地工技術

蘇花改東澳東岳段新建工程(A3標)排碳特性分析及減碳成效

邵厚潔
交通部公路總局蘇花公路改善工程處

許珮蒨　鄭維祐
中興工程顧問股份有限公司

摘　要

因應全球溫室效應與氣候變遷問題的持續升溫，公路總局於2012年初研擬道路工程碳管理架構，開始推動道路工程碳管理工作，國際間關於基礎設施碳管理工作及標準亦持續發展。蘇花改計畫碳管理工作自2012年6月展開，於執行之初建立盤查方法學及工具，隨著土建工程即將陸續完工，於2016年邀集專家學者討論確認營運管理階段估算範圍及內容，以使工程生命週期之碳管理內涵更為完整。

隨著工程進展，蘇花改計畫持續累積符合碳足跡查證要求的工程碳盤查資料，並已逐步產出可供參考的本土化碳排放資訊。本文以2016年完工之東澳東岳段新建工程(A3標)為例，說明土建工程碳足跡盤查結果、工程排碳特性、生命週期排碳量及減碳量成效。未來伴隨更多工程與盤查資料的累積與分析，蘇花改計畫碳管理工作成果將成為道路工程生命週期碳管理的重要基礎。

關鍵字：工程碳盤查、生命週期、工程排碳特性、減碳成效、臺 9 線蘇花公路。

Carbon Emission Characteristics, Analysis and Carbon Reduction Results for the Suhua Highway Improvement Project - Section A3

How-Jei Shau
Suhua Improvement Engineering Office, Directorate General of Highways, MOTC.

Pei-Chien Hsu　Wei-Yu Cheng
Sinotech Engineering Consultants, Ltd.

Abstract

In response to global warming and climate change, the Directorate General of Highways initiated a carbon management framework for road construction projects in early 2012 and has started to promote carbon management in road construction projects. International carbon management and the related standards for infrastructure have also developed. Carbon management has been an element of the Suhua Highway Improvement Project since June 2012. The methods and tools for carbon inventory were established at the beginning of the project. Following the completion of construction works in 2016, experts and scholars have discussed the estimation scope and content of the operation and the management stage, in order to allow more comprehensive carbon management for the entire life cycle of the infrastructure.

As the construction proceeded, the Suhua Project continued to gather data on carbon inventory, in compliance with the carbon footprint verification requirements, and has produced Taiwan-specific and localized information of carbon emissions. The Dongao-Dongyue Section Construction Project (Section A3) is presented as an example in this study, to illustrate the carbon footprint of construction, the carbon emission characteristics, the carbon emissions of the life cycle and the carbon reduction results. With more inventory information and analysis to come, the results of carbon management for the Suhua Project can be served as important foundation for life cycle carbon management for road construction in the future.

Key Words：carbon inventory, life cycle, construction carbon emission characteristics, carbon reduction results, Suhua highway improvement project.

地工技術

一、前　言

因應全球溫室效應與氣候變遷問題的持續升溫，工程節能減碳及考慮生命週期排碳量之碳管理議題持續發展，公路總局於2012年初研擬道路工程碳管理架構，開始推動道路工程碳管理工作；我國工程會於2012年12月起洽請主管道路、水資源、防洪、下水道、水土保持及建築等六項工程之部會，推動碳排放估算試辦作業，啟動我國公共工程碳管理工作。

英國在2009年由鐵路、公路及工程產官學界專家學者共同發表重大工程碳管理架構(UK Highways Agency, 2009)，建議工程碳排放量推估及調查範圍，作為排碳量控制基準；更由綠色建築委員會(The Green Construction Board)委託英國標準協會制訂並於2016年5月發佈PAS 2080：2016基礎設施碳管理標準(Carbon Management in Infrastructure) (British Standards Institution, 2016a)，建議由資產擁有者/管理者、設計者、建造者及產品/原物料供應商之價值鏈成員，建立共同且一致的基礎設施排碳量及成本降低目標，並達成其成效。

蘇花改計畫施工期間碳管理工作(以下簡稱本計畫)自2012年6月展開，完全呼應全球節能減碳議題與管制策略。工程生命週期須考量施工建造階段及營運管理階段之影響，本計畫於執行之初即界定盤查範疇、建立盤查方法、規劃盤查組織及分工(邵等人，2012；中興工程顧問股份有限公司，2012)，確立施工階段之盤查內容；隨著工程進展，於2016年邀集專家學者，討論營運管理階段估算範圍及內容，作為蘇花改計畫營運管理階段排碳量估算之基準，以使工程生命週期之碳管理內涵更為完整。

隨著工期發展，本計畫持續累積符合碳足跡查證要求的工程碳盤查資料，並已逐步產出可供參考的本土化碳排放資訊。其中東澳東岳段新建工程(以下簡稱A3標)已於2016年4月竣工，並於同年11月經由第三方查證後確認土建工程排碳量；本文即以A3標為標的，說明施工建造階段土建工程盤查結果、工項排碳特性、生命週期排碳量及減碳成效(中興工程顧問股份有限公司，2017)。

二、A3標工程特性

A3標工程範圍如圖一，全長約2.1公里；其中橋梁段約1.5公里、隧道段約0.22公里、路堤路塹段約0.33公里；工程項目包括：東澳北溪河川橋跨越東澳北溪支流及主流，東岳隧道通過幸福水泥廠北側之蛇山，經東岳隧道南路堤，以幸福高架橋跨過幸福水泥廠鐵路，最後沿幸福路堤漸降與臺9線平面交叉，匯回臺9線主線。

工程型式配置如表一，包含橋梁、隧道及路堤路塹三種工程型式。東澳北溪河川橋採南北向分離設計，基礎型式視場地是否受限而採樁基礎或井式基礎，上構採場鑄懸臂工法施工；東岳隧道為雙孔各單車道隧道，採眼鏡型隧道設計，以機械開挖為主；幸福高架橋為南北向共構，基礎型式採展式基礎或井式基礎，上構採場鑄逐跨工法施工。

圖一　A3標工程範圍示意圖

表一　A3標工程型式配置

構築型式	設施名稱	起迄里程(m)			工程型式
橋梁	東澳北溪河川橋	7K+213	8K+565	(SB)	樁基礎或井式基礎，場鑄懸臂工法
		7K+240	8K+565	(NB)	
隧道	東岳隧道	8K+560	8K+775		雙孔各單車道(眼鏡型隧道)，機械開挖
路堤路塹	東岳隧道南路堤	8K+775	8K+783		-
橋梁	幸福高架橋	8K+783	8K+963		展式基礎或井式基礎，場鑄逐跨工法
路堤路塹	幸福路堤	8K+963	9K+284		-

三、土建工程碳盤查結果

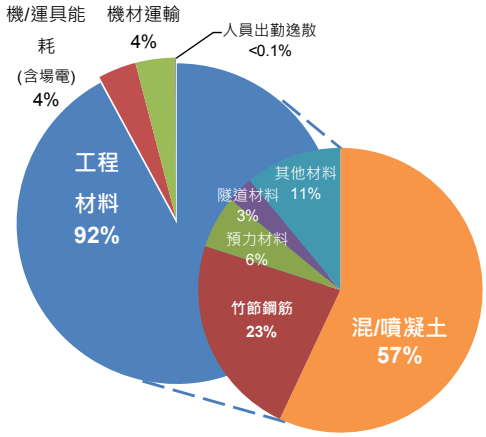
3.1 A3標土建工程排碳量

3.1.1 整體工程排碳量及分析

A3標土建工程排碳量依據相關標準(British Standards Institution, 2016b；ISO/TS 14067, 2013)進行盤查，土建工程全期之工區碳足跡約為71,472 tCO_2e，各類型排碳活動占比如圖二，碳足跡貢獻最大者為工程材料的使用，約占總工區碳足跡92%，機/運具使用排放約4%，運輸排放約4%，人員出勤逸散排放則未達0.1%；合計工程材料與機/運具使用排放量即占總碳足跡的96%。

3.1.2 工程項目占比分析

依據工項彙整機/運具使用能耗量及工程材料使用之排碳量占比結果如圖三。排碳量占比最高的為上構工程，約占40%，其次為包括井基、基樁、基礎層及墩柱結構的下構工程約占34%，隧道工程占17%，其他道路、排水及雜項工程占比較小，約2%~4%。A3標工程排碳量主要來自於橋梁工程，上構及下構工程即占整體工程排碳量74%。



圖二 A3標碳排放量占比分析

3.1.3 土建標盤查結果與設計估算差異

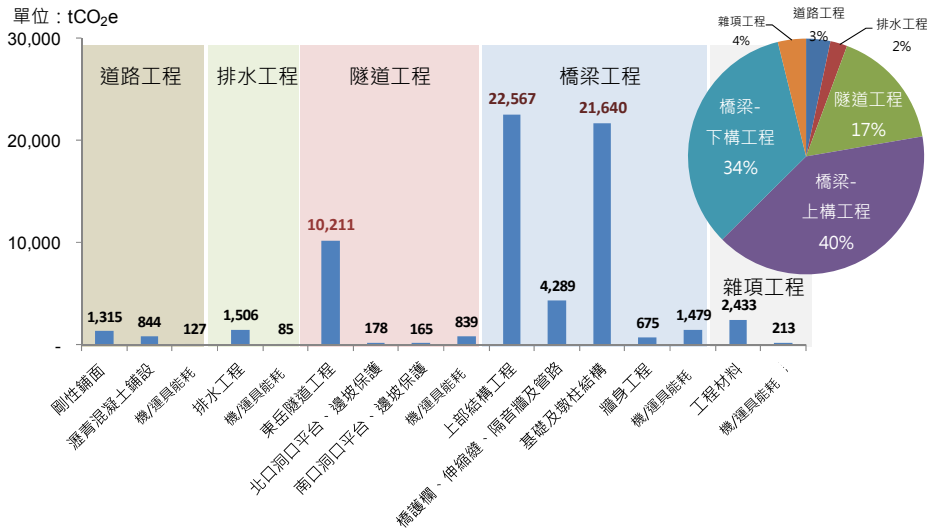
本文另將A3標土建工程盤查排碳量與設計階段推估值進行比較，結果如表二所示。依據排碳量計算方法(活動量×排碳係數)，主要影響因子即為活動量及排碳係數。

考量降低排碳係數之影響，本文將工程材料排碳量占比最大的鋼筋(23%)及混/噴凝土(57%)兩部份排碳係數以盤查係數替換，結果顯示原設計階段推估排碳量(A)與經係數替換後新推估排碳量(B)有所差異，主要為混/噴凝土係數之差別，鋼筋係數差異不大。

另降低排碳係數影響之後，新推估排碳量(B)與實際盤查排碳量(C)之間，實際盤查量較新推估量多約6,448tCO_2e，此差異原因亦來自係數及活動量兩部份。係數方面除已替換之鋼筋及混/噴凝土係數外，其他工程材料及機

表二 A3標推估量與盤查結果彙整分析

組別	引用資料	排碳量(tCO_2e)
A.設計階段推估	設計(活動量×係數)	58,187
B.設計階段替換係數	設計活動量×盤查係數	65,024
C.盤查結果	盤查(活動量×係數)	71,472



圖三 A3標各工項排碳量及占比分析

地工技術

具使用係數仍有差異，活動量亦有影響。進一步分析鋼筋及混/噴凝土在設計階段及實際盤查活動量之差異如表三，大部分混/噴凝土之實際投入量皆大於設計量，對於排碳量之影響達5,939.3tCO_2e。

3.2 橋梁工程工項單位排碳量

除整體工程外，本文進一步以盤查結果分析橋梁下構工程(基樁、井基、基礎層/樁帽及墩柱)及上構工程單位排碳量，作為可供其他工程進行排碳量估算之參考數據，並了解排碳特性。

橋梁工程各子工項主要使用工程材料及機具彙整如表四，本文分析之排碳量除表列項目外，還包括盤查過程蒐集之其他工程材料、機具、材料及機具運輸等資料。

3.2.1 基樁工程單位排碳量

A3標之基樁直徑皆為2 m，基樁工程單位排碳量分析結果如圖四及表五。整體來說，機具排碳量約占5%；混凝土為主要排碳來源，占56%~58%之間，平均約57%；竹節鋼筋排碳則在35%~38%之間，平均約36%；其他部分包括PVC管材料及總材料運輸排碳2項，排碳量占比約在1%至2%之間。

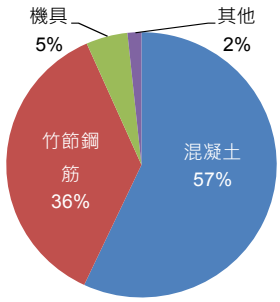
不同長度之基樁單位體積排碳量為0.44~0.45tCO_2e/m^2×m，差異不大，與A1標之盤查結果0.46~0.48tCO_2e/m^2×m相近；然與C2標之排樁之單位排碳量介於0.56~0.67tCO_2e/m^2×m有明顯之差異，其中C2標之機具排碳占比達22~25%，初步判斷與地質條件相關，詳細原因將待未來有更多資料後釐清。

3.2.2 井基工程單位排碳量

井基工程分析結果如圖五所示，機具排碳量約占3%~5%；混/噴凝土為主要排放來源，合計約占53%~63%，再細分為混凝土及噴凝

表三　A3標盤查與估算差異分析

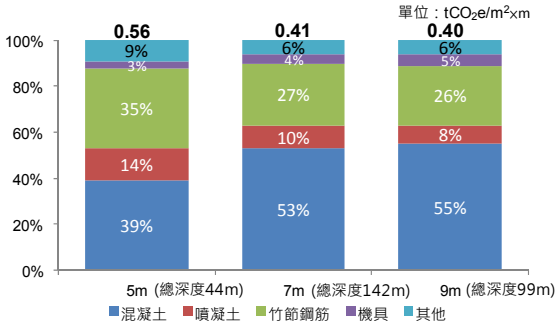
材料名稱	活動量差距	碳排係數 tCO$_2$e/unit	排碳量差異 (tCO$_2$e)
混凝土175 (m^3)	-2,145	0.1875	- 402.1
混凝土210 (m^3)	1,240	0.2331	289.0
混凝土245 (m^3)	2,004	0.2333	467.6
混凝土280 (m^3)	5,504	0.2462	1,354.9
混凝土350 (m^3)	1,446	0.2977	430.4
混凝土420 (m^3)	4,446	0.4686	2,083.6
噴凝土(m^3)	4,199	0.4087	1,716.0
竹節鋼筋(kg)	-249	0.0010	- 0.2
合計：			5,939.3



圖四　基樁排碳量占比結果

表五　基樁單位體積排碳量及項目占比

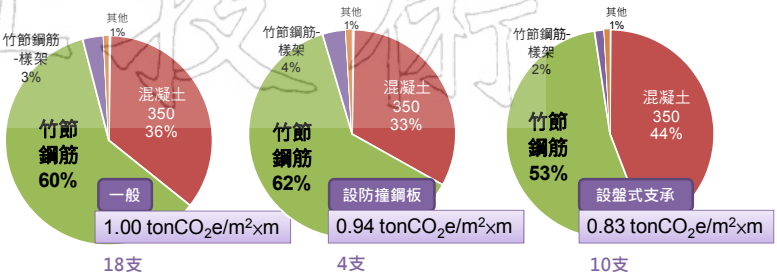
規格	20m	25m	30m
混凝土	56%	57%	58%
竹節鋼筋	38%	36%	35%
機具	5%	5%	5%
其他	1%	2%	2%
總單位排碳量 (tCO$_2$e/m^2×m)	0.45	0.44	0.44



圖五　井基單位體積排碳量及排碳占比分析

表四　A3標橋梁工程各子工項主要使用工程材料及機具彙整表

工程項目	主要工程材料	主要機具
基樁工程	210II水中混凝土、竹節鋼筋、PVC管	挖土機、搖管機、吊車、吊卡車
井基工程	280II混/噴凝土、竹節鋼筋、桁架支保、點焊網	挖土機、發電機、噴漿機、吊車、吊卡車、泵浦車
基礎層工程	280II混凝土、竹節鋼筋	挖土機、泵浦車、吊車、吊卡車
墩柱工程	350II混凝土、竹節鋼筋、盤式支承、防撞鋼板	吊車、吊卡車、泵浦車
上構工程	420II混凝土、竹節鋼筋、預力鋼腱、端錨/端錨續接器	吊車、吊卡車、泵浦車



圖六　墩柱單位體積排碳量及排碳占比分析

土，混凝土占比隨著井基直徑增加而增加，由39%至55%，噴凝土則是隨井基直徑增加而減少，為14%至8%；竹節鋼筋排碳則在26%~35%之間；其他部分包括點焊網、桁架支保材料及總材料運輸排碳等項目，占比約6%~9%之間。單位體積排碳量在不同直徑有明顯差異，隨直徑增加而降低，可能與井基施作總長度或地質條件有關。

3.2.3 基礎層/樁帽工程單位排碳量

A3標所完成之基礎層高度皆為3 m，基礎層主要排放來源為混凝土與竹節鋼筋，除此之外機具及材料運輸排碳量占比皆在1%以下，單位體積排碳量依基礎層所含基樁數量而不同，在0.36~0.53tCO_2e/m^3之間。

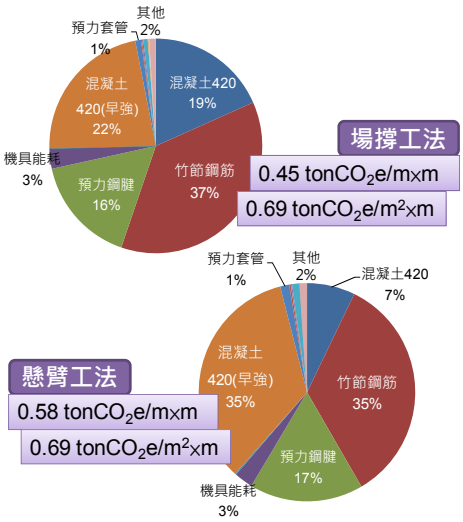
3.2.4 墩柱工程單位排碳量

墩柱工程分析結果如圖六，分為一般無裝設防撞鋼板及盤式支承墩柱、有裝設防撞鋼板無裝設盤式支承墩柱及無裝設防撞鋼板有裝設盤式支承墩柱等3類，並將每類墩柱排碳源再細分為混凝土、竹節鋼筋、竹節鋼筋樣架及其他等4項目，其他項目包括運輸、機具及其他材料等。各類型墩柱的主要排碳源為竹節鋼筋(含樣架)及混凝土，兩者共占99%的排碳量，竹節鋼筋(含樣架)占比超過55%，混凝土約占33%~44%。各類型墩柱單位體積排碳量為0.83~1.00tCO_2e/m^2×m。

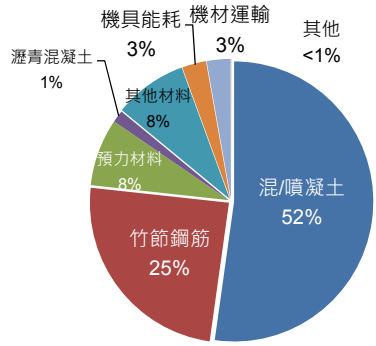
3.2.5 上構工程單位排碳量

A3標上構工程可分為場撐工法及懸臂工法，於幸福高架橋工區之上構工程皆為場撐工法；東澳北溪河川橋工區以懸臂工法為主，邊跨則是以場撐工法進行施作。

彙整兩種工法之工程材料、機具能耗及運輸等排碳量資料如圖七，場撐工法單位橋面積



圖七　上構單位面積排碳量及排碳占比分析



圖八　橋梁工程排碳源占比分析

排碳量較低，與橋梁上構型式有關；但單位體積排碳量兩者相近，皆為0.69tCO_2e/m^2×m。

雖然兩工法的單位橋面積排碳量略有不同，但從圖七可知，兩工法主要排碳來源皆為混凝土、竹節鋼筋及預力鋼腱等3種工程材料，此3種工程材料即占94%的排碳量來源，機具能耗約占3%，其餘材料運輸及其他材料使用共約占3%排碳量。

3.2.6 橋梁工程整體排碳特性

綜整橋梁工程整體排碳量為52,883tCO_2e(含鋪面)，排碳源分析如圖八所示。可看出整

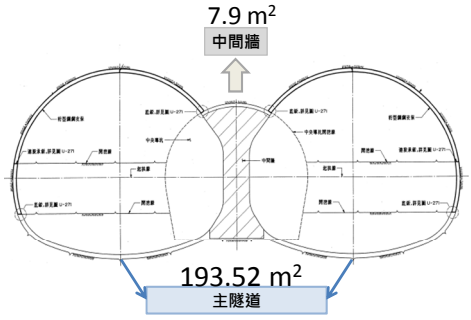
地工技術

體橋梁工程之主要排碳源為工程材料，其中又以混/噴凝土及鋼筋分別占52%及25%最顯著，預力材料亦占8%。

機具排碳量約占3%，與已取得查證聲明書之西濱南WH77-A標(高架道路交流道)之占比2.7%相近(中興工程顧問股份有限公司，2012)，與瑞典NCC AB於橋梁進行實際資料蒐集之環境宣告亦相近(NCC AB, 2015)。

3.3 眼鏡型短隧道工程單位排碳量

A3標東岳隧道為一眼鏡型短隧道，開挖方式採機械開挖，長度依據測量結果為203.5m，總排碳量為12,032tCO_2e。單位排碳量之計算以隧道斷面積及長度作為基準，由於東岳隧道為眼鏡型隧道，開挖量體包括中央導坑及主隧道，為避免中央導坑開挖面積對於單位排碳量之影響，本文隧道斷面積以兩種數據表示。隧道斷面積(含導坑開挖)如圖九所示，為避免重複計算，中央導坑面積僅採中間牆斷面積；主隧道部分則包括導坑與主隧道重疊部份，為193.52m²(僅含主隧道)；加總兩部份斷面積，總開挖面積為201.42m²(主隧道含導坑)。



圖九　東岳隧道工程單位斷面積示意圖

依據隧道工程特性，本文將隧道工程除開挖外分為四項作業：1. 補強、支撐及止水作業；2. 結構及回填作業；3. 管線及排水作業；4. 其他作業。四項作業主要使用之工程材料及機具彙整如表六，本文並依此四項作業進行不同工項之工程材料使用排碳量分析。

彙整東岳隧道各項作業單位排碳量如表七，由分析結果顯示，以工程材料排碳量占比最高，達91.5%，材料運輸僅占1.8%，機具及隧道工區用電約占6.7%。此占比分布與目前施工中隧道標(主要為長隧道)有所不同，例如A2標之機具及隧道工區用電占比約20%，此可能為長隧道與短隧道之排碳差異；而隨著未來隧道標接近完工，最終長隧道之機具及材料占比是否會接近短隧道之情況，本計畫將持續觀察。此外短隧道整體排碳量占比分布與橋梁工程亦有明顯的不同。

另由工程材料排碳源分析，顯示以結構及回填作業及補強、支撐及止水作業兩個作業項目為主要排碳來源，各占46.8%及42.3%。

綜整材料使用、機具能耗及材料運輸之單位排碳量，東岳隧道單位排碳量為0.2879tCO_2e/m²×m(面積考量導坑)，及0.2997tCO_2e/m²×m(面積僅考量主隧道)。

表六　東岳隧道主要工程材料及機具彙整表

作業類別	主要工程材料	主要機具
補強、支撐及止水	噴凝土、點焊網、管冪鋼管、先撐鋼管、卜特蘭水泥、水泥砂漿、H型鋼支保、自鑽式岩栓、岩栓、速凝劑、無收縮水泥砂漿、樹脂化學藥劑、瞬結劑	噴漿機、灌漿機、鑽堡機、高空作業車
結構及回填作業	竹節鋼筋、鋼筋續接器、混凝土175/210/245/245(高坍)/280	泵浦車、高空作業車
管線及排水作業	HDPE管中管、PVC-E管、PVC管、不織布、防水膜、電線鋼管	高空作業車
其他作業	免拆模板、連結蓋版、塑膠包覆不鏽鋼踏步、預鑄緣石、透水材料	挖土機

表七　東岳隧道單位排碳量及排碳占比分析

作業類別		單位排碳量-主隧道含導坑(tCO_2e/m²×m)		單位排碳量-僅含主隧道(tCO_2e/m²×m)		占比	
工程材料	補強、支撐及止水作業	0.1218	0.2634	0.1268	0.2742	42.3%	91.5%
	結構及回填作業	0.1346		0.1401		46.8%	
	管線及排水作業	0.0066		0.0069		2.3%	
	其他作業	0.0005		0.0005		0.2%	
開挖機具-挖土機		0.0079		0.0082		2.8%	6.7%
其他機具		0.0037		0.0039		1.3%	
隧道工區用電		0.0076		0.0079		2.6%	
材料運輸		0.0053		0.0055		1.8%	
總計		0.2879		0.2997		100.00%	

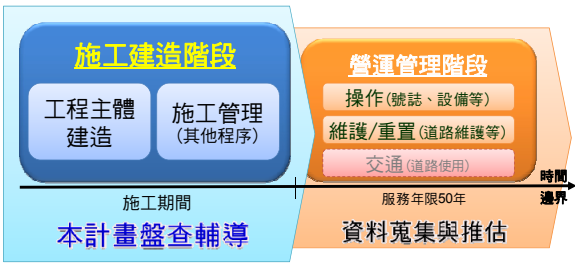
地工技術

四、生命週期排碳量

4.1 工程生命週期範圍

除了土建工程外，施工建造過程之管理單位及後續營運管理階段之排碳量仍需納入生命週期排碳量計算，如圖十所示。營運期間之操作、維護及重置亦為我國各項道路工程碳足跡產品類別規則(CFP-PCR)(行政院環境保護署，2014a;2014b;2014c)要求計算範圍，本計畫並於2016年12月以座談會方式邀請專家學者進行設定條件之討論，確認相關內容。

本節將針對施工建造階段管理單位排碳量分配、營運管理階段假設條件設定進行說明，並彙整目前A3標工程生命週期碳排放量。



圖十　道路工程生命週期碳足跡計算邊界

4.2 管理單位排碳量分配說明

土建工程管理單位排碳量於施工建造階段進行盤查，在計算過程中，除承包商管理單位排碳量可直接納入外，上位管理單位之蘇花改工程處、東澳工務段及蘇澳東澳段監造工程處，因同時間負責不只一個標之工程，故在計算過程中需要分配，各年度分配範圍如表八，本文以各標每年度之請款金額作為分配依據，計算A3標開工迄竣工之管理單位排碳量。

4.3 營運管理階段假設情境說明

根據座談會討論結果，營運管理階段應納入之估算情境如表九所示，由於目前與A3標相關之機電及交控工程尚未完工，本文現階段僅針對營運管理階段之照明燈具、柔性鋪面、剛性鋪面3部分進行估算，工程生命週期為50年。分項說明如後。

表八　管理單位各年度排碳量分配標別

管理單位	2012	2013	2014	2015	2016
蘇花改工程處	A3 B1~B4 C1	A1~A3 B1~B4 C1	A1~A3 B1~B4 C1~C2	A1~A4 B1~B4 C1A~C2	A1~A4 B1~B5 C1A~C2 E1
工務段	A3	A1~A3			
監造工程處	A3	A1~A3	A1~A3	A1~A4	A1~A4
承包商	A3(無須分配)				

表九　蘇花改計畫營運管理階段排碳量估算情境

分類	工程項目	操作	維護及重置
道路工程	照明燈具	用電：以設備功率及運轉時數進行計算	維護：不計算 重置：依運轉時數及燈具壽命計算更換次數
	柔性鋪面	無須估算內容	維護：不計算 重置：以7年作為使用年限計算更換次數，每次刨除5公分厚度
	剛性鋪面	無須估算內容	維護：不計算 重置：依使用年限計算更換次數，全面重置(年限待討論，目前暫定40年)
	排水疏濬	不計算	不計算
橋梁工程	照明燈具	同道路工程	同道路工程
	柔性鋪面	同道路工程	同道路工程
	剛性鋪面	同道路工程	同道路工程
	橋梁結構	無須估算內容	維護：維護規模及頻率待定 重置：不計算
隧道工程	照明燈具	同道路工程	同道路工程
	柔性鋪面	同道路工程	維護：不計算 重置：以10年作為使用年限計算更換次數，每次刨除5公分厚度(年限待討論)
	剛性鋪面	同道路工程	維護：不計算 重置：依使用年限計算更換次數，全面重置(年限待討論，目前暫定40年)
	隧道結構	消防用水	維護：維護規模及頻率待定 重置：不計算
	隧道通風	用電：以設備功率及運轉時數進行計算	維護：維護規模及頻率待定 重置：不計算
整體工程	交控能耗	用電：計算方式待定 (以設備功率及運轉時數進行計算，並參考試運轉資料進行計算及比對)	重置：以各設備使用年限計算更換次數，重置排碳僅估算設備運輸排碳

備註：A3標估算項目如表中底線標示項目

地工技術

4.3.1 照明燈具

照明燈具假設情境如表九所示，A3標所使用之燈具功率、數量、開燈時間、燈具使用率及更換次數則如表十，其中隧道照明燈具目前以50%開啟時間作為假設條件，本文以此參數配合下式(1)估算營運期間排碳量。

$$\text{燈具照明排碳}(tCO_2e) = (\Sigma\text{數量}\times\text{功率}\times\text{開燈時間}\times\text{使用率}\times\text{電力係數}) + (\Sigma\text{數量}\times\text{更換次數}\times\text{重置係數}) \quad (1)$$

表十　燈具照明規格參數

項目	道路照明	隧道照明			
功率(W)	5	28	400	35	28
數量(座)	69	6	396	288	8
開燈時間(h)	12.15	24	24	24	24
燈具使用率(%)	100	50			
更換次數	12	12	22	12	12

4.3.2 柔性鋪面

柔性鋪面假設情境如表九所示，在操作面向不需估算，在維護及重置面向則需估算。以每7年重置一次，配合50年生命週期計算更換次數，並假設每次刨除5公分進行重新鋪築，以此情境計算柔性鋪面重置之排碳量。

4.3.3 剛性鋪面

剛性鋪面假設情境如表九所示，在操作面向與柔性鋪面相同，無需估算的內容，在維護及重置面向則需估算。一般剛性鋪面設計年限為20年，惟於座談會委員提及，該設計年限過於保守，部分剛性鋪面使用年限可能超過40年，故本文暫時以40年作為設計年限，待未來有更適宜之假設參數時再做更換。鋪面更換次數同樣以生命週期50年計算重置次數，並以全面重置進行排碳量計算。

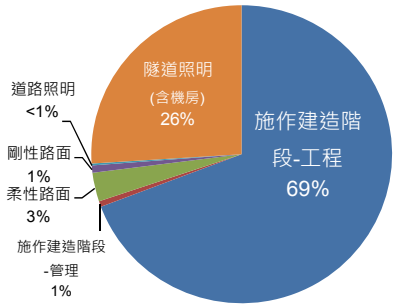
4.4　A3標生命週期排碳量

依據前述盤查結果及分配、計算條件，A3標目前盤查及估算之生命週期排碳量如表十一，包括施工建造及營運管理階段總排碳量為103,183.6tCO_2e。

各階段排碳量占比如圖十一，納入營運管理階段後，主要排碳源仍以施工建造階段之土建工程為主，約占69%，該階段之管理單位排碳量約占1%，較不顯著；而營運管理階段占約30%，排碳量不容忽視。

表十一　A3標目前全生命週期排碳量

	階段	排碳量(tCO_2e)	占比
施作建造階段	土建工程排碳	71,471.7	70%
	管理單位排碳	635.6	
營運管理階段	柔性路面	3,220.3	30%
	剛性路面	829.9	
	道路照明	211.9	
	隧道照明(含機房)	26,814.3	
總計：		103,183.6	
植生碳匯：		13.3(tCO_2e/year)	



圖十一　A3標各階段碳排放量占比分析

營運管理階段之主要排碳源為隧道照明，占26%，而隧道主體工程排碳量僅占生命週期排碳量11%，顯示隧道工程營運管理階段燈具操作之排碳量不容忽視；道路照明、鋪面重置之排碳量約占<1%~3%，顯示路工及橋梁工程生命週期排碳量，以工程主體為主。

另依據碳足跡標準規定，碳匯變化應分別計算及說明。由盤查資料顯示，全工期共掘除3.4公頃林地，植生草種共4.1公頃，依據此移除及植生資料，計算A3標碳匯變化結果為-13.3tCO_2e/year，意即每年有13.3tCO_2e之固碳量。

五、工程節能減碳效益

由盤查結果顯示，A3標土建標工程主要排碳來源為竹節鋼筋、各型混凝土及噴凝土，本計畫執行期間已完成A3標使用之鋼筋、水泥及混/噴凝土供應商之盤查，建立本土化係數，降低排碳量之不確定性及確認以飛灰/爐石粉替代水泥之減碳效益。

本文比較採用飛灰/爐石粉及未採用之各型混凝土排碳係數如表十二，結果顯示A3標使用之混凝土大部分皆採飛灰/爐石粉替代水泥，大部分替代率達45%；但剛性路面使用之R45混凝土及隧道一次襯砌使用之210噴凝土並未採用飛灰/爐石粉替代水泥；上構箱型梁使

地工技術

表十二　A3標各型混/噴凝土排碳係數及減碳比例彙整表

供應商標別	強度	盤查排碳係數A (含飛灰/爐石粉)($kgCO_2e/kg$)	僅含水泥之排碳係數B (未含飛灰/爐石粉)($kgCO_2e/kg$)	減碳比例 (B-A)/A	飛灰爐石粉替代率(%)
A3	R45混凝土 (II型水泥)	0.1888	0.1888	0%	0%
A3	210kgf/cm²(II型水泥噴)	0.1659	0.1659	0%	0%
A3	175kgf/cm²(II型水泥)	0.0770	0.1224	37%	45%
A3	210kgf/cm²(II型水泥)	0.0951	0.1580	40%	45%
A3	245kgf/cm²(II型水泥)	0.0991	0.1583	37%	45%
A3	245kgf/cm²(II型水泥高坍)	0.0939	0.1514	38%	45%
A3	280kgf/cm²(II型水泥)	0.1007	0.1623	38%	45%
A3	210kgf/cm²(II型水泥水中)	0.1113	0.1888	41%	45%
A3	350kgf/cm2(II型水泥)SCC	0.1128	0.1936	42%	45%
A3	420kgf/cm²(II型水泥)	0.1591	0.2171	20%	30%
A3	420kgf/cm²(II型水泥)早強	0.1771	0.2137	17%	20%
A1	420kgf/cm2(II型水泥)早強	0.1358	0.2236	39%	45%

用之420及420早強混凝土之替代率亦僅為30%及20%，而由盤查資料顯示，A1標採用之420早強混凝土，其飛灰/爐石粉替代可達45%，A3標似乎仍有減碳空間。由混凝土排碳係數計算各型混凝土減碳比例約在17%~42%。

由表十二之係數計算A3標減碳量，結果如表十三，總減碳量約15,766tCO_2e，減碳百分比約17%至42%，約占整體土建工程排碳量22%。另若將A3標所使用之420早強混凝土(飛灰/爐石粉替代率20%)替換為A1標(替代率45%)之係數，結果顯示總減碳量可達18,652tCO_2e，約增加2,886tCO_2e(4%)之減碳量。

表十三　以飛灰/爐石粉替代水泥之減碳量分析

混凝土型式	減碳量($kgCO_2e$)	減碳百分比
175 II	406,167	37%
210 II	626,567	40%
245 II	1,648,069	37%
245 II(高坍)	652,636	38%
280 II	5,481,151	38%
350-SCC	1,391,803	41%
420 II	1,030,137	42%
420 II(早強)	1,688,667	20%
210 II水中	2,840,633	17%
合計	15,765,830	31%
420 II(早強) 置換為A1標係數	4,574,525	39%
合計 置換為A1標係數	18,651,688	36%

六、結論與建議

經由A3標盤查及估算結果之分析，對於道路、橋梁及隧道工程之排碳特性及各項工程不同生命週期階段之排碳情形已有初步之瞭解，並建立本土化主要工程材料(包括鋼筋、水泥、水泥混凝土及瀝青混凝土)之排碳係數及機具、工項之單位排碳量；並由A3標完工後，完成道路工程營運管理階段排碳量估算條件之討論及確認；相關資訊及成果將可提供工程主管機關及設計單位參考。

以下就A3標產出之工程單位排碳量、減碳效益及討論與建議事項進行說明。

6.1 工程單位排碳量產出

彙整A3標土建工程整體單位排碳量，此資料將可供其他工程於工程不同生命週期階段進行排碳量估算之參考，但仍需注意不同個案工程之特性差異。

本文將資料等級分為二階，第一階以工程類型分配A3標整體土建工程，各工程類型單位排碳量如表十四，分為橋梁工程、隧道工程(眼鏡型短隧道)、道路工程(以橋台表示)及排水箱涵工程等四部分，此單位碳足跡已包含機具運輸、機具使用、工程材料運輸、工程材料使用及人員出勤造成之排碳量。

表十四　第一階工程單位排碳量

工程項目		單位排碳量	單位
橋梁	場撐工法	1.55	$tCO_2e/m\times m$
		1.93	$tCO_2e/m^2\times m$
	懸臂工法	1.56	$tCO_2e/m\times m$
		1.86	$tCO_2e/m^2\times m$
隧道	眼鏡型短隧道	0.30	$tCO_2e/m^2\times m$
橋台(道路)		181.91	tCO_2e/座
排水箱涵工程		0.75	tCO_2e/m^3

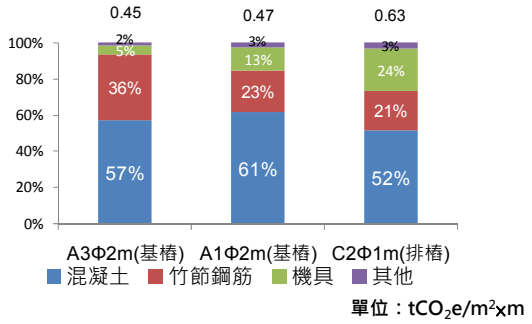
第二階係延續第一階資料內容，並進一步展開橋梁、隧道及道路之子工項，展開後子工項內容包括基樁、井基、基礎、墩柱、場撐工法、懸臂工法、眼鏡型短隧道、瀝青鋪面以及混凝土鋪面，單位排碳量如表十五。

地工技術

表十五　第二階工程單位排碳量

類別	子工項類別	子工項內容	單位排碳量	單位
橋梁	下構	基樁	0.45	$tCO_2e/m^2\times m$
		井基	0.45	$tCO_2e/m^2\times m$
		基礎層	0.41	tCO_2e/m^3
		墩柱	0.58	$tCO_2e/m^2\times m$
	上構	場撐工法	0.45	$tCO_2e/m\times m$
			0.69	$tCO_2e/m^2\times m$
		懸臂工法	0.58	$tCO_2e/m\times m$
			0.69	$tCO_2e/m^2\times m$
隧道	眼鏡型短隧道	整體隧道	0.30	$tCO_2e/m^2\times m$
道路	柔性鋪面	瀝青鋪面	0.11	tCO_2e/m^3
	剛性鋪面	混凝土鋪面	0.48	tCO_2e/m^3

另就A3標基樁與蘇花改計畫A1標(基樁)及C2標(排樁)盤查結果進行比較，結果如圖十二。由圖可知規格皆為直徑2m的A3及A1標基樁單位排碳量相近，約在0.45~0.47$tCO_2e/m^2\times m$之間；而直徑1m之排樁單位排碳量就與基樁不同，約0.63$tCO_2e/m^2\times m$，排碳量占比也不相同，排樁機具占比約24%，遠高於基樁的5%~13%，初步判斷與地質條件有關；但機具排碳量亦可能隨著現場施工的人員與廠商不同，產生一定的差異性，故仍需持續累積及蒐集不同工程資以降低不確定性，增加資料之參考性。



圖十二　基樁及排樁單位排碳量比較

6.2 飛灰/爐石粉替代水泥減碳成效

A3標工程採灰飛/爐石粉替代水泥確實具有減碳成效，全工程近4年之總減碳量約15,766tCO_2e，如以大安森林公園年固碳量387tCO_2e計算，相當於41座大安森林公園年固碳量。若實際使用之420早強混凝土之飛灰/爐石粉替代率可以提高，將可再增加減碳量。

6.3 討論與建議事項

1. 由盤查結果與估算結果比較可知，碳足跡盤查為碳管理的基礎，獲取正確資訊才能有效的控制碳排放量，進而減碳。蘇花改計畫已建立並執行盤查作業，並由此過程中建立主要工程材料本土化排碳係數，確認工程施作之實際排碳量。

2. 目前A3標生命週期排碳量仍有部分項目尚未納入計算，主要為交控及機電工程尚未完工，及部分營運管理階段排碳量推估條件尚待確定，未來將持續蒐集資料以使整體生命週期碳足跡完整，但現階段盤查及估算結果應已具代表性。

3. 本文已產出A3標工程之工項單位排碳量，後續須持續進行其他工程資料蒐集，以使工程排碳特性資料更具代表性。過程中建立之本土化油耗、工程材料碳足跡及工項排碳參數等資料，可作為未來工程設計參考。

4. 本文所分析之短隧道為眼鏡型隧道，係以先開挖導坑後再開挖主隧道之方式施工，為目前國內較少執行的施工型式，其單位碳量可能會與其他短隧道有所不同，並以兩種方式表示，提供未來設計者參考；另蘇花改計畫A1標亦有相似之眼鏡型短隧道工程，將持續蒐集彙整資料，確認其排碳特性。

參考文獻

中興工程顧問股份有限公司 (2012)，「臺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 正式工程碳足跡盤查執行計畫書」。

中興工程顧問股份有限公司 (2016)，「西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程 WH77-A標鹽埕交流道新建工程碳足跡盤查報告定稿」。

中興工程顧問股份有限公司 (2017)，「臺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105年度年末進度報告書」。

邵厚潔、李民政、李怡德、許珮蒨、黃琬淇 (2012)，「臺9線蘇花公路山區路段改善工程之碳管理構想」，第11屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會。

行政院環境保護署 (2014a)，「碳足跡產品類別規則，基礎建設-道路」。

行政院環境保護署 (2014b)，「碳足跡產品類別規則，基礎建設-橋梁」。

行政院環境保護署 (2014c)，「碳足跡產品類別規則，基礎建設-隧道。」

British Standards Institution (2016a). "Carbon Management in Infrastructure", *PAS 2080*.

British Standards Institution (2016b). "Greenhouse Gas Emissions Verification", *PAS 2050*.

ISO/TS 14067 (2013). "Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication".

NCC AB (2015). "Environmental Product Declaration for the Pedestrian and Bicycle Bridge 15-1787-1 over Viskan in project Road 27".

UK Highways Agency (2009). "Carbon Management Framework for Major Infrastructure Projects e21C Project Report", http://www.forumforthefuture.org/files/EC21-Carbon-Framework-FINAL.pdf (Apr. 5 ,2017).