

國立交通大學
運輸科技與管理學系碩士班

碩士論文

應用簡化之 CPM/PERT 模式預估專案工期之研究

A Study on Project Prediction Using Simplified
CPM/PERT Simulation Model



研究生：邱子長

指導教授：謝尚行 副教授

中華民國九十五年七月

應用簡化之 CPM/PERT 模式預估專案工期之研究
**A Study on Project Prediction Using Simplified
CPM/PERT Simulation Model**

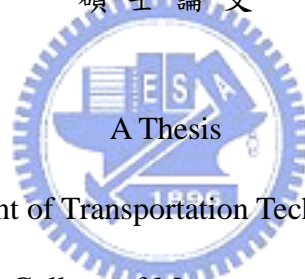
研 究 生：邱子長
指導教授：謝尚行

Student : Tzu-Chang Chiu
Advisor : Shang-Hsing Hsieh

國 立 交 通 大 學

運 輸 科 技 與 管 理 學 系

碩 士 論 文



Submitted to Department of Transportation Technology and Management

College of Management

National Chiao Tung University

In partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Master

in Transportation Technology and Management

Jul 2006

Hsinchu, Taiwan

中華民國九十五年七月

應用簡化之 CPM/PERT 模式預估專案工期之研究

研究生：邱子長

指導教授：謝尚行

國立交通大學運輸科技與管理學系

摘要

營建產業於目前台灣的產業市場日趨重要，如何讓營建工程於期限內順利完工，是很重要的課題，然而在實務上較廣泛被使用的進度規劃技術，如桿狀圖或是要徑法，這些確定性的進度規劃技術在面對較大規模的工程專案時，對於要徑的計算上缺乏效率；因此電腦模擬的技術可以幫助快速、正確地求算工期。Lu 與 AbouRizk 於 2000 年提出簡化 CPM/PERT 模式之模擬模型，其前推式的計算與 CYCLONE 類似；但逆推式的計算採用較簡單且較有效率的求解方式，不需求出各節點的總浮時便能找到總工程之要徑。另外此模式具有要徑指數（Criticality Index，簡稱 CI）的功能，能夠算出每項作業在工程專案中，成為要徑的機率，較傳統的要徑檢查更具完整性，對管理者也更具參考價值。

本研究利用 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化要徑法/計畫評核術 (CPM/PERT) 模擬模式，應用於個案工程專案中，取代傳統的 CPM/PERT 模式，幫助進度管理者預估較確定性的工期時間，並且計算網路中各路徑成為要徑的機率。另外經由與建築設計師及施工單位的訪談，探討工程中各作業工項變異的可能因素，最後在趕工情境之下進行模擬，比較個案工程專案於不同情境之下，要徑的變異性。

個案工程專案的模擬結果顯示，簡化 CPM/PERT 模式同樣具有預估工期的能力，且能求得較確定性的完工工期、對於要徑的判斷，能提供更完整的工程資訊；而在專案趕工的情境之下，Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式能判斷 6 種不同的要徑情況，提供較全面的作業要徑機率資訊，幫助管理者進行風險分析，增加在工期預估的效率與準確性。

關鍵字：簡化要徑法/計畫評核術

A Study on Project Prediction Using Simplified CPM/PERT Simulation Model

Student: Tzu-Chang Chiu

Advisor: Shang-Hsing Hsieh

Institute of Transportation Technology and Management
National Chiao Tung University

ABSTRACT

It is quite important to finish a project or a construction in the deadline for the project managements. Bar chart and classic critical path method (CPM) are both deterministic tools which easy to apply to the project scheduling. However, lack of efficiency to compute the critical path of larger scale project limit theirs effectiveness. Construction simulation by computer can provide promptly and accurately schedule information, such as critical path and the total project time. Lu and AbouRizk (2000) presented a simplified CPM/PERT Simulation Model, which has been done to overcome the limitations and enhance the computing efficiency of classic CPM/PERT model. This simplified model incorporates a simplified critical path identification method by “Critical Index, *CI*,” and supplies more comprehensive activities information then classic CPM/PERT model. This new solution to CPM network, presented by Lu and AbouRizk (2000), can provide project management with a convenient tool to assess alternative scenarios based on computer simulation and risk analysis.

In this research, the author used the simplified CPM/PERT simulation model (Lu and AbouRizk, 2000) to put into a practical case. It validates the simplified model and compares it to classic CPM/PERT analysis. The result shows that, in the basic scenario, the simplified model can provide more completed critical path information than classic model. Additionally, in the crashing scenario, the simplified model can judge 6 different critical path conditions. It can enhance CPM/PERT model analysis and reinforce the accuracy and efficiency on project prediction.

Key words: CPM/PERT model

誌謝

這篇論文能夠順利的完成，最要感謝我的指導老師 謝尚行教授的悉心教導，不論是研究的啟發與指點或是生活態度，皆不餘遺力，使我受益良多。另外承蒙論文口試委員 高凱教授與 李彌教授於口試期間之不吝指正與建議，使本論文能夠更加的充實與完整，諸位老師的寶貴意見讓學生受益匪淺，僅在此至上最誠摯的敬意與感謝。在資料蒐集的過程中，特別感謝李謝嵐建築師事務所李謝嵐建築師以及林珮如建築師的寶貴經驗與意見，在此併予感謝。

時光匆匆，在交大一晃眼就是六年，這些年來除了課業之外，我還有參加交通大學棒球校隊，而且很榮幸能成為教練 黃杉楹老師的門生，也是在我心目中，另外一個指導老師，他不但教導我的球技，也讓我學會了待人處世的道理。而待在球隊六年，過往的所有比賽，勝敗悲喜，都能與隊友一起分享，是我覺得最珍貴，也最快樂的時光，其中幾位提攜後輩的學長們，包括舜哥、兆平、阿麟、Taco、星哥、吸盤、岳章等等，感謝你們對球隊的貢獻以及對我的照顧，另外同期的隊友們包括耶穌、頭哥，以及恐龍、老周、斯文，感謝你們的義氣相挺，另外還有就是 Jason、帥銓、昱丞、范銘隆、小杜、大蠻、蔚廷、士含等等學弟，跟你們這群人打球真的是令人開心的一件事阿！當然，還要特別感謝跟我從高中就同隊的浩呆，陪我度過高中大學的點點滴滴。

在兩年研究所求學期間，感謝研究室裡博士班學長陳世鴻學長、王賢崙學長畢業學長善界、成政的指導與照顧，亦感謝同窗輝哥、大明星熊寶貝阿軒以及學妹思慧，一起在學業上努力；另外也感謝大學最好的室友們劉柏廷、陳阿丸、劉舊隆、林大魁，分享喜怒哀樂，生活中有你們永遠不會枯燥，謝謝你們。另外，亦感謝大學同學們：彥廷、Piece、小布、昱翰等等，讓我的大學生活充滿活力。此外特別感謝我的好朋友陳冠宇、大益、俊維、阿達、阿泰、小黑、吳叡彥、葉賽的鼓勵與協助，謝謝各位。

最重要要感謝的，是一路陪伴著我，分享我生活中的所有，支持我、鼓勵我、提點我、益師益友的佩青，妳讓我的生活永遠洋溢著喜悅與幸福，謝謝妳。

僅將此份論文獻給我最愛的爸爸、媽媽與老弟，因為有你們在我的身後給予支持與呵護，使我能夠順利完成學業！ 謝謝！

邱 子 長 謹誌于
國立交通大學運輸科技與管理研究所
中華民國 95 年 6 月 9 日

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究範圍.....	4
1.4 研究方法.....	5
1.5 研究流程與架構.....	5
第二章 文獻回顧：.....	8
2.1 傳統的進度管理技術.....	8
2.1.1 確定型態的進度管理技術.....	8
2.1.2 機率密度型態的進度規劃.....	11
2.2 進度管理的應用.....	14
2.3 傳統進度管理的限制與改良.....	15
2.4 營建模擬技術概況.....	16
2.5 小結.....	22
第三章 模式架構.....	23
3.1 模式介紹.....	23
3.2 簡化之 CPM/PERT 模擬模式之演算法.....	24
3.2.1 前推式的計算步驟：.....	25
3.2.2 逆推式的計算步驟.....	28
3.2.3 逆推式要徑搜尋法則之證明.....	29
3.3 小結.....	33
第四章 模式驗證.....	34
4.1 範例介紹.....	34
4.2 簡化之 CPM/PERT 模擬結果.....	36
4.3 簡化 CPM/PERT 模式與傳統模式之差異.....	37

第五章 案例評估.....	41
5.1 專案背景資料.....	41
5.2 專案進度規劃.....	41
5.3 模式套用與模擬結果.....	42
5.4 趕工情境探討.....	55
5.5 小結.....	58
第六章 結論與建議.....	60
6.1 結論.....	60
6.2 建議.....	62
參考文獻.....	63
附錄一 個案工程專案桿狀圖.....	67
個人資料.....	68



表目錄

表 1-1 營建產業產銷存變化趨勢	1
表 2-1 進度管理技術的比較	13
表 2-2 國內外營建工程之相關研究	20
表 2-3 CYCLONE 符號表	21
表 4-1 範例工程專案作業表	35
表 4-2 基本範例：簡化 CPM/PERT 模擬模式與傳統 CPM/PERT 模式分析表	37
表 4-3 要徑指標變數 (CI) 與傳統模式之比較	38
表 4-4 範例情境一與基本範例的模擬結果比較	39
表 4-5 情境一之要徑指標變數 (CI) 與傳統模式之比較	40
表 5-1 案例專案背景資料	41
表 5-2 專案作業之三時估計與相互關係表	44
表 5-3 專案工程結果比較表	47
表 5-4 個案工程專案作業的要徑指標 (CI)	49
表 5-5 「9-21」作業項目更改狀況	55
表 5-6 趕工情境下與傳統模式的比較	56
表 5-7 趕工情境下的模擬結果	56

圖目錄

圖 1-1 研究流程圖	7
圖 2-1 桿狀圖	9
圖 2-2 要徑法簡例	10
圖 2-3 貝他分配圖例	11
圖 3-1 複雜節點利用虛作業處理	24
圖 3-2 匯合節點示意圖	27
圖 3-3 法則一的圖解	29
圖 3-4 法則二的圖解	31
圖 4-1 基本範例工程專案網路圖	34
圖 4-2 模擬結果示意圖	36
圖 5-1 個案工程專案箭線式網路圖	46
圖 5-2 個案工程專案模擬結果	48
圖 5-3 個案專案工程要徑圖	54
圖 5-4 趕工情境模擬結果	57
圖 5-5 趕工情境下個案工程專案要徑圖	58

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

台灣地區的營建工程業萌芽於 1960 年代，在 1970 年代隨著經濟發展而漸趨蓬勃，而 1979 年由於國際油價大幅波動，國內通貨膨脹加速，民眾基於保值心態，大量投資於本產業，使房屋建築業交易更加活絡。雖然 80、90 年代建築產業由盛而衰，但是到了 21 世紀，在政府實施低利率房貸，並且持續釋出優惠政策等刺激之下，使得餘屋消化良好，房地產交易也重新活絡，2003 年建商開始釋出新的建物，其中工商綜合區與大型購物中心亦陸續興建，故 2003 年至 2005 年房屋建築工程業之工程值恢復成長趨勢，由表 1-1 可以看出營建產業近年來生產值都不斷的成長（劉佩真，2005）。

表 1-1 營建產業產銷存變化趨勢

年份	單位：百萬新台幣				
	2001	2002	2003	2004	2005
生產值	195,577	160,808	172,144	182,271	204,482
成長趨勢	-11.03 (%)	-17.78	7.05	5.89	12.19

資料來源：經濟部統計處工業生產統計磁帶資料、台灣經濟研究院產經資料庫整理，2006 年 3 月

因此營建產業於目前台灣的產業市場日趨重要，對於進度管理者而言，如何讓營建工程專案於期限內順利完工，便是最重要的課題，因為營建工程專案中，各項工程作業皆具有不確定性，其中涉及複雜的人員，機具，建材等資源交互作用，常因工程種類、性質不同，而須採用不同的機具、工法，且常面臨天候、地質狀況、機械故障等外在不確定因素之影響，因此唯有良好的進度管理技術的幫助，方可使專案順利完成。進度管理的發展從最早期尚無文獻記錄的金字塔、萬里長城建造時，所採取的方式為管理者緊迫釘人的方式，到 1930 年代的甘特圖，1957 年美國杜邦（Dupont）公司之工程師 Morgan R. 及 James E. Kelly 發明的要徑法（CPM）、隔年美國海軍特種工程局於執行「北極星飛彈專案」時，將要徑法

導入機率的概念，發展出計畫評核術（PERT）等等，總之決策者為了使專案能如期完工，進度管理的技術已經行之有年。根據 Osama Abudayyeh 等學者(2004)針對 ASCE (American Society of Civil Engineer) Journal of Construction Engineering and Management 所進行之研究趨勢分析中發現，1985至2002年間，有關排程（Scheduling）之研究數量總數位居營建工程與管理相關研究主題中之第一位，可見進度管理技術於營建工程管理領域中受重視之程度（蘇文彬，2005）。

然而在實務上，進度管理者多半是依循經驗法則來進行作業流程人員、機具及材料等資源的調度與安排，也因此當遇到突發狀況時，由於經驗的不足，或者錯誤的判斷，造成工程專案施作上資源的閒置，或影響工程專案的完成時間，必須趕工才能避免工程的展延，這些都是工程專案中常見的問題。因此自1950年代美國進入太空時代開始，進度管理者藉由電腦的高速度、高準確性的特性，來幫助進行工期的決策或模擬。隨著電腦科技的進步，模擬更成為廣泛利用的分析工具。電腦模擬在營建工程方面之應用亦很廣泛，舉凡排程、成本控制、投標、土方作業、高層建築施工、機具選擇、土方載運、管線埋設、基礎施工及混凝土施作等重複性單元之規劃，都是電腦模擬可應用的相關主題。

傳統的要徑法（CPM）模擬的技術，每個作業項目必須確定五個時間：最早開始時間（*ES*）、最早完工時間（*EF*）、最晚開始時間（*LS*）、最晚完工時間（*LF*）以及總浮時（*TF*），如此便能利用電腦的程式正確的計算出前推式與逆推式的工期；然由於每個作業皆需要記憶五個時間，因此當面對較大規模的工程專案時，電腦記憶體就面對巨大的負擔，結果可能影響到模擬的效率。直到1973年Halpin發展出營建專門之電腦模擬系統CYCLONE（CYCLic Operation Network），此系統能以簡單之幾個符號及邏輯模擬一般之營建作業流程，CYCLONE運用了六個簡單之符號就能把各類營建作業流程之施作情形給模擬出來，也能很快的測量生產力與改善工作效率，也由於CYCLONE 符號簡單易懂，故非常適合管理人員使用，因此，CYCLONE可說是營建作業模擬最普遍使用之方法。然而Halpin等（1992）在利用CYCLONE對PERT進行模擬時發現，要徑上的作業仍有可能具有自由浮時的時間，如此還是會造成工期的高估或是資源的浪費。Lu與AbouRizk（2000）等改良傳統的CPM/PERT的模擬模型，並且結合CYCLONE的優點，發展出較簡易的模擬模型，不但有效增進模擬的效率，並且能夠考慮作業

成為要徑的機率。

因此本研究期望利用Lu與AbouRizk（2000）之簡化傳統的要徑法/計畫評核術（CPM/PERT）模擬技術，應用於個案工程專案中，期望能取代傳統CPM/PERT模式需要計算每項作業之 ES 、 EF 、 LS 、 LF 以及 TF 的煩瑣程序，便能預估較確定性的工期時間，並且計算網路中各路徑成為要徑的機率。另外經由與建築設計師及施工單位的訪談，探討工程中各作業工項變異的可能因素，提供未來在工程專案中工期預估的參考。

1.2 研究目的

專案可以定義為一非例行性、暫時性、特殊性、不重複性的工作集合，當中包括人力、技術、管理及財務資源的有效組合，因此具有相當的複雜度與重要性。而工程專案首重準時完工，對承包商而言，工期的延遲完工不但增加利息的負擔，以及整個工程專案面對物價上漲的風險，對於業主還必須支付巨額的違約金，甚至會影響包商的商譽，因此如何將控制工期進度，便是進度管理者最重要的課題。良好的進度管理，不但能使工程順利進行，亦能增加額外的效益，例如：對業主而言，可以降低投資的風險、提早使用的營運收益及避免額外的成本；對承包商而言，可以增加資金週轉的彈性、提高信用與商譽以及提早完工的獎金；對設計單位而言，可以減少人力的調度、降低成本以及增加專案的靈活性。

因此營建專案的進度管理甚為重要，然而傳統技術如甘特圖等，當面對較大規模之工程專案時，人工的計算費時又容易出差錯，此時就必須仰賴電腦模擬的技術，電腦模擬主要有以下幾點優勢：（謝斌麒，2000）

1. 不需建構真實系統：欲進行的模擬試驗是一種構想中的系統，不需實際存在的系統。
2. 不會干擾原系統的運作：若實際作業操作時成本太高或具有高度危險時，可利用模擬方式來進行試驗。
3. 不必破壞原有物件：若實驗的目的在於決定物件能承受的壓力極限，利用電腦模擬可避免破壞原有之物件。
4. 節省時間：建立一複雜的電腦模擬模式需花費較多的時間，然而一旦程式完

成後，電腦模擬可模擬一週、一個月或一年等預測時間於短短幾秒或幾分鐘內。

5. 重複模擬相同狀況：實際的情況可能不斷改變、故相同的環境不大可能重複地出現，若於真實系統中實驗，其正確性也容易遭到質疑，而電腦模擬的系統環境是由使用者輸入，透過隨機或機率因素的保護，相對較有推估的空間，並且較具信服力。

從前的電腦模擬系統大多應用於製造業或生產線，直到1973年 Halpin發展出營建專門的電腦模擬系統 CYCLONE之後，許多相關應用於營建工程的電腦模擬系統也陸續推出，由於 CYCLONE系統較簡單易懂，因此成為目前最廣泛被使用的系統。然而 CYCLONE屬於特別用於營建排程的模擬工具，因此在功能上也受到許多限制。而傳統的CPM/PERT模擬技術，由於每單一作業就需要考慮五項時間變數，若遇到較大規模的工程專案，大量的變數會造成電腦記憶體在處理上的負擔，影響計算的效率，並且對於要徑路徑的判別也過於簡單，無法提供較完整的資訊。因此 Lu與AbouRizk（2000）簡化傳統的CPM/PERT模擬的架構，加上 CYCLONE的基本概念，發展出簡化之CPM/PERT模擬模型，以時間為主要考量，更有效率的計算出工期的時間與各作業之要徑機率。

因此本研究之目的是以 Lu與AbouRizk（2000）之簡化CPM/PERT模擬模式為基礎，同樣以時間為考量，針對簡化之CPM/PERT模式與傳統的CPM/PERT模式，對於模擬的結果進行比較與探討，了解專案工期之要徑的變異性；並且將本模擬應用於實務專案工程工期的預估，經由與建築設計師以及施工單位的訪談，探討工程專案各作業工項，分析其發生變異的可能原因，期望能提供給建築師或施工單位，於未來工程專案中工期預估的參考。

1.3 研究範圍

一項工程專案大致可以分為四大階段：初步規劃階段、細部設計階段、營建施工階段以及最後的營運驗收階段。由於在施工期間，各作業項目均涉及人、資源、機械等方面相互影響，且可能受到天候、機具故障或原物料供給變動等不確定的因素影響，因此各作業項目皆具有變異性，這些變異都有可能影響完工的工期。因此本研究主要著重於營建施工階段，探討具有變異性的工程專案之完工時

間。本研究利用 Lu與AbouRizk（2000）之簡化CPM/PERT模式模擬個案工程專案的工期進度，故在本研究中，主要考慮時間的變異，對於時間以外的其他資源或成本（如人力，機具等）暫不考慮。

1.4 研究方法

本研究方法可以分為三部分，分別說明如下：

1. 文獻回顧—首先參考國內外相關的學術文獻，分別了解目前進度規劃的技術發展，以及實務上較廣泛被應用的技術；另外並了解營建模擬技術發展的狀況，並且比較兩種進度管理技術的差異與適用範圍。
2. 模式介紹與驗證—本研究將建立Lu與AbouRizk（2000）之簡化CPM/PERT模擬模式，探討模式架構。之後再利用一簡單的工程專案範例，模擬範例工期，並且與傳統CPM/PERT模式比較改進之處。
3. 實例應用與情境分析—將模式應用於實際範例之工期預估，本研究將探討個案工程專案工期的影響因素，以及各項工程作業的變異性。另外在趕工情境之下進行模擬，比較個案工程專案於不同情境之下，要徑的變異性，提供給進度管理者參考。

1.5 研究流程與架構

本研究流程如圖1-1所示，以下為研究流程與步驟簡單的說明：第一部份為確立研究動機與目的，主要是要了解目前營建作業模擬之問題點與模擬系統之發展演進，激勵研究動機，以確認研究方向與目的；第二部份為蒐集相關文獻，蒐集整理有關營建管理常用的進度管理技術，其中包括傳統的進度管理技術之分析與探討以及營建模擬的現況探討；第三部份為進度管理技術之分析與探討，主要是介紹目前進度管理的技術包括甘特圖、要徑法（CPM）、計畫評核術（PERT）等，並且比較各技術差異與改進之處，以及探討適用之領域；另將介紹應用進度管理於實務上的文獻；第四部份為營建模擬現況探討，主要介紹目前較常使用的營建專門的模擬工具，包括CYCLONE等技術，並且介紹各工具在實務上的應用；接下來第五部份為架構模擬模型，本研究將介紹 Lu與AbouRizk（2000）的簡化之CPM/PERT模擬模型，該模式在模擬時不需要像傳統的模式計算每項作業

之 ES 、 EF 、 LS 、 LF 以及 TF ，便可以求出要徑工期，並且能分析每項作業成為要徑的機率；之後第六部份為模擬實證與比較，本研究先將一範例工程專案利用Lu與AbouRizk（2000）之簡化CPM/PERT模式進行模擬，求出工期要徑，以及各作業成為要徑的機率，再與傳統模式的結果比較異同之處，另外對工程專案做情境分析，探討專案在不同情況之下，要徑的變異性；第七部份為實例應用與探討，經由與建築設計師或施工單位訪談，蒐集各案工程專案之作業項目，利用Lu與AbouRizk（2000）之簡化CPM/PERT模式預估其要徑工期，以及各作業項目之變異原因與要徑機率，並且對個案工程專案做情境分析，探討專案在趕工情境之下，要徑的變異性，提供給建築設計師或施工單位作為參考；最後則提出結論與建議，整理本研究之研究成果與結論，並對未來相關研究提出建議。

在研究架構上，本研究共分為六個章節，其內容分述如下：

第一章、緒論：

本章介紹研究背景與動機、研究目的、研究範圍、研究方法與流程等節，主要描述本研究之輪廓。

第二章、文獻回顧：

本章分為兩的部份：第一部份為進度管理的介紹，將國內目前最廣泛使用的進度規劃技術分別為桿狀圖、要徑法與計劃評核術等進度規劃的技術做詳盡的介紹，之後並概述目前進度管理技術在實務上的應用。第二部份將介紹營建模擬的技術及其實務上的應用。

第三章、模擬模型架構：

本章將介紹Lu與AbouRizk（2000）之簡化CPM/PERT模擬模式，並且與傳統的CPM/PERT模擬模式比較架構上的差異。

第四章、模型實證與比較：

將Lu與AbouRizk（2000）之簡化CPM/PERT模式模擬基本工程專案，找出要徑工期，並與傳統模式比較改進之處。

第五章、個案評估與情境分析：

將 Lu與AbouRizk（2000）之簡化CPM/PERT模式模擬個案工程專案，預估其工程要徑工期，並且與傳統模式比較差異，並針對各項作業項目探討變異的原因。另外在不同情境之下進行模擬，比較工程於趕工的情況之下，要徑的變異性。

第六章、結論與建議：

本章總結研究成果與結論，並對未來相關研究提出建議。

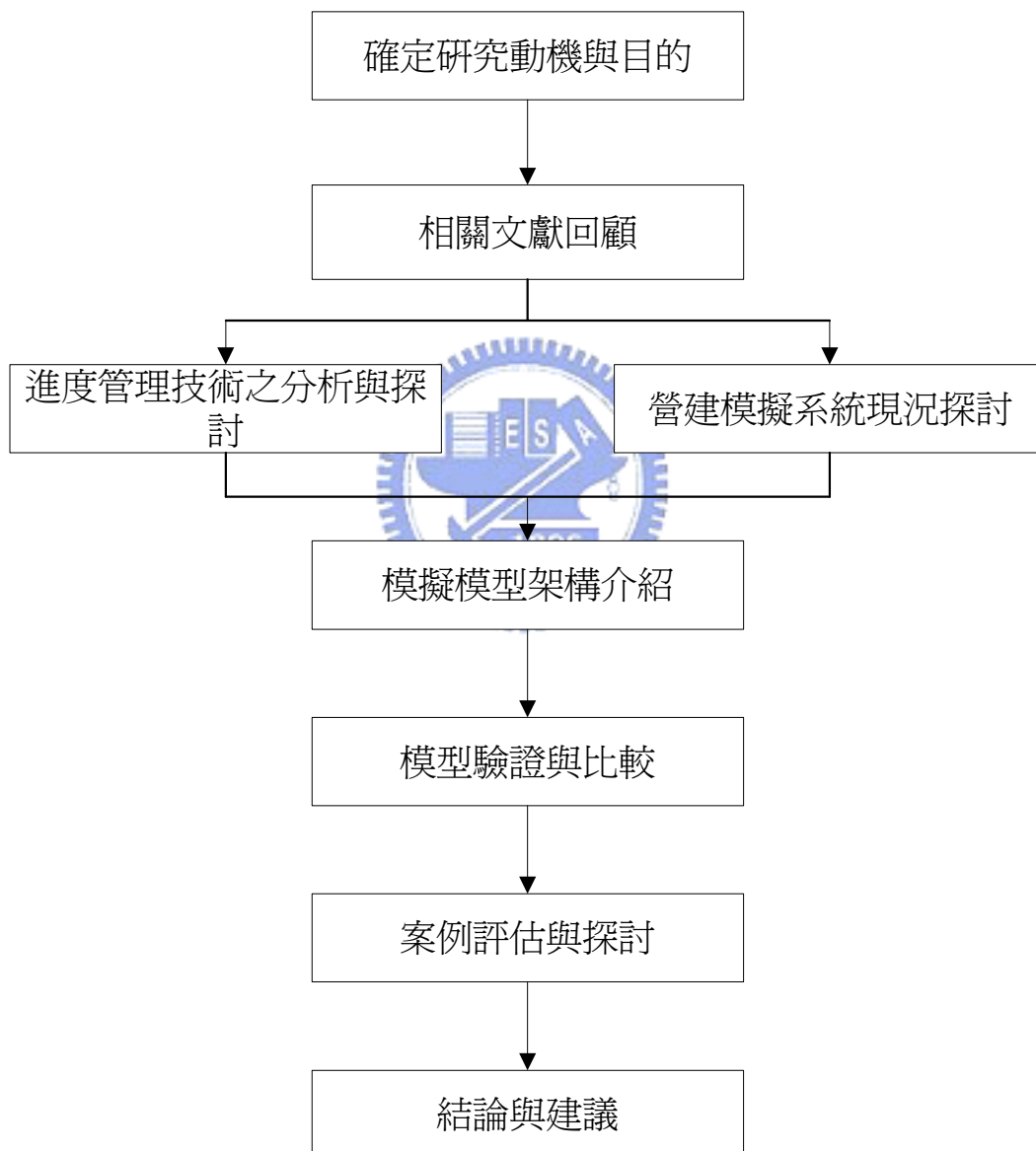


圖 1-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧：

本章分為兩的部份：第一部份為進度管理的介紹，分別為桿狀圖、要徑法與計劃評核術等進度規劃的技術做詳盡的介紹，之後並概述目前進度管理技術在實務上的應用。第二部份將介紹營建模擬的技術，如 CYCLONE 等，並介紹實務上的應用。

2.1 傳統的進度管理技術

傳統的進度管理技術主要分為兩大類別，確定型態的進度管理技術與機率密度型態的進度管理技術，首先介紹確定型態的進度管理技術。

2.1.1 確定型態的進度管理技術

目前國內營建業對於工程進度規劃方式，多是採用桿狀圖法（Bar Chart）或要徑法，這兩種方法的主要特色在於作業工期與總供期均為單一的定值，因此稱為確定型態的進度管理技術。將分別介紹如下：

1. 桿狀圖

所謂的桿狀圖，就是將圖面分為垂直水平的軸面，以水平為時間軸，垂直軸用來列舉作業項目，並將每一項作業以一條直線或桿狀劃於時間軸上，以長短的線段圖示每一項作業開始與結束時間的規劃方式。桿狀圖於二十世紀初由甘特（Gantt）先生採用直線條來代表作業項目，以線段的長度代表各作業之所需時間，在當時可說是一項創舉，使專案規劃由文字改變成立用簡潔的圖形來表示，因此甘特圖又稱為桿狀圖（Bar Chart），如圖2-1所表示

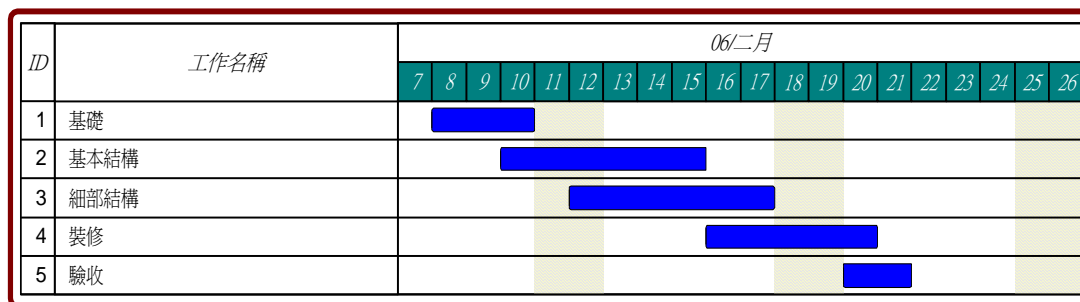


圖 2-1 桿狀圖

桿狀圖其優點在於製作容易、易懂且適合各階層的工程人員使用，但有其缺點如下（謝清俊，1998）：

- 無法明確表明先後關係。
- 不易掌握各作業間的相互關係。
- 不易追蹤各作業進行情況對整體的影響。
- 不易因進度落後或超前而提供有效之預警動作。
- 不易將資源一併考慮。

因此桿狀圖較適合簡單或單純的工程專案，面對較大規模之工程專案則不敷使用。

2. 要徑法

目前國內常用之排程方法以要徑法為主，要徑法之發展起始於 1957 年美國杜邦（Dupont）公司之工程師 Morgan R. 及 James E. Kelly，要徑法係以作業活動為導向（activity oriented）之進度管理技術，使用單一時間估算出單一專案要徑，其中假設作業之進行不受環境變化或資源數量等不確定因素所影響，而所有作業依預先規劃好之時程開始啟動。要徑係指工程專案中不具任何閒置時間之作業路徑，並運用浮時管控路徑上之作業，防止要徑上之作業耽誤而造成專案之延遲，而要徑上各個作業之工期加總即為專案從開始至結束所需要之最長作業時間，即專案之總工期。要徑法必須有明確定之作業項目，且作業彼此間為互相獨立之關係，同時作業彼此間之開始與結束時間為可分開但必須依序執行之條件下，才得以發揮最大之效用（高志魁，2003）。要徑法在執行上有許多優點，專案管理者

可明確地知道各作業發生之實際日期，並可明確對照何時將進行哪些作業以做出反應，並且易於發現整個工程中容易發生瓶頸之作業項目，可針對工程之要徑所在做重點管理等等。但也有其缺點，最主要就是無法表現出工期的變異特性。另外也有無法確實掌握人員、機具等資源指派之問題，且假設「資源為無限制之供應」，與實際狀況不同，容易造成應用上之問題。

要徑法的計算方式分為前推式與逆推式，利用圖 2-2 簡例分別介紹如下：(參考資料：Winston，2004)

1. 前推式計算：於初始節點開始計算至最後之節點，藉以求得各個作業之最早開始時間 (ES) 及最早完成時間 (EF)，計算式如下， D 為作業工期：

$$ES_{JK} = \underset{\forall x}{\text{Max}}(ES_{xJ} + D_{xJ}) \quad (1)$$

$$EF_{IJ} = ES_{IJ} + D_{IJ} \quad (2)$$

2. 逆推式計算：由最後之節點往原點計算，藉以求得各個作業之最晚開始時間 (LS) 及最晚完成時間 (LF)，計算式如下：

$$LS_{IJ} = LF_{IJ} + D_{IJ} \quad (3)$$

$$LF_{JK} = \underset{\forall x}{\text{Max}}(LF_{Kx} + D_{Kx}) \quad (4)$$

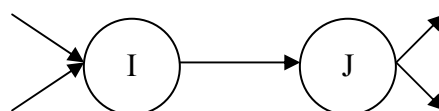


圖 2-2 要徑法簡例

經由前進計算及後退計算可求得各作業之最早開始、最早完成、最晚開始及最晚完成時間，利用上述資訊可進一步計算出作業間之總浮時以及自由浮時，計算說明如下：

1. 總浮時 (Total Float, TF): 即在作業節點間之最大寬裕時間，此段時間即使被耗用亦不致使整個工程延遲。

$$TF_{IJ} = LF_{IJ} - EF_{IJ} = LS_{IJ} - ES_{IJ} \quad (5)$$

2. 自由浮時 (Free Float, FF)：及某作業可延遲之天數，此延遲之舉動不使整個工程延誤，亦不影響後續作業之最早開始時間。

$$FF_{IJ} = \min_{\forall x} (ES_{Jx}) - EF_{IJ} \quad (6)$$

在網路總作業時間最長的路徑，即為要徑，位於要徑中的各項作業，其作業之總浮時為 0，表示該作業無閒置時間，稱該作業為要徑作業。

2.1.2 機率密度型態的進度規劃

一般認為機率分布必須符合下列三項假設(MacCrimmon，1964)：

1. 單峰；
2. 連續性；
3. 有兩個非負的座標節點；

在這三項假設之下，學者專家在尋找適合描述作業工期特性的機率分布。目前最普遍被使用的機率分布，是由Malcolm、Roseboom、Clark與Fazer於1959年所提出的貝他分配 (Beta Distribution)。因為大部分的連續機率密度函數都能藉由貝他分配中的 (α) 與 (β) 兩參數來表示之。貝他機率密度函數可表示如圖2-2所表示：

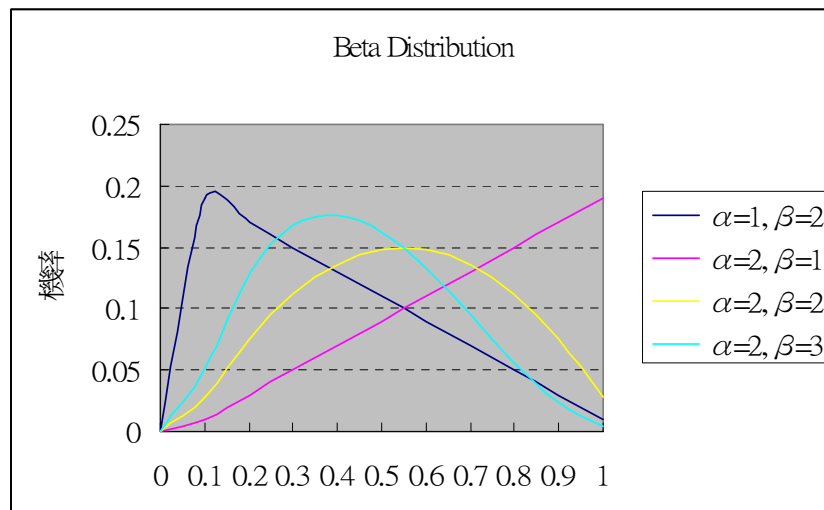


圖 2-3 貝他分配圖例

而在機率密度型態的進度管理技術當中，最常用之技術即為計劃評核術（PERT），這項技術起源於1958年美國海軍特種工程局於執行「北極星飛彈專案」時，有鑑於該專案十分龐大且事務繁多，在管理作業上必須協調將近三千個分別負責設計、發展及製造之承包商、供應商與政府機關等相關單位，於是美國海軍特種工程局會同管理顧問公司與該專案主要之承包商—洛克希達公司，共同利用CPM技術與當時之電腦技術，同時引入機率之概念於1959年發展完成，為世界上第一個電腦化之專案管理程式。

PERT基本上係以事件為導向，對每個時間不確定性的作業，利用網圖分析計算要徑以及要徑上之寬裕時間，進行各作業所需工期之估算，同時加入機率之觀點，它採用三時估計法，假設每個工程作業時間均服從統一之機率分配，通常為前述的貝他分配。三時估計點分別說明如下：

1. 樂觀時間（Optimistic Time）：各種客觀之作業條件極為理想，且實際上一切工作亦在很順利之情況下，作業所需要之工作時間，以 a 表示。
2. 最可能時間（Most-Likely Time）：在同一條件下，倘若該作業反覆做多次時，其最多出現之作業時間，以 m 表示。
3. 悲觀時間（Pessimistic Time）：與樂觀時間相反，一切作業條件極為惡劣，而實際上亦難照正常狀態進行工作時，該作業所需之工作時間，以 b 表示。

估算出上述三個時間後，各作業之工期即可用貝他分配概算：（參考資料：Winston，2004）

$$\text{作業時間平均值：} t_e = \frac{a + 4m + b}{6} \quad (7)$$

$$\text{標準差：} \sigma_{t_e} = \frac{b - a}{6} \quad (8)$$

$$\text{變異數：} \nu_{T_E} = \sum \nu_{t_e} \quad (9)$$

專案總工期之期望值即為要徑上各作業時間平均值之總和，而其總工期之變異數為要徑上各作業工期變異數之和，因此，要徑之總工期(T_E)及其標準差(σ_{T_E})

為：

$$T_E = \sum_x t_{e_x} \quad (10)$$

$$\sigma_{T_E} = \sqrt{v_{T_E}} \quad (11)$$

σ_{T_E} 值愈小，表示工程風險較低，反之則風險較大。最後可計算出符合工期要求之可能性 Z (T_S 為計畫所需工期， T_E 為期望工期)：

$$Z = \frac{T_S - T_E}{\sigma_{T_E}} \quad (12)$$

再由 Z 值推算如期完工之機率，並據此機率值評估該計畫工期，求得專案如期完工之可能性。計畫評核術之理論提出至今已經有一段時間，不過仍然是模擬不確定工期的良好方法之一。簡單的說，CPM 與 PERT 最大的不同點就是在於作業時間的估計上，當施工期確定性高的時，採用 CPM 為宜；而 PERT 應用於不確定較高的情況下。

綜合比較以上三種進度管理技術，如表2-1所示：

表 2-1 進度管理技術的比較

方法	桿狀圖	要徑法	計畫評核術
提出者	Henry L.Gantt	Morgan & Kelly	美國海軍特種工程局
年代	1918	1957	1958
內容	將專案規劃以簡潔的圖形表示，用簡單的水平桿狀圖表示作業開始、歷時與結束的時間。	要徑法係運用網路分析 (Network Analysis) 以找出投入於工程上總費用為最小時所需之最佳工期。	為一種網狀圖管理之工具，其功能與要徑法相似，其加入機率之因素，考慮作業工期之變動性。

優點	主要優點為簡單方便，容易了解。	主要優點為，易於顯示作業間之關係，並可藉由要徑對工程作重點之管理。	明確地顯示工程之相互關係，可依據網圖作業將未成形之工程明確地表示出，並導入機率之概念，與實際不確定之工程狀況較為符合。
適用領域	適合較簡單的工程，因為無法表達各作業間相互關係的限制，在使用上趨向於規劃階段。	此方法較適用於作業間關係明確、工期較清楚的工程建設。	此方法適用於不確定因素較多的情況，例如生產線的研發或是大規模的工程建設。

資料來源：本研究整理

2.2 進度管理的應用

目前進度管理的技術在實務上已經廣受建築業者的使用，最常使用的進度管理技術有二，分別為要徑法與計畫評核術。要徑法係以作業活動為導向（activity oriented），使用單一時間估算出單一專案要徑，其中假設作業之進行不受外界環境或資源等不確定因素影響，作業時間為單一且確定的，並且所有的作業皆於預先規劃的時程啟動；計畫評核術則以機率的觀念，認為工期具有受到天候、資源、或人為因素影響的不確定性，而計畫評核術的三時估計法能夠將這些不確定的特性涵蓋其中，並且能夠了解各作業間相互的影響關係。目前許多建築工程專案皆將要徑法融入計畫評核術作為進度規劃的決策輔助工具。

張元渝（1986）主要應用PERT/CPM的技術，幫助公路橋樑的施工管理。內容除了介紹PERT/CPM的基本法則外，並且彙整各管理單位，以及利用CPM/PERT技術模擬施工流程，並且將模擬的結果提供給該工程專案的決策者作為參考。吳崑霖（1982）則是在檢討台北市的各區都市計劃業務，包括作業程序、作業特性等過去計劃案所發揮的效益問題，並且找出延滯的原因，利用PERT的方法，研擬管理作業程序，找出要徑作業，以期能夠縮減作業時間。經過計算結果可以得知，若採用計畫評核術幫助決策，可以有效縮減作業時間，並且人事負擔也大量減輕。楊益林（2000）以計畫評核術（PERT）之網路要徑作業觀念，依據購物

中心定位之策略分析架構之理念，整理出 29 項相關之作業模式，作為落實策略分析理念之實際執行作業規範，並且提供其結構清楚完整之購物中心開發作業參考依循模式。李文祥（1999）利用專案規劃管理工具PERT來規劃、監督與控制案例農產品物流中心之生產作業流程，幫助案例公司縮短生產通路緊要路徑之作業時間，並且降低經由作業基礎成本制所計算出之物流處理成本。賴瓊華（2000）求解模糊計劃評核術的趕工問題，將成本與時間定義為模糊變數，並加入完工時間限制，發展出新的演算法。Ghaleb與Adnan（2001）利用線性規劃的技術，求解趕工專案的時間與成本的取捨問題，結果証實有效提高如期完工的機率，並且降低工期的變異性。潘南飛與黃智冠（2004）應用模糊線性規劃的技術，分析模糊作業之專案排程問題，並且以一測試專案說明，並驗證其合理性與實用性，提供給管理人員較準確之排程規劃。

2.3 傳統進度管理的限制與改良

雖然 CPM 與 PERT 目前最廣泛的被營建管理或是專案管理採用，此兩種技術的理論架設與實務卻有所差距，造成應用上的問題，分別介紹如下：

- I. 理論假設每一作業都可被確認，然作業間之相依性可知道，但並非所有作業皆有明確之起、迄點能確認，縱使 PERT 已考慮此種影響，但在規劃初期，依然很難予以合理之認定（李得璋，1987）；
- II. 假設所需資源為無限供應，只是將作業時間當作考量因素，並未考慮到資源方面之問題（Tavares，1990）；
- III. 資源有限時多重專案存在資源競爭之問題，而專案間資源資源使用之優先權影響個別專案之完成（劉自強，1999）；
- IV. 非要徑的高變異性可能會造成要徑的改變（Lu 與 AbouRizk，2000）；
- V. 過多的安全時間保護會造成浮報工時，安全時間的浪費；專案進行中可能造成傳統排程之時程延誤原因為：學生症候群、提早完工不回報、資源衝突（劉自強，1999）。

由於建築業的競爭環境日益激烈，加上要徑法與計畫評核術的限制相繼發現，因此許多學者改良原有的技術來增加其應用性，使原有的技術更具專業化。

鄭明淵與蘇振維（1997）認為 PERT 模式是以機率的方式，描述網路圖中每個工程作業，再計算要徑路徑，但是卻忽略了次要徑的重要性。因此作者提出了兩種方法來改善這項限制：聯合機率密度矩陣（JPDM），將施工路徑取最長的兩條路徑：主要徑與次要徑，之後再將兩者機率取交集下，取最大天數作為修正後的總工期數；或然率網圖評核術（PNET），將網路中與要徑路徑無關的獨立路徑之各工期發生機率乘積區間與該工期乘積總合，為該專案之總工期。最後在應用於一個簡單的案例，結果證明，PNET 雖然較為複雜，卻能夠計算出較準確的工期。

Gong（1997）認為，浮時常在不使專案期間產生負面衝擊之情況下，將資源調動以減少專案成本被使用；然當非要徑作業時間之不確定性非常大時，浮時之使用可能使專案超時之風險增加，導致專案之成本增加。作者呈現出一種於專案網圖中，將浮時之使用最佳化之程序，此種程序整合了進度風險分析以及成本風險分析。

Cottrell（1999）為專案規劃發展及測試一種簡化型式之 PERT，將 PERT 慣用之三個時間估計值簡化為兩個，此種簡化係利用常態分配取代原先之 Beta 分配，簡化後之兩個時間估計值分別為：最可能時間（Most-Likely Time）以及悲觀時間（Pessimistic Time），稱為簡化的 PERT 模式。在與傳統的三時估計的 PERT 模式比較之下，利用 12 種不同的工程進行比對，結果顯示這 12 種不論大小的工程專案，簡化的 PERT 能夠與傳統的 PERT 一樣具有預估結果，表示利用簡化的 PERT，不但可以代表傳統的 PERT，當期面對大規模的工程專案時，利用簡化的 PERT 能夠減輕計算的負擔。

2.4 營建模擬技術概況

模擬技術（Simulation Techniques）從 1950 年代開始發展，隨著電腦技術之進步，模擬亦成為廣泛應用之工具。而電腦模擬係將電腦技術應用於模擬上，利用電腦正確且迅速處理之特性，將許多複雜無法由人工處理或費時費力之問題，採用電腦分析而得到成果，因此電腦模擬較明確之定義為，針對研究分析之系統，建立數學及邏輯之模型，在電腦上進行實驗，並藉由電腦之分析改進，達成系統之最佳化。而電腦模擬對營建工程而言，能實際反應現況，提供詳細規劃及

分析工具，使用者須先建立現實運作模式，經由不斷地測試以求得模式演變，幫助使用者對預知狀況進一步分析與瞭解，有助於計畫階段與控制階段之規劃與檢討。(蔡雅雯，2002)

然並非全部狀況皆應用於電腦模擬，仍需依據實際適用之狀況、特性來運用，應用電腦模擬之時機有下列幾種 (Pegden, 1995)：

1. 評估 (Evaluation)：在實際進行作業前，評估目標系統之設計，利用模擬方法加以分析，可及早發現執行時可能發生問題與作業瓶頸所在，而能防範改善於未然。
2. 比較 (Comparison)：比較替代方案下之功能或比較不同作業策略及過程。模擬可用以分析系統之不確定變數，表現真實作業動態狀況，並能提供無實際工作經驗者，藉由模擬分析過程與結果，而能對作業程序有具體概念。
3. 預測 (Prediction)：預測各種情況下的績效與發展，預先瞭解可能產生之結果，降低錯誤判斷造成之風險。
4. 敏感性分析 (Sensitivity Analysis)：調節、分析及比較各因素對系統個別或綜合之影響。
5. 最佳化 (Optimization)：確定何種因素組合最有利於整個系統。
6. 功能性相關 (Function Relations)：建立相對之關係，分析一個或多個原因對於系統之影響。當面對重大且複雜之問題，而無法建立數學計算式或需以複雜數學計算式分析結果時，可以用模擬之方法進行分析。
7. 瓶頸分析 (Bottleneck Analysis)：找尋資源配置或作業上瓶頸或限制，並試著加以改善。

一般而言，模擬之模式大致可分為下列三種 (黃榮堯，1998)：

1. 離散式/連續式 (Discrete/Continuous)：所謂離散式模擬，係模擬過程中應變數 (dependent variable) 隨模擬時間之特定點而個別改變；而連續式

模擬為模式中應變數隨著模擬時間持續之變化。一般營建作業電腦模擬多採用較易處理之離散式模擬。

2. 常數式/隨機式 (Deterministic/Stochastic): 模擬進行時若流程中所有作業項目之耗時皆以常數表示, 則稱為常數式電腦模擬; 相對地若耗時皆以機率分配, 如常態分配、指數分配等形式表達, 個別作業項目每次耗時係由分佈曲線形中以亂數隨機產生, 則稱為隨機式電腦模擬。
3. 靜態/動態 (Static/Dynamic): 所謂動態模擬係為模型之變數隨時間而改變, 反之, 靜態模擬則為模型之變數不隨時間而改變。

此外, 在模擬之過程中, 主要為以下三種模擬策略 (蔡雅雯, 2002):

1. 事件排程策略 (Event Scheduling, ES): 係依事件之發生時間而改變, 模式開發者 (Modeler) 主要之工作在決定改變系統狀態之事件與邏輯, 描述並記錄事件點上系統狀態之變化。
2. 活動掃描策略 (Activity Scanning, AS): 觀念在於各種不同活動都可同時發生, 模式開發者主要工作為確認活動可發生之條件, 在模擬進行時, 每一個活動都會掃描, 只要有滿足之條件, 就開始進行該項工作。
3. 過程互動策略 (Process Interaction, PI): 主要利用實體通過一個系統之觀念, 這些實體必須經過取得、擁有、釋放資源之過程來完成模擬。

總體而言, 電腦模擬於營建工程上之應用時機如下 (蔡雅雯, 2002):

1. 新方法加入: 評估新方法之可行性時, 利用模擬方法加以分析, 預先瞭解可能產生之結果, 降低錯誤判斷造成之風險。如使用 CALTITE 防水防蝕混凝土系統對於台灣地區高速鐵路橋梁、隧道施工工期縮短趨勢之研究案, 其目的在於比較探討使用整體防水系統與傳統防水膜系統之施工速率及對工程施作工期之影響, 做為今後隧道工程防水系統選擇之參考, 以防水施作對高速鐵路計劃橋梁與隧道施工工期之影響為探討範圍, 作其評估使用新方法的狀況, 故用於新方法之模擬能進一步協助工

程不確定性及評估。

2. 替代方案測試：比較替代方案下之功能或比較不同之作業策略及過程。模擬可用以分析系統不確定變數，表現真實作業狀態，經由模擬分析，可及早發現執行時可能發生之問題與作業瓶頸之所在，而能防範改善於未然。
3. 資源有效利用（機具配置、人員調度）：電腦模擬可藉由資源、作業項目等元件的建構，評估資源、作業項目配合情形，且可藉由模擬輸出結果－資源使用率、閒置情形，進行機具配置、人員調度。
4. 產率評估：影響作業進行產率結果之因素相當多，如某作業項目、資源之循環時間、如何針對項目關係進行敏感度之分析，改善作業窒礙難行問題點，得出模擬最佳產率，協助作業之進行。
5. 分析、預測影響因子：營建作業受到許多外在環境影響，實難找出作業中應掌握重點，可加以利用模擬方法進行分析，進而評估、預測、影響作業進行之重要因子。
6. 精簡或規劃流程：在模擬模式的構建時，需經過團隊之討論流程，以確定模式形成，且設計缺失或瓶頸問題可透過模擬來預知，如此即在過程中規劃其作業流程，甚至流程再造。
7. 成本的估算：藉由資源、作業項目配合模擬出產率，以資源、工時，分析作業所需成本，進一步提供作業為成本預估、計算。

電腦模擬於營建工程之應用廣泛，舉凡排程、成本控制、投標、土方作業、高層建築施工、隧道施工、機具之選擇、隧道施工作業、土方載運、路面鋪設、管線埋設、橋樑施工、隧道施工、基礎施工、混凝土施作等重複性單元之規劃，由工程之規劃、投標至施工作業階段甚至工程糾紛之解決皆為電腦模擬可探討運用的相關主題（Halpin, 1992）。表 2-2 為國內外營建工程中曾應用模擬方法進行研究之範圍與相關研究。

表 2-2 國內外營建工程之相關研究

適用範圍	內容
1. 排程	Senior(1998) 等人發展一套專為重複性施工排程用的系統 PICASSO，不但能簡化CPM 龐大的網圖，且可得到資源利用的統計資料，並計算浮時。Chehayeb(1998) 等人發展了一套叫Simcon 的軟體，提供較CPM 更符合實際的營建工程專案排程規劃，利用模擬隨機及資源利用率的優點，且有效簡化重複性的施作流程。
2. 預測完工	吳啟榮(1996) 發展一套PDSS 模擬軟體，能幫助管理者預測工程的完工機率。使業主提早確認使用需求，設計監造單位所短圖說審查時間、承包商增加施工機具以及盡量重疊施工。
3. 土方作業	林景棋(1990)、郭俊延(1990) 皆以北部第二高速公路為例，利用CYCLONE 模擬土方開挖作業之產量、成本與最佳機具組合配置，提升土方作業效率。
4. 高層建築施工	詹益祥(1999) 以台北霖園大飯店與新光三越站前店大樓為例，利用電腦模擬分析鋼結構的作業流程，以提高鋼結構施工速率為主要考量。 朱憾湘(1993) 以鋼骨吊裝作業為探討對象，利用模擬分析替代方案於實際應用的可行性，以供管理者規劃最適作業程序之參考。
5. 帷幕牆施工	王萬枝(1996) 以帷幕牆為對象，探討混凝土與金屬帷幕牆的施工方式與生產力所面臨的問題，利用電腦模擬改善帷幕牆施作的缺失，提升生產力。
6. 管線埋設	Antonio(1993) 等人以管線埋設為例子，比較SLAM 與 CYCLONE 的差別，CYCLONE 雖然簡單，但是能在短時間之內模擬複雜的作業流程，且及結果大致與SLAM 相同。
7. 隧道施工	Touran(1987) 等人利用電腦模擬探討影響隧道輪進得影響因子，如TBM 的鑽挖速率、出渣車的數目及出渣速度、岩石的種類等。
8. 工程糾紛	AbouRizk(1993) 利用CYCLONE 分析業主和承包商在工程上的糾紛，所建構的模型也能讓承包商在預估投標前所需的成本、或工程變更後的成本

資料來源：林憶田，1998

目前電腦用於營建作業模擬最普遍使用的軟體就是 CYCLONE，CYCLONE 於 1973 年由 Halpin 所研發，給專門的營建方面的電腦模擬系統，由於 CYCLONE 符號簡單易懂，且能在很短的時間內量測生產力並改善施工效率的缺失，故非常適合現地管理人員使用。CYCLONE 能以簡單之幾個符號及邏輯模擬一般之營建作業流程，CYCLONE 符號如表 2-2 所示。然而，由於 CYCLONE 只使用六個表示施工的情況，因此產生許多限制，無法表現所有的施工情形；另外由於 CYCLONE 屬於專門特殊的模擬語言，因此在功能的擴充上，也有所不足，因此適用的範圍也較小。

表 2-3 CYCLONE 符號表

符號	名稱	說明
	Normal Activity (NOR)	本符號乃用於模擬僅需要單一資源且需要時間之工作項目。
	Combination Activity (COMBI)	本符號之作業模擬限制為需消耗到兩種類型以上（含兩個）之資源，並為該作業所需之所有資源皆到達到始可進行該作業模擬。
	Queue Node (QUE)	本符號為模擬單一類型資源之等待狀態，資源抵達時先於此節點進行等待。
	Consolidate Function Node (CON)	本符號用於模擬當工作項目需要重覆作業累積一定次數才能進行某一個後續作業時。
	Counter Accumulator (COU)	本符號為系統模擬之計數器。
	Arcs	本符號用於標示系統之作業流程。

資料來源：Halpin，1977

Halpin 與 Riggs 於 1992 年以 CYCLONE 模擬 PERT，成功的利用 COUNTER node 計算出前推式的期望工期時間；根據要徑法（CPM），網路中的身為要徑的節點，其總浮時（Total Float）必須為零；然而，Halpin 發現當要徑上有 QUEUE 節點連結於 COMBI 節點之後時，在 QUEUE 上可能會發因為等待 COMBI 的資源而出現自由浮時(Free Float)的現象，如此不符合要徑法的原則。Lu 與 AbouRizk 於 2000 年發展出簡化之 CPM/PERT 的模擬模型，有效改善從前傳統 CPM/PERT 模擬時，必須記憶大量作業時間，包括 ES 、 EF 、 LS 、 LF 以及 TF 。Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式之模擬方式，前推式的計算與 CYCLONE 類似；但逆推式的計算採用較簡單且較有效率的求解方式，不需求出各節點的總浮時便能找到總工程之要徑。如此在計算工程專案的工期時，可以大量減少所需的記憶體空間，增加電腦計算效率，另外此模式具有要徑指數（Criticality Index，簡稱 CI ）的功能，能夠算出每項作業在工程中，成為要徑的機率，較傳統的要徑檢查更具有彈性，對管理者或使用者也更具參考價值。



2.5 小結

因此本研究將以 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 之模擬模型為基礎，首先比較與傳統 CPM/PERT 模型之差異，驗證模式之可行性。並且將此模型應用於實務個案工程專案中，預估其工程專案之工期，並且探討各作業項目之變異性，及對整體工程要徑之影響，最後以趕工的情境下進行模擬，探討工程專案於不同情況下要徑的變異性，提供給進度管理者未來工期預估的參考。

第三章 模式架構

本研究乃架構在 Lu 與 AbouRizk (2000) 所發展的簡化之 CPM/PERT 的模擬模型上，故在本章將在第一節先行對模擬模型前提假設與變數設定做完整的交代，並且在第二節中，依照第一節的前提設定，將架構的模擬模型做詳細的解釋與說明。

3.1 模式介紹

Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式（以下簡稱簡化 CPM/PERT 模式）在模擬架構網路圖時，為方便計算，此模式延續傳統的 CPM 網路，工程網圖採用箭線式（AOA）的繪製方式，即事件利用箭頭（arrow）表示，頭尾以節點（node）表示作業的開始與結束，節點則表示事件（event），事件發生於作業的開始與結束。在網路圖中，所有的節點可以分為兩種：匯合節點（merge node）與發散節點（burst node）。在此模式中，對於發散節點與匯合節點的定義如下：

1. 發散節點的嚴格定義為，一節點為單一個作業之終點，並且為兩個或兩個以上的作業之起點者。
2. 匯合節點的定義，為兩個或兩個以上的作業之終點，並且為單一個作業之起點者。
3. 若有一節點，為單一個作業的終點，且為單一作業之起點者，將其視為發散節點。因為發散節點不需要考慮各作業之完成時間，計算起來較為方便，稱為單一發散節點。
4. 若有一節點，為兩個或多個作業之終點，並且也是兩個或多個作業之起點，則在網路中利用 CPM 網圖之虛作業的方式，將此節點分為一匯合節點及一發散節點，中間以虛作業連接，如圖 3-1 所表示：

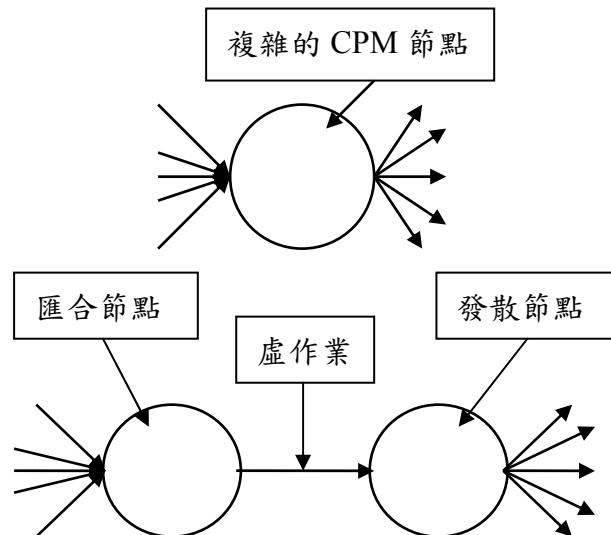


圖 3-1 複雜節點利用虛作業處理

5. 整個網路最後只能有一終點節點，用此節點表示完成所有的作業，利用一虛作業接在最後的作業匯合節點。
6. 若一節點無任何前項作業，或者是任何的作業箭線分枝，將其定義為起點，此起點具有下列特性：
 - 一個網路可能具有多個起點；
 - 在某特定時間下，若所有前項作業於該節點（無論發散節點或是匯合節點）皆已完成，則該節點自動變成起點；
 - 對於使用者於規劃階段，起點設定為 0；若於實際施工階段，起點的設定可為當時的日期。

3.2 簡化之 CPM/PERT 模擬模式之演算法

首先介紹模式中的各代號：

- a ：貝他分配的最低估計點（即作業之樂觀完工時間）；
- b ：貝他分配的最高估計點（即作業之悲觀完工時間）；

CI：要徑指標，即作業的要徑指標變數；

DT：離開時間，即質點之最早離開節點的時間；

ES：作業或節點之最早開工時間；

LS：作業或節點之最晚開工時間；

m：貝他分配之眾數估計點（即作業之最可能完工時間）；

N：指進入匯合節點的分枝數目，或者是指由發出節點出發的分枝數目；

PD：作業時間；

TF：作業之總浮時；

WT：等待時間，表示等候質點從分枝進入匯合節點的時間。

本模式採用離散式模擬的方式，即模擬過程中應變數（dependent variable）會隨模擬時間之特定點而個別改變，因此本模式在進行模擬時，以時間為變數在模擬的過程中，我們假設一質點（entity）沿著一作業前進或逆推，用以表示目前模擬進行的狀態與行為，例如「開始作業 *ij*」及「結束作業 *ij*」。當質點於某特定的時間點到達節點（發生事件）時，表示此質點發生狀態的改變，例如，當到達「單一發散節點 *I*」時，質點的狀態會由「處理前一項作業 *ij*」改變成「處理下一項作業 *jk*」。

簡化之 CPM/PERT 在找尋要徑的方法中，分為前推式與逆推式兩種搜尋方法，其演算法分別介紹如下：

3.2.1 前推式的計算步驟：

1. 模擬在時間 0 於起點啟動之後，我們以質點來表示各作業的進行狀況，而質點的數目會等於由起點發出的分枝數目。
2. 從起點出發之後，各質點依據作業時間，沿著網路順向前進（通常由上到下），當到達具有 N 個分枝的「匯合節點 *I*」時停下（ $N \geq 2$ ）。
3. 當所有的 N 個分枝上的質點皆到達匯合節點 *I* 時， N 個質點會結合為一個質點。

4. 結合成的質點會繼續從節點 I 的單一分枝作業出發，沿著網路前進直到另一個匯合節點。
5. 重複步驟 3 與步驟 4 直到到達終點。

在前推式的演算法中，所有的計算只會發生在網路中的匯合節點以及網路終點上，最主要的時間變數為質點到達時間 (AT)、質點離開時間 (DT) 以及等待時間 (WT)，分別說明如下：

質點到達時間 (AT):

在計算質點到達時間之前，必須先區分兩種狀況：

1. 若質點所屬之作業分枝 k 是由原點所發出 (即可以直接連接到原點)，則分枝 k 對於匯合節點 I 的到達時間可以表示為：

$$AT_k = \text{規劃時間} + PD_k \quad (13)$$

AT_k = 作業分枝 k 的到達時間；**規劃時間**，即原點的規劃時間，通常設定為 0； PD_k = 連接至匯合節點 I 的作業分枝時間。

2. 若質點所屬之作業分枝是由上一個發散節點 J 發出，則作業分枝 k 對於匯合節點 I 的到達時間可以表示為：

$$AT_k = DT_J + PD_k \quad (14)$$

其中 AT_k = 作業分枝 k 的到達時間； DT_J = 作業分枝 k 從節點 J 離開的時間； PD_k = 由節點 J 出發的作業分枝 k 之作業時間。

在匯合節點上之質點離開時間 (DT):

質點離開匯合節點 I 的時間依據所有的作業分枝到達節點 I 的到達時間 (AT) 而定，可以表示成：

$$DT_I = AT_c \quad (15)$$

其中 DT_I 等於質點離開當前之匯合節點 I 的時間；而 AT_c 的 c 代表這些進入分枝中，數值最大的作業分枝。以圖 3-2 為例，若作業 c 較作業 k 晚到達節點 I ，即 $AT_c > AT_k$ ，則節點 I 的離開時間，就是最晚抵達節點 I 的作業 c 的到達時間，如式 (15)。

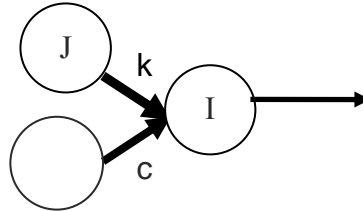


圖 3-2 匯合節點示意圖

匯合節點上的等候時間 (WT):

等待時間可以表示為：

$$WT_k = DT_I - AT_k \quad (16)$$

WT_k = 等待分枝 k 到達節點 I 的時間； AT_k = 分枝 k 的到達時間； DT_I = 質點離開當前之匯合節點 I 的時間。

以上所介紹的時間點皆用來描述一個匯合節點的情況，以此類推至網路中所有的節點上直到終點，我們便可以求出前推式的總工期。工期的總時數由終點的到達時間 (AT) 求得，即

$$\text{工期的總時數} = AT (\text{終點的虛作業}) \quad (17)$$

由於簡化 CPM/PERT 模式是以時間狀態為主軸，且工期的計算只會發生在匯合節點上，因此對於起點與發散節點而言，在模式中都不需要去記錄工期時間。而對匯合節點而言，若有一匯合節點 I 有 N 個會合分枝 ($N \geq 2$)，則我們需要 $2N$ 個變數來描述這些會合的分枝 (即所有的前項作業) 的時間狀態，其中有 N 個到達時間 (AT) 以及 N 個等待時間 (WT)；另外，我們還必須有一個變數描述從匯合節點 I 出發之作業的離開時間，因此，對於一個有 N 個前項作業之匯合節點 I 而言，只需要 $2N+1$ 個時間變數就能完整的描述該節點的狀態與特性；相較傳統的 CPM/PERT 技術，每個作業都至少需要六個時間變數，即 ES 、

EF 、 LS 、 LF 、 TF ，以及作業的時間，才能完整描述之。由此可見 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模擬模式在進行工期預估上，可以大幅減輕系統的負擔以及提高計算上的效率。

3.2.2 逆推式的計算步驟

簡化的 CPM/PERT 模擬演算法有別於傳統的 CPM 模式之處在於，在逆推式的計算上，我們不需要去利用計算各作業之 LS 、 LF 以及 TF 來決定要徑；反而可以將其視為模式中要徑的檢驗要徑的過程。逆推式的計算步驟如下：

逆推式的計算可分為四個步驟：

1. 在每個作業（即分枝）上定義一二元變數 CI

$$CI_{IJ} = \begin{cases} 1 & \text{若作業 } IJ \text{ 為要徑作業} \\ 0 & \text{作業 } IJ \text{ 為非要徑作業} \end{cases} \quad (18)$$

I 表示作業開工的節點， J 表示作業完工的節點；若 $CI_{IJ}=1$ 表示作業 IJ 為要徑作業；若 $CI_{IJ}=0$ 表示非要徑；

2. 我們將一開始的終點虛作業 CI 之設定為 1；
3. 應用下列兩條法則來搜尋後推式的要徑（逆推式的網路前進方向通常由下往上）：

- 法則一（應用於匯合節點）：

若自匯合節點出發的作業分枝之 $CI=1$ ，則此節點之所有前項作業分枝集合中， $WT=0$ 者，其 CI 皆=1；其餘前項作業分枝的 $CI=0$ 。

若自匯合節點出發的作業分枝之 $CI=0$ ，則表示該節點所有前項作業分枝集合的 CI 皆為 0。 WT 可經由前推式計算得到。

- 法則二（應用於發散節點）：若所有的自發散節點出發的分枝，其 CI 的總和為 0 時，表示此發散節點之進入的分枝，即惟一的前項作業之 CI 亦為 0；反之，則前項作業之 $CI=1$ 。法則二對於單一發散節點也適用。

4. 重複應用上述法則一與法則二於網路上逆推直到起點。

當逆推的模擬過程完成之後，我們可以根據各作業項目之 CI 值是否為 1，而很輕易的決定出要徑的路徑。

3.2.3 逆推式要徑搜尋法則之證明

有關法則一及法則二，主要是應用傳統的 CPM 之基本定理的特性，簡化了逆推式計算上需要計算每項作業的五個時間點：最早開工時間 (ES)、最早完工時間 (EF)、最晚開工時間 (LS)、最晚完工時間 (LF) 以及總浮時 (TF)，如此可以減輕許多計算上的負擔。以下將介紹並證明法則一與法則二的原理：

法則一之證明：

法則一又分為兩部分，我們將分別介紹，第一部份我們以數學方式表示為：

「在一匯合節點 I 上，得知 $CI_{IJ}=1$ ，若 $WT_{kl}=0$ ，則 $CI_{kl}=1$ ；否則 $CI_{kl}=0$ 。」

我們以簡單的 I, J 兩節點說明， CI_{IJ} 為 $I-J$ 兩節點間連接之作業的要徑變數，而節點 I 屬於匯合結點，質點由節點 I 沿著作業向節點 J 移動，如圖 3-3 所示。 WT_{kl} 表示進入節點 I 的作業分枝 k 的等待時間， $k=1,2,3\dots N$ ， N 表示所有進入節點 I 的作業分枝數目。 CI_{kl} 表示作業分枝 k 的要徑變數。

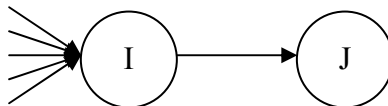


圖 3-3 法則一的圖解

因為 $CI_{IJ}=1$ ，故 $I-J$ 兩點間的作業必定為要徑作業，根據 CPM 的原則：若作業為要徑，其總浮時必定為 0。因此我們可以知道：

$$TF_{IJ}=LS_{IJ}-ES_{IJ}=0 \quad (19)$$

因此可知

$$ES_{IJ}=LS_{IJ} \quad (20)$$

ES_{IJ} 為傳統 CPM 模式中 $I-J$ 兩節點間的作業最早開工時間； LS_{IJ} 為 $I-J$ 兩節

點間的作業其最晚開工時間。而由分枝 k 到達匯合節點 I 的時間 AT_{kl} ，可以藉由作業分枝 k 之最早完工時間 EF_{kl} 的時間來表示：

$$EF_{kl}=AT_{kl} \quad (21)$$

而 I - J 間的作業分枝離開節點 I 的時間 DT_I ，可以藉由作業分枝 I - J 之最早開工時間 ES_{IJ} 的時間表示：

$$DT_I=ES_{IJ} \quad (22)$$

根據式 (21) 與 (22)，以及等待時間 WT 的式 (16)，我們可以得到：

$$WT_{kl}=DT_I-AT_{kl}=ES_{IJ}-EF_{kl} \quad (23)$$

若 $WT_{kl}=0$ ，則表示 $ES_{IJ}-EF_{kl}=0$ ，因此我們可以得到 $ES_{IJ}=EF_{kl}$ ，又根據式 (20) 可以得到：

$$LS_{IJ}=EF_{kl} \quad (24)$$

在傳統 CPM 逆推式計算中，我們知道前項作業的最晚完工時間會等於後項作業的最晚開工時間。在此例中，作業分枝 k 的最晚完工時間會等於 I - J 間的作業分枝最晚開工時間：

$$LF_{kl}=LS_{IJ} \quad (25)$$

由式 (24)、(25) 可知：

$$LF_{kl}=EF_{kl} \quad (26)$$

根據式 (26)，我們可以得到 $TF_{kl}=LF_{kl}-EF_{kl}=0$ ，因此根據傳統 CPM 要徑的原則，即當作業分枝 k 的等待時間 $WT=0$ 時，此作業為要徑作業，因此此作業之 $CI_{kl}=1$ 。

而對於其他進入匯合節點 I 的作業分枝而言，假設一作業分枝 k' 之 $WT_{k'I}>0$ ，根據式 (23) 可得 $WT_{k'I}=ES_{IJ}-EF_{k'I}>0$ ，則 $ES_{IJ}>EF_{k'I}$ ，根據式 (24) 得到 $LS_{IJ}>EF_{k'I}$ ，又根據式 (26) 可知 $LF_{k'I}>EF_{k'I}$ ，因此 $TF_{k'I}=LF_{k'I}-EF_{k'I}>0$ 。因此我們可以確定若到達節點 I 之作業分枝 k' ，其 $WT_{k'I}>0$ 時，該作業必定為非要徑，即 $CI_{k'I}$ 設定為 0。

關於法則一的第二部份，以數學方式表示為：

「在匯合節點 I 上，得知 $CI_{IJ}=0$ ，則 $CI_{kI}=0$ 。」

以上述圖 3-2 為例，因為 $CI_{IJ}=0$ ，因此 I - J 兩節點間的作業必定為非要徑，即總浮時 $TF_{IJ} > 0$ ，也就是：

$$ES_{IJ} < LS_{IJ} \quad (27)$$

而根據 CPM 前項作業之最早完工時間（作業分枝 k ）必定會小於或等於後項作業的最早開工時間（節點 I - J 間的作業），因此可能：

$$EF_{kI} \leq ES_{IJ} \quad (28)$$

根據式 (27)、(28) 可以得知：

$$EF_{kI} < LS_{IJ} \quad (29)$$

又根據式 (28) 與 (29) 可得：

$$EF_{kI} < LF_{kI} \quad (30)$$

即 $TF_{kI} = LF_{kI} - EF_{kI} > 0$ 。因此，若在匯合節點 I 上，得知 $CI_{IJ}=0$ ，則表示所有進入節點 I 的作業分枝皆為非要徑，即所有的作業分枝，如作業分枝 k ，其 $CI_{kI}=0$ 。

法則二之證明：

法則二利用數學的方式可以表示為：

「對一發散節點 I ，若 $\sum CI_{Ik} = 0$ ，則 $CI_{JI} = 0$ ；反之，若 $\sum CI_{Ik} > 0$ ，則 $CI_{JI} = 1$ 。」

$k=1,2,3\dots N$ ， N 表示所有由發散節點 I 出發的作業分枝數目，如圖 3-4 所示。

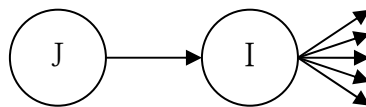


圖 3-4 法則二的圖解

若 $\sum CI_{Ik} = 0$ ，即所有從發散節點 I 出發的作業分枝皆為非要徑作業，也就是每個作業分枝的總浮時皆大於 0，即所有作業之 $TF_{Ik} > 0$ 。或者 $LS_{Ik} - ES_{Ik} > 0$ ，我們可得：

$$ES_{Ik} < LS_{Ik} \quad (31)$$

對於發散節點 I 而言，最早開工時間會等於，所有的作業分枝中，最早開工的作業分枝的時間：

$$ES_{Ik} = ES_I \quad (32)$$

而節點 I 的最晚開工時間，為所有離開節點 I 的作業分枝中，最晚開工時間的最小值，表示節點 I 最晚開工時間必定會小於或是等於所有作業分枝的最晚完工時間，如式 (33)：

$$LS_I \leq LS_{Ik} \quad (33)$$

根據式 (31) 到 (33)，我們可以確定發散節點 I 的最早開工時間必定會小於最晚開工時間：

$$ES_I < LS_I \quad (34)$$

另外，根據傳統 CPM 的模式，節點 I 的最早開工時間必定會等於作業分枝 $J-I$ 的最早完工時間，如式 (35)；且節點 I 的最早完工時間必定會等於作業分枝 $J-I$ 的最晚完工時間，如式 (36)：

$$ES_I = EF_{JI} \quad (35)$$

$$LS_I = LS_{JI} \quad (36)$$

根據式 (34) 到 (36)，我們可以得到 $EF_{JI} < LS_{JI}$ ，換句話說， $TF_{JI} = LS_{JI} - EF_{JI} > 0$ ，作業分枝 $J-I$ 具有總浮時。因此我們確定作業 $J-I$ 並不是要徑作業，即令 $CI_{JI} = 0$ 。

若 $\sum CI_{Ik} > 0$ ，表示至少有一個從發散節點 I 離開的作業分枝，假設為 k ，為要徑作業。因此 $TF_{Ik} = 0$ 或者 $ES_{Ik} = LS_{Ik}$ 。而由式 (32) 到 (34)，我們可以得到 $LS_I \leq ES_I$ ，因為根據傳統 CPM 之定理，節點上的最早開工時間必定會小於或等於最晚開工時間。而若作業分枝 k 為要徑作業，則表示發散節點 I 亦處在要徑之

上，因此可以確定：

$$LS_I = ES_I \quad (37)$$

由上式以及式 (35)、(36)，得知 $LF_{II} = EF_{II}$ ，即 $TF_{II} = LF_{II} - EF_{II} = 0$ 。因此可以確定此作業分枝 $J-I$ 必定為要徑，故令 CI_{II} 值為 1。

3.3 小結

在了解了 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式之後，本研究將於下章利用此模式模擬一基本的工程專案，探討 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模擬模型與傳統的 CPM/PERT 模型的改進之處；並且比較兩模型的差異。之後於第五章，本研究將應用此模式模擬實務的工程專案，藉由簡化的演算方式，預估較大規模之專案工期，並且利用要徑指標變數 CI ，檢查各工程作業身為要徑作業之機率，並且與建築設計師或施工單位探討各作業造成變異的因素，以及可能影響整個專案的原因。最後進行情境分析，探討個案工程專案於趕工的情境之下，專案工程要徑的變異性，期望提供給進度管理者未來在工期預估上的參考。

第四章 模式驗證

本章將介紹 Lu 與 AbouRizk(2000)之簡化 CPM/PERT 模式與傳統 CPM/PERT 模式的差異，第一節將引用一基本的工程專案做範例，介紹專案中的各作業項目，以及影響作業工期的因素；第二節將利用 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式進行模擬，求出範例工程的專案總工期，以及各作業成為要徑的可能性；最後將比較簡化之 CPM/PERT 模式與傳統的 CPM/PERT 模式的差異。

4.1 範例介紹

本研究將利用一基本的工程範例，下圖 4-1 為一簡單的工程專案，此範例為一便利商店的興建專案，出自 Ahuja et al.(1995, Ch15)。此網圖是以箭線式(AOA)的方式繪製，各節點間的作業項目如表 4-1，節點五與節點六之間以虛作業連接以方便逆推式的計算。

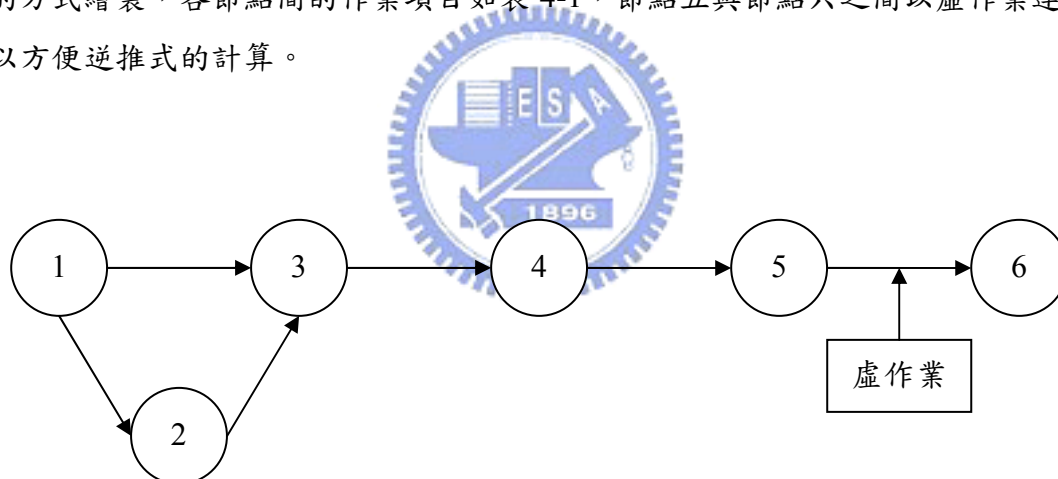


圖 4-1 基本範例工程專案網路圖

表 4-1 中，作業路徑表示作業項目的位置，作業項目則有五項，首先是訂製興建商店所需的原料，並且清掃整理建地周圍的環境，接下來便是打地基與基礎的建設，而前述三項作業可分為兩個分枝同時進行，都完成之後，才進行外部的建設以及最後內部的裝修，最後結束整個工期。而在工期不確定的因素方面，凡土木工程的建設，一項工程作業的內容常常都包括資源、金錢成本、勞力成本甚

至天氣因素等等，這些因子都有可能影響此項作業的完工工期，進而影響整個專案的工期。因此各作業項目之所以會有變異性，主要是歸因於這些因素，而各工期變異的範圍也相對不同，有些作業甚至在特殊的極不順利的狀態下進行，造成比預估的工期要多出一倍的時間才能完成。因此在界定各作業項目的變異範圍，便是非常重要的工作，若是太過於保守的評估，可能會造成工期太長而無法滿足業主需求；然若預估的太過於樂觀，則可能造成工期太短，無法在期限內趕工完成，因而建設者被懲罰巨額的違約金。根據 McLaughlin & Pickhardt(1997)，目前各統計的分配中，最能夠表現工期變異性的是貝他分配(Beta distribution)。因此在時間點的估計上，本模式沿用傳統 PERT 模式的三時估計法，即：

1. 樂觀時間 (Optimistic Time)：各種客觀之作業條件極為理想，且實際上一切工作亦在很順利之情況下，作業所需要之工作時間，在本模式中以 a 表示。
2. 最可能時間 (Most-Likely Time)：在同一條件下，倘若該作業反覆做多次時，其最多出現之作業時間，在本模式中以 m 表示。
3. 悲觀時間 (Pessimistic Time)：與樂觀時間相反，一切作業條件極為惡劣，而實際上亦難照正常狀態進行工作時，該作業所需之工作時間，在本模式中以 b 表示。

而基本範例中，各作業的三個估計時間則如表 4-1 所示。

表 4-1 範例工程專案作業表

作業路徑	作業項目	工期不確定的因素	樂觀時間 (a)	最可能完工 時間 (m)	悲觀時間 (b)
1—3	訂製原料	原料來源、運輸工具	20(天)	22(天)	25(天)
1—2	清除環境	天氣因素	5	10	15
2—3	地基與基礎 架構	地質因素	5	10	15
3—4	外部建設	天氣因素、勞工的生產力	8	10	20
4—5	內部建設	勞工的生產力	9	10	11

在了解範例中各作業項目的前後順序以及三個估計時間點之後，在下節中，將利用 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模擬模式進行模擬，便可以求得要徑以及各作業成為要徑的可能性，如此可以進一步探套各作業中，造成變異性的可能因素。

4.2 簡化之 CPM/PERT 模擬結果

Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模擬模式（之後簡稱簡化之 CPM/PERT 模式）將利用 Microsoft Excel 2002 以及內建 VBA 的軟體建立程式，各作業項目以貝他分配為基礎三個估計時間點為範圍，對此範例模擬 100 次，其 100 次模擬專案總工期之結果顯示，平均的工期為 43.6 天，最短與最長的工期分別為 39.2 天與 48.9 天，專案工期的標準差為 2.1 天，而專案完成工期的累積次數如圖 4-2 所示。由圖 4-2 可以看出，長條圖的部分表示在 100 次模擬結果中，各專案完成工期的天數的分布，x 軸表示完工天數，區間為 1.2 天。而折線圖則表示各專案工期完工天數的累積次數。

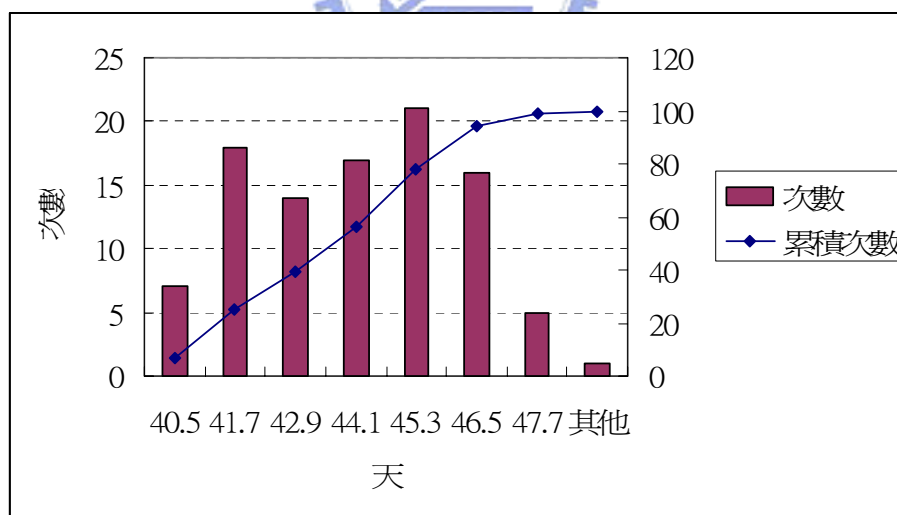


圖 4-2 模擬結果示意圖

4.3 簡化 CPM/PERT 模式與傳統模式之差異

上節所介紹 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式的模擬結果，在本節中，將與傳統的 CPM/PERT 模式做比較與探討。以傳統的 CPM/PERT 模式計算範例專案所得到的結果，與簡化之 CPM/PERT 模式模擬之結果，相比較的結果如表 4-3 所示。由表 4-3 可以看出，簡化之 CPM/PERT 模式與傳統 CPM/PERT 模式相同，都能表現作業項目的變異性，因此專案工期都具有變異性，但是與傳統模式不同的是甚，簡化之 CPM/PERT 模式還能求得整個專案的最短工期與最長工期，不單單只是求出專案的平均工期而已。另外，簡化之 CPM/PERT 模式所求出的專案平均工期為 43.6 天，與傳統的 CPM/PERT 模式的 43.5 天要比起來差不多，只多了 0.1 天，且簡化之 CPM/PERT 模式的標準差 2.1 天與傳統模式 2.2 天要小了 0.1，由此可見，簡化的 CPM/PERT 模式同樣具有預估工期的能力。另外由表 4-3 最下列，45 天內完工的機率可以看出，簡化之 CPM/PERT 模擬模式之完工機率為 72%，較傳統的 CPM/PERT 模式的 75% 能夠完成，低了 3%，表示在專案的風險評估上，簡化之 CPM/PERT 模擬模式能提供較確定性的資訊，避免專案管理者過於樂觀的評估，造成專案在與業主簽約後，卻無法在期限內完工，而被迫付出巨額違約金的情形。

表 4-2 基本範例：簡化 CPM/PERT 模擬模式與傳統 CPM/PERT 模式分析表

專案完工 天數	簡化之 CPM/PERT 模擬結果	傳統 CPM/PERT 模擬結果
最短工期	39.2(天)	N/A
最長工期	48.9	N/A
平均工期	43.6	43.5(天)
標準差	2.1	2.2
45 天內完 工的機率	72(%)	75

另外簡化之 CPM/PERT 模式與傳統的 CPM/PERT 模式最大不同的地方就是，簡化的 CPM/PERT 模式在進行逆推式的計算時，不需要依循傳統的 CPM/PERT 模式，計算每項作業的 LS 、 LF 以及 TF ，只需要利用一二元變數：

要徑指標變數 (CI) 即可。因此要徑指標變數 (CI) 對應每項作業的值，可視為簡化之 CPM/PERT 模擬模式檢驗要徑的方式。由於各作業都具有變異性，因此在某些情況之下，如當某些作業於極度悲觀的狀態下完工，造成整體的專案工程要徑的改變，因此要徑指標變數 (CI) 針對各作業項目提供更細微的檢視，而並非單純判斷是否為要徑作業。而範例中，各作業之要徑指標如表 4-4 所示，表中第二列顯示各作業在一百次的模擬結果中，成為要徑的次數，即作業 1-3「訂製原料」成為要徑的機率為 85%，作業 1-2「清除環境」，作業 2-3「地基與基礎架構」成為要徑的機率為 15%；而在表 4-4 中第三列顯示傳統的 CPM/PERT 模式，判別作業是否為要徑的結果，同樣針對作業 1-3「訂製原料」，結果顯示「Yes」，而針對作業 1-2「清除環境」與作業 2-3「地基與基礎架構」的判定結果皆為「No」。因此兩相比較可以發現，在簡化之 CPM/PERT 模式認為「訂製原料」作業成為要徑作業的機率為 85%，而另一條專案分枝中的兩項作業：「清除環境」以及「地基與基礎架構」，成為要徑作業的機率同樣為 15%，這就表示在某些極端的情況之下，也許因為連日的天氣因素造成清除環境以及地基與基礎架構皆無法順利進行，導致完工時間接近悲觀時間，在這樣的情況之下，原本是要徑作業的「訂製原料」，可能就會被「清除環境」以及「地基與基礎架構」此兩項作業的分枝取代。換句話說，原本的要徑為 1→3→4→5→6，改變成 1→2→3→4→5→6。而傳統的 CPM/PERT 模式並沒有這種風險評估的功能。接下來的範例情境一更能表現 CI 的重要性。

表 4-3 要徑指標變數 (CI) 與傳統模式之比較

作業項目	CI 的機率(簡化之 CPM/PERT 模式)(%)	是否為要徑(傳統 CPM/PERT 模式)
1-3	85	Yes
1-2	15	No
2-3	15	No
3-4	100	Yes
4-5	100	Yes

情境一

假設基本範例中，進度管理者在作業 1-3「訂製原料」的作業中，有一家新的原料供應商能提供服務，並且能在更短的時間內完成原料的訂製與輸送，使作業 1-3「訂製原料」能在更短的時間內完成。假設依據過去經驗，作業的三個估計時點能夠縮短成： $a=18$ ， $m=20$ ， $b=22$ 。同樣地，利用簡化之 CPM/PERT 模式進行模擬，而模擬所得到的結果與上述的基本範例結果比較如表 4-5 所示。表中第二列顯示範例情境一的模擬結果，結果顯示由於新的原料供應商的出現，造成整體專案工期的縮短，如平均工期由原本的 43.6 天縮短成 42.4 天，而在 45 天內完工的機率從原本的 72%，在情境一的狀況之下，提升至 85%，對於進度管理者而言，大幅降低了專案逾期的風險。而在要徑的路徑方面，同樣利用簡化之 CPM/PERT 模式中的要徑指標變數來檢驗，並且與傳統的 CPM/PERT 模式做比較，比較的結果於表 4-6 所示。

表 4-4 範例情境一與基本範例的模擬結果比較

專案完工 天數	簡化之 CPM/PERT 模擬結果	簡化之 CPM/PERT 模擬結果
最短工期	37.2(天)	39.2(天)
最長工期	50.1	48.9
平均工期	42.4	43.6
標準差	2.7	2.1
45 天完工 的機率	85(%)	72

由表 4-6 中可以發現，傳統的 CPM/PERT 在範例情境一中，對於要徑的判定並沒有改變，仍然維持 $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$ 。但是從要徑指標變數（CI）可以得知，

模擬的結果顯示，作業 1-3 成為要徑作業的機率只有 48%，而作業 1-2 及作業 2-3，其成為要徑作業的機率變成了 52%，甚至已經超越了原本作業 1-3 成為要徑作業的機率，由此可見在範例情境一中，傳統的 CPM/PERT 模式已經無法做出正確的判斷，簡化之 CPM/PERT 模擬模式便能改進傳統模式的限制。

表 4-5 情境一之要徑指標變數 (CI) 與傳統模式之比較

作業項目	CI 的機率(簡化之 CPM/PERT 模式)(%)	是否為要徑(傳統 CPM/PERT 模式)
1-3	48	Yes
1-2	52	No
2-3	52	No
3-4	100	Yes
4-5	100	Yes

由以上範例可以了解，簡化之 CPM/PERT 模擬模式除了能夠減少在運算時，時間變數的個數，增加計算上的效率之外，要徑指標變數 (CI) 還能對各項作業提供更完整的資訊，對於工程專案的風險評估上能提供更有用的訊息給進度管理者。因此在第五章，本研究將套用實際的工程專案進行評估，包括預估工程專案之完整工期，求解出要徑工期，並且針對工程專案中，各項工程作業項目，探討各作業工期的變異性，以及可能造成變異的原因；另外由於各作業項目的工期皆具有變異性，因此在某些情況之下，要徑可能會被非要徑取代，因此本研究將探討各作業成為要徑作業的機率，以及造成要徑變異的可能性。

第五章 案例評估

本章將以實際工程建設專案作為評估對象，首先將介紹該實際工程建設的專案背景與現況，並說明其進度規劃方式。之後便套用 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模擬模式，預估工程建設專案的工期，建立工程網圖，並且求出專案要徑，以及探討各作業的變異原因與影響因素。最後並對工程專案進行情境分析，期望能提供進度管理者或建築商在進度規劃上的參考。

5.1 專案背景資料

表 5-1 為個案工程專案的背景資料：

表 5-1 案例專案背景資料

工程名稱	新竹市某社區活動中心新建工程
工程概述	個案工程北接住宅社區，東邊以隔離綠帶鄰接新竹科學園區，東南向鄰接籃球場，西側目前為空地土地使用編定為住宅區，四邊鄰接 8M 道路，基地面積約 2000 平方公尺，建築面積約 974 平方公尺，主結構體為一座地上三層、地下一層的，以 RC 為構造的活動中心。總樓地板面積為 2663 平方公尺，停車場規劃室內 13 輛、室外 6 輛。
總工程經費	約 NT\$46,200,000 元
工程期限	期限 365 天日曆天

5.2 專案進度規劃

在專案的時程規劃上，建築師先完成建照圖，完成機電與消防的審核，以先取得建照使工地現場能開工為原則，再進行細部的設計與施工階段的進行。本研究的研究範圍為工程專案的施工期間，因此在此將介紹施工期間的進度規劃：在施工期間，進度管理者將依據經驗法則以及初步設計規劃階段的成果，先建立所有工程作業，再安排施工順序與評估時程。並採取桿狀圖為進度展現之方式，施工階段的進度桿狀圖如附錄一所表示。桿狀圖的優點在於易於製作、易懂且適合

各階層工程人員溝通使用；但其缺點為，無法表明先後關係、不易表現各作業項目間的相互關係等，因此設計單位與施工單位每固定期間需要開會檢討施工進度。另外桿狀圖對於各作業的表現方式皆是以確定性的時程來表示，如此無法實際土木工程中，各作業皆具有變異性的特性，對於進度管理者來說，會遇到作業可能會提前完工而造成工程的閒置，或因為作業延遲完工而必須超時趕工等等，這些都是確定性進度管理技術的限制。而一般營建或監造廠商，對於大型的模擬軟體，如 CYCLONE 等，由於取得價格昂貴，並且入門門檻過高的情況之下，使用的機率不高。故本研究期望以 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模擬模式（之後簡稱簡化之 CPM/PERT 模式），模擬預估該工程專案，預估工程專案之完整工期，求解出要徑工期，並且探討各作業工期的變異性，以及可能造成變異的原因，最後檢視各作業成為要徑作業的機率，以及造成要徑變異的可能性。

5.3 模式套用與模擬結果

在個案工程專案中，本研究對於各作業項目時間的估計，是根據 PERT 之三時估計法，即最悲觀時間、最可能時間與最樂觀時間，經由與個案工程專案的建築設計師與施工單位的訪談，訂定各作業之三個估計時間點。以各作業之三個時點為基礎，套用簡化之 CPM/PERT 模擬模式。而本研究對於實際工程專案評估流程如下：

1. 建立個案工程作業項目施工階段的個項作業，並且經由與專家訪談定義所有作業項目的三個時點，最後確定各作業前後相互關係；

個案工程專案主要施工作業項目有：假設工程、臨時排抽水與挖土方工程、PC 澆置與放樣、紮基礎筋，鋼筋查驗、組外模、基礎澆置、1 樓結構體 (1FRC)、地下室 (BF) 外牆防水，回填土方、2 樓結構體 (2FRC)，3 樓結構體 (3FRC)、屋頂結構體 (RFRC)、屋突一層 (R1FRC)、屋突二層 (R2FRC)、砌磚牆，內牆隔間，地下室，消防水池粉刷、浴室地坪內牆、電梯坑防水粉刷、平頂，內牆，管道間打底粉刷、地坪磨石子，石英止滑地磚，內牆打底貼磁磚、地板面材，天花板輕鋼架施作、樓梯扶手安裝、玻璃安裝、設備安裝、外牆吊線打石，門窗框安裝、外牆防水打底，抵石斬石磁磚貼作、模板

整理清除、水箱水塔防水施作、屋頂防水隔熱處理、屋頂鋼架及彩色鋼板安裝、油漆施作、戶外廣場，景觀工程，殘障坡道施作、屋頂花園工程、電梯安裝及測試、停車場工程，內牆木石礦鐵板隔間，廁所隔間施作、不銹鋼爬梯，人孔蓋板，踢腳板，門檻安裝、周邊設施，失活汙水處理設施，附屬工程施作，缺失補修、水電空調消防配合施作、環境整理，竣工驗收。所有的作業項目經由與建築設計師與施工單位訪談之後，確定 32 個主要工項，並且建立三個估計時間點：最樂觀時間 (a)、最可能時間 (m)、最悲觀時間 (b)，如表 5-2 所表示。

2. 繪製工程網圖，並且利用傳統 CPM/PERT 求解出要徑作業；

建立了各作業之先後關係之後，再利用箭線式 (AOA) 的方式建立工程網圖，個案工程專案的箭線式網路圖如圖 5-1 所示，圖中各節點之間的線段代表工程作業項目，其網路的繪製依據表 5-2 中各工程作業項目的前後關係。同樣為了方便逆推式的計算，在節點 14，也就是作業結束的節點之後，再加上一虛作業連結節點 15。

根據表 5-2 中各工程項目的三時估計點，可以求得各作業的平均工期與標準差，如表 5-2 中最右兩欄所示，其平均工期與標準差公式如式 (7) - (11) 所示：

$$\text{作業時間平均值：} t_e = \frac{a + 4m + b}{6} \quad (7)$$

$$\text{標準差：} \sigma_{t_e} = \frac{b - a}{6} \quad (8)$$

$$\text{變異數：} \nu_{T_E} = \sum \nu_{t_e} \quad (9)$$

在確立各作業的平均工期與變異特性之後，根據圖 5-1 利用傳統 PERT 模式求解可以得到要徑的工期，根據傳統 PERT 總工期與標準差的公式，式 (10) - 式 (11) 可求得，要徑的總平均工期為 364.99 天，標準差為 3.92 天。

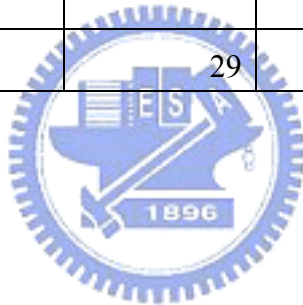
$$T_E = \sum_x t_{e_x} \quad (10)$$

$$\sigma_{T_E} = \sqrt{\nu_{T_E}} \quad (11)$$

表 5-2 專案作業之三時估計與相互關係表

工程 項目	作業 路徑	作業內容	樂觀時間 (a)	最可能時間 (m)	悲觀時間 (b)	平均 時間	工期標 準差
1	1-2	假設工程	32 (天)	35 (天)	36 (天)	34.67 (天)	0.67
2	2-3	臨時排抽水與挖土方工程	12	15	19	15.17	1.17
3	3-4	PC 澆置與放樣、紮基礎筋， 鋼筋查驗、組外模、基礎澆 置	36	40	42	39.67	1
4	4-5	1FRC	24	28	31	27.83	1.17
5	5-6	BF 外牆防水、回填土方	9	11	12	10.83	0.50
6	6-7	2FRC	24	28	31	27.83	1.17
7	7-8	3FRC	24	28	31	27.83	1.17
8	3-13	水電空調消防配合施作	270	280	285	279.17	2.50
9	8-15	RFRC	22	28	34	28.00	2.00
10	8-9	砌磚牆，內牆隔間，地下 室，消防水池粉刷	28	30	32	30	0.67
11	9-24	浴室地坪內牆、電梯坑防水 粉刷	25	30	35	30.00	1.67
12	9-10	平頂，內牆，管道間打底粉 刷	28	30	31	29.83	0.50
13	9-21	地坪磨石子，石英止滑地 磚，內牆打底貼磁磚	38	40	41	39.83	0.50
14	21-13	油漆施作	75	80	82	79.50	1.17
15	21-22	樓梯扶手安裝	29	30	31	31.00	0.33
16	22-23	玻璃安裝	18	20	25	20.50	1.17
17	23-13	不銹鋼爬梯，人孔蓋板，踢 腳板，門檻安裝	28	30	33	30.17	0.83
18	15-16	R1FRC	10	12	13	11.83	0.50
19	15-13	戶外廣場，景觀工程，殘障 坡道施作，屋頂花園工程	105	112	115	111.33	1.67
20	16-17	R2FRC	10	12	13	11.83	0.50
21	17-20	外牆吊線打石，門窗框安裝	23	24	26	24.17	0.50

22	17-18	模板整理清除	21	23	24	22.83	0.50
23	18-19	水箱水塔防水施作	22	25	27	24.83	0.83
24	17-13	電梯安裝及測試	85	88	90	87.83	0.83
25	19-13	屋頂防水隔熱處理	38	40	44	40.33	1.00
26	18-13	屋頂鋼架及彩色鋼板安裝	62	65	66	64.67	0.67
27	20-13	外牆防水打底，抵石斬石磁磚貼作	50	52	55	52.17	0.83
28	10-11	地板面材，天花板輕鋼架施作	28	29	30	29.00	0.33
29	11-12	設備安裝	19	20	22	20.17	0.50
30	12-13	周邊設施，失活汙水處理設施，附屬工程施作，缺失補修	25	30	33	29.67	1.33
31	24-13	停車場工程，內牆木石礦鐵板隔間，廁所隔間施作	37	40	42	39.83	0.83
32	13-14	環境整理，竣工驗收	29	30	35	30.67	1.00



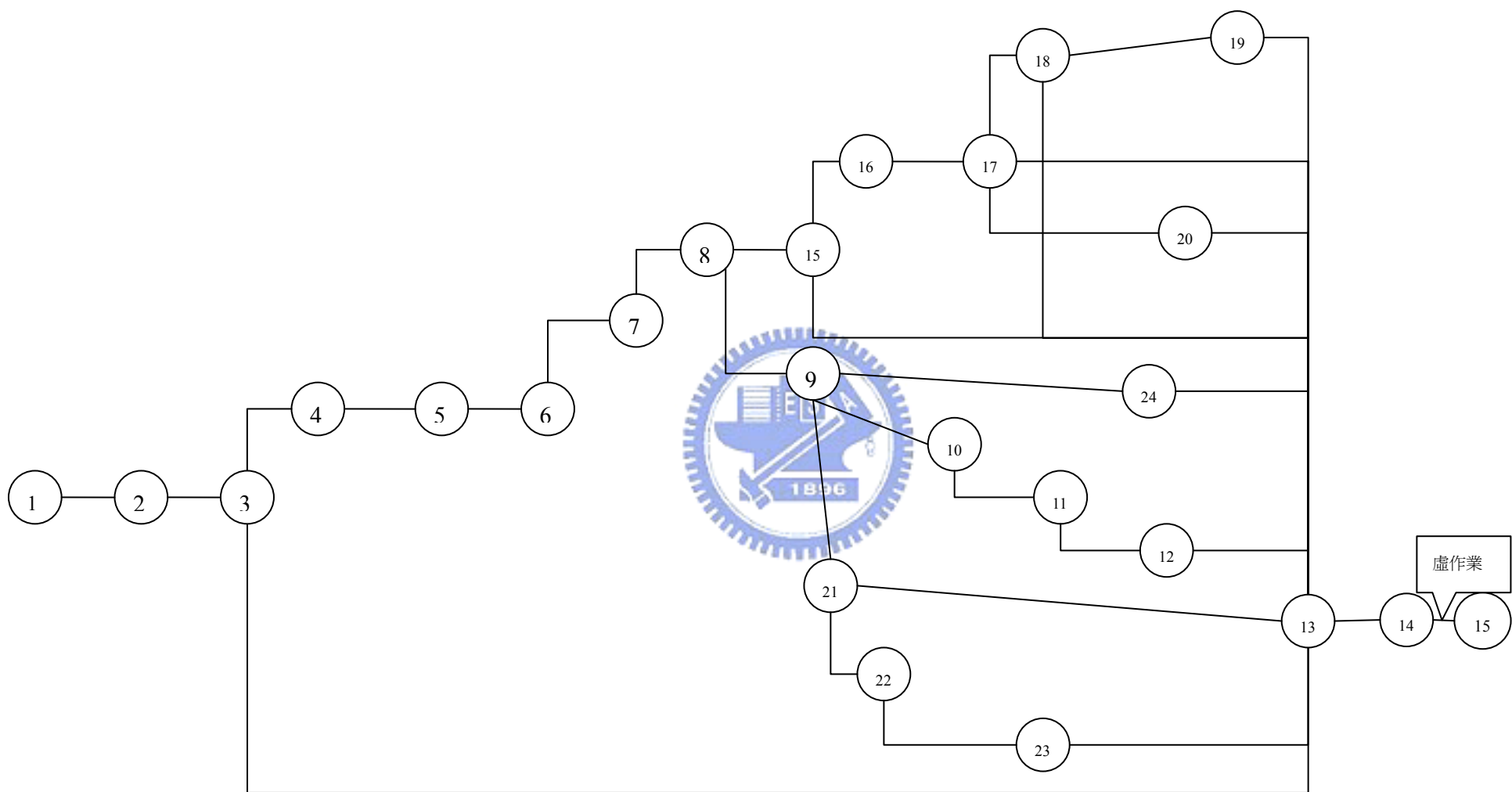


圖 5-1 個案工程專案箭線式網路圖

3. 以 Lu 與 AbouRizk (2000) 簡化之 CPM/PERT 模式套入專案進行模擬，將模擬之總工期結果與傳統模式結果比較相互間的差異；

在求出傳統的 CPM/PERT 模式的總工期之後，本研究利用 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化之 CPM/PERT 模擬模式套用在實際案例專案中，對工程專案進行 100 次的模擬，同樣應用 Microsoft Excel 2002 與 VBA 系統進行模擬，其模擬的結果與傳統的 CPM/PERT 模式比較如表 5-3 所示。

表 5-3 專案工程結果比較表

專案完工 天數	簡化之 CPM/PERT 模擬結果	傳統 CPM/PERT 模擬結果
最短工期	358(天)	N/A
最長工期	375	N/A
平均工期	365.94 (天)	364.99
標準差	3.30	3.32
365 天完工 的機率	38.8%	50.1%

由表 5-3 可以觀察到，簡化之 CPM/PERT 模式與傳統 CPM/PERT 模式相同，都能表現作業項目的變異性，同樣低，簡化之 CPM/PERT 模式能求得整個專案的最短工期與最長工期，在個案工程專案中，最短工期為 358 天，最長工期為 375 天，傳統 CPM/PERT 模式只求出專案的平均工期。另外，簡化之 CPM/PERT 模式所求出的專案平均工期為 365.94 天；較傳統的 CPM/PERT 模式的 364.99 天要長，而簡化之 CPM/PERT 模式的標準差 3.30 天較傳統模式 3.32 天小，由此可知簡化之 CPM/PERT 模式同樣具有預估工期的能力。另外由表 5-3 最下列，365 天內完工的機率可以方面，簡化之 CPM/PERT 模擬模式之完工機率為 38.8%；而傳統的 CPM/PERT 模式，根據公式 (12) 所示，其完工的機率為 50.1%，簡化之 CPM/PERT 模式較傳統模式低了 11.3%，表示在專案的風險評估上，簡化之 CPM/PERT 模擬模式能提供較確定性的資訊，避免專案管理者或者施工單位過於樂觀的評估，造成專案在與業主簽約後，卻無法在期限內完工，而被迫付出巨額違約金的情形。圖 5-2 為個案工程專案各模擬結果的分布與累積百分比的示意圖。

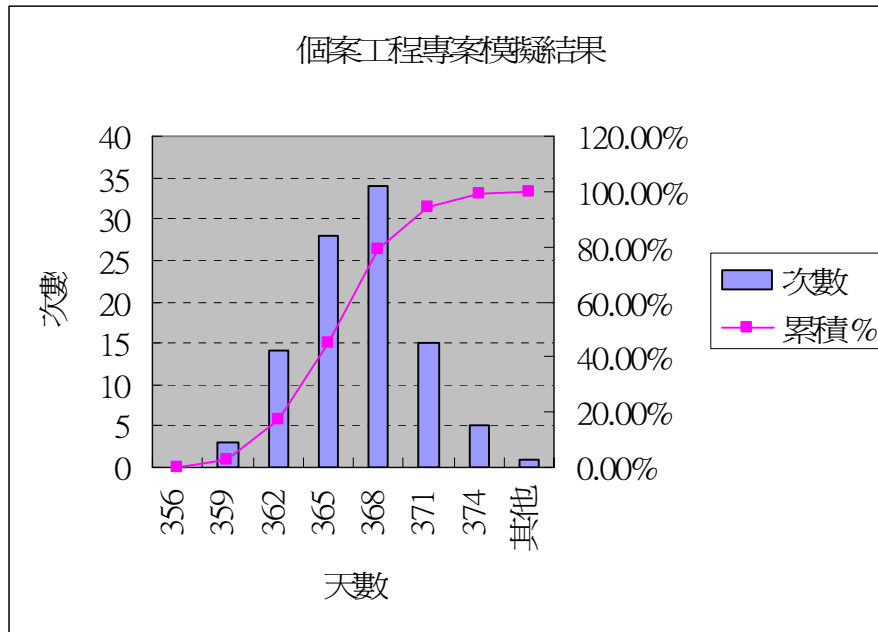


圖 5-2 個案工程專案模擬結果

4. 利用要徑指標變數 (CI) 定義各作業成為要徑的機率，並與建築設計師以及施工單位探討各作業的變異因素：

簡化之 CPM/PERT 模式與傳統的 CPM/PERT 模式最大不同的地方就是，簡化的 CPM/PERT 模式在進行逆推式的計算時，不需要依循傳統的 CPM/PERT 模式，計算每項作業的 LS 、 LF 以 TF ，只需要利用一二元變數：要徑指標變數 (CI) 即可。因此要徑指標變數 (CI) 對應每項作業的值，可視為簡化之 CPM/PERT 模擬模式檢驗要徑的方式。經由逆推式的計算，我們可以求出個案工程專案中，每個工程作業項目成為要徑的機率，這也可以視為對前推式模擬的一種檢驗方式。而計算的結果則如表 5-4 所表示。表中最右欄顯示傳統的 CPM/PERT 模式所計算的個案工程專案的要徑，若作業為要徑作業，則以 Yes 表示；反之，若為非要徑，則以 No 表示。在實務的土木工程施作上，由於各作業都具有變異性，因此在某些情況之下，如果當某些作業於極度悲觀的狀態下完工，可能造成整體的專案工程要徑的改變，因此要徑指標變數 (CI) 針對各作業項目提供更細微的檢視，而並非單純判斷是否為要徑作業。

表 5-4 個案工程專案作業的要徑指標 (CI)

作 業 路徑	作業內容	CI 的機率(簡化之 CPM/PERT 模式)(%)	是否為要徑(傳統 CPM/PERT 模式)
1-2	假設工程	100 (%)	Yes
2-3	臨時排抽水與挖土方工程	100	Yes
3-4	PC 澆置與放樣、紮基礎筋，鋼筋查驗、組外模、基礎澆置	100	Yes
4-5	1FRC	100	Yes
5-6	BF 外牆防水、回填土方	100	Yes
6-7	2FRC	100	Yes
7-8	3FRC	100	Yes
3-13	水電空調消防配合施作	0	No
8-15	RFRC	0	No
8-9	砌磚牆，內牆隔間，地下室，消防水池粉刷	100	Yes
9-24	浴室地坪內牆、電梯坑防水粉刷	0	No
9-10	平頂，內牆，管道間打底粉刷	0	No
9-21	地坪磨石子，石英止滑地磚，內牆打底貼磁磚	100	Yes
21-13	油漆施作	24 (+12) ¹	No
21-22	樓梯扶手安裝	64 (+12)	Yes
22-23	玻璃安裝	64 (+12)	Yes
23-13	不銹鋼爬梯，人孔蓋板，踢腳板，門檻安裝	64 (+12)	Yes
15-16	R1FRC	0	Yes
15-13	戶外廣場，景觀工	0	No

¹括號內表示同時成為要徑的機率

	程，殘障坡道施作， 屋頂花園工程		
16-17	R2FRC	0	No
17-20	外牆吊線打石，門窗 框安裝	0	No
17-18	模板整理清除	0	No
18-19	水箱水塔防水施作	0	No
17-13	電梯安裝及測試	0	No
19-13	屋頂防水隔熱處理	0	No
18-13	屋頂鋼架及彩色鋼 板安裝	0	No
20-13	外牆防水打底，抵石 斬石磁磚貼作	0	No
10-11	地板面材，天花板輕 鋼架施作	0	No
11-12	設備安裝	0	No
12-13	周邊設施，失活汙水 處理設施，附屬工程 施作，缺失補修	0	No
24-13	停車場工程，內牆木 石礦鐵板隔間，廁所 隔間施作	0	No
13-14	環境整理，竣工驗收	100	Yes

在個案工程專案中，各作業之要徑指標如表 5-4 所展示，而從表中我們可以觀察到，傳統 CPM/PERT 模式所計算出的要徑路徑為「1→2→3→4→5→6→7→8→9→21→22→23→13→14→15」。而利用 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模擬模式計算的結果顯示，可能成為要徑的路徑有二：「1→2→3→4→5→6→7→8→9→21→22→23→13→14→15」，以及「1→2→3→4→5→6→7→8→9→21→13→14→15」，如圖 5-3 所表示，其中「1-2 假設工程」、「2-3 臨時排抽水與挖土方工程」、「3-4 PC 澆置與放樣、紮基礎筋，鋼筋查驗、組外模、基礎澆置」、「4-5 1FRC」、「5-6 BF 外牆防水、回填土方」、「6-7 2FRC」、「7-8 3FRC」、「8-9 砌磚牆，內牆隔間，地下室，消防水池粉刷」、「9-21 地坪磨石子，石英止滑地磚，內牆打底貼磁磚」、「13-14 環境整理，竣工驗收」等作業成為要徑的機率皆為 100%；然而可能變動的要

徑作業有「21-13 油漆施作」、「21-22 樓梯扶手安裝」、「22-23 玻璃安裝」以及「23-13 不銹鋼爬梯，人孔蓋板，踢腳板，門檻安裝」等工程作業項目。由圖 5-3 可以得知工程作業在節點 21 時分成兩個工程作業分枝，分別是 21-13，在圖中以虛線表示，以及 21-22-23-13，在圖中以實線表示。另外由表 5-4 中可以發現兩工程作業分枝成為要徑的機率：

- 工程作業路徑「1→2→3→4→5→6→7→8→9→21→13→14→15」單獨成為要徑的機率為 24%；
- 作業路徑「1→2→3→4→5→6→7→8→9→21→22→23→13→14→15」單獨成為要徑的機率為 64%；
- 兩分枝同時為要徑，也就是兩工程作業分枝的工期皆相同的機率為 12%。

傳統的 CPM/PERT 模式對於要徑的判斷只能判斷一條，在實務工程專案的應用上，能夠提供給建築設計師或者施工管理者的資訊比較有限；相對起來，Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化的 CPM/PERT 模式能判斷各工程作業各別成為要徑作業的機率，建築設計師或施工單位能夠依據結果了解各作業可能成為要徑的機率，針對這些可能成為要徑的作業需要的資源或成本進行更準確監控，或者對於人為的變異因素進行更適當的管理，由此可見 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化的 CPM/PERT 模式能提供更完整的工期資訊。

至於變異因素方面，造成各工程作業變異的因素有很多，本研究經由與建築設計師與施工單位訪談之後，發現各工程作業在施工建造之初，若施工單位對於工程作業有施作上的疑問，則需要與建築設計師進行溝通與協調，如此的公文往來或開會決議都會造成工程作業進度的停滯。另外土木工程在基礎結構施作的時候，最長受到天氣的因素影響，例如連日的大雨可能會阻礙了臨時排水工程的施作，也可能會對挖土方的工程作業造成安全上的顧慮，另外還有資源的影響，由於目前原油不斷飆漲的緣故，造成許多原物料的成本都跟著上升，取得也會更加困難，如此可能在工程作業的施作上，必須等待原物料的到達才能進行施作等等，至於個別的作業變異因素，經由訪談之後，將主要工程以及變異因素整理如下：

1. 假設工程：建築設計師與施工單位在所有工程作業施作前，對於工程的目標

與預計的進度進行溝通與協調；

2. 臨時排抽水與挖土方工程：排水機具與開挖機具的等候時間，天氣造成基地發生崩塌現象，或造成開挖面積水，都須停止開挖，另外若對鄰棟建築物造成損傷時，亦須停止開挖，等鑑定補強之後才可繼續施作；
3. 鋼筋相關工程：鋼筋材料的供應，近年來鋼材報價漲幅日益擴增不但造成部分地區工程的延誤甚至停擺，也使營造業者財務調度趨緊，另外天候因素也會造成影響，如遇到打雷、大雨必須停工，高空作業的強風也必須暫停作業；最後工程人員對於鋼筋接續或焊接器具的技術能力也是變異的因素，與鋼筋有關的工程如紮基礎筋、各樓層基礎建設等作業。
4. 模板相關工程：模板塌垮的問題，根據營造業職業災害統計，模板塌垮主要可能由於木材模板的朽化以致無法載重，亦可能由於支柱上下兩端之承接處連結處理不當，或者支柱未使用適當之水平繫條斜向支撐，支柱有缺陷、過度的振動等等。另外混凝土於模板上的施工不當，也會造成模板的塌垮而造成作業的停滯，與模板有關的工程作業如基地模板、各樓層模板的製作與拆除等。
5. 混凝土澆置相關工程：較常見的造成延誤的項目包括澆置處理不當，設備機具規劃差，預拌車出貨、輸送的問題，以及天氣若太過炎熱，會造成混凝土的工作性太差而無法施作，工人施作技術也會影響工期，相關的工程作業如各標準樓層的施作，結構體施作等作業。
6. 防水施作相關工程：建物中幾乎所有的結構體工程或是機電工程都必須作防水防熱的處理，有關防水方面，建物依使用材料、施工方法以及防水部位的不同，可區分為軀體防水、線防水、表面防水等三種方式，另外在地下工程防水部分，則可概括整理為明挖法地下工程防水設防與暗挖法地下工程防水設防兩種。會造成影響的因素可能有材料的配置，施工單位施作的工法或技術的差異等。
7. 水電空調消防等相關工程：消防設施為建築物非常重要的設施，攸關建築使用者在意外災害中的安危，因此消防設備本身的品質非常重要，另外在施作消防設備時，若遇到阻礙工程進行之已裝設部份，必須設法暫時移置，完工後復原狀，如此便會影響工期的進度；另外在水電空調等電氣工程方面，這些作業包括許多管線的配置與按裝，因此除了本身管線電器的品質之外，還

需要與其他工種如基礎建設等相互配合，以防介面衝突的問題而造成停滯。

8. 其他建材施作相關工程，包括玻璃、木材、石材、衛浴設備、鋁、不銹鋼等金屬建材：影響最大為各建材的資源取得難易，由於工程建設的許多工項，都需要大量且不同的建材，因此各種建材的資源多寡、成本高低，都左右工程作業的施作進度。另外許多室外施作的工程作業亦會受到天氣影響，如玻璃裝設時，如果遇到風大的天氣，可能考慮到施作工人的安全而暫停施作。
9. 外牆面、粉刷、砌磚、油漆等相關工程：在外牆面與粉刷施作上，如遇到天雨或刮風日不得施工，如在施工中遇有上述情形，應鏟去待天晴時再重做。進行砌磚作業時，要保持壁磚磁磚濕潤以利施作。油漆施作時，凡空氣中充滿灰塵或氣候及溫度不適合於油漆施工時，不得施行，且油漆不得在陰天、潮濕天、或雨天中施工。
10. 景觀相關工程：景觀工程中，常常會由於施工單位對於建築設計圖的意義不瞭解，而必須暫停施作與建築設計師溝通意見。另外天氣因素以及建材成本同樣都會造成影響。



就個案工程專的進度管理者而言，雖然路徑「1→2→3→4→5→6→7→8→9→21→22→23→13→14→15」成為要徑路徑的機率是最高的 64%+12% 一共 76%；但是並不是傳統 CPM/PERT 模式所判斷的唯一要徑，還是有 24%+12% 一共 36% 的機會，要徑變成為「1→2→3→4→5→6→7→8→9→21→13→14→15」。因此進度管理者除了要正確的掌握「1→2→3→4→5→6→7→8→9→21→22→23→13→14→15」節點間的各作業進度之外，以及另一作業路徑，也就是對於作業「21-13 油漆施作」項目，也必須留意，也許如天候因素，或者油漆建材供給不足，而造成要徑路徑的改變。

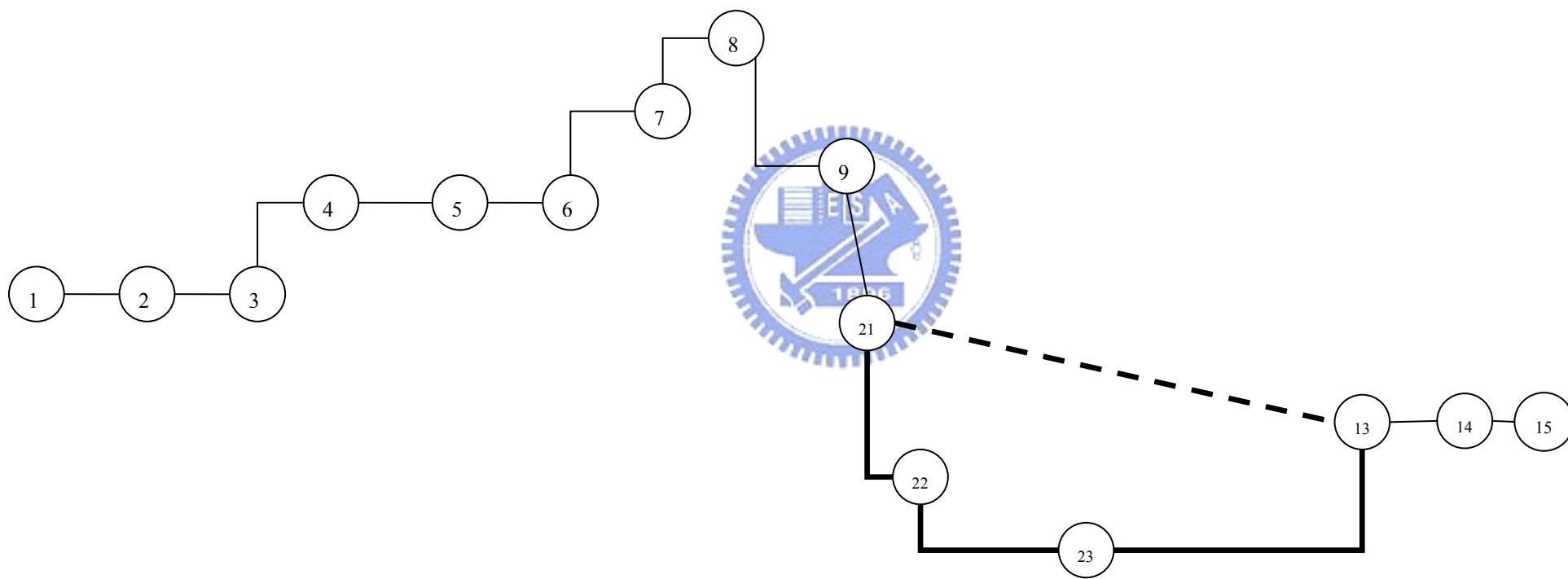


圖 5-3 個案專案工程要徑圖

5.4 趕工情境探討

假設建築設計師，也就是監工單位與業主開會討論工期之後，業主對於原訂工期模擬的結果，365 日曆天的完工機率 38.8 %的結果不盡滿意，期望能夠提高完工的機率，因此在溝通協商之後，雙方決議將專案工程中的第 13 項工程作業，也就是將「9-21 地坪磨石子，石英止滑地磚，內牆打底貼磁磚」的工程作業，期望縮短 5 天以達到業主的期望。因此第 13 項工程作業原本的三個時間點，經由施工單位重新預估之後，預計可提前到如表 5-5 所表示：

表 5-5 「9-21」作業項目更改狀況

工程項目	狀態	樂觀時間 (a)	最可能時間 (m)	悲觀時間 (b)	平均 時間	標準差
地坪磨石子，石英止滑地磚，內牆打底貼磁磚	原訂工期	38 (天)	40	41	39.83	0.5
	趕工工期	30	35	37	30.5	1.17

而在其他工程作業不改變的情況下，再次利用 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式進行模擬，其趕工的模擬結果與傳統 CPM/PERT 模式的結果，如表 5-6 所表示，而由從表 5-6 中可以發現，在趕工的情境之下，由表中最下列，對 365 天內完工的機率而言，簡化之 CPM/PERT 模式的結果為 86.9%，而傳統模式的結果為 93.8%。雖然完工的機率都大幅提高，但是簡化之 CPM/PERT 模式結果，依舊比傳統的機率要低了近 8%，這是因為簡化之 CPM/PERT 模式對於工期完工的預估是以更確定性角度進行模擬的結果。

表 5-6 趕工情境下與傳統模式的比較

專案完工天數	趕工情境下簡化之 CPM/PERT 模擬結果	趕工情境下，傳統 CPM/PERT 模擬結果
最短工期	351 (天)	N/A
最長工期	371	N/A
平均工期	360.26	359.66
標準差	4.22	3.48
365 日曆天內完工的機率	86.9%	93.8%

而簡化模式在趕工的情境下的結果與原訂工期的比較如表 5-7 所表示：

表 5-7 趕工情境下的模擬結果

專案完工天數	趕工情境下簡化之 CPM/PERT 模擬結果	原訂工期下簡化之 CPM/PERT 模擬結果
最短工期	351 (天)	358 (天)
最長工期	371	375
平均工期	360.26	365.94
標準差	4.22	3.30
365 日曆天內完工的機率	86.9%	38.8%

模擬結果的天數如圖 5-4 所表示，由模擬的結果可以發現，趕工情境之下，平均工期由原本的 365.94 天，縮減至 360.26 天，而在 365 日曆天內完工的機率由原先的 38.8%，提升至 86.9%，完工的機率大大的提高。不過工期的標準差從原本的 3.30 上升到 4.22，這結果也許是由於要徑路徑的改變所致，故接下來便

檢視網路中的各路徑成為要徑的機率。

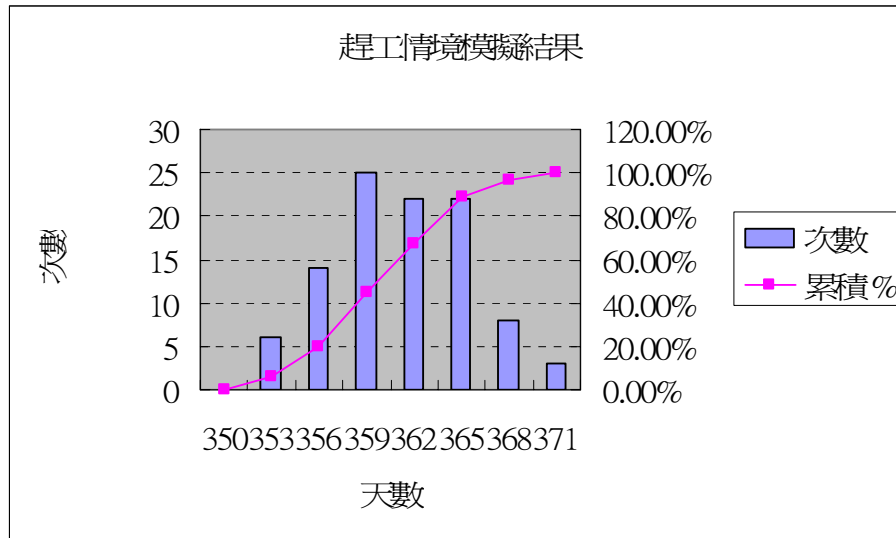


圖 5-4 趕工情境模擬結果

根據 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式模擬的結果，可能成為要徑的路徑如圖 5-5 所表示，並且彙整如下：

- 路徑「1→2→3→4→5→6→7→8→9→21→22→23→13→14→15」單獨成為要徑的機率為 61%；
- 路徑「1→2→3→4→5→6→7→8→9→21→13→14→15」單獨成為要徑的機率為 21%；
- 上述兩條路徑同時成為要徑的機率為 10%；
- 路徑「1→2→3→4→5→6→7→8→15→16→17→18→13→14→15」與上述兩條路徑同時成為要徑的機率為 3%；
- 路徑「1→2→3→4→5→6→7→8→15→16→17→18→19→13→14→15」單獨成為要徑的機率為 2%，與其他路徑同時成為要徑的機率為 2%；
- 路徑「1→2→3→4→5→6→7→8→15→13→14→15」、
「1→2→3→4→5→6→7→8→15→16→17→13→14→15」也有 1%的機率成為要徑。

因此利用 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模擬模式進行趕工情境的模擬可以發現，網路中的作業路徑，雖然成為要徑的路徑機率仍然是「1→2→3→4→5→6→7→8→9→21→22→23→13→14→15」以及「1→2→3→4

→5→6→7→8→9→21→13→14→15」這兩條為最高，兩條路徑總共佔了 61%+21%+10%=92%；然而卻有其他的路徑都有可能成為要徑，包括「1→2→3→4→5→6→7→8→15→16→17→18→13→14→15」、「1→2→3→4→5→6→7→8→15→16→17→18→19→13→14→15」、「1→2→3→4→5→6→7→8→15→13→14→15」、「1→2→3→4→5→6→7→8→15→16→17→13→14→15」共四條路徑，雖然成為要徑的機率不高，最高也只是 3%；然而這也代表了這幾條路徑中的各作業對整體的工程專案中還是具有一定的影響，因此對於進度管理者而言，若是在趕工的情境之下進行施工，除了原訂工期情境下的兩條可能要徑之外，還必須掌握另外四條路徑中各節點間的作業項目，新增可能成為要徑的作業包括：「8-15RFRC」、「15-16 R1FRC」、「16-17 R2FRC」、「17-18 外牆吊線打石，門窗框安裝」、「18-13 屋頂鋼架及彩色鋼板安裝」、「18-19 水箱水塔防水施作」、「19-13 屋頂防水隔熱處理」、「15-13 戶外廣場，景觀工程，殘障坡道施作，屋頂花園工程」、「17-13 電梯安裝及測試」等作業。這些工程項目若是在極度不順利的情況之下施作，雖然機率不大，但是還是有可能取代原來的要徑，成為新的要徑。



5.5 小結

本章藉由 5.1 節之個案工程專案，利用 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模擬模式進行模擬，在 5.3 節中求算基本的原訂工期模擬結果，以及 5.4 節趕工情境下的模擬結果，包括總工期的預估，以及各路徑節點間的各作業，其成為要徑的機率。經由上述兩小節的模擬結果，除了可以驗證 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式在實務上的實用性。

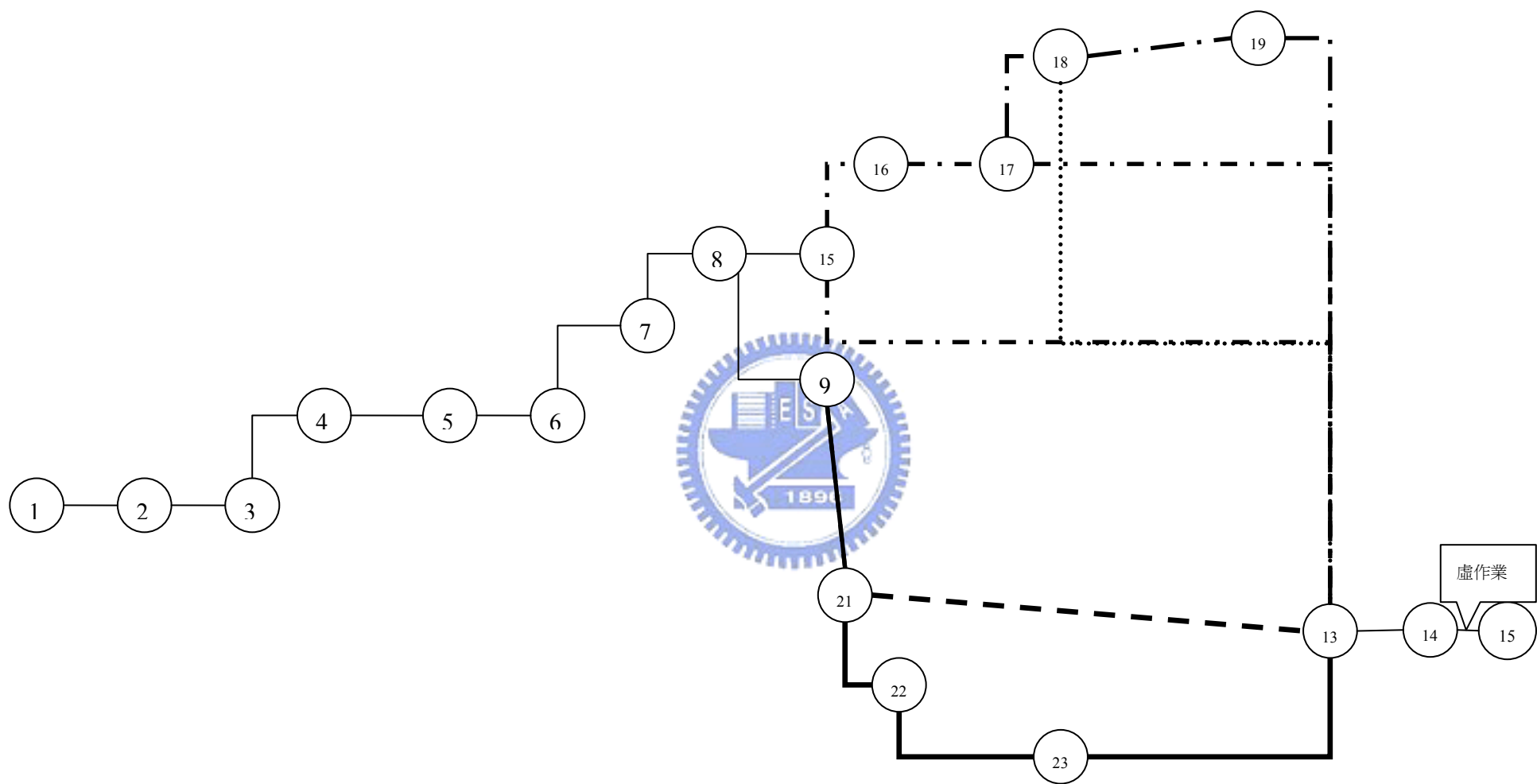


圖 5-5 趕工情境下個案工程專案要徑圖

第六章 結論與建議

現今的營建工程專案中，對於進度的規劃主要還是以桿狀圖或者傳統的要徑法（CPM）為主，桿狀圖的優點在於製作容易、易懂且適合各階層的工程人員使用，但是卻無法明確表明先後關係，且不易掌握各作業間的相互關係。而要徑法的優點在於可明確地知道各作業發生之實際日期，並可明確對照何時將進行哪些作業以做出反應，缺點是無法表現工期的變異性，且各作業項目必須先確定五個時間點，當面對較大規模的工程專案時，計算起來非常繁瑣費力。而傳統的計畫評核術（PERT）雖然能以三時估計點表現工期的變異性；然對於總工期的預估卻有過於樂觀的限制，且要徑的計算只能判斷一條要徑，在實際工程專案中無法適用。本研究以Lu與AbouRizk（2000）之簡化CPM/PERT模擬模式為基礎，利用易於計算，提供較完整且確定的訊息等優點，套用至個案工程專案中進行模擬，並將結果提供給建築設計師與施工單位進行探討，期望提供更準確的工期預估方式。



6.1 結論

其模擬的結果得到以下結論：

1. 經由模式的實證可以了解，Lu 與 AbouRizk（2000）之簡化 CPM/PERT 模擬模式確實可以改善傳統的 CPM/PERT 模式中，資料繁瑣的限制。在 Lu（2000）之簡化 CPM/PERT 模式中，對於起點與發散節點而言，都不需要去記錄工期時間，因為模式中的計算只發生在匯合節點上，而對於一個有 N 個前項作業之匯合節點 I 而言，只需要 $2N+1$ 個時間變數就能完整的描述該節點的狀態與特性；相較傳統的 CPM/PERT 技術，一個節點至少需要六個時間變數（ ES 、 EF 、 LS 、 LF 、 TF 以及作業工期）才能完整描述之。如此便能大幅減低系統的負擔。
2. 以 Lu 與 AbouRizk（2000）之簡化 CPM/PERT 模式預估個案工程專案之完整工期，得以求解出較確定性的要徑工期。Lu 與 AbouRizk（2000）之簡化 CPM/PERT 模式所求出的專案平均工期同樣具有預估工期的能力。365 天內完工的機率可以方面，Lu 與 AbouRizk（2000）之簡化 CPM/PERT 模式的

38.8%也較傳統的 CPM/PERT 模式的 50.1%低了 11.3%。表示在專案的風險評估上，Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模擬模式能提供較確定性的資訊，避免專案管理者或者施工單位過於樂觀的評估，避免專案在與業主簽約後，卻發生無法在期限內完工的情況；

3. 以 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式預估個案工程專案，可以利用要徑指標變數(CI)，判斷各路徑成為要徑的機率。傳統的 CPM/PERT 模式只能判斷一條要徑路徑，然而在 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式中，可能成為要徑的路徑有：

- 作業路徑「1→2→3→4→5→6→7→8→9→21→22→23→13→14→15」單獨成為要徑的機率為 64%；
- 工程作業路徑「1→2→3→4→5→6→7→8→9→21→13→14→15」單獨成為要徑的機率為 24%；
- 兩分枝同時為要徑，也就是兩工程作業分枝的工期皆相同的機率為 12%。因此對於要徑的判斷上，Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式能提供較完整的要徑資訊，；

4. 以 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式預估個案工程專案，能計算在趕工的情境之下，要徑工期的改變，以及要徑路徑的影響。由 5.4 節的結果顯示，趕工情境之下，平均工期由原本的 365.94 天，縮減至 360.26 天，而在 365 日曆天內完工的機率由原先的 38.8%，提升至 86.9%；然而要徑路徑也有所改變，原始情境之下有 2 條路徑可能成為要徑，而在趕工情境之下，共有 6 條路徑可能成為要徑，因此進度管理者在工期進度的掌握上可能需要考慮更多的面向；

5. Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式能提供較簡易的模擬技術。現今大型的營建工程模擬軟體，通常都是價格昂貴且入門門檻較高，一般的中小型建築設計師或者施工單位不易取得。而 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模擬模式能提供給一般進度管理者較簡易，且較確定性的模擬技術，增加在工期預估的效率與準確性。

6.2 建議

在整個研究過程中，對於 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模擬模式，或者個案工程專案的模擬過程，仍然有未臻完善之處，因此建議後續之研究可朝下列幾個方向著手，俾使模式的預估效果更有效可行，建議如下：

1. 本研究所以 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式為基礎，模式所考慮的變數只有時間變數，並不考慮金錢成本、專案可使用之資源或者各工種間資源使用的順序，後續研究者若能在模式中加入新的變數，則 Lu 與 AbouRizk (2000) 之簡化 CPM/PERT 模式將更加完整。
2. 在個案工程專案的展示中，有關各工程作業項目的作業時間，均是以主觀的建築設計師或者施工單位依照經驗法則做三個時間點（最快完工時間、最可能完工時間、最慢可完工時間）的判斷，雖然土木工程作業施作時，作業工期很不容易事先能判定，不過後續研究者也許能加入若干客觀之準則幫助工期的預估，以避免主觀的人為判斷造成模擬結果的誤差。
3. 本研究主要是探討個案工程專案初期之進度規劃，即探討的對象為主要的工作項目，並不會有更明確的細項，後續研究者若能將專案工程作業分成更細的分項做探討，專案工程要徑的模擬結果會更加完整。

參考文獻

1. 李文祥，「作業基礎管理制與 PERT 分析運用於農產品新鮮處理中心之研究」，碩士論文，國立中興大學農產運銷研究所，台中，1999。
2. 李得璋，「營建經營管理—營建工程規劃與進度控制」，財團法人台灣營建研究院，1987。
3. 林弘毅，「自充填混凝土施工效益評估與分析」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程學研究所，台北，2001。
4. 林憶田，「土方作業規劃同類資源考量之模擬研究」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，桃園，1998。
5. 吳崑霖，「台北市都市計畫通盤檢討案業務之研究」，碩士論文，國立交通大學交通運輸研究所，新竹，1981。
6. 吳國興，「專案分析及管制系統在專案工程資源調配之研究」，碩士論文，國立交通大學管理科學研究所，新竹，1985。
7. 郭奉宜，「統包工程之進度規劃模式」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹，2004。
8. 高志魁，「關鍵鍊排程於營建工程排程之研究」，碩士論文，中華大學營建管理研究所，新竹，2002。
9. 張元渝，「PERT/CPM 應用於公路橋樑施工管理之研究」，碩士論文，國立交通大學交通運輸研究所，新竹，1985。
10. 張敬廉，「網圖模組於大型公共工程主辦機關進度管理之應用」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹，2001。
11. 黃榮堯，「大處著眼、小處著手—施工作業流程電腦模擬規劃分析」，營建管理季刊，第 36 期，第 38—48 頁，1998。
12. 楊益林，「購物中心定位之策略分析及作業模式」，碩士論文，國立政治大學經營管理碩士學程，2000。

13. 蔡雅雯，「營建作業模擬系統邏輯控制元件之研究」，碩士論文，國立中央大學土木工程學系，桃園，2002。
14. 鄭明淵與蘇振維，「PERT 網圖分析之改善技術—以 JPDM 與 PNET 法為例」，營建管理季刊，第 30 期，第 21 頁-第 29 頁，1997。
15. 潘南飛與黃智冠，「模糊線性規劃用於專案排程分析之研究」，工程科技與教育學刊，第二期，第 173 頁-第 183 頁，2004。
16. 劉自強，「以限制理論為基礎之專案排程及執行控制研究」，碩士論文，國立交通大學工業工程與管理研究所，新竹，1999。
17. 劉佩真，「建築工程產業基本資料」，台灣經濟研究院產經資料庫，2006。
18. 賴欽泉，「計畫評核術在省住都局個案工程管理上應用之研究」，碩士論文，國立交通大學管理科學研究所，新竹，1985。
19. 賴瓊華，「完工時間限制下模糊計畫評核術之研究」，碩士論文，國立成功大學工業管理學系，台南，2000。
20. 謝清俊，「網圖模組應用於營建工程進度管理之研究」，碩士論文，國立交通大學，新竹，1998。
21. 謝斌麒，「資源物件化之營建作業模擬系統研究」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，桃園，1999。
22. AbouRizk, S. M., Halpin, D. W. and Wilson, J. R., 1994, "Fitting Beta Distribution Based on Simple Data," *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 120, pp 288-305.
23. Ashraf, M. E. and Ahmed, A. G., 2004, "Finance-Based Scheduling of Construction Projects Using Integer Programming," *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 130, pp 15-24.
24. Abbasi, G. Y. and Mukattash, A. M., 2001, "Crashing PERT networks using mathematical programming," *International Journal of Project Management*, Vol. 19, pp 181-188.

25. Cottrell, W. D., 1999, "Simplified Program Evaluation and Review Technique (PERT) ," *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 125, pp 16-22.
26. Gong, D., 1997, "Optimization of Float Use in Risk Analysis-Based Network Scheduling," *International Journal of Project Management*, Vol. 15, pp 187-192.
27. Halpin, D. W., and Riggs, L. S., 1992, "Planning and Analysis of Construction Operations," *Wiley, Inc.* N.Y.
28. Halpin, D. W., and Woodhead, R., 1998, "Construction Management," *Wiley, Inc.* 2nd Ed., N.Y.
29. Hon-Shiang, L. and Somarajan, C., 1995, "A proposal on improved procedures for estimating task-time distributions in PERT," *European journal of Operational Research*, Vol. 85, pp 39-52.
30. Kim, K. and de la Garza, J. M., 2005, "Critical Path Method with Multiple Calendars," *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 131, pp 330-342.
31. Kim, K. and de la Garza, J. M., 2005, "Evaluation of the Resource-Constrained Critical Path Method Algorithms," *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 131, pp 522-532.
32. Lu, M. and AbouRizk, S. M., 2000, "Simplified CPM/PERT Simulation Model," *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol. 126, pp 219-226.
33. Pietroforte, R., and Stefani, T. P., "ASCE Journal of Construction Engineering and Management : Review of the year 1983—2000" , *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 130, 2004, pp 440-448.
34. Pegden, C., Shannon, R., and Sadowski, R., "Introduction to Simulation Using SIMAN," *McGraw-Hill, Inc. New York*, 1995.
35. Wiest, J. D., and Levy, F. K., 1977, "A Management Guide to PERT/CPM,"

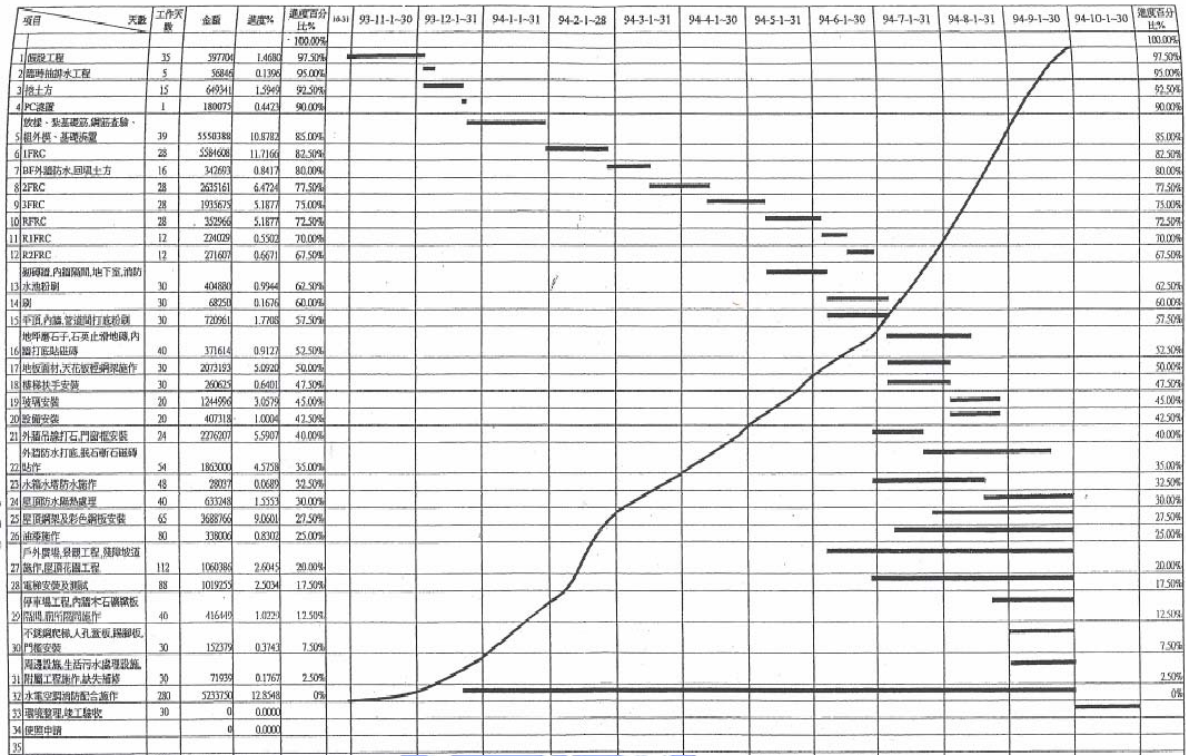
Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.

36. Winston, W. L., 2004, “Operations Research,” *DuxBury*, 4th Ed., Indiana.



附錄一 個案工程專案桿狀圖

活動中心新建工程預定進度表



簡歷



學生姓名：邱子長

出生地：台北市

生日：民國 71 年 7 月 23 日

學歷：

2006 年 6 月 國立交通大學運輸科技與管理系碩士班

2004 年 6 月 國立交通大學運輸科技與管理學系學士

2000 年 6 月 台北市立成功高級中學

聯絡方式：takahashi.tem93g@nctu.edu.tw