

ISSN:1812-2868

臺灣公路工程

第 45 卷 第 1 期

〈每月 15 日出刊〉



TAIWAN HIGHWAY ENGINEERING

Vol. 45 No.1 Jan. 2019

交通部公路總局

中華民國 108 年 1 月 15 日



封 面 說 明

台20線199K
梅花

劉玫伶 提供



臺灣公路工程

TAIWAN HIGHWAY ENGINEERING

中華民國 41 年 11 月 11 日創刊

第 45 卷 第 1 期 目錄

本刊為中華民國 41 年 11 月 11 日創刊，至 63 年 3 月 1 日發行第 22 卷第 5 期，經合併本局發行之臺灣公路工程、養路及公路機料等三種月刊，仍以臺灣公路工程為名，於 63 年 7 月 15 日起重訂為第 1 卷第 1 期繼續發行

臺灣公路工程

發行人

陳彥伯

社長

許鈺漳

總編輯

陳敬明

總幹事

李崇堂

編輯

賴常雄 陳進發

鄧文廣 李忠璋

黃三哲 何鴻文

蔡宗成 薛讚添

陳營富 陳嘉盈

林清洲 李順成

陳松堂 吳昭煌

江金璋 邵厚潔

顏召宜

實務報導

應用影像分析技術於交岔路口交通衝突之研究

.....林樹德、蘇志文、黃家耀、溫基信... (2)

RAP 利用於瀝青鋪面磚之研究

.....洪明澤、陳仙州、朱建東、何鴻文... (27)

應用影像分析技術於交岔路口交通衝突之研究

林樹德^{*}、蘇志文^{**}、黃家耀^{***}、溫基信^{****}

摘要

交通事故發生具有隨機性、突發性及無法預測性等特性，為降低交通事故傷亡人數與嚴重程度，交通事故防制為交通相關部門使命，交通安全防制與改善之分析須耗費巨大人事成本蒐集相關之交通資料作為分析之基礎。為能更有效掌握高事故風險地點之交岔路口複雜車流問題，本研究利用無人機酬載 1080p/4K 高解析數位相機，拍攝桃園市 4 處具高事故風險地點代表性及參考性之交岔路口，分析人車流動影像，透過影像分析技術，開發一套高事故風險地點診斷工具分析平台，並可從分析平台之車流軌跡、交通衝突熱區、交通調查資料、車輛速度，以及交通號誌同步等基本之交通資訊，診斷交通衝突問題及評估衝突風險，以協助交通管理單位與道路設計人員作為交通安全改善之參考。

關鍵詞：無人機、車流軌跡、交通衝突、交通事故、交通安全

壹、前言

我國交通部亦將臺灣地區易肇事路段列為長期性改善計畫之任務，自民國 69 年開始辦理第 1 期計畫迄今，其計畫目的在於降低臺灣地區都市及一般公路易肇事路段交通事故之傷亡人數與發生次數，增進整體道路之行車安全品質。交通事故的成因相當繁雜，主要可歸因於「人、車、路」之三大因素，且每一因素非具有個別獨立之特性，倘若透過交通事故調查資料進行分析及研擬交通安全改善方法，對於降低交通事故傷亡人數與嚴重程度有限。本研究係結合無人機應用、影像處理技術及交通管理三大領域專業，開發出一套交通分析工具平台，藉由無人機空拍影像，分析交岔路口行經之車輛數、車種及車流軌跡資料，透過車流軌跡資訊分析交岔路口車流量、車速、交通衝突熱區等

* 時任交通部運輸研究所助理研究員

現任交通部公路總局第五區養護工程處交通管理及控制中心 幫工程司

** 中原大學資訊工程系專任助理教授

*** 國立交通大學運輸與物流管理學系專任副教授

**** 訊力科技股份有限公司副總經理

交通資訊，探討各交岔路口易發生車輛間衝突之位置分佈，並進行相關圖表展示，能有效掌握交岔路口衝突點（熱區）位置，能在肇事發生前診斷出交通衝突問題。

貳、文獻回顧

2.1 影像式車流分析技術

在 M. A. Khana et al. (2017)^[1]研究提到無人機在交通相關領域應用與研究，並統整出包含硬體面與軟體面的數個重要步驟，其中包含無人機相關之飛行計畫、飛行方式、影像等資料蒐集方式，加上所須的資料分析技術、資料呈現與詮釋方法，以及針對交通問題的參數最佳化處理等步驟，如圖 1 所示。

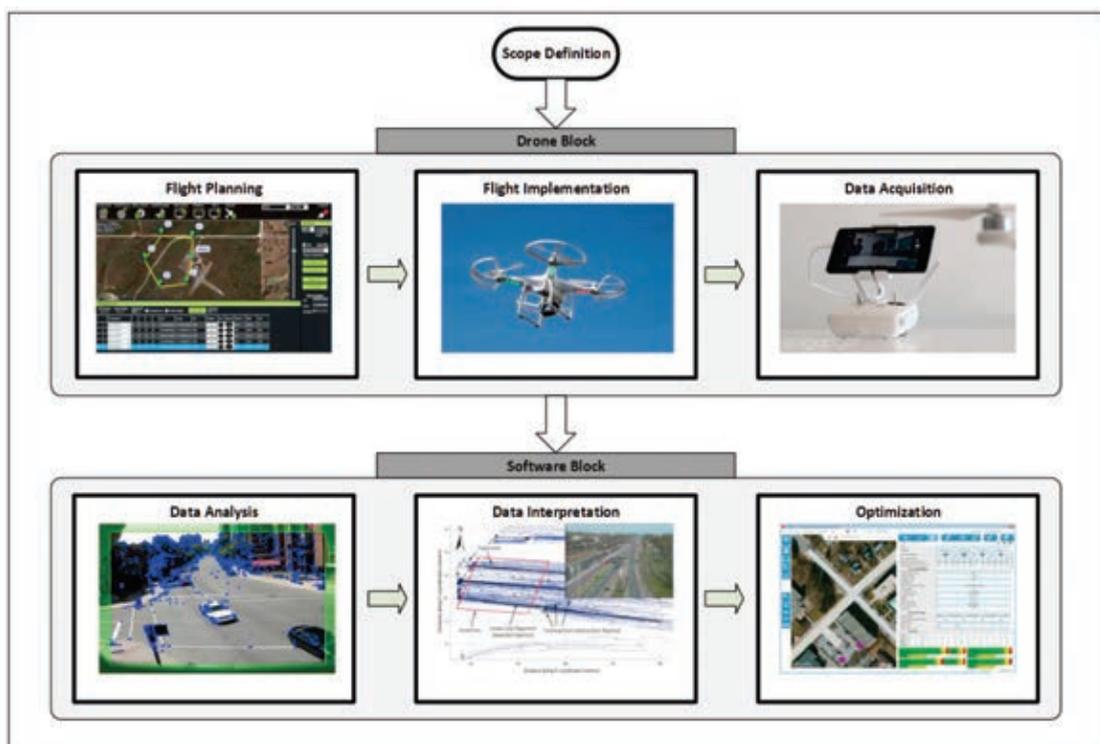


圖 1 無人機應用於交通領域研究之系統架構圖 (M. A. Khana et al., 2017)

由於本研究主要採用定點拍攝交岔路口的方式，來取得交岔路口之交通相關資料，透過影像處理技術偵測交岔路口車流量、判別不同車種、車輛軌跡及車速等交通資料，以圖表方式將相關之交通資料以系統化整合方式呈現於分析平台中。

2.2 傳統車流分析技術

在 X. Wang et al. (2008)^[2]所提車輛偵測與追蹤方法架構中，系統性地將傳統物件偵測與追蹤技術應用至空拍影像。其車輛偵測與追蹤流程，如圖 2 所示，包含了影像對齊校正、車輛偵測、車輛追蹤等步驟。由於空拍影像中的車輛外觀較一般監視器影像單純且容易處理，因此非常適合傳統的影像處理技術。本研究係採用類似的處理架構，取

得車輛的位置與軌跡特徵。首先透過無人機取得交岔路口之連續空拍影像，這些影像會經過影像晃動校正等前處理（如圖 2 中的 **image registration**），取得穩定的連續空拍影像，以確保所有影像座落在同一個 2 維坐標系統中。在車輛偵測與分類上則引入最新的深度學習架構，以提升偵測結果的穩定性。由於傳統上的影像特徵，如邊緣（**edge**）、輪廓（**contour**）等，相當容易受到拍攝環境光線變化、甚至建築物陰影等影響而無法準確取得。但隨著近年來深度學習在影像處理上的成功發展，已經漸漸取代利用傳統影像特徵的偵測方式，本研究希望透過導入深度學習強化車輛偵測的準確度，同時也輔以特徵追蹤技術，修正未能準確偵測的車輛位置，以提供完整精確的車輛軌跡資訊。

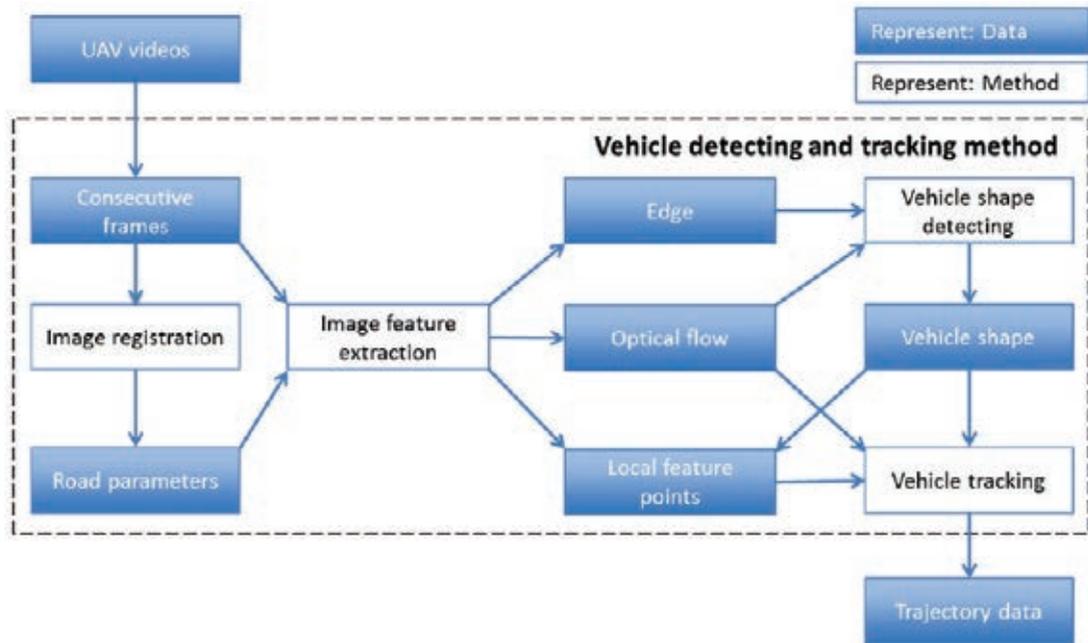


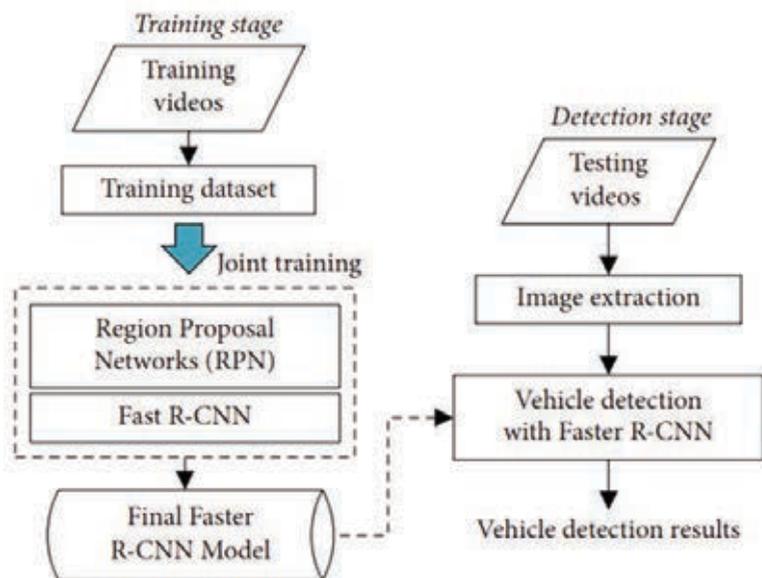
圖 2 車輛偵測與追蹤流程圖 (X. Wang et al., 2008)

2.3 深度學習之車流分析技術

機器學習已逐漸成為現今車流分析中不可或缺的一環。過去支援向量機 (Support Vector Machine, SVM)、方向梯度直方圖 (Histogram of Oriented Gradient, HOG)、Adaboost 與 harr-like 特徵等分類器與特徵的結合，被大量用於偵測車輛位置與及車種分類兩大問題上。近幾年隨著深度學習的崛起，特別是在影像辨識/分類方面之辨識率甚至已經超越人類。爰此，本研究利用深度學習中的卷積神經網路 (Convolutional Neural Networks, CNNs) 架構，依車種對車輛進行分類工作。卷積神經網路與過去機器學習方法的最大不同之處，在於過去方法皆有賴人類智慧去設計影像特徵，再透過機器學習根據影像特徵進行分類，因此影像特徵設計上的好壞會影響分類結果。然而由人類設計的影像特徵往往較為理想而單純，難以適用所有複雜而多變之實際影像內容。相對地，卷積神經網路將影像特徵的生成涵蓋在其網路架構裡，透過非常大量的影像訓練，在不同尺度 (scale) 上產生大量適用於各類影像的局部特徵，這些由百萬張真實照片所訓練歸

納得出的局部影像特徵，遠較人類設計之影像特徵更為泛用，也更能呈現多數影像的局部特質。另一方面，網路中的多層結構也保障了影像描述上所需的複雜結構，因此影像辨識/分類問題是如今深度學習最成功的領域之一。

Xu, Y. G. et al. (2017)^[3]將 Faster R-CNN (Regions with Convolutional Neural Network features) (2016) 架構用於空拍影像之車輛偵測分類，如圖 3 所示。在單純偵測出車輛不分車種的情況下，準確率可以達到 94.94%。由於上述例子的成功，因此我們認為可以從現有的 CNN (Convolutional Neural Network) 架構中挑選出符合需求的架構，來達成路口空拍影像下的車輛偵測與分類工作。



(a)



(b)

圖 3 Xu, Y. G.等人所提之 (a) 車輛偵測流程圖與 (b) 車輛偵測結果 (Xu, Y. G. et al., 2017)

Tang, T. et al. (2017) [4]提出了同樣基於 Faster R-CNN 的車輛偵測方法，如圖 4 所示，透過一種車輛提案網路 (Vehicle Proposal Network, VPN)，組合不同層的特徵來生成候選車輛狀區域。然後，使用車輛分類網路 (Vehicle Classification Network, VCN) 以進一步驗證候選區域，並在八個方向上對車輛進行分類。由於基於 CNN 的深度學習方法，通常需要大量的人工標記的訓練數據，但空拍影像的標記數據往往相當有限。因此，他們將原始的大型空拍影像裁切，並通過以四個角度 (即 0° , 90° , 180° 和 270°) 旋轉增加訓練數據集的大小。

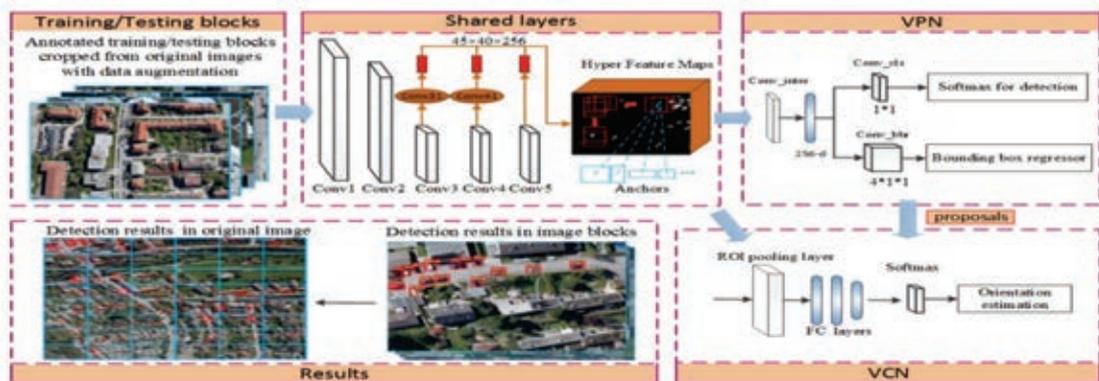


圖 4 Tang, T.等人設計之架構圖 (Tang, T. et al., 2017)

Sommer, L. et al. (2017) [5]將 Faster R-CNN 與 FCN (2015) 做結合，如圖 5 所示，透過結合分割與偵測結果來減少偵測時的錯誤率，並且減少 region proposal 的分類數量，首先他們先將影像做透過 RPN 預測車輛偵測框，同時他們基於 FCN 設計出 3 種分割架構 AFCN-32、AFCN-MS 以及 AFCN-D16 將影像做分割 (segmentation)，並將分割結果和 Faster R-CNN 結果結合，透過這種方法將錯誤率降低。

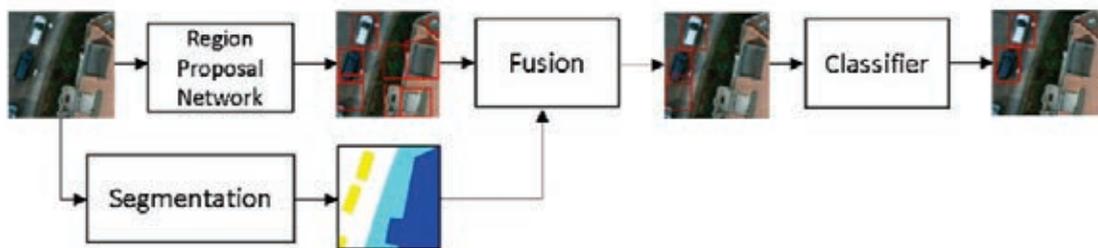


圖 5 Sommer, L.等人設計之架構圖 (Sommer, L. et al., 2017)

從過去文獻我們可以發現，一般 R-CNN 等深度學習架構下，車輛偵測框無法真正緊貼車體外緣。但在實際空拍影像中，車輛在轉彎過程中並不適合用邊界框來描述實際車輛範圍。因此本篇論文將重點探討空拍影像下，能夠準確偵測車輛外緣之 CNN 架構，以便未來能更精準地找出實際車輛外緣範圍，提升交通車流分析的準確性。

2.4 交通衝突技術

交通衝突技術 (Traffic Conflict Technique, TCT) 最早可追溯在美國五十年代開始發展，後來持續由其他國家延伸並修改。在原來的 TCT 中，沒有任何技術設備，交通情況由人類觀察員觀察、記錄和分析。交通衝突可以是任何潛在的事故情況，常見有兩類交通衝突：駕駛員的迴避行為和交通違規行為。在原來的 TCT 中，只計算事故的數量，後來發現衝突的重要性及嚴重程度，所以將其納入考慮來評估交通狀況的不安全性。

交通衝突是交通安全潛在危險之根源，其分類為交岔、併入及分出三種型態。若考慮對撞、追撞等碰撞型態，可將其分為分出衝突 (Diverging conflict)、併入衝突 (merging conflict)、穿越衝突 (crossing conflict) 及接續衝突 (sequential conflict)^[6]，茲介紹如下：

1. 分出衝突：車輛通過交岔路口時，由原來的車流分離以穿越或轉向產生之衝突。
2. 併入衝突：由相異車輛於穿越交岔路口時合併為一新車流所產生之衝突。
3. 穿越衝突：通過交岔路口之不同方向之車流，因彼此交岔穿越行為產生之衝突。
4. 接續衝突：由前行車減速或改變方向時，跟隨在後的車輛處於可能碰撞的危險狀態所產生之衝突。

2017 年美國微軟公司 (Microsoft Corp.) 的 Franz Loewenherz 等人的研究^[7]，與美國華盛頓州貝爾維尤市 (the City of Bellevue, WA, USA) 和華盛頓大學 (University of Washington) 已進入了一個技術開發合作夥伴關係，計畫屬名為 “Video Analytics Towards Vision Zero”，此計畫乃是使用既有的交岔路口攝影機所提供之影像，於後端藉由深度學習技術平台，以達防止路口碰撞事件為目的，進行以下 3 分類工作：

1. 計算：道路使用群體之數量、及速度 (群體含：車輛、行人、自行車)。
2. 紀錄：道路使用群體之流動方向 (車流、人流、自行車流)。
3. 評估：道路使用群體之可能碰撞之不安全狀態。

Peleg, M et al.^[8]研究在城市地區使用空中拍攝的照片進行交通調查，除了利用簡單的設備、方法和合適公式，用以取得車流密度，車流量，車輛計數，速度等交通資料。也考慮連續拍照和大範圍攝影的交通調查問題，及交通特性、車輛識別、和經濟效益與飛行規劃等交通調查量參數。Makigami, Y et al.^[9]在日本阪神高速公路上利用相機拍攝，記錄車流量並追蹤車輛軌跡於時空圖上，並繪出交通量的速率-密度圖，藉以分析壅塞原因。此外，Ardekani, S et al.^[10]也利用空拍影像分析流量、車速等交通資訊，並於地面實際確認比對，以確認分析之合理性。

鑒於影像分析技術的進步，使用深度學習可大幅取代傳統的車輛偵測與分類，進行交通衝突分析之相關研究，可節省時間並提高準確性，本研究採用智慧化影像辨識技術，透過偵測及追蹤空拍影像中的車輛，估測其車速與相對位置來進行上述交通衝突指標的估算，以作為交岔路口交通安全評估改善措施之基礎。

參、研究流程與方法

在都會區複雜的交通環境下，為能有效掌握高事故風險地點之車流軌跡，一般監視器影像中不同角落的車輛方向、大小、形狀都不相同，加上攝影機視角的差異與監控影像品質之問題，造成傳統影像監控技術難以直接應用到不同攝影機所拍攝的影像內容，往往需要事前對系統參數進行人工調整，才能應用不同攝影機所拍攝之影像。

近年來崛起的深度學習風潮，雖然在電腦視覺領域上有突破性的發展，但對於相對小型物體的辨識率仍有先天上的限制，在遠距離車輛偵測上較容易產生誤判，不如單純車輛分類表現優異。爰此，本研究預計採用建立能對應交通號誌變化的車流模型，再根據當下的車流模型利用傳統的前景偵測技術偵測出可能車輛或行人，再透過深度學習對可能的車輛或行人做進一步的驗證與分類。

本研究流程主要分為三大部分，如圖 6 所示：

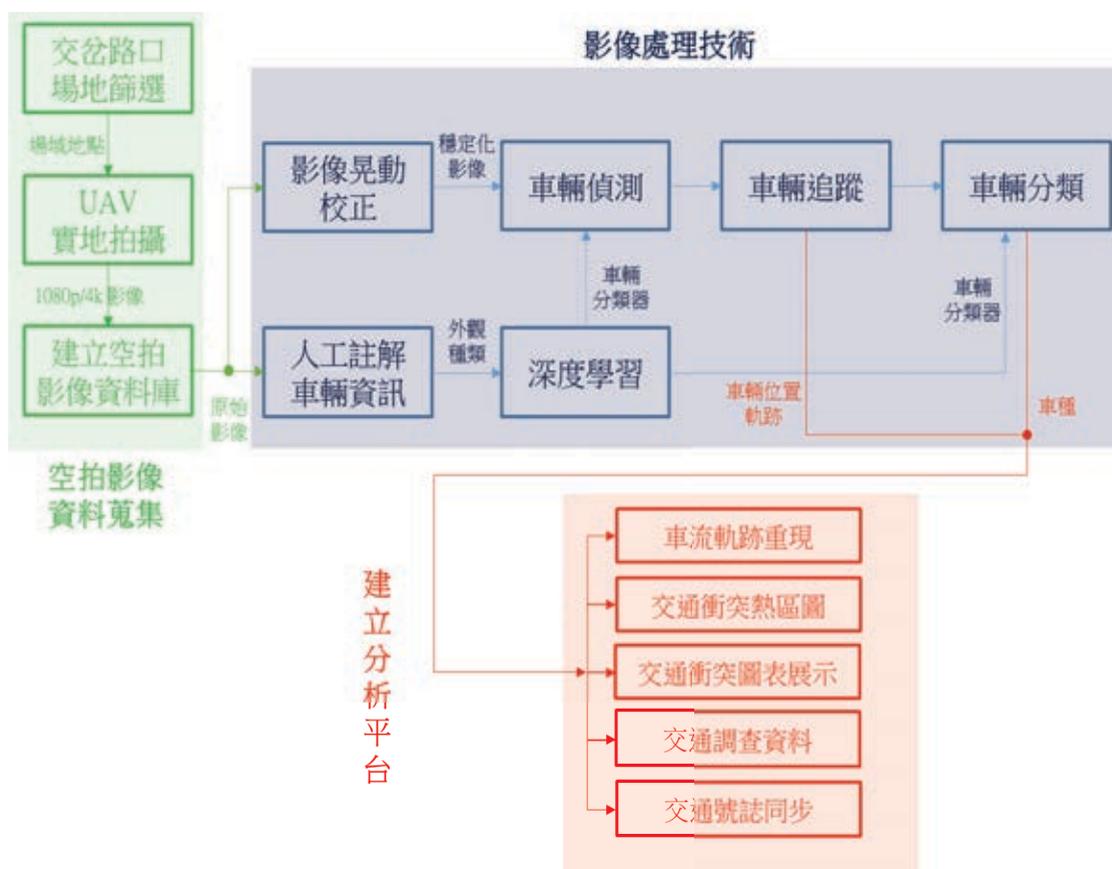


圖 6 本研究流程圖

3.1 空拍影像資料蒐集

為能有效掌握高事故風險地點特性，本研究選定桃園市 4 處具代表性及參考性之交岔路口（中華路與茄苳路口、中正路與大興西路口、中正路與三民路口，以及中山路與上海路口）作為優先拍攝之場域，拍攝畫面必須包含整個交叉口，蒐集多部 1080p/4K 高解析空拍影片，作為系統開發與測試所需之影像資料庫。

據本研究的調查經驗（如表 1 所示），以一般雙向三線道的交叉口為例，飛行高度 50 公尺拍攝時，縱向車道停止線後的範圍容易過小，影響追蹤車輛進出交叉口情形；飛行高度 100 公尺時，縱向車道停止線後的範圍過大，亦間接降低空拍影像中交叉口區域範圍大小，影響車輛偵測與辨識；飛行高度 75 公尺時，可涵蓋交叉口外之車輛停止線後約兩部車輛長度的範圍，使影像中的車輛在進出交叉口時能被完整追蹤，並保有較大的車輛偵測面積，為最適合進行交叉口車流分析之高度。

表 1 飛行高度比較表

| | | 拍攝地點 A | 拍攝地點 B | 拍攝地點 C |
|------|------|---|---|---|
| | | 桃園市八德區中華路與茄苳路口 | 桃園市桃園區中正路與大興西路口 | 桃園市桃園區中正路與三民路口 |
| 拍攝高度 | 50 m |  |  |  |
| | 75 m |  |  |  |
| | 100m |  |  |  |

考量本研究分析平台之空拍影像可用性，需蒐集可用之空拍影像資料作法歸納如下：

1. 為適合於都會區交岔路口迅速升空執行，具備機身輕巧、快速起降之特性，無人機選用以P4P最為合適。
2. 為分析交岔路口車流行為，以飛行高度75公尺拍攝涵蓋交岔路口之停止線後延伸約兩部車輛長度之範圍，最利於車輛在進出交岔路口時能被完整追蹤，並保有較大車輛偵測面積。
3. 為提升交通衝突指標估算準確度，採用0°垂直向下拍攝，可準確定位車輛角點，避免斜拍車輛在外觀上的不一致，提升車輛辨識與追蹤的準確性。
4. 針對無人機影像蒐集方案，為避免環境因素影響拍攝效果，須於無雨、霧，且風速小於9m/s以下進行，風速愈小，影像品質愈佳，因此建議於低風速下進行影像蒐集，以提高影像之可用性。影像解析度對於車輛偵測、辨識及追蹤具有高度關聯之影響性，爰此拍攝影片之解析度必須為1080P/4K，宜適用於後續影像分析訓練。
5. 為利於影像穩定技術對空拍影像之校正，畫面設定方式採主要道路橫向置中、次要道路縱向置中，確認影元此像對焦後，關閉其餘自動調整設定。

3.2 影像處理技術

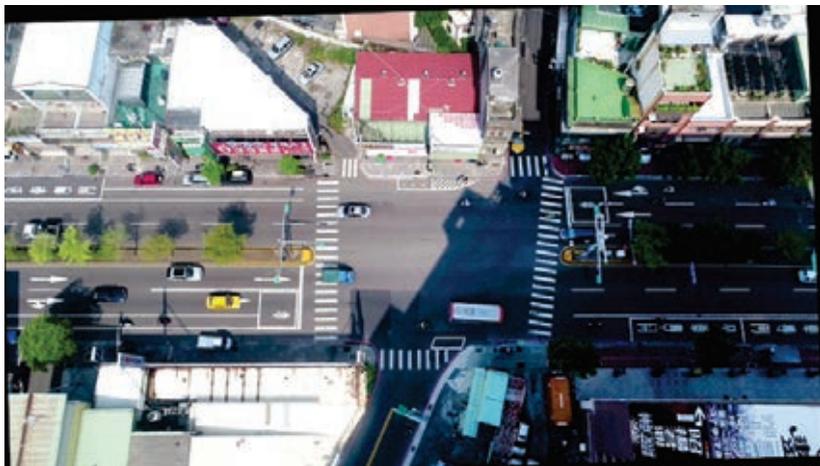
在利用空拍影像進行交通車流分析之前，由於無人機本身會受到陣風影響，導致影像中的街道位置偏離，因此須先針對影像進行對齊校準 (image alignment)，以確保所有影像中的道路、車輛物件皆維持在同一個平面坐標系統。本研究採用 2008 年由 G. D. Evangelidis 與 E. Z. Psarakis 所提出的 ECC (Enhanced Correlation Coefficient) 影像對齊技術^{[11][12]}，透過找尋輸入影像與樣板影像間最大的相關係數，決定出一個 3×3 的轉換矩陣，讓輸入影像中的所有點都能透過這個轉換矩陣，投影到與樣板影像一致的平面坐標系統，如圖 7 所示。



(a) 首張空拍影像



(b) 第 5 分鐘空拍影像



(c) 經對齊之第 5 分鐘空拍影像

圖 7 空拍影像對齊示意圖

在車輛偵測方面，本研究採用 2017 年由 K. He et al.^[13]所提出的深度學習架構 Mask R-CNN，以偵測車輛的矩形範圍。透過 Mask R-CNN 提供的像素級 (pixel-level) 物體區域範圍，本研究再利用可傾斜之矩形去擬合每個車輛的像素集合，進而成功取出可貼合轉彎中車輛外緣的矩形範圍。這樣的作法有助於大幅改善過往以單一車輛中心代表車輛位置的做法，有助於進一步提升後續交通衝突風險評估階段的精確性。由於 Mask R-CNN 在偵測出車輛位置時，也同時預測了其所屬的車輛種類，如圖 8 所示，可同步完成偵測與分類工作，有效簡化整體處理流程。



圖 8 利用 Mask R-CNN 進行車輛偵測與分類結果圖

由於 Mask R-CNN 是針對影片中單張畫面進行車輛偵測，因此無法得知不同畫面中的那些偵測車輛是屬於同一部車輛。爰此，本研究利用光流法 (optical flow)^[14]針對前一張影像的車輛特徵點進行追蹤，找尋下一張影像中鄰近位置的相似局部特徵並加以匹配，估算出相似特徵點在前後影像的位移作為追蹤結果。再針對第 $i-1$ 張畫面中車輛 V 的矩形範圍，估測其在第 i 張畫面的矩形範圍 $P_{v,i}$ 。之後，再將預測位置與 Mask R-CNN 在第 i 張畫面的所有偵測位置比對，若 $P_{v,i}$ 與其中一個偵測位置 $D_{w,i}$ ，兩者間的矩形範圍重疊程度明顯最高，則表示 $P_{v,i}$ 與 $D_{w,i}$ 兩者極可能為同一部車輛的預測與偵測結果，因此可以採用 $D_{w,i}$ 作為車輛 V_i 在下一畫面的實際矩形範圍。這是由於 Mask R-CNN 的偵測結果，往往較利用特徵點估測出的位置更為精準可靠，藉此提升四輪車輛在追蹤上的可靠性。若找不到任何偵測車輛位置與估測位置 $P_{v,i}$ 高度重疊，則由於缺乏合適的偵測結果，因此可以將 $P_{v,i}$ 視為車輛 V_{i-1} 在第 i 張畫面的實際矩形範圍。為了減少不必要的運算量，本研究針對已對齊校正好之空拍影片，以路口為中心並延伸至停止線外約 2 部小客車之影像範圍，縮放為 $1024*1024$ 像素，並將原本 29.97fps 的影片重新取樣為

5fps，如圖 9 所示。其中，紅色方框為前一張畫面車輛 V_{i-1} 的位置，青色方框為當前車輛 V_i 的位置，車上紅色數字為車輛編號。當前車輛位置（青色方框）主要來自於 Mask R-CNN 經矩形擬合後的偵測結果 $D_{w,i}$ ，若是無法找到與追蹤位置 $P_{v,i}$ 相近的偵測結果，則直接將 $P_{v,i}$ 視為當前車輛位置。



圖 9 車輛追蹤圖

透過前述車輛偵測與追蹤步驟，可以取出每部車輛的軌跡相關資訊，並透過車輛追蹤結果判定不同時間之同一部車輛位置，並透過車輛中心位移與畫面間的時間差計算出車輛速度，如圖 10 所示。其中，透過人工指定的青色線段是用於判定進出交岔路口之車輛，所有進入（車首經過）青色線段所圍區域的車輛將被追蹤，直到離開時（車首再次經過青色線段瞬間）再將其軌跡資訊一次寫入資料庫加以存檔。紅色矩形為偵測出之車輛範圍，並一旁顯示其車輛編號，以及白色為車輛速度資訊。雖然影片中的車輛位移是以像素為單位計算，但可透過實際路口場勘將影像中的像素換算為實際距離。以圖 10 飛行於 75 公尺高度及無廣角無縮放的拍攝模式為例，一像素約相當於 0.06 公尺。



圖 10 車輛速度估測圖

3.3 準確性驗證

1. 車輛偵測追蹤：以各類車輛所有的軌跡位置之mIOU（mean Intersection over Union）評定物體偵測出的位置與實際位置的重疊比例，來評估追蹤效果。在四輪車輛追蹤上，本研究的偵測框與實際車輛範圍的平均覆蓋率mIOU約為0.7439。從影像檢索的觀點來看，此位置準確度上已經算是相當精準，特別是本研究中的車輛具有旋轉角度，大幅提高了準確框住車輛範圍上的難度。
2. 車種分類：為釐清車種間的誤認關係，本研究以混淆矩陣（confusion matrix）來評估單張畫面下的Mask R-CNN車種分類結果。在四種不同形式之路口中，小客車平均分類正確率約為99.4%、貨車約為62.2%、巴士為100%。基於空拍影像下的貨車與小客車外型與大小接近，加上貨車訓練樣本數明顯較小客車少，且貨車間外觀差異大（易受車廂/車斗及車斗上酬載各式物體影響），導致貨車容易被誤認為小客車。
3. 車速度準確性評估：透過人工標註的車輛位置計算其在影像上移動速度（pixel/sec），並以實測路口大小換算比例成真實速度（km/hour）。最後根據透過人工標註計算出之速度 V_g 與程式計算出之速度 V_e ，取兩者間之差值 $|V_g - V_e|$ 來評估速度誤差，經計算出之結果平均相差僅1.384km/h。

3.4 建立分析平台

透過無人機空拍的定點影像，結合影像處理技術偵測交岔路口車流量、判別不同車種、車輛軌跡及車速等交通資料，以圖表方式將相關的交通資料以系統化整合方式呈現於分析平台中，再進一步計算車輛間之交通衝突參數與交岔路口衝突熱區等資訊，能在交通事故發生前先診斷出交岔路口之交通衝突問題，供交通管理單位與道路設計者，作為研擬交通改善之參考。

肆、研究限制

1. 依據民航法遙控無人機專章相關規定，從事遙控無人機飛航活動不得於日落後至日出前之時間飛航，爰不就夜間影像進行分析。
2. 本研究結合無人機應用、影像處理技術及交通管理三大領域專業，開發出一套交通分析工具平台。由於缺乏前例可循，屬於探索（嘗試）性質之研究，仍須針對不同方法（包含傳統影像處理技術與最新深度學習技術等）進行嘗試。鑑於近兩年深度學習在影像處理技術之領域中迅速發展，爰此，在追求較佳車輛偵測及追蹤車輛軌跡效果之前提下，選擇Mask R-CNN影像處理技術之方法進行本研究分析。
3. 惟受限於偵測及追蹤交岔路口車輛軌跡，拍攝範圍須覆蓋整個交岔路口，並包含停止線後兩輛車之距離，對於機車等小型車輛（自行車、機車）及行人而言，相對拍攝取得之物件面積較小，爰此，Mask R-CNN在執行時，會逐步將車輛影像卷積縮小，當經過多層卷積後的單層輸出結果畫面會越來越小。當一部機車、自行車或行人經過多層深度卷積，而不足以形成一個點，便會在輸出結果畫面上消失，尤其是遭遇路面標線、斑馬線等大量強烈特徵點時，軌跡追蹤資訊較易造成混淆而導致失敗，故在Mask R-CNN方法上直接限制能偵測到的物體大小。
4. 另本研究所選擇之交岔路口未必所有車種都能蒐集到足夠的樣本進行影像辨識訓練。深度學習的訓練影像數基本上越多越好，但所有訓練資料皆須以人工標註，以本研究小客車標註約萬輛（千張以上影像）能達到接近100%之分類成功率，訓練資料量已足夠。然而，每張影像在標註時的必要前提為所有影像中之車輛皆須標註，一張影像中即便偶有一部貨車/聯結車，仍需標註影像中其他十倍於此的小客車數，否則未標註之車輛會明顯影響訓練結果。

伍、分析平台功能展示

5.1 車輛軌跡

透過車輛軌跡資料的連續繪製，呈現車流行經交岔路口軌跡，如表 2 所示。其中，依序為 (a) 桃園市八德區中華路與茄苳路口、(b) 桃園市桃園區中山路與上海路口、(c)

桃園市桃園區中正路與大興西路口、(d) 桃園市桃園區中正路與三民路口。相較於單一線段的車輛軌跡表示方式，本研究分析平台提供車輛行駛經過的完整區域，每部車輛會以不同顏色描繪其行經路徑，讓瀏覽者更容易觀察不同車輛完整行經交岔路口軌跡之交疊情形。

表 2 交岔路口車流軌跡圖

| | | |
|------|--|---|
| 中華路 | <p style="text-align: center;">茄苳路</p>  | <p style="text-align: center;">上海路</p>  |
| | <p>(a) 桃園市八德區中華路與茄苳路口</p> | <p>(b) 桃園市桃園區中山路與上海路口</p> |
| 大興西路 | <p style="text-align: center;">中正路</p>  | <p style="text-align: center;">中正路</p>  |
| | <p>(c) 桃園市桃園區中正路與大興西路口</p> | <p>(d) 桃園市桃園區中正路與三民路口</p> |

5.2 交通衝突分析與圖表展示

衝突事件的定義涵蓋範圍廣且模糊。美國運輸研究委員會的交通安全委員會根據醫學上對替代事件的定義延伸，提出以衝突替代肇事評估交通安全須滿足兩條件^[15]：

1. 替代事件為可觀測的非碰撞事件。
2. 替代事件和肇事相關，且可轉換。

透過判斷衝突點後，即可針對可能發生肇事的衝突點為建立衝突指標，並以該指標判斷路口安全性。關於替代事件的選擇，常見的方式為描述車輛互動的時間空間關係。以下介紹二常見之交通衝突指標（Conflict indicators）：

1. 碰撞時間（Time to collision, TTC）

碰撞時間的定義為兩車維持當前速度與行駛方向不變的情況下，兩車碰撞所需的時間（Hayward, 1972）^[16]。此指標為連續型，即每個時點均能產生一筆資料，實務上常以記錄時間中所得秒數最低的碰撞時間為參考。此指標僅限於該時點處於即將碰撞（near miss）狀態下的車輛，並非所有車流交會都會產生 TTC 值。Laureshyn, A. et al. (2010)^[17]整理出兩車不同角度下產生衝突，TTC 的計算需考慮碰撞類別及碰撞點，90 度直角碰撞（right-angle collision）、追撞（rear-end collision）、對撞（head-on collision）的 TTC 計算公式，如圖 11 所示：

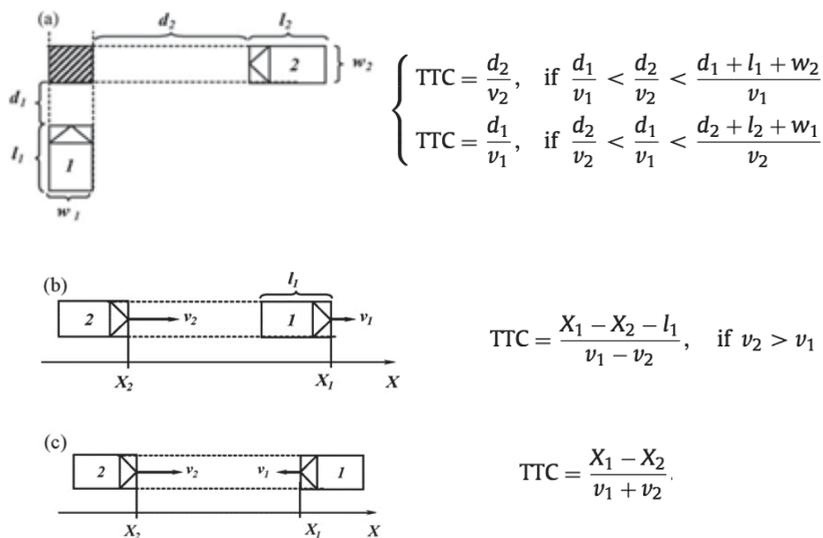


圖 11 TTC 計算公式及示意圖 (a) 90 度直角碰撞、(b) 追撞、(c) 對撞
(Laureshyn, A. et al., 2010)

當兩車相遇時的角度為任意角度時，有可能因前車與後車的碰撞點不同而產生不同的碰撞類別（Collision type），提出了更精細的計算方法。兩車為任意角度時，將會是

一車的角 (corner) 碰撞到另一車的邊 (side)，假設車輛以長方形代表，兩車相同角度下可產生 (2 車 x 4 角 x 4 邊) 共 32 個 “角-邊” 組合的碰撞類別，示意圖如圖 12 所示。可以以幾何投影的方式計算所有組合的 TTC，再取最小的 TTC 值作為這個衝突事件的 TTC。

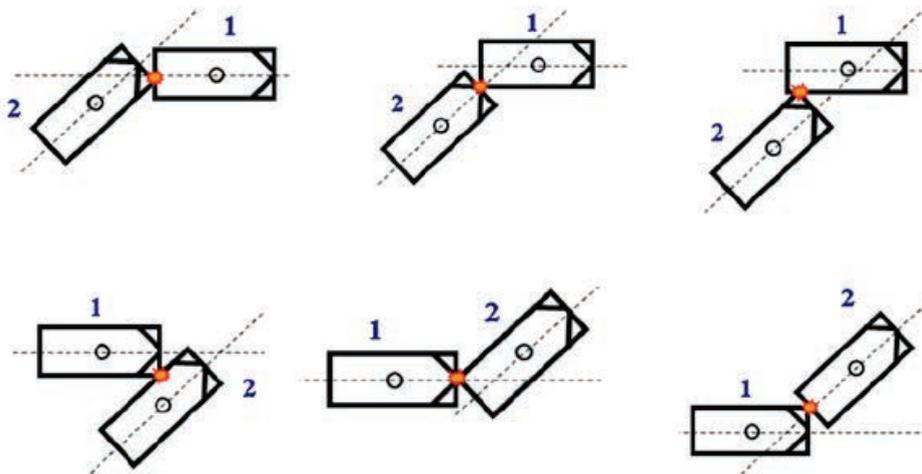


圖 12 兩車相同角度下的可能碰撞類別圖 (Laureshyn, A. et al., 2010)

在 TTC 的計算上，本研究根據每部車輛當前移動方向與速率，將預估出之未來第 k 張畫面的車輛位置描繪於影像，可取得任兩部車輛 v_i 與 v_j 交會重疊區域 O_k ，此時近 K 張畫面的 O_k 聯集區域即代表 $TTC < K$ 的所有預估碰撞區域，稱之為 TTC_K ，如公式 (2)：

$$O_k = \bigcup_{i \neq j} (v_{i,k} \cap v_{j,k}) \quad (1)$$

$$TTC_K = \bigcup_{1 \leq k \leq K} O_k \quad (2)$$

此時 TTC_K 代表在 K 張畫面內，所有可能衝突的車輛交疊位置。由於 TTC 代表的是在當前速度方向下的車輛衝突情況，例如後車比前車快或兩部對向車輛同時轉彎交會等情形。圖 13 (b) 為以 5fps 影片為對象估算 TTC_{15} 之範例，即 3 秒內發生的可能衝突區域。如此，每 3 秒我們會取得一筆 TTC 資料。圖 13 (b) 中越接近紅色代表該位置累計的 TTC 衝突次數越高。由圖中可見一連串縱向的衝突熱區，主要來自相當鄰近的對向車流與轉彎車輛；偏右方的獨立點熱區則來自停等待轉車輛及其後的跟隨車輛。圖 13 (a) 與 (c) 分別為 TTC_{10} 與 TTC_{20} 的熱區圖，也就是 2 秒內與 4 秒內的可能衝突熱區。在圖 13 (d) 中，特別針對圖 13 (c) 紅圈位置在 20 張畫面內的衝突次數進行表示，最短的 TTC 衝突為相隔 5 張畫面後發生 (一次)，其次為間隔 8 張畫面 (一次) 與間隔 9 張畫面 (兩次)，後續則隨著時間差增加，碰撞情形也越容易發生，並在間隔 19 張畫面下達到最高碰撞五次。若以 TTC_{10} 做為前提做統計，則只會採計衝突時間差 10 張畫面內之次數，也就是該點位置 TTC_{10} 為 4，分別發生在相隔 5、8、9 張畫面的情況，其中 9 張畫面佔了兩次。



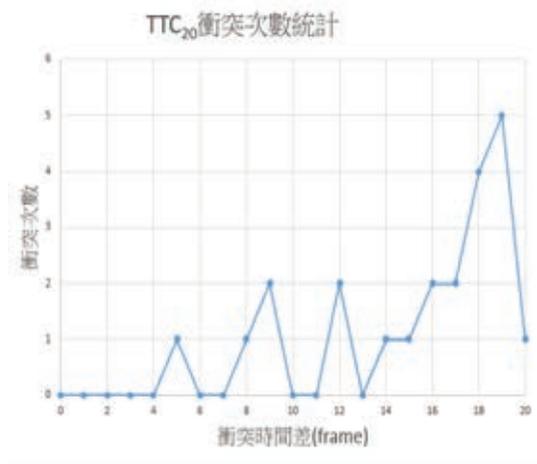
(a) TTC_{10}



(b) TTC_{15}



(c) TTC_{20}



(d) TTC_{20} 交通衝突次數統計

圖 13 交通衝突熱區分布圖

2. 後侵占時間 (Post encroachment time, PET)

後侵占時間的定義為兩車軌跡交會，車輛一方通過衝突區（軌跡交會點）與另一方通過衝突區的時間差。後侵占時間對於軌跡相交的事件，必能產生一後侵占時間資料，相較於碰撞時間較易取得，然而測得 PET 不代表兩車輛必會經歷衝突狀態，因此也需要定義衝突門檻的問題。右轉側撞的後侵占時間計算公式及示意圖，如圖 14 所示：

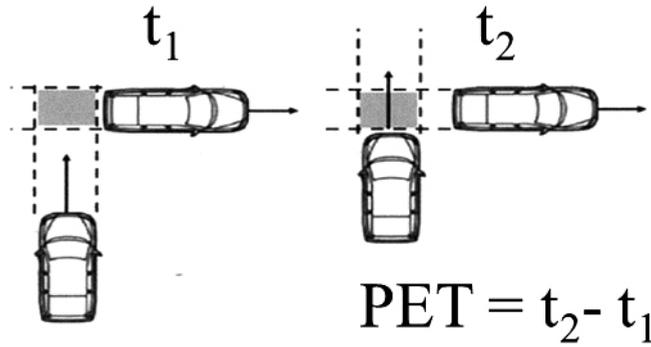


圖 14 PET 計算公式及示意圖 (Laureshyn, A. et al., 2010)

後侵占時間的計算，需要先找出兩車軌跡的共同區域 (common zone)。Laureshyn, A. et al. (2010) 指出，在兩車呈直角 90 度的情況下，後侵占時間的計算簡單；但當兩車呈任意角度時，傳統上以幾何投影車輛軌跡的計算方法，可能會產生兩車同時出現於共同區域內但兩車不產生碰撞之情況，如圖 15 所示，因此計算定義及方式須加以調整。

本研究所採用之影像分析方法，先萃取每一個畫面 (frame) 的影像中每一臺車輛之外框 (bounding box)，再透過檢視畫面中每一個畫素 (Pixel) 是否被車輛的外框所佔用，該區域被兩臺車於不同時間點佔用的時間差可以作為兩車之後侵占時間。

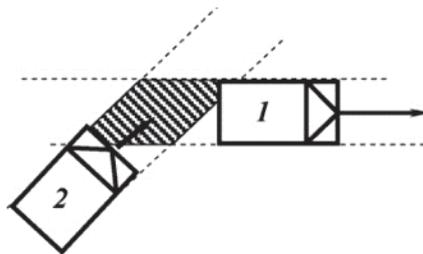


圖 15 兩車同時出現於共同區域內但不產生碰撞之情況圖
(Laureshyn, A. et al., 2010)

為了模擬計算不同車輛軌跡重疊情形，透過依序將軌跡繪製於空白影像上，來取得軌跡間重疊位置之時間差。其基本概念係以不同顏色表示不同車輛的矩形範圍，並以不同亮度代表車輛位置出現的時間，且同一像素位置僅保留該位置最新車輛的行經軌跡。如此，可以透過檢查每個像素位置上車輛軌跡顏色的變化，判斷是否有不同車輛軌跡交錯覆蓋，並可透過檢查其亮度差異來判斷兩部不同車流車輛交錯的時間差。以圖 16 為例，紅色與綠色分別表示於交岔路口上兩部車輛在不同時間的車輛軌跡，亮度越高代表時間越晚的車輛位置。紅色與綠色軌跡交錯的區域為可計算 PET 的區域，由於軌跡亮度代表行經的時間點，因此在軌跡交錯區域中的每個像素位置，皆可透過計算紅色與綠色軌跡的亮度差，來計算交岔路口影像中每個像素點之 PET 數值。

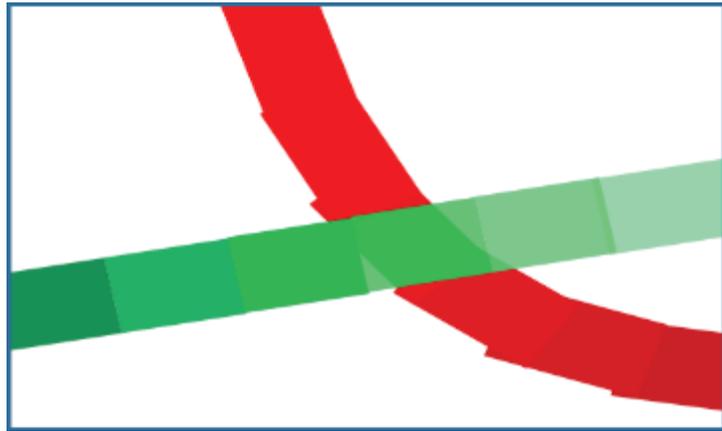


圖 16 兩部車輛軌跡之 PET 計算示意圖

表 3 交岔路口 PET50 衝突熱區分部

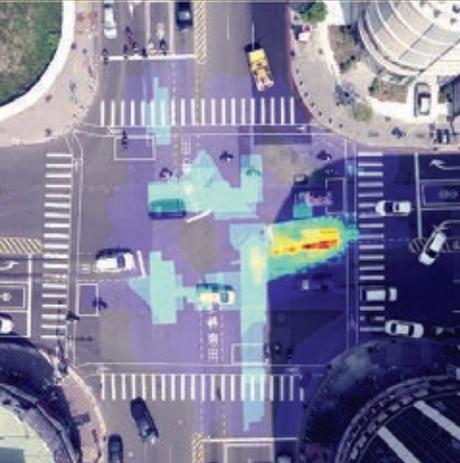
| | | 茄苳路 | 上海路 |
|------|---|--|-----|
| 中華路 |  |  | |
| | (a) 桃園市八德區中華路與茄苳路口 | (b) 桃園市桃園區中山路與上海路口 | |
| 大興西路 |  |  | |
| | (c) 桃園市桃園區中正路與大興西路口 | (d) 桃園市桃園區中正路與三民路口 | |

表 3 為針對 5fps 影片為對象估算 PET_{50} 之範例，即 10 秒內發生的可能衝突熱區分布。其中，依序為 (a) 桃園市八德區中華路與茄苳路口、(b) 桃園市桃園區中山路與上海路口、(c) 桃園市桃園區中正路與大興西路口、(d) 桃園市桃園區中正路與三民路口四個測試路口之 PET_{50} 衝突熱區圖。表 3 中越接近紅色代表該位置累計的 PET 衝突次數越高。如圖 (c) 桃園市桃園區中正路與大興西路口右側之衝突熱區主要由右方左轉車輛與上方左轉車輛形成；圖 (d) 桃園市桃園區中正路與三民路口中間之衝突熱區主要由下方左轉車流與上方向下之直行車流相互交錯產生。由觀察得知，TTC 中同方向車流間的可能追撞情況，並不會出現在 PET 熱區圖之中。

5.3 交通號誌同步

本研究同時提供交通號誌與影片同步之功能，只要以畫面為單位輸入各路口交通號誌的變化週期，以及影片首張畫面對應之實際號誌時間，便可在影片上顯示同步後的交通號誌變化情況，供瀏覽者作為交通管理之參考。例如在 5fps 影片中，某個路口之號誌變化週期為綠燈 30 秒，黃燈 2 秒，紅燈 28 秒重複循環，則表示影片中之號誌變化週期為綠燈 150 張後，接黃燈 10 張，之後再接紅燈 140 張形成每 300 張一次循環的變化週期，爰只須指定第一張畫面是處於這 300 張的哪一刻燈號狀態，便可依序推測後續的燈號變化情形。圖 17 所示之紅綠燈號誌變化，亦即為根據該路口實際號誌時相變化，透過人工校準時間取得之結果。所謂人工校準係採用人工進行影像停格與時相確認，由於時相變化之週期固定，經人工方法驗證後確認此同步功能可實際運用於號誌變化之紀錄。由於影片經過重新取樣為 5fps，而時相紀錄為以秒作為單位，因此誤差大約會落在 0.2 秒~1 秒間。



圖 17 交通號誌同步與車流統計圖

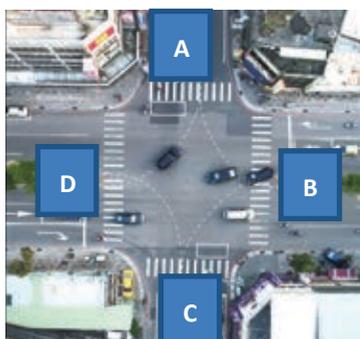
5.4 交通調查資料

除了透過本研究所發展風險偵測平台估算衝突熱區，機車、汽車、貨車與巴士等車輛通過入口之軌跡，也會以 CSV 檔方式加以記錄儲存，以方便其他交通分析人員讀取車輛軌跡資訊並加以運用。CSV 檔中每一列即為一部車輛在通過路口期間的完整軌跡資料。針對每一部車輛，系統將依序紀錄該部車輛進入路口時間 (frame)、離開路口時間 (frame)、進入路口代號、離開路口代號、車種 (m 為機車、c 為汽車、t 為貨車、b 為巴士)、連續的軌跡位置資訊。對於汽車、貨車與巴士等四輪車輛，將紀錄構成其矩形範圍之四個角點坐標 (x1,y1), (x2,y2), (x3,y3), (x4,y4)，對於機車則僅記錄單點坐標 (x1,y1)。以表 4 為例，第一列顯示的資訊為該部車輛從第 62 張畫面由路口 D 進入，至第 84 張畫面由路口 B 離開之機車車輛。由於機車是以坐標點 (x,y) 表示其位置，故該機車的軌跡移動依序為 (367,610), (383,610), (399,610),。若該筆車輛為汽車等四輪車輛，如表 4 中第二列紀錄，則該車第一個位置之四個角點坐標分別為 (814,433), (814,398), (897,398), (897,433)、第二個位置為 (796,435), (796,400), (879,400), (879,435)，以此類推。這些資料除了是平台計算 PET、TTC 等風險指標的基礎，更可以提供使用者根據自己需求，透過 Excel 試算表等工具，自行計算軌跡相關之交通調查資料，如速率變化、路口轉向分布 (如表 5)、路口車流量變化等不同用途分析。

表 4 桃園市桃園區中正路與三民路口軌跡紀錄表

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y | Z |
|----|-----|-----|---|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 10 | 62 | 84 | D | B | m | 367 | 610 | 383 | 610 | 399 | 610 | 415 | 609 | 431 | 609 | 447 | 608 | 463 | 608 | 479 | 607 | 495 | 606 | 511 | 605 | 527 |
| 11 | 53 | 85 | B | D | c | 814 | 433 | 814 | 398 | 897 | 398 | 897 | 433 | 796 | 435 | 796 | 400 | 879 | 400 | 879 | 435 | 778 | 435 | 778 | 400 | 863 |
| 12 | 57 | 92 | D | B | c | 194 | 633 | 194 | 598 | 285 | 598 | 285 | 633 | 212 | 632 | 212 | 597 | 301 | 597 | 301 | 632 | 232 | 633 | 232 | 598 | 317 |
| 13 | 81 | 99 | D | B | m | 369 | 588 | 390 | 588 | 411 | 588 | 431 | 588 | 451 | 587 | 470 | 587 | 490 | 587 | 510 | 587 | 530 | 587 | 550 | 587 | 569 |
| 14 | 78 | 104 | D | B | c | 252 | 587 | 252 | 552 | 325 | 552 | 325 | 587 | 346 | 589 | 272 | 586 | 274 | 552 | 348 | 555 | 367 | 588 | 293 | 586 | 295 |
| 15 | 78 | 126 | D | B | c | 187 | 660 | 187 | 627 | 268 | 627 | 268 | 660 | 200 | 661 | 200 | 628 | 281 | 628 | 281 | 661 | 212 | 661 | 212 | 628 | 295 |
| 16 | 1 | 133 | D | A | c | 466 | 546 | 450 | 515 | 526 | 475 | 542 | 506 | 466 | 545 | 450 | 515 | 526 | 475 | 542 | 505 | 469 | 546 | 452 | 516 | 525 |
| 17 | 1 | 167 | B | C | c | 784 | 491 | 784 | 454 | 875 | 454 | 875 | 491 | 786 | 491 | 786 | 454 | 875 | 454 | 875 | 491 | 782 | 492 | 780 | 454 | 870 |
| 18 | 155 | 168 | B | D | m | 706 | 409 | 679 | 409 | 651 | 409 | 625 | 408 | 598 | 408 | 570 | 408 | 543 | 408 | 516 | 407 | 489 | 407 | 462 | 407 | 434 |
| 19 | 148 | 177 | B | D | c | 812 | 380 | 810 | 343 | 902 | 338 | 904 | 376 | 790 | 379 | 790 | 344 | 885 | 344 | 885 | 379 | 772 | 379 | 772 | 344 | 865 |
| 20 | 133 | 187 | B | C | c | 738 | 492 | 735 | 454 | 822 | 448 | 825 | 486 | 734 | 492 | 731 | 454 | 822 | 448 | 825 | 486 | 730 | 494 | 728 | 454 | 808 |
| 21 | 151 | 209 | B | C | c | 830 | 495 | 830 | 460 | 909 | 460 | 909 | 495 | 822 | 493 | 822 | 460 | 905 | 460 | 905 | 493 | 895 | 495 | 816 | 495 | 816 |
| 22 | 224 | 248 | B | D | c | 822 | 416 | 822 | 381 | 915 | 381 | 915 | 416 | 796 | 417 | 796 | 382 | 889 | 382 | 889 | 417 | 774 | 419 | 774 | 384 | 865 |
| 23 | 248 | 268 | B | D | c | 718 | 423 | 718 | 388 | 799 | 388 | 799 | 423 | 694 | 425 | 694 | 388 | 775 | 388 | 775 | 425 | 672 | 425 | 672 | 390 | 755 |
| 24 | 222 | 287 | B | C | b | 828 | 499 | 828 | 449 | 985 | 449 | 985 | 499 | 810 | 492 | 810 | 448 | 975 | 448 | 975 | 492 | 805 | 498 | 803 | 448 | 958 |
| 25 | 256 | 292 | B | D | c | 820 | 479 | 820 | 444 | 907 | 444 | 907 | 479 | 893 | 479 | 893 | 444 | 893 | 444 | 893 | 444 | 792 | 479 | 792 | 444 | 883 |
| 26 | 270 | 292 | B | D | c | 806 | 423 | 806 | 390 | 891 | 390 | 891 | 423 | 784 | 423 | 784 | 390 | 867 | 390 | 867 | 423 | 758 | 423 | 758 | 390 | 839 |
| 27 | 269 | 315 | B | C | c | 830 | 489 | 830 | 452 | 913 | 452 | 913 | 489 | 814 | 489 | 814 | 452 | 903 | 452 | 903 | 489 | 800 | 489 | 800 | 454 | 889 |
| 28 | 303 | 332 | A | C | m | 468 | 345 | 467 | 353 | 467 | 362 | 467 | 371 | 467 | 382 | 466 | 393 | 466 | 404 | 465 | 417 | 465 | 430 | 464 | 443 | 464 |
| 29 | 301 | 333 | A | C | m | 472 | 343 | 472 | 349 | 472 | 356 | 472 | 364 | 471 | 373 | 471 | 382 | 471 | 393 | 471 | 404 | 470 | 415 | 470 | 427 | 469 |

表 5 交岔路口轉向比統計範例表



| | | 離開路口位置 | | | | |
|--------|---|--------|-----|-----|-----|------|
| | | A | B | C | D | 小計 |
| 進入路口位置 | A | 0% | 21% | 67% | 12% | 100% |
| | B | 8% | 7% | 13% | 72% | 100% |
| | C | 49% | 25% | 0% | 26% | 100% |
| | D | 1% | 81% | 17% | 1% | 100% |

表 5 顯示該路口的車輛轉向比例的統計範例，當中的轉向比例指由一個方向進入該路口並由各方向離開路口的車流比例。例如由 A 方向進入路口的車流量，有 0% 由 A 方向離開（迴轉）、21% 由 B 方向離開（左轉）、67% 由 C 方向離開（直行）、12% 由 D 方向離開（右轉）。值得注意的是，統計顯示由 B 方向進入路口的車流當中，由 B 方向離開的車輛數佔 7%；由 D 方向進入並由 D 方向離開的車輛數佔 1%，經確認這些車輛是在路口迴轉，說明平台有能力判斷車輛在路口進行各方向的轉向及迴轉。

綜上介紹分析平台展示之功能，亦即透過無人機空拍的定點影像，本研究結合影像處理技術偵測交岔路口之交通流量、判別不同車種、車輛軌跡及車輛速度等交通資料。透過圖表方式將蒐集的交通資料系統化地呈現於分析平台中，再進一步計算出交通衝突參數與圖表展示交岔路口交通衝突熱區等相關資訊，能在肇事發生前診斷出潛在之交通衝突問題，供交通管理單位與道路設計者，作為研擬交通改善之參考。

陸、結論與建議

6.1 研究結論

1. 傳統交通改善方法往往須花費長時間及大量人力蒐集事故發生後的統計資料，且僅能就事故發生後進行交通改善，無法探討交通事故預防；相較於應用無人拍攝交岔路口車流影像，透過影像分析軟體，找出交岔路口衝突點（熱區）位置，可提供交通工程人員作為研擬事前預防交通改善之參考。
2. 鑒於無人機飛行高度、雲台選擇、攝影機拍攝角度、影像解析度及拍攝範圍等，皆對於路口影像擷取及影像分析訓練有深度關聯性。為要確保無人機飛行及攝影機穩定，在雲台選擇上至少需支援三軸穩像功能，而飛行天候影響無人機飛行穩定性，須於 9m/s 以下方可取得穩定影像，風速愈小，影像品質愈佳。影像解析度部分以目前研究結果可取得 4K/1080p 影像解析度即可進行影像訓練。拍攝範圍係以交岔路口及停止線後涵蓋兩輛車為範圍。
3. 以深度學習方法（Mask R-CNN）進行車輛偵測與分類，並透過傳統影像處理常用的特徵點偵測/追蹤技術，對偵測到的車輛區域進行追蹤、配對，取出行經路口的車輛行經區域。惟車輛分類上，由於貨車訓練樣本較為缺乏以及貨車外觀上的不一致，因此容易將貨車誤判為小客車；貨車與小客車同屬小型車輛，兩者間之分辨與車輛軌跡估算無關，故不影響本研究成果。
4. 對於機車等小型車輛（自行車、機車）及行人，由於拍攝範圍需覆蓋整個交岔路口，並包含停止線後兩輛車之距離，拍攝取得之物件面積較小無法利用深度學習方法追蹤，故直接採用特徵點偵測/追蹤技術找尋連續的獨立特徵點移動軌跡，作為軌跡資訊。實際影像處理分析過程中，對於行人、自行車及機車之軌跡追蹤，無法透過深度學習進行有效訓練，僅能針對極小面積（機車約 20x10、行人約 10x10 像素大小）之相

關物件特徵點進行追蹤，以期找出畫面中的移動點。在機車方面由於面積稍大且外觀變化較多，故在一般路面上可較成功地被追蹤出來，但遭遇路面標線、斑馬線等大量強烈特徵點時，較易造成混淆而導致追蹤失敗，而行人與自行車相較於機車之特徵點數量更為缺乏且外觀相對單一，爰此，在空拍影像中難以被連續地成功追蹤。

6.2 研究建議

1. 對於行人、自行車、機車等小型車輛，由於拍攝範圍需覆蓋整個路口，並包含停止線後兩輛車之距離，故拍攝取得之物件面積較小，可能是受限於解析度問題（例如：行人像數目前只有 10×10 pixel，基本上無法偵測，專家學者建議像素至少 20×20 pixels），以及交岔路口有標線干擾問題，不易掌握其軌跡，未來可嘗試ENAS（Efficient Neural Architecture Search）、Pixelwise Labling、運用多張畫面補足進行軌跡學習、搭配魚眼鏡頭數等方法，但仍需要長時間的反覆測試驗證，才能得知這些方法是否能解決相關問題。
2. 本研究所開發之分析平台工具，已經具備分析事故風險的基本功能，可以運用交通衝突事件發生的頻率快速地評估交通工程設計改善方案的成效，降低分析的成本。未來可以進行更大規模之驗證分析，比較多個路口的交通衝突次數以及交通事故資料，分析其相關性及影響因素。如針對不同車種之車輛軌跡產生時空圖，探討車輛變換車道及不同車種之間干擾；交岔路口之左轉車輛行為，路段上的違規停車、併排停車、公車站對周邊交通車流狀況之影響等。

參考文獻

1. M. A. Khana, W. Ectorsa, T. Bellemansa, D. Janssens and G. Wetsa, "UAV-Based Traffic Analysis: A Universal Guiding Framework Based on Literature Survey," ScienceDirect Transportation Research Procedia, vol. 22, 2017, pp. 541-550.
2. X. Wang, K. T. Ma, G. Ng, and W. E. Grimson, "Trajectory Analysis and Semantic Region Modeling Using Nonparametric Hierarchical Bayesian Models," IEEE International Conference on Computer Vision., 2008.
3. Xu, Y. G. and Wang, Y. (Aug. 2017), "Car Detection from Low-Altitude UAV Imagery with the Faster R-CNN," Journal of Advanced Transportation, pp.40-49.
4. Tang, T., Zhou, S., and Deng, Z. (July 2017), "Fast multidirectional vehicle detection on aerial images using region based convolutional neural networks," IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).

5. Sommer, L., Nie, K., and Schumann, A. (Aug. 2017) , “Semantic labeling for improved vehicle detection in aerial imagery,” IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS) , pp. 1-6.
6. Thompson, Mary, Kwon, Oh, and Ju Park, Min, “The Application of Axiomatic Design Theory and Conflict Techniques for the Design of Intersections: Part 1”, The Fifth Internal conference on Axiomatic Design., 2009.
7. Video Analytics Towards Vision Zero (2017) . Retrieved from: <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/video-analytics-towards-vision-zero/>
8. Peleg, M, Stoch, L, & Etrog, U. Urban traffic studies from aerial photographs. Transportation, 1973;2 (4) :373-389.
9. Makigami, Y, Sakamoto, H, & Hayashi, M. An analytical method of traffic flow using aerial photographs. Journal of Transportation Engineering, 1985;111 (4) :377-394.
10. Ardekani, S, & Herman, R. Urban network-wide traffic variables and their relations. Transportation Science, 1987; 21 (1) :1-16.
11. G. D. Evangelidis, E. Z. Psarakis, “Parametric Image Alignment using Enhanced Correlation Coefficient Maximization,” IEEE Transaction on Pattern Analysis & Machine Intelligence, Vol. 30, No. 10, 2008, pp. 1858-1865.
12. G. D. Evangelidis E. Z. Psarakis, “Projective Image Alignment by using ECC Maximization,” in Proc. Int. Conf. on Computer Vision Theory and Applications (VISSAP) , 2008.
13. K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, R. Girshick. Mask R-CNN. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2017.
14. Gunnar Farneback. Two-frame motion estimation based on polynomial expansion. Lecture Notes in Computer Science, 2003; 2749:363-370.
15. 台大嚴慶齡工業研究中心, “混合車流交岔路口道路與交通工程設計範例 (1/4) ”, 交通部運輸工程研究所, 2017。
16. Hayward, J. Ch. “Near miss determination through use of a scale of danger”. Report no. TTSC 7115, The Pennsylvania State University, Pennsylvania., 1972.
17. Laureshyn, A., Svensson, Å. and Hydén C. “Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: Theoretical framework and first implementation”. Accident Analysis & Prevention, Vol. 42, Issue 6,2010, pp.1637-1646.

RAP 利用於瀝青鋪面磚之研究

洪明澤^{*}、陳仙州^{**}、朱建東^{***}、何鴻文^{****}

摘要

由交通部公路總局 103 年度「瀝青鋪面磚之研究」研究結果[1]顯示，以瀝青磚取代傳統冷料修補路面坑洞作法為可行方案。為了加速驗證瀝青鋪面磚之耐久性，本研究參考美國超級鋪面（Superpave）設計法，使用超級鋪面扭剪壓實機（SGC），以扭轉剪力法壓製試體與抗壓試驗機壓製試體 2 種設備製作瀝青鋪面磚，進行製作成本、時效性、力學成特性及噪音比較，比較結果在製作成本、時間及噪音，為 2 者設備壓製方式表現相當；力學成效性則在穩定值、流度值及漢堡車轍試驗結果 2 者設備壓製試體表現相當，滯留強度則以抗壓機壓製試體表現優於 SGC 壓製試體，惟都高於規範值 75%。確立以抗壓試驗機壓製瀝青磚方式為最佳方式後，再研究 RAP 利用於瀝青鋪面磚之最適摻配比例，並選擇南北共計 4 處省道路面工程現地試鋪。

本研究以 0%、20%、40% 及 60% 之 RAP 摻配比例進行測試，並製作瀝青磚試體，透過馬歇爾穩定值及流度值試驗、滯留強度試驗及漢堡車轍輪跡等試驗，以力學特性評估 RAP 料之最佳摻配比例。由結果得知，當 RAP 料摻配比例為 60% 時，工作拌合公式超出規範帶，且力學特性不及 RAP 料摻配比例為 40% 之瀝青磚試體。因此本研究建議 RAP 料利用於瀝青鋪面磚之摻配比例不宜超過 40%，方能有較佳的力學特性，及達到消耗 RAP 料之目的。

關於 RAP 瀝青磚現地試鋪部分，本研究選定 4 處省道路面工程，總計 40 點觀測點，由最後 1 次觀測結果顯示(鋪設後 242~329 日)，沉陷量低於 8mm 者，佔總比例之 97.5%，表示瀝青磚之適用性及成效佳，故以瀝青磚用於裂縫或坑洞修補係為可行方案。

關鍵詞：瀝青磚、再生瀝青混凝土、漢堡車轍輪跡試驗、現地試鋪

* 交通部公路總局材料試驗所路面科科長

** 交通部公路總局第三區養護工程處正工程司

*** 交通部公路總局材料試驗所副所長

**** 交通部公路總局工務組組長

壹、前言

1.1 研究動機與目的

國內目前雖有將 RAP 料運用在再生瀝青混凝土鋪面，但由於供大於求的緣故，依然有過多的 RAP 料堆置於瀝青廠，甚有多年後仍未使用，導致 RAP 瀝青與粒料性質已過度老化，依照現行規範規定，無法將其使用在再生瀝青混凝土鋪面。因此將 RAP 料應用於更多面向，藉以達到去化過多 RAP 料，為本研究案之主要動機。

由本所 103 年度研究案「瀝青鋪面磚之研究」之研究結果顯示，以瀝青磚取代傳統冷拌瀝青混凝土（冷料）修補路面坑洞之做法係為可行方案，並討論瀝青鋪面磚的壓製方式，確認瀝青磚以「抗壓試驗機壓製」之方式優於「馬歇爾夯打」之方式。本研究將以前述研究結果作為基礎，再比較較為新式之壓製方式。

參考美國超級鋪面（Superpave）設計中，扭剪壓實機（Superpave gyratory compactor, SGC）以旋轉剪力之方式壓制瀝青試體，並與抗壓試驗機壓製方式來進行優缺點的比較，以確認最佳的瀝青鋪面磚壓製方式。接著再使用過度老化的 RAP 料（針入度 15 以下）作為瀝青鋪面磚的部分材料，就瀝青鋪面磚相關特性作相對比較，綜上所述，可歸納本研究之主要目的如下：

1. 比較以扭剪壓實機（SGC）及抗壓試驗機夯製瀝青鋪面磚試體之相關試驗特性及優缺點，以決定之後瀝青鋪面磚製程的方式。
2. 建立過度老化的RAP料摻配比例與相關成效試驗的關係，並決定最適切的RAP料的摻配比例，以達消耗RAP料之目的。

1.2 研究範圍

本研究先依公路總局施工說明書[2]的相關規定，進行密級配瀝青混凝土配合設計，再以配合設計結果夯製瀝青鋪面磚，分別使用扭剪壓實機（SGC）及抗壓試驗機夯製瀝青鋪面磚試體，綜合比較不同夯製方式的優缺點，以決定瀝青鋪面磚壓製方式。

以過度老化的 RAP 料取代瀝青鋪面磚新料，比例分別為 20%、40%及 60%，再行比較相關試驗結果與特性，用以決定最適合的 RAP 料摻配比例，再依此摻配比例夯製瀝青鋪面磚，進行現地試鋪評估。

貳、文獻回顧

2.1 再生瀝青混凝土

瀝青混凝土刨除料 (Reclaimed Asphalt Pavement, 以下簡稱 RAP) 使用於瀝青混凝土混合料中已行之有年, 大部分再生瀝青混凝土都從既存瀝青混凝土鋪面刨除, 再將粒料尺寸處理成適用於瀝青混凝土混合料之大小[3]。RAP 料不同於原始粒料, 部分特點須加以考量, 分述如下:

1. 基本性質

依據公路總局施工說明書第 02966 章[2], 規定運回拌和廠作為再生瀝青混凝土之既有瀝青混凝土挖(刨)除料, 應符合下列條件:

- (1) 瀝青含量 (%): 3.0 以上 (對刨除混合料重量比)。
- (2) 針入度 (25°C、5 sec、100g): 15 以上。
- (3) 再生瀝青粒料不得含達有害量之木屑、金屬、有機物、土壤、及其他有害物。

2. 瀝青混合料再生機理分析[4]

瀝青路面的老化主要指瀝青混合料中瀝青結合料的老化與粒料的細化。舊瀝青混合料再生實質上為瀝青混合料中瀝青的再生與粒料的再利用。粒料的細化除由路面損壞所引起外, 回收舊路面材料是導致粒料偏細化的主要原因。粒料細化後, 舊瀝青混合料的級配會達到一般級配上限, 不能再滿足規範要求, 因此在再生舊瀝青混合料時, 需要添加一些不同規格的新料進行調配, 使調配後再生瀝青混合料的級配能滿足規範要求, 且具有所需的路用性能, 再生瀝青混合料可通過添加再生劑使老化瀝青性能得到改善, 同時通過添加新料使舊瀝青混合料的級配得到改善。對於再生瀝青混合料可進行馬歇爾試驗、車轍試驗等, 以測定混合料的穩定值、流度、瀝青體積百分率、飽和度與空隙率等性質以確定其實用性。

3. 瀝青膠泥選擇

美國採用 Superpave 級配設計規範後, 研究顯示一般添加 RAP 料的摻配比例對於 Performance Grade (PG) 瀝青膠泥選擇之影響, 研究結果如下[5]:

- (1) 低含量 (15%以下): 用同一等級 PG 瀝青膠泥。
- (2) 中含量 (15~25%以下): 可以使用次一等級 PG 瀝青膠泥做軟化劑。
- (3) 高含量 (25%以上): 使用拌合圖表決定適當的新黏結料等級。

4. 再生瀝青混凝土添加比例[6]

RAP 添加比例的多寡對回收瀝青混凝土的工程性質影響很大，特別在 RAP 添加量在 0~30% 之間變化最大。然而在間接張力強度方面，RAP 添加量在 30~50% 之間近似於傳統瀝青混凝土，但 RAP 添加量在超過 70% 便會有下降的趨勢。一般而言，回收瀝青混凝土有較高的張力強度、較低的張力應變及較高的勁度模數，而低溫裂縫則受到回收料比例多寡而影響。考慮到整體效益，建議 RAP 添加比例不超過 50% [7]。

Sondag et al. (2002) [8] 研究兩種新鮮瀝青與不同 RAP 添加量 (0, 10, 20, 40%) 下對混合物的影響。試驗結果顯示 RAP 含量高時對混合物的勁度有影響，RAP 含量低時則無明顯影響，而剪力試驗指出隨著 RAP 含量的增加使混合物勁度增加以及剪應變減少。該研究亦指出 RAP 含量較高的混合物，在粘結料等級不改變的情況下，抗車轍的能力較高。間接抗拉試驗則顯示高 RAP 含量的混合物勁度增加，提高了低溫裂縫發生的機率。疲勞試驗 (NCHRP, 2001) 也顯示較高含量的 RAP 會使勁度增加，減少疲勞壽命。

2.2 新料瀝青混凝土配合設計

本研究進行之初，至瀝青廠取粗粒料、細粒料、填縫料及瀝青膠泥等樣品，進行篩分析、比重等物性試驗後，再依照交通部公路總局施工說明書第 02741 章[2]，並參照 AI MS-2[美國瀝青學會出版手冊系列編號 MS-2][3]中之馬歇爾法，辦理瀝青混凝土配合設計。其執行流程如圖 1。

1. 決定拌和及夯壓溫度

以 CNS 14186[無填充料瀝青黏度測定法 (布魯克熱力黏度計法)] 試驗方法，測定瀝青 60°C 及 135°C 時之絕對黏度，再試驗瀝青膠泥比重後，依照 FHWA[美國聯邦公路總署]出版「SUPERPAVE Asphalt Mixture Design」[4]，換算成動黏度，參照 AI MS-2[3] 估算產生 170±20cSt 動黏度為拌和溫度，以及產生 280±30cSt 動黏度為夯壓溫度。

2. 符合過篩百分率曲線

依粗粒料、細粒料、填縫料的篩分析結果，調整三種粒料添加比例，以取得符合過篩百分率上下限之曲線，稱之為工作拌和公式 (Job Mix Formula, 簡稱 JMF)；其中過篩百分率上下限乃依據 ASTM D3515 之規定，並繪製試驗篩尺寸 0.45 次方 (x 軸) 與過篩百分率 (y 軸) 關係圖。

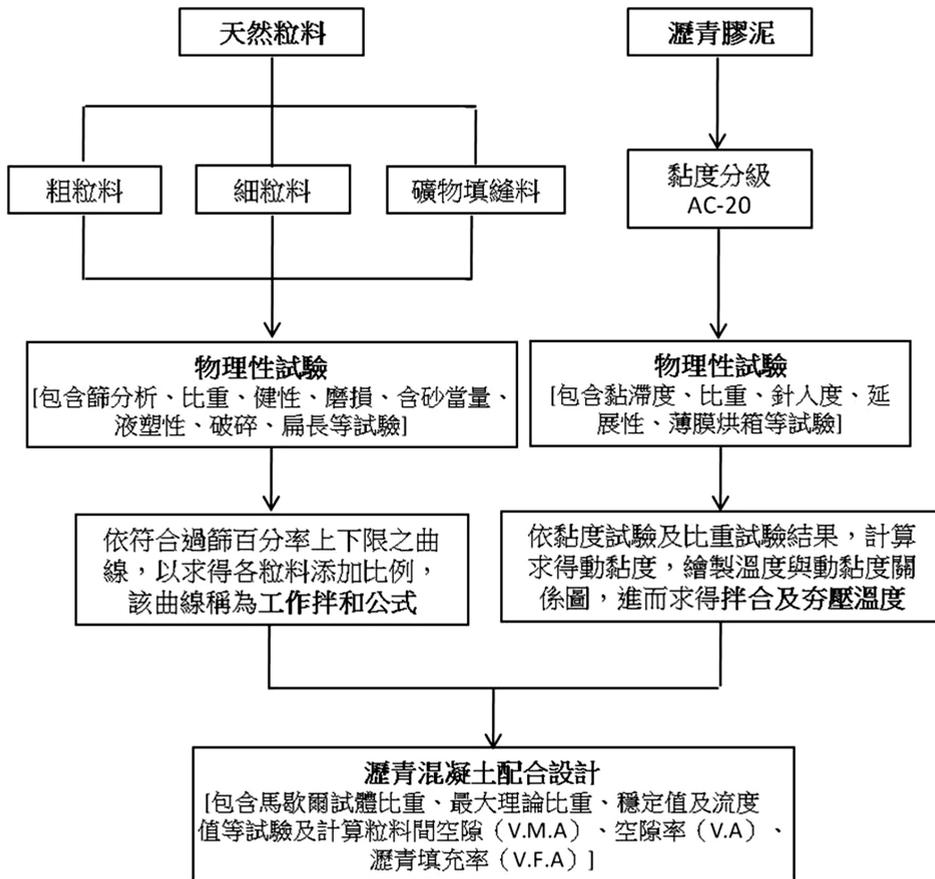


圖 1 瀝青混凝土配合設計流程

3.馬歇爾試驗

將添加比例的粒料，在拌和溫度中與瀝青拌和，形成瀝青混凝土拌和料，再依 CNS 12395[以馬歇爾儀試驗瀝青混合料塑性流動阻力試驗法]在夯壓溫度中，夯打 $\phi 100\text{mm}$ 瀝青混凝土試體；試體冷卻後，進行包括壓實試體密度、理論最大密度、穩定值、流度值、空隙率 (V.A)、粒料間空隙率 (V.M.A)、瀝青填充空隙率 (V.F.A) 及滯留強度指數等相關性質試驗。建立所有性質的上下限與瀝青含量的關係，據以求出最佳瀝青含量。

2.3 再生瀝青混凝土配合設計

再生瀝青混凝土配合設計與新料瀝青混凝土配合設計原理相同，再生瀝青混凝土在材料方面，增加了 RAP 料、軟化劑或再生劑（視實際需求）；再生瀝青混凝土配合設計流程如圖 2 所示：

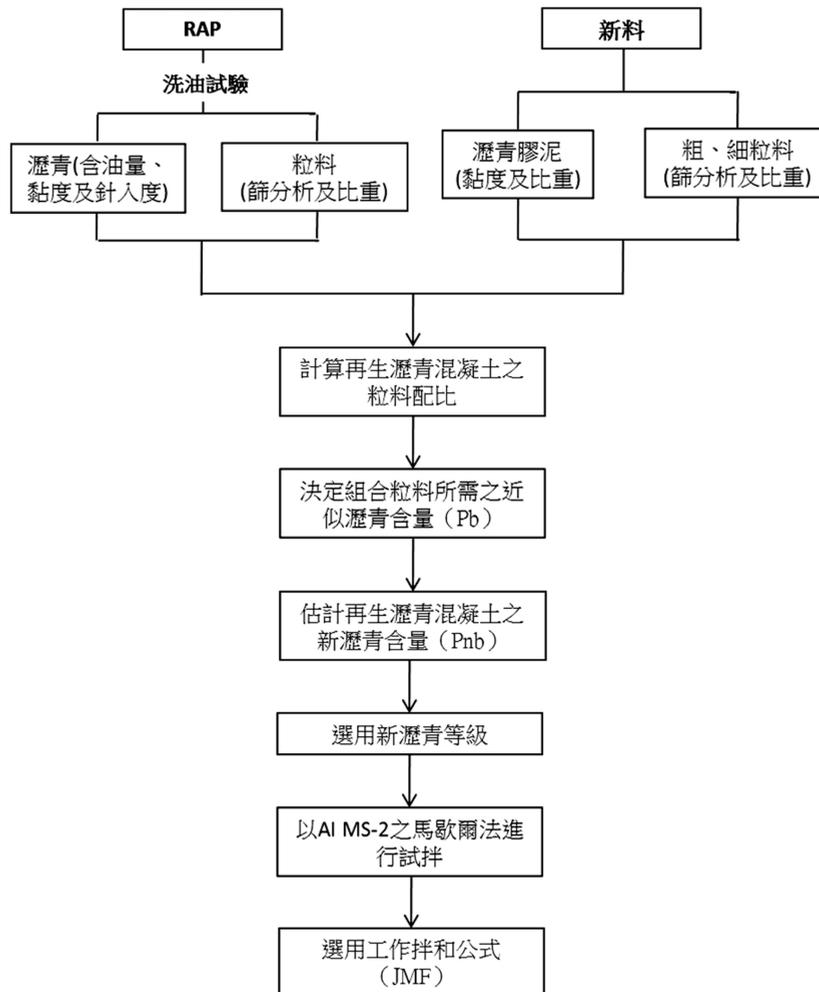


圖 2.再生瀝青混凝土配合設計流程

1. RAP料試驗

試驗 RAP 料之瀝青含油量、回收瀝青黏滯度及針入度、洗油後粒料篩分析及比重。

2. 新料物理性試驗

試驗新料(粗粒料、細粒料及填縫料)之物理性試驗，包含篩分析、比重、健性、磨損、含砂當量、液塑性、破碎及扁長等試驗。

3. 再生瀝青混凝土粒料配比

依新料(粗粒料、細粒料及填縫料)及 RAP 料篩分析結果，調整新粒及 RAP 料添加比例，以取得符合過篩百分率上下限之曲線，稱之為工作拌和公式 (Job Mix Formula，簡稱 JMF)；其中過篩百分率上下限乃依據 ASTM D3515 之規定，並繪製試驗篩尺寸 0.45 次方 (x 軸) 與過篩百分率 (y 軸) 關係圖。

4. 決定組合粒料所需之近似瀝青含量 (P_b)

公式為 $P_b = 0.035a + 0.045b + Kc + F$ ，其中

P_b = 近似瀝青含量，%

a = No.8 篩之留篩百分比 (取整數)

b = No.8 ~ No.200 篩之粒料重量百分比 (取整數)

c = 通過 No.200 篩之百分比

$K = 0.15$ ， c 值為 11 ~ 15%

$= 0.18$ ， c 值為 6 ~ 10%

$= 0.20$ ， c 值 < 5%

$F = 0 \sim 2$ ，依粒料的吸油率而定，無資料時，一般採 0.7

5. 估計再生瀝青混凝土之新瀝青含量 (P_{nb})

公式為 $P_{nb} = \frac{(100^2 - rP_{sb}) P_b}{100(100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r) P_{sb}}{100 - P_{sb}}$ ，其中

r = 新粒料佔比例 (依重量計算) (%)

P_{nb} = 新瀝青之重量百分比 (%)

P_{sb} = RAP 料之瀝青含量 (%)

P_b = 估計近似總瀝青含量 (%)

6. 選用新瀝青等級

可採用以下兩種方式決定新瀝青膠泥等級

(1) 公式法：

公式為 $\log(\log \eta_{Tar}) = a[\log(\log \eta_{RAP})] + b[\log(\log \eta_{New})]$ ，其中

η_{Tar} ：目標黏度 (poises)

η_{RAP} ：RAP 料回收瀝青黏度 (poises)

η_{New} ：新瀝青黏度 (poises)

$a + b = 1$

a ：RAP 之瀝青含量佔總瀝青量之比 (以小數表示)

b ：新瀝青佔總瀝青量之比 (以小數表示)

(2) 圖解法：

以 AI MS-2 (6 版) [3] 之圖解法為例，圖形如圖 3，橫軸為新瀝青膠泥添加比例，縱軸為 $\log(\log \text{黏度值})$ 。

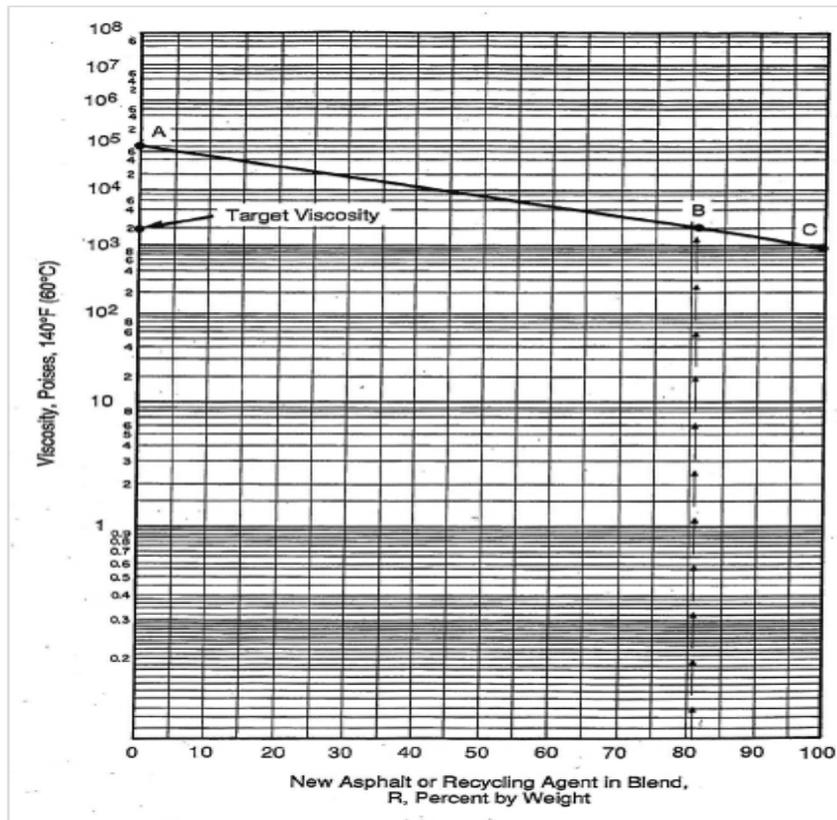


圖 3 AI MS-2 圖解法圖形[3]

首先標繪出 A 及 C 之 2 點位，A 點為 RAP 料黏度點位，其橫軸為新瀝青膠泥添加比例 0，縱軸為 RAP 料瀝青黏度 (poises)；C 點為新瀝青膠泥 (軟化劑或再生劑) 黏度點位，其橫軸為新瀝青膠泥添加比例 100，縱軸為瀝青膠泥黏度 (poises)。

最後繪出 B 點位：先於縱軸，找出目標黏度 (Target Viscosity) 值，再與 AC 連線得一交點，即 B 點位，再垂直對出 B 點位橫軸，就可得到在該目標黏度下新瀝青膠泥添加比例，亦可取得 RAP 之瀝青含量佔總瀝青量之比例 (100%-新瀝青膠泥添加比例)。

7. 以 AI MS-2[3] 之馬歇爾法進行試拌

一般以近似總含油量 (Pb) 之上下各選 2 組含油量 (共 5 組) 為試拌試體。依據 CNS 12395[以馬歇爾儀試驗瀝青混合料塑性流動阻力試驗法] 在夯壓溫度中，夯打 $\phi 100\text{mm}$ 瀝青混凝土試體；試體冷卻後，進行包括壓實試體密度、理論最大密度、穩定值、流度值、空隙率 (V.A)、粒料間空隙率 (V.M.A)、瀝青填充空隙率 (V.F.A) 及滯留強度指數等相關性質試驗。建立所有性質的上下限與瀝青含量的關係，據以求出最佳瀝青含量

8. 選用工作拌和公式 (JMF)

求出最佳瀝青含量後，亦可決定各種粒料 (RAP 料及新料) 過篩百分率，即工作拌和公式 (JMF)。

參、研究方法及材料

3.1 研究方法

研究首先進行一組新料瀝青混凝土配合設計試驗，再以試驗結果為基礎，決定最佳夯製瀝青磚方式、再生瀝青混凝土配合設計（過度老化 RAP 料）、回收瀝青性質試驗及瀝青混凝土成效試驗。研究規劃流程如圖 4：

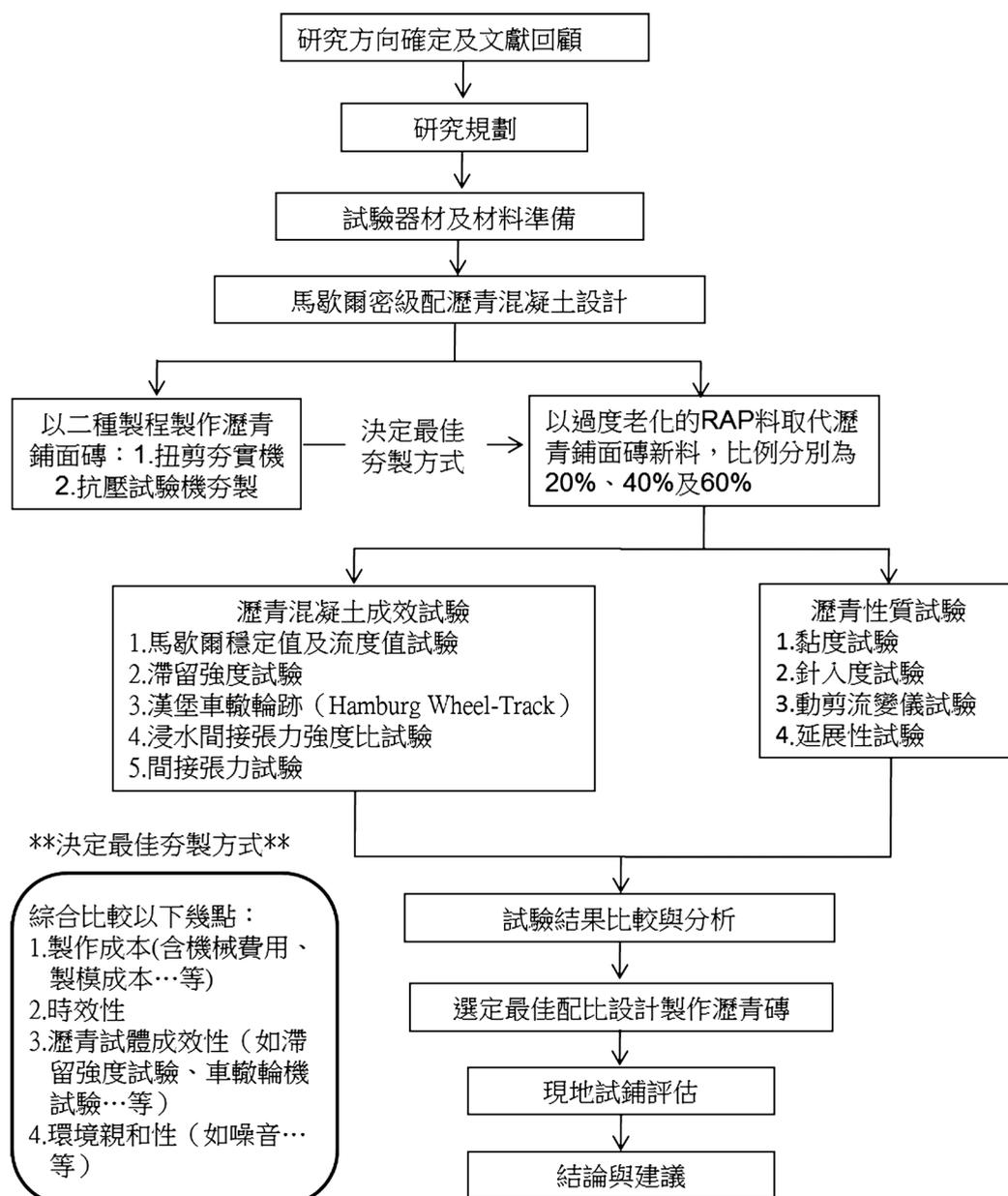


圖 4 研究規劃流程

1. 決定瀝青鋪面磚最佳夯製方式

本研究使用之瀝青鋪面磚夯製儀器為抗壓試驗機，夯製過程是以正反 2 面直接加壓方式擠壓瀝青混凝土混合料直至成型。在交通部公路總局材料試驗所 103 年瀝青鋪面磚應用於道路之研究[1]已探討過以馬歇爾夯打機與抗壓試驗機製磚過程之優缺點比較，比較結果以抗壓試驗機較佳；本研究再以扭剪壓實機（Superpave Gyrotory Compactor，簡稱 SGC）與抗壓試驗機進行製磚過程之優缺點比較，比較過程是先以新拌瀝青混凝土配合設計試驗結果，備製 5 顆試驗樣品，做瀝青混合料拌合，再製成瀝青鋪面磚；製磚過程中比較以下幾點：

- (1) 製作成本：主要考量包含機械費用、模具費用、電費及試驗人力費用。
- (2) 時效性：瀝青鋪面磚製作方式力求快速及大量製作，每顆製程時間為選用夯製方式重要考量。
- (3) 瀝青試體成效性：瀝青鋪面磚因使用於鋪面坑洞修補，需具有一定成效，故將進行滯留強度試驗、浸水間接張力強度比試驗及漢堡車轍輪跡（Hamburg Wheel-Track）試驗結果比較。
- (4) 環境親和性：主要考量包含製程噪音及製程空氣品質。

2. 瀝青混凝土成效試驗

瀝青混凝土的成效試驗(Performance Test)是指瀝青混凝土的相關力學性質試驗，對於瀝青混凝土混合料之承載力、抗水侵害...等性能進行比較。本研究之瀝青混凝土成效試驗包含馬歇爾穩定值試驗、流度值試驗、滯留強度試驗及漢堡車轍輪跡試驗（Hamburg Wheel-Track Testing）。以下分述之：

(1) 馬歇爾穩定值試驗

依據 AI-MS2 進行相關試驗，先以夯壓溫度夯打馬歇爾試體，待冷卻後，量測高度；開啟恆溫水槽使溫度達 $60.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 後，將試體放置恆溫水槽 30 分鐘，再放置馬歇爾穩定值試驗模具內，以速率 50.8mm/min 上升直至試體損壞，試驗所得力量，即為穩定值。

(2) 滯留強度試驗

參閱交通部公路總局施工說明書規定，夯打 2 組（2 顆/組以上）瀝青含量相同之馬歇爾試體，一組用馬歇爾穩定值試驗方式，所得穩定值為 P (30min)；另一組則將馬歇爾試體放置水槽時間更改成 24 小時，其餘試驗方式與馬歇爾穩定值試驗相同，試驗所得穩定值為 P (24Hr)。滯留強度指數計算方式如下：

$$\text{滯留強度指數(\%)} = \frac{P(24\text{Hr})}{P(30\text{min})} \times 100\%$$

(3) 漢堡車轍輪跡試驗

依據 AASHTO T324 規範進行相關試驗，主要內容如下：

- A. 適用試體為實驗室製作試體及現地取樣試體。
- B. 水溫：將試樣浸入溫度控制在 $40\sim 50^{\circ}\text{C}$ (104 至 122°F) 的水浴或瀝青膠泥的指定溫度。
- C. 鋼輪規定：直徑 203.2mm (8in.)， 47mm (1.85in.) 寬，載重是 $705\pm 4.5\text{N}$ ，每分鐘 52 ± 2 次在試樣往返。
- D. 試體規定：直徑 15 公分 (6in.) 試體組合成 8 字模，高度在 $40\pm 1\text{mm}$ 或 $60\pm 1\text{mm}$ ，將試驗樣品之空隙率控制在 $7\pm 1\%$ 。
- E. 試驗儀器如圖 5。



圖 5 儀器整體及試體放置照片

3. 瀝青性質試驗

瀝青性質試驗是指洗油回收後瀝青膠泥之相關性質試驗，用以比較設定不同目標黏度對瀝青膠泥之影響，是否會導致瀝青混凝土混合料過度老化而易脆之情形，使用於鋪面易產生疲勞裂縫之現象。本研究之瀝青膠泥性質試驗包含黏度試驗、針入度試驗、動態剪切流變試驗及延展性試驗。相關試驗內容如下：

(1) 黏度試驗

黏度試驗所使用的儀器為 Brookfield 黏度儀，依據 CNS 14186[無填充料瀝青黏度測定法（布魯克熱力黏度計法)]進行試驗，儀器設備如圖 6。

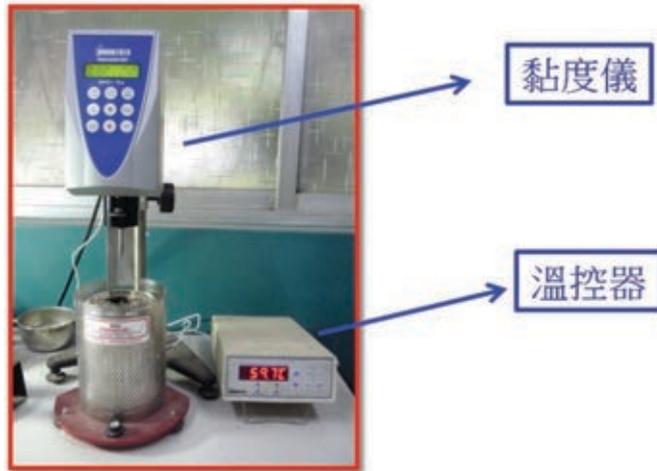


圖 6 黏度儀

(2) 針入度試驗

本試驗係依據 CNS 10090[瀝青物針入度試驗法]，控制瀝青膠泥在 25.0 ± 0.1 °C 溫度下，以總重計 100 ± 0.1 g 之貫入針，靜止釋放 5 秒之貫入總深度，單位以 0.1mm 計；儀器設備如圖 7。



圖 7 針入度儀

(3) 動態剪切流變試驗

動態剪切流變試驗之目的在試驗瀝青膠泥之 G^* (剪切模數) 跟 δ (相位角)，經由動態剪切流變儀可得到 $G^* \sin \delta \geq 1.0 \text{ kPa}$ 之對應溫度等級，據以比較不同目標黏度再生瀝青混凝土之瀝青膠泥等級，及可承受之鋪面最高溫，原理如圖 8。

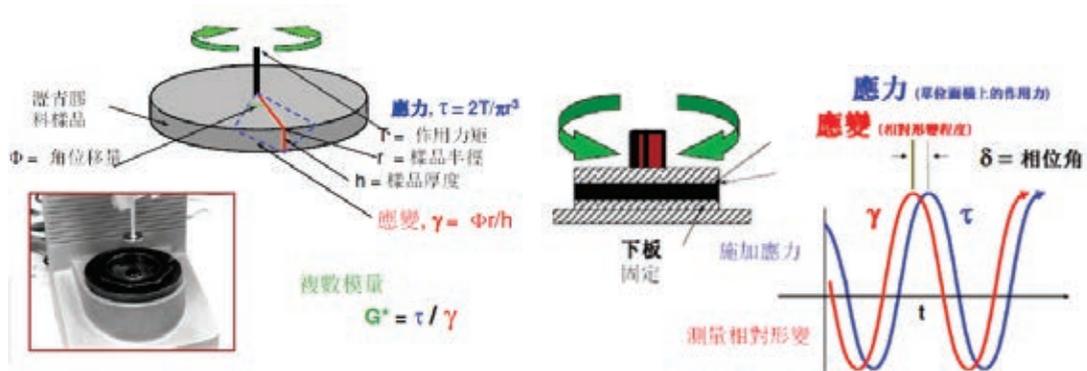


圖 8 動態剪切流變原理圖

4. 現地試鋪評估

因瀝青鋪面磚是使用於鋪面裂縫或坑洞修補及鑽心取樣後填補，因此現地試鋪評估為本研究之重點，藉觀察瀝青鋪面磚於現地試鋪後，是否能承受現地交通量、氣候...等因素影響，致磚體沉陷量較一般冷拌瀝青混凝土為小，並較能與鋪面成為一體。

現地鋪設考量臺灣南北氣候差異，選擇北部 3 處及南部 1 處工程，於鋪面鋪設完成，進行厚度及壓實度試驗之鑽心取樣後坑洞，以瀝青磚填補，並定期追蹤相對於鋪面水平面之沉陷程度，供後續進行相關研究之參考。選擇工程名稱及埋設瀝青磚 RAP 摻配比例列表如表 1。

表 1 新料瀝青混凝土配合設計粒徑摻配比例

| 工程編號 | 工程名稱 | 瀝青磚 RAP 摻配比例 | 埋設日期 |
|------|---------------------------------------|--------------|-----------------|
| 1 | 台 68 線 5k+000~15k+000 東向路基路面改善工程 | 20% | 104 年 12 月 18 日 |
| 2 | 台 31 線 6k+000~9k+000 段排水及路基路面改善工程 | 20% | 104 年 12 月 23 日 |
| 3 | 台 61 線 76k+000~85k+829 段兩側慢車道擇要路面整修工程 | 40% | 105 年 1 月 28 日 |
| 4 | 台 27 線 25k+532~37k+500 路面修復工程 | 40% | 105 年 1 月 11 日 |

3.2 研究材料

本研究之材料主要為過度老化 RAP 料、軟化劑及瀝青混凝土配合設計新料粒料，其中瀝青混凝土配合設計新料粒料包含粗粒料、細粒料及礦物填縫料，以下分述之：

1. 過度老化 RAP 料

本研究之 RAP 料包含粗 RAP 料及細 RAP 料 2 種，為同一剷除路段剷除料，經過瀝青廠進行清除雜物及破碎處理，分成粗 RAP 料及細 RAP 料。

為消耗過多 RAP 料，選用過度老化 RAP 料（針入度小於 15），進行再生瀝青混凝土配比試驗；該 RAP 料除針入度不符本局施工說明書【2】規定外，其餘項目（瀝青含量及有害物規定）仍須符合本局施工說明書【2】規定。

2. 軟化劑

為管控研究過程之變因及排除再生劑對再生瀝青混凝土之影響，本研究排除使用再生劑，僅以 AC-10 作為軟化劑。

因控制軟化劑種類，使 RAP 料摻配比例與目標黏度兩者關係，呈現正相關，故為增加 RAP 料摻配比例，研究過程中將目標黏度分別設定為 2000、3000 及 4000 poises，再計算不同目標黏度下，RAP 料最大摻配比例。

3. 粗、細粒料及礦物填縫料

本研究不論再生或新料瀝青混凝土配合設計，規格皆為標稱最大粒徑 19mm 密級配，其中新料粗粒料選用六分石、三分石及兩分石（業界慣稱）三種，以目視判斷為質地堅韌、潔淨、耐磨之碎石；新料細粒料則為天然砂及機製砂之混合物，目視判斷應須質地堅硬、表面粗糙且顆粒富有稜角；新料礦物填縫料為石粉，且不含有水分、土塊、黏土顆粒或其他有害物質；三種粒料皆由同一料源廠所提供。

肆、研究結果分析

4.1 新料瀝青混凝土配合設計試驗結果

新料瀝青混凝土配合設計粒徑摻配比例如表 2，配合設計粒徑曲線如圖 9，試驗結果如表 3，將此試驗結果做為基礎，進行後續試驗。

表 2 新料瀝青混凝土配合設計粒徑摻配比例

| 粒料 試驗 篩號 | 配合比例 | | | | | JMF (%) | 規範帶 (%) |
|----------------|------|------|------|------|-----|------------|------------|
| | 6分石 | 3分石 | 2分石 | 砂 | 填縫料 | | |
| | 14% | 25% | 30% | 30% | 1% | | |
| 過篩百分率 (%) | | | | | | | |
| 25mm | 14.0 | 25.0 | 30.0 | 30.0 | 1.0 | 100.0 | 100 |
| 19mm | 9.9 | 25.0 | 30.0 | 30.0 | 1.0 | 95.9 | 90~100 |
| 12.5mm | 0.8 | 20.7 | 29.9 | 30.0 | 1.0 | 82.4 | — |
| 9.5mm | 0.2 | 13.4 | 29.6 | 30.0 | 1.0 | 74.2 | 56~80 |
| 4.75mm | 0.1 | 2.6 | 7.9 | 27.5 | 1.0 | 39.1 | 35~65 |
| 2.36mm | 0.1 | 1.1 | 3.3 | 21.9 | 1.0 | 27.4 | 23~49 |
| 1.18mm | 0.1 | 0.8 | 2.4 | 17.7 | 1.0 | 22.0 | — |
| 600μm | 0.1 | 0.7 | 2.1 | 13.8 | 1.0 | 17.7 | — |
| 300μm | 0.1 | 0.6 | 1.8 | 8.8 | 1.0 | 12.3 | 5~19 |
| 150μm | 0.1 | 0.4 | 1.3 | 4.2 | 1.0 | 7.0 | — |
| 75μm | 0.1 | 0.3 | 0.6 | 1.7 | 0.9 | 3.6 | 2~8 |

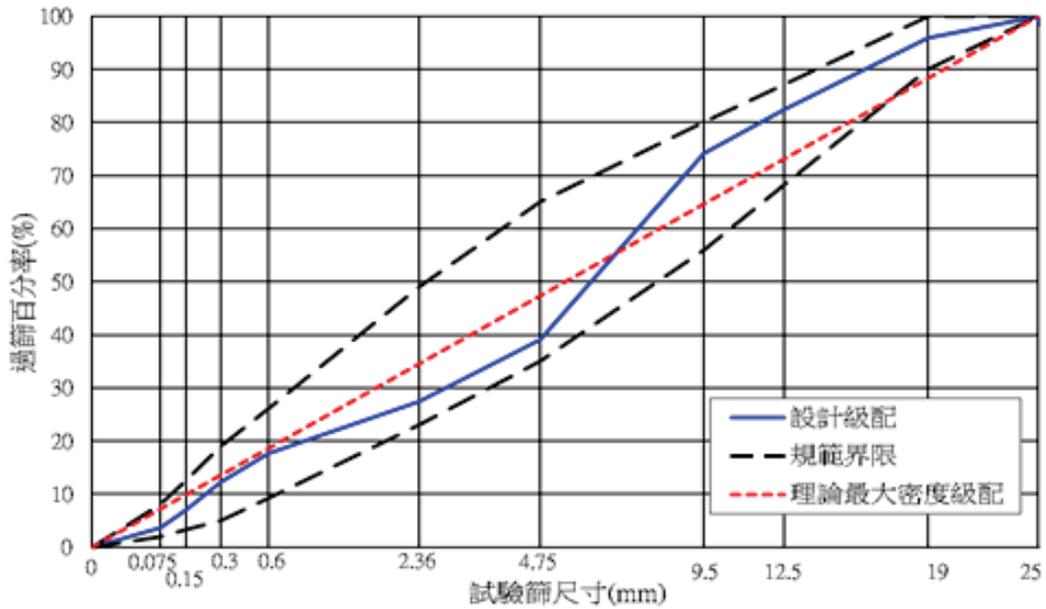


圖 9 新料瀝青混凝土配比設計粒徑曲線圖

表 3 新料瀝青混凝土配合設計試驗結果

| 項 目 | 建議配比及相應各值 | 規範值* |
|------------------------------------|-----------|--------------|
| 1. 粒料配合比 | 「粒料配比計算表」 | 「粒料配比計算表」之規範 |
| 2. 瀝青含量 | | |
| a. 瀝青種類 | AC-20 | AC-20 |
| b. 對乾粒料 (%) | 5.3 | — |
| c. 對混合料 (%) | 5.0 | 4~10 |
| 3. 試體密度 (kg/m ³) | 2311 | — |
| 4. 穩定值 (kgf) | 1230 | ≥817 |
| 5. 流度值 (0.25mm) | 11.7 | 8~14 |
| 6. 粒料間空隙率 (V.M.A., %) | 13.1 | ≥13 |
| 7. 瀝青填充率 (V.F.A., %) | 70 | 65~75 |
| 8. 空隙率 (V _a , %) | 4.0 | 3~5 |
| 9. 粒料平均比重 | 2.533 | — |
| 10. 瀝青比重 | 1.037 | — |
| 11. 混合料最大理論密度 (kg/m ³) | 2408 | — |
| 12. 滯留強度指數 (%) | 89 | ≥75 |

註：*表列規範值係摘自公路總局 101 年版施工說明書[2]規定。

4.2 瀝青磚最佳夯製方式試驗結果

本研究使用之瀝青鋪面磚夯製儀器為抗壓試驗機，夯製過程是以正反 2 面直接加壓方式擠壓瀝青混凝土混合料直至成型。本所先前研究已探討過以馬歇爾夯打機與抗壓試驗機製磚過程之優缺點比較，比較結果以抗壓試驗機較佳。

本研究再比對以超級鋪面扭剪壓實機（SGC）與抗壓試驗機進行製磚優缺點比較，比較項目如下表 4：

表 4 製磚方式優缺點比較

| 製磚方式 比較項目 | 抗壓試驗機 | SGC |
|---------------|-----------|------------|
| 儀器費用 | 價格較低且普遍性高 | 價格昂貴且普遍性不高 |
| 模具費用 | 圓筒型鋼模-價格低 | 特製規格鋼模-價格高 |
| 電費 | 兩者相當 | |
| 人力費 | 工序較繁複 | 工序簡單 |
| 製作試體時間 | 5 分 5 秒 | 4 分 47 秒 |
| 瀝青試體成效性 | 兩者相當 | |
| 平均最大噪音 (dB) * | 90.15dB | 87.75dB |

評估瀝青磚之最佳夯製方式，試驗結果及分析：

1. 抗壓試驗機與SGC進行製程上之比較，以儀器費用、模具費用及製作人力費3個部分有較大之差異，其餘各項則為相當。惟抗壓試驗機比SGC價格低廉且普遍性較高，抗壓試驗機則在製作瀝青磚試體時間稍較使用SGC久，整個製程約略控制在5分鐘上下。
2. 瀝青試體成效性：以抗壓試驗機與SGC製作試體，進行穩定值及流度值、滯留強度值及漢堡車轍試驗，試驗結果整理如表5，穩定值、流度值及漢堡車轍試驗結果表現相當，在滯留強度試驗結果則以抗壓試驗機製作試體表現比SGC製作試體好，惟都高於規範要求75%。

表 5 抗壓試驗機與 SGC 製作瀝青磚試體成效比較

| 項目 | 抗壓試驗機製作試體 | SGC 製作試體 |
|---------------|-----------|----------|
| 穩定值 (kgf) | 787 | 767 |
| 流度值 (0.25mm) | 8.9 | 9.4 |
| 滯留強度 (%) | 94 | 87 |
| 深度 12.5mm 輪次值 | 9,599 | 7,653 |

3. 抗壓試驗機及SGC噪音相當接近，因此對於環境親和性為一致良好。

4.3再生瀝青混凝土試驗結果

1 RAP料性質試驗結果

RAP料取自南部某瀝青廠之路面刨除料，經過破碎後，區分為粗RAP料及細RAP料兩種；經過相關性質之試驗，包含洗油後瀝青膠泥性質試驗（黏度、針入度及含油量）及洗油後粒料試驗（篩分析及比重），試驗結果如表6及表7。

表6 RAP料洗油後瀝青膠泥性質試驗結果表

| 項目 | 粗RAP料 | 細RAP料 |
|----------------|--------|--------|
| 針入度(0.1mm) | 10 | 9 |
| 60°C黏度(poises) | 258000 | 470000 |
| 含油量(%) | 3.2 | 4.8 |

表7 RAP料洗油後粒料性質試驗結果表

| 粒料 篩號 (mm) | 粗RAP料 | | | 細RAP料 | | |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------|
| | 各別留篩 百分率 (%) | 累計留篩 百分率 (%) | 過篩百分 率(%) | 各別留篩 百分率 (%) | 累計留篩 百分率 (%) | 過篩百分 率(%) |
| 19.0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 100 |
| 12.5 | 22 | 22 | 78 | 0 | 0 | 100 |
| 9.5 | 18 | 40 | 60 | 0 | 0 | 100 |
| 4.75 | 18 | 58 | 42 | 15 | 15 | 85 |
| 2.36 | 10 | 68 | 32 | 24 | 39 | 61 |
| 1.18 | 8 | 76 | 24 | 16 | 55 | 45 |
| 0.60 | 6 | 82 | 18 | 12 | 67 | 33 |
| 0.30 | 5 | 87 | 13 | 9 | 76 | 24 |
| 0.15 | 4 | 91 | 9 | 6 | 82 | 18 |
| 0.075 | 2.4 | 93.4 | 6.6 | 5.1 | 87.1 | 12.9 |
| 單位重 | 2.578 | | | 2.621 | | |

2. 目標黏度設定

目標黏度、RAP料摻配比例及軟化劑（或再生劑）等級三者互制關係，若控制軟化劑等級，則目標黏度與RAP摻配比例呈正相關。如設定目標黏度越高，則RAP摻配比例可越高；本研究均以AC-10作為軟化劑，目標黏度定為2000、3000及4000（Poises），經過計算法求以軟化劑AC-10（1000±200Poises），對不同目標黏度之RAP料摻配比例試算，其結果如表8所示。

表8 不同目標黏度之摻配比例計算結果表

| 目標黏度 (Poises) | RAP料添加量 (%) | 新瀝青膠泥添加比例(%) | 新瀝青黏度 (Poises) | 符合AC-10 (1000±200Poises) |
|------------------|----------------|--------------|-------------------|-----------------------------|
| 2000 | 20 | 85.1 | 1029.38 | √ |
| | 30 | 77.9 | 703.20 | × |
| | 40 | 70.9 | 461.75 | × |
| | 50 | 64.7 | 305.12 | × |
| | 60 | 57.7 | 178.43 | × |

| | | | | |
|------|----|------|---------|---|
| 3000 | 20 | 85.1 | 1593.40 | × |
| | 30 | 77.9 | 1105.33 | √ |
| | 40 | 70.9 | 736.38 | × |
| | 50 | 64.7 | 492.22 | × |
| | 60 | 57.7 | 290.90 | × |
| 4000 | 20 | 85.1 | 2177.63 | × |
| | 30 | 77.9 | 1529.61 | × |
| | 40 | 70.9 | 1031.59 | √ |
| | 50 | 64.7 | 696.72 | × |
| | 60 | 57.7 | 416.13 | × |
| 5000 | 20 | 85.1 | 2778.31 | × |
| | 30 | 77.9 | 1972.32 | × |
| | 40 | 70.9 | 1344.36 | × |
| | 50 | 64.7 | 916.40 | √ |
| | 60 | 57.7 | 552.84 | × |

表 8 之試算結果可以發現，軟化劑之黏度許可誤差為±20%，致使每種目標黏度之 RAP 料摻配比例範圍較大，但為求研究結果變異性較小，本研究先設定目標黏度 2000Poises 之 RAP 料摻配比例設定為 20%，目標黏度 3000Poises 之 RAP 料摻配比例設定為 40%，目標黏度 4000Poises 之 RAP 料摻配比例設定為 60%；研究過程若有無法完成之再生瀝青混凝土配合設計，則自動降低 RAP 料摻配比例，以達到去化 RAP 料最大化之目的。

3. 再生瀝青混凝土試驗結果

(1) 目標黏度 2000Poises 及 RAP 料摻配比例 20%之試驗結果

再生瀝青混凝土配合設計粒徑摻配比例如表 9，配合設計粒徑曲線如圖 10，試驗結果如表 10。

表 9 目標黏度 2000Poises 及 RAP 料 20%之配合設計粒徑摻配比例

| 粒料 試驗 篩號 | 6分石 | 3分石 | 2分石 | 砂 | 填縫料 | RAP (粗) | RAP (細) | JMF (%) | 規範帶 (%) |
|----------------|-----------|------|------|------|-----|------------|------------|------------|------------|
| | 配 合 比 例 | | | | | | | | |
| | 26% | 12% | 12% | 29% | 1% | 10% | 10% | | |
| | 過篩百分率 (%) | | | | | | | | |
| 25mm | 26.0 | 12.0 | 12.0 | 29.0 | 1.0 | 10.0 | 10.0 | 100.0 | 100 |
| 19mm | 18.4 | 12.0 | 12.0 | 29.0 | 1.0 | 10.0 | 10.0 | 92.4 | 90~100 |
| 12.5mm | 1.4 | 9.9 | 12.0 | 29.0 | 1.0 | 7.8 | 10.0 | 71.1 | — |
| 9.5mm | 0.4 | 6.4 | 11.8 | 29.0 | 1.0 | 6.0 | 10.0 | 64.6 | 56~80 |
| 4.75mm | 0.2 | 1.2 | 3.2 | 26.6 | 1.0 | 4.2 | 8.5 | 44.9 | 35~65 |
| 2.36mm | 0.2 | 0.5 | 1.3 | 21.1 | 1.0 | 3.2 | 6.1 | 33.4 | 23~49 |
| 1.18mm | 0.2 | 0.4 | 1.0 | 17.1 | 1.0 | 2.4 | 4.5 | 26.6 | — |
| 600µm | 0.2 | 0.3 | 0.8 | 13.4 | 1.0 | 1.8 | 3.3 | 20.8 | — |
| 300µm | 0.2 | 0.3 | 0.7 | 8.5 | 1.0 | 1.3 | 2.4 | 14.4 | 5~19 |
| 150µm | 0.2 | 0.2 | 0.5 | 4.0 | 1.0 | 0.9 | 1.8 | 8.6 | — |
| 75µm | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 1.6 | 0.9 | 0.7 | 1.3 | 5.0 | 2~8 |

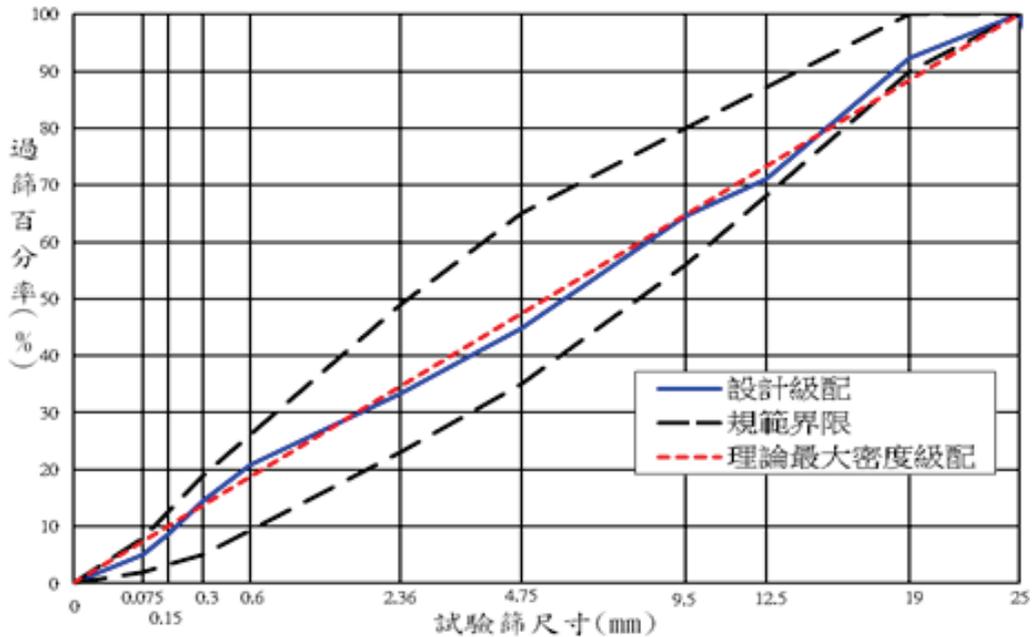


圖 10 目標黏度 2000Poises 及 RAP 料 20%之配合設計粒徑曲線圖

表 10 目標黏度 2000Poises 及 RAP 料 20%之配合設計試驗結果

| 項 目 | 建議配比及相應各值 | 規範值* |
|------------------------------------|-----------|-------|
| 1. 粒料配合比 | 「粒料配比計算表」 | — |
| 2. 瀝青含量 | | |
| a. 再生瀝青種類 | AC-10 | AC-10 |
| b. 對乾粒料 (%) | 5.7 | — |
| c. 對混合料 (%) | 5.4 | 4~10 |
| 3. 試體密度 (kg/m ³) | 2306 | — |
| 4. 穩定值 (kgf) | 1540 | ≥817 |
| 5. 流度值 (0.25mm) | 9.8 | 8~14 |
| 6. 粒料間空隙率 (V.M.A., %) | 14.2 | ≥13 |
| 7. 瀝青填充率 (V.F.A., %) | 70 | 65~75 |
| 8. 空隙率 (V _a , %) | 4.2 | 3~5 |
| 9. 粒料平均比重 | 2.550 | — |
| 10. 瀝青比重 | 1.037 | — |
| 11. 混合料最大理論密度 (kg/m ³) | 2407 | — |
| 12. 滯留強度指數 (%) | 82 | ≥75 |

註：*表列規範值係摘自公路總局 101 年版施工說明書[2]規定。

(2) 目標黏度 3000Poises 及 RAP 料摻配比例 40%之試驗結果

再生瀝青混凝土配合設計粒徑摻配比例如表 11，配合設計粒徑曲線如圖 11，試驗結果如表 12。

表 11 目標黏度 3000Poises 及 RAP 料 40% 之配合設計粒徑摻配比例

| 粒料 | 6分石 | 3分石 | 2分石 | 砂 | 填縫料 | RAP (粗) | RAP (細) | JMF | 規範帶 |
|----------|-----------|------|------|------|-----|------------|------------|-------|--------|
| 試驗 篩號 | 合 比 例 | | | | | | | (%) | (%) |
| | 16% | 12% | 12% | 19% | 1% | 20% | 20% | | |
| | 過篩百分率 (%) | | | | | | | | |
| 25mm | 16.0 | 12.0 | 12.0 | 19.0 | 1.0 | 20.0 | 20.0 | 100.0 | 100 |
| 19mm | 11.3 | 12.0 | 12.0 | 19.0 | 1.0 | 20.0 | 20.0 | 95.3 | 90~100 |
| 12.5mm | 0.9 | 9.9 | 12.0 | 19.0 | 1.0 | 15.6 | 20.0 | 78.4 | — |
| 9.5mm | 0.3 | 6.4 | 11.8 | 19.0 | 1.0 | 12.0 | 20.0 | 70.5 | 56~80 |
| 4.75mm | 0.1 | 1.2 | 3.2 | 17.4 | 1.0 | 8.4 | 17.0 | 48.3 | 35~65 |
| 2.36mm | 0.1 | 0.5 | 1.3 | 13.9 | 1.0 | 6.4 | 12.2 | 35.4 | 23~49 |
| 1.18mm | 0.1 | 0.4 | 1.0 | 11.2 | 1.0 | 4.8 | 9.0 | 27.5 | — |
| 600μm | 0.1 | 0.3 | 0.8 | 8.8 | 1.0 | 3.6 | 6.6 | 21.2 | — |
| 300μm | 0.1 | 0.3 | 0.7 | 5.5 | 1.0 | 2.6 | 4.8 | 15.0 | 5~19 |
| 150μm | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 2.6 | 1.0 | 1.8 | 3.6 | 9.8 | — |
| 75μm | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 1.1 | 0.9 | 1.3 | 2.6 | 6.3 | 2~8 |

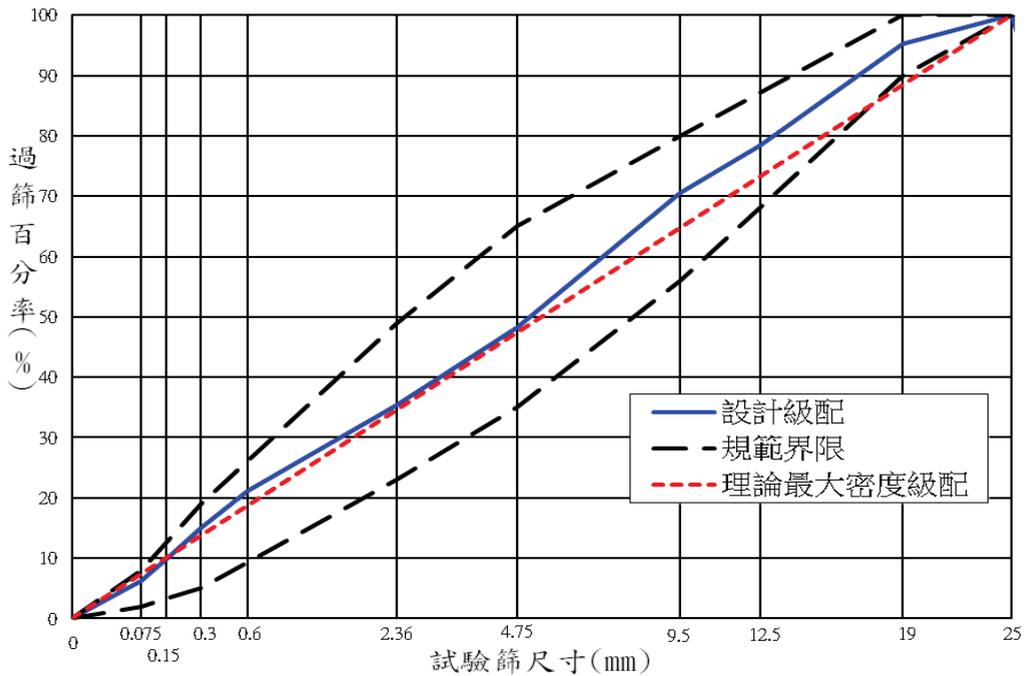


圖 11 目標黏度 3000Poises 及 RAP 料 40% 之配合設計粒徑曲線圖

表 12 目標黏度 3000Poises 及 RAP 料 40% 之配合設計試驗結果

| 項 目 | 建議配比及相應各值 | 規範值* |
|------------------------------------|-----------|-------|
| 1. 粒料配合比 | 「粒料配比計算表」 | — |
| 2. 瀝青含量 | | |
| a. 再生瀝青種類 | AC-10 | AC-10 |
| b. 對乾粒料 (%) | 5.7 | — |
| c. 對混合料 (%) | 5.4 | 4~10 |
| 3. 試體密度 (kg/m ³) | 2310 | — |
| 4. 穩定值 (kgf) | 1740 | ≥817 |
| 5. 流度值 (0.25mm) | 11.0 | 8~14 |
| 6. 粒料間空隙率 (V.M.A., %) | 14.4 | ≥13 |
| 7. 瀝青填充率 (V.F.A., %) | 70 | 65~75 |
| 8. 空隙率 (V _a , %) | 4.3 | 3~5 |
| 9. 粒料平均比重 | 2.561 | — |
| 10. 瀝青比重 | 1.037 | — |
| 11. 混合料最大理論密度 (kg/m ³) | 2416 | — |
| 12. 滯留強度指數 (%) | 94 | ≥75 |

註：*表列規範值係摘自公路總局 101 年版施工說明書[2]規定。

(3) 目標黏度 4000Poises 及 RAP 料摻配比例 60% 之試驗結果

再生瀝青混凝土配合設計粒徑摻配比例如表 13，配合設計粒徑曲線如圖 12，試驗結果如表 14。

表 13 目標黏度 4000Poises 及 RAP 料 60% 之配合設計粒徑摻配比例

| 粒料 | 6分石 | 3分石 | 2分石 | 砂 | 填縫料 | RAP (粗) | RAP (細) | JMF (%) | 規範帶 (%) |
|----------|-----------|-----|-----|-----|-----|------------|------------|------------|------------|
| | 配合 比 例 | | | | | | | | |
| | 16% | 7% | 7% | 9% | 1% | 30% | 30% | | |
| 試驗 篩號 | 過篩百分率 (%) | | | | | | | | |
| 25mm | 16.0 | 7.0 | 7.0 | 9.0 | 1.0 | 30.0 | 30.0 | 100.0 | 100 |
| 19mm | 11.3 | 7.0 | 7.0 | 9.0 | 1.0 | 30.0 | 30.0 | 95.3 | 90~100 |
| 12.5mm | 0.9 | 5.8 | 7.0 | 9.0 | 1.0 | 23.4 | 30.0 | 77.1 | — |
| 9.5mm | 0.3 | 3.8 | 6.9 | 9.0 | 1.0 | 18.0 | 30.0 | 69.0 | 56~80 |
| 4.75mm | 0.1 | 0.7 | 1.8 | 8.3 | 1.0 | 12.6 | 25.5 | 50.0 | 35~65 |
| 2.36mm | 0.1 | 0.3 | 0.8 | 6.6 | 1.0 | 9.6 | 18.3 | 36.7 | 23~49 |
| 1.18mm | 0.1 | 0.2 | 0.6 | 5.3 | 1.0 | 7.2 | 13.5 | 27.9 | — |
| 600μm | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 4.1 | 1.0 | 5.4 | 9.9 | 21.2 | — |
| 300μm | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 2.6 | 1.0 | 3.9 | 7.2 | 15.4 | 5~19 |
| 150μm | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 1.3 | 1.0 | 2.7 | 5.4 | 10.9 | — |
| 75μm | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.9 | 2.0 | 3.9 | 7.6 | 2~8 |

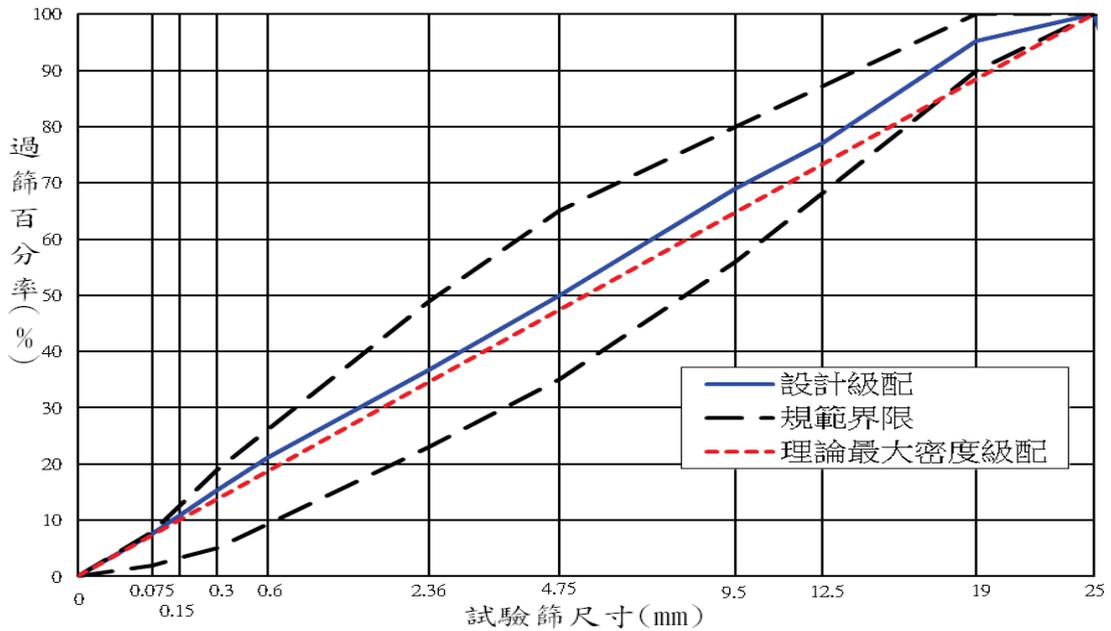


圖 12 目標黏度 4000 Poises 及 RAP 料 60% 之配合設計粒徑曲線圖

表 14 目標黏度 4000 Poises 及 RAP 料 60% 之配合設計試驗結果

| 項目 | 建議配比及相應各值 「粒料配比計算表」 | 規範值* |
|-----------------------------------|------------------------|-------------|
| 1. 粒料配合比 | | — |
| 2. 瀝青含量 | | |
| a. 再生瀝青種類 | AC-10 | AC-10 |
| b. 對乾粒料 (%) | 5.7 | — |
| c. 對混合料 (%) | 5.5 | 4~10 |
| 3. 試體密度 (kg/m^3) | 2228 | — |
| 4. 穩定值 (kgf) | 1390 | ≥ 817 |
| 5. 流度值 (0.25mm) | 9.8 | 8~14 |
| 6. 粒料間空隙率 (V.M.A., %) | 18.1 | ≥ 18.0 |
| 7. 瀝青填充率 (V.F.A., %) | 50 (NG) | 65~75 |
| 8. 空隙率 (V_a , %) | 9.0 (NG) | 3~5 |
| 9. 粒料平均比重 | 2.575 | — |
| 10. 瀝青比重 | 1.037 | — |
| 11. 混合料最大理論密度 (kg/m^3) | 2446 | — |
| 12. 滯留強度指數 (%) | 93 | ≥ 75 |

註：*表列規範值係摘自公路總局 101 年版施工說明書【2】規定。

4. 再生瀝青混凝土試驗結果分析：

RAP 添加量比例 20% 及 40% 再生瀝青混凝土配合設計試驗結果都符合配比規範要求，當 RAP 添加量比例提高至 60% 時，再生瀝青混凝土配合設計，試驗結果在瀝青填充率與空隙率未符合配比規範要求。

4.4 再生瀝青混凝土成效試驗結果

1. 馬歇爾穩定值試驗及流度值試驗結果

將新料瀝青混凝土配比及 3 組再生瀝青混凝土配比穩定值及流度值試驗結果整理如表 15，繪製比較圖形如附錄 1 圖 29。

表 15 馬歇爾穩定值試驗及流度值試驗結果

| 項目 | 新料瀝青混凝土配合設計 | 再生瀝青混凝土配合設計 | | |
|--------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | RAP 料比例 20%，目標黏度 2000Poises | RAP 料比例 40%，目標黏度 3000Poises | RAP 料比例 60%，目標黏度 4000Poises |
| 穩定值 (kgf) | 1230 | 1540 | 1740 | 1390 |
| 流度值 (0.25mm) | 11.7 | 9.8 | 11.0 | 9.8 |

2. 滯留強度試驗結果

新料瀝青混凝土配比及 3 組再生瀝青混凝土配比穩定值及流度值試驗結果整理如表 16，繪製比較圖形如附錄 1 圖 30。

表 16 滯留強度試驗結果

| 項目 | 新料瀝青混凝土配合設計 | 再生瀝青混凝土配合設計 | | |
|------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | RAP 料比例 20%，目標黏度 2000Poises | RAP 料比例 40%，目標黏度 3000Poises | RAP 料比例 60%，目標黏度 4000Poises |
| 滯留強度指數 (%) | 89 | 82 | 94 | 93 |

3. 漢堡車轍輪跡試驗結果

將新料瀝青混凝土配比及 3 組再生瀝青混凝土配比漢堡車轍輪跡試驗結果整理如表 17，繪製比較圖形如附錄 1 圖 31 至圖 36。

表 17 漢堡車轍輪跡試驗結果

| 項目 | 新料瀝青混凝土配合設計 | | 再生瀝青混凝土配合設計 | | | | | |
|-----------------|-------------|--------|-----------------------------|-------|-----------------------------|-------|-------------------------------|---|
| | | | RAP 料比例 20%，目標黏度 2000Poises | | RAP 料比例 40%，目標黏度 3000Poises | | RAP 料比例 60%，目標黏度 4000Poises 註 | |
| 輪跡 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 剝脫點 (SIP) 輪次平均值 | 17,768 | N.A. | N.A. | N.A. | 10,252 | 7,005 | — | — |
| 深度 12.5mm 輪次值 | 19,646 | 13,564 | 3,686 | 6,826 | 14,901 | 8,274 | — | — |
| 深度 12.5mm 輪次平均值 | 16,605 | | 5,256 | | 11,588 | | — | |

註：RAP 料比例 60% 之配合設計空隙率為 9.0%，不符合 AASHTO T324 要求之 6~8%，

故未進行試驗。

4. 成效試驗結果分析：

- (1) 穩定值與流度值：RAP 添加量為 0%、20%及 40%，穩定值與添加量為明顯正相關（如圖 13），RAP 60%穩定值結果則往下降，可歸因為 RAP60%再生瀝青混凝土配合設計試驗結果中，空隙率不符合配合設計相關規定，以致試體結構性有疑慮。
- (2) 流度值則與 RAP 添加量無明顯相關性。滯留強度明顯與 RAP 添加量無相關性，如圖 14。
- (3) 漢堡車轍輪跡試驗：由圖 31 至圖 36(詳附錄 1)顯示，在本研究中，車轍深度 12.5mm 之輪次平均數以 RAP0% > RAP40% > RAP20%，故若以再生瀝青混凝土(20%與 40%)而言，RAP 添加比例高者，則漢堡車轍輪次數為高。

4.5 瀝青性質試驗

將新料瀝青混凝土配比及 3 組再生瀝青混凝土配比，依配比試驗結果配料拌合後，再進行洗油取得回收瀝青膠泥，接著進行後續瀝青膠泥試驗，試驗結果如下所述：

1. 黏度試驗結果

依新料瀝青混凝土配比及 3 組再生瀝青混凝土配比結果拌合後洗油，取回收瀝青進行黏度試驗，結果整理如表 18。

表 18.回收瀝青黏度試驗結果

| 項目 | 新料瀝青混凝土配合設計 | 再生瀝青混凝土配合設計 | | |
|-------------|-------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | RAP 料比例 20%，目標黏度 2000 Poises | RAP 料比例 40%，目標黏度 3000 Poises | RAP 料比例 60%，目標黏度 4000 Poises |
| 黏度 (Poises) | 3,450 | 5,140 | 29,500 | — |

2. 針入度試驗結果

依新料瀝青混凝土配比及 3 組再生瀝青混凝土配比結果拌合後洗油，取回收瀝青進行針入度試驗，結果整理如表 19。

表 19 回收瀝青針入度試驗結果

| 項目 | 新料瀝青混凝土配合設計 | 再生瀝青混凝土配合設計 | | |
|------------|-------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | RAP 料比例 20%，目標黏度 2000 Poises | RAP 料比例 40%，目標黏度 3000 Poises | RAP 料比例 60%，目標黏度 4000 Poises |
| 針入度(0.1mm) | 54 | 47 | 27 | — |

3. 動態剪切流變試驗結果

依新料瀝青混凝土配比及 3 組再生瀝青混凝土配比結果拌合後洗油，取回收瀝青進行動態剪切流變試驗，結果整理如表 20。

表 20 回收瀝青動態剪切流變試驗結果

| 項目 | 新料瀝青混凝土配合設計 | 再生瀝青混凝土配合設計 | | |
|----------------------------|-------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | RAP 料比例 20%，目標黏度 2000 Poises | RAP 料比例 40%，目標黏度 3000 Poises | RAP 料比例 60%，目標黏度 4000 Poises |
| Original Binder Grade (°C) | 58 | 70 | 76 | — |
| RTFO Binder Grade (°C) | 52 | 58 | 70 | — |

4. 延展性試驗

依新料瀝青混凝土配比及 3 組再生瀝青混凝土配比結果拌合後洗油，取回收瀝青進行延展性試驗，結果整理如表 21。

表 21 回收瀝青延展性試驗結果

| 項目 | 新料瀝青混凝土配合設計 | 再生瀝青混凝土配合設計 | | |
|----------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | RAP 料比例 20%，目標黏度 2000Poises | RAP 料比例 40%，目標黏度 3000Poises | RAP 料比例 60%，目標黏度 4000Poises |
| 平均值 (cm) | >150 | >150 | 28.5 | — |

5. 瀝青性質試驗結果分析：

- (1) 黏度值與針入度：黏度值與 RAP 添加量比例成正相關，針入度值與 RAP 添加量比例成負相關；結果與一般認知相同。
- (2) 動態剪切流變試驗：試驗結果與添加量比例成正相關，結果亦與一般認知相同。
- (3) 延展性試驗：RAP 添加量比例 0%及 20%試驗結果符合新瀝青規範要求，RAP 添加量比例 40%則遠低於 50，顯見添加太多 RAP，或導致瀝青變脆，降低延展性。

4.6 現地試鋪評估結果

四個工程瀝青磚沈陷評估結果，分別敘述如下：

1. 工程1：台68線5k+000~15k+000東向路基路面改善工程，RAP料比例20%，定期現地量測結果如附錄2表22，瀝青磚沈陷觀測結果如圖13至圖16，瀝青磚沈陷現地觀測相片矩陣表如附錄2表23。

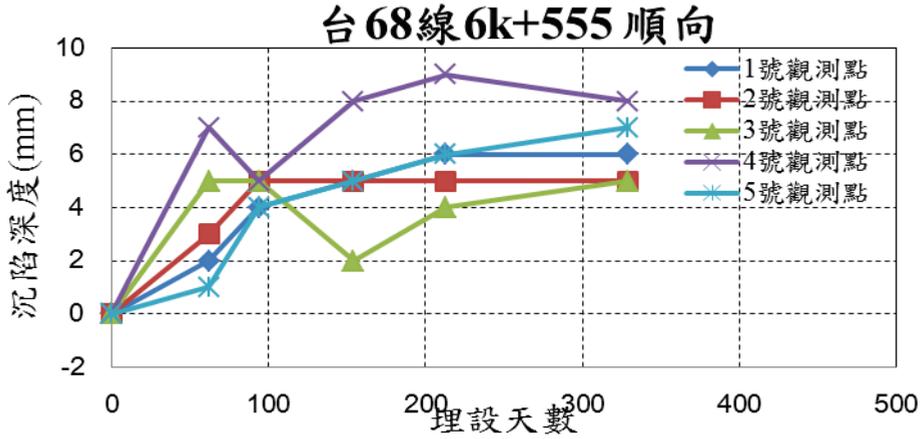


圖 13 瀝青磚沈陷觀測結果-台 68 線 6k+555 順向

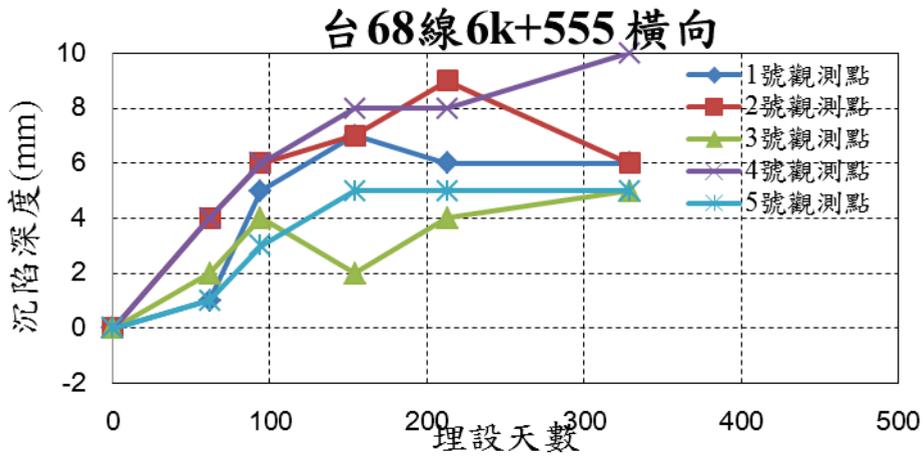


圖 14 瀝青磚沈陷觀測結果-台 68 線 6k+555 橫向

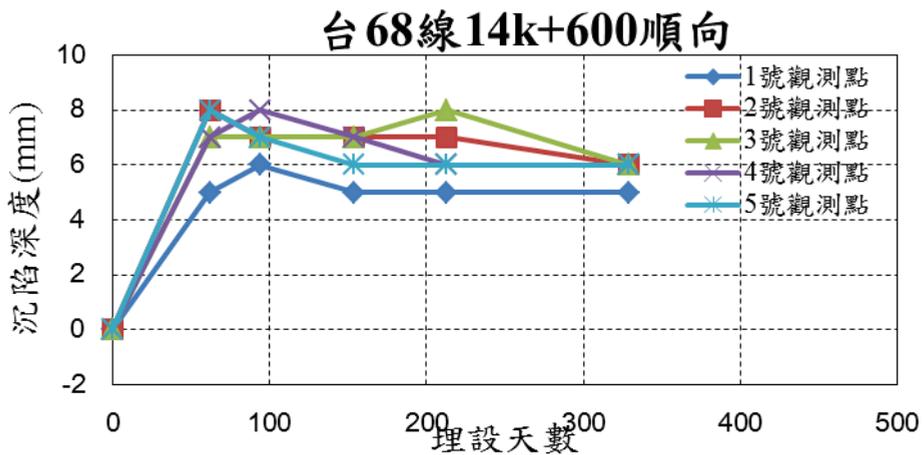


圖 15 瀝青磚沈陷觀測結果-台 68 線 14k+600 順向

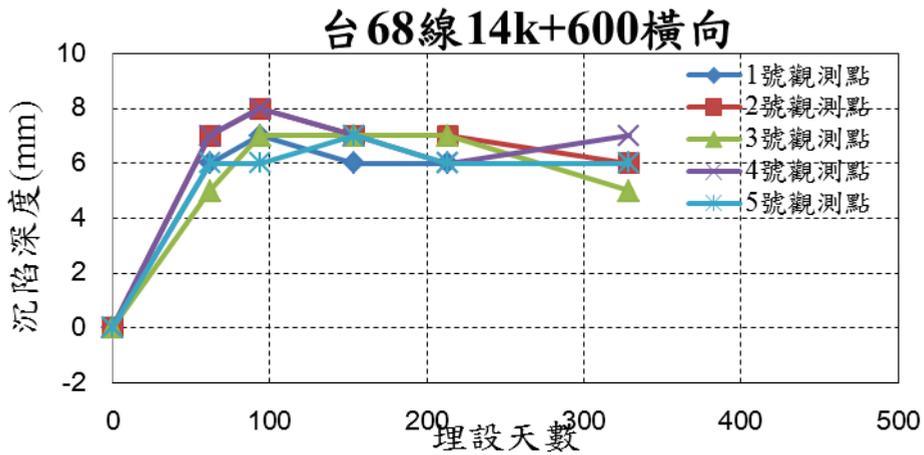


圖 16 .瀝青磚沈陷觀測結果-台 68 線 14k+600 橫向

2. 工程2：台31線6k+000~9k+000段排水及路基路面改善工程，RAP料比例20%，定期現地量測結果如附錄2表24，瀝青磚沈陷觀測結果如圖17至圖20，瀝青磚沈陷現地觀測相片矩陣表如附錄2表25。

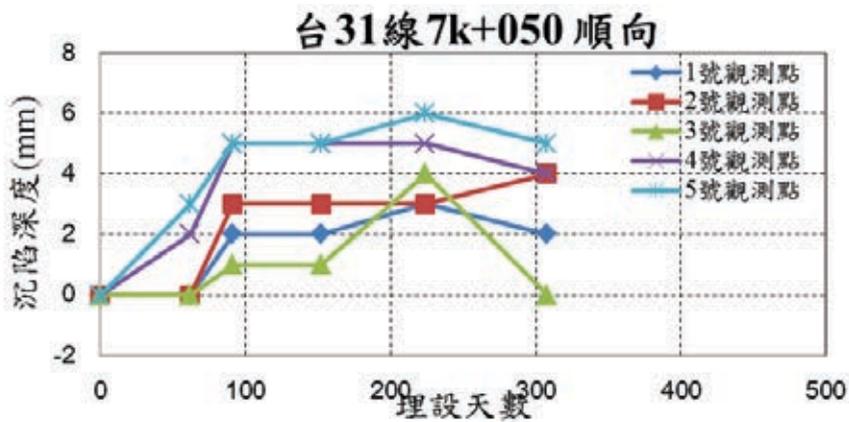


圖 17 瀝青磚沈陷觀測結果-台 31 線 7k+050 順向

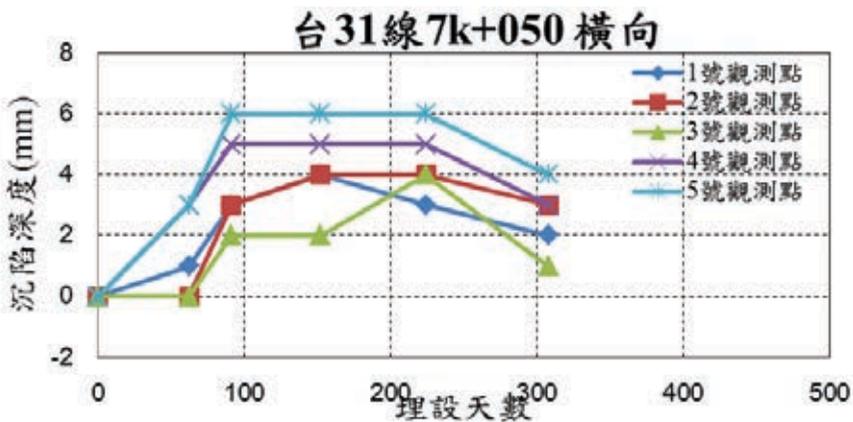


圖 18 瀝青磚沈陷觀測結果-台 31 線 7k+050 橫向

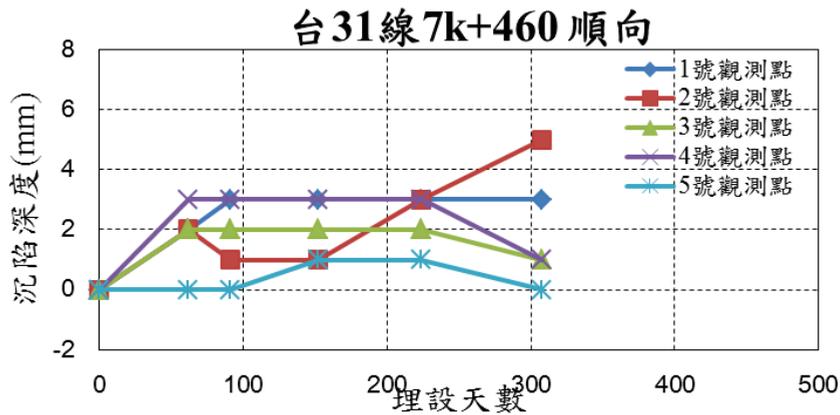


圖 19 瀝青磚沈陷觀測結果-台 31 線 7k+460 順向

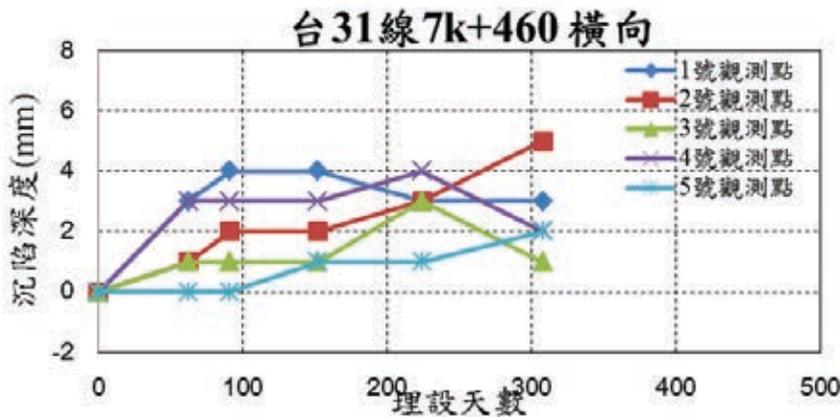


圖 20 瀝青磚沈陷觀測結果-台 31 線 7k+460 橫向

3. 工程3：台61線76k+000~85k+829段兩側慢車道擇要路面整修工程，RAP料比例40%，定期現地量測結果如附錄2表26，瀝青磚沈陷觀測結果如圖21至圖24，瀝青磚沈陷現地觀測相片矩陣表如附錄2表27。

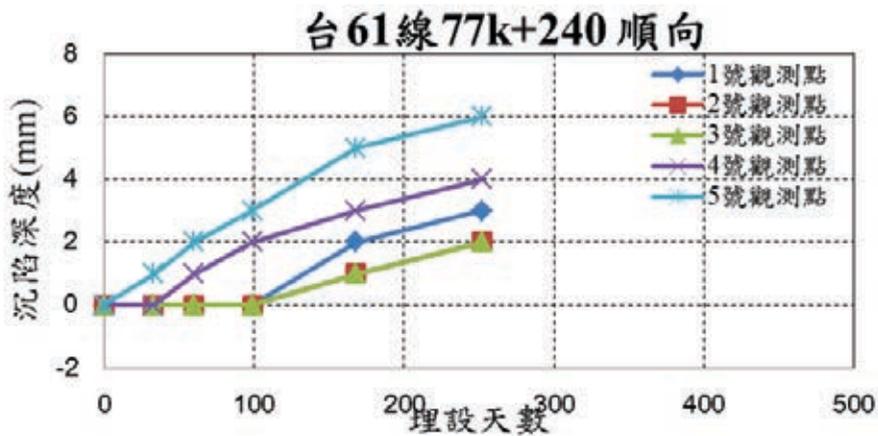


圖 21 .瀝青磚沈陷觀測結果-台 61 線 77k+240 順向

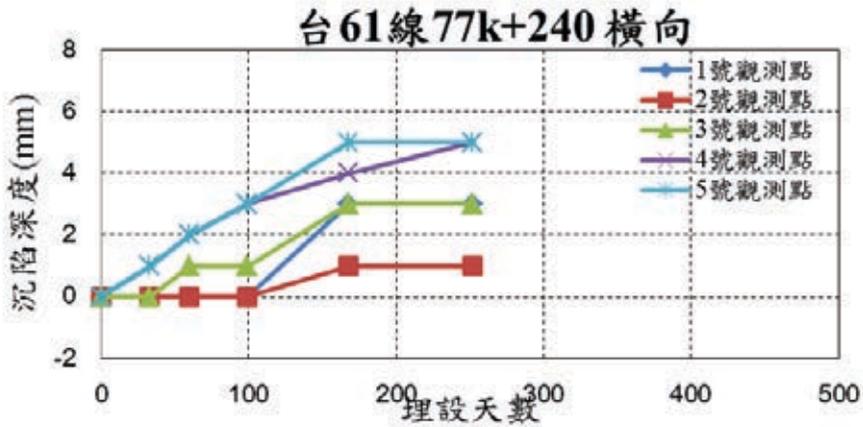


圖 22 瀝青磚沈陷觀測結果-台 61 線 77k+240 橫向

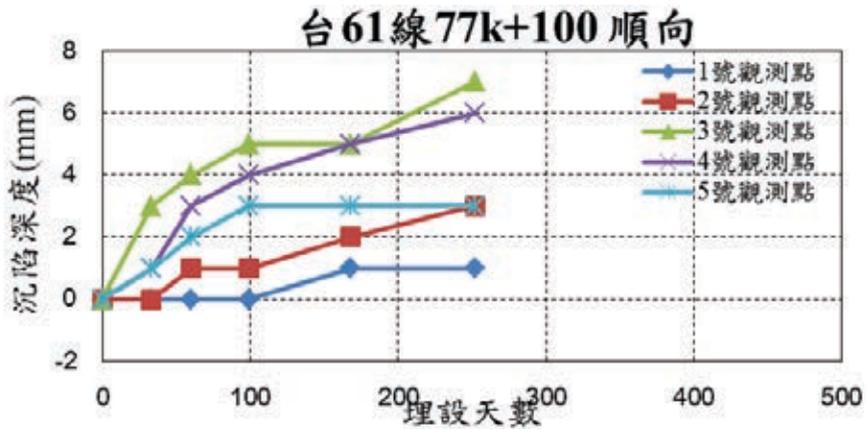


圖 23 .瀝青磚沈陷觀測結果-台 61 線 77k+100 順向

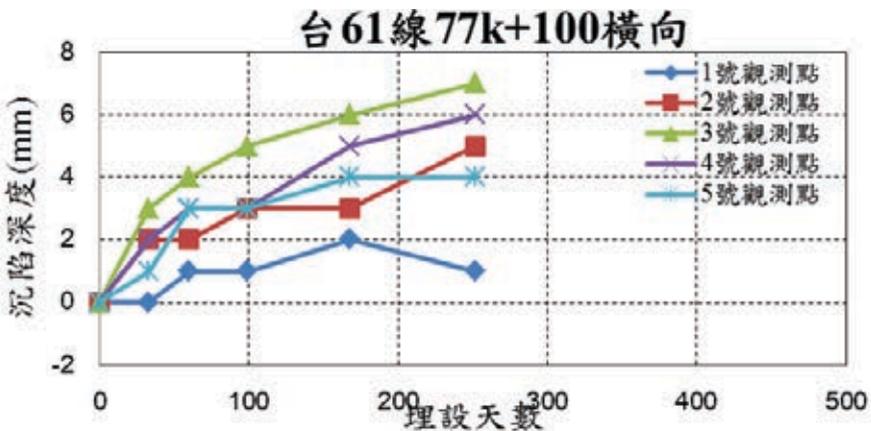


圖 24 瀝青磚沈陷觀測結果-台 61 線 77k+100 橫向

4. 工程4：台27線25k+532~37k+500路面修復工程，RAP料比例40%，定期現地量測結果如附錄2表28，瀝青磚沈陷觀測結果如圖25至圖28，瀝青磚沈陷現地觀測相片矩陣表如附錄2表29。

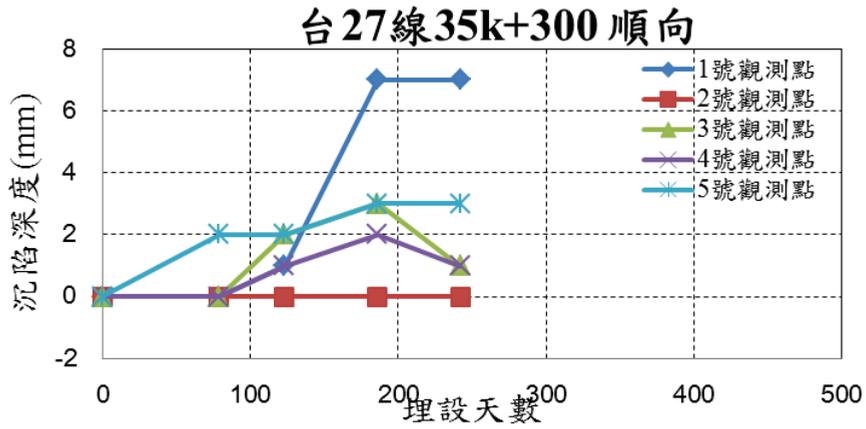


圖 25 瀝青磚沈陷觀測結果-台 27 線 35k+300 順向

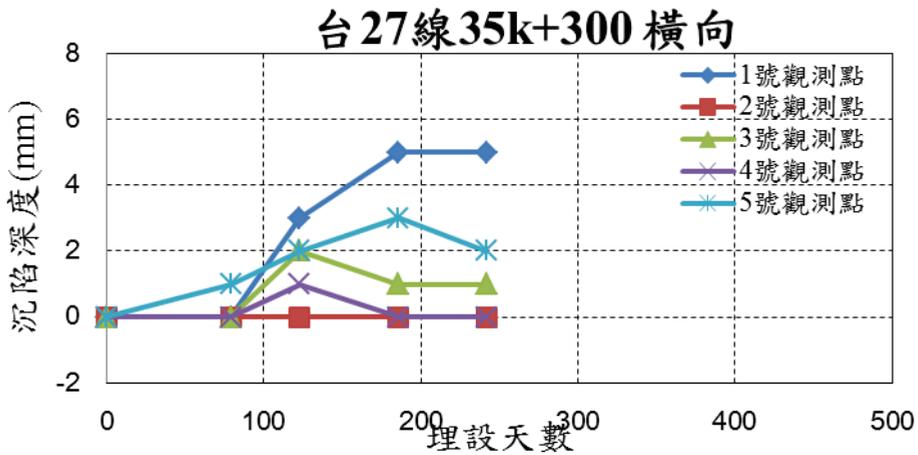


圖 26 瀝青磚沈陷觀測結果-台 27 線 35k+300 橫向

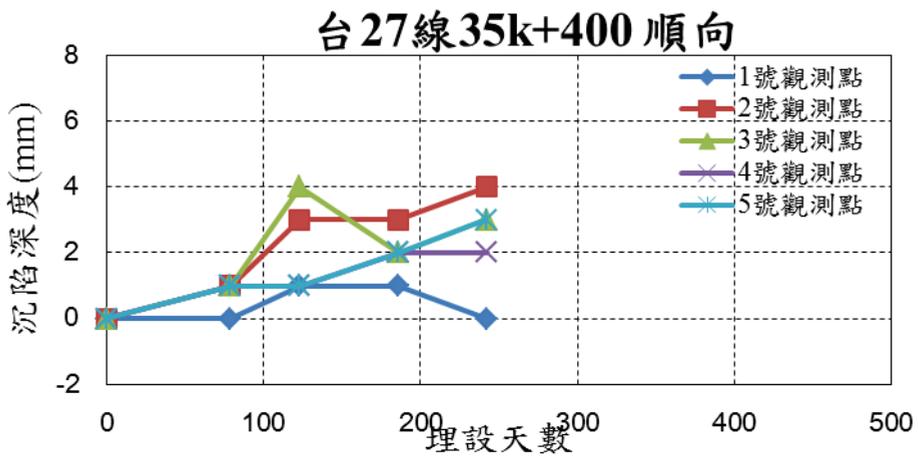


圖 27.瀝青磚沈陷觀測結果-台 27 線 35k+400 順向

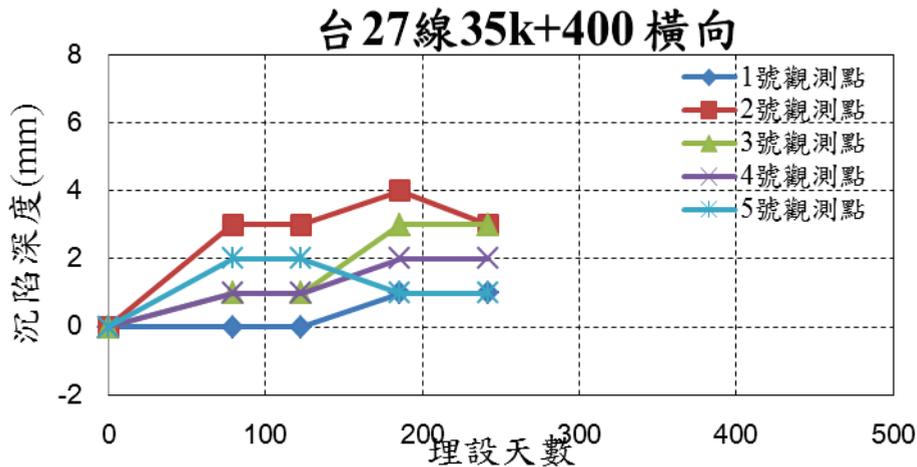


圖 28 瀝青磚沈陷觀測結果-台 27 線 35k+400 橫向

5. 現地試鋪結果分析：

- (1) 40 點觀測點位中最後 1 次觀測，僅有 5 點大於 6mm，佔總比例之 12.5%，僅有 1 點大於 8mm，佔總比例之 2.5%；且沉陷量隨著埋設天數的增加而趨於穩定，呈現一水平線。
- (2) 試鋪點位最後 1 次現地觀測圖，可看出與第 1 次現地觀測圖有明顯差別，最後 1 次觀測已明顯融入現地鋪面，看不出明顯切割線。
- (3) 瀝青磚摻配比例與去化 RAP 料效益分析

依據本局施工說明書[2]規定，新鋪路面應辦理鑽心或切割試體回收黏度試驗、鑽心試體厚度及壓實度試驗等試驗。本所以瀝青磚用於鑽心後坑洞修補試辦路段（台 1 甲線 16k+000~21k+000）為例，該路段至少需 45 顆直徑 150mm 之瀝青磚，每顆重量約為 2.2~2.3kg，若 RAP 添加比例為 40%，45 顆瀝青磚約消耗 40kg 之 RAP 料。臺灣省道公路總長度約 5,000 公里，若以上述例子每 5 公里可去化 40kg 之 RAP 料，則 5,000 公里刨除重鋪約可去化 40,000kg（相當於 40 噸）之 RAP 料，對於去化 RAP 料有其效用。

伍、結論與建議

1. 依RAP料添加量比例為20%、40%及60%試驗結果來看，RAP添加量比例在40%以內還能符合配比規範要求，對於去化過度老化RAP料有相當程度之效用。
2. 在成效試驗中，由力學相關之穩定值試驗與漢堡車轍輪跡試驗的結果顯示，在“符合配比規範要求”下，RAP料的添加量與這兩項試驗之試驗結果成正相關，顯見RAP料添加較多，則抵抗車轍能力較佳，但建議RAP之添加比例以不超過40%為原則。

3. 在瀝青膠泥性質試驗中，黏度值隨RAP料添加量比例增加而增加，延展性則會越差，顯見RAP料添加越多會容易造成鋪面越脆，越無法抵抗反覆載重，進而提早發生疲勞破壞。
4. 在現地試鋪結果中，試鋪瀝青磚沉陷量低於8mm比例為97.5%，顯見運用過度老化RAP料，於現場試鋪效果良好，惟其RAP料添加比例宜限制在40%以下。
5. 本研究案現地試鋪點位都為驗收之鑽心點位，若有填補小坑洞需使用瀝青磚時，仍可以過度老化RAP料當原料製作瀝青磚，以達去化RAP料之效用。

參考文獻

- [1] 黃三哲、陳仙州、洪明澤、蘇信詠、呂怡廷（2014），瀝青鋪面磚應用於道路之研究，交通部公路總局 103 年度自行研究計畫。
- [2] 交通部公路總局，施工說明書，2012 年 10 月。
- [3] Asphalt Institute Manual Series No.2 (AI MS-2) Sixth Edition, “Mix Design Methods For Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types”, 1995.
- [4] 邱欽偉（2009）再生劑對提升再生瀝青混凝土品質之研究，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，桃園。
- [5] 美國聯邦公路總署（FHWA）出版「SUPERPAVE Asphalt Mixture Design」（第 4 版）。
- [6] 簡志璵（2008）再生瀝青混凝土添加焚化爐底渣之工程性質，國立成功大學土木工程研究所碩士論文，台南。
- [7] Hadipour, K., and Anderson, K. O., (1998). “An Evaluation of Permanent Deformation and Low Temperature Characteristics of Some Recycled Asphalt Concrete Mixture,” *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol.57, pp.615-645
- [8] Sondag, M. S., Chadbourn, B. A. and Drescher, A., (2002). *Investigation of Recycled Asphalt Pavement (RAP) Mixtures Final Report*, Minnesota Department of Transportation, Virginia

附錄 1 馬歇爾及車轍輪跡試驗圖

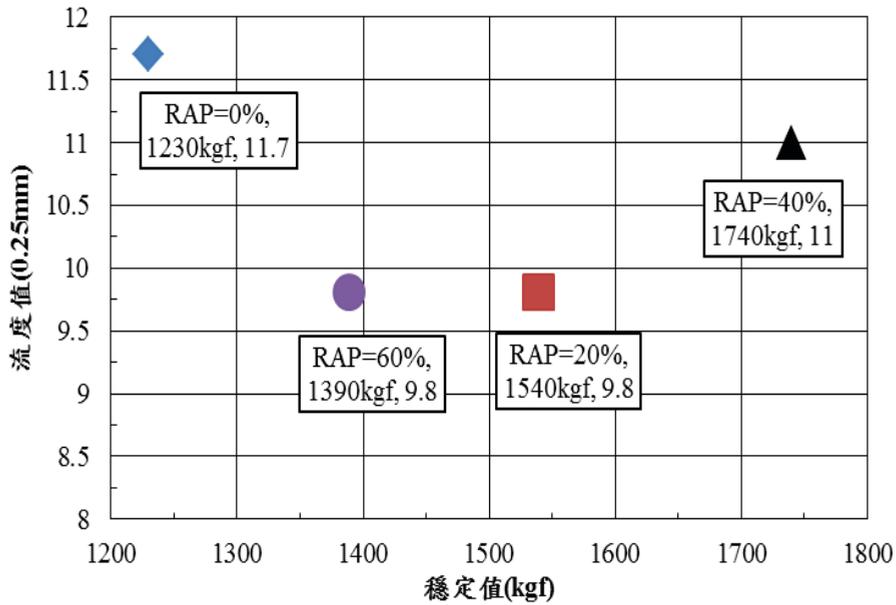


圖 29 馬歇爾穩定值試驗及流度值試驗結果比較

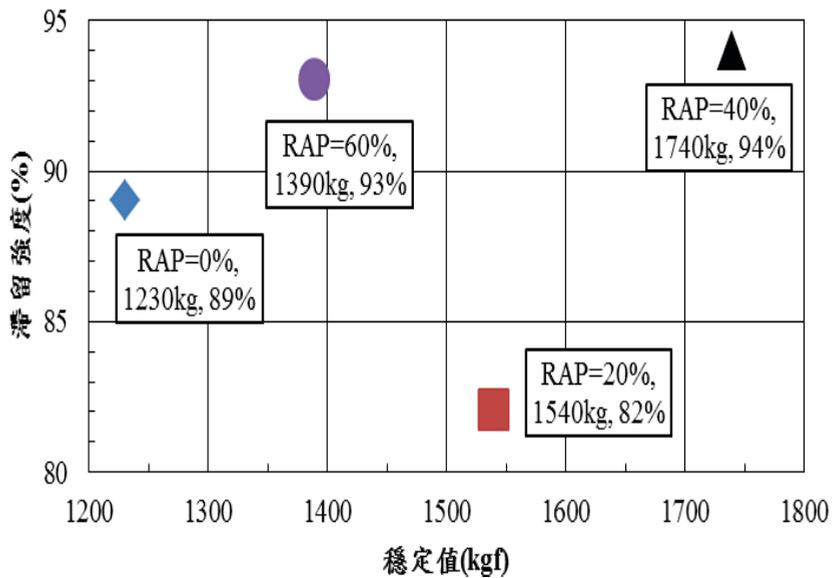


圖 30 滯留強度試驗結果比較

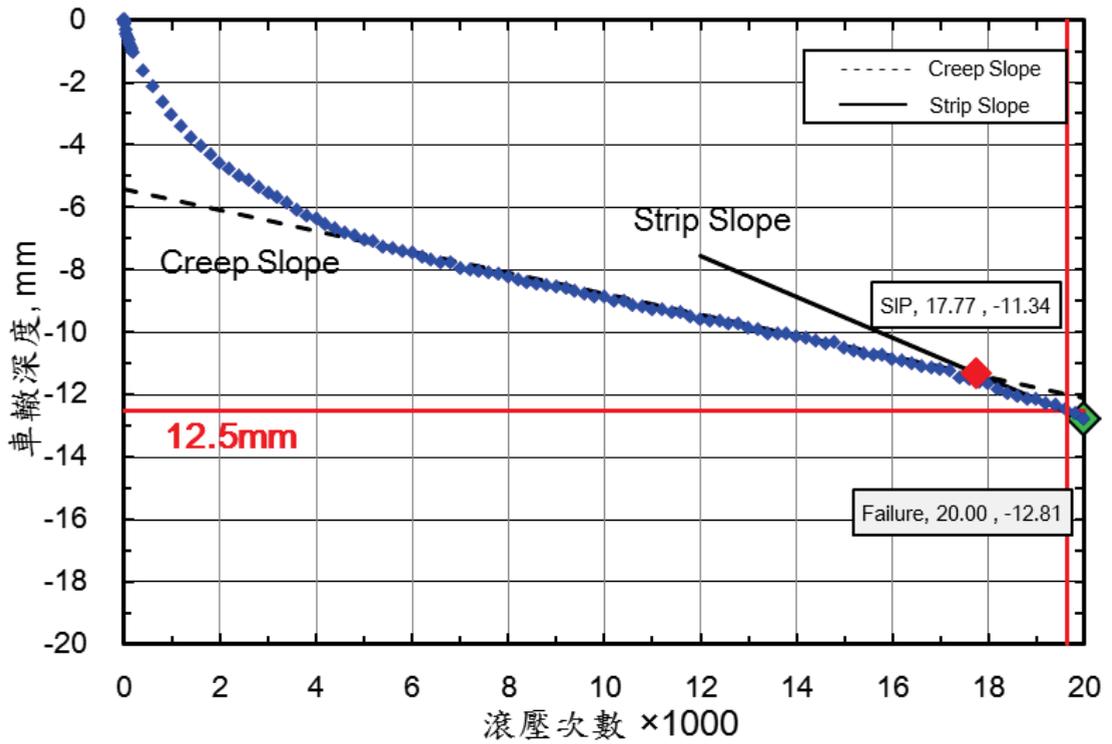


圖 31 漢堡車轍輪跡試驗結果 (0%-1)

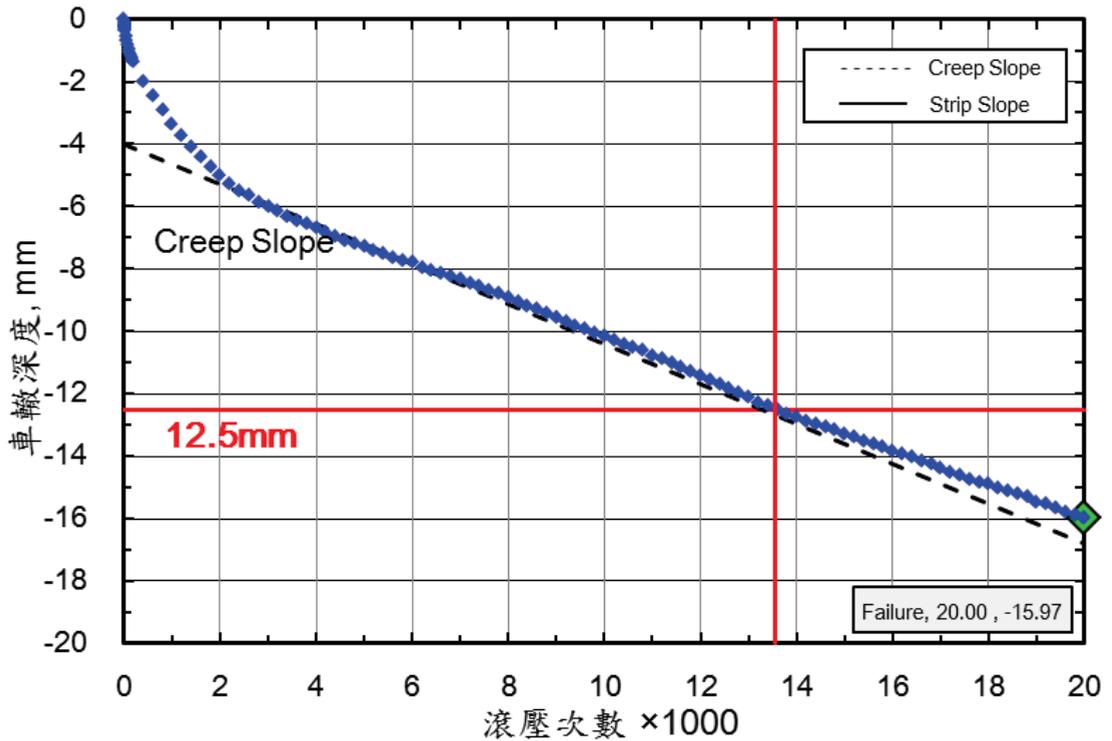


圖 32 漢堡車轍輪跡試驗結果 (0%-2)

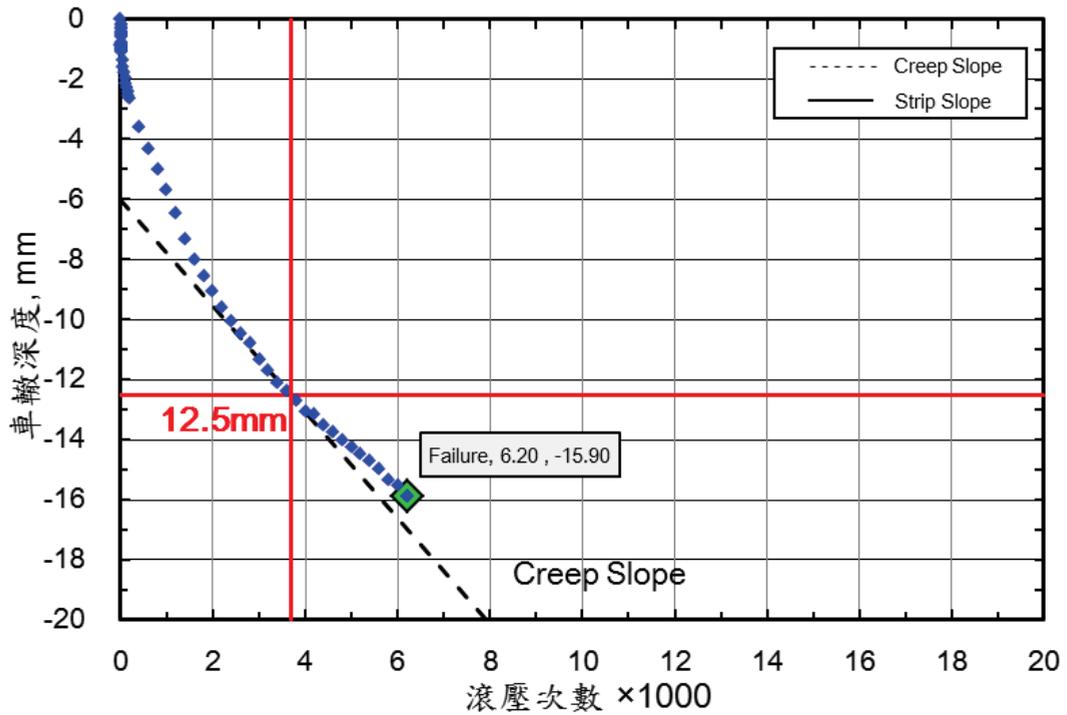


圖 33 漢堡車轍輪跡試驗結果 (20%-1)

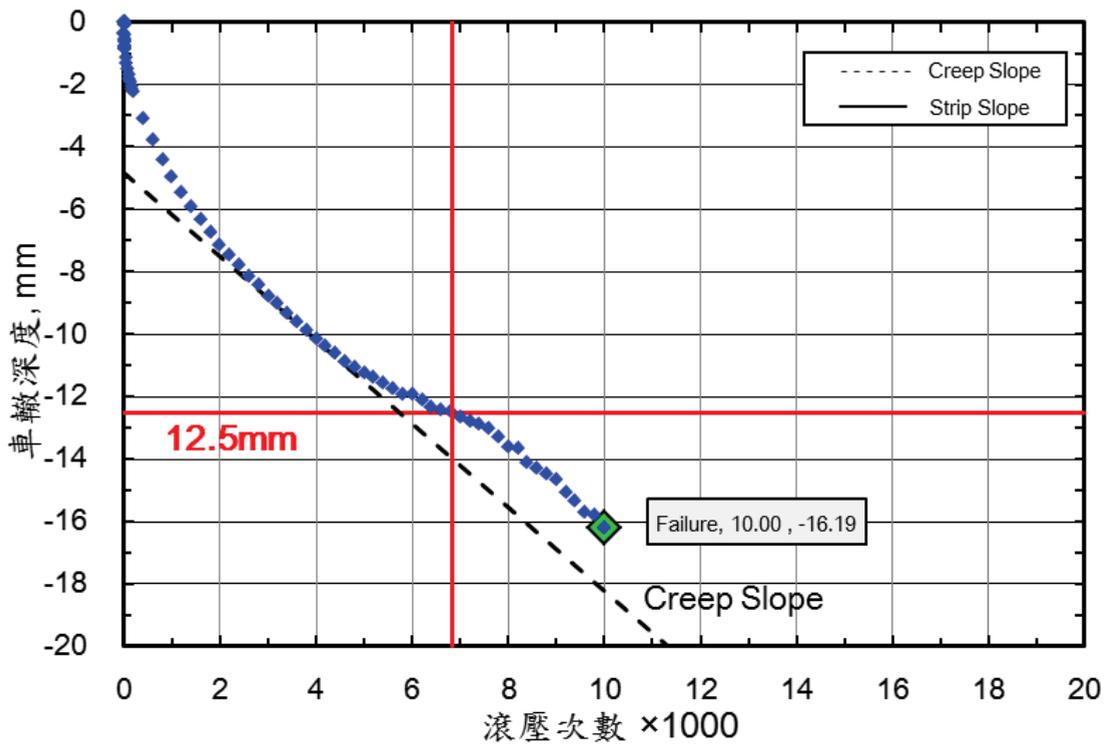


圖 34 漢堡車轍輪跡試驗結果 (20%-2)

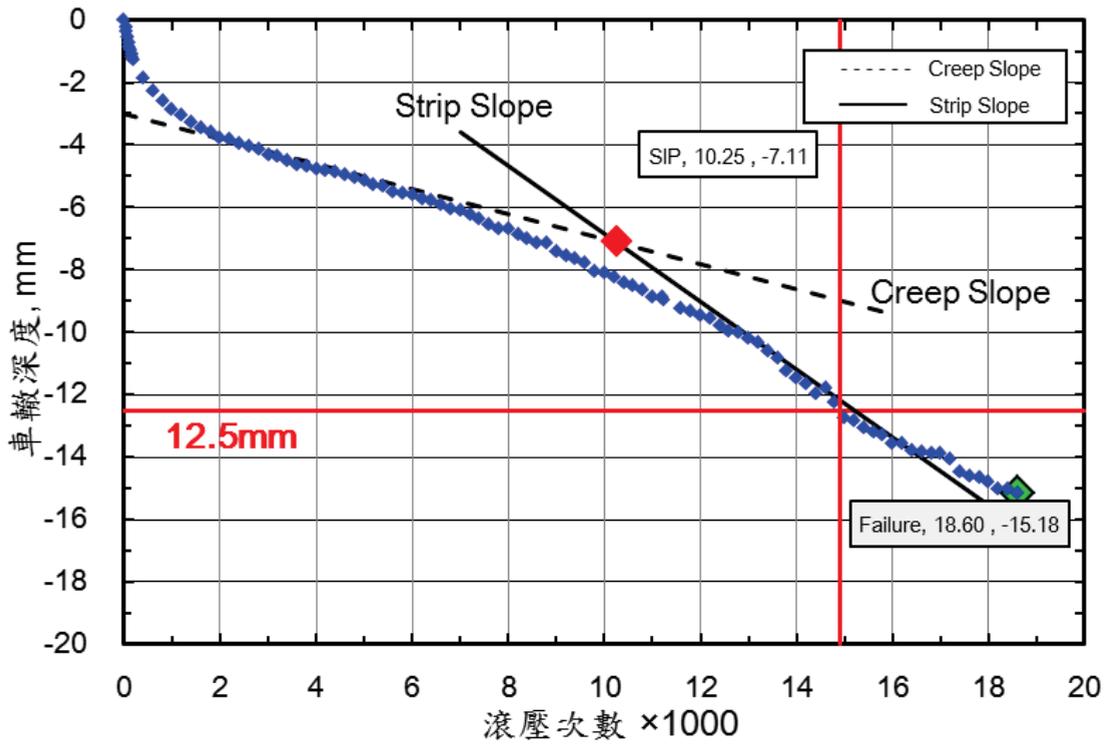


圖 35 漢堡車轍輪跡試驗結果 (40%-1)

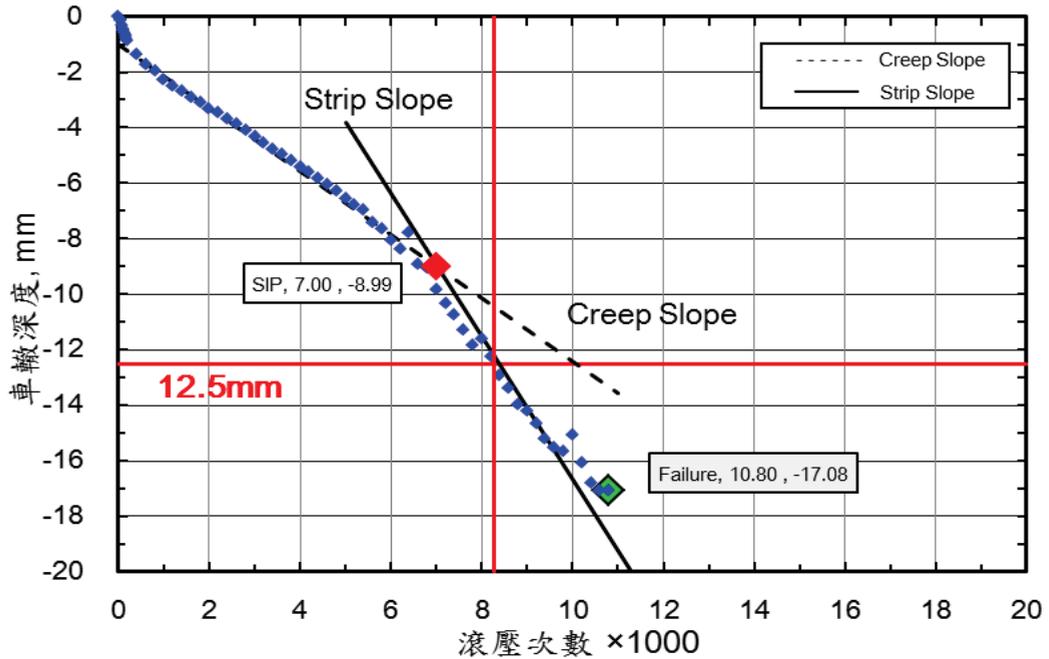


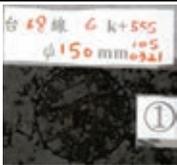
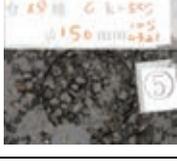
圖 36 漢堡車轍輪跡試驗結果 (40%-2)

附錄 2 瀝青磚沈陷結果與觀測相片矩陣表

表 22 工程 1 瀝青磚沈陷現地評估結果

| 試驗位置 | | 6k+555 | | | | | 14k+600 | | | | |
|-----------|------|--------------------------|---|---|----|---|---------|---|---|---|---|
| 點位 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 觀測日期 | 方向 | 單位 (mm) , +值代表下陷, -值代表上突 | | | | | | | | | |
| 105.02.18 | 車道順向 | 2 | 3 | 5 | 7 | 1 | 5 | 8 | 7 | 7 | 8 |
| | 車道橫向 | 1 | 4 | 2 | 4 | 1 | 6 | 7 | 5 | 7 | 6 |
| 105.03.21 | 車道順向 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 6 | 7 | 7 | 8 | 7 |
| | 車道橫向 | 5 | 6 | 4 | 6 | 3 | 7 | 8 | 7 | 8 | 6 |
| 105.05.20 | 車道順向 | 5 | 5 | 2 | 8 | 5 | 5 | 7 | 7 | 7 | 6 |
| | 車道橫向 | 7 | 7 | 2 | 8 | 5 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| 105.07.18 | 車道順向 | 6 | 5 | 4 | 9 | 6 | 5 | 7 | 8 | 6 | 6 |
| | 車道橫向 | 6 | 9 | 4 | 8 | 5 | 6 | 7 | 7 | 6 | 6 |
| 105.11.11 | 車道順向 | 6 | 5 | 5 | 8 | 7 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| | 車道橫向 | 6 | 6 | 5 | 10 | 5 | 6 | 6 | 5 | 7 | 6 |

表 23 工程 1 瀝青磚沈陷現地觀測相片矩陣表

| 日期 樁號 | 105.02.18 | 105.03.21 | 105.05.20 | 105.07.18 | 105.11.11 |
|----------|---|---|---|--|---|
| 6k+555-1 |  |  |  |  |  |
| 6k+555-2 |  |  |  |  |  |
| 6k+555-3 |  |  |  |  |  |
| 6k+555-4 |  |  |  |  |  |
| 6k+555-5 |  |  |  |  |  |

| 日期 樁號 | 105.02.18 | 105.03.21 | 105.05.20 | 105.07.18 | 105.11.11 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 14k+600-1 | | | | | |
| 14k+600-2 | | | | | |
| 14k+600-3 | | | | | |
| 14k+600-4 | | | | | |
| 14k+600-5 | | | | | |

表 24 工程 2 瀝青磚沈陷現地評估結果

| 試驗位置 | | 7k+050 | | | | | 7k+460 | | | | |
|-----------|------|-------------------------|---|---|---|---|--------|---|---|---|---|
| 點位 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 觀測日期 | 方向 | 單位 (mm), +值代表下陷, -值代表上突 | | | | | | | | | |
| 105.02.23 | 車道順向 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 0 |
| | 車道橫向 | 1 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 0 |
| 105.03.23 | 車道順向 | 2 | 3 | 1 | 5 | 5 | 3 | 1 | 2 | 3 | 0 |
| | 車道橫向 | 3 | 3 | 2 | 5 | 6 | 4 | 2 | 1 | 3 | 0 |
| 105.05.23 | 車道順向 | 2 | 3 | 1 | 5 | 5 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| | 車道橫向 | 4 | 4 | 2 | 5 | 6 | 4 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 105.08.03 | 車道順向 | 3 | 3 | 4 | 5 | 6 | 3 | 3 | 2 | 3 | 1 |
| | 車道橫向 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 |
| 105.10.26 | 車道順向 | 2 | 4 | 0 | 4 | 5 | 3 | 5 | 1 | 1 | 0 |
| | 車道橫向 | 2 | 3 | 1 | 3 | 4 | 3 | 5 | 1 | 2 | 2 |

表 25 工程 2 瀝青磚沈陷現地觀測相片矩陣表

| 日期 樁號 | 105.02.23 | 105.03.23 | 105.05.23 | 105.08.03 | 105.10.26 |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 7k+050 1 | | | | | |
| 7k+050 2 | | | | | |
| 7k+050 3 | | | | | |
| 7k+050 4 | | | | | |
| 7k+050 5 | | | | | |
| 7k+460 1 | | | | | |
| 7k+460 2 | | | | | |
| 7k+460 3 | | | | | |
| 7k+460 4 | | | | | |

表 26 工程 3 瀝青磚沈陷現地評估結果

| 試驗位置 | | 77k+100 | | | | | 77k+240 | | | | |
|-----------|------|--------------------------|---|---|---|---|---------|---|---|---|---|
| 點位 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 觀測日期 | 方向 | 單位 (mm) , +值代表下陷, -值代表上突 | | | | | | | | | |
| 105.03.01 | 車道順向 | 0 | 0 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 車道橫向 | 0 | 2 | 3 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 105.03.28 | 車道順向 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 4 | 3 | 2 |
| | 車道橫向 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 4 | 3 | 3 |
| 105.05.06 | 車道順向 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | 0 | 1 | 5 | 4 | 3 |
| | 車道橫向 | 0 | 0 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 | 5 | 3 | 3 |
| 105.07.14 | 車道順向 | 2 | 1 | 1 | 3 | 5 | 1 | 2 | 5 | 5 | 3 |
| | 車道橫向 | 3 | 1 | 3 | 4 | 5 | 2 | 3 | 6 | 5 | 4 |
| 105.10.06 | 車道順向 | 3 | 2 | 2 | 4 | 6 | 1 | 3 | 7 | 6 | 3 |
| | 車道橫向 | 3 | 1 | 3 | 5 | 5 | 1 | 5 | 7 | 6 | 4 |

表 27 工程 3 瀝青磚沈陷現地觀測相片矩陣表

| 日期 樁號 | 105.03.01 | 105.03.28 | 105.05.06 | 105.07.14 | 105.09.05 |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 77k+100 1 | | | | | |
| 77k+100 2 | | | | | |
| 77k+100 3 | | | | | |
| 77k+100 4 | | | | | |
| 77k+100 5 | | | | | |

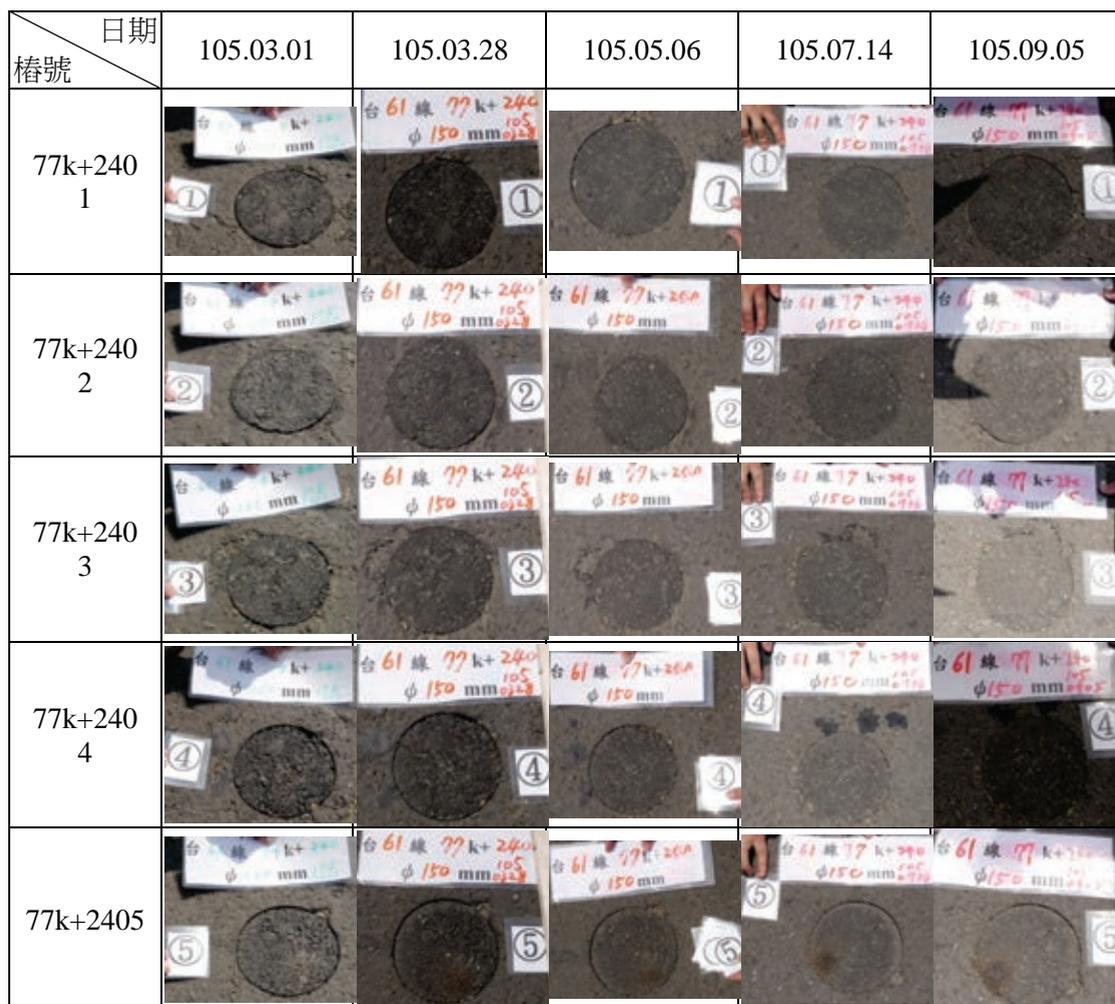


表 28 工程 4 瀝青磚沈陷現地評估結果

| 試驗位置 | | 35k+300 | | | | | 35k+400 | | | | |
|-----------|------|--------------------------|---|---|---|---|---------|---|---|---|---|
| 點位 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 觀測日期 | 方向 | 單位 (mm) , +值代表下陷, -值代表上突 | | | | | | | | | |
| 105.03.30 | 車道順向 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 車道橫向 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 1 | 1 | 2 |
| 105.05.13 | 車道順向 | 1 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 4 | 1 | 1 |
| | 車道橫向 | 3 | 0 | 2 | 1 | 2 | 0 | 3 | 1 | 1 | 2 |
| 105.07.15 | 車道順向 | 7 | 0 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| | 車道橫向 | 5 | 0 | 1 | 0 | 3 | 1 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 105.09.09 | 車道順向 | 7 | 0 | 1 | 1 | 3 | 0 | 4 | 3 | 2 | 3 |
| | 車道橫向 | 5 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 |

表 29 工程 4 瀝青磚沈陷現地觀測相片矩陣表

| 日期 樁號 | 105.03.30 | 105.05.13 | 105.07.15 | 105.09.09 |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 35k+300 1 | | | | |
| 35k+300 2 | | | | |
| 35k+300 3 | | | | |
| 35k+300 4 | | | | |
| 35k+300 5 | | | | |
| 35k+400 1 | | | | |
| 35k+400 2 | | | | |
| 35k+400 3 | | | | |
| 35k+400 4 | | | | |
| 35k+400 5 | | | | |

臺灣公路工程

出版者：臺灣公路工程月刊社

地 址：10863 臺北市萬華區東園街 65 號

電 話：(02)2307-0123 轉 8008

網 址：<http://www.thb.gov.tw/> 本局資訊 / 影音及出版品

編 者：臺灣公路工程編輯委員會

出版年月日：中華民國 108 年 1 月 15 日

創刊年月日：中華民國 41 年 11 月 11 日

刊期頻率：每月 15 日出刊

本期定價：新臺幣 30 元

展售處：

五南文化廣場

地 址：40042 臺中市中山路 6 號

電 話：(04)2226-0330

國家書店松江門市

地 址：10485 臺北市中山區松江路 209 號 1 樓

電 話：(02)2518-0207 (代表號)

國家網路書店：<http://www.govbook.com.tw>

三民書局

地 址：10045 臺北市重慶南路一段 61 號

電 話：(02)2361-7511

印刷者：先施印通股份有限公司

地 址：10491 臺北市中山區八德路二段 180 號

電 話：(02)8772-5566

中華民國 108 年 1 月初版一刷

GPN：2004100003

ISSN：1812-2868

著作財產權：交通部公路總局

本刊內容不代表本局意見，發表之文字如需轉載或引用
請先徵得本刊之同意。

(請洽臺灣公路工程月刊社，電話：(02)2307-0123 轉 8008)

半年新臺幣 150元
一年新臺幣 300元
軍人及學生半價優惠

訂閱匯款至中央銀行國庫局(代號0000022)
帳號(共14碼)：11297109095019
戶名：交通部公路總局其他雜項收入戶

ISSN 1812-2868



9 771812 286005

GPN200410003

定價新臺幣30元