

國立臺灣大學工學院土木工程學系



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

運用BIM技術進行機電設計與整合探討  
-以捷運新建案為例

A Research of the MEP Design and Integration with BIM  
Technology - A Case Study of MRT Projects

蘇美茹

Mei-Ju Su

指導教授：曾惠斌 博士

Advisor: Hui-Ping Tserng, Ph.D.

中華民國 106 年 6 月

June 2017

國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書



運用 BIM 技術進行機電設計與整合探討  
-以捷運新建案為例

A Research of the MEP Design and Integration with BIM  
Technology - A Case Study of MRT Projects

本論文係蘇美茹君 (P03521707) 在國立臺灣大學土木工程學系碩士班完成之碩士學位論文，於民國 106 年 6 月 15 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

曾惠斌 (指導教授)


陳柏翰

林祐正

蘇紋騏

系主任、所長 謝尚賢

## 誌謝



3年前，何其幸運的我帶著同事們稱羨的目光以及親友團熱切的祝福進入學生夢寐以求的台大殿堂，開啟人生中最美好、也最豐富的三年時光。儘管就學期間須同時扮演多重身分，上課、熬夜寫報告的在職學生，頂著嚴重睡眠不足的黑眼圈仍繼續奮鬥的上班族以及穿梭於高中校園的家長代表；雖然身兼數職而忙碌不已，心靈卻是異常的富足與快樂。除了能幸福的沐浴在多元化的課程與頂尖師資的薰陶下，班上16個同學代表著16本精彩的故事書，身懷絕技的他們皆是業界最優秀的人才，透過課堂討論與專題協同研究，讓我在最短的時間內改變原有的思維，學習到很多不同領域的專業。

論文靈感來自碩二下學期撰寫營建產業結構與經營管理課程之期末專題報告時，王明德老師的肯定與鼓勵，讓我省卻尋找論文题目的過程。論文的撰寫與完成，則要感恩我的指導教授曾惠斌博士。感謝曾老師在第一次討論會中馬上就首肯這個研究題目，在整個寫作的過程中給予的啟發與耐心的指導。而非常幸運的，研究內容與公司正在執行的專案有關，讓我同時兼顧到事業與研究領域。還要感謝103曾老師家族另外5位同門同學（書鳴、俊豪、力夫、文榮、大為），謝謝你們無私地提供自己職場的經驗來豐富我的研究，在腸枯思竭陷入低潮時給予彼此的加油打氣；還有寶貴經驗傳承與資訊分享的營管組學長姐們，感謝你們。

當然更要謝謝我最親愛的親友團這三年的支持，用行動力挺走進校園參與每次校際活動與畢業旅行的老公，以及三年來悄悄獨立成長的兒子女兒，總是在我俯首寫作時貼心的送上餐點，讓我放手也放心。

最後，感謝天、感謝神明、感謝爸爸、感謝媽媽、感謝一路上指引我伴我成長的每一位貴人，感恩您！

蘇美茹 謹致於臺大營管組

2017. 05.16

## 摘要

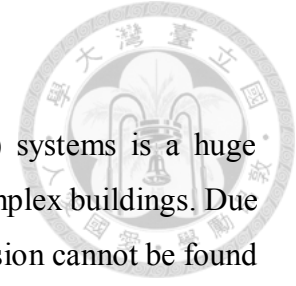
高科技廠房與現代化建築物之機電專業系統因設備、管線種類與數量繁多，例如執行智慧建築設計的專案或是大型的捷運工程，設計中的錯誤、漏項、碰撞與缺失等問題如未能在施工之前也就是設計整合過程中未能發現或解決，將導致後續施工階段一連串的問題。多數研究已提出建築資訊模型 (Building Information Modeling, 簡稱 BIM) 技術可提升建築物與機電設備的設計成果，尤其將建築、結構、機械、電氣和管線各組織間的介面協調工作簡化。使用 BIM 在設計與施工階段不僅大幅降低錯誤率，減少機電整合時間、費用及設計變更數量，更改善了工程品質與效率。

回顧多數的歷史文獻，針對機電系統 (Mechanical, Electrical & Plumbing, 簡稱 MEP) 與 BIM 技術之研究大多著重在 3D 建模技術的探討或是解決土建系統與機電系統之間的施工界面問題，甚少從規劃階段就開始探討 BIM 技術應用於 MEP 專業與專案其他成員之間的溝通與協同整合策略。本文以工期長達 5 年，全生命週期採用 BIM 技術的大型統包工程 (Engineering, Procurement, Construction 簡稱 EPC) - 「中東地區的捷運新建案」為研究對象，組織跨越全球數十個城市的專案團隊，從設計、時程管控、發包、採購、施工以及營運管理階段均以 BIM 工具來執行。同時為改善諸多介面問題與設計整合流程缺陷，本研究提出涵蓋規劃設計、施工與竣工階段應用 BIM 技術的 MEP 設計整合流程，藉由比較全生命週期應用 BIM 的實際案例及傳統專案之間於設計與施工階段的整合效益分析並提出結論與建議。

研究結果顯示，專案團隊除了著重 BIM 技術與 MEP 專業知識外，建議從專案初始即利用 BIM 工具進行建築設計方案選擇與施工性考量，方能將機電相關資訊正確、完整、及時地整合至工程生命週期各階段的交付成果中，對於工程品質與成本的管控有極大的助益。不可諱言，採用 BIM 技術導致設計階段的成本提高，然而在施工階段前已顯著降低計算錯誤及漏項之缺失，大幅減少變更設計數量；此外隨著科技的普及以及 BIM 團隊經驗的累積，未來也會因整體效率提高進而節省設計工時與成本。

[關鍵詞] BIM, MEP, Design-Bid-Build, Design-Build, EPC, IPD, 設計整合

# ABSTRACT



Coordination of Mechanical, Electrical and Plumbing (MEP) systems is a huge challenge for many technical projects such as Metro projects and complex buildings. Due to a mass of equipment and numerous pipelines, any errors and collision cannot be found or resolved before construction stage will lead a series of problems. Most studies have suggested that the use of Building Information Modeling (BIM) promises to address the challenges of the MEP coordination process. The use of BIM in the design and construction phase not only greatly reduce the design errors, the integration time among multidiscipline, cost and the expected number of change orders, also to improve the quality and efficiency of the project.

The most of the previous literature have concentrated on analysis of BIM benefit, 3D modeling technology application or how to resolve interferences between civil works and MEP systems during the construction stage, rarely derived from all phases of a project life cycle. In this paper, a five-year program of fixed-price engineering, procurement & construction Metro project use BIM technology for whole life cycle, which covers concept design, engineering design & coordination, scheduling, estimating and budgeting, procurement phase, construction phase and operations and maintenances, the BIM design work will be executed in multiple locations in globally distributed offices. In order to solve the interface problem and improving the defects of design and integration process, this study proposed a process for BIM-based MEP design and integration during the project life cycle. And moreover by comparing and analysis the effectiveness between this project and previous cases in design and construction stage to validate this practical BIM process.

The results indicated the project team in addition to focusing on BIM technology and MEP expertise, it is recommended from preliminary phase to use BIM tools for architectural design decision and construction considerations, MEP models have been appropriate integrated and control measures in place before packages are released as each phase. It is found in the case study that the use of BIM may increase the design time. However, it can reduce the time of MEP coordination, the number of change orders, as well as to save overall cost by more lessons the team learned.

[KEYWORDS] BIM, MEP System, Design-Bid-Build, Design-Build, EPC, IPD

# 目錄



口試委員會審定書.....	i
誌謝 .....	ii
摘要 .....	iii
ABSTRACT .....	iv
目錄 .....	v
圖目錄 .....	vii
表目錄 .....	ix
<b>第 1 章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 背景說明.....	1
1.2 研究動機.....	5
1.3 研究目的.....	5
1.4 論文架構.....	6
1.5 研究流程.....	8
<b>第 2 章 文獻回顧.....</b>	<b>9</b>
2.1 MEP 整合流程.....	9
2.2 施工可行性.....	16
2.3 專案整合交付 (IPD).....	18
2.4 BIM 於 MEP 設施維護管理之應用 .....	20
2.5 小結 .....	22
<b>第 3 章 MEP 整合現況分析與問題探討 .....</b>	<b>23</b>
3.1 現況分析.....	23
3.1.1 發包模式.....	23
3.1.2 MEP 整合策略 .....	25
3.2 問題探討.....	27
3.3 小結 .....	29
<b>第 4 章 MEP 設計整合流程改善.....</b>	<b>30</b>
4.1 BIM 軟體工具之選擇 .....	30
4.2 BIM 建模及整合流程.....	32
4.2.1 BIM USE 及 LOD 定義.....	32
4.2.2 建模與整合流程 .....	34
4.3 系統及介面整合 .....	39
4.3.1 衝突分類.....	39
4.3.2 衝突檢測與施工性.....	42
4.4 設計審核與成果交付 .....	43

4.4.1	設計審核.....	43
4.4.2	成果交付.....	44
4.5	小結.....	45
<b>第 5 章</b>	<b>整合式 MEP-BIM 流程之案例分析.....</b>	<b>47</b>
5.1	案例簡介.....	47
5.2	專案組織.....	47
5.2.1	BIM 組織架構.....	50
5.2.2	BIM 團隊工作範疇.....	51
5.3	定性分析.....	53
5.3.1	建模與整合分析.....	53
5.3.2	衝突檢測分析.....	64
5.3.3	設計審核與成果交付分析.....	79
5.4	定量分析 (BIM 成效的指標).....	81
5.4.1	BIM 應用於 MEP 衝突檢測之效益.....	82
5.4.2	BIM 應用改善變更設計之效益.....	85
5.5	小結.....	88
<b>第 6 章</b>	<b>結論與建議.....</b>	<b>90</b>
6.1	結論.....	90
6.2	具體成果與貢獻.....	91
6.3	建議.....	92
6.4	研究限制.....	93
<b>參考文獻</b>	<b>.....</b>	<b>95</b>



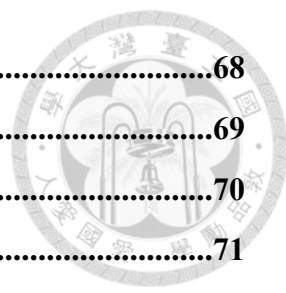
# 圖目錄



圖 1-1	水電環控工程(MEP)分類 .....	2
圖 1-2	捷運機電系統架構圖 .....	3
圖 1-3	研究流程.....	8
圖 2-1	BIM 模型與傳統 2D CSD 套圖之比較.....	11
圖 2-2	MEP 模型之發展流程.....	12
圖 2-3	MEP 分布密度與 MEP 系統整合時間的關係圖 .....	16
圖 2-4	不同發包模式之時程比較.....	19
圖 2-5	BIM 在 MEP 設施資訊整合示意圖 .....	21
圖 3-1	MEP 整合流程比較圖：傳統 2D 套匯 vs 3D BIM 技術 .....	27
圖 4-1	MEP 系統 3D 建模及整合流程 .....	37
圖 4-2	硬衝突偵測 - Cable Tray/風管/牆面衝突 .....	41
圖 4-3	軟衝突偵測 - 管線施工空間不足.....	42
圖 5-1	土木工程及建築物的分工架構圖 .....	48
圖 5-2	MEP 分工及工作範疇架構圖 .....	49
圖 5-3	BIM 組織架構圖 .....	50
圖 5-4	MEP 與其他成員整合互動方式 - 傳統 vs 3D BIM.....	54
圖 5-5	BIM 工具.....	55
圖 5-6	建築平面圖 .....	58
圖 5-7	電纜槽平面圖 .....	59
圖 5-8	照明系統圖 .....	59
圖 5-9	空調通風系統圖 .....	60
圖 5-10	消防/給排水系統 .....	60
圖 5-11	MEP 系統整合圖 .....	61
圖 5-12	傳統作業與導入 IPD/BIM 作業之成本效益圖 .....	63
圖 5-13	Navisworks Design Review and Clash Checking Workflow .....	65
圖 5-14	交互碰撞檢測數量表 .....	66
圖 5-15	Cable Tray Model-1 .....	66
圖 5-16	Cable Tray Model-2 .....	67



圖 5-17	Cable Tray Model-3 .....	68
圖 5-18	Cable Tray Model-4 .....	69
圖 5-19	Cable Tray Model-5 .....	70
圖 5-20	未考量電纜槽、風管與水管的施工空間.....	71
圖 5-21	未考量電纜槽與樓梯的施工空間 .....	72
圖 5-22	施工性設計 - 電纜槽穿牆開孔的衝突點 .....	72
圖 5-23	施工性設計 - 預留安裝與維修空間 .....	73
圖 5-24	軟衝突偵測與解決 - Cable Tray 實例 .....	75
圖 5-25	軟衝突偵測與解決 - 吊裝口實例 .....	76
圖 5-26	硬衝突偵測與解決 - 風管與電纜槽衝突 .....	77
圖 5-27	硬衝突偵測與解決 - 電纜槽與消防管衝突 .....	78
圖 5-28	設計審核流程.....	80
圖 5-29	MEP 設施維護資訊整合圖.....	81
圖 5-30	內部疑義澄清與設計變更趨勢圖 .....	88



## 表目錄



表 2-1	MEP 整合的優先順序.....	13
表 3-1	大型工程案例常見的問題與缺失彙整表.....	28
表 4-1	常見 3D BIM 軟體 .....	31
表 4-2	LOD 定義 .....	33
表 4-3	3D 建模與整合步驟彙整表.....	38
表 4-4	MEP 衝突種類 .....	40
表 5-1	BIM 團隊工作範疇 .....	52
表 5-2	BIM 分階段設計時程表.....	52
表 5-3	BIM 目的與用途 .....	56
表 5-4	MEP 模型交付元件的 LOD 需求表.....	57
表 5-5	分階段設計碰撞檢測結果.....	83
表 5-6	衝突檢測數據分析與匯出報告 .....	85
表 5-7	變更設計分析一覽表 .....	86

# 第 1 章 緒論



## 1.1 背景說明

建築物的主要成分包括建築、結構以及機電系統零組件等。從建築物的生命週期來看機電系統 (Mechanical, Electrical & Plumbing, 簡稱 MEP) 系統屬於中後期的階段,須等到基本設計完成,發包得標後才開始發展其設計。由於參與時間較晚,基於工程進度壓力下,在短時間內 MEP 設計者需同時了解業主需求、建築師設計理念、進行彼此專業的介面整合等,想要無缺失且如期完工交付者實屬不易。

尤其面對節能趨勢與智慧建築時代之來臨,各種應用建構在建築物上的自動化服務系統不斷的創新與發展,種類繁多且日趨複雜,系統規模依建築物屬性不同,占總工程金額從 15% 至 60% 的比例,因此機電系統的設計整合成果良與否對於整體工程的成敗影響與日俱增,其中,力求創新及推動永續的捷運系統可說是最龐大也最複雜的工程建設。捷運工程之機電系統區分為水電環控工程與機電系統兩大區塊。水電環控工程俗稱建築 MEP 專業,係包括電力系統、消防系統、空調系統、給排水系統、弱電以及建築物監控管理等子系統,詳細分類如下圖 1-1 所示。其中,空調、通風系統主要提供旅客舒適的乘車環境以及維持站內機房正常的運作環境;建築物監控管理系統負責車站、變電站環控系統於正常、塞車及緊急等模式下是否正常運轉之各項監視控制功能。機電系統於大眾捷運系統係包括供電系統、車輛系統、號誌及行車控制系統、通訊系統、中央監控系統、機廠設備系統、月台門系統、自動收費系統等子系統,架構詳見圖 1-2。供電系統負責提供捷運系統所有機電設備及行駛列車之電力;號誌系統主要負責自動行車之監控;通訊系統為捷運系統的神經中樞,下游子系統包括電話系統、站務人員通話系統、閉路電視系統、無線電系統、廣播系統、旅客資訊顯示系統、列車上通訊系統、子母鐘系統、傳輸系統及網管系統、通訊電力系統等,應用數據、語音及影像通訊技術以達到捷運行控中心、捷運機廠及車站等所有資訊來往的傳輸服務。

由於系統繁多,機電設備廣泛遍及建築物各處,隨著設計持續進行,設備數量與資訊的複雜度增加,其中任一單位的設計缺失或變更如未能在施工之前發現或解決,對專案整體的影響甚鉅,因此 MEP 之間的協調與整合工作是捷運專案能否

成功的關鍵因素之一。MEP 設計整合工作包括設備定位、決定 MEP 各系統元件之間的連接路徑，解決空間與功能性的干涉與衝突。然而當錯誤無法在設計或整合階段提早發現，待發包後交由施工廠商施作，施工時遇到衝突導致重工或辦理設計變更，工程延宕與成本增加，甚至遭遇無法重做的狀況，衍伸後續求償訴訟問題。因此，如何透過完整的設計及介面整合流程來減少錯誤與設計階段預先制定未來設計變更的機制，以期最終成本控制在預算內並將成果如期如質交付給業主，是值得我們去探究的課題。

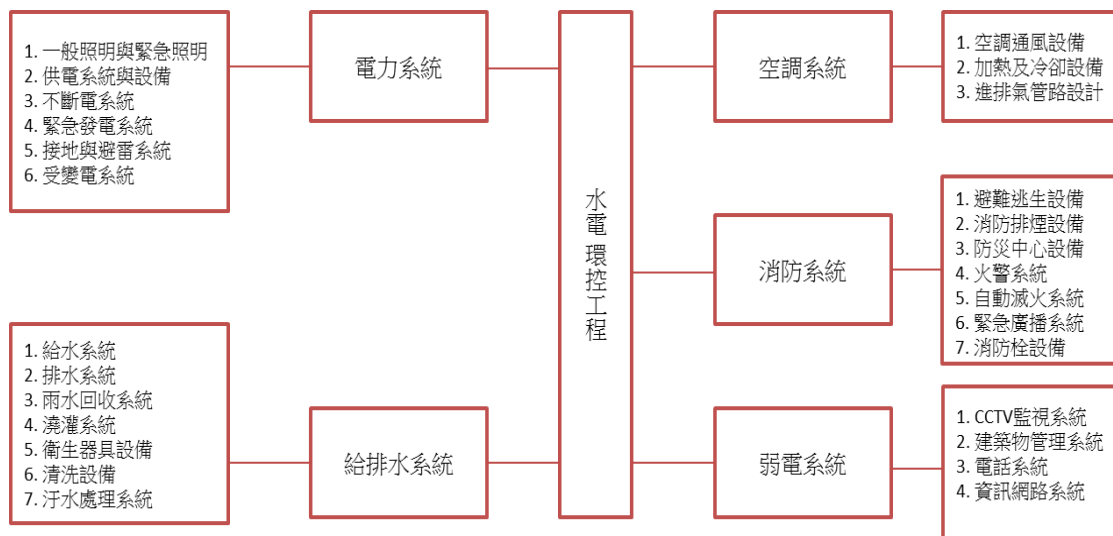


圖 1-1 水電環控工程(MEP)分類

(資料來源: 戴期甦等, 2007 及本研究整理)

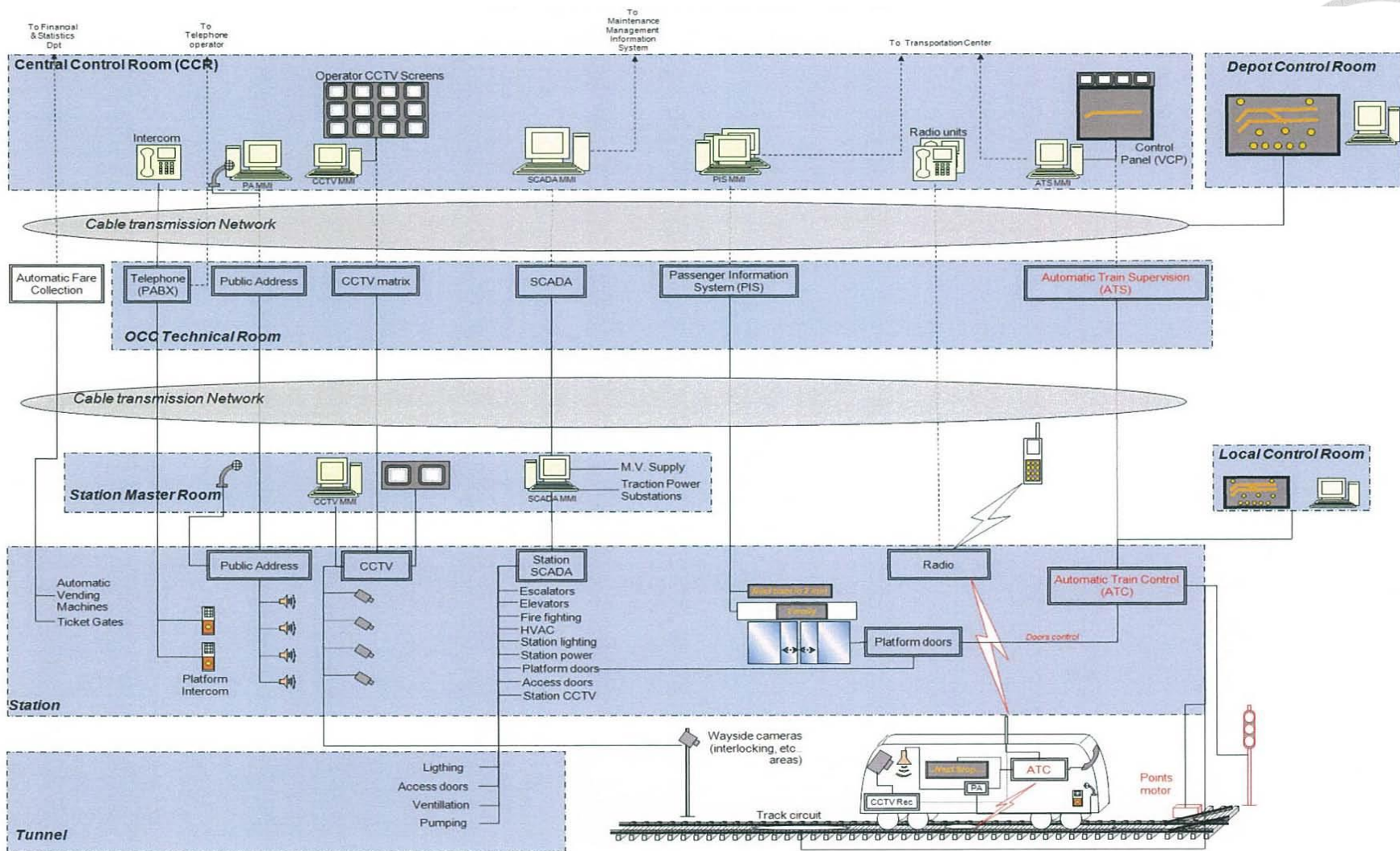
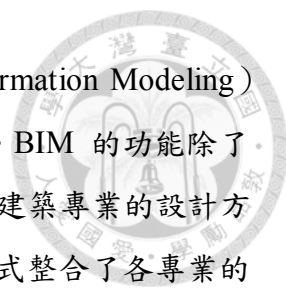


圖 1-2 捷運機電系統架構圖

(資料來源: 泰興工程, 2017)



近年來，以 3D 建築資訊模型為核心的 BIM (Building Information Modeling) 技術發展與應用，在全球營建產業已蔚成一股不可忽視的趨勢。BIM 的功能除了 3D 效果使工程圖說更加精細外，重要的是能協同作業，整合各建築專業的設計方案，包含建築、結構及機電等項目，以平台的方式及視覺化的形式整合了各專業的圖檔及設計介面，在設計過程當中就能了解各專業的介面及避開衝突的發生，降低來回溝通與整合的時間，節省成本並提升了設計品質，滿足客戶需求。BIM 之概念起始於 Autodesk 之 3D、物件導向(object-oriented)、AEC-specific CAD；BIM 軟體工具的開發從 1980 年代開始，早期因運行所需的硬體非常昂貴，而限制了相關技術的廣泛採用，直到 1984 年發布的 ArchiCAD 的 Radar CH，提供個人電腦上運行的第一個建模軟體，在執行建築專案時，使用建築資訊模型集合所有相關資訊的複雜性，接著許多公司開發出建築資訊模型運用規範及框架。這些軟體套件如 Autodesk Revit, Bentley AECOSim Building Designer, ArchiCAD, MagiCAD, Tekla Structures, Synchro PRO, VectorWorks, Trimble SketchUp 等，其中 Revit MEP 主要功能著重於建築機械與設備管線配置規劃，並且提供空調空間熱能分析及電力附載計算。軟體功能發展至今可將時間，成本，製造商細節，可持續性和維護管理資訊等等納入到建築模型中。3D BIM 應用於 MEP 系統的發展優勢，綜整 (Khanzode et al., 2008) 以及 (Korman et al., 2010) 等人的學術文章，初步歸納其重點如下，

1. 視覺化呈現，增進專案成員之溝通效率
2. 協同作業，可多方跨專業領域同時建模，提升工程效率
3. 以 BIM 模擬出設備配置多選項，供業主或承包商選擇最佳方案
4. 物件碰撞檢討，避免重工修改
5. 各專業之設計圖說整合，模型資料庫可完整銜接，移交順利
6. 自動檢出各類材料數量，有利估價及成本控制
7. 施工模擬及檢討
8. 4D BIM 可掌控施工進度
9. BIM 模型可直接發展成竣工圖，節省成本
10. 建立及銜接營運階段之設施管理系統

綜觀國內外運用 BIM 技術來執行的工程專案，不僅需投入時間、人力與資金來投資 BIM 的相關計畫以因應這項新的圖資管理科技，除了影響工程專案執行的流程與團隊間的互動關係，政府機關、業主、設計單位、施工單位與專業承包商們也必須改變既有的文化與思維得以發揮 BIM 實質的效率與效益。



## 1.2 研究動機

回顧大部分的歷史文獻，針對 MEP 系統與 3D BIM 技術之研究大多著重在 3D 建模技術的探討或是解決土建系統與機電系統之間的施工界面問題，甚少從規劃設計階段就開始探討 MEP 專業與專案其他成員之間的溝通與協同整合策略。BIM 技術的應用，除了科技本身面對不斷升級的問題外，配合工程生命週期各階段的設計流程與專案團隊間互動關係的改變亦衍生許多新的問題，如 BIM 之相關分析與成果未能於施工前完成將無法發揮 BIM 之效益、缺乏標準的設計整合流程、專案組織間的責任與義務以及 BIM 交付成果未明確定義等。

此外設計變更也是專案執行時最常面對的難題。施工過程無法解決而發生任何的變更設計對業主及施工廠商都是極大的風險，直接影響到工程品質、工期與成本。傳統 2D 設計整合方式資訊無法互通應用，建築、結構、機電任何一方的設計圖說變更，因無法即時取得完整的變更圖面與工程數量資料，在執行與管理上有相當大的缺失。從 MEP 專業人員的角度來看，如何應用 BIM 來預覽工程全貌以及透過 BIM 技術將機電相關資訊正確、完整、及時地整合至工程生命週期各階段的交付成果中，是非常值得期待也將是本文探討的重點。

## 1.3 研究目的

如何解決或改善上述問題俾使 BIM 達成其預期效益，實為一值得深入探討之課題。透過本研究，筆者將藉由實際案例探討 EPC 類型的捷運新建案，從規劃、設計階段到各專業系統之採購、施工乃至設施維護管理階段全程發展 BIM Level 2 技術，分析其設計階段、施工階段與 BIM 應用相對應之關係，依據 MEP 專業系統於各階段的 BIM 使用目的與範疇來擬訂最具效益之設計整合流程，以期能達成以下目的：



1. 運用 3D BIM 優勢，建立土建工程與機電系統的良好連結關係，在土建施工之前即納入機電系統需求且預作各項評估，減少重工作業與設計變更。
2. 透過 BIM 技術應用於不同階段的分析，制定出各專業團隊於各階段需進行與完成的各項分析與考量，以提升 BIM 應用之效率。
3. 發展一套快速解決設計問題的流程，將建築、結構、機械、電氣和管線各專業組織間的模型套疊整合與介面協調工作簡化，減少 MEP 整合時間。
4. 協助改善設計者與施工者間的互動模式，建立直接溝通平台，提早發現及解決問題，降低施工階段的爭議與錯誤率以提升整體工程效率。
5. 在設計階段透過 3D 軟體工具的輔助，尋求避免以及解決軟衝突的方法，降低人為判斷的失誤以協助 MEP 專業承商快速提出精確的設備及管線佈置圖。
6. 進而探討全生命週期 BIM 技術對於專案組織的工作範疇、MEP 介面問題與設計變更之影響與效益。

## 1.4 論文架構

本研究之撰寫架構將分為六個部分進行陳述，各章節概要茲簡述如下；

### 第一章 緒論

包括背景說明與研究動機、研究目的、研究流程以及論文架構。

### 第二章 文獻回顧

蒐集相關文獻包括 MEP 整合流程，施工可行性，整合專案交付，MEP 系統在設施維護管理階段等。

### 第三章 MEP 整合現況分析與問題探討

將透過現況分析以了解 MEP 設計整合、BIM 技術應用與統包模式之實際執行狀況，歸納整理出常見缺失與待解決的問題陳述。

### 第四章 MEP 設計整合流程改善



深入探討 BIM 軟體工具與 BIM 技術的優勢，檢討設計整合流程需涵蓋全生命週期以發展出具效益的 MEP 設計及整合流程。



## 第五章 案例分析

以捷運 EPC 新建案為案例進行定性分析及定量分析，包括 MEP 系統之 3D 設計與建模流程、衝突檢測分析、設計審核與成果交付分析、BIM 成效之定性與定量分析，以驗證本研究所提出的 MEP 設計整合流程之正確性與預期效益。

## 第六章 結論與建議

根據研究成果提出結論與未來建議研究方向。

## 1.5 研究流程

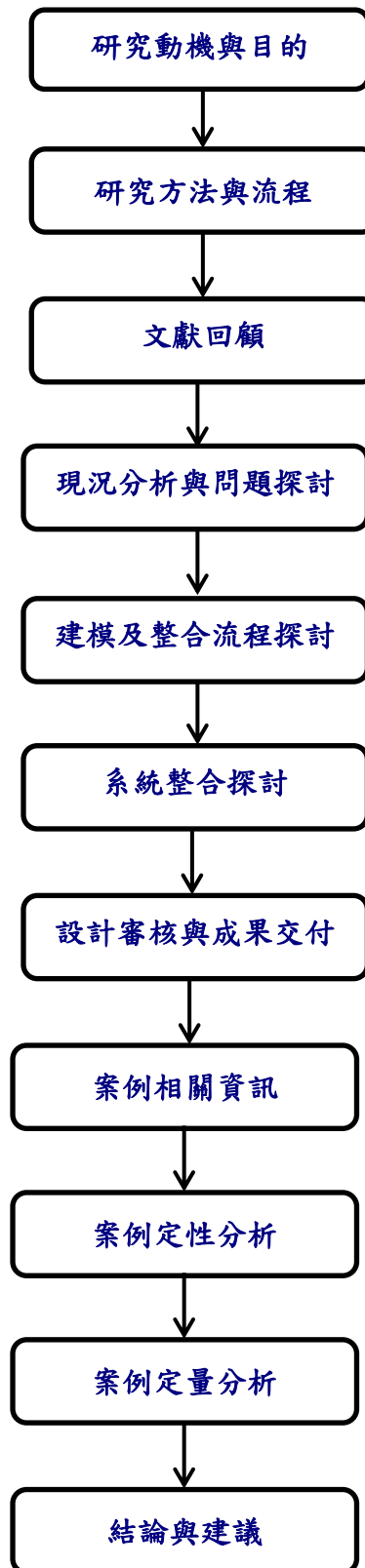


圖 1-3 研究流程

## 第 2 章 文獻回顧



MEP 系統的設計整合成果對於整體工程的成敗影響與日俱增，本章將透過相關文獻對於 MEP 系統整合、施工可行性、整合專案交付、MEP 系統在設施維護管理階段等內容進行回顧、分析與整理。


### 2.1 MEP 整合流程

建築物的設計整合是各組織間互動的過程，在於解決設計誤差以及建築物與設備元件之間的衝突。例如牆、門、梁、柱、管、管道以及有相互關聯性的照明燈具等。整合工作是相當複雜且富挑戰性的，過程中當某一部分需要移動或修改時，不僅會影響到直接相關聯的部位，常常也衍生一些無法預期的新問題。

機械、電氣及管路系統 (MEP) 的整合效率是審視各專業設計成果能否順利施工的一個重要關鍵，為順利完成 MEP 的整合，除了設計專業外，施工經驗、營運操作以及設施維護管理相關領域的知識都是必須具備的。事實上，許多營建專家也認為 MEP 的整合是營建專案交付過程中最具挑戰性的任務之一 (Korman et al., 2003)。

捷運系統的機電設計項目是相當的複雜，以往機電系統的整合依賴平面式的 CSD/SEM (Combined Service Drawing/Structural Electric and Mechanic Drawing) 套圖，先由設計顧問或是設計並建造 (design-build) 的承包商各自發展自己的系統，接著由另外一家公司 (通常是統包商或是 HVAC 承包商) 接續進行 MEP 的整合工作。專案類型不論是 Design-Bid-Build、Design-Build、Design-Assist 或 Engineering-Procurement-Construction (簡稱 EPC)，MEP 整合方式大多還是採用人工依序套匯 2D 圖說來整合不同專業分包商所完成的設計成果，這種設計協調過程耗時，衝突點不易判讀且缺乏效率 (Lee and Kim, 2014)。綜整其原因如下，

1. 設計圖說種類包含土建類與機電類，種類繁多且圖數龐大。當設計持續進行愈趨成熟階段需要整合的系統圖種類與數量成倍數成長。尤其是大型的新建案，機電設備的金額占工程總額的比例愈來愈高，在這種情狀下，MEP 系統的協調與整合更具挑戰性。

- 
2. 針對套匯各專業成果的圖說，2D 圖說複雜又重疊，即使是專家也不易解讀。
  3. 即使發現到錯誤，該由哪個系統來修正設計圖說？爭議與協調會議層出不窮。
  4. 由於各專業設計持續獨立進行，在修正一處錯誤的同時，設計條件可能已經更改，甚而影響其他層面。
  5. 建築和結構元素的設計更改，勢必導致下游機電系統一連串的衝擊。
  6. 只有很短的回饋週期。
  7. 軟衝突問題。例如淨高考量、施工可行性問題、搬運動線、施工路徑與維修空間的需求，在設計階段及圖說不易明確表示，在整合階段也很難偵測到問題。
  8. 機電整合過程涉及眾多專業承商，包括消防火警、冷凍空調、風管、共同管線、電力與電信服務。然而以往在建造階段，通常著重在機電整合界面而忽略了建築、結構等土建專業亦須共同參與來綜整各關聯廠商之意見需求，例如彙整開口、基座、套管、預埋件及管道間等需求納入建築結構圖中。

鑑於上述 8 項問題，以傳統 2D 機電圖說和 2D 建築、結構圖套疊之整合方式，當缺失與錯誤無法在設計或整合階段提早發現，待施工中遇到衝突再尋求現場解決或辦理設計變更導致成本增加約一成以上，後續衍伸相當多的問題。許多研究案例已證明，隨著 3D 作業的快速發展，BIM 技術應用分別在設計以及施工階段已大幅改善 MEP 整合效率，3D 視覺化的數位模型比傳統 2D 之 CSD 紙本更易溝通，許多原先不易判讀的設計缺失與衝突點透過 BIM 軟體均可自動檢出，不但縮短整合工期更改善了工程品質與效率。此外 BIM 技術還能協助將建築師之設計理念快速、清楚地傳達給管理階層、土木團隊、機電工程團隊、承包商、業主與施工團隊，強化各組織間的協同合作，透過 BIM 模型，所有物件的詳細資訊都統一存放在資料庫中，實現了資訊整合的目標。依據 Staub-French and Khanzode (2007) 的研究報告中指出，HVAC 專業承包商針對風管安裝以及管路施作的評估結果，結合 3D BIM 技術比傳統 2D 方式提高了 25% 至 30% 以上的生產率。Santos and Ferreira (2008) 也透過實例分析出應用 3D BIM 工具的設計整合比傳統 2D 技術的整合方式節省了將近 30% 的工時，大幅提昇整體經濟效益。針對 3D BIM 模型與傳統 2D CSD 的套圖結果比較，詳見下圖 2-1

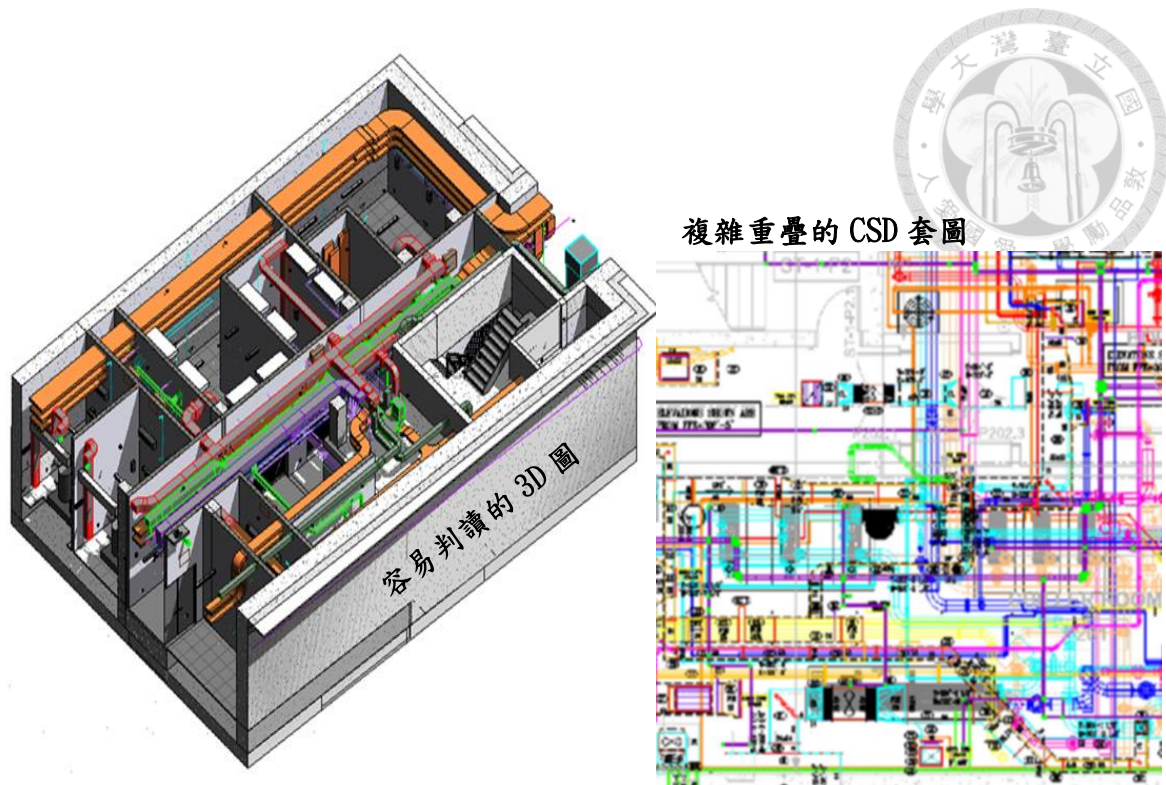


圖 2-1 BIM 模型與傳統 2D CSD 套圖之比較  
(本研究繪製)

MEP 的設計整合流程包括概念規劃、初步規劃、細部設計以及方案執行等。3D MEP 模型則包括 MEP 初步設計模型、MEP 細部設計模型、MEP 施工性之設計模型、施工用模型以及 MEP 預製模型等。(Wang et al., 2014) 嘗試提出 3D BIM 作業環境下之 MEP 模型之發展流程，由於考量當地環境與產業文化認為 3D BIM 屬於額外的工作項目，不包含於原承攬工程範疇與金額，對於 BIM 技術的執行，多以規模、成本以及使用目的為主要考量，欲執行全 BIM 技術確有其困難點。因此 Wang 等人建議採用 2D 細設團隊與 3D 建模團隊協同合作的方式，細設團隊先提出 2D CAD 設計圖說經業主核可，BIM 團隊接續依據不同階段 2D 圖來建置 3D 模型。下圖 2-2 為 Wang 等人建議之 MEP 模型之發展流程 (Wang et al., 2016)。

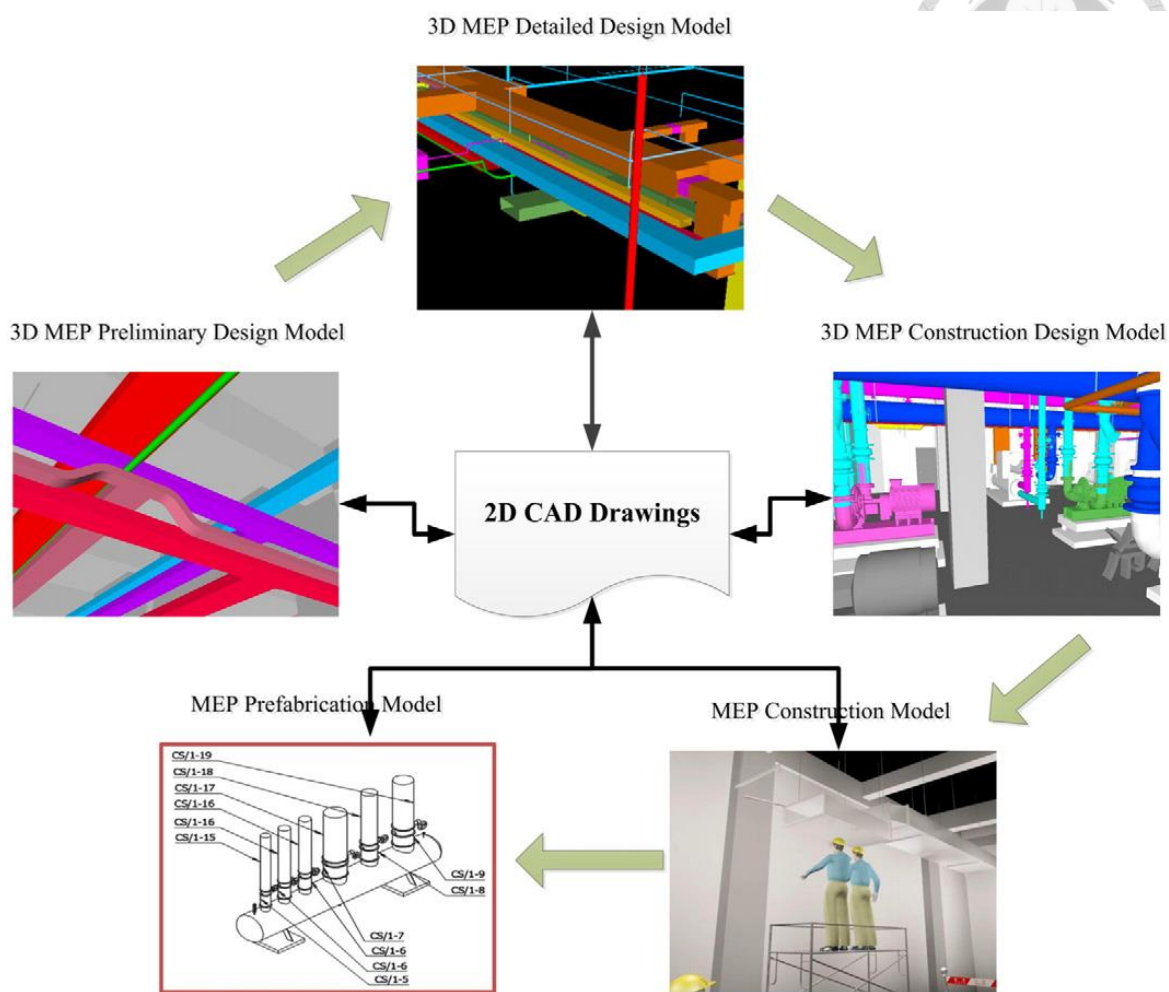


圖 2-2 MEP 模型之發展流程

(Wang et al., 2016)

BIM 技術最大的概念就是整合優勢以及資源共享，理想的 MEP 設計整合流程應該在規畫初期就直接執行 3D BIM 技術方式，方能發揮其效能至極致。然對於工程團隊而言，全 BIM 技術是一項新的協商整合模式，如何在最初概念規劃時期捨棄既有的 2D CAD 設計而直接進入 3D BIM 技術相當值得探討，即使是先進國家的研究報告目前尚無全程使用 BIM 之相關資料可供參考，因此全 BIM 設計整合流程相當值得探討。

MEP 的整合方式，依據先前的研究顯示有並行整合與依序整合兩種，而不同的整合策略對於專案執行的結果有很大的差別 (Lee and Kim, 2014)。史丹佛大學的學者 (Korman and Tatum, 1999) 提出 SCOP 依序整合的流程，認為 MEP 整合的

順序為乾式的加熱、通風等空調系統第一優先整合，再來是濕式的 HVAC 系統、管線、消防系統，最後才是電力系統。MPE 整合執行流程如表 2-1 所示，



表 2-1 MEP 整合的優先順序  
(Korman and Tatum, 1999)

System (in priority order)	Priority/Special Notes
Mechanical (HVAC Dry)	usually first due to large size of components
Mechanical (HVAC Wet)	follows HVAC Dry due to interdependency of these systems
Plumbing (gravity driven systems)	design criteria for slope essential for system performance
Plumbing (pressure driven systems)	lower priority because less difficult to re-route
Process piping	takes first priority if critical to manufacturing process
Fire Protection	flexible routing within safety and architectural requirements
Electrical	most flexible routing, especially small diameter conduit
Control systems	flexible routing but must limit bend radius for pneumatic tubes
Telephone/Datacom	flexible routing but must limit bend radius for fiber optic cables

另一研究案例中，Staub-French and Khanzode 認為應用 3D / 4D 工具來執行 MEP 的整合才是最佳方案，建議所有的設計工程師與 MEP 專業承包商應該集結在一間大辦公室裡進行整合作業，同時也提出建議的 MEP 整合順序依序為，

1. 結構和建築模型之間的協調整合
2. 鋼結構詳圖
3. 初步空間的分配
4. 硬衝突物件
5. 進出管道間的中壓管線
6. 主管線系統和通風口
7. 自動灑水管及分支管
8. 冷熱水管及分支管
9. 燈具和配管裝置
10. 小尺寸的管道
11. 小尺寸的冷熱水管以及可繞性的導管。

回顧以上兩案例中顯而易見的，施工性考量在 MEP 整合過程中是相當的重要，它將會影響到系統整合優先順序的決策。施工性考量於 2.2 章節將有更深入的探討。同時為改善耗時且無效率的傳統 2D 整合方式，Staub-French 等人提出後續執行 3D BIM 技術於設計整合階段之執程序。依序為，

1. 定義 3D 模型的主要用途
2. 訂定 3D 建模的架構與基本需求
3. 制定繪圖的標準與法則
4. 決定衝突檢測軟體與解決衝突的流程
5. 發展快速解決設計問題的平台
6. 發展各專業系統的 3D 模型
7. 整合各專業系統的 3D 模型
8. 定義各元件/各系統之間的衝突
9. 制定解決衝突的方法
10. 衝突檢測以及解決方案的報表

(Lee and Kim, 2014) 更進一步探討馬里蘭州一家醫學公司總部辦公大樓的新建工程進行定量分析，比較 MEP 依序整合策略以及同時進行整合策略兩者對於生產力以及專案各組織之間資訊分享方式之影響。研究結果證明依序進行的 MEP 整合方式比並行整合的方式效率上快約三倍；同步進行整合的流程，由於過多的資訊與決策工作都集中在 MEP 整合者身上，導致進度延遲。

根據他們的分析顯示，在並行整合的情況下，MEP 分包商們在缺乏足夠的信息之下各自同步發展自己的模型，大量的訊息往返集中在 MEP 整合者身上，相較於其他參與者，此時 MEP 整合者是唯一了解專案全貌的重要窗口，資訊傳遞、介面衝突和設計錯誤全依賴 MEP 整合者的專業及經驗來做決策。為解決單一問題的變更設計往往牽一髮而動全身，衍伸後續的問題、更多的整合會議，不斷循環的模式下，導致整合進度延誤了 3 個月。反之，在依序整合的過程，分包商可以依據其



他分包商已經整合好的模型進行設計與建模，而不是靠著 MEP 整合者的經驗與直覺，結果出現較少的錯誤，而且過程顯著減少了協調週期和時間。

文獻中同時也提出建議 MEP 依序整合的優先順序為：1. 由外向內，2. 由大到小，3. 由硬到軟。

1. 由外到內：外是指由建築設計優先，接著結構設計，然後 MEP 設計，整合過程是迭代的。
2. 從大到小：針對佔用大空間的物件先整合（例如，主要大型風管）
3. 由硬到軟：先解決空間上確實存在的衝突，如管線、電纜線槽配置於同一空間；而軟衝突為空間上無實際衝突，但無足夠的施作空間或施作時動線受到阻礙等。

遵循以上原則，建築和結構交付 BIM 模型後，MEP BIM 整合者針對 HVAC 系統優先建立模型 1，接著進行機械管路以及冷熱水管的模型 2，此時可同時進行這兩個模型的衝突檢測。接下來再針對電氣以及消防系統進行建模。這種整合策略的建模過程花費時間較長，然而在進行第一次衝突檢測時，衝突物件數較少，因為大幅及明顯的衝突早已經先前依序建模的階段中解決完成。

此外，MEP 設備數量也是 MEP 系統整合時需要考慮的一項重要因素，依據該案例分析顯示當 MEP 設備數量增加到一定的量，所需整合時間將會大幅的攀升且幾乎達到最大值。這是因為當系統元件全部擠滿在密集的空間，要解決任何碰種問題是相當艱難的。對於複雜的建築物、有大量 MEP 設備或是有空間限制的新建案非常適合採用 3D BIM 技術來執行艱難的 MEP 系統整合，可以避免設計與施工重複作業並且降低工程風險。下圖 2-3 為 MEP 設備分布密度與 MEP 系統整合時間的關係圖。

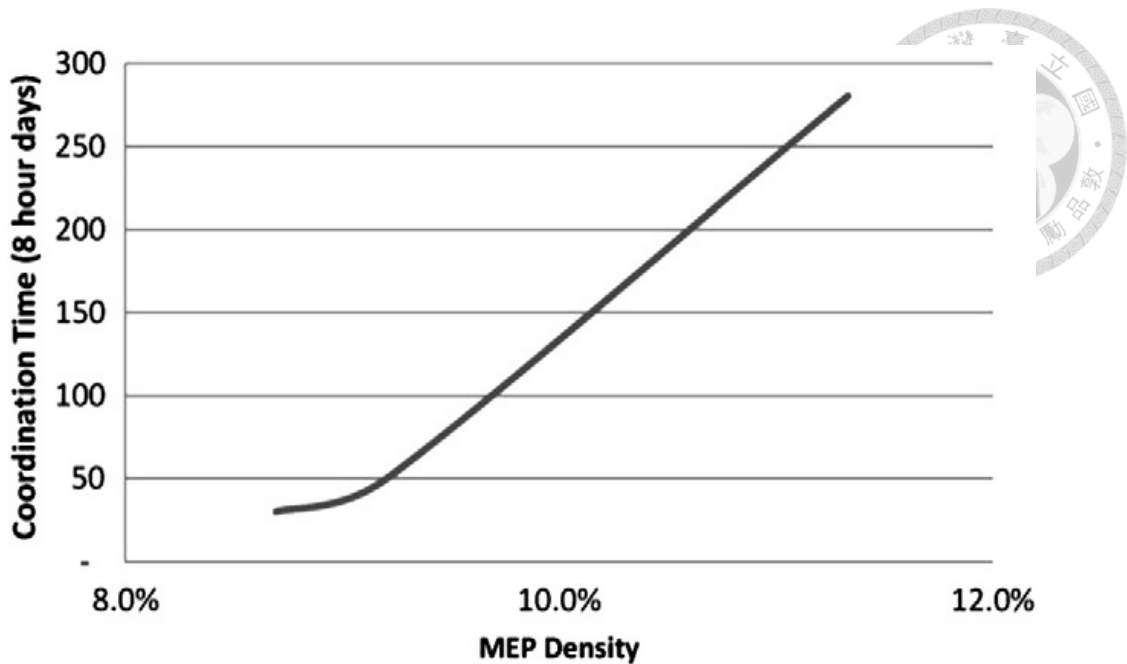



圖 2-3 MEP 分布密度與 MEP 系統整合時間的關係圖  
(Lee et al., 2014)


## 2.2 施工可行性

工程專案在漫長的生命週期中，其施工階段是真正在實體空間有成果產出的關鍵期。根據美國營建研究院 (Construction Industry Institute, CII) 對施工可行性所下的定義：施工知識加上規劃、設計、採購專業以及現場操作經驗所作最佳化的應用，以實現專案整體的目標。而美國結構研究期刊對施工可行性所下的定義則是：在專案成果提送之過程中，將施工知識作最佳化、系統化的整合，並且依據各類專案與環境之條件來調整，以達成專案目標以提升施工效益 (Journal: Structural Survey, 2006)，也有更簡單的說法，所謂施工可行性是指各設備元件施作之難易程度 (Pavitt and Gibb, 2003)。施工時需考量設備空間衝突、管路空間衝突、管徑尺寸過大或管子材質可撓度不佳、施工作業空間擁擠、管路排設過份擁擠、上層管路應先行施工等因素。過去工程設計者大都不負責施工，因此缺乏施工性的思考；而現場營造人員也只按圖施工，缺乏考量原設計者的意圖，加上從設計階段到施工階段的時程可能因發包策略而延長，導致設計者與施工者之間合作不易。依據國外之研究報告，專案在設計階段應該依事先建立之相關計畫，檢測施工所依據的設計成果 (design delivery) 之施工性。回顧過去包含施工的專案，應用 3D BIM 工具提昇施工可行性方面的研究甚多，包括可降低工程成本、縮短工期 (Trigunarsyah, 2004a, b；



Pocock et al, 2006)、提高工程品質 (Trigunarsyah, 2004c ; Pocock et al., 2006)、提高生產率 (Poh and Chen, 1998; Low, 2001)、提高安全性能 (Low and Abeyegoonasekera, 2001 ; Trigunarsyah, 2004a, c)、減少契約變更與爭議 (Pocock et al., 2006)。依據美國營建研究院的研究結果，實施施工可行性計畫可以縮短工期 8.7~43.5%，節省成本 1.1~10.7%，減少重工作業 8~40% (Construction Industry Institute, 2006)，透過 BIM 技術執行物件衝突檢測和空間干涉檢查，提供了業主、設計工程師、專業承包商與施工廠商之間的對話機制，3D 模型更可預見施工可行性問題，大量提升 DB、EPC 統包專案執行的品質、速度與精準度。BIM 模型應用效益相當多元，比起傳統只用 2D 的設計，現場施工安裝風管、水管的效率提昇了 25-30 % (Staub-French and Khanzode, 2007 )，美國史丹福大學 (CIFE)對 32 重大工程項目的調查結果也顯示出 1. 消除 40% 的預算外之變更。2. 工程估價準確度誤差小於 3%。3. 估價時間減少 80% 以上。4. 碰撞檢查減少合約費用的 10%。5. 工程項目完成時間減少 7%。(黃世昌與簡國峯，2014；CIFE, 2007)。針對 MEP 整合方面更是為業主及承包商雙方節省相當可觀的工程成本，因為管道承包商可依據 3D 模型預先製作，減少重工作業及縮短工期，且版次設計變更的模型修訂都有完整的數量計算，協助廠商追加工程款或是責任釐清。尤其統包工程在專案初始即應用施工性概念除可減少工程發包的次數，邊設計邊施工之方式亦可縮短工期與成本。所以，MEP 系統整合流程除了強調不同專業間的設計整合工作，應納入施工設計的工作，也就是在規劃與設計階段就考慮施工可行性，在工程專案之生命週期，愈早投入施工性之改善，其效益愈高，可以提早解決許多工程問題，並應加強考量工廠預製帶來的品質、成本、及工安的優點。

施工可行性考量常遭遇的問題有設計單位與施工單位間缺乏溝通的管道、相關人員施工經驗的不足、跨專業整合的困難度等 (Pocock et al, 2006)。傳統 2D 的設計整合流程，施工常識必須靠長期累積的施工經驗，而經驗豐富的工程人員是公司最寶貴的智慧財產。然而當產業出現人才斷層，專案團隊大量採用無現場經驗的年輕工程師時就無法全面考慮施工性，等到施工階段發生設計變更所付出的成本又是相當的高。導入 3D BIM 技術來協助專案團隊尋求最佳設計方案，透過 3D 電腦軟體來彌補設計人員施工經驗的不足，當設計方案還在擬定過程及早修正錯誤



避開施工風險，以期降低工程營建成本。Hartmann and Fischer (2007) 也提出，應用 BIM 技術對於設計階段、專案執行、進度掌控、施工可行性的發展以及資訊的溝通是非常有助益的。所以 BIM 不只是傳統 3D 在於建置完工後的模型而已，而是必須蘊含施作的過程資訊，來預先檢核設計成果之施工性，工程數量與成本估算等。回顧 2.1 節的案例中所提及，施工性考量在 MEP 整合過程中會影響到整合優先順序的決策，因此應把施工性納入 MEP 設計整合階段的一項重點工作。

## 2.3 專案整合交付 (IPD)

根據美國建築師協會的文件 (AIA, 2007)，BIM 技術帶來的重要流程改變，就是得以具體實現專案整合交付 (Integrated Project Delivery, IPD) 的理念。其理論重點在於應用 BIM 技術輔助專業協同整合，以提升專案之整合效益進而達到精確控管時間與成本之目標。IPD 指的是一個工程專案初始至終將設計團隊、施工團隊、設備承商與業主等相關單位結合成一個共同合作的團體，來完成一項工程，這跟過去分階段進行設計、發包、施工，發包給不同單位以致資料無法傳遞的作法不同。IPD 在觀念上類似工程統包，也就是需要在工程前期就將施工承商納入，以便最終能當成是整體成果交付給業主。

AIA 加州協會於 2006 首次提出 IPD 的定義：IPD 是一種專案成果交付的方式，結合工程設計人員、系統、業務貫穿整個工程生命週期，涵蓋設計、施工和專案交付。團隊成員協同參與共同分享智慧及經驗，對專案進行最佳化，減少工程浪費能更有效率地完成既定目標。其特色包括：

1. 專案初期就能將設計構想呈現給業主，透過協調以達成業主的目標，從而有效地控制各生命週期的成本、時程與品質。
2. 施工團隊在設計階段就協同參與，與設計者分享施工經驗與專業，可提高施工品質與降低工程成本。
3. 透過施工團隊的技術支援，設計者可減少設計時程、執行較準確的評估與決策。

BIM Handbook 第二版也提出應用 IPD 的成功案例，例如加州舊金山灣區 Camino 醫事集團新建的醫院，即採用 IPD 提早引入分包商協助設計，增加了設計與施工的重疊期而縮短整個專案的時間，且因採用 IPD 而在開始施工後很少變更

設計，也降低機關送審的需求，搭配在契約中納入獎勵條例使省下的成本由 IPD 團隊與業主共享，不但降低設計與施工的成本，更提高工地生產率及工地安全。另一案例中，專案團隊共同簽訂契約，規定團隊任何一方省下來的經費或風險由包括業主在內的所有成員共同分享，因此，團隊成功與專案成功息息相關，所有成員的風險和利益目標一致，能有效節省工程費用、工期、降低風險及分享利益 (Eastman BIM Handbook, 2011；邱垂德等，2014)。而筆者也嘗試給 IPD 下個另類的註解，IPD 就像合唱團員們看著共同樂譜，一起唱出完美和諧的曲調。

針對不同的發包模式在專案執行上之時程差異如圖 2-4 所示，設計-招標-建造模式 (DBB) 是應用最早的工程發包方式之一，特點是前一個階段結束後另一個階段才能開始；設計-建造模式 (DB) 是指設計連帶施工之承包方式，承包商於設計階段加入施工性可縮短整體工期；而 IPD 方式可提早確定設計方案與進行預先施工。

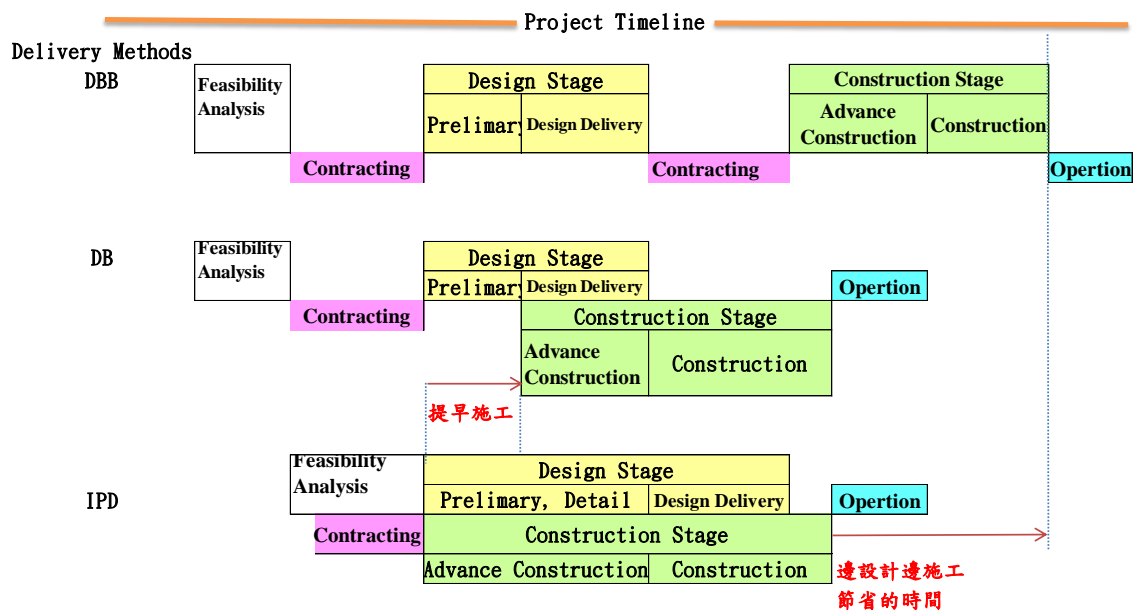


圖 2-4 不同發包模式之時程比較  
(Eastman et al., 2011；本研究重新整理)

儘管 IPD 的發包作業模式可使 BIM 之效益彰顯，然而業主對 BIM 的認知有限，將無法體會 IPD 發包作業模式之效益，加上現階段國內的發包模式與傳統觀念缺乏相關的案例或經驗，要直接導入 IPD 的困難度可能更甚於發展 BIM 技



術。因此建議可以先從統包專案開始實施，培養團隊對於 BIM 的認知與概念整合並進一步提供建議與加強教育訓練，讓專案團隊能夠接受未來 IPD 發包作業模式。

## 2.4 BIM 於 MEP 設施維護管理之應用

MEP 系統工程之全生命週期可細分為規劃、設計、施工、維護營運管理及拆除重建等多個階段。許多研究指出建築物經過設計、建造、完工後即進入漫長的運轉期，其設備更進入長達二、三十年的生命週期，而維護營運管理階段在建築物生命週期中所佔時間最長，總成本高達 83% 以上（營運階段約佔 30.6%，維護階段約佔 32.1%，修繕階段約佔 15.6%）卻常被忽略。而所謂的設施營運管理 (Facility Management)，意指為管理建築物各種設備或設施，使之保持正常運轉狀態，以達到原先設置的功能，所採取的各種電腦化、科學化、系統化管理等作為。傳統建築物設施管理主要採文字及圖表方式記錄維護資訊，在溝通介面上主要透過 2D 圖說之方式表達，往往無法明確地顯示所需的維護資訊，且以紙本方式記錄資訊常因文件不易保存而損壞或遺失；如遇捷運工程等大型建案內部包含許多的自動化裝置與機電系統設備，維修人員不僅無法即時有效地得知設備狀況及位置，容易造成誤判，或因整體資料過於龐大造成內部於整理維修紀錄之作業時容易發生如建檔不完整等問題，導致資料流失無法為管理人員運用，使整體成本大幅增加甚而影響後續管理之重要決策。

設施管理必需透過特定系統軟體的應用及因應不同建築物用途及設備的需求來進行開發建置以達成各項設備維運及智慧化的功能。目前設施管理系統主要有：  
1. 電腦化管理維護系統 (CMMS) 2. 建築管理系統 (Building Management System) 3. 建築自動系統 (Building Automation System)，以上三套系統主要以可持續發展、能源管理、房產與專案管理為主。BIM 在設計施工階段效益眾所皆知，但從設施管理觀點運用 BIM 尚未發揮其最大效益。營運階段 BIM 應用包含記錄模型、維護計畫、建築系統分析等功能，可將日益增多的設施及設備資料，轉化整合為單一模型資訊。BIM 可與上述特定系統軟體相互整合，即時提供維護資訊查詢及歷史紀錄，透過 3D 視覺化模組及設備基本資訊與標準之資料庫，將可有效輔助 MEP 設備維護管理作業，以提升營運管理及相互溝通之效率與正確性。BIM

於 MEP 設施維護資訊整合示意圖 (詳見圖 2-5)。而營運人員與設施管理者也因 BIM 技術普及得以早期就參與規劃設計,訂定後續 MEP 設施管理的目標,共同選用設施管理軟體,參與竣工 BIM 模型的建置過程,確認 BIM 交付格式與資訊內容等,優化了 MEP 設計整合流程,有助於提升交付過程、後期維護、營運管理階段之效率,所有資訊透過管理階層的分析與應用,亦可作為未來管理維護決策使用。

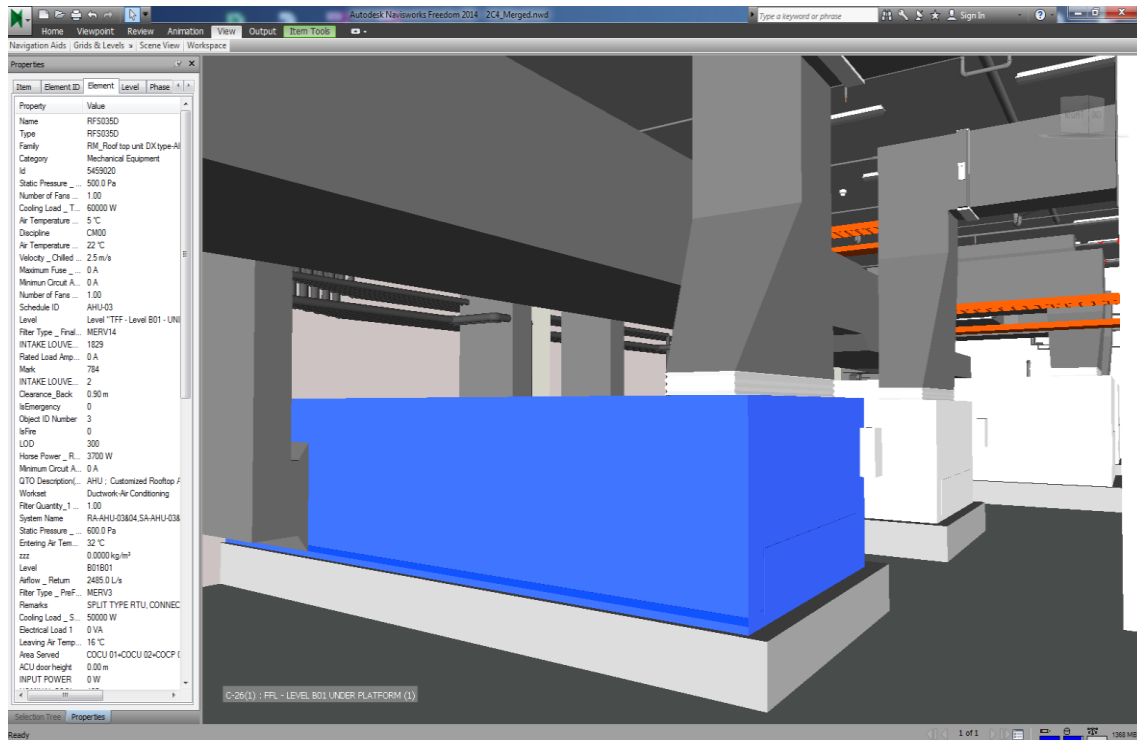


圖 2-5 BIM 在 MEP 設施資訊整合示意圖

BIM 在營運階段之設施維護管理應用實際成功案例,主要項目包括空間管理、能源管理、防災避難規劃、營運維護管理等,而未來仍會持續發展出其他 BIM 在營運管理方面的應用 (陳維東、黃盈樺與林佑正, 2014)。茲彙整過去案例導入 3D BIM 之主要效益如下:

1. 對於營運管理模型與相關資訊整合較有完善規劃管理效能
2. 有效協助業主及相關成員提前執行營運維護管理之前置作業。
3. 不論定期性或臨時性保養維護,皆可透過 BIM 模型與相關設備資料連接,透過 3D 視覺化呈現,協助管理及維護人員有效提升 MEP 設備維護與保養之管理品質。



維吉尼亞理工學院與州立大學在 2012 年針對高科技大樓業主進行一項「BIM 作為設施管理營運平台」的問卷調查發現，有 38% 的業主在設施完工後仍使用 BIM；在設施管理上有 19% 的業主用 BIM 改善管理流程；有 13%~27% 的業主運用 BIM 進行物料調度、空間管理、成本估算、設備盤點；有 16% 的業主運用 BIM 進行能源管理減少費用支出；多達 60%~70% 業主運用 BIM 進行能源監控（張詠翔等，2015；Alcorn & Wirdzek, 2013）。設施管理屬於智慧建築的指標之一，專案團隊若能整合 BIM 技術與設施管理系統應用於工程全生命週期，並將傳統設施管理與智慧化 ICT 設備整合，將有助於長期有效地累積 MEP 設備資訊來執行各項管理策略，確保建築物的永續經營。

## 2.5 小結

欲執行 BIM 技術，除了專案規模、成本以及使用目的外，仍須考量當地環境與產業文化的成熟與配合度。理想的 MEP 設計整合流程應該在規畫初期就直接執行 3D BIM 技術方式，方能發揮其效能至極致。

在 MEP 整合過程中施工性考量是相當的重要，施工性設計可以縮短工期亦影響到系統整合優先順序的決策。此外，設施維護管理屬於智慧建築的指標之一，若能整合 BIM 技術與設施維護管理系統應用於工程全生命週期，將有助於長期且有效地累積 MEP 設備資訊來執行各項管理策略，確保建築物的永續經營。



## 第3章 MEP 整合現況分析與問題探討

機電工程承攬金額及規模日益擴大，橫跨不同領域的 MEP 設計整合成為工程人員最大的挑戰，本章節將透過現況分析以了解 MEP 設計整合、BIM 技術應用與統包案之實際執行狀況，歸納整理出常見缺失與待解決的問題陳述。


### 3.1 現況分析

我國機電產業擁有完整之供應鏈，從上游各式元件至下游專用機械設備、控制系統與系統整合等。MEP 系統的設計與發展是跨領域的系統整合工程，涵蓋機械工業、電力工程、電腦工業、資訊科技與工業儀器等。隨著機電產業不斷升級以及提高建築物附加價值的誘因，業主對營建工程的需求逐漸趨向自動化、高效率與永續發展，結合 ICT 科技的應用與包羅萬象的智慧化設備，使得機電系統更加依賴網路、數位資訊工具與系統整合技術，橫跨不同領域的機電工程設計之複雜化也成為工程人員最大的挑戰，因此契合需求、改變原有專案管理思維與設計整合流程改造是非常重要且迫切的。另一方面由於工程承攬金額及規模也日益擴大，因此機電工程趨向與營建、土木及機械等產業結合，共同爭取市場，而不再以單一產業型態參與競標，以減少風險及增加承攬機會。

#### 3.1.1 發包模式

無論是傳統產業或高科技產業之 MEP 工程規模日趨龐大，專業分工也愈來愈細密，隨之接踵而來的介面問題更趨複雜且影響層面甚廣。從規劃設計、發包至施工各階段作業都攸關工程能否順利完成，其中發包策略更扮演著關鍵角色，不僅影響未來施工階段之工程進度，並因涉及決定分工介面多寡、介面協調以及系統整合之難易等，深切影響到工程最終品質。

MEP 系統的作業流程包含計畫、規劃、基本設計、細部設計、招標發包、施工、測試與驗收及營運管理等，包括機關、業主、規劃及設計顧問、總承包商以及專業包商及材料供應商等眾多參與者。參與成員之間的關係為臨時組合的合約關係，各自依契約完成階段性分工任務後合作關係即消失。依過去分包模式機電工程屬於下游產業，往往在工程顧問公司完成設計後才開始參與，且基於營運時程壓力，



MEP 承包商需同時執行發包、採購、施工程序。大多之機電工程公司取得專案後會將採購發包之類型分為材料、設備、勞務及系統工程統包，目標在成本範圍內能兼顧品質及如期或提早完成驗收並移交給業主。當發生介面問題或衝突時，不同期間進場作業的土建承商與眾多機電包商們往往採互推責任或不配合協商的態度，導致整合階段需花費更多的時間與成本來解決介面衝突。尤其捷運工程之機電界面最為複雜，過去依土木工程與機電系統工程之分標模式進行發包作業，各承包商分別對業主履行合約彼此間無任何合約關係，因此易產生許多介面問題與爭議，導致不斷的變更設計及工期延誤等難題，而業主也因介面未知風險而深受影響。有鑑於此，目前國內機場捷運系統已採用機電系統統包工程，採設計與建造統包的情況下，換句話說，業主願意支付較高的工程款並將較高的工程風險分配與承包商。

綜整國內捷運執行之發包方式如下，

1. 專業分工發包模式；除系統機電外，土建及水電環控工程之細部設計與施工均以專業分標方式辦理，即細部設計標完成後再將設計成果發包交予廠商施工。採專業分工發包之優點為工程合約與工作範疇單純，然工程界面甚多及包商進場時程難配合為其缺點。
2. 施工統包標及區段標發包模式；將土建、軌道、水電、環控、供電、通訊、電梯、電扶梯等併標統包作業。優點為減少發包次數，有利工程界面整合，減少衝突。
3. 統包模式；將工程設計與施工合併一案招標，設計與施工同步作業以縮短工期。優點為統包商工程責任明確，無設計者與施工者之間相互推諉責任問題。缺點為統包商需承擔比施工統包方式更大之風險。

雖然設計-招標-施工 (Design-Bid-Build) 模式仍是國內工程承包發包的主流方式，近年來發展十分迅速的 EPC 統包模式不容小覷。目前工程會發佈的統包契約類型如下：

1. 設計建造 (Design & Build, D&B) 統包契約：承包商通常依據主辦機關需求，辦理設計及施工。主辦機關需審查承包商之圖說並監督施工。
2. 設計建造與供應安裝 (Engineering, Procurement and Construction, EPC/Turnkey) 統包契約：主要用於供應製程工廠或基礎建設，其最後完成價格及竣工時程於

工程契約簽訂時即需確定者。承包商依據主辦機關需求，承擔設計、施工、供應及安裝等之全責，將整體工程全部完成至移交後即可營運之程度。主辦機關幾乎不涉入其過程，但仍應衡量個案特性及需要，依法督導工程品質。

EPC 工程總承包不同於傳統 DBB 模式的設計—發包—施工的作業流程，部分設計成果在投標階段已先行提出，得標後再進行其餘部分的設計，因此廠商得以進行設計與施工並行作業，縮短工期。

### 3.1.2 MEP 整合策略

傳統 MEP 整合方式：傳統機電相關系統的整合以平面式的 CSD/SEM 套圖，將各項機電管線設備圖合併到單一圖紙，並透過人工判讀立體空間的管線位置，必要時以剖面示意管線上下層的關係，避免物件之間的衝突。當不同系統的介面越多，面對數量龐大、複雜又重疊的 2D 套圖即使是資深的工程人員也難以面面俱到，任何的整合不當將影響到施工品質及導致設計變更。而設計變更泛指施工過程遇到原設計中未預料的情況，例如設計遺漏、錯誤以及與現場不符，且經探討後仍無法解決與施工因而發生的設計變更。契約變更對業主及施工廠商都是極大的風險，尤其是工期較長之大型捷運工程，更常發生配合現場需求辦理變更設計、追加預算、延長工期等情形，直接影響到工程品質、工期與成本。而施工界面管理與 MEP 系統整合更是工程重點工作項目之一，傳統 MEP 整合方式如下，

1. MEP 系統大多為細部設計完成後才發包給施工承包商進行整合作業，檢討各設備之設計位置與建築土木之配置是否恰當且沒有發生衝突，藉由不斷的 2D 圖套匯、開會協調程序以解決介面衝突問題。
2. 機電整合圖說 (CSD) 套繪作業：施工階段由承包商依契約需求及 CSD 圖說，重新規畫並確認所有 MEP 設備管路配置之施工性及設備管線安裝有無衝突。
3. 土木結構機電圖說 (SEM) 套繪作業：承包商將 CSD 圖以及套疊所有 2D 細設圖後繪製成 SEM 圖，針對機電系統所需於牆壁、地板和樑柱之開口及套管、設備之混凝土基座、預埋管和幹管…等相關需求，以人工方式檢核出所有衝突點。
4. 發現衝突點存在時，由承包商邀約原細設單位協助確認及澄清，透過召開界面協調會尋求解決方式。施工前，再次進行 CSD/SEM 圖說協調與確認，如有修

正，同時知會其餘各標工程進行修正與變更。最後依據更新版之設計圖說與經核定之設備資料進行施工圖繪製。

5. 針對整合階段未能發現及解決之介面衝突，由業主或承包商定期或不定期召開現場界面協調會議，協助各界面施工單位處理後續介面問題，整合過程耗費相當之人力及時間。

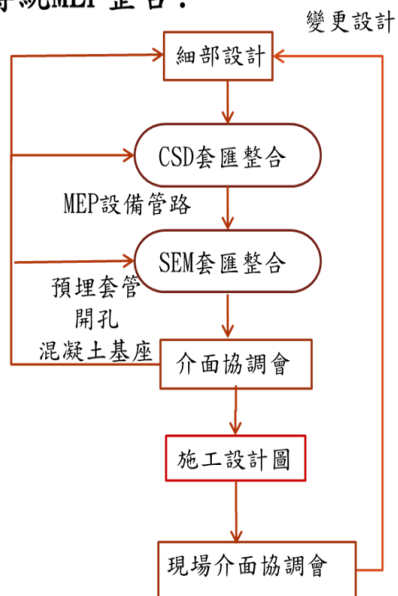
BIM 技術進行 MEP 系統整合：BIM 技術在全球主要先進國家已蔚為一股勢不可擋的風潮，許多國家亦將 BIM 系統列為設計及施工之必要條件，尤其是高服務性質的公共工程，其機電設施的分析與整合作業更透過 BIM 技術來達到最佳效能。現今大部分的專案透過 3D BIM 技術來進行 MEP 系統整合的步驟大致為，

1. 由機電子系統或分包商各自發展 2D 設計圖或提供 3D BIM 模型給 BIM 整合者。
2. 依據 2D 設計圖建置成 3D BIM 模型，由 BIM 整合者接續將機電分包商的模型彙整及產生衝突檢測報表。
3. 透過介面整合會議來解決所有衝突點，並且修訂 3D 模型。

然而各機電子系統、分包商、建模者、BIM 整合者大多分屬於不同公司，3D 建模工作往往等到 2D 設計工作完成後才開始，而建置完成的模型再轉由承包商接續並且進行一連串冗長的套匯整合過程。設計缺失往往等到套匯整合階段才發現，如需修正圖說或變更設計則須再回饋給原建模包商以及原設計單位確認，過程不僅耗時無效率且責任歸屬問題複雜，容易產生糾紛。針對傳統 MEP 整合 2D 套匯方式與 3D BIM 技術進行 MEP 整合方式比較，詳如圖 3-1

國內捷運工程於 2010 年底，自萬大線開始採用 3D BIM 技術進行建築、水電、環控等工程之細部設計作業，其它大型工程在規劃設計階段即導入 BIM 之案例也不多，為了降低承接自設計階段所隱藏的風險，有些營造單位會自行應用 BIM 來執行圖說整合與檢討，除了可以檢討施工性、界面整合、直接產出施工圖外，最大的效益莫過於清楚釐清設計與施工者的責任及避免施工品質、工程進度受到影響無法依照預定排程完工。

### 傳統MEP整合：



### BIM技術進行MEP系統整合：

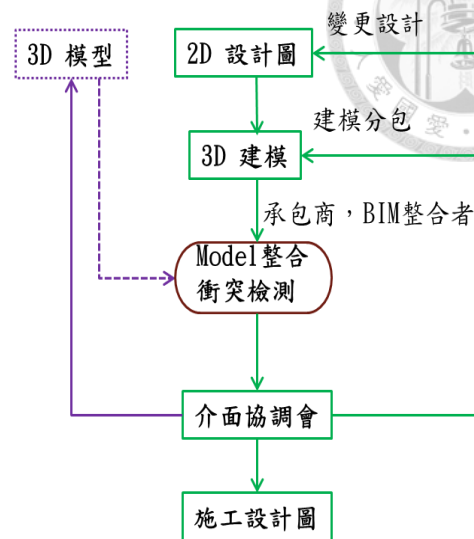


圖 3-1 MEP 整合流程比較圖：傳統 2D 套匯 vs 3D BIM 技術  
(本研究繪製)

## 3.2 問題探討

以過去 BIM 執行的實際狀況而言，建模完成時間常晚於採購發包時程，BIM 功能無法完全發展，除非於設計階段即採用 3D BIM 技術，方能於發包之前提出精確的設計與施工材料數量。從 MEP 專業人員的角度來看，如何應用 BIM 來預覽工程全貌以及透過 BIM 技術將機電相關資訊正確、完整、及時地整合至工程生命週期各階段的交付成果中，是非常值得期待也將是本文探討的重點。

MEP 系統之設備安裝需求，過去基於結構安全考量下，由土木工程標綜整各關聯承包商所提之意見需求彙整納入結構/機電施工圖 (Structural Electrical and Mechanical Drawing)，以配合機電設備安裝。由於土木工程人員普遍缺乏 MEP 系統專業知識，因此機電設備系統施工性需求與進場施作時程經常不受重視，嚴重影響到工程進度與品質。以往 MEP 設計整合缺失發生地點常見於建築物的出入口、走道、牆面/樓版的主要開孔、穿牆套管、樓地板下的預埋物件以及垂直的管道配置等。綜合過去大型工程案例產生問題之情況，歸納出常見缺失與待解決的問題，彙總於下表 3-1:

表 3-1 大型工程案例常見的問題與缺失彙整表

項目	常見缺失與待解決的問題:
1	傳統的營建工程設計者多數不負責施工，因此缺乏施工性的思考；而現場營造人員也只是按圖施工，缺乏考量原設計者的意圖，加上設計階段與施工階段分屬前後不同時程，設計者與施工者之間溝通與合作不易，導致施工期間問題與爭議不斷。
2	設計方案於設計階段無法實際演練與分析，待施工階段才發現工地現場有空間限制或與設計條件不符，導致原設計方案無法執行，必須辦理變更設計。
3	土建工程與機電系統沒有建立對等的對話平台，先行施工的土建工程經常未同步考慮機電系統的設備預埋與管路需求，造成日後需破壞構件或拆除重作。
4	現今 2D 作業方式以及 3D 協同作業之 MEP 整合流程，都是細部設計完成後才發包進行套圖程序，包含機電整合界面階段（CSD, Combined Service Drawing）以及結構機電整合界面階段（SEM, Structural Electrical and Mechanical）。兩階段重複地進行以下介面整合過程，1. 建築與結構的衝突檢查及協調。2. 管線與建築、結構的衝突檢查及協調。3. 各管線間的衝突檢查及協調。協調成果再反饋給原設計單位審核或導致變更設計，整合過程冗長又耗時，導致延誤工期。
5	傳統的 MEP 系統僅考慮功能需求，所提出示意式的平面圖及昇位圖無法確切妥善安排建築物內所有的設備。而 3D CAD 圖說亦無精確的管線佈線位置，需要再額外提供人力及時間來繪製施工圖及剖面圖。
6	整合流程尚未建立標準化，MEP 各專業承包商於設計階段各自發展設計圖說，往往基於自身成本考量甚少考慮其他系統的設計理念，依據細部規劃階段的初步施工圖套疊完成即交付成果。當產生介面問題時，各專業承包互推責任或不按時程進場施工，導致後續整合階段需花費許多時間進行各系統間的衝突檢討與修改，增加工程成本。
7	各專業承包商為節省人力及經費常忽略每個專案都有其獨特性、施工可行性以及未來營運維修的特殊需求，直接複製過往的經驗導致機電材料估算都得加上許多風險材料的費用，造成工程費用的浪費及超估。
8	衝突檢測作業多數針對有實際碰撞與干涉的物件，其它軟衝突（泛指物件無實際碰撞之衝突）例如搬運動線的空間需求、大型設備間的適當距離、施工作业空間、環境因素與設備位置散熱問題、設備/管路需預留將來擴充空間等問題，仍須仰賴現場經驗豐富的工程人員以人工方式檢查，無法由 3D 軟體工具自動檢出。如有遺漏常導致安裝施工作业被迫在侷限的環境中進行，甚至需拆除重作或重新採購較昂貴的客製化設備。

### 3.3 小結

如何解決或改善上述問題俾使 BIM 達成其預期效益，實為一值得深入探討之課題。透過本研究，筆者將藉由實際案例探討 EPC 類型的捷運新建案，從規劃、基本設計到各專業系統之細部設計、施工階段乃至設施維護管理階段全程發展 BIM Level 2 技術，分析其工程生命週期各階段與 BIM 應用相對應之關係，依據 MEP 專業系統於各階段的 BIM 使用目的與範疇來擬訂最具效益之設計整合流程，以期能達成以下目的：

1. 運用 3DBIM 優勢，建立土建工程與機電系統的良好合作默契與經驗值，在土建施工之前即納入機電系統需求且預作各項評估，減少重工作業與設計變更。
2. 分析土建與 MEP 各系統於不同設計階段的介面關係及需求，發展一套快速解決設計問題的流程，將建築、結構、機械、電氣和管線各專業的傳統套圖整合程序簡化，減少 MEP 整合時間。
3. 協助改善設計者與施工者間的互動模式，建立直接溝通平台，提早發現及解決問題，降低施工階段的爭議與錯誤率以提升整體工程效率。
4. 在設計階段透過 3D 軟體工具的輔助，尋求避免以及解決軟衝突的方法，降低人為判斷的失誤以協助 MEP 專業承包商快速提出精確的設備及管線佈置圖。
5. 探討 EPC 專案全生命週期導入 BIM 技術加上於設計階段納入建築物功能性、施工性考量與營運管理需求等，對於工程品質、執行進度與影響設計變更數量方面的成效分析。

## 第4章 MEP 設計整合流程改善

3D BIM 技術最大的優勢就是資料庫共享與快速界面整合，若於專案之規劃階段、設計階段、施工階段到營運階段同時納入應用，方能發揮其效能至極致，尤其大型建築物之 MEP 設備資訊規模龐大是最有條件且必要全程應用 BIM 技術。然目前國內外執行的 BIM 專案多數著重將初步設計階段的 2D 設計圖轉繪成 3D BIM 模型，主要用途供現狀建模與碰撞檢測，尚未全面普及將 BIM 技術再深化的應用，包括專案初始之工程方案分析、可持續性評估、規範驗證、施工安裝方案分析以及完成後的營運管理等。因此參考過去案例經驗，發展出一套提升設計正確度及效率的 MEP 設計整合流程與方法即是本章將探討的課題。

### 4.1 BIM 軟體工具之選擇

3D BIM 軟體工具從設計階段、施工階段到營運管理，不同階段都有不同領域的需求，非單一軟體所能負荷。依據 AGC (Associated General Contractors of American) 將 BIM 相關軟體分成八大類：

1. 概念設計和可行性研究軟體 (Preliminary Design and Feasibility Tools)
2. BIM 核心建模軟體 (BIM Authoring Tools)
3. BIM 分析軟體 (BIM Analysis Tools)
4. 加工圖和預製加工軟體 (Shop Drawing and Fabrication Tools)
5. 施工管理軟體 (Construction Management Tools)
6. 工程數量和預算軟體 (Quantity Take off and Estimating Tools)
7. 計劃/進度軟體 (Scheduling Tools)
8. 文件共享和協同軟體 (File Sharing and Collaboration Tools)


目前市面上常用的 BIM 軟體各有所長，依據軟體名稱、廠商及用途彙整如下表 4-1。



表 4-1 常見 3D BIM 軟體

軟體名稱	廠商	BIM用途
Revit Architecture , Auto CAD Architecture	Autodesk	概念設計，可行性研究，建築設計
Revit Structure	Autodesk	結構設計
AutoCad MEP , Revit MEP	Autodesk	MEP設計，加工圖
Navisworks Manage	Autodesk	碰撞檢查，施工管理
QTO	Autodesk	工程數量
Bentley BIM Suite	Bentley	概念設計，多專業
ProjectWise Navigator	Bentley	碰撞檢查，時程規劃，施工管理
Digital Project Designer	Gehry Technologies	多專業建模，結構分析，協調與施工管理
Digital Project MEP , System Routing	Gehry Technologies	MEP設計，模型協調，加工圖
SketchUp Pro	Google	概念設計，多專業
ArchiCAD	Graphisoft	概念設計，建築 + MEP
Vectorworks	Nemetschek	建築設計
Fastrak	CSC(UK)	結構設計
SDS/2	Design Data	結構設計，加工圖
RISA	RISA Technologies	結構設計
Tekla Structures	Tekla	概念設計，結構設計，加工圖，時程規劃
Cadpipe HVAC	AEC design Group	MEP設計
MEP Modeler	Graphisoft	MEP設計
Fabrication for ACAD MEP	East Coast CAD/CAM	MEP設計
CAD-Duct	Micro Application Packages Ltd.	MEP設計，加工圖
DuctDesigner 3D PipeDesigner 3D	QuickPEn International	MEP設計，預製加工
HydraCAD	Hydratec	消防設計
AutoSPRINK VR	M.E.P.CAD	消防設計
FireCad	Mc4 Software	消防設計

軟體選用原則建議依循專案特性、建築物用途、業主的需求為優先考量，再來考量預算、軟體特色以及相容性，最後就是選擇業界的領導品牌（市占率高者）。例如，在國內有一定普及率的 Revit 為 Autodesk 公司於 2002 年買下的 BIM 解決方案，也是近年 Autodesk 主打的建築解決方案之軟體。Revit 根據不同的專業族群又分為三個模組，建築專業使用的 Architecture，結構專業使用的 Structure，空調通



風系統、電氣系統及管線專業使用的 MEP，這三個系列俗稱 Revit 三兄弟，也是國內最多人使用的 BIM 軟體。此外 Naviswork 能匯入目前市面上常見的 BIM 軟體格式，它擔負起後續各專業整合、瀏覽、審閱，分析、模擬與協調專案資訊的任務，無論是設計者或是審核者皆可在 3D 環境下進行設計成果檢視、衝突檢測、空間尺寸量測、標註審查意見以及 4D 施工進度模擬等。NavisWorks 也是目前主流的 BIM 審閱平台軟體之一，除了設計階段之 BIM 整合者進行衝突檢測管理，於施工階段能夠將 3D 模型配合工期排程整合為 4D 施工順序模擬以及針對大型機具設備吊裝製作施工動畫。

常見應用歸納如下，

1. 民用建築（多專業）設計，可選用 Autodesk Revit
2. 工業工程、公共建設或基礎設施設計，可選用 Bentley、Revit
3. 建築師事務所，可選擇 ArchiCAD、Revit 或 Bentley
4. 專業度、困難度較高的工程且預算較充裕的專案，可選用較高階的 Digital Project 或 CATIA

BIM 軟體目前仍是價格不菲的工具，少則幾萬多則幾十萬，甚至是上百萬，所以針對軟體的使用成本、升級服務、培訓服務、開發服務等都是使用者與專案評估 BIM 技術需求時必須考慮的因素之一。加上軟體公司選擇的市場經營策略以及提供的服務不盡相同導致軟體價格差異很大，例如只提供消防設計、機電單一功能者價格就會便宜些，而整套可以貫穿土建、機電設計與施工，甚至包含營運維護功能者價格自然更為昂貴。面對市面上數十種產品，決策者無不希望能將預算花在刀口而非用不著的功能上，而軟體的正確選擇更可以幫助專案快速步入軌道。

## 4.2 BIM 建模及整合流程

### 4.2.1 BIM USE 及 LOD 定義

3D BIM 模型是工程設計、檢核、評估、整合、檢料和施工排序流程的基礎，並藉由模型進行設計檢討與施工比對，最後可將模型資料延伸至營運管理階段之系統發展。BIM 的導入及執行計畫，根據 BIM STANDARD 之規範精神，必需先




確立 BIM Use，BIM Use 是 BIM 系統的核心，定義 BIM 的目標及用途，規劃出相對應不同生命週期的應用項目以確保 BIM 模型完成時可滿足各階段的需求，達成設定的工作目標 (BIM Goal)。例如制定細部設計階段須提供性能軟體分析結果、完成整體佈置圖之系統模型、碰撞檢測、數量檢出等。

3D 模型依據契約文件或執行計畫書中所擬定的交付標準或 AIA 制定的模型元件發展程度 (Level of Development, 簡稱 LOD)，相對應於不同階段中的 LOD 定義如表 4-2。

表 4-2 LOD 定義  
(本研究整理)

LOD	生命週期	發展程度
100	Conceptual	概念或示意圖設計，展現建築基本量體之資訊。元件可以由一個符號或其他圖形表示，但並不滿足LOD 200信息。
200	Schematic (Design Development)	初步設計模型，元件由圖形來表示通用的系統，物件或大約數量的組件，大小，形狀，方位。非圖形信息同時註記到元件屬性中。
300	Detail Design	細部設計模型，元件以圖形來表示特定的系統，物件或組件的大小，形狀，方位。非圖形信息同時註記到元件屬性中。
350	Fully Coordinated	配合製造商的實際元件，以圖形表示特定的系統，物件或組件的大小，形狀，方位；必須表示出和其他系統之介面關係。非圖形信息同時註記到元件屬性中。解決所有碰撞及衝突問題。
400	Installation / Fabrication	製造及安裝(施工圖)，以圖形表示特定的系統，物件或組件的大小，形狀，詳細的方位，元件製造，裝配和安裝信息；非圖形信息同時註記到元件屬性中。依循LOD 300/350 之模型。
500	As-Built	竣工資訊，整合LOD 300/350/400模型，如實呈現實地元件的大小，形狀和方位。非圖形信息同時註記到元件屬性中。

1. LOD 100: 相當於概念設計，元件可以由一個符號或其他圖形表示，整體建築量體之面積、高度、體積、位置、座向等資訊可以 3D 模型或其他資料形式表示。此階段的資訊模型非常簡單，進行設計方案變更所付出的成本最低，卻是建築資訊模型建構過程中成本效益最高的一個階段。
2. LOD 200: 納入機電系統之初部設計，元件由圖形來表示通用的系統，物件或具近似數量、尺寸、形狀、位置、方向等。非幾何屬性資訊也可以建置於模型元件中。

- 
3. LOD 300: 相當於細部設計，元件以圖形來表示特定的系統，物件或具精確數量、尺寸、形狀、位置、方向等。非幾何屬性資訊也可以建置於模型元件中。
  4. LOD 350: 配合製造商的實際元件，以圖形表示特定的系統，物件或具精確數量、尺寸、形狀、位置、方向等，必須表示出和其他系統之介面關係。非幾何屬性資訊也可以建置於模型元件中。
  5. LOD 400: 相當於製造及安裝（施工圖），以圖形表示特定的系統，物件或具精確數量、尺寸、形狀、位置、方向等，元件製造，裝配和安裝信息；非幾何屬性資訊也可以建置於模型元件中。
  6. LOD 500: 相當於竣工圖，如實呈現實地元件的數量、尺寸、形狀、位置、方向等精確資訊。非幾何屬性資訊也可以建置於模型元件中。

不同 LOD 程度的建模時間與成本截然不同，LOD 400 的建模成本更高於次階的 LOD 300，加上各專業領域的用途因應工程階段與契約類型需求也會有所差異，因此於建模之前專案必須定義清楚以供設計者依循。例如電氣系統設計元件的成熟度達 LOD 300 即可接受，原因是大部分的安裝資訊將由後續承攬的設備廠商提出，而 HVAC 風管系統則必須發展至 LOD 400 成熟度方可被接受。無庸置疑的，專案初始的準則建立與後續管理是極其重要的，尤其在工程生命週期的不同階段，模型的內容與細節該如何定義要求，是否符合各專業分工的需求以及在成果交付時是否能滿足業主的期待，BIM 的應用須同時兼顧安全、品質與效率，減少不必要的紛爭，節省資源與成本的目標是每一位專業工程人員的責任。

在 3D BIM 的作業環境下，MEP 設計整合流程主要分為兩個主要部分：設計與建模階段以及系統整合階段，以下將作詳述說明。

#### 4.2.2 建模與整合流程

雖然 2D 的設計圖與施工圖繪製較為簡易與快速，但設計者的原始構想如果沒有加註其他說明，業主與執行者則難以理解，經常造成資訊的誤解，也無法呈現施工順序與高程分配。加上過去發包模式採設計完成後才由承包商與分包商接續施工作業，導致中後期階段進場的 MEP 系統開孔、預埋、包覆與外露於結構體中之需求，須待施工承商進行機電整合階段才納入界面考量，所以經常發生土建與機電

相互影響而延誤工程進度導致成本增加。即使是導入 3D BIM 技術的案例，各機電子系統、分包商、建模者、BIM 整合者大多分屬於不同公司，3D 建模工作往往等到 2D 設計工作完成後才開始，而建置完成的模型再轉由承包商接續並且進行一連串冗長的套匯整合過程。設計缺失往往等到套匯整合階段才發現，如需修正圖說或變更設計則須再回饋給原建模包商以及原設計單位確認，過程不僅耗時無效率且責任歸屬問題複雜，容易產生糾紛。

理想的 BIM 團隊互動模式應為平行單位的合作而非上下游產業的垂直整合，同時將 3D 建模的設計工作提前並加重，從工程之企劃、規畫調查、基本設計開始即應用 BIM 技術直到竣工後的營運維護階段，涵蓋整個專案的生命週期。目前營建業因普遍缺乏施工性的經驗與技能而導致許多工程案件的成本與工期增加，除降低了機具、人力的生產力，亦降低工程品質 (Nima et al., 2002)，許多文獻也建議在設計階段能進行 3D BIM 設計將有效地減少設計錯誤，提昇工程品質與符合經濟效益。本文建議專案應從規劃階段的前期以 3D BIM 模型來進行基地現況分析、功能需求、永續發展與施工性設計方案之選擇，內容包括 1. 建築設計選擇方案 2. 結構系統選擇方案 3. 機電系統選擇方案，以便決策者對於建物功能、量體空間應用、結構系統、機電設備、材料、施工性以及永續性的營運維護等使用作決策。其相關發展分析彙整如下：

1. 基地現況分析包括現地位置、既有建物與地下管線檢討及相關環境關係。
2. 建築選擇方案包括當地法規檢討、每層樓高程、主要構造承重結構、牆的種類、特殊需求與工法、價值工程、永續發展、成本估算與施工性等。
3. 結構檢討包括結構系統選擇、主要結構尺寸設計、空間需求、設備載重、動線考量、穿越結構需求、價值工程評估以及施工性等。
4. 機電系統包括空調系統形式、消防系統形式、管道、開孔位置與尺寸、系統空間需求、價值工程評估、施工性及營運維護等。

經審查單位及業主確認設計方案之選擇，方可進入工程生命週期的下一個階段，細部設計階段持續以 BIM 系統來建置細部的建築設計模型、結構設計模型、機電管線 (MEP) 設計模型。此階段的發展包含各系統模型建立、精確的設備與施

工材料數量、成本分析、評估與改善設計方案、衝突檢測與資訊整合等；並將整合後的資訊傳遞給後續辦理發包與施工的團隊。

依據美國建築師協會 (AIA) 提出的理論，專案若採用傳統作業模式其高峰期出現在發包文件階段，若採用 BIM 設計之作業模式，則其高峰將提前至設計階段，顯示 BIM 技術已大幅改變專案管理與執行的流程。尤其是專案初始階段應用 BIM 技術來溝通與分析模擬不同的替代方案，最能展現價值工程及高效能建築的效益，並且決定專案最重要的目標- 預算、工期與工作範疇。接著，專案進入細部設計階段，依循基設階段制定的目標，由各專業以 BIM 工具執行細部建模、施工性設計、介面整合與設計審核，此後，專案進入施工階段，團隊利用 BIM 工具共同研擬施工計畫與繪製施工模型，影響交期的外購可提早進行採購，大型機具及設備也因規劃的完整性，可以在適當的時間進場執行，避免不同分包商的爭議與施工錯誤。

MEP 系統雖區分不同專業，但 BIM 模型建置的流程大致相同，同時針對專案之基本設計階段、細部設計階段以及施工階段的 BIM 模型，檢討其是否達到整合的需求目標。如基本設計模型需符合建築物的功能性、需求性、施工性與未來營運維護性；細部設計模型需符合空間配置、功能性、永續發展性、其他系統介面需求、施工性與解決物件衝突；施工模型須完整呈現施工動線、材料/機具存放位置、設備進場時程、施工工序、施工位置、施工方式與工班排程等。

配合以上循環的建模與整合方式，歸納並繪製出 3D 建模以及整合步驟流程，詳如圖 4-1，後續章節將針對此建模以及整合架構，進行分析與改善來發展出有實用價值的 MEP 系統 3D 建模與整合流程。

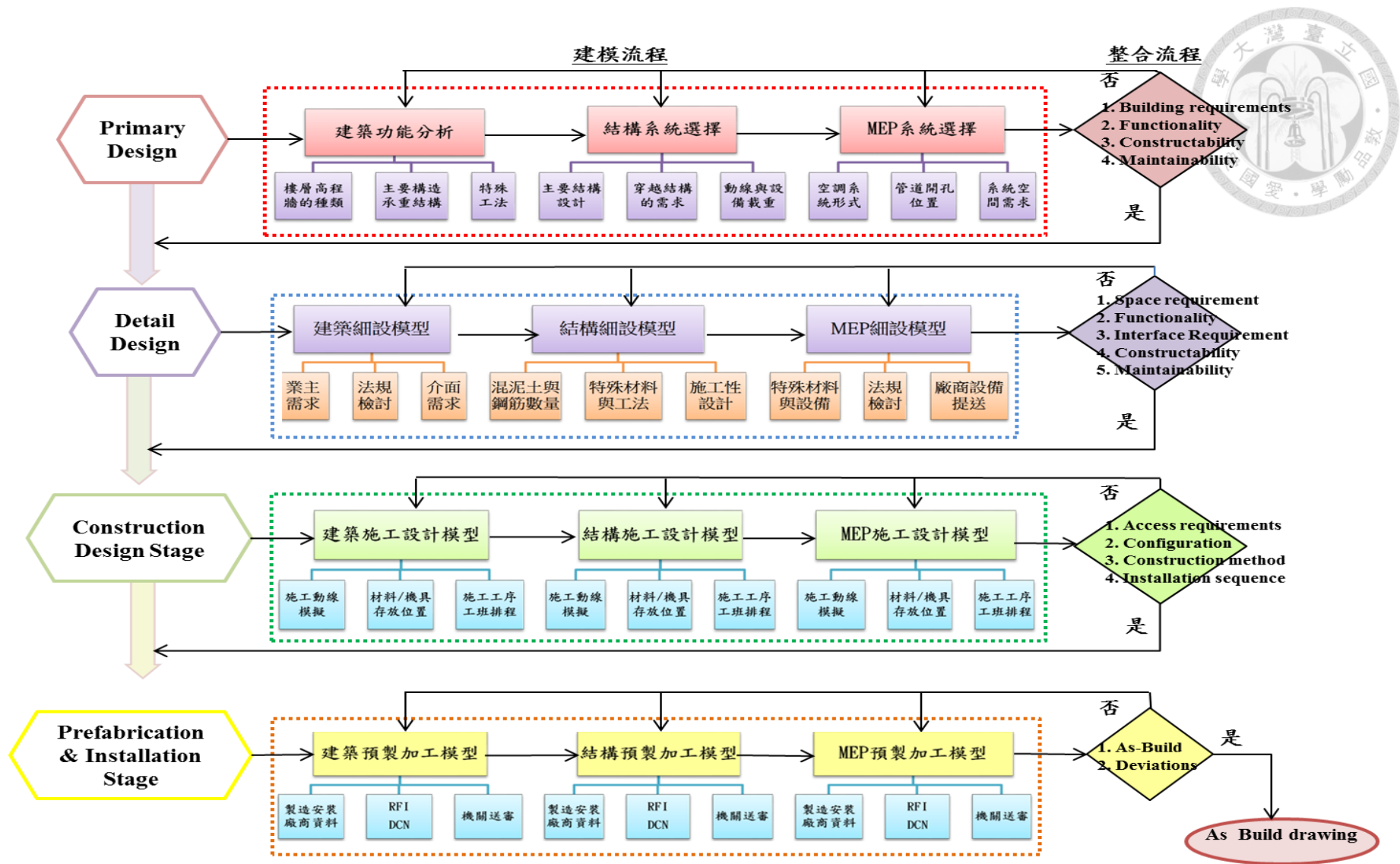


圖 4-1 MEP 系統 3D 建模及整合流程



上述 3D 建模及整合流程包含五個不同階段的 BIM 模型以及四次 MEP 系統整合步驟，包含規劃階段模型、細設模型、施工設計模型、施工模型以及竣工模型。將工程生命週期前期、中期、後期建模階段縱向串接，以及 MEP 系統整合橫向關係全部整合於其中。以第一階段的 MEP 基本規畫為例，3D 建模階段參與者包括機械、電機、管線專業之工程師以及專任的建模者，依據基地現況資料、建物特性、當地法規、合約需求與工程預算，並且配合建築功能分析、結構系統選擇來進行 MEP 系統選擇與基本設計圖說的建模工作。後續的系統整合作業由設計整合團隊加上施工單位、審查單位等，依據審查程序針對設計準則、法規、業主需求、合約規定來檢核設計是否符合 1. 建物的需求性 (Building Requirements) 2. 功能性 (Functionality) 3. 施工性 (Constructability) 4. 未來營運維護性 (Maintainability) 5. 永續性 (Sustainability) 並回饋審查意見給原設計單位修訂 3D BIM 模型，最後經業主核可後方可進入下一階段進行 MEP 細部設計。詳細步驟整理如下表 4-3。

表 4-3 3D 建模與整合步驟彙整表

設計建模與整合步驟	
一	<p>概念規劃與基本設計 3D 建模： 依據現地分析、建物需求與工程預算以 BIM 系統來進行設計方案選擇與基本設計階段的 3D 建模，包括基地現況、既有建物與管線模型、建築設計選擇方案與 BIM 模型、結構系統選擇方案與 BIM 模型以及機電系統選擇方案與 BIM 模型，以便決策者對於建物功能、量體空間應用、結構系統、機電設備、材料、施工性、永續發展性以及營運維護等使用作決策。</p> <p>1. 建築選擇方案包括當地法規檢討、每層樓高程、主要構造承重結構、牆的種類、特殊需求與工法、價值工程、永續發展、成本估算與施工性等。</p> <p>2. 結構檢討包括結構系統選擇、主要結構尺寸設計、空間需求、設備載重、動線考量、穿越結構需求、價值工程、永續發展、以及施工性等。</p> <p>3. 機電系統包括空調系統形式、消防系統形式、管道、開孔位置與尺寸、系統空間需求、價值工程、永續發展、既有管線銜接或遷移方式、施工性及營運維護等。</p>
二	<p>基本設計 BIM 模型整合： 檢討設計成果是否達到 LOD 200，並符合建築物的功能性、需求性、施工性、永續性與未來營運維護性。</p>
三	<p>修訂 3D BIM 模型，經業主團隊審核後進入細部設計階段。</p>
四	<p>細部設計 3D 建模： 承襲基本設計所制定的設計方案，依據各系統專業之空間需求與用途，接續發展 3D BIM 模型，包括期初、期中、期末與施工設計(IFC)階段的建築細設模型、結構細設模型與機電細設模型，並確認與改善原設計方案。</p> <p>1. 建築細設模型需考量特殊材料與工法、性能軟體分析、業主需求、法規檢</p>



設計建模與整合步驟	
	<p>討、其他系統介面需求、施工性設計與精確的材料數量計算。</p> <p>2. 結構細設模型需考量混泥土與鋼筋數量、特殊材料與工法、業主需求、法規檢討、其他系統介面需求、施工性設計等。</p> <p>3. 機電細設模型需考量特殊材料與設備、業主需求、法規檢討、能源分析、其他系統介面需求、廠商設備提送、操作與維護性、未來擴充性、施工性設計與精確的施工材料數量計算。</p>
五	<p>細部設計 BIM 模型整合:</p> <p>檢驗設計成果是否達到 LOD 300，並符合空間配置、功能性、其他系統介面需求、施工性與解決物件衝突。</p>
六	<p>修訂 3D BIM 模型以滿足細部設計資訊需求，經業主團隊審核後進入施工階段。</p>
七	<p>施工設計 3D 建模:</p> <p>承襲細部設計階段之 BIM 模型，發展 LOD 350/400 之建築施工模型、結構施工模型、機電施工模型並研擬施工計畫，外購品以及影響交期的設備可提早進行採購發包作業。各系統施工模型需預先檢討施工動線模擬、材料/機具存放位置、設備進場時程、施工工序、施工位置、施工方式與工班排程等。</p>
八	<p>施工 BIM 模型整合:</p> <p>檢驗是否規劃完整施工動線、材料/機具存放位置、設備進場時程、施工工序、施工位置、施工方式與工班排程等。</p>
九	<p>繪製預製加工與加工模型:</p> <p>依據施工模型與廠商資料繪製成 3D 製造及安裝模型，供專案團隊了解系統組件的細節，透過預製模型在工廠預製可提高施工品質、安全性與生產率。尤其在安裝 MEP 系統主要元件之前，BIM 團隊與 MEP 專業分包商必須依據已施作的現況與相關的竣工圖來修訂既有 BIM 模型。當現況與原設計差異太大時須回饋給原設計單位做適當的調整。</p>
十	<p>繪製竣工模型:</p> <p>依據現場實際情況整合 LOD 300/350/400 模型，修訂成為 LOD 500 之竣工模型。</p>

## 4.3 系統及介面整合

### 4.3.1 衝突分類

檢視 MEP 設計整合作業是否完整至少須包括正確的設備定位、MEP 各系統元件之間採用最經濟效益的連接路徑，完全解決空間與功能性的干涉與衝突。大型的專案設計中，MEP 系統設備繁多管線錯綜複雜，尤其當建築物有空間限制時常常會出現管線與管線之間或管線與結構物之間發生衝突碰撞，造成安全疑慮、施工不便、重工以及增加成本等問題。許多實例已經證實 BIM 工具應用於 MEP 空間設計上，可大幅降低與解決物件衝突數量，提升工程效率。然而有時費工解決了物件衝

突 (clash) 仍無法滿足 MEP 系統空間需求，例如 MEP 系統需求天花板淨空高度至少 3 米以上，指的是 MEP 管線安裝完成後，管線底部淨空仍需大於 3 米以上。如不足 3 米或接近 3 米，即使沒有實際的衝突干涉，加上天花板後所剩的淨空高度則無法滿足實際的空間需求。有鑑於此，Korman 將 MEP 系統的衝突種類分為 Actual interference、Extended interference、Functional interference、Temporal interference、Future interference 等五大類。詳如表 4-4。

表 4-4 MEP 衝突種類  
(Korman et al. 2003)

Interference type	Description
Actual	Actual (physical) interference occurs when two or more components physically interfere
Extended	Extended interference occurs when component interferes with extended space (such as access path for maintenance) that is associated with another component
Functional	Functional interference occurs when engineers position two or more components such that their location in relation to each other jeopardizes intended function of component, such as a pipe blocking light from a fixture
Temporal	Time-related interference occurs when engineers position components in a manner that prevents efficient construction sequencing and scheduling
Future	Future interference occurs when engineers position components in locations that do not allow space for routine operations and maintenance tasks or space for future expansion

其中 Actual interference 屬於確實存在的衝突，如兩個物件配置於同一空間；Extended interference 和 Functional interference 在空間上並無實際衝突，例如物件配置空間不足、搬運空間或維修空間不足，上述的天花板淨空高度不足屬於此類衝突；Temporal interference、Future interference 屬於時間安排與工作流程的衝突，例如未來擴充所需空間不足、現場工班、設備進場時程與施作流程衝突等。而依據解決衝突的方式又可將衝突種類分為三大類，(1)有實際碰撞，現場施工團隊可輕易解決的硬衝突 (2)有實際碰撞，會導致現場重工的硬衝突 (3)無實際碰撞，須依據施工經驗來判斷的軟衝突。第 1、2 類確實存在的衝突 (hard clash) 可透過 BIM 套裝軟體的基本功能自動檢測出來，至於第 3 類的軟衝突，某些軟體已有自訂的特殊選項

功能或利用 API 撰寫外掛程式來檢測軟衝突之存在，然而有些衝突是屬於可允許存在的衝突，在軟體自動檢出後必需由人工來做進一步判斷與分析。例如，1. 電纜線槽與牆面的衝突應註記為穿牆開孔的需求而非移開物件來解決衝突。2. 牆與套管的衝突與電管穿越鐵道的衝突應註記為預埋管需求。而軟衝突之判斷條件如，1. 以機械設備和走道間隙至少預留兩米的人行動線。2. 以電纜線槽與牆面間隙不到 1 米為條件來篩選檢測出軟衝突，留出搬運與維修空間。3. 管線與管線之間至少預留 100mm 以上的安裝空間。硬衝突如圖 4-2，軟衝突如圖 4-3 所示。

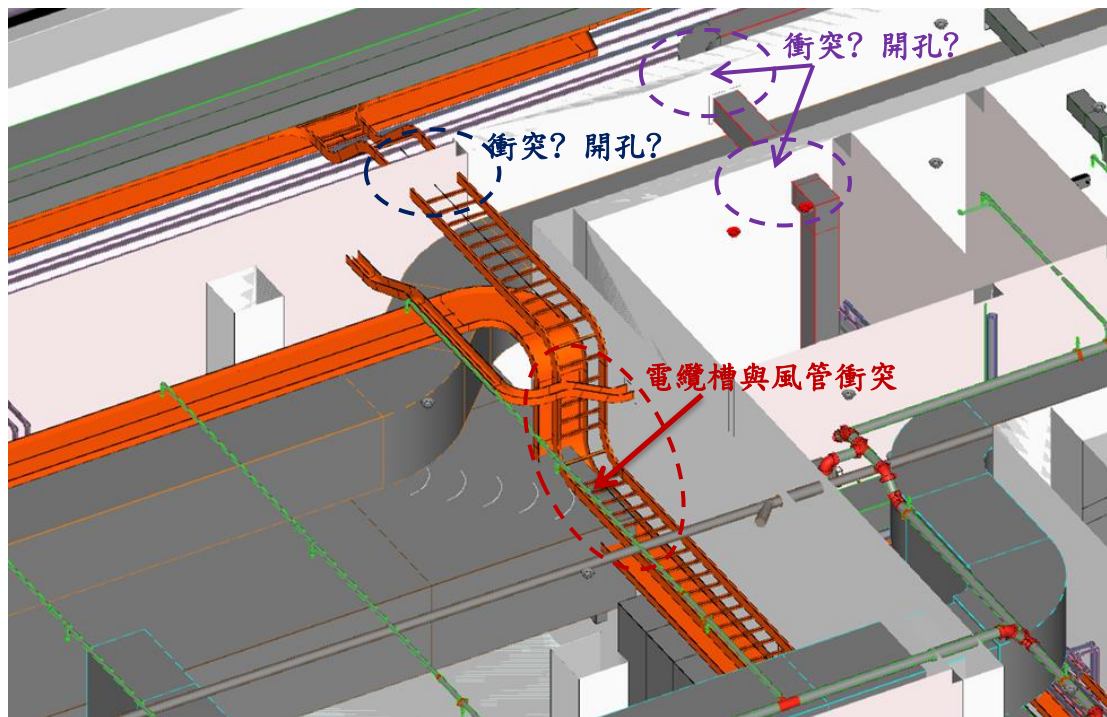


圖 4-2 硬衝突偵測 - Cable Tray/風管/牆面衝突

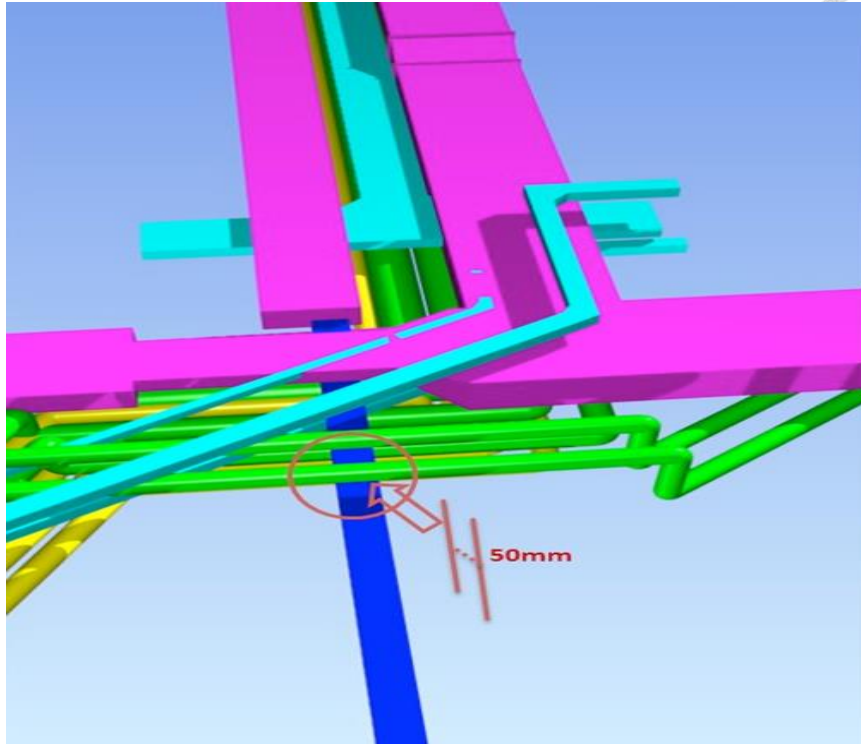


圖 4-3 軟衝突偵測 - 管線施工空間不足

#### 4.3.2 衝突檢測與施工性

BIM 的精神是整合各專業系統的模式，透過審閱平台軟體匯入各種模型來進行全方位的審閱批註、偵測衝突與干涉、模擬與協調專案資訊，同時可將衝突測試報告（包括詳細註解和螢幕快照）匯出，甚至將資訊回傳至 Revit 中，以便專案團隊間進行問題的溝通，後續也能夠管理及追蹤衝突與干涉，直到問題解決為止。

考量施工可行性的衝突檢測，主要是希望在規劃設計階段能納入營建知識及經驗來預防及改善設計缺失，以期在施工階段能降低工程風險並控管整體工程品質、成本與進度。專案整合團隊，包含建築師、土木工程師、結構工程師、電機工程師、機械工程師、空調工程師等以及現場施工團隊，透過設計審查程序，共同檢核及討論設計時所遭遇的問題並規劃可行的施工技術及工法，以避免未來因設計疏忽或考量不當的變更設計。

施工性考量至少包括：1. 再次檢核相關法規，2. 設備規格化，3. 材料統一化，4. 模組化的設計，5. 施工程序標準化，6. 人、機、料的運輸路徑與存放，7. 搬運動線與施工維修空間。其中採用模組化的設計、相同的材料與統一設備尺寸、型式與規格，除可加速採購流程提高施工安裝的效率外，亦可利用大量的採購來降低成本與工期。



## 4.4 設計審核與成果交付

### 4.4.1 設計審核

審查作業亦屬於設計整合流程中相當重要的工作之一，期能發現潛在問題並提早改進設計缺失，使設計成果達到既定的可靠度目標。設計審核目的在於工程生命週期各階段設計成果之品質管控尤其檢核統包設計是否滿足計畫需求以確保業主權益。近年來蓬勃發展的 EPC 承包模式，其合約規定由承包商負責設計、採購、施工並承擔工程全部責任，故業主無需過多地干預承包商的工作。反之，許多公共工程仍是採傳統發包之作業方式，由業主先行設計或委託顧問公司設計並完成設計審查後再辦理發包

施工作業。當工程出現缺失時，已完成設計審查作業的設計單位與按圖施工的承包商互推責任，負責擔任協調者的業主往往很難釐清到底誰應對工程缺陷承擔責任。

不同於傳統 DBB 模式的作業流程，EPC 的設計作業流程分為兩部分，一部分由總承包商在投標的時候提出，另一部分則在得標後再提出，因此廠商得以進行設計與施工並行作業，縮短工期。針對 EPC 統包工程，統包商應於執行計畫書提出初步之分階段核定設計，包括邊設計、邊施工之計畫，並與業主及專案審查單位詳細討論分階段之計畫以利工作執行。除了審核工程生命週期各階段細部設計之整合成果外，須依據各地法規辦理相關單位送審，由團隊邀集相關單位舉行專案檢討會議包括代表可靠性、可用性、可維護性以及安全性的 RAMS 評估、安全風險評估、建築執照審查、LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) 審查、消防送審等工作。設計審查之參與人員分為內部審查人員以及外部審查人員。內部審查人員包括專業設計人員、介面需求單位、施工單位、獨立驗證單位 (IV&V)、風險評估與可靠度分析團隊；外部審查人員包括業主團隊、消防機關、電力單位等。細部設計階段之審核驗證方式可採簡報會議、設計文件成果審查及產品測試驗證等方式，確保各項交付文件內容完整性、一致性，並追蹤所有缺失皆已完成改善並符合需求，經核可後始得進入施工階段。



## 4.4.2 成果交付

專案之交付、移交等工作需滿足終端使用者的需求，所謂 BIM 交付成果，是指在 BIM 專案的不同生命週期，由設計單位完成專案團隊與業主既定的工作項目，以期能符合 BIM 專案的目標需求。不同的業主對 BIM 的要求不同，直接影響 BIM 的應用與交付程序與標準，然而在設計與施工階段，只要 BIM 模型能達成原訂 BIM 應用範疇中的使用目的與模型細緻度 (LOD)，即可據以驗收。一般而言，BIM 交付項目包括：1. 建築、結構及機電模型；2. 材料數量及施工進度排程；3. 施工及廠製模型；4. 竣工模型；5. 設施管理所需資料；6. 其他經業主要求的文件。

傳統營建專案在興建完成交付時，由於制度缺失加上資訊管理不當，業主接收到建物大量設計與施工資訊未能轉化成營運管理所需的資訊，而導致營運維護管理工作挫敗。綜觀許多先進國家的 BIM 專案交付標準，不同國家採用策略不同，於 BIM Guide 中定義工程生命週期階段分類、可能的交付成果以及模型細緻度等。例如英國營建產業標準將生命週期階段分為 7 階段，LOD 有 7 種細緻度，皇家建築師協會也協助產業將其產品製作成 BIM 元件 (BIM Family) 以支援 BIM 資料庫；新加坡將生命週期階段分為 5 階段，LOD 有 5 種細緻度。我國營建業及建築師事務所組織與英國中小企業規模近似，多為 5 到 10 個人以下的公司組織居多，在發展 BIM 技術的推動上借鏡英國經驗將有助於國內推動 BIM 的工作。尤其英國營建產業在其政府全力支持下，成立 BIM 工作小組並重新定義工程界慣用的 CAD 與 BIM 的關係，將 BIM 的技術成熟度區分為 0、1、2、及 3 共四個等級，推出 BIM 元件庫平台、協同工作平台及協同工作資訊交付標準說明書，至今已從 Level 2 推動到 Level 3 更訂定 2016 年全面執行 BIM 的目標，企圖成為領導全球 BIM 技術領域之強國。

1. BIM Level 0 到 Level 4 階段之說明分述如下，

- (A) Level 0 階段: 泛指未能數據化管理的傳統 2D CAD 圖說 (或電子圖說如 pdf)。
- (B) Level 1 階段: CAD 圖說以 2D 或 3D 格式，提供檔案環境或包含一些標準資料結構與格式。





- (C) Level2 階段: 進入 3D 管理環境, 具備物件連結資料庫功能, 可進行施工 4D 模擬、5D 成本管理。
- (D) Level3 階段: 藉由雲端技術共享 iBIM 整合伺服器, 同時全面開放流程與 IFC/IFD 等資料格式。

2. 英國政府核定推動 BIM 技術與政策的內容大致摘錄如下：

- (A) 釐清性能效益需求內容, 以協助設計成果可滿足使用者需求與營運效益。
- (B) 定義 BIM 之設計成果如何交付, 藉由過往的經驗以確立可行之預期效益
- (C) 設計、施工階段即可探討後續營運資源需求與成本, 有效地評估工程變更的影響層面。
- (D) 加快試車運轉、教育訓練及移交的時間, 且更快速的優化建築設備操作性能。
- (E) BIM 可提供一個完整的建築設施資訊, 以便匯入電腦輔助設施管理系統, 節省時間與成本。
- (F) 促成營建產業供應鏈, 營造廠、設計單位與設施維護管理單位在全生命週期間的協同合作。
- (G) 應用 BIM 的視覺模擬能力來測試使用者及操作者的感受, 並協助後續的計畫調整與對全生命週期成本的衝擊。

## 4.5 小結

BIM 的競爭優勢之一在於促進專案成員間之資訊透明與共享成果, 英美等先進國家深切理解到 BIM 技術把設計的工作提前並且加重, 將原來的設計和細部設計往前延伸為規劃與概念設計階段, 以致能全面節省資源 (BIM 物件庫、採購、程序及材料)、規劃設計的工作更完善、施工設計的工作可提早進行、營運維護階段可應用 BIM 的資訊, 最能展現高效能的效益。

考量施工性的設計整合, 主要是希望在規劃設計階段能納入營建知識及經驗來預防及改善設計缺失, 以期在施工階段能降低工程風險並控管整體工程品質、成本與進度, 以避免未來因設計疏忽或考量不當的變更設計。而過去常被忽略的設計

審核與成果交付亦屬於設計整合流程的一部分，目的在於檢核統包設計是否滿足計畫需求以確保業主權益。為進一步探討本研究所提出的 MEP 設計整合流程之正確性，後續章節將以實際執行全 BIM 技術之工程案例予以論述。





## 第 5 章 整合式 MEP-BIM 流程之案例分析

本章節針對全生命週期運用 BIM 技術的捷運新建工程案例進行分析，主要內容針對設計及施工階段 MEP 系統之 3D 設計與建模流程、衝突檢測分析、設計審核與成果交付分析、BIM 成效之定性與定量分析，以驗證本研究所提出的 MEP 設計整合流程之正確性與預期效益。

### 5.1 案例簡介

本研究是以中東地區某新建捷運工程建置中兩條路線之 MEP 系統設計整合流程為探討，原計畫有 6 條無人駕駛的路線所構成的路網，軌道長達 180 公里，包括地面段、高架段、地下段、隧道工程、車站站體與設施、維修機場與行控中心等工程，於 2014 年開工，預計於 2019 年開始運行，預期成為全世界最大的大眾運輸系統之一。應用 BIM Level 2 技術，專案初始即委託專業的 CIC 團隊協助制定 BIM 執行計畫書 (BIM Execution Plan)，採用 4 階段的工程生命週期，分為：(1) 概念設計階段。(2) 細部設計階段。(3) 施工階段。(4) 竣工階段包括營運及維護資料移交。參考 LOD 規範擬定出 6 種細緻度，全生命週期使用 3D BIM 軟體工具，同時制定相關的設計標準與執行流程。

### 5.2 專案組織

本研究案例組織團隊以美商公司為首 (總部位於舊金山的大型私人企業，成立於 1898 年，年營業額約 \$372 億美元)，團隊還包括沙烏地阿拉伯當地的建設公司 (成立於 1972 年，年營業額約 \$1000 萬 Saudi Riyals)、施工總包商為美商 (員工數約 130,000 人，收入超過 \$5 億美元) 以及德國的跨國企業 (建立於 1847 年，總部位於德國慕尼黑，年營業額約 €23.7 億歐元) 等四家國際知名公司聯合承攬的大型 EPC 工程。所謂聯合承攬係指由兩個以上之企業，根據共同計算分擔損益之協定經營共同的事業。聯合承攬對業主可減少發包次數，並避免分標所增加之分介面協調工作與責任。由於本專案量體相當龐大，非單一企業所能承擔，且藉由不同專長之工程單位結合及相互間技術轉移與交流切磋機會，除可增加工程承接率亦可經由分擔工程而減少風險。前三家公司負責全線車站 (包含車站 MEP 系統)、軌道、隧道、橋梁、維修機場的土木工程，後者則負責全線系統機電工程，

工作範疇包括規劃設計、採購、施工、完工交付乃至營運管理等，具有貫徹設計理念並將設計成果履行實現。專案組織分工架構 (WBS) 細分為三大類型，第一類為土木工程及建築物的分工架構，第二類為軌道、號誌、行控中心、鐵路電氣化及捷運機場的分工架構，第三類為電訊、通訊系統的分工架構；本分析案例之 MEP 系統歸屬於土木工程及建築物之分工組織內，詳圖 5-1 為土木工程及建築物的分工架構圖，圖 5-2 為 MEP 分工及工作範疇架構圖。依照車站類型、軌道、隧道、橋梁、行控中心、捷運維修機場屬性以及專業分包之工作範疇，設計團隊分布於全球各地同時進行分項及協同作業功能；車站 MEP 設計內容包括空調通風、給排水、澆灌、電梯/電扶梯、照明、接地/避雷、消防火警、車站監控與低壓配電等數十個子系統，可以想像系統複雜度是相當之高，如何應用 BIM 技術來控管專案的時程、安全、品質與效率就是一項極大的挑戰。

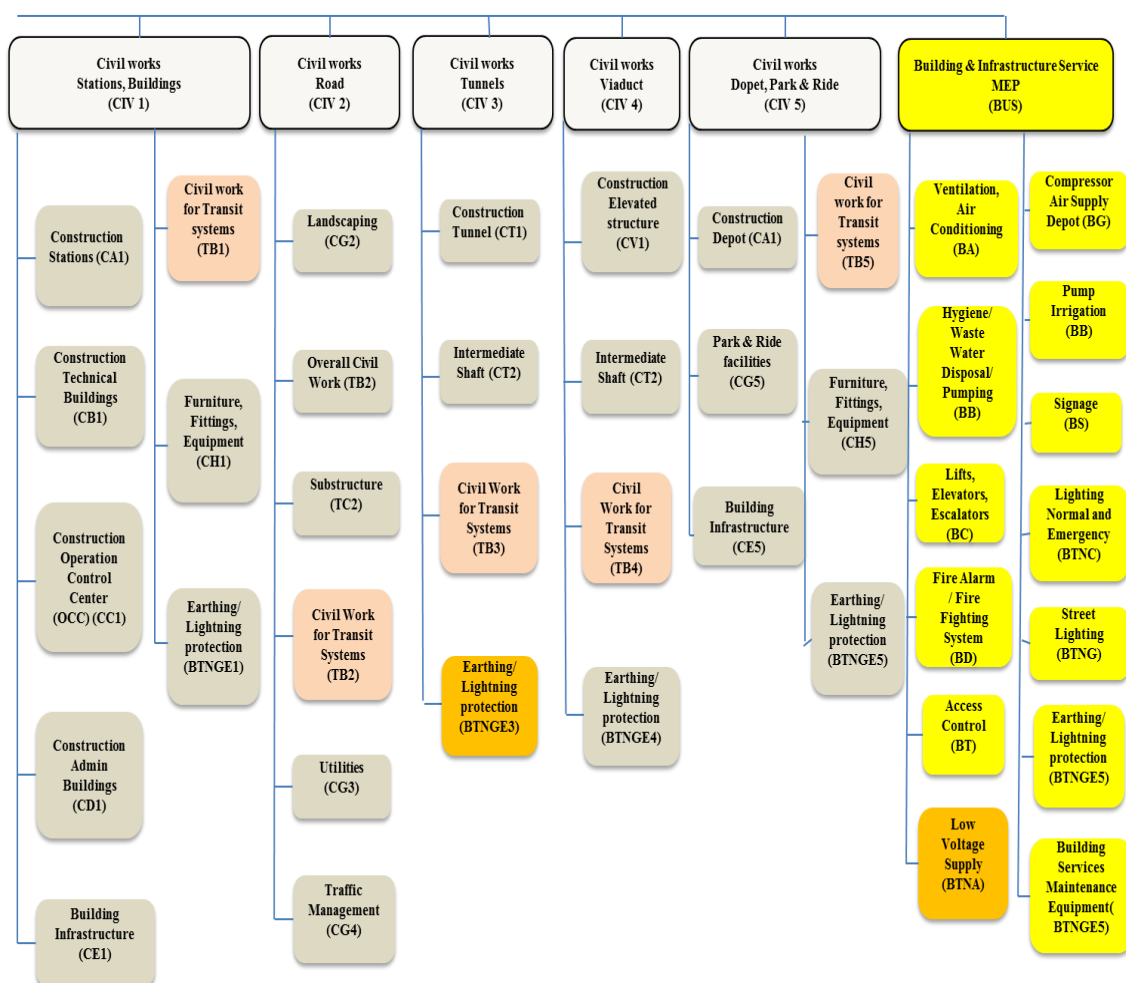


圖 5-1 土木工程及建築物的分工架構圖

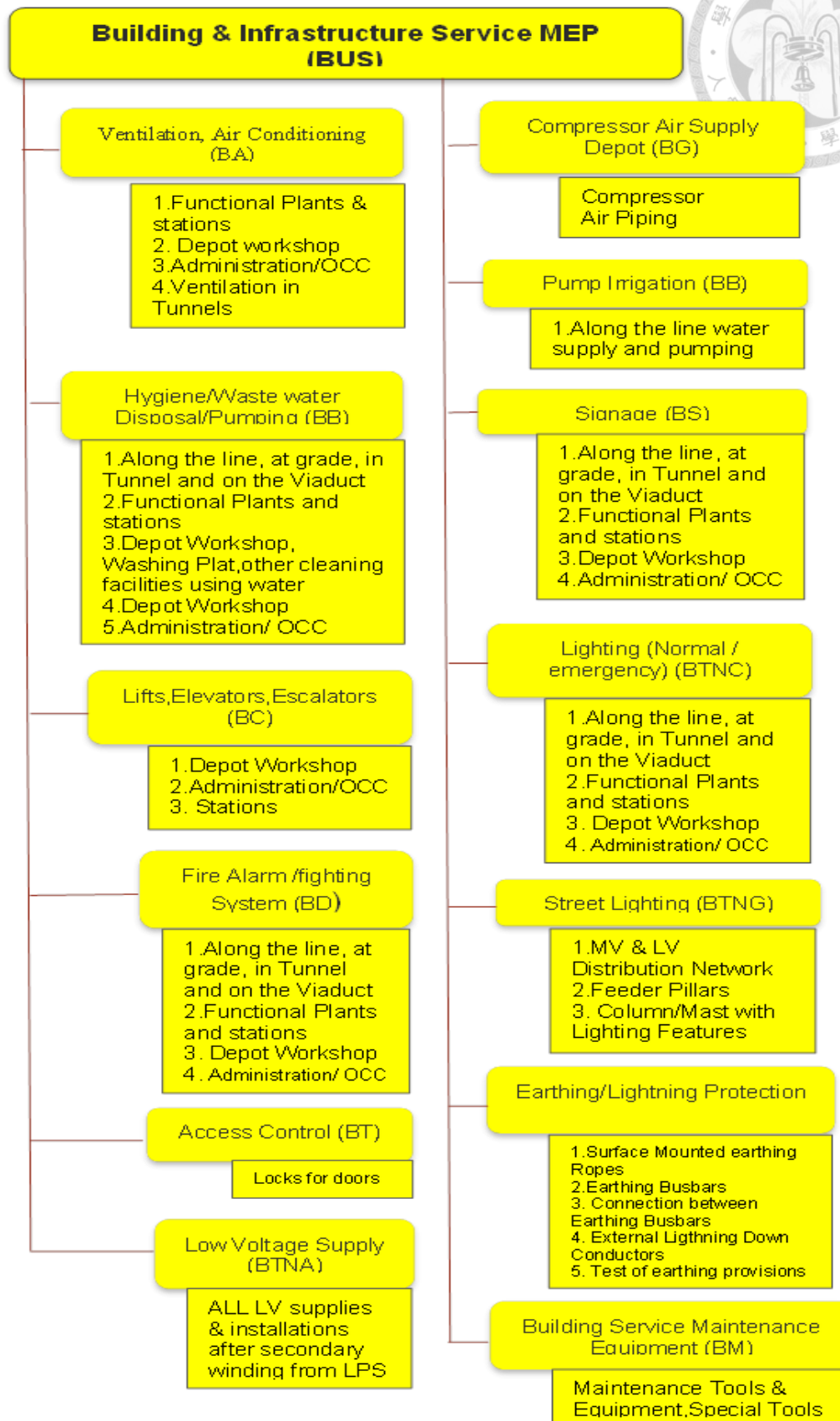


圖 5-2 MEP 分工及工作範疇架構圖

## 5.2.1 BIM 組織架構

不同於傳統的專案組織架構，企業與產業文化需調整組織特性以符合 BIM 技術之導入，並重新定義專案團隊、BIM 成員的角色及責任。本分析案例於 BIM 管理中心設置具有綜合知識的 BIM 經理負責協調與管理專案的 BIM 團隊，分布於全球各地的設計中心都有自己的 BIM 技術小組，成員包括 BIM Lead、不同專業的 BIM 整合者、專業工程師與 BIM 建模者，負責設計、建模、碰撞檢測、介面整合、設備數量檢出與設計成果交付等。下圖 5-3 為 BIM 組織架構圖。

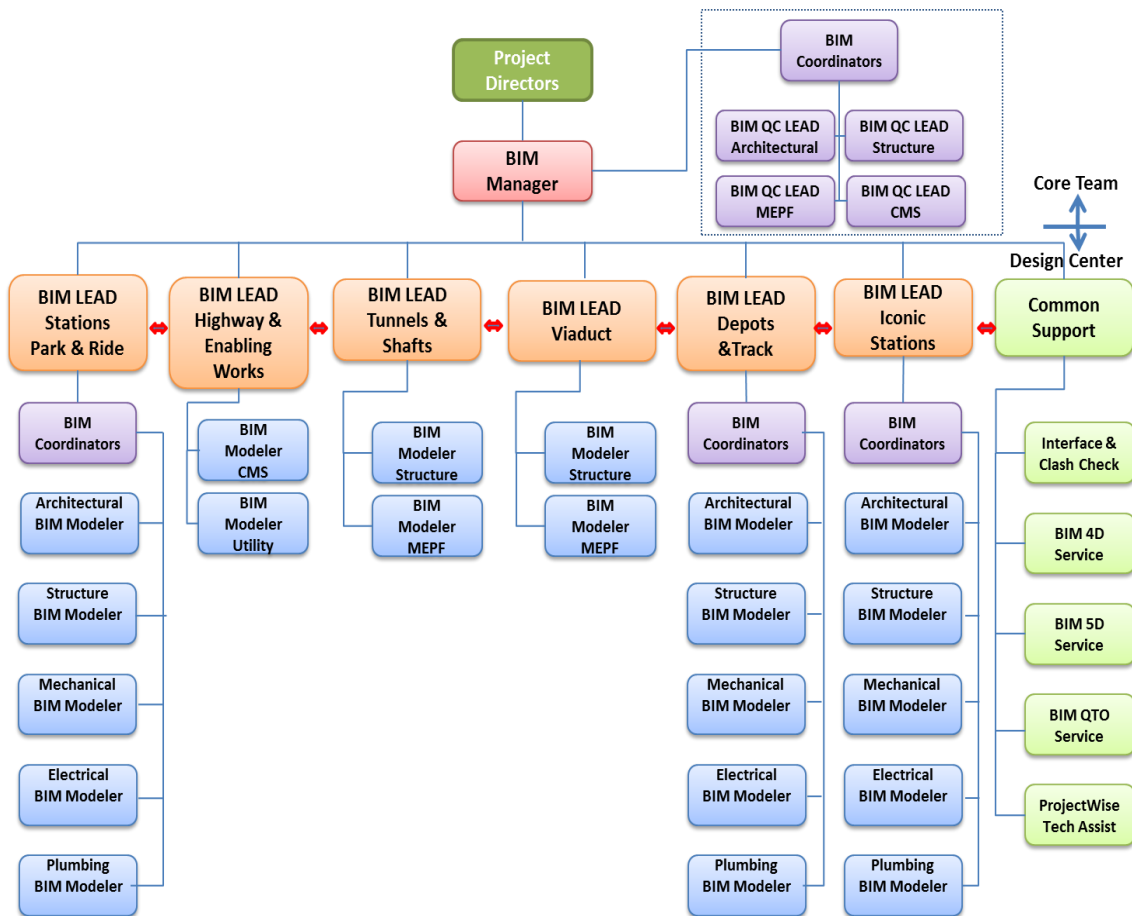



圖 5-3 BIM 組織架構圖

BIM 組織成員的角色及責任說明如下，

1. BIM 經理； BIM 經理是 BIM 組織之靈魂人物，至少必須擁有 10 年以上工作經驗，同時具備工地經驗以及 BIM 經驗或相關證照。負責擬定執行策略、BIM 技術的指導、溝通與管理，以及專案 BIM 數據的整合。
2. ProjectWise 和 Revit 管理員；負責管理資訊系統，與 Information Systems and Technology (IS & T) 的緊密聯繫並提供相關技術支援。

- 
3. 3D BIM 模型和 CAD 整合者；負責控管專案所有 BIM 模型和 CAD 資訊的品質，確實管理、協調和掌握所有設計資訊。BIM 整合者分屬在各設計團隊之專業組別中，執行及支援 BIM 相關技術。對車站設計而言，建築模型整合者須發揮領頭羊的角色，召開協調會議協助 MEP 以及結構模型完成整合工作。
  4. BIM Leader；為次階的資訊管理者，直接向專案經理報告。BIM Leader 主導各設計中心 BIM 計畫之執行，帶領 BIM 團隊整合設計和工程界面之 BIM 模型與資訊，以提供完整的 3D BIM 設計成果。
  5. IS&T；負責採購及提供 BIM 軟硬體工具、教育訓練和工作流程的功能設置。
  6. BIM 建模者；負責各系統專業之工程設計、3D 建模以及衝突檢測。

3D BIM 技術的核心並非 BIM 軟體，而是運用適當 BIM 軟體來執行專案的規劃、設計、預算、審核、施工與營運管理的 BIM 專業團隊，唯有專職的 BIM 團隊方能讓專案發揮其更大的經濟效益和社會效益。然而現況是大多數企業沒有自己的 BIM 團隊，因此將原有的組織以兼職方式組成臨時的工作小組來執行 BIM 專案工作，這是一件相當冒險與困難的任務。

本案例於專案初始即加強 BIM 教育訓練，培養設計團隊對於 BIM 的認知與概念整合，從設計階段即使用 Revit 軟體來發展 3D 建築模型、結構模型與 MEP 各專業模型。透過實際觀察，即使是完全不熟悉 BIM 技術的新手，接受 2 周的教育訓練，Revit 操作很快就能上手。加上建築模型、結構模型與 MEP 模型可以直接在同一作業平台操作上進行整合編輯，對於 MEP 整合作業流程更加方便。

### 5.2.2 BIM 團隊工作範疇

國外 BIM 推動已超過十年以上，業主與工程人員之間已有共識。儘管本研究案例業主於原合約文件中，並未提出任何 BIM 需求書與交付標準，BIM 管理階層確認業主對於設計與施工的要求後，BIM 經理於專案初始即制定相關標準、軟體工具、設計與建模工作範圍供 BIM 團隊於工程生命週期各階段遵循。表 5-1 顯示 BIM 團隊之工作範疇，描述工程生命週期各階段，專業分工下設計團隊之責任範疇。首先由聯合承攬單位共同組成一核心團隊，負責制定專案標準與依據、BIM 執行計劃書、設計及施工規範、地形測量，同時擔任所有專案成員 (stakeholder) 之間的窗口。

表 5-1 BIM 團隊工作範疇

Modeling	Design Package	Engineering Design Scope	Party	Location
		Topographical Survey	Engineering HUB	Riyadh
Yes	Track Alignment	Alignment Design	Bechtel CCEE	Dubai, UAE
Yes	Depots & Control Centres	MEPF & Structural	Bechtel PECL	Taiwan
Yes	At-Grad Works	Architectural、Structural、MEPF	Bechtel CCEE	Taiwan
Yes	Park & Rkde Facilities	Structural & MEPF	Bechtel NDEU	Dubai, UAE
Yes	Shallow Stations	Architectural、Structural、MEPF	Bechtel PECL	New Delhi,India
Yes	At-Grad Stations	Architectural、Structural、MEPF	Bechtel PECL	Taiwan
Yes	Deep Underground Stations	Architectural、Structural、MEPF	AECOM	New York, USA
Yes	Deep Underground Stations	Architectural、Structural、MEPF	Aroup	Landon, UK
Yes	Bored Tunnel	MEP, drainage, ventilation, walkways and 1st stage concrete for Tunnels and intermediate Shafts	AECOM	APAC,Brisbane
Yes	Mined Tunnel (NATM)	Adits & Intermediate Shats	Gall Zeidier	Croydon
Yes	Cut & Cover Sturctures and Tunnel Portals	Structural & MEPF	Bechtel NDEU	New Delhi,India
Yes	Viaducts	Structural	AECOM	Madrid, Spain
Yes	Elevated Stations	Architectural、Structural、MEPF	AECOM	Madrid, Spain
Yes	Enabling Works	Utility Diversions	AECOM	Ritadh, KSA
Yes	Olaya Street	Street Lighting	AECOM	Ritadh, KSA
Yes	KAFD Iconic Stations	Architecture	Zaha Hadid Architects	London
Yes	KAFD Iconic Stations	MEPF & Structural	Buro Happold	London, UK
Yes	Olaya Iconic Station	Architecture	Gerber Architekten	Berlin
Yes	Olaya Iconic Station	MEPF & Structural	Buro Happold	Bath, UK

本專案之 BIM 執行計劃書制定工程生命週期 BIM 採分階段核定設計，依序為概念設計階段 (Red Diamond Preliminary design)、60% 設計階段 (Developed Design)、90% 設計階段 (Developed Design)、期末設計階段 (final design)、最後提交施工設計圖說 (Issued for construction design)。BIM 設計時程詳如表 5-2 所示。

表 5-2 BIM 分階段設計時程表

Design Stage	Design Stage Description
Red Diamond	Preliminary design and options selected to form design baseline prior to commencement of detailed design
60% Developed Design	Developed Design
90%	Developed Design
100%	Final Design
IFC	Issued For Construction (including required permits and approvals)

除概念設計 (Red Diamond Preliminary Design) 預定由核心團隊執行，60% 細部設計到施工設計階段由分佈於全球各地的設計中心依據其設計範疇、分階段設計及送審時程發展各專業系統的 3D BIM 模型，核可之設計圖說提供施工團隊繪製施工圖、執行施工任務及成果交付予業主。另外本案採邊設計、邊施工之計畫，配

合現場施工時程，基礎、上部結構與相關預埋件設計圖說 (Advance Issued for Construction Design) 必須配合提前送審方能進行施工作業。

值得一提的是，其中參與地面車站 (At Grade Stations)和淺層車站 (Shallow Stations) 的專案成員均隸屬於台北辦公室，包括土木工程의 建築組、結構組，MEP 系統的機械組、管線組、電氣組與儀控組，對於執行專案與 MEP 的整合流程更加地便利及高效益。(Staub-French and Khanzode, 2007) 以及 (Khanzode et al., 2008) 於文獻中曾提出，過去 MEP 整合的做法，由不同專業的承包商各自獨立發展自己的模型，由於溝通不易常導致整合效率差。他們建議所有的工程師與專業承包商應該集結在一間大辦公室裡來進行整合作業，如同本案例從設計階段，建築師、結構技師、機電工程師等能夠面對面進行討論與模型修正，應用 BIM 技術的分工與協同作業平台進行整合分析，隨時反覆執行不同替代方案的模擬，達成更有效率的溝通。3D BIM 技術運用於建築、結構與 MEP 之間的设计協調整合，資訊透過平台更加流通，細設工程師、統包商與下游的 MEP 專業承商可接續對方的 BIM 模型直接溝通與設計，本案例大幅提昇執行 BIM 專案的整體經濟效益。

## 5.3 定性分析

過去文獻已明確指出，從專案的初步設計到施工階段，全程應用 BIM 技術來進行 MEP 的整合是最理想的方案 (Wang et al. 2016; Yung et al., 2014; Liu and Zhang 2014)。然而產業界、專業人員習慣現有之組織、設計方式與整合流程，難以接受新方法，很難要求立即改變，加上業主、專案管理階層對 BIM 了解與接受的程度不一，即使是 BIM 技術較成熟的歐美國家，也鮮少見到全程應用 BIM 技術來進行 MEP 整合的專案。以下將針對本案例的设计整合流程做進一步的探討。

### 5.3.1 建模與整合分析

傳統 2D 设计整合方式為線性流程，當有任何一方修改圖面，其他成員無法立即取得完整圖面與變更資料，須待其逐一修訂完各相關平面、立面、剖面、詳圖、數量詳細表後才會轉交給其他團隊成員以進行相關的修正，當專案組織龐大時恐掛一漏萬，導致影響工程進度與品質，在專案執行與管理上有相當大的缺失。本專案利用 BIM 技術偕同作業模式，所有成員針對 3D BIM 資料庫皆能即時、準確、



全面地接收並且提前進行討論與審查，彼此之間的溝通方式更為直接，能節約資源並加速解決問題，大幅增進工程效能。3D BIM 技術不僅改變傳統專案的設計整合流程也徹底影響專案成員間互動的模式，下圖 5-4 為傳統 2D 整合方式與 3D BIM 技術應用下，MEP 團隊與專案其他成員之間互動模式之示意圖。

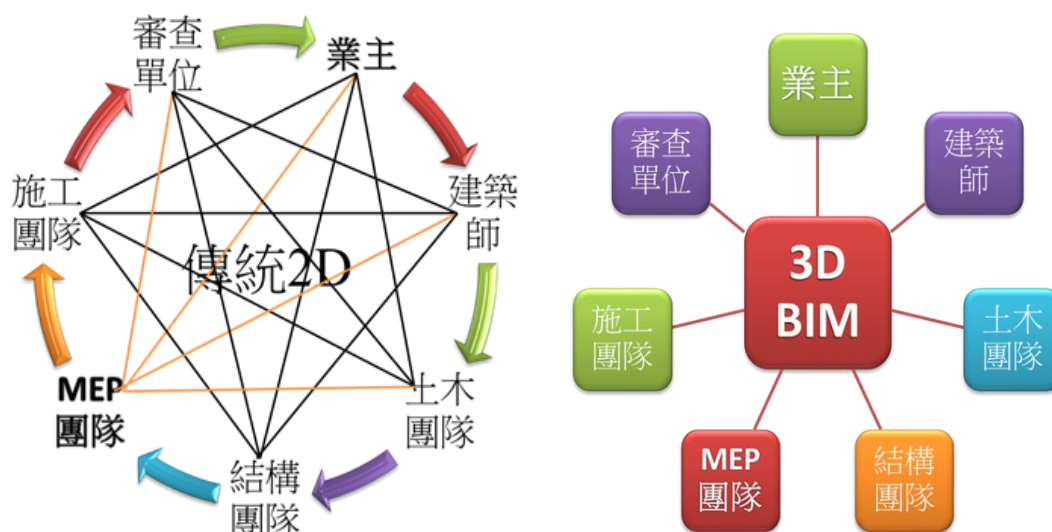


圖 5-4 MEP 與其他成員整合互動方式 - 傳統 vs 3D BIM

本案例之整合流程類似於 IPD 整合式專案交付模式，不僅全工程生命週期均使用 BIM 技術來執行整合設計作業，業主、審查單位、施工團隊與專業包商在各階段設計期間就協同參與，充分運用 BIM 的資訊平台分享施工經驗與專業技術，工程採邊設計邊施工方式，增加了設計與施工的重疊期以縮短整個專案的時程。再加上設計階段已將建築空間使用，施工性設計，土建、機電等材料、設備、工法之最佳化納入考量，目標在於提升設計與施工品質以及降低工程成本。

從概念設計、細部設計、採購階段、施工階段直至竣工且交付營運為止，期間由不斷轉化的 3D BIM 模型所產生的應用，可對應至各生命週期的 BIM 成果。依據軟體特性，本案例所使用之 BIM 工具如圖 5-5 所示，詳細說明如下，

1. 車站站體、維修機廠以及停車場設計使用 Revit (Version 2014, Architectural、Structural & MEP)
2. 土木基礎工程及高速公路設計採用 Civil 3D
3. 高架橋設計採用 Civil 3D 及 Revit
4. Bored 隧道設計採用 Civil 3D 或 AECOSim





5. 明挖覆蓋隧道設計採用 Civil 3D 或 AECOsim 或 Revit
6. NATM 隧道設計採用 AECOsim
7. 軌道定線設計採用 Bentley Railtrack (BRT) 以及 Microstation
8. Auto Cad 以及其他特殊需求軟體

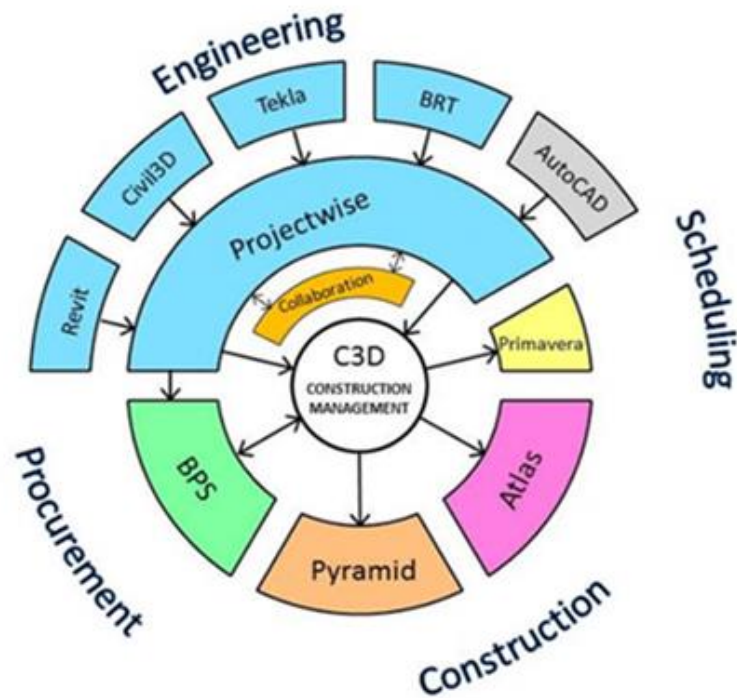


圖 5-5 BIM 工具

(資料來源: 泰興工程)

所有的模型與圖說成果透過 ProjectWise 進行協同作業，同時搭配 Navisworks 來進行設計檢核與碰撞檢測。採購軟體選用 BPS，最後將設計階段的 Revit Model、Civil 3D、Tekla、BRT 及 Auto Cad 資訊全部匯入 C3D 資料庫來執行施工階段與設施維護管理階段的工作。此外，由於本案是跨國整合式協同作業方式，需要以下環境配套，如擴充電腦硬體與軟體設備，IP 網路電話交換機以提供高準確的聯絡資訊，高速的網路與足夠的頻寬，文件儲存系統，網管安全性以及完善的專案管理。各階段 BIM 目的、用途及交付標準詳如表 5-3：

表 5-3 BIM 目的與用途  
(資料來源: 泰興工程)



Engineering (Including Sub-Contractor or Supplier Shop Drawing Production)	Project Controls	Procurement	Construction Quality Control
Design Authoring			
Engineering Analysis			
Drawing & schedule Generation			
Interference Management			
Engineering Progress Tracking			
Interactive Design Reviews			Interactive Design Reviews
Structural Detailing			
Visualisation			Visualisation
Construction Sequencing & Methods			
Quantity Take-Offs			
Vendor Equipment Submittals		Vendor Equipment Submittals	
	Field Progress Tracking		Field Progress Tracking
			Augmented Reality
		Digital Fabrication	
			Digital Setout / Surveying
Record Modelling / As- Built			Record Modelling / As-Built
		Operations & Maintenance Information and Handover	
			Reality Capture

儘管執行計畫書中已擬定從概念設計階段核心團隊需以 BIM 系統來進行功能需求與設計方案之選擇以作為後續細部設計的基礎。然透過實際執行，地面車站 (At Grade Stations) 和淺層車站 (Shallow Stations) 由細部設計團隊從 60% 設計階段開始發展 3D 建模工作，原因是核心團隊於專案初始缺乏經驗與技能而無法以 BIM 技術來執行功能需求與設計方案選擇，導致相關的建築方案選擇、空間需求、價值工程與 MEP 系統策略在細部設計階段才得以發展執行，也就是說，本分析案例於 60% 細部設計階段藉由 3D BIM 所建置的建築設計模型、結構設計模型、機電管線 (MEP) 設計模型，除了供業主及設計者檢討建物功能、量體空間應用、結構系統、機電設備、材料、施工性以及營運維護等使用作決策，還要同時考量邊設計邊施工的需求，提供精準的細部設計圖說與數量計算、解決物件衝突並即時轉給施工團隊辦理發包與施工。

接下來針對 MEP 系統在本案例中如何執行建模加以分析，本案例使用 Revit MEP 這套軟體，Revit MEP 模組主要是提供機械、電氣及管路的 3D 建模工具，可應用在電力系統、弱電系統、空調系統、給排水系統、消防系統以及風量計算等。細部設計階段的建模專注於 MEP 各專業系統模型之建立，主要以符合建築物的空間大小以及用途為設計基礎，因此需引入建築物的空間設定。MEP 團隊承接建築、結構組所提供的 3D 模型，由機械組、電氣組以及管線組分別依據業主需求、合約文件規定、國際標準與當地法規、其他系統介面需求以及 BIM 執行計畫書中各階段 LOD 發展程度來進行系統設計及繪製相關設備管路。

本案例之 BIM 執行計畫書依據 American Institute of Architects (AIA) 標準所制定的 BIM 模型中的元件發展程度 (Level of Development)，表 5-4 為 MEP 系統於不同生命週期所需交付的 3D BIM 模型 LOD 需求表。

表 5-4 MEP 模型交付元件的 LOD 需求表

Type of models	3D MEP	3D MEP	3D MEP	3D MEP	3D MEP
Element Breakdown	期初設計模型	細部設計模型	施工設計模型	施工檢討模型	竣工維護模型
Architecture	200	200	300	400	500
Structure	200	200	300	400	500
Cable Tray		200	300	400	500
Conduit			200	400	500
Device			300	400	500
Lighting Fixture			300	400	500
Pipe	200	200	300	400	500
Valve			200	400	500
Plumbing fixture	200	200	200	400	500
Sprinkler			300	400	500
Duct	200	200	300	400	500
Air terminal	200	200	300	400	500
Mechanical equipment		200	300	400	500

設計階段發展準確數量、尺寸、位置與方位的 LOD 300 模型並完成土建機電整合，其中建築平面如圖 5-6 所示，同一區域所建置之 3D 電纜槽模型如圖 5-7，照明系統模型如圖 5-8，空調系統模型如圖 5-9，消防/給排水系統模型如圖 5-10 所

示。此階段所完成的模型分為兩部分，其一為配合現場先行施工作業的基礎、上部結構與相關預埋件設計圖說 (Advance Issued for Construction Design)，通過審核程序後交給施工團隊執行；其餘屬於設計發展階段之模型繼續由 BIM Leader 以及各專業之 BIM 整合者 (BIM coordinator) 進行整合階段的碰撞檢測及設計解決方案之整合作業中使用，成果必須通過設計審核並且可以運用於計算施工材料數量以利後續採購發包。



圖 5-6 建築平面圖



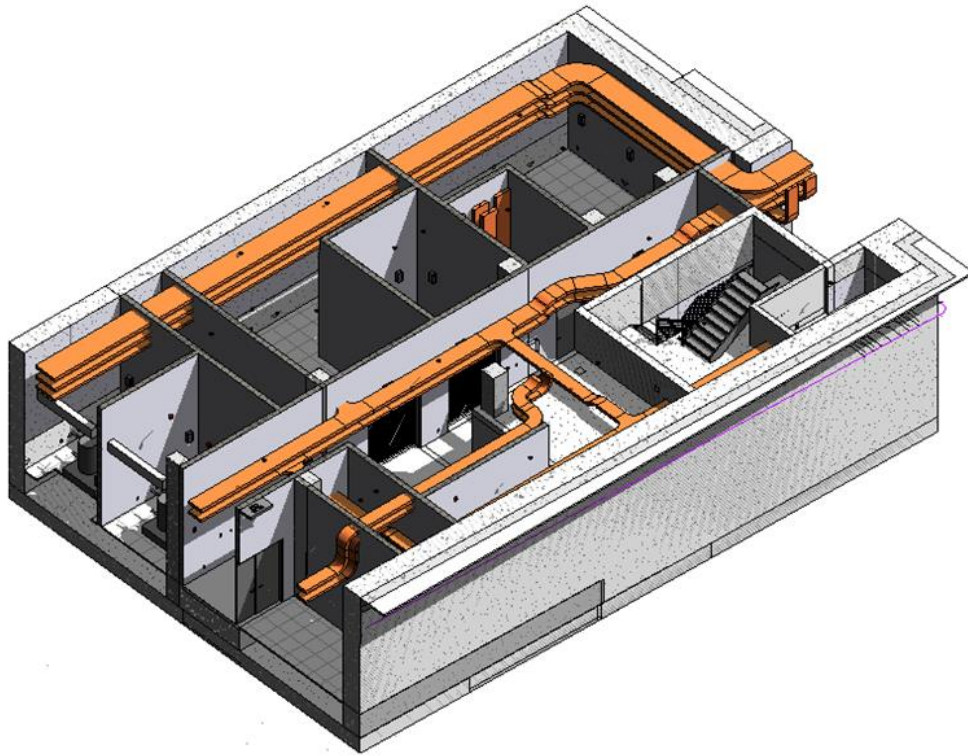


圖 5-7 電纜槽平面圖

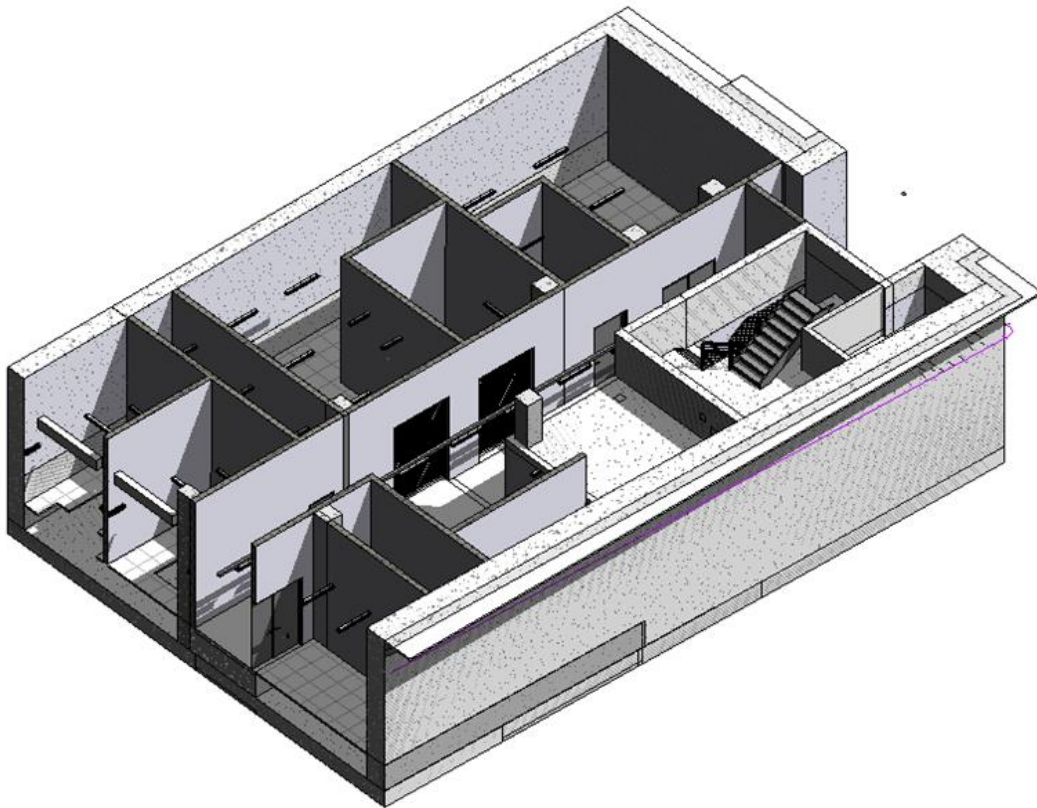


圖 5-8 照明系統圖

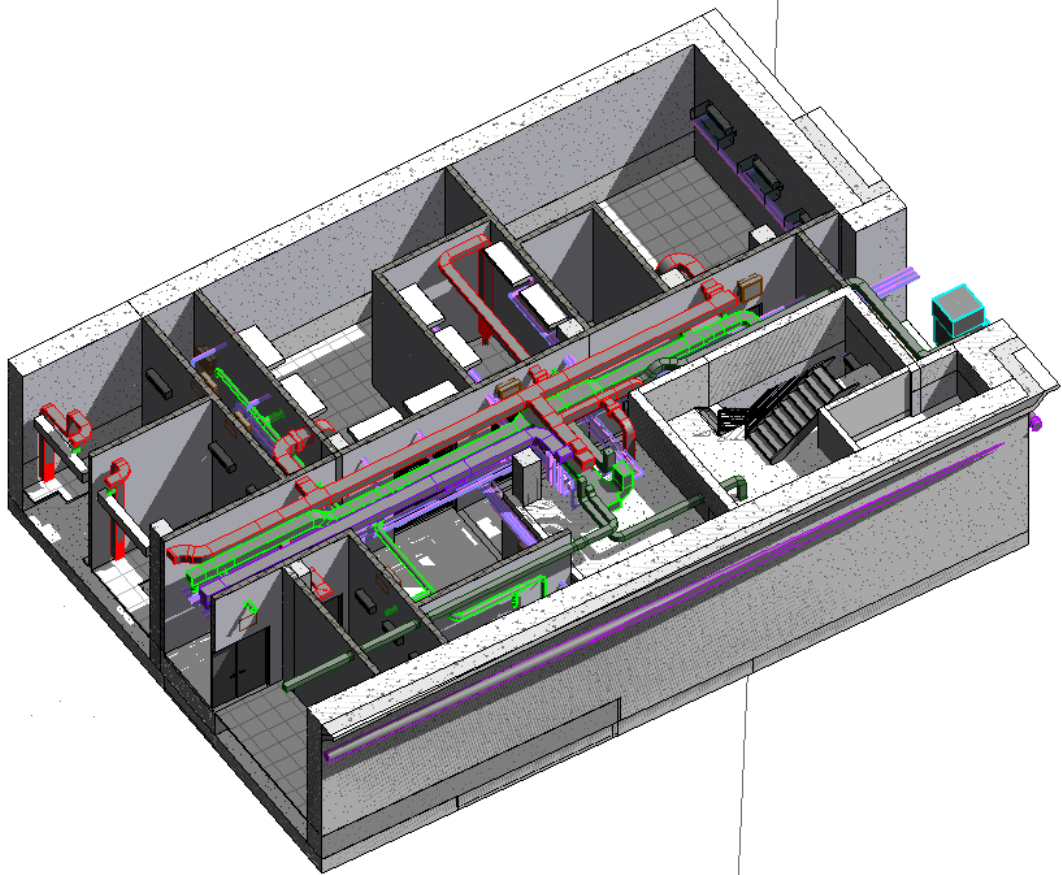


圖 5-9 空調通風系統圖

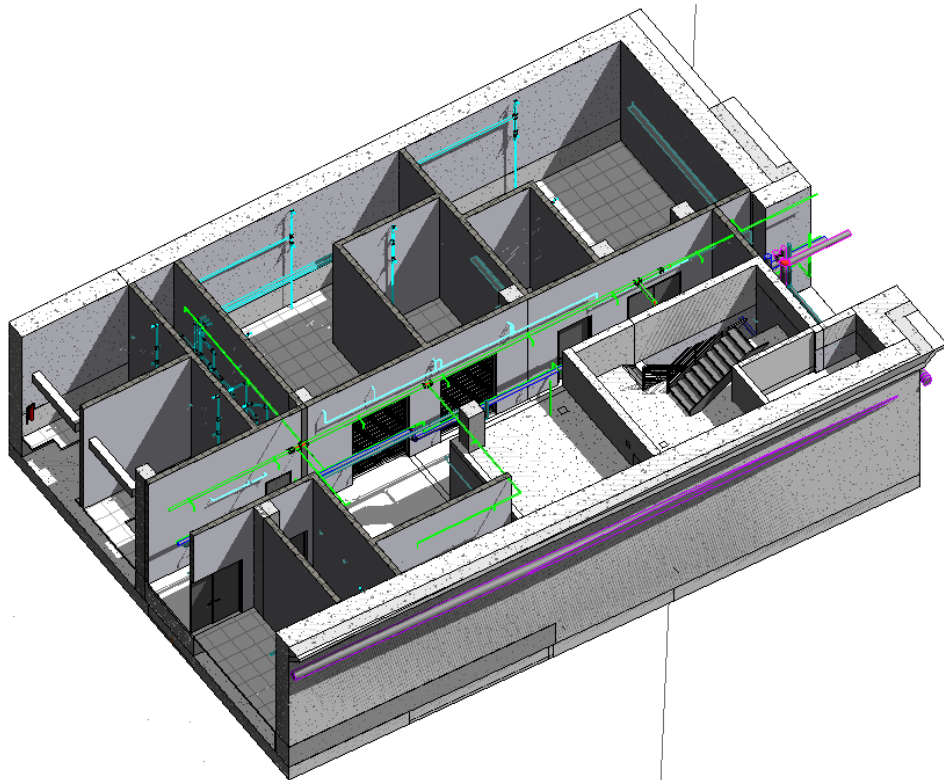


圖 5-10 消防/給排水系統



設計整合團隊利用工程測量的基準點（Survey Point）以分享座標（Shared Coordination）的方式，應用 Revit 與 Navisworks 軟體工具來協調整合所有專業系統之模型。BIM Leader 將所有機電系統設計圖外參連接至建築結構模型以備下一階段的碰撞檢測，圖 5-11 為透過 Navisworks 顯示出結合機械類、電氣類以及管線系統之 MEP 系統整合圖，其中棕色物件為電纜線槽，紅色物件為進氣風管，紫色物件為排氣風管，綠色物件為給排水管路，藍色物件為消防管線，利用不同顏色區分各系統管線，視覺效果的優勢有利於檢查 BIM 模型管線的排列與衝突狀況。

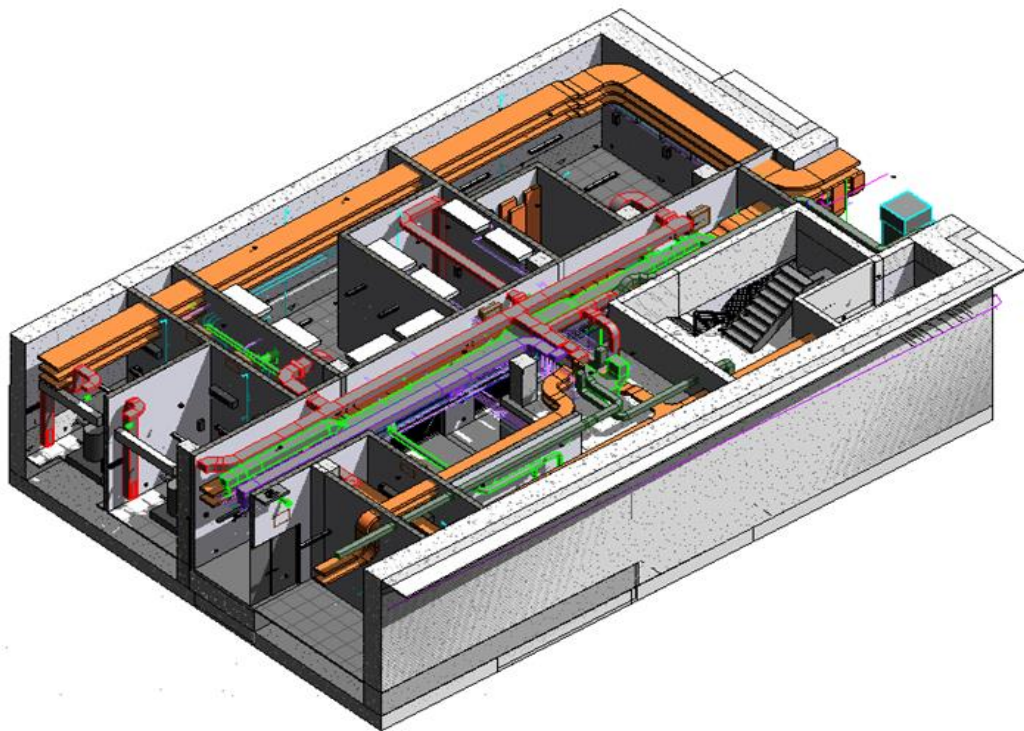


圖 5-11 MEP 系統整合圖

本案例之設計整合流程包含期初設計、分階段的細部設計、施工階段、竣工階段的 3D BIM 模型建置以及分階段的系統整合步驟。由於採邊設計邊施工的策略，本案於設計及施工階段均進行 4D 施工模擬之應用。設計階段針對建築、結構以及機電設備之間的整合模型進行施工程序探討，以做為設計與施工方法選擇決策之參考。在施工前，依照各細設模型將 BIM 元件依據製造流程及組裝程序建製，針對施作空間、施工機具、動線及施工程序進行 4D 模型分析，做為施工管理決策參考。以 MEP 系統為例，參與者包括機械、電機、管線專業之工程師以及專任的建模者，了解業主需求及依據 BIM 執行計畫書、各系統專業之空間需求與用途，分階段接續建築與結構逐步完成的 3D 模型，進行 60% 細部設計、90% 細部設計、

期末設計 100% 與施工設計 (IFC) 階段的機械專業模型、電氣專業模型與管線專業模型。各模型詳細說明如下，

1. 機械細設模型；包含空調系統模型與消防系統模型。設計時考量特殊材料與設備、業主需求、法規檢討、建物現況之節能分析、空調通風方案模擬、排煙設計模擬、其他系統介面需求、設備管路檢討、廠商設備提送、操作與維護性、未來擴充性、施工性設計與提出精確的施工材料數量計算。
2. 電氣細設模型；包含照明模型、火警系統模型、中央監控模型、避雷與接地系統模型、電力系統模型等。設計時考量特殊材料與設備、業主需求、法規檢討、照度分析、其他系統介面需求、設備管路檢討、操作與維護性、未來擴充性、施工性設計與提出精確的施工材料數量計算。
3. 管線細設模型；包含給水、排水等管路系統，設計時考量業主需求、法規檢討、連接既有管路及與其他系統介面需求、設備管路檢討、操作與維護性、未來擴充性、施工性設計與提出精確的施工材料數量計算。

在傳統設計案中，單價不高但數量較多或不易量化之工程數量大多以一式為單位，如油漆、磁磚、泥作粉刷、鋪面、管線彎頭、轉接頭、電氣配管工程等。一式計價之執行方式產生太多之施工爭議，在導入 BIM 技術後，透過建置的元件可正確估算出工程數量，尤其針對繁雜預算項目之機電工程，提供設計者在設計過程中有評估修正之機會，達到事先控制成本進而有效的管控預算。

後續的系統整合由原設計團隊加上施工團隊、獨立驗證審查單位等，依據內部審查程序針對設計準則、法規、業主需求、合約規定來檢核設計是否符合 1.建物的需求性(Building Requirements) 2. 功能性 (Functionality) 3.施工性 (Constructability) 4. 未來營運維護性 (Maintainability) 5.其他系統介面需求 (Interface Requirement) 6. 解決物件衝突 (Resolve Clash Check)，並回饋審查意見給原設計單位修訂 3D BIM 模型，最後經業主核可後方可進入生命週期下一階段。

本案例未能如期於概念設計階段應用 BIM 技術來分析建物需求、功能性、設計方案選擇以及業主需求等，儘管細部設計的工程人員處於同一辦公室，MEP 設計整合過程已比參與者分散於不同地點的專案更有效率之條件下，仍需耗費相當多的工時同時進行細部設計與功能需求分析供業主核可及方案選擇，且配合邊設



計邊施工以及分階段建模整合流程，導致設計階段所需人力與工時比專案預期的時程更久。此外，現場施工進度的迫切與準確度的需求，加上採購發包之前須提出精確的設備與施工材料數量的目標，細部設計團隊承擔比傳統專案的細設顧問更高的風險與責任。呼應之前 AIA 所提的 IPD 模式，若能在專案規劃初始確實採用 BIM 技術與 IPD 流程架構，制定出專案目標及設計方案以進入下一個階段，即使提高了細部設計階段的工作範疇與成本，卻能降低施工階段以及專案整體的風險與成本。下圖 5-12 為 MacLeamy Curve 比較傳統作業流程與導入 IPD/BIM 作業流程之成本效益。

新加坡發表的 BIM 準則也特別說明採用 BIM 技術將使設計階段的工程顧問費用提高，並且建議這些費用應由施工階段的工程顧問及管理費中轉移過來，目前建議轉移約 5%，轉給基本設計階段及細部設計階段各增加 2.5% (Building and Construction Authority, 2013)，對應到本研究案情況，此論述亦完全符合，若需承擔額外的責任與風險，設計階段的報酬理應增加；而且於初始階段進行設計方案分析與變更所付出的成本最低，卻是專案執行中成本效益最高的階段。

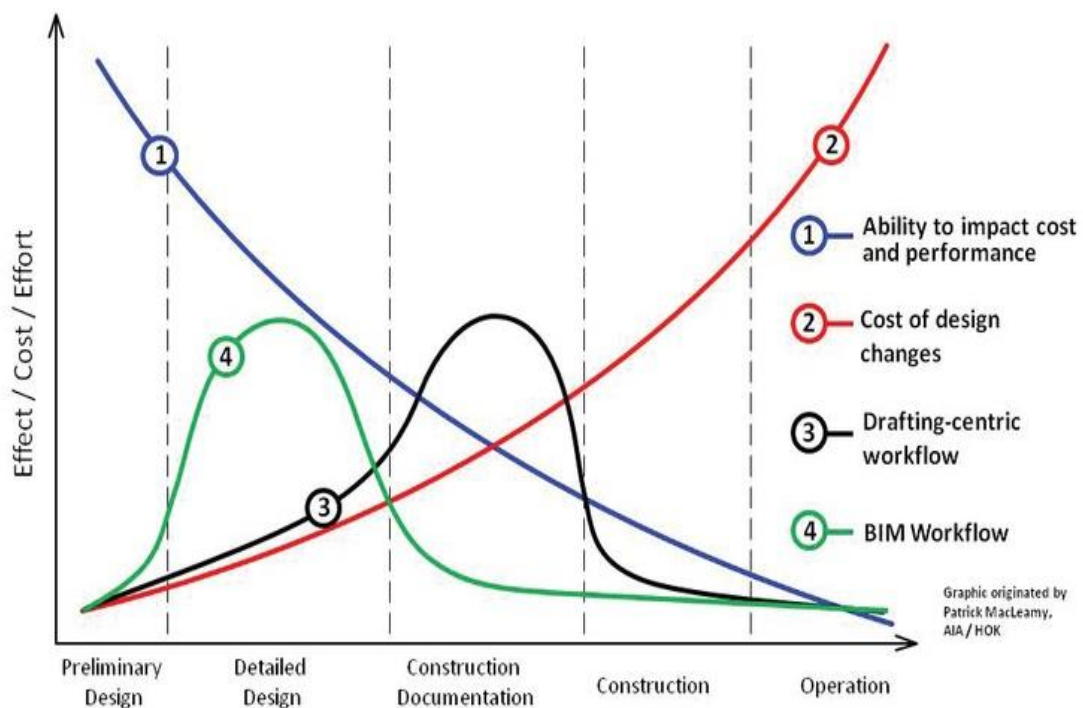


圖 5-12 傳統作業與導入 IPD/BIM 作業之成本效益圖

圖片來源：Patrick MacLeamy AIA/HOK



### 5.3.2 衝突檢測分析

不同於傳統 MEP 專案其設計單位僅發展 MEP 功能性設計，待施工階段發包給系統專業承包商才進行檢討規畫階段的功能是否周詳，各專業系統間是否有衝突等問題，常導致工期順延、設計變更、成本無法控管的困境。本案例 MEP 系統團隊於 60% 細部設計階段，除了功能性設計外也同時發展具建築表現性與施工性的細部設計模型。設計與建模內容涵蓋設備功能與定位、管道間大小、埋管預留、結構物開孔需求、風管路徑、電纜線槽路徑、2 吋以上的電管與水管、正確數量計算等。本案例機電系統包括行控中心中央監控、建物管理系統、車站電力、空調通風、消防火警、路線與隧道段機電、軌道號誌系統、車輛電力系統、月台門系統、通訊系統、電訊系統、隧道通風系統、電梯/電扶梯系統、自動收費系統、固網系統、多媒體、廣播與門禁系統等。儘管已全面使用 BIM 工具，30 幾個 MEP 系統之設備及大量管線需容納在有限的站體空間中，在設計建模與介面整合階段仍然面臨到相當大的挑戰。

BIM 設計整合團隊依據專案初始所制定的衝突流程 (clash check workflow) 來執行自主檢核與跨部門之間的整合，作業流程詳如圖 5-13。各專業模型完成自主檢查與修訂後，BIM leader 將全部 MEP 系統模型整合套匯在同一建築結構機電模型，轉檔以 Autodesk Navisworks 軟體來檢視 MEP 系統設備管路位置，並進行各系統間交互碰撞檢測並註記及產生報表供 MEP 各專業修改依據。詳細步驟執行如下：

1. 進行施工可行性評估
2. 碰撞檢測 clash checking 自主檢查，依據自主檢查表修訂模型
3. 各階段的建築、結構、MEP 模型上傳至資料管理平台 (ProjectWise)
4. BIM leader 以 Navisworks 開啟所有的模型並進行交互碰撞檢測 (例如 HVAC 模型與 Cable Tray 模型、MEP 模型與結構模型來進行碰撞檢測)
5. 各系統依據碰撞檢測報表修訂模型
6. 針對複雜且跨部門之衝突點，建築、結構、MEP 設計人員召開協調會議
7. 檢討修訂並提交碰撞檢測報表
8. 文件正式提送前，解決所有衝突點

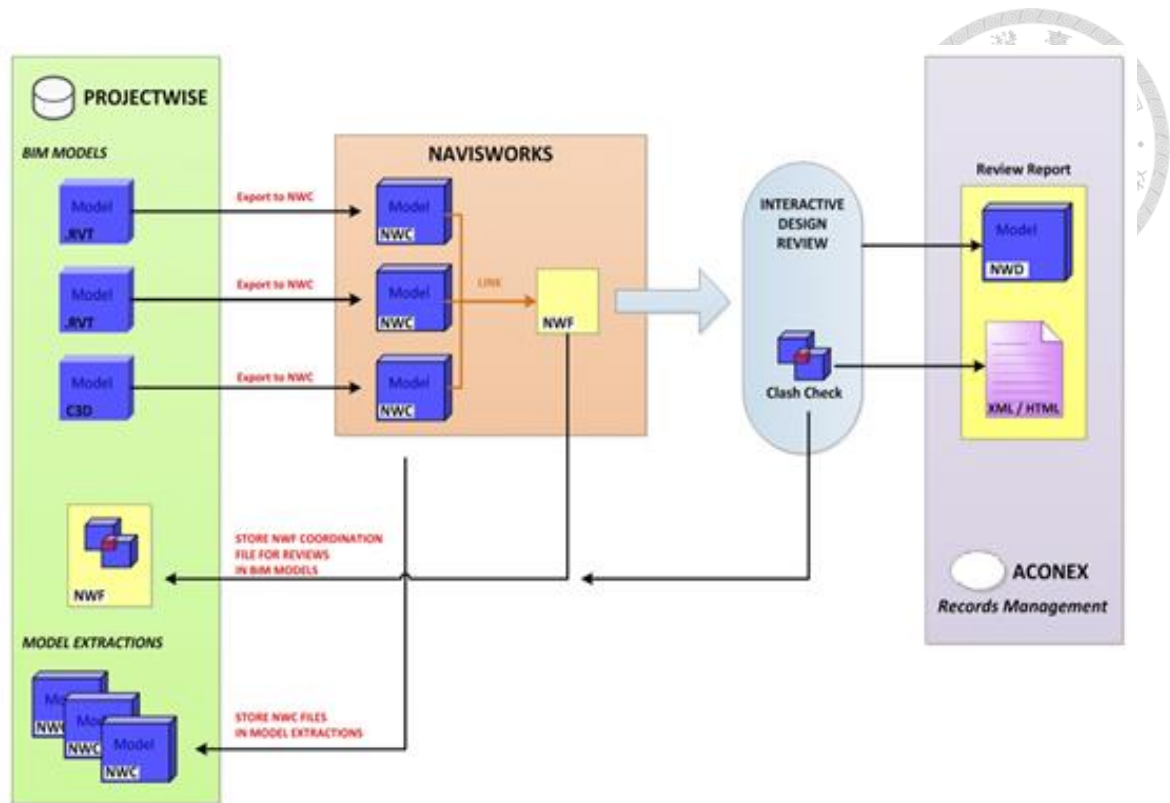


圖 5-13 Navisworks Design Review and Clash Checking Workflow

依據過去經驗以及本案例分析結果，MEP 設計疏失比例以電氣系統的錯誤量居多，其中又以電纜線槽設計疏失造成損失金額的比例最大，原因是電氣系統的設備、元件與線路數量最多，而容納電纜線的線槽空間需求僅次於大型風管，考量 MEP 系統的功能與集中性需密集布設於電氣室區域範圍，在有限的空間內進行電纜線槽的設計是相當具有挑戰性的。回顧傳統 2D 設計整合方式，電纜線槽施工時常見的缺失為 1. 未考慮最適當之鋪設路徑而造成浪費 2. 線槽彎頭太多導致拉線不易與成本增加 3. 設計圖未考慮線槽最小彎曲半徑導致無法施作 4. 牆面未預留電纜槽穿牆開孔，導致需進行二次施作之打鑿修補而影響結構強度 5. 穿樑間距不足或位置不當而影響樑補筋及結構強度。設計過程各系統模型之交互碰撞檢測表如圖 5-14 顯示，電氣系統的衝突數量明顯居高。

Name	Status	Clashes	New	Active
2E2 Mechanical vs MEPF	Done	10	0	10
2E2 Electrical vs MEPF	Done	227	0	227
2E2 Plumbing vs MEPF	Done	2	0	2
2E2 Fire Protection vs MEPF	Done	206	0	206
2E2 Lighting vs MEPF	Done	15	0	15
2E2 Mechanical vs CB	Old	213	0	213

圖 5-14 交互碰撞檢測數量表

### 5.3.2.1 硬衝突檢測- 以電纜線槽為例

在 3D 設計模型中，本案例之電氣系統使命為建立出安全具經濟實惠之電纜槽架。電氣工程師根據相關法規、業主特殊需求、各介面系統需求表、配電線路的用途以及環境條件等因素並經專業技術與碰撞分析後選擇最佳的鋪設方式與路徑。詳細設計與整合過程說明如下，

介面需求單位透過介面需求程序向 MEP 之電纜槽架細設單位提出 Cable Containment 數量、空間與路徑的需求。電氣工程師及 BIM designer 依據各介面單位的需求表納入設計與 3D 建模，首先以 Revit 內建功能來檢查本身模型相關系統和外部參考模型碰撞相關資料，在建模階段即透過自主檢查先行解決部分碰撞，接著將機電系統之開孔與預埋需求提供給結構組進行後續開孔與預埋件設計，以利施工團隊同時執行相關的施工作業。下列依序為 3D 電氣模型以 Revit 進行電纜線槽自主檢查硬衝突的步驟，

#### 1. 首先開啟電纜線槽模型之 Interference Check 功能:



圖 5-15 Cable Tray Model-1

2. 選取電氣模型之相關系統:

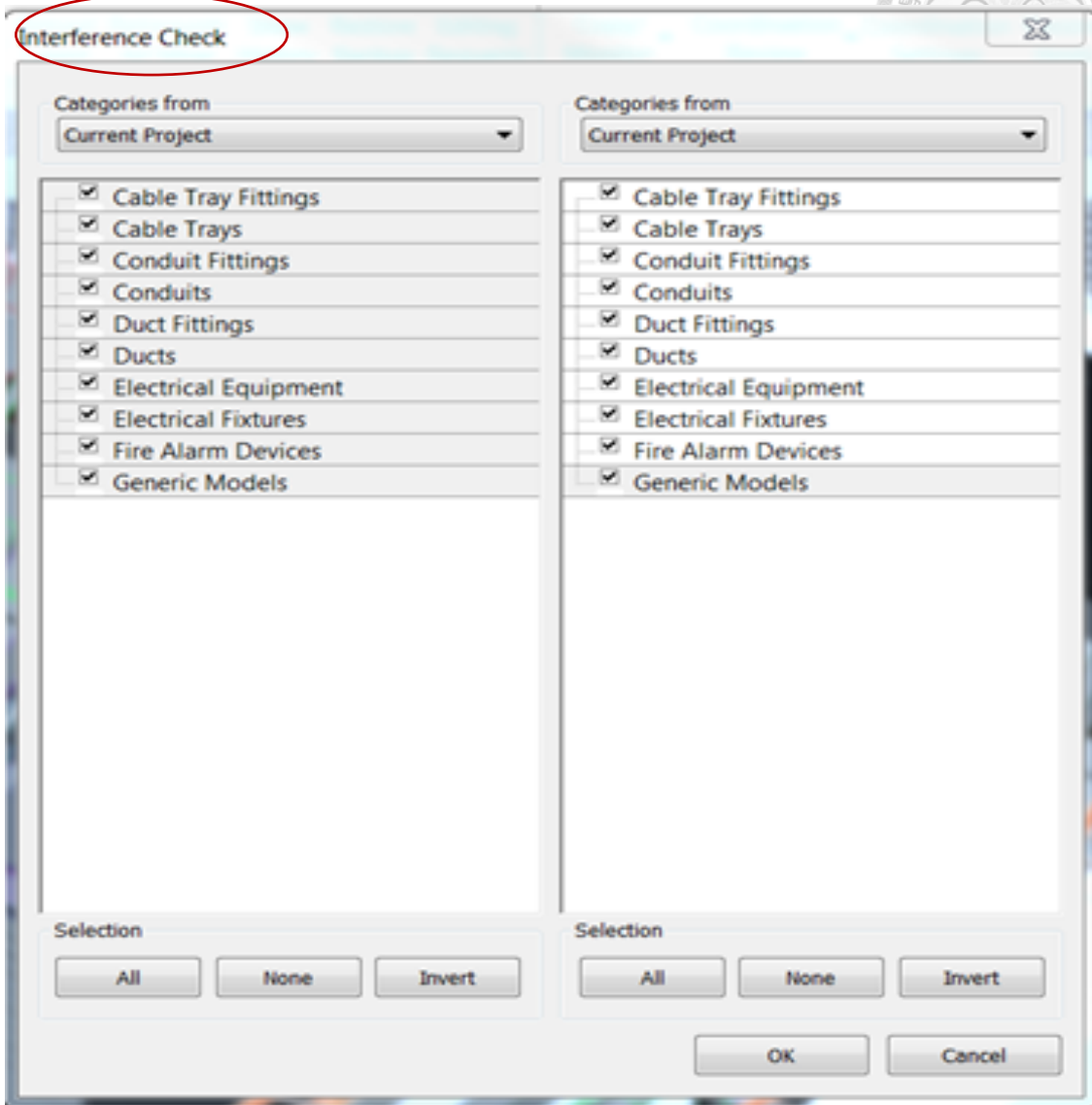


圖 5-16 Cable Tray Model-2



3. 選取外部參考模型，例如建築與結構模型

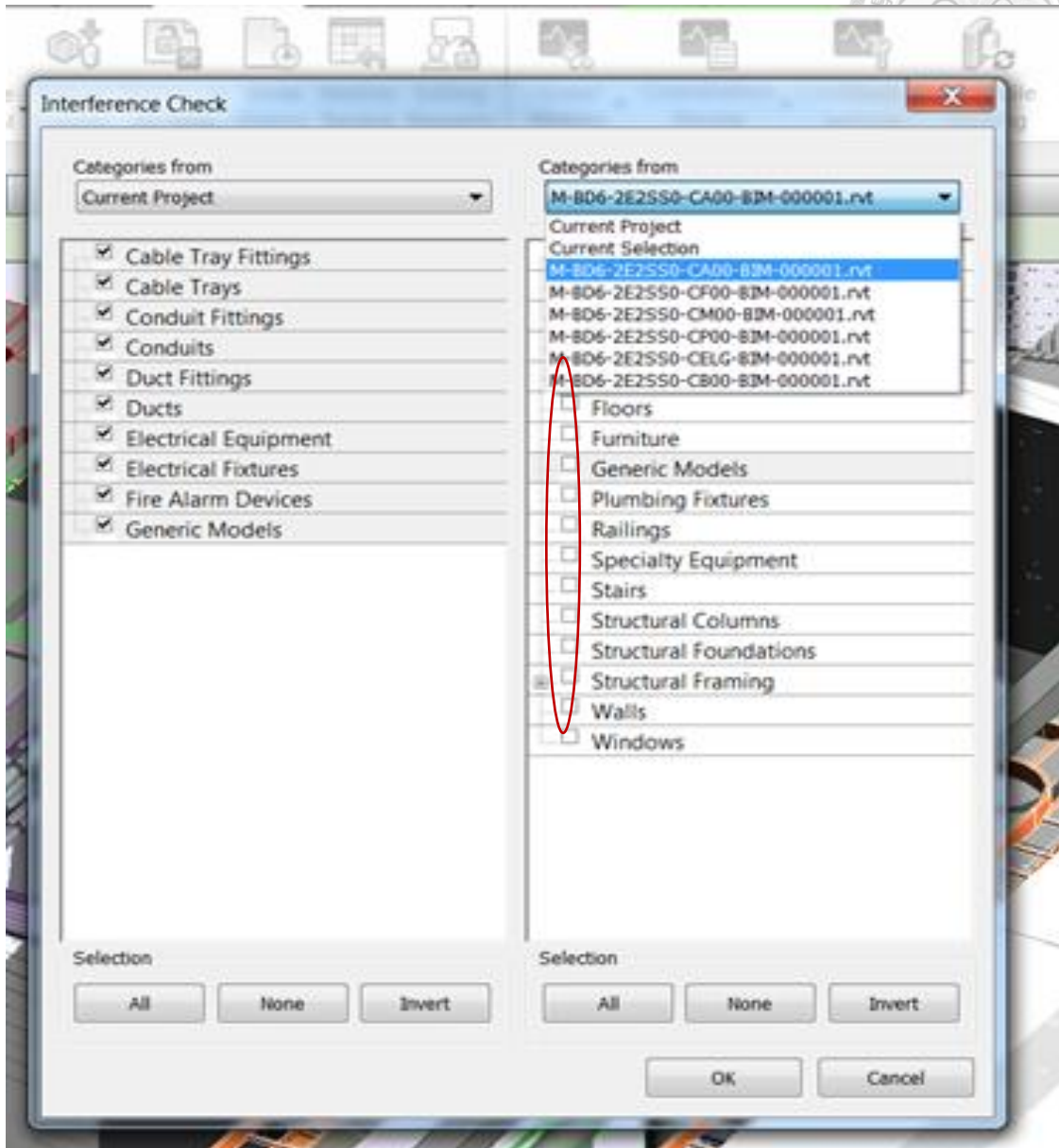


圖 5-17 Cable Tray Model-3

4. 自動產生衝突報表 name.html，A 欄顯示衝突物件之 ID



### Interference Report

Interference Report Project File: C:\Users\cho1\Documents\D 8211\bin-8211\_cho1.rvt  
 Created: 2016年10月20日 上午 09:55:07  
 Last Update:

	A	B
1	Cable Tray : Ducts : Rectangular Duct : Feeder-Siemens-Sentron-Aluminum-3200A - Mark 98 : id 3844665	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Refrigerant Pipe : Pipes : Pipe Types : Copper (Type ACR) Soldered - Mark 1982 : id 6289950
2	Cable Tray : Ducts : Rectangular Duct : Feeder-Siemens-Sentron-Aluminum-3200A - Mark 98 : id 3844665	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Refrigerant Pipe : Pipe Fittings : RM_Elbow - Welded - Generic : Elbow - Copper (Type ACR) Soldered - Mark 5216 : id 6289954
3	Cable Tray : Ducts : Rectangular Duct : Feeder-Siemens-Sentron-Aluminum-3200A - Mark 98 : id 3844665	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Refrigerant Pipe : Pipe Insulations : Pipe Insulation : Interior Flexible Elastomeric - Mark 3190 : id 7693565
4	Fire Alarm : Fire Alarm Devices : RM_FM-200 Warning Light : FM-200 Warning Light - Mark 634 : id 4112724	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Ductwork-Ventilation : Duct Accessories : RM_Fire Damper - Rectangular - Curtain Type : Fire Damper-1.5 Hours Fire Rating - Mark 1392 : id 6755144
5	E&L : Electrical Fixtures : RM_Ear 1000x50x6 : RM_Ear 1000x50x6 - Mark 812 : id 4416852	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Ductwork-FRTU : Duct Insulations : Duct Insulation : Mineral-Fiber Board w/ Aluminum Jacket_50mm - Mark 2775 : id 8361772
6	E&L : Electrical Fixtures : RM_Ear 1000x50x6 : RM_Ear 1000x50x6 - Mark 812 : id 4416852	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Ductwork-FRTU : Duct Insulations : Duct Insulation : Mineral-Fiber Board w/ Aluminum Jacket_50mm - Mark 2469 : id 9649647
7	Fire Alarm : Fire Alarm Devices : RM_Addressable Module : Control Module - Mark 855 : id 4506515	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Ductwork-Air Conditioning : Duct Accessories : RM_Fire Damper - Rectangular - Curtain Type : Fire Damper-1.5 Hours Fire Rating - Mark 920 : id 9269482
8	Fire Alarm : Fire Alarm Devices : RM_Duct Smoke Detector : Standard-0 - Mark 1019 : id 4566231	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Ductwork-Ventilation : Ducts : Rectangular Duct : Radius Elbows / Tees - Galvanized Steel - Mark 3934 : id 7178463
9	Power Panel : Electrical Equipment : RM_Disconnect Switches_WP : 220 V - Emergency Supply 25 A - Mark 837 : id 4645682	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Ductwork-Air Conditioning : Mechanical Equipment : RM_Air-Cooled Condensing Unit for FCU-RXYMQ36PVJU : RXYMQ36PVJU - Mark 461 : id 7856217
10	Power Panel : Electrical Equipment : RM_Disconnect Switches_WP : 220 V - Emergency Supply 25 A - Mark 838 : id 4645895	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Ductwork-Air Conditioning : Mechanical Equipment : RM_Air-Cooled Condensing Unit for FCU-RXYMQ36PVJU : RXYMQ36PVJU - Mark 462 : id 7856408
11	Power Panel : Electrical Equipment : RM_Disconnect Switches_WP : 220 V - Emergency Supply 25 A - Mark 839 : id 4646181	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Ductwork-Air Conditioning : Mechanical Equipment : RM_Air-Cooled Condensing Unit for FCU-RXYMQ36PVJU : RXYMQ36PVJU - Mark 464 : id 7856416
12	Power Panel : Electrical Equipment : RM_Disconnect Switches_WP : 380 V - Non-Fusible 63 A - Mark 845 : id 4648310	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Ductwork-Air Conditioning : Mechanical Equipment : RM_Air-Cooled Condensing Unit for FCU-RXYQ28PYLK : RXYQ28PYLK - Mark 579 : id 7001750
13	Power Panel : Electrical Equipment : RM_Disconnect Switches_WP : 380 V - Emergency Supply 63 A - Mark 846 : id 4648452	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Ductwork-Air Conditioning : Mechanical Equipment : RM_Air-Cooled Condensing Unit for FCU-RXYQ28PYLK : RXYQ28PYLK - Mark 636 : id 7072538
84	Cable Tray : Cable Tray Fittings : M_Ladder Vertical Inside Bend : Standard - Mark 8159 : id 5784612	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Refrigerant Pipe : Pipes : Pipe Types : Copper (Type ACR) Soldered - Mark 5830 : id 7827190
85	Cable Tray : Cable Tray Fittings : M_Ladder Vertical Inside Bend : Standard - Mark 8159 : id 5784612	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Refrigerant Pipe : Pipes : Pipe Types : Copper (Type ACR) Soldered - Mark 7370 : id 9377863
86	Cable Tray : Cable Tray Fittings : M_Ladder Vertical Inside Bend : Standard - Mark 8159 : id 5784612	M-BD6-2E2SS0-CM00-BIM-000001.rvt : Refrigerant Pipe : Pipe Fittings : RM_Elbow - Welded - Generic : Elbow - Copper (Type ACR) Soldered - Mark 4923 : id 9377877

圖 5-18 Cable Tray Model-4

5. 在 Revit Model 輸入物件 ID，可快速找到電纜線槽與冰水管線衝突位置，即可進行檢討與修正。

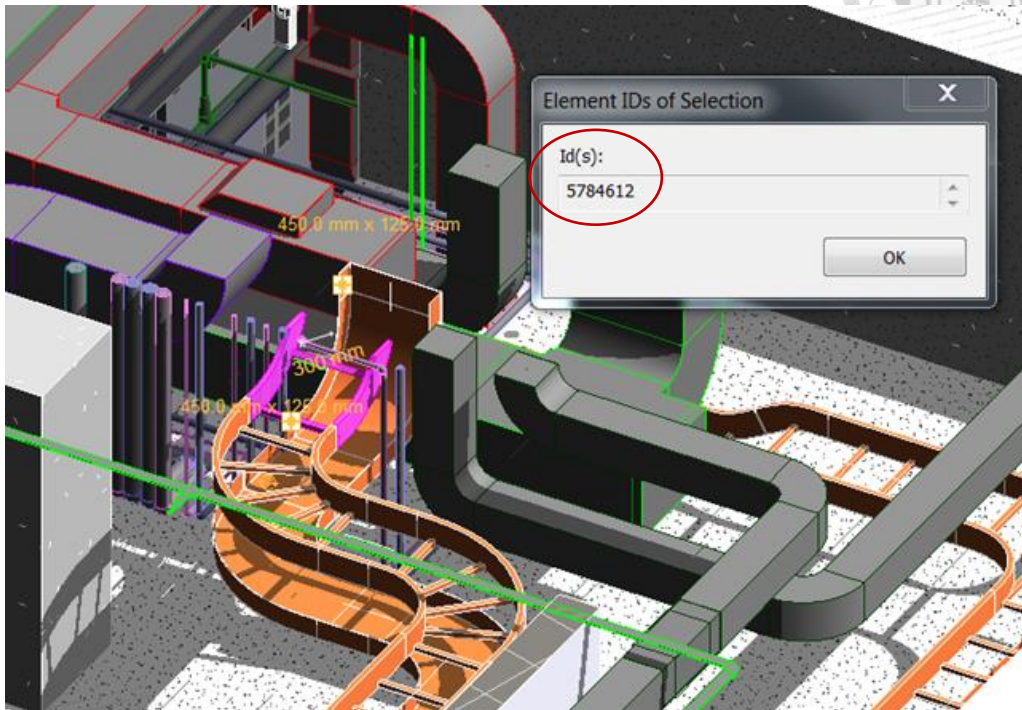


圖 5-19 Cable Tray Model-5

### 5.3.2.2 施工性分析

BIM 功能不只在於建置完工後的立體模型，同時也必須蘊含施作的過程資訊，來預先檢核設計成果之施工性；導入 3D 技術來彌補設計人員施工經驗的不足，預先防止施工時可能發生的錯誤，以期降低風險及工程營建成本。由於 Revit 軟體尚未提供偵測軟衝突之選項功能，專案組織也缺少能立即撰寫 API 外掛程式的軟體工程師，因此本案例之搬運動線與施工維修空間需求由 MEP 各系統工程師及建模者依據規範及設備需求於設計模型之設備元件周圍預留安裝與維修空間以避免軟衝突發生。同時間，具備設計與現場施工經驗的整合團隊針對衝突檢測報表所列出的衝突點進行分析，篩檢出屬於開孔或預埋管位置並彙整給建築及結構工程師納入開孔與預埋件設計，也協同判斷潛在的軟衝突並且提出所有衝突解決的建議方案，詳圖 5-20，5-21 顯示自動衝突檢測所忽略之未考慮施工性的設計，將導致現場無法施工。圖 5-22 之衝突位置，標示為牆面有 MEP 開孔設計需求，屬於可允許存在的衝突點。



本案例為 EPC 類型的統包工程，而設計兼施工 (Design /Build) 及快捷工法 (Fast-track Methods) 就是在工程專案初期即應用施工性概念縮減工期的最佳證明 (Nima et al., 2002)。BIM 設計整合團隊以及現場施作的營建工程師們，透過 ProjectWise 資訊平台即時分享 3D 設計模型，以及分階段的設計審查會議程序，順利導入先期施工性分析的回饋設計 (feed-back) 資訊傳遞方式，共同審查及討論設計、施工時所遭遇的問題並規劃可行的施工技術及工法來避免因設計疏忽或考量不當的變更設計發生。同時邊施工邊設計 (fast track construction) 的併行作業方式，施工單位依據現場狀況、施工工法與採購成本的考量，提出建議並協助檢討設計圖說、施工規範所制定的設備與材料是否符合當地法規與市場機制，搬運動線與施工維修空間是否足夠，配合大型設備及重要材料之進場時程，配合施工計畫與時程提醒設計團隊及早決定設備形式與數量以免採購不及。兼具施工性與操作性考量的設計方式以本案電氣設備為例，設計者參照國際電氣安全法規規定於電氣開關盤前後與盤體之間標註至少 100 公分間距並預留設備周遭搬運與操作維修空間，如圖 5-23 所示。設計團隊與施工團隊由傳統的對立關係成為夥伴關係，施工團隊承接設計模型來發展施工圖說 (shop drawings)，施工前透過 RFI 內部程序提出疑義澄清，大幅減少介面爭議與文件成本。

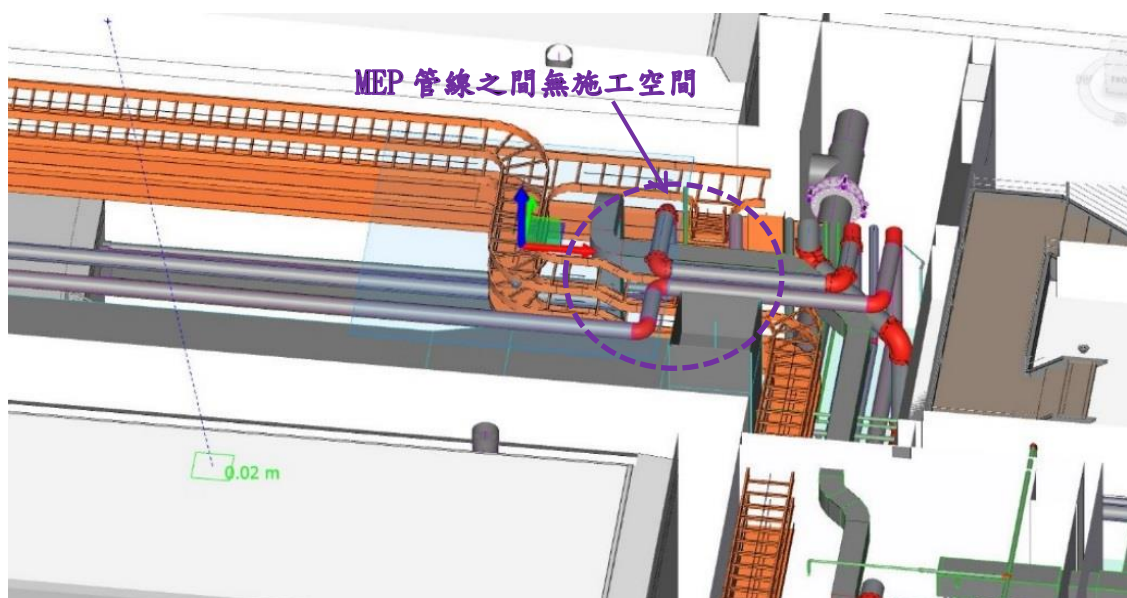


圖 5-20 未考量電纜槽、風管與水管的施工空間

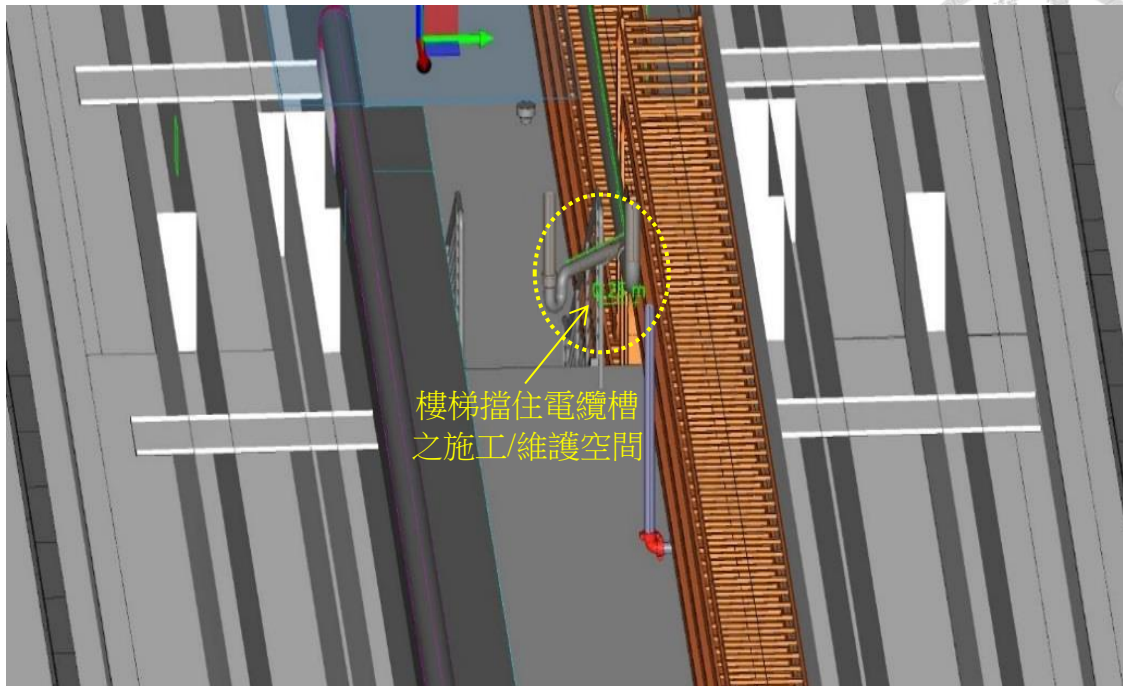


圖 5-21 未考量電纜槽與樓梯的施工空間

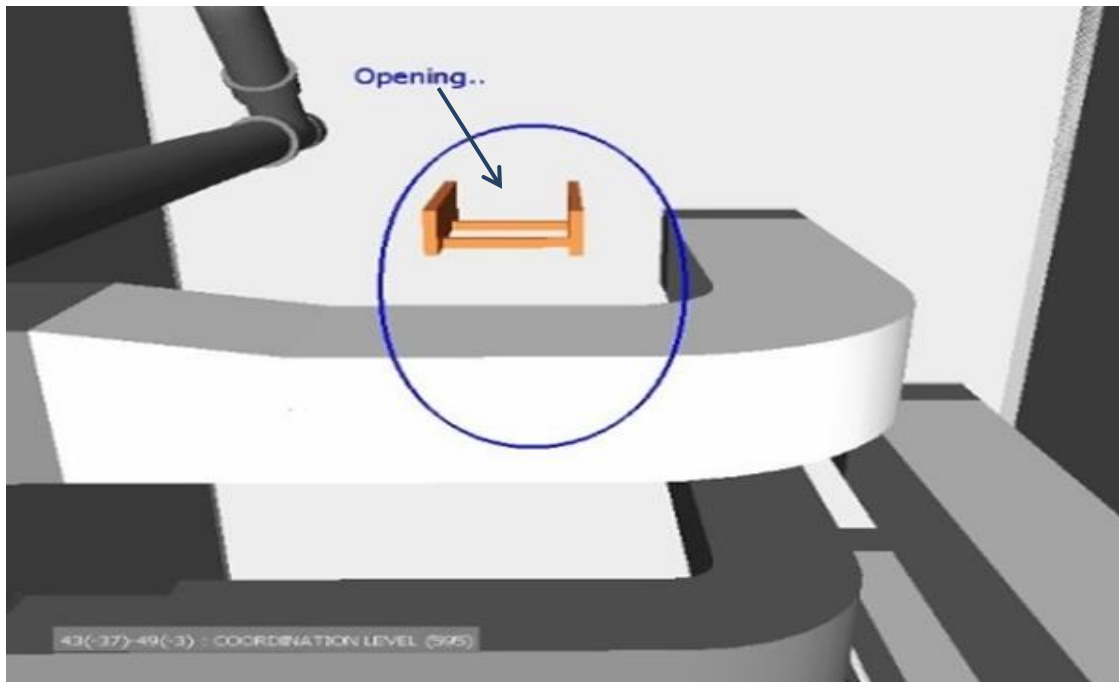


圖 5-22 施工性設計 - 電纜槽穿牆開孔的衝突點

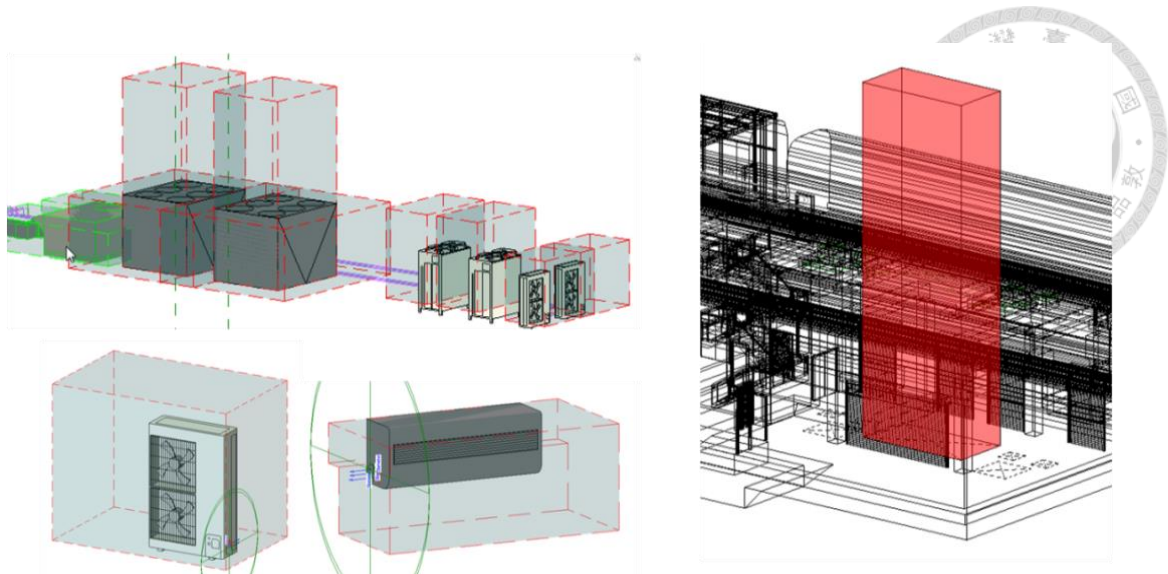



圖 5-23 施工性設計 - 預留安裝與維修空間

### 5.3.2.3 解決衝突的方法

以往 MEP 系統因專業分包策略，系統承商於設計階段依循不同的合約發展自身的設計圖說，許多物件干涉或介面問題直到套匯整合階段甚至施工期間才發現，加上各系統承商彼此之間沒有合約關係，處理介面衝突的態度採互推責任或不配合時程進場施工，常導致總承包商於整合階段需花費更多的時間與成本來解決介面衝突。由於本分析案例承攬團隊結合土建與機電專業的組合，除了前述的設計流程外，在規劃設計階段也發揮各系統專業制定出介面整合流程與解決衝突的方法。介面整合流程如下，

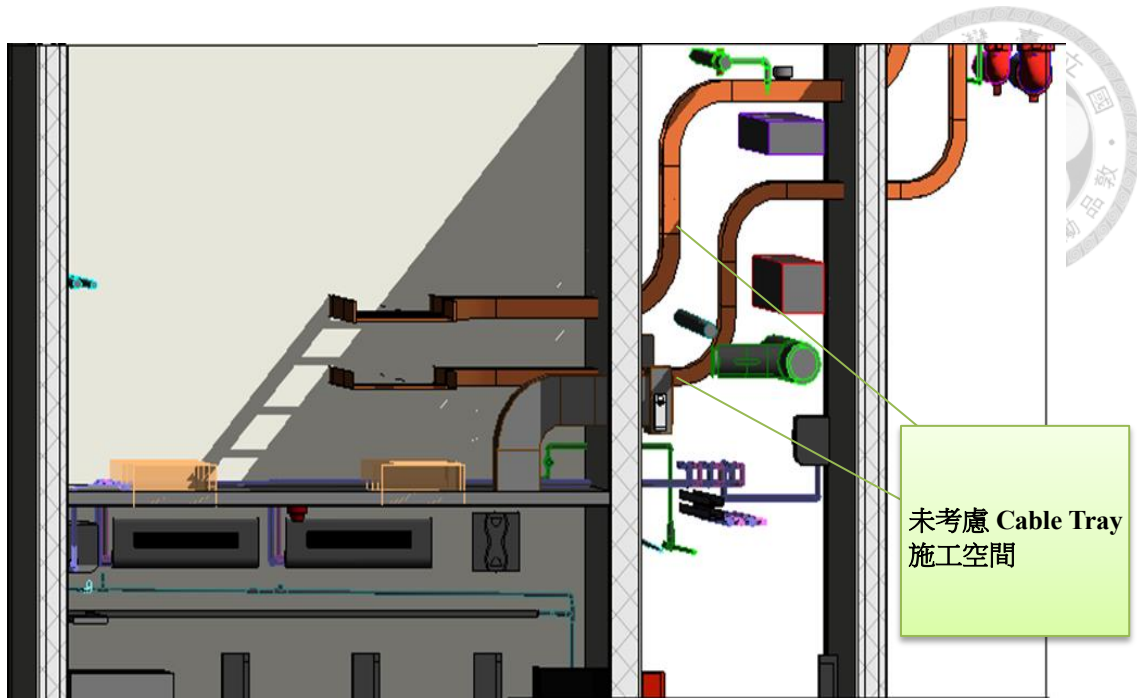
1. 需求單位 (通常是機電系統)透過介面需求表提出詳細介面需求，內容包括介面敘述、需求單位及配合單位雙方的工作範疇。
2. 召開介面會議確認此介面需求成立。
3. 配合單位納入 3D 設計模型並進行衝突檢測校核。
4. 設計成果經需求單位及配合單位雙方確認後簽署結案。
5. 設計成果送審

以上，施工前能完全解決衝突是非常重要的。尤其本案例在有限的平面空間下，MEP 管路以垂直多層次排列是必須的，因此管路配設高程的順序必須詳事先規劃以避免紛爭。綜整過去案例及觀察本實際案例，建議 3D BIM 作業模式下解決衝突的方法及程序如下，

- 
1. 依 MEP 管路的功能特性為檢討原則：由於有限的建築平面空間，重力流管線的坡度和流向須優先考慮、接著 HVAC 的大型風管、電纜線槽、消防系統管線、汙排水幹管，最後才是小尺寸以及可繞性的管路。
  2. 依 MEP 管路配設高程特性的考量原則：風管布置在最上方，電纜槽和水管在同一高度採水平分開布置，若在同一垂直方向時，電纜槽在水管之上方進行布置。水管類則以汙排水幹管優先在上層，接著消防系統及冰水管線檢討配設位置，在不影響結構安全下，兩者均需考量管路穿樑施工之可行性。
  3. 電纜線槽因體積較大，為避免影響結構體，均採樑下施工，並避免在各類水管下方。當電氣線路與水管及風管交錯時，應以爬升為優先處理原則，以避免漏水或冷凝水滴落而造成短路。
  4. 照明設備與泡沫噴頭應配合設置於風管下方，以不影響照度需求及消防檢查規定為原則。
  5. 小管避讓大管，造價低的管線避讓造價高的管線、施工簡單的避讓施工難度大的、新建管線避讓已建成的管線、臨時管線避讓永久管線。

設計整合階段落實上述原則，利用 BIM 的自動分析進行所有硬衝突校核，BIM 設計整合團隊定期進行施工性檢查並改善模型；施工團隊也隨時回饋工地現況分析與改善方案，施工前已大幅降低干涉碰撞與介面問題發生的機率。相關之 MEP 管線於 BIM 模型衝突整合前後如下圖 5-24, 5-25, 5-26, 5-27 所示。



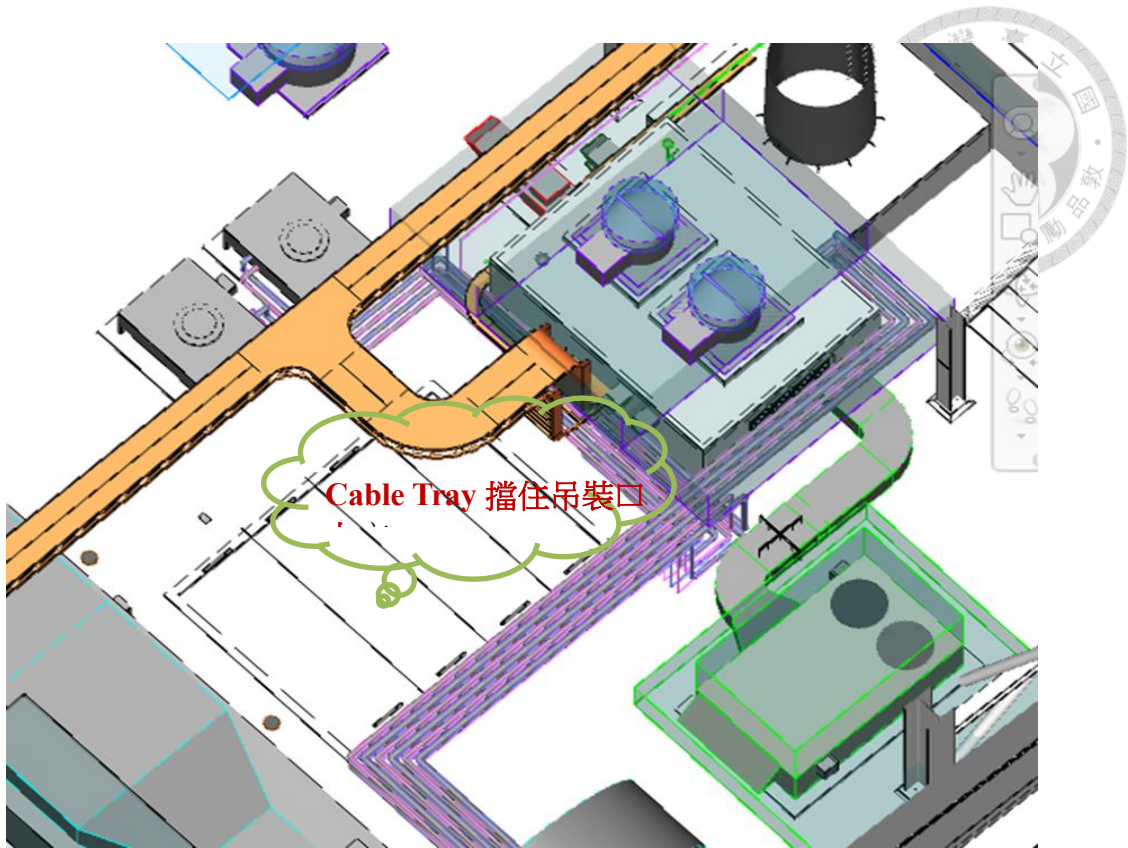


(a) 未考慮施工性之 Cable Tray 設計

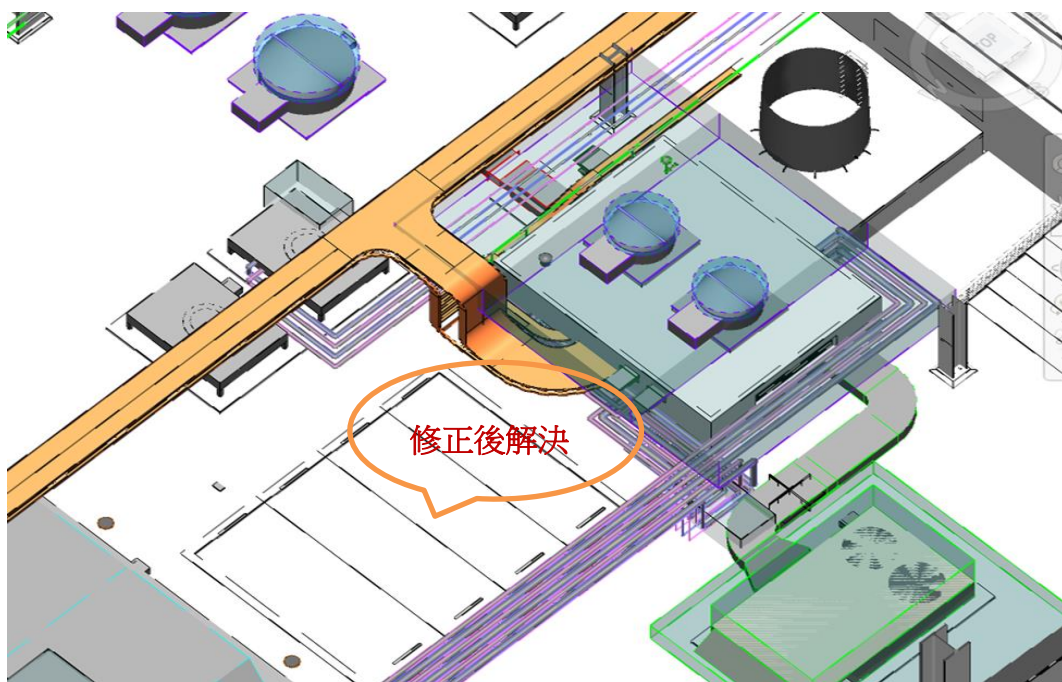


(b) 考量 Cable Tray 安裝與維修空間

圖 5-24 軟衝突偵測與解決 - Cable Tray 實例



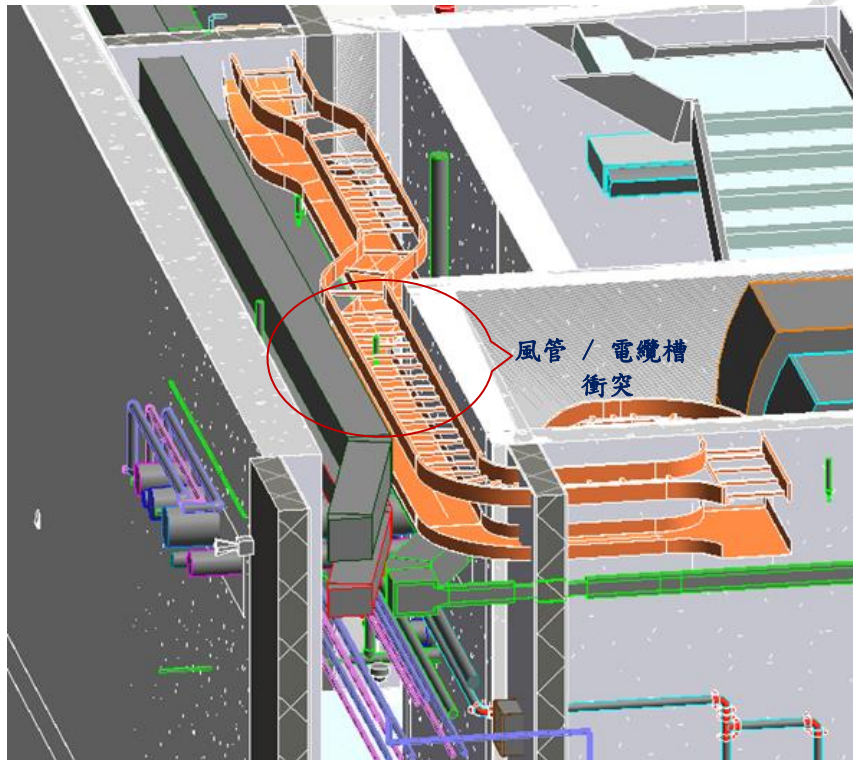
(a) 吊裝口上方未淨空，影響搬運動線



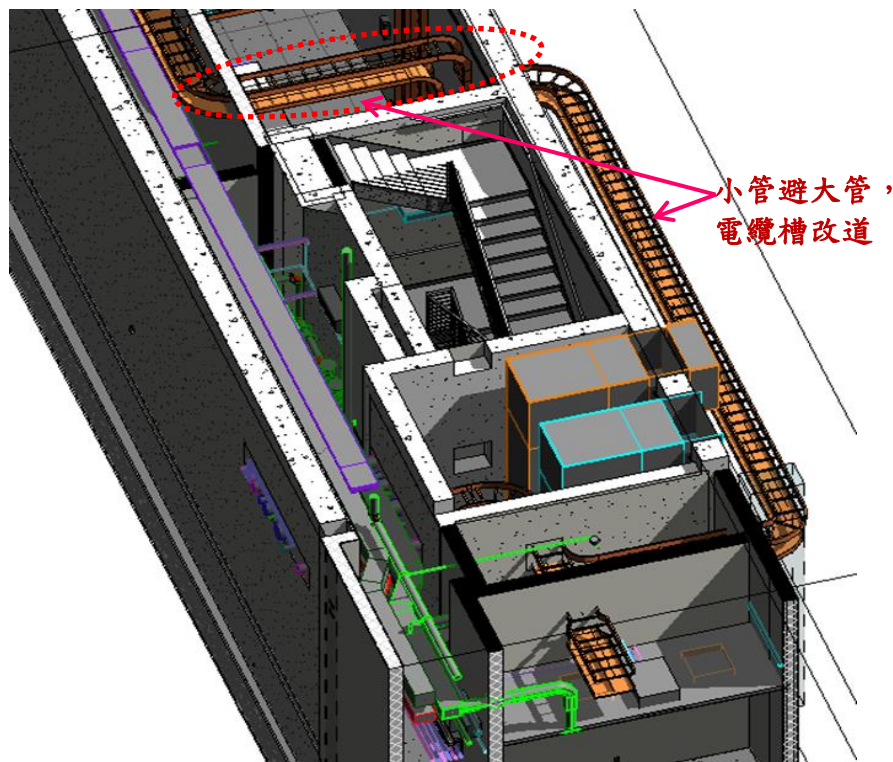
(b) 吊裝口上方動線保持淨空

圖 5-25 軟衝突偵測與解決 - 吊裝口實例



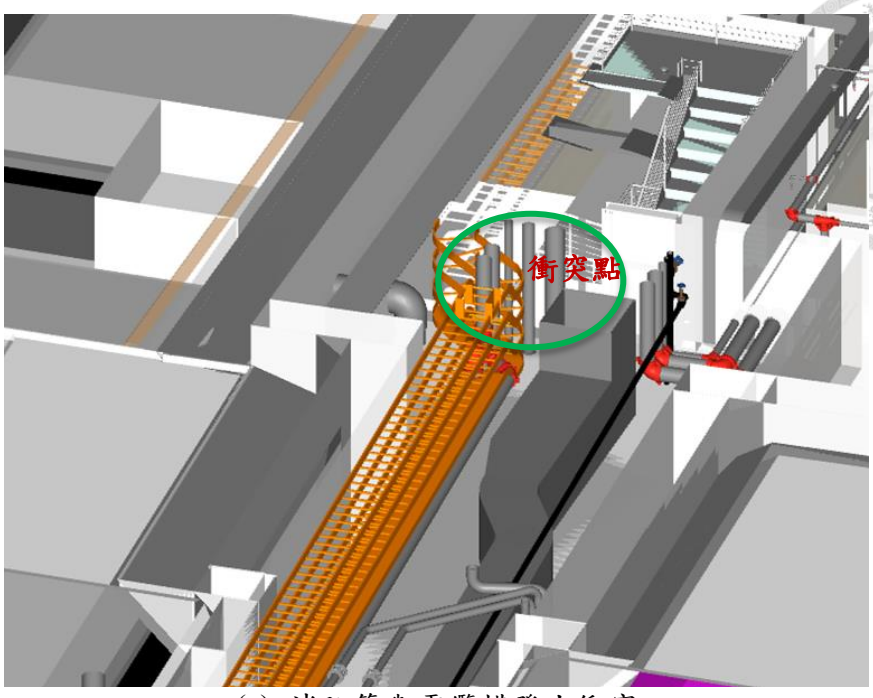
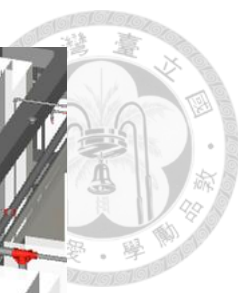


(a) 風管與電纜槽發生衝突

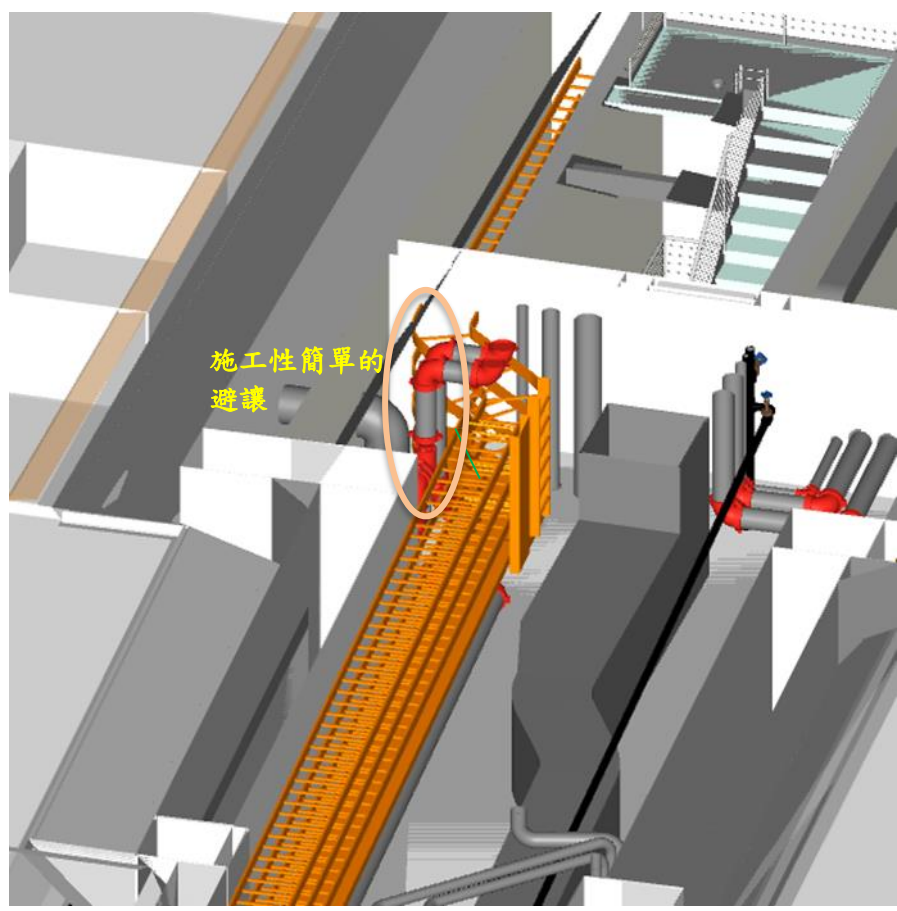


(b) 電纜槽更改路徑後解決衝突

圖 5-26 硬衝突偵測與解決 - 風管與電纜槽衝突



(a) 消防管與電纜槽發生衝突



(b) 消防管更改路徑後解決衝突

圖 5-27 硬衝突偵測與解決 - 電纜槽與消防管衝突





### 5.3.3 設計審核與成果交付分析

本分析案例依據不同階段 BIM 模型交付元件的 LOD 等級表，針對設計成果進行內部聯合審查會議，包括 IDR 會議 (Interactive Design Review)、Gate Review 會議。審查會議共同參與者包括專案核心團隊、介面單位、施工單位、獨立驗證單位、IV&V 以及不同設計中心交互審查等。專案團隊定期上傳未發佈的設計資料至 ProjectWise 資訊平台，分享各自負責的設計成果，除了不同設計團隊可互相借鏡外，已經展開施作的施工團隊亦可隨時流覽最新版的設計圖說，當發現問題可即時通知設計單位修正圖說以避免潛藏的設計疏失。其中為確保捷運機電系統設計之成果符合預期系統保證目標，配合各生命週期階段提送設計圖說以及系統可靠度 (Reliability)、維修度 (Maintainability)、系統安全 (Safety)、人因工程 (Human factor) 之設計準則、驗證計畫與分析報告。而營運人員與設施管理者的操作維護需求也藉由 3D 模型納入規劃設計，制定後續 MEP 設施管理的目標，成果藉由運轉維護計畫書呈現。

設計成果經整合確認所有的衝突已解決之後，正式上傳至 Aconex，內部審查單位透過 Aconex 這套在線系統來管理、儲存及循環審核專案所有的訊息與檔案，提供審查意見予設計者。依據既定時程，原設計者必須彙整及回覆各審查單位的審查意見並且重新上傳設計成果，包括更新版的設計圖說、零衝突檢測的報表、簽署結案的介面需求表、獨立驗證單位簽署核驗證明後才能將設計成果正式提送業主及外部審查單位審核。正式送審業主資料如：計算書、規格書、驗證計畫及報告、建築模型、結構模型、機電各專業的模型、景觀模型、整合模型的壓縮檔、衝突檢查報告、數量計算書、模型產出之 PDF 及 DWF file 圖說、操作及維護手冊等，透過 Aconex 系統正式提交給業主進行審查，審查單位填具審查意見表供設計單位配合回覆及修正圖說，經審查覆核後方可進入生命週期下一階段。設計審核流程詳如圖 5-28。

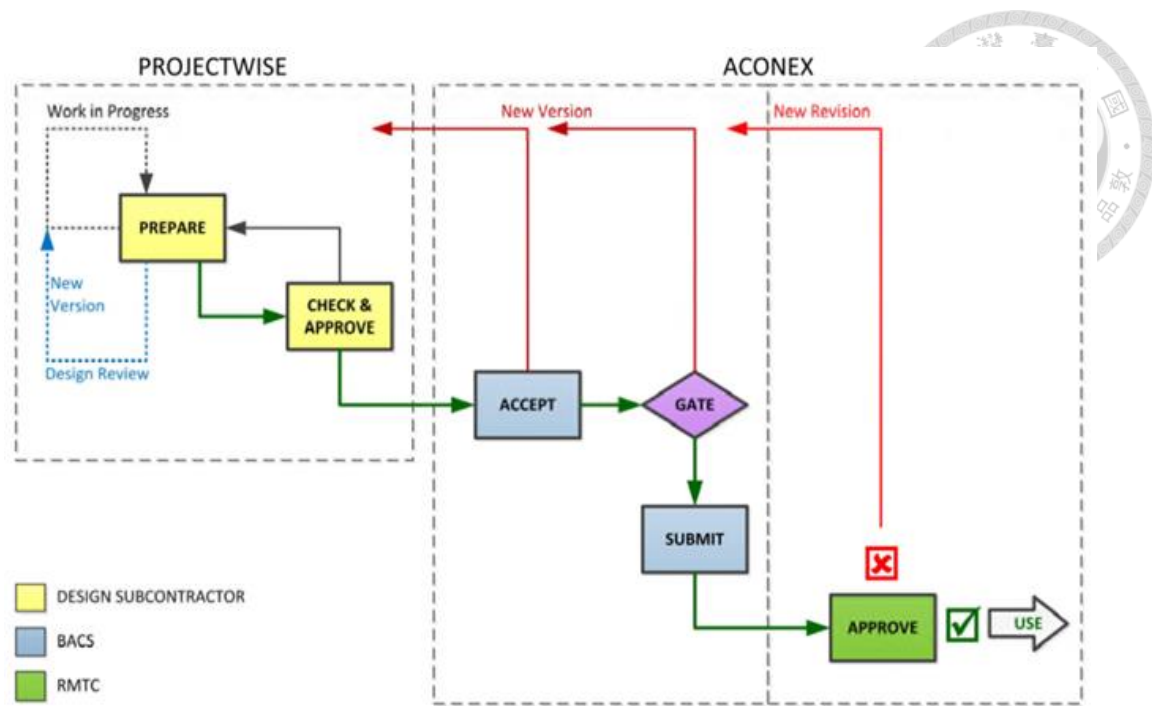


圖 5-28 設計審核流程  
(資料來源: 泰興工程, 2017)

本分析案例於專案初始階段由 BIM 核心團隊委託英國 CIC 單位 (Construction Industry Council) 針對專案目標並依據英國營建產業的標準- PAS1192、COBie、CIC BIM Protocol、NBS (National Building Specification) 來制定本專案的 BIM 執行計劃書。專案計劃書內容敘明；1. BIM 工作範圍與交付時程。2. BIM 組織與執行策略。3. 使用的軟體與檔案格式。4. 資料管理與交換平台。5. 各階段系統模型的 LOD 規定。6. 階段交付成果。

從細部設計階段開始分層建模且檔案依系統區分，建置完整之建築、結構、機械、管線、電氣、消防火警、照明、建築物管理等 3D 系統模型。每個修訂版次的設計變更都有完整的模型與數量計算，協助施工團隊於施工階段套匯施工圖、研擬潛在變更方案或廠商追加工程款之責任釐清。BIM 的競爭優勢之一在於促進專案成員間之資訊透明與共享，以致能節省資源 (採購、程序及材料)、規劃設計的工作更趨完善、施工設計的工作可提早進行、營運維護階段可應用 BIM 的資訊。

本案例於設計及施工階段依循 BIM 執行計畫書進行資訊建置與管理，配合建置中的建物管理系統 (Building Management System)，預期於興建完成時可快速整合大量的設計與施工資料，轉化成未來營運管理所需的資訊並完整地移交給業主。圖 5-29 為本案例之 MEP 設施維護資訊整合圖。

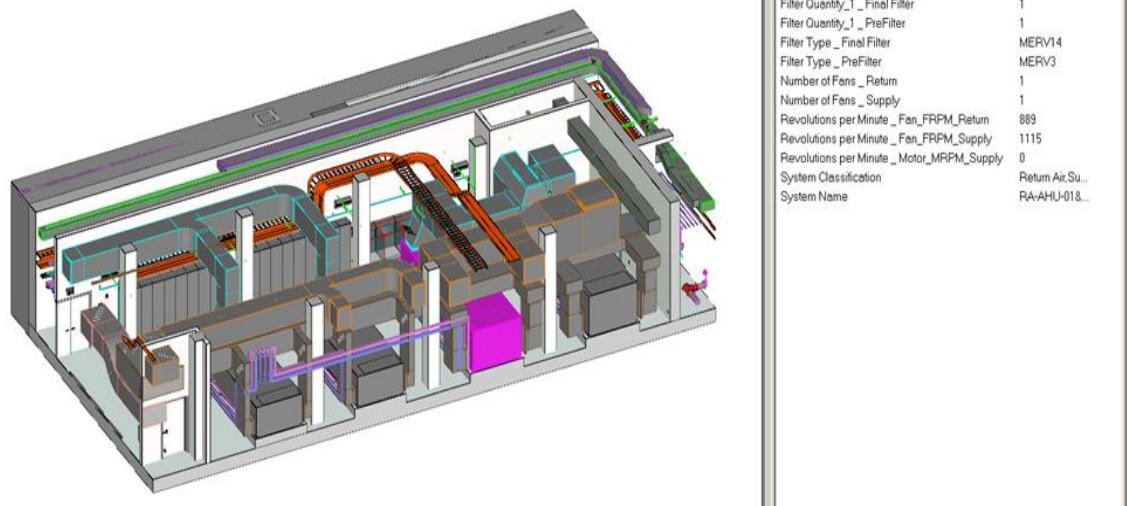


圖 5-29 MEP 設施維護資訊整合圖

(資料來源: 泰興工程, 2017)

## 5.4 定量分析 (BIM 成效的指標)

BIM 已從 3D 基本模型到 4D (3D +進度) 功能，更進一步發展到 5D (3D +進度+成本)，在設計階段已能預見施工階段的設計成果、預算成本與進度。應用 BIM 技術在於土建施工之前納入機電系統需求可正確地掌握數量計算、預作各項策略評估，減少重作業與設計變更等。回顧國內外針對 BIM 專案成效評估之研究，根據前述史丹佛大學設施整合中心的案例分析結果，使用 BIM 技術整體成效初步評估如下：1. 減少變更設計達 40%。2. 成本估算準確性誤差 3% 以內。3. 成本估算時間大幅減少 80% 以上。4. 檢討管線碰撞衝突，節約成本約 10%。5. 節省專案期程達 7% 以上 (CIFE, 2007; 黃世昌、簡國峯, 2014)。另外中興工程顧問公司比較性質類似的 A、B 兩座鋼鐵廠設計案，由於 BIM 3D 作業初始投資成本較高，因此初次成果交付時，3D 作業比 2D 作業之成本節省僅達約 11%，但隨設計作業次數增加，3D 作業累積成本節省效益大幅增加。當進行第四次設計作業時，累積成本效益比已可達 49% (林柏宏、邱韻祥, 2011; 黃世昌與簡國峯, 2014)。

許多方法已被開發來衡量 BIM 的導入程度與成熟度，例如資料包絡分析法 (DEA) 方法與關鍵績效因子 (KPI) 評估法，然以上兩種分析方法仍無法真正衡量 BIM 專案的效率。尤其 MEP 的整合目的在於避免設計變更的風險以及解決建築物

與設備元件之間的衝突，因此評估 BIM 應用的成效應該針對 3D BIM 技術的應用下設計變更的數量，以及物件之間隱藏或可能產生的衝突數量多寡。以下我們將透過本案例各階段整合成果的衝突數量分析，以及比較個案公司過去以傳統設計整合方式針對同性質、同規模專案之設計變更數量的分析，來驗證 BIM 技術導入本專案的成效。

#### 5.4.1 BIM 應用於 MEP 衝突檢測之效益

捷運工程涉及土木、建築、水電、環控及機電系統各類工程，規模比一般建築工程更為複雜。傳統 2D 套匯整合之衝突檢測及解決方式分析如下，

1. 土木工程與機電系統工程採分開招標，而土木工程包含站體水電、環控系統 (MEP) 部分是完成細部設計後再發包給承包商於施工階段才進行 2D 圖套匯及衝突檢測作業。而機電系統則由機電專業承商採設計兼施工方式依不同契約分階段進行，由於各機電承商之間因設計與施工時程不同，導致常未能緊密及即時配合 2D 圖套匯及衝突檢測作業。
2. 施工階段承包商依契約需求及機電整合圖說 (CSD) 來確認所有機電系統設備管路配置之可行性、施工性及設備管線安裝有無衝突。資深工程師依經驗檢核複雜的 2D 套繪圖說進行衝突檢測。
3. 承包商依據 CSD 圖說或以往的經驗進行套疊細設圖繪製成土木結構機電圖說 (SEM)，針對機電系統所需於牆壁、地板和樑柱之開口及套管、設備之混凝土基座、預埋管和幹管…等相關需求，以人工檢核衝突點。
4. 套匯結果發現衝突點存在時，所有相關單位透過召開界面協調會尋求解決方式，當系統龐大且建物有空間限制時，即使是相當有經驗的工程人員也很難精準的找出所有衝突點，整合過程耗費相當之人力及時間。
5. 各界面承商彼此無合約關係，面對衝突物件應由哪一方讓步很難有共識，因此時常造成介面爭議，施工前無法解決所有衝突點。

本分析案例 BIM 執行計畫書中規定，MEP 各專業分工之 3D 模型依據 60%、90%、100% 細部設計與 IFC 分階段交付時程配合建築、結構、MEP 模型碰撞檢測 (clash checking)，每階段均匯出詳細的衝突檢測報表 (clash check report)，供設計單

位進行設計檢討與改善，目標於期末設計成果提交業主審查之前解決所有衝突點，也就是施工階段之前已全數解決設計階段的衝突點。本案實際執行過程如下，




1. BIM 設計整合團隊定期提出各專業系統之間交互的 clash check report，供設計單位進行設計檢討與改善。
2. 依據功能性與施工性進行機電設備定位，而 MEP 管線配置順序與衝突解決原則依序為重力流管線→HVAC 大型風管→電纜線槽→消防管→給排水管等，設計階段已降低不必要的衝突發生。
3. 依據衝突檢測報表，BIM 整合者與機電工程師確認系統所需於牆壁、地板和樑柱之開口及套管、設備之混凝土基座和預埋管位置，確認與允許此類的衝突為開孔與預埋需求。

3D 模型配合設計時程不斷地檢討與修正，各階段衝突檢測數據結果如表 5-5 所示。

表 5-5 分階段設計碰撞檢測結果

		AS Station				SS Station					
Clash w/ MEPF		2G1	2F1	2C4	2C2	2E2	2E1	2D2	2C1	2B1	2A3
Current Progress		R-90%	R-90%	R-90%	R-90%	R-90%	R-90%	R-90%	R-90%	R-90%	R-90%
<b>Mechanical</b>											
Previous Week	Active+New	231	151	187	200	90	335	60	82	292	650
This Week	Active+New	182	152	193	0	90	255	62	246	237	0
	resolution %	21%	+	+	100%	flat	24%	+	+	19%	100%
<b>Electrical</b>											
Previous Week	Active+New	121	141	162	240	42	209	72	46	217	477
This Week	Active+New	124	141	175	0	42	209	68	85	168	0
	%	+	flat	+	100%	flat	flat	6%	+	23%	100%
<b>Plumbing</b>											
Previous Week	Active+New	146	87	138	0	0	119	80	82	194	124
This Week	Active+New	100	88	144	0	0	98	87	165	156	0
	%	32%	+	+	flat	flat	18%	+	+	20%	100%
<b>Fireprotection</b>											
Previous Week	Active+New	95	63	66	355	52	109	54	40	55	129
This Week	Active+New	72	63	66	0	52	95	53	57	74	0
	%	24%	flat	flat	100%	flat	13%	2%	+	+	100%
<b>Lighting</b>											
Previous Week	Active+New	39	55	57	62	65	29	2	19	14	10
This Week	Active+New	34	46	64	0	65	28	2	19	23	0
	%	13%	16%	+	100%	flat	3%	flat	flat	+	100%
<b>MEPF v MEPF</b>											
Previous Week	Active+New	134	345	307	408	74	448	116	119	376	677
This Week	Active+New	294	336	320	0	74	330	120	262	313	0
	%	+	3%	+	100%	flat	26%	+	+	17%	100%



分析各階段衝突檢測數據結果，顯示碰撞數量與整合次數並無相對關係，例如原本上周紀錄為 20 處，可能到下次碰撞整合時又新增 195 處，原因是本案例採土建系統與機電系統同步設計與建模，上游的土建系統還在設計整合階段，尤其建築空間常因業主意見、介面單位需求或現場環境變更下無法及早定案，建築模型一旦修正有如長鞭效應般，下游的結構以及 MEP 模型則需重新調整來解決新增的碰撞數量。因此設計整合階段的詳細碰撞數據僅可協助整合者查核系統整合是否完整，確保在正式提交業主審查之前解決所有碰撞點，尚無法真正利用該數據分析出 BIM 使用的效益。表 5-6 更進一步顯示 MEP 衝突檢測數據分析與匯出報告。

另外，回顧 Lee and Kim 分析比較 MEP 依序整合策略以及同時進行整合策略，他們提出依照順序進行的 MEP 建模與整合方式比 MEP 並行整合的效率快約三倍。由於該案例並沒有同時考慮細設顧問進行 2D MEP 設計圖說的時間，且該案例認為並行整合的方式沒有足夠的訊息或模型可用來檢查是否彼此干涉導致整合工期比依序整合策略長。反觀本分析案例，屬於同一設計單位的 MEP 團隊從設計階段採用同步進行 3D 建模與整合流程，然機械、電氣與管線各專業模型透過同一資訊平台即時分享所需的資訊且透過模型可隨時檢查彼此之間的干涉，加上節省 2D 設計圖轉匯成 3D 模型時間，因此本專案採用 BIM 技術是能真正預期在設計成果交付及施工前所有物件碰撞數量能有效的控管及解決。



表 5-6 衝突檢測數據分析與匯出報告

Date	Station	Disc.	Code	New	Active	Ongoing
19/Dec/2016	2E2	MEPF	2E2MEPF42723	1	40	41
30/Dec/2016	2E2	MEPF	2E2MEPF42734	75	0	75
6/Jan/2017	2E2	MEPF	2E2MEPF42741	0	74	74
13/Jan/2017	2E2	MEPF	2E2MEPF42748	0	74	74
20/Jan/2017	2E2	MEPF	2E2MEPF42755	0	94	94
26/Jan/2017	2E2	MEPF	2E2MEPF42761	4	37	41
10/Feb/2017	2E2	MEPF	2E2MEPF42776	2	無關聯性的 碰撞數據	6
17/Feb/2017	2E2	MEPF	2E2MEPF42783	18		20
24/Feb/2017	2E2	MEPF	2E2MEPF42790	95		195
3/Mar/2017	2E2	MEPF	2E2MEPF42797	29	193	222
10/Mar/2017	2E2	MEPF	2E2MEPF42804	8	12	20
17/Mar/2017	2E2	MEPF	2E2MEPF42811	1	55	56
24/Mar/2017	2E2	MEPF	2E2MEPF42818	0	0	0

解決所有衝突點

Name	Status	Clashes	New	Active	Reviewed	Approved	Resolved
2E2 Electrical vs MEPF	Done	6	0	6	0	0	0
2E2 Fire Protection vs MEPF	Done	0	0	0	0	0	0
2E2 Lighting vs MEPF	Done	3	0	3	0	0	0
2E2 Mechanical vs MEPF	Done	8	2	6	0	0	0
2E2 Plumbing vs MEPF	Done	3	2	1	0	0	0
MEPF vs MEPF	Done	6	2	4	0	0	0

### 5.4.2 BIM 應用改善變更設計之效益

工程會公布 99 年至 101 年一億元以上約 3,200 件國內公共工程標案，其中曾辦理變更設計者高達 65.30%，尤其以捷運工程之變更設計甚為頻繁，一個工程標案可能包括數次變更。依據工程契約屬性，傳統捷運工程變更分為細部設計契約變更案與施工標契約變更案，接下來針對本分析案例個案公司執行規模相當之捷運工程，探討其以傳統設計整合模式之設計變更數量與全生命週期導入 BIM 技術的本案例來做比較與說明。案例一為捷運松山線區段標工程歷次的契約變更案；案例二為興建中的環狀線捷運工程區段標工程歷次的契約變更案，目前統計累計之追加金額已超過原合約金額的 2.4 倍，詳細變更數量分析彙總於下表 5-7。

表 5-7 變更設計分析一覽表

變更案由	案例一 累計變更次數 (已完工)	案例二 累計變更次數 (工程進度約 78%)	本案例 變更次數 (工程進度 達 48%)
業主需求之變更	72	35	24
原合約工程項目(實做數量增減)	52	26	0
施工標契約變更新增項目	96	52	0
細部設計服務工作契約變更	46	5	0
前置作業調查疏失或延誤	6	15	0
其他	13	6	0
合計	285	139	24

變更設計之類型分為 1. 業主指示變更 2. 異常工地條件 3. 情事變更。傳統工程標案係依契約及設計圖說施作及執行，故如因業主需求變更、遭遇天災、法令修正、依現場狀況局部調整、設計圖說不一致、數量計算錯誤、展延工期及人民陳情等因素均需辦理變更設計，尤其是工期較長之大型工程，更常遇此情形。上述變更設計原因中，以前置作業調查疏失或延誤（含管線、路權、地質及用地等）、數量計算錯誤、漏列或不符現況及設計圖說不一致等因素，屬於可事先防範事項。

分析上述案例一、二之變更設計原因如下：

1. 因既有結構、管線或地質調查不足，致施工開挖後才發現現場狀況與原先設計之條件不同，導致施工單位辦理設計變更。
2. 由於專業系統分包商之合約工程進度不同，常因任一設計構件無法互相確認，影響工程進度與契約執行的困難導致變更設計頻繁。
3. 同一承攬合約包括已設計完成的土木工程與尚未設計的機電工程，為了符合機電規範，承包商提出大量的土木工程變更。
4. 傳統估算方式以人工從 2D 圖檢出設計數量，易發生漏列導致新增工程項目的契約變更。依據表 5.7 數量分析顯示，此項變更案件比率占總量之 30% 以上。
5. 傳統 2D 圖說套繪結果，施工期間相關單位提出疑義澄清給設計單位，由於施工單位與細設單位並無合約關係，往往需透過業主或總承包商確認後才召開會議，加上釋疑文件內容繁多與認知差異，當爭議無法順利經由疑義澄清程序解決將導致施工單位提出工程施作的變更。



分析本案例應用 BIM 流程，執行狀況如下：

1. 應用 3D 雷射掃描方式，提供現地之既有管線、結構物外觀與外型資料，將所有掃描資訊轉換成點雲，並透過點雲資訊建置成 BIM 模型作為設計基礎，將設計與真實現況連接以避免未來施工階段發生介面衝突及變更。
2. 設計階段應用 BIM 技術同步納入相關介面系統的需求，並於最終設計階段簽署界面需求書以確保系統整合的完整性。
3. 土木與機電工程同步設計與建模，機電規範的需求在設計階段已納入考量，無土木與機電設計時程差異的問題。
4. 針對業主提出或施工階段發生之潛在變更 (Change Notice) 需求，藉由設計單位所提供完整的 3D 模型可快速模擬並提出設計方案供業主確認與審核，儘速完成變更程序以利後續工進。
5. 已建立 LOD 300 之 BIM 模型可供 Revit 及 QTO 自動提取數量、計算及量測，且數量計算資訊隨時與設計保持一致，當後續有任何變更可連動調整相關的資訊。
6. 本專案的設計單位與施工團隊從設計階段就協同作業保持互動關係，加上工程採邊設計邊施工的方式，施工單位針對有疑慮的施工設計圖說透過疑義澄清 (RFI) 之內部程序，經由電子文件之形式提出與設計單位進行澄清，RFI 與 FCD 文件必須經設計單位正式簽署回覆後方能結案。經分析本案例 RFI 的數量在設計初期相當的多，原因是施工單位對設計細節、施工方式與規範不熟悉，加上承包商所繪製的施工圖也全數以 RFI 方式提出給設計單位確認。隨著設計的進行以及設計單位在最短時間內提供釋疑，RFI 數量隨即大幅減少，顯示 BIM 技術的應用已改善施工階段疑義澄清的效益。下圖 5-30 表示 RFI 與內部設計變更 FCD 數量趨勢圖，其中內部潛在設計變更數量相當的少。

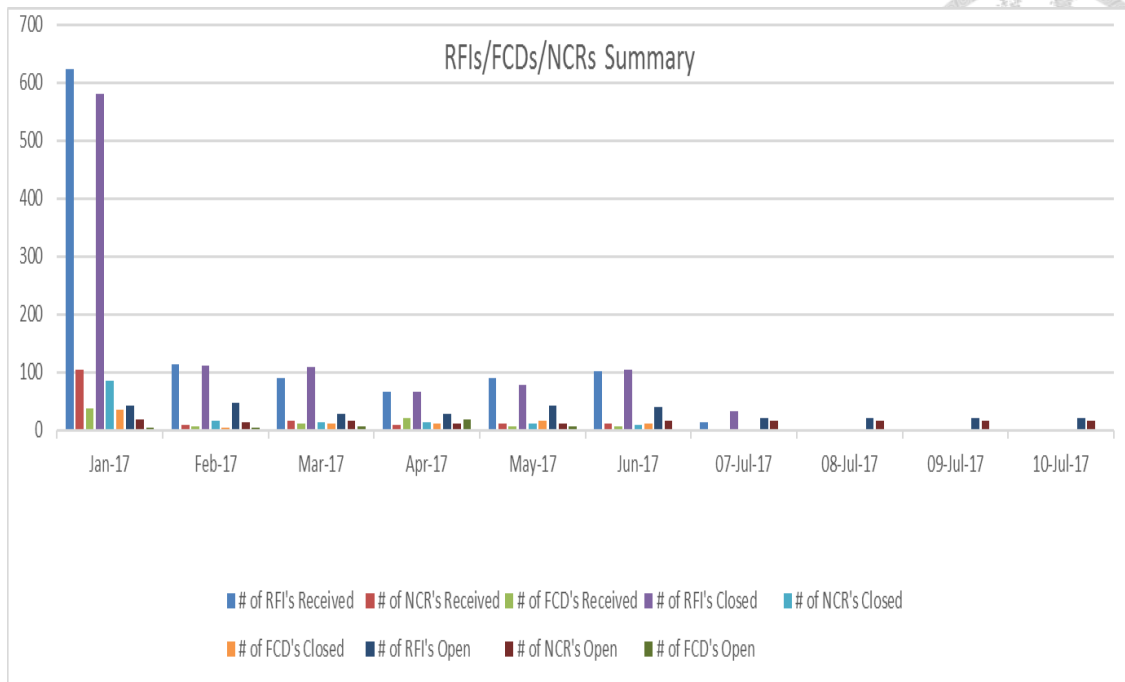


圖 5-30 內部疑義澄清與設計變更趨勢圖

由於國內公共工程規劃、設計階段所投入之時間與成本相對於其他生命週期較低，因而常發生規劃不完善、與現況條件不符無法施作，導致變更設計案件相當頻繁，且變更金額也因工程造價與規模逐年擴大而提高，甚至高達原工程契約之 20% 至 200% 以上。

傳統辦理工程變更程序所需時間往往較長，且現場施工涉及契約規範之限定，在未完成程序之前，構型現況無法隨著變更辦理過程而即時更新。本案例至目前 2017 年仍在進行中，確切的設計變更數量尚無法得知，但絕對可以肯定的是，由於專案團隊善用 BIM 技術的優勢並應用於施工圖面繪製、疑義澄清與預留變更設計機制，在施工前已加速解決問題並減少施工階段的設計變更率。

## 5.5 小結

3D BIM 技術的核心並非 BIM 軟體，而是運用 BIM 軟體來執行專案的規劃、設計、預算、審核、施工與營運管理的 BIM 專業團隊，唯有專職的 BIM 團隊方能讓專案發揮其更大的效益。

傳統工程變更案件易發生的高峰期往往在最終設計審查階段及施工前，儘管本案例未按照原計畫於概念設計階段即進行建物需求分析與設計方案選擇，從細

部設計階段開始全面應用 BIM 技術，以 3D 視覺化的優勢達到傳統 2D 整合流程所達不到的效益，例如導入點雲掃瞄資訊，避開既有管路或提早協調進行遷移已降低圖面錯誤發生之機率、降低干涉碰撞與介面問題、縮短與審查者溝通的時間、減少工程釋疑與評估變更需求的時間，預留變更設計的彈性。

BIM 導入使傳統之分工方式界線變得模糊，改變了專案團隊之間的責任、義務與風險分配的關係，設計單位承擔更多的風險與責任。因此，理想的 BIM 專案應於初始階段即制定工程的生命週期、相關標準、軟體工具、資訊交換格式、擬訂設計階段建模與交付範疇、施工階段工作範圍與營運管理階段之工作範圍供 BIM 團隊於生命週期各階段遵循。而邊設計邊施工的作業模式也充分發揮了統包專案運用 BIM 執行的精神，在施工前已全數解決物件碰撞問題，施工後減少疑義澄清以及變更設計數量。

## 第 6 章 結論與建議



### 6.1 結論

本研究主要係以設計及建置中的大型 EPC 捷運新建案例，探討其 MEP 設計整合流程應用 BIM 技術以及整合專案 (IPD) 概念，嘗試擬訂出具效益的設計整合流程。實際執行後發現，BIM 導入是設計整合流程改革，不論是各專業間的相互關係或計畫執行的先後順序，都帶來全新的思維。捷運工程各專業分工細密、介面繁多，若能於初期規劃階段即導入 BIM 作業，即使設計階段之工時與費用較高，預期將可大幅提升相關專業介面間之整合效率，減少施工階段之糾紛爭議與變更設計機率，進而縮短工期與提升工程整體品質。而理想的 BIM 執行模式，應於專案初始依據建築物的生命週期制訂出相關標準、軟體工具、資訊交換格式、成果交付內容以及擬訂設計階段、施工階段與營運管理階段之工作範疇供 BIM 團隊於生命週期各階段遵循。

本研究之結果總結如下：

1. 機電工程與土建工程結合的 EPC 專案已成為捷運工程承包的主要模式，而 BIM 技術的分工建模、協同設計整合能力大幅減低介面爭議與成本，正是得以發揮 EPC 專案邊設計邊施工的優勢。
2. BIM 技術有利於事前規劃與溝通協調，建議於工程生命初始即概念設計階段即導入 BIM 進行功能需求、設計方案選擇與施工性考量，所付出的成本最低，卻是成本效益回收最高的階段。
3. BIM 技術應用於施工性分析的回饋設計方式，在施工前已解決疑義澄清與衝突點，施工後大幅減少變更設計數量。
4. MEP 設計整合策略會影響大型專案執行的效率，應用 3D BIM 技術於不同生命週期之設計整合流程為：
  - (A) 概念規劃階段：以 BIM 系統來進行基地現況分析與設計方案選擇，設計須符合建築物的功能性、需求性、施工性與未來營運維護性。
  - (B) 細部設計階段：依據空間需求與用途，設計整合需符合空間配置、功能性、其他系統介面需求、施工性與解決物件衝突。



- (C) 施工設計階段: 規劃完整施工動線、材料/機具存放位置、設備進場時程、施工工序、施工位置、施工方式與工班排程等。
- (D) 施工階段: 施工團隊與 MEP 專業分包商依據已施作的現況與相關的竣工圖來繪製 MEP 的預鑄加工及竣工模型。
5. 傳統捷運標案之變更設計案件其追加預算高達總預算 20% 至 200%，以現地調查疏失、設計數量計算錯誤、漏列或不符現況占變更數量 30% 以上。藉由全生命週期 BIM 流程的導入，於設計階段可避開既有管路且提早進行遷移；Revit 模型及 QTO 自動提取精準數量、計算及量測，已顯著改善計算錯誤及漏項之缺失。
  6. 針對業主提出或施工階段發生之潛在變更設計，藉由完整的 BIM 模型可快速模擬並提出設計方案供業主確認與審核，加速完成變更程序以利工進。
  7. BIM 導入使傳統之分工界線變得模糊，改變了專案團隊之間的責任、義務與風險分配的關係。因應建模與整合需求，MEP 設計階段的工時與設計顧問費用要比傳統 2D 設計方式提高許多，設計單位承擔更多的風險與責任。
  8. MEP 管線在 3D BIM 作業下解決衝突之優先順序是 1. 依據管路的特性依序為重力流管線>HVAC 大型風管>電纜線槽>消防系統管線>汙排水幹管>小尺寸以及可繞性的管路。2. 依據管路配設高程依序為風管最上方>電纜槽>各類水管。

## 6.2 具體成果與貢獻

現代化的建築專案愈來愈具高專業性與複雜度，尤其在執行系統最龐大、最新技術且最複雜的捷運機電系統規劃、設計、施工作業中，要成功地達成整合及避免介面衝突發生是非常具有挑戰性的。經由本研究探討得知，專案團隊除需具備良好之機電基本專業知識外，採用 BIM 技術並配合適當的設計整合流程與發包策略可以大幅降低衝突點與設計變更數量，對於工程品質與成本的管控有極大的助益。不可諱言，採用 BIM 技術的初期設計費用較高，軟體費用、建模與檢討會議所衍伸的費用可能造成承包商向業主追加金額或糾紛爭議，但可預期的是隨著 BIM 技術更加普及，設計作業次數增加，累積經驗的 BIM 團隊反而會因效率提高而減少設計工時與費用。




本研究主要的貢獻：

1. 本研究提出應用 3D BIM 技術之 MEP 設計整合流程，可作為未來執行 BIM 專案的策略選擇。
2. 證明 BIM 技術的分工建模、協同設計整合能力正是得以發揮 EPC 專案邊設計邊施工的優勢以及提供施工階段變更設計的彈性與機制。
3. 3D MEP 設計階段承擔的工時、風險與責任要比傳統 2D 設計方式提高許多，提供未來估價階段需釐清工作範疇與提高工程設計階段費用的參考。
4. 提出概念規劃階段運用 BIM 進行功能需求、設計方案選擇與施工性考量，所付出的成本最低，卻是成本效益回收最高的階段。
5. 證明 BIM 技術應用於施工性分析的回饋設計方式，在施工前已解決疑義澄清與衝突點，施工後減少變更設計數量。

### 6.3 建議

雖然 Revit 軟體在國內市占率首屈一指，但模型量體龐大時就必須考量其執行效能仍有許多瓶頸。依據本案例的經驗，隨著設計內容愈複雜，MEP 模型檔案就愈來愈大，可能開啟一個模型檔案就要花數分鐘以上，建模時每轉一次視角就要等 10 秒鐘，同時開啟土建、機電整合模型檔案往往要等數十分鐘以上，對於建模人員來說是一件非常困惱的事情，因此軟體工具選擇應依循專案特性、建築物用途、業主的需求為優先考量，若碰到大型專案時建議模型還是要適當的分割以確保整體的執行效率。

有鑑於本案的經驗，當建築設計未定案時，常常牽一髮而動全身，結構模型以及更下游的 MEP 模型須不斷的配合衝突檢測修改模型，重複作業與協調會議次數不斷增多，加上邊設計邊施工的需求，專案團隊承擔更多的風險與責任。許多文獻也曾指出，錯誤是會蔓延的，一個錯誤常導致既有正確的設計變成有問題，也就是所謂的長鞭效應 (H.L.Lee et al. 1997; R. Boute et al. 2007)。長鞭效應是指在根部的一端只要有一個輕微的抖動，傳遞到末梢端就會出現很大的波動。因此建議建築團隊須扮演好領頭羊的角色，從最初概念階段利用 BIM 工具進行評估與分析建築設計方案，在進入細部設計階段之前提早定案，方能省下重複作業與協調時間。



英、美等先進國家在 BIM 產業推動發展上，政府具有成敗決定性的影響力。反觀國內政府在推動 BIM 技術的力道仍嫌不足，目前國內使用 BIM 技術大都處於發展嘗試階段以 3D 建模導入細部設計及施工階段為主，而 BIM 設備元件的建置需花費大量的工時與成本。本案例的經驗，為避免各設計單位重複建置標準不一的設備元件，BIM 整合中心於專案初始先行建立一套設備元件庫，分散全球各地的設計中心依序補充與提供意見，最後正式頒布經整合過的版本供設計中心共同使用。建議政府可以參考此例，由公部門帶頭先行建立模型統一標準或提供共通的模型供業界使用，除了統一標準外也能避免資源重複浪費，降低成本。

BIM 的優勢在於協同作業與資訊分享，為了達到最好的效率，除了專案規模、成本以及使用目的外，仍須考量當地環境與產業文化的成熟與配合度，所有專案團隊都必須接受並且應用 BIM 技術一起合作。以本案例為例，協同作業的成功與否有賴於環境配套，包括完善的組織文化與管理，軟硬體的擴充與資料庫支援，高速的網路、網路安全性與持續支援需納入規劃流程，在整個生命週期，提供持續的支援與維護。儘管初始投資成本較高，但隨設計次數增加，先行建立之標準與模型可供後續案例使用，3D 作業累積成本效益亦大幅增加。然而部分工程人員習慣既有的設計與整合方式，難以接受新方法，使得 BIM 執行效率大打折扣，加上各單位對相關責任義務與風險之重新分配尚無共識，也成為 BIM 導入後之新問題。建議企業先建立 BIM 組織，培養技術人才，利用教育訓練提升員工的 BIM 專業，重新檢討與制訂出專案成員於各生命週期應擔負的責任範疇，為迎接 BIM 專案做好準備。

## 6.4 研究限制

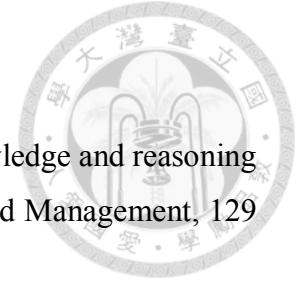
1. 在本研究中，MEP 設計階段的工時與設計顧問費用要比傳統 2D 設計方式提高許多，然而這可以根據任用不同資歷的工程師與建模者而有所變化。
2. BIM 技術的導入改變傳統專案團隊之間包括業主、設計單位、施工承商，甚至與保險公司的工作範疇、責任與風險等問題，後續研究者據此可作為延伸探討。
3. 本案例將土建設計與 MEP 設計同步進行，原因是土建與機電工程人員位於同一辦公室的優勢，應用 BIM 的協同作業平台可隨時模擬及修正模型以配合尚



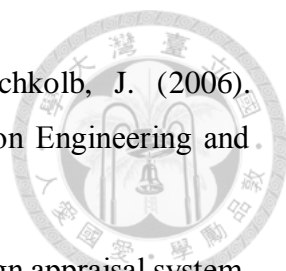
未取得業主核可的建築設計。建議後續的研究者據此可作為後續探討一般業界所依循的依序設計整合與同步設計整合之優劣分析。

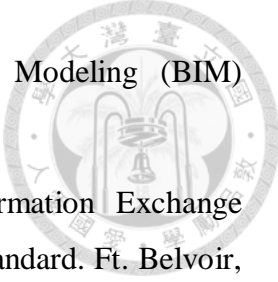
4. 本案例至目前 2017 年仍在進行中，確切的設計變更數量與最終成本效益尚無法驗證，建議後續的研究者據此作為後續探討全生命週期 BIM 技術對於 EPC 專案的實質效益。


## 參考文獻



1. Korman, T. M., Fischer, M. A., and Tatum, C.B. (2003). "Knowledge and reasoning for MEP coordination." *Journal of Construction Engineering and Management*, 129 (6), 627-34.
2. Korman, T. M., Simonian, L. and Speidel, E. (2010). "How building information modelling has changed the MEP coordination process." In Ghafoori (Ed.) *Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction*, Taylor & Francis, London, 959-63.
3. T.M. Korman, CB Tatum, *Development of a Knowledge-Based System to Improve Mechanical, Electrical and Plumbing Coordination*, Stanford University, Stanford. CA, 2001.
4. T.M. Korman, CB Tatum, *MEP Coordination in Building and Industrial Projects*, Stanford University, Stanford. CA, 1999.
5. Khanzode, A. Fischer, M., and Reed, D. (2008). "Benefits and lessons learned of implementing building virtual design and construction (VDC) technologies for coordination of mechanical, Electrical, and plumbing (MEP) systems on a large healthcare project." *ITcon*, 13, 324-42.
6. Ghang Lee, Jonghoon "Walter" Kim. "Parallel vs. Sequential Cascading MEP Coordination Strategies: A Pharmaceutical Building Case Study" *Automation in Construction* 43 (2014) 170–179
7. Trigunarysyah, B. (2004a). "A review of current practice in constructability improvement, case studies on construction projects in Indonesia." *Construction Management and Economics*, 22 (6), 567-80.
8. Trigunarysyah, B. (2004b). "Constructability practices among construction contractors in Indonesia." *Journal*.
9. Trigunarysyah, B. (2004c). "Project owners' role in improving constructability of construction projects, an example analysis for Indonesia." *Construction Management and Economics*, 22 (8), 861-76.

- 
10. Pocock, J. B., Kuennen, S. T., Gambatese, J., and Rauschkolb, J. (2006). "Construability state of practice report." *Journal of Construction Engineering and Management*, 132 (4), 373-83.
  11. Poh, P. S. H. and Chen, J. (1998). "The Singapore buildable design appraisal system, a preliminary review of the relationship between buildability, site productivity and cost." *Construction Management and Economics*, 16 (6), 681-92.
  12. Low, S. P. (2001). "Quantifying the relationships between buildability, structural quality and productivity in construction." *Structural Survey*, 19 (2), 106-12.
  13. Low, S. P. and Abeyegoonasekera, B. (2001). "Integrating buildability in ISO 9000 quality management systems, case study of a condominium project." *Building and Environment*, 36 (3), 299-312.
  14. Hartmann, T. and Fischer, M. (2007). "Supporting the constructability review with 3D/4D models." *Building Research & Information*, 35 (1), 70-80.
  15. Eastman, C., Teicholz P., Sacks R., Liston K.(2011). *BIM handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
  16. Jun Wang, Xiangyu Wang, Wenchi Shou, Heap-Yih Chong, Jun Guo (2016). "Building information modeling-based integration of MEP layout designs and constructability" *Automation in Construction* 61 (2016) 134 – 146.
  17. Staub-French, S. and Khanzode, A. (2007). "3D and 4D modelling for design and construction coordination, Issues and lessons learned." *ITcon*, 12, 381-407..
  18. Ping Yung, Jun Wang, Xiangyu Wang , Ming Jin (2014). "A BIM-ENABLED MEP COORDINATION PROCESS FOR USE IN CHINA" *Journal of Information Technology in Construction - ISSN 1874-4753*.
  19. Liu, H., and Zhang, L. (2014) "Lessons Learned from Case Projects and Enterprises Where BIM Was Utilized", in J. Wang et al. (eds.), *Proceedings of the 17th International Symposium on Advancement*.
  20. H.L. Lee, V. Padmanabhan, S. Whang, The bullwhip effect in supply chains, *Sloan Manag. Rev.* 38 (3) (1997) 93 – 102.

- 
21. Construction Industry Council, 2013. Building Information Modeling (BIM) Protocol, CIC/BIM Pro, first edition 2013.
22. East, E. W., 2007. Construction Operations Building Information Exchange (COBIE): Requirements Definition and Pilot Implementation Standard. Ft. Belvoir, Defense.
23. Building and Construction Authority, 2013. Singapore BIM Guide, version 2.
24. AIA/AGC BIM Forum 2013 Level of Development Specification.
25. The American Institute of Architects (2007). Integrated Project Delivery: A Guide, version 1.
26. National BIM Standard-United States Version 2 (2013).
27. AEC (UK) BIM Standard for Autodesk Revit v1.0 (2012).
28. Nima, M. A., Abdul-Kadir, M. R., Jaafar, M. S., and Alghulami, R. G. (2002) . Constructability Concepts in West Port Highway in Malaysia, Journal of Construction Engineering and Management, 128 (4) , pp. 348-356.
29. Santos, E. T., and Ferreira, R. C. (2008). “Building design coordination, Comparing 2D and 3D methods.” CIB W78 – 25th International Conference on Information Technology in Construction, July 15-17, Santiago, Chile.
30. Pavitt, T. C. and Gibb. A. G.F. (2003). ” Interface management within construction: in particular, building façade,” Journal of Construction Engineering and management, vol. 129, no. 1, 2003”.
31. CIFE, 2007. “Stanford University Center for Integrated Facility Engineering,” CIFE Technical Reports.
32. Construction Industry Institute (2006). Constructability Implementation Guide, Second Edition, 2.01 – Constructability, CII Online Education Courses.
33. Alcorn, T., & Wirdzek, P. (2013). BIM: Sustainable design and management for building owners. Journal of National Institute of Building Sciences, 1(4), 14-16.

- 
34. MEI LIU (2013). THE APPLICATION OF BIM AND IPD IN PUBLIC DESIGN AND CONSTRUCTION. POLYTECHNIC INSTITUTE OF NEWYORK UNIVERSITY.
35. H. Ping Tserng, Y.L. Yin, Edward J. Jaselskis, Wu-Chueh Hung & Yi-Chieh Lin (2011). “Modularization and assembly algorithm for efficient MEP construction” Automation in Construction 20 (2011) 837–863
36. 戴期甦、陳曉晴與郭斯傑 (2007)。建築工程機電系統施工界面整合之探討，中華民國建築學會「建築學報」第 61 期，43~62 頁，2007 年 9 月。
37. 邱垂德、劉得廣、余文德與劉沈榮(2014)。台灣地區現行 BIM 專案之交付成果探討，營建管理季刊 99 期:35-53。
38. 范素玲、沈裕倫與洪崇璋 (2013)。BIM 導入後衍生的新問題，中國土木水利工程學刊 第二十五卷 第三期:257-264
39. 林佑正、陳維東與黃盈樺(2014)。BIM 於物業管理之運用，物業管理學報 2014 年春季號 第五卷 第一期:77-82。
40. 蘇瑛敏、張詠翔 (2015)。新世代臺灣物業管理發展趨勢：BIM 整合設施管理之研究，物業管理學報 2015 年 春季號 第六卷 第一期:1-12。
41. 黃世昌、簡國峰 (2014)。BIM 工程專案績效評估架構之研究，營建管理季刊 98 期:1-12。
42. 英國政府運用 BIM 於公有建築使用階段之策略，  
<https://www.abri.gov.tw/tw/research/dl/2540/1> 搜尋日期：2017 年 3 月 29 日。
43. 建築物機水電施工及檢驗基準，搜尋日期:2017 年 3 月 29 日。  
[https://www.pcc.gov.tw/pccap2/BIZSfront/upload/article/c6c\\_6\\_2\\_9.pdf](https://www.pcc.gov.tw/pccap2/BIZSfront/upload/article/c6c_6_2_9.pdf)。
44. <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/建築信息模型> 搜尋日期:2017 年 4 月 2 日。
45. <https://www.google.com.tw/search?q=Patrick+MacLeamy+AIA> 搜尋日期:2017 年 4 月 3 日。
46. 公共工程標案設計變更數量  
[https://www.pcc.gov.tw/epaper/10206/download/news\\_17\\_2.doc](https://www.pcc.gov.tw/epaper/10206/download/news_17_2.doc)
47. 泰興工程顧問(股)公司，中東地區之捷運案例資料，台北 (2017)