臺灣建築學會「建築學報」第 125 期增刊（低碳建築專刊），51~65 頁，2023 年 12 月
JOURNAL OF ARCHITECTURE, No.125, Special Issue on Low Carbon Building, pp. 51~65, Dec. 2023
DOI:10.53106/101632122023120125010

BIM-LEBR：建築設計初期蘊含碳排可視化之工具開發

蔡耀賢 *　王致堯 **

關鍵字：淨零碳排，生命週期評估，建築資訊模型，蘊含碳排

摘 要

我國在邁向 2050 淨零碳排的路上，建築是不可或缺的重要一環。我國在施行建築能效評估系統(簡稱 BERS)管制使用碳排之後，接續提出了低碳(低蘊含碳)建築標示制度(簡稱 LEBR)，以促進建築蘊含碳排的減量，成為建築的全生命週期碳排評估的兩個制度。本研究將 LEBR 之計算邏輯與建築資訊模型(BIM)結合，開發出一套 BIM-LEBR 的快速計算工具，可於建築設計初期階段呈現工程細項之數據，運用可視化編程導出生命週期蘊含碳足跡、減碳量等評估。本研究透過將 BIM-LEBR 運用於實務設計階段計算，以分析其適用性與減碳策略，其中 LoD 300 之案例反映了 BIM-LEBR 於建築構件碳排計算上之精確度，具有較接近實際施工之碳排量；LoD 100 之案例則驗證了工具於規劃階段之可行性，評估結果能有效提供建築師減碳設計方案。

BIM-LEBR: A Tool for Visualizing Embodied Carbon in Early Design Stage via BIM Technology

Yaw-Shyan Tsay*　Chih-Yao Wang**

***KEYWORDS*:** Net-Zero, Life Cycle Assessment, Building Information Modeling, Embodied Carbon

ABSTRACT

With the severe global warming aggravating, IEA has announced *Net Zero by 2050* in 2021 to control global greenhouse gas emissions (GHG). To reduce the impacts brings by embodied carbon emissions. Taiwan implemented LEBR (Low-Embodied-Carbon Building Rating System) and BERS (Building Energy-Efficiency Rating System) to carry out LCA. LEBR enable assessment in design process, but not in a traditional calculate way as for its early stage assessment demands and several error data. This study development BIM-LEBR for integrated-assessment, which is automatic, precisely, and can be use in early stage. BIM-LEBR features BOQ (Bill of Quantity) and visual programming software which results in the data of life-cycle carbon emission and carbon reducing rate. By using BIM-LEBR in on-going projects in reality, there are two results in scenarios: Project in LoD 300 tells that BIM-LEBR is the priority of material calculating; Project in LoD 100 prove the early- stage reducing carbon potential by using BIM-LEBR.

收件日期：2023.10.02；**接受日期**：2023.11.20
*國立成功大學建築系教授(通訊作者 Email: tsayys@mail.ncku.edu.tw)
Professor, Department of Architecture, National Cheng Kung University, Taiwan
**國立成功大學建築系碩士生
Master Degree Student, Department of Architecture, National Cheng Kung University, Taiwan
DOI:10.53106/101632122023120125010

一、研究背景與目的

1.1 我國 2050 淨零路徑

隨著人類工業發展，全球暖化日益嚴重，各國相繼於 1997 年《京都議定書》溫室氣體減量倡議、2015 年《巴黎協定》淨零碳排的趨勢推動，其中更呼籲各國政府能夠以 2030 年、2050 年為階段，逐漸達到全面淨零碳排的目標，此規劃時程為了防止全球之氣溫上升，聯合國政府氣候變遷專門委員會 IPCC 指出，全球之平均氣溫上升需控制於 1.5°C 之內，2030 年全球溫室氣體排放量必須減半，2050 年之前更須達到淨零碳排。

IEA 的「2050 淨零路徑」報告書（IEA, 2021），揭露全球建築營建部門的能源消耗與溫室氣體排放約占全球 35%與 38%，彰顯了建築部門節能減碳的重要性。在這 38%的溫室氣體排放比例中有 28%是建築能源使用部分的溫室氣體排放，另有 10%是鋼筋、水泥、玻璃等建材的製造運輸與施工的溫室氣體排放，前者稱為使用碳排 OC（Operational Carbon），後者稱為蘊含碳排 EC（Embodied Carbon）。傳統所謂的建築節能政策通常只聚焦於前者 28%部分，卻忽略了後者全球溫室氣體排放占比 10%的建材製造運輸與施工部分之減碳政策。

1.2 蘊含碳於建築生命週期中之重要性

過去的永續建築政策優先管制使用碳排 OC，也就是建築節能的面向，卻忽略了蘊含碳排 EC 的「建材減碳」，其原因在於「建築節能」部分有悠久的研究累積而「建材減碳」部分缺乏足夠的研究成果所致。然而，根據全球企業永續發展協會 WBCSD（World Business Council For Sustainable Development）對於邁向淨零建築路徑的研究報告（WBCSD, 2021），蘊含碳排的特性與使用碳排有相當大的差異。使用碳排可以隨著建築節能法規的逐步調整、材料的性能提升，以及設備或家電的能源效率提升而逐年降低；相較之下，蘊含碳排是在工程開始至建造完成（A1-A5 階段）這個階段短期且大量的產生，之後將持續存在、難以減量，如圖 1 所示。圖中可以看出在未來能源效率逐漸提升的趨勢之下，蘊含碳排在生命週期的佔比將達到 50%，可說是相當重要的一個警訊。

1.3 台灣之淨零政策

為響應全球淨零意識，我國的國家發展委員會於 2022 年提出「2050 淨零排放路徑及策略總說明」，以 2030 年、2050 年為基準制定公有新建建築近零碳之目標。內政部建築研究所也正在推行建築全生命週期評估之制度，依據 ISO 21931-1 (2010)或 EN15978 (2011)，全生命週期應包含蘊含碳排之管理(圖 2)，因此我國現今推動低蘊含碳評估系統 LEBR (Low-Embodied-Carbon Building Rating System)，配合已於 111 年公告施行之建築能效標示制度 BERS（Building Energy-Efficiency Rating System），可提供建築師一套完整且簡易計算的生命週期評估(LCA: Life Cycle Assessment)工具。

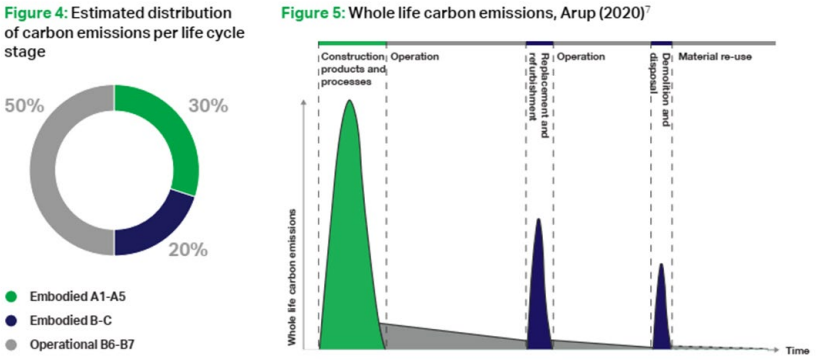


圖 1 WBCSD 所提出的 OC 與 EC 未來趨勢（圖片來源：WBCSD, 2021）

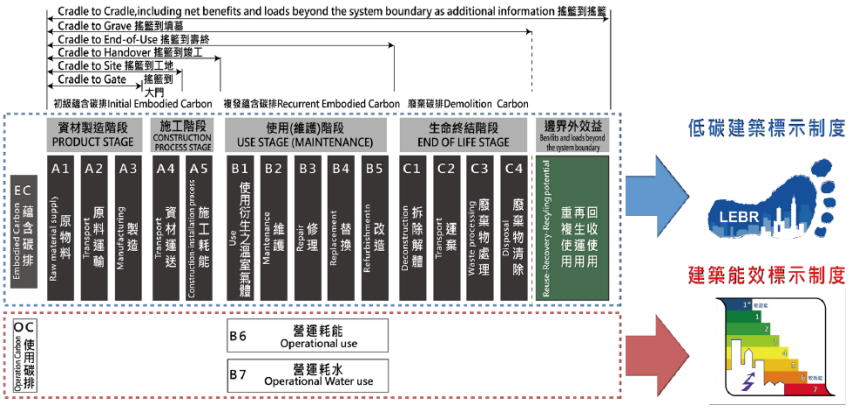


圖 2 我國建築碳排標示制度與建築全生命週期碳排的關係（圖片來源：內政部建築研究所，2023）

1.4 BIM 整合碳排評估之重要性

傳統的建築蘊含碳排計算，仍停留在以 AutoCAD 等 2D 繪圖軟體進行面積及高度等計算後，搭配 EXCEL 等試算工具進行體積或重量的加總計算，遇到造型較複雜的設計案時，常難以確保精確度。另外，在套用各項建築構件碳排放量數據時，需要逐項翻找碳排資料庫、尋找對應的建築構造或建材，相當耗時。為了促進建築設計實務上的效率、精簡化減碳評估，同時因應業界採用 BIM 工具的趨勢，本研究開發一套可在 BIM 中作業之蘊含碳整合計算系統、增加評估效率與準確度。

1.5 研究目的

本研究的著眼於BIM在建築蘊含碳排上的優勢，以工具開發有效解決建築設計階段的碳排可視化問題，並提升工作效率，研究目的彙整如下：

(1) 最小化計算誤差，避免造型複雜時人工計算上的差異。
(2) 碳排資料庫寫入 BIM，可直接帶入碳排資訊、避免逐項翻找。
(3) 於建築初期階段計算即可估算碳排放量，適用於大量方案的減碳評估。
(4) 可視化的工具操作介面，讓建築師可直觀操作減碳策略。

二、文獻回顧

2.1 建築的 LCA 評估流程與範疇

LCA 是一種環境影響評估的方法，從原物料開採至拆除廢棄物處理，評估涵蓋多項指標如全球暖化潛勢(GWP)、酸化潛勢...等。其中 GWP 是衡量蘊含碳之指標，以 $kgCO_2e$(公斤二氧化碳當量)為單位，將甲烷、N_2O 等其他 GHG(溫室氣體)一同計算在內。建築領域的 LCA 評估流程，主要可分為目標確定、評估範圍確定、生命週期庫存 LCI（Life cycle inventory）清單導入、計算環境影響評估、評估結果分析。

進行 LCA 分析的目的除了揭露碳排與環境影響的資訊之外，更可找出減碳或減少環境破壞的熱點，進而進行減碳等策略的擬定。在減碳熱點分析時，主要以 3 個項目做為分析歸類，分別為建築構件項目、所處生命週期階段、材料類型；而在檢查階段，數據會與第三方基準案數據做比較，分析該類型建築之碳排密度($kgCO_2e/m^2$)；敏感度分析則是在結果分析階段，評估影響總蘊含碳排放量之首要因子。

2.2 現有 BIM-LCA 工具之發展

美國建築師公會 AIA（American Institute of Architecture）將蘊含碳排的計算工具分成三類，分別是設計整合工具（Design-integrated LCA tools）、產品選擇工具（Calculator/ Product selection/ Procurement tools），以及專業碳排計算工具（Professional LCA software）（AIA, 2021）。

設計整合工具大多仰賴 BIM 系統作為連結平台，

可供建築師於設計階段操作，適用於設計初期階段、對於減碳設計（結構系統、構造系統）的影響也最大。這些工具包含 Athena Impact Estimator、Beacon、Buildings and Habitat Object Model (BHoM)、Hawkins Brown Emission Reduction Tool (H\B:ERT)、OneClick、Tally、Cove.Tools 等，大多依附於 Revit 平台進行計算。One Click LCA 是由 Bionova Limited 所開發之 LAC 評估工具，可運用於 Revit，其碳排資料庫符合第三類產品環境宣告(EPD)，評估建築從搖籃至墳墓之生命週期成本(LCC)、生命週期評估(LCA)。Tally 由 KieranTimberlake 的附屬公司 KT Innovations 與 Autodesk 和 Sphera 合作創建，為一個 Revit 插件，Tally 量化了各種建築材料的環境影響，並可提供設計者於 Revit 之中比較不同方案之各環境影響數值，包含全球暖化潛勢(GWP)、再生能源消耗…等，並分析不同生命週期階段所佔之比率。

產品選擇工具主要為碳排資料庫，包含 Build Carbon Neutral、EPIC、Kaleidoscope、OneClick LCA Planetary、Embodied Carbon in Construction Calculator (EC3)等，以線上計算工具為主（Web-Based Calculator）。Carbon Leadership Forum 是由華盛頓大學所領導的產學聯盟，結合了 50 間公司聯合開發出稱為 EC3 的建材蘊含碳排資料庫及計算工具，評估範籌如表 1 所示。EC3 納入了相當多具備產品環境宣告 EPD 的產品，在世界各國積極推行 ESG 投資的商業模式下，開發商或建築師可以快速找到低碳的產品。

而專業碳排計算工具則主要有 Gabi、SimaPro 等，主要用於計算產品生命週期碳排，多用於產品的環境宣告 EPD 之用。

Tam et al. (2023)將現有 BIM-LCA 方法歸納成五類(圖 3)，分別為運用 BIM 配合 Excel 計算、LCA 軟體運用、BIM 的專屬 LCA 插件軟體、可視化編程技術、IFC(工業基礎類別)檔案之運用等。透過 NSFDM(非結構模糊決策)與專家訪談，得出針對不同設計階段適用之 BIM-LCA 方法之優劣排序。研究指出，在設計初期階段(LoD 100)，可視化編程技術最能反映自動化 LCA

表 1 各種蘊含碳排計算工具與 BIM 之應用

名稱	製造階段 A1-A3	施工階段 A4-A5	使用階段 B1-B7	廢棄階段 C1-C4	邊界外效益 D	相關認證	主要使用地區			
							歐洲	北美	澳洲	中國
EC3	O	X	X	X	X	LEED V4		O		
One Click LCA	O	O	O	O	O	LEED V4, BREEAM 等	O	O	O	O
Tally	O	O	O	O	O	LEED V4, BREEAM 等		O		

(資料來源：本研究彙整)

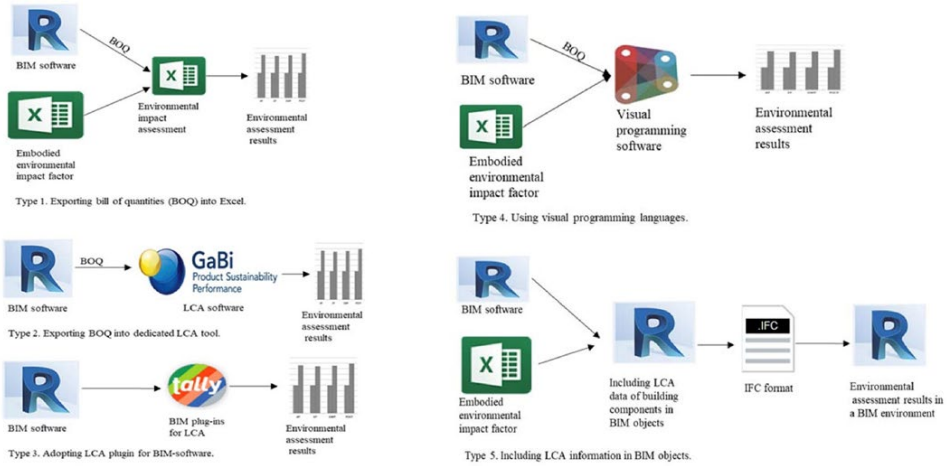


圖 3 五種 BIM-LCA 方法(圖片來源：Tam, et al., 2023)

之需求，且兼顧變更設計即時更新評估結果；在基本設計階段(LoD 200)，考量整棟建築評估所需時間，以可視化編程與 BIM 外掛技術為優先；在施工細部階段(LoD 400)，亦是可視化編程為優先，解決手動操作上之困難，根據 BIMForum (2020) 此階段之材料量已確定，因此在 BIM 模型中如已具備含有 LCA 數據之元件，能夠得出最細且量化之建築產品碳排數據，唯運用 IFC 檔評估之技術較需要專業操作之技術。

三、研究方法

3.1 確立評估範圍

3.1.1 LoD 等級與設計階段

B.C. Paulson 等人指出，越往設計初期，改變設計的成本較低，但需要快速、簡易且可大量運算的工具。設計前期重視尋找設計概念呈現的機會，而非建築實體系統的構築，而建築設計前期與後期的支援需求差異相當大，為解決建築構件之用料多寡、細部設計等系統設備之量化數據等，實務上常藉由 BIM 工具轉換來應對。

由於設計初期改變設計之成本最少、且減碳潛力最高(WGBC, 2019)，在設計初期階段建築師能夠規劃量體形式、樓地板面積與樓層數、構造系統等方案以達到減碳設計，並且舊建築材料再利用、低碳循環材也能在初期做使用規劃，因此本研究首先要確立 BIM-LCA 工具建置所對應之設計階段標準，方能分析不同設計階段之工具運用。中華民國公共工程之設計階段以工程經費估算時程為準，分為 5 個階段(圖 4)。

Revit 提供設計者建立不同設計階段，以針對每個階段建立不同模型，分為 LoD100~500 以表示模型細節程度(BIM Forum, 2020)，其中：

(1) LoD 100 為建築計畫、大略量體形式、少有構件之幾何資訊。
(2) LoD 200 建築構件具備大略尺寸、形式、位置。
(3) LoD 300 具備建築構件與材料之尺寸、系統、位置、組成資訊。
(4) LoD 350 具備與 300 相同之細節，包含構件之接合面。
(5) LoD 400 模型趨近於完整營建所需，可做為建築產品量化數據。
(6) LoD 500 實際營建之產品與系統均具備。

本研究探討於規劃階段(開發興建、建築計畫)進行減碳設計之可能性與效益，以及基本設計階段於 BIM 評估工具之各工程項目碳排量，計算建築總蘊含碳排、變更設計之碳排數據可視化。因此評估範籌以 LoD 100-300 為主。

3.1.2 生命週期評估範疇

根據 EN 15978:2011，建築生命週期之蘊含碳排階段，可歸納為以下：

(1) A1 原物料、A2 原料運輸、A3 製造、A4 資材運送、A5 施工耗能。
(2) B1 使用衍生之溫室氣體、B2 維護、B3 修繕、B4 替換、B5 改造。
(3) C1 拆除解體、C2 運棄、C3 廢棄物處理、C4 廢棄物清除。

現有之 BIM-LCA 工具與研究，其所能納入計算之生命週期階段均不同，如 EC3 資料庫僅涵蓋建築產品階段 A1~A4，基於 ArchiCAD 之 Pycab 工具其蘊含碳數據來源為 ICE 資料庫 A1~A3 階段 (Alwan, et al., 2022)。本研究採用 LEBR 低碳評估系統，透過於 BIM 可視化編程中建立迴歸公式與理論情境公式，以評估建築全生命週期蘊含碳 A1~C4 階段(不包含使用階段)。

3.2 採用 LEBR 低碳評估制度

本研究著重於設計初期之建築蘊含碳排、減碳潛力評估，採用成功大學林憲德教授所編「低碳建築評估手冊草案(ABRI 版)」做為碳排計算式參考，建築資材運輸製造碳排可區分為主結構、非主結構，結合施工、拆除廢棄物碳排量計算，可運用 LEBR 等級評估系統以及 CFR 減碳率計算，檢視設計案之減碳潛力。如圖 5，LEBR 分為不同建築階段，此特性可提供設計者於設計初期進行減碳量概估，以下為 LEBR 評估系統簡介：

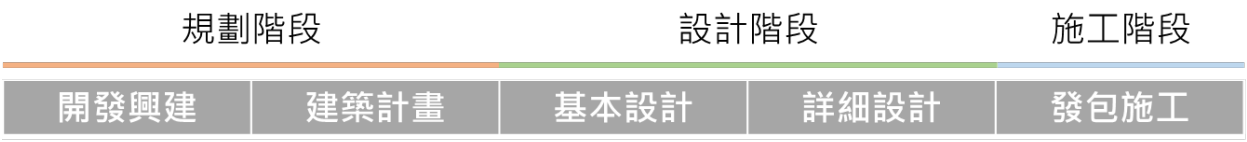


圖 4 公共工程設計階段(本研究繪製)

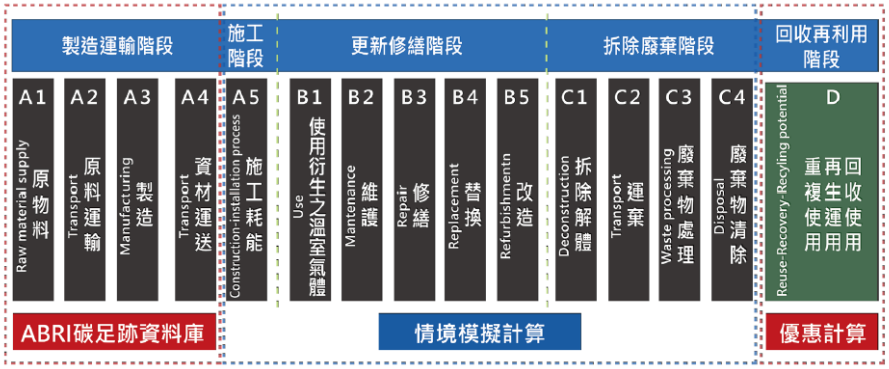


圖 5 LEBR 生命週期階段與計算方式(內政部建築研究所，2023)

LEBR 是依照 EN15798(2011) 或 ISO21931-1(2022)所建議的全生命週期計算邊境共 16 個項目，扣除 B6-7 的使用碳排(已納入建築能效標示)後共 14 個必要項目，其中建築產品與建材構件來源為依據製成盤查法(PB 法)所建立的 ABRI 資料庫，可涵蓋 A1-4 範疇(從搖籃到工地)；A5-C4 的 10 個項目採用模擬情境計算，以利設計階段的評估運用。

3.2.1 建築主結構的計算法

(1) 採用迴歸公式計算(設計初期)或提出結構計算對比模型分析(設計後期)。

(2) 結構設計合理性(跨距變化係數、平面形狀不規則修正係數等)、建材運用(高爐水泥、高性能混凝土等)、舊建築再利用等。

3.2.2 建築非主結構資材的計算法

(1) 依據 ABRI 資料庫中建築構件之碳排係數，乘上面積與更新次數求取

(2) 於 ABRI 建築構件碳足跡資料庫 B-LCC 無法找到相近名稱的構件時，可選用其他碳排資料庫資料選用（ABRI 初級資材碳足跡資料庫 P-LCC、環保署、Simapro 等國際知名碳排資料庫）

3.2.3 低碳(低蘊含碳)建築等級評估法

分別計算基準案與設計案的

(1) 評估範疇蘊含碳排放量 EEC ($kgCO_2$)

(2) 蘊含碳排指標 ECI ($kgCO_2/m^2$)

(3) 碳足跡減碳率 CFR (比值、無單位)

依據 LEBR 分級評估間距求取分級

3.3 BIM-LCA 工具開發

如圖 6 所示，本研究開發之工具具備多種 BIM-LCA 方法之優點：

(1) BOQ(工程量清單)做為材料計算基準

(2) 含有 LCA 數據($kgCO_2e$)之 BIM object(元件/實體)

(3) 運用可視化編程

BOQ(工程量清單)反映了建築最確切的量化數據，對於計算建築構件碳排有著精準度。現有的 BIM-LCA 方法多為透過 BOQ 傳輸至 LCA 軟體導出評估結果，但無法在變更設計時即時回饋數據(Wastiels & Decuypere, 2019)。具備 LCA 數據之 BIM 物件為匯出 IFC 檔評估之依據，此評估系統具備較精確、高細節之材料碳排計算，但仰賴專業 BIM 操作人員、且耗時較久(Tam, et al., 2023；Alwan, et al., 2022)

本研究開發之 BIM-LEBR 評估工具，透過建置具備 LCA 數據之 BIM 物件資料庫，節省每次評估需連接外部資源之時間，並採用 BOQ 做為建築構件計算，如圖所示，為達自動化、快速計算，採用可視化編程整合，並能在 BIM 軟體中檢視評估結果，計算之架構於圖 7 中解釋。

3.4 實際案例應用

本研究著重於 BIM 評估工具於建築設計階段之適用性，擬透過實際設計案之試算做為驗證。LEBR 之計算考量範圍上至構造設計減碳，屬於建築計畫或概念設計(CD)階段；下至建築構件設計，屬於基本設計(SD)階段，因此本研究以一規劃設計階段之高層集合住宅、一基設核定階段之集合住宅為試算案例，其中設計初期案例之 BIM 模型為 LoD 100，設計中後期案例之 BIM 模型為 LoD 200-300(包含 6 種建築構件工程、外牆開口與梯間)。

實際案例帶入 BIM-LEBR 分析流程主要分為 (1) BIM 模型之繪製，提供設計者選擇 ABRI 資料庫中之建材，進行建模與繪圖，並檢視、編輯主結構碳排之設計因素，亦可於資料庫中選用 RC、SRC、S 等構造進行設計。 (2) 建築構件之種類、數量、以及其碳排報告之設定及檢視，明細表之自動運算可供設計者即時檢視目前設計階段所用之材料、以及建築平面形狀

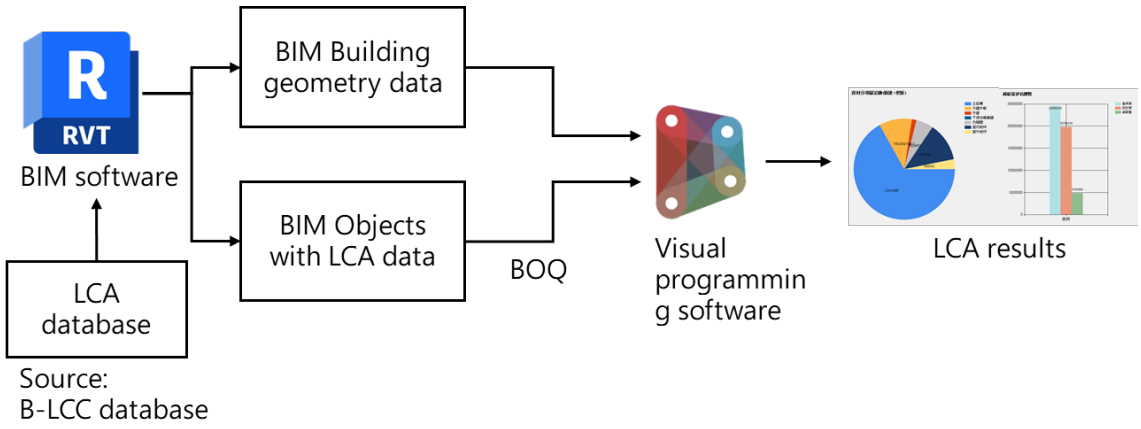


圖 6 BIM-LEBR 系統(圖片來源：本研究繪製)

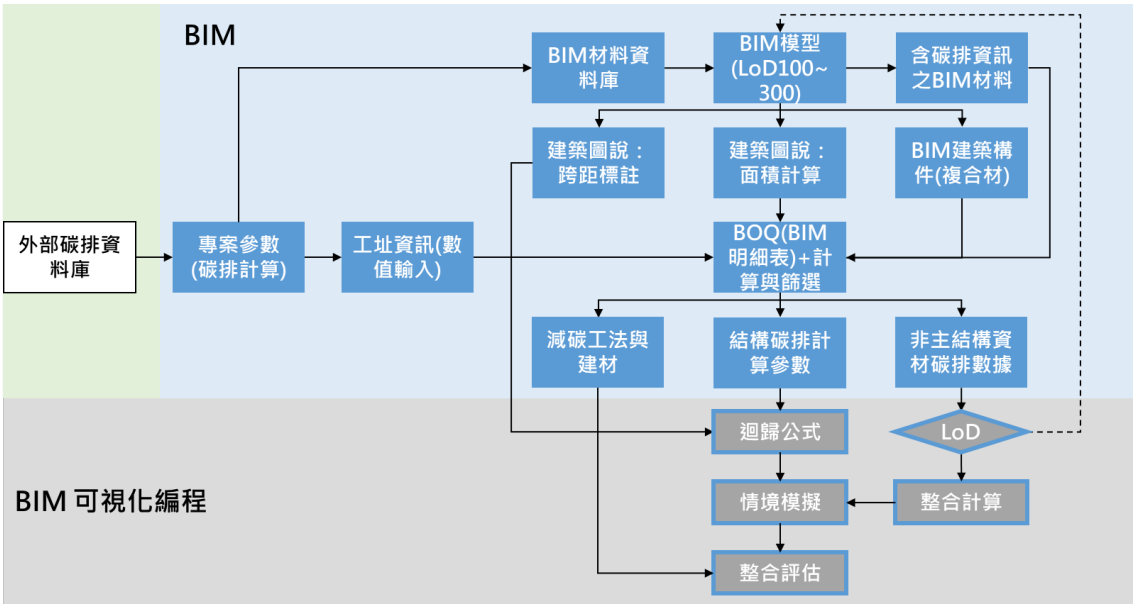


圖 7 BIM-LEBR 計算架構(圖片來源：本研究繪製)

係數等主結構碳排參數。 (3) 可視化圖表與報告導出，透過 Dynamo 運算，設計者可於 Revit 介面之中檢視設計初期之生命週期碳排、資材分項碳足跡、減碳量。

以下透過 LoD 200-300(BIM 模型細節度)之 LEBR 手冊範例案，演示其操作所需步驟，如圖 8 所示。LoD 100 之設計初期 BIM 模型則是相同操作流程，BIM-LEBR 會自動判定其設計階段並給予相應的生命週期碳排評估：

(1) BIM 專案開啟
選擇「BIM-LEBR 樣板」，匯入建築圖面(AutoCAD)，或直接開啟 BIM 模型。
繪製 BIM 模型(如已具備 BIM 模型則不需進行繪圖)

(2) 設定評估參數
輸入工址地震力參數
繪製「跨距標註線」
繪製「建地平面圖」(平面形狀分析範圍)
確認建築構件工程之材料資訊

(3) 生命週期與減碳評估
確認明細表報告、Dynamo 運算
得出生命週期碳排量與減碳評估

四、評估工具

本研究提出之 BIM-LEBR 能更有效協助設計者於設計初期快速評估建築減碳潛力，設計者僅需在 Revit 平台就能檢視減碳評估、工程項目之碳排數據。操作此工具需具備 Revit 基本繪圖能力及些許 Dynamo(Revit 系統下之可視化編程功能)技巧。

LEBR 之效率提升之處，主要是在 Revit 模型繪製同時，非主結構及主結構參數之自動彙整計算、生命週期蘊含碳評估以及減碳量之報告導出，透過 ABRI 資料庫之寫入，設計者還能隨意組合材料進行減碳設計，設計變更也能隨時反應至減碳評估報告，並以數據以及可視化圖表之方式呈現，提供設計者於設計初期評估建築之減碳潛力。

4.1 操作介面與可視化資訊

BIM-LEBR 評估工具運用 Revit 專案參數、材料資料庫、明細表篩選試算功能、可視化編程與少量語言宣告等技術，實現在 BIM 軟體中得出生命週期減碳評估。使用者介面以符合 BIM 設計流程為主，並提供以 B-LCC 資料庫(ABRI 建築構件數據)單一材料為基礎之建模與工項清單細節。操作者可依照其需求開啟 Dynamo 進行節點編輯，以作進一步的數據評估；也能在不開啟 Dynamo 之下進行減碳評估，評估圖表會呈現於使用者介面之中，而工程細項碳排則是透過 Revit 樣版之圖紙呈現，評估結果均即時隨設計發展而更新。

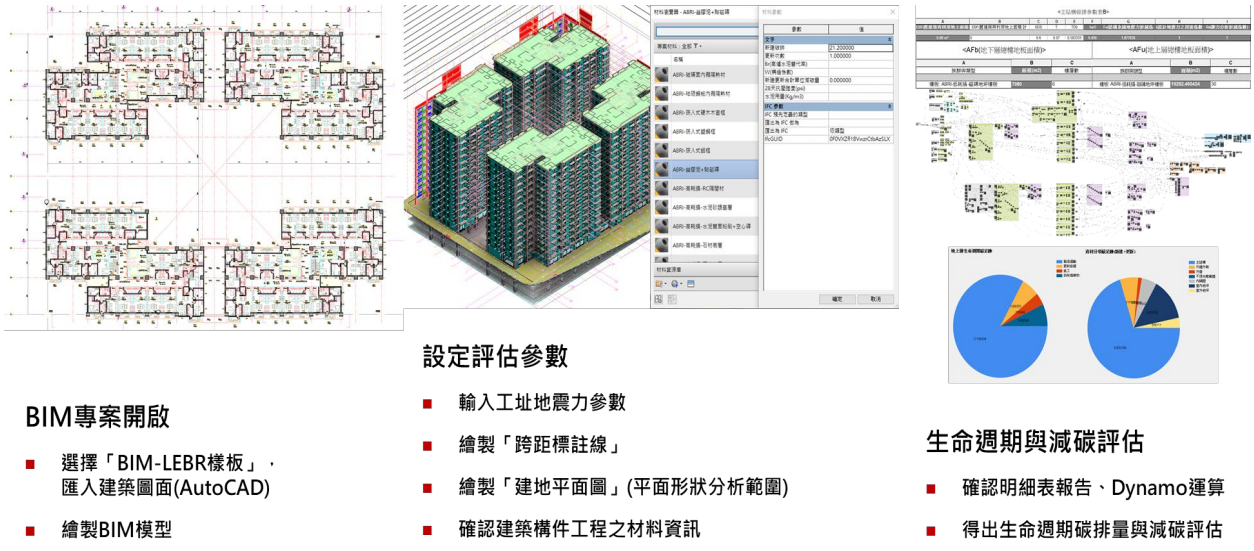


圖 8 BIM-LEBR 實際案例評估流程(圖片來源：本研究繪製)

4.1.1 碳排資料庫(圖 10)

(1) 透過 Revit 參數之寫入，賦予材料碳排之資訊
(2) 低碳材料與碳排資料庫可透過 BIM-LEBR 之外掛由外部匯入 BIM，如圖 9 所示
(3) 資料庫可加入、修改材料碳排資訊，材料更可組建成建築構件
(4) 建築構件(族群-類型)均以資料庫中的材料組建而成
(5) 材料之碳排資訊會自動加總，得出構件單位碳排
(6) 設計者可依照需求自行組建構件材料，以達減碳設計

4.1.2 工程細項碳排之明細表(圖 11)

(1) 用以公式計算之碳排參數與工址資訊，由明細表方式呈現數據供操作者即時檢視
(2) 各建築構件工程之組合材料、數量、生命週期更新次數均顯示於明細表之中，並隨著設計發展即時變更數據。

4.1.3 可視化圖表之評估結果(圖 12)

(1) Revit 模型之幾何資訊、工程細項明細表之碳排加總透過 Dynamo 整合後，以圖表方式呈現各項指標與評估結果
(2) 透過 Dynamo 中的外掛，可視化圖表可於設計階段導出，提供設計者減碳評估與建議
(3) 可視化圖表呈現資材分項碳足跡、生命週期蘊含碳評估、減碳量、減碳率

4.2 運用可視化編程實現設計階段減碳評估

BIM-LEBR 系統提供建築師於不同設計階段亦或是不同 LoD 等級(100-300)之 BIM 模型下，進行減碳評估，各生命週期階段之碳排數據於評估圖表導出，也可於 Dynamo 中檢視；各建築工程之新建與更新修繕數據可於明細表之中查看。而其中生命週期總碳排計算結果，會因應模型之設計進度而得出相應的數據，以了解在目前進度之下之減碳潛力。舉例來說，以一高層集合住宅案為例，目前處於概念設計階段，僅具備簡單量體與結構模型(LoD 100)，評估結果得出：

(1) 結構設計所需之減碳量
(2) 尚未考量基本設計之總蘊含碳足跡

於設計階段之減碳評估，可幫助建築師更快了解現階段之變更設計策略，並針對單一構造或系統進行減碳設計。這樣的概估或自動篩選評估功能是運用可視化編程在背景運算達成的，Revit 系統下之可視化編程(Dynamo)，提供開發者自行編寫程式節點，因此在 BIM 模型幾何資訊與碳排數據匯入計算時，透過已在 Dynamo 中建立之節點如 lst==null?0.00 : lst 等宣告，系統能自動判斷哪些 Input 值是 0，從而不計算該項目之碳排，如圖 14 所示，或者是自動將其定為基準案之值，以判斷任一 BIM 模型之設計階段並給予相應需求之減碳評估結果，而這些步驟由 BIM-LEBR 背景運算得出，操作者不需額外輸入假設值或更改評估工具中之編程，即可快速得出設計初期減碳潛力。

五、評估工具應用與結果

5.1 基本設計階段

設計完工之案例不一定具備 BIM 模型，透過 AutoCAD 圖資匯入，可於 BIM 之中建立更為精確之構件資訊、面積與數量計算等，減少碳排計算之誤差。本研究將 LEBR 手冊範例案中運用 CAD 圖檔手動計算之評估數據，與同案例運用 BIM-LEBR 系統評估之結果，進行數據比較並分析。以下為兩評估方法之數據總覽：

5.1.1 透過 BIM-LEBR 工具於 Revit 之中進行分析評估

(1) 評估範籌蘊含碳排量 19,796,239 $kgCO_2$
(2) 生命週期蘊含碳排量 32,446,398 $kgCO_2$
(3) 減碳量 4,793,989 $kgCO_2e$，減碳率 19.50%
(4) LEBR 等級 1 級

5.1.2 LEBR 手冊中評估結果，經確認後為參照 AutoCAD 圖面計算

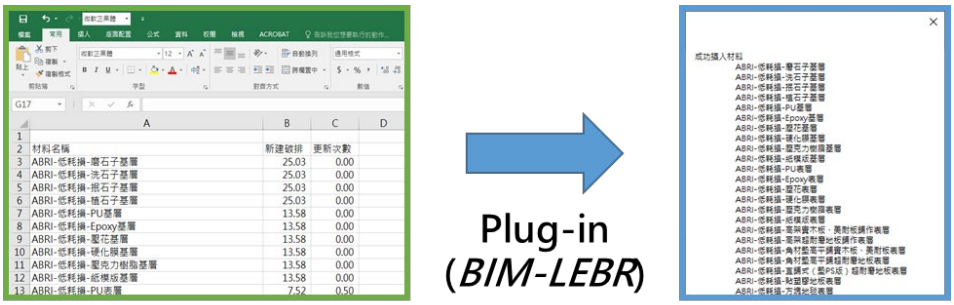


圖 9 BIM-LEBR 之外掛功能可快速匯入 Excel 資料庫(本研究繪製)

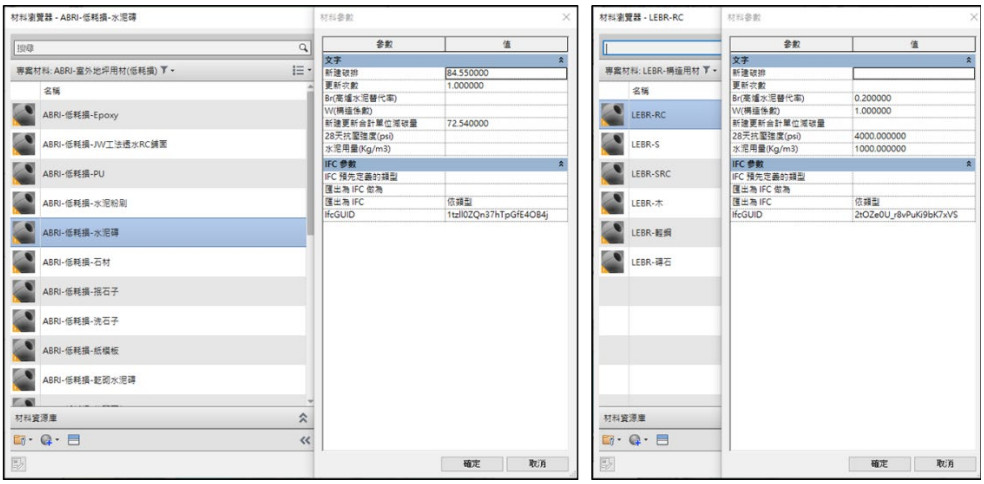


圖 10 BIM-LEBR 資料庫介面(本研究繪製)

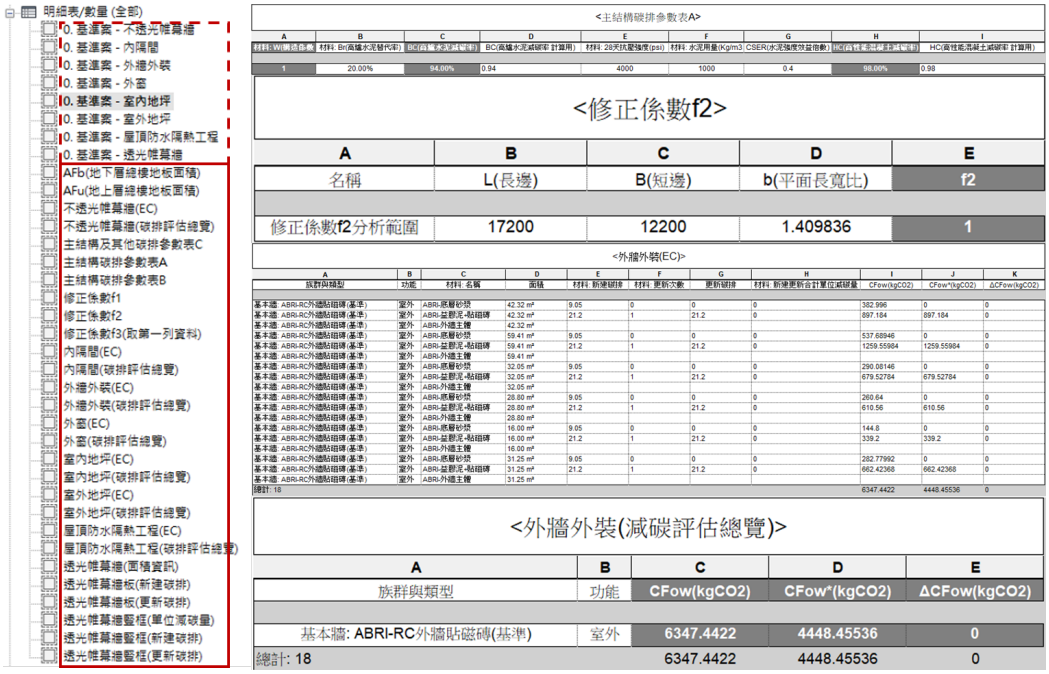


圖 11 BIM-LEBR 工項碳排明細(本研究繪製)

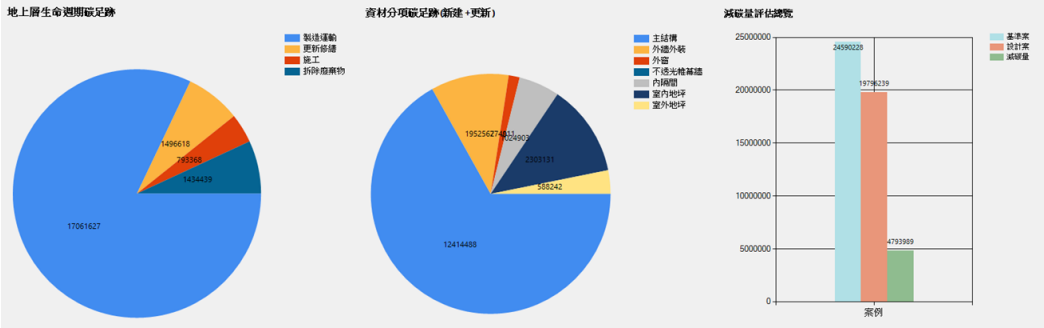


圖 12 BIM-LEBR 可視化評估圖表(本研究繪製)

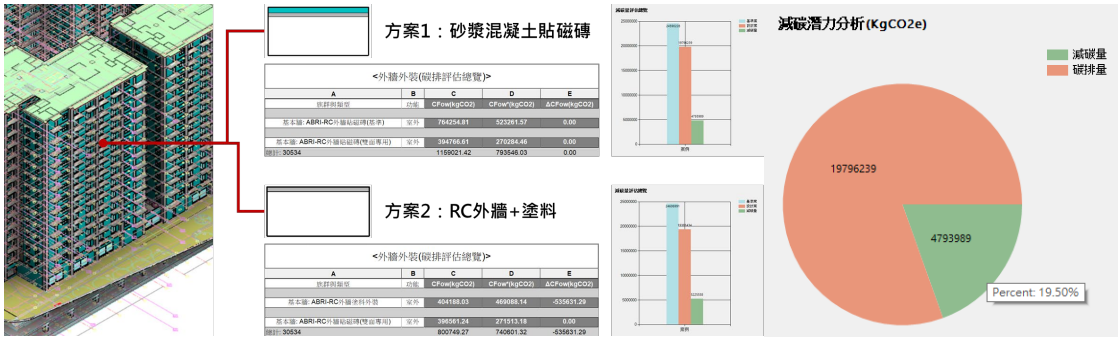


圖 13 變更設計即時得出減碳量與減碳率圖表(本研究繪製)

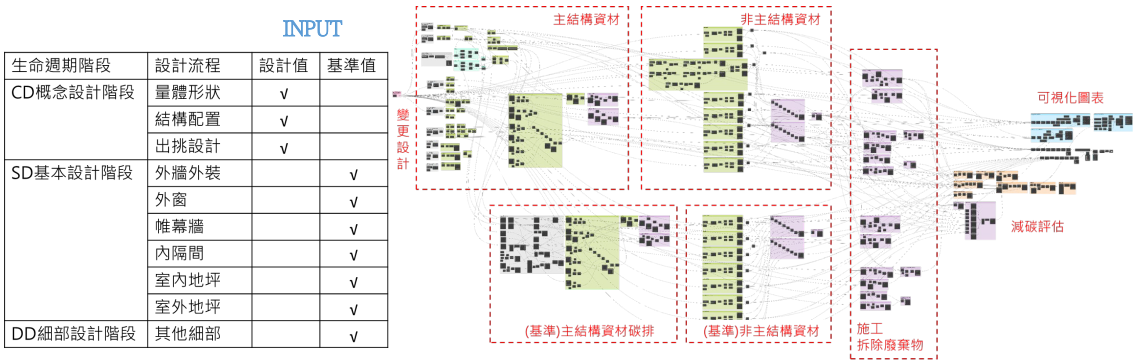


圖 14 可視化編程自動判斷設計初期評估所需參數(本研究繪製)

(1) 評估範籌蘊含碳排量 19,782,755 $kgCO_2$

(2) 生命週期蘊含碳排量 32,432,921 $kgCO_2$

(3) 減碳量 4,804,522 $kgCO_2e$，減碳率 19.54%

(4) LEBR 等級 1 級

值得一提的是，由於 LEBR 計算公式中之施工碳足跡、拆除廢棄物碳足跡等情境模擬數據，多為資材總碳排(CFum)加以計算而出，而資材總碳排包涵主結構與非主結構資材碳排。因此，BIM-LEBR 可以主結構、非主結構碳排，驗證工具計算準確度，間接驗證施工、拆除廢棄物與生命週期蘊含碳排之評估結果。

5.1.3 綜合比較：主結構碳排與生命週期評估(表 2)

在 LEBR 系統中，主結構碳排之計算受結構模型與混凝土配比影響，因此當 BIM-LEBR 中樓地板、結構柱之繪製與 LEBR 手冊中 CAD 之繪製一致時，兩種評估方式數據結果相同。不同之處唯混凝土配比在 BIM-LEBR 中具備自動計算之功能，在小數點進位上不同，具有微小差異，以下為比較兩種方式之相差比率：

(1) LCCR 差異：0.924 (BIM-LEBR) vs 0.925 (LEBR 手冊) 。

(2) 主結構碳足跡之相差比率 <0.1%，達工具驗證。差異源自於 LCCR 與 AFu 在 BIM 模型中計算之方式。

(3) 總碳足跡之差值源自於 BIM 與 CAD 計算方式之異，本研究將資材分項檢討。

5.1.4 綜合比較：非主結構資材碳排(表 3)

(1) BIM 模型中能依據實際施工(灌漿、塗料)接合介面計算牆體長度，而 LEBR 手冊以牆心線的方式計算牆體長度，如圖 15 所示。以內隔間工程為例：在此範例案中，BIM-LEBR 之值會略小於 LEBR 手冊之值，約-1.7%，如表 3 所示。

(2) LEBR 手冊計算法忽略內隔間開口，但其在實際施工中並不會施作灌漿，而 BIM-LEBR 可以模擬實際施工情況，快速計算扣除開口部之面積，讓評估數據更接近真實碳排。

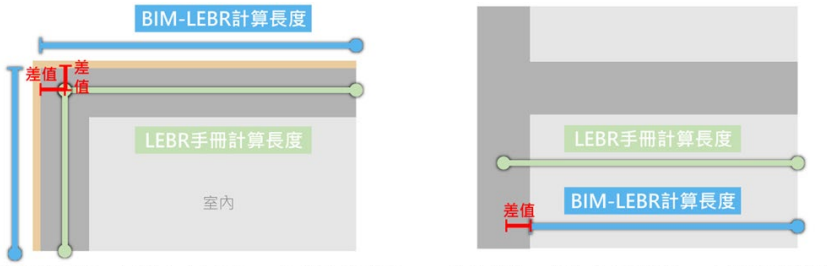
運用 BIM-LEBR 繪製建築構件之優點為準確化評估，BIM 模型不會重複計算接合處之材料，複合材料則是透過構件資料庫(例如應用砂漿混凝土+磁磚之工法)直接繪製，並且能於 BIM-LEBR 中之工項明細表查看各構件工程之碳排加總，此處數據即可與 LEBR 手冊作比較。

表 2 兩種算法之生命週期評估(本研究繪製)

計算方式	(1) BIM-LEBR		(2) LEBR 手冊		(1)-(2) 相差比率	
(單位：$kgCO_2$)	設計案	基準案	設計案	基準案	設計案	基準案
CFs(c) 地上層主結構碳排	**12,414,488**	**15,472,602**	**12,416,313**	**15,472,650**	**-0.015%**	**0.000%**
CFum 資材製造運輸階段碳排	17,061,627	20,898,751	17,064,307	20,912,447	-0.016%	-0.065%
CFrm更新修繕階段碳足跡	1,496,618	1,463,670	1,481,602	1,448,847	1.013%	1.023%
CFc 地上層施工碳足跡	793,368		792,719		0.082%	
CFdw 地上層拆除廢棄物碳足跡	1,434,439		1,433,264		0.082%	
TEC 生命週期蘊含碳排	32,446,398		32,432,921		0.042%	

表 3 兩種算法之非主結構資材碳足跡(本研究繪製)

(單位：$kgCO_2$)		(1) BIM-LEBR	(2) LEBR手冊	差值 [(1)-(2)]	相差比率
外牆外裝	新建 CFow	1,159,021	1,137,091	21,930	1.929%
	更新 CFow*	793,546	778,531	15,015	1.929%
外窗	新建 CFw	274,911	278,983	-4,072	-1.460%
	更新 CFw*	0	0	0	0.000%
不透光帷幕牆	新建 CFcw	0	0	0	0.000%
	更新 CFcw*	0	0	0	0.000%
內隔間	新建 CFiw	1,024,903	1,042,649	-17,746	-1.702%
	更新 CFiw*	0	0	0	0.000%
室內地坪	新建 CFf	1,794,526	1,795,484	-958	-0.053%
	更新 CFf*	508,605	508,682	-77	-0.015%
戶外地坪	新建 CFp	393,776	393,786	-10	-0.003%
	更新 CFp*	194,466	194,389	77	0.040%
非主結構資材(新建+更新)小計		6,143,754	6,129,595	14,159	0.231%
CFum 資材製造運輸階段碳足跡		17,061,627	17,064,307	-2,680	-0.016%



外牆外裝：BIM-LEBR > LEBR手冊　內隔間：BIM-LEBR < LEBR手冊

圖 15 按實際施工面積計算評估之數據差異(本研究繪製)

5.2 概念設計階段

以透過 BIM-LEBR 試算之高雄市高層集合住宅案為例，由於處於設計初期，許多設計因素未定，因此未考量之碳排計算參數設為基準值(請參閱 LEBR 手冊草案)，而現有之設計考量為影響減碳潛力之重要因素，現階段為簡易結構規劃之量體設計階段。

5.2.1 設計初期減碳策略

BIM-LEBR 能有效分析設計初期欲達減碳之數值，此階段僅考量量體(平面)形狀、大略結構配置所產生之減碳效益，BIM-LEBR 已自動將部份尚未考量之參數設為基準值，尚未設計之建築構件工程與細項，則是自動判定為無，以最大精確化評估結構設計之減碳潛力。以下為該案例之減碳效益評估：

(1) 評估範籌蘊含碳排量 9,347,270 $kgCO_2e$。
(2) 高於基準之 1,306,177 $kgCO_2$ 碳排量需透過減碳設計改善。
(3) CFR 為減碳率，設計產生高於基準 16%碳排放，LEBR 分級 6 級。

考量目前設計階段之影響因素，可優先分析結構配置改善所帶來之減碳效益，變更設計如圖 16。透過模型得知，建築低樓層與高樓層之跨距變化不一且差距大。擬將跨距變化減小，以評估減碳效益。結果如表 4 所示：

(1) 改善各層跨距變化，將跨距係數 Sp 縮小為 1.00。
(2) 結果顯示，減碳率獲得改善，從-16%變為-8%。

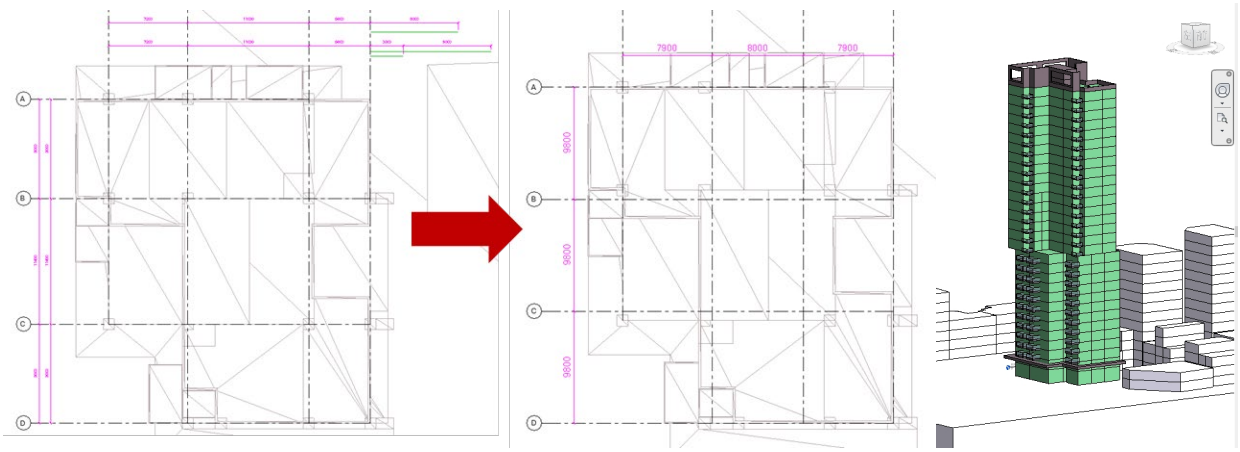


圖 16 設計初期跨距變更設計(本研究繪製)

表 4 跨距減碳設計之效益(本研究繪製)

	原案	改善案
跨距係數Sp	1.51	1.00
評估範籌蘊含碳排量($kgCO_2$)	9,347,270	8,672,463
高於基準值排碳量($kgCO_2$)	1,306,177	627,892
減碳率(正值為減碳)	-16%	-8%
LEBR等級	6級	5級

5.2.2 BIM-LEBR 初期減碳之效益

LEBR 具備以主結構、構件工程分別計算之特色，有效找出減碳熱點。本研究開發之 BIM-LEBR 善用 LEBR 系統與 BIM 之優點，能有效分析結構與非主結構模型之碳排量，這提供建築師在以結構資訊為主的設計初期階段，能得出以下分析結果或後續設計策略：

(1) 現階段設計之減碳潛力分析，在 BIM 中變更設計後能即時檢視改善效果。

(2) 僅具備結構、量體之設計初期減碳評估結果，能有效輔助建築師衡量設計中後期之建築構件材料選用、建材用量控制、低碳工法策略。

六、結論與建議

6.1 結論

(1) LEBR 減碳評估導入 BIM 工具的開發方向

隨著 2050 淨零路徑相關公共政策的施行，LEBR 評估系統的推廣迫在眉睫，而搭配 BIM 工具的開發，則是提供建築業界因應制度的便民工具。本研究發現由於各建築師事務所之進行中設計案均處在不同設計階段，且相同設計階段之案例其 LoD 不盡相同，因此 BIM-LEBR 之開發方向需兼顧設計初期與中後期之適用性，本研究透過 BOQ 於 BIM 模型中之數據轉換，以及可視化編程之運用，創建可針對特定生命週期或設計階段進行碳排量估算之系統，系統能自動判斷、篩選所需參數，並兼顧建築構件細部之碳排數據精確程度。

(2) BIM-LEBR 模擬實際施工情境之計算

本研究透過運用 BIM-LEBR 評估 LEBR 手冊範例案，並導出數據與之相比較，發現能夠取得建築構件施工面積之 BIM-LEBR 有著較貼近實際施工情形之碳排考量，而由於 BOQ 清單(Revit 材料明細表之技術)之細項基礎源於個別的 B-LCC 資料庫材料，因此各材料之數量、組成、碳排當量均能一覽無遺。如此，BIM 模型之估算能更加貼近與實際營造所產生之碳排

(3) BIM-LEBR 於設計初期概估減碳潛力

透過系統化的工作流程，設計者得以在設計初期，概估案例之減碳效益，並以圖表化之方式呈現，提高設計效率。以透過 BIM-LEBR 試算之高雄市高層集合住宅案為例，由於處於設計初期的量體發展階段(簡易結構規劃)，現有之設計考量為影響減碳潛力之重要因素。經分析後，可快速提出 LEBR 系統的蘊含碳排放量、減碳率，以及等級評估。

(4) BIM-LEBR 於實務之輔助評估

本研究開發之 BIM-LEBR 已透過 LEBR 手冊範例案進行精準度之驗證，期盼未來於實務案例能有效輔助建築業者進行評估，但不在低碳評定審查與執照申請之內。

6.2 建議

(1) 本研究開發之 BIM-LEBR 適用不同設計階段，輔助建築師、工程顧問等業者於設計初期競圖至基本設計階段進行減碳評估。建議未來可將其導入建築產業或進行工具操作培訓等，並蒐集實務應用之回應以作技術精進。

(2) BIM-LEBR 之可視化評估結果以生命週期蘊含碳排揭露與階段性減碳潛力分析為主，減碳策略與技術需由操作者自行繪圖並即時得出評估結果，不具備主動提示之功能，建議未來可延伸開發具備減碳技術指引之使用者介面。

參考文獻

內政部建築研究所 (2023)。*低碳(低蘊含碳)建築評估手冊*。新北市：內政部建築研究所。

國家發展委員會(2022)。*臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明*。引用於 2023 年 9 月 28 日，取自 https://ws.ndc.gov.tw/Download.ashx?u=LzAwMS9hZG1pbmlzdHJhdG9yLzEwL3JlbGZpbGUvMC8xNTA0MC8yZTZhZTA0Mi0wYjUyLTQ4OTAtOGY5NC1hYjk5MzgzNWZlZTIucGRm&n=6Ie654GjMjA1MOa3qOmbtuaOkuaUvui3r%2bW%2bkeWPiuetlueVpee4veiqquaYji5wZGY%3d&icon=.pdf.

AIA, (2021). *AIA-CLF Embodied Carbon Toolkit for Architects.* Retrieved Sep 28, 2023 from

https://www.aia.org/resources/6445061-aia-clf-embodied-carbon-toolkit-for-archit.

Alwan, Z., & Jones, P. (2014). The importance of embodied energy in carbon footprint assessment. *Structural survey*, *32*(1), 49-60. (DOI: 10.1108/SS-01-2013-0012)

Alwan, Z., & Jones, B. I. (2022). IFC-based embodied carbon benchmarking for early design analysis. *Automation in Construction*, *142*, 104505. (https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104505)

Autodesk (2023). *Tally.* Retrieved Sep 28, 2023 from https://apps.autodesk.com/RVT/en/Detail/Index?id=3841858388457011756&appLang=en&os=Win64

BIM Forum (2023). *Level of Development (LOD) Specification.* Retrieved Sep 28, 2023 from https://bimforum.org/resource/lod-level-of-development-lod-specification/

Carbon Leadership Forum (2023). *EC3 Tool.* Retrieved Sep 28, 2023 from https://carbonleadershipforum.org/ec3-tool/.

OneClick LCA (2023). *Get maximum BREEAM credits with the 100% rated LCA tool.* Retrieved Sep 28, 2023 from https://www.oneclicklca.com/certifications/breeam/.

Paulson Jr, B C. (1976). Desiging to reduce construction costs. *Journal of the Construction Division*, *102*, *No. C04.*

Tam, V. W., Zhou, Y., Shen, L., & Le, K. N. (2023). Optimal BIM and LCA integration approach for embodied environmental impact assessment. *Journal of Cleaner Production*, *385*, 135605. (https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135605)

Tomasetti, T. (2023). *Beacon.* Retrieved Sep 28, 2023 from https://www.thorntontomasetti.com/capability/beacon.

Wastiels, L., Decuypere, R. (2019). Identification and comparison of LCA-BIM integration strategies. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., 323*(doi:10.1088/1755-1315/323/1/012101)

WBCSD (2021). *Net zero Buildings: Where Do We Stand?* Retrieved Sep 28, 2023 from https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/net-zero-buildings-where-do-we-stand.

World Green Building Council (2019). *Bringing Embodied Carbon Upfront.* Retrieved Sep 28, 2023 from https://worldgbc.org/article/bringing-embodied-carbon-upfront/.