

營造業趕工計畫最佳化人力數量之研究

王鵬森¹、*楊大和²、陳怡如²

¹南臺科技大學工業管理與資訊系、²成功大學製造資訊與系統研究所

*tyang@mail.ncku.edu.tw

摘要

營造業常因天候、物料、人工、設計變更及施工不良等問題導致工程進度不如預期，因此趕工計畫為施工流程當中必要的項目之一，而趕工計畫一般皆由工程主管依據經驗來決定增加的人力數量及加班時間等，此舉常造成現場人力配置不當，甚至延遲工期。本研究藉由生產指示看板來控制工程專案進度，當進度落後需增加人力時，則藉由模擬最佳化演算法找出需增加的最佳施工人數後，重新增加看板數量與調配看板裡的工作量，使得工作量得到合理的分配，來執行最佳化後的趕工計畫。本研究使用臺灣南部的營造公司當作案例，來說明研究方法的有效性，研究顯示里程碑檢驗及兩天一次進度檢驗這兩種工程進度檢驗模式，平均成本分別降低 10% 和 8.58%；最後我們透過敏感度分析，讓決策者了解人力數量、完工時間及總成本之間的互動變化，以作為未來規劃專案時程之參考。

關鍵詞：精實營建、看板、模擬最佳化、趕工計畫

Study of Optimal Number of Workers in a Crashing Plan for the Construction Industry

Peng-Sen Wang¹, *Taho Yang², Yi-Ju Chen²

¹Department of Industrial Management and Information, Southern Taiwan University of Science and Technology

²Institute of Manufacturing Information and Systems, National Cheng Kung University

Abstract

Construction progress could be slowed down due to many problems such as the weather, materials, manpower, design changes and improper construction, so a crashing plan is one of the crucial elements to the construction process. Construction managers usually increase the numbers of workers and overtime based on their experience when making a crashing plan, which often results in improper on-site manpower allocation and delays in work progress. This study controls construction progress by production indicative kanbans. When the construction progress falls behind schedule, the number of workers needs to be increased. Simulation optimization algorithms are used to find out an optimal increase in workers. With an optimal increase in workers, production kanbans are also increased and workload is re-adjusted to reach a balance between workforce and workload to execute an optimal crashing plan. A construction company in Southern Taiwan was used as a case study to illustrate the effectiveness of the proposed approaches. For inspecting work progress, the study proposes two scenarios of progress inspections: milestone inspections and inspections once every two days. They both have advantages and disadvantages. The results show that through both inspections, the proposed approaches can decrease the cost by 10% and 8.58% on average, respectively. Besides, both improved service levels. Finally, sensitivity analysis is concerned with how changes in the number of workers and completion time influence the total cost, which helps managers make an optimal future project schedule.

Keywords: Lean Construction, Kanbans, Simulation Optimization, Crashing Plan

Received: Oct. 20, 2017; first revised: Apr. 7, 2018; accepted: July, 2018.

Corresponding author: T. Yang, Institute of Manufacturing Information and Systems, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan.

壹、緒論

營造業為國家經濟建設重要的一環，通常業務來源不穩定，生產時間較長，工程分包較細，無特定業主，常為單一工程成立臨時性的專案組織，圖 1 說明營造公司承接專案的方式，當訂單確定時，公司通常擁有少部份的人力(一般為監工人員)及設備，依照顧客需求尋找合適的下包商；另外，工作場所危險性高，造成人員流動率大，施工品質不易控制。由於營造業這些特殊的產業特性，因此在施工過程常有變異發生，例如物料延遲送達、設計變更、施工人員素質不佳、工程危險度等變異而使得工程進度遭到延遲，進而影響整體專案完工時間，為了避免延期完工的高懲罰成本，趕工計畫變成施工流程的必要項目之一。一般而言，營造業主要採用增加人力來啟動趕工計畫，但增加人力方式往往為主管或下包商依照經驗來增加人力，無全盤考慮或是有個最佳的增加人力數量，若增加人數過多，則造成常有施工人員閒置，浪費人力成本；若增加人數過少，則需要再次額外增加人力，造成營造公司不信任下包商之專業，因而產生對立。

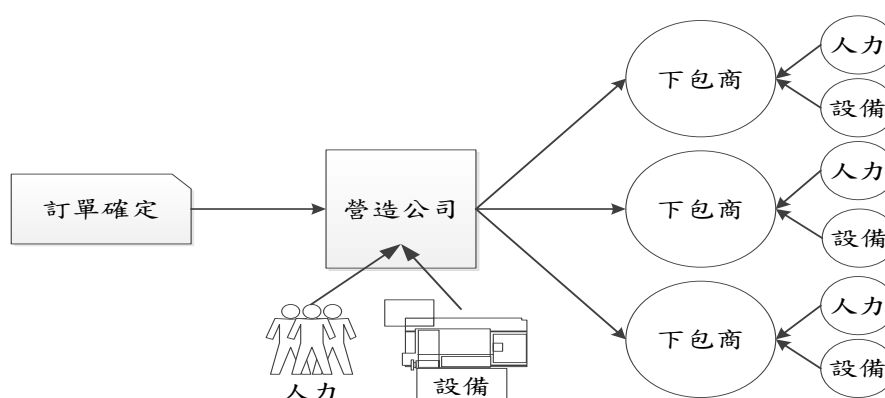


圖 1 營造公司一般承接專案的方式

Hosseini *et al.* (2012)整理出營造流程當中可能所產生的浪費，主要分為施工現場、外部因子及施工流程三方面探討：

- 一、施工現場：等待的浪費、設計錯誤、設備的拆卸與安裝、休息時間、在現場擁有過多的物料。
- 二、外部因子：過多的物料、施工安全成本、工程澄清說明需求。
- 三、施工流程：不良品、瑕疵、重工、過多的生產、運輸/搬運時間、等待、不必要的存貨、不適當方法的選擇。

精實管理主要思想核心為「消除一切浪費」，Koskela (1992)提出將新式生產管理概念應用至營建管理，應用 Just in Time (JIT)、Total Quality Management (TQM)及新式專案組織來消除傳統營建管理上的浪費，稱為精實營建。Karim and Nekoufar (2011)提到精實專案管理 (lean project management)的概念是由精實生產到營建產業，與精實管理思想核心相同，目標在於最大化價值及最小化浪費。

看板為附在零組件箱或盒上的小卡片 (Monden, 2012)，是豐田式生產系統 (Toyota production system, TPS)中一個重要的工具，針對工廠或供應鏈，控制系統在必要的時間，生產出必要數量的必要產品，能夠簡單有效地實現精實生產中的拉式概念。看板在製造上具有兩個機能，其一為製造製品或零件的指示機能，其二為對搬運作業者發出請搬運製品或零件的指示機能，前者稱為生產指示看板，後者則稱為領取看板。在生產指示看板上，清楚載明了生產資訊，讓作業員能夠一目了然，避免生產錯誤或生產過剩等浪費發生，本研究將導入精實管理技術，透過看板來指示施工人員應作的工程及工作量，以控制專案進度；其次發展演算法，以模擬最佳化方式找出最佳的趕工計畫，包含人力數量和加班時間等，來達到最小成本及在交期內完成專案。我們分析兩種情境模式：里程碑檢驗及兩天一次進度檢驗來檢查工程進

度，最後透過敏感度分析來探討增加人力數量對工期的影響，以及完工時間對人力成本的變化，這些資訊可提供決策者判斷人力數量對完工時間及總成本產生的影響。

貳、文獻探討

一、精實管理

Green and May (2005)指出精實營建是導入精實管理概念於營建當中，減少在營建當中的浪費。營建的傳統概念認為營建是由許多活動所組成，將建築物分為許多元件，再依據每一元件分析所需物料及人力所需成本。由於主要專注在各個活動單元上，卻忽略掉了整體流程及價值的考量。典型的營建專案涉及多個離散的團隊同時在現場工作，而遭受到許多明顯的浪費如等待施工人員、物料送達，沒必要的移動或搬運物料，沒有使用到的存貨及工作空間。

在營建專案當中，主要分為兩種流程：(1)設計流程 (2)施工流程。根據 Lean Construction Institute 所定義的精實營建如下所述：

- (一)以生產管理為基礎的管理哲學，並將精實生產應用於營建業，精實營建同樣對營建業造成革命性的改變；
- (二)以客戶價值為目標，於設計階段即將施工程序納入考量；
- (三)透過客戶價值最大化與去除浪費的過程，安排作業程序；
- (四)專案不斷的改善，降低成本與加快作業執行速度；
- (五)重新定義「控制」的意義，讓控制從「監視結果」提升為「讓事情發生」，促使控制與規劃成效得以測量與改進；
- (六)作業安排時考慮作業之設計、物料供應與施工性，提升各作業間之協調性。

Ballard (2000)提出 Last Planner System (LPS)為推動精實營建之新技術，而 Last Planner 被定義為可以被派遣工作的一個人或是團隊，此概念與傳統推式規劃不同。傳統規劃是當有專案目的進來時，透過資訊將會規劃日後應該做什麼，當資源進入時，則按照當初所計畫來進行，但此方法只能等問題發生才能解決，無法預防問題的產生；而新技術 Last Planner System 則多了一道由一個人或一個團隊所組成的 Last Planner 來判斷目前是否可依照舊有計畫來進行，作業中限制條件是否解除，若尚未解除，邊做邊看必然存在許多浪費，不如停下來待限制條件解除後再做。Sacks et al. (2010) 指出在實務上，LPS 能被應用在營建業當中以減少變異，進而改善工作流程。

Womack and Jones (2004)指出精實管理之思想核心為「以顧客角度出發，找出無附加價值之處」，以顧客(業主)角度出發而言，其顧客期望為(1)完工期內完成專案；(2)追加金額減少，價錢減低；(3)品質優良；另一方面以營造公司角度分析，其公司期望為(1)成本降低，利潤得以增加；(2)專案進度如期完成。考慮上述兩種角色不同之期望，為了達到雙贏的局面，在變異無法立即解決的情況下，本研究著重在當有變異發生且延誤時程時，增加適當的人力，透過增加看板數量與調配看板裡的工作量，使得工作量得到合理的分配，來執行最佳化後的趕工計畫。

二、模擬最佳化

模擬是依據真實系統的流程及其限制加以建構，用以呈現出真實系統的行為，能夠依據時間的變化模擬系統運作，如加工、物料搬運、當機及人員調動等行為模式，並可結合決策方法，透過仿效系統運作及其特性產生出系統績效值，如成本、產出、利用率等。在模擬最佳化中，模擬工具模擬出真實的複雜系統，而最佳化可以提供一個在廣大的搜尋範圍裡找出一個最佳解，Swisher et al. (2000)說明模擬最佳化提供一個尋找與模擬模式結合並能找出最佳函數的輸出值的最佳輸入參數值的工具。Fu (2002)也提及最佳化工具已漸漸發展為能與模擬工具結合，並在模擬當中找出參數組合來最佳化績效指標。

OptQuest 是一種常用的商用軟體，藉由搜尋模擬模式的最佳解，來提升模擬模式的分析能力 (Glover et al., 1996)。本研究希望藉由模擬模式來解決人力數量配置的績效問題，一般來說，模擬模式僅能針對設定的控制水準進行評估，因此在評估績效的過程中，必須先選擇一組特定的人力數量配置，爾後在這個配置下執行模擬來預測系統的績效。而利用 OptQuest 軟體，可於 OptQuest 中描述最佳化問題，使得 OptQuest 能夠在模擬模式中自動地搜尋符合目標式的解。OptQuest 在面對最佳化問題求解時，以公式(1)至(4)之模型搜尋最佳解。

$$\text{Max or Min } f(x) \quad (1)$$

$$\text{Subject to} \quad Ax \leq b \quad (\text{限制條件}) \quad (2)$$

$$g_1 \leq g(x) \leq g_u \quad (\text{需求}) \quad (3)$$

$$l \leq x \leq u \quad (\text{上下界線}) \quad (4)$$

其中，公式(1)之目標函數 $f(x)$ 可為一組值所組成或是一個實數；公式(2)限制條件的部分則不僅須為線性，且係數矩陣 A 與右手邊常數 b 皆須以之；公式(3)需求的部分可利用上下界線的方式，不論是否為線性皆可加入模型中當作限制，此外， g_1 與 g_u 為已知常數；公式(4) 要求所有變數也需要上下界線，連續或離散都是可接受的選項。

三、趕工計畫

李俊辰 (2011)指出在專案趕工問題的相關研究，主要在專案排程的趕工策略發展，或專案排程的時間/成本權衡問題；因此他發展一套專案評估模式，利用最佳化模式計算專案的時程與最小化成本，最後再使用時程、成本和風險三項數據作為評估指標。周志航 (2012)考慮里程碑限制、趕工及替代使用成本限制，利用數學規劃模型來幫助專案管理者了解完工天數與成本之間的關連。李玟瑩 (2013)考慮資源受限專案最佳趕工策略，提出了三種不同的數學模型，模型 I 探討未趕工的情況下，專案預期最少完工時間；模型 II 在線性趕工成本結構下，追求最低成本之最佳專案排程方法；模型 III 在離散型趕工成本結構下，追求最低成本之最佳專案排程方法。Hu et al. (2015) 指出市場變化迅速，執行項目日益複雜，導致準時交貨困難，緩衝管理將執行的項目狀態和項目計劃及前期承諾進行比較，當出現較大的偏差的時候即需要採用相關的糾正行動，然而緩衝管理面臨著忽視成本信息的問題，因此他在緩衝管理的基礎上，引入了一個新的控制程序，來評估項目完成的成功率和趕工成本，並決定何時以成本效益的方式加快哪些活動。廖靜雅 (2016)指出國內公共工程經常發生進度延遲之狀況，為解決工期延遲，承包商通常向主管機關提出展延工期或趕工計畫，經由機關審核後同意承包商展延完工工期及進行趕工計畫，她蒐集國內外資料，建立可供國內機關在審查展延工期及趕工計畫審查作業參考之準則，以利機關審查人員在審查時有明確的參考依循。

參、研究方法

本研究的方法，可分為五個階段：第一階段為使用要徑法找出關鍵作業；第二階段為應用生產指示看板合理分配工作量和控制專案進度；第三階段為建構模擬模式尋找趕工計畫最適人力數量配置；第四階段為工程進度檢驗與啟動趕工計畫；第五階段為敏感度分析檢測人力數量對完工時間及總成本之影響，茲分述如下：

一、使用要徑法找出關鍵作業

以箭線及結點繪製專案計畫的流程，用以規劃或顯示其計畫的目標、資源、時間分配及追蹤控制的模式，此種箭線圖若用於專案之規劃時，則稱為計畫評核術 (program evaluation and review technique,

PERT)或要徑法 (critical path method, CPM)。要徑作業是專案中的一連串作業，是作業總時間最長，所連結起來的路徑。當要徑中的任何一個作業無法在預定時間內完成時，整個專案將會被延滯。規劃專案中各項作業的開始或完成時間，以及確認所有的要徑作業是 CPM 技術的主要目標 (Kerzner, 2013)。假設某一個工程施工步驟的先後關係及預估的完工天數如圖 2 所示，若要找出工程關鍵的要徑，首先須由前向後找出各作業的最早開始時間 (earliest start time, ES)及最早完成時間 (earliest finish time, EF)，此時最後一個作業的完成時間就是完成整個專案所需時間；其次找出的專案完成時間做為最後一個作業的最晚完成時間，從後往前推，以找出各作業的最晚開始時間 (latest start time, LS)及最晚完成時間 (latest finish time, LF)；最後算出每個作業的最晚開始時間與最早開始時間之差，即為寬鬆時間 (slack time, ST)，寬鬆時間為 0 的作業即為要徑，要徑作業如圖 3 之陰影部份。

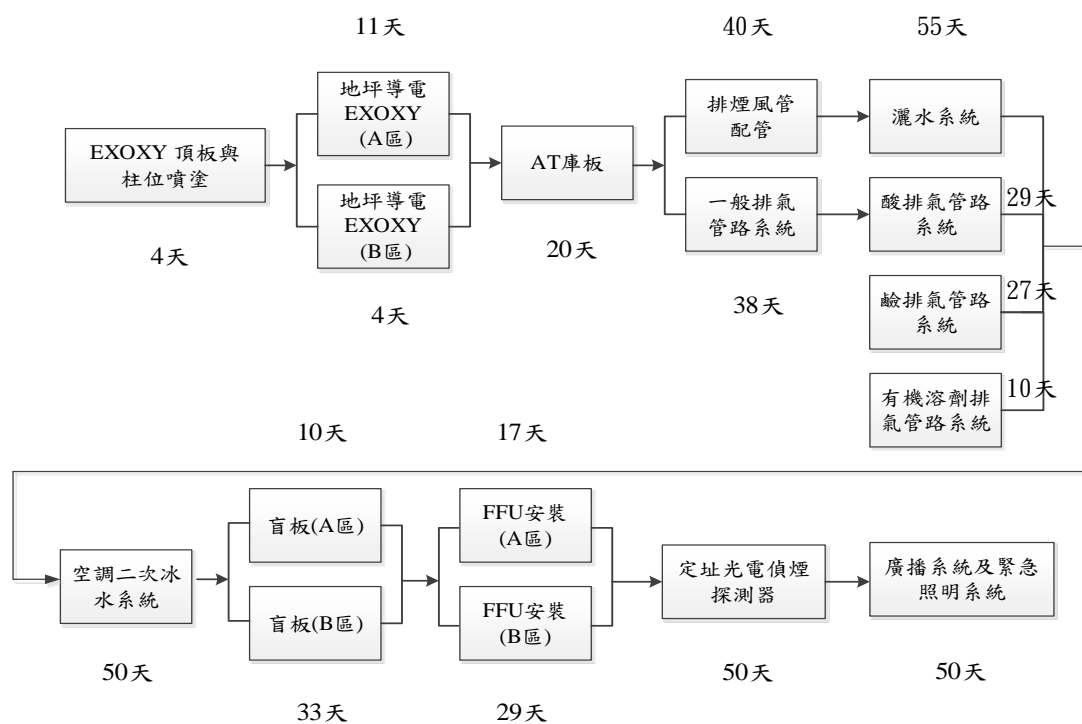


圖 2 工程專案流程之前後關係及施工時間

二、應用生產指示看板合理分配工作量和控制專案進度

張祐齡 (民 102)指出在專案規劃預計時程時，透過生產指示看板與交貨指示看板來追蹤物料送達進度，有明顯改善的成效，然而目前案例公司在專案規劃預計時程時，僅安排預計施工人數及預計施工天數，而施工進度則無細分，以致於無法準確的執行進度檢驗，當預計時程將至時，才發現進度延遲，已經無法準時在專案時程內趕工完成，因此本研究應用 TPS 當中的生產指示看板來控制專案的進度，以一張看板代表一位施工人員一天的工作量，看板上詳細列載今天應做的工程進度及範圍，並載明施工預期開始時間及結束時間，專案進度定義如式(5)，當進度落後時，需增加人力時，可以重新增加看板數量與調配看板裡的工作量，使得工作量得到合理的分配，避免專案延遲。

$$\text{專案進度定義} = \frac{\text{實際回來的看板數量}}{\text{預計規劃的看板數量}} \times 100\% \quad (5)$$

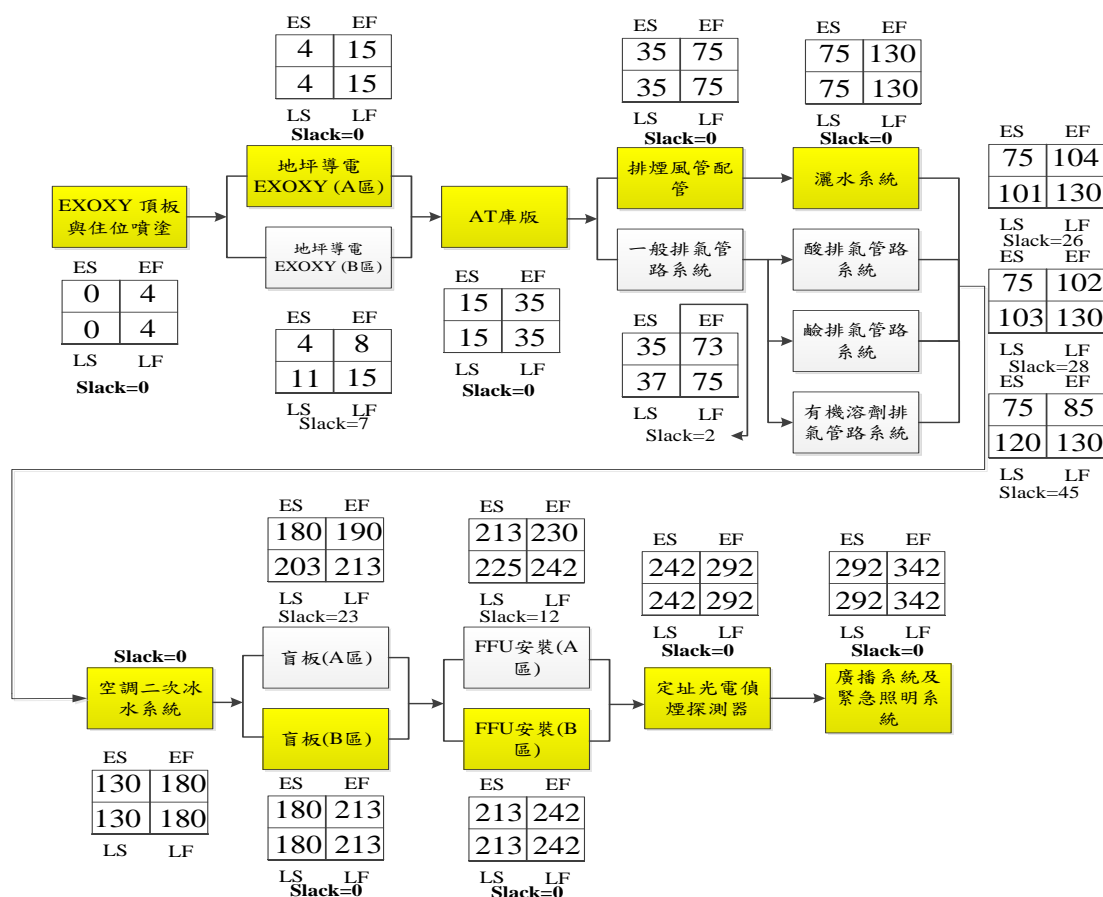


圖 3 施工流程要徑作業

三、建構模擬模式尋找趕工計畫最適人力數量配置

在複雜的真實生產環境下，由於具有統計波動與依存關係，因此不容易利用數學模式來分析複雜的系統行為，或者不能依靠經驗和直覺而進行決策，更不可能對真實系統加以實際試驗，尤其在真實情境下有些變動因素是無法控制的。因此藉由模擬模式描述產品在製造系統間流動的方式，不僅對變數參數可任意調整變化，且可重複試驗，藉由重複抽樣的觀念增加模擬模式的可信度。本研究採用 Arena®13.5 的輔助工具 OptQuest 作為進行模擬最佳化的工具，用以搜尋當變異發生時，所需進行趕工計畫的最佳人力數量配置為何，使得總成本最小化。在搜尋最佳解的過程中，需提出模擬最佳化模式作為輸入訊息，首先針對模擬最佳化模式作符號定義，如下所述。

參數符號

- i 第 i 個工程, $i=1,2,\dots,N$
- k 專案時程當中, 第 k 天
- N 專案工程總數
- P_{ik} 第 i 個工程第 k 天預計工程人員總數
- C_h 每小時工程人員人力成本, 在這個案中, $C_h = \$250/\text{hr}$
- C_d 工程延遲一天完工的懲罰成本, 在這個案中, $C_d = 92$ 萬/天
- D_i 第 i 個工程預計總完工天數

決策變數

X_{ik} 第 i 個工程第 k 天增加施工人員總數

W_{ik} 第 i 個工程第 k 天的加班時間

D_i' 第 i 個工程實際完成天數

在決策變數方面，將決定在發生進度延遲後，應該增加多少施工人員或是加班時間，因此在最佳化求解當中，趕工計畫部分僅考慮增加的人力數量、加班時間及懲罰成本。

目標式

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{D_i} (8 \times C_h \times X_{ik} + T_k \times C_h \times (P_{ik} + X_{ik})) + M \tag{6}$$

Subject to

$$T_k = \begin{cases} 1.33W_k, & \text{if } 0 \leq W_k \leq 2 \\ 1.33 \times 2 + 1.66(W_k - 2), & \text{if } 2 < W_k \leq 4 \end{cases} \quad \text{for } k \in \text{positive integer} \tag{7}$$

$$M = \begin{cases} 0, & \text{if } D_i' \leq D_i \\ C_d \times (D_i' - D_i), & \text{if } D_i' > D_i \end{cases} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N \tag{8}$$

$$X_{ik}, D_i' \in \text{positive integer} \tag{9}$$

其中，公式(6)表示目標函數，最小化趕工成本，並且再加上懲罰成本，以此來避免專案延期可能導致的高懲罰成本；公式(7)使用 T_k 表示依勞基法規定，每天加班時間不得超過 4 個小時，而加班前兩小時薪資為 1.33 倍，後兩小時薪資為 1.66 倍；公式(8)中， M 表示工程實際完成天數大於工程預計總完工天數時所產生的成本，即未如期完工的懲罰成本；公式(9)表示增加的施工人數和工程實際完成天數必須為正整數。

四、工程進度檢驗與啟動趕工計畫

工程進度可透過建立里程碑和檢驗來控制項目工作的進展，檢驗工程進度是否符合預期，可協助及早發現專案的績效，及時解決可能的延誤。里程碑的管制點視活動的數目、風險的程度、管理的詳細度來決定，因此每個專案管制點的設定會有所不同，例如，Thomas et al.(2002)以 20%、50%及 80%當作里程碑來做為進度檢驗，而本研究則是參考公司內部的專案時程規劃，以天數的 40%及 70%來做為進度檢驗，並評估現場施工情況使用兩天一次進度檢驗（某些工程可能因為備料或搬運等問題，一天的進度並不明顯）來比較其績效。在進度應完成一半天數之前（40%）作為里程碑進度檢驗，以避免太早進行進度檢驗可能會沒有變異發生；而選擇 70%則是因為在進度完成一半之後的天數再作一次進度檢驗，可免在施工天數結束時才發現進度延遲。圖 4 中，施工天數總共為 18 天，天數的 40%及 70%為第 8 天及第 13 天，因此第一此進度檢驗會在第 8 天進行，若有變異發生則啟動趕工計畫，圖中 x_1 表示增加的人力數量，在第 8 天檢驗發現進度有延遲的現象，因此透過模擬最佳化對其後的天數進行人力數量的最佳計算；接著第二次檢驗會在第 13 天進行，若有延遲會再作人力數量的最佳計算， x_2 表示第 2 次增加的人力數量。

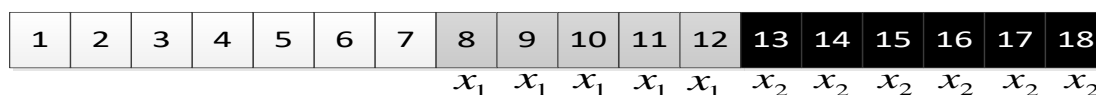


圖 4 里程碑檢驗人力數量設定

相對里程碑檢驗，兩天一次進度檢驗頻率較高，例如圖 5 中施工天數同樣為 18 天，若兩天進行一次進度檢驗，第 1 次的進度檢驗將會在第 2 天，圖中的 x_1 表示第一次增加的人力數量，第 2 次檢驗將會在第 4 天來進行，而 x_2 表示第 2 次增加的人力數量，以此類推。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	x_1	x_1	x_2	x_2	x_3	x_3	x_4	x_4	x_5	x_5	x_6	x_6	x_7	x_7	x_8	x_8	x_9

圖 5 兩天一次進度檢驗人力數量設定

五、敏感度分析檢測人力數量對完工時間及總成本之影響

Aronson *et al.* (2004)提到敏感度分析是對於提出解答的輸入或參數，嘗試去檢測上述數值改變時會對結果產生的衝擊。可分為兩種類型：

- (一)自動的敏感度分析：通常用於線性規劃，主要是想了解變數或參數在某種範圍內改變時，對於結果不會有顯著改變。
- (二)試誤法：想了解某任一變數或數項變數改變時，對於結果所造成的衝擊。

本研究將進行敏感度分析 (Sensitivity analysis)，觀察參數改變時對於目標值的影響情形，並進一步了解模型系統的限制為何，作為管理者在改善流程時的參考。

肆、案例分析

本研究以南部某營造業公司的實際施工流程作為分析對象，案例公司為一個機電監控施工及統包工程的整合公司，於 1989 年 5 月創立，目前員工人數含合作夥伴為 400 人，通常客戶來自晶圓半導體、光電產業至微電子封裝測試等高科技產業，業務主要為電子業無塵室及相關機電、製成管路之設計與建造施工，以及舊廠房改建。案例公司工程承接工程的方式皆是以專案的方式來執行，承接專案後，會先交由設計部轉成內部圖面，爾後展開專案時程規劃，尋找下包商發包以及進行物料採購。

現場施工常會遇到變異發生，如物料延遲、業主設計變更及施工不良重工等，Thomas *et al.* (1989)指出在營造業裡常見的主要問題為物料供應商無法在對的時間及對的地點送達物料；Howell *et al.* (1993)指出若工程活動共享設備則會緩慢工程完工；另外，業主設計變更在案例公司當中，有 30% 的機率會發生，不管是物料延遲或設計變更都會影響整體專案工期，若無好的趕工計畫，將可能導致專案延遲，而產生龐大的懲罰金額。在案例公司現狀當中，當變異發生，下包商的主管會依據「經驗」來決定增加的人力數量及趕工計畫，此舉常造成在現場有多餘的閒置人力。本研究之改善目標在於當變異發生時，以科學方法建構一套演算法，以研究方法裡所述的五個階段來解決趕工計畫的人力數量最佳化問題，有別以往以經驗判斷增加人力的數量，使得專案在預計施工時程內完成，讓總成本最小化，其步驟說明如下：

一、使用要徑法找出關鍵作業

透過圖 5 施工流程的陰影部份，我們可以得知個案公司專案流程的要徑作業如圖 6 所示，在要徑作業上，有三個工程因變異發生 (EPOXY 頂板及柱位噴塗、灑水系統及空調冰水系統) 如表 1 所示，變異導致實際施工天數比預計施工天數還要長，預計總天數為 342 天，但實際上的總天數為 350 天，施工延遲天數高達 8 天，使得總成本增加，服務水準也跟著降低。

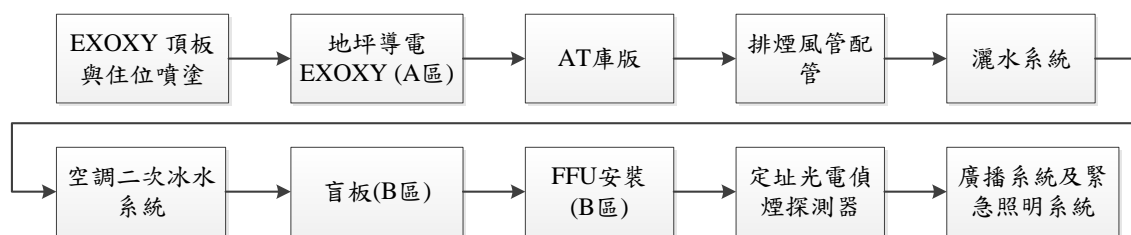


圖 6 個案公司專案流程的要徑作業

表 1 各工程施工天數

	EPOXY 頂板及 柱位噴塗	地坪導電 EPOXY (A 區)	AT 庫板	排煙風管配管	灑水系統
預計施工天數	4	11	20	40	55
實際施工天數	7	7	20	34	74
施工人數	7	5	6	5	10
	空調冰水系統 (DCC)	盲板(B 區)	FFU 安裝 (B 區)	定址光電式偵煙 探測器	廣播系統及緊急照 明系統
預計施工天數	50	33	29	50	50
實際施工天數	77	18	17	50	46
施工人數	9	6	12	5	5

二、應用生產指示看板合理分配工作量和控制專案進度

各工程所需施工進度的看板數量依照預計規劃的不同而有所不同，計算方法為在一天（8小時）當中，一位作業員須完成一張看板，按照專案預計規劃，可計算出如表 2 所列各工程之看板數量。以 EPOXY 頂板及柱位噴塗為例，預計施工天數為 4 天，施工人數為 7 人，可得看板數量為 $4 \times 7 = 28$ 張；若實際施工天數小於預計施工天數，則以實際施工天數來做為看板的計算，如盲板（B 區）工程其預計天數為 33 天，但實際天數為 18 天，因此總看板數量為 $18 \times 6 = 108$ 張，當這些看板完成，也代表此工程完工。應用生產指示看板可以準確的量化施工進度，因此當發生進度落後時，可以即時的啟動趕工計畫。

表 2 各工程看板數量

	EPOXY 頂板及 柱位噴塗	地坪導電 EPOXY(A 區)	AT 庫板	排煙風管配管	灑水系統
看板數量	28	35	120	170	550
	空調冰水系統 (DCC)	盲板(B 區)	FFU 安裝 (B 區)	定址光電式偵煙 探測器	廣播系統及緊急 照明系統
看板數量	450	108	204	250	230

三、建構模擬模式尋找趕工計畫最適人力數量配置

本研究發展模擬模式，以作為數據蒐集與比較之基礎，模式建構步驟如下：

(一) 蒐集模擬模式所需資訊且設定假設條件

1. 模擬模式所需資訊

- (1) 各工程施工人數及天數如表 1 所列，員工人力成本以時薪 250 元計算。
- (2) 違約金額為合約的千分之二，本研究專案合約金額為 46 億元，因此若延遲一天則罰款 92 萬元。

2. 系統假設

- (1) 經由模擬隨機亂數而使得變異隨機發生；
- (2) 若變異產生，則當天則無進度（因沒有物料到達或設計變更，導致無法施工）；

- (3) 忽略物料成本及設備成本；
- (4) 假設各施工人員皆受良好技術訓練，各人員其工作效率相同；
- (5) 趕工計畫僅考慮增加人力數量和加班時間兩部份；
- (6) 工程的開始與結束為前一工程結束後一工程才開始；
- (7) 人力數量與施工進度不成線性關係。

Frederick P. Brooks (2004)指出人越多並不代表可以做越多的事情，原因為溝通的路徑變多，因此造成溝通的複雜度而使得團隊合作的困難度提高。在本研究當中，我們根據個案公司歷史資料及參考產業專家意見將人力與施工進度用指數迴歸函數來描述，且依照各工程需求製作不同的人力進度函數曲線。舉 EPOXY 工程為例，表 3 描述當員工總數 7 人時，可進行施工的看板數量為 7 個；若員工總數為 8 人時，則可進行施工的看板數量為 9.5 個，因考量在進度發現延遲時，啟動趕工計畫將造成人員緊張及工作效率增加，當人力數量越往上增加，其工作效率會漸漸遞減。式(10)是 EPOXY 的指數迴歸函數，函數圖形如圖 7 所示，人數增加 9 人以上並不適用此人工進度函數，而專案中各個工程當中的人力進度函數，整理如表 4。

表 3 EPOXY 人數及看板數量統計

人數	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
可進行看板數量	7	9.5	10.3	11.1	11.8	12.6	13.4	14.3	15.1	15.8

$$y = 1.43x^{0.87}, \text{ 其中 } 7 \leq x \leq 16 \quad (10)$$

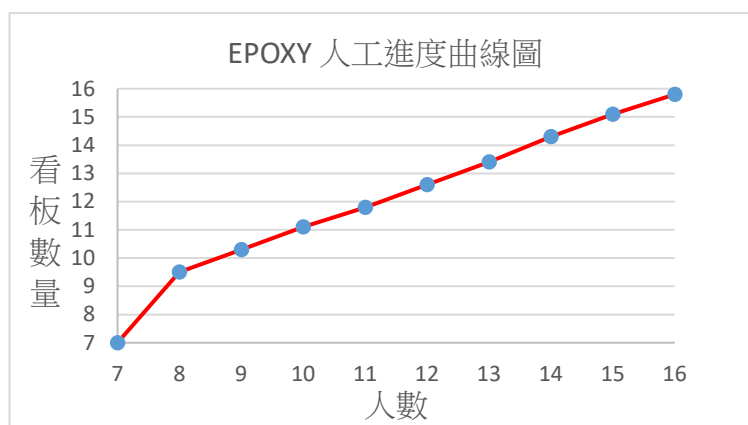


圖 7 EPOXY 人工進度曲線圖

表 4 各工程人力進度函數

工程名稱	人力進度函數	範圍限制
EPOXY 工程	$y = 1.43x^{0.87}$	$7 \leq x \leq 16$
EPOXY (A 區)	$y = 1.45x^{0.86}$	$5 \leq x \leq 14$
AT 庫板	$y = 1.45x^{0.87}$	$6 \leq x \leq 15$
排煙工程	$y = 1.45x^{0.86}$	$5 \leq x \leq 14$
灑水系統	$y = 1.45x^{0.88}$	$10 \leq x \leq 19$
空調系統	$y = 1.94x^{0.74}$	$9 \leq x \leq 18$
盲版工程	$y = 1.45x^{0.87}$	$6 \leq x \leq 15$
FFU (B 區)	$y = 1.57x^{0.85}$	$12 \leq x \leq 21$
偵煙設備	$y = 1.45x^{0.86}$	$5 \leq x \leq 14$
廣播系統	$y = 1.45x^{0.86}$	$5 \leq x \leq 14$

(二) 建構現況模擬模式

施工流程之現況模擬模式架構如圖 8 所示，此模擬模式分析範圍包含整個專案的要徑作業、變異是否發生、看板數量進入施工流程及績效指標的蒐集，分述如下：

1. 是否發生變異

本研究模擬模式是以看板作為系統內的 entity 流動，一個看板經過施工流程，則代表施工正在進行，而變異為隨機亂數產生，在模擬當中採用均勻分配隨機產出數字，若產出數字小於所設定的值，則代表變異發生；若有變異發生，表示當天無物料進度，即無生產看板進入施工當中。

2. 施工流程時間設定

在建構模擬模式的假設當中，我們將各工程的人力進度函數計算出來，意謂著施工流程時間與人 數多寡相關，舉 EPOXY 例子說明如下：

(1) EPOXY 工程： $y = 1.43x^{0.87}$

(2) 施工人數：7 人，代入函數則為 $1.43 \times 7^{0.87} = 7.77$ ，亦即 7 位施工人員在一天的工時當中，可以完成 7.77 張看板數量，因此一張看板施工時間為 $1 \div (7.77 \div 7) = 0.9001$ 天。

3. 前工程完工後，後工程才可開始施工

這項重點在於工程與工程之間的前後關係，因此除了第一個工程 (EPOXY) 外，爾後的 9 個工程當中，都須建構等待前工程完工才可進行施工的邏輯。

4. 績效指標的蒐集

需要收集的資料有各工程的完工時間、人力成本及總完工時間等。

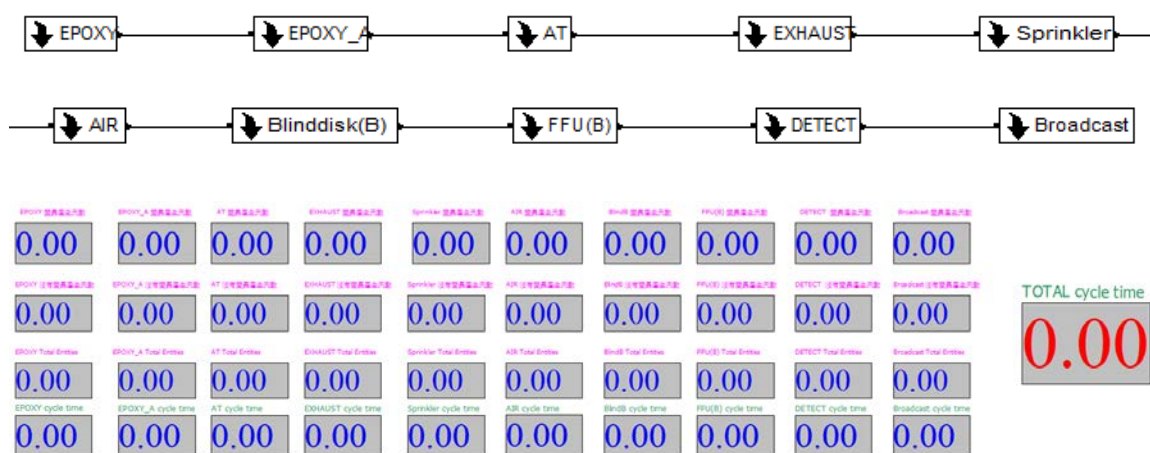


圖 8 整體模擬模式架構圖

(三) 模擬模式驗證

模擬模式合理性須由信度和效度兩方面分別驗證，探討建構模擬模式是否符合現況及建構邏輯。

1. 信度

以數據收集的方式驗證模擬模式的運作邏輯是否符合設計邏輯。首先，在模擬過後各工程產生的總看板數量與當初設定的總看板數量應相同；其次前工程完工後，後工程才能開始生產，則以動畫檢視之。

2. 效度

比對真實系統的輸出值與現況模擬模式所產生的輸出值是否相同，以作為判斷此模擬模式是否能夠代表真實系統的依據，表 5 比較各個工程中，現況與模擬施工天數的差異，其誤差之比例皆小於 5%，因此接受以此模式代表真實系統。

表 5 各工程效度實證誤差表

施工天數 (單位：天)	EPOXY 頂板及柱位噴塗			地坪導電 EPOXY(A 區)			AT 庫板		
	現況	模擬	誤差	現況	模擬	誤差	現況	模擬	誤差
	7	7	0%	7	7	0%	20	20	0%
施工天數 (單位：天)	排煙風管配管			灑水系統			空調冰水系統 (DCC)		
	現況	模擬	誤差	現況	模擬	誤差	現況	模擬	誤差
	34	35	2.8%	74	75	1.4%	77	78	1.3%
施工天數 (單位：天)	盲板(B 區)			FFU 安裝(B 區)			定址光電式偵煙探測器		
	現況	模擬	誤差	現況	模擬	誤差	現況	模擬	誤差
	18	18	0%	17	17	0%	50	51	2%
施工天數 (單位：天)	廣播系統及緊急照明系統								
	現況	模擬	誤差						
	46	47	2.1%						

(四) 模擬最佳化求解

本研究使用 Arena[®]13.5 版之輔助工具 OptQuest 進行模擬最佳化，以求解最佳增加人力數量，包含里程碑檢驗和兩天一次的進度檢驗。

四、工程進度檢驗與啟動趕工計畫

本研究針對在施工流程中，有發生延遲的工程來增加人力數量啟動趕工計畫，免於高金額的懲罰成本和降低服務水準。經由個案實驗分析顯示，發生變異之工程為 EPOXY 工程、灑水工程及空調工程等三項工程。

(一) 里程碑檢驗分析

透過模擬最佳化，得到各施工工程每天需增加的人力，如表 6 所列，三個工程皆增加一位施工人數，有些增加加班時數兩小時；以 EPOXY 工程為例，在第一次里程碑檢查後，其餘天數需增加施工人員一名；在第二次里程碑檢驗後，也是需增加施工人員一名，其他兩個工程也如前述，增加後各工程完工時間如表 7 所示，由表 7 可得知，改善後的各完工時間皆有些微幅度的改善，最大可以到 9.1% 的時程改善；對於總成本及總天數的改善如表 8 所列，運用里程碑檢驗並計算出最佳增加人力數量及加班時間，其總成本改善幅度下降 10%，且總完工時間也減少 3.7% 至規劃完工時間內。

表 6 里程碑檢驗人力增加結果

里程碑 檢驗	EPOXY 頂板及柱位噴塗		里程碑 檢驗	灑水系統		里程碑 檢驗	空調冰水系統 (DCC)	
	第 1 次 (第 2 天)	第 2 次 (第 4 天)		第 1 次 (第 22 天)	第 2 次 (第 39 天)		第 1 次 (第 20 天)	第 2 次 (第 35 天)
預定 人數	7 人	7 人	預定 人數	10 人	10 人	預定 人數	9 人	9 人
增加 人數	1 人	1 人	增加 人數	1 人	1 人	增加 人數	1 人	1 人
加班 時間	0	0	加班 時間	2 小時	0	加班 時間	2 小時	0

表 7 里程碑檢驗增加人力後各工程完工時間及改善程度

工程名稱	EPOXY 頂板及柱位噴塗		地坪導電 EPOXY(A 區)	AT 庫板	排煙風管配管	灑水系統	
施工天數	6.06	1.1%	6.57	19.59	34.48	68.78	7.8%
工程名稱	空調冰水系統 (DCC)		盲板(B 區)	FFU 安裝 (B 區)	定址光電式偵煙探測器	廣播系統及緊急照明系統	
施工天數	70.06	9.1%	17.59	16.62	50.48	46.54	

表 8 里程碑檢驗總成本改善績效

	總成本	改善程度	完工時間	改善程度
現況	149,484,835 元	降低 10%	349.67 天	週期時間縮短 3.7%，並且在約定時間之內
里程碑檢驗	134,628,726 元		336.78 天	

(二)兩天一次進度檢驗分析

在相同的基礎下，進行兩天一次進度檢驗最佳化的計算，EPOXY 工程、灑水系統工程及空調工程增加人數及加班時間如表 9，10 和 11 所列。因限制施工總完工時間與里程碑檢驗相同，因此改善後的總工時與里程碑相當，此結果如表 12 所示；然而對於總成本的變化，兩天一次進度檢驗的總成本較里程碑為高，由表 13 可知成本績效改善僅降低 8.58%。

表 9 EPOXY 工程最佳增加人力數量及加班時數

EPOXY 頂板及柱位噴塗		預定人數：7 人			
第 n 天		1	2	3	4
增加人數(人)	-	-	2	2	7
加班時間(時)	-	-	0	0	0

表 10 灑水系統工程最佳增加人力數量及加班時數

灑水系統		預定人數：10 人														
第 n 天		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
增加人數(人)	-	-	7	7	1	1	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0
加班時間(時)	-	-	3	3	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
第 n 天		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
增加人數(人)	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
加班時間(時)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	0	0	0
第 n 天		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
增加人數(人)	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	1	1
加班時間(時)	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	2	2	0	0	0
第 n 天		46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
增加人數(人)	0	0	0	0	3	3	2	2	0	0	0	0	0	10	10	7
加班時間(時)	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	2	2	1	1	0
第 n 天		61	62	63	64	65	66	67	68	69						
增加人數(人)	7	0	0	0	0	2	2	10	10							
加班時間(時)	0	0	0	0	0	4	4	0	0							

表 11 空調工程最佳增加人力數量及加班時數

空調冰水系統 (DCC)															預定人數：9 人
第 n 天	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
增加人數(人)	-	6	6	0	0	1	1	0	0	2	2	1	1	3	3
加班時間(時)	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
第 n 天	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
增加人數(人)	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
加班時間(時)	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0
第 n 天	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
增加人數(人)	0	0	0	8	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
加班時間(時)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
第 n 天	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
增加人數(人)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	8	3	3	1
加班時間(時)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
第 n 天	61	62	63	64	65	66	67	68	69						
增加人數(人)	1	1	1	0	0	3	3	0	0						
加班時間(時)	0	0	0	2	2	1	1	0	0						

表 12 兩天一次進度檢驗增加人力後各工程完工時間及改善程度

工程名稱	EPOXY 頂板及 柱位噴塗	地坪導電 EPOXY(A 區)	AT 庫板	排煙風管配管	灑水系統
施工天數(天)	4.08	33%	6.57	19.59	34.48
69.74					6%
工程名稱	空調冰水系統 (DCC)	盲板(B 區)	FFU 安裝 (B 區)	定址光電式偵煙 探測器	廣播系統及緊急照 明系統
施工天數(天)	69.60	9.7%	17.59	16.62	50.48
					46.54

表 13 兩天一次進度檢驗總成本改善績效

	總成本	改善程度	完工時間	改善程度
現況	149,484,835 元		349.67 天	
兩天一次進度檢驗	136,657,995 元	降低 8.58%	335.29 天	週期時間縮短 4.1% ， 且在約定時間內完工

(三)比較兩種情境結果

1. 里程碑檢驗小結

(1) 總週期時間難以減少太多

因開始檢查日期較晚 (是施工天數的 40% 及 70%)，因此發現變異時間較晚，前面已延遲的進度在後期需要較多人力來趕工，較難以縮短總完工時間。

(2) 進度檢驗間隔較長，人力數量增加彈性也較小

最佳化增加人力數量僅檢查兩次，因此人力數量增加彈性小，但與兩天一次進度檢驗比較，管理人員負擔較輕，人力成本也較低。

2. 兩天一次進度檢驗小結

(1) 總週期時間降低幅度較大

開始檢查日期早，發現變異也較早 (即施工第 2 天開始進度檢驗)，因此可以提早做人力配置來減少總工程週期時間；另一方面，進度檢驗間隔較短，人力配置彈性比里程碑檢驗大。

(2) 付出人力成本較高

管理人員每兩天即對工程重新配置人力，在人力成本方面，比里程碑檢驗要高。由以上分析發現，兩種情境各有優缺點，管理者可根據情況來選擇適合的情境。

五、敏感度分析檢測人力數量對完工時間及總成本之影響

(一)增加人力數量對工期長短之影響

圖 9 描述人力數量增減變化對整體成本之影響，以提供決策者管控人力之依據，在一開始增加少許人力 (如 1-3 人)，總完工時間下降的斜率較陡，代表增加少許人力其效率與整體比較是有遞增的效果；隨著人數增加越多，其斜率漸趨平緩，表示人力數量並不為增加越多越好，也不呈線性關係，在管理上應該要適當增加人力，以導正增加越多人力則效益可以遞增之迷思。

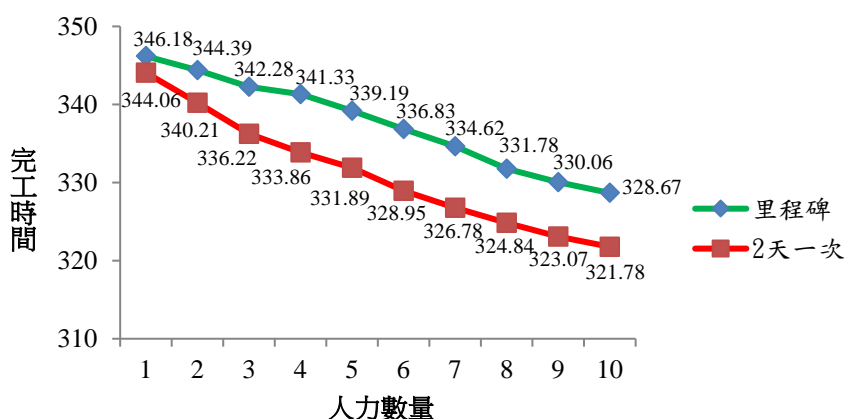


圖 9 增加人力數量不同其完工時間的變化

(二)總完工時間限制對總成本之變化

在圖 10，我們將個案總完工天數分四個階段，依序為小於 325 天、325-330 天、330-335 天及 335-342 天，來探討總成本變化，圖形顯示兩天一次的進度檢驗其總成本在最後三個階段都較里程碑檢驗來的高，且隨著總完工時間縮小，成本大致有往下遞減的趨勢；但在第一階段，發現里程碑檢驗之總成本比兩天一次進度檢驗高，主要原因是里程碑檢驗較難以縮短總完工時間，且發現變異時間較晚，必需付出更多的人力數量或加班時間來補足。因此總完工時間並不全然為越短越好，可能會造成成本大幅增加，公司在專案規劃時期，應對可能影響成本之工程期限進行敏感度分析評估，以避免過大的成本或延誤交期。

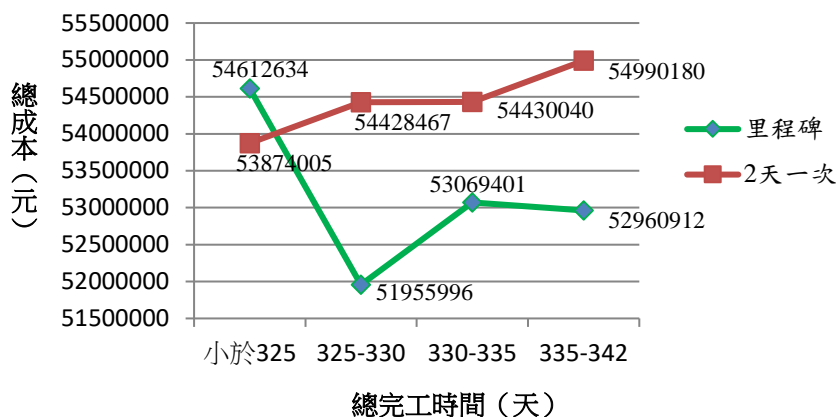


圖 10 總完工時間不同對總成本之變化

伍、結論與建議

本研究藉由生產指示看板來控制專案的進度，當進度落後時，需增加人力時，可以重新增加看板數量與調配看板裡的工作量，使得工作量得到合理的分配，避免專案延遲；另外，透過模擬最佳化發展演算法來執行趕工計畫，最佳化增加人力數量及加班時間，研究顯示此演算法較依經驗設定人力數量及加班時間有執行及成本上的優勢。

對於里程碑檢驗及兩天一次進度檢驗，兩種情境皆有優缺點，且優勢的地方不同，但共通的是，由於有最佳化增加人力數量及進度檢驗，可使得完工時間皆在規劃時程內或甚至更短，總成本也較現況低。由個案分析結果顯示，里程碑檢驗成本降低 10%，兩天一次進度檢驗成本降低 8.58%，且兩者服務水準皆有提高。另外，若依照不同的完工時間限制，則可配置更多適當的人力數量或是加班時間來縮短工期，增強公司的競爭力。

在營造業，承接專案公司常因追加金額或完工時間與下包商產生衝突，導致供應商夥伴關係無法長久維持，科學化的解決方案比起經驗判斷的優勢在於擁有較多證據來支持論點，藉由此演算法計算出的最佳趕工計畫某種程度上亦能降低彼此的摩擦。本研究僅發展演算法來做進度控制，未來研究者可朝發展精實 E 化資訊平台以更即時的方式來作進度控制及最佳化計算，以最小總成本及最短完工時間為目標建構資訊平台來執行趕工計畫。

致謝

本研究部分由中華民國科技部研究計畫資助，編號為 MOST-106-2221-E-006-162-MY3。

參考文獻

- [1] 李玟瑩 (2013)。考慮不同趕工成本結構下之資源受限專案最佳趕工策略研發(碩士論文)。國立中正大學企業管理研究所，嘉義。
- [2] 李俊辰 (2011)。趕工策略與風險考量下，專案評估模式之研究(碩士論文)。國立臺北科技大學商業自動化與管理研究所，台北。
- [3] 周志航 (2012)。考慮趕工、替代、里程碑下之專案成本分析(碩士論文)。國立中正大學企業管理研究所，嘉義。
- [4] 張祐齡 (2013)。建構專案管理 e-Kanban 系統—以高科技廠建廠專案為例(碩士論文)。國立成功大學製造資訊與系統研究所，台南。
- [5] 廖靜雅 (2016)。機關審查廠商展延工期及趕工計畫作業程序與參考準則建立之研究(碩士論文)。國立中央大學營建管理研究所，桃園。
- [6] 錢一一(譯)(2004)。人月神話：軟體專案管理之道(原作者：Frederick P. B., Jr.)。台北市：經濟新潮社。(原著出版於 1975)
- [7] 鍾漢清(譯)(2015)。精實革命：消除浪費、創造獲利的有效方法(原作者：Womack, J. P. & Jones, D. T.)。台北市：經濟新潮社。(原著出版於 2003)

- [8] Aronson, J., Liang, T., & Turban, E. (2004). *Decision support systems and intelligent systems*. New York, NY: Pearson Prentice Hall.
- [9] Ballard, H. G. (2000). *The last planner™ system of production control*. (PhD dissertation) School of Civil Engineering, the University of Birmingham, UK.
- [10] Fu, M. C. (2002). Optimization for simulation: theory vs. practice. *INFORMS Journal on Computing*, 14, 192-215.
- [11] Glover, F., Kelly, J. P., & Laguna, M. (1996). *New advances and applications of combining simulation and optimization (pp.144-152)*. Proceedings of the 28th Conference on Winter Simulation, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA.
- [12] Green, S. D. & May, S.C. (2005). Lean construction: arenas of enactment, models of diffusion and the meaning of 'leanness'. *Building Research and Information*, 33, 498-511.
- [13] Hosseini, S. A. A., Nikakhtar, A., Wong, K., & Zavichi, A. (2012). *Implementing lean construction theory to construction processes' waste management (pp.414-420)*. International Conference on Sustainable Design and Construction, Kansas City, MO, USA.
- [14] Howell, G., Laufer, A., & Ballard, G. (1993). Interaction between subcycles: One key to improved methods. *Journal of Construction Engineering and Management*, 119, 714-728.
- [15] Hu, X., Cui, N., & Demeulemeester, E. (2015). Effective expediting to improve project due date and cost performance through buffer management. *International Journal of Production Research*, 53(5), 1460-1471.
- [16] Karim, A. & Nekoufar, S. (2011). *Lean project management: In large scale industrial & infrastructure project via standardization*. Retrieved from: http://projectmanager.com.au/wp-content/uploads/2011/03/LeanPM_Saviz-Nekoufar.pdf
- [17] Kerzner, H. (2013). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [18] Koskela, L. (1992). *Application of the new production philosophy to construction, center for integrated facility engineering (CIFE Report #73)*. Retrieved from Stanford University, Department of Civil, Engineering,
- [19] Monden, Y. (2012). *Toyota production system : An integrated approach to just-in-time*, 3rd Ed. New York, NY: Taylor & Francis.
- [20] Sacks, R., Radosavljevic, M., & Barak, R. (2010). Requirements for building information modeling based lean production management systems for construction. *Automation in Construction*, 19, 641-655.
- [21] Swisher, J. R., Hyden, P. D., Jacobson, S. H., & Schruben, L. W.(2000). *A survey of simulation optimization techniques and procedures (pp.119-128)*. Proceedings of 2000 Winter Simulation Conference, Orlando, FL, USA.
- [22] Thomas, H., Horman, M., de Souza, U., & Zavrski, I. (2002). Reducing variability to improve performance as a lean construction principle. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128, 144-154.
- [23] Thomas, H. R., Sanvido, V. E., & Sanders, S. R. (1989) Impact of material management on productivity-a case study. *Journal of Construction Engineering and Management*, 115, 370-384.