

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

應用類神經網路配合 ACI 規範

輔助卜作嵐混凝土配比設計

Application of neural networks and ACI  
code in pozzolanic concrete mix design

研究生：沈錦鴻

指導教授：洪士林 博士

中華民國 一〇二年六月

應用類神經網路配合 ACI 規範輔助卜作嵐混凝土配比設計

Application of Neural Networks and ACI code in pozzolanic  
concrete mix design

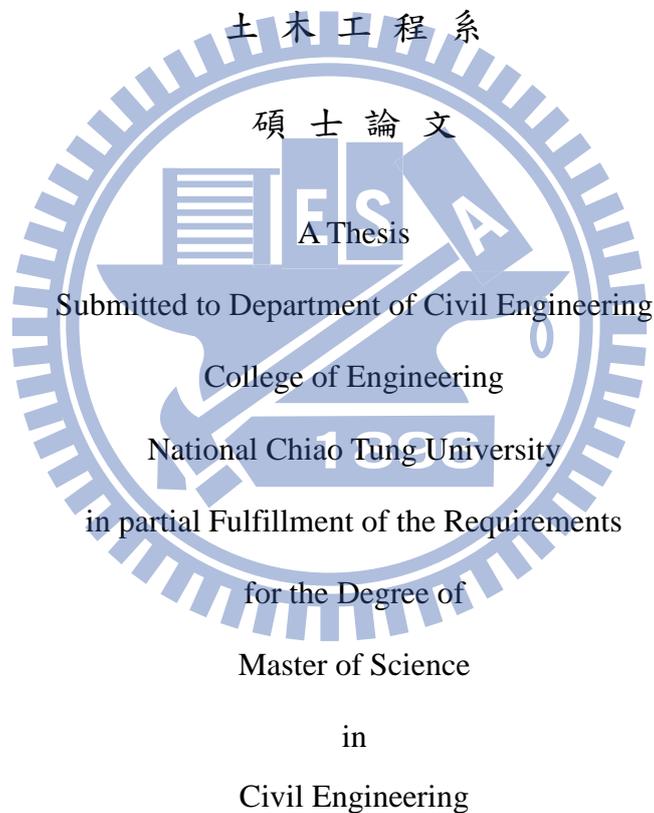
研究生：沈錦鴻

Student : Chin-Hung Shen

指導教授：洪士林

Advisor : Dr. Shih-Lin Hung

國立交通大學



June 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年六月

# 應用類神經網路配合 ACI 規範輔助卜作嵐混凝土配比設計

研究生：沈錦鴻

指導教授：洪士林 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

## 摘要

混凝土是土木營建工程中最被廣為運用之材料。混凝土本身為一變異性很高之材料，其是由各種不同之材料所組成，每種材料之特性都不一樣，目標需求所設計出的配比往往和實際有落差。而配比、製作及養護環境之不同，皆會對混凝土之性質產生影響。其中又以配比對混凝土之影響最大，再加上材料科技的進步，現行所用之混凝土已非傳統一般水泥混凝土，因混凝土配比中皆添加了卜作嵐摻料及化學摻料，這使得混凝土性質更加難以掌控。本研究之目的係建構一套電腦輔助混凝土配比系統。首先，先利用由各文獻或實驗室中所蒐集到的資料來建構一個真實混凝土配比資料庫；接著我們利用監督式學習的類神經網路來建立混凝土強度及坍度之預測模型，並同時利用電腦程式配合 ACI 規範及設計流程來產生合理之混凝土配比。預測模型經訓練及測試後，其所得之結果、準確性和效能皆屬不錯。再以所建立好之預測模型來預測混凝土配比之強度和坍度性質，並將此配比資料整合成一可用配比資料庫。隨後利用一試驗來驗證模型預測配比之準確度，試驗結果顯示，實際值和預測值之誤差大多在合理範圍之內，再次證明預測模型之準確性是可靠的。最後，利用歐式距離觀念、卜作嵐取代率及材料成本三種方法來將配比加以分類，並建立一配比資料庫，使其有如一混凝土配比之型錄，可提供使用者方便依其工區環境、材料使用及成本考量來作選擇及使用。

**關鍵字：**類神經網路、預測模型、混凝土配比、分類、資料庫。

# **Application of Neural Networks and ACI code in pozzolanic concrete mix design**

Student : Chin-Hung Shen

Advisor : Dr. Shih-Lin Hung

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

## **Abstract**

Concrete is the most widely used materials in civil engineering. Concrete is a high variability of material owing to composed with a variety of different materials. Since the mix proportioning of concrete are added pozzolanic and chemical admixtures, it became more difficult to control the properties of concrete. The purpose of this study is to establish a computer-aided system for concrete mix design. First, actual data in reference or laboratory are collected to establish a real mix proportioning of concrete database. A supervised neural network (ANN) model is then employed to establish the prediction models of strength and slump of concretes. Following, based on ACI code, a practical database of mix proportioning of concrete is produced. For verifying the correction of generated data, the strength and slump of concrete are yielded via ANN prediction models. 12 different mix designs are also verified via cylinder test in laboratory. Finally, a classification system is utilized to categorize data into 360 clusters based on strength of concrete, pozzolanic admixtures replacement rate, and materials costs. Simulation results reveal that based on these grouped 360 clusters, the proposed concrete mix computer-aided design system can provide engineering acceptable solutions (mix design) as users acquiesced required strength of concrete, pozzolanic admixtures replacement rate, and materials costs.

**Keywords:** Neural networks, Prediction model, Mix proportioning of concrete, Classification, Database.

## 誌謝

轉眼間研究所二年的生活即將結束，回想起當初決定暫時離開工作崗位，重返學生生活的那一刻，感覺就好像是昨天剛發生的事一樣，如今我已經要畢業了，真是時光飛逝。在這條路上，首先，最要感謝的是我的指導教授洪士林老師，老師總在我研究出現瓶頸和迷惘時為我指點迷津，甚至一直到口試前還教導我在簡報製作和上台報告方面的技巧，令學生我獲益良多，在此先謝謝洪老師這二年來的指導和教誨。再來感謝黃炯憲老師、林昌佑老師和詹君治學長於課餘時間撥冗參加學生的口試，並給予許多寶貴的意見，使學生的論文能夠更為完整，在此也謝謝老師們的指導。

感謝詹君治學長這二年來，不論是在簡報製作、專業知識和口頭報告上給予的指導，使我們在個人本質學能上又更精進了許多。感謝穎泰學長、思伶學姐、孟軒學長、宣治學長、晟佑學長、俊佐學長、勇奇學長在課業和論文方面給予的協助和建議，使我在面臨困難之時，也不會覺得無助。

感謝研究所同窗好友子陽、銘澤、奇霖、義洋、耀緯、明廉、冠龍、湘銘、曉德、懿賢、立晨、俊閔、孟諺和伯熙在生活、課業、程式、實驗、論文方面給予的協助，大家一起討論、嘻笑、打鬧、玩樂在一起的日子和回憶，我想我這輩子都不會忘記。感謝學弟丁丁、智嵩、建文和允璿也在我需要幫忙時，即時伸出援手，研究室有你們的加入，增添了不少歡樂。有你們這群小老弟的相伴和互相扶持，即便碩士這條路再辛苦，也不會讓我感到孤單，謝謝你們。

感謝五專同窗好友俊村、宗國、政富、盛清、室賢總在我論文卡關、心情煩悶和需要幫忙時即時挺身而出，不論是在論文寫作、實驗幫忙、聽我抱怨和解悶，感謝你們總在重要的關鍵時刻拉我一把、排解疑惑和情義相挺，不論何時何地，只要我開口，你們總是說 yes，即便擔誤到你們的假期，你們也都相挺到底、毫無怨言，我想這就是認識了快 20 年的同窗

情誼吧，在此我想跟你們說聲謝謝，你們是我一生的摯友。

感謝英文小老師祺惠老是幫我翻譯看不懂的英文 paper，以及在英文文法和語句用法方面的指導，有時候還指導我到凌晨一~二點，害妳睡眠不足，對妳真的很不好意思，謝謝妳讓我的破英文又進步了。

感謝二技同學科呈、俊元，同梯的虹升，同事顥頌、士棋、致廷、國霖、文鋒、鈞宇、斐津、金輝、冠名、佩諭、子慶、勝仁哥、小花姐、阿峯姐、斐津、寶桂姐和滿滿姐三不五時的給我加油打氣和勉勵，謝謝你們。

感謝 99HS2 班的同學懷萱、龍哥、嘉麟、馨誼、建智、銘軒、文祥的關心和鼓勵，謝謝你們的噓寒問暖和帶我出遊放鬆心情，讓我在巨大的課業壓力下，能獲得短暫的疏緩，也讓我有繼續努力下去的動力，謝謝你們。

感謝台科大材料實驗室、交大材料實驗室以及趙文成老師研究室裡的學長和同學們於實驗方面提供的協助和支持，令本研究之實驗能順利進行並如期完成，在此謝謝你們的幫忙和配合。

感謝弟弟錦蔚、妹妹怡均、小表妹怡蓓、表弟柏維和文哲以及親友們的鼓勵和支持，在我心情不好的同時，還有你們陪我說話解悶，謝謝你們。

碩士班這條路上，一篇論文的完成要感謝的人真的很多，在此可能有遺漏或無法一一提及，但對於幫助過我的人，我在此致上最深的謝意，也感謝老天爺能讓我認識你們大家，沒有你們我想我可能走不到這裡，更不會有這本論文的誕生，我很想說有你們真好，謝謝你們。

最後，將本論文獻給從小到大養育、愛護和關懷我的父母，因為你們無私的奉獻、付出、栽培和支持，才使我能無後顧之憂專心致力於我的研究上，沒有你們就不會有今天的我，謝謝你們這 30 年來的養育之恩，這份恩情我將永懷於心，此生不忘。

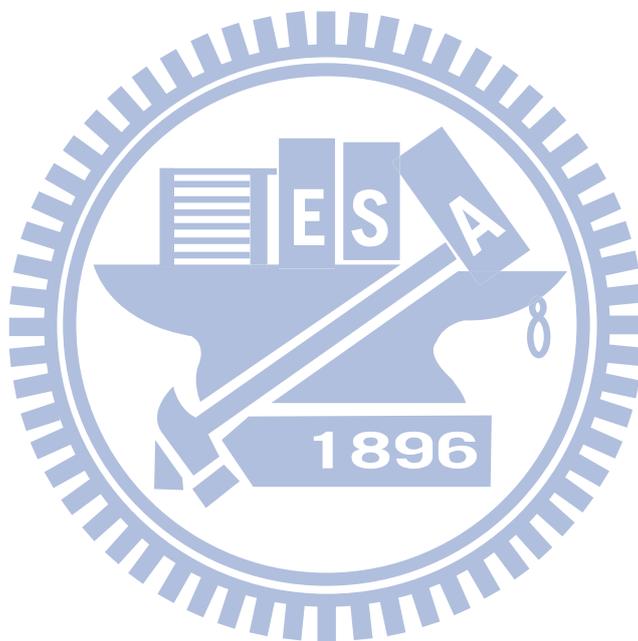
沈錦鴻 謹誌

中華民國 102 年 6 月于國立交通大學

# 目錄

摘要 .....	i
Abstract.....	ii
誌謝 .....	iii
目錄 .....	v
表目錄 .....	vii
圖目錄 .....	xii
一、緒論 .....	1
1-1 背景 .....	1
1-2 研究動機 .....	2
1-3 研究目的 .....	4
1-4 論文研究架構 .....	4
二、文獻回顧.....	5
2-1 混凝土抗壓強度之預測 .....	5
2-2 混凝土坍度之預測 .....	12
2-3 混凝土利用電腦程式作最佳配比設計 .....	14
三、研究方法.....	18
3-1 類神經網路 .....	18
3-2 類神經網路模型之建立 .....	24
3-3 混凝土配比之產生 .....	25
3-4 配比之分類 .....	26
3-5 試驗計畫 .....	30
3-6 系統架構 .....	34
四、結果分析與討論 .....	35
4-1 類神經網路強度模型之結果分析 .....	35
4-2 類神經網路坍度模型之分析 .....	35
4-3 預測模型參數敏感度之分析 .....	36

4-4 試驗結果分析 .....	39
4-5 配比分類結果 .....	40
五、結論與建議.....	42
5-1 結論 .....	42
5-2 建議 .....	43
參考文獻 .....	44
附錄 .....	52



# 表目錄

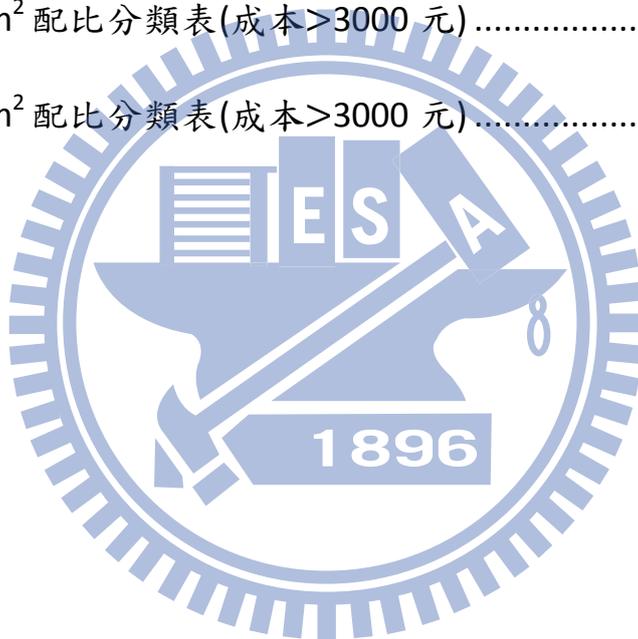
表 1 類神經網路模型統計值 .....	52
表 2 文獻配比資料.....	52
表 3 文獻配比資料出處 .....	67
表 4 類神經網路模式.....	68
表 5 混凝土暴露卻冰鹽下對卜作嵐材料之限制量(ACI 318-95).....	69
表 6 坍度與標稱最大粒徑所需單位用水量及含氣量 .....	69
表 7 單位體積混凝土中乾燥粗粒料所佔體積 .....	70
表 8 無試拌或試驗資料之最大容許水膠比.....	70
表 9 特殊暴露環境下最大水膠比及最低抗壓強度限制 .....	71
表 10 各種構件混凝土施工之坍度建議值.....	71
表 11 混凝土抵抗凍融環境之總含氣量規定 .....	72
表 12 混凝土暴露於含硫酸鹽溶液環境之限制 .....	72
表 13 材料上下限範圍 .....	73
表 14 卜作嵐取代率分類表 .....	73
表 15 單價表 .....	73
表 16 成本分類表.....	73
表 17 水泥物理性質及化學成份 .....	74
表 18 飛灰之物理性質及化學成份 .....	75

表 19 爐石粉之物理性質及化學成份.....	75
表 20 粗、細骨材基本性質 .....	76
表 21 強塑劑之基本性質 .....	76
表 22 混凝土配比(kg/m <sup>3</sup> ).....	76
表 23 強度模型測試結果表 .....	77
表 24 坍度模型測試結果表 .....	78
表 25 強度參數敏感度分析表.....	78
表 26 坍度參數敏感度分析表 .....	78
表 27 配比試驗結果表.....	79
表 28 坍度範圍表.....	79
表 29 強度範圍表.....	79
表 30 210kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元).....	80
表 31 280kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元).....	80
表 32 350kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元).....	81
表 33 420kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元).....	81
表 34 490kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元).....	83
表 35 560kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元).....	84
表 36 630kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元).....	84
表 37 700kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元).....	85

表 38	770kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元)	85
表 39	840kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元)	86
表 40	210kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)	86
表 41	280kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)	86
表 42	350kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)	87
表 43	420kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)	87
表 44	490kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)	88
表 45	560kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)	89
表 46	630kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)	90
表 47	700kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)	90
表 48	770kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)	91
表 49	840kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)	91
表 50	210kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)	92
表 51	280kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)	92
表 52	350kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)	92
表 53	420kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)	93
表 54	490kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)	93
表 55	560kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)	94
表 56	630kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)	95

表 57	700kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)	96
表 58	770kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)	96
表 59	840kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)	97
表 60	210kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)	97
表 61	280kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)	97
表 62	350kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)	98
表 63	420kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)	98
表 64	490kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)	99
表 65	560kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)	99
表 66	630kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)	100
表 67	700kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)	100
表 68	770kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)	101
表 69	840kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)	102
表 70	910kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)	102
表 71	490kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元)	103
表 72	560kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元)	103
表 73	630kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元)	103
表 74	700kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元)	104
表 75	770kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元)	104

表 76	840kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元).....	104
表 77	910kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元).....	105
表 78	980kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元).....	106
表 79	700kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本>3000 元).....	106
表 80	770kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本>3000 元).....	106
表 81	840kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本>3000 元).....	107
表 82	910kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本>3000 元).....	107
表 83	980kgf/cm <sup>2</sup> 配比分類表(成本>3000 元).....	108



## 圖目錄

圖 1 研究流程圖.....	109
圖 2 強度模型預測與實際值比較圖.....	110
圖 3 坍度模型預測與實際值比較圖.....	110
圖 4 真實系統和類神經網路之比較圖.....	111
圖 5 監督式學習演算法流程.....	111
圖 6 非監督式演算法流程.....	111
圖 7 倒傳遞類神經網路架構圖.....	112
圖 8 常用之活化函數型態圖.....	113
圖 9 倒傳遞演算法流程圖.....	114
圖 10 類神經網路模型建立流程.....	115
圖 11 Convex hull 凸多邊形.....	116
圖 12 普通卜作蘭混凝土配比設計流程.....	117
圖 13 配比產生流程圖.....	118
圖 14 二維平面歐式距離計算示意圖.....	119
圖 15 爐石之分類.....	119
圖 16 試驗流程圖.....	120
圖 17 強制式拌合機.....	121
圖 18 坍度模及搗棒.....	121

圖 19 試體模具.....	122
圖 20 試體養護槽.....	122
圖 21 200 噸抗壓試驗機.....	123
圖 22 新拌混凝土坍度施作.....	123
圖 23 試體澆灌搗實施作.....	124
圖 24 試體養護施作.....	124
圖 25 試體蓋平施作.....	125
圖 26 試體蓋平完成.....	125
圖 27 混凝土抗壓試驗施作.....	126
圖 28 系統架構圖.....	127
圖 29 類神經網路強度模型基本設定圖.....	128
圖 30 強度模型網路最佳驗證效能圖.....	128
圖 31 強度模型網路訓練成果圖.....	129
圖 32 強度模型測試結果圖.....	129
圖 33 類神經網路坍度模型基本設定圖.....	130
圖 34 坍度模型網路最佳驗證效能圖.....	130
圖 35 坍度模型網路訓練成果圖.....	131
圖 36 坍度模型測試結果圖.....	131
圖 37 水-強度分析圖.....	132

圖 38 水-強度敏感度分析圖 .....	132
圖 39 水泥-強度分析圖 .....	133
圖 40 水泥-強度敏感度分析 .....	133
圖 41 SP-強度分析圖 .....	134
圖 42 SP-強度敏感度分析圖 .....	134
圖 43 SP-坍度分析圖 .....	135
圖 44 SP-敏感度分析圖 .....	135
圖 45 預測值-實際值強度圖 .....	136
圖 46 實際-預測坍度圖 .....	136
圖 47 分類流程圖 .....	137



# 一、緒論

## 1-1 背景

混凝土是土木營建工程最被廣為運用的材料，目前混凝土配比設計品質一般是參照中國國家標準 CNS 規範來控制。隨著建築物越蓋越高的情況下，這使得傳統普通水泥混凝土已不符需求，為求在工程品質及成本均能兼顧的考量下，許多專家學者或學術研究單位開始致力於研究發展具有較高工作性、耐久性、安全性及經濟性之新型混凝土。

現代混凝土之組成成份裡，除了水、水泥、粗骨材、細骨材外，還另外添加了如飛灰、爐石粉……等卜作嵐礦物摻料用來取代部分水泥用量或填塞骨材間的間隙。這除了可減少水泥用量，使混凝土較為經濟外，尚可降低水化熱、增加水密性、晚期強度及耐久性。而添加了如緩凝劑、強塑劑(即高效能減水劑)……等化學摻料則是用來增加混凝土的工作性、減少混凝土用水量。這使得混凝土在低水膠比下，仍保有高的工作性，除降低發生泌水或析離等現象的機率，還可藉由自身的高流動性容易填充至狹窄的鋼筋與模板間隙中，避免產生蜂窩或冷縫等混凝土澆置缺失，有助於結構物品質強度的提升〔2〕。

混凝土是一種不確定性很高的材料，即便使用想同的配比設計，若材料來源改變或生產過程溫濕度的改變，都可能造成混凝土強度與工作性之變化。又其品質及特性之表現主要取決於其配比設計；再加上配比須依澆置構造物之複雜度、施工人員本身技術和環境不同等因素來作考量及設計〔2〕，另配比之好壞將直接影響現場施工品質之良窳及成本之控制，故配比設計於建物結構體工程品質、強度、耐久性及成本考量上，佔有著極為重要的地位。

## 1-2 研究動機

在早期一般傳統的配比設計方面，主要以純水泥混凝土為主，其在品質強度方面係以水灰比(W/C)來控制，水灰比(W/C)越低，亦即用水量越少、水泥量越多，則混凝土強度就越高。

但殊不知在要求低水灰比、高強度設計的同時，因水泥用量之增加，從而造成混凝土成本的提高，既不經濟、且不環保，更不符合現代提倡綠建築、生態工法及永續經營的理念，另用水量的減少，亦導致混凝土工作性變差、澆置不易、施工現場加水等導致混凝土泌水或析離等影響施工品質之缺點產生，這使得傳統混凝土在設計的同時，無法兼顧施工時之強度與工作性，故要如何使混凝土能於適當之環境或場所發揮其最大之性能及經濟效益，則成為了工程師需要思索及探討的課題。

在為了使混凝土之強度、工作性、耐久性和經濟性等皆可兼顧的需求下，而有了卜作嵐礦物摻料和化學摻料的加入。但由於添加了礦物摻料及化學摻料後，將使得其配比設計較一般傳統混凝土要來得困難，因任一種摻料加入的多寡，皆有可能使得混凝土不論在工作性、強度或其它性能方面產生極大的變異性。配比設計一般都是先由傳統配比設計法配合工程師的經驗和反覆的試拌後，視混凝土拌合後之情況，再作配比上適當之調整，並經由統計分析後，才可獲得合理之配比，以達到最初所預期之效果。

在台灣地區，每一種混凝土經配比設計、拌合完成後，該試體皆需依照中國國家標準 CNS1232 澆置並養護混凝土圓柱試體，並以 28 天混凝土齡期試驗來測試其抗壓強度，而所設計之混凝土配比並不一定一次就能成功達到所需之目標需求，再加上整個過程中最耗費的就是時間的等待，若試驗所得之結果不如預期，則不僅費時，亦浪費掉許多寶貴的資源〔3〕。為使混凝土能滿足、配合和適應當今各種環境之現況，故如何將混凝土配比作一完整且準確之設計，應為現前最主要之考量。

有鑑於上述各種原因，在為求節省人力、時間和資源成本且希望以較科學，而非以個人經驗判斷之方式來設計配比的情況下，開始有專家學者利用各種方法或工具來建立混凝土預測模型，從早期以水灰比來預測試體強度及利用統計學原理建立經驗公式，到後來運用電腦之運算能力並搭配不同之演算法所建立出的預測模型，皆是為了使混凝土配比設計之品質及其預測結果能夠更加準確。

過去也曾有利用電腦搭配其它方法來隨機產生混凝土配比之研究，如呂夙修〔3〕於2010以convex hull之方法來界定配比之有效區域，並利用電腦程式在有效區域範圍內產生各種配比，再以預測模型來預測配比之強度和坍度。但此方法所得之配比並不一定能符合規範之規定(如：卜作嵐摻料取代率限制…等)，而工程師亦可能無法以經驗或直覺來判斷該配比是否合理，再加上其產生配比之方法較為耗時，倘若產生之配比不滿足設計需求，則需重複上述動作，直到有合用之配比出現為止。這樣的方式可能會有以下二種缺點的發生，第一，整個過程中所獲得之配比並不一定皆符合設計規範的規定，第二，工程師可能要經過多次數或長時間的嘗試後才能獲得合理之配比，此二點缺點可能會導致花費了很多的人力、時間或資源後，仍無法獲得我們所需之配比。

因此，我們若能建立一套準確預估混凝土配比設計的機制與方法，並提早預知混凝土配比之試驗結果，則不僅對成本控管、提供合適之配比及品質提升等方面有所幫助外，亦可使大大節省人力、時間的浪費和地球資源的損耗。

### 1-3 研究目的

本研究目的係希望先由國內外文獻中蒐集相關之混凝土配比，而後經由類神經網路訓練學習並建立模型，並利用電腦程式配合混凝土 ACI 設計規範(如：水膠比、各材料之上下限值、摻料取代率之限制……等)和流程來分析並建立一準確性高且可用之混凝土配比資料庫，另再加上現場實驗輔以佐證，藉此除可增加並補充原始配比資料庫中不足之數據外，亦可提供更多種配比組合資料供使用者參考，並可依其工區或現場施工之環境條件選擇合適之配比來使用。

### 1-4 論文研究架構

本研究論文架構大致上共分為五個章節，其章節名稱及內容概要介紹，如下所述，而研究流程則如圖 1 所示。

第一章為緒論，本章將說明本研究之背景、動機、目的及研究架構。

第二章為文獻回顧，本章將針對國內外人士已完成之相關研究作一簡要之回顧、概述和介紹。

第三章為研究方法，本章主要將本研究所使用之系統工具、方法及其原理和架構作一介紹和概述。

第四章為研究結果分析，本章為將研究中所獲得之結果作進一步之分析和探討。

第五章為結論與建議，本章主要為對本研究所得之結果作一總結，並對本研究中尚不足之部分或未來可繼續研究之方向提出相關之建議。

## 二、文獻回顧

本章將針對近幾年來與本研究有關之國內外文獻作一簡單的回顧、敘述和介紹，其中包含混凝土抗壓強度與坍度之預測，以及如何利用電腦程式軟體來輔助混凝土作配比設計之發展史〔3〕。

### 2-1 混凝土抗壓強度之預測

混凝土之抗壓強度與用水量、水泥用量、膠結量、水灰比、水膠比、骨材粒徑級配和摻料取代量有著密不可分的關係。設計者往往需藉由上述條件，依指定規範來設計配比，並以設計強度作為依據，初步評估混凝土強度是否可達目標需求，而在經由多次設計和實驗過程中，即有某些專家學者便利用相關數據作迴歸分析，進而推導出與抗壓強度有關之預測式。

#### 2-1-1 利用水灰比原理預測抗壓強度

Abrams〔6〕於1918年從大量實驗數據中，發現了混凝土行為與用水量、骨材粒徑級配大小及水泥使用比例有著密切的關係，並發現用水量與混凝土強度趨勢呈反比，而水泥用量則與混凝土強度趨勢呈正比現象，作者以水灰比為依據，並利用數值分析迴歸出需要的參數來推導以下之經驗公式，並用以預測混凝土之抗壓強度，公式如下：

$$S = \frac{A}{B^x} = \frac{14000}{8.2^x} \quad (1)$$

(1)式中，S為28天之抗壓強度； $x$ 為水灰比(即W/C)；A和B則為因應水泥種類、空氣含量、齡期、養護條件、強度及隨其它影響條件而改變之實驗參數。

Feret〔7〕於1984年認為中等強度之混凝土，其強度主要係由混凝土本身水泥漿體之性質特性來控制，因而提出下式來預估強度：

$$f'c = k \left( \frac{C}{c + w + a} \right)^2 \quad (2)$$

(2)式中， $f'c$ 為混凝土抗壓強度(MPa)； $k$ 為係數； $C$ 為水泥重( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )； $c$ 、 $w$ 和 $a$ 則分別為水泥、水、空氣之絕對體積( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )。

在水灰比方面，前人已針對混凝土強度與水灰比(或灰水比)二者間之關係，提出了許多預測式，以下即列出一般常用之預測式〔8〕：

1. ACI Code 建議關係式：

$$f'c = -60 + 176 \times \frac{c}{w} \quad (3)$$

(3)式中， $f'c$ 為混凝土 28 天抗壓強度( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )， $c$ 為水泥重， $w$ 為水重， $\frac{c}{w}$ 則為灰水比( $\frac{c}{w} < 1.6$ )。

2. 日本土木學會建議關係式：

$$f'c = 215 \times \frac{c}{w} - 210 \quad (4)$$

3. 美國墾務局建議關係式：

$$f'c = 200 \times \frac{c}{w} - 100 \quad (5)$$

(5)式中， $\frac{c}{w}$ 之範圍介於 0.5~0.7 之間

4. Popovics(1990)建議關係式〔9〕：

$$\log f'c = 4.43 - 0.972 \times \frac{w}{c} - 0.00111 \times w \text{ (psi)} \quad (6)$$

(6)式中， $w$ 為用水量；單位為( $\frac{\text{lb}}{\text{yd}^3}$ )或( $0.593 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )

除上述由水灰比或灰水比推導出之強度預測式外，另尚有一些專家學者及相關文獻利用其它與混凝土強度有關之相關參數提出了不同的強度預測式，其關係式如下所示：

1. 若 ACI 配比不考慮卜作嵐材料及含氣量時，則可以下式來預測混凝土抗壓強度〔10〕：

$$f'_c = \frac{K_g S_c}{\left[1 + 3.1 \left(\frac{W}{C}\right)\right]^2} \quad (7)$$

(7)式中， $K_g=3.5$ (骨材河川係數)， $S_c=750.6\text{kg/cm}^2$ (水泥強度因數)，而 $\frac{W}{C}$ 為水灰比。

2. 上式若考量水泥強度因素、骨材形狀及堆積因素、卜作嵐材料因素拌合及含氣量因素等，建立本土化 HPC 強度預測及評估公式，參考 Larrad [11] 於 1987 年所提出之公式，重新修正實驗，獲得下列 HPC 材料配比參數及強度推估公式：

$$f'_c = \frac{K_g R_c}{\left[1 + 3.1 \frac{W + A}{C(1 + K_1 + K_2) + sl}\right]^2} \quad (8)$$

$$K_1 = 0.4 \frac{fa}{C} + 3 \frac{sf}{C} \quad (9)$$

$$K_2 = 0.2 \frac{lf}{C} \quad (10)$$

上列(8)式、(9)式及(10)式為 1987 年 Larrad 所提出之經驗公式，式中， $W$ 為用水量， $A$ 為含氣量之當量水量， $C$ 為水泥量， $sl$ 為爐石量， $K_1 \leq 0.05$ ；該值卜作嵐係數， $fa$ 為飛灰量， $sf$ 為矽灰量， $K_2 \leq 0.07$ ；該值為填充料係數， $lf$ 為石粉量。

而經改良後所得之修正式如下所示：

$$f'_c = \frac{K_a S_c}{\left[1 + 3.1 \frac{W + A}{C + 0.4fa + sl}\right]^2} \quad (11)$$

(11)式中， $K_a$ 為骨材係數； $S_c$ 為水泥強度因數； $W$ 為用水量； $A$ 為含氣量(等值水之體積)； $C$ 為水泥量； $fa$ 為飛灰量； $sl$ 為爐石量。

潘坤勝 [12] 認為 Abrams 強度預測式之所以未臻完善的原因是由於該式並未考慮如：水化程度、毛細孔隙等影響混凝土強度之重要因素，而使得該式強度預測方面之準確性，仍尚有改善及加強之空間，故其於 2004

年時，利用試驗資料分別建立了水化程度與水灰比以及水化程度與毛細孔隙間之關係式，並利用水灰比及毛細孔隙兩個參數來建立二者與混凝土強度間之共同關係式，而後再以此模式驗證其它配比資料，建立以水灰比及孔隙推導而得之普通水泥混凝土強度預測式，該式如下所示：

$$f'c = \frac{A}{Bw/c} + \frac{C}{D^{Pc}} \quad (12)$$

(12)式中，為混凝土抗壓強度； $A$ 、 $B$ 、 $C$ 和 $D$ 均為常數； $w/c$ 為水灰比； $Pc$ 為MIP試驗之毛細孔量(cc/g)，其中 $Pc$ 之求法如下所示：

$$Pc = -0.25458 \ln(\alpha) + \frac{0.333849}{0.30749w/c} - 0.6213 \quad (13)$$

(13)式中， $\alpha$ 為水化程度； $w/c$ 為水灰比。

另在研究中提到除改善原本普通水泥混凝土之預測式外，亦針對了添加波索蘭材料之混凝土推導出相關之預測式，該式主要以混凝土之材齡和強度發展趨勢及波索蘭材料取代率作為推導依據，其預測式如下所示：

$$fc = a + b \times \log(\text{材齡}) + c \times \text{材齡} + d \times \text{材齡}^2 + e \times \text{波索蘭取代率} \quad (14)$$

(14)式中， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 均為迴歸係數

最後結果顯示，該式於任何齡期上，其抗壓強度與齡期之 $R^2$ 值始終維持在0.95~0.99，此表示二者間有著相當高之關聯性，亦即該式能夠有效並準確地預測波索蘭混凝土之抗壓強度。

## 2-1-2 利用類神經網路預測抗壓強度

賴鴻成〔13〕於1993年利用類神經網路來預測混凝土之強度行為，其類神經網路之輸入層係以兩種不同之參數模式來建立，第一種模式之輸入參數為水灰比、水、水泥、細骨材、粗骨材和試體齡期等六個參數，而第二種模式除了包含上述參數外，還增加了骨材最大粒徑作為輸入參數，而在隱藏層部分皆設定為一層，隱藏層神經元之數量係以輸入層參數數量

之二倍加上一(即輸入層參數數量 $\times 2 + 1$ )，而輸出層參數則為混凝土抗壓強度，研究中類神經網路之學習訓練方式係以改變輸入結點數目和變化學習速率  $\eta$  二種方式作為控制因素，最終結果顯示，整體預測之均方誤差為 4.14% 相較於台泥公司的 30.39% 和日本土木協會的 47.30% 為低，故類神經網路對於混凝土抗壓強度方面之預測精度是良好且可靠的。

陳堉照〔14〕於 2000 年利用非監督式模糊類神經網路 (Unsupervised Fuzzy Neural Network Reasoning Model, UFN) 來建立混凝土抗壓強度預測模型，其原理係先將過往解決過的相似案例全部集結為一「案例資料庫」，再將新進之案例拿來和原有資料庫中之案例作相似度的比對，進而從中找出相像或相關之案例，最後將這些相似案例的答案組合成新案例之解答。研究中將非監督式模糊類神經網路 (UFN) 用來和監督式類神經網路中的 BFGS 演算法以及傳統經驗公式預測法分別針對一般傳統混凝土和高性能混凝土所建立之模型進行比較，並評估預測模型之效益，由實際分析結果中顯示，UFN 推理模式用於一般傳統混凝土和高性能混凝土之強度預測模式，其有著低於相對系統誤差 5% 以下之良好精度，此一結果亦證明了非監督式模糊類神經網路 (UFN) 對於處理關於資料複雜、龐大以及高度非線性之混凝土強度預測問題同樣具有著相當好之解決能力。

Ahmet Öztas et al.〔15〕前於 2006 年提出高強度混凝土係為一無法以一般組成成份、拌合、放置和養護方式即可達到滿足特殊性能及均勻性要求之混凝土，且其為一高度複雜之材料，故要建立預測其行為之模型是一件不容易的事。研究中將利用類神經網路的適用性來預測高性能混凝土之行為，並從文獻上收集了 187 組高強度混凝土之配比供類神經網路訓練學習和測試之用，研究中之類神經網路以水膠比、用水量、細骨材比例、飛灰用量、輸氣劑量、強塑劑量及砂灰取代量等七種變數作為輸入參數，

隱藏層設為二層；第一層有五個節點；第二層則有三個節點，輸出參數為抗壓強度及坍度，學習演算法則是使用調整共軛梯度法(scaled conjugate gradients algorithm)，最後結果如圖 2、圖 3 及表 1 所示，其強度模型之  $R^2$  值為 99.93%、坍度模型之  $R^2$  值為 99.34%，由此可見，類神經網路於預測高強度混凝土之抗壓強度及坍度是一個可行且極具潛力的工具。

Cahit et al. [16] 於 2009 年利用三種不同之水灰比(W/C 等於 0.3、0.4、0.5)，三種不同之水泥用量(300、400、450kg/m<sup>3</sup>)，以及四種不同之爐石取代率(20%、40%、60%、80%)，一共製作了 225 個混凝土試體，並測試其齡期為 3、7、28、90 及 360 之抗壓強度，將所測得之試驗數據交由類神經網路作訓練、測試及建模，其以水泥、爐石、水、高效能減水劑、骨材和試體齡期等六個輸入參數及抗壓強度一個輸出參數來建立模型，另研究結果顯示出 Levenberg - Marquardt (LM) 為該研究之最佳演算法，而其實際強度和預測強度所得之  $R^2$  值介於 0.92 至 0.96 之間，此一結果表示類神經網路於預測爐石混凝土之抗壓強度上已有相當高之準確性。

Marek [17] 於 2010 提出了三種方法來建立類神經網路預測混凝土強度模型，這三種方法分別為驗證集法(validation set)，最大邊界似然法(maximum marginal likelihood)和貝葉斯法(full Bayesian approach)，藉由比較這三種方法之優缺點及差異性來選擇最佳模型，研究中提到以貝葉斯法(full Bayesian approach)搭配蒙地卡羅(Monte Carlo)隨機抽樣法所得之預測模型是最好的，其原理係基於貝葉斯推理而得，在此法中所有參數皆被視為隨機變量，其預測原理是集合所有空間上之參數和超參數，並使用其近似技術來解析較為複雜之問題，貝葉斯方程式推導如下所示：

$$p(w|t, \alpha, \beta) = \frac{p(t|w, \beta)p(w|\alpha)}{p(t|\alpha, \beta)} \quad (15)$$

$$p(t|w, \beta) = \prod_{n=1}^N p(t_n|w, \beta) = \prod_{n=1}^N (2\pi\sigma^2)^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{\{t_n - y(x_n; w)\}^2}{2\sigma^2}\right] \quad (16)$$

$$p(t|\alpha, \beta) = \int p(t|w, \beta)p(w|\alpha)dw \quad (17)$$

$$p(t_{N+1}|x_{N+1}, t, \alpha, \beta) = \int p(t_{N+1}|x_{N+1}, w, \beta)p(w|t, \alpha, \beta)dw \quad (18)$$

$$p(w, \alpha, \beta|t) = \frac{p(t|w, \beta)p(w|\alpha)p(\alpha)p(\beta)}{p(t)} \quad (19)$$

$$p(t_{N+1}|x_{N+1}, t) = \int p(t_{N+1}|x_{N+1}, w, \beta)p(w, \alpha, \beta|t)dwd\alpha d\beta \quad (20)$$

(15)式中之 $p(w|\alpha)$ 為先驗分佈之過量權重， $\beta = \frac{1}{\sigma^2}$ 。

(16)式和(17)式中之 $p(t|w, \beta)$ 為近似然函數，其係由式(16)推導而得。

(17)式中的 $p(t|\alpha, \beta)$ 為正規化因子，其可表示為超參數。

(18)式中， $\alpha$ 和 $\beta$ 皆假設為已知之超參數。

(20)式為貝葉斯預測方程式最終之推導結果。

而研究中亦於過程中配合實驗加以佐證，最後結果顯示，相較於驗證集法(validation set)及最大邊界似然法(maximum marginal likelihood)，貝葉斯法(full Bayesian approach)應用於類神經網路作學習和預測混凝土之抗壓強度是可在不需要手動選擇最終模型架構和超參數之情況下，即可獲得最精確之預測值。

Mucteba et al. [18] 於 2011 年利用了一種一般混凝土和六種 SCC 混凝土共七種配比設計製作了七組試體牆，其於每組試體牆上取 24 個點來做吸水率、單位重和試體鑽心試抗壓試驗，並以每組配比之水泥、飛灰、石灰粉、大理石粉、砂、粗骨材 I、粗骨材 II、高效能減水劑、吸水率及單位重等十個參數作為類神經網路之輸入參數，隱藏層數量設定為兩層，其節點數分別為十四個和十個，而輸出參數則為抗壓強度，再以倒傳遞類神經網路(Back-Propagation-Networks)搭配(Fletcher - Powell

conjugate gradient)共軛梯度法和(Levenberg - Marquardt)二種演算法來預測鑽心試體抗壓強度，於研究結果顯示，由(Fletcher - Powell conjugate gradient)共軛梯度法所得之預測結果較好，也證明了類神經網路可用來準確預測 SCC 混凝土鑽心試體之抗壓強度。

## 2-2 混凝土坍度之預測

在混凝土壓送、拌合或澆置的過程中，工作性佔有著極為重要的地位，工地現場常為提高工作度而發生任意加水之現象，此舉除會提高混凝土之水灰比且降低混凝土本身強度外，尚有可能使混凝土產生析離或造成表面泌水等不良之現象，故工作性之好壞除了直接影響混凝土施工之難易度外，還進而控制施工品質之良窳，且會間接影響混凝土相關成本之支出及硬固後是否產生蜂窩、冷縫等澆置不良的情況發生，而在配比中控制工作性之主要因子即為用水量、減水劑或強塑劑等化學摻料，又現今混凝土配比中皆含有各式各樣的摻料，使得工作性變化更為多樣，傳統之迴歸分析已無法準確地分析、評估、預測並建構新拌混凝土工作性之模型，故已有許多專家學者開始利用各種方法來預估混凝土之工作性，期望能使混凝土品質達到一定的水準，下面就以最近國內外的文獻作一簡單之回顧和介紹。

柯泰至〔19〕於2001年認為若採以拌合實驗(mixture experiments)之理念來作為混凝土工作度模型實驗之設計方法，並在實驗設計階段選擇以單體形心設計作為實驗因子之控制方法來設計和進行相關實驗時，可較有效率地來建構高性能混凝土之工作度模型。研究中於實驗階段係經由限制各材料成份及比例上下限，以作為實驗施作之合理範圍，實驗雖經上述各過程作合理化之篩選，但仍有多組配比因用水量或強塑劑(SP)用量調配不當；亦或材料比例限制偏異，造成其初始結果所得之工作度不如預期，且有較為偏低之現象，故其將原始設計中之用水量及強塑劑用量作適度的

調整，才改善上述工作度不良之情況。而後其分別以一階、二階迴歸分析及類神經網路三種方法建立工作度模型並分析比較三種方法之優劣，而我們從分析結果中發現水及強塑劑(SP)的用量對於工作性有著很大的影響，這顯示三者間之相互關係是密不可分的，同時亦發現了強塑劑(SP)和工作度間的關係是非線性的。最後經由驗證結果顯示，三種方法就整體評估而言，類神經網路仍為建構工作性模型之最佳工具。

葉怡成〔20〕於2005年以導入篩選問題之實驗方法，來獲得精確的實驗數據，並利用類神經網路建構更精準的工作性模型。其研究過程主要分為五個階段，首先，第一階段是利用單體形心設計之實驗方法取得實驗數據，在實驗設計之過程中，故依規範和經驗公式對材料用量之上下限及各成份間之比例作一定的限制，此為使混凝土設計配比更加合理且可行。第二階段：將初始實驗之數據結果利用類神經網路來建構模型，其輸入變數為水、水泥、爐石、粗骨材、細骨材、飛灰、爐石及強塑劑等7項參數，輸出變數則為坍流度。第三階段：以建構好之坍流度模型對原本設計之實驗配比進行坍流度之預測，將誤差偏差較大之數據篩選出來，並針對該筆數據重覆進行實驗，除確保實驗數據無誤外，亦可使實驗數據更為可靠。第四階段：以修正後之實驗數據再利用類神經網路建構新的模型。第五階段：評估初始及修正數據二模型間之差異及影響，經比較過後，修正過後之模型不論是在判定係數或均方根誤差方面皆較初始模型要來得好，由此可見，研究中所提出之方法確實對提升模型之準確性有著極高的助益。另研究中亦用相同之實驗數據比較類神經網路和二階迴歸分析二種方法何者所建立之預測模型較佳，結果顯示，類神經網路遠比二階迴歸分析所建立之模型來得精確。

### 2-3 混凝土利用電腦程式作最佳配比設計

當電腦可準確地建立混凝土預測模型時，便有專家學者開始想利用電腦程式來設計配比，一來是希望藉由電腦高運算之效能來減少設計過程中之錯誤，二來則希望能夠由電腦直接得知配比之設計資料(即強度或工作性)，以便評估該配比是否適用於當地現場之環境狀況，藉此除可減少混凝土試拌的次數，還能避免材料的浪費和 28 天試體養護之等待期，以下則就國內外一些相關的文獻作一簡單之回顧和簡介。

陳怡成〔21〕於 2001 年以材料成本和配比須同時滿足強度限制、工作度限制、各成份上下限限制、各成份間比例限制、絕對體積限制等五個條件，以作為高性能混凝土最佳化設計之目標。因強度與工作度二者為研究成敗之關鍵，又兩者雖是材料成份之函數，但此函數確是個未知數，而類神經網路又是解決非線性問題之最佳利器，因此研究過程中，利用類神經網路來建立強度及工作度模型，以增加模型之準確性，最後搭配以類神經網路為基礎之品質設計軟體 CAFÉ(Computer-Aided Formula Engineering)作為設計系統，以配合不同設計需求，用來產生不同之混凝土配比，最後經實驗驗證結果顯示，CAFÉ 軟體雖於強度和工作度預測方面，多呈低估傾向居多，且有些許工作度需求較高之配比經實驗後，會有泌水及析離之現象發生，此一現象可依現場狀況，調整用水量或強塑劑(SP)用量，即可改善之。但就整體而言，各實驗誤差之均方根尚在合理範圍內，且配比本身與混凝土設計規範及過往經驗法則相符合，故證明利用本軟體來作高性能混凝土最佳化配比設計，仍為一可用途徑。

Tao Ji et al.〔22〕於 2006 年提出傳統之混凝土配比設計法皆由膠結料之漿體量來推算粗細骨材之用量，作者認為使用傳統設計法將導致混凝土成分中之水和水泥用量過多；粗細骨材粒料用量減少，而所設計出來之混凝土既不經濟、耐久性也較為不足，其亦提出傳統混凝土設計法本身

即建立於過往之經驗公式及表格上，又因每一材料本身即存在著不確定因子，使得每項經傳統設計法所設計出之配比皆要經過大量之試誤過程，方可使用，此舉將造成很多人力、資源和時間上之浪費。故作者於研究中將提出由骨材體積量及最小膠結漿體量之觀念來作混凝土配比設計，其所使用主要參數有標稱水灰比、當量水灰比、平均漿體厚度、飛灰膠體比及細骨材體積比等五個參數，再配合類神經網路及 Modified Tourfar's 模型來作配比設計。在強度模型之建立方面，其係以細骨材體積比、平均漿體厚度、飛灰-膠體比及當量水灰比作為輸入參數；而輸出參數則為強度，另坍度模型之輸入參數則為細骨材體積比、平均漿體厚度、飛灰-膠體比、標稱水灰比；輸出參數則為坍度，其中，強度模型及坍度模型可用於反推算當量水灰比及平均漿體厚度，其反推算之過程，僅需將強度和坍度值設定為模型之輸入參數，而欲求解設為輸出參數即可，本法之主要流程第一步為需先假設標稱水灰比及細骨材體積比；第二步為計算平均漿體厚度、細骨材體積比及混凝土配比總漿體體積所對應之骨材單位體積( $V_D$ )，若所計算出之細骨材體積比和原本假設的值相等，則第三步繼續計算當量水灰比及標稱水灰比；若否則重回第一步，最後所計算出之標稱水灰比要和當初假設之量相同，則該水灰比即為所求，而作者認為利用此法所設計出之混凝土配比較比它法來得經濟且耐久性較高。

Bang Yeon Lee et. al. [23] 於 2009 年時認為類神經網路對於有限資料庫區域面積外之預測模型，其所產生錯誤預測結果之機率較大，倘若要解決此問題，除非以類神經網路之所有輸入變數之範圍來作為此資料庫所涵蓋的區域，但因混凝土本身之輸入變數居多，且要建立此一資料庫是件非常費時、且成本昂貴的一件事，故作者提出了以數學方法中之 convex hull 演算法來界定資料庫之有效區域範圍，藉此除可縮小搜尋範圍外，尚可確保資料庫中所留下之數據具有一定的精度和準確性，並於研究中結

合了基因演算法，使其在分類過程中，亦能創造出新的解決方案，如此一來，便可防止解答落入局部最佳解，而能更精準的評估及預測有效區域內材料之最佳配比設計。

呂夙修〔3〕前於2010年利用凸殼演算法(Convex hull)來定義各材料之有效區域及範圍，其原理係將所有資料點散佈在X-Y二維座標中，首先將各散佈於最外圍之資料點連接成一個凸多邊形，並定義在此凸多邊形內之資料點稱為有效資料，而落於凸多邊形外之資料點，則視為無效資料，而後再將電腦程式隨機產生之配比資料以此方法交由凸殼演算法(Convex hull)之凸多邊形來判定該資料是否為有效資料，以確立配比資料之有效性。待有效資料確定後，接著將配比資料交由已建立好之類神經網路強度及坍度預測模型來預測該配比之強度及坍度，為了因應使用者須在不同環境條件下有著不同的需求，研究中再利用K-Means演算法來分析、分類混凝土配比資料庫中之有效配比，其以強度分別為25MPa、32.5MPa、40MPa、47.5MPa、55MPa，坍度則均為25公分，共分成五類作為設計目標值，當資料庫中有符合前述五大類之相關配比，K-Means演算法便會將其選擇出來並放入有效資料庫內，以供使用者作選擇及使用。

Mohammad〔24〕於2012年提出了以類神經網路作高性能混凝土最佳配比設計，其是針對需求強度、需求坍度、需要之流變性能(材料之降伏應力和塑性黏度)、各材料重量範圍、成份比例、絕對體積等以上參數作一定之限制，並於實驗中發現飛灰、爐石粉及矽灰等三種卜作嵐摻料之取代量對於材料之降伏應力、塑性黏度和抗壓強度有一定之影響，研究中還發現到在固定水膠比之情況下，以矽灰取代部分水泥會降低混凝土之工作性，但可於混凝土中摻入飛灰來彌補不足之工作性。於強度方面，除了發現當矽灰取代量為7%至12%有著較佳之強度外，也從飛灰、爐石粉和矽灰間之相互關係中找出了可作為合理抗壓強度預測之條件，最後以類神經網

路預測材料本身之降伏應力及塑性黏度，並將所得之預測值和實際值繪製成圖，結果顯示，二者有著很好的關聯性，此表示類神經網路已可提供一些適當的指示來選擇混凝土材料之配比，以減少試驗配比之失敗及材料的浪費。

Joo-Ha Lee et. al. [25] 於 2012 年提出了以和諧搜尋演算法 (Harmony search algorithm) 來作為高性能混凝土配比設計之工具，和諧搜尋演算法的設計概念是從音樂執行的過程中搜尋一個較好且完美的和諧而來的。在研究中總共搜集了 189 組配比來進行測試，其中以 181 組配比試驗結果來建立強度及工作性之多元迴規模型，而多元線性迴歸方程式如下所示：

$$f'c = a_0 + a_1 W_c + a_2 W_{FA} + a_3 W_{SF} + a_4 W_w + a_5 W_{sp} + a_6 W_s + a_7 W_G \quad (21)$$

$$\text{slump} = b_0 + b_1 W_c + b_2 W_{FA} + b_3 W_{SF} + b_4 W_w + b_5 W_{sp} + b_6 W_s + b_7 W_G \quad (22)$$

(21)式及(22)式中， $f'c$ 表示強度(MPa)，slump表示坍度(mm)， $W_c$ 為水泥重， $W_{FA}$ 為飛灰重， $W_{SF}$ 為矽灰重， $W_w$ 為水重， $W_{sp}$ 為強塑劑重， $W_s$ 為細骨材重， $W_G$ 為粗骨材重， $a_i$ 和 $b_i$ 為迴歸係數。

最後再以和諧搜尋演算法應用適應性函數(fitness functions)來獲得混凝土配比之最佳解，在求取配比最佳解的過程中，需適當的加入一些條件限制，例如：定義各材料重量和參數比例之合理範圍，如：水泥重、水膠比…等，此除可用來提高預測精度，且會加快最佳化之過程，而後將其餘 8 組配比用來和類神經網路及基因演算法所獲得之結果作一比較，並驗證之，結果顯示，使用和諧搜尋演算法所得之配比設計亦有不錯之成效，由此可見，利用和諧搜尋演算法來作混凝土最佳配比設計也是個不錯的方法。

## 三、研究方法

本章節將介紹本研究所使用之方法理論、概念和架構以及試驗計畫和流程，在方法理論方面以介紹類神經網路之基本原理和架構，以及其如何配合 ACI 配比設計規範設計出適當且合理之配比為主，另於試驗計畫方面，則以介紹整個試驗流程及過程中所使用之材料、機具為主。

### 3-1 類神經網路

人類的大腦是由數以計數的神經元所組成〔27〕，當其接收外來的資訊，而神經元被該輸入資訊所激發時，會產生一串脈衝列延著軸索傳遞，脈衝列的速率是由輸入信號的強弱和突觸強度所決定，而我們人就是透過這個複雜的神經網路系統脈絡來學習、判斷和辨識。

電腦是現今社會上的主流，其擁有強大的運算能力及處理複雜問題的技術，所以我們希望電腦能夠擁有和人腦一樣的學習及辨識能力來幫助我們處理專業領域上一些非線性、複雜且棘手之問題，故許多學專家學者開始研究如何使電腦也能試著模擬像人腦一樣架構之神經網路脈絡系統，我們將該系統稱之為類神經網路系統〔3〕。

類神經網路是一種基於腦與神經系統研究所啟發的資訊處理技術〔4〕，其是由許多非線性的運算單元(稱做神經元 Neuron)和位於這些運算單元間的眾多連結所組成的，而這些運算單元通常是以平行且分散的方式來進行運算〔27〕，並用以模仿生物神經網路之能力，故亦可視為一種模仿生物神經網路的資訊處理計算系統〔28〕，它是利用一組範例(即系統輸入與輸出所組成的資料)來建立系統模型(輸入與輸出間之關係)，有了這樣之系統模型後，便可利用此系統來推估、預測、決策及診斷〔4〕，大腦與類神經網路系統上之不同，可由圖 4 來表示。

在本系統中，包含軟、硬體方面，皆使用了大量且簡單之神經元來模仿生物神經網路系統，這些運算單元(神經元)其通常係由外界環境或其它神經元來獲取相關資訊〔29〕，並從人類專家解決問題的實際案例中來做學習，再藉由系統本身之非線性函數作轉換，且能對大量資料作有效的分析、處理、運算及應用，綜合以上敘述，類神經網路的運作模式，就有如人類的大腦一般，可透過樣本或資料之訓練，進而展現出學習、回想、歸納推演之能力，而其在處理形式配套、分類、函數近似、最佳化及資料聚類等方面皆有不錯的成效〔27〕。

### 3-1-1 類神經網路之特性〔28,29〕

1. 具有平行處理之特性。
2. 具有高度容錯的特性(fault tolerance)。
3. 具有結合式記憶的特性(Associative Memory)。
4. 具有解決最佳化問題之能力(Optimization)。
5. 聯想速度快、網路架構容易調整。

### 3-1-2 類神經網路之優點〔4〕

1. 可建構非線性之模型，且模型準確度高。
2. 可表達輸入變數間的交互作用，且模型準確度高。
3. 可接受邏輯、數值、有序分類、無序分類變數作輸入，適應性強。
4. 可用於函數映射、數列預測、樣本分類等問題。
5. 模型建構能力強。

### 3-1-3 類神經網路之缺點〔4〕

1. 易因中間變數(即隱藏層)數目的多寡而影響學習速率及優化。
2. 因其加權值和門檻值可調整，故易發生過度學習之現象，而產生較大之誤差。

### 3-1-4 類神經網路之類型

類神經網路之類型若依其學習方式來分的話，可分為監督式學習和非監督式學習二種，以下即針對二種學習方式之原理分別作介紹：

#### 1. 監督式學習〔27, 30〕

從問題領域中取得所需學習之範例，必須包含有輸入變數資料及輸出變數資料，透過範例之學習以迭代方式不斷修正神經網路中的權值，在修正的過程中，使網路從中取得輸入變數與輸出變數間之對應規則，再以此規則應用於新案例之推論（只有輸入值，輸出值則以推論方式取得），將輸出儘量符合預期結果，在每個訓練例子給予神經網路輸入值與期望輸出值，不斷監督神經網路，並不斷修正權值，直至神經網路輸出值與期望輸出值之間的誤差小於一定之臨界值或權值不再改變為止，有如老師指導學生對問題做正確的回答。其演算法之流程如圖 5 所示。

#### 2. 非監督式學習〔27, 30〕

從問題領域中取得所需之學習範例，此法之特點為在訓練過程中，只需要提供輸入變數值，但不需提供輸出變數值，網路會依輸入資料本身之特性自行調整學習權重，亦即表示不需要誤差訊息去改善類神經網路之輸出值，而僅需透過範例學習就能夠自行找出資料中的那些特徵是重要的或是可忽略之潛在規則，再將資料作“群聚”

(clustering)之處理，最後將這個聚類規則應用於新的案例分析，如此便可以判斷其類別。其演算法之流程如圖 6 所示。

本研究係利用監督式學習中之倒傳遞神經網路(Back-propagation network, BPN)來建立混凝土強度預測模型及坍度預測模型，倒傳遞神經網路為一前向式架構之類神經網路，因其有著簡易操作學習和預測準確率高之特性，故其目前為類神經網路學習模式中最具代表性，且應用最為普遍之模式。

### 3-1-5 倒傳遞類神經網路(Back-propagation network, BPN)

倒傳遞類神經網路於 1986 年由 Rumelhart 等人所提出，也使得網路架構為多層感知器之構想得以實現〔27〕。在網路學習之過程中，其目的即為修正網路連結上的加權值，令網路誤差能夠達到最小值，使得網路模擬預測之輸出值能趨近原本之目標輸出值，故其基本原理係利用最陡坡降法(Gradient Steepest Descent Method)之觀念將誤差函數予以最小化〔4〕，透過它可以將資料的輸入與輸出值間的映射問題變成一個非現性的最佳化問題，而後再利用網路運算逐步修正參數，最後經由迭代運算後得到更精確的解答〔27〕。

倒傳遞類神經網路之學習精度高、回想速度快、輸出值可為連續值，能處理複雜的樣本識別與高度非線性的函數合成問題，其適用範圍非常廣泛，如樣本識別、分類問題、函數模擬、預測、系統控制、雜訊過濾、資料壓縮等，可說是一種應用普遍之類神經網路〔27〕。

#### 1. 網路架構〔4, 27〕

倒傳遞神經網路之整體架構如圖 7 所示，共有輸入層、隱藏層、輸出層，各層之功能及設定如下所述：

(1) 輸入層：

用來表現輸入值的量，其個數之多寡，視問題大小、型式來決定。

(2) 隱藏層：

用以表現處理單元間之交互影響，其神經元個數並無定量，通常須以試誤法來決定最佳數目，而層數則依問題複雜程度來決定。

(3) 輸出層：

用來表示輸出值的量，其個數之多寡，視問題大小、型式來決定。

網路中各層間之神經元係靠相關權重來連結，輸入層中之輸入值傳至隱藏層後，經過加權及活化函數轉換完成後，得一輸出值，再將此輸出值傳至輸出層〔2〕。常用之活化函數則如(23)式所示，而函數之型態則如圖8所示。

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} \quad (23)$$

## 2. 網路演算法

倒傳遞網路演算法之學習過程是由正向及負向傳播所組成，整個過程中係透過修正各神經元之權重和偏權值來降低誤差，希望能使誤差函數E在容許範圍內並達到最小值，最後再利用最陡坡降法來搜尋E之最佳解〔27〕。以下則就權重與偏權值之修正公式及誤差函數E之定義做一介紹，另網路演算法之程序流程如圖9所示。

(1) 權重與偏權值修正公式：

$$y_j^n = f\left(\sum_i w_{ji} y_i^{n-1}\right) = f(\text{net}_j^n) \quad (24)$$

$$\text{net}_j^n = \sum_i w_{ji}^n y_i^{n-1} + b_j^n \quad (25)$$

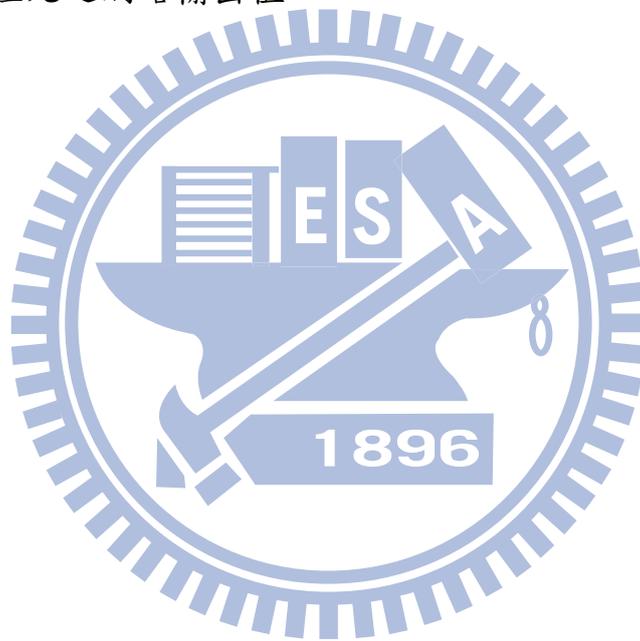
(24)式中， $y_j^n$ 為第 n 層之輸出值， $f$  為活化函數， $net_j^n$ 為第 n-1 層輸出值之權重累積值。

(25)式中， $w_{ji}^n$ 為第 n 層第 j 個神經元與第 n-1 層第 i 個神經元之連結權重， $b_j^n$ 為第 n 層第 j 個神經元之偏權值。

(2) 誤差函數 E 的定義：

$$E = \frac{1}{2} \sum_k (d_k - y_k)^2 \quad (26)$$

(26)式中， $d_k$ 為第 k 個神經元之目標輸出值， $y_k$ 為輸出層第 k 個神經元之網路輸出值。



### 3-2 類神經網路模型之建立

本研究需利用類神經網路來建立一強度模型及一坍度模型，兩模型皆由監督式學習之倒傳遞神經網路來建立，建立模型所使用之真實配比數據由各文獻中來取得，一共蒐集了 482 筆數據，該數據之內容及出處請詳見表 2 及表 3 所示。

在強度模型建立方面，首先由各文獻中所蒐集到的 482 筆混凝土配比數據，利用其中的 462 組數據讓類神經網路作學習、訓練之用，另 20 組數據則作為測試之用，本網路之輸入參數為水、水泥、細骨材、粗骨材、飛灰、爐石粉及高效能減水劑(SP)等 7 種，隱藏層設定為 1 層；其結點數量則以試誤法來決定最佳個數，而輸出參數則為混凝土 28 天抗壓強度。

在坍度模型方面，由各文獻中所蒐集到的 482 筆數據中，擁有坍度數據之配比共有 295 組，利用其中 285 組數據讓類神經網路作學習、訓練之用，另 10 組數據則作為測試之用，本網路之輸入參數及隱藏層之設定方法皆與強度模型相同，唯獨輸出參數改為混凝土之坍度。

類神經網路模型架構如表 4 所示，所有訓練及測試數據皆需經由正規化程序之處理，而所有資料經正規化後之數值必須介於 0~1 之間，正規化公式如(27)式所示。

$$\text{正規化之數值} = \frac{A_i - A_{min}}{A_{max} - A_{min}} \quad (27)$$

(27)式中， $A_i$ 為該材料之值， $A_{min}$ 為該材料之最小值， $A_{max}$ 為該材料之最大值。

類神經網路模型建立之步驟如下所述，整體流程如圖 10 所示。

1. 首先由各文獻中蒐集真實之混凝土配比資料。
2. 將所蒐集到的資料先作正規化之處理。
3. 設定類神經網路模型之基本參數(如輸入值、隱藏層數、隱藏層節點數、輸出值、演算法…等)。

4. 進行類神經網路模型訓練。
5. 如訓練結果良好則進入第六步驟模型測試階段，若結果不良則重回第三步驟。
6. 進行類神經網路模型測試。
7. 如測試結果良好則模型建立完成，若結果不良則重回第三步驟。

### 3-3 混凝土配比之產生

本研究所蒐集到的混凝土資料共有 482 筆，為補充資料庫中不足之配比及讓使用者有更多重之選擇，故研究中擬以電腦程式配合 ACI 規範來輔助混凝土作配比設計，然混凝土配比資料及材料種類非常眾多，而各材料所涵蓋之範圍亦甚廣，因此如何界定混凝土配比中各材料之有效範圍及上下限值，且令所產生之配比資料更具合理性及參考價值，實為本節之重點課題。

前於第二章時有介紹呂夙修 [3] 於 2010 年利用凸殼演算法(Convex hull)來定義各材料之有效區域及範圍，並利用資料點連接成一個凸多邊形，用以界定資料的有效與否，再利用 K-Mean 演算法將配比作分類，以建立合適的混凝土配比資料庫供使用者選擇。其中凸殼演算法(Convex hull)之圖形如圖 11 所示，資料點位於凸多邊形內者，則視為有效資料。

為使所產生之混凝土配比趨於合理且可靠性高，故本研究配比之產生，係先利用由各文獻中所蒐集到之配比數據及參考 ACI 規範之相關規定如表 5~表 12 及圖 12 之配比設計流程圖所示，先參考真實配比之材料用量，再將表 5~表 7 之相關規範電腦程式化，並以之來界定各材料用量產生之合理範圍，最後利用電腦程式來產生許多合理且可用之混凝土配比，配比產生之整體流程如圖 13 所示，表 8~表 12 為一些特殊情況之相關規定，可供使用者作為選擇適用配比之參考。

本研究中各材料上下限範圍如表 13 所示，其中水用量範圍為 125~240kg/cm<sup>3</sup>，水泥用量範圍為 110~500kg/cm<sup>3</sup>，爐石粉用量範圍為 0~300kg/cm<sup>3</sup>，飛灰用量範圍為 0~300kg/cm<sup>3</sup>，粗骨材用量範圍為 >450kg/cm<sup>3</sup>，細骨材用量範圍 >450kg/cm<sup>3</sup>，高效能減水劑(SP)用量範圍 <2%總粉體量(水+水泥+卜作嵐摻料)kg/cm<sup>3</sup>，以此為基準，進而以電腦程式隨機產生多種配比。

### 3-4 配比之分類

本研究業經類神經網路及電腦程式搭配設計規範隨機產生多樣化可使用之配比，為令使用者在選擇及使用上能更為快速及便捷，故本節之重點著重於將已產生之混凝土配比作一有系統之分類。分類方法之種類非常之多，其通常依模型建構型式來作區分，主要有統計理論分析法、幾何距離計算法、決策樹模型法及類神經網路法等 [31]，而本研究所引入之方法為幾何距離計算法中之歐式距離法，再配合混凝土配比中卜作嵐摻料之取代率及材料成本等三種方式來作分類，而這三種分類方式將再下面各節一一介紹。

#### 3-4-1 歐式距離(Euclidean Distance) [32]

當我們在做分類時，常需將較為類似的樣本聚集在一起，形成集群(cluster)，這使我們能更容易且清楚地辨識及判別該樣本之屬性類別，而要如何計算各個不同樣本之間的相似性度量(Similarity Measurement)及確認其精確度和可行性，就相對變得格外重要，又因計算方式可能影響到整個分類過程的正確與否，故採用什麼樣的方法來計算，亦非常重要。

現行的分類方法有非常多種，一般採用最直接的方法就是計算樣本間的「距離」(Distance)。以距離作為分類的依據，定義相對距離越近的，其相似度越高，歸類成一組，此種統計分析法可在不需要任何的假設的情況下來作計算。

以距離來作分類之方法非常之多，如：歐氏距離、曼哈頓距離 (Manhattan Distance)、切比雪夫距離 (Chebyshev Distance)、閔可夫斯基距離(Minkowski Distance)、馬氏距離(Mahalanobis Distance)……等，其中歐氏距離是最易於理解的一種距離計算方法，故本研究亦採取本法，而其係源自於歐氏空間中兩點間的距離公式，圖 14 為基本二維平面歐式距離計算示意圖，相關計算公式則如(28)式所示。

1. 二維平面上兩點  $a(x_1, y_1)$  與  $b(x_2, y_2)$  間的歐氏距離：

$$d_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (28)$$

2. 三維平面上兩點  $a(x_1, y_1, z_1)$  與  $b(x_2, y_2, z_2)$  間的歐氏距離：

$$d_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (29)$$

3. 兩個  $n$  維向量  $a(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n})$  與  $b(x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n})$  間的歐氏距離：

$$d_{12} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{1k} - x_{2k})^2} \quad (30)$$

### 3-4-2 卜作嵐摻料取代率分類

卜作嵐摻料為本身具有很低或不具有膠結性質，但在水份存在下能與水泥水化產生氫氧化鈣( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )，或與外加鹼質物產生緩慢卜作嵐水化反應，而有類似水泥水化產物之膠結性反應之材料均屬卜作嵐摻料，一般卜作嵐摻料皆用來取代部分水泥用量或細骨材用量〔26〕。

卜作嵐摻料之種類有很多，如飛灰、爐石粉、矽灰、稻殼灰……等，本研究所使用之卜作嵐摻料為飛灰和爐石粉，其相關介紹如下：

#### 1. 飛灰

現代火力發電廠在燃燒粉煤期間(煤碳細磨成粉煤)，當粉煤通過火爐高溫區時，揮發性物質和固定碳被燒掉，而存在煤粉中之黏土、

石英和長石礦物等雜質在高溫下會被溶化，其中所產生之氫氣與氮氣會將熔化物鼓脹起，形成中空體或破裂中空體，這些被溶化之物質迅速被送到低溫區，經冷卻變成玻璃圓球粒子，有些較重或熔融相互黏結之礦物團聚成較粗顆粒而掉入爐底，即形成底灰(BA)，但大多數微粒子隨著高溫廢氣飛出，稱之為飛灰，飛灰係利用漩渦分離器、靜電集塵器(EP)或袋濾式集塵器補集而成〔26〕。

## 2. 爐石

高爐爐石係於煉鋼廠在高爐煉鐵的過程中，所產生的副產物〔34〕，國家標準(CNS)稱為高爐爐渣，每生產一噸的生鐵約能產生 300 公斤的高爐爐渣，其為卜作嵐摻料的一種，又因冷卻方式之不同，可分為氣冷高爐石和水淬高爐石〔26〕。而水淬高爐石具有潛在的膠結能力和水硬性，若加以研磨成細粉添加於混凝土中會產生卜作嵐反應，增加耐久性，而另爐石之分類則圖 15 所示。

添加卜作嵐摻料的作用主要為降低水泥用量、減少水化熱及提升混凝土之耐久性，而其目的則歸納如下〔26〕：

1. 改善混凝土之工作度。
2. 減少混凝土之熱裂縫。
3. 增加混凝土之水密性。
4. 降低鹼質粒料反應。
5. 增加混凝土晚期強度。
6. 降低硫酸鹽的侵蝕。
7. 增加混凝土耐久性。
8. 可搭配強塑劑製作高性能混凝土。

前有介紹卜作嵐摻料可用來取代部分水泥用量，此舉除可減少水泥用量、降低水化熱、增加耐久性外，還可節省成本，因此本階段將利用混凝土配比中之卜作嵐取代率來進行第二次的分類，預計以每 10% 之取代率分為一類，因規範有規定卜作嵐總取代率至多為總膠結量之 50%〔26〕，故共可分為五大類，分類別如表 14 所示，而卜作嵐取代率之計算方法如下(31)式所示。

$$\text{卜作嵐取代率} = \frac{\text{卜作嵐摻料}}{\text{水泥} + \text{卜作嵐摻料}} \times 100\% \quad (31)$$

### 3-4-3 材料成本分類

成本控制一直是經營者、業主或消費者者在選擇上一重要之考量因素，因此如何以最節省、經濟的方式來獲得最佳的效益，亦是當前一重要之課題，故本研究除利用上述二種方法將配比分類外，本節將再利用材料成本分析來作為第三種分類方式，以期能令使用者在配比之選擇及考量上，能夠更加快速、便捷地選擇到適用的混凝土配比。

本法以一立方混凝土所需之材料成本來作分類，材料之單價如表 15 所示，成本以 2000 元以下為第一類，超過 2000 元至 2250 元為第二類，超過 2250 元至 2500 元為第三類，超過 2500 至 2750 元為第四類，超過 2750 至 3000 元為第五類，超過 3000 元為第六類，分類別如表 16 所示。

## 3-5 試驗計畫

本研究之試驗計畫主要為驗證由電腦程式設計並經由類神經網路來預測抗壓強度及工作性之相關配比是否與試驗出來之結果實際值相符。

試驗中將以隨機任選 12 組配比來進行混凝土強度及坍度試驗，最後再與預測值進行比對，另亦可藉由本次試驗結果來研判電腦程式輔助設計之配比是否合於混凝土設計規範及原理。

### 3-5-1 試驗材料

#### 1. 拌和水

本試驗所使用之拌合用水為台灣自來水公司所提供之一般可飲用水，並符合 CNS 13961 混凝土拌合用水之相關規定。

#### 2. 水泥

本試驗所使用之水泥為台灣水泥公司生產之卜特蘭第 I 型水泥，其性質符合 CNS 61 卜特蘭水泥之相關規定，而材料基本之物理性質及化學成份如表 17 所示。

#### 3. 飛灰

本試驗所使用之飛灰為台電公司興達火力發電廠出產 F 級飛灰，其性質符合 CNS 3036 混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐攪和物之相關規定，而材料基本之物理性質及化學成份如表 18 所示。

#### 4. 爐石粉

本試驗所使用之爐石粉為中聯資源(股)公司所出產之爐石粉，其性質符合 CNS 12549 混凝土及水泥砂漿用水淬高爐爐渣粉之相關規定，而材料基本之物理性質及化學成份如表 19 所示。

## 5. 粗細骨材

本試驗所使用之粗、細骨材皆為台灣大安溪所開採之碎石及河砂，材料本身皆經烘乾過後，才過篩處理，處理完成後再置於適當場合予以保存，其基本性質如表 20 所示。

## 6. 強塑劑

本試驗所使用之強塑劑為台灣巴斯夫(股)公司所提供之 G-51HE 型羧酸系高性能減水劑，其性質如表 21 所示，且符合 CNS12283 混凝土用化學摻料中 F 型之相關規定。

### 3-5-2 試驗方法與流程

本研究之配比數據係由電腦程式搭配 ACI 規範隨機產生，本試驗將從中任選取出 12 組配比來進行試驗，試驗配比數據如表 22 所示，而試驗方程序步驟則如下所述，整個試驗流程如圖 16 所示。

#### 1. 混凝土拌合澆灌及養護程序〔35〕

- (1) 將混凝土試體所需之材料依配比重準確稱重及量測。
- (2) 將水泥及卜作嵐摻料先倒入拌和機內，加入些許用水量先均勻拌合後，再依序加入細骨材、粗骨材、剩餘用水量及強塑劑(SP)拌合。
- (3) 新拌混凝土依 CNS1176 混凝土坍度試驗法內之規定，進行坍度試驗並量測新拌混凝土之坍度。
- (4) 每組混凝土配比依規定取樣，並澆灌 4 顆試體。
- (5) 試體可於澆灌 20~48 小時後拆模，並置於室溫石灰液水槽中養護，俟 28 天齡期到後，即進行抗壓試驗。

## 2. 新拌混凝土坍度試驗〔35〕

本試驗將依 CNS1176「混凝土坍度試驗法來進行」，目的是為了量測新拌混凝土之工作性，其實驗過程如下：

- (1) 將坍度模先行潤溼，並置於鍍鋅鐵板上，以足踏緊兩旁腳踏處，以防漿體由底部滲露出來。
- (2) 將新拌之混凝土分三層填入坍度模中，每層距底板面約 6 公分、15 公分、30 公分，每層並以搗棒搗實 25 下。
- (3) 將坍度模填滿後，先以墾刀抹平上緣混凝土，頂緣不足之混凝土應立即補滿，再予以抹平。
- (4) 俟頂緣抹平後，以  $5 \pm 2$  秒之速度等速提升坍度模 30 公分，混凝土即會開始向下塌陷。
- (5) 俟混凝土不再向下塌陷時，即可以鋼捲尺量取混凝土之坍度。
- (6) 坍度計算如下(32)式所示：

$$\text{坍度(slump)} = \text{原始高度} - \text{坍下後高度} \quad (32)$$

## 3. 混凝土 28 天抗壓試驗〔35〕

本試驗將依 CNS1232「混凝土圓柱試體抗壓強度檢驗法」規定來進行，目的是為了量測混凝土 28 天齡期之抗壓強度，其實驗過程如下：

- (1) 將混凝土試體先以石膏蓋平，放於指定位置，靜置 1~2 小時，待石膏蓋板硬化。
- (2) 將蓋平完成之試體置於抗壓試驗機上，以每秒  $1.4 \sim 3.4 \text{ kgf/cm}^2$  之負荷加載於試體上進行抗壓試驗。
- (3) 俟混凝土試體被壓碎後，紀錄其抗壓強度數值。
- (4) 抗壓強度計算如下(33)式所示：

$$\text{抗壓強度} = \frac{P}{A} = \frac{4P}{\pi D^2} \left( \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) \quad (33)$$

(33)式中，P=最大荷重(kgf)；A=試體面積( $\text{cm}^2$ )；D=試體直徑(cm)

### 3-5-3 試驗儀器和設備

1. 強制式拌合機：如圖 17 所示，用於將配比材料均勻拌合之機具。
2. 坍度模和搗棒：如圖 18 所示，坍度模用於施作混凝土坍度試驗，搗棒則用於均勻搗實置入坍度模中之混凝土。
3. 試體模具：如圖 19 所示，用於製作混凝土抗壓試體之模具，試體大小為  $\Phi 10 \times 20\text{cm}$ 。
4. 試體養護槽：如圖 20 所示，養護混凝土試體所用之石灰水槽。
5. 200 噸抗壓試驗機：如圖 21 所示，用於施作混凝土抗壓試驗之機台。

### 3-5-4 現場試驗照片

1. 新拌混凝土坍度施作：如圖 22 所示，將拌合好之混凝土用料放入坍度模中，依規範規定施作，並量測坍度值。
2. 試體澆灌搗實施作：如圖 23 所示，將拌合好之混凝土用料澆灌於試體模具中，並均勻搗實之。
3. 試體養護施作：如圖 24 所示，將澆灌完成之試體置於石灰水槽中進行 28 天齡期之養護施作。
4. 試體蓋平施作：如圖 25 所示，試體進行抗壓試驗前，為防試體因表面不平整而導致受力不均，故均須先施行蓋平施作。
5. 試體蓋平完成：如圖 26 所示，試體經蓋平完成即可進行抗壓試驗。
6. 混凝土抗壓試驗施作：如圖 27 所示，將已蓋平好之試體置於抗壓試驗機上，進行抗壓試驗並記錄該試體之抗壓強度。

### 3-6 系統架構

本研究目的主要是希望建立一套準確性高且可用之混凝土配比資料庫，藉此除可增加並補充原始配比資料庫中不足之數據外，亦可提供更多種配比組合資料供使用者參考，並可依其工區或現場施工之環境條件選擇合適之配比來使用。

配比資料庫建立之整體系統架構如圖 28 所示，首先利用所蒐集到的真實配比資料利用類神經網路來建立能夠預測混凝土強度及坍度之預測模型，再同時以電腦程式配合 ACI 規範來產生配比，利用已建立好之預測模型來預測混凝土之強度和坍度，並建立可用之工程配比資料庫，將配比依強度(12 類)、卜作嵐取代率(5 類)、成本(6 類)作一分類，共可分為 360 個類別之配比資料庫，當使用者提出需求時，該資料庫即可提供合適的配比。



## 四、結果分析與討論

本章主要針對本研究前述方法所得出之各種結果作一統整、分析及討論，首先從類神經網路模型建立之成果開始分析，接著依序為預測模型敏感度分析、實驗結果之驗證分析及最終配比分類之結果探討。

### 4-1 類神經網路強度模型之結果分析

本節將分析由類神經網路建立之強度模型結果，該模型之建立則如前章 3-2 節中所述，係由各文獻所搜集到之 482 組混凝土配比數據來作為類神經網路訓練及測試之範例，類神經網路強度模型之基本設定為輸入值共有 7 個參數(即，水、水泥、飛灰、爐石粉、粗骨材、細骨材、SP)；隱藏層設為 1 層(其中含有 14 個神經元)；輸出值為 1 個參數(即混凝土 28 天抗壓強度)，網路架構詳圖 29 所示，我們由圖 30 中可看出本網路最佳驗證效能值為 0.005988，由圖 31 網路訓練成果圖中可看出本網路訓練之整體 R 值為 0.92556，最後將其餘 20 組配比較由網路模型作測試，測試結果詳如表 23 及圖 32 所示，結果得到實際值與預測值之相關係數 (correlation coefficient) 為 0.958，而  $R^2$  值則為 0.9175，由分析及測試結果中可知本網路模型預測之成效是良好的。

### 4-2 類神經網路坍度模型之分析

本節將分析由類神經網路建立之坍度模型結果，該模型之建立則如前章 3-2 節中所述，係由各文獻所搜集到之 295 組混凝土配比數據來作為類神經網路訓練及測試之範例，輸入值與強度模型之參數相同；隱藏層設為 1 層(其中含有 6 個神經元)；輸出值為 1 個參數(即混凝土之坍度)，網路架構詳圖 33 所示，我們由圖 34 中可看出本網路最佳驗證效能值為

0.0079527，由圖 35 網路訓練成果圖中可看出本網路訓練之整體 R 值為 0.93996，最後將 10 組配比較由網路模型作測試，測試結果詳如表 24 及圖 36 所示，結果得到實際值與預測值之相關係數為 0.942，而  $R^2$  值為 0.8515，由分析及測試結果圖中可知本網路預測之成效雖不像強度模型那樣來得好，但整體成效尚屬不錯。

### 4-3 預測模型參數敏感度之分析

為再次確認本研究經由類神經網路所建立之強度及坍度模型其準確性及精確度是高的，故本研究擬利用高清雲〔36〕於 2002 年論文中所提及之輸入參數對於輸出參數之敏感度公式來作確認，該公式係利用輸出參數對輸入參數作一階偏微分後，即可獲得該輸入參數對於輸出參數的敏感度，其公式如下所示：

$$D_{ki}^1 = \frac{\partial O_k}{\partial X_i} = \sum_{jn} \cdots \sum_{j1} W_{hnjn,ok} f'(net_{ok}) \cdots W_{xi,h1j1} f'(net_{h1j1}) \quad (34)$$

(34)式中， $D_{ki}^1$ 為輸入參數對於輸出參數的敏感度； $O_k$ 為輸出參數； $X_i$ 為輸入參數； $jn$ 為第 $n$ 個節點； $j1$ 為第1個節點； $hn$ 為第 $n$ 層隱藏層； $h1$ 為第1層隱藏層。

本研究利用(34)式分別來求得輸入參數為水、水泥和 SP 對於輸出參數為強度之敏感度以及輸入參數為 SP 對輸出參數為坍度時之敏感度，其計算步驟如下所示：

1. 由類神經網路模型中取得各輸入參數對各隱藏層各節點之權重 $W_{ij}$ 和偏權值 $\theta_j$ ，以及各隱藏層和各輸出參數間之權重 $W_{jk}$ 和偏權值 $\theta_k$ 。
2. 於輸入層和隱藏層間，先利用(35)式來求得 $net_k$ ，再利用(36)式來求得隱藏層各節點之輸出值 $H_j$ 。

$$net_j = \sum W_{ij} X_i - \theta_j \quad (35)$$

$$H_j = f(\text{net}_j) \quad (36)$$

(35)式中， $W_{ij}$ 為第*i*個輸入參數與第*j*個隱藏節點間之權重； $X_i$ 為第*i*個輸入參數； $\theta_j$ 為第*j*個隱藏節點之偏權值。

(36)式中， $H_j$ 為隱藏層第*j*個節點之輸出值； $f$ 為轉換函數。

3. 於隱藏層和輸出層間，先利用式先利用(37)式來求得 $\text{net}_k$ ，再利用(38)式來求得輸出層各節點之輸出值 $O_k$ 。

$$\text{net}_k = \sum W_{jk}H_j - \theta_k \quad (37)$$

$$O_k = f(\text{net}_k) \quad (38)$$

(37)式中， $W_{jk}$ 為第*j*個隱藏節點與第*k*個輸出節點間之權重； $\theta_k$ 為第*k*個輸出節點之偏權值。

(38)式中， $O_k$ 為輸出層第*k*個節點之輸出值； $f$ 為轉換函數。

4. 再利用 $H_j$ 及 $O_k$ 來求得 $f'(\text{net}_k)$ 和 $f'(\text{net}_j)$ ，計算過程如(39)式及(40)式所示。

$$f'(\text{net}_j) = H_j(1 - H_j) \quad (39)$$

$$f'(\text{net}_k) = O_k(1 - O_k) \quad (40)$$

5. 將(34)式展開得到(41)式，最後以(41)式來求得該輸入參數對輸出參數之敏感度。

$$D_{ki}^1 = \sum_{jn} \dots \sum_{j1} W_{ij} \times f'(\text{net}_j) \times W_{jk} \times f'(\text{net}_k) \quad (41)$$

計算所得之結果如圖 37~圖 44 及表 25~表 26 所示。

由圖 37 水-強度分析圖中我們可看出，水和強度間之關係曲線呈反比趨勢，該線斜率為-0.123，此即配比中之用水量越少，則混凝土強度越高，因用水量減少將使得混凝土之水膠比(W/B)或水灰比(W/C)降低，當水灰比或水膠比降低時，將使混凝土之強度提高。由圖 38 水-強度敏感度分析圖中可看出敏感度分析之平均值為-0.092 與真實分析圖中之斜率為-0.123 間的關係皆為負值，故本結果為合理。

由圖 39 水泥-強度分析圖中我們可看出，水泥和強度間之關係曲線係呈正比趨勢，該線斜率為 0.0764，此表示配比中水泥成份所佔之比例越高；則混凝土強度越高。此亦與水灰比或水膠比有關，水灰比(W/C)公式中之 C 為水泥量，由公式可看出當水泥量越高時，則水灰比越低；同理，水膠比(W/B)公式中之 B 為水泥量加上卜作嵐摻料量；當水泥量越多時，則水膠比越低，故水泥量增加，將使混凝土之強度越高。由圖 40 水泥-強度敏感度分析圖中可看出敏感度分析之平均值為 0.037 與真實分析圖中之斜率為 0.0764 間之關係皆為正值，故本結果為合理。

由圖 41 SP-強度分析圖中可看出，SP 和強度間之關係曲線成正比趨勢，該線斜率為 1.6298，此表示真實數據中之 SP 用量和強度間有著正向比例的關係。由圖 42 SP-強度敏感度分析圖中可看出敏感度分析之平均值為 0.087 與真實分析圖中之斜率為 1.6298 間之關係皆為正值，故本結果為合理。

由圖 43 SP-坍度分析圖中可看出 SP 和坍度間之關係曲線成正比趨勢，該線斜率為 0.6246，即表示 SP 用量越多，則混凝土之坍度越大、工作性越好且流動性越高，但須注意 SP 之添加量，以避免造成粒料析離，進而導致混凝土無法固結和強度降低之情事發生。但由圖 44 SP-坍度敏感度分析圖中可看出敏感度分析之平均值為-0.146 與真實分析圖中之斜率為 0.6246 間之關係係一正一負並不相同，經確認並檢核類神經網路模型權重及計算敏感度之公式無誤後，此結果顯示 SP 本身可能為一變異性較大之材料，加上每一品牌之 SP 的特性皆不同，此皆為可能造成誤差之結果。

## 4-4 試驗結果分析

本試驗為驗證本研究中由類神經網路配合 ACI 規範所建立之強度及坍度模型其預測之準確性是否精確；誤差值是否位於容許範圍內，故由電腦程式隨機產生之混凝土配比中，任意挑選 12 組來進行試驗，試驗之數據結果列於表 27 中；數據趨勢線則繪於圖 45~圖 46 中，結果將於本節一併作分析與探討。

### 4-4-1 強度結果分析

在強度結果分析方面，我們由試驗結果表 27 及圖 45 中可看出，實際強度值大部分皆較預測強度值為高，其中有幾組數據比起預測值略微高出了許多，造成此種誤差之可能原因如下所述：

1. 本試驗所使用之粗骨材為機械破碎之粒料，相較於由河水溪流中經沖刷後所取得之卵石圓滑粒料，本粒料稜角較為突兀，可使骨材顆粒間互相鎖制之效應較為良好，故對於強度提升方面有一定之幫助。
2. 試體於養護期間時是以石灰水來養護，養護期間內提供了足夠之相對濕度，再加上天氣狀況佳及本試驗為卜作嵐混凝土，上述幾項優勢將使得混凝土水化及卜作嵐反應較一般情況要來得快；晚期強度可能因此提早到來，故使得混凝土之實際強度較預測強度略高許多。

另 12 組數據中僅少部分實際強度略低於預測強度值；誤差來源可能為試體拌製過程中之搗實或試體蓋平等人為誤差所造成，但所幸誤差均不至太大，其誤差值尚屬可接受之範圍，再加上因本研究之混凝土配比中皆含有卜作嵐摻料，故晚期強度應可再有所提升。

### 4-4-2 坍度結果分析

在坍度結果分析方面，我們由試驗結果表 27 及圖 46 中可看出，實際

坍度值與預測坍度值誤差大多在規範值 $\pm 3.8\text{cm}$ 以內，數據當中僅一組誤差較大，其可能造成誤差來源之主要原因如下：

1. 建立坍度模型之訓練學習案例並不如強度模型來得多，此為可能造成預測誤差之主因之一。
2. SP 藥劑因品牌不同，其減水率與其它化學特性均會有所不同，故所造成之效果也就大大不一樣，再加上交由類神經網路學習之數據中，每項配比所使用之 SP 品牌也不一，且類神經網路並無法辨識 SP 之品牌及其減水率之大小，這也或多或少會造成預測結果上之一些誤差。

以上二種原因皆有可能使坍度之預測值和實際值二者間產生較大誤差之影響因素，要排除此誤差，可先於文獻中所蒐集之數據案例中先作整合；或多蒐集同一型 SP 品牌之配比案例來作訓練，亦或於建模時先將 SP 從訓練參數中移除，SP 改以實際添加量來記錄，此應可降低誤差發生之比例。

#### 4-5 配比分類結果

前於 3-4 節中有提到本研究係利用歐式距離法、卜作嵐取代率和材料成本三種方式來對由電腦程式隨機產生之混凝土配比加以分類，三種分類方法業於 3-4 節作介紹，本節將針對分類過程及結果來作一分析及探討。

本研究所分類之設計強度範圍為  $210\text{kgf}/\text{cm}^2 \sim 980\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，而設計坍度則統一為  $20\text{cm}$ ，依據混凝土施工工程規範中規定，任一組抗壓強度不得低於設計強度  $f'c$  之  $35\text{kgf}/\text{cm}^2 (3.4\text{MPa})$  [37]，而設計坍度大於  $10\text{cm}$  以上時，其許可誤差範圍為  $\pm 3.8\text{cm}$  [38]。

首先，我們先以混凝土強度之規範值 ( $\pm 3.4\text{MPa}$ ) 及坍度之規範值  $\pm 3.8\text{cm}$  來作為計算歐式距離和判斷配比相似度之原則，歐式距離之計算觀念及公式，前已於 3-4 節介紹過，在此將說明分類時之計算過程，當一組新的配比其強度為  $f'c_i$ 、坍度為  $\text{slump}_i$  時，其歐式距離  $d_i$  之計算如下(42)

式所示：

$$d_i = \sqrt{(f'c_i - f'c_s)^2 + (slump_i - slump_s)^2} \quad (42)$$

(42)式中， $d_i$ 為歐式距離； $f'c_i$ 為新配比之強度(MPa)； $f'c_s$ 為設計強度(MPa)； $slump_i$ 為新配比之坍度(cm)； $slump_s$ 為設計坍度(cm)。

依規範而言， $f'c_i - f'c_s$ 之差值須在 $\pm 3.4$ 以內，而 $slump_i - slump_s$ 之差值則應在 $\pm 3.8$ 以內，計算所得之歐式距離最大值 $(d_i)_{max}$ 為5.10，故當一組新的混凝土配比進入此系統時，將依此原則先行與設計強度及坍度計算歐氏距離，判斷並篩選該配比應屬於哪一類別，不符合者則予以剔除，強度及坍度範圍詳表 28~表 29 所示，本階段完成後，即可進入第二及第三階段之分類。

接下來第二階段之卜作嵐取代率分類即以每10%之卜作嵐取代率來分類共可分為5大類，詳見3-4節中表 14；而第三階段則以混凝土材料成本來作分類，共可再細分為6大類，詳見3-4節中表 15~表 16 所示。

本研究以電腦程式隨機產生1500筆混凝土配比數據來作分類，依上述三種分類法依序分類，配比分類之整體過程詳圖 47 所示。最終1500筆混凝土配比中，共有278筆配比符合設計要求，我們將其予以分類，並利用表格以分門別類之方式來呈現，分類結果如表 30~表 83 所示。由表中我們可看出本表有如一混凝土配比之型錄，此表可提供多樣式之配比，並讓使用者方便依其工區施工環境、材料使用及成本考量來作選擇及使用。

## 五、結論與建議

本研究利用類神經網路和電腦程式結合 ACI 規範來輔助卜作嵐混凝土作配比設計，以期能提供予使用者多樣化且適於該工區環境之配比，研究過程中並以現場實驗針對電腦程式所設計出之配比進行驗證，由研究結果中可看出某些配比之預測值和實際值間仍有些微誤差，但整體結果上，仍屬可接受範圍，惟於預測模型之準確度上仍尚有改善空間，可針對此方向去作改善，以下即針對本次研究之過程及成果作一整理、歸納和結論，並針對未來可改善之方向提出幾點建議供參。

### 5-1 結論

1. 本研究中可看出由電腦程式 MATLAB 配合 ACI 規範設計混凝土配比是可行的，惟於過程中須注意卜作嵐摻料之取代量限制之設定，以避免造成混凝土配比中之卜作嵐摻料過多，而使得混凝土中之水泥量過少，進而導致所設計出之配比不符合規範規定。
2. 本研究利用類神經網路來建立混凝土強度模型及坍度模型，於模型建立的過程中，其訓練學習和測試之結果準確度皆非常高，後透過輸出參數與輸入參數間之敏感度分析來確認模型之可靠性確無誤。
3. 本研究經由試驗結果比對驗證後發現雖有幾組配比之預測值和實際值間誤差略大，但大都還在合理誤差範圍內，整體結果大致上尚可接受，故本研究於預測模型建立方面，仍尚有些微地方需要改進，改進方法將於建議中說明。
4. 本研究最後利用了卜作嵐取代率及成本來作分類，此舉可將電腦設計之多樣化配比作一有規則之分類，使該配比資料庫有如一混凝土配比之型錄，讓使用者能在配比之選擇及使用上能更加清楚、明確及完善。

## 5-2 建議

1. 在真實配比資料之蒐集方面，共收集了 482 筆混凝土配比資料，建議可再多蒐集更多之配比資料，並可針對同一類型之混凝土配比資料來作蒐集，或將蒐集到之混凝土配比先依其添加摻料、特性和同一實驗室所做之試驗先予以分類，此應可使類神經網路在模型建立上更為準確。
2. 在類神經網路模型建立方面，建議將 SP 從輸入參數中移除，因於輸入參數中加入 SP 訓練模型時，模型於訓練過程中，或多或少皆會對 SP 數配予適當之權重，再加上 SP 為化學摻料；且各個廠牌之效能皆不同，對混凝土性質之預測方面亦或多或少都有些微影響，故若將 SP 由輸入參數中先行移除，改以外加之方式來作紀錄，此應可使預測模型不受 SP 之影響，在預測之精度上應可再提高些。
3. 在電腦程式設計配比方面，建議可從他人文獻中找尋是否有其它更好用之方法於規範合理範圍內，可用來界定材料之上下限範圍和設計出更好之混凝土配比。
4. 在現場試驗方面，建議可多做幾組不同之配比試驗，並可規劃將同一配比之試體分別置於現地室溫下和水中二種地方來作養護，可藉此比較二種養護環境下，配比強度之差異性，此除可為資料庫添加真實案例外，亦可多方驗證預測模型之準確性。

## 參考文獻

1. 葉怡成，張皓博，「高性能混凝土配比實驗設計方法之比較研究」，技術學刊，第二十二卷，第二期，179~185 頁，民國 96 年
2. 陳松堂，林建宏，「自充填混凝土之適用性介紹」，臺灣公路工程，第三十卷，第五期，2~14 頁，民國 92 年 11 月
3. 呂夙修，「應用人工智慧技術輔助設計混凝土配比」，國立交通大學，碩士論文，民國 99 年
4. 葉怡成，應用類神經網路，三版一刷，儒林圖書有限公司，台北，民國 91 年
5. 羅華強，類神經網路-MATLAB 的應用，三版修定，高立圖書有限公司，台北，民國 100 年
6. Abrams, D., "Design of concrete mixtures", Bulletin No. 1, Structural Materials Laboratory, Lewis Institute, Chicago, pp. 20, 1918.
7. Feret, R., Compacité des mortiers hydrauliques, Annales des Ponts et Chaussées, 1984.
8. 鄭安順，「卜作嵐混凝土之微觀結構及強度預測」，國立中興大學，博士論文，民國 100 年
9. Popovics. S., "Analysis of concrete strength versus water-cement ratio relationship", ACI Materials Journal, pp. 517-529, Sep.-Oct., 1990
10. 劉俊杰，「高性能混凝土緻密充填配比法及早期性質演繹」，國立台灣科技大學，博士論文，民國 84 年
11. De Larrard, F., M. Buil, "Granularite et compacitedans lesmareriaux de genie civil", Material and Structures, 20, pp.117-126., March 1987
12. 潘坤勝，「波索蘭混凝土早齡期強度、波速預測式之建構」，國立中興大學，博士論文，民國 93 年
13. 賴鴻城，「類神經網路在混凝土材料強度預測之應用」，國立交通大學，

- 碩士論文，民國 99 年
14. 陳琦照，「非監督式模糊類神經網路推理模式在高性能混凝土抗壓強度預測之應用」，國立交通大學，碩士論文，民國 89 年
  15. Ahmet Öztas, et al., “Predicting the compressive strength and slump of high strength concrete using neural network”, Construction and Building Materials, 20, pp.769-775, November 2006.
  16. Cahit, B. et al., “Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network”, Advances in Engineering Software, 40, pp.334-340., May 2009
  17. Marek, S., “A comparison of model selection methods for compressive strength prediction of high-performance concrete using neural networks”, Computers & Structures, 88, pp.1248-1253., November 2010
  18. Mucteba, U. and Harun T., “Predicting the core compressive strength of self-compacting concrete (SCC) mixtures with mineral additives using artificial neural network”, Construction and Building Materials, 25, pp.4105-4111., November 2011
  19. 柯泰至，「以類神經網路建構高性能混凝土工作度坍度模型之研究」，中華大學，碩士論文，民國 90 年
  20. 葉怡成，陳家偉，「以實驗計劃法與類神經網路建構混凝土的坍流度模型」，技術學刊，第二十卷第二期，153~162 頁，民國 94 年
  21. 陳怡成，「以類神經網路作高性能混凝土最佳配比設計之研究」，中華大學，碩士論文，民國 90 年
  22. Tao Ji, et al., “A concrete mix proportion design algorithm based on artificial neural networks”, Cement and Concrete Research, 36, pp.1399-1408, July 2006.
  23. Bang Y. L. et al., “Optimum Concrete Mixture Proportion Based on a Database Considering Regional Characteristics”, Journal of Computing in Civil Engineering, 23, pp. 258-265, Sep.-Oct. 2009

24. Mohammad I. K., "Mix proportions for HPC incorporating multi-cementitious composites using artificial neural networks", Construction and Building Materials, 28, pp.14-20, March 2012
25. Joo-Ha Lee, Young-Soo Yoon, Joong-Hoon Kim, "A New Heuristic Algorithm for Mix Design of High-Performance Concrete", KSCE Journal of Civil Engineering, 16, pp.974-979, 2012
26. 黃兆龍，卜作嵐混凝土使用手冊，財團法人中興工程顧問社，台北，民國 96 年
27. 張斐章，張麗秋，類神經網路導論：原理與應用，初版一刷，滄海書局，台中，民國 99 年
28. 巫沛昌，類神經網路簡介(無日期)，2013 年 3 月 12 日取自 <http://140.133.35.1/faculty/pwu/expert/ann.ppt>
29. 林文賜，類神經網路概念-數位學習平台(無日期)，2013 年 3 月 12 日取自 <http://el.mdu.edu.tw/datacos/09823412017A/%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%96%B9%E6%B3%95%285%29-%E9%A1%9E%E7%A5%9E%E7%B6%93%E7%B6%B2%E8%B7%AF-SOM&BPN.pdf>
30. 盧坤勇，類神經網路在智慧型管理決策之應用(無日期)，2013 年 3 月 12 日取自 [web.nuu.edu.tw/~carlu/ai/N1.ppt](http://web.nuu.edu.tw/~carlu/ai/N1.ppt)
31. 賴昆佑，「以統計分析探討文件分類程序對期刊論文分類效果之影響」，國立中央大學，碩士論文，民國 96 年
32. Plexnet, 機器學習中的相似度量(2011 年 10 月 25 日)，2013 年 4 月 3 日取自 <http://tiredapple.pixnet.net/blog/post/4757594-%E6%A9%9F%E5%99%A8%E5%AD%B8%E7%BF%92%E4%B8%AD%E7%9A%84%E7%9B%B8%E4%BC%BC%E6%80%A7%E5%BA%A6%E9%87%8F>
33. 行政院公共工程委員會，公共工程飛灰混凝土使用手冊

34. 行政院公共工程委員會，公共工程高爐石混凝土使用手冊
35. 黃兆龍，混凝土材料品質控制試驗，初版二刷，詹式書局，台北，民國 97 年
36. 高清雲，「類神經網路系統識別模式於結構健康檢測之研究」，國立交通大學，博士論文，民國 91 年
37. 中國土木水利工程學會，混凝土工程施工規範與解說(土木 402-88)，初版一刷，科技圖書股份有限公司，台北，民國 89 年
38. 行政院公共工程委員會，混凝土基本材料及施工一般要求(第 03050 章)，台北，民國 99 年
39. 林治強，「不同飛灰燒失量對優生混凝土工程性質之影響」，國立台灣科技大學，碩士論文，民國 87 年
40. 蔡宗勳，「水泥型別對優生混凝土性質影響之研究」，國立台灣科技大學，碩士論文，民國 87 年
41. 李嘉銘，「添加 PP 纖維對優生混凝土體積穩定性之影響」，國立台灣科技大學，碩士論文，民國 89 年
42. 吳俊毅，「自充填混凝土工程性質之探討」，國立中興大學，碩士論文，民國 93 年
43. 楊傑漢，「高流動化混凝土配比設計」，國立臺灣大學，碩士論文，民國 99 年
44. 廖肇昌、羅財怡、游文慧，「自充填混凝土對構件行為影響之探討」，自充填混凝土產製與施工，台灣營建研究院，43~57 頁，民國 89 年 2 月
45. 陳相熹，「普通混凝土與自充填混凝土梁在彎矩、剪力與扭矩組合載重作用下之承力行為比較」，國立成功大學，碩士論文，民國 96 年
46. 王奕程，「鋼筋混凝土梁柱複合構件於高溫中、後之行為研究—自充填

- 混凝土梁之承力行為」，國立成功大學，碩士論文，民國 97 年
47. 謝明宏，「自充填混凝土之本土化研究」，國立臺灣大學，碩士論文，民國 88 年
48. 陳育聖，「自充填混凝土之工程性質」，國立臺灣大學，碩士論文，民國 89 年
49. 鄭達鈞，「配比參數對自充填混凝土工程性質之影響」，國立屏東科技大學，碩士論文，民國 92 年
50. 孫若先，「添加卜作嵐材料之高性能混凝土中羧酸強塑劑最佳劑量之研究」，國立屏東科技大學，碩士論文，民國 99 年
51. 林建良，「礦物摻料及粒料級配對自充填混凝土新拌性質之影響」，國立台灣科技大學，碩士論文，民國 89 年
52. 黃乃明，「不同礦物摻料對高性能混凝土性質影響之研究」，國立台北科技大學，碩士論文，民國 93 年
53. 陳展裕，「高性能混凝土梁之動態撓曲行為」，國立中興大學，碩士論文，民國 91 年
54. 莊昆斌，「蒸氣養護對不同爐石添加量自充填混凝土熱學性質及工程性質之研究」，國立台灣科技大學，碩士論文，民國 93 年
55. 高富銓，「SCC 自充填混凝土膠結材料組合之研究與應用」，國立臺灣海洋大學，碩士論文，民國 93 年
56. 周俊儒，「同時添加飛灰爐石對高性能混凝土抗壓強度及脆裂韌性之影響」，國立中興大學，碩士論文，民國 98 年
57. 賴睿璿，「飛灰混凝土之施工性與介面力學性質探討」，國立臺灣大學，碩士論文，民國 100 年
58. 武懷登，「高性能飛灰混凝土之乾縮潛變預測模式研究」，國立臺灣大學，碩士論文，民國 100 年

59. 劉彥志，「飛灰混凝土傳輸行為之研究」，國立臺灣海洋大學，碩士論文，民國 100 年
60. 胡顧曦，「高飛灰含量混凝土之耐久性研究」，國立臺灣大學，碩士論文，民國 99 年
61. 陳駿，「高摻量飛灰混凝土配比設計與力學行為探討」，國立臺灣大學，碩士論文，民國 99 年
62. 溫凱翎，「混凝土添加飛灰及爐石在高溫環境下之硬固性質及熱傳導行為」，國立台灣科技大學，碩士論文，民國 95 年
63. 郭同杉，「添加飛灰對混凝土抗壓強度及耐久性影響之探討」，國立臺灣海洋大學，碩士論文，民國 95 年
64. 張裕閔，「含爐石混凝土之孔隙與強度關係」，國立中興大學，碩士論文，民國 95 年
65. 謝忠麒，「飛灰顆粒粗細對高性能混凝土抗壓強度及脆裂韌性之影響」，國立中興大學，碩士論文，民國 97 年
66. 蔡其德，「爐石顆粒粗細對高性能混凝土抗壓強度及脆裂韌性之影響」，國立中興大學，碩士論文，民國 96 年
67. 吳文貴，「混凝土加速氯離子傳輸試驗中非穩態與穩態傳輸性質之關係」，國立臺灣海洋大學，碩士論文，民國 95 年
68. 王暄豐，「利用快速氯離子滲透試驗評估飛灰/爐石混凝土之耐久性」，國立臺灣海洋大學，碩士論文，民國 93 年
69. 林聰邦，「飛灰取代部分水泥對巨積混凝土水化溫度上升之影響」，國立中興大學，碩士論文，民國 91 年
70. 陳韋嘉，「添加爐石粉對混凝土抗壓強度及滲透行為之探討」，國立臺灣海洋大學，碩士論文，民國 95 年
71. 龔傑仁，「混凝土作為橋墩、水工構造物面層材料之性能探討」，國立

臺灣大學，碩士論文，民國 100 年

72. 廖肇昌，林嘉永，顏志欽，魏銘輝，「國道六號南投段自充填混凝土施工技術探討」，結構工程，第二十二卷第二期，29~42 頁，96 年 6 月
73. 顏旭堯，「以不同試驗法探討添加卜作嵐材料對混凝土微觀特性影響之研究」，國立臺灣海洋大學，碩士論文，民國 90 年
74. M. Nehdi, et al., “Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements”, Cement and Concrete Research, 34, pp.2103-2112, March 2004
75. M.A. Megat Johari, et al., “A simple mix design method for self-compacting concrete”, Construction and Building Materials, 25, pp.2639-2648, January 2011
76. Nan Su, et al., “A simple mix design method for self-compacting concrete”, Cement and Concrete Research, 31, pp.1799-1807, June 2001.
77. Erhan Gu`neyisi, et al., “Evaluating and forecasting the initial and final setting times of self-compacting concretes containing mineral admixtures by neural network”, Materials and Structures, 42, pp.469-484, May 2009
78. Rafat Siddique, “Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash”, Materials and Design, 32, pp.1501-1507, March 2011
79. A. Oner, et al., “An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete”, Cement and Concrete Research, 35, pp.1165-1171, June 2005
80. Kefeng Tan, et al., “Strengthening effects of finely ground fly ash, granulated blast furnace slag, and their combination”, Cement and Concrete Research, 28, pp.1819-1825, December 1998
81. Rafat Siddique, “Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete”, Cement and Concrete Research, 34, pp.487-493, March 2004
82. Gengying Li, et al., “Properties of concrete incorporating fly ash and

- ground granulated blast-furnace slag”, Cement & Concrete Composites, 25, pp.293-299, April 2003
83. Gengying Li, “Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>”, Cement and Concrete Research, 34, pp.1043-1049, June 2004
84. 吳崇豪, 「爐石混凝土之抗衝擊磨耗性質研究」, 國立中興大學, 碩士論文, 民國 93 年
85. A.A. Ramezani pour, et al., “Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume”, Cement and Concrete Composites, 17, pp.125-133, February 1995
86. 廖展章, 「以加速氯離子穿透試驗評估礦物摻料及用量之混凝土耐久性影響」, 國立臺灣海洋大學, 碩士論文, 民國 93 年(文獻數據 397~407)
87. 羅心好, 「強塑劑質與量對混凝土性質之影響」, 國立台灣科技大學, 碩士論文, 民國 92 年
88. 駱國富, 「高性能混凝土預力梁預力損失與長期變位之研究」, 國立臺灣大學, 碩士論文, 民國 85 年
89. 劉家佑, 「高性能混凝土自體收縮性質之研究」, 國立臺灣大學, 碩士論文, 民國 85 年
90. 盧玉山, 「混凝土收縮行為與材料參數影響之探討」, 國立臺灣大學, 碩士論文, 民國 86 年
91. 李銘智, 「流動化混凝土配比演繹及澆置震動特性之研究」, 國立臺灣大學, 博士論文, 民國 99 年
92. 陳俊村, 「矽灰混凝土配比簡化模式建構與其相應工程性質之研究」, 國立台灣科技大學, 博士論文, 民國 101 年

## 附錄

表 1 類神經網路模型統計值

Statistical values of proposed NN model

	Training set		Test set	
	Compressive strength	Slump	Compressive strength	Slump
RMS	0.019331	0.068743	0.016455	0.055425
SSE	0.061658	0.070237	0.004874	0.055295
$R^2$	0.998977	0.992576	0.99931	0.993451
MAPE (%)	2.617104	6.58954	1.956208	5.782223

資料來源：〔15〕

表 2 文獻配比資料

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
1	0.26	133.00	306.00	868.00	866.00	16.10	191.00	20.60	51.00	25.0
2	0.27	156.00	377.00	818.00	816.00	19.80	180.00	16.50	55.00	25.5
3	0.28	180.00	447.00	768.00	766.00	23.60	169.00	11.70	51.00	25.0
4	0.28	141.00	291.00	868.00	866.00	15.30	191.00	18.30	45.00	25.0
5	0.29	164.00	360.00	818.00	816.00	18.90	180.00	14.10	52.00	26.0
6	0.31	189.00	428.00	768.00	766.00	22.60	169.00	9.40	53.00	24.0
7	0.37	152.00	207.00	893.00	891.00	10.90	196.00	13.60	28.00	23.5
8	0.37	165.00	238.00	868.00	866.00	12.50	191.00	11.70	33.00	24.0
9	0.38	191.00	301.00	818.00	816.00	15.80	180.00	7.50	35.00	24.5
10	0.39	217.00	363.00	768.00	766.00	19.10	169.00	2.90	38.00	23.0
11	0.29	138.39	296.05	887.69	864.63	15.58	169.08	15.43	57.93	22.5
12	0.30	162.73	363.35	837.51	815.76	19.12	159.53	10.71	66.34	27.0
13	0.30	182.39	430.64	787.34	766.89	22.67	149.97	10.66	66.71	22.0
14	0.29	138.39	296.05	887.69	864.63	15.58	169.08	15.43	57.67	22.5
15	0.30	162.73	363.35	837.51	815.76	19.12	159.53	10.71	61.14	25.0
16	0.30	182.39	430.64	787.34	766.89	22.67	149.97	10.66	63.02	26.0
17	0.29	138.39	296.05	887.69	864.63	15.58	169.08	15.43	34.12	25.0

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
18	0.30	162.73	363.35	837.51	815.76	19.12	159.53	10.71	45.83	26.5
19	0.30	182.39	430.64	787.34	766.89	22.67	149.97	10.66	50.55	26.0
20	0.28	156.00	401.00	1050.00	617.00	21.00	145.00	13.70	62.89	27.0
21	0.27	146.00	365.00	1083.00	637.00	19.00	150.00	13.53	60.80	27.0
22	0.25	123.00	328.00	1117.00	656.00	17.00	154.00	27.17	57.01	23.0
23	0.38	162.00	257.00	1123.00	660.00	14.00	155.00	7.70	45.20	23.0
24	0.38	153.00	229.00	1153.00	677.00	12.00	159.00	7.25	41.10	20.0
25	0.38	144.00	201.00	1182.00	694.00	11.00	163.00	6.39	32.50	14.0
26	0.49	175.00	192.00	1141.00	670.00	157.00	10.00	5.30	22.20	12.0
27	0.49	165.00	170.00	1167.00	686.00	161.00	9.00	5.14	21.10	10.0
28	0.48	155.00	147.00	1194.00	701.00	165.00	8.00	4.64	21.30	9.5
29	0.36	189.00	366.00	780.00	835.00	53.00	105.00	7.80	64.50	27.0
30	0.40	189.00	330.00	827.00	835.00	47.00	94.00	8.48	54.40	27.0
31	0.44	194.00	308.00	883.00	797.00	44.00	87.00	7.05	49.50	27.0
32	0.39	173.25	225.00	900.00	775.40	135.00	90.00	5.85	60.29	28.0
33	0.39	173.25	292.50	900.00	803.70	135.00	22.50	5.85	58.53	27.5
34	0.39	173.25	157.50	900.00	747.10	135.00	157.50	5.85	57.16	28.0
35	0.39	173.25	315.00	900.00	781.90	45.00	90.00	5.85	59.90	26.5
36	0.39	173.25	135.00	900.00	768.90	225.00	90.00	5.85	47.84	28.0
37	0.36	162.00	225.00	900.00	805.10	135.00	90.00	5.85	71.86	25.0
38	0.41	184.50	225.00	900.00	745.70	135.00	90.00	5.85	49.61	28.0
39	0.39	173.25	225.00	900.00	775.40	135.00	90.00	4.95	67.06	26.0
40	0.39	173.25	225.00	900.00	775.40	135.00	90.00	6.75	50.69	28.0
41	0.42	168.00	200.00	940.00	796.30	120.00	80.00	4.80	54.22	27.0
42	0.42	168.00	260.00	940.00	821.40	120.00	20.00	4.80	50.20	28.0
43	0.42	168.00	140.00	940.00	771.10	120.00	140.00	4.80	48.92	26.5
44	0.42	168.00	280.00	940.00	802.10	40.00	80.00	4.80	53.43	26.0
45	0.42	168.00	120.00	940.00	790.50	200.00	80.00	4.80	48.92	27.0
46	0.39	156.00	200.00	940.00	828.00	120.00	80.00	4.80	62.94	21.0
47	0.45	180.00	200.00	940.00	764.60	120.00	80.00	4.80	44.80	28.0
48	0.42	168.00	200.00	940.00	796.30	120.00	80.00	4.00	54.90	24.5
49	0.42	168.00	200.00	940.00	796.30	120.00	80.00	5.60	51.76	27.5
50	0.47	176.30	187.50	940.00	798.00	112.50	75.00	4.13	37.35	28.0
51	0.47	176.30	243.80	940.00	822.00	112.50	18.80	4.13	48.33	26.5
52	0.47	176.30	131.30	940.00	775.00	112.50	131.30	4.13	29.80	28.0

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
53	0.47	176.30	262.50	940.00	804.00	37.50	75.00	4.13	37.75	28.0
54	0.47	176.30	112.50	940.00	793.00	187.50	75.00	4.13	26.47	26.5
55	0.44	165.00	187.50	940.00	828.00	112.50	75.00	4.13	44.12	26.0
56	0.50	187.50	187.50	940.00	768.00	112.50	75.00	4.13	31.57	28.0
57	0.47	176.30	187.50	940.00	798.00	112.50	75.00	3.38	46.76	27.0
58	0.47	176.30	187.50	940.00	798.00	112.50	75.00	4.88	41.67	27.5
59	0.32	158.00	350.00	820.00	892.00	80.00	70.00	1.60	54.90	26.5
60	0.59	182.60	215.90	971.00	863.40	9.30	84.30	2.80	29.22	23.5
61	0.42	153.30	182.50	934.80	879.30	18.30	164.30	4.70	29.22	22.5
62	0.39	167.00	300.00	503.00	1184.00	0.00	128.00	3.00	38.82	22.5
63	0.43	182.00	300.00	657.00	994.00	0.00	128.00	2.20	27.94	24.0
64	0.48	205.00	300.00	713.00	879.00	0.00	128.00	2.00	27.94	24.5
65	0.57	181.00	223.50	952.00	880.00	0.00	95.80	4.00	30.00	24.0
66	0.28	153.00	250.00	763.00	910.00	197.00	100.00	13.50	62.16	25.0
67	0.28	153.00	350.00	547.00	1170.00	131.00	66.00	13.50	71.57	22.0
68	0.39	191.00	293.00	819.00	782.00	49.00	147.00	6.85	43.92	27.0
69	0.37	168.00	260.00	920.00	740.00	200.00	0.00	6.50	54.51	28.0
70	0.28	170.00	320.00	748.00	811.00	187.00	95.00	10.80	69.71	27.0
71	0.36	195.00	378.00	850.00	789.00	130.00	32.00	8.50	61.27	27.0
72	0.36	168.73	200.00	830.00	790.00	110.00	160.00	4.00	35.00	26.2
73	0.49	185.00	188.00	858.00	903.00	112.00	75.00	3.75	36.00	20.0
74	0.49	175.00	180.00	818.00	971.00	72.00	108.00	3.60	34.00	19.0
75	0.33	168.25	253.00	798.00	822.00	91.00	162.00	3.75	34.30	25.5
76	0.34	185.00	378.00	850.00	789.00	130.00	32.00	8.50	58.92	27.5
77	0.39	191.00	293.00	819.00	782.00	49.00	147.00	6.73	43.92	26.5
78	0.40	195.00	293.00	817.00	780.00	39.00	157.00	7.95	41.18	27.0
79	0.43	195.00	290.00	877.00	777.00	40.00	120.00	7.26	36.18	27.0
80	0.41	185.00	250.00	861.00	848.00	120.00	80.00	5.00	47.35	28.0
81	0.46	185.00	200.00	1002.00	742.00	100.00	100.00	4.40	36.96	27.0
82	0.32	168.00	300.00	921.00	750.00	230.00	0.00	6.36	63.63	27.0
83	0.32	168.00	300.00	921.00	750.00	184.00	46.00	6.36	57.45	27.0
84	0.32	168.00	300.00	921.00	750.00	138.00	92.00	6.36	55.29	27.0
85	0.32	168.00	300.00	921.00	750.00	115.00	115.00	6.36	54.41	27.0
86	0.32	168.00	300.00	921.00	750.00	92.00	138.00	6.36	48.53	27.0
87	0.32	168.00	300.00	921.00	750.00	46.00	184.00	6.36	55.10	26.5

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
88	0.32	168.00	300.00	921.00	750.00	0.00	230.00	6.36	43.53	26.0
89	0.29	147.00	368.00	897.00	851.00	40.00	94.00	8.53	57.94	27.0
90	0.29	147.00	368.00	897.00	851.00	56.00	82.00	8.60	54.90	27.0
91	0.29	147.00	368.00	897.00	851.00	70.00	70.00	8.64	52.84	27.5
92	0.35	190.00	354.60	836.10	776.20	152.70	38.20	7.60	70.85	25.0
93	0.37	195.00	295.00	836.10	776.20	182.20	45.60	9.41	61.70	24.0
94	0.37	195.00	295.00	836.10	776.20	182.20	45.60	8.36	51.62	23.5
95	0.39	195.00	250.00	854.30	776.20	197.80	49.50	7.96	59.69	25.0
96	0.38	193.00	255.00	854.30	776.20	198.70	49.70	8.05	61.51	24.0
97	0.38	191.00	255.00	854.30	776.20	202.90	50.70	8.14	58.15	25.0
98	0.40	195.00	220.00	854.30	776.20	218.00	54.50	7.88	50.60	25.5
99	0.38	190.00	205.00	854.30	776.20	238.70	59.70	8.05	58.34	25.5
100	0.41	195.00	205.00	872.30	776.20	213.40	53.30	7.55	49.63	27.0
101	0.39	190.00	200.00	872.30	776.20	227.40	56.80	7.75	55.89	26.0
102	0.41	190.00	200.00	874.00	791.80	213.50	53.40	7.47	47.64	26.5
103	0.41	190.00	200.00	866.50	807.30	207.10	51.80	7.34	47.77	27.0
104	0.44	195.00	200.00	866.50	807.30	196.50	49.10	7.13	49.50	27.5
105	0.46	195.00	235.00	859.00	822.80	55.90	130.30	6.74	28.58	27.0
106	0.48	195.00	230.00	844.00	853.90	52.60	122.80	6.49	26.13	27.0
107	0.41	198.00	434.00	874.00	744.00	0.00	48.00	4.83	38.63	22.5
108	0.41	193.00	376.00	874.00	744.00	0.00	94.00	4.70	34.41	23.5
109	0.41	188.00	321.00	874.00	744.00	0.00	137.00	4.58	31.67	25.0
110	0.41	183.00	268.00	874.00	744.00	0.00	179.00	4.47	29.31	26.0
111	0.41	202.00	444.00	874.00	744.00	49.00	0.00	4.93	39.80	23.5
112	0.41	201.00	392.00	874.00	744.00	98.00	0.00	4.90	38.63	24.5
113	0.41	200.00	341.00	874.00	744.00	146.00	0.00	4.88	36.67	25.5
114	0.41	199.00	291.00	874.00	744.00	194.00	0.00	4.85	35.39	26.0
115	0.65	200.92	214.72	780.00	1040.00	30.68	61.35	3.00	22.40	25.0
116	0.61	195.94	224.85	780.00	1040.00	32.12	64.24	3.69	28.50	23.3
117	0.47	176.46	264.49	780.00	1040.00	37.79	75.57	7.18	49.00	22.7
118	0.31	185.00	481.83	776.25	825.00	120.46	0.00	6.63	61.43	26.0
119	0.31	185.00	355.35	776.25	825.00	236.90	0.00	6.51	64.99	26.0
120	0.43	170.00	210.00	986.00	791.00	140.00	50.00	4.40	38.73	27.0
121	0.44	174.00	230.00	977.00	791.00	120.00	50.00	4.40	40.20	27.0
122	0.44	175.00	250.00	976.00	791.00	100.00	50.00	4.40	45.10	27.0

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
123	0.44	175.00	280.00	978.00	791.00	70.00	50.00	4.40	47.65	26.0
124	0.40	168.00	180.00	954.00	791.00	140.00	100.00	4.62	43.53	27.0
125	0.42	175.00	200.00	944.00	791.00	140.00	80.00	4.62	40.10	27.0
126	0.40	170.00	220.00	958.00	791.00	120.00	80.00	4.62	41.08	27.0
127	0.42	175.00	250.00	947.00	791.00	90.00	80.00	4.62	44.90	27.0
128	0.38	172.00	200.00	935.00	791.00	200.00	50.00	4.95	45.88	27.0
129	0.55	175.00	120.00	920.00	791.00	120.00	80.00	4.95	47.35	26.0
130	0.34	170.00	400.00	926.00	791.00	100.00	0.00	5.00	56.67	27.0
131	0.34	168.00	275.00	923.00	791.00	225.00	0.00	5.00	56.86	26.0
132	0.34	170.00	275.00	883.00	791.00	125.00	100.00	5.00	45.10	26.0
133	0.35	182.00	312.00	770.00	850.00	208.00	0.00	10.40	72.94	26.0
134	0.35	182.00	312.00	770.00	833.00	156.00	52.00	9.90	70.00	26.0
135	0.35	182.00	312.00	770.00	817.00	104.00	104.00	9.40	61.08	25.0
136	0.35	182.00	312.00	770.00	800.00	52.00	156.00	9.40	56.57	24.5
137	0.35	182.00	312.00	770.00	783.00	0.00	208.00	9.90	49.02	26.0
138	0.48	163.00	204.00	752.00	1017.00	0.00	136.00	1.70	24.93	N/A
139	0.37	138.80	188.00	940.00	875.00	0.00	188.00	6.39	27.35	N/A
140	0.33	149.00	225.00	860.00	860.00	0.00	225.00	5.85	35.86	N/A
141	0.37	168.00	270.00	890.00	831.00	90.00	90.00	3.83	47.70	25.0
142	0.40	170.00	252.00	911.00	833.00	84.00	84.00	3.36	43.40	25.0
143	0.39	160.00	208.00	929.00	829.00	104.00	103.00	3.81	35.30	25.0
144	0.44	180.00	308.00	766.00	983.00	72.00	31.00	4.51	37.66	25.0
145	0.37	168.00	246.00	879.00	822.00	137.00	73.00	5.47	41.19	25.0
146	0.42	157.50	225.00	940.00	845.00	0.00	150.00	4.87	44.62	25.0
147	0.35	157.50	270.00	900.00	810.00	0.00	180.00	5.85	50.00	27.0
148	0.31	139.50	225.00	900.00	830.00	0.00	225.00	6.75	51.08	26.0
149	0.35	202.80	532.00	59.00	966.00	0.00	59.00	4.10	61.70	15.0
150	0.35	202.80	473.00	118.00	966.00	0.00	118.00	4.10	56.30	17.0
151	0.35	202.80	413.00	177.00	966.00	0.00	177.00	4.10	50.60	15.0
152	0.50	206.90	372.00	41.00	966.00	0.00	41.00	0.00	38.60	19.0
153	0.50	206.90	331.00	83.00	966.00	0.00	83.00	0.00	34.00	19.0
154	0.50	206.90	190.00	124.00	966.00	0.00	124.00	0.00	29.50	19.0
155	0.70	206.90	266.00	30.00	966.00	0.00	30.00	0.00	20.70	18.0
156	0.70	206.90	237.00	59.00	966.00	0.00	59.00	0.00	17.10	17.5
157	0.70	206.90	207.00	89.00	966.00	0.00	89.00	0.00	13.30	20.0

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
158	0.35	206.90	532.00	557.00	966.00	59.00	0.00	0.00	55.30	17.0
159	0.35	206.90	473.00	553.00	966.00	118.00	0.00	0.00	60.70	18.0
160	0.35	206.90	355.00	543.00	966.00	237.00	0.00	0.00	59.80	16.5
161	0.50	206.90	372.00	706.00	966.00	41.00	0.00	0.00	43.20	19.0
162	0.50	206.90	331.00	702.00	966.00	83.00	0.00	0.00	45.30	19.0
163	0.50	206.90	248.00	695.00	966.00	166.00	0.00	0.00	44.70	17.5
164	0.70	206.90	266.00	815.00	966.00	30.00	0.00	0.00	25.40	18.0
165	0.70	206.90	237.00	812.00	966.00	59.00	0.00	0.00	25.30	20.0
166	0.70	206.90	177.00	807.00	966.00	118.00	0.00	0.00	25.20	22.0
167	0.35	206.50	473.00	544.00	966.00	59.00	59.00	0.38	54.90	12.0
168	0.35	206.50	414.00	526.00	966.00	59.00	118.00	0.43	50.70	15.0
169	0.35	206.40	296.00	529.00	966.00	237.00	59.00	0.45	51.60	13.0
170	0.35	206.40	237.00	511.00	966.00	237.00	118.00	0.45	47.20	11.0
171	0.50	206.90	331.00	699.00	966.00	41.00	41.00	0.00	45.90	14.0
172	0.50	206.90	290.00	687.00	966.00	41.00	83.00	0.00	41.20	12.5
173	0.50	206.90	207.00	689.00	966.00	166.00	41.00	0.00	42.20	13.5
174	0.50	206.90	166.00	676.00	966.00	166.00	83.00	0.00	37.40	13.5
175	0.70	206.90	237.00	850.00	966.00	30.00	30.00	0.00	26.20	13.5
176	0.70	206.90	207.00	875.00	966.00	30.00	59.00	0.00	22.80	11.5
177	0.70	206.90	148.00	923.00	966.00	118.00	30.00	0.00	24.20	10.5
178	0.70	206.90	118.00	947.00	966.00	118.00	59.00	0.00	22.80	11.5
179	0.35	155.00	366.00	821.00	944.00	0.00	91.00	4.57	46.14	N/A
180	0.35	155.00	320.00	806.00	944.00	0.00	137.00	4.57	45.52	N/A
181	0.35	155.00	274.00	791.00	944.00	0.00	183.00	4.57	44.41	N/A
182	0.35	155.00	229.00	777.00	944.00	0.00	229.00	4.57	32.50	N/A
183	0.35	155.00	183.00	762.00	944.00	0.00	274.00	4.57	26.72	N/A
184	0.35	155.00	137.00	747.00	944.00	0.00	320.00	4.57	18.31	N/A
185	0.45	160.00	284.00	925.00	944.00	0.00	71.00	0.00	39.14	N/A
186	0.45	160.00	249.00	913.00	944.00	0.00	107.00	0.00	35.19	N/A
187	0.45	160.00	213.00	901.00	944.00	0.00	142.00	0.00	31.78	N/A
188	0.45	160.00	178.00	890.00	944.00	0.00	178.00	0.00	24.72	N/A
189	0.45	160.00	142.00	879.00	944.00	0.00	213.00	0.00	19.46	N/A
190	0.45	160.00	107.00	866.00	944.00	0.00	249.00	0.00	11.77	N/A
191	0.55	160.00	233.00	984.00	944.00	0.00	58.00	0.00	31.13	N/A
192	0.55	160.00	204.00	974.00	944.00	0.00	87.00	0.00	25.77	N/A

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
193	0.55	160.00	175.00	965.00	944.00	0.00	116.00	0.00	22.99	N/A
194	0.55	160.00	145.00	955.00	944.00	0.00	145.00	0.00	17.27	N/A
195	0.55	160.00	116.00	945.00	944.00	0.00	175.00	0.00	12.17	N/A
196	0.55	160.00	87.00	936.00	944.00	0.00	204.00	0.00	8.24	N/A
197	0.65	160.00	197.00	1024.00	944.00	0.00	49.00	0.00	23.32	N/A
198	0.65	160.00	172.00	1016.00	944.00	0.00	74.00	0.00	22.79	N/A
199	0.65	160.00	148.00	1008.00	944.00	0.00	98.00	0.00	17.39	N/A
200	0.65	160.00	123.00	1000.00	944.00	0.00	123.00	0.00	12.43	N/A
201	0.65	160.00	98.00	992.00	944.00	0.00	148.00	0.00	9.45	N/A
202	0.65	160.00	74.00	984.00	944.00	0.00	172.00	0.00	5.66	N/A
203	0.47	176.00	300.00	940.00	820.00	0.00	75.00	3.75	39.12	N/A
204	0.42	157.00	225.00	940.00	845.00	0.00	150.00	4.88	44.62	N/A
205	0.37	138.00	188.00	940.00	875.00	0.00	188.00	5.64	49.38	N/A
206	0.33	123.00	150.00	940.00	900.00	0.00	225.00	6.75	36.09	N/A
207	0.39	175.00	360.00	900.00	800.00	0.00	90.00	4.95	50.69	N/A
208	0.35	157.00	270.00	900.00	810.00	0.00	180.00	5.85	50.00	N/A
209	0.31	139.00	225.00	900.00	830.00	0.00	225.00	6.75	51.08	N/A
210	0.28	126.00	180.00	900.00	850.00	0.00	270.00	8.10	44.02	N/A
211	0.47	176.30	300.00	940.00	820.00	0.00	75.00	3.86	39.12	25.0
212	0.42	157.50	225.00	940.00	845.00	0.00	150.00	5.33	44.62	25.0
213	0.37	138.80	188.00	940.00	875.00	0.00	188.00	5.64	49.38	27.0
214	0.33	123.80	150.00	940.00	900.00	0.00	225.00	7.43	36.09	24.0
215	0.39	175.50	360.00	900.00	800.00	0.00	90.00	4.28	50.69	26.0
216	0.35	157.50	270.00	900.00	810.00	0.00	180.00	4.95	50.00	27.0
217	0.31	139.50	225.00	900.00	830.00	0.00	225.00	6.48	51.08	26.0
218	0.28	126.00	180.00	900.00	850.00	0.00	270.00	7.38	44.02	27.0
219	0.60	235.00	333.20	568.60	1044.00	0.00	58.80	0.00	43.53	N/A
220	0.60	235.00	274.40	545.10	1044.00	0.00	117.60	0.00	34.39	N/A
221	0.60	235.00	332.20	586.30	1044.00	58.80	0.00	0.00	47.02	N/A
222	0.60	235.00	274.40	580.60	1044.00	117.60	0.00	0.00	42.07	N/A
223	0.35	210.00	549.00	511.00	1012.00	0.00	61.00	3.10	43.00	N/A
224	0.35	210.00	488.00	501.00	1012.00	0.00	122.00	3.10	41.20	N/A
225	0.35	210.00	427.00	492.00	1012.00	0.00	183.00	3.10	40.80	N/A
226	0.45	212.00	427.00	626.00	1012.00	0.00	47.00	1.20	36.10	N/A
227	0.45	212.00	379.00	619.00	1012.00	0.00	95.00	1.20	35.60	N/A

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
228	0.45	212.00	332.00	612.00	1012.00	0.00	142.00	1.20	34.30	N/A
229	0.55	213.00	349.00	698.00	1012.00	0.00	39.00	0.40	36.80	N/A
230	0.55	213.00	310.00	693.00	1012.00	0.00	78.00	0.40	39.90	N/A
231	0.55	213.00	272.00	687.00	1012.00	0.00	116.00	0.40	40.80	N/A
232	0.35	202.80	532.00	565.00	973.00	59.10	0.00	4.14	60.74	N/A
233	0.35	202.80	472.90	560.00	973.00	118.20	0.00	4.14	59.23	N/A
234	0.35	202.80	354.70	552.00	973.00	236.50	0.00	4.14	56.70	N/A
235	0.50	206.50	372.40	715.00	973.00	41.40	0.00	0.41	43.24	N/A
236	0.50	206.50	331.00	712.00	973.00	82.80	0.00	0.41	47.94	N/A
237	0.50	206.50	248.30	706.00	973.00	165.50	0.00	0.41	43.60	N/A
238	0.70	206.90	266.00	815.00	973.00	29.60	0.00	0.00	24.49	N/A
239	0.70	206.90	236.50	812.00	973.00	59.10	0.00	0.00	24.21	N/A
240	0.70	206.90	177.30	807.00	973.00	118.20	0.00	0.00	26.09	N/A
241	0.35	182.00	468.00	820.00	831.00	0.00	52.00	7.80	63.63	25.0
242	0.35	182.00	416.00	820.00	816.00	0.00	104.00	8.70	58.43	24.0
243	0.35	182.00	416.00	850.00	803.00	104.00	0.00	7.50	62.75	23.0
244	0.35	182.00	312.00	870.00	773.00	208.00	0.00	6.80	65.78	26.5
245	0.35	165.70	389.80	946.50	806.30	0.00	97.50	4.90	41.00	N/A
246	0.45	189.60	340.80	946.10	805.90	0.00	85.20	2.10	33.04	N/A
247	0.55	208.20	302.80	945.70	805.60	0.00	75.70	0.00	28.23	N/A
248	0.65	221.40	272.50	945.70	805.60	0.00	68.10	0.00	19.67	N/A
249	0.35	174.00	298.30	945.70	805.60	198.90	0.00	0.00	52.40	N/A
250	0.45	195.20	260.20	945.70	805.60	173.50	0.00	0.00	46.12	N/A
251	0.55	211.60	230.80	945.70	805.60	153.90	0.00	0.00	33.66	N/A
252	0.65	224.60	207.30	945.70	805.60	138.20	0.00	0.00	25.11	N/A
253	0.35	167.10	345.30	946.60	806.30	103.60	44.40	5.60	46.99	N/A
254	0.45	191.30	301.40	946.20	806.00	90.40	38.80	2.40	37.91	N/A
255	0.55	210.10	267.40	945.70	805.60	80.20	34.40	0.00	30.64	N/A
256	0.65	223.20	240.40	945.70	805.60	72.10	30.90	0.00	23.96	N/A
257	0.35	236.80	588.20	593.30	733.70	0.00	88.20	0.00	60.00	N/A
258	0.35	230.90	488.70	593.30	733.70	0.00	171.00	0.00	64.00	N/A
259	0.35	228.60	450.50	593.30	733.70	0.00	220.70	0.00	58.00	N/A
260	0.45	237.60	459.00	724.10	733.70	0.00	68.90	0.00	48.00	N/A
261	0.45	232.40	382.60	724.10	733.70	0.00	133.90	0.00	50.00	N/A
262	0.45	230.40	353.10	724.10	733.70	0.00	158.90	0.00	42.00	N/A

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
263	0.55	238.20	376.50	807.90	733.70	0.00	57.50	0.00	43.00	N/A
264	0.55	233.60	314.60	807.90	733.70	0.00	110.10	0.00	41.00	N/A
265	0.55	231.80	290.70	807.90	733.70	0.00	130.80	0.00	35.00	N/A
266	0.65	238.70	319.30	869.90	733.70	0.00	47.90	0.00	32.00	N/A
267	0.65	234.50	267.30	869.90	733.70	0.00	95.50	0.00	31.00	N/A
268	0.65	232.90	247.10	869.90	733.70	0.00	111.20	0.00	25.00	N/A
269	0.35	239.70	507.20	593.30	733.70	177.50	0.00	0.00	67.00	N/A
270	0.35	239.00	470.90	593.30	733.70	211.90	0.00	0.00	66.00	N/A
271	0.35	238.40	439.50	593.30	733.70	241.70	0.00	0.00	56.00	N/A
272	0.45	240.10	395.20	724.10	733.70	138.30	0.00	0.00	58.00	N/A
273	0.45	239.50	367.10	724.10	733.70	165.20	0.00	0.00	57.00	N/A
274	0.45	239.00	342.70	724.10	733.70	188.50	0.00	0.00	52.00	N/A
275	0.55	240.40	323.80	807.30	733.70	113.30	0.00	0.00	48.00	N/A
276	0.55	239.90	300.80	807.30	733.70	135.40	0.00	0.00	51.00	N/A
277	0.55	239.50	280.90	807.30	733.70	154.50	0.00	0.00	46.00	N/A
278	0.65	240.70	274.30	864.90	733.70	95.90	0.00	0.00	38.00	N/A
279	0.65	240.20	254.90	864.90	733.70	114.70	0.00	0.00	41.00	N/A
280	0.65	239.80	238.10	864.90	733.70	130.90	0.00	0.00	32.00	N/A
281	0.50	182.00	328.00	853.00	958.00	0.00	37.00	0.00	34.02	16.0
282	0.50	182.00	291.00	847.00	951.00	0.00	74.00	0.00	32.65	16.0
283	0.50	182.00	256.00	842.00	944.00	0.00	110.00	0.00	31.37	16.0
284	0.50	182.00	219.00	836.00	937.00	0.00	146.00	0.00	25.29	15.5
285	0.35	210.00	488.00	511.00	1012.00	122.00	0.00	3.10	51.83	N/A
286	0.35	210.00	366.00	502.00	1012.00	244.00	0.00	3.10	53.32	N/A
287	0.35	210.00	244.00	493.00	1012.00	366.00	0.00	3.10	50.19	N/A
288	0.45	212.00	379.00	626.00	1012.00	95.00	0.00	1.20	41.79	N/A
289	0.45	212.00	285.00	618.00	1012.00	190.00	0.00	1.20	43.16	N/A
290	0.45	212.00	190.00	611.00	1012.00	285.00	0.00	1.20	40.64	N/A
291	0.55	213.00	310.00	699.00	1012.00	78.00	0.00	0.40	33.93	N/A
292	0.55	213.00	232.00	693.00	1012.00	155.00	0.00	0.40	33.20	N/A
293	0.55	213.00	155.00	687.00	1012.00	233.00	0.00	0.40	31.12	N/A
294	0.30	160.00	386.00	865.00	811.00	50.00	116.00	6.00	76.00	27.0
295	0.35	160.00	329.00	943.00	811.00	42.00	99.00	5.00	65.00	27.5
296	0.40	160.00	287.00	1000.00	811.00	37.00	86.00	4.00	60.00	27.0
297	0.45	160.00	255.00	1045.00	811.00	33.00	76.00	4.00	57.00	26.0

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
298	0.30	160.00	386.00	732.00	947.00	50.00	116.00	6.00	77.00	28.5
299	0.35	160.00	329.00	809.00	947.00	42.00	99.00	5.00	69.00	27.0
300	0.40	160.00	287.00	866.00	947.00	37.00	86.00	4.00	63.00	24.0
301	0.45	160.00	255.00	911.00	947.00	33.00	76.00	4.00	62.00	24.5
302	0.30	160.00	386.00	598.00	1083.00	50.00	116.00	6.00	79.00	26.0
303	0.35	160.00	329.00	675.00	1083.00	42.00	99.00	5.00	69.00	27.0
304	0.40	160.00	287.00	733.00	1083.00	37.00	86.00	4.00	64.00	24.0
305	0.45	160.00	255.00	777.00	1083.00	33.00	76.00	4.00	58.00	24.5
306	0.30	160.00	276.00	703.00	947.00	83.00	193.00	6.00	77.00	27.0
307	0.35	160.00	235.00	784.00	947.00	71.00	165.00	5.00	69.00	27.5
308	0.40	160.00	205.00	845.00	947.00	62.00	144.00	4.00	66.00	27.0
309	0.45	160.00	182.00	892.00	947.00	55.00	127.00	4.00	52.00	25.0
310	0.36	165.00	253.00	848.00	864.00	207.00	0.00	5.98	67.45	N/A
311	0.34	165.00	264.00	830.00	864.00	216.00	0.00	6.24	75.88	N/A
312	0.50	229.20	412.20	841.50	731.70	0.00	45.80	0.00	34.41	N/A
313	0.50	229.20	366.40	822.90	731.70	0.00	91.60	0.00	31.57	N/A
314	0.50	229.20	320.60	804.30	731.70	0.00	137.40	0.00	28.53	N/A
315	0.50	229.20	320.60	819.50	731.70	45.80	91.60	0.00	29.61	N/A
316	0.50	229.20	320.60	827.10	731.70	68.70	68.70	0.00	30.59	N/A
317	0.50	229.20	320.60	834.70	731.70	91.60	45.80	0.00	33.04	N/A
318	0.38	163.40	215.00	925.00	905.00	0.00	215.00	1.50	20.40	N/A
319	0.38	161.50	215.00	920.00	905.00	105.00	105.00	1.30	36.90	N/A
320	0.28	126.00	405.00	675.00	1125.00	0.00	45.00	14.00	85.70	18.0
321	0.28	126.00	360.00	675.00	1125.00	0.00	90.00	14.00	84.30	22.0
322	0.28	126.00	315.00	675.00	1125.00	0.00	135.00	14.00	82.10	25.0
323	0.28	126.00	360.00	675.00	1125.00	90.00	0.00	14.00	95.30	11.0
324	0.28	126.00	270.00	675.00	1125.00	180.00	0.00	14.00	87.60	17.0
325	0.28	126.00	180.00	675.00	1125.00	270.00	0.00	14.00	86.70	20.0
326	0.42	176.00	200.00	961.00	743.00	67.00	157.00	7.60	27.50	N/A
327	0.37	173.00	250.00	945.00	731.00	66.00	154.00	8.50	34.30	N/A
328	0.34	172.00	300.00	928.00	718.00	63.00	148.00	8.20	41.20	N/A
329	0.31	170.00	350.00	912.00	706.00	61.00	142.00	8.80	48.00	N/A
330	0.32	176.00	440.00	713.50	916.80	0.00	110.00	7.43	69.80	N/A
331	0.32	176.00	330.00	699.60	898.90	0.00	220.00	7.43	60.90	N/A
332	0.32	176.00	220.00	685.80	881.10	0.00	330.00	6.67	47.50	N/A

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
333	0.32	176.00	440.00	724.70	931.10	110.00	0.00	10.43	75.10	N/A
334	0.32	176.00	330.00	721.90	927.50	220.00	0.00	10.00	80.10	N/A
335	0.32	176.00	220.00	719.10	924.00	330.00	0.00	8.89	78.10	N/A
336	0.32	176.00	440.00	719.10	923.90	55.00	55.00	8.00	77.00	N/A
337	0.32	176.00	330.00	710.80	913.20	110.00	110.00	7.50	62.30	N/A
338	0.32	176.00	220.00	702.40	902.50	165.00	165.00	4.44	69.40	N/A
339	0.44	198.00	360.00	813.50	855.10	0.00	90.00	3.20	52.10	N/A
340	0.44	198.00	270.00	800.80	841.90	0.00	180.00	2.96	44.70	N/A
341	0.44	198.00	180.00	788.20	828.60	0.00	270.00	3.00	30.30	N/A
342	0.44	198.00	360.00	823.60	865.80	90.00	0.00	3.70	59.00	N/A
343	0.44	198.00	270.00	821.10	863.10	180.00	0.00	3.44	58.00	N/A
344	0.44	198.00	180.00	818.60	860.50	270.00	0.00	2.80	56.20	N/A
345	0.44	198.00	360.00	818.50	860.50	45.00	45.00	3.20	62.40	N/A
346	0.44	198.00	270.00	811.00	852.50	90.00	90.00	3.20	53.60	N/A
347	0.44	198.00	180.00	803.40	844.50	135.00	135.00	2.80	45.90	N/A
348	0.41	227.70	465.00	910.00	590.00	0.00	85.00	10.73	35.19	N/A
349	0.42	228.60	440.00	910.00	590.00	0.00	110.00	11.01	33.15	N/A
350	0.42	233.30	415.00	910.00	590.00	0.00	135.00	9.91	31.47	N/A
351	0.43	234.40	385.00	910.00	590.00	0.00	165.00	9.91	30.66	N/A
352	0.44	241.60	355.00	910.00	590.00	0.00	195.00	9.91	29.62	N/A
353	0.94	216.00	200.00	1293.00	558.00	0.00	30.00	0.00	21.30	12.0
354	0.88	219.00	200.00	1266.00	547.00	0.00	50.00	0.00	22.40	11.5
355	0.83	221.00	200.00	1246.00	538.00	0.00	65.00	0.00	22.90	11.5
356	0.79	224.00	200.00	1225.00	529.00	0.00	85.00	0.00	22.70	12.0
357	0.76	229.00	200.00	1203.00	519.00	0.00	100.00	0.00	21.40	12.5
358	0.74	232.00	200.00	1184.00	511.00	0.00	115.00	0.00	20.00	12.5
359	0.81	223.00	240.00	1251.00	540.00	0.00	35.00	0.00	27.10	12.0
360	0.75	225.00	240.00	1221.00	527.00	0.00	60.00	0.00	29.20	11.5
361	0.71	228.00	240.00	1195.00	516.00	0.00	80.00	0.00	29.60	11.5
362	0.68	231.00	240.00	1176.00	508.00	0.00	100.00	0.00	29.80	12.0
363	0.66	236.00	240.00	1146.00	495.00	0.00	120.00	0.00	28.50	12.0
364	0.63	240.00	240.00	1122.00	484.00	0.00	140.00	0.00	26.90	12.5
365	0.72	230.00	280.00	1208.00	522.00	0.00	40.00	0.00	33.00	11.5
366	0.66	232.00	280.00	1174.00	507.00	0.00	70.00	0.00	35.60	12.0
367	0.63	236.00	280.00	1142.00	493.00	0.00	95.00	0.00	36.20	11.5

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
368	0.60	240.00	280.00	1114.00	481.00	0.00	120.00	0.00	36.50	12.0
369	0.58	245.00	280.00	1088.00	470.00	0.00	140.00	0.00	35.50	12.5
370	0.56	249.00	280.00	1058.00	457.00	0.00	165.00	0.00	33.60	12.5
371	0.64	237.00	320.00	1159.00	501.00	0.00	50.00	0.00	39.30	11.5
372	0.60	240.00	320.00	1122.00	484.00	0.00	80.00	0.00	41.40	11.5
373	0.57	243.00	320.00	1096.00	473.00	0.00	105.00	0.00	42.50	11.5
374	0.54	247.00	320.00	1062.00	458.00	0.00	135.00	0.00	42.70	12.0
375	0.52	251.00	320.00	1032.00	446.00	0.00	160.00	0.00	41.20	12.5
376	0.50	255.00	320.00	1009.00	436.00	0.00	185.00	0.00	39.50	12.5
377	0.30	150.00	400.00	703.00	1147.00	0.00	100.00	7.50	79.30	15.0
378	0.30	150.00	400.00	703.00	1147.00	100.00	0.00	7.50	79.90	16.0
379	0.30	150.00	400.00	703.00	1147.00	50.00	50.00	7.50	80.70	16.0
380	0.40	160.00	240.00	614.00	1224.00	0.00	160.00	2.50	26.70	8.5
381	0.41	164.00	220.00	610.00	1226.00	0.00	180.00	2.60	24.70	9.0
382	0.40	160.00	200.00	616.00	1225.00	0.00	200.00	2.70	23.10	10.0
383	0.28	140.00	300.00	644.00	1135.00	0.00	200.00	1.50	65.20	N/A
384	0.28	140.00	300.00	647.00	1140.00	75.00	125.00	2.00	80.60	N/A
385	0.28	140.00	250.00	644.00	1135.00	0.00	250.00	1.50	54.40	N/A
386	0.41	170.00	229.00	664.00	1124.00	188.00	0.00	2.92	32.85	18.0
387	0.37	170.00	253.00	651.00	1099.00	207.00	0.00	3.22	42.23	21.5
388	0.34	170.00	400.00	656.00	1111.00	100.00	0.00	3.50	43.92	20.0
389	0.34	170.00	275.00	637.00	1079.00	225.00	0.00	3.50	51.53	23.0
390	0.34	170.00	125.00	648.00	1097.00	375.00	0.00	3.50	39.31	19.0
391	0.30	170.00	320.00	620.00	1049.00	254.00	0.00	4.02	62.68	19.0
392	0.27	170.00	344.00	608.00	1029.00	281.00	0.00	4.38	65.49	19.0
393	0.50	186.00	280.00	655.00	1165.00	92.00	0.00	0.00	41.10	14.0
394	0.50	186.00	186.00	655.00	1165.00	186.00	0.00	0.00	35.30	16.5
395	0.50	186.00	280.00	655.00	1165.00	0.00	92.00	0.00	31.50	21.5
396	0.35	130.00	156.00	681.00	1209.00	0.00	216.00	3.60	32.10	12.0
397	0.35	233.00	533.00	593.00	733.00	0.00	133.00	0.00	67.95	N/A
398	0.45	234.00	417.00	724.00	733.00	0.00	104.00	0.00	53.36	N/A
399	0.55	235.00	342.00	807.00	733.00	0.00	85.00	0.00	42.65	N/A
400	0.65	236.00	291.00	869.00	733.00	0.00	72.00	0.00	35.83	N/A
401	0.35	241.00	599.00	593.00	733.00	89.00	0.00	0.00	64.12	N/A
402	0.35	240.00	549.00	593.00	733.00	137.00	0.00	0.00	66.10	N/A

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
403	0.45	241.00	466.00	724.00	733.00	70.00	0.00	0.00	54.02	N/A
404	0.45	240.00	428.00	724.00	733.00	107.00	0.00	0.00	53.48	N/A
405	0.55	241.00	383.00	807.00	733.00	57.00	0.00	0.00	43.95	N/A
406	0.55	241.00	350.00	807.00	733.00	87.00	0.00	0.00	46.63	N/A
407	0.65	241.00	296.00	864.00	733.00	74.00	0.00	0.00	33.51	N/A
408	0.28	152.50	437.10	816.10	856.00	23.00	111.30	7.50	49.18	28.0
409	0.28	135.00	362.70	869.00	911.50	19.10	118.50	5.00	32.53	28.5
410	0.28	116.50	290.70	920.10	965.20	15.30	125.50	4.10	30.80	26.0
411	0.32	157.30	365.60	844.40	885.70	19.20	115.10	2.70	33.81	26.0
412	0.40	158.00	265.70	883.80	927.00	14.00	120.50	2.00	27.47	26.5
413	0.29	162.00	400.00	845.00	845.00	160.00	0.00	12.32	69.90	27.0
414	0.32	187.70	352.00	835.00	915.00	234.70	0.00	8.27	63.17	N/A
415	0.32	187.70	352.00	835.00	915.00	100.90	133.80	10.52	47.46	N/A
416	0.32	187.70	352.00	835.00	915.00	0.00	234.70	15.38	41.90	N/A
417	0.32	187.70	264.00	840.00	910.00	322.70	0.00	7.81	55.98	N/A
418	0.32	187.70	264.00	840.00	910.00	138.70	184.00	11.72	47.06	N/A
419	0.32	178.00	333.80	859.70	931.30	95.70	126.80	16.16	40.99	N/A
420	0.32	178.00	333.80	859.70	931.30	0.00	222.50	5.37	56.40	N/A
421	0.32	178.00	250.30	859.70	931.30	306.00	0.00	5.88	58.20	N/A
422	0.32	178.00	250.30	859.70	931.30	131.60	174.40	7.48	45.27	N/A
423	0.32	178.00	250.30	859.70	931.30	0.00	306.00	10.94	37.80	N/A
424	0.32	168.50	316.00	883.30	946.00	210.60	0.00	14.03	43.48	N/A
425	0.32	168.50	316.00	883.30	946.00	96.90	113.70	15.29	37.06	N/A
426	0.32	168.50	316.00	883.30	946.00	0.00	210.60	5.09	54.91	N/A
427	0.32	168.50	237.00	883.30	946.00	289.60	0.00	5.57	56.66	N/A
428	0.32	168.50	237.00	883.30	946.00	133.20	156.40	7.09	36.53	N/A
429	0.32	168.50	237.00	883.30	946.00	0.00	289.60	10.36	35.37	N/A
430	0.32	188.00	352.00	835.00	915.00	235.00	0.00	7.04	64.97	20.0
431	0.29	151.70	314.00	654.00	1092.20	104.60	104.60	8.90	55.16	22.0
432	0.29	151.10	314.60	655.50	1092.50	104.90	104.90	10.50	56.93	22.0
433	0.29	148.30	309.90	645.70	1076.10	103.60	103.30	11.40	59.72	18.0
434	0.38	173.00	225.00	900.00	775.00	135.00	90.00	5.85	60.33	28.0
435	0.38	173.00	157.50	900.00	747.00	135.00	157.50	5.85	57.19	28.0
436	0.38	173.00	315.00	900.00	782.00	45.00	90.00	5.85	59.94	26.5
437	0.36	162.00	225.00	900.00	805.00	135.00	90.00	5.85	71.91	25.0

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
438	0.41	185.00	225.00	900.00	746.00	135.00	90.00	5.85	49.64	28.0
439	0.37	167.00	318.80	900.00	814.00	81.40	49.80	5.31	67.00	25.5
440	0.37	167.00	131.30	900.00	772.00	188.60	130.20	5.31	63.67	27.3
441	0.40	180.00	238.40	900.00	745.00	81.40	130.20	5.31	55.72	25.0
442	0.40	180.00	211.60	900.00	771.00	188.60	49.80	5.31	54.54	27.5
443	0.42	168.00	200.00	940.00	796.00	120.00	80.00	4.80	53.07	28.0
444	0.42	168.00	260.00	940.00	821.00	120.00	20.00	4.80	50.23	28.0
445	0.42	168.00	140.00	940.00	771.00	120.00	140.00	4.80	48.95	26.5
446	0.42	168.00	280.00	940.00	802.00	40.00	80.00	4.80	53.46	26.0
447	0.42	168.00	120.00	940.00	791.00	200.00	80.00	4.80	48.95	27.0
448	0.39	156.00	200.00	940.00	828.00	120.00	80.00	4.80	62.98	21.0
449	0.45	180.00	200.00	940.00	765.00	120.00	80.00	4.80	44.83	28.0
450	0.40	161.00	283.00	940.00	834.00	72.00	44.00	4.31	60.14	20.5
451	0.40	161.00	117.00	940.00	797.00	168.00	116.00	4.33	52.09	22.0
452	0.44	175.00	212.00	940.00	766.00	72.00	116.00	4.32	42.58	25.5
453	0.44	175.00	188.00	940.00	789.00	168.00	44.00	4.32	52.97	26.5
454	0.47	176.30	187.50	940.00	798.00	112.50	75.00	4.13	36.76	28.0
455	0.47	176.30	243.80	940.00	822.00	112.50	18.80	4.13	40.69	26.5
456	0.47	176.30	131.30	940.00	775.00	112.50	131.30	4.13	29.86	28.0
457	0.47	176.30	262.50	940.00	804.00	37.50	75.00	4.13	37.79	25.5
458	0.47	176.30	112.50	940.00	793.00	187.50	75.00	4.13	31.96	28.0
459	0.44	165.00	187.50	940.00	828.00	112.50	75.00	4.13	46.15	23.0
460	0.50	187.50	187.50	940.00	768.00	112.50	75.00	4.13	31.57	28.0
461	0.45	169.60	265.60	940.00	833.00	67.90	41.50	4.58	40.76	27.0
462	0.45	169.60	109.40	940.00	799.00	157.10	108.50	4.58	28.35	27.5
463	0.49	182.90	198.70	940.00	770.00	67.90	108.50	4.58	28.44	28.0
464	0.49	182.90	176.30	940.00	791.00	157.10	41.50	3.67	33.82	26.0
465	0.53	163.81	165.00	900.90	1005.60	0.00	143.57	0.00	26.08	N/A
466	0.41	175.06	165.00	746.60	1005.80	128.50	132.10	8.08	46.17	N/A
467	0.42	179.94	178.03	746.80	1007.30	129.80	118.60	3.57	38.98	N/A
468	0.41	175.46	167.35	746.60	1006.30	129.90	128.62	7.79	41.01	N/A
469	0.44	156.76	172.38	856.40	1006.30	13.61	172.37	4.41	33.53	N/A
470	0.41	164.77	173.54	793.50	1006.20	50.05	173.53	6.47	38.03	N/A
471	0.40	164.03	167.00	770.10	1007.30	75.40	167.00	7.91	41.22	N/A
472	0.40	172.34	173.81	746.60	1007.20	93.37	159.90	9.73	37.64	N/A

編號	水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	坍度 (cm)
473	0.53	166.61	190.34	798.90	1079.00	0.00	125.18	9.88	24.73	N/A
474	0.55	191.84	250.00	857.20	948.90	0.00	95.69	5.33	27.09	N/A
475	0.41	159.21	213.50	771.90	1043.60	0.00	174.24	11.66	44.43	N/A
476	0.58	170.17	194.68	901.80	998.00	0.00	100.52	7.48	37.09	N/A
477	0.52	192.94	251.37	754.30	1043.60	0.00	118.27	5.75	33.12	N/A
478	0.56	165.62	194.68	905.90	1006.42	0.00	100.52	7.48	17.90	N/A
479	0.51	188.40	251.37	757.73	1028.44	0.00	118.27	6.35	27.34	N/A
480	0.43	179.48	175.10	746.60	1008.90	105.80	141.26	2.24	24.73	N/A
481	0.58	196.99	256.04	797.34	1002.72	5.40	77.75	7.11	21.93	N/A
482	0.49	183.20	236.39	808.30	1001.88	63.48	71.08	5.58	29.83	N/A

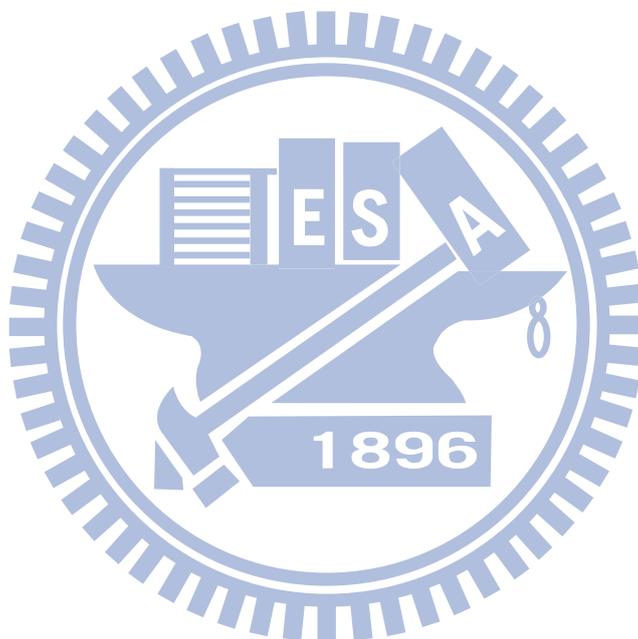


表 3 文獻配比資料出處

編號	文獻數據出處
1~10	文獻〔39〕
11~19	文獻〔40〕
20~28	文獻〔41〕
29~31	文獻〔42〕
35~58	文獻〔43〕
59~71	文獻〔44〕
72~74	文獻〔45〕
75	文獻〔46〕
76	文獻〔47〕
77~81	文獻〔48〕
82~88	文獻〔49〕
89~91	文獻〔50〕
92~106	文獻〔51〕
107~114	文獻〔52〕
115~117	文獻〔53〕
118~119	文獻〔54〕
120~132	文獻〔55〕
133~137	文獻〔56〕
138~140	文獻〔57〕
141~148	文獻〔58〕
149~178	文獻〔8〕
179~202	文獻〔59〕
203~210	文獻〔60〕
211~218	文獻〔61〕
219~222	文獻〔62〕
223~231	文獻〔63〕
232~240	文獻〔64〕
241~242	文獻〔65〕
243~244	文獻〔66〕
245~256	文獻〔67〕
257~280	文獻〔68〕
281~284	文獻〔69〕
285~293	文獻〔70〕
294~309	文獻〔71〕
310~311	文獻〔72〕

編號	文獻數據出處
312~317	文獻〔73〕
318~319	文獻〔74〕
320~325	文獻〔75〕
326~329	文獻〔76〕
330~347	文獻〔77〕
348~352	文獻〔78〕
353~376	文獻〔79〕
377~379	文獻〔80〕
380~382	文獻〔81〕
383~384	文獻〔82〕
385	文獻〔83〕
386~392	文獻〔84〕
393~396	文獻〔85〕
397~407	文獻〔86〕
408~412	文獻〔87〕
413	文獻〔88〕
414~429	文獻〔89〕
430~433	文獻〔90〕
434~464	文獻〔91〕
465~482	文獻〔1〕

表4 類神經網路模式

網路型式	Feed-forward back propagation (前饋式倒傳遞網路)
訓練函數	TRAINLM (LM最佳化演算法)
性能函數	MSE (均方誤差)
轉換函數	TANSIG (雙彎曲正切函數)

資料來源：〔3〕

表 5 混凝土暴露卻冰鹽下對卜作嵐材料之限制量(ACI 318-95)

膠結料名稱	佔總膠結料重量 (%膠結總重量)	標準規範
(1)飛灰或其他卜作嵐摻料	25	CNS 3036
(2)爐石粉	50	CNS 12549
(3)矽灰	10	ASTM C1240
(4)=(1)+(2)飛灰或其他卜作嵐與爐石粉總量(飛灰須低於 25%總膠結量)	50	CNS 3036 CNS 12549
(5)=(1)+(3)飛灰或其他卜作嵐與矽灰總量(飛灰須低於 25%總膠結量)	35	CNS 3036 ASTM C1240

資料來源：〔26〕

表 6 坍度與標稱最大粒徑所需單位用水量及含氣量

		標稱最大粒徑 (mm)	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	150
			坍度(cm)							
非輸氣 混凝土	單位 用水量 (kg/m <sup>3</sup> )	2.5~5	207	199	190	179	166	154	130	113
		7.5~10	228	216	205	193	181	169	145	124
		15~18	243	228	216	202	190	178	160	-
	含氣量(%)		3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
輸氣 混凝土	單位 用水量 (kg/m <sup>3</sup> )	2.5~5	181	175	168	160	150	142	122	107
		7.5~10	202	193	184	175	165	157	134	119
		15~18	216	205	197	184	174	166	154	-
	建議 輸氣 量 (%)	輕度曝露	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
		中度曝露	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
		嚴重曝露	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

資料來源：〔26〕

**表 7 單位體積混凝土中乾燥粗粒料所佔體積**

粗粒料 標稱最大粒徑 (mm)	每單位體積混凝土中乾燥粗粒料所佔體積(b/b <sub>0</sub> )			
	細粒料之細度模數(FM)			
	2.4	2.6	2.8	3.0
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19.0	0.66	0.64	0.62	0.60
25.0	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50.0	0.78	0.76	0.74	0.72
75.0	0.82	0.80	0.78	0.76
150.0	0.87	0.85	0.83	0.81

註：鋪面混凝土可增加 0.1，利用泵送機輸送之混凝土可減少 0.1

資料來源：〔26〕

**表 8 無試拌或試驗資料之最大容許水膠比**

工程設計抗壓強度 f'c(kgf/cm <sup>2</sup> )	水膠比 W/B(重量比)	
	輸氣混凝土	非輸氣混凝土
175	0.54	0.67
210	0.46	0.58
245	0.40	0.51
280	0.35	0.44
315	#	0.38
350	#	#

註：#須以試拌或試驗資料決定

資料來源：〔26〕

**表 9 特殊暴露環境下最大水膠比及最低抗壓強度限制**

暴露情況	最大水膠比(W/B)	最低抗壓強度 f'c(kgf/cm <sup>2</sup> )
暴露於水中混凝土需具有水密性	0.5	280
暴露於凍融循環之混凝土	0.45	315
暴露於卻冰鹽、鹽水、海水或鹽霧等之鋼筋混凝土，必須考量鋼筋防蝕之問題	0.4	350

資料來源：〔26〕

**表 10 各種構件混凝土施工之坍度建議值**

構件種類	坍度(cm)
1. 鋼筋混凝土基腳與基腳牆	2.5~7.5
2. 鋼筋混凝土沉箱、地下結構牆	2.5~7.5
3. 鋼筋混凝土梁及牆	2.5~10
4. 建築物柱構件	2.5~10
5. 鋪面及版構件	2.5~7.5
6. 巨積混凝土構件	2.5~10
註 1 表中坍度建議值係採用振動器搗實，若用其他方法之上限值可增加 2.5cm。 註 2 若採用高流動化混凝土為設計，則坍度可介於 23~28cm 間，惟不得有粒料沉澱、浮水、浮灰或浮漿之發生。	

資料來源：〔26〕

表 11 混凝土抵抗凍融環境之總含氣量規定

粗粒料標稱最大粒徑 (mm)	總含氣量(%)	
	嚴重暴露之環境	中度暴露之環境
9.5	7.5	6.0
12.5	7.0	5.5
19.0	6.0	5.0
25.0	6.0	4.5
37.5	5.5	4.5
50.0	5.0	4.0
75.0	4.5	3.5

註 1. 輸送至工地之容許差±1.5%。  
註 2. 設計抗壓強度超過 350kgf/cm<sup>2</sup>，總含氣量可依規定減少 1%。

資料來源：〔26〕

表 12 混凝土暴露於含硫酸鹽溶液環境之限制

硫酸鹽 暴露程度	土壤中水溶性 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 之重量百分比 (%)	水中 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 之濃度 (ppm)	最大水膠比 W/B (重量比)	最低抗壓強度 f'c (kgf/cm <sup>2</sup> )
輕 量	0~0.1	0~150	-	-
中 度	0.1~0.2	150~1500	0.50	280
嚴 重	0.2~2.0	1500~10000	0.45	315
非常嚴重	>2.0	>10000	0.45	315

資料來源：〔26〕

表 13 材料上下限範圍

材料成份	用量下限(kg/m <sup>3</sup> )	用量上限(kg/m <sup>3</sup> )
水	125	240
水泥	110	500
爐石粉	0	300
飛灰	0	300
粗骨材	>450	
細骨材	>450	
高效能減水劑(SP)	<2%粉體量(水泥+卜作嵐摻料)	

表 14 卜作嵐取代率分類表

類別	第 1 類	第 2 類	第 3 類	第 4 類	第 5 類
取代率(%)	0~10	11~20	21~30	31~40	41~50

表 15 單價表

材料項目 (kg/m <sup>3</sup> )	水	水泥	飛灰	爐石粉	粗骨材	細骨材	SP
單價(元)	0.0074	3	0.8	1.7	0.48	0.54	60

表 16 成本分類表

類別	第 1 類	第 2 類	第 3 類	第 4 類	第 5 類	第 6 類
成本 (元)	≤2000 元	>2000 元 ≤2250 元	>2250 元 ≤2500 元	>2500 元 ≤2750 元	>2750 元 ≤3000 元	>3000 元

表 17 水泥物理性質及化學成份

物理性質		
項目	規範值	實際值
比重	-	3.15
細度( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	最小值：2800	3335
化學成份(%)		
二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )	-	20.23
氧化鋁 $\text{Al}_2\text{O}_3$	-	4.30
氧化鐵 $\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	3.08
氧化鈣 $\text{CaO}$	-	63.68
氧化鎂 $\text{MgO}$	最大值：6	3.12
氧化鈉 $\text{Na}_2\text{O}$	-	0.35
氧化鉀 $\text{K}_2\text{O}$	-	0.54
三氧化硫 $\text{SO}_3$	最大值：3	2.77
矽酸三鈣 $\text{C}_3\text{S}$	-	42.16
矽酸二鈣 $\text{C}_2\text{S}$	-	32.43
鋁酸三鈣 $\text{C}_3\text{A}$	-	9.03
鋁鐵化四鈣 $\text{C}_4\text{AF}$	-	9.95
燒失量	最大值：3	0.62
不溶殘渣	最大值：0.75	0.13

表 18 飛灰之物理性質及化學成份

物理性質		
項目	規範值	實際值
比重	-	2.20
細度( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	-	3230
強度活性指數(7天)	最小值：75	78
強度活性指數(28天)	最小值：75	95
化學成份(%)		
二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )	最小值：70	52.33
氧化鋁 $\text{Al}_2\text{O}_3$		28.64
氧化鐵 $\text{Fe}_2\text{O}_3$		6.76
氧化鈣 $\text{CaO}$	-	5.08
氧化鎂 $\text{MgO}$	最大值：5	1.73
氧化鈉 $\text{Na}_2\text{O}$	最大值：5	2.26
氧化鉀 $\text{K}_2\text{O}$	-	1.88
三氧化硫 $\text{SO}_3$	最大值：5	0.81
燒失量	最大值：12	4.67

表 19 爐石粉之物理性質及化學成份

物理性質		
項目	規範值	實際值
比重	-	2.83
細度( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	最小值：2800	6010
化學成份(%)		
二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )	-	33.21
氧化鋁 $\text{Al}_2\text{O}_3$	-	16.32
氧化鐵 $\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	0.32
氧化鈣 $\text{CaO}$	-	38.95
氧化鎂 $\text{MgO}$	-	8.83
氧化鉀 $\text{K}_2\text{O}$	-	0.33
三氧化硫 $\text{SO}_3$	最大值：4	2.07

表 20 粗、細骨材基本性質

項目	粗骨材	細骨材
比重(OD)	2.62	2.60
比重(SSD)	2.66	2.64
細度模數(FM)	6.45	2.8
最大粒徑(mm)	12.5	4.75
單位重(kg/m <sup>3</sup> )	1600	-

表 21 強塑劑之基本性質

比重	1.07
固溶物含量	35.7%
pH 值	6.84
顏色	淡黃色
氯離子含量	19

表 22 混凝土配比(kg/m<sup>3</sup>)

編號	水	水泥	飛灰	爐石粉	粗骨材	細骨材	SP
1	194	223	72	76	1040	669	0.74
2	184	244	19	105	1104	649	0.79
3	187	194	22	171	1072	650	0.81
4	189	272	14	121	1040	670	0.70
5	191	346	41	38	1136	549	0.73
6	189	261	57	93	1072	619	0.88
7	204	331	54	99	1136	457	0.77
8	191	280	46	121	1104	555	0.68
9	210	300	51	131	1040	535	0.54
10	207	430	61	20	960	604	0.76
11	190	329	52	112	1104	516	0.87
12	208	351	121	52	960	554	0.72

表 23 強度模型測試結果表

相關係數=0.958		R <sup>2</sup> =0.9175	
編號	強度實際值(MPa)	強度預測值(MPa)	誤差(MPa)
1	57.67	54.93	2.74
2	67.06	58.74	8.32
3	54.90	51.92	2.98
4	41.67	41.12	0.54
5	57.45	58.72	-1.27
6	51.08	52.51	-1.43
7	60.70	62.97	-2.27
8	44.70	38.17	6.53
9	24.20	16.85	7.35
10	46.14	54.93	-8.79
11	44.62	40.39	4.23
12	40.80	44.19	-3.39
13	25.00	30.28	-5.28
14	57.00	59.32	-2.32
15	77.00	70.62	6.38
16	69.00	65.30	3.70
17	64.00	57.01	6.99
18	84.30	85.01	-0.71
19	78.10	75.91	2.19
20	59.00	59.52	-0.52

表 24 坍度模型測試結果表

相關係數=0.942		R <sup>2</sup> =0.8515	
編號	坍度實際值(cm)	坍度預測值(cm)	誤差(cm)
1	23.0	19.9	3.1
2	20.0	17.6	2.4
3	23.5	24.6	-1.1
4	27.0	27.2	-0.2
5	13.5	16.1	-2.6
6	11.5	11.5	0.0
7	22.0	22.4	-0.4
8	26.5	25.9	0.6
9	26.0	22.8	3.2
10	19.0	21.1	-2.1

表 25 強度參數敏感度分析表

項目	水分析值(W)	水泥分析值(C)	強塑劑分析值(SP)
總合	-44.204	17.943	42.035
平均值	-0.092	0.037	0.087

表 26 坍度參數敏感度分析表

項目	強塑劑分析值(SP)
總合	-43.092
平均值	-0.146

表 27 配比試驗結果表

編號	預測 強度 (MPa)	實際 強度 (MPa)	強度 誤差 (MPa)	強度 誤差 (%)	預測 坍度 (MPa)	實際 坍度 (MPa)	坍度 誤差 (MPa)	坍度 誤差 (%)
1	34.32	44.10	9.77	22.16	19.0	19.0	-0.0	-0.03
2	32.26	47.99	15.73	32.77	18.5	20.0	1.5	7.46
3	34.85	49.75	14.90	29.95	19.0	20.0	1.0	4.86
4	35.60	52.87	17.27	32.67	19.2	20.0	0.8	3.77
5	45.96	46.70	0.74	1.59	16.9	20.0	3.1	15.62
6	39.04	47.06	8.02	17.05	18.7	20.0	1.3	6.67
7	54.55	54.52	-0.03	-0.06	14.1	18.0	3.9	21.70
8	50.16	47.61	-2.55	-5.36	17.2	19.5	2.3	11.72
9	52.05	46.06	-5.99	-13.01	16.7	20.5	3.8	18.40
10	40.08	54.30	14.22	26.18	19.1	21.0	1.9	8.93
11	55.07	54.98	-0.09	-0.16	17.2	19.0	1.8	9.63
12	40.91	55.13	14.22	25.79	14.1	21.5	7.4	34.30

表 28 坍度範圍表

坍度(cm)	20
容許誤差(cm)	±3.8
下限值(cm)	16.2
上限值(cm)	23.8

表 29 強度範圍表

強度												
英制(psi)	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000
公制(kgf/cm <sup>2</sup> )	210	280	350	420	490	560	630	700	770	840	910	980
SI 制(MPa)	20.6	27.5	34.3	41.2	48.0	54.9	61.8	68.6	75.5	82.4	89.2	96.1
放大係數(MPa)	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
上限值(MPa)	24.0	30.9	37.7	44.6	51.5	58.3	65.2	72.1	78.9	85.8	92.6	99.5

表 30 210kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元)

210kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.55	199	337	20	6	704	991	0.74	23.80	20.4	1952	0.07
0.55	192	244	65	41	1024	703	2.26	23.45	23.0	1858	0.30
0.48	177	221	39	106	1136	629	3.58	21.55	22.9	1971	0.40
0.52	186	195	72	92	1056	671	2.67	23.87	23.3	1826	0.46

表 31 280kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元)

280kgf/cm <sup>2</sup>												
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)	水膠比
0.50	182	294	30	43	1104	662	1.55	28.58	19.5	1.24	1957	0.20
0.50	236	362	84	27	704	780	0.50	29.97	22.8	3.79	1986	0.23
0.50	165	239	4	88	1104	737	3.02	24.89	23.7	4.52	1976	0.28
0.46	240	311	88	126	800	620	0.00	29.78	16.7	4.07	1935	0.41
0.49	186	217	93	69	1104	613	3.06	26.76	21.7	1.80	1884	0.43
0.40	221	301	137	111	736	698	0.00	26.63	22.1	2.24	1930	0.45
0.45	235	263	30	229	800	645	0.43	26.57	23.0	3.09	1958	0.50

表 32 350kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元)

350kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.44	171	352	10	23	1056	724	0.00	34.73	19.5	1998	0.09
0.46	179	335	51	2	1024	717	1.07	34.94	21.7	1989	0.14
0.50	201	285	62	59	1024	633	2.02	33.03	21.6	1957	0.30
0.47	206	293	103	41	880	718	0.00	35.30	21.7	1839	0.33
0.48	188	246	89	53	992	710	0.00	34.42	19.6	1756	0.37
0.52	194	223	72	76	1040	669	0.74	34.32	19.0	1758	0.40
0.47	181	232	54	99	1056	674	0.00	36.79	18.7	1775	0.40
0.42	227	319	82	139	848	608	0.00	37.26	16.9	1992	0.41
0.42	224	288	134	117	768	667	0.00	33.11	19.9	1897	0.47

表 33 420kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元)

420kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.49	154	280	20	15	944	921	0.46	39.73	21.1	1856	0.11
0.45	187	333	62	19	992	704	0.00	38.66	19.6	1934	0.20
0.50	217	344	49	44	1024	577	0.08	44.00	16.8	1951	0.21
0.46	185	305	30	67	912	793	0.00	42.72	23.0	1916	0.24

420kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.43	215	342	106	57	880	636	0.00	40.96	19.5	1971	0.32
0.49	216	290	68	81	960	630	0.51	42.01	19.0	1891	0.34
0.50	224	298	55	99	960	603	0.00	41.38	17.4	1890	0.34
0.50	148	193	50	54	1136	771	0.07	40.72	18.9	1673	0.35
0.46	189	261	57	93	1072	619	0.88	39.04	18.7	1885	0.36
0.45	180	242	71	91	1024	688	0.00	39.58	19.4	1798	0.40
0.47	215	259	26	168	880	693	1.11	39.39	23.3	1944	0.43
0.45	205	261	48	148	912	680	0.00	42.10	21.2	1875	0.43
0.46	233	288	112	107	768	679	0.00	38.54	21.6	1869	0.43
0.48	208	238	83	112	848	748	0.00	38.69	22.6	1779	0.45
0.42	171	222	42	141	1136	617	0.00	42.26	16.8	1815	0.45
0.47	162	188	2	158	1056	765	0.78	43.48	22.2	1797	0.46
0.42	180	228	91	114	1072	618	0.47	43.28	17.9	1824	0.47
0.41	198	250	106	124	944	626	1.58	41.40	23.1	1929	0.48
0.40	195	242	119	121	960	628	0.00	43.65	19.0	1824	0.50

表 34 490kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元)

490kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.49	202	335	5	75	1024	647	0.00	48.85	18.0	1975	0.19
0.50	205	327	1	84	992	674	0.00	46.22	18.6	1962	0.21
0.48	233	370	90	28	768	710	0.00	48.68	22.6	1980	0.24
0.41	167	306	42	63	1040	726	0.00	45.11	19.1	1947	0.26
0.36	145	282	36	88	944	857	0.16	48.82	23.5	1946	0.31
0.43	202	315	20	131	992	626	0.00	49.30	18.3	1995	0.32
0.40	174	294	84	59	944	740	0.82	47.10	23.8	1948	0.33
0.45	202	298	84	67	1056	559	0.00	49.48	16.6	1881	0.34
0.36	177	312	116	60	1040	610	0.00	51.03	17.5	1957	0.36
0.39	179	282	81	93	960	708	0.00	49.32	20.7	1909	0.38
0.43	191	280	46	121	1104	555	0.68	50.16	17.2	1950	0.37
0.35	177	306	120	79	992	628	0.00	50.87	19.4	1961	0.39
0.47	203	258	20	157	848	777	0.00	51.08	23.2	1881	0.41
0.48	212	251	92	97	1024	567	0.00	49.03	16.5	1787	0.43
0.37	170	264	3	197	1136	579	0.00	50.92	16.7	1984	0.43
0.39	180	250	70	138	1104	568	1.48	45.02	18.7	1963	0.45
0.42	197	246	57	165	1024	588	0.00	48.97	17.8	1871	0.47
0.40	198	257	74	169	992	585	0.00	50.73	18.0	1907	0.49
0.37	173	236	98	130	1056	609	0.99	48.92	20.3	1899	0.49

表 35 560kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元)

560kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.43	142	265	18	44	1056	836	2.40	58.01	22.5	1983	0.19
0.45	144	255	1	63	1072	841	1.29	52.87	20.6	1915	0.20
0.32	134	266	33	120	880	935	0.64	54.01	19.8	1990	0.37
0.35	164	293	49	126	1104	614	0.00	53.44	17.4	1991	0.37
0.35	180	299	113	96	1040	584	0.00	54.19	17.0	1962	0.41
0.35	143	212	0	193	880	928	0.63	53.30	17.9	1922	0.48
0.35	140	208	76	114	704	1079	3.10	54.72	19.7	1981	0.48

表 36 630kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元)

630kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.48	133	202	69	5	1056	893	0.00	60.53	18.9	1655	0.27
0.38	149	283	56	58	704	1077	0.00	60.96	18.1	1909	0.29
0.36	155	234	8	185	704	1041	0.00	63.92	17.6	1920	0.45
0.39	172	224	61	161	944	737	0.00	60.40	22.9	1843	0.50

表 37 700kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元)

700kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.40	136	257	58	22	1040	860	2.49	66.47	22.2	1964	0.24
0.34	131	284	0	104	848	1015	0.16	65.98	18.3	1990	0.27
0.29	140	287	116	81	1136	612	0.00	70.54	18.0	1964	0.41
0.50	133	144	45	78	1024	929	2.04	69.98	17.0	1712	0.46
0.36	137	203	79	102	768	1042	0.00	70.31	17.1	1773	0.47

表 38 770kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元)

770kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.36	127	224	60	72	1024	865	2.49	75.41	19.2	1946	0.37
0.29	143	286	105	107	1024	693	0.00	73.73	22.4	1986	0.43

表 39 840kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本≤2000 元)

840kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.33	134	217	73	122	1104	730	0.00	80.62	19.8	1837	0.47
0.31	132	214	4	203	992	843	0.00	81.27	20.3	1918	0.49

表 40 210kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)

210kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.54	194	327	21	9	704	1000	4.52	23.83	23.6	2159	0.08
0.44	210	350	112	11	1024	536	4.43	20.37	20.5	2203	0.26

表 41 280kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)

280kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.49	219	405	31	11	1024	568	2.43	27.52	20.5	2200	0.09
0.44	227	464	26	29	704	787	0.00	28.64	18.1	2223	0.11
0.44	202	351	80	24	1072	546	4.70	26.16	22.8	2247	0.23

表 42 350kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)

350kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.41	220	476	50	11	912	589	0.00	32.82	17.3	2240	0.11
0.45	235	415	88	20	704	742	0.00	37.08	20.9	2086	0.21
0.48	213	333	59	48	944	643	2.34	31.08	23.7	2066	0.24
0.42	178	255	49	116	1104	609	3.86	31.99	23.5	2089	0.39

表 43 420kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)

420kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.46	187	389	3	13	1040	698	0.00	40.84	17.8	2065	0.04
0.42	178	343	39	43	1040	689	0.00	41.85	18.2	2002	0.19
0.43	187	340	30	69	1072	618	2.03	39.64	20.3	2129	0.23
0.41	218	393	93	51	880	600	2.72	38.34	21.8	2248	0.27
0.47	203	287	11	135	1024	616	2.29	38.62	22.0	2058	0.34
0.40	194	310	77	101	1136	471	3.62	40.47	18.9	2178	0.36
0.36	225	388	46	196	704	676	0.00	42.53	23.2	2235	0.38
0.41	195	274	49	151	1056	554	2.85	42.42	22.3	2093	0.42
0.38	222	330	21	241	800	624	0.00	44.06	22.4	2136	0.44

表 44 490kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)

490kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.41	202	425	43	19	1056	548	0.00	45.63	16.5	2142	0.13
0.43	149	299	22	29	912	930	2.28	45.39	16.6	2037	0.15
0.45	191	346	41	38	1136	549	0.73	45.96	16.9	2018	0.19
0.45	142	266	17	35	1136	777	3.00	49.28	23.4	2012	0.16
0.40	216	388	127	29	848	622	2.41	46.77	20.0	2200	0.29
0.39	200	362	54	93	944	622	0.00	49.44	20.1	2074	0.29
0.35	163	302	15	144	1104	632	0.00	49.39	17.7	2031	0.34
0.36	193	334	43	152	1024	548	2.84	51.05	22.7	2250	0.37
0.40	210	322	38	167	880	643	0.00	48.04	21.2	2048	0.39
0.36	175	281	57	144	1104	560	3.78	46.31	23.2	2190	0.42
0.39	216	316	27	217	848	631	0.00	45.92	21.3	2084	0.44
0.35	181	272	3	240	1056	564	2.80	45.80	23.2	2203	0.47
0.40	227	285	59	222	848	577	3.76	45.34	22.7	2222	0.50

表 45 560kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)

560kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.42	153	324	2	38	960	877	3.46	51.56	21.7	2177	0.11
0.37	179	396	74	10	1056	603	0.00	52.98	18.0	2094	0.18
0.40	154	319	33	37	848	941	3.66	56.75	19.0	2178	0.18
0.48	163	270	66	2	800	982	5.59	51.95	22.0	2113	0.20
0.42	212	370	0	139	880	669	0.00	53.51	21.3	2128	0.27
0.36	168	338	64	63	1040	671	0.00	53.58	18.5	2031	0.27
0.40	230	409	0	169	848	594	0.00	52.01	19.2	2240	0.29
0.36	158	302	40	93	1040	724	1.26	56.56	22.1	2059	0.31
0.45	235	362	35	126	768	685	0.45	55.27	23.6	2092	0.31
0.33	197	373	43	176	912	589	0.00	58.00	20.4	2206	0.37
0.39	190	329	52	112	1104	516	0.87	55.07	17.2	2077	0.33
0.31	135	254	24	159	880	913	2.25	56.51	22.0	2098	0.42
0.36	201	292	54	217	944	562	0.00	53.19	19.1	2042	0.48

表 46 630kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)

630kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.35	142	351	42	13	848	966	0.00	59.23	17.7	2034	0.14
0.32	158	388	75	25	1136	582	0.01	61.69	16.9	2123	0.20
0.34	189	359	76	113	1072	502	1.93	58.33	16.8	2229	0.34
0.33	125	224	90	65	992	869	4.36	62.86	21.2	2058	0.41
0.30	179	335	17	235	1024	544	0.00	62.36	18.4	2201	0.43
0.29	165	317	12	231	1040	602	0.00	64.99	18.6	2175	0.43
0.31	156	278	54	169	1136	569	0.00	63.82	17.1	2014	0.45
0.34	181	279	77	170	1136	472	1.38	60.09	16.2	2068	0.47
0.32	179	286	123	155	992	559	2.58	61.72	22.3	2150	0.49

表 47 700kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)

700kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.34	134	292	3	103	1104	763	2.43	71.16	22.2	2137	0.27
0.30	145	281	97	101	1056	673	0.90	71.17	22.5	2013	0.41
0.33	144	232	36	173	736	1009	3.56	68.25	23.4	2127	0.47
0.32	157	253	3	239	1056	648	0.73	65.67	21.5	2065	0.49

700kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.28	175	322	131	183	944	542	1.46	69.62	18.0	2213	0.49

表 48 770kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)

770kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.38	129	255	71	11	1104	809	3.55	76.88	23.4	2016	0.24
0.27	153	369	114	90	1136	502	0.97	72.20	17.4	2223	0.36
0.26	154	310	83	210	1104	508	0.00	76.43	17.3	2155	0.49

表 49 840kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2000 元<成本≤2250 元)

840kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.25	144	300	94	176	1104	555	2.31	79.24	23.0	2240	0.47

表 50 210kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)

210kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.49	216	370	38	29	1104	506	5.35	18.89	22.2	2311	0.15
0.49	217	372	16	56	704	862	5.71	22.18	18.1	2367	0.16
0.46	212	322	115	26	1040	525	8.21	19.40	18.3	2375	0.30

表 51 280kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)

280kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.40	223	451	64	44	912	546	3.52	25.75	18.5	2421	0.19
0.42	213	388	113	3	960	560	7.54	29.45	18.9	2473	0.23

表 52 350kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)

350kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.41	220	476	50	11	912	589	0.00	32.82	17.3	2240	0.11
0.45	235	415	88	20	704	742	0.00	37.08	20.9	2086	0.21

350kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.48	213	333	59	48	944	643	2.34	31.08	23.7	2066	0.24
0.42	178	255	49	116	1104	609	3.86	31.99	23.5	2089	0.39

表 53 420kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2250 元 < 成本 ≤ 2500 元)

420kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.41	214	431	61	34	736	757	5.44	41.76	20.4	2486	0.18
0.32	197	479	114	20	800	661	0.00	42.63	22.5	2301	0.22
0.41	214	316	102	107	960	535	6.52	38.30	21.6	2350	0.40

表 54 490kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2250 元 < 成本 ≤ 2500 元)

490kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.38	188	424	39	34	1040	598	2.93	51.07	22.2	2356	0.15
0.38	210	407	4	147	1040	489	3.95	50.72	20.7	2472	0.27
0.46	234	337	126	43	704	728	6.16	46.19	22.8	2284	0.33

490kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.30	215	376	72	280	704	601	0.90	48.33	17.4	2376	0.48

表 55 560kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)

560kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.36	178	475	18	5	1072	601	3.11	55.74	22.6	2471	0.05
0.41	208	470	3	40	912	654	0.00	54.94	20.5	2269	0.08
0.34	175	467	33	12	1136	530	1.98	56.47	18.7	2395	0.09
0.32	192	499	72	30	960	561	1.10	58.27	17.8	2433	0.17
0.36	144	312	42	50	912	881	5.98	53.50	19.4	2324	0.23
0.30	171	426	13	124	1024	597	0.00	56.21	19.5	2310	0.24
0.29	159	405	29	106	1104	572	1.96	58.25	21.0	2372	0.25
0.35	190	397	16	137	1104	481	3.56	55.10	20.9	2437	0.28
0.39	206	361	0	171	1040	524	2.17	57.88	19.2	2284	0.32
0.37	206	341	128	88	944	522	8.01	57.98	17.8	2489	0.39
0.35	195	321	67	171	1056	470	5.04	53.80	21.4	2368	0.43
0.36	175	266	93	132	1104	528	9.25	55.50	23.5	2464	0.46
0.34	214	335	9	289	880	534	3.86	55.26	23.4	2444	0.47

表 56 630kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)

630kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.31	167	473	36	28	1104	557	2.70	63.65	21.6	2485	0.12
0.31	171	471	61	17	1056	571	0.00	64.56	18.2	2303	0.14
0.33	185	453	55	45	1040	552	3.19	60.46	22.2	2466	0.18
0.33	189	450	48	68	1024	541	0.00	59.78	17.0	2285	0.20
0.30	175	433	101	49	960	609	0.83	63.87	21.6	2300	0.26
0.31	194	465	24	145	960	537	0.00	63.37	16.6	2409	0.27
0.28	173	428	111	70	960	589	0.00	64.81	19.6	2268	0.30
0.27	185	468	54	159	912	544	0.00	63.71	19.9	2447	0.31
0.29	174	381	13	213	1056	508	1.76	58.50	21.1	2400	0.37
0.31	201	390	33	218	880	569	0.00	59.04	19.2	2295	0.39
0.28	186	407	133	132	848	588	0.00	59.37	16.4	2274	0.39
0.33	158	239	20	216	736	932	9.09	61.73	23.0	2499	0.50

表 57 700kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)

700kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.28	164	486	62	37	1136	487	1.35	70.58	17.3	2457	0.17
0.38	228	453	90	55	768	621	3.60	65.83	19.3	2443	0.24
0.27	181	459	92	129	912	545	0.00	66.25	18.6	2400	0.33
0.38	140	233	7	124	992	860	6.90	71.16	17.8	2266	0.36
0.26	183	441	108	144	880	550	1.48	67.87	21.0	2460	0.36
0.26	186	396	69	248	848	563	0.76	68.70	23.4	2419	0.44
0.39	227	305	140	140	848	530	8.26	65.43	18.1	2452	0.48
0.28	184	335	44	290	960	506	2.36	71.43	20.2	2407	0.50

表 58 770kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)

770kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.30	129	284	46	97	848	954	8.00	72.49	23.6	2452	0.33
0.28	171	405	103	102	1072	485	3.54	73.92	17.4	2457	0.34
0.28	179	386	110	147	992	495	4.28	73.45	17.7	2494	0.40
0.27	172	374	107	163	992	516	2.63	72.32	18.9	2395	0.42
0.26	161	341	56	222	1024	549	1.13	73.64	22.8	2298	0.45

表 59 840kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2250 元<成本≤2500 元)

840kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.31	132	260	30	137	1024	786	7.23	81.96	23.5	2383	0.39
0.31	227	374	138	216	704	545	4.30	80.00	17.8	2488	0.49

表 60 210kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)

210kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.38	219	477	77	22	944	502	6.05	23.25	17.1	2615	0.17
0.39	228	479	57	49	912	508	6.00	21.78	17.5	2636	0.18

表 61 280kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)

280kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.45	216	433	4	47	1104	475	6.15	26.14	23.2	2535	0.11
0.37	220	482	37	71	960	497	5.05	29.58	17.5	2626	0.18
0.40	223	421	64	74	960	495	9.18	26.50	17.2	2717	0.25

表 62 350kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)

350kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.40	207	447	15	54	1072	501	5.34	35.30	23.5	2548	0.13
0.46	222	359	42	80	704	800	8.59	32.45	20.4	2530	0.25

表 63 420kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)

420kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.37	197	500	11	28	800	748	4.28	42.83	23.2	2599	0.07
0.40	191	436	20	17	800	813	5.72	41.00	20.6	2517	0.08
0.39	200	410	76	33	1024	527	7.57	42.36	23.0	2575	0.21

表 64 490kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)

490kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.38	180	434	16	30	736	897	6.67	50.25	18.1	2560	0.10
0.35	203	455	32	101	1024	477	4.99	45.79	20.5	2604	0.23
0.37	229	357	18	241	912	473	6.23	46.29	18.6	2608	0.42

表 65 560kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)

560kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.38	171	414	18	14	800	886	6.39	51.88	20.5	2523	0.07
0.35	211	396	7	203	960	501	6.21	53.02	23.8	2640	0.35
0.35	210	383	62	160	944	486	8.75	56.96	20.0	2709	0.37
0.33	193	340	39	207	1072	452	6.87	58.10	22.9	2572	0.42

表 66 630kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)

630kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.31	134	402	24	5	1024	796	6.40	62.62	18.9	2535	0.07
0.38	218	468	92	17	848	593	6.90	60.88	17.0	2646	0.19
0.30	132	346	55	33	992	812	8.17	60.76	20.5	2539	0.20
0.29	178	437	15	158	1104	456	5.55	62.00	23.8	2698	0.28
0.28	194	427	18	245	944	475	4.22	61.26	19.9	2672	0.38
0.34	219	336	46	265	880	489	7.79	64.95	19.0	2647	0.48

表 67 700kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)

700kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.44	200	429	3	25	912	702	8.32	69.07	22.0	2645	0.06
0.33	157	400	15	64	768	917	9.14	70.02	23.0	2730	0.16
0.28	189	497	98	79	960	487	4.39	71.54	16.6	2688	0.26
0.29	186	454	53	141	992	494	4.40	67.31	20.4	2648	0.30
0.33	170	353	112	43	944	663	9.64	69.15	23.8	2609	0.31
0.25	191	476	73	210	880	482	0.79	70.81	21.3	2571	0.37
0.27	209	446	82	241	736	547	2.80	71.52	22.3	2628	0.42

700kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.30	201	358	98	221	736	633	5.76	69.19	23.8	2567	0.47

表 68 770kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)

770kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.32	165	420	72	23	1104	553	9.11	75.88	22.6	2729	0.18
0.27	160	480	101	22	1072	529	3.22	76.90	23.3	2549	0.20
0.31	171	413	138	2	992	583	9.72	76.97	22.0	2724	0.25
0.29	142	366	117	10	1072	650	8.43	77.04	23.3	2577	0.26
0.34	171	363	120	19	1040	598	8.02	73.27	22.7	2518	0.28
0.28	170	405	79	118	1104	460	7.48	75.96	22.3	2703	0.33
0.31	212	454	82	139	768	591	4.57	74.56	19.6	2624	0.33
0.27	168	391	111	126	1056	469	6.36	76.51	20.3	2615	0.38
0.32	223	376	22	300	736	581	4.17	72.48	20.9	2571	0.46
0.31	182	306	96	182	1024	490	10.84	74.43	21.5	2708	0.48

表 69 840kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)

840kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.28	186	464	161	43	880	543	6.30	78.96	19.3	2685	0.31
0.30	196	347	82	232	848	558	8.59	79.44	22.6	2723	0.48

表 70 910kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2500 元<成本≤2750 元)

910kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.33	225	373	135	167	768	531	6.63	86.47	18.2	2563	0.45
0.36	233	344	113	196	768	528	8.77	86.34	18.4	2634	0.47

表 71 490kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元)

490kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.35	204	472	30	73	1024	480	8.81	44.63	22.4	2841	0.18
0.33	214	467	29	150	944	457	7.93	46.29	18.7	2853	0.28
0.36	217	382	22	191	944	482	10.89	50.42	22.4	2853	0.36
0.38	231	319	19	268	912	462	10.74	47.60	19.7	2758	0.47

表 72 560kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元)

560kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.38	231	362	66	188	880	475	11.70	56.16	17.8	2838	0.41

表 73 630kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元)

630kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.34	180	478	5	45	704	884	9.95	64.34	17.5	2924	0.09
0.33	186	398	29	145	1104	453	9.89	61.75	23.8	2829	0.30

表 74 700kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元)

700kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.32	202	441	53	140	912	520	8.88	67.51	22.2	2853	0.30
0.32	206	341	26	272	912	499	9.98	65.76	23.5	2810	0.47

表 75 770kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元)

770kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.30	203	485	60	139	848	539	8.55	76.48	20.4	2948	0.29
0.30	215	453	25	240	800	521	6.45	73.15	19.3	2838	0.37
0.25	184	387	46	298	912	474	8.48	75.93	22.6	2905	0.47

表 76 840kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元)

840kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.28	163	454	81	49	1104	492	10.88	81.35	21.9	2956	0.22
0.26	157	450	117	36	1040	546	10.17	80.27	23.6	2906	0.25

840kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.26	186	489	153	79	912	466	6.45	84.75	21.1	2798	0.32
0.27	161	406	115	79	1056	501	11.66	80.41	21.0	2919	0.32
0.25	200	482	64	242	848	454	6.08	78.93	23.5	2924	0.39
0.28	196	417	100	192	880	487	7.64	81.43	18.9	2799	0.41
0.29	211	400	60	267	768	536	8.63	84.18	19.4	2876	0.45

表 77 910kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表 (2750 元 < 成本 ≤ 3000 元)

910kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.26	188	483	161	75	880	485	9.63	87.14	17.1	2965	0.33
0.31	225	419	94	220	736	523	7.15	89.56	18.4	2770	0.43
0.30	222	397	73	270	704	553	9.86	88.88	18.8	2935	0.46
0.29	223	402	98	260	768	463	9.46	91.48	18.5	2911	0.47

表 78 980kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(2750 元<成本≤3000 元)

980kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.30	236	394	141	241	704	469	8.34	93.04	18.4	2795	0.49

表 79 700kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本>3000 元)

700kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.27	198	432	6	287	880	481	12.34	69.90	21.7	3209	0.40

表 80 770kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本>3000 元)

770kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.30	172	496	63	7	992	592	11.24	78.75	22.1	3018	0.12
0.34	216	489	43	96	848	556	11.04	75.29	20.7	3033	0.22
0.28	198	475	62	166	912	463	10.89	74.95	18.5	3096	0.32
0.30	205	421	14	252	848	529	11.26	74.47	23.5	3069	0.39

表 81 840kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本>3000 元)

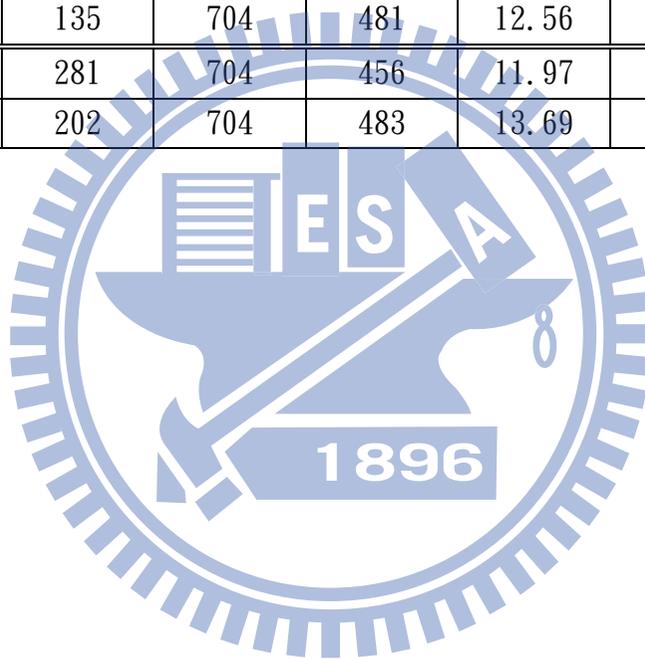
840kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.26	197	486	92	167	848	487	9.66	83.31	21.5	3063	0.35
0.29	203	453	38	212	848	514	12.36	79.66	20.4	3174	0.36
0.28	198	425	86	201	800	535	13.84	84.67	19.1	3187	0.40

表 82 910kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本>3000 元)

910kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.30	218	444	79	213	768	501	11.99	90.98	18.6	3114	0.40
0.27	212	453	63	261	768	475	15.53	91.18	18.9	3409	0.42

表 83 980kgf/cm<sup>2</sup> 配比分類表(成本>3000 元)

980kgf/cm <sup>2</sup>											
水膠比	水 (kg/m <sup>3</sup> )	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰 (kg/m <sup>3</sup> )	爐石 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )	預測強度 (MPa)	預測坍度 (cm)	成本 (元)	卜作嵐取代率 (%)
0.26	214	483	192	135	704	481	12.56	93.90	18.6	3182	0.40
0.29	234	475	61	281	704	456	11.97	93.57	18.9	3253	0.42
0.27	216	437	163	202	704	483	13.69	93.77	18.0	3204	0.46



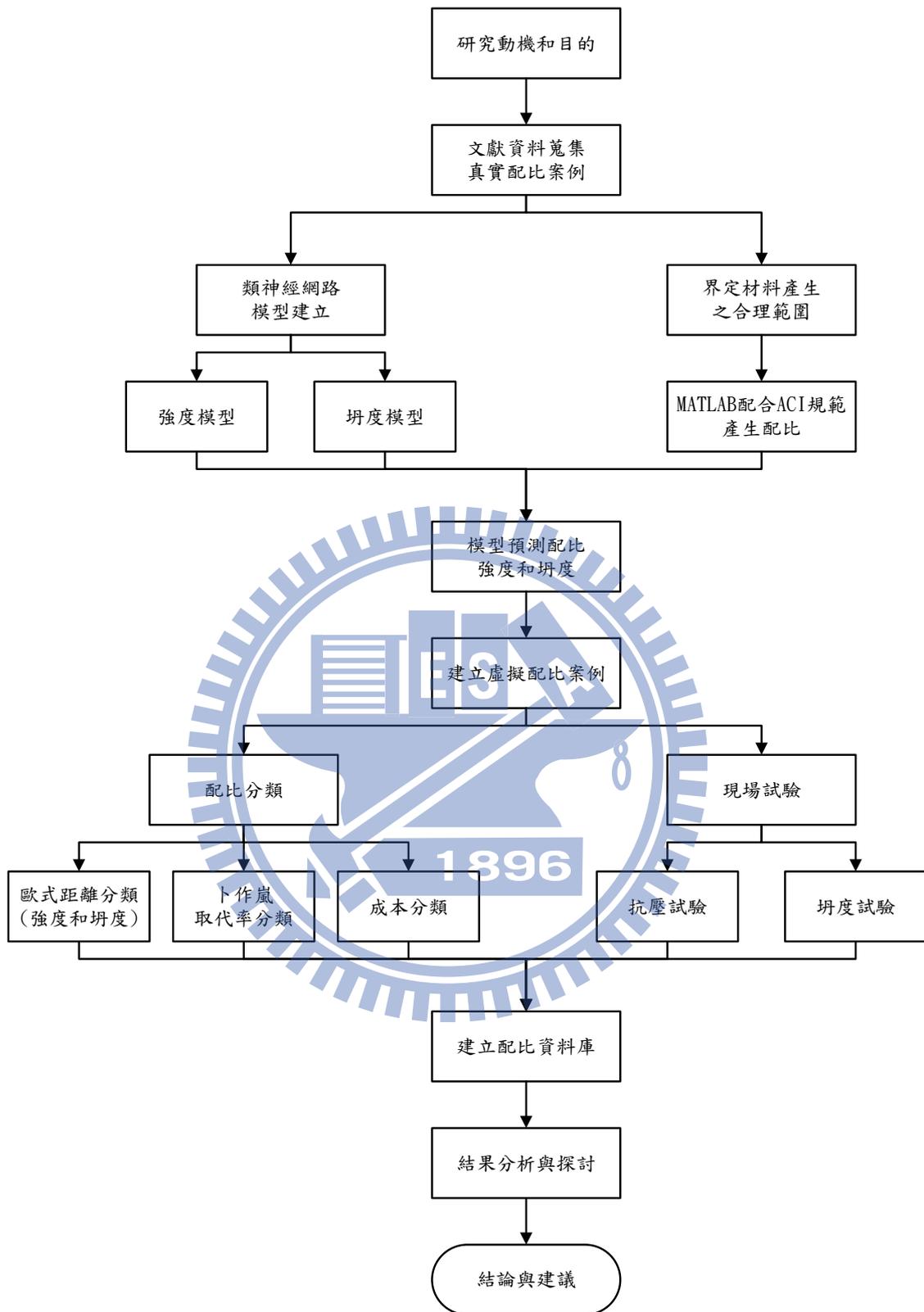


圖 1 研究流程圖

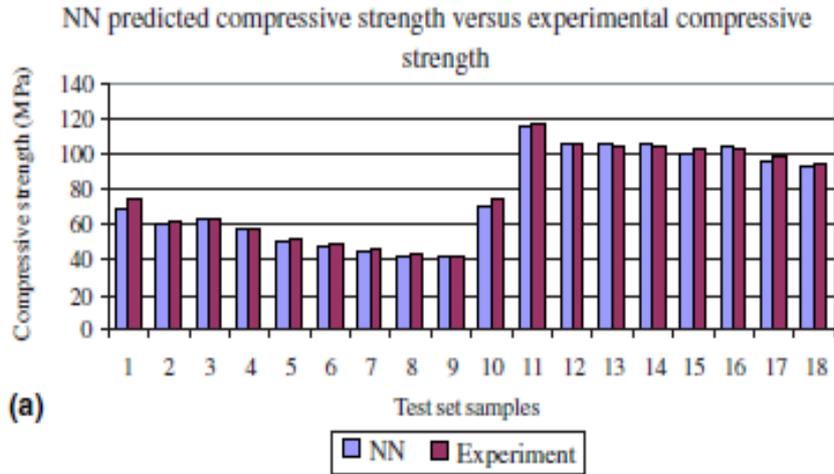


圖 2 強度模型預測與實際值比較圖

資料來源：〔15〕

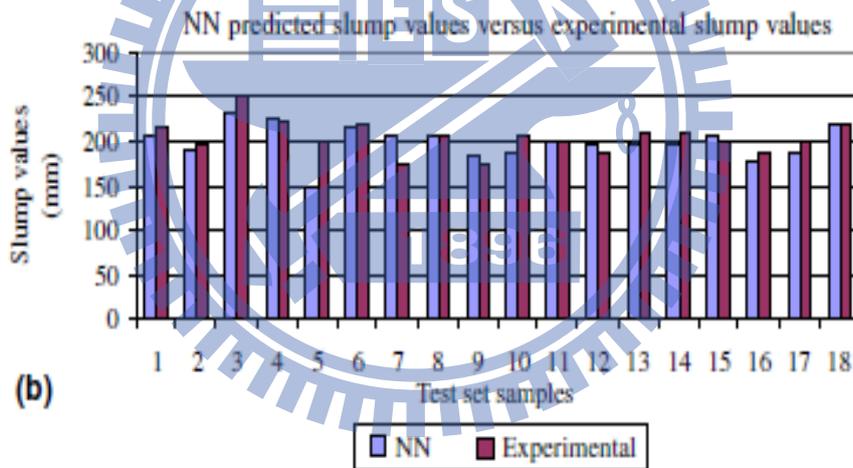


圖 3 坍度模型預測與實際值比較圖

資料來源：〔15〕

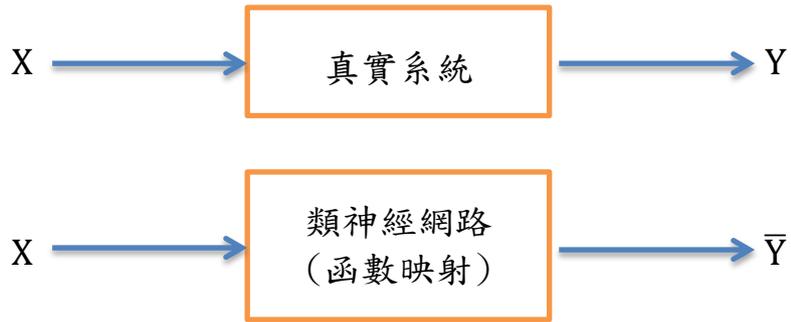


圖 4 真實系統和類神經網路之比較圖

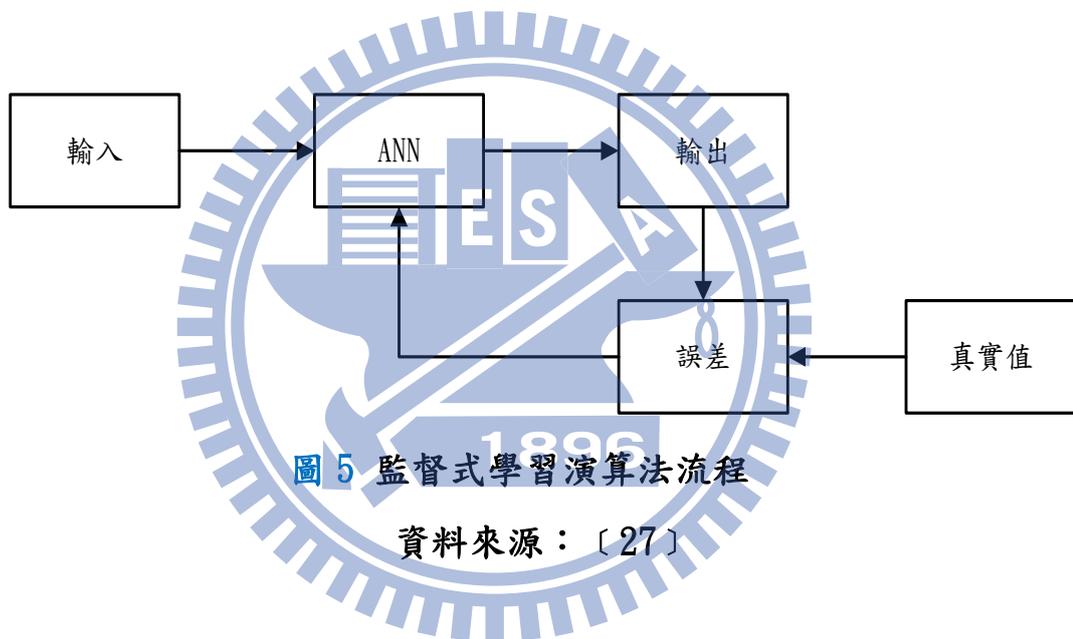


圖 5 監督式學習演算法流程

資料來源：〔27〕

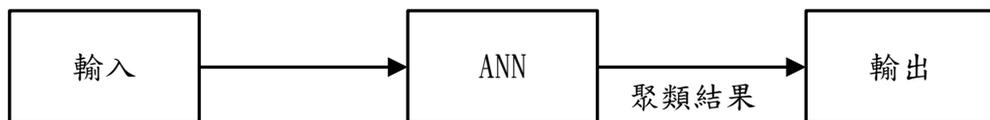


圖 6 非監督式演算法流程

資料來源：〔27〕

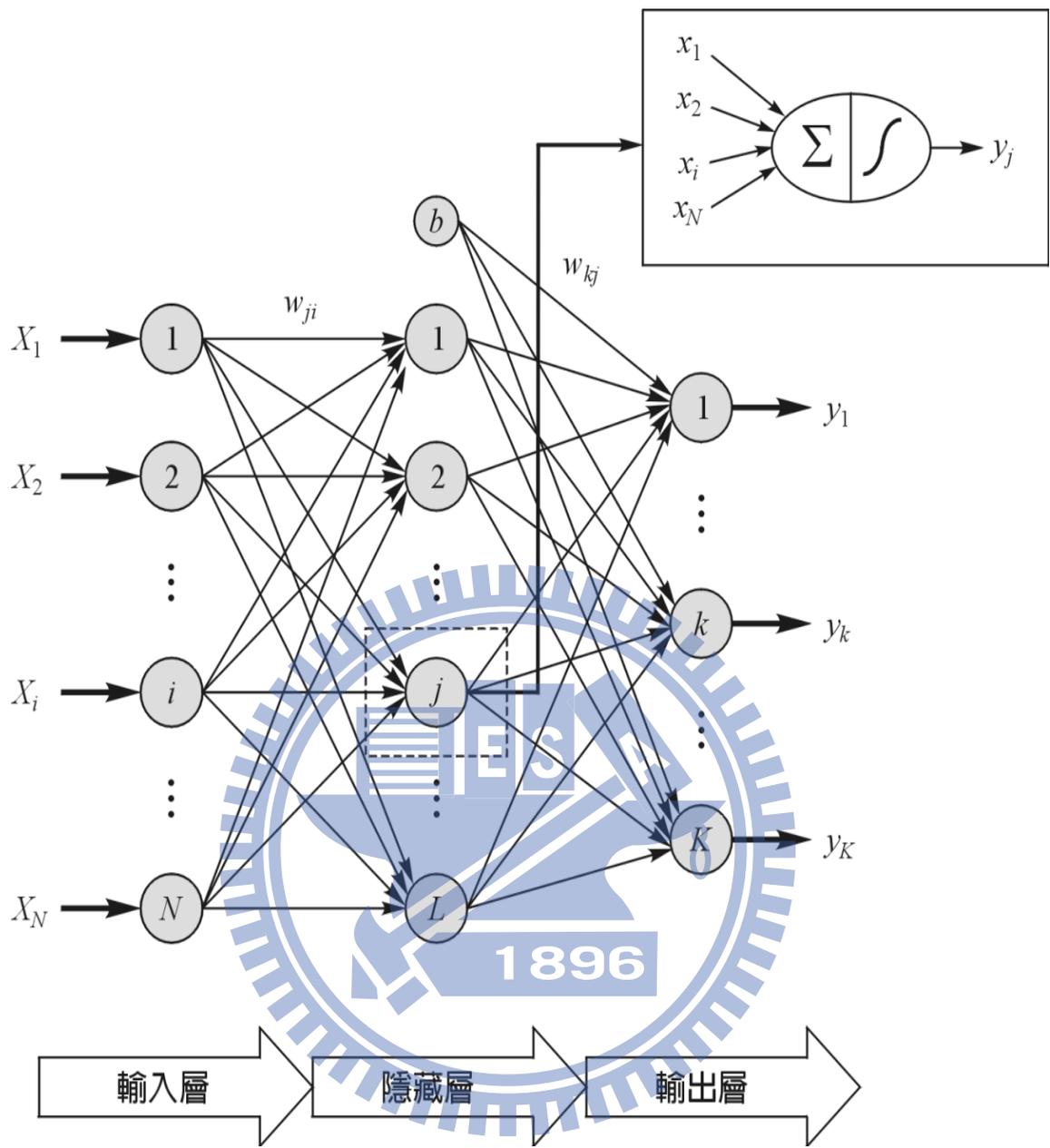
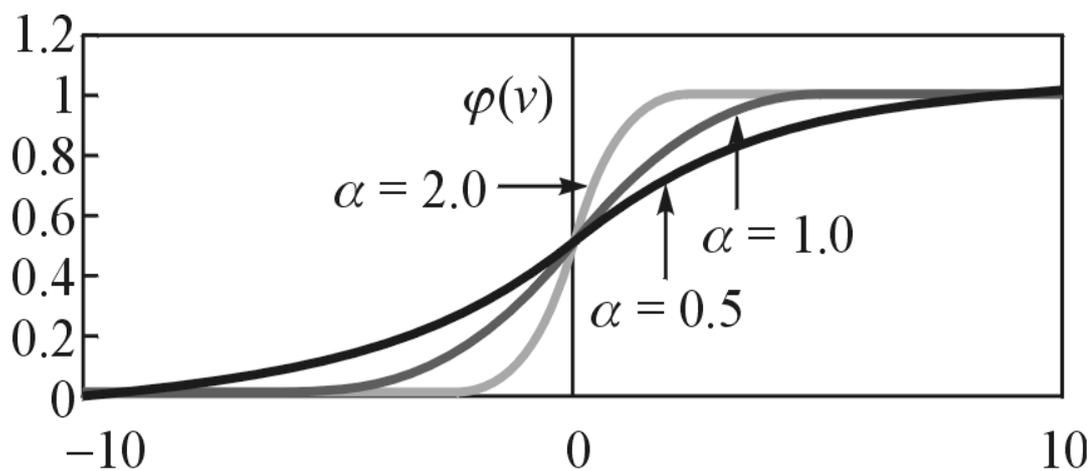
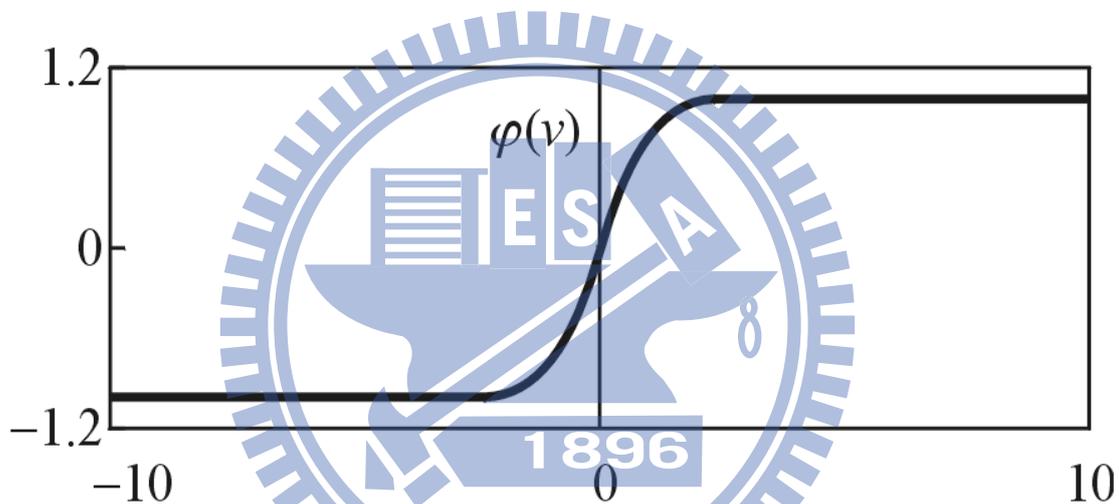


圖 7 倒傳遞類神經網路架構圖

資料來源：〔27〕



(a) S形函數 ( $\alpha=0.5, 1$  和  $2$ )



(b) 雙曲線函數

圖 8 常用之活化函數型態圖

資料來源：〔27〕

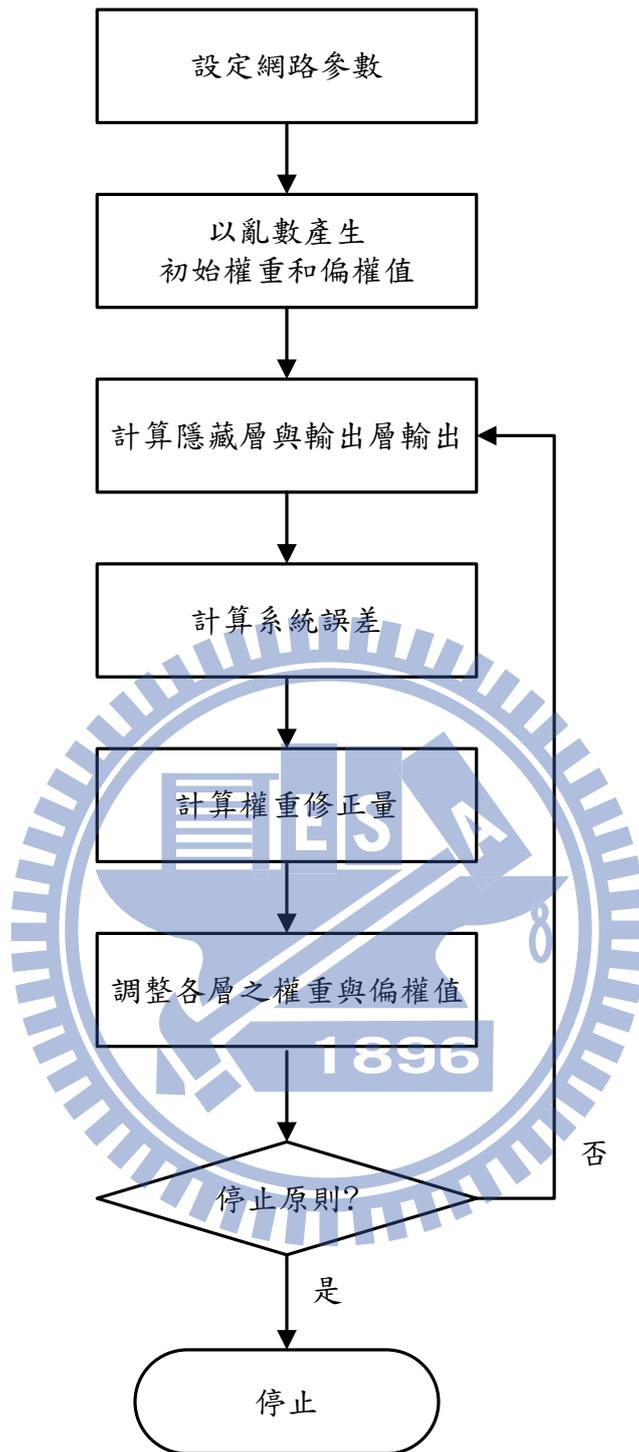


圖 9 倒傳遞演算法流程圖

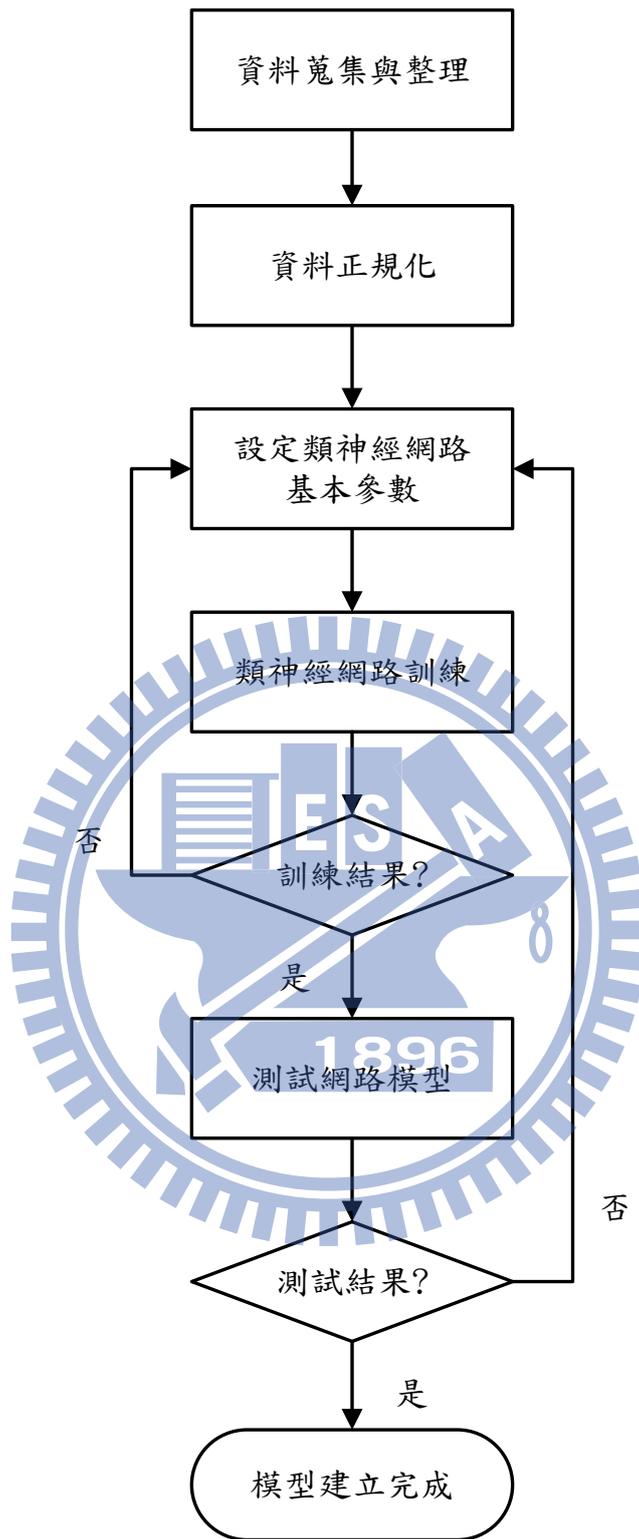


圖 10 類神經網路模型建立流程

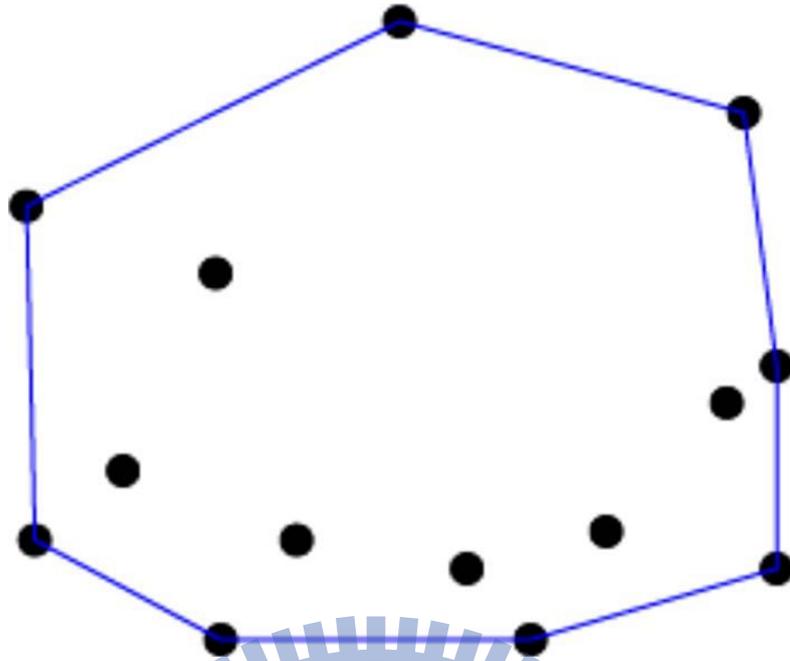


圖 11 Convex hull 凸多邊形

資料來源：〔23〕



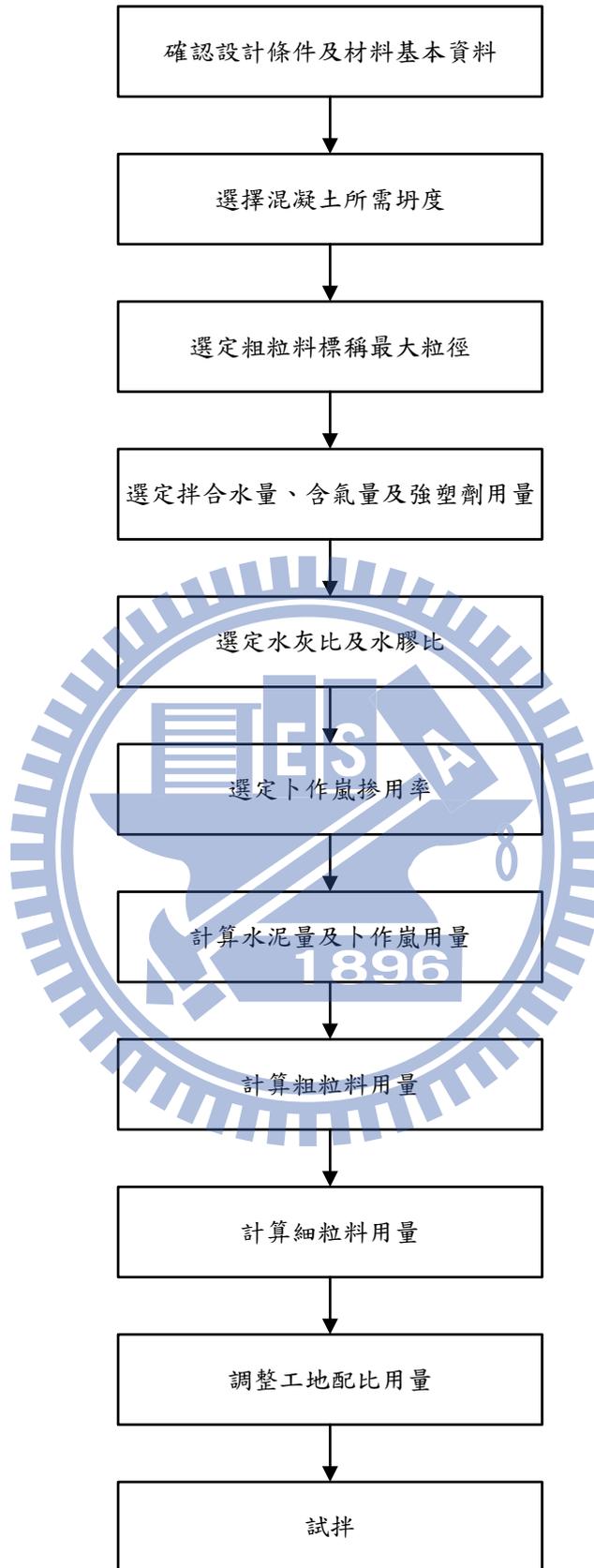


圖 12 普通卜作蘭混凝土配比設計流程

資料來源：〔26〕

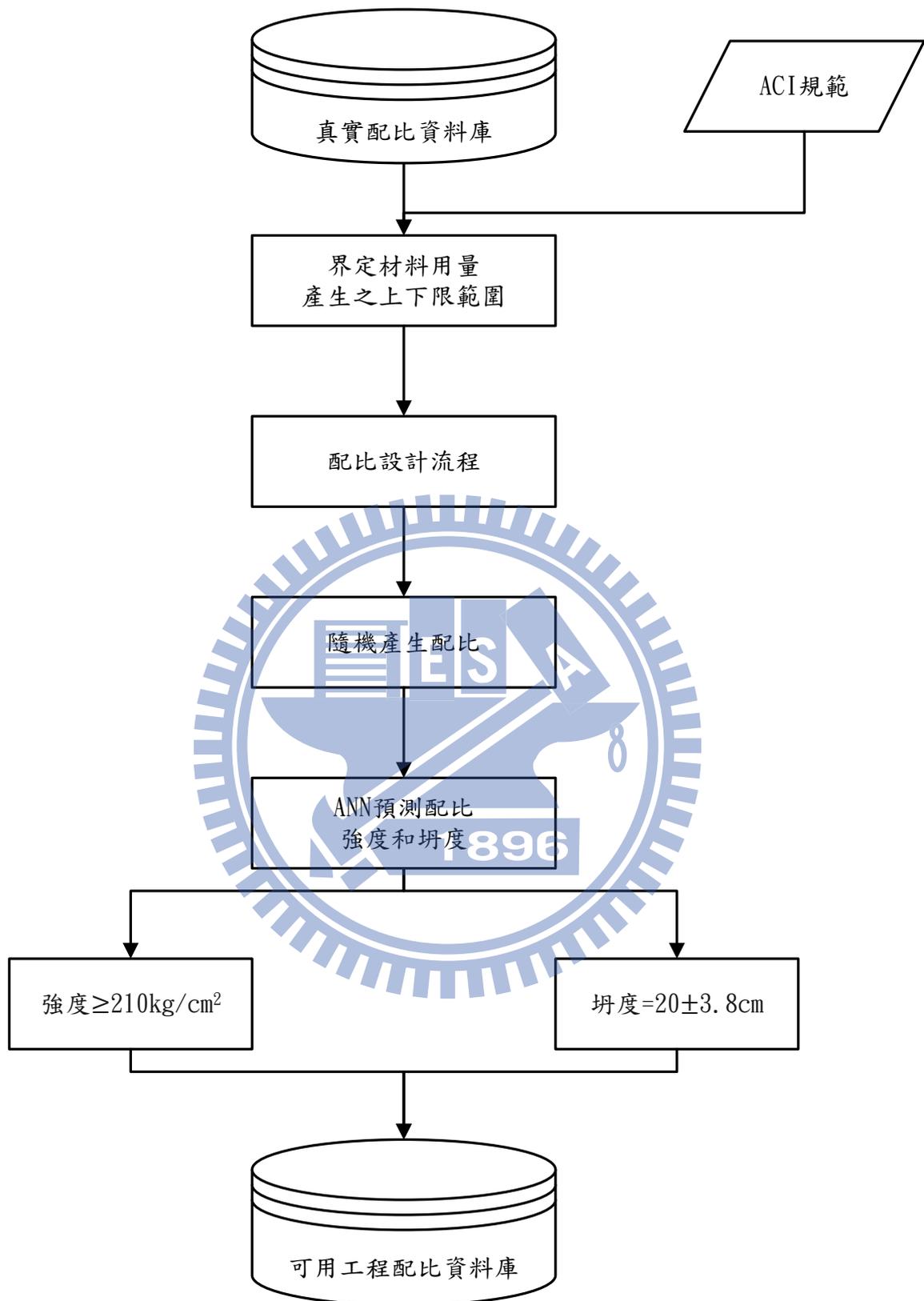


圖 13 配比產生流程圖

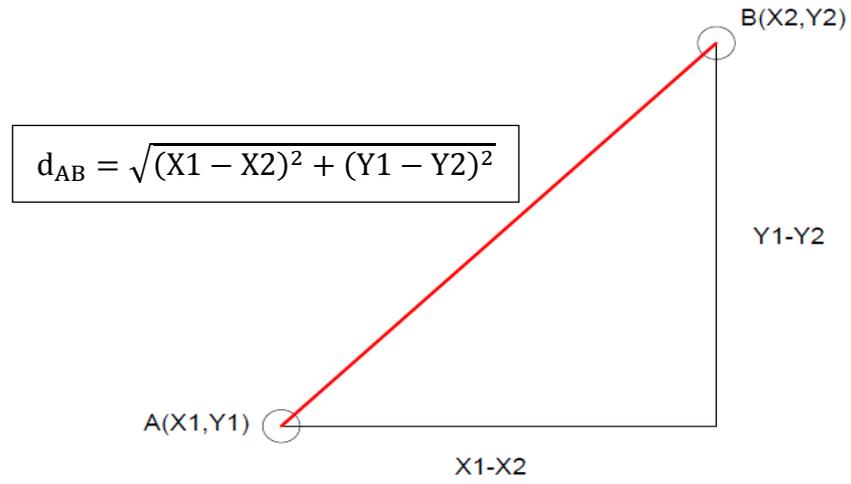


圖 14 二維平面歐式距離計算示意圖

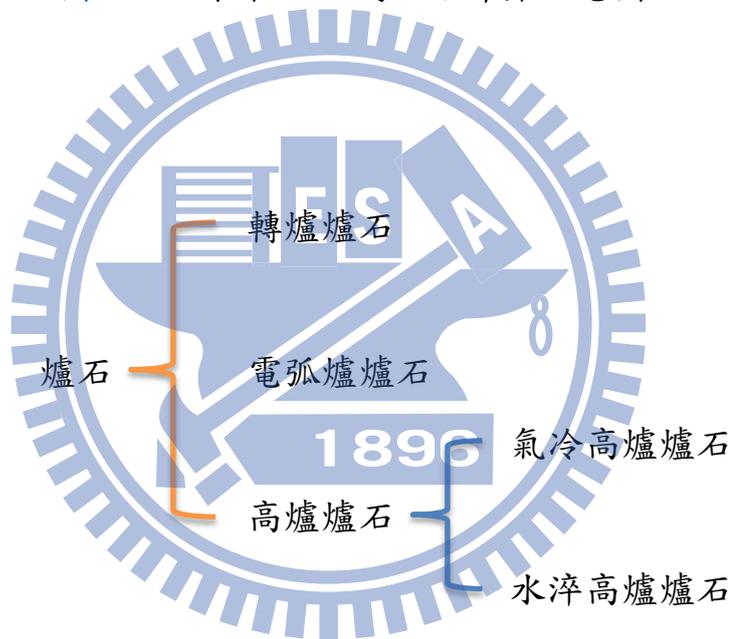


圖 15 爐石之分類

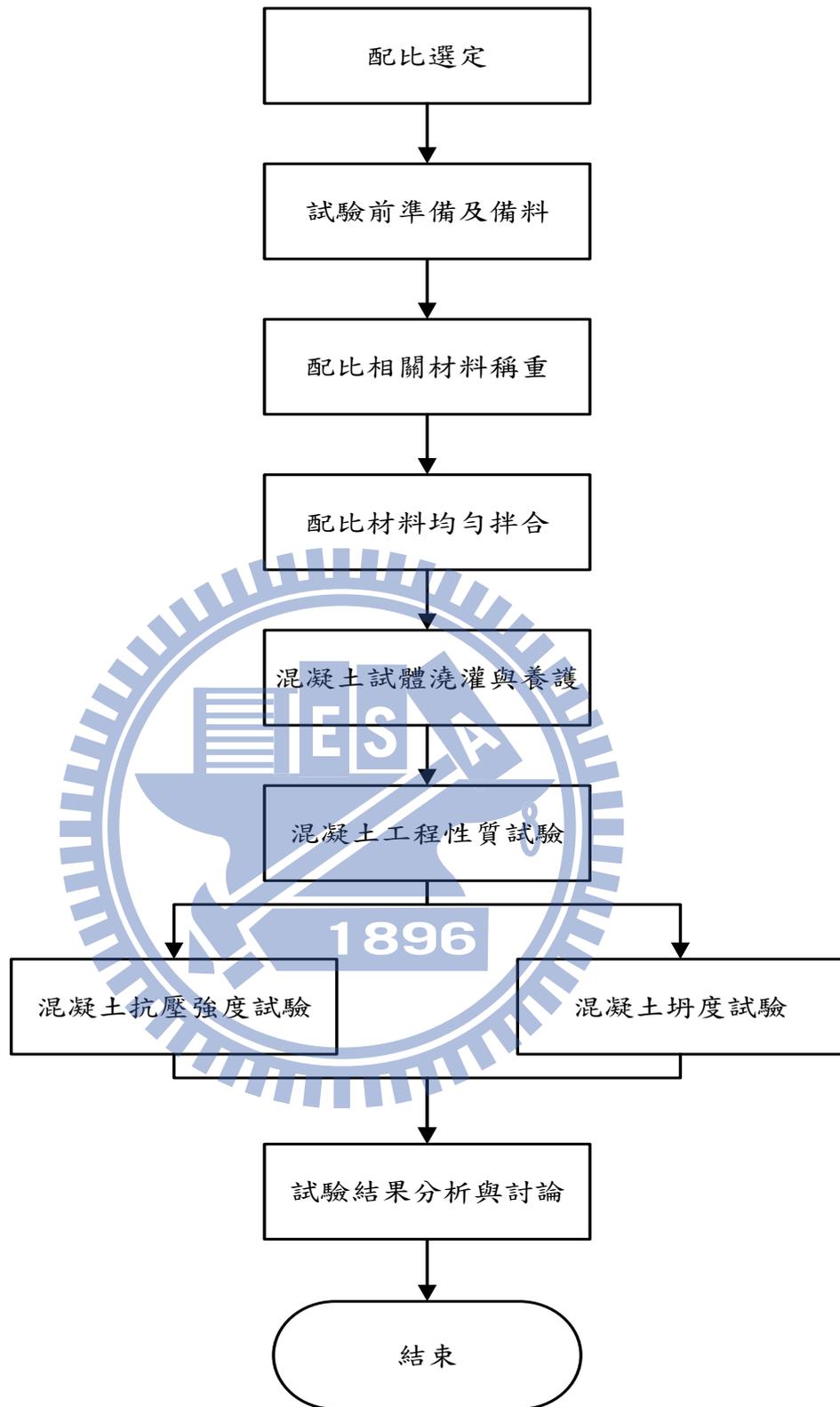


圖 16 試驗流程圖



圖 17 強制式拌合機



圖 18 坍度模及搗棒



圖 19 試體模具



圖 20 試體養護槽



圖 21 200 噸抗壓試驗機



圖 22 新拌混凝土坍度施作



圖 23 試體澆灌搗實施作



圖 24 試體養護施作



圖 25 試體蓋平施作



圖 26 試體蓋平完成



圖 27 混凝土抗壓試驗施作



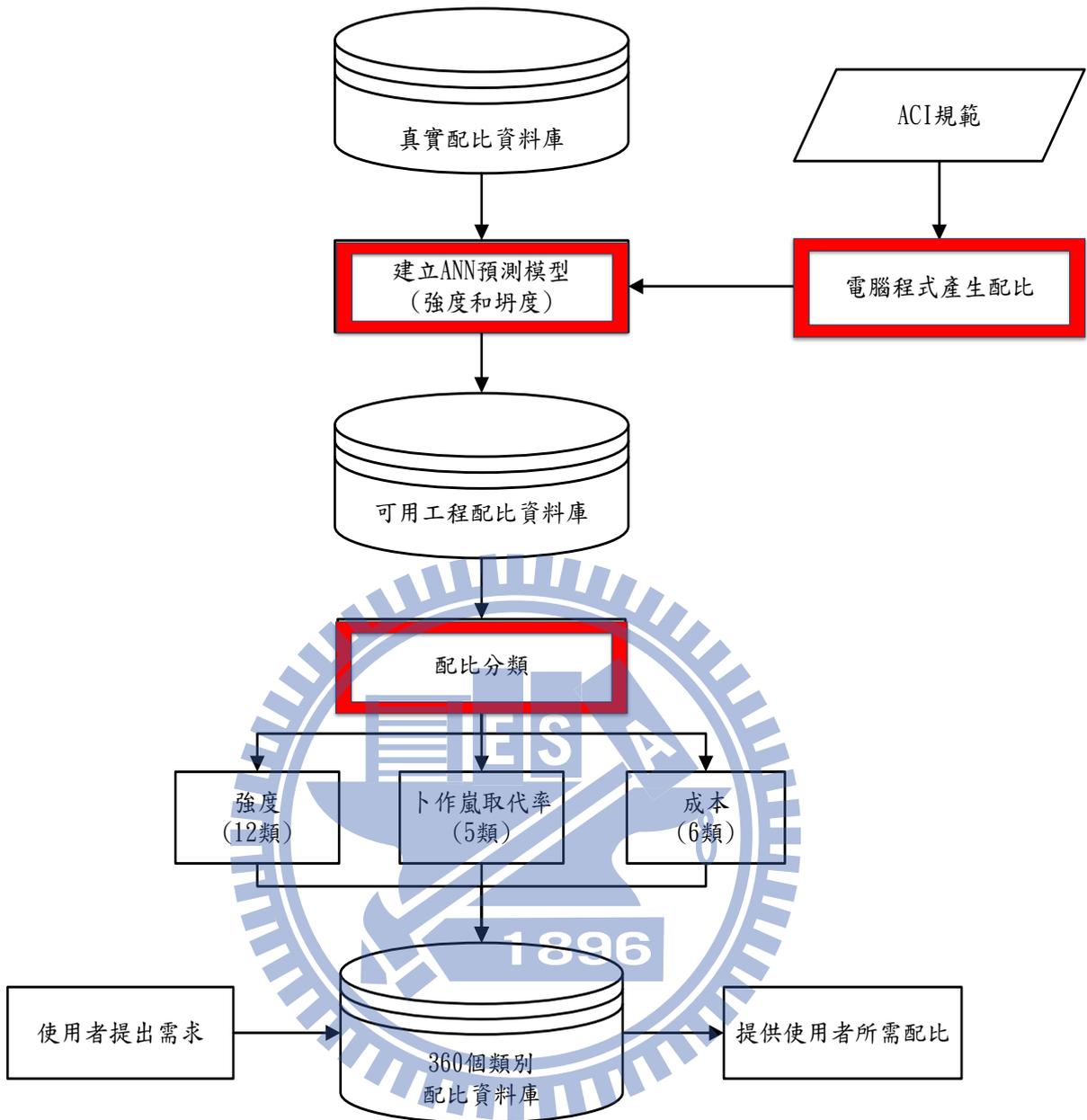


圖 28 系統架構圖

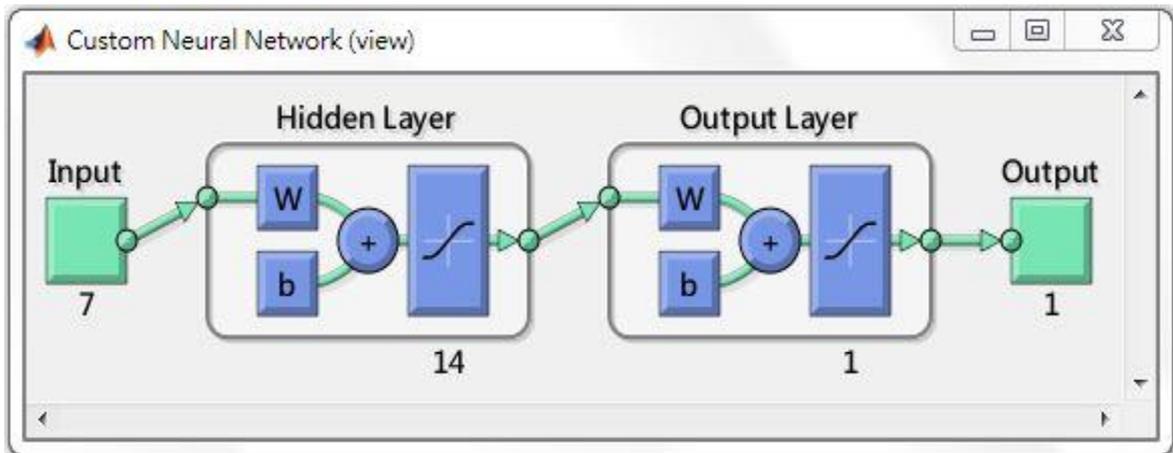


圖 29 類神經網路強度模型基本設定圖

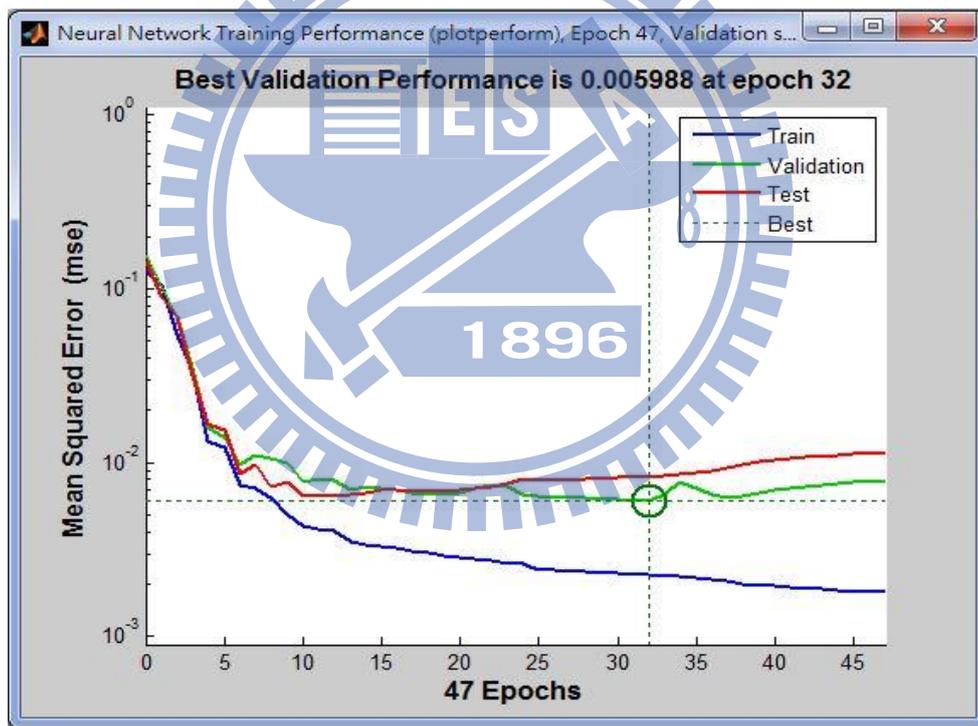


圖 30 強度模型網路最佳驗證效能圖

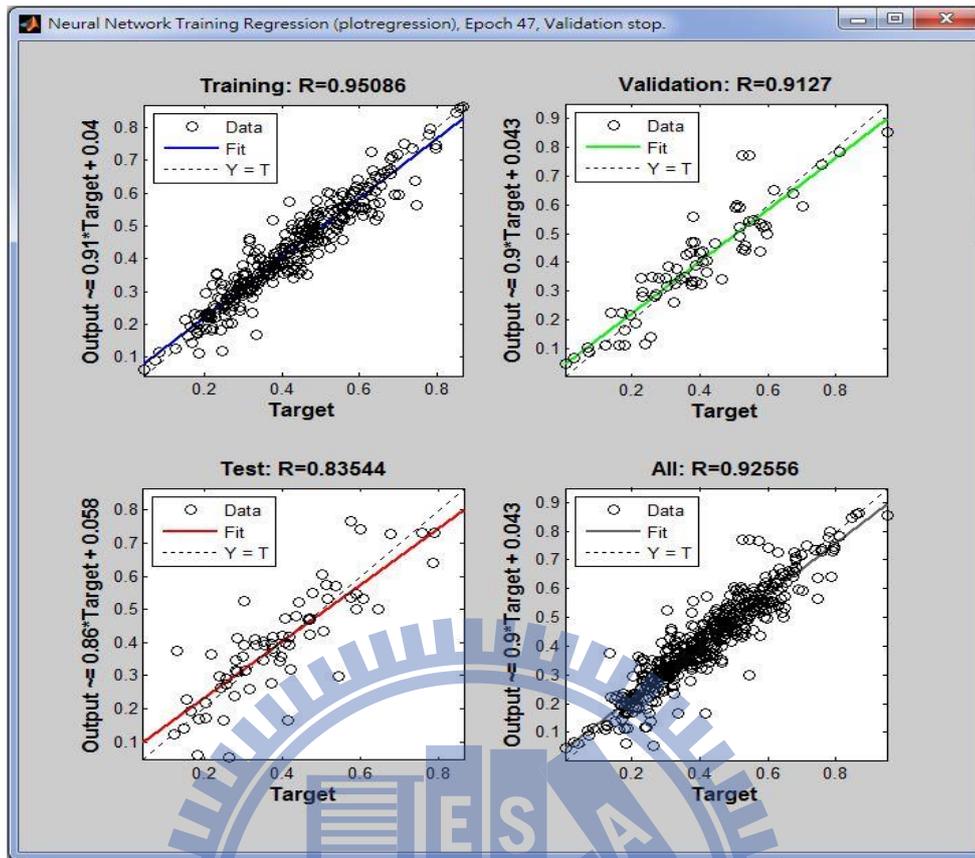


圖 31 強度模型網路訓練成果圖

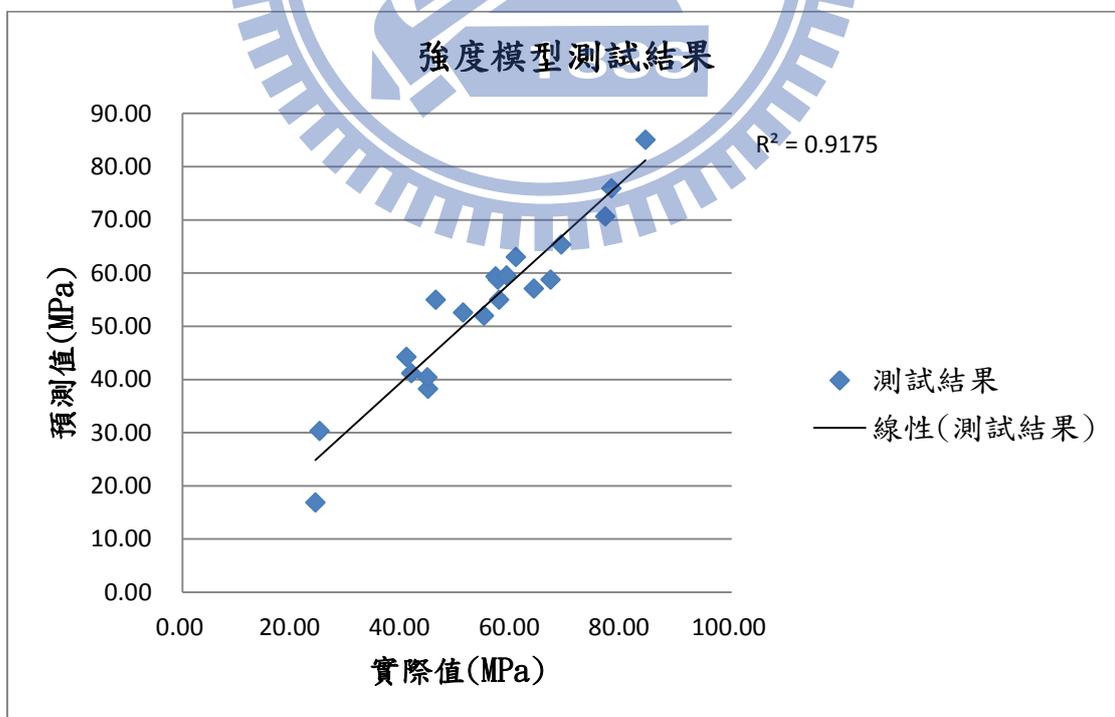


圖 32 強度模型測試結果圖

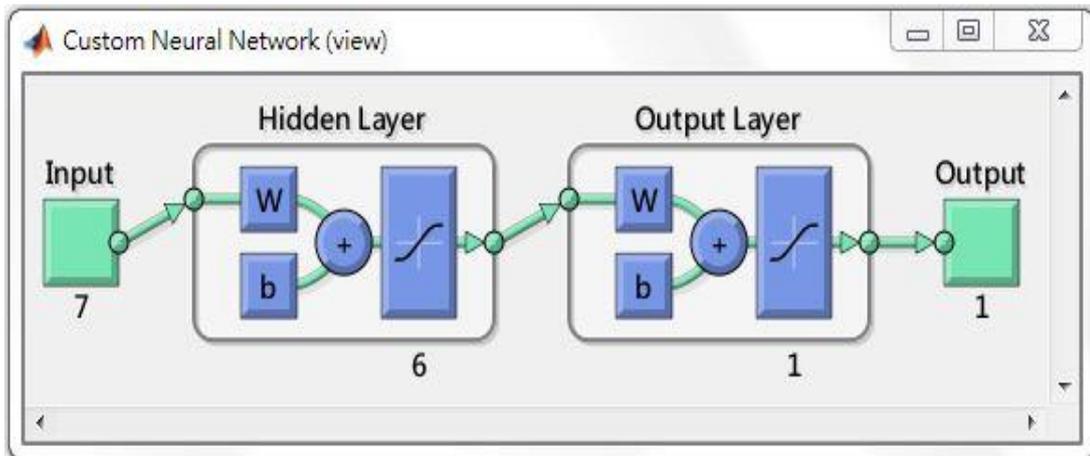


圖 33 類神經網路坍塌度模型基本設定圖

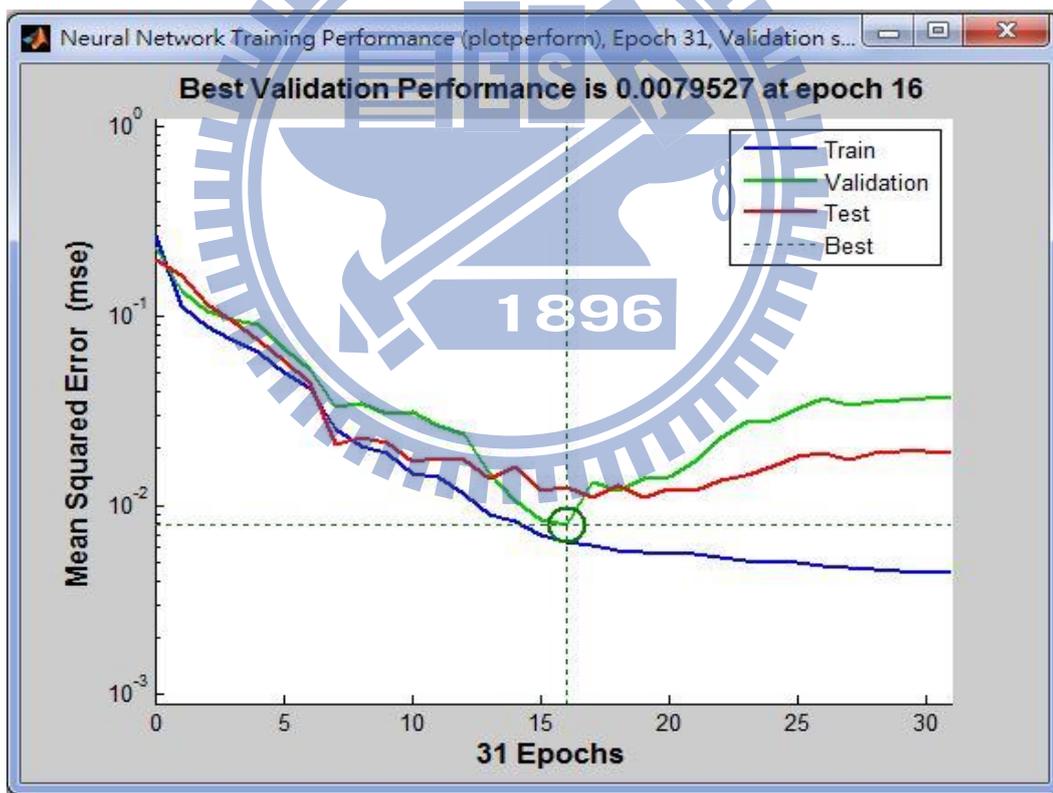


圖 34 坍塌度模型網路最佳驗證效能圖

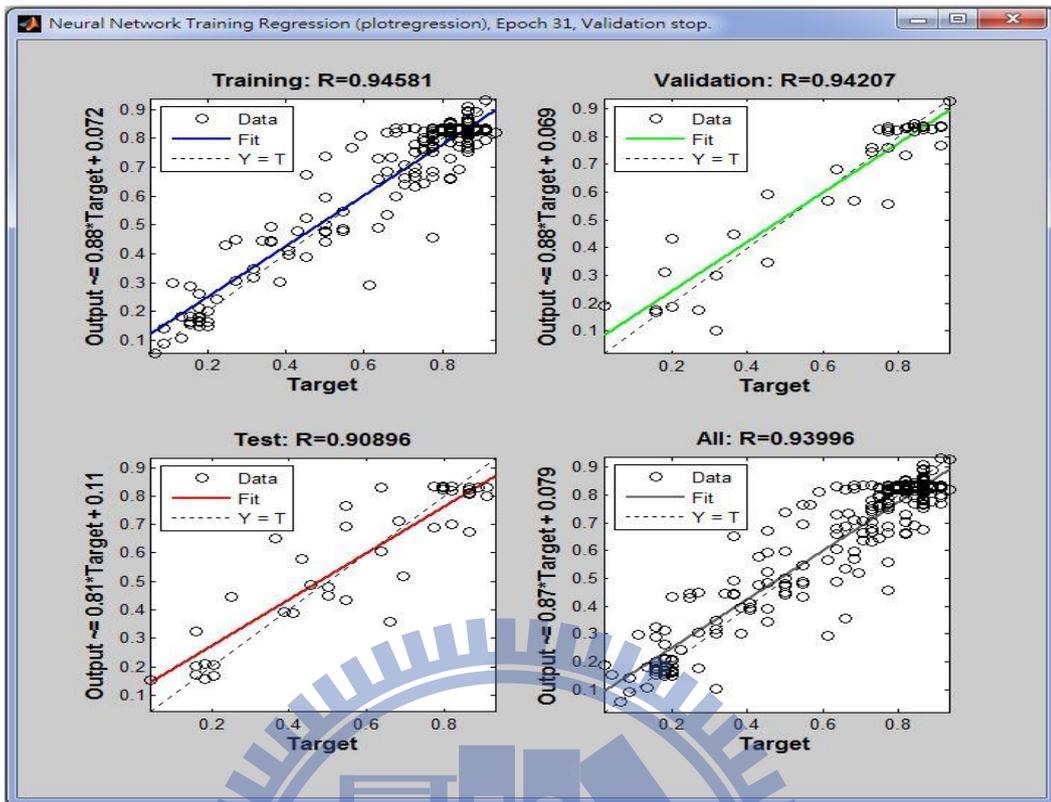


圖 35 坍塌度模型網路訓練成果圖

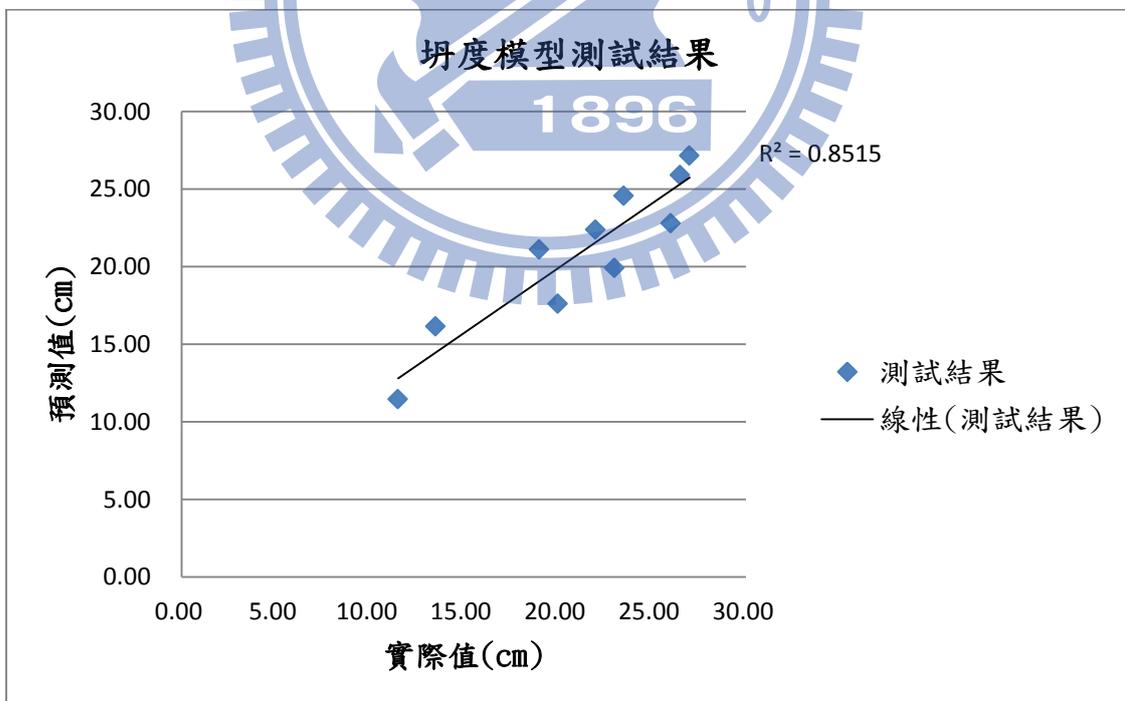


圖 36 坍塌度模型測試結果圖

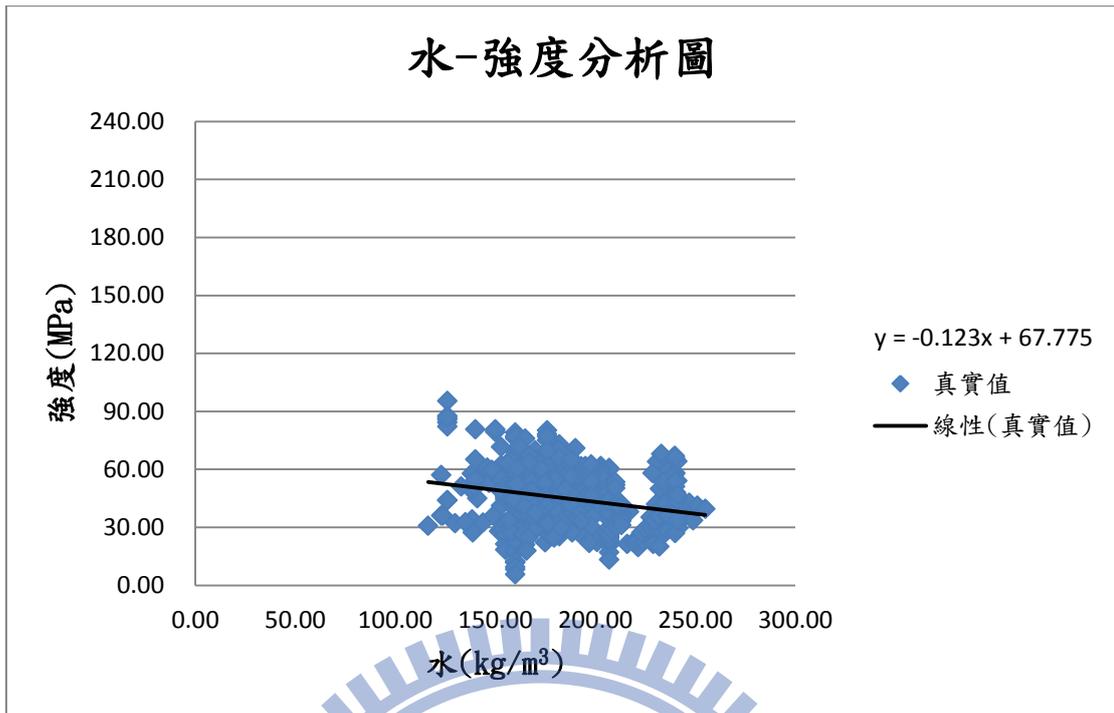


圖 37 水-強度分析圖



圖 38 水-強度敏感度分析圖

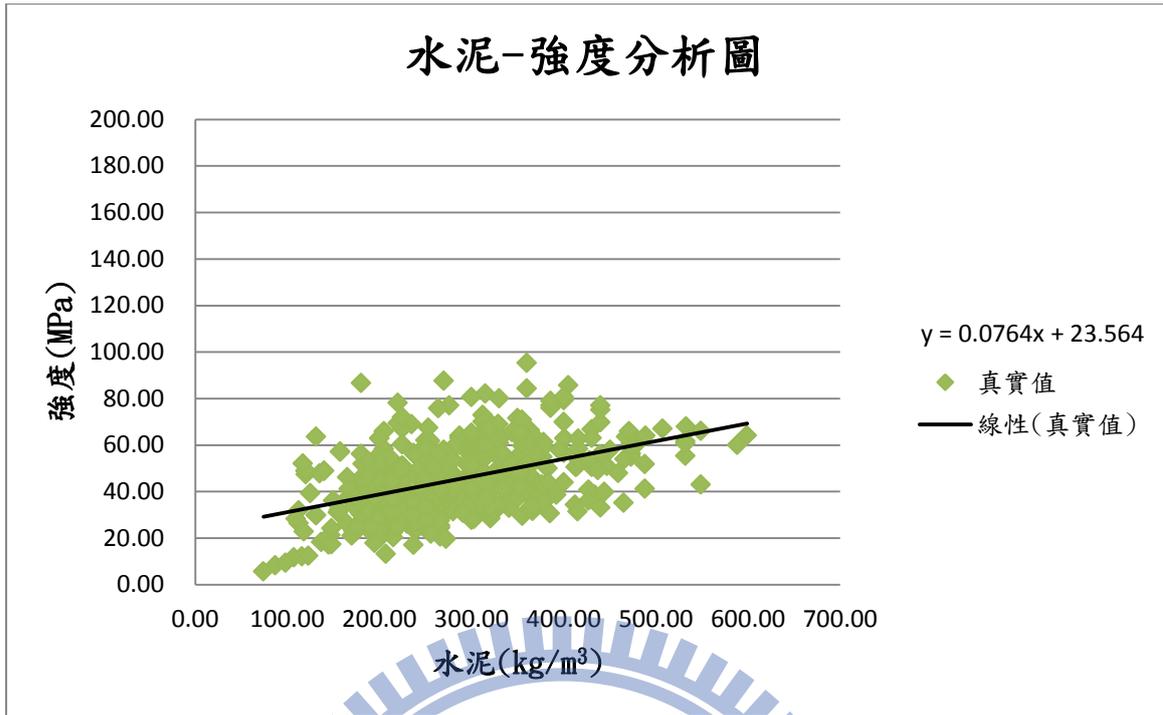


圖 39 水泥-強度分析圖

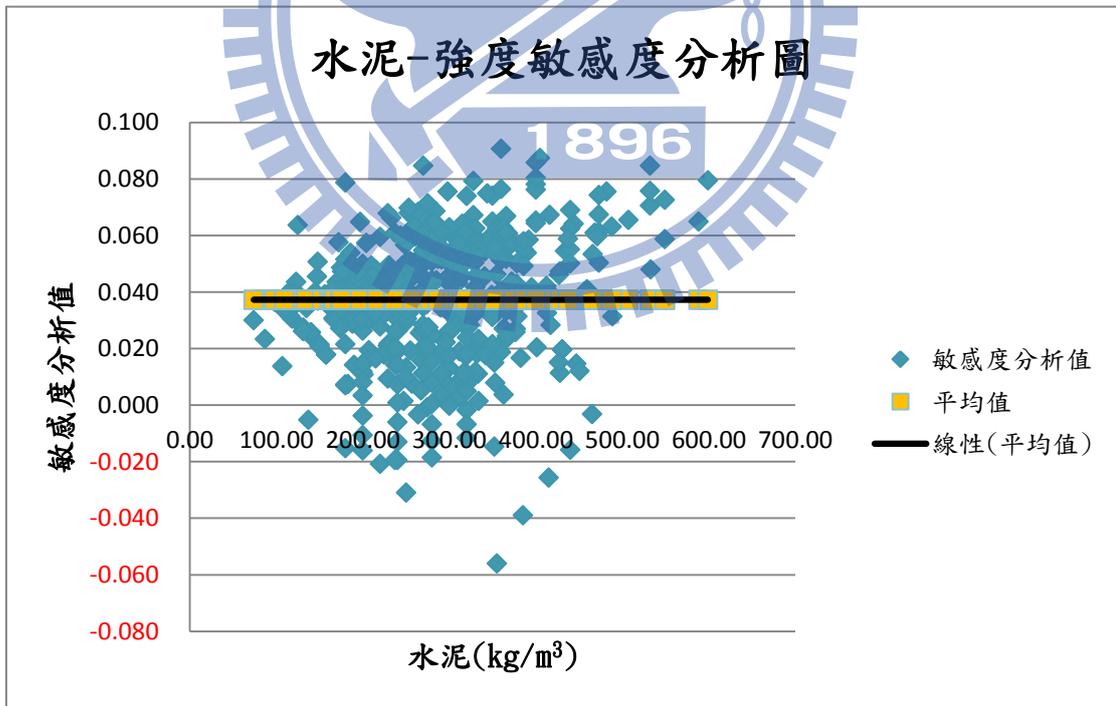


圖 40 水泥-強度敏感度分析

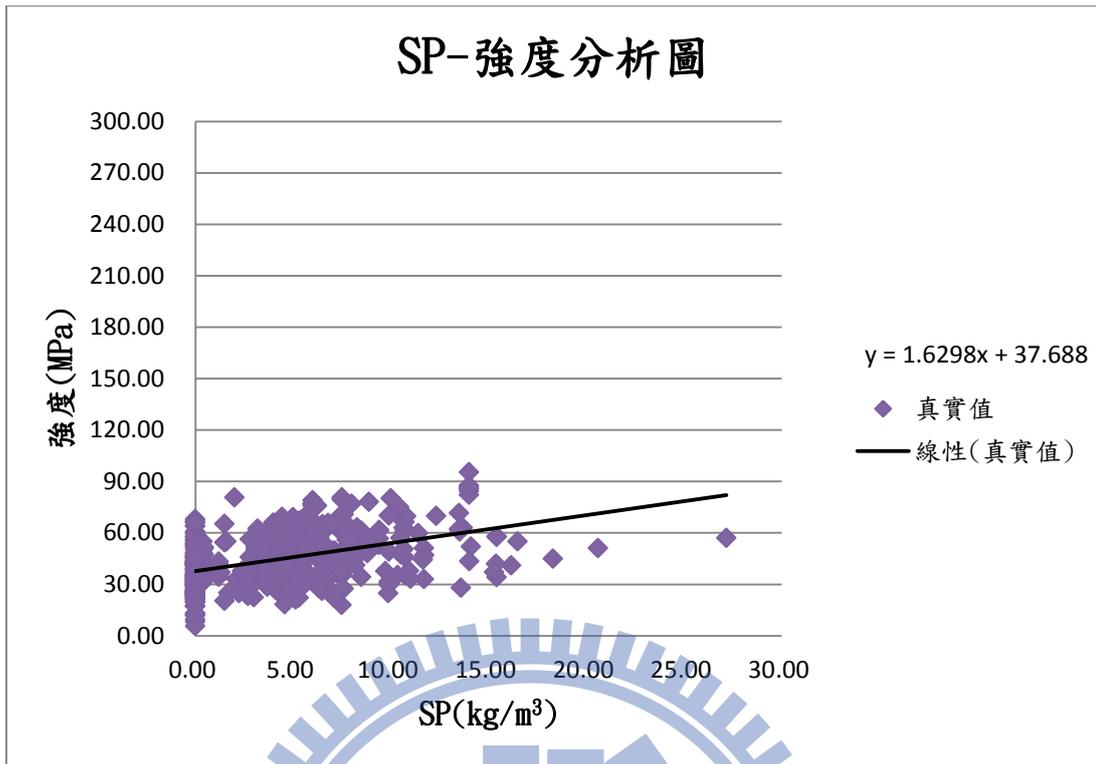


圖 41 SP-強度分析圖

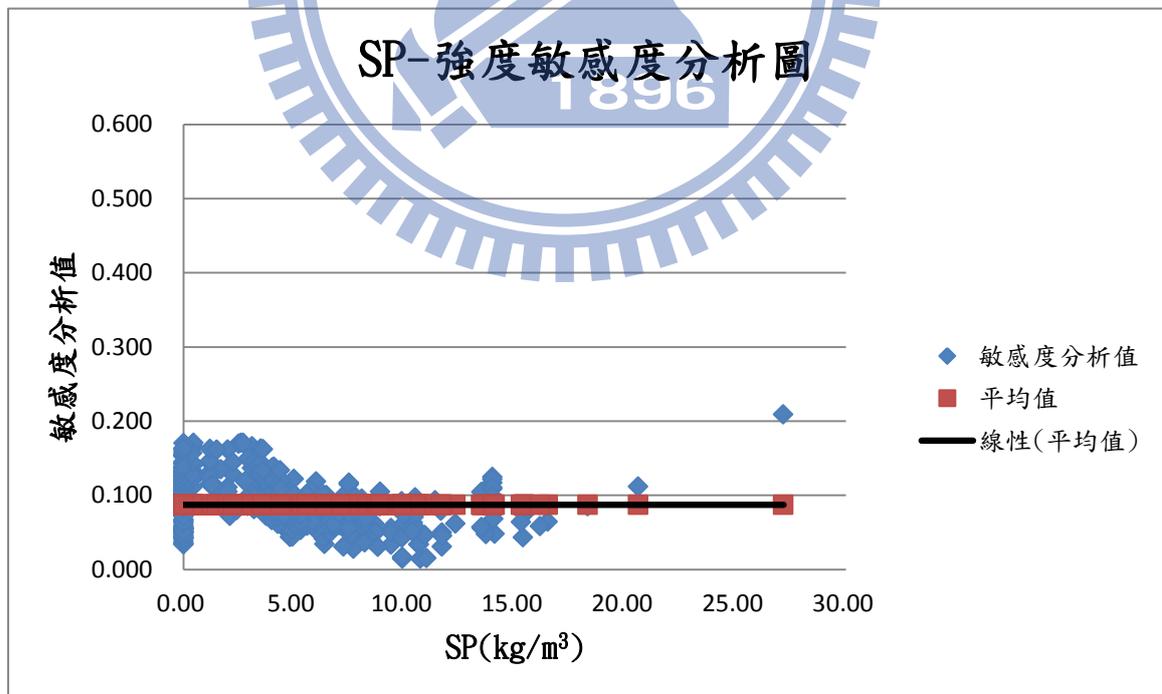


圖 42 SP-強度敏感度分析圖

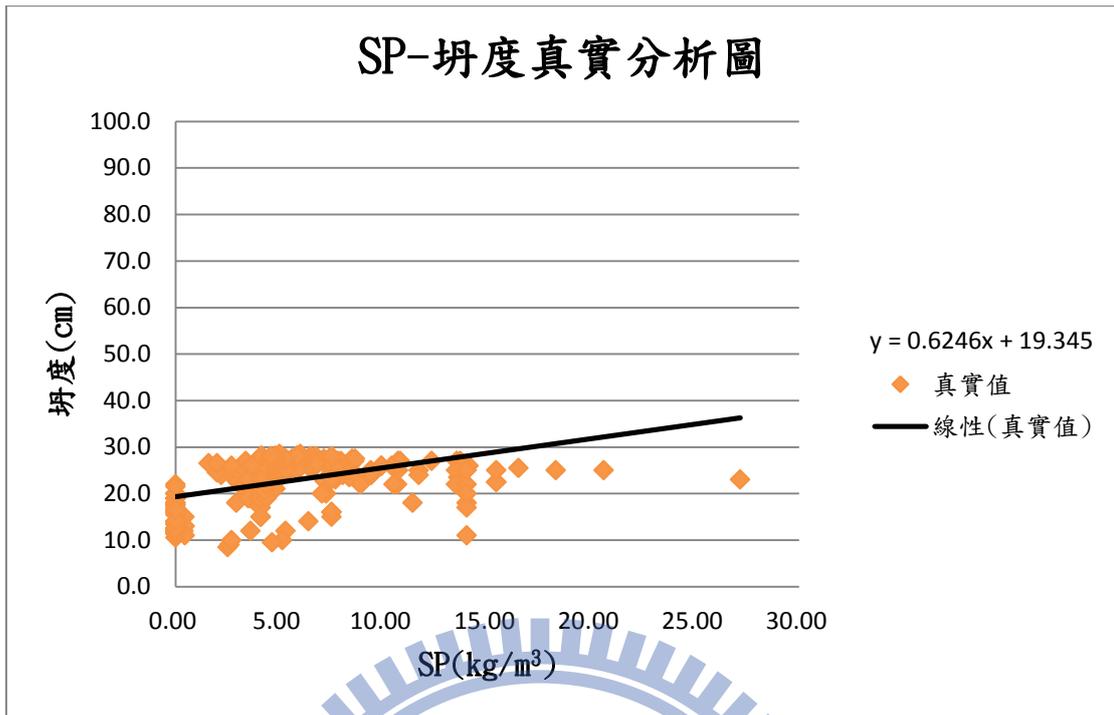


圖 43 SP-坍度分析圖

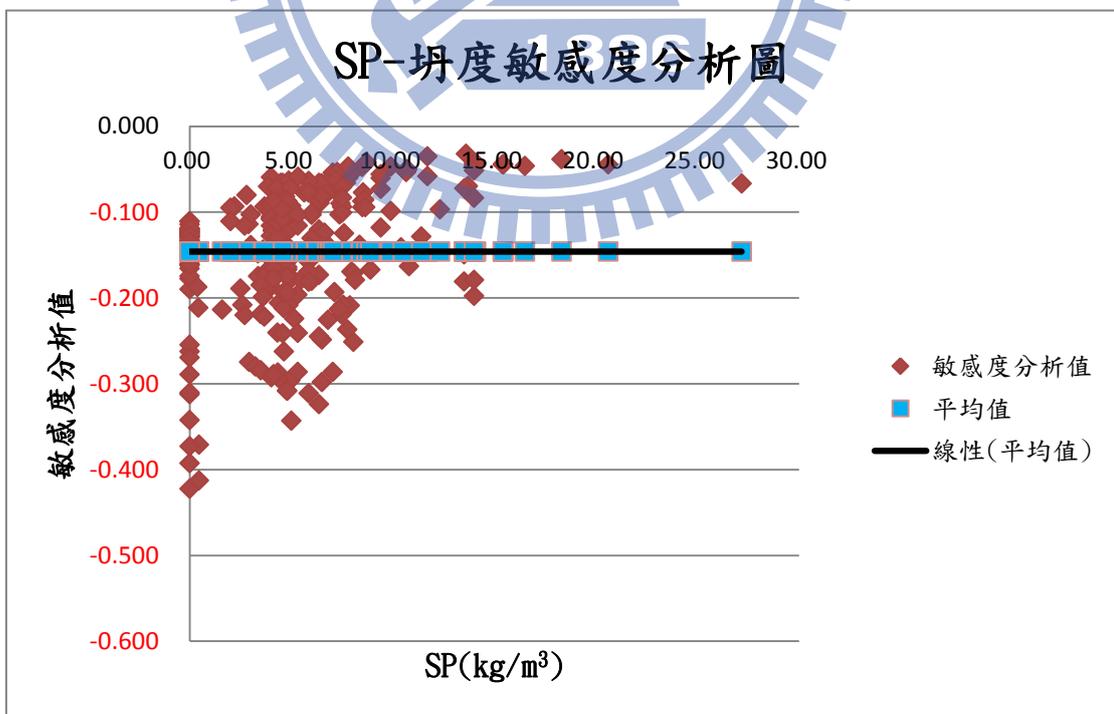


圖 44 SP-敏感度分析圖

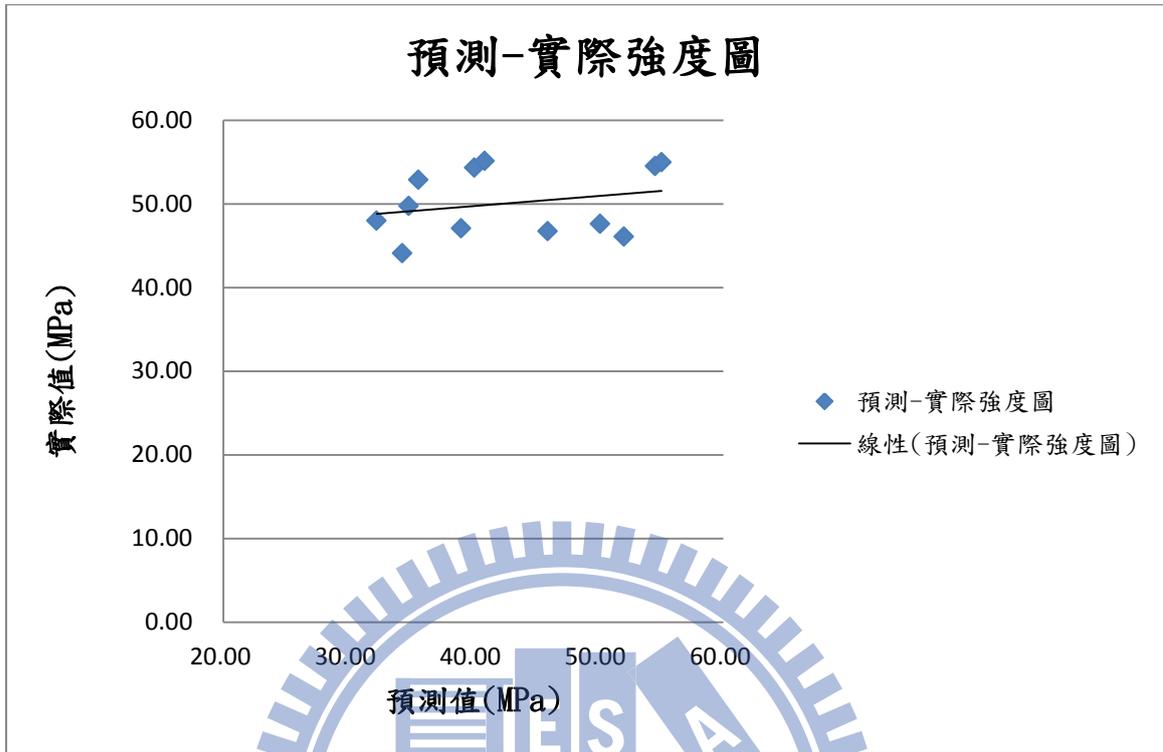


圖 45 預測值-實際值強度圖

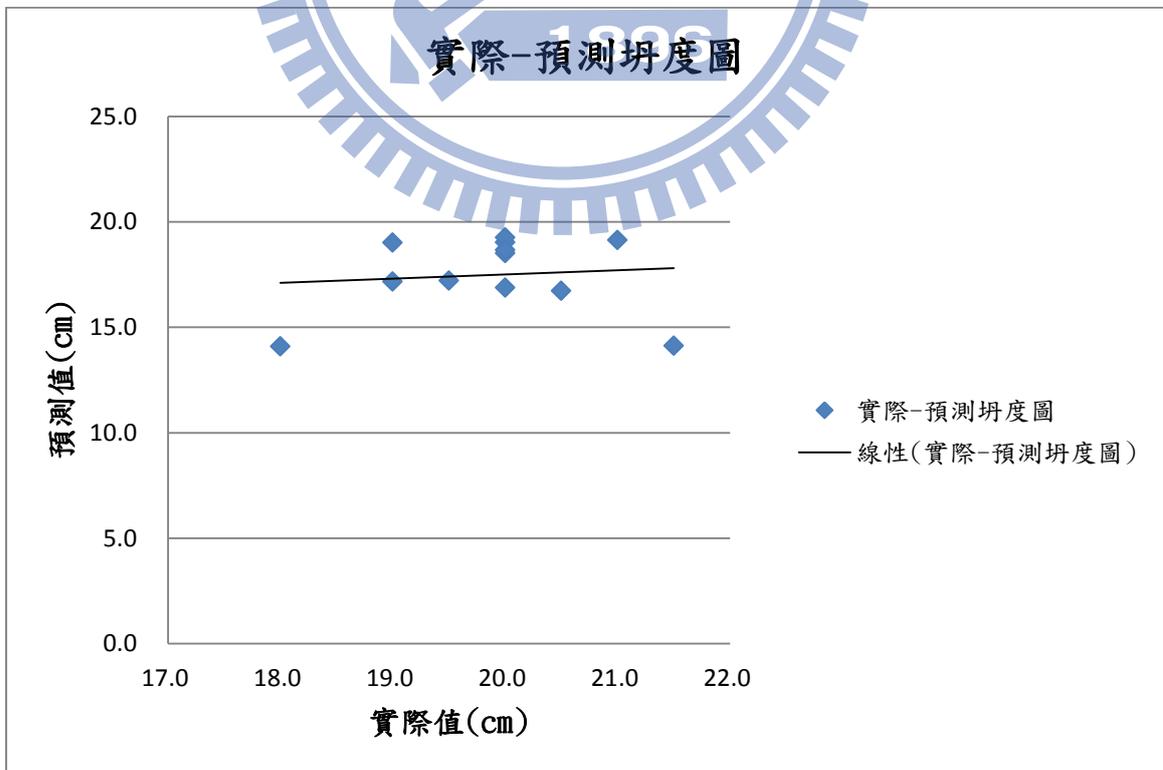


圖 46 實際-預測坍度圖

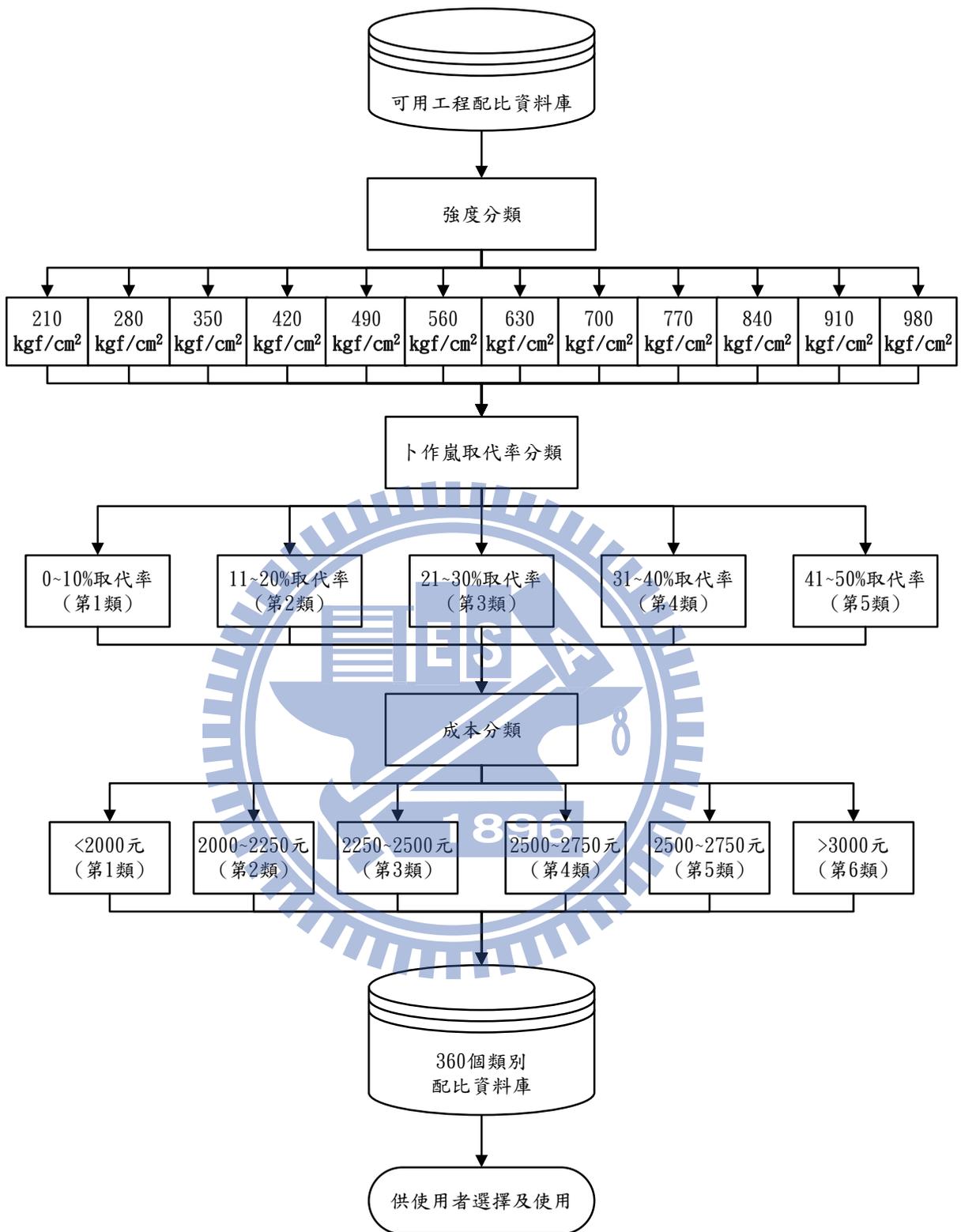


圖 47 分類流程圖