



# 工程碳管理於西濱快速公路之執行成效及未來發展

西部濱海公路南區臨時工程處處長 / 江金璋  
西部濱海公路南區臨時工程處工程科科长 / 羅國峯  
中興工程顧問股份有限公司環境工程部計畫主任 / 許珮蓓  
中興工程顧問股份有限公司環境工程部工程師 / 王寧沂

關鍵字：工程碳管理、碳足跡、碳盤查、工程減碳

## 摘要

西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程(以下簡稱本工程)於2012~2017年間執行WH7-A、WH77-B及WH77-C三標工程碳足跡盤查作業,於2016年初取得我國道路公共工程碳足跡查證聲明書首例,並於2018年完成全工程碳足跡查證作業,亦是國內首次取得全工程碳足跡查證聲明書之道路新建工程。

本工程於盤查過程中,累積及產出可供參考之本土化碳排放資訊。本文即以本工程為例,說明工程碳足跡盤查成果、整體生命週期排放量、工項排碳特性、以及應用於本工程減碳措施之效益。期望藉由本工程產出成果與經驗,建置我國道路工程碳管理之基礎。

## 一、前言

工程碳管理係以生命週期概念進行,英國於2009年發表重大工程碳管理計畫[1],內容考量工程生命週期並以重大交通工程為評估對象,發展一套碳管理架構,作為工程碳排放量推估、調查及減碳之依據準則。而後歐盟及瑞典 International EPD® System 分別於2012及2013年,公告 EN15804[2]、道路及橋梁工程產品類別規則 [3][4],使國際間對於工程生命週期碳足跡量化方式,具有一致性遵循之規則、要求及指引。

近年來,國際工程碳管理已由碳足跡量化逐漸進展至完整供應鏈之碳管理,英國綠色建築委員會(The Green Construction Board)委託英國標準協會(BSI)制定並於2016年發佈 PAS 2080:2016 基礎設施之碳管理(Carbon Management in Infrastructure)[5],期望藉由所



有成員包括資產擁有者 / 管理者、設計者、建造者及產品 / 原物料供應商之共同參與，降低基礎設施之碳排放量及成本。同年歐盟公開「公路設計、建造及維護」綠色採購文件 (Procurement Practice Guidance Document) [6]，建議採購當局於招標文件中納入要求，達到有效降低生命週期之成本與環境衝擊之目標。

為落實國家工程排碳評估與減碳政策，公路總局於 2012 年建立工程碳管理循環架構，開始推動道路工程碳管理工作；工程會並於 2013 年洽請各部會提出公共工程試辦案例，辦理道路、防洪、水資源、下水道、建築及水土保持等 6 類工程碳排放估算及盤查作業，期望透過各單位執行成果，可提供各方參考。

除前述工程會推動之試辦案例外，各單位亦著手推動公共工程之碳盤查等作業。西濱南工處即因應公路總局工程碳管理構想，於 2012 年開始展開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)，進行施工建造階段之碳盤查作業。

## 二、西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程特性

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 8.45 公里，工程範圍及型式如圖 1 與表 1。工程項目包括：主線高架橋梁、鹽埕交流道、七股溪橋段、九塊厝交流道及擋土牆等工程。本工程已於 2017 年 9 月竣工，並於同年 11 月全線通車。

工程碳管理應考量包含工程施工建造及營運管理階段完整生命週期之影響，。本計畫除於施工建造階段蒐集盤查資料，另於 2016 年邀集專家學者，討論營運管理階段估算範疇及內容，以作為本工程營運管理階段估算之基準。

隨著各標別工程陸續竣工，本計畫完成所有標別之碳足跡盤查及查證作業，於 2016 年取得國內公共工程之道路工程碳足跡查證聲明書首例 (WH77-A 標)，更進一步於 2018 年取得全工程 (不分標別) 查證聲明書，為國內首次取得全工程碳足跡查證聲明書之道路新建工程。

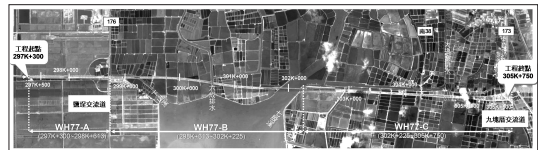


圖 1 西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程範圍

表 1 西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程型式

工程內容	長度 (m)	工程型式	工法
主線高架橋梁	7,397	樁基礎 / 箱型梁	場鑄逐跨 / 場鑄懸臂
七股溪橋段	440	樁基礎 / 拱橋	場鑄懸吊
鹽埕交流道	939	樁基礎 / 箱型梁	場鑄逐跨
九塊厝交流道	258		
擋土牆 (鹽埕交流道)	1,215	加勁式	-
擋土牆 (九塊厝交流道)	217	懸臂式	-
擋土牆	305	重力式	-



本文即以本工程為標的，說明碳足跡範疇及盤查組織架構、施工建造階段盤查成果、生命週期排碳量及節能減碳效益。

### 三、西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程碳足跡範疇與盤查組織架構

#### (一) 八棟寮至九塊厝新建工程碳足跡範疇

本計畫參考國內橋梁及道路碳足跡產品類別規則 CFP-PCR[7][8]，碳足跡範疇包含施工建造及營運管理階段，如圖 2 所示。施工建造階段即本計畫盤查輔導重點，包括工程施工過程之工程材料、機運具燃料與能資源使用等，以及管理單位之活動數據；營運管理階段為本工程橋梁未來 50 年營運操作、維護 / 重置之材料使用、機運具燃料及能資源使用。

#### (二) 工程碳足跡盤查組織架構

本計畫工程碳足跡盤查組織架構如圖 3 所示，包括主管單位 (西濱南工處)、輔導單位 (中興公司)、查驗機構 (英國標準協會)、工區方 (監造、承包商及其相關協力廠商與供應商)，然本工程契約未包含照明工程，為考量完整的評估邊界，亦將照明設備商納入組織成員。

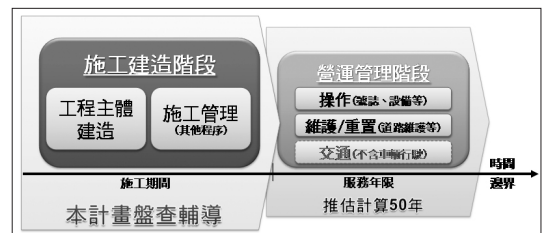


圖 2 工程生命週期碳足跡範疇

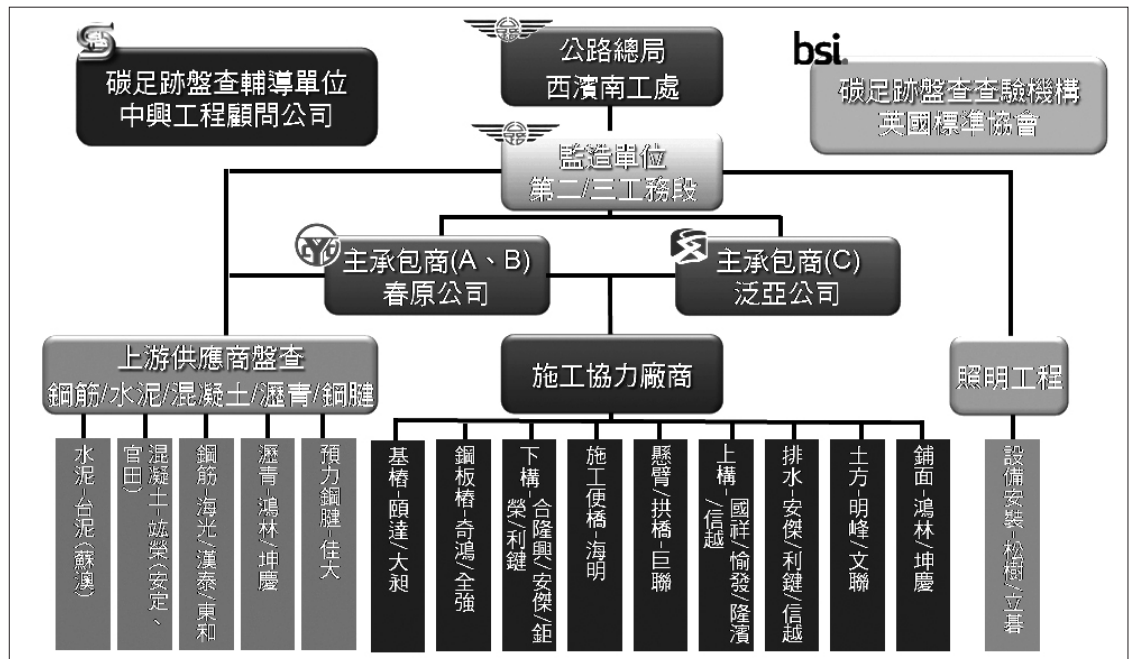


圖 3 工程碳足跡盤查組織架構



盤查組織運作機制由主管方督導整體碳管理工作之執行，輔導單位協助承包商及碳足跡計算，查驗機構負責查核碳足跡之成果，工區執行方則為與工程主體建造具直接關係之承包商，同時工區監造單位協助確認工區現場與盤查資料之一致性。

為提升本工程一級數據比例及建立本土化係數，本計畫於施工期間執行鋼筋、水泥、混凝土、瀝青混凝土及預力鋼腱供應商盤查作業，於盤查邊界內將供應商納入盤查組織架構。

#### 四、工程碳足跡盤查成果

##### (一) 施工建造階段排碳特性分析

###### 1. 整體新建工程排碳量及分析

本工程施工建造階段排碳量係依據 ISO/TS 14067[9] 進行盤查，整體新建工程排碳量為 324,331 tonCO<sub>2</sub>e，排碳源占比如圖 4，施工建造階段以工程材料使用為主要排碳量來源，約占整體工區排碳量 93%，機 / 運具燃料使用及運輸各為 3%，管理單位 1%，工區人員逸散及廢棄物僅約 0.1%；進一步分析工

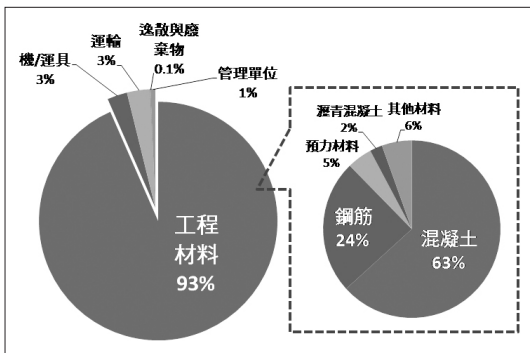


圖 4 施工建造階段整體排碳量占比

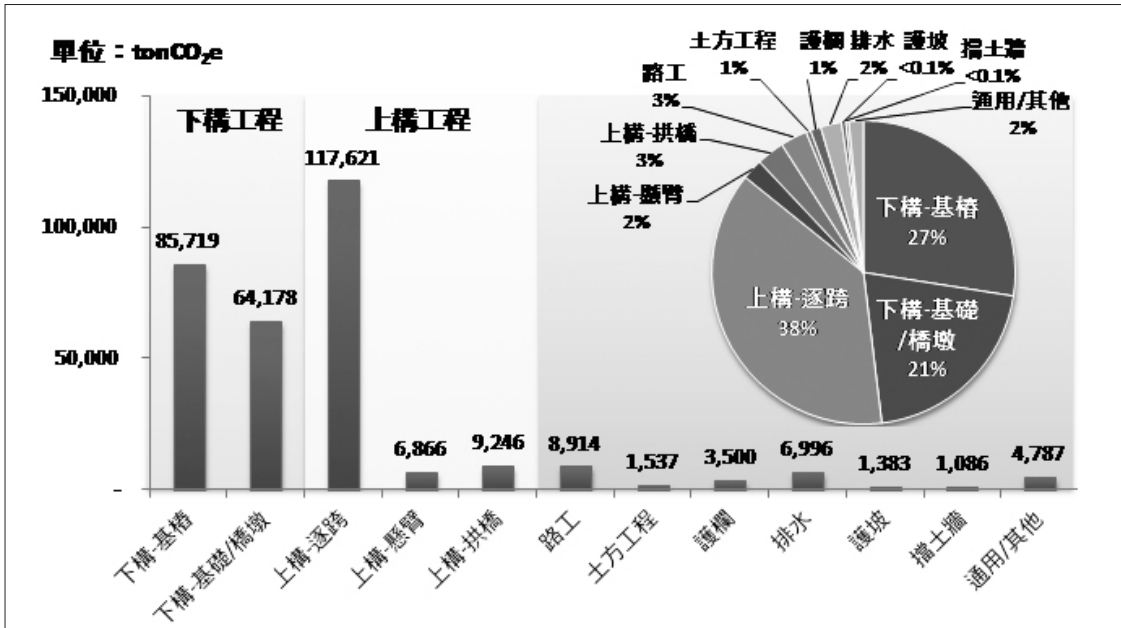


圖 5 施工建造階段工程項目排碳量及占比分析



程材料使用排碳來源，以混凝土及鋼筋排碳占比最高，分別為 63% 及 24%。

## 2. 工程項目排碳量占比分析

彙整本工程機 / 運具及工程材料使用之排碳量，並依據工程項目分類，結果如圖 5 所示。下構工程（基樁、基礎 / 橋墩）及上構工程（逐跨、懸臂及拱橋）為主要排碳來源，分別占整體工程排碳量之 48% 及 43%，路工及排水占 3% 及 2%，其餘工程項目占比較低。

由於工程材料為主要排碳來源，且本工程上構主要採逐跨工法為主，使得上構 - 逐跨使用的工程材料明顯高於其他工項，具有最高的排碳量占比。

### (二) 本工程工項單位排碳量

為了解各工項排碳特性及產出相關工程可參考之數據，本文將施工建造階段盤查結果進行基樁、基礎、橋墩、上構、整體橋梁工程及擋土牆之單位排碳量分析。各工項主要工程材料與機具如表 2。

#### 1. 基樁工程單位排碳量

本工程基樁型式為全套管基樁，樁徑包含 100cm 及 150cm，樁徑 150cm 分佈位置包括主線陸上段與跨河段（七股溪橋），排碳量分析結果如圖 6 及表 3。整體排碳量占比以混凝土最高為 69%，其次為鋼筋 24%，機具、材料運輸及基樁測管則皆小於 5%。

樁徑 150cm 單位長度之基樁排碳量為 0.91 ~ 1.02 tonCO<sub>2</sub>e/m，與陸上段及跨河段單位排碳量差異不大；樁徑 100cm 單位長度之基樁排碳量為 0.51 ~ 0.56 tonCO<sub>2</sub>e/m，明

表 2 工項主要工程材料與機具

工項	主要工程材料	主要機具
基樁	鋼筋、210II 水中混凝土、PVC 管	挖土機、搖管機、吊車
基礎	鋼筋、280II 混凝土	打樁機、挖土機、吊車、泵送車、發電機
橋墩	鋼筋、350II 混凝土、剪力鋼箱、盤式支承	吊車、泵送車、發電機
上構	鋼筋、420II 混凝土、預力鋼腱 / 套管、預力端錨材料、PVC 管	吊車、吊卡車、泵送車、發電機
擋土牆	鋼筋、245II 混凝土、止水帶、PVC 管	吊卡車、發電機、泵送車

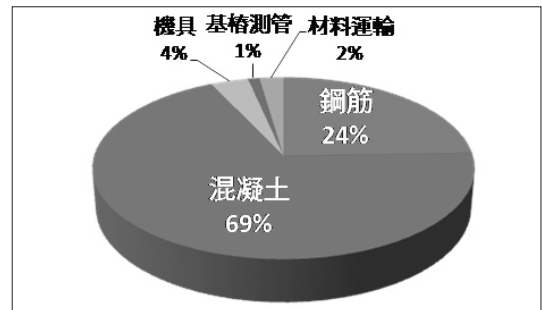


圖 6 基樁排碳量占比分析

表 3 基樁排碳量占比及單位排碳量

項目	規格		
	Φ 150cm (陸上段)	Φ 150cm (跨河段)	Φ 100cm
鋼筋	24%	27%	36%
混凝土	69%	67%	58%
基樁測管	1%	1%	2%
機具	4%	4%	3%
材料運輸	2%	2%	2%
單位排碳量 (tonCO <sub>2</sub> e/m)	0.91 ~ 1.02	0.91 ~ 0.98	0.51 ~ 0.56
單位排碳量 (tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> )	0.51 ~ 0.58	0.52 ~ 0.55	0.65 ~ 0.71





顯低於樁徑 150cm 基樁，單位長度排碳量隨著樁徑減少而降低。

另再考慮 2 種樁徑之單位面積，比較單位體積之基樁排碳量，以樁徑 100 cm 單位排碳量較高 0.65 ~ 0.71 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>，樁徑 150 cm 則為 0.51 ~ 0.58 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>，主要差異為樁徑 100 cm 之單位體積鋼筋數量較高，而具有較高的單位體積排碳量。

## 2. 基礎工程單位排碳量

本工程基礎皆屬於樁基礎型式，基礎單位體積排碳量及占比如圖 7。各基礎之混凝土及鋼筋排碳占比合計大於 95%，單位體積排碳量

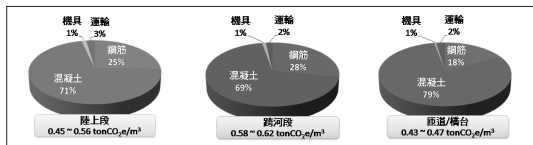


圖 7 基礎單位排碳量及占比分析

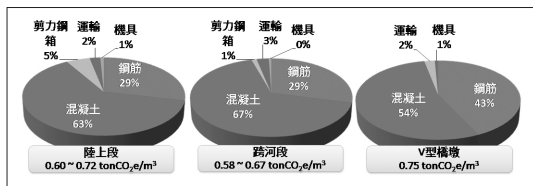


圖 8 橋墩單位排碳量及占比分析

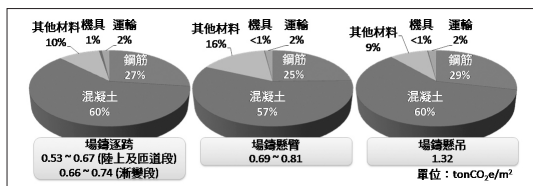


圖 9 上構單位排碳量及占比分析

以跨河段最高介於 0.58 ~ 0.62 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>，其次為陸上段 0.45 ~ 0.56 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>，匝道 / 橋台為 0.43 ~ 0.47 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>。主要係因為鋼筋數量配置量之差異，造成各基礎單位體積排碳量不同。

## 3. 橋墩工程單位排碳量

橋墩工程分析結果如圖 8，分為陸上段、跨河段及 V 型橋墩，主要排碳來自於工程材料使用包含混凝土、鋼筋及剪力鋼箱，運輸及機具排碳量較小。各類型橋墩仍以混凝土為主要排碳來源，占比 54% ~ 67%，鋼筋排碳次之占比 29% ~ 43%；V 型橋墩因鋼筋配置數量較多，致鋼筋排碳占比比較跨河及陸上段高。各類型橋墩單位體積排碳量在 0.60 ~ 0.75 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> 間，其中 V 型橋墩具有最高排碳量 0.75 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>，亦是鋼筋數量較多所導致。

## 4. 上構工程單位排碳量

本工程上構工程包括場鑄逐跨、場鑄懸臂及場鑄懸吊工法，其中跨河段 (七股溪橋) 以場鑄懸吊工法施作。各工法上構排碳分析結果如圖 9。混凝土排碳占比 57% ~ 60%，鋼筋占比 25% ~ 29%，其他材料占比差異略高約 9% ~ 16%，機具與運輸占比則差異不大合計皆為 3%。

單位面積排碳量以場鑄懸吊工法最高 1.32 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>，此工法施作之橋單元屬於跨河景觀橋段，其結構所需的混凝土及鋼筋數量明顯高於其他工法；比較場鑄逐跨與場鑄懸臂工法之排碳差異，由於懸臂工法橋單元之箱型梁規格尺寸較大而有較高的單位排碳量 0.69 ~ 0.81 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>，場鑄逐跨工法



單位排碳量介於 0.53 ~ 0.74 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>，其中部分橋單元因為漸變段而有較高的單位排碳量。

### 5. 整體橋梁工程單位排碳量

彙整本工程各橋梁構件之基樁、基礎、橋墩及上構之排碳量，及分析單位面積橋梁排碳量，結果如圖 10 及圖 11。各類型工法排碳量占比相似，混凝土及鋼筋為主要排碳來源合計約 90% 以上，其他材料占比 5% ~ 7%，機具及運輸占比較低。

分析各工法之單位排碳量，與上構單位排碳量相似，仍以場鑄懸吊(跨河段)最高為 2.95 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>，其次場鑄懸臂為 1.63、1.75 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>，場鑄逐跨由於不同型式配置造成差異，單位面積排碳介於 1.16 ~ 2.05 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>，整體單位排碳量由高至低為：匝道段 > 漸變段 > 陸上段 > 含既有橋墩。

彙整本工程各橋單元之構件排碳量來源占比如圖 12，僅匝道段以基樁為主要排碳來源，排碳占比 42%，其次為上構占比 34%，基礎及橋墩分別為 16% 及 8%；陸上段及跨河段主要排碳量來源為上構占比 45%，其次為基樁占比 27 ~ 32%，基礎占比 16% ~ 20%，橋墩占比最低為 7% ~ 8%。顯示橋梁工程係以上構為排碳熱點，上構之規格及材料配置為影響整體排碳量主因。

### 6. RC 擋土牆單位排碳量

本工程 RC 擋土牆包含重力式及懸臂式，排碳量分析結果如圖 13。重力式擋土牆材料

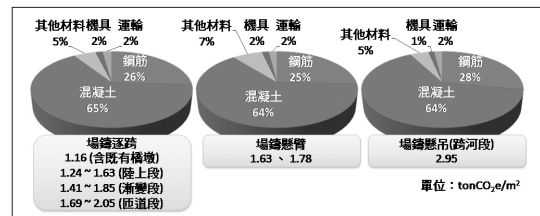


圖 10 整體橋梁工程排碳量及占比分析

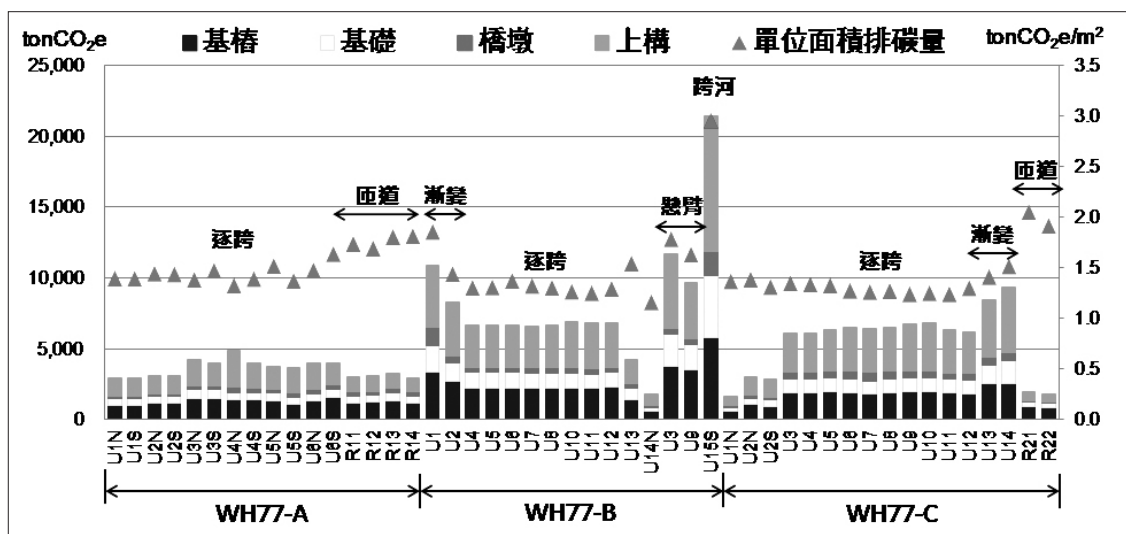


圖 11 整體橋梁工程構件排碳量分析

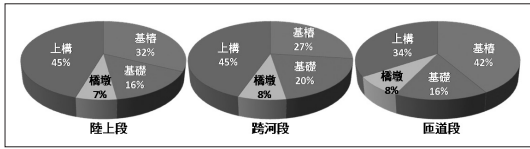


圖 12 整體橋梁工程構件排碳量占比分析

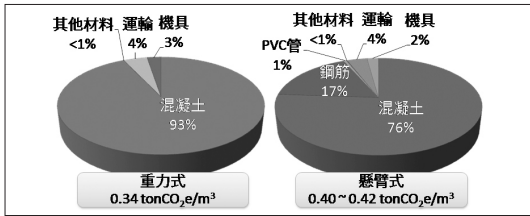


圖 13 擋土牆排碳量占比分析

表 4 營運管理階段假設情境

營運管理階段	項目	假設情境
操作	照明	依燈具功率及每日操作時間 12 小時估算用電量 [10]
	照明	參考 CFP-PCR 燈具使用壽命估算更換數量 [11]
維護 / 重置	鋪面	密級配瀝青混凝土重鋪頻率 5 年，厚度 5 公分；
		多孔隙瀝青混凝土重鋪頻率 10 年，厚度 3 公分 [12]
	標線	與鋪面重鋪頻率相同
	伸縮縫	參考養護單位經驗，更換頻率 20 年
	防眩板	參考養護單位經驗，更換頻率 7 年
運輸	-	鋪面材料同施工建造階段之運輸距離，其餘假設材料運輸距離 80 公里
機具使用	-	依施工建造階段機具燃料用量及材料比例估算

備註：

- (1) 照明操作時間依據中央氣象局 102 ~ 105 年日出日落統計資料設定；
- (2) 燈具更換頻率依據路燈 CFP-PCR 之燈具壽命，LED 燈具設定 30,000 小時，複金屬燈具設定為 20,000 小時；
- (3) 鋪面重置頻率參考養護單位經驗、文獻及國道 6 號多孔隙瀝青混凝土鋪面實務經驗。

使用以混凝土為主，其排碳占比達 93%，懸臂式擋土牆由於材料包含鋼筋配置，混凝土排碳占比比較低為 76%，鋼筋占比為 17%。

重力式擋土牆單位體積排碳量為 0.34 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>，懸臂式擋土牆較高為 0.40 ~ 0.42 tonCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>，由於鋼筋配置使得懸臂式擋土牆單位排碳量較高。

## 五、工程生命週期排碳量

依據工程生命週期範疇及施工建造階段排碳量結果，依序說明營運管理階段假設情境及本工程生命週期排碳量。

### (一) 營運管理階段假設情境說明

工程營運管理階段排碳活動包含 50 年之操作及維護 / 重置，本工程操作階段即為燈具照明之用電量，維護 / 重置階段考量照明燈具、鋪面、標線、伸縮縫及防眩板等項目，根據各種項目估算材料使用、運輸及機具使用之排碳量。各項目估算之假設條件如表 4 所示。

### (二) 西濱快八棟寮至九塊厝工程生命週期排碳量

彙整施工建造階段與營運管理階段排碳量如表 5 及圖 14，本工生命週期排碳量為 351,365 tonCO<sub>2</sub>e。主要排碳來自於施工建造階段占 92%(圖 14)，管理階段不及 1%；營運管理階段以鋪面 / 標線為主要排排碳來源約占 5%，其餘項目僅占總排放量不到 3%。

本工程碳匯係依據各種類植栽數量、植栽密度及碳匯係數，並以碳匯計入期 40 年





表 5 本工程生命週期排碳量

階段		排碳量 (tonCO <sub>2</sub> e)	占比
施工建造	土木工程	322,186	92%
	管理階段	2,146	
營運管理	鋪面 / 標線	18,288	8%
	照明	4,677	
	伸縮縫	3,955	
	防眩板	114	
總計		351,365	
碳匯 (tonCO <sub>2</sub> e/年)		385	-

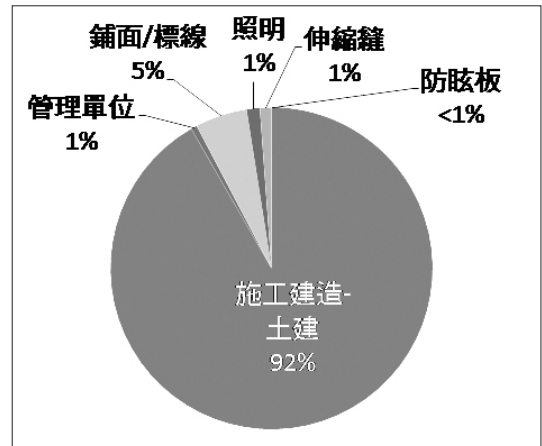


圖 14 生命週期排碳量占比分析

計算碳儲存變化量，總計碳匯量為 15,400 tonCO<sub>2</sub>e，換算每年約 385 tonCO<sub>2</sub>e/年之固碳量。

彙整本工程功能單位排碳量如表 6，整體功能單位排碳量介於 15,753 ~ 62,084 tonCO<sub>2</sub>e/km，各標別之排碳量與工程規模有關。跨河段因功能需求，單位排碳量較主線高 62,084 tonCO<sub>2</sub>e/km；匝道因規模較小，單位排碳量較低 15,753 tonCO<sub>2</sub>e/km。

表 6 本工程功能單位排碳量

項目	路寬 (m)	功能單位排碳量 (tonCO <sub>2</sub> e/km)
主線 - 陸上段	11.4 ~ 44.5	49,463
主線 - 跨河段	20	62,084
匝道	7.5	15,753

## 六、工程節能減碳效益分析

依據歐盟綠色採購「公路設計、建造與管理」文件指出 [6]，道路工程節能減碳措施包括：使用再生材料、耐久性鋪面、材料運輸排碳要求及交通壅塞減緩等。

本工程應用之減碳措施即包含水泥替代材料、加勁式擋土牆、多孔隙瀝青混凝土鋪面、場電使用及營運期間交通改善等，各項減碳效益評估分析說明如後。

### (一) 水泥替代材料

根據本工程碳足跡盤查成果，混凝土為最主要的排碳來源，本工程混凝土之原物料包含飛灰及爐石粉，用以替代原物料中的水泥。本計畫於施工建造期間已執行混凝土供應商盤查作業，建立各強度混凝土之本土化碳足跡係數，提升混凝土排碳量之準確性，並確認飛灰及爐石粉替代水泥之減碳效益。

本文為評估飛灰及爐石粉替代材料之減碳效益，比較 2 種情境之混凝土排碳量：採用供應商盤查建立之本土化碳足跡係數，以及依各標混凝土配比資料計算無飛灰及爐石粉之混凝土排碳量，分析結果如表 7。



表 7 水泥替代材料減碳量分析

標別	混凝土強度	飛灰爐石粉替代率	混凝土排碳量 (A)	無飛灰爐石粉之排碳量 (B)	減碳量 (B-A)	減碳比例 (B-A)/A
WH77-A	420 II	20%	14,948	18,175	3,227	22%
	350 II, SCC	20%	2,579	3,140	561	22%
	280 II	20%	6,267	7,597	1,330	21%
	245 II	20%	1,070	1,291	221	21%
	140 II	20%	1,055	1,272	218	21%
	210 II 水中	20%	14,869	18,048	3,178	21%
	210 II	20%	2,130	2,580	450	21%
WH77-B	420 II 無收縮	5%	157	164	7	4%
	420 II 早強	22%	32,742	40,417	7,674	23%
	350 II, SCC	31%	4,216	5,774	1,559	37%
	280 II, SCC	31%	13,782	18,786	5,004	36%
	245 II	31%	1,437	1,940	503	35%
	210 II 水中	31%	25,898	35,105	9,207	36%
	210 II	31%	1,710	2,299	589	34%
	175 輕質	0%	41	41	-	0%
	140 II	31%	1,171	1,562	391	33%
	CLSM	31%	21	36	15	74%
WH77-C	420 無收縮	5%	140	146	6	4%
	420 II 早強	22%	27,645	34,061	6,416	23%
	350 II, SCC	25%	4,406	5,668	1,262	29%

備註：單位 tonCO<sub>2</sub>e

本工程飛灰及爐石粉替代水泥之減碳量總計為 53,359 tonCO<sub>2</sub>e，總減碳比例約 28%，減碳比例隨著飛灰爐石粉替代率增加而提升。各標飛灰爐石粉替代率不同，介於 0% ~ 31% 之間，若可再提升替代率，將可減少水泥使用量，進而增加水泥替代材料之減碳效益。

### (二) 加勁式擋土牆

加勁式擋土牆結構係於土壤中鋪設加勁材料，具有取代傳統 RC 擋土牆、達成工區土方平衡及景觀等優點，屬於綠色永續工法。

本工程鹽埕交流道即設置加勁式擋土

牆，為確認其減碳效益，本文引用其他計畫之評估成果 [13]，該計畫參考本工程加勁式擋土牆設計參數，設計對應之懸臂式擋土牆，比較加勁式及傳統懸臂式之擋土牆排碳量結果如圖 15。本工程加勁式擋土牆排碳量為 827 kgCO<sub>2</sub>e/m，對應之懸臂式擋土牆為 6,935 kgCO<sub>2</sub>e/m，加勁式擋土牆減碳比例約為 88%，具有顯著的減碳效益。

### (三) 多孔隙瀝青混凝土鋪面材料

道路鋪面耐久性為營運期間重鋪頻率之關鍵影響因素，若採用服務年限較長之鋪面

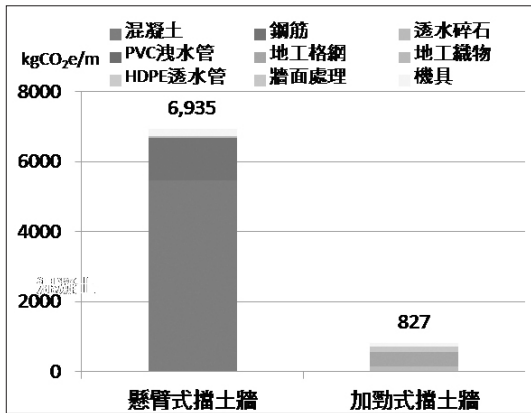


圖 15 加勁式擋土牆與懸臂式擋土牆排碳量分析 [13]

材料，將可降低鋪面重鋪之工程材料與機具施工排碳量。摘述本工程鋪面排碳特性分析結果如後 [14]。

本工程主線橋梁段鋪面結構如圖 16，WH77-A 及 B 標為 8 公分密級配瀝青混凝土 (DGAC)，WH77-C 標則為 5 公分密級配與 3 公分多孔隙瀝青混凝土 (PAC)。

參考國內橋梁及道路 CFP-PCR[7][8]，設定本工程鋪面生命週期系統邊界如圖 17，包含產品、施工建造及 50 年營運管理階段。於產品階段各標瀝青混凝土碳足跡為供應商盤查結果，施工建造階段蒐集本工程使用之材料與機具活動數量，營運管理階段僅考量鋪面重鋪排碳量，各標鋪面重鋪假設條件如表 8。

本工程鋪面生命週期碳足跡結果如圖 18，WH77-A 及 B 標單位面積排碳量相近為 128.66 及 134.60 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>，而 WH77-C 標僅有 60.76 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> 最低，各標營運期管理

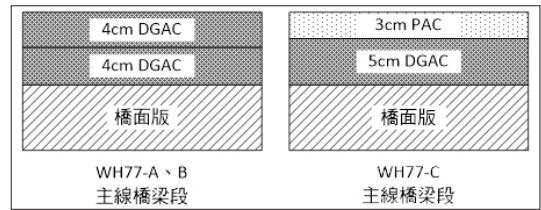


圖 16 本工程主線橋梁段鋪面結構

備註：DGAC 為密級配瀝青混凝土；PAC 為多孔隙瀝青

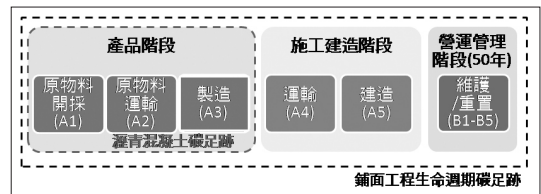


圖 17 鋪面工程生命週期碳足跡系統邊界

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

表 8 本工程主線橋梁段鋪面之營運管理階段假設條件

標別	WH77-A	WH77-B	WH77-C
重鋪材料	DGAC	DGAC	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

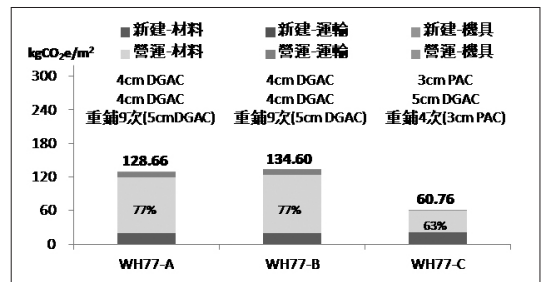


圖 18 鋪面工程生命週期碳足跡

備註：DGAC 為密級配瀝青混凝土；PAC 為多孔隙瀝青混凝土。



表 9 WH77-B 標基樁鋼筋加工排碳量分析

情境	場電	發電機
鋼筋量 (ton)	8,557	584
柴油量 (L)	17,962	3,562
柴油係數 (kgCO <sub>2</sub> e/度)	3.48	
用電量 (度)	33,560	-
電力係數 (kgCO <sub>2</sub> e/度)	0.65	
排碳量 (tonCO <sub>2</sub> e)	84.32	12.40
單位排碳量 (kgCO <sub>2</sub> e/t 鋼筋)	9.85	21.22

備註：柴油量包含鋼筋廠之吊車用油量。



圖 19 本工程營運期間交通量影響路段

階段之材料排碳占比介於 63% ~ 77%。造成排碳量差異之原因為營運管理階段重鋪材料數量之不同，相較於 WH77-A 及 B 標之密級配瀝青混凝土鋪面，WH77-C 標 PAC 鋪面於 50 年營運期間之重鋪次數與厚度明顯低於其他 2 標，因此 PAC 鋪面重鋪之材料用量可大幅減少，其減碳比例約為密級配瀝青混凝土鋪面 53% ~ 55%。

#### (四) 場電使用

工程施工過程使用之機具常以電力作為機具能量來源，然公共工程之施工環境變異性大，有時因工址位處偏遠地區，有時因工區幅員廣大，是否可採用固定式電源（場電）之不確定性高。因此，工程中常見使用可移動之發電機替代固定式電源。然以移動式之發電機需添加燃油以產生電力，考量相同機具使用場電與移動式發電機之排碳量結果應不相同。

本工程各標工區之鋼筋加工場，即有使用場電或移動式發電機為電力來源之情形。其中 WH77-B 標基樁加工作業，初期係使用場電為電力來源，而後為提升施工進度，短期使用燃油發電機產生電力，比較 2 種情境之排碳量如表 9。結果顯示使用發電機之鋼筋加工單位排碳量為 21.22 kgCO<sub>2</sub>e/t，使用場電之單位排碳量則僅約 9.85 kgCO<sub>2</sub>e/t。

根據分析結果，使用場電較燃油發電機產生較少之碳排放量。因此，工期長、用電量大之工程，應可考量工區申請臨時用電，除可有效減少施工機具之碳排放量，亦有節省成本之效益。

#### (五) 營運期間交通量

本工程路段於營運期間將影響鄰近台 17 及台 19 線道路之交通量變化，如圖 19 所示。本文參考可行性報告之通車前後交通量[15]，評估整體交通量改善之減碳效益。

本文計算通車前後之年度排碳量公式如公式 1 所示。本工程通車前排碳量來自台 17 與台 19 線，假設此 2 條道路與本工程道路相



同為 8.45 km，並根據公路路線設計報告及研究報告資料，分別設定本工程路段、台 17 及台 19 線之最小設計速率與小客車對應油耗值，估算本工程通車前後之年度排碳量如表 10。

公式 1

交通運輸排碳量

= 年度交通量 × 道路長度 × 最小設計速率  
之小型車油耗值 × 燃料排放係數

由於本工程最小設計速率較台 17 與台 19 線高，其相對應之小客車油耗值較低，且通車後台 17 與台 19 線之車流量轉移至本工程，使得整體道路之交通流速明顯提升，進而減少車輛油耗量並降低排碳量，本工程營運階段每年可減少約 1,585 tonCO<sub>2</sub>e。

## 七、結論與未來展望

本工程經由盤查取得施工建造階段之盤查數據，建立我國橋梁工程本土化資料，包含主要工程材料排放係數、機具及工項之單位排碳量；並由營運管理階段之排碳量估算，完成本工程完整生命週期排碳量之成果。

以下說明本工程產出之排碳量成果、工程單位排碳量、減碳效益、建議與未來展望事項。

### (一) 本工程生命週期排碳量成果

本工程生命週期排碳量為 351,365 tonCO<sub>2</sub>e，各類別排碳來源排碳量及一級數據比例如表 11。

表 10 本工程通車前後交通量之排碳量分析

項目	通車前		通車後		
	台 17	台 19	台 17	台 19	本工程
年度交通量 (10 <sup>6</sup> PCU/yr)	12.1288	10.8268	4.6357	5.9669	12.5011
道路長度 (km)	8.45		8.45		
最小設計速率 (km/hr)	50		50		80
小型車油耗值 (L/km)	0.101		0.101		0.093
汽油排碳係數 (kgCO <sub>2</sub> e/L)	2.361		2.361		
年度排放量 (tCO <sub>2</sub> e/yr)	24,442	21,818	9,342	12,024	23,309
	46,260		44,675		
年度減碳量 (tCO <sub>2</sub> e/yr)	1,585				

備註：

- (1) 最小設計速率資料來源：[16]
- (2) 小型車油耗率資料來源：[17]
- (3) 汽油排碳係數資料來源：[18]

表 11 本工程生命週期類別排碳量與一級數據比例

類別	排碳比例	一級數據比例
工程材料	86%	51%
運輸	3%	2%
施工機具	2%	2%
管理單位	1%	1%
廢棄物及人員逸散	<1%	-
營運管理階段	8%	-
總計 (tonCO <sub>2</sub> e)	351,365	56%

其中，工程材料排碳比例高達 86%，主要排碳來源為混凝土及鋼筋，執行大宗材料（鋼筋、水泥、混凝土等）供應商盤查作業大幅提升材料之一級數據比例至約 51%，為本





表 12 本工程生命週期類別排碳量與一級數據比例

工項	規格	單位排碳量	單位
基樁	Φ 150cm- 陸上段	0.91~1.02	tonCO <sub>2</sub> e/m
	Φ 150cm- 跨河段	0.96	tonCO <sub>2</sub> e/m
	Φ 100cm	0.55	tonCO <sub>2</sub> e/m
基礎	陸上段 - 主線	0.45~0.56	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
	陸上段 - 匝道 / 橋台	0.43~0.47	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
	跨河段	0.58~0.62	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
橋墩	陸上段	0.60~0.72	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
	跨河段	0.58~0.67	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
	V 型	0.75	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
上構	場鑄逐跨 - 陸上 / 匝道段	0.53~0.67	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
	場鑄逐跨 - 漸變段	0.66~0.74	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
	場鑄懸臂 - 陸上段	0.69、0.81	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
	場鑄懸吊 - 跨河段	1.32	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
整體橋梁工程	場鑄逐跨 - 含既有橋墩	1.16	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
	場鑄逐跨 - 陸上段	1.24~1.63	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
	場鑄逐跨 - 漸變段	1.41~1.85	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
	場鑄逐跨 - 匝道段	1.69~2.05	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
	場鑄懸臂	1.63、1.78	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
	場鑄懸吊 - 跨河段	2.95	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
擋土牆	重力式	0.34	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>
	懸臂式	0.40~0.42	tonCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>

工程主要的一級數據來源；運輸排碳占比約為 3%，主要以混凝土運輸占比最高，亦透過混凝土供應商盤查取得運輸油耗資料，提升運輸類別一級數據比例，約為 2%；總計本工程一級數據比例為 56%。

## (二) 本工程單位排碳量

本工程盤查過程中，確認各工項之材料及機具等，完成各工項單位排碳量計算，彙

整如表 12。相關單位排放參數於類似工程規劃設計階段時，具有參考價值。

## (三) 本工程節能減碳措施效益

應用於本工程之減碳措施，包含水泥替代材料、加勁式擋土牆、多孔隙瀝青混凝土鋪面及營運期間交通量等項目。

其中減碳效益以飛灰及爐石粉替代水泥材料最為顯著，主要係因混凝土於本工程排碳量占比高，減碳量總計約總計為 53,359 tonCO<sub>2</sub>e，減碳比例約 28%。

加勁式擋土牆相對傳統 RC 懸臂式擋土牆，具有實質的減碳效果，減碳比例約為 88%；本工程於 WH77-C 標鋪面材料選用多孔隙瀝青混凝土 (PAC)，由於 PAC 服務年限高於一般密級配瀝青混凝土，可減少鋪面營運期間之重鋪排碳量，PAC 減碳比例約為密級配瀝青混凝土鋪面 53% ~ 55%。

本工程通車後將改善鄰近台 17 及台 19 線之交通量，進而影響降低車輛之排碳量。根據評估結果，由於本工程設計車速較高，且台 17 及台 19 線之車流量轉移至本工程路段，使得本工程營運階段每年將可減少 1,585 tonCO<sub>2</sub>e 之車輛排碳量。

## (四) 建議與未來展望

本工程經由多年碳足跡盤查作業，已逐漸累積工程碳盤查執行經驗，碳盤查作業與制度已相當成熟，並有相關成果產出，可提供未來相關工程於碳足跡盤查及規劃設計階段之排放量計算參考，藉由排放量估算結果，進一步擬定合適的工程減碳措施。



碳足跡盤查為工程碳管理之基礎，必須獲取正確的排碳量結果，以進行排碳量控制，進而達到減碳目標。目前國內工程碳盤查執行制度與經驗相當完整，建議後續重大指標工程可持續執行工程碳足跡盤查作業，累積不同工程型式之本土化參數，完備我國工程碳足排放資料庫。

此外，建議參考歐盟綠色採購文件「公路設計、建造及維護」，於工程招標文件內納入工程減碳相關措施，例如契約內明訂優先採用揭露產品碳足跡之供應商，期望藉此拓展供應商供應鏈的共同努力，達到節能減碳實踐。

#### 參考文獻

1. UK Highways Agency, “Carbon Management Framework for Major Infrastructure Projects e21C Project Report”, 2009.
2. BRE Global Ltd, “Product Category Rules for Type III environmental product declaration of construction products to EN 15804 : 2012”, 2013.
3. International EPD® System, “PCR: Highways, streets and roads (except elevated highways)”, 2018. (2.0 版)
4. International EPD® System, “PCR: Bridges, elevated highways and tunnels”, 2018. (2.0 版)
5. The British Standards Institution, “PAS 2080: 2016 - Carbon Management in Infrastructure”, 2016.
6. European Commission JRC, “Revision of Green Public Procurement Criteria for Road Design, Construction and Maintenance, Procurement Practice Guidance Document”, 2016.
7. 行政院環保署，「基礎建設 - 道路 (Infrastructure-Road) 碳足跡產品類別規則」，2017。
8. 行政院環保署，「基礎建設 - 橋梁 (Infrastructure-Bridge) 碳足跡產品類別規則」，2017。
9. ISO, “ISO/TS 14067:2013 specifies principles, requirements and guidelines for the quantification and communication of the carbon footprint of a product (CFP),” 2013. (產品碳足跡量化與溝通標準原則、要求與指引)
10. 交通部中央氣象局，日出日沒統計資料。
11. 行政院環保署，「路燈 (Street Luminaire) 碳足跡產品類別規則」，2016。
12. Carsten B. N., “Durability of porous asphalt - International experience,” 2006.
13. 交通部公路總局西部濱海公路北區臨時工程處，「碳足跡應用於快速公路地工合成材料之研究委託服務工作期末報告 (定稿本)」，2018。
14. 陳保展、羅國峯、林彥宇、許珮蒨、王寧沂，「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」，鋪面工程，第十六卷第二期，P.55 ~ 64，2018年6月。
15. 交通部公路總局，「西濱快速公路曾文溪橋段新建工程計畫委託可行性評估工作報告」，2009。
16. 交通部，「交通技術標準規範公路類工程 - 公路路線設計規範」，2015。
17. 交通部運輸研究所，「探討運輸部門政策對溫室氣體排放量之影響專案研究報告」，2011。
18. 行政院環保署，溫室氣體排放係數管理表 6.0.3 版，2017。