

應用模擬實驗構建高速公路入口匝道儀控模式

蘇志強¹ 蘇梓見²

摘要

匝道儀控乃是高速公路交通擁塞管理的主要方法，也是執行運輸走廊控制的基礎，而有效的匝道控制需確實掌握與時俱變之交通狀況，方能適時反應恰當的儀控率。一般在執行地區交通感應儀控系統，惟恐繁瑣的數學運算，延誤線上即時控制，常須事先建立控制路段有關的主線容量、臨界佔有率、流量-佔有率關係圖及佔有率-儀控率對照表等資料，但要實際調查高速公路上各種流量、佔有率、儀控率等的最適組合關係相當困難，且所需經費甚鉅。因此本研究採用 TRAF 序列中的 FRESIM 微觀車流模擬模式，運用其微觀車流模擬模式的特點及可以任意指定埋設位置及類別偵測器監控之功能，以完整的實驗設計配合高速公路實質條件，針對主線與上匝道 490 種不同的流量組合，進行模擬實驗，建立高速公路主線容量、臨界佔有率及流量-佔有率關係圖等，俾提供地區交通感應能即時查表儀控，以符合動態實況控制之需。

一、前言

一般入口匝道控制策略有定時儀控、地區交通感應儀控、整體交通感應儀控及可接受間距匯入控制等[4,13]，若要兼顧重現性壅塞與非重現性壅塞[5]，必須採用交通感應儀控，而地區交通感應儀控應用最為普遍。地區交通感應儀控策略求算即時儀控率的模式大致有三種：需求-容量控制、佔有率控制及 ALINEA 模式[8,22]等，前二者屬於自動控制理論中的干擾補償邏輯，後者屬於回饋控制邏輯[8]。「需求-容量控制」以主線下游容量與上游需求的差求儀控率，並以佔有率輔助判別是否壅塞，「佔有率控制」必須事

¹ 中央警察大學交通學系副教授（電話、傳真：03-3281911）

² 中央警察大學警政研究所研究生。

先建立高速公路主線佔有率與流量關係圖，並找出臨界佔有率以判別是否壅塞，而「ALINEA 模式」是根據上一控制時段之儀控率及主線下游佔有率與臨界佔有率之差距來求算適當儀控率，若為滿足上述控制的需要，則需將偵測器埋設於匝道附近主線上，以有效捕捉匝道上游主線路段上複雜的車流行為，例如加減速、變換車道、交織、分流及併流等情形，因此一般路段上所蒐集之偵測器資料與匝道附近蒐集來的資料並不相同，也不能以一般路段的偵測器資料代替匝道附近之主線偵測器資料，以執行彈性儀控。

在傳統作法方面，研究人員大都利用高速公路所埋設之偵測器或利用現場攝影方式來蒐集高速公路流量、密度、佔有率及速率等資料 [6]；以供即時運算式建立儀控模式的基礎，但利用偵測器方式必須遷就偵測器位置，而且調查樣本必須包含壅塞及非壅塞情況，因此，地點的選擇甚為重要，有時適合的地點，可能未埋設偵測器，則調查人員需以現場攝影調查方式加以捕捉。即便如此，調查的樣本數必須有代表性，且需涵蓋各種流量狀況組合，因此必須花費大量的時間及成本，更重要的是，有些交通狀況可能無法在調查期間出現，而影響資料蒐集的代表性。

自 1945 年第一套數位電腦運作之車流模擬模式發展完成以來，乃引發交通學者從事電腦模擬車流行為之趨勢[2]。再加上資訊科技及軟硬體的突飛猛進，發展出來的車流模擬模式能夠處理更精確、更複雜的幾何設計及交通狀況，並且大大減少了所需的模擬時間。現有許多高速公路微觀車流模擬模式更具有匝道儀控及埋設偵測器，蒐集動態交通資料的能力(例如：FRESIM 及 INTEGRATION [16]等)。佔有率與流量關係圖，理應在各種交通組合下由實際調查資料據以建立，但此項調查所需人力、財力及觀測時間甚鉅，甚或某些交通狀況較難出現，無法實際蒐集，為克服上述難關，本研究運用模擬實驗法，在完整的實驗設計及滿足各種交通狀況組合下，進行交通資料蒐集，廣泛構建的儀控模式，能真正符合各種交通狀況變化之需。

二、模擬模式篩選

車流模擬模式就模擬的對象及觀念而言可分為：(1)巨觀(Macroscopic)模仍著重於整體車流現象之概況描述，對於車輛行為以密度、速率、流量之平

均數值來處理，並不模擬個別車輛間之運作。(2)中觀(Mesosopic)模式的模擬之對象係以車隊為著眼點，對於車輛之推進處理，係利用事先調查或分析之平均數值來代替，而不處理車輛與車輛間之相互干擾行為，因此較為節省時間，並可用於較大型之網路。(3)微觀(Microscopic)模式則著眼於車輛與車輛間之個別運作處理，可將不同推進判斷模式結合處理運用，較為複雜且記憶體用量大，而不易模擬較大型之網路。[2]

本研究之目的係要建立高速公路主線流量與佔有率關係圖，作為匝道儀控之依據，因此，所使用之模擬模式必須具備的特點有(1)精確地表達車流行為，車輛的推進、變換車道等均能精確地描述與表達，提供較切合實際的交通行為表示，(2)必須具備埋設偵測器的能力，調查地點不同所得結果不同，偵測器依據實際需要位置埋設，蒐集流量、佔有率等資料，(3)優良的幾何表示能力，模擬地點為高速公路的交流道，因此必須可以表示進入或駛離高速公路的加、減速車道。就以上所述，為滿足本需求，所選用的車流模擬模式必須是微觀模式。

國內外常見的高速公路車流模擬模式有：CORFLO、FREFLO、FREQ、INTEGRATION、FRESIM(其前身是INTRAS)、CORSIM等[16]，其中CORFLO、FREFLO及FREQ模式為巨觀模式，INTEGRATION為中觀模式，其餘為微觀模式。CORFLO、FREFLO及FREQ不能滿足本研究需要，INTEGRATION雖可以埋設偵測器，但無變換車道及跟車邏輯，在幾何表示上亦無法表示加減速車道，因此，亦不予採用。INTRAS為FRESIM的前身，FRESIM的幾何表示能力及運作能力均較INTRAS優越、可以埋設偵測器、豐富的變換車道模式、優越的幾何設計能力，有六種不同的車種表示，能滿足本研究之需要。CORSIM為FRESIM與NETSIM的結合體[17]，用以整合高速公路與地區聯絡道路的車流模擬，本研究地點僅限於高速公路，因此無須使用CORSIM模式。

綜上所述，為滿足本研究需要，採用FRESIM微觀車流模擬模式進行高速公路車流模擬。

三、FRESIM 模式特性分析

高速公路車流模擬模式 FRESIM 係美國聯邦公路總署於 1994 年所研發，係屬於微觀高速公路車流模擬模式，屬於 TRAF 系列的模式之一，有關 TRAF 內容請參考表 1。

表 1 TRAF 模擬模式表

適用路段 \ 模式別	微觀模式 (Microscopic)	巨觀模式 (Macroscopic)
高速公路	FRESIM	FREFLO
平面道路	NETSIM	NETFLO LEVEL 1、LEVEL 2

資料來源：美國聯邦公路總署 [17]

FRESIM 的幾何表示及運作能力均較其前身 INTRAS 模式強；例如其能模擬比較複雜的高速公路幾何設計，並提供較切合實際的交通行為表示，同時，其亦比 INTRAS 模式有彈性，對使用者來說亦較為友善 [12]，有關其公路幾何設計及運行特性之優越性、資料輸入格式、資料輸出項目，分別整理如下：

1. FRESIM 最優勢的高速公路幾何設計的模擬能力包括：

- 1 – 5 個高速公路主線車道、1 – 3 個匝道車道。
- 不同的高速公路坡度變化、轉彎半徑及超高。
- 允許高速公路任何地方的車道增加及縮減。
- 高速公路道路封閉事件。
- 施工路段可以透過使用障礙物處理的能力來處理。
- 可以表示進入或離開高速公路的輔助車道（加、減速車道）。

2. 運行特性的模擬能力：

- 豐富的變換車道模式。
- 定時及交通感應式匝道儀控。

- 豐富的高速公路監控系統表示。
- 六種不同車種表示，包括兩種小客車及四種貨車，都有個別的績效能力。
- 重型車輛專用車道、限制使用車道。
- 依駕駛習慣（跟車敏感度係數）的差異：從膽怯的(timid)到具有攻擊性(aggressive)等定義十種不同的駕駛人類型。
- 車輛對幾何變化的反應：在接近意外事件、車道縮減、下匝道的地點使用者可以指定警告標誌影響變換車道的行爲。

3. 資料輸入

FRESIM 的資料輸入卡共有 31 張，其中 12 張為必須輸入之資料卡，其餘為選擇性輸入資料卡，第 3 卡為時段描述卡（ Time Period Record ）描述模擬時段數及各時段模擬時間長短，第 4 卡為時階控制卡（ Time-Step Control Record ）設定時距（ Time Interval ）及時階（ Time Step ）長度，其中時段必須為時距的倍數，而時距必須為時階的倍數，第 19 卡為連線幾何特性卡（ Link Geometry ）描述各節線的幾何特性，第 20 卡為連線幾何運作卡（ Link Operation Record ），描述各節線的坡度、超高、彎道半徑等特性，第 28 卡為監控描述卡（ Surveillance Specification Record ），依實驗需要埋設必要之偵測器，而有關各輸入卡之應注意事項，請參酌 FRESIM 使用手冊 [12]。

4. 資料輸出

FRESIM 模式的基本輸出可歸納如下列四個主要部份：

- (1) 輸入資料回應表(Input Data Echo Tables)：提供使用者所輸入資料的全貌，使用者較易於閱讀；將類似之資料放在一起，不但使使用者易於閱讀、便於偵錯。
- (2) 中間統計輸出(Intermediate Statistics)：中間統計輸出包括“中間節線(link)統計”與“車輛內涵表(the vehicle content table)”等兩個

表格。車輛內涵表描述在模擬子網路中，每一節線中每一車道內所含的車輛數，中間節線統計輸出由一些和高速公路運作有關的績效評估(MOE)項目組成，其輸出項目如下：節線內車輛數(Content)、駛離之車輛數(Vehicles Discharged)、轉向車輛數(Turn Movements)、延滯/車輛數比值、平均速率、儀控碼及變換車道車輛數等。

- (3) 累計統計輸出(Cumulative Statistics Output)：相關的輸出項目整理如下：進入車輛數(Vehicles In)、駛離車輛數(Vehicles Out)、變換車道數(Lane Changes)、節線內車輛數(Current Content)、平均節線內車輛數(Average Content)、延車一哩(Vehicle-Miles)、延車一分(Vehicle-Minutes)、總時間(Total Time)、實際行駛時間(Moving Time)、總行駛時間(total time)、延滯時間(Delay Time)、M/T (Moving time/Total Time)、Total (Vehicle-Minute/ Vehicle-Miles)、延滯(Delay)、流量、密度及速率等。
- (4) 油耗和排氣輸出(Fuel and Emissions Output)：包括總油耗(單位：加侖)、油耗率(Fuel consumption rates)(單位：哩/加侖)，HC、CO和NO的廢氣排放率(克/哩)。

四、模擬實驗設計

爲充分觀察高速公路上匝道管制與高速公路主線及其平面道路間之互動關係，本研究將實驗的高速公路網路，設計如圖 1，而其實質條件含：單一入口匝道、高速公路主線全長十公里（匝道上、下游各五公里）、研究網路幾何設計、儀控設備及偵測器佈設等，而有關的各種實驗條件分述如下：

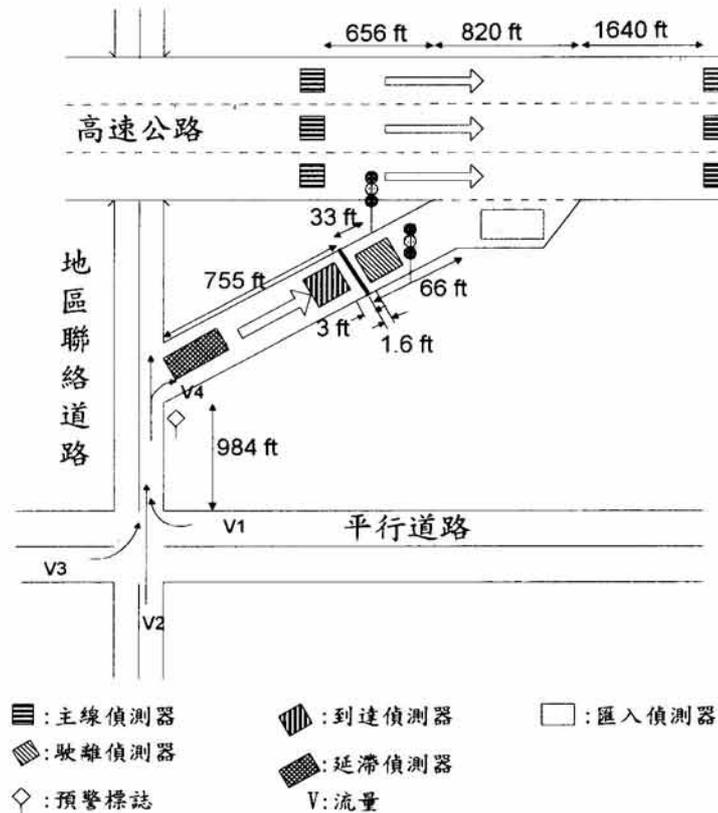


圖 1 匝道儀控設備與偵測器佈設圖

(一) 模擬控制條件設計

本研究之高速公路及平面道路幾何條件、儀控設備與偵測器設計，說明與整理如表 2。

表 2 模擬網路幾何條件

項 目	條 件	備 考
幾何條件：		
高速公路主線	全長 32808 呎(十公里)，入口匝道上、下游各 16404 呎(五公里)，三車道	
加速車道	長度 820 呎	
匝道條件	單一車道、長度 820 呎	
地區聯絡道路	具有中央分隔島、距離匝道入口 984 呎	
偵測器：		
主線上游偵測器	設置於距匝道匯入緣石鼻端上游 492 - 656 呎處	
主線下游偵測器	其位置距匝道匯入緣石鼻端，宜介於 3280 至 6562 呎間，且應在車輛已完成匯入動作後，暫將其位置定於加速車道結束點後方至少 1640 呎處，並視實際需要再予調整之	
到達車輛偵測器	設於距停止線前約 3 至 5 呎處	
駛離車輛偵測器	設置於距停止線後方 1.6 呎以上	
延滯車輛偵測器	設置於進入匝道後，並依匝道現場狀況調整之	
匯入偵測器	設置於加速車道中間偏後位置(車道寬尚餘 7 呎處前方)	
儀控設備：		
儀控號誌	停止線後方 16 - 49 呎處	
停止線	設於距匝道鼻端 66 呎處	

(二) 模擬網路設計圖

虛擬節點與實際網路關係，配置如圖 2 與圖 3，5 個虛擬節點與 7 個虛擬節線 (Link)，為配合 FRESIM 模擬網路設計需要，因 FRESIM 模式具有埋設偵測器之功能，因此有關本實驗所必須之偵測器佈設，將依照圖 1 與表 2 所配置的位置與條件進行。

(三) 實驗條件與設計

建立佔有率與流量關係圖所需的各種資料，將在完整的實驗設計下，以 FRESIM 模擬產生，其產生的過程如下：模擬路段幾何條件及偵測器佈設請參考表 2，假設各節線交通組成為固定不變，並參酌八十四年交通動態資料調查報告，高速公路主線大貨車比率取 5%，小客車佔 95%、交流道大貨車比率取 2%，小客車佔 98%；第 20 卡中期望自由流速率 (Desired free-flow speed) 採用預設值 (55 哩/時)。節點 8001 (高速公路主線) 之 Entry Volume

由 100vph/hr 至 9900 vph/hr，每次遞增 100 vph/hr，節點 8021（入口匝道）Entry Volume 則分爲：0vph（無流量）、100vph、300vph（低流量）600vph（中流量）、1200vph（高流量）等五種，分別與主線各不同流量狀況搭配進行模擬，共有 490 種不同流量組合。每一種交通流量狀況組合模擬一小時（模擬時間（Duration of Time Period）設爲一小時，時距（Time Interval）設爲 60 秒，時階（Time Step）設爲 1 秒），且每十分鐘輸出偵測器資料乙次，每種交通流量狀況組合之模擬輸出可得 6 筆流量與佔有率資料，總共可得 2316 筆資料，並由流量與佔有率作非線性迴歸分析，可得出最適曲線。表 3 爲 FRESIM 偵測器輸出範例，本研究利用其中流量與平均佔有率建立流量-佔有率關係圖。

表 3 FRESIM 偵測器之輸出範例

節線 (位置)	車道編 號	距離上游節 點距離(呎)	偵測器類型	偵測器 長度(呎)	流量 (VPH)	平均速率 (MPH)	平均間距 (秒)	平均佔有 率(%)
1-2	1	5905	SINGLE SHORT LOOP	6.0	786	43.845	4.638	6.032
1-2	2	5905	SINGLE SHORT LOOP	6.0	1056	44.845	3.459	7.873
1-2	3	5905	SINGLE SHORT LOOP	6.0	768	43.979	4.625	5.854
2-3	1	2460	SINGLE SHORT LOOP	6.0	804	43.528	4.468	6.610
2-3	2	2460	SINGLE SHORT LOOP	6.0	942	44.996	3.819	7.031
2-3	3	2460	SINGLE SHORT LOOP	6.0	852	43.581	4.224	6.631

表 4 佔有率-儀控率表

佔有率 x (%)	流量 y (vphpl)	車道容量-流量 Cap-y	儀控率 3*(Cap-y) (輛/時)
15	1825	375	1125
16	1901	299	897
17	1966	234	702
18	2021	179	537
19	2064	136	408
20	2097	103	309
21	2118	82	246
22	2129	71	213
23	2129	71	213
24	2118	82	246
25	2097	103	309

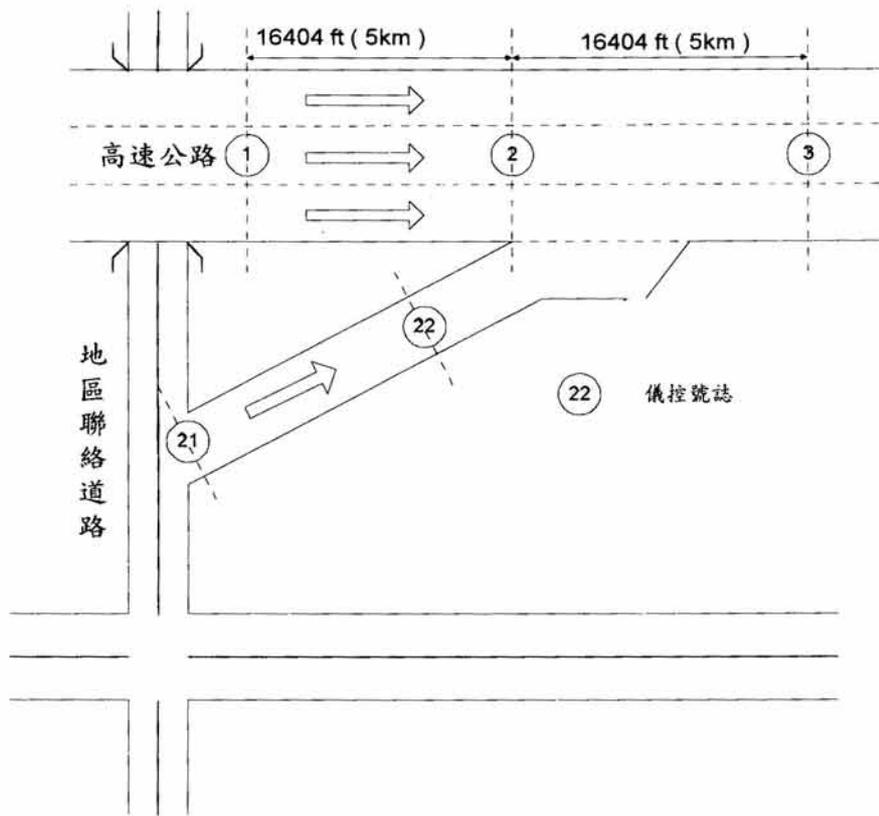


圖 2 實際網路與虛擬節點關係圖

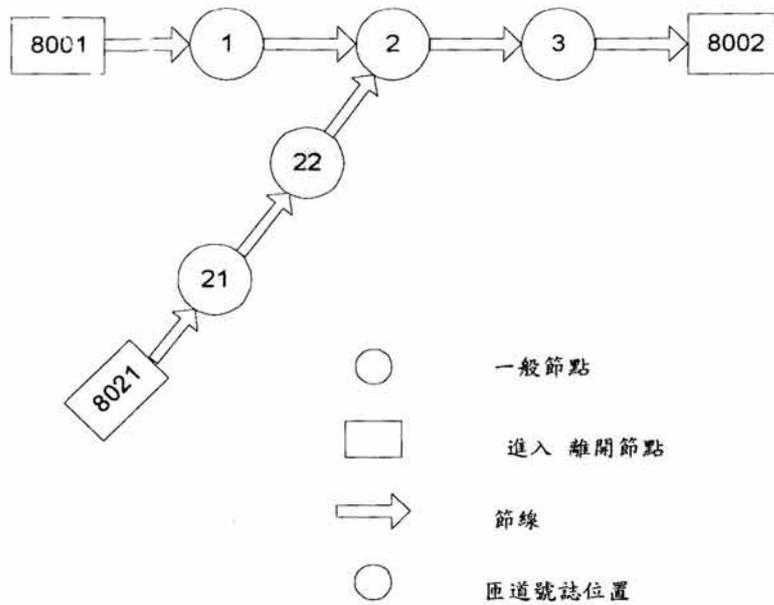


圖 3 FRESIM 模擬網路設計圖

五、模式構建與評估

根據以上路網及模擬實驗設計，經由 FRESIM 模式進行模擬，共可得 1348 筆偵測器輸出資料，其中流量與佔有率關係詳如圖 5。

根據圖 3-5 關係，可得車道容量約為 2200vph/lane；並可得一四次回歸式： $y = .0044 x^4 - .3493 x^3 + 4.8583 x^2 + 111.13 x + 21.803$ ，判定係數 $R^2 = 0.99$ ，其中 x 為佔有率、 y 為流量，依據藍武王、許書耕（8）之建議：當高速公路服務水準在 C 級以內（或佔有率小於 15%）時，可不實施上匝道儀控。當高速公路服務水準為 D 級或 E 級（或佔有率 15~25%）時，係實施上匝道儀控最佳時機。因此，為建立佔有率及流量關係表之需要，以佔有率 15 至 25 分別求出其流量之對應值，再以車道容量減去各流量值，因為有三個車道，因此再將車道容量與各流量值之差乘以三倍即可求得對應之儀控率（詳如表 4），提供交通感應儀控使用。其數學式如下：

$$rate(x) = l \times (Cap_{lane} - y(x))$$

其中：

- x : 佔有率
- y : 車道流量
- l : 高速公路主線車道數（本例高速公路主線為 3 車道）
- $rate(x)$: 在佔有率為 x 時，所應採用之儀控率
- Cap_{lane} : 車道容量（2200vph）

在上列數學式中，係假設高速公路之容量為車道容量乘以車道數，並且假設位於平直路段，若在公路容量手冊 [18] 中有因應坡道、彎度等之容量調整方法，可依其規定調整之。由表 4 中可看出當佔有率為 23% 時，車道流量為最高，因此臨界佔有率為 23%，且最小儀控率為 213vph。

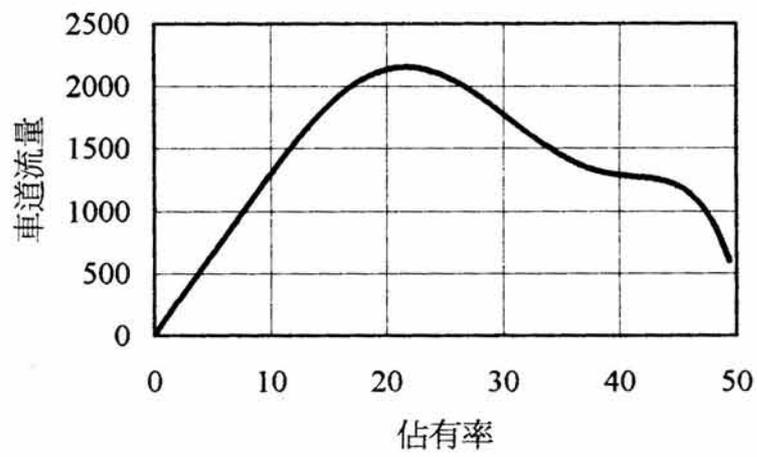
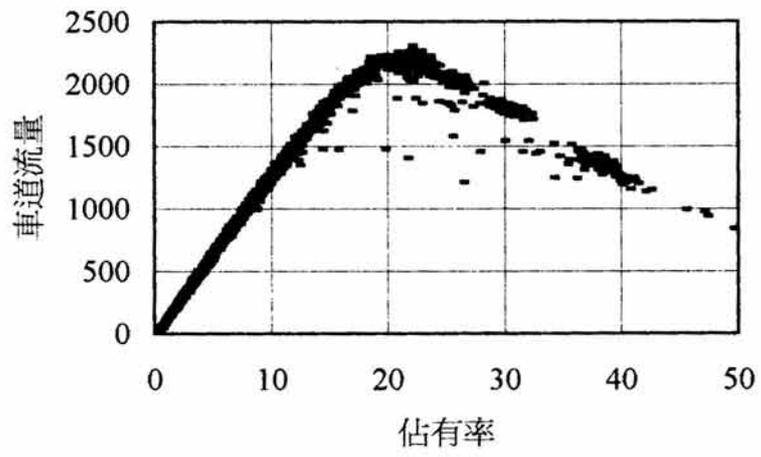


圖 5 佔有率-流量關係圖

六、結論與建議

本研究已運用 FRESIM 微觀車流模擬模式的特點及其可以任意指定埋設位置及類別偵測器監控之特色，在設計符合實際高速公路實質條件之路段及完整的實驗設計流程下，成功的以實驗法建立高速公路主線容量、臨界佔有率及流量-佔有率等關係圖，俾提供地區交通感應能即時查表儀控，其既能符合動態實況應用，又可免去繁瑣的數學運算。以模擬實驗法除可以省卻大筆的調查經費外，不受車流狀況的影響，而且其涵蓋範圍包括非壅塞狀況、接近容量車流狀況及壅塞狀況等，並非一般調查可以獲得。但畢竟 FRESIM 為美國聯邦公路總署(FHWA)所開發的車流模擬模式，適合於美國的道路狀況及駕駛行為，未必適合於台灣地區的車流狀況，若要進一步應用於台灣地區高速公路時，應該進一步驗證 FRESIM 車流模擬模式在台灣地區的適用性問題。

參考文獻

1. 交通部台灣區國道高速公路局，中山高速公路入口匝道儀控系統工程規劃報告，1995年2月。
2. 交通部台灣區國道新建工程局，匝道儀控與平面道路之號誌群組連鎖控制歸劃與設計，1996年1月。
3. 交通部運輸研究所，高速公路匝道儀控現場督導、實施績效與衝擊評估，1994年11月。
4. 吳健生，高速公路交通控制策略，運輸計畫季刊，第十四卷，第二期，PP257-285，1985年6月。
5. 蔡輝昇，交通控制理論與實務，生和出版社，1980年。
6. 范俊海、賴淑芳，高速公路車道縮減路段速度-流量-密度關係之實證研究，中華民國運輸學會第七屆論文研討會，1992年12月。
7. 張程皓，都會區高速公路匝道儀控之研究，國立臺灣大學土木工程研究所碩士論文，1994年6月。

8. 藍武王、許春耕，高速公路上匝道儀控系統之理論與實務初探，都市及公路交通監控技術研討會論文集，1993年12月。
9. 羅永光、陳菀蕙，FREQ8PE應用於高速公路匝道控制之研究--以五股至內湖段為例，中華民國運輸學會第六屆論文研討會，1991年7月。
10. Ana Coady, "Ramp metering: State of the Art Review", 交通部台灣區國道高速公路局, 中山高速公路入口匝道儀控系統工程第一次技術研討會論文集, 1995.
11. Federal Highway Administration, Freeway Simulation Model Enhancement and Integration FRESIM Technical Report, FHWA Contract DTFH61-85-C-00094, 1990, .
12. Federal Highway Administration, "FRESIM User Guide", Research, Development, and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center 1994, .
13. Federal Highway Administration, Traffic Control Systems Handbook, 1985.
14. Federal Highway Administration, Manual on Uniform Traffic Control Devices, U.S. DOT, 1989.
15. Harold J. Payne, ESSCOR, San Diego., "FREFLO: A Macroscopic Simulation Model of Freeway Traffic", Transportation Research, Vol. 722, 1979.
16. Henry C. Lieu, "Simulation - An Evaluation Technique for Ramp Metering Control Strategies for Freeway Corridors", 交通部台灣區國道高速公路局, 中山高速公路入口匝道儀控系統工程第二次技術研討會論文集, 1995.
17. Federal Highway Administration, "CORSIM User Manual", 1995.
18. Highway Research Board, 1994, Special Report 209, Highway Capacity Manual, 1995.

19. Looze D.P., Houpt P.K., Sandell N.R. and Athans M., "Freeway Ramp Metering", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 23, pp268-275, 1978.
20. Michel Van Aerde, "INTEGRATION: An Overview of Current Model Features", 交通部台灣區國道高速公路局, 中山高速公路入口匝道儀控系統工程第二次技術研討會論文集, 1995.
21. Papageorgiou M., Blosseville J.-M and Hadj.Salem H., "Modelling and Real-Time Control of Traffic Flow on the Boulevard Peripherique in Paris: Part II: Coordinate Onramp Metering", Transportation Research A, Vol. 24A, 1990.
22. Papageorgiou, M., H. Hadj-Salem and J.-M. Blosseville, "ALINEA: A Local Feedback Control Law for On-Ramp Metering", Transportation Research Record 1320, pp 58-64, 1991.
23. Paul F. Eveiall FED., Urban Freeway Surveillance & Control, Federal Highway Administration.