

# 混凝土組成配比優化與性能提升之初探

吳志仁<sup>1</sup>

中國科技大學建築系碩士班研究生

徐鑫元<sup>3</sup>

中國科技大學建築系碩士班研究生

何明錦<sup>5</sup>

中華大學建築與都市計畫學系教授

溫上元<sup>2</sup>

中國科技大學建築系碩士班研究生

李彥民<sup>4</sup>

中國科技大學建築系碩士班研究生

## 摘要

混凝土中水泥、爐石粉、飛灰等為最重要的3種膠結材料，本文調查並彙整各種膠結材之來源、供應量以及影響供應的因素，分析未來可能的供需變化。其次依據調查分析各種候選替代材料，比較其優點與缺點。第三部分則針對最可能成為添加材料的石灰石粉(Limestone powder)特質作一說明，並彙整學界對此課題的研究進展。本文並以預拌混凝土產業現況，探討「水泥，爐石粉，石灰石粉」三種材料的膠結粉體性能，以及以石灰石粉替代飛灰之可行性。希望能為日漸緊迫的缺灰危機提供另一解方。

**關鍵字：**混凝土配比，混凝土摻料，石灰石粉，性能優化

## Discussion on Optimization of Concrete Composition Ratio and Performance Improvement

### Abstract

Cement, furnace stone powder and fly ash are the three most important cementing materials in concrete. This paper investigates and summarizes the source, supply and factors affecting supply of various cementing materials, and analyzes possible future supply and demand changes. Secondly, according to the investigation and analysis of various candidate alternative materials, their advantages and disadvantages are compared. The third part explains the characteristics of Limestone powder, which is most likely to be an additive material, and summarizes the research progress of this topic in the academic circles. In this paper, based on the current status of the ready-mixed concrete industry, the performance of cemented powders of three materials, "cement, furnace stone powder, and limestone powder", and the feasibility of replacing fly ash with limestone powder are discussed. It is hoped that the research results will provide another solution to the increasingly urgent ash shortage crisis.

**Keywords:** concrete composition ratio, concrete admixture, limestone powder, performance optimization

## 一、研究動機與目的

混凝土是世界上第二常用的材料，僅次於水<sup>[1]</sup>。它主要由 6 種原料構成(如圖 1)，其中水泥、爐石粉、飛灰三者合稱膠結材，膠結材與水混合攪拌後在混凝土中扮演「膠水」的角色，把所有原料緊密黏結在一起，提供建築所需要的強度、水密性、耐久性…等各種性質。唯其組成材料受到全球暖化與氣候變遷之影響，加上全球各國均一再宣示 2050 年要達成淨零排碳(net zero)目標，未來煉鋼產業製程與煅製能源的改變，對爐石、飛灰等副產品的產量必有重大之影響，未來混凝土組成材料的供應與性能提升，將成為吾人必須面對營建產業永續發展的重要課題。



圖 1 混凝土主要組成原料及其主要功能

## 二、混凝土膠結材料的供應狀況

### 2.1 水泥、爐石粉、飛灰的供應現況與未來供應預估

台灣地區水泥、爐石、飛灰的供應來源如表 1 所示。過去 10 年水泥供給量如圖 2，平均供給量 1,479 萬噸/年，以國內自產為主，平均每年 1,294 萬噸<sup>[2]</sup>，佔比約 87%；進口水泥(含熟料，以熟料量/0.96=水泥量的比例估算)量約 185 萬噸/年<sup>[3]</sup>，佔比 13%。

台灣的水泥供給長期供過於求：根據水泥公會資料<sup>[3]</sup>，全台水泥旋窯設備年產能達 2,023 萬噸，據此換算近年產能利用率僅 60% 上下；而產出的水泥，約有 25%(10 年平均值 323 萬噸/年)以低於內銷價格出口外銷<sup>[3,4]</sup>。由於國內水泥價格持續走高，且經濟部已政策指引出口量在 2025 年須降至 20% 以內，預期將有百萬噸以上的水泥量由外銷轉內銷；加上各港口水泥圓庫(Silo)週轉率普遍偏低，台灣仍保有相當大的進口能量。因此近期雖常有國內水泥廠因設備老舊而停機保修的事件發生，但尚不致造成長期缺料。

表 1 台灣地區水泥、爐石、飛灰來源與主要營運模式 (本研究整理)

材料	水泥	爐石	飛灰
國內生產廠商	台泥蘇澳廠 信大南聖湖廠 潤泰冬山廠 幸福東澳廠(以上宜蘭) 台泥和平廠	中國鋼鐵(高雄) 中龍鋼鐵(台中)	林口電廠(新北) 華亞汽電(桃園) 大園汽電(桃園) 台中電廠(台中) 麥寮電廠(雲林) 興達電廠(高雄)

	亞泥花蓮廠 台泥花蓮廠(以上 花蓮)		大林電廠(高雄) 和平電廠(花蓮)
進口港口	基隆港、台北港、台 中港、安平港、高 雄港	基隆港、台北港、台 中港、安平港、高雄港(以 上為主)、花蓮港、蘇澳 港	(無)
主要營運模式	1. 國內/國外水 泥廠→(海運)港 口→(陸運)預拌 廠 2. 國內水泥廠/ 研磨廠→(陸運) 至各預拌廠	1. 國內鋼鐵廠→(陸運) 研磨廠→(陸運)預拌 廠 2. 國外鋼鐵廠→(海運) 港口→(陸運)研磨廠 →(陸運)預拌廠	燃煤電廠→(陸運) 預拌廠

## 台灣市場水泥供給量

(單位:萬噸)

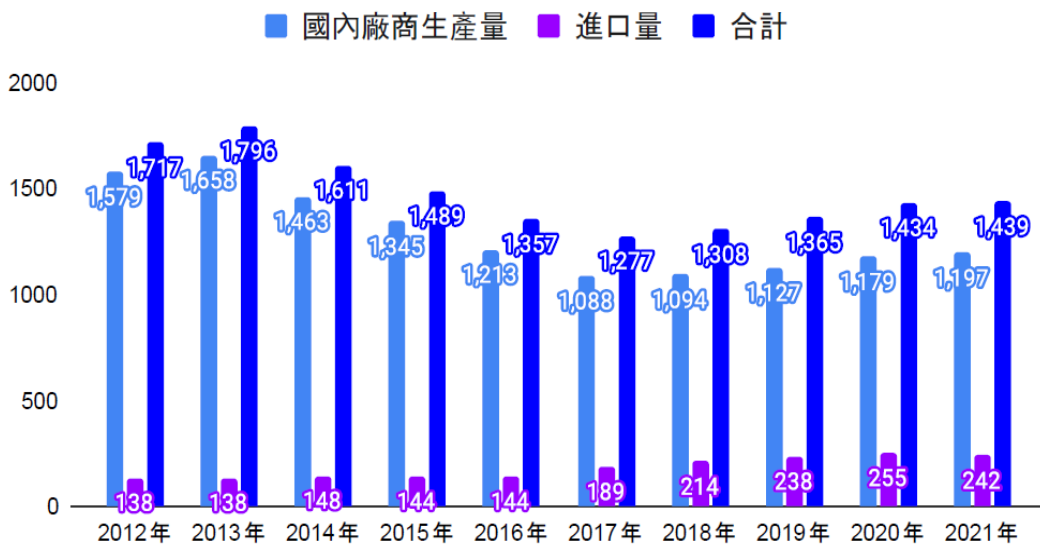


圖 2 近 10 年台灣地區水泥供給量(本研究整理-資料來源: 2021 年台灣區水泥工業概況, 2021/05; 進口量-“海關進出口統計”財政部關務署網站)

過去 10 年爐石供給量如圖 3, 平均供給量 524 萬噸/年, 國內產出平均每年 280 萬噸<sup>[5]</sup>, 佔比約 53%; 進口量則約 244 萬噸/年<sup>[3]</sup>, 佔比約 47%。台灣有 6 支高爐, 包含高雄中國鋼鐵 4 支以及台中中龍鋼鐵 2 支, 以長期數字來看爐石年產量上限約 300 萬噸左右, 不足的部分則靠進口鄰近各國爐石供應。近年雖然中國實施鋼鐵減產且日、韓逐步將老舊高爐除役, 但包含越南、印尼、印度等各國都有新鋼鐵廠產能陸續開出, 現階段暫無長期供應短缺的趨勢; 另一方面當爐石粉不足時可以提高水泥、飛灰用量, 藉由配比調整的方式穩定成本持續供貨。

## 台灣市場爐石供給量

(單位:萬噸)

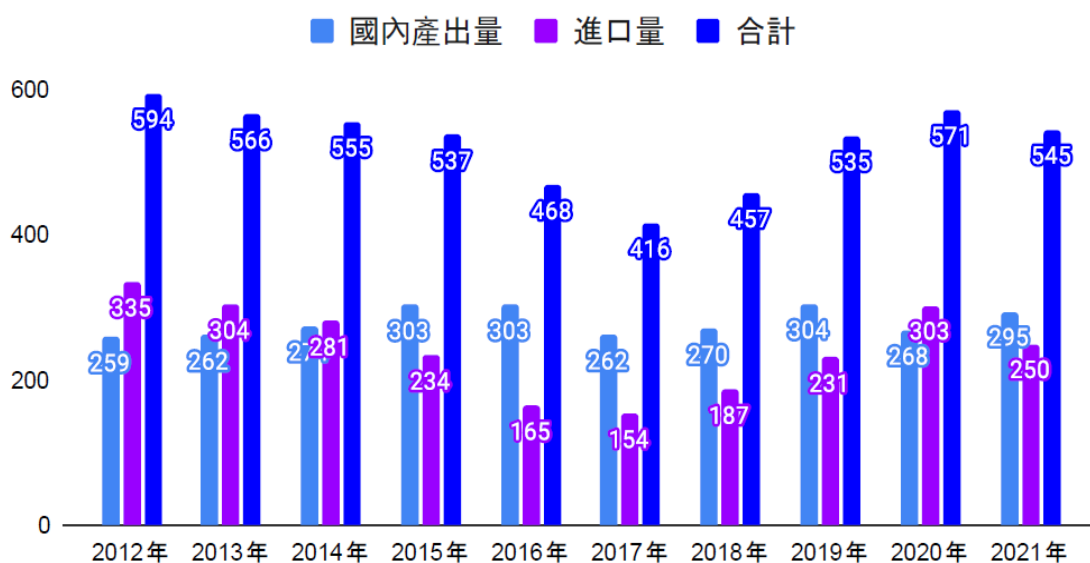


圖 3 過去 10 年台灣地區爐石供給量

## 台灣市場飛灰供給量

(單位:萬噸)

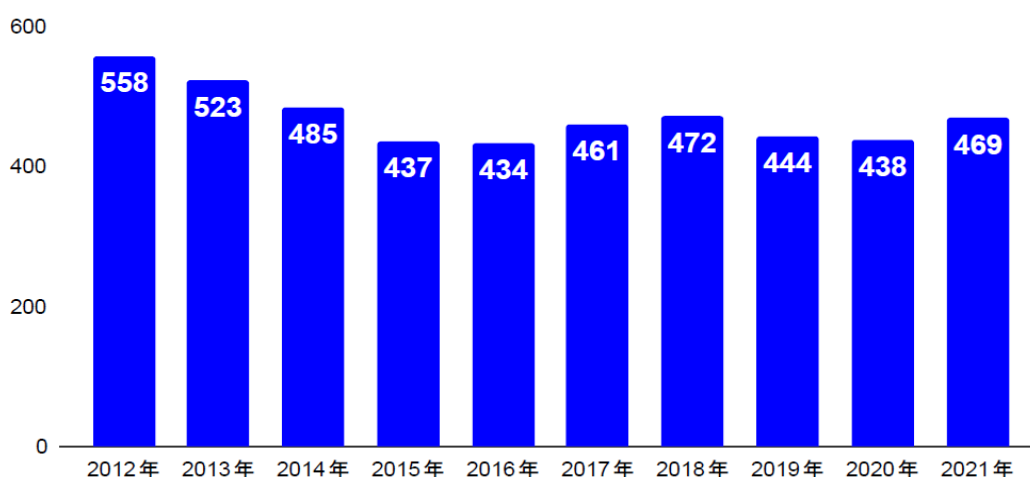


圖 4 過去 10 年台灣地區飛灰供給量

過去 10 年飛灰供給量如圖 4，平均供給量 472 萬噸/年<sup>[5]</sup>，主要為國內燃煤電廠產出，無進口。飛灰進口難度相當高：一是飛灰進口須依環保署「事業廢棄物輸入輸出管理辦法」向地方主管機關申請取得許可文件後始得輸入，不但須備齊之資料繁多且官方的態度普遍保守；其二是由於飛灰為粉體，為避免逸散須使用封閉式的水泥專用船(Cement Carrier)運輸，到港後儲存於水泥圓庫(Cement Silo)，這不但限制了進口數量，也大幅拉高進口的總成本；由於飛灰活性低於爐石粉，爐石粉的單價也理所當然成為飛灰單價的天花板；當飛灰進口成本高到一定程度即不具備經濟可行性。

機組類別： 燃煤 燃氣 燃油 核能 再生能源 儲能 括號內單位：萬瓩



圖 5 台電新增及除役發電機組時程規劃(資料來源：110 年度全國電力資源供需報告)

表 2 主要飛灰縣市飛灰產出量以及迄 2026 年預估飛灰減少量(本文整理)

縣市	飛灰產出量 (2018-2020 年均) (萬噸/年)	飛灰主要來源 (電廠，機組數)	電廠機組 裝置容量 (萬瓩)	迄 2026 減少機組	預估飛灰 產出減少量 (萬噸/年)	飛灰產出 減少比例 (%)
新北市	54.9	林口電廠，3 組	240.0	-	-	-
桃園市	19.6	華亞汽電，2 組 大園汽電，1 組	17.4 3.8	-	-	-
台中市	83.4	台中電廠，10 組	550.0	中火 2 組	16.7	20
雲林縣	142.3	麥寮電廠，3 組 台塑化汽電，16 組	180.0 282.0	麥寮 3 組	55.4	39
高雄市	92.6	興達電廠，4 組 大林電廠，2 組	210.0 160.0	興達 4 組 -	52.6	57
花蓮縣	22.2	和平電廠，2 組	130.0	-	-	-
其他	36.5	小型工業燃煤鍋爐	-	-	-	-
合計	451.5		1,773.2	9 組	124.7	28



由前述可知，飛灰的供給大架構下完全取決於國內電廠的燃煤量。而根據政府『2025 非核家園』所制定的能源轉型規劃<sup>[6]</sup>，燃煤發電比例將由 2023 年(民 112 年)41%逐步降至 2025 年的 27%<sup>[6]</sup>，具體作為就是將燃煤機組除役<sup>[7]</sup>，如圖 5：台電規劃 2023 年起 4 年內將 9 部燃煤機組(含台電承諾台中 2 部新燃氣機組上線後拆除 #1、#2 燃煤機組)除役，屆時燃煤機組將由目前的 43 組(含民營電廠與汽電共生)減至 34 組，裝置容量則由目前 1773 萬瓩降至 1,273 萬瓩。表 2 列出全台主要飛灰產出縣市 2018~2020 年年均飛灰產出量、該縣市主要飛灰來源、迄 2026 年將減少的燃煤發電機組，以及以裝置容量等比例估算飛灰產出減少量等資訊，合理估算約莫 4 年後，雲林、高雄各將減少 55.4 與 52.6 萬噸左右，台中則減少 16.7 萬噸左右；全台飛灰產量將減少 124 萬噸以上，佔目前產出量的 28%。

## 2.2 其他可添加於混凝土的材料初步比較

上述三種膠結材料供應狀況等相關比較整理如表 3。基本上水泥、爐石活性較高，單價也較高，長期以來已經建立穩定的進口管道與方式，當面臨突然短缺時可立刻提高進口量來因應；相對地，飛灰進口程序複雜，加上運儲成本高，且須和現有的水泥系統(船隻、圓庫)競爭，這些都大大提高了飛灰進口的門檻。另外，當任一膠結材料短缺時，基本上都可以靠配比調整方式，即降低該材料的用量、提高另外兩種材料的用量因應；但單價低的飛灰不足時增加單價高的水泥、爐石粉，這將導致混凝土材料成本大幅增加，衝擊預拌廠的營運。

表 3 水泥、爐石、飛灰供給、性價狀況與短缺因應(本文整理)

膠結材	水泥	爐石	飛灰
平均供給量	1,479 萬噸/年	524 萬噸/年	472 萬噸/年
活性	高	中	低
單價	高	中	低
進口方式	水泥以水泥專用船海運，入港後儲存於港邊水泥圓庫(運儲成本高) 熟料以散裝船海運，入港後於散裝碼頭卸貨(運儲成本低)	爐石以散裝船海運，入港後於散裝碼頭卸貨(運儲成本低)	<b>須專案申請並擬妥運輸倉儲與退返方案</b> 飛灰以水泥專用船海運，入港後儲存於港邊水泥圓庫(運儲成本高)
供應短缺機率	低	低	高
供應短缺因應	1. 提高進口量 2. 增加爐石飛灰用量，成本可控	1. 提高進口量 2. 增加水泥飛灰用量，成本可控	<b>1. 進口難度高</b> <b>2. 增加水泥爐石用量，成本增加</b>

綜合以上資訊：由於能源政策轉型，在未來 5 年內飛灰年產出預估將減少百萬公噸以上，佔比超過 1/4；而飛灰限於本身特性，無論是進口或者是以配比調整的方式，都會大幅提高成本，不利預拌廠的營運。因此尋求缺灰時的替代方案實迫在眉睫。

表 4 比較幾種材料添加於混凝土時的考量因素：燃煤底灰同樣出自於燃煤電廠的事業廢棄物，基本上性質與飛灰最接近；底灰最大的問題來自性質不穩，必須經過乾燥、純化、研磨……前處理，且依文獻研究對混凝土的影響利弊均有。稻殼灰、牡蠣殼灰是農業與水產養殖業的副產品，取得成本應不高，比較大的問題是需要燒結，這個製程本身帶來碳排污染；稻殼目前已有多种用途與去化管道，來源是

否穩定不無疑問；牡蠣殼數量問題不大，但即便燒結後仍可能殘餘氯離子，造成鋼筋腐蝕問題。偏高嶺土與矽灰品質沒有問題，但目前國內仰賴進口、單價遠比水泥還高，不具備大量添加的經濟可行性。只有石灰石粉，單價低、數量多、材質穩，另外對混凝土無害，是最可行的候選材料。本文下半部分即整理石灰石粉應用於水泥材料的研究與文獻並進行分析討論。

表 4 取代飛灰候選材料簡單比較(本文整理)

材料	燃煤底灰	稻穀灰	牡蠣殼灰	偏高嶺土	矽灰	石灰石粉
主要前處理	純化 研磨	燒結	燒結	燒結	無	研磨
量多	○	×	○	×	×	○
價低	○	○	○	×	×	○
性質穩	×	?	○	○	○	○
對混凝土無害	?	○	? (氯離子)	○	○	○

註：○ 條件較佳      × 條件差      ? 有可能引發其他品質變化疑慮

### 三、石灰石粉應用於混凝土的研究進展

#### 3.1 石灰石粉介紹

石灰石粉(Limestone powder)主要成分是碳酸鈣( $\text{CaCO}_3$ )，碳酸鈣在地球上多以岩石或生物體(貝殼、珊瑚、動物骨骼……)方式存在。在台灣，成份以碳酸鈣為主的岩石是石灰石與大理石，其相關整理如表 5：石灰石蘊藏量較少，主要散布在新竹、高雄、台東等西部縣市，近年零星有開採量；大理石(又稱結晶石灰石)則是帶狀分布在中央山脈下方，在宜蘭、花蓮等地露頭，開採成本不高。大理石是台灣蘊藏最多的礦產，109 年底蘊藏量仍高達 937,573 萬噸<sup>[8]</sup>；即便以 1 年 2,000 萬噸速率開採，仍可開採 400 年以上。

表 5 石灰石與大理石的差異(本文整理)

岩石種類	石灰石(Limestone)	大理石(Marble) (又稱結晶石灰石)
說明	類型：沈積岩 來源：生物遺骸 生成：主要在淺海環境下生成 純度較高的石灰石中 $\text{CaCO}_3 > 95\%$	類型：變質岩 來源：石灰石受高溫高壓 生成：主要在山脈中 純度較高的大理石中 $\text{CaCO}_3 > 90\%$
台灣資源量 <sup>[8]</sup>	109 年蘊藏量 13,387 萬噸 109 年開採量 0 萬噸	109 年蘊藏量 937,573 萬噸 109 年開採量 1,662 萬噸

石灰石與大理石都可以用做水泥、石灰、人造石、混凝土……等建材原料，或者作為煉鋼…等工業產品的原料或添加劑。本文所指的石灰石粉，即是指石灰石、大理石研磨成的粉體。

#### 3.1 石灰石粉用於混凝土膠結材料之研究進程

石灰石/大理石既是地球上豐富的資源，也是水泥的主要原料，因此關於石灰石

/大理石在水泥生產方面的研究早已不可考；而將石灰石/大理石磨成粉體，以添加劑的角度用於混凝土中的研究最早始於1960年代初期<sup>[9]</sup>(圖6)；90年代由於地球暖化趨勢日益明顯，減少二氧化碳排放成為全球共識，能夠減少水泥使用量的**輔助膠結材料(supplementary cementitious materials, 簡稱 SCMs)**成為熱門研究議題，石灰石粉也是候選材料之一，相關研究經過數十年的醞釀終於在2010年起呈現爆發式增長；研究方向則以力學性質、水化性質與耐久性質為主。

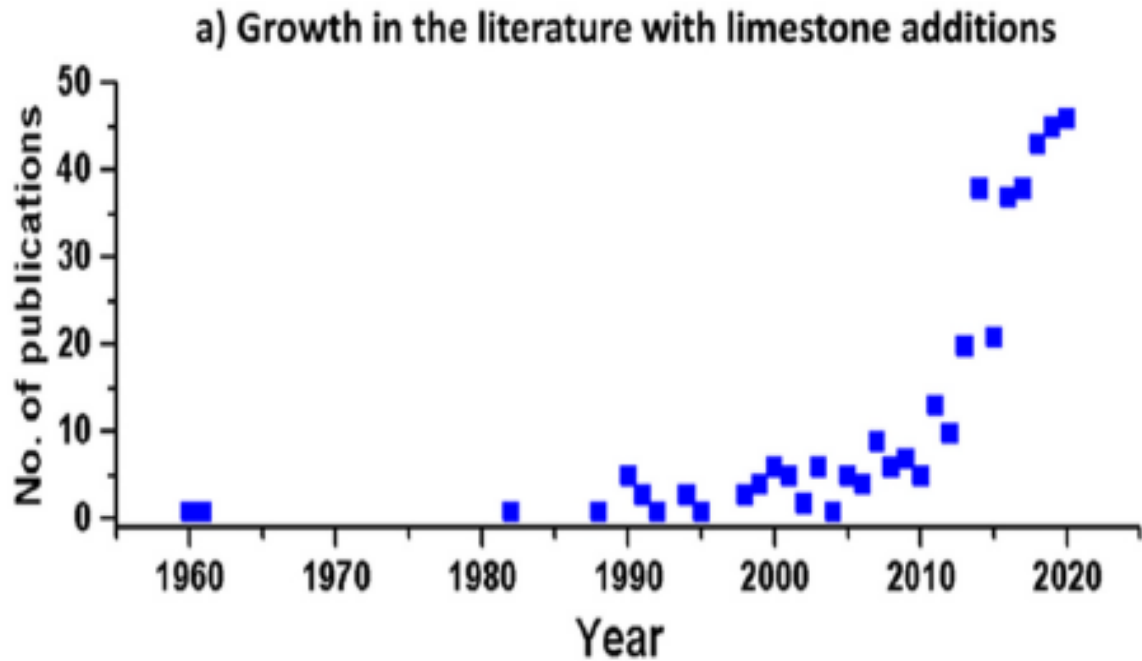


圖6 石灰石粉應用於水泥基材料之研究概況[9]

石灰石粉最大添加量：

國家/地區	規範簡稱	Max. LSP (%)
歐盟	EN	35%
加拿大	CSA	15%
美國	ASTM	15%
澳洲	AS	20%
印度	IS	5%

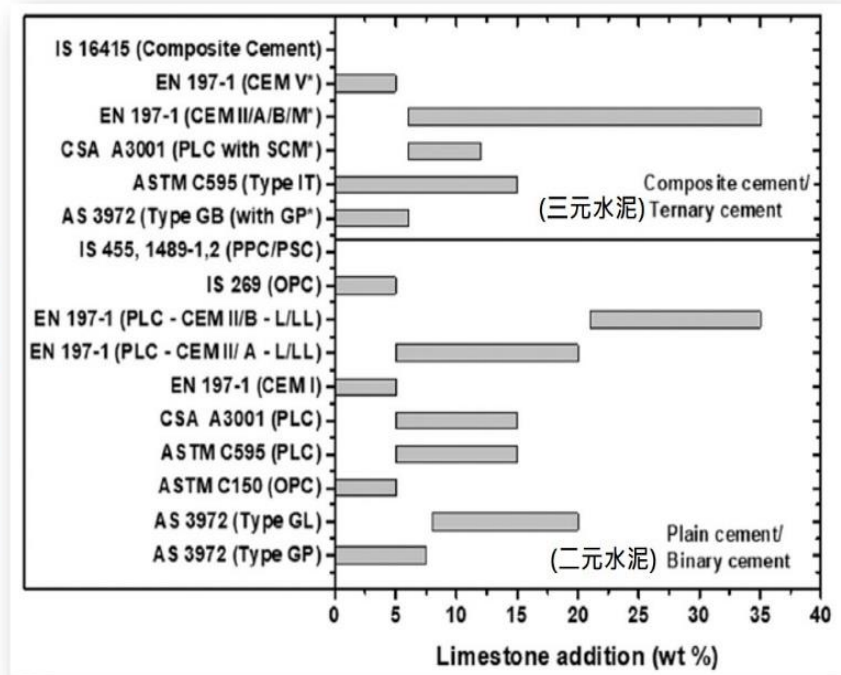


圖7 各國對石灰石粉允許添加量的規範[9]



在大量研究基礎之下，世界各國也逐步開放於混凝土中添加石灰石粉，如圖 7：其中歐盟進展最為快，目前已允許 35%最大添加量；澳洲、美國、加拿大的允許添加量也達到 15~20%之間。相對之下台灣進展較慢，CNS61 規範水泥中添加量<5%。

### 3.2 石灰石粉在混凝土中的作用

表 6 彙整出的石灰石粉在混凝土中產生的 4 種主要作用<sup>[10]</sup>、最早研究時間以及機理簡單說明，各項作用分述如下：

表 6 石灰石粉在水泥基中的 4 種主要作用（本文整理）

作用	主要機理	最早研究	說明
化學作用 (Chemical)	化學	1938	石灰石粉主要和水泥中 C <sub>3</sub> A、C <sub>4</sub> AF 以及爐石粉、飛灰中的鋁質材料反應
成核作用 (Nucleation)	化學	1976	石灰石粉表面原子結構 Ca 及 O 和水泥水化產物 C-S-H 類似，C-S-H 膠體易在石灰石粉表面沈澱成長
填充作用 (Filler)	物理	1948	石灰石粉填充水泥顆粒間的空隙，使微結構變得更緻密
稀釋作用 (Dilution)	物理	-	低活性的石灰石粉取代高活性的粉體，可能使粉體總活性減少

1. 化學作用：石灰石粉的化學作用主要是和鋁質材料反應，包含水泥中的 C<sub>3</sub>A、C<sub>4</sub>AF 以及爐石粉、飛灰中的鋁質材料。在沒有石灰石粉的一般水泥中，如果沒有石膏存在，C<sub>3</sub>A 和水接觸會立即發生反應：



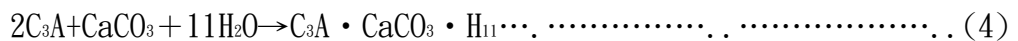
上述反應稱作「閃凝」，會使水泥快速失去流動性。為防止閃凝會加入石膏 (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O，簡稱 C $\bar{S}$ H<sub>2</sub>)來延緩凝結時間：



式(2)中的 C<sub>3</sub>A · 3C $\bar{S}$  · H<sub>32</sub> 即是鈣鈣石 (AFt)；正常情況下石膏不會加太多，因此剩餘的 C<sub>3</sub>A 會再和鈣鈣石反應生成單硫型鋁酸鈣 (C<sub>3</sub>A · C $\bar{S}$  · H<sub>12</sub>，AFm)：



因此一般水泥水化後會同時存在鈣鈣石 (AFt) 與單硫型鋁酸鈣 (AFm)。如圖 8 最左<sup>[11]</sup>。飛灰加入會進行卜作嵐反應，使 Ca(OH)<sub>2</sub> 減少 (圖 8 左邊第 2、3 組)。加入石灰石粉後最大差異在於石灰石粉會和剩餘的 C<sub>3</sub>A 反應，因此式(3)會被式(4)取代：



由於式(3)被式(4)取代，因此水化產物中就沒有單硫型鋁酸鈣 (AFm)，取而代之的是碳鋁化物 (C<sub>3</sub>A · CaCO<sub>3</sub> · H<sub>11</sub>，圖 8 右邊 3 組紅色部分)。

與飛灰、爐石粉等卜作嵐材料不同的是，石灰石粉化學反應發生在水化初期，之後幾乎沒有任何貢獻；另外，參與石灰石粉化學反應的鋁質材料在水泥中含量並不高，因此石灰石粉活性偏低；而有文獻<sup>[12]</sup>指出，適度添加石灰石粉產生的水化產物組合有較高的緻密度 (較低的孔隙率)，可提昇漿體的強度。

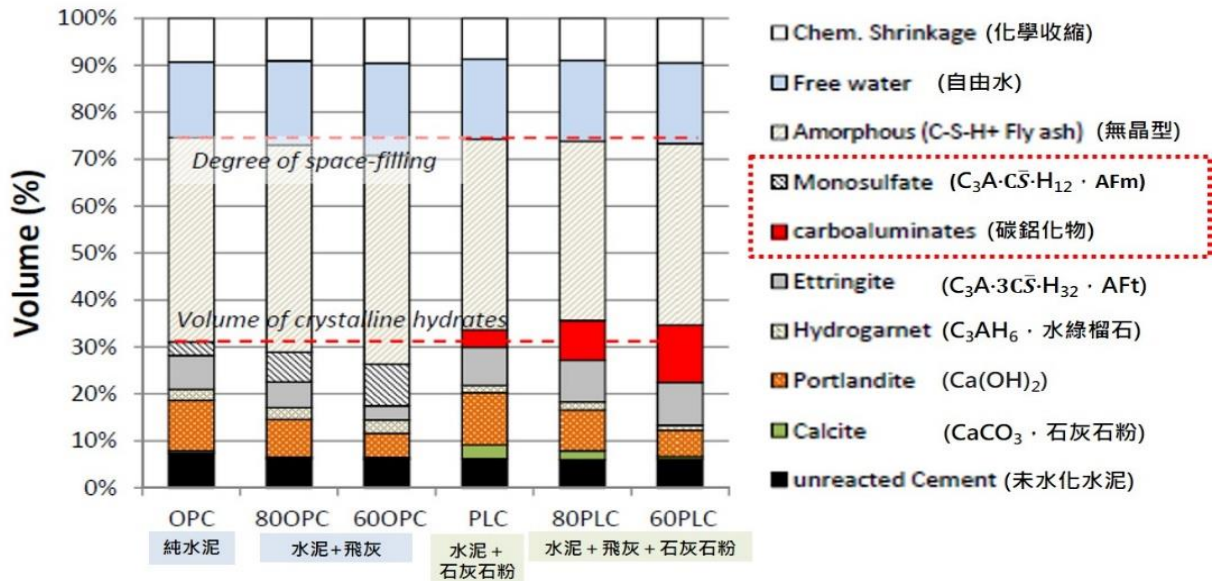


圖 8 不同膠結粉體之水化產物與其體積佔比<sup>[11]</sup>

2. **成核作用**：石灰石粉表面原子結構是 Ca、O，本質上與水泥水化產物 C-S-H 膠體相似，因此會吸引 C-S-H 膠體在其表面沈澱生長<sup>[13]</sup>，圖 9 電子顯微鏡成像證實了上述作用的發生。

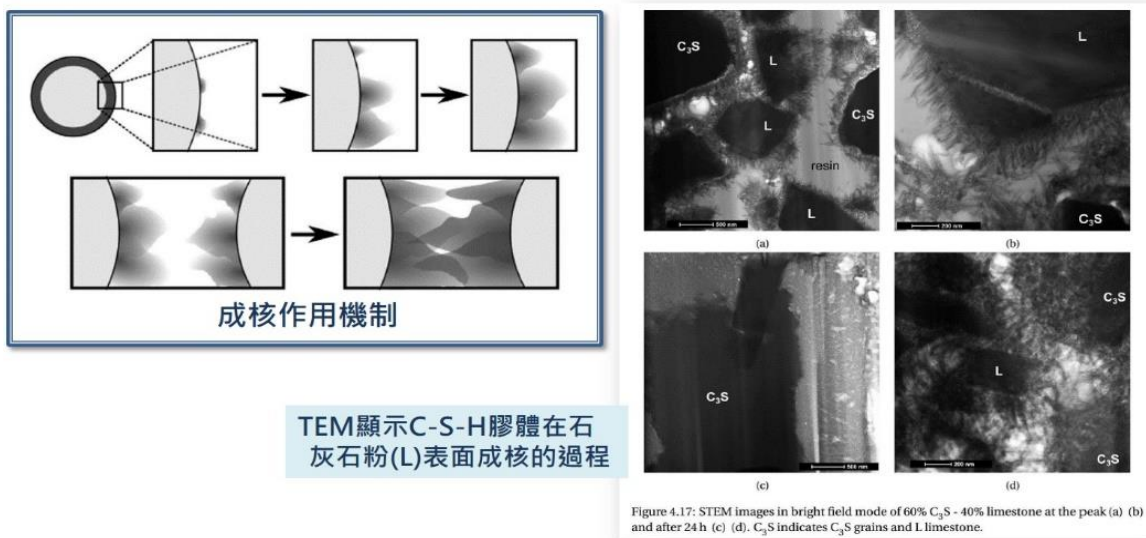


圖 9 電子顯微鏡下的石灰石粉成核作用<sup>[13]</sup>

成核作用發生在水化初期，使得水化的放熱高峰提前發生(圖 10<sup>[14]</sup>)，也因此加快了水化反應的進行。

3. **填充作用**：理論上，當大小顆粒同時存在時，粒徑小的顆粒可以填充大顆粒堆積時留下的孔隙，因此可以提高堆積密度。而實務上，不同粒徑的顆粒組合，存在一個最佳比例可以讓堆積密度達到最高。圖 11<sup>[10]</sup>以電腦計算三元粉體「水泥-爐石粉-石灰石粉」在不同比例下的堆積密度，結果發現當石灰石粉粒徑大於等於水泥時(圖 11a)，堆積密度的提高相當有限；而當石灰石粉粒徑小於水泥時(圖 11b)，存在一個範圍的最佳比例，堆積密度可以由 0.73 增至 0.82，約提高 12% 左右。

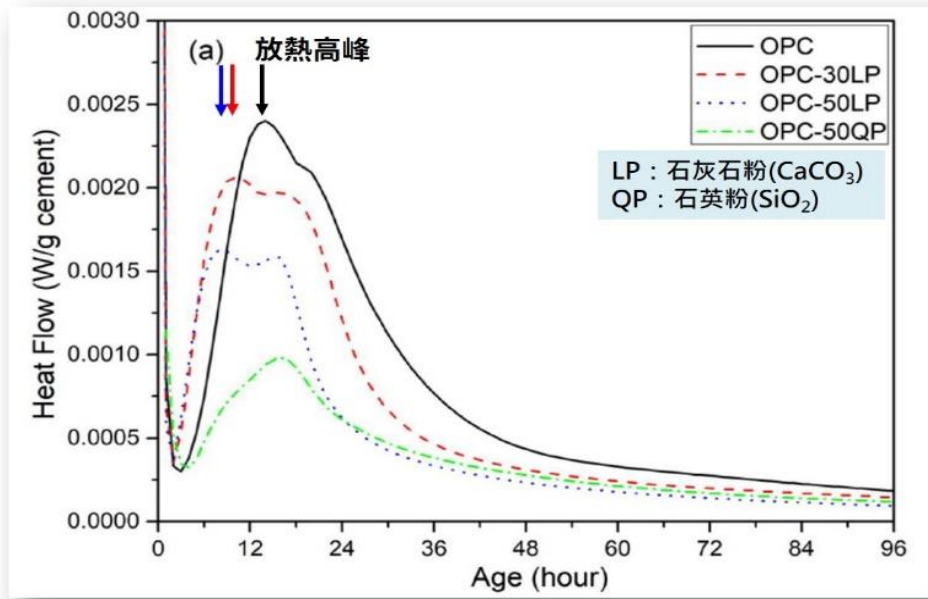


圖 10 石灰石粉成核作用加速水化反應的進行<sup>[14]</sup>

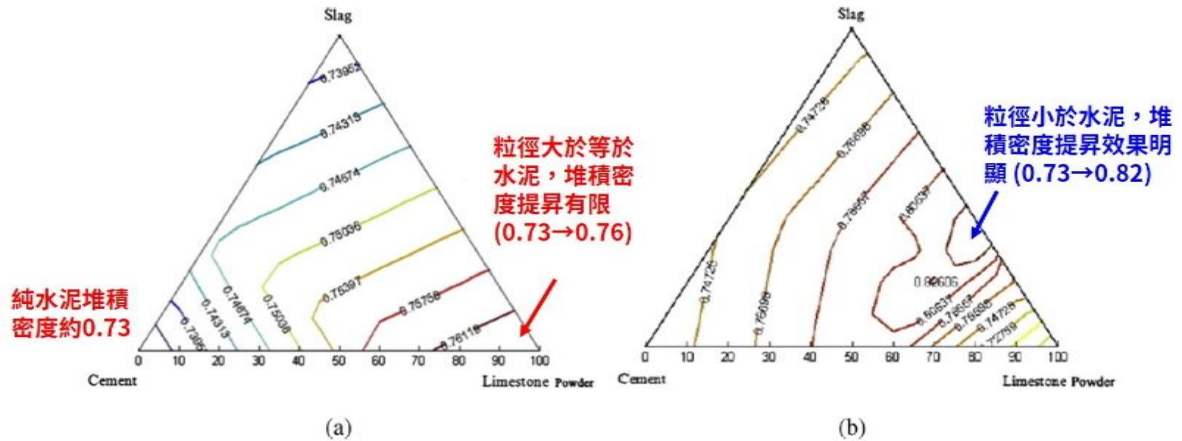


圖 11 不同比例下「水泥-爐石粉-石灰石粉」三元粉體的堆積密度<sup>[10]</sup>

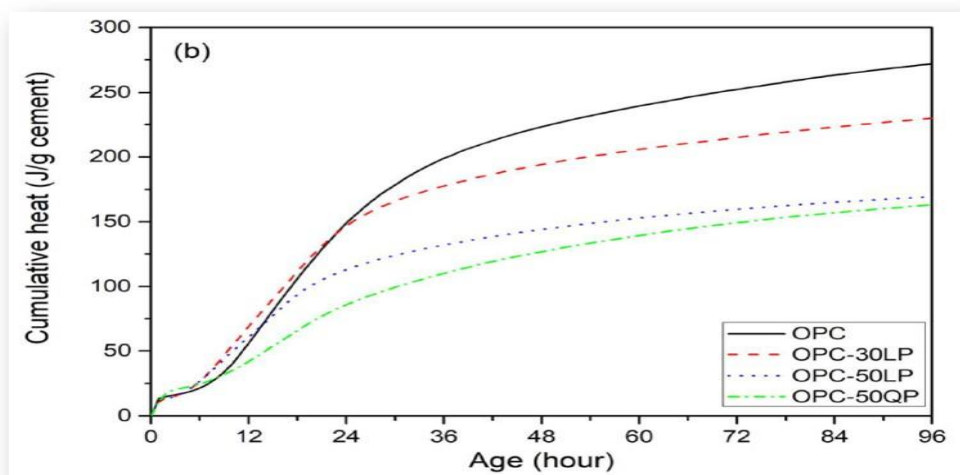


圖 12 添加不同比例石灰石粉(LP)與石英粉(QP)之水泥累積水化熱<sup>[14]</sup>

4. 稀釋作用：用活性低的輔助膠結材料(SCMs)取代水泥時都會發生稀釋作用，差別僅在於程度：如相同取代比例下，由於飛灰活性較爐石粉低，飛灰的稀釋作用就

比較明顯。上述狀況同樣發生在石灰石粉上。圖 12 可以看出添加石灰石粉(LP)與石英粉(QP)的試驗組，累積水化熱都明顯低於純水泥(OPC)組，這說明了稀釋作用。但更值得注意的是，石灰石粉取代 30%(OPC-30LP)試驗組累積水化熱並非只有純水泥(OPC)組的 30%，說明了石灰石粉仍存在一定活性，而非僅是無活性的堆積材料。另一方面，本研究探討的方向是缺飛灰的情況下石灰石粉的加入，由於飛灰並不是活性高的粉體，二者之間是否存在稀釋作用以及稀釋的比例亦是相當值得深入探討的議題。

### 3.3 影響石灰石粉性質的主要變因

表 7 整理石灰石粉在混凝土中的作用、其對混凝土性質的效益與影響因子<sup>[10]</sup>，可以看出「粒徑大小」以及「添加量」是影響石灰石粉效益發揮的最主要兩項因素：整體而言粒徑愈小，正面效益可能發揮的愈顯著；當然，粒徑愈小意味著研磨成本愈高，也會對流動性產生負面影響。另外應該存在一個最佳添加比例，讓化學、成核、填充等作用產生的正面效益大於稀釋作用產生的負面效益。此二者應該是石灰石粉應用這個議題後續最該被關注的課題。

表 7 石灰石粉主要作用與影響因子 (本文整理)

石灰石粉的作用	對混凝土的效益	影響因子	說明
化學作用	+	粒徑大小 鋁含量	粒徑愈小，反應愈快愈完全 因混凝土中鋁含量並不高，化學作用效益通常不大
成核作用	++	粒徑大小 表面粗糙 添加量	粒徑愈小，成核作用愈明顯 研磨方式 添加愈多，成核作用愈明顯
填充作用	++	粒徑大小 添加量	粒徑小於水泥才有效果 存在一最佳比例可得到最佳效果
稀釋作用	-	添加量	添加量愈高，稀釋作用愈嚴重

## 四、結論

- (1). 本文前半部整理國內水泥、爐石粉、飛灰近年的供應狀況並分析三者之供應模式以及未來可能的變化。可以肯定的是因為能源政策調整，未來飛灰的供給勢必大幅減少；且飛灰進口成本高、以水泥、爐石粉取代飛灰的材料成本也高，目前亟需一個可行的缺灰替代方案；而這個替代方案需具備「數量足」、「單價低」、「性質穩」以及「不能對混凝土有害」這幾個特質，在台灣同時符合上述特質、最具潛力的材料即是石灰石粉；
- (2). 石灰石粉作為輔助膠結材料(SCMs)，在混凝土中主要發揮化學、成核、填充與稀釋等 4 個作用。影響這 4 個作用的因子主要是粒徑大小以及添加量，此二項變因應該是後續研究的重點；
- (3). 面對飛灰不足時，預拌廠可能的配比調整方式如表 8 所列三種：



表 8 預拌廠配比調整方式 (本文整理)

原本配比	新配比：二元	新配比：三元	新配比：四元
<p>飛灰不夠了 怎麼辦？</p>	<p>方法最簡單 成本暴增 無競爭力</p>	<p>符合既有軟硬體 有機會控制成本 需投入研發成本</p>	<p>生產變數太多 Silo數量恐不足 拌和軟體須調整</p>

1. 二元配比：捨棄飛灰，直接以水泥、爐石粉取代。這種方式最簡單，但會造成成本暴增，因此二元配比並不具備競爭力；
2. 四元配比：配比中仍保留飛灰，而不足量以石灰石粉補上，形成「水泥-爐石粉-飛灰-石灰石粉」四元粉體。四元配比最大的問題是複雜，因為數量、材料性質造成的生產變數更多，這都需要投入相當的研發心力與成本；另外預拌廠現有軟體(拌和程式)與硬體(粉槽桶)多是以三元為主，需要調整成四元系統，將增加另一筆成本支出；
3. 三元配比：在部分飛灰不易取得、成本也較高的區域，以石灰石粉完全取代飛灰。這個方式除了較符合預拌廠軟硬體現況，另外變數較少較單純，產品品質較能控制、研發投入也可能比較低。後續研究建議以此作為實驗規劃與設計的參考基礎。

### 五、參考文獻

- [1] “混凝土電池”，布希維克，科學人雜誌，第 237 期，2021
- [2] “2021 年台灣區水泥工業概況”，2021.05
- [3] “海關進出口統計”，財政部關務署網站
- [4] “工業產銷存動態調查-產品統計”，經濟部統計處網站
- [5] “事業廢棄物申報及管理資訊系統”，行政院環境保護署網站
- [6] “107 年度全國電力資源供需報告”，經濟部能源局
- [7] “108-109 年度全國電力資源供需報告”，經濟部能源局；台中電廠#1、#2 機組為媒體報導
- [8] “109 年綠色國民所得帳編製報告(環境與經濟帳)” 行政院主計處，2021.12
- [9] “Towards ternary binders involving limestone additions- A review”, Cement and Concrete Research, 143, 1-26, 2021
- [10] “A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures”, Construction and Building Materials, 181, 659-672, 2018
- [11] “Extending the Use of Fly Ash and Slag Cement in Concrete through the Use of Portland-Limestone Cement”, International Concrete Sustainability Conference, 1-15, 2014”
- [12] “The role of calcium carbonate in cement hydration “, Cement and Concrete Research, 37, 551-558, 2007
- [13] “study of early hydration mechanisms of cement by means of electron microscopy”, EPFL, PhD Thesis, 2014
- [14] “influence of high-volume limestone powder on hydration and microstructural development of cement”, Advances in Cement Research,33, 197-209, 2019