



2019「中技社科技獎學金」

2019 CTCI Foundation Science and Technology Scholarship

研究獎學金 Research Scholarship



為著台灣營建產業之循環經濟之基於建築資訊模型之網頁平台

A Building Information Model (BIM)-Based Web Platform for Circular Economy in Construction Industry in Taiwan

國立台灣大學土木工程研究所電腦輔助工程組 博士班二年級學生張芸翠 謝尚賢教授指導

研究重點

面對全球日益嚴峻的氣候變遷及環境污染問題，「循環經濟」(Circular Economy)此一重新思考資源價值的新型經濟模式隨之興起。作為極度消耗及浪費資源的營建產業，這項變革顯得更為重要。隨著資訊科技的快速發展，建築資訊模型(Building Information Modeling)能以有效管理並分享建築資訊，促進循環經濟的推動。因此，本研究之目的在於應用建築資訊模型之技術，建立一網頁平台，協助建築專案資訊之分析與分享，以推動台灣營建產業之循環經濟發展。本研究將會結合材料循環度評估以及生命週期分析方法，並建置在地資料庫，將研究成果於國內專案驗證。此研究題目將促進台灣營建產業之智慧化以及永續化，提高營建產業之價值，減少資源浪費。

研究成果

如同過往許多新興技術的發展，一套有效的評估方法能夠鑑別專案的優劣，以此作為設計修改和政策獎勵的依據。面對近年來一波循環經濟的潮流，許多國家研究單位開始了「循環度指標」的研究。自2010年創立的艾倫麥克阿瑟基金會(Ellen MacArthur Foundation)致力於循環經濟的推廣，他們於2015年提出了一套「材料循環度指標」(Material Circularity Indicator)的評估方法，得到了廣泛的迴響。雖然當初這套方法的通用對象以一般產品製造為主，然而近年來也有一些研究單位及組織(如荷蘭的建材護照公司 Madaster)將其應用於建築產業，好一窺建築專案的材料循環度，實為一個簡潔有效的方法。本文將簡介此套評估方法的架構及其於設計應用。建築材料流向與三階段之分析架構

循環經濟之核心觀念為「兩個增加、兩個減少」，亦即「增加材料之循環利用、增加產品之利用效率、減少初始原料之開採、減少廢棄物之產生」。艾倫麥克阿瑟基金會的「材料循環度指標」報告中便提供了材料於產品生命週期的流向分析圖，好以此架構來檢視材料的去向以及循環性。此架構可以以「製成」、「使用」、「終結」三個產品生命週期階段加以討論，而其到建築產業則可被理解為「建造」、「使用」、「拆除」三個建築生命週期階段(參照圖3)，此三個階段有各自的循環思維與目標，在此加以解釋。

(1) 建造階段
此階段意在檢討所「輸入」或「儲存」於建築物的材料，是否「循環而來」？其目標為「增加循環材料使用」，亦即減少一般初始原料的使用，增加可快速再生原料(例如竹子、稻草、棉花等)或是回收材料以及再使用之組件之使用。此階段之循環度可以「建築中之循環材料之比例」檢核之。下面為簡易的計算公式：

$$CI(\text{construction}) = FR + FRR + FU$$

FR: 使用回收材料的比例
FRR: 使用可快速再生材料的比例
FU: 再使用的產品或組件的比

(2) 使用階段
此階段意在提升產品的使用效率，其目標為使用耐久度高之產品。此階段循環度之計算可以「所使用產品之預期壽命與其屬之建築層平均壽命之比值」得知，而下面為簡易的計算公式：

$$CI(\text{in-use}) = L/Lav$$

L: 使用產品的預期使用壽命(年)
Lav: 該建築層的平均壽命(年)

(3) 拆除階段
此階段則檢視建築物使用壽命結束時，儲存於建築物之材料的去向，可否「循環而去」？目標為「提升材料之循環性」，亦即鼓勵產品組件之再使用、材料再次回收利用，以減少焚化或掩埋材料之機會。此階段之循環度可以「建築中可再次循環之材料比例」。然而，產品或材料能否再次循環利用，與其是否考慮「拆卸設計」(Design for Disassembly)有關，此為重要的判斷因素。另外，值得注意的是，回收材料再次製成原料通常會有一個折損比例，亦稱回收效率，在此需要考慮此因素。下面為簡易的計算公式：

$$CI(\text{end-of-life}) = CR * EC + CU$$

CR: 使用後產品可回收材料的比例
EC: 回收材料之效率
CU: 使用後產品可再使用組件比例

最終如何整合各階段的考量因素，計算建築物整體的循環度呢？艾倫麥克阿瑟基金會所提出的「材料循環度指標」，則是藉著分析「材料是否線性流向」，反推該產品之整體「材料循環度」，其整體計算公式如下，並在下面加以說明：

$$CI = 1 - LFI * F(X)$$

LFI: 線性流向指標
F(X): 效用因子

線性流向指標 (Linear Flow Index, LFI) 意在評估有多少材料為線性流動發展，而所謂線性流動意指被開採之原料，在經過產品製成和使用過後，以焚化和掩埋等方式處理。因此，若是一棟建築物所使用之產品皆為初始材料製成，建築生命週期結束之後這些材料都進到焚化爐或掩埋場處理，這樣子這棟建築物的 LFI 將會是 100%，非常不循環。若是建築物改採用由「循環材料」所製成之建材，這些建材在使用過後也能夠再度循環利用，這樣可以減少 V+W 的數值，降低 LFI 的結果。這樣的計算方式可以同時考量「建造」及「拆除」階段之材料循環度。另外值得注意的是，為製造產品之回收過程而產生之廢物以及產品壽命結束後回收過程而產生之廢物亦必須納入計算考量，此舉與相對於產品之重複利用勝於製成回收材料。下面為簡易計算公式：

$$LFI = (V+W)/(2M+(WF-WC)/2)$$

V: 所使用之原始材料(公斤)
W: 所產生之廢物總量(公斤)
M: 所使用之材料/產品總量(公斤)
WF: 為製造產品之回收過程而產生之廢物總量(公斤)
WC: 產品壽命結束後回收過程而產生之廢物總量(公斤)

除了線性流向指標(LFI)以外，反映產品之使用效率之效用因子(F(X))亦為計算建築物之整體循環度之重要因子，其計算方式如下方所示。由此可見，若是建材之預期使用壽命為該建築層之90%，其效用因子即達100%。下面為簡易的計算公式：

$$F(X) = 0.9/X$$
$$X = L/Lav$$

L: 使用產品的預期使用壽命(年)
Lav: 該建築層的平均壽命(年)

在這樣的分析邏輯之下，建築循環度的分析結果可以同時反映建築物於三個生命週期階段的循環設計。一棟完全由循環材料所組成，並以再循環利用之方式處理之建築物，可稱作「循環建築」，其循環度結果可達100%，即使其使用壽命短於平均壽命。然而，一棟完全由初始材料所建造的建築物，且其壽命短於平均壽命，主要以廢物形式結束，可稱作「線性建築」，其循環度約為0-10%。因此，若是建築物所使用之回收材料在最後階段難以再次利用的情況下，其循環度之計算也較差。若是所使用之初始材料在將來能以多次的循環再利用，亦為可行之情境，而這樣的分析工具，能夠幫助設計規劃者考量建築材料循環度之全局，以及循環經濟之多面向。

上述之評估方法能以反映循環經濟的核心原則，然而這些原則要應用到建築設計的時候，便不得不考慮到建築物不同層次之特性和狀況。建築物這項「產品」的巨大規模及其高度複雜性，即是營建產業與其他製造產業之最大不同。下面將討論建築物不同層次之循環設計考量(見圖7)。

(1) 基地 (site):
建築物最初始的層次為基地，此層之生命週期最長、影響最久，有時會消耗可觀之材料。譬如說整地所需之土方可達幾百公噸，佔整體專案所需材料之總質量的一半以上。因此善用已開發之土地(brownfield land)之既有設施為一重要觀念，適度的降低建築物基地開發面積為一有效的設計策略，而基地內外之土方平衡之工作亦極其重要。

(2) 結構 (structure):
結構體為建築物之最重要層次，一般而言其生命週期約六十年左右，影響深遠，並且消耗大量的材料，視結構類型而定，其材料總量可佔建築物整體質量之五至七成左右，因而牽動建築物整體循環度結果。無論何種結構類型，對於此層之最有效之循環設計策略，即為多加利用既有建築結構體。因此比起打掉重建，適時的結構補強以延長建築壽命，能有效的提升建築循環度之表現。

(3) 外裝 (skin):
外裝為建築物之重要的保護層，此層包括外牆外裝、外門窗、屋頂外裝等建築構件，其生命週期大致為二十年左右，與結構層相比，雖然此層之材料總量僅佔整體少數(約一成左右)，但其影響層面廣闊，包括建築熱負荷表現以及建築美學，因此需要慎重考量。在台灣，最常見的外牆外裝形式為濕式磁磚，然而目前在市面上由回收材料所製成之外裝磁磚非常少數，其中回收材料的比例亦有限(約百分之十五)。此外，濕式工法使得這類建材非常難以回收再利用，因此就現況而言，此種外牆外裝形式十分不循環。與其相比，乾式外掛工法雖然較為複雜，但是能讓建材在拆除階段時有更多再次利用的機會，因此較為推薦之外牆外裝形式。此外，模框化的立面系統設計有助於日後建築的維護更新以及建材的再利用，為一重要的循環設計策略。

(4) 設備 (service):
設備是確保建築物能夠正常運作的重要層次，其中包括空調、電氣、給排水、消防、運輸等系統，其生命週期大致為十五年左右。雖然此層之材料總量亦僅佔整體之少數(約一成左右)，但其影響層面廣闊，包括建築能源負荷以及室內舒適度，亦需慎重考量。因著各類型的設備系統所涉之材料和技術皆有所不同，相較其他層次，設備層之複雜度更高。這些設備是否採用回收材料製成，生命週期結束後能否回收再利用，則仰賴各個設備廠商的努力。就建築設計師的角色，則可考慮以下幾點策略：第一，設備系統的明管設計對其日後的維護更新以及再利用有所幫助。第二，採用以租代買的服務模式能夠促進設備系統的優化管理與設計。第三，利用智慧建築系統協助設備系統的管理與維護。

(5) 內裝 (space):
內裝是與使用者最相關的層次，其中包括內牆、天花及地面裝修工程，其生命週期視建築類型而定，短至三年，長至二十年更新一次。此層之材料總量約佔整體之兩至三成左右，對於建築物整體循環度之影響力不可小覷。

(6) 傢俱 (stuff):
傢俱是另個與使用者息息相關的層次，然而其所包含之種類繁多，各自有不同的生命週期，因此難以計算比較。此外，傢俱佔整體建築物總值量之少數(少於一成)。因此，雖然在美國作家 Stewart Brand 所提出之建築物「速度層次模型」(Pace Layer Model)裡面包含傢俱一層，但荷蘭的建材護照公司 Madaster 並未將其加入建築循環度之計算。作者在此亦建議可以依專案需求考量是否加入評估範圍。

雖然目前這套評估方法仍有不少改進的空間，另如何將循環經濟的重點模式(以租代買、共享經濟等)加入評估方法，以及如何反映不同建築類型等等問題，但其已能反映循環經濟之核心精神和原則，可供設計師及決策者融入循環設計思考，以及比較不同方案之成果。期待未來這塊議題能夠引起更多人的重視，讓台灣建築產業能以善待這塊土地的資源與環境。

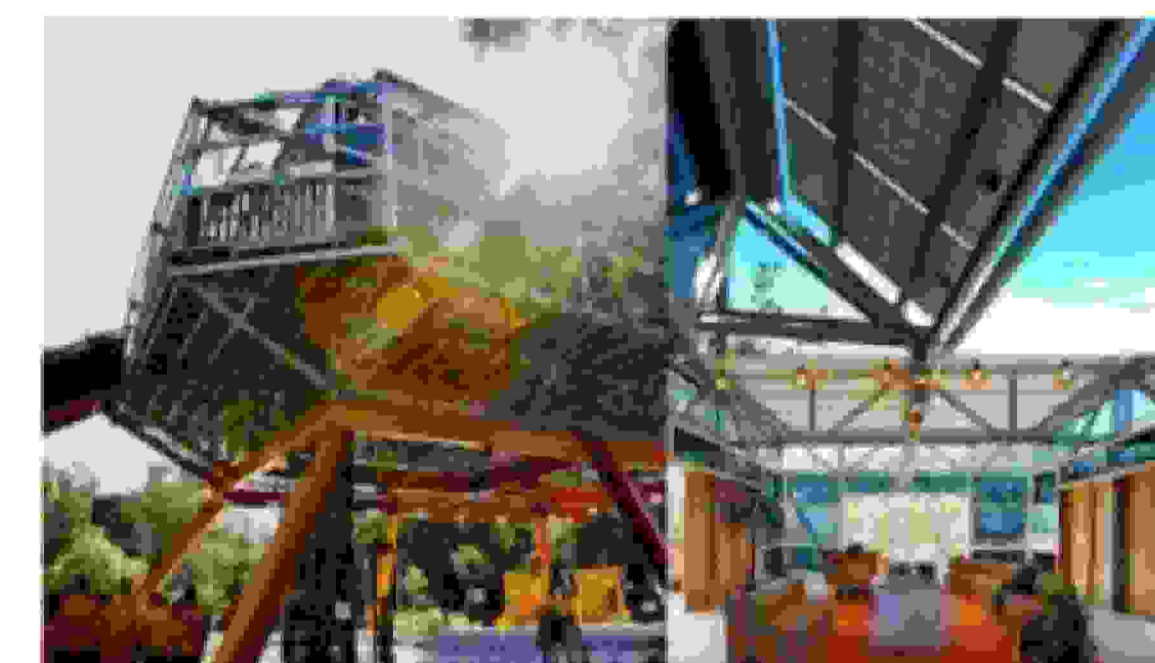


圖1: 台灣循環建築之研究案例-花博館之照片



圖2: 研究案例之建築資訊模型(BIM)



圖3: 艾倫麥克阿瑟基金會所提出之「建築材料流向」簡圖



圖4: 利用「材料循環度指標」計算的案例得分

Category	Material	Quantity	Unit	Value
Construction	Concrete	1000	m³	24000000
	Steel	500	t	12000000
	Brick	2000	m³	12000000
	Wood	100	m³	1200000
	Insulation	500	m³	1200000
	Roofing	1000	m²	1200000
	Window	100	unit	1200000
	Door	100	unit	1200000
	Paint	100	unit	1200000
	Other	100	unit	1200000
Use	Concrete	1000	m³	24000000
	Steel	500	t	12000000
	Brick	2000	m³	12000000
	Wood	100	m³	1200000
	Insulation	500	m³	1200000
	Roofing	1000	m²	1200000
	Window	100	unit	1200000
	Door	100	unit	1200000
	Paint	100	unit	1200000
	Other	100	unit	1200000
End-of-life	Concrete	1000	m³	24000000
	Steel	500	t	12000000
	Brick	2000	m³	12000000
	Wood	100	m³	1200000
	Insulation	500	m³	1200000
	Roofing	1000	m²	1200000
	Window	100	unit	1200000
	Door	100	unit	1200000
	Paint	100	unit	1200000
	Other	100	unit	1200000

圖5: 基於「材料循環度指標」建立之評估工具樣板



圖6: 基於建築資訊模型之線上評估工具之介面設計

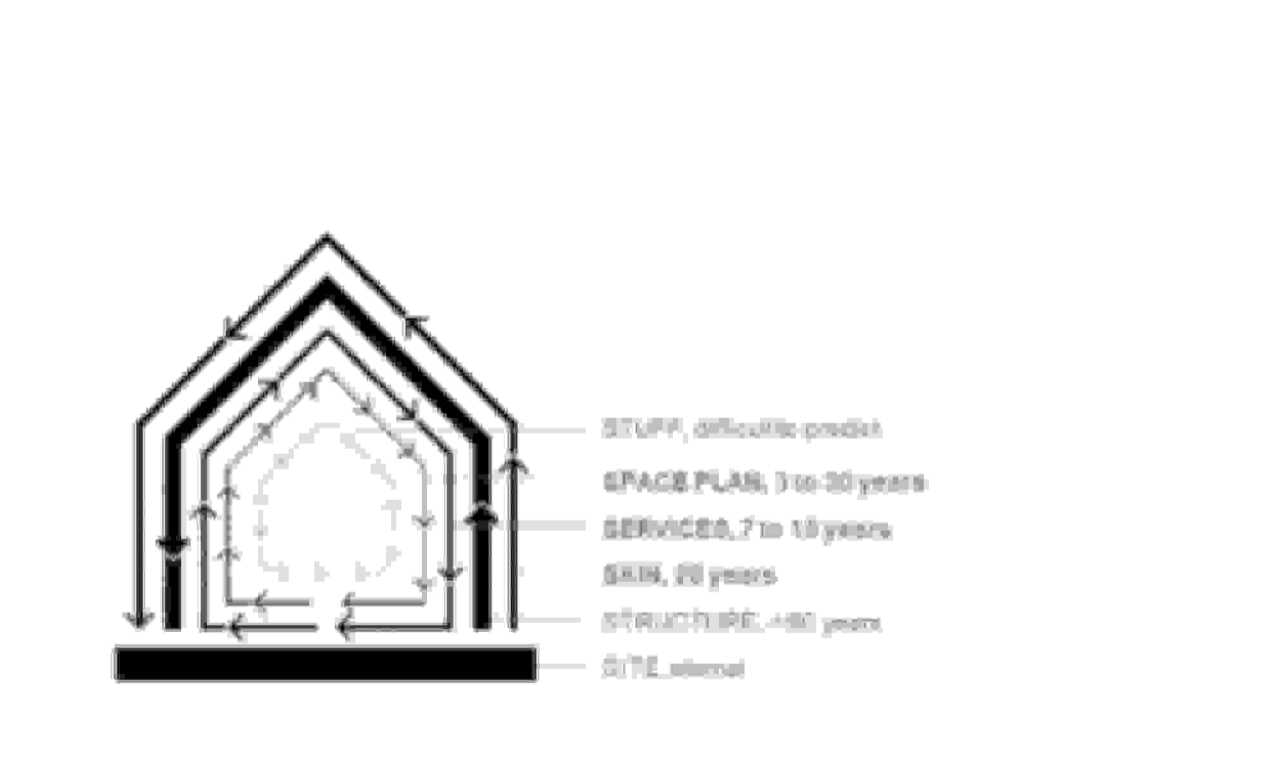


圖7: 建築物「速度層次模型」(Pace Layer Model)

研究心得

感謝上天再次給予的機會，能夠在台灣第一學府徜徉書海，探索世界。感謝家人一路來的支持，讓這位新手媽媽能以勇敢追夢。感謝研究室的同仁為這段旅程帶來歡笑，並感謝指導老師的教誨。再次感謝營建研究院給予的資源，以及中技社的肯定。本人將不負期望，繼續致力於台灣智慧永續城鄉的研究工作，為未來世代打造更美好的建成環境。要感謝的人太多了，就謝天吧。