

2013中華民國營建工程學會第十一屆營建工程與 永續能源研討會

以BIM為基礎之建築物碳排放分析個案探討

劉得廣
中華大學營建管學系
碩士班研究生

余文德
中華大學營建管理學系
研究所教授

國科會計畫編號：NSC NSC 101-2221-E-216 -031 -MY2

摘要

由於全球暖化與極端氣候的威脅，近年來世界各國越來越重視建築永續化之議題，並大力投入建築物環境能源效益評估之研究。營建產業為高耗能產業，其所消耗能源佔美國日常能源消耗量之40%，在台灣亦高達28%。若能改善營建產業的碳排放量，將是有效減低全球暖化的有效方法。雖然目前各國已發展出計算建築物各構件材料碳排放量之指標系統，但因人工計算所需時間甚長，且若進行設計變更則須重新計算，往往曠日廢時，所以建築設計人員鮮少於設計方案決定前進行建築物碳排放量之計算；其結果導致建築設計方案在設計成果完成之後才進行碳排放量檢核，不利於永續設計方案之產生。建築資訊模型(Building Information Model 或BIM)為物件導向之參數式建模方式，能即時進行模型變更及產出模型物件之相關明細資料。將BIM技術應用在建築物碳排放量之自動計算，在國外已經實行多年，然而相關技術仍未應用在國內相關工程中。究其原因，除因國內業主沒有要求外，更因為工程人員尚未熟諳相關技術所致。為了改善此一問題，本研究結合BIM技術與國內外既有之碳排放計算模式，建立一套自動化的建築碳排放計算方法，並以一個實際的建築個案為例，進行實證研究。經過實證案例分析發現，運用BIM為工具能夠即時獲得變更模型之相關資訊，有效縮短計算碳排放量的時間，在設計階段能進行最佳方案的選擇，因此可以讓設計者在建築設計方案發展階段就進行碳排放量之評估，如此有助於產生更具永續性之建築方案。

關鍵詞：建築資訊模型、永續建築、碳足跡、方案評估

BIM-Based Building Carbon Dioxide Emission Analysis—A Case Study

Abstract

Construction sustainability has become a global issue due to the extreme weather and global warming; as a result many efforts have been invested in building energy efficiency evaluation. Construction industry consumes 40% of energy in the USA and 28% of energy in Taiwan. Improvement of energy efficiency in construction industry will impact the global energy consumption significantly. Although there have been many existing systems for calculating the CO₂ emission of a building, they rely mainly on manual operations so that they are time-consuming and costly. Moreover, the change in building design will result in recalculation of CO₂ emissions. As a result, the current practice of CO₂ emission evaluation is conducted after design alternative has been determined. Such a practice does not help the designer in developing a more sustainable design alternative. Building Information Modeling (BIM) is an object-oriented modeling method for building description and modeling, which provides detailed information required for analysis of building performance including CO₂ emission. BIM has been adopted for sustainability analysis of building for a decade in other countries, but not many cases were reported in the local construction projects. Lack of the clients' demands and the insufficient qualified BIM modelers may be primary reasons of the slow adoption of BIM. In order to improve such a situation, the current research aims at proposing a BIM-based CO₂ emission evaluation method that integrates BIM techniques and the existing CO₂ emission evaluation schemes. A real world fire station building is selected for case study: It is found that the BIM-based approach for CO₂ emission evaluation provides an efficient way for building designers in shortening analysis procedure and time for generating more sustainable building designs, so that the energy efficiency of buildings is better improved.

Keywords : BIM, sustainable building, carbon footprint, alternative evaluation.

一、前言

由於全球暖化與極端氣候的威脅，近年來世界各國越來越重視建築永續化之議題，並大力投入建築物環境能源效益評估之研究。為減少環境負荷，最根本的方法就是減少溫室氣體排放。根據蒙特婁協定書所界定影響地球氣候的主要溫室氣體包括CO₂，CH₄及N₂O，其中以CO₂排放量佔99%最高，因此目前國內外研究單位在估算溫室氣體排放時，皆以CO₂排放量為計算指標，若能減少CO₂的排放量，將可有效減少溫室氣體對地球環境的影響[1]。

營建產業為高耗能之產業，依據世界企業永續發展協會(World Business Council for Development, WBCSD)於2009年6月份的研究報告—Transforming the

Market: Energy Efficiency in Building—指出，建築物的耗能約佔全世界耗能總量的40%左右 [2]。其所消耗之能源佔美國日常能源消耗量之40%[3]，在台灣營建產業二氧化碳排放總量，約佔全國總排放量的28.8%[4]。若能改善營建產業之碳排放量，將可有效減低全球暖化之問題。雖然目前各國已發展出計算建築物各構件材料碳排放量的指標系統，但因其多採用人工計算方法，所需時間甚長，且若進行設計變更則必須重新計算，往往曠日廢時，所以建築設計人員鮮少於設計方案決定前進行建築物碳排放量之計算。其結果導致在實務上，建築設計方案常在設計成果完成之後才進行碳排放量之檢核，不利於永續設計方案之產生。

建築資訊模型(Building Information Model 或BIM)為物件導向之參數式建模方法，BIM定義了物件之間的相互關係，倘若一物件遭到改變，則透過參數或定義的物件關聯性，BIM系統將正確自動地改變受到影響的其它物件[5]。傳統2D CAD設計圖在處理變更時，往往必須一一變更各個圖面，因此容易造成掛萬漏一之情形；在導入BIM系統之後，這些個別圖面的變更將自動完成。這對於不同建築設計方案之比較，提供了非常有用的幫助。將BIM技術應用在建築物碳排放量自動計算之技術，在國外已經行之有年，然而相關技術仍未落實在國內的相關工程中。究其原因，除了因為國內業主沒有要求外，更因為相關人員之技術尚未發展成熟所致。為了改善此一問題，本研究結合BIM技術與碳排放計算模式，建立一套自動化之建築碳排放計算方法，並以一個實際的建築個案為例，進行實證研究。應用BIM工具能夠及時獲得變更模型之相關資訊，使計算碳排放量的時間能有效縮短；因此在設計階段能進行最佳方案的選擇，也可以讓設計者在建築設計方案發展階段進行碳排放量之評估，如此將有助於產生更具永續性之建築方案。

本文之架構如下：第二節回顧碳排放及BIM研究相關文獻；第三節說明運用BIM進行碳排之計算步驟與方法；第四節以一個實際個案為例說明設計階段碳排放之計算過程；最後歸納結論與建議。

二、文獻回顧

2.1 永續工程與綠色建築課題研究

「永續營建(Sustainable construction)」之是指營建產業在資源有效利用及顧及生態的原則下，以促進人類社會及經濟永續發展為目標的各項作為[6]。綠建築 (Green Building) 則是基於追求環境生態共生共存之永續目標，於營建工程之規劃、設計、施工與養護、使用與管理及拆除等各階段，降低對自然環境衝擊，促進資源有效利用，確保生態永續發展，並與環境相調和的工程建設[7]。在全球暖化及極端氣候日趨嚴重的今日，永續工程與綠色建築題研究課題已成為國內外熱門探討及研究之議題[1,2,3]。

2.2 建築物碳排放分析

由於營建產業消耗了最多的能源[2,3]，也貢獻了最大部分的碳排放量[4]，為了有效降低建築產業對於溫室氣體的排放，世界各國紛紛開始嚴格

管控建築物之碳排放量，而其首要工作便是進行建築物的碳排放量分析。聯合國組織的政府間氣候變遷小組 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於1996 年及2006 年分別出版「國家溫室氣體清冊指南(Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories)」以提供各國溫室氣體排放量計算之參考[8]。目前國際上對於碳足跡的計算方式，大多以二氧碳當量CO₂e(CO₂ equivalents)作為計算基礎。而各國計算碳足跡的標準，亦界定需計算之生命週期階段，以盤查全部的「碳」排放量。部份國家以生命週期評估 (Life Cycle Assessment, LCA) 方式來蒐集各階段碳排放資料，並建立資料庫來發展碳計算軟體，提供國際及該國企業界的使用[9]。曾正雄[10]探討公寓住宅設備管線二氧化碳的排放量，推算出評估公式，以了解建築物設備管線二氧化碳排放量對環境負荷之影響：溫善政[11]則針對建築物生命週期施工及營運維護階段，探討CO₂排放量計算，並對機電設備常見規格建立碳排放係數資料庫。

2.3 BIM技術回顧

BIM(Building Information Modeling)技術在2000 前後逐漸發展成熟[5]，BIM 能使永續分析能更精確及更有效率，且可作為決策考量時的依據。林逸峰[12]將 BIM 應用在 LEED 認證過程中，找出設計階段所需添加之參數，使欲申請 LEED 認證的專案有一個較簡便的方法，進而減少與 LEED 顧問間之討論、降低變更設計的時間。華祈峯[13]運用 BIM 並配合程式語言及資料庫，開發一套離型系統，可讓使用者在做設計時即時得知設計方案的節能效果、LEED EA credit1 可得到的分數，進而讓業主選擇適合方案。

2.4 小結

依據文獻回顧之結果可知，永續工程為當前國內外產官學界之重要議題，各國皆有相當多的研究，但卻無適當的工具，導致須花費長時間分析且無法有效量化。結合BIM工具可使能源分析數值化及有效縮短分析時間，可比較獲得節能減碳的效益，BIM技術結合建築物碳排放分析，可提供更有效率的永續工程方案比較方法。

三、以BIM為基礎之建築物碳排放分析方法

3.1 建築物碳排放分析項目說明

建築物碳排放分析，一般依據建築物之生命週期分為設計階段、施工階段、營運維護階段及最後的拆除解體階段。本研究主要探討建築物初步設計階段各構件材料之碳排放分析，透過變更建築物排碳量較高之構件材料，以比較材料對於建築物減碳的效益，並達到減碳節能之目標。

3.2 BIM模型建置

本研究採用BIM作為建築資訊建模之方法，目前坊間常見之BIM軟體包括Autodesk Revit、Bentley和Graphisoft ArchiCAD等，其中以Autodesk Revit

為最普遍使用的BIM建模工具平台。因此，本研究採用Autodesk Revit作為建築物各構件模型建置之工具。

3.3 利用BIM模型萃取建築構造項目

本研究利用Revit軟體明細表輸出之功能，將模型參數資訊輸出得到各構件的相關資訊，例如：體積、數量及材料等相關資訊。再應用文獻之碳排放係數資訊，進行碳排放量之計算。

3.4 建築碳排放量計算

本研究碳排放量之計算乃參考張佑生建立之建築相關產品單位生產CO₂放統計表[14]，針對材料生產階段CO₂之排放量探討，其結構材料總碳排之計算公式如式(1)所示：

$$CO_2e_{total} = \sum_{i=1}^N Q_i \times CO_2e_i \quad (1)$$

式中，CO₂e_{total} = 結構材料總碳排放當量 (Ton)

Q_i = 第i項材料之數量 (Kg)

CO₂e_i = 第i項材料之碳排放當量係數 (Ton-CO₂/材料Kg)

3.5 建築碳排放量計算流程圖

本文所提出之建築碳排放量計算流程，如圖1所示，共包括九個步驟：(1) 選定分析個案；(2) 建立個案之Revit BIM模型；(3) 萃取BIM模型之材料數量明細；(4) 計算原方案碳排放量；(5) 變更構建材料設計方案；(6) 計算新設計方案之碳排放量；(7) 若碳排放量有改善則接受方案，否則回到步驟(5)；(8) 持續步驟(5)~(7)，直到滿足建築物碳排放目標為止，比較各設計方案並選擇最佳方案；(9) 結束。

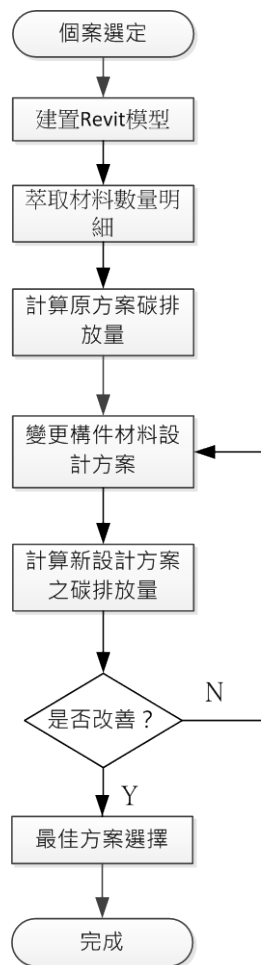


圖1 BIM為基礎之建築物碳排放分析流程圖

四、個案研究

4.1 個案背景

以下以美國印第安納州之 Kokomo 鎮中之消防局為個案，說明本文所提方法之應用。本個案為一棟兩層樓之建築，不同於一般辦公建築，該案例屬於災害受理以及具有派車勤務之公有建築，平時人員以及車輛需待命，因此另一部分設計特色包含挑高之桁架屋頂式之停車空間，以及具有住宿以及餐廳等空間等。整體建築基地約為 10145.6m^2 ，室內總樓地板面積約為 1428.7m^2 以該案例中建築之設計尺寸、材料與規格等數據做為分析資料，其建築物外觀如圖 2 所示：



圖 2 Kokomo fire station 外觀示意圖

4.2 建築資訊模型明細表材料數量分析

透過 Revit 建模，可以輸出建築物模型各材料構件之資訊明細，如表 1 所示。將表 1 的材料總量及材料生產 CO₂ 排量系數[14]套入公式(1)，即可獲得建築物各材料之總排放量如表 2 所示。

表 1 個案主要建築材料組成分析

材料	鋼	混凝土	空心磚	紅磚	剛性隔熱板	屋頂材料	其他	總計
體積(m ³)	68.643	337.96	150.62	53.98	53.21	10.64	111.41	786.46
百分比	9%	43%	19%	7%	7%	1%	14%	100%

表 2 個案主要建築材料碳排放總量分析

材料	鋼	混凝土	空心磚	紅磚	剛性隔熱板	屋頂材料	其他	總計
百分比	9%	43%	19%	7%	7%	1%	14%	100%
數量	538.84T	337.94m ³	10916 塊	35560 塊	56.4T	9.765T	157.81m ³	
*材料生產碳排放係數 kg	940.86	148.95	6.17	0.41	1194.22	878.21	165.8	
總碳排放量 ton	506.973	50.336	67.351	14.579	67.354	8.575	26.164	741.335t

*碳排放係數參考自[14]

4.3 模型構件材料轉換碳排放方案之比較

由上述表 2 可得知，就碳排放係數之比例而言，每噸剛性隔熱板可排出 1194.22kg 最高，其次為噸鋼之 940.86kg。因此，以屋頂設計作為方案比較之對象。依據建築資訊模型所匯出屋頂之相關明細，其總面積為 838m² (包含室內停車場屋頂 348m² 以及辦公空間屋頂 490m²)。由於個案室內停車場屋頂之結構形式為桁架結構，辦公空間則為一般結構形式之屋頂設計，屋頂材料結構之組成分析如表 3 所示，包括：型鋼、剛性隔熱板、EPDM 薄膜等三項材料。將前述三項材料乘上各材料之碳排放係數，可得知停車場屋頂結構之總碳排放量約為 227.4 噸。

表 3 個案車場屋頂建材之碳排放量(面積=348m²)

材料	單位	數量	生產階段碳排放量(kg)	總碳排放量 t
型鋼	T	208.18	940.86	195.868
剛性隔熱板	T	23.42	1194.22	27.969
EPDM 薄膜	T	4.06	878.21	3.565
屋頂碳排放的總量				227.402

因本研究案例屋頂的材料為不透光之材質，牆面及屋頂並無開窗，僅依靠車庫之自動門達到採光功能，因此需要利用日光燈等輔助光源協助照明，不利於能源效率。所以為有效達成減少碳排放量以及增加室內採光效率，本研究提出兩個方案如下：

方案一：採用鋁板帷幕工法取代原先之屋頂材料—鋁板帷幕工法以輕量化之鋁板材料取代原先屋頂材料結構，其屋頂外觀如圖 3 所示。

方案二：採用鋁板帷幕工法與玻璃帷幕工法的結合—採用鋁板帷幕工法低碳排放量的特性，以及玻璃帷幕工法採光的特性形成複合式之屋頂結構其屋頂外觀如圖 4 所示



圖 3 鋁板帷幕工法概念圖(方案一)



圖 4 鋁板與玻璃帷幕複合式屋頂工法(方案二)

表 4 屋頂原方案及方案一、二價格計算

	項目名稱	單位	數量	單價	複價	總計 NT
原方案	剛性隔熱板	M ³	22.1	96.00	2121.6	808368
	EPDM 薄膜	m ²	348	20.00	6960.0	

	型鋼	才	3828	4.67	17864.0	
鋁板帷幕 (方案一)	鋁板帷幕(10mm)	才	3828	155	593340	662940
	五金鐵件	m ²	348	200	69600	
鋁板與玻璃 帷幕(方案二)	鋁板帷幕	才	2593.4	155	401977	644421
	玻璃帷幕	才	1234.6	140	172844	
	五金鐵件	m ²	348	200	69600	

表 5 鋁板帷幕材料排碳量計算(面積=348m²)

	最大設計風壓(kg/m ²)	生產階段碳排放量(kg)	鋁板幕碳排放總量 kg	鐵件總碳排放 kg	總碳排放量 t
鋁板帷幕	0	73.3	25508.4	1622.87	27.131
	1	78.26	27234.48		28.857
	2	83.22	28960.56		30.583
	3	88.18	30686.64		32.309
	4	93.14	32412.72		34.035
	5	98.1	34138.8		35.761

表 6 鋁板與玻璃複合式帷幕排碳量計算(面積=348m²)

	最大設計風壓(kg/m ²)	鋁板帷幕碳排放量 kg(面積=236M ²)	玻璃帷幕碳排放量 kg(面積=112M ²)	鐵件總碳排放 kg	碳排總和 T
鋁板與玻璃 複合式帷幕	0	17298.8	6874.56	1622.87	25.796
	1	18469.36	7549.92		27.642
	2	19639.92	8225.28		29.488
	3	20810.48	8900.64		31.333
	4	21981.04	9576		33.179
	5	23151.6	10251.36		35.025

將此二方案應用建築資訊模型輸出模型資訊明細，進行材料成本之估算如表 4 所示。應用玻璃帷幕之材料清單與價格，加上五金配件後之材料預算約為 612480 元；鋁板帷幕之材料清單與價格，加上五金配件約為 662940 元。方案比較碳排放量之估算也應用模型資訊明細之功能，材料數量對應材料生產 CO₂ 排量系數[14]套入公式(1)中，玻璃帷幕以及鋁板帷幕之材料碳排放量分別彙整成如表 6 與表 7 所示。其中並針對 0~5 級不同之設計風壓進行計算，並加上五金鐵件的碳排放量計算[14]，可得知以玻璃帷幕針對不同之設計風壓之最低至最高值之排碳量從 22.983t~33.475t；以及鋁板帷幕最低至最高值之排碳量從 27.131t~35.761t。

4.4 個案研究小結

依據上述表 5 及表 6 碳排放分析與原方案比較結果可知，本研究所提出之兩項方案之碳排放量皆遠低於原方案屋頂材料之碳排放量；此外在材料成本方面也達到節省之效益。可見應用 BIM 工具進行碳排放分析可快速比較不同設計方案，並減少計算碳排放量的時間，因此可幫助設計者進行最有方案之選擇，達到永續及減碳目標。

五、結論

5.1 結論

本研究提出一種以BIM為基礎之建築碳排放分析方法，該方法可有效運用建築資訊模型之資訊明細於工程設計階段進行碳排放量的計算與方案分析。相較傳統運用人工計算碳排放量方法，本文所提出之方法能夠大幅的減少計算的時間，使設計者能在設計階段進行不同方案碳排放量之計算及方案永續性比較，因此更能夠達到節能減碳之效益，以提升建築物之永續性。

5.2 建議

本研究已初步完成BIM與建築碳排放計算方法之整合，未來尚可朝以下方向研究：

- 1、本研究目前採半手動方式，將建築資訊明細一一套入各項材料生產CO₂排放係數，以得到總排放量。未來可建立自動化系統，將建築資訊明細自動連結碳排資料庫，以更快速獲得總碳排放量。
- 2、本研究目前所探討之碳排放量僅為設計階段，未包含建築物其它階段，在後續之研究可納入建築物施工階段及營運維護等階段，以提升建築物全生命週期之碳排放量效能。

六、致謝

本研究承蒙國科會專題研究計畫補助（計畫編號：NSC101-2221-E216-031-MY2），特此申謝。

七、參考文獻

- 1.張又升，「RC 建築物生命週期環境負荷評估—以耗能量與溫室氣體排放量解析」，成功大學建築系碩士論文，1997
2. Energy Efficiency in Building Transforming The Market - Free PPT
freedownloadb.com/ppt/energy-efficiency-un-buildings-transformingw
www.cnfi.org.tw/wto/admon/upload/21/Kyoyo%20Protocol.doc，(May,2012),
accessed 2013/10.

3. United Nations Environment Programme, “Buildings and Climate Change”, Sustainable United Nations, 2009.
4. 郭柏巖、趙又蟬、林憲德,「台灣建築物生命週期水電管線二氧化碳排放量之研究」, 嘉南學報, 第三十三期, 第 187~197 頁, 2007。
5. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., and Liston, K., BIM handbook, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., NY, USA, 2011.
6. 許維庭,「國家層級永續營建評估指標建立之研究」, 國立中央大學土木工程學系博士論文, 2011。
7. 陳韶賜、周鼎金、游本志,「推動綠營建工程評估審議制度及評估指標之研究」, 委託研究計劃報告, 行政院公共工程委員會, 2001。
8. IPCC, Revised 1996 IPCC Guidelines for Greenhouse Gas Inventories, OECD, 1996.
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>, accessed 2013/10.
9. 葉怡秀,「我國產品碳足跡發展現況分析」, 工研院綠能所研究報告,
<https://w3ap.itri.org.tw/idbcfp/index.aspx>, 2013年9月查詢。
10. 曾正雄,「公寓住宅設備管線二氧化碳排放量評估」, 國立成功大學建築研究所碩士論文, 2006。
11. 溫善政,「建築物施工暨營運階段碳足跡探討-以嘉創中心為例」, 中華大學營建管理研究所碩士論文, 2013。
12. 林逸峰,「以BIM為基礎評估LEED指標之適用性分析」, 國立成功大學土木工程學系碩士論文, 2011。
13. 華祈峯,「BIM自動化輔助節能設計與LEED EA Credit 1之初步整合系統建立」, 國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文, 2010。
14. 張又升,「建築物生命週期二氧化碳減量評估」, 國立成功大學建築研究所博士論文, 第三章, 第66~68頁, 2002。