

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis



雙效標線之長期績效與成本效益分析

Dual Performances Road Marking's

Long-term Inspection and Cost-effectiveness Analysis

董皓

Hao Tung

指導教授：周家蓓 教授

Advisor: Chia-Pei Chou, Ph.D.

中華民國 113 年 7 月

July 2024

誌謝



自兩年前加入周老師研究團隊之後，就展開了一系列的實驗與現地檢測。若是將實驗室比喻成一輛汽車，老師就像是駕駛輔助系統，在研究的路上提供導航且適時地警示提醒，而同學們就是四顆輪胎，在一定的胎壓壓力之下持續地滾動學習，讀萬卷書亦行萬里路。

而看似平凡的道路標線，卻須經過眾多的努力方能發揮兼顧反光與抗滑之非凡成效。從最初在士林至善路的小範圍雙效標線試辦，到臺大水源校區停車場、校總區小椰林道與森林系館、竹北校區驗證道路的多次材料配比實驗，再選擇紹興南街、陽金公路、天母忠誠路做為不同路段之擴大試辦，甚至是土木系館頂樓的標線試片。每一次的標線劃設，都須經由多次的材料測試與劃線機調整，以及眾多且繁瑣的細節規劃與溝通。劃設完成後更是需要透過長期的追蹤，經過無數的烈日當頭與披星戴月的現地檢測，才得以掌握標線材料的性能，並且歸納結果作為下次實驗基礎，再持續地展開往後的研究。

回首這兩年的研究里程，無非要誠摯地感謝周老師基於學術專業仔細地指導與提點、諸位老師們集畢生所學的傳道授業、行政助理與系辦人員不厭其煩地協助庶務處理、共同挺過各式各樣實驗的學姐與學弟們、煜盛團隊不遺餘力地傾囊協助、臺北市新工處的計劃支持、磐碩營造與勇順營造的百般配合，以及女友楊喻幘的日常扶持與包容，集結這一路上眾人的努力與付出，方能成就本篇碩士論文順利完成。不僅由衷地謝謝這段期間各種難能可貴的機會，以及各路好手的鼎力相助，讓我這兩年能入寶山而滿載而歸，同時感謝這些充實且愉快的研究經驗，亦樂見日後能有更多的交流與合作，攜手攀登再創高峰。

摘要

道路標線作為交通工程中至關重要的一環，主要負責指示、警告與禁制之管制交通目的，不僅能發揮反光性能清楚地提供道路資訊，同時也能保持抗滑性能避免用路人打滑，眾多研究亦指出良好的標線能有效降低交通事故數，顯示標線對於道路交通安全至關重要。然而因標線之反光與抗滑性能係分別仰賴玻璃珠與抗滑骨材等不同材料機制，兩者在性能表現上又存有物理性質之互制關係，故縱觀國內外皆鮮少有同時兼顧反光與抗滑之雙效標線研究。

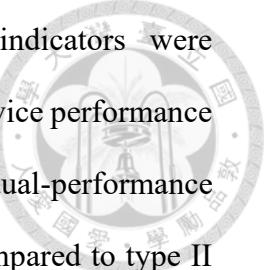
為此本研究之研究目的係力求標線能兼顧優異的反光與抗滑雙性能表現，基於多次標線材料配比實驗，確定雙效標線甲料與乙料之內摻與外撒材料配比，於市區道路現地劃設並展開為期十二個月之回歸反射 RL、擴散反射 Qd、抗滑係數 BPN 標線性能長期追蹤檢測。研究結果顯示等比例混合料外撒之甲料不但保有充分的抗滑性能($BPN \geq 50$)，更具有亮眼的反光性能($RL \geq 300 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)；而前後各自撒佈玻璃珠與抗滑骨材的乙料亦有良好的反光表現($RL \geq 200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)，抗滑表現甚至與僅注重高抗滑之 II 型標線相當($BPN \geq 55$)。同時根據國內外標線規範回顧與實驗數據支持，提出施工驗收與維護標準標線性能建議門檻。進而規劃標線試片外撒量成效實驗，隨著使用材料與外撒量變換分析其雙性能之成效差異與材料經濟性，作為日後標線材料之選擇建議。此外本研究亦建立標線性能指標作為標線性能之等級區分，並依照不同使用情境之性能需求評量標線之服務績效，得知雙效標線甲、乙料不論在日間或夜間、乾燥或多雨都能較一般 II 型標線提供更佳的服務績效。關於成本效益部分，雙效標線在郊區道路缺乏照明之環境中展露突出的反光性能，克服成本劣勢達到更佳的成本效益，可作為後續標線材料之推廣應用，以此提升道路標線之服務水準落實道路交通安全之目的。

關鍵字：標線性能規範、雙效性能、回歸反射輝度係數 RL、英式擺錘抗滑係數 BPN、服務績效、成本效益分析

ABSTRACT

Road markings play a key role of traffic engineering and perform crucial functions such as directing, warning, and regulating traffic. They provide vital road information through their reflective properties and ensure safety by preventing skidding. Numerous studies have shown that well-maintained road markings significantly reduce traffic accidents. However, achieving both high reflectivity and skid resistance in road markings presents a challenge due to the conflict between glass beads and anti-skid aggregates that enhance reflectivity and skid resistance, respectively. Therefore, very few research findings addressed this area.

The objective of this study is to develop dual-performance thermoplastic road markings that offer superior reflectivity and skid resistance simultaneously. Through extensive material proportion experiments, two types of dual-performance marking materials, Types A and B, were identified. These markings were applied on urban roads and subjected to 12 months data collection along with the conventional type II thermoplastic marking. The coefficient of retroreflected luminance (RL), luminance coefficient under diffuse illumination (Qd), and skid resistance (BPN) were assessed. The results indicate that Type A, characterized by an equal mix of materials applied externally, maintained adequate skid resistance ($BPN \geq 50$) and exhibited remarkable reflectivity ($RL \geq 300 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$) after serving 1 year. Type B, which involved the sequential application of glass beads and anti-skid aggregates, demonstrated great reflectivity ($RL \geq 200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$) and outstanding skid resistance ($BPN \geq 55$) which is even better than type II markings. Based on a comprehensive review of international standards and experimental data, threshold values for construction acceptance and maintenance were also proposed in this research. Additionally, experimental factor designs on the drop-on materials were conducted. The findings provide valuable



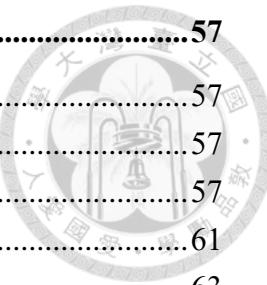
information for future road markings selection. Performance indicators were established to classify road marking performance levels, assessing service performance according to different usage scenarios. The research revealed that dual-performance Type A and Type B markings offer superior service performance compared to type II markings under various environment conditions. Through cost-effectiveness analysis, dual-performance markings showcased outstanding reflectivity in area with insufficient street lights, such as country roads, even their unit costs are higher than type II markings. It indicates that dual-performance markings are a viable option for widespread application, aiming to enhance the service level of road markings and ultimately improve road traffic safety. The proposed materials and application methods present a practical approach for maintaining markings' high performances under diverse conditions.

Keywords: *Road Marking performance specifications , Dual-Performance, Coefficient of Retroreflected Luminance(RL), British Pendulum Number(BPN), Serviceability Performance, Cost Effectiveness*

目次



誌謝.....	i
摘要.....	ii
ABSTRACT	iii
圖次.....	vii
表次.....	x
第一章、緒論	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 研究內容與方法.....	2
1.3 研究流程.....	3
第二章、文獻回顧	5
2.1 我國標線相關規範檢視.....	5
2.2 各國標線規範回顧.....	11
2.2.1 各國標線反光性能規範.....	11
2.2.2 各國標線抗滑性能規範.....	15
2.3 國內外標線規範比較.....	17
2.4 道路安全與標線性能回顧.....	19
2.5 小結.....	22
第三章、研究方法	23
3.1 標線性能檢測方法.....	23
3.1.1 標線反光性能檢測.....	23
3.1.2 標線抗滑性能檢測.....	25
3.1.3 標線檢測點位選擇.....	27
3.2 現地雙效標線劃設實驗.....	28
3.2.1 標線材料配比實驗.....	28
3.2.1.1 內摻材料之配比設計經驗.....	28
3.2.1.2 臺大水源校區配比實驗及追蹤檢測成果.....	30
3.2.1.3 臺大校總區配比實驗及追蹤檢測成果.....	36
3.2.1.4 臺大竹北校區配比實驗及追蹤檢測成果.....	41
3.2.2 現地劃設之雙效標線材料配比說明.....	44
3.2.3 雙效標線現地劃設規劃.....	46
3.3 標線試片外撒量成效實驗.....	50
3.3.1 標線試片之外撒量設計.....	50
3.3.2 外撒儀器與試片劃設步驟.....	53



第四章、實驗數據收集與分析	57
4.1 現地雙效標線之長期追蹤成果.....	57
4.1.1 各標線配比材料檢測數據分析.....	57
4.1.1.1 標線回歸反射係數 RL 分析	57
4.1.1.2 標線擴散反射係數 Qd 分析.....	61
4.1.1.3 標線抗滑性能 BPN 分析.....	63
4.1.2 標線性能綜合比較與建議.....	66
4.2 標線外撒量成效之實驗結果.....	75
4.2.1 標線試片密集檢測性能變化探討.....	75
4.2.2 標線性能與外撒量迴歸分析與驗證.....	80
第五章、研究結果探討與應用	85
5.1 道路標線性能指標建立.....	85
5.2 標線服務績效分析.....	90
5.2.1 標線使用情境之權重設定.....	90
5.2.2 標線服務績效比較.....	92
5.3 標線成本效益探討.....	98
5.3.1 標線成本界定與計算.....	98
5.3.2 標線成本效益定義.....	100
第六章、結論與建議	104
6.1 結論.....	104
6.2 建議.....	106
參考文獻.....	107

圖次



圖 1.1 研究流程圖.....	4
圖 2.1 雙效標線之關鍵詞文字雲分析(GRB 政府研究資訊系統).....	5
圖 2.2 白色標線(新繪)之反光性能規範統計百分比	14
圖 2.3 白色標線(維護)之反光性能規範統計百分比	14
圖 2.4 黃色標線(新繪)之反光性能規範統計百分比	15
圖 2.5 黃色標線(維護)之反光性能規範統計百分比	15
圖 2.5 標線抗滑性能規範統計百分比.....	16
圖 2.6 各國家每千人擁有機車數量.....	18
圖 2.7 白色標線長期維護之反光與抗滑性能規範總覽.....	19
圖 3.1 標線反光性能之回歸反射(RL)與擴散反射(QD)示意圖	23
圖 3.2 ZEHNTHER ZRM 6014 反光檢測儀器照片	25
圖 3.3 ZEHNTHER ZRM 6014 反光檢測操作照片	25
圖 3.4 CONTROLS 英式擺錘抗滑實驗儀照片	26
圖 3.5 CONTROLS 英式擺錘抗滑實驗儀檢測操作照片	27
圖 3.6 ASTM D7585/D7585M-10 判定評估準則流程圖	27
圖 3.7 內摻玻璃珠之粒徑分析.....	30
圖 3.8 滾軸式雙外撒劃線機.....	31
圖 3.9 臺大水源校區各配比劃設位置.....	33
圖 3.10 臺大水源校區大客車停車格標線.....	33
圖 3.11 各材料粒徑篩分析結果.....	34
圖 3.12 水源校區標線反光性能追蹤.....	35
圖 3.13 水源校區標線抗滑性能追蹤.....	35
圖 3.14 臺大校總區減速標線.....	37
圖 3.15 臺大校總區標線反光性能追蹤.....	40
圖 3.16 臺大校總區標線抗滑性能追蹤.....	40
圖 3.17 臺大竹北校區平坦度驗證實驗道路標線.....	41
圖 3.18 竹北校區標線反光性能追蹤.....	43



圖 3.19 竹北校區標線抗滑性能追蹤.....	44
圖 3.20 現地雙效標線劃設之聚酯出料口與雙外撒示意圖.....	45
圖 3.21 紹興南街交通量觀測.....	47
圖 3.22 紹興南街早晨尖峰交通量資料.....	47
圖 3.23 紹興南街現地雙效標線劃設.....	48
圖 3.24 各類標線之施工劃設位置.....	49
圖 3.25 紹興南街各標線材料之佈置規劃.....	49
圖 3.26 外撒儀器外觀.....	53
圖 3.27 減速齒輪與電動馬達(左)、可變電阻器與儀器控制器(右).....	53
圖 3.28 標線試片劃設步驟說明圖.....	56
圖 3.29 標線試片之放置環境.....	56
圖 4.1 甲料、乙料、II 型標線施工當天至第十二個月之 RL 性能分佈.....	58
圖 4.2 紹興南街行穿線反光效果之視覺差異對比.....	59
圖 4.3 標線表面因路口鄰近搶修工程施工受汙之結果.....	59
圖 4.4 紹興南街機車停等區反光效果之視覺差異對比.....	60
圖 4.5 紹興南街各標線材料之反光性能比較.....	61
圖 4.6 甲料、乙料、II 型標線施工當天至第十二個月之 QD 性能分佈.....	62
圖 4.7 標線反光 QD 與環境降雨關係圖.....	63
圖 4.8 甲料、乙料、II 型標線施工當天至第十二個月之 BPN 性能分佈.....	64
圖 4.9 甲料歷時一年之性能變化趨勢圖.....	67
圖 4.10 甲料標線表面之狀態變化.....	67
圖 4.11 乙料歷時一年之性能變化趨勢圖.....	69
圖 4.12 乙料標線表面之狀態變化.....	69
圖 4.13 II 型標線歷時一年之性能變化趨勢圖.....	70
圖 4.14 II 型標線表面之狀態變化.....	70
圖 4.15 紹興南街各標線反光 RL 綜合比較.....	72
圖 4.16 紹興南街各標線反光 QD 綜合比較.....	72
圖 4.17 紹興南街各標線抗滑 BPN 綜合比較.....	73
圖 4.18 各標線材料之雙性能分佈圖.....	74



圖 4.19 車載鏡頭拍攝之標線反光效果.....	74
圖 4.20 標線試片 A 料、B 料之反光 RL 性能.....	76
圖 4.21 標線試片 A 料、B 料之反光 QD 性能	77
圖 4.22 標線試片 A 料、B 料之抗滑 BPN 性能	77
圖 4.23 標線試片 C 料、D 料、E 料之反光 RL 性能	79
圖 4.24 標線試片 C 料、D 料、E 料之反光 QD 性能.....	79
圖 4.25 標線試片 C 料、D 料、E 料之抗滑 BPN 性能.....	79
圖 4.26 標線試片之 RL 檢測與迴歸比較圖	81
圖 4.27 標線試片之 RL 檢測與迴歸誤差圖	81
圖 4.28 標線試片之 RL 檢測與迴歸相關性圖	82
圖 4.29 標線試片之 QD 檢測與迴歸比較圖	82
圖 4.30 標線試片之 QD 回歸誤差圖	83
圖 4.31 標線試片之 QD 檢測與迴歸相關性圖	83
圖 4.32 標線試片之 BPN 檢測與迴歸比較圖	84
圖 4.33 標線試片之 BPN 檢測與迴歸誤差圖	84
圖 4.34 標線試片之 BPN 檢測與迴歸相關性圖	84
圖 5.1 標線服務績效與成本效益分析模式架構.....	85
圖 5.2 標線性能總指標(MPI_{TOTAL})分級(以紹興南街現地標線實驗為例).....	89
圖 5.3 標線服務績效計算說明.....	94
圖 5.4 各標線材料之服務績效(MSP)比較	97
圖 5.5 各標線材料之成本效益(MCE)比較	102

表次



表 2.1 CNS15834 乾燥標線回歸反射 RL 分級與對應最低值.....	6
表 2.2 CNS15834 乾燥標線擴散反射 QD 分級與對應最低值.....	6
表 2.3 CNS15834 標線抗滑性能 BPN(SRT)分級與對應最低值	7
表 2.4 CNS 1333 道路標線塗料分類.....	7
表 2.5 CNS 4342 玻璃珠材料品質要求.....	8
表 2.6 我國各直轄市之熱處理聚酯標線相關規範比較.....	9
表 2.7 我國各縣市與道路主管機關之熱處理聚酯標線相關規範比較.....	10
表 2.8 各國標線反光性能規範.....	11
表 2.9 各國標線抗滑 BPN(SRT)基準值之規範.....	16
表 3.1 臺大水源校區八種外撒材料配比設計.....	32
表 3.2 臺大校總區六種外撒材料配比設計.....	37
表 3.3 臺大竹北校區四種外撒材料配比設計.....	42
表 3.4 現地雙效標線劃設之甲、乙料材料配比.....	46
表 3.5 標線試片外撒量實驗配比(A 料、B 料)	51
表 3.6 標線試片外撒量實驗配比(C 料、D 料、E 料).....	52
表 3.7 外撒儀器之外撒量調整結果.....	55
表 4.1 標線各時間 BPN 性能差異百分比.....	65
表 4.2 白色標線性能規範建議.....	71
表 4.3 各項性能迴歸分析結果.....	80
表 5.1 標線性能指標(MPI)計算	86
表 5.2 各時間階段標線性能指標(MPI)變化表	87
表 5.3 各道路分類之照度(LUX)標準.....	91
表 5.4 道路標線使用情境權重設定.....	92
表 5.5 雙效標線甲料之性能指標試算.....	95
表 5.6 雙效標線甲料各使用情境之性能指標試算.....	95
表 5.7 標線服務績效試算(多雨有照明).....	95
表 5.8 標線服務績效試算(多雨無照明).....	96



表 5.9 標線服務績效試算(少雨有照明).....	96
表 5.10 標線服務績效試算(少雨無照明).....	96
表 5.11 標線成本計算表(參考臺北市政府近三年標線工程預算).....	99
表 5.12 標線成本效益試算(多雨有照明).....	101
表 5.13 標線成本效益試算(多雨無照明).....	101
表 5.14 標線成本效益試算(少雨有照明).....	101
表 5.15 標線成本效益試算(少雨無照明).....	102
表 5.16 四種情境下之雙效標線單價競爭力分析.....	103

第一章、緒論



1.1 研究動機與目的

根據我國交通部的全國歷年事故總數統計資料，臺灣近三年之交通事故總數正呈現逐年攀升的狀態，甚至於去年民國 112 年達到歷史新高 402,926 件[1]。平均每百萬人之死傷數也較其他已開發國家如：美國、日本、德國等高出許多，再加上因交通事故導致的附加財損儼然是一筆可觀的支出。雖然交通事故經常是由複雜的原因導致而成，但不可諱言地此現象亦顯示出交通工程與交通安全議題迫在眉睫之重要性。其中，道路標線身為交通工程中至關重要的一環，主要負責指示、警告與禁制之管制交通目的，不僅能有效地劃分車道範圍與引導交通車流，並可作為相關執法依據。

依據我國交通工程規範[2]，明訂道路標線宜具備反光與抗滑兩種性能，方能確保無論在日間或夜間、乾燥或潮濕的條件之下標線都能有效地發揮功能。首先，在標線的反光性能部分，係藉由標線在車燈照射下之反射功能達到良好的識別效果，讓用路人可以明確且迅速地掌握道路方向與資訊，擁有更加充分的反應時間應變道路狀況。近年來隨著車輛自動化駕駛的機器視覺技術發展，為了能使自駕車於行駛過程中清晰地辨識標線做出判斷，反光性能也更顯重要。接著，在標線的抗滑性能部分，則是利用標線表面材質提供適當的摩擦特性，以此維護車輛的行駛安全；特別預防摩托車、自行車、行人在潮濕狀態下行經時打滑之交通安全風險。尤其我國以及其他二輪車輛使用頻繁之國家或區域，皆須格外注意標線長期的抗滑性能是否仍符合規範所要求之標準。

然而，回顧眾多先進國家不僅對於新劃設標線訂定回歸反射輝度係數 RL 的反光性能驗收標準，也對於標線的抗滑性能設定標準，並具體提出標線的長期養護建議門檻值。但是若進一步細觀我國道路標線規範，至今為止均與其他國際標準相去甚遠。雖然我國的標線規範已要求玻璃珠折射率、粒徑尺寸與含量為依據但卻未見對回歸反射係數 RL 訂定相關的驗收要求，反而大多聚焦於標線施工完

成後 14 天內的抗滑 BPN 數值是否符合標準，僅追求單效且短期的標線性能，相對缺乏標線反光性能的雙效長期維護之注重。此外，因標線之反光與抗滑性能係分別仰賴玻璃珠與抗滑骨材等不同材料機制，兩者在性能表現上又存有物理性質上之互制關係，故縱觀國內外皆鮮少有同時兼顧反光與抗滑之雙性能標線研究。

為此本研究之研究目的除了持續探討雙效標線之內摻與外撒材料的配比設計，力求標線能兼顧優異的反光與抗滑雙性能表現。期能提出具經濟性之雙效標線配比設計，在績效表現部分預期長期 12 個月使用後，反光回歸反射 RL 性能可達 100 (mcd/m²/lx)以上，抗滑性能則符合 BPN 50 之要求。同時也預期透過長時間固定周期的標線性能追蹤檢測，實際掌握標線於各階段的性能表現與變化，並提出合適的標線完工後驗收日期與建議的維護門檻性能標準。

此外本研究也期望利用各式外撒材料搭配不同外撒量的標線試片，分析外撒材料之成效表現差異與材料經濟性，並且根據實際道路環境之標線性能需求，建置標線服務績效與成本效益分析模式。冀藉由雙效標線的眾多實驗與長期追蹤，提供標線夜間可視性之同時，亦兼具抗滑能力以降低用路人打滑之風險，以此提升整體道路標線的服務品質，並落實道路交通安全之目的。

1.2 研究內容與方法

為了達到前述之研究目的，本研究之內容與方法主要可分為四大部分，依序如下方列點說明：

1. 標線國內外規範與相關文獻回顧：

檢視我國標線規範與驗收標準，並蒐集各個國家對於標線性能之初始與維護標準，進行綜合歸納與比較，並回顧其他道路交通安全與標線性能之研究，作為本研究之參考依據。

2. 雙效標線之現地劃設與追蹤檢測：

經由多次的標線雙效標線材料配比實驗，確定配比具備良好的反光與抗滑性能、重現性。實際於紹興南街進行現地劃設實驗，展開為期一年的

檢測追蹤，洞察其性能數據變化與成因。並根據實驗檢測數據提出合適的標線性能規範。



3. 標線試片外撒量成效實驗與分析：

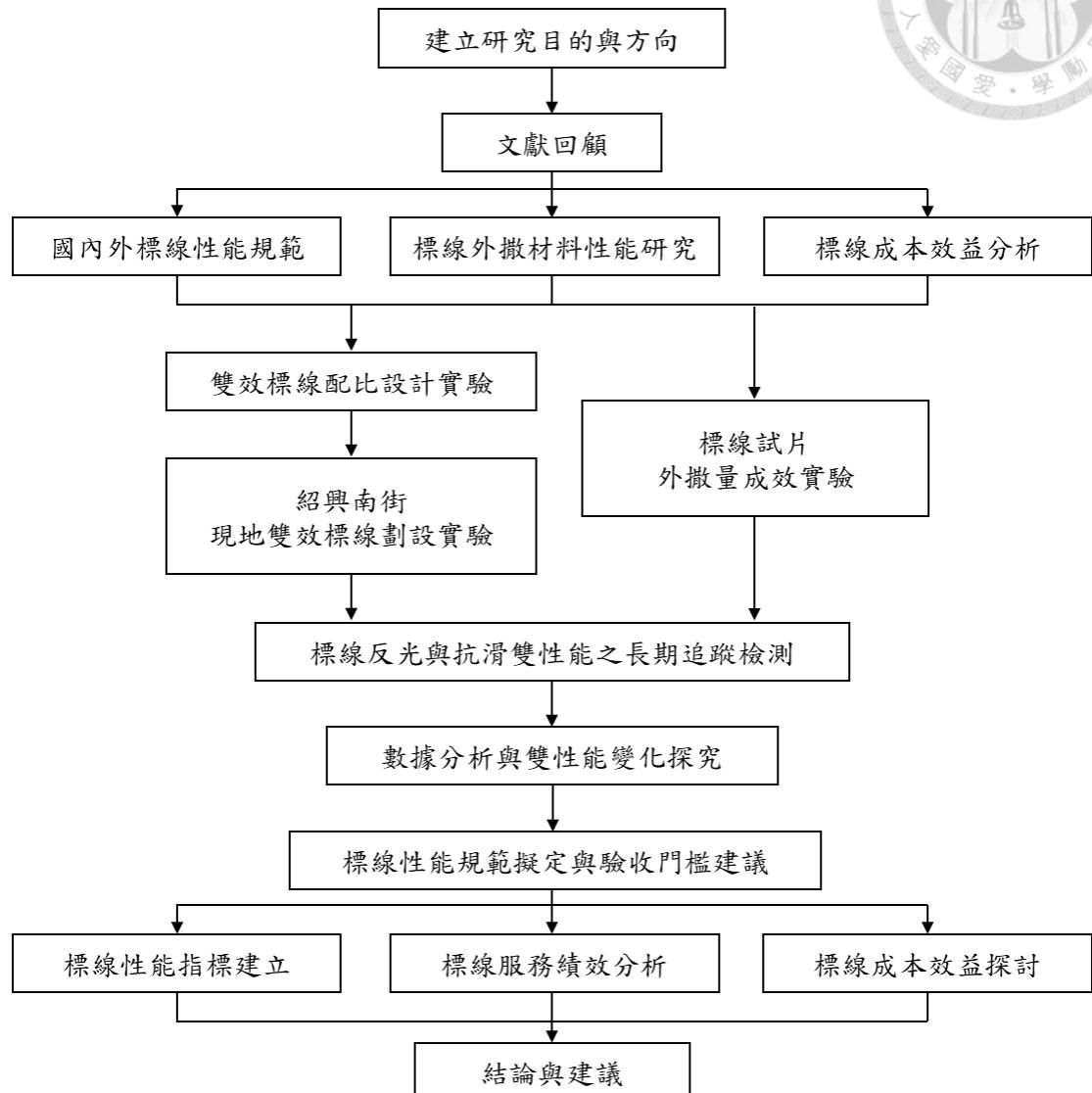
在實驗室內製作經設計過的標線外撒材料之標線試片，透過檢測掌握各種標線外撒材料之不同外撒量對於反光與抗滑性能之成效，研究標線外撒材料使用之材料經濟性。並進一步根據標線試片之實驗結果進行外撒材料性能之迴歸分析，探討不同外撒材料對於標線之性能成效影響。

4. 標線服務績效與成本效益分析模式：

根據標線性能建置性能指標，並以實際不同道路環境下對於標線的性能需求，對標線各項性能設置不同的權重因子，評量道路標線服務績效。同時計算標線成本，進行標線成本效益分析，作為不同標線材料之客觀比較依據。

1.3 研究流程

本研究經由第一章確立研究目的與方法後，於第二章進行標線相關文獻與規範回顧；並在第三章進行研究方法說明，分別是標線性能追蹤檢測方法、現地雙效標線劃設實驗、標線試片外撒量成效實驗；第四章則根據現地雙效標線與標線試片之長期檢測追蹤，進行實驗數據分析與雙性能變化探究，以及後續的標線性能規範標準與工程驗收建議；第五章為研究結果探討與應用，以標線績效分析模式為主包含標線性能指標建立、服務績效比較、成本效益分析；最後第六章將綜合上述研究彙整結論與建議。而本研究之詳細研究流程圖如下頁圖 1.1 所示。



第二章、文獻回顧



為能掌握有關標線性能近期之研究動態[3] (圖 2.1)，以及世界各國對於道路標現性能之規範要求，將於本章先行檢視我國現行之標線相關規範，並且蒐集各個國家之標線反光與抗滑性能規範，檢視標線雙性能規範之異同，比較標線成效規範之優劣。同時回顧道路安全與標線性能之相關研究，針對實驗設計與成果進行討論，以此提升本研究後續研究方法與研究結果之應用價值。



圖 2.1 雙效標線之關鍵詞文字雲分析(GRB 政府研究資訊系統)

2.1 我國標線相關規範檢視

回顧我國國家標準 CNS15834 道路標線使用性能[4]已於民國 104 年制定並提出標線回歸反射 RL、擴散反射 Qd、抗滑性能 BPN(SRT)之分級標準與對應之最低數值，本研究重新繪製於下方表 2.1、表 2.2、表 2.3。在回歸反射 RL 部分分為 R1 到 R5 五個等級，且因為白色標線之反光性能較黃色為優，所以白色標線之回歸反射基礎等級由 R2 ($\geq 100 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$) 開始到 R5($\geq 300 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)；而黃色標線則由 R1($\geq 80 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$) 至 R4($\geq 200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)。至於無測出性能是指標線本身無需具備性能要求，如一般停車格標線等。擴散反射則因標線的顏色與鋪面顏色的對比度差異，分為瀝青混凝土鋪面與水泥混凝土鋪面兩類，數值範圍從 80 到 200($\text{mcd/m}^2/\text{lx}$) 分為 Q1 到 Q5 等級。一般而言，白色標線的 Qd 均較黃色標線要求略高。至於攸關車輛打滑風險之標線抗滑性能，包含無測出性能及 BPN(SRT) 45(S1) 到 BPN(SRT) 65(S5)，共分為五級。依照上述三種標線性能分級標準，建議標線在不同條件下應具備之性能成效。

表 2.1 CNS15834 乾燥標線回歸反射 RL 分級與對應最低值

等級	乾燥標線最低回歸反射輝度係數 R_L ($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)		
	永久性		暫時性
	白色	黃色	
R0	無測出性能	無測出性能	無測出性能
R1	-	$R_L \geq 80$	-
R2	$R_L \geq 100$	-	-
R3	$R_L \geq 150$	$R_L \geq 150$	$R_L \geq 150$
R4	$R_L \geq 200$	$R_L \geq 200$	-
R5	$R_L \geq 300$	-	$R_L \geq 300$

表 2.2 CNS15834 乾燥標線擴散反射 Qd 分級與對應最低值

等級	乾燥標線擴散照明下之輝度係數 Qd 最低值 ($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)		
	白色		黃色
	瀝青混凝土	水泥混凝土	
Q0	無測出性能	無測出性能	無測出性能
Q1	-	-	$Qd \geq 80$
Q2	$Qd \geq 100$	-	$Qd \geq 100$
Q3	$Qd \geq 130$	$Qd \geq 130$	$Qd \geq 130$
Q4	$Qd \geq 160$	$Qd \geq 160$	-
Q5	-	$Qd \geq 200$	-

表 2.3 CNS15834 標線抗滑性能 BPN(SRT)分級與對應最低值

等級	BPN(SRT)數值
S0	無測出性能
S1	BPN ≥ 45
S2	BPN ≥ 50
S3	BPN ≥ 55
S4	BPN ≥ 60
S5	BPN ≥ 65

而有關我國標線材料相關規範，則可依照材料內容參考 CNS1333[5]道路標線塗料、CNS4342 [6]交通反光標誌用玻璃珠兩大規範。在 CNS1333 中依照標線塗料的施工方法、材料狀態、稀釋劑進行分類(表 2.4)，並且針對標線塗料之密度、黏度、軟化點、附著性、塗膜外觀、顏色與輝度、耐磨耗性、壓縮強度、玻璃珠含量等項目訂出詳細的材料規範；而在 CNS4342 中則對標線所使用之玻璃珠比重、粒度、外觀、折射率、耐水性、金屬含量進行完整的材料品質規範，如下表 2.5。根據以上兩種標線材料規範，提供道路標線可使用之材料選擇。

表 2.4 CNS 1333 道路標線塗料分類

種類		玻璃珠含量 (重量百分比)	施工方法	狀態	稀釋劑
第一種	A	-	常溫施工	液體	水
	B	-			有機溶劑
第二種	A	-	加熱施工	粉體	水
	B	-			有機溶劑
第三種	1 號	15 至未滿 20	熱熔施工	粉體	-
	2 號	20 至未滿 25			-
	3 號	25 以上			-

表 2.5 CNS 4342 玻璃珠材料品質要求

項目	種類							
	第 1 類		第 2 類		第 3 類			
比重	2.4 ~ 4.5							
粒度	試驗篩 標稱孔寬 (μm)	質量 百分比 (%)	試驗篩 標稱孔 寬(μm)	質量 百分比 (%)	試驗篩 標稱孔 寬(μm)	質量 百分比 (%)		
	>850	0	>600	0	>212	0		
	850~600	5~30	600~300	40~90	<90	0~4		
	600~300	30~80						
	300~106	10~40						
	<106	0~5						
外觀	外觀應為透明圓球狀，如有橢圓、銳角、不透明、珠粒融結及摻含異物，均視為瑕疵，瑕疵比率以個數計，須在 20% 以下。							
折射率	I 級	$1.50 \leq RI < 1.70$						
	II 級	$1.70 \leq RI < 1.90$						
	III 級	$RI \geq 1.90$						
耐水性	玻璃珠表面不得呈現霧面現象，且所使用 0.01 N 氢氯酸 (HCl) 之滴定消耗量，第 1 類及第 2 類為 10.0 mL 以下，第 3 類為 15.0 mL 以下。							
砷、鉛、錫 含量	0 級	無要求						
	1 級	個別為 200 mg/kg 以下						

此外，本研究進一步檢視我國直轄市、各縣市政府、道路主管機關之標線施工說明書與工程規範，整理製作如下表 2.6 及表 2.7。由表格內容可發現我國現行之標線規範大多根據 CNS 15834 的抗滑性能標準，選擇標線抗滑數值 BPN 之某等級作為道路標線工程施工後兩周的性能驗收標準，並以 CNS 1333、CNS 4342 規定道路標線塗料、熱拌聚酯、玻璃珠材料之使用材料。導致我國多數標線雖符合標線之熱拌聚酯、玻璃珠等材料規範，但只單方面重視標線施工後驗收時的抗滑性能，忽視標線應同時提供之反光性能，顯得僅注重短期且單效之標線性能，對道路標線應發揮之完整道路交通功能形成隱憂。



表 2.6 我國各直轄市之熱處理聚酯標線相關規範比較

	新北市	臺北市	臺中市	桃園市	臺南市	高雄市
道路標線 塗料種類	CNS 1333 第3種第3號	CNS 1333 第3種第1號	I型：第3種第3號 II型：第3種第2號	參照 CNS 1333	參照 CNS 1333	參照 CNS 1333
熱處理聚酯 材料規格	參照 CNS 1333 比重： < 2.3 ；軟化點： > 80 ；壓縮強度： $> 0.802\text{kN/cm}^2$ ；耐磨耗性(每100轉)：損耗 $< 200\text{mg}$					
玻璃珠品質	CNS 4342 第1類					
玻璃珠含量 (重量百分比)	I型：25%以上 II型：18%以上	18%以上 外撒 160g/m^2	I型：30%以上 II型：18%以上 外撒 160g/m^2	30%以上 均勻外撒	30%以上 均勻外撒	30%以上 每公尺長度內， 以每 10cm 寬使 用 16g 玻璃珠
玻璃珠折射率	參照 CNS 4342	$\text{RI} \geq 1.50$	$1.50 \leq \text{RI} \leq 1.64$	參照 CNS 4342	參照 CNS 4342	$1.50 \leq \text{RI} \leq 1.64$
標線抗滑性能 (BPN)	I型：2周內檢測值達45以上 II型：2周內檢測值達65以 上，2周至1年內達45以上	2周內檢測值 達65以上	I型：2周內檢測值 達45以上 II型：2周內檢測 值達65以上	2周內檢測值 達50以上	2周內檢測值 達50以上	2周內檢測值 達50以上



表 2.7 我國各縣市與道路主管機關之熱處理聚酯標線相關規範比較

	宜蘭縣	嘉義市	南投縣	屏東縣	公路總局	高速公路局
道路標線 塗料種類	參照 CNS 1333	參照 CNS 1333	參照 CNS 1333	參照 CNS 1333	參照 CNS 1333	CNS1333 第3種
熱處理聚酯 材料規格	參照 CNS 1333 比重： < 2.3 ；軟化點： > 80 ； 壓縮強度： $> 0.802\text{kN/cm}^2$ ； 耐磨耗性(每100轉)：損耗 $< 200\text{mg}$					
玻璃珠品質	CNS 4342 第1類					
玻璃珠含量 (重量百分比)	30%以上 每公尺長度內，以每 10cm 寬使用16g 玻璃珠	18%以上 均勻外撒	30%以上、 外撒 160g/m^2	30%以上	30%以上 每公尺長度內， 以每10cm 寬使 用16g 玻璃珠	30%以上、 外撒 160g/m^2
玻璃珠折射率	參照 CNS4342					
標線抗滑性能 (BPN)	市區道路65 BPN、 非市區道路 介於50至65 BPN	2周內檢測值 達50以上	2周內檢測值 達50以上	2周內檢測值 達65以上	2周內檢測值 達50以上	2周內檢測值 達45以上



2.2 各國標線規範回顧

2.2.1 各國標線反光性能規範

為能全面了解各國對於道路標線反光性能之實際要求，本研究盡可能地蒐集 24 個國家/地區的標線反光性能規範，並列出各自基於不同的標線顏色、交通量、道路速限、道路等級，以及新繪與維護等條件下，道路標線應具備之乾燥回歸反射係數 RL 數值，詳細內容整理如下方表 2.8 所示。至於潮濕環境下標線所需具備之回歸反射係數 RLwet，則多數規範均未作要求。

表 2.8 各國標線反光性能規範

各國規範	反光規範內容	乾燥RL (mcd/m ² /lx) 數值標準				
			等級 1	等級 2	等級 3	維護
ASTM D7942-15 (2023) [7]	RL 新繪及 維護下限值	白	300	450	800	150
		黃	200	350	525	125
			限速			
MUTCD Manual on Uniform Traffic Control Devices 美國交通管制設 施標準手冊 [8]	RL 維護下限值		$\geq 56 \text{ kph}$		$\geq 113 \text{ kph}$	
		>6000	50		100	
		AADT				
紐西蘭 [9]	RL 維護下限值	AADT	200 - 1000	1000 - 5000	>5000	
		白	100	100	150	
英國 [10]	乾燥 RL 下限性能等級		一般道路		高速公路	
		白	150		150	
		黃	150		150	
東、中西日本高 道路株式會社標 線施工管理要領 [11]	初期 RL 下值限、 耐磨耗性 RL 值	初期：白 150 、 黃 90 經磨耗儀 180 分鐘後：65				

希臘 [12]	新繪、維護 乾燥 RL	白	新繪	維護
			200	100
巴西 [13]	新繪、維護 乾燥 RL	新繪	維護	
		白	250	100
		黃	150	80
中國 [14]	新繪、維護 乾燥 RL	新繪	維護	
		白	150	80
		黃	100	50
香港 [15]	新繪乾燥 RL 下限性能等級	新繪白色：100 、 新繪黃色：80		
北歐 [16] (挪威、瑞典、 丹麥、冰島)	乾燥 RL 標準	新繪白色：150 、 新繪黃色：100		
美國德州交通部 特別條例 [17]	完工後 30 天內 乾燥 RL	白色：400 、 黃色：325		
馬來西亞 [18]	新繪乾燥 RL 標準	白色(7 天)：300		
韓國 [19]	新繪乾燥 RL		7 天	
		白	240	
		黃	150	
新加坡 [20]	新繪、維護 乾燥 RL		7-14 天	5 個月
		白	300	150
		黃	160	50
印度 [21]	乾燥 RL 標準	限速	7 天	2 年
		<65	200	80
		65-100	250	120
		>100	350	150
印尼 [22]	乾燥 RL 標準		6 個月	一年
		白	300	250
		黃	175	100

西班牙 [23]	乾燥 RL 標準	30 天	180 天		730 天
		300	200		100
澳大利亞 [24]	乾燥 RL 標準		30 天	365-395 天	>395 天
		白	350	200	150
		黃	200	150	100
菲律賓 [22]	新繪、維護 乾燥 RL		7 天	6 個月	一年
		白	325	200	150
		黃	200	100	75
烏拉圭 [26]	新繪、維護 乾燥 RL		15 天		180 天
		白	一級	200	100
			二級	250	200
		黃	一級	150	100
			二級	200	150
越南 [27]	新繪、維護 乾燥 RL		7 天		6 個月
		白	類型 I	300	200
			類型 II	200	150
			類型 III	150	100
		黃	類型 I	200	100
			類型 II	150	80
			類型 III	75	30

考量到不同等級的交通磨耗、周遭環境、降雪與剷雪等因素皆可能降低標線的反光表現，各國對於標線的反光性能需求可能略有差異。本研究另將白色與黃色標線之新繪與維護反光性能規範，製作統計圓餅圖如下圖 2.2、圖 2.3、圖 2.4、圖 2.5，以便於清楚地分類各國規範所採用之標線反光等級。綜觀最多國家建議白色標線劃設初期應有 $150 \text{ (mcd/m}^2/\text{lx)}$ 以上之 RL，最高亦有要求至 $300 \text{ (mcd/m}^2/\text{lx)}$ 以上；若設定 $200(\text{mcd/m}^2/\text{lx})$ 以上，則可滿足約 70% 國家/地區之反光

要求。長期維護標準則僅介於 80 ($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$) 至 200($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)之間，又以介於 ≥ 100 ($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)與 ≥ 150 ($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)佔比最多，共約 81%。而黃色標線則因為本身顏色顯眼已能提高用路人警覺，且根據光學理論黃色相較白色不易反射光線，故其反光 RL 數值要求相對白色標線較低。不過根據歐洲道路協會(European Road Federation)之反光滿意度調查研究[28]，結果顯示黃色標線之回歸反射 $RL > 100$ ($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)應能提供合適之夜間可視性。

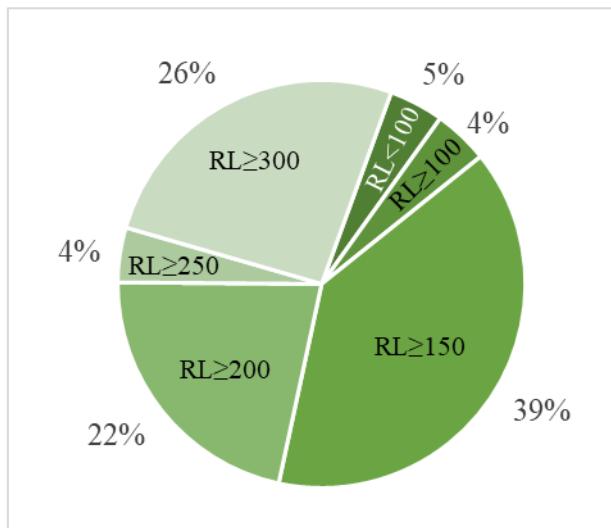


圖 2.2 白色標線(新繪)之反光性能規範統計百分比

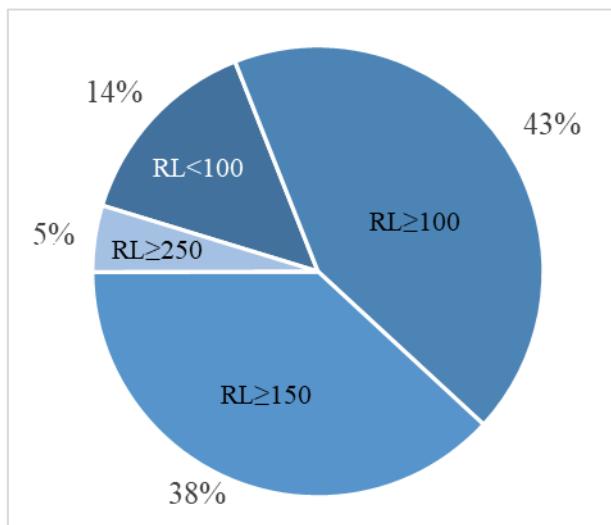


圖 2.3 白色標線(維護)之反光性能規範統計百分比

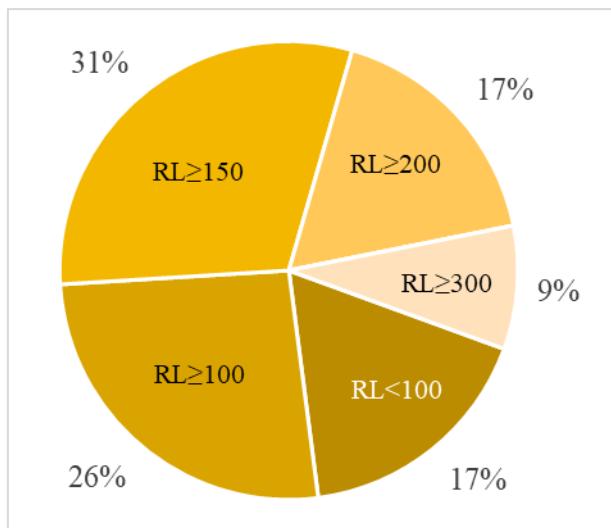


圖 2.4 黃色標線(新繪)之反光性能規範統計百分比

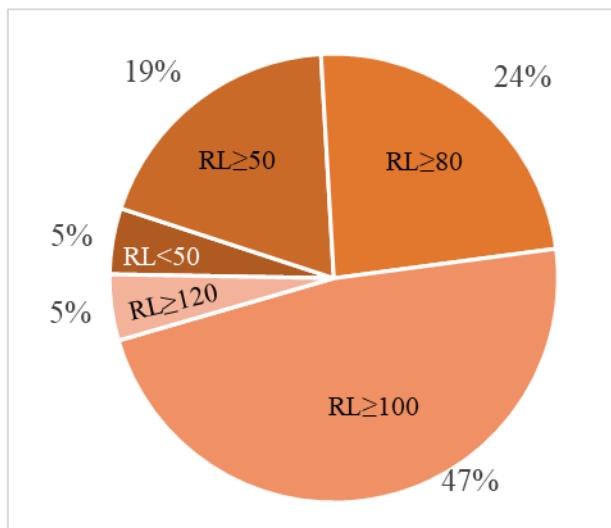


圖 2.5 黃色標線(維護)之反光性能規範統計百分比

2.2.2 各國標線抗滑性能規範

關於標線抗滑性能之規範回顧，本研究共蒐集到 17 國家/地區針對標線抗滑性能 BPN(SRT)提出要求，其基準值彙整如表 2.9，且進一步根據標線長期抗滑性能標準繪製成統計圓餅圖，如圖 2.5 所示。由圖表可知有 32%的國家以 BPN(SRT) 50 作為標線抗滑最低標準值；而有 68%國家則將標線抗滑性能設為 BPN(SRT) 45，維持 CNS 15834 [4]與 EN 1436 [10]標線抗滑標準中之最低等級，確保標線至少具備一定程度的抗滑功能。

表 2.9 各國標線抗滑 BPN(SRT)基準值之規範

各國標準	標線抗滑基準值
新加坡 [20]	SRT 42
香港 [15]	SRT 45
中國 [14]	BNP 45
澳大利亞 [24]	BNP 45
英國 [10]	SRT 45
希臘 [12]	SRT 45
西班牙 [23]	SRT 45
印尼 [22]	SRT 45
馬來西亞 [18]	SRT 45
越南 [27]	BNP 45
美國 [17]	BNP 45
印度 [21]	BNP 45
紐西蘭 [9]	BNP 50
北歐（挪威、瑞典、丹麥、冰島） [16]	PFT 0.52 = SRT 50

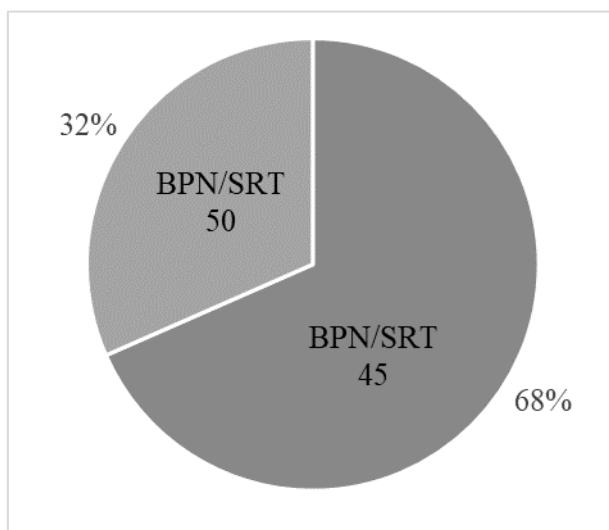


圖 2.5 標線抗滑性能規範統計百分比



2.3 國內外標線規範比較

經由上述之標線相關規範回顧，可發現多數國家主要對於新劃設標線訂定回歸反射係數 RL 的反光性能驗收標準，同時也具體提出標線的長期養護建議門檻值。在所收集的 24 個國家與地區標線反光要求規範中，僅有 17 國家與地區同時對於標線抗滑性能設定基礎標準。至於研究文獻大多探討駕駛反應時間和標線宜具備之最低反光門檻，較少探討標線抗滑性能之相關內容。此現象可能因素有二，其一為基於歐美各國道路運輸多以四輪汽車和多輪貨卡車為主，二輪機車數量較少，故多數研究聚焦於標線在道路交通安全中之反光功能；其二為反光與抗滑性能各自仰賴不同之添加物，而彼此之間互相產生負面影響，容易顧此失彼，因此少有研究將兩項標線性能同時納入考慮。

反觀我國道路標線性能規範，至今為止與其他國際標線規範相去甚遠。我國的標線規範不但從未如其他先進國家皆有明文規定標線的反光性能，反而僅注重標線施工完成後 14 天內的抗滑 BPN 數值是否符合驗收標準，追求單效且短期的標線抗滑性能，相對缺乏兼顧標線反光與抗滑雙性能之長期維護。雖然以我國道路使用者組成與歐美各國相較來說，二輪車輛所佔比例高出許多，致使我國道路主管機關現今仍多偏重標線抗滑性能。但是，其他同樣擁有較多二輪車輛之國家 [29] (圖 2.6)如：越南、印尼、馬來西亞、希臘，除了制定標線的抗滑性能標準之外，亦同時考慮標線的反光性能。使得標線除了具備良好的磨擦係數，確保機車騎士之行車安全之外；也兼顧標線的反光效果，足以清楚地提供道路資訊。

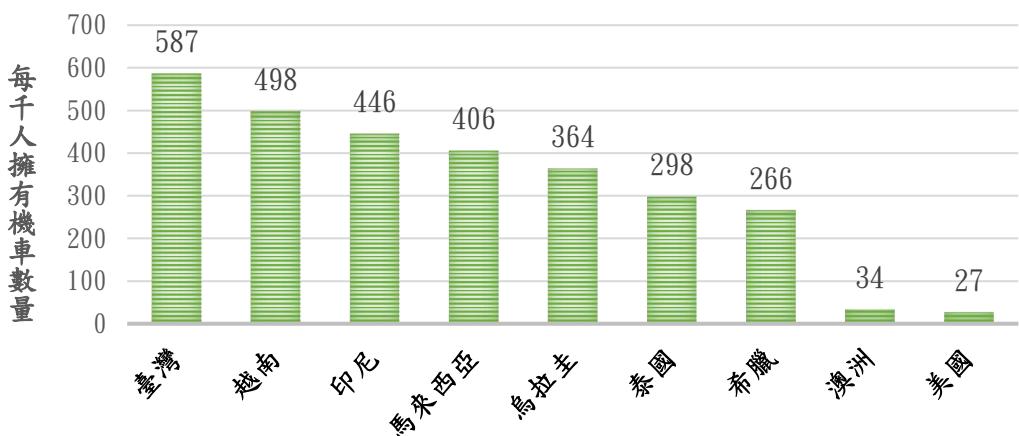


圖 2.6 各國家每千人擁有機車數量

我國現階段標線相關規範係採用熱拌聚酯和玻璃珠的材料規範，搭配施工後兩周驗收 BPN 數值之抗滑性能規範，與國外標線規範相比，不僅缺乏標線之反光性能成效規範，同時對於抗滑之最低維護標準也未有規定。圖 2.7 中可以看出許多國家與地區對於標線的反光與抗滑都提出最低可接受之維護門檻值。雖然國內以標線材料規範規定熱拌聚酯的玻璃珠含量，確保標線的反光材料添加量，並對玻璃珠材料的折射率與粒徑大小提出分類，預期玻璃珠能發揮一定水準的反光效果。但在始終缺少標線反光性能成效規範的前提下，即使事前取樣玻璃珠送驗均能通過材料規範檢測，事後現場標線取樣亦能通過玻璃珠含量百分比要求，我國標線之反光能力卻依舊普遍低落，缺乏夜間可視性。甚至基於玻璃珠與抗滑骨材間存在物理性質互制關係，外撒玻璃珠雖能提升標線反光效果卻會降低部分抗滑效果，外撒抗滑骨材則能有效地提高標線抗滑性能，但卻部分阻擋了玻璃珠的反光折射路徑。甚至國內部分廠商為了通過高抗滑 BPN 數值的驗收標準，而放棄使用玻璃珠作為外撒材料，僅單一使用硬度較高的抗滑骨材作為外撒材料，雖可令標線短期達到良好的抗滑效果，卻幾乎不具備任何反光性能，偏廢道路標線性能。

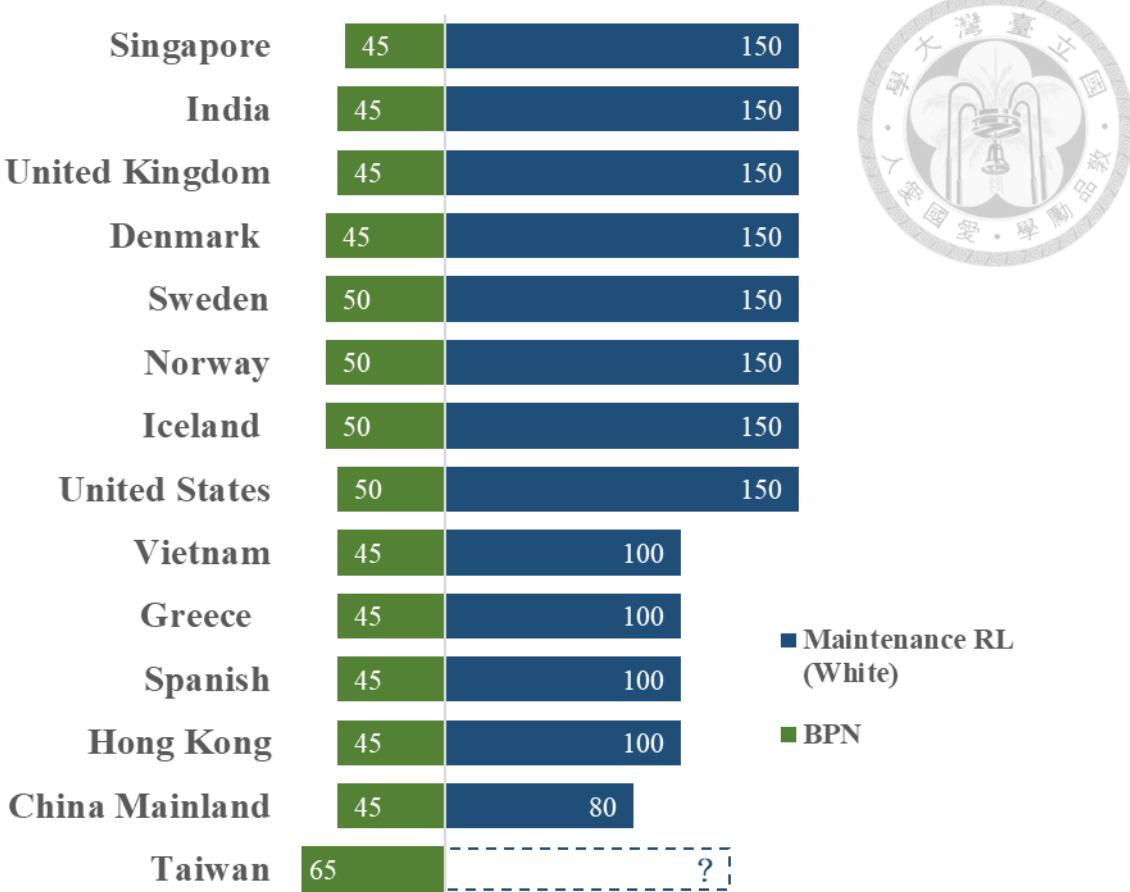


圖 2.7 白色標線長期維護之反光與抗滑性能規範總覽

所以本研究建議我國道路標線規範可在維持既有標線材料規範，確保標線材料使用避免不肖廠商偷工減料，除了現有的標線抗滑驗收標準之外，增加標線反光性能的驗收門檻，以此改善現有標線性能驗收單以抗滑最高等級 S5(BPN \geq 65)作為驗收目標，卻始終忽略標線反光性能之現況。預期藉由些微調降標線抗滑性能的驗收標準，並加入適當的標線反光性能的成效規範，且訂定合宜的標線長期性能標準，做為日後維護之性能參考依據。利用標線的材料規範搭配短期與長期的反光與抗滑雙性能規範雙管齊下，真正落實道路標線之長期雙效表現。

2.4 道路安全與標線性能回顧

根據聯合國世界衛生組織(World Health Organization, WHO)2023 年道路安全全球現況報告[29]指出，每年約有 119 萬人死於道路交通事故，且道路交通事故造成的財務損失佔大多數國家國內生產毛額 (Gross Domestic Product, GDP) 的

3%，不可否認道路安全已是一個緊迫的全球問題。同時聯合國永續發展目標(SDGs)亦強調了交通安全與基礎設施的重要性，呼籲採取更多積極措施以減少交通事故所造成的嚴重後果。

而道路標線不但負責指引駕駛和先進駕駛輔助系統(Advanced Driver Assistance Systems, ADAS)辨別道路的範圍與方向，保持穩定行駛於車道中央，並提供必要的道路資訊，確保交通安全[30]。同時在夜間、照明不足或是惡劣天氣條件下，作為駕駛甚至是高齡駕駛提前判斷前方道路線型的依據，以此有效地降低交通事故發生[31]。此外美國德州農工大學下屬的德州交通研究所(Texas Transportation Institute, TTI)基於密歇根州農村雙車道道路的夜間碰撞、道路特徵和標線反光性能數據進行歷史資料分析，證實增加標線反光能降低夜間交通事故[32][33]。Mario Fiolić (2023)甚至使用駕駛模擬器，模擬夜間條件和不同道路標誌和標線能見度之道路狀況，研究結果顯示提高道路標誌和標線的能見度可以增強受測駕駛者對於環境的認知與警覺，從而正面影響整體駕駛反應與行為[34]。

為了能提升道路標線的反光性能與長期耐久性，亦有研究展開相關的標線材料配比實驗。預期透過不同的標線材料如：溶劑型、水漆型、冷塑型、熱拌型，搭配不同的折射率($RI = 1.5$ 、 $RI = 1.6 - 1.7$ 、 $RI = 1.9$)、成圓度、粒徑大小之玻璃珠外撒材料作為變因，於現地劃設標線並檢測其反光性能。眾多研究結果皆顯示越高折射率之玻璃珠確實能有效提高標線之回歸反射 RL，但因高折射率玻璃珠質地較軟表面易受損，較難維持長期的反光效果，同時考量到標線的材料成本與使用壽命，建議於一般道路選擇折射率 1.6 - 1.7 之玻璃珠作為標線外撒材料使用，即可達到優異的反光性能提供駕駛辨識，亦能在日常交通量磨耗下維持良好的長期性能，並且更具標線材料成本效益之經濟性[35][36][37][38]。而較大粒徑之玻璃珠雖能提供較佳的回歸反射路徑增加標線的反光效果，但標線的反光性能依舊與玻璃珠的嵌入深度有大的關聯，一般而言嵌入標線深度達外撒材料粒徑三分之二時，能有較理想的附著效果，並透過裸露於標線表面三分之一的玻璃珠發揮良好反光效果[39][40]。

除了多數聚焦於標線反光性能之研究，亦有少數研究針對抗滑材料的材料種

類選擇、添加比例進行實驗，探討不同標線材料間之抗滑性能的差異。使用較大粒徑的二氧化矽顆粒、發泡黏土顆粒、廢玻璃粉末，可令雙組份標線的抗滑值從原先 SRT 36，依序提升至 50、56、62，其中又以廢玻璃粉末的硬度較高，足以抵抗磨耗維持較久的抗滑性能[41]。此外美國華盛頓州立大學[42]比較成型標線、水漆型標線外撒玻璃珠、熱拌聚酯標線外撒玻璃珠的抗滑效果，可發現無論在乾燥、潮濕或結冰的路面情況下，成型標線得利於特殊表面結構均保持最佳的抗滑效果，而在外撒相同玻璃珠的條件下，水性漆標線則優於熱拌聚酯標線，但該研究並未針對標線的耐久性進行比較。同時該研究請自行車騎士根據在乾燥與潮濕標線的騎行感受進行評分，評分結果與量測的 BPN 數值結果呈現正相關，隨著 BPN 降低自行車騎士之安全水準亦下降，證實標線抗滑性能對於道路安全之重要性。

然而，即便道路標線之反光與抗滑性能應被同等重視，但至今為止僅有極少數同時使用玻璃珠與抗滑骨材作為混合材料之標線材料配比研究。Tomasz (2023)選擇水漆型標線為基底，以折射率 1.5 之玻璃珠搭配不同比例的剛玉、方矽石、鋁土礦、玻璃顆粒，進行外撒總量 400 公克的現地標線劃實驗，並於施工後兩周、兩個月、三個月、十個月檢測標線抗滑數值，根據兩周的實驗數據可知相較於無任何外撒材料的水漆型標線(BPN 35)，外撒 100% 玻璃珠(BPN 45)能提高些許抗滑性能。其餘添加部分抗滑骨材的材料配比對抗滑性能亦有所提升，抗滑數值分佈於 BPN 48 到 65 之間，但第十個月後抗滑數值持續衰退僅剩 BPN45 左右[43]。而 Coves-Campos (2018)[44]同樣以水漆型標線為底，使用五種規格的玻璃珠材料與兩種抗滑骨材材料於西班牙境內公路進行劃設，各材料配比之標線皆可達到反光 RL 300($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)和抗滑 SRT 50 以上，但歷經一年的使用後多數標線的反光 RL 僅剩 100 ($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)，抗滑 SRT 則約為 45。雖屬於少數類似雙效標線的材料配比與性能追蹤實驗，但卻受限於水漆型標線的特性，無法維持較長期之標線性能。



2.5 小結

綜上所述，國外不僅注重標線初繪與維護的反光性能，對標線抗滑也有基本的數值規定；反觀國內則因二輪車輛較多，僅多聚焦於標線施工後 14 天之抗滑性能，缺乏標線長期抗滑與反光之雙效性能規定。本研究建議可藉由調降標線抗滑性能的驗收標準，並新增標線反光性能的成效規範，且訂定合宜的標線長期性能標準，真正落實道路標線之長期雙效表現。

同時根據道路安全與標線性能之文獻回顧，也可得知標線的反光與抗滑性能各自負責提供道路資訊與避免打滑之重要功能，良好的標線性能得以有效降低交通事故數，對於道路交通安全至關重要。而為了能提升道路標線的性能，亦有眾多研究針對不同的玻璃珠顆粒粒徑、折射率，以及抗滑骨材與玻璃珠之材料混合比例進行標線材料配比實驗。但是有鑑於標線反光與抗滑性能係仰賴不同材料機制，而玻璃珠與抗滑骨材兩者在性能表現上又為互制，故綜觀國內外皆鮮少有雙效標線材料配比實驗，以及對於標線之長期性能追蹤研究。

為此本研究回顧各國標線規範及我國 CNS 規範，並將國內獨特的交通運具組成與氣候條件納入考量，且根據長期多次的材料配比實驗與資料收集分析，期能以熱拌聚酯為標線材料基底，提出合適的雙效標線材料配比設計。目標在長期 12 個月使用後標線反光性能 RL 依舊可維持 100 (mcd/m²/lx)以上，抗滑性能則是能符合 BPN(SRT) 50 標準。提供標線夜間可視性之同時，亦兼具抗滑能力以降低用路人打滑之風險。並且預計利用標線試片之外撒量成效實驗，隨著使用材料與外撒量變換，分析其雙性能差異與材料經濟性，並根據實際道路環境之性能需求，建置標線績效分析模式，進而探討標線之服務績效與成本效益表現，以此提升道路標線服務水準。

第三章、研究方法



本章節主要可分為三大部分，首先，以標線的雙效性能檢測為基礎介紹，涵蓋標線反光性能檢測、標線抗滑性能檢測、標線檢測點位選擇；接著，以現地雙效標線劃設實例，說明逐次之材料配比實驗與現地標線劃設規劃；其後延伸至實驗室標線試片劃設之說明，包含標線試片外撒量成效實驗設計，以及外撒儀器與標線試片劃設步驟說明。以此流程架構建置完整的雙效標線研究方法，並於第四章進行後續實驗數據蒐集與分析。

3.1 標線性能檢測方法

3.1.1 標線反光性能檢測

標線反光性能(圖 3.1)主要可分為擴散照明下之輝度係數 (luminance coefficient under diffuse illumination, Qd)，以及回歸反射輝度係數 (coefficient of retroreflected luminance, RL)，以下將依序說明兩項反光性能指標與檢測方法。

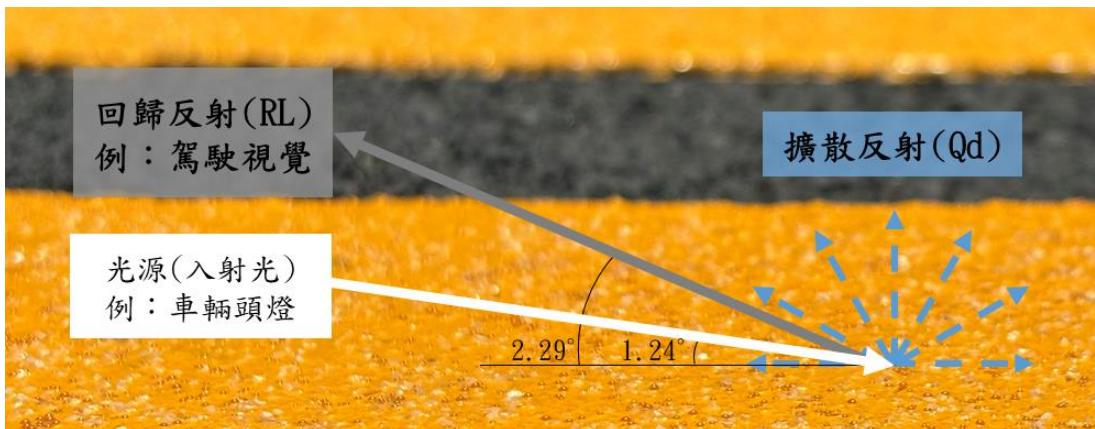


圖 3.1 標線反光性能之回歸反射(RL)與擴散反射(Qd)示意圖

根據我國國家標準 CNS 15834[4]Qd 的定義係道路標線範圍在特定方向的輝度，除以該範圍內的照度所得之商數，意即在一定光源照度下標線反射的光線強度。通常以擴散反射係數 Qd 代表在日照或光源充足條件下，駕駛人目視 30 公尺遠處地面標線之清晰程度。同時根據研究經驗與文獻資料顯示，擴散反射係數

Qd 之數值高低主要受到標線的熱拌聚酯材料及內摻材料影響較大，與標線玻璃珠或抗滑骨材等外撒材料較無顯著的影響性。一般來說，標線顏色清晰與鋪面存有鮮明對比，且未受汙損的熱拌聚酯標線皆可有不錯的 Qd 數值表現，並以擴散反射係數 Qd 超過 100 ($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$) 作為門檻值確定標線之日間可見度。

而回歸反射係數 RL 在 CNS 15834 中之定義則為道路標線範圍在特定駕駛人觀測方向的輝度，除以在與入射光方向垂直之照度所得之商數。意即標線經由車前燈照明，再回歸反射至駕駛者人眼的輝度，與車前車燈在標線上所產生照度之比值。通常以回歸反射係數 RL，代表在夜間或照明不足條件下，駕駛人目視 30 公尺遠處標線的可見程度。相比於擴散反射係數 Qd 在照明充足條件下辨識標線的可見度，回歸反射係數 RL 著重於標線材料對於車燈反射光線的強弱，對駕駛者夜間行駛而言也顯得更為重要。以熱拌聚酯標線材料為例，可藉由提高二氧化鈦添加量、玻璃珠成圓率與折射率加強回歸反射係數 RL。

此外，回歸反射係數又可因標線表面狀態區分為乾燥狀態下之 RL 與潮溼狀態下之 RL_{wet}，兩者的性能規範要求等級略有不同。然而，有鑑於大多數地區的平均降雨天數皆小於無降雨天數，且因 RL_{wet} 的性能要求會連帶將標線成本大幅增加，實務界較少納入應用案例。所以各國規範僅在部分特殊路段與機場跑道設定潮溼狀態下之 RL_{wet} 標準，其餘狀況之回歸反射係數則多以乾燥狀態下之 RL 訂定。而本研究也依循此框架，聚焦熱拌聚酯標線在乾燥狀態下之 RL 反光性能表現。

關於標線反光性能檢測方法說明，本研究選擇使用瑞士廠牌 ZEHNTHER ZRM 6014 反光檢測儀(圖 3.2)，展開標線反光性能的檢測與追蹤研究(圖 3.3)。該儀器主要模擬在夜間無其他環境照明，僅以車頭燈照射前方距離 30 公尺遠處標線之效果。換言之，即以車燈離地高度 0.65 公尺，駕駛人坐姿視線高度 1.2 公尺設計，在掌握入射光源之照度且保持與地面夾角 1.24 度，駕駛者視線與地面夾角為 2.29 度之幾何條件下進行檢測。同時，ZEHNTHER ZRM 6014 也符合歐盟 EN 1436 (RL/Qd) [10]，與美國 ASTM E1710 (RL) [45]、ASTM E2302 (Qd) [46] 和

ASTM E2177 (RLwet) [47]等檢測規範，並且為了維持反光儀檢測之精準性與穩定性，也定期將設備送回原廠進行反光儀的校正與驗證，並於每次檢測前確定 ZRM 6014 儀器之自我校正值皆符合原廠標準值 15 %以內。



圖 3.2 ZEHNTNER ZRM 6014 反光檢測儀器照片



圖 3.3 ZEHNTNER ZRM 6014 反光檢測操作照片

3.1.2 標線抗滑性能檢測

根據 CNS 15834 標線抗滑性能須經由英式擺錘抗滑實驗儀(British Pendulum Tester, BPT)檢測，以擺錘與橡膠滑塊模擬車輛於潮濕路面行駛時，以時速 50 公里煞車鎖死輪胎時之性能，得出英式擺錘係數(British Pendulum Number, BPN)。儀器之檢測原理係將擺錘提升至水平位置具有位能後令其自由落下，當擺錘於最

低點時動能最大與待測表面接觸施以 22.2 (N)的恆定作用力，而待測表面所提供之抗滑之摩擦力將對擺錘做負功降低總能，並由擺錘通過待測表面後之指針上升高度，反應待測表面之抗滑能力。抗滑儀指針上擺的高度越低，所得之 BPN 讀值越高，代表檢測表面越為粗糙，擁有較佳的抗滑性能。

無論是英式擺錘抗滑實驗儀(BPT)或是防滑測試器(Skid Resistance Tester, SRT)，兩者的檢測原理皆為相同，得出之檢測數值為 BPN、SRT，彼此間僅存有名稱上之差異，數值大小亦可互通[48]。此外，因為英式擺錘抗滑檢測儀器之橡膠滑塊對溫度變化較為敏感，本研究回顧 106 年交通部公路總局材料實驗所「熱處理聚酯標線於不同使用環境下抗滑能力與反光強度標準之研究」[49]，將 BPN 數值經過標線溫度校正計算(公式 1)，亦即統一校正檢測數值至標線表面攝氏 30 度的標準溫度。不僅能貼近臺灣鋪面溫度的實際狀況，也能對於橫跨四季的標線抗滑性能長期追蹤有一共同對照基礎。

$$BPN_{30} = \frac{BPN_T}{1 - 0.004 * (T - 30)} \quad (\text{公式 3.1})$$

T = 待測試體之表面溫度

而本研究選擇使用義大利 CONTROLS 英式擺錘抗滑實驗儀(圖 3.4)，進行標線抗滑性能的檢測(圖 3.5)，檢測之橡膠滑塊均符合規範硬度 IRHD 55±5，且滑塊厚度和寬度的最大磨損度，皆分別維持在 1.6 (mm)和 3.2 (mm)要求範圍之內，代表依據規範檢測流程之標線抗滑 BPN 檢測結果，具備高可信度與準確度。

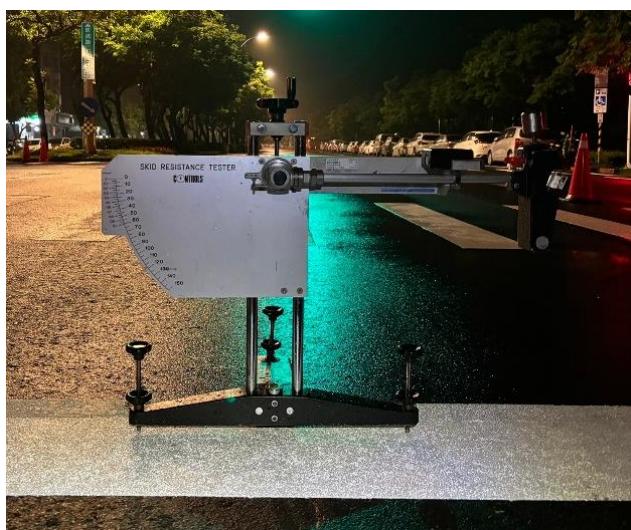


圖 3.4 CONTROLS 英式擺錘抗滑實驗儀照片



圖 3.5 CONTROLS 英式擺錘抗滑實驗儀檢測操作照片

3.1.3 標線檢測點位選擇

為確保標線的檢測點位選擇具備足夠的代表性與抽樣密集度，本研究參考美國 ASTM D7585/D7585M-10[50]，依循其對標線工程完工後的驗收點位判定評估準則(圖 3.6)，設置本研究之標線檢測點位。本研究將根據現地的道路條件，以及實驗組與對照組之標線材料佈置，盡可能於縱向標線、標字、符號、橫向線與行穿線均勻取樣，以充分的檢測點位數據，掌握各式標線實際的雙效性能，包含擴散照明下之輝度係數 Qd、回歸反射輝度係數 RL 及抗滑係數 BPN，並由眾多檢測點位確保本研究長期追蹤之穩定性。

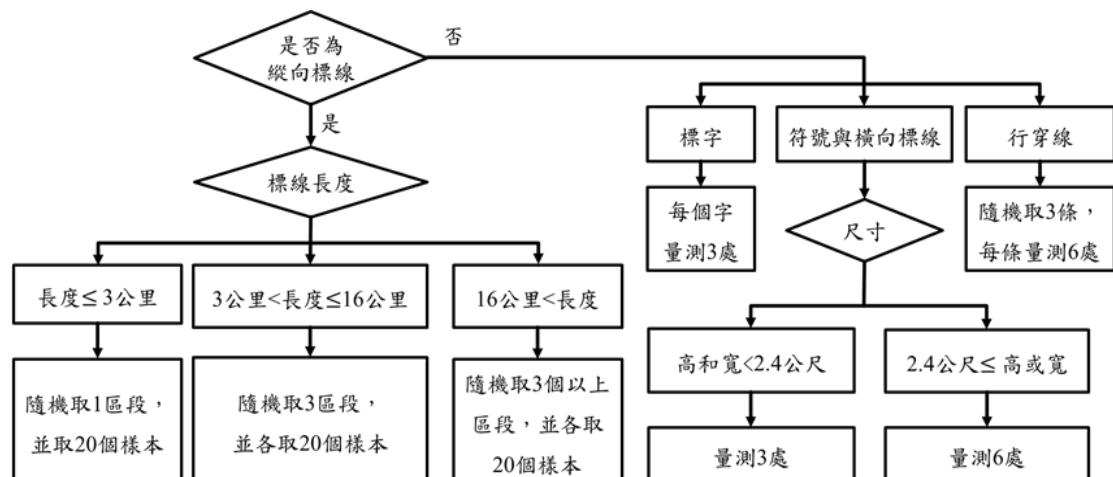


圖 3.6 ASTM D7585/D7585M-10 判定評估準則流程圖



3.2 現地雙效標線劃設實驗

本研究受臺北市政府工務局新建工程處委託「111 年臺北市區道路熱處理聚酯標線之抗滑與反光性能追蹤委託專業服務」計畫，透過雙效標線之配比實驗與追蹤，逐次調整與收斂合適的材料配比，並在市區道路進行實際劃設，以及展開後續的分析與研究。期能提出具經濟性之雙效標線配比設計，在績效表現部分預期長期 12 個月使用後，反光性能 RL 可達 $100 \text{ (mcd/m}^2/\text{l}\text{x)}$ 以上，抗滑性能則符合 BPN 50 之要求。將於本論文後續小節分別說明材料配比與線地劃設規劃細節。

3.2.1 標線材料配比實驗

標線材料配比設計除基本理論之外，首重實驗數據之分析及經驗累積。為達到本研究雙效標線之性能表現目的，須以熱拌聚酯標線材料為基底，設計提供反光性能的玻璃珠與提供抗滑性能的抗滑骨材之材料選擇與使用比例，確保標線的外撒與內摻材料皆能達到初期與長期的雙效性能。

鑑於玻璃珠與抗滑材兩種材料間之類型、粒徑尺寸、添加百分比等組合相當複雜，綜觀國內外皆鮮少有研究以標線材料配比與雙性能表現作為研究目標，於文獻中僅知有成型標線兼顧高抗滑與高反光之材料，但目前均受美國與國際專利保護[48]。故本研究目標藉由多次的標線配比實驗資料，結合各自為期三個月的追蹤結果進行分析，根據研究過程長期累積之實驗結果，作為開創雙效標線理想材料配比之依據。

以下將依序說明標線內摻材料之設計經驗，以及由臺大水源校區和臺大校總區之標線配比實驗，測試最佳的外撒材料選擇與外撒重量，進而在臺大竹北校區標線配比實驗，驗證材料配比實驗之重現性；最終確立現地雙效標線劃設之配比設計規劃。

3.2.1.1 內摻材料之配比設計經驗

根據先前累積的標線劃設經驗，隨著標線劃設完成後受到交通量等外在環境因素的影響，當嵌入標線表面的外撒材料日漸磨損，原先添加於熱拌聚酯的內摻

材料將逐漸嶄露頭角，於標線產品生命週期的中後階段發揮其添加材料的特性；同時可能會因為不同地區的氣溫、降雨、降雪等等環境因素，而產生週期性的標線性能變化。為求標線能達到長期良好的反光與抗滑雙效性能，本研究在進行標線材料配比設計時，也參照中華民國國家標準 CNS 15834 「道路標線使用性能」之規範[4]，依據標線反光等級由 R0 至 R5 分為六級(表 2.1)，抗滑性能由 S0 至 S5 共分六級(表 2.3)。

當實際在熱拌聚酯材料中添加內摻材料時，本研究亦遵守中華民國國家標準 CNS 1333 「道路標線塗料」[5]，明定熱拌聚酯塗料的密度、黏度、軟化點、耐磨性、安定性、耐候性等各項基礎性質的規範要求，並且為避免材料間因粒徑大小差異，對玻璃珠回歸反射形成遮蔽，需額外以過篩法分析欲添加材料之粒徑分佈；甚至是調整二氧化鈦、防沉劑、助溶劑等添加劑種類與比例，以維持整體熱拌聚酯加熱後之施工流動性。

此外，為了加強原本市售 II 型標線僅以抗滑為主而缺乏反光性能的弱項，本研究也嘗試在內摻材料中使用不同的玻璃珠材料，以提升該標線的反光性能，並且參考中華民國國家標準 CNS 4342 「交通反光標誌塗料用玻璃珠」[6]，依照玻璃珠的比重、粒度、外觀、折射率、耐水性、鉛錫砷含量進行品質分類，其中又以玻璃珠的折射率與粒徑大小尤為關鍵。然而，經由多次的標線劃設經驗，以及長期的標線性能追蹤檢測成果，發現以折射率近 1.65 之 Swarco Solidplus 100 - 800 玻璃珠作為標線內摻材料，具有良好的標線反光效果，並且其粒徑大小也符合功能需求。

最終，考量目前國內大宗市售聚酯型標線多以抗滑 II 型標線為主要訴求，故本研究建議此次實驗採取市售高抗滑 II 型標線為熱拌聚酯基礎，取其良好抗滑表現之優點，但一般標線廠商原本設定約 23% 第一類玻璃珠(折射率約 1.5)全數以折射率 1.65 之 Swarco Solidplus 100 - 800 玻璃珠替代。根據過往相關研究經驗，為能確保長期有良好反光性能且不影響抗滑表現，建議稍微加高玻璃珠的比

例，故採用標線聚酯重量比 25% 之高反珠，以求長期穩定反光性能。同時，又因內摻材料之性能展現是隨時間而呈現漸進式表現，與標線表面外撒材料之展現方式不同，故其材料顆粒尺寸可以略低，針對 Swarco Solidplus 100~800 與 CNS4342 之第一類玻璃珠之粒徑分佈呈現如下圖 3.7。

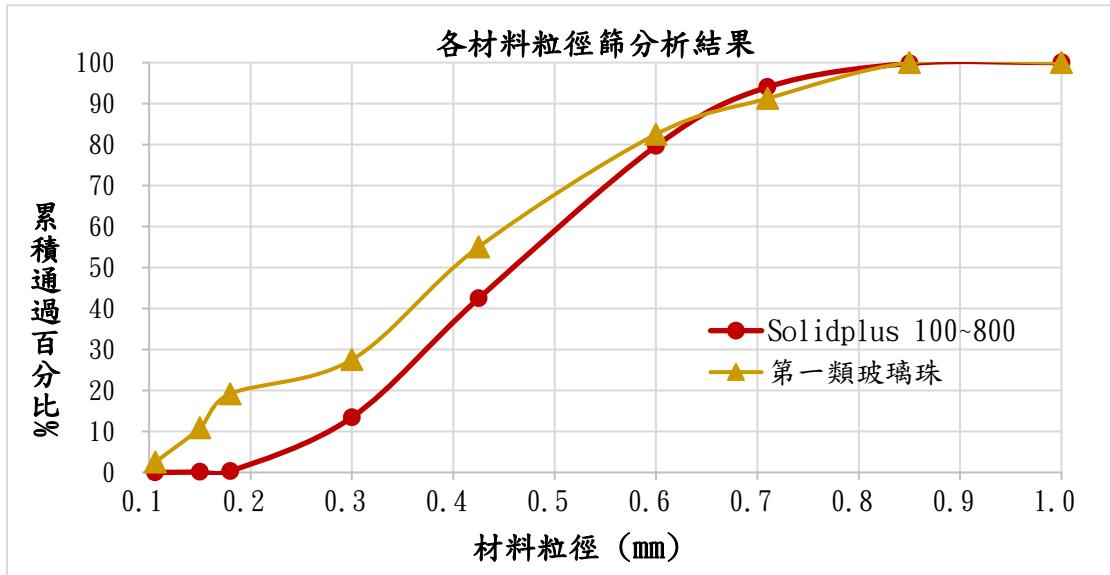


圖 3.7 內摻玻璃珠之粒徑分析

至於內摻的抗滑材料則以一般市售 II 型標線原本配料為主，並未多做更改。主要是基於多筆市售 II 型標線的追蹤經驗，該材料既有配比即以提供長期優良的抗滑性能為主，故在抗滑材料的部分則沿用之。整體而言，本研究之標線材料內摻配比選擇以市售 II 型抗滑標線之熱拌聚酯材料為基底，將原先內摻之第一類玻璃珠(23%)全數由 Swarco Solidplus 100 - 800 玻璃珠替代，並略微增加比例至 25%，而抗滑材料則不額外添加與更動。

3.2.1.2 臺大水源校區配比實驗及追蹤檢測成果

基於公路總局研究報告[49]的多次實驗研究，得知採用折射率 1.65 玻璃珠(後稱高反珠)及抗滑骨材作為外撒材料時，以重量近似 1:1 之配比與外撒總量約每平方公尺 400 公克的情況下，可獲得前期約 8 個月相當優異的反光及抗滑性能。同時，為了能更精準地控制與調整外撒量，強化標線初期性能之重現性與掌握配比材料特性。本研究特別與劃線機製造商共同改良畫線機，以不受施工劃設

時之步行速度影響之滾軸式設計為主，並首次嘗試搭載雙撒佈之外撒機制，如下圖 3.8 所示。冀透過前與後的雙外撒盒搭配不同的齒輪關係，以及調整出料口閘門、墊片搖桿之撒佈機制，充分掌握玻璃珠、抗滑骨材、混合料之外撒成效[51]。



圖 3.8 滾軸式雙外撒劃線機

因此，本研究規劃了如表 3.1 的臺大水源校區八種外撒材料配比設計實驗，此為第一次現地劃設實驗。編號(1)、(2)、(3)、(4)為前外撒盒先撒高反珠，後外撒盒撒抗滑骨材；編號(5)、(6)則是相反順序的外撒設計，即前盒撒抗滑骨材，後盒撒高反珠；編號(7)、(8)為兩種材料均勻混合後一起撒佈。研究現地劃設利用臺大水源校區大客車停車格標線，分成 8 段劃設不同材料(圖 3.9)，共計劃設標線總面積為 4.0 平方公尺，劃設完工成果如圖 3.10 所示。不論編號(1)到編號(8)之各式外撒材料配比組合，總外撒量皆為 400 公克至 420 公克，其中，編號(1)與編號(3)均是採用國內常用抗滑骨材，前者使用粒徑 20-30 目(550-830 微米)的石英砂，後者抗滑骨材則添加少許 10-20 目(830-1700 微米)較大顆粒之石英砂材料組合，以稍微提升其整體粒徑尺寸分佈(圖 3.11)；至於編號(2)為 Swarco Korund 抗滑骨材。編號(4)則同時降低高反珠與抗滑骨材粒徑，但因為外撒盒存有一定之外撒量限制，加上玻璃珠因外觀圓滑粒徑較小而容易滑出，故其 Swarco Solidplus 100-800 高反珠撒佈量為每平方公尺 250 公克，為所有編號中最多者，材料成本較高。編號(7)與(8)都是先以高反珠 220 公克與抗滑骨材 200 公克混合均勻後，

放入前後兩盒一起外撒，總量也是 420 公克，但編號(7)是選用國內抗滑材料，編號(8)則是採用奧地利進口之 Swarco Korund 抗滑骨材。



表 3.1 臺大水源校區八種外撒材料配比設計

配比		後外撒(公克/平方公尺)		前外撒(公克/平方公尺)	
編號		材料	外撒量	材料	外撒量
前 外 撒 玻 璃 珠	(1)	抗滑骨材 20~30 目	200 公克	Swarco Solidplus 600-1000	220 公克
	(2)	Swarco Korund	200 公克	Swarco Solidplus 600-1000	220 公克
	(3)	抗滑骨材 10~20 目	20 公克	Swarco Solidplus 600-1000	220 公克
		抗滑骨材 20~30 目	180 公克		
	(4)	Swarco Minigrain	150 公克	Swarco Solidplus 100-800	250 公克
	(5)	Swarco Solidplus 600-1000	220 公克	抗滑骨材 20~30 目	200 公克
	(6)	Swarco Solidplus 600-1000	220 公克	Swarco Korund	200 公克
	(7)	Swarco Solidplus 600-1000 (220 公克) + 國內抗滑骨材 20~30 目 (200 公克)			
混 合 料	(8)	Swarco Solidplus 600-1000 (220 公克) + Swarco Korund (200 公克)			



(8) 混合料		(4) 前外撒玻璃珠	
(6) 後 外 撒 玻 璃 珠	大 客 車 停 車 格	(3) 前 外 撒 玻 璃 珠	大 客 車 停 車 格
(5) 後 外 撒 玻 璃 珠		(2) 前 外 撒 玻 璃 珠	
(7) 混合料		(1) 前外撒玻璃珠	

圖 3.9 臺大水源校區各配比劃設位置

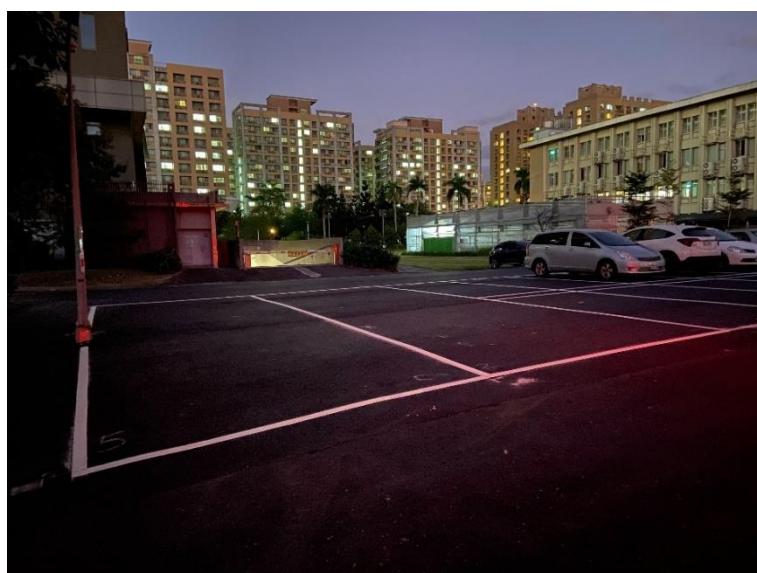


圖 3.10 臺大水源校區大客車停車格標線

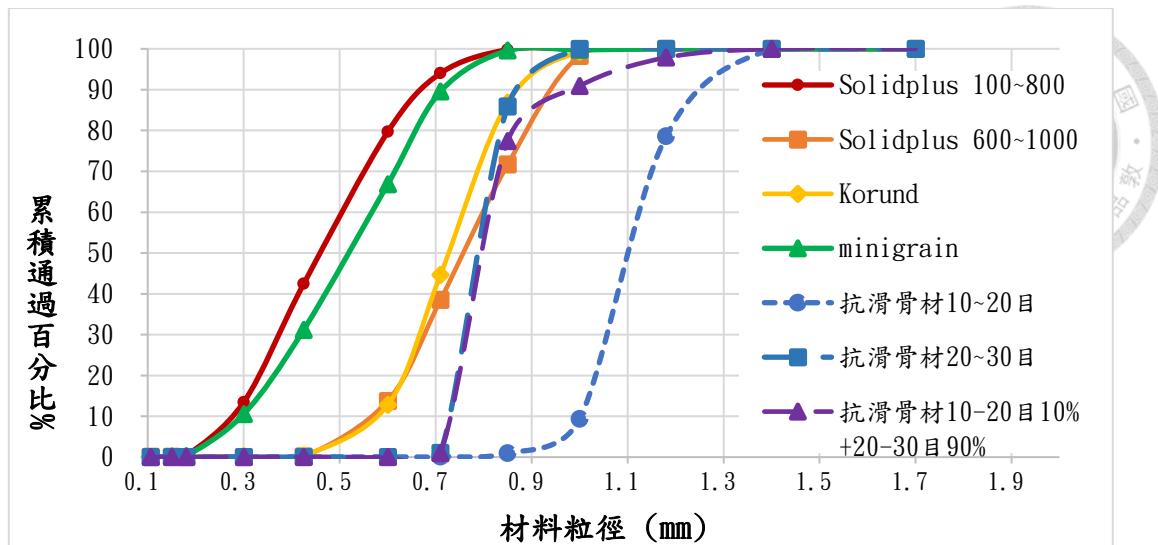


圖 3.11 各材料粒徑篩分析結果

圖 3.12 和圖 3.13 分別為臺大水源校區自劃設後兩周至三個月的標線反光和抗滑性能追蹤成果，針對使用玻璃珠與抗滑骨材粒徑相近之材料，如編號(2) Swarco Solidplus 600-1000 搭配 Swarco Korund，在三個月內反光能維持 CNS 15834 的 R5 ($\geq 300 \text{ mcd/m}^2/\text{lX}$) 級等級，抗滑性能則可達到 CNS 15834 S4 ($\geq 60 \text{ BPN}$) 級等級。對比編號(1)、(3)採用 10~20 目及 20~30 目粒徑較大之國內抗滑骨材，其抗滑 BPN 值表現反而不甚理想，僅落在 45 至 50 間。其原因有二，首先當前外撒玻璃珠落下後，標線表面面積已有部分受玻璃珠鑲嵌佔據，較大顆的抗滑骨材由後外撒盒落下時，剩餘表面積較小較難附著；接著就算其能於表面附著也可能因嵌入深度不足，導致材料耐久性較差。

然而，儘管較高折射率的玻璃珠可以提供較佳之反光性能，但是編號(5)、(6)卻因先外撒抗滑骨材的外撒量過大，後外撒高反珠所能附著之空間所剩不多，而導致反光性能極差，並非建議的外撒方式。而由此次臺大水源校區的八種外撒材料配比設計實驗可知，不論前外撒何種材料，其性能反應均極佳；但因玻璃珠較易滾動，故當其置於前外撒盒時可能有部分玻璃珠滾跳至標線外，留下部分表面空間給後外撒之抗滑骨材。反之，抗滑骨材先撒可能因稜角較多直接嵌入熱拌聚酯且佔用面積甚多，以至於即便後外撒相當重量之玻璃珠，其整體反光效果仍舊



不佳，如編號(5)與編號(6)。

而編號(7)與(8)均是將反光與抗滑兩種材料充分混合後置入前後外撒盒中，隨標線劃設過程均勻撒下。由圖可知，編號(7)與(8)的反光性能於前一個月可達 R4($\geq 200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)以上，三個月亦可維持 R3($\geq 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)。而抗滑能力更是維持在 S4 至 S5 之間，其中又以編號(8)的 Swarco Solidplus 600-1000 (220 公克)搭配 Swarco Korund (200 公克)之混合料表現更佳。

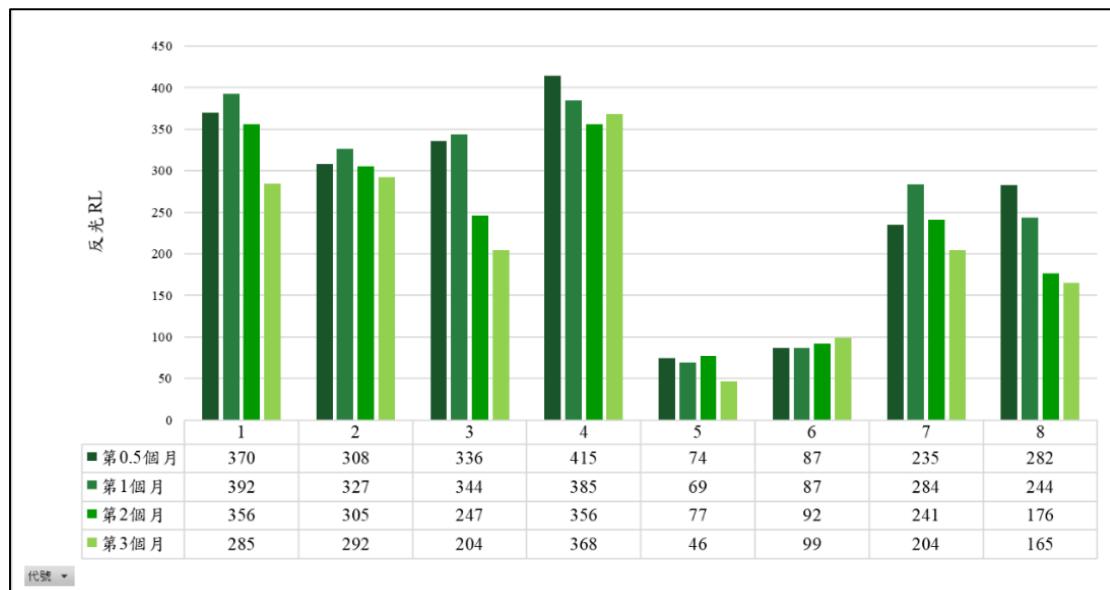


圖 3.12 水源校區標線反光性能追蹤

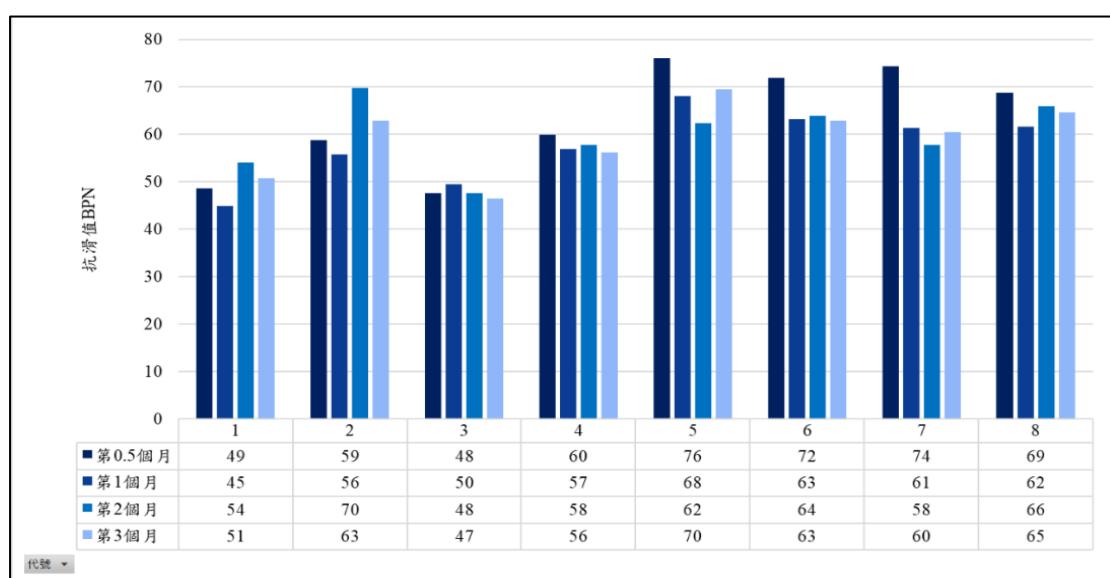


圖 3.13 水源校區標線抗滑性能追蹤

綜合上述的外撒材料配比設計與追蹤成果，排除玻璃珠使用較多材料成本較高之編號(4)配比後，可得出編號(2)前外撒盒 Swarco Solidplus 600-1000 (220 公克)搭配後外撒盒 Swarco Korund(200 公克)，以及編號(8)使用 Swarco Solidplus 600-1000 (220 公克) 與 Swarco Korund (200 公克)之混合料，為本次水源校區外撒實驗中表現較穩定且符合配比設計預期的兩種材料選擇，進而統整歸納出以下三大重要結果：

- (一) 不論前外撒盒為何，其材料表現均會明顯突出；但若為前珠後砂之整體反光與抗滑表現會較前砂後珠為佳。此乃因為玻璃珠圓滑特性，撒落時會有部分滾動彈跳出標線表面之外，留下部分標線空間給後撒盒抗滑骨材；反之，抗滑骨材先撒則無此現象，致使後撒玻璃珠鑲嵌效果不佳。故建議於前外撒盒放置玻璃珠，後外撒盒放置抗滑骨材。
- (二) 選擇粒徑分佈相近且重量相當之玻璃珠與抗滑骨材為較合適之配比規劃，可以同時兼顧反光與抗滑性能。本研究雖以倡議標線應具有適度夜間反光性能為重心，但對國內交通涵蓋較高的兩輪車之特性而言，標線抗滑性能應也須重視。故建議採取 Swarco Solidplus 600-1000 置於前外撒盒與 Swarco Korund 置於後外撒盒，兩者比例接近 1:1，且總重 400 公克左右應為適當。
- (三) 經由實驗編號(7)與(8)實際觀察，適當重量之玻璃珠與抗滑骨材充分混合後外撒，可獲得良好的雙性能結果。故建議將 Swarco Solidplus 600-1000 220 公克與 Swarco Korund 200 公克充分混合後，以總重約 420 公克採前後盒共同混合外撒亦為可行。

3.2.1.3 臺大校總區配比實驗及追蹤檢測成果

依循第一次實驗之臺大水源校區歷時三個月的標線外撒材料配比追蹤結果，為達到良好的反光與抗滑雙效性能，在外撒材料方面建議選擇較高折射率的玻璃珠，搭配粒徑大小較為接近之抗滑骨材，並以前外撒盒先行撒佈玻璃珠，搭配後

外撒盒接續撒佈抗滑骨材，前後撒佈之重量比例 1：1 且外撒總量控制於 400 公克到 420 公克之間為佳。同時，顧及現有標線施工廠商的劃線機具設備仍以單一外撒為主，本研究另一項外撒撒佈方式為前述比例將玻璃珠與抗滑骨材先行充分混合，再行均勻撒佈，其反光性能與抗滑表現亦有不錯的效果。

雖然關於外撒材料配比已有基本結論，但仍應確認標線性能追蹤檢測之重現性，以及前後兩個外撒盒撒佈量之穩定性。為此，本研究為重現上述觀察之實驗結果，在臺大校總區森林系館前之減速標線(圖 3.14)，規劃六種外撒配比設計(表 3.2)，各劃於長 7 公尺，寬 0.1 公尺的白色實線，標線劃設總面積為 4.55 平方公尺，以進行第二階段的實驗測試。



圖 3.14 臺大校總區減速標線

表 3.2 臺大校總區六種外撒材料配比設計

編號	後外撒(公克/平方公尺)	前外撒(公克/平方公尺)
(1)	1 : 1 混合料 Swarco Solidplus 600-1000 + Swarco Korund 195 公克	1 : 1 混合料 Swarco Solidplus 600-1000 + Swarco Korund 195 公克



(2)	1 : 1 混合料 Swarco Solidplus 600-1000 + Swarco Korund 195 公克	1 : 1 混合料 Swarco Solidplus 600-1000 + Swarco Korund 220 公克
(3)	Swarco Korund 210 公克	Swarco Solidplus 600-1000 215 公克
(4)	Swarco Korund 210 公克	Swarco Solidplus 600-1000 240 公克
(5)	Swarco Korund 210 公克	Swarco Solidplus 100-800 200 公克
(6)	Swarco Korund 210 公克	Swarco Solidplus 100-800 210 公克

編號(1)和編號(2)是為了重現臺大水源校區編號(8)之實驗成果，以 Swarco Solidplus 600-1000 與 Swarco Korund 以 1:1 比例均勻混合外撒。不過受到撒佈機具的硬體設備限制，現階段外撒材料之撒佈量並非可連續性調整，而是屬於級距式設計且隨著不同外撒材料的使用亦會有不同的撒量。本研究為了兼顧材料使用的經濟性，特別嘗試外撒總量 390 公克編號(1)與 415 編號(2)公克，以了解兩種外撒公克數對應的標線性能表現差異。而編號(3)、(4)的前外撒盒為 Swarco Solidplus 600-1000 高反珠 215 公克和 240 公克，後外撒盒均為每一平方公尺 210 公克的 Swarco Korund。此乃考量玻璃珠在施工時，可能會有部分玻璃珠滾跳至標線範圍之外。因此，編號(4)相對於編號(3)提高外撒量，為實地劃設後之資料收集進行分析比較。

前述編號(1)到(4)即本研究自過往經驗與水源校區獲得之最佳建議組合，另

外，編號(5)與(6)則是考慮臺大水源校區實驗之編號(4)，Swarco Solidplus 100-800 與粒徑相近的 Swarco Minigram 抗滑骨材亦有不錯表現，但過去該配比玻璃珠用量達 250 公克，相對成本較高。故本次擬使用較小粒徑之 Swarco Solidplus 100-800 降低外撒量至 200 公克及 210 公克兩種配比，以比較其與編號(1)、(2)、(3)、(4)採取較大粒徑 Swarco Solidplus 600-1000 之性能表現。

根據第二次實驗為期三個月的標線反光性能追蹤(圖 3.15)和抗滑性能追蹤(圖 3.16)結果顯示，編號(1)外撒總重每平方公尺 395 公克之混合料不管在抗滑或反光成效，皆優於編號(2)總重用量每平方公尺 415 公克之混合料，前者的配比設計可提供反光 R5 ($\geq 300 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$) 等級，抗滑則可提供接近 S5 ($\geq 65 \text{ BPN}$) 等級。因此，得以再度驗證 Swarco Solidplus 600-1000 與 Swarco Korund 以 1:1 充分混合後，採前後盒混合外撒能獲得優異的雙效性能，並且總重可調降至 390 公克至 400 公克之間。

編號(3)與(4)同為 Swarco Solidplus 600-1000 玻璃珠置於前外撒盒，Swarco Korund 抗滑骨材置於後外撒盒，兩材料重量比例接近 1:1 分別撒佈，但(3)與(4)之重量使用略有不同，兩者在反光表現皆極為優異，同編號(1)均可達 R5 等級 ($\geq 300 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$) 等級。而整體的標線抗滑表現也屬於伯仲之間，直到施工後第三個月的檢測依舊能維持 S4 ($\geq 60 \text{ BPN}$) 等級。其中，又以編號(3)之外撒總量較編號(4)少 25 公克之高反珠，較具成本考量上之經濟性。而綜觀使用 Swarco Solidplus 600-1000 之編號(3)與(4)的標線性能表現，均較使用 Swarco Solidplus 100-800 之編號(5)與(6)優秀且穩定，代表較大粒徑之高反珠能比小粒徑者提供更佳的反光效果，此結果亦與國外研究文獻[39]相互呼應。

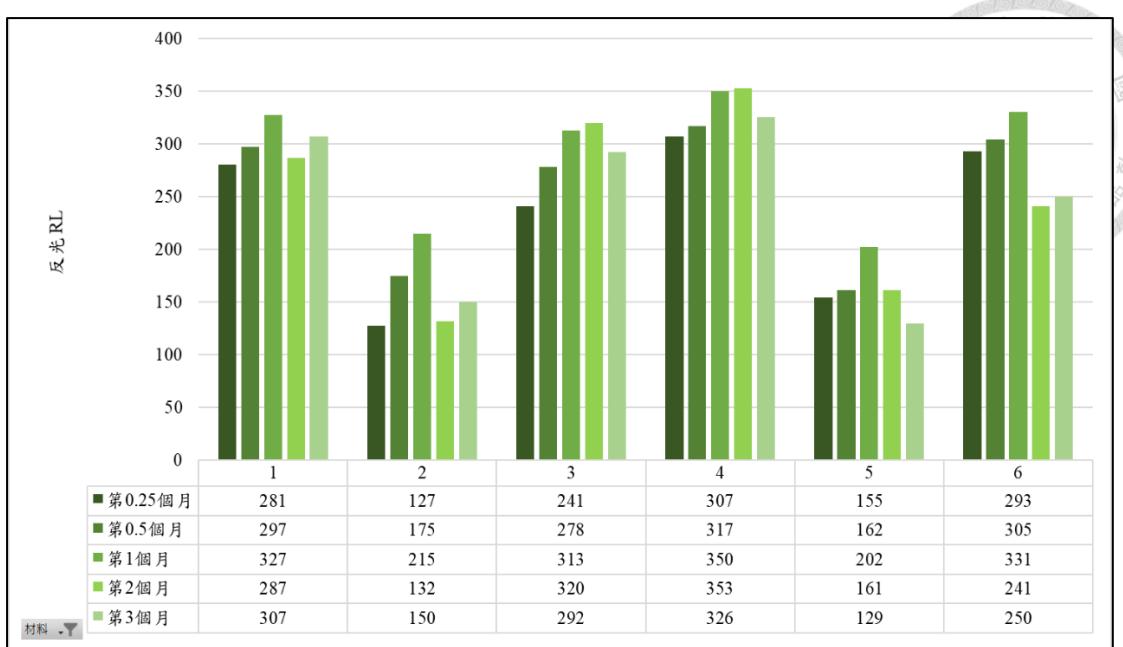


圖 3.15 臺大校總區標線反光性能追蹤

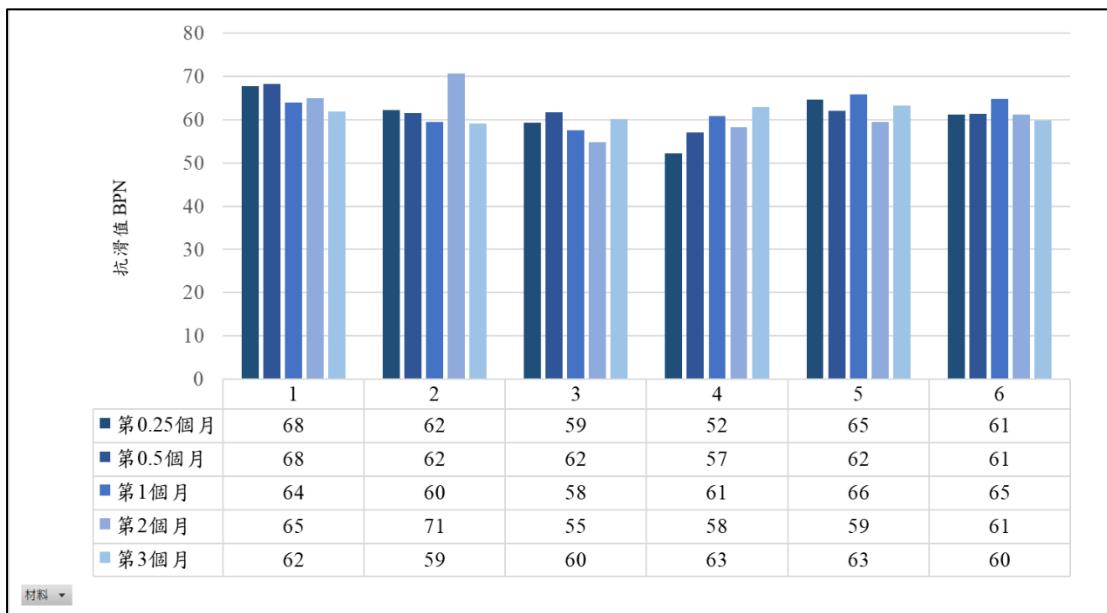


圖 3.16 臺大校總區標線抗滑性能追蹤

綜上所述，歸納本次臺大校總區配比實驗及追蹤檢測成果，可得到編號(1)前後外撒盒皆以 Swarco Solidplus 600-1000 + Swarco Korund 1:1 混合料(各約 195 公克)，具備良好的混合外撒成效；編號(3) 前外撒盒 Swarco Solidplus 600-1000(215 公克)搭配後外撒盒 Swarco Korund(210 公克)前後分開外撒，屬於一合理且有效的外撒重量選擇。並且彙整出以下三大重點：



(一) 將 Swarco Solidplus 600-1000 與 Swarco Korund 以 1:1 充分混合後，採前後外撒盒共同撒佈，再次驗證為可行，然外撒材料總重可調降至 390 公克至 400 公克之間。

(二) 將 Swarco Solidplus 600-1000 玻璃珠置於前外撒盒，Swarco Korund 抗滑骨材置於後盒，兩者比例接近 1:1，且總重介於 400 公克至 420 公克之間的組合應為合適。

(三) 根據不同外撒總量的使用，顯示出標線外撒材料對於標線性能並非呈現線性增長關係，每單位面積的熱拌聚酯存在最大外撒量的極限公克數。若欲尋求更高效果的反光或抗滑性能，則需藉由其他高折射率的玻璃珠與高硬度的抗滑骨材，而材料成本則可能隨之增加。

3.2.1.4 臺大竹北校區配比實驗及追蹤檢測成果

藉由臺大水源校區與校總區的性能追蹤檢測，以及對劃線機與外撒盒多次仔細調校確認外撒量控制，顯示 Swarco Solidplus 600-1000 + Swarco Korund 以重量比 1:1 混合料置於前後雙外撒盒且各自撒佈 195 公克之雙效性能，與前盒以 Swarco Solidplus 600-1000 外撒 215 公克，搭配後盒撒料 Swarco Korund 採取 210 公克之標線反光與抗滑表現，兩者均為合適之設計。不過嚴謹起見，本研究選擇在臺大竹北校區再次進行重現性實驗(圖 3.17)，且精煉臺大校總區之劃設成果，選定四種配比如表 3.3 所述。



圖 3.17 臺大竹北校區平坦度驗證實驗道路標線

表 3.3 臺大竹北校區四種外撒材料配比設計



編號	後外撒(公克/平方公尺)	前外撒(公克/平方公尺)
A	1 : 1 混合料 Swarco Solidplus 600-1000 + Swarco Korund 195 公克	1 : 1 混合料 Swarco Solidplus 600-1000 + Swarco Korund 195 公克
B	Swarco Korund 210 公克	Swarco Solidplus 600-1000 215 公克
C	1 : 1 混合料 Swarco Solidplus 600-1000 + Swarco Korund 310 公克	無
D	1 : 1 混合料 Swarco Solidplus 600-1000 + Swarco Korund 400 公克	無

關於本次竹北校區 A、B、C、D 四種外撒材料配比設計的說明如下：A 料為前後各外撒 195(公克/平方公尺)，外撒總重 390(公克/平方公尺)之 Swarco Solidplus 600-1000 + Swarco Korund 重量比 1:1 混合料。B 料則為 Swarco Solidplus 600-1000 玻璃珠置於前外撒盒撒佈 215 公克，Swarco Korund 抗滑骨材置於後外撒盒撒佈 210 公克，前後外撒盒兩者重量比例亦接近 1 : 1，總重達 425 公克之組合，此兩種組合即依照前述兩次現地實驗(臺大水源校區與臺大校總區)所得建議而設定。此外，本次實驗尚額外新增 C 料與 D 料 2 種外撒配比，同樣使用 Swarco Solidplus 600-1000 + Swarco Korund 以重量 1:1 混合料，並僅以單一後外

撒盒分別撒佈 310 公克與 400 公克。不僅嘗試以單外撒盒的撒佈機制模擬現今多數標線施工廠商所使用之外撒方式，比較標線性能是否會受到外撒方式影響，以作為後續推廣應用之參考，同時也持續調降外撒總量，力求更具經濟效益之外撒材料配方。在 C 與 D 之間存在之總量 90 公克差異，主要因為外撒盒之外撒量調整無法連續，最接近之兩組外撒量即為 310 公克與 400 公克。

經過三個月的標線反光性能追蹤(圖 3.18)和抗滑性能追蹤(圖 3.19)成果，可發現 A、B、C、D 四種外撒材料配比皆有極良好雙效表現，可提供 R4(≥ 200 mcd/m²/lx)等級之標線反光服務水準，抗滑性能也到達 S5 (≥ 65 BPN)等級。雖然本次竹北校區的標線繪設位置，屬於封閉交通之平坦度驗證實驗道路，但其中又以 B 料的抗滑性能格外亮眼一度達到 85 BPN，更足以負荷開放交通的磨損使用。而 A、C、D 料皆為混合料，三者的表現也非常近似，意即 Swarco Solidplus 600-1000 與 Swarco Korund 以 1:1 充分混合後，無論採前後盒共同外撒，抑或是單一外撒盒撒佈，都具有良好的反光與抗滑效果，確認兩種外撒方式都為可行方案。同時，如果慮及材料使用的經濟成本效益，採用單盒撒佈時則可從總量約 400 公克，降至 310 公克，便足以發揮突出的雙效標線性能。

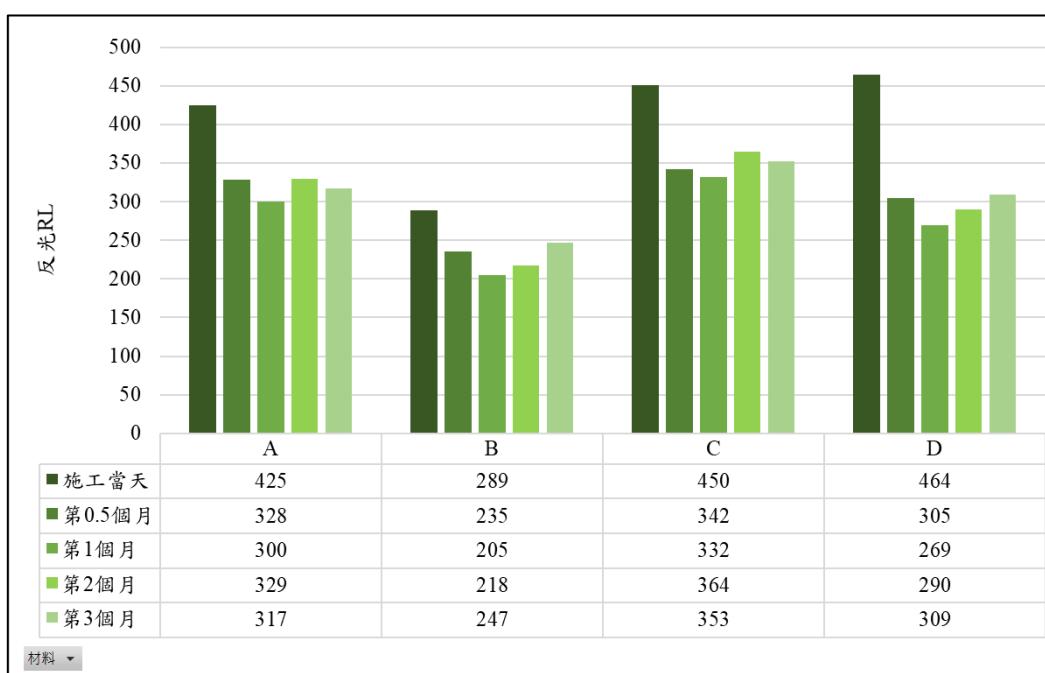


圖 3.18 竹北校區標線反光性能追蹤

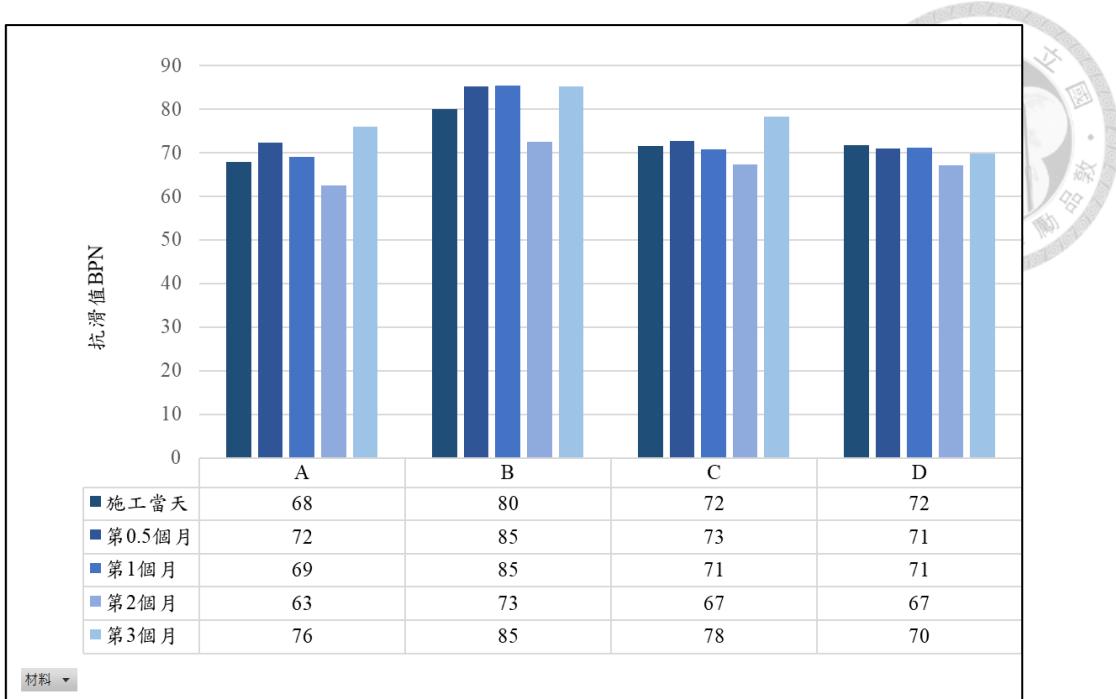


圖 3.19 竹北校區標線抗滑性能追蹤

綜合先前於臺大水源校區八種外撒材料配比(標線劃設面積 4.0 平方公尺)，接著臺大校總區六種外撒材料配比(標線劃設面積 4.55 平方公尺)，以及臺大竹北校區四種外撒材料配比(標線劃設面積 9.0 平方公尺)的追蹤檢測成果與成效重現性探討，本研究於臺北市市區道路之實際標線劃設外撒配比將建議：

(一) 將 Swarco Solidplus 600-1000 玻璃珠置於前撒盒外撒 210 公克，搭配 Swarco Korund 抗滑骨材置於後撒盒外撒 215 公克，前後雙盒共計約 425 公克之外撒配比組合應為合適。

(二) 將 Swarco Solidplus 600-1000 玻璃珠與 Swarco Korund 抗滑骨材經重量比 1：1 充分混合後，採單一外撒盒亦為可行，且總重可降至 310 公克左右。

3.2.2 現地劃設之雙效標線材料配比說明

依據本研究對標線雙性能追蹤數據，確切肯定高反珠對標線長期反光性能之貢獻。並考量目前市售 II 型標線訴求較高抗滑性能表現，但其反光性能並不理想，因此本研究自訂熱拌聚酯的標線材料要求，委託標線材料製造廠商以市售 II

型抗滑標線(一般內含約 23% 第一類玻璃珠)為熱拌聚酯基礎，但使用折射率 1.65 且粒徑相近之 Swarco Solidplus100 - 800 替代原本 23%的第一類玻璃珠。並且為了確保標線長期能有良好反光性能且不影響抗滑表現，略提升高反珠使用量至 25%。至於抗滑材料則不另外添加或更動，維持 II 型標線原先具高抗滑之配比。同時，基於本研究歷次於臺大水源校區、校總區、竹北校區之材料配比實驗與追蹤，提出三項外撒材料建議：

- (一) 外撒材料以粒徑相近之高反珠與抗滑骨材搭配；
- (二) 兩種外撒材料之每平方公尺外撒重量以接近 1：1 為佳；
- (三) 若採前後外撒盒各自撒佈，建議以前外撒玻璃珠搭配後外撒抗滑骨材，總量約為 420 公克，而兩料充分混合撒佈則可降至 310 公克左右。

因此，本研究根據上述結果，規劃二種最為合適之現地標線外撒模式(圖 3.20、表 3.4)：其一，「甲料」為每平方公尺外撒總量 310 公克，以 1:1 比例混合粒徑分佈相近之 Solidplus 600 -1000 與 Korund 後，置入單一外撒盒均勻撒佈，此種佈撒方式預期能獲得不錯的標線雙性能成果，如此則對現有市場標線劃設廠商之未來施工調整方式衝擊最小。其二，「乙料」則為研究過程當中亦獲得不錯成果之前外撒 Solidplus 600-1000 與後外撒 Korund，前後外撒量設計各為每平方公尺 215 公克、每平方公尺 210 公克，外撒總量共計為 425 公克。

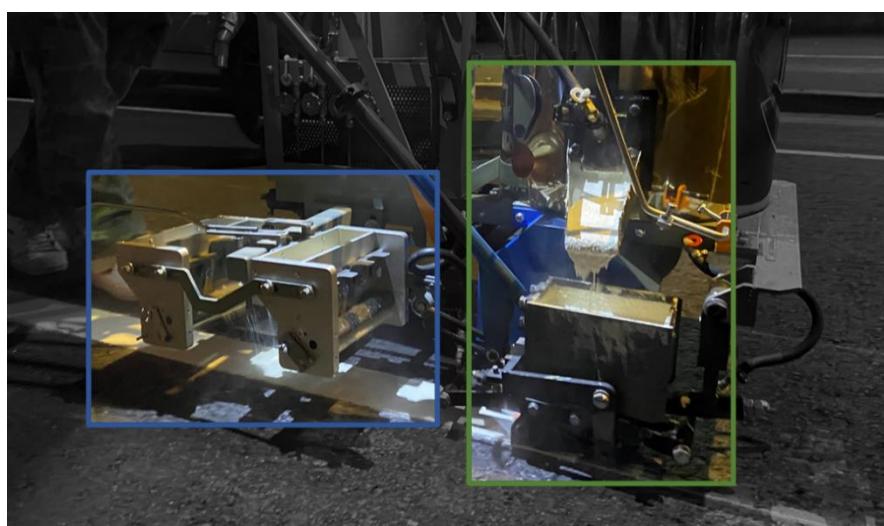


圖 3.20 現地雙效標線劃設之聚酯出料口與雙外撒示意圖

表 3.4 現地雙效標線劃設之甲、乙料材料配比



材料 配比	甲料	乙料	
標線 材料	市售 II 型抗滑熱拌聚酯標線(含填充劑、助劑)		
內摻 材料	玻璃珠 Swarco Solidplus 100 – 800，約佔 25 %		
	一般抗滑骨材，約佔 14 %		
外撒 材料	前 外 撒	無	玻璃珠 Swarco Solidplus 600 - 1000 約 215 (公克/平方公尺)
	後 外 撒	混合料 1 : 1 (玻璃珠 Swarco Solidplus 600 – 1000 + 抗滑骨材 Swarco Korund) 約 310 (公克/平方公尺)	抗滑骨材 Swarco Korund 約 210 (公克/平方公尺)

3.2.3 雙效標線現地劃設規劃

本論文研究為執行臺北市政府工務局新建工程處「111 年度臺北市區道路熱處理聚酯標線之抗滑與反光性能追蹤委託專業服務」計畫，本次雙效標線之現地劃設路段經過與各單位共同討論協商後，最終選擇臺北市中正區「紹興南街」做為本研究之目標場域。該道路屬於一般市區道路，道路由北到南串聯忠孝東路、仁愛路、信義路，與鄰近臺北市主要幹道中山南路和林森南路屬於平行關係。經現地交通流量觀測(圖 3.21、圖 3.22)得知，相較於鄰近的平行幹道而言，紹興南街的交通車流量較少，且該路段早晨尖峰、午間離峰、黃昏尖峰交通量也並無明顯差異，其交通量約為每小時 300 PCU，多以汽機車為主，較少貨車與大型車輛。



圖 3.21 紹興南街交通量觀測

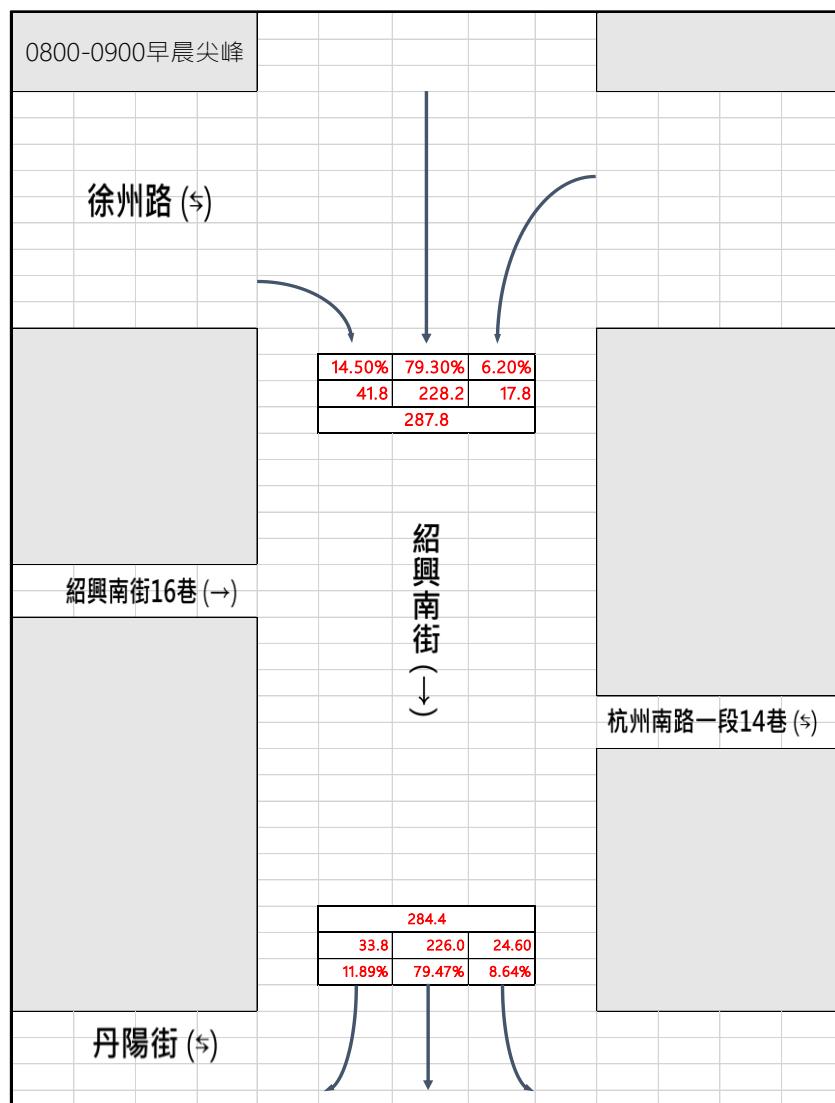


圖 3.22 紹興南街早晨尖峰交通量資料

而經過現地場勘評估交通量與既存的道路標線，並考量往後標線性能檢測時之交通維持條件，盡可能降低對周遭的交通影響程度，最終確定之標線現地劃設路段範圍為「紹興南街(B0K +090~200)」徐州路至丹陽街口。道路的車道佈置為全單向雙車道，平均寬度約 12.737 公尺，並隨道路銑鋪工程完工之後，立即於民國 112 年 4 月 13 日夜間 22：00 開始道路標線之劃設。圖 3.23 為施工當日協助標線廠商於現地劃設雙效標線之現場照片，同時遵循施工規範第 02898 章標線現場施工注意事項，並格外注意劃線機之撒佈狀況與熱拌聚酯之加熱溫度。

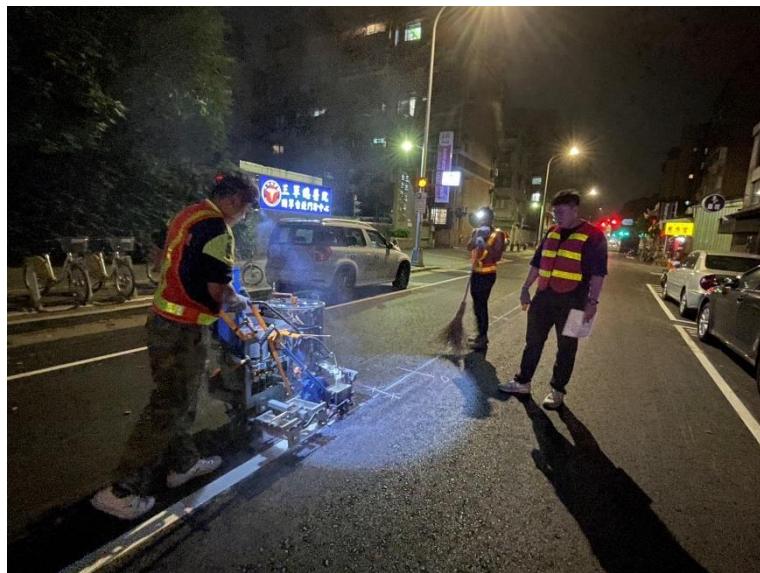


圖 3.23 紹興南街現地雙效標線劃設

而本次雙效標線劃設面積共計 14.9 平方公尺，其中包含 6 條車道線、5 公尺機車停等區垂直行車方向之橫向標線、6 條行穿線、以及 1 個指向箭頭，各類標線之施工劃設位置規劃如圖 3.24，黃底為選定之施工區域，紅色圖樣則為試辦標線之位置。同時，甲料與乙料兩種外撒原則上平均分配劃設面積，但指向箭頭數量僅設計 1 個，另一個為 II 型標線對照組。考量到指向箭頭施工較為複雜，難以分為一半面積進行施工，故僅由甲料外撒工法執行之。至於圖 3.25 則為各標線材料之佈置規劃，圖例中黑底為甲料，斜線則為乙料。此外，為能掌握標線性能狀態與變化，本研究針對本次新劃設之標線自施工當日、第 14 天、第 30 天、第 60 天、第 90 天…到第 360 天，展開逐月的長期追蹤檢測。檢測抽樣密度高於

ASTM D7585 要求，足以深入了解各樣式標線雙性能之均勻性與穩定性，實驗組和對照組共計檢測 102 個反光點位、42 個抗滑點位，將於後續第四章進行檢測數據之彙整與分析。

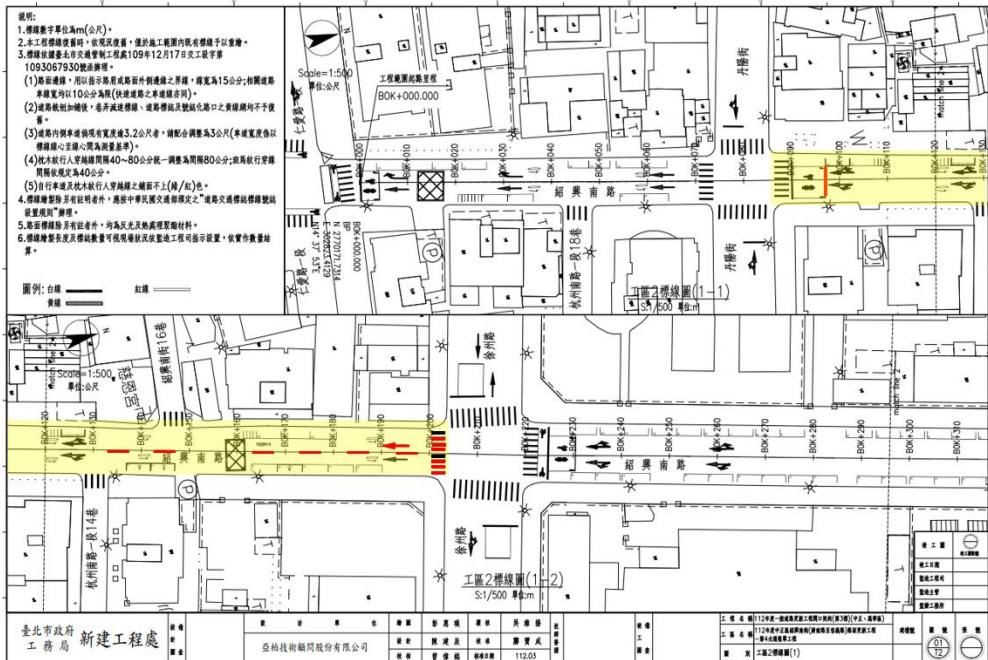


圖 3.24 各類標線之施工劃設位置

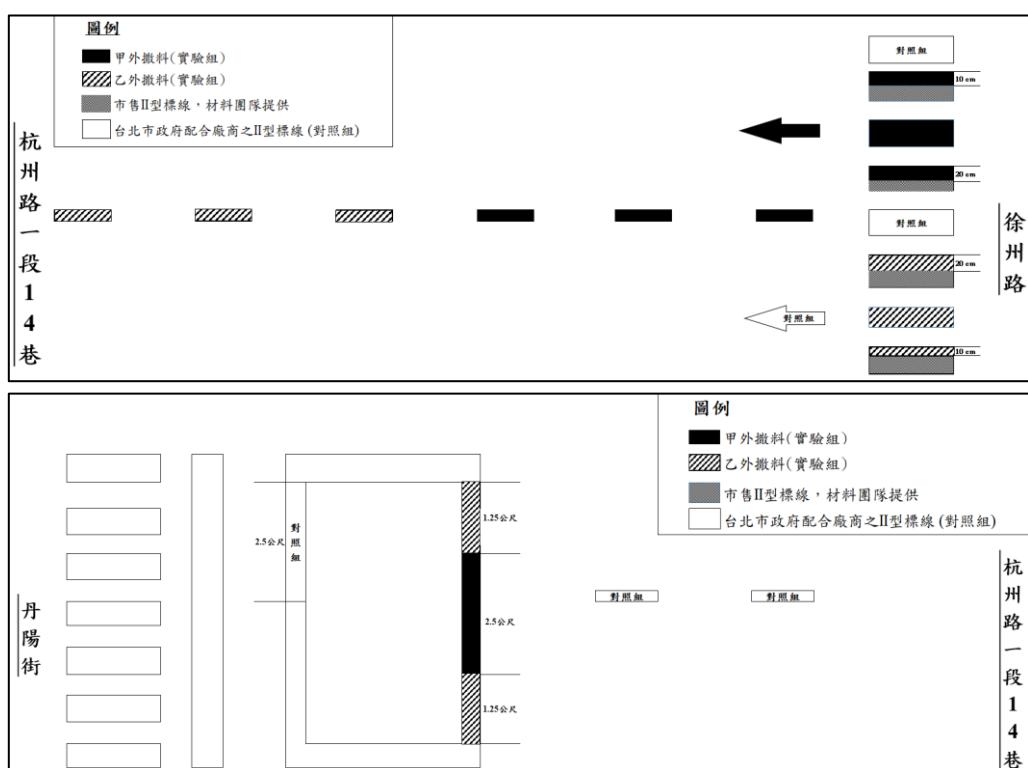


圖 3.25 紹興南街各標線材料之佈置規劃



3.3 標線試片外撒量成效實驗

承接雙效標線之現地劃設實驗，本研究為能更仔細地探究各式標線外撒材料之不同外撒重量與標線性能間之關係，故規劃一系列之標線試片外撒量成效實驗。預期藉由各種外撒材料之標線試片製作，掌握不同外撒量所對應之性能成效，以此尋求更佳的材料配比建議。以下將依序說明標線試片之外撒量設計，以及關於外撒儀器與試片劃設步驟。

3.3.1 標線試片之外撒量設計

經回顧國內外有關標線材料之眾多文獻，發現多數研究僅以不同的水漆型、溶劑型、熱熔型標線塗料，搭配特定重量之玻璃珠或抗滑料等外撒材料，檢測其實驗配比之標線性能。整體而言，關於外撒材料之外撒量調整缺乏彈性且較不完整，並且無法有系統地掌握不同材料外撒量對於標線性能之影響差異，對於缺乏標線反光與抗滑性能之配比研究，以及較少針對各種外撒材料之材料搭配與外撒量等材料經濟性討論均實屬可惜。

為此，本研究規劃一系列標線試片之外撒量成效實驗，於實驗室內依照不同外撒材料之外撒量配比製作標線試片。藉由可主動調整外撒重量之外撒儀器，穩定且定量地撒佈各種外撒材料，從最基礎之標線外撒量研究切入，探討標線之外撒量成效結果。在材料選擇方面，本研究均以我國較為常見之抗滑 II 型熱拌聚酯作為標線塗料之基底，以及較為熟悉之玻璃珠 Swarco Solidplus 600-1000 與抗滑骨材 Swarco Korund 為外撒材料選擇，根據五種實驗目的而設計不同之外撒材料配比。以下將陸續說明標線試片 A 料、B 料、C 料、D 料和 E 料之各組實驗目的和外撒材料配比。

首先，在 A 料配比部分，接續紹興南街甲料(玻璃珠 155 公克與抗滑骨材 155 公克 1：1 混合料)，以外撒總量 310 公克為基準，上下增減外撒總量公克數，並以最大外撒量不超過標線表面最大附著量 500 公克，維持玻璃珠與抗滑骨材等比例均勻混合為配比設計原則。規劃 A1 到 A8 共八種配比，外撒總量分別為 240

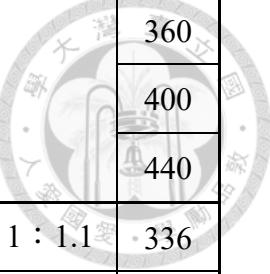
公克、280 公克、300 公克、320 公克、340 公克、360 公克、400 公克、440 公克，以此進行 1：1 混合料之最佳外撒量測試。

接著，在 B 料配比部分，根據我國現今標線驗收仍以抗滑值 BPN65 為標準，在相對重視標線抗滑性能之前提下，依循近似 1：1 的混合比例，但保持抗滑骨材仍占多數滿足標線抗滑需求。以玻璃珠 160 公克為基礎，分別以玻璃珠與抗滑骨材 1：1.1、1：1.2、1：1.3 之混合比例，設計 B1 外撒總量 336 公克、B2 外撒總量 352 公克、B3 外撒總量 368 公克三種配比，測試近似 1：1 比例之外撒對於標線雙性能變化之影響。

至於 C 料配比部分，設置 C1 為純抗滑 II 型熱拌聚酯且無任何外撒材料，以此做為標線性能之對照基準。同時，在 D 料配比部分，以探討不同抗滑骨材外撒量對於標線性能影響為實驗目的，設計 D1 至 D6 六種配比，從少至多依序為 80 公克、160 公克、240 公克、320 公克、400 公克、480 公克之定量區間抗滑骨材外撒量。而在 E 料配比部分，則目標分析不同玻璃珠外撒量對於標線性能影響，設計 E1 至 E6 六種配比，同樣為 80 公克到 480 公克之每 80 公克定量區間的玻璃珠外撒量實驗。關於標線試片外撒量之詳細實驗配比，另整理如下表 3.5(A 料、B 料)，以及表 3.6(C 料、D 料、E 料)所呈現。

表 3.5 標線試片外撒量實驗配比(A 料、B 料)

配比 編號	標線 塗料	外撒材料(公克/平方公尺)			
		玻璃珠 Swarco Solidplus 600-1000	抗滑骨材 Swarco Korund	外撒 比例	外撒 總量
A1	抗滑 II 型 熱拌聚酯	120	120	1 : 1	240
A2		140	140		280
A3		150	150		300
A4		160	160		320
A5		170	170		340



A6		180	180	360 400 440
A7		200	200	
A8		220	220	
B1	抗滑 II 型 熱拌聚酯	160	176	1 : 1.1 336
B2		160	192	1 : 1.2 352
B3		160	208	1 : 1.3 368

表 3.6 標線試片外撒量實驗配比(C 料、D 料、E 料)

配比 編號	標線 塗料	外撒材料(公克/平方公尺)	
		玻璃珠 Swarco Solidplus 600-1000	抗滑骨材 Swarco Korund
C1	抗滑 II 型 熱拌聚酯	0	0
D1	抗滑 II 型 熱拌聚酯	0	80
D2		0	160
D3		0	240
D4		0	320
D5		0	400
D6		0	480
E1	抗滑 II 型 熱拌聚酯	80	0
E2		160	0
E3		240	0
E4		320	0
E5		400	0
E6		480	0



3.3.2 外撒儀器與試片劃設步驟

為能達到上述外撒量成效實驗各種配比之外撒量需求，本研究特別與廠商合力研發製作可以主動且精準調整外撒量之外撒儀器，儀器外觀如下圖 3.26、圖 3.27 所示。該外撒儀器主要模擬實際刮板式標線的施劃方法，同樣以刮板式劃斗與滾軸式外撒盒在儀器平臺劃設標線，並結合電動化與自動化之改良設計，打造一臺不但能定速推動劃斗施劃標線，甚至可以調整多樣性外撒重量之標線試片劃設外撒儀器。



圖 3.26 外撒儀器外觀



圖 3.27 減速齒輪與電動馬達(左)、可變電阻器與儀器控制器(右)

關於外撒儀器之架構與功能說明，主要係將滾軸式外撒盒裝置於外撒儀器之左右雙螺紋旋桿，並將劃斗架設於外撒盒前方，藉由兩顆電動馬達作為動力來源，一顆電動馬達作用於右側螺紋旋桿，使外撒盒與劃斗能以穩定的速度行進，另一顆電動馬達作用於滾軸式外撒盒之滾軸。搭配減速齒輪降低轉速提升扭矩，並以可變電阻器進行調整，主動式控制滾軸式外撒盒之出料滾軸轉速。如此一來，便可透過外撒儀器完成熱拌聚酯的拖劃，並且達到預期設定之外撒量目標。

此外，當選擇標線試片該施劃於何種材質表面時，雖然瀝青貼片能提供較接近實際道路鋪面的表層紋理與孔洞狀態，但考量到日後標線試片移動與存放的便利性，以及製作標線試片時難免會因人工失誤導致瑕疵須重新製作，故本研究選擇使用鋁板作為標線試片之載體。鋁板不僅具備重量輕、移動方便、成本較低等優點，同時，又因鋁板具備光滑的材質表面，可待熱拌聚酯標線冷卻定型後，敲打鋁板背面使瑕疵標線結塊脫落，重複利用鋁板繼續劃設。至於鋁板的尺寸大小選擇，則須將後續使用反光儀與抗滑儀進行性能檢測時所需之量測範圍納入考慮。所以，本研究最終決定以長 50 公分、寬 15 公分之鋁板，劃設各式長 50 公分、寬 10 公分之標線外撒材料配比。

然而有關標線外撒材料之外撒量，經常會因為顆粒形狀、比重、粒徑、靜電...等材料特性影響，而造成不同外撒重量之結果差異。為此，本研究為達到先前設定之 A 料、B 料、C 料、D 料、E 料各配比之預計外撒量公克數，在標線試片實際劃設之前，利用可變電阻逐項調整不同外撒材料之外撒量，而每項外撒量之結果均經過三次測試確認，力求可變電阻刻度的調整結果盡可能地貼近預計外撒量目標，以利後續實驗進行。關於外撒儀器各個配比之外撒量詳細調整結果，可參考下方表 3.7。

表 3.7 外撒儀器之外撒量調整結果

配比 編號	外撒材料	可變 電阻 刻度	鋁板外撒量 (公克/0.05 平方公尺)	換算外撒量 (公克/平方公尺)	預計外撒量 (公克/平方公尺)
A1	混合料 1 : 1	2.4	11.9	238.0	240.0
A2		2.6	14.2	284.0	280.0
A3		2.8	15.2	304.0	300.0
A4		3.0	16.1	322.0	320.0
A5		3.1	17.3	346.0	340.0
A6		3.2	18.2	364.0	360.0
A7		3.6	19.8	396.0	400.0
A8		3.8	21.9	438.0	440.0
B1	混合料 1 : 1.1	3.1	16.7	334.0	336.0
B2	混合料 1 : 1.2	3.2	17.8	356.0	352.0
B3	混合料 1 : 1.3	3.4	18.4	368.0	368.0
D1	Swarco Korund	1.4	3.9	78.0	80.0
D2		2.0	8.0	160.0	160.0
D3		2.6	12.0	239.0	240.0
D4		3.8	15.9	318.0	320.0
D5		5.2	20.1	402.0	400.0
D6		6.2	24.0	480.0	480.0
E1	Swarco Solidplus 600-1000	1.3	3.9	78.0	80.0
E2		1.8	7.9	158.0	160.0
E3		2.2	12.1	242.0	240.0
E4		3.0	16.0	320.0	320.0
E5		3.8	20.3	406.0	400.0
E6		4.6	24.3	486.0	480.0

而標線試片之劃設流程可分為八大步驟，如下方圖 3.28 所呈現：(1)放置鋁板試片並確認劃斗預計劃設位置；(2)添加欲使用之外撒材料至滾軸式外撒盒中，並開啟十公分寬之外撒閘門；(3)根據各材料之預計外撒量調整可變式電阻刻度；(4)加熱熱拌聚酯至合適之劃設溫度，約為攝氏 185 到 195 度間；(5)加熱刮板式劃斗至可施劃之溫度；(6)將加熱後之熱拌聚酯快速倒入劃斗中；(7)確認馬達設定速度，啟動儀器開始劃設標線，過程中須手扶劃斗，並於劃設結束時收掉劃斗

斷料；(8)檢查劃設完成之標線試片是否有拖料或不均勻等瑕疵，經品管確認後繼續製作其他標線試片。

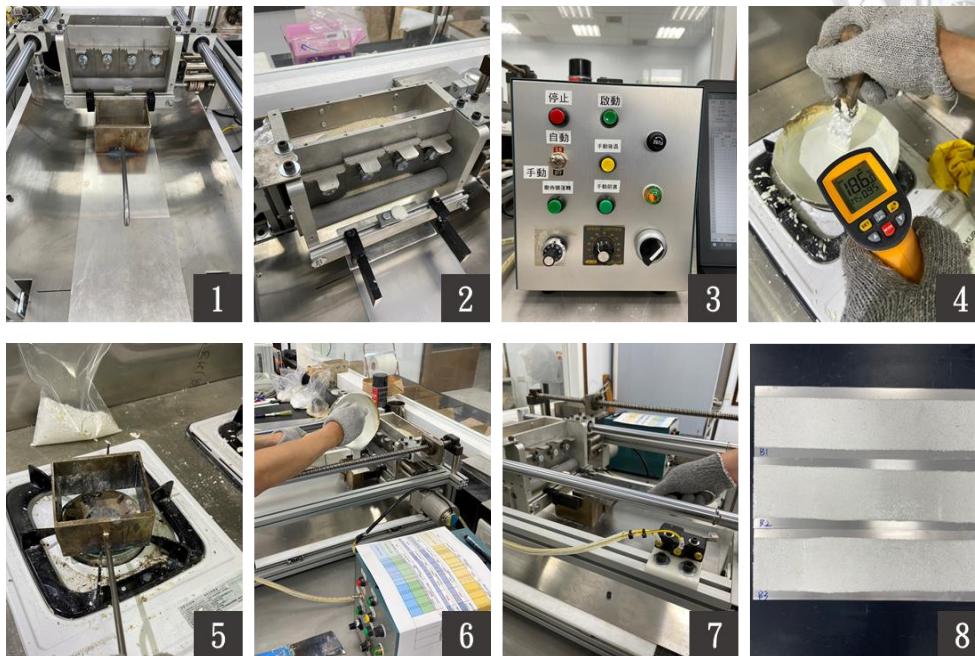


圖 3.28 標線試片劃設步驟說明圖

考量到標線劃設後初期性能易受到標線表面疏水膜干擾，顧並無在標線施工完畢後立即進行標線性能檢測，而是將各標線試片放置於臺大土木工程系館頂樓進行自然環境露天置放(圖 3.29)。規劃於曝曬當天、7 天、14 天、21 天、28 天、56 天後進行標線反光與抗滑雙性能檢測，並在後續章節分析不同外撒量之成效差異結果。

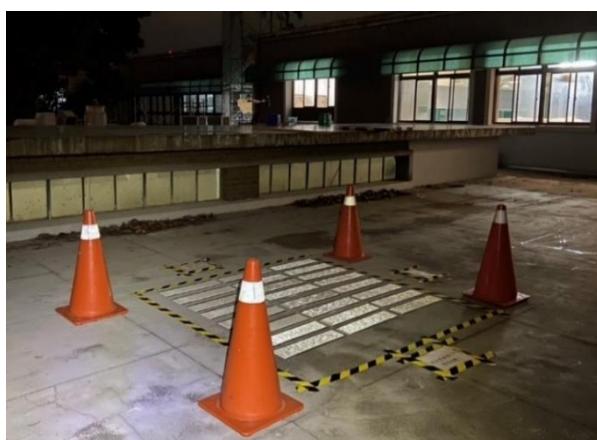


圖 3.29 標線試片之放置環境

第四章、實驗數據收集與分析



4.1 現地雙效標線之長期追蹤成果

承接第三章有關現地雙效標線劃設實驗、標線試片外撤量成效實驗之配比規劃，以及後續執行之標線性能追蹤檢測，將於第四章詳細說明實驗數據收集與分析，針對現地雙效標線反光與抗滑之雙性能長期變化，進行實驗結果探究與綜合比較。同時說明標線試片外撒量之具體成效，並且根據標線性能數據進行迴歸分析，掌握各類外撒材料與標線性能間之關係。

4.1.1 各標線配比材料檢測數據分析

關於現地雙效標線劃設實驗之檢測頻率，本研究自施工當天、兩周、第一個月、第二個月...展開逐月追蹤直到第十二個月，每次檢測均配合紹興南街道路封閉管制，確保檢測工作安全無虞。而標線反光性能檢測儀器則使用瑞士廠牌之 ZEHNTHER ZRM 6014，於每次檢測前均檢查儀器自我校正數值皆符合原廠設定標準，執行實驗組和對照組共計 102 個反光檢測點位。標線抗滑性能檢測部分則使用義大利製造 CONTROLS 英式擺錘抗滑試驗儀，並確認檢測之橡膠滑塊符合硬度與磨損之規範要求後，遂進行 42 個抗滑點位之抗滑檢測。以此完整地掌握雙效標線甲料、乙料、II 型標線於各時間之性能狀態與變化，並依序以標線回歸反射係數 RL、擴散反射係數 Qd、抗滑性能 BPN 進行深入探討。

4.1.1.1 標線回歸反射係數 RL 分析

歷經為期一年的實地檢測追蹤，本研究將紹興南街劃設的甲料、乙料及 II 型標線自劃設完工當天到第十二個月歷次的反光性能回歸反射 RL 彙整如圖 4.1 所示。同時因長期追蹤過程中受到紹興南街與徐州路路口的管線搶修作業影響，原先既存之乙料與 II 型行穿線，遭到重繪標線覆蓋無法進行量測，故部分數據自第七個月後即不再持續，並且將重繪標線納入檢測目標，作為一般市區道路搶修作業後之標線對照組。

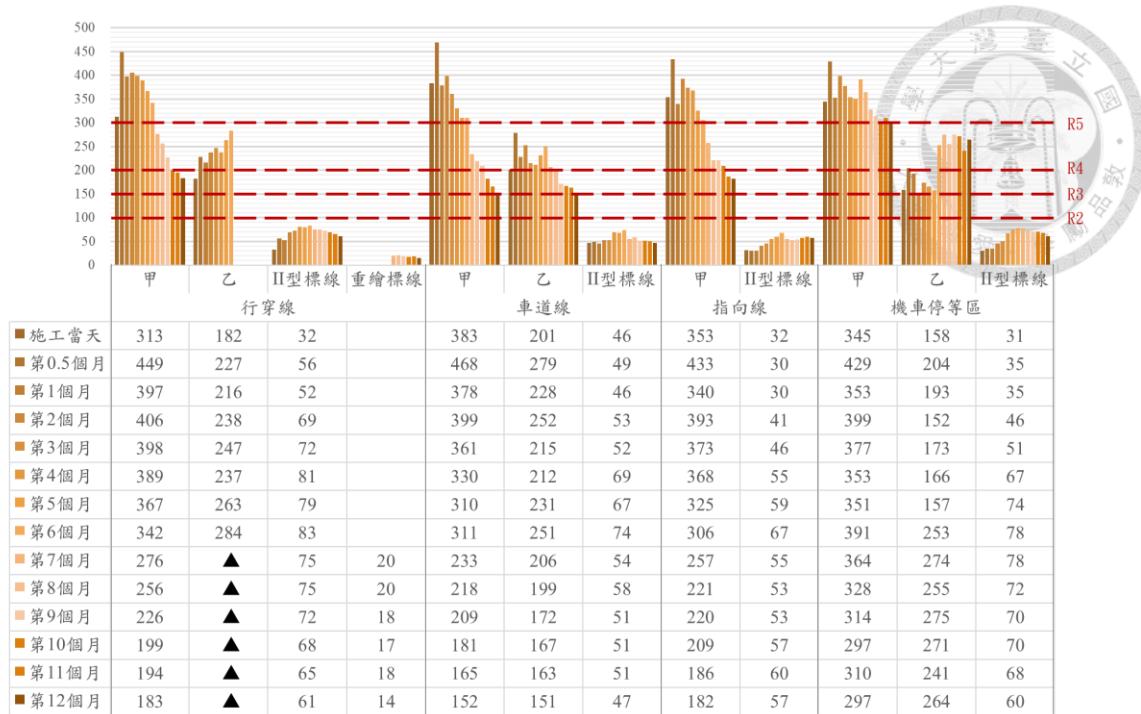


圖 4.1 甲料、乙料、II 型標線施工當天至第十二個月之 RL 性能分佈

(三角形：受鄰近路口工程影響，既有標線遭重繪標線覆蓋)

從十二個月之 RL 性能分佈可發現，在施工當天使用玻璃珠 Swarco Solidplus 600-1000 與抗滑骨材 Swarco Korund 1：1 均質混合，單一外撒 310(克/平方公尺)混合料的甲料，即可達標反光性能最高等級 R5($\geq 300 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)以上；而使用前外撒玻璃珠 215 (公克/平方公尺)搭配後外撒抗滑骨材 210 (公克/平方公尺)的乙料，則位於 R3($\geq 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)到 R4($\geq 200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)等級之間。並且隨著標線的表面疏水膜消去，施工後兩周甲、乙料的 RL 反光數值均有所提升，車道線甲料最高可達 468($\text{mcd/m}^2/\text{lx}$)、車道線乙料可達 279($\text{mcd/m}^2/\text{lx}$)。無論是甲、乙料在回歸反射 RL 性能皆表現優異，滿足用路人於夜間的標線識別需求，證實先前雙效標線材料配比實驗之成功。

反觀，所有 II 型標線在施工初期的 RL 數值雖略有變化，但是卻仍遠遠不及反光最低門檻 R1($\geq 80 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)。與反光效果突出的甲料形成明顯落差，經實際標線影像拍攝，即可清楚辨識出雙效標線與 II 型標線之視覺差異，如下方圖 4.2 所示。同時重繪標線的反光 RL 數值也明顯落後於其他標線材料，此乃因緊

急搶修道路工程在標線材料與性能要求上未如正式道路之標線施工規定，可預期重繪標線不論反光甚至抗滑性能均不如一般 II 型標線該有的表現，甚至可能因未達最少劃設面積之驗收標準，而成為標線性能疑慮與安全漏洞。



圖 4.2 紹興南街行穿線反光效果之視覺差異對比

而自施工後兩周，隨著道路交通對標線的磨耗和環境因素影響，雙效標線甲料的反光性能呈現自然衰退。主要是因為甲料本身採用單一外撒盒混合外撒粒徑相近的玻璃珠與抗滑骨材，使得玻璃珠回歸反射路徑在初期較不易受到遮蔽干擾，形成優異的反光效果；同時，隨著交通量逐漸磨耗，使顆粒圓滑之玻璃珠較具有稜角之抗滑骨材容易脫落，以至於在內摻之玻璃珠尚未顯現之前，反光 RL 數值逐漸下降之趨勢。其中，第七個月的甲料行穿線、車道線、指向線因鄰近路口搶修作業干擾，導致部分標線表面受汙(圖 4.3)，RL 數值陡然降低。相比於意即距離管線施工範圍較遠的近丹陽街口機車停等區標線，標線表面受工程影響較小，因此甲料機車停等區的 RL 數值跌幅屬於自然交通狀況下之衰減狀況，與甲料行穿線與車道線之劇烈下滑形成明顯對比。



圖 4.3 標線表面因路口鄰近搶修工程施工受汙之結果

關於雙效標線乙料的回歸反射 RL 數據，多數分佈於 150 至 300($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)之間，雖無法與甲料初期傑出的反光性能比肩，但長期而言乙料整體的反光性能呈現逐次上升再緩慢衰退之態勢，此原因主要與甲、乙料的標線外撒撒佈機制與標線受到磨耗有關。乙料因先外撒玻璃珠後外撒抗滑骨材，導致部分反光路徑受阻，其初期的標線反光性能相比於甲料較為遜色。但是，當標線表面上層的外撒抗滑骨材逐漸消耗之後，使得較下層的外撒玻璃珠材料得以嶄露頭角，促成逐次上升的反光 RL 檢測成果。此種觀察由機車停車格之乙料 RL 值特別明顯，因為該橫向標線幾乎必定會受到行經車輛之輾壓，在第 6 個月與第 7 個月的 RL 數值存有顯著的上漲趨勢，往後則又隨著表面剛顯露之玻璃珠日漸脫落反光性能略為衰退。截至第十二個月的追蹤，機車停等區乙料之反光性能已接近甲料，代表兩種撒佈方式之外撒料可能逐漸磨盡，而相通的內摻材料則有類似的表現，雙效標線甲、乙料與周圍 II 型標線的夜間反光識別差異也極為明顯(圖 4.4)。



圖 4.4 紹興南街機車停等區反光效果之視覺差異對比

同樣地此種外撒材料逐漸磨去的標線性能變化，也發生於一般 II 型標線。儘管 II 型標線自劃設當天至一年後的反光性能皆遠遠落後於甲、乙料，但若細究 II 型標線的數據變化，雖其變動幅度不大，但隨著逐月檢測的 RL 數值卻隨之增長再接續緩慢下降。主因是 II 型標線大多選擇以注重抗滑的石英類砂質材料作為外撒材料，而當表面抗滑料脫落時，原先內摻於熱拌聚酯的第一類玻璃珠便得以發揮反光功效。即便如此，仍可發現 II 型標線受限於內摻所使用之玻璃珠折射率

表現平平，RL 數據雖有增長，最高值也僅恰過最基本之 R1($\geq 80 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)等級。無非再次說明玻璃珠材料的折射率選擇，對於標線反光性能有最直接的影響。

然而，雖本研究先前曾多次以紹興南街路口拍攝之車流影片，分析位於路口八條行穿線在不同車輪輾壓頻率下之標線性能與標線厚度變化，但其分析結果較不顯著，無法單純地以交通量預測標線性能發展，須進一步結合更多關於車速、軸重等車輛因素，方能完整地量化解釋交通量對於標線的磨耗影響。在本研究中因難以得知上述數據，故暫不對此深入探討。

總而言之，經由長達一年的標線反光性能追蹤檢測，初期回歸反射性能由甲料領先乙料且優於 II 型標線，後期隨著標線表面的材料更迭，甲、乙料 RL 數值日漸接近均保持 R3 等級以上，具備良好的反光辨識效果，符合研究設定之長期十二個月使用後 RL 性能維持 R2 等級($\geq 100 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)以上。而 II 型標線、重繪標線之反光性能則相較於雙效標線而言望塵莫及，嚴重缺乏標線的夜間識別功能。關於紹興南街各標線材料完整的反光性能目視差異比較，可參考下方圖 4.5。



圖 4.5 紹興南街各標線材料之反光性能比較

4.1.1.2 標線擴散反射係數 Qd 分析

擴散反射係數 Qd 代表在日間視線良好或夜間照明充足情形下，駕駛人目視 30 公尺遠處標線之清晰程度，其數值高低主要受標線熱處理聚酯材料與顏色影

響，與玻璃珠之折射率和使用量較無直接相關，一般使用中的道路標線擴散反射係數 Q_d 倘若能維持在 $100 \text{ (mcd/m}^2/\text{lx)}$ 以上，則可發揮不錯之識別功能，下圖 4.6 為施工當天至第十二個月的 Q_d 檢測彙整圖表。

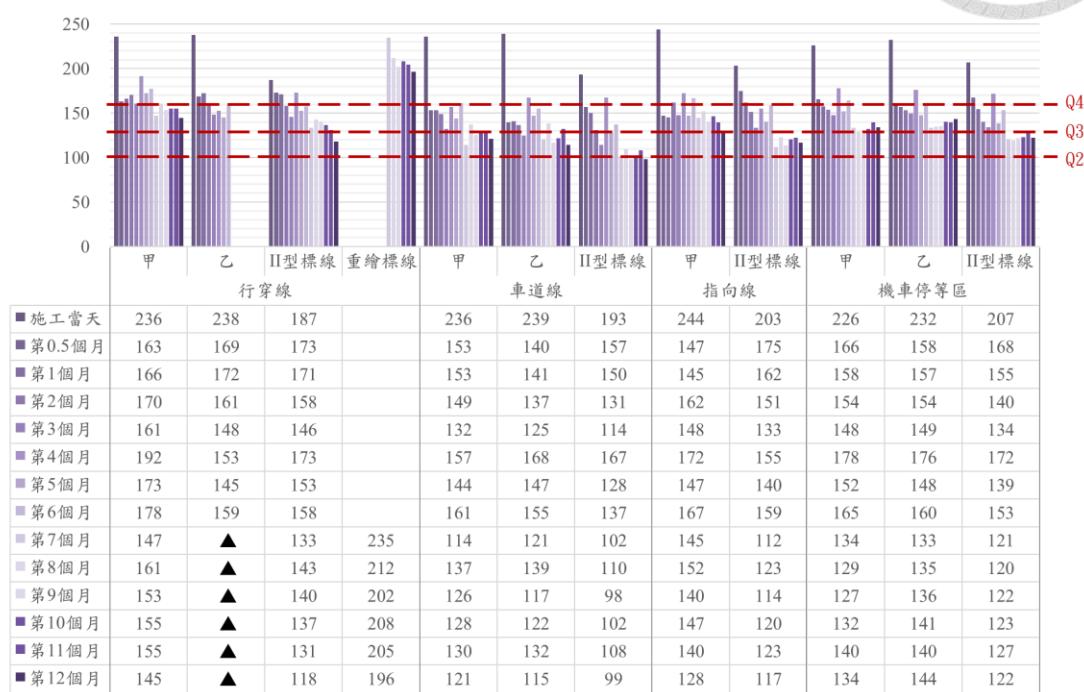


圖 4.6 甲料、乙料、II 型標線施工當天至第十二個月之 Q_d 性能分佈

(三角形：受鄰近路口工程影響，既有標線遭重繪標線覆蓋)

從圖中可知甲料、乙料、II 型標線在施工當天(四月)，因標線表面尚未受到任無污染，可達到白色標線在瀝青混凝土鋪面之最高擴散反射等級 Q4($\geq 160 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)。經過一年的開放交通後，甲、乙料標線的 Q_d 檢測數值均可維持在 $115(\text{mcd/m}^2/\text{lx})$ 以上，略高於 II 型標線，三者皆呈現一類似的穩定衰退趨勢。並且因為本次實驗中三種標線皆為白色標線，所使用之熱拌聚酯基底材料與二氧化鈦添加均屬類似，故不論是施工當天初始值乃至於第十二個月後的 Q_d ，尚能具備一定程度之日間辨識功能。

此外，針對甲、乙料與 II 型標線的 Q_d 歷時變化情形，也可發現甲、乙料因為使用的外撒材料粒徑級配接近，整體而言標線表面較為緻密，對比 II 型標線以較大粒徑之抗滑材料外撒為主的粗糙表面。即便三種標線均經歷第六個月發生之

路口施工影響，甲、乙料雙效標線仍擁有較佳的 Qd 表現和標線外觀維持程度，足以令標線材料使用更具耐久性。

然而縱觀為期一年之 Qd 檢測結果，正常應隨著標線使用表面逐漸變髒 Qd 型成緩降，但在第二個月(2023 年六月)、第四個月(2023 年八月)、第六個月(2023 年十月)卻略為上升，主要原因與降雨條件相關(圖 4.7)。尤其在第四個月時臺北發生多起短延時強降雨之對流雨，因為豪雨造成路面積水，甚至超出既有道路排水負荷導致淹水，意外地對道路標線產生清潔效果。而第六個月則因檢測時間剛好接續短暫陣雨，於剛清潔完之標線表面進行檢測，驗證降雨對於標線表面可視性之提高效用甚佳。

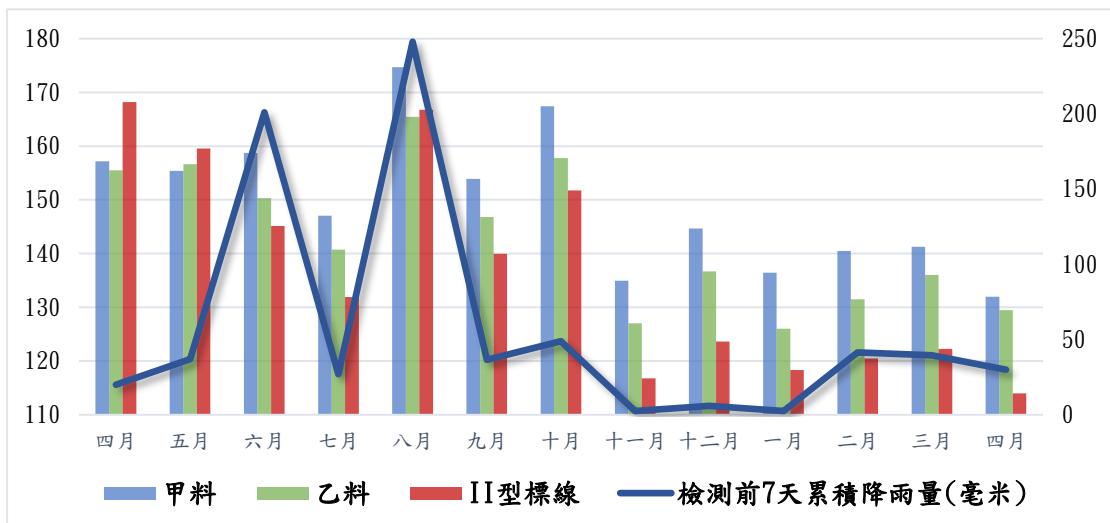


圖 4.7 標線反光 Qd 與環境降雨關係圖

4.1.1.3 標線抗滑性能 BPN 分析

標線抗滑性能是藉由英式擺錘測得 BPN 數值，本研究統整各個檢測點位之抗滑性數如圖 4.8 所示。同時，因為英式擺錘抗滑檢測儀器之橡膠滑塊對溫度變化較為敏感，本研究的 BPN 數值均是經過標線溫度校正公式計算之成果，亦即統一校正檢測數值至標線表面攝氏 30 度的標準溫度，不僅能更貼近臺灣鋪面平均溫度的真實狀況，也能對橫跨寒暑之長期追蹤有一共同對照基礎。

由標線抗滑性能的長期追蹤檢測，可發現甲料、乙料、II 型標線在施工當天因標線表面疏水膜影響，導致極高的 BPN 抗滑數值；隨著車輛磨耗於第二周疏

水膜散去抗滑數值略微降低，除了部分甲料其餘多數標線維持抗滑最高等級 R5(≥ 65 BPN)；接著持續下跌直到第一個月，待疏水膜徹底消散和部分嵌入度不佳的外撒材料剝落後，標線表面狀態趨於穩定，乙料和 II 型標線之抗滑性能皆為突出高於 BPN 65，甲料 BPN 數值則表現一般多落在 BPN 54 到 64 區間。

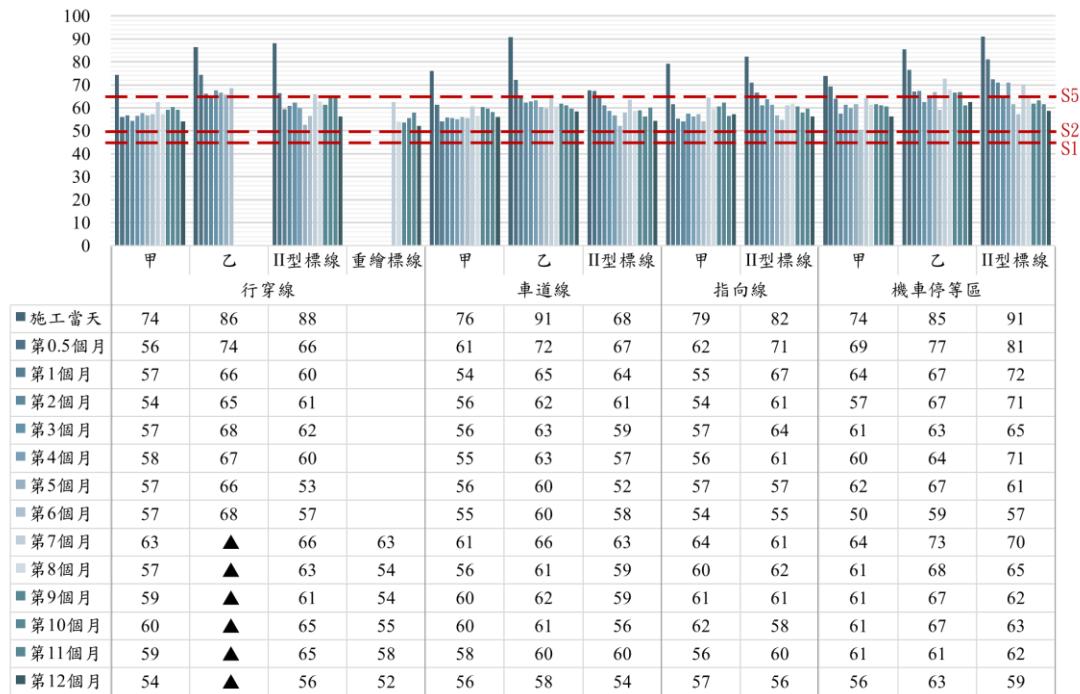


圖 4.8 甲料、乙料、II 型標線施工當天至第十二個月之 BPN 性能分佈

(三角形：受鄰近路口工程影響，既有標線遭重繪標線覆蓋)

隨後逐次檢測三種標線材料的 BPN 數值，雖有些微下降但十分平穩，且整體數值變化幅度不大，意即標線抗滑性能自施工一個月後即具備長期穩定的特性。相比於標線反光性能可能受到玻璃珠露出程度和標線表面狀態等因素影響，標線抗滑性能即使經過路口搶修工程的干擾，BPN 數值僅稍有波動，仰賴骨材高硬度與良好嵌入度的優勢，仍保有一定程度的抗滑效果。而在經歷 12 個月的使用後，甲、乙料和 II 型標線也依舊具備抗滑等級 S3(≥ 55 BPN)之性能水準，能確實降低用路人行經標線時發生打滑之外風險。

綜觀三種標線材料歷經一年的 BPN 實驗數據，以雙效標線乙料的長期抗滑表現較最佳。雖然乙料初期的反光效果不如甲料亮眼，但是在抗滑性能部分卻因

後外撒抗滑骨材於標線表面的發揮，使乙料的抗滑效果明顯優於甲料，且與 II 型標線處於伯仲之間。雙效標線乙料不但不遜色於單方面注重抗滑性能的 II 型標線，更同時具備 II 型標線所缺乏的反光性能，說明乙料除了可提供良好的夜間識別功能之外，也足以兼顧現有規範對於標線的高抗滑需求。

除此之外，依照現行標線工程驗收僅以 BPN 抗滑數值大於 65 為標準，為確保標線驗收能符合實際的標線性能變化與長期狀態，本研究根據現地標線為期一年之抗滑檢測數據，進一步對比標線施工當天、兩周、一個月、兩個月、三個月、四個月、六個月各時段與十二個月之 BPN 性能差異百分比(表 4.1)。分析結果得知各標線施工當天與十二個月的 BPN 抗滑數值差異最大，平均性能差異為 42.2%，接續兩周與十二個月的 19.6% 差異，縮小至一個月與十二個月的 10.5%，隨後 BPN 數值自第二個月至第十二個月性能差異逐漸收斂。

表 4.1 標線各時間 BPN 性能差異百分比

各時間 BPN 性能 差異百分比(%)	行穿線		車道線			指向線		機車停等區			差異絕對值 平均(%)
	甲料	II 型	甲料	乙料	II 型	甲料	II 型	甲料	乙料	II 型	
施工當天與十二個月	-37.0	-57.1	-35.7	-56.9	-25.9	-38.6	-46.4	-34.9	-34.9	-54.2	42.2
施工後兩周與十二個月	-3.7	-17.9	-8.9	-24.1	-24.1	-8.8	-26.8	-22.2	-22.2	-37.3	19.6
施工後一個月與十二個月	-5.6	-7.1	3.6	-12.1	-18.5	3.5	-19.6	-6.3	-6.3	-22.0	10.5
施工後兩個月與十二個月	0.0	-8.9	0.0	-6.9	-13.0	5.3	-8.9	9.5	-6.3	-20.3	7.9
施工後三個月與十二個月	-5.6	-10.7	0.0	-8.6	-9.3	0.0	-14.3	3.2	0.0	-10.2	6.2
施工後四個月與十二個月	-7.4	-7.1	1.8	-8.6	-5.6	1.8	-8.9	4.8	-1.6	-20.3	6.8
施工後六個月與十二個月	-5.6	-1.8	1.8	-3.4	-7.4	5.3	1.8	20.6	6.3	3.4	5.7

雖然現今規範建議標線驗收時間排除施工當天，並盡量於標線完工後兩周內完成驗收作業，從 42.2% 減少檢測性能落差至 19.6%。然而，若關注施工後一個

月與長期性能差異，可發現其不僅相較於兩周的檢測數據，從 19.6%降低至 10.5%又再度減少近乎一半的性能差距，同時也與後續的標線性能表現更為接近。為此，為確保標線施工品質與長期性能維持，並且考量工程驗收時效性驗收檢測時間不宜距施工日過久，本研究特此建議標線驗收時間可由現行規範之施工後十四天內，延長至三十天內。如此一來，不但可令標線的抗滑值驗收更具代表性，且真正落實標線高抗滑之交通安全目標，亦能減緩相關工程檢驗單位之驗收時間壓力。

4.1.2 標線性能綜合比較與建議

接續前一節分析各標線材料在十二個月內的反光與抗滑性能，本研究以此為基礎，整理每一種標線材料各自歷時一年的回歸反射 RL 與抗滑係數 BPN 表現。依序針對雙效標線甲料、乙料、II 型標線的雙性能變化進行深入探討，並進一步進行各標線材料的長期性能綜合比較，以及最後的材料建議。

由雙效標線甲料歷時一年之性能變化趨勢圖(圖 4.9)，扣除施工當天因標線表面疏水膜、第七個月因施工影響之檢測數據，搭配隨時間之標線表面狀態變化(圖 4.10)，可發現甲料基於玻璃珠與抗滑骨材混合撒佈之配比，在施工當天的標線表面看見圓形玻璃珠和不規則形狀的白色抗滑骨材均勻分佈，令玻璃珠回歸反射路徑較不受干擾，在初期即有傑出的反光表現。對於標線表面狀態的觀察，在開放交通條件之磨耗下，除可明顯發現輪胎胎屑與髒汙對於標線潔淨程度的影響，也可在第一個月和第三個月的標線表面照片中發現部分黑點，代表附著於標線表面的外撒材料脫落。其中，又因玻璃珠顆粒較圓滑，在相同嵌入深度之下，玻璃珠相較具有稜角的抗滑骨材更容易脫落，故在第六個月、第九個月、第十二個月的照片中，標線表面出現更多的圓形黑點空洞，反光 RL 數值一路下滑，而抗滑 BPN 數值則較為穩定。縱觀歷時一年觀察，反光 RL 與抗滑 BPN 數值變化斜率皆為負值，不過又以 RL 衰退程度更為嚴重，呼應前述之標線表面材料脫落說明。

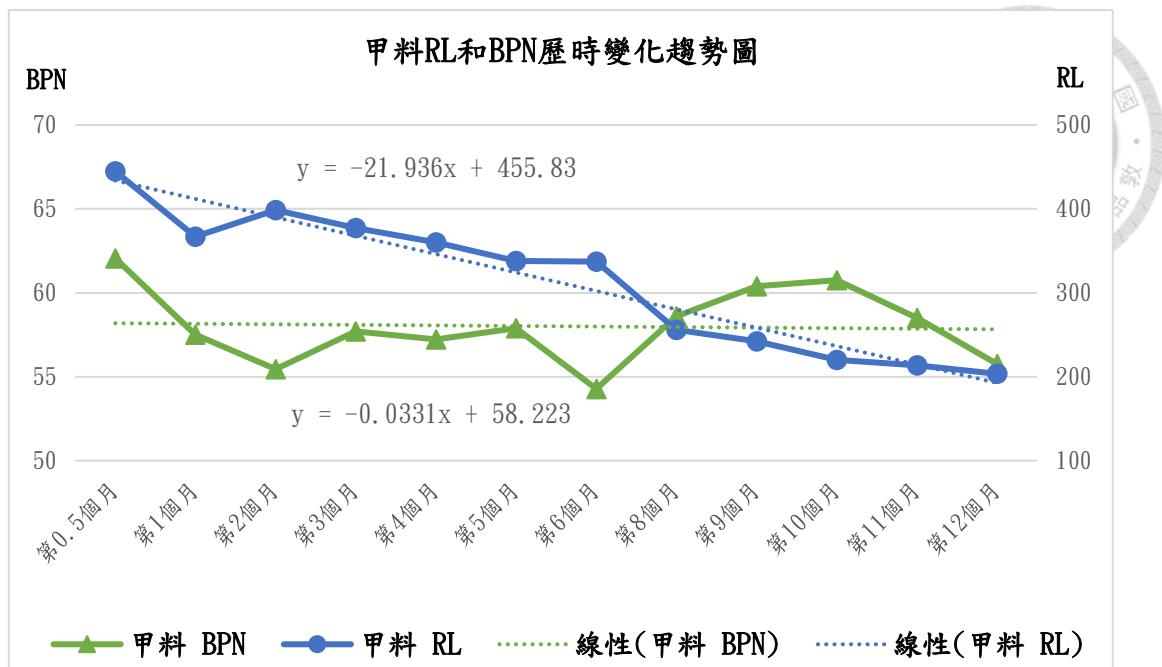


圖 4.9 甲料歷時一年之性能變化趨勢圖

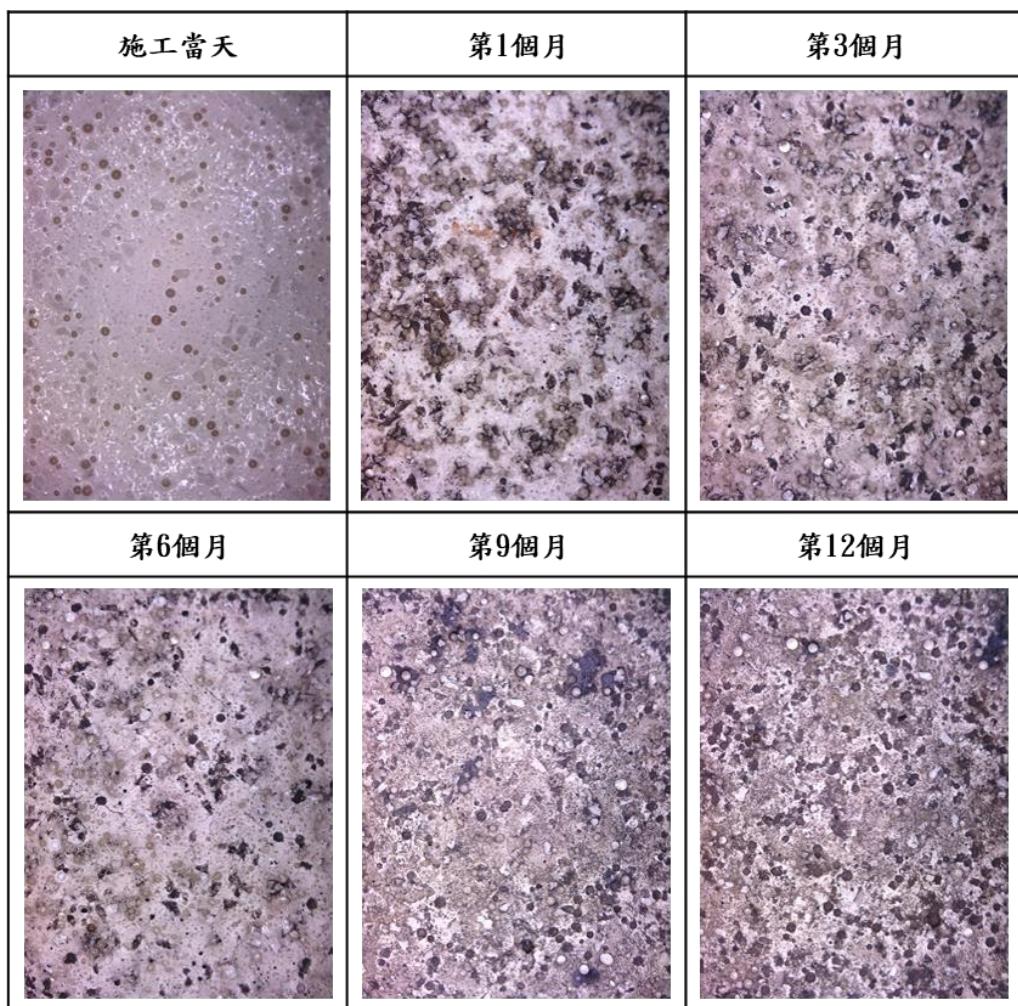


圖 4.10 甲料標線表面之狀態變化

接著，相比於甲料以混合料單外撒盒撒佈，前珠後砂雙外撒的乙料在施工當天的標線表面照片中，可發現更多白色不透明的抗滑骨材，BPN 抗滑初始值也明顯較高，可參考圖 4.11 和圖 4.12。但是隨即在第一個月的照片中可發現標線表面出現不少黑色不規則形狀坑洞，代表部分抗滑骨材已從標線表面脫離，抗滑性能平均值也從施工當天 BPN 88 下跌至第一個月 BPN 66。雖然 BPN 趨勢隨時間推移略為遞減，但隨後幾個月的性能變化幅度則明顯較小，佐證本研究先前提及建議將標線驗收時間由完工後兩周內延後至一個月內，以此減少標線性能落差，可促使標線驗收成果能與標線長期性能相符。同時，隨著標線表面上層抗滑骨材逐漸脫落，下層玻璃珠顯露，於標線表面照片出現亮白色圓點令反光性能有所提升，在第六個月前整體反光性能趨勢斜率大於零呈現正成長，並在第六個月時 RL 數值到達高峰，隨後玻璃珠陸續脫落，使雙效標線乙料的反光性能回復穩定狀態。

而關於 II 型標線歷時一年之性能變化與標線表面狀態(圖 4.13、圖 4.14)，可在施工當天的照片中發現更多顏色不透明且粒徑明顯較大的之石英砂外撒材料，同時標線表面卻幾乎不見圓形透明玻璃珠蹤影，導致 II 型標線初期 BPN 數值雖可達 70 到 80 之間，但反光 RL 則落在 40 到 50($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)區間。而在第三個月和第六個月的標線表面照片中，可看見標線表面浮現部分圓形亮點，此乃因外撒石英砂脫落後，原先內含於熱拌聚酯的第一類玻璃珠顯現，也使 II 型標線的反光性能略有起色。若是以整體 II 型標線性能變化趨勢而言，在第七個月前的 BPN 數值隨時間推延性能逐次下探，RL 檢測結果則步步高升；而在第七個月之後，標線表面狀態已逐漸定型，II 型標線的抗滑與反光呈現平行關係，兩者皆隨著交通磨耗和環境因素影響保持穩定下降的變化。

儘管如此，II 型標線雖具有不錯的標線抗滑性能，但全程來看其反光性能依舊不達最低需求門檻 R1($\geq 80 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)，始終無法滿足用路人良好的夜間辨識效果。在部分缺乏照明之駕駛環境中，若駕駛人無法迅速且清楚地獲得道路標線資訊，將大幅壓縮駕駛人的行為反應時間，綜觀現有 II 型標線幾乎不具備反光功能的狀態之下，儼然已成為夜間照明不足之道路交通安全隱憂。

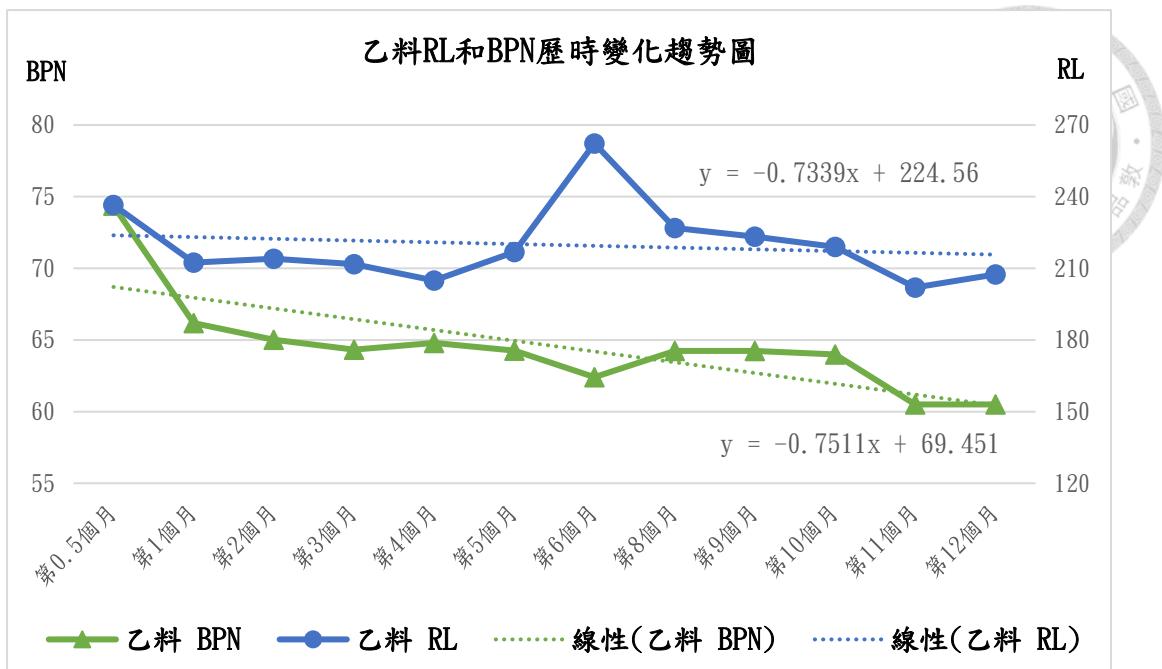


圖 4.11 乙料歷時一年之性能變化趨勢圖

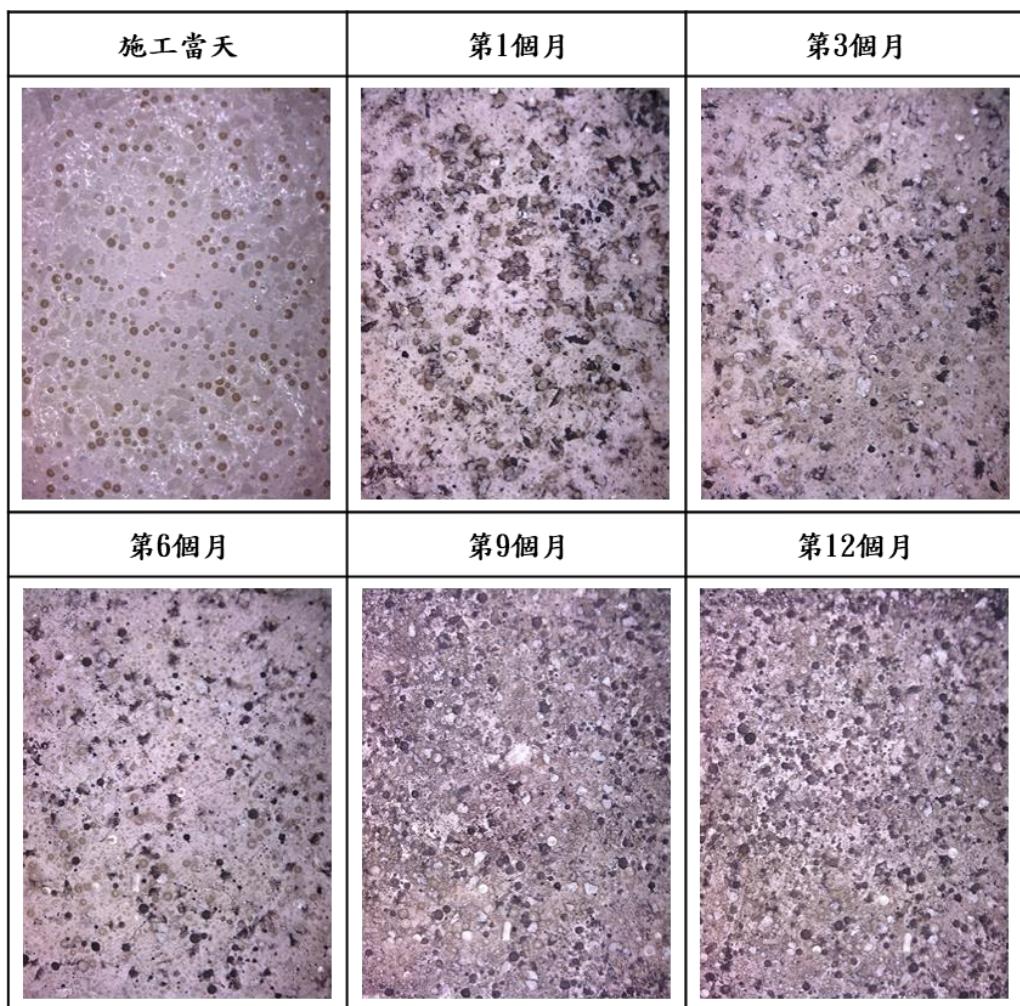


圖 4.12 乙料標線表面之狀態變化

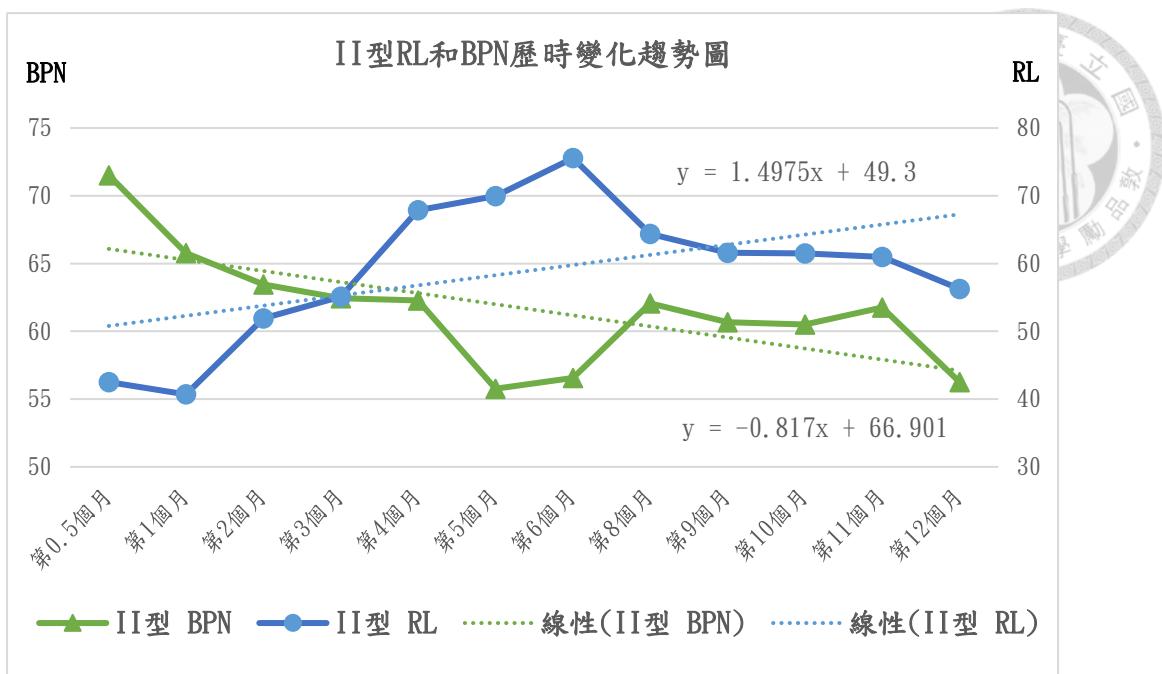


圖 4.13 II 型標線歷時一年之性能變化趨勢圖

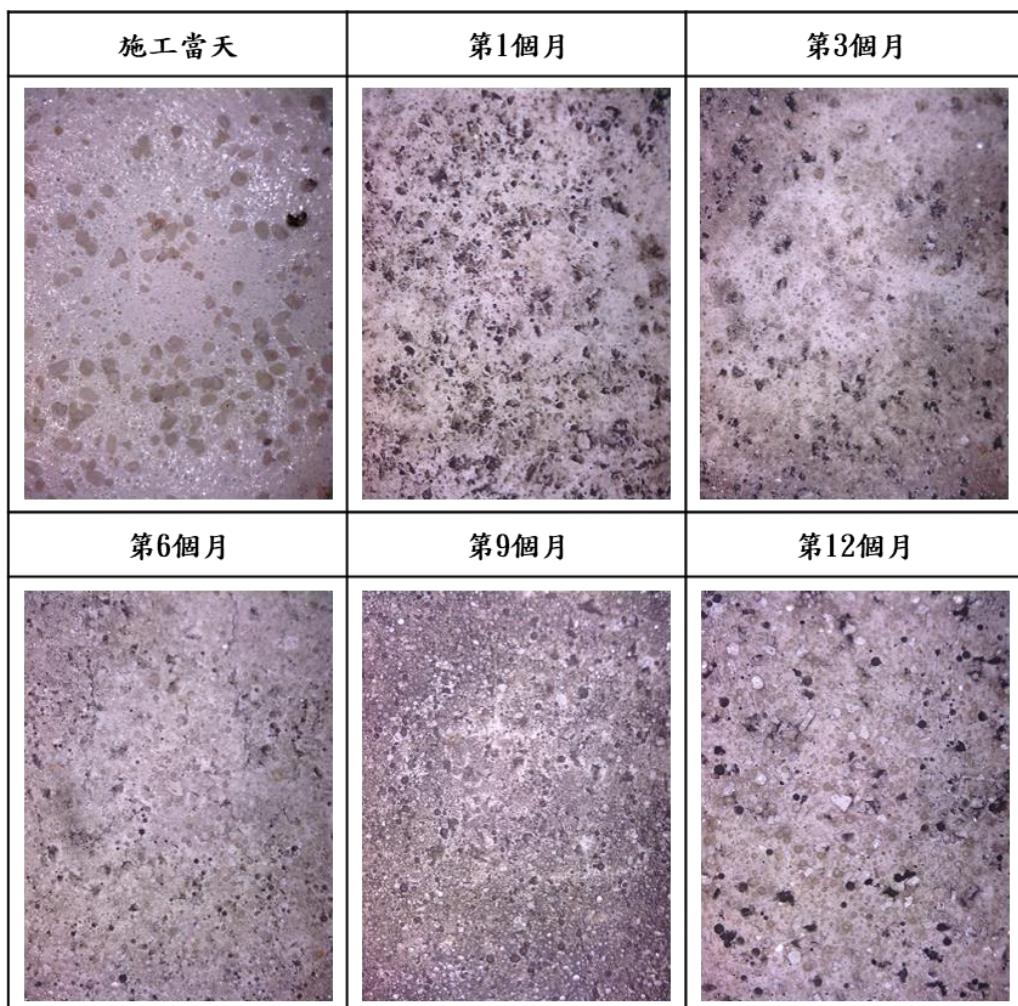


圖 4.14 II 型標線表面之狀態變化

為此，根據先前回顧各國家對於標線的性能規範，以及長期且大量的現地檢測實驗數據支撐，並綜合考量我國二輪車比例較高的交通特性，本研究以白色標線為例，提出適合我國交通環境之短期與長期標線性能規範建議，如下表 4.2。

表 4.2 白色標線性能規範建議

性能規範建議 (白色標線)	抗滑性能	反光性能
	BPN (SRT)	乾燥狀態之回歸反射係數 RL (mcd/m ² /lx)
完工後一個月	55	150
完工後 365 天	50	100

除了具體建議現有道路標線工程的驗收時間改為完工後一個月以內，為了兼顧良好的反光性能，針對新繪設之白色標線性能規範，可適當微幅降低抗滑性能之要求，從既有的 BPN 65 調整為 BPN 55；同時也加強對標線反光性能的重視，要求標線在乾燥狀態下應至少具備 150 (mcd/m²/lx) 之回歸反射係數 RL，以此改善現有標線因追求高抗滑表現而喪失反光性能的缺失。

至於標線的長期性能維護門檻則建議在標線完工後 365 天，應持續維持抗滑數值 BPN 50 與反光乾燥 RL 數值 100(mcd/m²/lx) 以上的雙性能表現，確保道路標線得以發揮充分抗滑與反光功能，達到交通安全之目標。關於上述之標線性能規範建議，不僅賦予道路標線足夠的抗滑能力，降低用路人打滑風險；亦預期發揮良好的反光效果增加夜間可視性，減少交通意外發生，完整滿足各使用族群對於道路標線之性能需求。

此外，本研究為了完整比較雙效標線甲料、乙料、II 型標線三種標線材料之間的性能差異，依據回歸反射係數 RL、擴散反射係數 Qd、抗滑性能 BPN 三種性能項目，進行三種標線材料各項性能的綜合比較，如圖 4.15、圖 4.16、圖 4.17。

在回歸反射係數 RL 比較圖(圖 4.15)中，在六個月以前雙效標線甲料皆維持優異的反光表現領先乙料，且與 II 型標線存有顯著差距，隨後甲、乙料 RL 數值逐漸趨近，並在第 10 個月後甲、乙料因使用相同聚酯與內摻材料，使得 RL 表



現近乎一致，合理推測標線內摻材料顯露。關於擴散反側係數 Qd 性能(圖 4.16)部分，主要隨著降雨量和標線表面的潔淨狀態而有所變動，由高到低呈現甲料、乙料、II 型標線的排序，歷時變化趨勢大抵相同。

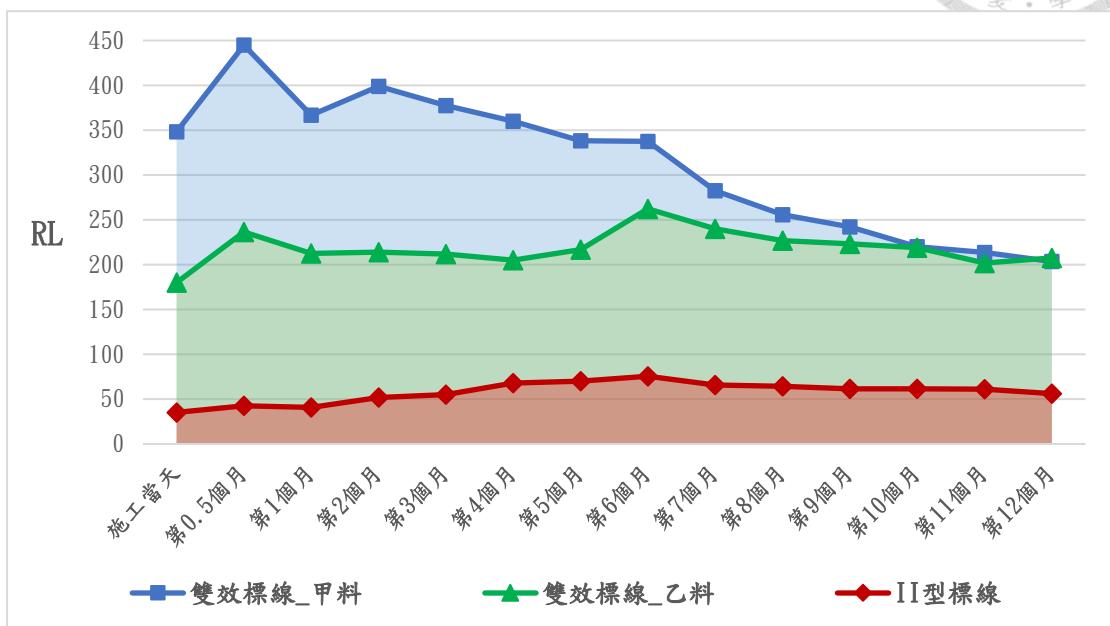


圖 4.15 紹興南街各標線反光 RL 綜合比較

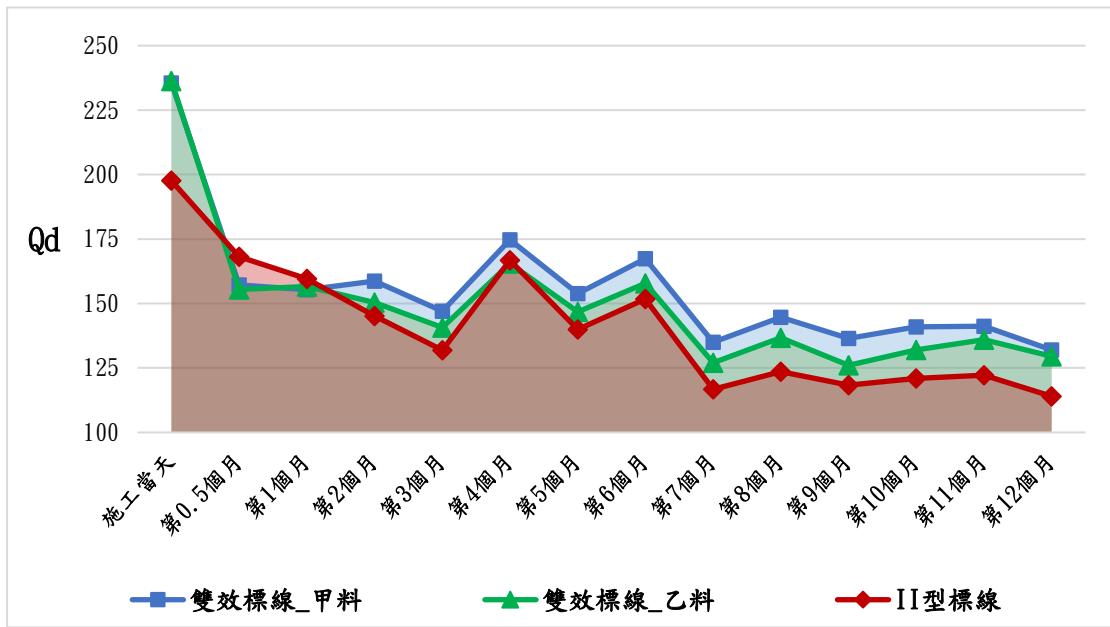


圖 4.16 紹興南街各標線反光 Qd 綜合比較

而在抗滑 BPN 部分(圖 4.17)，則可發現雙效標線乙料與 II 型標線的 BPN 數值變化近似，抗滑表現均為良好屬於伯仲之間，至於甲料的 BPN 數值雖在前期

較為遜色，直至後期漸有提升且數度與 II 型標線相互交迭，長期而言三種標線都幾乎維持在 BPN 55 以上，表現不錯的抗滑性能。換言之，在保有一定抗滑性能水準的同時，無論是甲料或乙料之雙效標線材料配比，皆能高度顯現一般 II 型標線所缺乏的反光性能。

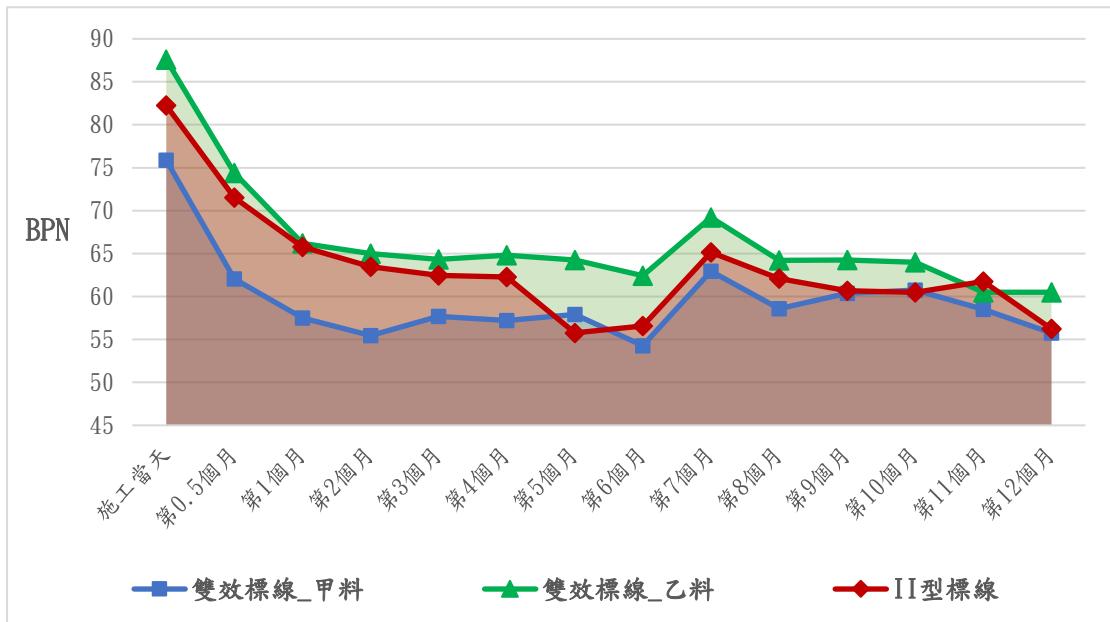


圖 4.17 紹興南街各標線抗滑 BPN 綜合比較

最後，本研究根據歷次的檢測資料製作圖 4.18，共同分析各標線材料的雙性能分佈和衰退程度，其中甲、乙料受標線表層材料磨損與更替影響，雙性能均有所降低但變化幅度不大；反倒是以高抗滑為主之 II 型標線抗滑性能衰退最為顯著，其反光性能雖有提升但亦不顯著。若進一步以抗滑性能 BPN 50 和 BPN 65，以及反光性能 RL 100($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)和 300($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)劃分標線性能，則可察覺三種標線一年後之 BPN 逐漸趨於一致，而 RL 則呈現明顯分級。初期甲料反光性能拔得頭籌領先乙料與 II 型，後期甲、乙料表現較為接近但明顯優於 II 型，透過車載鏡頭拍攝之反光效果(圖 4.19)即可發現顯著差異。綜上所述，本次雙效標線之現地劃設實驗與長期性能追蹤，不僅藉由逐次檢測確保標線為期一年的抗滑性能表現，同時也顯現出雙效標線反光性能的重要性，甚至有效證實雙效標線之內摻與外撒材料配比實驗成功，可納入作為日後道路標線材料之選擇建議。

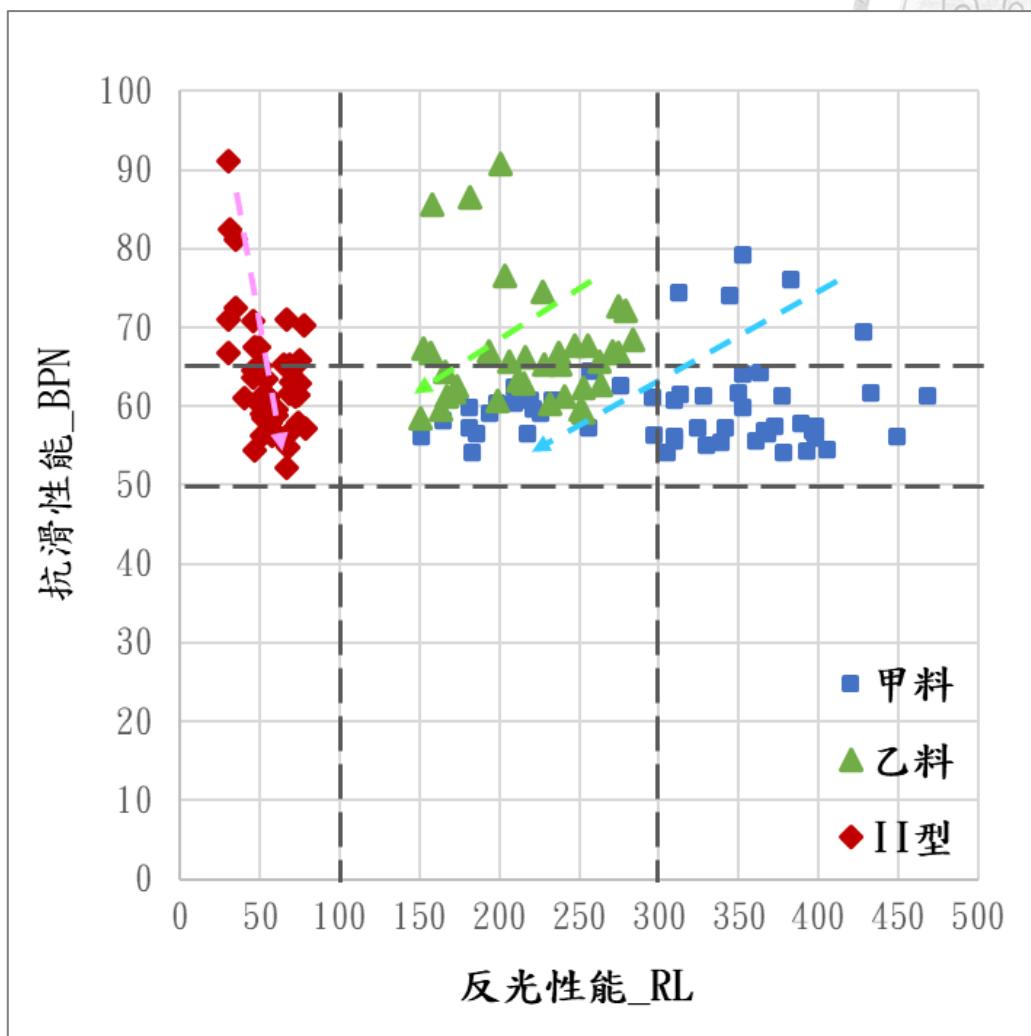


圖 4.18 各標線材料之雙性能分佈圖



圖 4.19 車載鏡頭拍攝之標線反光效果



4.2 標線外撒量成效之實驗結果

為了探究各式標線外撒材料之不同外撒重量與標線性能關係，本研究藉由可主動調整外撒量之實驗室外撒設備，穩定且定量地撒佈各種外撒材料，根據各項實驗目的製作各配比編號之標線試片，經環境曝曬消除標線表面油膜影響後，展開當天、第一周、第二周、第三周、第四周及第八周追蹤檢測，觀察各材料之性能特點。從基礎的標線外撒量研究切入，並且透過迴歸分析了解不同材料外撒量之性能成效，目標尋求合適的材料配比建議。

4.2.1 標線試片密集檢測性能變化探討

關於外撒材料和外撒量差異對於標線成效影響，可根據外撒材料分為兩大類別，分別是使用玻璃珠和抗滑骨材等比例及抗滑骨材比例較高的混合料 A 料和 B 料，專注討論單一外撒盒混合料之性能差異；以及無外撒添加物之純聚酯 C 料、純外撒抗滑骨材 D 料和純外撒玻璃珠 E 料，聚焦探討外撒材料隨不同外撒量對性能的影響程度。以下將遵照標線性能三大指標：回歸反射係數 RL、擴散反射係數 Qd、抗滑係數 BPN，依序進行上述兩大類別的標線試片實驗結果分析。

首先，針對 A 料、B 料混合料的反光 RL、Qd、抗滑 BPN 性能表現，整理如下圖 4.20、圖 4.21、圖 4.22。觀察玻璃珠與抗滑骨材以重量比 1：1 等比例混合的 A 料材料外撒成效，從 A1 到 A4(外撒量 240 公克到 320 公克)的反光 RL 表現相近屬於 R3 到 R4 級級接近 200 ($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)；A5(外撒量 340 公克)和 A7(外撒量 400 公克)則略為提升可達 250 ($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$)。至於擴散反射 Qd 表現則較為類似，在無交通量影響之下，僅因環境因素而使標線試片之 Qd 隨著時間逐漸降低。

而所有標線試片 A 料在抗滑性能部分，皆能達到 BPN 65 以上的抗滑最高等級。唯獨 A6 和 A8 可能因外撒較不均勻，導致 RL 和 BPN 性能落差較大，不過整體反光與抗滑性能均在 A5 達到性能高峰，相較於更多外撒量的 A7 配比反倒未見性能表現有所提升。所以，可合理判定在 1：1 混合料從 240 公克到 480 公克的 A1 到 A8 八種外撒配比中，以外撒 340 公克的 A5 配比雙性能表現最佳，

且具備外撒材料經濟性。

而以玻璃珠與抗滑骨材 1：1.1、1：1.2、1：1.3 混合的 B1、B2、B3 混合料配比，基於抗滑骨材較多之材料配比設計，可發現 B1(抗滑料 176 公克)和 B3(抗滑料 208 公克)都有達到抗滑標準 BPN 65 表現尚可，且隨著白色抗滑骨材的外撒量提高擴散反射 Qd 略有提升，但是在回歸反射 RL 反光表現則因抗滑骨材外撒量較玻璃珠多，干擾玻璃珠之回歸反射路徑，導致反光 RL 數值與等比例混合的 A 料相比普遍較低，此現象又以抗滑骨材較多之 B3 比 B1 更為明顯。B 料的實驗結果顯示當抗滑骨材外撒量越多材料成本更高時，不僅無法得到較佳的抗滑性能，反而會對反光性能造成大幅度折減，甚至無法有效掌握非等比例混合外撒材料之性能區間，因此較不建議將此外撒材料配比納入後續材料使用。

綜合上述 A 料、B 料之標線性能表現，雖然混合料在抗滑 BPN 部分皆有不錯之成效，但若同時考慮標線反光 RL 性能，則建議選擇以等比例混合之 A 料配比，外撒量維持 300 克到 340 克較為合適，此配比也與紹興南街的雙效標線甲料相近，均展現出良好的反光與抗滑雙性能。

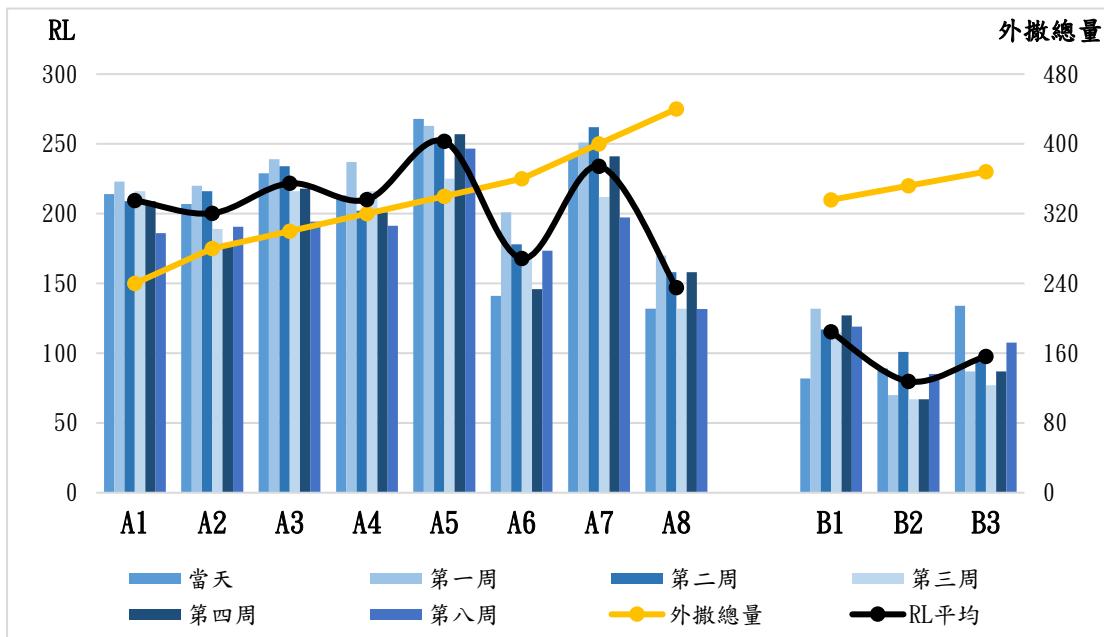


圖 4.20 標線試片 A 料、B 料之反光 RL 性能

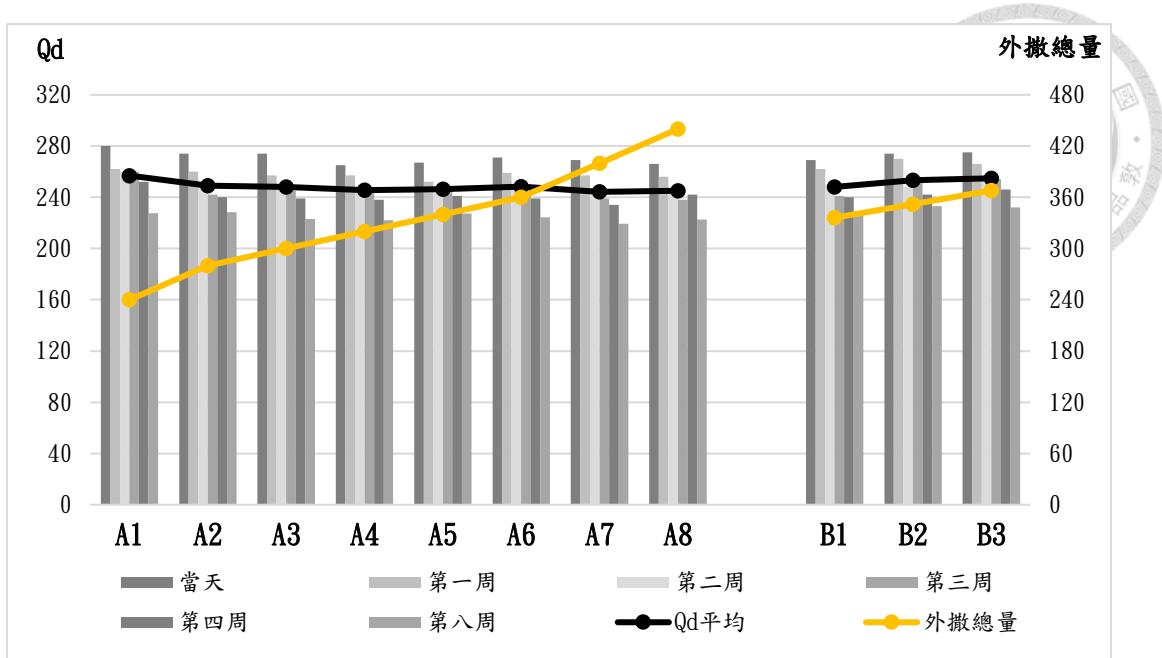


圖 4.21 標線試片 A 料、B 料之反光 Qd 性能

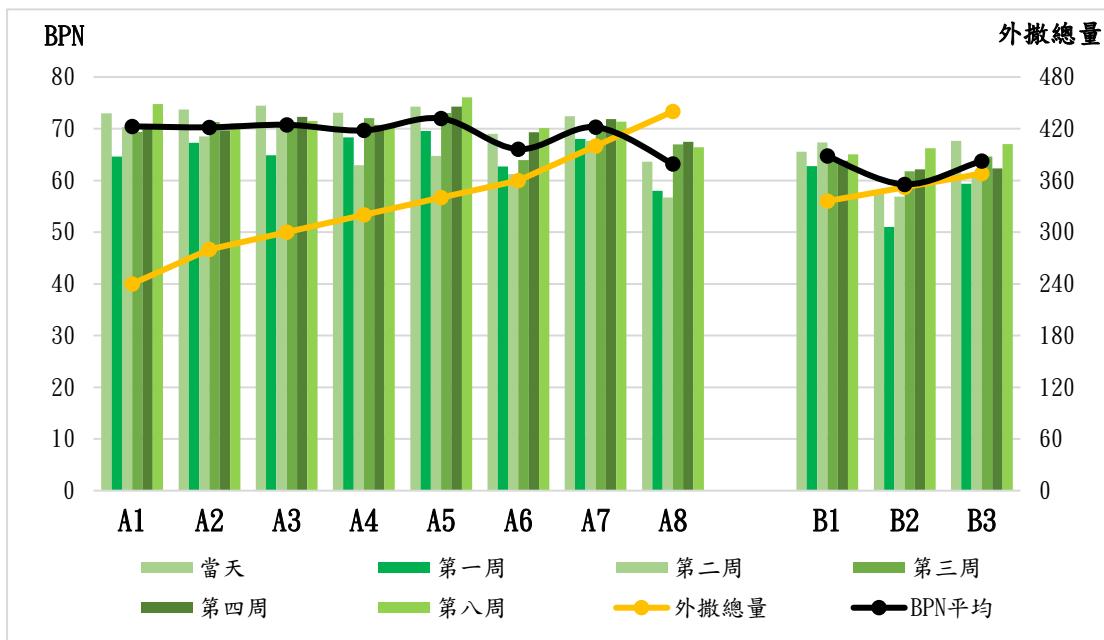


圖 4.22 標線試片 A 料、B 料之抗滑 BPN 性能

接續關於 C 料、D 料、E 料標線試片的反光 RL、Qd、抗滑 BPN 性能檢測結果，彙整如下圖 4.23、圖 4.24、圖 4.25。在反光 RL 表現部分，純 II 型標線熱拌聚酯無任何外撒的 C 料及單外撒抗滑骨材的 D 料，兩者在標線表面缺少反光材料的狀態下，幾乎均不具反光效果，RL 數值與現地劃設之 II 型標線初期類似。

反觀單外撒玻璃珠的 E 料在 E1(外撒量 80 公克)、E2(外撒量 160 公克)時，即具備 R4 等級的優異反光水準，且隨著 E3(外撒量 240 公克)、E4(外撒量 320 公克)、E5(外撒量 400 公克)、E6(外撒量 480 公克)的玻璃珠外撒量增加 RL 數值也隨之提高，一度達到 RL 568($\text{mcd}/\text{m}^2/\text{l}\text{x}$)之傑出反光表現，此與國外僅探討反光 RL 性能之研究所得數值接近。同時有鑑於熱拌聚酯標線表面所能附著之外撒材料大約以 480 公克到 500 公克左右為極限，如果希望能有更高的 RL 反光性能，可建議添加更多比例的二氧化鈦於熱拌聚酯內摻材料中，抑或是使用更高折射率的玻璃珠進行外撒，本研究目前暫不討論。

在反光 Qd 性能部分 C 料、D 料、E 料均隨著時間平穩下降，但若細究三者的 Qd 數值差異，無任何外撒的 C 料領先外撒白色抗滑骨材的 D 料，略勝外撒淡黃色玻璃珠的 E 料，說明了擴散反射性能與標線顏色的關係，愈接近白色色度座標者 Qd 數值愈高。

在抗滑 BPN 性能部分，C 料僅依靠純 II 型熱拌聚酯即可達 BPN 50 的基礎水平。而 D 料隨著抗滑骨材外撒量增多抗滑性能也有所提升，BPN 數值大致可分為三種層級，第一層級 D1(外撒量 80 公克)可達 BPN 65；第二層級 D2(外撒量 160 公克)、D3(外撒量 240 公克)增長至 BPN 75；第三層級 D4(外撒量 320 公克)和 D5(外撒量 400 公克)、D6(外撒量 480 公克)可突破至 BPN 90。日後可依據不同的標線抗滑性能需求，選擇相對應的外撒量配比，達到更佳的材料使用價值。至於單外撒玻璃珠的 E 料則仰賴 C 料純 II 型熱拌聚酯的抗滑基礎，隨著玻璃珠外撒量增加，抗滑性能有先增加後遞減之變化。主要原因是當玻璃珠外撒量較少時，在標線表面凸起的玻璃珠會形成阻力，提供一定程度之抗滑性能，但隨著玻璃珠撒佈越多時標線表面則越為滑溜，BPN 數值則稍微下降。

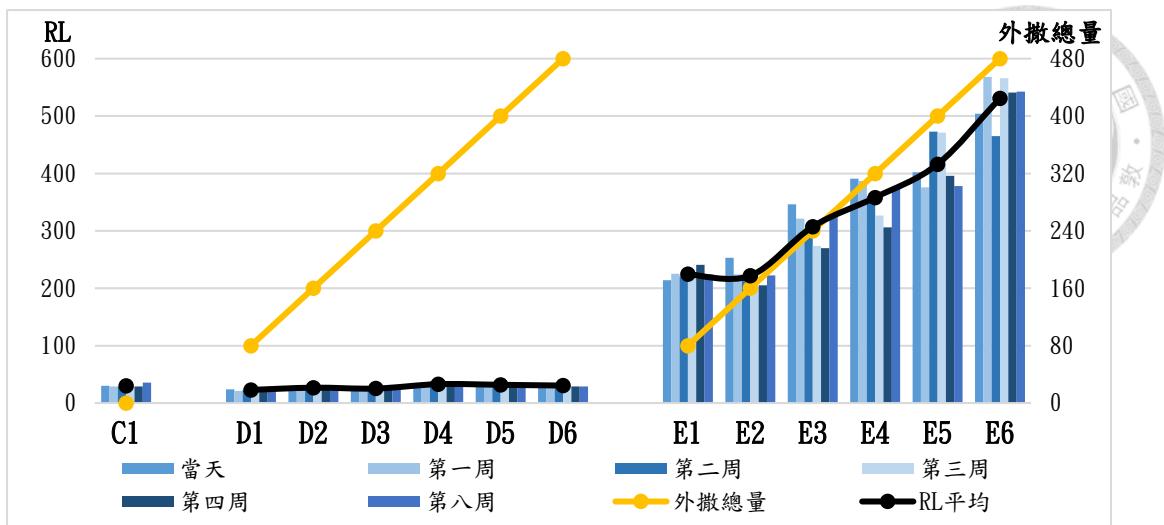


圖 4.23 標線試片 C 料、D 料、E 料之反光 RL 性能

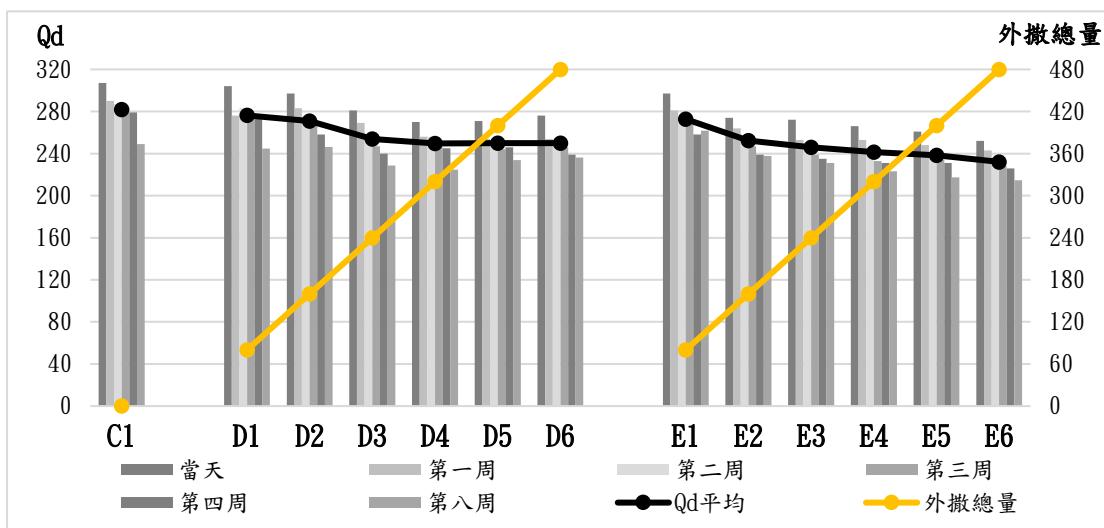


圖 4.24 標線試片 C 料、D 料、E 料之反光 Qd 性能

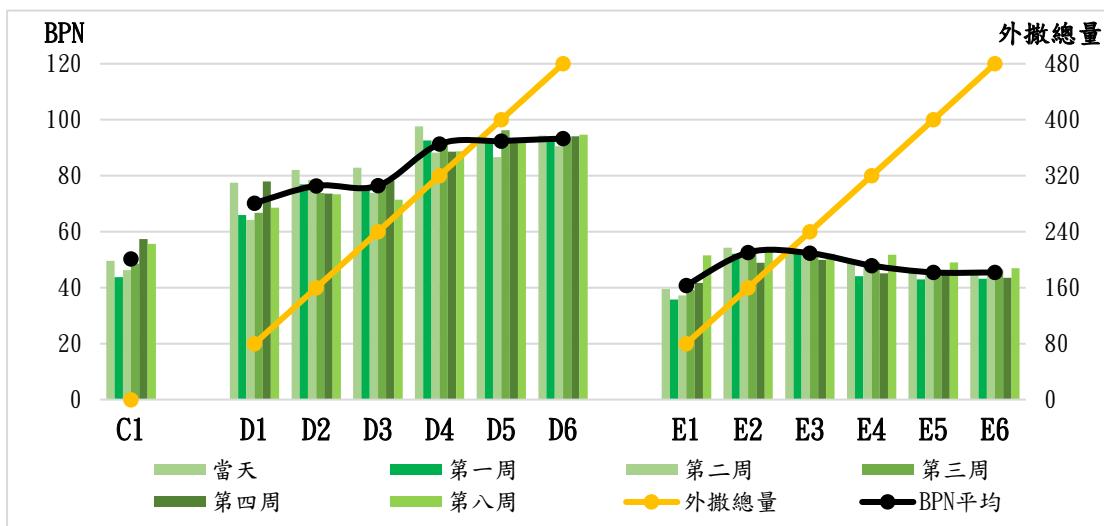


圖 4.25 標線試片 C 料、D 料、E 料之抗滑 BPN 性能



4.2.2 標線性能與外撒量迴歸分析與驗證

為了完整理解外撒材料對於標線成效之影響，本研究遂利用標線試片各式外撒材料與外撒量之實驗檢測結果，設定 RL、Qd、BPN 三項性能指標為應變數，以玻璃珠外撒量(GB)、抗滑骨材外撒量(SD)為自變數，進行標線性能二元線性迴歸分析，預期釐清標線實質性能與外撒材料間之交互關係。

最初本研究基於因外撒材料使用令標線性能有所增加之概念，試圖將 A 料、B 料、D 料、E 料的各項性能扣除純聚酯 C 料之性能基準，進行 B、A&B、D、E、D&E 各組之性能差異迴歸分析，雖然結果尚可但迴歸分析結果卻受限於本次 C 料之性能數據，較無法應用至其他標線案例，整體實用價值較低。而後直接使用 A 料、B 料、D 料、E 料之性能數據，進行各組的迴歸分析，並以無外撒之 C 料作為性能驗證，但分析結果一般且部分組別呈現共線性，常數項次與 C 料 (RL=30、Qd=280、BPN=50) 亦存有較大落差。隨即接續嘗試利用所有標線試片之性能數據，與 C 料共同迴歸，依序開展 B&C、A&B&C、D&C、E&C、D&E&C 五組迴歸，其中以 D&E&C 之各項性能迴歸統計結果最為顯著，所有項次之係數正負號均符合實際物理意義，且常數項較貼近未外撒任何材料之 C 料純 II 型熱拌聚酯狀態。故最終本研究選擇採用該迴歸分析結果(表 4.3)，將於後續進行迴歸式說明與驗證。

表 4.3 各項性能迴歸分析結果

C 料(純聚酯無外撒)、D 料(單外撒抗滑骨材)、E 料(單外撒玻璃珠)迴歸分析		
$X_1 = GB$ (玻璃珠外撒量，單位： g/m^2) ； $X_2 = SD$ (抗滑骨材外撒量，單位： g/m^2)		
$Y_1 = RL$	$RL = 0.963GB -0.090SD +61.032$	迴歸式(4.1)
	$R^2 = 0.958$ ； P-value > 0.05 之項次：無	
$Y_2 = Qd$	$Qd = -0.104GB -0.068SD +277.185$	迴歸式(4.2)
	$R^2 = 0.454$ ； P-value > 0.05 之項次：無	
$Y_3 = BPN$	$BPN = -0.021GB +0.095SD +54.667$	迴歸式(4.3)
	$R^2 = 0.893$ ； P-value > 0.05 之項次：無	

首先針對標線回歸反射係數 RL 之迴歸結果，在迴歸式(4.1)中玻璃珠外撒量項次係數為正值、抗滑骨材外撒量項次係數為負值，代表隨著玻璃珠外撒量愈多、抗滑骨材外撒量愈少，標線反光 RL 表現愈佳。其中玻璃珠外撒量項次係數的數值大小為抗滑骨材項次之十倍，意味著玻璃珠能提升的標線反光 RL 性能遠遠超過抗滑骨材的影響程度。以標線試片 A 料為例，A1 到 A8 配比雖維持玻璃珠與抗滑骨材外撒量等比例增加，但得利於玻璃珠影響顯著，標線試片反光數值仍呈現逐漸上升。同時標線試片 B 料可視為在玻璃珠外撒量保持固定的狀態下，B1 到 B3 抗滑骨材外撒量逐漸增加，反光性能卻明顯下滑，上述材料配比成效皆說明此 RL 回歸式之合理性。而關於標線性能與外撒量迴歸分析結果之驗證，如下圖 4.26、圖 4.27、圖 4.28，可得知多數 RL 回歸數值和實際檢測數值相近，僅在部分純外撒玻璃珠的配比略有誤差，整體迴歸預測趨勢正確，且兩者相關性極高。

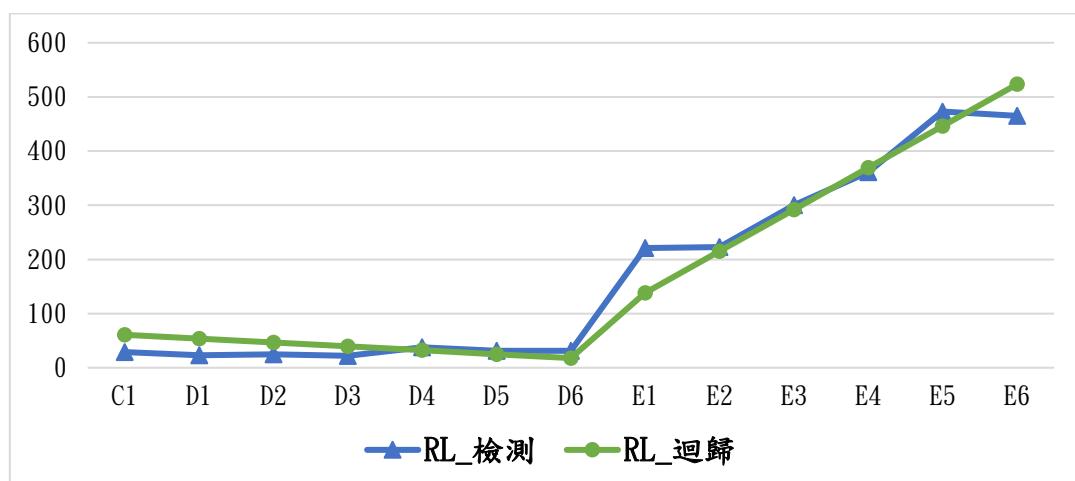


圖 4.26 標線試片之 RL 檢測與迴歸比較圖

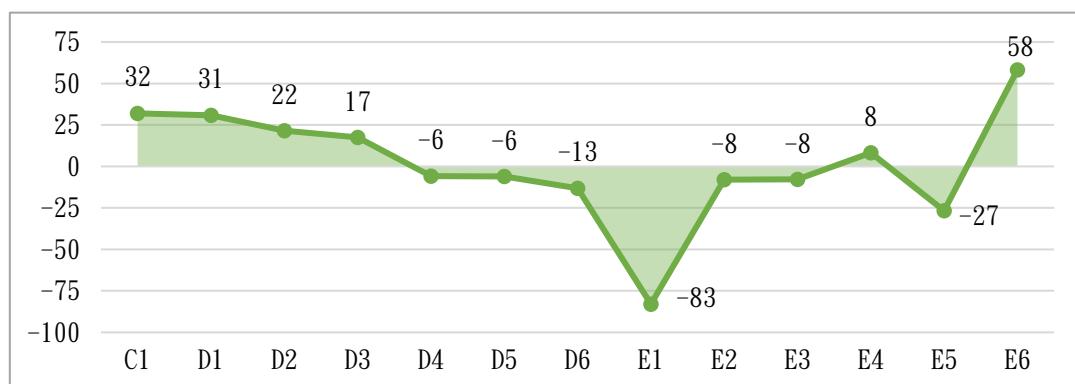


圖 4.27 標線試片之 RL 檢測與迴歸誤差圖

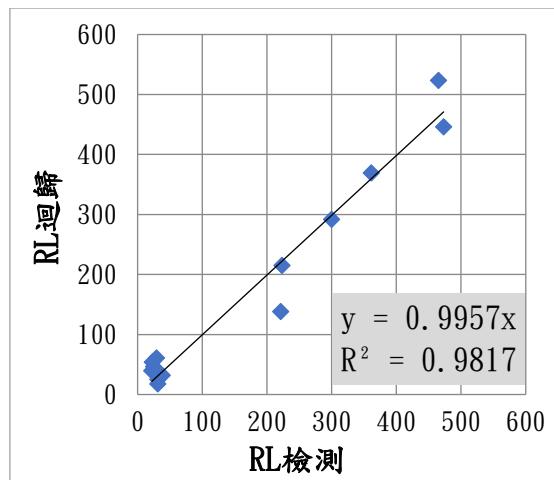


圖 4.28 標線試片之 RL 檢測與迴歸相關性圖

接著根據擴散反射係數 Q_d 的迴歸分析結果，可發現迴歸式(4.2)中玻璃珠外撒量與抗滑骨材外撒量兩者項次係數皆為負值，又因為外層帶有防水疏水膜的玻璃珠顏色較黃，相比於白色石英砂材質的抗滑骨材，對標線的擴散反射影響程度更大。形成無任何外撒的 C 料 Q_d 數值最高，而單外撒玻璃珠的 E 料隨著 E1 到 E6 外撒量增加， Q_d 性能遞減程度比起相同外撒量級距但僅外撒抗滑骨材的 D1 到 D6 更為顯著。至於迴歸結果與檢測數據之驗證比較(圖 4.29、圖 4.30)兩者擬合程度得宜，最大之誤差百分比僅為 4%，且相關性對比結果優異(圖 4.31)，代表迴歸結果與真實情況相互吻合。

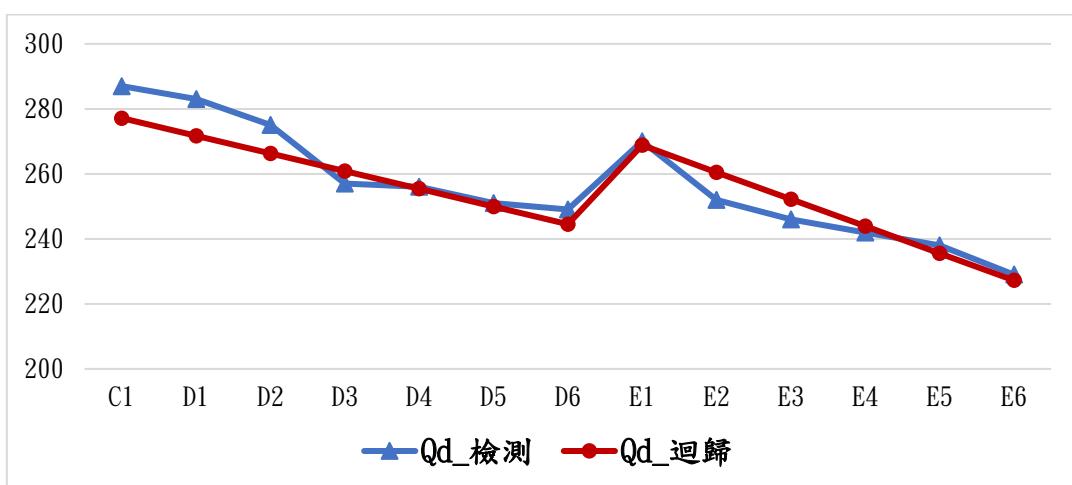


圖 4.29 標線試片之 Qd 檢測與迴歸比較圖

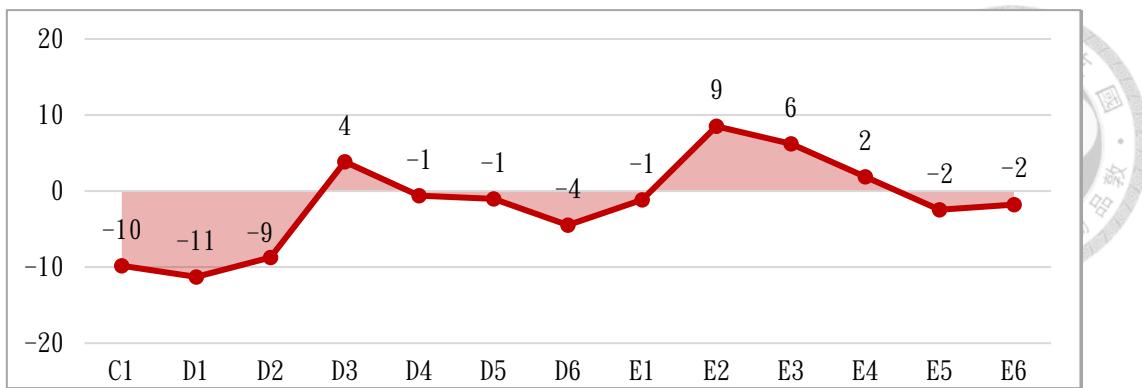


圖 4.30 標線試片之 Qd 迴歸誤差圖

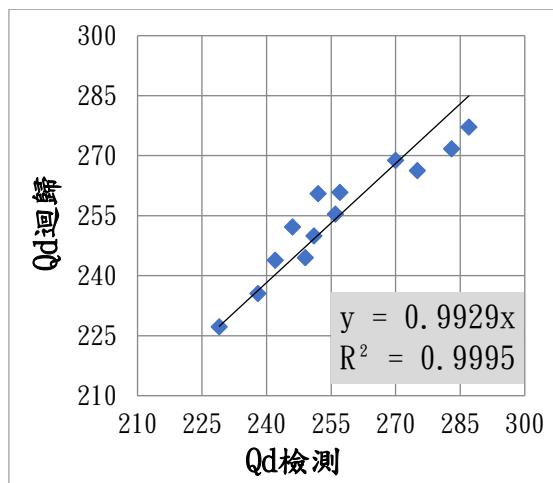


圖 4.31 標線試片之 Qd 檢測與迴歸相關性圖

最後有關標線抗滑係數 BPN 的迴歸結果說明(迴歸式 4.3)，在無任何外撒狀況下之標線抗滑數值即可達 BPN 54.7，與標線試片實驗中之純 II 型熱拌聚酯 C 料表現相近，且隨著抗滑骨材外撒量的增加 BPN 數值呈現正向增長，但跟著玻璃珠外撒量愈多 BPN 數值則略微降低。不過玻璃珠外撒量項次與抗滑骨材外撒量項次的斜率差值較小，兩者的影響程度略同，亦即在玻璃珠與抗滑骨材保持等比例增加的條件下，A1 到 A8 的抗滑性能變化幅度不大僅略微上升。再以標線試片 B 料為例，當玻璃珠外撒量保持固定時，即使 B1 到 B3 隨著抗滑骨材外撒量的增加，抗滑性能提升效果也相對有限，凸顯兼顧反光與抗滑雙性能標線配比之重要性功不可沒。而從迴歸分析和實際檢測之比較結果 (圖 4.32)，也可發現本研究標線抗滑性能與外撒量迴歸分析之迴歸式與實際檢測值貼合狀況良好。在迴歸結果誤差對比部分(圖 4.33)，較可惜無法細膩地表現出玻璃珠外撒量對於抗滑

BNP 先增後減的影響，儘管如此整體誤差差距尚屬可接受範圍，而迴歸與檢測之相關性極佳(圖 4.34)，再次驗證標線性能迴歸分析成功，可提供日後標線外撤材料配比之成效參考，能更有效地設計符合預期性能之標線材料。

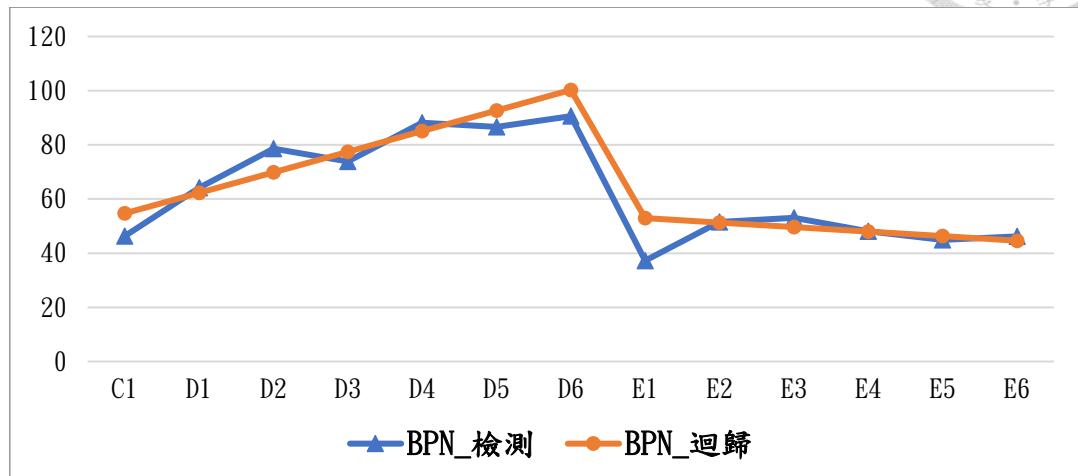


圖 4.32 標線試片之 BPN 檢測與迴歸比較圖

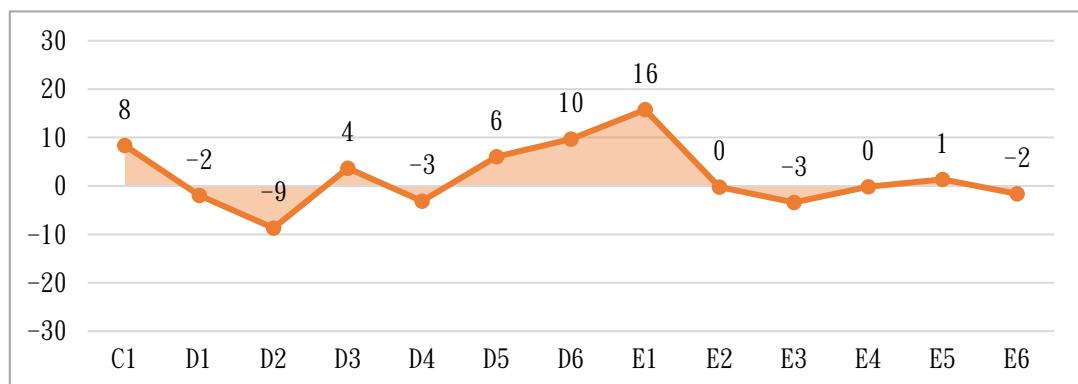


圖 4.33 標線試片之 BPN 檢測與迴歸誤差圖

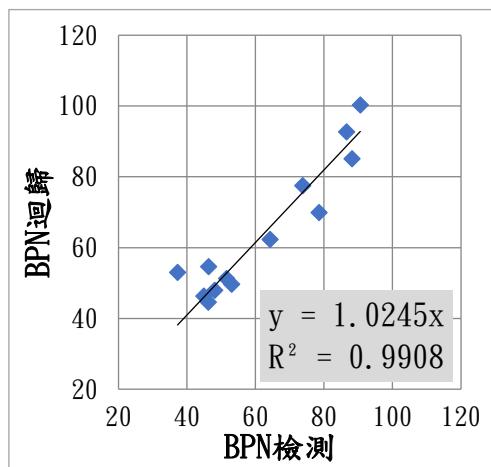


圖 4.34 標線試片之 BPN 檢測與迴歸相關性圖

第五章、研究結果探討與應用



本章將根據現地雙效標線之實驗數據分析結果延伸探討與應用，以標線服務績效與成本效益分析模式為主軸，首先由標線三項性能建立標線性能指標，評量標線性能表現；接著以實際道路使用情境對於標線之性能需求設定權重因子，進行標線服務績效分析；最終根據標線成本界定與計算結果，探討各標線之成本效益，詳細的分析模式架構如下圖 5.1 所示。

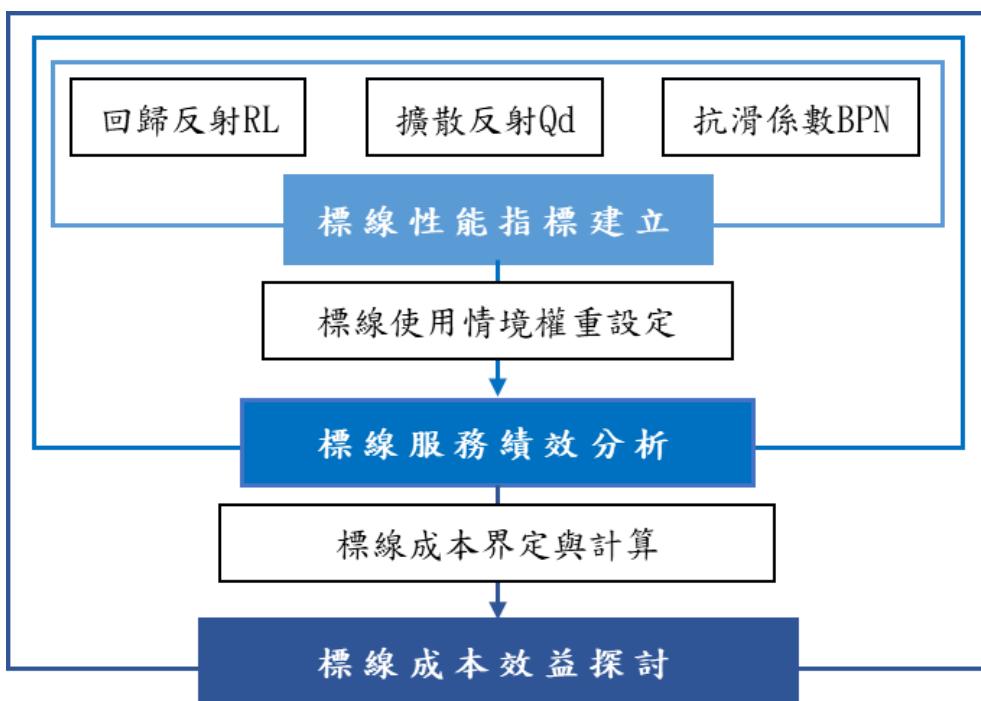


圖 5.1 標線服務績效與成本效益分析模式架構

5.1 道路標線性能指標建立

為了能精準且客觀地評估標線全方位性能表現，須建立一套道路標線性能指標(Marking Performance Index, MPI)，方能展開不同標線性能之共同比較。本研究期許經由道路標線性能指標的制定和應用，將有助於道路主管機關關於使用階段的各時期掌握道路標線之性能狀況，針對性能不佳的部分即時安排維護，以確保道路標線皆能提供良好的反光與抗滑雙效功能。

有鑑於標線反光與抗滑性能之檢測數值範圍並不是相同範圍，反光 RL 和 Qd 通常是高達數百以上之數據，抗滑 BPN 則僅約數十左右之範圍，兩者數值位數差異過大。倘若直接將反光與抗滑性能數值相加，比較結果將可能由檢測數值較大之反光性能主導，忽視檢測數值較小但同等重要之抗滑性能表現，有失標線各性能評估之公允。為此，本研究建議將各項性能之檢測數值先各自進行正規化處理，將各項檢測數據轉換至相近的數值範圍尺度，再評量各標線之性能表現。

此外若是依照統計學正規化公式計算，由該次單項性能檢測的眾多數據選取最大值與最小值展開計算，所得到之正規化結果將僅限於單一案例，無法進行不同路段的標線性能比較，缺乏工程實務應用價值。故本研究歷經多次數據測試，最終選擇參考我國 CNS 15834 道路標線使用性能規範之標準，根據其對於標線乾燥回歸反射係數 RL、乾燥擴散反射係數 Qd、抗滑係數 BPN 之各類別分級標準作為基礎，將性能規範中最高性能等級門檻值設為正規化計算最大值、最低性能等級門檻值設為最小值、兩項差值即設為全距，使各項標線性能檢測數據均能客觀且公平地進行類似正規化計算。而關於 RL、Qd、BPN 各項性能最高與最低性能等級，以及正規化之標線性能指標(MPI)計算公式細節，整理如下表 5.1 中說明。

表 5.1 標線性能指標(MPI)計算

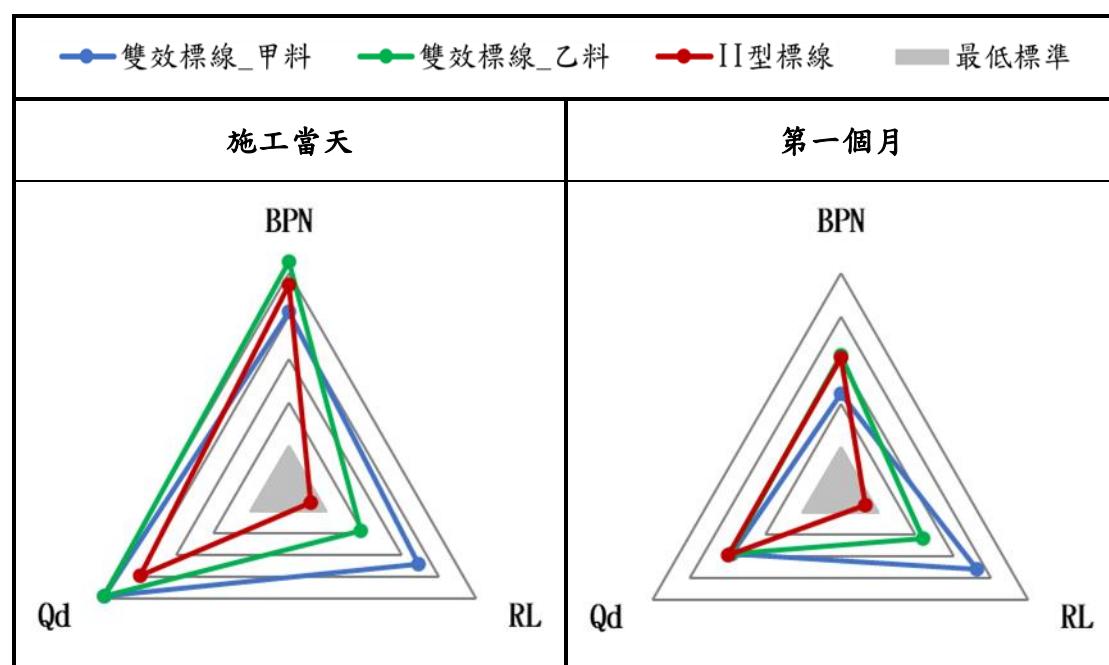
	最高性能等級	最低性能等級	性能指標(MPI)
乾燥回歸反射係數，RL	300 (mcd/m ² /lx)	80 (mcd/m ² /lx)	$MPI_{RL} = (RL-80) / (300-80)$
擴散反射係數，Qd	160 (mcd/m ² /lx)	80 (mcd/m ² /lx)	$MPI_{Qd} = (Qd-80) / (160-80)$
抗滑係數，BPN	65	45	$MPI_{BPN} = (BPN-45) / (65-45)$

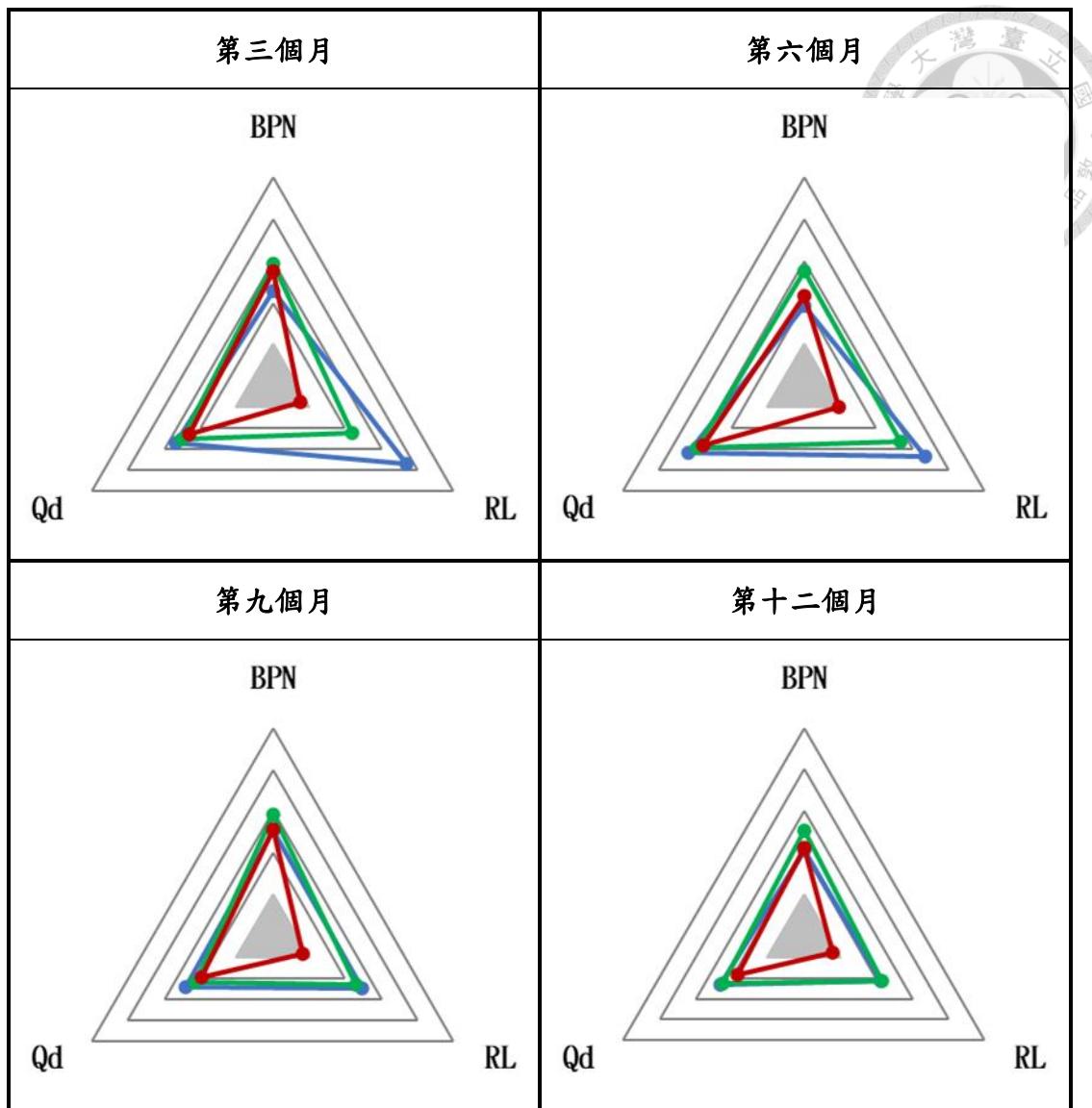
同時本研究亦根據紹興南街現地標線劃設實驗的長期追蹤檢測數據，進行雙效標線甲料、雙效標線乙料、II 型標線之三項標線性能指標(MPI_{RL} 、 MPI_{Qd} 、 MPI_{BPN})計算，並以 CNS 15834 最低性能等級($RL = 80$ 、 $Qd = 80$ 、 $BPN = 45$)設定為最低

標準，製作施工當天、第一個月、第三個月、第六個月、第九個月及第十二個月之各時間階段標線性能指標 (MPI) 變化雷達圖，可發現隨著時間更迭各標線之性能指標雷達圖面積皆逐漸內縮，如下表 5.2。整體而言，在各個時間點三種標線材料之三項標線性能指標所圍出之三角形面積愈小，則表示該標線之性能績效表現愈差。

針對回歸反射 RL 性能指標初期甲料(藍色)明顯大於乙料(綠色)，後期隨時間變化甲、乙料性能逐漸收斂，在第十二個月幾乎完全一致。II 型標線(紅色)則因欠缺反光功能自初始即落在最低標準範圍之內變化不大，儘管後續內摻的第一類玻璃珠露出 RL 性能指標略微提升，仍未達到我國規範對於標線反光之最低性能建議($RL \geq 80 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)，於表 5.2 中之各月份分 MPI_{RL} 指標幾乎未見改變。而甲、乙料、II 型標線三者的擴散反射 Qd 和抗滑係數 BPN 性能指標，在施工當天表現最佳，但隨著開放交通磨去標線表面疏水膜後，於第一個月時兩項指標均明顯縮減，往後時間的性能指標在三種標線材料之間變化則較為相近且趨勢相同，自第一個月之後便隨著時間緩慢降低。最後致第九個月和第十二個月時，三種標線所計算的 MPI_{Qd} 及 MPI_{BPN} 亦趨於一致。

表 5.2 各時間階段標線性能指標(MPI)變化表





而為了擴展標線性能指標的應用價值，提供未來各道路主管機關方便使用，本研究嘗試規劃標線性能總指標(MPI_{Total})，並設置對應的分級制度，如下圖 5.2。設計邏輯係接續上述各項標線性能之正規化性能指標計算公式，將 RL、Qd、BPN 正規化後之標線性能指標分數加總，得到標線性能總指標。根據逐月的標線性能總指標匯入圖中，進一步按照總指標之分數進行分級，利用圖表資訊持續掌握道路標線的性能變化，並能迅速地對標線性能狀態一目瞭然。

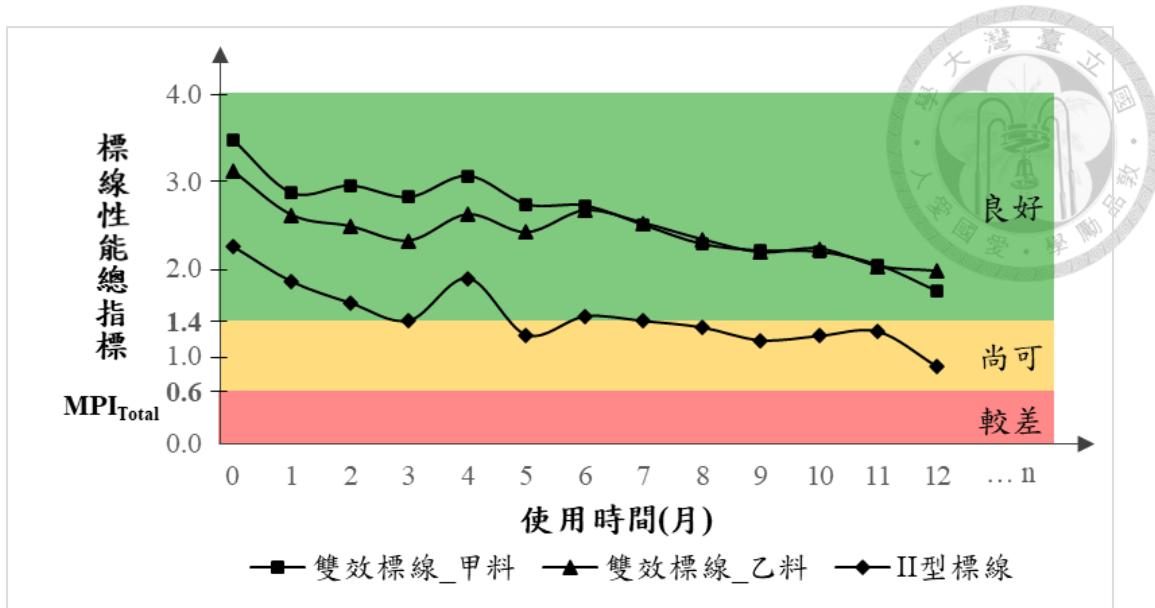


圖 5.2 標線性能總指標(MPI_{Total})分級(以紹興南街現地標線實驗為例)

關於標線性能總指標(MPI_{Total})之分級細節，主要依循標線性能表現分為三種等級，從高至低分級依序是良好(綠色)、尚可(黃色)、較差(紅色)。

一、「良好等級」(Good)之門檻值為標線性能總指標大於 1.4，等同達到回歸反射係數 R3 級(RL \geq 150 mcd/m²/lx)、擴散反射係數 Q3 級(Qd \geq 130 mcd/m²/lx)、防滑性等級 S3 級(BPN \geq 55)以上，所有新繪設標線皆須具備此等級之性能。此時， $MPI_{RL} = (150-80) / (300-80) = 0.3$ ， $MPI_{Qd} = (130-80) / (160-80) = 0.6$ ， $MPI_{BPN} = (55-45) / (65-45) = 0.5$ ，故性能總指標 $MPI_{Total} = 0.3 + 0.6 + 0.5 = 1.44$ ，以此訂為良好等級門檻值。

二、「尚可等級」(Fair)之標線性能總指標介於 1.4 到 0.6 之間，保持在回歸反射係數 R2 級(RL \geq 100 mcd/m²/lx)、擴散反射係數 Q2 級(Qd \geq 100 mcd/m²/lx)、防滑性等級 S2 級(BPN \geq 50)之上，為標線正常使用後之預期水準。其計算方法同上，將 R2、Q2 及 S2 帶入各項性能指標公式中再行加總。

三、「較差等級」(Poor)則定義標線性能總指標低於 0.6，顯示該標線已明顯欠缺部分反光或抗滑性能表現，可能會影響用路人日常使用之安全風險。

乃至於標線性能總指標小於 0.0 時，代表道路標線已低於各項性能之最低標準 $RL \leq 80(\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx})$ 、 $Qd \leq 80(\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx})$ 、 $BPN \leq 45$ ，建議道路主管機關應即刻安排進場維護重繪標線。

綜觀圖 5.2 之標線性能總指標(MPI_{Total})分級，不僅符合本研究前述章節對於標線性能的建議規範，同時可明確地發現無論是雙效標線甲料或是乙料歷經一年的使用後，均依舊長期維持良好等級，代表雙效標線的性能成果值得肯定。而 II 型標線在初期的性能總指標，因為抗滑 BPN 性能及擴散反射 Qd 性能均佳，雖然回歸反射 RL 性能不理想，整體也可達到良好等級，但隨時間發展則逐漸下探，在第七個月過後落入尚可等級。至於後續標線性能是否持續劣化，則須仰賴持續的標線追蹤檢測，以達成標線完整生命週期之服務性能總指標評估。在上述 MPI_{Total} 之計算分析中，並無特別強調哪一個標線性能指標之重要性，三種指標各自計算加總後，再以 1.4 及 0.6 做為性能等級區分。換言之，標線性能總指標本身對於三項標線性能平均重視，但若單一性能表現特別優異亦可能平衡其他表現較差之標線性能，而無法顯示出標線性能之偏頗狀態。

5.2 標線服務績效分析

有鑑於用路人在不同使用情境下，對於道路標線可能會有不同的性能需求，例如：在缺乏環境照明時對於標線的反光性能更為依賴、在天雨路滑的情境則凸顯標線抗滑性能的重要性。為此，本研究預期藉由不同標線使用情境之各項性能權重設定，表達真實使用狀況之標線服務績效，以此建議適合的標線材料選擇。

5.2.1 標線使用情境之權重設定

為了確保道路標線在實際道路環境中發揮良好的反光與抗滑雙性能表現，並且能夠應對各種複雜的交通和氣候條件，滿足用路人於各種標線使用情境之需求。本研究接著藉由道路標線各項使用情境之區分，根據不同情境所需之道路標線性能設定不同權重，更精確地評量道路標線之性能成效。

為此本研究回顧歐盟 CIVITAS Renaissance 計畫[52]，該計畫選定標線之乾

燥回歸反射係數 RLD、潮濕回歸反射係數 RLwet、擴散反射係數 Qd、抗滑數值 SRT、目視顏色共五項指標。將各項指標之量測結果依據評分標準，轉換為 1 到 10 分得分，同時解決不同檢測性能之數值範圍差異問題。再依照標線所處之道

本研究除了借鏡該計畫對於道路標線之使用情境劃分與相關權重設定，同時也將我國二輪車輛數量佔比較高且潮濕多雨之背景條件納入考慮，規劃將國內道路區依照客觀標準分為六種環境狀況。分別是日間乾燥、日間潮濕、夜間乾燥有照明、夜間乾燥無照明、夜間潮濕有照明、夜間潮濕無照明，進而根據駕駛人對各情境之標線性能需求，訂定合適的標線性能權重。關於六種使用情境係根據日出與日落時間劃分日間與夜間；依照降雨條件分為乾燥與潮溼兩種標線表面狀態；並且按照內政部頒佈之市區道路及附屬工程設計規範第十九章道路照明[53]，以各道路功能分類所設置之照度標準為依據(表 5.3)，高於標準者視為有充分環境照明，低於標準或未設置道路照明者則界定為無清楚環境照明。

表 5.3 各道路分類之照度(Lux)標準

道路功能分類	商業區	住商混合區	住宅區
快速道路	15(10)	10(7)	7(5)
主要道路	15(10)	10(7)	7(5)
次要道路	10(7)	7(5)	6(4)

括弧內為水泥混凝土或路面顏色較淺之平均照度標準

此外本研究也特別針對道路標線在潮濕之使用情境，加強對車輛打滑風險的重視，統一將標線抗滑性能的權重加重設為 0.7，作為首要安全條件；但在乾燥情境下將抗滑的權重降低至 0.2，此亦是參考歐盟計畫而擬定。對於其他乾燥路面情境下之標線權重設定，則依照有照明時用路人較依賴擴散反射 Qd，辨識標線顏色與位置。至於在無照明使用情境之下，駕駛僅能唯一仰賴車燈照射標線之回歸反射 RL，以此在昏暗環境中看清標線內容。最終設定各項性能指標權重加

總為 1.0 之前提下，確立適合臺灣之六種道路標線使用情境權重設定，如下表 5.4 所呈現，預期可涵蓋各類型之道路標線實際使用情境。



表 5.4 道路標線使用情境權重設定

WR + WQ + WB = 1.0	日間		夜間			
	乾燥	潮濕	乾燥 有照明	潮濕 有照明	乾燥 無照明	潮濕 無照明
RL 性能權重，WR	0.0	0.0	0.2	0.1	0.8	0.3
Qd 性能權重，WQ	0.8	0.3	0.6	0.2	0.0	0.0
BPN 性能權重，WB	0.2	0.7	0.2	0.7	0.2	0.7

5.2.2 標線服務績效比較

綜整前述各節依序完成之正規化標線性能指標、標線使用情境之權重設定，將於本章節進行標線服務績效(Marking Service Performance, MSP)之計算方法說明，同時將本研究稍早於現地劃設之雙效標線與 II 型標線長期性能追蹤結果，作為實際案例列入分析比較。本研究將標線服務績效(MSP)定義為標線在使用期間內所能提供之回歸反射係數 RL、擴散反射係數 Qd、抗滑係數 BPN 各項長期性能服務表現。此概念亦類似於鋪面之現況服務能力指標(Present Serviceability Index, PSI)，分析鋪面隨著使用時間所提供之功能服務。

關於標線服務績效(MSP)之詳細計算方法，首先利用正規化後回歸反射係數 RL、擴散反射係數 Qd、抗滑係數 BPN 三項標線性能指標(MPI_{RL} 、 MPI_{Qd} 、 MPI_{BPN})，搭配表 5.4 中六種不同使用情境之各項性能權重設定(WR_i 、 WQ_i 、 WB_i , $i = 1 \sim 6$)，計算標線在各種使用情境之標線性能指標 MPI_{W_i} ，如公式 5.1。

$$\text{MPI}_{\text{W}_i} = \text{MPI}_{\text{RL}} * \text{WR}_i + \text{MPI}_{\text{Qd}} * \text{WQ}_i + \text{MPI}_{\text{BPN}} * \text{WB}_i \quad (\text{公式 5.1})$$

其中， MPI_{W_i} ：六種使用情境權重各自之標線性能指標， $i = 1$ 到 6；

MPI_{RL} ：經正規化計算之標線回歸反射係數 RL 性能指標；

WR_i ：六種使用情境之 RL 性能權重， $i = 1$ 到 6；


 MPI_{Qd}：經正規化計算之標線擴散反射係數 Qd 性能指標；
 WQ_i：六種使用情境之 Qd 性能權重，i=1 到 6；
 MPI_{BPN}：經正規化計算之標線抗滑係數 BPN 性能指標；
 WB_i：六種使用情境之 BPN 性能權重，i=1 到 6。

接著計算各使用情境之標線性能指標與使用時間所涵蓋之面積，並且依照各使用情境於實際案例中分析期間之時間佔比(T)，精準地評估標線在該地區各使用情境下隨使用時間之服務績效(MSP)，如公式 5.2 所列。至於不同道路交通量對於標線之磨耗影響，因其涉及車速、車重等多項因素共同影響，較難單獨評量分析，故本研究直接將交通量影響視作隨使用時間造成標線性能變化之成因，並未特別列入標線服務績效計算公式中。

$$\mathbf{MSP} = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=0}^{\text{service end}} \Delta \mathbf{MPI}_{w,j} * T_i \quad (\text{公式 5.2})$$

其中，MSP：標線服務績效(Marking Service Performance)；

$\Delta \mathbf{MPI}_{w,j}$ ：標線性能指標隨使用時間(service time)涵蓋之面積；

T_i ：六種使用情境分析期間之時間佔比，i=1 到 6，

且 $T_1+T_2+T_3+T_4+T_5+T_6=1$ 。

基於上述標線服務績效之計算說明，本研究帶入前述紹興南街現地實驗之雙效標線甲料、乙料、II 型標線為期一年的性能數據，經計算獲得性能指標結果，如圖 5.3 所示。由圖可看出依現地之地理環境，雙效標線甲、乙料之標線服務績效(MSP)皆遠大於 II 型標線，此服務績效即為標線性能指標與使用時間所涵蓋之圖形總面積，可清楚地針對不同標線之服務能力進行比較。倘若以紹興南街三種標線材料為期十二個月的性能資料，調整為不同情境之降雨潮濕特性，以及有無照明之道路環境條件，進而規劃進行多雨有照明、多雨無照明、少雨有照明、少雨無照明等四種標線使用情境之服務績效試算。關於使用情境設定部分，以日間與夜間平均各佔 12 小時，並根據交通部中央氣象署單日降雨量大於 0.1 毫米之

年平均降雨日數[54]，選擇年平均降雨日數為 163 天的臺北市及 83 天的臺南市兩地區為例，分別代表多雨和少雨的氣候環境；照明條件則以路燈照明充足之市區道路、缺乏路燈照明之郊區道路為例，並計算各使用情境之全年時間佔比。

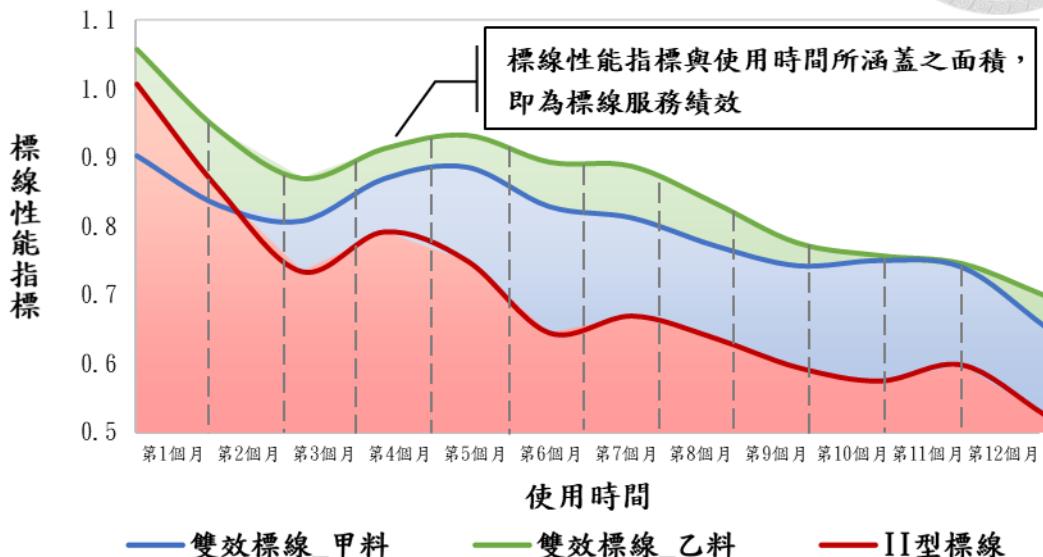


圖 5.3 標線服務績效計算說明

本研究以「多雨有照明的臺北市市區道路」之雙效標線甲料為例，說明詳細的計算步驟。首先將甲料每個月量測之回歸反射係數 RL 、擴散反射係數 Qd 、抗滑係數 BPN 進行正規化計算，獲得各時間之性能指標(MPI_{RL} 、 MPI_{Qd} 、 MPI_{BPN})，如表 5.5 所呈現；接續乘上六種使用情境之權重設定，加總得到六種使用情境之標線性能指標(9.09、7.96、9.40、10.30、8.11、8.41)，如表 5.6；同時計算六種使用情境於分析期間之時間佔比(0.28、0.22、0.28、0.00、0.22、0.00)；將各使用情境之性能指標與時間佔比逐項相乘，再行加總得出標線服務績效(8.70)，如表 5.7。此計算結果即為雙效標線甲料在多雨有照明的臺北市市區道路之服務績效，同理亦可帶入其他種標線材料之性能數據，以及各使用情境之全年時間佔比，分別計算該標線於實際使用情境之服務績效，以此作為標線材料於現地之長期表現比較依據。進而歸納出其他情境之標線服務績效試算，遂將試算結果彙整如表，依序為多雨無照明的臺北市郊區道路(表 5.8)、少雨有照明的臺南市市區道路(表 5.9)、少雨無照明的臺南市郊區道路(表 5.10)。

表 5.5 雙效標線甲料之性能指標試算

雙效標線 甲料	第 1 個 月	第 2 個 月	第 3 個 月	第 4 個 月	第 5 個 月	第 6 個 月	第 7 個 月	第 8 個 月	第 9 個 月	第 10 個 月	第 11 個 月	第 12 個 月
MPI_{RL}	1.30	1.45	1.35	1.27	1.17	1.17	0.92	0.80	0.74	0.64	0.61	0.56
MPI_{Qd}	0.94	0.98	0.84	1.18	0.92	1.09	0.69	0.81	0.71	0.76	0.77	0.65
MPI_{BPN}	0.63	0.52	0.63	0.61	0.64	0.46	0.90	0.68	0.77	0.80	0.68	0.54

表 5.6 雙效標線甲料各使用情境之性能指標試算

雙效標線 甲料	第 1 個 月	第 2 個 月	第 3 個 月	第 4 個 月	第 5 個 月	第 6 個 月	第 7 個 月	第 8 個 月	第 9 個 月	第 10 個 月	第 11 個 月	第 12 個 月	性能 指標 MPI_{W_i}
日間/乾燥	0.91	0.89	0.84	0.93	0.97	0.92	0.85	0.76	0.75	0.74	0.76	0.69	9.09
日間/潮濕	0.80	0.69	0.68	0.74	0.76	0.69	0.74	0.78	0.73	0.77	0.75	0.64	7.96
夜間/乾燥/有照明	1.02	0.97	0.94	0.99	1.00	0.95	0.88	0.78	0.75	0.73	0.73	0.66	9.40
夜間/乾燥/無照明	1.33	1.22	1.24	1.17	1.10	1.05	0.97	0.85	0.76	0.71	0.65	0.59	10.30
夜間/潮濕/有照明	0.86	0.73	0.73	0.77	0.77	0.71	0.76	0.79	0.74	0.76	0.73	0.62	8.11
夜間/潮濕/無照明	0.96	0.81	0.83	0.83	0.81	0.74	0.79	0.81	0.74	0.76	0.70	0.60	8.41

表 5.7 標線服務績效試算(多雨有照明)

臺北市市區道路 之情境假設	分析期間 佔比(T_i)	六種使用情境權重之標線性能指標(MPI_{W_i})		
		雙效標線甲料	雙效標線乙料	II型標線
日間/乾燥	0.28	9.09	8.93	7.71
日間/潮濕	0.22	7.96	9.95	8.43
夜間/乾燥/有照明	0.28	9.40	8.64	6.05
夜間/乾燥/無照明	0.00	10.30	7.75	1.06
夜間/潮濕/有照明	0.22	8.11	9.81	7.60
夜間/潮濕/無照明	0.00	8.41	9.51	5.93
標線服務績效 (MSP)		8.70	9.27	7.39
乙料 > 甲料 > II型				

表 5.8 標線服務績效試算(多雨無照明)

臺北市郊區道路 之情境假設	分析期間 佔比(T_i)	六種使用情境權重之標線性能指標(MPI_{W_i})		
		雙效標線甲料	雙效標線乙料	II 型標線
日間/乾燥	0.28	9.09	8.93	7.71
日間/潮濕	0.22	7.96	9.95	8.43
夜間/乾燥/有照明	0.00	9.40	8.64	6.05
夜間/乾燥/無照明	0.28	10.30	7.75	1.06
夜間/潮濕/有照明	0.00	8.11	9.81	7.60
夜間/潮濕/無照明	0.22	8.41	9.51	5.93
標線服務績效 (MSP)		9.02	8.96	5.63
		甲料 > 乙料 > II 型		

表 5.9 標線服務績效試算(少雨有照明)

臺南市市區道路 之情境假設	分析期間 佔比(T_i)	六種使用情境權重之標線性能指標(MPI_{W_i})		
		雙效標線甲料	雙效標線乙料	II 型標線
日間/乾燥	0.44	9.09	8.93	7.71
日間/潮濕	0.11	7.96	9.95	8.43
夜間/乾燥/有照明	0.44	9.40	8.64	6.05
夜間/乾燥/無照明	0.00	10.30	7.75	1.06
夜間/潮濕/有照明	0.11	8.11	9.81	7.60
夜間/潮濕/無照明	0.00	8.41	9.51	5.93
標線服務績效 (MSP)		8.97	9.03	7.14
		乙料 > 甲料 > II 型		

表 5.10 標線服務績效試算(少雨無照明)

臺南市郊區道路 之情境假設	分析期間 佔比(T_i)	六種使用情境權重之標線性能指標(MPI_{W_i})		
		雙效標線甲料	雙效標線乙料	II 型標線
日間/乾燥	0.44	9.09	8.93	7.71
日間/潮濕	0.11	7.96	9.95	8.43
夜間/乾燥/有照明	0.00	9.40	8.64	6.05
夜間/乾燥/無照明	0.44	10.30	7.75	1.06
夜間/潮濕/有照明	0.00	8.11	9.81	7.60
夜間/潮濕/無照明	0.11	8.41	9.51	5.93
標線服務績效 (MSP)		9.35	8.66	5.02
		甲料 > 乙料 > II 型		

同時，本研究亦將上述各標線材料之服務績效成果彙整如圖 5.4，可發現雙效標線甲料與乙料不論在任何情境下之服務績效均十分優異，且高過 II 型標線甚多。其中，乙料在「多雨有照明」的使用情境中，除了保有一定水準的反光性能，更能發揮充分的抗滑效果降低打滑風險，確保用路人在使用時間內之交通安全。同時在「少雨無照明」的條件下，則由雙效標線甲料提供絕佳的標線服務績效，利用傑出的反光性能在無照明的環境中引領駕駛人行駛。至於其他兩種情境「多雨無照明」和「少雨有照明」使用環境中，雙效標線甲、乙料皆能持續提供良好的標線服務績效，達到優異的服務水準。在各種道路標線使用情境中，雙效標線之服務績效皆遠勝過一般 II 型標線，不但顯現雙效標線之長期績效表現突出，也代表雙效標線相比於 II 型標線更適合應用於臺北市、臺南市之市區道路、郊區道路等各類使用情境之實際道路中。

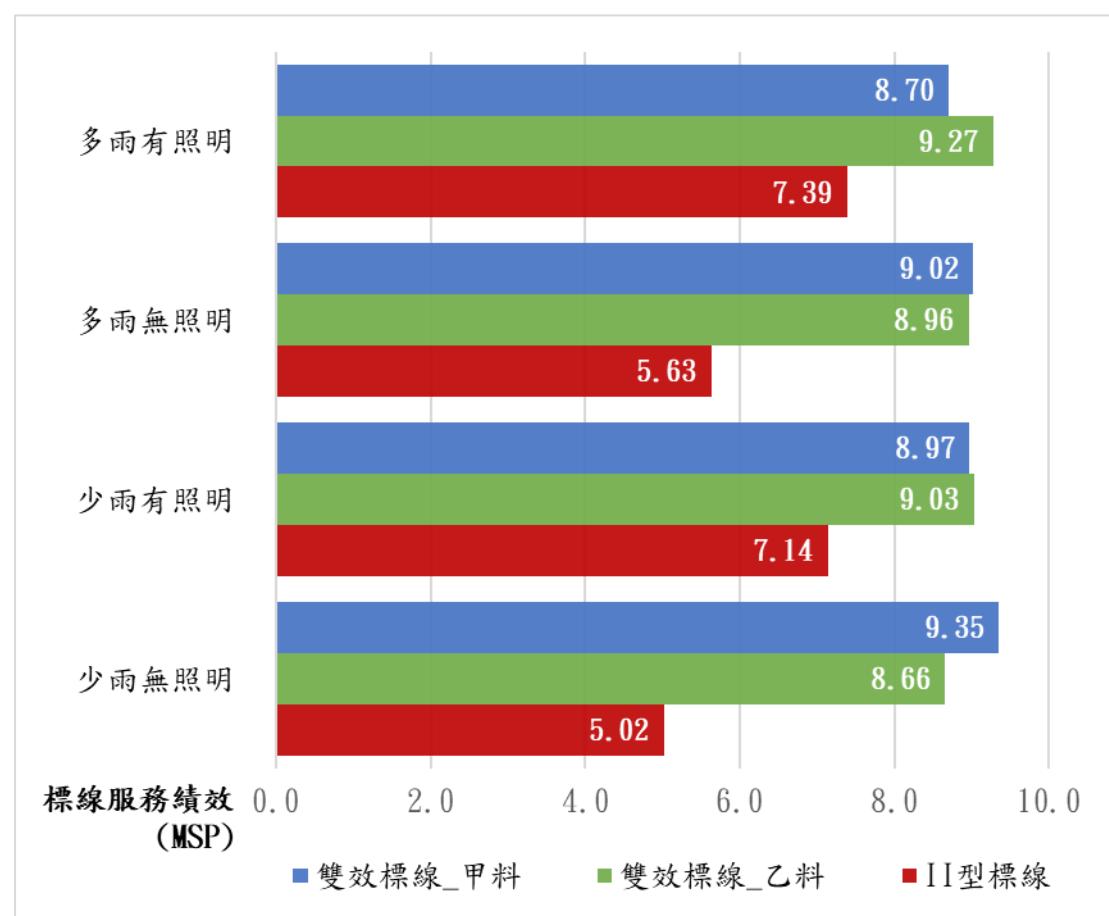


圖 5.4 各標線材料之服務績效(MSP)比較



5.3 標線成本效益探討

本研究除了致力於標線反光與抗滑雙性能提升之外，亦根據長期的性能檢測數據分析不同標線材料之成本效益。而為了有效進行標線的成本效益分析，本節將依序進行標線成本之界定與計算，並根據 5.2 節的標線服務績效結果，完整分析各類標線材料之成本效益。

5.3.1 標線成本界定與計算

基於標線成本涉及層面廣泛，從原料開採、製造生產、運輸配送、產品使用、回收處置，隨著產品生命週期均會產生各階段的成本金額，同時也可能因地區範圍差異而產生不同的管理費、工資及等等因素影響[55]。甚至是道路標線施工與維護過程中對於周圍交通的衝擊影響、因標線所導致的交通事故財損支出，以及揮發性有機化合物(Volatile Organic Compound, VOC)對環境造成的汙染成本，皆屬於標線成本計算之範疇，鑑於成本項目過於龐雜且涉及層面較廣，難以採用系統化方式逐條精算。同時，基有鑑於交通事故發生原因較為複雜，無法單純地將責任歸屬於道路標線，且交通事故之經濟影響計算迄今尚無標準計算方式，因此本研究亦不納入討論。

關於本次現地劃設雙效標線甲、乙料與 II 型標線之成本分析與計算，本研究主要參考近三年臺北市政府之標線單價分析表，以及公共工程委員會之公共工程價格資料庫標線單價資料，從工程施工單價掌握標線成本價格的基本資料；並且透過與標線施工單位、標線材料廠商多次訪談，瞭解標線成本在工程實務界的執行狀況，以此再次確認各項標線成本價格之合理性；並且聚焦於標線成本之差異部分，將此次標線工程之材料、人員、機具成本列表計算。本研究依循標線廠商施作經驗，以每平方米平均耗費約五公斤之熱拌聚酯進行計算，彙整之標線成本計算結果如下表 5.11。

表 5.11 標線成本計算表(參考臺北市政府近三年標線工程預算)

標線成本計算		雙效標線 甲料	雙效標線 乙料	市售 II 型標線
熱 拌 聚 酯 標 線 材 料	材料說明	抗滑 II 型 熱拌聚酯 (未含玻璃珠)	抗滑 II 型 熱拌聚酯 (未含玻璃珠)	抗滑 II 型 熱拌聚酯 (已含玻璃珠)
	單價 (元/公斤)	32.5	32.5	28
	單位面積使用重量 (公斤/平方公尺)	5	5	5
	每平方公尺金額(元)	162.5	162.5	140
材 料 成 本	材料說明	玻璃珠 (折射率 1.65)	玻璃珠 (折射率 1.65)	-
	單價 (元/公斤)	170	170	-
	單位面積使用重量 (公斤/平方公尺)	1.25	1.25	-
	每平方公尺金額(元)	212.5	212.5	-
外 撒 材 料	材料說明	玻璃珠	抗滑 骨材	抗滑 骨材
	單價 (元/公斤)	170	36	36
	單位面積使用重量 (公斤/平方公尺)	0.155	0.155	0.21
	每平方公尺金額(元)	26.35	5.58	35.7
標線材料價格 (元/平方公尺)		406.93	418.44	150.8
人 員 機 具 成 本	標線技術工、普通工、 標線機具、黏層劑、 燃料費、零星工料 (雙效標線與 II 型標線 之人員機具成本相同) (元/平方公尺)	400	400	400
總價(元/平方公尺)		810	820	550

由表格內容可知雙效標線甲料、乙料因內摻材料與外撒材料皆使用一定比例之折射率 1.65 玻璃珠，以至於雙效標線之材料成本相對提高。至於熱拌聚酯、抗滑骨材等其他項材料成本金額則與 II 型標線較為接近，而雙效標線所需之施工人員、機具與 II 型標線成本亦為相同。最終計算得出連工帶料之雙效標線甲料成本為新臺幣 810(元/平方公尺)、雙效標線乙料成本為新臺幣 820(元/平方公尺)、市售 II 型標線成本為新臺幣 550(元/平方公尺)，雙效標線甲料、乙料與 II 型標線之成本價格差異約為每平方公尺 260 到 270 元。

此外，因為本次現地劃設之雙效標線實驗，屬於市區道路首次小範圍試辦計畫，相關標線材料購買總量較少，且根據先前提出的標線材料配比，需特別客製化雙效標線之內摻玻璃珠材料製作，連帶增加熱拌聚酯標線材料成本。若日後持續推廣更大範圍的雙效標線劃設案量，建立穩定的標線材料需求，相信將可有效降低雙效標線之市場價格，使雙效標線之材料成本再下修調整。

5.3.2 標線成本效益定義

關於標線成本效益(Marking Cost Effectiveness, MCE)係參考美國堪薩斯州亮度效益因子 (Brightness Benefit Factor, BBF) [56]概念，將標線成本設為分母，計算標線在使用年限期間內可貢獻之回歸反射能力。在本研究中，除了標線的亮度之外亦同時考慮國內所重視之標線抗滑性能，進一步定義標線成本效益(MCE)為標線服務績效(MSP)除上標線單位面積之成本價格(千元/平方公尺)，如下方公式 5.3，數值愈高代表成本效益愈佳，並且在公式計算中特別將標線成本價格換為每單位面積千元之計價方式，以此符合我國多數工程之計價習慣。

$$MCE = MSP / C \quad (\text{公式 5.3})$$

其中，MCE：標線成本效益(Marking Cost Effectiveness)；

MSP：標線服務績效(Marking Service Performance)；

C：標線單位面積之成本價格(千元/平方公尺)。

根據上述各類標線在四種標線使用情境(多雨有照明、多雨無照明、少雨有

照明、少雨無照明)之服務績效結果，除以雙效標線甲料、乙料、II 型標線之單位面積成本價格，即可計算得出三種標線在四種使用情境之成本效益，詳細試算結果整理如表 5.12、表 5.13、表 5.14 及表 5.15。



表 5.12 標線成本效益試算(多雨有照明)

臺北市市區道路 之情境假設	雙效標線 甲料	雙效標線 乙料	II 型 標線
標線服務績效(MSP)	8.70	9.27	7.39
成本(千元/平方公尺)	0.81	0.82	0.55
標線成本效益 (MCE)	10.75	11.31	13.43
	II 型 > 乙料 > 甲料		

表 5.13 標線成本效益試算(多雨無照明)

臺北市郊區道路 之情境假設	雙效標線 甲料	雙效標線 乙料	II 型 標線
標線服務績效(MSP)	9.02	8.96	5.63
成本(千元/平方公尺)	0.81	0.82	0.55
標線成本效益 (MCE)	11.14	10.93	10.25
	甲料 > 乙料 > II 型		

表 5.14 標線成本效益試算(少雨有照明)

臺南市市區道路 之情境假設	雙效標線 甲料	雙效標線 乙料	II 型 標線
標線服務績效(MSP)	8.97	9.03	7.14
成本(千元/平方公尺)	0.81	0.82	0.55
標線成本效益 (MCE)	11.07	11.02	12.98
	II 型 > 甲料 > 乙料		

表 5.15 標線成本效益試算(少雨無照明)

臺南市郊區道路 之情境假設	雙效標線 甲料	雙效標線 乙料	II 型 標線
標線服務績效(MSP)	9.35	8.66	5.02
成本(千元/平方公尺)	0.81	0.82	0.55
標線成本效益 (MCE)	11.55	10.56	9.13
甲料 > 乙料 > II 型			

關於各標線材料之成本效益探討整理如下圖 5.5，由圖可知在有照明條件下之多雨和少雨使用情境中，因相對不需要高回歸反射性能，RL 權重設定較低，令 II 型標線可依靠成本價格之優勢，獲得較佳的標線成本效益。反觀無論在多雨或少雨的無照明使用情境中，則皆由雙效標線優異的反光與抗滑雙性能表現，展現更佳的成本效益。然而，有鑑於雙效標線現階段仍舊屬於小批量製作，雙效標線之成本價格為 II 型標線 1.5 倍之多，導致前者在部分使用情境中成本效益較 II 性標線差。

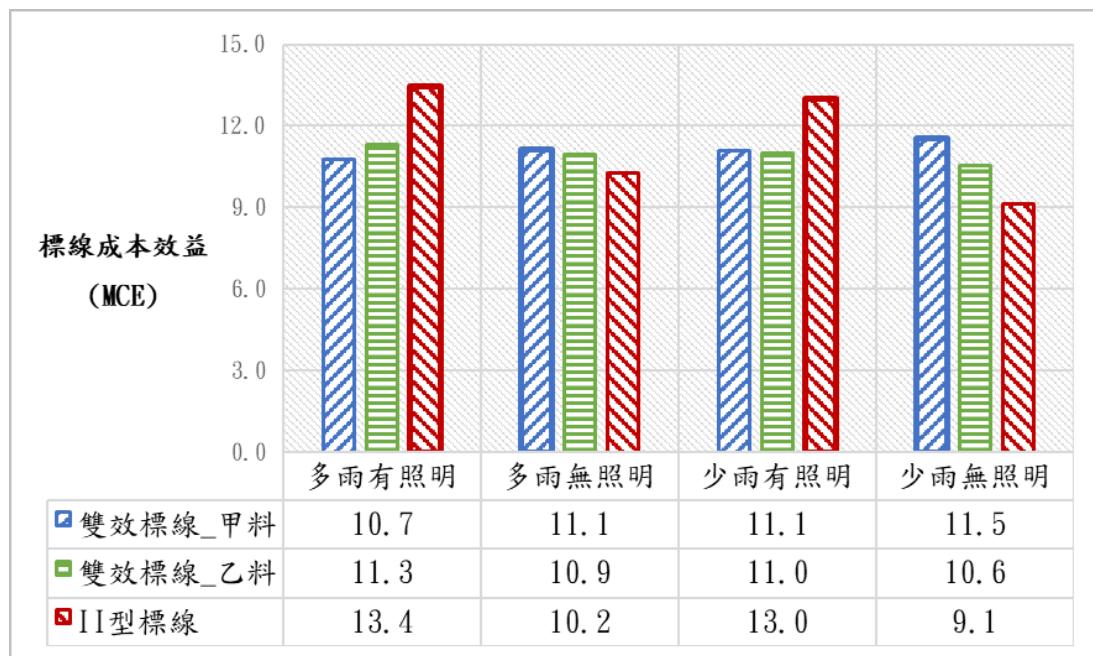


圖 5.5 各標線材料之成本效益(MCE)比較

而回顧以往剛推行 II 型標線時，相較 I 型標線更注重標線抗滑性能，其當初之標線價格也高出 I 型標線許多，乃至於近期 II 型標線日漸普及成本價格隨市場均衡逐漸下降。換言之，如果隨著日後雙效標線之施作面積擴大且材料陸續普及，則應可有效地提升雙效標線之成本效益。本研究同時依循雙效標線甲、乙料之服務績效表現，探討甲料與 II 型之標線服務績效與成本效益，試算在各種情境下具有競爭力之單價，如表 5.16。根據計算結果顯示，在甲料表現最不利之多雨有照明使用情境下，當雙效標線的價格降至每平方公尺 648 元左右時，即可與 II 型標線之成本效益達到平衡。無論在任何情境下皆優於 II 型標線之成本效益表現，實現最大化雙效標線之成本效益目標。

表 5.16 四種情境下之雙效標線單價競爭力分析

(元/平方公尺)	多雨有照明	多雨無照明	少雨有照明	少雨無照明
雙效標線_甲料	650	880	690	1025
雙效標線_乙料	690	875	700	950

第六章、結論與建議



本研究之目標為研發兼具反光性能與抗滑性能之雙效標線，及探討期工程實務應用。基於多次的標線材料配比實驗，進而確定雙效標線之內摻與外撒材料配比，並選擇紹興南街作為現地劃設路段，展開為期一年之回歸反射 RL、擴散反射 Qd、抗滑係數 BPN 標線性能長期追蹤檢測，探究各標線隨時間的性能變化，並提出合適的標線性能成效規定。同時規劃標線試片外撒量成效實驗，藉由可自主調整外撒量之外撒儀器，探究不同外撒材料隨著不同外撒量之性能差異，作為標線材料選擇建議。此外本研究亦建立標線性能指標作為等級區分，並依照不同使用情境之性能需求評量各標線之服務績效，最後根據標線成本計算結果，進一步討論各標線材料之成本效益分析。將於本章節依序精要說明本研究之成果結論，並且提出後續研究之展望建議。

6.1 結論

將根據本研究之各項研究成果內容進行重點彙整，於下方依序列點說明：

1. 基於我國現階段僅規範標線的材料選擇與施工後驗收之抗滑標準，本研究經由眾多規範回顧與現地實驗檢測數據支持，建議驗收時間可調整為標線施工完成後 30 天。針對白色標線提出完整的雙性能規範，應在完工後一個月達到 BPN 55、乾燥狀態下之回歸反射係數 RL 達 $150 \text{ (mcd/m}^2/\text{lx)}$ ；並且於完工後一年仍然維持抗滑性能 BPN 50、反光性能 RL 100 ($\text{mcd/m}^2/\text{lx}$)以上之長期雙效表現。
2. 根據歷次的標線材料配比實驗，建議使用折射率 1.65 之玻璃珠作為標線內摻材料，外撒材料則建議選擇粒徑分佈相近、重量相當之玻璃珠與抗滑骨材，可同時兼顧標線的反光與抗滑性能。進而確定雙效標線之材料配比「甲料」以玻璃珠與抗滑骨材 1:1 充分混合，使用單一外撒盒外撒 310 公克/平方公尺。「乙料」為前外撒玻璃珠 215(公克/平方公尺)，搭配後外撒抗滑骨材 210(公克/平方公尺)，外撒總量約為 425(公克/平方公尺)。

3. 歷經十二個月的標線反光性能追蹤檢測，初期回歸反射係數 RL 由甲料($R_5 \geq 300 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)領先乙料($R_4 \geq 200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)。後期隨標線表面材料更迭，甲、乙料 RL 數值日漸接近均保持 $R_3(\geq 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx})$ 級以上，具備良好的反光辨識效果，符合長期一年使用後 RL 性能維持($R_2 \geq 100 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$)以上。而 II 型標線之反光性能則相較於雙效標線而言望塵莫及，嚴重缺乏標線的夜間識別功能，始終不及反光最低門檻 $R_1(\geq 80 \text{ mcd/m}^2/\text{lx})$ 。
4. 經過一年之現地使用後，雙效標線甲、乙料及 II 型標線之擴散反射係數 Q_d 皆維持在 $100 (\text{mcd/m}^2/\text{lx})$ 以上，足以提供用路人清楚辨識。同時因短延時強降雨之豪雨清潔效果令 Q_d 數值提升，驗證降雨與標線反光性能呈現正相關。
5. 在抗滑性能部分多數標線呈現緩降趨勢，不過一年後仍保持抗滑等級 $S_3(\geq 55 \text{ BPN})$ 以上。其中又屬乙料的抗滑表現最佳，雖初期反光效果不如甲料亮眼，但因後外撤抗滑骨材於標線表面發揮，使得乙料抗滑效果明顯優於甲料，且與僅注重高抗滑的 II 型標線處於伯仲之間，但更具備 II 型標線所缺乏的優異反光性能。
6. 由標線表面狀態變化照片比較各標線衰退程度，可發現甲、乙料受標線表層材料磨損反光與抗滑雙性能均有所降低，長期而言雙效標線不僅可提供穩定且良好的反光識別功能，亦能兼顧現有規範對於標線高抗滑的安全需求。
7. 透過正規化計算標線性能指標，並建立良好、尚可、較差三種等級，得以客觀評估標線性能表現。進一步根據標線於各使用情境之性能需求，精準地評量標線服務績效，並且得知無論在多雨有照明、多雨無照明、少雨有照明、少雨無照明之四種情境中，雙效標線甲、乙料皆能依靠性能優勢，展現比 II 型標線更優秀的服務績效。
8. 關於標線成本效益分析結果，因雙效標線現階段仍屬於少量製作價格成本較高，在有照明的市區道路情境之下成本效益表現較 II 型標線差。但在缺乏照明的郊區道路使用情境中，雙效標線仰賴突出的反光性能克服成本劣勢，發揮更佳的成本效益，可作為後續標線材料之推廣應用。

9. 藉由可主動調整外撒量之實驗室外撒儀器，探究各式標線外撒材料之不同外撒重量與標線性能關係。結果顯示 A 料(等比例混合料)、B 料(抗滑骨材較多)雖然皆有不錯之抗滑成效，但若要兼顧標線反光，則建議選擇玻璃珠較不易受遮蔽之等比例混合 A 料配比，外撒量維持 300 克到 340 克較為合適。
10. 至於標線試片 C 料(純 II 型聚酯)和 D(外撒抗滑料)因標線表面缺少反光材料幾乎不具 RL 效果；C 料靠純 II 型聚酯即可達 BPN 50，而 D 料隨抗滑料外撒量增加抗滑性能有所提升可分為 BPN 65、75、90 三個層級。E 料(外撒玻璃珠)之外撒量增加 RL 也隨著提高最高可達 RL 568，抗滑性能則有先增後減之變化。可依據不同的標線性能需求，選擇相對應的外撒量配比。

6.2 建議

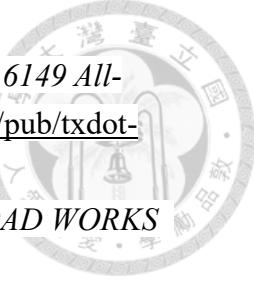
針對本研究不足之處以及後續研究方向之具體建議如下方列點說明：

1. 本研究現階段僅以白色標線為目標進行標線性能探討與規範建議，尚未包含黃色等其他顏色標線。而鑑於人眼視覺對於不同顏色的感知差異，建議日後可持續探究不同顏色之雙效標線材料配比，並追蹤其反光性能表現。
2. 雖然雙效標線之回歸反射係數 RL，已是現有 II 型標線數倍之高，但是在潮溼天候下，與全天候反光標線相比則仍有可提升的空間。建議可嘗試利用更高折射率之玻璃珠或陶瓷珠等外撒反光材料，搭配不同比例之二氧化鈦內摻材料，進行標線濕反光性能之相關材料實驗。
3. 即使雙效標線在保持良好標線抗滑性能之前提下，利用材料配比設計大幅提升標線的反光性能，但本研究並未深入探討駕駛者在不同道路線型所需之最低反光性能。後續可藉由類似的研究結果，確立更精準且合適的反光性能需求。以此調整雙效標線之材料配比，降低材料成本令其更符合經濟效益。
4. 關於標線性能指標、服務績效和成本效益之架構模式，目前僅以臺北市紹興南街之現地標線資料進行分析，較缺乏其他路段之案例比較，建議日後可收集其他道路標線之相關數據，再行匯入以臻完善標線成本效益分析。

參考文獻



1. 交通部，道安資訊查詢網，2024 年。
<https://roadsafety.tw/Dashboard/Custom?type=%E7%B5%B1%E8%A8%88%E5%BF%AB%E8%A6%BD%E5%9C%96%E8%A1%A8>
2. 交通部，交通工程規範，2021 年。
3. 政府資訊研究系統 GRB，關鍵詞文字雲分析，2024 年 6 月。
<https://www.grb.gov.tw/search;keyword=%E9%9B%99%E6%95%88%E6%A8%99%E7%B7%9A;type=GRB05>
4. 中華民國國家標準 CNS 15834，道路標線使用性能，經濟部標準檢驗局，2015 年。
5. 中華民國國家標準 CNS 1333，道路標線塗料，經濟部標準檢驗局，2017 年。
6. 中華民國國家標準 CNS 4342，交通反光標誌塗料用玻璃珠，經濟部標準檢驗局，2016 年。
7. *ASTM D7942 - 15.* (2023). Standard Specification for Thermoplastic Pavement Markings in Non Snow Plow Areas.
8. United States Department of Transportation - Federal Highway Administration. (2023). *Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD)*.
<https://mutcd.fhwa.dot.gov/>
9. waka kotahi nz transport agency. (2022). *Road Marking Materials*.
<https://www.nzta.govt.nz/resources/road-marking-materials/>
10. bsi. (2018). *BS EN 1436:2018 Road Marking Materials. Road Marking Performance for Road Users and Test Methods*.
11. 日本高速道路株式會社，レーンマク施工管理要領，2017 年。
12. Institute of coating technologies . (2022). ΣΧΕΔΙΟ ΕΛΟΤ ΤΠ 1501-05-04-02-00:2022. <https://coatinginstitute.org/etep/>
13. instituto de pesquisas rodoviárias – ipr . (2018). *NORMA DNIT 100/2018 – ES*.
https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_100_2018_es.pdf
14. 中華人民共和國國家標準，道路交通標線質量要求和檢測方法，2009 年。
<http://c.gb688.cn/bzgk/gb/showGb?type=online&hcno=353CFB3F50B9612DF0ACEF4CF6CF8033>
15. Hong Kong Highways Department Research & Development Division. Guidance Notes ON Road Markings. 2016
16. Carina, F. (2022). Nordic certification system for road marking materials. Version 9:2022. <http://vti.diva->

- 
17. Texas department of transportation. (2014). *Special Specification 6149 All-Weather Thermoplastic Pavement Markings.* <https://ftp.txdot.gov/pub/txdot-info/cmd/cserve/specs/2014/spec/ss6149.pdf>
 18. Cawangan jalan. (2017). *STANDARD SPECIFICATION FOR ROAD WORKS JKR/SPJ/2017-S6.*
 19. Korean National Police Agency. (2022). *Traffic Safety Facilities (Road Marking) Installation and Management Manual.*
 20. Singapore standard. (2022). SS 589:2013 (2022) *Specification for Hot-Applied Thermoplastic Road Marking Materials – Materials, Performance and Application.*
 21. Indian roads congress. (2015). *IRC-35:2015. Code of Practice for Road Marking (Second Revision).*
<https://Law.Resource.Org/Pub/in/Bis/Irc/Irc.Gov.in.035.2015.Pdf>.
 22. Ministry of transportation legal bureau. (2019). *REGULATION OF THE DIRECTOR GENERAL OF LAND TRANSPORTATION NUMBER: KP. 106/AJ.501/DRJD/2019 Concerning Technical Instructions for Road Markings.*
<https://Law.Resource.Org/Pub/in/Bis/Irc/Irc.Gov.in.035.2015.Pdf>.
 23. Ministry of development government of spain. (2012). *Guide for the Project and Execution of Horizontal Signaling Works.*
<https://Law.Resource.Org/Pub/in/Bis/Irc/Irc.Gov.in.035.2015.Pdf>.
 24. Austroads technical specification. (2021). *ATS-4110-21 Longitudinal Pavement Marking.* https://Austroads.Com.Au/Publications/Test-Methods/Ats-4110/Media/ATS-4110-21_Longitudinal_Pavement_Marking.Pdf.
 25. Department of public works and highways. (2013). *DPWH Standard Specification for Item 612 - Reflective Thermoplastic Stripping Materials (Solid Form) with Performance Requirements.* <https://Www.Dpwh.Gov.Ph/Dpwh/Issuances/Department-Order/2967>.
 26. Ministry of transport and public works. (2022). *210 - Requirements for the Execution of Pavement Demarcations on National Routes.*
 27. National standards. (2018). *Traffic Paints – Thermoplastic Road Marking Materials – Specifications, Test Methods, Constructions and Acceptances.*
https://iltech.com.vn/Data/upload/files/Tai%20lieu/ILTech_TCVN%208791_2018_Son%20vach%20duong%20he%20nhiet%20deo.pdf
 28. European union road federation. (2015). *Marking the Way towards a Safer Future.* https://erf.be/wp-content/uploads/2018/07/ERF-Paper-on-Road-Markings_release_v2.pdf

29. World health organization. (2023). *Global Status Report on Road Safety 2023*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086517>
30. Board, T. R., National Academies of Sciences, Engineering, & Medicine. (2022). Performance Criteria for Retroreflective Pavement Markers (A. M. Pike, T. P. Barrette, S. Hallmark, N. Oneyear, G. Basulto-Elias, O. Smadi, R. Srinivasan, W. J. Kumfer, T. Saleem, F. Ye, P. J. Carlson, H. G. Hawkins, & T. E. Lindheimer, Eds.). The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26814>
31. Calvi, A. (2015). A Study on Driving Performance Along Horizontal Curves of Rural Roads. *Journal of Transportation Safety & Security*, 7(3), 243–267. <https://doi.org/10.1080/19439962.2014.952468>
32. Carlson, P. J., Park, E. S., & Kang, D. H. (2013). Investigation of Longitudinal Pavement Marking Retroreflectivity and Safety. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2337(1), 59–66. <https://doi.org/10.3141/2337-08>
33. Avelar, R. E., & Carlson, P. J. (2014). Link between Pavement Marking Retroreflectivity and Night Crashes on Michigan Two-Lane Highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2404(1), 59–67. <https://doi.org/10.3141/2404-07>
34. Fiolić, M., Babić, D., Babić, D., & Tomasović, S. (2023). Effect of road markings and road signs quality on driving behaviour, driver's gaze patterns and driver's cognitive load at night-time. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 99, 306–318. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2023.10.025>
35. Burghardt, T. E., Maki, E., & Pashkevich, A. (2021). Yellow thermoplastic road markings with high retroreflectivity: Demonstration study in Texas. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00539. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00539>
36. Burghardt, T. E., Pashkevich, A., Fiolić, M., & Żakowska, L. (2019). *Horizontal Road Markings with High Retroreflectivity: Durability, Environmental, and Financial Considerations*.
37. Burghardt, T. E., & Pashkevich, A. (2023). PREMIUM ROAD MARKINGS: ONE TIME HIGHER EXPENSE FOR LOWER OVERALL COST. *New Horizons*.
38. Songchitruksa, P., Ullman, G. L., & Pike, A. M. (2011). Guidance for Cost-Effective Selection of Pavement Marking Materials for Work Zones. *Journal of Infrastructure Systems*, 17(2), 55–65. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000043](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000043)

39. Grosges, T. (2008). Retro-reflection of glass beads for traffic road stripe paints. *Optical Materials*, 30(10), 1549–1554.
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2007.09.010>
40. Smadi, O., Hawkins, N., Aldemir-Bektas, B., Carlson, P., Pike, A., & Davies, C. (2014). Recommended Laboratory Test for Predicting the Initial Retroreflectivity of Pavement Markings from Glass Bead Quality. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2440(1), 94–102.
<https://doi.org/10.3141/2440-12>
41. Siyahi, A., Kavussi, A., & Boroujerdian, A. M. (2016). Enhancing Skid Resistance of Two-Component Road Marking Paint using Mineral and Recycled Materials. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56426322>
42. Rodin III, H., Nassiri, S., Yekkalar, M., Pacific Northwest Transportation Consortium (PacTrans) (UTC), University of Washington. University Transportation Center for Region 10, & Washington State University. Department of Civil and Environmental Engineering. (2018). *Evaluation of Motorcyclists' and Bikers' Safety on Wet Pavement Markings*.
<https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/63404>
43. BURGHARDT, T. E., KÖCK, B., PASHKEVICH, A., & FASCHING, A. (2023). Skid resistance of road markings: Literature review and field test results. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 22(2), 141–165.
<https://doi.org/10.7409/rabdim.023.007>
44. Coves-Campos, A., Bañón, L., Coves-García, J. A., & Ivorra, S. (2018). In Situ Study of Road Marking Durability Using Glass Microbeads and Antiskid Aggregates as Drop-On Materials. *Coatings*, 8(10), 371.
<https://doi.org/10.3390/coatings8100371>
45. ASTM E1710, “Standard Test Method for Measurement of Retroreflective Pavement Marking Materials with CEN-Prescribed Geometry Using a Portable Retroreflectometer”, 2018.
46. ASTM E2302, “Standard Test Method for Measurement of Retroreflective Pavement Marking Materials with CEN-Prescribed Geometry Using a Portable Retroreflectometer”, 2022.
47. ASTM E2177,” Standard Test Method for Measuring the Coefficient of Retroreflected Luminance (RL) of Pavement Markings using the Bucket Method in a Condition of Wet Recovery”, 2022.
48. Yakopson, S., & Greer, R. W. (2016). *Preformed thermoplastic pavement marking and method for high skid resistance with maintained high retroreflectivity* (World Intellectual Property Organization Patent WO2016081078A1). <https://patents.google.com/patent/WO2016081078A1/en>



49. 周家蓓主持，陳艾勳協同主持，「熱處理聚酯標線於不同使用環境下抗滑能力與反光強度標準之研究」，公路總局材料試驗所委託研究，民國 106 年 11 月。
50. ASTM D7585/D7585M-10, “Standard Practice for Evaluating Retroreflective Pavement Markings Using Portable Hand-Operated Instruments”, 2022.
51. 曾翊瑄，「雙校標線材料配比分析與實務應用探討」，國立臺灣大學土木工程學系碩士論文，民國 112 年 8 月。
52. Asdrubali, F., Buratti, C., Moretti, E., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2013). Assessment of the Performance of Road Markings in Urban Areas: The Outcomes of the CIVITAS RENAISSANCE Project. *The Open Transportation Journal*, 7(1), 7–19. <https://doi.org/10.2174/1874447801307010007>
53. 內政部，市區道路及附屬工程設計規範(111 02 修正版)。
<https://myway.nlma.gov.tw/wiki/wikimain/2>
54. 交通部中央氣象署，氣候月平均資料，民國 113 年 6 月。
<https://www.cwa.gov.tw/V8/C/C/Statistics/monthlymean.html>
55. Pike, Adam M., and Bharadwaj Bommanayakanahalli. “Development of a Pavement Marking Life Cycle Cost Tool.” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2672(12):148–57, 2018.
56. Kansas department of transportation. (2002). Kansas Department of Transportation Pavement Marking Policy. Kansas Department of Transportation.