



淡江大橋 基樁工程排碳 特性分析

蔡富仔／中興工程顧問股份有限公司環境工程部 組長

陳奕伸*／中興工程顧問股份有限公司環境工程部 工程師

近年來節能減碳、氣候變遷及淨零碳排議題已成為國際共識，我國自 2012 年起推動公共工程碳管理工作，而其中「淡江大橋及其連絡道路新建工程（第 3 標）」之施工階段工程碳足跡盤查作業亦刻正執行中。淡江大橋工程係首屈一指之國際性指標工程，施作內容複雜且具高度之獨特性，有鑑於淡江大橋工程基樁已全數施作完成，且碳足跡盤查工作執行迄今，已完成階段性資料蒐集作業，故本文以淡江大橋基樁工程為例，針對橋梁樁式基礎之全套管基樁工程項目進行排碳量、排碳特性分析及減碳效益評估，進而產出基樁工程排碳參數。依據階段性分析成果，樁徑 1.5 m 基樁單位體積排碳量約為 $0.40 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ ，直徑 2.0 m 及直徑 2.5 m 之基樁平均單位體積排碳量則同樣皆為 $0.41 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 。

基樁工程排碳占比以材料為主要來源，其中又以水中混凝土約 56% 為最高，竹節鋼筋約 30% 次之，機具排碳占比約 9%；基樁施作之機具能耗會受工程地質條件差異之影響，並以岩體地質之機具能耗明顯高於粉砂土地質，淡江大橋工程基樁施作單位體積能耗率平均約 11.46 L/m^3 ；另外，承載力需求亦影響結構與量體之設計，針對基樁單位容許承載力與排碳量進行皮爾森積差相關性分析，相關係數（R 值）結果為 0.84，顯示呈現高度正相關。

淡江大橋工程基樁以水中混凝土使用之 IP 水泥具最高之減碳效益，其採用飛灰與爐石粉取代部份 I 型水泥之減碳量約 $34,260.37 \text{ tCO}_2\text{e}$ ，減碳率約為 65.28%；基樁圍束區採螺旋箍筋工法相較於閉合彎鉤工法之整體減碳效益約 $485.10 \text{ tCO}_2\text{e}$ ，減碳率約 20.45%；另外評估以工區場電替代燃油發電機，作為基樁鋼筋加工之電力來源，其減碳潛勢約 $12,206.31 \text{ tCO}_2\text{e}$ ，減碳率約為 31.78%。

關鍵詞：淡江大橋、碳足跡盤查、基樁工程、全套管基樁、節能減碳

前言

因應氣候變遷及淨零排放趨勢，全球皆面對迫切之減碳需求及淨零目標，各國無不積極投入碳管理及減碳領域，截至 2025 年 6 月 30 日已有約 139 個國家、285 個城市及 1,199 家企業宣示 2050 年前達「淨零碳排」目標^[1]。國際上針對工程碳管理面向之實務，包含如挪威奧斯陸推動之「零排放工地」案例，以及英國公路公司（National Highways）「淨零公路計畫」，除了規劃階段性目標以持續追蹤執行進度與成果，英

國公路公司亦針對高碳排之預拌混凝土、鋼材及瀝青混凝土提出淨零路徑圖。

我國《氣候變遷因應法》（以下簡稱氣候法）於 112 年 2 月正式公布施行，而行政院公共工程委員會（以下簡稱工程會）為落實公共工程節能減碳，除了自民國 102 年起推動公共工程碳排放量估算試辦案例，亦持續規劃公共工程整體性減碳策略，要求各主管部會訂定不同類型公共工程減碳作業指引，並辦理碳管理相關工作；為此，工程會碳排資料庫已於 113 年 5 月公告上線試行，提供各部會進行碳揭露之參考。此外，工程會於 113 年 7 月公告修正後之公共工程金質獎頒發作業要點，評審標準增列具體減碳成效與具體綠化成效等項目。

* 通訊作者，yishen@mail.sinotech-eng.com

因應國家減碳政策推動及公路局工程碳管理之發展，北區公路新建工程分局於「淡江大橋及其連絡道路新建工程（第3標）」辦理工程碳管理與碳足跡盤查工作，希冀藉由工程盤查作業之執行蒐集及累積本土化工程碳排放資訊，以瞭解我國西部北區公路工程生命週期碳排放情形與工程排碳特性，進而有效落實減碳策略、達成減碳目標。

工程簡介及盤查範疇

淡江大橋及其連絡道路新建工程（第3標）（以下簡稱淡江大橋工程），總長度2.035公里，跨越淡水河出海口，主要串聯台61線（西濱快速道路）及台64線（八里新店線快速道路），自108年2月23日開工，截至114年6月之工程進度約84%；主要工程內容、規模、型式及工法如表1所示，其中與本文分析標的相關之工項為橋梁工程下部結構樁式基礎，而工程之基樁型式則皆為場鑄混凝土全套管基樁^[2]。

表1 淡江大橋（第3標）工程內容簡介

位置	主要工程內容	工程型式	長度(m)	工法
八里端 引橋段	高架橋梁 匝道路堤	上構：PC箱型梁 下構：樁式基礎	910.0	場鑄逐跨 工法
主橋段	斜張橋	上構：鋼箱型梁 下構：樁式基礎	920.5	吊裝工法 / 場撐工法
淡水端 引橋及匝道	高架橋梁 匝道路堤	上構：PC箱型梁 下構：樁式基礎	335.0	場鑄逐跨 / 場鑄工法

註：基樁型式皆為全套管基樁。

淡江大橋工程施工期間碳足跡盤查範疇如圖1所示，涵蓋工區及非工區，工區包含工程材料使用、運輸、能資源使用、碳匯變化及廢棄物處理，非工區則為施工管理單位之辦公室。



圖1 工程施工期間碳足跡盤查範疇

基樁工程排碳量計算方法

系統邊界

淡江大橋工程基樁設計規格彙整資訊如表2所示，依工區可分為八里端、河中段及淡水端，八里端及淡水端工區依位置可進一步分為引橋段、公車道、匝道、自行車道及擋土牆（機車道僅淡水端）。基樁規格包含直徑1.5 m、2.0 m及2.5 m，並依各位置地理條件（如岩盤深度）設計不同長度之基樁；而河中段因包含主橋塔施作，其所需之承載力較高，故基樁設計長度及體積亦較大。

表2 各工區基樁設計規格彙整表

工區	位置	基樁規格			總體積 (m ³)
		直徑(m)	樁長(m)	支數	
八里端	引橋段	1.5、2.0	25~69	257	46,409.77
	公車道	1.5、2.0	23~72	20	3297.89
	匝道	1.5、2.0	16~54	34	3503.66
	自行車	1.5	12~53	72	4325.97
	擋土牆	1.5	20~30	8	311.02
河中段	主橋段	2.0、2.5	46~71	188	42,884.70
	引橋段	1.5、2.0	20~40	56	5,549.62
	公車道	1.5、2.0	15~60	32	3,951.34
	匝道	1.5、2.0	16~35	52	4,255.29
	自行車	1.5、2.0	12~19	10	444.14
淡水端	機車道	1.5、2.0	10~55	35	2,824.88
	擋土牆	1.5	10	32	565.49

註：基樁型式皆為全套管基樁。

參考歐盟營建產品之產品類別規則（Product Category Rules, PCR）EN15804工程生命週期階段，主要包含產品階段（A1-A3）、建造階段（A4-A5）、使用階段（B1-B5與結構物相關及B6-B7與操作相關）、壽命終了（C1-C4）及系統邊界外利益與負荷（D）等階段。本文依此設定基樁工程系統邊界如圖2所示，包含產品及建造兩階段，即工程材料（A1-A3）、運輸（A4）及施工能耗（A5）^[3-6]。

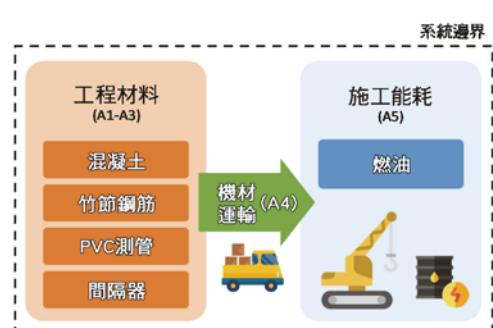


圖2 基樁工程系統邊界

彙整實際盤查內容，工程材料主要使用項目包含混凝土、竹節鋼筋、PVC 測管、間隔器等，另基樁施工過程使用之鋼套管及特密管由於可重複利用，屬於資本財故不納入系統邊界；運輸包含混凝土與竹節鋼筋等大宗材料之運輸以及施工機具之運輸；施工能耗則為施作過程機具使用之燃油。

活動數據及排放係數

排碳量計算方法為排放係數法，即「排碳量 = 活動數據 \times 排放係數」，活動數據蒐集項目包含各類工程材料數量、運輸活動量及施工機具能資源使用量等，基樁排碳量計算使用之排放係數如表 3。

混凝土係數來源為淡江大橋工程混凝土供應商之盤查結果，竹節鋼筋係數則參考鋼筋供應商之產品碳足跡證聲明書；PVC 測管及間隔器則是參考商用軟體 Gabi 之 Gabi-PE 係數資料庫選用適當的係數。運輸之排放係數部分，竹節鋼筋與施工機具運輸係採用國內其他工程全拖車調查結果，預拌混凝土車運輸係數則為淡江大橋工程供應商盤查結果。施工機具、運具與設備所使用之燃油採用環境部產品碳足跡資訊網^[7]所公佈之最新係數。

功能單位

淡江大橋工程基樁依工區位置可分為八里端、河中段及淡水端，基樁直徑包含 1.5 m、2.0 m 及 2.5 m 等 3 種尺寸，為進行不同直徑尺寸基樁的排碳量分析及建立統一的比較基礎，故以 1 m³ 作為基樁單位體積排碳量的功能單位。

基樁工程排碳特性分析

主要排碳源（項目）鑑別

淡江大橋工程基樁之主要排碳源鑑別與各排碳源活動數據蒐集內容，說明如下：

1. 混凝土：淡江大橋工程使用 350 kgf/cm² 水中混凝土，並以混凝土實際投入量作為活動量計算之依據。
2. 竹節鋼筋：淡江大橋工程使用 SD420W 竹節鋼筋，並以施工圖數量作為活動量計算之依據。
3. PVC 測管：淡江大橋工程使用 PVC 膠管（管徑 2 英吋）作為基樁測管，並以施工圖數量作為活動量計算之依據。
4. 間隔器：淡江大橋工程鋼筋間隔器為鋼材質，以基樁設計長度作為活動量計算之依據。
5. 運輸：包含混凝土與鋼筋等主要大宗材料以及施工機具之運輸，運輸距離採 Google Map 預估值，運輸量則採材料與機具能耗實際投入數量作為活動量計算之依據。
6. 施工能耗：淡江大橋工程基樁主要使用之機具種類包含起重機、搖管機、挖土機、空壓機、發電機及拖板車；統計基樁施作期間之燃油使用總數量，再以基樁混凝土澆置數量 (m³) 作為基樁單位體積施工能耗之分配依據。

另考量氧氣、乙炔、二氧化碳及焊材等其他工程材料，對於整體基樁工程而言，其投入量及排碳量皆影響甚小，故於整體基樁工程排碳量占比結果中合併以「其他材料」呈現。

排碳量分析與排碳參數

本文依據基樁工程各項排碳源計算排碳量，施作總排碳量約 52,915.91 tCO₂e，各項排碳源占比如圖 3，最主要排碳來源為水中混凝土，占比達 56.28%，其次為竹節鋼筋約 30.35%，機具則約 9.26%，而機材運輸、PVC 測管、間隔器及其他材料占比分別約為 2.82%、0.85%、0.28% 及 0.16%。

各工區與位置之基樁數量、總排碳量及單位體積排碳量資訊如表 4 及圖 4，各工區之單位體積排碳量分

表 3 基樁工程排碳量計算使用之排放係數

項目	單位 (unit)	排放係數 (kgCO ₂ e/unit)	係數來源
350 kgf/cm ² 水中混凝土 (A 廠)	m ³	238.6954	供應商盤查結果
350 kgf/cm ² 水中混凝土 (B 廠)	m ³	222.0500	供應商盤查結果
竹節鋼筋	kg	0.8900	供應商產品碳足跡查證聲明書
PVC 測管	m	2.8213	Gabi 6-PE
間隔器	個	0.9730	Gabi 6-PE
全拖車	tkm	0.0996	國內其他工程盤查結果
預拌混凝土車 (A 廠)	m ³ km	0.4885	供應商盤查結果
預拌混凝土車 (B 廠)	m ³ km	0.4825	供應商盤查結果
柴油 (鐵路運輸與非道路運輸移動源)	L	3.5600	環境部產品碳足跡資訊網
柴油 (公路運輸移動源)	L	3.3200	環境部產品碳足跡資訊網
柴油 (固定源)	L	3.2900	環境部產品碳足跡資訊網

註：1. 因表格欄位寬度限制，僅列出 4 位小數。2. 淡江大橋工程基樁之水中混凝土使用 IP 水泥。

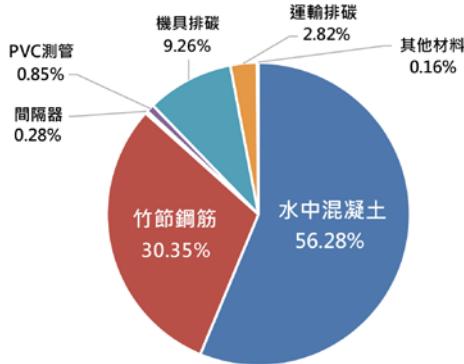


圖 3 基樁工程排碳量占比

別為八里端 $0.39 \sim 0.42 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 、河中段 $0.42 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 及淡水端 $0.37 \sim 0.48 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ ，結果顯示淡水端擋土牆之單位體積排碳量為最高；整體排碳量以八里端引橋段為最高，河中段次之，主要係因河中段及八里端基樁受地理條件影響，所需長度較長且混凝土量體較大，導致整體排碳量亦隨之上升。

表 4 各工區基樁排碳量及單位排碳

工區	位置	施作數量 (支)	總排碳量 (tCO_2e)	單位體積 排碳量 * ($\text{tCO}_2\text{e/m}^3$)
八里端	引橋段	257	20,739.86	0.41
	公車道	20	1,339.34	0.40
	匝道	34	1,766.73	0.42
	自行車	72	1,875.63	0.39
	擋土牆	8	145.64	0.42
河中段	主橋段	188	19,000.01	0.42
	引橋段	56	2,473.92	0.40
淡水端	公車道	32	1,782.91	0.41
	匝道	52	1,944.40	0.41
	自行車	10	199.19	0.37
	機車道	35	1,328.13	0.42
	擋土牆	32	320.14	0.48

註：體積為實際混凝土澆置量。

本文另彙整各規格基樁直徑之施作數量、總排碳量及單位體積排碳量如表 5，平均之單位體積排碳量分別為直徑 1.5 m 約 $0.40 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 、直徑 2.0 m 及直徑 2.5 m 皆約 $0.41 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ ，整體而言三種基樁直徑間之單位體積排碳量差距不明顯。

淡江大橋工程涵蓋八里端陸域側、河中段深槽區以及淡水端陸域側，其中淡水側之岩盤起始位置約介於河床下 $16 \text{ m} \sim 40 \text{ m}$ ，深度較淺；而八里側則相對岩盤深度較深，約於河床下 65 m 處，最深處約 74.5 m 始達岩盤。考量地質條件之差異可能影響基樁施作之機具能耗，故本文以淡江大橋工程基樁施作機具總柴油用量及量體進行換算，彙整單位體積之施工能耗率及單位施工能耗排碳量如表 6，單位體積能耗率平均約 11.46 L/m^3 ，若依據不同工區分別計算，以河中段 14.68 L/m^3 為最高，八里端次之為 9.90 L/m^3 ，淡水端則約為 8.92 L/m^3 。

表 5 各規格基樁排碳量

基樁規格 (直徑)	施作數量 (支)	總排碳量 (tCO_2e)	單位體積排碳量 ($\text{tCO}_2\text{e/m}^3$)
1.5 m	172	3,741.39	0.40
2.0 m	566	41,164.34	0.41
2.5 m	58	8,010.18	0.41

表 6 基樁工程單位體積之施工能耗排碳量

工區	燃油用量 (L)	基樁體積 (m^3)	單位體積 能耗 (L/m^3)	單位體積之施 工能耗排碳量 ($\text{kgCO}_2\text{e/m}^3$)
八里端	627,936	63,436	9.90	32.57
河中段	671,590	45,744	14.68	48.30
淡水端	171,969	19,271	8.92	29.36
全工區	1,471,495	128,450	11.46	37.69

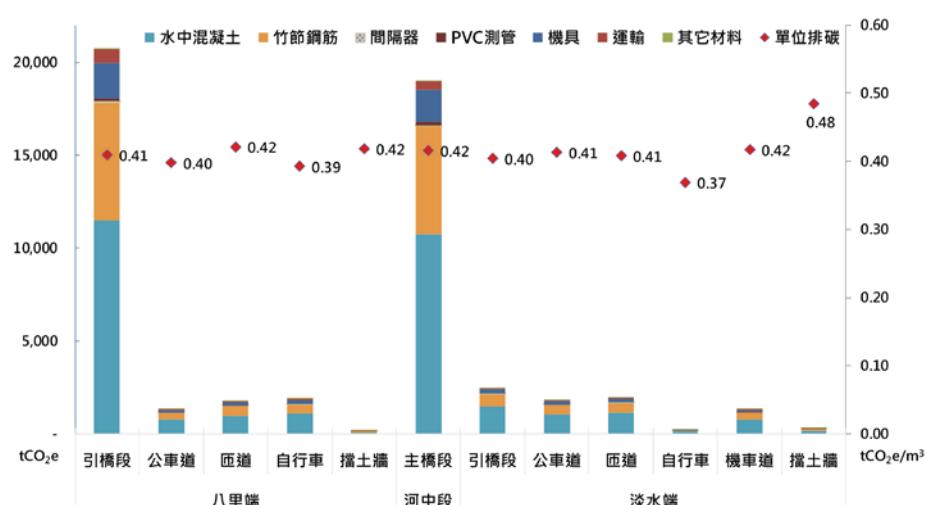


圖 4 基樁工程於各工區位置之排碳占比及單位體積排碳量

淡江大橋工程地質組成大致可為粉砂質細砂層及粉砂質黏土層、礫石層、砂岩及泥岩，惟淡水端及八里端兩側之地層分佈深度具明顯之差異。

本文彙整淡江大橋工程及國內各地區工程之地質組成資訊與基樁施作單位體積能耗如表 7，其中以地質條件包含岩體之工程案例（蘇花改^[8]、國 4^[9]與淡江工程^[2]）基樁單位能耗較高，約介於 9.0 ~ 17.2 L/m³；主要地質組成為粉土、細砂與黏土之工程（國 5^[10]與西濱南工程^[11]），單位體積能耗則相對較低，約介於 4.9 ~ 6.0 L/m³。

基樁工程設計考量因子包含橋梁與基礎型式、地質條件、載重條件及樁徑尺寸等影響，且因各基樁規格皆不相同，無法直接進行比較，故本文以淡江大橋工程基樁之單位承載力進行排碳量分析，如圖 5 所示，以河中段主橋塔基樁之單位容許承載力排碳量最高。針對基樁工程容許承載力與排碳量進行相關性分

析（Correlation Analysis），其皮爾森積差相關係數（R 值）為 0.84，顯示基樁工程容許承載力與排碳量呈高度正相關，另決定係數（ r^2 值）為 0.70，表示容許承載力可解釋約 70% 之排碳量變異。

國內工程案例基樁排碳量分析

本文另彙整國內其他道路工程案例之基樁排碳量分析結果以供參照，案例包含台 9 線蘇花公路改善工程（以下簡稱蘇花改）^[8]、西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程（以下簡稱西濱南）^[11]、國道 4 號臺中環線豐原潭子段工程（以下簡稱國 4）^[9] 及國道 5 號頭城交流道增設上下匝道改善工程（以下簡稱國 5）^[10]。前述工程案例之盤查標別、基樁規模與排碳量資訊如表 8，基樁直徑尺寸大多為 1.5 m 及 2.0 m，基樁長度介於 7 m ~ 55 m。

表 7 基樁施作單位能耗與地質條件

工程	標別	區域位置	地質條件	單位體積能耗 (L/m ³)
淡江大橋	第 3 標	西部北區	<u>淡水側</u> +0 ~ -35 m：粉砂質細砂層及粉砂質黏土層 -5 m ~ -35 m：礫石層 -16 m ~ -40 m 及 >-40 m：砂岩、泥岩 <u>八里側</u> +0 ~ -60 m：粉砂質細砂層及粉砂質黏土層 -50 m ~ -65 m：礫石層 -65 m ~ -74 m 及 >-74 m：砂岩、泥岩	11.5
蘇花改	A1	東部	板岩、粉砂質板岩與硬頁岩	17.2
	A3		礫石、砂、泥、板岩與硬頁岩	13.2
	C1A		崩積塊石與片麻岩	9.8
國 5	E14	東北部	細砂、沉泥質細砂與黏土	5.9
西濱南	A	西部南區	粉土、細砂與粘土	4.9
	B			6.0
	C			5.2
國 4	C713	西部中區	砂岩、泥岩與砂頁岩互層	14.2
	C714		礫石、砂岩、泥岩與頁岩	9.0

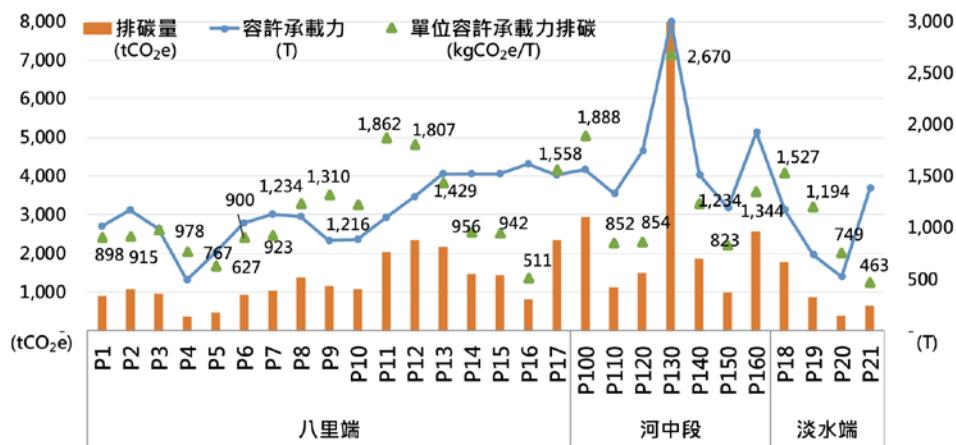


圖 5 基樁工程單位容許承載力排碳分析

表 8 各工程案例之基樁工程規模與單位排碳量

工程 簡稱	標別	基樁規格			總排碳量 (tCO ₂ e)	單位體積排碳量 (tCO ₂ e/m ³)
		直徑 (m)	樁長 (m)	支數		
蘇花改	A1	2.0	20、25、30	379	13,296.00	0.47
	A3			179	6,534.00	0.44
西濱南	C1A	1.5	22~35	54	1,409.30	0.53
	A	1.0	20~27	30	422.00	0.70
西濱南	A	1.5	41~53	468	20,076.00	0.54
	B	1.5	24~55	915	39,221.00	0.53
國 4	C		21~47	706	28,412.00	0.53
	C713	2.0	7~12	85	1,511.05	0.53
國 4	C714		20~36	336	13,402.96	0.48
國 5	E14	1.5	45	24	1,079.00	0.56
淡江大橋	第 3 標	1.5	10~55	172	3,741.39	0.40
		2.0	12~72	566	41,164.34	0.41
		2.5	65	58	8,010.18	0.41

註：1. 基樁型式皆為全套管基樁；不包含排樁；國 5 工程不含擋土牆基樁。2. 表列基樁長度規格不包含樁頭長度。

各工程案例之基樁工程單位排碳量及排碳源分析結果，說明如後：

單位排碳量

各工程案例之基樁單位體積排碳量分別為蘇花改工程 0.44 ~ 0.53 tCO₂e/m³，西濱南工程 0.53 ~ 0.70 tCO₂e/m³，國 4 工程 0.48 ~ 0.53 tCO₂e/m³，國 5 工程 0.56 tCO₂e/m³，整體如圖 6 所示，大致呈現單位體積排碳量隨基樁直徑尺寸增加而下降之趨勢。

排碳源分析

各工程案例之基樁排碳源占比分析結果如表 9，以混凝土排碳量占比最高約 58% ~ 69%，其次為鋼筋 22% ~ 36% 及機具 3% ~ 10%，間隔器、PVC 測管、其他材料及運輸占比則皆不及 5%。其中，混凝土及鋼筋

為最主要排碳來源（占比合計約 85% ~ 94%），機具之排碳占比僅次於前兩者，並以蘇花改工程直徑 2.0 m 基樁之機具排碳占比為最高（均超過 10%）。

基樁工程減碳措施與效益

依據淡江大橋工程基樁排碳特性分析結果，混凝土及竹節鋼筋為最主要排碳來源，故針對大宗材料的減碳措施一般亦被認為較具效益。以下分別計算水泥替代材料及基樁箍筋綁紮工法之減碳效益，另亦評估以工區場電替代燃油發電機之潛在減碳效益。

IP 水泥（含替代材料之水泥）

淡江大橋工程基樁之水中混凝土，其使用之 IP 水泥配比包含 I 型水泥及飛灰與爐石粉等替代材料。因

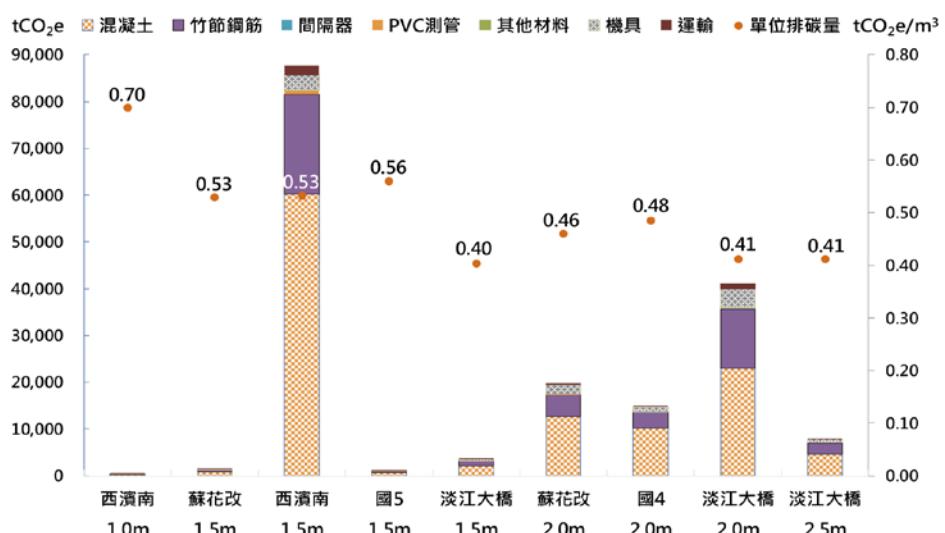


圖 6 各工程案例之基樁直徑尺寸與排碳量分析

表 9 各工程案例之基樁直徑尺寸與排碳占比

基樁直徑 (m)	工程 簡稱	排碳占比 (%)							單位體積排碳量 (tCO ₂ e/m ³)
		混凝土	竹節鋼筋	間隔器	PVC 測管	其他材料	施工能耗	運輸	
1.0	西濱南	57.82%	36.02%	—	1.66%	—	2.84%	1.66%	0.70
1.5	蘇花改	63.79%	27.74%	0.02%	1.63%	—	6.39%	0.43%	0.53
	西濱南	68.55%	24.40%	—	1.09%	—	3.63%	2.32%	0.53
	國 5	68.12%	22.43%	—	1.48%	—	3.99%	3.99%	0.56
	淡江大橋	56.64%	28.64%	0.48%	1.37%	0.16%	9.44%	3.27%	0.40
2.0	蘇花改	64.27%	23.17%	—	0.80%	—	10.30%	1.46%	0.46
	國 4	68.12%	23.34%	0.01%	0.50%	—	6.99%	1.05%	0.48
	淡江大橋	55.92%	30.65%	0.28%	0.76%	0.16%	9.25%	2.98%	0.41
2.5	淡江大橋	57.93%	29.61%	0.19%	1.06%	0.16%	9.25%	1.81%	0.41

飛灰及爐石粉之碳足跡較一般水泥低（飛灰為 0.004 kgCO₂e/kg，爐石粉為 0.104 kgCO₂e/kg，水泥為 0.906 kgCO₂e/kg），故由其取代 IP 水泥中部份 I 型水泥可具備減碳效益。淡江大橋基樁 IP 水泥之飛灰與爐石粉替代率、減碳效益及減碳率如表 10，總減碳效益約 34,260.37 tCO₂e，減碳率約為 65.28%。

表 10 IP 水泥之減碳效益

工區	飛灰及爐石粉 替代率 (%)	減碳效益 (tCO ₂ e)	減碳率 (%)
八里端	70.00%	16,919.61	65.28%
河中段		12,200.77	
淡水端		5,139.99	

註：1. 飛灰及爐石粉替代率 = (飛灰 + 爐石粉) 重量 / (I 型水泥 + 飛灰 + 爐石粉) 重量。

2. 減碳率 = 1 - 有替代材料之排碳量 / 無替代材料之排碳量。

基樁圍束區箍筋綁紮工法

淡江大橋工程 796 支基樁之圍束區箍筋係採用螺旋箍筋工法進行綁紮，相較一般的閉合彎鈎工法可減少鋼筋使用量，惟螺旋箍筋每 15 m 仍需進行 80 cm 之搭接焊接作業，故計算減碳效益時需將焊接材料排碳量扣除。

本文將兩工法之材料設計量，配合其相應之材料碳足跡係數進行排碳量計算，結果如表 11。整體而言基樁工程圍束區採螺旋箍筋工法相較於閉合彎鈎工法具有減碳效益，於淡江大橋工程之整體減碳效益約 485.10 tCO₂e，減碳率約為 20.45%。

工區場電替代柴油發電機減碳潛勢

淡江大橋工程基樁之鋼筋加工係以柴油發電機作為電力來源，若電力使用工區場電將可產生減碳效益；本文假設淡江大橋工程基樁皆以工區場電力作

表 11 基樁圍束區箍筋綁紮工法之減碳效益

項目	螺旋箍筋工法		閉合彎鈎工法
	鋼筋	焊材	
基樁施作數量 (支)	796		
材料使用重量 (kg)	223,732.11	406.82	286,928.54
排碳量 (tCO ₂ e)	1,856.85	29.66	2,371.62
減碳效益 (tCO ₂ e)	485.11		
減碳率 (%)	20.45%		

註：減碳率計算之分母為閉合彎鈎工法之排碳量。

為鋼筋加工之電力來源，並評估其潛在減碳效益。

工區使用發電機之活動量計量方式為燃油用量，本文以發電機規格之單位功率作為計算依據，配合柴油碳足跡係數計算發電機之單位排碳量。參考東元柴油引擎發電機之單位油耗 0.27 L/kWh (30 ~ 250 kW) 及環境部公告 2021 年之柴油 (於固定源使用) 碳足跡係數 3.29 kgCO₂e/L，得出發電機單位排碳量為 0.8883 kgCO₂e/kWh；另工區場電係數則採用環境部公告 2021 年之電力碳足跡 0.606 kgCO₂e/kWh。以工區場電替代柴油發電機於淡江大橋工程基樁施作之潛在減碳效益總計約 12,206.31 tCO₂e，減碳率約為 31.78%，評估結果如表 12。

表 12 工區場電替代柴油發電機之潛在減碳效益

項目	工區場電	柴油發電機 (30 ~ 250kW)
發電機理論發電量 (kWh)	43,238.79	
單位排碳量 (tCO ₂ e/kWh)	0.6060	0.8883
排碳量 (tCO ₂ e)	26,202.71	38,409.02
潛在減碳效益 (tCO ₂ e)	12,206.31	
減碳率 (%)	31.78%	

註：減碳率計算之分母為柴油發電機之排碳量。

結論

本文彙整淡江大橋（第3標）之基樁工程碳足跡盤查資料，並進行排碳特性與減碳效益分析，相關結論條列式說明如後：

1. 淡江大橋工程之基樁型式皆為場鑄混凝土全套管基樁工程，數量共計 796 支，以位置分為八里端、河中段及淡水端工區，基樁直徑包含 1.5 m、2.0 m、2.5 m 三種不同規格。
2. 樁工程以材料為最主要排碳來源，排碳占比以水中混凝土 56.28% 為最高，其次為竹節鋼筋約 30.35%，機具則約 9.26%，而運輸、PVC 測管、間隔器及其他材料占比分別約為 2.82%、0.85%、0.28% 及 0.16%。
3. 基樁排碳量及排碳參數
 - (1) 整體排碳量以八里端引橋段及河中段工區為最高及次高。各工區之平均單位體積排碳量分別為八里端 $0.39 \sim 0.42 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 、河中段 $0.42 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 及淡水端 $0.37 \sim 0.48 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 。
 - (2) 三種樁徑規格之單位體積排碳量以直徑 2.0 m 及 2.5 m 基樁最高，約為 $0.41 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ ，直徑 1.5 m 基樁為 $0.40 \text{ tCO}_2\text{e/m}^3$ 。
 - (3) 基樁施作單位體積能耗率以河中段 14.68 L/m^3 為最高，八里端次之約為 9.90 L/m^3 ，淡水端則約為 8.92 L/m^3 ，全工區整體平均約 11.46 L/m^3 。
4. 河中段主橋塔基樁具最高的單位容許承載力排碳量，基樁工程容許承載力與排碳量呈高度正相關（皮爾森積差相關係數 R 值為 0.84），容許承載力可以解釋約 70% 排碳量（決定係數 r^2 值為 0.70）之變異。
5. 基樁工程減碳措施與效益
 - (1) 基樁之水中混凝土，其使用之 IP 水泥配比包含飛灰與爐石粉等水泥替代材料；材料替代之整體減碳效益約 $34,260.37 \text{ tCO}_2\text{e}$ ，減碳率約為 65.28%。
 - (2) 基樁圍束區箍筋係採用螺旋箍筋工法進行綁紮，雖需進行搭接焊接作業，但相較一般的閉

合鈎工法可減少鋼筋使用量。整體減碳效益約 $485.11 \text{ tCO}_2\text{e}$ ，減碳率約為 20.45%。

- (3) 基樁之鋼筋加工係以柴油發電機作為電力來源，假設以工區場電替代柴油發電機，潛在減碳效益約 $12,206.31 \text{ tCO}_2\text{e}$ ，減碳率約為 31.78%。
6. 淡江大橋工程施作內容複雜且具高度之獨特性，冀由碳足跡盤查作業之落實，累積寶貴之排碳成果，以供未來減碳目標規劃及減碳策略研訂之參考。

參考文獻

1. Net Zero Tracker，取自：<https://zerotracker.net/>
2. 交通部公路局北區公路新建工程分局（2024），淡江大橋及其連絡道路新建工程（第3標）監造（含碳足跡盤查輔導及查證）委託服務工作 – 113 年度年末進度報告書。
3. 環境部（2019），基礎建設 – 橋梁（Infrastructure-Bridge）碳足跡產品類別規則，取自：<https://cfp-calculate.tw/cfpc/Carbon/WebPage/FLPCRDoneList.aspx>
4. BRE Global Ltd (2018) Product Category Rules for Type III Environmental Product Declaration of Construction Products to EN 15804. Available: https://www.greenbooklive.com/filelibrary/EN_15804/PN514-BRE-EN-15804-PCR.pdf
5. European Commission (2016). Commission Staff Working Document, EU Green Public Procurement Criteria for Road Design, Construction and Maintenance. Available: https://ec.europa.eu/environment/gpp/eu_gpp_criteria_en.htm
6. Peab Grundläggning AB (2019). Environmental Product Declaration – EPD PRECAST CONCRETE FOUNDATION PILES Available: https://www.environdec.com/library/_?Epd=16880
7. 環境部產品碳足跡資訊網，取自：<https://cfp-calculate.tw/cfpc/WebPage/WebSites/CoefficientDB.aspx>
8. 交通部公路局蘇花公路改善工程處（2021），台 9 線蘇花公路山區路段改善計畫施工期間工程碳管理委託服務工作 – 成果報告書。
9. 交通部高速公路局第二新建工程處（2021），國道 4 號臺中環線豐原潭子段工程委託監造及專業技術顧問服務 – 工程碳盤查 109 年度進度報告。
10. 交通部高速公路局第一新建工程處（2019），國道 5 號頭城交流道增設上下匝道改善工程（第 E14 標）碳足跡盤查輔導與查證服務 – 服務成果報告。
11. 交通部公路局西部濱海公路南區臨時工程處（2018），西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程委託工程碳管理暨碳足跡盤查輔導及查證服務工作 – 正式成果報告書。