應用 BIM 及 AI 之建築工程資源分配及時程規劃系統研發

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 107 年 12 月

PG10604-0024

應用 BIM 及 AI 之建築工程資源分配及時程規劃系統研發

研究主持人　：陳士明

研 究 期 程　：中華民國 107 年 2 月至 107 年 12 月

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 107 年 12 月

MINISTRY OF THE INTERIOR

RESEARCH PROJECT REPORT

BIM-and-AI Applications in System Development of Resource Planning and Scheduling in Building Construction Project

BY

Shih-Ming Chen

November, 2018

目次

目次 I
表次 II
圖次 III
摘　要 VI
ABSTRACT IX
第一章 緒 論 1
　第一節 研究緣起與目的 1
　第二節 研究範圍 2
　第三節 研究流程 2
第二章 文獻回顧 3
　第一節 施工時間及施工成本權衡文獻回顧 3
　第二節 營建工程資源受限之分配文獻回顧 3
　第三節 營建工程資源不受限之分配文獻回顧 4
　第四節 營建工程之靜態與動態空間資源佈局規劃模型及計算文獻回顧 5
　第五節 電腦數值模擬分析方法文獻回顧 6
第三章 應用 BIM 及 AI 之建築工程資源分配及時程規劃系統研發 7
　第一節 系統特性 7
　第二節 系統應用 AI 之分析流程 10
　第三節 數值模擬分析程式 14
　第四節 系統操作步驟 15
第四章 實作驗證 19
　第一節 範例一 19
　第二節 範例二 22
　第三節 範例三 31
第五章 結論與建議 50
　第一節 結論 50
　第二節 建議 51
參考書目 53

表次

表 4-1 各工項所需時間、各工項所需資源及每天可用資源總數.....19
表 4-2 各工項的資源分配及時程規畫.....21
表 4-3 各工項基本資料.....22
表 4-4 各資源於各工項之可能最大生產率、單位成本、每天可提供最大數量限制、單位資源所需工作空間.....24
表 4-5 各工項相對於材料的工作數量、所需材料種類、各材料單位成本、各材料於各工項相對於工作數量之生產率.....25
表 4-6 每個工作區域之總工作面積.....25
表 4-7 各工項資源分配、資源生產率、成本、開始時間、結束時間、所需時間（第一部份）.....29
表 4-8 各工項資源分配、資源生產率、成本、開始時間、結束時間、所需時間（第二部份）.....30
表 4-9 各資源於整個工程的利用率.....31
表 4-10 各空間於整個工程的利用率.....31
表 4-11 施工工項名稱及前置作業施工工項編號.....31
表 4-12 各工項施工時間、資源需求、每日資源數量限制.....32
表 4-13 各工項資源需求比率.....35
表 4-14 各資源單位成本（第一部份）.....36
表 4-15 各資源單位成本（第二部份）.....36
表 4-16 各資源最大可能生產率（第一部份）.....36
表 4-17 各資源最大可能生產率（第二部份）.....37
表 4-18 各工項中各資源分配、各資源生產率、各工項施工成本、各工項開始施工時間、各工項完成施工時間、各工項施工時間（第一部份）.....39
表 4-19 各工項中各資源分配、各資源生產率、各工項施工成本、各工項開始施工時間、各工項完成施工時間、各工項施工時間（第二部份）.....40
表 4-20 各工項中各資源分配、各資源生產率、各工項施工成本、各工項開始施工時間、各工項完成施工時間、各工項施工時間（第三部份）.....41

圖次

圖 3-1 ISM 同時考慮和整合大多數重要的施工影響因素 9
圖 3-2 ISM 進行模擬分析過程的計算參數 9
圖 3-3 各工項所需資源相關的工作數量可藉由工作分解結構功能直接從 3D BIM 模型匯入本系統 10
圖 3-4 ISM 模擬計算分析後產出的資料 10
圖 3-5 ISM 系統流程圖 13
圖 3-6 使用 ISM 的資源元件庫設定各工項間邏輯和順序關係流程圖 16
圖 3-7 設置工程限制條件 16
圖 3-8 設置工程執行目標 16
圖 3-9 設定整個工程各可用資源的數量、各空間的面積及各資源單位成本之機率分布樣態 17
圖 3-10 從 BIM 模型導入各工項工作數量或從手動界面設定各工項工作數量 17
圖 3-11 設定每個工項所需的資源類型、空間位置、資源關係、最大資源生產率，及各資源於各工項所需工作面積 17
圖 3-12 使用 ISM 分析出各工項最佳施工時間、資源分配、資源生產率、空間分配、成本、開始施工時間及完成施工時間 18
圖 3-13 使用 ISM 分析出最佳工程施工時間、基本成本、總金額及成本淨現值 18
圖 3-14 使用 ISM 分析出各資源於整個工程資源使用率 18
圖 4-1 工項網絡圖 19
圖 4-2 工程所需時間、基本成本、總金額、成本淨現值 25
圖 4-3 工程所需時間、基本成本、總金額、成本淨現值的隨機分佈相關資料 26
圖 4-4 工程所需時間的隨機分佈機率圖 26
圖 4-5 工程所需時間的累計分佈機率圖 26
圖 4-6 工程基本成本的隨機分佈機率圖 26
圖 4-7 工程基本成本的累計分佈機率圖 27
圖 4-8 工程總金額的隨機分佈機率圖 27
圖 4-9 工程總金額的累計分佈機率圖 27
圖 4-10 工程總金額的累計分佈機率圖 28
圖 4-11 工程起始時間之成本淨現值的累計分佈機率圖 28
圖 4-12 整個工程的現金流量預測圖 28
圖 4-13 實作驗證案例施工工項網絡圖 (號碼為施工工項編號) 31
圖 4-14 實作驗證案例 BIM 模型 34
圖 4-15 經資源分配分析最佳化之工程施工時間、基本成本、總金額及成本淨現值 39
圖 4-16 當資源生產率及單位成本為為隨機分佈之工程施工時間、基本成本、總金額及成本淨現值 43
圖 4-17 工程施工時間隨機分佈機率圖 43
圖 4-18 工程施工時間累計分佈機率圖 44

圖 4-19 工程基本成本隨機分佈機率圖.....44
圖 4-20 工程基本成本累計分佈機率圖.....45
圖 4-21 工程總金額隨機分佈機率圖.....45
圖 4-22 工程總金額累計分佈機率圖.....46
圖 4-23 工程起始時間之成本淨現值隨機分佈機率圖.....46
圖 4-24 工程起始時間之成本淨現值累計分佈機率圖.....47
圖 4-25 勞工工頭於整個工程的資源利用率.....47
圖 4-26 勞工於整個工程的資源利用率.....47
圖 4-27 輕型設備操作員於整個工程的資源利用率.....47
圖 4-28 中型設備操作員於整個工程的資源利用率.....47
圖 4-29 挖掘裝載機於整個工程的資源利用率.....47
圖 4-30 液壓錘於整個工程的資源利用率.....48
圖 4-31 前端裝載機於整個工程的資源利用率.....48
圖 4-32 鑽掘機於整個工程的資源利用率.....48
圖 4-33 木匠於整個工程的資源利用率.....48
圖 4-34 電工於整個工程的資源利用率.....48
圖 4-35 木匠工頭於整個工程的資源利用率.....48
圖 4-36 標尺手於整個工程的資源利用率.....48
圖 4-37 水泥修整機於整個工程的資源利用率.....48
圖 4-38 燃氣發動機振動器於整個工程的資源利用率.....48
圖 4-39 熟練工人工頭於整個工程的資源利用率.....49
圖 4-40 技術工人於整個工程的資源利用率.....49
圖 4-41 鈑金工人於整個工程的資源利用率.....49
圖 4-42 鈑金學徒於整個工程的資源利用率.....49
圖 4-43 車床於整個工程的資源利用率.....49
圖 4-44 整個工程的現金流量預測.....49

摘　要

關鍵詞：建築資訊模型(BIM)、人工智慧、工程排程

一、　研究緣起

目前，決定建築工程各工項所需資源（人工、材料及設備）的流程通常為使用預先建立的資料庫為各工項分配所需資源，並使用資源分配方法（例如，分析方法和啟發式方法）做資源分配。 但是，這個過程無法保證為各工項做最佳資源分配，因為各建築工程各工項都有其不同的工程目標及限制條件，現有的資源分配流程有其使用限制。

目前建築業界所使用的商業排程軟體，各工項資源分配及施工時間皆由使用者依經驗或過往工程資料估計而得，然而每個工程都有其不同的工程條件(例如：工班數量、機具數量、材料數量、施工範圍、受限施工環境之施工效率等) 及不同最佳化目標(例如：最短施工時間、最低施工成本、有施工時間限制之最低施工成本等)，經驗或過往工程資料無法保證能適用於新的工程。

3D BIM(Building Information Modeling,建築資訊模型)本身具有相當豐富的工程基本資訊(例如：元件代號、種類、面積、體積、材料、空間面積等資料)，但是 BIM 模型並未包含任何施工順序相關資訊。

依據維基百科，「目前有大量的工具應用了人工智慧，其中包括搜尋和數學最佳化、邏輯推演。」。

綜上，本研究研發一應用 BIM 及 AI (Artificial Intelligence，人工智慧)之建築工程資源分配及時程規劃系統，該系統可以自動產製各種可能的工項資源分配組合及時程規劃選項，並依使用者設定的最佳化目標及工程條件，從中自動挑選出最佳的資源分配組合及時程規劃選項。

二、　研究方法及過程

本研究擬蒐集及探討分析國內外包含 BIM、營建工程資源分配、營建工程主要影響參數、空間規劃、電腦數值模擬分析方法等相關文獻，並依文獻資料研提一應用 BIM 及 AI 之建築工程資源分配及時程規劃系統，供國內辦理相關研究之參考。

三、　重要發現

本研究研發一應用 BIM 及 AI (Artificial Intelligence，人工智慧)之建築工程資源分配及時程規劃系統，該系統可以自動產製各種可能的工項資源分配組合及時程規劃選項，並依使用者設定的最佳化目標及工程條件，從中自動挑選出最佳的資源分配組合及時程規劃選項。

本系統同時考慮和整合大多數重要的施工影響因素(例如:工項排程、成本估算，空間分配、各工種數量分配，各型設備數量分配及材料管理)，並應用具有數值模擬分析功能的 AI 技術分析並求取最佳解，如此可使工程資源分配及時程規劃接近最佳化。 本系統進行模擬分析過程的

計算參數包含：(1) 各工項所需資源相關的工作數量；(2) 整個工程每日各資源數量限制；(3) 整個工程的可用空間；(4) 工程目標（例如: 整個工程最短施工工期、最少施工成本、最長施工工期條件限制之最少施工成本等)；(5)工程限制條件(例如，施工工期不可多於 500 工作日)；(6) 各資源單位成本；(7) 各工項的最大資源生產率；(8) 各工項所需資源種類；(9) 各工項各資源所需的空間位置；(10) 各工項所需資源數量比率限制；(11) 各工項各資源所需工作面積；(12) 符合工項施工網絡關係圖之各工項施作優先順序；(13) 銀行年利率；(14) 加價百分比等（圖 4.2)。其中，各工項所需資源相關的工作數量可藉由作者研發之「工作分解結構及資料庫系統」工作分解結構功能直接從 3D BIM 模型匯入本系統(請參見本所 106 年度「應用 BIM 於建築工程之資源分配及時程規劃策略」研究成果報告)，無需人工逐項輸入。

本系統模擬計算分析後產出的資料包含：(1) 各工項資源分配；(2) 施工期間各空間動態分配；(3) 決定各工項施工時間之主要資源生產率；(4) 整個工程各資源及各空間利用率；(5) 各工項施工時間及施工起迄時間；(6) 整個工程施工時間、施工起迄時間及施工成本的計算(包含工程成本現值計算)；(7) 材料管理和採購期程規劃；(8) 整個工程施工時間、施工成本、施工成本現值等風險性分析。此外，本系統可讓使用者依假設狀況做結果預測分析，並可依據工程不可預見的臨時狀況（例如:變更設計、材料交付延遲等）即時安排調整各工項資源分配及時程規劃。

根據研究結果，本研究有四項建議，建議一為持續研究及推廣應用 BIM 於工程施工階段與維護管理階段；建議二為拓展結合 BIM 及 AI 技術應用於建築工程施工階段資源分配及時程規劃之研究，詳細說明請參考下面章節。

四、 主要建議事項

建議一

立即可行建議—持續研究及推廣應用 BIM 於建築工程施工階段與維護管理階段

主辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署、內政部建築研究所

協辦機關：財團法人臺灣建築中心、財團法人臺灣營建研究院

在公共工程委員會、本所、財團法人臺灣建築中心、財團法人臺灣營建研究院、各機關學校 BIM 中心及 BIM 軟體廠商共同努力推廣下，BIM 於工程規劃設計階段之應用在本國已逐漸成熟。相對的，BIM 於本國工程施工階段與維護管理階段之應用範圍仍較小，大部分稍具規模工程僅應用於施工階段之 4D、虛擬實境及碰撞檢查，尚屬 CAD 應用範圍，僅少數大型工程或高科技廠建置會搭配基本 BIM 模型資料管理，故建議加強 BIM 於本國工程施工階段與維護管理階段之深層應用研究，並將研究成果於國內業界推廣。

建議二

立即可行建議—拓展結合 BIM 及 AI 技術應用於建築工程施工階段資源分配及時程規劃之研究

主辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署、內政部建築研究所

應用 BIM 及 AI 之建築工程資源分配及時程規劃系統研發

協辦機關：財團法人臺灣建築中心、財團法人臺灣營建研究院

3D BIM 模型本身具有相當豐富的工程基本資訊，但是 BIM 模型並未包含任何施工順序相關資訊，所以需要一工項時程規劃系統提供工項排程功能。傳統工項時程規劃系統決定各工項所需時間時常靠經驗或過往工程資料估計，然而每個工程都有其不同的工程條件(例如：工班數量、機具數量、材料數量、施工範圍、受限施工環境之施工效率等) 及不同最佳化目標(例如：最短施工時間、最低施工成本、有施工時間限制之最低施工成本等)，經驗或過往工程資料無法保證能適用於新的工程。

另外，傳統資源最佳化技術主要包括數學方法和啟發式方法。然而，數學模型由於公式複雜可能導致求得局部最佳解。啟發式模型則是在不同情況下具有不同的有效性，因此無法適用於所有的工程案例。此外，使用者也無法針對給定的工程案例事先知道適用於何種啟發式模型。所以，啟發式模型無法保證獲得最佳解。啟發式模型不一致的解決方案已經導致商用工程管理軟體於資源調度功能間巨大分歧。

依據維基百科，「目前有大量的工具應用了人工智慧，其中包括搜尋和數學最佳化、邏輯推演。」。AI (Artificial Intelligence，人工智慧)應用為目前及未來世界各國重要的研究趨勢，但是 AI 在建築工程施工階段與維護管理階段方面的應用，仍屬起步階段，未來有非常大的發展潛力，建議加強 AI 於本國工程施工階段與維護管理階段資源分配及時程規劃之研究，並將研究成果於國內業界推廣。

建議三

立即可行建議—拓展結合 BIM 與資料庫管理應用於建築工程施工階段及維護管理階段之研究

主辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署、內政部建築研究所

協辦機關：財團法人臺灣建築中心、財團法人臺灣營建研究院

資料準備是營建管理過程中非常重要的工作之一，並且是最耗時間及最困難的工作之一。雖然 3D BIM 模型本身具有相當豐富的工程基本資訊，但是 BIM 模型並無法提供工程施工階段及維護管理階段所需之全部資訊(例如：施工階段之工項施工順序、工項起迄時間、施工成本控管及材料採購控管，及維護管理階段之設施管理等相關資訊)，所以需要於工程施工階段及維護管理階段另增加一資料庫管理系統，以補足 3D BIM 模型本身不足之處。

綜上，建議拓展結合 BIM 與資料庫管理應用於工程施工階段及維護管理階段之研究，以符工程施工階段及維護管理階段之實際需求。

ABSTRACT

Keywords: BIM、AI、project scheduling

At present, the process of assigning activity duration and the resources (labor, material, and equipment, etc.) required for each activity are executed manually and based on personal experiences or pre-established database, in using the commercial scheduling softwares used by the construction industry. However, each project has different restrictions (for example, number of work classes, number of equipments, number of materials, construction scope, construction efficiency, etc.) and different objectives (for example, minimum project duration, minimum project cost, minimum project cost with project duration limit, etc.), personal experiences or pre-established database are not definitely suitable for new projects. Moreover, the resource allocation methods (for example, analytical methods and heuristics) used to allocate resources for each activity cannot guarantee the optimal resource allocation for each activity.

According to Wikipedia, "Many tools are used in AI, including versions of search and mathematical optimization, artificial neural networks, and methods based on statistics, probability and economics." AI is applied in the developed system, which uses the techniques of search and mathematical optimization, artificial neural networks, and methods based on statistics, probability and economics.

Building information modeling (BIM) has been recognized as a revolutionary change for its applications in the entire lifecycle of a construction project. However, the applications of BIM within the construction domain still have a lot of potential.

In summary, this research presents a resource planning and scheduling system with applications on BIM and AI (Artificial Intelligence). This system can automatically produce various options for resource distribution and activity scheduling, and find the optimal resource distribution and activity scheduling according to restrictions and objectives assigned by users.

第一章　緒 論

第一節　研究緣起與目的

建築工程資源分配及時程規劃過程涉及各種程序，包括判定施工工項、估算各施工工項施工時間、判定各施工工項施工順序關係及其他條件限制、建立各工項施工順序排列關係、決定工程施工目標、決定建築工程各工項所需資源（人工、材料及設備）、規劃各工項開始施工時間及完成時間，並估算工程開始施工時間及完成時間。

各施工工項施工順序關係定義為各工項在工項網絡模型中的連接邏輯關係。傳統上，有許多技術可用於表達及決定各施工工項的施工順序關係、各工項開始施工時間及完成時間，及工程開始施工時間及完成時間。這些技術包括甘特圖，及線性施工順序關係、數學編程技術和網絡模型等技術（例如，要徑法《Critical Path Method，CPM》，及計畫評核術《Program Evaluation and Review Technique, PERT》）。

目前，決定建築工程各工項所需資源（人工、材料及設備）的流程通常為使用預先建立的資料庫為各工項分配所需資源，並使用資源分配方法（例如，分析方法和啟發式方法）做資源分配。 但是，這個過程無法保證為各工項做最佳資源分配，因為各建築工程各工項都有其不同的工程目標及限制條件，現有的資源分配流程有其使用限制。

目前建築業界所使用的商業排程軟體，各工項資源分配及施工時間皆由使用者依經驗或過往工程資料估計而得，然而每個工程都有其不同的工程條件(例如：工班數量、機具數量、材料數量、施工範圍、受限施工環境之施工效率等) 及不同最佳化目標(例如：最短施工時間、最低施工成本、有施工時間限制之最低施工成本等)，經驗或過往工程資料無法保證能適用於新的工程。

3D BIM(Building Information Modeling)模型本身具有相當豐富的工程基本資訊(例如：元件代號、種類、面積、體積、材料、空間面積等資料)，但是 BIM 模型並未包含任何施工順序相關資訊。

依據維基百科，「目前有大量的工具應用了人工智慧，其中包括搜尋和數學最佳化、邏輯推演。」。本研究研發一應用 AI 之系統，該系統使用之技術包括搜尋與數學最佳化及邏輯推演。

綜上，本研究研發一應用 BIM 及 AI (Artificial Intelligence，人工智慧)之建築工程資源分配及時程規劃系統，該系統可以自動產製各種可能的工項資源分配組合及時程規劃選項，並依使用者設定的最佳化目標及工程條件，從中自動挑選出最佳的資源分配組合及時程規劃選項。

第二節　研究範圍

本研究針對建築工程施工階段營建管理研提一應用 BIM 及 AI 之建築工程資源分配及時程規劃系統，該系統可以自動產製各種可能的工項資源分配組合及時程規劃選項，並依使用者設定的最佳化目標及工程條件，從中自動挑選出最佳的資源分配組合及時程規劃選項。。

第三節　研究流程

本研究擬蒐集及探討分析國內外包含 BIM、營建工程資源分配、營建工程主要影響參數、空間規劃、電腦數值模擬分析方法等相關文獻，並依文獻資料研提一應用 BIM 及 AI 之建築工程資源分配及時程規劃系統，供國內辦理相關研究之參考。

研究流程詳列如下：

- 蒐集國內外相關文獻。
- 翻譯及探討分析國內外相關文獻。
- 依文獻資料研提一應用 BIM 及 AI 之建築工程資源分配及時程規劃系統。
- 案例驗證。

第二章　文獻回顧

第一節　施工時間及施工成本權衡文獻回顧

解決施工時間及施工成本權衡問題的方法主要包含數學編程方法及啟發式方法。

數學編程方法常用於解決時間/成本權衡問題，這些方法使用線性編程或動態編程（Kelly 1961; Meyer 和 Shaffer 1965; Butcher 1967; Talbot 1982）。在這些方法中，各工項施工成本和施工時間之間的關係通常假設為：（1）線性或非線性;（2）離散或連續;或（3）混合。應用數學編程方法於時間/成本權衡模型需要大量的計算工作;因此，它們僅適用於小型項目（Panagiotakopoulos 1977）。

啟發式方法也無法解決時間/成本權衡問題，因為這些方法雖然提供了解決方案，但不保證是最佳解決方案。 Fondahl 的方法（1961 年），Siemens 的模型（1971 年）和 Moselhi 的模型（1993 年）都是啟發式方法的例子。

第二節　營建工程資源受限之分配文獻回顧

處理營建工程資源受限分配的問題是數學家稱之為「大組合問題」的複雜數學問題。資源分配問題是假設資源可用數量受限於某個最大值，目標是將可用資源分配給各工項，並試圖依工程目標(例如，最低成本、最短工期或工期不超過特定期限之最低成本等)分配這些資源。

營建工程資源受限分配期程規劃處理模式可以分為：（1）確定性調度;（2）非確定性調度。目前，大部份的處理模式為確定性調度，確定性調度模式中最普遍的處理技術為數學分析方法和啟發式方法。

早期嘗試解決確定性資源受限的調度問題係使用數學模型來求取最佳解，並且常使用整數線性規劃及動態規劃（David 1973）。 Elmaghraby（1977）和 Talbot（1982）使用整數規劃技術來解決特定環境下的資源受限分配問題。然而，數學模型需要大量的計算工作來解決這種問題。

為了避免“組合爆炸”的問題，啟發式方法也被用來解決確定性資源受限的調度問題（Morse and White-house 1988; Tsai and Chiu 1996）。 到目前為止，已經有許多啟發式模型被發表用來解決確定性資源受限的調度問題，例如 MINSLK 模型（David 和 Patterson 1975）、ROT

模型（Elsayed 1982）、GENRES 模型（Whitehouse 和 Brown 1979），及 three-heuristic 模型（Boctor 1990）。每個啟發式模型都有自己的理念，並且它們都試圖盡可能獲得最佳解。

由於施工作業中涉及許多不確定的變數，營建管理最近開始關注非確定性的資源調度問題。非確定性的資源調度模型可分為資源受限與資源不受限兩種，並使用不確定性理論解決這類問題。傳統上，使用概率理論對與施工工期相關的不確定變數進行建模，它們可以分為資源受限與資源不受限兩種。實務上，解決非確定性的資源不受限調度模型中，最普遍被使用的模型為 PERT 及 Monte Carlo 模擬（Diaz 和 Hadipriono 1993）。近年來，隨著計算機技術的急劇升級，市場上開始出現以 CPM 為基礎的風險分析工具，主要軟體包括 Project-Gear 公司的 Risk1（MS Project 軟體的配合軟體）和 Primevera 的 Monte Carlo（P6 的配合軟體）。實務上，由於缺乏工項相關資料，各工項變數的數值常由工程人員估算。PERT 可以被當作是 CPM 的改進版，因 PERT 包含了不確定性和風險分析，但由於 PERT 潛在的理論假設，仍然讓使用者有疑慮。CPM / PERT 使用統計的中心極限定理，分析工項時間或成本超出規畫值的風險。然而，PERT 計算所得的工程平均施工時間總是低於工程實際施工時間的平均值（Ahuja et al.1995）。這種平均估計值的偏差被稱為“合併事件偏差”，Ahuja 等人（1995）對 PERT 的缺點進行了全面的分析和理論解釋，並認為 PERT 固有問題的解決方案是透過正式的隨機模擬研究進行網絡分析。Ang（1975）、Gong（1993）和其他幾位研究員也開發了資源不受限的資源調度概率模型。僅少部分概率模型考慮到資源受限時的資源調度，例如 Ahuja 和 Arunachalam（1984）提出的模型，及 Padilla 與 Carr（1991）提出的 DYNASTRAT。

第三節　營建工程資源不受限之分配文獻回顧

資源分配算法在無限的資源可用性的前提下，試圖在工程施工期間減少資源需求的峰值並盡量減少周期性波動。典型的資源包括需要盡早退回的租用設備或需要雇用的技術工人。早期資源分配問題的最佳解決方案求解方式是使用混合的整數公式（Shah 等人 1993; Easa 1989）。

類似於資源受限之分配方法，資源不受限之分配方法通常是使用數學模型或啟發式模型（Harris 1978）。 由於數學模型需要巨大的運算量，因此很少被用於解決資源不受限之分配問題（Easa 1989）。

第四節　營建工程之靜態與動態空間資源佈局規劃模型及計算文獻回顧

大多數建築資源需要施工現場空間，包含材料、設備、附屬設施（例如拖車或停車場）、特定區域（例如，道路或工作空間）及障礙物（例如樹木或現有建築物）都須納入空間規劃作業中。 將空間分配給資源以便這些資源在施工期間可以及時取得並發揮功能即是一空間佈局規劃的問題。空間佈局規劃可分為靜態與動態，隨著施工的進行，空間佈局維持不便者稱為靜態空間佈局規劃，空間佈局隨施工現場不同時間狀況而變化的佈局稱為動態空間佈局規劃。 動態空間佈局規劃提高了施工作業的效率，但是如果動態空間佈局規劃處理不當，將因材料等資源須臨時重新配置空間而導致施工成本增加。

資源在決定其最終位置的過程中是動態的相互牽制關係，例如堆置鋼筋的空間，不能與堆置模板的空間重疊，而且堆放鋼筋與模板的數量及空間常隨施工過程而變化。相反的，空間在本研究中亦屬資源的一種，空間資源位置便可與其他資源（例如，鋼筋）位置重疊。

資源在不同空間位置的相互牽制關係也可能包含不同資源的相對位置，並且也會隨著時間而變化。例如，裝載機具和填充材料在回填期間是一起運作的關係，因此它們的位置必須盡可能靠近以盡量減少行程。完成回填工項後，它們之間的一起運作關係亦終止，裝載機具可能會被分配到不同的工項，因此裝載機具這個資源與其他資源的相互牽制關係須重新定位。因此，資源之間的相互牽制關係、相對位置的牽制，以及牽制關係會隨時間而變化，皆是動態空間佈局規劃的特徵。

許多研究提出應用啟發式模型或數值最佳化模型來解決靜態空間佈局規劃問題（例如，Warszawski 和 Peer 1973; Rodriguez-Ramos 1982; Hamiani 1987; Tommelein 1989; Tommelein 等 1991; Yeh 1995）。這些模型在整個工程施工期間靜態地為資源分配空間，包括永久和臨時設施，但忽略了幾個重要的可能性，包括不同資源在不同時間重複使用同一空間的可能性，重新分配資源空間位置的可能性，以及資源隨時間變化需要不同空間位置及不同空間大小的可能性。

目前有幾種解決動態空間佈局規劃問題的方法。在生產設施領域，Rosenblatt（1986），及 Montreuil 和 Venkatadri（1991）根據設施的形狀和面積範圍，及設施之間不可重疊的限制，為生產設施的動態空間佈局規劃問題開發了幾種不同的公式。解決這類問題的最佳算法是 NP-complete，但是只有小的或具有極大限制條件的問題才能獲得精確的解答。在營建工程方面，Tommelein（1989）、Thabet（1992）、Cheng（1992）、Tommelein 和 Zouein（1993）、Riley（1994），以及 Lin 和 Haas（1996）藉由使用交互式選擇或電腦資源定位方式，開發了不同的

方法來解決動態空間佈局規劃問題。

選擇施工方法、規劃工項施工期程、分配資源，及依據不同施工時間動態規劃空間佈局是有效率的工程施工的關鍵步驟。 然而，這些步驟常被視為獨立問題而分別尋求不同解決方法。這些步驟的相互依賴性在規劃階段經常被忽略，直到施工階段爆發問題時才被迫處理。當這些問題在施工階段才被發現時，問題通常已經很難解決，而這些問題在規劃階段常可以很容易地解決，甚至可以避免。

第五節　電腦數值模擬分析方法文獻回顧

電腦數值模擬分析是為真實系統設計一數學邏輯模型並在電腦上對該模型進行實驗的過程[35]。過程模擬的目標涵蓋生產力提升、風險分析、資源分配和現場規劃等範圍。經由對構成該過程之活動本身及活動間順序關係精確表示於模型中，建模者可以預估該過程最後成果的相關資訊和於某特定時間內完成該過程的機率。由於營建工程所需資源包括笨重且昂貴的設備，透過電腦數值模擬分析可以檢視各種可能的資源動態空間規劃選項，並從中挑選出最佳的資源動態空間規劃。施工建模需要使用各模型所定義的建模元素來表達及組成施工過程。電腦數值模擬分析可應用於動態性模擬分析施工過程隨時間產生的變化。

電腦數值模擬分析是於施工管理過程中協助使用者做決策分析的利器之一。精確建立施工過程模型後，可利用電腦數值模擬分析出較佳的替代方案及優化相關資源的動態空間規劃。然而，在建築業中應用電腦數值模擬分析技術於施工管理的案例幾乎很難找到，主要原因為電腦數值模擬分析技術的複雜性和建築業人員缺乏該技術的相關知識，另一個可能的原因為需要針對不同的營建管理目標開發不同的電腦數值模擬模型。由於通常不同的工程會有不同的工項及工項間網絡關係，導致不同的工程需要使用不同的電腦數值模擬模型。另外，目前工程管理一般皆使用要徑法（ Critical Path Method ，CPM）技術做排程、時程控制，然而應用要徑法技術的電腦軟體與應用電腦數值模擬技術的電腦軟體間並不相容，因此想同時應用這兩種技術仍存在一個很大的技術門檻，也導致幾乎很難找到應用電腦數值模擬分析技術於建築業施工管理做排程、時程控制的案例。

綜上，開發一與實際建築工程施工管理系統有極高相似性、可視覺化，且可靈活應用於不同工程與適用於不同施工管理目標的電腦數值模擬分析系統，將是把電腦數值模擬分析技術轉移到施工管理實際應用層面一個很好的策略。

第三章　應用 BIM 及 AI 於建築工程之資源分配及時程規劃系統研發

第一節　系統特性

目前，決定建築工程各工項所需資源（人工、材料及設備）的流程通常為使用預先建立的資料庫為各工項分配所需資源，並使用資源分配方法（例如，分析方法和啟發式方法）做資源分配。 但是，這個過程無法保證為各工項做最佳資源分配，因為各建築工程各工項都有其不同的工程目標及限制條件，現有的資源分配流程有其使用限制。

目前建築業界所使用的商業排程軟體，各工項資源分配及施工時間皆由使用者依經驗或過往工程資料估計而得，然而每個工程都有其不同的工程條件(例如：工班數量、機具數量、材料數量、施工範圍、受限施工環境之施工效率等) 及不同最佳化目標(例如：最短施工時間、最低施工成本、有施工時間限制之最低施工成本等)，經驗或過往工程資料無法保證能適用於新的工程。

3D BIM(Building Information Modeling)模型本身具有相當豐富的工程基本資訊(例如：元件代號、種類、面積、體積、材料、空間面積等資料)，但是 BIM 模型並未包含任何施工順序相關資訊。

依據維基百科，「目前有大量的工具應用了人工智慧，其中包括搜尋和數學最佳化、邏輯推演。」。本研究研發一應用 AI 之系統，該系統使用之技術包括搜尋與數學最佳化及邏輯推演。

綜上，本研究研發一應用 BIM 及 AI (Artificial Intelligence，人工智慧)之建築工程資源分配及時程規劃系統，簡稱為 ISM，該系統可以自動產製各種可能的工項資源分配組合及時程規劃選項，並依使用者設定的最佳化目標及工程條件，從中自動挑選出最佳的資源分配組合及時程規劃選項。

本系統同時考慮和整合大多數重要的施工影響因素（例如:工項排程、成本估算，空間分配、各工種數量分配，各型設備數量分配及材料管理）（圖 3-1），並應用具有數值模擬分析功能的 AI 技術分析並求取最佳解，如此可使工程資源分配及時程規劃接近最佳化。 本系統進行模擬分析過程的計算參數包含：（1）各工項所需資源相關的工作數量；（2）整個工程每日各資源數量限制；（3）整個工程的可用空間；（4）工程目標（例如: 整個工程最短施工工期、最少施工成本、最長施工工期條件限制之最少施工成本等）；（5）工程限制條件（例如，施工工期不可多

於 500 工作日)；(6) 各資源單位成本；(7) 各工項的最大資源生產率；(8) 各工項所需資源種類；(9) 各工項各資源所需的空間位置；(10) 各工項所需資源數量比率限制；(11) 各工項各資源所需工作面積；(12) 符合工項施工網絡關係圖之各工項施作優先順序；(13) 銀行年利率；(14) 加價百分比等（圖 3-2)。其中，各工項所需資源相關的工作數量可藉由作者研發之「工作分解結構及資料庫系統」工作分解結構功直接從 3D BIM 模型匯入本系統（圖 3-3，請參見本所 106 年度「應用 BIM 於建築工程之資源分配及時程規劃策略」研究成果報告)，無需人工逐項輸入。

本系統模擬計算分析後產出的資料包含：(1) 各工項資源分配；(2) 施工期間各空間動態分配；(3) 決定各工項施工時間之主要資源生產率；(4) 整個工程各資源及各空間利用率；(5) 各工項施工時間及施工起迄時間；(6) 整個工程施工時間、施工起迄時間及施工成本的計算（包含工程成本現值計算)；(7) 材料管理和採購期程規劃；(8) 整個工程施工時間、施工成本、施工成本現值等風險性分析（圖 3-4)。此外，本系統可讓使用者依假設狀況做結果預測分析，並可依據工程不可預見的臨時狀況（例如:變更設計、材料交付延遲等）即時安排調整各工項資源分配及時程規劃。

本系統是在 Simphony（NSERC / Alberta Construction Industry，University of Alberta）的環境下開發的，Simphony 是一種通用的模擬語言。本系統是一個全自動電腦模擬系統，並可以像使用一般傳統排程軟體般輕鬆使用，但具有更強大的功能，包含考慮工程的不確定性和動態行為。本系統讓使用者在不熟悉電腦模擬技術的情況下能夠構建模擬模型，並讓使用者能夠直接找到經過最佳分析之所有建築項目重要資訊。

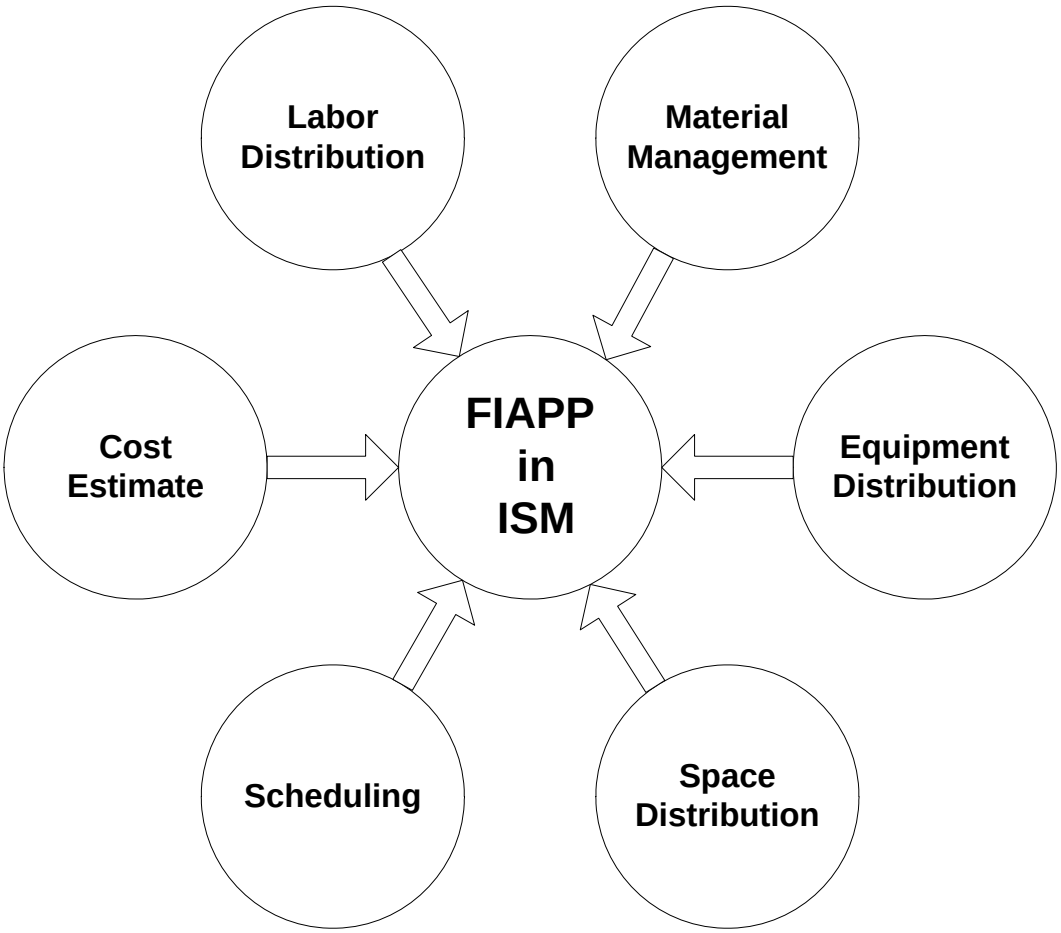


圖 3-1:ISM 同時考慮和整合大多數重要的施工影響因素

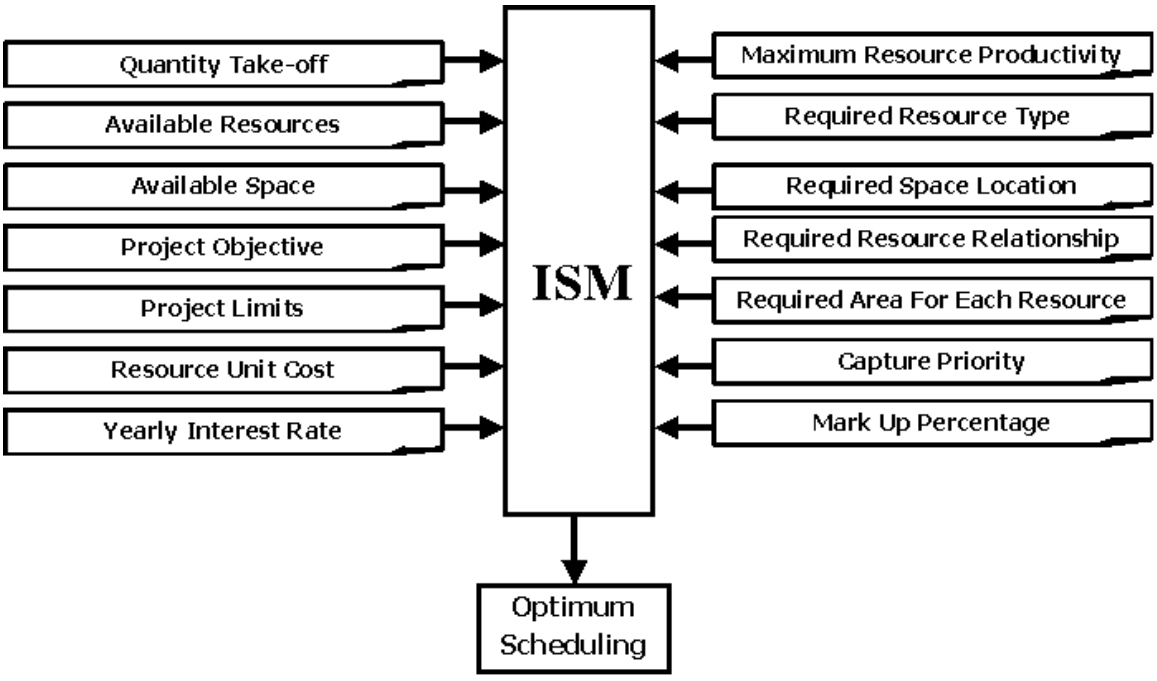


圖 3-2:ISM 進行模擬分析過程的計算參數

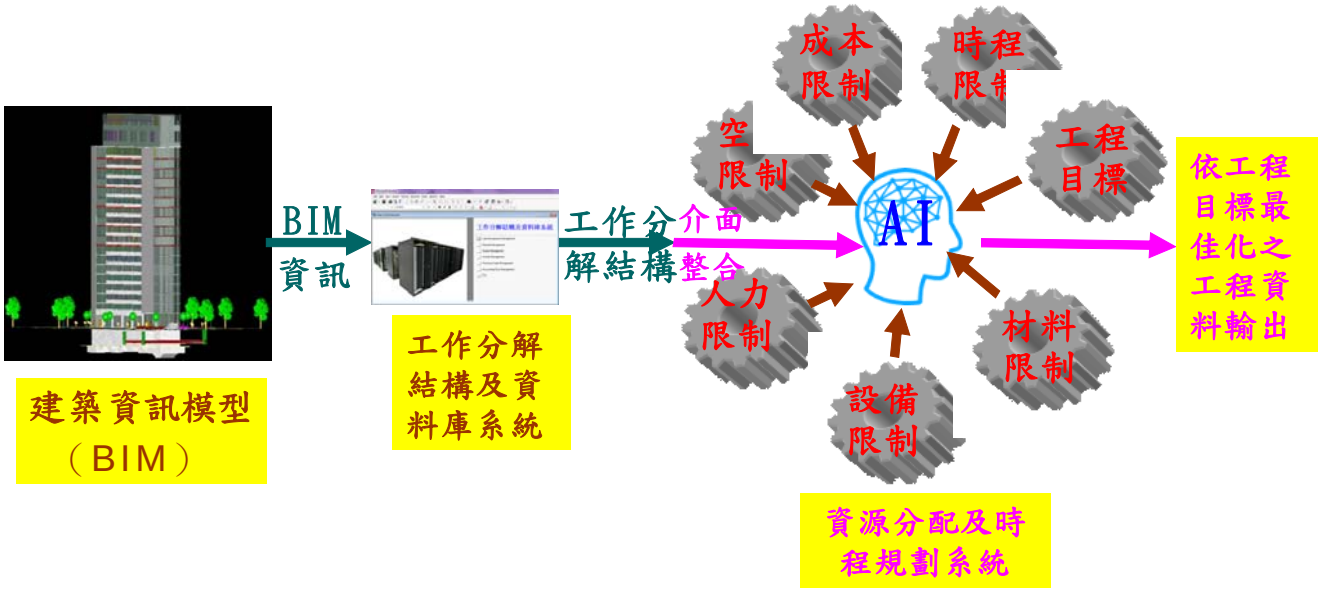


圖 3-3:各工項所需資源相關的工作數量可藉由工作分解結構功能直接從 3D BIM 模型匯入本系統

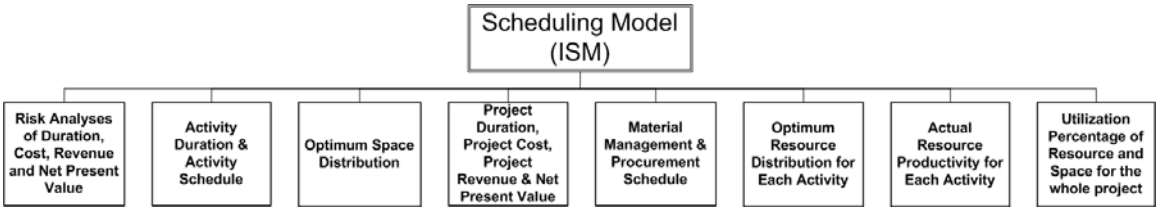


圖 3-4: ISM 模擬計算分析後產出的資料

第二節　系統應用 AI 之分析流程

本研究所開發之資源分配及時程規畫系統乃使用模擬及分析技術去模擬 PERT 中工項時程的不確定性。本系統乃依據各相關資源的生產率及其機率分佈（包括分佈的形狀，均值和方差）計算各工項的時程。此外，本系統引用 Ahuja et al.(1995)所介紹的工項關鍵性概念，而非一般常用的路徑關鍵性概念來避免 PERT 所導致的缺失。

本系統的流程圖如圖 3-5 所示，包括：(1) 建構各工項網絡關係;(2) 執行模擬分析;(3)

風險性分析，此流程圖的 16 個演算步驟詳述如下：

建構各工項網絡關係

步驟 1：先設定在整個工程中可以使用的人力、設備、材料及空間類型。然後，建構各工項網絡關係，並設定各工項所需資源類型。

步驟 2：從 BIM 模型輸入或手動輸入各工項所對應人力、設備及材料的工程數量；設定各工項中各資源的平均生產率及資源間的數量關係限制；設定每天可用資源與空間的最大數量及資源的平均單位成本；設定工程目標（如：最低工程成本、最短工期等）及工程限制條件（如：工程完成期限、每天可使用的資源數量限制等）。

執行模擬分析

步驟 3：設定模擬分析次數

步驟 4：設定每個工項執行的優先程度。若無特殊考量，可以設定最小值為 1，最大值為總工項數目的均勻分佈。

步驟 5：系統依據每個工項於步驟 4 所設定的優先程度分配人力、設備及空間。

步驟 6：系統根據步驟 5 所分配的人力、設備及空間計算各工項所需時間、各工項時程及整個工程所需時間。

步驟 7：綜整步驟 6 之結果，檢查每天各類型資源所分配的總數目是否超過該類型資源每天可用的最大數量，並確認各工項各資源間的數量關係沒有違反原先所設定的限制條件。

步驟 8：計算每個工項所需各種材料數量。

步驟 9：計算各工項成本及整個工程成本。

步驟 10：產生及儲存各次模擬分析相關資料，包括：各工項及整個工程所需時間、各工項及整個工程所需成本、整個工程所需成本現值、所需材料數量、各工項所需各種資源數量、各資源在各工項的預計生產率等。

步驟 11：根據步驟 2 所設定工程目標，比較新的模擬分析結果是否優於先前的模擬分析結果，以較優者為新的最優者。

步驟 12：重複步驟 4 到步驟 12，直至完成步驟 3 所設定模擬分析次數。

風險性分析

步驟 13：設定針對風險性分析的模擬分析次數。

步驟 14：將各資源生產率及資源單位成本設定為機率密度函數。

步驟 15：將各資源數量設定為常數，其值等於「執行模擬分析」階段所獲得的最佳結果。

步驟 16：產生所需工程時間及所需工程成本等的隨機分佈機率圖及累計分佈機率圖。

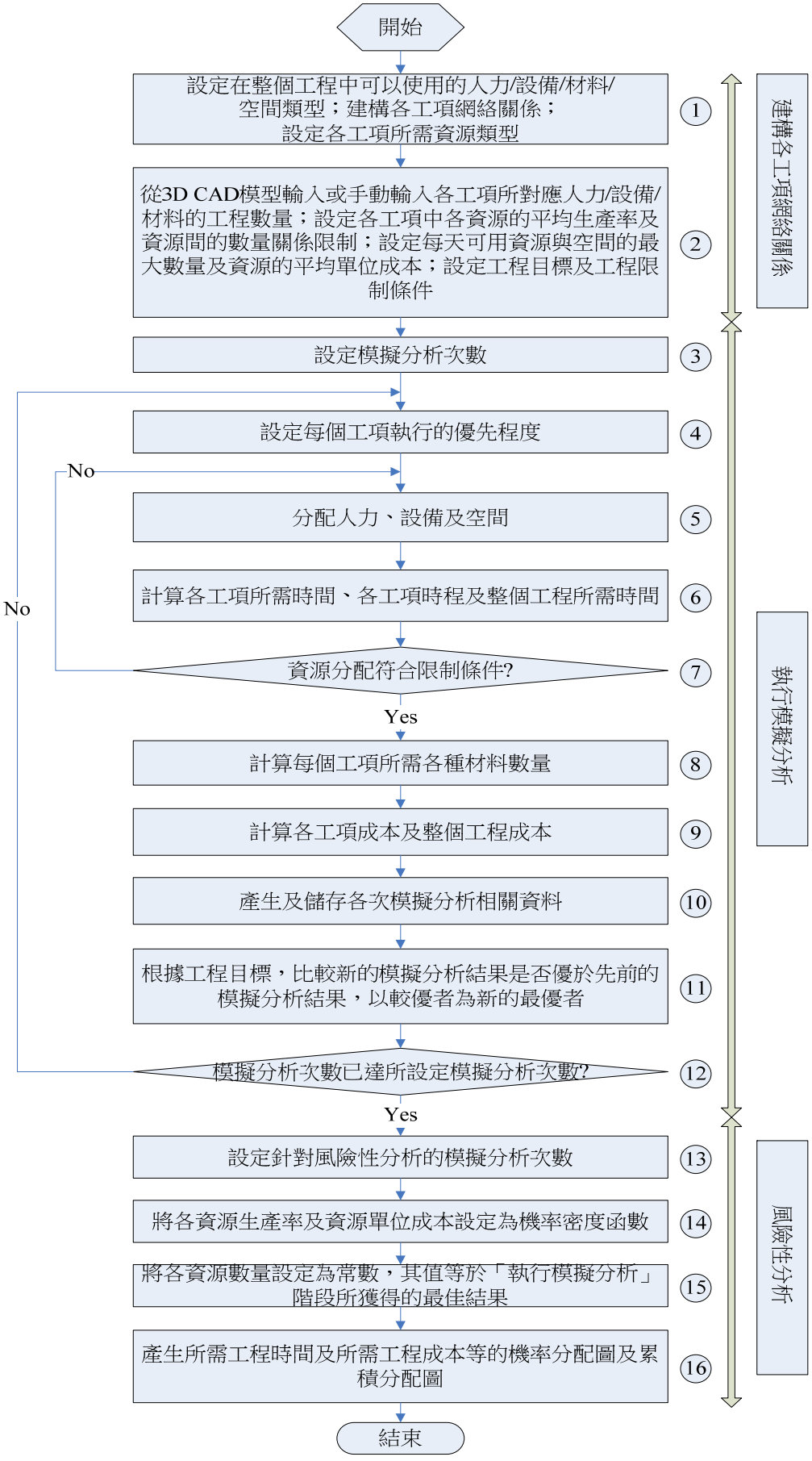


圖 3-5: ISM 系統流程圖

第三節　數值模擬分析程式

工項是本系統於模擬過程中直接處理的基本要素，而營建過程的動態活動則是反映於各工項的細部狀態改變。本系統主要的模擬演算法主要包含兩個兩個階段：

（1）　計算各工項的主要資源生產率、各工項的持續時間、各工項的基本成本、各工項的總金額、各工項所需空間，其主要算式如下：

$$DN(i) = \min\{G(i,j) * N(i,j)\}$$

$$t(i) = \max\left\{\frac{Q(i,j)}{G(i,j) * N(i,j)}\right\}$$

$$C(i) = \sum_{j=1}^{m}[U(j) * G(i,j) * t(i)] + \sum_{k=1}^{n}[G(i,k) * U(k)]$$

$$R(i) = C(i) * (1 + overhead + contingency + profit + tax + mark_up)$$

$$G(i,k) = \frac{Q(i,k)}{N(i,k)}$$

$$A(i) = \sum_{j=1}^{m}[a(i,j) * G(i,j)] + \sum_{k=1}^{n}[a(i,k) * G(i,k)]$$

其中：

DN(i) = 工項 i 的主要資源*生產率

t(i) = 工項 i 的持續時間

Q(i ,j) =與工項 i 中的資源* j 相關的工作數量

Q(i ,k) =與工項 i 中的材料 k 相關的工作數量

G(i , j) = 工項 i 中的資源* j 數量

G(i , k) =工項 i 中的材料 k 數量

N(i, j) = 工項 i 中的資源* j 生產率

N(i, k) = 工項 i 中的單位材料 k 所生產數量

C(i) = 工項 i 的基本成本

R(i) = 工項 i 的總金額

U(j) = 資源* j 的單位成本

U(k) = 材料 k 的單位成本

A(i) = 工項 i 所需總空間

a(i, j) = 工項 i 中的單位資源* j 所需空間

a(i, k) = 工項 i 中的單位材料 k 所需空間

資源*= 人力資源或設備

各工項所需人力、設備、材料及空間數量皆於此階段中計算，材料則假設沒有每天能提供最多數量的限制，也不考慮材料運送延遲的問題。G(i，j)是由系統以隨機的均勻分佈方式自動設定，並限定為整數。N(i, j)、N(i, k)、U(j)、U(k)、a(i, j) 及 a(i, k)則可以由使用者設定為隨機分佈函數或固定的常數。

（2） 安排工項施做順序

在此階段，所有工項的施做順序乃依據他們的邏輯，資源和空間的要求決定。如果某工項符合所有啟動的條件，它就會被選入工項可實行工項的名單中。某工項的最早可施做時間決定於獲得所需資源與空間的時間，及相關前置工項完成時間。可實行工項名單中計算出最早之最早可施做時間者，便會被選定為優先施做工項。

第四節 系統操作步驟

ISM 的建模過程定義明確，包含下列須依序完成的步驟：

（1）確定執行工程過程所需的工項，並確定它們之間的邏輯和順序關係。最後，使用 ISM 的資源元件庫設定各工項間邏輯和順序關係流程圖（圖 3-6）。

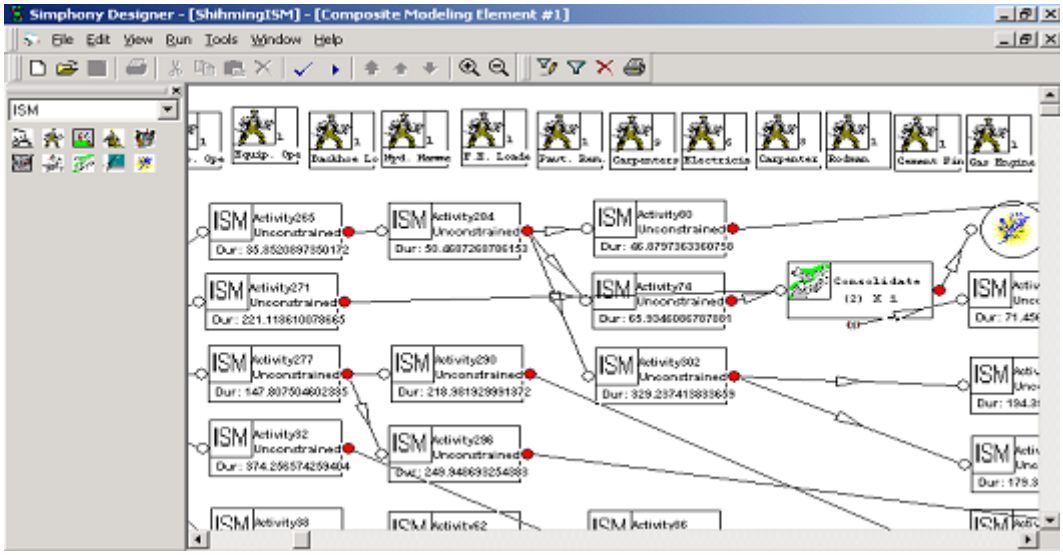


圖 3-6: 使用 ISM 的資源元件庫設定各工項間邏輯和順序關係流程圖

（2）設置工程限制條件（圖 3-7）和工程執行目標（圖 3-8）。 一般而言，工程限制條件是工程的最長施工時間限制，工程執行目標是最短工程施工時間、最低工程基本成本、最少工程總金額或最少工程成本淨現值。但是，ISM 還是允許使用者為 ISM 中存在的任何其他參數（例如，資源或空間面積等）設置限制條件，並將工程執行目標設定為最短工程施工時間、最低工程基本成本、最少工程總金額或最少工程成本淨現值。

Parameter	Value
Attribute Value to Check	LINKED
Operator	<
Value	5000.00

圖 3-7: 設置工程限制條件

Parameter	Value
Objective Value to Find	Minimum Project Net Present
Description	Minimum Project Duration
Target Quantity to Stop Simulation	Minimum Project Cost
	Minimum Project Revenue
	Minimum Project Net Present Valu

圖 3-8: 設置工程執行目標

（3）設定整個工程各可用資源的數量、各空間的面積及各資源單位成本之機率分布樣態（例如：constant、uniform、 triangular、normal、beta 或 exponential 機率分布）（圖 3-9）。

Parameter	Value
Resource Description	R6
Total Number of Resources	13.00
Resource Unit Cost[$/unit-hr]	Constant (60.00)

圖 3-9：設定整個工程各可用資源的數量、各空間的面積及各資源單位成本之機率分布樣態

（4）從 BIM 模型透過「工作分解結構及資料庫系統」工作分解結構功能，導入各工項工作數量到每個工項或從手動界面設定各工項工作數量，並設定各工項所需的其他數據資料（圖 3-10）。

Parameter	Value
Quantity Source	C:\My Documents\ShihmingF
Activity Description	A
Number of Servers	Unconstrained
Yearly Interest Rate	0.15
Overhead percentage [%]	10.00
Contingency percentage [%]	25.00
Profit percentage [%]	15.00
Sales Tax[%]	8.25
Mark Up[%]	17.00
No. of Resources Requested	ALL
File Name	0
Capture Priority	1.00

圖 3-10：從 BIM 模型導入各工項工作數量或從手動界面設定各工項工作數量

（5）設定每個工項所需的資源類型、空間位置、資源關係（例如，一輛卡車需要一位司機）、最大資源生產率，及各資源於各工項所需工作面積（圖 3-11）。設定各種資源生產率隨機分佈型態的目的是為了求取各工項施工時間之隨機分配資料，設定各資源於各工項之空間面積需求隨機分佈型態的目的是為了求取各工項空間面積需求之隨機分配資料。這些資源生產率及空間面積需求可以依據先前的經驗或工程實際狀況設定。例如，運輸時間的分佈資料可藉由運輸距離除以估計的運輸速度範圍求得。目標是要儘可能掌握各工項執行中固有的不確定性。類似地，資源單位成本資料可以依據先前其他工程的數據設定，或依據當地當時的相關數據加以修改。此步驟是為了求取施工時間、空間面積需求及施工成本分布範圍，其中資源生產率、單位資源空間需求及單位成本可被設定為隨機分布樣態或常數。

Parameter	Value
Resource to Request/Release	R2
Multiplier of Number of Resources	5.00
Number of Resources	Uniform (1.00,2.00)
Maximum Resource Productivity(unit/hr)	Constant (4.00)
Required Working Area Per Unit Resource	4.00
Name of The Working Area	A3

圖 3-11：設定每個工項所需的資源類型、空間位置、資源關係、最大資源生產率，及各資源於各工項所需工作面積

（6）使用 ISM 分析尋找最佳資源分配及時程規劃相關資料。（圖 3-12 及 3-13）

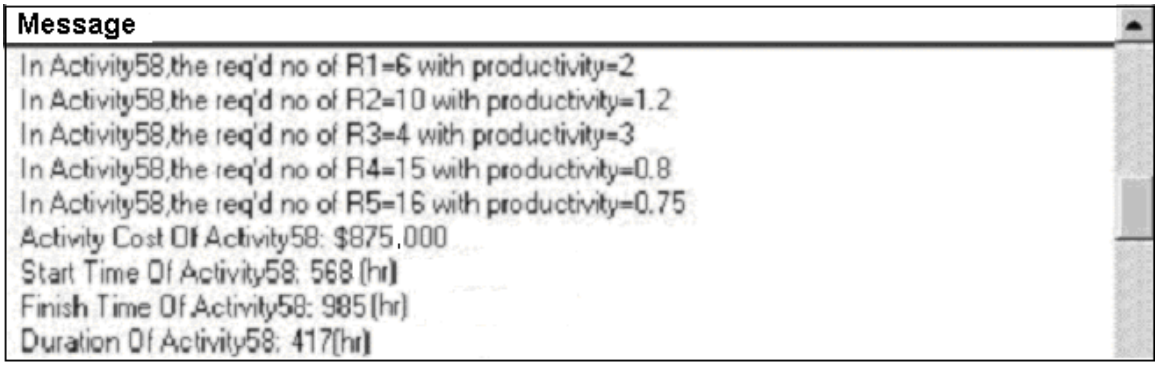


圖 3-12: 使用 ISM 分析出各工項最佳施工時間、資源分配、資源生產率、空間分配、成本、開始施工時間及完成施工時間

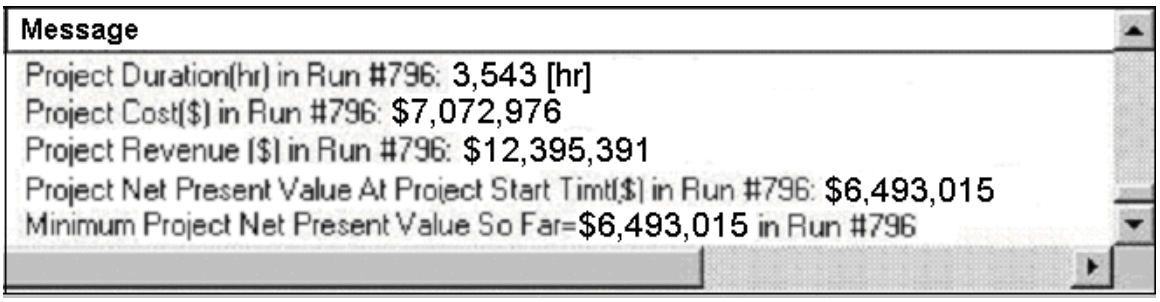


圖 3-13: 使用 ISM 分析出最佳工程施工時間、成本、成本淨現值

（7）如果最佳人員及設備分配係以最短工程施工時間為佳化目標，並且在此最佳化目標下出現兩個或更多選擇方案時，ISM 會自動挑選成本較低的選擇方案。

（8）分析結果。執行數值模擬後，使用者應檢查整個工程中每個資源和每個施工空間區域的使用百分率（圖 3-14）。如果某些資源的最大使用百分率較低，則可能意味著可以使用較少的這些資源來達到相同的工程施工時間。如果某些施工空間區域的最大使用百分率較低，而其他某些施工空間區域的最大使用百分率較高，則使用者應考慮調整這些施工空間區域的區域範圍，即可能縮短工程施工時間。最後，使用者應檢查工程施工時間、工程成本及工程成本現值的隨機風險分析結果。如果計算所得的工程施工時間具有高風險，則承包商可能需要考慮增加具有高最大資源使用率的資源數量，然後依此程序一直重複執行數值模擬分析過程，直到風險降到可接受的範圍。如果計算所得的工程成本或成本淨現值具有高風險，那麼承包商可能需要提高其工程報價。

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	55.92	31.82	1.09	0.00	100.00	None

圖 3-14: 使用 ISM 分析出各資源於整個工程資源使用率

第四章　實作驗證

為了讓讀者對本系統有一基本的認識，我們用Talbot and Patterson (1979)所提供資料做範例。

第一節　範例一

本範例之工項網絡圖如圖4-1所示，各工項所需時間、各工項所需資源及每天可用資源總數則如表4-1所示，皆為常數。

為了用本系統與商用軟體Primavera Project Planner及Microsoft Project做性能上的比較，我們用同樣的上述資料做分析。Primavera Project Planner及Microsoft Projec所得到的所需總工程時間皆為49天，用本系統則得到所需總工程時間為45天（如表4-2所示），約少了8.2%的時間。

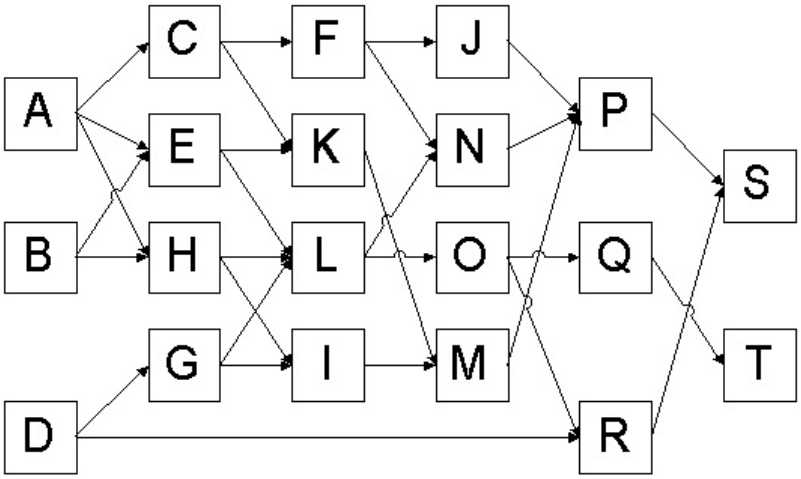


圖 4-1：工項網絡圖

表 4-1：各工項所需時間、各工項所需資源及每天可用資源總數

Activity	Duration (days)	Predecessors	Daily Resource Requirements					
			R1	R2	R3	R4	R5	R6
A	6	-	5	2	2	2	7	4
B	3	-	3	5	2	3	9	6
C	4	A	2	4	4	2	3	1
D	6	-	5	4	3	5	5	4
E	7	A, B	3	5	2	3	8	0
F	5	C	4	1	4	9	2	5
G	2	D	4	1	4	3	9	8

H	2	A, B	5	5	4	0	9	1
I	2	G, H	3	2	4	3	4	2
J	6	F	1	5	4	6	7	3
K	1	C, E	3	3	2	4	5	1
L	2	E, G, H	3	2	2	8	3	4
M	4	I, K	2	2	2	2	4	8
N	2	F, L	1	4	4	3	4	1
O	3	L	5	5	4	6	2	3
P	5	J, M, N	3	2	3	4	7	8
Q	8	O	4	5	4	2	3	4
R	2	D, O	5	3	3	3	7	8
S	6	P, R	2	4	6	2	3	4
T	2	Q	1	6	2	7	5	2
Daily resource limits			7	10	10	16	18	13

表 4-2: 各工項的資源分配及時程規畫

activity / resource / day	Daily Activities																			Resource Quantity					
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	R1	R2	R3	R4	R5	R6
1	X																				5	2	2	2	7	4
2	X																				5	2	2	2	7	4
3	X																				5	2	2	2	7	4
4	X																				5	2	2	2	7	4
5	X																				5	2	2	2	7	4
6	X																				5	2	2	2	7	4
7		X	X																		5	9	6	5	12	7
8		X	X																		5	9	6	5	12	7
9		X	X																		5	9	6	5	12	7
10			X	X																	7	8	7	7	8	5
11				X																	5	4	3	5	5	4
12				X																	5	4	3	5	5	4
13				X																	5	4	3	5	5	4
14				X																	5	4	3	5	5	4
15				X																	5	4	3	5	5	4
16					X	X															7	6	6	12	10	5
17					X	X															7	6	6	12	10	5
18					X	X															7	6	6	12	10	5
19					X	X															7	6	6	12	10	5
20					X	X															7	6	6	12	10	5
21					X		X														7	6	6	6	17	8
22					X		X														7	6	6	6	17	8
23								X		X											6	10	8	6	16	4
24								X		X											6	10	8	6	16	4
25									X	X	X										7	10	10	13	16	6
26									X	X											4	7	8	9	11	5
27										X		X									4	7	6	14	10	7
28										X		X									4	7	6	14	10	7
29													X		X						7	7	6	8	6	11
30													X		X						7	7	6	8	6	11
31													X		X						7	7	6	8	6	11
32													X	X							3	6	6	5	8	9
33														X				X			6	7	7	6	11	9
34																		X			5	3	3	3	7	8
35																X	X				7	7	7	6	10	12
36																X	X				7	7	7	6	10	12
37																X	X				7	7	7	6	10	12
38																X	X				7	7	7	6	10	12
39																X	X				7	7	7	6	10	12
40																	X		X		6	9	10	4	6	8
41																	X		X		6	9	10	4	6	8
42																	X		X		6	9	10	4	6	8
43																			X	X	3	10	8	9	8	6
44																			X	X	3	10	8	9	8	6
45																			X		2	4	6	2	3	4

第二節　範例二

本範例之主要目的為幫助讀者對本系統有進一步瞭解，其基本資料如圖4-1及表4-3至表4-6所示。此外，利率設定為15%，經常費用設定為10%，偶發性費用設定為25%，利潤設定為15%，銷售稅設定為8.25%，物價通膨設定為17%。

這個範例的目標是定義為在整個工程工期不超過5000工作小時的前提下，找出最低成本淨現值所對應的各工項資源分配及時程。

用本系統分析上述資料所得結果如圖4-2至圖4-12及表4-7至表4-10所示。從以上資料，我們可以得知所有資源的最大使用率都已經達到100%，表示如果降低每天可以使用資源的最大數量可能會導致工期延長。此外，約有90%的機率，此工程總支出不會超過7,250,000元。

表 4-3: 各工項基本資料

工項	Predecessors	Work Quantity for Manpower or Equipment	Required Resources (Manpower or Equipment)	Resource Relationship Constraint	Working Region
A	-	1,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R1:R2=5:2	A1
B	-	2,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R3:R4:R5=2:3:9	A1
C	A	3,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R2:R5=4:3	A2
D	-	4,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R2:R4=4:5	A2
E	A, B	5,000	R1, R2, R3, R4, R5	R2:R5=5:8	A3
F	C	1,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R1:R4=4:9	A4
G	D	2,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R5:R6=9:8	A4
H	A, B	3,000	R1, R2, R3, R5, R6	R2:R5=5:9	A3
I	G, H	4,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R3:R4=4:3	A6
J	F	5,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R4:R5=6:7	A6
K	C, E	1,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R4:R5=4:5	A5
L	E, G, H	2,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R1:R4=3:8	A5
M	I, K	3,000	R1, R2, R3, R4, R5,	R5:R6=4:8	A8

			R6		
N	F, L	4,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R3:R4=4:3	A7
O	L	5,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R2:R4=5:6	A7
P	J, M, N	1,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R5:R6=7:8	A9
Q	O	2,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R1:R2=4:5	A8
R	D, O	3,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R5:R6=7:8	A9
S	P, R	4,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R2:R3=4:6	A10
T	Q	5,000	R1, R2, R3, R4, R5, R6	R2:R4=6:7	A10

表 4-4: 各資源於各工項之可能最大生產率、單位成本、每天可提供最大數量限制、單位資源所需工作空間

Item	Activity	Resource (Manpower or Equipment)					
		R1	R2	R3	R4	R5	R6
Max Productivity (Q/unit-hr)	A	Triang (4,5,6)	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)	Triang (5,6,7)
	B	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (4,5,6)	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (4,5,6)
	C	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)
	D	Triang (4,5,6)	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)	Triang (5,6,7)
	E	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (4,5,6)	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	-
	F	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)
	G	Triang (4,5,6)	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)	Triang (5,6,7)
	H	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (4,5,6)	-	Triang (2,3,4)	Triang (4,5,6)
	I	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)
	J	Triang (4,5,6)	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)	Triang (5,6,7)
	K	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (4,5,6)	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (4,5,6)
	L	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)
	M	Triang (4,5,6)	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)	Triang (5,6,7)
	N	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (4,5,6)	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (4,5,6)
	O	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)
	P	Triang (4,5,6)	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)	Triang (5,6,7)
	Q	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (4,5,6)	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (4,5,6)
	R	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)
	S	Triang (4,5,6)	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (3,4,5)	Triang (4,5,6)	Triang (5,6,7)
	T	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (4,5,6)	Triang (3,4,5)	Triang (2,3,4)	Triang (4,5,6)
Unit Cost ($/unit-hr)	ALL	Normal (30,3)	Normal (40,4)	Normal (50,5)	Normal (30,3)	Normal (40,4)	Normal (50,5)
Daily Resource	ALL	7	10	10	16	18	13
Req'd Working Area Per Unit	ALL	2	4	6	8	10	12

表 4-5: 各工項相對於材料的工作數量、所需材料種類、各材料單位成本、各材料於各工項相對於工作數量之生產率

Activity	Work Quantity for Material (Q)	Material Unit Cost/Material Type Required/Material Productivity (Q/unit)					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6
		20 ($/unit)	30 ($/unit)	40 ($/unit)	15 ($/unit)	25 ($/unit)	35 ($/unit)
A	5,000	800	-	-	-	250	-
B	4,000	-	800	-	500	-	-
C	3,000	400	-	250	-	-	-
D	2,000	-	-	400	-	250	-
E	1,000	200	-	-	100	-	-
F	5,000	-	-	800	-	500	-
G	4,000	-	-	-	800	-	500
H	3,000	250	400	-	-	-	-
I	2,000	400	-	250	-	-	-
J	1,000	-	200	-	-	100	-
K	5,000	-	-	500	-	800	-
L	4,000	-	-	-	500	-	800
M	3,000	-	250	-	-	400	-
N	2,000	400	-	-	250	-	-
O	1,000	-	-	200	-	-	100
P	5,000	500	-	800	-	-	-
Q	4,000	-	800	-	500	-	-
R	3,000	400	-	250	-	-	-
S	2,000	-	-	-	400	-	250
T	1,000	100	-	-	-	200	-

表 4-6: 每個工作區域之總工作面積

Area Name	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Total Area	450	400	400	400	500	400	500	350	350	400

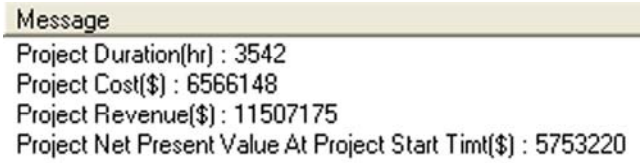


圖 4-2: 工程所需時間、基本成本、總金額、成本淨現值

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Project Duration (hr)	500	3777.99	0.00	101.31	3493.00	4107.00	View
Project Cost (x1000)($)	500	6968.70	0.00	205.54	6464.00	7752.00	View
Project Revenue (x1000)($)	500	12213.04	0.00	360.20	11328.00	13586.00	View
Project Present Value (x100(	500	6084.29	0.00	169.74	5661.00	6730.00	View

圖 4-3：工程所需時間、基本成本、總金額、成本淨現值的隨機分佈相關資料

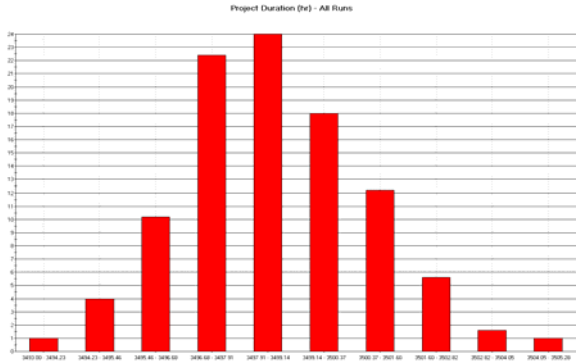


圖 4-4：工程所需時間的隨機分佈機率圖

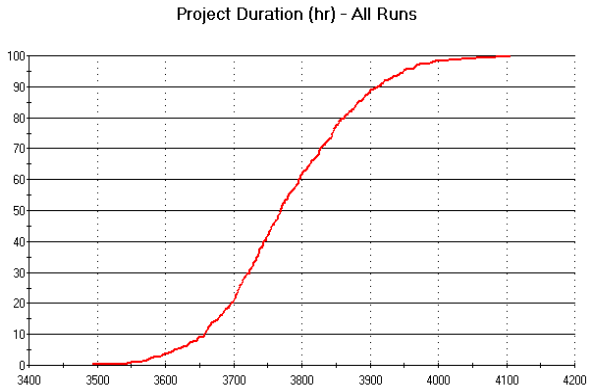


圖 4-5：工程所需時間的累計分佈機率圖

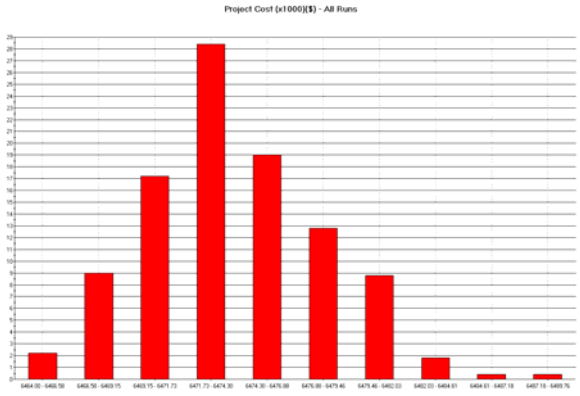


圖 4-6：工程基本成本的隨機分佈機率圖

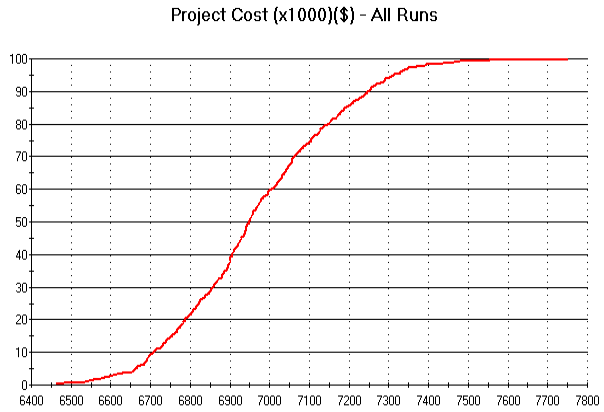


圖 4-7：工程基本成本的累計分佈機率圖

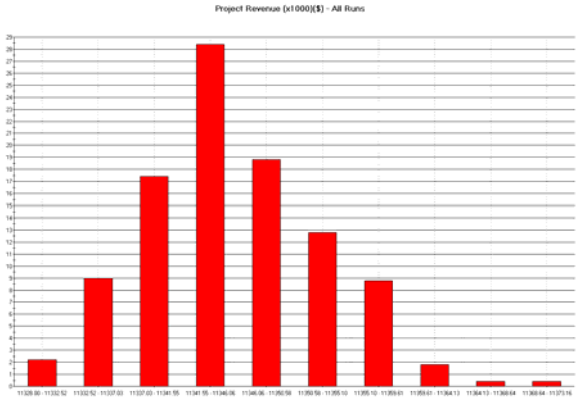


圖 4-8：工程總金額的隨機分佈機率圖

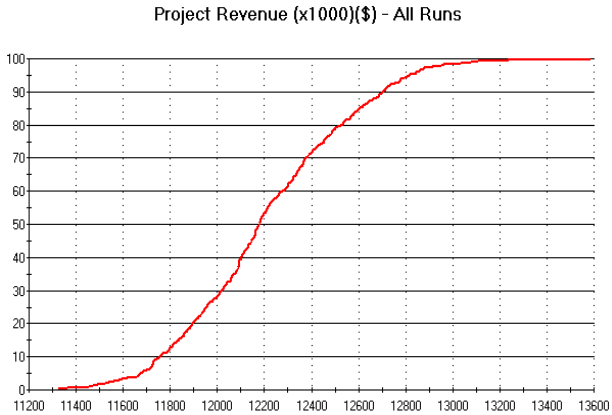


圖 4-9：工程總金額的累計分佈機率圖

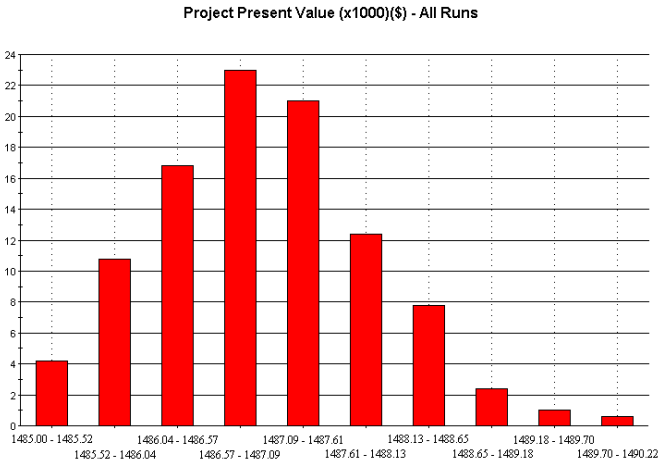


圖 4-10：工程起始時間之成本淨現值的隨機分佈機率圖

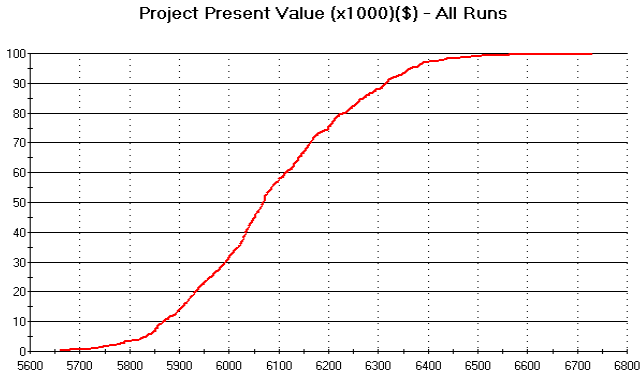


圖 4-11：工程起始時間之成本淨現值的累計分佈機率圖

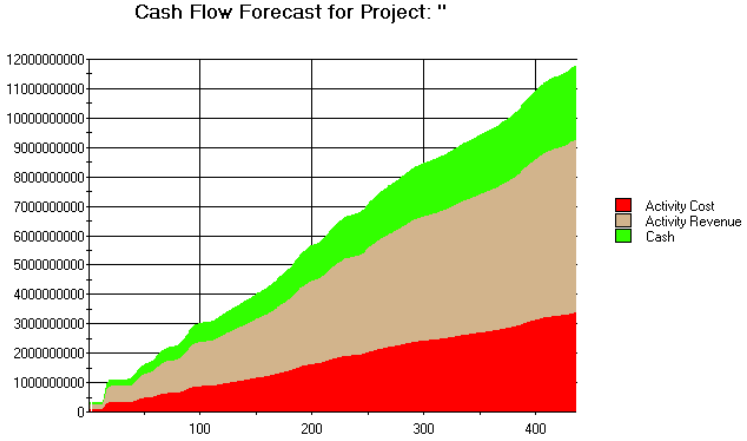


圖 4-12：整個工程的現金流量預測圖

表 4-7: 各工項資源分配、資源生產率、成本、開始時間、結束時間、所需時間（第一部份）

Activity Title		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
R1	Req'd no	5	6	5	6	6	4	6	5	7	4
	Productivity	1.6	2	4.2	5	2	5	2.67	2.4	3.43	4.5
R2	Req'd no	2	3	8	8	10	7	4	10	8	6
	Productivity	4	4	2.63	3.75	1.2	2.86	4	1.2	3	3
R3	Req'd no	10	4	7	10	4	7	8	4	8	6
	Productivity	0.8	3	3	3	3	2.86	2	3	3	3
R4	Req'd no	10	6	6	10	15	9	14	-	6	12
	Productivity	0.8	2	3.5	3	0.8	2.22	1.14	-	4	1.5
R5	Req'd no	2	18	6	6	16	14	9	18	12	14
	Productivity	4	0.67	3.5	5	0.75	1.43	1.78	0.67	2	1.29
R6	Req'd no	6	11	5	13	-	7	8	6	11	7
	Productivity	1.33	1.09	4.2	2.31	-	2.86	2	2	2.18	2.57
M1	Req'd no	6	-	8	-	5	-	-	12	5	-
M2	Req'd no	-	5	-	-	-	-	-	8	-	5
M3	Req'd no	-	-	12	5	-	6	-	-	8	-
M4	Req'd no	-	8	-	-	10	-	5	-	-	-
M5	Req'd no	20	-	-	8	-	10	-	-	-	10
M6	Req'd no	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-
Cost ($)		176,875	325,270	213,487	292,400	779,417	97,000	240,355	442,965	357,087	536,511
Start Time (hr)		0.000	125.000	425.000	291.667	567.857	1359.524	1234.524	984.524	1584.524	1751.190
Finish Time (hr)		125.000	291.667	567.857	425.000	984.524	1409.524	1359.524	1234.524	1751.190	2028.968
Duration (hr)		125.000	166.667	142.857	133.333	416.667	50.000	125.000	250.000	166.667	277.778

表 4-8: 各工項資源分配、資源生產率、成本、開始時間、結束時間、所需時間（第二部份）

Activity Title		K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
R1	Req'd no	7	6	4	6	7	4	4	7	3	4
	Productivity	3.43	2.5	5	4	2.57	2.25	3	3.43	5	5
R2	Req'd no	8	9	10	6	10	8	5	6	4	6
	Productivity	3	1.67	2	4	1.8	1.125	2.4	4	3.75	3.33
R3	Req'd no	8	5	9	8	6	3	8	10	6	8
	Productivity	3	3	2.22	3	3	3	1.5	2.4	2.5	2.5
R4	Req'd no	12	16	8	6	12	14	6	10	10	7
	Productivity	2	0.94	2.5	4	1.5	0.64	2	2.4	1.5	2.86
R5	Req'd no	15	4	4	5	11	7	6	7	16	9
	Productivity	1.6	3.75	5	4.8	1.64	1.29	2	3.43	0.94	2.22
R6	Req'd no	13	4	8	9	13	8	2	8	4	13
	Productivity	1.85	3.75	2.5	2.67	1.38	1.125	6	3	3.75	1.54
M1	Req'd no	-	-	-	5	-	10	-	8	-	10
M2	Req'd no	-	-	12	-	-	-	5	-	-	-
M3	Req'd no	10	-	-	-	5	6	-	12	-	-
M4	Req'd no	-	8	-	8	-	-	8	-	5	-
M5	Req'd no	-	-	8	-	-	-	-	-	-	5
M6	Req'd no	6	5	-	-	10	-	-	-	8	-
Cost ($)		106,389	217,628	266,048	275,220	656,106	188,227	206,937	241,880	451,022	495,325
Start Time (hr)		1409.524	1451.190	2473.413	2306.746	2028.968	2915.079	2623.413	2790.079	3276.190	3026.190
Finish Time (hr)		1451.190	1584.524	2623.413	2473.413	2306.746	3026.190	2790.079	2915.079	3542.857	3276.190
Duration (hr)		41.667	133.333	150.000	166.667	277.778	111.111	166.667	125.000	266.667	250.000

表 4-9: 各資源於整個工程的利用率

Resource	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Mean Resource Utilization Percentage	74.84%	71.42%	65.42%	59.06%	60.46%	55.92%
Maximum Resource Utilization Percentage	100%	100%	100%	100%	100%	100%

表 4-10: 各空間於整個工程的利用率

Area Name	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
Mean Space Utilization Percentage	6.23	7.21	16.22	4.62	3.38	12.24	9.82	6.45	6.48	13.25
Maximum Space Utilization Percentage	90.67	100	89	93.5	99.20	98.50	90.40	86.29	98.29	95.50

第三節　範例三

本案例是位於美國紐約市的兄弟會猶太教堂的實際案例，其施工工項網絡圖、工項描述、工項施工時間、各工項所需資源，以及每日資源數量限制如圖 4-13、表 4-11，及表 4-12 所示。在有每日資源數量限制條件下，使用 Primavera 的排程軟體來安排這些施工工項的施工時間並為這些施工工項分配資源，所得工程總施工時間為 316 天。

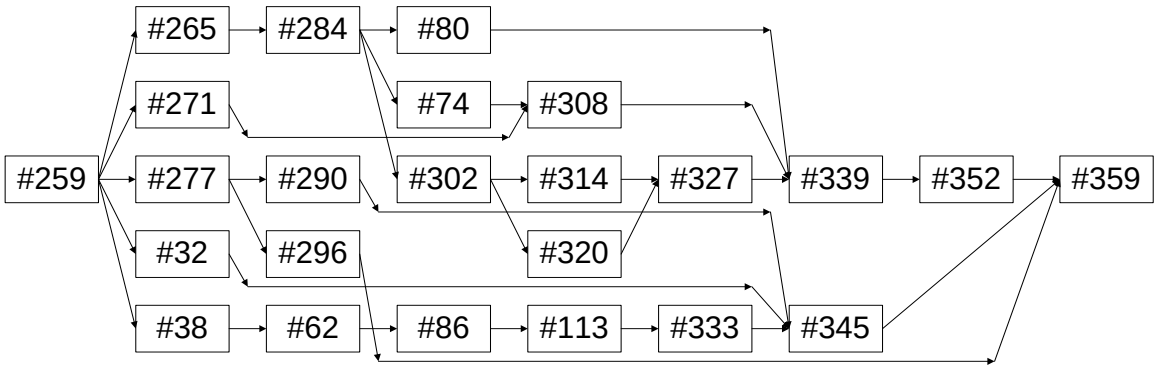


圖 4-13: 實作驗證案例施工工項網絡圖（號碼為施工工項編號）

表 4-11:施工工項名稱及前置作業施工工項編號

Activity ID	Activity Description	Predecessors
32	Construct stairs	259
38	Construct scaffolding	259
62	Construct girders for 4th floor	38
74	Walls, windows 202, 201, 209	284

80	Doors 200, 201, 202, 204	284
86	Construct joists for 4th floor	62
113	Complete 4th floor	86
259	Start	N/A
265	Start demo	259
271	Fabricate millwork	259
277	Demo for sprinkler and AC	259
284	Finish 2nd floor	265
290	Sprinkler	277
296	Install duct	277
302	Start electrical 201, 202, 205	284
308	Install millwork	74, 271
314	Ceiling 201, 202, 205	302
320	Complete electrical for 2nd floor	302
327	Install lighting	314, 320
333	Take down scaffolding	113
339	Finish floor	80, 308, 327
345	Ceiling (lights)	32, 290, 333
352	Finish trim	339
359	Finish up	296, 345, 352

表 4-12:各工項施工時間、資源需求、每日資源數量限制

工項編號	施工時間 (天)	每日資源數量需求																		
		LF	L	EOL	EOM	BL	HH	FEL	PRB	C	E	CF	R	CEF	GEV	SWF	SW	SMW	SMA	LA
32	40	-	1	-	-	-	-	-	-	2	3	1	1	1	1	-	-	-	-	-
38	20	-	4	-	-	-	-	-	-	3	3	4	-	-	-	-	-	-	-	-
62	60	-	1	-	-	-	-	-	-	4	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-
74	15	-	1	-	-	-	-	-	-	4	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-
80	20	-	2	-	-	-	-	-	-	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-
86	90	-	2	-	-	-	-	-	-	1	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-
113	30	-	3	-	-	-	-	-	-	1	2	5	-	-	-	-	-	-	-	-
259	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
265	4	1	2	1	1	1	1	1	1	5	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-
271	60	-	3	-	-	-	-	-	-	2	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-
277	20	-	2	-	-	-	-	-	-	6	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-
284	6	-	5	-	-	-	-	-	-	1	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-
290	30	-	2	-	-	-	-	-	-	4	4	2	-	-	-	2	8	-	-	-
296	30	-	4	-	-	-	-	-	-	5	3	4	-	-	-	-	-	2	1	-
302	40	-	3	-	-	-	-	-	-	4	1	3	-	-	-	-	-	-	-	-
308	10	-	4	-	-	-	-	-	-	1	3	2	-	-	-	-	-	-	-	-
314	25	-	3	-	-	-	-	-	-	3	4	3	-	-	-	-	-	-	-	1
320	20	-	2	-	-	-	-	-	-	4	1	4	-	-	-	-	-	-	-	-
327	10	-	3	-	-	-	-	-	-	5	1	3	-	-	-	-	-	-	-	-
333	20	-	2	-	-	-	-	-	-	3	4	3	-	-	-	-	-	-	-	-
339	10	-	4	-	-	-	-	-	-	1	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-
345	30	-	3	-	-	-	-	-	-	5	1	4	-	-	-	-	-	-	-	-
352	5	-	2	-	-	-	-	-	-	1	3	4	-	-	-	-	-	-	-	-
359	1	-	4	-	-	-	-	-	-	1	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
每日資源數量限制		1	6	1	1	1	1	1	1	9	6	8	1	1	1	2	8	2	1	1

備註：

LF =Labor Foreman(勞工工頭)

L = Laborers(勞工)

EOL =Equip. Oper. [light](輕型設備操作員)

EOM = Equip. Oper. [medium](中型設備操作員)

BL =Backhoe Loader (挖掘裝載機)

HH =Hyd. Hammer(液壓錘)

FEL =F.E. Loader(前端裝載機)

PRB = Pavt. Rem. Bucket(鑽掘機)

C = Carpenters(木匠)

E =Electricians(電工)

CF = Carpenter Foreman(木匠工頭)

R =Rodman(標尺手)

CEF =Cement Finisher(水泥修整機)

GEV =Gas Engine Vibrator(燃氣發動機振動器)

SWF =Skilled Worker Foremen(熟練工人工頭)

SW =Skilled Workers(技術工人)

SMW =Sheet Metal Workers(鈑金工人)

SMA = Sheet Metal Apprentice(鈑金學徒)

LA = Lathe(車床)

使用本研究系統執行排程程序及結果

為了讓讀者了解本系統操作程序，除了已知的工程相關數據外，作者假設其餘未知的數據，以期較完整呈現本系統功能。在不違反每日各資源最大數量使用限制條件下，此案例的排程目標為求取對短施工工期，並安排各工項施工起迄時間及每日所需各資源的數量。本系統操作程序如下：

程序一　繪製 BIM 模型、自 BIM 模型擷取資料、以「工作分解結構及資料庫系統」工作分解結構功能重新整合資料

本步驟於繪製 BIM 模型(如圖 4-14)後，可以二不同方式完成其餘步驟(細部步驟請參閱本所 106 年研究案「應用 BIM 於建築工程之資源分配及時程規劃策略研究」):

方式一:

- 自 BIM 模型匯出 IFC 格式檔案
- BIM 模型 IFC 格式檔案轉成 COBie 格式檔案
- 研發「工作分解結構及資料庫系統」工作分解結構功能
- BIM 模型 COBie 格式檔案資料依「工作分解結構及資料庫系統」工作分解結構功能重新整合

方式二:

- 匯出 BIM 模型明細表資料並存成 Excel 格式檔案
- 研發「工作分解結構及資料庫系統」工作分解結構功能
- BIM 模型明細表 Excel 格式檔案資料依工作分解結構重新整合

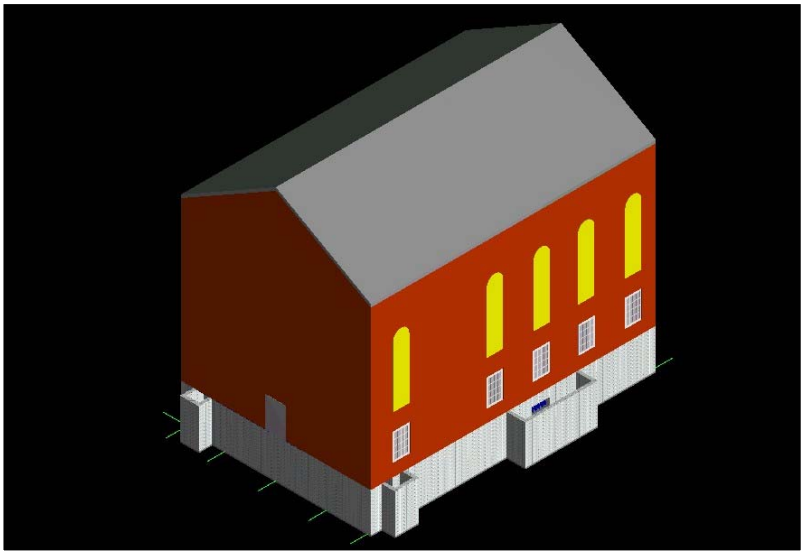


圖 4-14: 實作驗證案例 BIM 模型

程序二　將經工作分解結構功能重新整合之 BIM 模型資料匯入本研究排程系統，並分析產出最佳資源分配及時程規畫

為了測試本系統分析計算最佳資源分配及排程的能力，本案例使用了相同的施工工項網絡圖（如圖 4-13），每個工項名稱、所需的資源類型以及每日資源限制如表 4-11 及表 4-12 所示。但是，為符合工班數量調度彈性，每個工項中每個資源類型所需資源數量並非設定固定數量，而是設定固定比率。為了比較使用 Primavera 獲得的結果，作者特意依據表 4-12 中顯示的資源數量設置資源數量比率，資源數量比率詳如表 4-13 所示。

單位成本和資源生產率的平均值是模擬的基本資料，詳如表 4-14 至表 4-17。經由使用本系統模擬分析這些數據一千次，在第 991 次模擬分析時找到了最佳結果：工程施工時間為 296 個工作日（即基於每天施工 8 個工作小時，共施工 2,368 個工作小時）（圖 4-15）。各工項所需資源、資源生產率、工項開始時間、工項完成時間、工項施工時間及工項施工成本詳如表 4-18 至表 4-20。比較商用排程軟體 Primavera 及本系統於本範例分析結果，二者之施工工項網絡圖、工項施工時間、各工項所需資源，以及每日資源數量限制皆相同情況下，Primavera 所得工程總施工時間為 316 個工作日，本系統所得工程總施工時間為 296 個工作日。

表 4-13：各工項資源需求比率

Activity ID	Daily Resource Requirement Ratio
32	L : C : E : CF : R : CEF : GEV = 1 : 2 : 3 : 1 : 1 : 1 : 1
38	L : C : E : CF = 4 : 3 : 3 : 4
62	L : C : E : CF = 1 : 4 : 2 : 1
74	L : C : E : CF = 1 : 4 : 3 : 1
80	L : C : E : CF = 2 : 2 : 2 : 2
86	L : C : E : CF = 2 : 1 : 2 : 2
113	L : C : E : CF = 3 : 1 : 2 : 5
259	N/A
265	LF : L : EOL : EOM : BL : HH : FEL : PRB = 1 : 1 : 1 : 1 : 1 : 1 : 1 : 1
271	L : C : E : CF = 3 : 2 : 2 : 3
277	L : C : E : CF = 2 : 6 : 1 : 5
284	L : C : E : CF = 5 : 1 : 4 : 4
290	L : C : E : CF : SWF : SW = 2 : 4 : 4 : 2 : 2 : 8
296	L : C : E : CF : SMW : SMA= 4 : 5 : 3 : 4 : 2 : 1
302	L : C : E : CF = 3 : 4 : 1 : 3
308	L : C : E : CF = 4 : 1 : 3 : 2
314	L : C : E : CF : LA = 3 : 3 : 4 : 3 : 1
320	L : C : E : CF = 2 : 4 : 1 : 4
327	L : C : E : CF = 3 : 5 : 1 : 3
333	L : C : E : CF = 2 : 3 : 4 : 3
339	L : C : E : CF = 4 : 1 : 2 : 3
345	L : C : E : CF = 3 : 5 : 1 : 4

352	L : C : E : CF = 2 : 1 : 3 : 4
359	L : C : E : CF = 4 : 1 : 3 : 3

表 4-14: 各資源單位成本（第一部份）

Resource Unit Cost ($/unit-hr)									
LF	L	EOL	EOM	BL	HH	FEL	PRB	C	E
N(24.85, 2.49)	N(22.85, 2.29)	N(28.75, 2.88)	N(30.35, 3.04)	N(22.63, 2.26)	N(23.80, 2.38)	N(64.85, 6.49)	N(5.70, 0.57)	N(29.15, 2.92)	N(34.30, 3.43)

備註： N = normal distribution

表 4-15: 各資源單位成本（第二部份）

Resource Unit Cost ($/unit-hr)								
CF	R	CEF	GEV	SWF	SW	SMW	SMA	LA
N(31.15, 3.12)	N(32.75, 3.28)	N(27.95, 2.80)	N(4.75, 0.48)	N(31.85, 3.19)	N(29.85, 2.99)	N(33.55, 3.36)	N(26.84, 2.68)	N(28.20, 2.82)

備註：N = normal distribution

表 4-16: 各資源最大可能生產率（第一部份）

ID	Possible Maximum Resource Productivity (Q/unit-hr)									
	LF	L	EOL	EOM	BL	HH	FEL	PRB	C	E
32	-	N(10.38, 1.04)	-	-	-	-	-	-	N(5.19, 0.52)	N(3.46, 0.35)
38	-	N(0.47, 0.05)	-	-	-	-	-	-	N(0.63, 0.06)	N(0.63, 0.06)
62	-	N(38.75, 3.88)	-	-	-	-	-	-	N(9.69, 0.97)	N(19.38, 1.94)
74	-	N(3, 0.3)	-	-	-	-	-	-	N(0.75, 0.08)	N(1, 0.1)
80	-	N(0.13, 0.01)	-	-	-	-	-	-	N(0.13, 0.01)	N(0.13, 0.01)
86	-	N(8.75, 0.88)	-	-	-	-	-	-	N(17.5, 1.75)	N(8.75, 0.88)
113	-	N(0.8, 0.08)	-	-	-	-	-	-	N(2.4, 0.24)	N(1.2, 0.12)
259	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
265	N(4.13,	N(2.06,	N(4.13,	N(4.13,	N(4.13,	N(4.13,	N(4.13,	N(4.13,	N(0.83,	N(4.13,

	0.41)	0.21)	0.41)	0.41)	0.41)	0.41)	0.41)	0.41)	0.08)	0.41)
271	-	N(0.04, 0.01)	-	-	-	-	-	-	N(0.06, 0.01)	N(0.06, 0.01)
277	-	N(24.69, 2.47)	-	-	-	-	-	-	N(8.23, 0.82)	N(49.38, 4.94)
284	-	N(0.48, 0.05)	-	-	-	-	-	-	N(2.4, 0.24)	N(0.6, 0.06)
290	-	N(0.4, 0.04)	-	-	-	-	-	-	N(0.2, 0.02)	N(0.2, 0.02)
296	-	N(3.75, 0.38)	-	-	-	-	-	-	N(3, 0.3)	N(5, 0.5)
302	-	N(3.33, 0.33)	-	-	-	-	-	-	N(2.5, 0.25)	N(10, 1)
308	-	N(0.04, 0.01)	-	-	-	-	-	-	N(0.15, 0.02)	N(0.05, 0.01)
314	-	N(6.88, 0.69)	-	-	-	-	-	-	N(6.88, 0.69)	N(5.16, 0.52)
320	-	N(5, 0.5)	-	-	-	-	-	-	N(2.5, 0.25)	N(10, 1)
327	-	N(0.24, 0.02)	-	-	-	-	-	-	N(0.14, 0.01)	N(0.71, 0.07)
333	-	N(0.95, 0.10)	-	-	-	-	-	-	N(0.63, 0.06)	N(0.47, 0.05)
339	-	N(0.6, 0.06)	-	-	-	-	-	-	N(2.4, 0.24)	N(1.2, 0.12)
345	-	N(0.24, 0.02)	-	-	-	-	-	-	N(0.14, 0.01)	N(0.71, 0.07)
352	-	N(12.5, 1.3)	-	-	-	-	-	-	N(25, 2.5)	N(8.33, 0.83)
359	-	N(0.6, 0.06)	-	-	-	-	-	-	N(2.4, 0.24)	N(0.8, 0.08)

備註： N = normal distribution

表 4-17: 各資源最大可能生產率（第二部份）

ID	Possible Maximum Resource Productivity (Q/unit-hr)								
	CF	R	CEF	GEV	SWF	SW	SMW	SMA	LA
32	N(10.38, 1.04)	N(10.38, 1.04)	N(10.38, 1.04)	N(10.38, 1.04)	-	-	-	-	-
38	N(0.47,	-	-	-	-	-	-	-	-

	0.05)								
62	N(38.75, 3.88)	-	-	-	-	-	-	-	-
74	N(3, 0.3)	-	-	-	-	-	-	-	-
80	N(0.13, 0.01)	-	-	-	-	-	-	-	-
86	N(8.75, 0.88)	-	-	-	-	-	-	-	-
113	N(0.48, 0.05)	-	-	-	-	-	-	-	-
259	-	-	-	-	-	-	-	-	-
265	N(2.06, 0.21)	-	-	-	-	-	-	-	-
271	N(0.04, 0.01)	-	-	-	-	-	-	-	-
277	N(9.88, 0.99)	-	-	-	-	-	-	-	-
284	N(0.6, 0.06)	-	-	-	-	-	-	-	-
290	N(0.4, 0.04)	-	-	-	N(0.4, 0.04)	N(0.1, 0.01)	-	-	-
296	N(3.75, 0.38)	-	-	-	-	-	N(7.5, 0.75)	N(15, 1.5)	-
302	N(3.33, 0.33)	-	-	-	-	-	-	-	-
308	N(0.08, 0.01)	-	-	-	-	-	-	-	-
314	N(6.88, 0.69)	-	-	-	-	-	-	-	N(20.63, 2.06)
320	N(2.5, 0.25)	-	-	-	-	-	-	-	-
327	N(0.24, 0.02)	-	-	-	-	-	-	-	-
333	N(0.63, 0.06)	-	-	-	-	-	-	-	-
339	N(0.8, 0.08)	-	-	-	-	-	-	-	-
345	N(0.18,	-	-	-	-	-	-	-	-

	0.02)								
352	N(6.25, 0.63)	-	-	-	-	-	-	-	-
359	N(0.8, 0.08)	-	-	-	-	-	-	-	-

備註：N = normal distribution

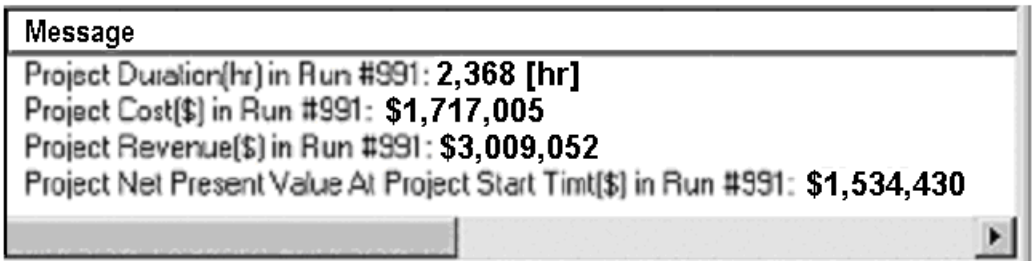


圖 4-15: 經資源分配分析最佳化之工程施工時間、基本成本、總金額及成本淨現值

表 4-18：各工項中各資源分配、各資源生產率、各工項施工成本、各工項開始施工時間、各工項完成施工時間、各工項施工時間（第一部份）

Activity ID		32	38	62	74	80	86	113	259
LF	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
L	Req'd No	1	4	1	1	2	2	3	-
	Productivity (Q/hr)	10.38	0.47	38.75	3	0.13	8.75	0.8	-
EOL	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
EOM	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
BL	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
HH	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
PRB	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
C	Req'd No	2	3	4	4	2	1	1	-
	Productivity (Q/hr)	5.19	0.63	9.69	0.75	0.13	17.5	2.4	-

E	Req'd No	3	3	2	3	2	2	2	-
	Productivity (Q/hr)	3.46	0.63	19.38	1	0.13	8.75	1.2	-
CF	Req'd No	1	4	1	1	2	2	5	-
	Productivity (Q/hr)	10.38	0.47	38.75	3	0.13	8.75	0.48	-
R	Req'd No	1	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	10.38	-	-	-	-	-	-	-
CEF	Req'd No	1	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	10.38	-	-	-	-	-	-	-
GEV	Req'd No	1	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	10.38	-	-	-	-	-	-	-
SWF	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
SW	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
SMW	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
SMA	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
LA	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
Cost ($)		89,916	86,052	154,644	33,302	37,955	232,661	79,612	0
Start Time (day)		5	1	41	171	81	101	191	0
Finish Time (day)		44	20	100	185	100	190	220	0
Duration (day)		40	20	60	15	20	90	30	0

表 4-19：各工項中各資源分配、各資源生產率、各工項施工成本、各工項開始施工時間、各工項完成施工時間、各工項施工時間（第二部份）

Activity ID		265	271	277	284	290	296	302	308
LF	Req'd No	1	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	4.12	-	-	-	-	-	-	-
L	Req'd No	2	3	2	5	2	4	3	4
	Productivity (Q/hr)	2.06	3.73	24.69	0.48	0.4	3.75	3.33	0.04
EOL	Req'd No	1	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	4.12	-	-	-	-	-	-	-
EOM	Req'd No	1	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	4.12	-	-	-	-	-	-	-
BL	Req'd No	1	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	4.12	-	-	-	-	-	-	-

HH	Req'd No	1	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	4.12	-	-	-	-	-	-	-
FEL	Req'd No	1	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	4.12	-	-	-	-	-	-	-
PRB	Req'd No	1	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	4.12	-	-	-	-	-	-	-
C	Req'd No	5	2	6	1	4	5	4	1
	Productivity (Q/hr)	0.824	0.06	8.23	2.4	0.2	3	2.5	0.15
E	Req'd No	1	2	1	4	4	3	1	3
	Productivity (Q/hr)	4.12	0.06	49.38	0.6	0.2	5	10	0.05
CF	Req'd No	2	3	5	4	2	4	3	2
	Productivity (Q/hr)	2.06	3.73	9.88	0.6	0.4	3.75	3.33	0.08
R	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
CEF	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
GEV	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
SWF	Req'd No	-	-	-	-	2	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	0.4	-	-	-
SW	Req'd No	-	-	-	-	8	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	0.1	-	-	-
SMW	Req'd No	-	-	-	-	-	2	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	7.5	-	-
SMA	Req'd No	-	-	-	-	-	1	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	15	-	-
LA	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
Cost ($)		15,666	139,291	65,697	19,450	159,432	134,062	100,128	22,860
Start Time (day)		1	81	21	45	141	51	171	236
Finish Time (day)		4	140	40	50	170	80	210	245
Duration (day)		4	60	20	6	30	30	40	10

表 4-20：各工項中各資源分配、各資源生產率、各工項施工成本、各工項開始施工時間、各工項完成施工時間、各工項施工時間（第三部份）

Activity ID		314	320	327	333	339	345	352	359
LF	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-

L	Req'd No	3	2	3	2	4	3	2	4
	Productivity (Q/hr)	6.88	5	0.24	0.95	0.6	0.24	12.5	0.6
EOL	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
EOM	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
BL	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
HH	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
FEL	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
PRB	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
C	Req'd No	3	4	5	3	1	5	1	1
	Productivity (Q/hr)	6.88	2.5	0.14	0.63	2.4	0.14	25	2.4
E	Req'd No	4	1	1	4	2	1	3	3
	Productivity (Q/hr)	5.16	10	0.71	0.47	1.2	0.71	8.33	0.8
CF	Req'd No	3	4	3	3	3	4	4	3
	Productivity (Q/hr)	6.88	2.5	0.24	0.63	0.8	0.18	6.25	0.8
R	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
CEF	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
GEV	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
SWF	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
SW	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
SMW	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
SMA	Req'd No	-	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	-	-	-	-	-	-	-	-
LA	Req'd No	1	-	-	-	-	-	-	-
	Productivity (Q/hr)	20.63	-	-	-	-	-	-	-
Cost ($)		82,970	51,392	27,364	57,746	22,608	89,568	12,094	2,535
Start Time (day)		211	221	246	246	256	266	266	296

Finish Time (day)	235	240	255	265	265	295	270	296
Duration (day)	25	20	10	20	10	30	5	1

程序三　執行風險性分析及分析各資源使用比率

接著，將各工項各資源數量設定為前面最佳化分析計算所得之資源數量固定值，但是定義資源單位成本和資源生產率為隨機分佈（如表 4-14 至表 4-17 所示），並另外使用本系統模擬分析這些數據 500 次，產生了圖 4-16 至圖 4-44 所示的資料。

不包括材料在內的其他資源的資源利用率詳如圖 4-25 至圖 4-43，顯示最大資源利用率皆為 100%，這意味著如果減少任何資源的總數量，即可能導致延長工程施工時間。

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Project Duration (hr)	500	2770.71	0.00	187.60	2429.00	3399.00	View
Project Cost (x1000)($)	500	1780.74	0.00	52.93	1665.00	1961.00	View
Project Revenue (x1000)($)	500	3121.09	0.00	92.78	2918.00	3437.00	View
Project Present Value (x100(	500	1586.30	0.00	45.67	1485.00	1746.00	View

圖 4-16：當資源生產率及單位成本為為隨機分佈之工程施工時間、基本成本、總金額及成本淨現值

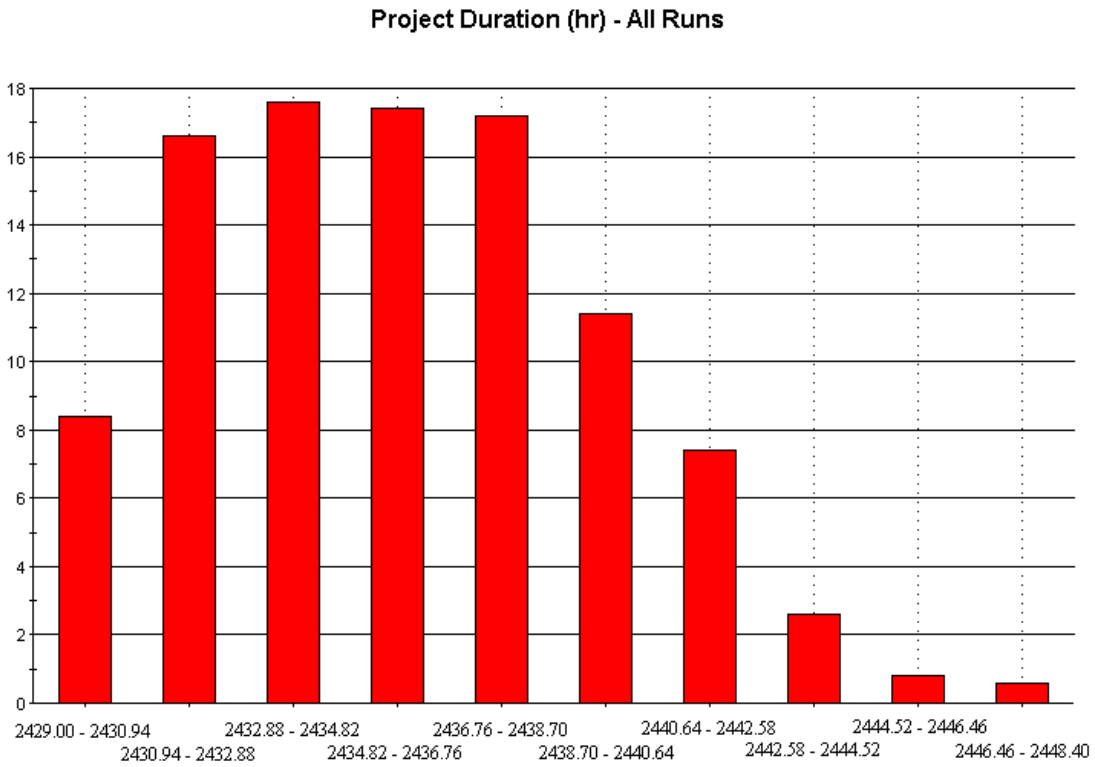


圖 4-17：工程施工時間隨機分佈機率圖

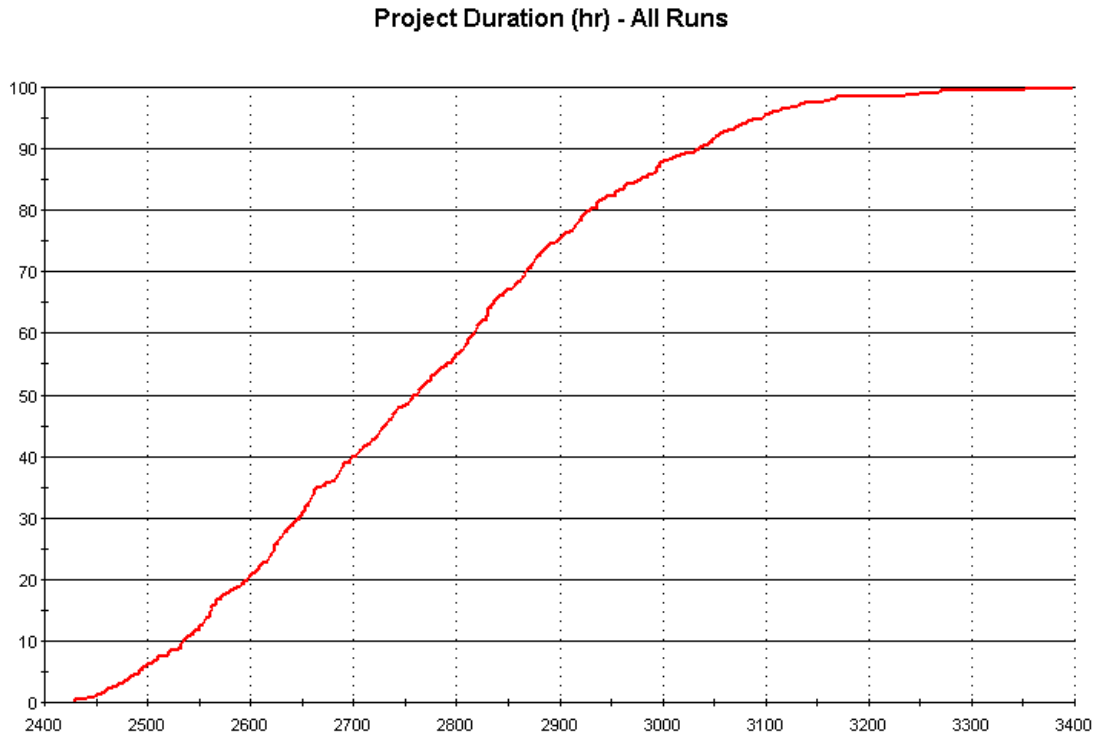


圖 4-18：工程施工時間累計分佈機率圖

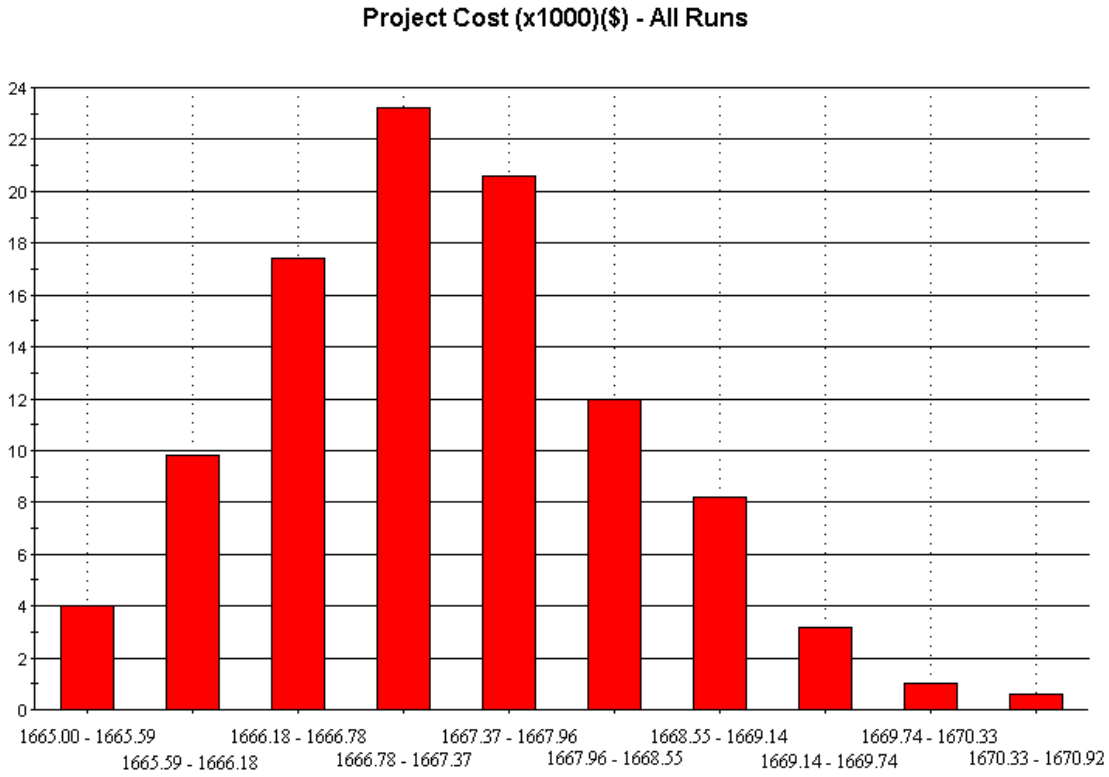


圖 4-19：工程基本成本隨機分佈機率圖

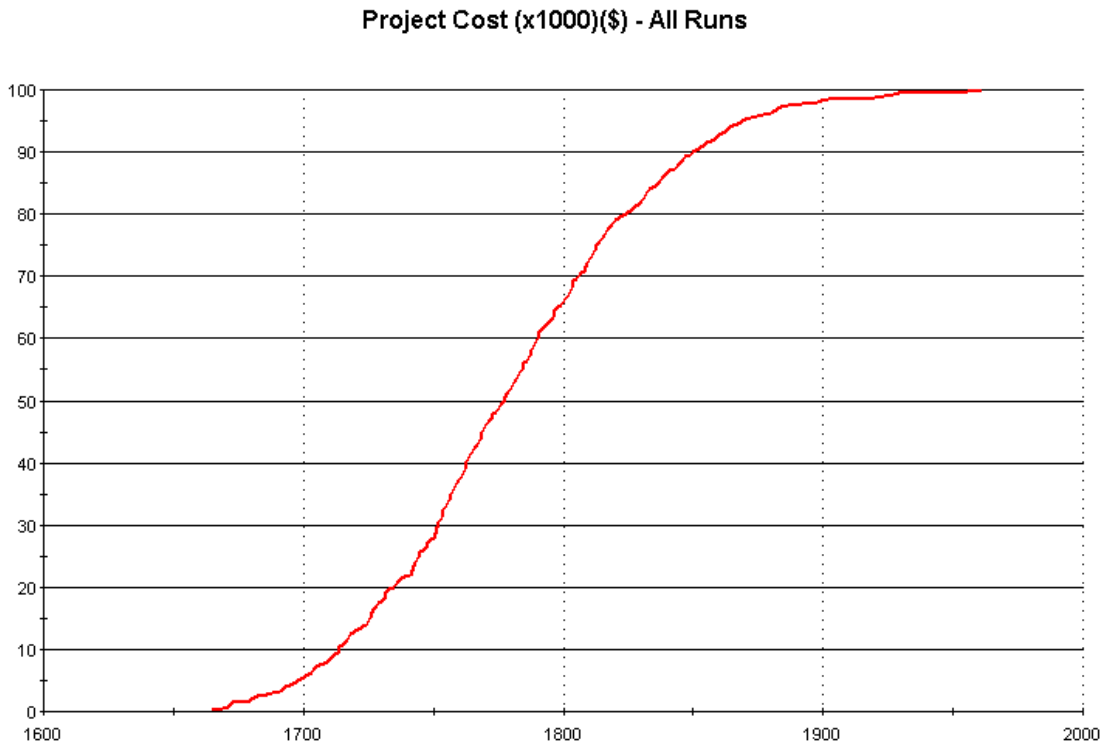


圖 4-20：工程基本成本累計分佈機率圖

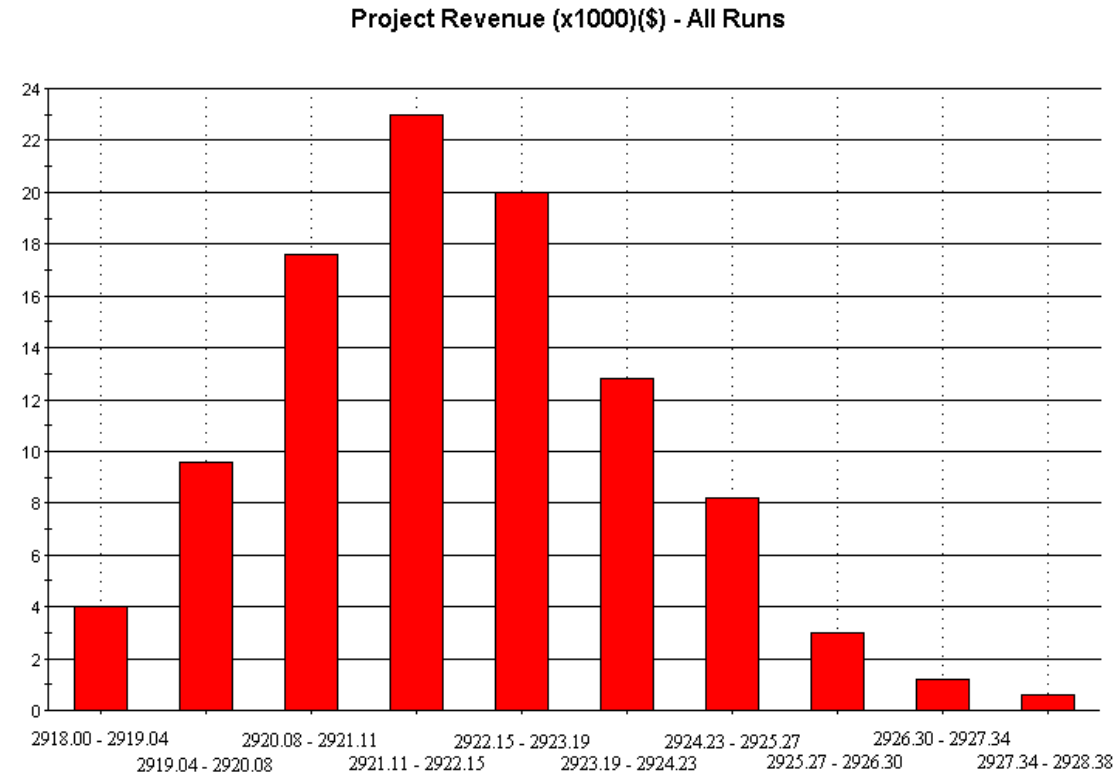


圖 4-21：工程總金額隨機分佈機率圖

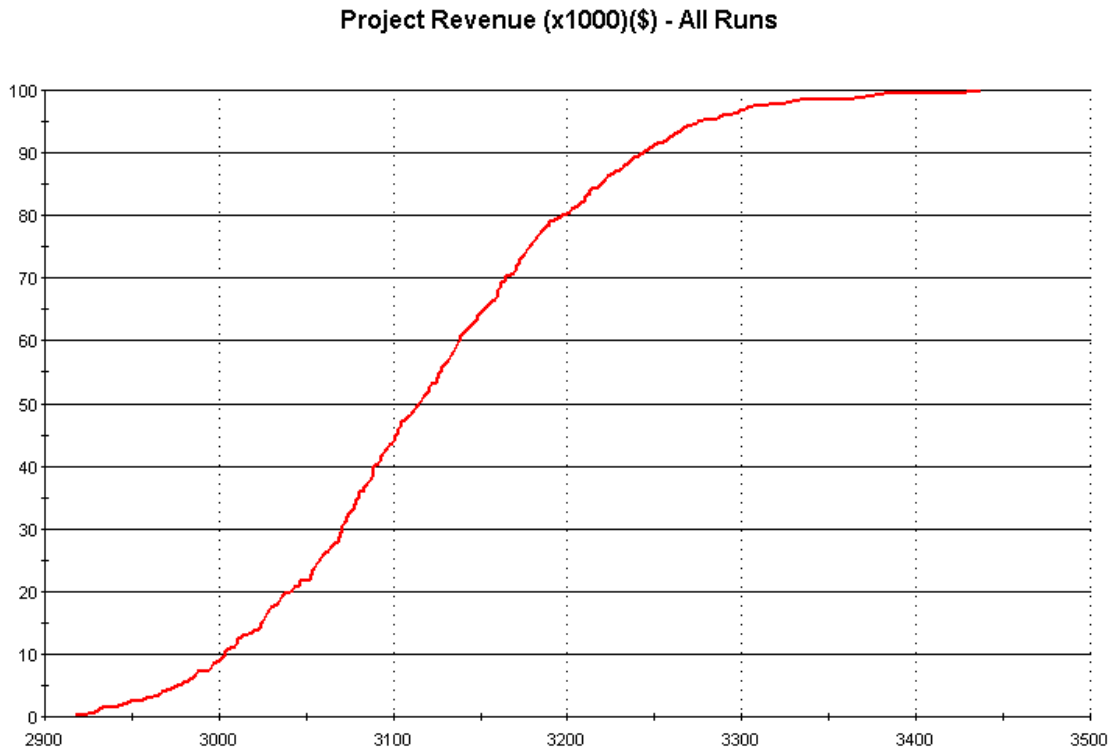


圖 4-22：工程總金額累計分佈機率圖

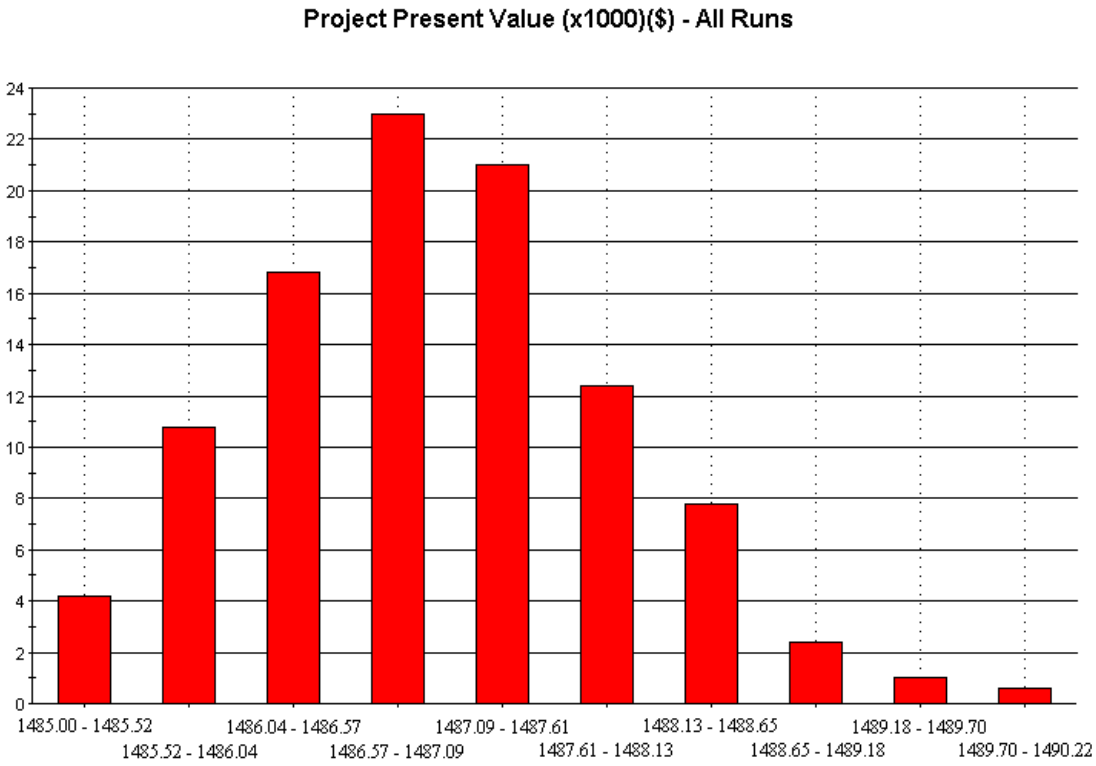


圖 4-23：工程起始時間之成本淨現值隨機分佈機率圖

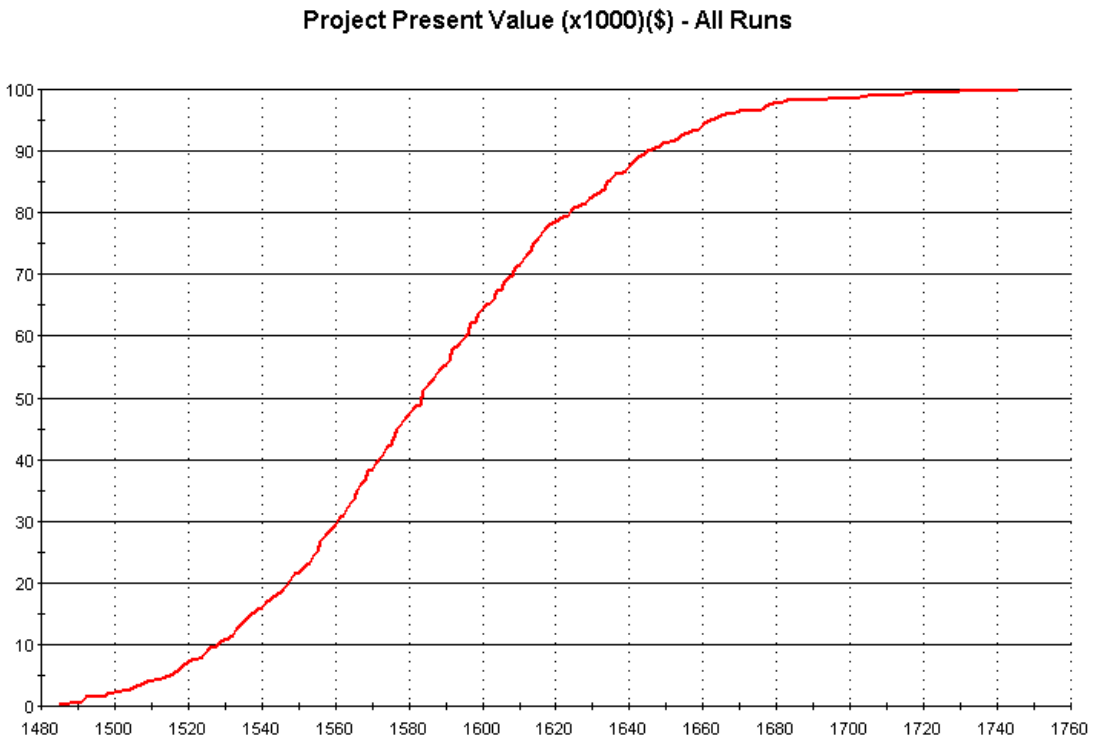


圖 4-24：工程起始時間之成本淨現值累計分佈機率圖

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	1.35	11.94	0.13	0.00	100.00	None

圖 4-25：勞工工頭於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	71.27	22.48	4.39	0.00	100.00	None

圖 4-26：勞工於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	1.35	11.94	0.13	0.00	100.00	None

圖 4-27：輕型設備操作員於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	1.35	11.94	0.13	0.00	100.00	None

圖 4-28：中型設備操作員於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	1.35	11.94	0.13	0.00	100.00	None

圖 4-29：挖掘裝載機於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	1.35	11.94	0.13	0.00	100.00	None

圖 4-30：液壓錘於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	1.35	11.94	0.13	0.00	100.00	None

圖 4-31：前端裝載機於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	1.35	11.94	0.13	0.00	100.00	None

圖 4-32：鑽掘機於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	58.42	27.84	3.61	0.00	100.00	None

圖 4-33：木匠於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	68.16	29.68	4.20	0.00	100.00	None

圖 4-34：電工於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	60.16	18.02	3.73	0.00	100.00	None

圖 4-35：木匠工頭於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	13.31	32.33	1.30	0.00	100.00	None

圖 4-36：標尺手於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	13.31	32.33	1.30	0.00	100.00	None

圖 4-37：水泥修整機於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	13.31	32.33	1.30	0.00	100.00	None

圖 4-38：燃氣發動機振動器於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	9.30	27.31	1.04	0.00	100.00	None

圖 4-39：熟練工人工頭於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	9.30	27.31	1.04	0.00	100.00	None

圖 4-40：技術工人於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	9.27	29.55	1.00	0.00	100.00	None

圖 4-41：鈑金工人於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	9.27	29.55	1.00	0.00	100.00	None

圖 4-42：鈑金學徒於整個工程的資源利用率

Statistic	Runs	Mean	First StdDev	Global StdDev	Minimum	Maximum	Graphs
Resource Utilization	500	7.32	24.81	0.90	0.00	100.00	None

圖 4-43：車床於整個工程的資源利用率

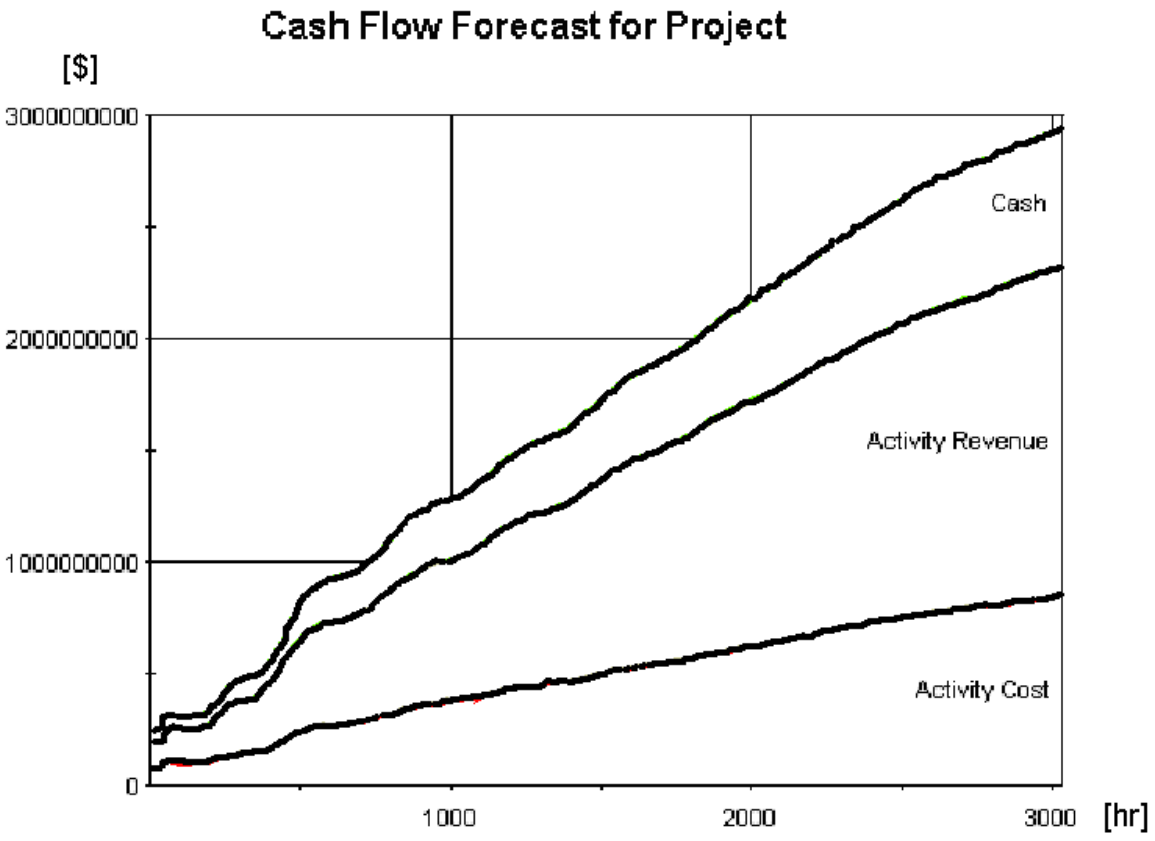


圖 4-44:整個工程的現金流量預測

第五章　結論與建議

第一節　結論

本研究研發一應用 BIM 及 AI (Artificial Intelligence，人工智慧)之建築工程資源分配及時程規劃系統，該系統可以自動產製各種可能的工項資源分配組合及時程規劃選項，並依使用者設定的最佳化目標及工程條件，從中自動挑選出最佳的資源分配組合及時程規劃選項。

本系統同時考慮和整合大多數重要的施工影響因素（例如:工項排程、成本估算，空間分配、各工種數量分配，各型設備數量分配及材料管理），並應用具有數值模擬分析功能的 AI 技術分析並求取最佳解，如此可使工程資源分配及時程規劃接近最佳化。 本系統進行模擬分析過程的計算參數包含：(1) 各工項所需資源相關的工作數量；(2) 整個工程每日各資源數量限制；(3) 整個工程的可用空間；(4) 工程目標（例如: 整個工程最短施工工期、最少施工成本、最長施工工期條件限制之最少施工成本等);(5)工程限制條件(例如，施工工期不可多於 500 工作日)；(6) 各資源單位成本；(7) 各工項的最大資源生產率；(8) 各工項所需資源種類；(9) 各工項各資源所需的空間位置；(10 各工項所需資源數量比率限制；(11)各工項各資源所需工作面積；(12) 符合工項施工網絡關係圖之各工項施作優先順序；(13) 銀行年利率；(14) 加價百分比等（圖 4.2)。其中，各工項所需資源相關的工作數量可藉由作者研發之「工作分解結構及資料庫系統」工作分解結構功能直接從 3D BIM 模型匯入本系統（請參見本所 106 年度「應用 BIM 於建築工程之資源分配及時程規劃策略」研究成果報告)，無需人工逐項輸入。

本系統模擬計算分析後產出的資料包含：(1) 各工項資源分配；(2) 施工期間各空間動態分配；(3) 決定各工項施工時間之主要資源生產率；(4) 整個工程各資源及各空間利用率；(5) 各工項施工時間及施工起迄時間；(6) 整個工程施工時間、施工起迄時間及施工成本的計算（包含工程成本現值計算)；(7) 材料管理和採購期程規劃；(8) 整個工程施工時間、施工成本、施工成本現值等風險性分析。此外，本系統可讓使用者依假設裝況做結果預測分析，並可依據工程不可預見的臨時狀況（例如:變更設計、材料交付延遲等）即時安排調整各工項資源分配及時程規劃。

根據研究結果，本研究有四項建議，建議一為持續研究及推廣應用 BIM 於工程施工階段與維護管理階段；建議二為拓展結合 BIM 及 AI 技術應用於建築工程施工階段資源分配及時程規劃之研究。

第二節　建議

建議一

持續研究及推廣應用 BIM 於建築工程施工階段與維護管理階段：立即可行建議

主辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署、內政部建築研究所

協辦機關：財團法人臺灣建築中心、財團法人臺灣營建研究院

在公共工程委員會、本所、財團法人臺灣建築中心、財團法人臺灣營建研究院、各機關學校 BIM 中心及 BIM 軟體廠商共同努力推廣下，BIM 於工程規劃設計階段之應用在本國已逐漸成熟。相對的，BIM 於本國工程施工階段與維護管理階段之應用範圍仍較小，大部分稍具規模工程僅應用於施工階段之 4D、虛擬實境及碰撞檢查，尚屬 CAD 應用範圍，僅少數大型工程或高科技廠建置會搭配基本 BIM 模型資料管理，故建議加強 BIM 於本國工程施工階段與維護管理階段之深層應用研究，並將研究成果於國內業界推廣。

建議二

拓展結合 BIM 及 AI 技術應用於建築工程施工階段資源分配及時程規劃之研究：立即可行建議

主辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署、內政部建築研究所

協辦機關：財團法人臺灣建築中心、財團法人臺灣營建研究院

3D BIM 模型本身具有相當豐富的工程基本資訊，但是 BIM 模型並未包含任何施工順序相關資訊，所以需要一工項時程規劃系統提供工項排程功能。傳統工項時程規劃系統決定各工項所需時間時常靠經驗或過往工程資料估計，然而每個工程都有其不同的工程條件(例如：工班數量、機具數量、材料數量、施工範圍、受限施工環境之施工效率等) 及不同最佳化目標(例如：最短施工時間、最低施工成本、有施工時間限制之最低施工成本等)，經驗或過往工程資料無法保證能適用於新的工程。

另外，傳統資源最佳化技術主要包括數學方法和啟發式方法。然而，數學模型由於公式複雜可能導致求得局部最佳解。啟發式模型則是在不同情況下具有不同的有效性，因此無法適用於所有的工程案例。此外，使用者也無法針對給定的工程案例事先知道適用於何種啟發式模型。所以，啟發式模型無法保證獲得最佳解。啟發式模型不一致的解決方案已經導致商用工程管理軟體於資源調度功能間巨大分歧。

依據維基百科，「目前有大量的工具應用了人工智慧，其中包括搜尋和數學最佳化、邏輯推演。」。AI (Artificial Intelligence，人工智慧)應用為目前及未來世界各國重要的研究趨勢，但是 AI 在建築工程施工階段與維護管理階段方面的應用，仍屬起步階段，未來有非常大的發展潛力，建議加強 AI 於本國工程施工階段與維護管理階段資源分配及時程規劃之研究，並將研究成

應用 BIM 及 AI 之建築工程資源分配及時程規劃系統研發
果於國內業界推廣。

建議三

立即可行建議—拓展結合 BIM 與資料庫管理應用於建築工程施工階段及維護管理階段之研究

主辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署、內政部建築研究所

協辦機關：財團法人臺灣建築中心、財團法人臺灣營建研究院

資料準備是營建管理過程中非常重要的工作之一，並且是最耗時間及最困難的工作之一。雖然 3D BIM 模型本身具有相當豐富的工程基本資訊，但是 BIM 模型並無法提供工程施工階段及維護管理階段所需之全部資訊(例如：施工階段之工項施工順序、工項起迄時間、施工成本控管及材料採購控管，及維護管理階段之設施管理等相關資訊)，所以需要於工程施工階段及維護管理階段另增加一資料庫管理系統，以補足 3D BIM 模型本身不足之處。

綜上，建議拓展結合 BIM 與資料庫管理應用於工程施工階段及維護管理階段之研究，以符工程施工階段及維護管理階段之實際需求。

參考書目

[1]AbouRizk, S., Halpin, D., and Lutz, J. (1992). “State-of-the-art in construction simulation.” Proc. 1992 Winter Simulation Conf., 1271-1277.

[2]Chen, Shih-Ming, Griffis, F.H. (Bud), Chen, Po-Han, Chang, Luh-Maan (July 2011). “Simulation and analytical techniques for construction resource planning and scheduling”. Automation in Construction（In Press, Corrected Proof, Available on line 6 July 2011, SCI/EI）.

[3]Chapman, C. (1997). ‘‘Project Risk Analysis and Management—PRAM the generic process.’’ Int. J. Proj. Mgmt., 15(5), 273–281.

[4]Cheng, M.-Y. (1992). ‘‘Automated site layout of temporary facilities using geographic information systems (GIS),’’ PhD dissertation, Civil Engineering Dept., University of Texas, Austin, Tex.

[5]Fischer, M., and Kunz, J. (1995). “The circle: architecture for integrating software.” J. Comp. in Civ. Engrg., ASCE, 9(2), 122-133.

[6]Fischer, M., Betts, M., Hannus, M., Yamazaki, Y., and Laitinen, J. (1993). “Goals, dimensions, and approaches for computer integrated construction.” Management of information technology for construction, K. S. Mathur, M. P. Betts, and K. W. Tham, eds., World Scientific, Singapore, 421-433.

[7]Fowler, M., and Scott, K. (1997). UML distilled: Applying the standard object modeling language, Addison-Wesley, Reading, Mass.

[8]Hajjar, D., AbouRizk, S., (1996) “Building a Special Purpose Simulation Tool For Earth Moving Operations”, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ASCE, pp. 1313-1320

[9]Hajjar, D., AbouRizk, S., (1998) “Modeling and Analysis of Aggregate Production Operations”, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, Volume 124, Number 5, September 1998.

[10]Hajjar, D., AbouRizk, S., Xu, J. (1998). “Optimizing Construction Site Dewatering Operations using CSD”, Canadian Journal of Civil Engineering, CSCE, Volume 25, Number 3, June, 1998.

[11]Halpin, D. W. (1990). MicroCYCLONE user’s manual. Div. of Constr. Engrg. and Mgmt., Purdue University, West Lafayette, Ind.

[12]Halpin, D. W., and Riggs, L. S. (1992). Planning and analysis of construction operations. Wiley, New York.

[13]Hijazi, A. M., AbouRizk, S. M., and Halpin, D. W. (1992). ‘‘Modeling and simulating learning development in construction.’’ J. Constr. Engrg. and Mgmt., ASCE, 118(4), 685–700.

[14]Huang, R., Grigoriadis, A. M., and Halpin, D. W. (1994). ‘‘Simulation of cable-stayed bridges using DISCO.’’ Proc., 1994 Winter Simulation Conf., IEEE, Piscataway, N.J., 1130–1136.

[15]Institution of Civil Engineers (ICE) and Faculty and Institute of Actuaries (FIA). (1998). RAMP: Risk Analysis and Management for Projects, Thomas Telford, London.

[16]Liggett, H. R., Trevino, J., and Lavelle, J. P. (1992). “Activity based cost management systems in an advanced manufacturing technologies, H.R. Parsaei, ed., Elsevier Science Publishing Co., New York, N.Y.

[17]Lin, K.-L., and Haas, C. T. (1996). ‘‘An interactive planning environment for critical operations.’’ J. Constr. Engrg. Mgmt., ASCE, 122(3), 212–222.

[18]Montreuil, B., and Venkatadri, U. (1991). ‘‘Strategic interpolative design of dynamic manufacturing systems layouts.’’ Mgmt. Sci., 37(6), 682–693.

[19]Pritsker, A. A. B., O’Reilly, J. J., and LaVal, D. K. (1997). Simulation with visual SLAM and AweSim. Wiley, New York.

[20]Pritsker, A., Sigal, C., and Hammesfahr, R. (1989). SLAM II network models for decision support. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

[21]Project material management handbook. (1987). Constr. Industry Inst., University of Texas at Austin, Austin, Tex.

[22] ‘‘Reports on materials management.’’ (1983). Construction Industry Cost Effectiveness Project, Appendix A-6.5, Business Roundtable, New York.

[23]Riley, D. R. (1994). ‘‘Modeling the space behavior of construction activities, PhD dissertation, Dept. of Architectural Engrg., Penn State University, University Park, Pa.

[24]Rosenblatt, M. J. (1986). ‘‘The dynamics of plant layout.’’ Mgmt. Sci., 32(1), 76–86.

[25]Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F., and Lorensen, W. (1991). Object-oriented modelling and design, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

[26]Shi, J., and AbouRizk, S. M. (1998b). ‘‘Continuous and combined event-process models for simulating pipeline construction.’’ Constr. Mgmt. and Economics, 16(4), 489–498.

[27]Smith, S. D., Obsorne, J. R., and Forde, M. C. (1995). ‘‘Analysis of earth-moving systems using discrete-event simulation.’’ J. Constr. Engrg. and Mgmt., ASCE, 121(4), 388–396.

[28]SofTech Inc. (1981). ‘‘Integrated computer-aided manufacturing (ICAM). Architecture, Part II—Volume IV—Function modeling manual (IDEF0).’’ AFWAL-TR-81-4023. Mat. Lab., Air Force Wright Aeronautical Lab., Air Force Systems Command, Wright-Paterson Air Force Base, Ohio.

[29]Songer, A. D., Ibbs, C. W., and Napier, T. R. (1994). “Process model for public sector design-build planning.” J. Constr. Engrg. and Mgmt., ASCE, 120(4), 857-874.

[30]Talbot, F., and Patterson, J. (1979). ‘‘Optimal methods for scheduling projects under resource constrains.’’ Proj. Mgmt. Quarterly, Dec., 26–33.

[31]Tarricone, P. (1992). “Howdy, partner.” Civ. Engrg., 62(3), 72-74.

[32]Tatum, C. B. (1987). “The project manager’s role in integrating design and construction.” Proj. Mgmt. J., 13(2), 96-107.

[33]Thabet, W. Y. (1992). ‘‘A space-constrained resource-constrained scheduling system for multi-story buildings,’’ PhD dissertation, Civil Engineering Dept., Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Va.

[34]Tommelein, I. D. (1989). ‘‘SightPlan—an expert system that models and augments human decision-making for designing construction site lay-outs, ’’ PhD dissertation, Dept. of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, Calif.

[35]Tommelein, I. D., and Zouein, P. P. (1993). ‘‘Interactive dynamic layout planning.’’ J. Constr. Engrg. and Mgmt., ASCE, 119(2), 266–287.

[36]Touran, A. (1987). ‘‘Simulation of tunnel operation.’’ J. Constr. Engrg. and Mgmt., ASCE, 113(4), 554–568.

[37]Ulgen, O.M., Thomasma, T. (1986). “Simulation Modeling In An Object-Oriented Environment Using Smalltalk-80.” Proceedings the 1986 Winter Simulation Conference Proceedings.

[38]Vanegas, J. A., Bravo, E. B., and Halpin, D. W. (1993). ‘‘Simulation technologies for planning heavy construction processes.’’ J. Constr. Engrg. and Mgmt., ASCE, 119(2), 336–354.

[39] 陳士明(2017).應用 BIM 於建築工程之資源分配及時程規劃策略研究, 內政部建築研究所.