

公路工程減碳現況與發展探討

Study on the Status and Development of Carbon Reduction in Highway Engineering

運輸工程及海空運組 胡智超

研究期間:民國 114 年 1~12 月

摘 要

節能減碳與綠能產業為目前國家重要政策方向，持續推動節能減碳落實於公共工程亦是重要工作之一。過去在「振興經濟擴大公共建設投資計畫落實節能減碳執行方案」，其目標明確揭示希望能打造具節能減碳效果之公共工程，落實環境保護，同時協助國內綠色產業發展，增進國內綠色能源產業競爭力。

本研究建立工程碳排放簡易評估方法，可應用於工程可行性評估與綜合規劃階段。案例分析結果顯示，工程碳排放對方案選擇具有一定影響，不同施工工法間之碳排差異明顯，低碳結構形式於全生命週期減碳上具發展潛力。若能進一步將工程碳排成本納入經濟效益評估，可作為檢視工程方案環境合理性的重要依據，並提供規劃與設計階段導入減碳策略之參考工具，有助於在經濟效率與環境永續間取得平衡。本研究所提出之分析架構，補充現行交通工程（道路、橋梁、隧道）經濟效益評估於工程減碳面向之不足，提供一套兼顧工程效益與碳排影響之整合性評析方式。此外，碳價為影響工程可行性之重要變數，在高碳價情境下，工程碳排成本對評估結果之影響將更為顯著，顯示未來決策宜將碳排成本及不同碳價情境納入綜合考量，以提升交通工程之永續性。

關鍵詞：

工程碳排、工程效益

公路工程減碳現況與發展探討

一、前言

賴總統 113 年揭示「國家希望工程」明定「綠色成長與 2050 淨零轉型」施政目標，設定淨零轉型 5 大策略持續推動，於 113 年 6 月總統府成立「國家氣候變遷對策委員會」，以國家整體發展的視野進行氣候治理與國際合作，邀集產官學研代表參與，強化因應氣候變遷溝通平臺，加速政策落實並加大社會參與。國家氣候變遷對策委員會宣示加大氣候行動來提升產業國際競爭力，加速接軌國際 NDC 的步伐，重新檢視 2030 目標，以更大企圖心突破瓶頸，並設定臺灣 2032 年和 2035 年「國家減碳新目標」草案，相較於基準年(2005 年)，臺灣 2032 年減量 $32\pm 2\%$ 、2035 年減量 $38\pm 2\%$ 。

節能減碳與綠能產業為目前國家重要政策方向，持續推動節能減碳落實於公共工程亦是重要工作之一。過去在「振興經濟擴大公共建設投資計畫落實節能減碳執行方案」，其目標明確揭示希望能打造具節能減碳效果之公共工程，落實環境保護，同時協助國內綠色產業發展，增進國內綠色能源產業競爭力。各項公共建設之設計均應採用符合環保、節能減碳概念之綠色工法、綠色材料、綠色設計，並應融入節能減碳觀念及再生能源之設置，上述「綠色內涵」原則不低於工程預算(不含土地、地上物補償及勞務採購等非工程經費)之 10%。

目前工程會正在推動公共工程碳排放量估算及導入 PAS 2080，本所曾在 100 年及 101 年辦理相關工程減碳研究，因此為瞭解國際最新在工程減碳之發展，以及規劃後續本所相關前瞻計畫，爰辦理本研究。

二、國際公路工程碳管理發展趨勢

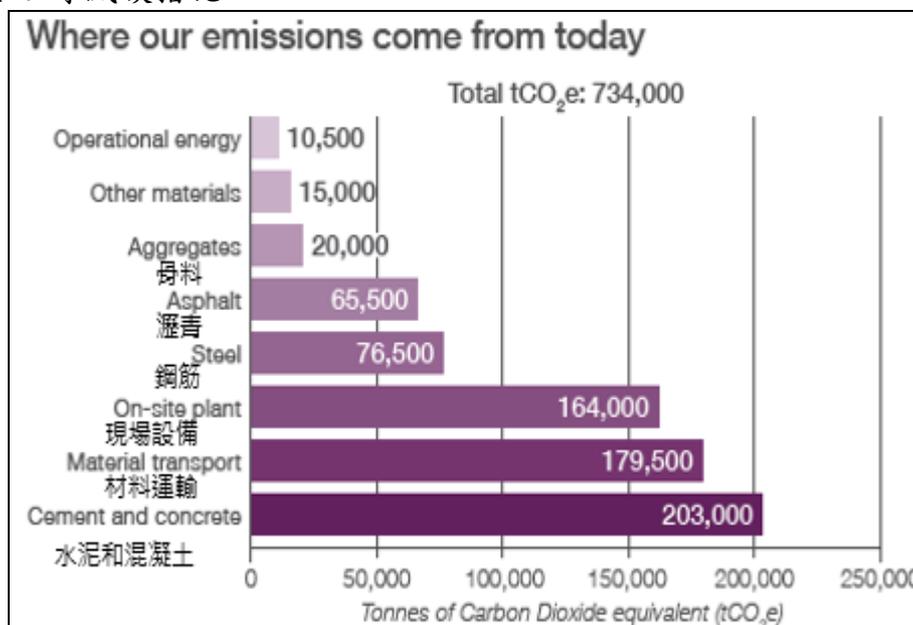
2.1 英國工程碳管理推動概況^[1、2]

為配合英國政府承諾於 2050 年達成淨零碳排放目標，基礎建設部門在減碳轉型中扮演極為關鍵的角色。英國公路局(National Highways)因應此目標，提出明確的減碳方向與行動策略，包括：設立三大核心目標、全面蒐集並管理供應鏈碳排放數據、落實 PAS 2080 全生命週期碳管理制度、推動淨零設計原則、與地方政府協作推動減碳作為，以及強化未來道路使用與管理的低碳化設計等。

在淨零排放相關的政策架構中，英國公路局亦緊密配合英國交通部於 2021 年發布的「淨零公路計畫(Net Zero Highways Plan)」，依據該計畫中的方向制定策略、落實具體措施，目標是在機構管理、工程維護與建設，以及道路使用三大面向同步減少溫室氣體排放，並逐步實現英國政府於 2050 年達成淨零排放的國家願景。

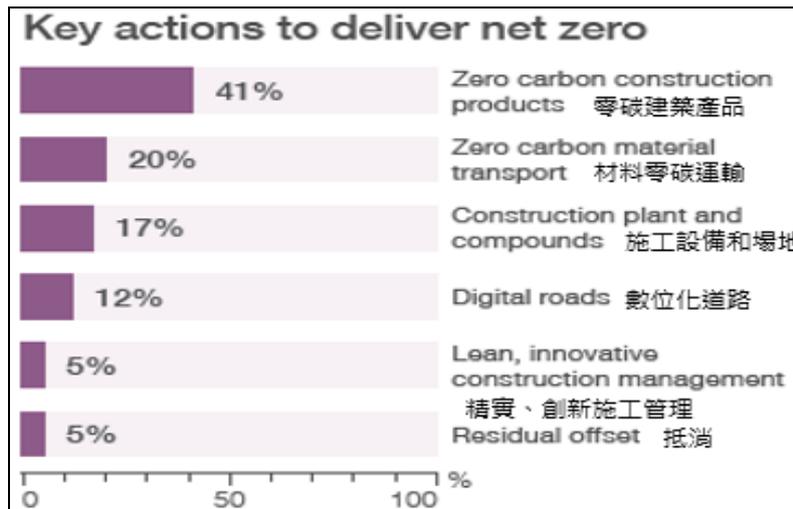
由於公路工程涵蓋瀝青、水泥、混凝土與鋼鐵等材料的製造、運輸與使用。資料顯示 2020 年英國在道路維護與建設過程中產生約 73.4 萬噸二氧化碳當量(CO₂e)排放，同時指出即使不採取進一步行動，預計到 2040 年排放仍將下降至約 35 萬噸。此外公路減碳重點聚焦於瀝青、水泥與鋼鐵等產業，並透過碳管理系統，導入能減少排放的方法，例如精實施工(Lean Construction)與循環經濟的原則；同時也將運用數位科技，提升現有道路網的使用效能，盡量減少新建設的需求。

由圖 2.1 可知，英國 2020 年公路工程碳排中，以水泥和混凝土排碳最多，達到 203,000 噸 CO₂e，其次是材料運輸 179,500 噸 CO₂e，接續為現場設備、鋼筋、瀝青、骨料等。為達 2050 年淨零排放願景，該計畫提出措施減碳比例(圖 2.2)，以使用零碳建築產品最高，減碳貢獻占 41%，其次為材料零碳運輸為 20%，接續為施工設備和場地、數位化道路、精實創新施工管理等減碳措施。



資料來源：【1】

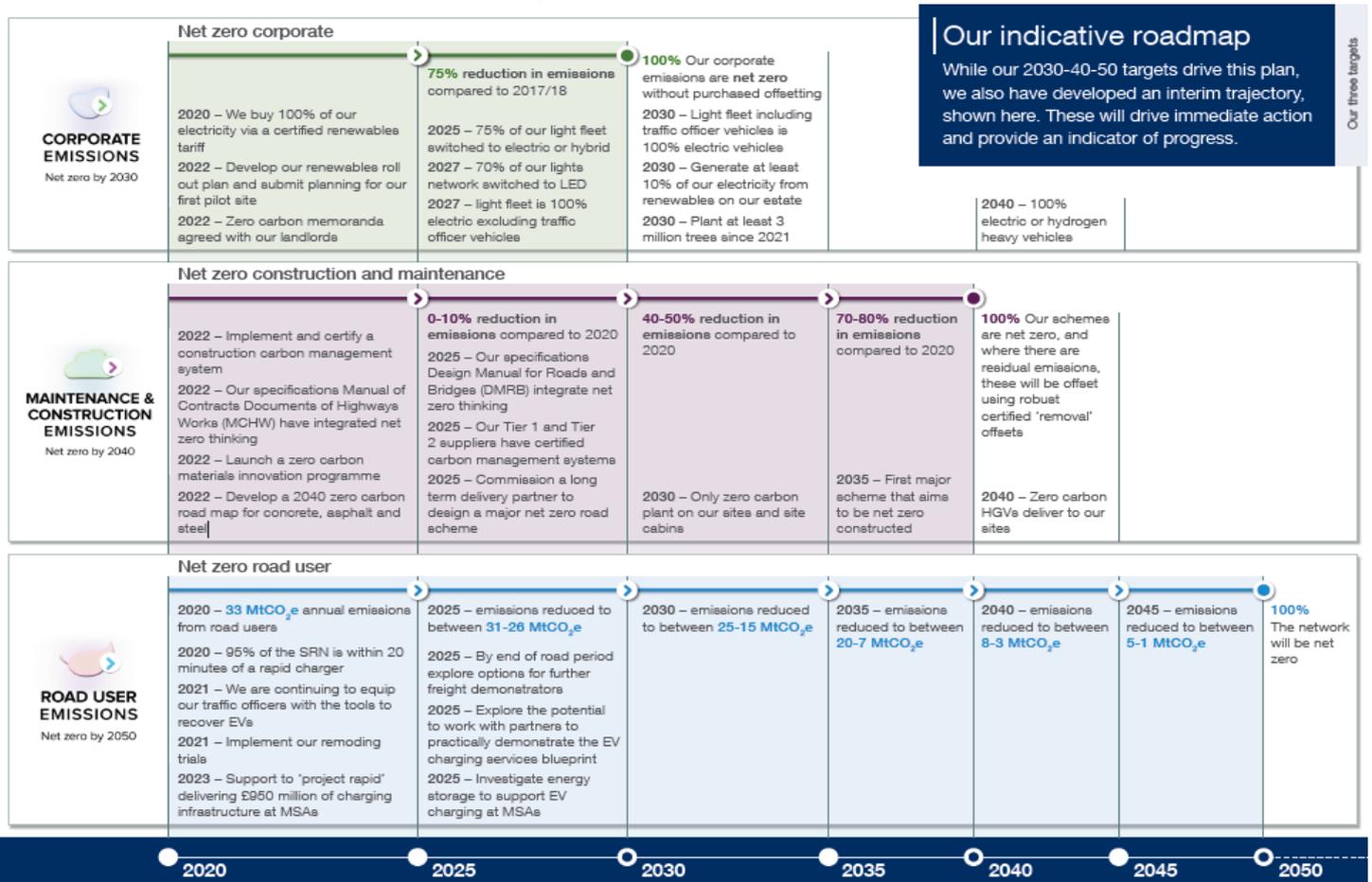
圖 2.1 英國公路工程碳排來源統計



資料來源: 【1】

圖 2.2 英國公路工程碳排淨零措施

「淨零公路計畫(Net Zero Highways Plan)」在機構管理、工程維護與建設、道路使用三大面向訂定各年度之目標詳圖 2.3，本研究並將其內容摘述如表 2-1，預期 2050 年達成淨零排放。



資料來源: 【1】

圖 2.3 英國公路工程減碳藍圖

表 2-1 英國公路工程減碳藍圖目標內容

期間	機構淨零排放	維護及建造階段淨零排放	用路人淨零排放
2020~2024	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 採購 100%具官方認證的再生能源電力(2020 年) ▪ 完成再生能源推動計畫，並提出第一個示範場域的設置申請(2022 年) ▪ 與土地業主簽訂零碳合作備忘錄(2022 年) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 導入並通過「工程施工碳管理系統」認證(2022 年) ▪ 英國公路工程合約文件手冊(MCHW)納入淨零理念(2022 年) ▪ 啟動「零碳建材創新計畫」(2022 年) ▪ 制定混凝土、瀝青與鋼材「2040 零碳路徑圖」(2022 年) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 道路使用者的年度碳排放量達 33 百萬噸 CO₂e(2020 年) ▪ 全國高速公路網，有 95%的路段位於快速充電站 20 分鐘可達的範圍內(2020 年) ▪ 為交通巡邏人員配備協助救援電動車(EV)的相關工具(2020 年) ▪ 推動並執行電動車救援與調度試驗計畫(2021 年) ▪ 支持「Project Rapid」計畫，在高速公路休息站建置 9.5 億英鎊規模的充電基礎建設(2023 年)
2025~2029	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 相較 2017 及 2018 年度，碳排減少 75% ▪ 75%的輕型車隊更換為電動或油電混合車(2025 年) ▪ 70%的道路照明系統全面汰換為 LED(2027 年) ▪ 除交通巡邏人員使用的車輛外，其餘輕型車隊 100%電動化(2027 年) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 相較 2020 年度，碳排減少 0~10% ▪ 「道路與橋梁設計手冊」規範納入淨零思維(2025 年) ▪ 第一級與第二級供應商均具備通過認證的碳管理系統(2025 年) ▪ 委託長期合作夥伴設計一項大型的淨零道路工程方案(2025 年) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 碳排放量降至 26~31 百萬噸 CO₂e (2025 年) ▪ 探索貨運示範方案的選項(2025 年) ▪ 探索與合作夥伴共同實際示範電動車充電服務藍圖的可能性(2025 年) ▪ 研究能源儲存，以支持服務區的電動車充電(2025 年)
2030~2039	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 100%企業排放已達淨零，無需購買碳抵消 ▪ 輕型車隊(包括交通巡查員車輛)全部為電動車(2030 年) ▪ 機構範圍內至少 10% 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 與 2020 年相比，碳排放量減少 40~50%(2030 年) ▪ 工地上的所有機具與辦公室均為零碳排放(2030 年) ▪ 與 2020 年相比，碳排 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 碳排放量降至 15~25 百萬噸 CO₂e (2030 年) ▪ 碳排放量降至 7~20 百萬噸 CO₂e (2035 年)

	的電力由可再生能源產生(2030年) • 自2021年起，至少種植300萬棵樹(2030年)	排放量減少40~50%(2035年) • 完成首個以實現淨零為目標的大型工程建設(2035年)	
2040~2050	• 重型車輛全部採用電動或氫能(2040年)	• 工程方案100%均達到淨零排放，對於仍存在的剩餘碳排放，將採用經認證的可靠「碳移除」抵消方式(2040年) • 採用零碳重型貨車運送工地物資(2040年)	• 碳排放量降至3~8百萬噸CO ₂ e(2040年) • 碳排放量降至1~5百萬噸CO ₂ e(2045年) • 實現淨零排放(2050年)

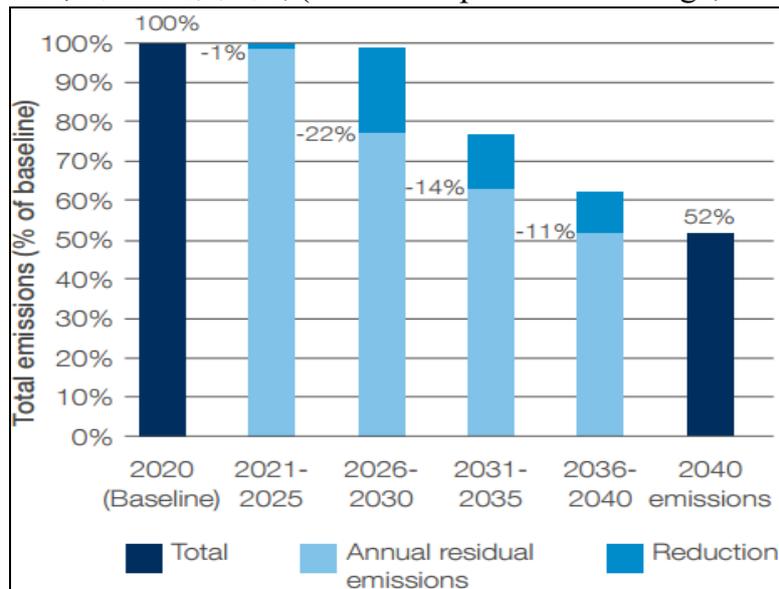
資料來源:本研究自行整理

此外英國公路局於2021年針對大宗材料，如混凝土、鋼材和瀝青提出淨零路線圖，藉由相關措施以減少碳排。

1. 混凝土減碳路徑

依路徑圖模型推估，2040年相較於2020年基準值，藉由減少新建、延長混凝土使用壽命等策略，可降低混凝土碳排48%(如圖2.4)。

2030年前降低混凝土生產排放的策略包括:1.透過使用石灰石水泥與三元混合水泥(Ternary Blends)，可降低對高爐礦渣粉的依賴、2.在合約中明訂使用低碳混凝土配比、3.使用先進混凝土配比技術的供應商。2030~2040年推動更進一步的減碳包括:1.使用低碳化原料、2.提升熱能效率、3.安裝碳捕捉與封存(Carbon Capture And Storage, CCS)系統。



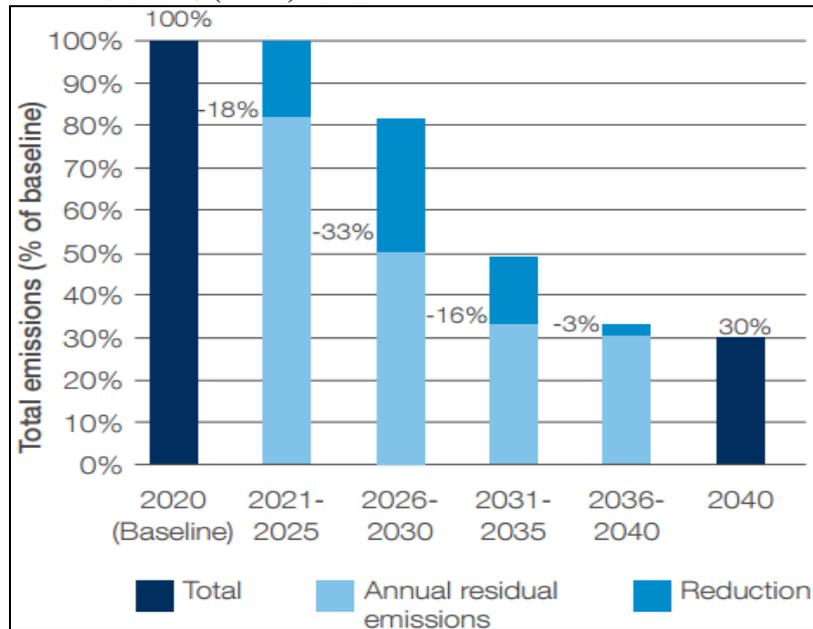
資料來源:【2】

圖 2.4 英國工程混凝土各期推動減碳比例

2. 鋼材減碳路徑

依路徑圖模型推估，2040 年相較於 2020 年基準值，藉由減少新建鋼構設施及延長鋼材壽命，可降低鋼材碳排 70%(如圖 2.5)。

2030 年前降低鋼材生產排放的策略包括:1.運用現有與新興技術，以降低鋼材生產(A1 模組階段)所產生的排放、2.透過優化設計與檢討標準以減少不必要的鋼材用量、3.供應鏈逐步導入低碳燃料。2030~2040 年推動更進一步的減碳包括:1.氫能燃料技術、2.電弧爐(Electric Arc Furnaces, EAF)與直接還原鐵(Direct Reduced Iron, DRI)結合的混合製程、3.碳捕捉與封存(CCS)技術。



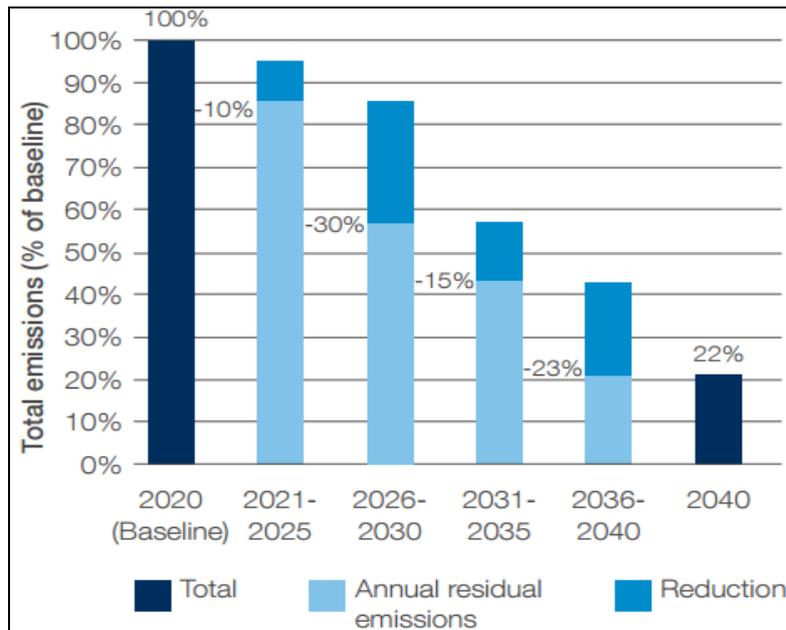
資料來源: 【2】

圖 2.5 英國工程鋼材各期推動減碳比例

3. 瀝青減碳路徑

依路徑圖模型推估，2040 年相較於 2020 年基準值，藉由減少新建工程與延長瀝青壽命，可降低瀝青碳排 78%(如圖 2.6)。

2030 年前降低瀝青生產排放的策略包括:1.使用溫拌瀝青(Warm Mix Asphalt)、2.提高刨除舊瀝青回收再利用比例，做為新拌瀝青配比之材料來源、3.供應鏈導入低碳燃料、4.合約的材料採購須重視瀝青的碳排要求。2030~2040 年推動更進一步的減碳包括:1.鼓勵使用生物基黏結劑(Bio-component Binders)可部分抵減瀝青黏結劑生產的碳排、2.使用替代燃料降低加熱與乾燥過程的碳排放。



資料來源：【2】

圖 2.6 英國工程瀝青各期推動減碳比例

2.2 澳洲工程碳管理推動概況^[3]

澳洲新南威爾斯州於 2024 年提出「基礎設施脫碳交付政策」，承諾 2050 年達淨零排放(基準年為 2005 年)，其中減碳目標為至 2030 年減少 50%；2035 年減少 70%。此外政策適用對象為政府基礎設施交付之機構，以工程金額規模設定：

1. 金額大於 5,000 萬澳元建築項目。
2. 金額大於 1 億澳元其他基礎項目(如公路、鐵路、橋梁、水壩等)。

政策聚焦施工建設階段前期碳排放，包括材料生產(A1-A3)及施工活動(A4-A5)如圖 2.7。雖然政策主要關注前期碳排放，但鼓勵機構在具備能力時考慮整個生命週期碳排放 (Whole Life Carbon)；政策預期未來將擴大範圍以涵蓋整個生命週期碳排放，且量化要求分為三個階段，包括：

1. 可行性階段(Business Case)。
2. 規劃、設計及採購階段。
3. 專案完成階段。

機關應自行評估自身的碳管理能力屬於下列兩類何者，並依其能力層級適用相應之政策要求。

1. 基本能力(Foundational Capability)：機構在碳排放量化項目方面，經驗有限或沒有經驗，則要求必須遵守政策中所有強制性行動(Mandatory Actions)。
2. 成熟能力(Maturing Capability)：機構在碳排放量化項目方面有經驗，並

具備設定目標的能力，則要求必須遵守強制性行動，並鼓勵採取政策中概述的可選行動 (Optional Actions)。

政策的核心是指導碳管理活動的四項原則：

1. 應用碳減排層級

(1) 強制行動：

- a. 在項目構思和文件中，提供需要新建基礎設施的合理理由，包括考慮前期碳排放。
- b. 在案例選項分析中，必須考慮「不建選項」、升級現有基礎設施、資產多用途使用，以及低碳設計和施工方法。
- c. 在採購要求中納入低碳設計和施工方法。

(2) 層級排序(如圖 2.8)：

- a. 避免(Avoid)：評估對新工程的需求，探索替代方案(如需求管理、數位解決方案、政策變革)，或延長現有資產壽命並重新利用。
- b. 轉換 (Switch)：考慮替代的項目範圍、設計方法、材料和技術等，以減少前期碳排放，同時滿足服務需求。
- c. 改進(Improve)：採用可降低資源消耗，並提高製造和運輸效率，以及設計延壽的施工技術。

2. 評估前期碳影響

(1) 強制行動(所有機構)：

- a. 量化階段：須於案例規劃核准／設計／採購階段，以及項目竣工時，完成量化前期碳影響。
- b. 工程案例：須將碳排放納入選項分析內容，並依據相關指南估算各選項的前期碳排放量。
- c. 合同要求：須於契約中納入履約規範，要求承包商提供竣工資料，以做為前期碳排放報告之依據。

(2) 可選行動(具備成熟能力的機構)：

- a. 在最終工程案例中，為首選方案設定基線(Baseline)及前期碳減量目標。
- b. 將基線與減量目標之設定作業納入招標文件，並得要求投標廠商提出超越最終工程案例減碳目標的方案。
- c. 在詳細設計與施工階段，持續尋求並落實額外的前期碳減排措施。

3. 與市場接洽

(1) 強制行動：

- a. 明確界定機構在項目生命週期中，可加以控制或影響前期碳排放

的活動範疇。

b. 若工程案例階段尚未涵蓋脫碳議題，機構應以「如不採行，則須說明理由」為原則，將脫碳內容納入市場接洽，以瞭解市場在脫碳方面的意願與能力。

(2) 可選行動 (具備成熟能力的機構)：

a. 在概念設計簡報中納入要求，確保針對所有合理的脫碳機會進行盤點與捕捉。

b. 概念設計完成後，透過早期市場接洽流程，對前述脫碳機會進行市場測試。

c. 將低碳設計與施工方法納入投標評選標準。

d. 將前期碳減量目標轉化為具體可執行的工作。

4. 制定碳管理計畫

(1) 強制行動 (所有機構)：

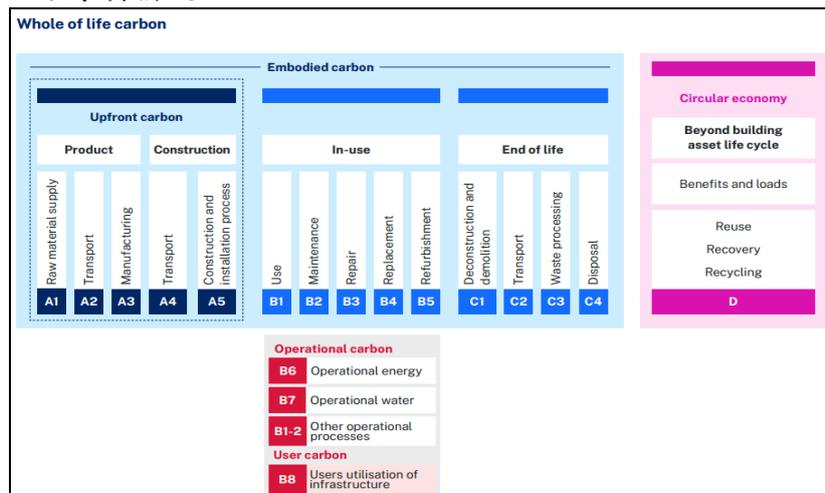
a. 必須於最終工程案例中編製完整的碳管理計畫。

b. 碳管理計畫必須文件化：包括預期參與之供應鏈成員，以及可用以減少碳排放的控制與影響機會；前期碳管理與量測相關的角色與責任分工；採購策略如何促進早期市場接洽與創新脫碳方法；前期碳量化結果；與前期碳減排目標達成相關之主要風險。

c. 確保項目治理框架中的碳管理角色與責任，與投標提案一致。

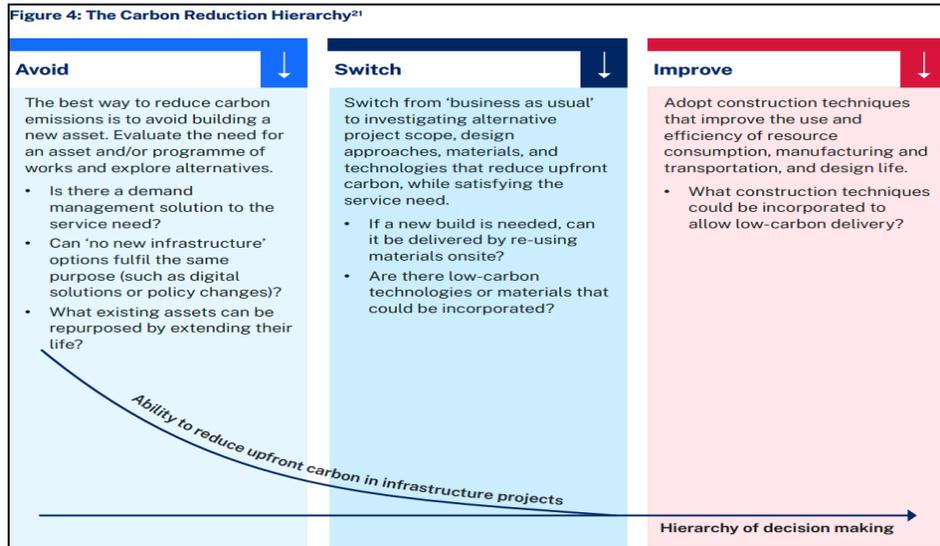
(2) 可選行動 (所有機構)：

a. 系統性整理並文件化本案之經驗教訓，以支持政府在碳管理實務上的持續精進。



資料來源：【3】

圖 2.7 新南威爾士州工程全生命週期碳排來源分類



資料來源: 【3】

圖 2.8 新南威爾士州工程減碳層級排序

2.3 日本工程碳管理推動概況^[4,5]

日本國土交通省國土技術政策綜合研究所於 2024 年 8 月公布「基礎建設期間溫室氣體排放計算手冊草案」，主要是呼應日本「2050 碳中和」目標，同時支持國家「GX 基本方針」(綠色轉型)，推動基礎建設施工階段的脫碳。

日本雖已有多項脫碳技術，但缺乏統一的 GHG 排放量計算方法，因此制定本手冊，藉此提供施工階段產生的 GHG 排放量與減量效益計算方法，此外同時促進建設工程中發包方與承包方共同應用，以推進碳盤查與減排行動。

該手冊計算僅限於基礎設施「施工階段」的 GHG 排放量，適用對象為「國家發包工程」承包商及協力公司，排放量計算方式為:排放量=活動量×碳排係數；另涵蓋的 Scope 類別與活動分類如表 2-2 所示。

表 2-2 日本碳排範圍與分類

Scope 類別	活動分類	計算與否
1	機械、現場運輸的燃料使用	是
2	外部電力等間接能源使用	是
3-1	材料製造的排放	是
3-3	調度階段排放	是
3-4	材料、機具運輸排放	是

3-5	建設廢棄物運輸與處理	是
3-2,6-8	資本財、租賃資產、差旅、通勤等	否

資料來源:【4】

日本在「GX 基本方針(綠色轉型)」政策中規劃了 14 項重點措施，涵蓋節能、製造業結構轉型(燃料與原料轉換)，以及家庭、商業、產業與運輸等領域的節能法規強化。GX 的核心目標在於透過導入蓄電池與智慧控制系統推動需量反應，建立具韌性、穩定且高效率的能源供需體系。其中機場、道路、水壩與下水道等基礎建設也被列入 14 項重點之一，藉此推動再生能源導入、降低整體能源消耗，並促進能達成淨零目標的都市與地區發展。

在資源循環方面，GX 政策強調提升整體生命週期的資源利用效率，鼓勵循環友善設計，並透過數位技術公開產品的循環度與碳排放資訊。日本同時支持具有減碳效果的水泥製造設備與碳酸鈣相關產品的導入，並研議如何擴大需求及市場規模。此外日本也要求建立水泥製程的碳排放評估方式，並先於中央政府管轄工程中導入，做為推動全國採用的前導示範。

日本政府於 2019 年發布「碳循環技術路徑圖」，將碳循環再利用技術依用途分為化學品、燃料與礦物等領域，並規劃三階段的發展戰略。為加速技術落地，日本運用「綠色創新基金」支持碳循環再利用研發，促進新產品商業化。其中涵蓋「創新負碳混凝土」材料與施工技術(包括固碳材料與製造系統)、高二氧化碳利用率混凝土的開發及其在道路與建築物的應用、混凝土固碳評估標準化研究、水泥製程的碳捕集系統開發，以及使用廢混凝土與焚燒灰渣等含鈣廢棄物生產再生水泥。此外日本在低碳混凝土配方中亦推動使用飛灰、高爐礦渣粉、矽粉與再生石料等再生資源。

日本提出「創新負碳混凝土」的概念，目標不僅降低排放，而是積極開發可主動吸收並固存二氧化碳的建築材料。同時將水泥製程中的 CO₂ 固定於工業廢棄物中，亦體現碳捕捉與利用的具體應用，然而此類技術的商業化推進仍需政策持續支持及產業合作。此外日本也特別重視「測量循環度與碳排放」並公開透明資訊，同時提出建立生命週期碳排放(LCA)、生命週期評估(LCE)與生命週期成本(LCC)的綜合評價體系，並針對固碳評估進行標準化研究。水泥製程的碳排放評估方式也被要求標準化，以確保材料減碳效果具備可量化、可追溯與可驗證性，進而成為碳定價制度與 ESG 投資的重要基礎。對公路工程而言，未來的材料選擇不僅須符合強度與成本等性能要求，也將需通過更嚴格的生命週期碳足跡門檻。

2.4 「國際橋梁及結構工程學會」工程碳管理策略^[6]

「國際橋梁及結構工程學會(International Association For Bridge And Structural Engineering, IABSE)」推動碳管理的兩大核心目標是：減少結構物的「蘊含碳」(Embodied Carbon,即材料製造和施工階段的碳排放)，以及將碳足跡評估納入設計優化流程；並提出具體策略。

1. 減少生命週期碳排放(Life Cycle Carbon Reduction):從橋梁的整個生命週期(包括材料選擇、設計、施工、營運、維護到拆除)來考量碳排放，而不僅是著重於單一階段。

(1) 優化材料選擇：

- a. 鼓勵使用低碳的材料，例如：採用環保高效混凝土、用回收骨料(Recycled Aggregates)的結構混凝土，以及具有低碳和永續性證明的石材(如石灰岩、花崗岩)。
- b. 最大化使用工業副產品(如爐渣、飛灰)來替代普通波特蘭水泥(Ordinary Portland Cement, OPC)，以顯著減少與水泥生產相關的排放。
- c. 鼓勵使用鋼鐵廢料(Steel Scrap)而不是原始鋼材(Virgin Steel)，因廢鋼製程的碳排放較低。

(2) 設計優化與輕量化：

- a. 推動參數化設計(Parametric Design)和結構優化，減少所需材料的總量，目標是在不犧牲性能的前提下，實現材料成本和碳排放達到至少 20%減量。
- b. 強調設計應考慮長期性能、彈性、耐久性和美觀，以延長橋梁的使用壽命，從而減少初始的隱含碳排放。

2. 建立 SCORBS 橋梁碳評級制度:IABSE 與英國等工程機構共同發展 SCORBS(Sustainable Carbon Rating For Bridges)概念，目的在建立橋梁碳排放的評級標準，提供業主與設計單位一套可量化、可比較的評估工具。將橋梁的「蘊含碳」(A1-A5 模組)量化，並將碳足跡標準化(Normalized)，計算每平方米的 CO₂ 當量。同時用字母(如 A++ 到 G)和顏色標籤來清晰傳達橋梁設計的碳足跡表現，使所有利害關係者都能快速瞭解項目的永續性水平。表 2-3 為國際橋梁減碳案例。

表 2-3 低碳排放橋梁案例

橋梁類型	橋名	減碳特點(包含 A1~A5 範圍碳排)
人行橋	漢普頓人行橋 (Hampton Footbridge)	本工程於早期即設定 A+等級的碳排放目標，並透過最大化材料使用效率、線位優化以減少橋梁長度與橋墩高度，同時採用階梯式構造兼作側向支撐，以全面降低前期碳排放。
人行橋	盧旺達 Bridges	大量使用回收材料(主跨纜索、鋼材)，僅少量新材料(基礎中的水泥、現場柴油)。
公路橋	Honey Monster Bridge	本工程最終達成每平方公尺 840 公斤 CO ₂ e 的碳排放績效，符合 SCORPS 評級標準中的 A 級要求。
鐵路高架橋	HS2 Team Valley Viaduct	採用短跨重複且高度優化的截面設計，以最大限度減少材料用量，並透過大規模預製化施工降低現場浪費並提升施工效率。
特殊性橋梁	克利夫頓吊橋 (Clifton Suspension Bridge)	維護階段的碳排放量極低(每年約 3~4 公斤 CO ₂ e/m ²)，並以延長既有結構的使用壽命為核心策略，以利未來採用更低碳的材料與技術。

資料來源: 【6】

2.5 PAS 2080 碳管理內容介紹^[7]

PAS 2080(Publicly Available Specification 2080)為英國標準協會(BSI)發布的基礎建設碳管理標準，旨在提供政府、業主、顧問、承包商及供應鏈一套一致的減碳流程與要求。其核心理念為以「全生命週期」與「系統思維」進行碳管理，並藉由透明資訊與跨單位協作，提升基礎設施的整體減碳效益。近年來 PAS 2080 已成為國際公共工程減碳的主要實務規範之一。

1. PAS 2080 的核心原則

(1) 全生命週期碳管理

PAS 2080 要求從需求釐清、規劃設計、採購、施工到營運維護

等階段全面盤查碳排放，並將決策過程中的每一項變更都視為可影響碳排的重要因子。此作法使減碳不再局限於施工階段，而是在專案早期即介入、避免不必要的建設或材料使用。

(2) 系統思維(System Thinking)

鼓勵以整體系統角度檢視需求，例如：是否可透過既有設施改善達成需求，或是可調整設計縮小規模，以及可否能以替代材料減少隱含碳。此思維有助在不降低功能的前提下達到最大程度的減碳。

(3) 角色共享與協作

透過資訊透明、職責明確，整個工程體系得以建立共同減碳文化。同時 PAS 2080 強調業主、設計顧問、承包商與供應鏈需協同運作。

- a. 業主：制定減碳目標與政策，確保專案遵循碳管理流程。
- b. 設計單位：提出低碳設計與材料最佳化方案。
- c. 承包商：落實低碳施工與能源管理。
- d. 供應鏈：提供可靠的材料碳排資訊。

2. 架構與主要內容: PAS 2080 內容可概分為四大工作面向。

(1) 領導與管理(Leadership and Management)

此部分強調管理階層的承諾與制度化的重要性，確保碳管理不只是技術議題，而是決策核心。

- a. 制定碳管理政策與策略。
- b. 將碳管理納入專案管理流程。
- c. 設定碳減量目標與關鍵績效指標(KPI)。

(2) 全生命週期碳量化(Whole Life Carbon Quantification)

PAS 2080 要求建立一致且透明的碳盤查方法，包括：

- a. 材料生產與運輸(隱含碳)。
- b. 施工階段排放。
- c. 使用階段能源消耗。
- d. 拆除及末端處理。

同時需建立基線(Baseline)、目標(Target)與實際排放(Actual)，讓減碳成果可被客觀衡量與驗證。

(3) 減碳策略與解決方案(Carbon Reduction)

PAS 2080 特別強調「減碳成本效益(Carbon Value)」，透過成本與碳排的綜合比較，協助選擇最有利的方案，並鼓勵在不同階段提出具體減碳措施，包括：

- a. 需求端減碳：避免新建或縮小規模。
 - b. 設計減碳：降低材料需求、結構優化、模組化設計。
 - c. 材料減碳：採用再生混凝土、低碳鋼材或替代材料。
 - d. 施工減碳：電動機具、綠電使用、優化工地管理。
 - e. 營運減碳：能源效率提升、智慧管理系統。
- (4) 資訊透明與供應鏈參與(Reporting And Engagement)
- 此要求提升工程的可比較性，有助於建構產業的低碳採購與透明供應鏈，同時專案需建立完整記錄，內容包括：
- a. 決策依據。
 - b. 碳排計算方法。
 - c. 材料數據來源與環境產品宣告。
 - d. 減碳措施與成效。
 - e. 可追溯審核資料。
3. 導入效益
- 實際導入 PAS 2080 的政府與企業可獲得之效益，包括：
- (1) 減少不必要工程:藉由早期需求審查，可避免過度設計或不必要建設，是最具成本效益的減碳方式。
 - (2) 材料最佳化與成本下降:透過設計優化，常可減少 10~30%的材料用量，降低隱含碳並節省施工成本。
 - (3) 建立一致的減碳流程:使各單位共享一致的標準、資料格式與方法論，促進跨部門協作。
 - (4) 支持淨零政策: PAS 2080 已成為許多公共工程與大型基礎建設的採購要求，有助達成國家層級的淨零排放目標。

三、國內交通工程碳排管理相關研究

3.1 交通運輸工程碳排放量推估模式建立與效益分析之研究^[8]

本所於 100 年彙集國外交通運輸工程節能減碳評估作業相關文獻，並依據國內外碳排放量評估規範與案例，發展交通運輸工程排碳量推估方法，並廣泛蒐集國內外相關參數、建立碳排放量計算參數資料庫，做為發展交通運輸工程碳排放量推估模式之依據。

本研究建立工程碳排放量推估模式為「活動強度」乘以「碳排係數」，同時建立相關計算流程及程序，並首次示範利用工程單價分析表中(如表 3-1~表 3-3)，材料、機具及人員資料，計算各工作項目產生之單位碳排(長

度、體積或重量)，利用單位碳排乘於各工項之數量(圖 3.1)，最後總和即為該工程產生之總碳排放量。

表 3-1 工程單價工作項目

項次	工作項目	金額(元)
壹	發包工程費	388,013,332
壹.一	直接工程費	329,606,705
壹.一.1	土建工程	211,554,606
壹.一.2	電氣工程	5,558,350
壹.一.3	管線工程	98,412,476
壹.一.4	跨越鶯歌大排水溝橋樑部份	4,448,583
壹.一.5	雜項工程	9,632,690
壹.二	間接工程費	58,406,627
壹.二.1	勞工安全衛生費	3,199,830
壹.二.2	環境保護措施費	2,880,166
壹.二.3	品質管制作業費	4,179,844
壹.二.4	承包商利潤及管理費	24,725,861
壹.二.5	工程保險費	4,944,101
壹.二.6	營業稅	18,476,825
貳	工程管理費	14,583,696
參	空氣污染防治費	1,034,702
肆	其他費用	365,270

資料來源：【8】

表 3-2 工程單價項目及說明

項次	項目及說明	單位	數量	單價	複價	編碼(備註)
壹	發包工程費		1.00	388,013,332	388,013,332	
壹.一	直接工程費		1.00	329,606,705	329,606,705	
壹.一.1	土建工程	全	1.00	211,554,606	211,554,606	
壹.一.1.1	基地清除與掘除	M2	8,029.00	25	200,725	023210A00A,*
壹.一.1.2	構造物開挖,挖土方,機械挖	M3	11,871.00	44	522,324	02316#E023,含抽排水,*
壹.一.1.3	構造物開挖,軟岩,機械挖	M3	64,579.00	90	5,812,110	0231650H63,含抽排水,*
壹.一.1.4	現地河床剝回填	M3	21,534.00	25	538,350	023190D003,*
壹.一.1.5	構造物回填	M3	13,953.00	50	697,650	023174000Z,*
壹.一.1.6	餘方近運利用	M3	41,322.00	32	1,322,304	0232310003,*
壹.一.1.7	回填控制性低強度混凝土	m3	3,825.00	1,420	5,431,500	0223502141-1,*
壹.一.1.8	混凝土打除(無筋),未含運費	M3	359.00	255	91,545	0222012414,*
壹.一.1.9	混凝土打除(含鋼筋),未含運費	M3	10.00	420	4,200	0222011414,*
壹.一.1.10	混凝土切除(含鋼筋),未含運費	M2	12.00	5,000	60,000	02220114Z4,*
壹.一.1.11	路床基層滾壓費	M2	2,047.00	15	30,705	02742000B2,*
壹.一.1.12	密級配瀝青混凝土鋪面	M3	205.00	6,800	1,394,000	0274203B03,#,*
壹.一.1.13	級配粒料底層,碎石級配	M3	512.00	780	399,360	027261000B,*
壹.一.1.14	瀝青透層	M2	2,047.00	26	53,222	0274500002,*
壹.一.1.15	瀝青黏層	M2	2,047.00	27	55,269	0274700001,*
壹.一.1.16	臨時擋土樁設施,鋼軌樁50kg/m,L=9m	支	2,656.00	1,650	4,382,400	0225539031,*
壹.一.1.17	臨時擋土樁設施,鋼軌樁 50kg/m輔助施工	支	1,328.00	3,190	4,236,320	0225530041,*
壹.一.1.18	臨時擋土樁設施,鋼板樁SP-III,L=9m,(含引孔)	M	1.00	12,000	12,000	0225540C21,單邊水平長度,未含擋土支撐系統,*
壹.一.1.19	水平支撐(H型鋼水平支撐,含橫擋及角撐)	T	208.00	8,780	1,826,240	022562200Z,平均單價,*

資料來源:【8】

表 3-3 工程單價材料、機具及人員分析

壹.一.1.2	工作項目:構造物開挖,挖土方,機械挖		單位:M3		計價代碼:02316#E023	
	工料名稱	單位	數量	單價	複價	編碼(備註)
	開挖機,0.7~0.79m3	時	2.500	700	1,750	5000004407001
	開挖面保護	式	1.600	50	80	0231212A4B1
	操作手	時	2.500	250	625	L000005100001
	抽排水	式	1.000	900	900	02240A0003
	普通工	工	0.800	1,200	960	L000006000002
	零星工料及損耗	式	1.000	85	85	W0127110004
	合計	M3	100.000		4,400	
	計	M3	1.000		44	
	人工: 16 機具: 18					
	材料: 0 雜項: 10			每 M3 單價計	44	

資料來源:【8】

材料類別	材料名稱	單位	排放量數 (kgCO ₂ e)	資料來源	生命週期範圍	國別	備註(材料編碼)
水泥類	水泥	kg	0.79	【4】	N/A	日本	M030521141A
水泥類	水泥 I 型熟料	kg	0.51	【16】	N/A	台灣	M03051
水泥類	水泥 II 型熟料	kg	0.50	【16】	N/A	台灣	M03051
水泥類	白水泥	kg	0.96	【1】	N/A	台灣	M030521141A
水泥類	白水泥 ²	T	979.33	【1】	N/A	台灣	更新
水泥類	石膏	kg	0.22	【1】	N/A	台灣	更新
水泥類	石膏板(9mm)	m ²	2.12	【1】	N/A	台灣	更新
水泥類	石膏磚(66.5×50×10cm)	塊	2.09	【1】	N/A	台灣	更新
水泥類	矽酸鈣、矽酸鈣	kg	0.24	【1】	N/A	台灣	更新
水泥類	矽酸鈣板(12mm)	m ²	2.28	【1】	N/A	台灣	
水泥類	高爐水泥(爐石粉 30%)	kg	0.31	【1】	N/A	台灣	M03051
水泥類	高爐水泥(爐石粉 30%)	T	307.19	【1】	N/A	台灣	
水泥類	高爐水泥(爐石粉 45%)	kg	0.26	【1】	N/A	台灣	M03051
水泥類	高爐水泥(爐石粉 45%)	T	256.00	【1】	N/A	台灣	
水泥類	預拌廠加工拌合	m ³	1.25	【1】	N/A	台灣	更新
水泥類	爐石粉	kg	0.07	【1】	N/A	台灣	M03050
水泥類	爐石粉	T	68.05	【1】	N/A	台灣	更新
木材	Timber sections (75 mm [1] 100 mm)	m ³	281.00	【3】	N/A	斯里蘭卡	M06060
木材	Timber, air dried, roughsawn, untreated(alcorn)	kg	1.67	【2】	Cradle to Grave	紐西蘭	M06060
木材	Timber, air dried, roughsawn, untreated(gabi)	kg	1.80	【2】	Cradle to Grave	紐西蘭	M06060
木材	Timber, Kiln dried, gas fired, dressed(alcorn)	kg	1.35	【2】	Cradle to Grave	紐西蘭	M06060
木材	Timber, Kiln dried, gas fired, dressed(gabi)	kg	1.33	【2】	Cradle to Grave	紐西蘭	M06060
木材	Totals for Timber and Timber Products in Timber LVL Storage Building	kg	1.14	【6】	Cradle to Grave	紐西蘭	M06060
木材	Wood	kg	1.45	【7】	N/A	瑞典	M06060
木材	木材原材(林管木)	m ³	904.60	【1】	N/A	台灣	M06060

資料來源: 【8】

圖 3.1 碳排放量計算參數資料庫

該研究以花蓮臺九線省道改善計畫為案例分析，改善計畫包括「蘇澳至東澳」、「南澳至和平」、「和中至大清水」三個路段，總計新建改善長度 38.4 公里，隧道合計 23.6 公里(約占總長度的 61%)，以 A-2、A-3、C-1、C-2 標進行分析，結果如表 3-4~表 3-6 所示。

1. 蘇澳東澳段(A 段)

蘇澳東澳段工程依工程特性分為 3 個工程標及 1 個機電標，共計 4 個施工標。就工程種類單純與否分析，A-2 標最為單純，為單一隧道工程；A-1 及 A-3 標則皆為具有路工、橋梁和隧道的綜合工程。

2. 南澳和平段(B 段)

南澳和平段依工程特性分為 4 個工程標及 1 個機電標，共計 5 個施工標。工程內容共包括路堤路塹段 6 處、橋梁段 6 座及隧道段 3 座，其中包含兩座長隧道(觀音隧道約 7.9 公里、谷風隧道約 5 公里)。

3. 和中大清水段(C 段)

和中大清水段依工程特性分為 2 個工程標及 1 個機電標，共計 3 個施工標。主要以隧道工程為主，並包含部分路工及橋梁工程。

表 3-4 第 A-2 標工程施工主要碳排放源比較

排名	碳排放源	排碳量 (tonCO _{2e})	佔本標總排碳量 百分比	備註
1	預拌混凝土	25,115	23.17%	
2	施工機具	17,187	15.86%	直接排放量
3	噴凝土	17,063	15.74%	
4	鋼構材及配件	8,708	8.03%	
5	鋼筋	8,407	7.76%	
6	岩栓、鋼支保	7,831	7.22%	
7	炸藥	6,140	5.66%	

資料來源：【8】

表 3-5 第 A-3 標工程施工主要碳排放源比較

排名	碳排放源	排碳量 (tonCO _{2e})	佔本標總排碳量 百分比	備註
1	鋼筋	17,206	29.58%	
2	預拌混凝土	16,813	28.89%	
3	施工機具	3,528	6.07%	直接排放量
4	噴凝土	1,590	2.73%	
5	鋼構材及配件	1,207	2.08%	
6	炸藥	424	0.73%	
7	岩栓、鋼支保	223	0.38%	

資料來源：【8】

表 3-6 第 C-1 標工程施工主要碳排放源比較

排名	碳排放源	排碳量 (tonCO _{2e})	佔本標總排碳量 百分比	備註
1	預拌混凝土	30,066	26.09%	
2	施工機具	18,572	16.12%	直接排放量
3	噴凝土	12,397	10.76%	
4	鋼筋	12,369	10.73%	
5	鋼構材及配件	9,832	8.53%	
6	炸藥	6,369	5.53%	
7	岩栓、鋼支保	4,189	3.64%	

資料來源：【8】

表 3-7 第 C-2 標工程施工主要碳排放源比較

排名	碳排放源	排碳量 (tonCO _{2e})	佔本標總排碳量 百分比	備註
1	預拌混凝土	17,815	27.23%	
2	施工機具	10,569	16.15%	直接排放量

3	噴凝土	8,221	12.56%	
4	鋼構材及配件	7,078	10.82%	
5	鋼筋	6,125	9.36%	
6	炸藥	4,296	6.56%	
7	岩栓、鋼支保	2,112	3.23%	

資料來源: 【8】

3.2 交通運輸工程節能減碳規劃設計手冊研究與編訂^[9]

本所於 101 年提出簡易型工程碳排評估模式，此模式適用於可行性評估階段優選方案之額外評估指標項目。由於可行性階段為初步評估工程內容之可能性，因此相關資料較為粗略，其主要內容針對環境、路線、交通、工程結構、施工可行性、經費等問題進行初步分析，並依據效益評估之原則、成本與實際需求等探討方案之可行性。本簡易型評估模式係利用前期成果及歷史工程案例進行彙整與評析，針對不同工程類型(橋梁、隧道及路工)提出簡易計算方式，以橋梁為例，僅需知橋面板面積、橋梁結構形式及下部結構類型，即可運用本模式所建立之基礎係數進行加總，便可快速推估各方案之碳排放量，本研究將工程分為路工段、橋梁段、隧道段分述如下。

1. 路工段

路工段之計算可分成鋪面工程與土方工程。鋪面工程以單位面積進行計算，內容則考量不同鋪面之組成，分為柔性鋪面與剛性鋪面；土方工程則以單位體積進行計算之。路工段建議碳排係數，如表 3-8 所示。

路工段碳排放量評估計算式為：

$$\text{路工段碳排放量} = \Sigma(\text{鋪面面積} \times \text{碳排係數}) + (\text{土方填築體積} \times \text{碳排係數})$$

表 3-8 路工段碳排放計算推估表

工程項目		計算單位	碳排放係數建議	案例數量
鋪面工程	柔性鋪面	tonCO2e/m2	0.058	5
	剛性鋪面		0.071	1
土方工程	路堤填築	tonCO2e/m3	0.00162	5

資料來源: 【9】

2. 橋梁段

橋梁段工程之估算需分成上、下部結構分別評量，計算單位皆以單位橋面板面積計算之。上部結構部分評估時需考量不同主梁材質、主梁型式及施作工法等差異；下部結構之評估方式主要以基樁型式為主，惟考量規劃設計報告內容差異，使用者亦可依據橋下是否跨河、橋梁平均

淨高、有無橋墩等方式進行評量。橋梁段碳排放量評估計算式為：

$$\text{橋梁段碳排放量} = \Sigma (\text{橋面板面積} \times \text{工法碳排放係數}) + (\text{橋面板面積} \times \text{下部結構碳排放係數})$$

上部結構部分，使用者應針對主梁材質後，再依據主梁型式與適用之工法進行計算，如某混凝土橋箱型梁採用場鑄逐跨工法，其碳排放量便可採用建議係數 0.32 tonCO₂e/m² 計算之。其餘上部結構碳排放建議係數，如表 3-9 所示。

表 3-9 橋梁段上部結構碳排放建議係數

工程項目		計算單位	碳排放係數建議	案例數量
混凝土橋	I 型梁	預鑄吊裝工法	0.39	3
	箱型梁	場鑄懸臂工法	0.48	7
		場鑄逐跨工法	0.29	4
		預鑄節塊工法	0.44	1
		就地支撐工法	-	0
		無指定工法	0.42	12
鋼橋	鋼箱梁	吊裝工法	1.35	8

資料來源：【9】

下部結構部分，若規劃報告內容已明確說明基樁型式者，如直接基礎、樁基礎、沉箱基礎、井式基礎等，建議可直接參考表 3-10 之基樁型式碳排放建議係數乘橋面板面積進行計算；若報告中未說明基樁之型式，亦可使用無指定基礎之係數 0.42 tonCO₂e/m² 計算之。

使用者亦可依據規劃報告之資訊差異，考量不同計算方式，如以橋梁是否跨越河川區分，內容如表 3-11 所示；使用者亦可利用橋下平均淨高與是否有橋墩進行碳排放評量，例如某橋梁非跨越河川、具有橋墩且平均淨高於 9.5m 以上，便可選用表 3-12 依據橋下平均淨高差異所建議之係數 0.44 tonCO₂e/m² 計算之。

表 3-10 橋梁段下部結構碳排放建議係數-以基樁型式區分

工程項目		計算單位	碳排放係數建議	案例數量
基樁型式	直接基礎	tonCO2e/m2	0.31	4
	樁基礎		0.47	11
	沉箱基礎		0.21	1
	井式基礎		-	0
	單跨(僅為橋台)		0.53	8
	無指定基礎		0.42	17

資料來源:【9】

表 3-11 橋梁段下部結構碳排放建議係數-以是否跨河區分

下部結構類型		計算單位	碳排放係數建議	案例數量
跨河	多跨	tonCO2e/m2	0.61	4
	單跨		0.44	6
非跨河	多跨		0.33	8
	單跨		0.75	1

資料來源:【9】

表 3-12 橋梁段下部結構碳排放建議係數-以橋下平均淨高區分

下部結構類型		高度	計算單位	碳排放係數建議	案例數量
跨河	多跨	-	tonCO2e/m2	0.61	4
	單跨	6.5m 以上		0.51	4
		6.5 m 以下		0.31	2
非跨河	多跨	9.5 m 以上		0.44	4
		6.5m~9.5 m		0.27	2
		6.5 m 以下		0.23	2
	單跨	-	0.75	1	

資料來源:【9】

3. 隧道段

隧道段工程之碳排放評量採用隧道開挖地質資訊進行碳排放計算，該研究根據專家訪談之結果，隧道地質與工法具相關性，故僅考慮隧道地質之影響。首先將隧道斷面積與長度換算成體積後，再配合地質組成之比例進行計算，該手冊依據國內地質成分與施工成本之關係，推估地質差異間之比例。使用者若無法得知地質資訊時，亦可利用表 3-13 所提供之地質不分類係數進行推估。隧道段工程主要計算式為：

$$\text{隧道段碳排放量} = \Sigma(\text{隧道體積} \times \text{各地質所占比例} \times \text{各地質類別碳排放係數})$$

表 3-13 隧道段碳排放計算推估表-以地質組成區分

工程項目		計算單位	碳排放係數建議	案例數量
地質組成	地質不分類	tonCO2e/m3	0.184	4
	第 I 類		-	0
	第 II 類		0.1272	4
	第 III 類		0.1527	4
	第 IV 類		0.1832	4
	第 V 類		0.2199	4
	第 VI 類		0.2638	4

資料來源:【9】

3.3 國、省道工程減碳導入 PAS 2080^{[10][11]}

行政院公共工程委員會於 113 年 6 月 24 日工程技字第 1130200603 號函指示：「...研議訂定所管工程類別全生命週期減碳作業指引」，以加速落實國家 2050 淨零目標並接軌國際；爰公路局及高公局辦理碳管理相關研究，並推動 PAS2080。

1. 國道工程

為掌握高速公路工程之碳排放特性，高公局首先依工程屬性將其分為路堤、橋梁及隧道三大類，並以各類型工程的單位工程數量為基礎，結合其碳排放量與工程預算，建立不同工程類型的「平均單位碳排放量」與「預算」之間的相關性。

在碳排放量的估算上，高公局採用「排放係數法」。此方法係以單一排放源的「活動數據(活動量)」(Activity Data) 乘上對應的「排放係數」(Emission Factor) 以計算其排碳量 (Emissions)。在明確界定的範疇內，將高速公路工程全生命週期所涉及的排放源全面彙整，據以求得工程總碳排放量。

計畫蒐集環境部產品碳足跡資訊網、既有碳盤查成果及各項公告排放係數，建置排碳係數資料庫。透過線上排碳估算輔助程式，讀取工程預算書之 XML 檔後，可將資源統計表中的每一項目，自動比對至資料庫中適切的排放係數，並視需求進行單位換算。程式再依據預算書中的活動量，自動計算各工項的單位排碳量及整體工程的總排碳量。

計畫共分析 67 件高速公路工程案例，並使用 1,322 筆排碳係數資料，據以推估路堤、橋梁及隧道三類工程之單位碳排放量(如圖 3.2)，做為後續碳管理與估算模型之基礎。

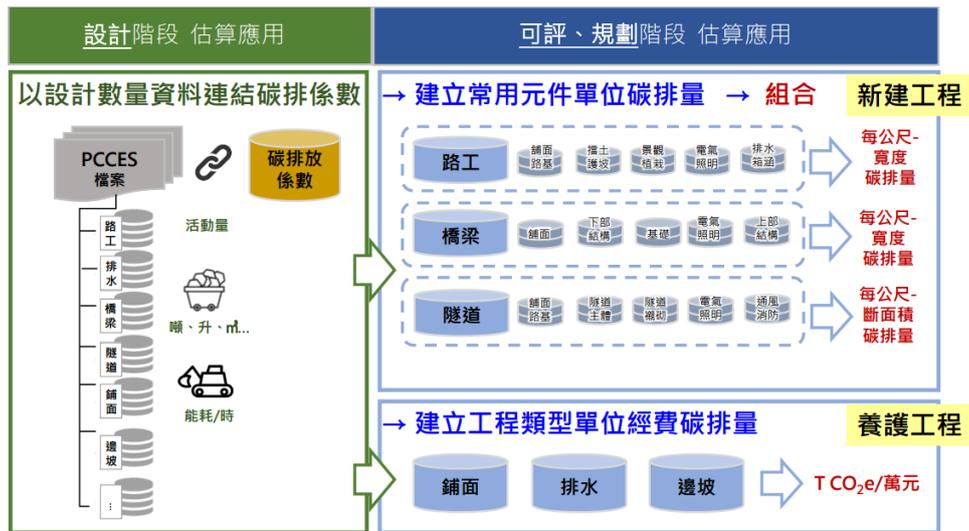


圖 3.2 各階段碳排放量計算原則

2. 省道工程

為掌握省道工程之碳排放特性，公路局首先依工程屬性將其分為道路(高架、一般)、橋梁(高架、一般)及隧道三大類，並以各類型工程的單位工程數量為基礎，結合其碳排放量，建立不同工程類型的「平均單位碳排放量」。在碳排放量的估算上，公路局亦採用「排放係數法」，在明確界定的範疇內，將公路局工程全生命週期所涉及的排放源全面彙整，據以求得工程總碳排放量。

計畫共分析 23 件省道工程案例(如圖 3.3)，並彙整 6,149 筆排碳係數資料，據以推估路堤、橋梁及隧道三類工程之單位碳排放量(如圖 3.2)，做為後續碳管理與估算模型之基礎。

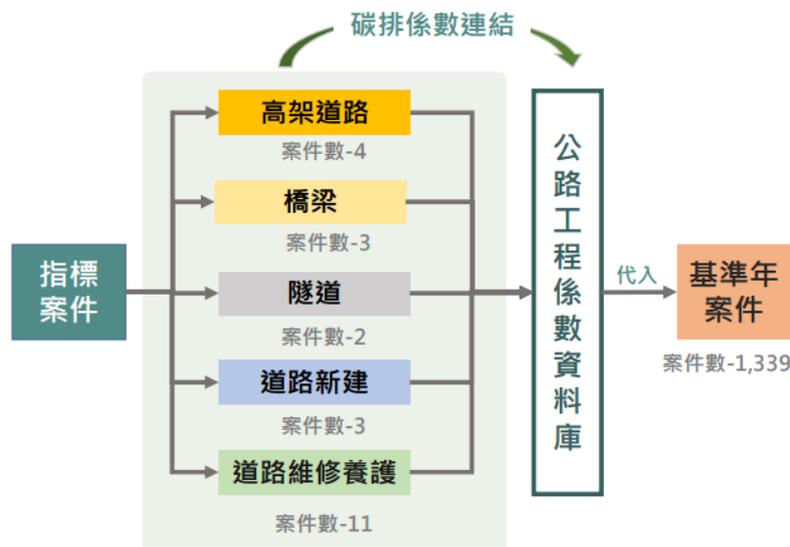


圖 3.3 各類工程碳排放量計算

3.4 本所與兩局研究之差異性分析

本所蒐集兩局近期研究成果，針對工程詳細碳排與概估碳排計算之差異進行分析。

1. 詳細碳排計算

詳細碳排放量計算一般適用於基本設計及細部設計階段，此時工程內容已具體明確，並可取得較完整且精確之工程數量資料。計算時係依據工程單價分析表，逐一拆解各工作項目中所包含之材料用量、施工機具使用情形及人力投入等資訊，以此推估各工項之活動強度。

在計算流程上，先針對各工作項目計算其單位碳排放量(可依工程特性以長度、體積或重量等單位表示)，再將單位碳排放量乘以對應之工程數量，彙整後即可得出各工項之碳排放量，最終加總即為該工程整體之總碳排放量。其基本計算原則為：**碳排放量 = 活動強度 × 排放係數**其中活動強度係由工程數量及單價分析內容推算而得，排放係數則反映材料生產、運輸、施工機具使用等過程所產生之碳排放特性。

經比較，兩局與本所在詳細碳排計算之方法論與操作流程上皆具一致性，均係以工程數量及單價分析結果推估活動強度，並乘以相應之排放係數進行計算。差異在於兩局所採用之排放係數已更新至較新版本資料庫(如圖 3.4~圖 3.5)，可更即時反映近年材料製程、能源結構及施工技術之變化，使計算結果在精準度與代表性上更具參考價值。

工項大類	工項編碼	工項名稱	工項單位	工項碳排放係數	資料來源	年份
金屬材料	M0506020009	產品·金屬材料·鐵線	KG	2.13	工程會(2024/05)	2023
金屬材料	M0506020702	產品·鐵線	KG	2.13	工程會(2024/05)	2023
金屬材料	M0506020709	產品·金屬材料·鐵線·(#20·D=0.889mm)	KG	2.13	工程會(2024/05)	2023
金屬材料	M05060CB009AX	產品·金屬材料·鋼料·型鋼(已扣抵殘值)	KG	2.13	工程會(2024/05)	2023
金屬材料	M05060D0009	產品·鐵件	KG	2.13	工程會(2024/05)	2023

圖 3.4 各類最新工項碳排係數(1)

工項代碼	工項名稱	單位	排碳係數(kgCO ₂ e)	能耗參數	能耗參數單位	燃料	排碳係數(kgCO ₂ e)	資料來源	公告年份
E4172X32181	傾卸卡車 7 m ³ (21T)	時	18.8705	25.85	L/hr	柴油(未燃燒·2020)	0.73	環保署	2022
E4172X32A81	傾卸卡車 7 m ³ (21T)	時	85.822	25.85	L/hr	柴油(於公路運輸移動源使用·2021)	3.32	環境部(政府資料開放平台)	2023
E3511X11561	挖土機 0.52 m ³	時	42.1148	12.46	L/hr	柴油(於公路運輸移動源使用·2020)	3.38	環保署	2022
E3511X11891	挖土機 0.8 m ³	時	47.9888	13.48	L/hr	柴油(於鐵路運輸與非道路運輸移動源使用·2021)	3.56	環境部(政府資料開放平台)	2023
E3531A0001	混凝土攪拌輸送車 3.5 m ³	時	65.6734	19.43	L/hr	柴油(於公路運輸移動源使用·2020)	3.38	環保署	2022
E4172X33001	吊卡車	時	12.45	3.75	L/hr	柴油(於公路運輸移動源使用·2021)	3.32	環境部(政府資料開放平台)	2023
E3814YL4501	膠輪式吊車 45.4 MT	時	39.84	12	L/h	柴油(於公路運輸移動源使用·2021)	3.32	環境部(政府資料開放平台)	2023
E3814YL1301	膠輪式吊車 13.6 MT	時	106.8	30	L/hr	柴油(於鐵路運輸與非道路運輸移動源使用·2021)	3.56	環境部(政府資料開放平台)	2023
E3814YL2701	膠輪式吊車 27.2 MT	時	140.62	39.5	L/hr	柴油(於鐵路運輸與非道路運輸移動源使用·2021)	3.56	環境部(政府資料開放平台)	2023
E3512X90001	手推式夯實機 0.5 MT	時	2.492	0.7	L/hr	柴油(於鐵路運輸與非道路運輸移動源使用·2021)	3.56	環境部(政府資料開放平台)	2023
E3524X40001	破石機	時	47.9888	13.48	L/hr	柴油(於鐵路運輸與非道路運輸移動源使用·2021)	3.56	環境部(政府資料開放平台)	2023
E3814YL45A1	輪式吊車	時	140.62	39.5	L/hr	柴油(於鐵路運輸與非道路運輸移動源使用·2021)	3.56	環境部(政府資料開放平台)	2023
E3533A0001	混凝土面磨平機	時	2.424	4	kw	電力線足跡(2021)	0.606	環境部(政府資料開放平台)	2023
E3531A2001	震動機	式	60.6	100	度/hr	電力線足跡(2021)	0.606	環境部(政府資料開放平台)	2023
...	...								

圖 3.5 各類最新工項碳排係數(2)

2. 概估碳排計算

概估碳排放量計算一般適用於可行性評估及綜合規劃階段，此階段工程內容尚未細化，工程數量及施工方式多仍屬概略性質，尚難以進行逐項之詳細碳排計算。爰此概估碳排計算係以前述詳細碳排計算方法為基礎，回溯盤點過去已完成或具代表性之工程案例，彙整其實際碳排計算成果。

在操作上，先依工程性質與型態進行分類(如依工程類型、結構形式或施工特性等)，再統計分析各類工程之碳排放表現，推導出具代表性之單位碳排放量指標，其單位可依規劃階段需求，以工程面積、工程長度或工程經費等方式表示。後續於新案評估時，僅需將規劃階段所掌握之概略工程規模，乘以對應之單位碳排放量，即可快速推估工程整體之碳排放量(如表 3-14)。

此種計算方式可在資料尚未完整之前，提供快速、具一致性之碳排估算結果，可做為方案比較、路線選擇或低碳策略研擬之參考依據，並可於後續設計階段再逐步轉換為詳細碳排放量計算，以提高估算精度。

表 3-14 概估碳排計算分類及案件數

單位	工程分類	分析案件數	碳排量單位
公路局	1. 高架道路	23 件	tCO ₂ e/m ²
	2. 橋梁		tCO ₂ e/m ²
	3. 隧道		tCO ₂ e/m ²
	4. 道路新建		tCO ₂ e/m ²
	5. 道路維修養護		tCO ₂ e/百萬元
高公局	新建工程	62 件	tCO ₂ e/m ²
	1. 路工		tCO ₂ e/m ²
	2. 橋梁		tCO ₂ e/m ²
	3. 隧道		tCO ₂ e/m ²
	養護工程		tCO ₂ e/百萬元
	1. 鋪面		tCO ₂ e/百萬元
	2. 排水		tCO ₂ e/百萬元
3. 邊坡	tCO ₂ e/百萬元		
本所	1. 路工	18 件	tCO ₂ e/m ²
	2. 橋梁		tCO ₂ e/m ²
	3. 隧道		tCO ₂ e/m ²

	4. 維護工程	碳排放固定百分比
--	---------	----------

資料來源:本研究自行整理

3. 各單位概估碳排計算差異性

本研究針對各單位碳排放量計算方式進行差異性分析(如表 3-15)。

(1) 詳細碳排放量計算:

各單位所採用之計算架構與方法，與本所於 2011 年提出之計算方式一致，皆以工程數量推估活動強度，並配合排放係數進行計算。差異主要在於碳排放係數之選用，各單位已改採用 2023 年較新之相關資料庫，得以反映近年材料製程、能源結構及施工條件之變化，爰其計算結果較能貼近實際工程情況，具較高之代表性與參考價值。

(2) 概估碳排放量計算:

各單位於工程分類及分析層級上存在差異。整體而言，工程類型多以道路、橋梁、隧道及維護工程四大類為主，惟各單位在細部分類與分析方式上有所不同。

就工程分類而言，公路局除一般道路與橋梁外，另將高架道路與高架橋梁獨立納入分類；高公局則於維護工程項下進一步細分為鋪面、排水及邊坡等三類，以反映維護作業性質之差異。橋梁形式方面，各單位多以預力混凝土梁(PCI)、鋼筋混凝土箱型梁及鋼構橋梁為主要分類，惟公路局另增列特殊性橋梁類型，以因應具特殊結構或施工條件之橋梁工程；此外僅本所於橋梁工程中進一步將結構拆分為上部結構與下部結構分別進行碳排分析，以提升估算之細緻度。

在道路、隧道工程部分，公路局與高公局皆採單一分類方式進行概估計算；相較之下，本所則進一步區分為路面工程與土方工程，以及隧道特定地質與否，以反映不同施工內容與碳排特性。至於維護工程之計算方式，公路局與高公局係以盤點近期實際工程案例作為推估基礎；本所則主要依據相關文獻資料，建議採用固定比例進行估算。

綜合比較上，各單位概估碳排計算方式各有其優缺點。本所之評估方式在道路工程、橋梁工程與隧道工程之拆解層級較為細緻，可提供較精細之碳排估算結果，惟其案例分析與拆解流程相對複雜，且所採用之排放係數較為偏舊。相對而言，公路局與高公局之作法則具備排放係數更新、案例分析方式較為簡化之優點，惟在概

估階段尚難以辨識如是否跨河、橋墩高度差異等關鍵工程特性對碳排放量之影響。

表 3-15 各單位概估碳排計算差異性

項目		公路局	高公局	本所
詳細碳排	計算方式	相同	相同	相同
	碳排係數(時間)	2023 年	2023 年	2011 年
概估碳排	工程分類	5 類，增加高架道路、橋梁	4 類，但養護項目再細分 3 項(鋪面、排水、邊坡)	4 類
	橋梁型式	PCI、RC 箱型、鋼結構、特殊性橋梁	PCI、RC 箱型、鋼結構	PCI、RC 箱型、鋼結構
	橋梁是否拆分上、下部結構	無	無	有(包括不同施工工法)
	路工(道路)工程分類	單一	單一	分為路面與土方
	隧道	單一	單一	分為特定地質與否
	維護工程計算方式	盤點實際最新案例	盤點實際最新案例	依文獻資料建議固定百分比
優點		排放係數採最新資料，案例分析方式較為簡單	排放係數採最新資料，案例分析方式較為簡單	路工、橋梁、隧道分解較細，可得較精細之結果
缺點		無法辨識跨河與否、橋墩高度差之碳排差異性	無法辨識跨河與否、橋墩高度差之碳排差異性	案例分析拆解方式較為複雜，排放係數較舊

資料來源:本研究自行整理

四、工程碳排放案例分析與應用探討

4.1 交通建設計畫經濟效益評估概述

交通建設計畫大多由政府資金挹注，為能在有限的預算限制下讓資源作最有效的運用，必須將資金投入在可對整體社會創造最大效用的建設計畫方案上。經濟效益評估(Economic Appraisal)是從社會整體福利觀點來界定及估計交通建設計畫的成本與效益，並透過社會經濟(Social Economic)的角度來評估經濟效益相對於投資成本的有效性。

透過系統化與科學化之分析方法，可有效篩選具備較高經濟效益之計畫方案，並使評估結果成為政府判斷是否投入公共資源進行建設的重要依據。經濟效益評估係自整體社會經濟觀點出發，檢視計畫所創造之效益相對於其投資成本之有效性，因此在空間範疇上以國內全體社會為評估對象；在時間範疇上，原則上以計畫生命週期作為分析基礎(如圖 4.1)。

在現行交通建設計畫之經濟效益評估作業流程中，針對本研究所發展之工程碳排放量評估模式，其計算結果可透過制度化之方式，納入既有成本效益分析(Cost-Benefit Analysis, CBA)架構加以應用。具體而言，係將工程各階段所估算之碳排放量，轉換為具貨幣化意義之碳排放成本，並做為外部成本之一環，併入計畫整體經濟效益評估項目中。

藉由上述納入機制，交通建設計畫除可延續既有以時間節省、行車成本、事故減少等為核心之評估架構外，亦能進一步反映工程建設與維運過程中所衍生之碳排放影響，使經濟效益評估更趨完整。相關評估成果不僅可作為不同方案間比較之依據，亦有助於政府於政策層級檢視工程方案在經濟效益與節能減碳目標間之權衡關係，進而作為後續工程計畫納入節能減碳考量、進行政策評析與決策支援之重要參考。



圖 4.1 交通建設計畫經濟效益衡量

1. 成本效益分析評估要項

成本效益分析的範疇可由供給面觀點、需求面觀點以及第三者觀點切入，各種觀點之內涵如下(圖 4.2)：

- (1) 供給面觀點：針對交通基礎建設的投資資金，估算交通建設計畫的成本。
- (2) 需求面觀點：針對交通建設計畫的使用者，包括交通運輸服務的消

- 費者剩餘與交通運輸服務的生產者剩餘，估算貨幣化的使用者效益。
- (3) 第三者觀點：針對交通建設計畫的外部影響衝擊，包括經濟、環境、社會等層面，估算貨幣化的外部效益。

成本效益分析		
成本面	效益面	
	使用者效益	外部效益
<ul style="list-style-type: none"> • 規劃設計成本 • 施工成本 • 管理養護成本 • 結束成本 	<ul style="list-style-type: none"> • 旅行時間節省效益 • 行車成本節省效益 • 肇事成本節省效益 • 營運成本節省效益 	<ul style="list-style-type: none"> • 空氣污染減少效益 • CO₂ 排放減少效益

圖 4.2 交通建設計畫成本與效益評估要項

2. 使用者效益

評估的項目主要包含下列四項，前三項屬於消費者剩餘變動，第四項屬於生產者剩餘變動。

- (1) 旅行時間節省。
- (2) 行車成本節省。
- (3) 肇事成本節省。
- (4) 營運成本節省(大眾運輸服務業者)。

3. 外部效益(External Benefit)

涵蓋範圍廣泛且層面複雜多樣，整體而言大致可歸納為經濟、環境及社會三大層面(圖 4.3)。目前設定環境層面的外部效益評估項目為空氣污染與二氧化碳排放 2 項。本所交通建設計畫經濟效益評估手冊亦提及施工建造期間與營運期間的例行性維修對附近環境所造成的空氣污染與噪音應當計入外部效益的負項，爰工程興建中所產生之碳排亦可納入外部效益的負項。

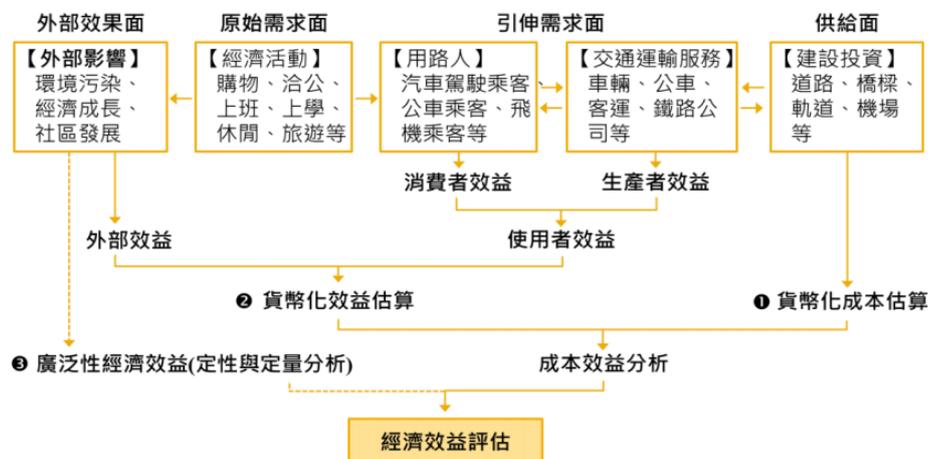


圖 4.3 交通建設計畫成本效益分析基本架構示意圖

4.2 工程案例分析

本研究透過蒐集與整理過往橋梁工程之實際案例，進行系統性分析，並進一步納入工程建設及後續維運階段所衍生之碳排放影響，以建構更為完整之評估基礎。藉由整合工程全生命週期中之碳排放量與經濟效益評估結果，可具體檢視碳排放因素對傳統經濟效益分析之影響程度與差異。

1. 案例 1 (短橋)

(1) 工程基本資料如下:

- a. 工程性質:橋梁改建。
- b. 工程特性:跨河橋。
- c. 橋梁規劃長度 72m，寬度 25m。
- d. 工法:方案一預力箱型梁、方案二 PCI。

碳排估算結果如表 4-1，鋼構橋梁之碳排量約為 PCI 梁橋的 2.1 倍，即便鋼構橋在施工便利性與跨距能力上具優勢，於「短跨橋」條件下，其材料隱含碳(Embodied Carbon)劣勢明顯。

表 4-1 案例 1-各工法碳排結果

	PCI 梁橋	單跨鋼 I 梁
碳排量 tCO ₂ e	72*25*3.28=5,904	72*25*6.89=12,402

(2) 方案評選應用

原方案評選結果(未納入碳排，如表 4-2)，鋼 I 梁在施工風險與景觀性上略占優勢，使其在傳統評選架構下排名第一。PCI 梁橋則在工期經費與維護性上表現穩定，但不足以影響結果。

納入工程碳排量後之評選結果，即便納入碳排後，鋼 I 梁仍維持第一順位，但兩方案差距已明顯縮小。顯示碳排指標已開始對決策產生實質影響，但目前權重仍偏低，尚不足以影響最後結果。

表 4-2 案例 1-各替代方案比較

比較項目 \ 主橋方案	方案甲	方案乙
	PCI 梁橋	單跨鋼 I 梁
施工風險(30%)	25	29
管理維護性(30%)	28	27
景觀性(10%)	8	9
工期經費(30%)	28	27

原合計	89	92
原序位名次	2	1
加入工程碳排量(10%)	9	7
新合計	98	99
新序位名次	2	1

(3) 經濟效益評估應用

- a. 旅行時間、行車成本節省等:2.97 億。
- b. 建設成本、維護成本:3.41 億。
- c. 工程排碳支出:碳排放量*碳價。臺灣碳權交易所 2024 年辦理國內額度交易及拍賣事宜，目前提出申請且已上架的減量專案均採定價交易，6 個專案總上架額度為 6,080 公噸二氧化碳當量，價格介於每噸 2,500 至 4,000 元。

本案以各種碳價情境進行分析(如表 4-3)，在不考慮碳排時，本案 B/C 值為 1.15，具經濟可行性(如表 4-4)。當加入碳排時，碳價達每噸 2,500 元時，B/C 值降為 1.04，但仍具經濟可行性。當高碳價壓力時，碳價達每噸 4,000 元時，B/C 值降至 0.98(小於 1)，代表該工程在經濟上變得不可行，則需進行工程減碳檢討，尋求積極減碳之替代方案或工法。

表 4-3 案例 1-各種碳價情境

	情境 1	情境 2
碳價	2,500	4,000
工程排碳支出	0.31 億	0.49 億

表 4-4 案例 1-經濟效益各情境(敏感度)分析

	原案	情境 1	情境 2
旅行時間、行車成本節省	3.41	3.41	3.41
建設成本、維護成本等	2.97	2.97	2.97
工程排碳支出		0.31	0.49
益本比(B/C)	1.15	1.04	0.98

2. 案例 2(長橋)

(1) 工程基本資料:

- a. 工程性質:橋梁改建。
- b. 工程特性:跨河橋。
- c. 橋梁規劃長度 1,346m，北上南下各 15m，寬度共 30m。
- d. 工法:方案一預力箱型梁、方案二 PCI。

碳排估算結果如表 4-5，預力箱型梁之碳排量比 PCI 梁橋高 40%。此一差異主要來自於箱型梁斷面材料用量較高、施工工序較複雜，進而提高材料生產與施工階段之碳排放。

表 4-5 案例 2-各工法碳排結果

	預力箱型梁	PCI
碳排量 tCO ₂ e	1,346*30*4.6=185,748	1,346*30*3.28=132,446

(2) 方案評選應用

在未納入工程碳排考量前，方案評選係依防洪排水、興建維護、結構型式、經費、施工安全及環境景觀等六大面向進行加權評分，方案一原合計 88 分，排序第 1；方案二原合計 70 分，排序第 2(如表 4-6)。

當工程碳排量納入評選指標，並給 10% 權重後，方案一得分較弱，雖方案排序未發生變動，但可以觀察到低碳工法(PCI)在加權後具備「補強弱勢指標」的效果，同時亦將工程減碳理念納入考量。

表 4-6 案例 2-各替代方案比較

比較項目	主橋方案	方案一	方案二
		預力箱型梁橋	預力 I 型梁橋
防洪排水(25%)		25	18
興建維護(20%)		20	15
結構型式(15%)		15	10
經費(15%)		8	13
施工安全(15%)		12	8
環境景觀(10%)		8	6
原合計(100%)		88	70

原序位名次	1	2
加入工程碳排量(10%)	6	8
新合計(110%)	94	78
新序位名次	1	2

(3) 經濟效益評估

- a. 旅行時間、行車成本節省等:108.5 億。
- b. 建設成本、維護成本:44.6 億。
- c. 工程排碳支出:碳排放量*碳價。臺灣碳權交易所 2024 年辦理國內額度交易及拍賣事宜，目前提出申請且已上架的減量專案均採定價交易，6 個專案總上架額度為 6,080 公噸二氧化碳當量，價格介於每噸 2,500 至 4,000 元。

本案以各種碳價情境進行分析(如表 4-7)，在不考慮碳排時，本案 B/C 值為 2.43，具經濟可行性(如表 4-8)。當加入碳排時，碳價達每噸 4,000 元時，工程排碳成本對整體經濟效益影響有限，益本比(B/C)仍維持在 2 以上，顯示工程整體仍具良好之經濟可行性。

假設碳價大幅提高、超過每噸 3 萬元以上之高碳價情境下，工程排碳成本才會對經濟效益造成顯著衝擊，使益本比降至 1 以下。惟考量目前國內外碳定價制度與實際市場情況，短期內出現如此高碳價之可能性相對有限，該情境較屬於長期或極端假設條件。

綜合而言，工程經濟效益對碳價具一定敏感性，但在合理且可預期之碳價範圍內，納入工程碳排成本並未改變本案整體經濟可行性判斷，相關分析仍可做為未來碳政策趨嚴時之風險評估與決策參考。

表 4-7 案例 2-各種碳價情境

	情境 1	情境 2
碳價	4,000	34,407
工程排碳支出	7.4 億	64 億

表 4-8 案例 2-經濟效益各情境(敏感度)分析

	原案	情境 1	情境 2

旅行時間、行車成本	108.5	108.5	108.5
建設成本、維護成本	44.6	44.6	44.6
工程排碳支出		7.4	64
益本比(B/C)	2.43	2.1	0.99

3. 案例 3(多型式橋梁)

(1) 工程基本資料

- a. 工程性質:橋梁改建。
- b. 工程特性:跨河橋。
- c. 橋梁規劃長度 465m，寬度 21m。
- d. 工法:方案一 PCI、方案二預力箱型梁、方案三鋼箱梁。

碳排估算結果如表 4-9，PCI 梁(方案一)的碳排放量最低，而鋼箱梁(方案三)的排放量最高，約為方案一的 2.1 倍，而鋼箱梁因鋼材用量較高且製造階段碳排密集，其整體碳排表現最不利。

表 4-9 案例 3-各工法碳排結果

	PCI	預力箱型梁	鋼箱梁
碳排量 tCO ₂ e	465*21*3.28 =32,029	465*21*4.6 =44,919	465*21*6.98 =68,160

(2) 方案評選應用

在未納入工程碳排量前，各方案之原始評分結果顯示，方案二(預力箱型梁)整體表現最佳，方案三次之，方案一(PCI)則因工期與經費等指標表現相對不利，原序位名次為第三。

惟於評估架構中加入「工程碳排量」做為比較指標後，各方案之整體排序出現明顯變化。由於 PCI 工法具備最低工程碳排表現，其於新增指標中取得最佳評分，使其新合計分數提升，序位由原第三名上升為第二名；相對地，鋼箱梁方案因碳排量最高，整體序位降至第三。

此一結果顯示，工程碳排量具有「補強原本弱勢方案」之效果。亦即當某方案在傳統工程或經濟指標上處於相對弱勢時，若其具備顯著的低碳優勢，於整體決策中仍可透過碳排指標取得競爭力，促

使決策結果更貼近低碳與永續政策目標。

表 4-10 案例 3-各替代方案比較

主橋方案 比較項目	方案一	方案二	方案三
	PCI	預力箱型梁	鋼箱梁
施工風險	3	1	2
施工技術	2	1	1
耐久性	1	1	2
橋檢作業	1	2	2
舒適性	2	1	1
耐震性	2	1	1
耐洪性	2	1	1
景觀	2	1	1
工期	1	3	2
經費	1	2	3
原合計	17	14	16
原序位名次	3	1	2
加入工程碳排量	1	2	3
新合計	18	16	19
新序位名次	2	1	3

(3) 經濟效益評估

a. 旅行時間、行車成本節省等:8.9 億。

b. 建設成本、維護成本:7.4 億。

c. 工程排碳支出:碳排放量*碳價。臺灣碳權交易所 2024 年辦理國內額度交易及拍賣事宜，目前提出申請且已上架的減量專案均採定價交易，6 個專案總上架額度為 6,080 公噸二氧化碳當量，價格介於每噸 2,500 至 4,000 元。

在經濟效益評估方面，原案未納入工程碳排成本時，益本比(B/C)為 1.19，顯示計畫具備基本經濟可行性。當納入碳價 2,500 元/噸之情境後，B/C 降至 1.05，仍維持高於 1；惟於碳價提升至 4,000 元/

噸時，B/C 進一步下降至 0.97，略低於 1。

由敏感度分析結果可知，僅在碳價達相對偏高水準時，整體經濟效益才會由正轉負。考量目前國內外碳價趨勢及短中期政策推估，短期內碳價大幅超過 3,000~4,000 元/噸之可能性相對有限。

表 4-11 案例 3-各種碳價情境

	情境 1	情境 2
碳價	2,500	4,000
金額	1.1 億	1.8 億

表 4-12 案例 3-經濟效益各情境(敏感度)分析

	原案	情境 1	情境 2
旅行時間、行車成本	8.9	8.9	8.9
建設成本、維護成本	7.4	7.4	7.4
工程排碳支出		1.1	1.8
益本比(B/C)	1.19	1.05	0.97

4.3 工程減碳案例作法

在交通建設計畫之經濟效益評估中，若進一步將工程全生命週期所衍生之碳排放成本納入分析，將有助於更完整反映工程方案之社會成本。當納入碳排成本後，評估結果顯示益本比(Benefit-Cost Ratio, B/C)低於 1，代表該工程方案在考量環境外部成本後，其整體經濟效益相對不足，顯示原有規劃於環境面向仍存在改善空間。

在此情境下，工程方案不宜僅依賴傳統經濟指標作為唯一決策依據，而應進一步檢視其碳排結構與主要排放來源，並評估具減碳潛力之工程措施，包括材料選用、設計優化、施工工法調整及施工階段管理等面向。透過系統性盤點與比較不同減碳作法對碳排放量與工程成本之影響，可作為後續工程規劃與方案優化之重要參考；本節將就相關減碳作法進行說明。

1. 材料減碳技術面向

在公路與橋梁工程之碳排放結構中，材料製造階段(尤其為水泥、鋼材與瀝青)通常為主要碳排來源。多項國際研究指出，僅於施工階段採取節能改善措施，其整體減碳效益相對有限；相較之下，若能於工程

規劃初期之材料選擇與配比設計階段即導入低碳策略，較有助於在工程全生命週期中降低碳排放量。因此材料面向之減碳技術已逐漸成為近年交通基礎建設推動永續轉型的重要著力點。

(1) 混凝土與水泥材料之低碳技術

a. 低熟料水泥與替代膠結材料

傳統波特蘭水泥於熟料煅燒過程中會產生大量二氧化碳排放，長期以來被認為是公路與橋梁工程中最主要的材料碳排來源之一。近年來，國際間積極推動低熟料水泥相關技術，透過以石灰石、煅燒黏土、高爐礦渣或飛灰等材料部分替代熟料含量，以降低水泥製程所衍生之碳排放。其中石灰石-煅燒黏土水泥(Limestone Calcined Clay Cement)已於歐洲及部分新興國家之道路工程中逐步導入。

相關研究與實務案例顯示，其碳排放量相較於傳統波特蘭水泥可降低約3至4成，且於適當配比與品質管控條件下，其力學性能與耐久性多能滿足道路與橋梁結構之使用需求，顯示具備一定之工程應用潛力。

b. 地聚合物混凝土與非水泥系統

地聚合物混凝土係以工業副產品(如飛灰、礦渣)搭配鹼激發劑製成，於製程中不需使用傳統波特蘭水泥，為近年國際間關注之高潛力低碳混凝土材料之一。相關研究指出，其碳排放量相較傳統混凝土可顯著降低，部分文獻顯示減碳幅度可達4成以上，且多數研究亦顯示其具備良好之耐化學侵蝕能力與長期耐久性。

目前地聚合物混凝土之工程應用仍以預鑄構件、橋梁附屬設施及非主結構工程為主。隨著材料配比設計、施工品質控制及相關設計與施工規範逐步完善，未來其應用範圍具進一步擴展至橋梁下部結構與道路版工程之潛力。

c. 碳礦化與碳封存混凝土技術

碳礦化混凝土係於混凝土製造或養護過程中導入二氧化碳，使其與水泥水化產物反應並形成穩定之碳酸鈣結構，以達到碳之長期封存效果。此類技術除可降低混凝土製程之淨碳排放外，部分研究亦指出其有助於提升混凝土早期強度，進而具備減少水泥用量之潛在效益。

目前國際間已開始於道路鋪面、橋梁預鑄構件及各類混凝土製品中試行或導入碳礦化相關技術，相關應用多著眼於兼顧減碳效益

與材料性能之提升，顯示其作為低碳混凝土材料解方之一，具備持續發展與擴大應用之潛力。

(2) 瀝青材料之低碳化與高耐久發展

a. 再生瀝青與高再生率混合料

再生瀝青混合料(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)係將既有鋪面材料回收再利用，可有效降低新瀝青結合料與天然骨材之使用需求，進而減少材料製造階段所衍生之碳排放。國際實務經驗顯示，透過適當之再生劑添加與混合設計優化，即使於較高再生率條件下(RAP 含量約達 30~40%以上)，其力學性能與耐久性多能維持於可接受範圍。

目前再生瀝青混合料已廣泛應用於公路鋪面之表層與基層工程，相關技術成熟度相對較高，具備於現階段進一步擴大推動之可行性，並可做為道路工程材料面向中具立即減碳效益之重要策略之一。

b. 低溫瀝青與生物基瀝青材料

低溫瀝青(Warm Mix Asphalt, WMA)係透過化學或物理改質方式降低瀝青混合料之拌合與鋪築溫度，可降低能源消耗並減少製程階段所衍生之碳排放，同時有助於改善施工環境條件。另有研究發展生物基瀝青黏結材，透過以植物油或再生有機資源部分取代石化來源原料，以降低對化石燃料之依賴程度。

目前上述技術多應用於試辦或示範工程，相關研究顯示其於減碳面向具備一定潛力，惟在長期耐久性表現、成本效益及供應穩定性等方面，仍有待持續累積實務經驗與評估資料，以做為後續擴大推動之依據。

c. 高耐久與多功能瀝青材料

近年瀝青材料之發展已由以承載結構功能為主，逐步朝向結合排水、降噪、抗車轍及延壽等多功能設計方向推進。高耐久瀝青混合料透過提升材料性能與結構穩定性，可延長鋪面使用年限，降低維修與重鋪之頻率，進而減少施工階段以及使用階段(如因施工造成交通延誤)所衍生之碳排放。

自全生命週期觀點觀之，「延長使用壽命」本身即具備顯著之減碳意義，亦為國際間推動長壽命鋪面(Long-life Pavement)發展之重要核心理念之一。

(3) 鋼材與複合材料之減碳應用

a. 低碳鋼材與高比例再生鋼

橋梁工程中鋼材用量大，其碳排放主要來自煉鋼製程。國際上已逐步導入電弧爐高比例廢鋼、氫能煉鋼等低碳製程技術，生產所謂「綠色鋼材」，可顯著降低單位鋼材之碳足跡。

b. 纖維強化複合材料(FRP)

FRP 與 CFRP 等複合材料因具備高強度、低重量與耐腐蝕特性，已廣泛應用於橋梁補強與附屬構件。雖其初期材料碳排相對較高，但可有效延長既有結構使用年限，避免拆除重建，整體全生命週期碳排放具明顯優勢。

2. 工法與施工減碳面向

在公路與橋梁工程中，施工階段所衍生之碳排放主要來自施工機具之燃料消耗、材料與設備運輸，以及工地現場之能源使用。國際經驗顯示，即使導入低碳材料，若施工工法選擇不當或現場管理成效不足，整體碳排減量效果仍可能受到限制。因此施工與工法面向之減碳策略，除需與材料技術相互配合外，尚須一併納入施工流程優化、能源使用管理及數位化管理工具之整合應用，方能有效提升減碳成效，並朝向工程全生命週期減碳之目標推進。

(1) 設計階段的施工碳敏感策略

a. 碳敏感設計(Carbon-aware Design)

國際道路與橋梁工程已逐步導入「碳敏感設計」理念，於設計早期階段即評估不同路線、結構型式與材料方案之碳排放。透過LCA(Life Cycle Assessment)分析，可在方案決策中選擇碳排較低且耐久性佳的方案，例如：

- 優化橋梁跨徑與梁型，減少鋼材與混凝土用量
- 調整路線與排水設計，減少土方與排水工程量
- 配合高耐久材料，降低未來維護頻率

b. 數位化設計與施工管理

國際案例顯示，BIM(Building Information Modeling)與管理系統的整合可減少施工階段 5~15%的碳排放，並提高工程效率，成效如下：

- BIM 可模擬施工流程、材料需求及運輸路徑，精準估算碳排避免現場過量施工與材料浪費。
- 透過歷史維護資料與檢測資訊，預測維修時機將維修需求提前排程，減少緊急維修與施工次數。

(2) 施工階段低碳工法技術

a. 施工機具與能源管理

施工機具燃料消耗為碳排放主要來源，國際減碳策略包括：

- 低碳燃料或電動化施工機具，包括電動或混合動力挖土機、壓路機等，適用於道路鋪設與橋梁施工現場。
- 優化施工順序與布局，盡量縮短材料運輸距離，減少施工機具空轉時間與多次搬運。

b. 快速施工與模組化工法

預鑄構件與裝配式橋梁，橋墩、橋面板等可於工廠預製，現場快速組裝，減少現場混凝土澆築與鋼筋加工耗能。典型案例：歐洲高速橋梁採用預鑄箱梁，現場施工時間縮短 40~50%。

(3) 施工現場資源管理與減廢策略

a. 現場材料管理

- 精準計量與分批供料，降低材料過量使用及剩料廢棄情形。透過施工現場的即時監控與物料追蹤，可提升材料利用效率，減少不必要的運輸與處理次數，進一步降低施工階段碳排放。
- 配合現場存放與保護措施，避免材料受潮或受損，確保再利用或回收率最大化。
- 結合施工計畫與物料管理系統，可優化材料配送時程與存量管理，減少現場等待與多餘搬運，達到節能減碳效果。

b. 水與能源管理

- 使用雨水收集或循環水降低施工用水。
- 施工用電使用再生能源或高效發電設備。

c. 廢棄物減量與再利用

- 將混凝土與瀝青拆除廢料進行分類回收，可做為路基填料、再生混凝土骨材或其他工程材料使用，降低新材料需求及廢棄物掩埋量。
- 透過施工現場廢料追蹤與管理系統，確保回收物料符合品質要求，促進永續工程發展。

五、結論與建議

5.1 結論

1. 工程碳排放簡易評估方法，可應用於工程可行性評估與綜合規劃階段，

本研究案例分析結果顯示，工程碳排對方案選擇具有一定影響力，不同施工工法之碳排差異明顯，顯示低碳結構形式在全生命週期減碳上具潛力。雖在相關案例中，碳排納入評選未改變方案排序，但低碳方案可獲得額外考量，突顯其減碳政策引導意義。

2. 本研究結果顯示，將工程碳排成本納入經濟效益評估，能提供檢視工程方案環境合理性的重要依據，並做為規劃與設計階段導入減碳策略之參考工具。此一作法有助於在經濟效率與環境永續間取得平衡，並提升評估結果於決策過程中的說服力與實用性。
3. 本研究所提出之分析架構，補充現行交通工程(道路、橋梁、隧道)經濟效益評估在工程減碳面向的不足，提供一套兼顧工程效益與碳排放影響之整合性評析方式，可做為未來交通工程規劃與方案決策的參考。
4. 此外碳價可能成為影響工程可行性的重要變數。在高碳價情境下，工程碳排成本對經濟效益評估結果之影響將更加明顯，可提醒未來決策需將碳排成本及碳價情境納入綜合考量，以提升工程之永續性。

5.2 建議

1. 本研究可做為未來交通建設計畫納入減碳政策評析之具體示例，並於決策流程中系統性導入工程碳排量與碳成本考量。建議未來交通建設計畫可逐步將碳排量及成本納入分析，並於可行性研究及綜合規劃階段同步進行工程碳排量及碳價情境分析，以提升工程永續性，並促進低碳工程技術之採用。
2. 碳管理應在早期概念階段就整合到決策中，因為這是影響最大的階段。雖然規劃設計高度優化可以減少初始碳排放，但在設計時仍應避免過於極端，以預留一定的彈性來應對未來交通負荷或用途的變化，建議減碳思考邏輯如下：

(1) 不建造(Build Nothing)

在進行任何建造前，應首先評估是否能維持現有結構，以及系統層面是否真正需要新增路線。此階段決策對碳排放影響最大，是全生命週期減碳的首要考量。

(2) 建造更少(Build Less)

若建造不可避免，應考慮以最小結構滿足需求，因橋梁尺寸與材料總量與碳排放量呈正相關。

例外情況：在特定情境下，為提升交通網絡整體效益或支持永續模式轉型(例如設計較長的自行車橋以鼓勵騎行)，建造稍大結構可能反而可減

少整體生命週期碳排放。

(3) 聰明與高效建造(Build Clever and Build Efficiently)

此階段涵蓋概念設計與細部設計之優化，主要策略包括：採用結構碳評級系統評估與比較不同設計方案之碳強度。透過優化材料使用、提高結構效率及改進施工方法，降低施工與全生命週期碳排放。

3. 建立動態碳排係數庫，針對國內工程特性，定期更新碳排係數(Emission Factors)，以反映最新製程與能源結構，確保估算的精準度與代表性。同時亦可針對其他結構型式碳排進行調查，如密排預力 I 型梁橋，俾利提升工程碳排評估之多樣性與適用性。

參考文獻

1. Net zero highways: our 2030 / 2040 / 2050 plan, National highways, 2021
2. Net zero highways: our zero carbon roadmap for concrete, steel and asphalt, National highways, 2021
3. www.infrastructure.nsw.gov.au
4. 「基礎建設期間溫室氣體排放計算手冊草案」，日本國土交通省國土技術政策綜合研究所，2024 年 8 月
5. 日本《GX 基本方針》評析 - 能源知識庫，2021 年 7 月，<https://km.twenergy.org.tw/ReadFile/?p=Reference&n=d9688960672749909e6da9931cda26ab.pdf>
6. <https://www.iabse.org/TG.6.6>
7. <https://www.bsigroup.com/zh-TW/>
8. 「交通運輸工程碳排放量推估模式建立與效益分析之研究」，交通部運輸研究所，民國 101 年
9. 「交通運輸工程節能減碳規劃設計手冊研究與編訂」，交通部運輸研究所，民國 102 年
10. 省道工程減碳導入 PAS 2080 推動進度簡報資料，公路局，民國 114 年
11. 國道工程減碳導入 PAS 2080 推動進度簡報資料，高公局，民國 114 年
12. 「交通建設計畫經濟效益評估手冊」，交通部運輸研究所，民國 108 年
13. “Low-carbon Technologies & Initiatives for Quality Road Infrastructure in Japan”, Director for International Affairs, Planning Division, Road Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT), JAPAN