

高速公路上坡路段大車之小客車當量¹

PASSENGER CAR EQUIVALENTS OF LARGE VEHICLES ON FREEWAY UPGRADE SEGMENTS

曾平毅 Pin-Yi Tseng²

陳冠男 Kuan-Nan Chen³

(104 年 10 月 22 日收稿，105 年 3 月 22 日第 1 次修改，
105 年 9 月 6 日第 2 次修改，105 年 9 月 25 日定稿)

摘 要

進行高速公路服務水準分析時，常以大車之小客車當量 (*PCE*) 轉換實際車流成對等純小客車流，此作法並無法反應坡度、坡長及大車比例對上坡路段車流之影響。本研究以交通部運輸研究所發展之 TGS 模式進行模擬，分析高速公路上坡路段之車流特性，並據以估計上坡路段大車之 *PCE*。研究發現，上坡路段之車流速率會隨著坡度、坡長及大車比例增加而降低。大車 *PCE* 隨著坡度及坡長增加呈現上升趨勢；惟當大車比例增加，大車 *PCE* 呈現下降趨勢。大車 *PCE* 在坡度 2% 以下時約為 2.0。本研究建議分析大於 2% 之上坡路段時，不宜直接以一相同 *PCE* 轉換車流，而可利用 TGS 模式進行模擬，進而評估服務水準。

關鍵詞：高速公路；坡度；坡長；TGS 模式；小客車當量

-
1. 本研究初稿曾於 104 年中華民國運輸學會年會暨學術論文研討會中發表；作者感謝科技部專題研究 (MOST103-2410-H-015-012) 補助經費。
 2. 中央警察大學交通學系教授 (聯絡地址:333 桃園市龜山區樹人路 56 號 中央警察大學交通學系；電話：03-3282321 分機 4619；E-mail：una139@mail.cpu.edu.tw)。
 3. 中央警察大學交通管理研究所碩士，目前服務於內政部警政署國道公路警察局。

ABSTRACT

The analysis methodology of level-of-service on freeway segments usually converted real traffic flow rate to equivalent passenger-car flow by constant passenger-car-equivalent (PCE). However, it did not reflect the effect of grade, length of grade and percentage of heavy vehicle on upgrade segments. This study employed the TGS model, developed by the Institute of Transportation, to simulate the traffic condition and estimate heavy vehicle's PCE on freeway upgrade segments. On the basis of the simulation results, this study found that average speed decreased with the increase of grade, length of grade and percentage of heavy vehicles. In addition, the PCE increased with the increase of grade and length of grade, but decreased with the increase of percentage of heavy vehicles. The PCE approximated 2.0 when the grade below 2%. Finally, this study suggested using TGS model to simulate and estimate capacity or level-of-service when grade greater than 2%, rather than convert directly the mixed traffic flow into the equivalent passenger cars by a constant PCE.

Key Words: Freeway; Grade; Length of grade; TGS model; Passenger car equivalent

一、前言

高速公路坡度路段之車流速率，不僅受到坡度之影響，亦可能受到上游坡長及坡度變換之影響，甚至車流中之大車比例對流率及速率之影響亦相當顯著，因此在坡長較長或是坡度較陡的路段上，其車流特性與平坦路段有很大的差異^[1]。坡度路段之交通作業受許多因素的影響，這些因素包括公路類型、坡度、坡長、曲度、車道數、車種組成、車輛爬坡性能、速限、匝道或交叉口之位置及車流等。

2011 年臺灣公路容量手冊 (highway capacity manual, HCM) 分析高速公路服務水準時，以平坦路段大車 1.5 及上坡路段 2.0 之小客車當量 (passenger car equivalent, PCE)，轉換實際車流成對等純小客車流，此作法並無法反應坡度、坡長及大車比例對上坡路段車流之影響。因為影響因素太多，不可能蒐集足夠的現場資料來探討各影響因素與交通作業績效的關係，進而建立分析性模式 (analytical model) 以做為分析工具。有鑑於此，歐美國家常利用電腦模擬模式 (simulation model) 的模擬結果來發展公路設計及容量分析之方法。

目前臺灣交通界對於高速公路上坡路段之車流特性及其影響因素的了解相當有限，交通部運輸研究所 (以下簡稱運研所) 有鑑於修訂臺灣公路容量手冊時，沒有合適的分析工具來分析不同公路之坡度路段，乃於 2013 年開始一個 3 年期之計畫來發展分析坡度路段之工具^[2-4]。目前運研所已經發展一微觀模擬模式，可用以分析高速公路坡度路段 (無上、

下匝道) 之車流，該模擬模式命名為公路坡度路段模擬模式 (traffic-on-grade simulation model，簡稱 TGS 模式)。

由於不同的坡長及坡度會組成各種上坡路段，如果要蒐集各種情境下的交通條件及幾何狀況，進而評估上坡路段之服務水準，有其難度。因此本研究利用 TGS 模式，模擬各種常見的上坡路段其坡長及坡度之組合情形，從穩定之低流率至不穩定之高流率、常見之大車比例範圍等條件下之車流運作狀況，進而建立各種流率與速率之關係及速率與坡長之關係，並進一步估計高速公路上坡路段之大車 *PCE* 值。

二、高速公路服務水準分析方法

2.1 2011 臺灣 HCM

2011 年臺灣 HCM^[5] 的高速公路服務水準分析程序為：

1. 訂定需求流率

先將車流中實際或預測之尖峰小時流率，以尖峰小時係數轉換成尖峰 15 分鐘單方向之需求流率。

2. 訂定幾何設計狀況

針對一現存或一特定之交通設施，分析時係依其幾何設計狀況為主，例如車道數、坡度、坡長、車道寬及路肩寬。

3. 建立幾何設計之近似直線路段

基本路段縱斷面之幾何設計可能包含直線段及平曲線段。有平曲線段時，整個基本路段須轉換成一系列的近似直線坡度路段 (equivalent grade)。

4. 訂定分析臨界點及估計臨界點之平均自由速率

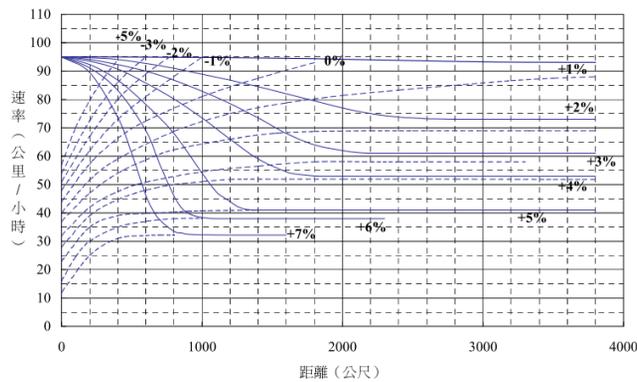
臨界點係指平均自由速率最低之地點。為訂定臨界點，近似直線路段可先分成平坦路段及坡度路段，坡度路段包括主線車道及大車爬坡道。由於爬坡道之功能異於主線車道，故通常爬坡道之服務水準並非一重要之考慮因素。平坦路段指坡度在 1% 以下之路段，若所有平坦路段之車道數、車道寬及車道離路旁障礙物之橫向距離皆相同，則所有平坦路段可當成同一路段以分析之。本分析方法假設平坦路段各點之自由速率不會因在車道之位置而變，所以同一車道上任何一點都可當做臨界點，其平均自由速率可依照表 1 之數據估計之。

只有一上坡路段時，臨界點在該路段之頂端；如果有一系列之上、下坡則必須先估計自由速率在各點之值以訂定臨界點。臨界點的自由速率須分成小車及大車的個別速率，再依照大車比例轉換成平均自由速率。有關大車之自由速率，可由圖 1 估計之。而圖 1 亦可用來估計小車之自由速率，惟依照 2011 臺灣 HCM，須先將分析小車速率之上坡坡度轉換成實際坡度之 40%。

表 1 平坦路段之自由速率估計值

速限 (公里/小時)	內車道自由速率 (公里/小時)	外車道自由速率 (公里/小時)
100	104	94
90	97	87

資料來源：[5]。



資料來源：[5]。

圖 1 大車在上、下坡路段加速 (虛線) 及減速 (實線) 之特性

5. 估計臨界點在基本狀況下各內車道之對等需求流率

步驟 1 之需求流率可根據式 1 轉換成基本狀況下各內車道之對等需求流率，此即對等純小客車之需求流率。

$$q_e = \frac{q(1 - P_t)f_c + qP_tEf_t}{f_w f_d} \quad (1)$$

此式中，

q_e ：各內車道在基本狀況下之平均流率 (小客車/小時/車道)；

q ：尖峰 15 分鐘單方向之需求流率 (輛/小時)；

P_t ：大車比例；

f_c ：各內車道小車佔小車總數之比例；

E ：大車之 PCE (平坦路段 1.5；上坡路段 2.0)；

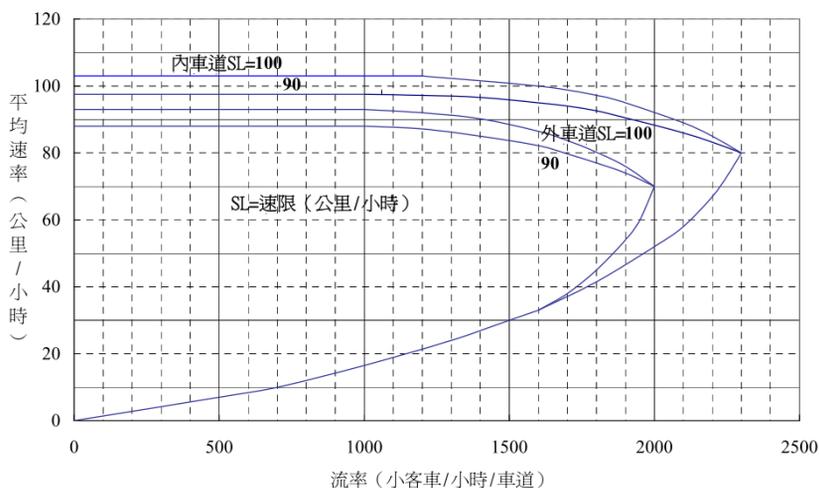
f_t ：各內車道大車佔大車總數之比例；

f_w ：車道寬調整因素 (暫訂 1.0)；

f_d ：路肩橫向淨距調整因素（暫訂 1.0）。

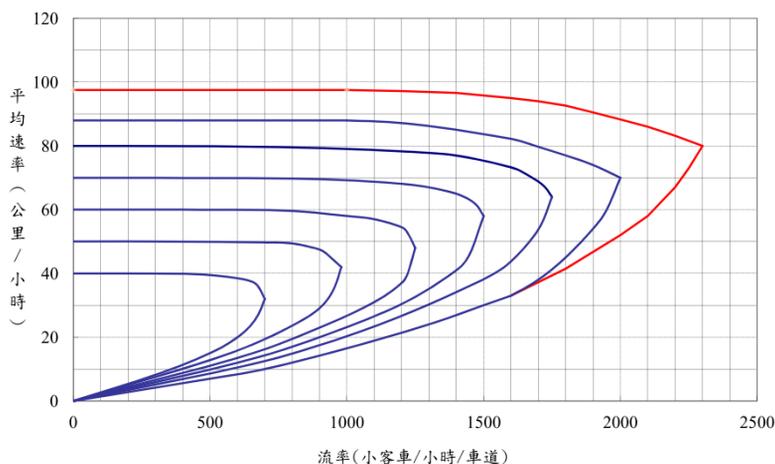
6. 評估服務水準

平坦路段內側與外側車道及上坡路段之代表性流率與速率，以及平坦路段及上坡路段臨界點之平均自由速率，可分別從圖 2 及圖 3 估計之。求出對等純小客車之流率後，由該對等需求流率與臨界速率所得之流率（即該路段容量）之比值，可得到 V/C ；由該對等需求流率對照圖 2 或圖 3，可估計對應該流率之平均速率，進而得到平均速率與速限之差距。以「 V/C 」及「平均速率與速限之差距」兩個績效指標，即可評估該路段之服務水準 [5]。



資料來源：[5]。

圖 2 平坦路段基本狀況下之流率與速率關係



資料來源：[5]。

圖 3 上坡路段流率與速率之可能關係

2.2 2010 美國 HCM

2010 美國 HCM^[6]分析高速公路服務水準之流程為：

1. 蒐集公路幾何資料、需求流量、自由速率等資料。
2. 計算自由速率

自由速率如果可以直接現場測量，也可以利用下式估計：

$$FFS = 75.4 - f_{LW} - f_{LC} - 3.22TRD^{0.84} \quad (2)$$

此式中，

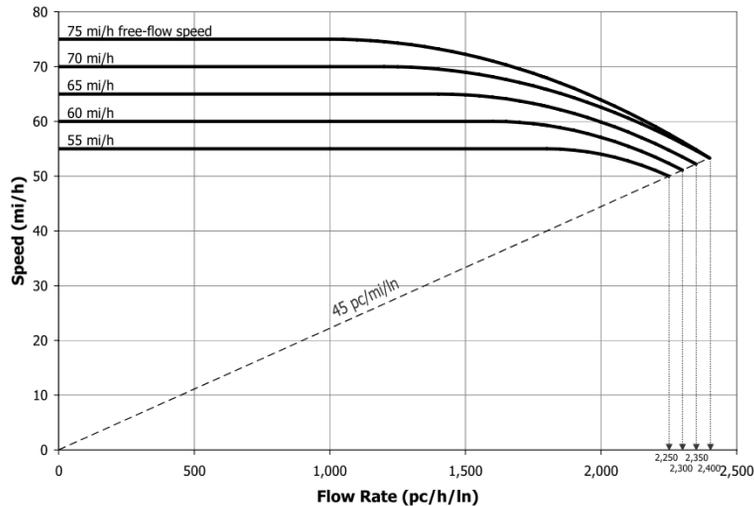
FFS ：基本路段之自由速率 (英哩/小時)；

f_{LW} ：車道寬調整因素 (英哩/小時)；

f_{LC} ：右側路肩側向淨距調整因素 (英哩/小時)；

TRD ：所有匝道(ramp)密度調整因素 (匝道數/英哩)。

3. 由自由速率選取適用的速率與流率曲線 (圖 4)



資料來源：[6]。

圖 4 美國高速公路基本路段在基本狀況下之流率與速率曲線

4. 將需求流量轉換成對等純小客車之需求流率

因為需求流量必須反應出重型車輛、駕駛人行為及短時間內交通量之變化程度等影響因素，因此必須要調整需求流量，將其轉換成對等純小客車之需求流率。調整後的需求流率 (V_p) 以式 3 表示之。

$$V_P = \frac{V}{PHF \times N \times f_{HV} \times f_P} \quad (3)$$

此式中，

V_P ：基本狀況下之對等需求流率 (輛/小時)；

V ：現有狀況下之需求流量 (輛/小時)；

PHF ：尖峰小時係數；

N ：車道數；

f_{HV} ：重型車輛調整因素；

f_P ：駕駛人行為調整因素(0.85~1.00)。

重型車輛 (簡稱重車或大車) 調整因素 (f_{HV}) 係指因高速公路之車流包含小客車、大客車(bus)、大貨車 (truck)、露營車 (RV)、半聯結車及全聯結車等，屬混合車流，因此必須將其他非小客車之車輛以 PCE 調整成對等小客車之數量，以反應其對車流所造成之影響。2010 美國 HCM 有關重車之定義係指任何超過 4 輪的車輛即屬之。重型車輛調整因素可用式 4 表示。

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T (E_T - 1) + P_R (E_R - 1)} \quad (4)$$

此式中，

E_T ：大貨車及大客車之 PCE ；

E_R ：露營車之 PCE ；

P_T ：車流中大貨車及大客車所占之比例；

P_R ：車流中露營車所占之比例。

其中 E_T 及 E_R 之 PCE 值，在 2010 美國 HCM 中，依照地形 (terrain)、坡度(upgrade)、坡長 (length) 及重型車輛比例 (percentage of trucks, buses, and RVs)，都有不同的 PCE 值。

5. 比較調整後之需求流率

以 PCE 調整後之需求流率大於基本容量，則服務水準為 F 級；若調整後之需求流率小於基本容量，則繼續估計速率及密度。

6. 估計速率及密度

以調整後之需求流率 (V_P) 及估計或測量所得之自由速率，可從圖 4 高速公路基本路段在基本狀況下之流率與速率曲線中，得到該需求流率所對應之車流平均速率；經由基本狀況下之對等需求流率及平均速率，可得到車流之密度。

7. 評估服務水準

密度為美國 HCM 評估服務水準之績效指標，因此根據步驟 6 所得到車流之密度，可用以評估服務水準。

2.3 小結

2011 臺灣 HCM 分析高速公路上坡路段之服務水準時，並未考慮坡度、坡長及大車比例對車流速率之影響，僅利用有限的現場資料所建立之上坡路段流率及速率可能關係，估計對等需求流率下的平均速率，進而評估服務水準。且上坡路段之大車 *PCE* 直接設定為 2.0，並無隨著交通及幾何條件改變而調整。

2010 美國 HCM 雖有考慮到重型車輛在不同地形、坡度、坡長及重型車輛比例等情境下有不同之 *PCE* 值，但是在最後步驟「估計速率及密度」中，仍是以「高速公路基本路段在基本狀況下之流率與速率曲線」，得到該調整需求流率所對應之車流平均速率。因該曲線係在基本狀況下之各項條件所建立，亦即其係屬純小客車車流之狀況，並無考慮其他坡度、坡長及大車比例等交通特性對於小客車自由車流速率之影響，亦不符合車流中有大車之情形，以致若以上述分析方法來估計臺灣高速公路之服務水準，常產生高估之情形。

三、高速公路大車之小客車當量

根據 2010 美國 HCM^[6]，小客車當量 (*PCE*) 係指：「在特定的道路、交通及控制條件下，對於一特定車種的單一重型車輛能造成相同運作條件之小客車數量。」Demarchi 與 Setti 之研究^[7]指出，因為大車的車輛尺寸較大且性能較小車差，因此對於高速公路服務水準及容量會造成較大的影響，特別是在上坡路段，這些影響一般是以 *PCE* 來表達。大車之 *PCE* 係指在混合車流中，將大車的數量以小客車替換後，對於駕駛人而言其感受到交通設施所提供的服務品質仍保持相同，則這些小客車數量即為大車之 *PCE*。

換言之，*PCE* 常用以反應大車在混合車流中對比純小客車車流所造成之阻礙 (impedance)。在估計 *PCE* 值時，Huber^[8] 提出一最基本的概念：找出混合車流與純小客車車流具有相同的阻礙之情況。衡量混合車流所造成阻礙之方法包括利用密度 (density)、車距 (headway)、疏解車流 (queue discharge flow)、速率 (speed)、延滯 (delay)、流量與容量比 (V/C ratio)、車一小時 (vehicle-hours)、旅行時間 (travel time) 等。

2010 美國 HCM^[6] 有關上坡路段及一般路段大車 (truck、bus and RV) 之 *PCE*，如表 2 及表 3 所示。

由表 2 及表 3 可歸納以下特性：

1. 在一般路段中，*PCE* 只與地形有關；坡度增加，則 *PCE* 增加 (山嶺>丘陵>平原)；
2. 在上坡路段中，其 *PCE* 呈現以下趨勢：
 - (1) 坡度不超過 2% 之情境下，*PCE* 不隨坡長或大車比例有所變動，呈現均一態樣 (1.5)；
 - (2) 在坡度大於 2% 至 6% 之路段，坡度增加，則 *PCE* 增加；坡長增加，*PCE* 亦增加；
 - (3) 當大車比例增加，*PCE* 下降；
 - (4) *PCE* 增加的幅度，大貨車及大客車增加的比露營車多。

表 2 上坡路段大貨車及大客車之 PCE 值

坡度 (%)	坡長 (公里)	大貨車 (trucks) 與大客車 (buses) 比例 (%)								
		2	4	5	6	8	10	15	20	≥25
≤2	全部皆相同(All)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
>2~3	0.00~0.40	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.40~0.80	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.80~1.20	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>1.20~1.60	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>1.60~2.40	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	>2.40	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
>3~4	0.00~0.40	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.40~0.80	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5
	>0.80~1.20	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	>1.20~1.60	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	>1.60~2.40	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5
	>2.40	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5
>4~5	0.00~0.40	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.40~0.80	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	>0.80~1.20	3.5	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	>1.20~1.60	4.0	3.5	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	>1.60	5.0	4.0	4.0	4.0	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0
>5~6	0.00~0.40	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	>0.40~0.48	4.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	>0.48~0.80	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	>0.80~1.20	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	>1.20~1.60	5.5	5.0	4.5	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	>1.60	6.0	5.0	5.0	4.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
>6	0.00~0.40	4.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	1.0
	>0.40~0.48	4.5	4.0	3.5	3.5	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
	>0.48~0.80	5.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
	>0.80~1.20	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0
	>1.20~1.60	6.0	5.5	5.0	5.0	4.5	4.0	3.5	3.5	3.5
	>1.60	7.0	6.0	5.5	5.5	5.0	4.5	4.0	4.0	4.0

資料來源：[6]。

表 3 一般路段之大車 *PCE* 值

車種	不同地形 (terrain) 下之 <i>PCE</i>		
	平原 (level)	丘陵 (rolling)	山嶺 (mountainous)
大貨車 (trucks) 及大客車 (buses)	1.5	2.5	4.5
露營車 (RVs)	1.2	2.0	4.0

資料來源：[6]。

Cunha 與 Reynaldo^[9] 曾用 CORSIM 模擬軟體模擬巴西實體分隔之多車道公路，以密度當作績效指標，並選定坡度從 0% 至 8%、坡長從 0.5 公里至 2 公里及大車比例從 0% 至 50% 之路段，得到 *PCE* 值從 1.0 至 10.9。其研究發現：

1. 當坡度、坡長增加，*PCE* 增加；
2. 在特定的流量下，當大車比例增加，*PCE* 下降；
3. 當服務水準降低，*PCE* 增加。

Bains 等人^[10] 研究指出在已發展國家中，例如歐洲、美國、加拿大及澳洲，及車流狀況係屬同質性 (homogeneous) 車流，因為其車流中大部分只有小客車及大貨車兩種主要的車種。但在印度等開發中國家，其車流狀況係屬異質性車流，其車道的使用規定 (lane discipline) 亦不明顯甚至沒有規範，或是駕駛人根本不遵守。高速公路車流中的大車 (或是慢速車，slow-moving vehicles) 會對一般車輛造成阻礙，也會降低道路的服務品質，上坡路段尤為嚴重。這些大車對車流的衝擊影響通常是用「如果把車流中的大車替換，需要多少小客車數量才會造成同樣的影響？」來表達，而這些小客車之數目即是大車之 *PCE*。通常因為大車的速度較慢，所以其超車行為較為困難，且占用的道路空間亦較小車大，因此對車流所造成的影響較大。

Webster 與 Elefteriadou^[11] 指出，大車之 *PCE* 係代表與車流中之大車會造成相同影響的小客車車輛數。而會影響大車 *PCE* 的因素有坡度、坡長、車道數、自由車流速率、大車比例及流量。該研究利用微觀車流模擬軟體 FRESIM 模擬高速公路的運作情形，其得到以下結論：

1. 當流率、自由速率、坡度、坡長增加，*PCE* 增加；
2. 當大車比例、車道數增加，*PCE* 下降；
3. 在平坦及坡度較緩 (slight grades) 的地點，*PCE* 近似於 1994 美國 HCM 之 *PCE*；在坡度較陡及較長的地點，*PCE* 小於 1994 美國 HCM 之 *PCE*。

2011 臺灣 HCM^[5] 指出一車輛之 *PCE* 可隨著用以衡量對車流影響程度之參數而變，因此 *PCE* 是用以將混合車流轉換成對等純小客車之車流，並衡量混合車流對交通所造成影響或衝擊。一般而言，任何一車流之平均速率 (*V*)、流率 (*Q*) 及密度 (*D*) 以巨觀車流來看，有以下之關係： $Q=DV$ 。因此如欲以平均速率當作車流的衡量指標，在 *PCE* 的估計方

面，必須尋找在將混合車流中的大車以小車替換後，其平均速率應保持不變之情形。因此混合車流與純小客車之車流若以 PCE 做轉換，則轉換前後之平均速率應保持不變，其必須有以下關係：

$$q_b = (1-p)q_m + E \times p \times q_m \quad (5)$$

此式中，

q_b ：純小客車之流率；

q_m ：混合車流之流率；

p ：車流中之大車比例；

E ：大車之 PCE 。

將上式整理後，可得

$$E = \frac{1}{p} \left[\frac{q_b - q_m}{q_m} \right] + 1 \quad (6)$$

目前 2011 臺灣 HCM 根據國道 1 號三義附近北上坡度路段有限的現場資料，依照上述公式將上坡路段大車之 PCE 訂為 2.0，平坦路段大車之 PCE 訂為 1.5。但根據文獻回顧，上坡路段之 PCE 係一動態之因子，會因坡度、坡長、車道數、自由車流速率、大車比例、流量等因素而有所變動。另外不同公路上大車之性能及載重可能不同，美國 HCM 所訂定之大車 PCE 是否適用於臺灣也令人質疑。因此有必要建立屬於臺灣本土高速公路之大車 PCE 。各文獻的 PCE 研究有兩個特性，其一是當上坡坡度、坡長增加， PCE 增加；其二是在特定的流量下，當大車比例增加， PCE 下降。

四、TGS 模式與模擬計畫

為進一步探討臺灣高速公路上坡路段之車流特性及大車 PCE 特性，本節分別介紹分析工具 TGS 模式及其模擬計畫。

4.1 TGS 模式概述

運研所有鑑於進行臺灣 HCM 修訂工作時，沒有合適的分析工具來分析不同公路的坡度路段，乃於 2013 年開始一個 3 年期的計畫來發展分析坡度路段的工具，以改善此現象^[2-4]。目前已發展一微觀模擬模式，可用以分析高速公路坡度（沒有上或下匝道）路段之車流。該模擬模式命名為坡度路段車流模擬模式（即 TGS 模式）。TGS 模式已可用來分析坡度路段交通作業隨地點及車道之變化^[2]。關於 TGS 模式之開發與現場資料校估（calibration）及驗證（validation），有興趣的讀者可進一步參考運研所研究報告^[2-4]。

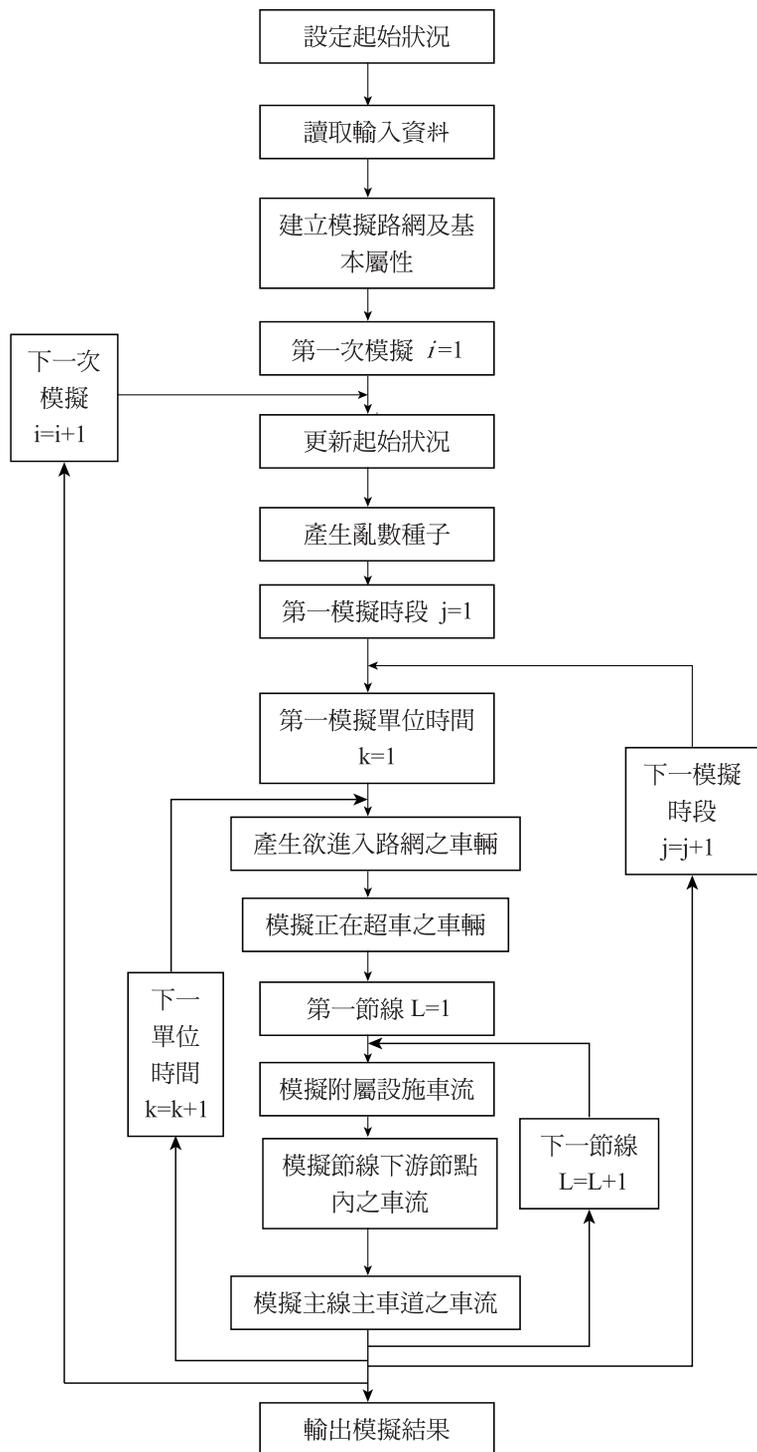
TGS 模式係利用 FORTRAN-77 語言建立微觀之模擬邏輯。此模式每 Δt 秒推進模擬之車輛一次。模擬單位時段 Δt 之長短由使用者設定，但以不超過 1 秒或短於 0.5 秒為原則。模擬單位時間越長，模擬車輛行為之精度會降低；模擬單位時間越短，模擬之精度可增高但是模擬時間會增長^[2]。

TGS 模式將實際公路路網用一近似的模擬路網 (simulation network) 來代表，模擬路網是節線 (link) 及節點 (node) 之組合。節點分成兩類，第 1 類代表車輛進入或離開模擬路段之地點，此類節點依序以 600 至 620 之代號註明；第 2 類代表讓車輛從第 1 節線進入到另一節線之地點，其代號從 1 開始。節線代表單向行車之路段，而節點代表交叉路口或幾何設計因路段分流或併流而有顯著變化之地點。應用 TGS 模式需要建立一輸入資料檔，此檔之檔名設訂為 TGS.txt，資料檔的內容及建立，請見運研所報告^[2]。TGS 模式之輸入檔必須與執行檔 TGS.exe 放在電腦之同一子目錄中。快速按執行檔 (檔名 TGS.exe) 兩次之後所得的輸出檔檔名為 TGSout.txt。為獲得較可靠的模擬結果，每一模擬情境均模擬 10 次 (runs)⁴，以反應不同車流到達狀況，並以平均值代表模擬輸出結果。在相同流率狀況下，個別車輛駕駛員之行為、車距的分布等特性均會影響到平均作業績效，因此 TGS 模式讓使用者選擇在同一流率、車種組成、行車方向比例等狀況下欲模擬的次數。每一次模擬時，TGS 模式隨機訂定車輛到達出發節點之瞬間，並隨機訂定每一車輛及駕駛員的屬性，然後用多次模擬的結果估計平均作業績效。因為在模擬過程中車流狀況可能隨時間而變，因此 TGS 模式讓使用者能訂定模擬時段數，但每一時段 (如 5 分鐘) 的交通狀況 (如流率、車種組成等) 不隨時間而變^[2]。

TGS 模式每一模擬時段又分成許多很短的模擬單位，每單位的長度不超過 1 秒。在每單位時間內，TGS 模式模擬每一車輛之行為一次，即更新車輛在單位時段結束時之位置及速率。圖 5 為 TGS 模式之主要流程^[2]，此模擬流程使用到許多模擬邏輯，主要包括：(1) 訂定節線之模擬次序；(2) 產生欲進入模擬路網之車輛；(3) 自由旅行車輛與跟車車輛之區分；(4) 訂定車輛在平坦路段之自由旅行加速率及跟車加速率；(5) 訂定車輛在坡度路段之自由旅行加速率及跟車加速率；(6) 跟車邏輯；(7) 變換車道邏輯；(8) 爬坡道之使用；(9) 耗油量之估計。

TGS 模式輸入檔之固定參數包括：模擬次數、模擬作業時間、上坡路段幾何設計、上坡路段交通條件。TGS 模式輸入檔之變動參數則包括：上坡坡度、上坡坡長、車種比例、需求流率等。

4. 每一模擬情境的模式次數，理論上越多越好；但必須考慮現實的議題：「精確度要求」與「電腦資源限制」。經本研究測試，模擬 10 次以上的結果差異不大，而由於要模擬的情境有很多種組合 (尤其是每一種條件下要從低流率要模擬到中、高流率)，因此，本研究最後選取 10 次。



資料來源：[2]。

圖 5 TGS 模式之基本模擬流程

4.2 模擬計畫

4.2.1 模擬路段

本研究以圖 6 之模擬路網作為 TGS 模式之模擬上坡路段，其中上坡路段前 3 公里之平坦路段，作為車輛在進入模擬路段前的熱機區段，避免不穩定的車流影響模擬結果；上坡路段後 3 公里之平坦路段，亦作為讓車輛緩衝之區段；而模擬之上坡路段 4 公里，僅採用前 3 公里作為模擬路段，最後 1 公里亦作為緩衝區段，係為避免車輛在行駛至坡頂欲進入平坦路段時，車流行為會產生變化而影響模擬結果。

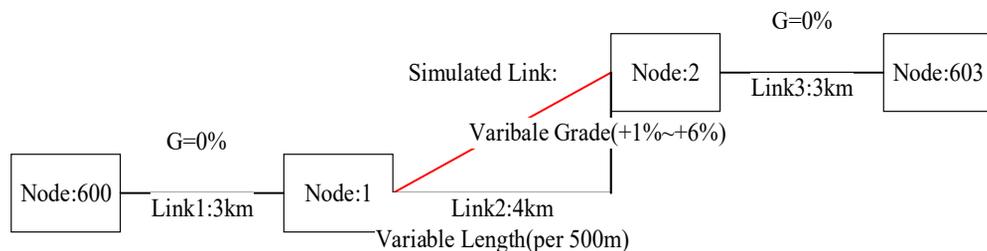


圖 6 模擬路段示意圖

本研究模擬路段之速限設定為 100 公里／小時，內側車道之小車平均自由速率設定為 104 公里／小時；其他車道（因為內側車道禁行大車）之大車平均自由速率設定為 94 公里／小時。

4.2.2 需求流率設定

TGS 模式有關車道容量之設定，係以速限區內車道只有小車時之容量為輸入參數，依照圖 2 所示，速限 100 公里／小時之路段，其內側車道容量約為 2,300 小客車／小時。雖然上坡路段之容量應比平坦路段為低，但目前無足夠的現場資料可證明上坡路段之容量為何，因此本研究暫時將內側車道容量設定為 2,300 小客車／小時。在模擬主線三車道路段之狀況下，初步規劃上坡路段車流率之增加率，從 600 輛／小時至 7,200 輛／小時，每次增量 600 輛／小時，共 12 種車流率，一直到車流率超過容量 6,900 小客車／小時。

4.2.3 上坡坡度及坡長設定

根據國道 1 號三義及林口路段之公路幾何資料，臺灣高速公路上坡路段之坡度在 1% 至 6% 之間，坡長最長不超過 3 公里。因此模擬之上坡路段，其坡度將由 1% 逐步增加至 6% 等 6 種情境。在坡長方面，因 TGS 模式每一條節線從上游到下游可設定 10 個蒐集流率及速率資料之地點，因此在 3 公里之上坡路段，每 500 公尺設定為一資料蒐集的地點，代表坡長 500、1,000、1,500、2,000、2,500 及 3,000 公尺之路段。

4.2.4 車種組成設定

依據 2013 年臺灣高速公路各收費站之大型車通行量，大車比例約可分為 5%、10%、15%、20%、25% 等情境，其中大車比例 15% 為平均值。因此本研究將模擬上述 5 種大車比例以及純小客車（大車比例 0%）之情境。

五、資料分析與比較

利用前述模擬計畫，TGS 模式輸出之節線流率、平均速率、車種組成及每一資料蒐集地點各車道之流率、速率、車種組成等輸出值，本研究進一步分析高速公路上坡路段之車流特性及大車 *PCE*。

5.1 上坡路段之各車道的速率與坡長關係

Arasan 與 Arkatkar^[12,13] 以 HETEROSIM 模擬軟體建立不同車種在上坡路段之速率與坡長關係時，以 *V/C* 值 0.5 作為建立速率與坡長關係之基準。另依照「公路路線設計規範」在設計速率大於 90 公里／小時之公路時，低流量之服務水準等級約為 A 或 B，服務水準 A 之 *V/C* 值 ≤ 0.35 ，服務水準 B 之 *V/C* 值為 $0.35 < V/C \leq 0.60$ 。因此，本研究以服務水準 A 及 B 之臨界值，亦即 *V/C* 值為 0.35 作為分析基礎。由於本研究模擬路段係單向三車道，其容量為 6,900 小客車／小時，因此利用 TGS 模式模擬需求流率 2,415 輛／小時 (*V/C* 值為 0.35)，以及不同坡度、坡長及大車比例之情境。

模擬分析將 7 個資料蒐集地點（0、500、1,000、1,500、2,000、2,500 及 3,000 公尺）視為 7 種不同坡長，本研究分別以 TGS 模式輸出各資料蒐集地點之平均速率，建立不同大車比例之情境下，坡度由 1% 至 6% 之內側車道、中線車道及外側車道速率與坡長關係。圖 7~圖 9 為小車比例 100% 情境下之速率與坡長關係，圖 10~圖 12 及圖 13~圖 15 則分別展示大車比例 20% 及 25% 情境下之速率與坡長關係。這些的模擬分析可歸納出以下現象：

1. 在坡度 1% 及 2% 之情境下，內側車道及中線車道從上坡起點到坡頂，坡長對於速率之變化並無顯著影響；惟外側車道之速率隨坡長增加而稍微降低。而在坡度 3% 至 6% 之情境下，各車道速率隨著坡長增加而快速降低。
2. 內側車道及中線車道之速率，在坡度 1% 及 2% 之情境下，其曲線幾乎重疊，表示坡度 1% 及 2% 對於速率幾乎無造成影響；但在大車比例 20% 及 25% 之情境下，外側車道之速率坡度 2% 稍低於坡度 1%。
3. 有關各情境下速率之降幅，外側車道降幅最大，內側車道最小。

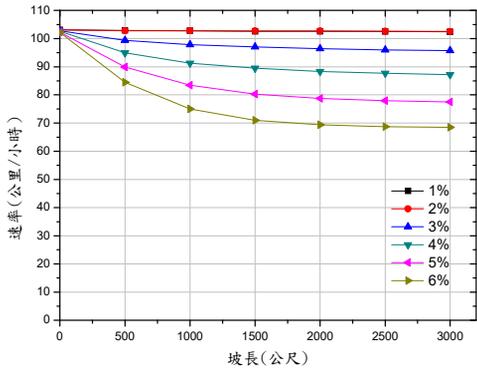


圖 7 小車比例 100%情境下內側車道之速率與坡長關係圖

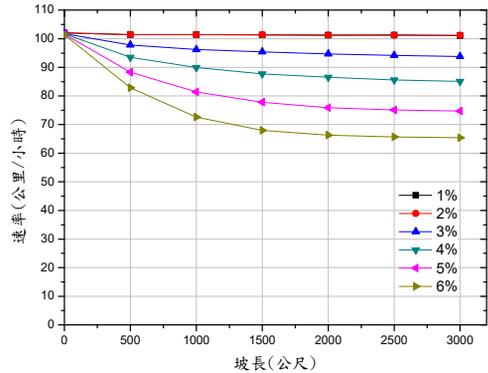


圖 8 小車比例 100%情境下中線車道之速率與坡長關係圖

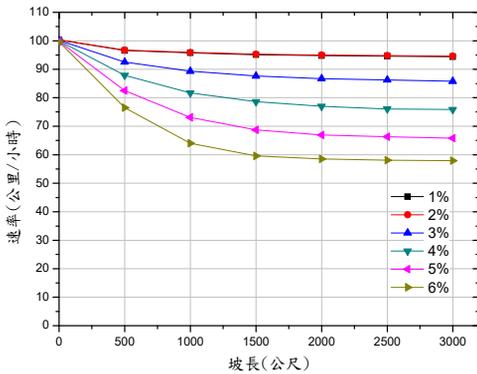


圖 9 小車比例 100%情境下外側車道之速率與坡長關係圖

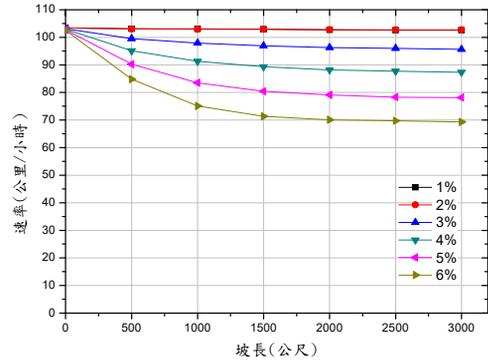


圖 10 大車比例 20%情境下內側車道之速率與坡長關係圖

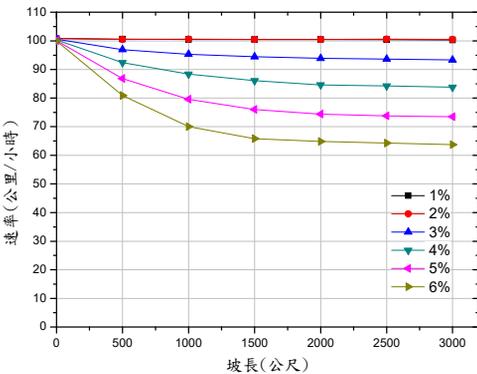


圖 11 大車比例 20%情境下中線車道之速率與坡長關係圖

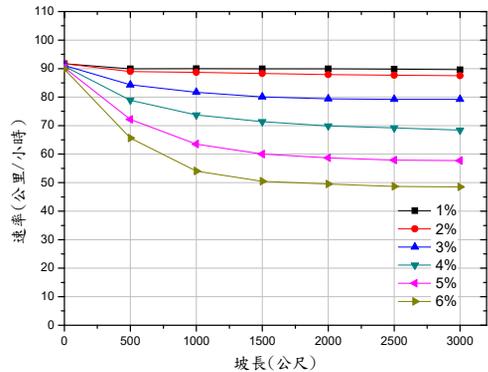


圖 12 大車比例 20%情境下外側車道之速率與坡長關係圖

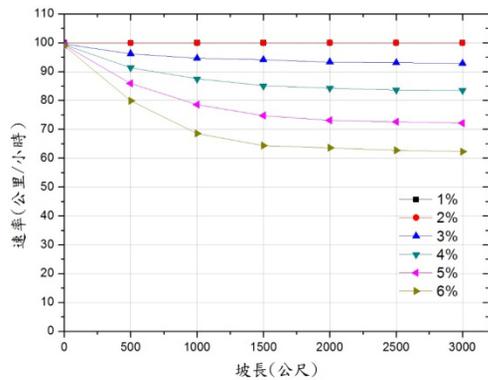
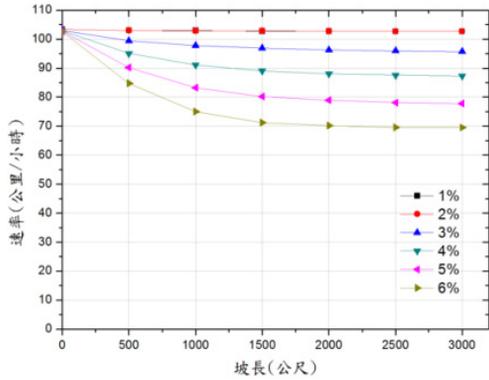


圖 13 大車比例 25%情境下內側車道之速率與坡長關係圖 圖 14 大車比例 25%情境下中線車道之速率與坡長關係圖

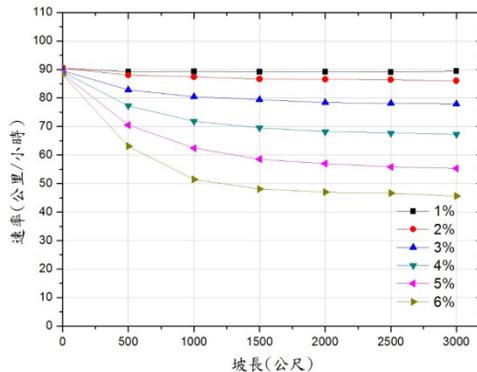


圖 15 大車比例 25%情境下外側車道之速率與坡長關係圖

5.2 上坡路段之流率與速率關係

TGS 模式可以輸出模擬路段車輛通過各節線終點時之流率、平均速率及各節線車種組成情形，利用這些輸出值可建立各種情境下之流率與速率關係，圖 16 至圖 21 分別是小車 100%及大車 5%、10%、15%、20%及 25%之關係圖。這些圖可知，坡度 1%及 2%時兩者之速率變化並無顯著影響，而坡度 3%至 6%之情境下，速率會隨著坡度增加而降低。

5.3 上坡路段之大車 PCE

2011 臺灣 HCM 在估計大車 PCE 時，係以平均速率當作衡量指標，亦即將混合車流中的大車以小客車替換 (replace) 後，其平均速率應保持不變。TGS 模式的輸出值有平均速率及流率，因此可利用已知大車比例的混合車流 (流率 q_b) 與純小客車流 (流率 q_m) 之「平均

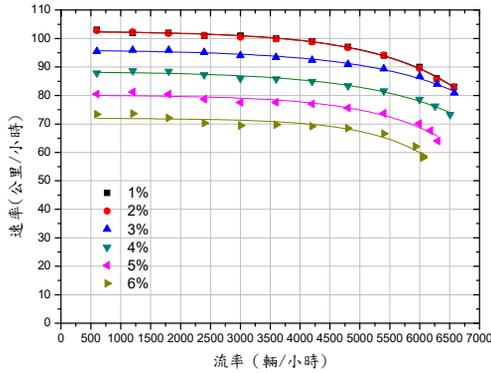


圖 16 小車比例 100%情境下不同坡度之流率與速率關係圖

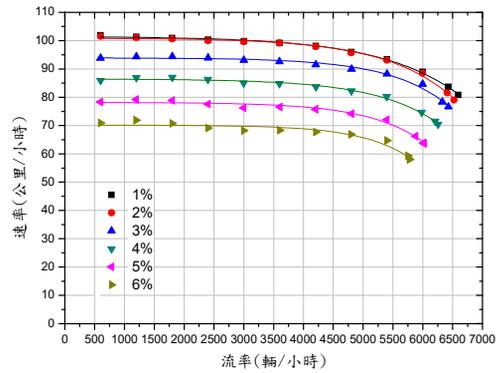


圖 17 大車比例 5%情境下不同坡度之流率與速率關係圖

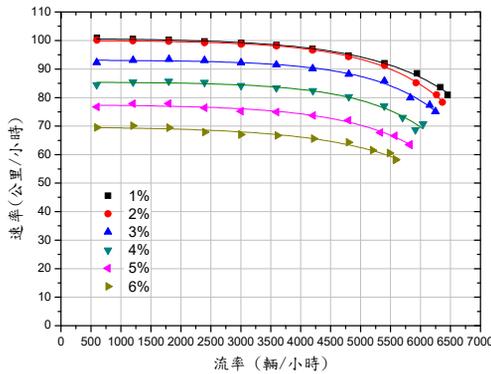


圖 18 大車比例 10%情境下不同坡度之流率與速率關係圖

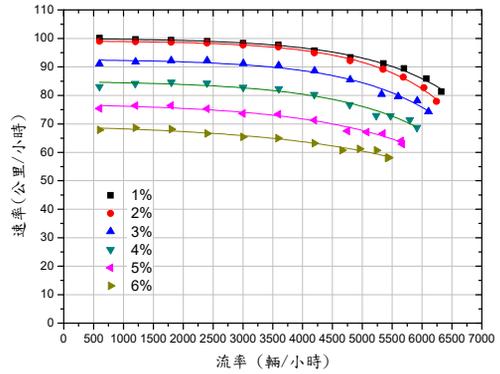


圖 19 大車比例 15%情境下不同坡度之流率與速率關係圖

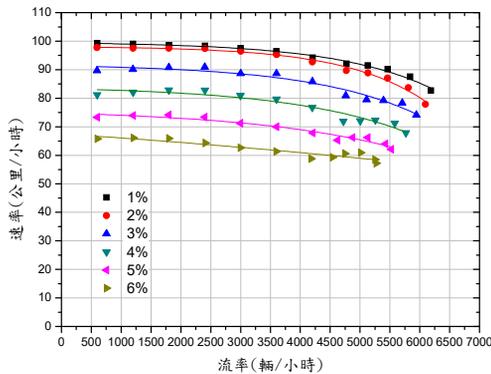


圖 20 大車比例 20%情境下不同坡度之流率與速率關係圖

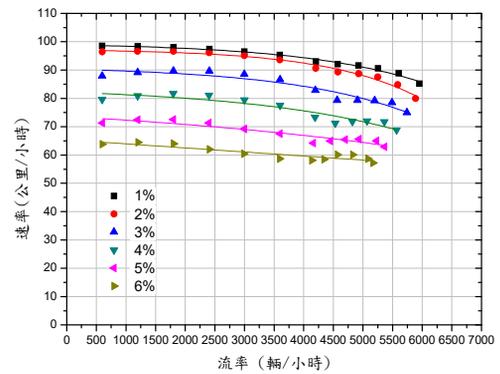


圖 21 大車比例 25%情境下不同坡度之流率與速率關係圖

速率相等」，當作估計大車 *PCE* 之基礎。換言之，混合車流的大車比例可利用 *PCE* 來轉換，再來對照平均速率相同狀況下的純小客車流率。本研究以式 6 估計大車 *PCE*，分別將大車比例 5%、10%、15%、20%及 25%情境下之混合車流，轉換為純小客車之車流，且轉換前後之平均速率保持不變為原則，用以估計大車之 *PCE*。

本研究之模擬路段係單向三車道，且內側車道禁行大車，因此只有中線車道及外側車道有大車行駛；從高速公路的現場資料^[2]及模擬結果均顯示，外側車道的大車數量明顯較中線車道多，因此在估計大車 *PCE* 時，可利用外側車道為分析對象⁵。為簡化分析，本研究所指大車包括大客車、大貨車及半聯結車等 3 種車輛。

以下舉車流大車比例 15%、坡度+3%、坡長 2,000 公尺及 3,000 公尺之情境為例，說明如何以 TGS 模式模擬結果來估計大車 *PCE*。表 4 為大車比例 15%與坡度+3%，且坡長為 2,000 公尺及 3,000 公尺之流率與速率輸出結果。此輸出結果係逐步增加需求流率，分別記錄外側車道的流率 (包括大車及小車) 與車流平均速率等輸出結果。

表 4 坡長 2,000 公尺及 3,000 公尺處之流率與速率輸出結果

100%小車		15%大車		100%小車		15%大車	
2,000m (外側車道)		2,000m (外側車道)		3,000m (外側車道)		3,000m (外側車道)	
流率	速率	流率	速率	流率	速率	流率	速率
60	83.9	135	75.8	60	82.9	135	74.7
132	85.7	273	77.9	135	85.3	278	77.1
204	87	420	79.9	207	86.3	417	79
326	86.6	600	81.3	322	85.8	606	80.8
563	86.2	824	80.8	563	85.3	825	79.8
712	86.6	986	79.7	711	85.9	994	79.3
958	85.8	1219	76.8	957	85.2	1225	76.1
1206	84.3	1452	71.1	1202	84	1454	70.4
1419	83.4	1574	60.4	1413	83.1	1567	64.6
1694	80.9	1597	59.7	1697	80.7	1588	64.6
1824	78.7	1625	58.6	1839	78.6	1622	64.8
1972	75.6	1641	58.5	1992	75.1	1636	64.7

在坡長為 2,000 公尺之情境下，選定外側車道流率 1,219 輛／小時 (大車比例為 44.3%) 及速率 76.8 公里／小時為估計基準。經比對純小客車車流 (大車比例 0%)，流率 1,824 輛

5. 利用式 6 來估計大車 *PCE*，最好是能顯現出在已知幾何條件下，大車所占比例及其造成對整體車流的影響。若大車比例較小，其對車流影響相對較小，較無實務應用上的意義。此外，大車多行駛於外側車道，分析其在已知幾何條件下不同大車比例狀況下的大車 *PCE*，比較有應用價值。

／小時的速率為 78.7 公里／小時，而 1,972 輛／小時的速率為 75.6 公里／小時；經以內差方式可估計在平均速率 76.8 公里／小時狀況之車流率為 1,915 輛／小時。因此，大車 *PCE* 可依據式 6 估計如下：

$$PCE = \frac{1}{p} \left[\frac{q_b - q_m}{q_m} \right] + 1 = \frac{1}{0.443} \left[\frac{1915 - 1219}{1219} \right] + 1 \cong 2.29$$

另在坡長 3,000 公尺之情境下，選定外側車道流率為 1,225 輛／小時（大車比例為 43.7%）及速率為 76.1 公里／小時為估算基準。經比對純小客車車流，流率 1,839 輛／小時的速率為 78.6 公里／小時，而 1,992 輛／小時的速率為 75.1 公里／小時；經以內差方式可估計在平均速率 76.1 公里／小時狀況之車流率為 1,948 輛／小時。此狀況下的大車 *PCE* 依據式 6 可估計為 2.35。

以上僅為+3%情境之舉例。本研究進一步進行不同坡度之模擬分析，並與對應的純小客車車流比較，最後彙整在不同坡度、坡長及大車比例情境下所估計之不同大車 *PCE*，如表 5 所示。

表 5 的關鍵變數主要有坡度、坡度長度及大車比例等 3 項，可依據已知的相關條件來探討重要變數的影響關係。探討如下：

1. 在相同坡度長度與大車比例狀況下，坡度越大時，大車對車流的影響逐漸明顯，故大車 *PCE* 值逐漸上升。
2. 在相同坡度及大車比例狀況下，坡度長度越長時，大車對車流的影響逐漸明顯，故大車 *PCE* 值逐漸上升。
3. 在相同坡度及坡度長度狀況下，大車比例越高時，由於大車主要利用外側車道，而本研究係利用外側車道來探討大車 *PCE*，故大車 *PCE* 值因車流逐漸單純而略有變動，變動幅度不大且有增有減。

由表 5 可進一步發現上坡路段之大車 *PCE* 與 2011 臺灣 HCM 將平坦路段大車 *PCE* 訂為 1.5，上坡路段訂為 2.0 明顯不同。本研究進一步以平坦路段 3,000 公尺之速率及流率狀況，估計平坦路段大車之 *PCE* 約為 2.0。上坡路段各種不同情境下大車之 *PCE* 則是變動之數值（參見表 5），明顯受到了坡長、坡度及大車比例之影響。從表 5 可看出，在坡度 1% 及 2% 之情境下，大車之 *PCE* 並無隨著坡長及大車比例的不同而有顯著改變；換言之，論臺灣高速公路在坡度 2% 以下之路段，大車對車流的影響並不顯著。

表 2 為 2010 美國 HCM 上坡路段大車之 *PCE*，本研究進一步與表 5 比較。結果發現美國 HCM 坡長之上限 1.6 公里或 2.4 公里，而本研究建立之表 5 的情境較為完整；而臺灣高速公路上坡路段之大車 *PCE* 均略大於美國 HCM 的大車 *PCE*，隨著坡度增加到 4% 以上及坡長超過 2 公里，差距更為明顯。基本上，本研究建立之表 5 資料可以提供國內交通界更進一步了解高速公路上坡路段大車對車流之影響。

表 5 臺灣高速公路上坡路段大車之 PCE 估計值

坡度(%)	坡長 [#] (km)	大車比例				
		5%	10%	15%	20%	25%
1	0	2.0	1.9	1.9	2.0	1.9
	1	2.0	2.1	2.0	2.1	2.0
	2	2.0	2.0	2.1	2.2	2.1
	3	2.0	2.1	2.1	2.2	2.1
2	0	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0
	1	1.9	2.1	2.2	2.1	2.2
	2	2.1	2.2	2.3	2.2	2.2
	3	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2
3	0	2.0	2.0	2.0	2.1	2.0
	1	2.3	2.2	2.3	2.5	2.2
	2	2.7	2.6	2.3	2.5	2.2
	3	3.0	2.8	2.4	2.5	2.3
4	0	2.2	2.1	2.1	2.1	2.0
	1	2.6	2.6	2.4	2.4	2.3
	2	3.0	2.8	2.7	2.4	2.3
	3	3.6	3.6	3.1	2.4	2.3
5	0	2.2	2.1	2.2	2.2	1.9
	1	3.0	3.2	2.4	2.4	2.2
	2	3.5	3.6	3.1	2.5	2.3
	3	4.2	4.0	3.4	2.5	2.3
6	0	2.2	2.2	2.3	2.0	2.2
	1	3.7	3.3	2.8	2.8	2.5
	2	4.8	4.1	3.9	3.0	2.7
	3	5.9	5.1	5.0	3.9	3.4

註：坡長 0 公里係指由平坦路段開始進入一均勻坡度時的狀況，用以顯示與比較大車在平坦路段的 PCE 狀況。

六、結論與建議

本研究以運研所發展之 TGS 模式進行模擬分析，並進一步分析高速公路上坡路段之交通特性及估計上坡路大車 PCE，獲得以下結論與建議。

6.1 結論

1. 由上坡路段之流率—速率關係及坡長—速率關係發現，坡度低於 2%時，車流平均速率的變化並不顯著，僅在大車比例較高或是流率較高時較有差異。此結果與 2000 美國 HCM 將基本狀況訂定為坡度不超過 2%之平原地形定義相符。當坡度由 3%增加至 6%時，各種大車比例情境下之車流速率均呈現遞減之趨勢，且坡度及大車比例越高，速率越低。
2. 本研究將內側車道容量設定為 2,300 小客車／小時，因此模擬路段三車道之容量約為 6,900 小客車／小時。但根據模擬結果發現，隨著大車比例越高，容量會隨之下降；坡度越大，容量亦呈現下降趨勢。綜言之，上坡路段之車道容量受到了坡度及大車比例之影響。
3. 上坡路段之車流速率會因為坡長增加而下降，特性說明如下：
 - (1) 大車比例低於 20%時，各車道在上坡坡度 1%及 2%時之車流平均速率並沒有隨著坡長增加而有明顯變化。
 - (2) 上坡坡度 3%至 6%之情境下，坡長越長，平均速率降幅越大。
 - (3) 在速率隨坡長下降之部分，內側車道之降幅小於中線車道，而中線車道又小於外側車道。其原因可能係因慢速車輛或大車會因上坡而行駛較外側車道，造成外側車道速率降幅明顯。
 - (4) 不論是大車或是小車，平均速率在超過坡長 1,500 公尺後，其速率呈現較平穩之趨勢，顯示坡長之影響主要在 1,500 公尺之前。
4. 本研究分析上坡路段大車之 *PCE* (表 5) 發現，2011 臺灣 HCM 將平坦路段大車之 *PCE* 訂為 1.5，坡度路段訂為 2.0，過於簡化實際問題。因為上坡路段大車之 *PCE* 其係一變動的數值，並非固定不變。在坡度低於 2%狀況時，大車之 *PCE* 變化不大，但在坡度 3%至 6%之情境，當坡度、坡長逐步增加，大車之 *PCE* 明顯增加；在特定的流量下，當大車比例增加，*PCE* 下降。表 5 可以提供國內交通界進一步了解高速公路上坡路段大車對車流之影響。

6.2 建議

1. 本研究模擬之路段係不受進、出口匝道影響之高速公路上坡路段，且僅針對單向三車道之均一直線路段進行模擬，無爬坡車道及平曲線之設置。將來待 TGS 模式發展成熟後，可進一步模擬高速公路有進、出口匝道之路段，並針對更多不同情境下之高速公路上坡路段進行模擬分析，以了解其交通作業情形。
2. 影響高速公路坡度路段的大車 *PCE* 因素有坡度、坡長、車道數、自由車流速率、大車比例及流率 (Webster 與 Elefteriadou^[11])，本研究考量坡度及坡長會影響到自由車流速率，因此主要探討在臺灣常見的主線三車道高速公路的坡度、坡長、流率、大型車比例的大車 *PCE* 特性。分析過程尚未細分大型車輛的車種 (大客車、單體大貨車、半聯結車

或全聯結車等)，若資料及資源許可，建議後續研究可以進一步分析不同大型車輛的 *PCE*。

3. 本研究以 V/C 值 ≤ 0.60 條件下，模擬並估計所得之表 5 大車 *PCE*，可提供國內交通界參考。TGS 模式可作為建議後續研究探討更為廣泛狀況下之高速公路坡度路段車流特性分析。
4. 本研究之分析成果顯示，高速公路在坡度低於 2% 狀況時，車流平均速率並未明顯受到影響，未來是否將臺灣 HCM 定義坡度 1% 以下為平坦路段，改為 2% 以下之路段，建議後續繼續研究與探討。

參考文獻

1. 交通部運輸研究所，高快速公路收費站、隧道及坡度路段容量及車流特性之研究(1/3)，民國 100 年。
2. 交通部運輸研究所，公路坡度路段模擬模式之發展及應用(1/3)，民國 103 年。
3. 交通部運輸研究所，公路坡度路段模擬模式之發展及應用(2/3)，民國 104 年。
4. 交通部運輸研究所，公路坡度路段模擬模式之發展及應用(3/3)，民國 105 年。
5. 交通部運輸研究所，2011 年臺灣公路容量手冊，民國 100 年。
6. Transportation Research Board, *Highway Capacity Manual*, National Research Council, Washington, D. C., 2010.
7. Demarchi, S. H. and Setti, J. R., "Limitations of Passenger-Car Equivalent Derivation for Traffic Streams with More than One Truck Type", Annual Meeting of the Transportation Research Board, CD-ROM, 2003.
8. Huber, M. J., "Estimation of Passenger-Car Equivalents of Trucks in Traffic Stream", *Transportation Research Record*, Issue 869, 1982, pp. 60-70.
9. Cunha, A. L. and Reynaldo, J. R., "Truck Equivalence Factors for Divided, Multilane Highways in Brazil", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 16, 2011, pp. 248-258.
10. Bains, M. S., Ponnun, B., and Arkatkar, S. S., "Modeling of Traffic Flow on Indian Expressways Using Simulation Technique", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 43, 2012, pp. 475-493.
11. Webster N. and Elefteriadou L., "A Simulation Study of Truck Passenger Car Equivalents (PCE) on Basic Freeway Sections", *Transportation Research Part B*, Vol. 33, 1999, pp. 323-336.
12. Arasan, V. T. and Arkatkar, S. S., "Derivation of Capacity Standards for Intercity Roads Carrying Heterogeneous Traffic Using Computer Simulation", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 16, 2011, pp. 218-229.
13. Arasan, V. T. and Arkatkar, S. S., "Micro-Simulation Study of Vehicular Interactions on Upgrades of Intercity Roads under Heterogeneous Traffic Conditions in India", *European Transport*, Issue 52, 2012, pp. 1-33.

