

國立成功大學
土木工程研究所
碩士論文

工程碳足跡與 BIM 之結合-以建築結構為例

**Linking BIM with construction carbon footprint
- building structure as an example**



研 究 生：陳振洋

指導教授：張行道

中華民國一百零五年七月

國立成功大學
碩士論文

工程碳足跡與 BIM 之結合-以建築結構為例

Linking BIM with construction carbon footprint—
building structure as an example

研究生：陳振洋

本論文業經審查及口試合格特此證明
論文考試委員

劉玉雯

柯千求

張行道

馮重偉

指導教授：張行道

系主任：胡宣德

胡宣德

中華民國 105 年 7 月 11 日

摘要

工程碳足跡為工程中材料與機具施作項目，於全生命週期階段產生之二氧化碳排放量總合，計算碳足跡能夠量化工程對於環境造成之影響。工程要有效減碳，必須從設計階段便思考減碳方針，然而現行的碳足跡計算多在細部設計確定之後，藉由估算設計圖產出工項標單，並由工項標單中之數量與碳排放係數得出總量，在此計算方法下，要在設計前端回饋有困難，且變更設計所提高之成本與減碳效果無法即時呈現。

本研究建立碳足跡與工項對應資料庫，並導入至 BIM。分析應用 BIM 於碳足跡，一為利用 UNIFORMAT II 分類架構對 BIM 模型元件編碼，藉以將模型元件依使用功能分類，擷取元件數量以及量體資訊以關聯至工項；二為拆解工項之材料、機具之碳足跡資訊，得出工項碳排放係數，建立工項碳足跡資料庫。兩者彙整後，工項數量及碳排放係數相乘即為工項耗用的碳排放量，加總所有工項產出工程碳足跡。

藉由賦予 BIM 模型元件 UNIFORMAT II 編碼並解析其與工項、碳足跡之間的關係，能由 BIM 模型擷取數量資訊，得出工程碳足跡。簡化計算碳足跡以及標單產出之流程，設計完成即可得出工程碳足跡，檢討與改善便能提至前端，增進其效率。最後提出主體工程工項建模規則及資訊規範，確保於 BIM 模型建置階段便考量碳足跡計算需求，並納入所需資訊，減少 BIM 模型因資訊不足而需反覆修改甚至重新建置的問題。

關鍵字：碳足跡、碳排放係數、BIM、UNIFORMAT II、建模規則

Abstract

Linking BIM with construction carbon footprint -building structure as an example

Chen-Yang Chen

Prof. A. S. Chang

Department of Civil Engineering

National Cheng Kung University

SUMMARY

A construction project's carbon footprint is the sum of CO₂ emission generated from material production and energy consumption of equipment. Calculating construction carbon footprint can quantify the environment impact caused by a construction project. The effective way to reduce CO₂ emission is to take sustainable measures into account at early design stage. However, the current carbon footprint calculations are mostly based on the work items listed in the bill of quantities after design is finished, which would be difficult to get feedbacks while design is still going. Therefore, the carbon and cost of each sustainable measure can not be comparable before the bill of quantities comes out.

This research focused on: (1) applying BIM (Building Information Modeling) to calculate construction carbon footprint, and (2) establishing specifications of BIM model to make sure that the calculation framework this research created can be implemented. By giving BIM components UNIFORMAT II code and analyzing its corresponding work items, the quantity of each work item can be extracted from the BIM model. Consequently the quantities used in carbon footprint calculation can be obtained from the BIM model instead.

A database was built to store the analyzed information such as correspondences of UNIFORMAT II codes and work items, and CO₂ emission factors of each work item. Overall, taking building structure as an example, the feasibility of engaging BIM to calculate construction carbon footprint has been shown.

Keywords: Carbon footprint, CO₂ emission factor, BIM, UNIFORMAT II, BIM specification.

INTRODUCTION

With the rising awareness of sustainable issues, the construction industry has been concerned about reducing impacts to the environment. A construction project's carbon footprint is the sum of CO₂ emission generated by materials and energy consumption of equipment. Calculating construction carbon footprint can quantify the environment impact caused by a construction project. Public construction projects have been requested that 10% of the budget should contain green concept, which means green materials, green design, and green construction techniques to take sustainability into account (Chen, 2013).

BIM development has become mature gradually. Its three-dimensional concept is assembled by BIM components. By attaching building information, BIM models can be built to simulate real situation, analyze possible conflicts, and solve problems beforehand over all life cycle stages.

The main objectives of this research were: (1) applying BIM to calculate construction carbon footprint, and (2) establishing specifications of BIM model to make sure that the calculation framework created in this research can be implemented.

MATERIALS AND METHODS

To link BIM with construction carbon footprint, this research reviewed previous studies at first, then used a building structure as a case to study. Further details are explained as below.

(1) Literature review

Literatures of carbon footprint calculation and BIM quantity takeoffs were reviewed. Also, two different classification, MasterFormat and UNIFORMAT II, were analyzed to help to classify their correspondence.

(2) Case study

A building was used as a case, and its bill of quantities was analyzed to find out how UNIFORMAT II can be used in practice. By giving BIM components UNIFORMAT II codes and analyzing its corresponding work items, the quantity of each work item can be extracted from the BIM model. Consequently the quantities used in carbon footprint calculation would be obtained from BIM model instead. On the other hand, the work items from the bill of quantities can be broken down into raw materials and equipment used, so that the CO₂ emission factors can be searched, respectively. Overall, multiplying each raw material and equipment by its CO₂ emission factors, the carbon footprint of

work items can be calculated.

(3) Database building

To store the analyzed information such as correspondences of UNIFORMAT II codes and work items, and CO₂ emission factors of each work item, a database was built. With the database, carbon footprint can be calculated by inputting quantity information classified by UNIFORMAT II. The system would automatically calculate the carbon footprint through following the correspondences of UNIFORMAT II and work items.

RESULTS AND DISCUSSION

This research proposed a framework which can be followed to apply BIM and UNIFORMAT II to construction carbon footprint calculation. The results of conducting a building structure as an example verify that construction carbon footprint calculation to be accelerated with BIM technology. Using quantity takeoffs of BIM model instead of bill of quantities allows construction carbon footprint to be calculated before the detail design is finished, which means that the iteration time of design and redesign can be reduced.

The results show that concrete construction produces 2,808,577 kgCO₂ in total, and the material production is the largest contributor, about 96.1%. The CO₂ emission of concrete material transportation, which is 2.8%, is 2 times higher than the CO₂ emission generated by equipment operation.

CONCLUSION

To conclude, this research has shown that BIM technology can be used for carbon footprint calculation. A framework was proposed for users to follow while applying UNIFORMAT II in practice. Lastly, this research stipulated a set of BIM specification, which can assure that the BIM components are cut rationally, data needs of calculating carbon footprint would be considered while modeling BIM models, and needed information is included in the BIM model.

Future research is suggested as follow: (1) BIM quantity takeoffs can be extracted by plug-in program to enhance the accuracy, and (2) other construction work, such as interior decoration, or MEP system, can be analyzed to gain complete construction carbon footprint.

誌謝

時光飛逝，在台南絢麗的兩年過去，還鄉的學子仍未衣錦，幸獲滿載的知識及閱歷。回想路途上，要感謝的著實太多了，謝天之餘，亦要期許自己能貢獻所學於社會，幫助所及，意義人生。

感謝恩師 張行道教授，兩年間於論文及人生的指導，教誨我嚴謹的處世態度，學生感激之情溢於言表，惟能謹記別「想得太多，做得太少」，盼如老師所言，終成為有決斷力的領導者。

感謝口試委員 馮重偉教授、柯千禾教授、劉玉雯教授，不吝指教，提供精闢的建議使本論文更趨完整。感謝能在成大土木所工程管理組的修課期間，接受 張行道老師、馮重偉老師、沈芳滢老師的教導，得以探究如何於工程專案中做好管理，以達成如期、如質、如算之目標。

感謝張門學長姐鐘青、子健、士傑、淨如、筱蓉於修課及研究上的幫助。感謝張門學弟妹冠今、琮鈞、立庭、乃容、雍容、祖寧、鑫鈺、星鴻處理各類雜務，並在我們畢業之時費心籌備，給予最大的祝福。感謝同屆夥伴翊亘、子涵、柏仁、豪威、暉倫、元佑、茂堂、家尹、安琪、Claudia、明濬兩年來的包容、照顧與陪伴，細數自頂樓夜烤、魔術之王爭奪秀、營管盃征戰摘銀至唱歌、桌遊、吃好吃的，研究之路上的歡笑與汗水仍恍如昨日，但願兩年間的相互扶持，能化作更堅韌的情誼，回憶的老酒仍待未來的我們細細品味呢！

最後感謝我的家人，給予我最大的支持，總是替我設想，只求我的人生少走冤枉路。願我能汲取您們的智慧，開創燦爛的未來。

窮理致知，修齊治平。遠大目標，堅定心意，縮小自己。勉勵自己能有寰宇的格局與濟世的胸懷，分享生命中的幸運，永遠保持飢餓、保持愚笨，讓成大以我為榮。

目錄

摘要	i
Abstract	ii
誌謝	v
目錄	vi
表目錄	viii
圖目錄	x
第 1 章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究方法與流程	2
1.3 研究範圍與限制	3
1.4 論文內容架構	4
第 2 章 文獻回顧	6
2.1 碳足跡	6
2.1.1 溫室氣體排放	6
2.1.2 碳足跡計算方法	8
2.2 建築資訊模型	10
2.2.1 BIM 沿革	10
2.2.2 BIM 發展現況	12
2.3 編碼與 BIM 的關係	14
2.3.1 MasterFormat 編碼	14
2.3.2 UNIFORMAT II 編碼	16
2.3.3 MasterFormat 與 BIM	18
2.3.4 UNIFORMAT II 與 BIM	21
第 3 章 BIM 碳足跡整合系統分析	24
3.1 現有 BIM 碳足跡計算工具	24
3.1.1 國外計算工具	24
3.1.2 國內計算工具	26
3.2 BIM 碳足跡整合架構	27
3.2.1 碳足跡計算功能需求	27
3.2.2 BIM 碳足跡整合資訊需求	28
3.2.3 BIM 碳足跡整合建構流程	30
3.3 Microsoft Access 資料庫	32
3.3.1 Access 資料庫功能	32
3.3.2 Access 資料庫建置流程	33
3.4 案例驗證	34

3.4.1	案例背景	35
3.4.2	案例 BIM 模型	36
第 4 章	BIM 碳足跡整合前置作業	38
4.1	解析 UNIFORMAT II 編碼	38
4.1.1	實務應用 UNIFORMAT II	38
4.1.2	編碼新建規則	41
4.1.3	編碼納入規則	42
4.2	實證解析 UNIFORMAT II 分類成果	43
4.2.1	下部結構	43
4.2.2	外殼	44
4.3	建立元件工項相關性	45
4.3.1	對應編碼至工項	45
4.3.2	工項數量資訊相關性分析	48
4.4	解析工項碳足跡	50
4.4.1	工項拆解原則	50
4.4.2	實證工項碳足跡解析成果	51
第 5 章	BIM 碳足跡整合資料庫建置	56
5.1	BIM 碳足跡整合資料庫建置	56
5.1.1	BIM 模型匯出數量明細	56
5.1.2	建立資料表	59
5.1.3	建立資料關聯	61
5.1.4	建立查詢	63
5.1.5	建立表單	66
5.2	建模規則建立	67
5.2.1	建模規則考量	67
5.2.2	主體工程工項建模規則及資訊規範	68
5.3	實證 BIM 碳足跡整合計算成果	71
5.3.1	案例輸入資料	71
5.3.2	BIM 碳足跡整合計算結果	73
第 6 章	結論與建議	79
6.1	結論	79
6.2	建議	81
	參考文獻	82

表目錄

表 2.1 建築碳足跡盤查之建議範圍	7
表 2.2 LOD 發展程度	11
表 2.3 MasterFormat 1997 綱要分類	14
表 2.4 UNIFORMAT II 分類概況-以 A 類下部結構為例	17
表 2.5 UNIFORMAT II 與 MasterFormat 比較表	18
表 3.1 案例工程概述	35
表 3.2 工程項目金額	35
表 4.1 案例 BIM 結構模型涉及編碼	43
表 4.2 牆元件明細	44
表 4.3 元件對應工項-以混凝土樓板為例	46
表 4.4 結構用混凝土工項細目碼編列規則	48
表 4.5 初步解析元件與工項關聯性	49
表 4.6 案例結構工程工項	51
表 4.7 各機關單位編列混凝土工項單價分析表比較	52
表 4.8 案例與本研究編列之混凝土工項單價分析比較	53
表 4.9 本研究解析之混凝土工項單價分析表碳排放資訊	54
表 5.1 工項編碼用資料表-鋼筋工項為例	59
表 5.2 關聯用資料表	59
表 5.3 輸入用資料表-組合代碼輸入	60
表 5.4 輸入用資料表-材料運輸機具	60
表 5.5 工項資料表合併至工項總表	64
表 5.6 工項數量計算總表	65
表 5.7 初步碳足跡計算成果	65

表 5.8 工項總碳排放量	66
表 5.9 工程細項材料運輸碳排	66
表 5.10 混凝土建模規則及資訊規範	69
表 5.11 鋼筋建模規則及資訊規範	70
表 5.12 模板建模規則及資訊規範	71
表 5.13 案例鋼結構工項	75
表 5.14 連續壁工項工程細項(每公尺連續壁)	75
表 5.15 工程細項數量總表-以混凝土、鋼筋、模板工項為例	76
表 5.16 工項總碳排放量計算結果	77
表 5.17 工程細項碳足跡組成	77
表 5.18 材料運輸機具碳足跡計算結果	78
表 5.19 混凝土工項碳排放組成	78

圖目錄

圖 1.1 研究流程.....	3
圖 2.1 工項拆解分析流程.....	9
圖 2.2 BIM 應用於各專案類型的比例	13
圖 2.3 設計(施工前階段)BIM 應用之作業.....	13
圖 2.4 工程細目碼架構.....	16
圖 2.5 元件嵌入工程會 PCCES 編碼(賴東延 2011).....	19
圖 2.6 模型建立至預算書產出流程(陳育群 2013).....	20
圖 2.7 Revit 內組合代碼欄位	22
圖 3.1 國外應用 BIM 於碳足跡計算	24
圖 3.2 整合資訊示意.....	27
圖 3.3 BIM 碳足跡工項整合資料庫資訊需求.....	29
圖 3.4 BIM 碳足跡整合建構流程	31
圖 3.5 資料庫建置流程.....	33
圖 3.6 案例結構模型.....	36
圖 3.7 案例建築模型.....	37
圖 4.1 傳統工程分類與 UNIFORMAT II 分類之對應.....	39
圖 4.2 UNIFORMAT II Level 3 元件分類.....	40
圖 4.3 BIM 軟體 Revit 內建組合代碼-結構柱	40
圖 4.4 組合代碼-A 下部結構.....	44
圖 4.5 依結構柱工法編列編碼.....	45
圖 4.6 UNIFORMAT II 與 MasterFormat 編碼對應	46
圖 4.7 對應 UNIFORMAT II 至元件與工項.....	47
圖 5.1 數量明細表性質	57

圖 5.2 體積欄位格式設定-單位符號.....	57
圖 5.3 體積欄位格式設定-計算總數.....	58
圖 5.4 匯出明細表格式設定.....	58
圖 5.5 資料關聯.....	61
圖 5.6 正規化後之資料關聯.....	62
圖 5.7 運用查詢功能總計組合代碼數量資訊.....	64
圖 5.8 利用表單輸出計算結果-工項總數量為例.....	67
圖 5.9 利用表單建立資料庫維護介面-混凝土工項為例.....	67
圖 5.10 BIM 碳足跡整合資料庫起始畫面.....	72
圖 5.11 輸入案例組合代碼數量資訊.....	72
圖 5.12 輸入材料運輸機具假設.....	73
圖 5.13 工項總數量計算結果.....	73

第1章 緒論

我國 2010 年成立行政院節能減碳推動會，頒布「國家節能減碳總計畫」，綜整各級機關相關節能減碳計畫，加速落實各部門節能減碳策略措施，期能形塑節能減碳社會(綠能低碳推動會，2015)。對於營建產業，工程碳足跡即為工程中材料與機具施作項目於全生命週期階段產生之二氧化碳排放量總合(環保署，2010)，計算碳足跡能夠量化工程對於環境造成之影響，進而思考如何改善。

公共建設亦被要求預算之 10% 須包含綠色內涵，而各項公共建設均應採用環保、節能減碳之綠色材料、綠色設計、綠色施工等方法，配合永續發展之目的達成(陳昭秀，2013)。

建築資訊模型(Building Information Modeling, BIM)近年發展日趨成熟，其三維概念以元件構成，能附加涵蓋全生命週期之建物資訊，並在虛擬空間建置模型，以便事先模擬、分析潛在的衝突，進而了解並解決問題(Smith, 2007)。

1.1 研究動機與目的

BIM 對於營建產業，能把全生命週期之資訊納入。運用 BIM 技術於設計先期階段計算碳足跡，可以方便設計者即時呈現減碳成果。目前國外開發成熟的 BIM 碳足跡計算軟體多以設計者的角度切入，藉由能源耗用分析軟體分析，注重的是綠色設計如何在營運階段體現。全生命週期碳足跡中，營運階段所佔碳排放量為 80% 以上(Okoroh et al, 2012; Biswas, 2014; Wang, 2015)，故如何減少於營運階段日常耗能為建築設計者需考量之減碳熱點(Miller et al., 2015)。若以施工的角度思考，如何減少工程完工前之碳排放量，藉由使用低能耗機具、縮短材料及機具運輸距離、更換使用減碳材料及工法等，皆可為節能減碳盡一份心力。

因此本研究以營造廠的角度切入，探討工程完工前之碳排放量，應用 BIM 技術簡化碳足跡計算，期能將碳足跡計算與檢討提前，研究目的有二：(1)提出應用 BIM

計算以整合工程碳足跡，(2)建立應用本研究計算之建模規則與資訊規範。

1.2 研究方法與流程

研究方法先回顧文獻、分析案例，並建置資料庫儲存解析成果，以下詳細說明。

(1) 文獻回顧

分別回顧碳足跡及 BIM 相關文獻，探討 BIM 於實務編碼之應用，並比較 MasterFormat 與 UNIFORMAT II 編碼以於後續對應關聯。此外，亦回顧現有應用 BIM 計算碳足跡之工具，了解碳足跡計算需求以擬定研究開發方向。

(2) 案例分析

本研究以某建築工程為對象，取得其工程相關表單，如詳細價目表、單價分析表、相關圖說及 BIM 模型，以主體工程工項為例，分別探討 UNIFORMAT II 編碼編列準則、工項碳足跡資訊及元件工項相關性，以應用 BIM 計算碳足跡。

(3) 資料庫建置

將解析成果儲存於資料庫，建置「資料表」與「關聯」為資料庫架構；以「查詢」建立計算功能；建置「表單」為使用者介面。建置成果得以自動化計算工程碳足跡。

研究流程如圖 1.1 所示，首先由文獻回顧了解碳足跡計算方法，並了解編碼於 BIM 之應用，比較 MasterFormat 與 UNIFORMAT II 編碼之差異。再分析現有應用 BIM 計算碳足跡之文獻與工具，擬定開發方向以建立 BIM 碳足跡整合建構流程。

再來探討 UNIFORMAT II 編碼編列規則，對應至工項並探討元件工項相關性，定義工項數量資訊於編碼數量取得的方式。工項需解析碳足跡組成，藉由將工項拆解至細項以了解材料、機具使用，查找碳排放係數以求得工項碳足跡。

接著建置 Microsoft Access 資料庫，將解析成果儲存，並得以自 BIM 模型提取 UNIFORMAT II 數量資訊至資料庫，依循關聯性自動化計算工程碳足跡。最後以案例主體工程，實際計算應用 BIM 計算工程碳足跡，呈現 BIM 碳足跡整合計算成果，並

提出適用於碳足跡計算之建模規則與資訊規範，供 BIM 模型建置階段依循。

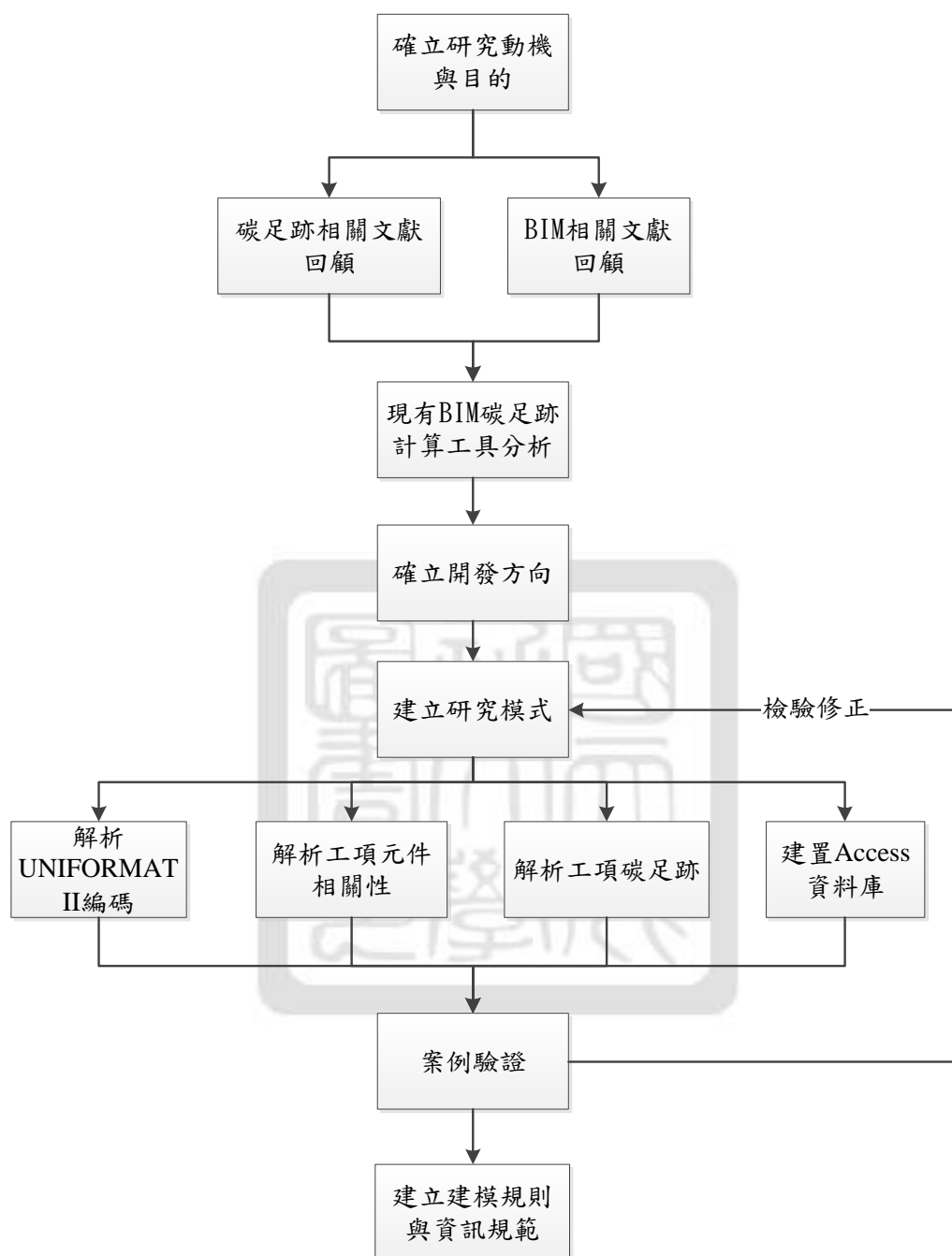


圖 1.1 研究流程

1.3 研究範圍與限制

本研究以某建築工程為例，研究範圍為主體工程工項，提出 BIM 碳足跡整合架構，研究限制如下：

(1) 採用之碳足跡計算方式以工項為基準，未計算間接碳排放量。

間接碳排放量為現場使用能源之碳排，包括場地照明、工區用電量、工區用水等，使用情形於 BIM 模型內無法體現，需另外假設計算。

(2) 案例 BIM 模型精細度影響碳足跡計算結果。

碳足跡計算為彙整能資源耗用以轉換為碳排放量，數量資訊若從 BIM 模型取得，則模型繪製的精細度與正確度將大幅地決定碳足跡計算結果。案例 BIM 模型未繪製鋼筋，無法直接自模型取出數量資訊，僅以混凝土估算無法產出正確鋼筋數量。應用 BIM 計算碳足跡，適用於初步設計後即時檢視碳足跡計算成果，藉以提供設計者思考綠色材料及工法，減少工程碳足跡。

(3) 僅考量主體工程工項，未完整計算完整碳足跡。

本研究重點在於提出 BIM 碳足跡整合架構及應用碳足跡計算之建模規則及資訊規範，供實務上使用 BIM 計算碳足跡時參照。僅以主體工程工項為例，計算結果不足以代表完整碳足跡計算成果，工程其餘項目尚需後續研究解析補足，以呈現完整計算結果。

1.4 論文內容架構

本研究分為：(1)解析 UNIFORMAT II 編碼於碳足跡計算，(2) 建立工項及元件相關性，(3) 解析工項碳足跡，(4)BIM 碳足跡整合資料庫建置四個階段。

第一章為緒論，敘述本研究之研究動機與目的、研究方法與流程、研究範圍與限制以及論文內容與架構。第二章回顧文獻，回顧 BIM、碳足跡及工程編碼相關文獻，針對相關領域深入了解與剖析，以此擬定研究方法。第三章分析 BIM 碳足跡整合系統，比較現有 BIM 碳足跡計算工具，已擬定本研究開發方向及建構流程。第四章為 BIM 碳足跡整合前置作業，解析 UNIFORMAT II 編碼應用，建立元件與工項相關性，並解析工項碳足跡。第五章建置 BIM 碳足跡整合資料庫，將解析成果儲存至資料庫以自動化計算工程碳足跡；亦建立建模規則供依循，確保建置之 BIM 模型

滿足碳足跡計算需求；後以案例主體工程為例，做完本研究模式之驗證。第六章為結論與建議，總結研究成果，提出研究結論及後續研究之建議。



第2章 文獻回顧

本章回顧碳足跡理論以及建築資訊模型文獻發展，考量碳足跡計算準則以確立需求，並檢討現有碳足跡輔助計算工具。2.1 節介紹碳足跡，2.2 節介紹建築資訊模型，2.3 節說明編碼與 BIM 的關係。

2.1 碳足跡

全球暖化問題日益嚴重，世界各國紛紛將節能減碳列入施政方針，溫室氣體減量成為全球趨勢。我國亦遵循國際溫室氣體相關標準規範，目前國內產品與服務生命週期溫室氣體排放量評估依循 PAS 2050 之步驟，準則引用國際標準組織 ISO 14040(2006) 對生命週期評估之定義：「對產品系統自原物料的取得到最終處置的生命週期中，投入和產出及潛在環境衝擊之彙整與評估」。考量之環境衝擊包含應資源使用、人體健康及生態影響等，其中造成氣候變遷之環境衝擊以溫室氣體排放量為主要影響因子。以下 2.1.1 節介紹溫室氣體排放，2.1.2 節介紹碳足跡計算方法。

2.1.1 溫室氣體排放

根據我國環保署產品與服務碳足跡計算指引，計算碳足跡時應涵蓋所有 IPCC 所公布之溫室氣體。京都議定書列管的六類溫室氣體：二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亞氮(N₂O)、氫氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)及六氟化硫(SF₆)。國外文獻指出其中以二氧化碳造成影響最為顯著(Gaussin et al., 2013)，於所有溫室氣體中佔 82.9% (Todd et al., 2001)；國內亦有研究結果顯示：化石能源產生之溫室氣體，二氧化碳(CO₂) 佔 99% 以上的比例(張又升，1997)，余品蓁(2012)亦指出 CO₂ 為大氣中濃度最高的溫室氣體，約佔 92.6%。衡量一項活動或產品之生命週期過程，會直接或間接產生溫室氣體，需轉換為同一單位表示(Wiedmann and Minx 2007)，國內外研究單位在衡量溫室氣體所造成之環境衝擊，皆以二氧化碳當量(CO₂e)為單位。使用 CO₂e 為指標並不

只能衡量目標產品對溫室效應之影響，二氧化碳減量代表之意義亦有節約能資源、減量廢棄物等，如此能減少資源開發以及排放廢棄物對環境的危害，降低環境負荷(張又升，1997)。

根據環保署 2010 年頒佈之「產品與服務碳足跡計算指引」，碳足跡評估邊界應包含：(1)原物料的製造過程排碳，(2)能源供應與使用排碳，(3)製造過程包括耗材用的排碳，(4)製造場所營運的排碳，(5)運輸排碳，(6)儲存排碳，(7)使用階段排碳，(8)最終處理階段排碳。依據營建業產品性質，工程碳足跡應包含全生命週期之碳排放，從建材生產運輸、營造施工、建築使用、維護更新到拆除廢棄，詳細項目如表 2.1 所示。

表 2.1 建築碳足跡盤查之建議範圍

生命週期五階段	碳足跡盤查範圍
建材生產運輸	原材料取得耗能
	原材料運輸耗能
	建材生產耗能
	成品運輸耗能
營造施工	施工機具耗能
建築使用	空調設備耗能
	照明設備耗能
	生活熱水設備耗能
	室內電器設備耗能
	給排水汙水設備耗能
	升降設備耗能
維護更新	建材生產運輸耗能
	施工機具耗能
拆除廢棄	營建廢棄物運輸耗能

(資料來源：林憲德等，2013)

行政院環保署(2010)訂定碳足跡之計算過程以 PAS 2050 為基準，可利用監測儀器直接量測、質能平衡或排放係數等方法來計算，但在建築產業通常只採用「排放係數法」。藉由碳盤查建置 CO₂ 排放係數資料庫，計算各階段特定活動之碳足跡。計算公式為：「特定活動碳足跡 = 活動強度(質量/容積/仟瓦小時/公里) × 排放係數(每單

位活動之二氧化碳當量)」，加總即為工程碳足跡，如式 2-1 所示：

$$\text{工程碳足跡} = \sum(\text{活動強度} \times \text{排放係數}) \quad (\text{式 2-1})$$

其中「活動強度」(Activity Intensity)是指一段時間內之生產量(或能源消耗量或服務量)大小，主要配合排放係數之單位項目代入推估。而「排放係數」(Emission factors)指將每單位原(物)料、燃料使用量、產品產量或其他操作量所造成之溫室氣體排放量。

交通部運研所(2011)亦將工程碳排放量分為五項計算，包含直接碳排放量、間接碳排放量、材料碳排放量、運輸碳排放量及碳匯變化量。

- (1) 直接碳排放量：指施工機具或現場燃料產生之碳排放量。
- (2) 間接碳排放量：指施工現場內外購能源產生之碳排放，如場地照明、通風或耗電機具之用電量、工區用水等。
- (3) 材料碳排放量：指工程所需之材料，其生命週期碳排放量總和。
- (4) 運輸碳排放量：指運輸之燃料消耗產生之碳排放。
- (5) 碳匯變化量：指地表植被改變前後之內藏碳(Embodied carbon)量差異。

2.1.2 碳足跡計算方法

使用排放係數法計算碳足跡，碳排放係數的數據品質決定碳足跡計算結果。根據溫室氣體查驗指引(環保署，2010)，碳排放係數選用之優先順序為：國家公告係數>國內專案報告>國際公告係數>國外研究。應以本土化、可信度與時間性為選用原則。

張又升(2002)整理出建材生產的本土化排放量資料庫，其調查國內各類建材代表廠商，依照「生產線直接耗能統計法」，以生產量與能源使用平均資料計算出 CO₂ 排放量，主要建材分類為石質、鋼鐵水泥、鋁金屬、玻璃、土質、木材、化學與塑膠及瀝青類。

林憲德等(2013)自 1994 年歷經十數年蒐集資材碳排放資訊，並為了溯及原料開採耗能，彙整瑞士 Simapro 原料開採之碳排資料與既有碳排資料，建立符合建築原材

料計算邊界之完整本土建材碳足跡資料庫。

劉安瑀(2014)將範圍界定於建築物建設階段之軀體工程碳足跡評估，將常用工法及複合材料系統化的換算為單位碳排量，擴充建材碳足跡資料庫，便於設計者在辨認出減碳熱點後替換工法，計算減碳效益。

陳啟明等(2013)提出「應用公共工程經費電腦估價系統(PCCES)架構估算工程二氧化碳排放量委託研究案成果報告」，透過解析工項標單及資源統計表，將工項拆解得到的材料、機具及人力，與碳排放係數資料庫對應，得到工項項目之碳排放量，分析流程如圖 2.1 所示。

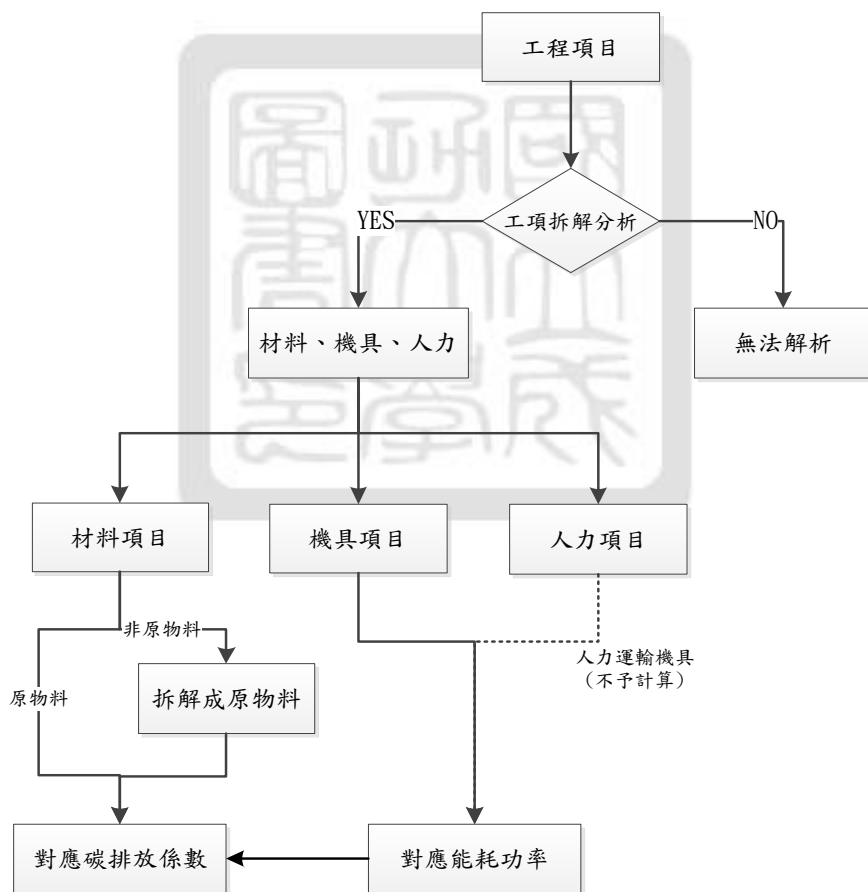


圖 2.1 工項拆解分析流程

(資料來源: 陳啟明, 2013)

16 個各類型案例工程如道路、建築、橋梁、堤防中，平均可計算項目約占四成，

無法計算之排除項目約占三成，其中建築案例包含大量缺少碳排放資料的裝潢項目，可計算項目低於其餘案例。

Russell-Smith et al.(2015)結合生命週期評估(Life cycle analysis)、目標值設計(Target value design)與生命週期成本(Life cycle costing)的概念，提出永續目標設計法(Sustainable Target Value, STV)，概念在於碳足跡計算應為不斷設立目標，再更改設計、重新計算後再訂定新目標之反覆流程，以達到最佳減碳成果。

建置對應工項編碼之碳足跡資料庫，能夠將拆解工項的繁瑣流程加以儲存，方便日後取用，避免為了計算碳足跡而須以設計圖重新估算建材以及機具使用，加速碳足跡之計算，讓設計者得以反覆修正，最大化減碳成果。

2.2 建築資訊模型

Building Information Modeling (BIM)建築資訊模型是一個整合設計、施工、營運管理的新流程(process)。美國建築師協會(American Institute of Architects, AIA)將 BIM 定義為:「以模型為根基且連結至建物資料庫的技術」。BIM 的三維概念以元件構成，能附加涵蓋全生命週期之建物資訊，例如，一般建築主體結構工程由柱、牆、樑、板等元件所組成，於建模時可附加其長度體積等量體資訊以及材料性質、成本、製造商等建物資訊，這些資訊直接以屬性的方式存於 BIM 元件中，可供不同生命週期使用者進行資料處理、分析與模擬，達成資料共享與資訊再利用之目的。2.2.1 節回顧 BIM 沿革，2.2.2 節說明 BIM 發展現況。

2.2.1 BIM 沿革

Building Information Model 一詞最早出現由荷蘭學者 van Nederveen and Tolman 於 1992 年提出，其概念更早源於 Eastman 等人與 1974 年之研究(郭榮欽等，2010)，其於 1999 年出版之 Building Product Model，詳細介紹建築物的元件資訊模型組構原理，亦闡釋資訊交換標準 ISO-STEP (The Standard for the Exchange of Product data model)

與 IAI-IFC (Industry Foundation Classes)。

International Standard Organization (ISO)於 1994 年提出 STEP，目的為發展一套中性的溝通方式(neutral computer language)，提供在不同介面間交換與傳輸。STEP 所整合的產品資訊定義了該產品的幾何資料、生產程序、生產規範等主要資料(謝尚賢，1998)。Industrial Alliance for Interoperability (IAI)則提出 IFC，有別於 STEP 適用於整個製造業，IFC 為針對 AEC 產業 (Architecture、Engineering、Construction)所建立之資訊模型標準，較 STEP 單純且考慮實務性，讓模型資訊得以完整地在不同軟體間傳遞。

美國建築師協會(AIA, 2013)提出 Level of Development (LOD)，定義模型在工程生命週期不同階段所被期待的發展程度。主要可以分為五個等級: LOD100、200、300、400、500。各等級對於元件須具備的資訊各有不同，依照 E202 號文件，五種發展程度之定義歸納如表 2.5。

表 2.2 LOD 發展程度

發展程度	LOD100	LOD200	LOD300	LOD400	LOD500
生命週期階段	概念設計	初步設計	細部設計	施工	竣工
模型需求	整體建築基本量體資訊 整體建築物之面積、高度、體積、位置、方向。	模型元件基本量體資訊 大略數量、尺寸、形狀、位置、方向。	建築細部模型 準確數量、尺寸、形狀、位置、方向。	建築施工模型 包含完整安裝資訊、施作方法資訊之建築細部模型。	建築竣工資訊 實際數量、尺寸、形狀、位置、方向。

BIM 元件是建構模型的基礎，必須依循「建模規則」建置以滿足生命週期不同階段的需求，被要求的往往有模型繪製之精細程度、資訊交付的完整度。為了達到各階段不同的使用需求，模型於建置時所需遵循之建模規則將會不同，例如，於概念設計階段模擬風場，模型部分僅需建築物整體量體資訊，相對重要的是當地氣候條件以及與鄰近建築物之間的關係。賴東延(2011)提出以工程圖說轉換成 BIM 模型並導入 BIM 技術於招標階段製作各種表單，其 BIM 元件之詳細程度必須達到 LOD300。

本研究彙整工項與碳足跡資訊，連結至 BIM 元件，並由模型取得之詳細數量計算工程碳足跡。故所需之發展程度亦須達到 LOD300，才能藉由準確之數量、尺寸、形狀、位置、方向等資訊，計算出精確之碳排放量，建立應用 BIM 於碳足跡計算之建模規則於第五章說明。

2.2.2 BIM 發展現況

營建產業應用 BIM 技術來提昇生產力與競爭力已是全球的趨勢，而世界上先進國家也都各自持續發展 BIM 可應用的區域。目前 BIM 的發展已經不只包含點線面構成之空間量體資訊，傳統 3D BIM 加入專案時程資訊維度後即為 4D BIM，如此便可模擬於工程各階段之工程施作情形，用以預先規劃人力以及假設工程之配置，並探討施工活動間之衝突。

5D BIM 則是除了加入時程維度之外，再加上專案成本資訊，方便掌握經費估算，將工程總價於模型內細分至專案、元件等級，可以進一步發展詳細的分包商資訊管理；為滿足全生命週期之需求。利用動態 BIM 模型提供的資訊，在設計階段前期估算工程所需要成本費用，更定義出擷取元件量體資訊的方式(Cheung et al. 2012)。但 BIM 模型提供的數量資訊不見得能滿足所有計算成本上的需求，因此 Monteiro et al. (2013) 提出以數量計算為導向之元件設計，定義一個創造元件的程序，此程序創立出來的元件能滿足後續應用所需要之數量。6D BIM 納入了設施管理資訊，解決了營造商與維護商之間資訊交付的問題，大大降低了維護所耗費的時間與成本。

McGraw-Hill Construction (2013)調查 BIM 全世界應用情況，調查對象為使用 BIM 技術已具相當程度之國家，包含美國、巴西、德國、法國、日本、南韓，及澳洲等。報告中整理各地應用 BIM 的程度，並將調查結果整合及歸納出 BIM 的趨勢，其結果如圖 2.2 所示。在各項應用結果中，其中一項為各地區承包商使用 BIM 於各專案類型的百分比，分為建築與非建築兩種類型，建築使用 BIM 的比例 63%，非建築類型 32%，非建築專案亦在發展 BIM。

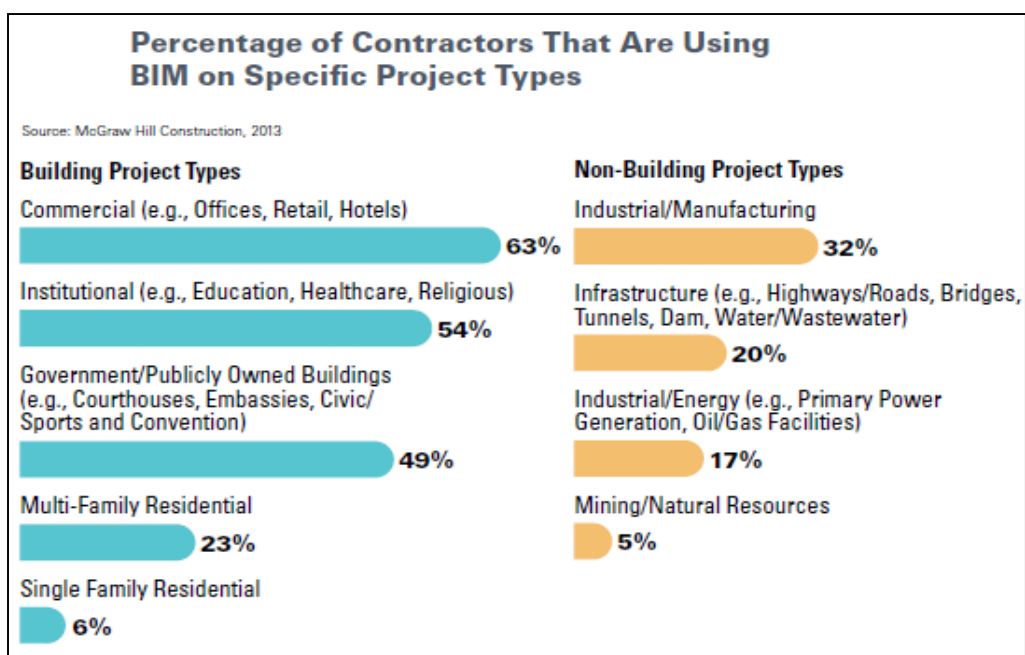


圖 2.2 BIM 應用於各專案類型的比例

(資料來源: McGraw-Hill Construction, 2013)

此外，McGraw-Hill Construction (2013)亦整理出工程專案於設計(施工前階段)，承包商應用 BIM 之作業。由圖 2.3 可知，BIM 最常應用於協同作業(Multi-Trade Coordination)、設計概念視覺化(Visualization of the Design Intent)、施工性評估(Modeling for Constructability Evaluation)，及數量計算(Determining Quantities From a Model)等作業，此等作業亦是目前 BIM 應用於專案管理上常見的方式。

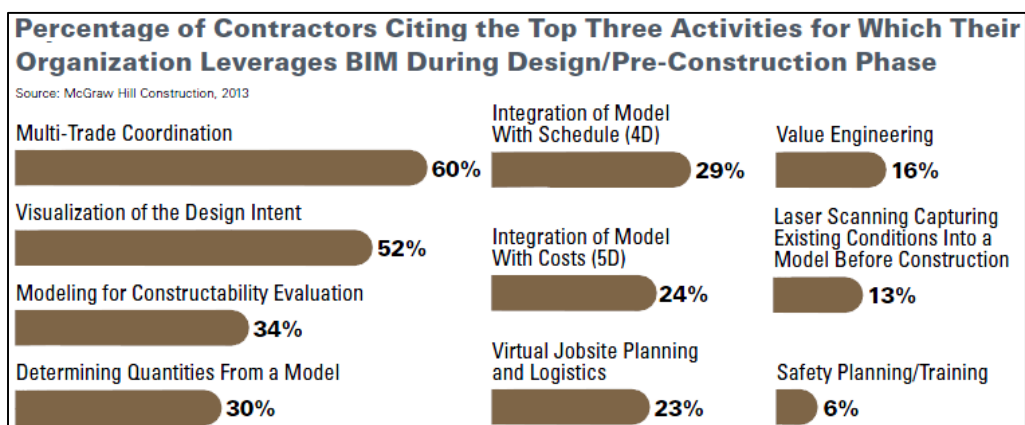


圖 2.3 設計(施工前階段)BIM 應用之作業

(資料來源: McGraw-Hill Construction, 2013)

4D BIM 和 5D BIM 的應用比例各為 29%、24%，雖然使用比例沒有過半，但此兩項於未來 BIM 發展會是值得關注的重點，於營建工程專案可試著應用。

2.3 編碼與 BIM 的關係

使用BIM，其元件與工程項目皆需要編碼，以便有系統地存取資料。2.3.1節介紹MasterFormat編碼，2.3.2節介紹UNIFORMAT II編碼，2.3.3介紹MasterFormat與BIM，2.3.4節介紹UNIFORMAT II與BIM。

2.3.1 MasterFormat 編碼

MasterFormat 是由美國建築標準協會(The Construction Specification Institute, CSI)及加拿大建築標準協會(Construction Specifications Canada, CSC)最早在 1972 年所頒布，最初用於北美地區建築項目的規範編排標準。

工程會於公共工程技術資料庫架構下成立編碼審查委員會，依據美國 CSI 協會之 MasterFormat 編碼，編訂一套符合國際工程慣例以及國情之公共工程施工綱要規範、公共工程製圖手冊、工程發包與施工文件之編訂架構與格式，以利加速推動工程管理制度化及經費估電腦化。

工程會綱要編碼的建置以 MasterFormat 1997 版本為基準，從 00 篇至 16 篇共分為 17 個分類，如表 2.6 所示。隨著新材料、新工法等轉變，2004 年 MasterFormat 編碼擴充為 50 章，但國內仍以 17 章為架構。

表 2.3 MasterFormat 1997 綱要分類

篇碼	章碼	篇名	篇碼	章碼	篇名
00	00001~00940	招標文件及契約要領	07	07050~07921	隔熱及防潮
		計畫簡介	08	08050~08990	門窗
		招標文件	09	09050~09990	裝修
		契約要領	10	10100~10996	特殊設施
01	01100~01953	一般要求	11	11010~11900	設備
02	02050~02991	現場工作	12	12050~12900	裝潢

03	03010~03932	混凝土	13	13010~13975	特殊構造物
04	04050~04940	圬工	14	14100~14950	輸送系統
05	05050~05900	金屬	15	15020~15950	機械
06	06050~06920	木作及塑膠	16	16001~16880	電機

工程編碼由綱要編碼及細目編碼組成，前五碼為綱要編碼，以施工規範、施工工法、品質檢驗標準決定，其五碼編碼規則說明如下。

- (1) 第一層為第 1 碼和第 2 碼，為各專篇之代碼。
- (2) 第二層為第 3 碼，為各專篇內之分類大項。
- (3) 第三層為第 4 碼，為各專篇分類大項下之細分類碼。
- (4) 第四層為第 5 碼，歸屬第三層之相關工項，使用者可依據實際需求自行編碼。目前 CSI 為求分類之簡化，有些編碼已事先將第 3、4 碼合併為第二層，將第 4、5 碼合併為第三層。

工程細目編碼如圖 2.4 所示，分為工作項目碼(計價碼)及資源項目碼(包含材料、機具、人力及雜項)等兩大項，其編碼架構說明如下(PCCES 操作手冊，2012)。

- (1) 工作項目碼共 10 碼，XXXXXX□□□□△。
- (2) 資源項目碼：人力、機具碼，前置碼+12 碼共 13 碼，材料、雜項碼，前置碼+10 碼共 11 碼。
- (3) 前置碼：M (Material)、E (Equipment)、L (Labor)、W (Miscellaneous Work)分別表示。
- (4) XXXXXX：施工綱要規費綱要編碼(共五碼)。
- (5) □□□□□□：功能或規格碼(材料、雜項為 4 碼，人力、機具為 6 碼)。
- (6) △：計價單位碼共 1 碼。

一般編列預算書時，依據工程會或主管機關的工程預算書編製原則、工料分析手冊、單價分析原則。單價分析主要包含四個部份，分別為基本工資編列、物料單價、材料運費及施工機具費，編列工程細目碼，彙整材料、機具、人力項目，估算工程總價。

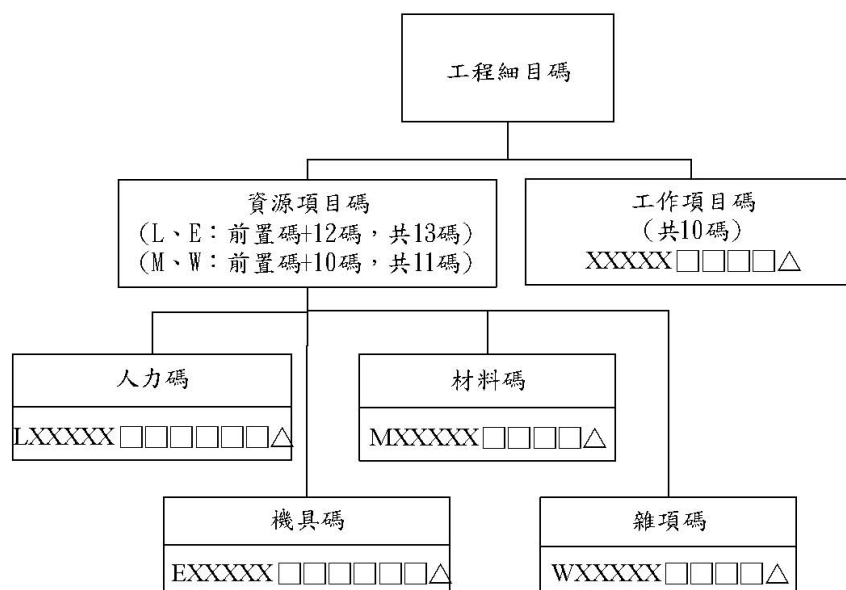


圖 2.4 工程細目碼架構

2.3.2 UNIFORMAT II 編碼

1970 年代，美國建築師學會和美國通用事業管理局 (General Services Administration, GSA) 發展一套建築分類標準，按照項目構成和位置對項目資訊分解和編碼，開創 Unidormat 編碼體系，為了解決設計階段估價之問題。美國材料試驗學會 (American Society of Testing and Materials, ASTM) 下屬 E06.81 建築經濟委員會 (Building Economics) 於 1989 年為加強對建築業之管理，以 UNIFORMAT 為基礎發展建築構造組成分類，擴增原編碼的使用範圍，命名為 UNIFORMAT II，1993 年美國國家標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 正式發行標準的 UNIFORMAT II 體系。

UNIFORMAT II 是按照建築物的構造組成以及場地工作元素分類，原始的分類為七層，由一個英文數字以及七位數字組成，目前 NIST 發表的 ASTM E1557-97 文件詳細描述至第四層，如表 2.4 所示。

- (1) 第一層主群組元件 (Major group elements)：共分七類主群組元件，依次為 A 類下部結構、B 類建築外殼、C 類建築內部、D 類服務、E 類設備裝潢、F 類特殊施工及拆除、G 類建築基地工作。

- (2) 第二層群組元件(Group elements)：可作為規劃階段概算，共 22 類。
- (3) 第三層個別元件(Individual elements)：依元件大致功能分類，共 79 類。
- (4) 第四層次元件(Sub-elements)：依元件細部功能分類，可代表細部設計階段，共 518 項。

表 2.4 UNIFORMAT II 分類概況-以 A 類下部結構為例

Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
A 下部結構	A10 基礎	A1010 一般地基	A1011 牆體地基
			A1012 柱地基及柱帽
			A1013 周圍排水及防水
		A1020 特殊地基	A1021 牆地基
			A1022 斜坡梁
			A1023 沉箱
			A1024 淺基礎
			A1025 降水
			A1026 筏式基礎
			A1027 軟土區加強地基
			A1029 其他特殊情況
		A1030 底板	A1031 一般底板
			A1032 結構底板
			A1033 斜面底板
			A1034 溝渠、深坑
			A1035 底板排水及防水
	A20 地下室	A2010 地下室土方工作	A2011 地下室挖土
			A2012 結構回填土及壓實
			A2013 支撐
		A2020 地下室牆體	A2021 地下室牆體砌築
			A2022 防潮
			A2023 地下室牆體保溫
			A2024 內牆抹灰

(資料來源：NIST, 1999)

UNIFORMAT 編碼體系是為了解決設計階段之估價問題而建置，發展至 UNIFORMAT II 則可以應用於建築工程全生命週期階段，因為其編碼階層結構性強，並以空間、功能分類，能夠表現元件較完整之資訊，方便設計初期估價。另外，公共工程工項編碼系統以 MasterFormat 為基礎，分類採用工種以及材料，注重的是材料使用，如此的分解和組織符合施工階段的資訊處理習慣，適合招標階段彙整材料使用。

整理 NIST(1999)、羅芳艷(2005)、李亮群(2005)、郭宇芬(2012)、吳翌禎(2014)之文獻，彙整 UNIFORMAT II 與 MasterFormat 之比較如表 2.5 所示。

表 2.5 UNIFORMAT II 與 MasterFormat 比較表

	UNIFORMAT II	MasterFormat
適用階段	適用於工程全生命週期，於設計階段作用尤為突出。	不利於規劃準備及設計階段，因較符合工程建造階段之資訊處理方式，多用於最終招標階段。
編碼分類方式	以建築構造組成之位置、功能分類。	以材料及工種分類，直接闡述施工的方法與材料。
主要特色	以功能為基礎的分類，項目的功能及位置資訊被保留，能反映建築實體的組成，進而關聯成本估算。	以材料為基礎的分類，編制者需要知道項目之施工流程以編列詳細的材料與機具使用。因注重施工結果，便於材料的統計與計算。
數據層次結構性	數據層次多，分類敘述清楚，易於各層次彙總分析。	數據層次較少，每一層項目多，不利於各層次彙總分析。

2.3.3 MasterFormat 與 BIM

公共工程委員會依政府採購法頒布工程價格資料庫作業辦法(2011)，規定國內公共工程預算金額超過新台幣壹仟萬元以上之工程標案，均須透過公共工程經費電腦估價系統(PCCES)編列預算，以劃一全國施工規範、工程編碼、製圖標準及工項名稱等工作。

以往用以產出預算書之工程數量，皆由專業估算人員以 2D 設計圖為基準估算，

倚賴的是估算人員的專業以及經驗，耗費時間與人力；再者，除了國內少數大型顧問公司內部發展有自己的編碼系統，大部分公司仍以 PCCES 內建的自動編碼系統編列預算書，使用時仍須於 PCCES 平台上點選綱要編碼與細目碼規則表。由於編碼規則會隨專案特性、施工規範、材料規格、主辦單位不同而有所差異，如此要對各項目正確執行編碼的困難度相當高，亦需時間與人力，且有錯誤率高等問題(陳育群，2013)。

賴東延(2011)將 BIM 導入公共工程招標準備階段，所建議之導入方式為依照 WBS 拆解工項資訊，與 PCCES 編碼對應，再將工程工項編碼(十碼)內嵌至元件之關鍵註記欄位(圖 2.5)，最後輸出工程專案之材料、尺寸、數量等資訊於明細表，轉入 Excel 格式並匯入至 PCCES 以製作招標文件。

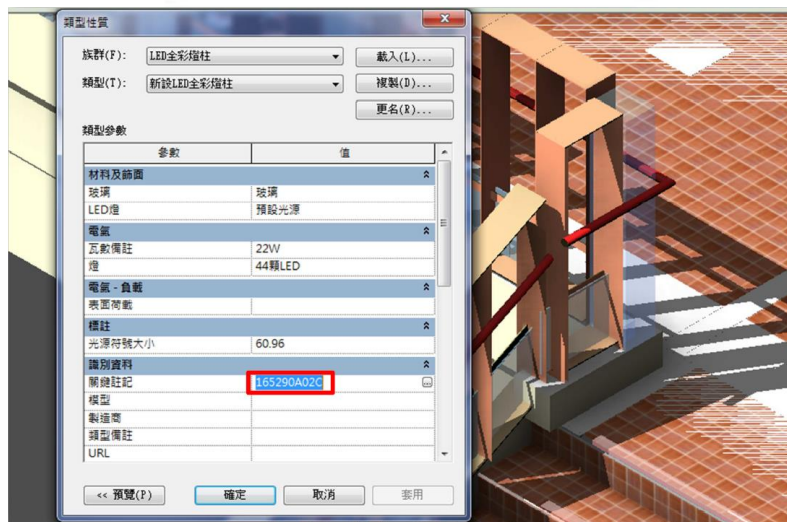


圖 2.5 元件嵌入工程會 PCCES 編碼(賴東延 2011)

陳育群(2013)將公共工程系統編碼與 BIM 結合於預算書製作，建立 BIM 模型建立至預算書產出的流程，如圖 2.6 所示，首先建立 BIM，將模組元件規格資訊嵌入，其命名規則必須符合工程會提供之工程編碼規則表(step1)，然後利用材料明細表功能匯出相關之資訊(step2)。接著藉 Visual Basic 2010 Express 撰寫程式，運用程式自動讀取材料明細表內的工程項目(step3)，並取得綱要編碼與細目編碼規則表內的工程編碼(step4~6)。最後，應用工程會提供之外掛程式安裝於 PCCES 軟體，並製作預算書(step7)。

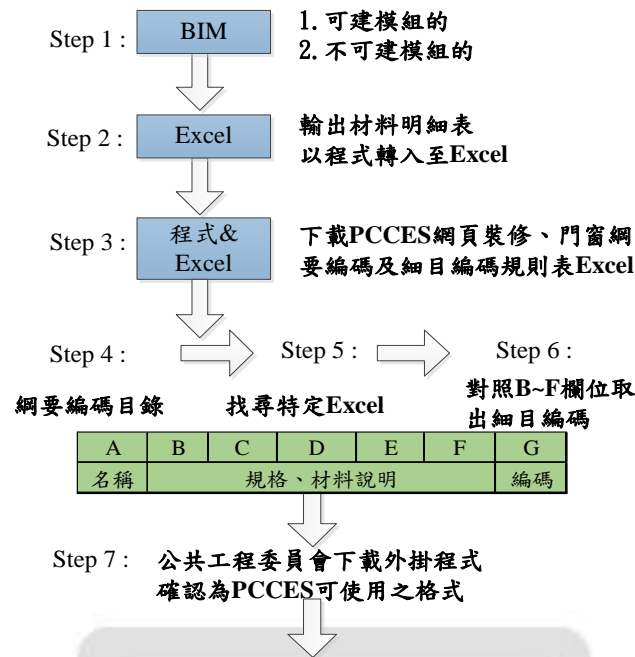


圖 2.6 模型建立至預算書產出流程(陳育群 2013)

國內文獻探討工項編碼與 BIM 的結合、BIM 導入公共工程招標階段之可行性，利用 WBS 拆解工項資訊，並嵌入至元件，再產出明細表一併匯出工程專案之材料、尺寸、數量以及工項編碼資訊(賴東廷 2011，陳育群 2013)。著重資訊如何在軟體介面間交付，尚不足以於實務上應用於公共工程招標階段，原因列舉如下。

(1) 工項與元件之關聯性儲存於外部。

研究中藉由 WBS 拆解工程資訊藉以對應與元件，其關聯性並無於 BIM 建模軟體 Revit 內儲存，亦即於建模時仍需費時查詢外部資料以嵌入資訊至元件。

(2) 人為嵌入工項資訊，易有疏漏。

嵌入元件之工項資訊，無論是十碼工項編碼或是模組規格資訊，皆須與工程會提供之工項編碼規則表一字不漏，由人為輸入錯誤率高，且不易即時檢核。

(3) 直接嵌入工程編碼資訊，將工項與元件之間的關係限制為一對一。

工項與元件之間的關係應為多對多，也就是單一元件可能包含許多工項，單一工項亦可由多個元件組成。以柱、牆、樑、板元件為例，包含工項可能有混凝土、模板以及鋼筋(若未繪製則需由柱、牆、樑、板元件體積估算)。

(4) 研究對象多為裝修工程及門窗工程，工項與元件關聯性較易解析。

門窗類、裝修類、機電類的模型元件與工項之間大多為一對一的關係，藉由加總明細表提供之元件個數即為工程總數量，並無涉及同工項對應不同元件類別之情況。

(5) 於公共工程招標階段之模型精細度並不足以產出預算書。

於公共工程招標階段繪製之建築資訊模型，精細度大多未繪製至詳細的裝修元件，故要最大化納入 BIM 於預算書製作之效益，應以建築軀體工程之大宗材料為目標，並加以對應。

李則威(2014)以橋樑工程為案例，藉由建築項目階層(Building Project Hierarchy, BPH)概念，建立元件與工項之間的相關性，區分相關性為：直接相關、間接相關、無相關。並解析項目的計算基準、計算單位以及對應元件的量體資訊，專案資訊被儲存至關聯式資料庫，並匯入至 Vico Office Software 專案整合工具產出數量及工程標單，驗證成本管理流程的可行性。

因此，欲以 BIM Model 產出工程數量，結合 BIM 元件與 PCCES 工項之多對多關係，才能有效利用 PCCES 工項連結碳足跡計算。本研究以 UNIFORMAT II 編碼為媒介，定義 BIM 元件與 PCCES 編碼之間的關係，且利用關聯式資料庫的特性，將工項與元件之間多對多的關係儲存於資料庫，以利碳足跡計算應用，完整且確保其資訊的正確性。

2.3.4 UNIFORMAT II 與 BIM

應用 UNIFORMAT II 於 BIM 數量估算，已被提出且印證其可行性，藉由賦予 BIM 元件 UNIFORMAT II 編碼，可以將 BIM 模型產出之數量明細表加以分類，提升估算之效率。

郭宇芬(2012)賦予元件 UNIFORMAT II 編碼，產出材料明細表並對應至公共工程工項編碼，其中工項所需的工種及機械皆由國內的工料分析資料補足，以案例實際比

對利用 UNIFORMAT II 產出之估價與實際預算書之差異，研究結果由元件直接輸出之成本約占實際直接成本的 48.5%，扣除模型未建置之工程大項如假設工程、景觀工程等等，約占 60%，差異主要來自於工料分析與單價來源不同。

本研究選用 UNIFORMAT II 賦予 BIM 元件編碼，原因條列如下：

(1) UNIFORMAT II 組成架構與 BIM 相似。

BIM 為由元件組成之建築資訊整合資料庫，每個元件皆被賦予有位置、功能、材質等屬性資料，依 UNIFORMAT II 編碼將元件分類，能夠確保大部分的屬性資料被正確地傳遞。

(2) BIM 建模軟體 Revit 內建與 UNIFORMAT II 關聯。

Revit 於元件族群屬性的組合代碼欄位中，元件族群已與 UNIFORMAT 建置簡單的關聯，以混凝土柱為例：點開該欄位編碼時，只會顯示可能的相關類別(B, Shell)，設計者依照該構件的功能以及材料等屬性資料即可快速編碼(如圖 2.7 所示)。

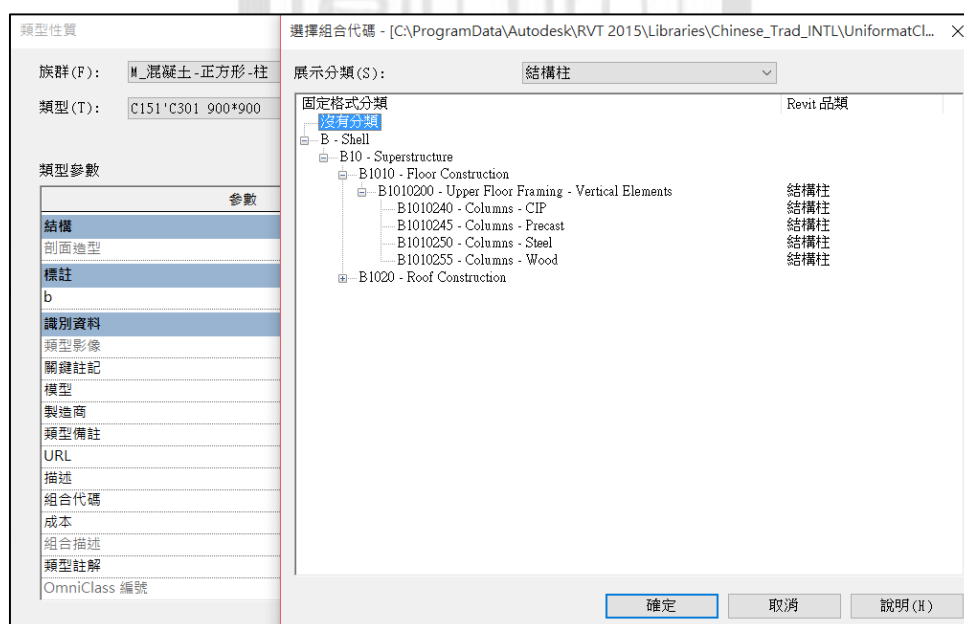


圖 2.7 Revit 內組合代碼欄位

(3) 應用 UNIFORMAT II 於對應元件與工項編碼。

利用 UNIFORMAT II 為媒介對應元件與公共工程工項編碼，能夠解決直接

於建模軟體 Revit 內對應元件與工項編碼僅能為一對一關係，且將關聯建於外部關聯式資料庫亦能將關聯儲存，節省人為分析之問題。

(4) UNIFORMAT II 方便自行依使用情形編碼。

ASTME1557-09 文件僅將 UNIFORMAT II 列至第四層，而建模軟體 Revit 內建組合代碼欄位則依元件工法及材料編列完整七碼，最後一碼皆有所間隔，預留供使用者視情形編制。可將材料性質(不同混凝土強度)、工法資訊等編列至最後一碼以附加資訊，便於資料庫中關聯。



第3章 BIM 碳足跡整合系統分析

在建立 BIM 碳足跡整合架構之前，有必要了解現有 BIM 碳足跡計算工具，思考如何改善。3.1 節介紹現有 BIM 碳足跡計算工具，3.2 節建立 BIM 碳足跡整合架構，3.3 節介紹 Microsoft Access 資料庫，3.4 節案例驗證，說明案例背景。

3.1 現有 BIM 碳足跡計算工具

本節回顧現有應用 BIM 於碳足跡計算之成果，分析優劣以確立功能需求。3.1.1 節說明國外工具，3.1.2 節說明國內工具。

3.1.1 國外計算工具

BIM 技術在國外已逐漸發展成熟，亦因應節能減碳議題，導入於碳足跡計算。國外應用 BIM 計算碳足跡之研究，大多撰寫程式來強化自動化計算之功能，或是藉由軟體介面開發(Application Programming Interface, API)連結原建模軟體 Autodesk Revit，如圖 3.1 所示，API 軟體介面開發能直接擷取 BIM 模型元件量體資訊，而 BIM 模型亦可輸出資料交換格式至外部程式計算碳足跡。本研究若利用 BIM 建模軟體輸出數量明細至資料庫，因不以程式語言撰寫，較另兩者簡易且彈性，計算透明，適合開發中之碳足跡計算工具。

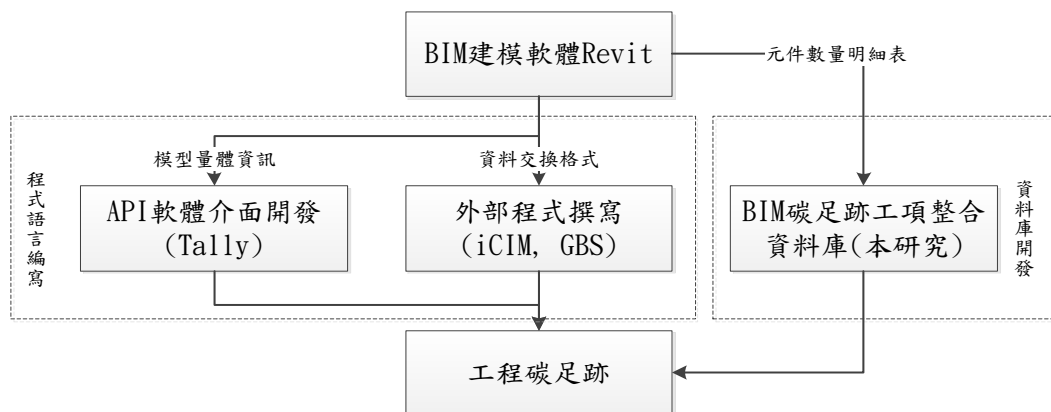


圖 3.1 國外應用 BIM 於碳足跡計算

整理國外現有應用 BIM 計算碳足跡之工具，簡述如下：

(1) Tally

Tally 由 Autodesk, KT Innovations, Thinkstep 三家公司共同研發，於 2014 年獲得 2014 AIA Technology in Architectural Practice (TAP) BIM Award Winner，為 Autodesk Revit 之外掛程式，藉由擷取模型數量以及材料資訊來計算碳足跡，碳排放係數以 GaBi 之材質資料庫為基礎，可以於 Revit 內替換整體專案之材料參數並即時計算建築軀體碳足跡。

(2) iCIM (Interoperable Carbon Information Modelling)

iCIM 由英國 Northumbria University 和 University of Bath 於 2011 年共同研發，為一計算碳足跡之網路平台，利用上傳 IFC 檔案格式(標準交換格式)，並輸入基本資料包含生命週期年數、占地面積、基地經緯度、維護更新周期等。產出結果以 3D 圖像化模型來展示，不同建築軀體材料於建築中所耗用之碳足跡，可以藉由更換材料來快速選擇低碳材料。

(3) Autodesk Green Building Studio (GBS)

GBS 由 Autodesk 公司發展，亦為雲端計算平台，藉由上傳 gbXML 格式，並輸入地理位置、建築類型、空調類型、開窗率、遮陽深度等條件，採用 DOE2.2 分析引擎，計算全生命週期之碳足跡，與能耗分析軟體 eQUEST 類似。碳排放係數資訊取自美國環境保護署(EPA)提供之資料。

總結以上，國外應用 BIM 計算碳足跡之工具已發展成熟，計算皆自動化且迅速，唯仍無法完全應用於國內營建產業，原因如下。

(1) 程式自動化計算，運算透明度低

不同的碳足跡計算方法會影響計算結果，雲端平台如 iCIM 與 GBS，其計算碳足跡之方法並無完整說明，可信度有待商榷。

(2) 係數使用國外資料庫，與國內有所差異

係數為決定碳足跡計算結果最重要的因子，若未使用一定程度的本土化數據，

並不足代表國內工程之碳足跡計算結果。

(3) 施工及運輸之碳排放量無法計算

要計算工程碳足跡，施工機具以及運輸機具碳排放量應該包括在內，若只以模型計算數量，大多僅著重在於材料碳足跡。

要將 BIM 應用於國內碳足跡計算，應該從國內碳足跡發展成果著手，借鏡國外發展的碳足跡計算工具，思考如何結合，才能取用已建立之本土化碳排放係數資料庫，較準確地計算工程碳足跡。

3.1.2 國內計算工具

國內應用 BIM 於碳足跡計算，李育杰(2013)藉由 BIM 物件導向的特性，計算建築物全生命週期碳足跡。碳排放係數使用「生產線直接耗能法」，並訪談廠商取得；營運階段碳排放則匯入 eQUEST 模擬分析，最後納入碳稅課徵議題，使用妥協規劃法及淨現值法，求出減碳設計與增加成本之最適化解。

台灣低碳建築聯盟(2013)建立碳足跡之本土化資料庫，與建築碳足跡評估方法 (Building carbon footprint calculation method, BCF)，藉由具有階層關係之各階段參數以涵蓋全生命週期之碳足跡。LCBA-Dalta 建築碳足跡評估軟體 V1.52，將 BCF 繁雜的計算公式設置於內部，輸入參數值於對應欄位即可求得建築碳足跡，唯需數入之參數值甚多，使用者將花費大量時間查找參數並輸入，並需要確認其正確性。

呂啟銘(2015)提出「應用 BIM 於建築設計階段之碳足跡模擬計算工具研發」，將建築碳足跡評估法 BCF 理論公式建置於 Autodesk Dynamo 裡，主要針對規劃階段 BCFs 為主要操作對象，項目包含空調、照明、電器使用、給排水、電力運輸設備、加熱設備等，其中以空調及照明影響最為顯著。產出之建築碳足跡計算結果以建築設計者角度切入，營運階段所佔碳排放量佔最大比重，為 80% 以上 (Okoroh et al, 2012; Biswas, 2014; Wang, 2015)。其中在空調、採光照明、通風等項目，皆有更專業的能耗分析軟體可以提供更精確之數據模擬，若能加以結合，將能提升設計操作的效率以及

計算精準度。

如何減少於營運階段日常耗能，應為建築設計者需考量之減碳熱點(Miller et al., 2015)。若以營造廠的角度切入，亦須思考如何減少施工之碳排放量，藉由使用低能耗機具、縮短材料及機具運輸距離、更換使用減碳材料及工法等，皆可為節能減碳盡一份心力。

3.2 BIM 碳足跡整合架構

本節提出 BIM 碳足跡整合工具架構，確認碳足跡計算需求，分析所需要的資訊，並建立應用 BIM 計算流程。3.2.1 節說明碳足跡計算功能需求，3.2.2 節分析 BIM 碳足跡整合資訊需求，3.2.3 節提出 BIM 碳足跡整合計算流程。

3.2.1 碳足跡計算功能需求

BIM 元件與碳足跡資訊，可以藉由對應至工項以編碼連結，進而彙整成資料庫，以圖 3.2 所示。以下歸納提出本研究應用 BIM 於碳足跡計算開發方向。

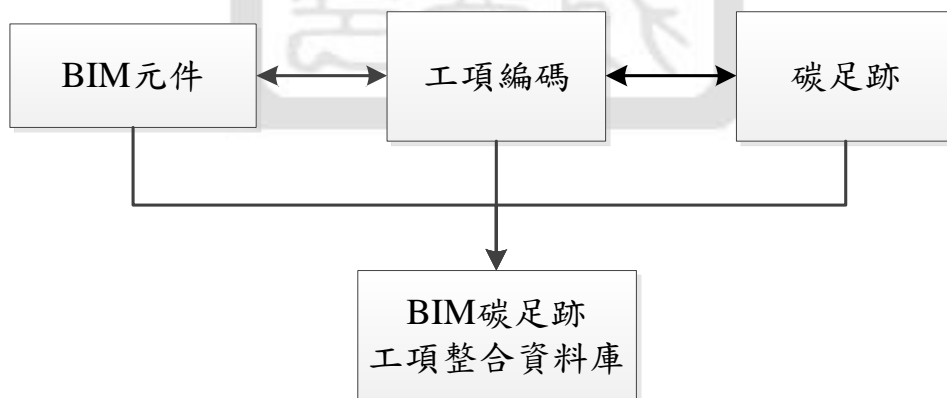


圖 3.2 整合資訊示意

(1) 解析 BIM 元件與工項對應資料庫

BIM 產出之數量資訊，於實務上必須對應至工項。4.4 節將解析元件與工項之間的關係，並將關聯儲存於資料庫，減少日後人為解析之耗費時間、成本。

(2) 建立碳足跡與工項對應資料庫

彙整現有文獻成果，對工項拆解分析，將所包含之材料、機具之碳排放量納入於資料庫儲存，方便日後更新與維護。

(3) 以國內碳排放係數為基礎

碳排放係數由生產線直接耗能計算法而來，耗用之能資源為主要影響因子，而不同地域之能資源所排放之二氧化碳不盡相同，故要計算準確之碳足跡，應取國內碳排放係數為優先。

(4) 納入計算施工及運輸之碳排放量

以營造廠角度切入，施工階段材料運輸、施工機具運輸及施工機具施工耗能皆須納入計算。於設計結果常無明確之機具使用量，可藉由工期、材料總量等估算其耗能。

(5) 計算範圍排除營運階段碳排

現有碳足跡計算軟體多以設計的角度，檢討營運階段的減碳成果。從施工的角度，注重的是減少施工過程的碳排放，不強調營運階段碳排，能夠放大完工前的碳足跡，避免其重要性被忽略。

(6) 產出碳足跡計算結果之數據品質

為增加碳足跡計算之透明度，產出係數使用總表以及解析工項總表，便於設計者得知使用之一級數據比例與工項納入比例，了解碳足跡計算結果之數據品質。

3.2.2 BIM 碳足跡整合資訊需求

建立 BIM 碳足跡工項整合資料庫之前，分析資訊需求能確保所有資訊被考慮，並且有用。以魚骨圖表達原因與結果關係，分析建構 BIM 碳足跡工項整合資料庫所需要考量之因素，如圖 3.3 所示，用以考量 BIM 碳足跡整合資訊需求，確保資訊被納入。四大面向的因素，分別為 BIM 模型、UNIFORMAT II 編碼、工項編碼、碳足跡資訊，以下說明。

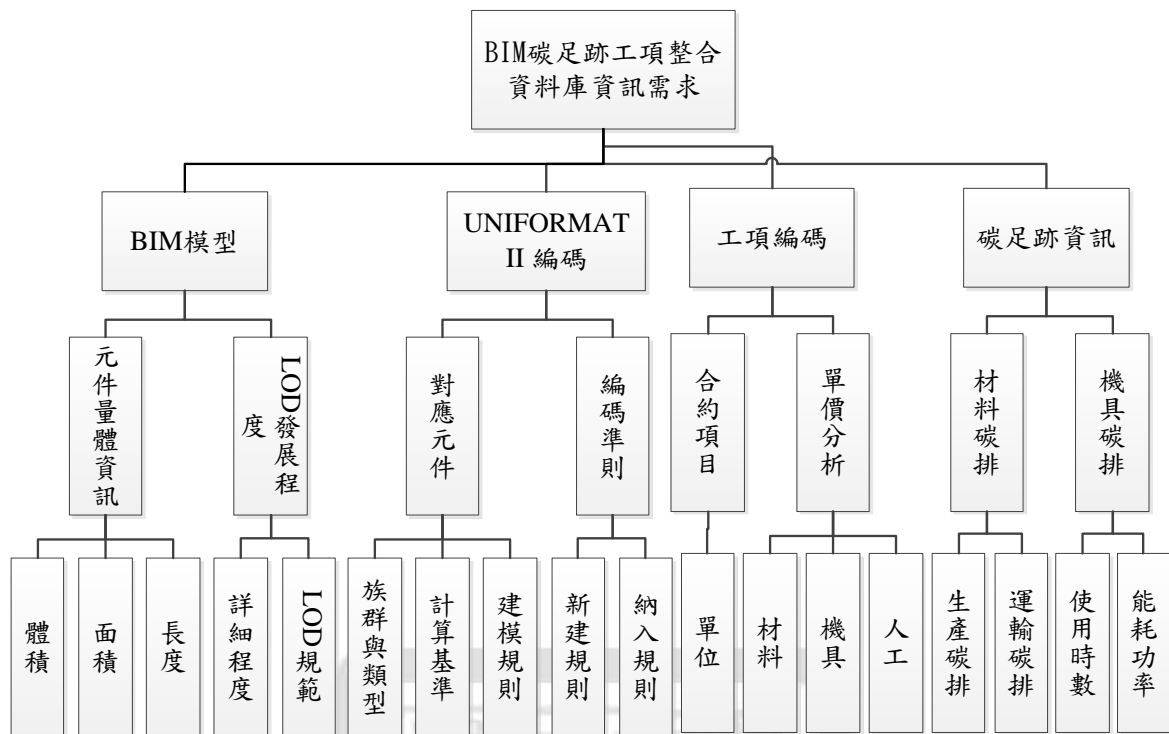


圖 3.3 BIM 碳足跡工項整合資料庫資訊需求

(1) BIM 模型

BIM 的三維概念以元件構成，能附加涵蓋全生命週期之建物資訊，例如，一般建築結構工程由柱、牆、樑、板等元件所組成，於建模時可附加其長度、面積、體積等量體資訊，以及材料性質、成本、製造商等建物資訊。應用 BIM 於碳足跡計算，意即碳足跡計算時的數量資訊由 BIM 模型元件產出，提供完整的量體資訊，包含元件長度、面積、體積。

應用 BIM 計算工程碳足跡，數量資訊由 BIM 模型產出，必須包含完整的 BIM 元件量體資訊，以確實由數量明細表產出所需資訊。Level of Development (LOD) 定義了模型的發展程度，提供使用者初步了解模型的精細度是否滿足使用需求。欲從 BIM 取出量體資訊以計算碳足跡，應達到 LOD300 以滿足數量計算的需求。

(2) UNIFORMAT II 編碼

為滿足碳足跡計算需求，將 BIM 模型中的元件依照 UNIFORMAT II 編碼架

構分類，可以解決直接鍵入工項編碼於元件只能一對一相關的限制。因為 UNIFORMAT II 編碼架構並不被國內業界所熟悉，且為更適用於碳足跡計算。本研究建立編碼準則，包括新建規則以及納入規則，提供設計者在對元件編列 UNIFORMAT II 編碼時，可以依循並加以修改其分類架構。

以鋼結構柱為例，數量明細表產出單位為體積，工項使用單位為重量，計算基準為元件體積×單位重。

(3) 工項編碼

工程預算書包含了工程的所有項目，用以計算工程總價，工程會訂定統一的編碼規則，方便編列工項時能依情形編碼(賴東延，2011)。使用工程預算書計算碳足跡，能確保碳足跡的完整性，於資料庫內使用工項編碼作為主鍵，能定義工項與元件之間關連性，並對應至碳足跡。合約項目必須有數量計算單位，以正確產出 BIM 模型元件數量明細表。在解析工項碳足跡，必須有完整的單價分析表，將工項拆解成材料、機具、人力組成，分別分析所造成之碳排放量。

(4) 碳足跡資訊

藉由工項的單價分析，可以了解工項所使用的材料、機具、人力。分別對應之碳排放資訊則需要藉碳盤查取得，碳盤查即為完整性的調查產品，於前端製造時所耗費的所有能源，並轉換為單位碳排放量表示。因人力所造成的碳排放量甚少，不予計算。

3.2.3 BIM 碳足跡整合建構流程

BIM 技術已發展成熟，國內使用 BIM 輔助分析的工程也越來越多，但實際使用 BIM 建模軟體做初期設計的案例卻不普遍，因建築設計人員對於在設計初期納入 BIM 尚不熟悉，建置 BIM 模型大多變成額外的工作成本。本研究建立 BIM 碳足跡整合工具，將碳足跡計算移至前端，透過建立 BIM 元件與工項多對多的關係，工項數量資訊能由模型產出，於資料庫中關聯產出部分標單資訊，輔助編列工程標單。

整合流程如圖 3.4 所示，階段一及階段二為 BIM 碳足跡整合前置作業，首先檢核 BIM 模型是否依照建模規則繪製，以包含所需資訊，並確認模型繪製精細度是否滿足碳足跡計算需求，接著依循解析之編碼應用準則，對 BIM 元件編列 UNIFORMAT II 編碼，產出 UNIFORMAT II 元件數量資訊為資料庫輸入資訊；階段二，先分析工程細項組成，解析工項碳足跡，最後解析工項與元件相關性，定義工項數量資訊如何從數量明細表取得。

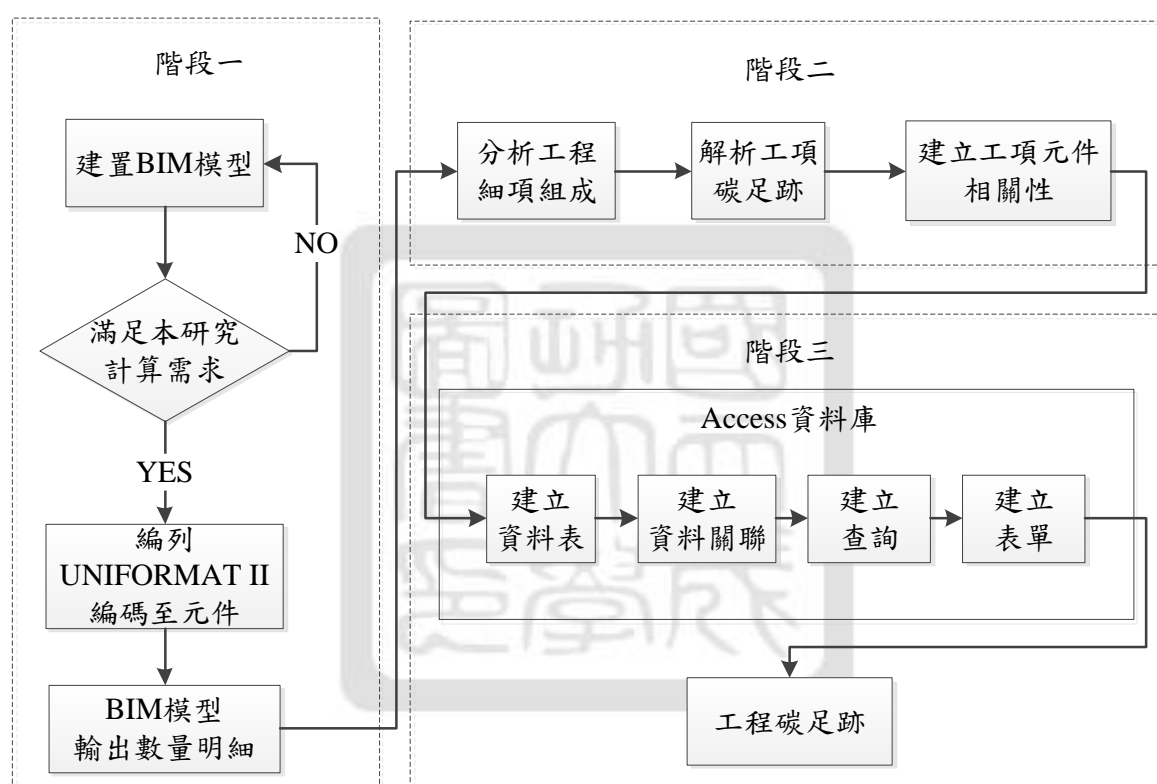


圖 3.4 BIM 碳足跡整合建構流程

圖 3.4 中階段三為 BIM 碳足跡整合資料庫，將前置作業之解析成果匯入至 Microsoft Access 資料庫儲存以便日後取用，並依循資料庫建置原則建立自動化計算，由輸入 BIM 模型數量資訊計算工程碳足跡。

本研究擬建立資料庫儲存工項與元件相關性及工項碳足跡資訊，儲存的資訊可以持續新增與更新。日後在計算類似案例時，僅須針對 BIM 模型元件編列 UNIFORMAT II 編碼，擷取 BIM 模型數量資訊匯入資料庫以產出模型涉及工項以及總工程碳足跡。

3.3 Microsoft Access 資料庫

本研究使用 Microsoft Access 資料庫管理系統，建置 BIM 碳足跡整合資料庫以儲存多對多的關聯與資料，藉由輸入 BIM 模型數量資訊，自動化計算碳足跡，詳細建置內容於第五章詳述，本節簡述 Microsoft Access 資料庫。3.3.1 介紹 Access 資料庫功能，3.3.2 介紹 Access 資料庫建置流程。

3.3.1 Access 資料庫功能

資料庫(Database)被定義為(盧坤勇, 2003):「具有固定屬性及重複性質之資料，為了便於管理和維護，以及提供多人使用，可將這些資料儲存在經過規劃屬性之檔案內，這些檔案之集合即稱之為資料庫。」

目前最常用的資料庫管理系統均使用關聯式資料庫(Relational Database)來儲存與處理資訊，儲存在二維矩陣(行、列)的資訊皆會有所關聯，數個資料表之間也可以因為欄位的關係而產生關聯性。李則威(2014)解析 BIM 橋梁元件與工項間的多對多關係，將對應的工程編碼及數量計算公式儲存於資料庫中。資料庫的功用在於能完整儲存資訊並方便維護，完善的資料庫需具備以下功能(李則威, 2014)：

- (1) 資訊化分成基礎的資料表，已減少資料重複的情況。
- (2) 建立資料表聯結之關係，並提及所需要的資訊。
- (3) 確保資訊表內資訊的正確性與完整性。
- (4) 定義符合資訊處理與報告的需求。

Jalaei and Jade(2015)撰寫外掛程式於 BIM 建模軟體 Revit，擷取模型元件材料資訊，匯入至 Microsoft Access 資料庫以計算工程於美國綠建築指標(LEED)於材料與資源(MR)及能源與大氣(EA)項目之得分，並依案例大小等資訊計算案例認證 LEED 所額外消耗之成本。

以上文獻著重如何將資料正確且有效率的儲存在資料庫中，是一個資料庫完善與

否最基本也最重要的條件。除此之外，本研究利用關聯式資料庫的特性，建立 UNIFORMAT II 編碼、工項、碳足跡之間的關聯，如此便能藉由從 BIM 提取 UNIFORMAT II 編碼數量資訊，輸入資料庫後自動查找關聯，彙總涉及的工項以及碳排放資訊，計算工程碳足跡。

所建立之 BIM 碳足跡整合資料庫，除上述外，亦應具備以下功能：

- (1) 建立基礎的資料表，提供新建資料時參照，方便資料庫的新建與維護。
- (2) 輸入 UNIFORMAT II 編碼數量資訊，自動對照關聯性產出工項數量及碳足跡。
- (3) 利用「查詢」功能，了解碳足跡的組成，找出減碳熱點。

3.3.2 Access 資料庫建置流程

資料庫的建置需要歸納大量資料，並釐清資料的正確性、必要性，以及資料間的關聯性，建置可以簡化成流程圖表示(圖 3.5)，以下分述。

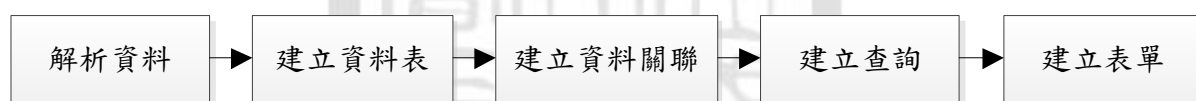


圖 3.5 資料庫建置流程

(1) 解析資料

建立資料庫，能夠將大量具有固定屬性且重複的瑣碎資料歸納、完整地儲存。

對於這些資料，依照使用者需求與目的，分析資料屬性，確保納入的屬性是有效的，資料確實解析後始能於 Microsoft Access 內實際建置資料庫。

(2) 建立資料表

資料庫主要由資料表(Table)及關聯(Relation)組成，解析完之資料必須劃分成數個基礎的資料表，透過關聯以減少資料重複輸入，並確保資料輸入的正確性與完整性。依循正規化(Normalization)的原則能夠避免資料庫中儲存太多重複的資料，精簡屬性資料間的關係。

(3) 建立資料關聯

資料表被建立後必須分析屬性資料間的相互關係以定義關聯性，正確地建立關聯性才能供資料庫依循，得以依使用需求查找資料。

(4) 建立查詢

在完整正規化的資料庫中，資訊通常散置於數個基礎資料表中，並透過關聯相互連結。因此針對使用者的需求需使用「查詢」功能，自動化於不同資料表查找資料，並得以建立計算公式處理資料以滿足使用需求。

(5) 建立表單

表單主要功能為建立使用者介面，方便使用者在新增、編輯、顯示儲存之資料。設計良好的表單能夠簡化資料庫的操作，確保資料輸入的正確性以及效率。

在建構資料表及資料關聯時，可藉由正規化(Normalization)來降低資料的「重複性」及避免「更新異常」(盧坤勇，2003)，藉由讓資料庫中重複的欄位資料減到最少，能快速的查找資料，提供關聯性資料庫的效能。

當資料庫符合正規化的規則則稱其為「正規形式」，符合第一條規則，資料庫即為第一正規化形式(1NF)；符合前二條規則，資料庫即為第二正規化形式(2NF)，依此類推，最多可以進行到第五正規化形式。在實務上，大多數資料庫僅須至第三正規化形式就足以滿足需求，以下為其定義(盧坤勇，2003)。

- (1) 第一正規化：指在資料表中所有紀錄之屬性資料皆無重複項目群，代表每個資料表中建有主鍵，且其他所有欄位都相依於主鍵。
- (2) 第二正規化：指資料表中所有欄位皆須完全相依於主鍵，不得「部分功能相依」。
- (3) 第三正規化：指資料表中所有欄位與主鍵間不得「遞移相依」。

3.4 案例驗證

本研究以某建築工程為案例，實際分析以確保研究成果滿足實務應用需求。3.4.1 節介紹案例背景，3.4.2 節說明案例 BIM 模型。

3.4.1 案例背景

案例工程概述如表 3.1，包含兩棟對稱設計之地上三層地下一層建築(17.6m)，構造為鋼骨鋼筋混凝土。

案例金額如表 3.2 所示，工程造價 286,000,000 餘元，其中結構工程約佔 57,000,000 元、大地工程約佔 29,000,000 元，建築工程約佔 111,000,000 元，包含防水隔熱工程、門窗工程、外牆工程、電梯工程、建築雜項工程、景觀鋪面工程、植栽工程、景觀照明工程；機電工程約佔 89,000,000 元，包含電氣設備工程、弱電工程、給排水設備工程、消防設備工程、空調通風設備工程、機房噪音防治工程、太陽能發電設備工程。

表 3.1 案例工程概述

案例內容	某建築工程
基地總面積	5,696.4 m ²
構造種類	鋼骨鋼筋混凝土造
建築樓地板面積	7,422.75 m ²
結構體	地上三層地下一層
建築高度	17.6 m
地下室面積	2,160.5 m ²

表 3.2 工程項目金額

工程項目	金額(千元)	百分比
結構	57,000	19.9
大地	29,000	10.1
建築	111,000	38.8
機電	89,000	31.1
合計	286,000	100

取得案例資料有細部設計詳細價目表及單價分析表，因案例工程發包方式為統包，計價方式為總價承攬，詳細價目表及單價分析表皆在發標後核定，其完整度及詳細度並不若一般標案工程。本研究欲利用詳細價目表及單價分析表，分析工程的材料、機

具組成，進而計算碳足跡，案例缺少之單價分析資料，可參考工程會發布之工項編碼規範，及機關單位出版之工料分析手冊補足，於 4.4 節詳述。

3.4.2 案例 BIM 模型

案例提供 BIM 模型，以 BIM 建模軟體 Autodesk Revit 2014 建置，分為結構及建築模型，如圖 3.6 及圖 3.7 所示，兩者可藉由外部連結功能合併。案例 BIM 模型使用需求主要為整合工程介面，將結構、建築及機電模型進行衝突檢測，及早排除未來施工可能面臨之問題。

案例 BIM 模型為細部設計完成後，依照建築圖及結構圖建置。結構模型建置內容以結構圖為主，建有基礎、柱、樑、牆、樓板、屋頂，其中鋼結構元件不包含節點、接頭，混凝土元件不包含鋼筋；建築模型建置內容以建築圖為主，建有隔間牆、天花板、門、窗、樓梯、電梯、帷幕牆，包含空間面積資訊、材料資訊等。BIM 模型未繪製屋頂，整體建置原則為；不影響碰撞分析之細部構件可以忽略。

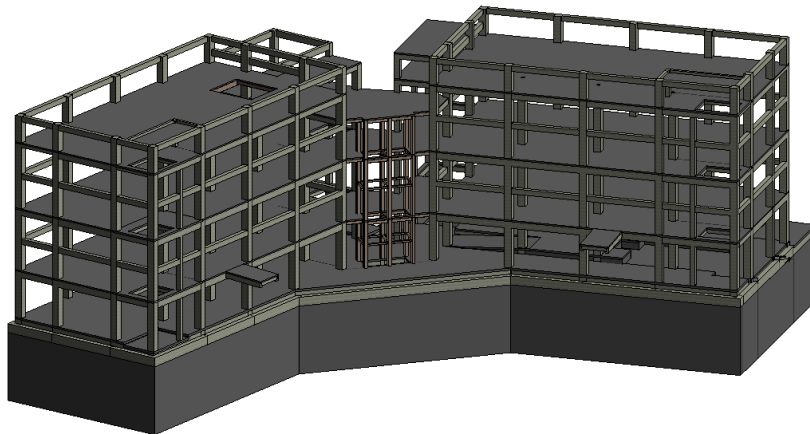


圖 3.6 案例結構模型

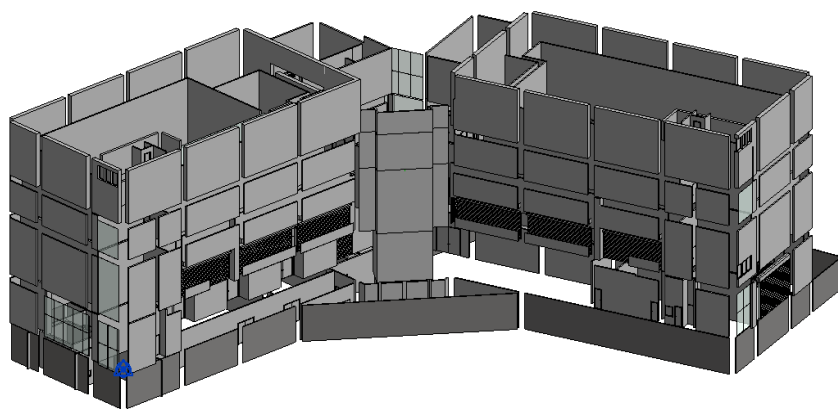


圖 3.7 案例建築模型

考量工程碳足跡，其中以材料耗費的碳排放量最多，約佔九成(張筱蓉，2015)，本研究計算案例主體工程，建立解析架構供實務應用。計算範圍包含結構模型中的柱、牆、樑、板元件。



第4章 BIM 碳足跡整合前置作業

欲將 BIM 與碳足跡整合，應用工項關聯 BIM 模型元件及碳足跡資訊，前置作業分為兩部分：一為先對 BIM 模型元件編列 UNIFORMAT II 編碼，正確分類 BIM 模型元件以輸出適用的模型數量資訊，本章以實際案例，說明 BIM 碳足跡整合前置作業；二為依工項解析碳足跡資訊，拆解材料、機具的碳排放組成，計算工項碳足跡。4.1 節解析 UNIFORMAT II 編碼，並建立 UNIFORMAT II 編碼應用準則，4.2 節實證解析 UNIFORMAT II 分類成果，4.3 節解析工項元件相關性，4.4 節解析工項碳足跡。

4.1 解析 UNIFORMAT II 編碼

UNIFORMAT II 編碼依建築構成的元件分類，著重的是其所代表的功能以及位置，與國內公共工程編碼依材料分類不同。要將兩者對應，必須逐步解析建築資訊，4.1.1 節說明於實務應用 UNIFORMAT II。UNIFORMAT II 為因應美國對於建築物估價需求所建立之編碼標準，分類架構並不符合碳足跡計算需求，需建立應用碳足跡計算之 UNIFORMAT II 編碼應用準則，提供編列架構供設計者依循，4.1.2 節介紹編碼新建規則，4.1.3 節介紹編碼納入規則。

4.1.1 實務應用 UNIFORMAT II

郭宇芬(2012)提出「以 BIM 模型資訊在設計階段估算建築工程成本之實證研究」，將專案的工作項目改用建築元件來分類，應證於 BIM 資訊模型應用 UNIFORMAT II 之可行性。本研究依循其原則，首先藉由 WBS 將建築工程有系統地拆解，初步對應至 UNIFORMAT II 之 Level 1 分類，如圖 4.1 所示，提供對元件編碼時初步參考。

UNIFORMAT II 依照元件的功能與位置分類，因此傳統工程分類大多會拆解至不同項目，以結構工程為例，於 A 下部結構對應地下室牆體；於 B 外殼對應上層結構樓層工程；於 C 內裝對應樓梯。相對地，UNIFORMAT II 的分類也多牽涉到許多類型

的工程，例如 B 外殼中，除了主結構體的混凝土元件外，也會包含外窗、外牆打底及防水隔熱等裝修工程工項。

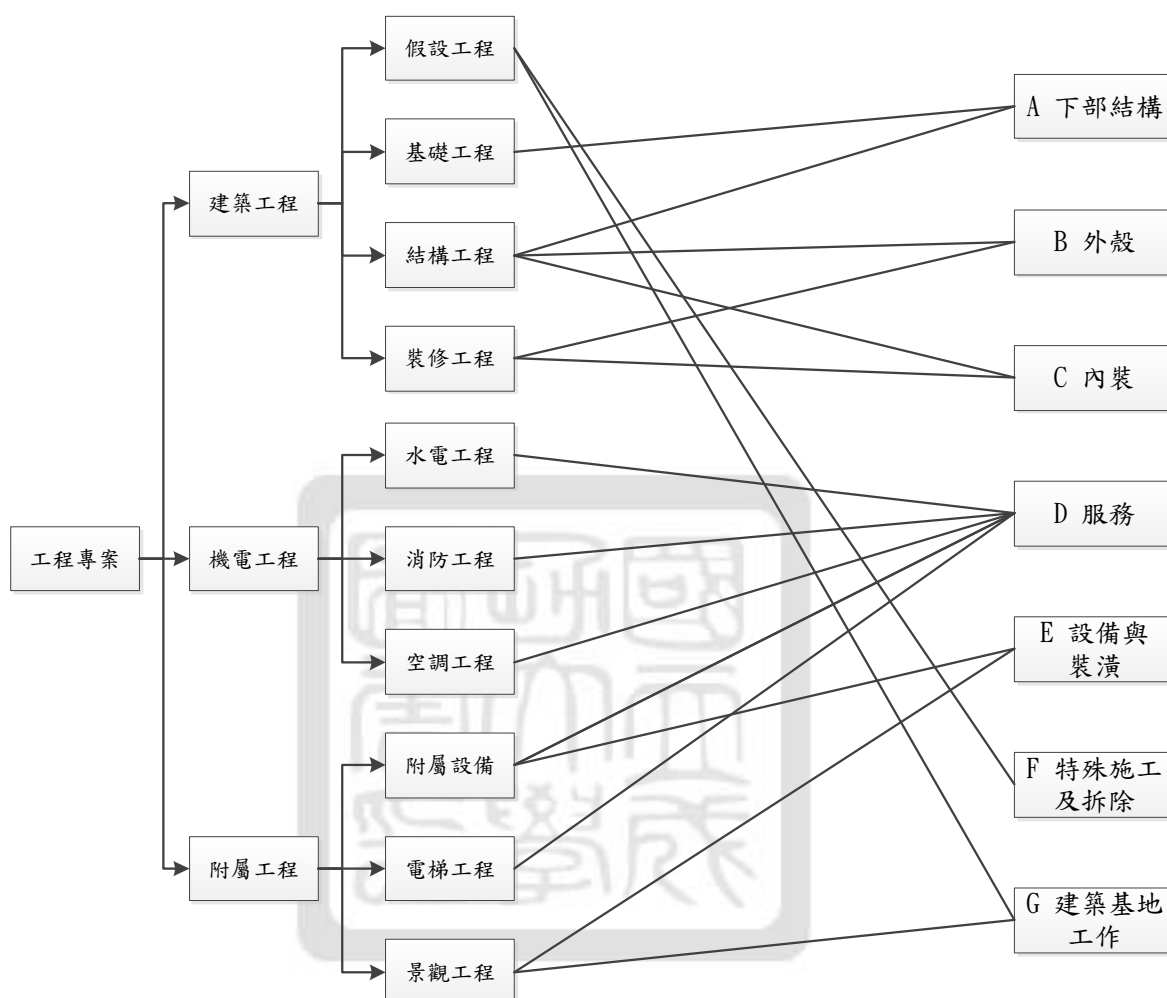


圖 4.1 傳統工程分類與 UNIFORMAT II 分類之對應

應用 UNIFORMAT II 於 BIM 模型編碼，在於藉由元件的功能及位置資訊，探討不同功能及位置使用到不同的材料、機具以及工法，可能造成不同的碳排放。舉例來說，地下室牆體使用的混凝土強度較高，且需要防水隔熱措施，與上部結構所使用之混凝土所造成的碳排放量不同。

對應 UNIFORMAT II 元件的詳細程度，取決於 BIM 模型繪製的精細度，建築工程細部設計階段 BIM 模型中繪製的元件，可以對應至 UNIFORMAT II 中 A 下部結

構、B 外殼以及 C 內裝三類項目，如圖 4.2 所示。

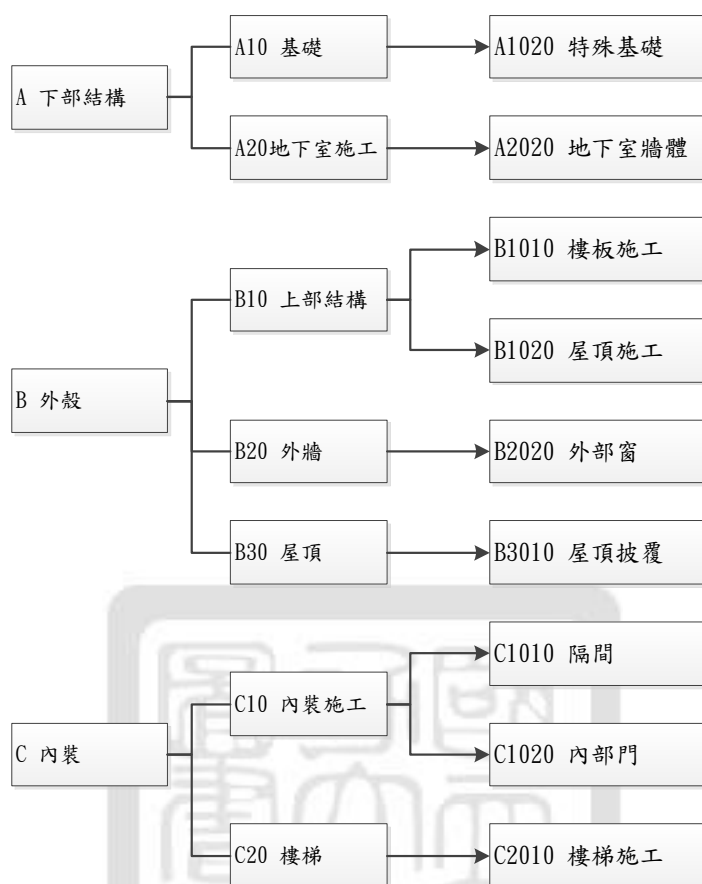


圖 4.2 UNIFORMAT II Level 3 元件分類

在 BIM 建模軟體 Revit，族群屬性的組合代碼欄位中，內建有 UNIFORMAT II 編碼，且依照元件建置時使用的材料、工法，部分已編列至 Level 5。

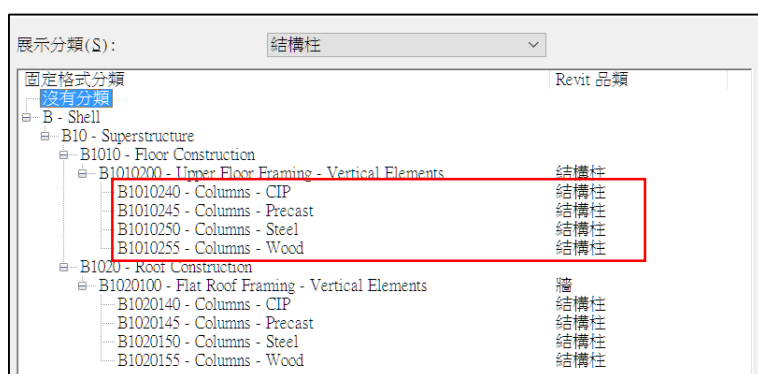


圖 4.3 BIM 軟體 Revit 內建組合代碼-結構柱

如圖 4.3 所示，以結構柱為例，有場鑄(CIP)、預鑄(Precast)、鋼及木頭四種分類；牆亦有場鑄、磚牆、CMU 磚牆、石膏牆等，供編列時依實際情形選擇不同編碼。其

分類略不同於 NIST 出版的 ASTM E1557-97 文件(僅詳細說明至 Level 4)。本研究探討 UNIFORMAT II 於 BIM 的實務上應用，以 Revit 族群屬性中的組合代碼內建為基準，對 BIM 模型編列 UNIFORMAT II 編碼。

4.1.2 編碼新建規則

解析元件組建所包含的施工作業，可以確實考慮所涵蓋的工項，進而探討碳足跡計算結果。然而因為模型與實務的差距，兩者的關係可能隨專案不同，以筏基元件為例，通常以牆、樑等元件組成筏基，在模型中與上部結構的牆與樑無法區別，但在實務上筏基工程對應到的工項不同、使用的材料與機具亦與上部結構的牆與樑有所差別，影響最終的碳足跡計算結果。

當同一族群之元件所產生碳足跡計算結果不同時，可以附加不同之 UNIFORMAT II 編碼讓元件有所區別，造成差異的因子統整如下：

(1) 材料使用

若僅考慮工程碳排放，材料生產所耗用的碳排放量為大宗。於建築工程中，低樓層多用強度較高的混凝土，不同強度的混凝土造成不同碳排放量。

(2) 機具使用

機具使用消耗能資源、排放二氧化碳，影響因子有機具能耗功率以及使用時數，不同的工程所需使用的機具規格不同，能耗功率不同；工程施作效率也會影響機具使用時數。當同樣元件所牽涉的機具有所差異時，會造成碳足跡不同。於 UNIFORMAT II 編碼時必須有所分別，舉例來說，一樣是混凝土工程，上部結構混凝土施工所使用的機具與連續壁混凝土所使用的機具不同。

(3) 工法使用

工法大多代表使用的材料、機具，在 BIM 軟體 Revit 內建之組合代碼僅編列常見工法，如場鑄、預鑄、CMU 工法等，若遇特殊工法則不敷使用，設計者應斟酌不同工法之碳足跡是否有所差異，以決定是否新建編碼。

在實際對模型元件編碼之前，設計者應針對元件分析其對碳足跡計算結果之影響，依照對碳足跡影響的程度，以材料使用>機具使用>工法使用為順序對元件編制新碼，操作上就分類最接近的元件碼為基礎更改尾碼，新建編碼以適用於碳足跡計算。BIM 軟體 Revit 內建之組合代碼在分類上對尾碼預留有五碼間隔，如圖 4.3 所示，以結構柱為例，對應組合代碼分別自 B1010240 編至 B1010255 共四種類型，若因應不同的材料、機具及工法使用而需新建編碼，得以流水號方式依序上述順序將尾碼加 1、加 2 等類推。

4.1.3 編碼納入規則

UNIFORMAT II 編碼的分類架構以元件位置及功能為基礎，可以區別不同位置及功能的元件差異，但在工項編碼僅在乎項目總量，而碳足跡計算結果在同質的施工作業之間亦不需要有所區別。且過多的 UNIFORMAT II 編碼分類代表與 BIM 軟體 Revit 中，必須要新建更多的族群類型以滿足對應，多餘的族群類型會使檔案過大，占用記憶體致使使用不順暢，設計者應在滿足碳足跡計算需求的前提下，適當將過多的分類納入一併計算。納入時須考量的因素與新建編碼時類似，主要在考量該分類是否對於碳足跡計算結果有所影響，必須同時滿足元件在材料使用、機具使用皆相同且無特殊發包時才能考慮納入。

以牆元件為例，在 UNIFORMAT II 編碼架構下區分為外牆、內部承重牆以及建築隔間牆，其中外牆除了牆面裝修工程之外，其結構體與內部承重牆在材料以及機具的使用皆無差別，亦皆發包給同一個分包商，並不會造成碳足跡計算結果差異，將兩者一併納入承重牆計算，避免建置多餘的類型元件，簡化編碼的複雜性。

本研究建立編碼新建規則與編碼納入規則，提出應用 UNIFORMAT II 編碼於國內實務編列之參考，考量 BIM 模型元件於碳足跡計算結果是否有所差異。

4.2 實證解析 UNIFORMAT II 分類成果

本節呈現使用 UNIFORMAT II 編碼實證成果，說明案例工程之編碼應用準則。

4.2.1 節說明下部結構實際編列情形，4.2.2 節說明外殼實際編列情形。

4.2.1 下部結構

表 4.1 為案例 BIM 結構模型涉及編碼，於下部結構類別涉及的編碼分類，包含 A1020600 筏式基礎及 A2020100 為地下室牆體施工。

表 4.1 案例 BIM 結構模型涉及編碼

編碼	項目
A1020600	筏式基礎
A2020100	地下室牆體施工
B1010100	地下室樓板施工
B1010210	上部樓層框架-場鑄式承重牆
B1010240	上部樓層框架-場鑄式垂直柱
B1010250	上部樓層框架-鋼柱
B1010310	上部樓層框架-場鑄式樑
B1010330	上部樓層框架-鋼樑
B1010412	上部樓層系統-場鑄式樓板-平板

A1020600 筏式基礎，Revit 軟體組合代碼欄位內建有關連至結構基礎元件，但在實務上多以柱、牆、樑、板元件取代，以組構成筏式基礎。為了能區別建構筏式基礎的元件，必須新建規則，新增元件類型。A2020100 為地下室牆體施工，本案施作連續壁，涉及的碳排放量與一般牆體不同。以牆元件為例，表 4.2 為 BIM 模型輸出之數量明細，原族群基本牆內元件類型 W30 在基礎層、地下一層及地面層分別組構一般牆體、地下室牆體及筏式基礎元件，為了要能輸出不同分類數量資訊，在族群基本牆內新增元件類型 W30 (raft)，用以區隔為筏基元件；新增元件類型 W30 (basement)，用以區隔地下室牆體元件，另由於地下室元件於工項對應為連續壁，計算單位為 M^2 ，

匯出之明細必須包含長度欄位以滿足工項數量資訊輸出需求。

表 4.2 牆元件明細

A	B	C	D	E	F
族群與類型	底部約束	數量	組合代碼	體積	長度
基本牆: W15	地面層	16	B1010210	5.87	69.250 m
基本牆: W20 (raft)	BASE	2	A1020600	1.56	6.500 m
基本牆: W30	地面層	1	B1010210	1.58	13.366 m
基本牆: W30 (baseme	地下一層	3	B1010100	28.76	18.742 m
基本牆: W30 (raft)	BASE	1	A1020600	1.47	4.089 m

4.2.2 外殼

案例於外殼的分類，如表 4.1 所示，包含 B1010100 地下室樓板施工、B1010210 上部樓層框架-場鑄式承重牆、B1010240 上部樓層框架-場鑄式垂直柱、B1010250 上部樓層框架-鋼柱、B1010310 上部樓層框架-場鑄式樑、B1010412 上部樓層系統-場鑄式樓板-平板。

B1010100 地下室樓板施工包含地下室結構體，因為下部結構在 UNIFORMAT II 編碼分類內僅涉及基礎形式、開挖、樓板及牆體，如圖 4.4 所示，其餘地下室結構體，如柱、樑，並未關聯至下部結構分類，致使編列者易於混淆。為簡化編碼，案例適用納入規則，將筏基元件與地下室牆體元件之外的地下室結構體，納入至外殼類別中的 B1010100 地下室樓板施工。



圖 4.4 組合代碼-A 下部結構

B1010210 上部樓層框架-場鑄式承重牆包含結構模型內所有牆體，於 UNIFORMAT II 編碼分類內另建有 B2010110 場鑄式外牆，用以區分承重牆與外牆，

但兩者考量於材料使用並無顯著差異，碳足跡計算結果亦應相同。為簡化編碼，案例適用納入規則，將牆體將納入同一類別，方便編碼與產出數量資訊。

實際編碼時需依照元件的施工方法，編列對應的 UNIFORMAT II 編碼，以結構柱為例，有 B1010240 場鑄式混凝土柱及 B1010250 鋼柱兩類，如圖 4.5 所示。其餘 B1010310 上部樓層框架-場鑄式樑、B1010330 上部樓層框架-鋼樑及 B1010412 上部樓層系統-場鑄式樓板-平板，分別對應至 BIM 模型結構框架元件及樓板元件。

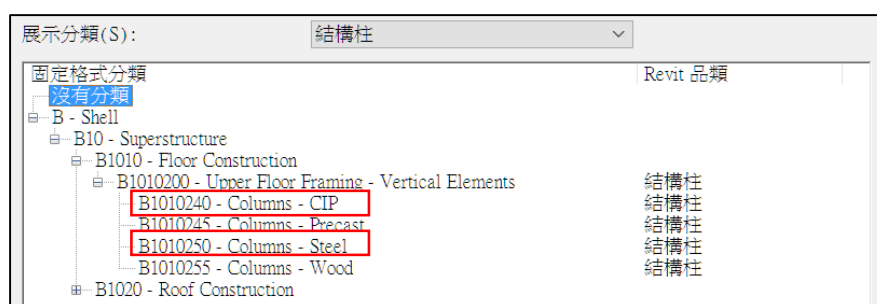


圖 4.5 依結構柱工法編列編碼

4.3 建立元件工項相關性

元件工項相關性解析流程，以系統化的方式解析 UNIFORMAT II 編碼與 BIM 元件、工項資訊之相關性，整合並儲存至資料庫。4.3.1 節對應編碼至工項，4.3.2 節分析工項數量資訊相關性。

4.3.1 對應編碼至工項

BIM 模型元件被賦予 UNIFORMAT II 編碼，得以輸出編碼數量資訊，這些以編碼分類的數量資訊要能夠在資料庫中被使用，必須先定義編碼與工項的關聯性。

在 NIST 發表的 ASTM E1557-97 文件(Charette et al., 1999)中，對於 UNIFORMAT II 編碼與 MasterFormat 編碼的對應簡單描述如圖 4.6 所示，UNIFORMAT II 在 Level 2 分類與 MasterFormat 的十六個綱要分類為多對多的關係，要將此多對多關係定義至每一個編碼細項，需要的是對兩編碼的熟悉，並與實務情形結合。

Design Unifomat Level 2	Level 3	Construction UCI	Construction UCI															
			01 General Requirements	02 Sitework	03 Concrete	04 Masonry	05 Metals	06 Wood • Plastic	07 Thermal and Moisture Protect	08 Doors and Windows	09 Finishes	10 Specialties	11 Equipment	12 Furnishings	13 Special Construction	14 Conveying Systems	15 Mechanical	16 Electrical
01 Foundations	011 Standard Foundations																	
	012 Spec Foundation Cond																	
02 Substructure	021 Slab On Grade																	
	022 Basement Excavation																	
	023 Basement Walls																	
03 Superstructure	031 Floor Construction																	
	032 Roof Construction																	
	033 Stair Construction																	
04 Ext. Closure	041 Exterior Walls																	
	042 Ext. Doors & Windows																	
05 Roofing																		
06 Int. Const.	061 Partitions																	
	062 Interior Finishes																	
	063 Specialties																	

圖 4.6 UNIFORMAT II 與 MasterFormat 編碼對應

(資料來源：Charette et al., 1999)

UNIFORMAT II 編碼編列至元件後，藉由解析元件於實務中的施作流程，納入相關工項，以系統化地探討元件的工項組成。以混凝土樓板為例，完整的施作流程應為綁紮鋼筋、模板組立、混凝土澆鑄、混凝土養護。如表 4.3 所示，對應的工項分為鋼筋、模板、混凝土三類主要工項外，尚包含模板支撐架、鋼筋續接器工程等附屬工項。

表 4.3 元件對應工項-以混凝土樓板為例

工項類別	工項說明
混凝土	結構用混凝土含澆置，245kgf/cm ²
	結構用混凝土含澆置，280kgf/cm ²
	結構用混凝土含澆置，350kgf/cm ²
	結構用混凝土含澆置，420kgf/cm ²
鋼筋	鋼筋加工彎紮組立
	鋼筋，SD280W
	鋼筋，SD420W
	鋼筋續接器工程
模板	場鑄結構混凝土用普通模板，建築物
	場鑄結構混凝土用清水模板，建築物
	室內超高樓板模板支撐架

整體解析流程如圖 4.7 所示，元件對應之工項需進一步拆解材料、機具、人力組成，以探討工項實際的碳排放量。

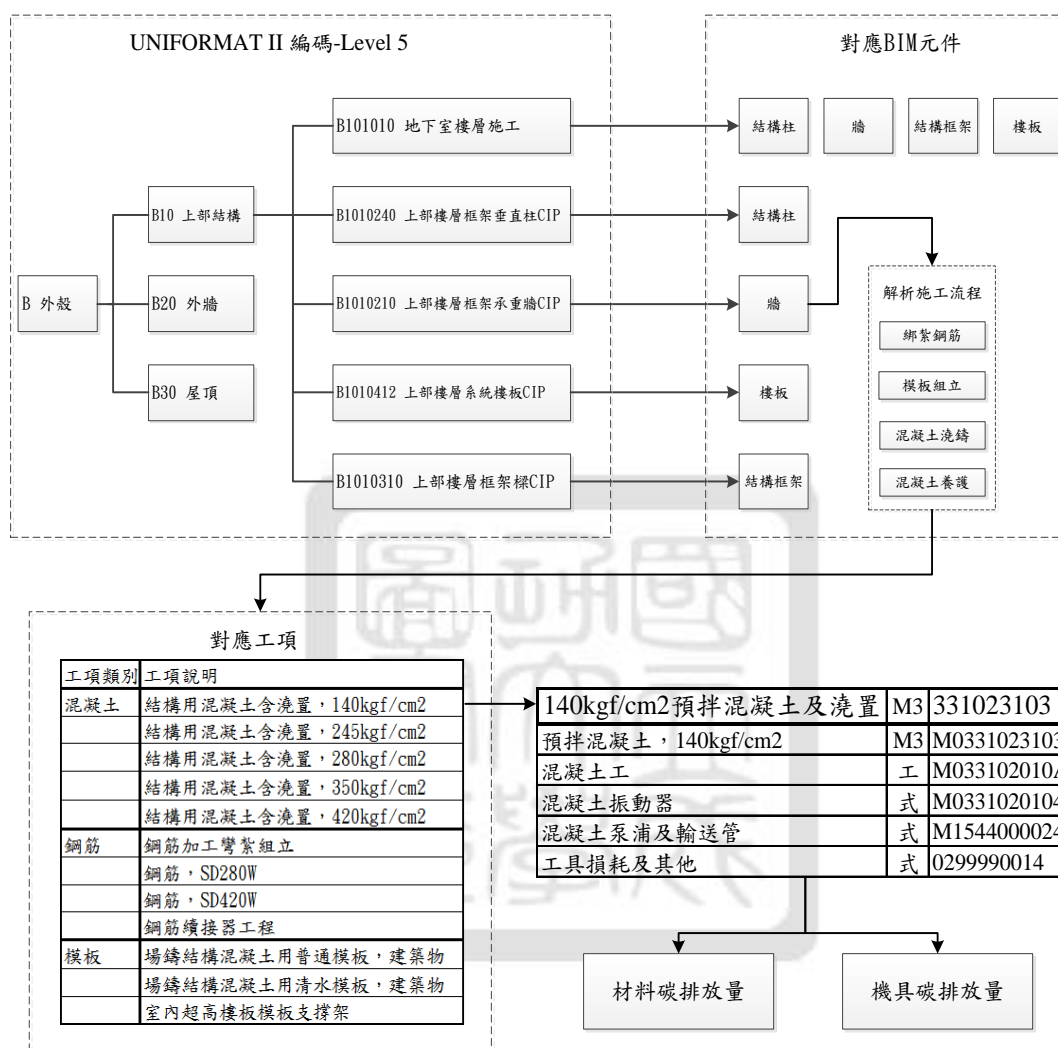


圖 4.7 對應 UNIFORMAT II 至元件與工項

工項的的編列依照編列人員的考量不同會有所差異，以下整理差異因子有：

- (1) 工項細目碼編列的詳細程度不同。

工項編碼後五碼為細目碼，編碼規則可依照工程會規定，表 4.4 以混凝土工項說明，編列工項時依序拌合地點、混凝土抗壓強度、水泥類型、計價單位選擇細目碼。以本案混凝土工項為例，「結構用混凝土含澆置，280kgf/cm²」工項編碼為 0331007002，細目碼僅說明混凝土抗壓強度以及計價單位。元件與工項關聯

需要依工項逐一解析，工項細目碼的編列差異將會有所影響。

表 4.4 結構用混凝土工項細目碼編列規則

綱要編碼	大類別	抗壓強度	水泥類型	其他	估價用單位
03310 結構用混凝土	0	0	0	0	1 M
	1 機拌	1 80kgf/cm ²	1 第1型水泥	1 含減水劑	2 M ²
	2 預拌	2 105kgf/cm ²	2 第2型水泥	2 含緩凝劑	3 M ³
	3 (機拌，水中)	3 140kgf/cm ²	3 第3型水泥	3 含早強劑	4 式
	4 (預拌，水中)	4 175kgf/cm ²	4 第4型水泥	4 含減水緩凝劑	5 T
	5 (預拌，10樓以下)	5 210kgf/cm ²	5 第5型水泥	5 含減水早強劑	6 只
	6 (預拌，20樓以下)	6 245kgf/cm ²	6 輪氣第1A型水泥	6 含高性能減水劑	7 個
	7 (預拌，30樓以下)	7 280kgf/cm ²	7 輪氣第2A型水泥	7 含高性能減水緩凝劑	8 組
	8 人工拌合	8 315kgf/cm ²	8 輪氣第3A型水泥	8 含附屬品	9 KG
	9 再生粒料	9 350kgf/cm ²		9 含附屬品及減水劑	
	A 卵(塊)石混凝土	A 400kgf/cm ²		A 含附屬品及緩凝劑	
		B 450kgf/cm ² (弓型支堡)		
		C 420kgf/cm ²		Z 含澆置及搗實	
		D 265kgf/cm ²		a 含澆置及模板	
		E 抗彎45kgf/cm ²		b 機電設備及動力	
				d 運具10km內	

(2) 編列人員經驗與習慣不同。

編列人員多依據相似案例之歷史資料編列工項，正確性及完整性隨經驗與習慣不同而有所差異。

4.3.2 工項數量資訊相關性分析

應用 BIM 計算工程碳足跡，涉及工項的數量資訊要從 BIM 元件取得，必須先建立元件對應工項的關係，並定義其取得量體資訊之單位。初步解析依據數量取得方式，可將工項分為與元件直接相關、間接相關、人為解析相關與無相關，如表 4.5 所示。

(1) 直接相關

元件量體資訊直接提供項目之數量，所需資訊可直接藉由 BIM 元件模型之屬性資料獲得，例如：混凝土工項所需之體積，可直接由 BIM 模型中混凝土元件之柱、牆、樑、板計算而獲得。

(2) 間接相關

元件量體資訊間接計算提供項目所需之數量，所需資訊需間接藉由 BIM 元件模型之屬性資料並經調整後得，例如：放樣所需之面積，為間接統合樓板面積而得。模板之面積則為計算內部表面積，加上外部面積及底部面積。

(3) 推算相關

由元件量體資訊藉由人為解析後推算項目所需之數量，所需資訊可藉由相關元件推算而得。工程細項與元件數量之間的關係是否為推算相關取決於 BIM 模型是否依照建模規則繪製，例如：若鋼筋未於模型繪製，可以藉由柱、牆、樑、板的混凝土體積分別推算鋼筋量。若模型繪製精細度不滿足建模規則，則定義為推算相關，其量體資訊由相關 BIM 元件取得。

(4) 無相關

無法透過元件量體資訊直接或間接提供所需要之數量，指無法或不需透過 BIM 模型獲得資訊，例如：申請執照與 BIM 模型內的元件無關聯。

表 4.5 初步解析元件與工項關聯性

工項類別	工項編碼	工項說明	數量	單位	相關性
混凝土	033100C002	結構用混凝土，預拌，420kgf/cm ²		M3	
	M03050482L3	混凝土材料費，420kgf/cm ²	1	M3	直接
	03310000Z3	混凝土澆置及搗實	1	M3	直接
	E000003100004	混凝土振動器	1	式	推算
	E000002600016	混凝土泵浦車	1	式	推算
	L000006100001	小工	0.72	時	間接
	L000006900021	混凝土作業工，澆置	0.32	時	間接
	127110004	零星工料	1	式	推算
鋼筋	032106005	鋼筋，SD420W		T	
	M0321060005	產品，鋼筋，SD420W	1	T	直接
	L000005K00002	鋼筋工	1.3	工	間接
	L000005a00002	電鉚工	1.3	工	間接
	M0506020009	產品，金屬材料，鐵線	4	KG	間接
	W0127110004	零星工料	1	式	推算
模板	0331020202	場鑄結構混凝土用普通模板，建築物		M2	
	M0605020003	產品，模板用木	0.004	M3	間接
	M05060DR009	產品，五金零件	0.3	KG	間接
	L00000R100002	一般技工	0.055	工	間接
	L000006000002	普通工	0.015	式	間接
	W01271RR004	零星工料	1	式	推算

工項數量資訊相關性與 BIM 模型是否繪製有關，以鋼筋工項為例，數量資訊可以直接自模型提取鋼筋元件長度，再乘上鋼筋單位重(kg/m)即為鋼筋重量。因案例工

程 BIM 模型並未繪製鋼筋工項，故鋼筋工項數量資訊相關性為推算相關，僅能以混凝土體積推算，慣例上欲利用混凝土體積估算鋼筋量，混凝土柱、牆、樑、板結構的配筋量皆不相同，需要分別乘上鋼筋比以轉換，以結構柱為例，推算之結構柱鋼筋量即為其混凝土體積(m^3)乘上柱之約略鋼筋比 $0.2(\text{ton}/m^3)$ (謝尚賢等，2014)。

4.4 解析工項碳足跡

工項編碼並建置於資料庫，方便編制者依不同工程需求編列預算，使用工項標單來計算碳足跡，能考量工程所有要素，解析成果儲存於資料庫後亦能縮短日後計算碳足跡之耗時。4.4.1 節介紹工項拆解原則，4.4.2 節說明實證工項碳足跡解析成果。

4.4.1 工項拆解原則

編列工程預算時，考量施工方法，以及施工作業程序，能夠概估所需要的材料、機具、人員、措施等，進而估算使用數量、時程、頻率等，因此有工程詳細價目表、單價分析表等用以估算工程總費用。因為工程項目包含施工活動，藉由工程項目檢視碳足跡，可以確保碳足跡計算結果的完整性。

單價分析項目可概分為材料、機具、人力，解析流程，如圖 2.1 所示，材料需拆解成原物料，個別查找碳排放係數；機具需探討其能耗工率及使用時間，以計算單位碳排放係數；人力不予計算。

(1) 材料

材料在工項標單上，可以分為原物料以及非原物料，原物料可以直接查找碳排放係數並計算；非原物料則需要分析其不同比例之原物料組成，依據個別原物料之碳排放量加以累積計算，如爐石飛灰混凝土。碳排放係數資料庫建置越趨完全，部分大宗非原物料項目亦可直接查找碳排放係數計算。

(2) 機具

機具依據其工率以及工程量，可以推估出使用時間，與對應機具規格之能耗

功率、碳排放係數可一併換算機具項目碳排放量。機具項目的碳排放包含施工材料運輸、施工機具運輸、施工機具使用，其中施工機具運輸佔比重較小，可以忽略不予計算，若工項標單沒有明確分析機具使用時數，可以由工程量與工率概估。

(3) 人力

人力項目涉及工程碳排放量僅有人員運輸，包含有工地內人員運輸以及通勤至工地人員運輸，工地內人員運輸可以模擬工地內運輸機具的使用情形以及能耗功率推估；通勤至工地之人員運輸則因人員差異性大，需實際紀錄人員之實際運輸距離以及運輸載具取得。人力的碳排放量與總工程碳排放量相比甚小，不納入計算。

4.4.2 實證工項碳足跡解析成果

應用工項解析碳足跡，能夠確保涵蓋工程計價項目，碳足跡計算結果的正確性取決於工項單價分析編列的情況。本節解析案例工程標單，說明實證解析成果，以結構工程工項為例。

因案例工程為統包承攬，工項的編列以總價為依據，並不若傳統標案會詳細編制單價分析，解構人、機、料組成。本案例工程為鋼骨鋼筋混凝土構造，詳細價目表在結構工程僅編列八項，如表 4.6 所示。

表 4.6 案例結構工程工項

工項編碼	工項名稱	單位
0321060005	鋼筋，SD420W	ton
0311010002	普通模板	m ²
0331007002	結構用混凝土含澆置，280kgf/cm ²	m ³
051240A025	建築鋼結構，A36	ton
051240A005	建築鋼結構，A572 Gr.50	ton
051240A015	建築鋼結構，SN490B	ton
051240A032	鋼承板	m ²
051240B015	中央廊道遮陽設施構架鋼結構，SN490B	ton

表 4.6 中，單價分析表僅編列鋼筋、混凝土。鋼結構相關工項(A36 鋼材、A572 Gr. 50 鋼材、SN490B 鋼材、鋼承板)並未編列單價分析表，為了詳細解析工項碳足跡資訊，部分工項必須查找國內工料分析資料補足。

依據施工綱要規範及編碼作業總表之規定，前五碼綱要規範碼須依據相同編碼編訂，細目編碼則依規格性能編列而不盡相同。國內各機關單位出版的工料分析手冊對相同工項的編列即有所差異，參考工料分析手冊編列單價分析表，並與案例比較，以台北市政府工務局(2009)及農委會林務局(2010)出版的工料分析手冊為依據。

以混凝土工項為例，各機關單位編列的單價分析表差異甚大，詳如表 4.7。

表 4.7 各機關單位編列混凝土工項單價分析表比較

台北市工務局工料分析手冊混凝土工項單價分析表					
工項代碼	工項名稱	細項名稱	細項代碼	單位	數量
0331027003	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm2	產品，預拌混凝土材料費，280kgf/cm2，第1型水泥，工地交貨	M03050461L3	m ³	1
		混凝土作業工，澆置	L000006900021	時	0.32
		小工	L000006100001	時	0.72
		混凝土振動器	E000003100004	式	1
		混凝土養護	0339000004	式	1
		混凝土輸送設備	E0000010L0004	式	1
		零星工料	W0127110004	式	1
		農委會林務局工料分析手冊混凝土工項單價分析表			
工項代碼	工項名稱	細項名稱	細項代碼	單位	數量
03310270Z3	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm2，含澆置及搗實	產品，預拌混凝土材料費，280kgf/cm2，工地交貨	M03050460L3	m ³	1
		結構用混凝土，含澆置及搗實	03310000Z3	m ³	1
		零星工料及工具損耗	W01271RR004, #	式	1

台北市工務局工料分析手冊編列細項完整，僅未明確編列混凝土輸送設備；農委會林務局工料分析手冊的單價分析最為簡略，未編列機具及人力細項。為滿足碳足跡計算需求，單價分析表應包含所有材料、機具及人力組成。探討混凝土實際施作流程，彙總三者的工程細項，編列符合碳足跡計算需求之單價分析表以儲存於資料庫。

混凝土的施作流程為拌合、輸送、澆置、搗實、養護。本研究解析之混凝土工項單價分析與案例提供之差異如表 4.8 所示，參考工料手冊後編列之施作細項有混凝土澆置及搗實；機具有輸送和澆置所需之輸送設備(混凝土泵浦車輸送、塔式吊車輸送、升降塔輸送、手推車輸送等)以及搗實所需之混凝土震動器；人力有混凝土作業工、小工；雜項有零星工料。

表 4.8 案例與本研究編列之混凝土工項單價分析比較

案例提供混凝土工項單價分析表					
工項代碼	工項名稱	細項名稱	細項代碼	單位	數量
0331007002	結構用混凝土 含 澆 置 ， 280kgf/cm2	混凝土材料費， 280kgf/cm2	M03050461L3	m³	1
		混凝土澆置及搗實	03310000Z3	m³	1
		混凝土泵浦車	E00000260001	趟	0.005
		領班	L000004001002	工	0.005
		零星工料	0127110004,#	式	1
本研究編列混凝土工項單價分析表					
工項代碼	工項名稱	細項名稱	細項代碼	單位	數量
0331007002	結構用混凝土 含 澆 置 ， 280kgf/cm2	產品，預拌混凝土 材料費， 280kgf/cm2，第 1 型水泥，工地交貨	M03050461L3	m³	1
		混凝土澆置及搗實	03310000Z3	m³	1
		混凝土振動器	E000003100004	式	1
		混凝土泵浦車	E00000260001	式	1
		小工	L000006100001	時	0.72
		混凝土作業工，澆 置	L000006900021	時	0.32
		零星工料	W0127110004	式	1

確定單價分析表能完整包含工項的所有材料、機具、人力組成後，須考量工程實際情況，依工程細項查找碳排放係數。彙整現有應用工項計算碳足跡文獻成果，碳排放係數來源以陳啟明等(2013)及張德鑫等(2011)為主要依據，部分缺項查找環保署網站碳排放係數資料庫。

解析混凝土工項碳排放資訊，如表 4.9 所示，以下詳述在材料、機具的碳排放係數之選用(不計算人力)。

表 4.9 本研究解析之混凝土工項單價分析表碳排放資訊

細項名稱	細項代碼	單位	數量	碳排放係數	來源
產品，預拌混凝土材料費，280kgf/cm ² ，第 1 型水泥，工地交貨	M03050461L3	m ³	1	272.03	張(2011)
混凝土澆置及搗實	03310000Z3	m ³	1	175.39	張(2011)
混凝土振動器	E000003100004	式	1	0.48	陳(2013)
混凝土泵浦車	E00000260001	式	1	4.52	陳(2013)
小工	L000006100001	時	0.72	0	
混凝土作業工，澆置	L000006900021	時	0.32	0	
零星工料(以上項目 1%)	W0127110004	式	1	4.52	

(1) 材料

張德鑫等(2011)依照農委會林務局工料分析手冊之工項單價分析表，查找工程細項碳排放係數，工程細項完全相同時可優先選用。混凝土工項單價分析表中(4.9 表下部)，「280kgf/cm² 混凝土材料費」與「混凝土澆置及搗實」取自農委會林務局工料分析手冊，得以取用自張德鑫等(2011)之研究資料，單位碳排放係數分別為 272.03(kgCO₂e)與 175.39(kgCO₂e)。

(2) 機具

因實務上單價分析表在編列機具使用時，大多以「式」為單位，甚少以時數表示，在解析機具使用碳排放時須合理假設，以求得合理的碳排放係數。機具碳排放量計算為：機具的能源耗用效率×使用時數×消耗能源碳排放係數，耗能源種

類有柴油、電力，取用環保署 2015 年公布係數，柴油為 3.49 kgCO₂e/L，電力為 0.66 kgCO₂e/度。

混凝土工項涉及的機具有混凝土振動器及混凝土泵浦車，混凝土振動器使用電力，能源耗用效率為 1.0 度/hr(陳啟明等，2013)，假設混凝土振動器使用時數與小工工作時數(0.72)相同，得出混凝土振動器單位碳排放量為 1.0(能源耗用效率)×0.72(使用時數)×0.66(電力碳排放係數)=0.48(kgCO₂e)；混凝土泵浦車(20m³/hr~20m³/hr)使用柴油，能源耗用效率為 32.4 L/hr(陳啟明等，2013)，假設依混凝土泵浦車規格，換算得 1m³ 混凝土使用時數為 0.03~0.05 小時，取平均 0.04 小時，得出混凝土泵浦車單位碳排放量為 32.4(能源耗用效率)×0.04(使用時數)×3.49(柴油碳排放係數)=4.52(kgCO₂e)。

利用工項詳細價目表與單價分析表計算工程碳足跡，能切實考量工程所有的計價項目，但實務上工程材料通常為工地交貨，單價分析並不會編列材料運輸，材料運輸使用的機具碳排放量需要額外計算。計算方法為假設材料運輸機具的規格，以決定機具載運量與能耗係數，藉由材料總量除以其載重量得出載運趟數，並假設運距得出總能耗，最後乘上單位能耗碳排放量即為材料運輸碳排放量。

材料運輸碳排放量的計算涉及諸多假設，不同工程差異甚大，不適建置於資料庫內儲存。於資料庫額外建置輸入欄位，供每次碳足跡計算時輸入假設，於第五章詳述。

第5章 BIM 碳足跡整合資料庫建置

本章將前置解析成果建置於資料庫，並建立適用碳足跡計算之建模規則，供建模階段依循，最後以案例實證，呈現建置成果。5.1 節說明 BIM 碳足跡整合資料庫建置，5.2 節建立建模規則，5.3 節實證 BIM 碳足跡整合計算成果。

5.1 BIM 碳足跡整合資料庫建置

前述章節解析 UNIFORMAT II 編碼數量資訊、工項碳足跡資訊及元件工項相關性，需彙總於資料庫儲存，本節說明 BIM 碳足跡整合資料庫如何於 Microsoft Access 建置，5.1.1 節 BIM 模型匯出數量明細，說明得以直接匯入 Access 資料庫之數量明細格式設定。5.1.2 節建立資料表，5.1.2 節建立資料關聯，5.1.3 節建立查詢，5.1.4 建立表單。

5.1.1 BIM 模型匯出數量明細

依循 UNIFORMAT II 編列原則對 BIM 模型元件編碼，得以從 BIM 建模軟體 Revit 輸出 UNIFORMAT II 編碼之數量資訊，資料庫輸入資訊僅有組合代碼的量體資訊(包含數量、長度、體積)，使用 Revit 內建數量明細表匯出功能即可滿足需求，且匯出數量資訊為文字檔(txt)，可以直接匯入至 Microsoft Access 資料庫，格式輸出正確則不需手動修正。本節定義數量明細表匯出格式設定，確保輸出資訊適用於 BIM 碳足跡整合資料庫。

欲依照 UNIFORMAT II 分類輸出數量資訊，須利用「視圖」功能分類中的「明細表/數量」功能，分別輸出各元件的數量資訊。在計算碳足跡上，注重的是使用材料的總數，故取消勾選「詳細列舉每個例證」，如圖 5.1 所示，讓明細表僅計算各組合代碼所包含元件的總量體資訊；在明細表輸出欄位需選擇組合代碼(即 UNIFORMAT II 編碼)與量體資訊(數量、長度、體積)。

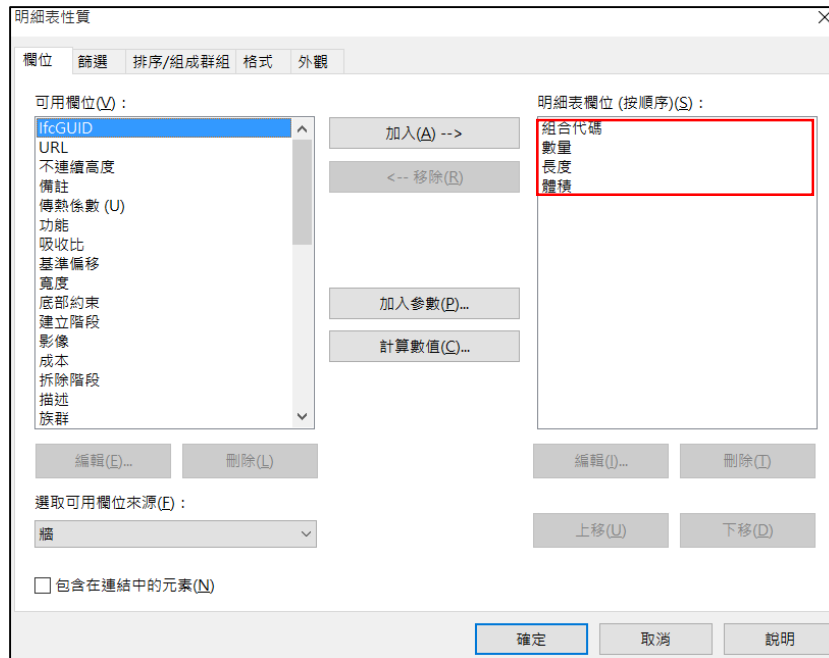


圖 5.1 數量明細表性質

在體積欄位格式設定，單位符號應設定為「無」(圖 5.2)，如此輸出之數量資訊才能以數字形式直接匯入至 Microsoft Access 為資料表，方便於資料庫內加總。

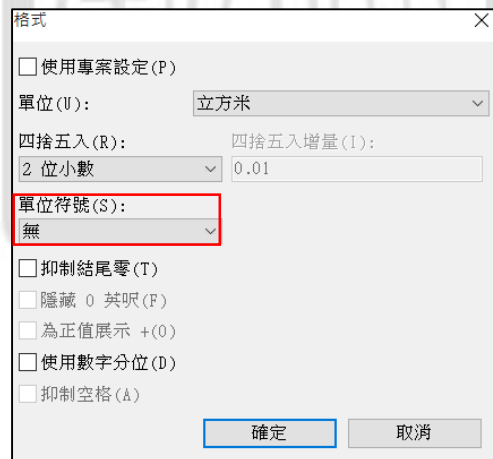


圖 5.2 體積欄位格式設定-單位符號

欄位如數量、體積、長度等，需要加總所有元件時，勾選「計算總數」，以產出量體資訊對應至工項，如圖 5.3 所示，欄位得以輸出加總資訊。

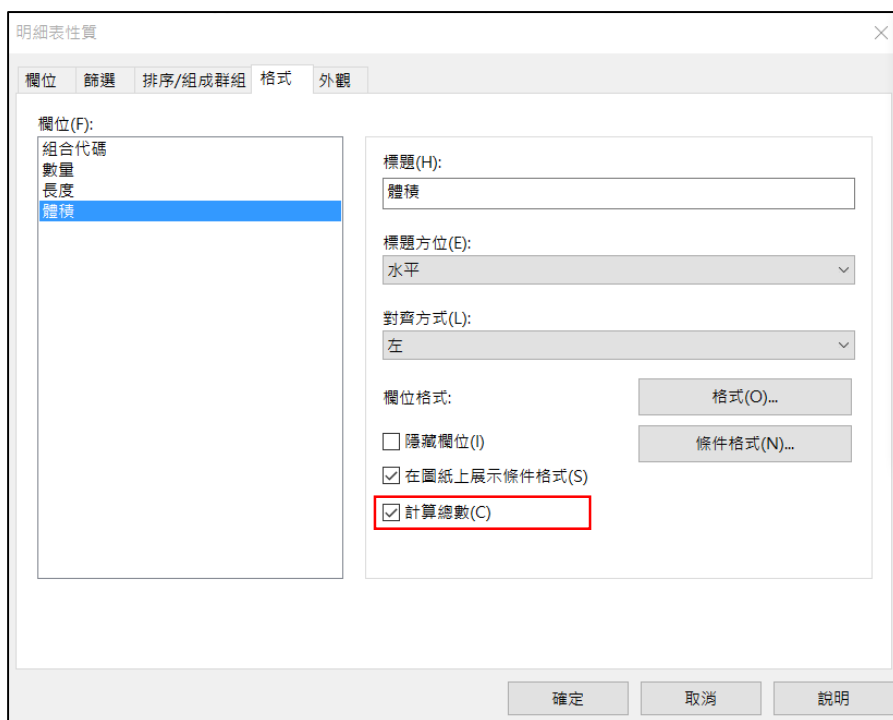


圖 5.3 體積欄位格式設定-計算總數

設定好明細表欄位，即可匯出文字檔格式之數量明細表，為減少手動更改的麻煩，匯出格式必須能直接匯入至 Microsoft Access 資料庫，格式設定如圖 5.4 所示，取消勾選「匯出標題」及「匯出群組頁首、頁尾的空白行」，以減少匯出不必要的標題及空白行。以此格式匯出之明細表可以直接匯入 Microsoft Access 創建資料表，簡化資訊傳遞，作為 BIM 碳足跡計算整合資料庫的輸入資訊。

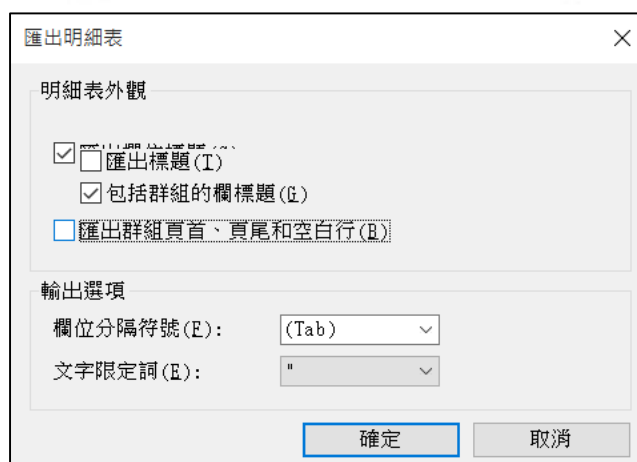


圖 5.4 匯出明細表格式設定

5.1.2 建立資料表

將資料表分為四個類型，並取開頭英文字母命名資料表，以方便辨識資料表用途，以下條列說明：

(1) 工項編碼用資料表(PCCES)。

每個工項編碼須建立個別的資料表，完整儲存工項涉及之工程細項，如表 5.1 所示，儲存的資訊包括工程細項的單價分析資訊，為表中左半部，「數量」欄位代表每單位工項所包含細項之數量；工程細項的數量資訊相關性，為表中中間部分，以鋼筋工項為例，數量資訊由混凝土乘上推算公式得來；工程細項的碳排放資訊，為表中右半部，。

表 5.1 工項編碼用資料表-鋼筋工項為例

P0321060005										
工項編碼	工項註解	工項	細項編碼	細項註解	數量	數	相關性	推算依據	推算公式	材料碳排放數
0321060005	鋼筋，SD420W	T	0321060005	鋼筋，SD420W	1	T	間接相關	混凝土體積	0.129	0
0321060005	鋼筋，SD420W	T	L000005a00002	電焊工	1.3	工	間接相關	混凝土體積	0.129	0
0321060005	鋼筋，SD420W	T	L000005K00002	鋼筋工	1.3	工	推算相關	混凝土體積	0.129	0
0321060005	鋼筋，SD420W	T	M0321060005	產品，鋼筋，工地交貨	1	T	間接相關	混凝土體積	0.129	923.45
0321060005	鋼筋，SD420W	T	M0506020009	產品，金屬材料，鐵線	4	KG	間接相關	混凝土體積	0.129	0.92
0321060005	鋼筋，SD420W	T	W0127110004	零星工料	1	式	間接相關	混凝土體積	0.129	0

(2) 關聯用資料表(Relationship)。

用以儲存工項編碼與 UNIFORMAT II 編碼之關聯(表 5.2)，輸入編碼數量資訊，將依循此關聯對應至工項，以計算工項總數量及碳足跡。

表 5.2 關聯用資料表

R元件對應工項			
組合代碼	組合代碼註解	對應BIM元件	工項編碼
A1020600	筏式基礎	結構柱, 結構框架, 樓板, 牆	0331007002
A1020600	筏式基礎	結構柱, 結構框架, 樓板, 牆	0321060005
B1010100	地下室樓板施工	結構柱, 結構框架, 樓板, 牆	0331007002
B1010100	地下室樓板施工	結構柱, 結構框架, 樓板, 牆	0321060005
B1010240	上部樓層框架-場鑄式垂直柱	結構柱	0331007002
B1010210	上部樓層框架-場鑄式承重牆	牆	0331007002
B1010310	上部樓層框架-場鑄式樑	結構框架	0331007002
B1010412	上部樓層框架-場鑄式樓板-平板	樓板	0331007002
A1020600	筏式基礎	結構柱, 結構框架, 樓板, 牆	03110R0002
B1010100	地下室樓板施工	結構柱, 結構框架, 樓板, 牆	03110R0002
B1010240	上部樓層框架-場鑄式垂直柱	結構柱	03110R0002
B1010210	上部樓層框架-場鑄式承重牆	牆	03110R0002
B1010310	上部樓層框架-場鑄式樑	結構框架	03110R0002
B1010412	上部樓層框架-場鑄式樓板-平板	樓板	03110R0002
B1010240	上部樓層框架-場鑄式垂直柱	結構柱	0321060005
B1010210	上部樓層框架-場鑄式承重牆	牆	0321060005
B1010310	上部樓層框架-場鑄式樑	結構框架	0321060005

(3) 輸入用資料表(Input)。

輸入用資料表為每次計算時需輸入資料，共有兩類：一用以輸入由 BIM 模型匯出之數量明細表資訊；二用以輸入材料運輸機具資訊。組合代碼輸入資料表如表 5.3 所示，須依照文字檔格式之數量明細表，以匯至特定資料表，輸入時選擇以「定位點」為分隔符號，勾選「第一列是欄位名稱」，並選擇「讓 Access 自動加入主索引鍵」，避免因資料重複而造成匯入錯誤。

表 5.3 輸入用資料表-組合代碼輸入

I 組合代碼輸入			
識別碼	組合代碼	數量	體積
1	A1020600	34	118.76
2	B1010100	16	14.00
3	B1010240	162	537.83
4	B1010250	54	11.74
5	A1020600	107	651.65
6	B1010100	157	412.75
7	B1010310	326	671.34
8	B1010330	213	21.31
9	A1020600	2	1050.66
10	B1010100	1	418.11
11	B1010412	32	1203.66
12	A1020600	3	3.03

因單價分析表不編列材料運輸項目，需另外假設材料運輸機具資訊以計算，建立之材料運輸機具資料表如表 5.4 所示，包含資訊有對應工程細項及假設之運輸機具載量、運輸距離、平均時速、能耗效率、柴油碳排放係數。

本研究假設材料皆以 21 噸傾卸卡車(載量 8m^3)運輸，假設平均運具為 50km，單位運輸油耗 0.3(PaLATE, 2011)，柴油碳排放係數取 3.49(環保署，2015)。於資料表輸入載量時需依工程細項單位轉換，以鋼筋為例，因鋼筋工項使用單位為噸(ton)，載量 $8(\text{m}^3)$ 需乘上鋼筋密度 $7.8(\text{g}/\text{cm}^3)$ 轉換為 62.4(ton)。

表 5.4 輸入用資料表-材料運輸機具

I 材料運輸機具					
工項編碼	細項編碼	運輸機具載量	運輸距離	單位運輸油耗	柴油碳排放係數
03110R0002	M05060DR009	8000	50	0.3	3.49
0321060005	M0321060005	62.4	50	0.3	3.49
0331007002	M03050461L3	8	50	0.3	3.49
05500mD009	M05500m0009	62.4	50	0.3	3.49
0321060005	M0506020009	8000	50	0.3	3.49

(4) 基礎用資料表(Basis)。

用來組構其他資料表重複出現的屬性資料，方便於新建資料時能夠使用下拉式選單選取資訊。資料庫建置之基礎用資料表有相關性資料表、對應 BIM 元件資料表、單位資料表。

5.1.3 建立資料關聯

資料表間的關聯組構資料庫的邏輯，供查找資訊時依循。建構正確且完整的關聯才能確保資料有效地流通。建置資料庫之運算邏輯為：輸入 UNIFORMAT II 編碼數量資訊，資料庫能自動依照已解析之工項與元件關聯性，合計包含的工項及碳足跡。

建置之資料關聯如圖 5.5 所示，每一框格代表為已建立之資料表，框格內為資料表儲存的屬性資料，不同屬性資料藉由線條表示兩者的關聯。

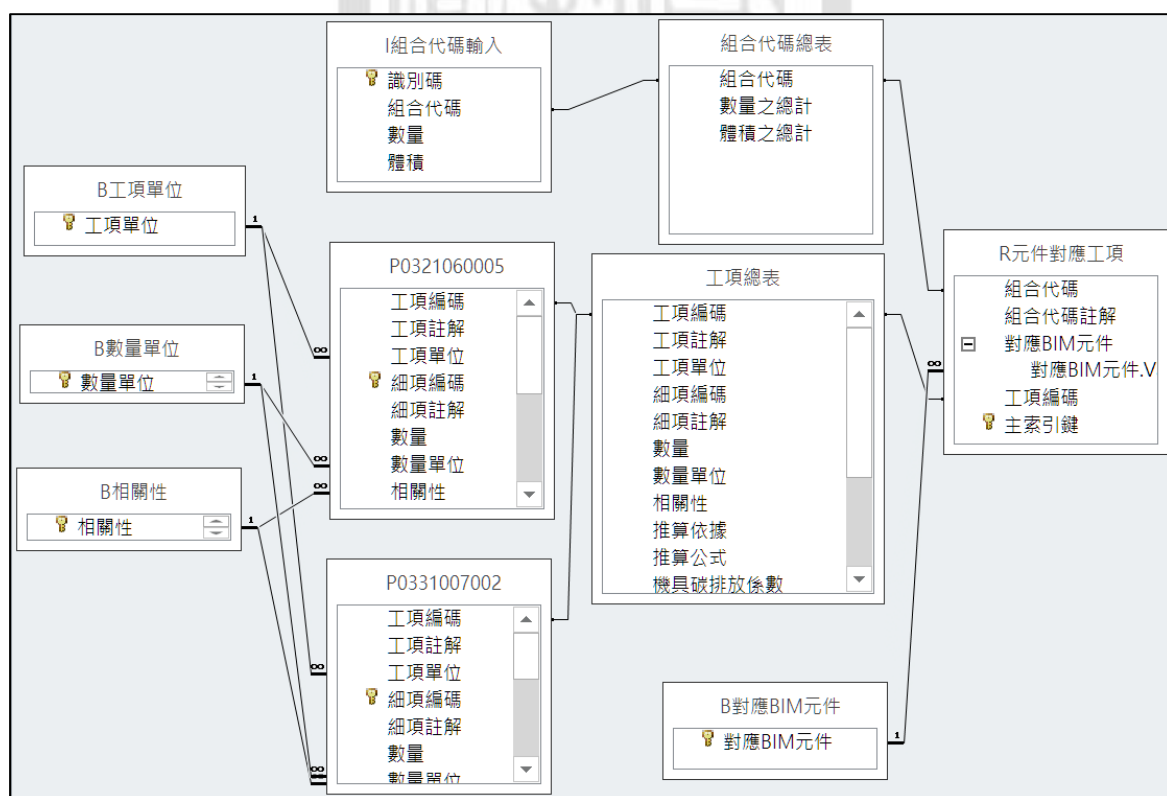


圖 5.5 資料關聯

圖 5.5 中除了輸入用資料表(例如：I 組合代碼輸入)為每次計算時的輸入資訊，其

餘皆須先行解析並建置於資料庫內。基礎用資料表(例如：B 相關性)為其餘資料表之屬性資料來源，關聯至工項編碼資料表及關聯資料表的單位、相關性等欄位。工項需個別建置工項編碼用資料表儲存其單價分析及碳足跡資訊(例如：P0331007002)，最終彙總至工項總表以方便「查詢」計算。工項及元件的關聯儲存在關聯用資料表(例如：R 元件對應工項)，對應輸入的 UNIFORMAT II 數量資訊至相關工項。

將圖 5.5 建置之資料關聯，試以正規化減少重複資料並避免更新錯誤，圖 5.6 為滿足第三正規化形式之資料庫，正規化後之資料庫將工項編碼資訊及細項編碼資訊分別建置資料庫儲存，組合代碼資訊亦另建資料表，藉由關聯來減少資料表中「部分相關」及「遞移相關」。

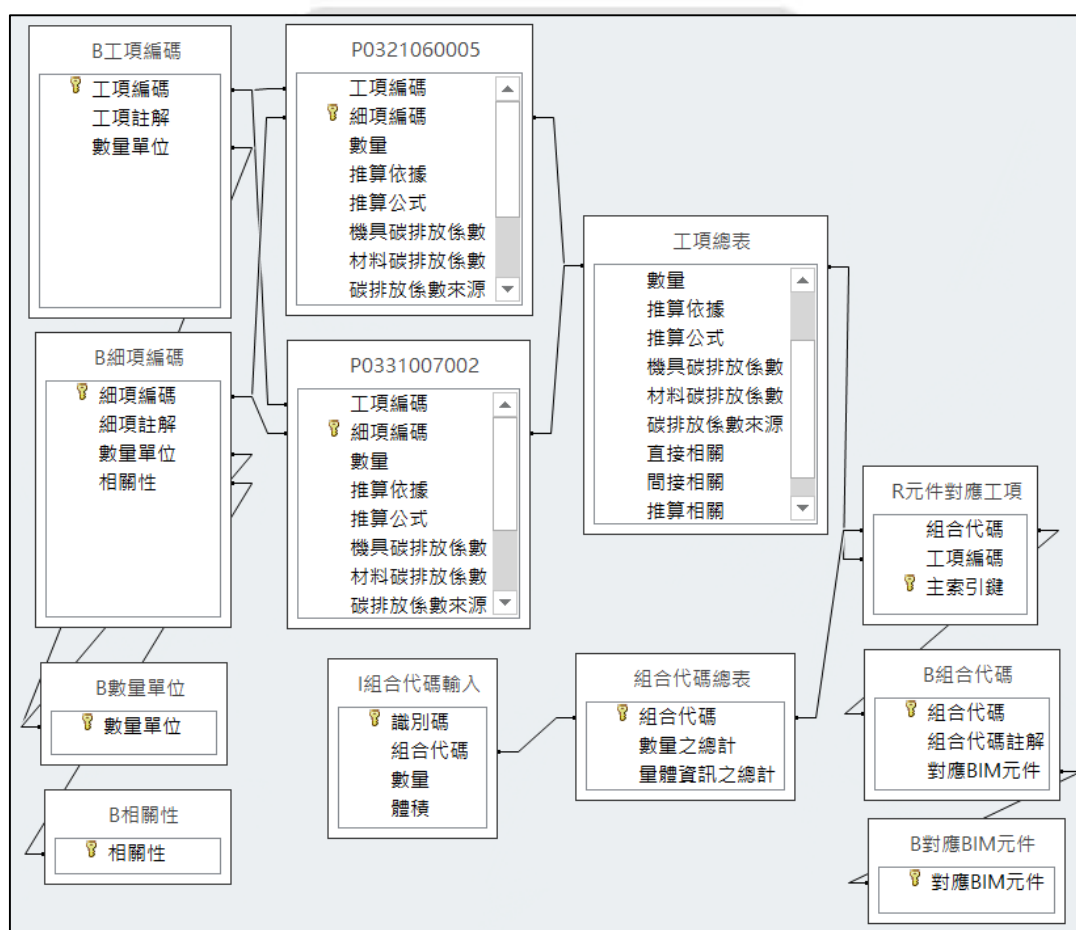


圖 5.6 正規化後之資料關聯

因資料的屬性及架構不同，正規化後之資料庫在實際更新資料時，步驟反而更

為繁瑣，原因如下。

- (1) 更新資料時須新增資料表，資料關聯必須重新建立。

更新資料時須新增工項編碼用資料表，於第三正規化形式時須重新建置關聯才得以於新增之工項編碼用資料表內新建資料，且於基礎用資料表(例如：B 工項編碼、B 細項編碼)亦必須包含有新增工項資訊，故既有之資料表亦須額外新建資料。

- (2) 資料庫儲存既有單價分析表資訊，資訊得以直接輸入。

如圖 5.5 所示，第一正規化形式之資料表將工項資訊於同一資料表儲存，較便於輸入既有之單價分析資訊，若於第三正規化形式新建工項編碼用資料表，則需於數量龐大之工程細項中勾選其單價分析資訊，實際操作較為繁瑣。

- (3) 單價分析資訊除人力項目外，不易重複。

工項單價分析表之資訊，除人力項目外重複率不高，在編列時仍須依實際狀況編列工程細項，故不須另建資料庫以包含所有工程細項。

綜上所述，本研究資料庫以第一正規化形式設計，便於新增資料及維護。

5.1.4 建立查詢

本節建立三種類型之查詢，一為處理現有資料表之資料供後續查詢使用；二為依計算需求從不同資料表擷取資料，並計算結果；三為分析計算成果的資料組成。

第一類需要預先利用查詢功能處理之資料有：

- (1) 組合代碼數量資訊。

因為在 BIM 模型輸出 UNIFORMAT II 編碼數量資訊時，須依次輸出結構柱、牆、結構框架、樓板等元件之數量資訊，而這些元件編列相同的 UNIFORMAT II 編碼時，需要先行藉由查詢功能加總，求得總數量。以圖 5.7 示意，左表為輸入組合代碼數量資訊之原始資料，同樣的組合代碼的數量資訊來自不同元件，經計算彙總後為右表。

I 組合代碼輸入			
識別碼	組合代碼	數量	體積
1	A1020600	34	118.76
2	B1010100	16	14.00
3	B1010240	162	537.83
4	B1010250	54	11.74
5	A1020600	107	651.65
6	B1010100	157	412.75
7	B1010310	326	671.34
8	B1010330	213	21.31
9	A1020600	2	1050.66
10	B1010100	1	418.11
11	B1010412	32	1203.66
12	A1020600	3	3.03
13	A2020100	12	915.37
14	B1010100	3	28.76
15	B1010210	17	7.45

組合代碼總表		
組合代碼	數量之總計	體積之總計
A1020600	146	1824.1
A2020100	12	915.37
B1010100	177	873.62
B1010210	17	7.45
B1010240	162	537.83
B1010250	54	11.74
B1010310	326	671.34
B1010330	213	21.31
B1010412	32	1203.66

圖 5.7 運用查詢功能總計組合代碼數量資訊

(2) 各工項資料表

運用工項與元件相關性涉及的工項，對應至 UNIFORMAT II 編碼數量資訊時，因為每一個工項需要個別建置包含其細項、碳足跡資訊之資料表，而這些屬性資料都相同，所以在查詢時亦必須個別建置，如此將過於複雜，而喪失簡化計算之目的。

因此各工項資料表應先行彙總，簡化複雜的查詢。使用 SQL 語法(Structural Query Language)的 UNION 指令，能夠將相同屬性資料的資料表合併，合併結果如表 5.5 所示，上部取自鋼筋工項編碼資料表，下部取自混凝土工項編碼資料表。

表 5.5 工項資料表合併至工項總表

工項編碼	工項註解	工	細項編碼	細項註解	數量	單位	相關性	推算依據	推算公式	機具碳排放係數	材料碳排放係數	碳排放係數
0321060005	鋼筋，SD420W	T	M0321060005	產品，鋼筋，工地交貨	1	T	間接相關	混凝土體積	0.129	0	923.45	張(2011)
0321060005	鋼筋，SD420W	T	M0506020009	產品，金屬材料，鐵線	4	KG	間接相關	混凝土體積	0.129	0	0.92	張(2011)
0321060005	鋼筋，SD420W	T	L000005K00002	鋼筋工	1.3	工	推算相關	混凝土體積	0.129	0	0	0
0321060005	鋼筋，SD420W	T	L000005a00002	電焊工	1.3	工	間接相關	混凝土體積	0.129	0	0	0
0321060005	鋼筋，SD420W	T	W0127110004	零星工料	1	式	間接相關	混凝土體積	0.129	0	0	0
0321060005	鋼筋，SD420W	T	0321060005	鋼筋，SD420W	1	T	間接相關	混凝土體積	0.129	0	0	0
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	M03050461L3	產品，預拌混凝土材料	1	M3	直接相關		1	0	272.03	張(2011)
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	0331000023	混凝土澆置及搗實	1	M3	直接相關		1	0	175.39	張(2011)
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	E000003100004	混凝土振動器	1	式	推算相關	混凝土體積	1	0.48	0	陳(2013)
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	E00000260001	混凝土泵浦車	1	式	推算相關	混凝土體積	1	4.52	0	陳(2013)
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	L000006100001	小工	0.72	時	間接相關		1	0	0	無
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	L000006900021	混凝土作業工，澆置	0.32	時	間接相關		1	0	0	無
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	W0127110004	零星工料	1	式	間接相關	混凝土體積	1	0.05	4.47	無
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	0331007002	結構用混凝土，預拌，	1	M3	直接相關		1	0	0	無

第二類，依計算需求從不同資料表擷取資料以計算結果的有：

(1) 工項數量計算總表

模型輸出之 UNIFORMAT II 編碼數量資訊藉由建立「查詢」，依循前述關聯

用資料表儲存的工項與元件關聯性對應至工項，考量工項的數量資訊與組合代碼數量資訊的相關性可以分為直接相關、間接相關、推算相關及無相關，工項初始數量需再經計算後得出各細項數量，計算結果如表 5.6 所示。以結構用混凝土工項為例，對應到的組合代碼有 A1020 的筏式基礎及 B1010 上部結構的柱、牆、樑、板，總計工項初始數量為 1,824.1m³，直接相關表示數量可以直接取用，亦為 1,824.1m³；間接相關表示數量必須再乘上間接計算公式取用，此類細項分別有 583.7 時的混凝土作業工與 1,313.3 時的小工；推算相關表示該細項雖無法由數量資訊直接取得，但與模型元件有關聯，可人為推算，此類細項有混凝土泵浦車、混凝土振動器與零星工料；無相關指該細項既無法由數量資訊取得也無法推算。

表 5.6 工項數量計算總表

工項編碼	工項註解	細項編碼	細項註解	單價數量	單位	相關性	體積	直接數量	間接數量	計算後數量	推算依據
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	M03050461L3	產品，預拌混凝土材料費，1		M3	直接相關	1824.1	1824.1	0	1824.1	
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	1	M3	直接相關	1824.1	1824.1	0	1824.1	
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	03310000Z3	混凝土澆置及搗實	1	M3	直接相關	1824.1	1824.1	0	1824.1	
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	E000003100004	混凝土振動器	1	式	推算相關	1824.1	0	0	0	混凝土體積
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	E00000260001	混凝土泵浦車	1	式	推算相關	1824.1	0	0	0	混凝土體積
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	L000006100001	小工	0.72	時	間接相關	1824.1	0	1313.352	1313.352	
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	L000006900021	混凝土作業工，澆置	0.32	時	間接相關	1824.1	0	583.712	583.712	
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	W0127110004	零星工料	1	式	間接相關	1824.1	0	0	0	混凝土體積

(2) 初步碳足跡計算結果總表

將 UNIFORMAT II 編碼數量資訊與相對應之工程細項碳排放係數相乘，並依工項加總後即為工項碳足跡。如表 5.7 所示，計算後之細項數量乘上材料生產碳排放係數與機具施工碳排放係數，即為材料生產碳排與機具施工碳排，此總表為其他查詢之基礎，得以因應不同需求擷取其中不同的資訊。

表 5.7 初步碳足跡計算成果

工項編碼	工項註解	細項編碼	細項註解	材料生產碳排	機具施工碳排
0321060005	鋼筋，SD420W	L000005a00002	電焊工	0	0
0321060005	鋼筋，SD420W	L000005K00002	鋼筋工	0	0
0321060005	鋼筋，SD420W	M0321060005	產品，鋼筋，工地交貨	2491209.534	0
0321060005	鋼筋，SD420W	M0506020009	產品，金屬材料，鐵線	2481.9024	0
0321060005	鋼筋，SD420W	W0127110004	零星工料	0	0
0331007002	結構用混凝土，預拌	03310000Z3	混凝土澆置及搗實	897646.02	0
0331007002	結構用混凝土，預拌	E00000260001	混凝土泵浦車	0	23133.36
0331007002	結構用混凝土，預拌	E000003100004	混凝土振動器	0	2456.64
0331007002	結構用混凝土，預拌	L000006100001	小工	0	0
0331007002	結構用混凝土，預拌	L000006900021	混凝土作業工，澆置	0	0
0331007002	結構用混凝土，預拌	M03050461L3	產品，預拌混凝土材料費	1392249.54	0
0331007002	結構用混凝土，預拌	W0127110004	零星工料	22877.46	255.9

(3) 工項碳足跡總表

以主體工程為例建置資料庫，工項共計有鋼筋、混凝土、模板及鋼結構，利用總計功能彙總各工項的碳排放量，如表 5.8 所示。

表 5.8 工項總碳排放量

工項編碼	工項註解	材料生產碳排	機具施工碳排	總碳排放量
03110R0002	場鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	8,953.66	0.00	8953.656227488
0321060005	鋼筋，SD420W	721,589.66	0.00	721589.6643249
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm2	2,699,450.41	30,166.85	2729617.2554
05500mD009	鋼材(ASTM A36)，含加工及安裝	599,148.91	0.00	599148.908

(4) 材料運輸碳排

材料運輸碳排放量計算公式為：

$$\frac{\text{材料總量}}{\text{運輸機具載量}} (\text{趟數}) \times 2 (\text{來回}) \times \text{單位能耗效率} \times \text{柴油碳排係數} \quad (\text{式 5-1})$$

利用查詢計算出材料運輸碳排如表 5.9 所示，將工項拆解成材料、機具、人力組成後，依據各材料運輸情形假設運輸機具資訊，建置於資料表以代入公式計算。

表 5.9 工程細項材料運輸碳排

工項編碼	工項註解	細項編碼	細項註解	單位	計算後數量	材料運輸碳排量
05500mD009	鋼材(ASTM A36)，含加工及安裝	M05500m0009	產品，鋼材(ASTM A36)	T	257.79	432.54
0321060005	鋼筋，SD420W	M0506020009	產品，金屬材料，鐵線	KG	3113.21892	40.74
0321060005	鋼筋，SD420W	M0321060005	產品，鋼筋，工地交貨	T	778.30473	1,305.91
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm2	M03050461L3	產品，預拌混凝土材料費	M3	6033.37	78,961.73
03110R0002	場鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	M05060DR009	產品，五金零件	KG	7022.84268	91.91

5.1.5 建立表單

本節兩種類型之表單，一為將計算成果以表單呈現，如圖 5.8 所示，建立列印按鈕供使用者快速輸出計算結果。最後再以表單切換管理員建置資料庫起始介面及表單切換介面，實證計算成果於 5.3 節呈現。

工項總數量									
工項編號	工項註解	細項編號	細項註解	單位	相關性	直接數量之總計	間接數量之總計	計算後數量之總計	推算依據
03110R000	場邊結構混凝土用模板，普通模板(使用5:1)	03110R000	場邊結構混凝土用模板，普通模板(使用5:1)	M2	間接相關	0	#####	29147.2584	混凝土體積
032106000	鋼筋，SD420W	032106000	鋼筋，SD420W	T	間接相關	0	#####	969.07122	混凝土體積
033100700	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	033100700	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	直接相關	7512.18	0	7512.18	
05500mD0C	鋼材(ASTM A36)，含加工及安裝	05500mD0C	鋼材(ASTM A36)，含加工及安裝	T	間接相關	0	257.79	257.79	鋼材體積
<input type="button" value="列印"/> <input type="button" value="關閉"/>									

圖 5.8 利用表單輸出計算結果-工項總數量為例

二為將資料表建立成表單形式，如圖 5.9 所示，提供使用者操作介面方便資料新增與維護，並建立按鈕以維護資料。

0331007002

工項編號	工項註解	工項單位	細項編號	細項註解	數量	數量單位	相關性	推算依據	推算公式	材料碳排放數	機具碳排放數	碳排放係數來源
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	0331000023	混凝土澆置及搗實	1	M3	直接相關		1	175.39	0	張(2011)
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	1	M3	直接相關		1	0	0	無
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	E00000260001	混凝土泵浦車	1	式	推算相關	混凝土體積	1	0	4.52	陳(2013)
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	E000003100004	混凝土振動器	1	式	推算相關	混凝土體積	1	0	0.48	陳(2013)
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	L000006100001	小工	0.72	時	間接相關		1	0	0	無
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	L0000069000021	混凝土作業工，澆置	0.32	時	間接相關		1	0	0	無
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	M0305046113	產品，預拌混凝土材料費，280kg/cm ² ，第1型水	1	M3	直接相關		1	272.03	0	張(2011)
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kg/cm ²	M3	W01271100004	零星工料	1	式	間接相關	混凝土體積	1	4.47	0.05	無

圖 5.9 利用表單建立資料庫維護介面-混凝土工項為例

5.2 建模規則建立

因應不同階段的使用需求，BIM 模型在建模階段便須考量納入碳足跡，減少因資訊不足而需反覆修改甚至重新建置的問題。本節整理 LOD 規範及相關文獻，彙整前述之 UNIFORMAT II 編碼編列規則及碳足跡計算需求，建立應用 BIM 於碳足跡計算之建模規則，5.2.1 節建模規則考量，說明建模時應考慮之不同層面資訊，5.2.2 節主體工程工項建模規則及資訊規範，說明用以輸出正確數量之建模規則。

5.2.1 建模規則考量

總結於應用 BIM 於碳足跡計算須考量的建模規則，可以分為：(1)詳細程度，(2)

切割區域，(3)納入資訊。

(1) 詳細程度

碳足跡計算結果取決於模型繪製的詳細程度，概念設計所建置之 LOD100 模型僅以概略量體表示模型，並未繪製元件詳細數量資訊，故無法輸出正確之數量以計算碳足跡。

正確地輸出 BIM 模型數量資訊，才能減少碳足跡計算結果的誤差。賴東延(2011)提及，要從 BIM 模型輸出數量資訊以應用於工程招標階段，模型發展程度必須達 LOD300。

(2) 切割區域

實際建模時，若僅為能耗軟體分析需求，如風場分析、日照分析等，為便於繪製，元件大多不依實際施作情形切割。在應用本研究建立之碳足跡計算時，如元件未切實切割，UNIFORMAT II 編碼將無法正確分類，故各類元件之切割區域應於建模時考量。

(3) 納入資訊

BIM 模型在因應不同的使用需求，須納入不同的資訊。為滿足數量計算需求，元件的材料性質必須於建模時納入，以混凝土工項為例，低樓層多使用高強度的混凝土以確保結構安全，不同材料強度的混凝土對應之工項不同，故需於建模時將兩者區別。

5.2.2 主體工程工項建模規則及資訊規範

本節彙整 LOD 規範及國內相關文獻，探討 UNIFORMAT II 編碼編列及碳足跡計算需求，依循上節所述的三個面向考量主體工程工項之建模規則。

美國建築師學會(AIA)提出 LOD 定義模型元件的完整度，以於營建生命週期不同階段使用。美國總承包公會(Association of General contractors, AGC)的 BIMForum 工作小組以 AIA 中所定義之 LOD 為基礎，將其依 UNIFORMAT II 編碼詳細定義。

BIM 在建模階段並未考慮不同專案參與者對 BIM 模型的需求，導致 BIM 模型無法全盤提供所需資訊，而反覆修改甚至重建，且若純粹以 LOD 來定義 BIM 模型涵蓋之資訊無法表達實際需求，需重新定義 BIM 發展程度準則(蔡政軒，2014)。

施工階段使用之 BIM 模型，多要求包含物件接頭及施工資訊等，必須達到 LOD400，但所包含資訊仍不足以滿足 UNIFORMAT II 編碼及碳足跡計算需求。本節建立滿足碳足跡計算需求之主體工程工項建模規則及資訊規範，表 5.10 為混凝土建模規則及資訊規範，混凝土為主體工程之主要工項，且可用以推算鋼筋及模板數量資訊，建置時是否考量所有資訊將大幅地影響碳足跡計算結果。

表 5.10 混凝土建模規則及資訊規範

	工項數量計算需求	編碼編列需求	碳足跡計算需求
詳細程度	依照正確方位，建置準確數量、形狀、尺寸、位置之混凝土構件。		
切割區域	混凝土元件之切割應考量施工區域(樓層、空間)： <ol style="list-style-type: none"> 1.基本要求為依循混凝土分段澆置原則，切割依施工縫設置。 2.進階要求為柱依樓層切割；樑依牆及大樑切割(樑、牆不可以柱心為始末)；牆依柱切割(不可跨樓層)；板依大樑切割。 3.混凝土元件間須切實接合以避免重疊，無法輸出正確數量。 	混凝土元件之切割應考量 UNIFORMAT II 編碼分類： <ol style="list-style-type: none"> 1. 筏基元件新建族群以滿足編碼需求。 2. 模型元件以地下結構、地上結構及屋頂切割。 	混凝土元件之切割應考量碳足跡資訊： <ol style="list-style-type: none"> 1. 同元件若使用不同材料、機具會造成碳足跡計算結果不同，應切割以納入計算。
納入資訊	1.納入混凝土規格資訊(強度、輸氣劑、骨材粒徑)。	1. 模型元件依不同混凝土規格新建類型，編碼時亦應調整尾碼以輸出不同混凝土強度資訊。	1. 假設之混凝土材料運輸使用機具規格及運距應附加說明。 2. 特殊使用之材料、機具使用應附加說明，以考量碳足跡資訊。

鋼筋元件於 BIM 模型內依附混凝土元件建置，建模詳細程度及切割區域與混凝土相同，且 UNIFORMAT II 編碼並無鋼筋編碼，僅須考量工項數量計算及碳足跡計算需求。如表 5.11 所示，欲於模型內繪製正確鋼筋，需考量鋼筋續搭接長度、保護層厚度、彎鉤及倒角資訊。於輸出鋼筋數量資訊時，模型內輸出資訊為長度，與鋼筋工項計價單位為重量(ton)與不同，須依不同號數鋼筋之單位重量轉換。鋼筋數量若未繪製於模型，鋼筋數量資訊只能由混凝土體積乘上鋼筋比得出，計算結果僅能用以概估，尚不足以產出正確之鋼筋工項數量資訊。

表 5.11 鋼筋建模規則及資訊規範

	工項數量計算需求	碳足跡計算需求
詳細程度	同混凝土工項	
切割區域	同混凝土工項	
納入資訊	1. 納入鋼筋號數、單位重量、鋼筋彎鉤、倒角、搭續接、保護層資訊，以輸出正確的鋼筋數量明細。 2. 鋼筋工項計價單位為重量(ton)，而 BIM 模型內數量計算單位為長度(m)，須再乘上單位長度重量以計算總重(ton)。	1. 假設之鋼筋材料運輸使用機具規格及運距應附加說明。

模板未於 BIM 模型內建置，且 UNIFORMAT II 編碼並無模板編碼，數量由混凝土表面積及混凝土元件接面計算而得，僅考量工項數量計算及碳足跡計算需求。如表 5.12 所示，因模板在樓高較高時需要額外編列支撐架工項，須於建置時納入考量。模板工項計價單位為面積 (m^2)，需依柱、牆、樑、板擷取不同混凝土元件之表面積計算，計算公式為(蔡承諺，2012)：

柱模板= 柱四面 - 板接面 - 樑接面 - 牆接面

樑模板= 樑側面 + 底面 - 牆接面 - 板接面

板模板= 板底 + 側面 - 牆接面 + 底面 + 梯踏及樓梯斜底 + 梯側

牆模板= 牆立面 - 端接面 - 樑接面 - 門窗開口 + 門窗開口側邊

模板計算時，於 BIM 模型擷取之數量資訊複雜，涉及許多計算，適合利用外掛程式自動化擷取資訊以計算。

表 5.12 模板建模規則及資訊規範

	工項數量計算需求	碳足跡計算需求
詳細程度	同混凝土工項	
切割區域	因應模板計算需求，規範混凝土元件切割區域大致與混凝土計算相同，唯為得以輸出個元件接合面積，切割區域應額外考量： 1. 樓板與柱之接合應以樓板包覆柱為原則；需額外建置整層之樓板以計算樓板側模；樑不得跨柱，需切割建置；牆不得與柱重疊。	
納入資訊	1. 納入模板材質、支撐架資訊。 2. 模板工項計價單位為面積(m ²)，擷取混凝土元件之表面積與元件接觸面以計算。	1. 假設之模板使用次數應附加說明，計算上模板工項碳足跡為：模板使用材料碳足跡除以使用次數。

5.3 實證 BIM 碳足跡整合計算成果

本節以案例主體工程工項，實際輸入 BIM 模型數量資訊至資料庫計算，呈現 BIM 碳足跡整合計算成果。5.3.1 節說明案例輸入資料，5.3.2 節 BIM 碳足跡整合計算結果。

5.3.1 案例輸入資料

依循資料庫建置流程依序將資料庫、關聯、查詢及表單建置後，利用「切換表單管理員」能建立簡易的使用者介面，連結資料庫中的所有資料，方便使用者使用。圖 5.10 為碳足跡整合資料庫起始介面，資料庫主要分為兩部分，圖中上部供每次計算時

輸入資訊並檢視計算結果；圖中下部為資料庫維護，可維護內建之工項、碳足跡、UNIFORMAT II 編碼相關性等資訊。

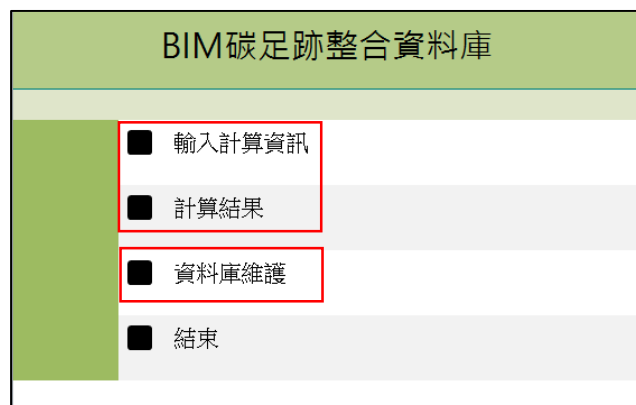


圖 5.10 BIM 碳足跡整合資料庫起始畫面

依循本研究規範，由案例 BIM 模型匯出文字檔格式之數量明細表需利用功能列之「外部資料匯入」功能匯入，或可逐項輸入，如圖 5.11 所示，每筆資料可藉由功能按鈕新增、刪除、復原、儲存。

圖 5.11 顯示了「組合代碼輸入」表單。表單上方標題為「組合代碼輸入」。表單內容包含一個表格，表格的表頭為「識別碼」、「組合代碼」、「數量」和「體積」。表格下方有一個「###」按鈕。表格下方還有兩個按鈕：「跳至第一筆」和「跳至最後一筆」。表格下方還有一排功能按鈕：「新增」、「刪除」、「復原」、「儲存」和「結束」。

識別碼	組合代碼	數量	體積
1	A1020600	34	118.76
2	B1010100	16	14.00
3	B1010240	162	537.83
4	B1010250	54	11.74
5	A1020600	107	651.65
6	B1010100	157	412.75
7	B1010310	326	671.34
8	B1010330	213	21.31
9	A1020600	2	1050.66
10	B1010100	1	418.11
11	B1010412	32	1203.66
12	A1020600	3	3.03
13	A2020100	12	915.37
14	B1010100	3	28.76
15	B1010210	17	7.45
17	B1010210	503	2394.18
▶	###		

圖 5.11 輸入案例組合代碼數量資訊

材料運輸機具假設亦須輸入，如圖 5.12 所示，假設材料皆以 21 噸傾卸卡車(載量 8m³)運輸，能源耗用率為 25.85(L/hr)，假設平均運具為 50km，平均時速為 40(km/hr)。因資料庫計算時，同屬性欄位計算式需相同，故於資料表輸入載量時需依對應工程細項計價單位轉換，以鋼筋為例，因鋼筋工項使用單位為噸(ton)，載量 8(m³)需乘上鋼筋密度 7.8(g/cm³)轉換為 62.4(ton)。

材料運輸機具						
工項編碼	運輸機具載量 (依工項單位換算)	運輸距離(M)	平均時速(KM/HR)	運輸機具能耗係數	柴油碳排放量	
03110R0002	8000	50	40	25.85	3.49	
0321060005	62.4	50	40	25.85	3.49	
0331007002	8	50	40	25.85	3.49	
05500mD009	62.4	50	40	25.85	3.49	
米						

圖 5.12 輸入材料運輸機具假設

5.3.2 BIM 碳足跡整合計算結果

匯入之組合代碼數量資訊，依據相關性對應至工項，計算結果如圖 5.13 所示，因案例 BIM 模型僅繪製混凝土及鋼結構元件，以下說明數量取用依據。

工項總數量								
工項編碼	工項註解	細項編碼	細項註解	單位	相關性	直接數量	間接數量	計算後數量
02260000F1	連續壁(t=50cm, L=11m)	02260000F1	連續壁(t=50cm, L=11m)	M	直接相關	237.758	0	237.758
02300RR003	土方工作，開挖，砂土礫岩	02300RR003	土方工作，開挖，砂土礫岩	M3	直接相關	11349.54	0	11349.54
03110R0002	牆鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	03110R0002	牆鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	M2	間接相關	0	19857.84	19857.84
0321060005	鋼筋，SD420W	0321060005	鋼筋，SD420W	T	間接相關	0	660.222	660.222
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	M3	直接相關	5118	0	5118
05500mD009	鋼材(ASTM A36)，含加工及安裝	05500mD009	鋼材(ASTM A36)，含加工及安裝	T	間接相關	0	257.79	257.79

圖 5.13 工項總數量計算結果

(1) 混凝土工項

混凝土工項數量直接由混凝土元件輸出體積資訊，因計算範圍為主體工程，數量資訊由 BIM 結構模型之柱、牆、樑、板元件分別輸出組合代碼數量明細。BIM 模型輸出混凝土體積總共 $6,033\text{m}^3$ ，案例詳細價目表編列混凝土工項體積為 $6,122\text{m}^3$ ，差距約 89m^3 ，誤差僅約 1.5%。

(2) 鋼筋工項

案例 BIM 模型未繪製鋼筋元件，鋼筋數量資訊由混凝土體積乘上鋼筋比得出，取用之鋼筋比會影響概估結果，本研究以案例實際詳細價目表混凝土(m^3)與鋼筋(ton)之比例得來，為 0.129。計算出鋼筋工項數量約為 778 ton，案例詳細價目表編列鋼筋工項數量為 788 ton，差距為 10 ton。

(3) 模板工項

應用 BIM 計算模板數量需要分別考量柱、牆、樑、板之側表面積與不同元件之接面，李哲威(2014)利用 BIM 專案管理軟體 Vico Office Software 擷取元件不同之表面積資訊，建立計算公式以計算模板使用數量。模板數量計算亦可藉由撰寫外掛插件擷取 BIM 模型量體資訊，計算模板使用數量，經案例驗證誤差量為 1% 以下(蔡承諺，2012)。本研究著重於探討 BIM 與碳足跡結合之可行性，模板數量計算之精細度應為後續研究精進方向，故僅以案例實際詳細價目表混凝土(m^3)與模板(m^2)之比例得來，為 3.88。計算出模板工項數量約為 $23,409\text{m}^2$ ，案例詳細價目表編列模板工項數量為 $23,752\text{m}^2$ ，差距為 343m^2 。

(4) 鋼結構工項

BIM 模型輸出之鋼結構元件有鋼樑及鋼柱，輸出資訊為體積，總計約 33m^3 ，取鋼密度約 7.8g/cm^3 計算得鋼結構重量總計有 258 ton；案例詳細價目表編列鋼結構工項依鋼材不同有四類，數量資訊如表 5.13 所示。因鋼承板元件未於模型繪製，剩餘鋼結構總量為 337 ton，與 BIM 模型輸出數量相比，兩者差距有 79 ton，主要原因應為模型未依設計圖繪製，或是鋼結構材料斷面未依設計圖建置。

表 5.13 案例鋼結構工項

工項編碼	工項名稱	數量	單位
051240A025	建築鋼結構，A36	40	ton
051240A005	建築鋼結構，A572 Gr.50	102	ton
051240A015	建築鋼結構，SN490B	195	ton
051240A032	鋼承板	3,690	m ²

(5) 連續壁工項

於工程詳細價目表及單價分析表內，連續壁工項計價單位為長度(m)，為與其他牆體輸出之體積資訊有所區別，在輸入時需手動輸入，BIM 模型輸出連續壁長度為 237.758m，與詳細價目表編列之 237.8m 僅差距 0.042m，小於 1%。如表 5.14 所示，案例連續壁工項作業包含鋼筋、混凝土及壁體施工費，因案例提供之施工機具資訊不足以計算碳足跡，故本案例驗證不考慮連續壁壁體施工費產生之碳足跡，於連續壁工項僅探討其材料碳排放量。

表 5.14 連續壁工項工程細項(每公尺連續壁)

細項編碼	細項註解	數量	單位
0226600701	連續壁壁體施工費	1	M
0321060005	鋼筋，SD420W	0.510	T
0331047002	結構用混凝土， 280kgf/cm ² ，水中	5.5	m ³
W0127110004	零星工料	1	式

(6) 土方工項

土方挖除量並未於 BIM 模型中繪製，若需計算可藉由匯入地形檔由軟體產出挖方，因本案例未取得鄰近地形資料，故以建築物面積扣除連續壁面積為土方挖除面積，再乘上地面層至基礎層之高程差，得出挖除土方量為 11,349.54m³，與詳細價目表編列之 11,726m³ 差距為 376m³，約 3%。

資料庫亦可輸出之工程細項數量資訊，供參考編列資源，如表 5.14 所示，其中各

細項數量皆依循數量資訊相關性得來，以鋼筋工項使用之鐵線為例(表 5.15 上框)，單價分析編列每 ton 之鋼筋需使用 4kg 之鐵線，計算得出鐵線總量約為 3,113kg。

若單價分析表編列單位為「式」，代表該細項數量資訊僅能由人為推算得出，以混凝土泵補車及混凝土振動器為例(表 5.15 下框)，兩者皆可藉由混凝土體積推算，可參考混凝土總體積為 6,033m³ 來推算工程可能使用到之資源量。

表 5.15 工程細項數量總表-以混凝土、鋼筋、模板工項為例

工程細項數量									
工項編碼	工項註解	細項編碼	細項註解	單位	關係性	直接數量	間接數量	計算後數量	推算依據
03110R0002	場鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	03110R0002	場鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	M2	間接相關	0.00	23,409.48	23,409.48	混凝土體積
03110R0002	場鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	L000006000	普通工	式	間接相關	0.00	351.14	351.14	混凝土體積
03110R0002	場鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	L00000R100	一般技工	工	間接相關	0.00	1,287.52	1,287.52	混凝土體積
03110R0002	場鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	M05060DR0	產品，五金零件	KG	間接相關	0.00	7,022.84	7,022.84	混凝土體積
03110R0002	場鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	M06050200	產品，木作及塑膠基本材料及施工方法，模板用	M3	間接相關	0.00	93.64	93.64	混凝土體積
03110R0002	場鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	W01271RR0	零星工料	式	間接相關	0.00	23,409.48	23,409.48	混凝土體積
0321060005	鋼筋，SD420W	0321060005	鋼筋，SD420W	T	間接相關	0.00	778.30	778.30	混凝土體積
0321060005	鋼筋，SD420W	L000005a00	電焊工	工	間接相關	0.00	1,011.80	1,011.80	混凝土體積
0321060005	鋼筋，SD420W	L000005K00	鋼筋工	工	推算相關	0.00	1,011.80	1,011.80	混凝土體積
0321060005	鋼筋，SD420W	M03210600	產品，鋼筋，工地交貨	T	間接相關	0.00	778.30	778.30	混凝土體積
0321060005	鋼筋，SD420W	M05060200	產品，金屬材料，鐵線	KG	間接相關	0.00	3,113.22	3,113.22	混凝土體積
0321060005	鋼筋，SD420W	W01271100	零星工料	式	間接相關	0.00	778.30	778.30	混凝土體積
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	03310000Z3	混凝土澆置及搗實	M3	直接相關	6,033.37	0.00	6,033.37	
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	M3	直接相關	6,033.37	0.00	6,033.37	
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	E000002600	混凝土泵浦車	式	推算相關	0.00	0.00	0.00	混凝土體積 6033.37
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	E000003100	混凝土振動器	式	推算相關	0.00	0.00	0.00	混凝土體積 6033.37
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	L000006100	小工	時	間接相關	0.00	4,344.03	4,344.03	
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	L000006900	混凝土作業工，澆置	時	間接相關	0.00	1,930.68	1,930.68	
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	M03050461	產品，預拌混凝土材料費，280kgf/cm ² ，第1區	M3	直接相關	6,033.37	0.00	6,033.37	
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	W01271100	零星工料	式	間接相關	0.00	0.00	0.00	混凝土體積

產出之工項碳足跡及其工程細項碳足跡組成如表 5.16 及表 5.17 所示，碳足跡以混凝土工項碳排放量 2,729,617kgCO₂e 最多，約占 67.3%。因鋼結構、鋼筋、模板於單價分析表內皆未編列施工機具細項，故機具施工碳排僅有混凝土，共 30,166kgCO₂e，約佔混凝土工項的 1.1%(尚未考量材料運輸機具碳排)。

表 5.16 工項總碳排放量計算結果

工項總碳排放量				
工項編號	工項註解	材料生產碳排	機具施工碳排	總碳排放量
02260000F1	連續壁(t=50cm, L=11m)	476,639.10	6,538.35	483,177.44
02300RR003	土方工作，開挖，砂土礫岩	0.00	131,747.73	131,747.73
03110R0002	場鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	7,595.23	0.00	7,595.23
0321060005	鋼筋，SD420W	624,352.14	0.00	624,352.14
0331007002	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	2,289,895.56	25,590.00	2,315,485.56
05500mD009	鋼材(ASTM A36)，含加工及安裝	599,916.33	0.00	599,916.33
列印		關閉		

表 5.17 工程細項碳足跡組成

工程細項碳足跡							
工項編號	工項註解	細項編號	細項註解	材料生產碳排	機具施工碳排	碳排係數來源	總碳排放量 單位
03110R000	場鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	M05060DR0C	產品，五金零件	2,036.62	0	張(2011)	2,036.62 kgCO ₂ e
03110R000	場鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	M060502000	產品，木作及塑膠基本材料及施工	1,130.21	0	張(2011)	1,130.21 kgCO ₂ e
03110R000	場鑄結構混凝土用模板，普通模板(使用5次)	W01271RR0C	零星工料	5,786.82	0	無	5,786.82 kgCO ₂ e
032106000	鋼筋，SD420W	M032106000	產品，鋼筋，工地交貨	718,725.50	0	張(2011)	718,725.50 kgCO ₂ e
032106000	鋼筋，SD420W	M050602000	產品，金屬材料，鐵線	2,864.16	0	張(2011)	2,864.16 kgCO ₂ e
033100700	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	03310000Z3	混凝土澆置及搗實	1,058,192.76	0	張(2011)	1,058,192.76 kgCO ₂ e
033100700	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	E000002600C	混凝土泵浦車	0.00	27270.8324	陳(2013)	27,270.83 kgCO ₂ e
033100700	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	E000003100C	混凝土振動器	0.00	2896.0176	陳(2013)	2,896.02 kgCO ₂ e
033100700	結構用混凝土，預拌，280kgf/cm ²	M03050461L	產品，預拌混凝土材料費，280kg	1,641,257.64	0	張(2011)	1,641,257.64 kgCO ₂ e
05500mD0i	鋼材(ASTM A36)，含加工及安裝	M05500m00C	產品，鋼材(ASTM A36)	598,382.15	0	張(2011)	598,382.15 kgCO ₂ e
05500mD0i	鋼材(ASTM A36)，含加工及安裝	W012711000	零星工料	766.76	0	無	766.76 kgCO ₂ e
列印		關閉					

材料運輸機具碳排計算結果如表 5.18 所示，以混凝土材料運輸機具 78,961 kgCO₂e 最多，其餘運輸機具碳排量甚小，相比於總碳排放量皆小於 0.1%。

彙總混凝土工項碳足跡，如表 5.19 所示，以材料生產碳排為大宗，約佔 96%，材料運輸機具碳排約為機具施工碳排之兩倍。將本案例計算結果與碳足跡相關文獻比較，材料生產碳排差異不大，亦約佔九成；案例機具施工碳排與材料運輸碳排兩者比

例則與文獻不同，於文獻中機具施工碳排應大於材料運輸機具碳排，可能原因為案例混凝土工項單價分析表之機具細項未編列正確，或有缺漏，致使機具施工碳排並未完整計算。

表 5.18 材料運輸機具碳足跡計算結果

材料運輸碳排					
工項編碼	工項註解	細項編碼	細項註解	單位	計算後數量 材料運輸碳排量
05500mD009	鋼材(ASTM A36)，含力	M05500m0009	產品，鋼材(ASTM A36	T	257.79 432.54
0321060005	鋼筋，SD420W	M0506020009	產品，金屬材料，鐵線	KG	3,113.22 40.74
0321060005	鋼筋，SD420W	M0321060005	產品，鋼筋，工地交貨	T	778.30 1,305.91
0331007002	結構用混凝土，預拌，	M03050461L3	產品，預拌混凝土材料	M3	6,033.37 78,961.73
03110R0002	場鑄結構混凝土用模板	M05060DR009	產品，五金零件	KG	7,022.84 91.91
<input type="button" value="列印"/>		<input type="button" value="關閉"/>			

表 5.19 混凝土工項碳排放組成

階段 碳排	材料生產	機具施工	材料運輸	合計
碳排放量	2,699,450	30,166	78,961	2,808,577
比例(%)	96.11	1.07	2.81	100

第6章 結論與建議

本研究建立 BIM 碳足跡工項整合建置架構，提出應用 BIM 計算碳足跡，供設計者參照，將碳足跡減碳設計之檢討與改善提至前端，即時呈現減碳成果。

首先由文獻回顧了解碳足跡計算方法，並了解編碼於 BIM 之應用，比較 MasterFormat 與 UNIFORMAT II 編碼之差異。再分析現有應用 BIM 計算碳足跡之文獻與工具，擬定開發方向以建立 BIM 碳足跡整合建構流程。

前置作業探討 UNIFORMAT II 編碼編列規則，對應至工項並探討元件工項相關性，定義工項數量資訊如何從編碼數量取得。工項需藉由單價分析表分析材料、機具組成，彙總工程細項碳排放量為工項碳足跡。

接著建置 Microsoft Access 資料庫，將解析成果儲存，並得以自 BIM 模型提取 UNIFORMAT II 數量資訊至資料庫，依循關聯性自動化計算工程碳足跡。最後以主體工程為例，提出適用於碳足跡計算之建模規則與資訊規範，供建置階段依循，以實際案例計算主體工程工項碳排放量，呈現 BIM 碳足跡整合計算成果。結論與建議如下 6.1 節、6.2 節。

6.1 結論

(1) 建立 UNIFORMAT II 對應元件與工項解析架構。

國內工項編碼依據美國 MasterFormat 編碼建置，其分類架構不同於 UNIFORMAT II 編碼，前者依據的是材料，後者依據的是功能及位置，兩者為多對多關係。本研究探討 UNIFORMAT II 編碼編列準則，供實務參考，並分析工項數量資訊相關性，定義工項數量資訊如何自 UNIFORMAT II 編碼取得，案例工程僅解析主體工程工項，後續研究可依循提出之解析架構建置。

(2) 建立 BIM 碳足跡整合資料庫，儲存解析成果。

工項碳足跡資訊、UNIFORMAT II 編碼數量資訊，及元件工項相關性皆於

Microsoft Access 資料庫儲存，建置資料表、資料關聯與查詢以構成資料庫的邏輯架構，輸入之編碼資訊得以自動計算工項數量及碳足跡，另建立表單及使用者頁面簡化操作，資料庫建置成果得以做為日後程式開發之原型。

(3) 印證應用 BIM 計算工程碳足跡之可行性。

現有 BIM 碳足跡計算工具多以能耗分析為基礎，計算全生命週期碳排放量，計算結果以營運階段日常耗能為重。如此無法體現完工前，包含材料生產、材料運輸及施工機具階段之減碳成果。工程詳細價目表及單價分析表能考量各工項的材料、機具組成，加總計算工程碳足跡。本研究以案例印證應用 BIM 計算工程碳足跡之可行性，將 BIM 模型輸出 UNIFORMAT II 數量資訊對應至工項計算碳足跡，日後可增加資料庫內容以應用於不同類型之工程。

(4) 建立應用本研究計算之建模規則與資訊規範。

BIM 模型要能於全生命週期不同階段應用，於建置時必須先行考量並將資訊納入。欲將 BIM 應用於工程碳足跡計算，建立之建模準則及資訊規範考量層面有模型元件詳細程度、切割區域及納入資訊，分別依工項數量計算需求、UNIFORMAT II 編碼需求及碳足跡計算需求建立主體工程工項建模規則及資訊規範，包括混凝土、鋼筋及模板，供建模時依循。

(5) 混凝土工項碳排放量以材料生產占最重，約 96%。

實際以案例主體工程工項，輸入 BIM 模型數量資訊至資料庫計算，呈現 BIM 碳足跡整合計算成果。得出混凝土體積為 $6,033\text{m}^3$ ，與案例混凝土體積 $6,122\text{m}^3$ 差距約 89m^3 ，誤差僅約 1.5%。混凝土工項之碳排放組成以材料生產碳排為大宗，約佔 96%，機具施工碳排約佔 1.07%，材料運輸機具碳排約佔 2.81%。以往文獻多以機具施工碳排較材料運輸機具碳排多，與本研究計算結果不同，可能原因有二：(1)案例混凝土工項單價分析表之機具細項未編列正確，或有缺漏，致使機具施工碳排並未完整計算，(2)混凝土工項本身使用機具較少，僅混凝土泵補車及混凝土振動器，大多數施工機具為基礎開挖使用。

6.2 建議

綜合以上結論，碳足跡得以應用 BIM 模型計算，內容尚有進步空間，後續研究建議如下。

- (1) BIM 模型數量資訊可由外掛程式擷取，增加精確度。

本研究鋼筋及模板工項數量資訊由混凝土體積乘上係數估算而來，精確度尚不足以於實務中產出工項標單。未來於鋼筋工項，可於 BIM 模型內繪製，輸出鋼筋數量資訊並與實務比較；於模板工項，可參考模板數量計算文獻(蔡承諺，2012)，由外掛程式以精進計算結果。

- (2) 僅以主體工程為例，基礎工程、建築裝修工程及機電工程尚待解析。

本研究印證應用 BIM 計算碳足跡之可行性，並提出 BIM 整合碳足跡計算架構，日後可依循解析基礎工程、建築裝修工程及機電工程，擴增資料庫。對於橋梁、道路、水利等不同類型之工程，亦可依循以應用 BIM 計算工程碳足跡。

- (3) 建立之資料庫可為程式開發原型。

本研究使用 Microsoft Access 資料庫儲存解析成果，得以依循關聯自動計算結果，資料庫建置便於修改且邏輯架構得以清楚呈現，適合程式開發初期使用。唯於輸入 BIM 數量資訊時仍須手動自 BIM 模型輸出元件數量明細，匯入至資料庫。以本研究建立之資料庫架構開發外掛程式，能使碳足跡計算更加自動化，簡化操作。

參考文獻

英文文獻

1. Biswas, W. K. (2014). "Carbon footprint and embodied energy consumption assessment of building construction works in Western Australia." *International Journal of Sustainable Built Environment*, Vol. 3, pp. 179-186.
2. Charette, R. P. and Marshall, E. H. (1999). *UNIFORMAT II Elemental Classification for Building Specification, Cost Estimating, and Cost Analysis*, NIST, US.
3. Cheung, F., Rihan, J., Tah, J., Duce, D. and Kurul, E. (2012). "Early Stage Multi-level Cost Estimation for Schematic BIM Model." *Automation in Construction*, Vol. 27, pp. 67-77.
4. Eastman, C. M. (1999). *Building Product Models: Computer Environments Supporting Design and Construction*, CRC Press, Boca Raton FL, US.
5. Gaussin, M., Hu, G., Abolghasem, S., Basu, S., Shankar, M.R. and Bidanda, B. (2013). "Assessing the environmental footprint of manufactured products: a survey of current literature." *International Journal of Production Economics*, Vol. 146, pp. 515-523.
6. Green Building Studio. (2016). <http://www.autodesk.com/products/green-building-studio/overview>, accessed on 20th June, 2016.
7. iCIM. (2012). <http://www.openbim.org/case-studies/interoperable-carbon-information-modelling>, accessed on 20th June, 2016.
8. IPCC. (2007). <http://www.ipcc.ch/index.htm/>, accessed on 20th June, 2016.
9. ISO 14040 (2006). *Environmental performance. Life cycle assessment-principles and framework*. ISO, Switzerland.
10. Jalaei, F. and Jraide A. (2015). "Integrating building information modeling (BIM) and LEED system at the conceptual design stage of sustainable buildings." *Sustainable Cities and Society*, Vol. 18, pp. 95-107.
11. McGraw Hill Construction. (2013). <http://construction.com/>, accessed on 20th June, 2016.
12. Miller, D., Doh, J. H., Panuwatwanich, K. and van Oers, N. (2015). "The contribution of structural design to green building rating systems: An industry perspective and comparison of life cycle energy considerations." *Sustainable Cities and Society*, Vol. 16, pp. 39-48.
13. Monteiro, A. and Martins, J. (2013). "A Survey on Modeling Guidelines for Quantity Takeoff-oriented BIM-based Design." *Automation in Construction*, Vol. 35, pp. 238-253.
14. Okoroh, M., Dean, A. and Tracadi, E. (2012). "Strategic Framework for Building

- Environmental Performance.” *Proceedings of the joint CIB W010, W092 & Tg72 International Conference*, 23th-25th, January, University of Cape Town.
15. PAS 2050 (2008). *Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*, BSI, UK.
 16. Russell-Smith, S. V., Lepech, M. D., Fruchter, R. and Littman, A. (2015). “Impact of progressive sustainable target value assessment on building design decisions.” *Building and Environment*, Vol. 85, pp. 52-60.
 17. Smith, D. (2007). “An Introduction to Building Information Modeling (BIM).” *Journal of Building Information Modeling*, Vol. Fall 2007, pp. 12-15.
 18. Tally. (2016). <http://choosetally.com/>, accessed on 20th June, 2016.
 19. Todd, J.A., Crawley, D., Geissler, S. and Lindsey, G. (2001). “Comparative assessment of environmental performance tools and the role of the green building challenge.” *Building Research & Information*. Vol. 29, pp. 324-335.
 20. van Nederveen, G. A. and Tolman, F. P. (1992). “Modelling multiple views on buildings.” *Automation in Construction*, Vol. 1, pp. 215-224.
 21. Wang, X., Duan, Z., Wu, L. and Yang, D. (2015) “Estimation of carbon dioxide emission in highway construction: a case study in southwest region of China.” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 105, pp. 705-714.
 22. Wiedmann, T. and Minx, J. (2007). *A definition of carbon footprint*. Nova Science Publishers, Hauppauge, NY, USA.

中文文獻

1. 台北市工務局(2009), *工料分析手冊*, 台北市工務局, 台北。
2. 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*, 交通部運輸研究所, 台北。
3. 朱士傑(2014), *材料製造與施工階段環境衝擊及分析-以兩橋梁為例*, 國立成功大學碩士論文。
4. 行政院公共工程委員會 (2009), *振興經濟擴大公共建設投資計畫落實節能減碳執行方案*, <http://eem.pcc.gov.tw/node/30243>, 2016年6月20日網上資料。
5. 行政院公共工程委員會(2012), *PCCES預算編製手冊4.3版*, 行政院公共工程委員會, 台北。
6. 行政院公共工程委員會(2016), <https://www.pcc.gov.tw/pccap2/>, 2016年6月20日網上資料。
7. 行政院農委會林務局(2010), *工料分析手冊*, 行政院農委會林務局, 台北。
8. 行政院綠能低碳推動會(2015), https://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/reduceco21/content/Content.aspx?menu_id=2467, 2016年6月20日網上資料。
9. 行政院環保署 (2010), *產品與碳足跡計算指引*, 行政院環保署, 台北。
10. 行政院環保署 (2010), *溫室氣體查驗指引*, 行政院環保署, 台北。

11. 行政院環保署(2016), <http://www.epa.gov.tw/>, 2016 年 6 月 20 日網上資料。
12. 余品蓁(2012), 道路設計因子對行車碳排放影響之研究, 國立中央大學營建管理研究所碩士論文。
13. 吳翌禎、郭榮欽等(2014), 應用BIM輔助建築設施管理之國內案例探討成果報告, 內政部建築研究所委託研究報告, 台北。
14. 呂啟銘(2015), 應用BIM於建築設計階段之碳足跡模擬計算工具研發, 國立成功大學建築研究所碩士論文。
15. 李育杰(2013), 應用BIM計算台灣建築物碳排放暨成本效益之整合, 國立台灣大學土木工程學系碩士論文。
16. 李亮群(2005), 在工程項目管理中的應用研究, 國立東北財經大學碩士論文。
17. 李則威(2014), 建構以BIM為基礎之橋梁成本管理模式, 國立成功大學土木工程學系碩士論文。
18. 林憲德、葉茂榮等(2013), 建築物設計階段碳揭露標示法之研究-建築物碳揭露方法及碳排放資料庫之研究, 內政部建築研究所委託研究報告, 台北。
19. 林憲德等(2015), 建築碳足跡, 詹氏書局, 台北。
20. 張又升(2002), 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。
21. 張筱蓉(2015), 綠道路指標對應之個案碳排放分析與認證策略, 國立成功大學碩士論文。
22. 張德鑫等(2011), 新興公共工程計畫落實節能減碳評估, 行政院農業委員會林務局委託辦理計畫, 桃園。
23. 郭宇芬(2012), 以BIM模型資訊在設計階段估算建築工程成本之實證研究, 國立中華大學營建管理系碩士論文。
24. 郭榮欽、謝尚賢(2010), BIM概觀與國內推行策略, 土木水利, 第三十七卷, 第五期, 8-20頁。
25. 陳育群(2013), 公共工程編碼系統與BIM結合於預算書製作之研究, 國立台灣大學土木工程學系碩士論文。
26. 陳昭秀(2003), 橋梁工程碳排放量案例分析之研究, 國立中央大學營建管理研究所碩士論文。
27. 陳啟明、彭成邦、余宗賢、柯欽彬、陳敏蕙、吳佩蓉、李忠文、黃麗如(2013), 應用公共工程經費電腦估價系統(PCCES)架構估算工程二氧化碳排放量委託研究案成果報告, 行政院公共工程委員會委託研究計畫, 台北。
28. 蔡承諺(2012), 應用BIM技術於模板數量計算之研究, 國立台灣大學土木工程學系碩士論文。
29. 鄭巧欣(2013), 建築物軀體工程碳排構成分析-以南部地區住宅、學校、辦公建築為例, 國立成功大學碩士論文。
30. 盧坤勇(2003), 資料庫應用講義-活用ACCESS資料庫,

國立聯合工商技術學院電子工程系，苗栗。

31. 賴東延(2011)，*導入BIM於臺灣公共工程招標準備階段之研究*，國立台灣大學土木工程學系碩士論文。
32. 謝尚賢、郭榮欽、陳奐廷、蔡沅濤(2014)，*透過案例演練學習BIM：基礎篇*，國立臺灣大學出版中心，台北。
33. 鍾敦沛、彭成邦、侯鈞耀、黃志雄、王士傑 (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*，公共工程委員會，台北。
34. 羅芳艷、王廣斌、張文娟 (2005)，*工程項目投資分解體系研究*，*同濟大學學報*，第三十三卷，第8期，1122-1126頁。

