

西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程 之鋪面工程生命週期排碳特性分析

陳保展¹ 羅國峯² 林彥宇³ 許珮蓓⁴ 王寧沂⁵

¹ 公路總局西部濱海公路南區臨時工程處 代理處長

² 公路總局西部濱海公路南區臨時工程處工程課 課長

³ 國立高雄第一科技大學營建工程系 助理教授(本計畫顧問)

⁴ 中興工程顧問股份有限公司 計畫主任

⁵ 中興工程顧問股份有限公司 工程師

摘要

公路總局於 2012 年開始推動道路工程碳管理工作，西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程碳管理計畫(以下簡稱本計畫)亦於同年展開，隨著工程進展累積國內重要大宗工程材料之盤查資料，建立本土化碳足跡係數。本計畫執行過程中與各標瀝青混凝土廠協商，取得廠內製程、產品運輸及瀝青鋪面施工碳盤查資料；並於 2016 年底邀集專家學者討論及確認營運管理階段之估算範疇與內容，作為道路工程全生命週期碳排放量評估基準。

本工程各標案已陸續完工，本文以鋪面工程為例，說明各廠商/各類型瀝青混凝土碳足跡盤查結果、排碳熱點、與資料庫及文獻之差異性；並納入產品運輸與施工之排碳量，完整至施工階段生命週期排碳量；再考量鋪面工程全生命週期範圍(含營運管理階段)，因重鋪次數之不同，分析不同類型瀝青混凝土鋪面工程全生命週期之排碳量特性。最後，由鋪面工程生命週期各階段排碳特性，鑑別排碳熱點，提出減碳建議。

由分析結果顯示，因廠商及配比差異，各類型瀝青混凝土具有不同之排碳熱點，並確實具有減碳潛能，瀝青混凝土廠商之實際盤查及配比審核具重要性及必要性；除初期工程材料之選擇外，營運管理階段亦應納入考量，才能完整評估各類型鋪面之生命週期排碳量影響，提供決策參考。

關鍵詞：鋪面工程、瀝青混凝土、碳足跡、生命週期、盤查

一、前言

為落實國家工程排碳評估與減碳政策，公路總局於 2012 年開始推動道路工程碳管理工作，西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程碳管理計畫(以下簡稱本計畫)亦於同年開始展開，進行施工建造階段之碳盤查作業，隨著工程進展以及與材料供應商持續協商之過程，逐漸累積及建立國內大宗工程材料之本土化碳足跡係數，瞭解國內道路工程之排碳特性。

瀝青混凝土鋪面工程為道路工程之主要工項，本工程鋪面除一般密級配瀝青混凝土

⁵ 中興工程顧問股份有限公司(通訊作者,聯絡地址:台北市松山區南京東路五段 171 號,電話:02-2769-8388 分機 10435, E-mail:nikki@mail.sinotech.com.tw)

外，亦包含公路總局第一次採用之多孔隙瀝青混凝土(PAC)，本文以本工程各標鋪面工程為例，蒐集各標瀝青混凝土供應商之廠內製程及產品運輸盤查資料，產出不同類型瀝青混凝土之產品碳足跡以及運輸排碳係數；同時依據本工程施工建造之盤查資料，納入產品運輸及施工建造階段之排碳量；為考量鋪面工程之完整全生命週期排碳量，納入道路工程完工後之營運管理階段，進行鋪面之重置頻率、材料數量及機具鋪設耗能估算，比較不同類型瀝青混凝土之於鋪面工程全生命週期的排碳特性影響，並依據前述成果提出減碳建議。

二、鋪面工程案例與生命週期碳足跡

2.1 西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程及鋪面工程簡介

西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程(以下簡稱本工程)包括 WH7-A、WH77-B 及 WH77-C 三標，主要工程內容為高架橋梁，全長約 8.4 公里，工程範圍如圖 1。本工程主線路段之鋪面組成如圖 2，WH77-A 及 B 標主線橋梁段為 8 公分密級配瀝青混凝土，WH77-C 標則為 5 公分密級配瀝青混凝土及 3 公分多孔隙瀝青混凝土(PAC)，路堤引道段於 WH77-A 及 C 標皆為 45 公分碎石級配、10 公分粗級配瀝青混凝土及 5 公分密級配瀝青混凝土。



圖 1 西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程範圍

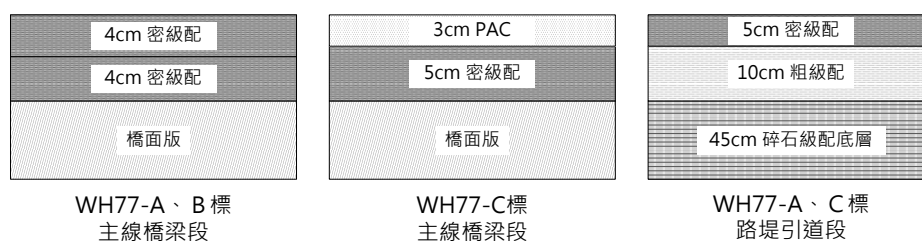


圖 2 西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程之鋪面組成

2.2 鋪面工程之生命週期與碳排放量評估

鋪面工程之生命週期評估於 1990 年代開展，鋪面相關從業人員(公務機關、業界、公會/協會、研究人員)大致依循 ISO14040 規範，應用生命週期評估進行環境衝擊之量

化。目前各項鋪面生命週期評估之範疇設定不盡相同，彙整道路鋪面之碳排放量評估案例內容如表 1，由於各案例的系統邊界、生命週期及功能單位之設定不一致，使得排放量之計算結果具有差異，後續若要進行鋪面之排碳量估算較不易應用。

表 1 道路鋪面之碳足跡評估案例

案例	道路等級	產品階段 (A1-A3)	建造階段 (A4-A5)	營運管理階段		壽命終了 (C1-C4)	生命週期 (年)	功能單位	排碳量 (tonCO ₂ e)
				結構物 (B1-B5)	操作 (B6-B7)				
Mroueh et al.(2000)	一般道路	●	●	●	●		50	1 km (2 車道)	206~441
Stripple (2001)	一般道路	●	●	●	●		40	1 km (4 車道)	234~1,064
Weiland et. al., (2008)	高速公路	●	●	●			50	1 mi (1 車道)	191~525
Huang et al. (2009)	一般道路	●	●			●	-	1 km (2 車道)	91~238
Zhang et al., (2010), Qian et al., (2013)	高速公路	●	●	●	●		40	10 km (4 車道)	65,000*
Kang, (2013)	高速公路	●	●				-	1 mi (1 車道)	254
Araújo et al., (2014)	快速公路	●	●		●		20	1 km (2 車道)	102~120

*含行駛車輛之加油與交通延遲造成之排碳量；資料來源：[1][2][3][4]。

產品類別規則(PCR)用途為使各項相同功能的產品，其環境衝擊量化結果具有一致性的比較基礎。歐盟於 2012 年公告營建產品類別規則 EN15804[5]，使營建產品及工程有一致的評估參考基準；而瀝青混凝土及其鋪面之 PCR，亦已由產品階段發展至涵蓋鋪面工程之全生命週期評估，歐洲及美國瀝青鋪面協會相繼於 2016 ~ 2017 年公告產品階段 PCR[6][7]，瑞典 EPD 系統更進一步於 2017 年開始發展鋪面工程全生命週期 PCR(草案)[8]，該 PCR 範疇必須包含瀝青混凝土的產品階段，而施工建造及營運管理階段則由使用者選擇性納入範疇。

三、鋪面工程生命週期碳足跡計算方法

鋪面工程之生命週期碳足跡包含產品(原料)、建造及營運管理(重鋪)階段，本文參考國內外相關產品類別規則(PCR)進行各階段系統邊界之設定，並以本工程各標主線橋

梁段為案例進行評估。於所界定之系統範疇內，蒐集相關的活動數據與排放係數，再依據排放係數法計算得鋪面工程之生命週期碳足跡。

3.1 系統邊界

歐盟營建產品類別規則 EN15804[5]完整說明工程生命週期階段，分別為產品(A1-A3)、建造(A4-A5)、使用(B1-B5 結構物與 B6-B7 操作)及壽命終了(C1-C4)四階段，使用者可依據不同類別產品進行界定。本計畫之鋪面工程參考國內橋梁及道路碳足跡產品類別規則 CFP-PCR 設定[9][10]，系統邊界包含產品、建造及營運管理階段，如圖 3 所示，與 EN15804 不同之處在於營運管理階段僅考量鋪面之維護/重置，以及拆除階段不納入範疇。以下說明本計畫鋪面工程之產品、建造及營運管理階段，分別蒐集之活動數據內容。

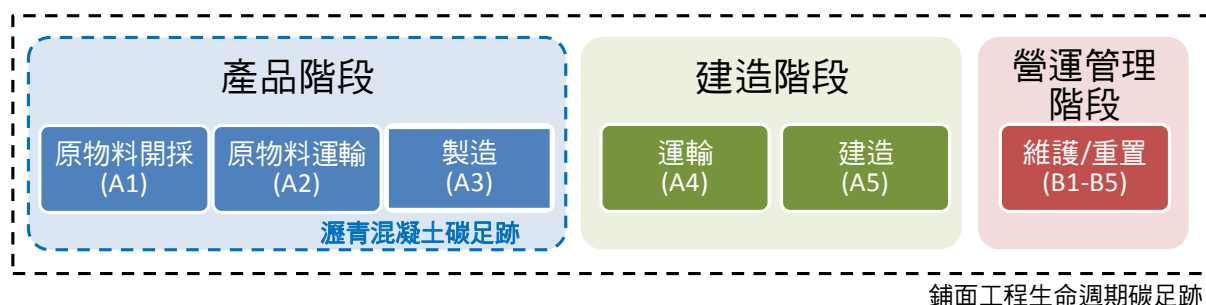


圖 3 鋪面工程生命週期碳足跡之系統邊界

備註：A1-A5 及 B1-B5 為相對應於 EN15804 之生命週期階段編碼。

3.1.1 產品階段

產品階段為瀝青混凝土之產品碳足跡，參考瑞典 EPD 系統、歐洲及美國瀝青鋪面協會 PCR[6][7][8]，設定瀝青混凝土碳足跡之系統邊界為「搖籃到大門」，即 EN15804 之 A1-A3 產品階段。根據前述產品階段之系統邊界，瀝青混凝土廠需蒐集盤查資料內容如圖 4，涵蓋原物料來源、製程投入之原物料及能資源。

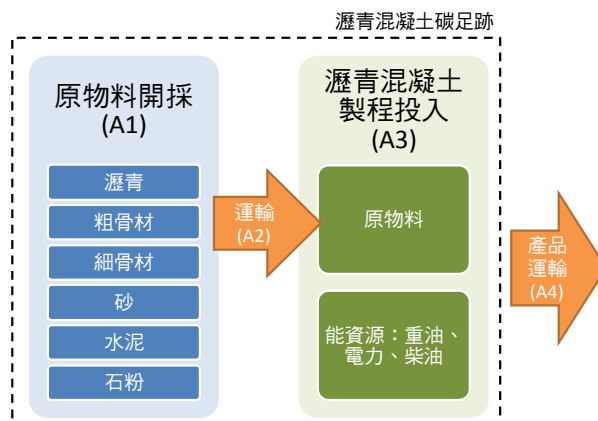


圖 4 產品階段之系統邊界及盤查資料蒐集內容

本工程之瀝青混凝土由 2 家瀝青廠供應，WH77-A 及 WH77-B 標由廠一提供，WH77-C 標供應商為廠二。本計畫蒐集 2 廠之產能、原物料、能資源投入量及運輸盤查資料，原物料係依據各類型瀝青混凝土配比資料計算瀝青、骨材、砂、水泥及石粉等投入量；能資源為 2 廠提供之電力、重油及柴油使用量，並以提供區間之總產能(噸數)進行分配；運輸則依各原物料之運輸距離及原物料投入量換算。

3.1.2 建造階段

本文以本工程各標主線橋梁段之鋪面工程為案例，於建造階段需蒐集之盤查資料包括瀝青混凝土之材料使用量、瀝青混凝土運送至工區之運輸，以及機具於工區中鋪設瀝青混凝土之能資源消耗。材料使用量係依據各標於施工期間之進貨單據統計；運輸為各標瀝青混凝土使用數量及單向運距計算，WH77-A 及 WH77-B 標為同廠，單向運距為 80km，WH77-C 標運距為 26km；機具能資源消耗為施工廠提供之加油單據，彙整施工期間總柴油用量。

由於本工程各標鋪面工程皆涵蓋既有車道之刨鋪，建造階段各路段之材料及機具之活動數據，採用其設計之材料數量進行分配，即「活動數量 = 材料設計數量比例 × 總活動量(材料或機具)」。

3.1.3 營運管理階段

參考國內道路及橋梁 CFP-PCR[9][10]，設定鋪面工程營運管理階段之時間邊界為 50 年，空間邊界為營運期間內鋪面之維護/重置(鋪面重鋪)。本計畫於 2016 年底邀集專家學者，共同討論及確認道路營運管理階段之估算範疇與內容，會議結論為鋪面重鋪次數依其他道路經驗進行假設。

WH77-A 及 WH77-B 標主線橋梁段鋪面之面層結構皆為密級配瀝青混凝土，參考本工程路段(台 61 線)養護單位提供之經驗值，假設密級配重鋪厚度為 5cm，重鋪頻率為 5 年一次，計算得 50 年營運期間重鋪次數為 9 次；WH77-C 標主線橋梁段鋪面為公路總局首次採用之多孔隙瀝青混凝土(PAC)，目前尚未有相關養護單位之重鋪經驗值，依文獻顯示 PAC 服務年限可達甚至超過 10 年[11]，以及國內道路實務經驗如國道 6 號(98 年通車)至今尚未進行 PAC 重鋪，因此假設 PAC 重鋪頻率為 10 年，重鋪數量與建造階段時期相同(厚度 3cm)，各標鋪面之營運管理階段假設條件如表 2 所示。

表 2 鋪面之營運管理階段假設條件

標別	WH77-A 標	WH77-B 標	WH77-C 標
瀝青混凝土種類	密級配 (DGAC)	密級配 (DGAC)	多孔隙 (PAC)
重鋪厚度(cm)	5	5	3
重鋪頻率(年)	5	5	10
50 年營運期間重鋪次數	9	9	4

各標營運期間之機具活動數據以「營運階段材料用量 / 各標建造階段材料用量 × 建造階段機具總活動量」計算。

3.2 碳排放量計算方法

碳足跡計算以排放係數法進行，由該活動各種溫室氣體活動數據，乘以該活動單位溫室氣體排放係數，再乘以所排放之溫室氣體的全球暖化潛勢(GWP)所得之合計量，以二氧化碳當量(CO₂e)表示，如下列公式(1)：

$$\text{碳排放量(CO}_2\text{e)} = \sum \text{活動數據 } i \times (\sum \text{溫室氣體排放係數 } ij \times \text{GWP}_{ij}) \quad (1)$$

其中：i 為活動種類；j 為溫室氣體種類。

GWP：全球暖化潛勢以 IPCC 2007 年第四次評估報告為主。

基於碳足跡計算規範要求，各項活動數據之溫室氣體排放係數應考量完整的生命週期，本計畫採用的係數皆屬生命週期係數，來源包含供應商配合本計畫盤查之產品碳足跡、環保署公告係數及生命週期資料庫係數，各項活動數據對應之排放係數彙整如表 3。

表 3 排放係數彙整表

類別	係數名稱	排放係數	單位	來源
原物料	水泥	0.9635	kgCO ₂ e/kg	供應商盤查
	砂/石粉	0.0041	kgCO ₂ e/kg	GaBi database
	級配	0.0344	kgCO ₂ e/kg	GaBi database
	瀝青	0.3333	kgCO ₂ e/kg	GaBi database
	SBR 橡膠	3.8672	kgCO ₂ e/kg	GaBi database
	改質瀝青	0.5807	kgCO ₂ e/kg	以 7% SBR 橡膠 +93% 瀝青換算
	乳化瀝青	0.3058	kgCO ₂ e/kg	GaBi database
運輸	34-40t 大貨車	0.0471	kgCO ₂ e/tkm	GaBi database
	35t 大貨車(瀝青廠一)	0.1015	kgCO ₂ e/tkm	供應商盤查
	21-35t 大貨車(瀝青廠二)	0.1315	kgCO ₂ e/tkm	供應商盤查
能資源	電力	0.65	kgCO ₂ e/kwh	環保署公告
	重油	4.0	kgCO ₂ e/L	環保署公告
	柴油	3.48	kgCO ₂ e/L	環保署公告

3.3 功能單位

參考瑞典 EPD 系統及歐洲瀝青鋪面協會之瀝青混凝土 PCR[6][8]，設定產品階段之瀝青混凝土功能單位為 1 ton，鋪面工程完整之生命週期功能單位為 1m²，生命週期包含產品、建造及營運管理階段。

四、鋪面工程碳足跡結果分析

4.1 瀝青混凝土之產品碳足跡(產品階段)

彙整本工程各標瀝青混凝土碳足跡如表 4，以 WH77-C 標(瀝青混凝土廠二)之粗級配及密級配具較低的碳足跡約 77.05 及 77.79 kgCO₂e/ton，而 WH77-A 及 WH77-B 標(瀝青混凝土廠二)之粗級配及密級配之碳足跡明顯高於 WH77-C 標，應與配比中包含水泥成分有關，各類型之碳足跡隨著水泥比例增加而更加顯著，其中又以水泥含量 4%之 WH77-C 標 PAC 碳足跡 134.24 kgCO₂e/ton 最高。

表 4 瀝青混凝土產品碳足跡

供應商		瀝青混凝土廠一			瀝青混凝土廠二			LCA
標別		WH77-A		WH77-B	WH77-C			資料庫
產品種類		粗級配 AC	密級配 AC	密級配 AC	粗級配 AC	密級配 AC	PAC	無區分
原物料 (kgCO ₂ e/ton)	級配	19.50	19.79	19.27	18.25	18.98	27.12	-
	瀝青	15.67	16.33	16.67	16.00	16.09	29.03 ^a	
	砂	1.49	1.49	1.53	1.66	1.57	0.51	
	水泥 (比例) ^b	22.96 (2.5%)	13.73 (1.5%)	18.31 (2.0%)	-	-	36.61 (4.0%)	
	石粉	-	-	-	0.08	0.08	-	
原物料運輸 (kgCO ₂ e/ton)		0.49	0.49	0.49	2.83	2.83	2.73	
製程 能資源 ^c (kgCO ₂ e/ton)	重油	34.89			33.07			
	電力	4.76			4.29			
	柴油	0.87 ^d			0.87			
產品碳足跡 ^e (kgCO ₂ e/ton)		100.63	92.35	96.79	77.05	77.79	134.24	68.5^f 76.0^g
一級數據占比		40.27%	43.88%	41.87%	49.62%	49.16%	28.49%	
與 GaBi 係數 之差異		+47%	+35%	+41%	+12%	+14%	+96%	-

a：WH77-C 標 PAC 使用改質瀝青、b：水泥配比比比例(未扣除瀝青占比)、c：製程能資源排碳量(kgCO₂e/ton) = 廠內能資源總排碳量(kgCO₂e) / 總產能(ton)、d：引用瀝青混凝土廠之單位柴油排放量(kgCO₂e/ton)、e：產品碳足跡=原物料+原物料運輸+製程能資源、f：GaBi 生命週期資料庫、g：英國公路局碳排放量計算工具[12]。

進一步比較原物料、製程能資源及運輸之排碳差異如圖 5，2 廠製程能資源之排碳

量相近約 40 kgCO₂e/ton，皆以重油排碳占比最高約 25%~43%，其中瀝青混凝土產品不包含水泥配比之製程排碳占比較高約 50%，而含水泥配比則較低約為 28%~40%；原物料因各類型瀝青混凝土配比不同而有差別，以水泥排碳占比最為顯著約 15%~27%，然其於原料之重量占比約 1.5%~4%；運輸排碳量則相對較低。

將本計畫瀝青混凝土產品碳足跡與其他資料庫係數進行比較，英國公路局計算器碳足跡為 76 kgCO₂e/ton，與本計畫不含水泥配比之粗級配與密級配瀝青混凝土(WH77-C 標)相近，若與 GaBi 生命週期資料庫之碳足跡係數比較，差異介於 12%~96%，顯示實際盤查之重要性。

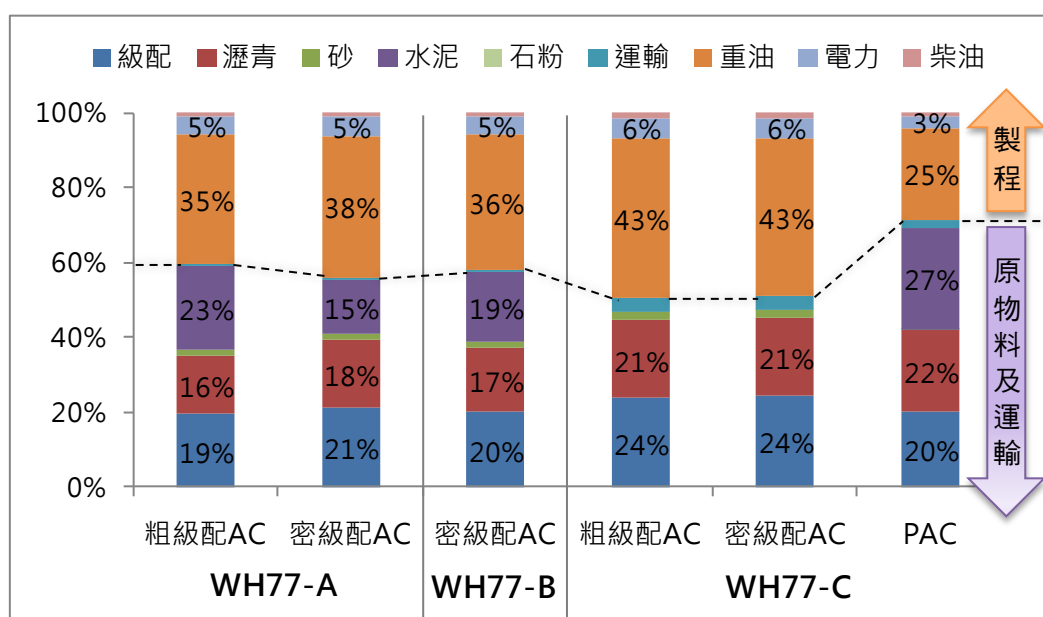


圖 5 瀝青混凝土產品碳足跡占比

4.2 鋪面工程之建造階段排碳量

彙整鋪面工程各標主線橋梁段之建造階段活動數據如表 5，再依據各活動數據之排放係數相乘換算，得各標建造階段單位面積排碳量如表 6 所示。各標建造階段之單位面積排碳量相近約 20 kgCO₂e/m²，其中 WH77-C 標於材料使用部分，因 PAC 產品碳足跡較高，使得整體材料使用排碳量略高於其他 2 標，運輸為各標運輸距離不同而造成差異，機具則無明顯差距。

表 5 鋪面工程之建造階段活動數據

標別			WH77-A	WH77-B	WH77-C
材料 使用	密級配 AC	ton	6,777	24,555	8,823
	PAC	ton	-	-	4,690
	黏油	ton	13	44	20

標別			WH77-A	WH77-B	WH77-C
運輸	tkm		542,137	1,964,382	351,346
機具	柴油	L	1,154	10,379	4,893
鋪設面積	m ²		34,915	130,444	66,085

表 6 鋪面工程建造階段單位面積排碳量

標別			WH77-A	WH77-B	WH77-C
主線橋梁段鋪面組成			4cm 密級配 4cm 密級配	4cm 密級配 4cm 密級配	3cm PAC 5cm 密級配
材料使用 (kgCO ₂ e/m ²)	密級配 AC		17.92	18.22	10.39
	PAC		-	-	9.53
	黏油		0.11	0.10	0.09
運輸(kgCO ₂ e/m ²)			1.58	1.53	0.70
機具 (kgCO ₂ e/m ²)	柴油		0.11	0.28	0.26
單位面積排碳量 (kgCO ₂ e/m ²)			19.73	20.13	20.96

4.3 鋪面工程之營運管理階段排碳量

根據 3.1.3 節 50 年營運管理階段之假設條件，彙整此階段主線橋梁段之活動數據及排碳量如表 7 及表 8。WH77-A 標與 WH77-B 標之主線橋梁段皆為密級配瀝青混凝土，且營運階段之估算假設條件相同，計算得單位面積排碳量相近為 108.94 及 113.56 kgCO₂e/m²；WH77-C 標主線橋梁段雖 PAC 產品碳足跡較高，但因 PAC 重鋪次數較少且厚度較小，單位面積排碳量明顯低於其他路段，約為 39.80 kgCO₂e/m²。

由估算結果顯示，材料使用為營運管理階段主要排放熱點，各標之材料使用排碳占比皆達 90% 以上，不同鋪面重鋪次數將導致不同的重鋪材料用量，若能降低鋪面重鋪頻率以及使用材料之產品碳足跡，將可明顯降低此階段之排碳量。

表 7 鋪面工程營運管理階段活動數據

標別			WH77-A	WH77-B	WH77-C
材料使用	密級配 AC	ton	37,284	138,121	-
	PAC	ton	-	-	18,761
	黏油	ton	116	393	79
運輸		tkm	3,392,858	11,049,650	487,798
機具	柴油	L	6,348	58,382	6,793

表 8 鋪面工程營運管理階段單位面積排碳量

標別		WH77-A	WH77-B	WH77-C
重鋪厚度(cm)		5	5	3
重鋪次數		9	9	4
材料使用 (kgCO ₂ e/m ²)	密級配 AC	98.61	102.48	-
	PAC	-	-	38.11
	黏油	1.02	0.92	0.36
運輸 (kgCO ₂ e/m ²)		8.67	8.60	0.97
機具 (kgCO ₂ e/m ²)	柴油	0.63	1.56	0.36
單位面積排碳量 (kgCO ₂ e/m ²)		108.94	113.56	39.80

4.4 鋪面工程之全生命週期排碳量

綜整前述瀝青混凝土碳足跡、建造及營運管理階段之全生命週期排碳量，如表 9 及圖 6。各標別主線橋梁段單位面積排碳量以 WH77-C 標 60.76 kgCO₂e/m² 最低，其餘 WH77-A 及 WH77-B 標單位排碳量則約為 WH77-C 標 2 倍，為 128.66 及 133.69 kgCO₂e/m²，主要原因在於 WH77-C 標之 PAC 鋪面於營運管理階段之重鋪次數較少且厚度較小，使得營運管理階段材料數量明顯低於其他 2 標。

整體而言，鋪面工程之生命週期碳足跡以營運階段之材料使用排碳占比最高，約為 63% ~ 77%，若能減少瀝青混凝土碳足跡及鋪面重鋪之材料使用量，將可大幅減少整體的生命週期排碳量。

表 9 鋪面工程全生命週期排碳量

標別		WH77-A	WH77-B	WH77-C
建造階段 (kgCO ₂ e/m ²)	材料	18.04	18.32	20.00
	運輸	1.58	1.53	0.70
	機具	0.11	0.28	0.26
	小計	19.73	20.13	20.96
50 年營運管理階段 (kgCO ₂ e/m ²)	材料	99.63	103.40	38.47
	運輸	8.67	8.60	0.97
	機具	0.63	1.56	0.36
	小計	108.94	113.56	39.80
單位面積排碳量 (kgCO ₂ e/m ²)		128.66	133.69	60.76

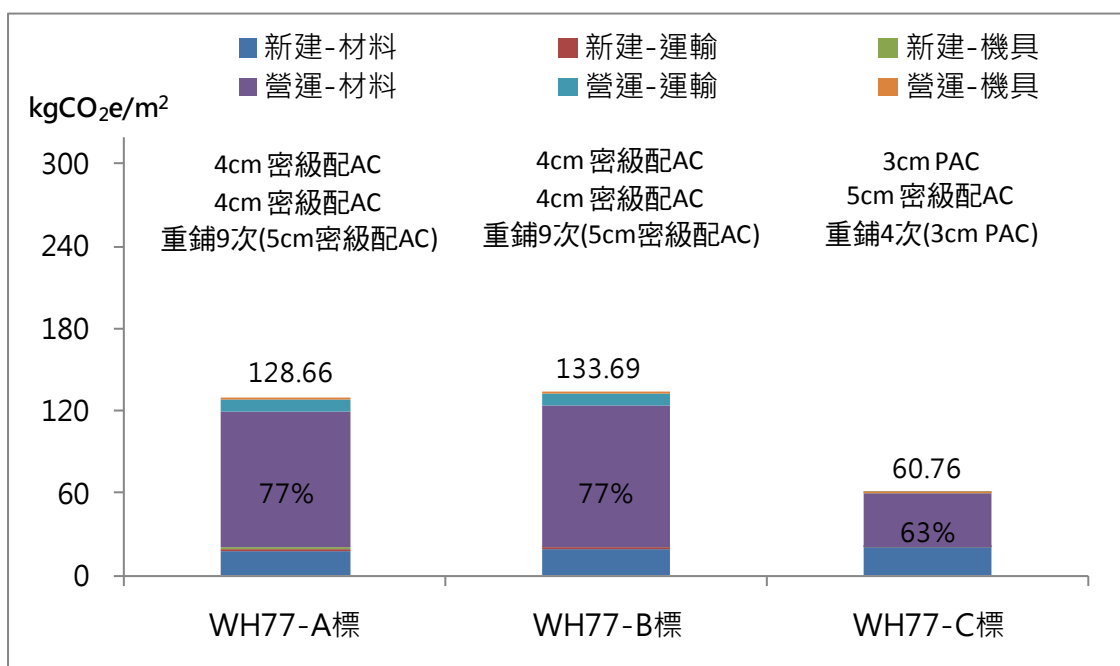


圖 6 鋪面工程全生命週期排碳量

五、減碳評估及敏感度分析

鋪面工程若於規劃設計階段，能將節能減碳概念納入考量，對於不同方案之排放量進行差異比較，可作為鋪面組成與材料選擇參考。敏感度分析可針對不同之方法與數據，估算各種方案所造成的影響，若應用於碳足跡估算即檢視各參數對於整體碳足跡之影響。

根據第四章鋪面工程排碳量分析結果，瀝青混凝土產品碳足跡及營運管理階段之重鋪材料用量，為影響整體鋪面生命週期排碳量主要因素，另考量瀝青混凝土為大宗工程材料，若能降低運輸距離應可減少排碳量，因此本節以瀝青混凝土材料替代、營運管理階段降低重鋪頻率以及運輸距離等 3 種參數進行敏感度分析，評估各參數對於碳足跡之影響，結果如表 10。

依據公路總局施工規範[13]，瀝青混凝土填縫料之組成包含水泥、石粉與石灰。WH77-A 與 WH77-B 標之密級配瀝青混凝土，由於填縫料成分皆為水泥而有較高的碳足跡，假設與 WH77-C 標供應商相同，使用石粉作為填縫料，計算得 WH77-A 及 WH77-B 標之瀝青混凝土碳足跡(約 78.5 kgCO₂e/ton)與 WH77-C 標相近，生命週期單位面積排碳量減少約 13% 及 17%。

降低營運管理階段重鋪頻率之假設，參考我國道路 CFP-PCR 之路面服務年限約 5-8 年[10]，假設 WH77-A 及 WH77-B 標鋪面之服務年限提高為 8 年，計算 50 年營運管理階段之重鋪次數降為 6 次；PAC 參考文獻之服務年限可超過 10 年，假設 WH77-C 標之服務年限提高為 15 年，計算得 50 年營運管理階段之重鋪次數為 3 次。由估算結果顯示 WH77-A 及 WH77-B 標減碳幅度較高，減少約 28%，WH77-C 標之減碳幅度約 16%。

運輸假設 WH77-A 及 WH77-B 標之材料單向運距減少 50%，約 4% 減碳比例，另 WH77-C 標由於建造時期的單向運距僅 26 公里，考量工地現場工程材料之運輸情形，不再進行單向運距減少之敏感度分析。

表 10 敏感度分析

項目			單位	主線橋梁段		
				WH77-A	WH77-B	WH77-C
水泥替換為石粉	原參數	密級配 AC	kgCO ₂ e/ton	92.35	96.79	77.79
		PAC	kgCO ₂ e/ton	-	-	134.34
	假設參數	密級配 AC	kgCO ₂ e/ton	78.62	78.48	-
	原排放量		kgCO ₂ e/m ²	128.66	133.69	60.76
	假設後排放量		kgCO ₂ e/m ²	111.41	110.96	-
	影響程度		%	-13%	-17%	-
50 年營運管理階段降低重鋪頻率	原參數	重鋪次數 (服務年限)	次數 (年)	9 (5)	9 (5)	4 (10)
		假設參數	重鋪次數 (服務年限)	6 (8)	6 (8)	3 (15)
	原排放量		kgCO ₂ e/m ²	128.66	133.69	60.76
	假設後排放量		kgCO ₂ e/m ²	92.35	95.84	50.80
	影響程度		%	-28%	-28%	-16%
單向運距減少 50%	原參數	單向運距	km	80	80	26
		假設參數	單向運距	km	40	40
	原排放量		kgCO ₂ e/m ²	128.66	133.69	60.76
	假設後排放量		kgCO ₂ e/m ²	123.54	128.63	60.76
	影響程度		%	-4%	-4%	-

六、結論與建議

1. 由實際盤查及估算結果顯示，雖然 PAC 之產品碳足跡較密級配瀝青混凝土高，但在本工程之鋪面工程生命週期排碳量，採用 PAC 鋪面具有較低的單位面積排碳量，為 60.76 kgCO₂e/m²；採用一般之密級配瀝青混凝土則約為 PAC 之 2 倍，單位面積排碳量介於 128.66 ~ 133.69 kgCO₂e/m²，除重鋪次數及厚度影響外，與本工程採用之密級配瀝青混凝土的配比組成亦有關聯。
2. 由各類型瀝青混凝土之產品碳足跡結果，顯示填縫料採用水泥成分將大幅增加排碳量，以本工程案例而言，密級配瀝青混凝土大約增加 19%~25%，若能於鋪面工程之材料送審階段，審視各類型瀝青混凝土配比成分，考量採用替代材料；以及製程用於加熱的燃料油排碳量亦為排放熱點，排碳占比約 25%~43%，若能在不影響產品性

能之情況下，提高能源效率、降低加熱溫度或是採用溫拌瀝青等，應可減少加熱過程之燃料油使用量。如此，將可降低瀝青混凝土於產品製造階段之排碳量。

3. 營運管理階段之鋪面重鋪材料使用量，為整體鋪面工程碳足跡之排放熱點，占生命週期排碳量 63%~77%。設計階段應考量鋪面合適的重鋪頻率，採用服務年限較長的瀝青混凝土，例如公路總局首次於本工程 WH77-C 標鋪面採用服務年限較長的 PAC，依評估結果於營運管理階段確實具有減碳效益，較 WH77-A 標及 WH77-B 標減少約 53%~55%，因此建議鋪面設計可將耐久性能作為材料選擇依據。
4. 瀝青混凝土屬公共工程常見之大宗工程材料之一，由於材料數量較大，若能選擇當地或鄰近之材料供應商，對於材料運輸距離可大幅減少，以降低運輸階段所造成的排碳量，如本工程 WH77-A 及 WH77-B 標若減少一半運輸距離約減碳 4%。
5. 歐盟綠色採購(GPP)之「公路設計、建造及維護」文件中[14][15]，細設與功能需求階段之準則內容包含鋪面使用低溫瀝青混凝土、再生材料之添加、鋪面耐久性能及大宗材料運輸的排碳要求等項目，與第四章評估結果相呼應，建議鋪面工程相關招標文件可考量納入相關減碳要求，不僅能有效將低環境之衝擊影響，亦可作為採購者選擇承包商之參考依據。

七、致謝

本文內容承蒙本計畫各標工程承包商：春原營造股份有限公司(WH77-A 及 WH77-B 標)及泛亞工程建設股份有限公司(WH77-C 標)，於施工期間協助協調瀝青混凝土廠及現場施作廠商提供資料，使碳盤查作業更趨完備，特此致謝。

參考文獻

- [1] Santero, N.J., Masanet, E., Horvath, A., “Life-cycle assessment of pavements.Part I: critical review”, Resource, Conservation and Recycling, 55, pp. 801-809, 2011.
- [2] Hessam AzariJafari, Ammar Yahia, Mourad Ben Amor, “Life Cycle Assessment of Pavements: Reviewing Research Challenges and Opportunities,” Journal of Cleaner Production, 112, pp. 2187-2197, 2016.
- [3] Stephen T. Muench, “Roadway Construction Sustainability Impacts Review of Life-Cycle Assessments”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2151, pp. 36-45, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2010.
- [4] Seunggu Kang, “The Development of a Regional Inventory Database for the Material

- Phase of the Pavement Life-Cycle with Updated Vehicle Emission Factors Using Moves”, Science in Civil Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, 2013.
- [5] “Product Category Rules for Type III Environmental Product Declaration of Construction Products to EN 15804 : 2012”, BRE Global Ltd, 2013.
- [6] “Guidance Document for Preparing Product Category Rules (PCR) and Environmental Product Declarations (EPD) for Asphalt Mixtures”, European Asphalt Pavement Association (EAPA), 2016.
- [7] “Product Category Rules (PCR) for Asphalt Mixtures”, National Asphalt Pavement Association (NAPA), 2017.
- [8] “Draft Product Category Rules (PCR) - Asphalt Mixtures (Product Category Classification: UN CPC 1533 & 3794)”, International EPD® System, 2017.
- [9] 基礎建設-橋梁(Infrastructure-Bridge) 碳足跡產品類別規則，行政院環境保護署，2017。
- [10] 基礎建設-道路(Infrastructure-Road) 碳足跡產品類別規則，行政院環境保護署，2017。
- [11] Carsten B. N., “Durability of Porous Asphalt - International Experience”, Road Directorate, Danish Road Institute, 2006.
- [12] “Carbon Emissions Calculation tool v1.03”, Highways England, 2016.
- https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/553866/Task_446_Carbon_Tool_v1.03.xlsm
- [13] 公路工程施工規範-第 02741 章瀝青混凝土之一般要求，交通部公路總局，2014。
- [14] “Revision of Green Public Procurement Criteria for Road Design, Construction and Maintenance, Procurement Practice Guidance Document”, European Commission JRC, 2016.
- [15] “Commission Staff Working Document, EU Green Public Procurement Criteria for Road Design, Construction and Maintenance”, European Commission JRC, 2016.