

# 工程碳足跡評估及盤查實務 — 以加勁路堤為例

鄭恆志／盟鑫工業股份有限公司協理

黃品萱、蔡維哲、鄒萬祥／盟鑫工業股份有限公司工程師

陳衍舜／土木技師

面對溫室效應氣候變遷之衝擊，節能減碳成為世界各國需共同面對焦點議題。從「地球高峰會議」至「京都議定書」等國際決議，各國無不積極推動各項減碳政策及措施，行政院也於 2008 年頒佈「永續公共工程 — 節能減碳政策白皮書」。

綜觀國內工程碳足跡評估目前均屬研究或推估，有關工程類別判定、一級活動數據及排放係數之資料庫均仍待建立中，而通過國際規範針對實體工程的碳足跡盤查驗證更是尚無實例。本文提出之加勁路堤之工程碳足跡評估係依據 PAS 2050：2011 商品與服務生命週期階段之溫室氣體評估規範進行盤查聲明，並使用德國生命週期分析評估軟體 GaBi 4 Compilation 4.4.131.1，進行路堤工程之碳足跡評估，報告書揭露一級活動數據所計算之排放量貢獻於路堤工程投入高達 84% 溫室氣體排放量，經第三方查證單位查證後之查證型態屬於合理保證等級，並取得亞洲首張實體工程的碳足跡盤查驗證聲明書。

營建相關產業所產生之二氧化碳排放量約佔台灣總排量約 28-30% (姚志廷、蕭良豪，2008；張又升，2002)，對環境之衝擊不可小覷。如何以管理之手段達成溫室氣體之減量與控制，以及使用具體之永續理念降低或建造工程開發過程中對環境之威脅，達成永續發展及節能減碳之目標已成國際推動之重點及趨勢。

故本文將以亞洲首張實體工程的碳足跡盤查驗證聲明書 - 盟鑫教育園區之加勁路堤為例 (詳圖 1)，說明如何計算及盤查驗證實體工程之二氧化碳排放量，並分析生命週期中之重大排放源，以瞭解工程碳盤查之實質效益。



圖 1 盟鑫教育園區之碳足跡盤查驗證聲明書

## 文獻回顧

### 引用規範

- (1) PAS 2050:2011 『商品和服務生命週期溫室氣體排放評估規範』：基於 BS EN ISO14040 與 BS EN ISO14044 所建立之生命週期評估法，並詳細規定如何評估產品與服務生命週期之溫室氣體排放。

- (2) IPCC 2006 『國家溫室氣體清冊準則』：提供國際認可之方法學，供各國用來估算溫室氣體清單，其內容包含估算時之方法、指標、流程等。
- (3) IPCC 2007 『氣候變遷之科學基礎報告』：提供各溫室氣體之 100 年期全球暖化潛勢係數 (Global warming potential, GWP)，用以轉換成二氧化碳之當量值。
- (4) 行政院環境保護署，2010，「產品與服務碳足跡計算指引」。
- (5) 行政院環境保護署，2010，「產品與服務碳足跡查證技術指引」。

### 生命週期溫室氣體排放量之相關研究

- (1) 林憲德等人 (1999) 進行建築物生命週期各階段環境負荷分析，且釐清建築產業二氧化碳排放減量之功能與效益，規劃建築產業於減碳之措施及對策，進而建立建築物生命週期各階段環境負荷評估體系及指標。
- (2) 張又升 (2002) 提出建築物於生命週期之減碳評估，內容說明如何簡化計算建築物所用之水、電、耗材、建材等之二氧化碳排放量之計算，以瞭解建築物整體對環境負荷與衝擊程度。
- (3) 林政興等人 (2009) 將生命週期之概念帶入水土保持工程，分成材料生產、運輸及現地施工三大階段，探討各階段之二氧化碳排放量之計算流程及評估公式，並分析傳統護岸工程與生態式護岸工程之二氧化碳排放量差異。
- (4) 回顧國內相關研究 (詹璨榮 (2010)、林憲德 (2011)、蔡育霖 (2011)、黃榮堯 (2012) 等)，將生命週期分為：材料生產階段、運送階段、施工階段、使用、修繕、廢棄處理階段、建材回收利用階段。
- (5) 國內相關研究 (成大發展基金會 (2009)、詹璨榮 (2010)、蔡育霖 (2011) 等)，研究成果指出加勁擋土工法碳排放量約為傳統混凝土擋土工法 10~20%。國外相關研究 (WRAP (2009)、Heerten, G (2009) 等)，研究成果指出加勁工法耗能及碳排放量相較傳統工法有明顯之優勢。
- (6) 綜合近年有關加勁相關之工程生命週期碳足跡研究成果 (詳表 1)，雖然都是在工程生命周期的架構下去做評估與計算，但內容完整性及資料來源之可靠性是否符合一級活動數據及排放係數，應再進一步提升研究完整及可靠性。

表 1 相關研究完整性

回顧文獻	各生命週期階段					
	生產	運輸	施工	修繕	使用	廢棄
成大研究發展基金會 (2009)	◎	◎	-	◎	◎	◎
詹璨榮 (2010)	○	○	◎	-	◎	-
蔡育霖 (2011)	◎	-	-	-	◎	-
Georg Heerten (2012)	○	○	○	-	-	-
WRAP (2010)	○	○	-	-	-	-

◎中等 ○簡述 - 未考慮評估

### 工程碳足跡計算及盤查

本文生命週期評估委託者為盟鑫工業股份有限公司，生命週期評估執行者為財團法人台灣綠色生產力基金會，報告日期為 2012 年 11 月 22 日，作業係依據 PAS 2050：2011 商品與服務生命週期階段之溫室氣體評估規範遵循相關性、完整性、一致性、準確性及透明度原則進行評估聲明，查證型態屬於合理保證等級。

### 工程產品系統界定

國際間目前尚未建立路堤工程產品類別規則，使得產品系統邊界設定與計算範疇尚未確立，路堤工程雖然非屬於建築物，但其生命週期流程有部份類似。

本報告參考 EPD (Environmental Product Declarations) 營造產品與營造服務產品類別規則 (Product category rules and PCR basic module for Construction products and Construction services)，配合實地盤查確認路堤工程評估時應納入之項目，並建立起加勁工法系統評估模式，作為未來應用於評估加勁工法之減碳效益基礎。

### 產品碳足跡評估範疇

#### ■ 盟鑫教育園區

本次選定進行產品碳足跡盤查計算之標的產品為盟鑫工業股份有限公司自行設計並委外施工之加勁路堤工程，盟鑫永續綠色教育園區位於台中市梧棲區，占地約 1 萬平方公尺，園區設計主體由路堤、河道及景觀池構成二十餘種綠色工法，打造出亞洲首見全尺寸實體綠色工程園區 (詳圖 2)。

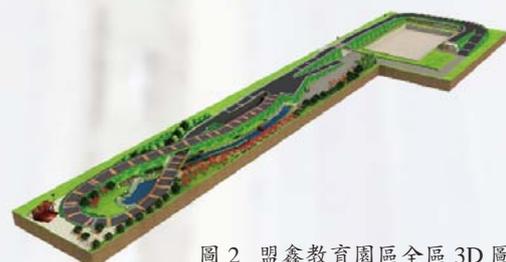


圖 2 盟鑫教育園區全區 3D 圖

■ 產品盤查範圍與邊界之選定

本文主要盤查之範圍以加勁工法之路堤為主，選定區域中包含回包式加勁擋土牆、鋼柵式加勁擋土牆、多功能複合植生網護坡、綠纖（固草）植生網護坡、矩形錐植網護坡等五種工法（詳圖 3）。盤查內容不包含地質改良工程、堤頂步道工程、噴灌系統、護欄系統等設施。

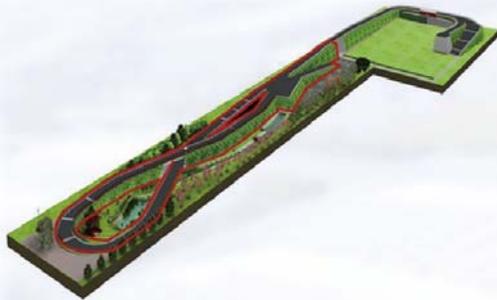


圖 3 盟鑫教育園區盤查範圍

■ 產品之功能單位

功能單位 (Functional unit) 係指產品系統量化績效之參照單位，即產品之功能單位需清楚地指明產品之功能，並以此功能單位進行後續之盤查及宣告。而盟鑫教育園區之路堤高度及寬度為漸變型式，因此將

尺寸進行加權平均後作為尺寸聲明部分。故本盤查範圍之產品功能單位為「一座加勁路堤工程（路堤總長 209 公尺、平均寬度 5.23 公尺、平均高度 2.54 公尺）」。

系統邊界

■ 系統邊界說明

依據 PAS2050: 2011 商品與服務生命週期階段之溫室氣體評估規範之內容，系統邊界區分為搖籃到大門 (Cradle-to-gate) 與搖籃到墳墓 (Cradle-to-grave) 兩種。因本次盤查之路堤工程係提供給最終使用者，故本系統邊界屬於搖籃到墳墓，包含原料階段、製造階段、使用階段與最終廢棄階段 (詳圖 4)。



圖 4 系統邊界

■ 製程地圖

選定進行評估之工程並定義其功能單位後，再決定工程生命週期計算範圍，建立製程地圖，確認對所選工程之生命週期有貢獻之材料、活動與過程 (詳圖 5)。

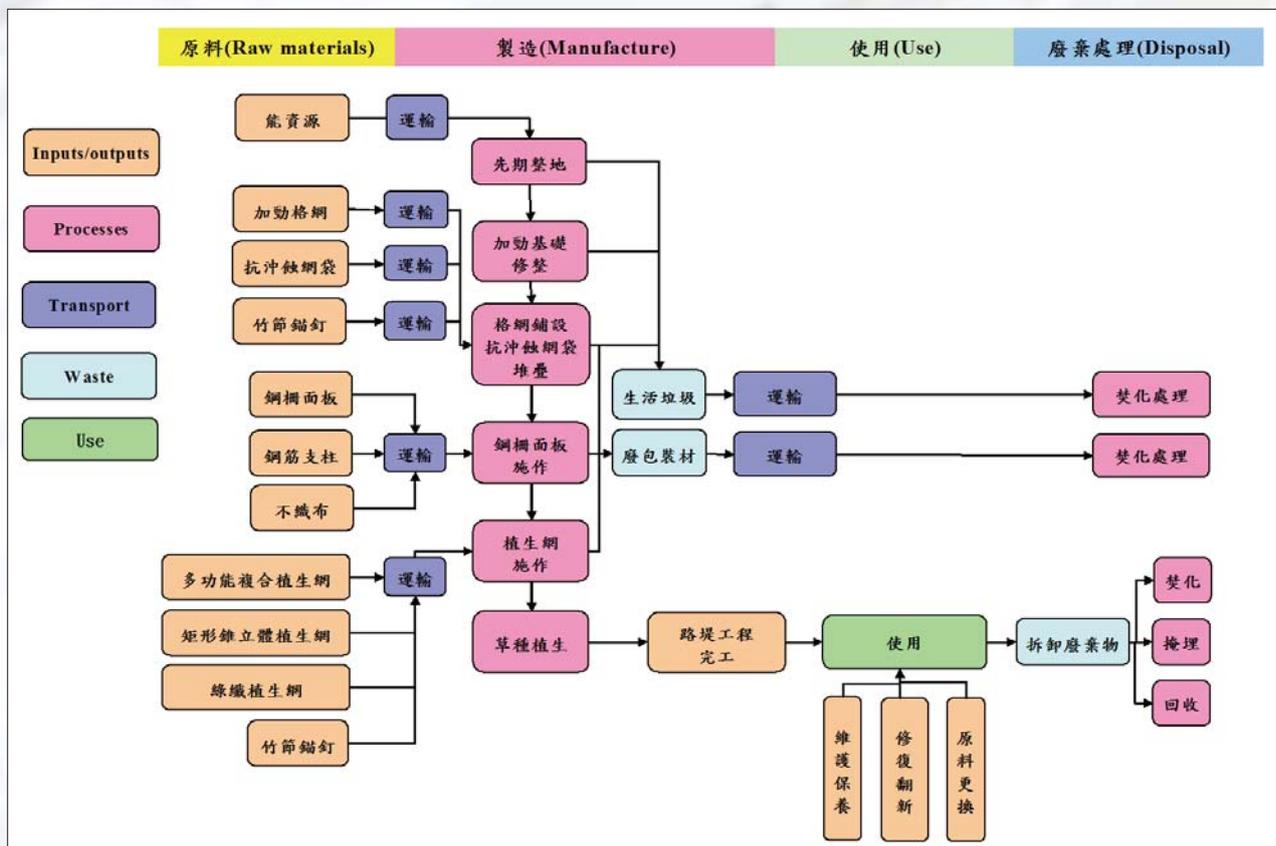


圖 5 盟鑫教育園區路堤之製程地圖

## 截斷準則

原則上被界定於系統邊界中之所有排放都應被列入計算，但為了避免過度資源之投入，且能夠優先評估影響最大之排放源，故依據 PAS2050: 2011 將所得之實質性百分比加總後小於 1% 之成份給予排除不計（即實質貢獻，material contribution），但總截斷量不得大於全程生命週期排放量之 5%。

## 產品碳足跡之計算方式

本路堤工程盤查之溫室氣體種類為 IPCC2007 第四次評估報告及蒙特婁議定書所列氣體及管制物質。溫室氣體評估期間以產品形成後 100 年內溫室氣體排放之 CO<sub>2</sub> 當量影響，公式 (1) 如下：

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

其中，活動數據 (Activity data) 可分為一級活動數據 (Primary activity data) 與二級數據 (Secondary data)，一級活動數據指一產品生命週期之活動量化測量，若乘上一排放係數即可決定一過程導致之溫室氣體排放；二級數據指產品生命週期之過程中並非直接量測所獲得之數據。排放係數 (Emission factor) 為單位活動之溫室氣體排放量，以二氧化碳當量表示，若國內已有建置之數據則使用之，或無則使用國際之數據庫。全球暖化潛勢係數 (GWP) 為敘述以質量為單位之某特定溫室氣體之輻射驅動影響，在一特定期間內相當於等量之二氧化碳輻射驅動影響。

## 土地利用變更

依據 PAS2050: 2011 說明從直接土地利用變更之 GHG 排放及移除應被評估，因此任何源自土地投入至生命週期應被包含於產品溫室氣體排放。本路堤工程施作後增加植生面積約 300 m<sup>2</sup>。以碳匯吸收溫室氣體排放計算，增加植生面積 300 m<sup>2</sup> 於 20 年評估期約增加碳匯 5 tCO<sub>2</sub>e，但本園區工址因氣候、地質等資料不足，無法參酌 IPCC2006 之碳匯資料及管理因子等，由於數據來源不確定太高，此處僅提供參考，並無納入本路堤工程生命週期碳排放量計算。

## 數據取得及分析

此次路堤工程施工期間由工作人員填寫施工日誌表，確實紀錄施工項目、工地人員管理、機具使用時數、機具柴油領用量等施工情形，交由監工人員審閱存放。另於盤查期間內全程以縮時攝影方式紀錄工程施作情形，照片攝影時間間隔 2.5 分/張，首創以縮時攝影技術佐證碳足跡盤查數據與提昇數據品質。為要求數據品質準確度，每筆數據資料均需說明來源，凡能證明及佐證數據之可信度資料均需調查，並將其資料妥善保存 3 年，作為往後查核追蹤之依據。本路堤工程盤查數據之取得及品質整理如表 2，所採用之一級活動數據達 84% 以上，可大幅提升整體工程盤查之準確性。

表 2 數據取得與數據品質一覽表

生命週期階段	名稱	數據品質	資料來源/備註說明
原料階段	加勁格網	高	採購單據、現場縮時攝影確認範疇內使用量
	抗沖蝕網袋	中	設計量
	竹節錨釘	中	
	鋼柵面板、小鋼筋支柱	高	採購單據、現場工地盤點施工使用量
	土工不織布	高	
	立體植生網	高	
	多功能植生網	高	
	綠織植生網	高	距離以 google map 計算
	原料運輸距離	中	
	原料運輸運具型式	高	供應商提供車型、以現場縮時攝影判斷車型
製造 (施工) 階段	載運機具運輸距離	中	距離以 google map 計算
	載運機具運輸運具型式	高	供應商提供車型
	整地期間機具使用柴油量	高	施工日誌領用量、縮時攝影系統邊界內工程分配
	施工期間機具使用柴油量	高	採購單據
	電力	高	無使用
	地下水	中	引用平均灑水強度
	生活垃圾	中	施工日誌人數
	化糞池	中	施工日誌工時
	原料包裝材廢棄量	高	現場工地量測
	廢棄物 (生活垃圾及包裝材) 運輸距離	中	距離以 google map 計算
	廢棄物處理及運輸運具型式	高	供應商提供處理方式及運輸車型

## 各階段碳足跡說明

根據前述內容，將此路堤工程之生命週期分為原料階段、施工階段（製造階段）、使用（維護）階段、廢棄階段。以下就各階段所考量及計算方法進行介紹：

### ■ 原料階段

本階段主要盤查項目及來源資料請詳表 2，生命週期評估原料階段除了收集一級活動數據，增加數據品質可靠度外，引用符合生命週期之原料排放係數更為重要。由於盟鑫工業本身即為地工產品材料商，除了自廠本身進行碳盤查取得原料之一級活動數據及碳排放係數，更邀請供應商提供相關數據，大幅提昇路堤工程之溫室氣體排放量準確度。

### ■ 施工階段

路堤工程施作階段包含投入機具與人力，使用機具有挖土機、傾卸卡車、震動壓路機及噴灑水車；使用人力為機具操作手、技術工、測量技工等工作人員，本階段主要盤查項目及來源資料請詳表 2。另針對整地階段柴油使用分配以縮時攝影計算機具於系統邊界內施工時間與總施工時間之比例 27.46 % 進行分配，測量手及機具操作手工時與人數以系統邊界內面積與總整地面積比例 22.24% 分配。以下就施工過程中幾項步驟進行探討：

#### ● 工址挖填

本路堤工程係使用加勁工法，進而達到工區挖填平衡，降低棄土量及減少外運，避免因外購或棄土之運輸而造成車輛機具廢棄排放污染。此外，由於路堤工程無夜間施工，現場無架設燈具，無使用臨時用電之情形，故工址挖填作業之電力使用量為零。

#### ● 機具使用

因路堤工程為教育園區多項工程之一，且多項工程皆同步進行施工，因此各機具施作時柴油油耗與施工人員無法清楚切割。但計算階段之排放量需瞭解機具使用量及人員數，故利用縮時攝影之紀錄進行合理之比例分割，使得分配程序符合各系統邊界施工情境。

#### ● 抑塵作業

為防止現場粉塵飛揚，故施工單位進行灑水作業。由於水源為地下水，無實際量測使用水量，參考營建工程空氣污染防治設施管理辦法執行手冊中噴灑強度，其建議噴灑強度宜介於 0.3 ~ 0.6 mm/hr 之間。由於園區位

於台中港加工出口區，平均風速較強，導致工程揚塵嚴重，故以平均灑水強度 0.6 mm/hr 估計。加上噴水面積為 1890 m<sup>2</sup>，一天進行噴水 2 hr，施工天數約 23 天計算，以公式 (2) 進行推算，可得知總噴灑用水量約為 52 m<sup>3</sup>。

$$\text{噴灑強度 (mm/hr)} = \frac{\text{總噴灑用水量 (m}^3\text{)}}{\text{噴灑面積 (m}^2\text{)} \times \text{噴灑時間 (hr)}} \quad (2)$$

工地使用之地下水主要溫室氣體排放為抽水使用之耗電量，參考沉水馬達設備規格，若能耗 1 Hp、抽水流量 12 m<sup>3</sup>/hr，則總噴灑用水僅需 3 kWh，溫室氣體排放量約為 2.5 kgCO<sub>2</sub>e。對於工程不具實質貢獻，予以截斷。

#### ● 系統邊界排除項目

依據 PAS2050: 2011 商品與服務生命週期階段之溫室氣體評估規範，一般與產品供應鏈無直接關聯之過程，得排除於系統邊界外，包含過程中投入之人力、員工上下班運輸等，故可排除於系統邊界。

### ■ 使用階段

工程應用類型多元，其生命週期使用階段各有不同情境之描述，例如建築工程，使用階段涉及住戶或使用者入駐建築本體後資源消耗；道路工程則需考量營運階段時溫室氣體排放等。路堤工程完工後使用階段情境則參考前述類別規則模組，其包含維護保養、修復翻新及原料更換。

#### ● 維護保養

本路堤工程維護保養情境主要為灑水提供植栽草種生長。系統邊界內植栽面積約 1400 m<sup>2</sup>，假設灑水一天兩次，單次噴灑時間為 10 分鐘，園區噴灑系統馬達為 5HP，馬達負載率 85%，計算一天噴灑耗電為 1.06 kWh，假設需一年時間定時噴灌養護園區植栽景觀以確保後續自然生長，扣除降雨天數後（參考中央氣象局近一年之台中測站降雨日數量），總用電量為 245 kWh。

#### ● 修復翻新與原料更換

修復翻新及原料更換則是當路堤工程受到破壞時才可能進行之情境，一般而言，工程設施之破壞原因可分為自然因素及人為因素。其中，人為因素包含設計不良、材料品質不佳、施工作業不當，皆會造成路堤工程內外部之破壞。自然因素則包含地震、暴雨等氣候影響，造成結構基礎承載力不足、傾倒及滑動破壞等。

本路堤之設計年限與加勁擋土結構設計年限相同，係依據 FHWA NHI-00-043 之設計規範中「加勁擋土結構之設計年限，對於永久性結構物之設計年限定義為 75 年以上 …」進行設計，且路堤之主要材料（即加勁格網）之使用年限經由檢測認證可約達 114 年，施工過程更是全程監工，因此排除人為造成路堤破壞之因素。

根據台灣地震危害度分級與氣候監測結果，評估園區受到氣候影響而受到極大損壞之機率極低。此外，考慮地震及暴雨對加勁路堤穩定性之影響，進行 STABL 及 MSEW 之分析，結果顯示加勁路堤足以抵抗地震等情況。綜合以上說明使用情境無需考慮修復翻新及原料更換等新增原料與能資源之使用。

### ■ 廢棄階段

本節廢棄階段分別說明施工過程生活垃圾、原料包裝材料清除處理情形及路堤工程生命週期最終處置之情境內容。

施工過程中工作人員於工地產生之生活垃圾，以及建材運送至工地拆解後之包裝材料，皆待工期結束後運送至相關之資源回收場或焚化廠進行最終處理。而園區之加勁路堤強度足以成為永久性結構物，但仍需提出除役之處置以進行計算。評估其除役過程，以情境假設方式計算拆除解體及營建廢棄物處理過程所排放之溫室氣體量。而拆解及廢棄處理過程中皆需機具進行挖除與載運，因此評估本盤查宣告之功能單位總體積為 2776 m<sup>3</sup> 下，計算一台 200 型挖土機及一台 10 噸傾卸卡車之總工時與總耗油量，再換算所排放之溫室氣體量。

此外，路堤工程之營建廢棄物同使用原料，其中之鋼柵面板部分可回收再利用，其它地工材料一般可混於現地土壤中，故本路堤除役後則依營建廢棄物處理方式進行物質安定掩埋。

## 生命週期評估結果

經由上述之評估分析後，得知功能單位「一座加勁路堤工程（路堤總長 209 公尺、平均寬度 5.23 公尺、平均高度 2.54 公尺）」之碳足跡約為 101.22tonCO<sub>2</sub>e。

盟鑫永續綠色工程教育園區加勁路堤工程於原料、製程、銷售配送、使用及廢棄各階段生命週期中，以產品原料階段所造成之溫室氣體排放量最大，

約占總排放量之 75.96%；其次為施工階段溫室氣體排放量，約占總排放量之 19.42%；本路堤不適用銷售配送階段，故不評估；使用階段依情境假設，其約占總排放量之 0.19%；廢棄階段則占總排放量之 4.43%。

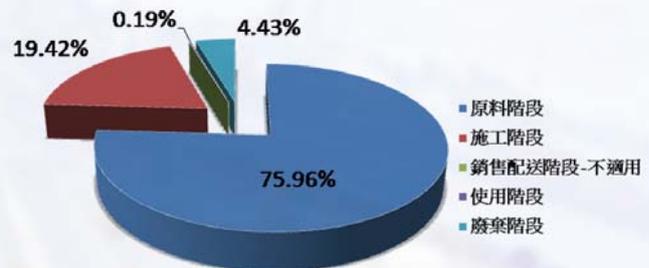


圖 6 路堤工程各階段之溫室氣體排放量之比例

原料階段中，加勁格網與抗沖蝕網袋之使用量最多，故其排放比例亦較高；而錨釘與鋼柵面板雖使用量少，但因其原料碳足跡排放量較高，故位居第二；至於原料運輸部分，因本工程大多採用鄰近供應商，故大量減少原料運輸之排放量。



圖 7 原料階段建材之溫室氣體排放量比例

製程階段（施工階段）中因施工作業需求，各式機具使用燃料成為此階段最主要之排放源，約占 84%。而載運機具運輸部分因後期趕工增加機具及遠地調車使用，造成此部分亦有較多之排放源，約占 14.9%。

施工人員至工地工作視為員工上下班運輸，依 PAS2050: 2011 規範排除邊界外，但施工人員於工地產生之生活垃圾及化糞池逸散則須納入。此部分則隨施工時間長短增減。

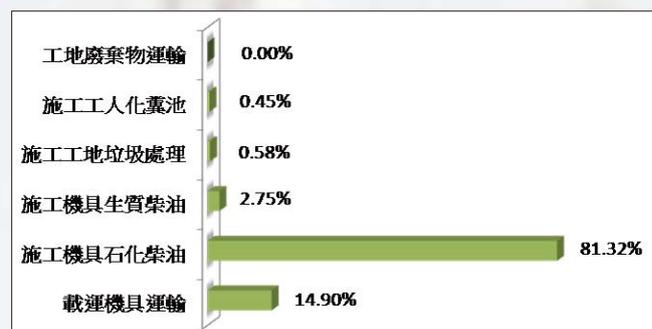


圖 8 施工階段之溫室氣體排放量比例

使用階段部分，因園區提供參訪導覽，需進行植被養護即澆灌灑水，而修復翻新及原料更換部分則排除計算，故澆灌灑水用電占此階段之 100%。

最終廢棄階段則評估路堤工程除役過程，以情境假設方式計算路堤工程拆除解體及營建廢棄物處理，工程進行拆除解體時機具耗油之排放量約占 97%，營建廢棄物安定掩埋溫室氣體排放約 3%。



圖 9 最終廢棄階段之溫室氣體排放量

### 綜合討論

#### 工程碳盤查評估比較

本路堤於工程規劃、設計及興建期間，業主、施工廠商、輔導單位積極配合查證單位進行實體工程碳盤查，相較於前人之相關研究比較，本路堤盤查採用 PAS2050 (2011) 之標準進行，在一致性的原則下，所採用之量化統計數據及原料係數品質皆高出許多 (詳表 3)，除一級數據達 84% 以上外，施工期間油料、廢棄物量及施作人員管控，施工全程 24 小時縮時攝影紀錄，格網材料採用實際盤查數據等，皆大幅有效提升整體工程之盤查準確度，相關單位日後進行實體工程盤查或方案評估時或可參考以增加盤查成果品質。

表 3 各階段數據取得原則

生命週期階段	評估計算原則說明
原料階段	數量部分採用實際使用數量，係數部分優先採用實際盤查成果數據。
施工 (製造) 階段	全程油料、人員、廢棄數量管控紀錄。
使用 (修繕) 階段	合理情境假設模擬 (保守未採計碳匯之負碳排效益)。
廢棄階段	合理情境假設模擬。
各階段中運輸部分：以 google map 實際計算運輸距離。	

本研究整理

比較目前國內相關之工程碳足跡評估方法及研究後，以交通部運輸研究所的詳細型評估方法較為完備，其計算項目詳圖 10。本研究並將其與 PAS2050 的異同之處整理如表 4，供各界使用時參酌。

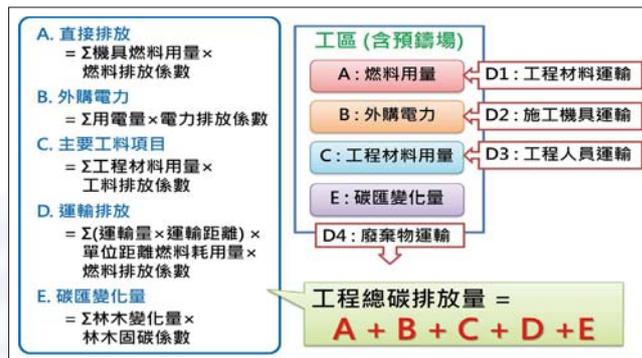


圖 10 工程碳排放詳細型評估項目 (運研所)

表 4 計算方式比較表

計算階段	PAS2050 (盟鑫盤查依循規範)	交通部運研所 詳細型評估方法	
	相同處	工程材料、施工、運輸：大致相同，差別在活動數據的計算精度及採用的碳排係數等級。	
相異處	廢棄物	考慮廢棄運輸及處理過程的碳排量。	只考慮廢棄運輸過程。
	使用階段 (維護)	需合理情境假設並計算評估之。	未明確說明或以百分比概估之。
	碳匯變化	可納入，但須依照一致性之標準計算植生改變之生命週期碳足跡影響。(本路堤盤查保守不納入)	可納入，但只考慮植生固碳不考慮植生腐化所額外增加之碳排。
	人員運輸	依規範排除不計。	列明需計算考量。

本研究整理

#### 工程碳足跡的評估及盤查

現今政府各單位皆已積極投入減碳工作之中，在公共工程中如何將減碳工作具體落實，有效正確的評估工程的碳排量也成為重要課題，因此在蘇花改及台 9 線等重大交通工程中也積極落實及進行實體工程碳盤查工作，為工程碳足跡計算踏出了第一步，惟礙於工程規模龐大相關資訊及盤查工作尚未全數完成，相關資訊尚未全數公開給各界參考。

就工程碳足跡部分我們可以分成兩個階段探討，一是工程方案擬定前之碳排放「評估」，二是實際工程碳排放「盤查」，兩階段由於配合實際工程階段的進行，所需的程度也應有所區別。

以筆者經驗而言，工程碳「盤查」部分在依據 PAS2050 或相關標準，涉及之原物料及機具等現地資料多而複雜，目前仍待政府單位建立工程用大宗材料資材及施工機具之係數資料庫，使執行工作及盤查成果更加快速及完善。

而擬定工程方案的碳「評估」部分，就如同工程設計中的初設階段 很多的活動數據尚無法明確量化，更別談實際的盤查，採用上述標準則有所窒礙難行，因此建立統一且可行簡便的工程碳排評估方法也十分重要，現行較明確如交通部運研所所研擬之簡略型及詳細型評量方法或可做為基礎參考，再由各界討論修正成通體適用的評量方法。

### ■ 替代工法碳足跡優勢比較

本工程碳盤查結果出爐後，將盤查標的的結構形式與尺寸數量採用傳統 RC 構造完成（材料用量詳表 5），在碳排放量之表現，僅採 RC 構造方案的原料階段來做計算，尚不考慮製造（施工）、使用（維護）及廢棄階段，即高達約 340.06tonCO<sub>2</sub>e（詳表 6），約為加勁方案的 3.5 倍左右（詳圖 11），此結果與前人所得成果趨勢符合，足見加勁工法對於減碳效益上的貢獻相當顯著，確實符合工程綠色內涵之要求。

表 5 RC 構造方案材料用量表

工程材料	用量	單位
鋼筋	70049	kg
預拌混凝土 3000psi	1650	m <sup>3</sup>
碎石	91	m <sup>3</sup>
普通模板	3502	m <sup>2</sup>
材料運輸用油	16992	L

表 6 RC 構造方案碳排計算表

工程材料	碳排係數	單位	碳排量	單位
鋼筋	0.69	kgCO <sub>2</sub> e/kg	48333.81	kgCO <sub>2</sub> e
預拌混凝土 3000psi	148.95	kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	245767.50	kgCO <sub>2</sub> e
碎石	3.11	kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	283.01	kgCO <sub>2</sub> e
普通模板	0.34	kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	1190.68	kgCO <sub>2</sub> e
材料運輸用油	2.65	kgCO <sub>2</sub> e/L	45029.65	kgCO <sub>2</sub> e
總計			340604.65	kgCO <sub>2</sub> e
總計			340.60	TCO <sub>2</sub> e

備註 1：數據引用「研訂公共工程計畫相關審議基準及綠色減碳指標計算規則」委託研究案—成果報告 減碳規則篇。

備註 2：運距僅以 10~20km 評估。

### ■ 相關綠色工法應用

由前述我們除了可以了解到工程碳足跡的盤查評估過程，亦可從中發現加勁等工法在減碳效益上的優異表現，符合綠色工法內涵與精神，值得我們多加推廣使用。不單侷限在路堤工程，本文將其他不同類型綠色工法的工程應用實際案例整理彙整如後，供各界參考（詳圖 12）。

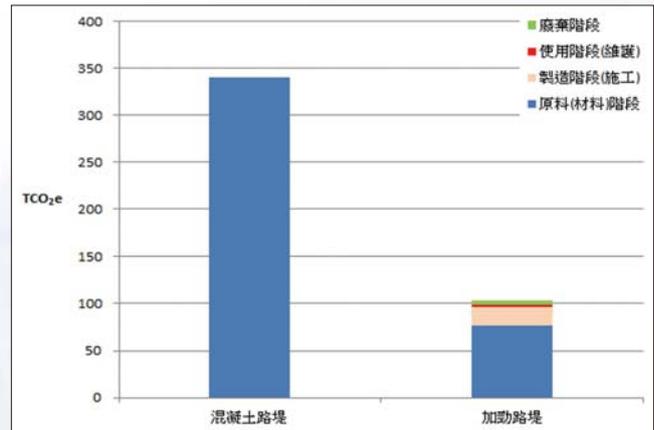


圖 11 方案各階段碳排比較圖

## 「加勁路堤」建設具參考價值

工程建設於國家環境、社會及經濟發展上扮演重要角色，各國於工程營建之發展上，節能減碳與氣候變遷調適儼然成為未來重要之課題。

依據國際碳管理進程之各階段目標：(1) 碳足跡盤查；(2) 擬定減量目標及方案進行碳減量；(3) 透過碳抵換及碳交易達到碳中和。盟鑫教育園區加勁路堤為台灣甚至亞洲第一座通過 PAS 2050 碳足跡盤查之實體工程，對於未來台灣各項工程建設落實碳盤查及減碳具體作為有一定參考價值。

- (1) 工程生命週期各階段之碳足跡都息息相關，工程規劃對於工法之選擇、施工作業、運輸、後續營運、維護及廢棄等均需整體評估，並選擇最適當之方案與工法，以達減碳最佳效益。
- (2) 碳足跡盤查重點在於一致性及完整性，除上述要求外，引用資料的正確性及佐證資料也必須更加完備。目前國內工程碳足跡計算均屬研究或推估，有關工程類別判定、一級活動數據及排放係數之資料庫均仍待盤查及建立中。
- (3) 整體工程生命週期碳排放量的計算，目前。以原料階段（工程材料之生產及運輸）、製造階段（工程施工）等二階段可明確進行計算及盤查，而後續之使用階段及廢棄階段因於計算及盤查時尚未發生，應訂定合理之計算評估標準，以利整體工程在生命週期中總工程碳排的評量。
- (4) 擋土牆工程之生命週期碳足跡盤查中，原料階段之碳排放均佔總碳排之最高比例，如能要求材料廠商進行產品碳足跡盤查，而後提供給施工單位，將可大幅提昇工程碳盤查一級活動數據及排放係數之比例。



### 苗栗景觀加勁擋土牆工程

本工程採用加勁工法，施工過程最大程度減輕材料運送量並縮短工期，對山區環境之干擾最輕，完工後牆體及牆面可栽植各類草花，具環境調和涵養及保持天然景觀等功能。



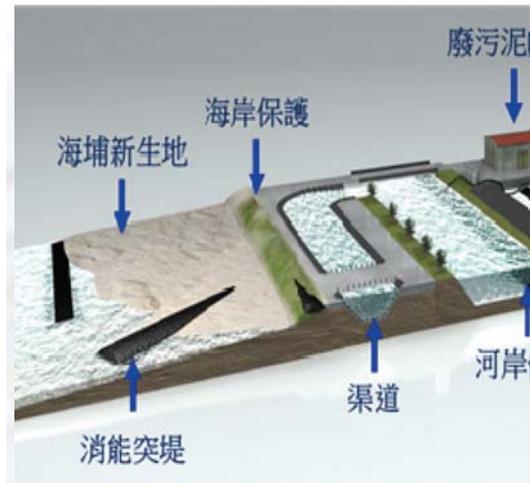
### 彰化河川整治工程

本工程採用地工砂腸袋填灌工址既有土石料，表層鋪織物模板內填水泥砂漿加強坡面強度，於群樁丁壩底部使用護床措施之地工砂腸袋。



### 高雄生態滯洪池開闢工程

本工程採用現地土壤施作加勁護坡及自然修坡並配合植生施作，減少鋼筋混凝土用量，使生物棲息空間儘可能不受影響。



### 宜蘭路基缺口修復工程

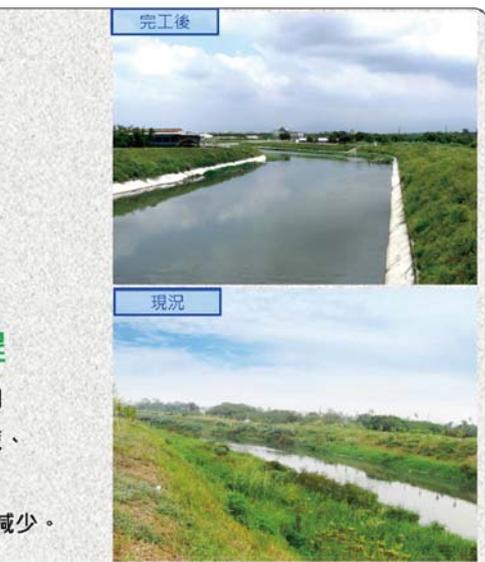
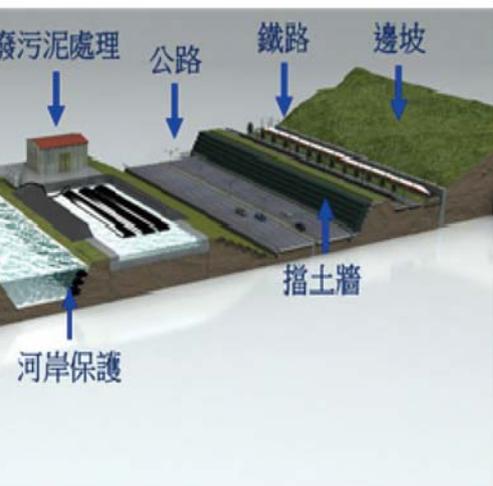
本工區採用半重力式擋土牆為臨水保護結構，配合混凝土基樁提高坡趾穩定性，並考量回填料就地取材的經濟性及方便性，以回包式加勁擋土結構進行修復。



### 屏東排水幹線改善工程

本工程除必要暴雨線基礎以下使用鋼筋水泥，其餘採用加勁格網、蛇籠、筏式客土袋、高抗拉抗沖蝕網，以改善河水漫流問題，有效將水患問題減少。

圖 12 加勁相關綠色工法應用



### 台中崩塌地整治復育工程

本工程採複合式工法，於工區坡趾設置混凝土基樁結合混凝土壩穩定基礎，壩上方設計回包式加勁擋土牆，排水設施設置縱橫排水溝和集水井，下方緩坡部分設置石籠護坡。



### 台中飄飛砂整治工程

本工程將港內淤砂疏浚至地工砂腸袋，築成高2公尺以上，長2600公尺的圍堤，並抽取淤砂至圍堤內填海造陸，造陸地區後區域以天然竹製防風定砂設施搭配鋪設稻草，減少此區的飛砂現象。



### 台中景觀綠美化工程

本工區採用回包式加勁擋土牆、掛網護坡工法、生態草溝及石籠護岸等綠色工法進行施作

- (5) 工程碳足跡計算應分成兩個階段探討，一是工程方案擬定前之碳排放初期「評估」，二是實際工程執行後，整體工程生命週期碳排放「盤查」。
- (6) 永續工程建設在國家環境、社會公義及經濟發展上扮演重要角色。傳統高度加工的工程材料製造生產與高耗能的施作工法，將因排放大量溫室氣體恐無法符合公眾對環境永續的看法與要求。

### 參考文獻

1. 交通部運輸研究所，2013，「交通運輸工程節能減碳規劃設計手冊研究與編訂」。
2. 行政院公共工程委員會，2012，「研訂公共工程計畫相關審議基準及綠色減碳指標計算規則」委託研究案—成果報告 減碳規則篇。
3. 交通部運輸研究所，2012，「交通運輸工程碳排放量推估模式建立與效益分析之研究」。
4. 盟鑫工業股份有限公司，2012，「產品碳足跡研究報告書—盟鑫永續綠色工程教育園區加勁路堤工程」。
5. 行政院環境保護署，2010，「產品與服務碳足跡計算指引」。
6. 行政院環境保護署，2010，「碳足跡產品類別規則 (CF-PCR)—針軋不織布」。
7. 行政院環境保護署，2007，「營建工程空氣污染防治設施管理辦法執行手冊」。
8. 林憲德等人，1999，「綠建築解說與評估手冊」，內政部建築研究所。
9. 林憲德，2003，「快速成長型東亞都市住宅 CO<sub>2</sub> 排放量生命週期評估」，第三屆中國城市住宅國際研討會，香港。
10. 林憲德，2011，「台灣綠建築政策的成就」，科學發展，第 460 期，pp. 6~13。
11. 財團法人台灣營建研究院，2008，「加勁擋土結構應用於交通土木工程規範草案之研究」。
12. 黃榮堯，2012，「建築溫室氣體減量評估」。
13. 經濟部工業局，2002，「人纖業二氧化碳減量研究調查計畫」。
14. 經濟部能源局，2010，「石油煉製業與輸入業銷售國內車用柴油摻配酯類之比率實施期程範圍及方式」。
15. 詹燦榮，2010，「以二氧化碳排放量評估回包植生式加勁擋土牆」，台灣科大碩士論文。
16. 蔡育霖，2011，「土工合成材料應用於加勁擋土牆之碳排放分析」，台灣大學碩士論文。
17. 張又升、鄭元良、林憲德、許茂雄，2002，「台灣建築物 CO<sub>2</sub> 排放量簡易評估法之研究」，建築學報，第 41 期。
18. 張又升，2002，「建築物生命週期二氧化碳減量評估」，成大建築所博士論文。
19. 陳瑞玲、林憲德，2006，「建築生命週期 CO<sub>2</sub> 排放量評估之研究 (一)—辦公建築生命週期 CO<sub>2</sub> 排放量解析」，內政部建築研究所協同研究案。
20. 財團法人成大研究發展基金會，2009，「混凝土、RC 及景觀加勁擋土牆生命週期減碳之研究」。
21. FHWA (2001), "Mechanically stabilized earth wall and reinforced soil slopes design & construction guidelines," Publication No. FHWA-NHI00-043.
22. Highways Agency (2009), "Carbon Management Framework for Major Infrastructure Projects".
23. ISO14040: 2006 環境管理—生命週期評估-原則與架構。
24. ISO14044: 2006 環境管理—生命週期評估-要求事項與指導綱領。
25. ISO14061-1: 2006 溫室氣體—第一部：組織層級溫室氣體排放與移除之量化及報告附指引之規範。
26. ISO14061-2: 2006 溫室氣體—第二部：計畫層級溫室氣體排放與移除增量監督及報告附指引之規範。
27. ISO14061-3: 2006 溫室氣體—第一部：溫室氣體主張之確證與查證附指引之規範。
28. IPCC 2006 國家溫室氣體清冊準則。
29. IPCC 2007 氣候變遷之科學基礎報告。
30. PAS 2050: 2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services.
31. The International EPD® system (2011), Product Category Rules and PCR Basic Module for Construction products and Construction services.
32. WRAP (2009), "Sustainable geosystems in civil engineering applications," Project Code MRF116, May 2009.
33. Heerten, G. (2009), "Reduction of climate-damaging gases in geotechnical engineering by use of geosynthetics," Proc. Int. Symp. on geotechnical engineering, ground improvement and geosynthetics for sustainable mitigation and adaptation to climate change including global warming, Bangkok, Thailand.