

國立臺灣大學理學院
氣候變遷與永續發展國際學位學程
碩士論文



International Degree Program in Climate Change and Sustainable Development
College of Science
National Taiwan University
Master Thesis

木構造房屋生命週期碳足跡與林木經營碳匯效益評估
Wooden-building Life Cycle Carbon Footprint and
Forestry Carbon Sink Assessment

李冠賢

Kuan-Hsien Li

指導教授:邱祈榮 博士

Advisor: Chyi-Rong Chiou, Ph.D.

中華民國 108 年 2 月

February, 2019



摘要

本研究為求找出人為活動的二氧化碳減量熱點，以盤點林業上下游的碳排放為旨，於上游的林地經營階段採用 Individual model 與 Allometric equation 建立符合個體生長曲線，且合乎林分測量的林地生長模式，對未來林地的生長做預測推估。於下游選擇建築產業，作為林業產品碳替代的標的，以生命週期評估的範疇帶入 BICF 法與台灣的資料庫，進行台灣木構造建築的二氧化碳計算，並以相同功能的鋼筋混凝土建築作為比較基線。並提出修改建議，將木材的碳儲藏效益計入原料部分，且於廢棄部分進行情境設計並扣除原計入的碳儲藏效益。

研究成果得出：一、台灣的木構造建築四層樓案例，在總生命週期評估三十年內，碳排放量共 1,411,647 kgCO₂e；相同功能的鋼筋混凝土建築，在總生命週期評估六十年內，碳排放量共 2,856,168 kgCO₂e，兩者相差 2.02 倍。二、程式模擬出林地的林分生產率，隨時間變長且樹木變大後，會有減緩的趨勢，可以作為林業上游需要人為採伐，以釋放林地提供樹木新生空間的證據。綜合以上兩點定量結果，可以定性的歸納，台灣林業在木構造建築的碳替代效益，從上游到下游都是有益於二氧化碳減量的。

關鍵字:生命週期評估、碳足跡、木構造、碳替代、異速生長方程式

ABSTRACT



Buildings contribute significantly to Greenhouse gas emissions, because of the high-energy consumption and the material used. By finding out a way to reduce the Greenhouse gas (GHGs) emissions of building, we can slow down climate change. In addition, the carbon substitution of wooden products can store GHGs in the wood, and free land for planting new saplings to absorb more carbon. According to the ISO 14025 specification and the CFP-PCR the life cycle assessment of buildings in Taiwan is divided into five phases: Materials Manufacturing, Construction, Use phase, Maintenance and End-of-life. There is many research about reducing carbon emission in civil engineering, but most of this research did not consider carbon storage project to import the concept of carbon substitution.

Thus, to sum up the carbon substitution totally, this research calculated the carbon substitutions of wooden building by life-cycle assessment (LCA) and also model the forestry in Taiwan. We established a model to take into account the storage benefits of carbon substitution. The model can estimate the carbon reduction from replacing reinforced concrete buildings (RC-building) with Cross-Laminated-Timber buildings (CLT-building). This study is based on the LCA of RC-building and CLT-building. The two parameters, 「GHGs emission of non-wooden product」 and 「GHGs emission of wooden product」, were put into this model. Because of the multiple effects of forestry management, we let the 「GHGs storage in wooden product」 become a part of Materials Manufacturing Phase in CLT-building. It reduces 232,137 KgCO₂e emission in life cycle, and needs 85 m³ wood by using CLT-building instead of RC-building in a four-floor building.

Key words: Life cycle assessment, carbon footprint, Individual-based model, Allometric equation, Cross-Laminated-Timber building

目錄

論文口試委員審定書	
摘要	i
ABSTRACT	ii
第壹章 緒論	1
一、 研究背景與動機	1
二、 研究目的	2
三、 研究流程	4
第貳章 文獻探討	5
一、 建築生命週期評估	5
(一) 建築生命週期評估發展	5
(二) 國外建築生命週期評估比較案例	5
(三) 功能相同之自我比較方法	7
(四) 台灣木構造建築過去研究	7
二、 BICF 建築碳足跡法	8
(一) BICF 建築碳足跡法研究範疇	8
(二) BICF 建築碳足跡法計算公式之合理性	9
三、 林地生長模式	13
(一) 樹木生長曲線與樹齡及直徑關係	13
(二) 異速生長方程式 (Allometric equation)	14
(三) 台灣林地碳匯調查實證案例	16
第參章 方法與材料	17
一、 研究方法	17
(一) 研究框架	17
(二) 建築碳足跡 BICF 計算法	19
(三) Individual-based model	24
(四) 統計軟體 R	26
二、 試驗材料	29
(一) 木構造房屋_台中 CLT 四層木構造建物	29
(二) 模擬林地之初始資料	32
第肆章 結果與討論	33
一、 BICF 估計法的建築生命週期評估	33
(一) 生命週期評估法五階段結果	33
(二) 合併建築生命週期評估與碳儲藏情境分析	34
二、 林地碳匯功能_ Individual-based model 模擬結果	36
三、 合併建築生命週期評估碳足跡與林地管理碳匯總量	44
第伍章 結論與建議	46
參考文獻	49



圖目錄

圖 1- 1. 研究流程圖.....	- 4 -
圖 2- 1 STAGES OF AN LCA 本研究引用自 ISO14040, 2006	- 5 -
圖 2- 2 PROCESS-BASED LCA 對 RC 建築的生命週期評估流程圖 引用自 ANGELA 2005 ..	- 6 -
圖 3- 1 整體研究框架圖 本研究繪製	- 17 -
圖 3- 2 產品生命週期評估與木材碳儲藏合併示意圖 本研究繪製	- 17 -
圖 3- 3 台灣二葉松林樣區株數密度與林木大小之關係, 引用自林世宗等人, 2008	- 25 -
圖 3- 4 木構造 CLT 建築樓板與牆板結合處 本研究拍攝	- 29 -
圖 3- 5 台灣森科外觀照 本研究拍攝	- 31 -
圖 4- 1 各階段 30 年碳排放比	- 34 -
圖 4- 2 MODEL_2 初始值與第一百年比較 本研究繪製.....	- 36 -
圖 4- 3 MODEL_3 初始值與第一百年比較 本研究繪製.....	- 36 -
圖 4- 4 MODEL_3.1 初始值與第一百年比較 本研究繪製.....	- 36 -
圖 4- 5 MODEL_2 V_{STEM} 的一百年變化量 本研究繪製.....	- 38 -
圖 4- 6 MODEL_3 V_{STEM} 的一百年變化量 本研究繪製.....	- 38 -
圖 4- 7 MODEL_3.1 V_{STEM} 的一百年變化量 本研究繪製.....	- 39 -
圖 4- 8 MODEL_2 W_{ABOVE} 的一百年變化量 本研究繪製.....	- 39 -
圖 4- 9 MODEL_3 W_{ABOVE} 的一百年變化量 本研究繪製.....	- 40 -
圖 4- 10 MODEL_3.1 W_{ABOVE} 的一百年變化量 本研究繪製.....	- 40 -
圖 4- 11 樹木直徑隨時序變化圖 MODEL2, 減產參數設 0.1 本研究繪製	- 41 -
圖 4- 12 樹木直徑隨時序變化圖 MODEL2, 減產參數設葉子量分配 本研究繪製....	- 42 -
圖 4- 13 樹木直徑隨時序變化圖, 減產參數設 0.15 本研究繪製	- 42 -
圖 4- 14 樹木直徑隨時序變化圖 MODEL_1 每年 LOOP 減產參數設 0.8 本研究繪製 ..	- 43 -
圖 4- 15 MODEL_4 百年內每年林地材積總量隨時序變化	- 44 -
圖 4- 16 MODEL_4 在第 31 年與第 61 年有伐木情況下, 整體林地的材積時序變化 .	- 45 -



表目錄

表 2- 1 建築碳足跡計算法比較 本研究重繪 引自建築產業碳足跡.....	- 8 -
表 2- 2 各類建築物之構造係數 W 標準值 建築產業碳足跡改編自黃振祥, 2015...	- 12 -
表 2- 4 五類異速生長方程式比較表格 本研究重製, 參考孫, 2011	- 14 -
表 3- 1 BICF 公式本研究整理, 並引用自 建築產業碳足跡 林憲德, 2018	- 19 -
表 3- 2 建築設計值.....	- 30 -
表 3- 3 樣區資訊.....	- 32 -
表 3- 4 模式初始值.....	- 32 -
表 4- 1 計算鋼筋混凝土使用 60 年、30 年, 及木構造使用 30 年的排放比較.....	- 33 -
表 4- 2 鋼筋混凝土與木構造建築皆使用 30 年並考量碳儲藏效益的情境.....	- 35 -
表 4- 3 三種模式在成長放緩以及樹木死亡的差別	- 37 -



第壹章 緒論

一、 研究背景與動機

人為的溫室氣體 Greenhouse gas (GHGs) 排放，在工業革命後已逐步成為全球氣候變遷的重要因子。依照 IPCC 於 2007 年公佈的全球二氧化碳排放量報告，[森林土地利用改變]與[住商用建築] 兩項目的碳排放，分別占 17.3%與 7.9%。這兩項的顯著排放占比，原因在於林地被農地或商業用地取代造成焚燒林；另外過去通常以木材作為建材，施工的耗能較低、工期較短，但現今在部分國家被低價鋼筋混凝土取代，建築的碳排放因此提高。

本研究假定溫室氣體減量可減緩氣候變遷，將從顯著影響碳匯(carbon sink)的兩大項目尋求減量。故將以建築作為木質碳替代的目標，同時計算林業的木材使用提升的碳儲藏，並根據現有木構造市場成品，進行生命週期評估(LCA)，計算建築碳排放的降低，建立模式計算跨建築工程與林業管理兩個領域的總體效益。

首先以林業經營的角度，認為森林進行適當伐木，可增進大氣中的二氧化碳更被固定於生物圈。例如將成熟林木做成建材，木材被作為產品保存，而原本的林地透過再栽種新的樹木吸收二氧化碳，過程應該益於固定二氧化碳。然而，根據 Nature 507 (N. L. Stephenson et al., 2014) 做的全球 403 種樹木調查，單株樹木生長模式與樹木尺寸有正向關係，但林地密度又有壓迫的負向影響。基於上述研究，我們難以單憑經驗評估最適當的伐材時機，需透過模式模擬，才能比較不同林業管理的實質碳儲藏效果，並建立林業碳匯效益的評估模式。

其次，國外雖有個案研究，對木構造建築與鋼筋混凝土建築，進行生命週期評估的比較結果。但研究皆指出生命週期評估因地而異，因此仍需對台灣的建築物，進行因地制宜的生命週期評估。台灣環保署已於 2014 年通過範疇包含原料開採、施工、使用、維護及廢棄處理，五階段的建築碳足跡產品類別規則 CFP-



PCR (行政院環境保護署，2015)。本研究以台灣的情境，計算木構造建築相較於相同功能的鋼筋混凝土，能減低的二氧化碳排放量，並以情境模擬的模式再加上林業木材碳匯的效益，得出木材碳替代(carbon substitutions) 的溫室氣體減量總體效益。

二、 研究目的

樹木自然生長的年齡通常大於百年，如果僅以量測決定樹木伐木時機，無法找出碳匯量最大的最佳伐木時機，也無法清楚提供皆伐、疏伐或是不伐木，各種人為行為之間的森林碳匯差異。本研究的首要目的，是藉由生態學中的個體模式 (Individual-based model, IBM)，考量樹木個體生長的 Allometric function ($\log Y = a + b \log X$)，以及群聚而生的樹木受到密度影響，建立完整的動態模擬。驗證以下結果，如果放任林地生長會因為彼此的壓迫，造成整體二氧化碳固定總量下降。並以模式模擬找出皆伐、疏伐的最佳尺寸與時機點。

進而聯結單株樹木與整體森林的成長速率差異，因為個體的生產率隨年齡及大小持續上升，但整體森林層級卻是總生產率下降。透過模式模擬將兩種測量結果，合併於相同的生長方程式中，驗證林業所提及的森林需要人為疏伐。並量化計算木材的取用，在林地管理方面實質可達成的二氧化碳減量效應，不單是木材內部的碳素量，還透過林地的模式模擬，得到更貼近真實情況的數值。

木材生產在產品端也須有對應的商品需求，才能確保產生的木材不是被棄置又回到大氣的碳循環。本研究將以木構造建築與鋼筋混凝土建築的生命週期評估，得到個案的二氧化碳排放差異。並修正原有的模型將木材的碳儲藏效益，納入木構造生命週期評估的原料階段，同時為避免高估儲藏效益，須於廢棄物處理階段設計兩類情境，將儲藏的碳素下個階段的二氧化碳排放清楚估計。

釐清儲藏效益如何結合木構造建築的生命週期評估，此模式將可以估計隨時間變化，木構造建築的碳替代造成的二氧化碳排放總量變化，包含了產品的生命

週期評估，以及木材原料的碳儲藏效益，兩部分總體產生的效益。

綜合上述說明，本研究的研究目的主要有三項。一、利用 Allometric equation 與 Individual model 建立符合個體生長曲線，且合乎林分測量的林地生長模式。二、選定案例計算木構造建築的二氧化碳排放，並與相同功能的鋼筋混凝土建築比較。三、修正現有的模式計算範疇，將木材的碳儲藏效益計入木構造建築的二氧化碳排放計算中。



三、 研究流程

本研究以台灣木構造建築的碳替代總體效益評估，以生命週期概念納入原料碳儲藏，估算長期時序的碳排放量變化，內容共分為五個章節，如圖 1-1 所示：

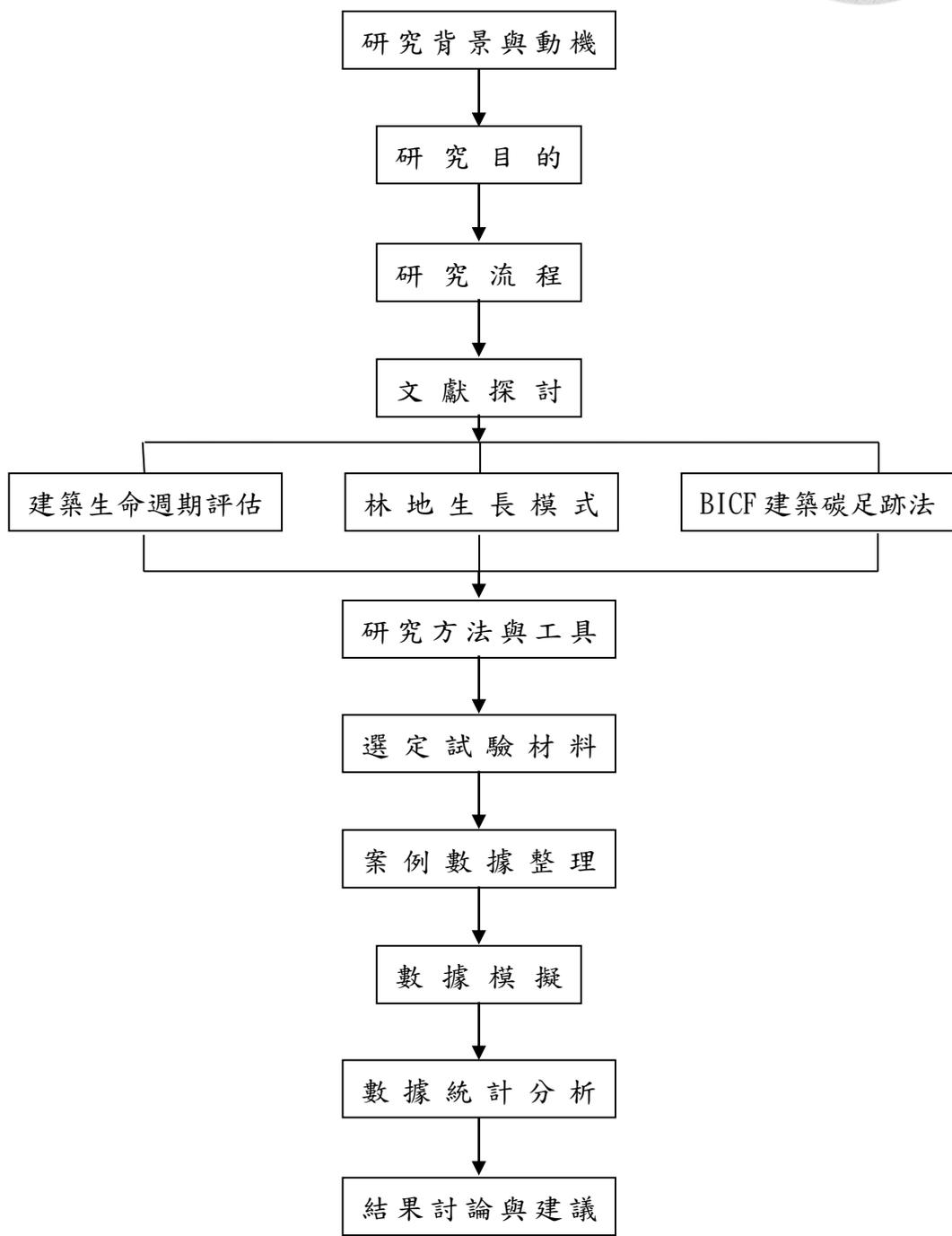


圖 1- 1. 研究流程圖



第貳章 文獻探討

一、 建築生命週期評估

(一) 建築生命週期評估發展

生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA) 是根據國際標準組織(International Organization for Standardization, ISO) 制定的全球工商業產品的國際標準，於「ISO14040 環境管理-生命週期評估-原則與架構」當中所公告，將產品的生命週期分為四個部分(圖 2-1):目標與範疇界定、盤查分析、衝擊評估、結果闡釋。在目標與範疇界定，需明定分析目標的生命週期評估範疇為搖籃到大門、搖籃到墳墓、搖籃到搖籃哪一類，並界定需要盤查的所有項目；盤查分析包含進行數據收集與清單計算，輸入資料與輸出成果；衝擊評估評估則評斷分析結果對環境衝擊；闡釋則需結合盤查分析與衝擊評估，提出結論與建議(ISO, 2006)。

本研究案在建築部分範疇界定如同台灣環保署核定的建築 CFP-PCR，並以設計圖資料進行盤查分析，衝擊評估部分只看二氧化碳的排放量衝擊，並將產出具體二氧化碳排放量報告，作為建築結構的選擇建議。

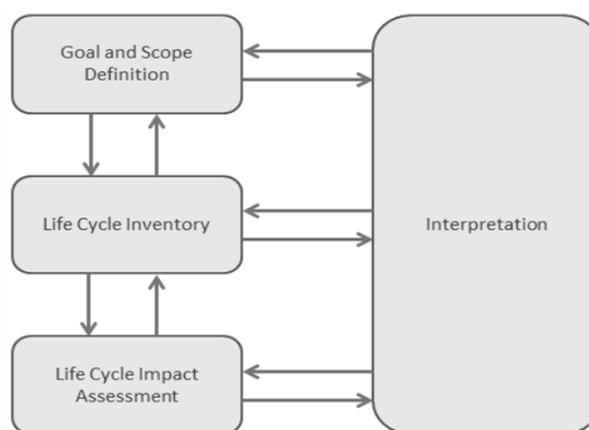


圖 2- 1 Stages of an LCA 本研究引用自 ISO14040, 2006

(二) 國外建築生命週期評估比較案例

關於鋼筋混凝土與鋼骨結構建物的生命週期比較，在國外已有許多研究，包含美國中西部的五層樓中小型商業辦公室大樓的比較 (Angela Acree Guggemos & Arpad Horvath, 2005)，研究依照生命週期評估界定的五個階段，分別為 Materials manufacturing & Construction & Use phase & Maintenance & End-of-life，對兩棟真實存在的 4,400 平方公尺的大樓，進行使用年限五十年的生命週期評估。研究方

法採取 Process-based LCA 對建築的生命週期評估畫出流程圖(圖 2-2)以及計算維護階段與廢棄階段的輸出；並採取 Economic input - output analysis-based LCA (EIO-LCA)的方式，進行材料及建築使用階段評估的輸入與輸出；且應用 Construction Environmental Decision Support Tool (CEDST)工具，進行施工現場的輸出。

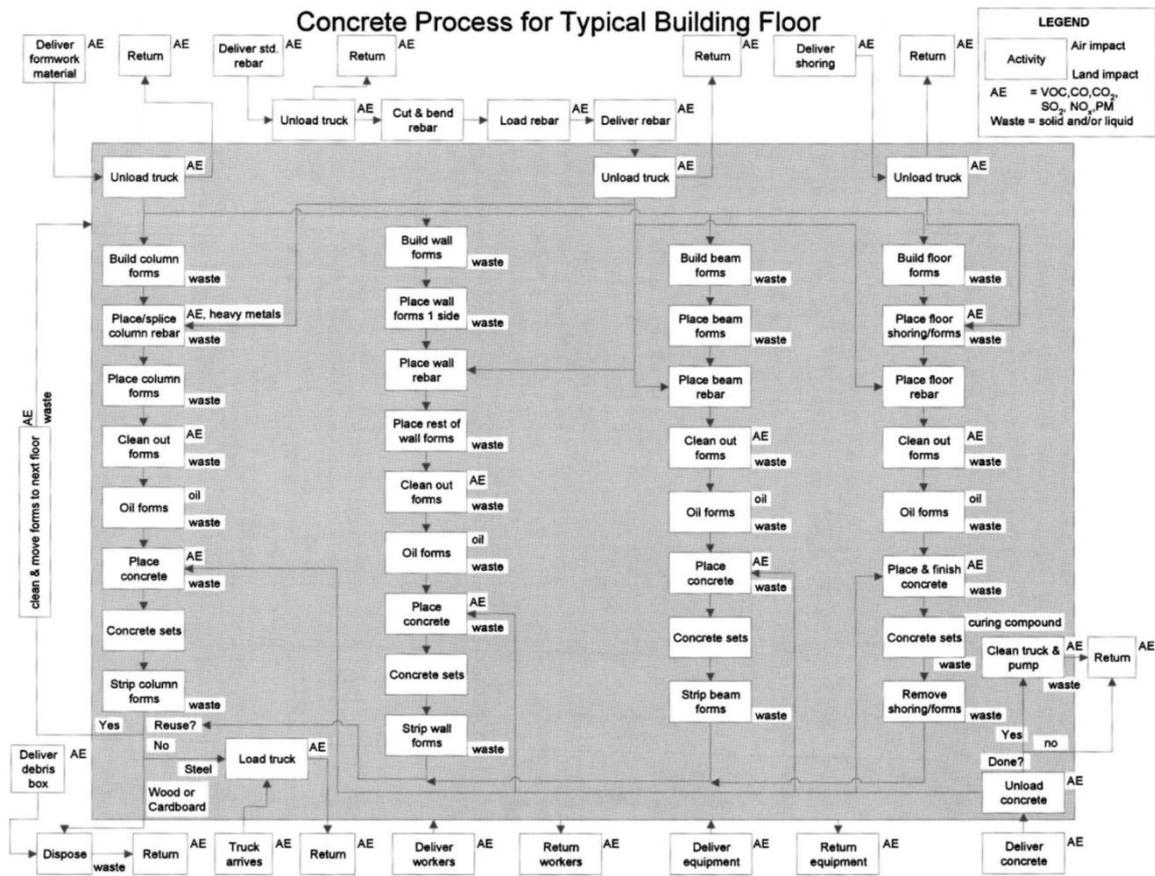


Fig. 1. Process diagram for reinforced-concrete construction [(Guggemos 2003), modified from Guggemos and Horvath (2003)]

圖 2- 2 Process-based LCA 對 RC 建築的生命週期評估流程圖 引用自 Angela 2005

另外根據加拿大的建築生命週期評估研究(Cole R.J., 1999) ，加計了工人運輸以及工地加熱的排放，以及瑞典的研究 (Asa Jonsson, Thomas Bjorklund, Anne-Marie Tillman, 1998) 都是針對相似的鋼骨建築與鋼筋混凝土做比較。多篇研究中都有一個共通點，就是點明了雖然他們的研究成果為實證研究且可以呈現大致的差異趨勢，但不同地方及不同年代的建築物來說，仍然都需要進行自己的生命週期評估才可以做為實證研究。主要是在於計算的基準值設定可能不同，舉例來說



瑞典研究中，不論是鋼骨結構還是鋼筋混泥土輸出的數值，都遠遠低於 Angela Acree Guggemos 對美國中西部的辦公大樓的計算。故我們不可以單純引用他國的研究做為台灣的生命週期評估比較，必須以台灣的建築物做實際的計算。

(三) 功能相同之自我比較方法

而根據木構造建物與鋼筋混泥土的比較，可以參考加拿大對於多層次實木積材 cross-laminated-timber (CLT)與鋼筋混泥土的建物比較(Adam B. Robertson, Frank C. F. Lam, Raymond J. Cole 2012)，研究採用 14,233 平方公尺的鋼筋混泥土建築物做為案例，並設計出相同功能與熱阻值 thermal resistance (RSI)的 CLT 建物進行模擬比較。重點不在於結構尺寸一模一樣，而是在於功用與功能相同則兩者在於使用階段的估算可以完全視做相同，將差異聚焦在材料、施工、維護、拆除四個階段做計算，也不會因為假設使用階段相同而遭到質疑，基於上述優點，我的研究方法也預計採用拿 CLT 建築為實例計算，並模擬相同功能功用的鋼筋混泥土建物做比較。且此份研究於結果闡釋的部分，除了定量描述各類別輸出與衝擊外，同時進行了不確定性評估以及敏感性分析，作為生命週期評估報告中提高可信度的重要部分，確認 CLT 建物即使在不確定性分析下，仍優於鋼筋混泥土建物的環境衝擊。

(四) 台灣木構造建築過去研究

台灣研究部分也有關於木構造建物的比較 (塗三賢，2007)，基於台灣的木構造建物、鋼骨建物與鋼筋混泥土三者的比較，得出鋼筋混凝土的二氧化碳排放，比較木構造建築提高了 1.8 倍，但採取的方式計算中是採用國外 Athenatm model 分析所使用原材料及能源做計算，所以仍欠缺台灣本土的建築情境，以及經營林木所多得的碳匯考量。故本研究將針對台灣現有真實建物做模擬評估，並考量以本國林業做建材的碳匯總量。



二、 BICF 建築碳足跡法

(一) BICF 建築碳足跡法研究範疇

根據建築產業碳足跡(林憲德, 2018) 建立的建築產業碳足跡評估系統 (Building Industry Carbon Footprint Evaluation System, BICF), 建築產業碳足跡可以區分為建築碳足跡評估系統 (Building Carbon Footprint Evaluation System, BCF), 與室內裝修碳足跡評估系統 (Interior Renovation Carbon Footprint Evaluation System, ICF), 以及景觀碳足跡評估系統(Landscape Carbon Footprint Evaluation System, LCF)三類。當中 BCF 系統範疇完全一致於環保署 2015 年通過的, 建築 CFP-PCR 的生命週期評估範疇, 兩者之間的比較附表 2-1。

表 2- 1 建築碳足跡計算法比較 本研究重繪 引自建築產業碳足跡

	LCBA 的 BICF 法	環保署 CFP-PCR 法
計算邊界	兩者一致	
數據要求	使用既有資料庫	資材與施工碳排 10%要求一級數據盤查
資材計算法	以圖面面積計算	以原物料清單盤查計算
能源模擬	標準化情境公式	自提計算送審
認證時段	多階段認證	完工後認證
第三方查驗單位	台灣建築中心	環保署指定機構

由於生命週期評估的概念來自於產品導向的成品, 然而建築物為工程導向的成品, 在設計與施工過程皆屬於單一專案的形式, 難以像可口可樂這樣的商品, 單一設計後大量製作, 並有固定規格修正。如果採用一般產品導向的 CFP-PCR 計算成品的碳足跡, 須由成品完成後, 才能盤點所有流程中所有的履歷過程, 如果施行在建築工程上, 則喪失透過生命週期評估, 找出減碳熱點的主要意義。因為不會有相同的建築物有相同的設計, 並坐落在相同的方位, 產生相同的能源使用。因此由台灣開發的 BICF 法透過四階段的驗證, 規劃認證系統(BCF Certification for Completed Project, BCFc)、設計認證系統(BCF Certification for Design Project, BCFd)、完工認證系統(BCF Certification for Occupant Project,



BCFo)、用後認證系統(BCF Certification for Completed Project, BCFs)，分別對不同階段的建築設計及施工規劃，做情境的計算模擬，以相同於 CFP-PCR 符合國際規範的範疇計算，找出二氧化碳減量熱點，並透過自我比較原則降低建築生命週期的二氧化碳排放。本研究目的在找出整體木構造建築的碳替代整體效應，並有效提升二氧化碳的減量，所以透過 BICF 計算法，計算並找出台灣情境的木構造建築二氧化碳減量效益，更為合理。以下先對 BICF 建築碳足跡法計算之合理性做文獻探討。

(二) BICF 建築碳足跡法計算公式之合理性

BICF 建立台灣情境的碳排放資料庫，與 Simapro 等他國生命週期商業軟體做法相似，對產業所需資材做碳排放清點，並界定清點範疇後做計算使用。但較為特別的是 BICF 僅針對建築產業做計算，所以並非利用 Process-based LCA 的方式畫出生產流程圖，再將製成過程逐一清點計算。而是採取 Economic input - output analysis-based LCA (EIO-LCA)的相似方式，進行全建築生命週期階段的輸入與輸出評估，方式相同於前人研究(Angela Acree Guggemos et., 2005)在材料及建築使用階段的評估方式。故此方式並非台灣首開先例之算法，以下將詳列並探討。

$$\text{TCF} = \text{CFm} + \text{CFrm} + \text{CFc} + \text{CFdw} + \text{CFeu} - \text{Cfo} \quad (\text{式 2-1})$$

TCF: 生命週期總碳足跡 (kgCO₂e)

CFm: 新建工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

CFrm: 修繕更新工程資材生命週期碳足跡 (kgCO₂e)

CFc: 施工碳足跡 (kgCO₂e)

CFdw: 拆除及廢棄物處理碳足跡 (kgCO₂e)

CFeu: 建築使用耗能碳足跡 (kgCO₂e)

CFo: 自我檢證減碳 (kgCO₂e)



依照前人研究(Angela Acree Guggemos et., 2005)，該研究將原料階段(相似於 CFm)與使用階段(相似於 CF_{eu}) 採用 EIO-LCA，而在施工階段(相似於 CF_c) 採用 Construction Environmental Decision Support Tool (CEDST)是一個美國本土的施工計算工具，也屬於 IO 系統的一種。在維護階段(相似於 CF_{rm})雖然會畫流程圖，清點更換的材料設備與施工流程，但仍然是採用第一階段原料的資料，及套用施工流程的設備耗能做計算。所以最主要的差別是在於廢棄階段，台灣現有的 BICF 系統是採用統一的廢棄物處理情境，僅估量建築體會產生的廢棄物總量，做出廢棄物碳排放的估計，並沒有考量到可能有不同情境的推估。本研究因此將設計三類可能情境，並以 Process-based LCA 畫出流程圖，清點廢棄物處理流程的耗能與掩埋，對廢棄物的排放處理做出更詳盡的推估。

BICF 法在施工碳足跡階段(CF_c) 將維護更新階段(CF_{rm}) 的施工耗能也一併計入 (式 2-2)，並將維護更新階段的範疇僅計算材料，雖與 CFP-PCR 的分類不同，但整體考量範疇並沒有改變，不需要擔心重複計算或式疏漏。依修繕更新所需用地資材總量比上新建工程所需資材總量之比例，等比例加計修繕更新階段所需之施工所需耗能碳排放。

$$CF_c = (0.286 + 0.589 \times S + 1.327 \times S_b) \times AF \times (1.0 + CF_{rm}/CF_m) \times LCr \quad (\text{式 2-2})$$

S: 地上樓層數 (無單位)

S_b: 地下樓層數 (無單位)

AF: 建築總樓地板面積 (m²)

LCr: 生命週期減碳係數 (無單位)

在 CF_m 新建工程資材碳足跡 (式 2-3) 當中包含其中兩部分，CF_s 結構工程 (式 2-4) 與 CF_{ns} 非結構工程 (式 2-5) 的計算中，有牽涉木構造結構與 RC 結構的主要差異，以下特別列出進行探討。



$$CF_m = CF_s + CF_{ns} + CF_e + CF_{in} \quad (\text{式 2-3})$$

CF_s: 主結構工程資材 (kgCO₂e)

CF_{ns}: 非結構工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

CF_e: 設備工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

CF_{in}: 毛胚裝修資材碳足跡 (kgCO₂e)

$$CF_s = 1.9 \times [(C_s \times W + C_b) \times B_c + C_w] \times L_{Cr} \quad (\text{式 2-4})$$

C_s: 地上部分柱梁樓板等主結構資材碳足跡 (kgCO₂e)

C_b: 地下部分結構體資材碳足跡 (kgCO₂e)

C_w: 外牆構造資材碳足跡 (kgCO₂e)

W: 構造係數 (無單位) 表 2-2

B_c: 高爐混凝土減碳比例，無參用爐石粉時=1.0 (無單位)

$$CF_{ns} = CF_{ow} + CF_w + CF_{iw} + CF_r + CF_f \quad (\text{式 2-5})$$

CF_{ow}: 外牆外裝工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

CF_w: 外窗框架窗扇工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

CF_{iw}: 內隔間牆工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

CF_r: 屋頂外裝工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

CF_f: 地板內裝工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

根據 BICF 系統算法，CF_s 中的 W 如附表(表 2-2)，在木構造建物中採用 0.5 倍的係數，主要由建築資材資料庫統計木構造建築可以達成的水泥減少量，推估出的減碳係數。若建築為多種構造混合而建，則須以各構造之面積進行加權，以本研究的木構造案例以及大部分木構造建物，都會是地基地下一層或第一層採用 RC 構造防止潮濕，所以都需要按比例計算混合構造之 W 係數才屬合理。另外 CF_{ns} 的計算部分，木構造建築也已經併入 CF_s 中做計算，並不需要而外計算非結構資材的碳排放，這部分在本研究的 CLT 建築中也當然適用，因為交錯實木結

構積成材工法(CLT)的主結構直接就是內裝。



表 2- 2 各類建築物之構造係數 W 標準值 建築產業碳足跡改編自黃振祥, 2015

建築用途係數分類	一般建築	公共使用之建築	重要公眾建築物
磚石構造	1.50		
RC 構造	1.00	1.15	1.25
SRC 構造	1.35	1.45	1.55
S 構造	0.70	0.80	0.85
輕鋼構造	0.50		
木構造	0.5		



三、 林地生長模式

(一) 樹木生長曲線與樹齡及直徑關係

根據 Nature, 507 樹種生產率與直徑大小的全球調查(N.L. Stephenson et, 2014) , 該研究對 403 種熱帶和溫帶樹種進行全球分析, 發現單一樹種的生產率隨直徑上升而同時提高。其中, 樹種的葉面總面積與樹木直徑的平方相關, 而單葉的光合作用效率則有負相關。綜合兩者效應後, 仍可以得到單棵樹木的生產率, 隨樹木增大而生產率更高。然而因為森林層級的尺度上, 會有樹種的競爭與壓迫, 造成樹木的死亡, 使的森林層級的總體生產率降低。研究以全球資料的追蹤分析, 聯結對於森林生長模型的不同兩派學者的說法, 解釋不同學者對於樹木成長減緩與否的差異。該研究得出個體生長於競爭設定為零的情況下, 單木生產率隨樹木尺寸越大也越高, 但是林分生產率則會減緩。

該篇研究採用異速生長方程式 (Allometric equation) 對樹木進行直徑與生物量的轉換, 且以各地不同樹種的樹木也分別採取最適應的異速生長方程式。並以每五到十年的抽查以生物量的變化量, 作為生長速率(growth rate, G)。取生物量的對數值, 與生長速率做分段回歸, 大樹木與小樹的差異不會互相影響。而本研究在林地模擬部分也將採用異速生長方程式(另有譯稱為相對關係式)做生物量估計, 但因為模擬式希望通用於台灣林業的模擬, 所以將採用不同於該篇研究的異速生長方程式, 將於下個章節提供選擇的異速生長方程式的文獻探討。



(二) 異速生長方程式 (Allometric equation)

根據相對關係式推估林木及竹類地上部生物量的相關研究(孫正華, 2011), 由於過去多數研究的異速生長方程式, 通常僅能適用於單一物種的 DBH 換算生物量, 對於不同的種類、樹齡、林地條件都不一定能適用。大多為單一樣區的樹木做抽樣整顆採伐後, 利用回歸找出此林地的單一樹種 DBH 與地上部生物量的異速生長方程式, 再用以推估該地區整片面積的碳吸存總量。但這樣透過回歸找出的異速生長方程式, 無法一體適用於不同地點、品種、樹齡的推估, 也沒辦法快速推進大範圍林地的估量, 所以開始有了通用的異速生長方程式模型研究, 希望找出跨越樹種的理論模型。該篇研究引進五種異速生長方程式, 分別為一般相對關係式、WBE(I)相對關係式、WBE(II)相對關係式、Global 相對關係式、Ruark 相對關係式, 詳盡式子見下表(表 2-3)。並以台灣地區資料驗證五種通用關係式, 並修正模型找出最適用於台灣的通用關係式。

表 2- 3 五類相對關係式比較表格 本研究重製, 參考孫, 2011

異速生長方程式名稱	異速生長方程式型態	可調整參數
一般相對關係式	$Y = a \times (\text{DBH})^b$	a, b
WBE(I)相對關係式	$Y = 0.10 \times (\text{DBH})^{2.67}$	無
WBE(II)相對關係式	$Y = a \times (\text{DBH})^{2.67}$	a
Global 相對關係式	$Y = 0.1424 \times (\text{DBH})^{2.3679}$	無
Ruark 相對關係式	$Y = a \times (\text{DBH})^b \times \exp(c \times \text{DBH})$	a, b, c
其中 Y 為地上部生物量(kg), DBH 為樹的胸高直徑(cm)		

其中一般相對關係式有兩項參數, 完全需透過生物量與胸高直徑的關係推導出。而 WBE(I)相對關係式透過生物體的代謝速率(metabolic rate)作為推估原理, 考量維管束的碎形分布分配生物所需物質, 由 West et.在 1999 推導出參數 b 應該恆為 8/3 (大約 2.67), a 值則由 Chambers et.在 2001 年推導出約 0.10 左右。WBE(II)相對關係式維持 b 值 2.67, 但 a 值須隨生長情形不同而有調整。Global 相對關係式為 Zianis et.於 2008 年以全球 279 組的數據資料, 找出的異速生長方

程式，可應用於準確度不需要太高的全球估量上。而 Ruark 相對關係式則是 Ruark et.於 1987 年提出的三個參數異速生長方程式。該研究透過台灣的三種針葉樹及兩類竹類，共計 101 株的資料，利用 SPSS 軟體進行非線性模組的求解，分別求出各組的參數。

該研究利用上述五條異速生長方程式，對台灣現有資料做殘差均方根 RMSE(式 2-6)找出 RMSE 值較小者，得出 WBE(II)為最適用於台灣的通用模擬。並同時有做出 WBE(II)對於大型樹木與小型樹木的估計差異，對大型樹木有稍微低估；也以疏伐與否的林分密度作為變因，發現 RMSE 並沒有達顯著水準，表示不會因為林分密度有異造成預估失準。以該研究結論為由，本研究將會以 WBE(II)帶入林地計算的模擬，去估計台灣林地的地上部碳匯總量。同時該篇研究有提及根據 WBE 的模型原理中，葉子的數量正比於生物量的四分之三次方，本研究也將利用這個關係，在樹木長大到會互相壓迫時，作為生產速率(growth rate)因樹徑不同的分配。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (y_i - \hat{y})^2}{n-p}}$$

(式 2-6， y_i 為實測值， \hat{y} 為理論值， n 為實測數目， P 為參數觀測數目)



(三) 台灣林地碳匯調查實證案例

跟據台灣二葉松地上部生物量及碳吸存量之估算(林世宗、鍾智昕、邱祈榮、林朝欽, 2008), 該研究整理出做林地碳匯調查的方法學, 並以台灣二葉松的估計做為實際案例。本研究採用該研究的試驗材料及結論, 作為本研究模式模擬植物生長的初始值。同時也需將模式模擬的生長結果, 轉換為不同部位做計算。以下列出該篇研究整理的相關公式, 並探討該篇研究對本篇研究之貢獻。

$$C_{\text{plant}}(\text{每公頃地上部碳吸存}) = V_{\text{stem/ha}} \times (W_{\text{above}}/V_{\text{stem}}) \times C_{\text{con}} \times (\text{CO}_2/C) \quad (\text{式 2-7})$$

$$W_{\text{above}}/V_{\text{stem}} = (W_{\text{stem}}/V_{\text{stem}}) \times EF_{\text{above}} \quad (\text{式 2-8})$$

$V_{\text{stem/ha}}$: 林分材積生長量

$W_{\text{above}}/V_{\text{stem}}$: 地上部生物量與樹幹(連皮)材積之轉換值

$W_{\text{stem}}/V_{\text{stem}}$: 立木密度

EF_{above} : 擴張係數(地上部生物量與樹幹生物量之轉換值)

C_{con} : 林木平均的碳濃度

式 2-7 為每公頃地上部碳吸存, 本研究模式模擬初步結果為單位面積上的立木直徑與株樹, 需要透過異速生長方程式得到地上部生物量(同於 $V_{\text{stem/ha}}$: 林分材積生長量)。透過該篇研究的林木平均的碳濃度、立木密度、擴張係數(地上部生物量與樹幹生物量之轉換值), 可以推得單位面積的林分地上部碳吸存總量, 作為林業經營管理的二氧化碳減量效益評估。

該篇研究同時有做出該樣區的胸高直徑及樹高, 與樹幹材積之經驗回歸式 ($V=0.3647D^2H$, $R^2=0.98$), 以及總乾重的回歸式 ($W=191.99D^{1.968}H^{0.984}$)。但因為該篇研究的樣區僅有少數比例林木 DBH 超過 30 公分, 與本研究模擬情境不同。該篇研究也有估算經驗回歸式套用不同樹齡可能會有低估的情況, 故本研究不會引用該篇的經驗回歸式, 仍以 WEB(II)通用相對關係式為本研究計算 $V_{\text{stem/ha}}$ 。該研究也以每 5 年量測一次, 得出 $V_{\text{growth}}=0.0043(D^2H)^{1.2367}$ 的單木材積生長式 (m^3/year), 將引用於本研究的模擬中。



第叁章 方法與材料

一、 研究方法

(一) 研究框架

本研究部分採取 R 做程式撰寫、部分採取 Excel 做計算，依照圖 3-1 可以見到整體概念內部具有三個項變項，分別為木構造房屋(N1)、製材廠產生木材(N2)、以及林地上樹木的碳匯(N3)三項。由於木構造房屋在台灣占比仍不達所有各類建築使用執照的 1%，如果以木構造取代鋼筋混凝土建築，應有可取代的比例最大值，便是 N1 的極限。而森林土地利用面積有最大值，所以 N3 的森林可固定碳匯，也會因土地的面積有極限。

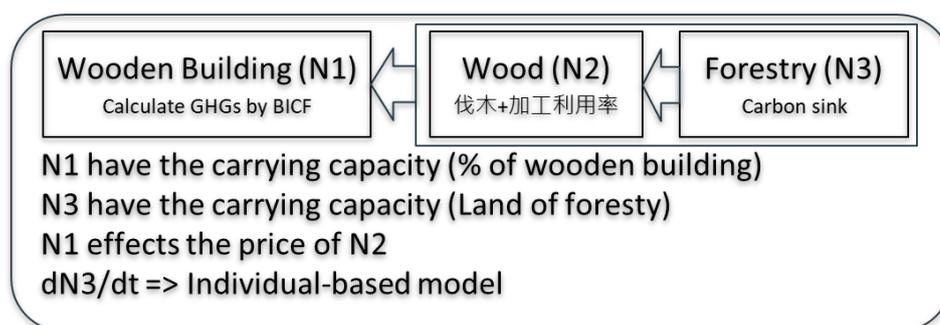


圖 3- 1 整體研究框架圖 本研究繪製

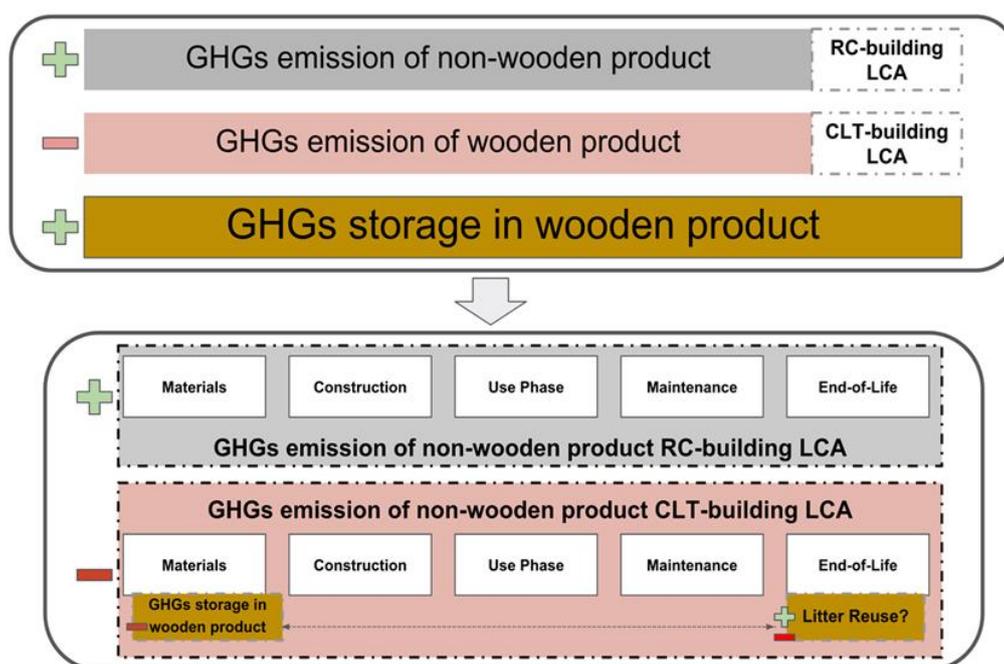


圖 3- 2 產品生命週期評估與木材碳儲藏合併示意圖 本研究繪製



本研究分別以 BICF 法(林憲德，2018) ，計算 N1 中的木構造建築與鋼筋混凝土建築的二氧化碳排放量差異。並再將木材的碳儲藏效益納入傳統 LCA 的原料開採與廢棄物處理中計算，如圖 3-2 所見，並於廢棄物處理階段設定兩類情境，估量廢棄後的木材碳儲存會有什麼變化。分別為: I. 棄置原地銷毀(完全未再利用)；II. 部分回收再利用(碳儲藏並不計入下個產品的生命週期評估)。以完整的生命週期搖籃至搖籃範疇，避免高估木構造的二氧化碳減量效益。

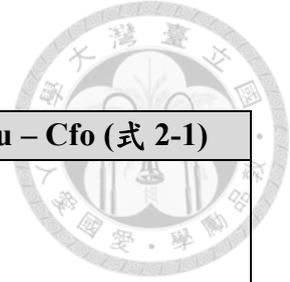


(二) 建築碳足跡 BICF 計算法

本研究採用的 BICF 法(林憲德, 2018) 為完整的 IO 評估法, 提供建築生命週期評估階段的結構圖相關參數做輸入, 並完整計算由搖籃到墳墓 LCA 過程碳足跡(本研究延伸為搖籃到搖籃)。以下列 BICF 計算所用主要公式, 提供參考。

表 3- 1 BICF 公式本研究整理, 並引用自 建築產業碳足跡 林憲德, 2018

假設尺寸法
A_{ij} (內牆面積) 查表 A_e (總立面面積) $= (B_h + 1.2) \times S_L$ A_w (總外窗面積) $= B_h \times (S_L - W_L) \times O_r$ $A_{cb}(RC)$ 鄰接外氣的柱梁面積 $= 0.25 \times B_h \times S_L$ $A_{cb}(S)$ 鄰接外氣的柱梁面積 $= 0.15 \times B_h \times S_L$ $A_{cb}(S)$ 與帷幕外牆構造 $= 0$ A_{ow} (不含樑柱之外牆總面積) $= A_e - A_w - A_{cb}$ B_h (建築樓高) S_L (外周長度) W_L (不可開窗之共同壁長度, 實際值帶入) O_r (開窗率) 查表 S (地上樓層數) a_g (外窗玻璃總面積) $= A_w$ (總外窗面積) a_c (外窗不透光幕牆總面積) $= 0$ A_r (屋頂面積) $= f_a$ (單層平均樓地板面積) A_{FI} (室內樓板面積) $= I_{fr}$ (室內樓地板面積比查表) $\times AF$ (總樓地板面積) A_{Fa} (空調樓地板面積) $= 0.7 \times (A_{FI} - A_{Fp})$ A_{Fp} (地下停車場層面積)
標準情境比較:
n_{pi} (住宅單元空間) $= 4 \times n_{fi}$ (住宅空間住戶數) $\times p_{ri}$ (空間人員使用率) n_{pi} (住宅單元空間) $=$ p_{di} (公共建築空間人員密度標準) $\times A_{Fli}$ (空間室內面積) $\times p_{ri}$ (空間人員使用率) $Q_w = n_{pi} \times Q_{wi}$ (空間用水量)
生命週期管理的減碳角度提出 生命週期減碳係數(LCr)
$0.6 \leq LCr$ (生命週期減碳係數) ≤ 1.4 $LCr = 1.0 - \sum A_i$ (不良環境修正係數) $- \sum B_j$ (建築結構耐久化修正係數)



BCF 系統總碳足跡 $TCF = CF_m + CF_{rm} + CF_c + CF_{dw} + CF_{eu} - C_{fo}$ (式 2-1)

I. CF_m (新建工程資材碳足跡) = $CF_s + CF_{ns} + CF_e + CF_{in}$

CF_s (主結構工程資材) = $1.9 \times [(C_s \times W + C_b) \times B_c + C_w] \times LCr$

C_s : 地上部分柱梁樓板等主結構資材碳足跡 (kgCO₂e)

C_b : 地下部分結構體資材碳足跡 (kgCO₂e)

C_w : 外牆構造資材碳足跡 (kgCO₂e)

W : 構造係數 (無單位) 查表 2-2

B_c : 高爐混凝土減碳比例, 無參用爐石粉時=1.0 (無單位)

$C_s = [245 + 4.11 \times (S - 10) + 679.64 \times (Z - 0.137)] \times AF_u$

$C_b = 330 \times AF_b + 45.5 \times AF$

$C_w = \sum C_{owj} \times A_{owj}$

Z (設計地震力係數) 查表

AF_u (地上層總樓地板面積)

AF_b (地下層總樓地板面積)

C_{owj} (一般外牆構造碳排) 查表

CF_{ns} (非結構工程資材碳足跡) = $CF_{ow} + CF_w + CF_{iw} + CF_r + CF_f$

CF_{ow} : 外牆外裝工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

CF_w : 外窗框架窗扇工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

CF_{iw} : 內隔間牆工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

CF_r : 屋頂外裝工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

CF_f : 地板內裝工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

$CF_{ow} = \sum F_{owj} \times (A_{owj} + A_{cbj}) + \sum F_{wcj} \times a_{cj}$

$CF_w = \sum (F_{wgj} + F_{wfj}) \times A_{wj}$

F_{owj} (外牆外裝碳排) 查表

F_{wcj} (帷幕外牆中不透光帷幕牆碳排) 查表

F_{wgj} (外窗之玻璃碳排) 查表

F_{wfj} (外窗窗框部位碳排) 查表

$CF_r = \sum Fr_j \times Ar_j$

$CF_{iw} = \sum F_{iwj} \times A_{ij}$

$CF_f = \sum F_{fj} \times A_{fj}$

Fr_j (屋頂外裝工程單位碳排) 查表

F_{iwj} (內隔間牆單位碳排) 查表

F_{fj} (地板內裝工程單位碳排) 查表

CF_{in} (毛胚裝修資材碳足跡) = $1.0 \times AF_{li}$

AF_{li} : i 類空間室內總樓地板面積 (m²)

CF_e (設備工程資材碳足跡) = $CF_{fac} + CF_{e1} + CF_{e2} + CF_{e3} + CF_t$

CF_{fac} : 空調設備工程資材碳足跡 (kgCO₂e)



CFe1: 電氣設備工程資材碳足跡 (kgCO₂e)
 CFe2: 給排水衛生設備工程資材碳足跡 (kgCO₂e)
 CFe3: 消防設備工程資料碳足跡 (kgCO₂e)
 CFt: 輸送設備工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

$$CFac = \sum fac(AFI_i)$$

$$CFt = \sum F_{evix}N_{evi} + \sum F_{ecix}N_{eci}$$

fac(AFI_i) (功能空間空調工程資材碳足跡) 查表

F_{evi}(電梯資材碳排放基準值) 查表

N_{evi}(電梯數量)

F_{eci}(電扶梯資材碳排放基準值) 查表

N_{eci}(電扶梯數量)

II. CF_{rm}(修繕更新工程資材生命週期碳足跡)=CF_{ns}*+CF_e*

CF_{ns}*: 修繕更新階段非結構工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

CF_e*: 修繕更新階段設備工程資材碳足跡 (kgCO₂e)

$$CF_{ns} * = CF_{ow} \times RT_{owj} + CF_{w} \times RT_{wj} + CF_{iw} \times RT_{iwj} + CF_{r} \times RT_{wrj} + CF_{f} \times RT_{fj}$$

RT_{owj}: 外牆外裝工程更換次數 (無單位) 查表

RT_{wj}: 外窗框架窗扇工程更換次數 (無單位) 查表

RT_{iwj}: 內隔間牆工程更換次數 (無單位) 查表

RT_{rj}: 屋頂外裝工程更換次數 (無單位) 查表

RT_{fj}: 地板內裝工程更換次數 (無單位) 查表

$$CF_e * = CF_{ac} \times RT_{ac} + CF_{e1} \times RT_{e1} + CF_{e2} \times RT_{e2} + CF_{e3} \times RT_{e3} + CF_{t} \times RT_t$$

RT_{ac}: 空調設備工程更換次數 (無單位) 查表

RT_{e1}: 電氣設備工程更換次數 (無單位) 查表

RT_{e2}: 給排水衛生設備工程更換次數 (無單位) 查表

RT_{e3}: 消防設備工程更換次數 (無單位) 查表

RT_t: 輸送設備工程更換次數 (無單位) 查表

III. CF_c(施工碳足跡)=(0.286+0.589×S+1.327×S_b)×AF×(1.0+CF_{rm}/CF_m)×LC_r

S(地上樓層數)

S_b(地下樓層數)

AF(建築總樓地板面積)

LC_r(生命週期減碳係數)=1.0-A_i(不良環境修正係數)-B_j(建築結構耐久化修正係數)

IV. CF_dw(拆除及廢棄物處理碳足跡)=(CF_d+CF_{wa})×(1.0+CF_{rm}/CF_m)×LC_r

$$CF_d: \text{拆除工程碳足跡 (kgCO}_2\text{e)} = (0.06 \times S + 0.135 \times S_b + 2.01) \times AF$$

$$CF_{wa}: \text{廢棄物處理工程碳足跡 (kgCO}_2\text{e)} = 0.055 \times W_d \times AF$$

W_d: 新建與拆除廢棄物量密度 (kg/m²) 查表

V. CF_{eu}(建築使用耗能碳足跡)=CF_a+CF_l+CF_e+CF_v+CF_{wt}+CF_{tr}+CF_g

$$CF_a: \text{建築使用空調耗能碳足跡 (kgCO}_2\text{e)} = \sum EU_{Ia} \times AFI_{ix} \times ER_{aix} \times B \times LC$$

$$CF_l: \text{建築使用照明耗能碳足跡 (kgCO}_2\text{e)} = \sum EU_{Il} \times AFI_{ix} \times ER_{lix} \times B \times LC$$



CFe: 建築使用插座電器耗能碳足跡 (kgCO₂e)= Σ EU_{Iei}×AF_{Ii}×E_{Rei}×B×LC

ER_{ai}: i 類功能空間之空調設備總承諾節能潛能 (無單位) 查表

ER_{li}: i 類功能空間之照明設備總承諾節能潛能 (無單位) 查表

E_{Rei}: i 類功能空間之插座電器設備總承諾節能潛能 (無單位) 查表

EU_{Iai}: i 類功能空間之空調耗能密度 (kWh/m²yr) 查表

EU_{lli}: i 類功能空間之照明耗能密度 (kWh/m²yr) 查表

EU_{Iei}: i 類功能空間之插座電器耗能密度 (kWh/m²yr) 查表

AF_{Ii}: i 類空間室內總樓地板面積 (m²)

β: 電力碳排放係數依能源局公告 (kgCO₂e/kWh)

LC: 建築生命週期標準, S/SRC/S 構造 60 年, 輕鋼構 40 年, 木構造 30 年

CF_v(建築使用換氣耗能碳足跡)=

(CF_{rpv}*Ar_p+CF_{ppv}*Ar_p+CF_{rtv}*Ar_t+CF_{ptv}*Ar_t)*LC

CF_{rpv}: 住宿類建築室內停車場換氣設備碳排放密度標準 (kgCO₂e) 查表

CF_{ppv}: 公共類建築室內停車場換氣設備碳排放密度標準 (kgCO₂e) 查表

CF_{rtv}: 住宿類建築及旅館客房浴廁換氣設備碳排放密度標準(kgCO₂e) 查表

CF_{ptv}: 公共類建築浴廁換氣設備碳排放密度標準 (kgCO₂e) 查表

Ar_p: 住宿類建築室內停車場面積 (m²)

Ar_p: 公共類建築室內停車場面積 (m²)

Ar_t: 住宿類建築及旅館客房之浴廁面積 (m²)

Ar_t: 公共類建築浴廁面積 (m²)

CF_w(建築使用給污水耗能碳足跡)=W_t*LC*B

W_t(給污水耗電量)=(Q_w*E_w+ (Q_w-365*qr_w)*E_w)*R_w

Q_w(總用水量, 由使用人數換算)

E_w(揚水耗能密度)=0.02*(S+2)

qr_w(平均每日雨中水利用量)=w₁*rt*sum(n_{pi})+w₂*A_{ig}, 且 qr_w<0.001*R*Ar*P

w₁(雨中水沖廁之用水量, 有雨水沖廁系統時為 0.06, 無時為 0)

rt(採雨中水利用之庭園澆灌面積, 雨水沖廁/總廁)

w₂(單位澆灌庭園面積之雨水用水量, 有雨水庭園澆灌系統設計實為 0.003, 無時為 0)

A_{ig}(採用雨中水利用之庭園澆灌面積)

R(日平均雨量) 查表

P(日降雨概率) 查表

Ar(集雨面積)一般設計以屋頂面積計算, 也可以納入基地地面及與面積

E_w(淨水污水處理耗能密度)標準值 0.81

R_w(省水效率)=1.0-0.3*r₁-0.05*r₂ 基準案時 R_w=1.0

r₁(省水馬桶比例)基準案時 r₁=0.0

r₂(省水水栓比例)基準案時 r₂=0.0

CF_{tr}(建築使用輸送耗能碳足跡)=(sum(nei*E_{eli})+sum(ns_j*E_{esj}))*LC*B

nei(i 類電梯台數)

nsj(j 類電扶梯台數)

Eeli(i 類電梯全年標準耗電量) 查表

Eesj(j 類電扶梯全年標準耗電量) 查表

CFg(建築使用加熱耗能碳足跡)=(sum(G1j)+sum(G2j))*LC

G1j(加熱設備碳排量) 查表

G2j(廚房設備碳排量) 查表





(三) Individual-based model

Individual-based model 是生態學上，常用來估計族群中有個體差異的情況，生物體隨時序變化下，個體樹木的變化，以及本身性狀的表現。模式通常會設定超級個體 super individual (SI)作為分類，每種 SI 類別中會設定初始的生物數量，並分別在模式中寫出各 SI 的性狀。利用程式碼寫出性狀與環境的關係，會造成個體成長的表現以及數量變化。

以本研究的研究方法為例，模式依照 Nature 507 的結論設計(N. L. Stephenson et al., 2014)，假設單株樹木個體隨直徑越大，生產速率越大，但林分尺度的生長會受到競爭與壓迫，產生生長減緩與死亡。模式中的單木材積生長速率(m^3/yr) 引用台灣二葉松的觀測如式 3-1 (林世宗等人，2008)。並採用該篇論文對於胸高直徑(DBH)與樹高(H)的關係式(式 3-2)帶入，取得 V_{growth} 與 DBH 兩者之間的關係，為生產速率正比於直徑的 2.90 次方，如式 3-3 所見。並在生物量的分配回推，利用式 3-2 以及樹幹解析材積回歸式(式 3-4)，得到胸高直徑的年變化量。而最終的地上部估量，為讓模式可推廣至不同林地適用，採用經過台灣林地資料驗證(孫正華，2011) 的通用關係式中，WEB 相對關係式(II) 做最終的直徑與生物量之換算，如式 3-4。

$$\text{生長速率 } V_{growth} = 0.0043 \times ((DBH)^2 H^1)^{1.2367} \quad (\text{式 3-1})$$

$$\text{樹高 } H = 480.6 \times (DBH)^{0.3473} \quad (\text{式 3-2})$$

$$\text{生長速率 } V_{growth} = 8.91 \times (DBH)^{2.90} \quad (\text{式 3-3})$$

$$\text{材積 } V_{stem} = 0.3647 \times (DBH)^2 H^1 = 175.27 \times (DBH)^{2.3473} \quad (\text{式 3-4})$$

$$\text{胸高直徑年變化量 } \Delta DBH = (V_{growth} / 175.3)^{0.426} \quad (\text{式 3-5})$$

$$\text{地上部生物量 } W_{above} = 0.0290 \times (DBH)^{2.6700} \quad (\text{式 3-6})$$

透過 10 種 SI 分別為 0.08(m)-0.12 (cm) 直徑的林木隨機分布，每種 SI 分別有 300 棵。模擬的一百年中，每年的樹木生產力會分配 0.426 次方回饋到直徑，並影響下個年度的生產力。透過三類數值(直徑 DBH、年生產率 V_{growth} 、樹種數目)的監測一百年，再做出生長的曲線圖，驗證成長模式與一般觀測的情況相符合後，可以在此情境下取得總體的木材量，並換算為二氧化碳當量。

另外在模式模擬的一百年內，樹木尚未達到個體衰老的生長遲緩變化，但仍會受到森林密度的影響，在森林層級會受到壓迫，無法成長或死亡。此處引用同篇論文中(邱祈榮 et.,2008)的，二葉松樣區株樹密度與林木大小之關係回歸式(圖 3-3)，以樣區內樹木的平均胸徑為條件，設定株樹須符合對應的平均胸徑大小，同時也以平均胸徑大小作為生產力減量的依據。

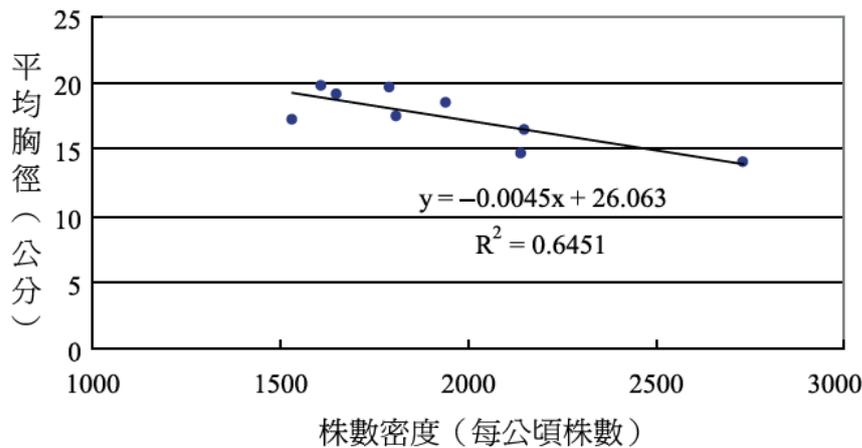


圖 3- 3 台灣二葉松林樣區株數密度與林木大小之關係，引用自林世宗等人，2008



(四) 統計軟體 R

R 是以 S 語言的架構，發展出來的統計軟體，由 Ross Ihaka 及 Robert Gentleman 兩人於 1993 年設計，以統計分析及繪圖為主要目的，且善於做矩陣操作與運算。至今已發展 25 年以上，為市面上最通用的免費統計軟體，同時因為使用者多，所以有許多的 R Packages，以下將簡列本研究會用到的 R Packages 與相關語法及程式碼，提供檢視與討論。

```
##### Tree_model
##### Initiation: create an initial population
diameter <- sort(runif(10, min = 0.08, max = 0.12))
leaves_productivity <- (diameter^2.90)*8.91
id <- seq(from=1, to=10, by=1)
number <- rep(300, times=10)
POP <- cbind(id,diameter,leaves_productivity,number)
POP
##### define function of tree number(x) & diameter(y) by  $y=-0.0045x+26.063$ 
number_to_diameter <- function(x){
  y <- (-0.0045*x+26.063)/100
  return(y)
}
diameter_to_number <- function(x){
  y <- (x*100-26.063)/-0.0045
}
```

以上程式碼設定本研究樣區 3000 棵/公頃，並定義函數: 樹徑與密度的回歸關係式。

```
##### first year
monitor.d <- matrix(,10,20)
monitor.l <- matrix(,10,20)
monitor.n <- matrix(,10,20)
monitor.d[,1] <- POP[,2]
monitor.l[,1] <- POP[,3]
monitor.n[,1] <- POP[,4]
```

設定空白矩陣[10×20]紀錄第一年情況，共分為三類: 樹徑、生產率、棵。



```
##### 2~100 years (five years/each loop)
for (t in 2:20){
  P <- 0.12 ##### carrying capacity of this Land
  a <- runif(1, min = 0.8, max = 1) ##### random of the weather effect
  b <- a*P

  for(i in 1:10){ #20 SI
    if(sum(POP[,4]*POP[,2])/sum(POP[,4])>number_to_diameter(sum(POP[,4]))){ ##### oppress
      POP[i,2] <- POP[i,2]+(POP[i,2]^2.0025/sum(POP[,2]^2.0025))*(POP[i,3]/175.3)^0.426
      ##### distribute by D^2.0025
    } else{
      POP[i,2] <- POP[i,2]+(POP[i,3]/175.3)^0.426
    }

    if(sum(POP[,4]*POP[,2])/sum(POP[,4])>number_to_diameter(sum(POP[,4])){ ##### oppress
      N <-
      diameter_to_number(sum(POP[,4]*POP[,2])/sum(POP[,4]))*number_to_diameter(POP[i,2])/sum(n
umber_to_diameter(POP[,2]))
      POP[i,4] <- floor(N) ##### dead
    }
    if(POP[i,4]<0){
      POP[i,4] <- 0
    }
    POP[i,3] <- (POP[i,2]^2.90)*8.91
  }
  monitor.d[,t] <- POP[,2]
  monitor.l[,t] <- POP[,3]
  monitor.n[,t] <- POP[,4]
}
POP
```

因為給定的生長速率為 $V_{\text{growth}} / dt_{5\text{year}}$ ，所以一百年的模擬以五年為單位做二十次的循環。（*P/a/b 在本次的模擬中沒有用到）

I. 首先，當環境因素(# oppress 平均胸徑>棵數回歸)發生，樹木生長力減少，原本生產力按照樹葉量分配(model_3)。也有嘗試採取平均分配 0.1 倍生產力

(model_3.1) POP[i,2] <- POP[i,2]+0.1*(POP[i,3]/175.3)^0.426 ##### average distribute

II.其次，一樣當平均胸徑大於棵數回歸時，樹木總數會減少，以符合棵數密度與平均胸徑的關係(邱祈榮 et.,2018): $Y_{\text{diameter}} = -0.0045 X_{\text{number}} + 26.063$

此處的減少方式，各個 Super Individual 的胸徑都做棵數回歸，再按照各個的棵數比例分配總棵數回歸值(model_3)。另外也有設計按照大小等比例縮放的簡化方式(model_2) `POP[i,4] <- POP[i,4]-(14-i)##### dead`

III.最後，按照新的尺寸大小，重新設定 SI 樹木的生產力。

```
Mass_above <- matrix(,11,20)
for (j in 1:20){
  for (i in 1:10){
    Mass_above[i,j] <- monitor.n[i,j]*0.029*monitor.d[i,j]^2.67
  }
  Mass_above[11,j] <- sum( Mass_above[1:10,j] )
}

timber <- matrix(,11,20)
for (j in 1:20){
  for (i in 1:10){
    timber[i,j] <- monitor.n[i,j]*175.27*monitor.d[i,j]^2.3473
  }
  timber[11,j] <- sum( timber[1:10,j] )
}

plot(monitor.d[4,],xlab="time",ylab="diameter_4",type = "b")
plot(monitor.n[1,],xlab="time",ylab="number_1",type = "b")
plot(Mass_above[11,],xlab="time",ylab="Mass_above",type = "b")
plot(timber[11,],xlab="time",ylab="sum timber",type = "b")
```

分別做出地上部總生物量(孫正華, 2011)，以及樹幹材積總量(邱祈榮 et., 2008)的一百年的變化資料矩陣。材積總量以同於試驗樣區的回歸式，地上部總量採用 WEB 通用相對關係式。

畫出部分的直徑、棵數、總材積、總地上部生物量，確認資料正確完成模擬。



二、 試驗材料

(一) 木構造房屋_台中 CLT 四層木構造建物

Cross-Laminated-Timber 交錯實木結構積成材工法(CLT)，為近二十年來發展最快速的木構造建築，透過交錯的實木進行膠合，產生大面積且支撐力高的建築材料，可以透過鋼構的螺帽接法(圖 3-4)，以外牆結構支撐樓板結構，建造高層的木構造建物。於加拿大溫哥華的 UBC 有全世界最高的 18 層木構造建築，就是利用 CLT 工法建造的。但台灣法規現行規範的木構造建築最高就是地面上四樓，所以在台灣，暫時不可能看到大量的 CLT 建築，取代傳統的鋼骨構造或是鋼筋混凝土構造的高樓。



圖 3- 4 木構造 CLT 建築樓板與牆板結合處 本研究拍攝

本研究選取台灣第一座 CLT 建築，台中大肚山腳的台灣森科(圖 3-5)，為地下一層(RC)地上四層(CLT)的建築，作為個案研究的分析案例。以下簡列研究計算所需的建築相關設計做的初步條件計算，並於下個章節呈現此建築的詳盡計算結果。但研究初期並未取得設計圖，所以採用假設尺寸法模擬相關須輸入的參數，並以 BCFc 進行計算。後期取得設計圖，依實際圖面重新計算立面與樓地板等相關參數，再以 BCFd 進行計算，以下表 3-2 分別呈現本研究採取之建築參數值。

表 3- 2 建築設計值

	CLT 木構造		RC 鋼筋混凝土	
	BCFc	BCFd	BCFc	BCFd
npi 住宅單元空間 (人)	62.480	45.912	62.480	45.912
Qw 空間用水量 (m ³ /yr)	1586.982	1166.155	1586.982	1166.155
LCr (無單位)	1.000			
Ai 不良環境修正係數(無單位)	0.000 * ¹			
Ae 總立面面積 (m ²)	1272.000	857.370	1272.000	857.370
Aw 總外窗面積 (m ²)	360.000	175.118	360.000	175.118
Acb RC 鄰接外氣柱梁面積 (m ²)	0.000	0.000	300.000	235.566
Aow 不含樑柱之外牆總面積 (m ²)	912.00	682.252	612.000	446.686
Aij 內牆面積 (m ²)	240.000	235.550	240.000	227.808
ag 外窗玻璃總面積 (m ²)	360.000	175.118	360.000	175.118
ac 外窗不透光幕牆總面積 (m ²)	0.000			
Ar 屋頂面積 (m ²)	148.761	136.714	148.761	136.714
AF 總樓地板面積 (m ²)	743.805	549.256	743.805	549.256
木構造部分樓地板面積 (m ²)	595.044	465.676	0.000	0.000
AFI 室內樓板面積 (m ²)	669.425	437.253	669.425	437.253
AFa 空調樓地板面積 (m ²)	434.233	247.571	434.233	247.571
W 構造係數	0.600	0.576	1.000	1.000
總使用材積 (m ³)	85.091 * ²	262.032	0	0
總材積碳儲藏效益 (kgCO ₂ e)	114754 * ²	212281	0	0
* ¹ 本案地點距工業區 2.5Km、距高鐵 1Km、距海超過 2Km (皆無需修正)				
* ² 引用框組壁式木構造建築推算 (塗三賢, 2007)				

同時也將以上述初步計算資料，進行自我比較原則，設計相同功能之 RC 建築物。因 RC 建築與木構造建築在相同功能條件上，遇到的最大阻礙為隔熱的不同，本研究將模擬之 RC 建物搭配五腳隔熱磚 & 隔熱水泥磚防水處理屋面(60.000 kgCO₂e)，以確保在熱舒適上可以維持，相近木構造建築之室內溫度，以期在未來使用時間內有相同的能耗表現。然因建築外殼之隔熱計算，熱傳透率(U 值)和熱阻值(R 值)皆超出本研究範疇，將僅於第五章節定性討論外殼隔熱的差別影響，考慮 RC 構造應須貼隔熱材的實際外牆面積約 682.252m²，實際結果鋼筋混凝土在資材的碳排，應略大於本研究計算。



圖 3- 5 台灣森科外觀照 本研究拍攝



(二) 模擬林地之初始資料

本研究模擬之初始設定，引用梨山地區 34 年生造林地的二葉松調查(邱祈榮 et., 2008)，模式設定符合該研究的觀測設定，以下以表格列出本研究模式樣區之初始值。

表 3- 3 樣區資訊

地區	大甲溪事業區 44、45 林班 34 年生
樹種	台灣二葉松
海拔	2050m
坡向	南向坡
樣區數目/大小	9 個 40m×250m 樣區
初始種植株數	3000 株/公頃
34 年後各樣區株樹範圍	Min:1530 株/公頃 Max:2730 株/公頃
34 年後各樣區平均胸徑範圍	Min: 14.0 公分 Max: 19.8 公分
樹幹材積與胸徑樹高回歸式	$V = 0.3647 \times (D^2H)$
胸徑樹高回歸式	$H = 480.6 \times D^{0.3473}$
樣區平均胸徑(Y)與株樹密度(X)回歸式	$Y = -0.0045X + 26.063 \quad (R^2=0.6451)$
單木材積生長式	$V_{\text{growth}} = 0.0043 \times (D^2H)^{1.2367} \quad (R^2=0.87)$

表 3- 4 模式初始值

初始直徑設定(Diameter)	0.08-0.12(m) Random distribution
每五年成長率(V_{growth})	$V_{\text{growth}} = 8.91 \times (DBH)^{2.90}$
受壓迫條件	$Y_{\text{diameter}} = -0.0045 X_{\text{number}} + 26.063$
Super individual	共 10 類，起始值每類 300 棵
林地起始密度	3000 株/公頃
WEB 通用相對關係式*	$W_{\text{above}} = 0.0290 \times (DBH)^{2.6700}$

第肆章 結果與討論



一、 BICF 估計法的建築生命週期評估

(一) 生命週期評估法五階段結果

本研究於初期並未取得建築設計原圖，所以採用假設尺寸法估計建築參數，並以規劃認證系統(BCFc)計算初步生命週期碳足跡。後期取得設計原圖，改以設計認證系統(BCFd)做計算，並納入木材的碳儲藏效益。但並未取得實際使用的電費單據，所以未能以完工認證系統、用後認證系統進行計算。以下提供 BCFc 與 BCFd 的計算結果。

根據 BCFc 方法計算結果(表 4-1)，本研究案例假設尺寸的木構造建物二氧化碳排放量為 1,411,647 kgCO₂e (台灣 CFP-PCR 規定木構造 30 年生命週期)，而模擬的基準案 RC 建築生命週期評估(60 年)二氧化碳排放量為 2,856,168 kgCO₂e。

表 4- 1 計算鋼筋混凝土使用 60 年、30 年，及木構造使用 30 年的排放比較。假設尺寸 BCFc

	鋼筋混凝土(I)	木構造(II)	I-II 差值	I/II 倍數
使用 RC 建築六十年與使用 CLT 建築三十年的比較				
TCF	2856168	1411647	1444521	2.023
CFm	414647	240590	174057	1.723
CFrm	156069	26598	129471	5.868
CFc	4063	3279	785	1.239
CFdw	18996	9984	9012	1.903
CFeu	2262392	1131196	1131196	2.000
TCF-CFeu	593776	280451	313325	2.117
RC 建築與 CLT 建築皆使用三十年的比較				
TCF	1643784	1411647	232137	1.164
CFm	414647	240590	174057	1.723
CFrm	78035	26598	51436	2.934
CFc	3508	3279	229	1.070
CFdw	16399	9984	6414	1.642
CFeu	1131196	1131196	0	1.000
TCF-CFeu	512588	280451	232137	1.828
單位	kgCO₂e			無單位

因為台灣建築 CFP-PCR 訂出木構造 30 年生命週期，而鋼筋混凝土為 60 年，以此框架比較，碳排放兩者仍有 2.023 倍的差異，相當於如果在第 31 年時再蓋第二棟的木構造建築原地重建，仍然可以較 RC 建築使用六十年少 **32,873** kgCO₂e 的二氧化碳排放。若引用 建築產業碳足跡(林憲德，2018) 所提情況“台灣平均拆除年限 23.21 年，但因為抽樣方法有計入未達屋齡及改建的樣本，所以實際上的建築平均壽命應該還是要略大”，作者引用日本資料比較，推論台灣的建築平均壽命約實際使用 30 到 40 年間。所以本研究同樣採用 BICF 法計算皆使用 30 年比較，可以發現木構造建築碳排放仍低於鋼筋混凝土建築。

另外因為採取功能相同之自我比較方法 (Adam B. Robertson et al., 2012) ，本研究案的 30 年比較中 CFeu (使用階段耗能) 試相同的，而且占比最高(圖 4-1)。如果扣除 CFeu，則可以看出木構造建築仍顯著低於鋼筋混凝土建築。此顯著差異來自於計算過程中結構係數 W 的差異，以本研究案為一般建築物比較，W 係數的差異造成在 CFm (新建工程資材) 方面的碳排達 1.7 倍的顯著差異。其中主結構資材，木構造與 RC 建築分別為 202,056 kgCO₂ 及 414,647 kgCO₂，而且由於木構造建築的內裝工程已計入主結構工程，所以造成差異，與國外幾篇文獻的比較趨勢相同。

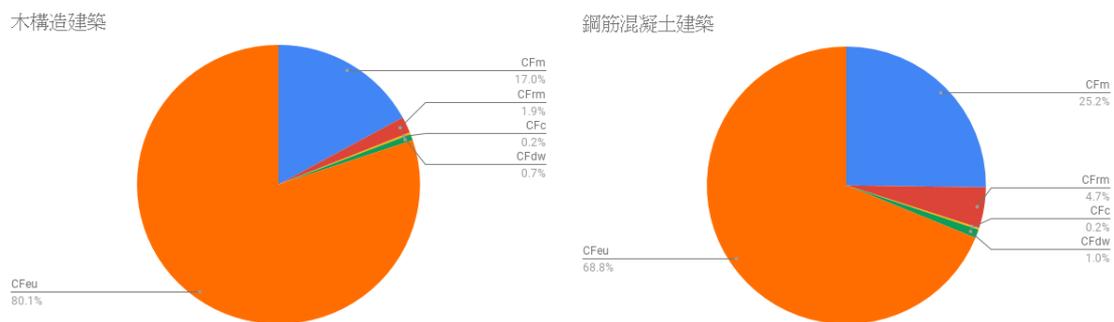


圖 4- 1 各階段 30 年碳排放比

(二) 合併建築生命週期評估與碳儲藏情境分析

第二階段，本研究案根據本研究案的建築設計圖(附錄一)，修正原本的 BCFc 數值，得出實際尺寸的 BCFd。並計算本 CLT 建築的總材積，以外牆、內牆、樓



板、屋頂四個部分各樓層計算，得出 262.032 m³ 的雲杉總材積量。根據原廠運輸密度為 471 kg/m³，引用林裕仁, 2008 將雲杉的碳濃度以 46.91% 計算，本建築實際所需材積總固碳量約為 212,281.317 kgCO₂e，按照本研究框架(圖 3-2)帶入新建工程資材的二氧化碳排放減量。

在廢棄處理階段引(塗三賢，2007)，木構造建築解體後有 60%材積加工製造粒片板，過程利用 80%，表示原本材積約 48%再利用進入下個商品的搖籃階段。粒片板製成的碳排放不計入本建築範疇，但本建築留用的 48%積材碳儲藏，也不能計入下個階段再算一次。而木構造房屋廢棄過程，必須將 52%未再利用的積材碳儲藏效益扣去。CFdw 將設定兩類情境：第一類為完全不再利用，當作就地銷毀；第二類情境再利用，須加上 52%積材碳儲藏效益的消失造成的碳排。(表 4-2)

表 4- 2 鋼筋混凝土與木構造建築皆使用 30 年並考量碳儲藏效益的情境。實際尺寸 BCFd

	鋼筋混凝土(I)	木構造(II)	I - II 差值	I / II 倍數
無再利用				
TCF	1247132	1096270	150862	1.138
CFm	321844	-438	322283	-733.985
CFrm	57784	22028	35756	2.623
CFc	2762	2585	177	1.068
CFdw	12041	219394	-207354	0.055
CFeu	852701	852701	0	1.000
TCF-CFeu	394431	243569	150862	1.619
有再利用				
TCF	1247132	994375	252757	1.254
CFm	321844	-438	322283	-733.985
CFrm	57784	22028	35756	2.623
CFc	2762	2585	177	1.068
CFdw	12041	117499	-105459	0.102
CFeu	852701	852701	0	1.000
TCF-CFeu	394431	141674	252757	2.784
單位	kgCO₂e			無單位



二、 林地碳匯功能_ Individual-based model 模擬結果

根據梨山大甲溪事業區 44、45 林班 34 年生的台灣二葉松觀測結果，本研究撰寫模式並帶入資料，進而模擬一百年的生長結果(三種模式)，參見圖 4-2 到 4-4，初步比較第一年設定與第一百年的資料，包含直徑(diameter)、生產力(leaves productivity)、每種 Super Individual 的存留樹木。

id	diameter	leaves_productivity	number	id	diameter	leaves_productivity	number
1	0.08169491	0.006240842	300	1	0.1466497	0.03404812	79
2	0.08554331	0.007132097	300	2	0.1793612	0.06105071	96
3	0.09394835	0.009359579	300	3	0.2344312	0.13271574	113
4	0.09419467	0.009430921	300	4	0.2350487	0.13373205	120
5	0.10827314	0.014124980	300	5	0.2368546	0.13673347	138
6	0.10946796	0.014581764	300	6	0.1759272	0.05772224	156
7	0.11020419	0.014867988	300	7	0.1772455	0.05898554	174
8	0.11091467	0.015147666	300	8	0.1785188	0.06022283	192
9	0.11729377	0.017814559	300	9	0.1900019	0.07215652	210
10	0.11861092	0.018400908	300	10	0.1923840	0.07481137	228

圖 4- 2 model_2 初始值與第一百年比較 本研究繪製

id	diameter	leaves_productivity	number	id	diameter	leaves_productivity	number
1	0.08066940	0.006016352	300	1	0.1301728	0.02409831	201
2	0.08827639	0.007813165	300	2	0.1516212	0.03750433	201
3	0.09389428	0.009343963	300	3	0.1704123	0.05262965	200
4	0.09573658	0.009885615	300	4	0.1771094	0.05885435	199
5	0.10332355	0.012332630	300	5	0.1580044	0.04226868	199
6	0.10522505	0.013002389	300	6	0.1634184	0.04660693	198
7	0.11291289	0.015952691	300	7	0.1890125	0.07107228	197
8	0.11411308	0.016449413	300	8	0.1931587	0.07568834	196
9	0.11426920	0.016514761	300	9	0.1932654	0.07580964	195
10	0.11718551	0.017766916	300	10	0.2046409	0.08948616	194

圖 4- 3 model_3 初始值與第一百年比較 本研究繪製

id	diameter	leaves_productivity	number	id	diameter	leaves_productivity	number
1	0.08340601	0.006627503	300	1	0.1747104	0.05657204	141
2	0.08462696	0.006912785	300	2	0.1777360	0.05946018	140
3	0.09662382	0.010153643	300	3	0.2079685	0.09377149	138
4	0.09688190	0.010232491	300	4	0.2086287	0.09463731	137
5	0.09855565	0.010753606	300	5	0.1840791	0.06582494	136
6	0.09895920	0.010881796	300	6	0.1849483	0.06673040	134
7	0.11240277	0.015744577	300	7	0.2142751	0.10225760	132
8	0.11501778	0.016830467	300	8	0.2200607	0.11047168	131
9	0.11775985	0.018020621	300	9	0.2261549	0.11957903	130
10	0.11781696	0.018045974	300	10	0.2262821	0.11977419	129

圖 4- 4 model_3.1 初始值與第一百年比較 本研究繪製

此三種模式初始值皆相同，有 0.08m 到 0.12m 的隨機常態分布樹苗 3000 棵，並且共同符合以下幾點假設。

$$\text{生長速率 } V_{\text{growth}} = 8.91 \times (\text{DBH})^{2.90} \quad (\text{式 } 3-3)$$



$$\text{材積 } V_{\text{stem}} = 0.3647 \times (\text{DBH})^2 H^1 = 175.27 \times (\text{DBH})^{2.3473} \quad (\text{式 3-4})$$

$$\text{胸高直徑年變化量 } \Delta \text{DBH} = (V_{\text{growth}} / 175.3)^{0.426} \quad (\text{式 3-5})$$

$$\text{地上部生物量 } W_{\text{above}} = 0.0290 \times (\text{DBH})^{2.6700} \quad (\text{式 3-6})$$

$$\text{DBH}_2 = (0.051 \times \text{DBH}_1^{2.90} + \text{DBH}_1^{2.3473})^{0.426} \quad (\text{式 3-7})$$

$$(N_{\text{leaf } i} / \sum N_{\text{leaf } i}) = (\text{DBH}_i^{2.0025} / \sum \text{DBH}_i^{2.0025}) \quad (\text{式 3-8})$$

以及當成長達(平均胸徑 $> Y_{\text{diameter}} = -0.0045 X_{\text{number}} + 26.063$)時，都開始受到壓迫以及死亡現象。另外在三個模式不同的假設則分別是受壓迫的生長減緩，與死亡分布情形的差異(表 4-3)，透過這三種模式分別模擬，觀察百年內的單一立木成長情形，以及林分總量變化。

表 4- 3 三種模式在成長放緩以及樹木死亡的差別

	受壓迫的成長放緩	受壓迫的樹木死亡
Model_2	所有生長量都減低 0.1 倍的參數。	較大的樹木較不容易死亡，樹木由大到小的死亡量=14-i (i 為 1~10 編號)
Model_3	按照地上部生物量 $W_{\text{above}} = 0.0290 \times (\text{DBH})^{2.6700}$ ，以及葉子量正比於生物量的 3/4 次方，得到葉子量正比於 $\text{DBH}^{2.0025}$ ，再由所有樹木的葉子量比例，算生長量的減低比。	按照密度分配，直徑較大的樹木較少棵 $Y_{\text{diameter}} = -0.0045 X_{\text{number}} + 26.063$
Model_3.1	所有生長量都減低 0.15 倍的參數。	按照密度分配，直徑較大的樹木較少棵 $Y_{\text{diameter}} = -0.0045 X_{\text{number}} + 26.063$

三種模式在一百年內的地上部生物量變化如圖 4-5 到圖 4-7，發現模式 3.1 與 3 的趨勢相近，都在第三個循環、第十五年的時間內成長放緩，此時樹木已經長到平均胸徑大到會互相影響的情況，此時生長放緩而且樹木總量符合回歸線而變少。

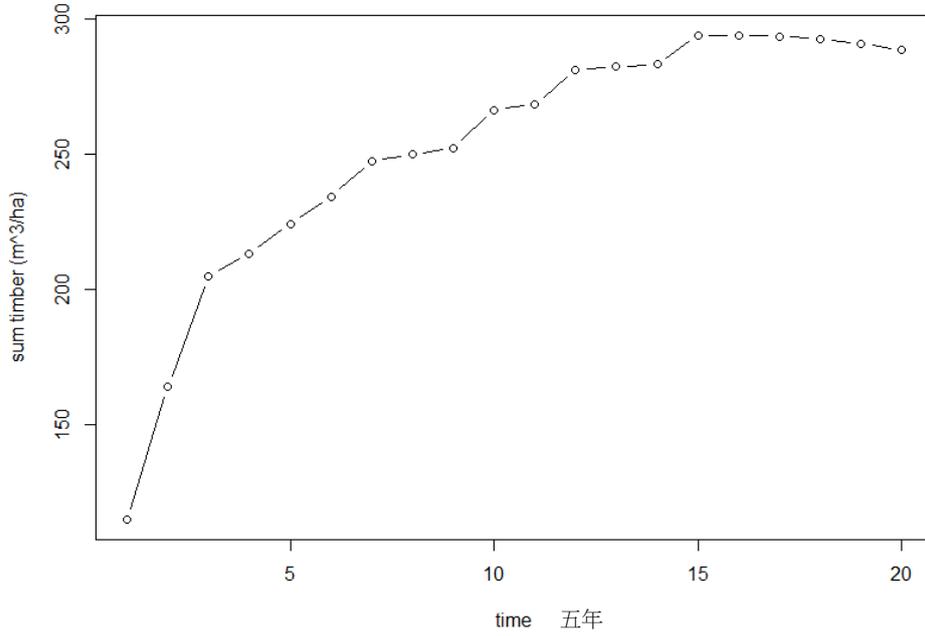


圖 4- 5 model_2 V_{stem} 的一百年變化量 本研究繪製

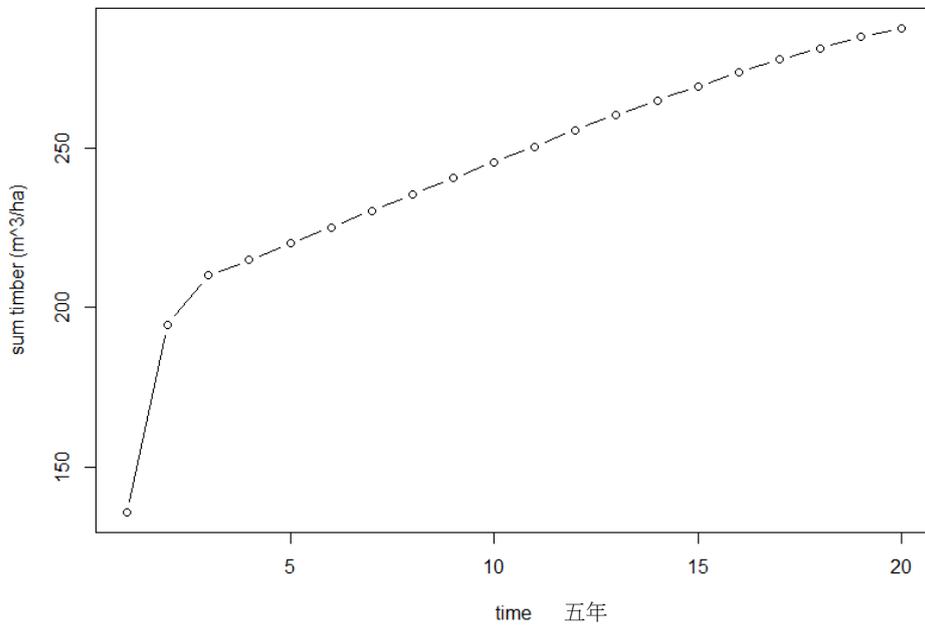


圖 4- 6 model_3 V_{stem} 的一百年變化量 本研究繪製

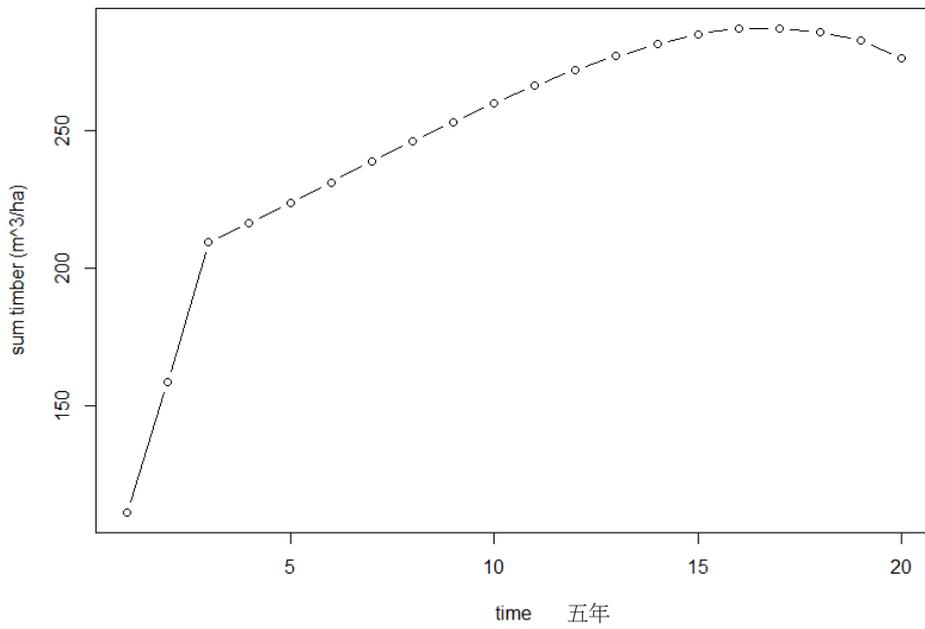


圖 4- 7 model_3.1 V_{stem} 的一百年變化量 本研究繪製

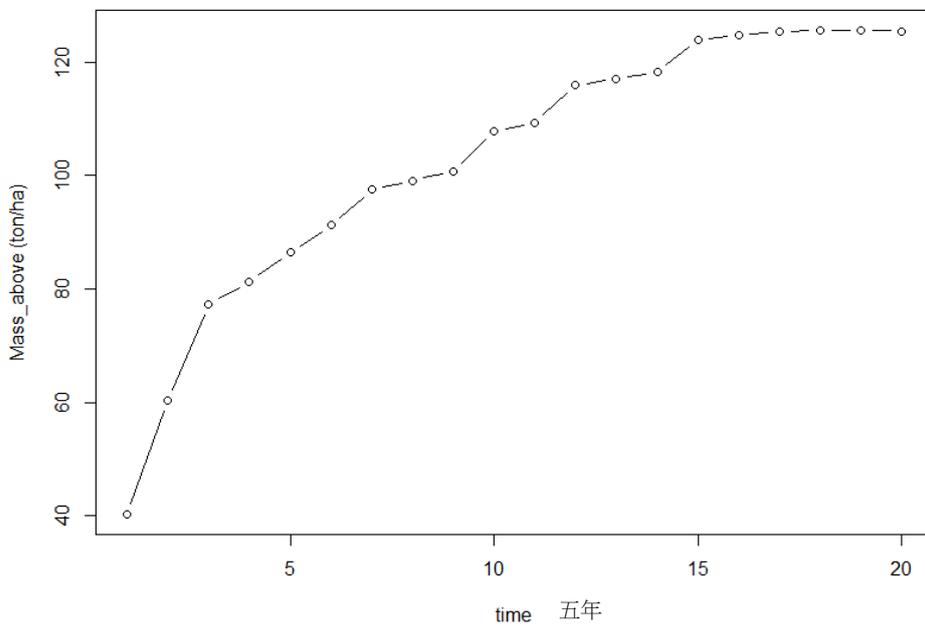


圖 4- 8 model_2 W_{above} 的一百年變化量 本研究繪製

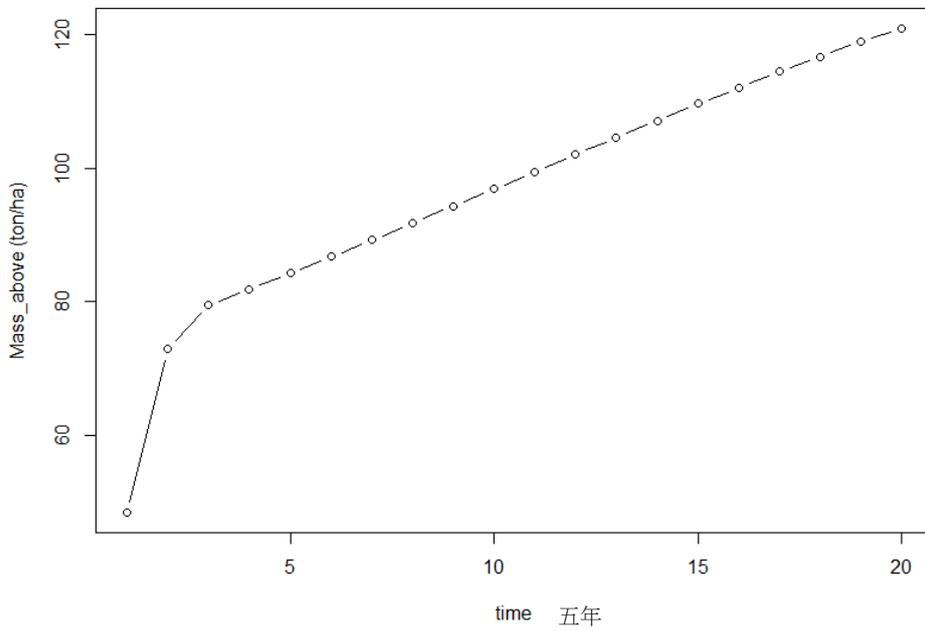


圖 4- 9 model_3 W_{above} 的一百年變化量 本研究繪製

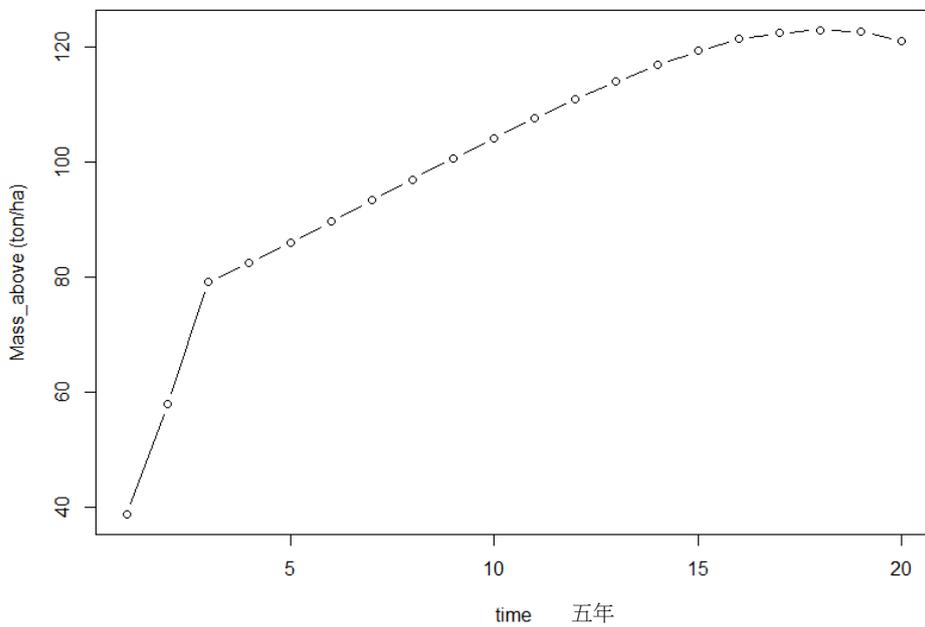


圖 4- 10 model_3.1 W_{above} 的一百年變化量 本研究繪製

而根據我們對於樹木數量的監測，三種模式都在第十五年左右，樹木大到超過環境附載，而開始發生樹木死亡，並且符合模式設定的線性下降。另外參

考圖 4-11 到圖 4-13，單株樹木直徑的成長隨年紀與大小增長而變大。若設定 0.8 參數為被壓迫的成長分配，趨勢會符合代謝理論的指數成長(圖 4-14)。但因為本研究要符合 34 年的觀測資料，所以降低參數約 0.1 到 0.2 的減產分配，會出現成長後期直徑成長都放緩的圖形。

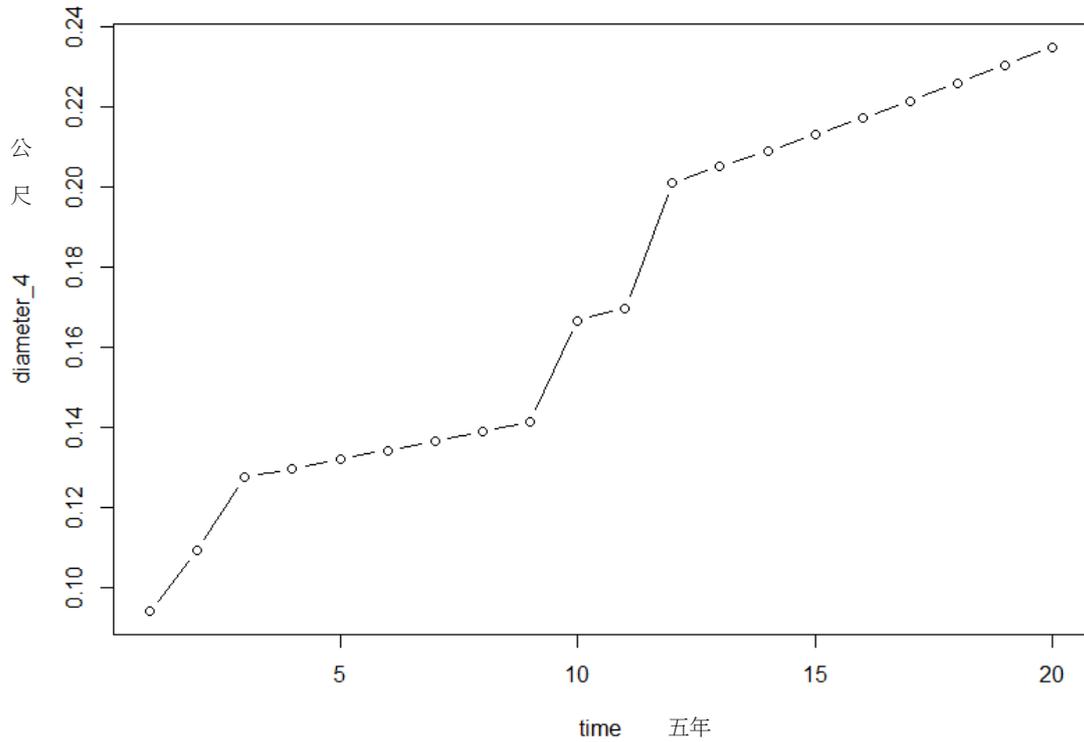


圖 4- 11 樹木直徑隨時序變化圖 model2，減產參數設 0.1 本研究繪製

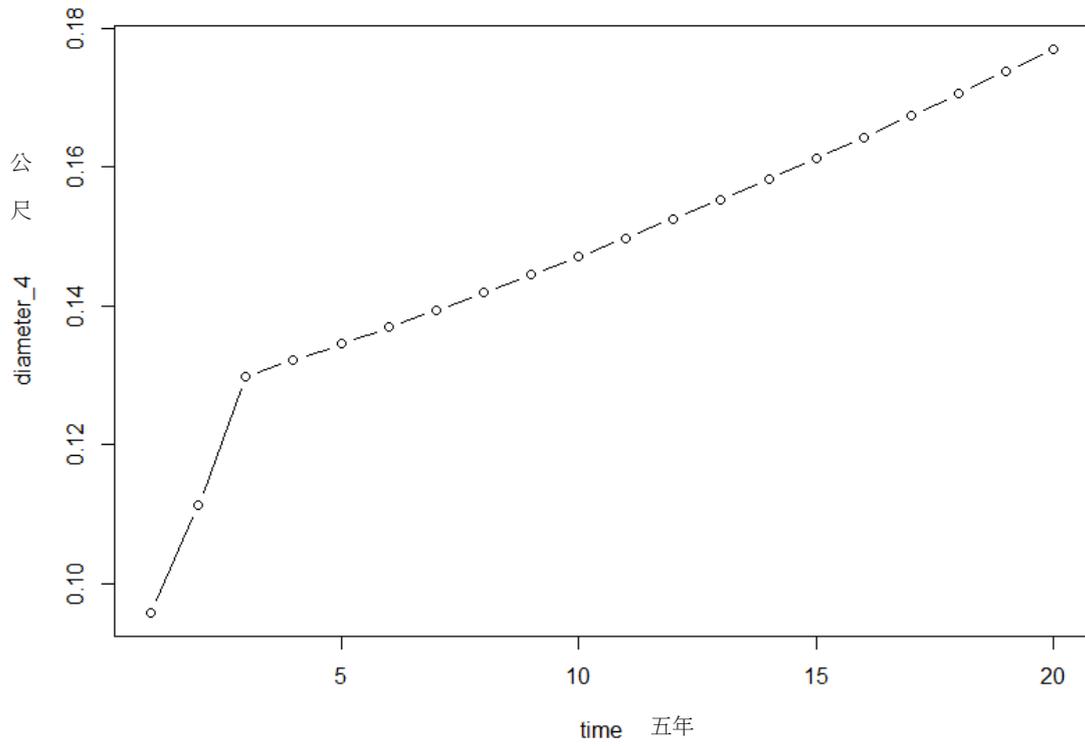


圖 4- 12 樹木直徑隨時序變化圖 model2，減產參數設葉子量分配 本研究繪製

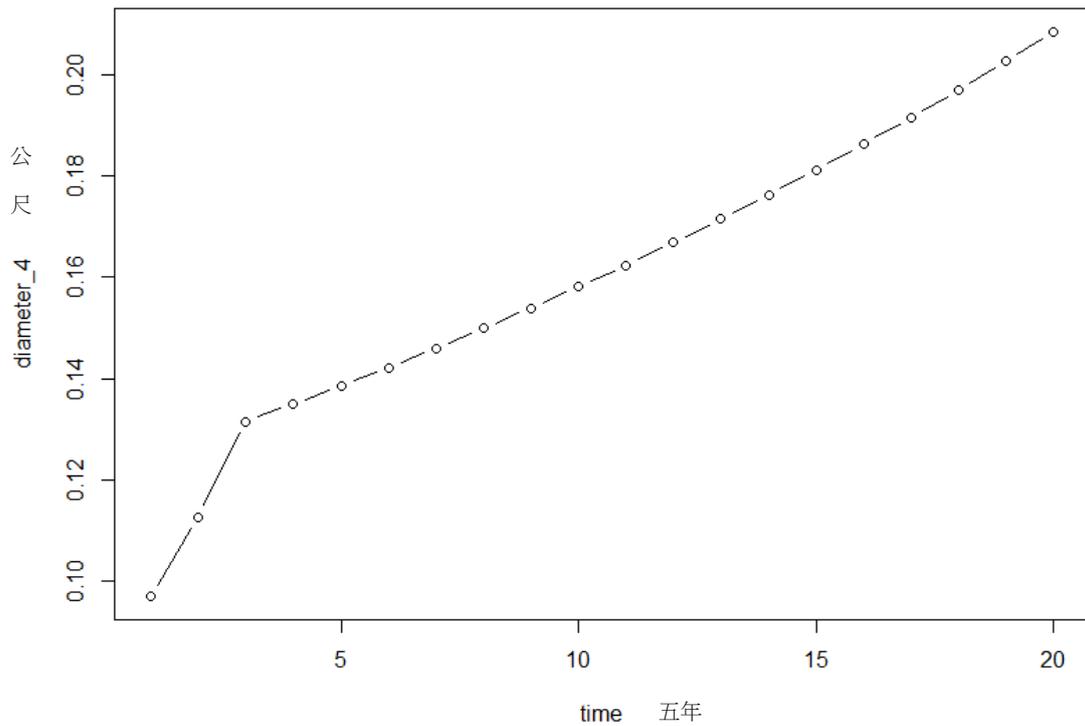


圖 4- 13 樹木直徑隨時序變化圖，減產參數設 0.15 本研究繪製

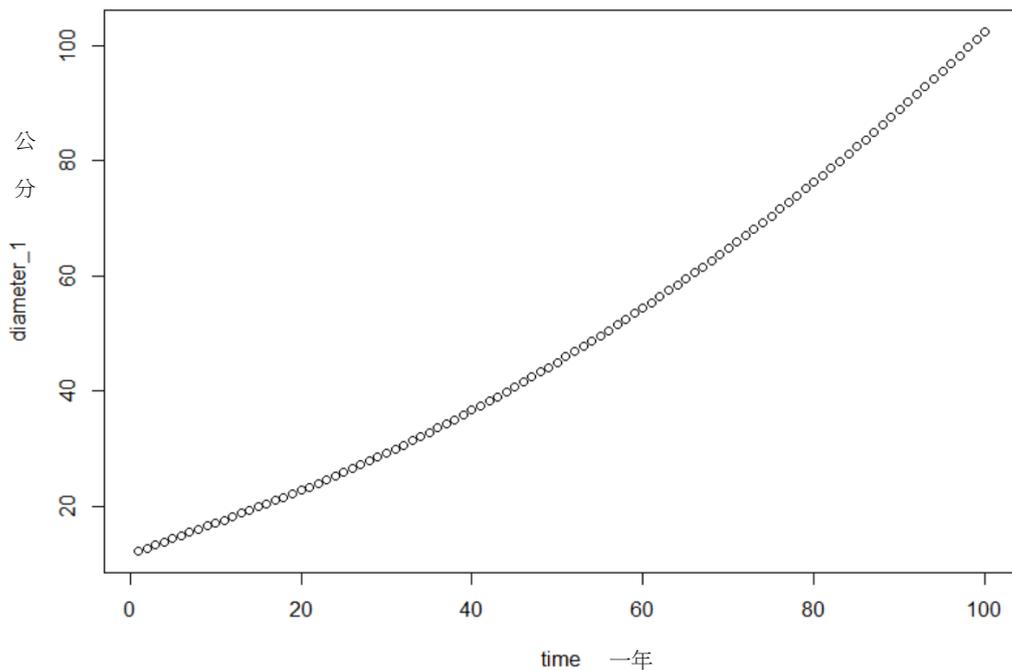


圖 4- 14 樹木直徑隨時序變化圖 model_1 每年 loop 減產參數設 0.8 本研究繪製

綜合三個模型都可以看到的結果，總體林分的樹木總材積變化，或是地上部生物量，都隨時間的拉長而有減緩現象。雖然 Nature 507 (N. L. Stephenson 2014) 提到單木越大生產率越大，但同時考量樹木的死亡及壓迫成長減緩，造成樹木下降，總體材積量會逐步趨緩。

綜合本章節初步數據結果，小結本模式已達成的成果有以下四個部分：

1. 納入 WEB Allometric 通用方程 $W_{\text{above}} = 0.0290 \times (\text{DBH})^{2.6700}$ 做地上部估量
2. 分配: 推導出 胸高直徑年變化量 $\Delta \text{DBH} = (V_{\text{growth}} / 175.3)^{0.426}$ 分配成長
3. 生長的壓迫與死亡: 利用 $Y_{\text{diameter}} = -0.0045 X_{\text{number}} + 26.063$ 找出壓迫關係式
4. 使模式初期符合觀測資料，並模擬更長時間的變化



三、 合併建築生命週期評估碳足跡與林地管理碳匯總量

本研究目的為呈現林業上下游之二氧化碳減量的變化，利用 R 語言將木構造建築所需的材積總量，換算為林地所需採伐的樹木大小與株數，並於原本的模式中建立伐木後的變化，以模擬長時間時序變化下的二氧化碳減量總效益。

在建築 N1 部分原本以雲杉為主要構造，現在則以台灣二葉松作為原料。二葉松材積密度 kg/m^3 ，碳濃度為 47.04%，所以其碳轉換係數為 258.720 kgC/m^3 較雲杉的 220.946 kgC/m^3 來的大，如果採用其作為同間 CLT 建築的建材，則可以提升整體材積的固碳量達 $248,573.848 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。而在木材利用的 N2 部分雖不列入本研究的研究範疇，並未盤點木材加工過程的碳排，但本研究採取 0.7 作為可使用材積與原木材積之比例，帶入模式計算。

林木管理部分延續 Model_3 的設計設定，並將成長的直徑變化，改用每年度的胸徑預估下一年度的胸徑大小： $DBH_2 = (0.051 \times DBH_1^{2.90} + DBH_1^{2.3473})^{0.426}$ ，設計出 Model_4 並做出百年內隨年序變化的生長量。並加大十類 Super Individual 棵數，每類各有 3000 棵，設定總林地大小為十公頃，作為生產建材的林場。模擬得到的生長變化如圖 4-15，第 65 年後到第 85 年的顯著下降至零，是因為模式採用胸徑回歸設定上限，所以胸徑超出可預期的範疇造成樹木全部死亡。

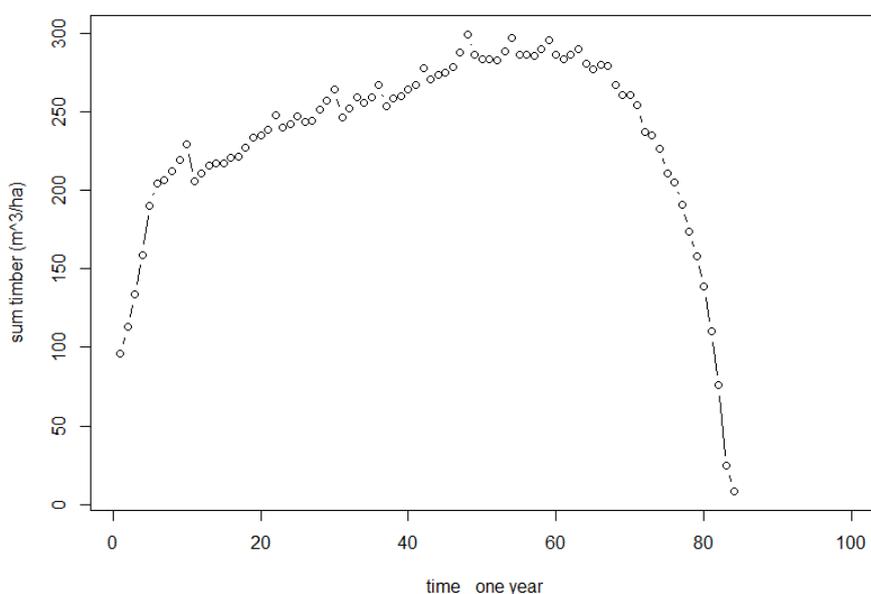


圖 4- 15 Model_4 百年內每年林地材積總量隨時序變化

如果將本研究案建築所需材積總量 262.032m^3 換算為所需的原木材積，約為 374.331m^3 的二葉松人工林原木，在林地管理的模式中，以第三十年的林木作為積材來源，大約需要 1.3 公頃左右的 30 年林齡林地。但若採用 Super Individual 中最大樹徑(19.54cm)的類別進行皆伐，約可以釋出 1 公頃林地，並且再種植初始值 8-12cm 的樹苗，模擬如圖 4-16。在接續的第 31-60 年間，釋出的林地即可長出略高於原本該有的材積總量，可以達成碳吸存量增加。同時也使材積固定於可長時間保存的建築中，以低碳排的木構造建築取代鋼筋混凝土。

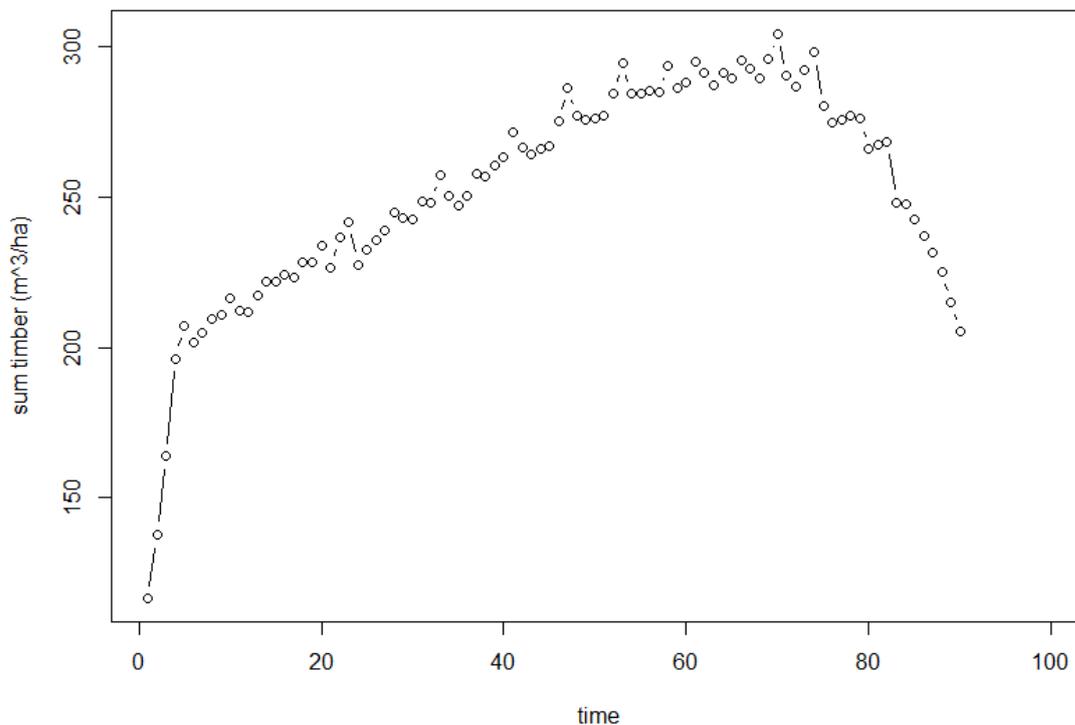


圖 4- 16 Model_4 在第 31 年與第 61 年有伐木情況下，整體林地的材積時序變化



第五章 結論與建議

一、 研究結論

本研究分兩部分研究成果：第一部分碳替代產品端 N1，以木構造房屋的二氧化碳減量效益計算，利用台灣資料庫的 BICF 法計算完整的木構造建築實際案例，得到木構造房屋相較於鋼筋混凝土建築物更低的二氧化碳排放量。並對傳統的 LCA 模式提出修正(圖 3-2)，應將木材的碳儲藏效益納入原料部分(新建工程資材)，計算為二氧化碳減量。再由廢棄階段選擇掩埋或是再利用情境，將原本計入的碳儲藏效益納入考量，避免高估木構造的二氧化碳減量效益。

另外引塗三賢, 2007，框組壁式木構造建築材積約為 $0.143\text{m}^3/\text{m}^2$ ，表示每平方米的樓地板，就有 0.143 立方公尺的材積，換算為二氧化碳相當於 $192.85\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ 。而本研究案的 CLT 木構造建築，樓地板面積為 466m^2 ，相當於 CLT 木構造建築的每單位材積用量約為 $0.563\text{m}^3/\text{m}^2$ ，與二氧化碳固定當量 $455.86\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ ，顯示出 CLT 木構造建築每單位面積的固碳，高於一般常見的框組壁式木構造。

第二部分則透過 R 語言建立模式，模擬符合觀測資料的人工林長期的生長情況，完成林地 N3 部分估算。透過該研究可以推估長時間的林分會有生產力下降的情況，並且此模式帶入適用台灣針葉林及竹科植物的 WEB 通用相對關係式，先由不同林地的初步觀測得到的生長速率 V_{growth} 、 $Y_{\text{diameter}} = -0.0045 X_{\text{number}} + 26.063$ 壓迫關係式、 V_{stem} 與 DBH 的異速生長方程式，就可以使用此模式進行更長時間的模擬，得到不同林地的成長情形。

但本研究的模式發展至此仍有 bias，調整減產的參數降低後，雖符合觀測，但單木生長曲線因此提早減緩。可能與 $Y_{\text{diameter}} = -0.0045 X_{\text{number}} + 26.063$ 的資料時間不夠長有關，待解決這部分問題後。即可將模式發展出人為伐木的比較情境，並進行伐木與否，對林地總體固碳效益_Dynamic system model 模擬結果。



綜合上述兩項結果，我們可以得知林分尺度的生產率，會隨樹木長大而減緩，適當的採伐並取用成熟的林木，才可以再釋出土地種植新生的木材。同時在伐木之後的產品端，透過木材用量最大的建築產業做出生命週期評估，確認台灣的木構造建築，較基線(base line)的鋼筋混凝土有更低的二氧化碳排放。也確保採伐的木材有可以使用的產品市場，避免隨意棄置而回到二氧化碳的循環。以此兩項成果，可以確認碳替代的具體成效。雖然本研究尚未完成包含 N2 木材加工利用的部分，還無法將三個部分的二氧化碳減量量化合併，形成完整的動態預估模式。但已經量化計算木構造 N1 與林地 N3 的成果，完成台灣情境的木構造碳替代效益實證研究。

二、 研究限制

本研究採取二級數據盤點，木構造建築採用廠商設計圖、林地模擬初始資料採用論文的已分析數據，以現有數據計算。研究範疇包含木構造建築生命週期評估，與林地生長的資料模擬，不包含木材加工廠的盤點計算。本研究進行過程，仍有部分限制尚未克服，以下列本研究限制：

1. 根據建築產業碳足跡所述，木構造建築的結構係數 W 利用砂石的減少量推估，並非由多筆資料推導，但修正木構造的 W 係數需要多筆完整施工資料，故無法在本篇研究提出修正。
2. 木材廢棄過程僅用材積利用比例帶入，廢棄者當作原地銷毀，尚未清點廢棄流程所產生的碳排放。
3. 林地的競爭並沒有分析生長原理做出競爭的關係式，採用觀測資料中平均胸徑與林分密度的回歸式模擬競爭狀態，資料時間不夠長就無法有效推論。
4. 本研究範疇未包含木材加工廠的製成，無法清點木材加工流程與使用率，無法換算木材量相對應需要多大面積的林地與林齡。因此未能將木材產業從上



下游，整體模擬二氧化碳變化。

5. 本研究案對 RC 建築的模擬僅以假設尺寸法設計，由於超出專業範疇無法提出對應的建築設計圖。在新建工程的資材上，因為計算隔熱材要貼的實際做法，略有低估碳排放。
6. 未能進行模式不確定性評估。

三、 後續研究建議

根據研究限制條列的項目，研究後續建議包含兩類，分別為本研究可修正部分，以及對未來其他研究之建議。

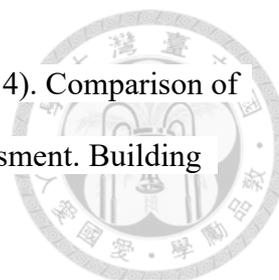
對於研究的未來修正方向包括：一、盤點木材加工廠的製成，清點木材加工流程與使用率，提出木材量換算對應需要多大面積的林地與林齡的真實情況，完成 N2 盤點再將木材產業從上下游，整體模擬二氧化碳變化。二、木材廢棄過程的流程所產生的碳排放清點，使情境切合真實的碳排放量。三、林地的競爭可以分析生長原理，做出競爭的關係式取代觀測資料的回歸關係式。四、對模式進行不確定性評估。

對於其他研究可延伸方向之建議：一、木構造建築的結構係數 W 現為砂石的減少量推估值，需蒐集大量木構造建築的完整施工資料，提出修正 W 。二、本研究案有計算出 RC 構造應須貼隔熱材的實際外牆面積約 682.252m^2 ，但由於台灣法規對於隔熱係數 R 值規範不嚴苛，所以並沒有廠商會實際作出如同木構造房屋 R 值的設計，所以本研究沒有辦法將這部分的碳排在加計上去，僅能交由建築與營建相關的學術研究進行。



參考文獻

- 王松永、塗三賢 (2007)。木材利用、木構建築對溫室氣體減量貢獻。林業研究專訊。14(6), 3-5。
- 孫正華 (2011)。相對關係式推估林木及竹類地上部生物量 (博士論文)。取自華藝線上圖書館。
- 林世宗 鍾智昕 邱祈榮* 林朝欽 (2008)。台灣二葉松地上部生物量及碳吸存量之估算。中華林學季刊。41(4), 521-535。
- 塗三賢 (2007)。台灣地區木構造住宅對碳貯存與二氧化碳減量之貢獻 (博士論文)。取自取自臺灣博碩士論文系統。
- 林裕仁 (2008)。森林減碳能力之推算方法。農政與農情。193(77)。
- 林憲德 (2018)。建築產業碳足跡。臺北市。詹氏書局。
- 行政院環境保護署 (2010) 產品與服務碳足跡計算指引。39 頁。
- N. L. Stephenson, A. J. Das, R. Condit, S. E. Russo, P. J. Baker, N. G. Beckman, ..., M. A. Zavala et al. (2014). Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature*, 507, 90–93.
- Raymond J. Cole (1999). Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems. *Building and Environment*, 34, 335–348.
- Asa Jonsson, Thomas Bjorklund, Anne-Marie Tillman (1998) LCA of Concrete and Steel Building Frames. Technical Environmental Planning Report, S-412 (96)
- Angela Acree Guggemos, Arpad Horvath (2005). Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings. *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 11, Issue 2.



Atsushi Takano, Stefan Winter, Mark Hughes, Lauri Linkosalmi (2014). Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. *Building and Environment*, 79, 20-30.

Adam B. Robertson, Frank C. F. Lam, Raymond J. Cole (2012). A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Mid-Rise Office Building Construction Alternatives: Laminated Timber or Reinforced Concrete. *Buildings*, 2(3), 245-270.

Stephen C. Sillett, Robert Van Pelt, George W. Koch, Anthony R. Ambrose, Allyson L. Carroll, Marie E. Antoine, Brett M. Mifsud. (2010). Increasing wood production through old age in tall trees. *Forest Ecology and Management*, 259, 976–994.

ISO (2006) ISO 14040 - Environmental management-Life cycle assessment - Principles and framework.

ISO (2006a) ISO 14064-1, Greenhouse gases-Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals. August.

ISO (2006b) ISO 14064-2, Greenhouse gases-Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements.

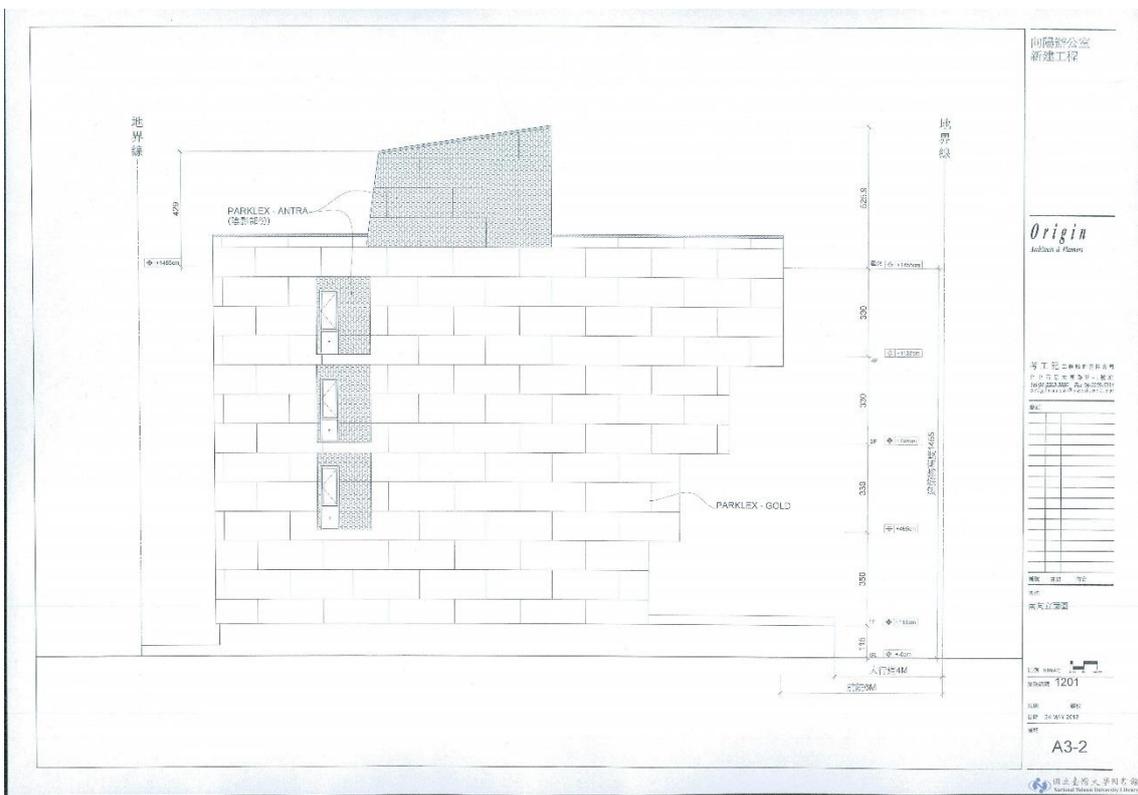
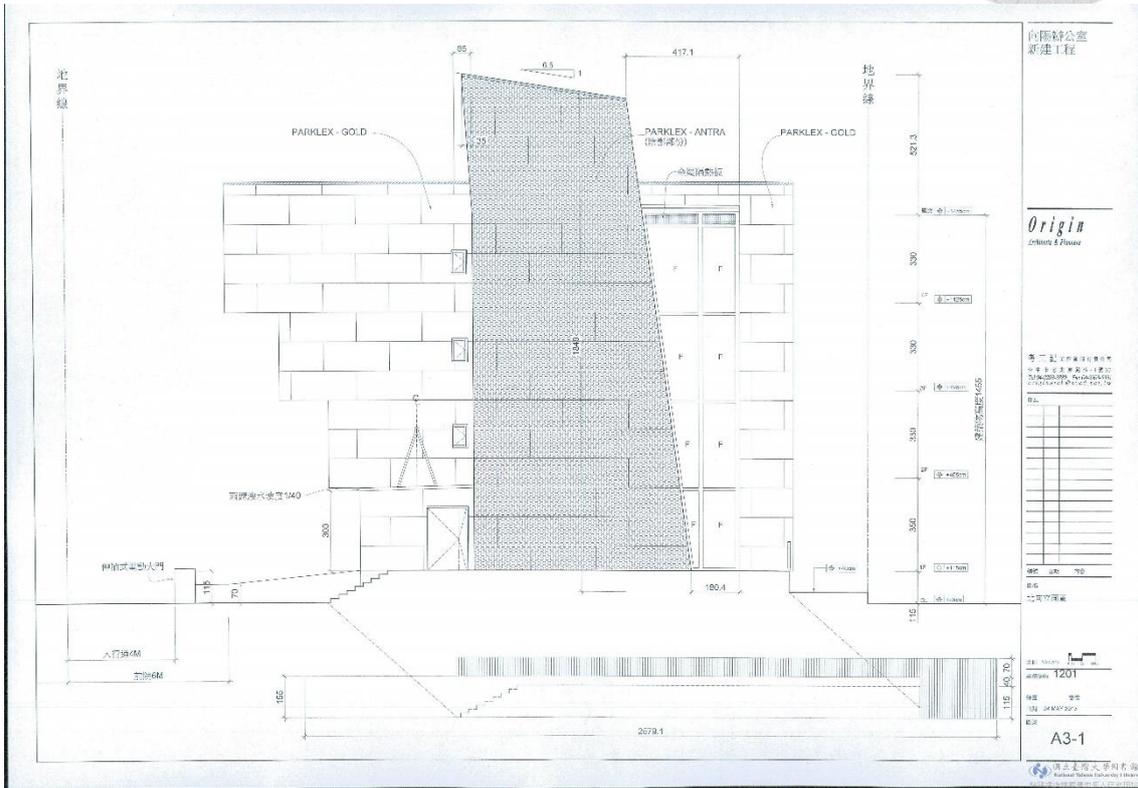
ISO (2006c) ISO 14064-3, Greenhouse gases-Part 3: Specification with guidance for the validation and verification of greenhouse gas assertions.

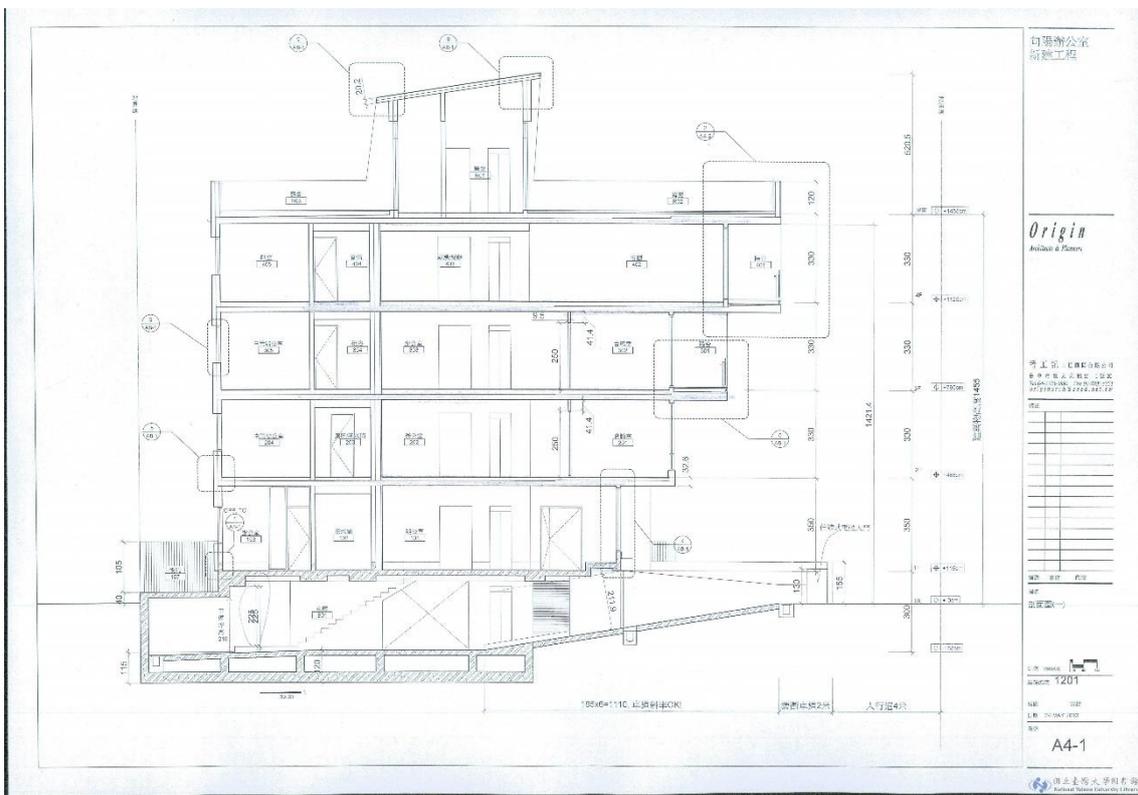
IPCC (2007) IPCC Fourth Assessment Report - AR4- Climate Change 2007: The Physical Science Basis.

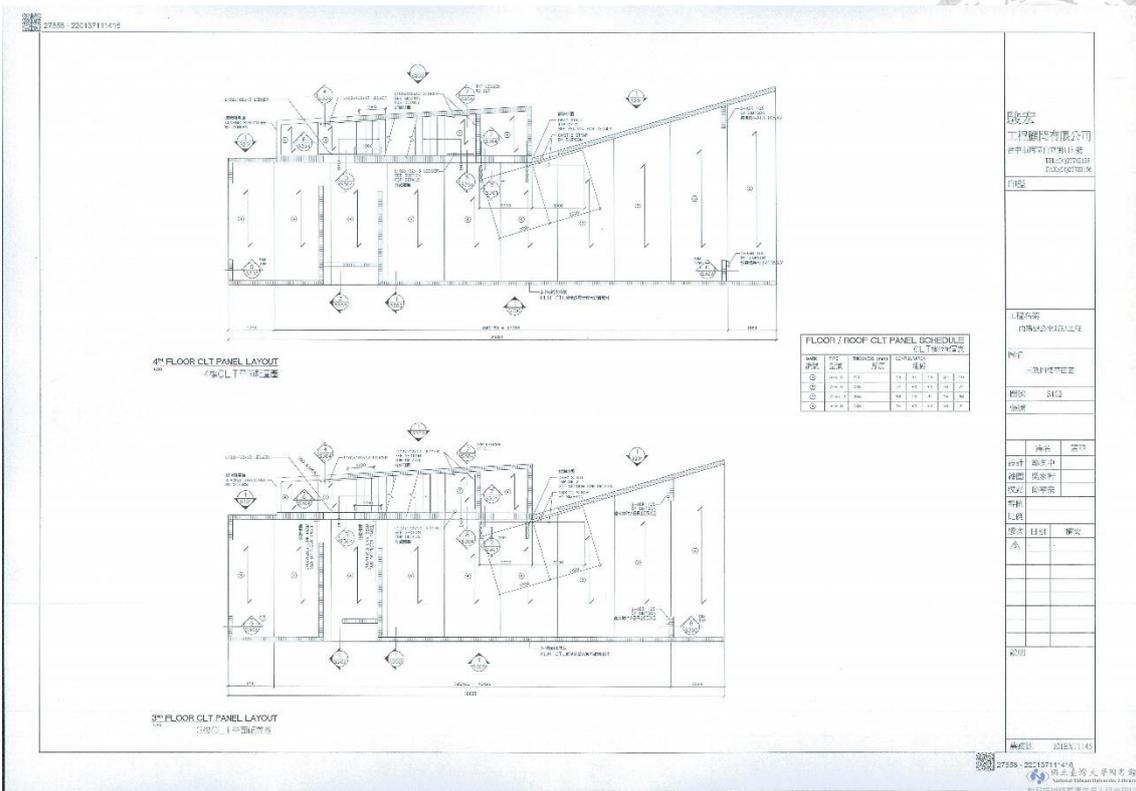
IPCC (2007) Mitigation of Climate Change Report.



附錄一.建築設計圖







致宏
工程顧問有限公司
台北市南港區新莊路
TEL: 02-27359114
FAX: 02-27359115

工程名稱
H66辦公大樓工程

圖名
4樓 CLT 樓板配置

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

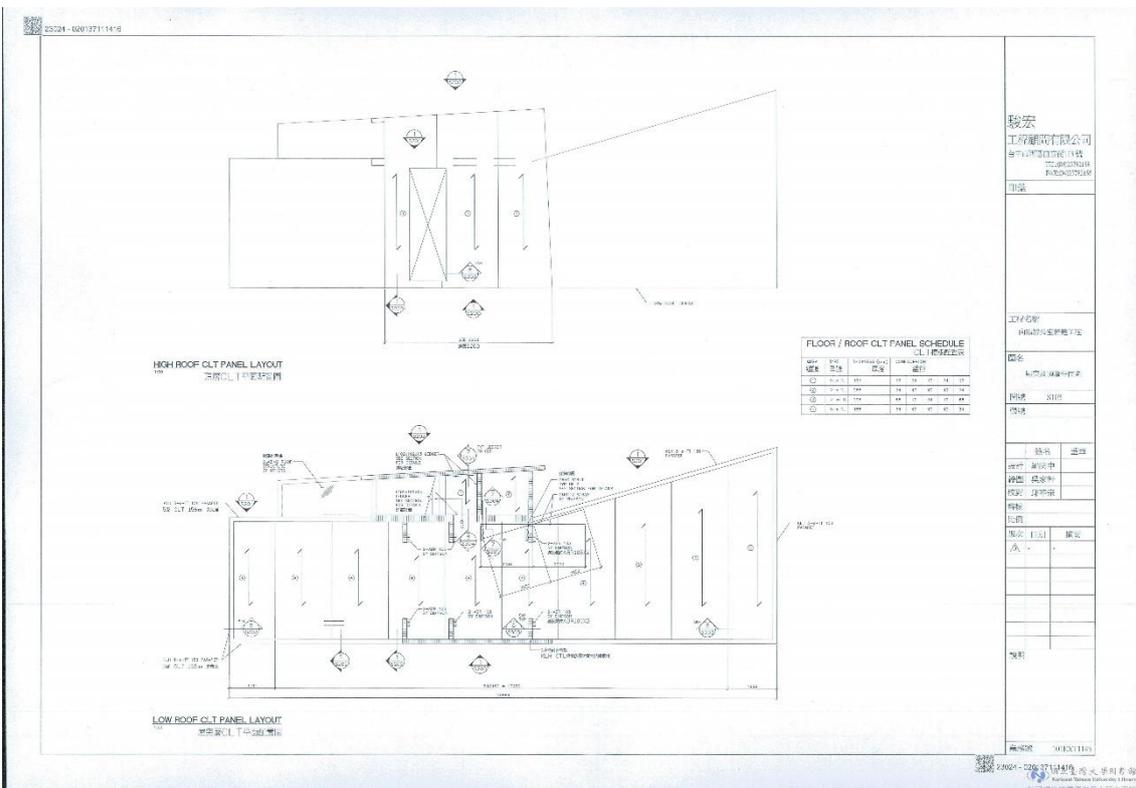
審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022



致宏
工程顧問有限公司
台北市南港區新莊路
TEL: 02-27359114
FAX: 02-27359115

工程名稱
H66辦公大樓工程

圖名
高樓 CLT 樓板配置

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022

繪圖
張中

校對
張中

審核
張中

備註
點檢

日期
2022

圖號
S113

日期
2022

