

國立交通大學  
運輸與物流管理學系

碩士論文

高速公路入口匝道匯流區之隨機容量分析

A Stochastic Capacity Analysis in Freeway Merge Areas

研究生：廖晉毅

指導教授：黃家耀

中華民國一〇九年七月

高速公路入口匝道匯流區之隨機容量分析  
A Stochastic Capacity Analysis in Freeway Merge Areas

研究生：廖晉毅      Student：Chin-Yi Liao  
指導教授：黃家耀      Advisor：Ka Io Wong

國立交通大學  
運輸與物流管理學系  
碩士論文

A Thesis  
Submitted to Department of Transportation and Logistics Management  
College of Management  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master  
in  
Traffic and Transportation

July 2020

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 109 年七月

**國立交通大學博碩士學位論文電子檔著作權授權書**

(請裝訂於紙本論文書名頁之次頁For authors to bind after the title page)

本授權書所授權之學位論文，為本人於 國立交通大學 運輸與物流管理學系 交通運輸 組，  
108 學年度第 二 學期取得 碩士 學位之論文。

論文題目：高速公路入口匝道匯流區之隨機容量分析  
指導教授：黃家耀

本人授權將本著作以非專屬、無償授權國立交通大學、台灣聯合大學系統圖書館及國家圖書館。

論文上載網路公開之範圍及時間：	
中英文摘要	必需公開
論文全文於本校及台灣聯合大學系統區域網路	■ 中華民國 114 年 8 月 24 日公開
論文全文於校外網際網路及國家圖書館	■ 中華民國 114 年 8 月 24 日公開

說明：基於推動「資源共享、互惠合作」之理念與回饋社會及學術研究之目的，得不限地域、時間與次數，以紙本、光碟或數位化等各種方式收錄、重製與利用；於著作權法合理使用範圍內，讀者得進行線上檢索、閱覽、下載或列印。

授權人： 廖石毅 (親筆簽名)

中華民國 109 年 08 月 25 日

# 國立交通大學

## 論文口試委員會審定書

本校 運輸與物流管理學系交通運輸碩士班 廖晉毅 君

所提論文 高速公路入口匝道匯流區之隨機容量分析

合於碩士資格水準、業經本委員會評審認可。

口試委員：胡守任

邱新銘

黃家維

指導教授：

黃家維

系主任：

黃明居

中華民國 109 年 7 月 30 日

# 高速公路入口匝道匯流區之隨機容量分析

學生：廖晉毅

指導教授：黃家耀

國立交通大學運輸與物流管理學系碩士班

## 摘要

高速公路之車流運行狀況，常因入口匝道匯入主線時，會有許多的車道變換行為發生，進而導致入口匯流區經常為高速公路上發生壅塞之交通瓶頸區，其通過流率之最大值可視為該設施之容量。傳統的分析方法將容量訂定為一固定值，然而，近年歐美國家有不少的研究指出，若以一天交通壅塞發生前之最大通過流率做為容量值，每天的容量值都會稍有不同並具有隨機性，可稱為隨機容量（stochastic capacity）。

本研究探討幾何型態或外在環境等因素對於高速公路匯流區容量之影響，而因容量具有隨機性，應採用隨機容量的分析方法。本研究運用臺灣高速公路國道1號及國道3號之偵測器資料進行分析，考慮的影響因素包括壅塞時段、天氣、主線速限、主線車道數、開放路肩、入口匝道流率，並透過韋伯分布之參數校估，進而比對在不同情境下容量之隨機分布，得出各種情境下之容量參考值。研究發現在平日早上、平日下午、假日之容量有明顯差異，推測通勤旅次為主的時段容量較大、休閒旅次為主的時間容量較小，而三個時段的容量值的大小順序會隨地點而有所不同。以主線三車道的匯流區而言，雨天的容量比晴天的容量低 250 車輛/小時；開放路肩之能使匯流區的容量提高 700 ~1,000 車輛/小時；當進口匝道流率越高，在三車道匯流區之容量值會越高；在匯流區上游總流率固定之情形，當匝道流率越高，其車流崩潰機率也會越高。另外，研究中也發現與直觀不符的結論，包括主線速限對於容量值無顯著影響，主線四車道匯流區之車道容量值比主線三車道多出 150 車輛/小時/車道，可能是符合分析條件地點的可用資料有限，比較分析尚不夠全面所導致。本研究結果將能夠得出各種情境下之容量參考值，可供政府單位於匯流區在管制上作為容量參考依據，使高速公路於匯流區之運作更有效率。

關鍵詞：高速公路、匯流影響區、車流崩潰、隨機容量、韋伯分布

## **A Stochastic Capacity Analysis in Freeway Merge Areas**

Student: Chin-Yi Liao

Advisor: Ka Io Wong

Department of Transportation and Logistics Management

College of Management

National Chiao Tung University

### **Abstract**

The bottleneck of a freeway usually happens at the on-ramp merge areas when the incoming flows from the upstream and on ramp exceeds the capacity of the ramp merge area. The maximum flow rate that can pass through a facility can be seen as the capacity of the facility. The traditional analysis sets the capacity as a fixed value. However, recent studies found that such maximum flow rates observed in each day could be quite different, subject to stochasticity, instead of a deterministic value. This is known as the stochastic capacity in traffic flow. This study investigates the stochastic capacity of the ramp merge areas of the freeway system. The aim is to find out the effects of geometric and external environments on the capacity of merging areas. We analyze the maximum pre-breakdown flow rates for the probability functions of traffic breakdown using Product Limit Method and Weibull distribution method. Using the vehicle detector data of National Freeway No. 1 and No. 3, we explore the effects of congestion periods, raining, shoulder lane opening, and on-ramp flow rate on the capacity. It is found that the capacity is significantly different in the weekday mornings, weekday afternoons, and holidays, and the order of the capacity values of the three time-periods varies by locations. The capacity during rainy days is lower than the capacity on sunny days by 250 veh/hr at three-lane sites. Opening shoulder lane can increase the capacity by 700 ~1,000 veh/hr. When the on-ramp flow rate is higher, the capacity value will be higher. Higher the ramp flows result in a higher traffic breakdown probability. The results of this study will be able to obtain capacity values in various scenarios in addition to the geometric parameters, which can be used as a reference by the freeway traffic operators in evaluating their traffic control and operation strategies for the freeway ramp merge areas.

**Keywords: Freeway, Merge influence area, Traffic breakdown, Stochastic capacity, Weibull distribution**

## 誌謝

在交大的攻讀碩士的這兩年時光過得相當快，從最初對於論文題目毫無頭緒，一直到訂下題目與目標，熬夜趕進度的日子，最終終於完成論文與通過口試，這段旅程上要感謝許多人。謝謝黃家耀老師在這兩年的指導與協助，研究過程中曾遇到許多困難，很感謝老師為我提供意見與討論執行細節，也謝謝胡守任老師與邱裕鈞老師願意擔任口試委員，給予本論文建議與指教。

這兩年在KI Lab也經歷了許多大大小小的事情，不論是一起趕計畫或是課業的其中期末報告等等。謝謝從大學時期就很常與我當隊友的人瑋，在課業報告你的反應永遠都是最快的，平常也很常跟我聊天解悶。謝謝哲伸這兩年的陪伴，有時候遇到一些電腦設備相關的問題都麻煩你來替我解惑。謝謝威瑜、祐德與亶理，在後面幾個月你們都很幫忙計畫案的事情，讓我能專心完成這份論文。謝謝陪我一起趕論文的雲晨，在第二年與你討論計畫案的過程中很能感受到你對研究的熱誠，也感謝你在論文完成的最後關頭與我互相打氣與努力。

最後，要感謝我的家人給我的支持，因為他們的鼓勵與關心，讓我在這六年在交大晉升學業的過程中能夠專心致志，未來踏入職場後也希望自己能夠繼續努力奮鬥。

廖晉毅 謹誌

2020年8月

# 目錄

摘要.....	i
誌謝.....	iii
圖目錄.....	v
表目錄.....	vi
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究範圍及分析對象.....	2
1.4 研究架構.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 容量隨機性分析.....	5
2.2 車流崩潰之定義.....	6
2.3 匝道匯流區容量的影響因素.....	6
2.4 文獻回顧重點與研究缺口.....	7
第三章 研究方法.....	9
3.1 車流崩潰之判斷.....	9
3.2 容量隨機性分布.....	12
第四章 數值分析.....	13
4.1 調查地點選定.....	13
4.2 容量隨機性分布.....	16
4.3 外在因素對容量隨機性分布之影響.....	22
第五章 結論與建議.....	33
5.1 結論.....	33
5.2 後續研究之建議.....	34
參考文獻.....	36

# 圖目錄

圖 1-1 偵測器之位置分布示意圖 .....	3
圖 1-2 研究流程圖 .....	4
圖 3-1 流率與速率之時間序列圖 .....	10
圖 3-2 流率-速率分佈圖 .....	10
圖 3-3 車流崩潰判斷流程 .....	11
圖 4-1 檢核流率守恆之偵測器位置 .....	15
圖 4-2 兩次性壅塞現象之流率、速率時間圖 .....	17
圖 4-3 以極限乘積法與韋伯分布所得之車流崩潰機率累積分布函數 .....	18
圖 4-4 各地點之車流崩潰累積分布圖 .....	19
圖 4-5 晴天、雨天於不同壅塞時段之車流崩潰機率累積分布圖 .....	24
圖 4-6 各主線速限於不同壅塞時段之車流崩潰機率累積分布圖 .....	26
圖 4-7 三車道與四車道之車流崩潰機率累積分布圖 .....	27
圖 4-8 有無開放路肩於不同壅塞時段之車流崩潰機率累積分布圖 .....	28
圖 4-9 不同匝道流率之車流崩潰機率累積分布圖（匯流區） .....	30
圖 4-10 不同匝道流率之車流崩潰機率累積分布圖（匯流區上游） .....	31

# 表目錄

表 4-1 重現性壅塞匯流區之流量守恆檢核結果 .....	15
表 4-2 符合分析條件之匯流區 .....	16
表 4-3 國道 3 號南下安坑交流道匯流區車流崩潰相關資訊表 (節錄) .....	17
表 4-4 各地點韋伯分布參數校估結果與容量值 .....	21
表 4-5 容量大小於不同壅塞時間之比對 .....	23
表 4-6 不同天氣之韋伯分布參數校估結果與容量值 .....	24
表 4-7 不同主線速限之韋伯分布參數校估結果與容量值 .....	26
表 4-8 不同車道數之韋伯分布參數校估結果與容量值 .....	27
表 4-9 有無開放路肩之韋伯分布參數校估結果與容量值 .....	29
表 4-10 不同匝道流率之韋伯分布參數校估結果與容量值 (匯流區) .....	30
表 4-11 不同匝道流率之韋伯分布參數校估結果與容量值 (匯流區上游) .....	31
表 4-12 各情境之結論統整表 .....	32

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

高速公路設施之容量無法負荷過大的流率，當流率超出設施容量時，會使原先順暢之車流進入不穩定之壅塞狀態，此時之車流速率會於短時間內急劇下降，且會維持低速率一段時間，待壅塞之車流紓解完畢後才會回到原先順暢之狀態，此現象被稱為車流崩潰（traffic breakdown）。在 2011 年臺灣公路容量手冊中，提及高速公路內側車道之容量在基本情況下為一定值—2,300 小車/小時/車道，該定義係指經常能持續最少 15 分鐘之最大流率的期望值。近年來國外有許多研究透過調查高速公路之壅塞現象，進而探討高速公路之容量，而這些研究文獻中均將交通壅塞前之最大通過流率，定義為匯流區之容量值。然而，於不同地點或不同日期所發生之交通壅塞，其壅塞前最大通過流率並非一定值，該值可能會受到道路幾何、運行管制、天氣所影響。若我們以壅塞前之最大通過流率定義為容量值，可以發現每次所得之容量值有所不同，由多次的交通壅塞事件可以得到大量的容量值，這些數據會成為一隨機分布，又稱「容量隨機性」（stochastic capacity）。透過這些數據我們可以確認在各個流率下會發生壅塞之機率為何。

前述提及以壅塞前最大通過流率作為容量依據之「運行容量」（operational capacity），可適用於交通管制上，能夠掌握何時需要控制匯入高速公路之流量。而運行容量與容量手冊提及定值之設計容量（design capacity）相比，從提升高速公路之運行效率，以及減少壅塞的角度上考量，運行容量應為交通管理者較為關心之議題。

在高速公路主線與入口匝道之匯流區域，由於匯入高速公路主線之流率增加，且入口匝道之車輛為了進入高速公路主線，以及主線之車輛為了有更好的運行效率，會有許多的車道變換行為發生，進而導致入口匯流區經常為高速公路發生壅塞之交通瓶頸區。以交通管理之角度，為了使高速公路之運行效率提升，會希望使主線之車流維持順暢狀態，避免發生車流崩潰而導致速率驟降的現象，但容量手冊所訂定之設計容量，往往會高於實際發生車流崩潰時之最大流率值，故該固定值不利於作為控制主線流率之依據。若能透過容量隨機性之研究取得各個流率下會發生壅塞之機率，並以界定一特定機率作為容量值，就能使管理者在運行管制上更有依據。然而，目前國內臺灣公路容量手冊之容量僅依據道路幾何給定容量之固定值，在高速公路容量分析上較少有與隨機性相關之實證研究。

## 1.2 研究目的

本研究之目的為探討高速公路於匯流區容量之隨機性，以及該隨機性會受到何種外在因素影響，目的說明如下：

1. 建立高速公路匯流區之隨機性容量模型；
2. 探討幾何形態因素（如車道數與路肩開放）對匯流區之容量及運作績效產生的影響；
3. 探討交通與環境因素（如早上尖峰、下午尖峰、平假日、天氣、匝道流率等）對匯流區之容量及運作績效產生的影響；

研究結果將能夠得出各種情境及因素下之容量參考值，可以提供政府單位對於高速公路匝道進口之設計及管理方式之參考依據，使高速公路於匯流區之運作更有效率。

## 1.3 研究範圍及分析對象

本研究的分析對象為臺灣高速公路國道 1 號及國道 3 號的獨立入口匝道匯流區，為了取得足夠的車流崩潰事件樣本，該匝道匯流區除了需具有重現性壅塞之現象，且需有足夠之有效偵測器資料可用。偵測器的位置分布如圖 1-1 所示，包括匝道入口（R）、匯流區上游之主線（U）、匯流區（B），以及匯流區結束之下游（D）共四位置。其中匯流區結束之下游之偵測器，用途為確認該匯流區為自然壅塞，即為車流崩潰之現象源自匯流區容量不足，而非下游車流回堵產生之壅塞。另外，偵測器之資料須進行有效性檢查，確認資料來源無大誤差，可反映真實情況，常用的檢核方式包括上下游偵測器的流量守恆、流率—密度—速率關係確認等。

國道 1 號高速公路共有 160 處之入口匝道、國道 3 號共有 154 處之入口匝道，本研究將透過逐一檢視的方式，篩選國內符合分析的地點並進行分析。

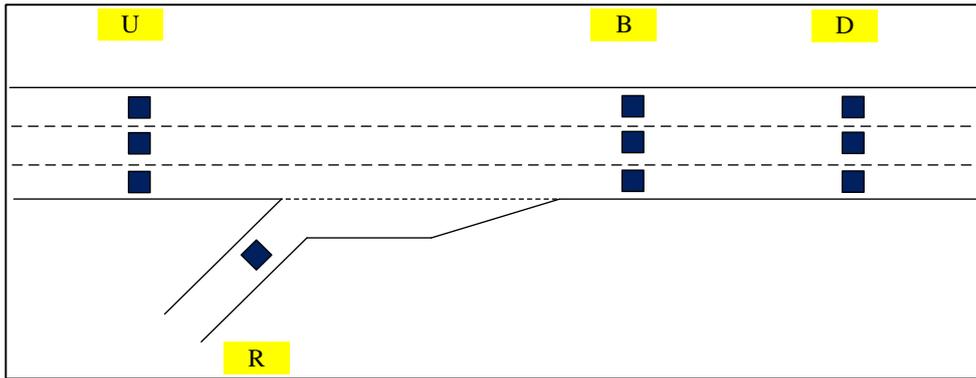


圖 1-1 偵測器之位置分布示意圖

#### 1.4 研究架構

本研究流程如圖1-2 所示，包含前述所提之研究背景、研究目的，以及有關容量隨機性分析與高速公路匯流區相關之文獻回顧；研究方法將說明車流崩潰之判斷方式，以及容量隨機性之分析方法；在資料蒐集的部份為確認臺灣國道 1 號與國道 3 號高速公路中適合進行容量隨機性分析之地點，並收集車流崩潰相關之資訊；實證分析的部份為透過參數之校估得出各分析地點其隨機容量分布，以及探討幾何型態與環境外在因素對隨機容量分布之影響，並於最後給出此研究之結論與建議。

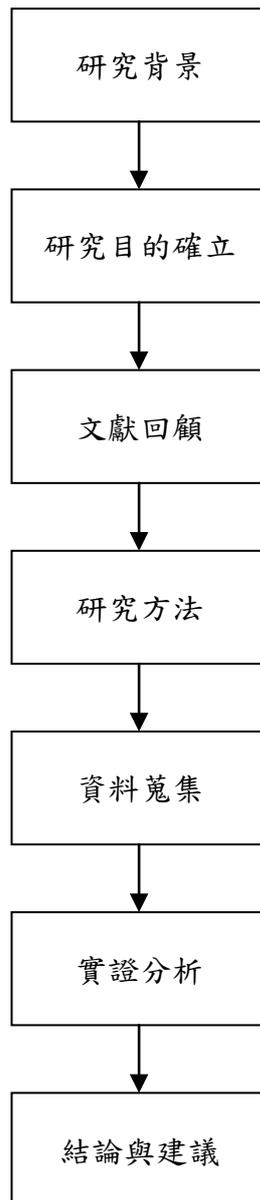


圖 1-2 研究流程圖

## 第二章 文獻回顧

進行容量隨機性分析，需充分了解車流崩潰其相關車流特性資訊之界定方式，以及高速公路於匯流區之車流特性對容量隨機性之影響。本章節將針對過去有關容量隨機性分析、車流崩潰之定義，以及匯流區之研究進行文獻回顧。

### 2.1 容量隨機性分析

本節為回顧過去有關高速公路容量隨機性分析之研究，主要之分析方法為極限乘積法與韋伯分布，透過容量隨機性分析可以有效了解各容量下其車流崩潰發生之機率為何。

Brilon 等人（2005）為確認容量隨機性之概念，透過高速公路之偵測器資料進行實證分析，並利用極限乘積方法（Product Limit Method），呈現並說明在每個流率下車流崩潰之機率分布，該方法原先用於可靠性工程與存活分析，顯示各個時間的系統失敗或死亡之概率，套用於容量分析時，則將發生車流崩潰之流率做為系統運作失敗之標記。該文獻指出車流崩潰之機率分布會因高速公路之幾何型態不同而有所差異，最終建議以車流崩潰機率 90% 之流率作為運行容量之參考值，也確認透過極限乘積方法所得之隨機分布，對未來交通工程上解釋容量之定義有很大的潛力與幫助。

Dehman 與 Drakopoulos（2016）透過建立韋伯分布（Weibull distribution）進行容量隨機性之分析，研究匯流區之車流對車流崩潰之影響。該研究針對三個入口匯流區內，各地點車流崩潰前匯流區的最大流率，以及車流崩潰後匯流區的紓解流率，分別校估韋伯分布之參數，得出三個地點之容量統計分布最終得到車流崩潰前的最大流率最高僅達到 4,200 小車/小時，此結果指出美國高速公路容量手冊所給定匯流區之最大通行流率（4,600 小車/小時）過於樂觀。

Heshami 等人（2019）年透過隨機性容量之分析，確認天氣因素對於隨機容量是否會有影響，該研究取得大量之壅塞前最大通過流率值，並將這些資料針對不同的天氣狀況分為晴天、起霧，以及下雪三群，進而校估出各群數據之韋伯分布參數，最終確定在晴天時之容量值會比起霧時之容量為高，而下雪時的容量值最低。

Asgharzadeh 等人（2020）透過隨機性容量之分析，嘗試量化道路幾何與運行情形對匯流區之容量的影響，其幾何因素為主線車道數，運行情形因素則為自由車流速率、匝道流率，以及是否有匝道儀控。最終該研究以 85% 之車流崩潰機率下之最大通過流率作為容量基準值，得出主線為三車道時，容量值為

2,043 車輛/小時/車道，四車道之容量值為 1,952 車輛/小時/車道，可得知主線車道數較多時，每車道之容量會較低；在有匝道儀控的匯流區，其容量會高出 150~300 車輛/小時/車道，而在調查的四個地點中，有兩個地點發現匝道流率越高時，發生車流崩潰之機率會越高。

## 2.2 車流崩潰之定義

Chung 等人（2007）針對三個自然壅塞之交通瓶頸區，探討密度與紓解流率之關聯性。該研究透過車輛偵測器之資料，確認車輛密度上升時會導致紓解流率下降，並證實密度上升會使車流崩潰發生。

Kondyli 等人（2013）針對五個入口匯流區，透過偵測器之資料，建構一機率模式以預測車流崩潰前之最大流率。該研究提出車流崩潰之定義為速度驟降或佔有率上升，並維持低速率或高佔有率一段時間以上。為有效擷取車流崩潰前之最大流率，本研究提出三個步驟之判斷機制來確認每個時間點是否有車流崩潰之發生。該研究透過數次車流崩潰之統計數據進行存活分析，最終成功建立車流崩潰之機率模型，且可透過該模型有效地獲得運行容量，該研究期望未來交通管理能夠有效使用該模型，使高速公路之運行更有效率。

## 2.3 匝道匯流區容量的影響因素

國內過去文獻中，歐陽恬恬等人（2016）針對匯流區車流特性進行研究，該研究透過車輛偵測器之資料得出，入口匯流區下游 2~3 公里路段之流率常可維持在 2,000~2,300 小車/小時/車道，且沒有壅塞情況發生，但於匯流區之流率卻難以維持在 1,900 小車/小時/車道以上，且外車道的車輛紓解情形比內車道更不理想，由此可看出匯流區常成為臺灣高速公路之瓶頸。

Elefteriadou 等人（1995）為了充分了解車流崩潰發生之現象，於入口匝道和主線架設路側攝影機，透過影片觀察並收集相關之車流特性資料，建構一機率模型並敘述匯流區車流崩潰發生之流程。根據該模型可看出「入口匝道匯入主線之流率」會是影響匯流區車流崩潰前最大流率的主要因素之一。

Srivastava 與 Geroliminis（2013）透過車輛偵測器之實證資料，確認入口匯流區之車流崩潰現象，會隨著入口匝道流率、匯流區上游流率之比值上升而隨之發生。

Kondyli 等人（2016）同樣利用 2013 年之研究方式，建立入口匯流區容量之預測模型，該研究發現若入口匝道有越高的流率匯入，匯流區之容量會跟著

下降，最終得出匯流區容量會受到匝道流率所占匯流區之流率比例、匯流區上游流率，以及車道數所影響。

Gubbala (2017) 為量化入口匝道匯入主線之流量對匯流區容量所造成之影響，以六個入口匯流區之偵測器資料，透過線性回歸之方式建立一容量模型。該研究認為匝道之流率會影響運行容量，且在匯入流量相同之情形下，入口匝道之流率若越多，該區域會越容易產生車流崩潰。最終成功建立一容量模型，內含四個隨機變數，其中呈現負相關之變數為入口匝道流率；呈現正相關之變數為匯流區上游主線兩外線道流率、匯流區上游主線兩外線道以外之流率，以及入口匝道流率與主線兩外線道流率之關係變數。

匯流區中經常有車道變換、車輛加減速之行為，導致匯流區之車流狀態較不穩定，該現象被稱作亂流區 (turbulence)。Van Beinum 等人 (2018) 為了解亂流區之微觀車流特性，選取共 14 個入口匝道匯流區、出口匝道分流區、交織區段之高速公路路段，透過直升機於高空收集影片，針對車輛軌跡資料進行分析。該研究發現車流量越多之情形，會有更多的車道變換發生，進而導致亂流區更為混亂與壅塞，若以幾何型態進行比較，當匯流區、分流區、交織區之長度越長，該路段之亂流情形則會較低。

## 2.4 文獻回顧重點與研究缺口

由文獻回顧中，臺灣之容量手冊定義高速公路容量為一定值，然而近年國外許多文獻認為容量手冊所定義之容量過於樂觀，車流崩潰前之最大流率往往小於容量手冊定義之容量值，此外，文獻認為容量並非為一定值，而是具有隨機性之變數。

在運行容量的計算上，透過文獻回顧本研究發現有兩種判斷運行容量之方式，一種為透過線性回歸，確認所有影響容量值之變因，並經由所有變數取得一容量之定值，另一種方式為透過容量隨機性之分析，確認各容量值其車流崩潰之機率。然而，透過線性回歸所得之容量值為一定值，由容量隨機性我們可得知即使在同一情境下，其容量值仍為一隨機分布，若以線性回歸的方式，我們無法看出在同一情境下每個容量值的車流崩潰機率為何。故本研究認為透過容量隨機性之分析，由於能夠確認各種情境下其容量值的車流崩潰機率，在交通管理上較能以使用者對風險的接受程度，選擇適合的容量值範圍。

有關容量隨機性之分析，Brilon 於 2005 年最先以極限乘積方法進行容量分析，該方法原先用於可靠性工程與存活分析，顯示各個時間的系統失敗或死亡之概率，套用於容量分析時，則將發生車流崩潰之流率做為系統運作失敗之標

記。此方法能夠有效地看出同一情境下的最大流率分布，使得容量估計更為精確。除了極限乘積方法，Dehman 與 Drakopoulos 於 2006 年則透過韋伯分布進行容量隨機性之分析，其容量分布曲線與極限乘積方法相同，韋伯分布所得之參數更能解釋該容量分布之樣態。而在容量隨機性之相關研究文獻中，均提及在實證分析上需要有足夠的車流崩潰資料，若有效的車流崩潰資料筆數越多，在隨機性分析上才會更加準確。

在容量隨機性分析之容量參考值，Brilon 於 2005 年以車流崩潰機率 90% 之流率作為運行容量之參考值，然而 Asgharzadeh 等人於 2020 年之文獻是以 85% 之車流崩潰機率下之最大通過流率作為容量基準值。容量參考值之選擇並無一定之說法，僅取決於使用者對風險的接受程度，若選擇較低的車流崩潰機率做為容量參考值，會使得高速公路發生壅塞之情況較少，但可能會導致運行效率下降；若選擇較高的車流崩潰機率做為容量參考值，雖然高速公路的通過量可能會上升，但也會有較容易發生車流崩潰的風險存在。透過文獻回顧後，本研究後續將選擇相對較為保守的 85% 車流崩潰機率做為容量基準值。

有關車流崩潰之定義，透過文獻回顧後本研究發現，不同文獻對於車流崩潰之判斷方式及相關參數計算方式有所異同，但多半得出判斷車流崩潰之方法為「速率驟降，並維持低速率一段時間」。而在匯流區之文獻部分，皆提及入口匝道之流率與匯流區上游之主線流率，對匯流區的容量會產生影響，有鑑於此，本研究針對車流崩潰同樣採用上述之判斷方式，針對匯流區之車輛偵測器資料進行處理，得出數個車流崩潰之歷史資料與其相關參數。

在已回顧之文獻中，本研究發現國外尚未有針對同一地點於不同時間之容量分布進行分析與探討，而國內也較少有文獻透過實證資料進行容量隨機性之研究分析。總結而言，透過文獻回顧本研究已確立研究方法為針對數個匯流區之偵測器擷取一年份之資訊，得出足夠的車流崩潰歷史資料，最終以容量隨機性進行容量分析，探討幾何型態因素與交通車流因素對於容量隨機性之影響。

## 第三章 研究方法

為確認容量隨機性之分布，需要擷取車流崩潰之相關資訊，以及建立車流崩潰機率之累積分布函數。本研究之研究方法將分為兩部分，分別為車流崩潰之判斷方式，以及容量隨機性之分析方式。

### 3.1 車流崩潰之判斷

由文獻回顧已得知車流崩潰之定義如下：當設施之容量無法負荷過大的流率，將進入不穩定之車流狀態，此時車流速度會於短時間內急遽下降，且會維持低速率一段時間。由此敘述可確認，在車流崩潰現象發生前的最大流率，可定義為該設施之容量，且過去文獻之研究發現，崩潰前的最大流率具有隨機性 (Stochastic)，每一次車流崩潰前的最大流率會有所不同。

有關車流崩潰之判斷主要分為三種，第一種方法判斷車流速率是否有驟降之現象 (Kondyli 等人, 2013)，第二種方法為確認是否低於關鍵速率 (Gubbala, 2017)，第三種方法為繪製每一天的流率-速率分布圖，並以曲線之間端坐為車流崩潰之時間點 (Brilon 等人, 2005)。本研究已第一種方式作為判斷依據，找出車流崩潰之時間點與該車流崩潰事件之相關參數。圖 3-1 與圖 3-2 兩圖為 2018 年 5 月 7 日由國道 3 號南下安坑交流道匯流區之一分鐘動態 VD (nfbVD-N3-S-32.735-M-LOOP) 所得之流率與速率時間序列圖，以及流率-速率分佈圖。由圖 3-2 可看出該日有上半部穩定之車流，以及下半部進入不穩定態之車流，由此圖可看出該日最大流率之速率為 64 公里/小時，即為圖中用方框標註之數值，此時間剛好為車流由穩定進入不穩定態之分界點。若將此關鍵速度移至圖 3-1 進行確認，可發現該偵測器顯示於早上 7 點時，有速度驟降之情形，且一直維持低速率至早上 9 點半，於本次車流崩潰之事件可擷取之資料包括最大崩潰前流率、壅塞時間長度、關鍵速度、速度下降幅度等。

由於本研究需處理一年大量之偵測器資訊，勢必需要一流程判斷車流崩潰發生之時間與收集其相關參數。在資料處理部分，本研究透過三個判斷步驟 (Kondyli et al., 2013) 確認該時段是否為車流崩潰發生之時間點，其流程如圖 3-3 所示。以下將詳細說明各流程之判斷方式：

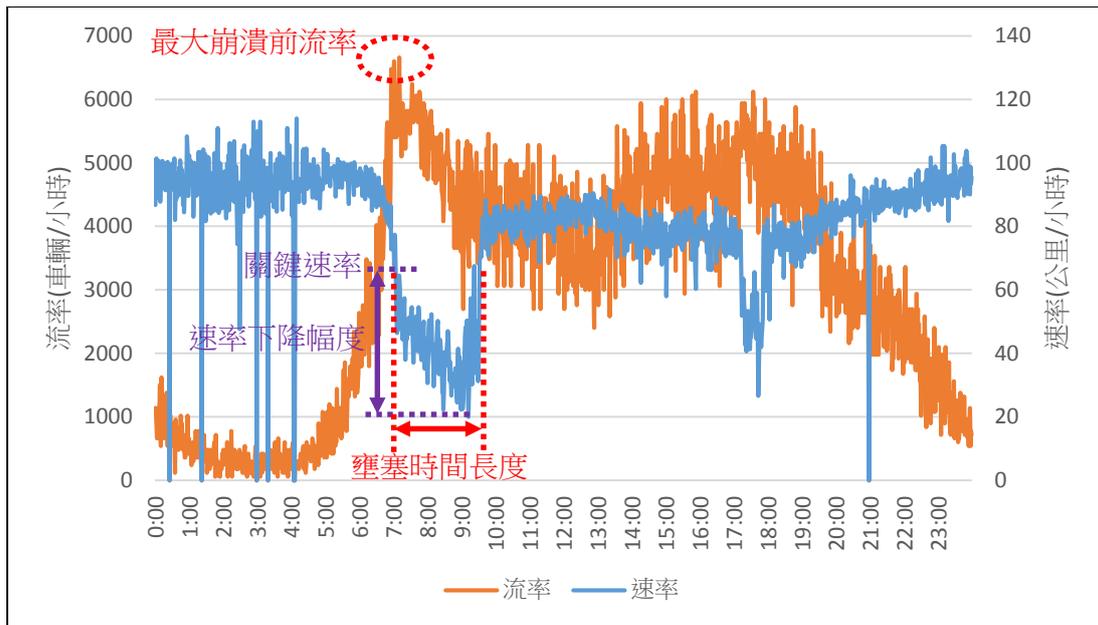


圖 3-1 流率與速率之時間序列圖

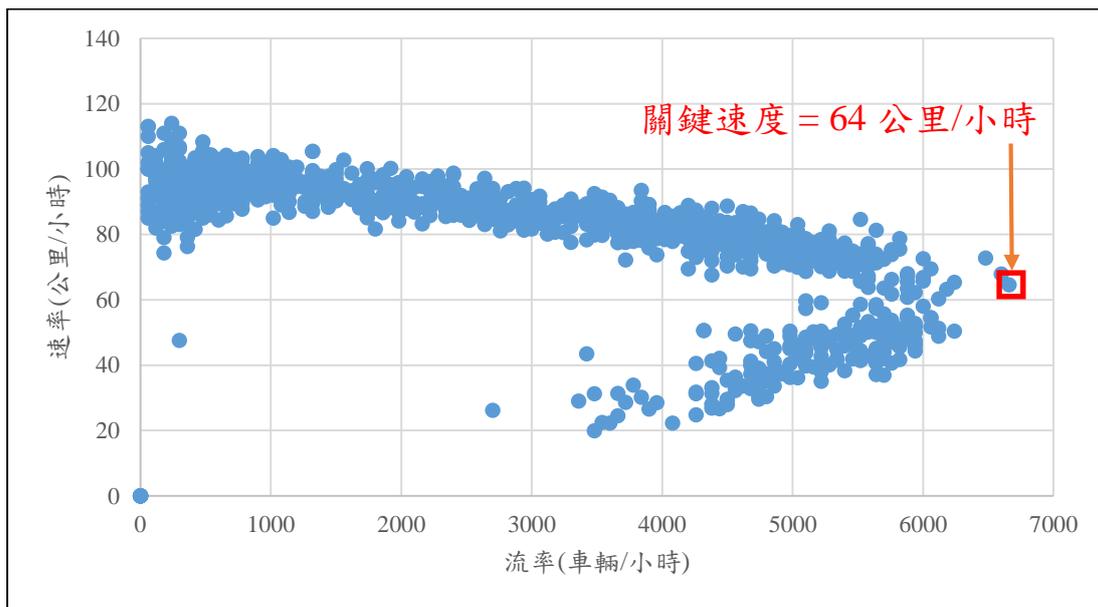


圖 3-2 流率-速率分佈圖

**步驟一：檢查連續兩分鐘的速度差**

本步驟為確認速率是否有下降之情況發生，若目標時間之速率比上一時間段之速率低，則進入步驟 2；若無，則回至步驟 1 觀察下一個時間點。

**步驟二：檢查前五分鐘與後五分鐘的速度平均誤差是否有達基準值 X**

本步驟為確認速率是否有在短時間發生驟降，該基準值於本研究參考 Kondyli 等人於 2013 年之數值，訂定基準值  $X = 8$  公里/小時。若達成該敘述，則進入步驟 3；若無，則回至步驟 1 觀察下一個時間點。

### 步驟三：Y 分鐘後的速度全不高於當下的速度

速率驟降之情況，可能為短暫的突發事件，如部分駕駛於高速公路上緊急剎車所產生之衝擊波。然而，此種狀況並非運行容量不足所產生之車流崩潰，故需確認一段時間內，速率皆無法回至順暢車流之水準。該基準值於本研究參考 Kondyli 等人於 2013 年之數值，訂定基準值  $Y = 5$  分鐘。

上述之三個步驟若均通過，則將該時間點定義為一個交通壅塞事件之樣本，並且需蒐集該時間點之車流崩潰相關參數，包含壅塞時段、崩潰前主線流率、匝道流率、降雨量等；若上述三步驟有無通過，則結束判斷流程，檢查下一個時間點。

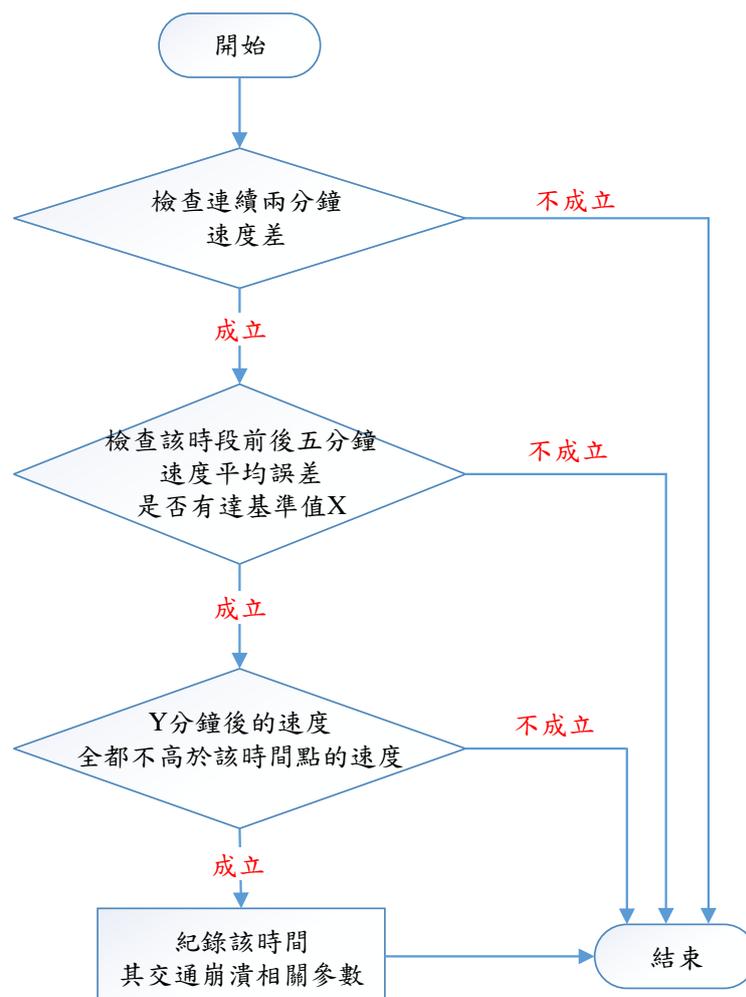


圖 3-3 車流崩潰判斷流程

### 3.2 容量隨機性分布

透過上節車流崩潰相關資料之蒐集，本節利用上節所擷取之最大崩潰前流率，建立容量之隨機性分布函數，由文獻回顧中已得知在容量隨機分布中，較常使用之兩種方法為極限乘積法，以及建立韋伯分布。

極限乘積法原先應用在存活分析上，可用於推測產品之使用時間長度，以及各使用時間的產品損毀機率，以及人類壽命長度之分析，在交通上則可以被應用於觀察其崩潰前流率值所對應之車流崩潰機率。在資料蒐集上，極限乘積法除了會擷取「發生壅塞前之崩潰前流率」外，若在車流崩潰之判斷上發現單日無發生壅塞之現象時，也會擷取「無發生壅塞之最大流率值」，該方法之分布函數為：

$$F(q) = 1 - \prod_{i: q_i < q} \frac{k_i - 1}{k_i} \quad i \in \{B\} \quad (1)$$

其中，

- $F(q)$  : 車流崩潰機率
- $q$  : 觀察之流率值 (車/小時)
- $q_i$  : 時間點  $i$  之崩潰前最大流率 (車/小時)
- $k_i$  : 於時間點  $i$  發生  $q_i \leq q$  之次數
- $\{B\}$  : 發生車流崩潰的時間點

韋伯分布同樣應用於存活分析以及可靠性分析上，此分布在應用上與極限乘積法相同，但不同處在極限乘積法為透過各筆「發生壅塞前之崩潰前流率值」以及「發生壅塞前之崩潰前流率值」進行累積機率分布，而韋伯分布則是僅將「發生壅塞前之崩潰前流率值」，透過最大概似估計法進行比例參數 (scale parameter) 以及形狀參數 (shape parameter) 之校估，進而得出各流率值之車流崩潰機率，其累積分布函數為：

$$F(q) = 1 - e^{-\left(\frac{q}{\beta}\right)^\alpha} \quad (2)$$

其中，

- $F(q)$  : 車流崩潰機率
- $q$  : 觀察之流率值 (車/小時)
- $\alpha$  : 形狀參數
- $\beta$  : 比例參數

## 第四章 數值分析

本本章節說明資料蒐集以及數值分析的詳細過程，首先會說明調查地點之選定流程，再來說明車流崩潰相關參數之擷取方式，以及透過韋伯分布之參數校估展示同一匯流區於不同時段的容量分布情形，建立容量模型。依據過去之文獻指出，透過此極限乘積法與韋伯分布所得出之車流崩潰累積機率函數並無太大之差異，而建立韋伯分布之方法在操作上較為簡易與快速，且後續也能透過卡方檢定之方式，確認各組樣本數是否足以校估出韋伯分布之參數。為了確認此兩種方式所得出之車流崩潰累積機率函數相同，本研究擬以國道 3 號北上中和交流道之崩潰前流率資訊進行兩種分析方法之測試，測試結果將於 4.2 節呈現之。4.3 節將分析臺灣高速公路之匯流區在不同情境下之隨機容量分布，上述所提之不同情境包括壅塞時段（平日上午、平日下午、例假日）、天氣（晴天、雨天）、有無開放路肩，以及入口匝道流率五種情形，用以確認各獨立匯流區，在不同情境下之運行容量是否有所不同。

### 4.1 調查地點選定

本研究針對臺灣高速公路之入口匯流區進行初步探索，目前臺灣國道 1 號高速公路共有 160 處之入口匝道；國道 3 號高速公路共有 154 處之入口匝道，為了能夠有足夠的車流崩潰資訊，本研究需針對數個經常發生壅塞現象之獨立匯流區進行分析，以下將透過三步驟篩選適合調查之獨立匯流區：

#### 步驟 1：是否有重現性之壅塞

檢查方法為透過交通部高速公路局交通資料庫（TISV）之 VD 資訊，擷取位於入口匝道下游最接近之主線 VD 資料，若該 VD 資料透過確認數日之資訊，均於某一時段有速率驟降或流量驟降之現象發生，則紀錄該入口匯流區為重現性壅塞之區域，並額外紀錄重現性壅塞發生之時段，如平日之上午尖峰、下午尖峰，以及假日等時段。壅塞之具體定義為車流速率低於每小時 40 公里，或者於 30 分鐘內下降幅度達每小時 40 公里以上，如各時段多次發生壅塞，則確認該匯流區於該時段為重現性壅塞。

#### 步驟 2：是否有足夠的 VD 可供使用

為了蒐集車流崩潰之相關參數，該匯流區範圍內需有足夠之有效偵測器資料可用。偵測器的位置分佈需包括匝道入口、匯流區上游之主線、匯流區、匯流區結束之下游。上述四地點若有其中一處無偵測器，則不納入調查對象。

### 步驟 3：排除壅塞原因為下游回堵之匯流區

確認有重現性壅塞之地點後，需檢查各匯流區 VD 下游最接近之 VD 資料，確認是否有發生壅塞（即上述步驟 1 之檢核方式）。若下游 VD 資料顯示發生壅塞之時間早於匯流區，則該地點定義為下游回堵，而非本研究所探討之自然壅塞，該地點必須刪除。透過上述流程找出數個能做為代表之匯流區進行容量分析。

本研究之資料來自交通部高速公路局交通資料庫之 VD 一分鐘動態資訊，為了確認匯流區之 VD 資料正確無誤，文獻期刊通常會使用兩種方式：（1）檢核上下游流量守恒；（2）確認透過流量、速率所得之密度與佔有率所得之密度是否一致。然而本研究經測試後，發現第二種檢核方式在國內之 VD 皆不通過，在詢問交管組後發現臺灣高速公路之 VD 在維護上僅針對速率與流量值進行微調與修正，多半為佔有率會產生異常值。由於本研究在判斷車流崩潰上為參照速率資訊，且研究目的為探討匯流區之容量，不會使用到佔有率之資訊，故本研究採用各匯流區下游之 ETC 資料，與匯流區 VD、匯流區上游之 VD 進行流量守恒之檢核，若流量守恒檢核通過，則將該匯流區納入分析考量。

流量守恒檢核擷取之 ETC 與 VD 位置如圖 4-1 所示，分別為匯流區下游之 ETC 門架（ETC）、匯流區上游主線 VD（U）、入口匝道 VD（R），以及匯流區 VD（B）四個位置。其檢核方式為確認 ETC 門架之單日總流量，需與匯流區 VD 之單日總流量，以及匯流區上游主線 VD 加上入口匝道 VD 之單日總流量落差是否在 5% 以內。

為求資料之準確性，本研究針對 2018 年之 VD 資料，各地點均以一個月作為檢核基礎，該檢核基礎為各地點之 VD 在一個月內若有 20 日以上之單日總流量符合流量守恒，該月則代表通過流量守恒。由上述之基準，若該地點在一年中有 7 個月以上滿足此條件，該地點將納入本研究分析，其中納入本研究分析之地點其不符流量守恒之日期，該日之資料則不納入分析。

本研究針對各個已確定發生重現性壅塞之匯流區 2018 年的 ETC 與 VD 資料進行流量守恒之檢核，已確定發生重現性壅塞之匯流區以及各地點之檢核結果如表 4-1 所示，而最終納入本研究進行分析之地點如表 4-2 所示，地點包含國道 3 號南下安坑、國道 1 號南下五堵、國道 1 號南下新竹、國道 3 號北上中和、國道 1 號南下后里、國道 1 號北上台中、國道 1 號北上林口、國道 3 號北上三鶯，以及國道 1 號北上新竹九個地點。

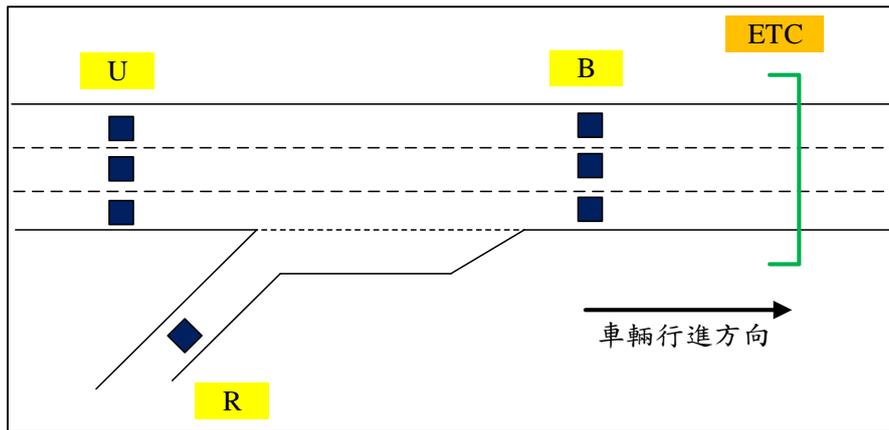


圖 4-1 檢核流率守恆之偵測器位置

表4-1 重現性壅塞匯流區之流量守恆檢核結果

交流道	主線 車道數	路肩 開放	檢核 通過月數	檢核結果
國 3 南下安坑	3	無	12	通過
國 1 南下五堵	3	無	12	通過
國 1 南下新竹	3	無	12	通過
國 3 北上中和	3	無	12	通過
國 1 南下后里	3	無	12	通過
國 1 北上台中	3	無	12	通過
國 1 北上林口	4	無	12	通過
國 3 北上三鶯	4	無	12	通過
國 1 北上新竹	3	有	9	通過
國 1 南下東湖	3	無	0	不通過
國 1 南下路竹	3	無	0	不通過
國 1 南下高科	3	無	0	不通過
國 1 北上竹北	3	無	0	不通過
國 1 北上湖口	3	無	4	不通過
國 3 南下龍潭	3	無	0	不通過
國 3 南下霧峰	3	無	0	不通過
國 3 北上新店	3	無	0	不通過
國 1 北上大雅	3	有	0	不通過
國 3 北上龍潭	3	有	6	不通過
國 3 南下三鶯	4	有	0	不通過

表 4-2 符合分析條件之匯流區

交流道	主線車道數	路肩開放	主線速限	使用 VD 資料之時間	匯流區 VD 與匝道入口之距離 (公尺)	加速車道長度 (公尺)
國 3 南下安坑	3	無	90	2018 年 1~12 月	1,285	650
國 1 南下五堵	3	無	100	2018 年 1~12 月	1,528	340
國 1 南下新竹	3	無	100	2018 年 1~12 月	1,115	1,100
國 3 北上中和	3	無	100	2018 年 1~12 月	300	220
國 1 南下后里	3	無	110	2018 年 1~12 月	390	250
國 1 北上台中	3	無	110	2018 年 1~12 月	1,090	310
國 1 北上林口	4	無	100	2018 年 1~12 月	1,390	830
國 3 北上三鶯	4	無	110	2018 年 1~12 月	2,220	210
國 1 北上新竹	3	有	100	2018 年 1~7、 11、12 月	530	430

## 4.2 容量隨機性分布

為求得容量隨機性之分布，本研究透過 4.1 節所確定之調查地點，進行車流崩潰相關資訊之蒐集，再將各地點之車流崩潰相關資訊依據壅塞時段分類，進行韋伯分布之參數校估。

### 4.2.1 車流崩潰相關資訊

本研究透過 3.1 節之車流崩潰判斷流程，已找出各地點於 2018 年可用之資料中全部車流崩潰事件之相關資訊。車流崩潰事件之定義如 3.1 節所述，透過該節所述之判斷方式，本研究已擷取之參數包括：車流崩潰事件發生的日期、時間、是否於平日上午壅塞、是否於平日下午壅塞、是否於假日壅塞、崩潰前流率、崩潰前速率、壅塞持續時間、入口匝道流率，以及降雨量，其中降雨量之資訊為擷取距離交流道最近之觀測站資料。表 4-3 為節錄 107 年 3 月 1 日至 107 年 3 月 10 日國道 3 號南下安坑交流道入口匯流區發生車流崩潰相關資訊表。

在整理車流崩潰相關資訊過程中，經確認原始資料後發現有部分之交通壅塞事件中，有速率在 15 分鐘內快速回復正常運行水準之現象，但隨即車流速率又進入壅塞狀況，導致透過 3.1 節之判斷方式，會被誤判成為兩次性壅塞。圖 4-2 為透過國道 3 號南下安坑於 2018 年 7 月 3 日匯流區下游之 VD 資料所繪製之流率與速率時間圖，可看出當日在上午 7 點時，已發生車流崩潰，而進入車流壅塞之現象，而在接近上午 8 點時，該速率很快回復到 70 公里／小時左右，此顯示當下車流回復至正常運行水準，但在短短幾分鐘內速率卻又下降至 40 公里／小時以下，再度進入車流壅塞狀況。本研究發現此類之第二次壅塞其崩潰前流率較低，其原因為車輛還尚未在第一次壅塞結束後時恢復原有之流量水準，

故實際上應為第一次壅塞之延續，不符合本研究探討之壅塞。其餘地點類似此種狀況之壅塞現象，本研究已將第二次壅塞之崩潰前流率值進行手動排除。

表 4-3 國道 3 號南下安坑交流道匯流區車流崩潰相關資訊表 (節錄)

地點	日期	壅塞時間	平日上午壅塞	平日下午壅塞	假日壅塞	崩潰前流率 (車輛/小時)	崩潰前速率 (公里/小時)	壅塞持續時間 (分鐘)	入口匝道流率 (車輛/小時)	降雨量 (毫米)
3S安坑	2018/3/1	07:12:00	1	0	0	5532	53.73	186	2892	0
3S安坑	2018/3/1	17:20:00	0	1	0	5544	50.73	59	1560	0
3S安坑	2018/3/2	07:20:00	1	0	0	6036	64.67	125	2184	0
3S安坑	2018/3/2	16:41:00	0	1	0	5520	60.82	122	1812	0
3S安坑	2018/3/3	16:37:00	0	0	1	4980	62.20	94	1356	0
3S安坑	2018/3/4	14:43:00	0	0	1	5196	54.87	258	1320	0
3S安坑	2018/3/5	07:02:00	1	0	0	6000	65.45	214	2916	0
3S安坑	2018/3/6	07:14:00	1	0	0	6204	57.91	123	2808	0
3S安坑	2018/3/7	07:26:00	1	0	0	5748	45.78	167	2664	0
3S安坑	2018/3/7	17:21:00	0	1	0	5496	64.97	91	2004	0
3S安坑	2018/3/8	07:17:00	1	0	0	5364	58.07	265	2676	2
3S安坑	2018/3/8	16:58:00	0	1	0	4836	65.07	158	1500	2
3S安坑	2018/3/9	07:15:00	1	0	0	5640	63.15	88	2496	0
3S安坑	2018/3/9	16:33:00	0	1	0	5376	61.87	168	1584	0
3S安坑	2018/3/10	16:03:00	0	0	1	5088	64.38	158	1956	0

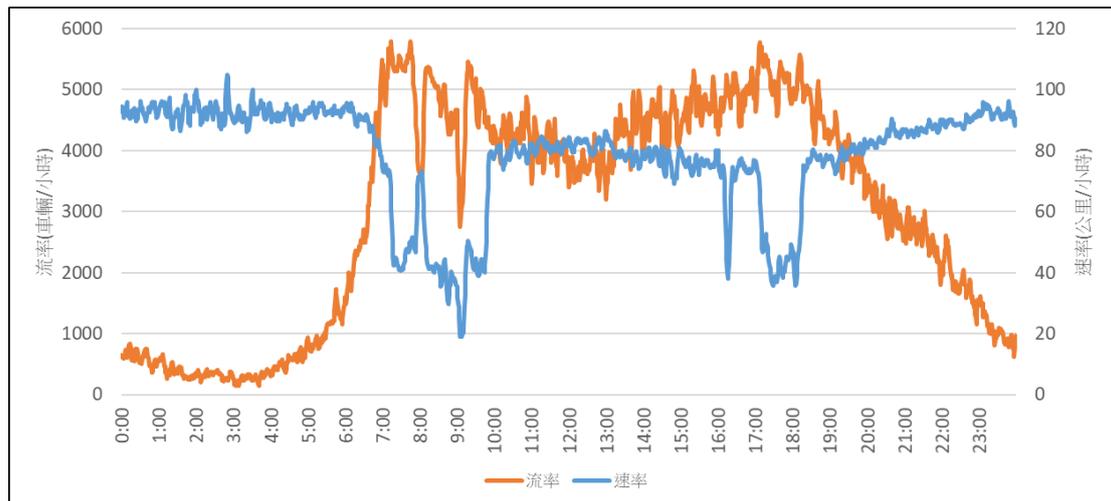


圖 4-2 兩次性壅塞現象之流率、速率時間圖

#### 4.2.2 極限乘積法與韋伯分佈之比較

本研究為確認兩種容量隨機性分析方式是否有差異，故透過國道 3 號北上中和交流道之崩潰前流率資訊進行兩種分析方法之測試，兩種分析方式所得之車流崩潰機率累積分布如圖 4-3 所示。其中藍色曲線為透過極限乘積法所得之累積分布函數，橘色曲線為透過校估韋伯分布參數所得之累積分布函數，由此圖可確認兩種容量隨機性之分析方式並無太大之差異，曲線上無太大差異之原因為臺灣高速公路較少有「高流率但無發生壅塞」之事件，故極限乘積法與韋伯分布兩者之累積分布函數相似。

在確認兩方式無太大之差異後，因建立韋伯分布之方法在操作上較為簡易與快速，且後續也能透過卡方檢定之方式，確認各組樣本數是否足以校估出韋伯分布之參數。故本研究將透過建立韋伯分布，統整出臺灣高速公路之匯流區在不同情境下之隨機容量分布。

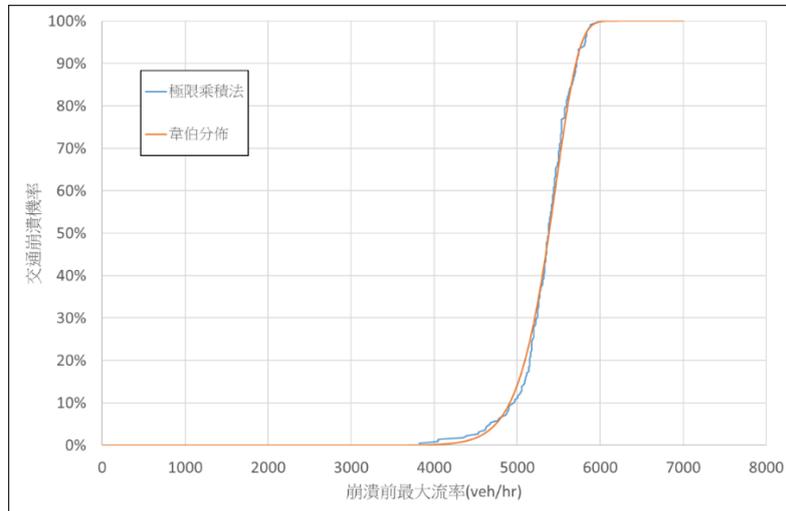
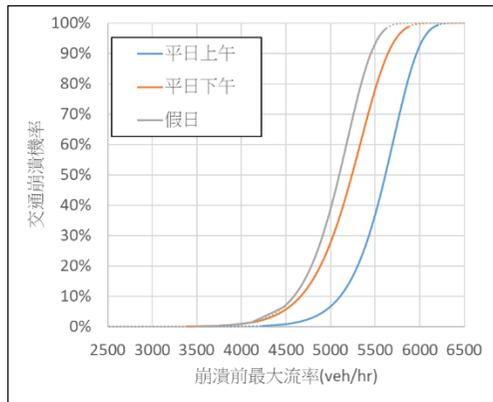


圖 4-3 以極限乘積法與韋伯分布所得之車流崩潰機率累積分布函數

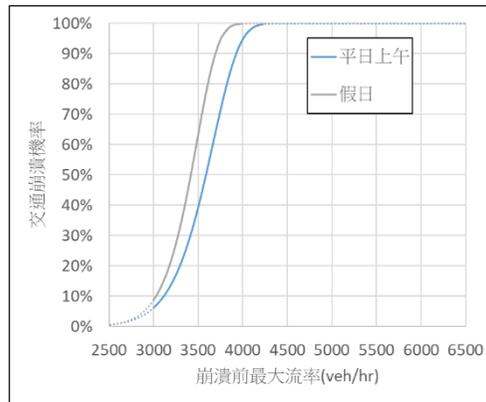
#### 4.2.3 韋伯分布參數校估

透過上節車流崩潰相關資訊之蒐集，本節利用上節所擷取之各地點於不同壅塞時段之最大崩潰前流率，透過最大概似估計法，校估各地點與壅塞時間下之韋伯分布參數，進而探討各個地點於平日上午、平日下午、假日三個壅塞時段下的容量分布。為了確認實際之樣本資料是否符合韋伯分布，在參數校估後需再進行卡方檢定，確認各地點於不同時段下，該組資料是否符合韋伯分布。然而在確認壅塞事件數之過程中，本研究發現有部分地點因資料筆數不足，故無法進行參數校估之狀況，其地點與壅塞時段分別包括國道 1 號南下五堵之平日下午、國道 1 號南下新竹之平日上午、國道 1 號南下后里之平日上午、國道 1 號北上台中之平日上午與平日下午。故在後續分析中，將不會針對上述資料組進行參數校估。

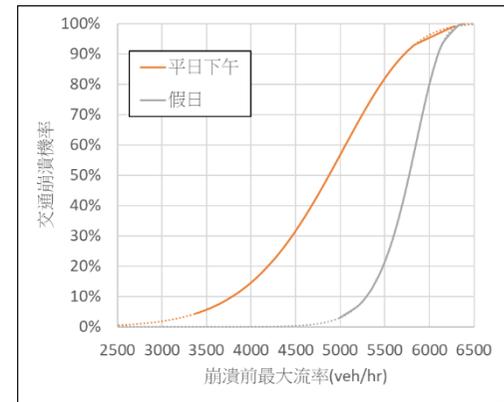
本研究已透過卡方檢定確認各地點於不同時段下其資料組是否符合韋伯分布。經過參數校估後，各地點於不同時段下之車流崩潰機率累積分布函數如圖 4-4 (a) ~ (i) 所示，而校估之資料樣本數、韋伯分布參數，以及 85% 崩潰機率下的最大崩潰前流率值如表 4-4 所示。由表 4-4 可發現除了國道 1 號北上林口於假日壅塞之資料組無法通過卡方檢定外，其餘地點之資料組均有通過卡方檢定，故可確認各地點於各個時段之崩潰前流率應符合韋伯分布。



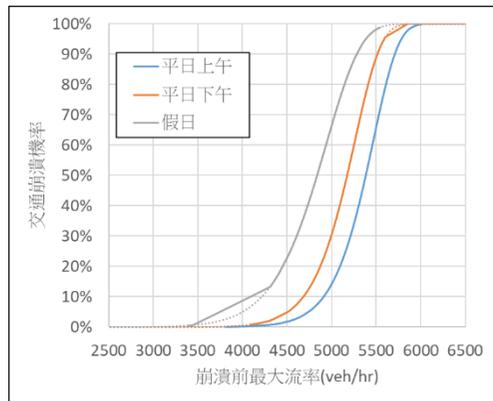
(a)國 3 南下安坑



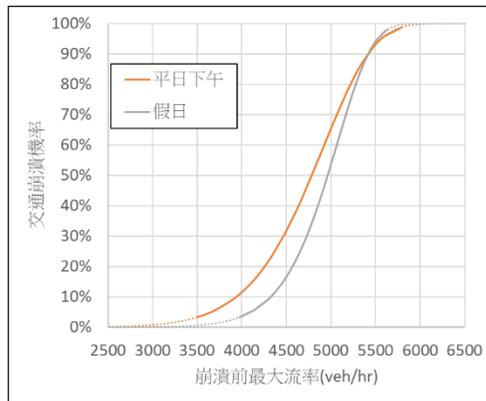
(b)國 1 南下五堵



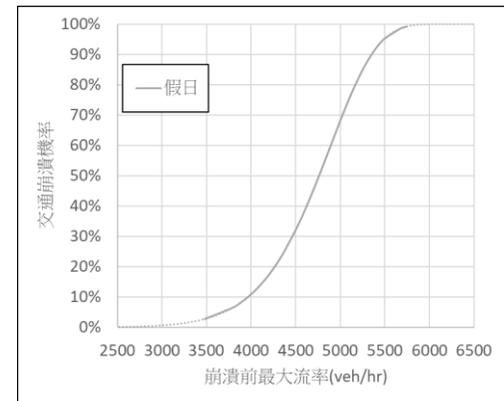
(c)國 1 南下新竹



(d)國 3 北上中和

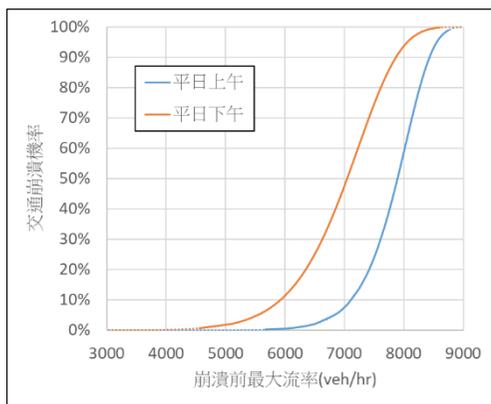


(e)國 1 南下后里

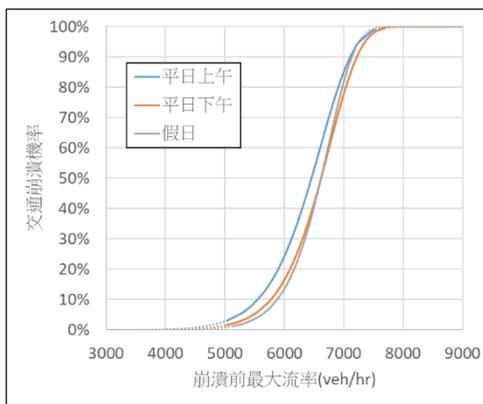


(f)國 1 北上台中

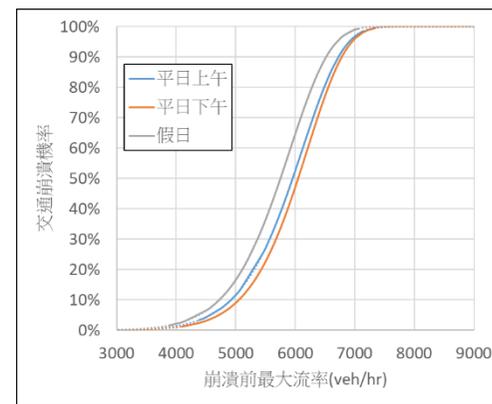
圖 4-4 各地點之車流崩潰累積分布圖



(g)國 1 北上林口



(h)國 3 北上三鶯



(i)國 1 北上新竹

圖 4-4 各地點之車流崩潰機率累積分布圖 (續)

表 4-4 各地點韋伯分布參數校估結果與容量值

地點	主線車道數	路肩開放	主線速限	平日上午				平日下午				假日			
				樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值
國3南下安坑	3	無	90	219	5,718.3	19.9	5,906	245	5,359.0	16.2	5,576	99	5,202.2	17.9	5,392
國1南下五堵	3	無	100	145	3,686.8	13.3	3,869	11	-	-	-	63	3,498.6	15.5	3,647
國1南下新竹	3	無	100	25	-	-	-	70	5,118.4	7.5	5,575	44	5,869.9	21.8	6,045
國3北上中和	3	無	100	224	5,479.8	20.5	5,654	110	5,274.4	18.9	5,457	53	4,967.8	13.7	5,206
國1南下后里	3	無	110	1	-	-	-	35	4,969.3	9.7	5,309	63	5,097.8	13.7	5,342
國1北上台中	3	無	110	16	-	-	-	17	-	-	-	61	4,936.2	10.3	5,253
國1北上林口	4	無	100	90	8,052.4	18.2	8,341	198	7,286	10.9	7,727	29	6,630.5*	8.2*	7,169
國3北上三鶯	4	無	110	56	6,647.1	12.5	6,997	173	6,794.7	13.8	7,118	104	6,769.2	16	7,046
國1北上新竹	3	有	100	52	6,180.4	9.9	6,594	235	6,262.8	10.5	6,657	122	5,975.2	9.6	6,388

\*該地點於此時段之資料組並未通過卡方檢定

### 4.3 外在因素對容量隨機性分布之影響

為確認不同之外在因素是否會對容量隨機性之分布造成影響，本研究透過各地點資料之組合，分別針對不同外在影響因素進行容量分布之分析，該外在影響因素包括壅塞時段、天氣、主線速限、主線車道數、路肩開放，以及入口匝道流率。

#### 4.3.1 壅塞時段

由 4.2 節中，本研究已得出各地點不同時段下之車流崩潰機率累積分布函數，由圖 4-4 (a)~(i) 中，為了能夠區分不同地點中於不同壅塞時段容量大小之類別，本研究擬透過兩種分類方式做為區分，分別為平日上午與平日下午之比對，以及平日與假日之比對，最終各地點透過分類結果如表 4-5 所示。

##### (1) 平日上午與平日下午之比對

由表 4-5 之統整，可得知在平日上午與平日下午之比對中，平日上午比平日下午容量來得大的地點分別為國道 3 號南下安坑、國道 3 號北上中和、國道 1 號北上林口，而平日上午比平日下午容量來得小的地點為國道 1 號北上新竹。

##### (2) 平日與假日之比對

由表 4-5 之統整，可得知平日與假日之比對中，平日比假日容量來得大的地點分別為國道 3 號南下安坑、國道 3 號北上中和、國道 1 號北上新竹、國道 1 號南下五堵，而平日比假日容量來得小的地點為國道 1 號南下新竹、國道 1 號南下后里。

在上述之分類中，國道 3 號北上三鶯於三種壅塞時段中，其容量值並無太大差異，此外，有部分地點因無各種壅塞時段之容量資訊，故無法進行比對，如國道 1 號南下五堵、國道 1 號南下新竹，以及國道 1 號南下后里無法判斷平日上午與平日下午之容量差異；國道 1 號北上台中，以及國道 1 號北上林口無法判斷平日與假日之容量差異。

透過上述之統整，本研究得出之結論為同一地點下，不同的壅塞時段會有不同的容量值，且各壅塞時段之容量值之大小排序，會隨地點而有所不同。以國道 3 號南下安坑與國道 3 號北上中和為例，由於兩交流道位於住宅區附近，故平日之容量會比假日容量來得大；而國道 1 號南下后里交流道由於通常為旅遊旅次，故在假日之壅塞事件較多，且能維持較大之容量值。

表 4-5 容量大小於不同壅塞時間之比對

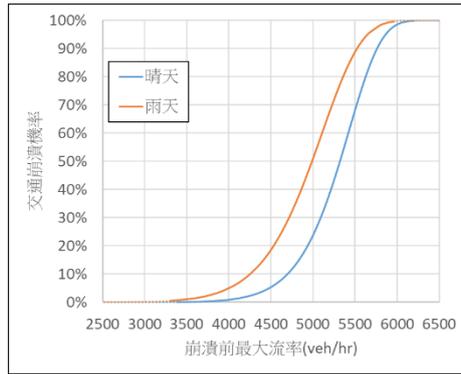
容量大小 比對	平日>假日	平日=假日	平日<假日	無法判斷 平假日差異	總 數
平日上午 > 平日下午	國 3 南下安坑 國 3 北上中和			國 1 北上林口	3
平日上午 = 平日下午		國 3 北上三鶯			1
平日上午 < 平日下午	國 1 北上新竹				1
無法判斷 平日上下午 差異	國 1 南下五堵		國 1 南下新竹 國 1 南下后里	國 1 北上台中	4
總數	4	1	2	2	

#### 4.3.2 天氣

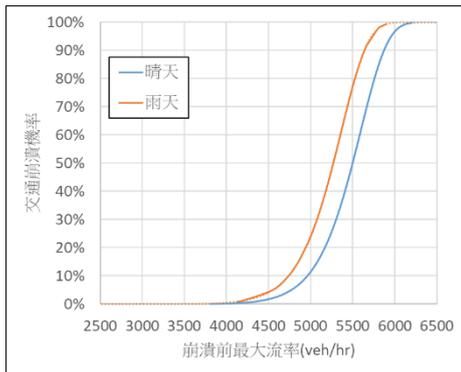
在天氣影響之因素部分，本研究擬探討晴天與雨天兩種情境下對容量分布所造成之影響。晴天之定義為降雨量小於 0.1 毫米之情況，而雨天之定義為降雨量界於 0.1 至 40 毫米之情況，定義 0.1 毫米作為下界值之原因為為參考中央氣象局對於降雨之定義為每小時降雨量達 0.1 毫米或以上時；定義 40 毫米作為上界值之原因為參考中央氣象局對於大雨之定義為每小時降雨量達 40 毫米以上之降雨現象，由於雨量過大可能導致容量值之影響不一，故本研究最終排除大雨或豪大雨以上之情形。為了固定其他可能之變因，本研究僅使用國道 3 號南下安坑與國道 3 號北上中和兩地點之資料組合進行分析，此兩交流道均屬於三車道，且均無開放路肩之情形。

經過資料組合後，本研究透過最大概似估計法校估出晴天與雨天其韋伯分布之參數，分別針對全時段、平日上午壅塞、平日下午壅塞、假日壅塞之結果進行比對，其車流崩潰機率累積分布函數如圖 4-5 (a) ~ (c) 所示，校估之資料樣本數、韋伯分布參數，以及 85% 崩潰機率下的最大崩潰前流率值如表 4-6 所示。由表 4-6 可看出全時段下，雨天會減少約 250 車輛／小時之容量；平日上午在雨天會減少約 250 車輛／小時之容量；平日下午會減少約 300 車輛／小時之容量，假日於雨天之資料數不足，故無法進行參數校估。

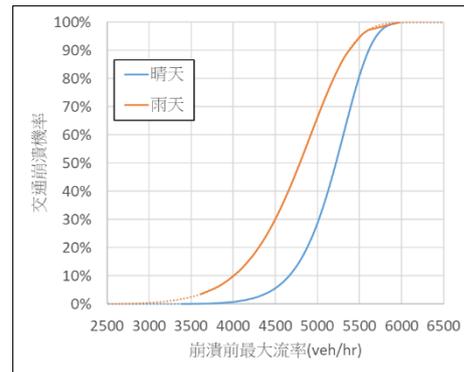
透過資料統整後，本研究得出之結論為在雨天時，其容量值會減少，原因為下雨會使道路之能見度不佳，使得高速公路運行之效率下降，而以此兩地點而言，在下班時間降雨對於容量之影響又較大。



(a)全時段



(b)平日上午



(c)平日下午

圖4-5 晴天、雨天於不同壅塞時段之車流崩潰機率累積分布圖

表4-6 不同天氣之韋伯分布參數校估結果與容量值

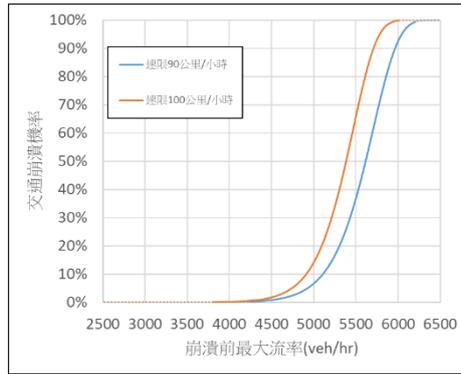
天氣	全時段				平日上午				平日下午			
	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值
晴天	950	5,449	15.1	5,686	443	5,609	18.3	5,809	355	5,334	16.7	5,543
雨天	127	5,144	11.8	5,431	48	5,379	17.7	5,577	59	4,960	10.5	5,272

### 4.3.3 主線速限

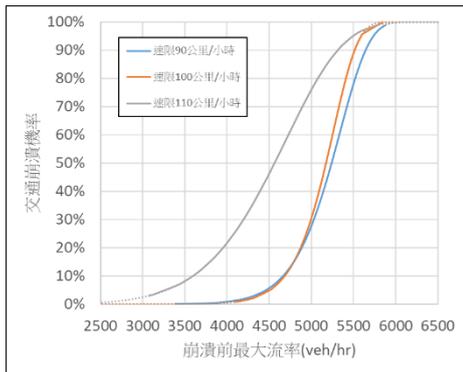
在主線速限之因素部分，本研究擬探討主線速限為 90、100、110 公里/小時之情況下對容量分布所造成之影響。本研究於本因素之分析下固定之變因為三車道、無路肩開放之地點，且天氣為晴天。在主線速限 90 公里/小時之參考地點為國道 3 號南下安坑；主線速限 100 公里/小時之參考地點為國道 3 號北上中和；主線速限 110 公里/小時之參考地點為國道 1 號南下后里與國道 1 號南下台中。

經過資料組合後，本研究透過最大概似估計法校估出各情境其韋伯分布之參數，分別針對平日上午壅塞、平日下午壅塞、假日壅塞之結果進行比對，其車流崩潰機率累積分布函數如圖 4-6 (a)~(c) 所示，校估之資料樣本數、韋伯分布參數，以及 85% 崩潰機率下的最大崩潰前流率值如表 4-7 所示。

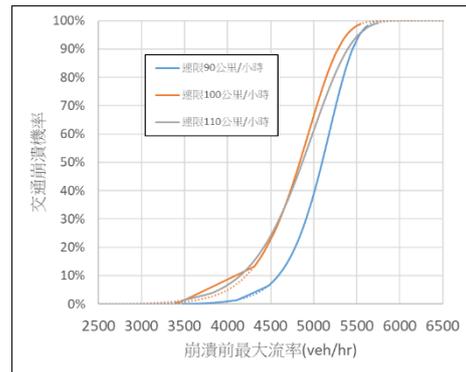
透過資料統整後，本研究發現在不同壅塞時段下，主線速限對容量造成之影響不一致，如速限為 110 公里/小時之地點，在平日下午其容量值較速限為 100 公里/小時之地點小，但在假日時其容量值與速限為 100 公里/小時之地點卻又無太大區別，此結論與直觀認為速限越高其運行效率越好之看法不同。本研究資料顯示主線速限較低之地點，其容量反而較大，剛好與容量手冊之結論相反，推測其原因為國道 3 號南下安坑受匝道儀控影響，導致其容量值較大，故本研究認為容量受管制之影響更大，受主線速限之影響較小。然而，主線速限為 90 公里/小時之地點僅有國道 3 號南下安坑，故此結論是否成立，需要後續更進一步的研究。



(a)平日上午



(b)平日下午



(c)假日

圖4-6 各主線速限於不同壅塞時段之車流崩潰機率累積分布圖

表4-7 不同主線速限之韋伯分布參數校估結果與容量值

速限	平日上午				平日下午				假日			
	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值
90	219	5,718	19.9	5,906	245	5,359	16.2	5,576	99	5,202	17.9	5,392
100	224	5,480	20.5	5,654	110	5,274	18.9	5,457	53	4,968	13.7	5,206
110	17	-	-	-	55	4,780	7.9	5,183	124	5,023	11.7	5,306

註：速限單位為公里／小時

#### 4.3.4 車道數

在車道數之因素部分，本研究擬探討車道數為三車道或四車道之情況下對容量分布所造成之影響。本研究於本因素之分析下固定之變因為無路肩開放之地點，且壅塞時段為平日上午，天氣為晴天。在主線三車道之參考地點為國道 3 號南下安坑、國道 3 號北上中和；主線四車道之參考地點為國道 1 號北上林口。

經過資料組合後，本研究透過最大概似估計法校估出各情境其韋伯分布之參數，其車流崩潰機率累積分布函數如圖4-7 所示，校估之資料樣本數、韋伯分布參數，以及85%崩潰機率下的最大崩潰前流率值如表4-8 所示。

透過資料統整後，本研究發現在四車道之單車道容量值比三車道多出 150 車輛/小時，與國外文獻所指出車道數越多時，其單車道之容量越低不同。在地點選定時，本研究發現臺灣高速公路中符合主線四車道條件的地點數較少，而初步分析發現，同為主線四車道之國道 1 號北上林口與國道 3 號北上三鶯，其兩地點之容量值分布差別較大，故在分析上僅以國道 1 號北上林口作為四車道之容量參考值。本研究認為主線四車道之容量值於各地點的差異性較大，故車道數越多，單車道之容量值越大之結論是否成立，需要後續更進一步的研究。

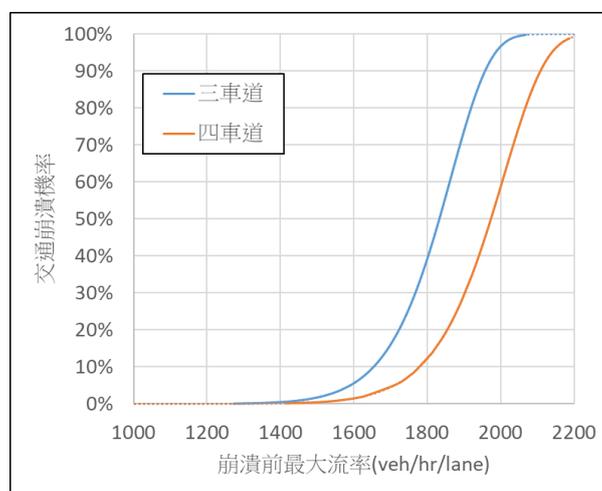


圖4-7 三車道與四車道之車流崩潰機率累積分布圖

表4-8 不同車道數之韋伯分布參數校估結果與容量值

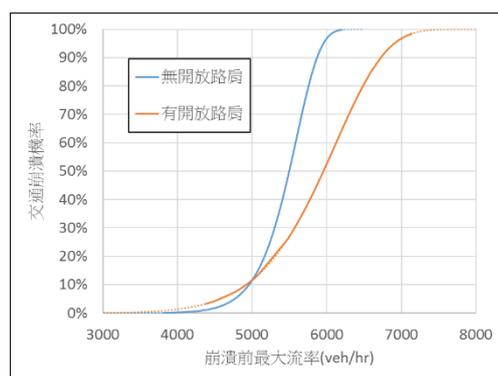
車道數	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率 85% 之容量值
三車道	443	1,869.6	18.3	1,937
四車道	90	2,013.1	18.2	2,086

#### 4.3.5 路肩開放

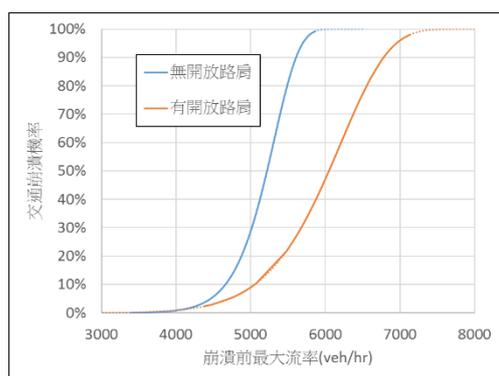
在路肩開放之因素部分，本研究擬探討開放路肩對於容量分布所造成之影響。本研究於本因素之分析下固定之變因為三車道之地點，且天氣為晴天。在無路肩開放之參考地點為國道 3 號南下安坑、國道 3 號北上中和；有開放路肩之參考地點為國道 1 號北上新竹。

經過資料組合後，本研究透過最大概似估計法校估出各情境其韋伯分布之參數，其車流崩潰機率累積分布函數如圖4-8 (a) ~ (c)所示，校估之資料樣本數、韋伯分布參數，以及 85% 崩潰機率下的最大崩潰前流率值如表4-9 所示。

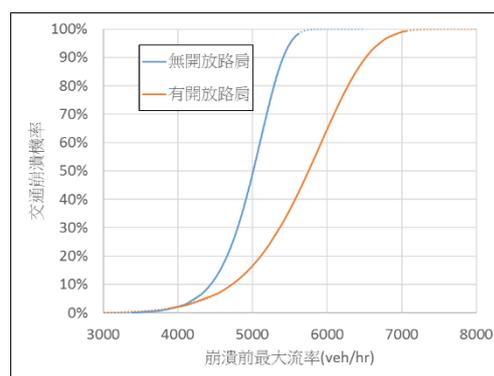
透過資料統整後，本研究發現在開放路肩之地點，在「總斷面容量」中，平日上午會增加約 700 車輛/小時的容量；平日下午會增加約 1,000 車輛/小時的容量，假日會增加 1,000 車輛/小時的容量。由此可得知開放路肩確實能使斷面總容量提升。



(a)平日上午



(b)平日下午



(c)假日

圖4-8 有無開放路肩於不同壅塞時段之車流崩潰機率累積分布圖

表4-9 有無開放路肩之韋伯分布參數校估結果與容量值

路肩	平日上午				平日下午				假日			
	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值
無開放	443	5,609	18.3	5,809	355	5,334	16.7	5,543	152	5,130	15.6	5,345
有開放	52	6,180	9.9	6,594	235	6,263	10.5	6,657	122	5,975	9.6	6,388

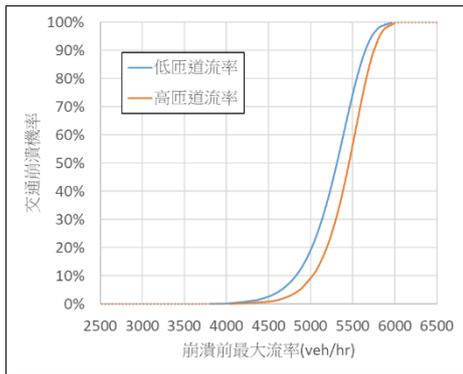
#### 4.3.6 入口匝道流率

在入口匝道流率之因素部分，本研究擬探討入口匝道流率對於容量分布所造成之影響。本研究於本因素之分析下固定之變因為無路肩開放之地點，壅塞時間為平日上午，且天氣為晴天。在三車道之參考地點為國道 3 號北上中和；四車道之參考地點為國道 1 號北上林口。

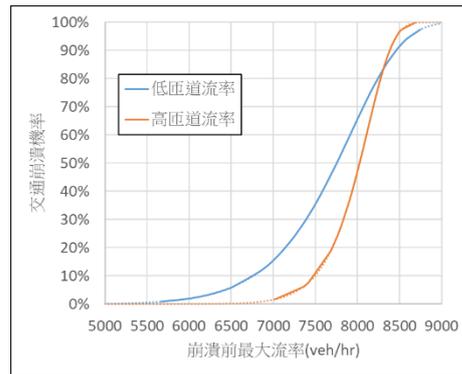
在入口匝道流率之分類上，本研究透過各情境下車流崩潰發生時匝道流率之中位數來區分「低匝道流率」以及「高匝道流率」兩種情境。若匝道流率值小於或等於於該情境下匝道流率之中位數，則該事件定義為低匝道流率下之車流崩潰；若匝道流率值大於該情境下匝道流率之中位數，則事件定義為高匝道流率之車流崩潰。國道 3 號北上中和之匝道流率中位數為 1,500 車輛/小時，其匝道為一車道；國道 1 號北上林口之匝道流率中位數為 2,916 車輛/小時，其匝道為兩車道。

經過資料組合後，本研究透過最大概似估計法校估出各情境其韋伯分布之參數，其車流崩潰機率累積分布函數如圖4-9 (a)、(b)所示，校估之資料樣本數、韋伯分布參數，以及 85% 崩潰機率下的最大崩潰前流率值如表4-10 所示。

透過資料統整後，本研究發現在三車道之情況下，高匝道流率會比低匝道流率之容量值高出 100 車輛/小時的容量，四車道之差異則較不顯著。在臺灣公路容量手冊上，並未將匝道流率納入容量值考量因素之一，故此研究得出之結論有所不同。



(a)主線三車道



(b)主線四車道

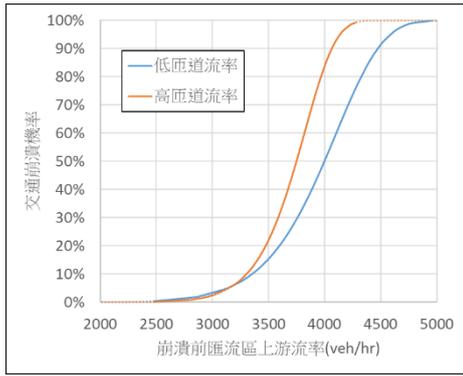
圖4-9 不同匝道流率之車流崩潰機率累積分布圖（匯流區）

表4-10 不同匝道流率之韋伯分布參數校估結果與容量值（匯流區）

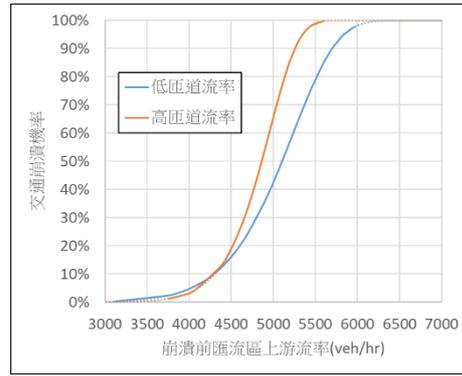
匝道流率	主線三車道				主線四車道			
	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值
低	114	5,412	19.5	5,593	47	7,960	13.8	8,339
高	110	5,543	22.8	5,701	43	8,131	27.5	8,323

本研究認為匝道流率之高低，對崩潰前流率之影響較小。然而從管制角度而言，匯流區主線上游之流率是無法控制的，管理者僅可透過儀控控制匝道流率，減少車流崩潰發生之機率。故在討論車流崩潰機率上，可以探討在同樣的匯流區主線上游流率時，低匝道流率與高匝道流率其車流崩潰機率是否有所不同。

為了確認低匝道流率與高匝道流率其車流崩潰機率是否有所不同，本部分改為以崩潰前匯流區上游流率作為容量值，同樣透過最大概似估計法校估出各情境其韋伯分布之參數，其車流崩潰機率累積分布函數如圖4-10 (a)、(b)所示，校估之資料樣本數、韋伯分布參數，以及85%崩潰機率下的最大崩潰前流率值如表4-11所示。透過資料統整後，本研究發現不論是在三車道還是四車道之情況下，當上游流率固定時，匝道流率值越高，其車流崩潰機率也會越高。故在交通管理上若能有效控制匯入匝道之流量，就能減少車流崩潰之發生。



(a)主線三車道



(b)主線四車道

圖4-10 不同匝道流率之車流崩潰機率累積分布圖（匯流區上游）

表4-11 不同匝道流率之韋伯分布參數校估結果與容量值（匯流區上游）

匝道流率	主線三車道				主線四車道			
	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值	樣本數	比例參數	形狀參數	累積機率85%之容量值
低	114	4,136	10.7	4,392	47	5277	10.9	5,597
高	110	3,841	14.9	4,011	43	4978	27.5	5,190

#### 4.3.7 各情境之統整

本研究針對壅塞時段、天氣、主線速限、主線車道數、路肩開放，以及入口匝道流率等不同情境下之結果統整如表4-12所示。本研究發現與使用者較為相關之壅塞時段因素，確實會影響容量之隨機性，各地點於不同壅塞時間之容量分布有所不同，而實際之大小排序會隨著地理位置而異，如通勤區或旅遊區等；而客觀因素中也發現天氣、路肩是否開放，以及匝道流率會影響容量之隨機性，晴天之容量值會比雨天高出 250 車輛/小時；開放路肩之地點其總斷面容量會增加 700~1,000 車輛/小時；在上游流率固定之情況下，當匝道流率值越高，其車流崩潰機率也越高。然而，本研究結論較不明確之情境為主線速限與主線車道數，經確認可能之原因如下：

1. 在主線速限之情境中，本研究並未考慮各地點之匝道儀控，或是機動開放路肩等管制措施對容量所造成之影響，故無法確認各地點其容量值不受其他管制因素影響，進而造成該結論不明確。
2. 不論在主線速限或是主線車道數之情境下，本研究發現符合特定情境之地點太少，如主線速限為 90公里/小時之地點僅有國 3 南下安坑匯流

區符合條件，主線車道數為四車道之地點僅有國 1 北上林口與國 3 北上三鶯匯流區符合條件。

表4-12 各情境之結論統整表

結論是否明確	情境	結論
明確	壅塞時段	(1) 容量隨機性依壅塞時段有所不同 (2) 容量值實際之大小排序隨地理位置因素而異
	天氣	(1) 晴天之容量值比雨天高出 250 車輛/小時 (2) 雨天因影響能見度，導致容量值較低
	路肩是否開放	(1) 開放路肩之地點容量會增加 700~1,000 車輛/小時 (2) 與近期THCM2020第四章基本路段提及「增加之容量值為一車道容量的一半（900~1,000）」結論類似
	匝道流率	(1) 三車道狀況下，高匝道流率會比低匝道流率高出100 車輛/小時 (2) 四車道狀況下，高匝道流率與低匝道流率之差異不顯著 (3) 在上游流率固定之情況下，當匝道流率值越高，其車流崩潰機率也越高 (4) 有效控制匯入匝道之流量，就能減少車流崩潰之發生
不明確	主線速限	(1) 主線速限對容量造成影響隨壅塞時段而有不同 (2) 因安坑交流道有匝道儀控，該變因導致主線速限影響容量隨機性結論不明確
	主線車道數	(1) 四車道容量比三車道容量多出150車輛/小時/車道 (2) 因四車道之容量在各地點的差異性較大，故該結論不明確

# 第五章 結論與建議

## 5.1 結論

本研究為了確認高速公路匯流區其容量隨機性會受何種外在因素之影響，透過確認符合重現性壅塞之臺灣高速公路之匯流區，以及檢核可用之VD，篩選出可作為隨機性容量分析之地點，並以一流程判斷車流崩潰發生之時間與收集其相關資訊，取得各地點於不同壅塞時段之多個車流崩潰前流率值，進行韋伯分布之參數校估，而後透過不同之情境分析不同外在因素對於容量隨機性之影響。

本研究之結論及研究限制整理如下：

1. 在車流崩潰之判斷流程中，本研究發現流程判斷上會多篩選到兩次性壅塞中第二次之車流崩潰相關資訊，在分析上可能會導致崩潰前流率值過低，不符合實際情形之狀況，本研究以人工方式確認崩潰前流率值較低之壅塞日期，進而透過繪製流率與速率時間圖，確認是否為兩次性壅塞之現象，再排除第二次車流崩潰之相關資訊。
2. 極限乘積法與韋伯分布為兩種容量隨機性之分析方式，在資料蒐集過程中，極限乘積法會將無壅塞之最大流率事件以及有壅塞之崩潰前流率納入資料考量；韋伯分布僅將有壅塞事件之崩潰前流率納入資料考量。經透過國道3號北上中和交流道之資料後確認兩方式所得之車流崩潰機率累積分布函數無太大差異，可確認臺灣高速公路較少有流率高但無發生壅塞之現象。
3. 在壅塞時段因素中，本研究發現在同一匯流區下，不同的壅塞時段會有不同的容量值，且各壅塞時段之容量值之大小排序，會隨地點而有所不同，該結果會與該交流道位於住宅區或旅遊地點等地理位置因素而有所差異。
4. 在天氣因素中，本研究得出之結論為在雨天時，其容量值會減少約250車輛／小時之容量，原因為下雨會使道路之能見度不佳，使得高速公路運行之效率下降，而以國道3號南下安坑與國道3號北上中和兩地點而言，在下班時間降雨對於容量之影響又較大。
5. 在主線速限因素中，本研究發現在不同壅塞時段下，主線速限對容量造成之影響不一致，此結論與直觀認為速限越高其運行效率越好之看法不同。然而，主線速限為90公里／小時之地點僅有國道3號南下安

坑，其匯流區之容量可能受匝道儀控所影響，故此結論是否成立，需要後續更進一步的研究。

6. 在主線車道數因素中，本研究發現在四車道之單車道容量值比三車道多出 150 車輛／小時，與國外文獻所指出車道數越多時，其單車道之容量越低不同。本研究認為主線四車道之容量值於各地點的差異性較大，故車道數越多，單車道之容量值越大之結論是否成立，需要後續更進一步的研究。
7. 在路肩開放因素中，本研究發現在開放路肩之地點，平日上午會增加約 700 車輛／小時的容量；平日下午會增加約 1,000 車輛／小時的容量，假日會增加 1,000 車輛／小時的容量，可得知開放路肩確實能使運行效率提升。但開放路肩後，每車道之容量值並未比無開放路肩來得高。
8. 在入口匝道流率因素中，本研究發現在三車道之情況下，高匝道流率會比低匝道流率之容量值高出 100 車輛/小時的容量，四車道之差異則較不顯著。在臺灣公路容量手冊上，並未將匝道流率納入容量值考量因素之一，故此研究得出之結論有所不同。
9. 在上游流率固定之情況下，當匝道之流率值越高時，其車流崩潰機率也會越高，故在交通管理上若能有效控制匯入匝道之流量，其車流崩潰之機率也能隨之降低。
10. 本研究的分析並未考慮重車及大型車對於容量值之影響，國內的 VD 資料雖然有按車長將車流量分為 3 個類別，但本研究之經驗發現 VD 按車種分類的流率數據與實際的重車比例差異較大，有許多不合理的情況。因此本研究在分析地點的選擇上，選取重車比例較低、非工業區的地點，各調查地點於每日之重車比例均不超過 7%，以排除重車比例對於容量的影響。因此，本研究流率的單位為車輛/小時，並未進行當量調整。

## 5.2 後續研究之建議

本研究在韋伯分布之參數校估中，在國道 1 號北上林口於假日壅塞之資料組中，僅有 29 次壅塞，本研究認為該資料組之樣本數過少，故無法透過足夠之資料確認該組資料是否符合韋伯分佈。本研究在確認符合韋伯分佈樣本組之最低樣本數為 35，而樣本數低於 35 之資料組則無法確認該資料組是否符合韋伯分佈。然而本研究並無法實際確認校估參數所需之樣本數為何，且過去研究僅提及資料樣本越多之狀況下，其分析結果會更為準確，並無更進一步說明其最低

樣本數之要求。若要避免無法校估參數之情形發生，可考慮擴充觀察之資料，進而得到更多車流崩潰事件之樣本，也可以改為使用極限乘積法進行容量隨機性之分析。

在容量隨機性之分析中，本研究在不同速限，以及不同車道數之容量隨機性分析並未有較為明確之結果，其可能原因為沒有考慮各地點之匝道儀控，或是機動開放路肩等管制措施對容量所造成之影響。以國道 3 號南下安坑交流道為例，該匯流區平日上午有經常性的匝道儀控，故該地點於平日上午之容量值均較高，導致無法確認在分析特定因素影響容量之過程中，各情境之容量值不受其他管制因素所影響，後續之研究若能將匝道儀控之時間與儀控率，以及機動性路肩開放之時間納入因素考慮，不同外在因素對容量隨機性影響之結論應會更為明確。

# 參考文獻

- 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(2018)，高速公路匝道分匯流區車流特性調查之先期規劃。
- 歐陽恬恬、林豐博、曾平毅、蘇振維(2016)，「高速公路主線及匝道匯流區車流特性之研究」，*交通學報*，第16卷第1期，頁19-38。
- Asgharzadeh, M., & Kondyli, A. (2020), "Effect of Geometry and Control on the Probability of Breakdown and Capacity at Freeway Merges," *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, Vol. 146, No. 7, 04020055.
- Brilon, W., Geistefeldt, J., & Regler, M. (2005), "Reliability of freeway traffic flow: a stochastic concept of capacity," *Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Vol. 125143, Maryland: College Park.
- Chung, K., Rudjanakanoknad, J., & Cassidy, M. J. (2007), "Relation between traffic density and capacity drop at three freeway bottlenecks," *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 41, No. 1, pp. 82-95.
- Dehman, A., & Drakopoulos, A. (2016), "Revisiting Merge-Influence Area Empirically: Operations Inside Recurrent Freeway Bottlenecks," *Transportation Research Record*, Vol. 2553, No. 1, pp. 52-62.
- Elefteriadou, L., Roess, R. P., & McShane, W. R. (1995), "Probabilistic nature of breakdown at freeway merge junctions," *Transportation Research Record*, Vol. 1484.
- Elefteriadou, L., Kondyli, A., Washburn, S., Brilon, W., Lohoff, J., Jacobson, L., Hall, F., & Persaud, B. (2011), "Proactive ramp management under the threat of freeway-flow breakdown," *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 16, pp. 4-14.
- Geistefeldt, J., & Brilon, W. (2009), "A comparative assessment of stochastic capacity estimation methods," *Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee*, Boston: Springer, pp. 583-602.
- Gubbala, P. S. S. S. (2017), Effect of On-Ramp Demand on Capacity at Merge Bottleneck Locations, M.E. Thesis, University of Kansas.
- Heikoop, H., & Henkens, N. (2016), "Recent developments and history of the Dutch HCM," *Transportation research procedia*, Vol. 15, pp. 51-62.
- Heshami, S., Kattan, L., Gong, Z., & Aalami, S. (2019), "Deterministic and stochastic freeway capacity analysis based on weather conditions," *Journal of*

*Transportation Engineering, Part A: Systems*, Vol. 145, No. 5, 04019016.

- Kondyli, A., Elefteriadou, L., Brilon, W., Hall, F. L., Persaud, B., & Washburn, S. (2013), "Development and evaluation of methods for constructing breakdown probability models," *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 139, No. 9, pp. 931-940.
- Kondyli, A., Gubbala, P., & Elefteriadou, L. (2016), "The Contribution of Ramp Demand in the Capacity of Merge Bottleneck Locations," *Transportation Research Procedia*, Vol. 15, pp. 346-355.
- Lorenz, M. R., & Elefteriadou, L. (2001), "Defining freeway capacity as function of breakdown probability," *Transportation Research Record*, Vol. 1776, No. 1, pp. 43-51.
- Srivastava, A., & Geroliminis, N. (2013), "Empirical observations of capacity drop in freeway merges with ramp control and integration in a first-order model," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 30, pp. 161-177.
- Van Beinum, A., Farah, H., Wegman, F., & Hoogendoorn, S. (2018), "Driving behaviour at motorway ramps and weaving segments based on empirical trajectory data," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 92, pp. 426-441.