

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

應用人工智慧技術

輔助設計混凝土配比



Application of Applied AI models
in concrete mixture proportion

研究生：呂夙修

指導教授：洪士林 博士

中華民國 九十九年八月

應用人工智慧技術輔助設計混凝土配比

研究生：呂夙修

Student : Su Hsiu Lu

指導教授：洪士林

Advisor : Dr. Shih-Lin Hung

國立交通大學

土木工程學系碩士班

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Civil Engineering

August 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年

應用人工智慧技術輔助設計混凝土配比

研究生：呂夙修

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

混凝土在土木建築結構工程中最為廣泛運用的營建材料。混凝土是敏感性很強的材料，在每一個製作過程，如配比、拌合、澆置及養護等等，皆對混凝土有重要的影響，尤其是配比部份。但是依照傳統的配比設計方法，並不一定能保證得到需求目標。整個過程不僅費時也浪費資源，若混凝土試體試驗失敗，不僅是資源成本的浪費，在時間成本的損失更是難以計價。如能藉由電腦輔助設計混凝土配比，不僅能降低資源成本，更能提升工程效率。

至今已有電腦輔助設計混凝土配比的方法，常以成本最佳化為設計目的。然而在不同的環境下，使用者會有不同的需求。本論文應用 K-Means 演算法分析資料庫，並建立混凝土配比設計系統；依使用者所需的目標設計混凝土配比，並提供多樣性的配比設計，讓不同環境下的使用者，依自身需求使用不同的混凝土配比；並利用類神經網路建立資料庫中缺乏的混凝土配比資料。模擬驗證結果顯示本系統可藉由 K-Means 演算法快速找尋可能解，若資料庫無近似解存在，則可由 ANN 提供答案。

關鍵字：混凝土配比設計、K-Means 演算法、類神經網路。

Application of Applied AI models in Concrete Mixture Proportion

Student : Su Hsiu Lu

Advisor : Dr. Shih-Lin Hung

Department of Civil Engineering

College Engineering

National Chaio Tung University

Abstract

Concrete is one of most utilized construction materials in civil and infrastructural engineering. Concrete is a highly sensitive material to the issues in production process, such as proportioning, mixing, pouring, curing, etc. Among those factors, propositioning is the most important aspect. However, concrete mix, designed based on conventional methods, are not guaranteed to satisfy the required aim. Meanwhile, if the concrete specimen test does not pass, it results in not only wasting cost, but also loss of time. Recently, computer-aided design of concrete mix proportioning is a feasible approach with the aspect of reducing the resource costs and increasing construction efficiency.

Based on cost optimization approach, there are, currently, many schemes of computer-aided concrete mix proportioning design. However, cost is not the only aim for concrete mix design. This work attempts to employ K-Means algorithm to analyze the pre-collected database to design concrete mix proposition based on the predefined requirements and provide a diversity of design to satisfy requirements of engineering. In addition, ANN model can generate solutions, if K-Means algorithm cannot find solutions in database. Simulation results reveal that the system is feasible and practicable in concrete mix design.

Keywords: Concrete proportioning, K-Means, artificial neural network.

誌謝

自從上了研究所後，發現原來求學之路還如此的漫長，轉眼間兩年已過，而在研究所的這一條道路上也即將到站了，細想在這條求學的路上，我們這班車的車長洪士林博士，不辭辛勞的帶領我們度過這必經之路，並將他的經驗與知識毫不保留的傳達給我們，讓我們在研究的道路上受益良多，在來是車掌先生詹君治學長也是努力的拉拔我們，深怕我們誤入歧途，並教了我們許多學業上或者是未來就業上該有的心態與準備，還有博士班的子軒學長、勇奇學長及玉邦學長無時無刻給予我們幫助與支持。

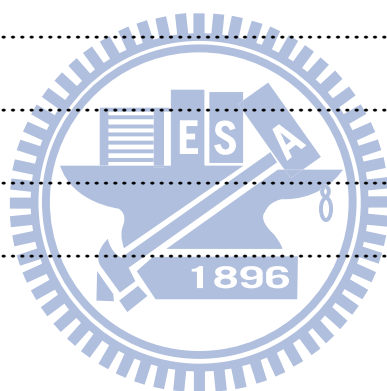
感謝碩士班的志銘學長、野口學姐還有志中學長在我剛搭上 410 的班車時，給予我許多寶貴的前輩建議，而跟我一起搭上這班列車的冠豪、家宇還有麗松，不但在學習的路上給我幫助我，更在我徬徨無助時幫我加油打氣，還有同學兼學弟的孟軒以及學弟妹阿祥、阿槍還有思伶，也在我需要他們幫助時，即時的伸出援手，這些同位於 410 這班車上的學長、同學以及學弟們，不管是學業還是遊戲都是相陪到底的好戰友。

最後也是最重要的，就是家人了，如果沒有他們的大力幫助與無私的奉獻，我連搭上 410 班車都不可能，不管是任何時間、任何地方，都不求回饋的幫助我，尤其是偉大的父母親，真是非常感謝他們，沒有他們就絕對不會有這本論文的誕生，所以只能努力的回報他們對我付出的一切。

目錄

摘要	i
Abstract.....	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	vi
圖目錄	viii
第一章、緒論	1
1-1 研究背景	1
1-2 研究動機	2
1-3 研究目的	3
1-4 論文架構	4
第二章、文獻回顧	5
2-1 混凝土行為預測發展	5
2-2 電腦輔助設計混凝土配比	11
第三章、系統設計原理以及方法	15
3-1 分類演算法介紹	15
3-1-1K-Means 演算法基本架構介紹	17
3-1-2K-Means 演算法基本公式介紹	18
3-2 類神經網路(ANN)介紹	19
3-2-1 倒傳遞類神經網路的架構介紹	22
3-3Convex hull 演算法介紹	24
3-3-1Convex hull 演算法建立有效區域方法介紹	25
3-3-2 判斷資料點是否在有效區域內的公式介紹	25

3-4 系統整體架構介紹	26
3-4-1 系統一介紹	26
3-4-2 系統一判斷 K-Means 分類結果的公式	27
3-4-3 系統二介紹	28
第四章、系統測試並修正及研究成果	29
4-1 建立混凝土資料庫與配比組合有效區域	29
4-2 建立混凝土模型的類神經網路架構與相關係數的設定	30
4-3 應用 K-Means 演算法分析資料庫以及相關係數的設定	32
4-4 配比設計系統應用結果	35
第五章、結論與建議	36
5-1 結論	36
5-2 建議	37
參考文獻	38
附錄	42



表目錄

表 2-1 由文獻所得的配比資料庫.....	42
表 4-1 混凝土強度預測模型使用的類神經網路架構.....	46
表 4-2 混凝土強度預測模型使用的正規化資料.....	46
表 4-3 混凝土坍度預測模型使用的類神經網路架構.....	47
表 4-4 混凝土坍度預測模型使用的正規化資料.....	47
表 4-5 不同隱藏層神經元預測抗壓強度的分析回歸結果.....	48
表 4-6 不同隱藏層神經元預測混凝土坍度的分析回歸結果.....	50
表 4-7 一百筆資料的資料庫進行混凝土配比設計.....	52
表 4-8 一千五百筆資料的資料庫進行混凝土配比設計.....	52
表 4-9 三千筆資料的資料庫進行混凝土配比設計.....	53
表 4-10 許可差異為 0.0001 進行混凝土配比設計.....	55
表 4-11 許可差異為 0.0005 進行混凝土配比設計.....	56
表 4-12 許可差異為 0.0007 進行混凝土配比設計.....	56
表 4-13 許可差異為 0.0003 進行混凝土配比設計.....	57
表 4-14 許可差異為 0.0004 進行混凝土配比設計.....	57
表 4-15 許可差異為 0.0008 進行混凝土配比設計.....	58
表 4-16 配比設計以三千筆資料，差異許可為 0.005.....	58
表 4-17 配比設計以三千筆資料，差異許可為 0.006.....	61
表 4-18 配比設計以三千筆資料，差異許可為 0.007.....	63
表 4-19 強度 55Mpa 坍度 25cm 差異許可為 0.0007 分類成果.....	65
表 4-20 強度 25Mpa 坍度 25cm 差異許可為 0.0007 配比設計.....	66
表 4-21 Convex hull 演算法及混凝土預測模型設計需求混凝土配比.....	66

表 4-22 混凝土配比設計系統的成果數據67

表 4-23 混凝土配比於「結構混凝土施工規範」建議適用69



圖目錄

圖 1-1 混凝土配比 CNS 規範設計流程.....	70
圖 3-1 階層式聚合演算法示意圖.....	71
圖 3-2 階層式聚合演算法示意圖.....	71
圖 3-3 類神經元示意圖.....	72
圖 3-4 倒傳遞神經網路示意圖.....	72
圖 3-5 有效區域製作示意圖.....	73
圖 3-6 判斷資料是否於有效區域示意圖.....	74
圖 3-7 K-Means 演算法於案例分類示意圖.....	75
圖 3-8 系統架構圖.....	76
圖 4-1 水-水泥資料散佈圖.....	76
圖 4-2 水-細骨材資料散佈圖.....	77
圖 4-3 水-粗骨材資料散佈圖.....	77
圖 4-4 水-爐石資料散佈圖.....	78
圖 4-5 水-飛灰資料散佈圖.....	78
圖 4-6 水-高效減水劑資料散佈圖.....	79
圖 4-7 水泥-細骨材資料散佈圖.....	79
圖 4-8 水泥-粗骨材資料散佈圖.....	80
圖 4-9 水泥-爐石資料散佈圖.....	80
圖 4-10 水泥-飛灰資料散佈圖.....	81
圖 4-11 水泥-強效減水劑資料散佈圖.....	81
圖 4-12 細骨材-粗骨材資料散佈圖.....	82
圖 4-13 細骨材-爐石資料散佈圖.....	82
圖 4-14 細骨材-飛灰資料散佈圖.....	83

圖 4-15 細骨材-強效減水劑資料散佈圖	83
圖 4-16 粗骨材-爐石資料散佈圖	84
圖 4-17 粗骨材-飛灰資料散佈圖	84
圖 4-18 粗骨材-強效減水劑資料散佈圖	85
圖 4-19 爐石-飛灰資料散佈圖	85
圖 4-20 爐石-強效減水劑資料散佈圖	86
圖 4-21 飛灰-強效減水劑資料散佈圖	86
圖 4-22 隱藏層為七個神經元的強度預測驗證誤差值	87
圖 4-23 隱藏層為七個神經元的強度預測各項回歸分析值	88
圖 4-24 強度模型預測實際測試案例的回歸分析值	89
圖 4-25 隱藏層為十一個神經元的坍度預測驗證誤差值	89
圖 4-26 隱藏層為十一個神經元的坍度預測各項回歸分析值	90
圖 4-27 坍度模型預測實際測試案例的回歸分析值	91
圖 4-28 類神經預測混凝土強度模型架構	92
圖 4-29 類神經預測混凝土坍度模型架構	92
圖 4-30 不同大小資料庫的強度與坍度資料散佈圖	93
圖 4-31 不同大小資料庫的水與水泥資料散佈圖	94
圖 4-32 不同大小資料庫的水與粗骨材資料散佈圖	95
圖 4-33 一百筆資料以 K-Meams 設計需求的混凝土配比	96
圖 4-34 一千五百筆資料以 K-Meams 設計需求的混凝土配比	96
圖 4-35 三千筆資料以 K-Meams 設計需求的混凝土配比	97
圖 4-36 使用此混凝土配比設計系統的成果	97

第一章、緒論

本文章將闡述研究背景、研究動機、研究目的、研究方法以及論文架構。敘述過去研究情形以及本研究要討論的問題。

1-1 研究背景

混凝土在土木建築結構工程中最為廣泛運用的營建材料，凡由膠結材料與骨材所組合而成之混合物，皆可稱為混凝土，傳統的混凝土是由水、水泥、細骨材以及粗骨材所組成的。

近期為了降低工程成本與提升效率，已有高性能混凝土的產生，高性能混凝土的組成材料比傳統的混凝土複雜許多，除了傳統混凝土的組成材料，亦加入了許多礦物摻料以及化學藥劑來提升傳統混凝土的品質，始得在工程中的安全性、工作性都有所成長提升，而經濟成本也能有效下降【1】。


混凝土是敏感性很強的材料，在每一個製作過程，如配比、拌合、澆置及養護等等的控制過程，皆對混凝土有重要的影響，尤其是配比的部份，在傳統的混凝土設計配比，首先是訂出需求的工作性、水灰比及平均強度，再根據 CNS 12891 規範中的混凝土配比設計準則，如圖 1-1 所示，開始設計配比，即混凝土組成材料的各個含量，再經由建築技術規則第 439 條的試驗配比法，在實驗室做平均強度的取得，試驗體依照中國國家標準 CNS 1232 澆置並養護混凝土圓柱試體，並以 28 日混凝土試體齡期試驗其壓力強度【2】，整個試拌過程不只費時也浪費資源，而且也不一定保證能得到需求的強度。

再來有些經驗老到的資深工程師也會以自身經驗作為依據，可使得整個混凝土配比設計準確不少，但是並不是所有的工程師都是經驗

豐富的，因此有工程師希望能事先預測混凝土試體的強度及坍度，就能減少時間以及資源成本的浪費，開始有學者藉由統計學的回歸公式直至電腦技術來建立混凝土配比的強度模型及坍度模型來彌補經驗上的不足，當混凝土模型準確時，學者們更藉由各種電腦技術輔助設計混凝土配比。

至今大多數的土木工程皆使用高性能混凝土為主，因添加了卜作嵐材料以及化學藥劑來提升傳統混凝土的強度與提升工作效率，因為組成材料增加，導致高性能混凝土的配比設計比傳統混凝土更難上許多，而高性能混凝土的強度以及坍度模型，亦有許多學者應用不同的電腦技術來建立，不管如何皆是希望能建立一個準確預測混凝土行為的模型，為工程師們解決混凝土配比的問題。

1-2 研究動機



在這個地球自然資源不斷減少以及時間就是金錢的時代，節省使用自然資源以及提升工作效率一直是人們所追求的目標，因此開始有許多人為了將成果發生錯誤的機率降低，而提出了許多預防錯誤發生的方法。

在土木工程上亦是如此，混凝土材料一直是土木工程中最常使用的材料，而在不同的環境或者是不同的需求下，所需求以及使用的混凝土類型也不盡相同。

依照我國的現行的混凝土設計規範中，就有基本的混凝土設計方法以及相關法規，並提供了混凝土試體的檢驗方式跟成果的要求，其中混凝土的試體驗證，不僅需要 28 天的試體齡期做試驗驗證，更同時需要 3 組以上的試體驗證才可行，但是如果只單純依照法規的設計流程，並不一定能一次就順利的成功設計出使用者所希望的需求目標，

當設計失敗時就需要在重新修正混凝土的配比設計，並重新進行試驗驗證，而且當混凝土試體試驗失敗錯誤的話，不僅僅是資源成本的浪費，在時間成本的損失上更是難以計價。

因此如果能提早預知混凝土試體試驗的成果，不僅能提升做事效率外亦能減少資源成本的浪費，因此開始有許多檢測混凝土配比的方法由此誕生，由一開始的以水灰比建立混凝土的強度模型來預測混凝土試體，便開始有許多學者提出更多的見解與方法來加強建立混凝土模型，以加強預測混凝土試體的準確度。

而預測的方式由早期的統計學原理建立的經驗公式，直至現在應用電腦的運算能力以及各種不同的演算法所建立的混凝土模型，都是為了能使混凝土配比的結果預測能更為準確，也從原本的強度預測模型更加入了工作度的預測，也因此有了混凝土配比設計到設計的最佳化產生，如成本最佳化等等。

但是在 2008 年 Sandro et. al.【3】提出，數學上的數值解常建立於有假設的模型上，有時不同的假設會有相似的數值解，如果用到錯誤的模型，那所得到的結論並不是適合或正確的。除此之外亦提出了工程上的問題有時並不是只有一種數值解能解決，所以可以提供多樣不同的數值解，供有不同需求的使用者作為選擇。

1-3 研究目的

這次研究的目的，是希望能夠藉由資料庫分析的應用，建立一套電腦輔助設計混凝土配比的機制，提供使用者所需目標的混凝土配比，且提供多樣的配比設計，讓不同環境下的使用者，依自身的需求使用不同的混凝土配比設計，並利用電腦技術建立混凝土的強度模型及坍度模型，以此輔助設計並補充資料庫中缺乏的配比組合資料。

1-4 論文架構

本研究論文總共分為五個章節：

第一章為緒論，說明本研究的背景、動機、目的以及方法。

第二章為文獻回顧，簡要的介紹混凝土強度預測以及混凝土的自動化配比設計的發展。

第三章為研究方法，介紹混凝土配比設計系統所使用的工具以及使用的方法。

第四章為研究成果，用來展現混凝土配比設計系統的成果以及修正系統不足或錯誤的地方。

第五章為討論與建議，對本研究的研究成果提出結論與建議。



第二章、文獻回顧

本章簡介近年來與本研究有關的論文或研究文獻，主要分為兩部份，包括混凝土強度與坍度行為的預測以及電腦輔助設計混凝土配比的發展史。

2-1 混凝土行為預測發展

混凝土的強度預測發展，首先於 1919 年 Abrams 【4】發表一篇混凝土設計理論，提出以下問題：

- 1、 在給定的工作環境下，適當的混凝土強度是如何組成的。
- 2、 用最低的成本，如何的材料組合比例下，能產生最好的混凝土。
- 3、 大量的材料的不同特性，適合用於怎樣的目下。
- 4、 改變混合比例、骨材級配與大小，所影響的混凝土強度變化。

這些問題是所有工程師都有興趣的，也提出許多不同的見解與想法，如固定的混合比例，而不去管其他影響因素等等，作者認為這是遠遠不能讓人滿意的，並從大量的實驗數據中，發現混凝土的行為與以下幾點有密切關係：

- 1、 水的使用量。
- 2、 骨材的級配與大小。
- 3、 水泥的使用比例。

從實驗中發現水的使用量與混凝土的強度行為呈現反比，而水泥的使用比例則與混凝土的強度行為成正比，並依此發展出以下的經驗公式：

$$S = \frac{A}{B^x} = \frac{14,000}{8.2^x} \quad (2-1)$$

其中 S 為混凝土抗壓強度； x 為水灰比； A 、 B 為水泥在其他條件下的測驗量所得到的常數，骨材級配在 0 - 1¼in、細度模數為 5.75。

此後便有許多學者以此為基礎，發展出不同的經驗公式，目的皆是希望能加強預測混凝土的強度行為。

1981 年 Sandor 【5】提出，除了水灰比等等的因素外，認為輸氣比對混凝土行為也有影響，對普通不輸氣混凝土，也提出以下公式：

$$f_{co} = \left(\frac{A}{B^{w/c}} \right) \times \sqrt{\frac{S_s}{S_o}} \times \frac{(1 - Pe^{-b_1 t} - (1 - P)e^{-b_2 t})}{(1 - Pe^{-90b_1} - (1 - P)e^{-90b_2})} \quad (2-2)$$

其中： f_{co} 為混凝土試體七天的預計強度； $A=15,500\text{psi}$ ； $B=6.4(6\phi \times 12''$ ， $15\phi \times 30\text{cm}$ ，ASTM C192,C39)； w/c 為水灰比； S_s 為水泥試樣； S_o 為標準第一種水泥之比表面積； P 為 C_3S 百分比含量； b_1 、 b_2 與 C_3S 含量、 C_2S 含量、強度、材齡及水泥細度無關，與 C_3A 含量、養護溫度、微量成份、 w/c 、添加劑、影響強度因子、強度型式、試驗法、1/天的強度等有關；亦可將公式表為：

$$f_{co} = f_1 \times \frac{(1 - Pe^{-b_1 t} - (1 - P)e^{-b_2 t})}{(1 - Pe^{-90b_1} - (1 - P)e^{-90b_2})} \quad (2-3)$$

其中： f_1 為混凝土試體第一天的強度。

而輸氣混凝土，混凝土的強度行為與含氣量成反比，在同一水灰比下輸氣百分比越高，則強度損失越大。

1987 年 Larrad 【6】，由於混凝土的組成材料變多，提出將骨材的級配密度、膠結材料的用量、空氣含量、爐石、飛灰、矽灰等的材料作用加入考慮，並發展出一個經驗公式：

$$f'_c = \frac{K_g R_c}{1 + 3.1 \frac{W + A}{C(1 + K_1 + K_2) + sl}} \quad (2-4)$$

$$K_1 = 0.4 \frac{fa}{C} + 3 \frac{sf}{C} \quad (2-5)$$

$$K_2 = 0.2 \frac{lf}{C} \quad (2-6)$$

其中， W 為水含量， A 為含氣量的當量水量； C 為水泥含量； sl 為爐石含量； $K_1 \leq 0.05$ 為卜作嵐係數； fa 為飛灰含量； sf 為矽灰含量； $K_2 \leq 0.07$ 為填充料係數； lf 為石粉含量，與近代混凝土組成模式較相近。

1993 年 賴鴻成 【7】，應用類神經網路來預測混凝土強度行為，以兩種不同的變數作為輸入層建立不同的神經網路系統，第一種以水灰比、水、水泥、細骨材、粗骨材與齡期作為輸入層，第二種則多加入骨材最大粒徑，而隱藏層的部份皆設定一層，隱藏神經元為輸入層的變數量乘二再加一個，以混凝土抗壓強度為輸出層，整個預測成果平均誤差都較台泥公司以及日本土木協會的經驗公式低上許多，發現類神經網路用於混凝土的抗壓強度預測是精確可靠的。

1997 年 Sergio Lai et. al. 【8】，認為傳統預測混凝土的強度方法，是應用混凝土的主要組成材料為參考基礎，並以此建立經驗公式，是不足的，因為還有影響程度大的化學藥劑被考慮，所以傳統的預測公式只能做為簡單的參考，而需要較準確的預測方法，可經由類神經網路建立混凝土強度預測模型，而類神經網路也沒有所謂的公式存在，在類神經網路中，所有會影響結果的輸入值都會經由隱藏層中的神經

元分配權重，而要加強類神經網路的預測準確度就是不斷改變各個輸入值對輸出值權重關係，此篇文獻以水灰比、水泥型號、粗骨材、細骨材、粗砂及細砂的比例含量及水泥與減水劑含量做為輸入值，以二十八天抗壓強度為輸出值，而隱藏層皆為一層，但隱藏層的神經元有五種，由四個到八個做為比較，發現不管隱藏層神經元用幾個都有不錯的預測結果，皆在五%的誤差以下，建議可用類神經網路預測混凝土強度。

1998 年葉怡成【9】，認為混凝土的強度行為，只由水灰比判斷是不夠準確的，而高性能混凝土更是如此，因為高性能混凝土的組成除了傳統的混凝土材料外，更加入了礦物摻料及化學藥劑，認為傳統的經驗公式很難預測高性能混凝土的強度行為，藉由類神經網路，預測高性能混凝土的強度行為，以水、水泥、飛灰、爐石、細骨材、粗骨材、高效減水劑以及齡期作為神經網路的輸入層變數，隱藏層為一層，隱藏層神經元八個，以高性能混凝土的抗壓強度為輸出層，提出類神經網路在預測高性能混凝土的強度行為較傳統的迴歸分析準確，但限於學習資料的範圍內，如是在學習資料範圍外的強度預測則預測成果較差。

2000 年 Ni Hong Guang et. al.【10】，提出傳統的混凝土強度預測的方法，基本上是以統計分析為基礎，發展出許多線性或非線性的迴歸方程式模型，通常是以預測混凝土的早期抗壓強度做為二十八天的抗壓強度的預測，而且選擇一個適合可用的迴歸方程式是困難的，應用多層前饋式網路的學習行為做為預測工具，以十一個材料參數作為輸入層，一層隱藏層且內含七個神經元，以混凝土二十八天齡期的抗壓強度作為輸出層，並認為有類神經網路能比傳統的迴歸方程式有較佳的預測成效。

2001 年 W.P.S. Dias et. al.【11】，認為類神經網路在有使用化學藥劑以及礦物摻料的混凝土的強度以及坍度預測有著不錯的成果，並應用類神經網路對混凝土的添加物做性能研究，在研究中發現水灰比確實是影響混凝土強度的重要因子，而增加矽灰取代水泥的量也能提高抗壓強度，另外也發現強度關係也與粗細骨材的比率成正比，而當水灰比為固定常數，過度的使用礦物摻料則會使強度降低。

2003 年 J. Bai et. al.【12】，建立類神經網路的坍度預測模型，並對高嶺土以及飛灰於混凝土的坍度影響做研究，並以此畫出當水膠比為 0.4 及 0.5 時，高嶺土以及飛灰的含量對混凝土坍度的影響。

2003 年 Seung Chang Lee【13】，認為混凝土的強度發展與每次固化時的溫度與時間息息相關，以一、二、三、六及二十八天建立五個類神經網路預測模型，依序預測出各個時期的強度變化，認為較只有單一架構的類神經網路有更好的預測成果，並認為類神經網路不單只能做為一個預測混凝土行為的工具，亦能利用此混凝土模型不斷的培養新的配比組合資料，並以新的資料重新訓練神經網路，加強混凝土預測的準確度。

2004 年 Jong In Kim et. al.【14】，指出傳統上混凝土的各項組成條件已經有良好的定義了，但是過去的經驗知識是有限的，一定還有未發現或者是未公開的組合比例資料，一般來說最重要的驗證還是以二十八天的試體齡期的抗壓強度為主，也指出當驗證的結果不符合設計的要求強度，已經為時已晚，勢必會提高資源成本的消耗，認為如果能在二十八天的實驗之前，預估混凝土試體的強度，是可行而且必要的，提出應用類神經網路建立混凝土的強度預測，可在有不完整且複雜的數據下，依然有良好的預測成果。

2005 葉怡成【15】提出傳統預測混凝土行為的模型，是利用傳統的混凝土材料所建構，並未考慮礦物摻料及化學材料的影響，並以類神經網路與多項式回歸分析，對混凝土行為預測做比較，以實驗計劃法做驗證，提出類神經網路預測成果較多項式回歸分析準確許多。

2005 年 Doo Kie Kim et. al.【16】，提出倒傳遞前饋式類神經網路，在混凝土的強度預測上已經是比傳統的準確許多，但是必須有適當的網路架構及訓練，提出應用機率類神經網路做為架構，預測混凝土強度行為，不會有較差的成果，但是有較佳的效率。

2006 年 Ahmet O ztas et. al.【17】，提到高強度混凝土的使用日益廣泛，但是其材料組成、攪拌與養護方式，與一般常規的混凝土差異頗大，高強度混凝土是一個非常複雜的材料，所以行為模式也更難以預測，提出以類神經網路預測其行為模式的適用性，以水膠比、含水量、細骨材比例、飛灰含量、引氣劑含量、高效減水劑含量和矽灰取代量為輸入層，並始用兩個隱藏層，分別使用五與三個隱藏神經元，以強度及坍度為輸出層，建立高強度混凝土的強度及坍度模型，發現類神經網路用於預測特殊混凝土的行為模式也能得到好的預測成果。

2-2 電腦輔助設計混凝土配比

當混凝土模型建立準確時，便開始有學者希望能藉由電腦設計出使用者所需求的混凝土配比，在 1999 年 Wang Ji-Zong et. al. 【18】，認為傳統混凝土的設計方法只建立於混凝土組成的基本材料，對於近期的混凝土在組成上以添加許多不同的材料，已經無法在做有效的配比設計了，平常工程師們會依照自身的經驗做為配比設計時的判斷，雖然並非完全可靠，但依然比無經驗的工程師有較佳成果，如果工程師要設計一種全新的配比設計，儘管已有許多設計混凝土配比的經驗，還是需要從頭開始設計並找尋一些已存在的可用訊息，提出應用類神經網路建立自動化知識搜尋系統並以此設計混凝土配比，首先建立混凝土配比組合的資料庫，以類神經網路模擬工程師的經驗知識，並以類神經的強度模型與坍度模型反覆驗證，設計出需求目標的混凝土配比，從此系統中能有良好的混凝土配比設計成果，並認為能以此系統為基礎建立專家系統。

1999 年葉怡成【19】，在傳統的混凝土材料中只有基本的水、水泥、細骨材與粗骨材，而高性能混凝土則多加入了飛灰、爐石以及一些化學材料如減水劑等等，由於較傳統的混凝土具有更高的強度以及工作性，認為高性能混凝土是未來最主要的工程使用材料，首先用實驗數據以類神經網路建立準確的強度模型與坍度模型，並利用非線性規劃設計材料混合比例，再以強度模型與坍度模型檢驗是否符合需求目標，如符合則輸出，若不符將配比資料傳回資料庫重建混凝土模型，再以非線性規劃程式重新產生配比設計，直至產生符合需求的混凝土配比設計，在設計的循環中能不斷補充資料庫缺乏的配比設計，並嘗試找出最佳化的配比設計。

2002 年 Francois de Larrard et. al. 【20】，由於近年來混凝土的組成材料越來越多也越來越複雜，如一些有機材料以及纖維材料的應用，但都是為了加強混凝土的使用性，也因為如此混凝土的配比設計也比傳統的設計困難許多，假設有一個良好精準的混凝土預測模型，其中包括屈服強度、坍流度以及塑性粘度的預測，結合一個擁有各種資料完整的資料庫，其中包含各種不同的材料及材料特性，運用自動優化的配比設計軟件，再經由使用者的微小調整，可產生令人滿意的結果。

2004 年 Chul Hyun Lim et. al. 【21】，認為高性能混凝土因為需滿足一些特殊要求，因此跟傳統混凝土的產生方式有所不同，自從高性能混凝土的問世以來，高性能混凝土在大型的結構上的使用頻率是越來越高，而高性能混凝土亦適用於常規混凝土所無法使用的一些環境下，由於常規混凝土的組合配比設計方法無法達成高強度、高工作性以及高耐久性等的要求，所以作者提出應用遺傳基因演算法來建立高性能混凝土的配比設計，在傳統混凝土與高性能混凝土最主要的分別是組成材料的成分不同，高性能混凝土使用了化學藥劑以及礦物摻料，首先以混凝土配比組合資料庫，定義強度以及坍度的影響因子，考慮需求的強度與工作性，應用基因演算法設計出適合的混凝土組合配比。

2006 年 Tao Ji et. al. 【22】，提出傳統的混凝土配比設計，皆是以膠結材料的用量來決定骨材的用量，在這樣的設計條件下，易造成使用過多的水泥用量，而骨材材料的使用量則會降低，這樣所產生的混凝土既不耐用也不經濟，亦提出了傳統的混凝土配比設計方法，是建立在具有不確定性的組成材料上，而在這種條件下，混凝土的驗證也容易造成錯誤當然也造成資源成本的浪費，認為近年來在類神經網路

的使用下，已經有不錯的配比設計成果，但是皆是跟傳統的混凝土設計方法一樣，都以先決定膠結材料的使用量在決定骨材材料的使用量為主，於是提出新的混凝土設計方法，一樣以類神經網路為基礎架構，首先以需求強度、坍度做為輸入值，假設水灰比，並決定細骨材體積大小及對應的平均漿體厚度，在反推導出實際細骨材體積大小，當假設的細骨材體積等於實際時，反之則重新假設細骨材的體積，在以細骨材體積大小，決定水灰比及其他組成材料的用量，在反推導出實際的水灰比，當假設的水灰比等於實際時則配比設計完成，反之則重新假設水灰比，在此系統設計出的混凝土較傳統混凝土具有更高的耐用性與經濟性。

2007 年葉怡成【23】，認為最好的混凝土配比設計是在使用性以及經濟性上取得一個最佳的平衡，但傳統的混凝土設計規範不易達成這樣的目標，提出利用類神經網路以及優化技術，建立良好的混凝土配比設計系統，系統由混凝土的強度、坍度以及材料行為的模型運用優化系統設計使用者需求的混凝土配比，提出此系統在已有存在的資料下能有最好的成果，如遇到不足或者是沒有的資料則須要一些條件設置來幫助設計。

2009 年 Bang Yeon Lee et. al.【24】，認為過去由類神經網路為架構並設計混凝土配比的方法，可能存在一些不穩定性，因為類神經網路對於資料的內插準確度較好，但是對於資料外推則較差，而大部分的電腦設計混凝土配比方法，是由混凝土的配比資料庫所涵蓋的所有範圍做為基礎，而產生的設計配比成果，其中可能包含資料的內插與外推，則會因為混凝土模型問題，而有不正確的設計配比產生，如果基礎資料能包含所有可能結果，則不會有資料外推的問題，但是要建立如此的資料庫是困難的，因此作者提出如何定義資料庫的資料範圍

讓設計的配比不會有外推的問題，經由數學上的 Convex Hull 方法，定義資料庫的可用範圍，而以此範圍設計出的混凝土配比具有更加的準確度。

經由以上的文獻回顧，發現許多電腦的配比設計均是由準確可用到最佳化設計，但在 2008 年 Sandro Saitta et. al. 【3】，發表一篇研究雖然不是針對混凝土配比設計而做，但是也給了我不同以往的配比設計想法，在此篇論文中，作者提出在工程問題上的數值解，有時會因為不同的假設或不同的簡化而有相似的數值解產生，如果用到不對的假設模型，想當然得到的結果亦是錯誤的，也提出一個工程問題並不會只有單單的一種方法能夠解決，因此提出應用資料庫的分析，建立不同的結構模型，讓工程師能夠選擇最符合自身需求的結構模型，進行試驗或找尋數值解，並發現這種模式能服務且滿足更多的工程師。

並以文獻提供的混凝土配比資料，建立本研究的混凝土配比基本資料庫，見表 2-1。



第三章、系統設計原理以及方法

本章將介紹本研究所使用的方法理論以及系統架構，方法理論有 K-Means 演算法、類神經網路以及 Convex hull 演算法。

3-1 分類演算法介紹

分類是資料分析領域中重要的技術之一，用於發現資料中未知的分類，分類分析已經有了很長的研究發展歷史，其重要性已經越來越受到人們的重視與肯定，分類演算法在機器學習、資料採擷和模式識別等等的研究中常被使用，分類分析主要是用來識別資料物件的內在關係，具有極其重要的作用，分類演算法主要應用於模式識別中的資料辨別、機器學習中的圖像分割以及資料處理中的資料壓縮以及資訊檢視，分類的另一個主要的應用是資料採集、資料庫應用及異常資料的分析等，此外分類分析在應用於生物學、統計學、地理學、地質學以及市場行銷等等的方面也有著許多重要的作用，分類分群法其主要目標是將大量的資料點做資料分割分群，使得相同群聚內的資料點儘量相似，而所屬不同群聚的資料點有相當的差異程度，並在各個族群資料中找出具有代表性的中心點，這些具有代表性的中心點為各個群聚的群聚中心點，這些處理主要包含以下特徵：

- 1、 資料壓縮：將大量的資料筆數以少數具特徵性的資料點來代表，以達到資料壓縮的功能。
- 2、 資料分類：以具有特徵性的代表點來代表特定類別的資料，可以減少資料筆數來降低資料處理的計算量，並可以避免或減少雜訊的不良影響。

而目前的分類分群法的種類約可概分為兩種，階層式分群法及分割式分群法：

1、 階層式分群法：階層式分群法是透過資料做層層的階層式分類的方式，將資料反覆地進行分開或結合，直至目標函數不再改變為止。

1-1、 階層式聚合演算法：將所有資料作為相異並分類，再將資料或群聚逐次結合。如圖 3-1

1-2、 階層式分裂演算法：將所有資料作為相同並分類，再將資料或群聚逐次分開。如圖 3-2

2、 分割式分群法：必須先指定群聚的個數數量，然後藉著反覆的疊代運算，逐次降低誤差目標函數的值，直至目標函數不再改變為止。

2-1、 K-Means 演算法：是利用分割式分群法中最基本的方法，由一個反覆疊代的方式，降低目標函數的誤差值，直至不再改變為止。

2-2、 模糊 C-Means 演算法：於 K-Means 演算法中加入了模糊的概念，藉由模糊邏輯的概念，進一步提升分群的效果。

2-3、 向量量化：是近年來在降低資料的數量上，最常被提出的方法之一，在整個向量量化的過程中，最重要的工作，是以這些挑選出來的編碼向量來代表該空間中全部的資料向量。

本研究選擇應用 K-Means 演算法來進行混凝土配比資料庫的分析應用，K-Means 演算法的優點是簡單易行且運算快速，並且適用於處理大規模資料，但是 K-Means 演算法存在著以下缺點，首先是需要使用者給定初始的群聚個數並以此決定各群聚的初始中心，K-Means 演算法對於群聚個數以及初始群聚中心的設定與選擇是很重要的，若其中任一的設定不當都容易使分類的結果落入局部最佳解的狀況，所以在本研究中也有提出一些解決的辦法。

3-1-1K-Means 演算法基本架構介紹

- 1、 決定群組數量並決定初始的群聚中心點。
- 2、 將所有資料點做群聚分類，將各個資料點分給最靠近自己的群聚中心，作為該群聚的資料點，由式子(3-1)。
- 3、 以相同群聚內的資料點來修正該群聚中心點的位置，以修正過後的資料點作為新的群聚中心點，由式子(3-2)、(3-3)、(3-4)。
- 4、 重新將所有資料點分類給離其最近的群聚中心點，做新的群聚分類。
- 5、 再修正中心點位置，重複以上 (3)、(4) 步驟，直至群聚中心點位置不再改變。
- 6、 以最終的群聚中心點做為該群聚的特徵資料點。

3-1-2K-Means 演算法基本公式介紹

1、 計算各個資料點與各群聚中心的位置並判斷所屬群聚：

$$r(i) = [C(i) - P(i)]^2 \quad (3-1)$$

其中： r 為群聚中心與資料點的差異度； C 為群聚中心所在位置；
 P 為資料點所在位置。

2、 計算並修正資料族群的群聚中心位置：

$$p_i = C_i - P_i \quad (3-2)$$

$$C_{n+1} = C_n - \frac{\sum_{i=1}^k p_i}{k} \quad (3-3)$$

$$|C_{n+1} - C_n| = 0 \Rightarrow O.K \quad (3-4)$$

其中： p 為群聚中心與資料點的距離； k 為該群聚內所含的資料筆數。

3-2 類神經網路(ANN)介紹

現今的電腦有著強大的運算能力，不管是多複雜的數學問題，都能得到可靠的高精度解答，但是仍然無法比上人腦，因為人腦具有辨識以及學習的能力。

人腦是由大量的神經細胞所組成，這些神經細胞相互連結成為一個巨大的神經網路，人腦處理問題便是利用這個巨大的神經網路，因此為了讓電腦也能如人腦般具有辨識以及學習能力，就有學者提出以類神經網路的方式，讓電腦來模擬人腦的神經網路系統架構，類神經網路由許多的人工神經元所組成，每個處理單元的輸出以扇狀送出，並成為其他神經元的輸入，如圖 3-3 所示，處理單元的輸入值與輸出值的關係式，可以用以下的函數表示：

$$net_j = \sum_i W_{ij} O_i + \theta_j \quad (3-5)$$

$$O_j = f(net_j) \quad (3-6)$$

其中 net_j 為處理單元值； W_{ij} 為模仿生物神經元的模型的神經細胞的權重，又稱連結加權值； O_i 為模仿生物神經元的模型的輸入訊號； θ_j 為模仿生物神經元的模型的偏權值； O_j 為模仿生物神經元的模型的輸出訊號； f 為模仿生物神經元的模型的轉換函數，是一個將其他處理單元輸入的輸入值做加權乘積並轉換成處理單元輸出值的數學公式。

當人類接收外界資訊並開始學習時，會刺激神經細胞並產生電流來改變神經細胞上的權重，再過程中神經細胞會因為電流反復在神經網路上流動而不斷的改變權重，直至穩定即為學習成功，類神經網路便以此為基礎，接收外界的資訊，訓練並修正各個人工神經元的連結

加權值，當連結加權值不再改變即為訓練成功。

類神經網路系統可以建構出非線性的預測與分析模型，並在以後的研究中證明此一系統的預測能力具有高度準確性，由於具有良好的建立模型能力，所以對於未知的輸入值亦能得到正確的輸出值。

目前的類神經網路依照學習模式能區分成兩大類，監督式學習以及非監督式學習：

- 1、 監督式學習：以疊代的方式不斷修正神經網路中的權值，在修正的過程中將輸出結果盡量符合期待結果，在每個訓練例子給與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臨界值或權值不再改變為止。
- 2、 非監督式學習：只需提供輸入值，不需提供期望輸出值，表示不需要誤差訊息去改善神經網路的輸出值，僅需依照輸入資料便可以判斷其類別。

所以可以知道監督式學習神經網路通常是利用在模型的訓練上面，而非監督式學習神經網路通常則是利用於分類的問題。

類神經網路的優點：

- 1、 可以建構非線性的模型。
- 2、 對於未知的輸入，亦可得到正確的輸出。
- 3、 適應性強，可以接受各種不同的變數作為輸入值。

類神經網路的缺點：

- 1、 已疊代方式修正誤差，計算量較大。
- 2、 能夠有無限多組解，無法得知哪一組解為最佳解。
- 3、 無法確定隱藏層的神經元個數，太多太少都會影響系統的準確性，需以試誤法找出適當的神經元個數。

本研究選擇應用監督式學習神經網路中的倒傳遞神經網路訓練並建構混凝土的強度與坍度預測模型，倒傳遞演算法是一個向前饋入、多層、監督式的神經網路，由於具有簡易及準確度高的性質，是目前應用最普遍的類神經網路學習模式，在使用此網路前必須有一筆存在輸入值與其相對應的輸出值的資料庫或案例做為訓練所用。



3-2-1 倒傳遞類神經網路的架構介紹

倒傳遞的網路構架包含了一層的輸入層、一層或多層的隱藏層以及一層的輸出層，而任一層的任一節點皆與其鄰層的任意節點互相連接，如圖 3-3 所示。

在此類神經的網路構架下，系統的誤差值會隨著隱藏層的節點增多而越小，但是當節點數目過多則會使系統誤差值收斂速度變慢，而對降低系統誤差值幾乎沒有任何的幫助，只是增加運算時間罷了，另外也有研究指出在大部分的實際應用問題上，一層的隱藏層已經足夠解決這些問題了。

應用倒傳遞類神經演算法的訓練過程中，包括了三個階段，第一階段為資料的向前饋入，輸出層中第 i 個節點的計算輸入值 y_i 的公式如下：

$$y_i = g \left(\sum_{j=1}^{N_h} \left(w_{ij} g \left(\sum_{k=1}^{N_i} v_{jk} x_k + \theta_{vj} \right) + \theta_{wi} \right) \right) \quad i = 1, 2, \dots, N_o \quad (3-7)$$

其中 w_{ij} 為隱藏層以及輸入層節點之間的連結權值； v_{jk} 為輸入層及隱藏層節點之間的連結權值； θ_{wi} 與 θ_{vj} 為轉換函數 g 之門檻值； x_k 為輸入層第 k 個節點的輸入值； N_h 、 N_i 以及 N_o 則分別為隱藏層、輸入層以及輸出層的節點數目；而轉換函數 g 的採用可取線性或非線性。第二階段為誤差向後推導，在訓練的過程中，以一系統誤差函數來監測網路的學習表現，而此函數的公式如下：

$$E(W) = \frac{1}{2P} \sum_{p=1}^P \left(\tilde{Y}_p - Y_p \right) \left(\tilde{Y}_p - Y_p \right)^T \quad (3-8)$$

$$\text{其中 } \tilde{Y} = \left(\tilde{y}_1 \tilde{y}_2 \cdots \tilde{y}_i \cdots \tilde{y}_{N_o} \right) ; \quad Y = \left(y_1 y_2 \cdots y_i \cdots y_{N_o} \right) ;$$

$$W = \left(v_{11} v_{12} \cdots v_{jk} \cdots v_{N_h N_i} \theta_{v1} \theta_{v2} \cdots \theta_{vN_h} w_{11} w_{12} \cdots w_{ij} \cdots w_{N_o N_h} \theta_{w1} \theta_{w2} \cdots \theta_{wN_o} \right) ;$$

P 為學習的案例數； \tilde{y}_i 為輸出節點 i 的期望值。

第三階段為權值的修正，標準的倒傳遞類神經演算法是基於最陡梯度法並使用固定的搜尋布幅或學習速率來訓練網路，而權值的修正公式如下：

$$W^{(k+1)} = W^{(k)} + \Delta W^{(k)} \quad (3-9)$$

$$\Delta W^{(k)} = -\eta \frac{\partial E}{\partial W^{(k)}} \quad (3-10)$$

其中 η 為學習率，一般介於 0~1 之間；上標 (k) 表示疊代第 k 次，即網路經過 k 次的學習，倒傳遞類神經演算法中最小化搜尋方向是由負的誤差函數梯度決定，這種搜尋方向上的搜尋步幅由固定的學習速率所決定，因此常有學習的系統誤差不穩定及學習速度緩慢的問題存在。

類神經網路需要被訓練的目的，就是為了讓類神經網路的輸出值越接近目標值，如相同的輸入值進入類神經網路作預測，所得到的輸出值結果要相同，類神經網路沒有被訓練前，輸出的結果是有問題且凌亂的，隨著訓練的次數增加變多，類神經網路中的連結權值會逐漸被修正，使類神經網路的輸出值與目標值的誤差越來越小，當誤差不再改變時，則類神經網路已不再收斂即訓練完成。

通常類神經網路訓練完成後，會使用一組類神經網路沒被訓練過的樣本樣本，測試其準確性，檢查是否得到與目標值接近的輸出值，並決定此類神經網路的可用性。

3-3 Convex hull 演算法介紹

由於類神經網路對於與訓練案例相近的未知輸入值，有較佳的預測結果並能給予一個合理的輸出值，但是如果是與訓練案例差異過大的未知輸入值，則類神經網路仍然是無法預測出合理的正確輸出值，因此希望能界定一個有效的未知輸入值的產生方式，讓類神經網路的預測成果能更準確有效。

如何界定資料庫的有效區域，有許多學者提出不同的想法，其中 Convex hull 演算法是常被使用的方法之一，Convex hull 演算法主要是在二維座標中，找出可以將資料庫中所有資料點包圍起來的一個凸多邊形，且此凸多邊形是由資料庫中的資料點所組成，並利用此多邊形來定義資料庫的有效區域或無效區域。

本研究應用 Convex hull 來設定隨機配比組合的有效區域，以此提高隨機配比的可用性。

3-3-1 Convex hull 演算法建立有效區域方法介紹

- 1、以座標點(0, 0)為初始點。
- 2、找尋 X 值與 Y 值皆大於初始點的資料點(即以初始點為中心的第一象限的所有資料點)。
- 3、對符合的資料點各別求出至初始點的斜率，以斜率最大的點為新的初始點(即包圍所有資料點的凸多邊型起點)。
- 4、重覆以上(2)、(3)步驟直至第一象限無資料點存在為止。
- 5、以新初始點為中心時只找尋第四象限的資料點。
- 6、重覆(3)的步驟直至第四象限無資料點存在，接著是第三象限、第二象限，直至回到凸多邊形的起點，如圖 3-5 所示。

3-3-2 判斷資料點是否在有效區域內的公式介紹

以多邊形各頂點依序對所需判斷點求取角度差的總合，來判別任意點是否在多邊形內，當 | 角度差的總和 | 為 2π ，即可判斷在多邊型內，其公式如下表示：

$$\Delta\theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{y_{(i+1)} - y_p}{x_{(i+1)} - x_p}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y_i - y_p}{x_i - x_p}\right) \quad (3-11)$$

$$\theta = \sum_{i=1}^n \Delta\theta_i \quad (3-12)$$

其中 $\Delta\theta_i$ 為第 i 點與 $(i+1)$ 點的角度差； (x_p, y_p) 為所需判斷點的座標值； (x_i, y_i) 為多邊形上第 i 點的座標值； n 為多邊形的頂點總數； θ 為多邊形各頂點依序對所需判斷點的角度差的總合，當 θ 的總和為 $\pm 2\pi$ 時，則被判斷點在有效區域內，如圖 3-6 所示。

3-4 系統整體架構介紹

如圖 3-7 所示，首先由使用者依照使用需求，由需求的強度及坍度作為目標值輸入，並決定資料搜尋範圍的上、下限值，若有符合的配比資料則進入第一種配比設計程序(系統一)，若資料庫沒有符合的配比資料則進入第二種配比設計程序(系統二)。

3-4-1 系統一介紹

當使用者輸入所需的目標強度以及坍度時，授予目標值一個合理的搜索範圍，再比對搜索資料庫內的所有配比資料，當有符合的配比資料被搜尋到時，便會開始進入系統一的處理程序：

- 1、 首先將所有符合的配比設計資料找出。
- 2、 利用 K-Means 演算法將資料做分類的分析，如表 3-8 所示。
 - 2-1、 首先將所有的配比資料分作為一群組作為初始值。
 - 2-2、 利用 K-Means 演算法進行計算，並找出該群組所代表的群聚中心的位置，由式子(3-2)、(3-3)、(3-4)。
 - 2-3、 將所有群聚內的配比資料點，對其群聚中心的位置做差異度的計算，由式子 (3-13)、(3-14)。
 - 2-4、 檢查所有配比資料點與群聚中心的差異度，是否有大於所設定的差異許可。
 - 2-5、 是，就將資料的分群數量多加一群，再從步驟 2-2 開始重新找尋各自的群聚中心位置。
 - 2-6、 循環以上步驟，直至所有資料點對其所屬群聚的群聚中心的差異度，皆小於或等於許可的差異度。

2-7、當所有資料皆滿足 2-6 所示，即進行不同群聚的群聚中心之間的差異度計算，由式子(3-15)、(3-16)。

2-8、當有任兩個群聚中心資料的差異度，小於許可的最大差異度，即將資料的分群減少一群，並於步驟 2-2 開始重新運算。

2-9、重復以上步驟，直至步驟 2-6 及 2-8 的條件具滿足時，則分類結束。

3、以分類的各個群聚中心，做為該分類群聚的特徵代表。

4、以群聚中心的資料數據，作為使用者需求目標的混凝土配比設計成果。

3-4-2 系統一判斷 K-Means 分類結果的公式

1、計算相同族群內資料與其群聚中心的差異度：

$$r(i)=[C(i)-P(i)]^2 \quad (3-13)$$

$$d=\sum_{i=1}^7 r(i) \quad (3-14)$$

其中： r 為群聚中心與資料點的差異度； C 為群聚中心所在位置； P 為資料點所在位置； d 為群心與資料點的總差異度。

2、計算相異不同族群的群聚中心的差異度：

$$R(i)=[C_m(i)-C_n(i)]^2 \quad (3-15)$$

$$D=\sum_{i=1}^7 R(i) \quad (3-16)$$

其中： R 為兩個相異群心各維度距離； D 為兩個相異群心的總差異度。

3-4-3 系統二介紹

當使用者輸入所需的目標數值時，授予目標值一個合理的搜索範圍，再搜索比對資料庫內的配比資料，當沒有符合的配比資料被搜尋到時，便會開始進入系統二的處理程序：

- 1、 首先設定各配比材料含量的上、下限，並以此由電腦隨機設計出混凝土配比。
- 2、 由 Convex hull 演算法產生的有效區域，檢測並刪除超出材料組合有效區域範圍的配比資料。
- 3、 將合格可用的配比資料，經由類神經網路建構的混凝土強度模型檢驗判斷，並將符合需求目標的混凝土配比留下。
- 4、 將符合需求強度的配比資料，經由類神經網路建構的混凝土坍度模型檢驗，並將符合需求目標的混凝土配比留下。
- 5、 將所有符合需求強度及坍度目標的混凝土配比資料，經由 K-Means 進行資料分群。
- 6、 分群後之群聚中心數據，作為使用者需求的目標混凝土的配比設計。
- 7、 將產生的混凝土配比設計資料輸出並儲存補充資料庫。

第四章、系統測試並修正及研究成果

4-1 節為說明建立系統資料庫的資料數據與有效區域的建立，4-2 節為混凝土模型的建立以及類神經網路的設定參數，4-3 節為說明 K-Means 演算法的使用與設定參數，4-4 節為系統應用結果。

4-1 建立混凝土資料庫與配比組合有效區域

所示本次研究的資料庫包含真實資料與虛擬資料，真實資料的來源皆是從文獻上取得，總共有一百筆資料，每筆資料皆包含混凝土配比的組成資料，如水、水泥、細骨材、粗骨材、爐石、飛灰以及高效減水劑的各個含量。

由資料庫的一百筆資料，設定出配比資料的有效區域，以其中任兩個參數數據即可建立出一部分的有效區域設定，因為有七個參數數據，共可建立二十一個有效區域設定，並可將一組混凝土配比資料的有效區域訂出，其中包含了水-水泥(圖 4-1)、水-細骨材(圖 4-2)、水-粗骨材(圖 4-3)、水-爐石(圖 4-4)、水-飛灰(圖 4-5)、水-強效減水劑(圖 4-6)、水泥-細骨材(圖 4-7)、水泥-粗骨材(圖 4-8)、水泥-爐石(圖 4-9)、水泥-飛灰(圖 4-10)、水泥-強效減水劑(圖 4-11)、細骨材-粗骨材(圖 4-12)、細骨材-爐石(圖 4-13)、細骨材-飛灰(圖 4-14)、細骨材-強效減水劑(圖 4-15)、粗骨材-爐石(圖 4-16)、粗骨材-飛灰(圖 4-17)、粗骨材-強效減水劑(圖 4-18)、爐石-飛灰(圖 4-19)、爐石-高效減水劑(圖 4-20)、飛灰-強效減水劑(圖 4-21)，其中點皆為資料點所在座標；線所包圍的區域為有效區域的範圍；單位皆為重量百分比。

4-2 建立混凝土模型的類神經網路架構與相關係數的設定

利用資料庫建立混凝土的強度模型以及坍度模型，其強度模型所使用的網路架構以及數值正規化於表 4-1 以及 4-2，坍度模型所使用的網路架構以及數值正規化於表 4-3 以及 4-4，如表所示，其輸入值皆是混凝土的組成材料，包括水、水泥、細骨材、粗骨材、爐石、飛灰、高效減水劑，輸出值分別為混凝土試體二十八天的抗壓強度以及混凝土試體的坍度，並進行資料數據的數值正規化，將所有數據以線性方程式，正規化至 0.1—0.9 之間，並以資料庫中的九十組數據作為混凝土預測模型的訓練案例，剩下的十組作為測試案例。

利用不同的隱藏神經元個數，找出最佳的預測成果，由表 4-5、4-6 所示，其中發現在強度預測上，隱藏神經元的個數從七到十五皆有不錯的預測成效，以試誤法在隱藏層神經元為七個的狀態下找出最好的預測成果，如圖 4-22 所示，在隱藏層為七個神經元下的強度預測的驗證誤差值為 0.0040，如圖 4-23 所示，在隱藏層為七個神經元下的強度預測的各項回歸分析值，訓練回歸分析值為 0.9744、驗證回歸分析值為 0.9072、測試回歸分析值為 0.8996、總回歸分析值為 0.9397，用此類神經模型進行實際測試案例的強度預測分析，如圖 4-24 所示，預測實際測試案例的回歸分析值為 0.9371。

在坍度的預測上，隱藏神經元的個數從九到十一個才有比較好的預測結果，但還是都較強度預測的準確度差，以試誤法在隱藏層神經元為十一個的狀態下找到最好的坍度預測成果，如圖 4-25 所示，在隱藏層為十一個神經元下的坍度預測的驗證誤差值為 0.0428，如圖 4-26 所示，在隱藏層為十一個神經元下的坍度預測的各項回歸分析值，訓練回歸分析值為 0.9705、驗證回歸分析值為 0.8152、測試回歸分析

值為 0.9567、總回歸分析值為 0.9379，用此類神經模型進行實際測試案例的坍度預測分析，如圖 4-27 所示，預測實際測試案例的回歸分析值為 0.8891。

圖 4-28 以及圖 4-29 為類神經網路預測強度與坍度的模型的完整架構，由於資料庫內只有一百筆資料，不足以讓 K-Means 進行資料分析，並進一步的設計出混凝土配比，於是利用類神經網路的混凝土模型與 Convex hull 結合利用，建立虛擬資料庫，其中包含有一千五百筆資料的資料庫以及包含三千筆資料的資料庫兩種，由於虛擬資料的加入，分別為一百筆、一千五百筆以及三千筆資料如圖 4-30 所示，資料庫所擁有不同或相同的混凝土強度與坍度組合會變的越來越多，而配比組合範圍分別為一百筆、一千五百筆以及三千筆的資料可由圖 4-31 以及圖 4-32 所示，由兩組相同的材料變數以不同的資料筆數作為代表，其資料散布圖顯示出，虛擬的配比組成資料都有在設定的有效區域範圍內。



4-3 應用 K-Means 演算法分析資料庫以及相關係數的設定

利用 K-Means 演算法分析資料庫並進行混凝土配比設計，首先以(1):強度 25(Mpa)及坍度 25(cm)、(2):強度 32.5(Mpa)及坍度 25(cm)、(3):強度 40(Mpa)及坍度 25(cm)、(4):強度 47.5(Mpa)及坍度 25(cm)、強度(5): 55(Mpa)及坍度 25(cm)，以上五組目標值作為需求目標值，並先設定 K-Means 的差異許可值為 0.001，以此嘗試設計出混凝土配比。

首先以資料筆數為一百筆的資料庫中找尋符合的配筆資料，並以目標值為下限及目標值乘以 1.08 的數值為上限，作為符合的目標範圍，如表 4-7 或圖 4-33 所示，由於資料庫的配比資料不足，所以在第(1)、(2)、(4)以及(5)組的需求目標下，皆沒有任何混凝土配比資料產生，而在(3)的目標下則有一筆資料產生，經由混凝土模型進行驗證，設計的混凝土配比預測強度以及預測坍度為 41.7(Mpa)及 26.5(cm)。

將資料庫由一百筆增加虛擬資料變為一千五百筆的資料庫，一樣以五組目標值做為設計目標，如表 4-8 或圖 4-34 所示，由於資料庫資料變多，發現除了第(1)組的目標外，以外的需求目標皆有一筆或一筆以上的混凝土配比設計產生，由於 K-Means 的差異許可設定不佳，所以需求目標的有些混凝土配比設計不佳。

增加虛擬資料，直至資料庫內有三千筆混凝土配比資料，並繼續以五組目標值做為設計目標，如表 4-9 或圖 4-35 所示，發現一樣除了第(1)組的目標外，以外的需求目標有更多樣的混凝土配比設計產生，但是也發現由於 K-Means 的差異許可設定不佳，有更多設計不佳的混凝土配比資料產生。

修正 K-Means 的差異許可，基於三千筆資料的資料庫，設計需求目標為 55(Mpa)及坍度 25(cm)，並以許可差異為 0.0001 值，進行配比設計，以表 4-10 所示，發現雖然在混凝土配比設計方面有較差異許可值為 0.001 好，但是有些配比資料的相異性太低，如表 4-10 中的第(3)與(8)；(4)與(7)；(6)與(10)，這幾組配比的相異性太低，應該能各自分類為同一類。

修正差異許可值為 0.0005，進行配比設計，以表 4-11 所示，發現分類效果較差異許可值為 0.0001 好，而所設計出的需求混凝土配比的預期值也較佳。

修正差異許可值為 0.0007，並進行混凝土配比設計，以表 4-12 所示，發現分類結果與差異許可值為 0.0005 相同，修正差異許可值為 0.0003，進行混凝土配比設計，以表 4-13 所示，發現分類結果與差異許可值為 0.0005 較差，修正差異許可值為 0.0004，進行混凝土配比設計，以表 4-14 所示，發現分類結果與較差異許可值為 0.0003 佳，但較差異許可值為 0.0005 差，修正差異許可值為 0.0008，進行混凝土配比設計，以表 4-15 所示，發現分類的結果與差異許可值為 0.001 是相同的。

由於在差異許可值為 0.0007 與 0.0005 時，在對需求目標 55(Mpa)及坍度 25(cm)的混凝土設計配比時有著相同的結果，改變需求目標為 (1)：32.5(Mpa)及坍度 25(cm)、(2)：40(Mpa)及坍度 25(cm)以及(3)：47.5(Mpa)及坍度 25(cm)等，以此三組需求目標，試誤出最好的差異許可值，首先以差異許可值為 0.0005 為 K-Means 分類的設定，如表 4-16 所示，其所設計需求目標的混凝土配比已經比以差異許可值為 0.001 時較佳，改變差異許可值為 0.0006，並以三組需求目標進行混凝土配比設計，如表 4-17 所示，發現比差異許可值為 0.0005 的設計

成果較好，改變差異許可值為 0.0007，並以三組需求目標進行混凝土配比設計，如表 4-18 所示，發現比差異許可值為 0.0006 與差異許可值為 0.0005 的設計成果都好。

經由以上測試，決定以差異許可值為 0.0007 做為設定值，進行 K-Means 分類並設計出需求目標的混凝土配比，表 4-19，為以 55(Mpa) 及坍度 25(cm)為需求目標，符合以目標值為下限並以目標值乘 1.08 的值為上限的所有資料，經由 K-Means 演算法的分類結果，表 4-20，為以此分類結果進行需求目標的混凝土配比設計成果。



4-4 配比設計系統應用結果

以三千筆資料的資料庫作為配比設計的基礎，以(1):強度 25(Mpa)及坍度 25(cm)、(2):強度 32.5(Mpa)及坍度 25(cm)、(3):強度 40(Mpa)及坍度 25(cm)、(4):強度 47.5(Mpa)及坍度 25(cm)、強度(5):55(Mpa)及坍度 25(cm)，以上五組目標值作為需求目標值，並設定 K-Means 的差異許可值為 0.0007。

當資料庫足以為需求目標提供混凝土配比資料時，如表 4-12 及表 4-18 所示，資料庫配合 K-Means 演算法設計出需求目標的混凝土配比，除了第(1)組的需求目標外，其他四組需求目標都有設計出相對應的混凝土配比，且經由混凝土模型預測是符合需求目標的。

當資料庫無法為需求目標提供任何配比資料時，就開始應用類神經網路與隨機配比，設計符合需求目標的混凝土配比，如表 4-21 所示，首先由配比資料庫中的各項配比資料的上下限值，產生隨機組成配比，再經由配比組合有效區域檢測，將超出有效區域範圍的配比資料剔除，並將有效區域內的配比資料經由類神經網路所建構的混凝土強度模型進行強度預測，留下符合需求強度的配比資料，將符合需求強度的配比資料經由類神經網路所建構的混凝土坍度模型進行坍度預測，留下符合需求坍度的配比資料，讓所有符合的配比資料經由 K-Means 演算法進行分類，以最終分類結果作為需求目標的混凝土配比設計，如表 4-22 及圖 4-36 為兩種設計混凝土配比方法的配合使用成果，表 4-23 為結構混凝土施工規範規定的配比適用處【25】。

第五章、結論與建議

5-1 結論

本次的研究對設計混凝土配比問題提出一種可行的方案，其中由 K-Means 演算法結合資料庫設計需求目標的混凝土配比，在本研究中證實是可行的，並能達成目的設計多種相異且符合需求的混凝土配比供使用者選擇，以下為本次研究的結論：

- 1、由 K-Means 演算法結合資料庫設計需求目標的混凝土配比是可行的，但是關鍵的差異許可值跟類神經網路的隱藏神經元數目是一樣需要用試誤法所取得的。
- 2、如果當資料庫的資料充足時，設計配比時可優先考慮由 K-Means 演算法結合資料庫，產生所需的配比設計，因為具有速度較快以及配比多樣性的優點。
- 3、由於經由 K-Means 分類過後的群心資料是所有相似的配比資料所組成的，由大量同群聚資料的平均所得出的群心資料具有更高的準確度。
- 4、在資料庫的資料不夠充足時，由 Convex hull 演算法在設計隨機配比組合時，可以有讓類神經網路所建構的混凝土模型較能準確預測的配比設計產生。
- 5、由於原始資料庫的資料貧乏與有效區域的限制，在由系統二設計資料庫中接近強度及坍度極值的混凝土配比時，會需要大量的時間做配比設計，甚至會無法成功產生所需的混凝土配比設計。

5-2 建議

- 1、 由於混凝土的組成材料是多樣的，其中有些對混凝土影響較大，有些則較小，建議可多收集相關文獻，為混凝土的組成材料做權重分析，以提升 K-Means 演算法做分類分析的效果，從而提高設計出更準確的混凝土配比組合。
- 2、 可多收集真實的混凝土實驗數據，對於不管由 K-Means 演算法結合資料庫或者由類神經網路設計混凝土配比並且在混凝土預測模型的建立，都有良好的效果。



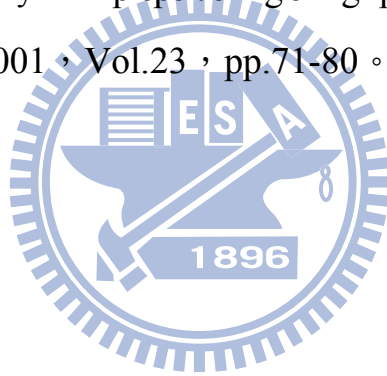
參考文獻

- 【1】 湛淵源,黃兆龍,「高性能混凝土材料設計和應用-HPC 的減碳及永續使用發展」,中華民國建築師公會全國聯合會,2009。
- 【2】 經濟部標準檢驗局,「中華民國國家標準」。
- 【3】 Sandro Saitta, Prakash Kripakaran, Benny Raphael, Ian F. C. Smith,「Improving System Identification Using Clustering」, J. Comput. Civ. Eng., 2008 , Vol.22 , No.5 , pp.292-302 。
- 【4】 Abrams, Duff A. ,「Design of concrete Mixtures」, Bulletin NO.1 , Structural Materials Research Lab. , Lewis institute , Chicago , 1919 。
- 【5】 Sandor Popovics ,「Generalization of the Abram's Law-prediction of str. Development of Concrete from Cement Properties」, ACI. Mar. , 1981 , pp.123-129 。
- 【6】 De Larrard, F., M. Buil ,「Granularite et compacitedans les mareriaux de genie civil」, Material et. structure , 1987 , pp.117-126 。
- 【7】 賴鴻城,「類神經網路在混凝土材料強度預測之應用」,國立交通大學土木研究所,碩士論文,民國 82 年。
- 【8】 Sergio Lai, Mauro Serra ,「Concrete strength prediction neural network」, Construct. Build. Mater. , 1997 , Vol.11 , No.2 , pp.93-98 。

- 【9】 I. C. Yeh , 「 MODELING OF STRENGTH OF HIGH-PERFORMANCE CONCRETE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS 」, Cem. Concr. Res. , 1998 , Vol.28 , No.12 , pp.1797–1808 。
- 【10】 Ni Hong Guang, Wang Ji-Zong , 「 Prediction of compressive strength of concrete by neural networks 」, Cem. Concr. Res. , 2000 , Vol.30 , pp.1245-1250 。
- 【11】 W.P.S. Dias, S.P. Pooliyadda , 「 Neural networks for predicting properties of concretes with admixtures 」, Construct. Build. Mater. , 2001 , Vol.15 , pp.371-379 。
- 【12】 Bai J, Wild S, Ware JA, Sabir BB. , 「 Using neural networks to predict workability of concrete incorporating metakaolin and fly ash 」 , Adv. Eng. Soft. , 2003 , Vol.34 , pp.663–669 。
- 【13】 Seung Chang Lee , 「 Prediction of concrete strength using artificial neural networks 」, Eng. Str. , 2003 , Vol.25 , pp.849-857 。
- 【14】 Jong In Kim, Doo Kie Kim, Maria Q.Feng, Frank Yazdani , 「 Application of Neural Networks for Estimation of Concrete Strength 」, J. Mater. Civ. Eng. , 2004 , Vol.16 , No.3 , pp.257-264 。
- 【15】 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塌度模型 」, Journal of Technology , 2005 , Vol. 20 , No. 2 , pp.153-162 。
- 【16】 Doo Kie Kim, Jong Jae Lee, Jong Han Lee, Seong Kyu Chang , 「 Application of Probabilistic Neural Networks for Prediction of Concrete Strength 」, J. Mater. Civ. Eng. , 2005 , Vol.17 , No.3 , pp.353-362 。

- 【17】 Ahmet Oztas, Murat Pala, Erdogan Ozbay, Erdogan Kanca, Naci Caglar, M. Asghar Bhatti , 「Predicting the compressive strength and slump of high strength concrete using neural network 」 , Construct. Build. Mater. , 2006 , Vol.20 , pp.769-775 .
- 【18】 Wang Ji Zong, Ni Hong Guang, He Jin Yun , 「The application of automatic acquisition of knowledge to mix design of concrete 」 , Cem. Concr. Res. , 1999 , Vol.29 , pp.1875-1880 .
- 【19】 I. C. Yeh , 「DESIGN OF HIGH-PERFORMANCE CONCRETE MIXTURE USING NEURAL NETWORKS AND NONLINEAR PROGRAMMING 」 , J. Comput. Civ. Eng. , Vol.13 , No.1 , 1999 , pp.36-42 .
- 【20】 Francois de Larrard, Thierry Sedran , 「Mixture proportioning of high-performance concrete 」 , Cem. Concr. Res. , 2002 , Vol.32 , pp.1699-1704 .
- 【21】 Chul Hyun Lim, Young-Soo Yoon, Joong-Hoon Kim , 「Genetic algorithm in mix proportioning of high-performance concrete 」 , Cem. Concr. Res. , 2004 , Vol.34 , pp.409-420 .
- 【22】 Tao Ji, Tingwei Lin, Xujian Lin , 「A concrete mix proportion design algorithm based on artificial neural networks 」 , Cem. Concr. Res. , 2006 , Vol.36 , pp.1399-1408 .
- 【23】 I. C. Yeh , 「Computer-aided design for optimum concrete mixtures 」 , Cem. Concr. Com. , 2007 , Vol.29 , pp.193-202 .

- 【24】 Bang Yeon Lee, Jae Hong Kim, Jin-Keun Kim , 「Optimum Concrete Mixture Proportion Based on a Database Considering Regional Characteristics」, J. Comput. Civ. Eng. , 2009 , Vol.23 , No.5 , pp258-265 。
- 【25】 內政部營建署, 建築管理組, 「結構混凝土施工規範」。
- 【26】 潘坤勝, 劉玉雯, 顏聰, 「高強度混凝土耐磨性及工程力學特性之研究」。
- 【27】 林宜賢, 「高性能混凝土之配比設計研究」, 國立成功大學土木工程研究所, 碩士論文, 民國 92 年。
- 【28】 B. H. Bhaskumar, R. Narayanan, B. K. Raghuprasad, D. S. Ramachandramurthy 「 Mix proportioning of high performance concrete」, Cem. Concr. Com. , 2001 , Vol.23 , pp.71-80 。



附錄

表 2-1 由文獻所得的配比資料庫

編號	強度 (MPa)	坍度 (cm)	水含量 (kg/m ³)	水泥含量 (kg/m ³)	細骨材含量 (kg/m ³)	粗骨材含量 (kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	飛灰 (kg/m ³)	高效減水劑 (kg/m ³)
<u>1</u>	<u>35.00</u>	<u>4.0</u>	<u>198.0</u>	<u>340.0</u>	<u>752.0</u>	<u>1216.0</u>	<u>0.0</u>	<u>0.0</u>	<u>0.00</u>
2	47.00	4.0	198.0	340.0	752.0	1123.0	0.0	0.0	0.00
3	31.00	18.0	198.0	340.0	752.0	1111.0	0.0	0.0	0.00
4	47.80	16.3	192.0	401.0	664.0	1052.0	0.0	62.6	11.60
5	25.20	13.5	183.0	287.0	768.0	1094.0	0.0	79.1	5.40
6	57.60	17.5	188.0	389.0	678.0	1047.0	0.0	68.9	10.50
7	28.50	15.0	195.0	288.0	738.0	1070.0	0.0	93.4	5.90
8	44.90	17.6	187.0	328.0	689.0	1093.0	0.0	80.3	9.40
9	39.60	15.5	174.0	301.0	723.0	1138.0	0.0	70.5	8.90
10	44.00	16.3	179.0	304.0	723.0	1098.0	0.0	78.9	9.60
<u>11</u>	<u>40.90</u>	<u>16.7</u>	<u>187.0</u>	<u>302.0</u>	<u>728.0</u>	<u>1082.0</u>	<u>0.0</u>	<u>87.7</u>	<u>6.60</u>
12	32.80	14.6	194.0	313.0	739.0	1060.0	0.0	84.1	5.70
13	46.50	16.0	198.0	399.0	687.0	1004.0	0.0	72.3	9.90
14	29.60	16.0	189.0	287.0	777.0	1057.0	0.0	87.3	5.00
15	42.20	16.5	184.0	356.0	715.0	1081.0	0.0	62.5	9.30
16	27.20	16.0	200.2	159.9	865.0	851.1	97.9	140.9	5.10
17	35.40	13.0	189.9	170.8	852.7	859.0	104.7	151.1	6.90
18	46.90	15.0	182.7	178.9	846.5	868.0	134.3	133.9	8.00
19	48.40	19.0	174.5	193.8	821.5	875.1	138.2	151.8	8.90
20	57.20	17.0	160.4	200.0	734.2	990.3	155.2	140.0	9.80
<u>21</u>	<u>42.10</u>	<u>6.0</u>	<u>154.9</u>	<u>159.5</u>	<u>823.5</u>	<u>1010.5</u>	<u>81.2</u>	<u>157.3</u>	<u>4.20</u>
22	41.30	10.0	161.0	162.4	825.2	980.3	86.6	156.6	6.80
23	43.60	16.0	183.1	183.7	830.6	865.7	116.5	158.5	8.10
24	45.60	22.0	183.6	186.9	773.3	911.9	124.8	155.1	9.50
25	43.20	24.0	184.6	190.2	737.9	934.0	129.5	155.7	10.70

表 2-1(續)

編號	強度 (MPa)	坍度 (cm)	水含量 (kg/m ³)	水泥含量 (kg/m ³)	細骨材含量(kg/m ³)	粗骨材含量(kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	飛灰 (kg/m ³)	高效減水劑(kg/m ³)
26	50.50	2.5	214.0	537.0	495.0	1100.0	0.0	0.0	0.00
27	42.60	5.5	226.0	502.0	495.0	1100.0	0.0	0.0	0.00
28	36.40	12.5	236.0	472.0	495.0	1100.0	0.0	0.0	0.00
29	47.40	5.5	226.0	566.0	431.0	1108.0	0.0	0.0	0.00
30	43.10	8.5	238.0	530.0	431.0	1108.0	0.0	0.0	0.00
<u>31</u>	<u>35.00</u>	<u>12.0</u>	<u>249.0</u>	<u>498.0</u>	<u>431.0</u>	<u>1108.0</u>	<u>0.0</u>	<u>0.0</u>	<u>0.00</u>
32	44.70	9.5	237.0	592.0	388.0	1102.0	0.0	0.0	0.00
33	44.50	13.0	250.0	554.0	388.0	1102.0	0.0	0.0	0.00
34	36.80	19.0	261.0	521.0	388.0	1102.0	0.0	0.0	0.00
35	49.70	4.5	203.0	461.0	495.0	1101.0	0.0	81.0	2.01
36	55.20	20.5	203.0	461.0	495.0	1101.0	0.0	81.0	5.64
37	50.80	21.0	203.0	461.0	495.0	1101.0	0.0	81.0	9.08
38	50.70	9.5	214.0	486.0	431.0	1108.0	0.0	86.0	2.11
39	53.10	21.0	214.0	486.0	431.0	1108.0	0.0	86.0	5.94
40	50.50	23.0	214.0	486.0	431.0	1108.0	0.0	86.0	9.57
<u>41</u>	<u>51.30</u>	<u>10.0</u>	<u>224.0</u>	<u>509.0</u>	<u>388.0</u>	<u>1102.0</u>	<u>0.0</u>	<u>90.0</u>	<u>2.21</u>
42	53.00	21.5	224.0	509.0	388.0	1102.0	0.0	90.0	6.22
43	50.40	23.5	224.0	509.0	388.0	1102.0	0.0	90.0	10.02
44	34.20	21.5	140.1	196.3	773.2	1049.3	135.1	11.1	3.70
45	34.80	22.0	140.3	196.6	780.7	1040.7	135.4	11.2	3.70
46	26.80	27.0	144.4	226.4	779.9	893.1	137.5	68.7	4.60
47	24.50	27.5	150.0	234.1	795.4	821.0	121.2	109.6	5.00
48	30.70	27.5	148.2	231.6	788.6	780.4	126.3	152.6	5.60
49	42.70	8.0	140.6	168.5	899.5	892.6	120.6	113.0	4.90
50	44.60	7.5	140.5	169.6	896.9	901.1	150.4	82.3	4.90
<u>51</u>	<u>47.20</u>	<u>15.0</u>	<u>140.0</u>	<u>180.8</u>	<u>899.2</u>	<u>839.6</u>	<u>163.7</u>	<u>98.6</u>	<u>5.20</u>
52	43.60	24.0	140.0	189.1	877.4	821.0	185.3	97.2	5.50
53	41.70	26.5	140.2	217.6	799.1	798.0	225.6	87.1	5.90

表 2-1(續)

編號	強度 (MPa)	坍度 (cm)	水含量 (kg/m ³)	水泥含量 (kg/m ³)	細骨材含量(kg/m ³)	粗骨材含量(kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	飛灰 (kg/m ³)	高效減水劑(kg/m ³)
54	50.20	15.0	140.0	169.0	897.8	858.7	172.5	102.1	5.40
55	52.70	9.0	140.3	170.0	897.5	865.9	199.9	72.4	5.40
56	51.60	8.0	140.6	178.8	899.0	830.0	222.5	72.9	5.70
57	51.50	16.0	146.4	191.4	854.9	791.5	239.3	89.0	6.20
58	49.90	22.0	191.0	204.6	805.1	782.6	239.2	76.6	6.60
59	48.20	8.5	140.2	168.5	894.7	829.7	231.9	83.6	5.90
60	52.70	22.5	156.3	173.0	889.8	821.6	239.8	67.2	6.00
<u>61</u>	<u>52.00</u>	<u>8.0</u>	<u>189.0</u>	<u>181.5</u>	<u>866.2</u>	<u>803.2</u>	<u>239.6</u>	<u>60.6</u>	<u>6.40</u>
62	54.30	18.5	230.1	190.6	830.8	793.1	239.1	49.6	6.80
63	53.70	26.5	294.0	206.2	755.0	790.4	238.7	34.4	7.40
64	53.30	2.0	216.1	169.0	872.0	806.5	239.8	60.7	6.80
65	53.30	11.5	242.1	173.7	868.0	804.9	239.8	36.5	6.80
66	53.80	3.0	287.6	182.5	821.6	804.9	239.9	22.9	7.20
67	54.50	23.0	331.6	188.3	794.8	784.2	239.8	13.3	10.60
68	53.80	28.0	390.0	200.0	742.3	780.4	230.0	0.0	11.00
69	37.76	23.0	140.0	330.6	809.4	1026.3	0.0	58.3	10.89
70	38.54	23.0	160.0	377.8	809.4	1026.3	0.0	66.6	12.44
<u>71</u>	<u>37.76</u>	<u>20.0</u>	<u>180.0</u>	<u>425.0</u>	<u>768.5</u>	<u>974.0</u>	<u>25.0</u>	<u>50.0</u>	<u>10.00</u>
72	50.41	23.5	140.0	350.0	799.9	1014.1	0.0	61.8	12.14
73	69.90	28.2	170.0	695.0	728.0	769	0.0	0.0	11.80
74	64.20	27.7	170.0	603.0	729.0	848	0.0	0.0	7.20
75	65.40	27.0	170.0	602.0	756.0	822	0.0	0.0	8.40
76	59.00	27.3	170.0	607.0	797.0	776	0.0	0.0	8.50
77	64.10	25.0	170.0	547.0	752.0	875	0.0	0.0	6.60
78	59.10	26.0	170.0	546.0	782.0	845	0.0	0.0	6.60
79	55.20	26.0	170.0	547.0	854.0	771	0.0	0.0	6.60
80	49.90	23.5	170.0	475.0	783.0	906	0.0	0.0	5.70
<u>81</u>	<u>55.10</u>	<u>24.0</u>	<u>170.0</u>	<u>480.0</u>	<u>906.0</u>	<u>776</u>	<u>0.0</u>	<u>0.0</u>	<u>5.80</u>

表 2-1(續)

編號	強度 (MPa)	坍度 (cm)	水含量 (kg/m ³)	水泥含量 (kg/m ³)	細骨材含量(kg/m ³)	粗骨材含量(kg/m ³)	爐石 (kg/m ³)	飛灰 (kg/m ³)	高效減水劑(kg/m ³)
82	44.30	22.0	170.0	430.0	851.0	877	0.0	0.0	5.20
83	40.93	2.0	170.0	340.0	819.0	1054.0	0.0	0.0	1.70
84	35.28	3.5	170.0	289.0	800.0	1054.0	0.0	51.0	2.04
85	33.53	4.0	170.0	255.0	787.0	1054.0	0.0	85.0	2.38
86	35.61	1.5	170.0	289.0	819.0	1054.0	51.0	0.0	2.04
87	38.28	2.5	170.0	238.0	819.0	1054.0	102.0	0.0	2.21
88	40.03	2.0	170.0	170.0	819.0	1054.0	170.0	0.0	2.21
89	53.79	1.5	170.0	405.0	765.0	1054.0	0.0	0.0	2.03
90	51.81	2.5	170.0	345.0	742.0	1054.0	0.0	60.0	2.63
<u>91</u>	<u>48.65</u>	<u>3.5</u>	<u>170.0</u>	<u>304.0</u>	<u>726.0</u>	<u>1054.0</u>	<u>0.0</u>	<u>101.0</u>	<u>3.44</u>
92	51.11	1.5	170.0	345.0	765.0	1054.0	60.0	0.0	2.43
93	53.79	2.5	170.0	283.0	765.0	1054.0	122.0	0.0	3.04
94	55.70	2.0	170.0	203.0	765.0	1054.0	202.0	0.0	3.44
95	75.07	2.5	170.0	486.0	684.0	1054.0	0.0	0.0	2.43
96	72.06	1.5	170.0	413.0	652.0	1054.0	0.0	73.0	2.92
97	65.58	2.5	170.0	365.0	631.0	1054.0	0.0	121.0	3.65
98	70.08	2.0	170.0	413.0	684.0	1054.0	73.0	0.0	3.40
99	72.93	1.5	170.0	340.0	684.0	1054.0	146.0	0.0	3.65
100	75.46	4.0	170.0	243.0	684.0	1054.0	243.0	0.0	2.43

註：由文獻取得的配比資料，1-3【7】、4-15【18】、16-25【19】、26-43【22】、44-68【23】、69-72【26】、73-82【27】、83-100【28】，其中第 1、11、21、31、41、51、61、71、81、91 筆資料為類神經網路建構混凝土預測模型的測試案例，其餘皆為類神經網路建構混凝土預測模型的訓練案例。

表 4-1 混凝土強度預測模型使用的類神經網路架構

網路型式	Feed-forward back propagation	(前饋式倒傳遞)
訓練函數	TRAINLM	(L-M 優化演算法)
學習函數	LEARNGDM	(動量梯度下降法)
表現函數	MSE	(均方誤差)
轉讓函數	TANSIG	(雙彎曲正切函數)

表 4-2 混凝土強度預測模型使用的正規化資料

輸入的變數	原始值範圍	正規化後範圍
水(重量百分比)	0 — 0.17	0.1 — 0.9
水泥(重量百分比)	0 — 0.27	0.1 — 0.9
細骨材(重量百分比)	0 — 0.40	0.1 — 0.9
粗骨材(重量百分比)	0 — 0.50	0.1 — 0.9
爐石(重量百分比)	0 — 0.11	0.1 — 0.9
飛灰(重量百分比)	0 — 0.07	0.1 — 0.9
減水劑(重量百分比)	0 — 0.006	0.1 — 0.9
輸出的變數	原始值範圍	正規化後範圍
混凝土強度 (Mpa)	0 — 76	0.1 — 0.9

表 4-3 混凝土坍度預測模型使用的類神經網路架構

網路型式	Feed-forward back propagation	(前饋式倒傳遞)
訓練函數	TRAINLM	(L-M 優化演算法)
學習函數	LEARNGDM	(動量梯度下降法)
表現函數	MSE	(均方誤差)
轉讓函數	TANSIG	(雙彎曲正切函數)

表 4-4 混凝土坍度預測模型使用的正規化資料

輸入的變數	原始值範圍	正規化後範圍
水(重量百分比)	0 — 0.17	0.1 — 0.9
水泥(重量百分比)	0 — 0.27	0.1 — 0.9
細骨材(重量百分比)	0 — 0.40	0.1 — 0.9
粗骨材(重量百分比)	0 — 0.50	0.1 — 0.9
爐石(重量百分比)	0 — 0.11	0.1 — 0.9
飛灰(重量百分比)	0 — 0.07	0.1 — 0.9
減水劑(重量百分比)	0 — 0.006	0.1 — 0.9
輸出的變數	原始值範圍	正規化後範圍
混凝土坍度 (cm)	0 — 28	0.1 — 0.9

表 4-5 不同隱藏層神經元預測抗壓強度的分析回歸結果

神經元個數	訓練回歸值	驗證回歸值	測試回歸值
7	0.9850	0.7002	0.6987
7	0.9872	0.5395	0.8634
7	0.9817	0.7718	0.7145
7	0.9913	0.3162	0.6284
8	0.9805	0.6829	0.8890
8	0.9902	0.7214	0.4048
8	0.9940	0.5652	0.7022
8	0.9848	0.6078	0.8083
9	0.9802	0.8119	0.7402
9	0.9733	0.6152	0.5097
9	0.9790	0.7655	0.6669
9	0.9963	0.8811	0.7608
10	0.9826	0.6742	0.6166
10	0.9824	0.7752	0.8490
10	0.9934	0.8978	0.7887
10	0.9759	0.5263	0.7260

表 4-5(續)

神經元個數	訓練回歸值	驗證回歸值	測試回歸值
11	0.9879	0.6936	0.7553
11	0.9836	0.7948	0.1694
11	0.9922	0.8102	0.7776
11	0.9701	0.7451	0.7542
12	0.9933	0.8410	0.8750
12	0.9774	0.7433	0.7524
12	0.9891	0.6068	0.6951
12	0.9829	0.3458	0.5572
13	0.9969	0.7018	0.6003
13	0.9895	0.4822	0.6648
13	0.9997	0.6777	0.7528
13	0.9925	0.7592	0.7333
14	0.9947	0.7693	0.6814
14	0.9925	0.6428	0.7786
14	0.9923	0.7261	0.7982
14	0.9969	0.6678	0.8820
15	0.9891	0.5813	0.8513
15	0.9878	0.8398	0.9073
15	0.9947	0.7325	0.8535
15	0.9957	0.8082	0.6823

表 4-6 不同隱藏層神經元預測混凝土坍度的分析回歸結果

神經元個數	訓練回歸值	驗證回歸值	測試回歸值
7	0.9712	0.5563	0.6044
7	0.9965	0.5192	0.6684
7	0.9967	0.6408	0.7548
7	0.9760	0.6697	0.7693
8	0.9550	0.6255	0.7447
8	0.9760	0.6697	0.7693
8	0.9359	0.7219	0.6316
8	0.8739	0.6895	0.6515
9	0.9752	0.5377	0.7880
9	0.8949	0.6291	0.6700
9	0.9299	0.4575	0.6133
9	0.9325	0.8000	0.8277
10	0.9795	0.7415	0.3577
10	0.9043	0.7620	0.4492
10	0.9123	0.5935	0.1370
10	0.8917	0.7246	0.6725
11	0.9965	0.5700	0.5754
11	0.9281	0.5872	0.5530
11	0.9408	0.6820	0.1166
11	0.9059	0.5471	0.5546

表 4-6(續)

神經元個數	訓練回歸值	驗證回歸值	測試回歸值
12	0.9987	0.8612	0.4948
12	0.9141	0.6137	0.3074
12	0.8680	0.3482	0.8285
12	0.7431	0.6918	0.1219
13	0.9968	0.6735	0.7791
13	0.8141	0.1778	0.1997
13	0.8672	0.2904	0.0445
13	0.9557	0.5503	0.4377
14	0.9513	0.1418	0.4788
14	0.9565	0.7147	0.4304
14	0.5007	0.3076	0.4815
14	0.8590	0.5134	0.7341
15	0.9974	0.8087	0.0986
15	0.7970	0.5479	0.5169
15	0.9442	0.7463	0.5513
15	0.9455	0.4261	0.8693

表 4-7 一百筆資料的資料庫進行混凝土配比設計

需求 目標	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(1)	無法產生符合目標的混凝土配比資料								
(2)	無法產生符合目標的混凝土配比資料								
(3)	0.062	0.096	0.352	0.351	0.099	0.038	0.003	41.7	26.5
(4)	無法產生符合目標的混凝土配比資料								
(5)	無法產生符合目標的混凝土配比資料								

註：組合材料單位為重量百分比；強度單位為 Mpa；坍度單位為 cm；SP 為高效減水劑。

表 4-8 一千五百筆資料的資料庫進行混凝土配比設計

需求 目標	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(1)	無法產生符合目標的混凝土配比資料								
(2)	0.097	0.133	0.310	0.389	0.035	0.032	0.003	33.0	26.9
(2)	0.070	0.139	0.325	0.397	0.032	0.034	0.004	34.1	26.5
(3)	0.069	0.119	0.313	0.414	0.061	0.021	0.003	41.5	26.0
(3)	0.105	0.114	0.292	0.384	0.068	0.033	0.004	40.2	26.3
(3)	0.080	0.116	0.285	0.412	0.061	0.042	0.004	39.6	25.1
(3)	0.107	0.099	0.331	0.364	0.058	0.037	0.004	42.0	26.5
(3)	0.062	0.101	0.345	0.361	0.083	0.045	0.002	43.1	26.6
(3)	0.087	0.153	0.265	0.424	0.029	0.039	0.004	41.9	26.6

表 4-8(續)

需求 目標	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(4)	0.102	0.179	0.230	0.423	0.025	0.039	0.004	50.5	27.3
(4)	0.111	0.093	0.320	0.3558	0.087	0.030	0.004	48.9	26.7
(4)	0.080	0.138	0.277	0.427	0.062	0.013	0.003	48.4	25.6
(4)	0.068	0.110	0.298	0.410	0.059	0.052	0.002	51.0	25.2
* (5)	0.104	0.194	0.220	0.455	0.013	0.011	0.002	60.0	26.5

註：組合材料單位為重量百分比；強度單位為 Mpa；坍度單位為 cm；SP 為高效減水劑；*為配比設計成果不佳。

表 4-9 三千筆資料的資料庫進行混凝土配比設計

需求 目標	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(1)	無法產生符合目標的混凝土配比資料								
(2)	0.068	0.123	0.333	0.397	0.030	0.039	0.003	33.8	26.5
(2)	0.070	0.147	0.315	0.393	0.046	0.025	0.004	34.7	26.5
(2)	0.096	0.141	0.308	0.392	0.030	0.029	0.004	33.5	26.7
(2)	0.080	0.113	0.311	0.420	0.022	0.050	0.004	34.4	26.3
(2)	0.089	0.120	0.323	0.381	0.045	0.039	0.003	34.2	27.3
(3)	0.115	0.109	0.282	0.395	0.065	0.031	0.004	42.0	26.1
(3)	0.069	0.120	0.311	0.416	0.064	0.018	0.003	42.1	26.0
(3)	0.078	0.109	0.294	0.412	0.048	0.055	0.004	39.6	26.2
(3)	0.091	0.111	0.298	0.390	0.063	0.043	0.004	39.9	26.2

表 4-9(續)

需求 目標	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(3)	0.075	0.140	0.264	0.442	0.064	0.011	0.005	43.0	26.6
(3)	0.065	0.104	0.339	0.369	0.079	0.041	0.003	41.2	26.4
(3)	0.087	0.156	0.253	0.441	0.008	0.049	0.004	41.9	26.6
(3)	0.113	0.112	0.309	0.361	0.080	0.021	0.004	41.5	26.1
(3)	0.111	0.095	0.332	0.366	0.055	0.036	0.004	42.0	26.6
(3)	0.091	0.153	0.268	0.414	0.037	0.034	0.004	41.3	26.6
(3)	0.074	0.130	0.287	0.443	0.039	0.023	0.004	41.1	25.6
(3)	0.111	0.150	0.262	0.385	0.057	0.032	0.003	40.9	26.7
(3)	0.081	0.128	0.281	0.418	0.060	0.029	0.004	40.5	25.8
(4)	0.107	0.150	0.243	0.457	0.006	0.034	0.003	51.0	25.3
(4)	0.082	0.147	0.272	0.422	0.059	0.015	0.004	48.0	26.0
* (4)	0.105	0.177	0.233	0.425	0.020	0.036	0.004	52.0	27.3
(4)	0.084	0.156	0.252	0.416	0.045	0.044	0.003	48.5	26.8
(4)	0.124	0.086	0.335	0.347	0.088	0.016	0.004	51.0	26.3
(4)	0.096	0.093	0.309	0.379	0.076	0.043	0.004	48.5	26.2
(4)	0.072	0.121	0.298	0.406	0.064	0.037	0.002	47.9	25.8
* (5)	0.108	0.177	0.241	0.440	0.012	0.020	0.002	61.4	26.2
* (5)	0.093	0.157	0.243	0.462	0.033	0.009	0.003	66.3	26.5
(5)	0.101	0.208	0.200	0.455	0.011	0.021	0.003	56.0	26.3
(5)	0.104	0.170	0.243	0.415	0.039	0.026	0.003	59.0	26.1

註：組合材料單位為重量百分比；強度單位為 Mpa；坍度單位為 cm；SP 為高效減水劑；*為配比設計成果不佳。

表 4-10 許可差異為 0.0001 進行混凝土配比設計

配比 編號	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(1)	0.089	0.159	0.251	0.472	0.019	0.008	0.002	58.4	25.0
(2)	0.101	0.208	0.200	0.455	0.011	0.021	0.003	55.7	26.3
%(3)	0.113	0.173	0.252	0.428	0.005	0.027	0.002	55.9	25.6
&(4)	0.107	0.181	0.238	0.452	0.014	0.006	0.002	58.6	25.6
(5)	0.084	0.158	0.240	0.449	0.054	0.010	0.004	59.3	25.6
*(6)	0.104	0.177	0.229	0.429	0.025	0.034	0.003	60.0	27.1
&(7)	0.112	0.181	0.249	0.409	0.027	0.018	0.004	58.3	25.7
%(8)	0.115	0.179	0.246	0.442	0.009	0.006	0.002	55.7	25.5
(9)	0.096	0.162	0.252	0.404	0.053	0.031	0.002	58.5	25.7
*(10)	0.097	0.171	0.231	0.447	0.011	0.040	0.003	57.4	26.0
(11)	0.108	0.153	0.237	0.465	0.027	0.009	0.002	56.1	25.9

註：組合材料單位為重量百分比；強度單位為 Mpa；坍度單位為 cm；SP 為高效減水劑；有相同特殊符號的差異度不足。

表 4-11 許可差異為 0.0005 進行混凝土配比設計

配比 編號	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(1)	0.104	0.172	0.251	0.406	0.040	0.024	0.003	56.1	25.8
(2)	0.101	0.208	0.200	0.455	0.011	0.021	0.003	55.7	26.3
(3)	0.084	0.158	0.240	0.449	0.054	0.010	0.004	59.3	25.6
(4)	0.113	0.178	0.246	0.441	0.009	0.011	0.002	58.1	25.6
(5)	0.102	0.175	0.229	0.435	0.020	0.036	0.003	59.3	26.9
(6)	0.098	0.156	0.244	0.468	0.023	0.008	0.002	56.7	26.1

註：組合材料單位為重量百分比；強度單位為 Mpa；坍度單位為 cm；SP 為高效減水劑。

表 4-12 許可差異為 0.0007 進行混凝土配比設計

配比 編號	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(1)	0.084	0.158	0.240	0.449	0.054	0.010	0.004	59.3	25.6
(2)	0.101	0.208	0.200	0.455	0.011	0.021	0.003	55.7	26.3
(3)	0.098	0.156	0.244	0.468	0.023	0.008	0.002	56.7	26.1
(4)	0.113	0.178	0.246	0.441	0.009	0.011	0.002	58.1	25.6
(5)	0.102	0.175	0.229	0.435	0.020	0.036	0.003	59.3	26.9
(6)	0.104	0.172	0.251	0.406	0.040	0.024	0.003	56.1	25.8

註：組合材料單位為重量百分比；強度單位為 Mpa；坍度單位為 cm；SP 為高效減水劑。

表 4-13 許可差異為 0.0003 進行混凝土配比設計

配比 編號	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(1)	0.096	0.162	0.252	0.404	0.053	0.031	0.002	58.5	25.7
(2)	0.112	0.180	0.244	0.445	0.011	0.006	0.002	56.6	25.6
(3)	0.113	0.177	0.251	0.418	0.016	0.022	0.003	60.1	26.4
(4)	0.097	0.171	0.231	0.447	0.011	0.040	0.003	57.4	26.0
(5)	0.101	0.208	0.200	0.455	0.011	0.021	0.003	55.7	26.3
(6)	0.104	0.177	0.229	0.429	0.025	0.034	0.003	60.0	27.1
(7)	0.084	0.158	0.240	0.449	0.054	0.010	0.004	59.3	25.6
(8)	0.098	0.156	0.244	0.468	0.023	0.008	0.002	56.7	26.1

註：組合材料單位為重量百分比；強度單位為 Mpa；坍度單位為 cm；SP 為高效減水劑。

表 4-14 許可差異為 0.0004 進行混凝土配比設計

配比 編號	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(1)	0.098	0.156	0.244	0.468	0.023	0.008	0.002	56.7	26.1
(2)	0.113	0.177	0.251	0.418	0.016	0.022	0.003	60.1	26.4
(3)	0.102	0.175	0.229	0.435	0.020	0.036	0.003	59.3	26.9
(4)	0.096	0.162	0.252	0.404	0.053	0.031	0.002	58.5	25.7
(5)	0.084	0.158	0.240	0.449	0.054	0.010	0.004	59.3	25.6
(6)	0.101	0.208	0.200	0.455	0.011	0.021	0.003	55.7	26.3
(7)	0.112	0.180	0.244	0.445	0.011	0.006	0.002	56.6	25.6

註：組合材料單位為重量百分比；強度單位為 Mpa；坍度單位為 cm；SP 為高效減水劑。

表 4-15 許可差異為 0.0008 進行混凝土配比設計

配比 編號	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
* (1)	0.108	0.177	0.241	0.440	0.012	0.020	0.002	61.4	26.2
* (2)	0.093	0.157	0.243	0.462	0.033	0.009	0.003	66.3	26.5
(3)	0.104	0.170	0.243	0.415	0.039	0.026	0.003	59.0	26.1
(4)	0.101	0.208	0.200	0.455	0.011	0.021	0.003	56.0	26.3

註：組合材料單位為重量百分比；強度單位為 Mpa；坍度單位為 cm；SP 為高效減水劑；* 為配比設計成果不佳。

表 4-16 配比設計以三千筆資料，差異許可為 0.005

需求 目標	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(1)	0.103	0.134	0.310	0.382	0.040	0.027	0.003	33.1	26.3
(1)	0.068	0.144	0.317	0.386	0.057	0.024	0.004	34.6	26.7
(1)	0.070	0.113	0.336	0.405	0.024	0.049	0.004	33.9	26.7
(1)	0.071	0.154	0.311	0.399	0.038	0.024	0.005	34.8	26.3
(1)	0.090	0.140	0.306	0.400	0.026	0.033	0.004	34.0	26.9
(1)	0.070	0.135	0.329	0.394	0.033	0.036	0.003	34.0	26.6
(1)	0.085	0.120	0.326	0.381	0.044	0.040	0.003	34.2	27.4
(1)	0.081	0.115	0.307	0.424	0.021	0.049	0.004	34.3	26.1

表 4-16(續)

需求 目標	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(2)	0.104	0.108	0.289	0.396	0.057	0.041	0.005	40.8	27.0
(2)	0.111	0.150	0.262	0.385	0.057	0.032	0.003	40.9	26.7
(2)	0.118	0.118	0.287	0.373	0.081	0.019	0.005	40.8	25.6
(2)	0.070	0.119	0.300	0.445	0.041	0.022	0.003	41.1	25.4
(2)	0.078	0.109	0.294	0.412	0.048	0.055	0.004	39.6	26.2
(2)	0.081	0.128	0.281	0.418	0.060	0.029	0.004	40.5	25.8
(2)	0.109	0.102	0.332	0.357	0.065	0.032	0.004	41.9	26.6
(2)	0.129	0.084	0.331	0.363	0.065	0.025	0.004	42.0	26.5
(2)	0.088	0.115	0.300	0.388	0.068	0.039	0.003	40.6	26.1
(2)	0.069	0.121	0.311	0.411	0.061	0.025	0.003	41.1	26.1
(2)	0.062	0.096	0.352	0.351	0.099	0.038	0.003	41.7	26.5
(2)	0.087	0.156	0.253	0.441	0.008	0.049	0.004	41.9	26.6
(2)	0.092	0.155	0.268	0.411	0.036	0.035	0.004	41.4	26.8
(2)	0.083	0.142	0.273	0.434	0.037	0.028	0.004	41.1	25.7
(2)	0.075	0.140	0.264	0.442	0.064	0.011	0.005	43.0	26.6
(2)	0.067	0.107	0.335	0.375	0.072	0.042	0.003	39.9	26.6
(2)	0.093	0.096	0.316	0.390	0.051	0.050	0.005	42.8	25.7
(2)	0.070	0.116	0.312	0.425	0.071	0.004	0.003	42.0	25.2

表 4-16(續)

需求 目標	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(3)	0.102	0.173	0.255	0.423	0.007	0.037	0.004	49.0	26.8
(3)	0.085	0.167	0.269	0.414	0.056	0.004	0.004	47.5	25.9
(3)	0.096	0.093	0.309	0.379	0.076	0.043	0.004	48.5	26.2
(3)	0.117	0.177	0.223	0.425	0.022	0.032	0.004	49.1	26.3
(3)	0.077	0.133	0.296	0.406	0.069	0.017	0.002	48.1	26.1
(3)	0.069	0.115	0.297	0.408	0.060	0.049	0.002	48.7	25.7
(3)	0.075	0.159	0.260	0.402	0.050	0.052	0.002	49.5	26.8
(3)	0.082	0.142	0.265	0.430	0.057	0.021	0.004	49.1	25.9
(3)	0.107	0.150	0.243	0.457	0.006	0.034	0.003	51.0	25.3
(3)	0.088	0.168	0.238	0.428	0.033	0.041	0.004	50.3	26.8
(3)	0.124	0.086	0.335	0.347	0.088	0.016	0.004	51.0	26.3

註：組合材料單位為重量百分比；強度單位為 Mpa；坍度單位為 cm；SP 為高效減水劑。

表 4-17 配比設計以三千筆資料，差異許可為 0.006

需求 目標	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(1)	0.103	0.137	0.306	0.385	0.036	0.029	0.004	33.0	26.5
(1)	0.068	0.147	0.314	0.389	0.053	0.025	0.004	34.6	26.7
(1)	0.065	0.128	0.336	0.399	0.029	0.040	0.003	33.8	26.3
(1)	0.075	0.107	0.327	0.405	0.025	0.057	0.004	34.7	26.5
(1)	0.085	0.120	0.326	0.381	0.044	0.040	0.003	34.2	27.4
(1)	0.076	0.141	0.320	0.397	0.033	0.029	0.004	34.7	26.4
(1)	0.081	0.115	0.307	0.424	0.021	0.049	0.004	34.3	26.1
(2)	0.091	0.111	0.298	0.390	0.063	0.043	0.004	39.9	26.2
(2)	0.087	0.156	0.253	0.441	0.008	0.049	0.004	41.9	26.6
(2)	0.067	0.107	0.335	0.375	0.072	0.042	0.003	39.9	26.6
(2)	0.091	0.153	0.268	0.414	0.037	0.034	0.004	41.3	26.6
(2)	0.080	0.111	0.290	0.412	0.052	0.052	0.004	40.1	26.2
(2)	0.111	0.150	0.262	0.385	0.057	0.032	0.003	40.9	26.7
(2)	0.062	0.096	0.352	0.351	0.099	0.038	0.003	41.7	26.5
(2)	0.112	0.099	0.331	0.358	0.065	0.031	0.004	42.7	26.7
(2)	0.101	0.093	0.326	0.388	0.043	0.046	0.004	41.3	25.7
(2)	0.118	0.118	0.287	0.373	0.081	0.019	0.005	40.8	25.6
(2)	0.075	0.128	0.291	0.416	0.061	0.026	0.003	41.1	26.5
(2)	0.112	0.106	0.285	0.401	0.058	0.034	0.005	41.7	26.3
(2)	0.074	0.130	0.287	0.443	0.039	0.023	0.004	41.1	25.6

表 4-17(續)

需求 目標	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(2)	0.069	0.118	0.315	0.420	0.065	0.012	0.003	41.9	25.9
(2)	0.075	0.140	0.264	0.442	0.064	0.011	0.005	43.0	26.6
(3)	0.069	0.115	0.297	0.408	0.060	0.049	0.002	48.7	25.7
(3)	0.093	0.170	0.244	0.426	0.024	0.040	0.004	50.5	26.8
(3)	0.077	0.133	0.296	0.406	0.069	0.017	0.002	48.1	26.1
(3)	0.096	0.093	0.309	0.379	0.076	0.043	0.004	48.5	26.2
(3)	0.107	0.150	0.243	0.457	0.006	0.034	0.003	51.0	25.3
(3)	0.117	0.177	0.223	0.425	0.022	0.032	0.004	49.1	26.3
(3)	0.075	0.159	0.260	0.402	0.050	0.052	0.002	49.5	26.8
(3)	0.083	0.151	0.266	0.425	0.057	0.015	0.004	48.1	26.1
(3)	0.124	0.086	0.335	0.347	0.088	0.016	0.004	51.0	26.3

註：組合材料單位為重量百分比；強度單位為 Mpa；坍度單位為 cm；SP 為高效減水劑。

表 4-18 配比設計以三千筆資料，差異許可為 0.007

需求 目標	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(1)	0.067	0.130	0.334	0.398	0.030	0.039	0.003	33.8	26.3
(1)	0.072	0.138	0.325	0.385	0.049	0.027	0.004	34.7	26.7
(1)	0.078	0.111	0.327	0.396	0.028	0.057	0.004	34.6	26.9
(1)	0.097	0.125	0.316	0.382	0.046	0.032	0.003	33.5	26.6
(1)	0.083	0.146	0.308	0.398	0.032	0.028	0.004	35.0	26.9
(1)	0.081	0.115	0.307	0.424	0.021	0.049	0.004	34.3	26.1
(2)	0.118	0.118	0.287	0.373	0.081	0.019	0.005	40.8	25.6
(2)	0.111	0.150	0.262	0.385	0.057	0.032	0.003	40.9	26.7
(2)	0.087	0.156	0.253	0.441	0.008	0.049	0.004	41.9	26.6
(2)	0.080	0.111	0.290	0.412	0.052	0.052	0.004	40.1	26.2
(2)	0.091	0.111	0.298	0.390	0.063	0.043	0.004	39.9	26.2
(2)	0.078	0.135	0.275	0.429	0.061	0.019	0.004	41.9	26.4
(2)	0.067	0.107	0.335	0.375	0.072	0.042	0.003	39.9	26.6
(2)	0.069	0.120	0.311	0.416	0.064	0.018	0.003	42.1	26.0
(2)	0.062	0.096	0.352	0.351	0.099	0.038	0.003	41.7	26.5
(2)	0.112	0.106	0.285	0.401	0.058	0.034	0.005	41.7	26.3
(2)	0.074	0.130	0.287	0.443	0.039	0.023	0.004	41.1	25.6
(2)	0.101	0.093	0.326	0.388	0.043	0.046	0.004	41.3	25.7
(2)	0.112	0.099	0.331	0.358	0.065	0.031	0.004	42.7	26.7
(2)	0.091	0.153	0.268	0.414	0.037	0.034	0.004	41.3	26.6

表 4-18(續)

需求 目標	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(3)	0.107	0.150	0.243	0.457	0.006	0.034	0.003	51.0	25.3
(3)	0.069	0.115	0.297	0.408	0.060	0.049	0.002	48.7	25.7
(3)	0.124	0.086	0.335	0.347	0.088	0.016	0.004	51.0	26.3
(3)	0.077	0.133	0.296	0.406	0.069	0.017	0.002	48.1	26.1
(3)	0.105	0.177	0.233	0.425	0.020	0.036	0.004	52.0	27.3
(3)	0.084	0.156	0.252	0.416	0.045	0.044	0.003	48.5	26.8
(3)	0.096	0.093	0.309	0.379	0.076	0.043	0.004	48.5	26.2
(3)	0.083	0.151	0.266	0.425	0.057	0.015	0.004	48.1	26.1

註：組合材料單位為重量百分比；強度單位為 Mpa；坍度單位為 cm；SP 為高效減水劑。

表 4-19 強度 55Mpa 坍度 25cm 差異許可為 0.0007 分類成果

資料 編號	混凝土配比設計資料							所屬群聚
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	編號
(1)	0.107	0.181	0.238	0.452	0.014	0.006	0.002	4
(2)	0.102	0.207	0.201	0.458	0.013	0.016	0.003	1
(3)	0.108	0.153	0.237	0.465	0.027	0.009	0.002	6
(4)	0.105	0.171	0.227	0.429	0.032	0.032	0.003	2
(5)	0.084	0.158	0.240	0.450	0.054	0.010	0.004	3
(6)	0.097	0.171	0.231	0.447	0.011	0.040	0.003	2
(7)	0.104	0.183	0.230	0.428	0.018	0.035	0.002	2
(8)	0.096	0.162	0.252	0.404	0.053	0.031	0.002	5
(9)	0.112	0.181	0.249	0.409	0.027	0.018	0.004	5
(10)	0.116	0.181	0.248	0.441	0.008	0.005	0.002	4
(11)	0.101	0.210	0.199	0.452	0.009	0.026	0.003	1
(12)	0.089	0.159	0.251	0.472	0.019	0.008	0.002	6
(13)	0.113	0.173	0.252	0.428	0.005	0.027	0.002	4
(14)	0.115	0.178	0.245	0.443	0.010	0.008	0.002	4

註：組合材料單位為重量百分比；SP 為高效減水劑。

表 4-20 強度 25Mpa 坍度 25cm 差異許可為 0.0007 配比設計

配比 編號	符合的混凝土配比設計							由模型預測	
	水	水泥	細骨材	粗骨材	爐石	飛灰	SP	強度	坍度
(1)	0.104	0.172	0.251	0.406	0.040	0.024	0.003	56.1	25.8
(2)	0.102	0.175	0.229	0.435	0.020	0.036	0.003	59.3	26.9
(3)	0.084	0.158	0.240	0.449	0.054	0.010	0.004	59.3	25.6
(4)	0.113	0.178	0.246	0.441	0.009	0.011	0.002	58.1	25.6
(5)	0.101	0.208	0.200	0.455	0.011	0.021	0.003	55.7	26.3
(6)	0.098	0.156	0.244	0.468	0.023	0.008	0.002	56.7	26.1

註：組合材料單位為重量百分比；強度單位為 Mpa；坍度單位為 cm；SP 為高效減水劑。

表 4-21 Convex hull 演算法及混凝土預測模型設計需求混凝土配比

隨機產生的配比(筆數)	1,270,000
Convex hull 篩選有效配比(筆數)	25,922
強度模型符合 (筆數)	173
坍度模型符合(筆數)	4,197
兩者皆符合(筆數)	1
強度/坍度	27.25(Mpa)/26.54(cm)

表 4-22 混凝土配比設計系統的成果數據

需求強度(Mpa)	需求坍度(cm)	配比強度(Mpa)	配比坍度(cm)
25	25	27.3	26.5
32.5	25	33.8	26.3
		34.7	26.7
		34.6	26.9
		33.5	26.6
		35.0	26.9
		34.3	26.1
40	25	40.8	25.6
		40.9	26.7
		41.9	26.6
		40.1	26.2
		39.9	26.2
		41.9	26.4
		39.9	26.6
		42.1	26.0
		41.7	26.5
		41.7	26.3
		41.1	25.6
		41.3	25.7
		42.7	26.7
		41.3	26.6

表 4-22(續)

需求強度(Mpa)	需求坍度(cm)	配比強度(Mpa)	配比坍度(cm)
47.5	25	51.0	25.3
		48.7	25.7
		51.0	26.3
		48.1	26.1
		52.0	27.3
		48.5	26.8
		48.5	26.2
		48.1	26.1
55	25	56.1	25.8
		59.3	26.9
		59.3	25.6
		58.1	25.6
		55.7	26.3
		56.7	26.1

表 4-23 混凝土配比於「結構混凝土施工規範」建議適用【25】

混凝土中飛灰取代水泥量之參考值		
種類	允許飛灰取代水泥之上限(%，以重量計)	
混凝土	20%	
預力混凝土	10%	
版混凝土	15%	
海邊及地下工程混凝土	25%	
巨積混凝土	25%	
水密性混凝土	20%	
鋪面混凝土	20%	
特殊暴露情況下混凝土之水膠比及強度要求		
暴露情況	常重混凝土 最大水膠比	常重及輕質骨材混凝土 最小規定抗壓 強度 f_c' (kgf/cm ²)
暴露於清水中需具水密性	0.50	280
暴露於凍融潮濕或解冰鹽	0.45	315
鋼筋混凝土暴露於解冰鹽、鹽分、 海水、鹽霧等氯離子環境必須考慮 鋼筋防蝕	0.40	350
凍融地區或解冰鹽撒佈區水泥含量至少310 kg/m ³		

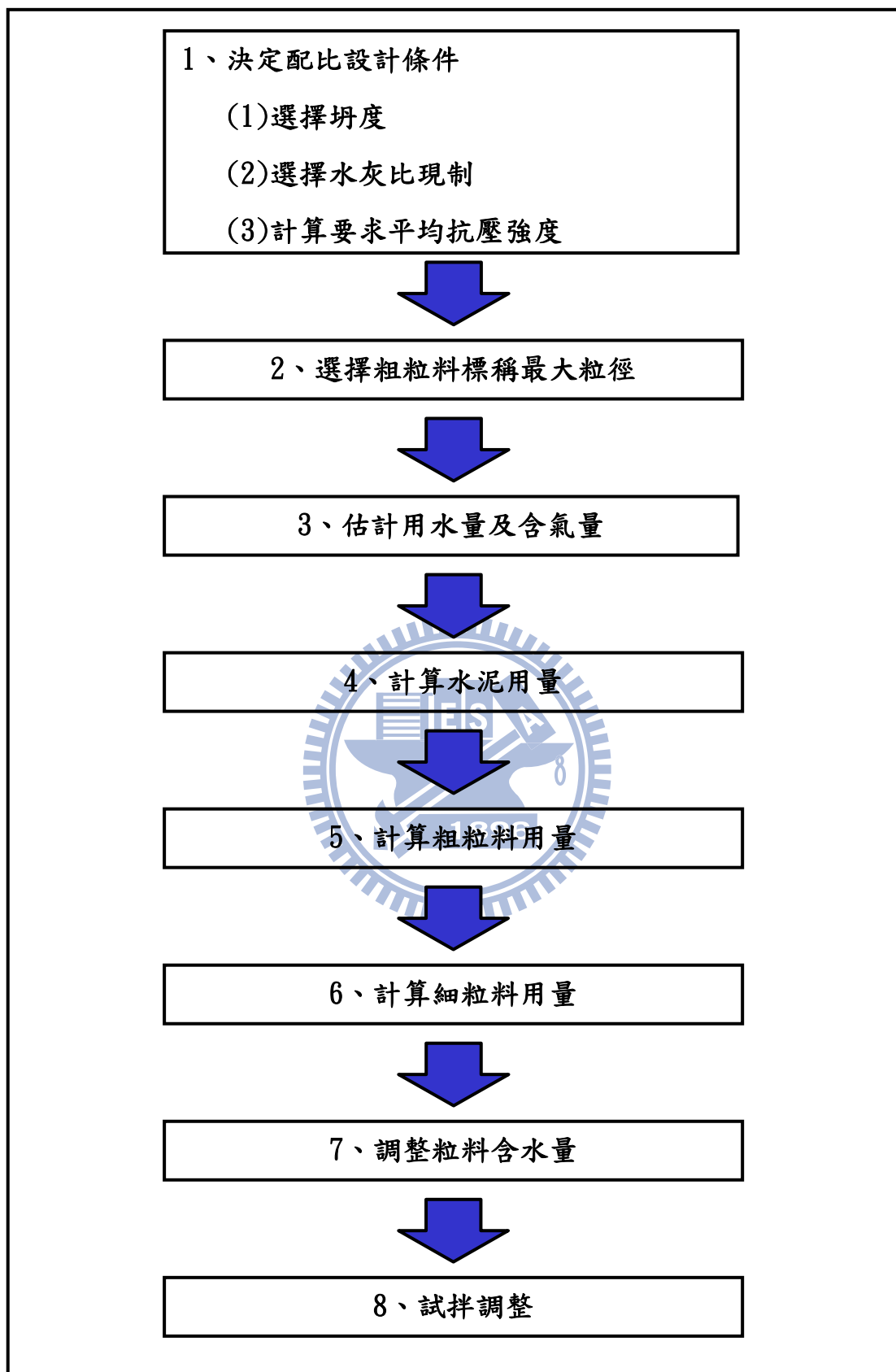


圖 1-1 混凝土配比 CNS 規範設計流程【2】

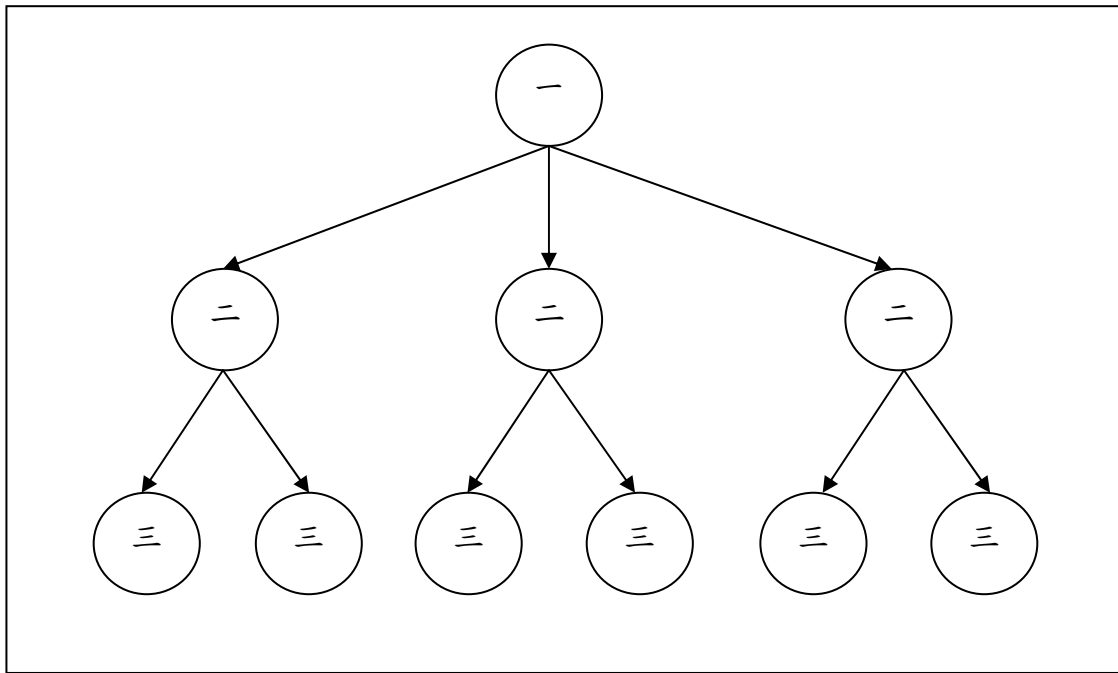


圖 3-1 階層式聚合演算法示意圖

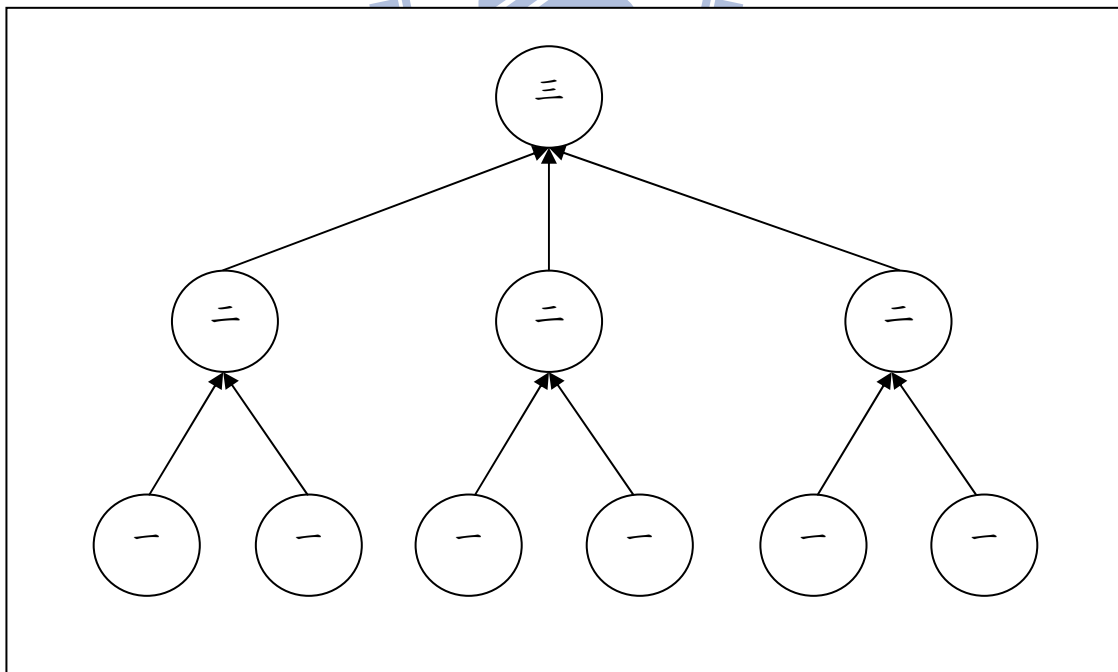


圖 3-2 階層式聚合演算法示意圖

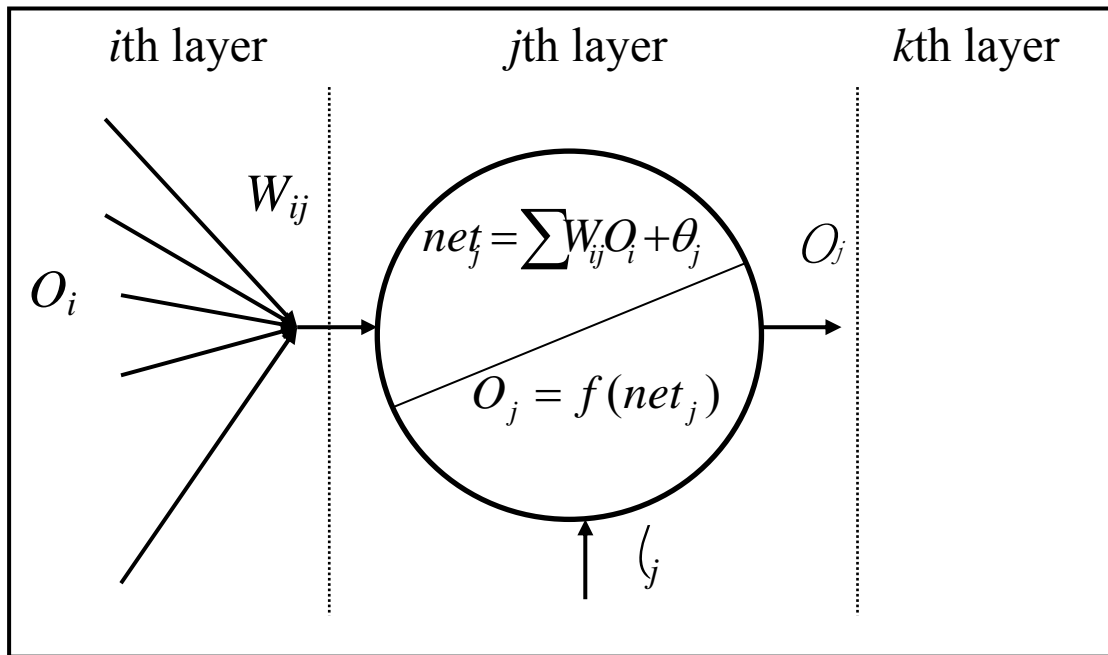


圖 3-3 類神經元示意圖

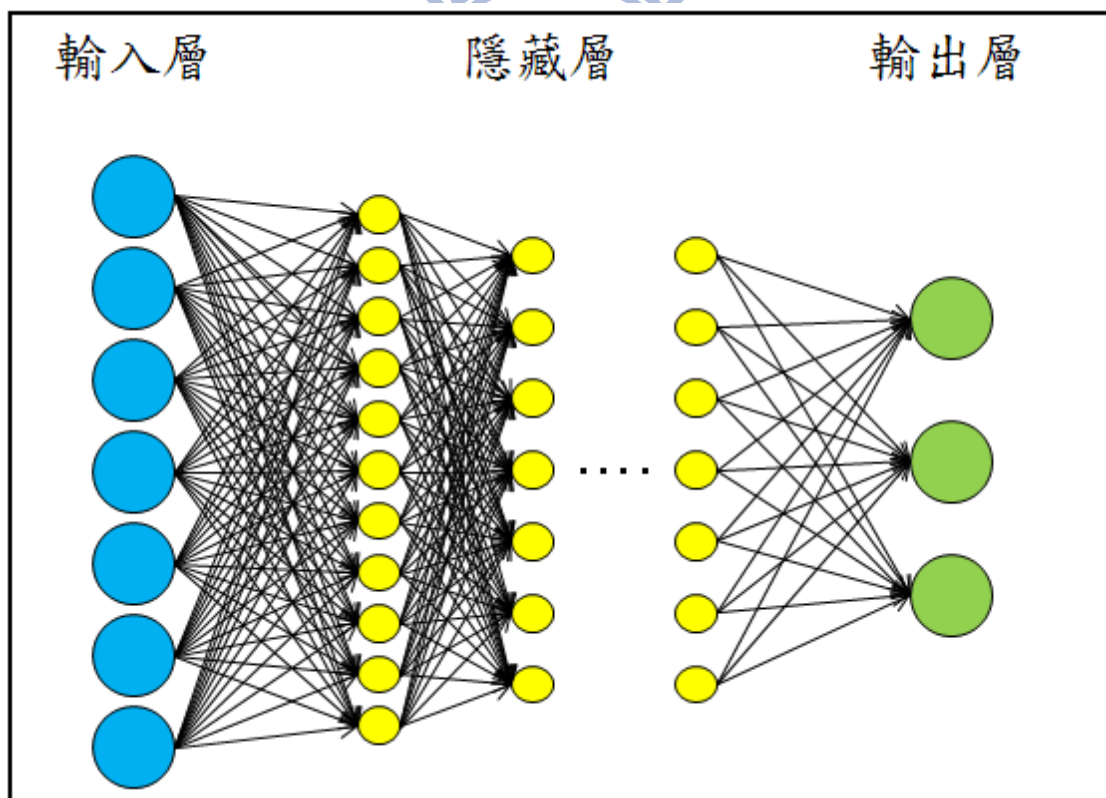


圖 3-4 倒傳遞神經網路示意圖

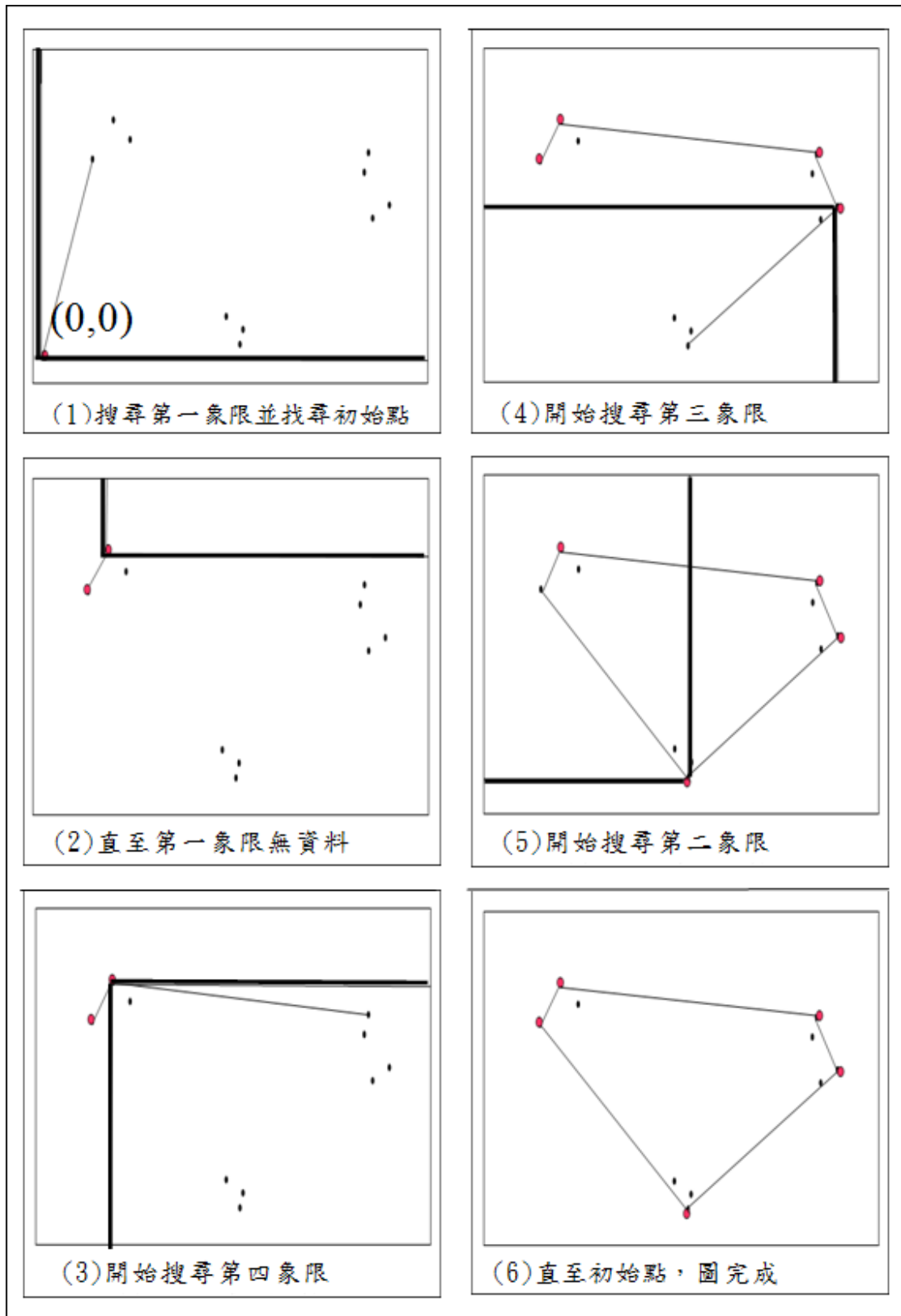


圖 3-5 有效區域製作示意圖

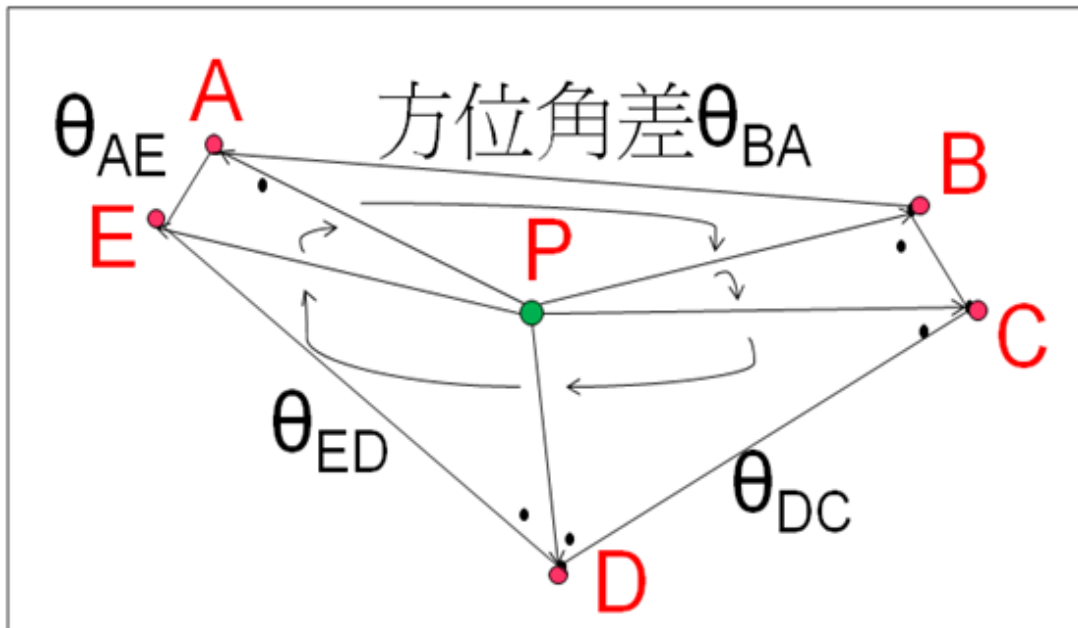


圖 3-6 判斷資料是否於有效區域示意圖



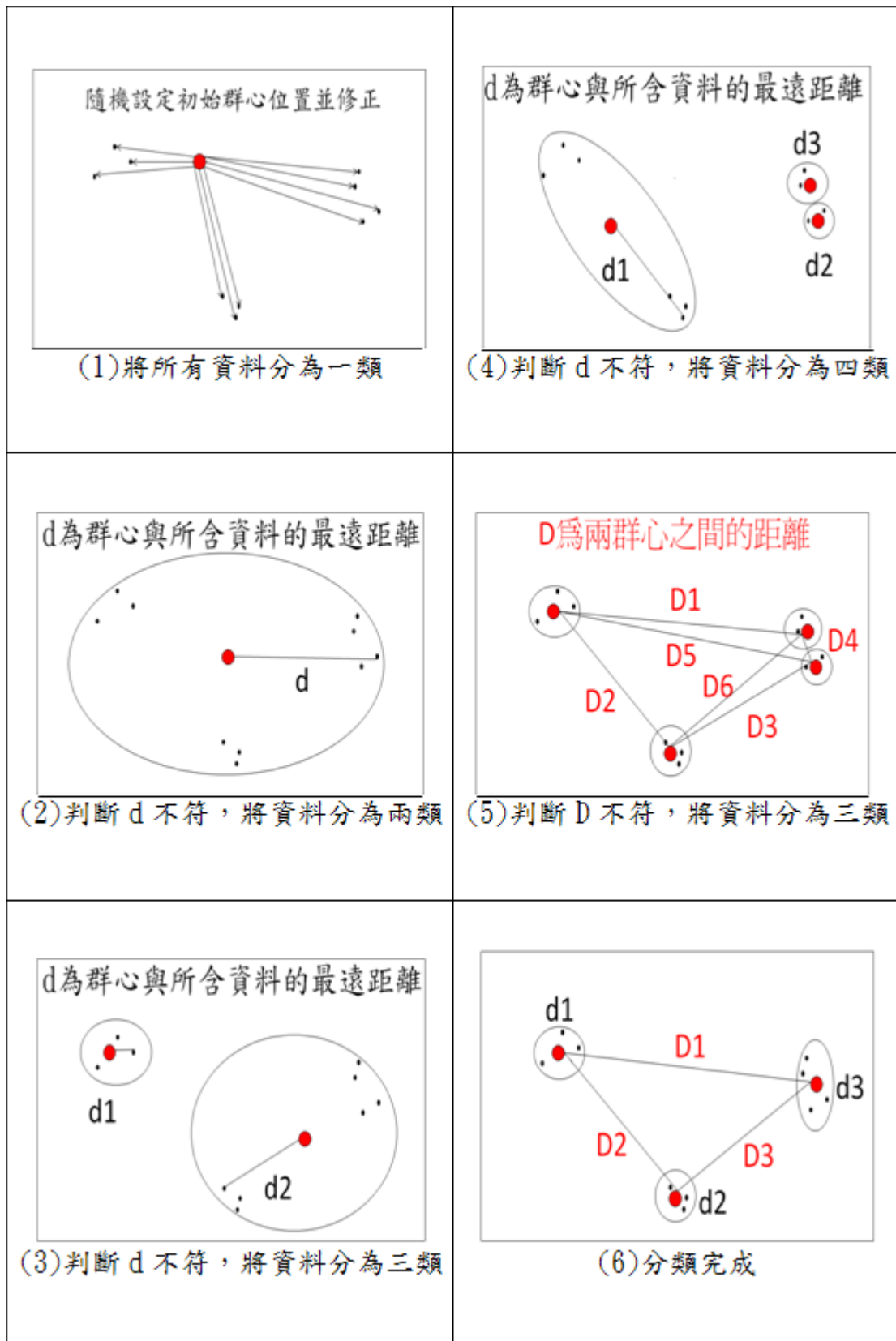


圖 3-7 K-Means 演算法於案例分類示意圖

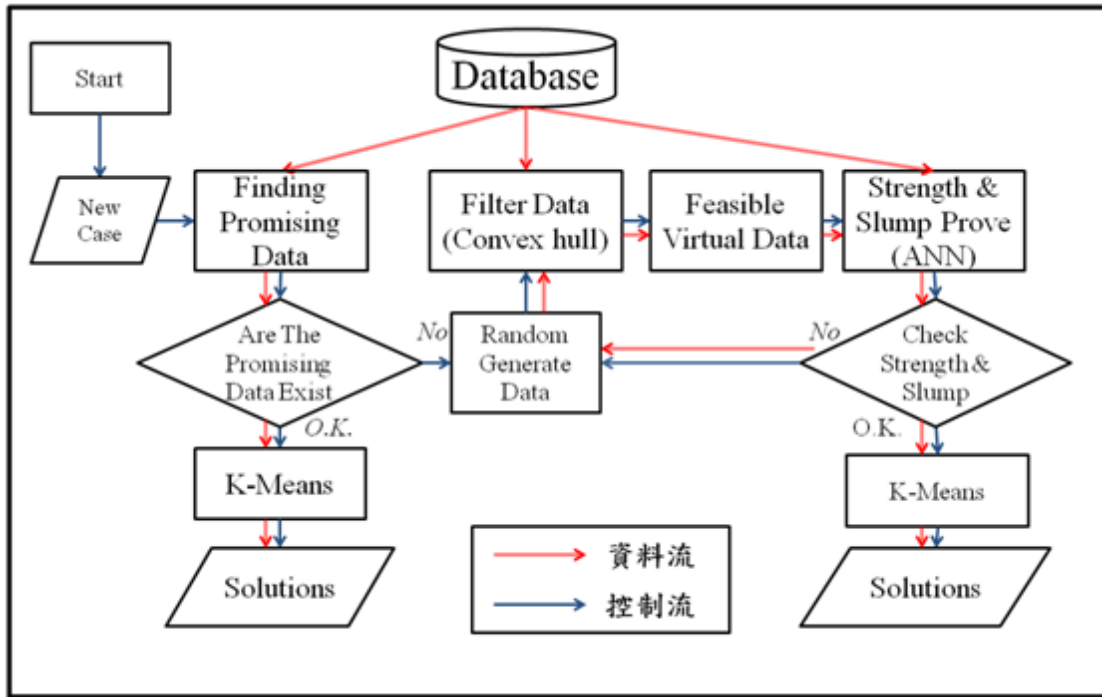


圖 3-8 系統架構圖

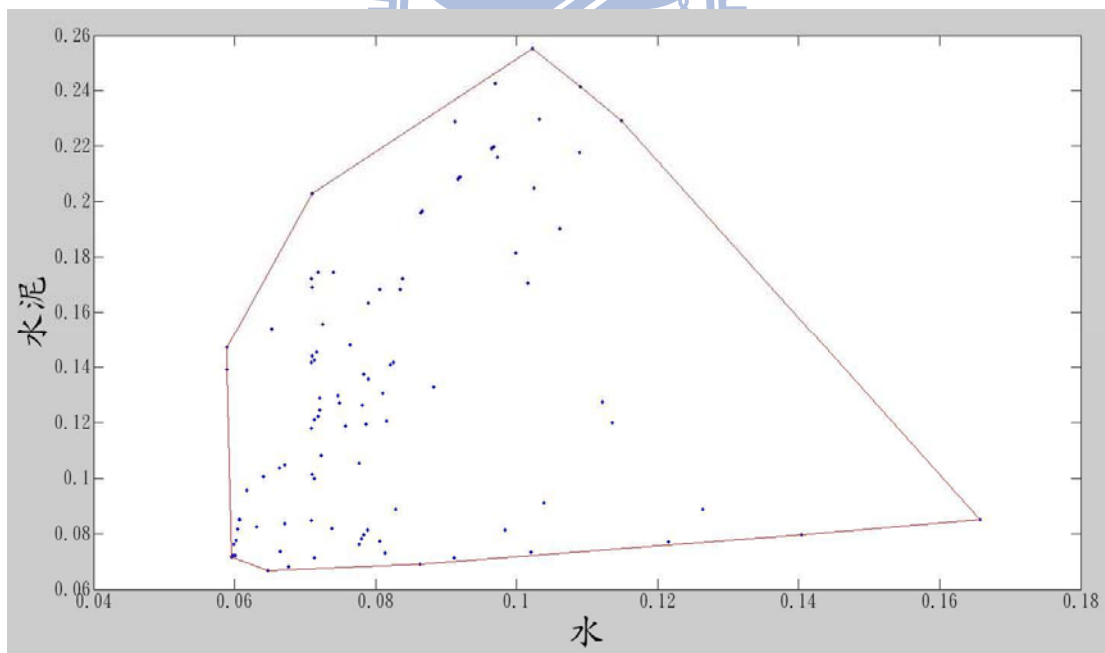


圖 4-1 水-水泥資料散佈圖

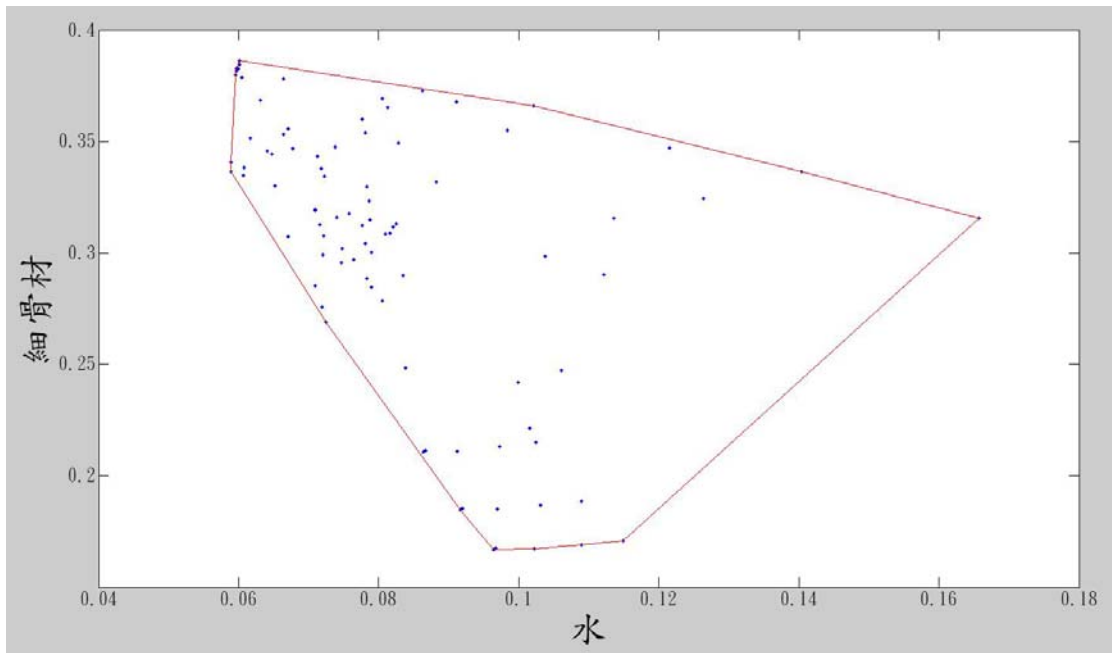


圖 4-2 水-細骨材資料散佈圖

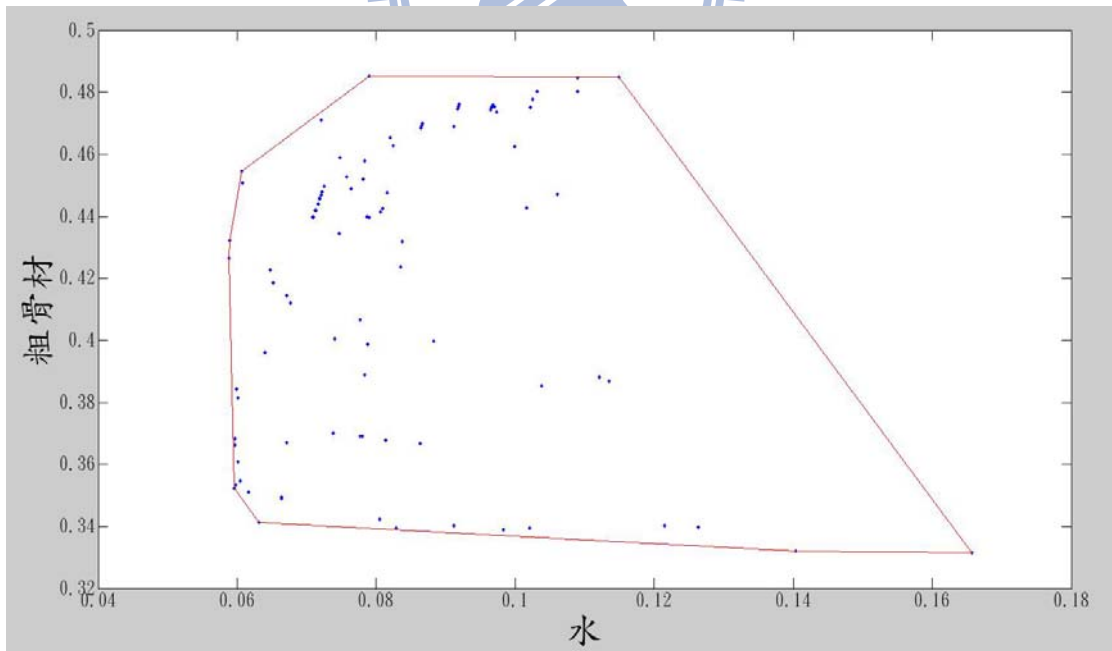


圖 4-3 水-粗骨材資料散佈圖

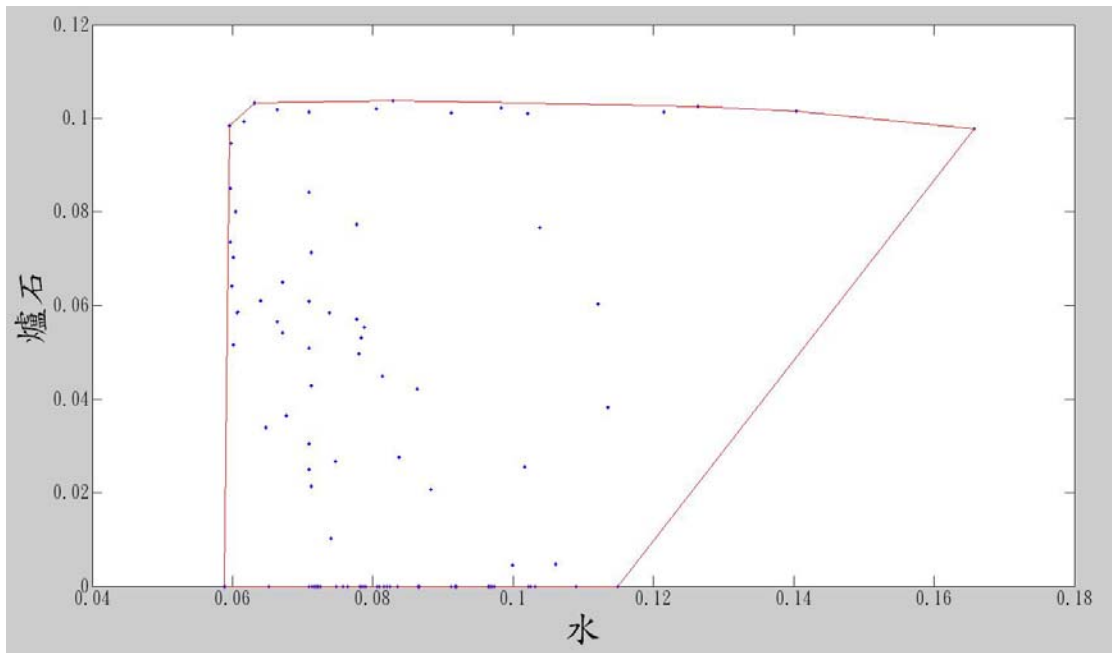


圖 4-4 水-爐石資料散佈圖

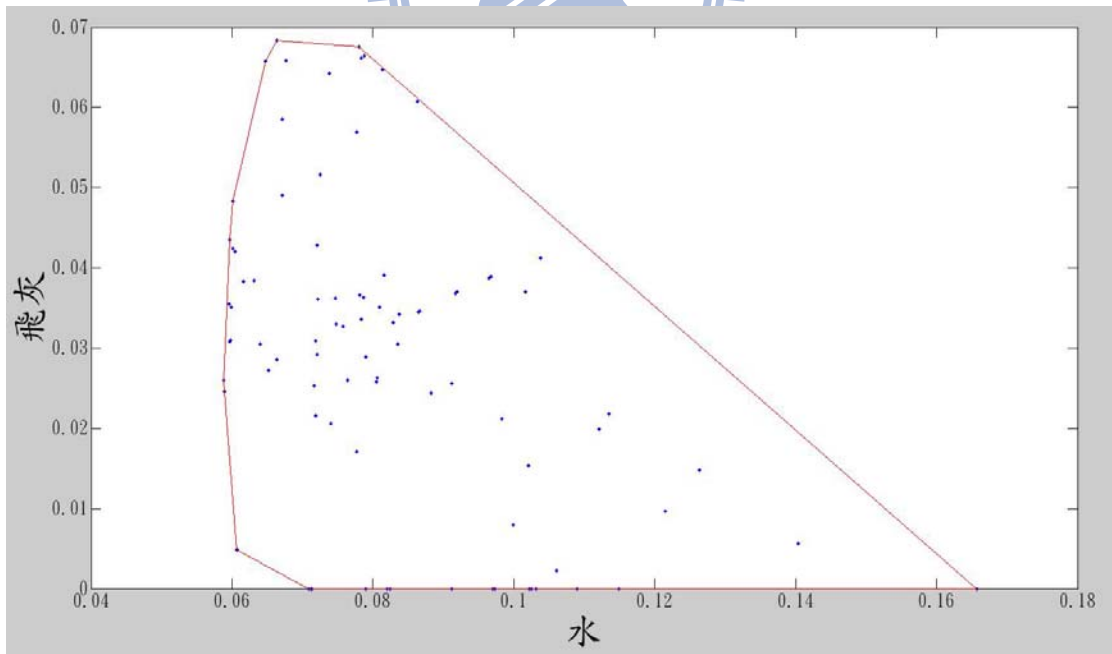


圖 4-5 水-飛灰資料散佈圖

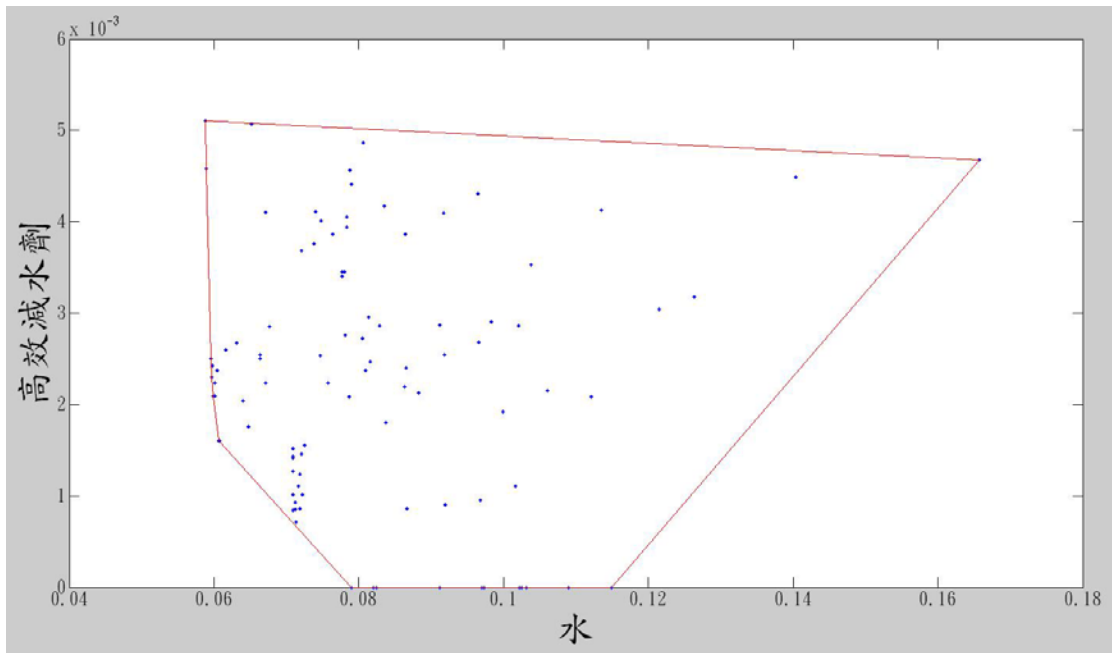


圖 4-6 水-高效減水劑資料散佈圖

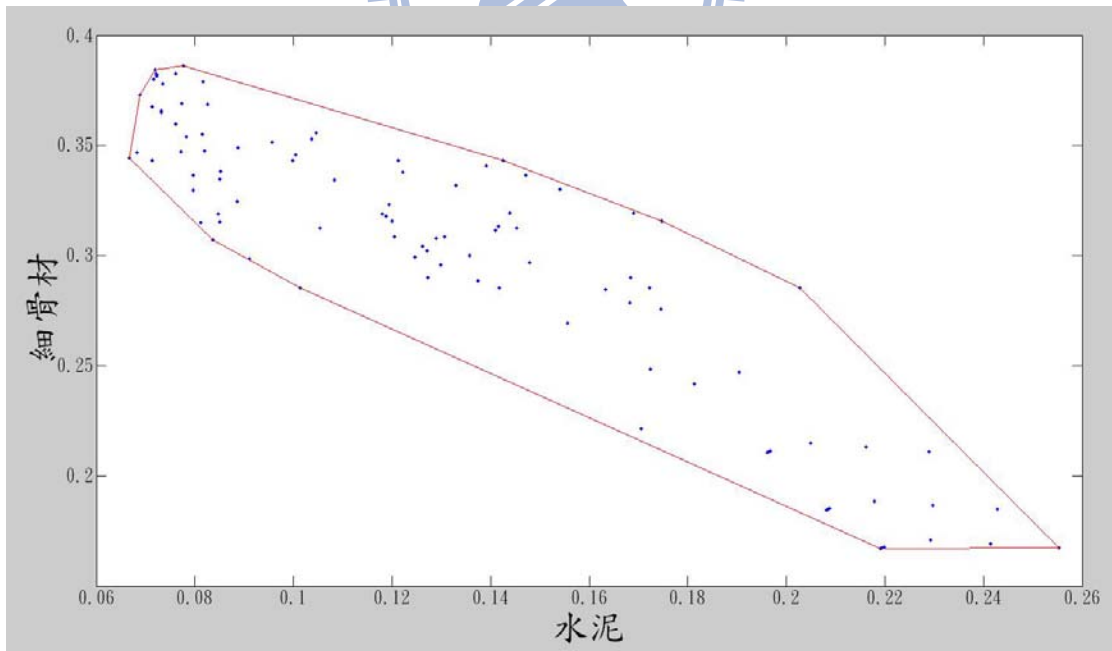


圖 4-7 水泥-細骨材資料散佈圖

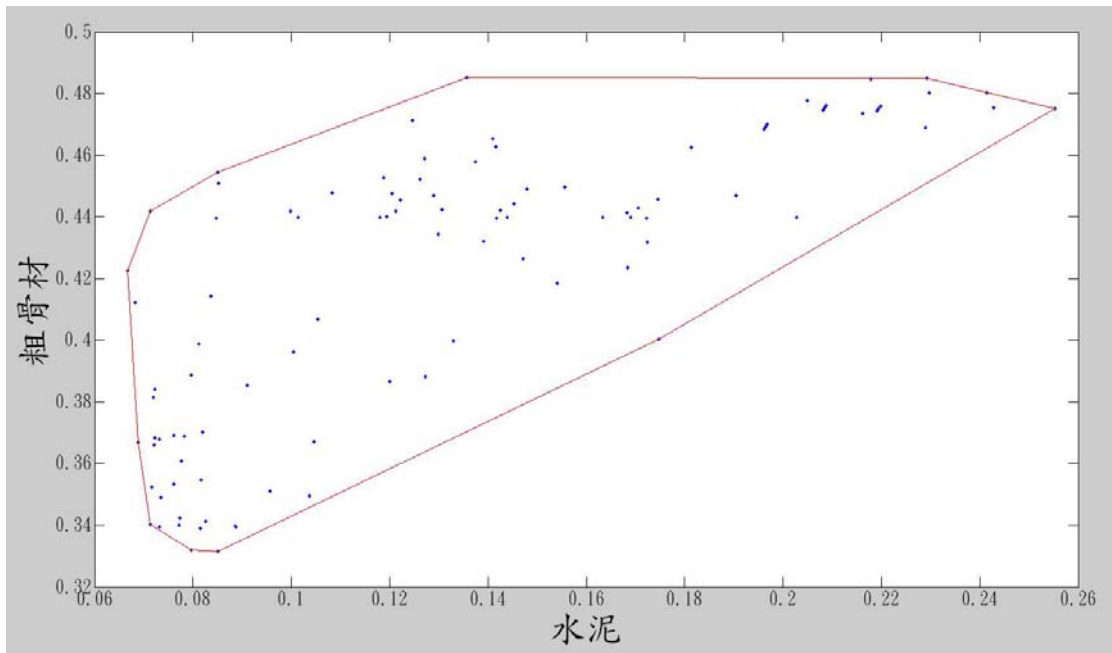


圖 4-8 水泥-粗骨材資料散佈圖

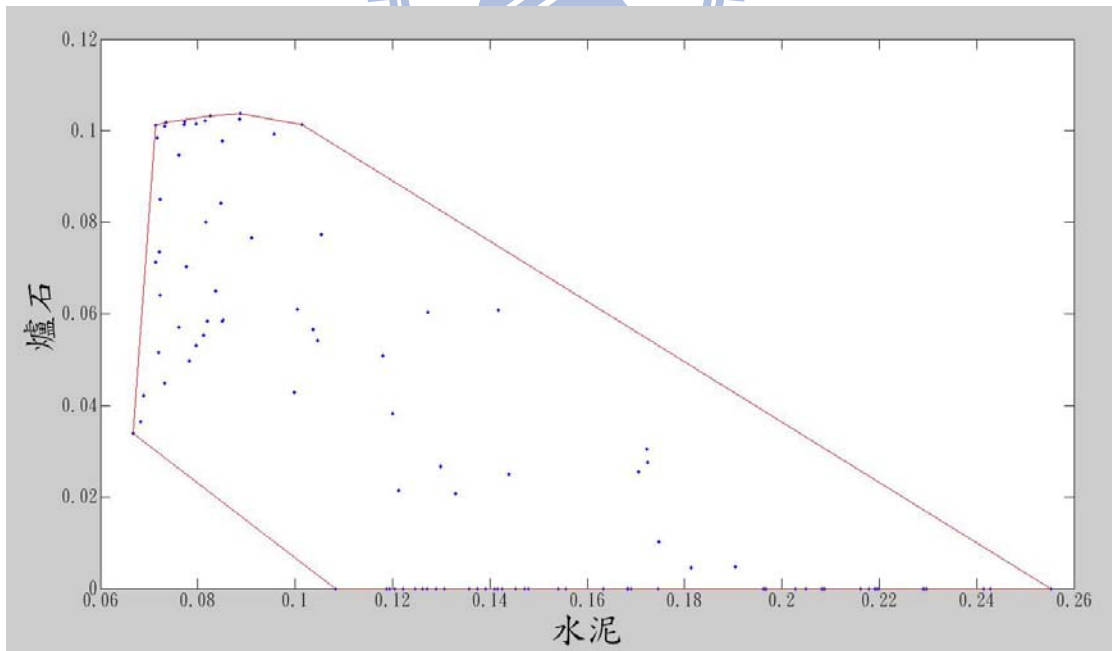


圖 4-9 水泥-爐石資料散佈圖

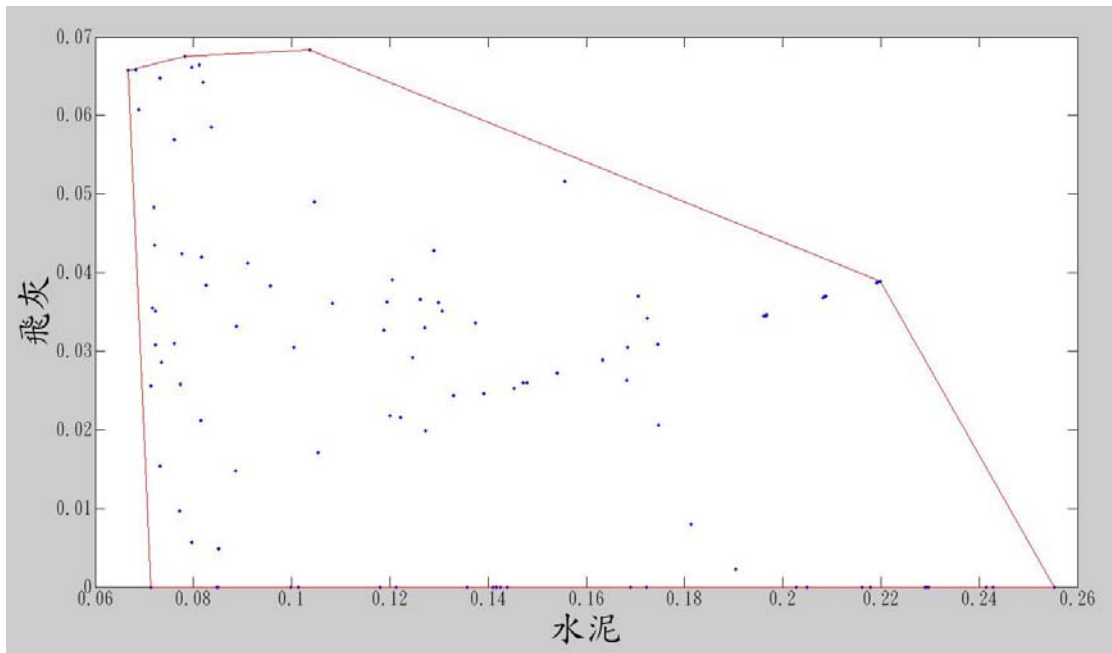


圖 4-10 水泥-飛灰資料散佈圖

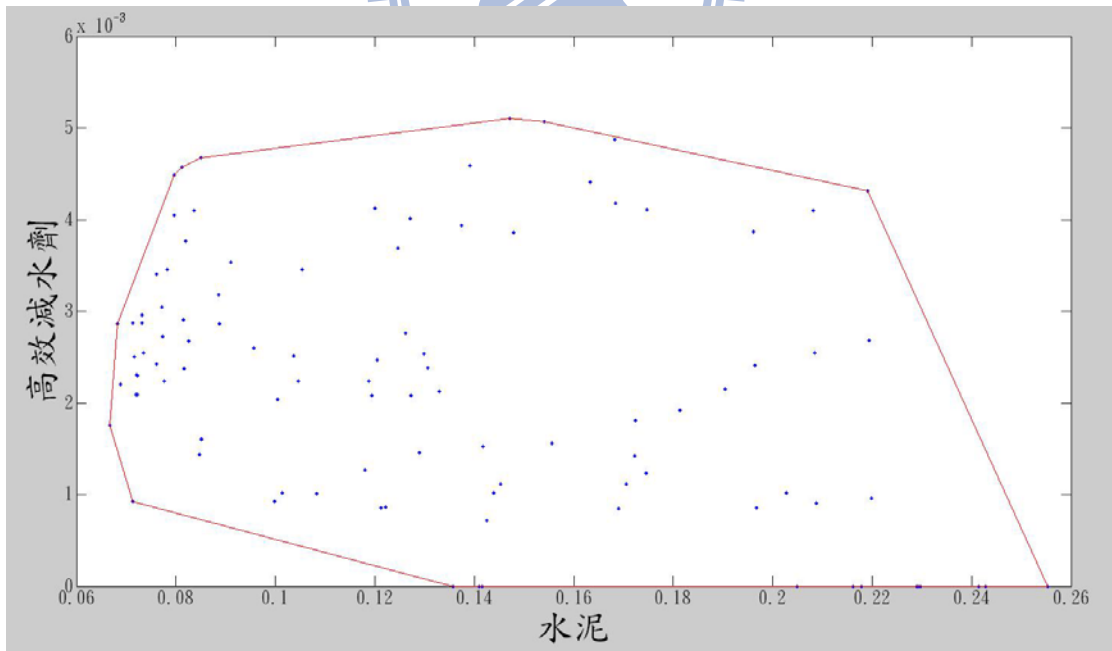


圖 4-11 水泥-強效減水劑資料散佈圖

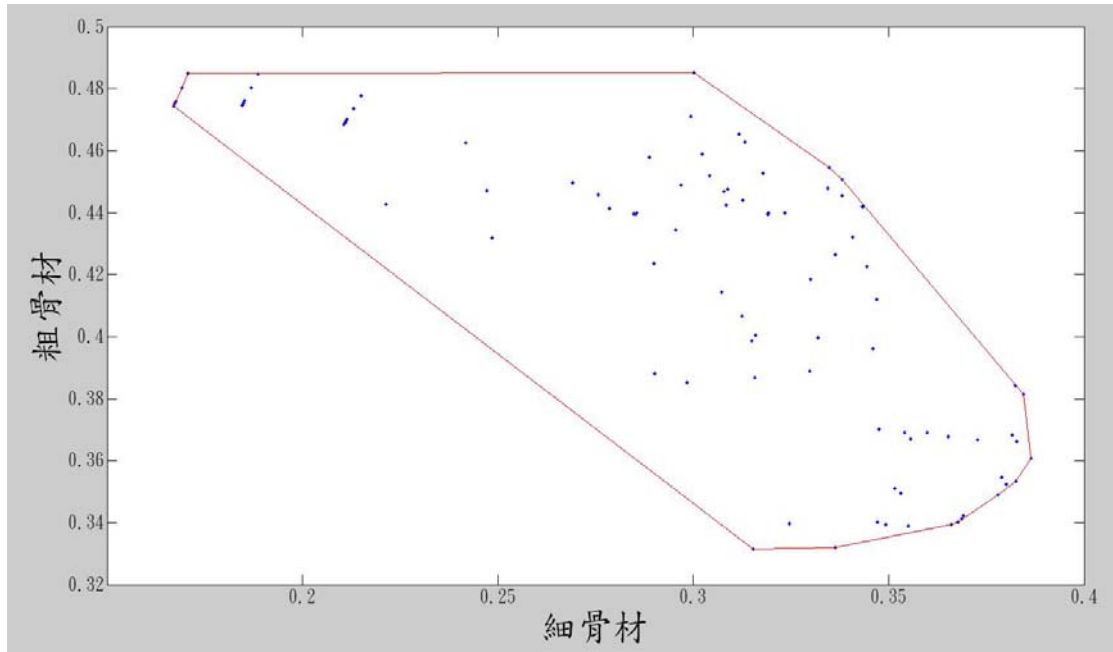


圖 4-12 細骨材-粗骨材資料散佈圖

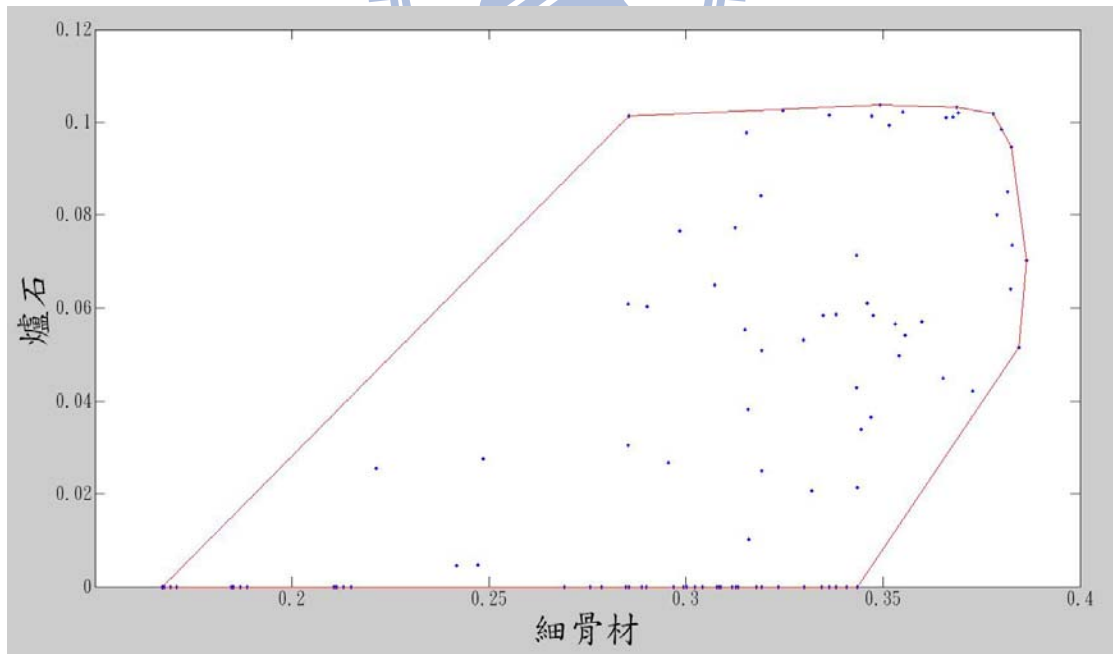


圖 4-13 細骨材-爐石資料散佈圖

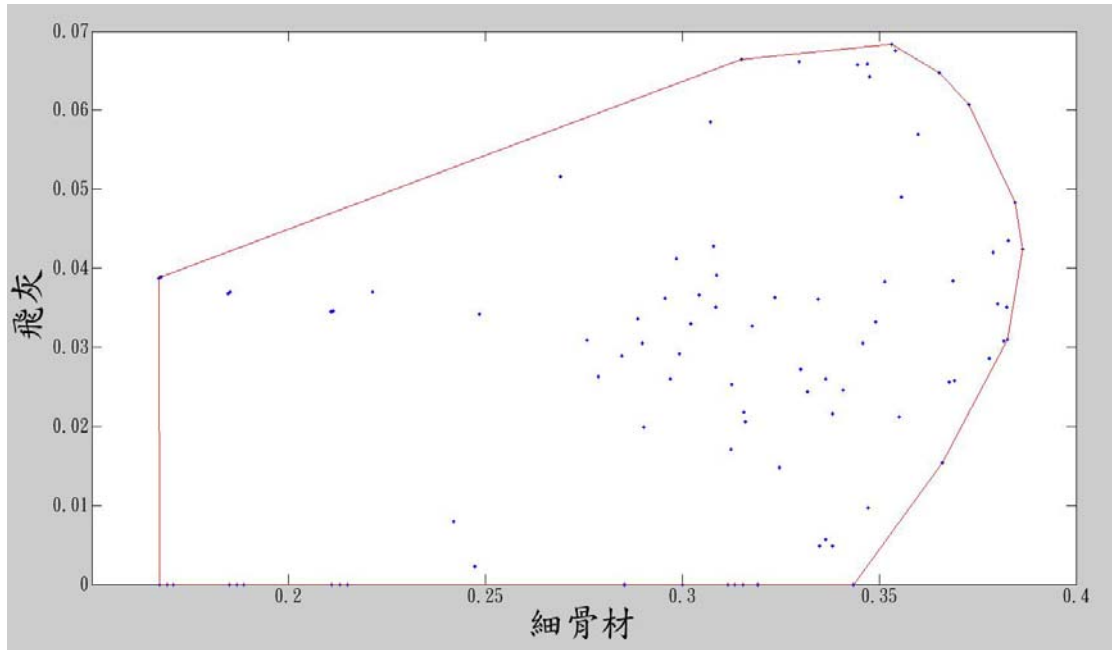


圖 4-14 細骨材-飛灰資料散佈圖

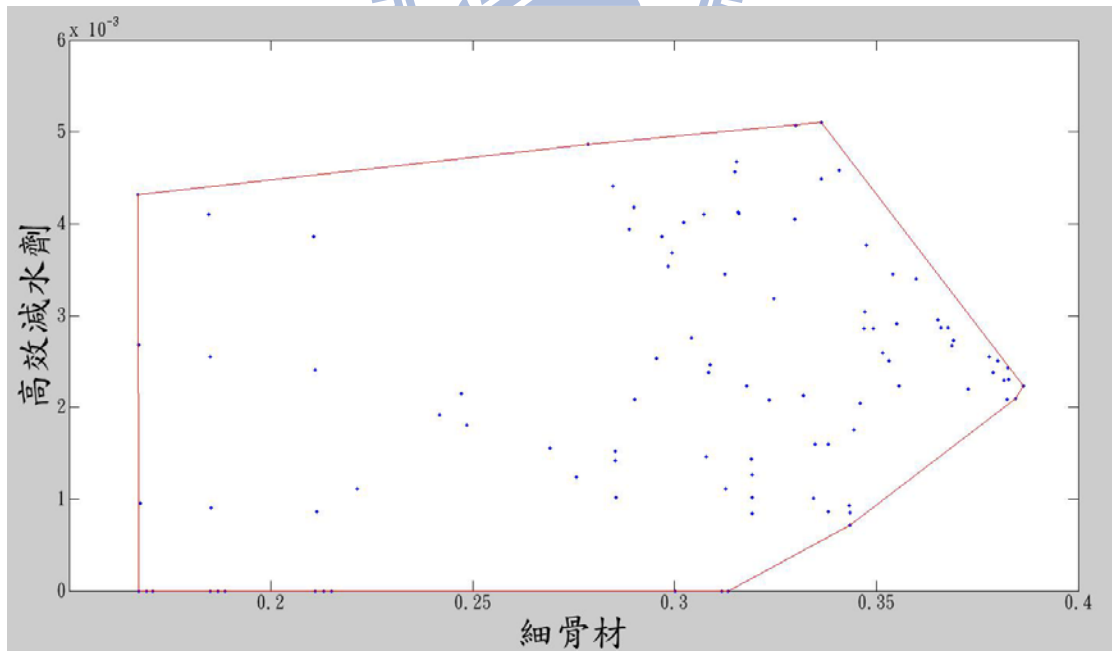


圖 4-15 細骨材-強效減水劑資料散佈圖

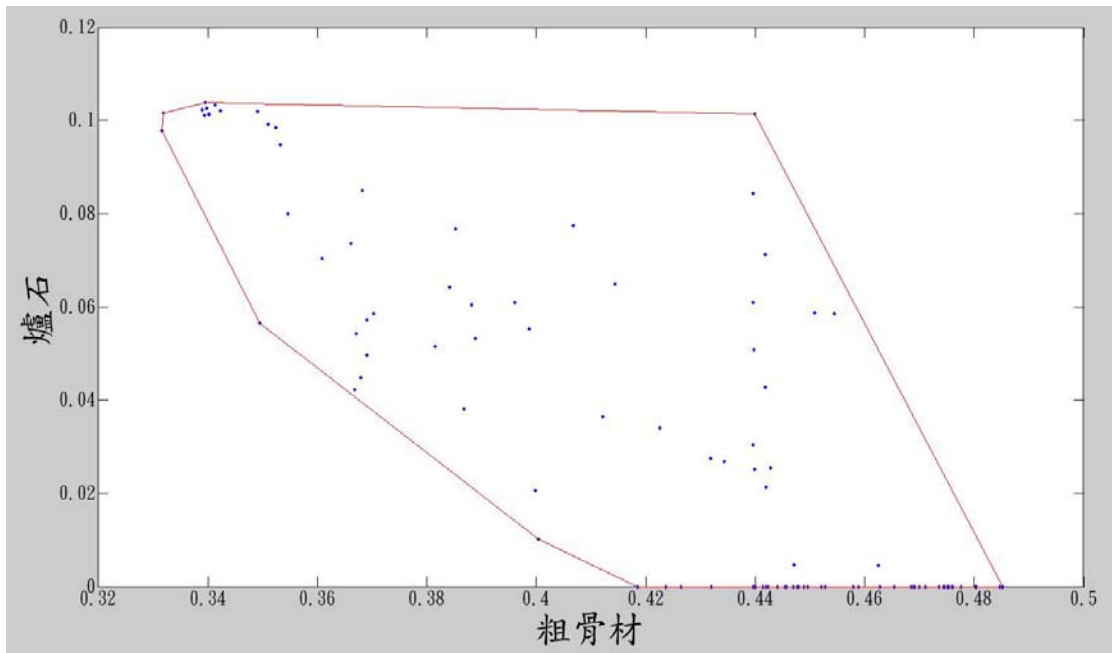


圖 4-16 粗骨材-爐石資料散佈圖

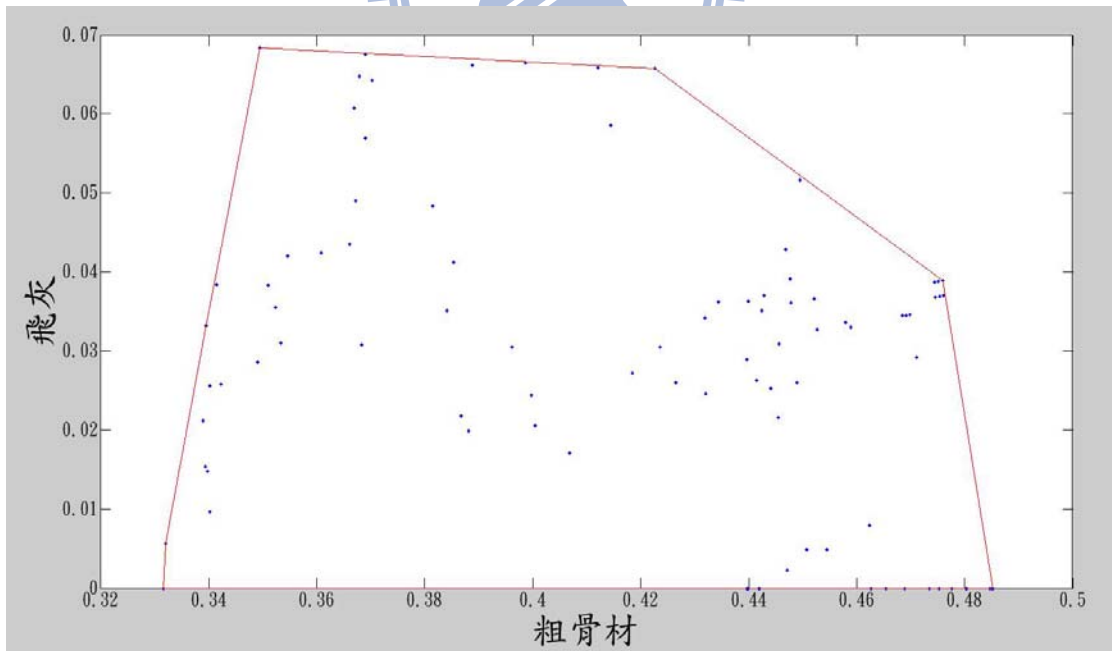


圖 4-17 粗骨材-飛灰資料散佈圖

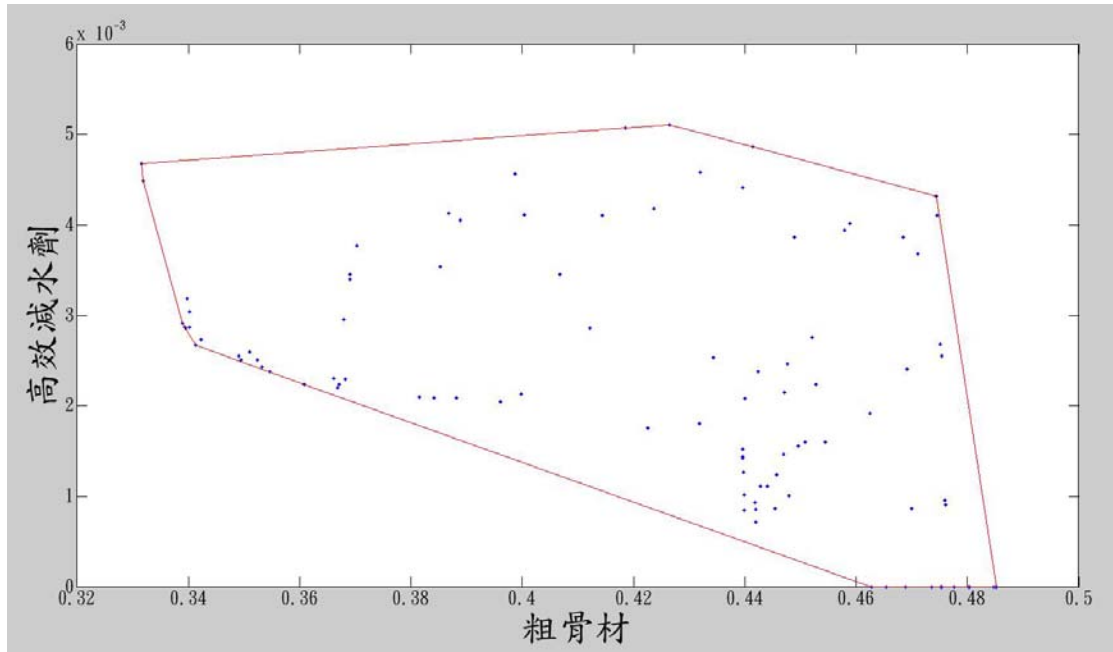


圖 4-18 粗骨材-強效減水劑資料散佈圖

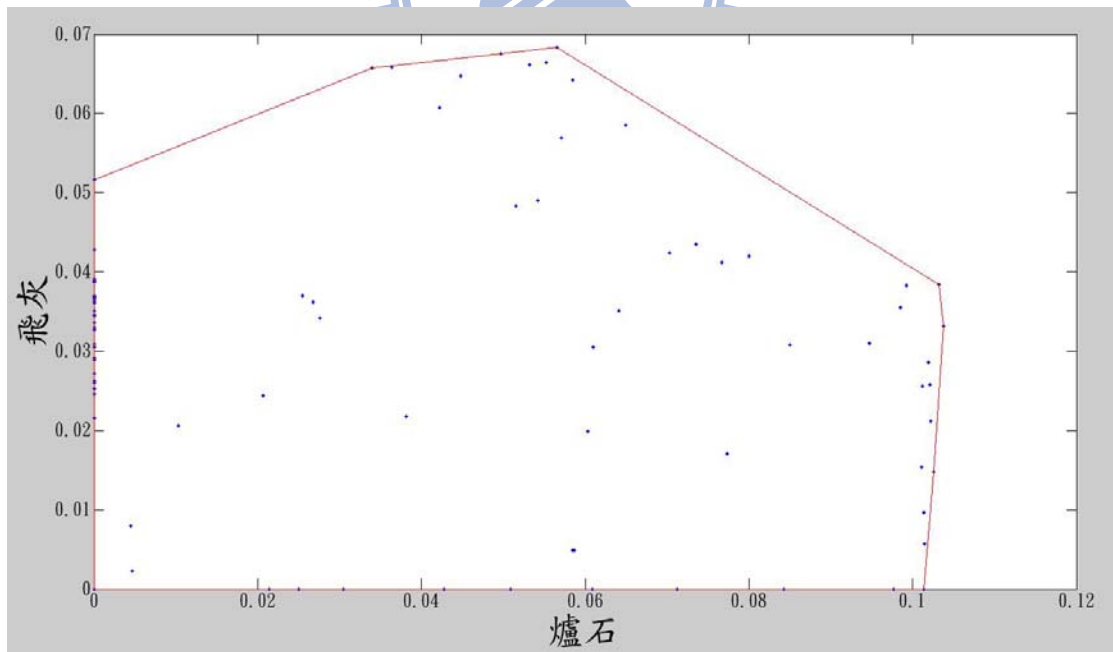


圖 4-19 爐石-飛灰資料散佈圖

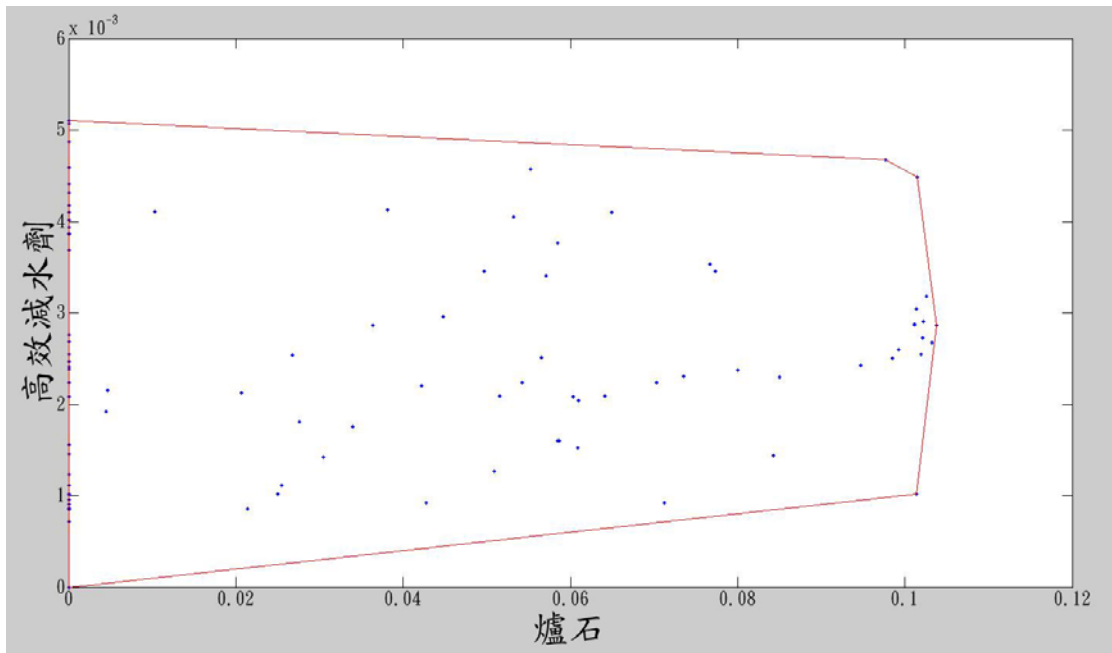


圖 4-20 爐石-強效減水劑資料散佈圖

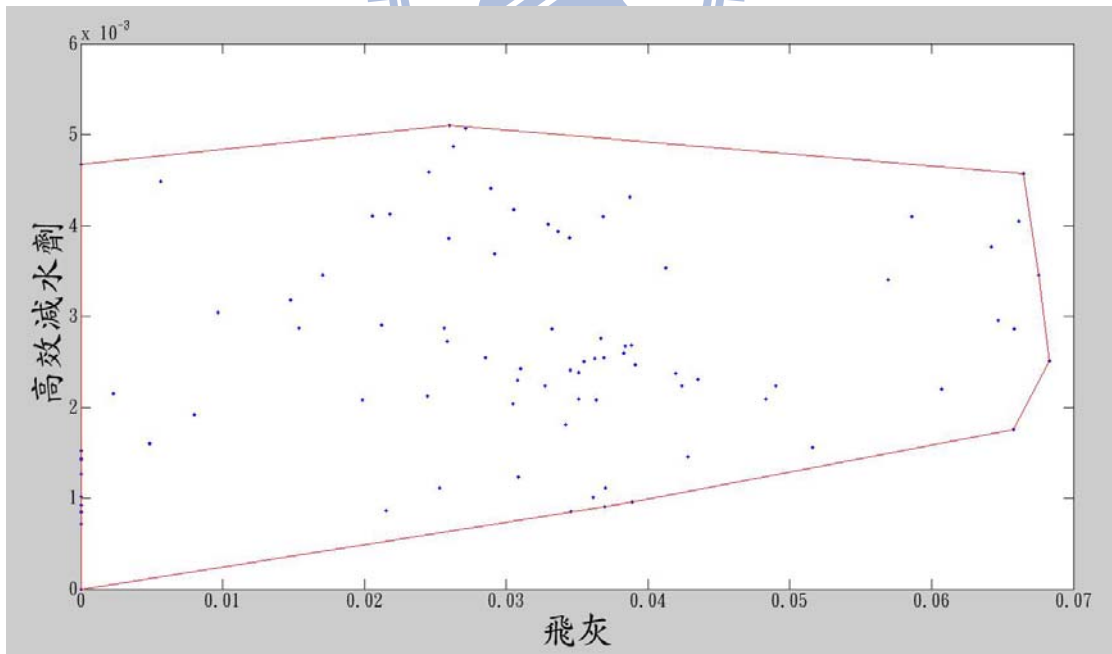


圖 4-21 飛灰-強效減水劑資料散佈圖

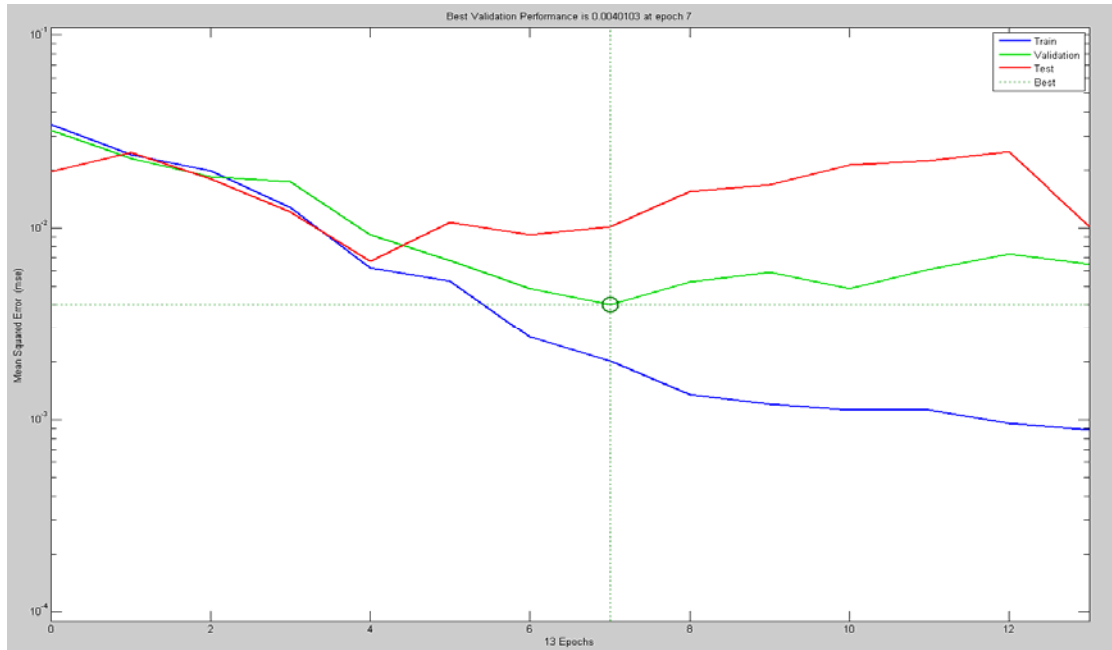


圖 4-22 隱藏層為七個神經元的強度預測驗證誤差值



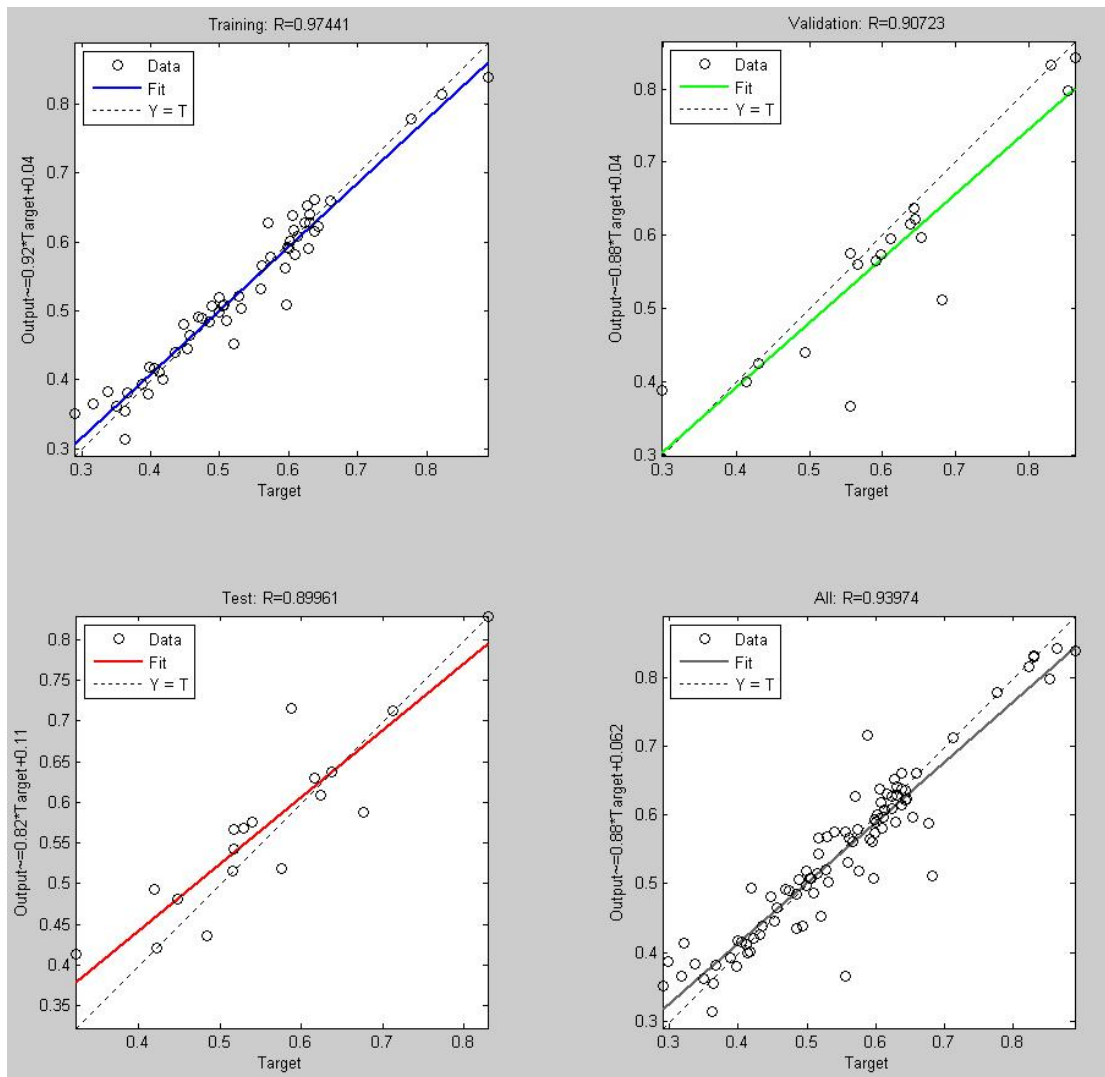


圖 4-23 隱藏層為七個神經元的強度預測各項回歸分析值

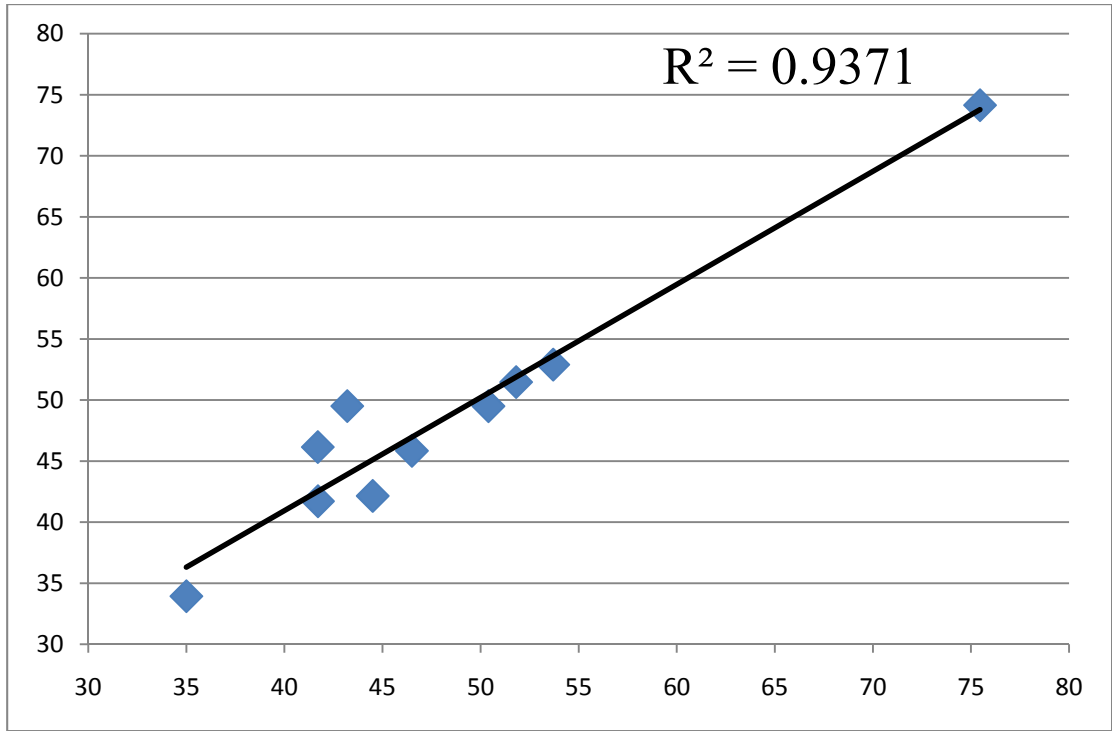


圖 4-24 強度模型預測實際測試案例的回歸分析值

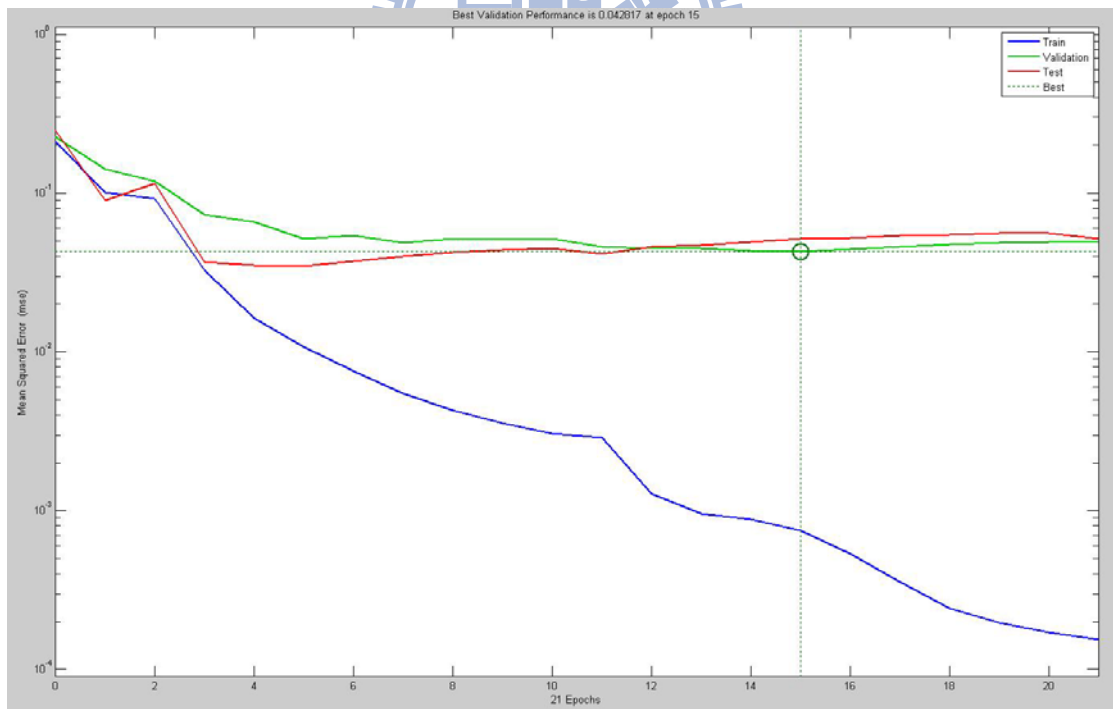


圖 4-25 隱藏層為十一個神經元的坍塌度預測驗證誤差值

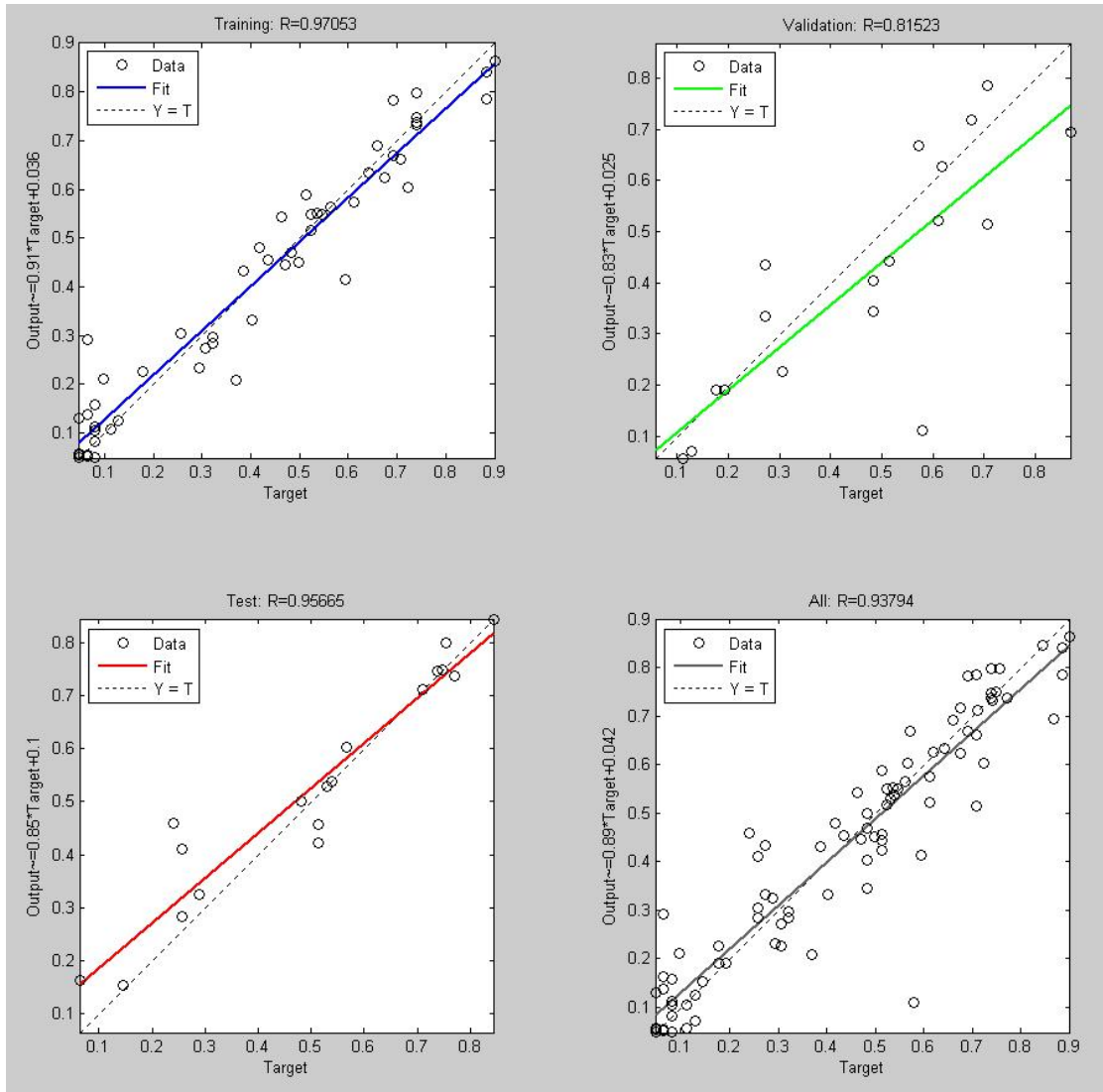


圖 4-26 隱藏層為十一個神經元的柎度預測各項回歸分析值

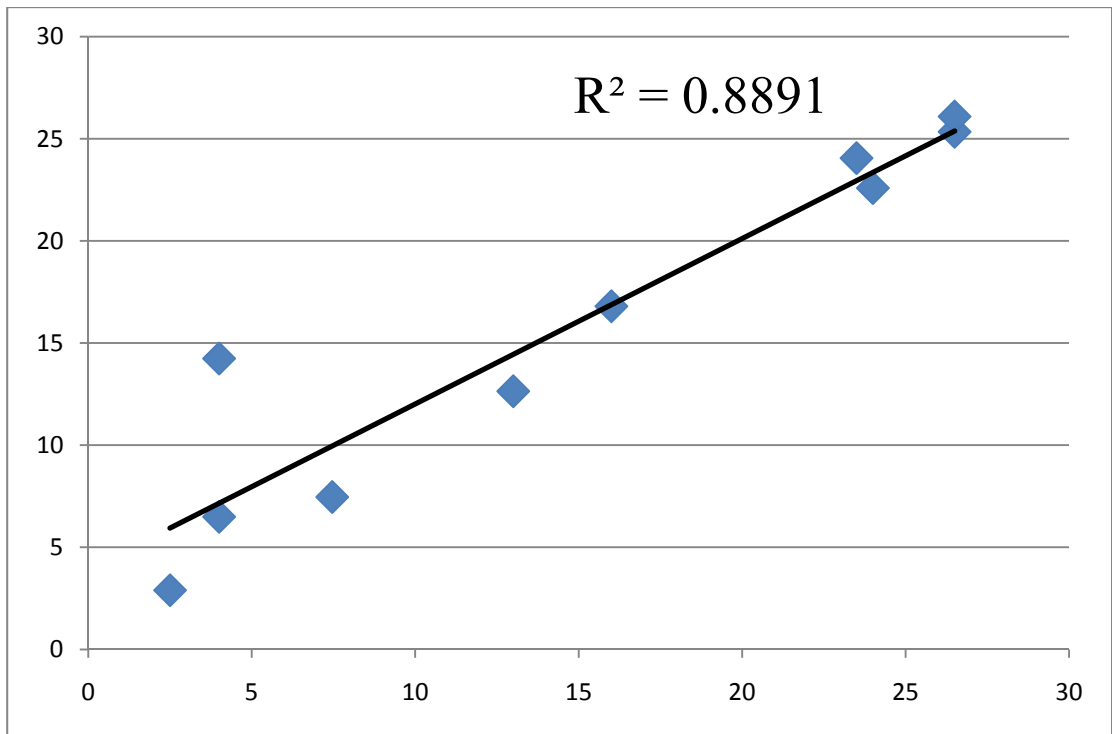


圖 4-27 坍塌度模型預測實際測試案例的回歸分析值



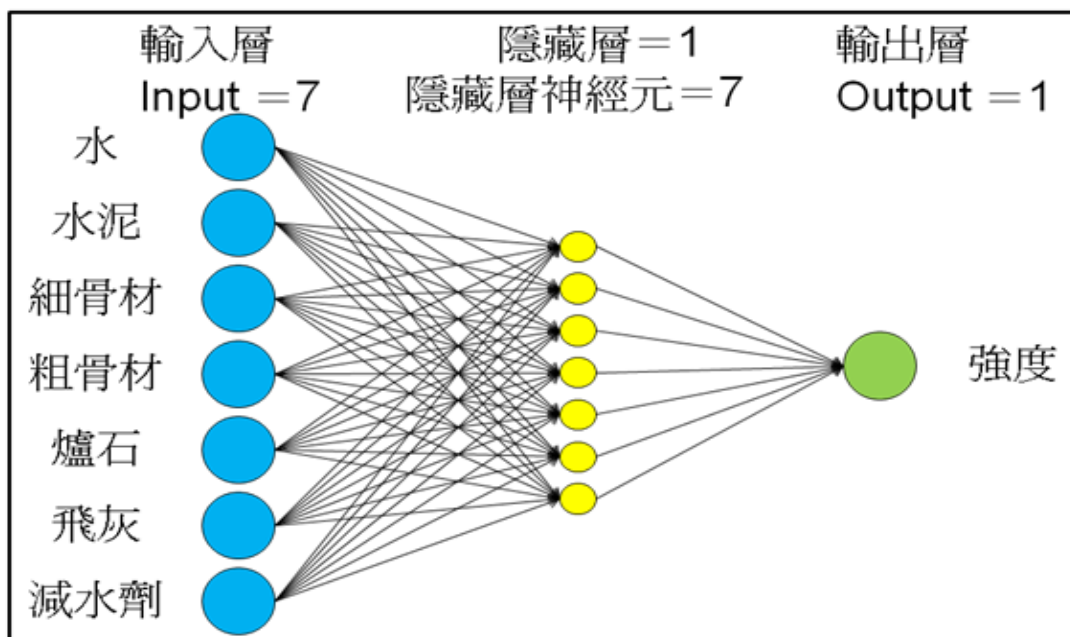


圖 4-28 類神經預測混凝土強度模型架構

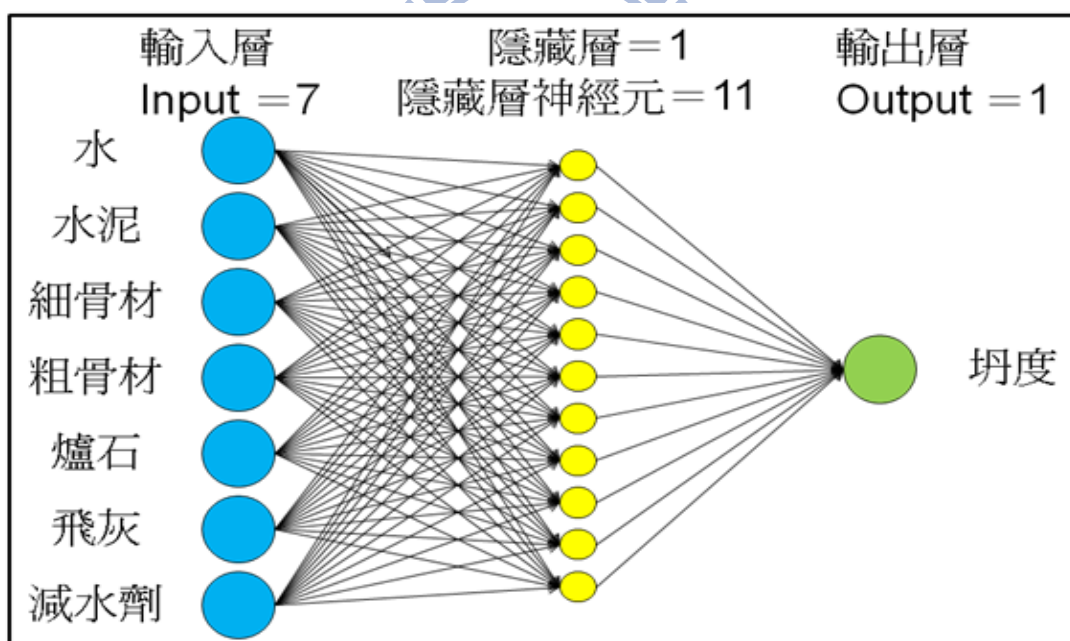


圖 4-29 類神經預測混凝土坍度模型架構

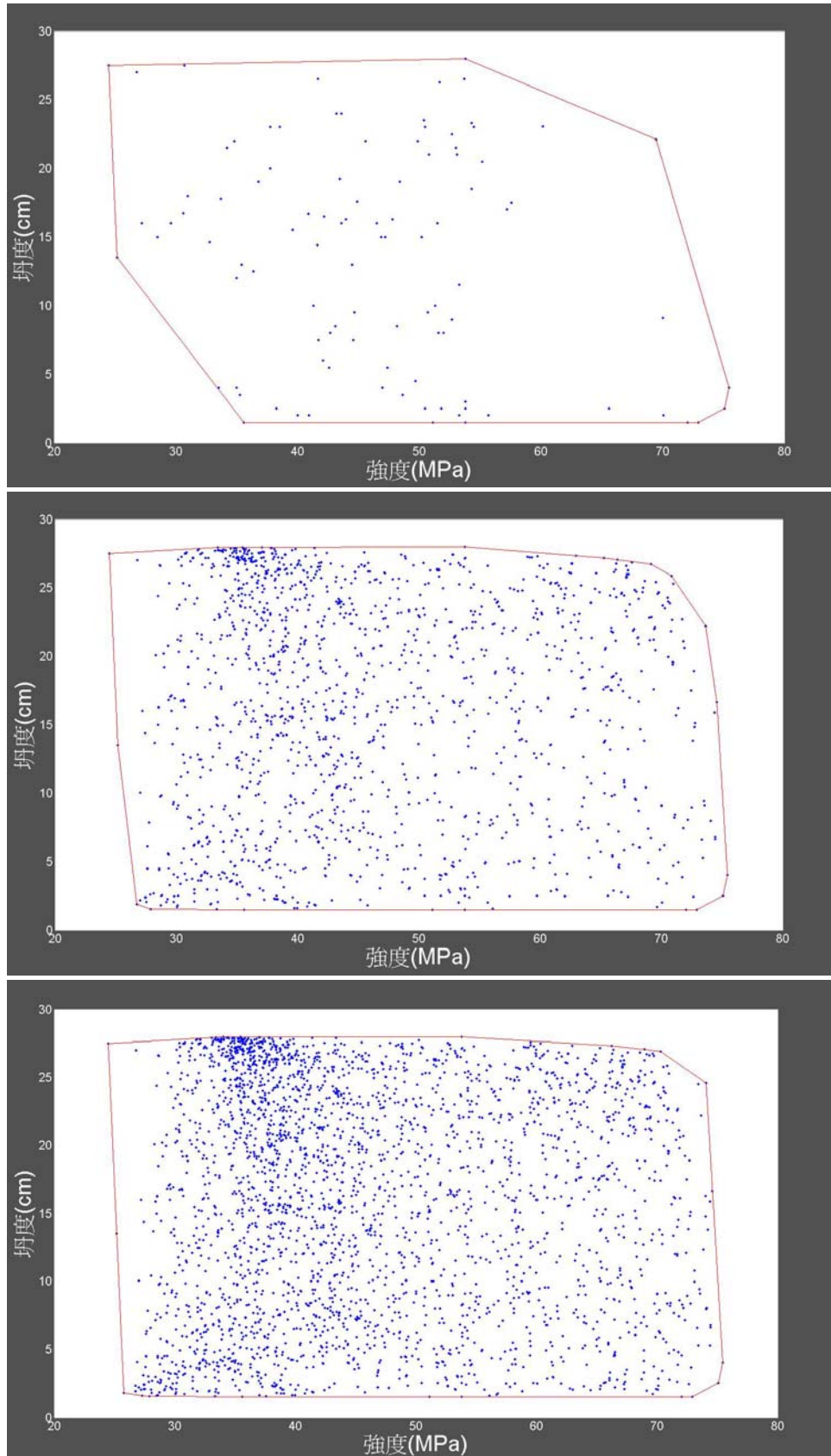


圖 4-30 不同大小資料庫的強度與坍度資料散佈圖

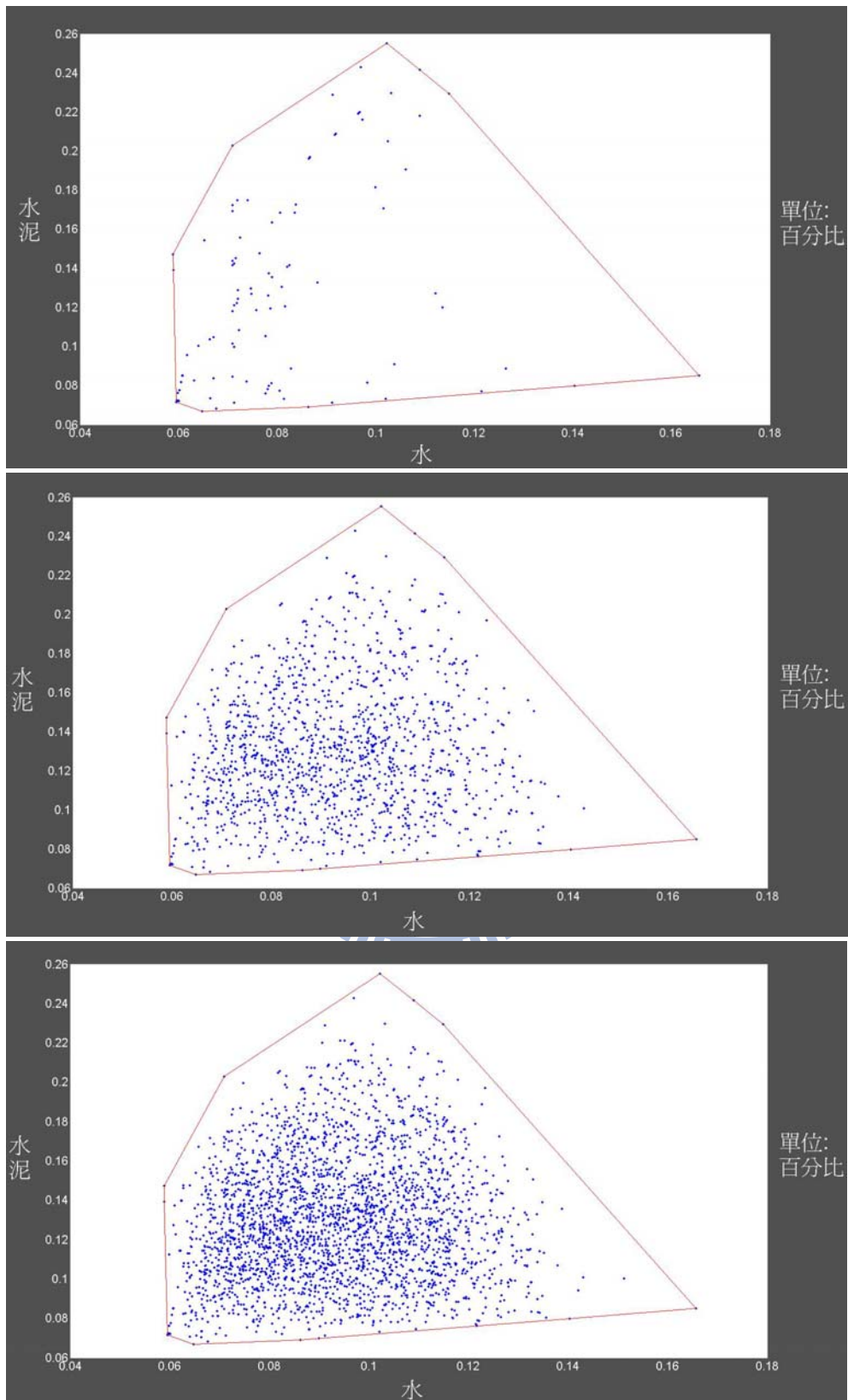


圖 4-31 不同大小資料庫的水與水泥資料散佈圖

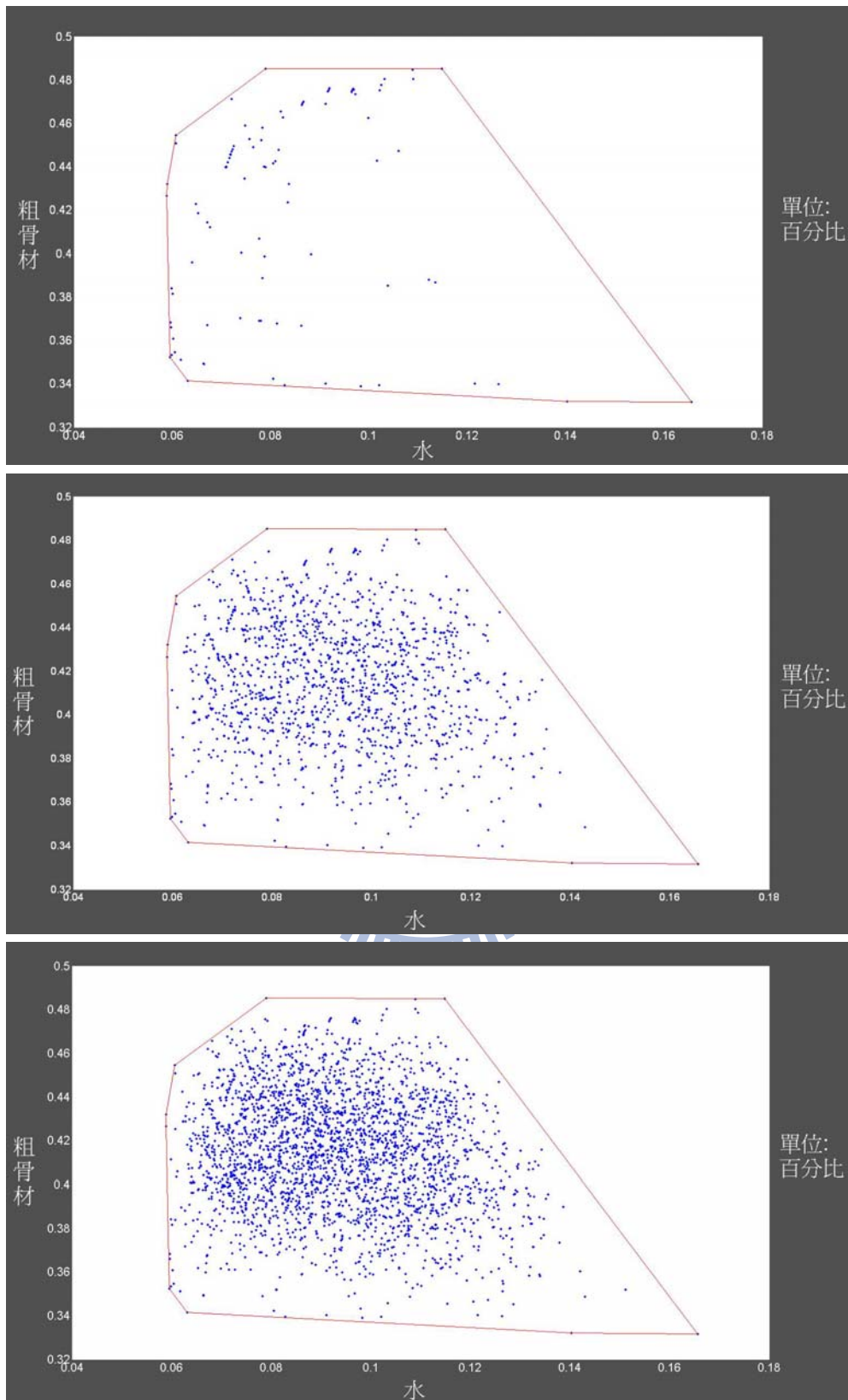


圖 4-32 不同大小資料庫的水與粗骨材資料散佈圖

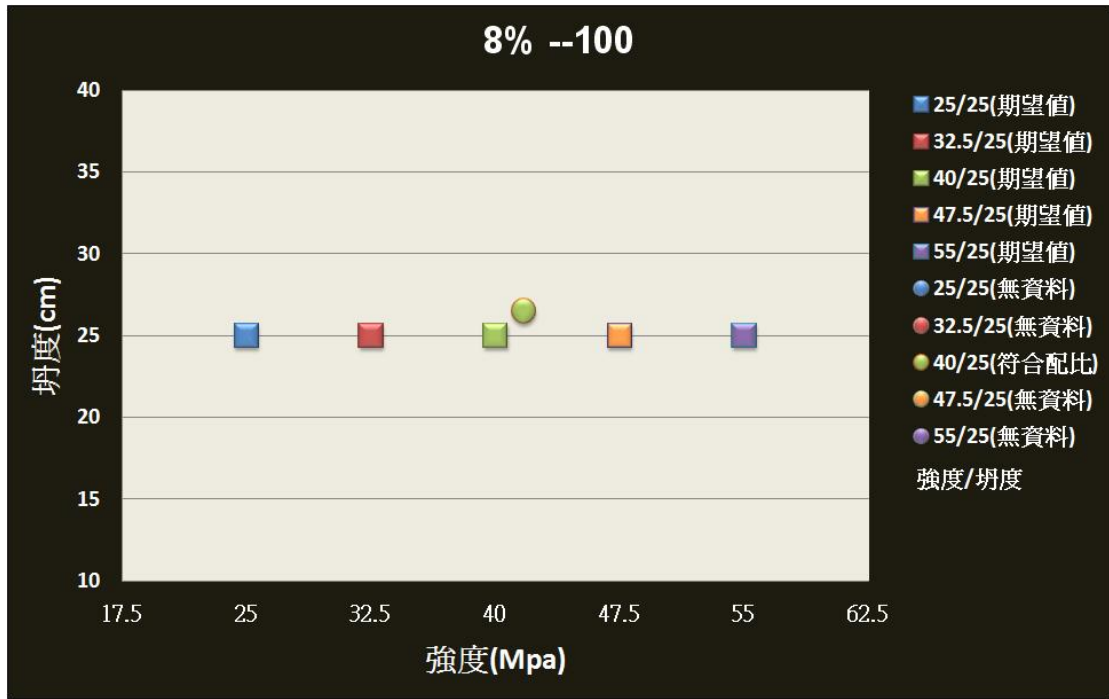


圖 4-33 一百筆資料以 K-Meams 設計需求的混凝土配比

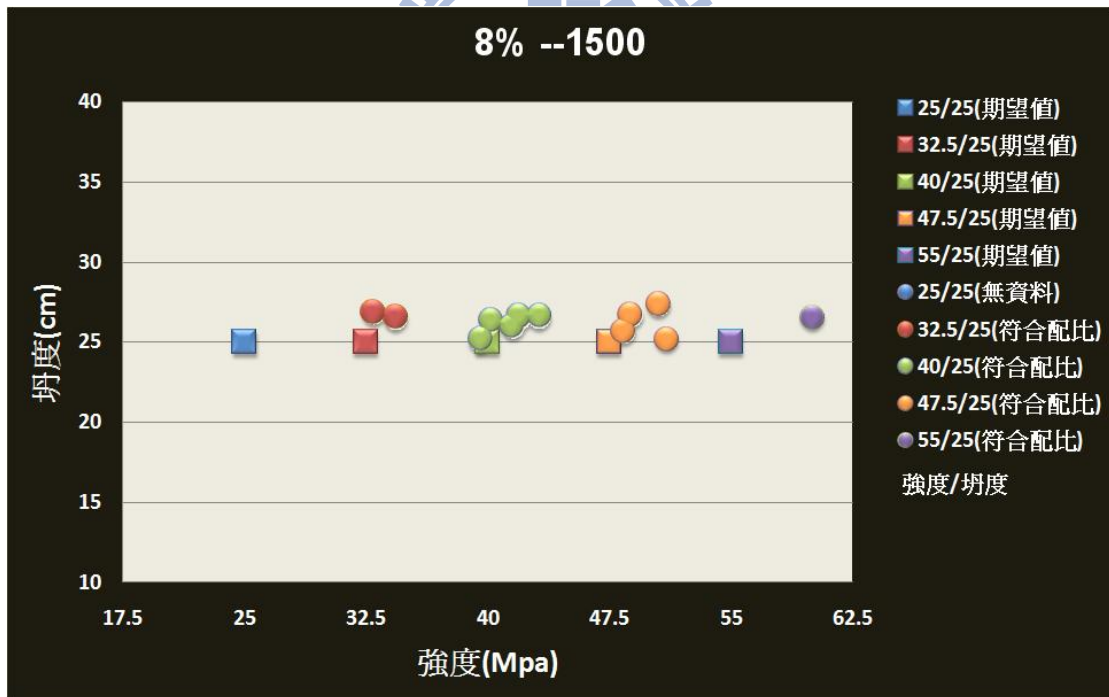


圖 4-34 一千五百筆資料以 K-Meams 設計需求的混凝土配比

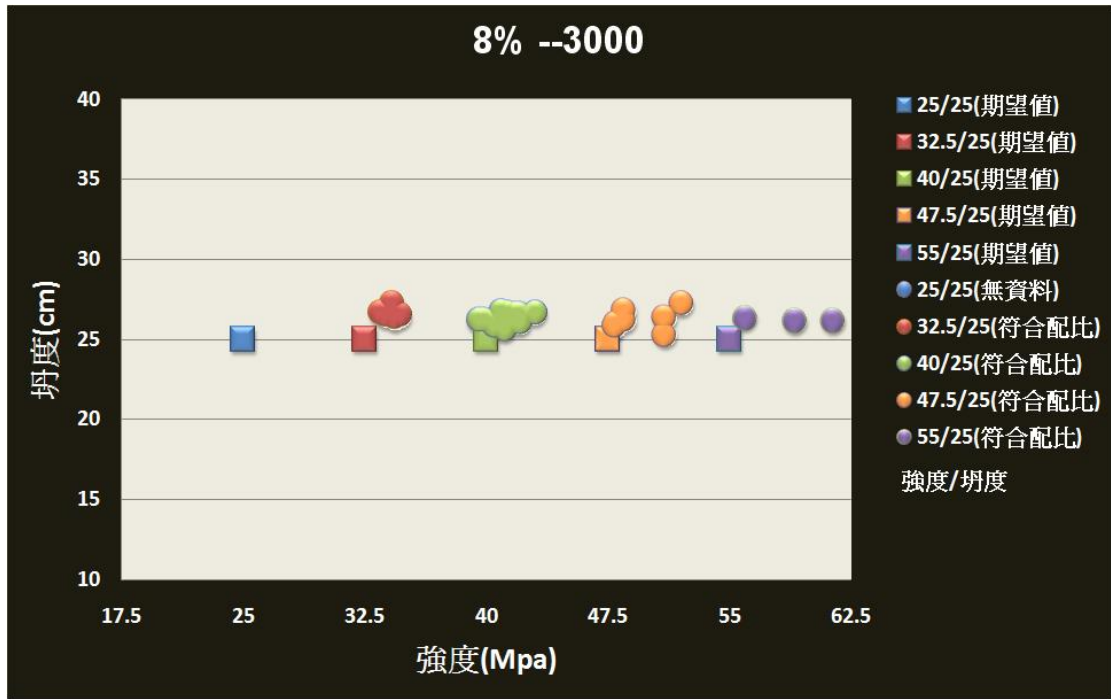


圖 4-35 三千筆資料以 K-Meams 設計需求的混凝土配比

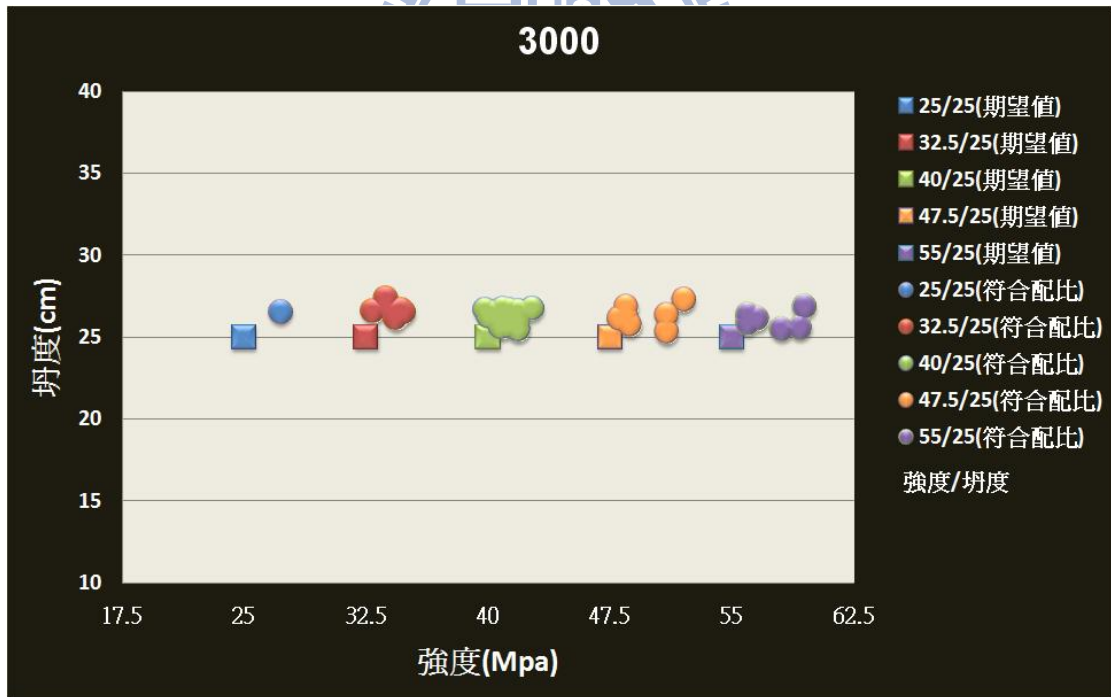


圖 4-36 使用此混凝土配比設計系統的成果