3號	南向	大林	0.15	南區
48	國道3號	北向	大林	0.15	南區

註：\*表本研究分析之隧道

### 3.2 分析資料來源

本研究所使用之資料為交通部高速公路局交通資料庫公開之VD資料，本研究分析範圍之隧道雙向起訖里程，以及隧道內之66組VD位置彙整如表2所示，並以今年國內新冠肺炎疫情爆發且進入三級警戒前之110年4月1日至30日為分析時間範圍。

表 2 本研究研究範圍各隧道雙向起訖里程表

國道 編號	隧道名稱	隧道總長 (公里)	方向	隧道起訖里程		VD 位置
				起點	訖點	
國道 3 號	福德	1.76	南向	18k+232	19k+994	18k+932、19k+334、 19k+732
			北向	19k+959	18k+239	18k+811、19k+211、 18k+411
	木柵	1.88	南向	21k+888	23k+736	22k+253、22k+588、 22k+996、23k+388
			北向	23k+735	21k+860	22k+224、22k+624、 23k+025、23k+374
國道 5 號	石碇	2.79	南向	0k+694	3k+481	1k+072、2k+050、 3k+178
			北向	3k+515	0k+795	1k+068、2k+068、 3k+198
	彭山	3.86	南向	9k+442	13k+303	9k+840、10k+845、 11k+903、12k+945
			北向	13k+263	9k+457	9k+840、10k+866、 11k+903、12k+922
	雪山	12.96	南向	15k+203	28k+128	15k+478、16k+187、 16k+902、17k+608、 18k+312、19k+013、 19k+677、20k+413、 21k+063、21k+807、 22k+506、23k+207、 23k+910、24k+678、 25k+312、26k+013、 26k+706、27k+442、 27k+748
			北向	28k+134	15k+179	15k+488、16k+196、 16k+900、17k+608、 18k+313、19k+012、 19k+689、20k+412、 21k+055、21k+808、 22k+510、23k+209、 23k+911、24k+677、 25k+310、26k+007、 26k+705、27k+468、 27k+779

### 3.3 分析方法

本研究以 110 年 4 月 VD 偵測之流量與速度資料，推估各隧道之道路容量及臨界速度，以瞭解隧道路段之車流特性。由前述文獻回顧可知，道路容量指在一已知之交通、控制、幾何及其他狀況下，單位時間內經常可通過一定點之最大流量（臺灣公路容量手冊，2011）。為探討路段「經常」可通過一定點之最大流量，本研究進一步將流量依固定級距計數，並統計各組流量出現之機率，以國道 5 號南向 13k+707 處之 VD 資料為例，彙整累積機率圖如圖 2 所示。由圖 2 可知累積機率曲線接近最大流量時，曲線則逐漸平緩，並發現約於 95% 處曲線之斜率變化達最大值（轉折最大），表示累積機率逾 95% 後流量出現機率逐漸下降。故本研究將以 95% 作為門檻值，取流量前 5% 之資料推估路段之容量及臨界速度。此外，目前交通設施常以尖峰 15 分鐘之需求流率做為設計依據（臺灣公路容量手冊，2011），故本研究以 15 分鐘 1 筆之 VD 資料推估道路容量及臨界速度，說明如下：

1. 容量分析：將整月（110 年 4 月）每日 VD 資料（15 分鐘 1 筆）依流量排序，並取流量前 5% 之流量平均值作為路段容量值。（例：每組 VD 每天應有 96 筆資料；1 個月則有 2,880 筆資料，依流量排序後，取流量前 144 筆之平均值。）
2. 臨界速度分析：將整月（110 年 4 月）每日 VD 資料（15 分鐘 1 筆）依流量排序，並取前述流量前 5% 流量資料所對應速度資料之平均值，作為路段臨界速度。

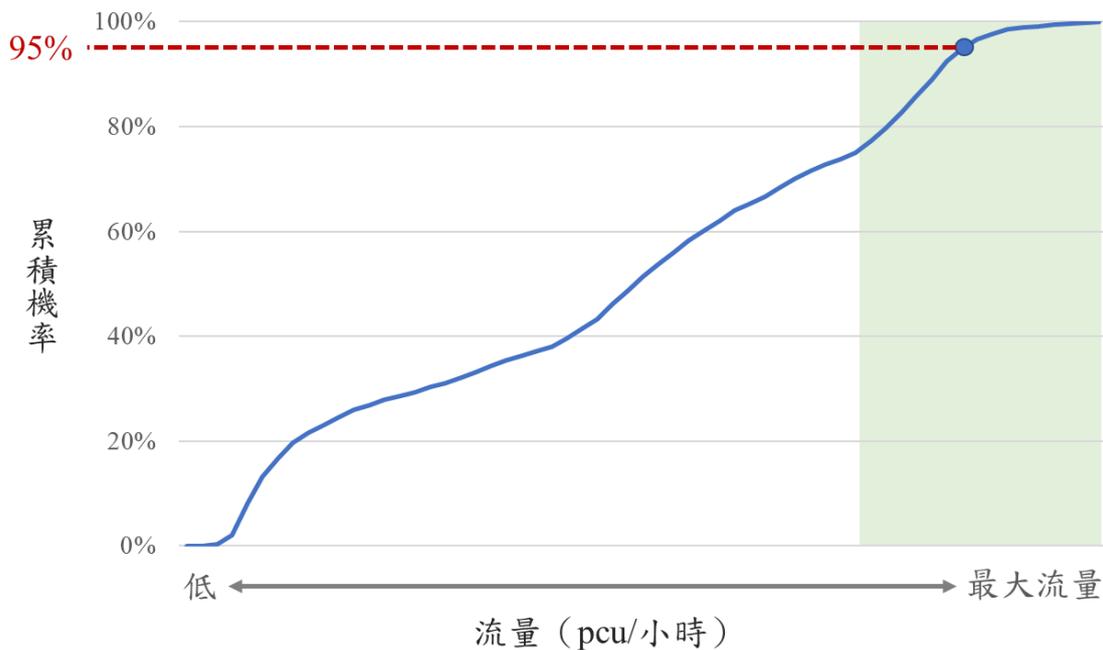


圖 2 流量累積機率曲線圖 (VD 資料)

由上述方法推估各隧道之道路容量及臨界速度後，本研究進一步計算高速公路基本路段之設計容量及臨界速度，以探討隧道路段與基本路段車流特性之差異。根據臺灣公路容量手冊（2011），高速公路基本路段內車道與外車道之流量速度關係圖如圖 3 所示。由圖可知，於基本路段內車道之容量為每小時 2,300 pcu，臨界速度為每小時 80.0 公里；外車道容量則為每小時 2,000 pcu，臨界速度為每小時 70.0 公里。

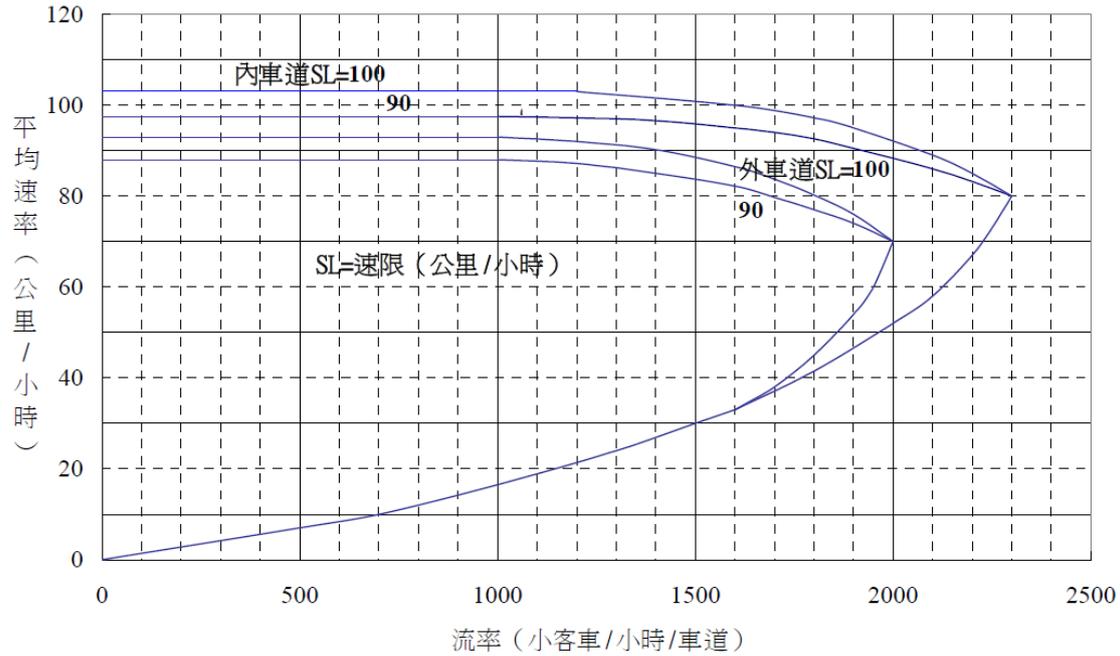


圖 3 基本路段內、外車道之流量速度關係圖 (臺灣公路容量手冊, 2011)

圖 3 係定義基本路段單一車道之流量與速度關係, 本研究以表 3 所示之方式, 換算高速公路 2 車道及 3 車道基本路段設計容量及臨界速度之計算方式, 彙整如表 3 所示。其中, 2 車道基本路段由一內車道與一外車道所組成, 容量為每小時 4,300 pcu, 以容量值加權平均後之臨界速度為每小時 75.3 公里; 3 車道基本路段則由二內車道及一外車道所組成, 容量為每小時 6,600 pcu, 以容量值加權平均後之臨界速度則為每小時 77.0 公里。將上述基本路段設計容量及臨界速度計算結果, 與隧道路段之推估容量及臨界速度比較, 即得以瞭解隧道路段與基本路段車流特性之差異。

表 3 高速公路 2、3 車道基本路段設計容量及臨界速度計算方式

車道數	內/外車道	設計容量 (pcu/小時)		臨界速度 (公里/小時)	
		每車道	路段	每車道	路段
2 車道	1 內車道	2,300	$2,300 + 2,000 = 4,300$	80.0	$\frac{(2,300 \times 80 + 2,000 \times 70)}{4,300} = 75.3$
	1 外車道	2,000		70.0	
3 車道	2 內車道	2,300	$2,300 \times 2 + 2,000 = 6,600$	80.0	$\frac{(2,300 \times 80 \times 2 + 2,000 \times 70)}{6,600} = 77.0$
	1 外車道	2,000		70.0	

## 四、隧道路段容量與臨界速度分析

### 4.1 國道 3 號

本節針對國道 3 號福德隧道及木柵隧道路段，推估其隧道內之容量及臨界速度。並進一步與高速公路基本路段之設計容量及臨界速度進行比較，探討隧道路段與基本路段車流特性之差異。

#### 4.1.1 福德隧道

國道 3 號福德隧道南向位於 18k+232 至 19k+994 處；而北向則位於 18k+239 至 19k+959 處，隧道總長分別約為 1.76 及 1.72 公里，係縱向高速公路長度排名第 11 及第 12 之隧道，以下將分別分析南、北向隧道內各組 VD 資料，探討隧道內之流量速度關係變化，以推估隧道之容量及臨界速度。

##### 1. 南向

福德隧道南向共有 3 組 VD 分佈於隧道內，彙整隧道內各路段之流量速度關係如圖 4 所示。由圖可知，隧道內各路段之流量速度關係相似，而依照 3.3 節分析方法，將 3 組 VD 資料合併分析所推估之隧道內容量平均約為每小時 4,900 pcu；臨界速度則平均約為每小時 66.4 公里，說明於穩定狀態下車流速度每小時均可保持於 66.4 公里以上。另外，當車速每小時低於 60 公里而處於不穩定車流狀態時，但每小時流量多仍可維持於 3,000 pcu 以上。

進一步將福德隧道南向之推估容量及臨界速度，與高速公路基本路段之設計容量及臨界速度相比，以實際資料推估之容量相較 3 車道基本路段設計容量之每小時 6,600 pcu 為低，下降 1,700 pcu，約折減 26%；而臨界速度亦較基本路段之每小時 77.0 公里為低，下降 10.6 公里，約折減 14%。

本研究再進一步繪製福德隧道南向路段車道配置圖，其 3 組 VD 集中在隧道之中下游路段，分別約位於隧道中游、隧道四分之三下游處，以及隧道下游，其間隔約為 400 公尺。並以 VD 資料彙整隧道內各路段之容量及臨界速度如圖 5 所示，以了解其不同路段之容量與臨界速度變化。由圖可知，隧道內為 3 車道路段，以各 VD 資料推估之各路段容量並無明顯差異，介於每小時 4,890 pcu 至 4,950 pcu 之間；若以臨界速度觀之，則以隧道中游之臨界速度較高，約為每小時 71.0 公里，隧道四分之三下游及下游則較低，為每小時 63.9 及 64.3 公里。

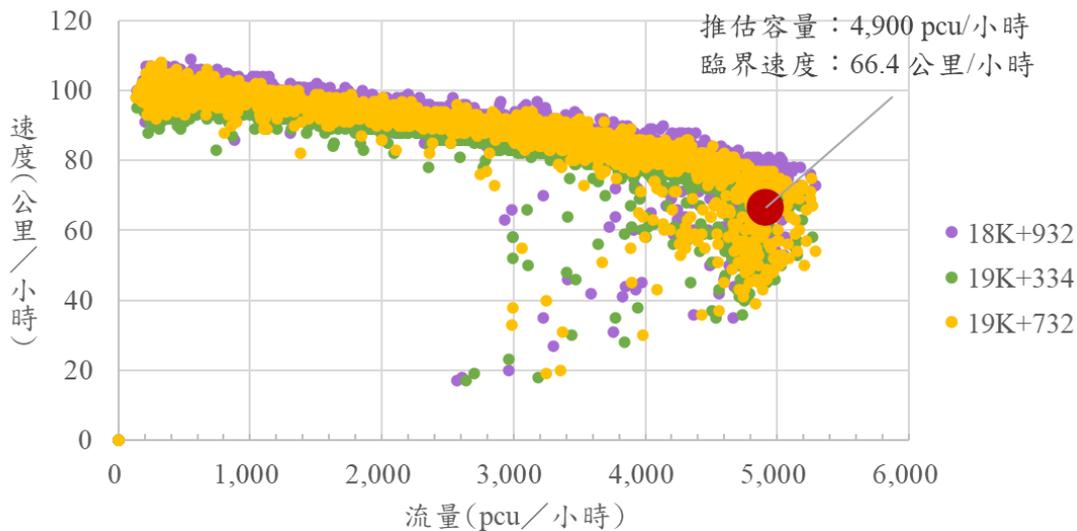


圖 4 福德隧道內各路段之流量速度關係圖（南向）

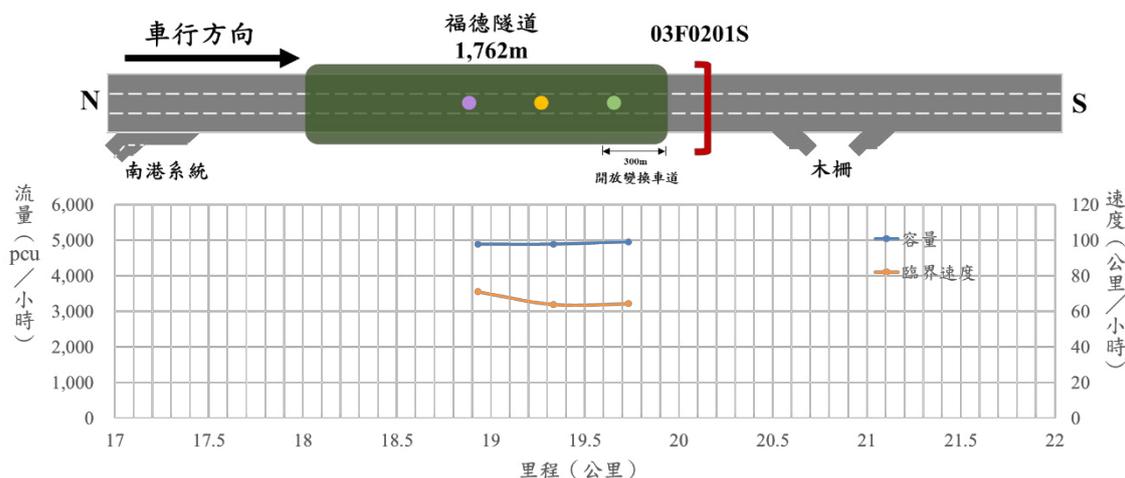


圖 5 福德隧道實際容量及臨界速度（南向）

## 2. 北向

福德隧道北向共有 3 組 VD 分佈於隧道內，彙整隧道內各路段之流量速度關係如圖 6 所示。由圖可知，隧道內各路段之流量速度關係相似，其中 18k+811 處 VD 之流量明顯較下游及上游偵測器（18k+411 及 19k+211）為大，但該處之車道配置與上、下游路段並無明顯差異，疑似 VD 異常，故該路段僅以 18k+411 及 19k+211 處之 VD 資料，推估隧道內之容量及臨界速度。以 2 組 VD 資料合併分析推估隧道內容量平均約為每小時 4,450 pcu；臨界速度則平均約為每小時 66.0 公里，說明於穩定狀態下車流速度每小時均可保持於 66.0 公里以上。另外，當車速每小時低於 60 公里而處於不穩定車流狀態時，每小時流量多仍可維持於 2,000 pcu 以上。

進一步將福德隧道北向之推估容量及臨界速度，與高速公路基本路段之設計容量及臨界速度相比，以實際資料推估之容量相較 3 車道基本路段設計容量之每小時 6,600 pcu 為低，下降 2,150 pcu，約折減 33%；而臨界速度亦較基本路段之每小時 77.0 公里為低，下降 11.0 公里，約折減 14%。

本研究再進一步繪製福德隧道北向路段車道配置圖，並彙整隧道內各路段推估之容量值及臨界速度如圖 7 所示。由圖可知，隧道內為 3 車道之路段，其 3 組 VD 均集中於隧道中下游，間隔約為 400 公尺。其中，18k+811 處因 VD 異常，故以 18k+411 及 19k+211 之 VD 資料推估，隧道內容量為每小時 4,430 pcu 及 4,480 pcu；以臨界速度觀之，於隧道中游之每小時 60.2 公里最低，至隧道下游則提升至每小時 71.7 公里。

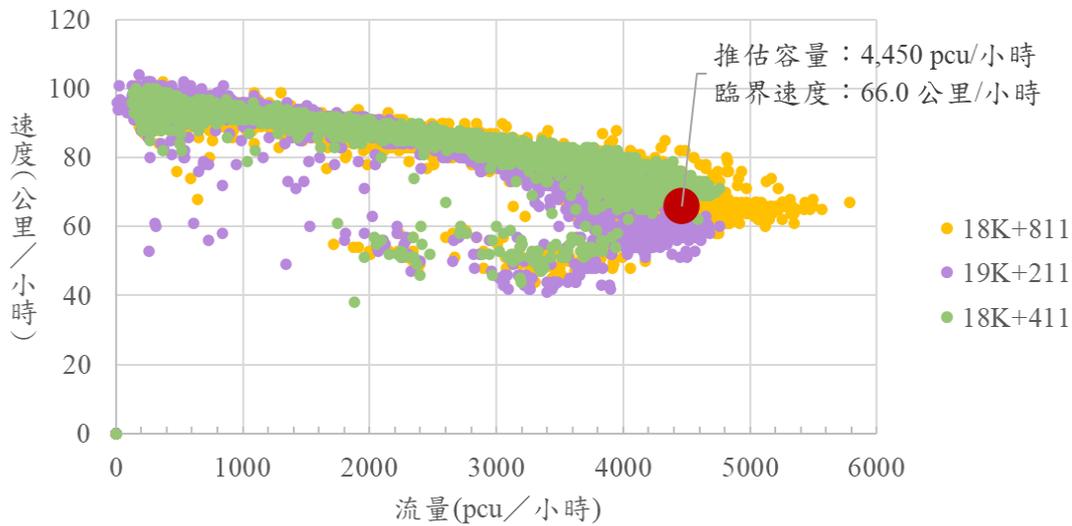


圖 6 福德隧道內各路段之流量速度關係圖（北向）

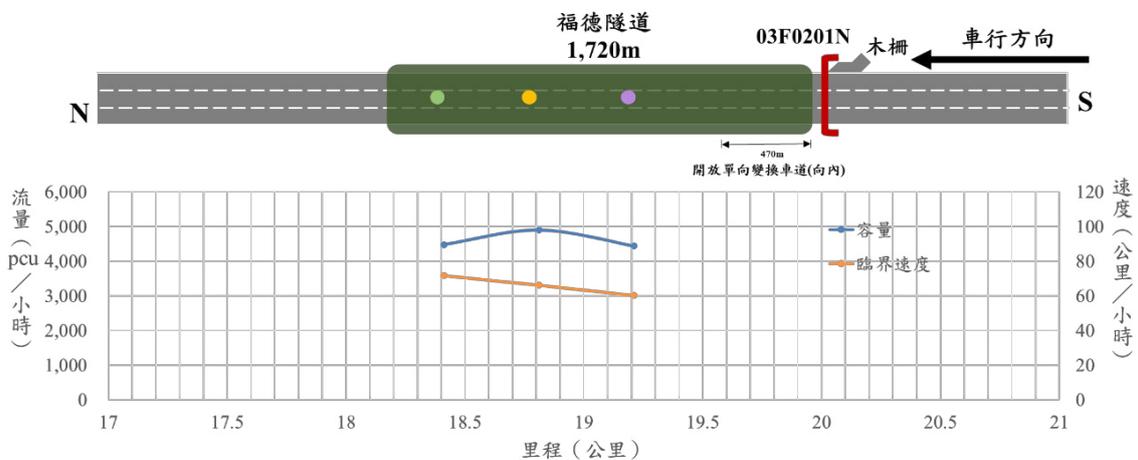


圖 7 福德隧道實際容量及臨界速度（北向）

#### 4.1.2 木柵隧道

國道 3 號木柵隧道位於南向 21k+888 至 23k+736 處；而北向則位於 21k+860 至 23k+735 處，隧道總長分別約為 1.88 及 1.85 公里，係高速公路長度排名第 7 及第 9 之隧道，以下將分別分析南、北向隧道內各組 VD 資料，探討隧道內之流量速度關係變化，以推估隧道之容量及臨界速度。

## 1. 南向

木柵隧道南向共有 4 組 VD 分佈於隧道內，彙整隧道內各路段之流量速度關係如圖 8 所示。由圖可知，進隧道之 22k+253 處於流量較高時速度分布較其他路段為低，而下游各路段之流量速度關係則相似。以 4 組 VD 資料合併分析之隧道內容量平均約為每小時 4,500 pcu；臨界速度則平均約為每小時 67.3 公里，說明於穩定狀態下車流速度每小時均可保持於 67.3 公里以上。此外，木柵隧道南向內僅有 22k+253 處有部分資料顯示車速低於 60 公里且處於不穩定車流狀態，但速度多仍可維持於每小時 40 公里以上，且每小時流量多仍可維持於 3,400 pcu 以上。

進一步將木柵隧道南向之推估容量及臨界速度，與高速公路基本路段之設計容量及臨界速度相比，以實際資料推估之容量相較 3 車道基本路段設計容量之每小時 6,600 pcu 為低，下降 2,100 pcu，約折減 32%；而臨界速度亦較基本路段之每小時 77.0 公里為低，下降 9.7 公里，約折減 13%。

本研究再進一步繪製木柵隧道南向路段車道配置圖，並彙整隧道內各路段推估之容量及臨界速度如圖 9 所示。由圖可知，隧道內為 3 車道之路段，其 4 組 VD 分佈平均，間隔約為 400 公尺，且各路段之推估容量並無明顯差異，均約為每小時 4,500 pcu；以臨界速度觀之，除隧道上游 (22k+253 處) 之臨界速度較低，約為每小時 60.3 公里，其餘路段之臨界速度則相同，約為每小時 69.7 公里。

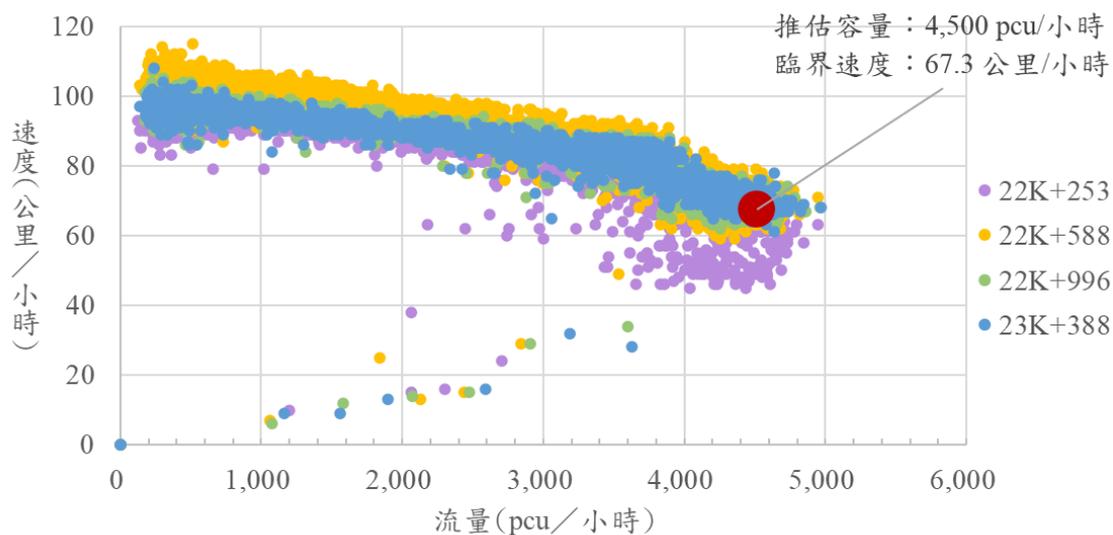


圖 8 木柵隧道內各路段之流量速度關係圖 (南向)

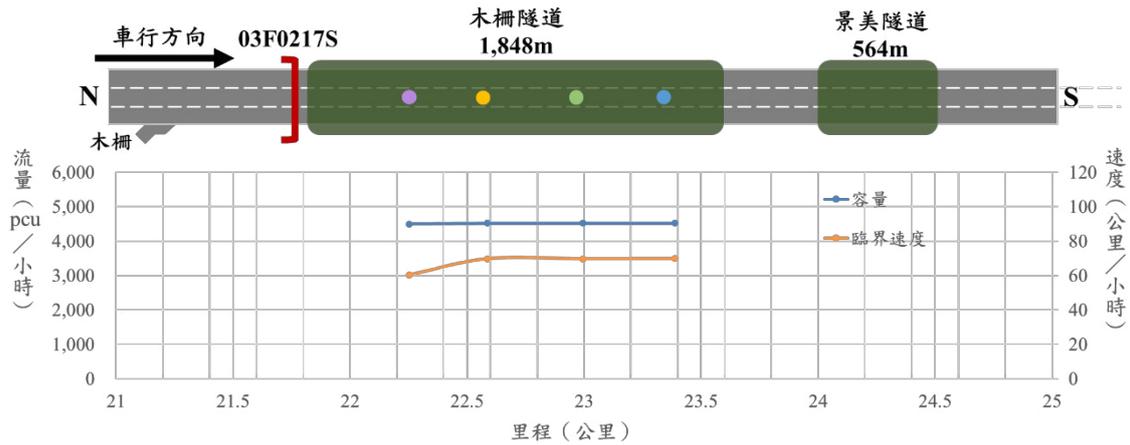


圖 9 木柵隧道實際容量及臨界速度 (南向)

## 2. 北向

木柵隧道北向共有 4 組 VD 分佈於隧道內，彙整隧道內各路段之流量速度關係如圖 10 所示。由圖可知，隧道內各路段之流量速度關係相似，除隧道下游 (22k+224 處) 之流量速度關係曲線較為內縮，代表容量較低以外，其餘三組 VD 顯示各路段之流量速度關係則相似。整體而言，以 4 組 VD 資料合併分析之隧道內容量平均約為每小時 4,750 pcu；臨界速度則平均約為每小時 72.5 公里，說明於穩定狀態下車流速度每小時均可保持於 72.5 公里以上。另外，當車速每小時低於 60 公里時而處於不穩定車流狀態時，每小時流量多仍可維持於 2,000 pcu 以上。

進一步將木柵隧道北向之推估容量及臨界速度，與高速公路基本路段之設計容量及臨界速度相比，以實際資料推估之容量相較 3 車道基本路段設計容量之每小時 6,600 pcu 為低，下降 1,550 pcu，約折減 28%；而臨界速度亦較基本路段之每小時 77.0 公里為低，下降 4.5 公里，約折減 6%。

本研究再進一步繪製木柵隧道北向路段車道配置圖，並彙整隧道內各路段推估之容量及臨界速度如圖 11 所示。由圖可知，隧道內為 3 車道之路段，其 4 組 VD 分佈平均，間隔約為 400 公尺。除隧道下游 (22k+224 處) 之容量較低，約為每小時 4,200 pcu 外，上游各路段之推估容量並無明顯差異，介於每小時 4,950 至 4,970 pcu 之間；以臨界速度觀之，同樣以隧道下游 (22k+224 處) 之每小時 70.0 公里為最低，上游路段則無明顯差別，介於每小時 72.9 至 73.8 公里。推測此係因木柵隧道緊接木柵交流道之出口匝道，且於隧道終點前 300 公尺開放車輛由內側車道可向外側變換車道，故隧道下游主線車流亦受到較多之車流交織干擾，故其容量及臨界速度下降。

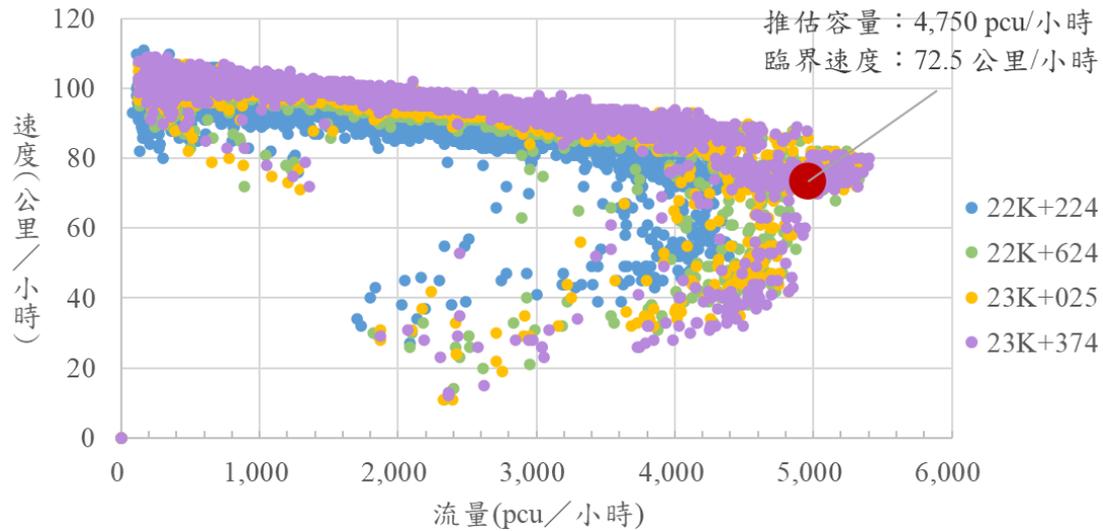


圖 10 木柵隧道內各路段之流量速度關係圖（北向）

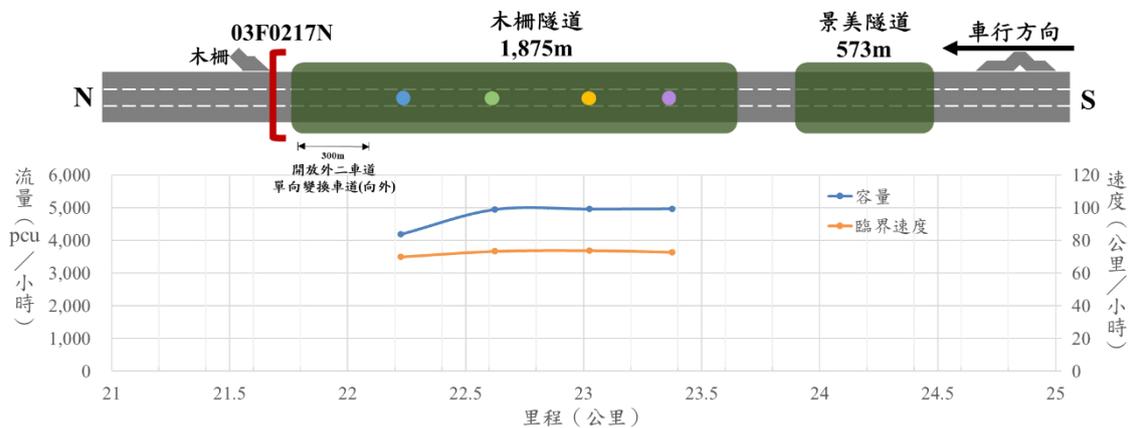


圖 11 木柵隧道內各路段之流量速度關係圖（北向）

## 4.2 國道 5 號

本節針對國道 5 號石碇隧道、彭山隧道以及雪山隧道路段，推估隧道內之容量及臨界速度，並進一步與高速公路基本路段之設計容量及臨界速度進行比較，探討隧道路段與基本路段車流特性之差異。

### 4.2.1 石碇隧道

國道 5 號石碇隧道南向位於 0k+694 至 3k+481 處，而北向則位於 0k+795 至 3k+515 處，隧道總長分別約為 2.79 及 2.72 公里，係高速公路長度排名第 5 及第 6 之隧道。此外，國道 5 號南港隧道南向位於 0k+238 至 0k+694 處，其與石碇隧道相連，故南向隧道實際係自 0k+238 處至 3k+481 處，總長約為 3.15 公里。以下將分別分析南、北向隧道內各組 VD 資料，探討隧道內之流量速度關係變化，以推估隧道之容量及臨界速度。

## 1. 南向

石碇隧道南向共有 3 組 VD 分佈於隧道內，彙整隧道內各路段之流量速度關係如圖 12 所示。由圖可知，隧道內各路段之流量速度關係相似，以 3 組 VD 資料合併分析隧道內之容量平均約為每小時 2,650 pcu；臨界速度則平均約為每小時 58.8 公里，說明於穩定狀態下車流速度每小時均可保持於 58.8 公里以上。另外，當車速每小時低於 60 公里而處於不穩定車流狀態時，每小時流量多仍可維持於 1,500 pcu 以上。

進一步將石碇隧道南向之推估容量及臨界速度，與高速公路基本路段之設計容量及臨界速度相比，以實際資料推估之容量相較 2 車道基本路段設計容量之每小時 4,300 pcu 為低，下降 1,650 pcu，約折減 38%；而臨界速度亦較基本路段之每小時 75.3 公里為低，下降 16.5 公里，約折減 22%。

本研究進一步繪製石碇隧道南向路段車道配置圖，並彙整隧道內各路段推估之容量及臨界速度如圖 13 所示。由圖可知，隧道內為 2 車道之路段，其 3 組 VD 分佈平均，間隔約為 1 公里，且各路段之推估容量並無明顯差異，介於每小時 2,640 pcu 至 2,650 pcu 之間；以臨界速度觀之，隧道上游之臨界速度約為每小時 58.7，中游為每小時 55.0 公里係隧道內最低處，下游則提升至每小時 62.7 公里，均較隧道上游與中游之臨界速度為高。

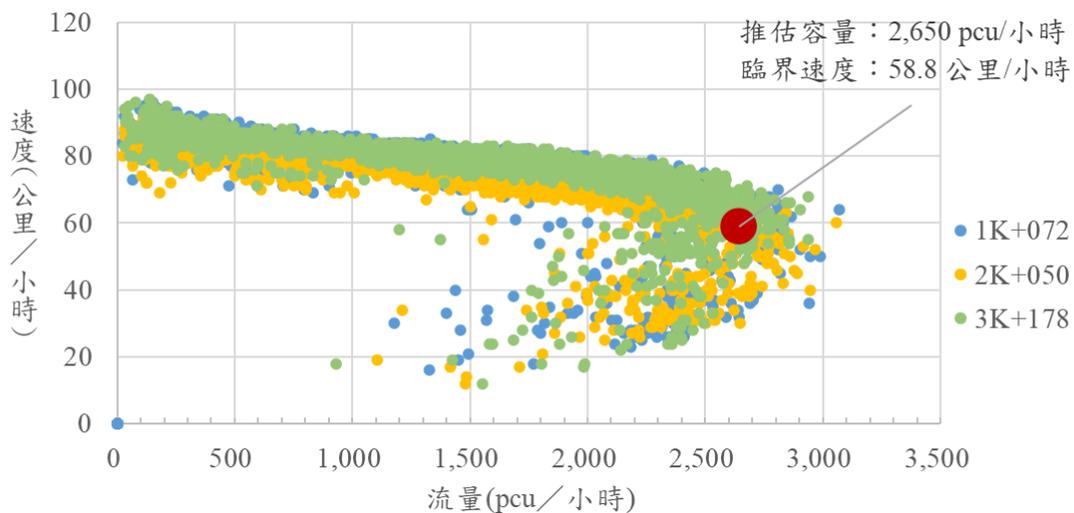


圖 12 石碇隧道內各路段之流量速度關係圖（南向）

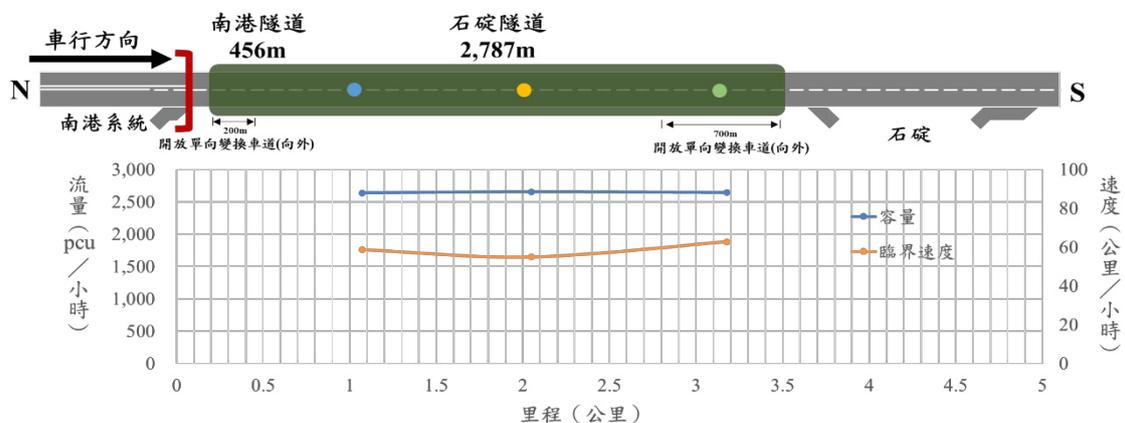


圖 13 石碇隧道實際容量及臨界速度（南向）

## 2. 北向

石碇隧道北向共有 3 組 VD 分佈於隧道內，彙整隧道內各路段之流量速度關係如圖 14 所示。由圖可知，隧道內各路段之流量速度關係相似，以 3 組 VD 資料合併分析隧道內之容量平均約為每小時 2,750 pcu；臨界速度則平均約為每小時 51.8 公里，說明於穩定狀態下車流速度每小時均可保持於 51.8 公里以上。此外，與南向路段較為不同處，在於其車流狀態多為穩定狀態，車速多仍可維持於每小時 40 公里以上，且流量多仍可超過每小時 2,500 pcu。

進一步將石碇隧道北向之推估容量及臨界速度，與高速公路基本路段之設計容量及臨界速度相比，以實際資料推估之容量相較 2 車道基本路段設計容量之每小時 4,300 pcu 為低，下降 1,550 pcu，約折減 36%；而臨界速度亦較基本路段之每小時 75.3 公里為低，下降 23.5 公里，約折減 31%。

本研究更進一步繪製石碇隧道北向路段車道配置圖，並彙整隧道內各路段推估之容量及臨界速度如圖 15 所示。由圖可知，隧道內同樣為 2 車道之路段，其 3 組 VD 分佈平均，間隔約為 1 公里，且各路段之推估容量並無明顯差異，皆約為每小時 2,750 pcu；以臨界速度觀之，隧道上游及中游之臨界速度皆為每小時 46.1 公里，相較於隧道下游之每小時 63.2 公里為低。

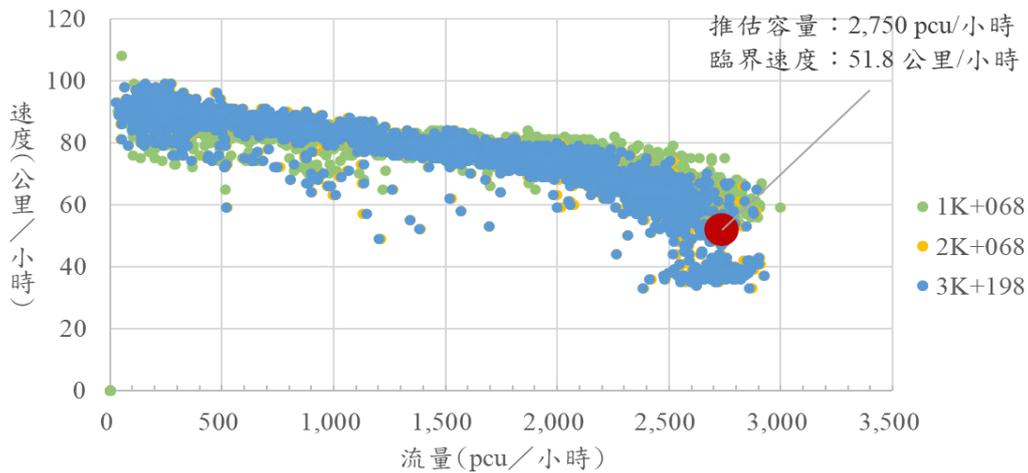


圖 14 石碇隧道內各路段之流量速度關係圖（北向）

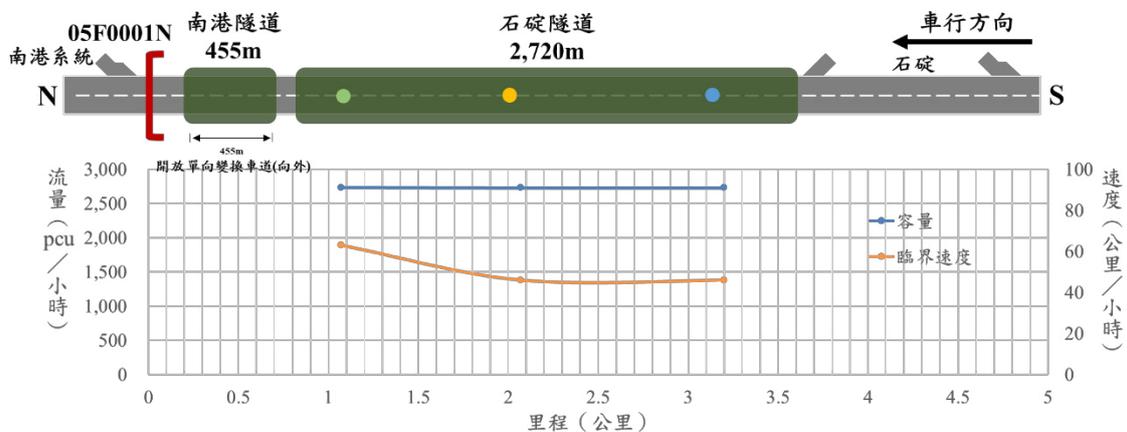


圖 15 石碇隧道內各路段之流量速度關係圖（北向）

## 4.2.2 彭山隧道

國道 5 號彭山隧道位於南向 9k+457 至 13k+263 處；而北向則位於 13k+263 至 9k+457 處，隧道總長分別約為 3.86 及 3.81 公里，係高速公路排名第 3 及第 4 之隧道，以下將分別分析南、北向隧道內各組 VD 資料，探討隧道內之流量速度關係變化，以計算隧道之實際容量及臨界速度。

### 1. 南向

彭山隧道南向共有 4 組 VD 分佈於隧道內，彙整隧道內各路段之流量速度關係如圖 16 所示。由圖可知，隧道內各路段之流量速度關係相似，以 4 組 VD 資料合併分析隧道內之容量平均約為每小時 2,750 pcu；臨界速度則平均約為每小時 60.9 公里，說明於穩定狀態下車流速度每小時均可保持於 60.9 公里以上。另外，當車速每小時低於 60 公里而處於不穩定車流狀態時，每小時流量多仍可維持於 1,500 pcu 以上。

進一步將彭山隧道南向之推估容量及臨界速度，與高速公路基本路段之設計容量及臨界速度相比，以實際資料推估之容量相較 2 車道基本路段設計容量之每小時 4,300 pcu 為低，下降 1,550 pcu，約折減 36%；而臨界速度亦較基本路段之每小時 75.3 公里為低，下降 14.4 公里，約折減 19%。

本研究進一步繪製彭山隧道南向路段車道配置圖，並彙整隧道內各路段推估之容量及臨界速度如圖 17 所示。由圖可知，隧道內為 2 車道之路段，其 4 組 VD 分佈平均，間隔約為 1 公里，且各路段之推估容量並無明顯差異，介於每小時 2,750 pcu 至 2,758 pcu 之間；以臨界速度觀之，隧道上游（隧道內前 2 公里）之臨界速度約為每小時 56.0 及 57.0 公里，相較於隧道下游（隧道內後 2 公里）之每小時 64.7 及 65.7 公里為低。

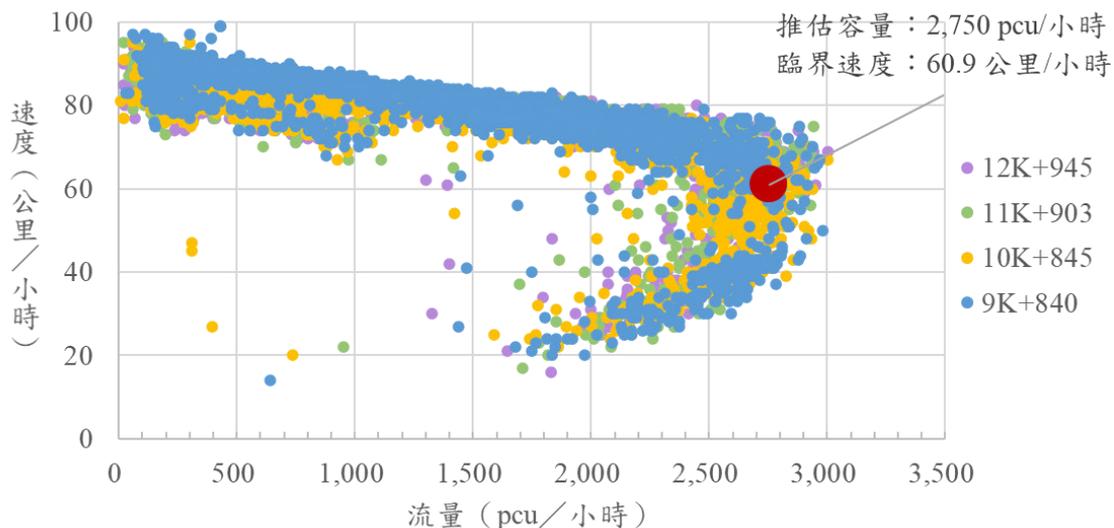


圖 16 彭山隧道內各路段之流量速度關係圖（南向）

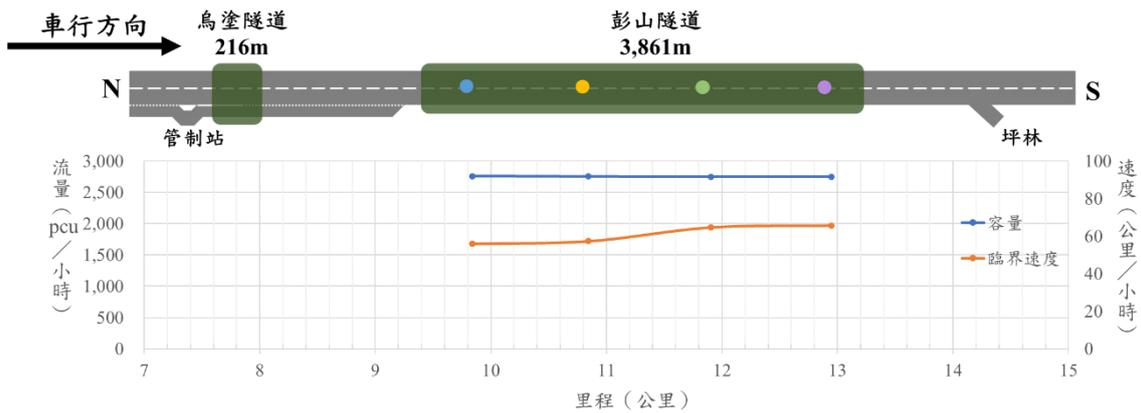


圖 17 彭山隧道實際容量及臨界速度（南向）

## 2. 北向

彭山隧道北向路段亦有 4 組 VD 分佈於隧道內，彙整隧道內各路段之流量速度關係如圖 18 所示。由圖可知，隧道內各路段之流量速度關係相似，以 4 組 VD 資料合併分析隧道內之容量平均約為每小時 2,650 pcu；臨界速度則平均約為每小時 62.2 公里，說明於穩定狀態下車流速度均可保持在每小時 62.2 公里以上。此外，與南向路段較為不同處在於其車速每小時低於 60 公里之筆數較少，且流量多仍可超過每小時 2,500 pcu。

進一步將彭山隧道南向之推估容量及臨界速度，與高速公路基本路段設計容量及臨界速度相比，以實際資料推估之容量相較 2 車道基本路段設計容量之每小時 4,300 pcu 為低，下降 1,650 pcu，約折減 38%；而臨界速度亦較基本路段之每小時 75.3 公里為低，下降 13.1 公里，約折減 18%。

本研究進一步繪製彭山隧道北向路段車道配置圖，並彙整隧道內各路段推估之容量及臨界速度如圖 19 所示。由圖可知，隧道內為 2 車道之路段，其 4 組 VD 分佈平均，間隔約為 1 公里，且各路段之推估容量並無明顯差異，介於每小時 2,657 pcu 至 2,664 pcu 之間；若以臨界速度觀之，介於每小時 58.0 及 66.4 公里，其中臨界速度於進隧道後之四分之三處（10k+866）較其前後路段為低，而接近出口之臨界速度則較其他路段為高。

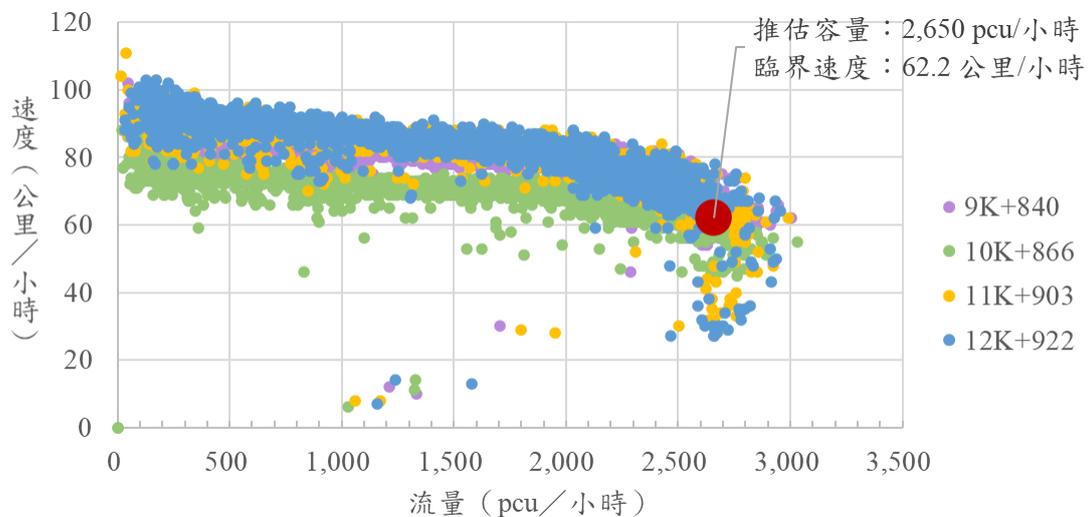


圖 18 彭山隧道內各路段之流量速度關係圖（北向）

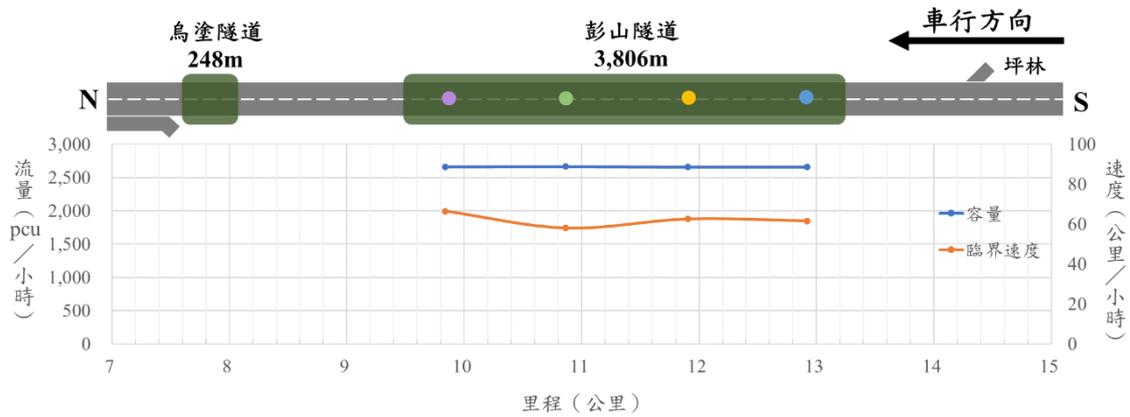


圖 19 彭山隧道實際容量及臨界速度 (北向)

### 4.2.3 雪山隧道

國道 5 號雪山隧道位於南向 15k+203 至 28k+128 處；而北向則位於 15k+179 至 28k+134 處，隧道總長分別約為 12.93 及 12.96 公里，係高速公路最長之隧道，以下將分別分析南、北向隧道內各組 VD 資料，探討隧道內之流量速度關係變化，以推估隧道之容量及臨界速度。

#### 1. 南向

雪山隧道南向路段有 19 組 VD 分佈於隧道內，將隧道上游、中游，以及下游各取 1 組 VD (分別位於 27k+748、21k+807、15k+478 座)，彙整流量速度關係如圖 20 所示。由圖可知，隧道上游有較多車速低於每小時 40 公里之不穩定車流資料，但流量依然可維持每小時 2,000 pcu 以上；而隧道中游流量亦多大於每小時 2,000 pcu，其速度均超過每小時 40 公里，相較於隧道上游為高；而隧道下游車速則較少出現不穩定車流，其速度可維持於每小時 60 公里以上。整體而言，以隧道內 VD 資料 (共計 19 組) 推估容量平均約為每小時 2,600 pcu；車速則明顯由上游往下游逐漸提升，而整體臨界速度則平均約為每小時 58.1 公里。

進一步將雪山隧道南向之推估容量及臨界速度，與高速公路基本路段設計容量及臨界速度相比，以實際資料推估之容量相較 2 車道基本路段設計容量之每小時 4,300 pcu 為低，下降 1,700 pcu，約折減 40%；而臨界速度亦較基本路段之每小時 75.3 公里為低，下降 17.2 公里，約折減 23%。

本研究進一步繪製雪山隧道南向路段車道配置圖，並彙整隧道內各路段推估之容量及臨界速度如圖 21 所示。由圖可知，隧道內為 2 車道之路段，其 19 組 VD 分佈平均，間隔約為 700 公尺，且各路段之推估容量並無明顯差異，介於每小時 2,590 至 2,630 pcu 之間；若以臨界速度觀之，介於每小時 51.4 及 67.5 公里，其中臨界速度於隧道總長約四分之三處 (25k+312) 達最低之每小時 51.4 公里，而隧道進口及出口之臨界速度則較隧道內各路段為高。

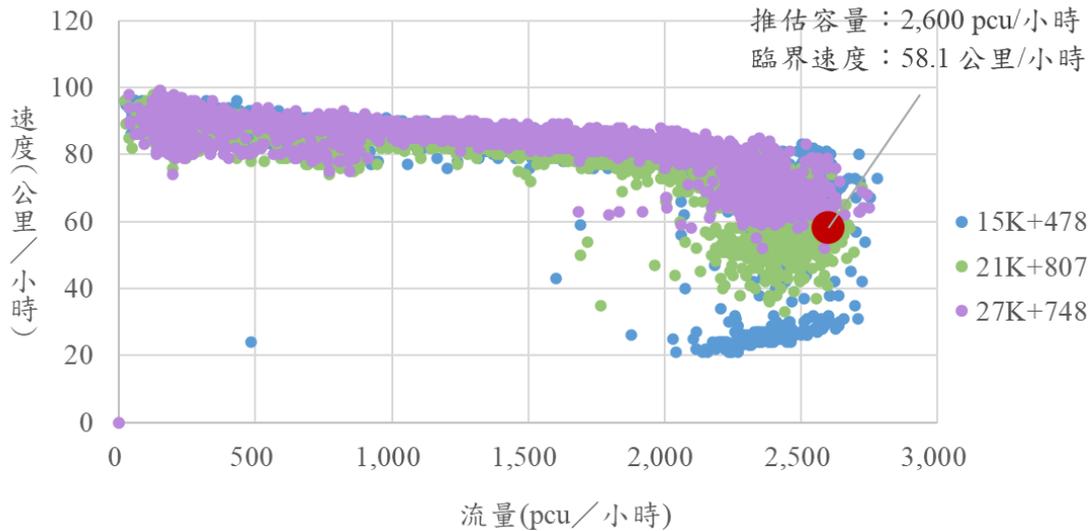


圖 20 雪山隧道內前中後各路段之流量速度關係圖（南向）

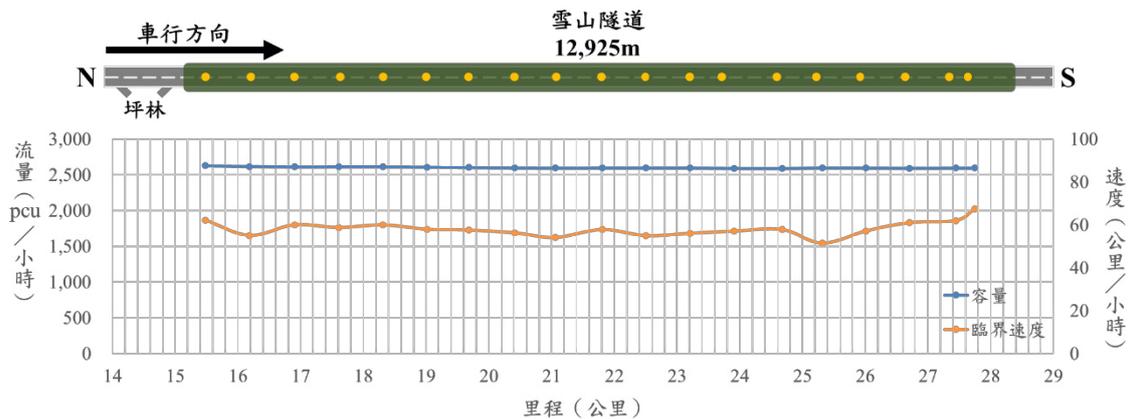


圖 21 雪山隧道實際容量及臨界速度（南向）

## 2. 北向

雪山隧道北向路段亦有 19 組 VD 分佈於隧道內，將隧道上游、中游，以及下游各取 1 組 VD（分別位於 27k+779、21k+808、15k+488），彙整流量速度關係如圖 22 所示。由圖可知，隧道上游有較多車速低於每小時 40 公里之不穩定車流資料，但流量依然可維持每小時 1,800 pcu 以上；而隧道中游流量亦多大於每小時 1,800 pcu，且速度均超過每小時 40 公里，相較於隧道上游為高；而隧道下游車速則較少出現不穩定車流，車速多可維持於每小時 60 公里以上。整體而言，以隧道內 VD 資料（共計 19 組）推估容量平均約為每小時 2,350 pcu，相較南向隧道路段為低；車速則明顯由上游往下游逐漸提升，而臨界速度則平均約為每小時 50.4 公里，相較於南向隧道路段為低。

進一步將雪山隧道北向推估容量及臨界速度，與高速公路基本路段設計容量及臨界速度相比，以實際資料推估之容量相較 2 車道基本路段設計容量之每小時 4,300 pcu 為低，下降 1,950

pcu，約折減 45%；而臨界速度亦較基本路段之每小時 75.3 公里為低，下降 24.9 公里，約折減 33%。雪山隧道北向無論容量及臨界速度之折減程度，均相較雪山隧道南向路段以及其他隧道路段為高。公路容量手冊（2011）說明於坡度路段時，大車比例越高或坡長及坡度增加，平均自由速率則會越低，且容量亦有降低之傾向。國道 5 號雪山隧道北向路段即為坡度 1.255%（曾平毅等人，2013）之上坡路段，因此本研究推測因於北向隧道係受到上坡頗度因素之影響，導致路段之容量及臨界速度較南向隧道有較大之折減。

本研究再進一步繪製雪山隧道北向路段車道配置圖，並彙整隧道內各路段推估之容量及臨界速度如圖 23 所示。由圖可知，隧道內為 2 車道之路段，其 19 組 VD 分佈平均，間隔約為 700 公尺，且各路段之推估容量並無明顯差異，介於每小時 2,345 至 2,435 pcu 之間；若以臨界速度觀之，介於每小時 44.5 及 62.8 公里，其中隧道上游臨界速度較低，最低達每小時 44.5 公里，而隧道下游接近隧道出口之路段，其臨界速度達最大之每小時 62.8 公里。

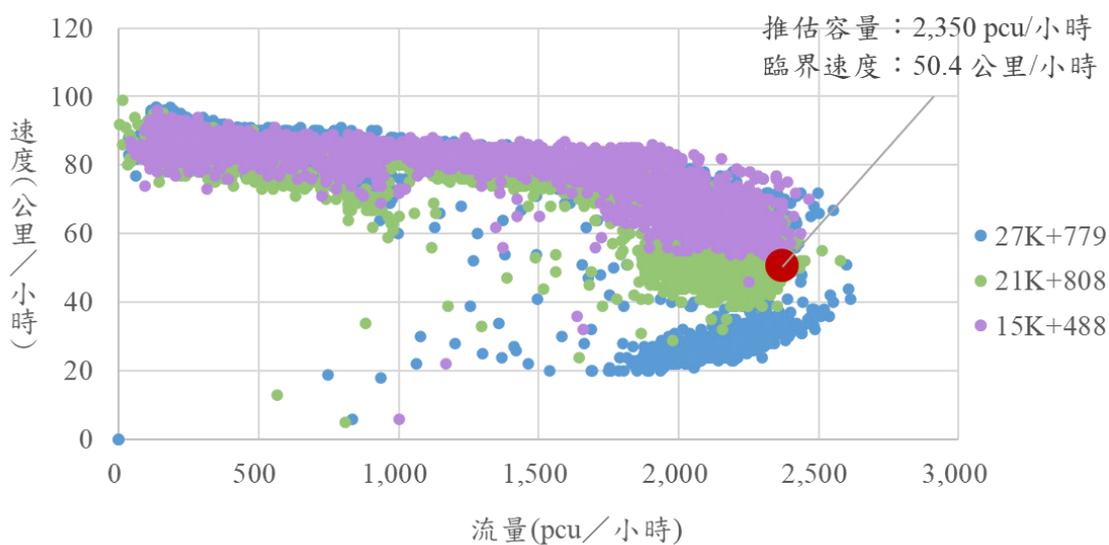


圖 22 雪山隧道內前中後各路段之流量速度關係圖（北向）

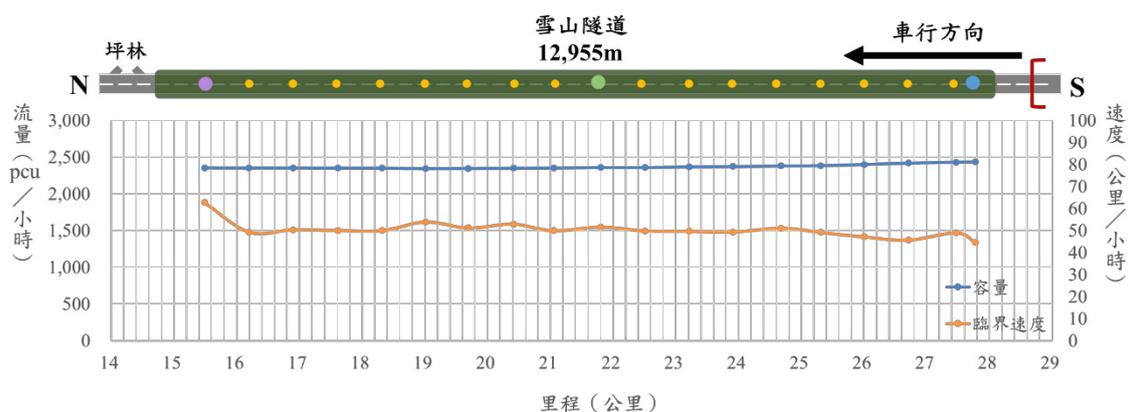


圖 23 雪山隧道實際容量及臨界速度（北向）

## 五、綜合分析

本研究將前述國道 3 號福德、木柵及國道 5 號石碇、彭山、雪山隧道之容量推估結果彙整於表 4。由表可知，本研究分析之國道 3 號隧道總長介於 1.7 至 1.9 公里，且均為 3 車道，其推估容量介於每小時 4,450 至 4,900 pcu 之間，與高速公路 3 車道基本路段設計容量之每小時 6,600 pcu，減少 1,700 至 2,150 pcu，約折減 26%至 33%；而分析之國道 5 號隧道總長介於 2.7 至 12.9 公里，且均為 2 車道，其推估容量介於每小時 2,350 至 2,750 pcu 之間，與高速公路 2 車道基本路段設計容量之每小時 4,300 pcu，減少 1,550 至 1,950 pcu，約折減 36%至 45%，其容量折減程度均較國道 3 號為大。

以臨界速度觀之，根據表 5 彙整各隧道路段之臨界速度可知，國道 3 號隧道路段之臨界速度介於每小時 66.0 至 72.5 之間，與高速公路 3 車道基本路段臨界速度之每小時 77.0 公里，下降 4.5 至 10.6 公里，約折減 6%至 14%；國道 5 號隧道路段之臨界速度介於每小時 50.4 至 62.2 公里之間，與高速公路 2 車道基本路段臨界速度之每小時 75.3 公里，下降 13.1 至 24.9 公里，約折減 18%至 33%，其臨界速度折減程度亦相較國道 3 號為大。

由上述分析結果可知，不論容量或臨界速度均以國道 3 號之折減程度較小，國道 5 號之折減程度較大。而綜合前述之文獻回顧結果可知，容量亦會受到旅次特性的影響。而由於因國道 3 號多為通勤旅次，駕駛對於道路熟悉度較高，於車流量較大時，仍可以較小之車間距，並維持一定之速度行駛，故其容量及臨界速度折減之程度較為低。而國道 5 號則可能有較多之休閒旅次，駕駛對於道路熟悉度較低，其平均車間距較長，致使道路容量及臨界速度折減程度較大。

表 4 本研究分析隧道推估容量與基本路段容量之差異

隧道名稱		方向	隧道長度 (公尺)	車道數	基本路段 設計容量 (pcu/小時)	隧道路段 推估容量 (pcu/小時)	差異 (%)
國道 3 號	福德	南	1,762	3 車道	6,600	4,900	-26%
		北	1,720	3 車道	6,600	4,450	-33%
	木柵	南	1,848	3 車道	6,600	4,500	-32%
		北	1,875	3 車道	6,600	4,750	-28%
國道 5 號	石碇	南	2,787	2 車道	4,300	2,650	-38%
		北	2,720	2 車道	4,300	2,750	-36%
	彭山	南	3,861	2 車道	4,300	2,750	-36%
		北	3,806	2 車道	4,300	2,650	-38%
	雪山	南	12,925	2 車道	4,300	2,600	-40%
		北	12,955	2 車道	4,300	2,350	-45%

表 5 各隧道臨界速度與基本路段臨界速度之差異

隧道名稱		方向	隧道長度 (公尺)	車道數	基本路段 臨界速度 (公里/小時)	隧道路段 臨界速度 (公里/小時)	差異 (%)
國道 3 號	福德	南	1,762	3 車道	77.0	66.4	-14%
		北	1,720	3 車道	77.0	66.0	-14%
	木柵	南	1,848	3 車道	77.0	67.3	-13%
		北	1,875	3 車道	77.0	72.5	-6%
國道 5 號	石碇	南	2,787	2 車道	75.3	58.8	-22%
		北	2,720	2 車道	75.3	51.8	-31%
	彭山	南	3,861	2 車道	75.3	60.9	-19%
		北	3,806	2 車道	75.3	62.2	-18%
	雪山	南	12,925	2 車道	75.3	58.1	-23%
		北	12,955	2 車道	75.3	50.4	-33%

## 六、結論與建議

經由上述分析，本研究彙整以下結論與建議，以供後續公路規劃與設計時之參考。

### 6.1 研究結論

1. 國道 3 號總長超過 1.5 公里之 3 車道隧道，容量約為每小時 4,450 至 4,900 pcu，較基本路段減少 26%至 33%；臨界速度則為每小時 66.0 至 72.5 公里，較基本路段下降 6%至 14%。
2. 國道 5 號總長超過 1.5 公里之 2 車道隧道，容量約為每小時 2,350 至 2,750 pcu，較基本路段減少 36%至 45%；臨界速度則為每小時 50.4 至 62.2 公里，較基本路段下降 18%至 33%。
3. 國道 5 號雪山隧道不論南北向，隧道內各路段之車流特性有所差異，隧道上游進入不穩定車流狀態後，其速度為每小時 20 至 40 公里；隧道中游之速度均超過每小時 40 公里，相較於隧道上游為高；而隧道下游車速則較少出現不穩定車流，速度均可維持於每小時 60 公里以上。
4. 國道 3 號與國道 5 號之旅次特性不同，國道 3 號主要多以通勤旅次為主，國道 5 號則可能有較多之休閒旅次；由於休閒旅次之駕駛對於道路熟悉度較低，可能致使國道 5 號隧道之容量及臨界速度之折減程度相較國道 3 號為大。

## 6.2 建議

1. 由本研究之分析可知，國道 3 號與國道 5 號所分析之隧道容量與臨界速度均較基本路段有所折減，且因旅次特性不同，其折減幅度亦有所不同；故未來於規劃及設計公路隧道時，應考量該設計路段之旅次特性，將可能發生之容量與臨界速度折減納入考量，以避免隧道成為公路之瓶頸路段。
2. 本研究僅針對隧道長度超過 1.5 公里之隧道進行分析，至於長度較短之隧道，其隧道內佈設之 VD 數量較少，甚至無佈設 VD，故尚難進行分析。建議未來可以其他方式蒐集短隧道之車流特性資料，以探討短隧道之容量及臨界速度等車流特性。
3. 國道 3 號較長之隧道均位於北部地區，惟北部地區交流道分佈較為密集，隧道多位於出、入口匝道之上下游路段，故車流特性亦會受到匝道匯入、匯出之車流影響，較難以觀察進隧道前與進隧道後車流特性之差異，建議後續進行相關研究時，可區分不同車道分別進行研究，針對干擾較少之主線內側車道進行分析，以探討其與基本路段內側車道之差異。
4. 本研究原欲針對幾何條件相似之隧道路段及基本路段，透過實際資料分析其容量及臨界速度差異，惟實務上較難找到幾何條件與隧道路段類似之基本路段，故本次先就公路容量手冊之基本路段進行比較，後續若可蒐集到幾何條件相似且資料較完整之基本路段，則建議可進一步以實際資料分析基本路段及隧道路段容量與臨界速度之差異。

## 參考文獻

- 交通部高速公路局交通資料庫，擷取日期：2021年6月，網站：<https://tisvcloud.freeway.gov.tw/>
- 林豐博、曾平毅、林國顯、蘇振維、張瓊文、鄭嘉盈、呂怡青、劉國慶、陳昭堯、王怡方（2011），*2011年臺灣公路容量手冊*。台北市：交通部運輸研究所
- 林豐博、蘇振維（2009），「國道5號雪山隧道車流特性之研究」，*運輸計劃季刊*，第三十八卷第一期，頁85-120。
- 張瓊文、林豐博、曾平毅、蘇振維（2010），「雪山隧道內車流特性與容量之分析」，*中國土木工程學刊*，第二十二卷第三期，頁333-340。
- 曾平毅、林豐博、張瓊文、蘇振維、呂怡青（2013），「雪山隧道之速限對通行能力的影響分析」，*運輸計劃季刊*，第四十二卷第一期，頁1-16。
- 蘇振維、鄭嘉盈、呂怡青、林豐博、曾平毅、楊信毅、黃祖斌、張筱瑜（2012），*高快速公路收費站、隧道及坡度路段容量及車流特性研究（2/3）*。台北市：交通部運輸研究所
- 岡村秀樹、渡辺修治、泉正之（2001），「高速道路単路部の交通容量に関する調査研究（下），高速道路と自動車」，*第四十四卷*，第3號，頁30-40。
- 割田博、赤羽弘和、船岡直樹、岡村寛明、森田綽之（2004），「首都高速道路におけるキャパシティボールの抽出とその特性分析」，*土木計画学研究*，講演集，29。
- 塚田幸広、桐山孝晴、保久原均、濱谷健太（2006），「道路の交通容量における新しい設計法に関する検討」，*国総研資料*，第317号，頁1-15。
- 越正毅（1984），「高速道路トンネルの交通現象」，*国際交通安全学会誌*，第十卷第一期，頁32-38。
- Korea Ministry of Construction (1992), *Highway Capacity Manual*.
- May A. D. (1990), *Traffic Flow Fundamental*.
- Sharma, S. C. (1987), Driver Population Factor in New Highway Capacity Manual. *Journal of Transportation Engineering*, 113(5), P.575-579.
- Transportation Research Board (2010), *Highway Capacity Manual 2010*. Washington, D.C.: National Research Council.