

國立臺灣大學工學院土木工程學研究所



碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

基於動態數位影像之粗粒料即時顆粒特性分析

Real-time Acquisition of Coarse Aggregate Characteristics

Based on Digital Dynamic Images

黃奕霖

I-Lin Huang

指導教授：詹穎雯 博士

Advisor: Yin-Wen Chan, Ph.D.

中華民國 113 年 8 月

August, 2024

## 誌謝



時光荏苒，碩士兩年生活稍縱即逝，這一路上認識了許多人，也受到許多貴人幫助，幸蒙恩師詹教授穎雯細心照顧與指導，對於碩士的期許不單只是學業上的進步，更多的是人格的培養以及處事的態度。

首先，感謝我的指導教授詹穎雯老師不僅提供許多不同觀點的想法與方向，一些研究上經驗談及訣竅更是受用無窮。最重要的是，老師時常提點我們如何將一件事思考的更全面、更嚴謹，所謂「授人以魚，不如授人以漁」便是此道理。

感謝廖文正老師提醒我一些研究上的盲點與可以補充得更完整的地方，感謝胡瑋秀老師提醒我注意一些研究細節上的疏漏，感謝楊仲家老師在口試中提供的寶貴意見，使得論文能夠交代得更完整精確，縝密而有條理。

感謝銘智學長和育聖學長不厭其煩得提供我研究上一切之所需，給了我不少研究上的幫助，包含實驗器材的採購、相關研究資料的提供、未來展望的討論等等，使我在研究上更有效率。感謝威佑學長在這兩年來對我的關心與幫助。另外，感謝季軒學長、瑞紋學姊和喬茵學姊幫我處理實驗上所遇到的大小事，像是實驗器材的運送、經費報帳又或是一些簡單的跑腿或採買，讓我省事又省心。偶爾還會自掏腰包請學弟妹喝飲料，備受關愛與照顧。

感謝 812 研究室的學長姐灝先、彥輔、灃恩、宇筌、映捷、奕親、文國、威翰，在我碩一修課時提供考古題參考，此外，還帶我們一起做實驗，熟悉實驗室環境，幫我們訂午餐，跟我們一起在研究室打橋牌，讓我碩一生活豐富許多。另外，感謝



灝先學長在畢業之後也時常回覆我所提出的疑問，讓我能更好地理解先前的研究，並思考更多的可能性。

感謝 812 研究室的同學瀚仁、庭安、竣帆、峻輔、濂淞、尚恩，在碩一修課時，大家一起互相討論幫助、一起打牌。碩二期間，一起做研究、一起吃飯、一起打球，都是難忘的寶貴回憶，祝福大家前程似錦，一切順遂。

感謝 812 研究室的學弟妹淳璋、林康、甫安、品宏、昀庭、恆育、宥霖、宏彬，謝謝你們在學長們需要幫忙時協助進行實驗，以及在我們口試時幫忙做筆記，祝福你們未來研究一切順利。

最後，我要感謝這兩年間家人給予的支持與鼓勵，使我能夠全心投入研究工作，並順利無憂地完成學業。

## 摘要



混凝土是建築中廣泛使用的基本材料。在一般預拌混凝土中，粒料之組成佔有大約混凝土體積的 60%~70%，扮演相當重要之角色，其形狀與粒徑分佈狀況將對混凝土的整體力學表現與工作性產生影響。於此，擁有良好的品管與監測是不容忽視的工作。

目前實務上對於粒料的品質控管主要採用「粗粒料篩析法」及「粗粒料中扁平、細長或扁長顆粒含量試驗法」，透過兩者求得級配曲線與扁平、細長、扁長率，然而這種方法既費時又費工，還存在人工量測誤差的問題。針對如此反覆且單調的實驗步驟，隨著科技的進步與發展，許多利用數位影像分析粒徑的方法逐漸受到重視。

本研究針對由台中預拌廠提供之粗粒料進行研究，旨在建立一套快速且準確的分析系統，能即時預測粒料之級配曲線和扁平、細長、扁長率。

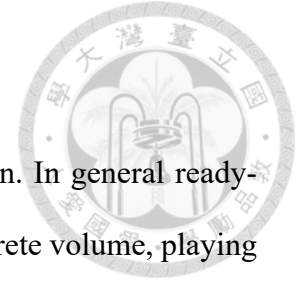
本研究採用一種動態攝影的方式，透過定點高速連拍自由掉落的粒料，獲得多張不同面向的平面影像，經由影像辨識與特徵篩選處理後，藉由模擬真實搖篩原理分類粒料，求得數量百分率級配曲線。計算過程中對粒料形狀進行了假設，因此需對預測結果進行尺寸校正，並透過統計估算出不同尺寸顆粒的平均重量，將數量百分率級配曲線轉換成重量百分制，根據結果顯示，3/4”、1/2”、3/8”及 #4 的精準度均達 9 成以上，最大誤差為 9.65%。

本研究從多角度的粒料平面影像裡獲得長寬平面與寬厚平面影像，並透過影像辨識取得長度、寬度及厚度資訊，計算扁平、細長、扁長率，結果顯示，三者中整體的最大誤差僅有 1.94%。

綜合上述，本研究結合了動態攝影與影像辨識，透過適當的特徵篩選與尺寸校正，加上重量與數量間的轉換，即時推算出級配曲線，另一方面，透過推測粒料的長寬平面與寬厚平面，求得扁平、細長、扁長率。此方法不僅快速且具有一定準確性，能有效節省人力與時間成本，對於混凝土生產和品質管理具有重要意義。

關鍵字：影像辨識、級配曲線、粗粒料、篩分析、扁平率

## Abstract

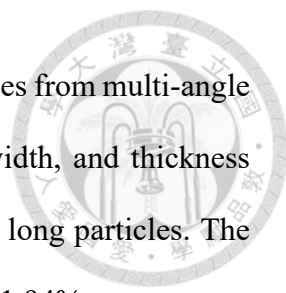


Concrete is a fundamental material widely used in construction. In general ready-mixed concrete, aggregates constitute about 60% to 70% of the concrete volume, playing a crucial role. The particle size distribution of aggregates significantly impacts the overall mechanical performance and workability of the concrete. Therefore, maintaining good quality control and monitoring is essential.

Currently, the practical quality control of aggregates primarily employs the "coarse aggregate sieve analysis method" and the "test method for flat, elongated, or long particles in coarse aggregates." These methods yield the gradation curve and the ratios of flat, elongated, and long particles. However, these methods are time-consuming, labor-intensive, and prone to human measurement errors. Given these repetitive and monotonous experimental procedures, the advancement of technology has led to increased attention on digital image analysis methods for particle size.

This study focuses on the coarse aggregates provided by a Taichung ready-mixed plant, aiming to establish a rapid and accurate analysis system capable of instantly predicting the gradation curve and the ratios of flat, elongated, and long particles.

The study adopts a dynamic photography approach, capturing multiple planar images of freely falling aggregates through high-speed continuous shooting at fixed points. After image recognition and feature selection processing, aggregates are classified by simulating the real sieving principle to obtain the particle size distribution curve in terms of quantity percentage. During the calculation process, assumptions about aggregate shapes are made, necessitating size correction of the predicted results. By statistically estimating the average weight of particles of different sizes, the quantity percentage gradation curve is converted into weight percentage. The results show that the accuracy for 3/4", 1/2", 3/8", and #4 is over 90%, with a maximum error of 9.65%.



This study obtains length-width and width-thickness planar images from multi-angle planar images of aggregates. Through image recognition, length, width, and thickness information is acquired to calculate the ratios of flat, elongated, and long particles. The results show that the overall maximum error among the three is only 1.94%.

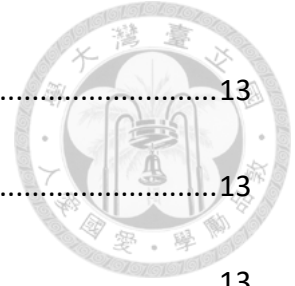
In conclusion, this study combines dynamic photography and image recognition. Through appropriate feature selection and size correction, along with the conversion between weight and quantity, the gradation curve is instantly calculated. Additionally, by estimating the length-width and width-thickness planes of aggregates, the ratios of flat, elongated, and long particles are derived. This method is not only rapid but also reasonably accurate, significantly saving labor and time costs, and holds significant importance for concrete production and quality management.

**Keywords:** image recognition, grading curve, coarse aggregate, sieve analysis, flatness ratio

# 目次



|                              |          |
|------------------------------|----------|
| 誌謝.....                      | I        |
| 摘要.....                      | III      |
| ABSTRACT.....                | V        |
| 目次.....                      | VII      |
| 圖次.....                      | XI       |
| 表次.....                      | XIV      |
| <b>第一章、緒論.....</b>           | <b>1</b> |
| 1.1 研究動機.....                | 1        |
| 1.2 研究範圍與內容.....             | 2        |
| 1.3 研究流程.....                | 3        |
| <b>第二章、文獻回顧.....</b>         | <b>4</b> |
| 2.1 粗粒料篩析法.....              | 4        |
| 2.2 粗粒料中扁平、細長或扁長顆粒含量試驗法..... | 5        |
| 2.3 影像辨識.....                | 6        |
| 2.3.1 拍攝方法.....              | 6        |
| 2.3.2 粒料尺寸.....              | 10       |
| 2.3.3 平面資訊立體化.....           | 12       |

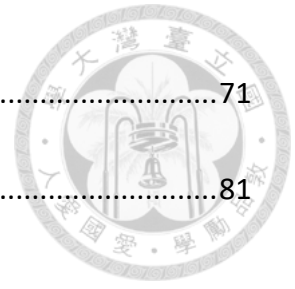


|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| 2.4 機器學習 .....                      | 13        |
| 2.4.1 前言 .....                      | 13        |
| 2.4.2 演算法 .....                     | 13        |
| <b>第三章、試驗與拍攝 .....</b>              | <b>17</b> |
| 3.1 資料集 .....                       | 17        |
| 3.2 粗粒料篩析法 .....                    | 19        |
| 3.2.1 器材 .....                      | 19        |
| 3.2.2 試驗流程 .....                    | 19        |
| 3.2.2.1 「六分石」級配、「三分石」級配試驗流程 .....   | 20        |
| 3.2.2.2 「平均分佈」級配、「分散兩側」級配試驗流程 ..... | 20        |
| 3.2.2.3 測試集級配試驗流程 .....             | 21        |
| 3.2.3 試驗結果 .....                    | 21        |
| 3.3 粗粒料中扁平、細長或扁長顆粒含量試驗法 .....       | 25        |
| 3.3.1 器材 .....                      | 25        |
| 3.3.2 試驗流程 .....                    | 26        |
| 3.3.3 試驗結果 .....                    | 27        |
| 3.4 影像拍攝 .....                      | 31        |
| 3.4.1 器材 .....                      | 31        |
| 3.4.2 拍攝流程 .....                    | 35        |



|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| 3.4.2.1 拍攝環境建置.....              | 35        |
| 3.4.2.2 AIS v4.9.1.2 操作.....     | 36        |
| <b>第四章、分析計畫與方法.....</b>          | <b>38</b> |
| 4.1 分析計畫背景.....                  | 38        |
| 4.2 影像辨識.....                    | 38        |
| 4.2.1 特徵篩選.....                  | 39        |
| 4.2.2 Image-Pro Plus 6.0 操作..... | 40        |
| 4.2.3 資料集.....                   | 42        |
| 4.3 程式碼.....                     | 43        |
| 4.3.1 特徵篩選.....                  | 43        |
| 4.3.2 敏感度分析.....                 | 47        |
| 4.3.3 篩分析預測.....                 | 57        |
| 4.3.3.1 篩分析原理與流程.....            | 58        |
| 4.3.3.2 篩分析結果.....               | 60        |
| 4.3.4 扁平、細長、扁長率預測.....           | 66        |
| 4.4 係數.....                      | 68        |
| 4.4.1 尺寸校正因子 C.....              | 68        |
| 4.4.2 重量數量比 R.....               | 70        |
| <b>第五章、分析結果與討論.....</b>          | <b>71</b> |

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| 5.1 篩分析結果與討論 .....        | 71        |
| 5.2 扁平、細長、扁長顆粒結果與討論 ..... | 81        |
| <b>第六章、結論與建議 .....</b>    | <b>87</b> |
| 6.1 結論 .....              | 87        |
| 6.2 建議 .....              | 89        |
| <b>參考文獻 .....</b>         | <b>91</b> |



# 圖次



|   |    |
|---|----|
| 圖 1.3-1 研究流程圖.....                      | 3  |
| 圖 2.2-1 ASTM D4791-19 顆粒尺寸定義示意圖[4]..... | 6  |
| 圖 2.3-1 WipShape 拍攝系統[5]、[6].....       | 7  |
| 圖 2.3-2 拍攝環境[7].....                    | 7  |
| 圖 2.3-3 拍攝裝置[8].....                    | 8  |
| 圖 2.3-4 拍攝系統[9].....                    | 8  |
| 圖 2.3-5 拍攝系統[10].....                   | 9  |
| 圖 2.3-6 整流板分離情形[10].....                | 9  |
| 圖 2.3-7 粒料尺寸預測示意圖[8].....               | 10 |
| 圖 2.3-8 模擬機械篩分析示意圖[12].....             | 11 |
| 圖 3.3-1 比例測徑器照片.....                    | 26 |
| 圖 3.4-1 分流板照片.....                      | 31 |
| 圖 3.4-2 儲料槽與擋板照片.....                   | 32 |
| 圖 3.4-3 棉線照片.....                       | 32 |
| 圖 3.4-4 鐵架照片.....                       | 33 |
| 圖 3.4-5 背板照片.....                       | 33 |
| 圖 3.4-6 PROMON U750 Color 高速攝影機照片.....  | 34 |
| 圖 3.4-7 腳架照片.....                       | 34 |



|  |    |
|--|----|
| 圖 3.4-8 300W 燈源照片 .....                                  | 35 |
| 圖 3.4-9 拍攝環境 .....                                       | 36 |
| 圖 3.4-10 動態拍攝過程 .....                                    | 37 |
| 圖 4.2-1 未初步篩選之辨識結果 .....                                 | 39 |
| 圖 4.2-2 有初步篩選之辨識結果 .....                                 | 40 |
| 圖 4.2-3 比例尺設定操作 .....                                    | 41 |
| 圖 4.2-4 影像辨識完成結果 .....                                   | 42 |
| 圖 4.3-1 Image pro Plus 6.0 之 Perimeter(ratio)定義示意圖 ..... | 45 |
| 圖 4.3-2 粒料篩分原理示意圖 .....                                  | 58 |
| 圖 4.3-3 「六分石」級配第一組之數量百分率級配曲線預測結果 .....                   | 60 |
| 圖 4.3-4 「六分石」級配第二組之數量百分率級配曲線預測結果 .....                   | 60 |
| 圖 4.3-5 「六分石」級配第三組之數量百分率級配曲線預測結果 .....                   | 61 |
| 圖 4.3-6 「三分石」級配第一組之數量百分率級配曲線預測結果 .....                   | 61 |
| 圖 4.3-7 「三分石」級配第二組之數量百分率級配曲線預測結果 .....                   | 62 |
| 圖 4.3-8 「三分石」級配第三組之數量百分率級配曲線預測結果 .....                   | 62 |
| 圖 4.3-9 「平均分佈」級配第一組之數量百分率級配曲線預測結果 .....                  | 63 |
| 圖 4.3-10 「平均分佈」級配第二組之數量百分率級配曲線預測結果 .....                 | 63 |
| 圖 4.3-11 「平均分佈」級配第三組之數量百分率級配曲線預測結果 .....                 | 64 |
| 圖 4.3-12 「分散兩側」級配第一組之數量百分率級配曲線預測結果 .....                 | 64 |



|   |    |
|---|----|
| 圖 4.3-13 「分散兩側」級配第二組之數量百分率級配曲線預測結果..... | 65 |
| 圖 4.3-14 「分散兩側」級配第三組之數量百分率級配曲線預測結果..... | 65 |
| 圖 5.1-1 測試級配第一組重量百分率粒徑分佈曲線比較.....       | 74 |
| 圖 5.1-2 測試級配第二組重量百分率粒徑分佈曲線比較.....       | 74 |
| 圖 5.1-3 測試級配第三組重量百分率粒徑分佈曲線比較.....       | 75 |
| 圖 6.1-1 試驗時間比較.....                     | 88 |

# 表次



|  |    |
|--|----|
| 表 2.2-1 CNS 15171 A3408 扁平顆粒、細長顆粒及扁長顆粒定義[3]..... | 5  |
| 表 3.1-1 校正資料各級配配置.....                           | 17 |
| 表 3.1-2 校正資料命名規則.....                            | 18 |
| 表 3.1-3 測試資料級配配置.....                            | 18 |
| 表 3.1-4 測試資料命名規則.....                            | 19 |
| 表 3.2-1 「六分石」級配第一組篩分析試驗結果.....                   | 21 |
| 表 3.2-2 「六分石」級配第二組篩分析試驗結果.....                   | 22 |
| 表 3.2-3 「六分石」級配第三組篩分析試驗結果.....                   | 22 |
| 表 3.2-4 「三分石」級配第一組篩分析試驗結果.....                   | 22 |
| 表 3.2-5 「三分石」級配第二組篩分析試驗結果.....                   | 23 |
| 表 3.2-6 「三分石」級配第三組篩分析試驗結果.....                   | 23 |
| 表 3.2-7 「平均分佈」級配第一組篩分析試驗結果.....                  | 23 |
| 表 3.2-8 「平均分佈」級配第二組篩分析試驗結果.....                  | 24 |
| 表 3.2-9 「平均分佈」級配第三組篩分析試驗結果.....                  | 24 |
| 表 3.2-10 「分散兩側」級配第一組篩分析試驗結果.....                 | 24 |
| 表 3.2-11 「分散兩側」級配第二組篩分析試驗結果.....                 | 25 |
| 表 3.2-12 「分散兩側」級配第三組篩分析試驗結果.....                 | 25 |
| 表 3.3-1 「六分石」級配第一組扁平、扁長、細長率試驗結果.....             | 27 |



|  |    |
|--|----|
| 表 3.3-2 「六分石」級配第二組扁平、扁長、細長率試驗結果.....   | 28 |
| 表 3.3-3 「六分石」級配第三組扁平、扁長、細長率試驗結果.....   | 28 |
| 表 3.3-4 「三分石」級配第一組扁平、扁長、細長率試驗結果.....   | 28 |
| 表 3.3-5 「三分石」級配第二組扁平、扁長、細長率試驗結果.....   | 28 |
| 表 3.3-6 「三分石」級配第三組扁平、扁長、細長率試驗結果.....   | 29 |
| 表 3.3-7 「平均分佈」級配第一組扁平、扁長、細長率試驗結果.....  | 29 |
| 表 3.3-8 「平均分佈」級配第二組扁平、扁長、細長率試驗結果.....  | 29 |
| 表 3.3-9 「平均分佈」級配第三組扁平、扁長、細長率試驗結果.....  | 29 |
| 表 3.3-10 「分散兩側」級配第一組扁平、扁長、細長率試驗結果..... | 30 |
| 表 3.3-11 「分散兩側」級配第二組扁平、扁長、細長率試驗結果..... | 30 |
| 表 3.3-12 「分散兩側」級配第三組扁平、扁長、細長率試驗結果..... | 30 |
| 表 4.3-1 重疊顆粒判定準則.....                  | 44 |
| 表 4.3-2 重疊顆粒剔除準則.....                  | 45 |
| 表 4.3-3 陰影顆粒判定準則.....                  | 46 |
| 表 4.3-4 陰影顆粒剔除準則.....                  | 46 |
| 表 4.3-5 低資訊量顆粒剔除準則.....                | 47 |
| 表 4.3-6 敏感度分析測試組合.....                 | 47 |
| 表 4.3-7 「六分石」級配 test1~5.....           | 48 |
| 表 4.3-8 「六分石」級配 test6~10.....          | 48 |



|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 表 4.3-9 「六分石」級配 test11~15 .....   | 49 |
| 表 4.3-10 「六分石」級配 test16~20 .....  | 49 |
| 表 4.3-11 「六分石」級配 test21~25 .....  | 49 |
| 表 4.3-12 「三分石」級配 test1~5 .....    | 50 |
| 表 4.3-13 「三分石」級配 test6~10 .....   | 50 |
| 表 4.3-14 「三分石」級配 test11~15 .....  | 50 |
| 表 4.3-15 「三分石」級配 test16~20 .....  | 51 |
| 表 4.3-16 「三分石」級配 test21~25 .....  | 51 |
| 表 4.3-17 「平均分佈」級配 test1~5 .....   | 51 |
| 表 4.3-18 「平均分佈」級配 test6~10 .....  | 52 |
| 表 4.3-19 「平均分佈」級配 test11~15 ..... | 52 |
| 表 4.3-20 「平均分佈」級配 test16~20 ..... | 52 |
| 表 4.3-21 「平均分佈」級配 test21~25 ..... | 53 |
| 表 4.3-22 「分散兩側」級配 test1~5 .....   | 53 |
| 表 4.3-23 「分散兩側」級配 test6~10 .....  | 53 |
| 表 4.3-24 「分散兩側」級配 test11~15 ..... | 54 |
| 表 4.3-25 「分散兩側」級配 test16~20 ..... | 54 |
| 表 4.3-26 「分散兩側」級配 test21~25 ..... | 54 |
| 表 4.3-27 篩選特徵測試組合 .....           | 55 |



|   |    |
|---|----|
| 表 4.3-28 「六分石」級配之特徵組合測試結果.....                | 55 |
| 表 4.3-29 「三分石」級配之特徵組合測試結果.....                | 55 |
| 表 4.3-30 「平均分佈」級配之特徵組合測試結果.....               | 56 |
| 表 4.3-31 「分散兩側」級配之特徵組合測試結果.....               | 56 |
| 表 4.4-1 各級配在不同 C 值下的各篩號誤差總和 ( 9 組平均結果 ) ..... | 69 |
| 表 4.4-2 各尺寸顆粒 R 值統計結果 .....                   | 70 |
| 表 5.1-1 測試級配第一組真實篩分析試驗結果.....                 | 71 |
| 表 5.1-2 test-1-1 篩分析預測結果.....                 | 71 |
| 表 5.1-3 test-1-2 篩分析預測結果.....                 | 72 |
| 表 5.1-4 測試級配第二組真實篩分析試驗結果.....                 | 72 |
| 表 5.1-5 test-2-1 篩分析預測結果.....                 | 72 |
| 表 5.1-6 test-2-2 篩分析預測結果.....                 | 73 |
| 表 5.1-7 測試級配第三組真實篩分析試驗結果.....                 | 73 |
| 表 5.1-8 test-3-1 篩分析預測結果.....                 | 73 |
| 表 5.1-9 test-3-2 篩分析預測結果.....                 | 73 |
| 表 5.1-10 D10、D50 和 D90 定義 .....               | 75 |
| 表 5.1-11 測試級配第一組 D10、D50、D90 結果比較 .....       | 76 |
| 表 5.1-12 測試級配第二組 D10、D50、D90 結果比較 .....       | 76 |
| 表 5.1-13 測試級配第三組 D10、D50、D90 結果比較 .....       | 76 |



|   |    |
|---|----|
| 表 5.1-14 test-1-1 與 test-1-2 之篩分析預測差異 .....       | 77 |
| 表 5.1-15 test-2-1 與 test-2-2 之篩分析預測差異 .....       | 77 |
| 表 5.1-16 test-3-1 與 test-3-2 之篩分析預測差異 .....       | 77 |
| 表 5.1-17 test-1-1、test-1-2 與真實篩分析之最大誤差 .....      | 78 |
| 表 5.1-18 test-2-1、test-2-2 與真實篩分析之最大誤差 .....      | 78 |
| 表 5.1-19 test-3-1、test-3-2 與真實篩分析之最大誤差 .....      | 79 |
| 表 5.2-1 測試級配第一組真實扁平、細長或扁長顆粒含量試驗結果.....            | 81 |
| 表 5.2-2 test-1-1 扁平、細長或扁長顆粒預測結果.....              | 82 |
| 表 5.2-3 test-1-2 扁平、細長或扁長顆粒預測結果.....              | 82 |
| 表 5.2-4 測試級配第二組真實扁平、細長或扁長顆粒含量試驗結果.....            | 82 |
| 表 5.2-5 test-2-1 扁平、細長或扁長顆粒預測結果.....              | 82 |
| 表 5.2-6 test-2-2 扁平、細長或扁長顆粒預測結果.....              | 83 |
| 表 5.2-7 測試級配第三組真實扁平、細長或扁長顆粒含量試驗結果.....            | 83 |
| 表 5.2-8 test-3-1 扁平、細長或扁長顆粒預測結果.....              | 83 |
| 表 5.2-9 test-3-2 扁平、細長或扁長顆粒預測結果.....              | 83 |
| 表 5.2-10 test-1-1 與 test-1-2 之扁平、扁長、細長率預測差異 ..... | 84 |
| 表 5.2-11 test-2-1 與 test-2-2 之扁平、扁長、細長率預測差異 ..... | 84 |
| 表 5.2-12 test-3-1 與 test-3-2 之扁平、扁長、細長率預測差異 ..... | 84 |



表 5.2-13 test-1-1、test-1-2 與真實扁平、細長、扁長顆粒含量試驗之間最大誤差  
..... 85

表 5.2-14 test-2-1、test-2-2 與真實扁平、細長、扁長顆粒含量試驗之間最大誤差  
..... 85

表 5.2-15 test-3-1、test-3-2 與真實扁平、細長、扁長顆粒含量試驗之間最大誤差  
..... 85

# 第一章、緒論



## 1.1 研究動機

混凝土在土木和建築領域扮演舉足輕重的角色，為確保其工作性和硬固性質，粒料的級配曲線是至關重要的因素。級配曲線描述了混凝土中不同粒料顆粒大小的比例和分佈，這直接關係到混凝土的流動性、密實度及強度。若級配曲線不合規範或顆粒分佈不均勻，會導致混凝土工作性下降，使其在施工過程中難以流動和成型，從而影響結構的整體品質和耐久性。此外，不良的級配會增加拌和水的需求，過多的水分會削弱混凝土的強度，進而影響結構的長期穩定性和耐久性。為了補償級配不理想的影響，施工過程中常需要調整砂率或增加水泥用量，這不僅增加了工程成本，還提高了碳排放。因此，確保混凝土的級配曲線符合設計要求，是保障建築和基礎工程品質和性能的基礎。

本研究欲開發一種全自動化技術，於預拌廠內的下料口處安裝高速攝影機，捕捉粒料翻滾掉落的影像，並使用影像辨識軟體分析以獲取粒料特徵。透過適當的篩選和分析，可以即時評估混料特性，包括級配曲線、扁平率、細長率及扁長率。藉由實時監控與調整配比，不僅能確保混凝土的工作性和硬固性質符合要求，減少工程缺失，還能降低人力與時間成本，並減少碳排放。



## 1.2 研究範圍與內容

本實驗主要採用台中預拌混凝土廠提供的三分石、六分石及少量的 1”和#8 篩大小之粒料，重點集中於探討 3/4”、1/2”、3/8”、#4 大小之顆粒。透過拍攝軟體 AIS v4.9.1.2 取得圖像資料，再藉由影像辨識軟體 Image Pro Plus6.0 獲得特徵資訊，用以預測粒徑分佈及顆粒扁平、細長、扁長程度。

有別於傳統的影像拍攝手法，本研究藉由動態高速攝影捕獲大量多角度的平面資訊，憑藉更全面的資訊，試圖以更精準且更有邏輯的方式預測級配曲線及扁平、細長和扁長率。透過統計不同尺寸的顆粒重量與數量，建立了「重量數量比 R」，用以將預測的顆粒數量結果轉換為實務上較常使用的重量表示法。這些研究成果將推動預拌混凝土產業邁向自動化，也對成本控制和品質管理提供了重要幫助。



### 1.3 研究流程

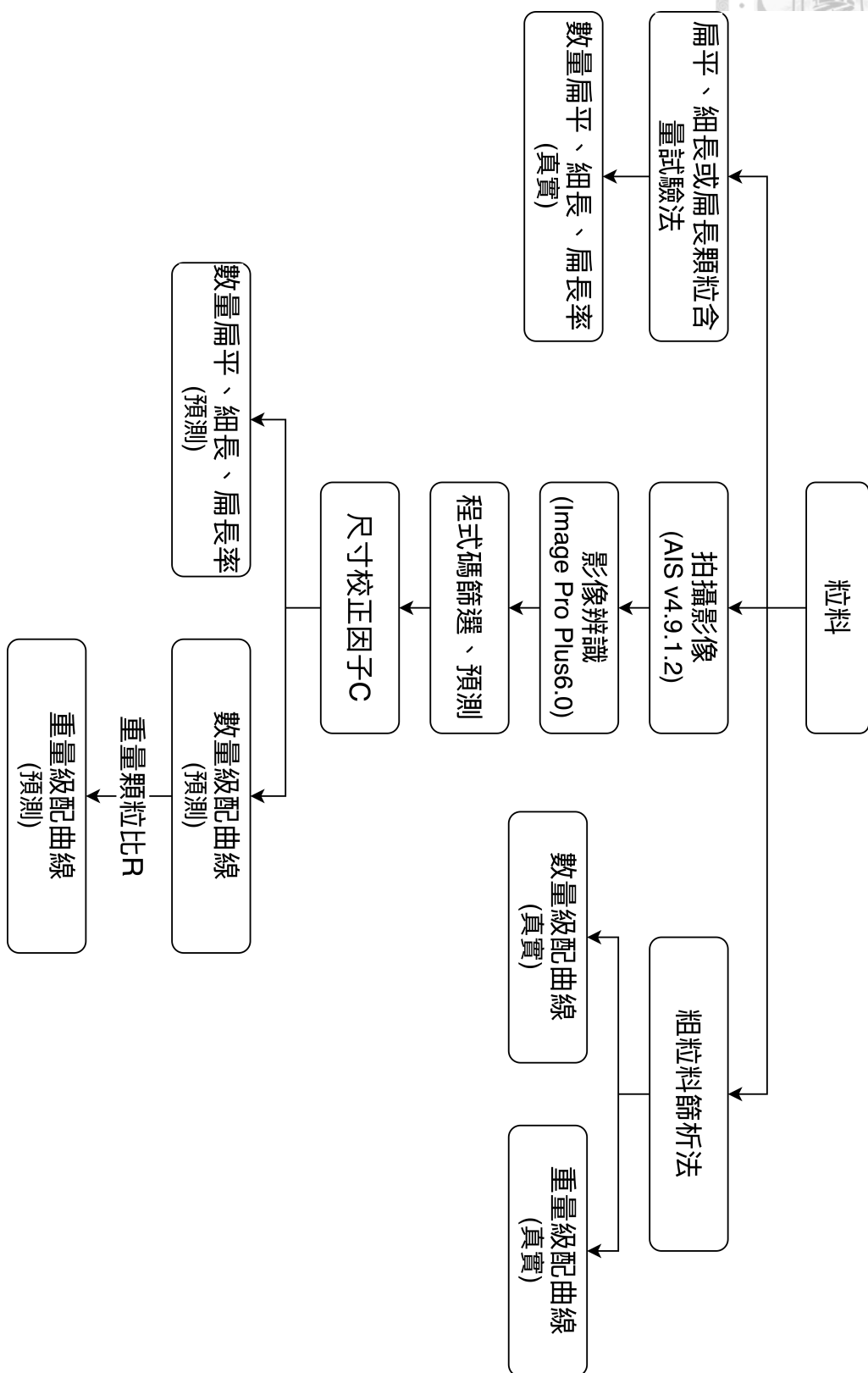


圖 1.3-1 研究流程圖

## 第二章、文獻回顧



### 2.1 粗粒料篩析法

CNS 486 A3005[1]、ASTM C136/C136M-19[2]粗粒料篩析法是一種測量與分析粗顆粒材料 ( 如砂石、碎石等 ) 大小分布的實驗方法，藉由確認材料之粒徑分布，從而評估其性能及適用性。粗粒料篩析法的基本流程如下：

1. 取樣：從待測材料中取出代表性試樣。
2. 乾燥：將試樣烘乾以去除水分，確保測量之準確性。
3. 過篩：將試驗篩按照大小由上至下依序放入搖篩機。將試樣倒入篩內，然後透過機械或人工震動，使顆粒旋轉、跳動而逐層通過篩網，直到顆粒無法再通過篩網為止。
4. 秤重：取出每層篩網上停留的粒料，秤重並紀錄。
5. 分析：根據每層停留粒料的重量數據，計算不同粒徑範圍內材料的累積重量百分比，繪製粒徑分布曲線。

骨材的粒徑分佈對材料的強度、耐久性和穩定性有直接影響。使用粗粒料篩析法可以確保骨材符合工程規範和標準，從而保證結構的品質。同時，合理的骨材級配能有效利用不同粒徑的骨材，減少細骨材或粗骨材的過量使用，從而降低材料成本。



## 2.2 粗粒料中扁平、細長或扁長顆粒含量試驗法

CNS 15171 A3408[3]、ASTM D4791-19[4]粗粒料中扁平、細長或扁長顆粒含量試驗法是一種用於測定粗粒料中不規則形狀顆粒比例的實驗方法，其主要目的在於檢測不規則形狀的顆粒含量，以確保材料的性能與使用效果。透過比例測徑器量測顆粒「長度」、「寬度」及「厚度」間的比值，若比值大於規定者，視其為不規則形狀之顆粒。

扁平率、細長率及扁長率的計算可分為計重和計數兩種方法，透過量測不規則顆粒佔整體試樣的重量或數量比例而得。

表 2.2-1 CNS 15171 A3408 扁平顆粒、細長顆粒及扁長顆粒定義[3]

| 名詞   | 定義                |
|------|-------------------|
| 長度   | 粒料的最大尺寸           |
| 寬度   | 垂直於長度的平面中的最大尺寸    |
| 厚度   | 垂直於長度和寬度的最大尺寸     |
| 扁平顆粒 | 顆粒寬度/顆粒厚度 > 規定比例者 |
| 細長顆粒 | 顆粒長度/顆粒寬度 > 規定比例者 |
| 扁長顆粒 | 顆粒長度/顆粒厚度 > 規定比例者 |

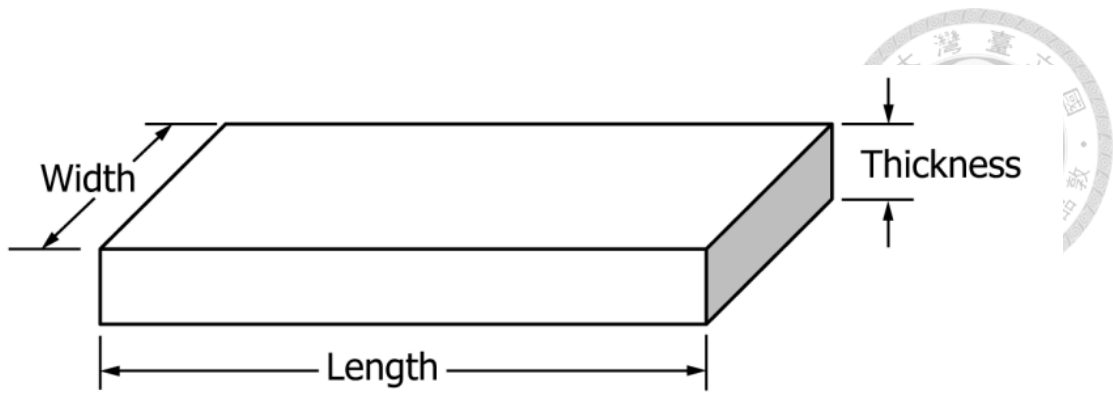


FIG. 1 Particle Dimensions

圖 2.2-1 ASTM D4791-19 顆粒尺寸定義示意圖[4]

本研究的顆粒長度、寬度及厚度參考了表 2.2-1 之定義，藉由預測長寬平面及寬厚平面而得。

## 2.3 影像辨識

影像辨識是一種基於計算機視覺、人工智慧等領域的應用，涉及圖像處理、特徵擷取、機器學習等技術，常見的功能有自動識別、追蹤、分類等等，能夠對圖像或影像進行一定的處理及分析。這項技術廣泛應用於安全監控、醫學影像分析、自動駕駛和面部識別等領域，隨著技術的進步，影像辨識在準確性和效率上不斷提升，成為現代人工智慧的重要組成部分。

### 2.3.1 拍攝方法

針對粒料影像的取得，傳統文獻上採用幾種不同的做法，分述如下：

1. Norbert, M. and S. Lusher[5]、Norbert, M.[6]架設一組相互垂直的攝影機以獲得粒料的雙重影像，並透過傳送帶逐顆拍攝。

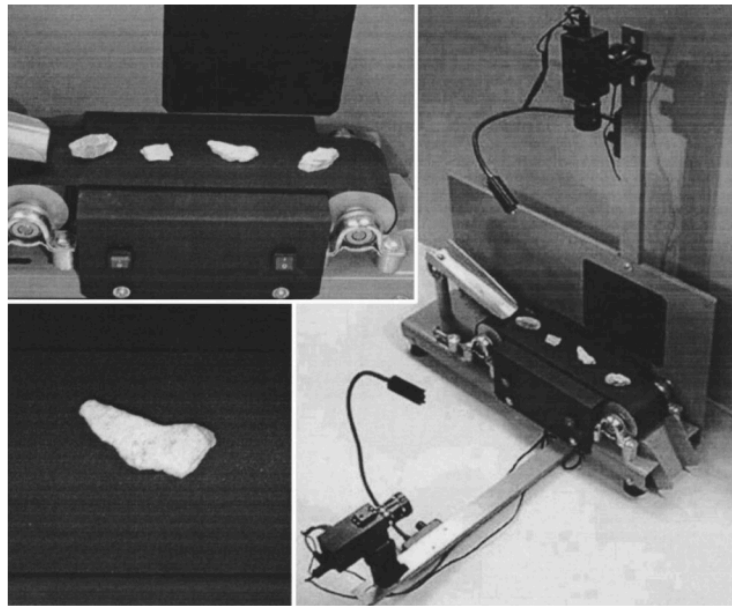


圖 2.3-1 WipShape 拍攝系統[5]、[6]

2. 項灝先[7]、Mora, C. F., et al.[8]將粒料人工分離並擺放至拍攝容器內，調整光源使顆粒陰影面積最小化後進行拍攝。

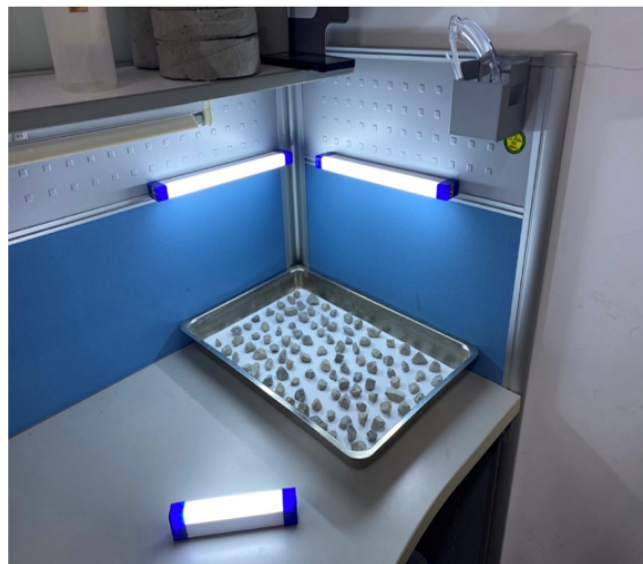


圖 2.3-2 拍攝環境[7]

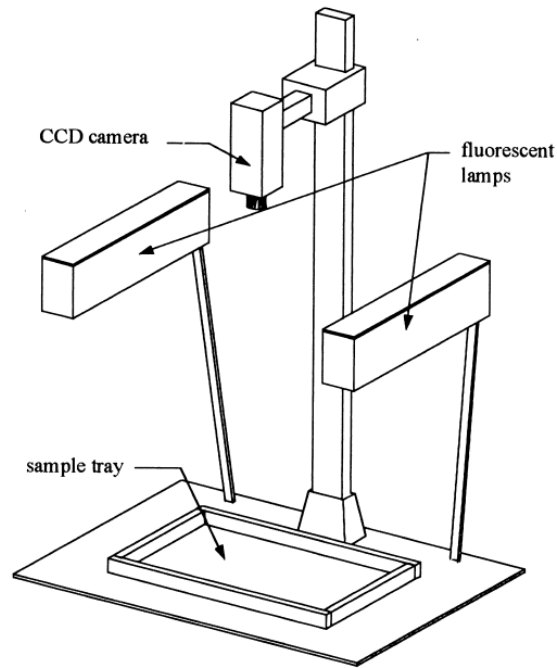


圖 2.3-3 拍攝裝置[8]

3. Kurnaz, T. F. and M. Aydın[9]將樣品顆粒放置於光盒中，為了防止其接觸或重疊，在光盒下方放置了一個震動裝置，並利用彈簧機構的作用，同時搖動光盒進行拍攝。

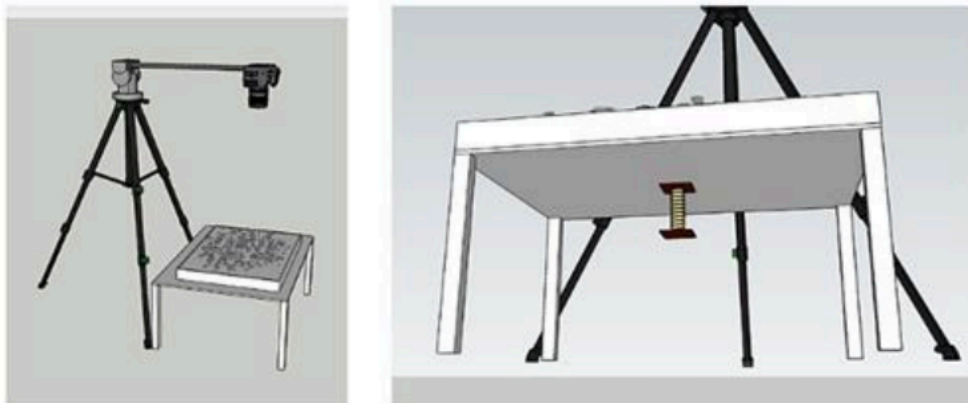


圖 2.3-4 拍攝系統[9]



4. 江田, 正., et al.[10]透過輸送帶將混料運送至高處, 接著使其自由落體落下, 並通過整流板分離掉落路徑, 同時在低處使用高速攝影機進行動態攝影。補光燈的使用是為了增加對比度以進行二值化處理。

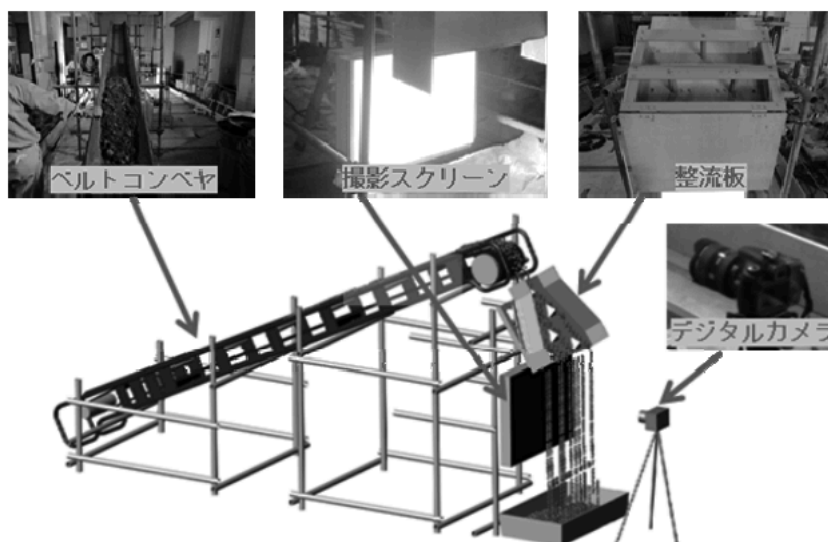


圖 2.3-5 拍攝系統[10]

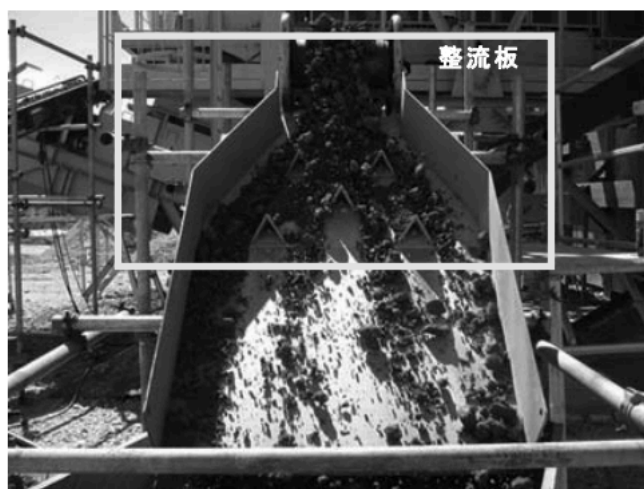


圖 2.3-6 整流板分離情形[10]

本研究以實現自動化、即時監測為目標導向, 關鍵部分在於人工干預及作業時間長短問題。考量到 Norbert, M. and S. Lusher[5]、Norbert, M.[6]的輸送帶只能逐顆



運送，整體拍攝耗時過長；項灝先[7]、Mora, C. F., et al.[8]需要人工分離粒料僅能實現半自動化，且無法即時預測。故本研究參考江田，正., et al.[10]的實驗方法，將多顆粒料以自由落體的方式從高處施放，通過分流板分離掉落路徑，並在低處架設高速攝影機及背板進行動態攝影，以期達到自動化與即時分析之目的。

### 2.3.2 粒料尺寸

傳統文獻上有許多利用數位影像處理來預測粒料尺寸的方式：

1. Mora, C. F., et al. [8]透過顆粒寬度模擬圓形篩網尺寸，並藉由試錯求得最佳尺寸校正因子  $C$ ，將圓形篩網尺寸轉換成方形篩網尺寸，見式 2.3-1，結果顯示預測與實際的級配曲線獲得良好的一致性。

$$\text{equivalent square sieve size} = C \times \text{circular sieve size} \quad \text{式 2.3-1}$$

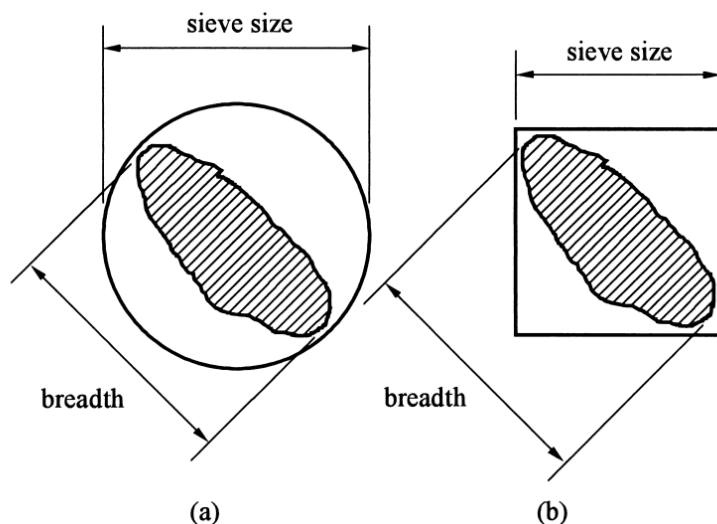


圖 2.3-7 粒料尺寸預測示意圖[8]



2. Maiti, A., et al.[11]評估了四種因子之成效，包含「主軸」、「次軸」、「邊界矩形的短邊長」、「等效直徑」，結果發現，不同粒徑範圍的試樣選用的最佳評估因子不同，並且利用多元迴歸分析生成的方程預測粒徑分佈，準確性高達99%，研究表明，顆粒的篩分尺寸在很大程度上依賴於這些形狀參數，91%的變化可以通過主軸、次軸、邊界框長度和等效直徑來解釋。其中等效直徑

$$= \sqrt{\text{主軸} \times \text{次軸}}$$

3. Pourebrahimi, M., et al.[12]提出了一種基於模擬機械篩分析的預測方法。在傳統機械搖篩時，粒料透過一段時間的震動、旋轉，嘗試是否能通過特定大小之篩網。為效仿此過程，該研究將粒料的二維圖像資料放置在模擬篩網尺寸的正方形裡，如圖 2.3-8，透過將方形平移及旋轉，檢測是否存在一種狀態，能讓粒料完全置於框內不接觸，以此判定是否能通過該特定尺寸篩網。4 次實驗結果顯示，各篩號累積通過率的均方誤差為 2.8、4.6、3.44、6.15。

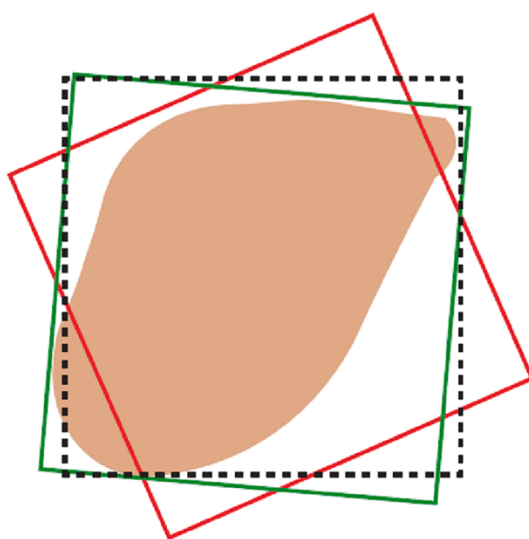


圖 2.3-8 模擬機械篩分析示意圖[12]



考量到傳統文獻上使用特定特徵當作主要影響因子的評估方法，會隨著拍攝到的粒料面向不同而有所差異，存在代表性不足的問題，故本研究參考並改良 Pourebrahimi, M., et al.[12]的做法，使用代數方法求解角度的最佳值及最小通過篩網尺寸，除了能繪製連續性的粒徑分佈圖外，利用動態攝影所拍攝到的多角度影像，也能更有邏輯的預測真實級配情形。

### 2.3.3 平面資訊立體化

平面影像辨識雖能降低實驗成本與複雜度，但卻有一定的侷限性，無法捕捉到粒料的三維空間特徵，導致在某些情形下無法提供足具代表性的資訊。為了更有效且精準地預測粒徑分佈，建立 2D 與 3D 之間的轉換關係尤為重要，傳統文獻上有不同作法，分述如下：

1. Mora, C. F., et al.[8]、Kurnaz, T. F. and M. Aydın[9]認為粒料厚度可用寬度表示，透過影像辨識面積乘以寬度獲得粒料體積，並利用體積通過比率繪製重量百分制級配曲線，見式 2.3-2。

$$\text{percentage by mass passing a sieve} = \frac{\sum_{i=1}^p (\text{area} \times \text{breadth})}{\sum_{i=1}^n (\text{area} \times \text{breadth})} \quad \text{式 2.3-2}$$

2. 江田, 正., et al.[10]透過建立粒料質量與影像面積之間的關係，獲得質量換算係數(kg/pixel)。將樣品粒料影像面積乘以質量換算係數，即可獲得粒料預估質量並推算重量累積過篩率。



3. Maiti, A., et al.[11]透過統計獲得每個篩號的顆粒平均重量。將試樣各層留篩顆粒數乘以對應的顆粒平均重量，即可推算出各層留篩重量，並加以繪製重量百分制級配曲線。

考慮到傳統文獻採用影像辨識特徵作為評估依據，存在單張平面影像代表性不足的問題，本研究參考 Maiti, A., et al.[11]選擇透過顆粒數量進行轉換，解決了動態拍攝下多視角照片的選擇性問題。

## 2.4 機器學習

### 2.4.1 前言

機器學習是一門計算機科學的子領域，致力於開發算法和統計模型，使計算機能夠通過經驗和數據進行學習和改進，而無需明確編程。其核心思想是利用數據驅動的方法來自動識別數據中的模式和趨勢，並據此進行預測或決策。機器學習技術廣泛應用於各種領域，如圖像識別、自然語言處理、推薦系統和自動駕駛等，並在人工智能發展中扮演關鍵角色。透過機器學習，計算機系統能夠從大量數據中學習，提升自身性能，從而解決複雜的問題並創造新的價值。

### 2.4.2 演算法

機器學習的演算法有很多種，以下為一些常見的機器學習演算法：



1. 邏輯回歸：1958 年由 David Cox[13]提出，用於處理二元分類問題，透過邏輯函數( sigmoid 函數 )將輸出轉換為 0 到 1 之間的數值，代表事件發生的機率，並藉由設定的閾值對概率值進行分類。
2. 決策樹與隨機森林：分別由 Quinlan, J.R.[14]最早於 1986 年及 Breiman, L.[15]於 2001 年提出。決策樹透過一系列分支條件來分割數據，隨機森林則是多個決策樹的集成，通過投票或平均來提高準確性和泛化能力。
3. XGBoost：2016 年由陳天奇[16]提出。XGBoost 是一種集成學習算法，透過依序訓練多個決策樹模型來提升預測性能。它透過最小化損失函數的梯度來訓練每棵樹，同時引入正則化項來控制模型複雜度，以防止過擬合。最終預測結果是基於所有樹的加權和，通過加強和改進單棵樹的預測能力來提升整體模型的性能。
4. Stacking：1992 年由 David H. Wolpert[17]提出。Stacking 是一種集成學習算法，通過將多個基模型的預測結果作為輸入，訓練一個次級模型( 元學習器 )來做最終預測。基模型可以是不同類型的算法，以獲得多樣性和更強的預測能力。元學習器通過學習基模型的預測誤差和關係，進一步優化最終預測結果，從而提高整體模型的性能。
5. 支持向量機 (SVM)：最早追溯到 1963 年由 Vladimir Vapnik 和 Alexey Chervonenkis 提出，1995 年 Cortes, C., Vapnik, V.[18] 對其進行了改進，並在



後續得到了廣泛的引用與關注。旨在高維空間中找到一個最優的分割超平面，使不同類別的數據點間間隔最大化，以提高分類的穩定性和泛化能力。

6. **k 近鄰算法 (k-NN)**: 概念最早於 1951 年由 Evelyn Fix 和 Joseph Hodges 提出，並由 T. Cover 等人[19]後續擴充。藉由統計與樣本最接近的  $k$  個已知數據點特性，進行分類或回歸預測。
7. **K-means** : 最早追溯到 1967 年，由 J. MacQueen 發表了一篇關於 K-means 算法的重要論文[20]。通過迭代將數據點劃分為  $k$  個類別，並使得每個數據點與其所屬類別的中心之間的平方距離最小化。
8. **主成分分析 (PCA)** : 最早由 Karl Pearson[21]於 1901 年提出。為一種數據降維算法，透過線性變換將數據投影到低維空間，並找到最大方差的方向。

在相關文獻中，已有許多利用影像辨識技術結合機器學習分析的方法，透過適當的特徵工程（特徵轉換、特徵提取、特徵建構、特徵選擇等等）與演算法預測骨材形狀，對比於傳統的量測方法，具有更好的準確性與適用範圍。

Sun, Z., et al.[22]對 17 種監督學習演算法進行特徵選擇，透過交叉驗證的方法選出最佳表現模型，發現大多數模型的平均準確度可以達到 90%以上。另外，該研究發現 3D 特徵的重要性高於大多數 2D 骨料輪廓特徵和幾何矩特徵。

Ren, Z., et al.[23]結果表示透過隨機森林改進的模擬篩分方法具有高精準性和穩定性，可達到超過 0.97 的準確度，加上利用 SMOTE 過採樣方法，可有效緩解數據不平衡的問題，並進一步提升準確率，達到接近 100%的準確度。

Feng, X., et al.[24]提出了基於 Per-Optuna-LightGBM 模型的粒料形狀分類方法，準確率達到 82.5%，相比 GS-XGBoost 而言，該模型可以更準確、更高效地分類粒料形狀。

綜合來說，本研究流程中使用的篩選特徵是透過實驗觀察而得的，最大誤差 9.65%，儘管精準度已達一定水準，仍具有進一步提升的潛力。眾多文獻表示，使用機器學習技術能有效提升預測準確性，後續研究工作可以考慮納入此技術優化改善整體性能。

### 第三章、試驗與拍攝



本研究涉及的粗粒料試驗有「粗粒料篩析法」及「粗粒料中扁平、細長或扁長顆粒含量試驗法」，透過此兩種試驗獲得真實的篩分析曲線和扁平、細長及扁長率，用於比較和校正預測值。拍攝部分透過動態攝影取得粒料照片，作為影像辨識的輸入資料。

#### 3.1 資料集

校正資料使用 4 種不同級配的試樣進行拍攝，見表 3.1-1。「六分石」級配及「三分石」級配乃直接採用預拌廠提供之六分石及三分石；「平均分佈」級配及「分散兩側」級配則是先進行篩分後，再取出各層所需顆粒數配製而成。其中每種級配配製 3 組，每組重複拍攝 3 次，故整個校正集資料共有 36 組，如式 3.1-1 所示。

表 3.1-2 展示了校正資料的命名規則，本文後續用其代號表示。

$$4 \text{ 種級配} \times 3 \text{ 組} \times 3 \text{ 次拍攝} = 36 \text{ 組} \quad \text{式 3.1-1}$$

表 3.1-1 校正資料各級配配置

|          | 3/4"  | 1/2"  | 3/8"  | #4    |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 「六分石」級配  | 六分石   |       |       |       |
| 「三分石」級配  | 三分石   |       |       |       |
| 「平均分佈」級配 | 200 顆 | 200 顆 | 200 顆 | 200 顆 |
| 「分散兩側」級配 | 300 顆 | 100 顆 | 100 顆 | 300 顆 |



表 3.1-2 校正資料命名規則

|          |     | 第一次      | 第二次      | 第三次      |
|----------|-----|----------|----------|----------|
| 「六分石」級配  | 第一組 | 6-1-1    | 6-1-2    | 6-1-3    |
|          | 第二組 | 6-2-1    | 6-2-2    | 6-2-3    |
|          | 第三組 | 6-3-1    | 6-3-2    | 6-3-3    |
| 「三分石」級配  | 第一組 | 3-1-1    | 3-1-2    | 3-1-3    |
|          | 第二組 | 3-2-1    | 3-2-2    | 3-2-3    |
|          | 第三組 | 3-3-1    | 3-3-2    | 3-3-3    |
| 「平均分佈」級配 | 第一組 | ave-1-1  | ave-1-2  | ave-1-3  |
|          | 第二組 | ave-2-1  | ave-2-2  | ave-2-3  |
|          | 第三組 | ave-3-1  | ave-3-2  | ave-3-3  |
| 「分散兩側」級配 | 第一組 | side-1-1 | side-1-2 | side-1-3 |
|          | 第二組 | side-2-1 | side-2-2 | side-2-3 |
|          | 第三組 | side-3-1 | side-3-2 | side-3-3 |

測試資料使用預拌廠提供之六分石及三分石，並混雜了 1”與#8 尺寸之顆粒以增加隨機性與複雜度，自由混合調配了 3 組，每組重複拍攝 2 次，共有 6 組資料，如式 3.1-2 所示。表 3.1-4 展示了測試資料的命名規則，本文後續用其代號表示。

$$3 \text{ 組任意級配} \times 2 \text{ 次拍攝} = 6 \text{ 組} \quad \text{式 3.1-2}$$

表 3.1-3 測試資料級配配置

|      |        |      |      |      |    |    |
|------|--------|------|------|------|----|----|
|      | 1”     | 3/4” | 1/2” | 3/8” | #4 | #8 |
| 測試級配 | 自由混合調配 |      |      |      |    |    |

表 3.1-4 測試資料命名規則

|      |     | 第一次      | 第二次      |
|------|-----|----------|----------|
| 測試級配 | 第一組 | test-1-1 | test-1-2 |
|      | 第二組 | test-2-1 | test-2-2 |
|      | 第三組 | test-3-1 | test-3-2 |

## 3.2 粗粒料篩析法

### 3.2.1 器材

1. 機械式搖篩機：藉由機械運動(如振動、往復運動)使粒料通過篩網進行篩分。  
篩網的孔徑決定了可以通過的顆粒大小，較大的顆粒會被保留在篩孔較大的篩網上，如此以實現粒料的分類與篩選。
2. 試驗篩：本研究使用符合 CNS 386 Z7008[25]規格的篩網，尺寸有 $1\frac{1}{2}$ ”、1”、  
3/4”、1/2”、3/8”、#4。
3. 烘箱：最高溫度可達約 900°C，並能控溫於 110±5°C。

### 3.2.2 試驗流程

本研究針對不同級配的試驗流程有些許差異，見下 3.2.2.1、3.2.2.2 及 3.2.2.3。



### 3.2.2.1 「六分石」級配、「三分石」級配試驗流程

1. 本研究分別對六分石、三分石各取樣三組，一共六組粗粒料試樣，六分石每組取約 5kg，惟三分石因受限於影像辨識軟體及電腦設備的規格，在辨識顆粒數量上存在限制，故每組只取約 1kg。
2. 將試樣置於烘箱中，以  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$  烘乾至恆重。
3. 將試驗篩按大小由上至下放入機械式搖篩機，每組試樣搖篩 15 分鐘。
4. 搖篩結束後各層取出計算顆粒數與秤重，並只考慮 3/4”、1/2”、3/8”、#4 之篩網，其餘忽略不計。
5. 完成累計顆粒數百分比與累計重量百分比表格。

### 3.2.2.2 「平均分佈」級配、「分散兩側」級配試驗流程

1. 任意以六分石及三分石配製試樣，使其粒料大小涵蓋在 3/4”、1/2”、3/8”、#4 範圍區間。為確保所有顆粒能在試驗中接觸到篩孔多次，並防止試驗篩過載造成變形，每次配製約 5kg 的量。
2. 將試樣置於烘箱中，以  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$  烘乾至恆重。
3. 將試驗篩按大小由上至下放入機械式搖篩機，每組試樣搖篩 15 分鐘。
4. 搖篩結束後，各層取出配製「平均分佈」級配、「分散兩側」級配所需之顆粒數量，見表 3.1-1，秤其重並完成累計顆粒數百分比與累計重量百分比表格。



如遇顆粒數量不足配製所需，則需重複 1~3 步驟，直到足夠為止。本研究分別對「平均分佈」、「分散兩側」級配各配製三組，一共六組粗粒料試樣。

### 3.2.2.3 測試集級配試驗流程

1. 測試集資料任意配製三組粗粒料試樣，當中除了任意參雜六分石及三分石之外，還添加 1”及#8 篩尺寸顆粒以增加隨機性與複雜度，每組配製約 5kg，受限於影像辨識軟體在辨識顆粒數量上的限制，故每組拆分成兩次試驗，再將結果合併。
2. 後續流程同 3.2.2.1 的 2~5。

### 3.2.3 試驗結果

校正集試驗結果見下表 3.2-1~表 3.2-12：

表 3.2-1 「六分石」級配第一組篩分析試驗結果

| 篩號公制<br>( mm ) | 篩號英制<br>( 英吋 ) | 留篩顆粒數<br>( 顆 ) | 顆粒數過篩百分率<br>( % ) | 留篩重量<br>( kg ) | 重量過篩百分率<br>( % ) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|
| 25.0           | 1              | -              | 100               | -              | 100              |
| 19.0           | 3/4            | 83             | 88.98             | 1.020          | 79.79            |
| 12.5           | 1/2            | 548            | 16.20             | 3.760          | 5.31             |
| 9.5            | 3/8            | 83             | 5.18              | 0.240          | 0.55             |
| 4.75           | #4             | 39             | 0                 | 0.028          | 0                |
| base           | base           | -              | -                 | -              | -                |



表 3.2-2 「六分石」級配第二組篩分析試驗結果

| 篩號公制<br>( mm ) | 篩號英制<br>( 英吋 ) | 留篩顆粒數<br>( 顆 ) | 顆粒數過篩百分率<br>( % ) | 留篩重量<br>( kg ) | 重量過篩百分率<br>( % ) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|
| 25.0           | 1              | -              | 100               | -              | 100              |
| 19.0           | 3/4            | 93             | 86.71             | 1.250          | 75.29            |
| 12.5           | 1/2            | 511            | 13.71             | 3.640          | 3.34             |
| 9.5            | 3/8            | 51             | 6.43              | 0.137          | 0.63             |
| 4.75           | #4             | 45             | 0                 | 0.032          | 0                |
| base           | base           | -              | -                 | -              | -                |

表 3.2-3 「六分石」級配第三組篩分析試驗結果

| 篩號公制<br>( mm ) | 篩號英制<br>( 英吋 ) | 留篩顆粒數<br>( 顆 ) | 顆粒數過篩百分率<br>( % ) | 留篩重量<br>( kg ) | 重量過篩百分率<br>( % ) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|
| 25.0           | 1              | -              | 100               | -              | 100              |
| 19.0           | 3/4            | 93             | 85.80             | 1.240          | 75.39            |
| 12.5           | 1/2            | 506            | 8.55              | 3.670          | 2.54             |
| 9.5            | 3/8            | 41             | 2.29              | 0.114          | 0.28             |
| 4.75           | #4             | 15             | 0                 | 0.014          | 0                |
| base           | base           | -              | -                 | -              | -                |

表 3.2-4 「三分石」級配第一組篩分析試驗結果

| 篩號公制<br>( mm ) | 篩號英制<br>( 英吋 ) | 留篩顆粒數<br>( 顆 ) | 顆粒數過篩百分率<br>( % ) | 留篩重量<br>( kg ) | 重量過篩百分率<br>( % ) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|
| 25.0           | 1              | -              | 100               | -              | 100              |
| 19.0           | 3/4            | 0              | 100               | 0              | 100              |
| 12.5           | 1/2            | 63             | 92.95             | 0.290          | 71               |
| 9.5            | 3/8            | 131            | 78.30             | 0.320          | 39               |
| 4.75           | #4             | 700            | 0                 | 0.390          | 0                |
| base           | base           | -              | -                 | -              | -                |

表 3.2-5 「三分石」級配第二組篩分析試驗結果

| 篩號公制<br>( mm ) | 篩號英制<br>( 英吋 ) | 留篩顆粒數<br>( 顆 ) | 顆粒數過篩百分率<br>( % ) | 留篩重量<br>( kg ) | 重量過篩百分率<br>( % ) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|
| 25.0           | 1              | -              | 100               | -              | 100              |
| 19.0           | 3/4            | 0              | 100               | 0              | 100              |
| 12.5           | 1/2            | 61             | 92.82             | 0.290          | 71.57            |
| 9.5            | 3/8            | 162            | 73.76             | 0.350          | 37.25            |
| 4.75           | #4             | 627            | 0                 | 0.380          | 0                |
| base           | base           | -              | -                 | -              | -                |

表 3.2-6 「三分石」級配第三組篩分析試驗結果

| 篩號公制<br>( mm ) | 篩號英制<br>( 英吋 ) | 留篩顆粒數<br>( 顆 ) | 顆粒數過篩百分率<br>( % ) | 留篩重量<br>( kg ) | 重量過篩百分率<br>( % ) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|
| 25.0           | 1              | -              | 100               | -              | 100              |
| 19.0           | 3/4            | 0              | 100               | 0              | 100              |
| 12.5           | 1/2            | 80             | 89.78             | 0.360          | 65.71            |
| 9.5            | 3/8            | 175            | 67.43             | 0.370          | 30.48            |
| 4.75           | #4             | 528            | 0                 | 0.320          | 0                |
| base           | base           | -              | -                 | -              | -                |

表 3.2-7 「平均分佈」級配第一組篩分析試驗結果

| 篩號公制<br>( mm ) | 篩號英制<br>( 英吋 ) | 留篩顆粒數<br>( 顆 ) | 顆粒數過篩百分率<br>( % ) | 留篩重量<br>( kg ) | 重量過篩百分率<br>( % ) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|
| 25.0           | 1              | -              | 100               | -              | 100              |
| 19.0           | 3/4            | 200            | 75                | 2.750          | 45.33            |
| 12.5           | 1/2            | 200            | 50                | 1.520          | 15.11            |
| 9.5            | 3/8            | 200            | 25                | 0.580          | 3.58             |
| 4.75           | #4             | 200            | 0                 | 0.180          | 0                |
| base           | base           | -              | -                 | -              | -                |

表 3.2-8 「平均分佈」級配第二組篩分析試驗結果

| 篩號公制<br>( mm ) | 篩號英制<br>( 英吋 ) | 留篩顆粒數<br>( 顆 ) | 顆粒數過篩百分率<br>( % ) | 留篩重量<br>( kg ) | 重量過篩百分率<br>( % ) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|
| 25.0           | 1              | -              | 100               | -              | 100              |
| 19.0           | 3/4            | 200            | 75                | 2.660          | 47.58            |
| 12.5           | 1/2            | 200            | 50                | 1.670          | 14.67            |
| 9.5            | 3/8            | 200            | 25                | 0.610          | 2.64             |
| 4.75           | #4             | 200            | 0                 | 0.134          | 0                |
| base           | base           | -              | -                 | -              | -                |

表 3.2-9 「平均分佈」級配第三組篩分析試驗結果

| 篩號公制<br>( mm ) | 篩號英制<br>( 英吋 ) | 留篩顆粒數<br>( 顆 ) | 顆粒數過篩百分率<br>( % ) | 留篩重量<br>( kg ) | 重量過篩百分率<br>( % ) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|
| 25.0           | 1              | -              | 100               | -              | 100              |
| 19.0           | 3/4            | 200            | 75                | 2.630          | 47.73            |
| 12.5           | 1/2            | 200            | 50                | 1.660          | 14.73            |
| 9.5            | 3/8            | 200            | 25                | 0.530          | 4.20             |
| 4.75           | #4             | 200            | 0                 | 0.211          | 0                |
| base           | base           | -              | -                 | -              | -                |

表 3.2-10 「分散兩側」級配第一組篩分析試驗結果

| 篩號公制<br>( mm ) | 篩號英制<br>( 英吋 ) | 留篩顆粒數<br>( 顆 ) | 顆粒數過篩百分率<br>( % ) | 留篩重量<br>( kg ) | 重量過篩百分率<br>( % ) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|
| 25.0           | 1              | -              | 100               | -              | 100              |
| 19.0           | 3/4            | 300            | 62.5              | 3.920          | 24.64            |
| 12.5           | 1/2            | 100            | 50                | 0.840          | 8.50             |
| 9.5            | 3/8            | 100            | 37.5              | 0.260          | 3.50             |
| 4.75           | #4             | 300            | 0                 | 0.182          | 0                |
| 底盤             | 底盤             | -              | -                 | -              | -                |

表 3.2-11 「分散兩側」級配第二組篩分析試驗結果

| 篩號公制<br>( mm ) | 篩號英制<br>( 英吋 ) | 留篩顆粒數<br>( 顆 ) | 顆粒數過篩百分率<br>( % ) | 留篩重量<br>( kg ) | 重量過篩百分率<br>( % ) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|
| 25.0           | 1              | -              | 100               | -              | 100              |
| 19.0           | 3/4            | 300            | 62.5              | 3.820          | 23.76            |
| 12.5           | 1/2            | 100            | 50                | 0.770          | 8.39             |
| 9.5            | 3/8            | 100            | 37.5              | 0.230          | 3.80             |
| 4.75           | #4             | 300            | 0                 | 0.190          | 0                |
| base           | base           | -              | -                 | -              | -                |

表 3.2-12 「分散兩側」級配第三組篩分析試驗結果

| 篩號公制<br>( mm ) | 篩號英制<br>( 英吋 ) | 留篩顆粒數<br>( 顆 ) | 顆粒數過篩百分率<br>( % ) | 留篩重量<br>( kg ) | 重量過篩百分率<br>( % ) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|
| 25.0           | 1              | -              | 100               | -              | 100              |
| 19.0           | 3/4            | 300            | 62.5              | 4.300          | 21.48            |
| 12.5           | 1/2            | 100            | 50                | 0.780          | 7.23             |
| 9.5            | 3/8            | 100            | 37.5              | 0.250          | 2.67             |
| 4.75           | #4             | 300            | 0                 | 0.146          | 0                |
| base           | base           | -              | -                 | -              | -                |

測試集試驗結果見第五章、分析結果與討論的表 5.1-1、表 5.1-4、表 5.1-7：

### 3.3 粗粒料中扁平、細長或扁長顆粒含量試驗法

#### 3.3.1 器材

1. 比例測徑器：用於量測並判斷扁平、細長和扁長顆粒之儀器，其原理乃透過幾何相似性質，檢核粒料遮之長短邊比例是否能通過規定比例。

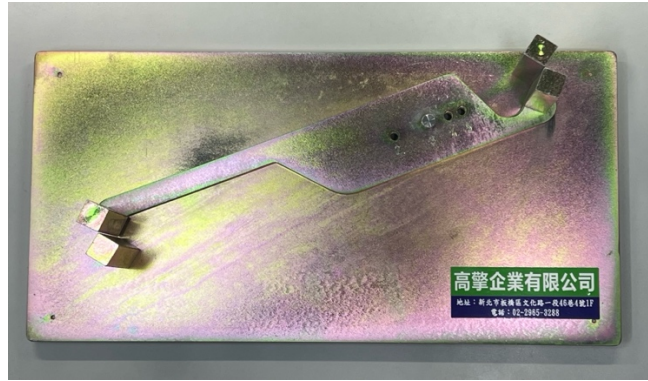


圖 3.3-1 比例測徑器照片

2. 磅秤：精度可達小數點後第 4 位（單位：克）。
3. 烘箱：最高溫度可達約  $900^{\circ}\text{C}$ ，並能控溫於  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.3.2 試驗流程

1. 將試樣放置於烘箱中，以  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$  烘乾至恆重。
2. 根據規範 CNS15171[3]，各篩號停留之顆粒數若超過 100 顆者，隨機抽樣 100 顆進行扁平、細長、扁長顆粒含量試驗。
3. 扁平顆粒含量試驗：使用比例測徑器，選擇並固定比例支點（可設置 1:2、1:3、1:4 和 1:5），利用支點遠端的固定柱和可調臂夾住粒料寬度，於近端開口檢驗其厚度是否能通過設定之比例（本研究採用 1:5），若否，該顆粒視為扁平顆粒。
4. 細長顆粒含量試驗：相似於上述步驟 3，選擇並固定比例支點（可設置 1:2、1:3、1:4 和 1:5），利用支點遠端的固定柱和可調臂夾住粒料長度，於近端開



- 口檢驗其寬度是否能通過設定之比例（本研究採用 1:5），若否，該顆粒視為細長顆粒。
5. 扁長顆粒含量試驗：相似於步驟步驟 3，選擇並固定比例支點（可設置 1:2、1:3、1:4 和 1:5），利用支點遠端的固定柱和可調臂夾住粒料長度，於近端開口檢驗其厚度是否能通過設定之比例（本研究採用 1:5），若否，該顆粒視為扁長顆粒。
6. 各篩號與整體的扁平、細長、扁長率，由式 3.3-1 及式 3.3-2 計算而得。

$$P_i(\%) = \frac{U_i}{U_n} \times 100 \quad \text{式 3.3-1}$$

其中： $P_i$  為各篩號之扁平、細長、扁長顆粒數量百分比(%)； $U_i$  為各篩號扁平、細長、扁長顆粒之數量(顆)； $U_n$  為各篩號試驗顆粒之總數(顆)

$$Q_i(\%) = \sum(S_i \times P_i)/100 \quad \text{式 3.3-2}$$

其中： $Q_i$  為整體之扁平、細長、扁長顆粒數量百分比(%)； $S_i$  為各篩號留篩顆粒數百分比(%)。

### 3.3.3 試驗結果

校正集試驗結果見下表 3.3-1 ~ 表 3.3-12：

表 3.3-1 「六分石」級配第一組扁平、扁長、細長率試驗結果

|      | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4" | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2" | 0.00           | 2.00           | 0.00           |
| 3/8" | 2.41           | 3.61           | 0.00           |

|       |      |      |      |
|-------|------|------|------|
| #4    | 0.00 | 5.13 | 0.00 |
| total | 0.27 | 2.12 | 0.00 |

表 3.3-2 「六分石」級配第二組扁平、扁長、細長率試驗結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 1.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 0.00           | 5.88           | 0.00           |
| #4    | 0.00           | 4.44           | 0.00           |
| total | 0.00           | 1.44           | 0.00           |

表 3.3-3 「六分石」級配第三組扁平、扁長、細長率試驗結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 2.38           | 14.29          | 0.00           |
| #4    | 0.00           | 13.33          | 0.00           |
| total | 0.15           | 1.20           | 0.00           |

表 3.3-4 「三分石」級配第一組扁平、扁長、細長率試驗結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 1.59           | 3.17           | 0.00           |
| 3/8"  | 0.00           | 5.00           | 0.00           |
| #4    | 0.00           | 4.00           | 0.00           |
| total | 0.11           | 4.09           | 0.00           |

表 3.3-5 「三分石」級配第二組扁平、扁長、細長率試驗結果

|      | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4" | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2" | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 3/8" | 2.00           | 7.00           | 0.00           |
| #4   | 0.00           | 6.00           | 0.00           |

|       |      |      |      |
|-------|------|------|------|
| total | 0.38 | 5.76 | 0.00 |
|-------|------|------|------|

表 3.3-6 「三分石」級配第三組扁平、扁長、細長率試驗結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 2.50           | 0.00           |
| 3/8"  | 0.00           | 6.00           | 0.00           |
| #4    | 0.00           | 5.00           | 0.00           |
| total | 0.00           | 4.97           | 0.00           |

表 3.3-7 「平均分佈」級配第一組扁平、扁長、細長率試驗結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 1.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 0.00           | 5.00           | 0.00           |
| #4    | 1.00           | 4.00           | 0.00           |
| total | 0.25           | 2.50           | 0.00           |

表 3.3-8 「平均分佈」級配第二組扁平、扁長、細長率試驗結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 1.00           | 2.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 2.00           | 4.00           | 0.00           |
| #4    | 1.00           | 3.00           | 0.00           |
| total | 1.00           | 2.25           | 0.00           |

表 3.3-9 「平均分佈」級配第三組扁平、扁長、細長率試驗結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 1.00           | 1.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 1.00           | 4.00           | 0.00           |
| #4    | 0.00           | 2.00           | 0.00           |
| total | 0.50           | 1.75           | 0.00           |

表 3.3-10 「分散兩側」級配第一組扁平、扁長、細長率試驗結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 2.00           | 4.00           | 0.00           |
| #4    | 2.00           | 4.00           | 0.00           |
| total | 1.00           | 2.00           | 0.00           |

表 3.3-11 「分散兩側」級配第二組扁平、扁長、細長率試驗結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 1.00           | 0.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 2.00           | 3.00           | 0.00           |
| #4    | 1.00           | 4.00           | 0.00           |
| total | 0.75           | 1.88           | 0.00           |

表 3.3-12 「分散兩側」級配第三組扁平、扁長、細長率試驗結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 1.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 3.00           | 3.00           | 0.00           |
| #4    | 2.00           | 3.00           | 0.00           |
| total | 1.13           | 1.63           | 0.00           |

測試集試驗結果見第五章、分析結果與討論的表 5.2-1、表 5.2-4、表 5.2-7：



## 3.4 影像拍攝

### 3.4.1 器材

影像拍攝使用的器材有：分流板×1、儲料槽×1、擋板×1、棉線×1、鐵架×1、背板×1、高速攝影機×1、腳架×1、燈源×1。

1. 分流板：尺寸為上底 30cm，下底 60cm，高為 60cm 的等腰梯形，似彈珠台原理，具有分離粒料的作用，見圖 3.4-1。

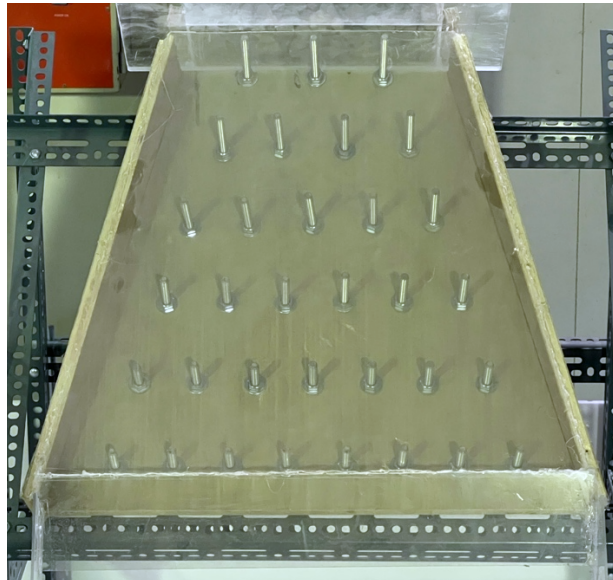


圖 3.4-1 分流板照片

2. 儲料槽：位於分流板上方，旨在確保所有試樣粒料一起落下以模擬真實情況，減少因人為施放速度不同產生的影響，見圖 3.4-2。

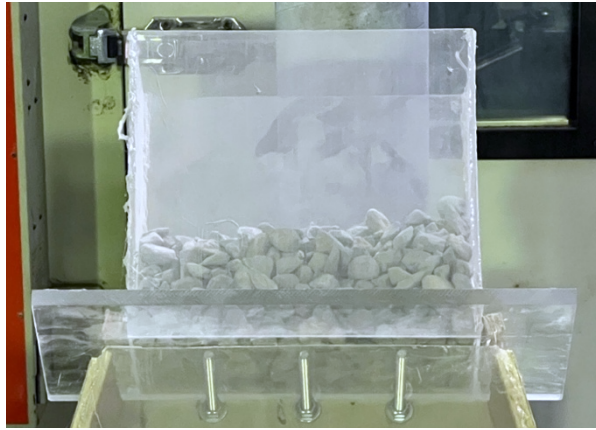


圖 3.4-2 儲料槽與擋板照片

3. 擋板：採取抽離式設計，放置於儲料槽與分流板之間，用於阻擋儲料槽之粒料落下，見圖 3.4-2。
4. 棉線：架設於粒料落下之平面上，為影像辨識提供真實之比例尺，見圖 3.4-3。



圖 3.4-3 棉線照片

5. 鐵架：用於調控分流板至適當高度與角度，見圖 3.4-4。



圖 3.4-4 鐵架照片

6. 背板：用以增加粒料與背景間的對比度，有助於提升影像辨識成功率，見圖 3.4-5。

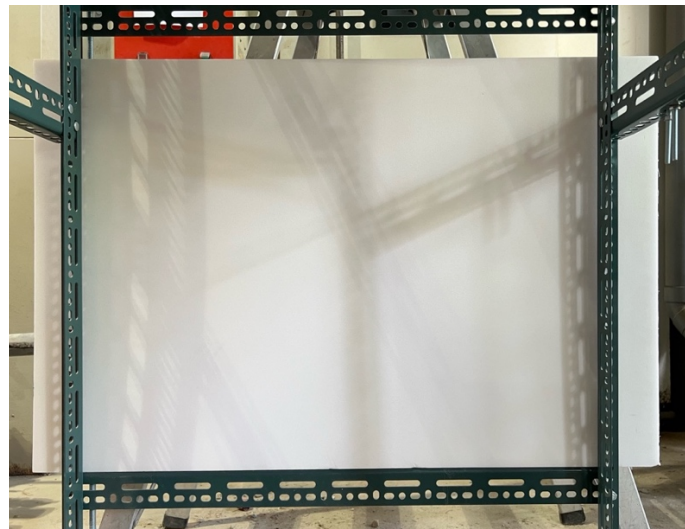


圖 3.4-5 背板照片

7. 高速攝影機：型號為 PROMON U750 Color，在 800×600 pixel 下，最高能達 511 幀/秒，圖 3.4-6。



圖 3.4-6 PROMON U750 Color 高速攝影機照片

8. 腳架：用於調控高速攝影機至適當高度與角度，見圖 3.4-7。



圖 3.4-7 腳架照片

9. 燈源：300 瓦不頻閃的白光，解決了由於拍攝條件限制需要較快的快門速度和較小的光圈，導致進光量不足的問題，見圖 3.4-8。



圖 3.4-8 300W 燈源照片

### 3.4.2 拍攝流程

校正資料與測試資料皆採用下述方式進行拍攝。

#### 3.4.2.1 拍攝環境建置

1. 將分流板放置於鐵架上，調整至適當高度與角度，並將背板固定於鐵架後。
2. 利用左右穿出之螺桿，將棉線固定於粒料落下處，並利用奇異筆標註適當距離作為真實比例尺，如圖 3.4-3。本研究比例尺採用 10cm。
3. 將高速攝影機安裝於腳架上，放置於適當距離(本研究放置距離約為 1.5m)，調整至適當高度與角度，使影像畫面能涵蓋所有落下範圍，並調整攝影機之光圈與焦段至適當數值。注意盡量控制光圈於較小數值，得以讓景深變深，對焦主



體以外的背景或前景不容易變模糊，可以有效確保粒料前後重疊時，畫面依然能保持清晰。

4. 將燈源放置於攝影機後方，調整方向使其打向背板中央。

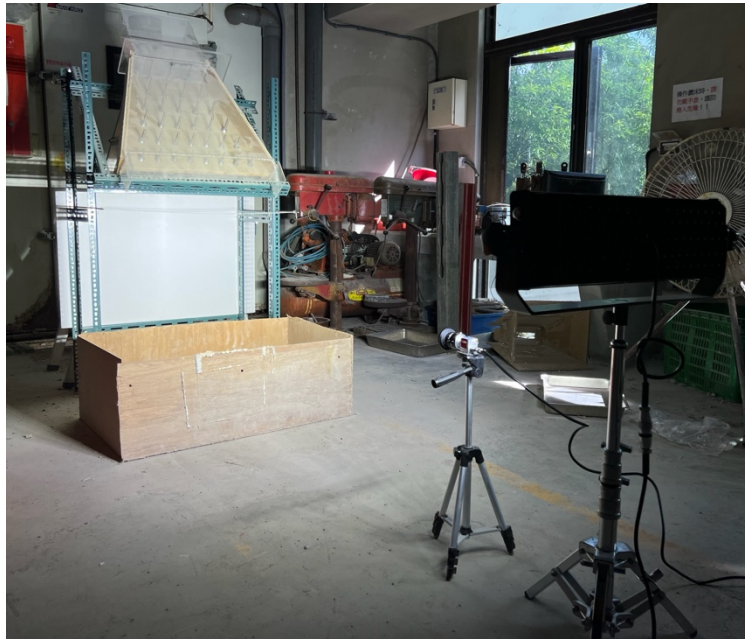


圖 3.4-9 拍攝環境

### 3.4.2.2 AIS v4.9.1.2 操作

1. 開啟影像拍攝軟體 AIS v4.9.1.2，選用適當的「圖像格式」，以能涵蓋所有粒料落下之路徑為主，本研究採用 800\*600 畫素大小。
2. 本研究「幀率」設定為 250 幀/秒，過低容易造成顆粒資訊量不足，過高則會提高運算的時間成本。
3. 本研究「曝光時間」設定為 500 us，過低容易造成照片亮度不足，過高顆粒則會產生拖影。

4. 按下綠色錄製按鍵後，迅速抽離儲料槽與分流板間之擋板，待粒料全部落下後再按紅色停止按鍵。
5. 點擊軟體內建「自動亮度」功能，調整照片參數至可用範圍，提升後續辨識成功率。
6. 使用「Set current Frame as "Mark In Frame"」及「Set current Frame as "Mark Out Frame"」功能，擷取畫面中段粒料出現的片段。
7. 將影片以 bmp 檔儲存供影像辨識時使用。

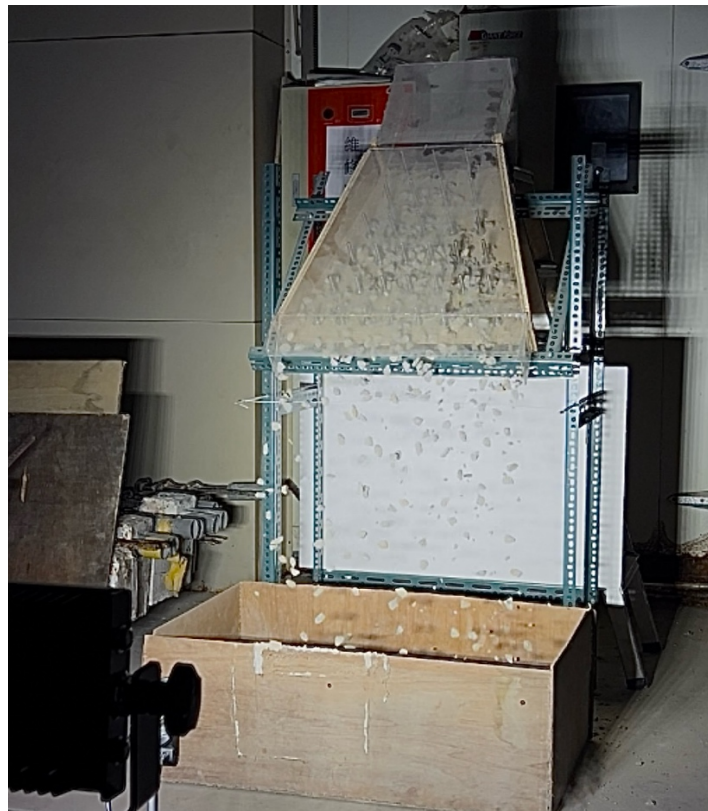


圖 3.4-10 動態拍攝過程

## 第四章、分析計畫與方法



### 4.1 分析計畫背景

一般來說，預拌廠之儲料槽在進行粒料補充時，通常會殘留一些上一批的粒料。傳統上為了評估儲料槽內之粒料品質，採用人工的方式進行粗粒料篩析法及粗粒料中扁平、細長或扁長顆粒含量試驗法，以取得粒徑分佈及扁平、扁長與細長率，但這些方法既費工又費時，還存在人工量測誤差的問題，因此，尋找一種高效且準確的方法來替代傳統手工操作就顯得尤為重要。本研究希望透過數位影像辨識與動態攝影，建立起一套自動化分析系統，藉由適當的篩選與計算，即時預測級配曲線與扁平、細長、扁長率。

本研究不同於其他文獻的是，透過動態高速攝影獲得粒料資訊，這不僅解決了傳統文獻在拍攝前需要人工分離粒料的問題，同時在自動化流程方面也有顯著的幫助。透過此研究，能更有效地提高生產效率和品質控制水平，並進一步推動了相關土木領域的技術進步和應用創新。

### 4.2 影像辨識

本研究採用影像辨識軟體 Image-Pro Plus 6.0 進行影像分析，以獲得每顆粒料的平面特徵資料。



#### 4.2.1 特徵篩選

為了確保影像辨識軟體在辨識時不會超負荷運作而異常退出，同時希望有效縮短分析時間以提升方法實用性和可行性，本研究在影像辨識軟體 Image-Pro Plus 6.0 中設定「Area」和「Perimeter」的範圍值以進行初步篩選，見 4.2.2 的步驟 4。透過排除一定數值範圍外的物體，能初步過濾掉尺寸過大及過小的顆粒，減少後續運算處理時間，從圖 4.2.1 和圖 4.2.2 的比較可以看出，能夠濾除掉許多陰影小點與過大的重疊粒料，成效顯著。

在設定範圍值時需要注意的是，過窄的範圍可能導致一些本應計算的顆粒被排除掉；相反地，過寬的範圍則可能顯著增加分析時間，甚至可能造成影像辨識軟體無法負荷，導致運行異常終止。

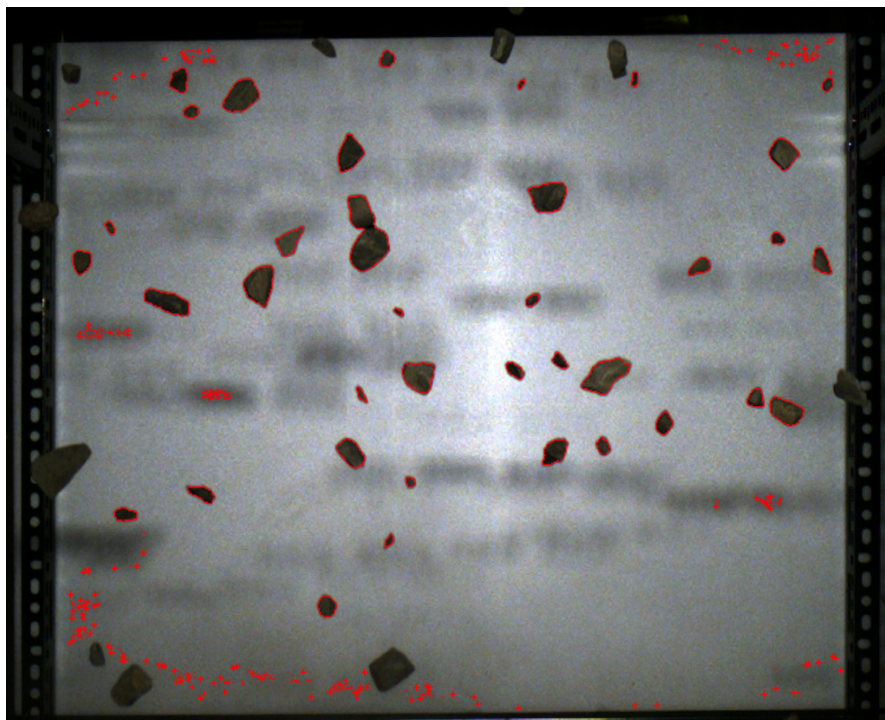


圖 4.2-1 未初步篩選之辨識結果

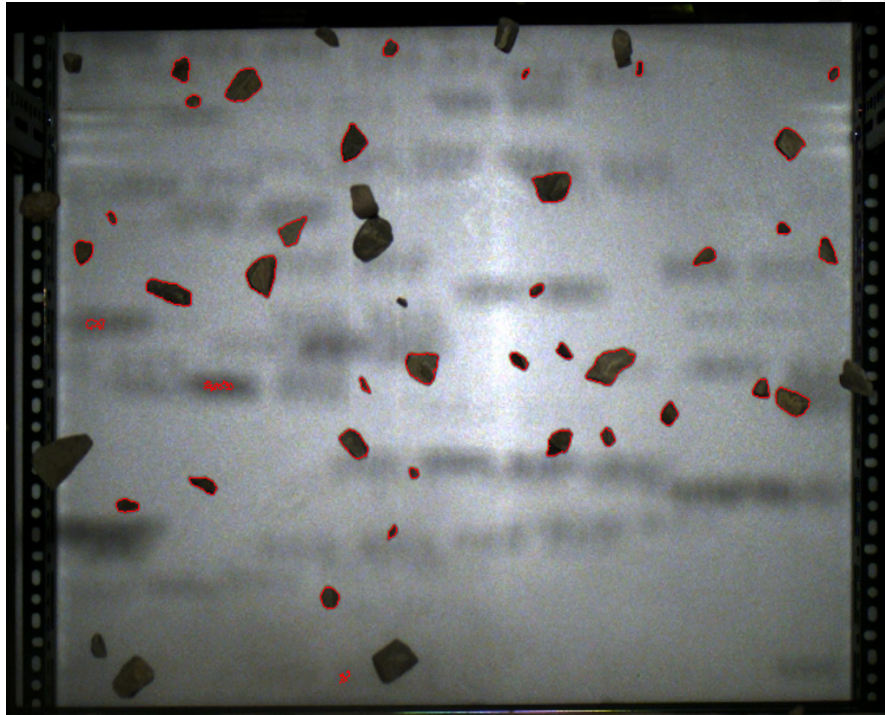


圖 4.2-2 有初步篩選之辨識結果

#### 4.2.2 Image-Pro Plus 6.0 操作

1. 導入影像：「Sequence」→「Merge Files」
2. 設定比例尺：「Measure」→「Calibration」→「Spatial」→「New」→Unit 選擇「centimeters」→「Image」→拖移圖中標線使其與比例尺重合→「Scaling」  
視窗輸入真實比例尺長度（本研究採用 10cm）→「Apply」

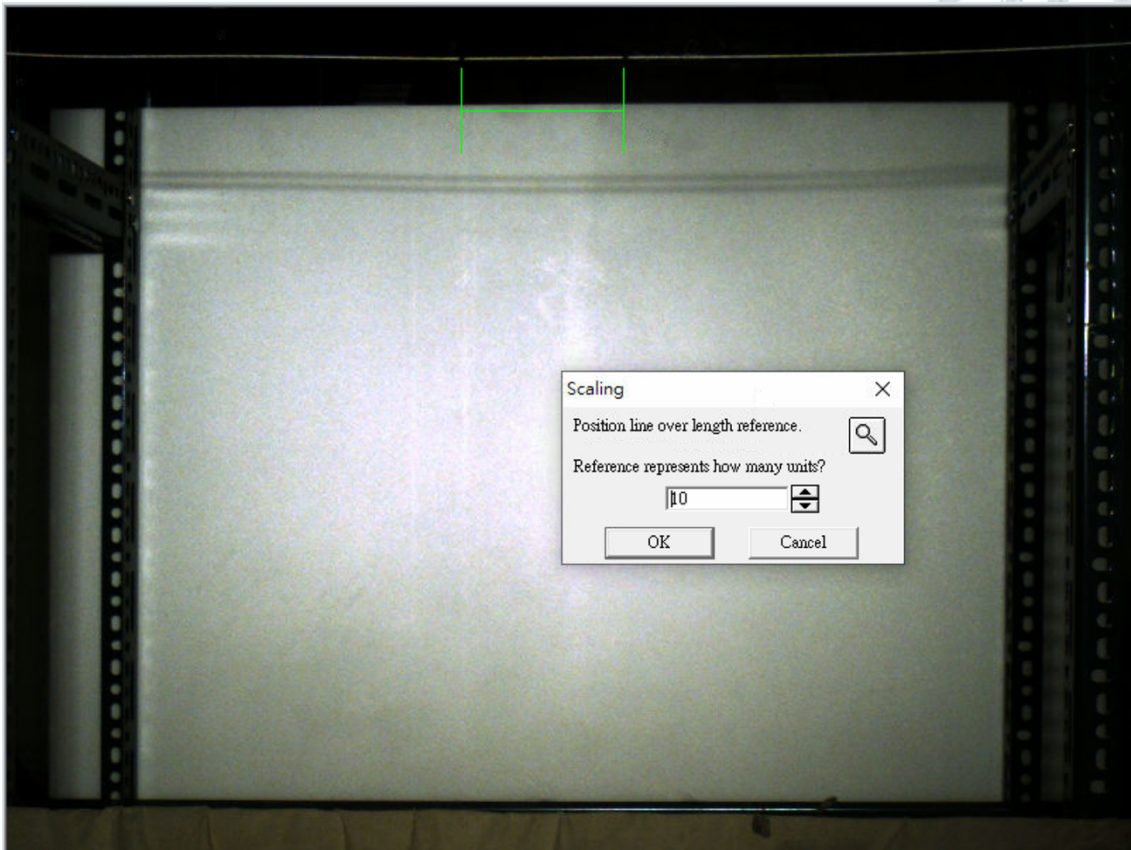


圖 4.2-3 比例尺設定操作

3. 設定讀取特徵：「Measure」→「Track Objects」→「Tracking option」→Statistical fields 選擇「Values」→Measurement 選用「Area」、「Box Height」、「Box Width」、「Density(mean)」、「Ferret(max)」、「Perimeter」、「Perimeter(ratio)」、「Size(width)」
4. 設定特徵範圍值：「Tracking Data Table」視窗點選「Find all tracks automatically」→「Measure」→「Select Measurements」→選用與步驟 3 相同之 Measurement→將「Area」的 Filter Range 設定為[0.1128125,7.25805]，「Perimeter」的 Filter Range 設定為[1.492256,11.96947]進行初步篩選，以確保影像辨識軟體能正常



運作為原則，注意範圍過小可能會導致應被計算的顆粒被排除；其他特徵的

Filter Range 設定愈廣泛愈好，以不產生過濾效果為原則。

5. 進行辨識：「Tracking」視窗點選「Continue」→「Check outlines」視窗點選「Y」

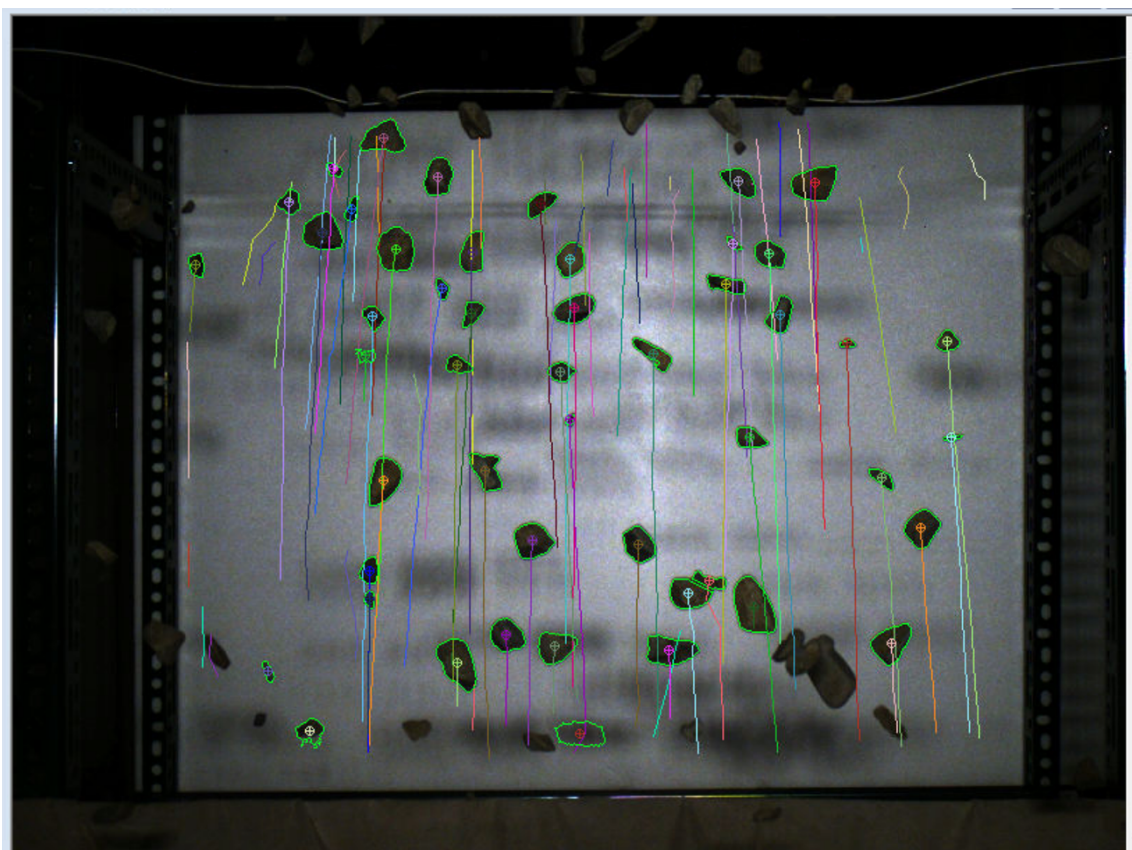


圖 4.2-4 影像辨識完成結果

6. 輸出 excel 檔：「Tracking Data Table」視窗點選「Export table」

### 4.2.3 資料集

同 3.1，使用的資料集有校正資料和測試資料兩部分，兩者均採用相同的影像辨識流程。



## 4.3 程式碼

本研究程式碼分為「篩選」與「預測」兩部分，透過一定的篩選與運算邏輯分析影像辨識的特徵資料，並預測粒徑分佈及扁平、扁長和細長率。

1. 篩選部分：有別於傳統文獻在拍攝前會人工分離粒料，本研究採用動態拍攝的手法，直接捕捉大量粒料掉落的瞬間，故不可避免產生「粒料重疊」與「陰影誤判」之情形。因此在實際預測級配曲線及扁平、扁長和細長率之前，尚須排除這些問題資料，否則容易影響預測結果。
2. 預測部分：本研究預測部分分為「篩分析」及「扁平、扁長和細長率」兩部分。  
「篩分析」運算選擇使用影像辨識特徵「Box Height」和「Box Width」；「扁平、扁長、細長率」運算選擇使用影像辨識特徵「Ferret(max)」和「Size(width)」，細節詳述於 4.3.3 與 4.3.4。

### 4.3.1 特徵篩選

本研究透過實驗觀察選定使用影像辨識特徵「Perimeter(ratio)」與「Density(mean)」及自定義的「Data\_quantity」進行後續篩選分析，其中「Perimeter(ratio)」與「Density(mean)」各自延伸出兩個準則與變量，相關定義詳述如下：

1. 根據 Image-Pro Plus 6.0，Perimeter(ratio)定義為「凸多邊形周長與周長之間之比值」，參考圖 4.3-1 中的綠色邊長除以紅色邊長，其數值介於 0 與 1 之間。



本研究根據  $Perimeter(ratio)$  延伸出兩個判定準則與變量，在本文後續以「 $P\_overlap$ 」及「 $P\_ratio$ 」稱之。

- i.  $P\_overlap$  為「判定重疊顆粒的閾值」，當  $Perimeter(ratio)$  數值小於其值時視為重疊情形發生，見表 4.3-1。本研究經過實驗觀察發現不論粒料大小與扁平程度為何，其形狀多為近似於橢圓或圓形的凸多邊形。然而，重疊的粒料卻容易以凹多邊形的形式出現。基於此邏輯，本研究認為  $Perimeter(ratio)$  小於某一定數值時，該粒料影像高機率為重疊影像，如圖 4.3-1 之紅色邊長有機率被視為兩顆粒料重疊。

表 4.3-1 重疊顆粒判定準則

| 條件                              | 結果   |
|---------------------------------|------|
| $Perimeter(ratio) < P\_overlap$ | 重疊顆粒 |
| $Perimeter(ratio) > P\_overlap$ | 正常顆粒 |

- ii.  $P\_ratio$  為「濾除重疊顆粒的閾值」，當該顆粒重疊總數比大於其值時將剔除該顆粒不納入後續計算，見式 4.3-1 與表 4.3-2。本研究為了保持一定的辨識容錯率，設定重疊照片的數量需超過總數的一定比例，才能將該顆粒排除不列入計算。

$$\text{重疊總數比} = \text{重疊顆粒照片數} / \text{總照片數} \quad \text{式 4.3-1}$$



表 4.3-2 重疊顆粒剔除準則

| 條件                 | 結果   |
|--------------------|------|
| 重疊總數比 $< P\_ratio$ | 納入計算 |
| 重疊總數比 $> P\_ratio$ | 剔除計算 |



圖 4.3-1 Image pro Plus 6.0 之 Perimeter(ratio)定義示意圖

2. 根據 Image-Pro Plus 6.0，Density(mean)定義為「物體平均光密度」，它描述了光線通過某種介質或物體時的衰減程度。本研究根據 Density(mean)延伸出兩個判定準則與變量，在本文後續以「D\_shadow」及「D\_ratio」稱之。
  - i. D\_shadow 為「判定陰影顆粒的閾值參數」，見表 4.3-3。利用粒料本身與陰影為不同介質之特性區分兩者，透過實驗觀察發現單張照片裡所有辨識物件的 Density(mean)呈現 M 型分佈，且陰影之平均光密度明顯高於真正粒料，故藉此方法可排除被錯誤認定為粒料之陰影。並且考慮到實驗燈光條件與粒料組成成分存在變化，為擴展研究的應用範圍與寬容度，將平均值及標準差納入考量。



表 4.3-3 陰影顆粒判定準則

| 條件   | 結果   |
|--|------|
| $Density(\text{mean}) < \text{Mean} + D\_shadow \times SD$ | 正常顆粒 |
| $Density(\text{mean}) > \text{Mean} + D\_shadow \times SD$ | 陰影顆粒 |

其中：SD 為單張照片所有辨識物件的  $Density(\text{mean})$  標準差；Mean 為單張照片所有辨識物件的  $Density(\text{mean})$  平均值

- ii.  $D\_ratio$  為「濾除陰影顆粒的閾值」，當該顆粒陰影總數比大於其值時將剔除該顆粒不納入後續計算，見式 4.3-2 與表 4.3-4。本研究為了保持一定的辨識容錯率，設定陰影照片的數量需超過總數的一定比例，才能將該顆粒排除不列入計算。

$$\text{陰影總數比} = \text{陰影顆粒照片數} / \text{總照片數} \quad \text{式 4.3-2}$$

表 4.3-4 陰影顆粒剔除準則

| 條件                 | 結果   |
|--------------------|------|
| 陰影總數比 $< D\_ratio$ | 納入計算 |
| 陰影總數比 $> D\_ratio$ | 剔除計算 |

3.  $Data\_quantity$  為「濾除低資訊量顆粒的閾值」，當該顆粒總照片數小於其值時將剔除該顆粒不納入後續計算，見表 4.3-5。透過設定照片數量門檻，排除因資訊量過低而缺乏代表性的顆粒資料，進而降低誤判的可能性，提高預測的準確度。



表 4.3-5 低資訊量顆粒剔除準則

| 條件                   | 結果   |
|----------------------|------|
| 總照片數 < Data_quantity | 剔除計算 |
| 總照片數 > Data_quantity | 納入計算 |

### 4.3.2 敏感度分析

本研究根據 4.3.1 的 5 個調控參數「P\_overlap」、「P\_ratio」、「D\_shadow」、「D\_ratio」及「Data\_quantity」進行單因子敏感度分析，測試組合見表 4.3-6，由上至下依序進行 25 次試驗，每 5 次更換一個操作變因，並始終保持四個控制變因，藉此探討不同因子對於整體之影響程度。

表 4.3-6 敏感度分析測試組合

|        | P_overlap | P_ratio | D_shadow | D_ratio | Data_quantity |
|--------|-----------|---------|----------|---------|---------------|
| test1  | 0.75      |         |          |         |               |
| test2  | 0.8       |         |          |         |               |
| test3  | 0.85      | 0.3     | 1.5      | 0.3     | 7             |
| test4  | 0.9       |         |          |         |               |
| test5  | 0.95      |         |          |         |               |
| test6  |           | 0.2     |          |         |               |
| test7  |           | 0.25    |          |         |               |
| test8  | 0.9       | 0.3     | 1.5      | 0.3     | 7             |
| test9  |           | 0.35    |          |         |               |
| test10 |           | 0.4     |          |         |               |
| test11 |           |         | 0.5      |         |               |
| test12 |           |         | 1        |         |               |
| test13 | 0.9       | 0.3     | 1.5      | 0.3     | 7             |
| test14 |           |         | 2        |         |               |
| test15 |           |         | 2.5      |         |               |
| test16 | 0.9       | 0.3     | 1.5      | 0.2     | 7             |

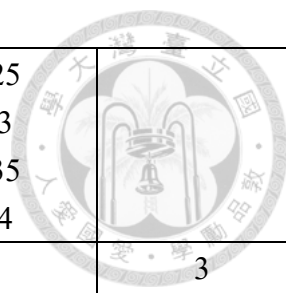
|        |     |     |     |      |   |
|--------|-----|-----|-----|------|---|
| test17 |     |     |     | 0.25 |  |
| test18 |     |     |     | 0.3  |   |
| test19 |     |     |     | 0.35 |   |
| test20 |     |     |     | 0.4  |   |
| test21 |     |     |     |      | 3   |
| test22 |     |     |     |      | 5   |
| test23 | 0.9 | 0.3 | 1.5 | 0.3  | 7   |
| test24 |     |     |     |      | 9   |
| test25 |     |     |     |      | 11  |

表 4.3-7~表 4.3-26 顯示了各級配在 test1~25 的結果，為 9 組平均值後的數據。

表 4.3-7 「六分石」級配 test1~5

|                | test1 | test2 | test3 | test4 | test5 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 58.02 | 58.15 | 58.73 | 59.23 | 59.52 |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 32.99 | 33.06 | 33.38 | 33.53 | 33.72 |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 3.36  | 3.36  | 3.24  | 3.07  | 3.04  |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 5.63  | 5.42  | 4.65  | 4.17  | 3.72  |

表 4.3-8 「六分石」級配 test6~10

|                | test6 | test7 | test8 | test9 | test10 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 59.40 | 59.32 | 59.23 | 59.16 | 59.09  |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 33.48 | 33.54 | 33.53 | 33.54 | 33.53  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 3.04  | 3.03  | 3.07  | 3.06  | 3.10   |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 4.08  | 4.11  | 4.17  | 4.23  | 4.29   |

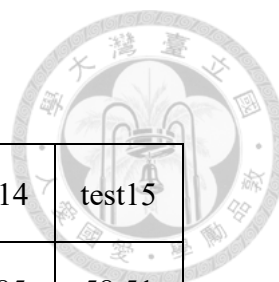


表 4.3-9 「六分石」級配 test11~15

|                | test11 | test12 | test13 | test14 | test15 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 60.74  | 59.69  | 59.23  | 58.85  | 58.51  |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 33.81  | 33.74  | 33.53  | 33.53  | 33.49  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 2.54   | 2.94   | 3.07   | 3.11   | 3.15   |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 2.91   | 3.63   | 4.17   | 4.51   | 4.85   |

表 4.3-10 「六分石」級配 test16~20

|                | test16 | test17 | test18 | test19 | test20 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 59.50  | 59.31  | 59.23  | 59.08  | 59.02  |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 33.59  | 33.58  | 33.53  | 33.63  | 33.62  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 2.95   | 3.02   | 3.07   | 3.09   | 3.08   |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 3.97   | 4.10   | 4.17   | 4.21   | 4.28   |

表 4.3-11 「六分石」級配 test21~25

|                | test21 | test22 | test23 | test24 | test25 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 59.23  | 59.43  | 59.23  | 59.25  | 59.07  |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 31.77  | 32.74  | 33.53  | 33.65  | 33.97  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 3.04   | 3.03   | 3.07   | 3.10   | 3.21   |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 5.97   | 4.80   | 4.17   | 4.00   | 3.75   |

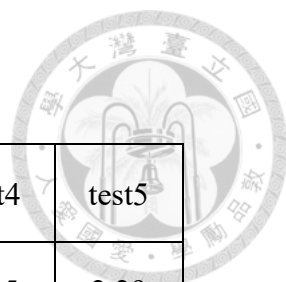


表 4.3-12 「三分石」級配 test1~5

|                | test1 | test2 | test3 | test4 | test5 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 2.24  | 2.24  | 2.25  | 2.25  | 2.29  |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 18.84 | 18.84 | 18.83 | 18.83 | 19.68 |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 17.80 | 17.80 | 17.80 | 17.77 | 18.69 |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 61.12 | 61.11 | 61.13 | 61.16 | 59.34 |

表 4.3-13 「三分石」級配 test6~10

|                | test6 | test7 | test8 | test9 | test10 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 2.23  | 2.22  | 2.25  | 2.25  | 2.25   |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 18.85 | 18.85 | 18.83 | 18.82 | 18.83  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 17.76 | 17.76 | 17.77 | 17.80 | 17.81  |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 61.15 | 61.16 | 61.16 | 61.13 | 61.12  |

表 4.3-14 「三分石」級配 test11~15

|                | test11 | test12 | test13 | test14 | test15 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 2.87   | 2.43   | 2.25   | 2.17   | 2.14   |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 24.16  | 20.39  | 18.83  | 18.49  | 18.22  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 20.85  | 18.89  | 17.77  | 17.43  | 17.30  |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 52.12  | 58.29  | 61.16  | 61.91  | 62.33  |

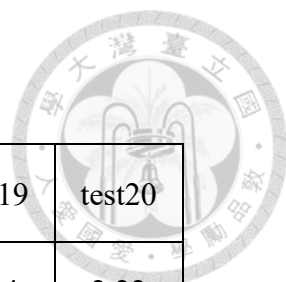


表 4.3-15 「三分石」級配 test16~20

|                | test16 | test17 | test18 | test19 | test20 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 2.31   | 2.29   | 2.25   | 2.24   | 2.22   |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 19.39  | 19.14  | 18.83  | 18.68  | 18.60  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 18.09  | 17.95  | 17.77  | 17.79  | 17.71  |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 60.21  | 60.62  | 61.16  | 61.28  | 61.47  |

表 4.3-16 「三分石」級配 test21~25

|                | test21 | test22 | test23 | test24 | test25 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 2.26   | 2.23   | 2.25   | 2.15   | 2.25   |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 17.61  | 18.17  | 18.83  | 19.43  | 19.92  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 16.35  | 16.95  | 17.77  | 18.44  | 19.06  |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 63.78  | 62.66  | 61.16  | 59.98  | 58.77  |

表 4.3-17 「平均分佈」級配 test1~5

|                | test1 | test2 | test3 | test4 | test5 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 35.30 | 35.36 | 35.44 | 35.62 | 35.66 |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 30.68 | 30.73 | 30.80 | 30.72 | 30.82 |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 13.71 | 13.72 | 13.73 | 13.88 | 14.17 |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 20.31 | 20.19 | 20.03 | 19.78 | 19.35 |

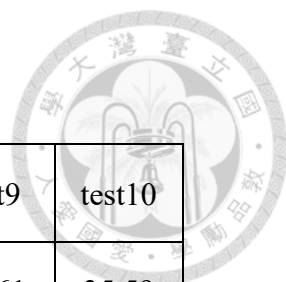


表 4.3-18 「平均分佈」級配 test6~10

|                | test6 | test7 | test8 | test9 | test10 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 35.36 | 35.55 | 35.62 | 35.61 | 35.59  |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 30.66 | 30.71 | 30.72 | 30.77 | 30.79  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 14.00 | 13.95 | 13.88 | 13.86 | 13.83  |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 19.98 | 19.79 | 19.78 | 19.77 | 19.78  |

表 4.3-19 「平均分佈」級配 test11~15

|                | test11 | test12 | test13 | test14 | test15 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 34.03  | 35.73  | 35.62  | 34.87  | 34.52  |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 32.31  | 30.99  | 30.72  | 30.42  | 30.18  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 14.85  | 14.22  | 13.88  | 14.03  | 14.11  |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 18.80  | 19.06  | 19.78  | 20.68  | 21.19  |

表 4.3-20 「平均分佈」級配 test16~20

|                | test16 | test17 | test18 | test19 | test20 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 35.79  | 35.69  | 35.62  | 35.61  | 35.52  |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 30.85  | 30.82  | 30.72  | 30.61  | 30.58  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 13.88  | 13.86  | 13.88  | 13.87  | 13.85  |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 19.47  | 19.63  | 19.78  | 19.92  | 20.05  |

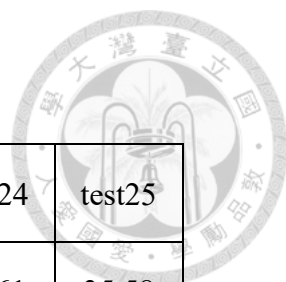


表 4.3-21 「平均分佈」級配 test21~25

|                | test21 | test22 | test23 | test24 | test25 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 35.27  | 35.58  | 35.62  | 35.61  | 35.58  |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 30.84  | 30.69  | 30.72  | 30.76  | 30.98  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 13.81  | 13.78  | 13.88  | 14.15  | 14.34  |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 20.08  | 19.95  | 19.78  | 19.48  | 19.10  |

表 4.3-22 「分散兩側」級配 test1~5

|                | test1 | test2 | test3 | test4 | test5 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 34.14 | 34.21 | 34.27 | 34.16 | 34.80 |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 16.47 | 16.48 | 16.43 | 16.42 | 16.59 |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 12.42 | 12.43 | 12.46 | 12.53 | 12.83 |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 36.97 | 36.89 | 36.84 | 36.89 | 35.78 |

表 4.3-23 「分散兩側」級配 test6~10

|                | test6 | test7 | test8 | test9 | test10 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 34.02 | 34.13 | 34.16 | 34.25 | 34.29  |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 16.40 | 16.39 | 16.42 | 16.40 | 16.36  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 12.55 | 12.56 | 12.53 | 12.50 | 12.48  |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 37.03 | 36.92 | 36.89 | 36.85 | 36.86  |

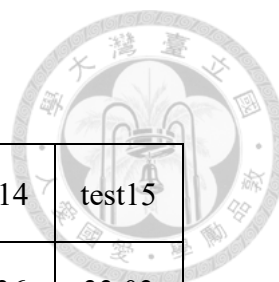


表 4.3-24 「分散兩側」級配 test11~15

|                | test11 | test12 | test13 | test14 | test15 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 34.46  | 34.89  | 34.16  | 33.36  | 33.03  |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 17.89  | 16.79  | 16.42  | 16.55  | 16.57  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 13.62  | 12.74  | 12.53  | 12.47  | 12.46  |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 34.02  | 35.58  | 36.89  | 37.61  | 37.93  |

表 4.3-25 「分散兩側」級配 test16~20

|                | test16 | test17 | test18 | test19 | test20 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 34.54  | 34.27  | 34.16  | 33.97  | 33.84  |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 16.67  | 16.63  | 16.42  | 16.46  | 16.49  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 12.60  | 12.56  | 12.53  | 12.47  | 12.44  |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 36.20  | 36.55  | 36.89  | 37.10  | 37.24  |

表 4.3-26 「分散兩側」級配 test21~25

|                | test21 | test22 | test23 | test24 | test25 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 33.14  | 33.56  | 34.16  | 34.73  | 34.68  |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 16.27  | 16.13  | 16.42  | 16.59  | 16.83  |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 12.55  | 12.44  | 12.53  | 12.66  | 12.90  |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 38.04  | 37.86  | 36.89  | 36.02  | 35.59  |



從以上分析結果可發現，在多重篩選條件下，單一變量的變動對結果影響有限，猜測是因為參數彼此間的過濾效果具有極高重疊性，對於大多數應需濾除的顆粒會符合超過一種的濾除條件，因此表 4.3-27 探討了不同篩選特徵組合對於整體之影響程度。

表 4.3-27 篩選特徵測試組合

|            | Perimeter(ratio) | Density(mean) | Data_quantity |
|------------|------------------|---------------|---------------|
| condition1 | no               | no            | no            |
| condition2 | yes              | no            | no            |
| condition3 | no               | yes           | no            |
| condition4 | no               | no            | yes           |
| condition5 | yes              | yes           | no            |
| condition6 | yes              | no            | yes           |
| condition7 | no               | yes           | yes           |
| condition8 | yes              | yes           | yes           |

表 4.3-28 「六分石」級配之特徵組合測試結果

|                | con.1 | con.2 | con.3 | con.4 | con.5 | con.6 | con.7 | con.8 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 38.52 | 56.84 | 55.73 | 50.67 | 59.23 | 59.27 | 57.90 | 59.23 |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 23.15 | 31.08 | 30.32 | 29.79 | 31.77 | 33.75 | 32.93 | 33.53 |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 6.54  | 3.45  | 3.59  | 4.43  | 3.04  | 3.07  | 3.35  | 3.07  |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 31.79 | 8.63  | 10.36 | 15.11 | 5.97  | 3.91  | 5.82  | 4.17  |

表 4.3-29 「三分石」級配之特徵組合測試結果

|                | con.1 | con.2 | con.3 | con.4 | con.5 | con.6 | con.7 | con.8 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 2.03  | 2.11  | 2.28  | 2.08  | 2.26  | 2.19  | 2.24  | 2.25  |

|                |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 16.01 | 16.62 | 17.64 | 17.86 | 17.61 | 19.14 | 18.84 | 18.83 |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 15.31 | 15.60 | 16.35 | 17.21 | 16.35 | 18.33 | 17.79 | 17.77 |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 66.66 | 65.68 | 63.73 | 62.85 | 63.78 | 60.35 | 61.13 | 61.16 |


表 4.3-30 「平均分佈」級配之特徵組合測試結果

|                | con.1 | con.2 | con.3 | con.4 | con.5 | con.6 | con.7 | con.8 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 26.07 | 33.16 | 34.37 | 31.49 | 35.27 | 35.32 | 35.30 | 35.62 |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 25.13 | 29.85 | 30.33 | 28.57 | 30.84 | 30.61 | 30.69 | 30.72 |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 14.19 | 13.87 | 13.72 | 14.05 | 13.81 | 14.15 | 13.71 | 13.88 |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 34.61 | 23.12 | 21.57 | 25.88 | 20.08 | 19.93 | 20.30 | 19.78 |

表 4.3-31 「分散兩側」級配之特徵組合測試結果

|                | con.1 | con.2 | con.3 | con.4 | con.5 | con.6 | con.7 | con.8 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 3/4"顆粒數量百分率(%) | 24.87 | 30.89 | 32.61 | 30.83 | 33.14 | 34.40 | 34.13 | 34.16 |
| 1/2"顆粒數量百分率(%) | 15.00 | 16.38 | 16.25 | 16.05 | 16.27 | 16.54 | 16.46 | 16.42 |
| 3/8"顆粒數量百分率(%) | 12.59 | 12.66 | 12.52 | 12.20 | 12.55 | 12.63 | 12.42 | 12.53 |
| #4 顆粒數量百分率(%)  | 47.54 | 40.06 | 38.62 | 40.92 | 38.04 | 36.43 | 37.00 | 36.89 |

從表 4.3-28~表 4.3-31 結果可發現，未進行特徵篩選處理的 condition1 與 condition2~8 之間存在一定程度上差異，並且參數彼此間的過濾效果具有極高重疊性，對於大多數應需濾除的顆粒會符合超過一種的濾除條件，故 condition2~8 之間的變化差異不大，但仍可以看到，不同級配在篩選特徵數量不斷增加的情況下，有持續修正並收斂的趨勢。



總結上述實驗結果發現，在篩選參數皆設定於合理範圍的情況下，篩選條件數量愈多，愈有可能達到收斂，雖存在邊際效益的問題，但在運算時間成本可接受的前提下，本研究優先考量精準度，因此增加篩選條件的數量是較為適當的做法，故最終採用「P\_overlap」= 0.9、「P\_ratio」= 0.3、「D\_shadow」= 1.5、「D\_ratio」= 0.3 及「Data\_quantity」= 7 進行後續分析研究。

### 4.3.3 篩分析預測

本研究參考 Pourebrahimi, M., et al.[12]藉由模擬真實搖篩原理計算級配曲線，不同的是，本研究利用高速動態攝影獲得粒料多角度的平面影像，並透過代數方法來計算最佳角度及最小通過篩網尺寸，故能夠繪製出更真實反應篩分情況的連續粒徑分佈圖。

本研究憑藉眾多的翻轉粒料影像，試圖在多面向視角裡找到包圍該顆粒的最小正方形，並認為在理想情況下顆粒停留於該尺寸之篩網上，以此來模擬真實搖篩原理。然而因本方法假定粒料平面形狀為長方形（圖 4.3-2 中紅色框線），故預測之篩網尺寸會略大於真實篩網尺寸。因此本研究透過乘上一尺寸校正因子  $C$ ，以修正形狀因素造成的影響。最後透過統計獲得各尺寸顆粒的平均重量，即重量數量比  $R$ ，將預測的顆粒數量結果轉換成重量表示。



### 4.3.3.1 篩分析原理與流程

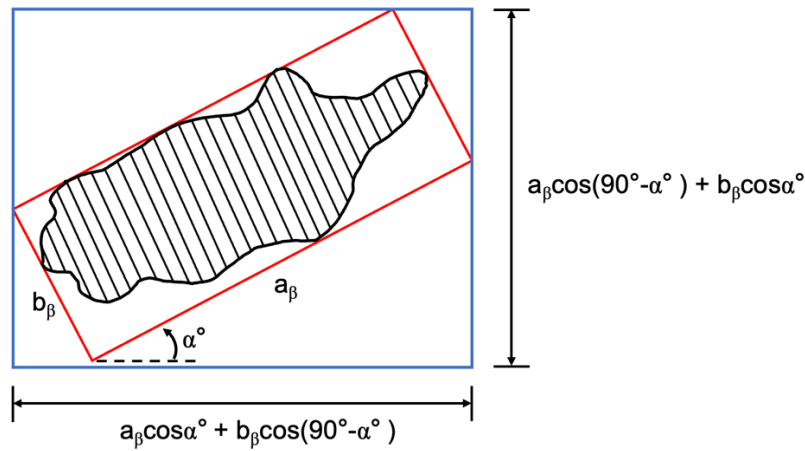


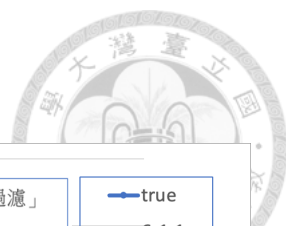
圖 4.3-2 粒料篩分原理示意圖

篩分析運算流程與相關符號定義詳述如下，可參考圖 4.3-2 理解：

1.  $a_\beta$ 、 $b_\beta$ ：a 值與 b 值分別由影像辨識特徵「Box Height」與「Box Width」獲得，根據 Image Pro Plus6.0 定義為「物體最小包圍矩形的高度」及「物體最小包圍矩形的寬度」。透過多角度的動態拍攝，同顆粒料會獲得數組不同面向的(a,b)，其中下標  $\beta$  表示第  $\beta$  張圖像。
2.  $X_{\alpha,\beta}$ ：定義為「最小包圍正方形之尺寸」。其中下標  $\alpha$  表示與水平面夾  $\alpha^\circ$ ，下標  $\beta$  表示第  $\beta$  張圖像。
3.  $a_\beta \cos \alpha^\circ + b_\beta \cos(90^\circ - \alpha^\circ)$ 、 $a_\beta \cos(90^\circ - \alpha^\circ) + b_\beta \cos \alpha^\circ$ ：為「最小包圍矩形邊長」（圖 4.3-2 中藍色框線），根據幾何數學關係式而得，取兩者中的大值作為  $X_{\alpha,\beta}$ ，見式 4.3-3。

$$X_{\alpha,\beta} = \max \{ a_\beta \cos \alpha^\circ + b_\beta \cos(90^\circ - \alpha^\circ) , a_\beta \cos(90^\circ - \alpha^\circ) + b_\beta \cos \alpha^\circ \} \quad \text{式 4.3-3}$$





### 4.3.3.2 篩分析結果

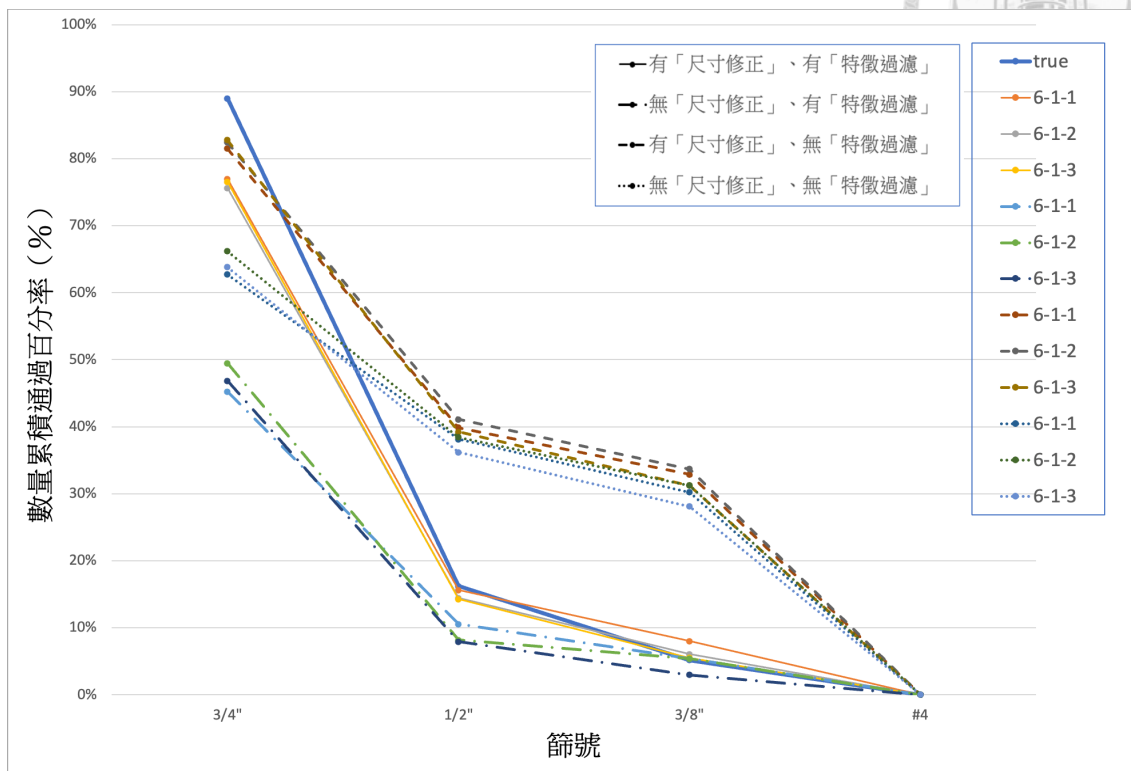


圖 4.3-3 「六分石」級配第一組之數量百分率級配曲線預測結果

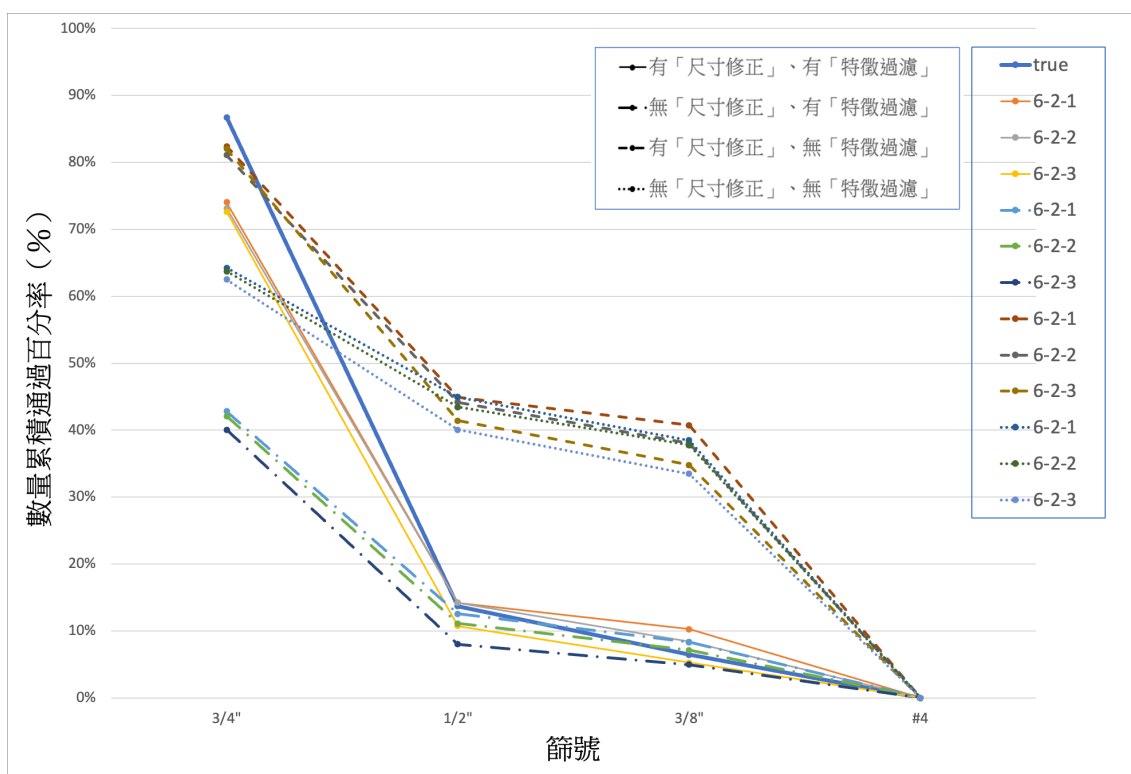


圖 4.3-4 「六分石」級配第二組之數量百分率級配曲線預測結果

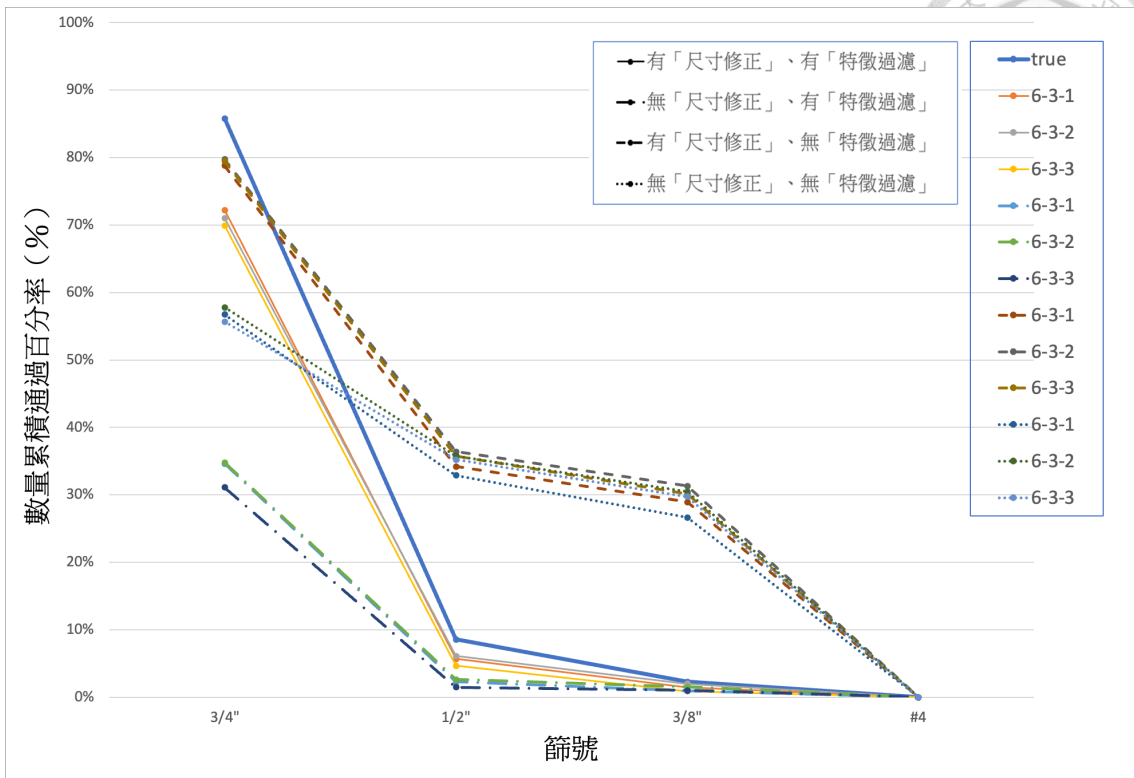


圖 4.3-5 「六分石」級配第三組之數量百分率級配曲線預測結果

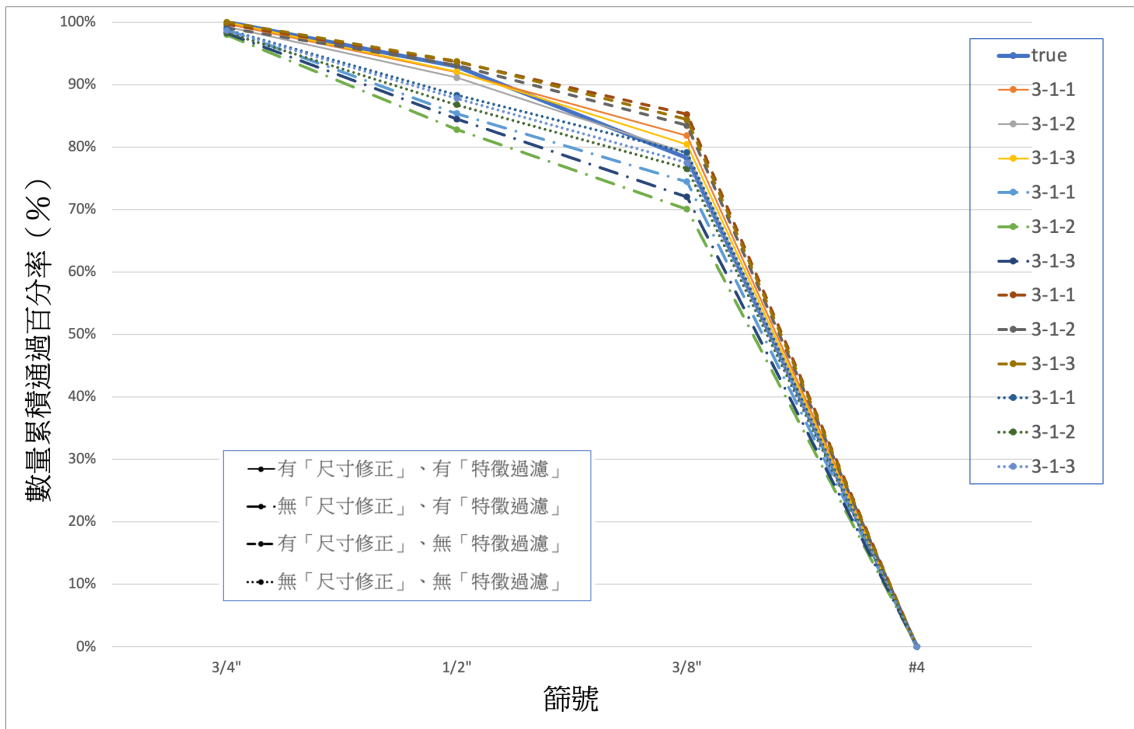


圖 4.3-6 「三分石」級配第一組之數量百分率級配曲線預測結果

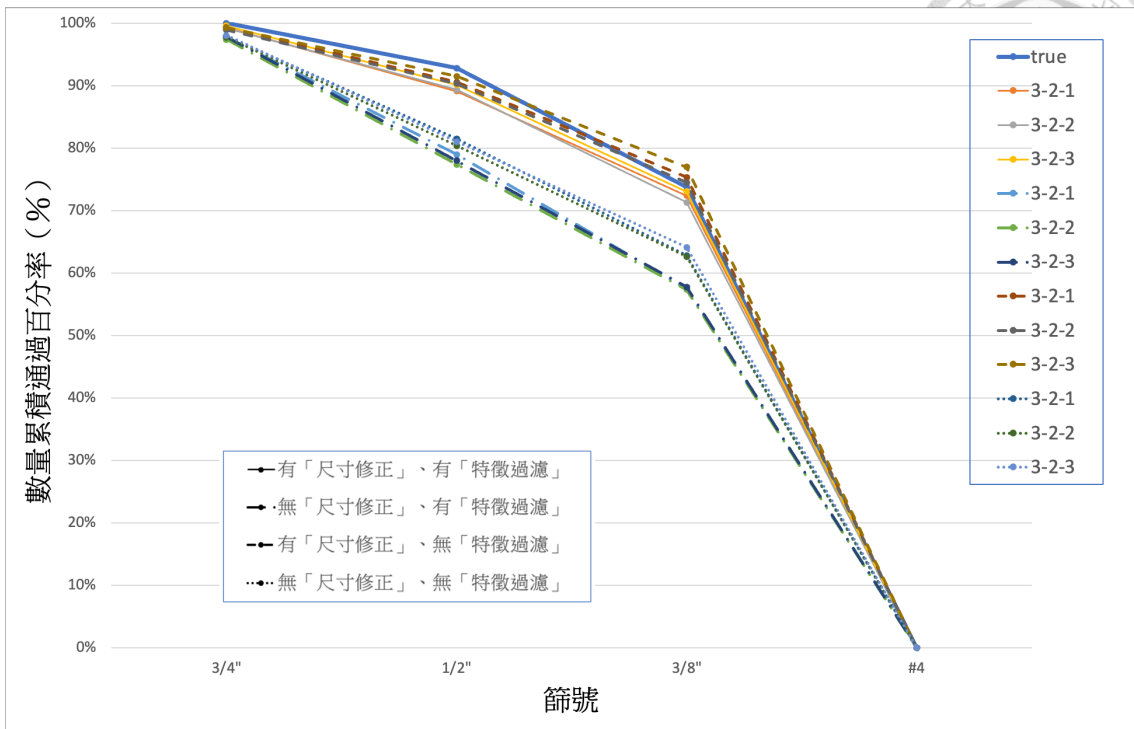


圖 4.3-7 「三分石」級配第二組之數量百分率級配曲線預測結果

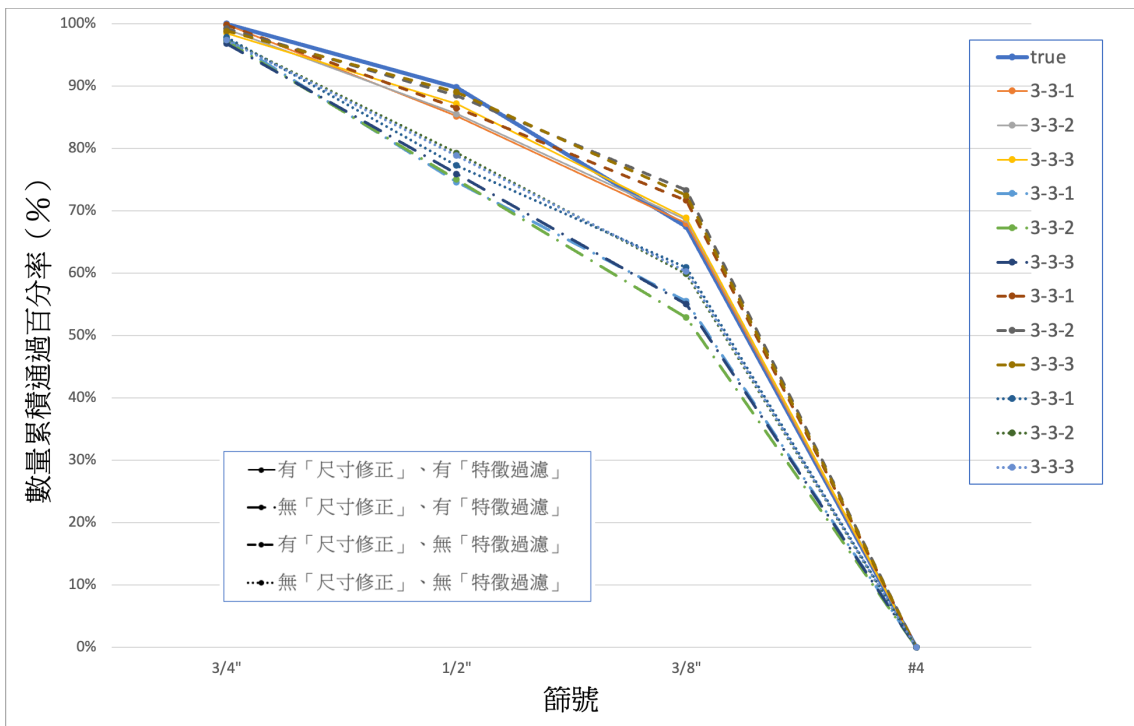


圖 4.3-8 「三分石」級配第三組之數量百分率級配曲線預測結果

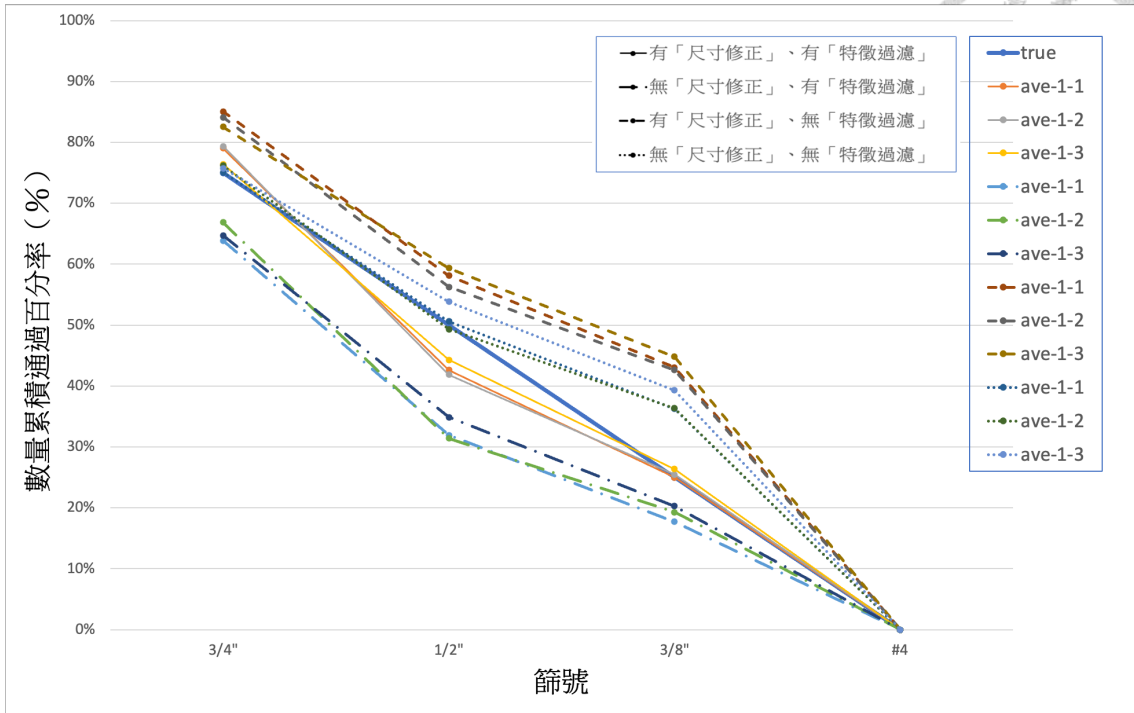


圖 4.3-9 「平均分佈」級配第一組之數量百分率級配曲線預測結果

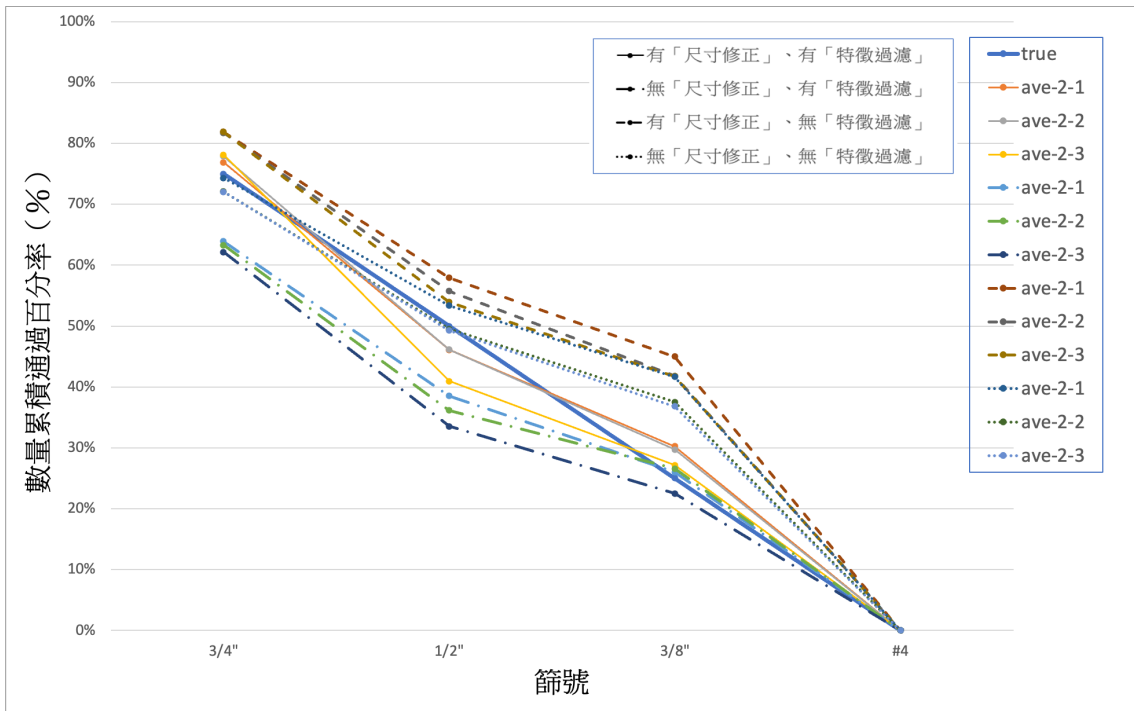


圖 4.3-10 「平均分佈」級配第二組之數量百分率級配曲線預測結果

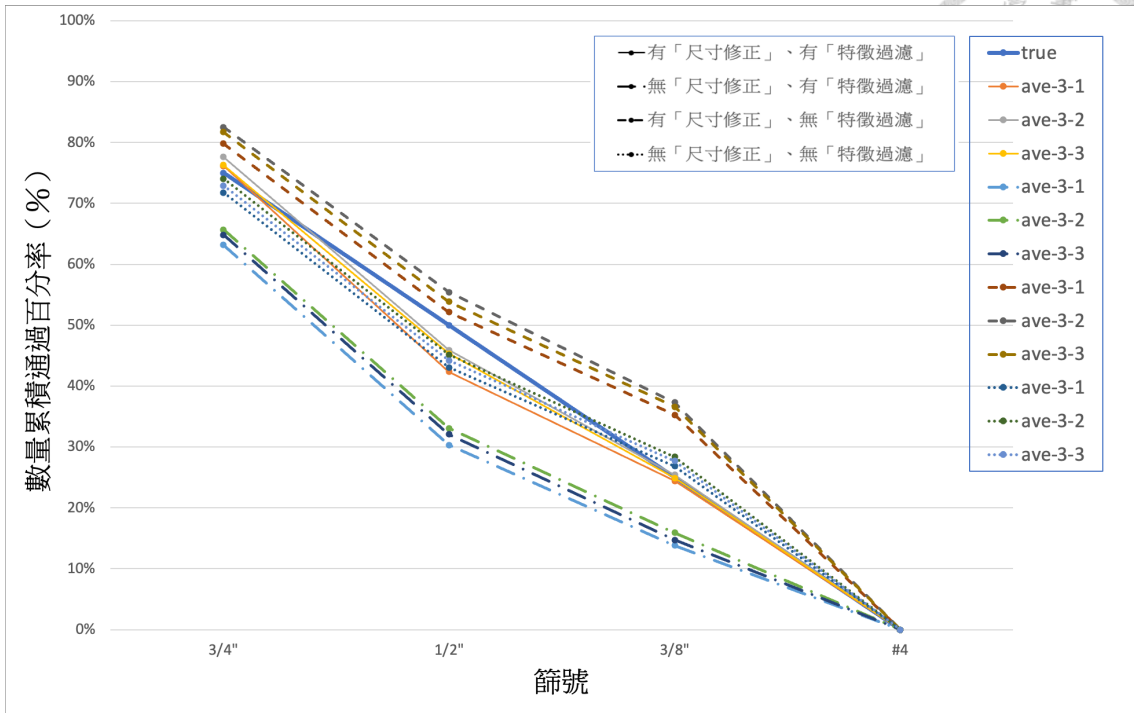


圖 4.3-11 「平均分佈」級配第三組之數量百分率級配曲線預測結果

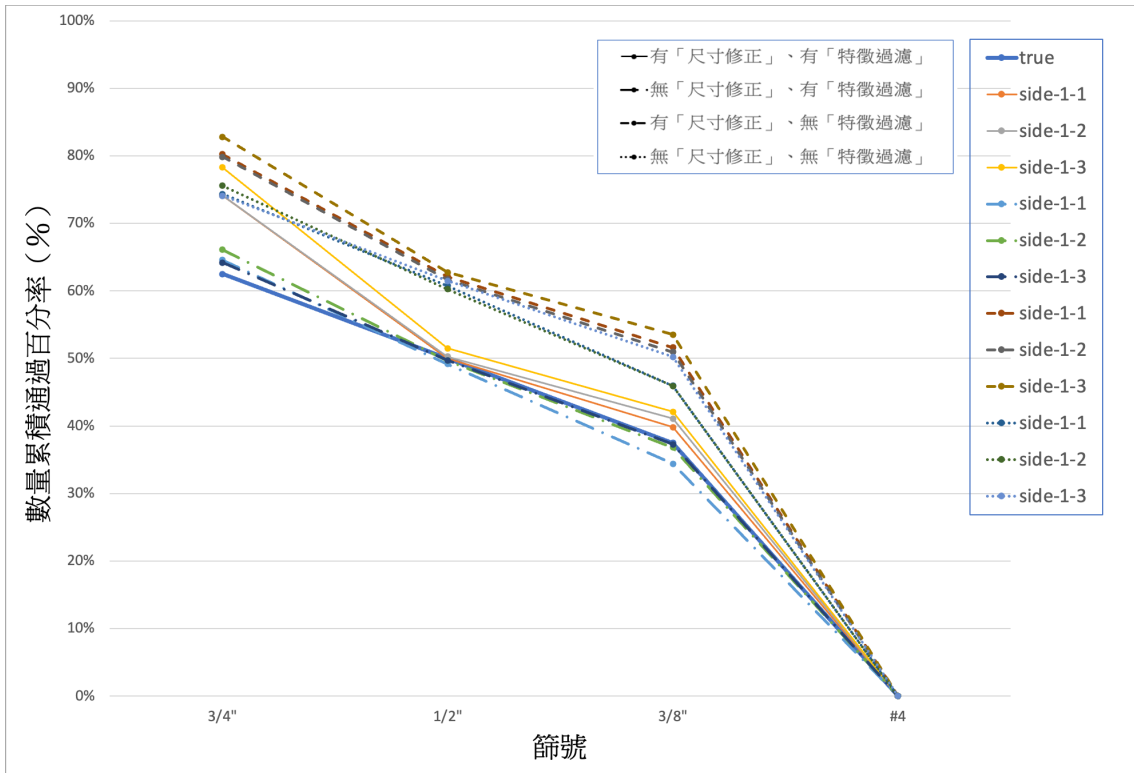


圖 4.3-12 「分散兩側」級配第一組之數量百分率級配曲線預測結果

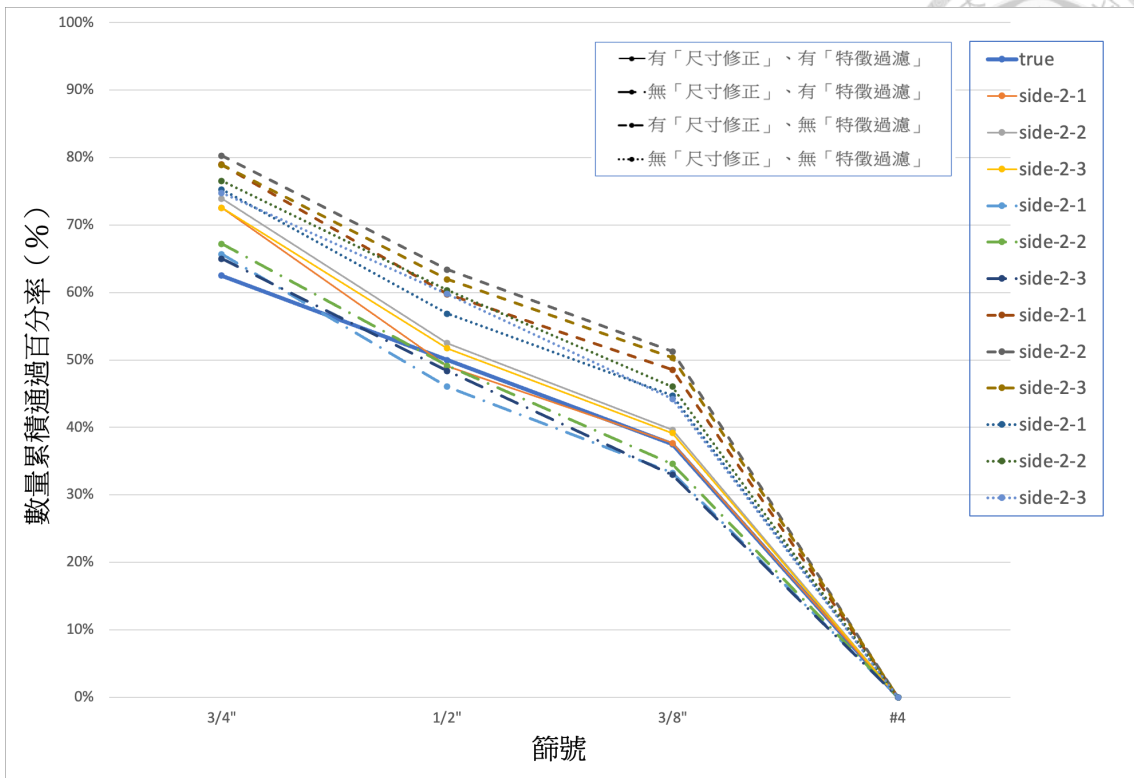


圖 4.3-13 「分散兩側」級配第二組之數量百分率級配曲線預測結果

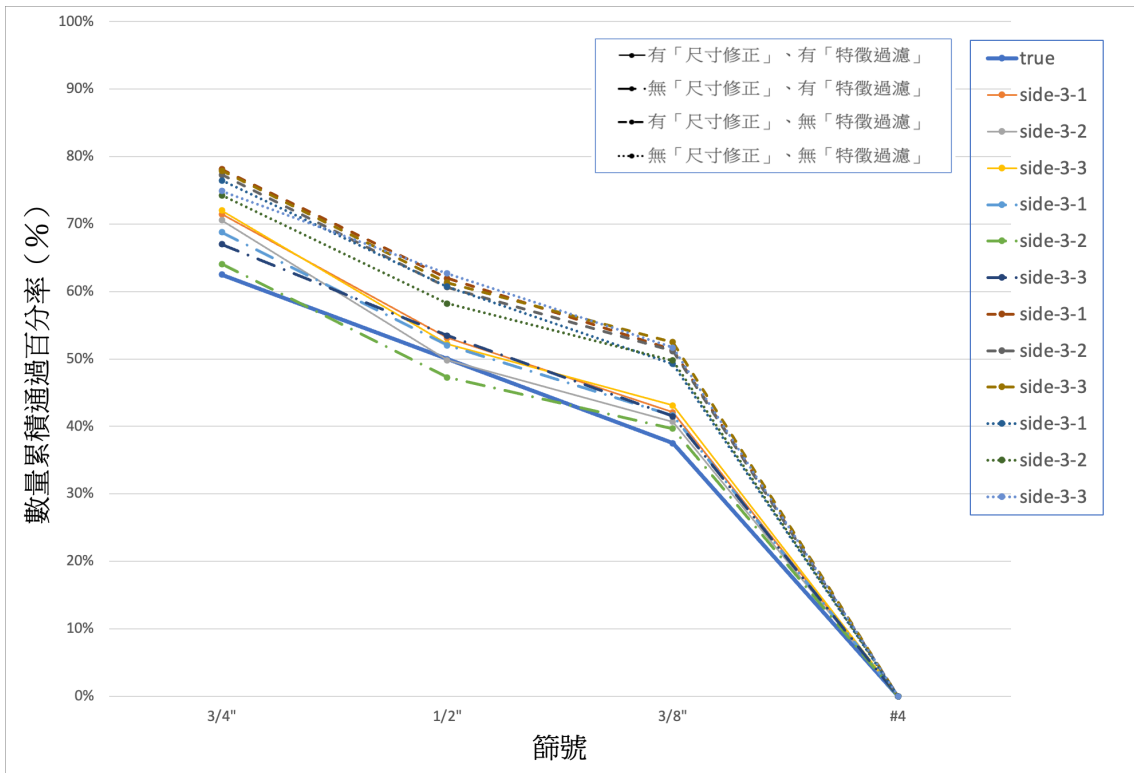


圖 4.3-14 「分散兩側」級配第三組之數量百分率級配曲線預測結果



圖 4.3-3~圖 4.3-14 展示了四種級配每組的篩分析曲線預測結果，每張圖表裡具有四種線型，後續依序以 A、B、C、D 稱之，分別代表有無「尺寸修正」與有無「特徵過濾」的結果。

在「六分石」級配中，C 和 D 的 1/2”和 3/8”篩明顯顯示出過高的情況，相反地，B 的 3/4”篩明顯顯示出偏低的問題。最終修正結果 A 則更好地表達出真實趨勢，且最大誤差也最小。

在「三分石」級配中，A、B、C、D 的趨勢較為一致且接近真實結果，但仍可看出 A 的預測最為準確，且誤差最小。

在「平均分佈」級配中，C 的數值在各篩號普遍偏高，B 的數值在各篩號普遍偏低，A 和 D 較能反映真實趨勢，而從最大誤差來看，A 仍然是最好的。

在「分散兩側」級配中，C、D 的 1/2”和 3/8”篩存在偏高的問題，A 和 D 較能反映真實情況，而觀察 3/4”篩部分，B 誤差最小為最佳，其次才是 A。

綜合而言，經過本研究「尺寸修正」及「特徵過濾」處理過後的預測結果，最能準確地表現出整體篩分析的真實情況，兩者都有其存在的必要，彼此相輔相成，缺一不可，並從結果可以看出，透過此方法進行預測具有一定的精準度。

#### 4.3.4 扁平、細長、扁長率預測

參照中華民國國家標準 CNS15171[3]對長度、寬度及厚度的定義：

1. 長度：「粒料之最大尺寸」



2. 寬度：「垂直於長度之平面中之最大尺寸」
3. 厚度：「垂直於長度及寬度之最大尺寸」。

本研究平面長度與寬度分別透過影像辨識特徵「Feret(max)」及「Side(width)」獲得，根據 Image Pro Plus6.0 定義為「最大卡尺長度」及「沿著等效橢圓短軸方向上之卡尺長度」。藉由「Feret(max)」及「Side(width)」分析多角度的平面影像資訊，找尋粒料的長寬平面與寬厚平面來獲取其長度、寬度及厚度資訊。最後根據表 2.2-1 對扁平、細長及扁長顆粒定義（本研究設置比例 1:5）及 4.3.3.1 對粒料大小的分類，套入式 3.3-1、式 3.3-2，計算出各尺寸及整體的扁平、細長和扁長率。關於本研究對長度、寬度及厚度的預估，詳細說明如下：

1. 長度：影像平面長度能由辨識軟體特徵「Feret(max)」獲得，定義為「最大卡尺長度」。本研究在所有的翻轉粒料影像裡找尋「Feret(max)」的最大值，將其視為粒料在三維中的最大長度，並定義為本研究之粒料長度。
2. 寬度：影像平面寬度能由辨識軟體特徵「Side(width)」獲得近似值，定義為「沿著等效橢圓短軸方向上之卡尺長度」，其中，等效橢圓為具有相同面積、一次矩、二次矩的橢圓。根據上述 1 方法獲得粒料長度，此時所對應的「Side(width)」最大值定義為本研究之粒料寬度。由於本研究採用的影像辨識軟體 Image Pro Plus6.0 缺乏同規範寬度定義的特徵可供使用，故以等效橢圓的短軸方向取代垂直於長度的方向。



3. 厚度：由於平面影像無法獲得厚度資訊，本研究假定在粒料任意翻轉的情況下，粒料的所有角度能被動態攝影所捕捉，在寬厚平面上勢必存在其平面長度等同於粒料寬度之現象，此時定義該影像之平面寬度為粒料厚度，以此模擬 CNS15171[3]中所描述的「垂直於長度及寬度之最大尺寸」。透過在所有的翻轉粒料影像裡找尋最接近粒料寬度的「Feret(max)」值，此時所對應的「Side(width)」值定義為本研究之粒料厚度。

## 4.4 係數

本研究使用到的係數有兩個，分別為「尺寸校正因子 C」及「重量數量比 R」，具體說明如下：

### 4.4.1 尺寸校正因子 C

本研究在預測粒料尺寸時為了簡化計算，假定粒料平面形狀為長方形（圖 4.3-2 中紅色框線），為修正其造成的尺寸偏差，透過尺寸校正因子 C 修正實際粒料尺寸與預測粒料尺寸之間的差異，見式 4.4-1。

$$\text{adjusted predict sieve size} = C \times \text{unadjusted predict sieve size} \quad \text{式 4.4-1}$$

本研究考慮了 C 值為 1、0.95、0.9、0.85、0.8、0.75、0.7 和 0.65 的情況。表 4.4-1 列出了四種級配在不同 C 值下的篩網誤差總和，並選擇誤差總和最小時的 C 值作為本研究最終採用的 C 值。經過比較，本研究最終選定的 C 值為 0.85。



表 4.4-1 各級配在不同 C 值下的各篩號誤差總和 (9 組平均結果)

|                             |       |        |       |        |       |        |       |        |
|-----------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
|                             | C=1   | C=0.95 | C=0.9 | C=0.85 | C=0.8 | C=0.75 | C=0.7 | C=0.65 |
| 「六分石」級配<br>各篩號通過百分率誤差總和(%)  | 53.10 | 44.75  | 34.87 | 17.03  | 10.44 | 6.98   | 24.49 | 37.78  |
| 「三分石」級配<br>各篩號通過百分率誤差總和(%)  | 27.18 | 22.90  | 12.49 | 5.22   | 3.14  | 2.64   | 9.90  | 14.68  |
| 「平均分佈」級配各篩號通過<br>百分率誤差總和(%) | 32.77 | 29.59  | 20.81 | 10.36  | 11.49 | 20.00  | 29.73 | 40.39  |
| 「分散兩側」級配各篩號通過<br>百分率誤差總和(%) | 22.84 | 22.20  | 24.08 | 19.43  | 19.59 | 26.75  | 36.91 | 40.33  |
| 最大之誤差總和 (%)                 | 53.10 | 44.75  | 34.87 | 19.43  | 19.59 | 26.75  | 36.91 | 40.39  |



#### 4.4.2 重量數量比 R

為了將預測的顆粒數量轉換為實務中更常用的重量表示法，本研究參考 Maiti, A., et al.[11]，透過建立顆粒總重與總數之間的關係，獲得重量數量比 R，如式 4.4-2 所示，其物理意義為顆粒的平均重量。表 4.4-2 為各尺寸顆粒的 R 值統計結果。

$$\text{重量數量比 } R = \text{顆粒總重} / \text{顆粒總數} \quad \text{式 4.4-2}$$

表 4.4-2 各尺寸顆粒 R 值統計結果

|          | 3/4"   | 1/2"  | 3/8"  | #4    |
|----------|--------|-------|-------|-------|
| R 值(g/顆) | 13.043 | 6.844 | 2.381 | 0.586 |
| 統計總數     | 2500   | 2500  | 2500  | 2500  |

## 第五章、分析結果與討論



### 5.1 篩分析結果與討論

本研究的粗粒料篩析方法透過動態拍攝獲取粒料影像，接著使用影像辨識軟體初步篩選後獲取特徵資料，再利用程式碼處理影像中的重疊和陰影問題，並模擬真實的搖篩原理實現粒料的分類。本研究主要針對台中預拌廠提供之三分石與六分石進行研究，分別將其任意混合調配成 3 組試樣，每組試樣約 5 公斤重，並加入了些許的 1”與#8 篩尺寸顆粒，以增加測試組的隨機性與複雜度。為了研究動態拍攝下的可靠性與穩定性，每組樣品重複拍攝 2 次，所以共有 6 組測試資料。最後將真實篩分析試驗結果與影像預測結果做比對，分析兩者級配曲線的差異及可能誤差原因，本研究主要探討 3/4”、1/2”、3/8”及#4 篩範圍內的粒料，因此其他尺寸篩上的粒料數量將設置為 0，忽略不計。

表 5.1-1 測試級配第一組真實篩分析試驗結果

| 篩號           | 個別留篩<br>數量百分率(%) | 個別留篩<br>重量百分率(%) | 累積過篩<br>數量百分率(%) | 累積過篩<br>重量百分率(%) |
|--------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 19.0mm(3/4") | 11.22            | 42.24            | 88.78            | 57.76            |
| 12.5mm(1/2") | 25.31            | 37.36            | 63.47            | 20.40            |
| 9.5mm(3/8")  | 26.06            | 13.51            | 37.41            | 6.90             |
| 4.75mm(#4)   | 37.41            | 6.90             | 0.00             | 0.00             |

表 5.1-2 test-1-1 篩分析預測結果

| 篩號 | 個別留篩 | 個別留篩 | 累積過篩 | 累積過篩 |
|----|------|------|------|------|
|----|------|------|------|------|

|              | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) |
|--------------|----------|----------|----------|----------|
| 19.0mm(3/4") | 11.56    | 38.25    | 88.44    | 61.75    |
| 12.5mm(1/2") | 25.56    | 44.37    | 62.88    | 17.38    |
| 9.5mm(3/8")  | 17.65    | 10.66    | 45.23    | 6.73     |
| 4.75mm(#4)   | 45.23    | 6.73     | 0.00     | 0.00     |

表 5.1-3 test-1-2 篩分析預測結果

| 篩號           | 個別留篩     | 個別留篩     | 累積過篩     | 累積過篩     |
|--------------|----------|----------|----------|----------|
|              | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) |
| 19.0mm(3/4") | 8.92     | 34.45    | 91.08    | 65.55    |
| 12.5mm(1/2") | 22.47    | 45.55    | 68.61    | 20.00    |
| 9.5mm(3/8")  | 15.22    | 10.73    | 53.39    | 9.27     |
| 4.75mm(#4)   | 53.39    | 9.27     | 0.00     | 0.00     |

表 5.1-4 測試級配第二組真實篩分析試驗結果

| 篩號           | 個別留篩     | 個別留篩     | 累積過篩     | 累積過篩     |
|--------------|----------|----------|----------|----------|
|              | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) |
| 19.0mm(3/4") | 8.11     | 34.02    | 91.89    | 65.98    |
| 12.5mm(1/2") | 25.84    | 43.49    | 66.05    | 22.49    |
| 9.5mm(3/8")  | 24.33    | 13.91    | 41.71    | 8.58     |
| 4.75mm(#4)   | 41.71    | 8.58     | 0.00     | 0.00     |

表 5.1-5 test-2-1 篩分析預測結果

| 篩號           | 個別留篩     | 個別留篩     | 累積過篩     | 累積過篩     |
|--------------|----------|----------|----------|----------|
|              | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) |
| 19.0mm(3/4") | 6.13     | 32.76    | 93.87    | 67.24    |
| 12.5mm(1/2") | 14.20    | 39.79    | 79.66    | 27.45    |
| 9.5mm(3/8")  | 11.34    | 11.06    | 68.32    | 16.40    |
| 4.75mm(#4)   | 68.32    | 16.40    | 0.00     | 0.00     |



表 5.1-6 test-2-2 篩分析預測結果

| 篩號           | 個別留篩     | 個別留篩     | 累積過篩     | 累積過篩     |
|--------------|----------|----------|----------|----------|
|              | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) |
| 19.0mm(3/4") | 5.43     | 31.01    | 94.57    | 68.99    |
| 12.5mm(1/2") | 13.40    | 40.16    | 81.17    | 28.82    |
| 9.5mm(3/8")  | 10.16    | 10.59    | 71.02    | 18.23    |
| 4.75mm(#4)   | 71.02    | 18.23    | 0.00     | 0.00     |

表 5.1-7 測試級配第三組真實篩分析試驗結果

| 篩號           | 個別留篩     | 個別留篩     | 累積過篩     | 累積過篩     |
|--------------|----------|----------|----------|----------|
|              | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) |
| 19.0mm(3/4") | 7.86     | 34.05    | 92.14    | 65.95    |
| 12.5mm(1/2") | 25.32    | 45.80    | 66.82    | 20.14    |
| 9.5mm(3/8")  | 20.15    | 11.51    | 46.67    | 8.63     |
| 4.75mm(#4)   | 46.67    | 8.63     | 0.00     | 0.00     |

表 5.1-8 test-3-1 篩分析預測結果

| 篩號           | 個別留篩     | 個別留篩     | 累積過篩     | 累積過篩     |
|--------------|----------|----------|----------|----------|
|              | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) |
| 19.0mm(3/4") | 5.74     | 31.03    | 94.26    | 68.97    |
| 12.5mm(1/2") | 14.51    | 41.18    | 79.75    | 27.79    |
| 9.5mm(3/8")  | 11.31    | 11.16    | 68.44    | 16.63    |
| 4.75mm(#4)   | 68.44    | 16.63    | 0.00     | 0.00     |

表 5.1-9 test-3-2 篩分析預測結果

| 篩號           | 個別留篩     | 個別留篩     | 累積過篩     | 累積過篩     |
|--------------|----------|----------|----------|----------|
|              | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) | 數量百分率(%) | 重量百分率(%) |
| 19.0mm(3/4") | 6.53     | 32.03    | 93.47    | 67.97    |

|              |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 12.5mm(1/2") | 16.45 | 42.35 | 77.02 | 25.62 |
| 9.5mm(3/8")  | 12.79 | 11.46 | 64.23 | 14.16 |
| 4.75mm(#4)   | 64.23 | 14.16 | 0.00  | 0.00  |

表 5.2-1~表 5.2-9 為所有測試級配的篩分析真實與預測結果數據，後續將進一步對這些數據進行分析討論。

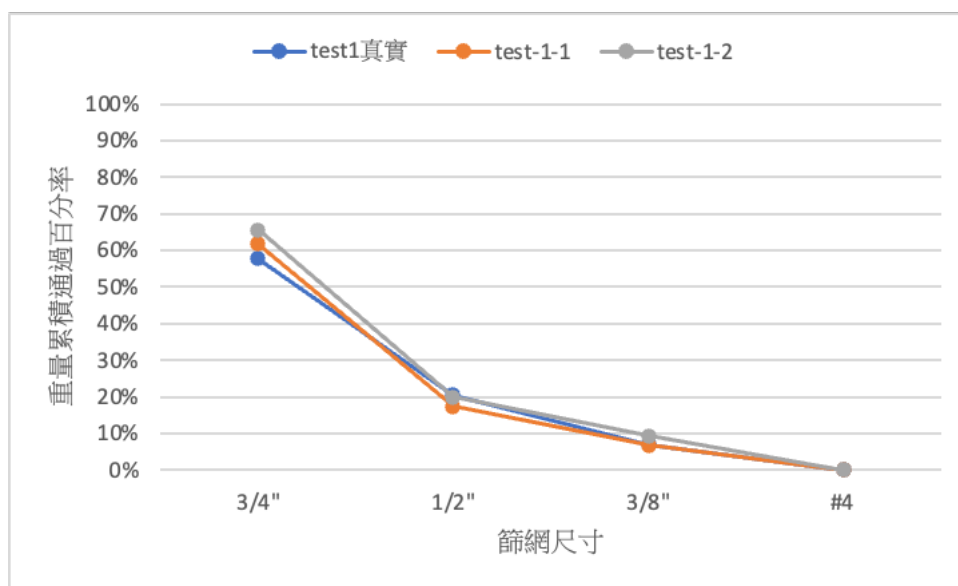


圖 5.1-1 測試級配第一組重量百分率粒徑分佈曲線比較

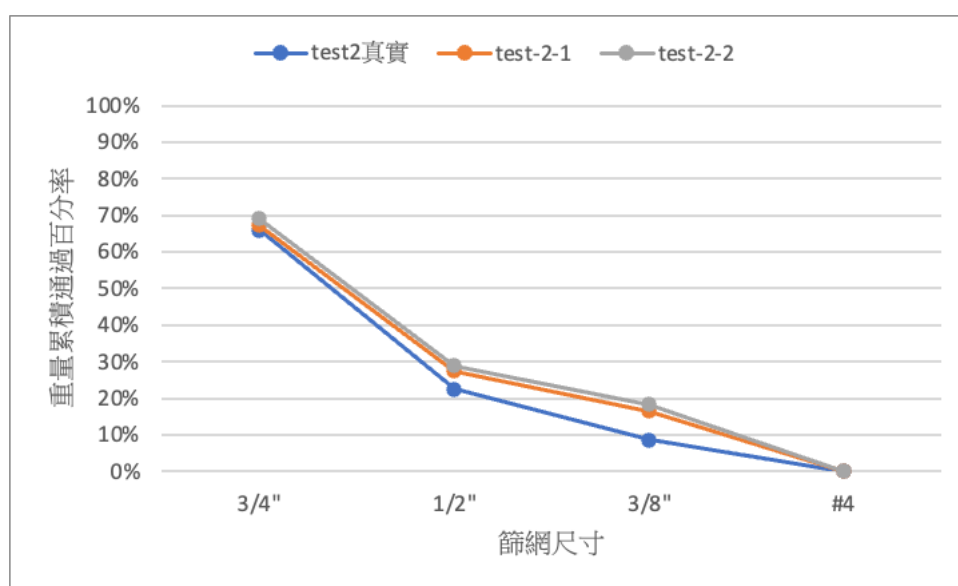


圖 5.1-2 測試級配第二組重量百分率粒徑分佈曲線比較

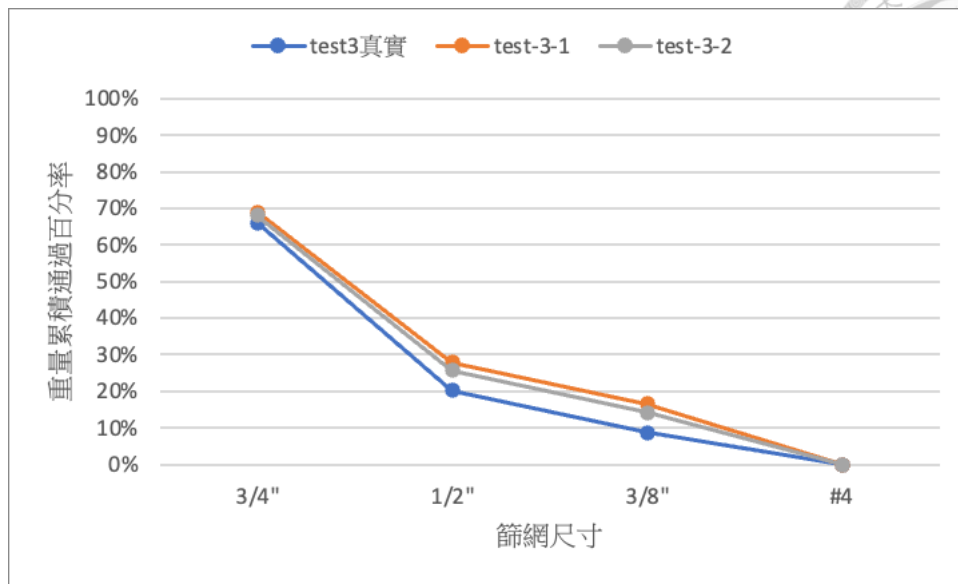


圖 5.1-3 測試級配第三組重量百分率粒徑分佈曲線比較

圖 5.1-1~圖 5.1-3 將預測結果與真實試驗值繪製於同張表格進行比較，可以看出兩者級配曲線大致保持一致趨勢，而在小顆粒的部分誤差較大。

在粒徑分佈的報告中，常使用 D10、D50 和 D90 來表示粒料的大小分佈，這些值之所以被使用是因為能簡潔的表示分佈情形，而標準化的度量也方便進行比較和分析。

表 5.1-10 D10、D50 和 D90 定義

|     | 定義  |
|-----|---|
| D10 | 累積粒徑分佈曲線上對應於 10% 累積百分比的位置，表示樣本中 10% 的顆粒小於此尺寸。 |
| D50 | 累積粒徑分佈曲線上對應於 50% 累積百分比的位置，表示樣本中 50% 的顆粒小於此尺寸。 |

|     |  |
|-----|--|
| D90 | 累積粒徑分佈曲線上對應於 90%累積百分比的位置，表示樣本中 90% 的顆粒小於此尺寸。 |
|-----|--|

表 5.1-11 測試級配第一組 D10、D50、D90 結果比較

|     | test-1 真實(mm) | test-1-1(mm) | test-1-2(mm) | max error(mm) |
|-----|---------------|--------------|--------------|---------------|
| D90 | 23.21         | 23.08        | 22.92        | 0.29          |
| D50 | 17.73         | 17.37        | 16.88        | 0.85          |
| D10 | 10.25         | 10.50        | 9.74         | 0.51          |

表 5.1-12 測試級配第二組 D10、D50、D90 結果比較

|     | test-2 真實(mm) | test-2-1(mm) | test-2-2(mm) | max error(mm) |
|-----|---------------|--------------|--------------|---------------|
| D90 | 22.90         | 22.84        | 22.74        | 0.16          |
| D50 | 16.72         | 16.30        | 16.05        | 0.67          |
| D10 | 9.85          | 7.66         | 7.37         | 2.48          |

表 5.1-13 測試級配第三組 D10、D50、D90 結果比較

|     | test-3 真實(mm) | test-3-1(mm) | test-3-2(mm) | max error(mm) |
|-----|---------------|--------------|--------------|---------------|
| D90 | 22.90         | 22.74        | 22.80        | 0.16          |
| D50 | 16.84         | 16.12        | 16.36        | 0.71          |
| D10 | 9.90          | 7.62         | 8.12         | 2.28          |

表 5.1-11~表 5.1-13 顯示了真實與預測篩分析結果的 D10、D50、D90，比較兩之間的差異可發現，當粒徑越小時誤差有逐漸放大的趨勢，與 Mora, C. F., et al.[8] 觀點一致，顆粒太小會導致像素表示不準確。D90 最大誤差為 0.29mm，而 D10 最大誤差則來到 2.48mm，能發現影像辨識對於粒徑小的顆粒掌握度較差，在精準度方便有待提升。



表 5.1-14 test-1-1 與 test-1-2 之篩分析預測差異

| 篩號           | 個別留篩  | 個別留篩  | 累積過篩  | 累積過篩  |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
|              | 數量百分率 | 重量百分率 | 數量百分率 | 重量百分率 |
|              | 差異(%) | 差異(%) | 差異(%) | 差異(%) |
| 19.0mm(3/4") | 2.64  | 3.80  | 2.64  | 3.80  |
| 12.5mm(1/2") | 3.08  | 1.18  | 5.73  | 2.62  |
| 9.5mm(3/8")  | 2.43  | 0.07  | 8.16  | 2.54  |
| 4.75mm(#4)   | 8.16  | 2.54  | 0.00  | 0.00  |

表 5.1-15 test-2-1 與 test-2-2 之篩分析預測差異

| 篩號           | 個別留篩  | 個別留篩  | 累積過篩  | 累積過篩  |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
|              | 數量百分率 | 重量百分率 | 數量百分率 | 重量百分率 |
|              | 差異(%) | 差異(%) | 差異(%) | 差異(%) |
| 19.0mm(3/4") | 0.71  | 1.74  | 0.71  | 1.74  |
| 12.5mm(1/2") | 0.80  | 0.37  | 1.51  | 1.37  |
| 9.5mm(3/8")  | 1.19  | 0.47  | 2.70  | 1.84  |
| 4.75mm(#4)   | 2.70  | 1.84  | 0.00  | 0.00  |

表 5.1-16 test-3-1 與 test-3-2 之篩分析預測差異

| 篩號           | 個別留篩  | 個別留篩  | 累積過篩  | 累積過篩  |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
|              | 數量百分率 | 重量百分率 | 數量百分率 | 重量百分率 |
|              | 差異(%) | 差異(%) | 差異(%) | 差異(%) |
| 19.0mm(3/4") | 0.79  | 1.00  | 0.79  | 1.00  |
| 12.5mm(1/2") | 1.93  | 1.17  | 2.72  | 2.17  |
| 9.5mm(3/8")  | 1.49  | 0.30  | 4.21  | 2.47  |
| 4.75mm(#4)   | 4.21  | 2.47  | 0.00  | 0.00  |



表 5.1-14 ~表 5.1-16 統整了每組測試級配在兩次不同拍攝之間的篩分析預測差異，從觀察個別留篩數量百分率可以發現，#4、3/8”、1/2”篩的最大差異較小，分別是 2.64%、3.08%、2.43%，而#4 篩的最大差異則有達 8.16%，並且能觀察出三張表中，較小篩號的預測顆粒數量差異較大，並且同樣的趨勢情況也發生於累積過篩數量百分率。然而因為小顆粒重量輕，在轉換成重量百分比時，影響權重較低，所以在個別留篩重量百分率部分，#4 篩的最大差異縮小至 2.54%，各篩號的最大差異也僅來到 3.8%。

此現象間接揭示了顆粒數預估方式的利弊，有鑒於影像畫素對愈小顆粒精準度要求愈高是必然趨勢，小顆粒的穩定性相對較差，但由於重量百分制度下其影響權重低，恰好消除了這種差異較大的問題，並不會產生過度的隨機性與不確定性。

表 5.1-17 test-1-1、test-1-2 與真實篩分析之最大誤差

| 篩號           | 個別留篩  | 個別留篩  | 累積過篩  | 累積過篩  |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
|              | 數量百分率 | 重量百分率 | 數量百分率 | 重量百分率 |
|              | 誤差(%) | 誤差(%) | 誤差(%) | 誤差(%) |
| 19.0mm(3/4") | 2.30  | 7.79  | 2.30  | 7.79  |
| 12.5mm(1/2") | 2.84  | 8.20  | 5.14  | 3.02  |
| 9.5mm(3/8")  | 10.84 | 2.85  | 15.98 | 2.37  |
| 4.75mm(#4)   | 15.98 | 2.37  | 0.00  | 0.00  |

表 5.1-18 test-2-1、test-2-2 與真實篩分析之最大誤差

| 篩號 | 個別留篩  | 個別留篩  | 累積過篩  | 累積過篩  |
|----|-------|-------|-------|-------|
|    | 數量百分率 | 重量百分率 | 數量百分率 | 重量百分率 |

|              |       |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
|              | 誤差(%) | 誤差(%) | 誤差(%) | 誤差(%) |
| 19.0mm(3/4") | 2.68  | 3.01  | 2.68  | 3.01  |
| 12.5mm(1/2") | 12.44 | 3.70  | 15.12 | 6.34  |
| 9.5mm(3/8")  | 14.18 | 3.31  | 29.30 | 9.65  |
| 4.75mm(#4)   | 29.30 | 9.65  | 0.00  | 0.00  |

表 5.1-19 test-3-1、test-3-2 與真實篩分析之最大誤差

| 篩號           | 個別留篩  | 個別留篩  | 累積過篩  | 累積過篩  |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
|              | 數量百分率 | 重量百分率 | 數量百分率 | 重量百分率 |
|              | 誤差(%) | 誤差(%) | 誤差(%) | 誤差(%) |
| 19.0mm(3/4") | 2.12  | 3.03  | 2.12  | 3.03  |
| 12.5mm(1/2") | 10.81 | 4.62  | 12.93 | 7.65  |
| 9.5mm(3/8")  | 8.84  | 0.35  | 21.77 | 8.00  |
| 4.75mm(#4)   | 21.77 | 8.00  | 0.00  | 0.00  |

表 5.1-17~表 5.1-19 顯示了每組測試級配的兩次預測結果與真實篩分析之間的最大誤差，從數量百分率結果來看，同樣可以發現篩號越小誤差越大的趨勢，在個別留篩數量百分率方面，#4 篩甚至在第二組與第三組都有超過 20%的誤差，最大誤差來到 29.3%。對比於校正集級配的最大誤差 5.59%，高達 5 倍之多。本研究認為極有可能的原因在於測試集多加入了#8 篩粒料，#8 篩孔徑為 2.36mm，與#4 篩的 4.75mm 僅相差 2.39mm，過窄的區間造成影像辨識分類粒料不易，故預測時考慮了許多#8 篩大小的粒料進#4 篩區間，導致#4 篩的個別留篩數量百分率顯著高於真實實驗值。

在最終累積過篩重量百分率的表示結果中，對比 Pourebrahimi, M., et al.[12]最大誤差可控制在 4.3%，本研究最大誤差來到 9.65%，可能的原因在於影像取得方



式的不同。本研究採用了動態拍攝的方法，後續還需經過特徵篩選步驟，這可能導致一定的偏差。未來研究可以針對特徵篩選部分進行優化與改善，以提高精度並減少誤差。

總結而言，對於小顆粒的預測精準度不足可能是因為影像辨識顆粒太小導致像素表示不準確，此外，篩網孔徑愈小，兩相鄰篩網間的孔徑差異也愈小，從而增加了影像辨識分類錯誤的機率。然而，由於小顆粒在重量百分比制度下的影響較小，最終以累積過篩重量百分率呈現時，誤差僅達到 9.65%。至於整體系統性誤差，可能來源如下：

1. 比例尺：在進行影像辨識前，需手動拖移圖中標線使其與比例尺重合，此舉可能造成人為的系統性誤差。
2. 旋轉角度不足：由於本研究對於粒料篩分析的預測方法是建立在動態攝影能捕捉到其所有角度，在找出最小包圍正方形後，將其視為粒料的留篩尺寸。然而，由於粒料採隨機翻滾落下，加上拍攝範圍有限，掉落路徑的長度可能不足以使物體完全翻轉，這會導致無法獲得完整的影像資訊，從而在預測時產生一定程度的誤判。
3. 特徵篩選：本研究根據實驗觀察「重疊」資料及「陰影」資料具有的特性，利用一些特徵參數進行篩選排除，期望能改善整體預測準確率。然而，關於篩選特徵的選擇，尚有許多特徵因子並未被發現與考慮，對於精準度仍有許多進步空間。



4. 尺寸校正因子：在對試樣整體尺寸進行校正時，本研究僅使用單一係數，這種方法略顯粗糙。由於不同尺寸的顆粒可能具有不同的形狀特徵，因此應為其設定不同的修正係數。
5. 重量數量比：隨著篩孔尺寸的增大，篩網涵蓋的孔徑範圍變廣，導致留在篩網上的顆粒重量標準差增加。因此，在較大尺寸顆粒上利用重量數量比轉換時，誤差將會增加。

整體來說，本研究採用的動態攝影在影像辨識上具有一定可行性，即便存在上述可能誤差來源，透過適當的特徵篩選與分析，最終預測結果與實際試驗值幾乎保持一致趨勢。對於後續研究改進，可進一步提升影像辨識的精準度，從而提高整體準確率與可靠性。

## 5.2 扁平、細長、扁長顆粒結果與討論

本研究透過動態攝影獲取多角度平面粒料影像，來尋找粒料的長寬平面和寬厚平面。接著利用影像辨識特徵「Feret(max)」、「Size(width)」獲得長度、寬度及厚度資訊，進一步計算出扁平、細長、扁長率（本研究比例設置為 1:5），最後將預測結果與真實扁平、細長或扁長顆粒含量試驗結果相互進行比較。

表 5.2-1 測試級配第一組真實扁平、細長或扁長顆粒含量試驗結果

|      | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4" | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2" | 0.00           | 1.00           | 0.00           |
| 3/8" | 3.00           | 4.00           | 0.00           |

|       |      |      |      |
|-------|------|------|------|
| #4    | 2.00 | 3.00 | 0.00 |
| total | 1.53 | 2.42 | 0.00 |

表 5.2-2 test-1-1 扁平、細長或扁長顆粒預測結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| #4    | 0.00           | 2.69           | 0.00           |
| total | 0.00           | 1.22           | 0.00           |

表 5.2-3 test-1-2 扁平、細長或扁長顆粒預測結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| #4    | 0.00           | 0.89           | 0.00           |
| total | 0.00           | 0.48           | 0.00           |

表 5.2-4 測試級配第二組真實扁平、細長或扁長顆粒含量試驗結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 1.00           | 0.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 1.00           | 2.00           | 0.00           |
| #4    | 3.00           | 4.00           | 0.00           |
| total | 1.75           | 2.16           | 0.00           |

表 5.2-5 test-2-1 扁平、細長或扁長顆粒預測結果

|      | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4" | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2" | 0.00           | 0.00           | 1.18           |
| 3/8" | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| #4   | 0.00           | 0.74           | 0.12           |

|       |      |      |      |
|-------|------|------|------|
| total | 0.00 | 0.50 | 0.25 |
|-------|------|------|------|

表 5.2-6 test-2-2 扁平、細長或扁長顆粒預測結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 0.00           | 0.00           | 0.86           |
| #4    | 0.00           | 0.49           | 0.37           |
| total | 0.00           | 0.35           | 0.35           |

表 5.2-7 測試級配第三組真實扁平、細長或扁長顆粒含量試驗結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 1.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 1.00           | 1.00           | 0.00           |
| #4    | 2.00           | 3.00           | 0.00           |
| total | 1.13           | 1.85           | 0.00           |

表 5.2-8 test-3-1 扁平、細長或扁長顆粒預測結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| #4    | 0.00           | 0.62           | 0.12           |
| total | 0.00           | 0.42           | 0.08           |

表 5.2-9 test-3-2 扁平、細長或扁長顆粒預測結果

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| #4    | 0.00           | 1.05           | 0.23           |
| total | 0.00           | 0.80           | 0.18           |



表 5.2-1~表 5.2-9 為所有測試級配的篩分析真實與預測結果數據，後續將進一步對這些數據進行分析討論。

表 5.2-10 test-1-1 與 test-1-2 之扁平、扁長、細長率預測差異

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| #4    | 0.00           | 1.80           | 0.00           |
| total | 0.00           | 0.74           | 0.00           |

表 5.2-11 test-2-1 與 test-2-2 之扁平、扁長、細長率預測差異

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 0.00           | 1.18           |
| 3/8"  | 0.00           | 0.00           | 0.86           |
| #4    | 0.00           | 0.25           | 0.25           |
| total | 0.00           | 0.15           | 0.10           |

表 5.2-12 test-3-1 與 test-3-2 之扁平、扁長、細長率預測差異

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| #4    | 0.00           | 0.43           | 0.11           |
| total | 0.00           | 0.38           | 0.10           |

表 5.2-10~表 5.2-12 比較了每組測試級配在兩次不同拍攝之間的扁平率、扁長率和細長率的預測差異，結果顯示，篩號之間的最大差異發生在#4 篩的 1.8%。



而整體最大差異則僅為 0.74%，可以認為透過本研究動態攝影獲得的粒料影像，具有一定的穩定性與代表性。

表 5.2-13 test-1-1、test-1-2 與真實扁平、細長、扁長顆粒含量試驗之間最大誤差

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 1.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 3.00           | 4.00           | 0.00           |
| #4    | 2.00           | 2.11           | 0.00           |
| total | 1.53           | 1.94           | 0.00           |

表 5.2-14 test-2-1、test-2-2 與真實扁平、細長、扁長顆粒含量試驗之間最大誤差

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 1.00           | 0.00           | 1.18           |
| 3/8"  | 1.00           | 2.00           | 0.86           |
| #4    | 3.00           | 3.51           | 0.37           |
| total | 1.75           | 1.81           | 0.35           |

表 5.2-15 test-3-1、test-3-2 與真實扁平、細長、扁長顆粒含量試驗之間最大誤差

|       | 數量扁平率(寬/厚) (%) | 數量扁長率(長/厚) (%) | 數量細長率(長/寬) (%) |
|-------|----------------|----------------|----------------|
| 3/4"  | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 1/2"  | 0.00           | 1.00           | 0.00           |
| 3/8"  | 1.00           | 1.00           | 0.00           |
| #4    | 2.00           | 2.38           | 0.23           |
| total | 1.13           | 1.43           | 0.18           |

表 5.2-13~表 5.2-15 顯示了每組測試級配的兩次預測結果與真實扁平、細長、扁長顆粒含量試驗之間的最大誤差，根據篩號之間的結果可以發現，扁長率與扁平率的誤差較大，最大誤差分別為 4%與 3%，細長率誤差則較低，最大誤差僅有 1.18%。



在整體最大誤差方面，扁長率與扁平率都超過 1%，分別達到 1.94%和 1.75%，而細長率則僅有 0.35%。對於這種趨勢現象，本研究認為主要原因在於厚度的預測較為困難，由於本研究的預測方法本質上是利用平面影像資訊預測第三維度，因此對厚度的掌握度可能會低於長度與寬度。至於扁平、扁長、細長率的系統性誤差，除了 5.1 提及的 1~4 項原因外，尚可能存在其他因素，分述如下：

1. 特徵評估：對於粒料寬度的評估，因影像辨識軟體 Image Pro Plus 6.0 沒有與規範相同定義之特徵可供使用，故本研究以等效橢圓的短軸方向取代垂直於長度的方向，可能是誤差來源之一。
2. 人為量測：現今規範對於粒料的長度、寬度、厚度雖有清楚定義，但實務上卻常因粒料的形狀凹凸多變，加上比例測徑器的操作難以標準化，量測值可能存在于人為的系統性誤差。

總結而言，本研究使用動態攝影結合影像辨識，透過分析多角度的平面影像資訊，能夠快速預測扁平、扁長、細長率，並且具有相當的準確性，然而，當中仍可能存在一些誤差。對於後續的研究改善，可以進一步增加粒料拍攝時的旋轉角度，擴增影像拍攝範圍，以獲得更全面的粒料資訊，改善評估特徵的精準度，提高預測結果的可靠性。

## 第六章、結論與建議



### 6.1 結論

1. 本研究採用一種動態攝影的方式，透過定點高速連拍獲得粒料多角度翻轉的平面影像，經由影像辨識與特徵篩選處理後，模擬真實搖篩原理來預測級配曲線，可以看出預測結果在 3/4”、1/2”、3/8”及 #4 篩的精準度均達 9 成以上，並與實際試驗值幾乎保持一致趨勢，能快速獲得相對精確的篩分析結果，有效節省人力與時間成本。本實驗採取的攝影方式可應用於預拌廠內的下料口，及時監測料倉的品質狀況，隨時調整三分石與六分石配比以符合實務要求，確保混凝土之工作性和硬固性質，對混凝土生產和品質管理提供了重要幫助。並且本研究採用一種全自動化的預測方式，從影像拍攝到影像辨識，再到特徵篩選，最後到繪製級配曲線，中間過程無需人工干預，標準化的流程能使人為誤差降到最低，這些研究成果將有助於推動預拌混凝土產業邁向自動化，並對成本控制和品質控制提供了重要信息。
2. 本研究藉由影像辨識，分析動態攝影獲取的多角度平面影像，尋找粒料的長寬平面和寬厚平面以獲取其長度、寬度及厚度資訊，並進一步計算扁平、細長、扁長率，結果顯示，三者中整體的最大誤差僅有 1.94%，幾乎與實驗值相同。此方法除了能快速提供精確的預測結果，也省去 CNS15171 所耗費的大量時間與人力，對於生產效率以及成本控制有重要幫助，同時標準化與全自動化的



預測方式，不僅解決了傳統上人工量測誤差的問題，也有助於推動相關土木領域的技術進步和應用創新，這種高效、即時且準確的評估方法對工程師和研究人員具有重要價值。這些成果將有助於改善預拌混凝土產業的工作環境與效率，在粒料品管和混凝土生產方面，具有極高的應用價值和潛力。

3. 傳統上 CNS486「粗粒料篩析法」與 CNS15171「粗粒料中扁平、細長或扁長顆粒含量試驗法」這兩項試驗既費時又費力，透過本研究的方法，除了能以自動化的方式進行預測，降低人為誤差，並即時獲得相對準確的結果之外，與傳統方法及文獻相比，預測所需時間更短，整體過程僅花費 5 分鐘。

|              | 本研究   | 傳統文獻<br>(手動分離粒料) | 傳統方法      |
|--------------|-------|------------------|-----------|
| 篩分析試驗        | 5 min | 15 min           | 40~60 min |
| 扁平、扁長、細長顆粒試驗 | 5 min | 20 min           | 2~2.5 hr  |

圖 6.1-1 試驗時間比較



## 6.2 建議

1. 本研究在實驗流程中受到兩項限制，詳述如下，後續研究可進一步改善與優化，這將有助於提升自動化之精準度與應用程度。
  - i. 單次影像辨識之總顆粒數存在上限，故每批「三分石」級配只取 1kg 進行試驗，並且每種級配的試樣都會透過「初步篩選」動作，減少軟體辨識顆粒數。
  - ii. 單次讀入影像辨識軟體之總照片數存在上限，故需擷取動態畫面中粒料出現的片段，去除頭尾無用之影像。
2. 本研究探討對象為 3/4”、1/2”、3/8”及#4 篩尺寸的顆粒，故繪製級配曲線時僅有 3 個點做分析比較，#4 篩的值恆為 0。可以考慮將 1”及#8 篩納入級配曲線，除了能更全面的分析研究，還能擴展研究的應用範圍與可靠度。
3. 關於篩選特徵的挑選，本研究僅透過實驗觀察而定，對於最佳值的選擇，建議可以借助機器學習或深度學習技術，透過 AI 演算法找到關聯性最大的因子，相信能對整體預測精準度有所幫助。
4. 本研究針對扁平、扁長、細長率的比例設置為業界常用的 1:5，但從結果發現，由於條件嚴苛造成多數數值普遍趨近於 0，較無法與從比對結果中看出預測成效，建議往後研究可以採 1:3 進行評估，較能看出差異變化。

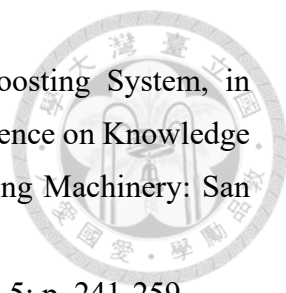


5. 本研究尺寸校正因子採用單一數值進行修正，方法過於簡陋，往後研究可針對不同尺寸的粒料，採用不同的尺寸校正因子，將有助於更好的擬合實際篩分析情形。
5. 本研究在粒料寬度的測量上，由於影像辨識軟體 Image Pro Plus 6.0 沒有與規範相符的特徵可供使用，因此以等效橢圓的短軸方向取代垂直於長度的方向。建議可借助機器學習或深度學習模型，找尋最具代表性的替代因子，或挑選使用具有相同定義特徵的辨識軟體。
6. 關於顆粒重量比的轉換，可能存在顆粒尺寸愈大誤差愈大的問題，建議可以參考其他文獻的做法，改採用影像辨識面積當作轉換媒介，並比較兩者之間的優劣。
7. 關於本研究拍攝時粒料翻轉角度不足的問題，建議可以更改上方儲料槽的位置，讓粒料能夠以斜向並持有一定初速的方式進入分流板，對於翻轉速度應能有所提升，從而拍攝到更多不同的角度。
8. 本研究目前預測所需時間為 5 分鐘，為進一步達即時分析之目的，改善程式運算性能，能大幅減少預測時間。

## 參考文獻



1. CNS 486 A3005 「粗細粒料篩析法」. 2001.
2. ASTM C136/C136M-19 「Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates」. 2020.
3. CNS 15171 A3408 「粗粒料中扁平、細長或扁長顆粒含量試驗法」. 2008.
4. ASTM D4791-19 「Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate」. 2023.
5. Norbert, M. and S. Lusher, Measurement of Flat and Elongation of Coarse Aggregate Using Digital Image Processing. 2001.
6. Norbert, M., Technical and Computational Aspects of the Measurement of Aggregate Shape by Digital Image Analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering - J COMPUT CIVIL ENG*, 2004. 18.
7. 項灤先, 運用 AI 進行不同料源粗粒料辨識. 2023, 國立臺灣大學. p. 1-94.
8. Mora, C.F., A.K.H. Kwan, and H.C. Chan, Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cement and Concrete Research*, 1998. 28(6): p. 921-932.
9. Kurnaz, T.F. and M. Aydın, An alternative method for the particle size distribution: Image processing. *Turkish Journal of Engineering*, 2023. 7(2): p. 108-115.
10. 江田, 正., et al., デジタル画像処理による連続粒度解析システムの開発. *ダム工学*, 2014. 24(2): p. 84-93.
11. Maiti, A., et al., Development of a mass model in estimating weight-wise particle size distribution using digital image processing. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017. 27(3): p. 435-443.
12. Pourebrahimi, M., V. Shahhosseini, and A. Ramezani-pour, Innovative sieve simulation and microstructure image analysis techniques for estimation of aggregate size distribution in hardened concrete. *Construction and Building Materials*, 2023. 384: p. 131456.
13. Cox, D.R., The Regression Analysis of Binary Sequences. *Journal of the royal statistical society series b-methodological*, 1958. 20: p. 215-232.
14. Quinlan, J.R., Induction of decision trees. *Machine Learning*, 1986. 1(1): p. 81-106.
15. Breiman, L., Random Forests. *Machine Learning*, 2001. 45(1): p. 5-32.

- 
16. Chen, T. and C. Guestrin, XGBoost: A Scalable Tree Boosting System, in Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016, Association for Computing Machinery: San Francisco, California, USA. p. 785–794.
  17. Wolpert, D., Stacked Generalization. *Neural Networks*, 1992. 5: p. 241-259.
  18. Cortes, C. and V. Vapnik, Support-vector networks. *Machine Learning*, 1995. 20(3): p. 273-297.
  19. Cover, T. and P. Hart, Nearest neighbor pattern classification. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1967. 13(1): p. 21-27.
  20. MacQueen, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. 1967.
  21. F.R.S., K.P., LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine Series 1*, 1901. 2: p. 559-572.
  22. Sun, Z., et al., Assessment of importance-based machine learning feature selection methods for aggregate size distribution measurement in a 3D binocular vision system. *Construction and Building Materials*, 2021. 306: p. 124894.
  23. Ren, Z., et al., Irregular characteristic analysis of 3D particles—A novel virtual sieving technique. *Powder Technology*, 2023. 420: p. 118383.
  24. Feng, X., et al., Coarse Aggregate Shape Classification Method Based on Per-Optuna-LightGBM Model. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023. 2589(1): p. 012015.
  25. CNS 386 Z7008 「試驗篩」. 1984.