

探討轉爐石瀝青混凝土試驗道路成果—以高雄市大業北路為例

林登峰¹、陳筠昀²、蔡昕融³、王美雲⁴

¹ 義守大學土木與生態工程學系 教授

² 義守大學資訊管理學系 助理教授

³ 義守大學土木與生態工程學系 研究生

⁴ 義守大學資訊管理學系 研究生

摘 要

國內最大鋼鐵廠中國鋼鐵股份有限公司所生產之轉爐石因具備有高硬度及親油等特性，適合取代天然骨材應用於瀝青混凝土，經相關學者研究已印證轉爐石瀝青混凝土道路之成效相當良好。以高雄市大業北路為例，轉爐石瀝青混凝土鋪面平坦度及車轍檢測結果皆優於傳統瀝青混凝土鋪面。雖然，轉爐石鋪面成效優於傳統瀝青混凝土，因瀝青黏結材亦影響鋪面成效重要要素之一，南部地區氣溫較高及於重交通量下，AC-20 瀝青之黏結力不足以承載，宜改採高黏度瀝青膠泥，再配合轉爐石瀝青混凝土使用，更能有效提升鋪面之耐用年限。從紅外線熱影像檢測瀝青混合料鋪築品質，發現轉爐石混合料有較佳熱均勻性，可提升瀝青混凝土鋪面施工品質。綜觀而言，轉爐石瀝青混凝土不僅在鋪面成效優於傳統瀝青混凝土，亦可提升瀝青混凝土較佳之施工品質要件。

關鍵詞：轉爐石、瀝青混凝土、耐久性、溫度、熱影像

一、前言

傳統瀝青混凝土鋪面因車行載重日漸增大，導致鋪面強度不足，而路面經常發生凹陷、車轍、隆起等破壞現象。Huang and Kang [1]以簡易落錘試驗(Portable falling weight deflectometer, PFWD)評估道路應力分布情形，因瀝青混凝土鋪面直接與車輪接觸，約承受 70%以上載重，顯示瀝青混凝土層為提供道路結構強度的主要來源之一。

因轉爐石為煉鋼過程之副產品，其粒料富含金屬氧化物，具有耐磨及高硬度之特性，取代傳統天然粒料應用於瀝青混凝土鋪面，經國內外許多專家學者研究後證實可提升鋪面的力學及耐久性。若以轉爐石做為瀝青混凝土之粒料，因轉爐石比天然粒料具有較粗糙之紋理，可增加與瀝青膠泥之凝聚力；也由於轉爐石具有多孔隙的特性可吸附瀝青膠泥，有利於降低高溫時之永久變形量[2,3]。林志棟[4]研究轉爐石提升瀝青混凝土耐久性，發現添加轉爐石能提升路面抗滑能力、回彈模數、抗車轍能力等優點；此外，瀝青混合料中若增加轉爐石含量能有效降低瀝青使用量，主要是因為轉爐石比重大，設計時是以重量比設計故相對體積會減少，因而減少瀝青用量[5]。由於轉爐石內含有高量的氧化鈣(CaO)而增加粒料與瀝青膠泥間的膠結性，降低路面剝脫現象發生，且其基本物理性質均可符合工

程規範需要，適合台灣地區多雨的特性[7]。林登峰[6]等人發現轉爐石取代量隨之增加，其各項鋪面成效亦提升。另外，從國內第一條轉爐石瀝青混凝土試驗道路長期觀測結果，發現此道路開放通車八年後，其穩定值仍可維持原配合設計值 83%，鋪面壓實度約為 100%，顯示轉爐石瀝青混凝土鋪面具有優良載重能力，其鋪面壽命明顯高於傳統瀝青混凝土鋪面，印證轉爐石可有效取代天然粗粒料。

轉爐石應用於不同級配瀝青混合料亦有其成效，研究顯示將轉爐石應用於多孔隙(porous asphalt)瀝青混凝土級配，可增加鋪面抗滑性、浸水敏感性、抗車轍及降噪之能力[9]。另外，將轉爐石應用於 SMA(stone mastic asphalt)，將可增加高溫抗變形及抗低溫脆裂能力。

鋪面除了受交通載重作用之外，還受到周圍環境因素的影響，因台灣位於亞熱帶地區，夏季之溫度時常高於 30°C，鋪面表層溫度甚至高於 50°C 以上。因為瀝青具高溫感性，在高溫時會造成其勁度降低，此時經由車輛行經的反覆荷載對於鋪面的傷害更為嚴重。若能降低鋪面的溫感性，應有利於增加瀝青混凝土鋪面的耐用年限。Pomerantz[10]等人採用淺色塗料於鋪面表層可提升反射率，但鋪面隨時間增加而老化，其反射率亦降低；另外，地表溫度會隨反射率改變，每增加 0.1 反射率溫度約降低 5°C。此外，由於瀝青材料的熱傳導係數介於 0.5W/m-K 至 2.5W/m-K 之間，當熱傳導係數增加，瀝青表面溫度亦然增加。瀝青材料熱傳導係數每改變 1 W/m-K，瀝青表面溫度變化約 3.3°C[11]。

上述針對鋪面溫感性的研究鮮少包含轉爐石材料，國內外針對轉爐石的熱學研究也大多傾向於轉爐石的聚熱儲溫效應，較少對於現地轉爐石瀝青混凝土鋪面熱感性做探討。Xue [12]等人利用模擬試驗研究顯示轉爐石加熱至高溫狀態可增加熱能吸收效應，表示轉爐石粒料具有聚溫儲熱效應。因添加轉爐石能維持瀝青混合料內部溫度使其不易散熱，運輸至工地比傳統瀝青混合料有較高之溫度，鋪築及滾壓溫度品質較得以控制[13]。本研究不僅針對轉爐石瀝青混凝土鋪面做檢測，更以轉爐石瀝青混凝土鋪面內部溫度梯度做評估，了解轉爐石鋪面應用於實際道路的熱感性，以此角度評估轉爐石鋪面的品質及耐久性。

本試驗道路為鄰近中鋼廠區之主要道路，因貨櫃車等大型車輛使用頻繁，尤其臨海工業區進出車輛之通行道路，重交通量極大，造成路面產生塑性變形及龜裂破壞，考量行車安全，而將本路段面層加鋪維護。本試驗路段以轉爐石及傳統瀝青混凝土鋪築，並評估兩者路面成效。

二、試驗道路現況

2.1 研究位置

本研究試驗道路地點在高雄市大業北路，該路段與中鋼路交接，現況位置如圖 1 所示，路段全長約 527 公尺，道路沿線二側均為工業廠區與住家，往來車輛以重型貨車居多，經現況調查，接近中鋼路約 500 公尺，原路面產生嚴重龜裂外，表面亦有剝脫、坑洞及修補後造成路面不平整等問題。圖 2 為本研究道路之示意圖，圖中標示了車輛行進之方向，分為南下及北上之內車道、外車道與機車道，

其中貨櫃車因轉彎需常常行駛內車道，而外車道多為直行車輛行駛而大多屬於貨車與汽車混合型，機車道則為機車行駛及停車格位。

本研究道路無論南下或北上車道，頗多重車行駛，且重車行駛產生較大之噪音，因而影響居民住家生活。圖 3~6，原路面兩邊路口破壞相當嚴重，可以看出明顯龜裂及粒料剝離。

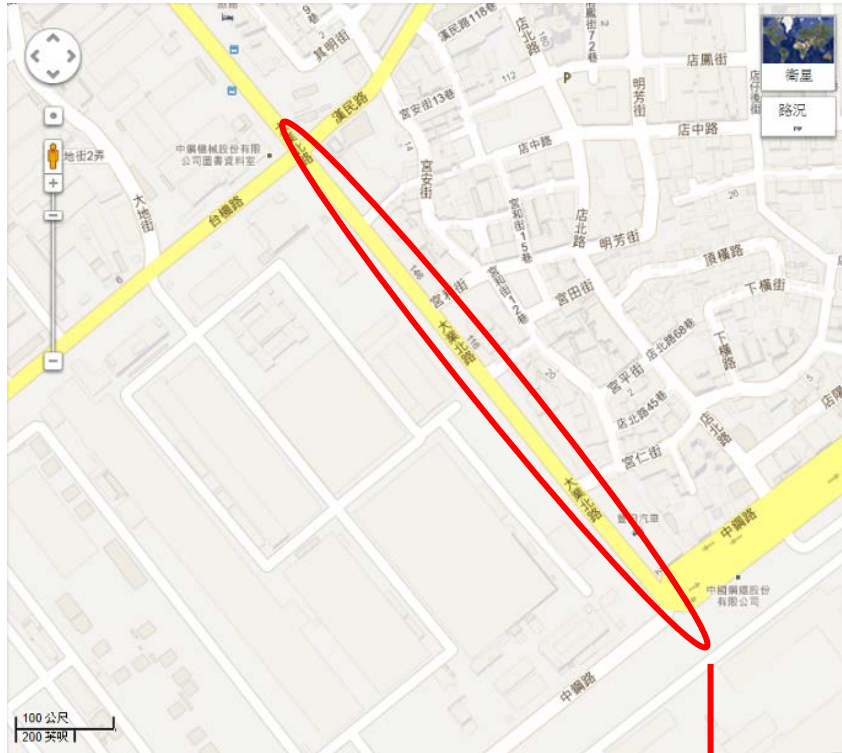


圖 1 試驗道路現況位址

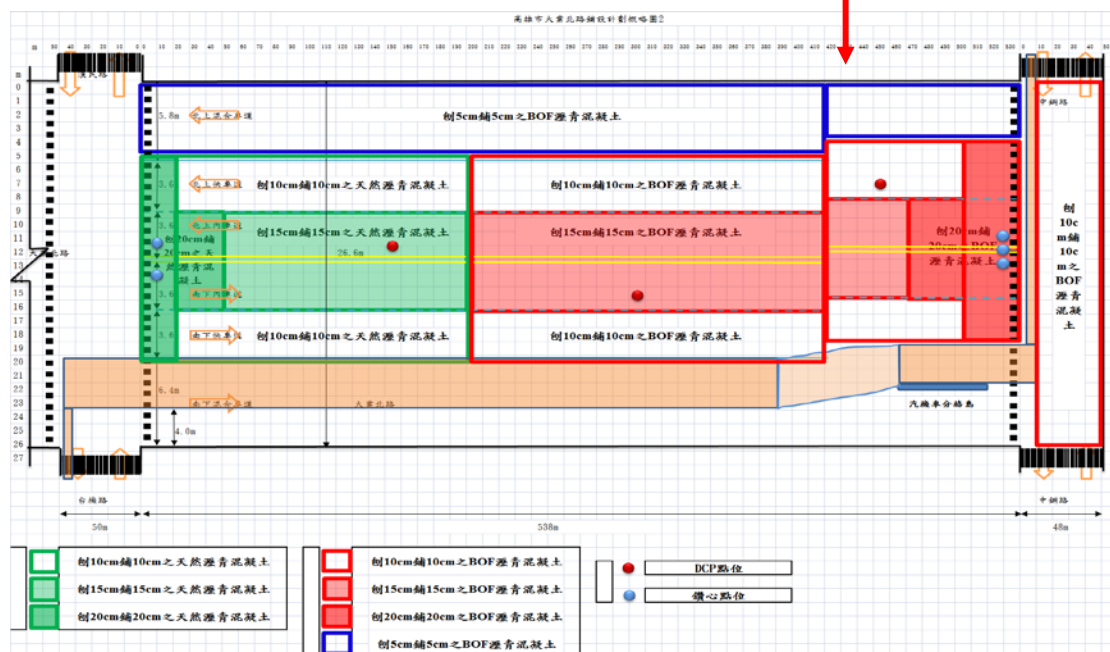


圖 2 試鋪道路位置示意圖

2.2 鑽心試體分析

從原路面鑽心試體判斷過去瀝青混凝土鋪設狀況。瀝青膠泥性質，必須進行黏滯度試驗。因鑽心試體體積回收之各層瀝青量不足以提供各項瀝青試驗使用，且現地無法進行大面積開挖及切割，故本研究採用簡易試驗以判斷鑽心試體，分析各層瀝青混凝土品質之差異性。

本簡易試驗說明如下：鑽心試體表面清除乾淨，置放於 90°C 烘箱內部 30 分鐘後，藉此觀察鑽心試體表面因溫度上升所產生的變化，以推斷此道路的層數、厚度，以及透層、黏層膠結分布情形，並觀察其粒料與瀝青膠泥之間包覆均勻性。

本試驗烘箱溫度控制在 90°C，其原因為烘箱溫度設定太低，瀝青膠泥無法軟化，較為不易研判各層材料之差異性；若溫度設定太高，亦可能造成鑽心試體全部軟化。由於瀝青膠泥黏滯度 10000poises 內在 90°C 以上時瀝青狀態變化較為明顯，故採用此溫度作為控制點。而烘箱放置時間，則以 TAF 認證之試驗方法即試體加熱 90°C 至全熱需烘烤 30 分鐘為參考。

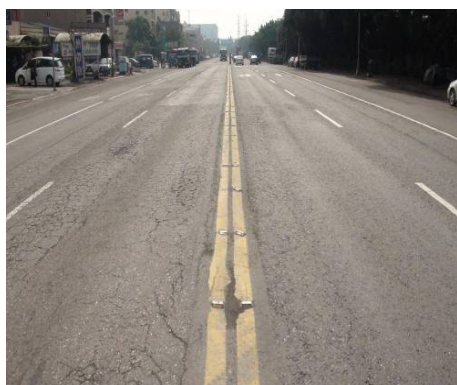


圖 3 原大業北路路口嚴重龜裂

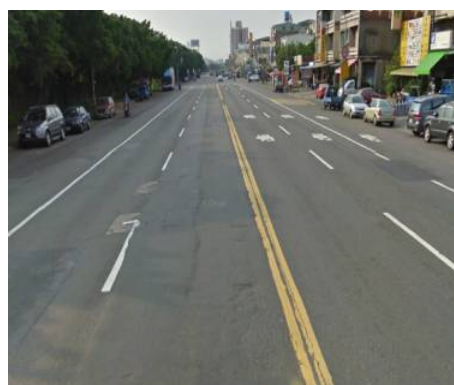


圖 4 原大業北路車轍



圖 5 原路段龜裂近照



圖 6 原路段粒料剝離近照

圖 7 及圖 8 分別為鑽心試體，為了利於量測觀察試體，將試體擺放方向與鑽心方向相反，如圖中表面層在最下面，而頂端黃土色之部分為底層相接處。兩圖中每顆試體皆可大致看出歷年加鋪之分界處，為更利於觀察，於圖中標示出各層編號，因本研究由管轄機關所取得之相關資料，其瀝青混凝土層厚度已累積至 20cm，且皆採取經驗厚度 5cm 鋪築，故設定表面層為第一層，由此往上推算，

底層與黃土交接層則為底四層。圖 7 為靠近漢民路轉彎路口處之瀝青混凝土鑽心試體。A 試體為南下內車道路口轉彎處；B 試體則為北上內車道路口轉彎處。因南下貨櫃車相對較多以空車的狀態進入工業區載運貨物，使得北上車道的負載較南下車道的負荷大。觀察 A、B 試體之第一層厚度皆已不足 5cm，其因為重型車輛因轉彎或是剎車之緣故，產生車轍，以及重剪力及扭力將面層逐漸磨損消耗。從圖中發現，A 與 B 試體第三層皆無 5cm，推測其位置曾進行刨除作業，但該路段內部有埋設物體，故未刨除至設計位置，即再覆蓋上新瀝青層。另外從圖中發現裂縫從第四層(底層)延伸至第一層，是以持續延伸方式，顯示這裂縫受到交通量荷重大或厚度設計不足時，由基底層所產生之反射裂縫。B 試體為北上內車道紅綠燈停車及剎車處，其行駛之車輛載重大於 A 試體，故其破壞較為嚴重。

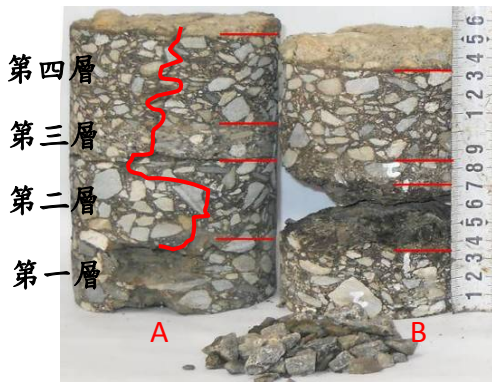


圖 7 A、B 鑽心試體

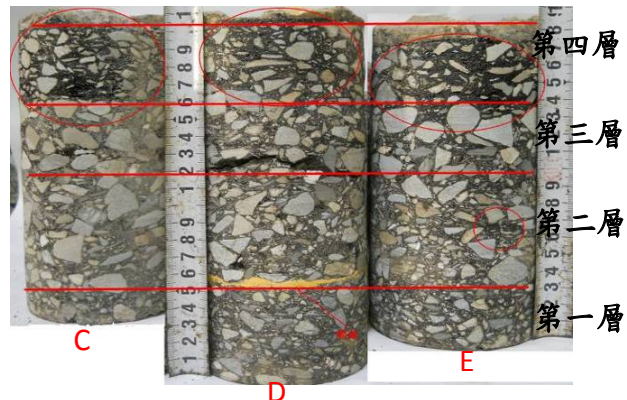


圖 8 C、D、E 鑽心試體

圖 8 為中鋼路銜接大業北路之路口鑽心試體，C、D、E 試體為同一斷面，C 試體為南下內車道車轍處，D 試體為中央雙黃線處，E 試體為北上內車道車轍處，此三點位於轉彎路口處，車輛會剎車減速轉彎或是加速通過路口，兩者產生瞬間扭力及荷重，導致此鋪面區域產生推擠作用使粒料橫向位移。觀察 C 試體，第一層因路面車轍，使此層厚度約為 2cm，而相對點 E 試體第一層厚度約為 3cm，但 D 試體厚度高於 5cm，主要原因是雙向交通量行駛行為不同所產生。

由圖 8 中可發現第二層到第四層之厚度皆相同，但第一層之厚度差異性大，證明轉彎路口及剎車處因重車易產生車轍現象。從試體中發現第一層細粒料較多及粒料分佈不均之現象，且第四層經過烘箱烘烤過後發現，其試體出現嚴重冒油現象，推估第四層瀝青含油量過多，且粗細粒料分佈不均，這可能造成此路段剪力強度不足之情況，而產生車轍、波浪狀等鋪面問題。

2.3 交通量分析

交通量為柔性鋪面設計考量因子，使用 80KN(18kips)單軸重當量(ESAL)或交通量指數(TI)做為交通量分析年限內求累積數之基準。並利用 ESAL、TI 值，了解此路段之交通量。

交通量之評估分析是影響鋪面厚度設計之重要因素，若低估交通量，路面容易未達預期使用年限而損壞，提供用路者服務品質必受到影響；若交通量高估，

則造成建造或維修經費濫用之嫌。表 1 為大業北路交通量檢測結果，依美國瀝青協會 AIMS-2 (瀝青混凝土及其他熱拌類配合設計法)，AC 配比設計準則對交通量之分類，ESAL 值為 10^7 屬工業區道路為重交通量等級，故本路段之南北方向之交通量均在重交通量級範圍。

表 1 大業北路交通量檢測結果

車輛類別	北上交通量 (輛/日)	南下交通量 (輛/日)	北上當量軸次 (80kN ESAL)	南下當量軸次 (80kN ESAL)	北上交通指數 T.I	南下交通指數 T.I
小型車	4808	4004				
大客車	35	43	5.9×10^7	5.4×10^7	14.62	14.50
大貨車	1063	752				
聯結車	1750	1678				

2.4 動態圓錐貫入試驗

鑽心試驗後將孔洞內之多餘游離污水吸乾及清除破碎粒料，即可開始進行動態圓錐貫入試驗(Dynamic Cone Penetrometer, DCP)。動態圓錐貫入儀量測基底層及路基土壤之現地強度，作為淺層地質之探查。DCP 試驗簡單，現地可量測貫入深度及累積打擊次數，兩者之比值稱為貫入比率(DCPI)。美國材料試驗學會 (ASTM) 在 2003 年已將之列為正式標準，稱號為 ASTM D6951-03 「DCP 在鋪面淺層應用之試驗法」[14]。其動態圓錐貫入試驗示意圖及現場施作情形如圖 9 與圖 10 所示。

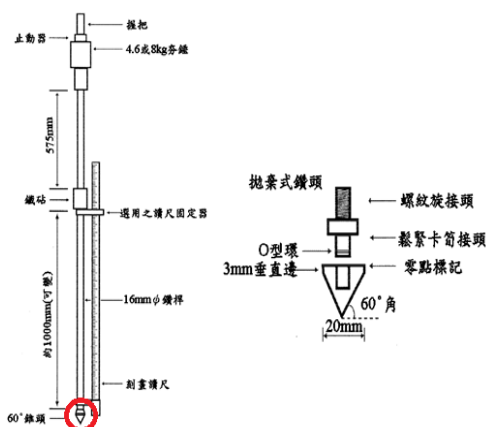


圖 9 動態圓錐貫入試驗構造示意圖



圖 10 DCP 現場試驗情形

DCP 係利用落錘傳遞貫入力量備配合貫入深度了解路基強度，試驗結果與材料之密度有相當之關聯性，其中將試驗資料檢算後所得之 DCPI 值為一項重要參考指標。本研究於高雄市小港區大業北路選取點位進行 DCP 貫入試驗，面層 AC 先以鑽心取樣取出，試驗層由底層開始。

圖 11 為此路段不同位置之 DCP 貫入指數趨勢圖，圖 11(a) 為 0k+150 處 DCP 試驗結果，由圖中可看出深度 0~40cm 處各點 DCPI 值介於 1~2.5(mm/下)之間，已經壓實至十分緊密。但觀察深度 40~90cm 處可發現，此斷面約每 10cm 即進行

分層滾壓的動作，且整體 DCPI 值皆小於 7(mm/下)，由此可知此路段承載力極高為優良的底層材料。圖 11(b)為 0k+300 處，由圖中大致可分為三個區塊，深度 0~30cm 為第一區，深度 30~60cm 處為第二區，第三區為深度超過 60cm 處。第一區及第二區的分界點不太明顯主要是因為此區經過長時間重車壓密，使得整體碎石級配的粒料緊密，其底層材料十分堅固及穩定。在深度 30cm 處，其 DCPI 值接近 0(mm/下)，顯示在此一深度進行頻繁的滾壓動作。第三區 60~70cm 處進行了厚度 10cm 的滾壓，因表面進行了頻繁滾壓的動作，其 DCPI 較低。深度 70cm 下的 DCPI 值較高，但其值仍小於 7(mm/下)均符合 ASTM 規範之要求。圖 11(c)則為 0k+450 處，此圖大致可分為兩部分，第一部分為深度 0~20cm 處，第二部分則為深度 20cm 以下。第一部份如圖(a)(b)描述，經重車長時間壓密，其 DCPI 值非常小。第二部分因重車夯實能量未能深入內部使得下層的 DCPI 值較高，但其值依然在 ASTM 規範接受的範圍內。

經由圖 11 發現大業北路路段基底層之 DCPI 值均小於 7(mm/下)，顯示此路段具有良好之承載能力。因此，大業北路原始鋪面之破壞問題已非基底層所產生，可以印證是面層材料不佳所產生之問題。

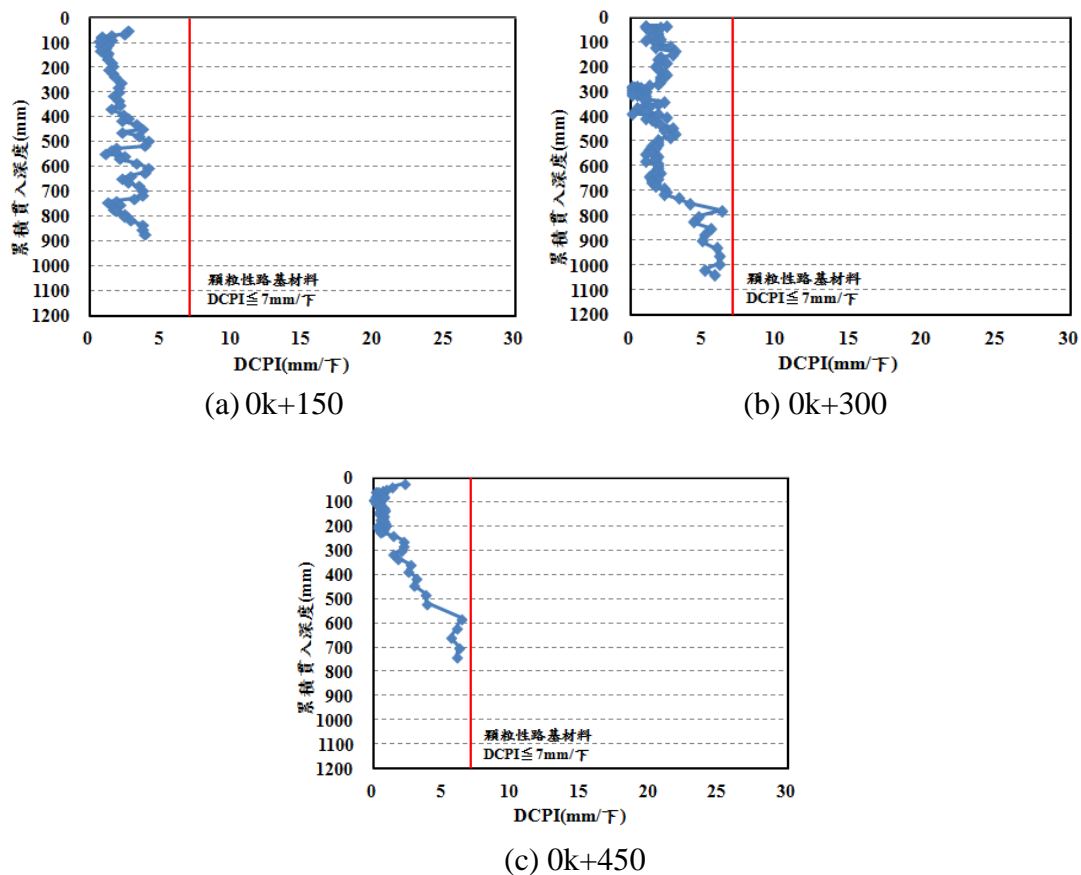


圖 11 DCP 貫入指數趨勢圖

2.5 馬歇爾配合設計

本試驗路段依馬歇爾配合設計做為瀝青混凝土鋪面材料之依據，在同一路段

在交通量相同下分別採用轉爐石及傳統(天然粒料)兩種密級配瀝青混凝土，並比較鋪築後兩種材料現地鋪面成效。本路段之級配料是採用傳統 IV-C 密級配，其粒徑分佈曲線如圖 12 所示。傳統瀝青混凝土路段之粗細粒料皆為天然石；轉爐石瀝青混凝土路段則有 60% 為轉爐石(粗粒料)、40% 為天然粒料(細粒料)。為了降低粒料間之差異性，路面成效評估較為精準，將轉爐石與天然粒料的級配分佈曲線調整趨於一致性，以減少其誤差。

由圖 12 中發現轉爐石路段與傳統路段之級配料僅在 4 號篩部分差異性較大，但整體粒徑分佈曲線趨於一致性，且符合規範要求。另外，此次鋪築路段之瀝青黏結料採用 AC-20 等級之瀝青膠泥。

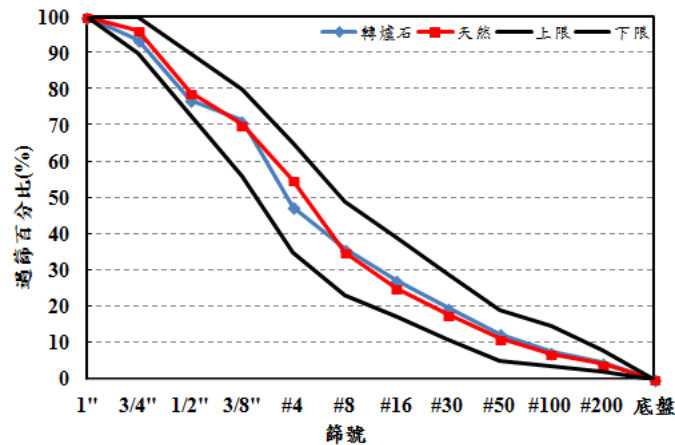


圖 12 配比設計級配粒徑分佈曲線

圖 13 為天然粒料及轉爐石粒料表面形狀之差異，由圖中可觀察出轉爐石外表較為粗糙，主要是因為轉爐石經高溫熔融過程後會急速水淬，此過程會使得轉爐石表面較為粗糙，進而提高其瀝青膠泥之附著力。由表 2 可明顯發現轉爐石扁平率及細長率遠低於天然粒料，有助於粒料間形成互鎖作用，減少瀝青混凝土之滑動。此外，轉爐石比重為 3.41 遠大於天然粒料 2.60，主要是因轉爐石粒料內含豐富之金屬物質，導致兩者比重差異相當大，為確保瀝青混合物中各粒料體積所佔百分比分佈能符合級配設計相關之規範，設計級配曲線需回歸體積法做為配合設計之準則。另外，由表中磨損率試驗值可明顯看出轉爐石磨耗率 8.9%，遠小於天然粒料 25.7%，可判斷出轉爐石較天然粒料堅硬，此結果有助於提升瀝青混凝土之耐久性。

表 2 粗粒料基本性質試驗

粒料種類	天然粒料	轉爐石	規範值
破碎率(二個破碎面)%	89.2	99.0	≥60
扁平率(寬厚比≥3)%	9.0	0.8	<10
細長率(長寬比≥3)%	7.6	0.5	<10
磨損率%	25.7	8.9	<40
吸水率%	1.26	1.78	<2
比重	2.60	3.41	≥2.45



(a) 天然石

(b) 轉爐石

圖 13 不同粒料之外觀

表 3、表 4 分別為傳統及轉爐石瀝青混合料實驗室與現地之馬歇爾配合設計結果。比較兩種鋪面最佳瀝青含油量，傳統鋪面較轉爐石鋪面之瀝青含油量高，主因是轉爐石比重較大，相同體積下瀝青混合料因轉爐石重量較重，但瀝青膠泥含量未改變下，因相對關係而導致瀝青含油量較低之故。由於轉爐石比重較大，其混合料之單位重及最大理論比重皆較大。此外，轉爐石因為粒料本身具備高硬度特性，使得轉爐石瀝青混凝土之穩定值較傳統瀝青混凝土高。

轉爐石因粒料形狀較為方正，具備較優良之粒料堆疊效果，使得整體 VMA 值較天然瀝青混凝土低，但基本上轉爐石瀝青混凝土 VMA 值皆符合規範要求。此外，表 3 傳統混合料的粒料平均比重 2.61，與表 2 天然粒料的比重 2.60 相符合，但表 4 轉爐石混合料之粒料平均比重 3.15，則小於表 2 之轉爐石比重 3.41，主要是因本試驗道路轉爐石取代量為 60%，另有 40% 為細骨材天然粒料，而使得轉爐石級配料比重較小。

另外，無論孔隙率亦或是瀝青填充率(VFA)現場鋪裝機取樣之試驗結果皆符合法規規範。

表 3 傳統瀝青混凝土配合設計值

項目	試驗室配合設計	鋪築取樣	規範值
最佳瀝青含量%	4.7	4.6	4.0~7.0
設計目標黏度 (poise)	1870	1870	2000±400
夯壓後試體比重(kg/m ³)	2.34	2.31	-
理論最大比重(kg/m ³)	2.45	2.42	-
穩定值 (kgf)	1369	1258	>816
流度值(0.25mm)	13.3	12.6	8~14
空隙率-VA (%)	4.3	4.2	3~5
粒料間空隙率-VMA (%)	13.7	14.3	≥13.0
瀝青填充率-VFA (%)	68.5	69.0	65~75
粒料平均比重	2.58	2.61	-
粒料吸油率%	0.57	0.62	-

表 4 轉爐石瀝青混凝土配合設計值

項目	試驗室配合設計	鋪築取樣	規範值
最佳瀝青含量%	4.3	4.2	4.0~7.0
設計目標黏度 (poise)	1870	1870	2000±400
夯壓後試體比重(kg/m ³)	2.79	2.83	-
理論最大比重(kg/m ³)	2.81	2.82	-
穩定值 (kgf)	1755	1644	> 816
流度值(0.25mm)	13.5	13.6	8~14
空隙率-VA (%)	4.4	4.3	3~5
粒料間空隙率-VMA (%)	14.0	13.0	≥ 13.0
瀝青填充率-VFA (%)	69	69	65~75
粒料平均比重	3.11	3.15	-
粒料吸油率%	0.032	0.036	-

2.5 鋪築厚度設計

試驗道路瀝青混凝土是採用密級配IV-C 等級設計，而瀝青黏結料為 AC-20 瀝青膠泥。本路段鋪築長度為 527 公尺，轉爐石及傳統鋪面各鋪設約一半長度，而鋪設厚度分為：路段前後紅綠燈車道轉彎處 20 公分(如圖 14 所示)、直線道內車道 15 公分(如圖 15)、直線外車道為 10 公分(如圖 16)及機車道為 5 公分(如圖 17)等 4 種斷面。

本試驗道路於鋪築前及鋪築完成後約每隔 3 個月進行現場試驗，至今共檢測 3 次，以利收集傳統瀝青混凝土與轉爐石瀝青混凝土路面成效資料。



圖 14 路口轉彎處鋪築厚度 20cm



圖 15 內車道直線段鋪築厚度 15cm



圖 16 外車道直線段鋪築 10cm



圖 17 機車道鋪築厚度 5cm

2.6 瀝青混凝土鋪築

本試驗路段為了確保其施工品質，道路刨鋪過程均依照施工規範進行，包含刨除厚度、刨除面清掃整潔、黏油均勻噴灑、瀝青混凝土鋪築厚度、滾壓溫度、滾壓次數、及滾壓後面層 60°C 以下才開放通車等等各項施工階段均須落實施工規範(如圖 18~22)，以確保工程施工品質。圖 23 為開放通車後鋪面整體平順，且道路使用相當頻繁之情形。



圖 18 現地施工刨除情形



圖 19 施工刨除面保持清潔



圖 20 各層黏油均勻噴灑



圖 21 路面鋪築現況



圖 22 現地鋪面滾壓情形



圖 23 開放通車後鋪面整體平順

三、研究方法與步驟

3.1 試驗道路基本性質檢測

本試驗路段刨鋪前後須均至現場進行鋪面性質評估，試驗內容包含鑽心取樣、摩擦試驗、車轍試驗及平坦度試驗，如圖 24~27 所示。



圖 24 現場鑽心取樣情形



圖 25 鋪面摩擦試驗



圖 26 鋪面車轍試驗



圖 27 路面平坦度試驗

3.2 紅外線熱影像試驗

紅外線熱影像檢測系統具有簡單快速且安全的特性，並可利用二維的方式對受測目標進行區域溫度分析，了解整體區域溫度的變化。本研究應用紅外線熱影像的特性進行現地鋪築施工的評估。評估項目如以下幾點：(1)判斷轉爐石及傳統混合料於運送過程中，卡車有蓋帆布及未蓋帆布對混合料均勻性的影響。(2)鋪築過程中混合料之鋪築溫度的均勻性。(3)評估工地現場鋪築面下方若有人孔蓋對於溫降速率及施工品質的影響。(4)觀察施工現場常遇到的問題對於施工品質及溫度之影響。本研究所使用之熱影像儀之型號為 NEC F30S，如圖 28 所示，圖 29 則為現地熱影像檢測情形。

3.3 噪音試驗

本試驗以噪音計量測道路路面之噪音值，目前國內採行的環境噪音指標，大多以瞬間測量到的 dB(A) 值，作適當的統計處理後，所得到的指數。依據行政

院環境保護署於民國 98 年 8 月 1 日所訂定之第四期(民國 96 年 1 月 1 日後所出產之新車)噪音管制標準，3.5 噸以上之大卡車行進中的噪音值 dB(A) 應該低於 78 dB(A)。本試驗比較鋪築前及鋪築後不同粒料所產生噪音之行為，以了解不同鋪面材料對噪音影響之程度。噪音量測器如圖 30 所示。



圖 28 紅外線熱像測溫分析儀

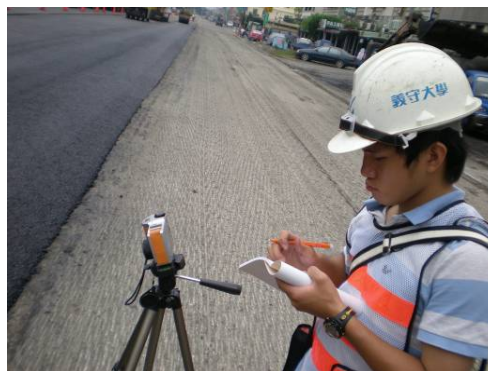


圖 29 紅外線熱影像試驗情形



圖 30 噪音量測器

3.5 瀝青混凝土鋪面溫度試驗

本試驗係檢測轉爐石瀝青混凝土及傳統瀝青混凝土鋪面溫度之變化，以利比較兩者之差異性。本研究於鋪築時以三種不同深度 10cm、15cm 及 20cm 埋設熱感溫線(圖 31)，以利於評估轉爐石與傳統瀝青混凝土兩種鋪面內部的降溫梯度情形。圖 32 為路面現場熱感線量測情形。



圖 31 現場感溫線埋設情形



圖 32 鋪面不同深度感溫線量測情形

四、結果與分析

4.1 鋪面平坦度量測

路面鋪築之目的在鋪面具平坦性，增進乘客舒適感，及減輕車輛耗損。平坦度之測試，在檢驗及控制路面最後鋪築面之平坦性，或檢驗在使用中路面平坦度，以作為路面維修之資料。本研究以高低平坦儀為鋪設路面平坦度檢測，計算參數採平坦度標準差，就平行路線方向檢驗平坦度，依交通部公路總局之規範平坦度標準差不得大於 4mm，超過規定者應改善至合格為止。

圖 33 為大業北路不同鋪面及不同時間路面平坦度之標準差，原始路面之平坦度標準差為 6mm，以及鋪面喘生嚴重龜裂與車轍，需要進行大幅修繕作業。本研究約每三個月進行檢測，大業北路經重新鋪築後整體平坦度標準差已大幅降低，檢測結果顯示鋪築後其值皆符合規範值。從圖中發現，開放通車大約半年，轉爐石路段之平坦度標準差遠低於傳統路段之平坦度標準差，主要其原因為轉爐石粒料本身之硬度較天然粒料大，顆粒間互鎖作用也較佳，故可提升鋪面抗車轍之能力，增加路面之平坦度。

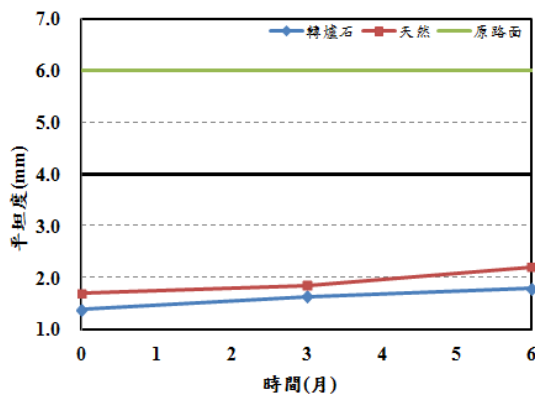


圖 33 試驗路段平坦度

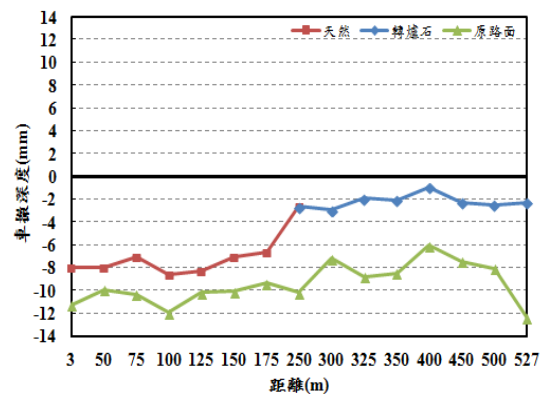


圖 34 試驗路段車轍量量測

4.2 現地鋪面車轍試驗

鋪面車轍值主要在量測位在輪跡處之縱向表面下陷，沿著車轍邊可能發生鋪面上舉，也可能併有橫向位移，一般係由交通荷重所引起之壓密或側向位移。再以三米直規量測現地鋪面車轍量。

由圖 34 之試驗結果顯示，車轍深度越接近 0(mm) 處表示無車轍現象發生。轉爐石瀝青混凝土鋪面車轍量遠低於傳統瀝青混凝土鋪面，其原因為係轉爐石互鎖能力較佳，以及轉爐石硬度大於天然粒料，以致其鋪面車轍量低於傳統路段。因此，在重交通量下設計轉爐石瀝青混凝土，將有助於長期抗車轍的能力，以及有助於提升鋪面的使用年限。

4.3 鋪面摩擦係數試驗

路面抗滑能力優劣係表示道路可提供車輛行駛時之摩擦能力，抗滑能力重要性在雨天路面濕滑狀態最能展現，摩擦力的大小關係到行車安全。而瀝青鋪面抗

滑性主要與兩個因素有關，一為粒料種類，一為面層粗糙度，鋪面粗糙度會影響輪胎與鋪面接觸面上水消散能力及輪胎抓地力。本研究針對車輛輪跡處進行抗滑試驗，利用統計平均數檢定分析方法，討論時間對瀝青混凝土鋪面之抗滑變化。

圖 35 為現地不同鋪面抗滑值檢測結果，其 BPN 值依照交通部施工標準應高於 45。整體而言，此路段重新鋪築並歷經開放通車六個月後，鋪面抗滑值 BPN 皆高於原有路面，顯示此道路路面維護可提高抗滑係數，增加用路人之安全性。

此外，觀察天然石及轉爐石鋪面可發現，轉爐石瀝青混凝土鋪面之 BPN 值較大，可能因轉爐石顆粒表面較為粗糙，且粒料破裂面較多，使得其鋪面之 BPN 值高於傳統鋪面。另外，轉彎路口處鋪面 BPN 值(3m 及 527m 處)小於直線路段鋪面(如 100m 及 300m 處)，故經由車輛轉彎或是透過改變速率增加與地表間的摩擦力，加速粒料表面的磨耗，導致路口處之摩擦值較小。

4.4 現地噪音量測

本研究於試驗道路鋪築前後，分別於同一地點進行噪音量測，量測儀器架設於大業北路傳統路段 0k+150m 及轉爐石路段 0k+300m，利用對講機同時進行量測同一台車輛，並紀錄量測各類車種各 50 輛車取平均做統計分析，比對不同鋪面之影響。

圖 36 為不同鋪面之噪音檢測值，從圖中看出無論是何種類車輛，鋪築後之路段噪音量較鋪築前之路段低。經由前述平坦度試驗了解到，鋪築後路面平坦度標準差約減少 4mm 左右，由此顯示，鋪面平坦度與噪音值呈現高度相關性。將傳統鋪面路段與轉爐石鋪面路段相互比較，轉爐石鋪面路段之噪音值較低於傳統鋪面路段 4~5 分貝，推估原因為轉爐石鋪面路段因為平坦度及車轍值皆明顯優於傳統鋪面路段，可減少車輛行經此路面之震動情形，相對地減少車輛因震動而發出的噪音值，使得轉爐石鋪面噪音值較低於傳統鋪面。

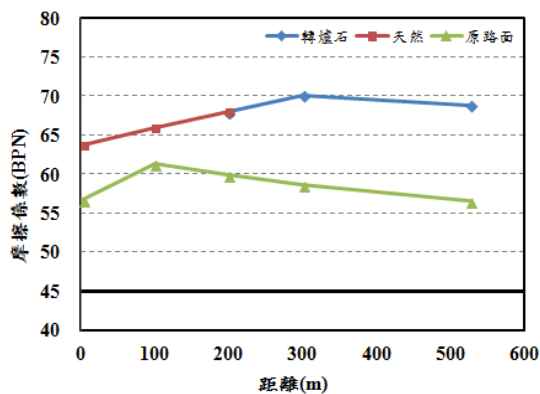


圖 35 現地鋪面抗滑值檢測

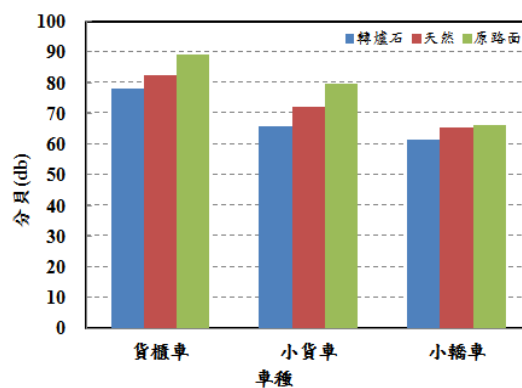


圖 36 不同鋪面之噪音檢測值

4.5 熱影像檢測系統

4.5.1 瀝青混合料運輸過程加蓋之影響

瀝青混合料運輸過程是否加蓋會影響其品質，目前加蓋方式常以蓋帆布方式處理。本研究以熱影像檢測系統量測運輸過程有無加蓋對瀝青混合料溫度之影響。

圖 37、38 分別為卡車有蓋及未蓋帆布傳統瀝青混合料表面熱影像溫度統計圖，圖 39、40 則為卡車有蓋及未蓋帆布之轉爐石瀝青混合料表面熱影像溫度統計圖。

本研究從瀝青拌和廠至現地位置，瀝青混合料運輸時間約 30 分鐘，其中高速公路行車時間約 20 分鐘。觀察瀝青混凝土運輸過程，發現傳統瀝青混合料未蓋帆布相對於有蓋帆布平均溫降為 24°C ，但是轉爐石瀝青混合料加蓋與否平均溫度差為 8°C ，顯示未蓋帆布對轉爐石瀝青混合料溫降影響較小，由此顯示轉爐石儲熱性能較為優越。

比較圖 37 及圖 39，發現轉爐石瀝青混合料蓋帆布表面平均溫度較傳統瀝青混合料溫度高約 11°C 左右，亦印證轉爐石具有儲熱聚溫效果，熱散失速率較慢。

了解鋪面表面溫度均勻性，以統計分析方式分析集中趨勢及離散程度，而標準差越大則越不均勻。由表 5 得知，傳統瀝青混合料有蓋帆布及未蓋帆布之標準差分別為 9.473 及 7.281，顯示傳統瀝青混合料有蓋帆布之溫度較高，但溫佈較不均勻，這與加蓋帆布是否緊密性有關。另外，未蓋帆布傳統瀝青混合料較有蓋帆布全距小，因為其卡車運送過程中與大氣流快速接觸，使得粒料表面熱散失，運輸時間越久而降溫影響越大，且其表面溫度越容易趨近於大氣溫度；而有蓋帆布則因為卡車與帆布間存在孔隙大小不定，且熱散失行為較為複雜，整體溫佈較不均勻。

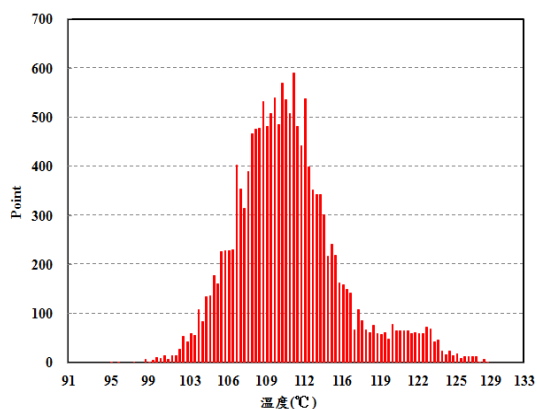


圖 37 天然石蓋帆布溫度分布統計

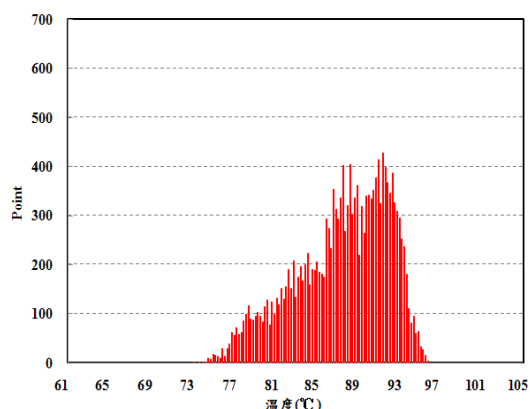


圖 38 天然石未蓋帆布溫度分布統計

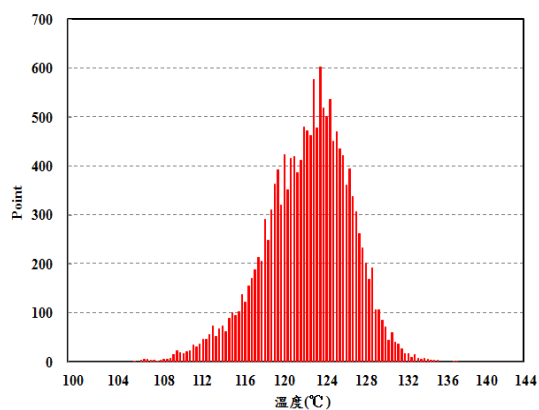


圖 39 轉爐石蓋帆布溫度分布統計

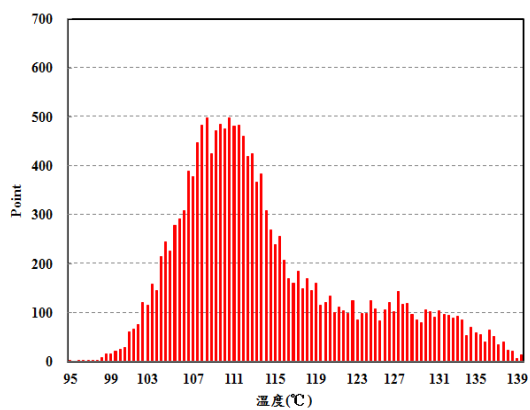


圖 40 轉爐石未蓋帆布溫度分布統計

轉爐石由於具有儲熱特性，散熱行為較為緩慢，並且混合料中具有轉爐石與天然粒料，兩者粒料溫降情形不同。原本轉爐石混合料之熱度可傳遞至天然粒料，使兩者粒料溫度較接近，但由於混合料未經壓實，使得粒料間存在較多孔隙，導致轉爐石之熱度傳遞於天然粒料速率不及於天然粒料之溫度散失於大氣中的速度，此結果使得轉爐石瀝青混凝土未蓋帆布時之溫度分布全距較大，標準差也較大溫佈較不均勻。

比較傳統及轉爐石瀝青混合料有蓋帆布，可發現轉爐石瀝青混合料之標準差小於傳統瀝青混合料，顯示有蓋帆布的轉爐石混合料是較均勻地。而未蓋帆布的轉爐石分佈較不均勻，但整體來說其溫降較小，有利於滾壓品質的保證。

表 5 不同鋪面種類運送過程有(未)蓋帆布之影響

量測型式	天然蓋帆布	天然未蓋帆布	轉爐石蓋帆布	轉爐石未蓋帆布
平均溫度(°C)	111.37	87.42	122.8	114.75
全距	32.66	22.99	32.02	44.63
自由度	100	100	100	100
SS	8974.50821	5300.96676	8686.556515	17392.66913
MS	89.74508	53.00967	86.86557	173.92669
標準差(σ)	9.473	7.281	9.320	13.188

4.5.2 鋪築溫度均勻性

卡車將瀝青混合料倒入鋪裝機中，依設計高度及寬度鋪設於路面，在未滾壓前分別量測傳統瀝青混合料及轉爐石瀝青混合料鋪築溫度，其統計結果如圖 41 及 42 圖。由圖中可知，傳統瀝青混合料高低分布約為 32°C，而轉爐石瀝青混合料約為 25°C，顯示轉爐石瀝青混合料鋪築溫度均勻性較佳。傳統瀝青混合料與轉爐石瀝青混合料之平均溫度相差約為 23°C 左右，表示轉爐石瀝青混合料之儲溫效果良好。由表 6 為通季結果，傳統及轉爐石瀝青混合料之標準差分別為 10.458 及 9.862，標準差越大表示較為離散，其結果表示溫度分佈較不平均。由此結果得知轉爐石混合料經過鋪裝機螺旋器攪拌過後鋪築於施工斷面上，其鋪面溫佈較為均勻，顯示此材料於施工時有良好之溫佈情形，將有助於壓實溫度的落實及施工品質之確保。

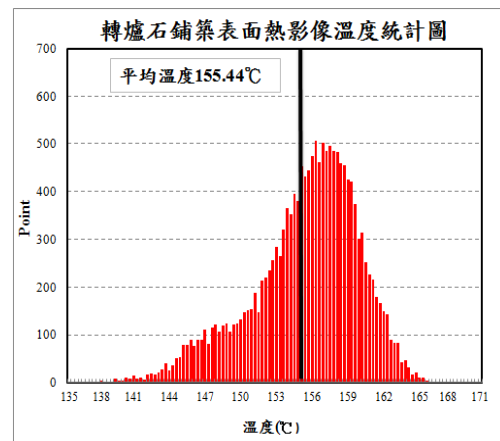
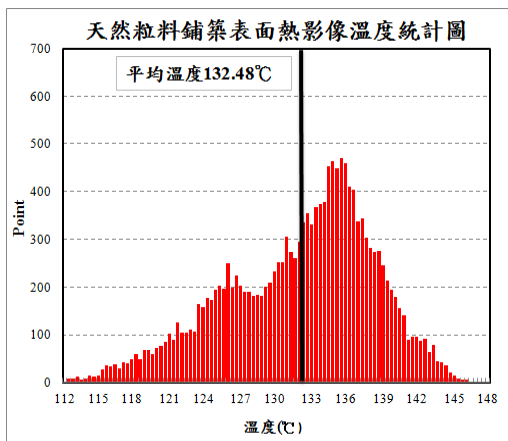


圖 41 傳統瀝青混合料鋪築溫度統計 圖 42 轉爐石瀝青混合料鋪築溫度統計

表 6 不同鋪面種類鋪築溫度比較分析

鋪面種類	天然瀝青混凝土	轉爐石瀝青混凝土
平均溫度(°C)	132.48	155.44
全距	35.32	30.09
自由度	100	100
SS	10936.13520	9725.53227
MS	109.36135	97.25532
標準差(σ)	10.458	9.862

4.5.3 施工常見問題

於鋪設過程中瀝青混合料會經由砂石車車斗傾倒於鋪裝機料斗上，當砂石車傾倒完混合料時車斗會殘於少數瀝青混合料。於此時，國內司機常有一習慣動作，會將砂石車開往前方鋪裝機還未鋪設之施工斷面，並將殘餘瀝青混合料傾倒乾淨於未鋪設施工面上，因這些殘餘瀝青混凝土無法與鋪裝機上之混合料均勻混合，且殘餘混合料於鋪裝機鋪築前之溫度已驟降。為此，將會導致鋪裝機經過這些殘餘混合料時，殘餘混合料鋪築溫度不足，造成鋪裝機鋪設過程較容易有粒料析離的情況發生。故砂石車司機將殘餘混合料傾倒於未鋪設之施工斷面的動作是否會造成施工品值的下降需有待進一步的商討。

圖 43 及 44 分別為初壓完成後粒料析離熱影像及現地情況，由圖 43 可明顯看出粒料析離處會影響周圍之溫度，析離處因沒有細粒料填縫孔隙，使得整體降溫非常明顯。

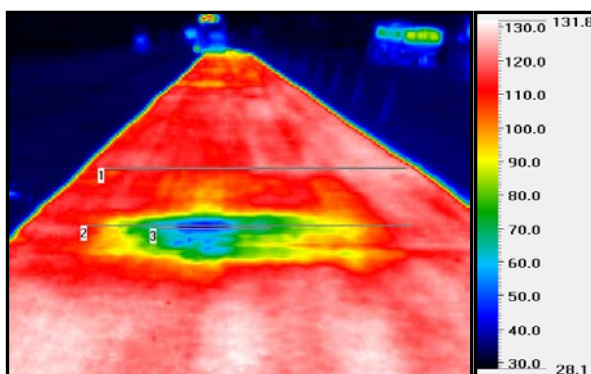


圖 43 粒料析離熱影像



圖 44 粒料析離實照

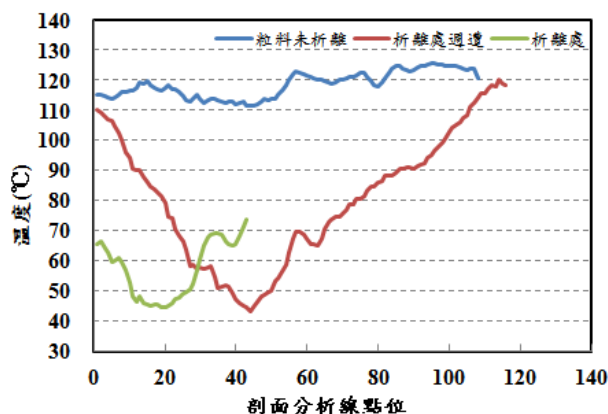


圖 45 初壓完成粒料析離溫度差異圖

利用圖 45 分析三種剖面線之溫度分佈情形，第一種為粒料未析離，第二者為析離處周遭之剖面線，第三則為析離處之溫度分佈情形。剖面 1 的溫度因為剛經過初壓完成，故其溫度皆接近初壓規範值標準溫度 120°C。而剖面 2 之溫度因為有經過粒料析離處，故可明顯看出析離處周遭溫降非常明顯，細看剖面 3 析離處發現，其溫度經初壓後已降至 45°C，此時滾壓溫度已過低無法確保壓實度的品質，故日後此部分可能會有耐久性不足之疑慮。

五、討論

5.1 轉爐石及傳統鋪面交接處

本試驗道路於 0K+250 為轉爐石鋪面路段及傳統鋪面路段之交接處，由圖 46 及 47 可看出此兩種鋪面於交接處有明顯車轍之差異，圖中上半部為傳統鋪面路段，下方則為轉爐石鋪面路段，傳統鋪面路段之車轍現象相當明顯，但轉爐石鋪面因其硬度較天然粒料高，使得抗車轍能力較傳統鋪面為佳，故無明顯車轍之痕跡，顯示轉爐石瀝青混凝土鋪面有較優之耐久性。

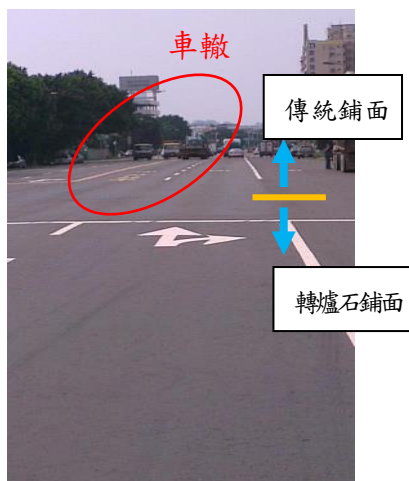


圖 46 鋪面交接處車轍比較(一)

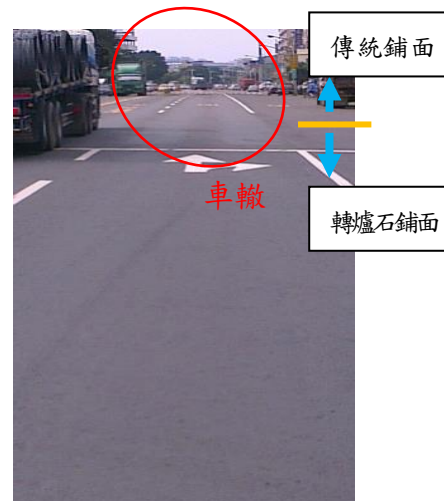


圖 47 鋪面交接處車轍比較(二)

5.2 紅綠燈標線處

由上述相關探討已證明轉爐石本身材料硬度較大，相對於天然粒料更能承受高荷重之承載；因轉爐石粒料形狀較為方正，粒料間的堆疊作用較良好並可提升互鎖能力，減少車轍的產生。此外，經由國內外相關學者研究後發現轉爐石粒料本身富含氧化鈣，可增加粒料與瀝青膠泥之黏結性減少剝脫現象的產生。綜觀而言，轉爐石瀝青混凝土鋪面成效是優於傳統瀝青混凝土，並可提升鋪面的耐久性抗車轍能力。

此試驗道路經歷開放交通六個月後，瀝青混凝土鋪面於標線處有明顯滑動之現象，無論在傳統瀝青鋪面或是轉爐石鋪面皆有此現象，以 0+527m 為例如圖 48、49 所示。雖然轉爐石品質良好，但瀝青膠泥等級稍嫌不足時，在重交通量作用下，鋪面受到外力所產生的剪應力大於瀝青混凝土材料抗剪強度時，鋪面之粒料

仍會產生滑動，甚至抗剪破壞。本路段所採用之瀝青膠泥等級為 AC-20，黏滯度 (60°C) 約為 2000(poises)，其瀝青膠泥等級不足以承受重交通量所帶來之高荷重反覆碾壓，雖然轉爐石具有良好之抵抗車轍能力，其鋪面仍有滑動情形。

由於本試驗道路位於工業區之重要聯外通道，此路段有較多貨櫃車及聯結車行駛，其交通量北上當量軸次及南下當量軸次分別為 5.9×10^7 及 5.4×10^7 (80kN ESAL)。依美國瀝青協會 AIMS-2 交通量之分類，此路段之交通量屬於工業區道路重交通量等級。在都會區中，紅綠燈停車線因煞車及啟動等強大剪力作用下，交通量所產生之鋪面破壞更為嚴重。另外，高雄地區夏季溫度高達 33°C 以上，而鋪面溫度亦會超過 60°C 以上，將使瀝青膠泥勁度降低。這一些因素都是造成此試驗道路於紅綠燈處產生滑動之主要原因。

基於提升國內瀝青混凝土鋪面耐用年限的立場，鋪築此等重交通量等級之道路，建議主辦單位及設計單位採用高黏度等級之瀝青膠泥，如改質 III 型 (黏滯度大於 8000 poises)；並配合轉爐石增加粒料本身強度及互鎖能力，將有助於提昇路面耐久性。



圖 48 鋪面滑動近照



圖 49 鋪面滑動情形

5.3 轉爐石儲熱特性

5.3.1 鋪裝機溫度變化

本研究為了瞭解瀝青混合料於鋪築過程中的溫度變化，分別針對卡車傾卸混合料於鋪裝機、瀝青混合料經過鋪裝機螺旋攪拌器及瀝青混合料鋪築於地面時的溫度進行量測。量測過程中因考慮到安全性，全程皆以紅外線感溫槍進行溫度檢測，以確保檢測人員與施工機具保持適當距離降低危險性。其中，因為量測機具為紅外線感溫槍，其量測方法屬於表面的單點量測法，故不能用以表示內部整體溫度，只能用以代表混合料表面的溫度。

由圖 50 及圖 51 皆可發現無論是傳統瀝青混凝土或是轉爐石瀝青混凝土，螺旋溫度最高、鋪裝機溫度次之、最低者為鋪築溫度。理論而言，運輸車輛傾料於鋪裝機的時間較早，混合料經過螺旋器的時間較晚，故鋪裝機的溫度應該最高，但由於上述所提到的量測方式為表面單點量測法，因混合料於鋪裝機料斗上時，

表面與大氣接觸產生熱消散作用，使得瀝青混合料表面溫度遽降。經螺旋器一再攪拌過後，混合料內部溫度與表面溫度產生熱傳遞作用，提高量測表面的溫度，使得螺旋器處的溫度相對較高。由此顯示，鋪裝機的螺旋器不只能將瀝青混凝土粒料攪拌均勻，亦能縮小混合料彼此間的溫差，提升溫度的均勻性。

圖 50 為傳統瀝青混凝土鋪裝機鋪築溫度的變化，而圖 51 則為轉爐石瀝青混凝土鋪裝機鋪築溫度的變化。由圖中可觀察出轉爐石瀝青混合料溫度皆高於傳統瀝青混合料。觀察瀝青混合料於鋪裝機至螺旋器攪拌過後溫度提升的情形，於此過程中傳統瀝青混合料約上升 5°C ，而轉爐石瀝青混合料則上升約 10°C 左右。主要是因轉爐石粒料富含氧化鐵，熱傳遞性能較佳，故於螺旋器攪拌的過程中較有利於溫度均勻的傳遞，其溫度的提升也較為明顯。

再者對於螺旋器溫度至鋪築於地面溫度的變化做觀察，無論傳統瀝青混凝土又或者為轉爐石瀝青混凝土，當兩者與地面接觸時其溫度皆迅速下降約 20°C 左右。比較瀝青混合料於鋪裝機至螺旋器及螺旋器至鋪築面兩者不同的溫度變化情形而言，於鋪裝機至螺旋器的降溫行為主要是瀝青混合料與大氣的熱對流所致。螺旋器至鋪築面的溫降情形則較為複雜，以熱傳遞的觀點得知，固體的熱傳導速率大於氣體。故當混合料與地表接觸時，雖然瀝青混合料與大氣會形成熱對流導致熱消散的作用，但由於氣體的熱傳遞速率較固體慢，使得鋪面主要的降溫行為是由地表吸收鋪面熱能所引起的。此外，由於鋪裝機至螺旋器的溫度變化為大氣熱對流所致，故整體溫度變化較小，約為 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ ，而螺旋器至鋪築面的溫度變化主要為固體熱傳遞的影響，其熱能散失速率較快，溫度變化也較為顯著，約為 20°C ，顯示瀝青混凝土主要的溫降變化為瀝青混合料與地表接觸的時段。但由於轉爐石瀝青混凝土初始溫度較高，使得鋪築溫度相對地提高，有利於滾壓溫度品質的保證。

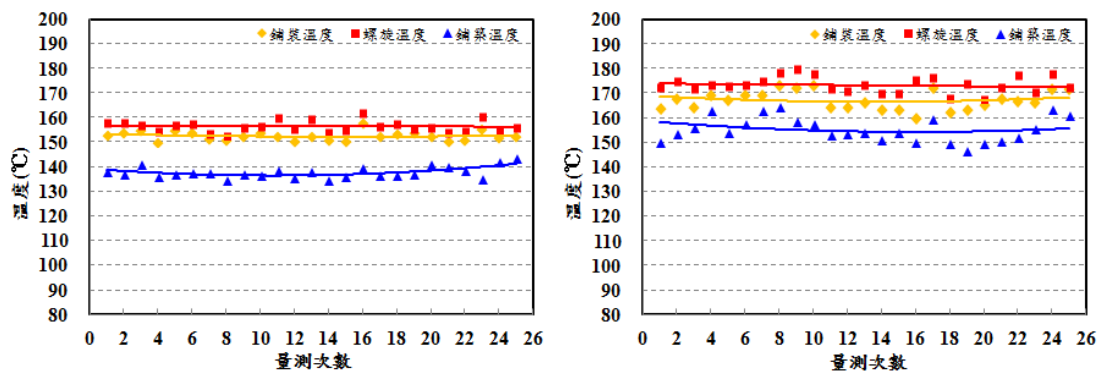


圖 50 傳統瀝青混合料鋪裝機溫度變化 圖 51 轉爐石瀝青混合料鋪裝機溫度變化

5.3.2 鋪面深度之降溫梯度分析

本研究於大業北路開放交通後，其鋪築厚度對於傳統鋪面及轉爐石鋪面溫度變化，如圖 52 及圖 53 所示。觀測時間由早上 9 點至下午 19 點，每 5 分鐘觀測一次。圖 52 與圖 53 之結果顯示，轉爐石及傳統鋪面溫度於 11 點至 13 點溫度最

高，此時為太陽光直射，而反映至鋪面之溫度，而越接近晚上 17 點~19 點鋪面溫度逐漸降低。

由圖 52 及 53 觀察得知，瀝青混凝土鋪面不同厚度各個點位溫度在 9 點及 19 點時相當接近，推測原因為該時段太陽光輻射強度小。隨著陽光直射能力越好，各層間之溫度差異也越大，過了 13 點後陽光直射能力逐漸變小，各層間溫度的點位也越趨近。

此外，由於 12 點~13 點太陽光輻射強度最高，鋪面表層吸收輻射熱能後溫度升高並將熱能向鋪面下方傳遞，而各層間之熱傳遞經過消散作用，使得不同厚度之溫度相差較遠。但轉爐石瀝青混凝土鋪面各層間的溫差較傳統瀝青混凝土鋪面小，主要是因為轉爐石具有較優良之熱傳遞能力，上層(10cm)鋪面可以有效地將熱能傳遞至下層(15cm、20cm)，且表層又可與大氣產生熱對流作用降低其溫度，使各層間溫差較小，表層溫度也較低。

一般而言，鋪面溫度接近常溫，表示瀝青混凝土趨向彈性，可承受車輛載重，而鋪面溫度越高表示瀝青混凝土趨向黏塑性，較容易產生永久變形。因轉爐石鋪面表層溫度較傳統天然瀝青混凝土低，此結果使得鋪面較趨向於彈性，有利於減小鋪面表層因中午時段的高溫對於其勁度降低的影響，亦是轉爐石瀝青混凝土鋪面增加耐久性及使用年限之原因。

由於白天氣溫較高陽光輻射能力較強，鋪面會吸收輻射光之能量，進而提高鋪面之溫度，此時溫度的傳遞方式主要為大氣傳遞至鋪面。但在下午 14 點過後，太陽光照射方式漸漸轉換為斜射，此時鋪面所接收的輻射量漸漸變小，鋪面底層(20cm 處)因放熱速率較吸熱速率快，熱傳遞方式漸漸轉換為鋪面表層吸熱而底層放熱，於下午 17 點，鋪面底層 15 公分處也漸漸轉換為放熱型式，直至下午 19 點後因為太陽西下，大氣輻射能量已相當小，此時熱傳遞型式則轉換為鋪面傳遞至大氣，使得鋪面溫度整體較大氣溫度低，如圖 52、53 所示。

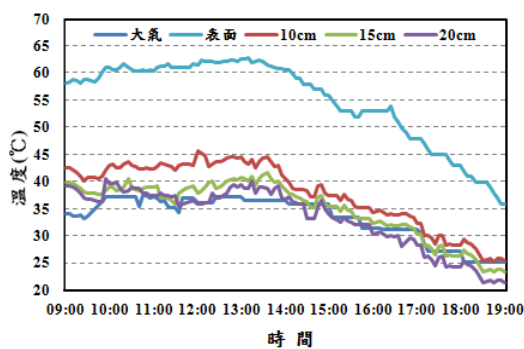


圖 52 天然粒料不同時間溫度變化

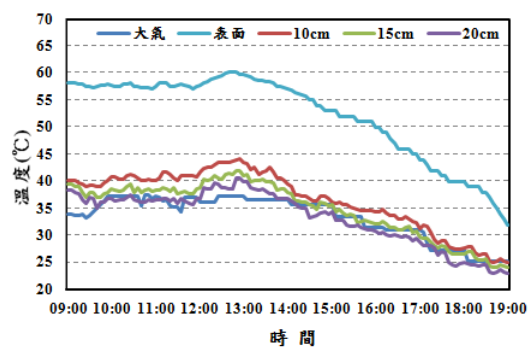


圖 53 轉爐石不同時間溫度變化

此外，經由 Asaeda[15]等人研究指出，由於瀝青黑色的表面亦為吸收熱能原因之一，於夜晚釋放大量熱能到空氣中，鋪面材料若具有較低的熱傳導可能使得白天鋪面較熱，當熱傳導較高則使得夜晚變熱。由圖 52 及 53 可發現鋪面下層 20cm 處轉爐石瀝青混凝土在白天溫度較傳統瀝青混凝土低，夜晚溫度則較高，

此結果更佳印證轉爐石瀝青混凝土之熱傳導係數較大，有利於減少鋪面的晝夜溫差降低鋪面的熱敏感性。

5.4 人孔蓋熱影像分析

5.4.1 鋪築過程中人孔蓋熱影像分析

圖 54 為人孔蓋未滾壓前之上方鋪築溫度熱影像，由圖中可觀察出人孔蓋在未滾壓時，粒料呈現較鬆散的狀態，粒料間的孔隙也較多，導致溫度傳遞速率較慢。但觀察圖 55 可明顯地看出經由滾壓後，同一範圍內人孔蓋與鋪築面的接觸面積變大，且粒料間孔隙變小，熱傳遞效應增加，使得人孔蓋上方鋪面溫降顯著，導致壓實度不足，造成開放交通後，人孔蓋附近瀝青混凝土鋪面容易產生裂縫及破壞等現象。

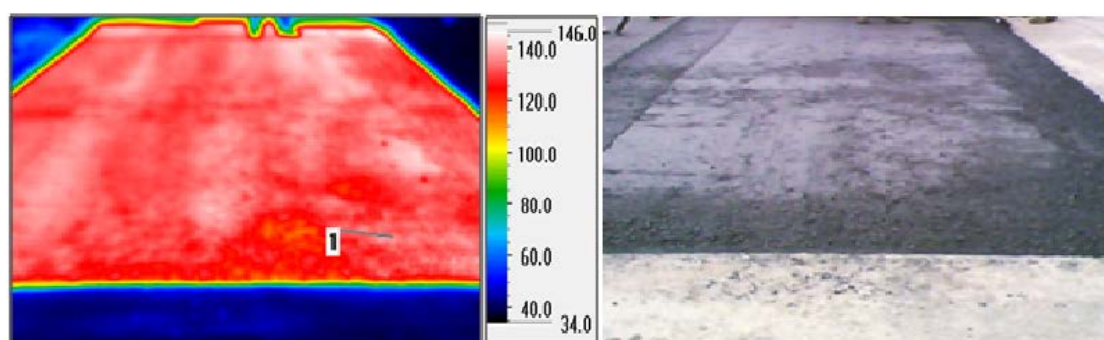


圖 54 為滾壓前人孔熱影像分析

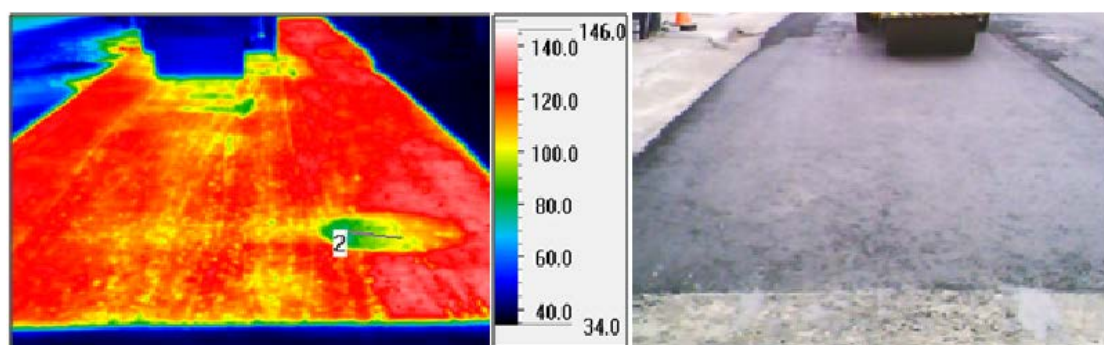


圖 55 初壓後人孔熱影像分析

圖 56 為人孔部分滾壓前後之溫度比較，圖 57 為非人孔部分滾壓前後溫度比較，由圖 56、57 可觀察出人孔蓋及非人孔蓋未經滾壓之溫度皆大於初壓規範值 120°C ，顯示未滾壓時，人孔蓋對於上方鋪面之溫度影響較小。但經初壓後，人孔部分已有點位超過中壓溫度規範值下限 82°C ，此部分因滾壓溫度過低容易造成壓實度的不足，日後可能有發生破壞之疑慮。總而言之，瀝青混凝土鋪面下方若有人孔蓋的存在時，會使得上方瀝青鋪面在鋪築的過程中，滾壓溫度不足且溫度分布不均，導致鋪面在鋪築的過程中品質不易控制，造成日後瀝青混凝土鋪面於人孔蓋的位置容易有破壞的情形發生。

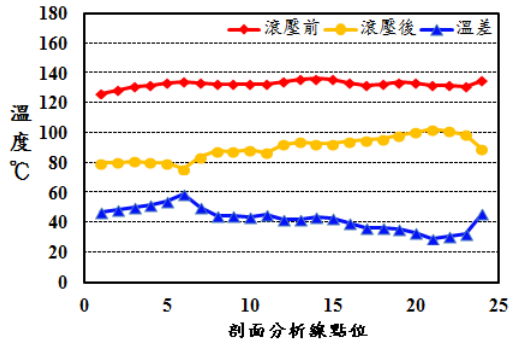


圖 56 人孔蓋滾壓前後溫差比較

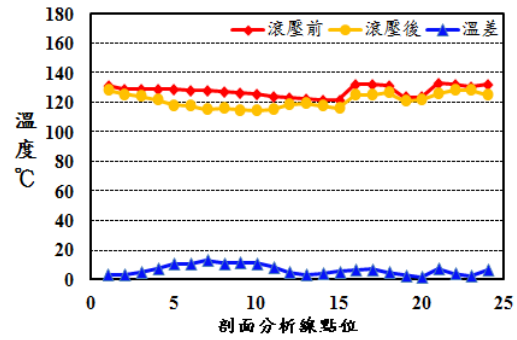


圖 57 非人孔蓋滾壓前後溫差比較

5.4.2 開放通車後人孔蓋熱影像分析

本路段於鋪築完成後發現某些地段之標線有隆起現象，故本試驗採用紅外線熱像儀觀察此地段發現位於隆起處下方溫度分布相似於與人孔蓋形狀，判斷此路段下方有人孔蓋。

由圖 58 熱影像圖可清楚看出人孔蓋周圍溫度較低且呈現方型外框，主要原因為人孔蓋周圍有方形的水泥混凝土結構物，此部份的鋪築厚度較薄，從而導致瀝青混凝土鋪面之儲熱效果較不明顯，所以溫度較低。

另外，由熱影像圖可觀察到人孔蓋鋪築面之中心溫度較高，遠離中心之溫度較低，其原因在於人孔蓋為鐵製金屬物質，具有吸熱之作用，故能將上方鋪面之熱量吸收。此外，人孔蓋下方為人孔井不易散熱，所以人孔蓋所吸收之熱量不會直接傳遞至下方，反而是由中心方向以輻射狀之方式向外緩慢地散熱，因此可以將鋪面之熱量吸收儲存，進而提高整體之溫度。

由圖 58 對應至圖 59 可觀察到人孔蓋上方鋪築瀝青混凝土大致可分為三個區塊，分界點分別為點位 40 及 120 左右，這兩點即為剖面線之最低溫，也是人孔蓋之邊緣，在點位 40 以前，越接近點位 40 之溫度越低，超過點位 40 未到點位 120 處之溫度分佈曲線則呈現倒 V 型，此時之最高溫處即是人孔蓋之中心點，而超過點位 120 後之溫度又接著上升。圖 59 之最低溫大約為 48.2°C，出現在點位 40 及 120 處左右，並且在中心點位 80 處出現最高溫大約為 50.7°C，兩者相差約為 2.5°C。經由試驗結果顯示，熱影像分析儀可以直接且明確地判斷出鋪面下方人孔蓋之精準位置，有利於判斷鋪面下方是否有人孔蓋的存在，並減少鋪面刨除時尋找人孔蓋位置之工時。

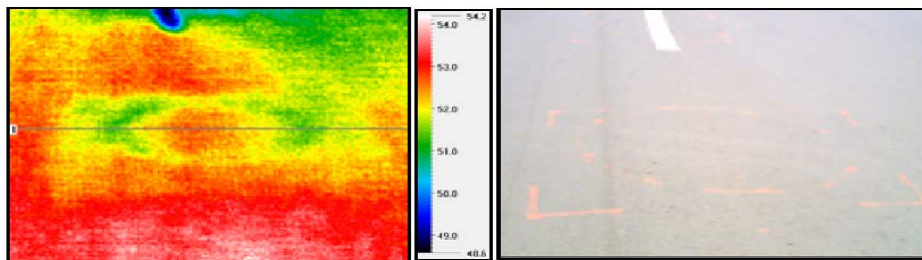


圖 58 人孔蓋鋪築現況熱影像圖

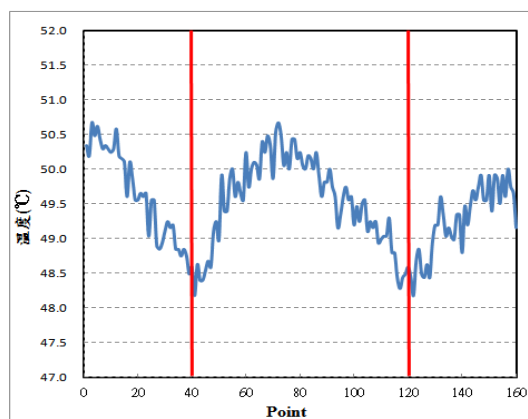


圖 59 人孔蓋鋪築現況熱影像分析

六、結論

1. 轉爐石粒料因為形狀較方正且硬度較大，其鋪面顆粒間互鎖能力較高，有助於提升抗車轍能力，並可增加鋪面的結構強度，使得轉爐石瀝青混凝土鋪面耐久性優於傳統瀝青混能土鋪面。
2. 轉爐石因為顆粒表面較為粗糙，且粒料破裂面較多，使得整體之 BPN 抗滑值較天然粒料大。此外，由此試驗道路可發現 BPN 值於路口轉彎處皆小於直線路段，主要是因路口轉彎處車輛轉彎或是改變速率會增加輪胎與地表間的摩擦力，加速粒料表面的磨耗，導致路口出之抗滑值較小。
3. 由現地噪音量測發現轉爐石鋪面噪音值較傳統鋪面約小於 4~5 分貝，評估其原因為轉爐石路段整體鋪面平坦度較佳，而降低車輛因震動所發出的噪音。
4. 比較瀝青混合料於運送的過程中，運送車輛未蓋帆布之轉爐石瀝青混合料溫降速度傳統瀝青混合料為低；另外，轉爐石瀝青混合料經過鋪裝機螺旋器攪拌過後鋪築於施工斷面時，其鋪面溫佈較傳統瀝青混合料均勻，此一特點有助於確保轉爐石瀝青混合料施工品質。
5. 下方有人孔蓋之瀝青混凝土鋪面，因滾壓溫度不足且溫度分布不均，導致鋪築過程不易控制品質，易造成日後於該位置發生破壞情形。
6. 重交通量道路，建議主辦單位及設計單位採用轉爐石瀝青混凝土，並配合如改質 III 型之高黏度瀝青，將有助於提昇路面耐久性及使用年限。

七、文獻回顧

1. Huang, L. S., and Kang, Y. V. (2010). "Nondestructive Evaluation of Thickness and Bearing Capacity of Roadway Pavement Structure," *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol.3, No.6, pp.311-319.
2. Xue, Y., and Wu, S., and Hou, H., and Zha, J. (2006). "Experimental Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture," *Journal of Hazardous Materials*, Vol 138, NO 2, pp.261-268.
3. Wu, S., and Xue, Y., and Ye, Q., and Chen, Y. (2007). "Utilization of steel slag as

- aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures,” *Building and Environment*, Vol 42, NO 7, pp.2580-2585.
4. 林志棟 (2006),「轉爐石於道路工程之推廣及應用」,鋼鐵工業爐渣資源化再利用實務研討會。
 5. 徐英傑 (2009),「評估溫度控制對轉爐石瀝青混凝土拌合過程成效」,碩士論文,私立義守大學土木與生態工程研究所,高雄。
 6. 林登峰、黃隆昇、李韋德 (2011),「轉爐石再生瀝青混凝土試區道路之長期成效」,2011年轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面研討會,高雄,第81頁至104頁。
 7. 林志棟、林平全、張東源、葉銘欽 (2005),「轉爐石於耐久性鋪面之研究」,九十四年轉爐石工程材料應用研討會,高雄,Part 4,第1頁至17頁。
 8. 黃隆昇、林登峰、盧俊愷、熊秋豪 (2008),「探討轉爐石對於瀝青混凝土鋪面溫度變化之影響」,第八屆鋪面工程材料及再利用學術研討會專輯,第3-24~3-32。
 9. Shen, D. H., and Wu, C. M., and Du, J. C. (2007). “Laboratory Investigation of Basic Oxygen Furnace Slag for Substitution of Aggregate in Porous Asphalt Mixture,” *Construction and Building Materials*, In Press, Corrected Proof, Available online 19 December.
 10. Pomerantz, M., and Akbari, H., and Chang, S.C., and Levinson, R., and Pon, B. (2002). “Examples of Cooler Reflective Streets for Urban Heat-Island Mitigation: Portland Cement Concrete and Chip Seals,” *Lawrence Berkeley National Laboratory*.
 11. Yavuzturk C., and Ksaibati K. (2002). “Assessment of Temperature Fluctuations Inasphalt Pavements Due to Thermal Environmental Conditions Using a Two-Dimensional, Transient Finite Difference Approach,” *Laramie,USA.*, pp. 49-67.
 12. Xue, Y., and Hou, H., and Zhu, S. (2009). “Adsorption Removal of Reactive Dyes from Aqueous Solution by Modified Basic Oxygen Furnace Slag: Isotherm and Kinetic Study,” *Chemical Engineering Journal*, Vol. 147, Issue. 2-3, pp.272-279.
 13. 黃隆昇、林登峰、林志棟、陳厚邑 (2011),「轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面之八年成效評估」,第十六屆鋪面工程學術研討會暨2011國際與兩岸專家高峰會議,桃園。
 14. ASTM D6951. (2003). “Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications”.
 15. Asaeda, T., and Ca, V. T. (2000). “Characteristics of Permeable Pavement During Hotsummer Weather and Impact on the Thermal Environment”, *Building and Environment*, Vol. 35, pp. 363-375.