

高速公路主線及匝道匯流區車流特性之研究

Traffic Flow Characteristics at On-Ramp Junctions on Taiwan's Freeways

歐陽恬恬 Tien-Tien Ou-Yang¹
林豐博 Feng-Bor Lin²
曾平毅 Pin-Yi Tseng³
蘇振維 Cheng-Wei Su⁴

摘要

交通部運輸研究所為發展高速公路主線匝道區之容量分析方法及匝道控制策略，乃利用高速公路布設之車輛偵測器，分析匝道區車流特性。本研究篩選了國道 1 號、3 號及 5 號，共 7 個進口匝道匯流區之車流資料，分析車流之車道分布、流率與速率關係，以及壅塞開始前後之車流變化等特性。分析結果顯示，離匯流區 2~3 公里之主線內、中線車道常可維持 2,000~2,300 小車/小時而沒有壅塞狀況，匯流區進口匝道上游主線內線及中線車道之流率則難以維持在 1,900 小車/小時以上。匯流區上游外線車道的交通功能更不理想，這些車道在進入壅塞狀況之前的流率通常只在 900~1,200 小車/小時之範圍。相對而言，離匯流區 2~3 公里之主線外線車道流率則可達 1,400~1,700 小車/小時。因此匯流區常成為臺灣高速公路之瓶頸。此外，壅塞前 0~5 分鐘之車流密度常在 18 小車/公里左右，壅塞開始之 5 分鐘內流率雖然有大的變異性，但壅塞情況皆發生在密度超過 21 小車/公里，或密度在 5 分鐘內從大約 18 小車/公里增加 4 小車/公里以上的時候。

關鍵詞：高速公路、匯流路段、流率與速率關係、密度

Abstract

To support the development of highway capacity analysis methodologies and ramp control strategies, the Institute of Transportation (IOT), Ministry of Transportation and Communications, has been investigating the traffic flow characteristics at ramp junctions on Taiwan's freeways. Focusing on on-ramp junctions, this study analyzed the traffic flow characteristics on National Freeways No.1, 3, and 5 based on the data collected by inductive-loop detectors. The results show that the operating efficiencies at on-ramp junctions are much lower than those at freeway segments that are far away from the ramp junctions.

¹ 交通部運輸研究所運輸計畫組副研究員(聯絡地址:10548 臺北市松山區敦化北路 240 號,電話: 02-23496812, E-mail: tien1126@iot.gov.tw)。

² 美國 Clarkson 大學土木與環境工程學系教授。

³ 中央警察大學交通學系教授。

⁴ 交通部運輸研究所運輸計畫組組長。

Freeway segments that are far away from on-ramp junctions can often maintain hourly flow rates of 2,000~2,300 car/hr/lane without congestion. In contrast, the inside and middle lanes of a freeway segment just upstream of an on-ramp can rarely maintain an hourly flow rate of exceeding 1,900 car/hr/lane. The operating efficiency of a freeway outside lane can also be expected to deteriorate significantly with owing to the presence of a nearby on-ramp. This study also reveals that when traffic density in the outside lane just downstream of an on-ramp reached about 18 cars/km, an increase of 4 cars/km or more in the subsequent 5 minutes time period would likely cause a breakdown in traffic movement on the freeway.

Keywords: Freeways, On-ramp junctions, Speed-flow relationships, Density

一、前言

高速公路主線與匝道匯流之區段常成為瓶頸，所以設計這種區段或建立匝道控制策略，須對主線及匝道車流互動的關係有充分的了解。

國外對匝道路段交通特性雖有相關文獻進行探討，惟即便同一國家，不同公路、不同路段的車流特性也有差異，且我國高速公路的幾何設計及駕駛員行為亦可能與其他國家不同，因此，國外之研究成果不一定適用於我國。交通部運輸研究所曾在民國 85 到 88 年期間針對匝道路段進行研究，並用所得的現場資料修訂 2011 年臺灣公路容量手冊（交通部運輸研究所，2011），惟這些資料不足夠用來建立匝道控制的策略。

目前臺灣高速公路上主線、進口匝道、出口匝道等路段，多設有車輛偵測器，高速公路局除定期整理相關的交通資料外，也提供即時用路人交通資訊。本研究乃利用高速公路布設之車輛偵測器，分析下列車流特性，以作為規劃及建立控制策略作業分析之參考：

1. 車種組成及車流之車道分布。
2. 流率與速率之關係。
3. 進口匝道下游主線開始壅塞及壅塞前後之車流狀況。

二、文獻回顧

美國 Transportation Research Board (TRB) 之 2010 年公路容量手冊(HCM 2010) 指出，在穩定車流狀況下（尚未進入壅塞狀況之前），進口匝道的影響區從進口延伸到下游主線 1,500 英尺（約 460 公尺），出口匝道的影響區則從出口往上游主線延伸 1,500 英尺。事實上，匯流或分流區進入壅塞之後的影響區可能長達數公里。

由於 Roess 與 Ulerio(1993)的研究提出匯流區或分流區內之亂流(turbulence)不會減低主線容量的結論。因此，HCM 2010 認為匯流區或分流區的容量與主線基本路段（不受匝道或交織路段影響）的容量沒有差別；平均自由速率為 55 及 70 英里/小時之區段的容量各為 2,250 及 2,400 小車/小時/車道。

此外，HCM 2010 亦指出匝道的容量隨平均自由速率而變。平均自由速率低於 20 英里/小時的匝道容量為 1,800 小車/小時/車道。平均自由速率增加到 50 英里/小時或更高時，匝道容量增高到 2,200 小車/小時/車道。但 Sarvi 等人(2007)探討壅

塞之後開始疏解時之容量，發現容量隨匝道所在地而變，其值在 1,679 及 2,068 輛/小時/車道之範圍，而且有匝道路段的容量比主線基本路段之容量低，這現象異於 HCM2010 所述之特性。

匯流區或分流區在何情形之下會進入壅塞狀況是一深受重視的問題。HCM 2010 指出車流密度超過 35 小車/英哩/車道時，車流隨時可能進入壅塞狀況。Elefteriadou 等人(1995)的研究發現，匝道有成群車輛(platooned vehicles)進入主線時比較容易造成壅塞狀況。Servi 及 Kuwahara(1999)於東京首都高速公路之 7 個匯流區所蒐集的資料顯示，匯流區的容量受加速道幾何設計的影響，而匝道流率與總匯流流率之比例(簡稱匯入比)為 0.32 時，匯流區的容量最高。Kim 等人(1997)探討韓國京釜高速公路(單向 4 主線車道，2 匝道車道，500 公尺長加速道)匯流區之車流特性，發現匯流區進入壅塞狀況時，進口匝道的流率約占總匯流流率的 24%，相當於匝道流率在 1,573 及 1,933 輛/小時之間的狀況。

從幾何設計的角度而言，匝道車輛之加速或減速行為影響所需之加、減速車道長度。美國 National Cooperative Highway Research Program(NCHRP)之研究計畫(2012)發現，匝道車輛匯入主線時的平均速率比主線低 4.6 到 24.8 英哩/小時，這差距隨匝道而異。分流時，匝道車輛的平均速率比主線約低 1.6 到 10.7 英哩/小時。該計畫亦發現進口匝道上小車以 26 英哩/小時之起始速率開始加速，而能在自由旅行狀況下自由匯入主線時的加速率在 1.97~3.4 英呎/秒²之範圍。起始速率相同時，大車的加速率在 1.35~2.27 英呎/秒²之間。另一方面，減速時之起始速率為 45 及 58 英哩/小時的情況下，出口匝道小車平均減速率各為 1.67 及 3.18 英呎/秒²，大車的減速率稍高，各為 2.25 及 3.25 英呎/秒²。

三、分析地點

本研究篩選了國道 1 號、3 號及 5 號，共 7 個匯流區之偵測器車流資料，分析地點如表 1 所示。分析地點篩選原則為：(1)進口匝道有偵測設備；(2)主線與進口匝道交會點下游約 1 公里內有偵測設備，且偵測設備下游至少 2~3 公里幾何設計不變(無匝道、橋樑、隧道…等)；(3)主線與進口匝道交會點上游約 1 公里內有偵測設備，且距上游進口匝道至少 2~3 公里，如圖 1 所示。另分析時段必須有車流量大且有壅塞之情形，以探討車流在穩定狀況、不穩定(壅塞)狀況及從穩定進入不穩定狀況之車流特性。

表 1 分析地點

高速公路	匝道位置	分/匯流區	高速公路	匝道位置	分/匯流區
國道 1 號	臺南北上進口	匯流區	國道 5 號	石碇北上進口	匯流區
	永康南下進口	匯流區		宜蘭北上進口	匯流區
	大雅北上進口	匯流區		宜蘭南下進口	匯流區
國道 3 號	竹山北上進口	匯流區		羅東北上進口	匯流區

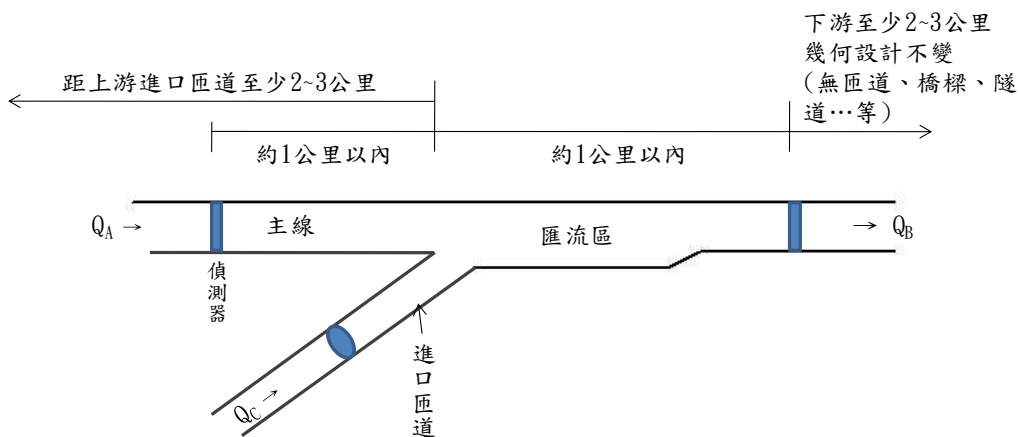


圖 1 匯流區分析地點篩選原則

分析地點偵測器及鄰近交流道的大約位置如圖 2 及圖 3 所示，國 1 及國 3 兩公路的主線有 3 車道。國 5 公路的主線只有 2 車道。加減速車道與主線偵測器之相對位置如圖 4 及圖 5 所示。進口匝道下游加速車道只有 1 車道，有正常寬度之部分，長度在 105 公尺（羅東）及 395 公尺（臺南）之間。為能掌握車流較高且有壅塞狀況之車流資訊，分析連續假日之偵測器資料較為可行。本研究分析國道 1 號及 3 號偵測器資料為 2014 年春節假期（1 月 30 日~2 月 5 日）間的車流狀況，國道 5 號之資料為 2011 年清明節（4 月 2 日~4 月 5 日）、母親節（5 月 7 日~5 月 10 日），及週末假期的車流狀況。

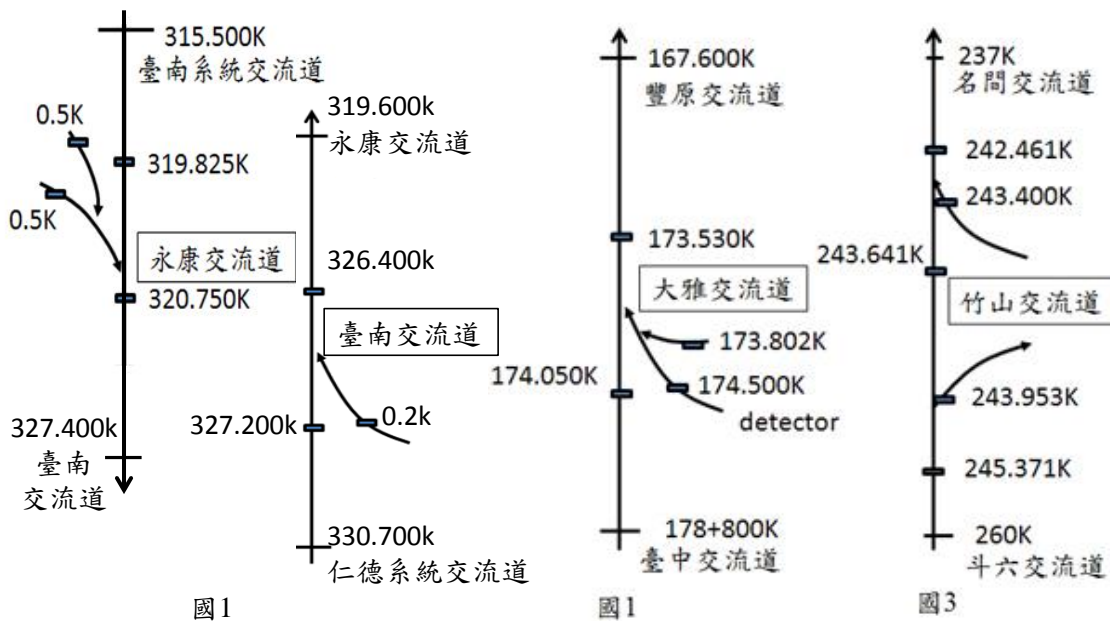


圖 2 國道 1 號與 3 號偵測器及鄰近匝道之位置

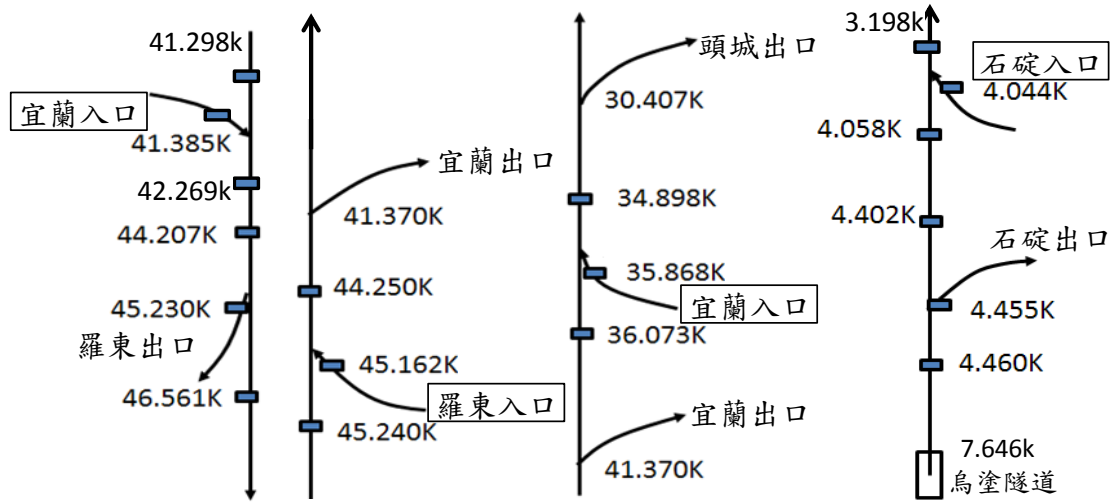


圖 3 國道 5 號偵測器及鄰近匝道之位置

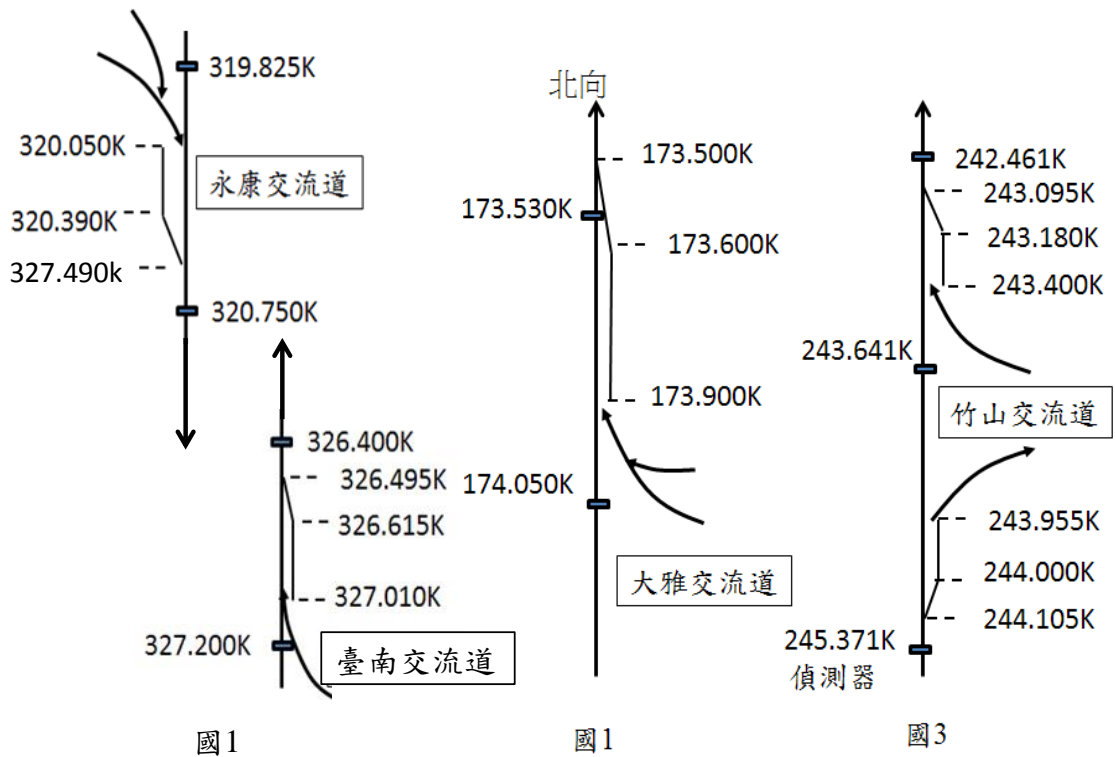


圖 4 國道 1 號與 3 號偵測器及加減速車道之位置

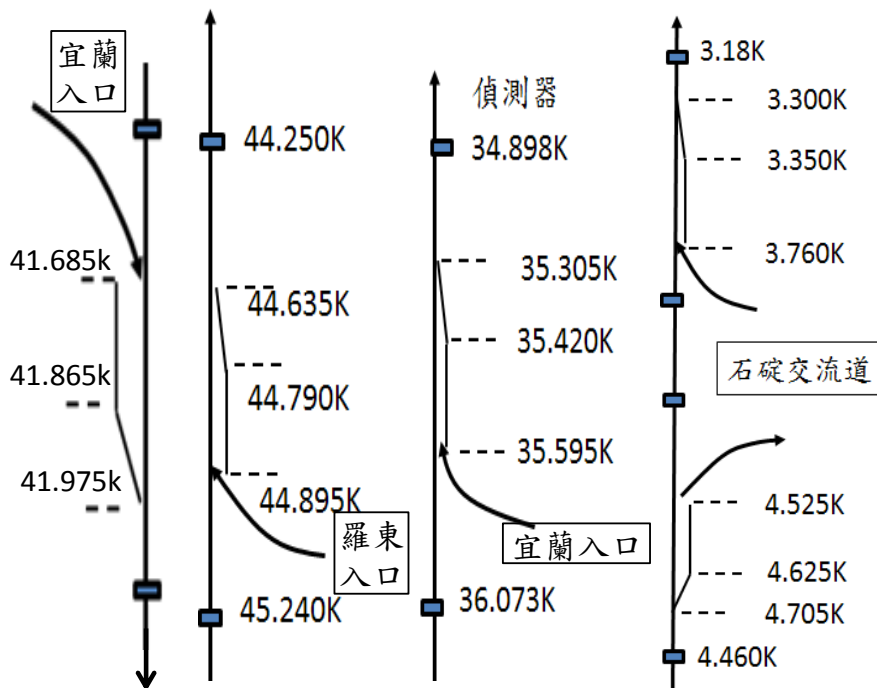


圖 5 國道 5 號偵測器及加減速車道之位置

四、偵測器資料之適用性

利用車輛偵測器資料分析車流特性之前，必須先評估偵測器資料之合理性，並將明顯不合理之 5 分鐘資料棄置不用。本研究評估對象包括流率、車種組成及速率。

流率資料是否合理可從匝道上下游主線及進口匝道之 5 分鐘流率的關係來評估。而本研究分析之匯流區中，匝道上游偵測器之距離皆在 1.2 公里以下。因此在沒有壅塞的狀況下，在 5 分鐘時段內通過上游偵測站的車輛大多數應能在同一時段內通過下游偵測站。匝道上偵測器與上下游主線偵測器的距離更短。因此如果匝道及主線上的偵測器皆能合理的估計流率，則在沒有壅塞狀況時，平均每 5 分鐘之流率應符合下列條件：

進口匝道上游主線流率加上從匝道進入主線之流率，應大約等於通過下游主線偵測站的流率。

一般而言，本研究分析地點之偵測器皆能提供合理的估計值。圖 6 為其中 1 套（大雅北向匯流區）分析結果，顯示在大量 5 分鐘無壅塞之時段內，主線上下游及匝道偵測器之流率估計值，大致符合上述條件。

至於車種組成，以竹山北上、臺南北上及永康南下等地點為例，如表 2 所示，高速公路上的偵測器常有不能準確判斷車種的現象，一般的問題是高估大車（包括大客車、大貨車及聯結車等）之流量。

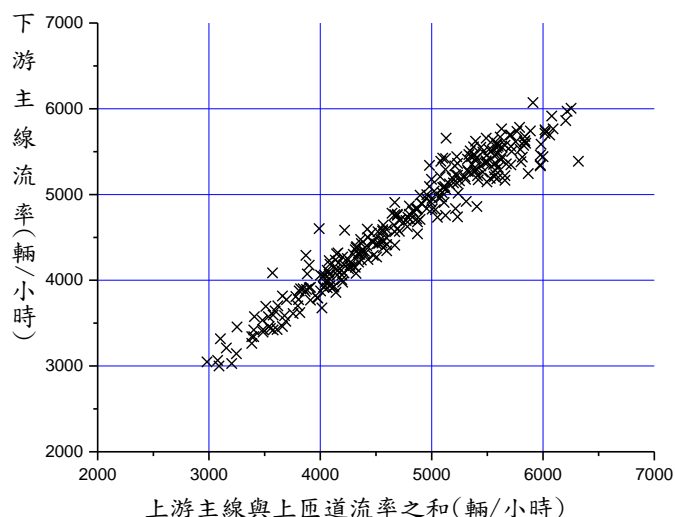


圖 6 大雅北向匯流區下游主線流率與上游主線及匝道總流率之比較 (1/31/2014 及 2/4/2014)

表 2 國 1 及國 3 主線分車道流率及大車比例

地點	105.1.31 不同時段	內線車道		中線車道		外線車道	
		流量 (輛/小時)	大車%	流量 (輛/小時)	大車%	流量 (輛/小時)	大車%
竹山北上 進口匝道 上游	6 am-9 am	599	0.0	1037	1.0	137	15.5
	9 am-noon	1975	0.1	2309	0.8	419	9.5
	noon-3 pm	2221	0.1	2448	0.3	736	6.4
	3 pm-6 pm	2743	0.0	2942	2.2	941	5.3
竹山北上 進口匝道 下游	6 am-9 am	620	1.0	1318	0.5	768	26.5
	9 am-noon	2266	0.9	2998	0.8	1908	22.7
	noon-3 pm	2890	0.9	3377	39.1	2133	21.7
	3 pm-6 pm	3796	0.7	4048	99.0	2642	27.3
台南北上 進口匝道 上游	6 am-9 am	2458	4.3	2511	8.0	967	22.3
	9 am-noon	3278	1.2	2360	2.9	1951	9.1
	noon-3pm	3593	3.8	3263	7.5	1404	18.4
	3 pm-6 pm	2866	4.6	2766	8.0	1049	20.1
台南北上 進口匝道 下游	6 am-9 am	2919	5.3	3042	5.7	1720	12.7
	9 am-noon	3797	0.7	2736	3.1	3204	5.1
	noon-3pm	4140	4.7	2959	2.8	2666	8.9
	3 pm-6 pm	3362	5.6	1427	4.9	2172	9.5
永康南下 進口匝道 上游	6 am-9 am	1481	2.2	1949	66.8	939	17.8
	9 am-noon	3030	1.2	3124	60.6	1656	9.5
	noon-3pm	3440	1.2	3431	69.8	1793	9.3
	3 pm-6 pm	5301	2.1	4514	59.1	3083	8.7
永康南下 進口匝道 下游	6 am-9 am	1671	5.9	2198	53.7	1303	15.5
	9 am-noon	3467	4.0	3716	41.3	2420	6.1
	noon-3pm	3796	2.4	3807	46.2	2494	5.7
	3 pm-6 pm	5633	1.9	5060	38.8	3975	5.2

圖 3 北上竹山進口匝道下游主線之中、外線車道的 5 分鐘大車百分比有時高達 99%；國 1 南下永康進口匝道上游中線車道的大車百分比常超過 60%；其他路段之 5 分鐘大車百分比比較合理，中線車道很少超過 15%，外線車道很少超過 30%。因此本研究分析流率-速率關係時，將大車比例超過上述百分比之資料棄置不用。

此外，國道 5 號只開放小型車及大客車通行。2009 到 2011 年間之大客車占總車流之百分比常在 1.7% 到 2.8% 之間（交通部運輸研究所，2012）。

除了分別車種的問題之外，大雅匯流區在 174.520K 處的偵測器常高估大貨車及聯結車的速率。有些估計速率高達 236 公里/小時。竹山匯流區在 243.641K 處的偵測器所估計得之大貨車及聯結車車速的錯誤更多，有估計速率高達 253 公里/小時之大車。臺南及永康匯流區的速率估計值則少有明顯的錯誤。

因為上述之速率估計問題，本研究在分析大雅及竹山之資料時，只用小車速率代表車流之平均速率。因為大車比例不高，在不陡的路段上（如大雅路段之 0.67% 坡度）大小車之平均速率差別也有限，所以用小車速率代表車流之平均速率，不會顯著的誤導對流率與速率關係的了解。

透過前述針對流率、大車比例及速率的比對與評估，本研究僅使用具合理性之偵測器資料，進行以下的車流特性分析。

五、主線車流之車道分布

5.1 國道 1 號及 3 號

高速公路主線外車道的駕駛員接近匝道時，有左移變換車道以避開正在進入或離開主線之車輛的傾向。不能變換車道的主線車道常須減速，因而在密度高時可能造成壅塞。匝道的存在有其必要性，但其幾何設計常顯著的降低高速公路之交通功能。

國道 1 號及 3 號的主線各方向有 3 車道。這兩公路上所分析之匯流區主線車流之車道分布特性可歸納如下：

1. 進口匝道上游主線內車道及中線車道的使用率大約各為 40%，但是內車道之流量百分比一般稍高於中線車道。兩者之差距大約有 2%。
2. 進口匝道上游主線外車道之使用率可能相當低，以臺南為例，上游主線外車道流量常只占總流量之 15%~19%，而永康上游主線外車道流量較高，但很少超過 24%。這現象可能是主線駕駛員在接近匝道時左移變換車道所造成。設置長的加速輔助車道可能有效的讓主線所有車道的使用率趨近均勻，因而改善匯流區之交通功能。
3. 進口匝道下游主線外車道吸收上游主線及匝道的車輛，因此其流量占總流量的百分比增加約 5%~10%。下游主線內車道及中線車道流量之百分比則相對減少，各占總流量之 37% 左右。外車道流量所占的百分比仍遠低於內車道及中線車道。

5.2 國道 5 號

國道 5 號雙向各只有 2 主線車道，車道分布特性與國道 1 號及 3 號有顯著的不同，歸納如下：

- 1.進口匝道上游主線內車道流量占總流量的百分比在 40%~56%之範圍。一般而言，進口匝道上游主線內外車道之使用率趨近均勻，而於每小時流量大約低於 1,000 輛之情況下，外車道流量常高於內車道。
- 2.進口匝道下游主線內車道之流量占總流量之 38%~54%。換言之，外車道的流量常高於內車道。流量低時，外車道使用率高於內車道的可能性較大。

六、流率與速率的關係

高速公路上駕駛人針對鄰近車輛之行為、幾何設計的變化、及交通控制等因素所採取的行動造成種種流率與速率的關係。這些關係是規劃、設計及建立交通管制策略的基礎資料。本研究利用偵測器資料探討在匝道上游主線車道及進口匝道每 5 分鐘之流率與速率關係。此工作用 1.5 小車當量(passenger car equivalent, pce)將大車轉換成對等小車來估計流率。

6.1 國道 1 號及 3 號

本研究分析國道 1 號及 3 號上 4 個匯流區主線及匝道之流率與速率關係，說明如下：

1.主線各車道自由速率

國道 3 號竹山路段速限 110 公里/小時，進口匝道上游主線內、中線車道的自由速率（高速率，流率幾乎等於 0 時之平均速率）大約各為 120 及 115 公里/小時；外車道的自由速率較低，只有 100 公里/小時左右（如圖 7 所示）。

國道 1 號臺南、永康及大雅等路段速限均為 110 公里/小時，進口匝道上游主線內線車道的自由速率也達 110 公里/小時，中線車道及匝道下游主線內車道的自由速率為 100 公里/小時。其他車道的自由速率在 90 公里/小時到 100 公里/小時之範圍，圖 8 為其中一例。

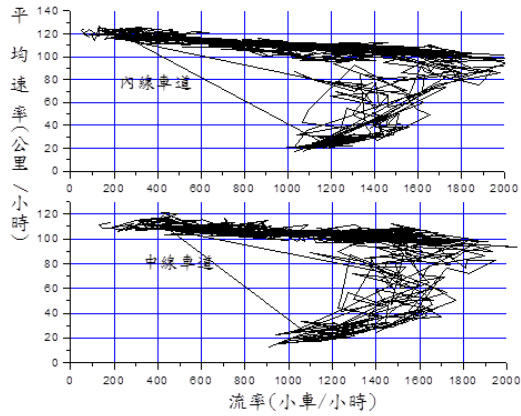
2.進口匝道自由速率

進口匝道自由速率在 60~70 公里/小時之範圍，如圖 9 所示。而永康及大雅匝道偵測器放在兩支道上（見圖 2），支道車流先匯流成一匝道車流之後才進入高速公路。因此偵測器所估計的速率不能反映匝道上的速率。

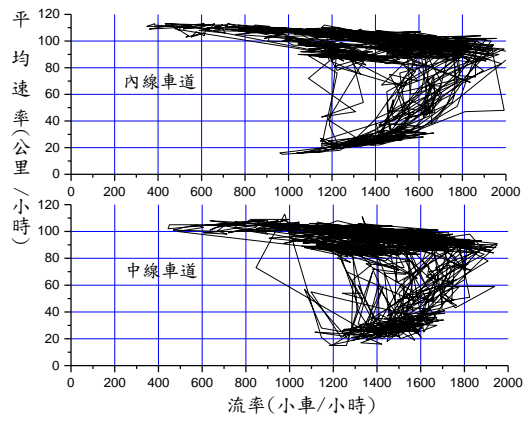
3.主線匯流區各車道流率

在無壅塞狀況下，進口匝道上游主線內線車道的 5 分鐘流率經常可達 1,900 小車/小時左右。中線車道的流率除了在永康匯流區達到 2,100 小車/小時左右之外，經常只承載 1,750~1,900 小車/小時之流率。但匝道下游主線內、中線車道的流率可達 2,000 到 2,200 小車/小時（見圖 7(b)及圖 8(b)）。

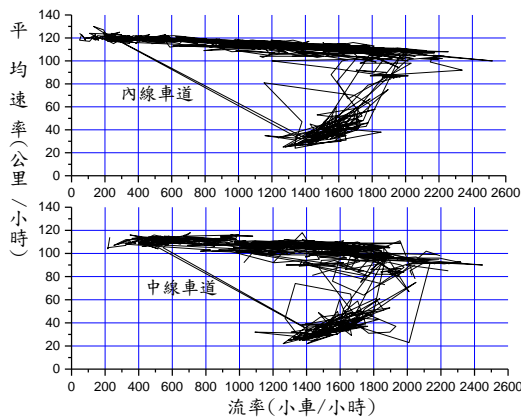
上述流率常不能持久，例如圖 8(a)顯示大雅進口匝道上游主線內、中線車道的流率超過 1,200 小車/小時之後就常進入壅塞狀況，圖 8(b)下游主線內、中線車道的流率超過 1,600 小車/小時之後也常進入壅塞狀況。永康及竹山（圖 7）匯流區的車流也常在低流率時就進入壅塞狀況。



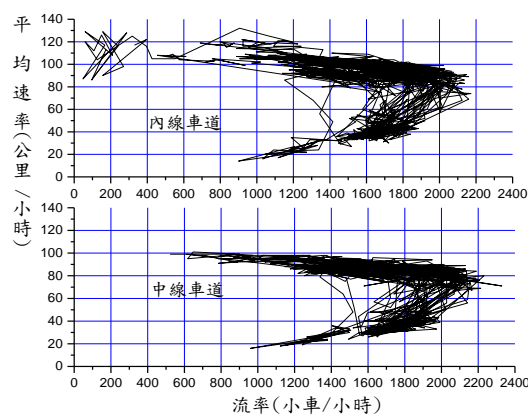
(a)上游內線及中線車道



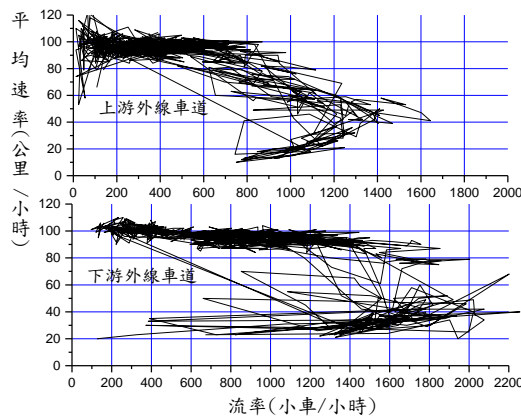
(a)上游內線及中線車道



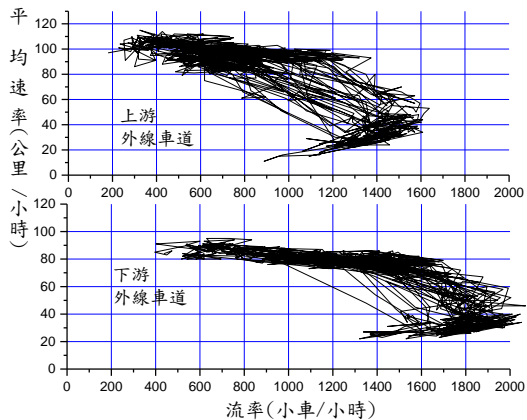
(b)下游內線及中線車道



(b)下游內線及中線車道



(c)上下游外線車道



(c)上下游外線車道

圖 7 竹山北上進口匝道匯流區主線各車道流率與速率關係

圖 8 大雅北上進口匝道匯流區主線各車道流率與速率關係

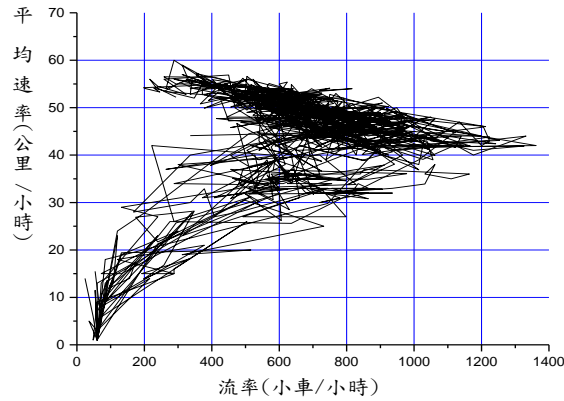


圖 9 進口匝道流率與速率關係-臺南北上

另匝道上游主線內、中線車道可承載之流率，竹山（圖 7(a)）及大雅（圖 8(a)）差距很小，臺南（圖 10(a)）為內線車道較中線車道高約 250 小車/小時，永康（圖 10(b)）則為中線車道承載流率高於內線車道。

進口匝道匯流區上下游外線車道的交通功能比內線及中線車道更不理想。以圖 7(c)為例，竹山進口匝道上游主線外車道的各別流率很少超過 900 小車/小時及 1,400 小車/小時。而且上游外車道流率在 600 到 1,200 小車/小時之範圍就常有壅塞狀況。下游外車道流率超過 1,000 小車/小時之後也常進入壅塞狀況。

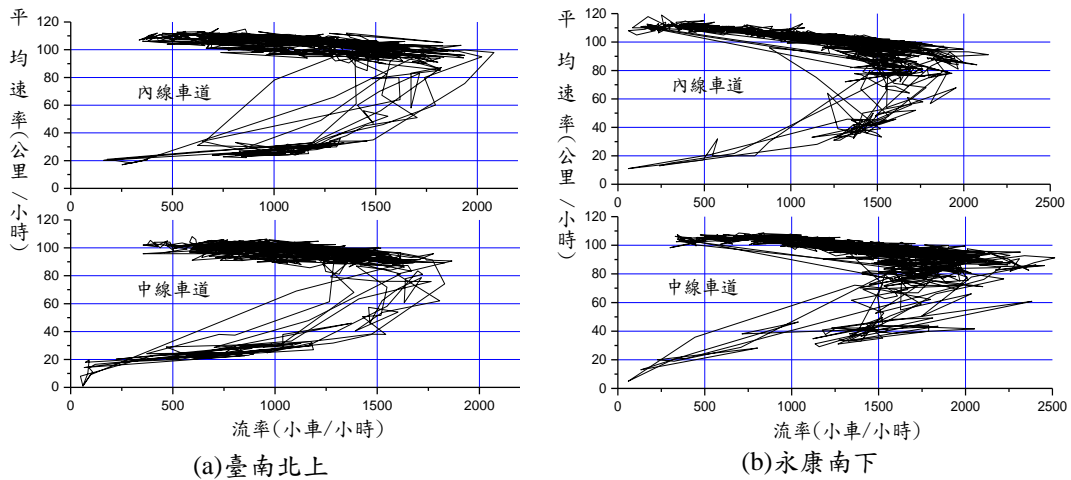


圖 10 進口匝道匯流區上游主線內、中線車道流率與速率關係

4. 進口匝道流率

進口匝道能進入高速公路之流率受匝道幾何設計、加速車道之長度及型態、主線車流狀況，與匝道控制等因素的影響。因此進口匝道上之流率與速率關係會隨匝道地點及現況而有很大的變化。圖 9 顯示臺南進口匝道進入壅塞狀況時之流率大約為 600 小車/小時。

6.2 國道 5 號

國道 5 號主線單向只有 2 車道。而且此公路上之雪山、彭山及石碇隧道的容量平均每車道只有 1,500 小車/小時左右。匝道之間及匝道與隧道之間的距離也不長，所以匯流區流率與速率關係很容易受到下游壅塞的影響。本研究分析國道 5 號上 3 個匯流區之流率與速率關係，其特性如下：

1. 匯流區主線自由速率及流率

進口匝道匯流區上游主線之自由速率隨地點及車道而變。宜蘭、羅東之內車道自由速率各為 100 及 110 公里/小時。外車道及匝道下游主線車道的自由速率則比上游內車道的自由速率約低 10 公里/小時。

匯流區上下游主線車道很難長時期承載超過 1,600 小車/小時的流率而不進入壅塞狀況。石碇北上進口匝道下游主線車道之流率大約超過 1,500 小車/小時之後速率會急速下降(圖 11(b))，下游壅塞所造成的衝擊波導致匝道上游主線內車道的流率超過 1,100 小車/小時就可能造成壅塞，外車道流率超過 900 小車/小時之後造成壅塞的可能性也相當高(圖 11(a))。宜蘭北上進口匝道上游主線在分析日期中沒有壅塞現象(圖 12(a))，但是匝道下游內外車道流率超過 600 小車/小時之後有壅塞狀況(圖 12(b))。

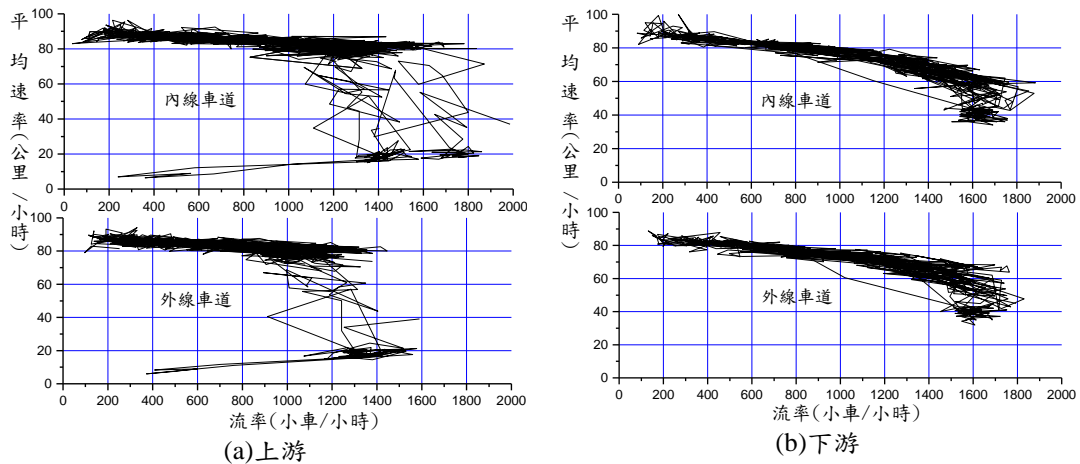


圖 11 石碇北上進口匝道匯流區主線分車道流率與速率關係

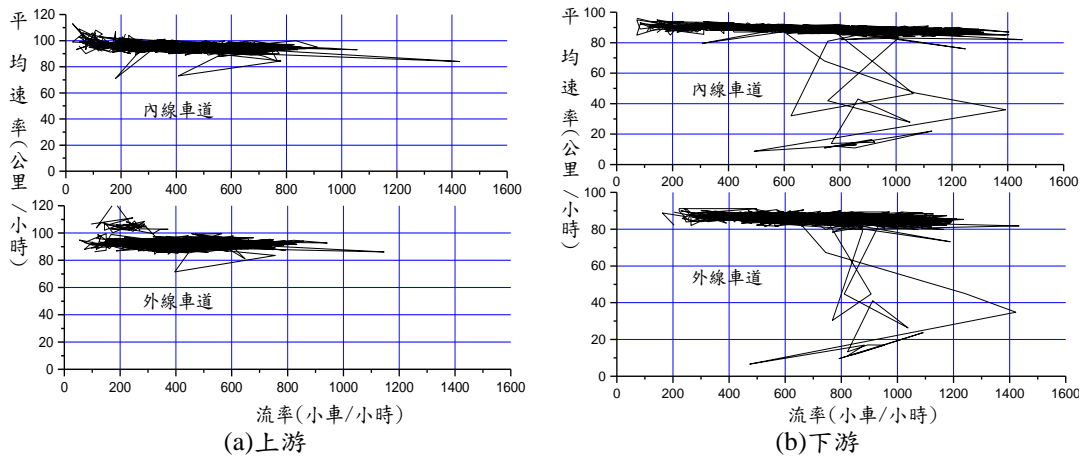


圖 12 宜蘭北上進口匝道匯流區主線各車道流率與速率關係

2. 進口匝道自由速率及流率

宜蘭及羅東北上進口匝道的自由速率大約為 70~75 公里/小時，流率超過 700 及 800 小車/小時就可能進入壅塞狀況（圖 13(a)）。

石碇北上進口匝道自由速率不到 35 公里/小時，而於流率不超過 1,200 小車/小時之情況下，平均速率常維持在 25 公里/小時到 35 公里/小時之間（圖 13(b)）。

石碇北上進口匝道自由速率與宜蘭及羅東差異如此大，推測一方面因匯入長度不足外，另一方面是併入主線過程隨即要進入石碇隧道，故車速不快。

雪隧以南的宜蘭及羅東北上進口匝道長度相對較長外，其進入主線過程均為高架路段，視野相當開闊，故平均自由速率相對明顯較高。

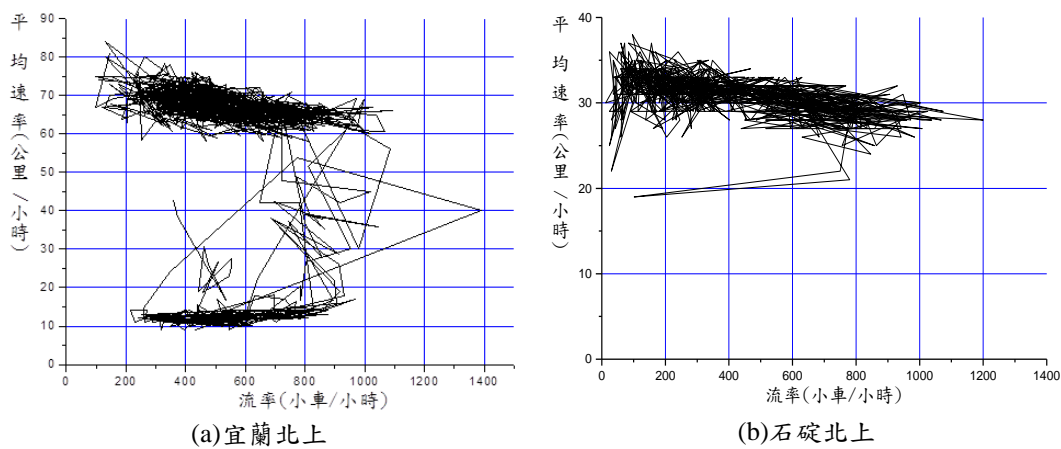
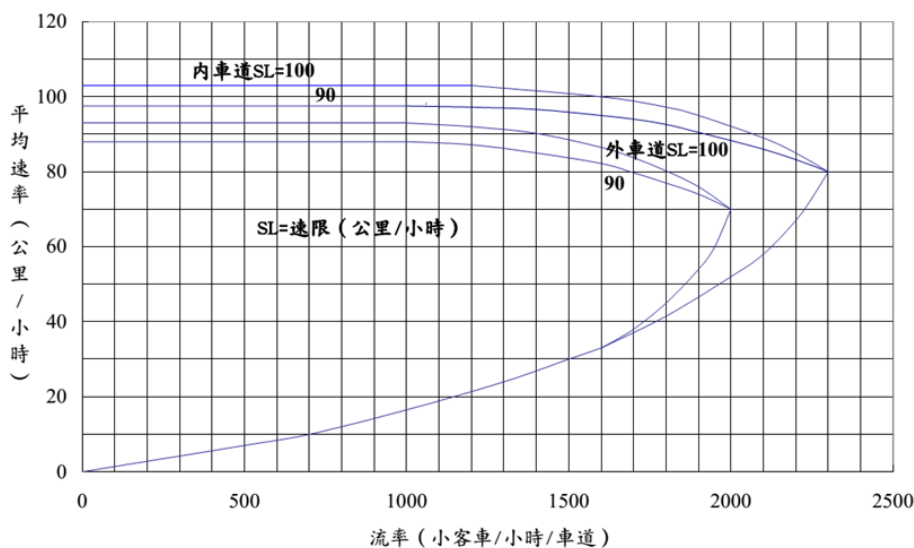


圖 13 進口匝道流率與速率之關係

七、匝道路段對主線交通效率之影響

2011 年臺灣公路容量手冊（交通部運輸研究所，2011）指出，在沒有匝道、隧道或坡度影響之情況下，內車道平均自由速率在 100 公里/小時左右，車流未進入壅塞之前可承載約 2,300 小車/小時/車道之流率；外車道平均自由速率在 90 公里/小時左右，車流未進入壅塞之前可承載約 2,000 小車/小時/車道之流率，如圖 14 所示。

一般而言，平均自由速率較高的公路會有較高之交通功能。但是從圖 7(a)及圖 8(a)可知，竹山及大雅匯流路段上游主線內車道之平均速率雖高於 100 公里/小時，其能承載之 5 分鐘流率難以超過 2,000 小車/小時，且通常 5 分鐘流率超過 1,600 小車/小時之後，車流就很可能進入壅塞狀況。



資料來源：交通部運輸研究所，(2011)。

圖 14 高速公路平坦路段在基本狀況下速率與流率之關係

匯流區上游主線外車道的交通功能惡化程度更高。圖 7(c)及圖 8(c)顯示外車道之 5 分鐘流率超過 600 小車/小時之後就有進入壅塞狀況之可能，而穩定車流之 5 分鐘流率很難超過 1,200 小車/小時。事實上在進入壅塞狀況之前，竹山北上匯流區上游外車道的 5 分鐘流率很難超過 800 小車/小時。這現象是因為外車道車流有移向中線或內線車道之傾向，而且主線與匝道的衝突也造成交通功能降低。

為了比較同一高速公路匝道路段的影響，本研究進一步探討國 1 北上 170.52k 地點的流率與速率關係，如圖 15 所示。該地點約在大雅交流道下游 3.5 公里、豐原交流道上游 2.5 公里處，與匯流區相較，該地點受匝道的影響微弱。

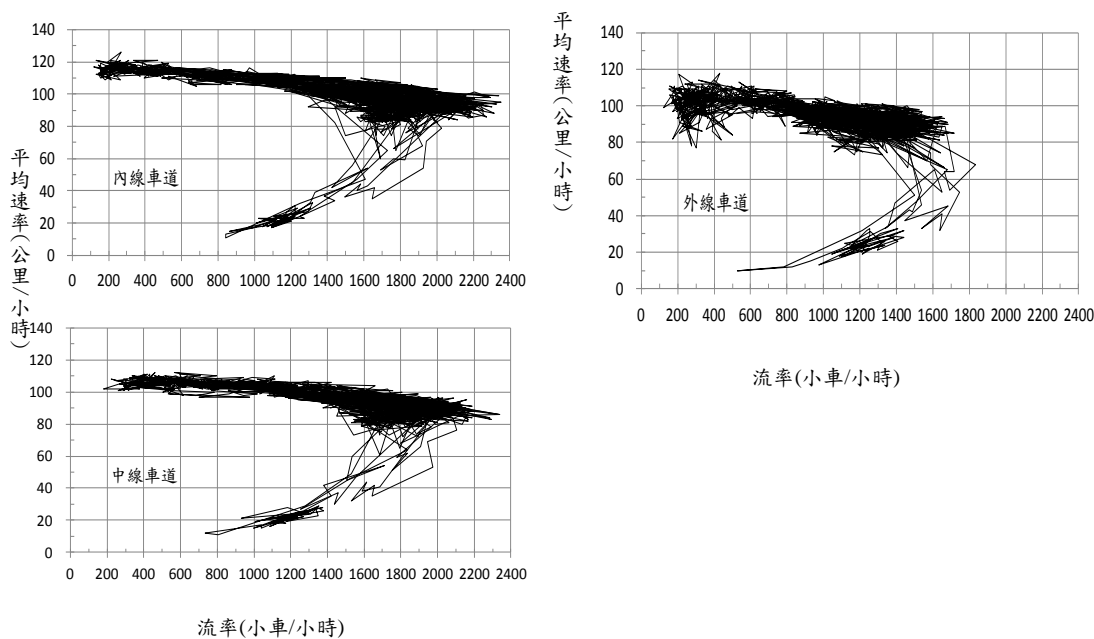


圖 15 大雅北上主線 170.52k 各車道流率與速率關係

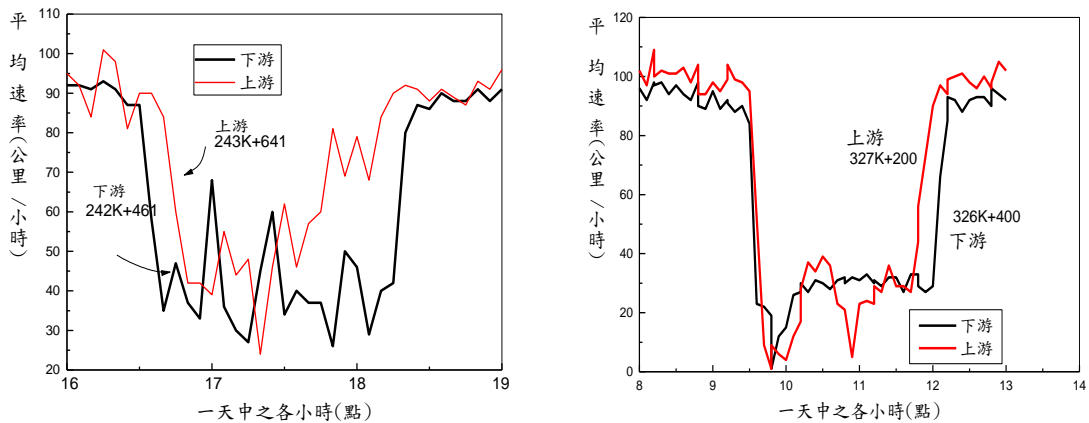
從圖 15 可知，國 1 北上 170.52k 處內車道之 5 分鐘流率常可維持在 2,000~2,300 小車/小時之範圍而不會導致車流進入壅塞狀況。相對而言，圖 8(a)顯示大雅北上匯流區上游主線內車道之 5 分鐘流率很難超過 2,000 小車/小時而不造成壅塞。圖 15 亦顯示 170.52k 處外車道之 5 分鐘流率在 1,400~1,700 小車/小時之範圍內才會產生壅塞狀況。但圖 8(c)則顯示匯流區上游主線外車道之 5 分鐘流率在 600~1,200 小車/小時之範圍內就經常產生壅塞狀況。

上述匯流區交通功能特別低之原因之一為幾何設計不佳。例如進口匝道的幾何設計若不能讓匝道車輛在匯入點能以高速匯入主線（與主線車道之速率相差在 10 公里/小時以內），則主線與匝道車輛會有嚴重的衝突而顯著的影響交通功能。雖然高速公路於設計階段均必須符合公路設計之相關規範，但是設計規範均屬於「最低要求」，若要設計較有效率或較為安全的公路，工程師必須要有較為遠見的規劃設計理念。

目前臺灣高速公路進口匝道之加速車道長度一般偏低，適當增加這些車道的長度，使匯入車流有足夠空間加速以減少衝突，因而改善匝道路段之交通功能，建議主管單位納入此項課題於可行性評估、工程設計或改善規劃中。

八、匯流區下游主線進入壅塞狀況期間及前後之車流狀況

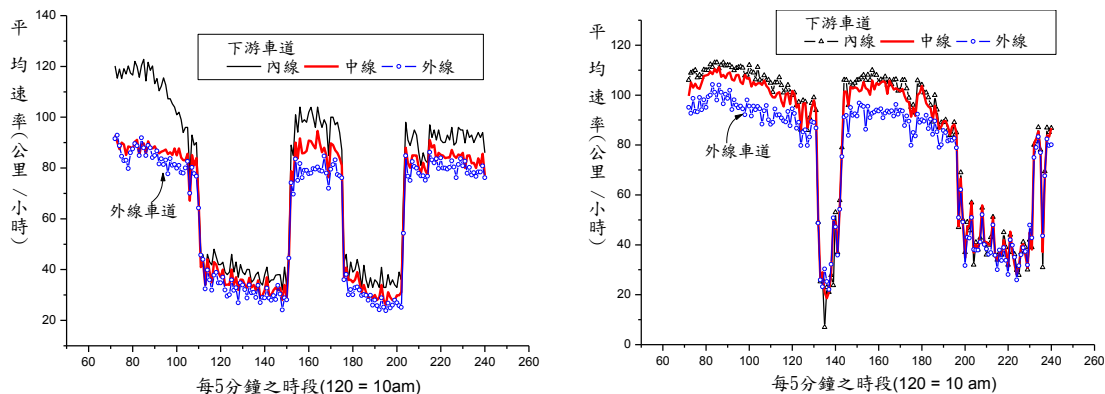
偵測器資料顯示，進口匝道下游主線會先進入壅塞狀況，然後上游才會隨著壅塞（圖 16），以及外車道進入壅塞狀況後，其他車道大約 5 分鐘內也隨著進入壅塞（圖 17）。因為匯流區中車輛之間的嚴重衝突發生在主線外車道，故本研究探討進口匝道下游外車道進入壅塞狀況及前後之車流特性。



(a)竹山北上(2014/2/2)

(b)臺南北上(2014/2/1)

圖 16 進口匝道匯流區上下游主線速率隨時間的變化



(a)大雅北上(2014/2/1)

(b)永康南下(2014/2/1)

圖 17 進口匝道下游主線各車道速率隨時間的變化

以竹山匯流區外線車道流率及速率隨時間而變化之資料為例(圖 18), 在 2014 年 2 月 2 日 16:30 時速率在 5 分鐘內從 72.4 公里/小時急速降到 42.2 公里/小時。進入壅塞之前 5 分鐘前及前 10 分鐘前的流率各為 1,662 及 1,794 小車/小時。壅塞之後 5 分鐘及 10 分鐘的流率各為 1,806 及 1,890 小車/小時。壅塞開始之 5 分鐘內的流率為 1,614 小車/小時。因此壅塞發生時的車流密度可估計為 1,614 小車/小時 ÷ 42.2 公里/小時 = 38.2 小車/公里。根據這手續, 各分析匯流區壅塞期間及其前後 0 ~ 5 分鐘內及 5 ~ 10 分鐘內的車流狀況估計值如表 3 所示。

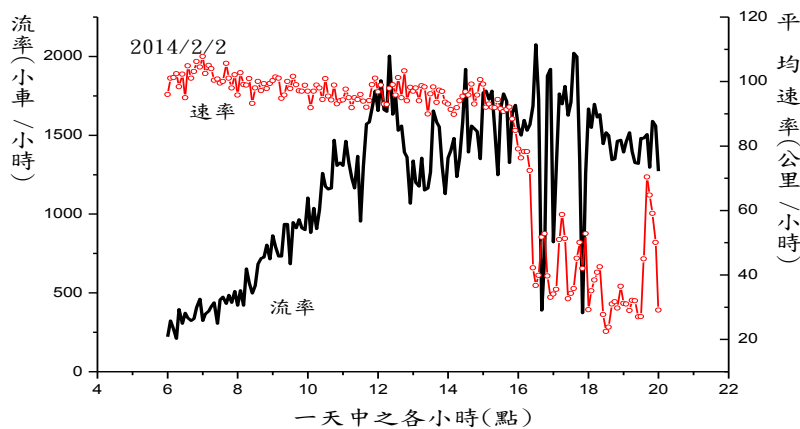


圖 18 竹山北上進口匝道下游外線車道流率與速率隨時間的變化

從表 3 可知在壅塞前 0~5 分鐘, 外線車道之車流密度常在 18 小車/公里左右(表中之 D(-1)), 壅塞開始 5 分鐘內的密度(表中之 D(0)) 則顯著增加。此外壅塞開始之 5 分鐘, 外線車道的流率雖然有大的變異性, 但壅塞情況皆發生在密度超過 21 小車/公里之時候, 或密度在 5 分鐘內從大約 18 小車/公里增加 4 小車/公里以上。

另壅塞前 0~5 分鐘, 外線車道之流率平均不到 1,500 小車/小時(各匯流區 Q(-1) 之平均), 壅塞開始之 5 分鐘內, 流率也經常低於 1,700 小車/小時(各匯流區 Q(0) 之平均), 換言之, 匝道上游外線車道流率加上進口匝道之流率在 1,700 小車/小時以下時, 就很可能進入壅塞狀況。

表 3 壅塞開始時段中及其前後 5 及 10 分鐘之車流狀況

範例		壅塞前				壅塞開始			壅塞之後			
		Q(-2)	D(-2)	Q(-1)	D(-1)	QT(0)	Q(0)	D(0)	Q(1)	D(1)	Q(2)	D(2)
竹山	1	1530	17.5	1470	16.8	5712	1554	26.7	1602	46.0	1716	36.6
	2	1794	22.9	1662	23.0	5124	1614	38.2	1806	49.2	1890	47.4
	3	1482	17.4	1236	13.7	4530	1356	25.6	1590	45.3	1920	38.6
臺南	1	1158	12.9	1308	15.6	1710	630	27.5	642	29.0	372	19.6
	2	1194	13.7	1482	18.3	5526	1668	27.9	1578	45.9	1308	37.3
	3	1206	14.0	1392	19.0	5142	1710	29.9	1656	35.5	1194	35.3
	4	1170	15.3	1188	17.5	4200	1188	21.4	1410	32.8	1542	35.5
永康	1	1356	16.2	1446	19.5	4662	1644	32.9	1284	31.5	1536	26.1
	2	1266	14.2	1404	16.2	3576	1074	22.1	756	29.2	306	13.2
	3	1212	14.7	1524	19.3	4842	1608	31.7	1596	25.7	1482	30.2
	4	1326	16.1	1326	16.4	1662	660	25.2	330	20.4	150	12.6
大雅	1	1350	18.6	1476	19.6	5436	1728	40.3	1896	41.1	1830	48.3
	2	1302	16.7	1296	16.9	5826	1524	23.8	1872	41.0	1866	42.4
	3	1404	18.3	1692	22.2	5334	1800	50.0	1830	48.2	1758	58.4
	4	1350	17.4	1350	17.1	5868	1638	25.5	1926	48.2	1956	52.4
	5	1452	19.3	1254	15.3	5580	1704	26.2	1632	24.0	1944	38.7
	6	1590	22.7	1440	19.0	6138	1992	33.4	1962	44.4	1806	45.4
	7	1326	15.9	1452	18.1	5292	1584	23.0	1830	40.8	1752	42.4
	8	1566	19.7	1476	19.6	4830	1638	36.3	1626	46.6	1680	52.7
	9	1398	19.0	1422	18.9	6072	1878	27.9	1806	38.3	1860	56.2
石碇	1	1386	20.1	1254	17.4	3096	1590	26.8	1242	18.8	1692	30.5
	2	1284	18.4	1188	18.0	2952	1434	23.6	1422	23.5	1656	30.3
	3	828	10.8	1260	18.3	3438	1704	32.8	1632	36.3	1518	32.9
	4	1338	20.2	1242	18.0	2694	1434	22.7	1428	23.7	1194	18.9

QT(0)：壅塞開始 5 分鐘內之下游總流率(小車/小時)；
 Q(j)：下游外線車道第 j 個 5 分鐘流率(小車/小時)；
 D(j)：相對應於第 j 個 5 分鐘車流之密度(小車/公里)；
 j = 0：當壅塞開始的時段(interval)；
 j = -1：當壅塞開始(j = 0)之前一時段；
 j = -2：當壅塞開始(j = 0)之前第二個時段；
 j = 1：當壅塞開始(j = 0)後的第一個時段；
 j = 2：當壅塞開始(j = 0)後的第二個時段。

九、結論

本研究利用高速公路布設之偵測器資料探討主線與匝道匯流路段之車流特性，重要分析結果說明如下：

1. 一般而言，國 1、國 3 匯流區外線車道使用率遠低於內線及中線車道。國 5 車道使用較均勻，而於車流量大約低於 1,000 小車/小時的時候，外車道使用率較內車道高。
2. 匯流區主線車道常在低流率時就進入壅塞狀況，如國 1 大雅匯流區下游主線內、中線車道流率超過 1,600 小車/小時即常進入壅塞，下游壅塞所造成之衝擊波更導致上游內、中線車道流率於 1,200 小車/小時即會發生壅塞。而國 5 發生壅塞之流率更低。
3. 進口匝道匯流區主線的交通功能受匝道之存在而顯著的降低。以大雅北上匯流區為例，匯流區下游 2~3 公里路段常可維持在 2,000~2,300 小車/小時而沒有壅塞狀況，匯流區之流率則難以維持在 1,900 小車/小時以上，且外車道的交通功能比內車道更不理想，原因之一為幾何設計不理想所致（加速車道長度不足）。
4. 壅塞前 0~5 分鐘，外線車道之車流密度常在 18 小車/公里左右；壅塞開始之 5 分鐘，流率雖然有大的變異性，但壅塞情況皆發生在密度超過 21 小車/公里，或密度在 5 分鐘內從大約 18 小車/公里增加 4 小車/公里以上的時候。
5. 壅塞前 0~5 分鐘，外線車道之流率平均不到 1,500 小車/小時；壅塞開始之 5 分鐘，流率也經常低於 1,700 小車/小時。換言之，匝道上游外線車道流率加上進口匝道之流率在 1,700 小車/小時以下時，就很可能進入壅塞狀況。
6. 本研究探討的匝道資料還相當有限，建議未來研究能針對所有的高速公路的匝道特性進一步了解，以作為交通管理與控制應用之基礎。
7. 匝道路段車流特性尚可就幾何設計之影響、該路段不同地點車流特性變化、未進入壅塞前車流運作最差的地點（臨界點）等項目及相關交通運作績效之關係進行基礎資料之蒐集與分析研究，除可逐步完善臺灣公路容量手冊所提供之分析方法，未來亦可協助檢討與建立本土的匝道設計規範。

參考文獻

- 交通部運輸研究所(1996)，高速公路上匝道路段交通特性資料蒐集。
- 交通部運輸研究所(1999)，都市快速道路與高速公路進口匝道車流特性之研究。
- 交通部運輸研究所(2011)，2011 年臺灣公路容量手冊。
- 交通部運輸研究所(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)。

- NCHRP(2012), Design Guidance for Freeway Mainline Ramp Terminals, NCHRP Report 730, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Elefteriadou, L., Roess, R. P., and McShane, W. R. (1995), “Probabilistic Nature of Breakdown at Freeway Merge Junctions,” *Transportation Research Record 1484*, pp.80 – 89, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- TRB(2010), *Highway Capacity Manual*, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Kim, S. G., Park, C. H., and Chon, K. S. (1997), “An Analysis of Traffic Characteristics at Freeway Merging Section,” *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 2, No. 3, pp.881-892.
- Roess, R. P., and Ulerio, J. M. (1993), Capacity of Ramp-Freeway Junctions, Final Report, NCHRP Project 3-37, Polytechnic University, Brooklyn, N.Y.
- Sarvi, M., and Kuwahara, M. (1999), “Comparative Study on Evaluation of Merging Capacity in Tokyo Metropolitan Expressway,” *Seisan-Kenkyu* , Vol.51, No.2, pp. 83 -86.
- Sarvi, M., Kuwahara, M., and Ceder, A. (2007), “Observing Freeway Ramp Merging Phenomena in Congested Traffic,” *Journal of Advanced Transportation*, Vol.41, No.2, pp.145-170.

(收稿 105.03.09，第一次修改 105.05.02，定稿 105.05.11)

